

21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

自动化仪表

主 编 齐志才 刘红丽
副主编 马汇海 李 可
参 编 杨胤铎

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书基于生产实际和工程应用,介绍了工业上最常用的参数检测仪表、控制仪表、执行器及防爆栅的工作原理与应用方案,并且重点讨论了以可编程逻辑控制器为代表的数字控制仪表的特点和功能,同时对智能仪表的组成、特点及发展趋势,智能仪表各组成部分的软硬件设计方法以及测量与控制算法,虚拟仪器的概念以及特点进行了详细的论述。最后,结合简单的工艺流程来分析某些典型过程控制方案的确定方法,阐明设计控制方案时的一般原则和思路,并列举了部分自动化仪表调解系统在生产过程控制中的应用实例。

本书可作为自动化相关专业本科教材,也可供工程技术人员及相关专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动化仪表/齐志才,刘红丽主编. —北京:中国林业出版社;北京大学出版社,2006.8
(21世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4401-9

I. 自… II. ①齐… ②刘… III. 自动化仪表—高等学校—教材 IV. TH86

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第090841号

书 名: 自动化仪表

著作责任者: 齐志才 刘红丽 主编

策划编辑: 李娉婷

责任编辑: 李 虎 曹 岚 裴振华 张 敏

标准书号: ISBN 7-5038-4401-9

出 版 者: 中国林业出版社(地址:北京市西城区德内大街刘海胡同7号 邮编:100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail:cfphz@public.bta.net.cn

电话:总编室 66180373 营销中心 66187711

北京大学出版社(地址:北京市海淀区成府路205号 邮编:100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail:pup_6@163.com

电话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者:

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 18.75印张 426千字

2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

定 价: 27.00元

《21世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

专家编审委员会

主任委员 张德江

副主任委员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈 静 丁坚勇 侯媛彬

纪志成 任庆昌 吴 斌

秘书长 于微波

委 员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈志新 戴文进 段晨旭 樊立萍

范立南 公茂法 关根志 嵇启春

蒋 中 雷 霞 刘德辉 刘永信

刘 原 马永翔 孟祥萍 孟彦京

聂诗良 王忠庆 吴旭云 燕庆明

杨新华 尤 文 张桂青 张井岗

总 序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学与技术的迅速发展和广泛应用，深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学与技术的发展。自动化科学与技术涉及到信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面，是信息科学与技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中，工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标，党和国家提出走新型工业化道路的战略决策，这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化，就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中，自动化科学与技术起着不可替代的重要作用，高等学校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣的历史使命。

我国高等教育中工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%~40%，其中自动化类的学生是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天，人才培养模式多样化已成为必然的趋势，其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养，发挥院校之间相互合作的优点，北京大学出版社组织了此套《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者，由此确定了教材的使用范围，也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点：

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养规格大多定位在高级应用型，对这一大类人才的培养要注重面向工程实践，培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发，本系列教材注重实用性，注意引用工程中的实例，培养学生的工程意识和工程应用能力，因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容，跟进时代，加入一些新的先进实用的知识，同时淘汰一些陈旧过时的内容。

(3) 院校间合作交流的果实。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北大出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会，来自各院校的教师比较充分地交流了情况，在相互借鉴、取长补短的基础上，形成了编写大纲，确定了编写原则。因此，这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和做法。

(4) 这一系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程，到目前为止，列入计划的已有 30 多门，教材门数多，参与的院校多，参加编写人员多。

II

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学之用，将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性，在审纲会上强调了“质量第一，明确责任，统筹兼顾，严格把关”的原则，要求各位主编加强协调，认真负责，努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责，密切合作，努力使自己的作品受到读者的认可和欢迎。尽管如此，由于院校之间、编者之间的差异性，教材中还是难免会出现一些问题和不足，欢迎选用本系列教材的教师、学生提出批评和建议。

张德江

2006年1月

前 言

现代工业控制系统中，自动化仪表检测技术和仪表控制系统是实现自动控制的基础。随着新技术的不断涌现，特别是先进检测技术、现代传感器技术、计算机技术、网络技术和多媒体技术的出现，给传统的自动控制系统带来了新的挑战，并由此引出许多新的发展，如虚拟仪器、软测量技术、数据融合理论与方法以及最新发展的传感器网络技术等。

本书是自动化仪表系统的基础理论和应用技术的教材。《自动化仪表》是在学完电子技术基础、自动控制理论、微机原理及应用等课程后所开设的自动化类专业课程。本书是大专院校自动化专业的一门必修课教材，也可供各工业部门从事过程控制工作的工程技术人员参考。

全书以典型工业过程控制系统的构成为基础，以应用自动控制理论设计过程控制系统为主线，重点介绍了自动化检测仪表、全刻度指示 PID 连续调节仪表、数字控制仪表、执行器和防爆栅、智能仪表与虚拟仪器以及自动化仪表应用实例。在内容的叙述上，以理论联系实际为原则，特别注重简明扼要、通俗易懂，努力使系统性与典型性相统一，技术先进性与工程实用性相融合。在知识结构的安排上，考虑与前置课程知识的合理衔接，使各部分内容的安排次序顺理成章。

全书共分 7 章。第 1 章介绍自动化仪表发展概况和仪表系统的基础知识；第 2 章介绍温度、压力、流量、物位、机械量、成分分析等过程参数的检测技术和仪表；第 3 章介绍模拟控制仪表 PID 调节器系统所包含的输入、调节、显示等单元；第 4 章主要介绍以可编程程序逻辑控制器为代表的数字控制仪表的特点和功能；第 5 章主要介绍以气动、电动、液动为代表的实现控制动作的执行器和防爆栅；第 6 章主要介绍智能仪表的组成、特点及其发展趋势，智能仪表各组成部分的软/硬件设计方法以及测量与控制算法，虚拟仪器的概念以及特点；第 7 章主要是从自动控制的角度出发，根据对象特性和控制要求，结合简单的工艺流程来分析某些典型过程控制方案的确定方法，阐明设计控制方案时的一般原则和思路。

本书由吉林建筑工程学院齐志才、武汉理工大学刘红丽任主编，陕西科技大学马汇海、吉林建筑工程学院装饰学院李可任副主编，武汉理工大学杨胤铎参编。其中第 1 章、第 3 章由齐志才编写，第 2 章由刘红丽编写，第 4 章、第 7 章由马汇海编写，第 5 章由李可编写，第 6 章由杨胤铎编写。

本书参考教学时数为 40 学时左右，其中包括 6 学时实验。限于作者的水平和能力，本书难免会存在不足或不妥之处，衷心希望广大读者批评指正。

编 者
2006 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.2.5 压力和差压变送器	46
1.1 自动化仪表及其发展概述	1	2.2.6 压力表的选用与安装	53
1.2 电动单元组合自动化仪表及其控制系统的组成	3	2.3 流量检测仪表	54
1.3 自动化仪表测控系统	5	2.3.1 流量的基本概念	54
1.3.1 典型自动化仪表测控系统	5	2.3.2 流量检测方法 with 仪表	55
1.3.2 检测仪表控制系统结构分析	7	2.3.3 差压式流量计	56
1.4 仪表的基本技术指标	7	2.3.4 转子流量计	59
1.4.1 测量范围、上下限及量程	8	2.3.5 电磁流量计	61
1.4.2 零点迁移和量程迁移	8	2.3.6 超声波流量计	62
1.4.3 灵敏度和分辨率	9	2.3.7 质量流量计	64
1.4.4 误差	9	2.3.8 相关流量计	65
1.4.5 精确度	10	2.4 物位检测仪表	67
1.4.6 滞环、死区和回差	11	2.4.1 物位的定义及物位检测仪表的分类	67
1.4.7 重复性和再现性	12	2.4.2 静压式液位计	68
1.4.8 可靠性	12	2.4.3 浮力式液位计	71
1.5 自动化仪表技术发展趋势	13	2.4.4 电容式物位计	73
本章小结	13	2.4.5 超声波式物位仪表	75
思考题与习题	14	2.4.6 物位开关	77
第 2 章 检测仪表	15	2.5 成分分析仪表	78
2.1 温度检测仪表	15	2.5.1 成分分析方法及其分类	78
2.1.1 温度与温标	15	2.5.2 热导式气体分析仪	78
2.1.2 测温方法	16	2.5.3 红外线气体分析仪	83
2.1.3 膨胀式温度计	16	2.5.4 色谱分析仪	85
2.1.4 热电偶温度计	17	2.5.5 氧含量的检测	87
2.1.5 热电阻温度计	26	2.6 机械量检测仪表	89
2.1.6 辐射测温仪表	29	2.6.1 位移检测仪表	89
2.1.7 温度变送器	32	2.6.2 速度检测	91
2.2 压力的检测	40	2.6.3 加速度检测	96
2.2.1 压力的概念和表示方法	40	本章小结	99
2.2.2 压力的检测方法和检测仪表	41	思考题与习题	99
2.2.3 弹性式压力仪表	42	第 3 章 连续调节器	102
2.2.4 电气式压力仪表	43	3.1 调节器的调节规律	102

3.2 PID 调节器的阶跃响应和频率特性	104	思考题与习题	175
3.2.1 PID 调节器的阶跃响应	104	第 5 章 执行器和防爆栅	177
3.2.2 PID 调节器的频率特性	104	5.1 执行器	177
3.3 PID 调节器线路实例	106	5.1.1 气动执行器	177
3.3.1 输入电路	107	5.1.2 电-气转换器	183
3.3.2 比例微分电路	108	5.1.3 阀门定位器	184
3.3.3 比例积分电路	109	5.2 防爆栅	189
3.3.4 输出电路	112	5.2.1 安全火花防爆系统的概念	189
3.3.5 调节器的整机传递函数	113	5.2.2 安全火花防爆的等级	190
3.3.6 手动操作电路	114	5.2.3 防爆栅的基本工作原理	191
3.3.7 指示电路	115	5.2.4 隔离式防爆栅	192
本章小结	116	本章小结	197
思考题与习题	116	思考题与习题	197
第 4 章 数字控制仪表	118	第 6 章 智能仪表与虚拟仪器	198
4.1 数字控制仪表	118	6.1 智能仪表概述	198
4.1.1 数字控制技术的发展	118	6.1.1 智能仪表的定义	198
4.1.2 数字控制系统的常用机型	119	6.1.2 智能仪表的基本组成	198
4.1.3 数字控制系统的分类	122	6.1.3 智能仪表的功能	199
4.2 数字控制算法	124	6.1.4 智能仪表的发展概况	199
4.2.1 基本数字 PID 控制算法	125	6.2 智能仪表硬件设计	200
4.2.2 改进型数字 PID 控制算法	129	6.2.1 模拟量输入通道形式	200
4.2.3 字长与采样周期的选择	133	6.2.2 前置通道接口设计	202
4.3 可编程序控制器	135	6.2.3 A/D 接口技术	204
4.3.1 可编程序控制器概述	135	6.2.4 D/A 接口技术	209
4.3.2 可编程控制器基本工作原理	137	6.2.5 数据通信及接口设计	212
4.3.3 S7—200 可编程控制器系统组成	142	6.3 智能仪表的软件设计	214
4.3.4 S7—200 可编程控制器的指令系统	145	6.3.1 软件设计方法	214
4.3.5 可编程控制器控制系统设计	164	6.3.2 软件系统组成	215
4.3.6 S7—200 可编程控制器应用实例	167	6.4 抗干扰技术	216
4.3.7 S7—300 可编程控制器简介	171	6.4.1 硬件抗干扰技术	216
本章小结	175	6.4.2 软件抗干扰技术	218
		6.5 智能仪表的测量与控制算法	220
		6.5.1 数字滤波算法	220
		6.5.2 量程自动转换与标度变换	223
		6.5.3 PID 控制算法	225
		6.6 智能仪表设计实例	229
		——智能温度测控仪	229
		6.7 虚拟仪器技术	230

6.7.1 虚拟仪器的概念.....	230	7.2.2 精馏过程的控制目标	244
6.7.2 LABVIEW 简介	231	7.2.3 精馏过程的静态和动态 特性	245
本章小结	233	7.2.4 精馏塔质量指标的选取	250
思考题与习题	234	7.2.5 精馏过程的基本控制方案	252
第 7 章 自动化仪表应用实例	236	7.3 传热设备的控制	258
7.1 大中型工业锅炉汽包液位的检测 与控制.....	236	7.3.1 传热设备的结构和特性	258
7.1.1 大中型工业锅炉 的工艺过程.....	236	7.3.2 换热器的控制	263
7.1.2 锅炉汽包水位的 检测与控制.....	237	7.3.3 加热炉的控制	266
7.2 石油蒸馏装置中的检测与控制	244	本章小结	274
7.2.1 连续精馏的工艺流程 和装置.....	244	思考题与习题	274
		附表 标准化热电偶分度表	275
		参考文献	283

第1章 绪 论

自动化仪表是工业企业实现自动化的必要手段和技术工具，任何一个工业控制系统都必然应用到自动化仪表控制单元，各种控制方案和算法都必须借助自动化工具才能实现。随着自动化技术的广泛应用，自动化仪表的需求量很大，已形成一个专门的仪表门类。自动化工程师要设计自动控制系统必须掌握各种自动化仪表的工作原理和性能特点，才能合理地选择和正确地使用它们，组成性能价格比好的控制系统。

半个多世纪以来，自动化仪表经历了从气动液动仪表、电动仪表、电子式模拟仪表、数字智能仪表，到计算机集散控制系统(DCS)等发展阶段，为各行各业的现代化大规模生产提供了强大的支持。近年来，随着网络通信等相关技术的快速发展，自动化仪表正处于一场意义重大的变革中，以仪表的全数字化、开放化、网络化为特征的现场总线控制系统(FCS)正在迅猛发展。现场总线把从检测端到执行端的所有自动化仪表通过数字通信方式互相连接起来，从而使控制系统网络化，十分有利于工业企业实现高层次的自动化。

自动化仪表与控制理论一样，都是自动化科技工作者的研究内容。自动化技术工具的进步不仅会推动工业企业自动化水平的提高，还会影响控制理论的研究方向和内容。

1.1 自动化仪表及其发展概述

看到“仪表”两个字，人们很容易想到电流表、电压表、示波器等实验室中常用的测试仪器。自动化仪表不是这些通用仪表，而是讨论生产自动化中，特别是连续生产过程自动化中必需的一类专门的仪器仪表。其中包括对工艺参数进行测量的检测仪表、根据测量值对给定值的偏差按一定的调节规律发出调节命令的调节仪表以及根据调节仪表的命令对进出生产装置的物料或能量进行控制的执行器等。这些仪表代替人们对生产过程进行测量、控制、监督和保护，是实现生产过程自动化必不可少的技术工具。

对于没有实践经历的自动控制初学者，往往以为控制工程师的工作是先画出控制方案图，然后自己动手，设计制作一定的测控装置去实现要求的控制算法。不难想像，如果大家都按自己的思路为各种系统制作专用的测控装置，其规格品种必将是五花八门，互不兼容。这对于用户来说，其维护和备品、备件将是难以解决的问题。为减少仪表品种，便于互换和维护，人们把自动化仪表的外部功能和联络信号进行规范化，即规定若干通用的标准化功能模块，其内部原理和电路可以不同，但外部功能必须相同，此外，它们之间的互联信号标准必须统一。这些规范促进了自动化仪表向通用化发展，大大方便了用户。这样，对控制工程师来说，主要的工作不是自己去制作仪表，而只要熟悉和精通各种现成的自动化仪表的工作原理和性能特点，以便根据不同的测控要求和应用环境，从大量系列化生产的通用型自动化仪表中，合理地选择和正确地使用它们，组成经济、可靠、性能优良的自动控制系统。

自 20 世纪 30 年代以来, 自动化技术获得了惊人的成就, 已在工业生产和国民经济各行业起着关键的作用。自动化水平已成为衡量各行各业现代化水平的一个重要标志。

过程控制通常是指石油、化工、电力、冶金、轻工、建材、核能等工业生产中连续的或按一定周期程序进行的生产过程自动控制, 它是自动化技术的重要组成部分。在现代工业生产过程中, 过程控制技术正在为实现各种最优的技术经济指标、提高经济效益和劳动生产率、改善劳动条件、保护生态环境等方面起着越来越大的作用, 而自动化仪表是生产过程自动控制的灵魂。

自动化仪表的发展, 大致经历了以下几个阶段:

1) 仪表化与局部自动化(20 世纪 50~60 年代)阶段

20 世纪 50 年代前后, 自动化仪表在过程控制中开始得到发展。一些工厂企业实现了仪表化和局部自动化。这是自动化仪表在过程控制发展中的第一个阶段。这个阶段的主要特点是: 采用的过程检测控制仪表为基地式仪表和部分单元组合式仪表, 而且多数是气动仪表; 过程控制系统的结构绝大多数是单输入—单输出系统; 被控参数主要是温度、压力、流量和液位四种工艺参数; 控制的目的是保持这些工艺参数的稳定、确保生产安全; 过程控制系统分析、综合的理论基础是以频率法和根轨迹法为主体的经典控制理论。

2) 综合自动化(20 世纪 60~70 年代中期)阶段

在 20 世纪 60 年代, 随着工业生产的不断发展, 对自动化仪表提出了新的要求; 电子技术的迅速发展, 也为自动化技术工具的不断完善提供了条件, 自动化仪表控制开始进入第二阶段。在这一阶段中, 工业生产过程出现了一个车间乃至一个工厂的综合自动化, 其主要特点是: 大量采用单元组合仪表(包括气动和电动)和组装式仪表。与此同时, 计算机开始应用于过程控制领域, 实现了直接数字控制(Direct Digital Control, DDC)和设定值控制(Statistical Process Control, SPC)。在自动化仪表过程控制系统的结构方案方面, 相继出现了各种复杂的控制系统, 如串级控制、前馈—反馈复合控制、Smith 预估控制以及比值、均匀、选择性控制等, 一方面提高了控制质量, 另一方面也满足了一些特殊的控制要求。自动化仪表控制系统的分析与综合的理论基础, 由经典控制理论发展到现代控制理论。控制系统由单变量系统转向多变量系统, 以解决生产过程中遇到的更为复杂的问题。

3) 全盘自动化(20 世纪 70 年代中期至今)阶段

20 世纪 70 年代中期以来, 随着现代工业生产的迅猛发展, 微型计算机的开发与应用, 使自动化仪表的发展达到了一个新的水平, 实现了全车间、全工厂、甚至全企业无人或很少人参与操作管理、过程控制最优化与现代化的集中调度管理相结合的方式, 即全盘自动化的方式, 过程控制发展到现代过程控制的新阶段, 这是自动化仪表发展的第三阶段。这一阶段的主要特点是: 在新型的自动化技术工具方面, 开始采用以微处理器为核心的智能单元组合仪表(包括可编程序控制器等); 成分在线检测与数据处理的应用也日益广泛; 模拟调节仪表的品种不断增加, 可靠性不断提高, 电动仪表也实现了本质安全防爆, 适应了各种复杂过程控制的要求。在过程控制系统的结构方面, 由单变量控制系统发展到多变量系统, 由生产过程的定值控制发展到最优控制、自适应控制, 由自动化仪表控制系统发展到计算机分布式控制系统等。

在控制理论的运用方面, 现代控制理论移用到过程控制领域, 如状态反馈、最优控制、

解耦控制等在过程控制中的应用,加速了过程建模、测试以及控制方法设计、分析等控制技术和理论的发展。

当前,自动化仪表控制已进入了计算机时代,进入了所谓计算机集成过程控制系统(Computer Integrated Process System, CIPS)的时代。CIPS 利用计算机技术,对整个企业的运作过程进行综合管理和控制,包括市场营销、生产计划调度、原材料选择、产品分配、成本管理,以及工艺过程的控制、优化和管理等全过程。分布式控制系统,先进过程控制策略以及网络技术、数据库技术等将是实现 CIPS 的重要基础。可以预计,过程控制将在我国社会主义现代化建设过程中得到更快的发展。

1.2 电动单元组合自动化仪表及其控制系统的组成

我国生产的电动单元组合仪表,到目前为止已有三代产品。它们分别为,20 世纪 60 年代中期生产的以电子管和磁放大器为主要放大元件的 DDZ—I 型仪表;20 世纪 70 年代初开始生产的以晶体管作为主要放大元件的 DDZ—II 型仪表;以及 20 世纪 80 年代初开始生产的以线性集成电路为主要放大元件、具有安全火花防爆性能的 DDZ—III 型仪表。这里的“DDZ”是汉语拼音文字中电(Dian)、单(Dan)、组(Zu)三字的第一个字母的组合。这三代产品虽然电路形式和信号标准不同,性能指标和单元划分的方法也不完全一样,但它们实现的控制功能和基本的设计思想是相同的,只要掌握其中一种,其他产品便不难分析。下面将主要对较有代表性的 DDZ—III 型电动单元组合式仪表进行讨论。

如图 1.1 所示是使用电动单元组合式仪表构成简单调节系统的例子,从中可以看到单元划分的原则和各单元的功能。图中,被调量一般是非电的工艺参数,如温度、压力等,必须经过一定的检测元件,将其变换为易于传送和显示的物理量。检测元件还常称为敏感元件、传感器、换能器、一次仪表等。被称为换能器的理由是工艺参数在检测元件上进行了能量形式的转换,例如,在使用热电偶测温时,热电偶将温度(热能)转换成了电压(电能)。被称为一次仪表的理由是这些检测元件安装在生产第一线,直接与工艺介质相接触,取得第一次的测量信号。由于检测元件输出的能量很小,一般不能直接驱动显示和调节仪表,必须经过放大或再一次的能量转换,才能将检测元件输出的微弱信号变换为能远距离传送的统一标准信号。图 1.1 中,起上述作用的环节就是变送单元,或称变送器,它有若干不同的类型,与相应的检测元件相配合。

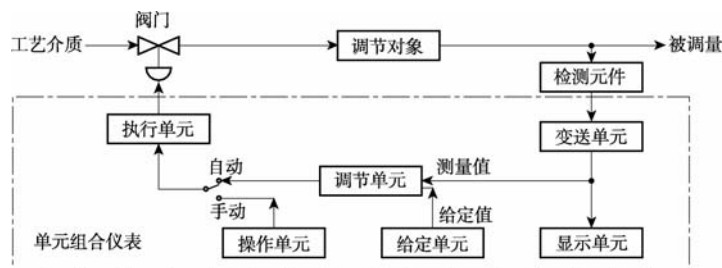


图 1.1 用电动单元组合仪表构成的调节系统

由变送单元输出的统一标准信号,一方面送到显示单元供记录或指示,同时送到调节单元与给定值进行比较。给定值可以由专门的给定单元取得,也可由调节单元内部取得。

目前,多数调节单元内部都有设定给定值的装置。调节单元又称调节器,它按比较得出的偏差,以一定的调节规律,如比例、微分、积分等运算关系发出调节信号,通过执行单元改变阀门的开度,控制进入调节对象的工艺介质流量,达到自动调节的目的。

实际上,除了图 1.1 中表示的几种基本单元外,在电动单元组合式仪表中,还有实现物理量转换的转换单元,进行加、减、乘、除、乘方、开方等运算的计算单元,以及为保证安全防爆所需要的安全单元等。其中,转换单元也是常用的单元,由于目前电动执行器无论在结构、性能、价格及安全方面都不如气动执行器,所以大部分使用电动单元组合仪表构成的调节系统中,其执行器仍然使用气动的。这样,就必须使用电-气转换器,将电动调节仪表输出的电信号转换为气压信号,以推动气动调节阀实现自动调节。安全单元是安全火花型防爆仪表所特有的一种单元,它的作用是在易燃易爆的生产现场周围筑起一道安全栅栏,从电路上对危险场所的线路采取隔离措施,防止高能量电路与现场线路之间的直接接触;同时通过电压、电流的双重限制电路,严格保证进入危险场所的能量在安全范围以内,因而是实现安全火花防爆的关键环节。

如前所述,使用单元组合仪表必须有统一的联络信号。目前我国电动单元组合仪表中并存着两种标准信号制度,在 DDZ—I 和 DDZ—II 型仪表中采用 $0\text{mA}\sim 10\text{mA}$ 直流电流作为标准信号,而在 DDZ—III 型仪表中,采用目前国际上统一的 $4\text{mA}\sim 20\text{mA}$ 直流电流作为标准信号。1973 年 4 月国际电工委员会(I.E.C)通过的标准规定,过程控制系统的模拟信号为 DC $4\text{mA}\sim 20\text{mA}$,电压信号为 DC $1\text{V}\sim 5\text{V}$,我国的 DDZ—III 型仪表规定,现场传输信号用 DC $4\text{mA}\sim 20\text{mA}$,控制室内各仪表间的联络信号用 DC $1\text{V}\sim 5\text{V}$ 。这两种标准都以直流电流作为联络信号。采用直流信号的优点是传输过程中易于和交流感应干扰相区别,且不存在相移问题,可不受传输线中电感、电容和负载性质的限制。采用电流制的优点首先可以不受传输线及负载电阻变化的影响,适于信号的远距离传送;其次由于电动单元组合仪表很多是采用力平衡原理构成的,使用电流信号可直接与磁场作用产生正比于信号的机械力。此外,对于要求电压输入的受信仪表和元件,只要在电流回路中串联电阻便可得到电压信号,故使用比较灵活。

在这两种信号制度里,零信号和满幅度信号电流大小的选择是这样考虑的:在 DDZ—III 型仪表中,以 20mA 表示信号的满度值,而以此满度值的 20% 即 4mA 表示零信号。这种称为“活零点”的安排,有利于识别仪表断电、断线等故障,且为现场变送器实现两线制提供了可能性。所谓两线制变送器就是将供电的电源线与信号的传输线合并起来,一共只用两根导线。为便于理解这种两线制变送器的组成原理,图 1.2 给出了一个简单的示意图。图中,被测压力 P 经弹性波纹管转变为电位器 RP_1 的滑动触头位移,产生正比于压力 P 的电压 V_1 ,该电压经运算放大器 A 和晶体管 VT 组成的电流负反馈电路,把 V_1 转变为晶体管的输出电流 I_2 ,它在 $0\text{mA}\sim 16\text{mA}$ 间随被测压力 P 作正比变化。此外,图中还可看到,为了给仪表内的检测和放大电路供电,用了一个 4mA 的恒流电路,它把内部耗电稳定在一个固定的数值上。图中,稳压管单向击穿二极管 VD_2 除用来稳定内部电路的供电电压外,还调剂内部电路的供电电流。这样,上述两部分电流合计,流过该仪表的总电流在 $4\text{mA}\sim 20\text{mA}$ 间变化,实现了电源线和信号线的合并。

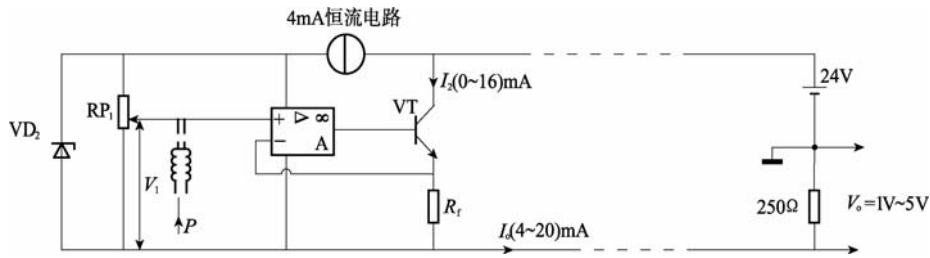


图 1.2 两线制变送器的组成原理

使用两线制变送器不仅节省电缆，布线方便，且大大有利于安全防爆，因为减少一根通往危险现场的导线，就减少了一个窜进危险火花的门户。由于“活零点”的表示法具有上述优点，受到普遍的欢迎和广泛的应用。

在上述信号标准里，从安全防爆、减少损耗、节省能量考虑，信号电流的满度值都希望选小一些。但太小也有困难，因为对力平衡式仪表，电流小了，产生的电磁力也小，不易保证这些仪表的精度。此外，在采用活零点的仪表中，降低满度电流的数值，必然同时降低起点电流的数值。起点电流太小将给两线制仪表带来困难，因为它将要求降低整个仪表在零信号时消耗的总电流。而在目前的元器件水平下，起点电流比 4mA 再小有时将发生困难。因此，目前国际采用 4mA~20mA 作为标准信号。

1.3 自动化仪表测控系统

任何一个工业控制系统都必然要应用一定的检测技术和相应的仪表单元，检测技术和仪表两部分是紧密相关和相辅相成的，它们是控制系统的重要基础。检测单元完成对各种过程参数的测量，并实现必要的数据处理；仪表单元则是实现各种控制作用的手段和条件，它将检测得到的数据进行运算处理，并通过相应的单元实现对被控变量的调节。新技术的不断出现，使传统的自动控制系统以及相关自动化仪表技术都发生了很大变化。

1.3.1 典型自动化仪表测控系统

典型的检测仪表控制系统，以化学工业中用天然气做原料生产合成氨的控制系统为例，此系统如图 1.3 所示为脱硫塔控制流程图。天然气在经过脱硫塔时，需要进行控制的参数分别为压力、液位和流量，这将构成 PC、LC 和 FC3 个单参数调节控制系统。

例如实现脱硫塔压力调节控制的单参数控制子系统(PC)，该系统的结构框图如图 1.4 所示，进行压力参数检测及实现检测信号转换和传输的单元称为压力变送单元，实现调节控制规律计算的单元称为调节单元，最终实现被控变量控制作用的单元称为执行单元。为了实现调节控制作用，首先测量进入脱硫塔的天然气的压力，检测到的信号经转换后，以标准信号制式传输到实现调节运算的调节单元；调节单元在接受到测量信号后，即与给定单元的设定压力值进行比较，并根据设定的控制规律计算出实现控制调节作用所需的控制信号；为保证能够驱动相应的设备实现对被控变量的调节，控制信号还需借助专用的执行单元机构实现控制信号的转换与保持。

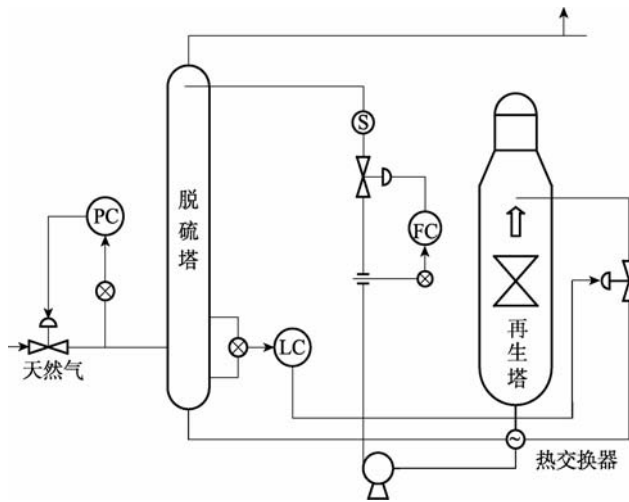


图 1.3 脱硫塔控制流程图

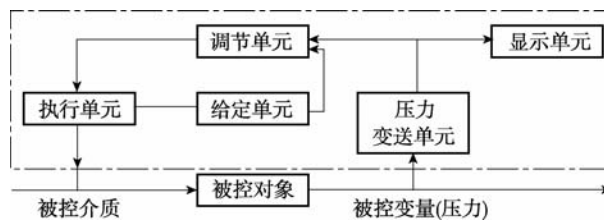


图 1.4 天然气压力控制系统结构框图

同理，考虑单独实现脱硫塔流量调节控制的情况，则控制子系统(FC)的结构框图如图 1.5 所示。其中流量变送单元是专门用于流量检测信号转换和传输的仪表变送单元，而安全栅的增加是为了实现安全火花防爆特性。

在无特殊条件要求下，常规工业检测仪表控制系统的结构基本相同，而与具体采用的仪表类型无关。这里所说的基本构成包括被控对象、变送器、显示仪器、调节器、给定器和执行器等。由于各控制子系统被控变量的不同，各子系统采用的变送器和调节器的控制规律因而有所不同。

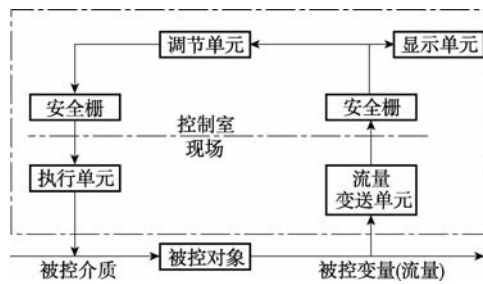


图 1.5 脱硫塔流量控制子系统结构框图

1.3.2 检测仪表控制系统结构分析

常规工业检测仪表控制系统的一般结构如图 1.6 所示。

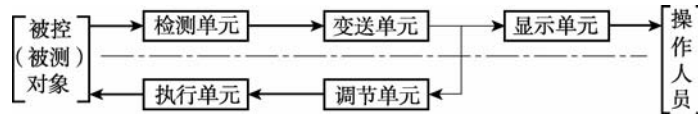


图 1.6 典型工业检测仪表控制系统结构图

显然，图 1.6 是一个闭环回路控制系统，只是为了突出被控对象和操作人员控制系统中的地位，对传统意义上的回路结构进行了适当的调整。

被控(被测)对象是控制系统的核心，它可以是单输入单输出对象，即常规的回路控制系统；也可以是多输入多输出，此时通常需采用计算机仪表控制系统，如直接数字控制系统 DDC、分布式控制系统 DCS 和现场总线控制系统 FCS。

检测单元是控制系统实现控制调节作用的基础，它完成对所有被控变量的直接测量，包括温度、压力、流量、液位、成分等；同时也可实现某些参数的间接测量，如采用信息融合技术实现的测量。

变送单元完成对被测变量信号的转换和传输，其转换结果须符合国际标准的信号制式，即 DC1V~5V 或 DC4mA~20mA 模拟信号或各种仪表控制系统所需的数字信号。

显示单元是控制系统的附属单元，它将检测单元测量获得的有关参数，通过适当的方式显示给操作人员，这些显示方式包括曲线、数字和图像等。

调节单元完成调节控制规律的运算，它将变送器传输来的测量信号与给定值进行比较，并对比较结果进行调节运算，以输出作为控制信号。调节单元采用的常规控制规律包括位式调节和 PID 调节，而 PID 控制规律又根据实际情况的需要产生出了各种不同的改进型。

执行单元是控制系统实施控制策略的执行机构，它负责将调节器的控制输出信号按执行机构的需要产生出相应的信号，以驱动执行机构实现对被控变量的调节作用。通常执行单元分气动、液动和电动三类。

这里需要特别说明的是，图 1.6 所示的只是控制系统的逻辑结构。当采用传统检测和仪表单元构成控制系统时，这种结构与实际系统相同，即图中相关两个单元间采用点对点的连接方式。但是有时检测单元和变送单元及显示单元的界限并不明显，会构成功能组合单元。而在网络化的控制回路系统中，由于多数检测和仪表单元均通过网络相互连接。

1.4 仪表的基本技术指标

自动化仪表和其他仪表一样，在保证可靠工作的前提下，有如下一些衡量其性能优劣的基本指标。

本小节介绍检测和仪表中常用的基本性能指标，包括测量范围及量程、基本温差、精度等级、灵敏度、分辨率、迁移、可靠性以及抗干扰性能指标等。

1.4.1 测量范围、上下限及量程

每个用于测量的仪表都有测量范围，它是该仪表按规定的精度进行测量的被测变量的范围。测量范围的最小值和最大值分别称为测量下限和测量上限，简称下限和上限。

仪表的量程可以用来表示其测量范围的大小，是其测量上限值与下限值的代数差，即

$$\text{量程} = \text{测量上限值} - \text{测量下限值} \quad (1-1)$$

使用下限与上限可完全表示仪表的测量范围，也可确定其量程。如一个温度测量仪表的下限值是 -50°C ，上限值是 150°C ，则其测量范围可表示为 $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ ，量程为 200°C 。由此可见，给出仪表的测量范围便知其上下限及量程，反之只给出仪表的量程，却无法确定其上下限及测量范围。

1.4.2 零点迁移和量程迁移

仪表测量范围的另一种表示方法是给出仪表的零点即测量下限值及仪表的量程。由前面的分析可知，只要仪表的零点和量程确定了，其测量范围也就确定了。因而这是一种更为常用的表示方式。

在实际使用中，由于测量要求或测量条件的变化，需要改变仪表的零点或量程，为此可以对仪表进行零点和量程的调整。通常将零点的变化称为零点迁移，而量程的变化则称为量程迁移。

以被测变量值相对于量程的百分数为横坐标，记为 X ，以仪表指针位移或转角相对于标尺长度的百分数为纵坐标记为 Y ，可得到仪表的标尺特性曲线 $X-Y$ 。假设仪表标尺是线性的，其标尺特性曲线可如图1.7中的线段1所示。

考虑单纯的零点迁移情况，如线段2所示，此时仪表量程不变，其斜率亦保持不变，线段2只是线段1的平移，理论上零点迁移到了原输入值的 -25% ，终点迁移到了原输入值的 75% ，而量程则仍为 100% 。考虑单纯的范围迁移情况如线段3所示，此时零点不变，线段仍通过坐标系原点，但斜率发生了变化，理论上量程迁移到了原来的 70% 。

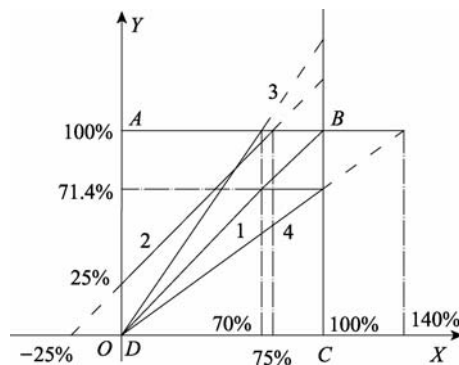


图 1.7 零点迁移和量程迁移示意图

由于受仪表标尺长度和输入通道对输入信号的限制，实际的标尺特性曲线通常只限于正四边形 $ABCD$ 内部，即用实线表示部分；虚线部分只是理论上的结果，无实际意义。因

此, 线段 2 的实际效果是标尺有效使用范围迁移到原来的 25%~100%, 测量范围迁移到原来的 0~75%。线段 3 的实际效果是标尺仍保持原来有效范围的 0~100%, 测量范围迁移到了原来的 0~70%。同理, 考虑图中线段 4 所示的量程迁移情况, 其理论上零点没有迁移, 量程迁移到原来的 140%; 而实际上标尺只保持了原来有效范围的 0~71.4%, 测量范围则仍为原来的 0~100%。

零点迁移和量程迁移可以扩大仪表的通用性。但是, 在何种条件下可以进行迁移能够有多大的迁移量, 还需视具体仪表的结构和性能而定。

1.4.3 灵敏度和分辨率

灵敏度是仪表对被测参数变化的灵敏程度, 常以在被测参数改变时, 经过足够时间仪表指示值达到稳定状态后, 仪表输出变化量 ΔY 与引起此变化的输入变化量 ΔU 之比表示, 即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \quad (1-2)$$

可见, 灵敏度也就是图 1.7 所示标尺特性曲线的斜率。因此, 量程迁移就意味着灵敏度的改变, 而如果仅仅是零点迁移则灵敏度不变。

由灵敏度的定义表达式(1-2)可知, 灵敏度实质上等同于仪表的放大倍数。只是由于 U 和 Y 都有具体量纲, 所以灵敏度也有量纲, 且由 U 和 Y 确定; 而放大倍数没有量纲。所以灵敏度的含义比放大倍数要广泛得多。

常容易与仪表灵敏度混淆的是仪表分辨率。它是仪表输出能响应和分辨的最小输入量, 又称仪表灵敏限。分辨率是灵敏度的一种反映, 一般说仪表的灵敏度高, 则其分辨率同样也高。因此实际中主要希望提高仪表的灵敏度, 从而保证其分辨率较好。

在由多个仪表组成的测量或控制系统中, 灵敏度具有可传递性。例如首尾串联的仪表系统(即前一个仪表的输出是后一个仪表的输入), 其总灵敏度是各仪表灵敏度的乘积。

1.4.4 误差

仪表指示装置所显示的被测值称为示值, 它是被测真值的反映。严格地说, 被测真值只是一个理论值, 因为无论采用何种仪表测到的值都有误差。实际中常将用适当精度的仪表测出的或用特定的方法确定的约定真值代替真值。例如使用国家标准计量机构标定过的标准仪表进行测量, 其测量值即可作为约定真值。

示值与公认的约定真值之差称为绝对误差, 即

$$\text{绝对误差} = \text{示值} - \text{约定真值} \quad (1-3)$$

绝对误差通常可简称为误差。当误差为正时表示仪表的示值偏大, 反之偏小。

绝对误差与约定真值之比称为相对误差, 常用百分数表示, 即

$$\text{相对误差}(\%) = \frac{\text{绝对误差}}{\text{约定真值}} \quad (1-4)$$

虽然用绝对误差占约定真值的百分数来衡量仪表的精度比较合理, 但仪表多应用在测

量接近上限值的量，因而用量程取代式(1-4)中的约定真值则得到引用误差如下式所示

$$\text{引用误差 (\%)} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{量程}} \quad (1-5)$$

考虑整个量程范围内的最大绝对误差与量程的比值，则获得仪表的最大引用误差为

$$\text{最大引用误差 (\%)} = \frac{\text{最大绝对误差}}{\text{量程}} \quad (1-6)$$

最大引用误差与仪表的具体示值无关，可以更好地说明仪表测量的精确程度。它基本误差的主要形式，仪表的主要质量指标之一。

仪表在出厂时要规定引用误差的允许值，简称允许误差。若将仪表的允许误差记为 Q ，最大引用误差记为 Q_{\max} 则两者之间满足如下关系

$$Q_{\max} \leq Q \quad (1-7)$$

任何测量都是与环境条件相关的，这些环境条件包括环境温度、相对湿度、电源电压和安装方式等。仪表应用时应严格按照规定的环境条件即参比工作条件进行测量，此时获得的误差称为基本误差；因此如果在非参比工作条件下进行测量，此时获得的误差除包含基本误差外，还会包含额外的误差，又称附加误差，即

$$\text{误差} = \text{基本误差} + \text{附加误差} \quad (1-8)$$

以上的讨论基本针对仪表的静态误差，静态误差是指仪表静止状态时的误差，或被测量变化十分缓慢时所呈现的误差，此时不考虑仪表的惯性因素。仪表还存在有动态误差，动态误差是指仪表因惯性迟延所引起的附加误差，或变化过程中的误差。仪表静态误差的应用更为普遍。

1.4.5 精确度

任何仪表都有一定的误差。因此，使用仪表时必须先知道该仪表的精确程度，以便估计测量结果与约定真值的差距，即估计测量值的大小。仪表的精确度通常是用允许的最大引用误差去掉百分号(%)后的数字来衡量的。

模拟式仪表的精确度一般不宜用绝对误差(测量值与真实值的差)和相对误差(绝对误差与该点的真实值之比)来表示，因为前者不能体现对不同量程仪表的合理要求，后者很容易引起任何仪表都不能相信的误解。例如，对一只满量程为 100mA 的电流表，在测量零电流时，由于机械摩擦使表针的示数略偏离零位而得到 0.2mA 的读数，若按上述相对误差的算法，那么该点的相对误差即为无穷大，似乎这个仪表是完全不能使用的；但在工程人员看来，这样的测量误差是很容易理解的，根本不值得大惊小怪，它可能还是一只比较精密的仪表呢！模拟式仪表的合理精确度，应该以测量范围中最大的绝对误差和该仪表的测量范围之比来衡量，这种比值称为相对(于满量程的)百分误差。例如某温度计的刻度由 $-50^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ ，即其测量范围为 250°C ，若在这个测量范围内，最大测量误差不超过 2.5°C ，则其相对百分误差 δ 为

$$\delta = \frac{2.5}{50 + 200} = 1.0\%$$

按仪表工业规定，仪表的精确度划分成若干等级，简称精度等级，如 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5 级等。由此可见，精度等级的数字越小，精度越高。

仪表精度等级的确定过程如图 1.8 所示。为便于观察和理解，对其中的偏差做了有意识地放大。图中直线 OA 且是理想的输入输出特性曲线，虚线 3 和 4 是基本误差的下限和上限。在检定或校验过程中所获得的实际特性曲线记为曲线 1 和 2，其中曲线 1 是输入值由下限值到上限值逐渐增大时获得的，称为实际上升曲线；而曲线 2 是输入值由上限值到下限值逐渐减小时获得的，称为实际下降曲线。由曲线 1 和 2 与直线 OA 的偏差可分别得到最大实际正偏差和负偏差。可见，曲线 1 和 2 愈接近直线 OA ，即仪表的基本误差限愈小，仪表的精度等级越高。

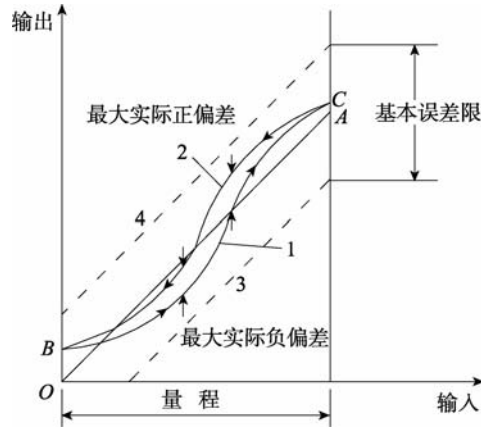


图 1.8 精度等级确定过程示意图

1.4.6 滞环、死区和回差

仪表内部的某些元件具有储能效应，例如弹性变形、磁滞现象等，其作用使得仪表检验所得的实际上升曲线和实际下降曲线常出现不重合的情况，从而使得仪表的特性曲线形成环状，如图 1.9 所示。该种现象即称为滞环。显然在出现滞环现象时，仪表的同一输入值常对应多个输出值，并出现误差。

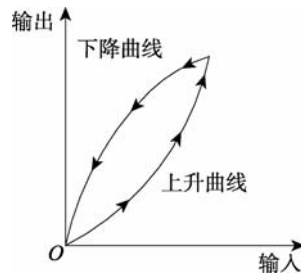


图 1.9 滞环效应分析

仪表内部的某些元件具有死区效应，例如传动机构的磨合间隙等，其作用亦可使得仪表检验所得的实际上升曲线和实际下降曲线常出现不重合的情况。这种死区效应使得仪表输入在小到一定范围后不足以引起输出的任何变化，而这一范围则称死区。考虑仪表特性

曲线呈线性关系的情况，其特性曲线如图 1.10 所示。因此，存在死区的仪表要求输入值大于某一限度才能引起输出的变化，死区也称为不灵敏区。理想情况下，不灵敏区宽度是灵敏限的 2 倍。

也可能某个仪表既具有储能效应，也具有死区效应，其综合效应将是以上两者的结合，典型的特性曲线如图 1.11 所示。

在以上各种情况下，实际上升曲线和实际下降曲线间都存在差值，其最大的差值称为回差，亦称变差，或来回变差。

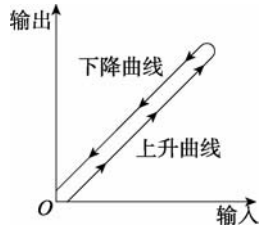


图 1.10 死区效应分析

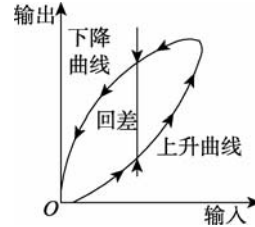


图 1.11 综合效应分析

1.4.7 重复性和再现性

在同一工作条件下，同方向连续多次对同一输入值进行测量所得的多个输出值之间相互一致的程度称为仪表的重复性，它不包括滞环和死区。例如，在图 1.12 中列出了在同一工作条件下测出的仪表的 3 条实际上升曲线，其重复性就是指这三条曲线在同一输入值处的离散程度。实际上，某种仪表的重复性常选用上升曲线的最大离散程度和下降曲线的最大离散程度两者中的最大值来表示。

再现性包括滞环和死区，它是仪表实际上升曲线和实际下降曲线之间离散程度的表示，常取两种曲线之间离散程度最大点的值来表示，如图 1.12 所示。

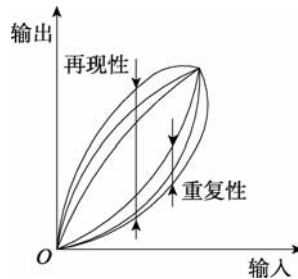


图 1.12 重复性和再现性分析

重复性是衡量仪表不受随机因素影响的能力，再现性是仪表性能稳定的一种标志，因而在评价某种仪表的性能时常同时要求其重复性和再现性。重复性和再现性优良的仪表并不一定精度高，但高精度的仪表一定有很好的重复性和再现性。

1.4.8 可靠性

表征仪表可靠性的尺度有多种，最基本的是可靠度。它是衡量仪表能够正常工作并发挥其功能的程度。简单地来说，如果有 100 台同样的仪表，工作 1000h 后约有 99 台仍能正

常工作，则可以说这批仪表工作 1000h 的可靠度是 99%。

可靠度的应用亦可体现在仪表正常工作和出现故障两个方面。在正常工作方面的体现是仪表平均无故障工作时间。因为仪表常存在的修复多是容易的，因而以相邻两次故障时间间隔的平均值为指标，可很好表示平均无故障工作时间。在出现故障方面的体现是平均故障修复时间，它表示的是仪表修复所用的平均时间，由此可从反面衡量仪表的可靠度。

基于以上分析，综合考虑常规要求，即在要求平均无故障工作时间尽可能长的同时，又要求平均故障修复时间尽可能短。为综合评价仪表的可靠性，引出综合性指标有效度，其定义为

$$\text{有效度} = \frac{\text{平均无故障工作时间}}{\text{平均无故障工作时间} + \text{平均故障修复时间}} \quad (1-9)$$

1.5 自动化仪表技术发展趋势

工业控制系统中的检测技术和仪表系统，是实现自动控制的基础。随着新技术的不断涌现，特别是先进检测技术、现代传感器技术、计算机技术、网络技术和多媒体技术的出现，给传统式的控制系统甚至计算机控制系统都带来了极大的冲击，并由此引出许多新技术的发展。归纳起来，这些发展包括：

- (1) 成组传感器的复合检测；
- (2) 微机械量检测技术；
- (3) 智能传感器的发展；
- (4) 各种智能仪表的出现；
- (5) 计算机多媒体化的虚拟仪表；
- (6) 传感器、变送器和调节器的网络化产品。

对工业检测仪表控制系统来说，以上的发展还远不是终点。由这些发展所产生的更深层次的变化正在悄然兴起，并越来越得到了各行各业的认同。这些深层次的变化包括：

- (1) 控制系统的控制网络化；
- (2) 控制系统的系统扁平化；
- (3) 控制系统的组织重构化；
- (4) 控制系统的工作协调化。

如何针对检测技术和仪表系统提出一系列新的概念和必要的理论，以面对高新技术的挑战，并适应当今自动化技术发展的需要，是目前亟待解决的关键问题。

本章小结

自动化仪表控制已进入了计算机时代，进入了所谓计算机集成过程控制系统的时代。本章介绍了自动化仪表的概念及自动化仪表技术发展趋势，分析了电动单元组合自动化仪表及其控制系统，对典型自动化仪表测控制系统结构进行了阐述，重点讲解了仪表的基本技术指标。必须掌握仪表测量范围、上下限、灵敏度和分辨率、精确度、重复性和再现性、

可靠性等概念。

思考题与习题

1-1 自动化仪表是指哪一类仪表？什么叫单元组合式仪表？

1-2 DDZ—II型与 DDZ—III型仪表的电压、电流信号传输标准是什么？在现场与控制室之间采用直流电流传输信号有什么好处？

1-3 什么叫两线制变送器？它与传统的四线制变送器相比有什么优点？试举例画出两线制变送器的基本结构，说明其必要的组成部分。

1-4 什么是仪表的精度？试问一台量程为 $-100\sim+100^{\circ}\text{C}$ 、精度为 0.5 级的测量仪表，在量程范围内的最大误差为多少？

1-5 自动化仪表在控制系统中起什么作用？

1-6 自动化仪表控制系统的结构是怎样的？各单元主要起什么作用？

1-7 什么是仪表的测量范围、上下限和量程？彼此有什么关系？

1-8 如何才能实现仪表的零点迁移和量程迁移？

1-9 什么是仪表的灵敏度和分辨率？两者间存在什么关系？

1-10 仪表的精度是如何确定的？

第2章 检测仪表

随着科学技术的发展、生产规模的扩大和强度的提高，人们对生产的控制和管理要求也越来越高，需要检测生产过程中的参数种类也将越来越多。这些参数除了指过程自动化最常见的温度、压力、流量、液位和成分等参数外，还包括物料组分、黏度、湿度、噪声、振动乃至诸如转化率、催化剂活性等无法直接在线检测的参数。

就检测仪表而言，检测、变送与显示可以是3个独立的部分，也可以只是其中的两部分，如热电偶测温输出毫伏级信号可以不通过变送，直接送到电子电位差计中显示。或者是三者有机结合成一个整体，如单圈弹簧管压力表。

过程控制对检测仪表有以下几个基本要求：

- (1) 测量值要能正确地反映被测变量的大小，误差不超过规定的范围；
- (2) 测量值必须迅速反映被测变量的变化，即动态响应比较迅速；
- (3) 检测仪表在工作环境条件下，应能长期工作，以保证测量值的可靠性。

本章主要介绍生产过程中常见的参数，如温度、压力、流量、成分和物位以及机械量的检测和应用。

2.1 温度检测仪表

温度是工业过程中最常见、最基本的参数之一，物体的任何物理变化和化学变化都与温度有关。温度一般约占全部过程参数的50%左右。因此温度检测在工业生产中占有非常重要的地位。

2.1.1 温度与温标

温度是表征物体冷热程度的物理量。温度只能通过物体随温度变化的某些特性来间接测量，而用来量度物体温度数值的标尺叫温标。温标规定了温度的读数起点(零点)和测量温度的基本单位。目前国际上用得较多的温标是经验温标和热力学温标。

1. 经验温标

经验温标的基础是利用物质体膨胀与温度的关系。认为在两个易于实现且稳定的温度点之间所选定的测温物质体积的变化与温度成线性关系。把在两温度之间体积的总变化分为若干等份，并把引起体积变化一份的温度定义为1度。经验温标与测温介质有关，有多少种测温介质就有多少个温标。按照这个原则建立的有摄氏度温标、华氏度温标。

摄氏温度和华氏温度的关系为

$$t(^{\circ}\text{F}) = 1.8t(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (2-1)$$

2. 热力学温标

热力学温标又称开尔文温标，或称绝对温标，它规定分子运动停止时的温度为绝对零度，水的三相点，即液体、固体、气体状态的水同时存在的温度，为 273.15K。水的凝固点，即相当摄氏温标 0℃，华氏温标 32°F，开氏温标为 273.15K。热力学温标单位为开尔文，符号为 K，定义水三相点的热力学温度的 1/273.15 为 1K。热力学温标和摄氏温标之间的关系为

$$t = T - 273.15 \quad (2-2)$$

热力学温标是以热力学第二定律为基础的一种理论温标，已被国际计量大会采纳作为国际统一的基本温标，其特点是不与某一特定的温度计相联系，与被测物质无关，用热力学温标表示的热力学温度被认为是最理想的温度数值。热力学温标是一种纯理论的理想温标，无法直接实现。

2.1.2 测温方法

测量温度的方法很多，按照测量体是否与被测介质接触，可分为接触式测温法和非接触式测温法两大类。

接触式测温法的特点是测温元件直接与被测对象相接触，两者之间进行充分的热交换，最后达到热平衡，这时感温元件的某一物理参数的量值就代表了被测对象的温度值。这种测温方法优点是直观可靠，缺点是感温元件影响被测温度场的分布，接触不良等都会带来测量误差，另外温度太高和腐蚀性介质对感温元件的性能和寿命会产生不利影响。

非接触测温法的特点是感温元件不与被测对象相接触，而是通过辐射进行热交换，故可避免接触测温法的缺点，具有较高的测温上限。此外，非接触测温法热惯性小，可达千分之一秒，便于测量运动物体的温度和快速变化的温度。由于受物体的发射率、被测对象到仪表之间的距离以及烟尘、水汽等其他介质的影响，这种测温方法一般测温误差较大。

根据这两种测温方法，测温仪表也可以分为接触式测温仪表和非接触式测温仪表。

2.1.3 膨胀式温度计

膨胀式温度计的测温是基于物体受热时产生膨胀的原理，可分为液体膨胀式和固体膨胀式两种。这里主要介绍固体膨胀式温度计中的一种介绍双金属温度计

双金属温度计是把两种膨胀系数不同的金属薄片焊接在一起制成的，是一种固体膨胀温度计，结构简单、牢固。双金属温度计可将温度变化转换成机械量变化，不仅用于测量温度，而且还用于温度控制装置(尤其是开关的“通断”控制)，使用范围相当广泛。

图 2.1 所示为最简单的双金属温度开关，由一端固定的双金属条形敏感元件直接带动电接点构成的。温度低时电接点接触，电热丝加热；温度高时双金属片向下弯曲，电接点断开，加热停止。温度切换值可用调温旋钮调整，调整弹簧片的位置也就改变了切换温度的高低。

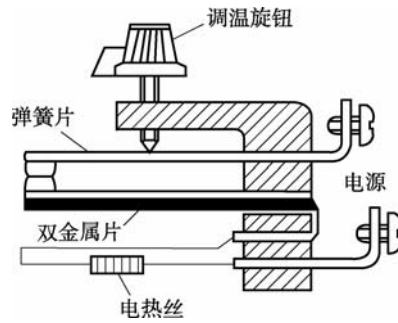


图 2.1 双金属温度开关

图 2.2 为双金属温度计的结构，它的感温元件通常绕成螺旋形，一端固定，另一端连接指针轴。温度变化时，感温元件的弯曲率发生变化，并通过指针轴带动指针偏转，在刻度盘上显示出温度的变化。为了满足不同用途的要求，双金属元件制成各种不同的形状，如 U 形、螺旋形、螺管形、直杆形等。双金属片温度计的测温范围与液体膨胀式温度计接近，精度较差，但在振动和受冲击的应用场合，读数方便，比较适用。

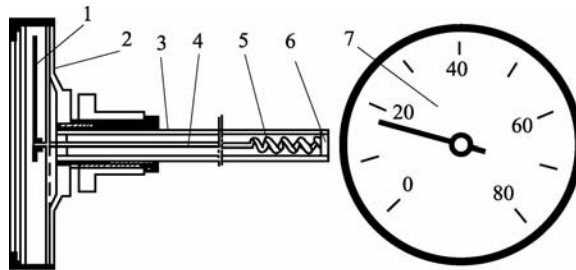


图 2.2 双金属温度计结构

- 1—指针；2—表壳；3—金属保护管；4—指针轴
5—双金属感温元件；6—固定端；7—刻度盘

2.1.4 热电偶温度计

热电偶是目前热电测温中普遍使用的一种温度计，其工作原理是基于热电效应，可广泛用于测量 -200°C ~ 1300°C 范围内的温度。特殊情况下，还可以测量 2800°C 高温和 -270°C 左右的低温。热电偶温度计具有结构简单、价格便宜、准确度高、测温范围广等特点。由于热电偶直接将温度转换为热电势进行检测，使温度的测量、控制、远传以及对温度信号的放大和变换都很方便，适用于远距离测量和自动控制。在接触式测温方法中，热电偶温度计的应用最普遍。

1. 热电效应

热电偶的测温原理是基于热电效应。两种不同材料的金属丝 A 和 B 两端牢靠地接触在一起，组成如图 2.3 所示的闭合回路，当两个接触点(又称为结点)的温度 T 和 T_0 不相同，回路中产生电势，并有电流流通，这种把热能转换成电能的现象称为热电效应。

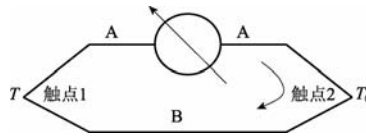


图 2.3 热电效应

导体 A, B 称为热电极。触点 1 通常是焊接在一起的, 测量时将它置于测温场所感受被测温度, 故称为测量端, 又称做工作端或热端。触点 2 要求温度恒定, 称为参考端或冷端。由两种导体组成并将温度转换为热电动势的传感器叫做热电偶。

2. 热电动势

热电动势是由两种导体的接触电势(珀尔贴电势)和单一导体的温差电势(汤姆逊电势)所组成。热电动势的大小与两种导体材料的性质及接点温度有关。

1) 接触电势

由于金属导体材料不同, 金属导体内部的自由电子密度也不相同, 当两种不同的金属导体 A 和 B 导体接触时, 自由电子就要从密度大的导体跑向密度小的导体中去, 从而产生自由电子的扩散现象。这样 A、B 接触处形成了一定的电位差, 这就是接触电势, 其大小可表示为

$$e_{AB} = (kT/e) \ln(N_A / N_B) \quad (2-3)$$

式中, e_{AB} ——为导体 A 和 B 在温度为 T 时的接触电势, A 和 B 的代表了电动势的方向;

k ——为玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

e ——为电子电荷量, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

T ——为导体接触处的温度;

N_A, N_B ——分别为导体 A 和 B 的自由电子密度。

2) 温差电势

在同一导体中, 当导体两端的温度不同即 $T > T_0$ 时, 两端的电子能量就不同。温度高的一端电子能量大, 电子从温度高端跑向温度低端的数量多, 而返回的数量少, 最后达到平衡。这样在导体两端形成一定的电位差就是温差电势, 其大小可表示为

$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma dT \quad (2-4)$$

式中, $e_A(T, T_0)$ ——导体 A 在两端温度分别为 T 和 T_0 时的温差电势, T 和 T_0 的顺序代表了电动势的方向;

σ ——汤姆逊系数, 表示温差 1°C 所产生的电动势值, 大小与材料性质及两端温度有关。

3) 闭合回路的总电势

导体 A 和 B 组成的热电偶闭合电路在两个接点处有两个接触电势 $e_{AB}(T)$ 与 $e_{AB}(T_0)$, 又因为 $T > T_0$, 在导体 A 和 B 中还各有一个温差电势。因此闭合回路的总电动势为

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (2-5)$$

式(2-5)对于已选定的热电偶, 当参考温度恒定时, 总热电动势就变成测量端温度 T 的单值函数, 即 $E_{AB}(T, T_0) = f(T)$, 就是热电偶测量温度的基本原理。理论和实验证明, 热电偶的热电势的大小只与导体 A 和 B 的材质、冷热端温度 T 和 T_0 有关, 而与导体的粗细、

长短以及导体的接触面积无关。

在实际测温时，必须在热电偶闭合回路中引入连接导线和仪表。

3. 热电偶的基本定律

1) 均质导体定律

由均质材料构成的热电偶的热电动势大小只与材料及结点温度有关，与热电偶的大小尺寸、形状及沿电极温度分布无关。均质导体定律表明：热电偶必须采用两种不同材质的导体构成，且热电偶两接点温度不同；由一种材料组成的闭合回路存在温差时，回路如果产生热电势，则说明该材料不均匀，这也是检查热电极材料均匀性的一种方法。如果热电偶是由两种均质导体组成，则热电偶的热电势仅与两接点的温度有关，而与沿电极的温度分布无关。如果热电偶的热电极是非均质导体，在不均匀的温度场中测温时将成测量误差，所以热电极材质的均匀性是衡量热电偶质量的重要技术指标之一。

2) 中间导体定律

如果在热电偶回路中接入第三种导体，只要与第三种导体相连接的两接点温度相同时，则接入第三种导体后，对热电偶回路中的总电势没有影响。如图 2.4 所示，将 A、B 构成的热电偶的 T_0 端断开，接入第三种导体 C，只要保持第三种导体两端温度相同，接入导体 C 后对回路总电动势无影响。根据这一性质，可以在热电偶回路中引入各种仪表和连接导线。图 2.5 所示为接入中间导体后的热电偶测温回路。中间导体定律为制造和使用不同材料的热电偶奠定了理论基础，即采用同一参考电极与各种不同材料组成热电偶，以测试其热电特性，再利用这些特性组成各种配对的热电偶。这是研究和测试热电偶的通用方法。利用中间导体定律可采用开路热电偶对液态金属合金避免进行温度测量。

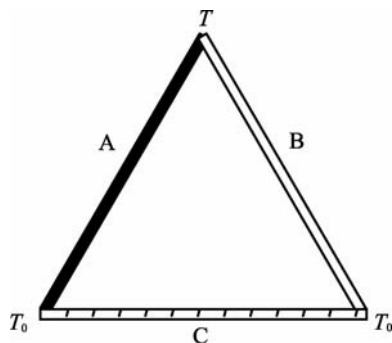


图 2.4 第三种导体的热电偶

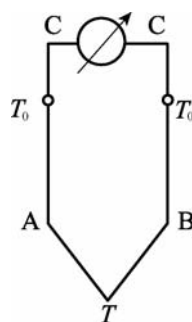


图 2.5 接入中间导体的热电偶测温回路

3) 中间温度定律

在热电偶回路中，两接点温度为 T 、 T_0 时的热电动势，等于该热电偶在接点温度为 T 、 T_n 和 T_n 、 T_0 时热电动势的代数和，即

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (2-6)$$

两端点在任意温度时的热电势为

$$E_{AB}(T, T_n) = E_{AB}(T, 0) - E_{AB}(T_n, 0) \quad (2-7)$$

根据这一定律，只需列出热电偶在参考端温度为 0°C 的分度表，就可以求出参考端在其他温度时的热电势值。中间温度定律示意图如图 2.6 所示。中间温度定律为在热电偶回路中应用补偿导线提供了理论依据，也为制定和使用热电偶分度表奠定了基础。各种热电偶的分度表都是在冷端温度为 0°C 时制成的，如果在实际应用中热电偶冷端温度不是 0°C 而是某一中间温度 T_n ，这时仪表的指示值为 $E_{AB}(T, T_n)$ ，而 $E_{AB}(T_n, 0)$ 值，可以通过分度表查得，则按照该电势值再查相应得分度表就可以得出被测对象得实际温度值。

$$E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, 0) \quad (2-8)$$

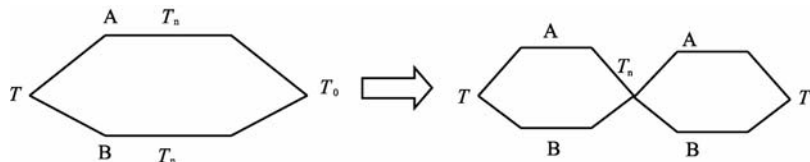


图 2.6 中间温度定律示意图

【例2.1】 利用镍铬镍硅(K型)热电偶测炉温时，工作时冷端温度 $T_0 = 40^{\circ}\text{C}$ ，测得的热电势为 35.72mV ，问被测炉温为多少？

解：查附表-4 中 K 型热电偶分度表可知 $E_{AB}(40, 0) = 1.611\text{mV}$

测得的 $E_{AB}(T, 40) = 35.72\text{mV}$ ，则

$$E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, 40) + E_{AB}(40, 0) = 35.72 + 1.611 = 37.33\text{mV}$$

再由附表中 K 型热电偶的分度表查出与其对应的实际温度为 900.1°C 。

4) 标准电极定律

两种导体 A、B 分别与第三种导体 C 组成热电偶，如果 A、C 和 B、C 热电偶的热电势已知、那么这两种导体 A、B 组成的热电偶产生的电动势可由下式求得

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) \quad (2-9)$$

4. 热电偶冷端温度补偿

前面已经分析过，对于已选定的热电偶，当冷端温度恒定时，总热电动势就变成测量端温度 T 的单值函数，即 $E_{AB}(T, T_0) = f(T)$ 。但在实际测温过程中，热电偶的冷端温度一般不能保持在 0°C ，也不易保持恒定，从而给测量带来误差。另外常用热电偶的分度表以及显示仪表，都是以热电偶参考端的温度为 0°C 为先决条件的。因此采用热电偶测温时必须考虑其冷端温度补偿的问题。热电偶冷端温度补偿的方法一般可采用以下几种方法：

1) 恒温法

保持冷端恒温的方法很多，常见的有以下两种：

(1) 冰点槽法。将热电偶冷端放在盛有绝缘油的试管中，然后再将其放入装满冰水混合物的冰点槽中。这种方法是一种理想的方法，只适用于实验室和精密测量中，工业中使用极为不便。

(2) 恒温箱法。将热电偶的冷端补偿导线引至电加热的恒温箱中，维持冷端为某一恒定的温度，通常恒温箱可供许多支热电偶同时使用，工业中常常采用这种方法。

2) 参比端温度修正法

当热电偶参比端不等于 0°C 时, 需对仪表的示值加以修正, 这是因为热电偶的温度与热电动势关系以及分度表是在参比端为 0°C 得到的。修正公式为

$$E_{\text{AB}}(T, 0^{\circ}\text{C}) = E_{\text{AB}}(T, T_0) + E_{\text{AB}}(T_0, 0^{\circ}\text{C}) \quad (2-10)$$

式中, $E_{\text{AB}}(T, T_0)$ ——测得的回路电势,

$E_{\text{AB}}(T_0, 0^{\circ}\text{C})$ 可查分度表求得。通过上式求出总电动势 $E_{\text{AB}}(T, 0^{\circ}\text{C})$, 再反查分度表求出被测温度 T 。由于热电偶的热电特性是非线性的, 所以不能简单地将温度直接相加。在使用微机测温时, 多采用这种方法进行热电偶冷端温度补偿。

3) 电桥补偿法

电桥补偿法是利用不平衡电桥产生输出电势, 以补偿热电偶由于冷端温度变化而引起的热电动势变化。电桥补偿法有铜电阻补偿法、二极管补偿法和铂电阻补偿法等, 其原理大致相同, 下面仅以铜电阻补偿法为例加以说明。

如图 2.7 所示, 与热电偶的补偿电桥串接在热电偶回路参考端处于同一温度 T_0 下。图中桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的阻值恒定, 不受温度影响; R_4 为铜电阻, 其阻值随温度升高而增大, 测量时将 R_4 置于冷端 T_0 相同的温度场中; E 为供桥直流稳压电源, RP_S 为限流电阻。电桥平衡点设置在 $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$, 即当 $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ 时电桥平衡, 而当 $T_0 \neq 20^{\circ}\text{C}$ 时, 电桥将产生不平衡输出电压 ΔU_{ab} , 此时热电偶亦因冷端温度不为 20°C 而产生偏移电势 $\Delta E_{\text{AB}}(T_0)$, 回路总电势为

$$U_0 = E_{\text{AB}}(T) - [E_{\text{AB}}(T_0) + \Delta E_{\text{AB}}(T_0)] + \Delta U_{\text{ab}} \quad (2-11)$$

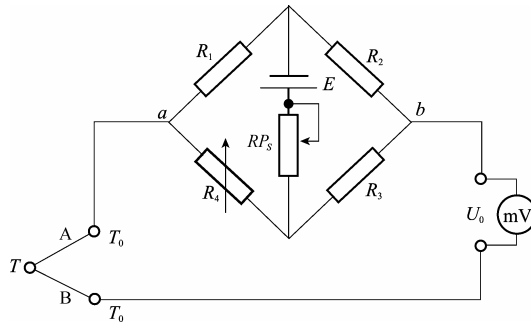


图 2.7 电桥补偿示意图

式中, $E_{\text{AB}}(T)$ ——热电偶热端接触电势;

$E_{\text{AB}}(T_0)$ ——热电偶冷端 $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ 时冷端接触电势, 即 $E_{\text{AB}}(T_0) = E_{\text{AB}}(20^{\circ}\text{C})$

调节铜电阻 R_4 , 使

$$\Delta U_{\text{ab}} = E_{\text{AB}}(20^{\circ}\text{C}),$$

则

$$U_0 = E_{\text{AB}}(T) - E_{\text{AB}}(20^{\circ}\text{C}) \quad (2-12)$$

显然, 无论热电偶冷端 T_0 温度如何变化, 由于电桥的补偿作用, 回路电势 U_0 只与热端温度有关, 因而可以有效地检测温度。

4) 补偿导线法

在实际应用中, 热电偶一般很短, 冷端温度受热源影响, 难以保持恒定。通常热电偶

的输出信号要传至远离数十米的控制室里，且中间不能用一般的铜导线连接。最简单的方法是直接把热电偶电极延长。实际上有的热电偶是贵重金属，价格昂贵，有的虽然不是贵重金属，但比较粗也不适宜拉线过长。特别是在工业装置上使用的热电偶一般都有固定结构，不能随意延长。因此常采用补偿导线的方法。

所谓补偿导线就是用热电性质与热电偶相近的材料制成导线,用它将热电偶的冷端延长到需要的地方，而且不会对热电偶回路引入超出允许的附加测温误差。补偿导线与热电偶连接，使热电偶的冷端远离现场，从而使冷端端温度稳定。图 2.8 所示为补偿导线在热电偶回路中的连接示意图。图中 A'、B'为补偿导线，在一定范围(0~100℃)内与主热电偶的热电性质基本相同。即

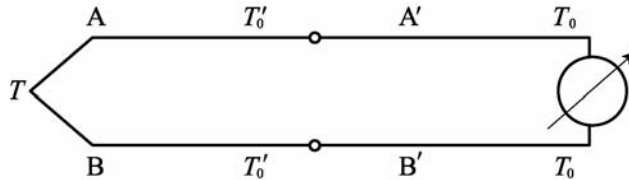


图 2.8 带补偿导线的热电偶测温原理图

A、B—热电极；A'、B'—补偿导线； T_0' —原参考端温度； T_0 —新参考端温度

$$E_{A'B'}(T_0', T_0) = E_{AB}(T_0', T_0) \tag{2-13}$$

因此，带有补偿导线的热电偶回路的总热电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_0') + E_{A'B'}(T_0', T_0) = E_{AB}(T, T_0') + E_{AB}(T_0', T_0) \tag{2-14}$$

由式(2-14)可以看出，回路中的总热电势只与 T 和 T_0 有关，与原冷端温度 T_0' 无关。这样，利用补偿导线将热电偶的参考端引至显示仪表，而显示仪表放在恒温和温度波动较小的地方，从而达到热电偶冷端温度补偿的目的。

补偿导线分延长型和补偿型两种，延长型导线的化学成分与被补偿的热电偶相同，补偿型导线则不同。随着热电偶的标准化，补偿导线也形成了标准系列。国际电工委员会也制定了国际标准，适合于标准化热电偶使用。表 2-1 列出了几种常用的补偿导线。

表 2-1 几种常用的补偿导线

补偿导线 型号	配用热电偶 的分度号	补偿导线合金丝		补偿导线颜色	
		正极	负极	正极	负极
SC	S(铂铑—铂)	SPC(铜)	SNC(铜镍)	红	绿
KC	K(镍铬—镍硅)	KPC(铜)	KNC(铜镍)	红	蓝
KX	K(镍铬—镍硅)	KPX(镍铬)	KNX(镍硅)	红	黑
EX	E(镍铬—铜镍)	EPX(镍铬)	ENX(铜镍)	红	棕
JX	J(铁—铜镍)	JPX(铁)	JNX(铜镍)	红	紫
TX	T(铜—铜镍)	TPX(铜)	TNX(铜镍)	红	白

注：型号的第一个字母与配用热电偶的分度号对应；型号第二个字母 C 表示补偿型，X 表示延长型。

5. 常用工业热电偶

在我国使用的热电偶达数十种,国际电工委员会(IEC)对其中已被国际公认的八种热电偶制定了国际标准,这些热电偶称为标准热电偶。标准热电偶已列入工业化标准文件中,具有统一的分度表,标准文件对同一型号的标准热电偶规定了统一的热电极材料、化学成分、热电性质以及允许偏差,因此同一型号的标准热电偶具有良好的互换性。表 2-2 列出了标准热电偶及其主要特性。

表 2-2 标准热电偶及其主要特性

热电偶名称	分度号	测温范围/℃		特点及应用场合
		长期使用	短期使用	
铂铑 ₁₀ -铂	S	0~1300	1700	热电特性稳定,抗氧化性强,测温范围广,测量精度高,热电势小,线性差,价格高。可作为基准热电偶,用于精密测量
铂铑 ₁₃ -铂	R	0~1300	1700	与S型热电偶的性能几乎相同,只是热电势大15%
铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆	B	0~1600	1800	测量上限高,稳定性好,在冷端温度低于100℃时不用考虑温度补偿问题,热电势小,线性较差,价格高,使用寿命远高于S型和R型
镍铬-镍硅	K	-270~1000	1300	热电势大,线性好,性能稳定,价格较便宜,抗氧化性强,广泛应用于中高温测量
镍铬硅-镍硅	N	-270~1200	1300	在相同条件下,特别是在1100~1300℃高温条件下,高温稳定性及使用寿命较K型热电偶成倍提高,价格远小于S型热电偶,而性能相近,在-200~1300℃范围内,有全面代替廉价金属热电偶和部分S型热电偶的趋势
铜-铜镍 (康铜)	T	-270~350	400	准确度高,价格便宜,广泛用于低温测量
镍铬-铜镍 (康铜)	E	-270~870	1000	热电势较大,中低温稳定性好,耐磨蚀,价格便宜,广泛应用于中低温测量
铁-铜镍 (康铜)	J	-210~750	1200	价格便宜,耐H ₂ 和CO ₂ 气体腐蚀,在含铁或碳的条件下使用稳定,适用于化工生产过程的温度测量。

根据国际温标规定, $T=0^{\circ}\text{C}$ 时,用实验的方法测出各种不同热电极组合的热电偶在不同工作温度下所产生的热电势值,列成一张张表格,这就是常说的分度表。新的 ITS-90 的分度表是由国际电工委员会和国际计量委员会合作安排,国际上有权威的研究机构(包括中国在内)共同参与完成的,它是热电偶测温的主要依据。附表中列出了以上八种标准热电偶的分度表。

6. 热电偶的结构形式

为了适应不同的测温要求和使用条件，热电偶具有多种结构形式，如普通型、铠装型、薄膜型、表面型热电偶和浸入型热电偶等。其中最常见的是普通型和铠装型热电偶。

1) 普通型热电偶

普通型热电偶主要由热电极、绝缘管、保护套管、接线盒和接线端子组成，如图 2.9 所示。热电极的直径由材料的价格、机械强度、导电率、应用和测温范围决定，贵金属热电极直径一般为 0.3mm~0.65mm，廉价金属热电极的直径一般为 0.5mm~3.2mm。热电极的长度由安装条件、插入深度来决定，一般为 350mm~2000mm。绝缘管用于防止两根热电极短路，其材质取决于测温范围，1000℃以下多采用普通陶瓷，1000℃~1300℃之间多采用高纯氧化铝，1300℃~1600℃之间多采用刚玉。保护套管的作用是保护热电极不受化学腐蚀和机械损伤，其材质一般根据测量范围、加热区长度、环境气氛以及测温的时间常数决定，要求耐高温、耐腐蚀、不透气和导热系数高。接线盒主要供热电偶参考端与补偿导线连接用，一般由铝合金制成。为了防止灰尘和有害气体进入热电偶保护套管内，接线盒的出线孔盒盖子均用垫片盒垫圈加以密封，接线盒内用于连接热电极盒补偿导线的螺丝钉必须拧紧，否则会增大接触电阻而影响测量的准确性。

2) 铠装型热电偶

铠装型热电偶用金属套管、陶瓷绝缘材料和热电极组合加工而成，结构如图 2.10 所示。铠装热电偶具有能弯曲、耐高温、响应时间快和耐用等特点，测温范围为-200~1600℃，适应复杂结构的安装要求。目前美国 Hoskins 公司开发出一种复合管型铠装热电偶，可长时间在 1260℃下使用，具有耐高温、抗氧化、使用寿命长等特点。

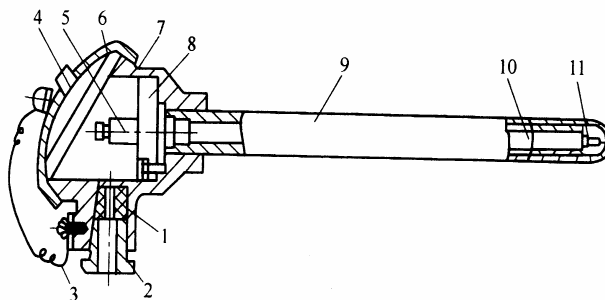


图 2.9 普通型热电偶基本结构图

1—出线孔密封圈；2—出线孔螺母；3—链条；4—面盖；5—接线柱；
6—密封圈；7—接线盒；8—接线座；9—保护管；10—绝缘子；11—热电偶

3) 薄膜型热电偶

薄膜型热电偶是利用真空镀膜法将两电极材料蒸镀在绝缘基底上的薄膜热电偶，是一种比较先进的瞬态温度传感器，其热接点很薄，热惯性极小，反映速度极快，反应时间仅为毫秒级，因此专门用于测量各种形状的固体表面温度和动态温度测量。薄膜型热电偶作为一种便携式温度计，其热电极一般为镍铬—镍硅或铜—康铜，使用时将其贴在被测物体的表面上，使薄膜层称为待测面的一部分，可忽略热接点与待测面的传热电阻，因此在纺

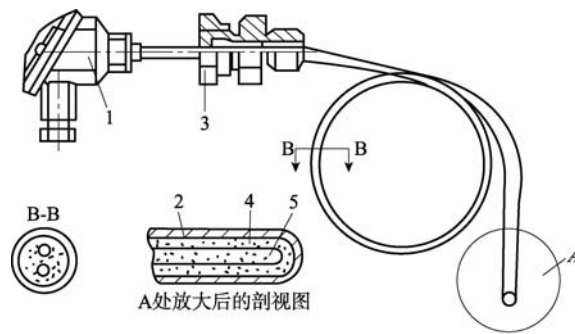


图 2.10 铠装型热电偶

1—接线盒；2—金属套管；3—固定装置；4—绝缘材料；5—热电极

织、印染、橡胶和塑料等工业领域应用广泛。

4) 隔爆型热电偶

隔爆型热电偶的基本参数与普通热电偶一样，区别在于它采用了防爆结构的接线盒。当生产现场存在易燃易爆气体的情况下必须采用隔爆型热电偶。

7. 热电偶实用测温电路

热电偶可以测量单点温度、两点之间的温差、平均温度和几点温度之和。

1) 测量某一点的温度

测量某一点温度的原理电路如图 2.8 所示。图中 T 为工作端， A' B' 为延伸导线，与导体 A 、 B 具有相近的热电特性； T_0 为原参考端温度， T_0' 为新的冷端温度。连接时应注意，热电偶冷端和补偿导线接点的两个端子必须保持在同一温度上，否则将引起误差。

2) 热电偶的串联

图 2.11 为若干支同型号的热电偶正向串联，称为热电堆，其总电势为各热电势之和。采用热电堆来测量同一温度，可使输出电势增加，提高仪表的灵敏度。但当一支热电偶出现故障，整个仪表回路开路，不能正常工作。

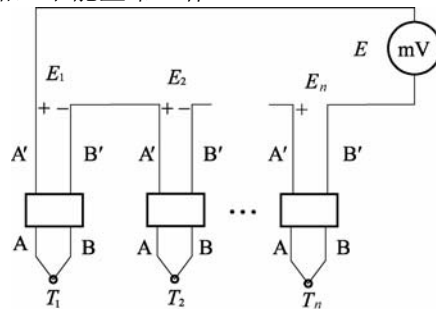


图 2.11 热电偶正向串联

图 2.12 为两支同型号热电偶反向串联，测温回路总电势等于两热电偶电势之差。

3) 热电偶的并联

将 n 支同型号的热电偶的正极和负极分别连接在一起，组成热电偶并联电路，如图 2.13 所示，如果这 n 支同型号的热电偶的电阻值相等，则并联电路的总电势等于 n 支热电偶热电势的平均值。

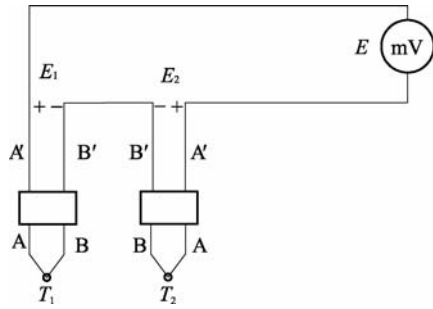


图 2.12 热电偶反向串联

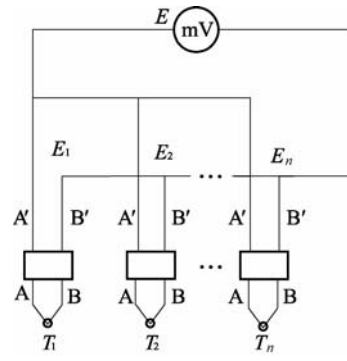


图 2.13 热电偶并联

2.1.5 热电阻温度计

利用导体和半导体的电阻随温度变化这一性质做成的温度计称为热电阻温度计。大多数金属在温度升高 1℃ 时电阻将增加 0.4%~0.6%。但半导体电阻一般随温度升高而减小，其灵敏度比金属高，每升高 1℃，电阻约减小 2%~6%。

热电阻温度计最大的特点是测量精度高，在测量 500℃ 以下高温时，其输出信号比热电偶大得多，性能稳定，灵敏度高，可在 -272.3~1100℃ 范围内测温。热电阻温度计输出为电信号，便于远传、多点测量和自动控制，不需要冷端温度补偿。缺点是需要电源激励，有自热现象、引线误差等影响测量精度。

这里主要介绍金属热电阻温度计。

金属热电阻的测温原理是基于导体的电阻随温度变化而变化的特性，只要测出热电阻阻值的变化，就可以测得被测温度。工业上常用的金属热电阻有铂电阻和铜电阻。

1. 铂电阻

铂是一种贵金属，它的特点是精度高，稳定性好，性能可靠，尤其是抗氧化性能很强。铂在很宽的温度范围内约 1200℃ 以下都能保证上述特性。铂很容易提纯，复现性好，有良好的工艺性，可制成很细的铂丝(0.02mm 或更细)或极薄的铂箔。与其他材料相比，铂有较高的电阻率，因此普遍认为是一种较好的热电阻材料。铂电阻的缺点是其电阻温度系数比较小，价格贵。在 -200~0℃ 范围内，铂电阻与温度的关系为

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(1 - 100)t^3] \quad (2-15)$$

在 0~850℃ 范围内，铂电阻与温度的关系为

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (2-16)$$

式中， R_0 ——温度为 0℃ 时电阻值；

R_t ——温度为 t ℃ 时得电阻值；

A ——常数 $A = 3.90802 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ ；

B ——常数 $B = -5.082 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ；

C ——常数 $C = -4.2735 \times 10^{-12} / ^\circ\text{C}$ 。

铂电阻的分度号为 Pt₁₀₀ 和 Pt₁₀ 两种，是指在 0℃ 时铂电阻的阻值 R_0 为 100Ω 和 10Ω。

2. 铜电阻

铜易于加工提纯，价格便宜，电阻与温度关系呈线性关系，在 $-50^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$ 测温范围内稳定性好。因此在一般测量精度要求不高、温度较低场合，普遍地使用铜电阻。

在 $-50\sim+150^{\circ}\text{C}$ 测温范围内，铜电阻值与温度得线性关系为

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2-17)$$

式中， R_0 ——温度为 0°C 时电阻值；

R_t ——温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时得电阻值；

α ——铜电阻温度系数， $\alpha = 4.25 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$ 。

铜电阻的分度号为 Cu_{100} 和 Cu_{50} 两种，是指在 0°C 时铜电阻的阻值 R_0 为 $100\ \Omega$ 和 $50\ \Omega$ 。

3. 热电阻的结构型式

工业用热电阻主要由电阻体、绝缘体、保护套管和接线盒等组成，如图 2.14 所示，通常还具有与外部测量及控制装置、机械装置相连接的部件。工业热电阻具有普通型、铠装型和专用型等形式。

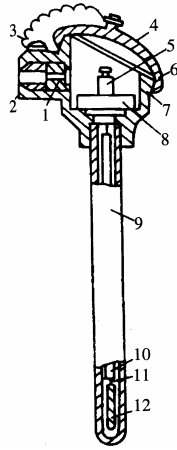
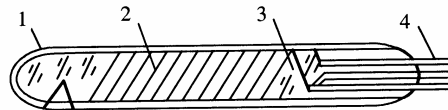


图 2.14 工业用热电阻结构

1—出线孔密封圈；2—出线孔螺母；3—链条；4—面盖；5—接线柱；6—密封圈；7—接线盒；

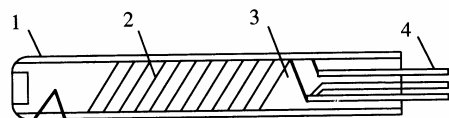
8—接线座；9—保护管；10—绝缘子；10—引出线；11—感温元件；12—感温元件

普通型热电阻与普通热电偶的外形结构极为相似，保护套管和接线盒基本相同，只是热电阻体和引线方式与热电偶不同。热电阻体一般有热电阻丝和绝缘支架组成，如图 2.15 所示，电阻丝采用无感双线绕制在云母、石英或陶瓷支架上，热电阻体装在保护套管内，电阻丝通过引出导线与接线盒内的接线柱相接，以便再与外接线路相连测量温度。

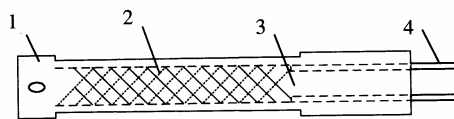


(a) 玻璃骨架

图 2.15 热电阻感温元件的几种典型结构



(b) 陶瓷骨架



(c) 云母骨架

图 2.15(续)

1—外壳或绝缘片；2—铂丝；3—骨架；4—引出线

铠装热电阻将电阻体预先拉制成型并与绝缘材料和保护套管连成一体，直径小，易弯曲，抗震性能好。

专用热电阻用于一些特殊的测温场合，如端面热电阻由特殊处理的线材绕制而成，与一般热电阻相比，能更紧地贴在被测物体的表面；轴承热电阻带有防震结构，能紧密地贴在被测轴承的表面，用于测量带轴承设备的轴承温度。

4. 热电阻的引线方式

热电阻温度计一般由热电阻、引线、连接导线、测量桥路和显示仪表组成，热电阻作为测量桥路的一个桥臂电阻。引线是热电阻出厂时自身具备的，使热电阻丝能与外部测量桥路连接，通常位于保护套管内。引线的电阻在环境温度变化的情况下会发生变化，对测量结果影响较大。目前常用的引线方式由两线制、三线制和四线制 3 种，如图 2.16 所示。

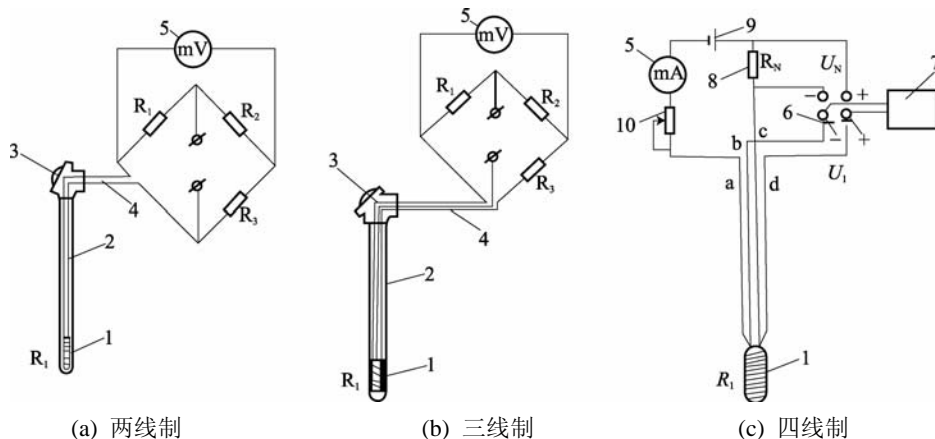


图 2.16 热电阻的几种引线方式

1—热电阻感温元件；2、4—引线；3—接线盒；5—显示仪表；
6—转换开关；7—电位差计；8—标准电阻；9—电池；10—滑线电阻

两线制是指在热电阻体的两端各连接一根导线的引线方式，如图 2.16(a)所示。这种引

线方式比较简单,但由于两根引线都接在电桥的一个桥臂上,引线电阻及其变化值会给测量结果带来附加误差,适用于引线较短,测量精度要求不高的场合。

三线制是指在热电阻体的一端连接两根导线,另一端连接一根导线的引线方式,如图 2.16(b)所示。由于热电阻的两根连线分别置于相邻两桥臂内,温度引起连线电阻的变化对电桥的影响相互抵消,电源连线电阻的变化,对供桥电压影响是极其微小的,可忽略不计,因此这种引线方式可以较好地消除引线电阻的影响,测量精度比两线制高,应用比较广泛。工业热电阻通常采用三线制接法,尤其在测温范围窄、导线长、架设铜导线途中温度易发生变化等情况下,必须采用三线制接法。

四线制是指热电阻体的两端各连接两根导线的引线方式,如图 2.16(c)所示。其中两根引线为热电阻提供恒流源,在热电阻上产生的压降通过另两根引线引至电位差计进行测量。这种接线方式能完全消除引线电阻带来的附加误差,且在连接导线阻值相同时,也可消除连接导线的影 响。这种引线方式主要用于高精度的温度检测。

2.1.6 辐射测温仪表

辐射测温是一种非接触测温,主要是利用光辐射来测量物体温度。任何物体受热后都有一部分的热能转变为辐射能,温度越高,则发射到周围空间的能量就越多。辐射能以波动形式表现出来,其波长的范围极广,从短波、X 光、紫外光、可见光、红外光一直到电磁波。而在温度测量中主要是可见光和红外光,因为此类能量被接收以后,多转变为热能,使物体的温度升高,所以一般就称为热辐射。辐射测温时,辐射感温元件不与被测介质相接触,不会破坏被测温度场,可实现遥测;测量元件不必达到与被测对象相同的温度,可测量高温。辐射测温适用于很宽的测量范围,可达到 $-50\sim 6000^{\circ}\text{C}$,但影响测量精度的因素很多,应用技术较复杂。

辐射测温仪表主要由光学系统、检测元件、转换电路和信号处理电路等部分组成,光学系统包括瞄准系统、透镜和滤光片等,把物体的辐射能通过透镜聚焦到检测元件上,再通过转换电路和信号处理电路将信号转换、放大、辐射率修正和标度变换等,输出被测温度相应的信号。

辐射测温的常用方法有亮度法、全辐射法、比色法和多色法等。辐射测温仪表有全辐射高温计、光学高温计、光电高温计、比色高温计红外探测器、红外测温仪、红外热像仪等。1) 全辐射高温计

全辐射温度计由辐射感温器、显示仪表及辅助装置构成,如图 2.17 所示。被测物体的热辐射能量,经物镜聚集在热电堆(由一组微细的热电偶串联而成)上并转换成热电势输出,其值与被测物体的表面温度成正比,用显示仪表进行指示记录。图中补偿光栏由双金属片控制,当环境温度变化时,光栏相应调节照射在热电堆上的热辐射能量,以补偿因温度变化影响热电势数值而引起的误差。

绝对黑体的热辐射能量与温度之间的关系为

$$E_0 = \sigma T^4 (\text{W/m}) \quad (2-18)$$

但所有物体的全发射率 ε_r 均小于 1, 则其幅射能量与温度之间的关系表示为

$$E_0 = \varepsilon_r \sigma T^4 (\text{W/m}) \quad (2-19)$$

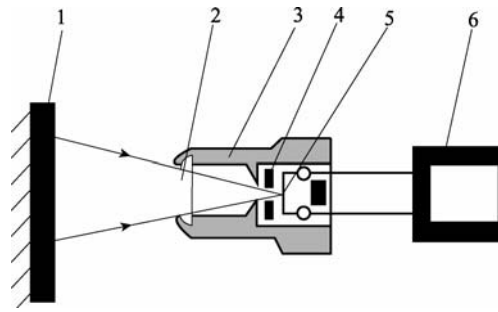


图 2.17 全辐射温度计的工作原理

1—被测物体；2—物镜；3—辐射感温器；4—补偿光栏；5—热电堆；6—显示仪表

一般全辐射温度计选择黑体作为标准体来分度仪表，此时所测的是物体的辐射温度，即相当于黑体的某一温度 T_p 。在辐射感温器的工作谱段内，当表面温度为 T_p 的黑体的积分辐射能量和表面温度为 T 的物体之积分辐射能量相等时，即

$$\sigma T_p^4 = \epsilon_T \sigma T^4 \tag{2-20}$$

则物体的真实温度为

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon_T}} \tag{2-21}$$

因此，当已知物体的全发射率 ϵ_T 和辐射温度计指示的辐射温度 T_p 时，就可算出被测物体的真实表面温度。

2) 光学高温计和光电高温计

光学高温计是发展最早、应用最广的非接触式温度计之一。它结构简单，使用方便，测温范围广(700℃~3200℃)，一般可满足工业测温的准确度要求。光学高温计目前广泛用于高温熔体、炉窑的温度测量，是冶金、陶瓷等工业部门十分重要的高温仪表。光学高温计是利用受热物体的单色辐射强度随温度升高而增加的原理制成的，由于采用单一波长进行亮度比较，因而也称单色辐射温度计。物体在高温下会发光，也就具有一定的亮度，物体的亮度与其辐射强度成正比，所以受热物体的亮度大小反映了物体的温度。通常先得到被测物体的亮度温度，然后转化为物体的真实温度。

光学高温计的缺点是以人眼观察，并需用手动平衡，因此不能实现快速测量和自动记录，且测量结果带有主观性。最近，由于光电探测器、干涉滤光片及单色器的发展，使光学高温计在工业测量中的地位逐渐下降，正在被较灵敏、准确的光电高温计所代替。光电高温计是在光学高温计的基础上发展起来的，用光敏元件代替人眼，实现光电自动测量。这里以比色高温计为例，介绍光电高温计的工作原理。图 2.18 为光电比色高温计的原理结构图。被测对象经物镜 1 成像，经光栏 3 与光导棒 4 投射到分光镜 6 上，使长波(红外线)辐射线透过，而使短波(可见光)部分反射。透过分光镜的辐射线再经滤光片 9 将残余的短波滤去后被红外光电元件(硅光电池)10 接收，转换成电量输出。

由分光镜反射的短波辐射线经滤波片 7 将长波滤去，而被可见光硅光电池 8 接收，转换成与波长亮度成函数关系的电量输出。将这两个电信号输入自动平衡显示记录仪进行比较得出光电信号比，即可读出被测对象的温度值。光栏 3 前的平行平面玻璃 2 将一部分光线反射到瞄准反射镜 5 上，再经圆柱反射镜 11、目镜 12 和棱镜 13，就能从观察系统中看

到被测对象的状态，以便校准仪器的位置。

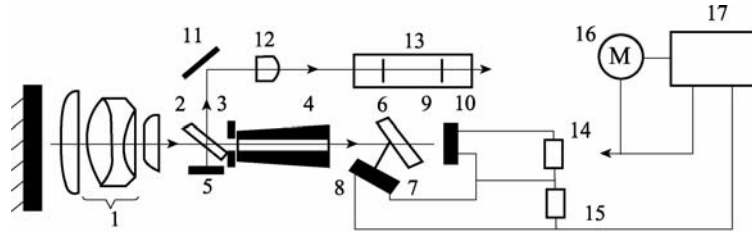


图 2.18 光电比色高温计的原理结构图

- 1—物镜；2—平行平面玻璃；3—光栏；4—光导棒；5—瞄准反射镜；
6—分光镜；7、9—滤光片；8、10—硅光电池；11—圆柱反射镜；
12—目镜；13—棱镜；14、15—负载电阻；16—可逆电动机；17—放大镜

设长波(红外线)波长为 λ_1 ，短波波长为 λ_2 ，光谱发射率分别为 ϵ_{λ_1} 和 ϵ_{λ_2} ，根据普朗克定律，两种波长的辐射能量为

$$E_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda_1^5} \cdot [\exp(\frac{c_2}{\lambda_1 T}) - 1]^{-1} \quad (2-22)$$

$$E_{\lambda_2} = \epsilon_{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda_2^5} \cdot [\exp(\frac{c_2}{\lambda_2 T}) - 1]^{-1}$$

两种波长下辐射能量之比为

$$\frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}} = \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \cdot \frac{[\exp(\frac{c_2}{\lambda_1 T}) - 1]^{-1}}{[\exp(\frac{c_2}{\lambda_2 T}) - 1]^{-1}} \approx \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp\left[\frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right] \quad (2-23)$$

由上式可见，如果波长 λ_1 和 λ_2 一定，且已知相应波长下的 ϵ_{λ_1} 和 ϵ_{λ_2} ，则两波长辐射能量之比与其热力学温度之间成单值对应关系，只要测出辐射能量之比就可以求得温度 T 。

比色高温计是按照黑度刻度的，用这种刻度的高温计去测量实际物体，所得到的温度示值为被测物体的“颜色温度”。若黑体在 λ_1 和 λ_2 两种波长下，在温度为 T_s 时的辐射能量之比和实际物体在温度 T 时的辐射能量之比相等，则 T_s 为该物体的“颜色温度”，二者之间存在以下关系

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} = \frac{\ln \frac{\epsilon_{\lambda_2}}{\epsilon_{\lambda_1}}}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)} \quad (2-24)$$

式中， T_s ——比色高温计的读数；

T ——实际温度，根据 λ_1 、 λ_2 、 ϵ_{λ_1} 、 ϵ_{λ_2} 和 T_s 可以通过读数求出被测物体的实际温度。

这种高温计属非接触测量，量程为 $800 \sim 2000^\circ\text{C}$ ，精度为0.5，响应速度由光电元件及

二次仪表记录速度而定。其优点是测温准确度高，反应速度快，测量范围宽，可测目标小，测量温度更接近真实温度，环境的粉尘、水汽、烟雾等对测量结果的影响小，可用于冶金、水泥、玻璃等工业领域。

3) 红外探测器

红外探测器是红外探测系统的关键元件，目前已研制出了几十种性能良好的探测器，大体可分为热探测器和光探测器两类。热探测器是基于热电效应，即入射光与探测器相互作用时引起探测元件的温度变化，从而引起探测器中与温度有关的电学性质变化。常用的热探测器有热电堆型、热释电型和热敏电阻型等。

光探测器的工作原理是基于光电效应，即入射光辐射与探测器相互作用是激发电子，光探测器的响应时间比热探测器短得多。常用的光探测器有光敏电阻型和光生伏特型。光敏电阻型探测器常用的有光敏二极管(又称光电二极管)、光敏三极管(又称光电晶体管，光电半导体管)等，光生伏特型光探测器常用的有光电池。

目前用于辐射测温的探测器已有长足进展，我国许多单位可生产硅光电池、钽酸钾热释电元件、薄膜热电堆热敏电阻和光敏电阻。图 2.19 为红外测温仪的工作原理图，图中 R 为补偿电阻， R_T 为检测电阻，被测物体的热辐射线由光学系统聚焦，经光栅调制为一定频率的光能，照在热敏电阻探测器上。电桥电路将热敏电阻的变化值转换为交流电压信号，放大后输出显示或记录。

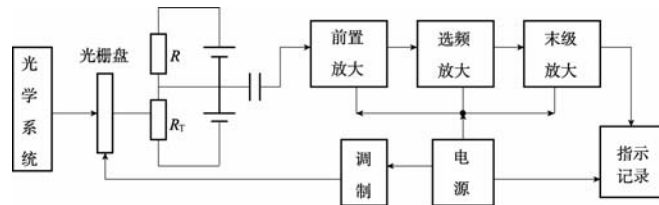


图 2.19 红外测温仪的工作原理图

光栅盘由两片扇型光栅板组成，一块固定，一块可动，可动板受光栅调制电路控制，并按一定频率正、反向转动，实现开(透光)、关(不透光)，使入射线变为一定频率的能量作用在探测器上。探测器表面温度测量范围为 $0\sim 600^{\circ}\text{C}$ ，时间常数为 $4\text{ms}\sim 10\text{ms}$ 。测量电桥将探测器(检测电阻)阻值的变化转换为电压输出，该电压输出信号经前置放大、选频放大和末级放大，最后通过显示仪表显示测量结果，或通过记录仪表记录结果。

2.1.7 温度变送器

热电偶、热电阻是用于温度信号检测的一次元件，它需要和显示单元、控制单元配合，来实现对温度或温差的显示和控制。目前大多数计算机控制装置可以直接输入热电偶和热电阻信号，但在实际工业现场，还有很多采用温度变送器，将传感器输出的电阻或电势信号转换为标准信号输出，再把标准信号接入其他显示单元或控制单元。

1. DDZ—III型温度变送器

DDZ—III型温度变送器是工业过程中使用比较广泛的一类模拟式温度变送器，它与各类型的热电偶、热电阻配套使用，将温度或温差信号转换为 $4\text{mA}\sim 20\text{mA}$ 或 $\text{DC}1\text{V}\sim 5\text{V}$ 的同一标准信号输出。DDZ—III型温度变送器主要有热电偶温度变送器、热电阻温度变送器

和直流毫伏变送器 3 种类型。3 种变送器在线路结构上都由量程单元和放大单元两部分组成，其中放大单元是通用的，而量程单元则随品种和测量范围的不同而不同。DDZ-III 型温度变送器的原理框图如图 2.20 所示。

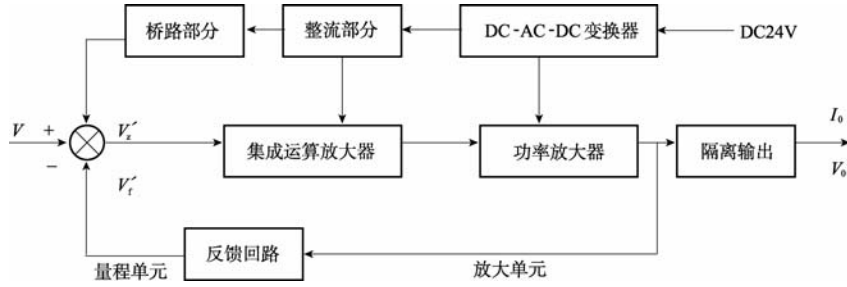


图 2.20 DDZ-III 型温度变送器的原理框图

1) 直流毫伏变送器量程单元

直流毫伏变送器量程单元的电路图如图 2.21 所示，由输入电路、调零电路和反馈电路组成。

输入电路中的 R_{i1} 、 R_{i2} 和 VD_1 、 VD_2 的作用是限流和限幅，限制打火能量在安全火花范围内。 R_{i1} 、 R_{i2} 和 C_i 组成低通滤波器，滤去输入信号 V_i 的交流分量。 R_{i3} 、 R_{i4} 、 R_{i5} 、 R_{i6} 、 R_{i7} 和 R_{ip} 组成调零电路， VT_z 和 R_z 构成恒流源，桥路电压由 VT_z 和 VD_3 提供。

反馈回路由 R_{f1} 、 R_{f2} 、 R_{f3} 和 RP_f 组成， RP_f 为量程电位器， R_{f1} 为反馈电压源的内阻，阻值远小于 R_{f2} 。反馈电压 V_f 来自放大单元的隔离反馈部分。

由于 $R_{f1} \ll R_{f2}$ ，分析计算时可忽略 R_{f1} 。放大器 IC 同相端的电压为

$$V_T = V_i + V_{z1} = V_i + \frac{RP_i + R_{i3}}{R_{i3} + (RP_i \parallel R_{i4}) + R_{i5}} V_z \quad (2-25)$$

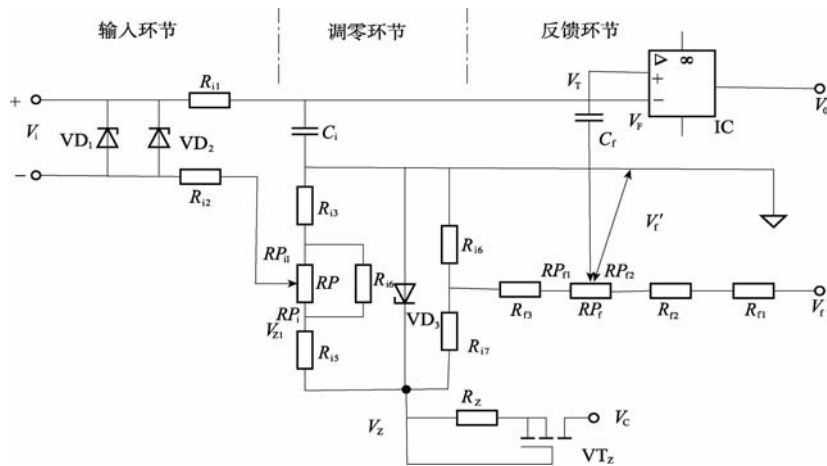


图 2.21 直流毫伏变送器量程单元

式中, $RP_1 = \frac{RP_{i1}R_{i4}}{RP_{i1} + R_{i4}}$ 。

反相端的电压为

$$V_F = \frac{(R_{i6} \parallel R_{i7}) + R_{f3} + RP_{f1}}{(R_{i6} \parallel R_{i7}) + R_{f3} + RP_f + R_{f2}} V_f + \frac{R_{i6}}{(R_{i6} + R_{i7})} \frac{R_{f2} + RP_{f2}}{(RP_f + R_{f2} + R_{f3})} V_Z \quad (2-26)$$

选取

$$R_{i5} \gg (R_{i6} \parallel RP_i) + R_{i3}, \quad R_{i5} = R_{i7}, \quad R_{i7} \gg R_{i6}, \quad R_{f2} \gg (R_{f3} + RP_f)$$

则

$$V_T = V_i + \frac{RP_1 + R_{i3}}{R_{i5}} V_Z$$

$$V_F = \frac{(R_{i6} + R_{f3} + RP_{f1})}{R_{i6} + R_{f3} + RP_{f1} + R_{f2}} V_f + \frac{R_{i6}}{R_{i7}} V_Z \quad (2-27)$$

由于变送器的输出电压和反馈电压之间的关系为

$$V_o = 5V_f \quad (2-28)$$

则

$$V_o = 5\beta[V_i + (\alpha - \gamma)V_Z] \quad (2-29)$$

式中, $\alpha = \frac{RP_1 + R_{i3}}{R_{i5}}$; $\beta = \frac{R_{i6} + R_{f3} + RP_f + R_{f2}}{R_{i6} + R_{f3} + RP_{f1}}$; $\gamma = \frac{R_{i6}}{R_{i7}}$ 。

式(2-28)为直流毫伏变送器输入输出之间的关系式。该式说明:

(1) $V_o = (\alpha - \gamma)V_Z$ 为变送器的调零信号, 当 $\alpha > \gamma$ 时得到正向调零信号, 可实现负向零点迁移; 当 $\alpha < \gamma$ 时得到负向调零信号, 可实现正向零点迁移。改变 R_{i3} 调整零点迁移量, 调整 RP_i 可零。

(2) 5β 位变送器输入输出的比例系数, 改变 RP_f 可微调量程, 改变 R_{f2} 可大范围调整量程。 β 越大, V_i 越小, 量程范围越小。

(3) 改变 RP_f 改变了比例系数, 调整了量程, 也影响了零点。同样调整了零点也影响了量程。因此仪表在调校时, 必须反复调整才能满足精度要求。

2) 热电偶温度变送器的量程单元

热电偶温度变送器的量程单元的电路与直流毫伏变送器的量程单元基本相同, 只是增加了冷端温度补偿电路和线性化电路。其电路图如图 2.22 所示。

电桥电路的 R_{i3} 桥臂串接一只铜电阻 R_{Cu} , R_{Cu} 放在热电偶的冷端附近, 感受与热电偶冷端相同的温度。如果以 20°C 为标准, 补偿电路补偿的条件为

$$\Delta V_i = I_1 R_{Cu} \alpha_{20} (t - 20) \quad (2-30)$$

式中, R_{Cu} ——铜电阻在 20°C 时的电阻值;

α_{20} ——铜电阻在 20°C 附近的电阻温度系数;

t ——热电偶冷端温度, 即现场温度;

I_1 —— R_{i3} 桥臂的电流, 为常数。

当现场温度变化时, 热电偶电动势的变化量为

$$\Delta V_i = \beta(t - 20) \quad (2-31)$$

式中， β ——热电偶在 20°C 附近时的灵敏度，不同材料的热电偶 β 不同。

由式(2-30)和式(2-31)可以求出 20°C 时铜电阻值

$$R_{Cu} = \frac{\beta}{I_1 \alpha_{20}} \quad (2-32)$$

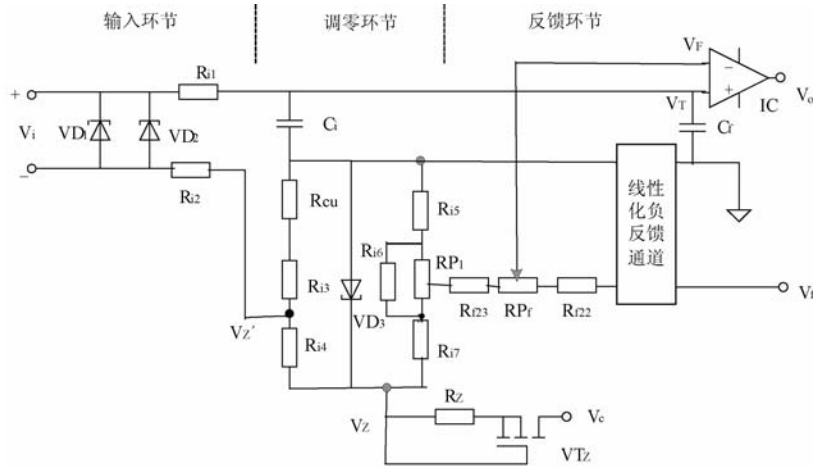


图 2.22 热电偶温度变送器量程单元

图 2.21 中在单向击穿二极管(稳压管)VD₁、VD₂、VD₃的支路上串联负基准电压V₁、V₂、V₃，且满足V₁>V₂>V₃，由于V₀=5V_f，V₀=1V~5V 电压不变，则V_f=200mV~1V 之间。下面采用四段折线逼近热电偶的特性，线性化原理图如图 2.23 所示。

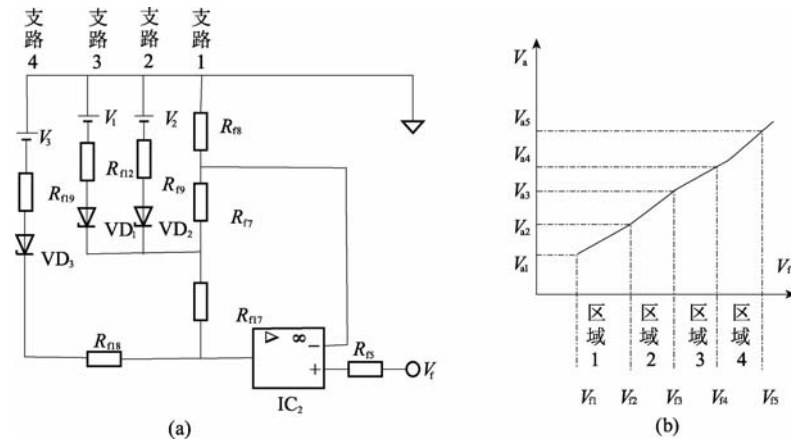


图 2.23 多段折线逼近法线性化原理

- (1) $V_f = 200\text{mV}$ ， $V_{f1} > V_c$ 对应变送器的零点，此时 $V_0 = 1\text{V}$ 或 $I_0 = 4\text{mA}$ 。
 - (2) 当 V_f 增加，达到 $V_{f1} < V_c < V_{f2}$ 时，稳压管 VD_1, VD_2, VD_3 均截止，电阻网络取决于 R_{f17}, R_{f18}, R_{f7} 和 R_{f8} ，此时折线斜率为 α_1 。
 - (3) 当 V_f 继续增加，达到 $V_{f2} < V_c < V_{f3}$ 时，稳压管 VD_1 导通， VD_2, VD_3 均截止，此时折线斜率为 α_2 。
- 依此类推当 V_f 继续增加，达到 $V_{f3} < V_c < V_{f4}$ 时，折线斜率为 α_3 。 $V_{f4} < V_c < V_{f5}$ 时，折线

斜率为 α_4 。从而采用四段折线逼近热电偶的非线性特性。折线的拐点取决于基准电压 V_1 、 V_2 、 V_3 的大小，折线的斜率取决于电阻网络的电阻值。因此，根据不同的热电偶的特性，选择不同的基准电压和电阻网络的电阻值，可实现热电偶线性化的目的。

3) 热电阻温度变送器的量程单元

热电阻温度变送器的量程单元的电路如图 2.24 所示， R_t 为热电阻， R_1 、 R_2 、 R_3 为引线电阻， VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 为限压稳压管，起安全火花防爆作用。

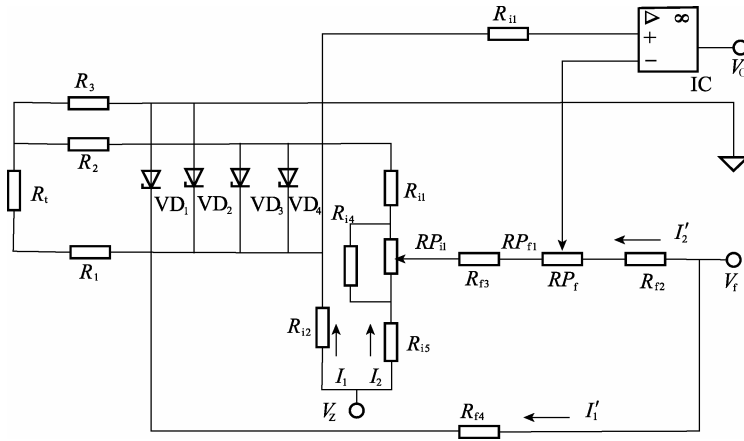


图 2.24 热电阻温度变送器量程单元原理图

热电阻和被测温度之间存在非线性关系，通过 R_{f4} 支路对热电阻的非线性特性进行线性化。 R_{f4} 支路将反馈电压 V_f 转换为电流 I'_1 ，并流过热电阻 R_t ，形成正反馈。热电阻上的电压降为

$$V_t = (I_1 + I'_1)R_t \tag{2-33}$$

热电阻的分度特性为一条上凸性函数曲线，式(2-33)表明热电阻上的电压降是随着温度的升高而增加，形成了一条凹形函数曲线，二者叠加从而实现了线性化，如图 2.25 所示。

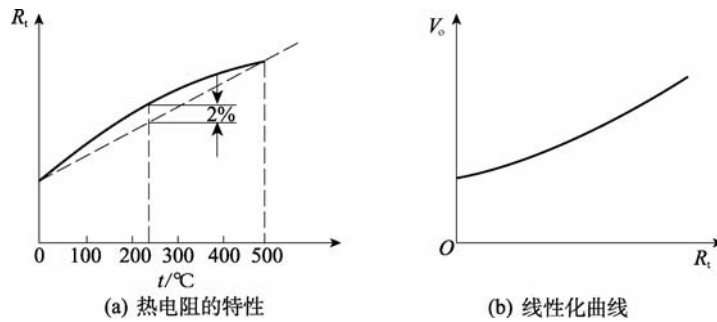


图 2.25 热电阻特性及其线性化要求

4) 温度变送器的放大单元

温度变送器的放大单元由集成运放、功率放大、隔离输出、直流—交流—直流变换器和电源等部分组成。其作用是将量程单元的输出电压经电压放大和功率放大，最后转换为 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 的统一标准信号输出。共电路图如图 2.26 所示。

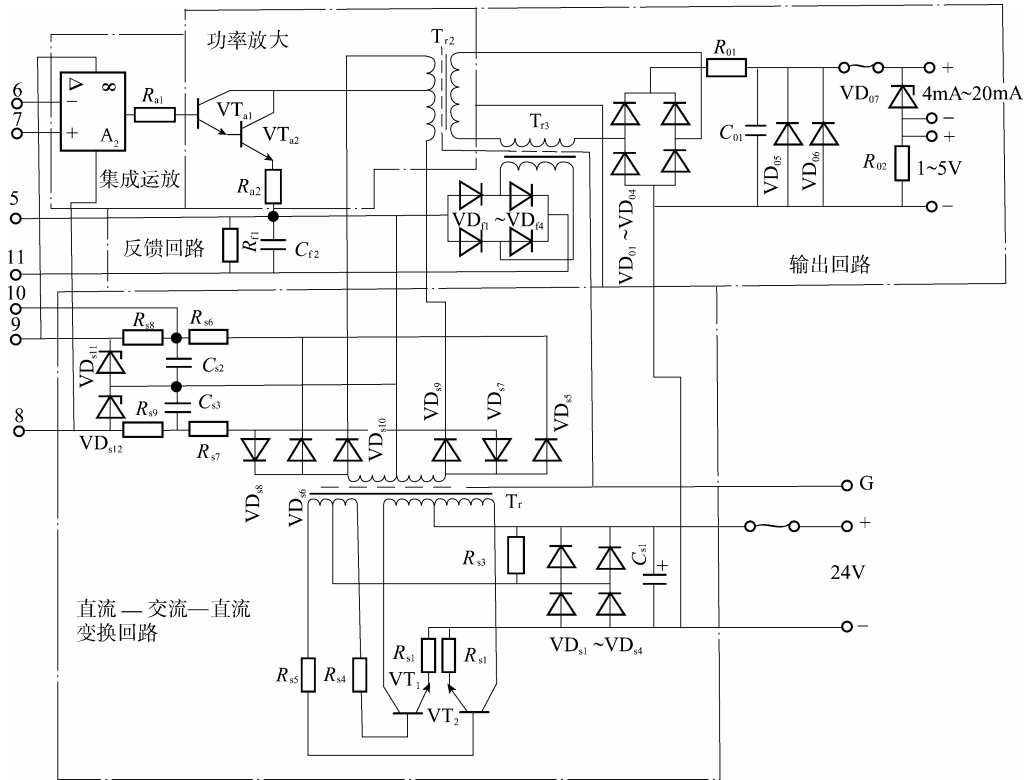


图 2.26 温度变送器的放大单元电路图

由 VT_{a1} 、 VT_{a2} 组成的功率放大器实际上是调制放大器，输出电流加在变压器 T_{r3} 的一次侧， T_{r3} 的二次侧输出电流经过二极管 $VD_{f1} \sim VD_{f4}$ 整流，再经 R_{f1} 、 C_{f2} ，滤波产生直流电压，该直流电压即为量程单元电路中的反馈输入电压 V_f 。与此同时， T_{r3} 的二次侧输出电流经二极管 $VD_{01} \sim VD_{04}$ 整流，再经 R_{01} 、 C_{01} 滤波产生 DC4mA~20mA 直流电流，在电阻 R_{02} 上产生 1~5V 的直流电流信号。

为了抑制共模干扰信号，防止其沿信号线窜入仪表信号系统，从防爆安全角度考虑，应利用变压器把输入、输出、电源信号有效隔离开来。由于仪表对信号形式要求是直流电流或电压，这里采用了直流—交流—直流转换器。晶体管 VT_1 、 VT_2 和变压器 T_{r1} 构成多谐振荡器，将外部引入的 DC24V 电源电压转换为方波形交流信号，再通过 T_{r1} 的二次侧经整流、滤波和稳压后向量程单元、集成运放提供直流电源，同时向功率放大器提供方波调制电源。

2. 一体化温度变送器

一体化温度变送器，是指将变送器模块安装在测温度元件接线盒或专用接线盒内，变送器模块和测温元件形成一个整体，可直接安装在被测设备上，输出为统一标准信号 4mA~20mA。这种变送器具有体积小、质量轻、现场安装方便等优点，因而在工业生产中得到广泛应用。由于一体化温度变送器通常直接安装在现场，变送器模块内部的集成电路在一般情况下工作温度为 $-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ ，超过这一范围，电子元器件的性能就会发生变化，变送器将不能正常工作，因此在使用中应特别注意变送器模块所处的环境温度。

一体化温度变送器分为一体化热电偶温度变送器和一体化热电阻温度变送器两种。一体化热电偶温度变送器把毫伏信号转换为标准电流输出；一体化热电阻温度变送器把电阻信号转换为标准电流输出。

一体化温度变送器的品种较多，其变送器模块大多数以一片专用变送器芯片为主，外接少量元器件构成，常用的变送器芯片有 AD693、XTR101、XTR103、IXR100 等。下面以 AD693 构成的一体化温度变送器为例进行介绍。

一体化热电偶温度变送器的电路图如图 2.27 所示，由热电偶、输入电路和 AD693 等组成。输入电路是一个冷端补偿电桥， R_{Cu} 为铜补偿电阻，通过改变电位器 W_1 的阻值可以调整变送器的零点。 W_2 和 R_3 的作用是调整量程。

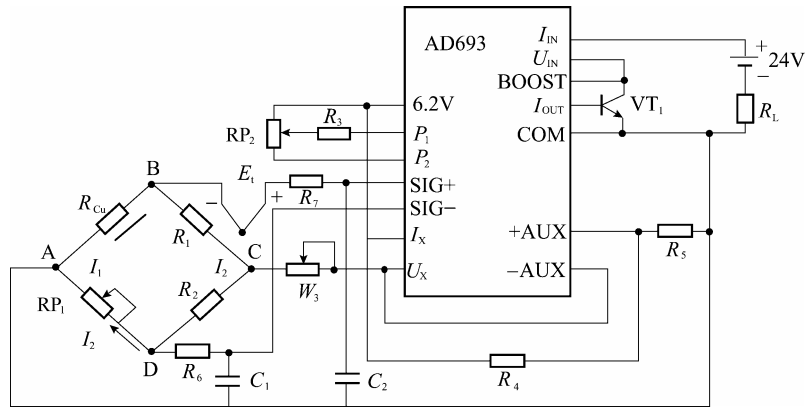


图 2.27 一体化热电偶温度变送器的电路图

AD693 的输入信号 U_i 为热电偶所产生的热电势 E_t 与电桥的输出信号 U_{BD} 之代数和，即

$$U_i = E_t + I_1(R_{Cu} - RP_1) \tag{2-34}$$

如果设 AD693 的转换系数为 K ，可得变送器输出与输入之间的关系为

$$I_o = KU_i = K[E_t + I_1(R_{Cu} - RP_1)] \tag{2-35}$$

结论：

(1) 变送器的输出电流 I_o 与热电偶的热电势 E_t 成正比关系。

(2) R_{Cu} 阻值随温度而变，合理选择 R_{Cu} 的数值可使 R_{Cu} 随温度变化而引起的 I_1R_{Cu} 变化量近似等于热电偶因冷端温度变化所引起的热电势 E_t 的变化值，两者互相抵消。

(3) RP_1 的作用是调零， RP_2 的作用是调满(量程)。

一体化热电阻温度变送器的电路图如图 2.28 所示。AD693 构成的热电阻温度变送器采用三线制接法，AD693 的输入信号 U_i 为电桥的输出信号 U_{BD} ，即

$$U_i = U_{BD} = I_1R_t - I_2RP_2 = I_1\Delta R_t E_t + I_1(R_t - RP_1) \tag{2-36}$$

式中， I_1, I_2 ——为电桥桥臂的电流；

ΔR_t ——为热电阻随温度的变化量；

R_t ——为温度为 t_0 时的热电阻值；

RP_1 ——为调零电阻值。

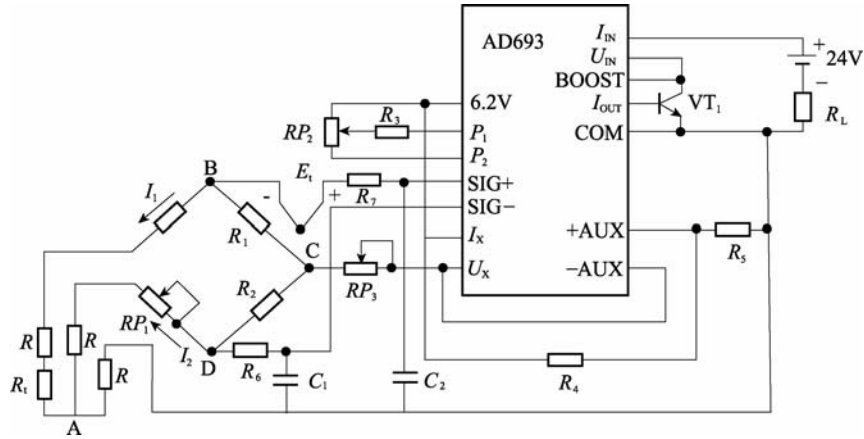


图 2.28 一体化热电偶温度变送器的电路图

同样可求得热电阻温度变送器的输出与输入之间的关系为

$$I_o = KU_i = K[I_1 \Delta R_t E_t + I_1 (R_t - RP_1)] \quad (2-37)$$

3. 智能式温度变送器

智能式温度变送器有的采用 HART 协议通信方式，也有的采用现场总线通信方式。下面以 SMART 公司的 TT302 温度变送器为例进行介绍。TT302 温度变送器是一种符合 FF 通信协议的现场总线智能仪表，它可以与各种热电阻或热电偶配合测量温度，具有量程范围宽、精度高、受环境温度和振动影响小、抗干扰能力强、质量轻以及安装维护方便等优点。

智能温度变送器的硬件构成原理图如图 2.29 所示，由输入板、主电路板和液晶显示器组成。输入板包括多路转换器、信号调理电路、A/D 转换器和隔离部分，其作用是将输入信号转换为二进制的数字信号，传送给 CPU，并实现输入板与主电路板的隔离。输入板上的环境温度传感器用于热电偶的冷端温度补偿。主电路板是变送器的核心部分，它由微处理器系统、通信控制器、信号整形电路、本机调整部分和电源部分组成。液晶显示器可以显示四位半数字和五位字母。

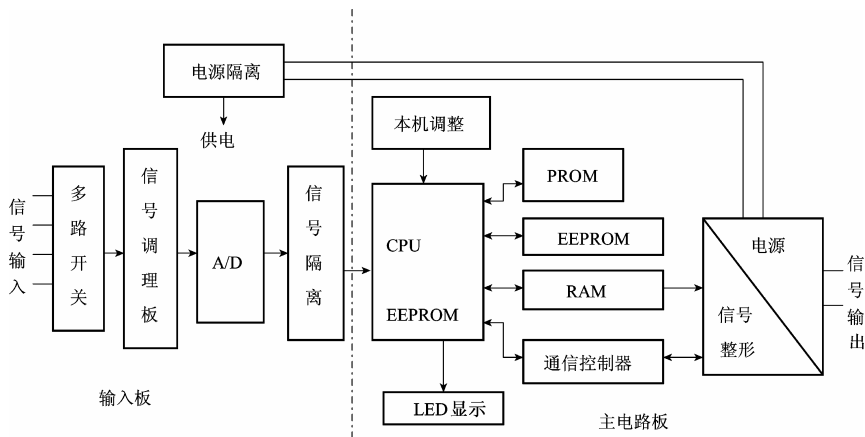


图 2.29 智能温度变送器的硬件构成原理图

智能温度变送器的软件使变送器各硬件部分电路正常工作，实现所规定的功能，完成各组成部分的管理。用户可以通过上位管理计算机或挂接在现场总线通信电缆上的手持式组态器，对变送器进行远程组态，调用或删除功能模块。还可以使用磁性编程工具对变送器进行本地调整。

2.2 压力的检测

压力和差压是工业生产过程中常见的过程参数之一。在许多场合需要直接检测、控制的压力参数，如锅炉的气包压力、炉膛压力、烟道压力；化学生产中的反应釜压力、加热炉压力等。此外，还有一些不易直接测量的参数，如液位、流量等参数往往需要通过压力或差压的检测来间接获取。因此，压力和差压的测量在各类工业生产领域中如石油、电力、化工、冶金、航天航空、环保、轻工等占有很重要的地位。

2.2.1 压力的概念和表示方法

在工程上将垂直而均匀作用在单位面积上的力称为压力，两个测量压力之间的差值称为压力差或压差，工程上习惯叫差压。

在国际单位制和我国的法定计量单位中，压力的单位采用牛顿/米²(N/m²)，通常称为帕斯卡或简称帕(Pa)。帕(Pa)这个单位在实际应用中太小，不方便，目前我国生产的各种压力表都统一用 kPa(10³Pa)或 MPa(10⁶Pa)为压力或差压的基本单位。我国在试行法定计量单位以前还常用工程大气压(kg/cm²)、毫米水柱(mmH₂O)和毫米汞柱(mmHg)等单位。另外在英美等西方国家的一些变送器中还常用 bar(巴)作压力的单位。表 2-3 为几种压力单位的换算关系。

表 2-3 压力单位换算表

单位	千帕 /kPa	兆帕 /MPa	千克力 /厘米 ² /(kgf/cm ²)	毫米 汞柱 /mmHg	毫米 水柱 /mmH ₂ O	巴/bar	磅/英寸 ² /psi	标准 大气压 /atm
千帕/kPa	1	10 ⁻³	0.0101972	7.5	102	0.01	0.14503 8	0.00896 92
兆帕/MPa	1000	1	10.2	7.50× 10 ⁻³	1.02×10 ⁵	10	1.45× 10 ²	98692
千克力/厘米 ² /(kgf/cm ²)	98.067	0.0981	1	735.6	10 ⁴	0.981	14.22	0.9678
毫米汞柱 /mmHg	0.1333	1.333 ×10 ⁻⁴	1.36× 10 ⁻³	1	13.6	1.333 ×10 ⁻³	19.34× 10 ⁻³	1.316× 10 ⁻³
毫米水柱 /mmH ₂ O	9.81× 10 ⁻³	9.81× 10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	73.56× 10 ⁻³	1	98.1× 10 ⁻⁶	1.422× 10 ⁻³	9.678× 10 ⁻⁵
巴(bar)	100	0.1	1.02	750	10.2×10 ³	1	14.50	0.9869
磅/英寸 ² /psi	6.89	6.89× 10 ⁻³	70.3× 10 ⁻³	51.72	703	68.9× 10 ⁻³	1	68.05× 10 ⁻³
标准大气压 /atm	101.33	0.1013	1.0332	760	1.0332× 10 ⁻⁴	1.0133	14.696	1

在工程上,被测压力通常有绝对压力、表压和负压(真空度)之分。三者关系如图 2.30 所示。绝对压力是指作用在单位面积上的全部压力,用来测量绝对压力的仪表称为绝对压力表。地面上空气柱所产生的平均压力称为大气压力,高于大气压的绝对压力与大气压力之差称为表压,低于大气压力的被测压力称为负压或真空度,其值为大气压力与绝对压力之差。由于各种工艺设备和检测仪表通常是处于大气之中,本身就承受着大气压力,因此工程上通常采用表压或者真空度来表示压力的大小,一般的压力检测仪表所指示的压力也是表压或者真空度。

除特殊说明之外,本书以后所提及的压力均指表压。

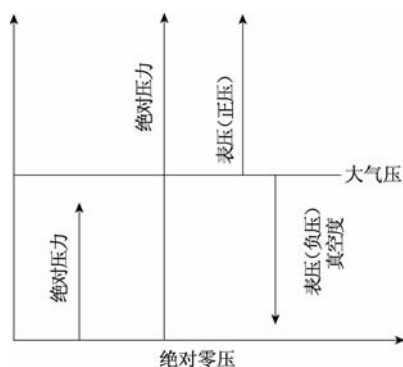


图 2.30 绝对压力、表压、负压(真空度)关系

2.2.2 压力的检测方法和检测仪表

目前工业上常用的压力检测方法和压力检测仪表很多,根据敏感元件和转换原理的不同,一般分为四类:

1) 液柱式压力检测

液柱测压法是以流体静力学理论为基础的压力测量方法,一般采用充有水或汞等液体的玻璃 U 形管或单管进行测量。以此原理构造的液柱压力计结构简单,使用方便,测量精度高,但不便于读数和远传,测量量程也受到一定的限制,一般在实验室或工程实验上使用。

2) 弹性式压力检测

弹性式压力检测是根据弹性元件受力变形的原理,将被测压力转换成位移进行测量的。常用的弹性元件有弹簧管、膜片和波纹管等。

3) 电气式压力检测

电气式压力检测是利用敏感元件将被测压力直接转换成各种电量进行测量的仪表,如电阻、电荷量等。

4) 活塞式压力检测

活塞式压力检测是根据液压机液体传送压力的原理,将被测压力转换成活塞面积上所加平衡砝码的质量来进行测量。活塞式压力计的测量精度较高,允许误差可以小到 0.05%~0.02%,普遍被用作标准仪器对压力检测仪表进行检定。这里主要介绍弹性式压力仪表和电气式压力仪表。

2.2.3 弹性式压力仪表

弹性式压力仪表是利用弹性元件在外力的作用下产生形变来测量压力的,其种类繁多,在工业上的应用也相当广泛。

1. 弹性元件

弹性元件是弹性式压力表的测压敏感元件,弹性压力表的测量性能主要取决于弹性元件的弹性特性,与弹性元件的材料、形状、工艺等有关,而且对温度敏感性强。不同的弹性元件测压范围也不同,工业上常用的弹性式压力表所使用的弹性元件主要有膜片、波纹管、弹簧管等,如图 2.31 所示。

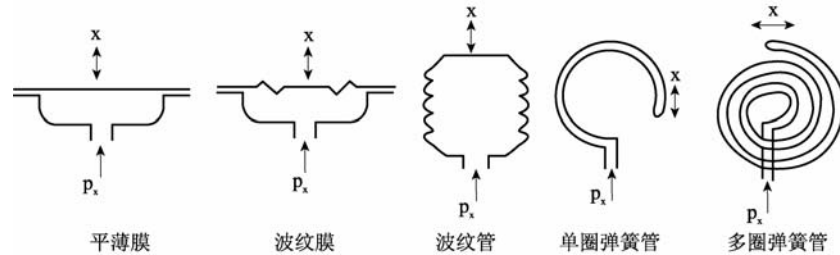


图 2.31 弹性元件示意图

1) 膜片

膜片是一种圆形薄板或薄膜,周边固定在壳体或基座上。将膜片成对地沿着周边密封焊接,就构成了膜盒。当膜片两边的压力不等时就会产生位移。位移可直接带动传动机构指示。但是膜片的位移较小,灵敏度低,指示精度不高,一般为 2.5 级。膜片更多的是和其他转换元件合起来使用,通过膜片和转换元件把压力转换成电信号。

2) 波纹管

波纹管是一种具有同轴环状波纹,能沿轴向伸缩的压力弹性元件。当它受到轴向力作用时能产生较大的伸长和收缩位移。一般可在其顶端安装传动机构,带动指针直接读数。其特点是灵敏度高(特别是在低压区),常用于检测较低的压力($1.0\text{Pa}\sim 10^6\text{Pa}$),但波纹管迟滞误差较大,精度一般只能达到 1.5 级。

3) 弹簧管

弹簧管是一根弯曲成圆弧形、横截面呈椭圆形或近乎椭圆形的空心管。它的一端焊接在压力表的管座上固定不动,并与被测压力的介质相连通。管的另一端是封闭的,称为自由端。被测压力介质从开口端进入并充满弹簧管的整个内腔,由于弹簧管的非圆横截面,使它有变成圆形并伴有伸直的趋势而产生力矩,其结果使弹簧管的自由端产生位移。弹簧管有单圈和多圈之分,单圈弹簧管自由端位移变化量较小,而多圈弹簧管的自由端位移变化量较大。

2. 弹簧管式压力表的结构及工作原理

弹簧管式压力表主要由弹簧管、传动机构、指示机构盒表壳组成,如图 2.32 所示。

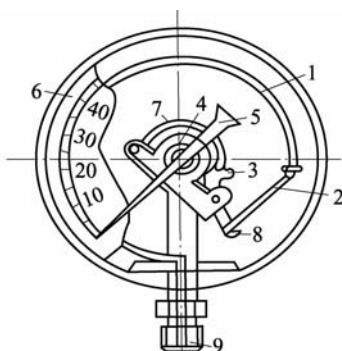


图 2.32 弹簧管压力表

1—弹簧管；2—拉杆；3—扇形齿轮；4—中心齿轮；5—指针；
6—面板；7—游丝；8—调节螺钉；9—接头

当被测压力从弹簧管的固定端输入时，弹簧管的自由端产生位移。在一定的范围内，该位移与被测的压力成线性关系。传动机构又称机心，是把弹簧管受到压力作用时自由端所产生的位移传递给刻度指示部分的。它由扇形齿、中心齿轮、游丝等组成，弹簧管自由端位移很小，如果不预先放大很难看出位移的大小。弹簧管自由端的位移是直线移动，而压力表的指针进行的是圆弧形旋转位移。所以必须使用传动机构将弹簧管的微量位移加以放大，并把弹簧管的自由端的直线位移转变为仪表指针的圆弧形旋转位移。指示机构包括指针、刻度盘等，其主要作用是将弹簧管的变形通过指针转动指示出来，从而在刻度盘上读取直接指示的压力值。表壳又称机座，其主要作用是固定和保护仪表的零部件。

在生产中，常需要把压力控制在一定范围内，以保证生产正常进行。这就需采用带有报警或控制触点的压力表。将普通弹簧管式压力表增加一些附加装置，即成为此类压力表，如电接点信号压力表。弹簧管式压力表结构简单、使用方便、价格低廉，使用范围广，测量范围宽，可以测量负压、微压、低压、中压和高压，因此应用十分广泛。根据制造的要求，仪表精度最高可达 0.15 级。

2.2.4 电气式压力仪表

电气式压力仪表是利用某些机械或电气元件将压力转换成电信号，如频率、电压、电流等信号来进行测量的仪表，如霍尔式压力变送器、应变片式压力计、电阻式压力表等。这类压力计因其检测元件动态性能好、耐高温，因而适用于测快速变化，脉动压力和超高压等场合。

1. 应变片式压力计

应变片式压力计由弹性元件、电阻应变片和测量电路组成。弹性元件用来感受被测压力的变化，并将被测压力的变化转换为弹性元件表面的应变。电阻应变片粘贴在弹性元件上，将弹性元件的表面应变转换为应变片电阻值的变化，然后通过测量电路将应变片电阻值的变化转换为便于输出测量的电量，从而实现被测压力的测量。

目前工程上使用最广泛的电阻应变片有金属电阻应变片和半导体应变片。

应变片一般和弹性元件结合使用，将应变片粘贴在弹性元件上，当弹性元件受压形变

时带动应变片也发生形变，使阻值发生变化，再通过电桥输出测量信号。由于应变片具有较大的电阻温度系数，其电阻值往往随环境温度而变化，因此常采用 2 个或 4 个静态性能完全相同的应变片，使它们处在同一电桥的不同桥臂上，实现温度的补偿。

图 2.33 为应变式压力检测仪表的测量电桥，电桥的四个桥臂都接有应变片，此时相邻桥臂所接的应变片承受相反应变，相对桥臂的应变片承受相同应变，即有

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R, \quad \Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R, \quad \Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R$$

全桥电路的输出电压为

$$U_o = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) U_i = \frac{\Delta R}{R} U_i \quad (2-38)$$

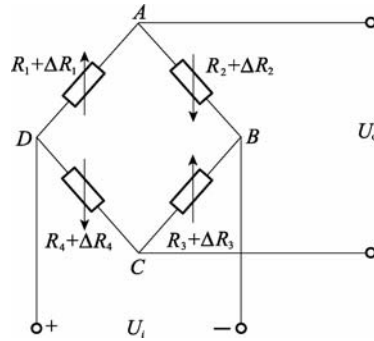


图 2.33 电阻应变式压力传感器的全桥测量电路

应变片式压力计具有较大的测量范围，被测压力可达几百兆帕，并具有良好的动态性能，适用于快速变化的压力测量。但尽管测量电桥具有一定的温度补偿作用，应变片式压力计仍具有比较明显的温漂，因此，这种压力检测仪表多应用于一般要求的动态压力检测，测量精度一般在 0.5%~1.0% 左右。

2. 压电式压力计

1) 压电效应

压电式压力计的工作原理是基于某些物质的压电效应。某些物质(物体)，如石英、铁酸钡等，当受到外力作用时，不仅几何尺寸会发生变化，而且内部也会被极化，表面会产生电荷；当外力去掉时，又重新回到原来的状态，这种由外电场作用导致物质(物体)产生机械变形的现象，称为逆压电效应或电致伸缩效应。具有压电效应的物质(物体)称为压电材料(或称为压电元件)，常见的压电材料可分为两类，即压电单晶体和多晶体压电陶瓷。

天然石英晶体，就其结构形状为一个六角形晶柱，两端为一对称棱锥，如图 2.34(a)所示。在晶体学中，这种结构形状可以用三维坐标表示，其中纵轴 Z 为光轴，通过六棱线而垂直于光轴的 X 轴称为电轴，与 X-X 轴和 Z-Z 轴垂直的 Y-Y 轴(垂直于六棱柱体的棱面)称为机械轴。如果从石英晶体中切下一个平行六面体并使其晶面分别平行于 Z-Z、Y-Y、X-X 轴线，可以得到不同的压电晶体切片。晶片在正常情况下呈现中性，不带电。若对其施力，则有几种不同的效应即纵向压电效应、横向压电效应和切向压电效应。纵向压电效应是指沿电轴(X 轴)方向的作用力产生的压电效应，横向压电效应是指沿机械

轴(Y轴)方向的作用力产生的压电效应。沿光轴(Z轴)方向的作用力不产生压电效应。切向压电效应是指沿相对两棱方向的作用力产生的压电效应。压电式传感器主要是利用纵向压电效应。图 2.34 为天然石英晶体及其切片。

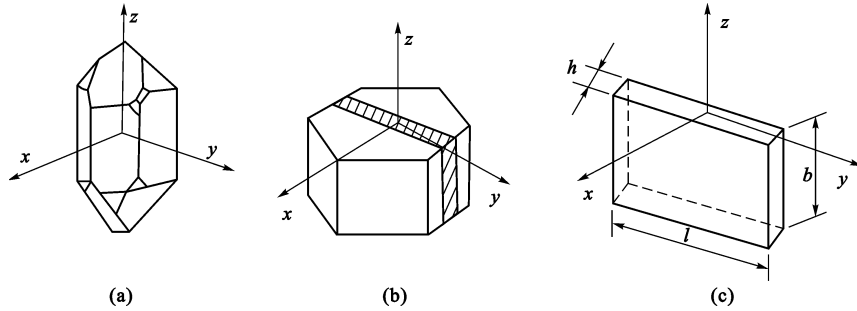


图 2.34 天然石英晶体及其切片

2) 测量电路

以压电效应为基础的压电传感器，是一种具有很高内阻而输出电信号又很弱的有源装置，在作非电测量时，为了提高灵敏度和测量精度，通常取多片压电材料组合成一个压电敏感元件。

由于压电传感器的输出电信号很微弱，通常先把传感器信号输入到具有高输入阻抗的前置放大器中，经过阻抗交换以后，再利用一般的放大检波电路将信号输入到指示仪表或记录仪表中。

前置放大器的作用是将传感器的高阻抗输出变换为低阻抗输出，并放大传感器输出的微弱信号。前置放大器电路有两种形式，一种是用电阻反馈的电压放大器，其输出电压与输入电压(即传感器的输出)成正比；另一种是用电容反馈的电荷放大器，其输出电压与输入电荷成正比。由于电荷放大器电路受电缆长度变化的影响不大(几乎可以忽略不计)，故而电荷放大器的应用日益广泛。压电传感器接至电荷放大器的等效电路图如图 2.35 所示。图中 R 和 C 分别表示前置电荷放大器的等效入端电阻和等效入端电容。电荷放大器是一个具有深度电容 C_f 负反馈的高增益放大器，略去极高 R 影响时，测量电路的输出电压为

$$U_o = -U_i A = -\frac{Aq_a}{C_a + C + C_f (K + 1)} \tag{2-39}$$

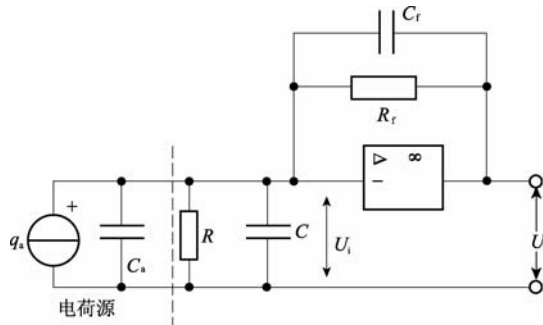


图 2.35 压电传感器接电荷放大器的等效电路图

由于运算放大器的输入阻抗极高, 通常 $K=10^4\sim 10^6$, 因此 $C_f(A+1)\gg C_a+C$, 所以式(2-39)可表示为

$$U_{sc} \approx -\frac{q}{C_f} \quad (2-40)$$

由式(2-40)可知电荷放大器的输出电压与压电传感器的电荷量成正比, 与电缆分布电容无关。因此采用电荷放大器时, 即使连接的电缆长度在百米以上, 灵敏度也无明显变化, 这是电荷放大器的显著优点。

3. 霍尔式压力计

霍尔式压力计是利用霍尔元件基于霍尔效应原理实现压力—位移—霍尔电势。

霍尔式压力计的结构如图 2.36 所示, 它是由单圈弹簧管的自由端安装在半导体霍尔元件上构成的。在霍尔元件片上的上下方向分别安装两对极性相反、呈靴形的磁钢, 使霍尔元件片置于一个非均匀的磁场中, 该磁场强度随单圈弹簧管的位移呈线性变化。在测量过程中, 直流稳压电源给霍尔元件提供恒定的控制电流 I , 当被测压力 P 进入弹簧管后, 弹簧管的自由端与霍尔元件一起在线性非均匀的梯度磁场中移动(对应着不同的磁感应强度 B)时, 便可以得到与弹簧管自由端位移成正比关系的霍尔电势, 如前所述, 弹簧管自由端位移与被测压力成正比关系, 因此只要测量出霍尔电势的大小, 就可以得知被测压力 P 的大小。霍尔电势为

$$U_H = K_x x \propto p \quad (2-41)$$

式中, K_x ——为霍尔式压力传感器的输出系数;

x ——为弹簧管自由端的位移。

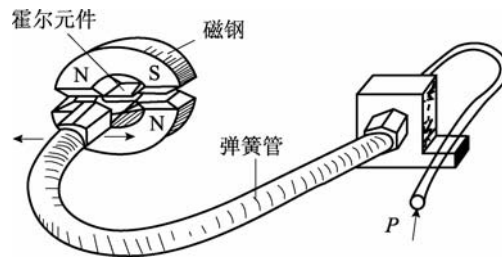


图 2.36 霍尔式压力计的结构示意图

霍尔式压力传感器输出的霍尔电势, 通过测量显示、记录装置和控制装置, 便可实现压力的显示、记录和控制。

2.2.5 压力和差压变送器

压力和差压变送器作为过程控制系统的检测变换部分, 将液体、气体或蒸汽的差压(压力)、流量、液位等工艺参数转换成统一的标准信号(如 DC4mA~20mA 电流), 作为显示仪表、运算器和调节器的输入信号, 以实现生产过程的连续检测和自动控制。

1) 差动电容式压力变送器

差动电容式压力变送器由测量部分和转换放大电路组成, 如图 2.37 所示。

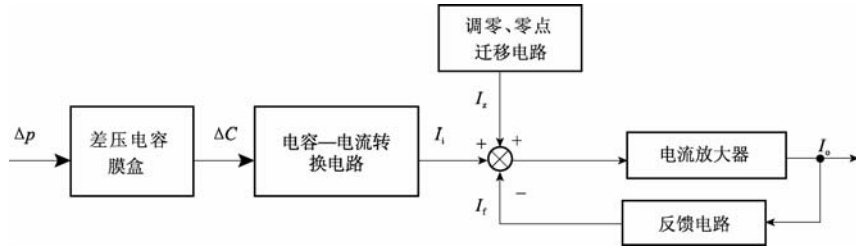


图 2.37 差动电容式压力变送器的原理框图

差动电容式压力变送器的测量部分常采用差动电容结构，如图 2.38 所示。中心可动极板与两侧固定极板构成两个平面型电容 C_H 和 C_L 。可动极板与两侧固定极板形成两个感压腔室，介质压力是通过两个腔室中的填充液作用到中心可动极板上。一般采用硅油等理想液体作为填充液，被测介质大多为气体或液体。隔离膜片的作用既传递压力，又避免电容极板受损。

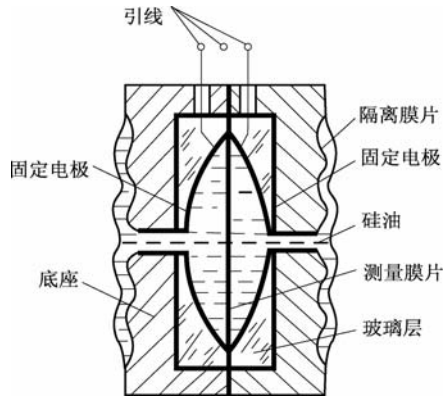


图 2.38 差动电容式压力变送器的差动电容结构

当正负压力(差压)由正负压导压口加到膜盒两边的隔离膜片上时，通过腔室内硅油液体传递到中心测量膜片上，中心感压膜片产生位移，使可动极板和左右两个极板之间的间距不相对，形成差动电容，若不考虑边缘电场影响，该差动电容可看作平板电容。设中心测量膜片产生位移为 δ ，则电容 C_H 减少， C_L 增加，即

$$C_H = \frac{\epsilon A}{d + \delta}, \tag{2-42}$$

$$C_L = \frac{\epsilon A}{d - \delta}$$

式中， ϵ ——介电常数；
 A ——电极板面积；
 d —— $\Delta p = 0$ 时极板之间的距离。

则

$$C_H - C_L = \frac{\epsilon A}{d + \delta} - \frac{\epsilon A}{d - \delta} = \frac{2\epsilon A\delta}{d^2 - \delta^2} \tag{2-43}$$

$$C_H + C_L = \frac{\epsilon A}{d + \delta} + \frac{\epsilon A}{d - \delta} = \frac{2\epsilon Ad}{d^2 - \delta^2} \tag{2-44}$$

设差动电容的相对变化值为两电容之差与两电容之和的比值，则

$$\frac{C_H - C_L}{C_H + C_L} = \frac{\delta}{d} \propto \Delta p \quad (2-45)$$

式(2-45)表明，差动电容的相对变化值与被测压力成正比，与填充液的介电常数无关，从原理上消除了介电常数的变化给测量带来的误差。

差动电容式压力变送器的电容-电流转换放大电路的作用是将式(2-45)，差动电容的相对变化值提取出来，并转化为 DC4mA~DC20mA 输出。

1151 型电容式差压变送器是这类变送器的典型产品，其转换电路原理图如图 2.39 所示。振荡器是变压器反馈的单管自激励 LC 振荡器，其作用是向检测头的调制器提供稳频、稳幅的交流调制信号，实现式(2-45)的差动电容的相对变化值的变换，同时向解调电路提供解调开关信号。解调器就是一种相敏检波电路，检波信号经 RC 滤波后成为直流电流信号 I_d ，解调器的输出电压作为振荡控制器的输入，振荡控制器的输出控制振荡器的输出电压的幅值，从而达到稳频稳幅的要求。

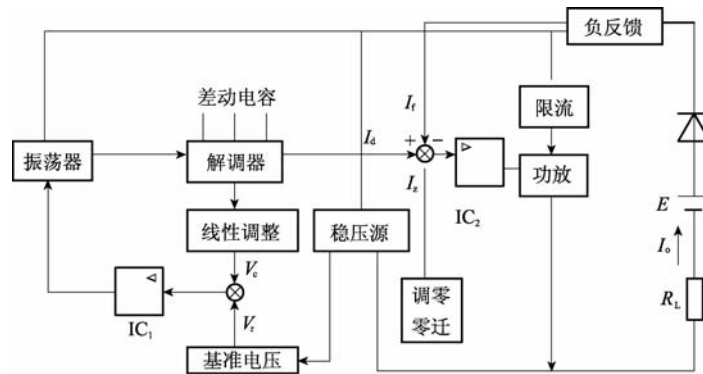


图 2.39 1151 型电容式差压变送器转换电路原理图

解调器输出的直流电流为

$$I_d = K_2 \delta \quad (2-46)$$

I_d 经过电流放大器 IC_2 、零点调整、量程调整、零点迁移、输出电流限幅和过流保护等转换为 DC4mA~20mA 的电流 I_o 即

$$I_o = K_3 I_d \quad (2-47)$$

设 $\delta = K_1 \Delta p$ 由此可以推导出该变送器的输入输出表达式：

$$I_o = K_3 I_d = K_2 K_3 \delta = K_1 K_2 K_3 \Delta p \quad (2-48)$$

由此可知：1151 型电容式差压变送器差动电容式压力变送器的输出电流 I_o 与被测压力 Δp 成正比。

差动电容式压力变送器体积小、质量轻、零点和量程调整互不干扰，其性能较为优越，应用广泛。与力矩平衡式相比，电容式没有杠杆传动机构，因而尺寸紧凑，密封性与抗振性好，测量精度相应提高，可达 0.2 级。

2) DDZ-III 型差压(压力)变送器

DDZ-III 型差压(压力)变送器是采用二线制的安全火花型仪表，与输入安全栅配合使用，可构成安全火花防爆系统，适用于各种易燃易爆场所。

DDZ-III 型差压(压力)变送器基于力矩平衡工作原理，主要由检测元件、杠杆系统、

位移检测放大器和电磁反馈装置组成，其原理框图如图 2.40 所示。图 2.41 为 DDZ-III 型差压(压力)变送器的工作原理示意图，被测压力通过高压室和低压室的比较转换成差压 $\Delta p = p_2 - p_1$ ，该差压作用于膜片或膜盒上，产生输入力 F_1 作用在主杠杆的下端，使主杠杆以密封膜片 O_1 为支点顺时针旋转，形成力 F_1 推动矢量机构沿水平方向移动。矢量机构将力 F_1 分解成垂直方向的分力 F_2 和斜向分力 F_3 ， F_2 作用于负杠杆使其以 M 为支点逆时针旋转，从而使固定在负杠杆上的位移检测片靠近差动变压器，使变压器气隙减小，输出电压增加，放大器的 DC4mA~20mA 输出电流 I_o 也增加。输出电流 I_o 通过电磁反馈线圈在永久磁钢的作用下产生反馈力 F_f 作用在副杠杆上，使副杠杆按顺时针旋转。当反馈力 F_f 与作用力 F_2 在副杠杆上形成力矩达到动态平衡时，杠杆系统保持稳定状态，放大器输出电流 I_o 也稳定在某一数值上， I_o 反映了被测差压 Δp 的大小。

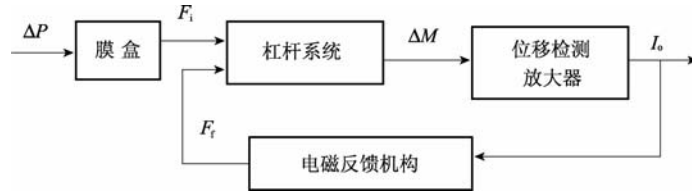


图 2.40 DDZ-III 型差压(压力)变送器的原理框图

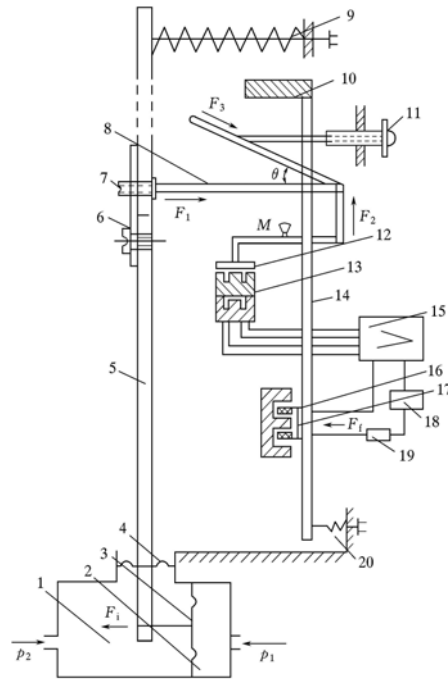


图 2.41 DDZ-III 型差压(压力)变送器工作原理示意图

- 1—高压室；2—低压室；3—膜片或膜盒；4—密封膜片；5—主杠杆；6—过载保护簧片；7—静压调整；
 8—矢量机构；9—零点迁移弹簧；10—平衡锤；11—量程调整螺钉；12—检测片；13—差动变压；
 14—副杠杆；15—放大器；16—反馈线圈；17—永久磁钢；18—调零弹簧

主、副杠杆和矢量机构的受力分析图如图 2.42 所示。输入力 F_1 、检测元件膜片或膜盒的有效面积 A 与被测压力 Δp 之间的关系为

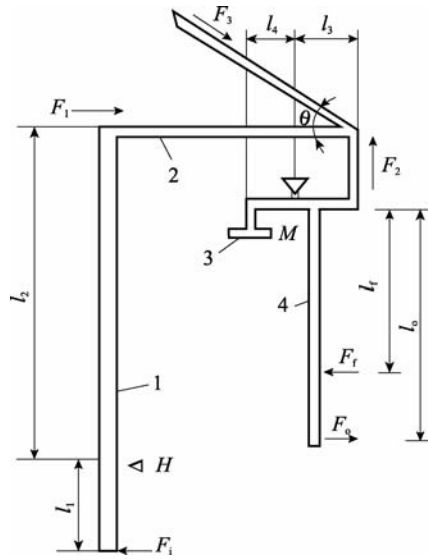


图 2.42 主、副杠杆和矢量机构的受力分析图

$$F_1 = A\Delta p \tag{2-49}$$

以 H 为支点的杠杆系统的力矩平衡关系为

$$F_1 l_1 = F_2 l_2 \tag{2-50}$$

F_1 按矢量方向分解的垂直方向的分力 F_2 为

$$F_2 = F_1 \tan \theta \tag{2-51}$$

以 M 点为支点的力矩平衡关系为

$$F_2 l_2 + F_0 l_0 \approx F_f l_r \tag{2-52}$$

式中， F_0 ——零点调整作用力。

电磁反馈力与变送器的输出电流之间存在以下关系：

$$F_f = \pi D \omega B I_0 = K_f I_0 \tag{2-53}$$

式中， D ——线圈的平均直径；

ω ——线圈的匝数；

B ——磁感应强度；

$K_f = \pi D \omega B$ ——力反馈系数。改变反馈线圈的匝数，可以改变 K_f 的大小。根据式(2-49)、式(2-50)、式(2-51)、式(2-52)和式(2-53)可以计算出输出电流与被测压力之间的关系为

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{l_1 l_3 A \tan \theta}{l_2 l_r K_f} \Delta p + \frac{l_0}{l_r K_f} F_0 \\ &= K_p \Delta p + \frac{l_0}{l_r K_f} F_0 \end{aligned} \tag{2-54}$$

式中, $K_p = \frac{l_1 l_3 A \tan \theta}{l_2 l_f K_f}$, 为差压变送器的灵敏度。

由式(2-54)可以得出以下结论:

(1) DDZ-III型差压(压力)变送器的输出电流 I_o 与被测差压之间 Δp 成线性关系。

(2) 式中第二项为调零弹簧所产生的输出电流的大小。当 $\Delta p = 0$, 调整调零弹簧使该项输出为 $I_o = 4\text{mA}$, 或者用于零点迁移。

(3) 式中第一项用于调整量程的上限。当 $\Delta p = \Delta p_{\text{max}}$ 时, 使该项对应的输出电流 $I_o = 20\text{mA}$ 。由于 K_p 与膜片的有效面积 A 、反馈线圈匝数 ω 和矢量机构的夹角 θ 有关, 因此, 可以改变 A 和 ω 进行量程粗调, 改变 θ 进行量程细调。

(4) 调整量程项和调零项都与 K_f 有关, 所以二者相互影响, 必须反复调整, 才能满足精度要求。

3) 扩散硅压力(差压)变送器

扩散硅压力(差压)变送器是以压阻式传感器为检测元件的一种压力检测仪表, 主要由扩散硅压阻传感器和电磁放大部分组成的, 如图 2.43 所示。压阻传感器的工作原理是基于压阻效应。其压力敏感元件是在半导体材料的基片上利用集成电路工艺制成的扩散电阻, 当受到被测压力的作用时, 扩散电阻的阻值由于电阻率的变化而改变, 扩散电阻一般要依附于弹性元件才能正常工作。用作压阻式传感器的基片材料主要为硅片和锗片, 由于单晶硅材料纯度高、功耗小、滞后和蠕变极小、机械稳定性好, 而且传感器的制造工艺和硅集成电路工艺有很好的兼容性, 所以以扩散硅压阻传感器作为检测元件的压力检测仪表得到了广泛的应用。

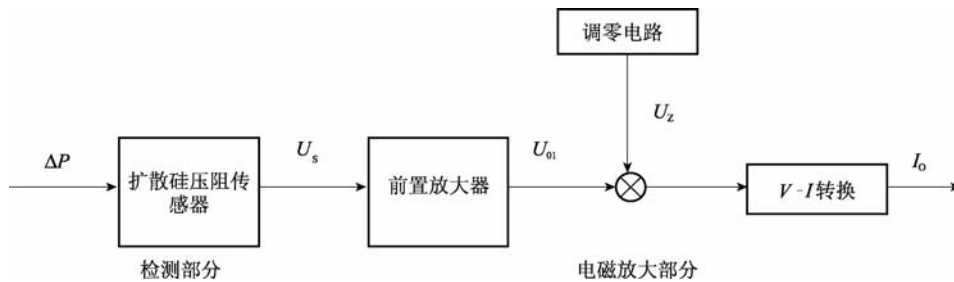


图 2.43 扩散硅压力(差压)变送器原理框图

图 2.44 为压阻式压力传感器的结构示意图。在硅膜片上用离子注入和激光修正方法形成四个阻值相等的扩散电阻, 并连接成惠斯顿电桥形式, 如图 2.45 所示。电桥用恒压源或恒流源激励。通过 MEMS 技术在硅膜片上形成一个压力室, 一侧与取压口相通, 另一侧与大气相连, 或做成标准的真空室。当被测压力作用在膜片上产生差压时, 使得膜片一部分压缩一部分拉伸, 位于膜片压缩区的电阻变小, 位于膜片拉伸区的电阻变大, 电桥失去平衡。电桥的输出电压反映了膜片上所受的的压力差。

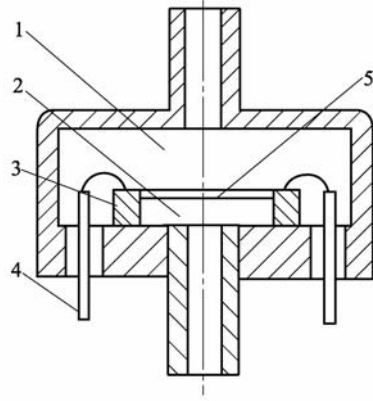


图 2.44 压阻式压力传感器结构示意图

1—低压室；2—高压室；3—硅杯；4—引线；5—硅膜片

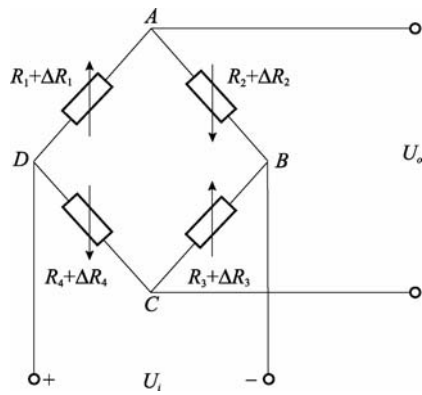


图 2.45 惠斯顿电桥

膜片不受压时 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ；膜片受压时 $\Delta R_1 = \Delta R_3 = r_1$ ； $\Delta R_2 = \Delta R_4 = r_2$ 则电桥输出电压为

$$\begin{aligned}
 U_o &= \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) U_i \\
 &= \frac{(r_1 - r_2)}{2R + r_1 + r_2} U_i
 \end{aligned}
 \tag{2-55}$$

变送电路原理线路图如图 2.46 所示，其作用是将桥路输出的毫伏信号转换为标准电流信号。

虚线框中的传感器接成惠斯顿电桥形式，位于运放 IC₁ 的反馈回路中，由 VD₄、IC₁、R₄、RP₂ 组成的恒流源激励，电流大小可以由 RP₂ 微调。运放 IC₂、IC₃、IC₄ 组成差动放大电路，具有极高的输入阻抗。

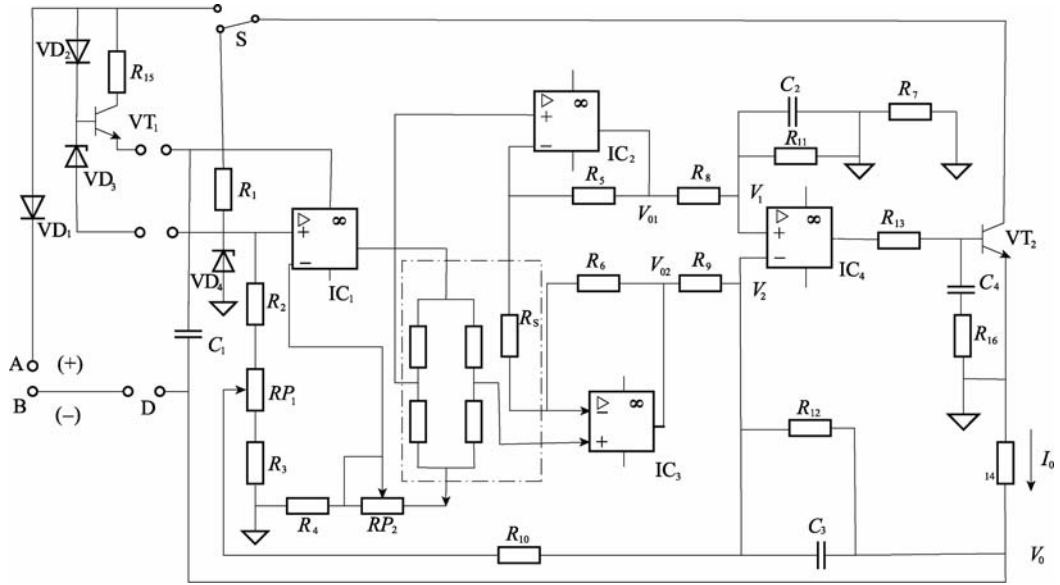


图 2.46 扩散硅压力变送器原理线路图

差动放大器的增益由 R_S 确定， R_S 为增益设定电阻，这一电阻用激光刻蚀，与扩散电阻在同一硅片中。 C_2 、 C_3 、 C_4 、 R_{16} 用来提高电路的稳定裕度。晶体管 VT_2 为变送器的电流输出级，设 IC_4 为理想运放，忽略零位校正电阻 R_{10} 支路及动态校正参数，则

$$\frac{V_{02} - V_2}{R_9} = \frac{V_2 - V_0}{R_{12}} \quad (2-56)$$

$$\frac{V_{01} - V_1}{R_8} = \frac{V_1}{R_{11}} \quad (2-57)$$

设 $R_8 = R_9$ ， $R_{11} = R_{12}$ ，因为 $V_1 = V_2$ 则

$$V_0 = \frac{R_{12}}{R_9} (V_{01} - V_{02}) \quad (2-58)$$

流经 R_{14} 上的电流为输出电流 I_0 ，即

$$I_0 = -\frac{V_0}{R_{14}} = \frac{R_{12}}{R_9 R_{14}} (V_{02} - V_{01}) \quad (2-59)$$

经过电路参数设计，桥路输出经差动放大，再经变送器电流输出级射出电流的增量等于 16mA ，通过调整电位器 RP_1 ，使变送器被测量程的下限为 4mA ，这样变送器就实现了 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 的电流转换。

2.2.6 压力表的选用与安装

为了使压力表在生产过程中能起到应有的作用，首先要正确选用和安装压力表。

1. 压力表的选用

压力表的选用应根据工艺要求，合理地选择压力表的种类、型号、量程和精度等级等。

(1) 确定仪表量程。根据被测压力的大小来确定仪表的量程。在选择仪表的上限时应

留有充分的余地。一般在被测压力稳定的情况下,最大工作压力不应超过仪表上限值的 2/3;测量脉动压力时,最大工作压力不应超过仪表上限值的 1/2;测量高压时,最大工作压力不应超过仪表上限值的 1/3。为了测量的准确性,所测得的压力值不能太接近仪表的下限值,即仪表的量程不能选得过大,一般被测压力的最小值应不低于仪表量程的 1/3。

(2) 选用仪表的精度 根据生产上所允许的最大测量误差来确定压力表的精度。选择时,应在满足生产要求的情况下尽可能选用精度较低、经济实用的压力表。

(3) 仪表类型的选择 选择仪表时应考虑被测介质的性质,如温度的高低、黏度的大小、易燃易爆和是否有腐蚀性等;还要考虑现场环境条件,如高温、潮湿、振动和电磁干扰等;还必须满足工艺生产提出的要求,如是否需要远传、自动报警或记录等。

2. 压力表的安装

压力表正确安装与否,直接影响到测量结果的准确性和压力表的使用寿命,因此

(1) 压力表应安装在易观察、检修的地方。

(2) 安装地点力求避免振动和高温影响。

(3) 测量蒸汽压力时应加凝液管,以防止高压蒸汽直接和测压元件接触。测量有腐蚀性介质压力时,应加装有中性介质的隔离管。

(4) 压力表的连接处应加密封垫片。

为安全起见,测量高压的压力表除选用有通气孔的外,安装时表壳应向墙壁或无人通过的地方,以防止发生意外。

2.3 流量检测仪表

流量是工业生产过程操作与管理的重要依据。在具有流动介质的工艺过程中,物料通过工艺管道在设备之间来往输送和配比,生产过程中的物料平衡和能量平衡等都与流量有着密切的关系。因此通过对生产过程中各种物料的流量测量,可以进行整个生产过程的物料和能量衡算,实时最优控制。

2.3.1 流量的基本概念

1. 体积流量和质量流量

流体的流量是指流体在单位时间内流经某一有效截面的体积或质量,前者称体积流量(m^3/s),后者称质量流量(kg/s)。

如果在截面上流体的速度分布是均匀的,则体积流量的表达式为

$$q_v = vA \quad (2-60)$$

式中, v ——流体流过截面时的平均流速;

A ——截面面积。

如果密度介质为 ρ , 则流体的质量流量为

$$q_m = \rho q_v = \rho vA \quad (2-61)$$

流过管道某截面的流体的速度在截面上各处不可能是均匀的,假定在这个截面上某一

微小单元面积上 dA 速度是均匀的, 流过该单元面积上的体积流量为

$$dq_v = v \cdot dA \quad (2-62)$$

整个截面积上的体积流量为

$$q_v = \int_A v \cdot dA \quad (2-63)$$

以上定义的体积流量和质量流量又称瞬时流量。在某段时间内流体通过的体积总量和质量总量称为累积流量或流体总量。即

$$V = \int_t q_v dt \quad M = \int_t q_m dt \quad (2-64)$$

用来测量流量的仪表统称为流量计。测量流量总量的仪表称为流体计量表或总量计。

2. 层流与紊流

流体在管道中的流动形式可分为层流和紊流两种。层流(laminar flow)是指流体在细管中流动的流线平行于管轴时的流动。紊流(turbulent flow)是指流体在细管中流动的流线相对混乱的流动。

管内流体流动时存在着两种状态: 层流状态和紊流状态。在不同的流动状态下, 流体有不同的流动特性。在层流流动状态时, 流量与压力降成正比; 在紊流流动状态时, 流量与压力降的平方根成正比, 而且在层流与紊流两种不同的流动状态时, 其管内的速度分布也大不相同。这些对于许多采用测量流速来得到流量的测量方法是很重要的。在层流流动状态下, 流速分布是以管轴为中心线的轴对称抛物线分布。在紊流流动状态下, 管内流速同样是以管中心线轴对称的分布, 但是其分布呈指数曲线形式。

3. 雷诺数

雷诺数是表征流体流动时惯性力与黏性力之比。利用细管直径 d , 可求出雷诺数 R_d , 即

$$R_d = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (2-65)$$

式中, v ——细管中的平均流速, 所谓平均流速, 一般是指流过管路的体积流量除以管路截面积所得到的数值;

η ——流体的运动黏度;

d ——管径。

利用雷诺数可以判断流动的形式, 当 $R_d < 2320$ 时为层流, $R_d > 2320$ 时为紊流。

2.3.2 流量检测方法 with 仪表

在工业生产过程中, 物料的输送绝大部分是在管道中进行的, 因此, 这里主要介绍用于管道流动的流量检测方法。由于流量检测条件的多样性和复杂性, 流量的检测方法非常多, 是工业生产过程常见参数中检测方法最多的。据统计, 目前在全世界流量检测的方法至少有百多种, 其中有十几种是工业生产和科学研究中常用的。

按照检测量的不同, 流量检测方法可以分为体积流量检测和质量流量检测, 按照检测

原理不同，流量检测方法有可分为速度法、容积法和质量法。

速度法是以流量测量管道内流体的平均流速，再乘以管道截面积求得流体的体积流量的。基于这种检测方法的流量检测仪表有差压式流量计、转子流量计、电磁流量计和超声波流量计等。

容积法是在单位时间以标准固定体积对流动介质连续不断地进行测量，以排出流体固定容积数来计算流量。基于这种检测方法的流量检测仪表有如椭圆齿轮流量计、活塞式流量计和刮板流量计等。

质量流量的检测分为直接法和间接法两种。直接式质量流量计直接测量质量流量，如角动量式、量热式和科氏力式等；间接式质量流量计是同时测出容积流量和流体的密度而自动计算出质量流量的。质量流量计测量精度不受流体的温度、压力和黏度等影响，是一种新型的正处于发展中的仪表。

2.3.3 差压式流量计

差压式流量计在流通管道内安装流动阻力元件，流体通过阻力元件时，流束将在节流件处形成局部收缩，使流速增大，静压力降低，于是在阻力件前后产生压力差。该压力差通过差压计检出，流体的体积流量或质量流量与差压计所测得的差压值有确定的数值关系。通过测量差压值便可求得流体流量，并转换成电信号(如 DC4mA~20mA)输出。把流体流过阻力元件使流束收缩造成压力变化的过程称节流过程，其中的阻力元件称为节流元件。

1. 差压式流量计的基本结构

差压式流量计主要由节流装置、信号管路、差压变送器和显示仪表/控制器组成。节流装置将被测流体的流量转换成差压信号，信号管路把差压信号传输到差压变送器或差压计。差压计对差压信号进行测量并显示出来，差压变送器将差压信号转换为与流量相对应的标准电信号或气信号，通过显示仪表进行显示、记录与控制。差压变送器的工作原理在前面已经阐述，这里不再介绍。

2. 基本原理

图 2.47 为差压式流量计的原理图。在节流元件前后选定两个截面 1 和 2。在截面 1 处，流体未受到节流元件的影响，流束充满管道，管道截面为 A_1 ，流体静压力为 p_1 ，平均流速为 v_1 ，流体密度为 ρ_1 。截面 2 是流体经节流元件后流束收缩的最小截面，管道截面为 A_2 ，流体静压力为 p_2 ，平均流速为 v_2 ，流体密度为 ρ_2 。图中压力曲线点画线代表管道中心处静压力，实线代表管壁处静压力。流体的静压力和流速在节流元件前后的变化充分反映了能量的转换。在节流元件前，流体向中心加速，至截面 2 处，流束截面收缩达到最小，流速最大，静压力最低。之后流束扩张，流速逐渐减小，静压力升高。流体流至截面 3 处，由于涡流区的存在导致流体能量损失，截面 3 处流体的静压力小于截面 1 处的静压力，即 $p_3 < p_1$ 。

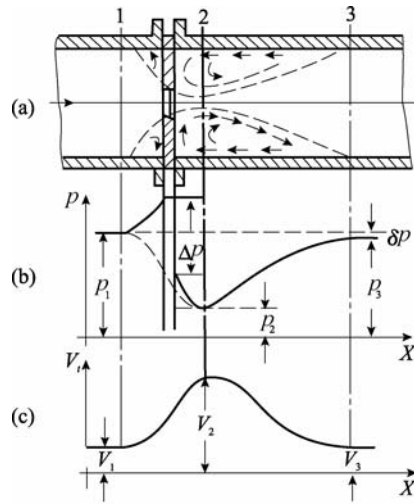


图 2.47 差压式流量计的原理图

1—取压孔；2—差压计；3—孔板

设流体为不可压缩的理想流体，在流经节流元件时不对外做功，和外界没有热能交换，流体本身也无温度的变化。根据伯努力方程，在截面 1 和 2 处沿管中心线存在以下能量关系：

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho} \quad (2-66)$$

由流体连续性方程可知

$$A_1 v_1 \rho = A_2 v_2 \rho \quad (2-67)$$

式中， p_1 、 p_2 ——流体在截面 1 和 2 处的静压力；

v_1 、 v_2 ——流体在截面 1 和 2 处的平均流速；

A_1 、 A_2 ——截面 1 和 2 处的截面积， ρ 为流体的密度。

由于流束在节流装置后的最小收缩面积 A_2 ，实际上很难确切地知道它的数值，因此用节流装置开孔的截面积 A_0 来表示，即

$$\frac{A_0}{A_1} = m \quad (2-68)$$

式中， m ——节流元件的开口截面比。令收缩系数 $\mu = \frac{A_2}{A_0}$ 则

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2 = \mu \frac{A_0}{A_1} v_2 = m \mu v_2 \quad (2-69)$$

式中， μ ——流束的收缩系数，其大小与节流装置的类型有关。将式(2-69)代入式(2-66)中，则

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2g}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (2-70)$$

上面得到的流速是理论值，因为理想的不可压缩的流体是不存在的。流体有黏度，故有摩擦，因此实际的流速应修正。其次，考虑到使用方便，实际上经常在节流装置前后两个固定位置上测取压力 p_1 、 p_2 ，代替流体在截面 1 和 2 处的静压力，在计算 v_2 的公式中亦应修正。考虑这两方面的因素，在截面 2 上的流速为

$$v'_2 = \xi v_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2g}{\rho}(p_1 - p_2)} \quad (2-71)$$

流过截面 2 的体积流量为

$$\begin{aligned} q_v &= A_2 v'_2 = \mu A_0 v'_2 = \frac{\xi \mu A_0}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2g}{\rho}(p_1 - p_2)} \\ &= \alpha A_0 \sqrt{\frac{2g}{\rho}(p_1 - p_2)} \end{aligned} \quad (2-72)$$

式中， $\alpha = \frac{\xi \mu}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}}$ 为流量系数，与节流装置的面积比，流体的黏度、密度、取压方式等有关，用实验的方法可以确定其大小。

3. 标准节流装置

节流装置就是使管道中流动的流体产生静压力的装置，完整的节流装置由节流元件、取压装置和上下游测量导管 3 部分组成，有标准节流装置和非标准节流装置两大类。对于标准节流装置，在设计计算时都有统一的标准规定、要求和计算所需的有关数据及程序，可直接按照标准制造；安装和使用时无须进行标定，能保证一定的精度。非标准节流装置主要用于特殊介质或特殊工况条件的流量检测，它必须用实验方法单独标定。作为流量检测用的节流元件有标准的和特殊的两种。标准节流元件包括标准孔板、标准喷嘴和标准文丘里管。

标准孔板是用不锈钢或其他金属材料制造的薄板，具有圆形开孔并与管道同心，其直角入口边缘非常锐利，且相对于开孔轴线是旋转对称的，顺流的出口呈扩散的锥形，如图 2.48 所示。对标准孔板的特征尺寸要求为：节流孔径 d 不小于 12.5mm，直径比 d/D 应在 0.2~0.75 之间， D 为管道直径，直孔厚度 h 应在 0.005 D ~0.02 D 之间，孔板的总厚度 H 应在 h ~0.05 D 之间，圆锥面的斜角 α 应在 30°~45° 之间。

标准孔板结构简单，加工方便，价格低廉。单对流体造成的压力损失较大，测量精度较低，而且一般只使用于洁净流体介质的测量。在测量大管径高温高压介质时，孔板容易变形。

4. 节流装置的取压方式

差压式流量计是通过测量节流元件前后静压力差 Δp 来实现流量测量的值与取压孔位置和取压方式紧密相关。根据节流装置取压口位置，取压方式分为理论取压、角接取压、

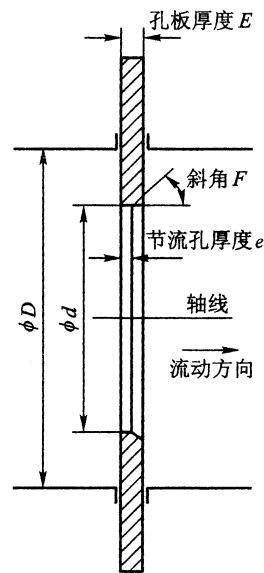


图 2.48 标准孔板

法兰取压、径距取压与损失取压五种,如图 2.49 所示。国家规定标准的取压方式有角接取压、法兰取压和 $D-D/2$ 取压。

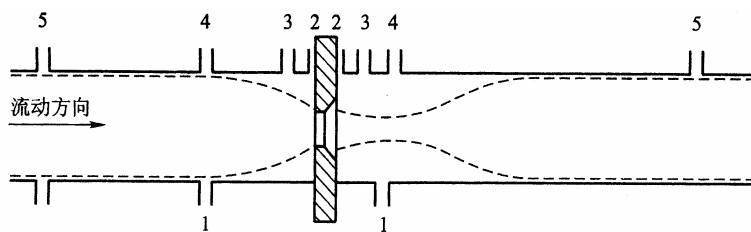


图 2.49 节流装置的取压方式

1—理论取压；2—角接取压；3—法兰取压；4—径距取压；5—损失取压

角接取压的两个取压口分别位于孔板的上下端面与管壁的夹角处,取压口可以是环隙取压口和单独钻孔取压口。环隙取压利用左右对称的 4 个环室把孔板夹在中间,通常要求环隙在整个圆周上穿通管道,或者每个夹持环应至少有 4 个开孔与管道内部连通,每个开孔的中心线彼此互成等角度,再利用导压管把孔板上下游的压力分别引出。当采用单独钻孔取压时,取压口的轴线应尽可能以 90° 与管道轴线相交,环隙宽度和单独钻孔取压口的直径 a 通常在 $4\text{mm}\sim 10\text{mm}$ 之间。显然,环隙取压由于环室的均压作用,便于测出孔板两端的平稳差压,能得到较好的测量精度,但是夹持环的加工制造和安装要求严格。当管径 $D > 500\text{mm}$ 时,一般采用单独钻孔取压。

角接取压法比较简单,环室取压容易实现,测量精度较高。

法兰取压装置的上下游侧取压孔的轴线至孔板上、下游侧端面之间的距离均为 $25.4\text{mm}\pm 0.8\text{mm}(1\text{inch})$ 。取压孔开在孔板上下游侧的法兰上。法兰取压法结构简单,容易装配,计算也方便,但精度较角接取压法低些,仅适用于标准孔板。

2.3.4 转子流量计

转子流量计又名浮子流量计或面积流量计。浮子流量计具有结构简单,使用维护方便,对仪表前后直管段长度要求不高,压力损失小且恒定,测量范围比较宽,工作可靠且线性刻度,可测气体、蒸汽和液体的流量,适用性广等特点。

浮子流量计主要由一根自下向上扩大的垂直锥管和一只可以沿着锥管的轴向自由移动的浮子组成,如图 2.50 所示。当被测流体自锥管下端流入流量计时,由于流体的作用,浮子上下端面产生一差压,该差压即为浮子的上升力。当差压值大于浸在流体中浮子的重量时,浮子开始上升。随着浮子的上升,浮子最大外径与锥管之间的环形面积逐渐增大,流体的流速则相应下降,作用在浮子上的上升力逐渐减小,直至上升力等于浸在流体中的浮子的重量时,浮子便稳定在某一高度上。这时浮子在锥管中的高度与所通过的流量有对应的关系。当流体自下而上运动时,作用在浮子上的阻力 F 为

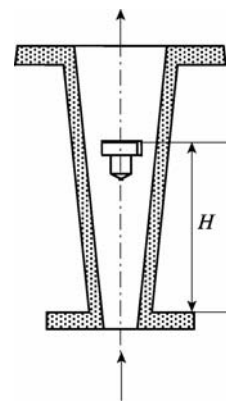


图 2.50 浮子流量计示意图

$$F = \frac{1}{2} \rho_0 v^2 c_d A_f \quad (2-73)$$

式中, c_d ——浮子的阻力系数;

ρ_0 ——流体密度;

v ——环形流通面积的平均流速;

A_f ——浮子的最大迎流面积。

浮子本身的垂直向下的重力 W 为

$$W = \gamma_f V_f \quad (2-74)$$

式中, γ_f ——转子材料的比重;

V_f ——转子的体积。

流体对浮子所产生的垂直向上的浮力 B 为 $B = \gamma_0 V_f$, 其中 $\gamma_0 = \rho_0 g$ 为流体的相对密度。

当转子处于平衡状态时

$$\begin{aligned} W &= B + F \\ \gamma_f V_f + \gamma_0 V_f &= \frac{1}{2} \rho_0 v^2 c_d A_f \end{aligned} \quad (2-75)$$

流体的流速为

$$v = \sqrt{\frac{2V_f(\gamma_f - \gamma_0)}{c_d A_f \rho_0}} \quad (2-76)$$

设流体环形流通面积为 A , 则体积流量为

$$q_v = Av = \sqrt{\frac{1}{c_d}} A \sqrt{\frac{2V_f(\gamma_f - \gamma_0)}{A_f \rho_0}} = \alpha A \sqrt{\frac{2V_f(\gamma_f - \gamma_0)}{A_f \rho_0}} \quad (2-77)$$

式中, $\alpha = \sqrt{\frac{1}{c_d}}$ 为流量系数。

环形流通面积 A 的大小由转子和锥形管尺寸所决定, 即

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_f^2) \quad (2-78)$$

式中, D ——转子所在处锥形管的内径;

D_f ——转子的最大直径。

若锥形管设计时保证在零刻度处 $D = D_f$, 锥形管锥角为 φ , 转子的高度为 h , 则

$$A = \pi D_f h \tan \varphi \quad (2-79)$$

因此流体的体积流量为

$$q_v = \alpha \pi D_f h \tan \varphi \sqrt{\frac{2V_f(\gamma_f - \gamma_0)}{A_f \rho_0}} \quad (2-80)$$

由式(2-80)可知, 只要保持流量系数不变, 则流量与转子所处的高度 h 成线性关系, 测得 h 的大小就可以测量流量。可以将这种对应关系直接刻度在流量计的锥管上。显然, 对于不同的流体, 由于密度发生变化, q_v 与 h 之间的对应关系也将发生变化, 原来的流量刻度将不再适用。所以原则上, 转子流量计应该用实际介质进行标定。

上面所介绍的转子流量计只适用于就地指示, 对配有电远传装置的转子流量计, 可以

将反映流量大小的转子高度 h 转换为电信号，传送到其他仪表进行指示、记录和控制。图 2.51 为电传式转子流量计的工作原理图。当流体流量变化时使转子转动，磁钢 1 和 2 通过带动杠杆 3 及连杆机构 6、7、8 使指针 10 在标尺 9 上就地指示流量。与此同时，差动变压器检测出转子的位移，产生差动电势通过放大和转换后输出电信号，通过显示仪表显示和通过控制仪表进行调节。

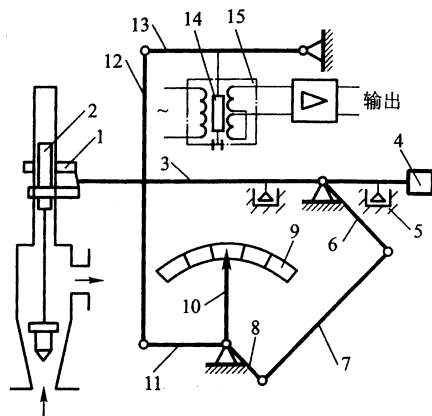


图 2.51 电传式转子流量计工作原理图

- 1、2—磁钢；3—杠杆；4—平衡锤；5—阻尼器；6、7、8—连杆机构；9—标尺；10—指针；
11、12、13—连杆机构；14—铁心；15—差动变压器

2.3.5 电磁流量计

电磁流量计是根据法拉第电磁感应定律制成的一种测量导电液体体积流量的仪表。

电磁流量计的测量原理图如图 2.52 所示。设在均匀磁场中，垂直于磁场方向有一个直径为 D 的管道。管道由不导磁材料制成，当导电的液体在导管中流动时，导电液体切割磁力线，因而在磁场及流动方向垂直的方向上产生感应电动势，如安装一对电极，则电极间产生和流速成比例的电位差。感应电动势的大小为

$$E = BDv \quad (2-81)$$

式中， B ——磁感应强度；

D ——管道直径；

v ——流体平均流速。

则流体的体积流量为

$$q_v = \frac{\pi D^2}{4} v = \frac{\pi D}{4B} E \quad (2-82)$$

由于电磁流量计的测量导管内无可动部件或突出于管道内部的部件，因而压力损失极小。流量计的输出电流与体积流量成线性关系，且不受液体温度、压力、密度、黏度等参数的影响。电磁流量计反映迅速，可以测量脉动电流，其量程比一般为 10 : 1，精度较高的量程比可达 100 : 1。电磁流量计的测量口径范围很大，可以从 1mm~2m 以上，测量精度高于 0.5 级。电磁流量计可以测量各种腐蚀性介质：酸、碱、盐溶液以及带有悬浮颗粒的浆液。此流量计无机械惯性，反应灵敏，而且线性较好，可以直接进行等分刻度。电磁

流量计只能测量导电液体，因此对于气体、蒸汽以及含大量气泡的液体，或者电导率很低的液体不能测量。由于测量管内衬材料一般不宜在高温下工作，所以目前一般的电磁流量计还不能用于测量高温介质。

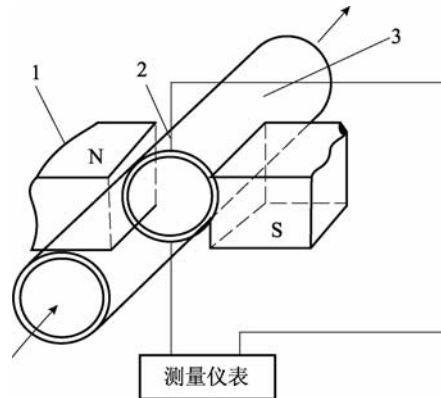


图 2.52 电磁流量计测量原理图

1—磁极；2—电极；3—管道

为了进一步提高电磁流量计测量精度，在安装时应注意：

- (1) 它可以水平安装，也可以垂直安装，但要求液体充满管道；
- (2) 电磁流量计对直管段要求不高，前直管段长度 $10D$ ，后直管段长度 $5D$ 以上；
- (3) 安装地点应避免强烈振动，并远离磁场；

(4) 变送器前后管道有时带有较大的杂散电流，一般要把变送器前后 $1m \sim 1.5m$ 处和变送器外壳连接在一起，共同接地。

2.3.6 超声波流量计

当超声波在流体中传播时，会载带流体流速的信息。因此，根据对接收到的超声波信号进行分析计算，可以检测到流体的流速，进而可以得到流量值。超声波流量测量的方法有很多，这里主要介绍传播速度差法的基本原理与流量方程。

传播速度差法的基本原理是通过测量超声波脉冲在顺流和逆流传播过程中的速度之差来得到被测流体的流速。

超声波速度差法原理图如图 2.53 所示。在测量管道中，装两个超声波发射换能器 F_1 和 F_2 以及两个接收换能器 J_1 和 J_2 ， F_1J_1 和 F_2J_2 与管道轴线夹角为 α ，管道直径为 D ，流体由左向右流动，速度为 v ，此时由 F_1 到 J_1 超声波传播速度为

$$c_1 = c + v \cos \alpha \tag{2-82}$$

$F_2 \sim J_2$ 超声波传播速度为

$$c_2 = c - v \cos \alpha \tag{2-83}$$

则流体的流速为

$$v = \frac{c_1 - c_2}{2 \cos \alpha} \tag{2-84}$$

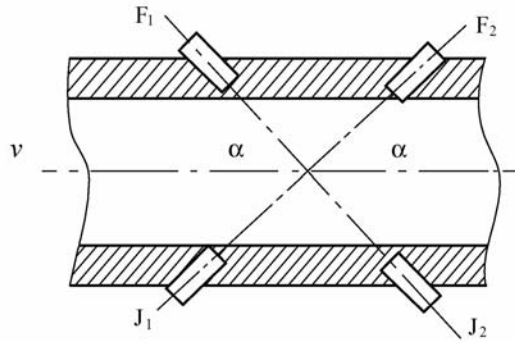


图 2.53 超声波速度差法原理图

根据测量的物理量的不同，超声波速度差法可以分为时差法(测量顺、逆流传播时由于超声波传播速度不同而引起的时间差)、相差法(测量超声波在顺、逆流中传播的相位差)、频差法(测量顺、逆流情况下超声脉冲的循环频率差)。频差法是目前常用的测量方法，是在前两种测量方法的基础上发展起来的。

1) 时差法

如果超声波发生器发射一短小脉冲，其顺流传播时间为

$$t_1 = \frac{D/\sin\alpha}{c + v\cos\alpha}$$

而逆流传播的时间为

$$t_2 = \frac{D/\sin\alpha}{c - v\cos\alpha}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Dvc \tan\alpha}{c^2 - v^2 \cos^2\alpha} \quad (2-85)$$

由于 $v \ll c$ ，则

$$\Delta t = \frac{2Dvc \tan\alpha}{c^2} \quad (2-86)$$

流体的流速为

$$v = \frac{c^2 \Delta t}{2Dvc \tan\alpha} \quad (2-87)$$

流体的体积流量为

$$q_v = Av = \frac{\pi D^2}{4} \frac{c^2 \Delta t}{2Dc \cot\alpha} = \frac{\pi D c^2}{8} \Delta t \tan\alpha \quad (2-88)$$

从式(2-87)可以看出，当声速 c 为常数时，流体的体积流量与时间差 Δt 成正比，测得时间差，就可以求出流量。但是在实际应用中 Δt 非常小，若流量测量要达到 1% 的精度，则时差测量需要达到 $0.01 \mu\text{s}$ 的精度。这样不仅对测量电路要求高，而且限制了测量流量的下限。因此，为了提高精度，可采用检测灵敏度高的相位差法。

2) 频差法

频差法是通过测量顺流和逆流时超声脉冲的重复频率差去测量流速。在单通道法中脉冲重复频率是在一个发射脉冲被接收器接收之后，立即发射出一个脉冲，这样以一定频率

重复发射，对于顺流和逆流重复发射频率为

$$f_1 = \frac{c + v \cos \alpha}{D / \sin \alpha} = \frac{c + v \cos \alpha}{D} \sin \alpha \quad (2-89)$$

$$f_2 = \frac{c - v \cos \alpha}{D / \sin \alpha} = \frac{c - v \cos \alpha}{D} \sin \alpha$$

发射频率之差为

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{c + v \cos \alpha}{D} \sin \alpha - \frac{c - v \cos \alpha}{D} \sin \alpha \quad (2-90)$$

$$= \frac{\sin 2\alpha}{D} v$$

则流体的体积流量为

$$q_v = \frac{\pi}{4} D^3 \frac{\Delta f}{\sin 2\alpha} \quad (2-91)$$

由式(2-91)可知，流体的流量与频差成正比，与声速 v 无关，这是频差法的最显著的特点。频差 Δf 很小，直接测量时误差大，为了提高测量精度，一般采用倍频技术。由于顺逆流两个声回路在测循环频率时会相互干扰，工作难以稳定，而且要保证两个声循环回路的特性一致也是非常困难的。因此实际应用频差法测量流量时，仅用一对换能器按时间交替转换作为接收器和发射器使用。

超声波流量计由超声波换能器、电子线路和测量显示仪表组成。电子线路包括发射电路、接受电路和控制测量电路，显示系统可显示瞬时流量和累积流量。在测量时，超声波换能器置于管道外，不与流体直接接触，不破坏流体的流场，没用压力损失，可用于测量腐蚀性、高黏度液体和非导电液体得流量，尤其是测量大口径管道得水流量或各种水渠、河流、海水的流速和流量，在医学上还用于测量血液流量等。

2.3.7 质量流量计

在工业生产中，由于物料平衡，热平衡以及储存、经济核算等所需要的都是质量，并非体积，所以在测量工作中，常需将测出的体积流量乘以密度换算成质量流量。但由于密度随温度、压力而变化，所以在测量流体体积流量时，要同时测量流体的压力和密度，进而求出质量流量。在温度、压力变化比较频繁的情况下，难以达到测量的目的。这时便用质量流量计来测量质量流量，而无需再人工进行上述换算。

质量流量计大致分为三大类：

(1) 直接式。即直接检测与质量流量成比例的量，检测元件直接反映出质量流量。

(2) 推导式。即用体积流量计和密度计组合的仪表来测量质量流量，同时检测出体积流量和流体密度，通过运算得出与质量流量有关的输出信号。

(3) 补偿式。同时检测流体的体积流量和流体的温度、压力值，再根据流体密度与温度、压力的关系，由计算单元计算得到该状态下流体的密度值，再计算得到流体的质量流量值。

直接式质量流量计品种很多，目前应用较广泛的是科里奥利质量流量计。科里奥利质量流量计(简称 CMF)是利用流体在振动管中流动时，产生与质量流量成正比的科里奥利力(科氏力)而制成的一种直接式质量流量仪表。利用科氏力构成的质量流量计有直管、弯管、单管、双管等多种形式。其中双弯管型最常见，它由两根金属 U 形管组成，其端部连通并与被测管路相连，如图 2.54 所示。这样流体可以同时两个 U 形管内流动在两管的中间

A、B、C 三处各装有一组压电换能器。

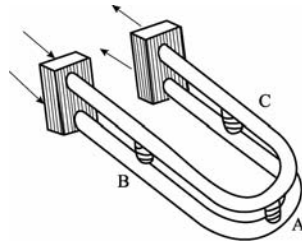


图 2.54 科里奥利质量流量计(CMF)

换能器 A 在外加交变电压作用下产生交变力，使两根 U 形管彼此一开一合地振动，相当于两根软管按相反方向不断摆动，换能器 B 和 C 用来检测两管的振动情况。由于 B 处于进口侧，C 处于出口侧，则根据出口侧振动相位超前于进口侧的规律，C 输出的交变信号的相位将超前于 B 某个相位。此相位差的大小与质量流量成正比。若将这两个交流信号相位差经过电路进一步转换成直流 4mA~20mA 等标准信号，就成为质量流量变送器。

CMF 的测量精度较高，主要用于黏度和密度相对较大的单相和混相流体的流量测量。由于结构等原因，这种流量计适用于中小尺寸的管道的流量检测。

2.3.8 相关流量计

相关流量测量技术是目前流量检测技术领域的一种较为新颖的技术，是基于相关分析理论来实现流体流量的在线检测技术，其相应的测量系统一般称为相关流量计。由于相关流量计是通过两个流动噪声的互相关函数计算并确定其峰值所对应的渡越时间实现流量的测量，因此相关流量计又称为互相关流量计。

相关流量计的核心是流速测量，其工作原理图如图 2.55 所示。在被测流体管道相距 L 处安置两个相同特性的传感器，即上游传感器和下游传感器。两个传感器分别测出被测流体流过相应测量区域所产生的随机流动噪声 $x(t)$ 和 $y(t)$ 。如果两传感器间距离足够小，流体在上下游传感器之间的流动特性变换较小，则随机流动噪声 $x(t)$ 和 $y(t)$ 基本相同，只是两信号之间有一个时间上的滞后，如图 2.56 所示。

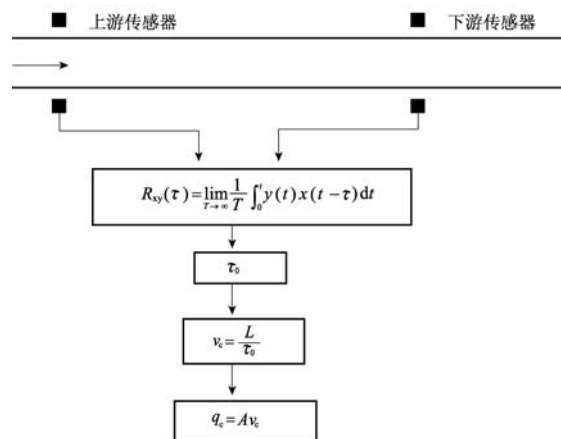


图 2.55 相关流量计工作原理图

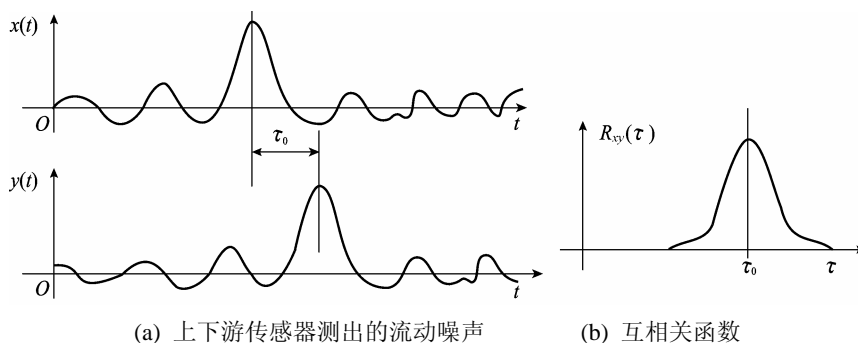


图 2.56 互相关流量测量示例

$x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)x(t-\tau)dt \quad (2-92)$$

式中，互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 图形的峰值位置所对应的时间 τ_0 就是两信号之间滞后时间，一般称为渡越时间。

流体在上下游传感器流动，其相关速度为

$$v_c = \frac{L}{\tau_0}$$

被测流体的截面平均流速为

$$v_{cp} = \frac{q_v}{A}$$

在理想流动状态下，流体的相关速度与截面平均流速相等，即 $v_{cp} = v_c$ ，所以被测流体的体积流量为

$$q_v = Av_{cp} = A \frac{L}{\tau_0} \quad (2-93)$$

在实际应用中，流体的相关速度与截面平均流速存在一定的差异，因此

$$q_v = KA \frac{L}{\tau_0} \quad (2-94)$$

式中， K 为速度校正因子。影响 K 的因素很多，其值很难通过理论计算获得，一般都是通过实验标定手段来确定。 K 也常称为相关流量计的仪表系数或流量系数。

图 2.57 为脉冲超声波相关流量计的工作原理及组成框图。它主要由脉冲超声波传感器系统、信号预处理电路和互相关器等组成。脉冲超声波传感器系统主要由超声波发射器和接收器两部分构成，发射器发射时间间距和幅度均等的超声波脉冲，该脉冲穿过左侧管壁、被测流体(纸浆)和右侧管壁，被接收器接收。在超声波传播的过程中，脉冲声波的能量将发生衰减。脉冲声波能量的变化导致超声波脉冲序列幅值的变化，也反映了被测流体内部随机流动噪声的信息。流动噪声的脉冲超声波检测示意图如图 2.58 所示。从图中可以看出，脉冲声波能量衰减的主要原因是由于被测流体中固相颗粒对声波的散射，相比较而言，液相对声波的吸收衰减作用要小得多。信号预处理电路的作用是从超声波接收器输出电压脉冲序列中提取流动噪声信号，并抑止其中的干扰噪声。它主要由峰值检测电路、采样保持器、低通滤波器和延时电路等组成。

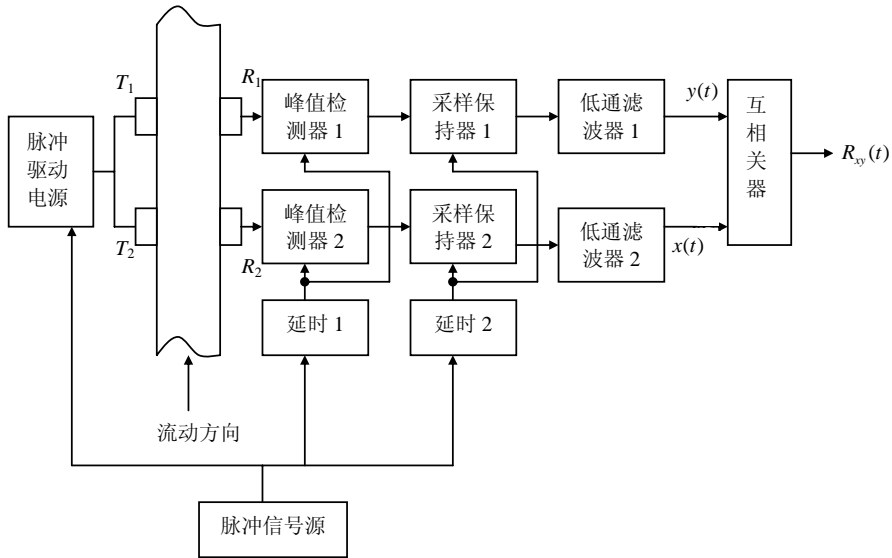


图 2.57 脉冲超声波相关流量计的工作原理及组成框图

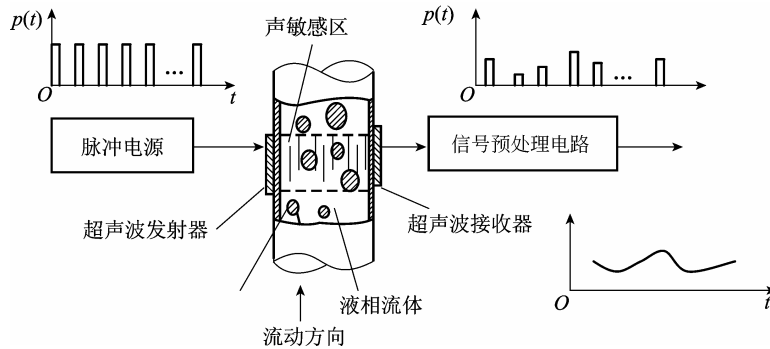


图 2.58 流动噪声的脉冲超声波检测示意图

2.4 物位检测仪表

在许多生产过程中，需要对物位进行检测和控制，以保证生产正常连续运行，确保产品质量。如锅炉内的水位，油罐、水塔和各种储液罐的液位，粮仓、煤粉仓、水泥库和化学原料库中的料位以及高温条件下连续生产中的铝水、钢水或铁水的液位等。

2.4.1 物位的定义及物位检测仪表的分类

物位统指设备和容器中液体或固体物料的表面位置。它包括以下 3 个方面：

- (1) 液位。容器中液体介质的高低，测量液位的仪表叫液位计。
- (2) 料位。容器中固体或颗粒状物质的堆积高度，测量料位的仪表叫料位计。
- (3) 界位。两种密度不同液体介质或液体与固体的分界面的高低，测量界位的仪表叫界面计。

物位是液位、料位和界位的总称，对物位进行测量、显示和控制的仪表称为物位检测仪表。在物位检测中，有时需要对物位连续测量，有时仅需要测量物位是否达到上限、下限或某个特定的位置，这种定点测量物位的仪表称为物位开关。物位开关常用来监视、报警或输出控制信号。

由于被测对象种类繁多，检测的条件和环境也有很大的差别，因而物位检测的方法有很多。归纳起来有以下几种：

(1) 直读式。采用在设备容器侧壁开窗口或旁通管方式，直接显示物位的高度。这种方法最简单也最常见，方法可靠、准确，但只能就地指示，主要用于液位检测和压力较低の場合。

(2) 静压式。基于流体静力学原理，容器内的液面高度与液柱质量形成的静压力成比例关系，当被测介质密度不变时，通过测量参考点的压力可测量液位。基于这种方法的液位检测仪表有压力式、吹气式和差压式等。

(3) 浮力式。基于阿基米德定理，漂浮于液面上的浮子或浸没在液体中的浮筒，在液位发生变化时其浮力发生相应的变化。这类液位检测仪表有浮子式、浮筒式和翻转式等。

(4) 机械接触式。通过测量物位探头与物料面接触时的机械力实现物位的测量。主要有重锤式、音叉式和旋翼式等。

(5) 电气式。将电气式物位敏感元件置于被测介质中，当物位发生变化时，其电气参数如电阻、电容、磁场等会发生相应的改变，通过检测这些参数就可以测量物位。这种方法既可以测量液位也可以测量料位。主要有电阻式、电容式和磁致收缩式等物位检测仪表。

(6) 声学式。利用超声波在介质中的传播速度以及在不同相界面之间的发射特性来检测物位的大小。可以测量液位和料位。

(7) 射线式。放射线同位素所发出的射线(如 γ 射线)穿过被测介质时因被介质吸收其强度衰减，通过检测放射线强度的变化达到测量物位的目的。这种方法可以实现物位的非接触式测量。

(8) 光纤式。基于物位对光波的折射和反射原理进行物位测量。

2.4.2 静压式液位计

静压式液位计基于容器内的液面高度时，由液柱重量形成的静压力成比例关系，当被测介质密度不变时，通过测量参考点的压力可测量液位。如图 2.59 所示，A 为实际液面，B 为零液位， H 为液面的高度。根据流体静力学的原理，A 和 B 两点的静压力为

$$\Delta p = p_B - p_A = H \rho g$$

即

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (2-95)$$

式中， p_A 、 p_B ——容器中 A、B 两点的静压力。由于液体密度一定，所以 Δp 与液位 H 成正比例关系，测得差压 Δp 就可以得知液位 H 的大小。

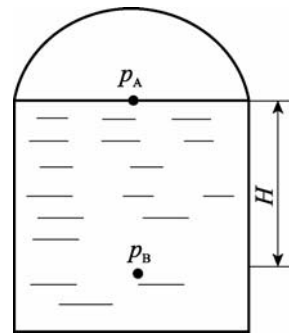


图 2.59 静压式液位计原理

1. 压力式液位计

对于开口容器， p_A 为大气压力，测量液位高度的 3 种静压式液位计如图 2.60 所示。

图 2.60(a) 为压力表式液位计，它利用引压管将压力变化值引入高灵敏度压力表中进行测量。压力表的高度与容器底等高，压力表中的读数直接反映液位的高度。如果压力表的高度与容器底不等高，当容器中液位为零时，表中读数不为零，为容器底部与压力表之间的液体的压力差值，该差值称为零点迁移。压力表式液位计使用范围较广，但要求介质洁净，黏度不能太高，以免阻塞引压管。

图 2.60(b) 为法兰式液位变送器。变送器通过法兰装在容器底部的法兰上，作为敏感元件的金属膜盒经导压管与变送器的测量室相连，导压管内封入沸点高、膨胀系数小的硅油，使被测介质与测量系统隔离。法兰式液位变送器将液位信号转换为电信号或气动信号，用于液面显示或控制调节。由于采用了法兰式连接，而且介质不必流经导压管，因此可检测有腐蚀性、易结晶、黏度大或有色等介质。

图 2.60(c) 为吹气式液位计。将一根吹气管插入至被测液体的最低面(零液位)，使吹气管通入一定量的气体，吹气管中的压力与管口处液柱静压力相等。用压力计测量吹气管上端压力，就可以测量液位。由于吹气式液位计将压力检测电移至顶部，其使用维修都很方便，很适合于地下储罐、深井等场合。

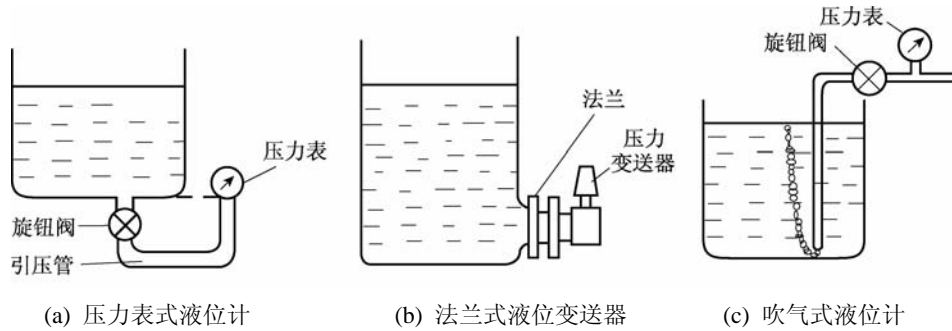


图 2.60 压力式液位计

2. 差压式液位计

在封闭容器中，容器下部的液体压力除了与液位高度有关外，还与液面上部的介质压力有关。在这种情况下，可以采用测量差压的方法来测量液位，如图 2.61 所示。这种测量方法在测量过程中需消除液面上部气压及气压波动对示值的影响。差压式液位计采用差压式变送器，将容器底部反映液位高度的压力引入变送器的正压室，容器上部的气体压力引入变送器的负压室。引压方式可根据液体性质选择。为了防止由于内外温差使气压引压管中的气体凝结成液体，一般在低压管中充满隔离液体。设隔离液体密度为 ρ_1 ，被测液体的密度为 ρ_2 ，一般使 $\rho_1 > \rho_2$ ，则正、负压室的压力为

$$\begin{aligned} p_1 &= \rho_1 g(H + h_1) + p \\ p_2 &= \rho_2 g h_2 + p \end{aligned} \quad (2-96)$$

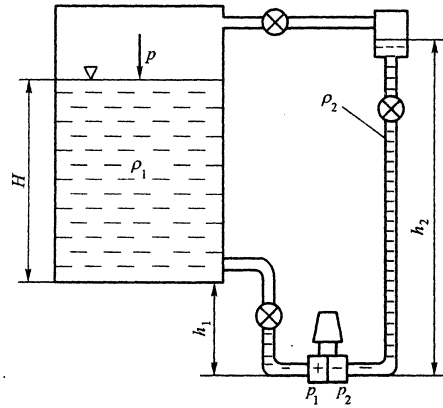


图 2.61 差压式液位计原理示意图

压力平衡公式为

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_1 g(H + h_1) - \rho_2 g h_2 = \rho_1 g H + \rho_1 g h_1 - \rho_2 g h_2 \quad (2-97)$$

式中， p_1, p_2 ——引入变送器正、负压室的压力；

H ——液面高度；

h_1, h_2 ——容器底面和工作液面距变送器的高度。

3. 差压式液位变送器的零点迁移

利用差压变送器测量液位时，将液位形成的差压转换成统一标准电信号输出。由于安装位置条件不同，物位存在仪表零点迁移问题。

式(2-97)中，设 $Z_0 = \rho_1 g h_1 - \rho_2 g h_2$ ，即为零点迁移量。零点迁移的目的就是使 $H=0$ 时，变送器的输出电流为 I_{\min} (如 4mA)。量程迁移有无迁移、负迁移和正迁移 3 种情况，如图 2.62 所示。

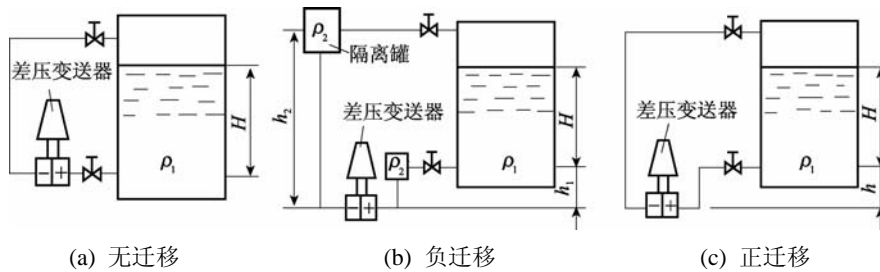


图 2.62 差压式液位变送器的零点迁移

1) 无迁移

如图 2.62(a)所示，差压变送器的正压室取压口正好与容器的最低液面处于同一水平位置，则零点迁移量为 $Z_0 = \rho_1 g h_1 - \rho_2 g h_2 = 0$ ，作用于变送器正负压室的差压与液面的高度的关系为

$$\Delta p = \rho_1 g H$$

当 $H=0$ 时， $\Delta p = 0$ ，变送器的输出最小值(如目前常用的 DDZ-III 型仪表)为 $I_0 = 4\text{mA}$ 。

当 $H=H_{\max}$ 时, $\Delta p = \rho_1 g H_{\max}$, 变送器的输出最大值 $I_0 = 20\text{mA}$ 。

2) 负迁移

如图 2.62(b)所示, 低压管中充满隔离液体。则零点迁移量为

$$Z_0 = \rho_1 g h_1 - \rho_2 g h_2$$

当 $H=0$ 时, $\Delta p = Z_0 = \rho_1 g h_1 - \rho_2 g h_2 < 0$, 变送器的输出电流 $I_0 < 4\text{mA}$ 。当 $H=H_{\max}$ 时, 变送器的输出最大值 $I_0 < 20\text{mA}$ 。通过调整迁移弹簧, 使变送器的输出仍为 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 。与无迁移相比, 负迁移特性曲线只是向负轴平移了一个固定差压 $\rho_2 g h_2 - \rho_1 g h_1$, 称为负迁移, 迁移量为 $\rho_2 g h_2 - \rho_1 g h_1$ 。

3) 正迁移

如图 2.62(c)所示, 当变送器的安装位置与容器的最低液位不在同一水平位置上, 则正、负压室的压力的压差为

$$\Delta p = \rho_1 g (H + h)$$

当 $H=0$ 时, $\Delta p = \rho_1 g h_1 > 0$, 变送器的输出电流 $I_0 > 4\text{mA}$ 。当 $H=H_{\max}$ 时, 变送器的输出最大值 $I_0 > 20\text{mA}$ 。通过调整迁移弹簧, 使变送器的输出仍为 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 。与无迁移相比, 特性曲线只是正向平移了一个固定差压 $\rho_1 g h_1$, 称为正迁移, 迁移量为 $\rho_1 g h_1$ 。

在差压变送器的产品手册中, 通常注明是否带有迁移装置以及相应的迁移量范围, 应根据现场的具体情况予以正确选用。

【例 2.2】 利用差压变送器测量液位, 如图 2.62 所示。已知 $\rho_1 = 1200\text{kg/m}^3$, $\rho_2 = 950\text{kg/m}^3$, $h_1 = 1\text{m}$, $h_2 = 5\text{m}$, 液位变化范围 $0\text{m} \sim 2.5\text{m}$, 求变送器的量程和迁移量。

解

$$H_{\max} \rho_1 g = 2.5 \times 1200 \times 9.8 = 29400\text{Pa}$$

变送器量程可选为 40kPa

当 $H=0$ 时, $-\rho_2 g (h_2 - h_1) = -4 \times 950 \times 9.8 = -37.24\text{kPa}$

变送器需要进行负迁移, 迁移量为 -37.24kPa 。

2.4.3 浮力式液位计

浮力式液位计是通过飘浮于液面上的浮子或浸没在液体中的浮筒, 在液位发生变化时其浮力发生相应的变化。

1. 浮子式液位计

浮子式液位计是一种恒浮力式液位计。作为检测元件的浮子漂浮在液面上, 浮子随着液面高低的变化而上下移动, 所受到的浮力大小保持一定, 检测浮子所在的位置可知液面的高低。浮子的形状常见的有圆盘形、圆柱形和球形等。

浮子式液位计示意图如图 2.63 所示, 浮子通过滑轮和绳带与平衡重锤连接, 绳带的拉力与浮子的质量及浮力平衡, 从而保证浮子处于平衡状态而漂在液面上。设圆柱型浮子的外直径为 D , 浮子浸入液体的高度为 h , 液体密度为 ρ , 则浮子所受到的浮力为

$$F = \frac{\pi D^2}{4} h \rho g \quad (2-98)$$

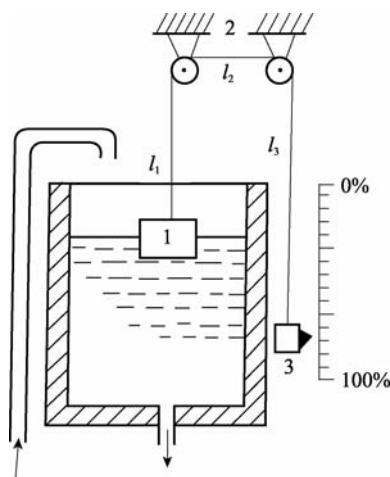


图 2.63 浮子式液位计示意图

1—浮子；2—滑轮；3—平衡重锤

当液位发生变化 ΔH 时，浮子浸入液体的深度 h 应保持不变才能使测量准确，但由于摩擦等因素的影响，浮子不会随液位迅速跟随动作，它的浸入深度的变化量为 ΔH ，所受浮力变化量为

$$\Delta F = \frac{\pi D^2}{4} \rho g \Delta H \tag{2-99}$$

只有浮力变化量 ΔF 克服了摩擦力后浮子才会开始动作，这就是这种液位计不灵敏区产生的原因。

浮子式液位计的灵敏度为 $\frac{\Delta F}{\Delta H} = \frac{\pi D^2}{4} \rho g$ ，与浮子的直径有关，适当增大浮子的直径，可提高液位的灵敏度，从而提高测量精度。

2. 浮筒式液位计

浮筒式液位计属于变浮力液位计，其原理图如图 2.64 所示。浮筒式液位计的典型敏感元件为浮筒，当被测液面位置发生变化时，被浸没的体积发生变化，因而所受的浮力也发生了变化，通过测量浮力变化确定液位变化量的大小。将一截面积为 A ，质量为 m 的圆筒形空心金属浮筒悬挂在弹簧上，由于弹簧的下端被固定，弹簧因浮筒的重力被压缩。设液位高度为 H ，当浮筒的重力与弹簧力达到平衡时，则

$$\begin{aligned} \text{即} \quad W - F &= Kx_0 \\ mg - AH\rho g &= Kx_0 \end{aligned} \tag{2-100}$$

式中， K ——弹簧的弹性系数；

x_0 ——弹簧由于浮筒重力被压缩所产生的位移。

这里以液面刚刚接触浮筒处为液面零点。当浮筒的一部分被液体浸没时，浮筒受到液体对它的浮力作用向上移动。当浮力与弹簧力和浮筒的重力平衡时，浮筒停止移动。若液面升高了 ΔH ，浮力增加，浮筒由于向上移动，浮筒上下移动的距离即弹簧的位移改变量为 Δx ，浮筒实际浸在液体里的高度为 $H + \Delta H - \Delta x$ ，则力平衡方程为

$$mg - A(H + \Delta H - \Delta x)\rho g = K(x_0 - \Delta x) \quad (2-101)$$

则

$$\Delta H = \left(1 + \frac{K}{A\rho g}\right)\Delta x \quad (2-102)$$

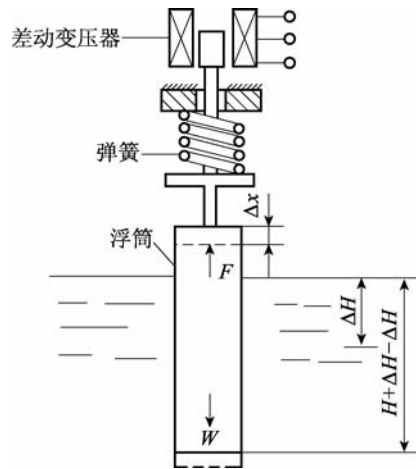


图 2.64 浮筒式液位计原理图

从式(2-102)可以看出，当液位发生变化时，浮筒产生的位移量(即弹簧变形程度)与液位高度成正比。检测弹簧变形有很多转换方法，常用的有差动变压器式、扭力矩力平衡式等。在浮筒的连杆上安装一铁心，并随浮筒一起上下移动，通过差动变压器使输出电压与位移成正比关系。也可将浮筒所收到的浮力通过扭力管达到力矩平衡，把浮筒的位移量变成扭力矩的角位移，进一步用其他转换元件转换为电信号，构成一个完整的液位计。改变浮筒的尺寸，可以改变量程。

2.4.4 电容式物位计

电容式物位计是利用敏感元件直接将物位的变化转换为电容量的变化。电容式物位计的结构形式很多，有平板板式、同心圆柱式等，适用范围较广。它对被测介质本身性质的要求不像其他方法那样严格，既能测量导电介质和非导电介质，也可以测量倾斜晃动及高速运动的容器的液位；不仅可以进行液位控制，还能用于连续测量，因此在液位测量中的地位比较重要。

在液位连续测量中，一般多使用同心圆柱式电容器，其检测原理图如图 2.65 所示。设电容器的长度为 L ，外径和内径分别为 D 和 d ，当两个圆筒间冲以介电常数为 ϵ_1 的介质时，该电容器的电容量为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_1 L}{\ln \frac{D}{d}} \quad (2-103)$$

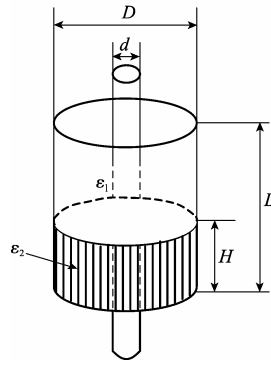


图 2.65 电容式物位计检测原理图

如果两圆筒形电极间的一部分被介电常数为 ϵ_2 的介质所淹没，设被淹没电极的长度为 H ，如图 2.65 所示。则此时的电容量

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_1(L-H)}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_2 H}{\ln \frac{D}{d}} \tag{2-104}$$

此时电容的变化量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{2\pi(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\ln \frac{D}{d}} H \tag{2-105}$$

式(2-105)表明，当圆筒形电容器的尺寸 L 、 D 和 r 保持不变，而且介电常数 ϵ_1 和 ϵ_2 也不变时，电容器的电容变化量 ΔC 与电极被介电常数为 ϵ_2 的介质所淹没的高度 H 之间成正比。两种介质的介电常数的差值 $\epsilon_2 - \epsilon_1$ 越大，电容变化量 ΔC 也越大，测量的相对灵敏度就越高。

从原理上讲，圆筒形电容式物位计既可检测导电性液体的液位，也可检测固体颗粒的料位。如果被测介质为导电性液体，则上述圆筒形电极会被导电液体短路。因此对于导电液体的液位测量，电极要用绝缘物覆盖作为中间电极，一般用紫铜或不锈钢作为内电极，外套聚四氟乙烯塑料管或涂搪瓷作为绝缘层，而导电液体和容器壁构成电容器的外电极，如图 2.66 所示。

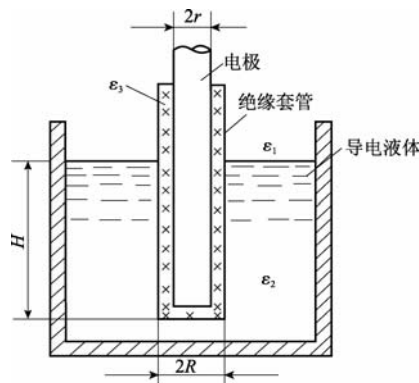


图 2.66 导电液体液位测量示意图

容器内没有液体时,内电极和容器壁组成电容器,绝缘层和空气为介电层,液面的高度为 H 时,有液体部分由内电极和导电液体构成电容器,绝缘套为介电层。此时整个电容相当于有液体部分和无液体部分的两个电容并联。

有液体部分的电容为

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_2 H}{\ln \frac{D}{d}} \quad (2-106)$$

无液体部分的电容为

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_1(L-H)}{\ln \frac{D_0}{d}} \quad (2-107)$$

总等效电容为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_1(L-H)}{\ln \frac{D_0}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon_2 H}{\ln \frac{D}{d}} \quad (2-108)$$

式中, ε_1 , ε_2 分别为空气和绝缘套组成的介电层的介电常数和绝缘套的介电常数, L 为电极和容器的覆盖长度, d , D 和 D_0 为内电极、绝缘套的外径和容器的内径。

当被测液位 $H=0$ 时,电容的电容值为

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_1 L}{\ln \frac{D_0}{d}} \quad (2-109)$$

当被测液位为 H 时,电容器的电容变化量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_1(L-H)}{\ln \frac{D_0}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon_2 H}{\ln \frac{D}{d}} - \frac{2\pi\varepsilon_1 L}{\ln \frac{D_0}{d}} = \left[\frac{2\pi\varepsilon_2}{\ln \frac{D}{d}} - \frac{2\pi\varepsilon_1}{\ln \frac{D_0}{d}} \right] H \quad (2-110)$$

若 $D_0 \gg d$, 且 $\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2$, 则

$$\Delta C = \frac{2\pi\varepsilon_2 H}{\ln \frac{D}{d}} \quad (2-111)$$

从式(2-111)可以看出,电容变化量与液位高度成正比。

电容式物位计主要由电极和电容检测电路组成。由于电容的变化量很小,因此准确测量电容量是物位测量的关键。目前在物位检测中,常见的电容检测方法主要有交流电桥法、冲放电法和谐振电路法等。电容式物位计一般不受真空、压力、温度等环境的影响,安装方便、结构牢固、易维修、价格较低。但不适用于以下情况:被测介质的介电常数随温度等影响而变化,被测介质在电极上有沉积或有气泡等产生。

2.4.5 超声波式物位仪表

超声波在气体、液体和固体中传播,具有一定的传播速度。超声波在介质中传播时会被吸收而衰减,在气体中传播的衰减最大,在固体中传播的衰减最小。超声波在穿过两种不同介质的分界面时会产生反射和折射,对于声阻抗差别较大的界面,几乎为全反射。从

发射超声波至接收发射回来的信号的时间间隔与分界面位置有关，超声波式物位仪表正是利用超声波的这一特点进行物位测量的。

超声波发射器和接受器既可以安装在容器底部，也可以安装在容器的顶部，发射的超声波在相界面被发射，并由接收器接收，测出超声波从发射到接收的时间间隔，就可以测量物位的高低。

超声波式物位仪表按照传声介质不同，可分为固介式、气介式和液介式 3 种，按探头的工作方式可分为自发自收单探头方式和收发分开的双探头方式。相互组合可以得到 6 种超声波物位仪表。在实际测量中，有时液面会有气泡、悬浮物、波浪或液体出现沸腾，引起反射混乱，产生测量误差，因此在复杂情况下宜采用固介式液位计。图 2.67 为单探头超声波液位计，它使用一个换能器，由控制电路控制，分时交替作发射器与接收器。

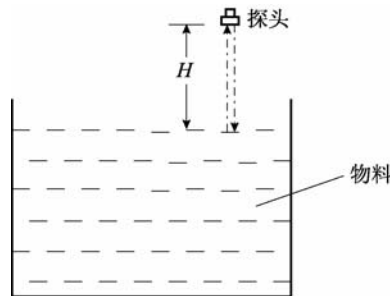


图 2.67 单探头超声波液位计

设超声波到液面的距离为 H ，波的传播速度为 c ，传播时间间隔为 Δt ，则

$$H = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (2-112)$$

要想通过测量超声波传播时间来确定物位，声速 c 必须恒定。实际上声速随介质及其温度变化而变化，为了准确地测量物位，对于一定的介质，必须对声速进行校正。对于液介式的声速校正的方法有校正具校正声速法、固定标记校正声速法和温度校正声速法。对于气介式的声速校正一般采用温度校正法，即采用温度传感器测量出仓或罐的温度，根据声速与温度之间的关系计算出当时的声速，再根据式(2-112)求出料位。

空气中声速 c 与温度 T 之间的关系为

$$c = 331.3 + 0.6T (\text{m/s}) \quad (2-113)$$

图 2.68 为基于单片机 8031 的超声波物位计的原理框图，该物位计以 8031 单片机为核心，进行超声波的发射、接收控制和数据处理，具有声速补偿功能及自动增益控制功能。

8031 单片机根据量程确定发射周期，输出脉冲信号，此信号使发射电路发出一串高频 (10kHz~40kHz) 电脉冲，经功率放大后，加到探头上，探头发出的超声波到达料面后，经发射又回到探头，探头将接收到的超声波能转换成电信号，放大后，送 8031 的中断口。8031 对超声波从发射到接收所需的时间计时，同时测量现场环境温度，按式(2-112)和式(2-113)计算出探头到料面的高度 H ，将料仓的高度减去 H 就可以得到料位的高度。

超声波液位计测量液位时与介质不接触，无可动部件，传播速度比较稳定，对光线、介质黏度、湿度、介电常数、电导率和热导率等不敏感，因此可以测量有毒、腐蚀性或高黏度等特殊场合的液位。超声波物位计既可以连续测量和定点测量物位，也可以方便地提

供遥测或遥控信号，还能够测量高速运动或有倾斜晃动的液体液位，如置于汽车、飞机、轮船中的液位。但其结构复杂，价格昂贵，测量时对温度比较敏感，温度的变化会引起声速的变化，因此为了保证超声波物位计的测量精度，应进行温度补偿。

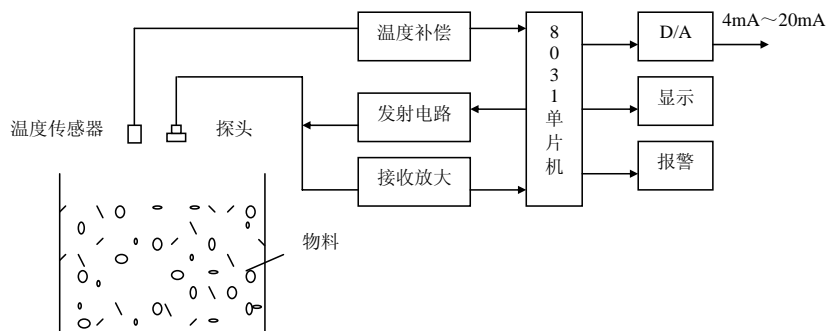


图 2.68 基于单片的超声波物位计原理框图

2.4.6 物位开关

在实际应用中，有时只需要检测物位是否达到上限、下限或某个特定位置，这类定点检测仪表一般称为物位开关。针对不同的被测对象，物位开关有多种形式，可以测量液位、料位、固液分界面、液液分界面以及判断物料的有无等，其工作原理与前面讲述的连续物位检测仪表相同。物位开关具有简单可靠、使用方便、适用范围广等特点。

表 2-4 列出了几种常见的物位开关的示意图。

表 2-4 几种常见的物位开关

分 类	示意图	与被测介质接触部
浮球式		浮球
电导式		电极
振动叉式		振动叉或杆
微波穿透式		非接触式
核辐射式		非接触式
运动阻尼式		运动板

2.5 成分分析仪表

成分分析仪表是对物质的成分及性质进行分析和测量的仪表。在现代工业生产过程中，必须对生产过程的原料、成品、半成品的化学成分、化学性质、黏度、浓度、密度、重度以及 pH 值等进行自动检测和自动控制，以达到优质高产、降低能源消耗和产品成本，保证安全生产和保护环境的目的。

2.5.1 成分分析方法及其分类

成分分析的方法有两种类型，一种是定期采样并通过实验室测定的实验分析方法，另一种是利用仪表连续测定被测物质的含量或性质的自动分析方法。成分分析仪表基于多种测量原理，在进行分析测量时，需要根据被测物质的物理或化学特性来选择适当的检测手段和仪表。

成分分析仪表按照测量原理来分，可以分为电化学式、热学式、光学式等。按照使用场合来分，成分分析仪表又分为实验室分析仪表、过程分析仪表、自动分析仪表和在线分析仪表等。过程分析仪表要求现场安装、自动采样、预处理、自动分析、信号处理以及远传，更适合生产过程的检测和控制，在过程控制中起着及其重要的作用。

自动分析仪表通常和试样预处理系统组成一个分析测量系统，以保证良好的环境适应性和高可靠性，其典型的基本组成图如图 2.69 所示。

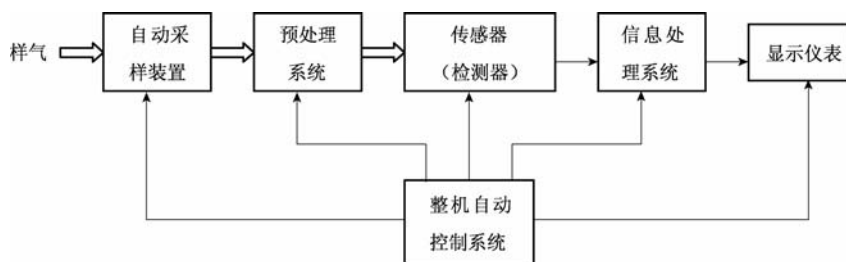


图 2.69 典型分析仪表测量系统的基本组成

自动采样装置从生产设备中自动快速地提取待分析的样品，预处理系统对该样品进行诸如冷却、加热、气化、减压和过滤等处理，为分析仪器提供符合技术要求的试样。传感器是分析仪表的核心，不同原理的传感器将被测试样的信息转换为电信号输出，送信息处理系统进行数字信号处理，最后通过模拟、数字或屏幕图文的形式显示测量分析的结果。整机自动控制系统用于控制各个部分的协调工作，使采样、处理和 analysis 的全过程可以自动连续地进行。

2.5.2 热导式气体分析仪

热导式气体分析仪是利用混合气体的总热导率随被测组分的含量而变化的原理制成的自动连续气体分析仪器。是目前使用较多的一种相当稳定的气体分析仪表，是基于不同气体导热特性不同的原理进行分析的。常用于分析混合气体中 H_2 、 CO_2 、 NH_3 、 SO_2 等组分

的百分含量。

1. 检测原理

热导式气体分析的基本原理是在热传导过程中，不同的气体由于热传导率的差异，其热传导的速率也不同。当被测混合气体的组分的含量发生变化时，利用热传导率的变化，通过特制的传感器热导池，将其转换为热丝电阻的变化，从而达到测量待测组分的含量的目的。表 2-5 列出了 0°C 时以空气热导率为基准的几种气体的相对热导率。

表 2-5 气体在 0°C 时的热导率和相对热导率

气体名称	相对热导率 $\lambda/\lambda_{\text{空气}}$	气体名称	相对热导率 $\lambda/\lambda_{\text{空气}}$
空气	1.000	一氧化碳	0.964
氢	7.130	二氧化碳	0.614
氧	1.015	二氧化硫	0.344
氮	0.998	氨	0.897
氦	5.91	甲烷	1.318
硫化氢	0.538	乙烷	0.807

从表中可以看出 H_2 的导热系数特别大，是一般气体的 7 倍多。在测量时必须满足以下两个条件，一是待测组分的导热系数与混合气体中其他组分的导热系数相差要大，越大越灵敏；另一个是要求其他各组分的导热系数相等或十分接近。这样混合气体的导热系数随被测组分的体积含量变化而变化，因此只要测量出混合气体的导热系数便可得知被测组分的含量。

实验证明彼此之间无相互作用的多组分混合气体的热导率 λ 可近似地认为是各组分热导率的算术平均值，即

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i c_i \quad (2-114)$$

式中， λ ——混合气体的总热导率；

λ_i ——混合气体第 i 组分的热导率；

c_i ——混合气体第 i 组分的浓度。

设被测组分的浓度为 c_1 ，相应的热导率为 λ_1 ，混合气体中的其他为背景组分，热导率相差不大，假定为 λ_2 ，则

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i c_i = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 \sum_{i=2}^n (c_2 + c_3 + \cdots + c_n) \quad (2-115)$$

由于 $\sum_{i=1}^n (c_1 + c_2 + \cdots + c_n) = 1$ ，即 $c_2 + \cdots + c_n = 1 - c_1$ ，所以

$$\lambda = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 (1 - c_1) \quad (2-116)$$

由此可以推出被测组分的浓度与混合气体的热导率之间的关系为

$$c_1 = \frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (2-117)$$

从式(2-117)可以看出，当待测组分的导热系数与混合气体中其他组分的导热系数相差较大，其他各组分的导热系数相等或十分接近时，可以通过待测组分的导热系数与混合气体中其他组分的导热系数测量出被测组分的浓度的大小。如果不满足上述两个条件，可以采取预处理的方法除去不满足条件的气体，使剩下的背景气体满足要求。如分析烟道中的CO₂的含量，已知烟道气体的组分为CO₂、N₂、CO、SO₂、H₂、O₂以及水蒸汽等，由表中可知，SO₂和H₂的热导率相差太大，应在预处理时除去，其他气体的热导率相近，并与被测气体CO₂的热导率差别较大。

2. 热导式气体分析仪的工作原理与结构

热导式气体分析仪的核心部件是热导池，热导池的作用是把多组分混合气体的平均热导率的大小转化为电阻值的变化，其结构示意图如图 2.70 所示。

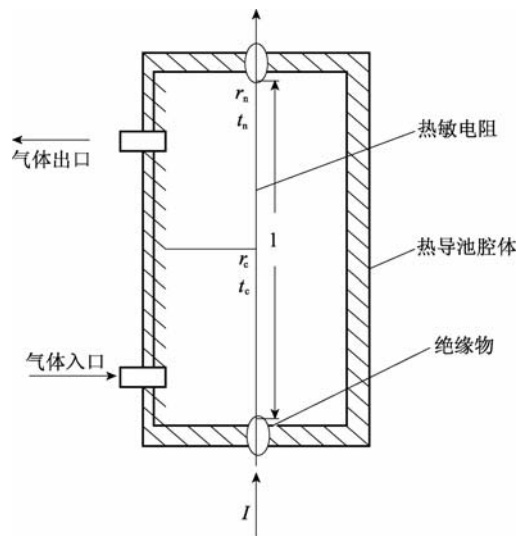


图 2.70 热导池结构示意图

热导池是用导热性好的金属制成的圆柱形腔体，腔体中垂直悬挂一根热敏电阻元件，一般为铂丝。电阻元件与腔体保持良好的绝缘。电阻元件通过两端的引线通以恒定电流 I ，使之维持一定的温度 t_n 。 t_n 高于室壁温度 t_c ，被测气体由热导池下面入口进入，从上面出口流出，热导池的热敏电阻既是加热元件也是测量元件，电阻丝上产生的热量通过混合气体向室壁传递。如果利用热导池测量混合气体中 H₂ 的浓度，当浓度增加时，混合气体的平均热导率增加，电阻丝产生的热量通过气体传导给室壁的热量也会增加，电阻丝的温度 t_n 就会下降，从而使电阻丝的阻值下降。通过测量电阻丝的阻值的大小就可以得知混合气体中 H₂ 的浓度。

单位时间内从电阻丝上传给热导池中被测气体的热量为

$$Q_1 = \frac{2\pi\lambda_m l(t_n - t_c)}{\ln \frac{r_c}{r_n}} \quad (2-118)$$

式中, l ——电阻元件的有效长度;

t_n, t_c ——分别为电阻丝和室壁的温度;

r_c, r_n ——分别为室壁内半径和电阻丝的半径;

λ_m ——混合气体平均导热率。

电阻丝通以电流时, 根据焦耳-楞次定律可知单位时间内产生的热量为

$$Q_2 = 0.24I^2R_t \quad (2-119)$$

电阻随温度变化时的电阻值为

$$R_t = R_0(1 + \alpha t_n) \quad (2-120)$$

式中, α ——电阻丝的温度系数。

当系统达到热平衡时, 有 $Q_1 = Q_2$, 则

$$R_t = R_0 \left[1 + \alpha \left(t_c + 0.24 \frac{\ln(\frac{r_c}{r_n})}{2\pi l} \frac{I^2 R_t}{\lambda_m} \right) \right] \quad (2-121)$$

进一步将 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 代入式(2-121), 则

$$R_t = R_0 \left[1 + \alpha \left(t_c + 0.24 \frac{\ln(\frac{r_c}{r_n})}{2\pi l} \frac{I^2 (1 + \alpha t_n)}{\lambda_m} \right) \right] \quad (2-122)$$

令结构参数为 $\frac{1}{k} = 0.24 \frac{\ln(\frac{r_c}{r_n})}{2\pi l}$, 并忽略高阶无穷小量, 则有

$$R_t = R_0(1 + \alpha t_c) + \frac{\alpha I^2 R_0^2}{k \lambda_m} \quad (2-123)$$

式(2-123)为电阻丝电阻值 R_t 与混合气体导热率 λ_m 之间的关系式。如果 R_0 、 α 、 t_c 、 I 、 l 、 r_c 、 r_n 等都为常数, 则电阻值 R_t 与混合气体导热率 λ_m 成单值对应的函数关系。为了满足以上条件, 对电阻丝的材料、几何尺寸以及气体流量均有严格的要求。通过实验和长期工作的分析研究, 热导池结构和工作参数一般为 $R_0 = 15\Omega$; $l \approx 50\text{mm} \sim 60\text{mm}$; $r_n \approx 0.01\text{mm} \sim 0.03\text{mm}$, $I \approx 100\text{mA} \sim 200\text{mA}$; $r_c \approx 4\text{mm} \sim 7\text{mm}$; $t_c \approx 50 \sim 60^\circ\text{C}$ 。

热导式气体分析仪通常采用四个热导池, 他们的四根电阻丝组成一个典型的惠斯登电桥, 如图 2.71 所示。

测量气室桥臂电阻为 $R_1 = R_3$, 室内通以测量气体, 参考气室桥臂电阻为 $R_2 = R_4$, 室内通以被测气体的下限含量气体, 当下限值为零时, 参考气室中一般为空气。四个其实是连体结构, 所处的环境条件如温度、压力、流量等完全一样。当流过测量气室的被测组分的浓度和参考气室中标准气样的浓度相等时, 电桥输出为零。当流过测量气室的被测组分的浓度发生变化, 电阻 R_1 、 R_3 发生变化, 电桥失去平衡, 输出电压的大小就代表了被测组分的浓度。

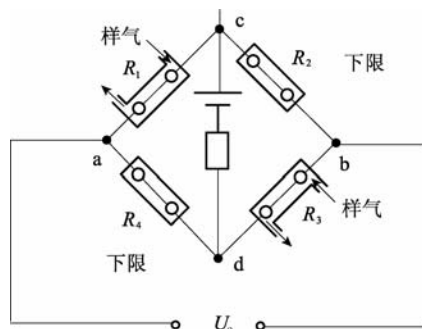


图 2.71 电桥式测量电路

为了进一步克服电源电压波动和环境温度变化等因素对测量带来的误差，还可以采用双电桥检测电路，如图 2.72 所示。

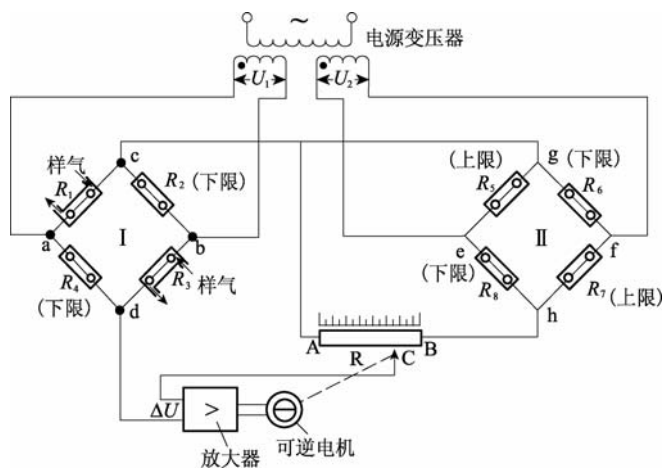


图 2.72 双电桥检测电路

双电桥检测电路中除了测量电桥 I 外还增加了一个参考电桥 II，测量电桥上面已经阐述过，是个不平衡电桥。参考电桥 II 中的电阻丝 R_5 和 R_7 的热导池内密封上限气体，且 $R_5=R_7$ ，因气体浓度大，导热换热能力强，平衡温度最低，电阻值最小。电阻丝 R_6 和 R_8 的热导池内密封下限气体，且 $R_6=R_8$ ，因气体浓度最小，导热换热能力最弱，平衡温度最高，电阻值最大。两电桥的工作电压由电源变压器的副边绕组输出电压提供，彼此相等 $U_1=U_2$ 。

参考电桥的输出电压 U_{gh} 是一个固定的常数，加在滑线电阻 R_{AB} 的两端。在测量电桥中，当被测组分的浓度发生变化时，电阻 R_1 和 R_3 的阻值发生变化，电桥的输出电压 U_{cd} 发生变化。 U_{gh} 和 U_{cd} 的极性相反，二者的差值送入放大器中放大，驱动可逆电机，从而使 R_{AB} 上的滑点 C 左右滑动，直到平衡为止， R_{AB} 上面的标尺可以直接指示被测组分的浓度值。

当被测组分的浓度为下限值时，测量电桥的输出电压 $U_{cd}=0$ ，参考电桥的输出电压全部 U_{gh} 加在滑线电阻 R_{AB} 上，滑线电阻的滑点 C 停在标尺的左端点 A 处，指针正对标尺的下限值。当被测组分的浓度为上限值时，测量电桥的输出电压 U_{cd} 与参考电桥的输出电压全部 U_{gh} 相等，即 $U_{cd}=U_{gh}$ ，滑线电阻的滑点 C 停在标尺的右端点 B 处，指针正对标尺的

上限值。当被测组分的浓度为测量范围的某一值时，滑线电阻的滑点 C 会停在标尺的中间的某一位置上。双电桥检测电路还可以利用微处理器采集放大器的输出信号，并进行相应的数据处理，最后显示测量结果。

热导式气体分析仪最常应用于锅炉烟气分析和氢纯度分析，也常用于色谱分析仪的检测器。在线使用这种分析仪表时，要求有采样和预处理装置。

2.5.3 红外线气体分析仪

红外线气体分析仪是基于红外检测原理，属于光学分析仪器中的一种。它是利用不同气体对不同波长的红外线具有特殊的吸收能力来实现气体的组分检测的。

1. 检测原理

红外线式气体检测主要利用了气体对红外线的波长有选择的可吸收型和热效应两个特点。图 2.73 为几种气体在不同波长时对红外辐射的吸收情况，该图又称为红外吸收光谱图。从图中可以看出，不同气体具有不同的红外吸收光谱图，对于给定的气体，只在一定的红外光波段上有吸收，单原子和无极性的双原子的气体不吸收红外线，水蒸气对所有波段的红外光几乎都吸收。

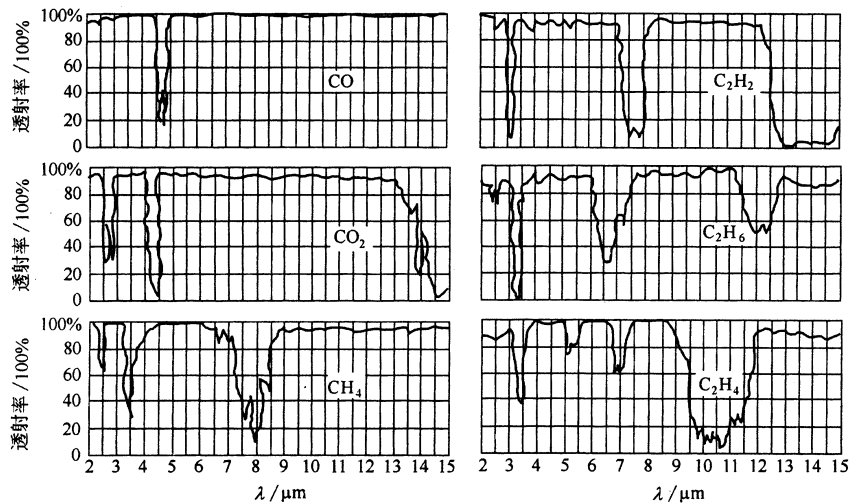


图 2.73 几种气体的红外吸收光谱图

基于红外吸收峰鉴别原理的红外气体分析仪只对单一组分气体的测定是有效的。因此有诸如“CO₂ 红外分析仪”等。如果被测气体与混合气体中的其他组分气体(背景气体)没有化学反应，则气体分析是可行的。如果背景气体中存在与被测气体红外吸收峰重叠的那些气体(干扰组分)，则在测量中应采取预处理措施将干扰组分去掉。

气体在吸收红外辐射能后温度上升，对于一定量的气体，吸收的红外辐射能越多，温度上升就越高。气体对红外线的吸收过程遵循朗伯-比尔定律，即

$$E = E_0 e^{-k_\lambda cd} \quad (2-124)$$

式中， E_0 、 E ——红外线吸收前后的能量；

k_λ ——气体吸收系数；

c ——气体浓度；
 d ——光程。

式(2-124)表明红外线通过被测气体后的能量大小随着物质的浓度和光程按指数曲线衰减，气体吸收指数 k_λ 取决于介质的特性和光的波长的大小。

人工制造一个包括被测气体特征吸收峰波长在内的连续光谱的辐射源，使其通过固定长度的含有被测气体的混合组分，由于被测气体的浓度不同，吸收固定波长红外线的能量不同，从而转换成的热量也不相同。在利用红外监测器将热量转换为温度或压力，只要测量温度或压力的大小就可以准确地测量被测气体的浓度。

2. 红外线气体分析仪的结构及工作原理

工业生产常见的红外线气体分析仪的结构原理图如图 2.74 所示。

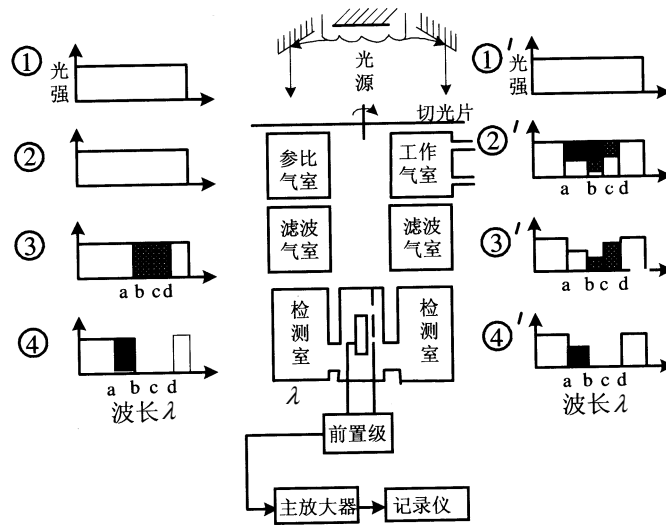


图 2.74 常见的红外线气体分析仪结构原理图

恒光源发出光强为 I_0 的某一特征波长的红外光，经反射镜产生两束平行的红外光，同步电机带动有若干对称圆孔的切光片，将连续红外光调制成两束频率相同的脉冲光。其中一束射入工作气室，另一束射入参比气室。在工作气室中被测组分和干扰组分分别吸收各自特征波成的红外线能量后，到达干扰滤光室。在参比气室中充满了不吸收红外线的干扰气体如 N_2 ，从参比气室中射出的红外光能量不变。干扰滤波气室中充满了 100% 的干扰气体，将其所对应的特征波长的红外线能量全部吸收。这样从干扰滤波气室射出的两束红外光分别进入检测室的上、下气室，上、下气室由膜片分开。检测室的上、下气室中均充满了 100% 的被测气体，因此在检测室中被测气体将其对应的特征波长的两束红外线能量全部吸收掉。由于到达下检测室的红外线强度比到达上检测室的红外线强度大，两束红外线在检测室分别被吸收后，下检测室产生的能量比上检测室产生的能量要大，从而导致电容器动极板(膜片)产生位移，引起电容器的电容值发生改变。放大器将电容的变化量转换为电压或电流输出，便于信号远传，同时可供显示和记录仪表显示和记录被测气体浓度的大小。

2.5.4 色谱分析仪

色谱分析仪是基于色谱法原理的，色谱法是一种分离技术，试样混合物的分离过程也就是试样中各组分在称之为色谱分离柱中的两相间不断进行着的分配过程。与前面介绍的几种气体成分分析仪不同，色谱分析仪能对被测样品进行全面的分析，既能鉴定混合物中的各种组分，还能测量出各组分的含量。因此色谱分析仪在科学实验和工业生产中应用比较广泛。

1. 检测原理

混合物的分离是色谱法的关键，分离过程是一种物理化学过程，由色谱柱来完成。需分离的样品由气体或液体携带沿色谱柱连续流过，携带样品的气体或液体称为流动相。色谱柱中放有固体颗粒或涂在担体上的液体，它们对流动相不产生任何物理化学作用，但能吸收或溶解被测样品中的各组分，并且对不同组分具有不同的吸收或溶解能力。色谱柱中不随流动相而移动的固体颗粒物或液体统称为固定相。

色谱法是利用色谱柱中固定相对被测样品中各组分具有不同的吸收或溶解能力，各组分在两相中反复分配，使各组分得以分离，这样各组分按照一定的顺序流出色谱柱。色谱柱的出口安装一个检测器，当有组分从色谱柱流入检测器中，检测器将输出对应于该组分浓度大小的电信号，通过记录仪把各个组分对应的输出信号记录下来，就形成了色谱图，如图 2.75 所示。根据各组分在色谱图中出现的时间以及峰值大小可以确定混合物的组成以及各组分的浓度。

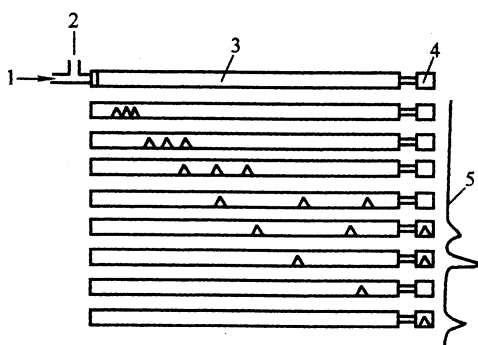


图 2.75 混合物在色谱柱中分离的过程

1—载气；2—样品；3—色谱柱；4—检测器；5—色谱图

由于流动相可以是气体或液体，固定相可以是液体或固体，因此色谱法有气-液色谱、气-固色谱、液-液色谱、液-固色谱等之分。不管采用哪一种色谱法，基本原理是相近的。这里主要介绍气相色谱仪。

2. 气相色谱仪

气相色谱仪的基本设备与流程如图 2.76 所示，主要由载气设备、进样装置、色谱柱、检测系统和温度控制系统等部分组成。

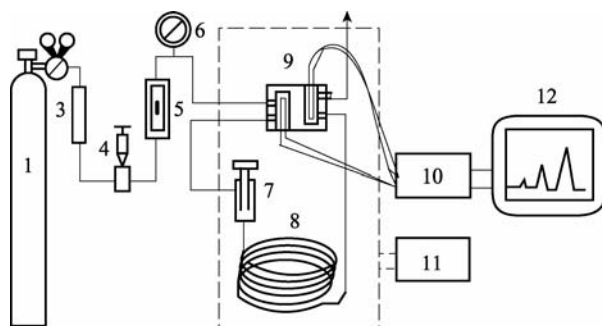


图 2.76 气相色谱仪的基本设备与流程

1—气源；2—减压阀；3—净化干燥管；4—针形稳压阀；5—流量计；6—压力表；7—净化器；
8—色谱柱；9—检测器；10—放大器；11—温度控制；12—输出设备

1) 载气设备

载气设备包括气源、净化干燥管和载气流速控制，常用的载气有氢气、氮气、氦气；净化干燥管去除载气中的水、有机物等杂质(依次通过分子筛、活性炭等)；载气流速控制包括压力表、流量计、针形稳压阀等，用于控制载气流速恒定。

2) 进样装置

进样装置由进样器和气化室组成。进样器可分为气体进样器和液体进样器。气体进样器(六通阀)有推拉式和旋转式两种，试样首先充满定量管，载气携带定量管中的试样气体进入分离柱；液体进样器是具有不同规格的专用注射器，填充柱色谱常用 $10\mu\text{L}$ ；毛细管色谱常用 $1\mu\text{L}$ ；新型仪器带有全自动液体进样器，清洗、润冲、采样、进样、换样等过程自动完成，一次可放置数十个试样。气化室将液体试样瞬间气化的装置，无催化作用。

3) 色谱柱

色谱柱是色谱仪的核心部件。其材质为不锈钢管或玻璃管，内径 $3\text{mm}\sim 6\text{mm}$ ，长度可根据需要确定。柱填料为粒度为 $60\sim 80$ 或 $80\sim 100$ 目的色谱固定相。液-固色谱采用固体吸附剂，液-液色谱采用担体+固定液。柱制备对柱效有较大影响，填料装填太紧，柱前压力大，流速慢或将柱堵死，反之空隙体积大，柱效低。

4) 检测系统

检测系统是色谱仪的眼睛，通常由检测元件、放大器、显示记录三部分组成。被色谱柱分离后的组分依次进入检测器，按其浓度或质量随时间的变化，转化成相应的电信号，经放大后记录和显示，给出色谱图。为了分析各种物质，一台气相色谱仪都配有多个检测器，有的检测器是广普型的，对所有物质均有响应；有的是专属型的，对特定物质有高灵敏响应。常用的检测器有热导检测器、氢火焰离子化检测器。热导检测器如前所述，这里不再介绍。

氢火焰离子化检测器是根据物质电离特性而制成的，灵敏度比热导式检测器高 1000 多倍，但只对有机碳氢化合物有响应，其响应信号随着化合物中碳原子数量的增多而增大，对所有的惰性气体和 CO 、 CO_2 、 SO_2 等气体都没有响应。但因其灵敏度高、反应快，在科研、石油、化工中有广泛的应用，其结构原理图如图 2.77 所示。

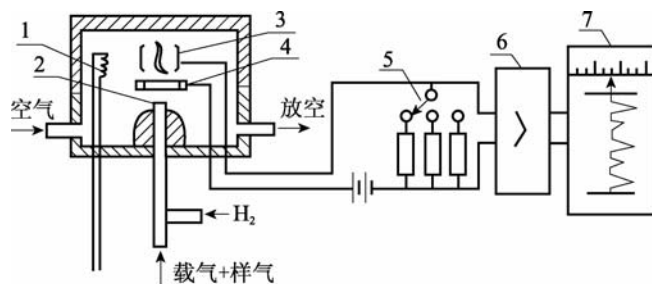


图 2.77 氢焰离子化检测器的结构原理图

1—点火丝；2—喷嘴；3—集电极；4—发射极；5—量程变换器；6—放大器；7—记录仪

带有样品的载气从色谱柱出来和氢气混合后进入检测器，由喷嘴 2 喷出。点火丝 1 通电后点燃氢气，空气从侧面进入检测器帮助氢气燃烧。含有碳氢原子的有机化合物在氢气的火焰中燃烧，由于化学电离作用，生成带电的离子对。在发射极和集电极之间加有一定的直流电压(100V~300V)构成一个外加电场。在没有样品组分进入检测器时，两极之间的离子流即基极电流很小。当样品组分在载气的冲刷下进入检测器时，在氢焰的高温下产生电离反应，生成带电离子对。在电场的作用下，这些带电离子向两极作定向移动，形成所谓的离子流。经过高阻抗的量程变换器后，输出电压信号，再经过放大器放大，送给记录仪，记录仪记录出色谱峰的图形。

5) 温度控制系统

温度是色谱分离条件的重要选择参数。气化室、分离室、检测器三部分在色谱仪操作时均需控制温度：气化室能保证液体试样瞬间气化；检测器可以保证被分离后的组分通过时不在此冷凝；分离室能准确控制分离需要的温度。当试样复杂时，分离室温度需要按一定程序控制温度变化，使各组分在最佳温度下分离。

2.5.5 氧含量的检测

在许多生产过程中，特别是燃烧过程和氧化反应过程中，测量和控制混合气体中的氧含量是非常重要的。电化学法是目前工业上分析氧含量的一种方法，具有结构简单、维护方便，反应迅速，测量范围广等特点。氧化锆氧量计是电化学分析器的一种，可以连续分析各种工业锅炉和炉窑内的燃烧情况，通过控制送风来调整过剩空气系数 α 值，以保证最佳的空气燃料比，达到节能和环保的双重效果。这里以氧化锆氧量计为例介绍氧含量的检测原理。

1. 氧化锆氧量计的测量原理

氧化锆为固体电介质，具有离子导电作用，在常温下为单斜晶体，基本上不导电，当温度达到 1150℃ 时，晶体排列由单斜晶体变为立方晶体，如果掺杂一定量的氧化钙和氧化钇，则其晶体变为不随温度而变的稳定的萤石型立方晶体。由于氧化钙所含氧离子数仅为氧化锆的一半，四价的锆离子被二价的钙离子和三价的钇离子置换后，在固溶体中产生了

大量的氧离子空穴。当温度为 800℃ 以上时，空穴型的氧化锆就变成了良好的氧离子导体，从而构成了氧浓差电池。

氧浓差电池的原理如图 2.78 所示，在氧化锆电解质的两侧各烧结上一层多孔的铂电极，电池左边是被测的烟气，它的氧含量一般为 4%~6%，电池的右侧是参比气体，如空气，空气的氧含量为 20.8%。由于电池左右两侧的混合气体的氧含量不同，在两个电极之间产生电势，这个电势只是由于两个电极所处环境的氧气浓度不同形成的，所以叫氧浓差电势。氧浓差电势的大小可以由 Nernst 公式表示：

$$E = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (2-125)$$

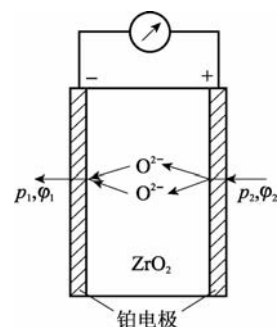


图 2.78 氧浓度电池原理

式中， E ——氧浓差电势；

n ——迁移一个氧分子输送的电子数，对氧而言 $n=4$ ；

p_1 ——被测气体的氧分压或氧浓度；

p_2 ——参比气体的氧分压或氧浓度；

R ——气体常数；

F ——法拉第常数。当空气为参比气体，在一个大气压下 $R=8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ， $F=96500\text{C}/\text{mol}$ 。

由上式可知如果温度保持不变，并选定一种已知氧浓度的气体为参比气体，则只要测量氧浓差电势就可以得知被测气体氧浓度 p_1 。

氧化锆氧量计能正常工作必须满足：

(1) 使氧化锆传感器的温度恒定，一般保持在 850℃ 左右时传感器灵敏度最高。温度的变化会直接影响氧浓差电势的大小，因此氧化锆氧量计的测量探头上都装有测温传感器和电加热设备。

(2) 必须要有参比气体，且参比气体的氧含量要稳定不变。参比气体氧含量与被测气体氧含量差别越大，仪表灵敏度越高。

(3) 被测气体和参比气体应具有相同的压力，这样可以用氧浓度代替氧分压。

2. 氧化锆氧量计的检测器

氧化锆氧量计的检测器主要由氧化锆传感器、温度调节器、恒温加热炉和显示仪表等组成。

氧化锆传感器的结构原理如图 2.79 所示，由氧化锆固体电解质、内外铂电极、 Al_2O_3 陶瓷管、热电偶、加热炉丝、陶瓷过滤管和引线组成。氧化锆制成一封闭的圆管，内外附有多孔铂相衬的内外电极，圆管内部一般通入参比气体如空气，烟气经过陶瓷过滤管后作为被测气体流氧化锆的外部。为了使氧化锆管的温度恒定，在其外部装有加热电阻丝和热电偶，热电偶检测氧化锆管的温度，再通过调节器调整加热电流的大小，使氧化锆管的温度稳定在 850℃ 上。当被测气体的温度控制在稳定恒值时，由测得氧浓差电势就可以确定被测气体的氧分压，从而得知氧含量。

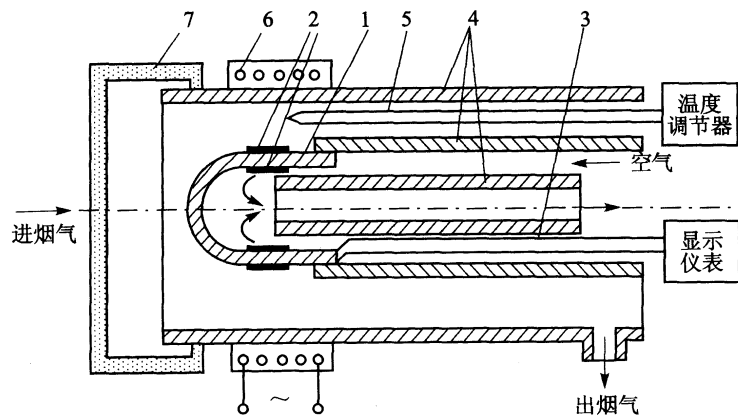


图 2.79 氧化锆传感器的结构原理图

1—氧化锆管；2—内、外铂电极；3—引线；4— Al_2O_3 陶瓷管；
5—热电偶；6—恒温加热炉；7—陶瓷过滤管

2.6 机械量检测仪表

机械量包括尺寸、位移、速度、质量、力、力矩和振动等参数。机械量不仅是运动控制系统的重要参数，许多非电量传感器与变送器的中间参数，也是许多物理量如力、压力、温度、振动等测量的前提。对于机械量的测量，同一参数可以用不同类型的传感器测量，某一种原理的传感器可以测量不同的参数。这里主要介绍几种常用机械量的测量。

2.6.1 位移检测仪表

位移检测包括直线位移和角位移两种，检测方法多种多样，常用的有积分法、相关测距法、回波法、线位移和角位移相互转换的方法以及位移传感器法，这几种方法的基本原理和应用见表 2-6。

表 2-6 位移传感器一览表

类 型		测量范围	准确度	线性度	特 点	
电 阻 式	滑 线 式	线位移	1mm~300mm	±0.1%	±0.1%	分辨率较好，可用于静态或动态测试，但机械结构不牢固
		角位移	0~360°			
	变 阻 器	线位移	1mm~1000mm	±0.1%	±0.1%	
		角位移	0~60 转			

(续)					
类 型	测量范围	准确度	线性度	特 点	
应 变 式	非粘贴	±0.5%应变	±0.1%	±1%	不牢固
	粘贴	±0.3%应变	±2%~±3%	—	—
	半导体	±0.25%应变	±2%~±3%	满 刻 度 20%	牢固, 使用方便, 需温度补偿和高绝缘电阻
电 感 式	自感式 变气隙型	±0.2mm	±1%	±3%	只宜用于微小位移测量
	螺管型	1.5mm~2mm	—	0.15%~1%	测量范围较前者宽, 使用方便可靠, 动态性能较差
	特大型	300 mm~200mm	—	—	—
	差动变压器	±0.08 mm~75mm	±0.5%	±0.5%	分辨率好, 受到杂散磁场干扰时需屏蔽
	涡电流式	±2.5mm~±250mm	±1%~3%	<3%	分辨率好, 受被测物体材料、形状、加工质量影响
	同步机	360°	±0.1° ~±7°	±0.5%	可在 1200r/min 的转速下工作, 坚固, 对温度和湿度不敏感
	微动同步器	±10°	±1%	±0.05%	线性误差与变压比和测量范围有关
	旋转变压器	±60°	—	±0.1%	—
电 容 式	变面积	0.001~100mm	±0.005%	±1%	介电常数受环境湿度、温度的影响
	变间距	0.001~10mm	±1%	±1%	分辨率很好, 但测量范围很小, 只能在小范围内近似保持线性
霍尔式		±1.5mm	0.5%	—	结构简单, 动态特性好
感 应 同 步 器	直线性	0.001~10000mm	2.5μm~250mm	—	模拟和数字混合测量系统, 数字显示(直线性感应同步器的分辨率可达1μm)
	旋转式	0~360°	±0.5	—	
计 量 光 栅	长光栅	0.001~10000mm	3μm~1m	—	同上, 长光栅分辨率
	圆光栅	0~360°	±0.5"	—	0.1μm~1μm
磁 场	长磁栅	0.001~10000mm	5μm~1m	—	测量时工作速度可达
	圆磁栅	0~360°	±1"	—	12m/min
角 度 编 码 器	接触式	0~360°	0.000001rad	—	—
	接触式	0~360°	0.0000001rad	—	分辨率好, 可靠性高

一般来说,在进行位移检测时,要充分利用被测对象所在场合和所具备的条件来选择和设计检测方法。

2.6.2 速度检测

速度检测分为线速度检测与角速度检测。线速度的单位为 m/s,角速度检测又分为转速检测和角速率检测,转速的单位常用 r/min,而角速率的单位常用 $^{\circ}/s$ 或 $^{\circ}/h$ 。

常用的速度检测方法有以下几种:

(1) 微积分法。根据运动物体的位移、速度和加速度的关系,对运动物体的加速度进行积分运算或对运动物体的位移信号进行微分运算就可以得到速度。

(2) 线速度和角速度相互转换测速法。同一运动物体的线速度和角速度存在固定的关系,在测量时可采用互换的方法。如测量执行电机的转速可得知负载的线速度。

(3) 速度传感器法。利用各种速度传感器,将被测物体的速度信号转换为电信号进行测量。这种方法是速度检测的常用方法。常见的速度传感器有磁电式速度传感器、测速发电机、光电编码器、多普勒测速仪、陀螺仪等

(4) 相关测速法。在被测运动物体经过的两固定距离为 L 的点上安装信号检测装置,通过对两信号检测装置输出的信号进行相关分析,求出时延 τ ,就可以得知运动物体的被测速度 $v = \frac{L}{\tau}$ 。相关测速法不受环境因素的影响,测速精度较高。

(5) 空间滤波器法。利用可选择一定空间频率段的空间滤波器件与被测物体同步运动,在单位空间内测得相应的时间频率,求得运动物体的运动速度。空间滤波器法既可测量运动物体的线速度,也可以测量转速。

目前常用的各种速度测量传感器的工作原理和主要技术性能见表 2-7。

表 2-7 常用的各种速度测量传感器的工作原理和主要技术性能

类型	原 理	测量范围	精 度	特 点
线速度测量	磁电式	工作频率 10Hz ~ 500Hz	$\leq 10\%$	灵敏度高,性能稳定,移动范围 $\pm(1\sim 15)\text{mm}$,尺寸质量较大
	空间滤波器	1.5km/h~200km/h	$\pm 0.2\%$	无需两套特性完全相同的传感器
转速测量	交流测速发电机	400r/min~4000 r/min	$< 1\%$ 满量程	示值范围在小范围内可通过调整预扭弹簧转角来调节
	直流测速发电机	1400 r/min	1.5%	有电刷压降形成死区,电刷及整流子磨损影响转速表精度
式	离心式转速表	30 r/min~24000r/min	$\pm 1\%$	结构简单,价格便宜,不受电磁干扰,精度较低
	频闪式转速表	$0\sim 1.5\times 10^5$ r/min	1%	体积小,量程宽,使用简便,精度高,是非接触测量
	光 反射式 电 转速表	30r/min~4800r/min	± 1 脉冲	非接触测量,要求被测轴径大于 3mm
	式 直射式转速表	1000 r/min		在被测轴上装有测速圆盘

(续)

类型	原 理	测量范围	精 度	特 点
	测频式转速仪	几万 r/min~几十万 r/min	± 1 脉冲/s	适合高转速测量, 低转速测量误差大
	测周法转速仪	1000r/min		适合低转速测量
	汽车发动机转速表	70r/min~9999r/min	$0.1\%n \pm 1r/min$ $(n \leq 4000 r/min)$ $0.2\%n \pm 1r/min$ $(n > 4000 r/min)$	利用汽车发动机点火时, 线圈高压放电, 感应出脉冲信号, 实现对发动机不剖体测量

1. 光电旋转编码器

脉冲编码器是一种光学式位置检测元件, 用以测量轴的旋转角度位置和速度变化, 其输出信号为电脉冲。它通常与驱动电动机同轴安装, 驱动电动机可以通过齿轮箱或同步齿轮驱动丝杠, 也可以直接驱动丝杠。脉冲编码器随着电动机旋转时, 可以连续发出脉冲信号, 例如电动机每转一圈, 脉冲编码器可发出 2000 个均匀的方波信号, 微处理器通过对该信号的接收、处理、计数即可得到电动机的旋转角度, 从而算出被控对象的位置。目前, 脉冲编码器每转可发出数百至数万个方波信号, 因此可满足高精度位置检测的需要。

按码盘的读取方式, 脉冲编码器可分为光电式、接触式和电磁式。就精度与可靠性而言, 光电式脉冲编码器优于其他两种。根据编码类型, 光电旋转编码器分为增量式旋转编码器和绝对式编码器。

1) 增量式旋转编码器

增量式光电脉冲编码器亦称光电码盘、光电脉冲发生器等。增量式光电编码器结构如图 2.80 所示。它主要由光源、透镜、光栅板、码盘基片、透光狭缝、光敏元件、信号处理装置和显示装置等组成。在码盘基片的圆周上等分地刻出几百条到上千条透光狭缝。光栅板透光狭缝为两条, 每条后面安装一个光敏元件。码盘基片转动时, 光敏元件把通过光电盘和光栅板射来的忽明忽暗的光信号(近似于正弦信号)转换为电信号, 经整形、放大等电路的变换后变成脉冲信号, 通过计量脉冲的数目, 即可测出工作轴的转角, 并通过数显装置进行显示。通过测定计数脉冲的频率, 即可测出工作轴的转速

从光栅板上两条狭缝中检测的信号 A 和 B, 是具有 90° 相位差的两个正弦波, 这组信号经放大器放大与整形, 输出波形如图 2.81 所示。根据先后顺序, 即可判断光电盘的正反转。若 A 相超前于 B 相, 对应电动机正转, B 相超前 A 相, 对应电动机反转。若以该方波的前沿或后沿产生计数脉冲, 可以形成代表正向位移和反向位移的脉冲序列。

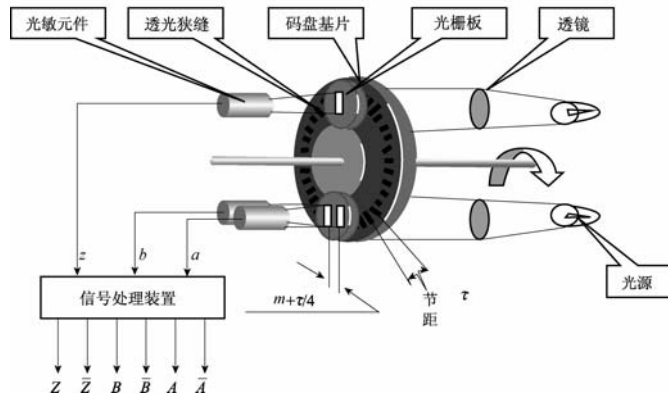


图 2.80 增量式旋转编码器的结构示意图

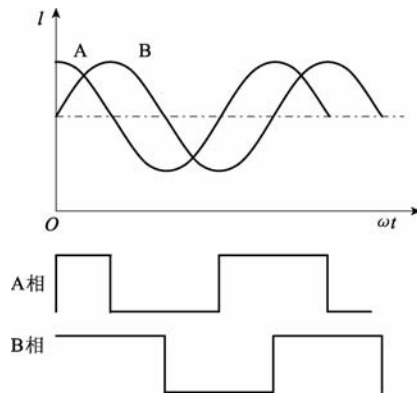


图 2.81 输出波形图

此外，在脉冲编码器的里圈还有一条透光条纹 C，用以产生基准脉冲，又称零点脉冲，它是轴旋转一周在固定位置上产生一个脉冲，给计数系统提供一个初始的零位信号。

在应用时，从脉冲编码器输出的信号是差动信号，差动信号的传输大大提高了传输的抗干扰能力。同时。在实际应用中为了进一步提高其分辨率，提高位置控制精度，常对上述信号进行倍频处理，如果接口电路从信号 A 的上升沿和下降沿各取一个脉冲，则每转所检测的脉冲数提高了一倍，称为二倍频。同样，如果从信号 A 和信号 B 的上升沿和下降沿均取一个脉冲，则每转所检测的脉冲数为原来的四倍，称为四倍频。四倍频信号的输出波形如图 2.82 所示。

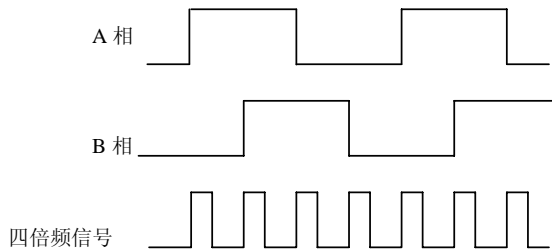


图 2.82 四倍频信号输出波形

当利用脉冲编码器的输出信号进行速度反馈时,可经过频率—电压转换器(F/V)变成正比于频率的电压信号,作为速度反馈,供给模拟式伺服驱动装置。

2) 光电式绝对编码器

增量式编码器的缺点是有可能发生由于噪声或其他外界干扰产生的计数错误;因停电、刀具破损而停机,事故排除后不能再找到事故前执行部件的正确位置。采用绝对值式编码器可以克服这些缺点。绝对值式编码器是在码盘的每一转角位置刻有表示该位置的唯一代码,因此称为绝对码盘。

光电式绝对编码器是通过读取编码盘上的图案来表示数值的。图 2.83 所示为四码道接触式二进制编码盘结构及工作原理图,图中黑的部分为导电部分表示为“1”,白的部分为绝缘部分表示为“0”,4个码道都装有电刷,最里一圈是公共极,由于4个码道产生四位二进制数,码盘每转一周产生0000~1111十六个二进制数,因此将码盘圆周分成16等份。当码盘旋转时,4个电刷依次输出16个二进制编码0000~1111,编码代表实际角位移,码盘分辨率与码道多少有关, n 位码道角盘分辨率为

$$\theta = \frac{360^\circ}{2^n} \tag{2-124}$$

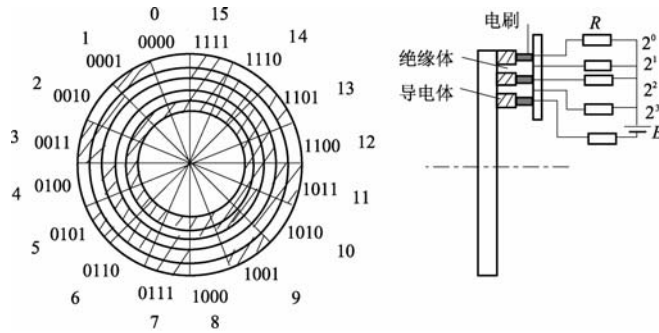


图 2.83 四码道接触式二进制编码盘结构及工作原理图

用二进制代码做的码盘,如果电刷安装不准,会使得个别电刷错位,而出现很大的数值误差。在图 2.83 中,当电刷由位置 0111 向 1000 过渡时,可能会出现从 8(1000)到 15(1111)之间的读数误差,一般称这种误差为非单值性误差。为消除这种误差,可采用格雷码盘,如图 2.84 所示。格雷码盘的特点是每相邻十进制数之间只有一位二进制码不同,图案的切换只用一位数(二进制的位)进行,所以能把误差控制在一个数单位之内,提高了可靠性。

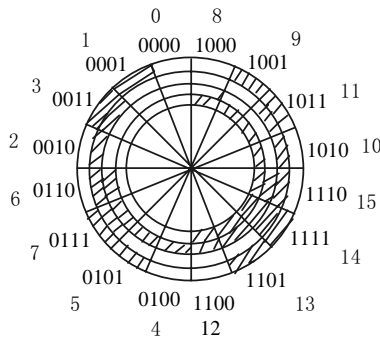


图 2.84 格雷码盘

2. 转速数字测量系统

转速数字测量系统包括转速传感器、数字化转换电路、显示器和控制逻辑电路。在数字化测量系统中，当转速较低时，一般采用周期测量法，当转速较高时一般采用频率测量法。周期测量法测速原理的示意图如图 2.85 所示，在被测信号的一个周期内，对时基信号进行计数，根据计数脉冲的个数 N 测出周期 T ，从而求得转速 n 。为了提高测量精度，拓宽测量范围，可以采用多周期测量法，即在多个周期内对时基信号进行计数。

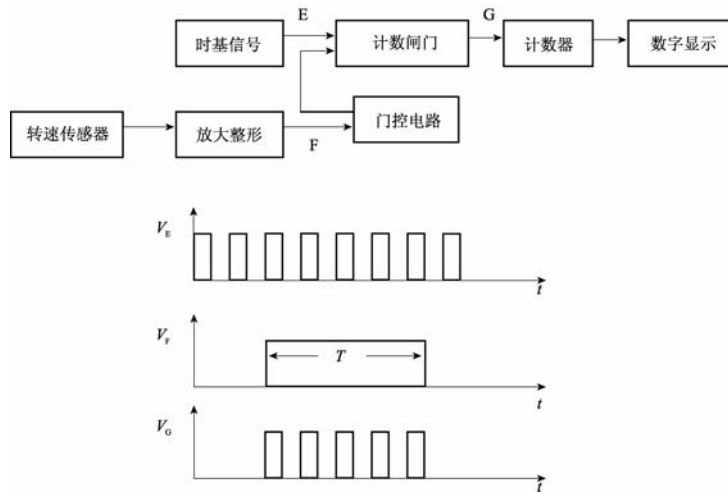


图 2.85 周期测量法测速原理的示意图

频率测量法的测速原理示意图如图 2.86 所示，在一定时间间隔内，对被测信号的输出脉冲进行计数，根据脉冲的计数个数求出转速。

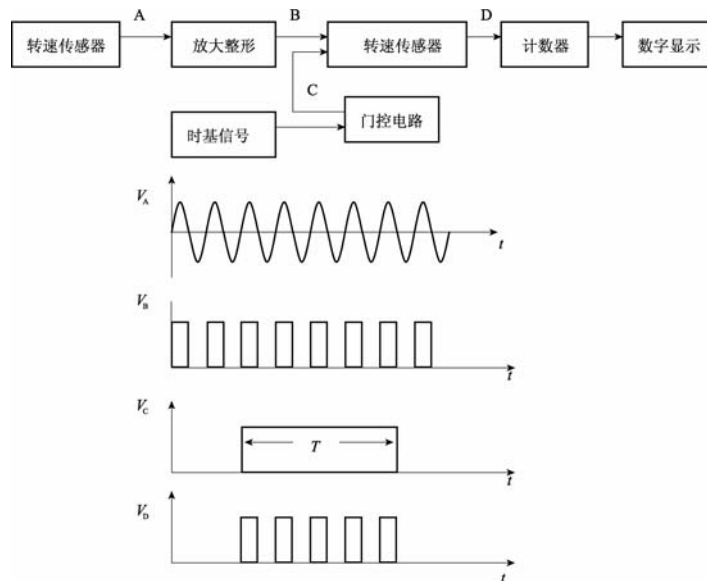


图 2.86 频率测量法的测速原理示意图

2.6.3 加速度检测

加速度是表征物体在空间运动本质的一个基本物理量。因此，可以通过测量加速度来测量物体的运动状态，判断运动机械系统所承受的加速度负荷的大小，以便正确设计其机械强度和按照设计指标正确控制其运动加速度，以免机件损坏。加速度检测是基于测试仪器检测质量块敏感加速度产生惯性力的测量，是一种全自主的惯性测量。加速度检测广泛应用于航空航天和航海的惯性导航系统和运载武器的制导系统中，在振动试验、地震监测、爆破工程、地基测量、地矿勘测等领域也有广泛的应用。

1. 加速度的测量原理

对于加速度，常用绝对法测量，即把惯性型测量装置安装在运动体上进行测量。当前测量加速度的传感器基本上都是基于图 2.87 所示的基本结构。它是由质量块 m 、弹簧 k 和阻尼器 C 所组成的惯性型二阶测量系统。质量块通过弹簧和阻尼器与传感器基座相连接。传感器基座与被测运动体相连，因而随运动体一起相对于运动体之外惯性空间的某一参考点作相对运动。由于质量块不与传感器基座相连，因而在惯性作用下将与基座之间产生相对位移。质量块感受加速度并产生与加速度成比例的惯性力，从而使弹簧产生与质量块相对位移相等的伸缩变形，弹簧变形又产生与变形量成比例的反作用力。当惯性力与弹簧反作用力相平衡时，质量块相对于基座的位移与加速度成正比，故可通过该位移或惯性力来测量加速度。

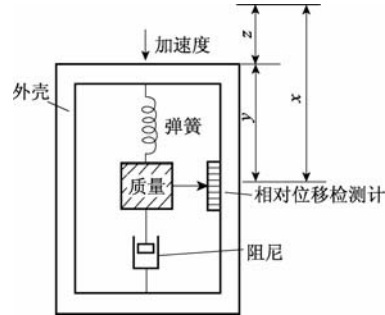


图 2.87 加速度检测的传感器的基本结构

将弹簧质量系统作为传感器，使之与被测系统直接连在仪器，当从系统框架外部施加位移与加速度时，设检测系统的外壳与质量 m 之间的相对位移为 y ，支点位移为 $z = A \sin \omega t$ ，则质量 m 的绝对位移 x 为

$$x = y + z = y + A \sin \omega t$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 y}{dt^2} - A \omega^2 \sin \omega t \quad (2-127)$$

弹簧力与阻尼力都与相对位移有关，其运动方程式为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -C \frac{dy}{dt} - ky \quad (2-128)$$

式中， k ——弹簧系数；

C ——阻尼系数。

则振动系统的运动方程式为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + C \frac{dy}{dt} + ky = mA \omega^2 \sin \omega t \quad (2-129)$$

式(2-129)表明：支点位移为 $z = A \sin \omega t$ 的振动系统等价于支点静止，受外力为 $mA \omega^2 \sin \omega t$ 冲击的加速度系统。该运动方程式的解为

$$y = y_0 \sin(\omega t - \theta) \quad (2-130)$$

$$\text{式中, } y_0 = A \frac{(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{[1-(\omega/\omega_0)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_0)]^2}}; \quad (2-131)$$

$$\theta = \arctan \left[\frac{2\xi(\omega/\omega_0)}{1-(\omega/\omega_0)^2} \right]; \quad (2-132)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad (2-133)$$

$$\xi = \frac{C}{2m\omega_0}。 \quad (2-134)$$

由此可知：根据弹簧质量系统的固有角振动频率 ω_0 与支点的角振动频率 ω 的关系，测量出支点与质量 m 之间的相对位移 y ，这样不仅可以计算出支点的位移变化即振动振幅，而且还可以计算出支点的速度和加速度。基于此，可以测量出支点的位移、速度和加速度。

加速度的计量单位为 m/s^2 ，在工程应用中常用重力加速度 $g = 9.81\text{m/s}^2$ 作为计量单位。加速度的测量主要采用加速度传感器，并配用适当的检测电路。依据对加速度传感器中质量所产生的惯性力的检测方式，加速度传感器可以分为：压电式、压阻式、应变式、电容式、振梁式、磁电感应式、热电式等；按照检测质量的支承方式，加速度传感器可以分为悬臂梁式、摆式、筒支承梁式等。

2. 伺服式加速度传感器

不同于一般的加速度传感器，伺服式加速度传感器是一种闭环测试系统，具有动态性能好、动态范围大和线性度好等特点。其工作原理图如图 2.88 所示，传感器的振动系统由“ $m-k$ ”系统组成，与一般加速度计相同，但质量 m 上还接着一个电磁线圈，当基座上有加速度输入时，质量块偏离平衡位置，该位移大小由位移传感器检测出来，经伺服放大器放大后转换为电流输出，该电流流过电磁线圈，在永久磁铁的磁场中产生电磁恢复力，力图使质量块保持在仪表壳体中原来的平衡位置上，所以伺服加速度传感器在闭环状态下工作。

由于有反馈作用，增强了抗干扰的能力，提高测量精度，扩大了测量范围，伺服加速度测量技术广泛地应用于惯性导航和惯性制导系统中，在高精度的振动测量和标定中也有应用。

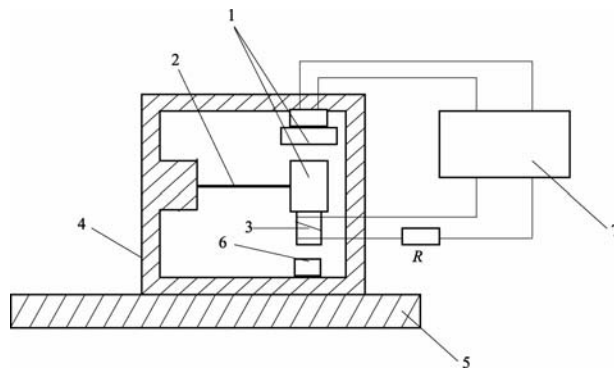


图 2.88 伺服式加速度传感器的工作原理图

1—质量块及位移传感器；2—弹簧；3—线圈；4—壳体；5—被测物体；6—永久磁铁；7—伺服放大器

3. 微机电加速度传感器

微电子技术和测试技术的进步，促进了微机电系统技术的发展，各种微型传感器、微型执行器发展非常迅猛。这些新型的微机电传感器中，微机电系统加速度计以其体积小，重量轻、成本低、可靠性好和测量范围广等特点受到高度重视，并将逐渐取代传统的加速度计。微机电加速度传感器通常是指利用微电子加工手段加工制作并和微电子测量线路集成在一起的加速度计，因常采用硅材料，故又称硅微型加速度计。

ADXL50 是美国 AD 公司开发的，集成在一片单晶硅片上的完整的微机电加速度测量系统，主要用于汽车上的安全气囊。加速度敏感元件是一个可变差动电容器，如图 2.89 所示。2 μm 厚的活动极板上伸出 50 个叉指，形成电容器的活动极板，固定电容极板则由一系列悬臂梁组成，悬臂梁的一端固定在基座上。整个活动极板通过支承梁固定，支承梁能保证活动极板沿敏感加速度的方向作线振动，而其他方向的运动都受到约束。支承梁同时作为一个弹簧，能将输入的加速度信号转换为位移信号，同时提供恢复力，使活动极板恢复到零点位置。挡加速度计处于静止状态时，叉指正好处于固定极板的中央，这时电容 $C_1=C_2$ ，当加速度计敏感加速度时，在惯性力的作用下，活动极板产生位移，叉指和左右两固定极板的间距发生了变化，电容 $C_1 \neq C_2$ ，这时产生的瞬间输出信号将正比于加速度的大小，输出信号的相位反映了运动方向。

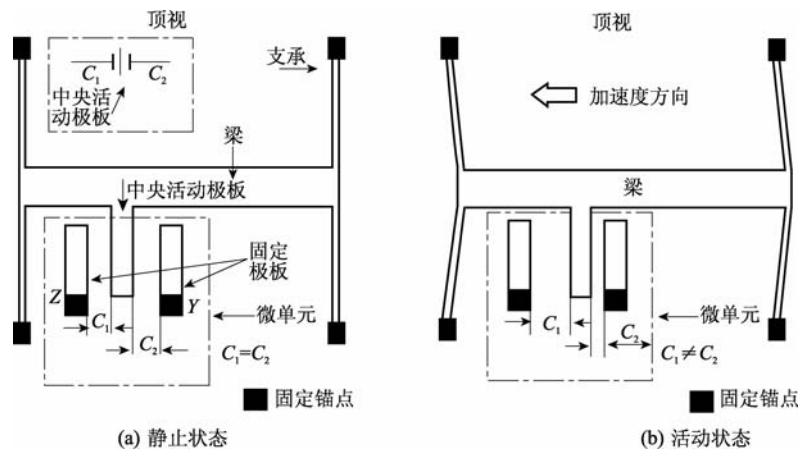


图 2.89 叉指式加速度敏感元件

图 2.90 为 ADXL50 的测量原理图。频率为 1MHz，相位差为 180° 的两个方波信号 u_A 和 u_C 分别施加在固定电容极板 Y 和 Z 上。为使活动极板输出在 $\pm 50g$ 范围内都为正，在固定电容极板 Y 和 Z 上分别施加了偏置电压 +3.4V 和 +0.2V。这样在静止状态时，活动极板的输出信号 u_B 应为 +1.8V。 u_B 经缓冲放大后，送入解调器和低通滤波器，再经前置放大器输出。前置放大器的输出信号 u_0 反馈给活动极板，在活动极板和固定极板上产生静电力，力图使活动极板恢复到中间位置。加负反馈后，在没有加速度信号时， $u_0 = +1.8V$ ，在满量程时 ($\pm 50g$) 时，输出电压的变化量 $\Delta u = \pm 1.0V$ 。

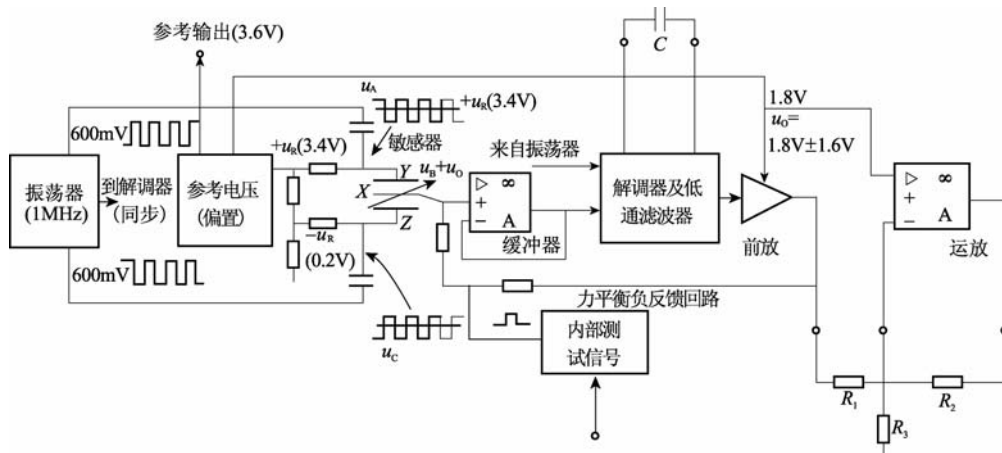


图 2.90 ADXL150 测量原理图

本章小结

检测仪表生产过程自动控制系统的重要组成部分，如果不能准确测量被控变量，就无法对生产过程进行有效地控制。在很多领域目前尚未进行有效控制的原因是检测技术尚未过关。检测仪表将生产过程中有关的工艺参数准确及时地测量出来，送往控制器和显示仪表。变送器可将检测出来的信号转换成统一的标准信号(0mA~10mA 直流电流信号、4mA~20mA 直流电流信号、20kPa~100kPa)送往控制仪表和显示仪表。本章主要介绍了生产过程中常见的参数如温度、压力、流量、物位、成分和机械量等的检测方法，相关检测仪表的基本组成、分类、工作原理和应用，以及与生产过程中应用较广泛的温度变送器和压力变送器的基本结构和工作原理。

思考题与习题

2-1 电偶的热电势由哪两部分组成？在热电偶测温闭合回路中，起主导作用的是哪一部分？

2-2 热电偶测温为什么要进行冷端温度补偿？冷端温度补偿的方法有几种？

2-3 热电阻测温时，为什么一定要用三线制？如果不用三线制，对测温有什么影响？

2-4 如果用镍铬-康铜热电偶测温时仪表指示值为 400°C ，而冷端温度为 30°C ，则认为热端实际温度为 430°C ，对不对？

2-5 由 K 分度号热电偶(包括补偿导线)、冷端温度补偿器和配 K 分度号的动圈仪表组成一个温度检测系统，测量显示 782°C ，此时室温为 32°C ，后来发现所用的冷端补偿器型号为 S，与 K 分度号热电偶不配套，请计算对象实际温度为多少？

2-6 用分度号为 S 型的铂铑-铂热电偶测量某设备的温度，测到的热电势为 20mV ，冷端为 25°C ，求设备的真实温度。如果改用 K 型热电偶，在同样的情况下，测到的热电势应

为多少?

2-7 在用热电偶和热电阻测量时,若出现如下几种情况,问仪表的指示值如何变化?

- (1) 当热电偶开路、短路或极性接反时;
- (2) 当热电阻开路、短路或热电阻使用二线制时;
- (3) 当正确地使用补偿导线将热电偶冷端延长时,若补偿导线极性反了又会如何?

2-8 DDZ—III温度变送器测温范围为 $800\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。选择哪一种测温元件较为适合?当输出电流为 $\text{DC}16\text{mA}$ 时,被测温度是多少?

2-9 某 DDZ—III直流毫伏变送器,其零点迁移到 $(\text{DC})V_{i0}=5\text{mV}$,零迁后的量程为 $\text{DC}10\text{mV}$,求该变送器输出 $(\text{DC})I_o=10\text{mA}$ 时的输入 V_i 为多少毫伏?

2-10 说明在温度变送器中,当使用热电偶或热电阻接入时,接线方法上有什么不同?工作原理上有什么不同?在与热电偶连接时,如何完成线性化工作?

2-11 什么是绝对压力、表压和真空度?它们之间的关系又是怎样的?

2-12 某台空压机的缓冲器,其正常工作压力范围是 $1.1\text{MPa}\sim 1.6\text{MPa}$,工艺要求就地指示压力,并要求测量误差不大于被测压力的 $\pm 5\%$,试选择一块合适的压力表(类型、示值范围、精度等级),并说明理由。

2-13 为什么弹簧管压力表测量的是压力?利用弹簧管压力表测压力,在大气中它的指示为 p 。如果把它移到真空中,指示值会不会改变?

2-14 试叙述力平衡式差压(压力)变送器的测量原理。

2-15 DDZ—III差压变送器是如何实现零点和量程调整的?

2-16 DDZ—III差压变送器是如何实现“二线制”的?DDZ—II 仪表为什么不能采用“二线制”传输方式?

2-17 简述应用超声波检测流量的工作原理。

2-18 用标准孔板测量气体流量,给定设计参数 $p=0.8\text{kPa}$, $t=20^{\circ}\text{C}$ 。实际被测介质参数 $p_1=0.8\text{kPa}$, $t_1=30^{\circ}\text{C}$ 。仪表显示流量 $Q=3800\text{m}^3/\text{h}$,求被测介质实际流量大小。

2-19 有一台电动差压变送器配标准孔板测量流量,差压变送器的量程为 16kPa ,输出为 $4\text{mA}\sim 20\text{mA}$,对应的流量为 $0\text{t/h}\sim 50\text{t/h}$ 。工艺要求在 40t/h 时报警。问:

- (1) 差压变送器不带开方器时,报警值设定在多少毫安?
- (2) 带开方器时,报警值又设定在多少毫安?

2-20 如图 2.91 所示是用双发式差压变送器测量密闭容器中有结晶液体的液位。已知被测液体的密度 $\rho=1200\text{kg}/\text{m}^3$,试确定变送器的量程和迁移量。

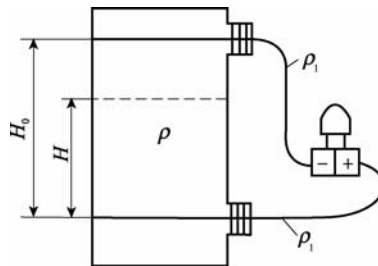


图 2.91 双发式差压变送器

-
- 2-21 浮子式液位计与浮筒式液位计都是利用浮力工作的，原理究竟有何不同？
- 2-22 用电容式差压变送器测量液位时怎样产生零点迁移？如何解决？
- 2-23 简述红外线气体分析仪的工作原理。它适用于什么场合？
- 2-24 气相色谱仪的基本环节有哪些？
- 2-25 简述光电式转速表的工作原理。

第 3 章 连续调节器

自动化控制仪表包括调节器、执行器、操作器以及可编程序调节器等各种新型控制仪表及装置。

自动化控制仪表按使用能源分，有气动仪表和电动仪表；按结构形式分，有基地式仪表、单元组合式仪表和组装式仪表等；按信号类型分，有模拟式仪表和数字式仪表。

单元组合式仪表又分为气动单元组合仪表和电动单元组合仪表。

气动单元组合仪表，简称 QDZ 仪表。它采用 140kPa 压缩空气为能源，以 20kPa~100kPa 为标准统一联络信号。由于 QDZ 仪表结构简单、价格便宜、性能稳定、工作可靠，具有安全、防火、防爆等特点，所以特别适用于石油、化工等易燃易爆的场合。

电动单元组合仪表，简称 DDZ 仪表，它经历了以电子管、晶体管和线性集成电路为基本放大元件的 I 型、II 型和 III 型等 3 个系列产品阶段。其中 DDZ—I 型早已停产；DDZ—II 型采用 220V 交流电源供电，各单元间以 DC 0~10mA 为统一联络信号；DDZ—III 型以 DC 24V 为电源，以 DC 4mA~20mA 为现场传输信号，以 DC 1V~5V 和 DC 4mA~20mA 为控制室联络信号，由于它的性能较 DDZ—II 型更好，加之采取了安全防爆措施，能应用于易燃易爆场合，因而使用更加广泛。

可编程序调节器是在模拟仪表、计算机控制和集散控制系统发展的基础上于 20 世纪 80 年代问世的一种新型自动化控制仪表。它是以微处理器为核心、能实现高级过程控制的新型仪表，在工业生产中正在得到越来越广泛的应用。

本章着重介绍 DDZ—III 型连续调节器，执行器和数字调节器将在后续章节讲述。

3.1 调节器的调节规律

调节器的作用是把测量值和给定值进行比较，得出偏差后，根据一定的调节规律产生输出信号，推动执行器，对生产过程进行自动调节。要掌握一个调节器的特性，最首要的问题是弄清楚它具有什么样的调节规律，即它的输出量与输入量之间具有什么样的函数关系。

调节器中最简单的一种是两位式调节器，其输出仅根据偏差信号的正负，取 0 或 100% 两种输出状态中的一种，使用这种调节器的优点是执行器特别便宜，例如用一个开关便可控制电炉的温度。但由于这种调节器的输出只有通、断两种状态，调节过程必然是一种不断做上下变化的振荡过程，借助调节对象自身热惯性的滤波作用，使炉温的平均值接近于设定值，故只能用于要求不高的场合。

要使调节过程平稳准确，必须使用输出值能连续变化的调节器，并通过采用比例、微分、积分等算法提高调节质量。实际上，工业生产中使用的绝大多数是输出值能连续变化的调节器。在这类调节器中，比例调节器是最简单的一种，其输出信号 $y(t)$ 随输入信号 $x(t)$

成比例变化，若以 $G(s)$ 表示这种调节器的传递函数，则可表示为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = K_c \quad (3-1)$$

式中， $Y(s)$ 与 $X(s)$ 分别为调节器的输出、输入信号的拉氏变换式；

K_c ——调节器的比例增益，为常数。

在自动调节系统中使用比例调节器时，只要被调量偏离其给定值，调节器便会产生与偏差成正比的输出信号，通过执行器使偏差减小。这种按比例动作的调节器，能及时而有力的对干扰起到抑制作用，使误差减小，在生产上有一定的应用。但它有一个不可避免的缺点即有静态误差存在，一旦被调量偏差不存在，调节器的输出也就为零，即调节作用是以偏差的存在作为前提条件的。所以使用这种调节器时，不可能做到无静差调节。

要消除静差，最有效的办法是采用对偏差信号具有积分作用的调节器，这种积分调节器的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{T_i s} \quad (3-2)$$

积分调节器的突出优点是，只要被调量存在偏差，其输出的调节作用便随时间不断加强，直到偏差为零。在被调量的偏差消除以后，由于积分规律的特点，输出将停留在新的位置而不回复原位，因而能保持静差为零。

但是，单纯的积分调节也有弱点：动作过于迟缓，不能及时有效地克服扰动的影响，使调节不及时，造成被控变量超调量增加，往往使调节的动态品质变坏，过渡过程时间延长，甚至造成系统不稳定。因此在实际生产中，总是同时使用上面的两种调节规律，把比例作用的及时性与积分作用消除静差的优点结合起来，组成“比例+积分”作用的调节器，简称为 PI 调节器，其传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (3-3)$$

目前，除了使用上述调节规律外，还常使用微分调节规律。单纯的微分调节器的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = T_d s \quad (3-4)$$

从物理概念上看，微分调节器能在偏差信号出现或变化的瞬间，立即根据变化的趋势，产生强烈的调节作用，使偏差尽快地消除于萌芽状态之中。但是，单纯的微分调节器也有严重的不足之处，它对静态偏差毫无抑制能力，因此不能单独使用，总要和比例或比例积分调节规律结合起来，组成“比例+微分”作用的调节器(简称 PD 调节器)，或“比例+积分+微分”作用的调节器(简称 PID 调节器)。

在 PID3 种作用调节器中，微分作用主要用来加快系统的动作速度，减小超调，克服振荡；积分作用主要用以消除静差。将比例、积分、微分 3 种调节规律结合在一起，既可达到快速敏捷，又可达到平稳准确，只要 3 种作用的强度配合适当，便可得到满意的调节效果。

这种 PID 调节器的传递函数是

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3-5)$$

因为这种调节器是目前自动控制中使用最普遍、也是最基本的调节器，所以，下面对其组成原理及使用特性作深入的分析。

3.2 PID 调节器的阶跃响应和频率特性

本节主要对 PID 运算电路的阶跃响应及频率特性进行简略的介绍。

3.2.1 PID 调节器的阶跃响应

PID 运算电路的阶跃响应可利用传递函数通过拉氏反变换求得，微分调节作用的效果主要体现在阶跃信号输入的瞬间，而积分调节作用的效果则是随时间而增加的。若积分时间 T_i 比微分时间 T_d 大得多，那么在阶跃信号刚加入的一段时间内 ($t < 4T_d/K_d$)，微分将起主要作用，而积分分量很小，可以忽略不计；但随着时间的推移，积分分量越来越大，微分分量越来越小，最后微分作用可以完全忽略。这样，微分和积分可以分阶段考虑，PID 调节器的阶跃响应如图 3.1 所示。

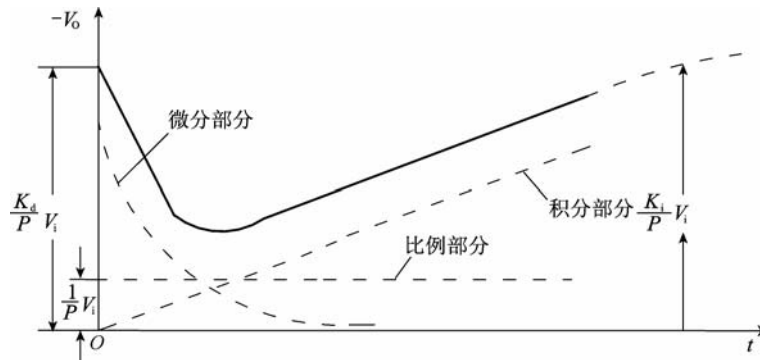


图 3.1 PID 调节器的阶跃响应

图 3.1 中整个输出曲线可看成由比例项、积分项及有限制的微分项三部分相加而得的，由于微分增益 K_d 为有限值，限制了输出曲线在初始瞬间跳变的幅度；而积分增益 K_i 的有限性，则限制了积分输出的最终幅度。

这样的阶跃响应表明，当调节器输入端出现偏差信号时，首先由微分和比例作用产生跳变输出，迅速作出反应；此后如果偏差仍不消失，那么随着微分作用的衰减，积分效果与时俱增，直到静差消除为止。当然在实际生产过程中，偏差总是不断变化的，因此比例、积分、微分等三种作用在任何时候都是协调配合地工作的。

3.2.2 PID 调节器的频率特性

实际应用的 PID 调节器，尽管具体电路和结构有各种各样，干扰系数有大有小，但其传递函数总可近似表示为式(3-6)的形式。这样，这类调节器的频率特性不难由此传递函数

导出。

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-1}{P} \left(\frac{1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s}{1 + \frac{1}{K_i T_i s} + \frac{T_d}{K_d} s} \right) \quad (3-6)$$

式中, P ——调节器的比例度;

T_i 、 T_d ——积分时间和微分时间;

K_i 、 K_d ——积分增益和微分增益。

将 $s = j\omega$ 代入式(3-6), 两边取对数且乘以 20, 求其对数幅频特性

$$L(\omega) = 20\lg|G(j\omega)| = 20\lg\frac{1}{P} + 20\lg\sqrt{1 + \left(T_d\omega - \frac{1}{T_i\omega}\right)^2} - 20\lg\sqrt{1 + \left(\frac{T_d}{K_d}\omega - \frac{1}{K_i T_i\omega}\right)^2} \quad (3-7)$$

依据式(3-7)可以绘出实际的 PID 调节器的对数幅频特性, 如图 3.2 实线所示, 它由两段斜线和三段水平线组成, 四个转折频率分别为 $\omega_1 = \frac{1}{K_i T_i}$, $\omega_2 = \frac{1}{T_i}$, $\omega_3 = \frac{1}{T_d}$, $\omega_4 = \frac{K_d}{T_d}$ 。

其相应的相频特性可用自控理论求得, 也可由最小相位系统的幅特性与相特性的关系推出, 如图 3.2 中曲线 $\varphi(\omega)$ 所示。该图还用虚线作出了式(3-6)表示的“理想”PID 运算装置的对数幅频特性和相频特性。

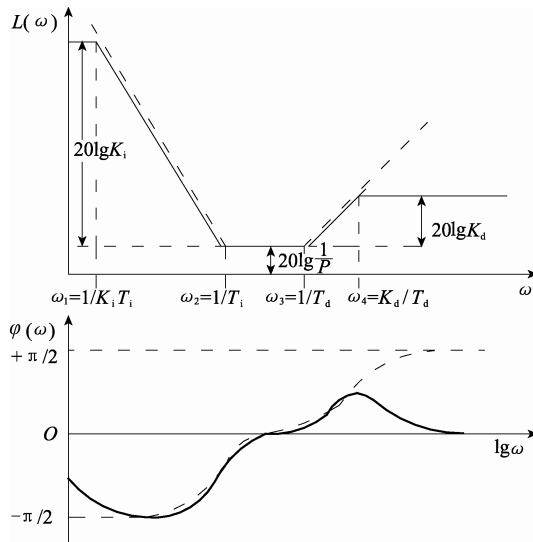


图 3.2 PID 调节器的对数幅频特性

由图 3.2 可知, 作为通用型串联校正装置的 PID 调节器加入控制系统后, 依靠积分作用, 可使系统闭环传递函数在低频段的增益大大提高, 从而把调节静差减小到接近于零。在高频段, 依靠微分作用, 可在系统截止频率附近增加正相移, 改善系统的稳定性, 并展宽频带, 提高调节动作的快速性。在使用中, 根据不同的控制对象, 可方便地通过修改 PID 参数, 满足绝大多数控制系统的要求。由于使用方便, 概念清晰, PID 调节器在工业生产中获得极为广泛的应用。

3.3 PID 调节器线路实例

DDZ—III型调节器有两个基本型，即全刻度指示调节器和偏差指示调节器。它们的线路结构基本相同，仅指示电路有差异。本节介绍全刻度指示调节器。

全刻度指示调节器的框图如图 3.3 所示，图 3.4 为其线路原理图。

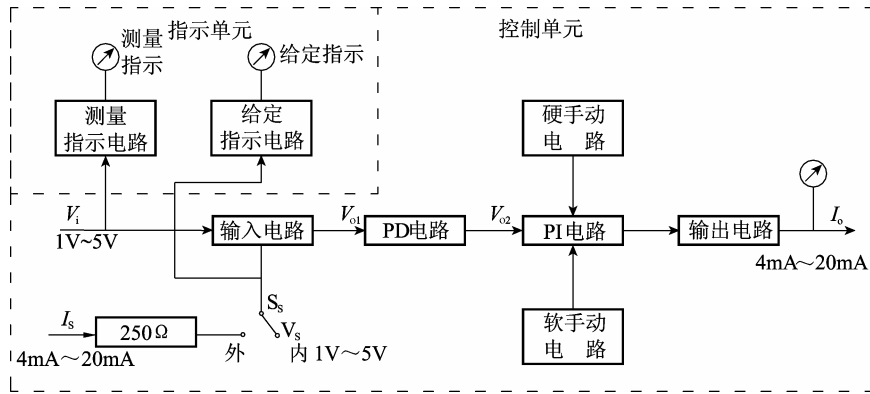


图 3.3 全刻度指示调节器框图

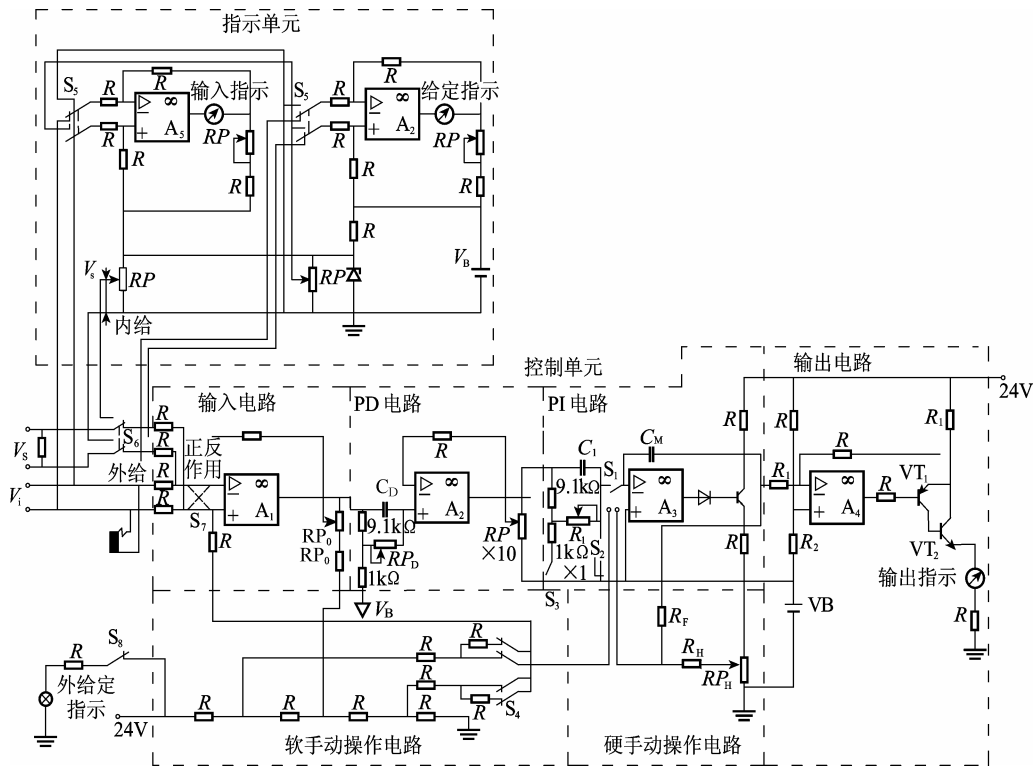


图 3.4 全刻度指示调节器线路原理图

由图 3.3 和图 3.4 可知，调节器由控制单元和指示单元组成。控制单元包括输入电路、PD 与 PI 电路、输出电路、软手动与硬手动操作电路；指示单元包括输入信号指示电路和给定信号指示电路。

调节器的作用是将变频器送来的 DC 1V~5V 的测量信号，与 DC 1V~5V 的给定信号进行比较得到偏差信号，然后再将其偏差信号进行 PID 运算，输出 DC 4mA~20mA 信号，最后通过执行器，实现对过程参数的自动控制。

调节器的测量输入信号与内给定输入信号均是以 0V 为基准的 DC 1V~5V 信号，而外给定信号是由 DC 4mA~20mA 通过 250Ω精密电阻转换成以 0V 为基准的 DC 1V~5V 信号。内、外给定信号由开关 S₆ 进行选择。

调节器有自动、软手动和硬手动 3 种工作状态，并通过联动开关 S₁、S₄ 进行切换。调节器各部分的原理分述如下。

3.3.1 输入电路

输入电路的主要作用有两种：一是用来获得与输入信号 V_i 和给定信号 V_s 之差成比例的偏差信号；二是对偏差信号实现电平移动，其电路图如图 3.5 所示。

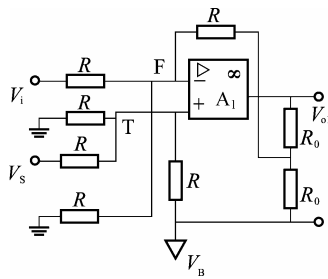


图 3.5 输入电路

由图可见，以 0V(地)为基准的测量信号 V_i 和给定信号 V_s，反相地通过两对并联输入电阻及加到运算放大器 A₁ 的两个输入端，其输出是以 V_B=10V 为基准的电压信号 V_{o1}，它一方面作为下一级比例微分电路的输入，另一方面则取出 V_{o1}/2 通过反馈电阻及反馈至 A₁ 的反相输入端。它的输入、输出关系推导如下。

设 A₁ 为理想运算放大器，其输入阻抗为无穷大，T 点与 F 点同电位，即 V_T=V_F。

对于 F 点：

$$\frac{V_i - V_F}{R} + \frac{0 - V_F}{R} = \frac{V_F - (\frac{1}{2}V_{o1} + V_B)}{R} \quad (3-8)$$

对于 T 点：

$$\frac{V_s - V_T}{R} + \frac{0 - V_T}{R} = \frac{V_T - V_B}{R} \quad (3-9)$$

经整理则有

$$V_{o1} = 2(V_s - V_i) \quad (3-10)$$

由以上各式可见：

(1) 输入电路的输出电压 V_{o1} 是偏差电压 $(V_s - V_i)$ 的两倍。

(2) 输入电路将两个以 0V 为基准的输入电压，转换成以电平 $V_B(10V)$ 为基准的偏差电压输出，从而实现了电平移动。

3.3.2 比例微分电路

图 3.6 所示为比例微分电路。以 10V 电平为基准的偏差信号 V_{o1} ，通过 $RP_D C_D$ 电路进行比例微分运算，再经比例放大后，其输出信号 V_{o2} 送给比例积分电路。图中 RP 为比例电位器， RP_D 为微分电位器， C_D 为微分电容。调及 RP_D 和 RP ，即可改变微分时间和比例度。

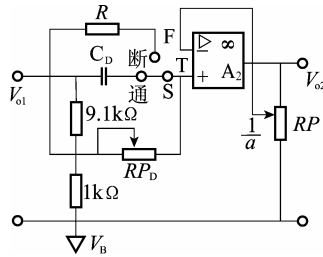


图 3.6 比例微分电路

图 3.6 中的比例微分电路由无源比例微分网络和比例运算放大器组成。设 A_2 为理想运算放大器，其输入阻抗为无穷大，输出阻抗为零，可不考虑放大器的影响，则前后两部分电路可单独分析。在得出前半部分电路运算关系后，只要乘上后面部分比例放大器的放大倍数，即可得到整个比例微分电路的运算关系。

为此，将无源比例微分电路单独画出如图 3.7(a)所示，各点电压都以电平 V_B 为基准。考虑到分压器上下两段电阻都比电阻 RP_D 小得多，故计算时分压器可以只考虑其分压比，而不计其输出阻抗。

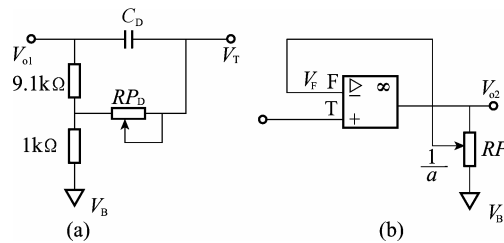


图 3.7 无源比例微分电路的组成

$$V_T(s) = \frac{V_{o1}(s)}{n} + I_d(s)R_D \quad (3-11)$$

式中， n 约等于 10， I_D 是电容 C_D 的充电电流

$$I_d(s) = \frac{V_{o1}(s) - \frac{1}{n}V_{o1}(s)}{R_D + \frac{1}{C_D s}} = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{C_D s}{1 + R_D C_D s} \cdot V_{o1}(s) \quad (3-12)$$

将式(3-12)代入式(3-11)并化简得

$$V_T(s) = \frac{1}{n} \cdot \frac{1+nR_D C_D s}{1+R_D C_D s} \cdot V_{o1}(s) \quad (3-13)$$

V_F 是 V_{o2} 的分压, 放大器的运算关系为

$$V_F(s) = \frac{1}{a} \cdot V_{o2}(s) \quad (3-14)$$

依据理想放大器的概念 $V_F(s) = V_T(s)$ 有

$$V_{o2}(s) = \frac{a}{n} \cdot \frac{1+nR_D C_D s}{1+R_D C_D s} \cdot V_{o1}(s) \quad (3-15)$$

若令 $n=K_D$ (微分增益); $nR_D C_D=T_D$ (微分时间); 则

$$V_{o2}(s) = \frac{a}{K_D} \cdot \frac{1+T_D s}{1+\frac{K_D}{T_D} s} \cdot V_{o1}(s) \quad (3-16)$$

设 $V_{o1}(t)$ 幅值为 V_{o1} 的单位阶跃函数, 即 $V_{o1}(s) = \frac{1}{s} V_{o1}$

整个电路的阶跃响应(如图 3.8 所示)由上式拉氏反变换求出

$$V_{o2}(t) = \frac{a}{n} [1 + (K_D - 1)e^{-\frac{K_D t}{T_D}}] V_{o1} \quad (3-17)$$

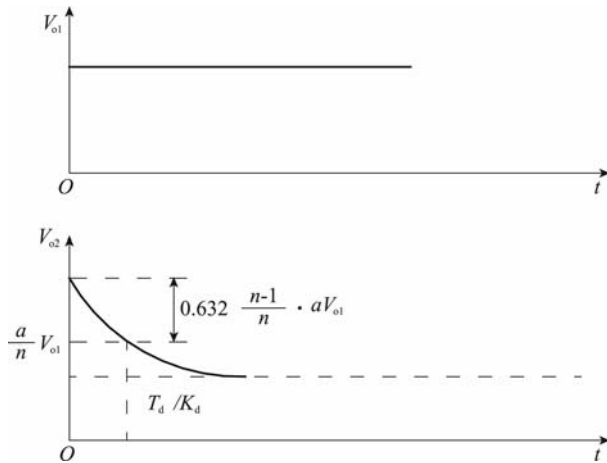


图 3.8 比例微分电路的阶跃响应

3.3.3 比例积分电路

比例积分电路如图 3.9 所示, 它接收以 10V 为基准的 PD 电路的输出信号 V_{o2} , 进行 PI 运算后, 输出以 10V 为基准的 1V~5V 电压 V_{o3} , 送至输出电路。该电路由 A_3 、 R_1 、 C_1 、 C_M 等组成。 S_3 为积分档切换开关, S_1 、 S_2 为自动、软手动、硬手动联动切换开关, 该电路除了实现 PI 运算外, 手操信号也从该级输入。 A_3 输出接电阻和二极管, 然后通过射极跟随器输出。

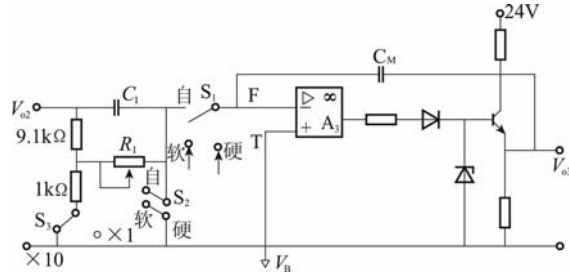


图 3.9 比例积分电路

由于射极跟随器的输出信号与 A_3 输出信号同相位，为了便于分析，可把射极跟随器包括在 A_3 中，于是简化成图 3.10 所示电路。手动操作另行讨论。

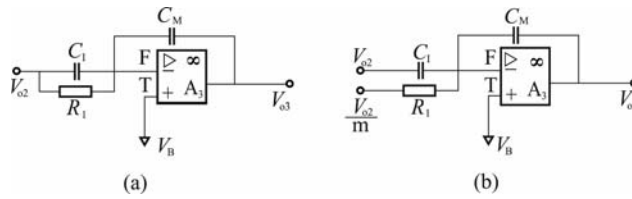


图 3.10 比例积分电路的简化

假设 A_3 为理想运算放大器， S_1 置于“自动”位置， S_3 切换在“ $\times 10$ ”挡，即 $m=10$ ，图 3.9 可简化成图 3.10(b)。对于 F 点，根据基尔霍夫第一定律，输出量与输入量拉氏变换式之间的关系为

$$\frac{V_{02}(s) - V_F(s)}{\frac{1}{C_1 s}} + \frac{\frac{V_{02}(s)}{m} - V_F(s)}{R_1} + \frac{V_{03}(s) - V_F(s)}{\frac{1}{C_M s}} = 0 \quad (3-18)$$

对于运算放大器，其增益为 K 则

$$V_{03}(s) = -K \cdot V_F(s) \quad (3-19)$$

将式(3-18)代入式(3-19)，简化可得

$$\frac{V_{03}(s)}{V_{02}(s)} = \frac{-\frac{C_1}{C_M} \left[1 + \frac{1}{m R_1 C_1 s} \right]}{1 + \frac{1}{K} \left[1 + \frac{C_1}{C_M} \right] + \frac{1}{K R_1 C_1 s}} \quad (3-20)$$

对于理想放大器 K 为无穷大，实际应用放大器由于 $K \geq 10^5$ ，所以

$\frac{1}{K} \left[1 + \frac{C_1}{C_M} \right] \ll 1$ ，可忽略不计，则

$$\frac{V_{03}(s)}{V_{02}(s)} = \frac{-\frac{C_1}{C_M} \left[1 + \frac{1}{m R_1 C_1 s} \right]}{1 + \frac{1}{K R_1 C_1 s}} \quad (3-21)$$

再设 $K_I = \frac{K}{m} \cdot \frac{C_M}{C_1}$ 为积分增益

$T_I = R_1 C_1$ 为积分时间常数, 则有

$$\frac{V_{o3}(s)}{V_{o2}(s)} = -\frac{C_1}{C_M} \cdot \frac{1 + \frac{1}{T_I s}}{1 + \frac{1}{K_I T_I s}} \quad (3-22)$$

设 $V_{o2}(t)$ 幅值为 V_{o2} 阶跃函数, 即 $V_{o2}(s) = \frac{1}{s} V_{o2}$

用拉氏反变换可求出输出电压 $V_{o3}(s)$ 的阶跃响应

$$V_{o3}(t) = -\left[\frac{C_1}{C_M} + \left(K - \frac{C_1}{C_M}\right) \left(1 - e^{-\frac{1}{K_I T_I t}}\right)\right] \cdot V_{o2} \quad (3-23)$$

当 $t=0^+$ 时, 则有

$$V_{o3}(0^+) = \frac{C_1}{C_M} V_{o2}$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 输出不会无限增长, 趋于一个确定的极限值

$$V_{o3}(\infty) = -K \cdot V_{o2}$$

中间变化过程为图 3.11 所示的指数曲线。当 $t \ll K_I T_I$ 时, 即指数曲线的起始段可用泰勒级数近似展开为

$$V_{o3}(t) = -\left[\frac{C_1}{C_M} + \left(K - \frac{C_1}{C_M}\right) \frac{t}{K_I T_I}\right] \cdot V_{o2} \quad (3-24)$$

考虑到 $K \gg \frac{C_1}{C_M}$, 可进一步写为

$$\begin{aligned} V_{o3}(t) &= -\left(\frac{C_1}{C_M} + K \frac{t}{K_I T_I}\right) \cdot V_{o2} \\ &= -\left(\frac{C_1}{C_M} + K_I m \frac{C_1}{C_M} \frac{t}{K_I T_I}\right) \cdot V_{o2} \\ &= -\frac{C_1}{C_M} \left(1 + m \frac{t}{T_I}\right) \cdot V_{o2} \end{aligned} \quad (3-25)$$

当 $t = \frac{T_I}{m}$ 时,

$$V_{o3}\left(\frac{T_I}{m}\right) = -2 \frac{C_1}{C_M} \cdot V_{o2} \quad (3-26)$$

式(3-26)常用来测定积分时间。

由上面的分析可知, 当放大器的放大倍数 K 为有限值时, 由于式(3-22)中分母上有一项 $\frac{1}{K_I T_I C_M s}$, 其积分作用不是理想的, 即积分输出的幅度为有限值。这就是说, 在系统中使用比例积分调节后, 只能大大减小而不能完全消除稳态误差。

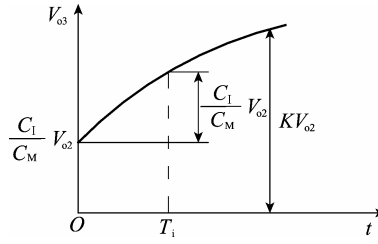


图 3.11 比例积分电路的阶跃响应

3.3.4 输出电路

图 3.12 所示为调节器的输出电路。其输入信号是经过 PID 运算后的以电平 V_B 为基准的 DC 1V~5V 的电压信号 V_{o3} ，输出是流经一端接地的负载电阻 R_L 的电流 (I_o =DC 4mA~20mA)。因此，它实际上是一个具有电平移动的电平-电流转换器。

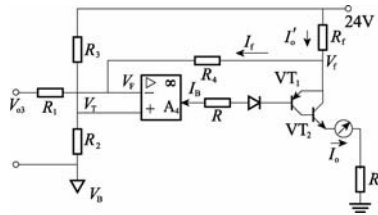


图 3.12 输出电路

为使调节器的输出电流不随负载电阻大小变化，输出电路应具有良好的恒流特性，为此，该电路使用集成运算放大器 A_4 ，并以强烈的电流负反馈保证这一点。为了提高调节器的负载能力，在放大器 A_4 的后面，用晶体管 VT_1 、 VT_2 组成复合管带动负载，这不仅可以减轻放大器 A_4 的发热、提高放大倍数，增进恒流性能，而且将如后面的分析中表明的，可以提高电流转换的精度。

图 3.12 所示输出电路实际上也是一个比例运算器，若设 $R_3=R_4=10k\Omega$ ， $R_1=R_2=4R_3$ ，则用理想放大器的分析方法

$$\text{对 } V_T \text{ 点: } V_T = \frac{24 - V_B}{R_3 + R_2} \cdot R_2 + V_B = \frac{1}{5}V_B + \frac{4}{5} \cdot 24 \quad (3-27)$$

$$\text{对 } V_F \text{ 点: } \frac{V_f - V_F}{R_4} = \frac{V_f - V_{o3} - V_B}{R_1} = \frac{V_f - V_{o3} - V_B}{4R_4} \quad (3-28)$$

根据 $V_T \approx V_F$ 可得

$$V_f = 24 - \frac{1}{4}V_{o3} \quad (3-29)$$

又直接从图 3.12 可知

$$V_f = 24 - I_o' R_f \quad (3-30)$$

对比式(3-29)与式(3-30)，得

$$I_o' R_f = \frac{1}{4}V_{o3}, \text{ 即 } I_o' = \frac{V_{o3}}{4R_f} \quad (3-31)$$

如果忽略反馈支路中的电流 I_f 和晶体管 VT_1 的基极电流 I_B ，则有

$$I_o = I'_o \quad (3-32)$$

得

$$I_o = \frac{V_{o3}}{4R_f} \quad (3-33)$$

如果令 $R_f = 62.5\Omega$, 则当 $V_{o3} = 1V \sim 5V$ 时, 输出电流 $I_o = 4mA \sim 20mA$ 。

实际上, 忽略晶体管 VT_1 的基极电流 I_B 误差不大。但反馈支路电流 I_f 一般不能忽略, 例如在图 3.12 中, 当 $I'_o = 4mA$ 时, 反馈支路电流 I_f 可求得

$$I_f = \frac{V_f - V_F}{R_4} \quad (3-34)$$

式中, V_f 的值可由式(3-30)求出

$$V_f = (24 - 4 \times 10^{-3} \times 62.5)V = 23.75V$$

V_F 的值可由式(3-27)中的 V_T 值得到

$$V_F = V_T = \left(\frac{1}{5} \times 10 + \frac{4}{5} \times 24\right)V = 21.2V$$

代入式(3-34), 得反馈支路电流

$$I_f = \frac{23.75 - 21.2}{10 \times 10^3} A = 0.255mA$$

可见此时 I_f 占 I'_o 的 6% 以上, 忽略它将有很大误差。为了提高转换精度, 应使 $R_1 \neq R_2$, 可以证明, 当月 $R_1 = 4(R_3 + R_f) = 40.25k\Omega$ 时, 可以精确地获得转换关系式(3-33)。

3.3.5 调节器的整机传递函数

通过上面的讨论, 输入电路、PD 及 PI 运算电路、输出电路的传递函数皆已获得, 现分别列出如下:

输入电路

$$\frac{V_{o1}(s)}{V_i(s) - V_s(s)} = -2$$

比例微分电路

$$\frac{V_{o2}(s)}{V_{o1}(s)} = \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{1 + T_d s}{1 + \frac{T_d}{K_d} s}$$

比例积分电路

$$\frac{V_{o3}(s)}{V_{o2}(s)} = -\frac{C_1}{C_M} \cdot \frac{1 + \frac{1}{T_i s}}{1 + \frac{1}{K_i T_i s}}$$

输出电路

$$\frac{I_o(s)}{V_{o3}(s)} = \frac{1}{4R_f} = \frac{1}{250}$$

整个调节器的传递函数如图 3.13 所示, 可表示如下式

$$\frac{I_o(s)}{V_i(s) - V_s(s)} = \frac{2a}{n} \cdot \frac{C_1}{C_M} \cdot \frac{1 + T_d s}{1 + \frac{T_d}{K_d} s} \cdot \frac{1 + \frac{1}{T_i} s}{1 + \frac{1}{K_i T_i} s} \cdot \frac{1}{250} \quad (3-35)$$

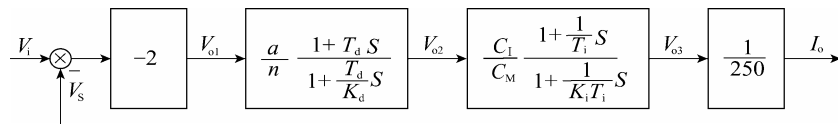


图 3.13 调节器的整机传递函数

3.3.6 手动操作电路

手动操作电路是在电路中附加软手动操作电路和硬手动操作电路而成。如图 3.14 所示。图中 $S_{4.1} \sim S_{4.4}$ ：为软手动操作开关； RP_1 为硬手动操作电位器； S_1 、 S_2 为自动、软手动、硬手动联动切换开关。

手动操作分软手动和硬手动两种。所谓软手动操作，是指调节器的输出电流与手动输入电压信号成积分关系；所谓硬手动操作，是指调节器的输出电流与手动输入电压信号成比例关系。

1. 软手动操作电路

在图 3.14 中，当 S_1 、 S_2 置于软手动位置时，按下 $S_{4.1} \sim S_{4.4}$ 中的任一开关，即可得到图 3.15 所示的软手动操作电路。这是一个反相输入的积分运算电路。

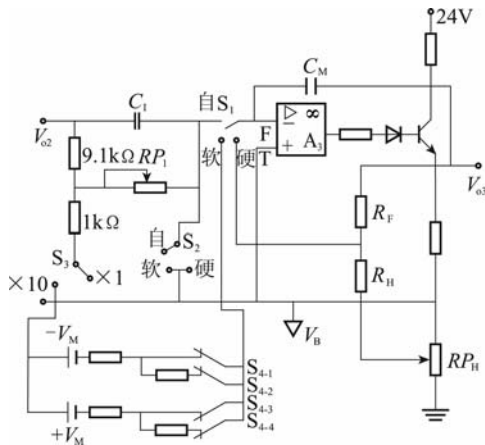


图 3.14 手动操作电路

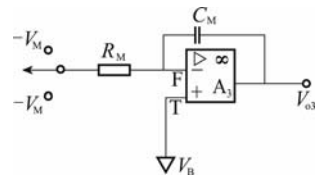


图 3.15 软手动电路

当按下 $S_{4.1}$ 或 $S_{4.2}$ 时， $V_R < 0$ (相对于 V_B 而言)， V_{03} 则积分上升；当按下 $S_{4.3}$ 或 $S_{4.4}$ 时， $V_R > 0$ (相对于 V_B 而言)， V_{03} 则积分下降。

$S_{4.1} \sim S_{4.4}$ ：四个开关可分别进行快、慢两种积分上升或下降的手动操作。 $S_{4.1}$ 、 $S_{4.3}$ 为快速； $S_{4.2}$ 、 $S_{4.4}$ 为慢速。

当 $S_{4.1} \sim S_{4.4}$ 都处在断开位置时，即为保持电路，此时输入端浮空， $V_F = V_T = 0V$ (相对于 V_B 而言)，若运算放大器为理想放大器，且 C_M 无漏电阻时， C_M 上的电压无放电回路而长

时间保持不变。即 $V_{o3}=V_{CM}$ ，调节器输出也就能保持长时间不变。

必须指出，上述软手动“保持”输出不变的情况是有条件的和暂时的，即运算放大器不可能是理想的，电容 C_M 的漏电阻也不可能是无穷大，因此放大器 A_3 的输出电压总要随时间慢慢变化。读者可自行分析。

2. 硬手动操作电路

当开关 S_1 、 S_2 置于“硬手动”位置时，其等效电路图如图 3.16 所示。这时，电阻 R_F 被接入反馈电路中，与电容 C_M 并联，硬手动操作电位器 RP_H 上的电压 V_H 经电阻 R_H 输入放大器。这样，放大器成为时间常数 $T=R_F C_M$ 的惯性环节，即

$$\frac{V_{o3}(s)}{V_H(s)} = -\frac{R_F}{R_H} \cdot \frac{1}{1 + R_F C_M s} \quad (3-36)$$

由于 $R_F C_M = 30 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6} = 0.3s$ ，可忽略不计，若令 $R_F = R_H = 30k\Omega$ ，这样硬手动电路可看作传递函数为 1 的比例电路，调节器的输出完全由硬手动操作电位器 RP_H 的位置确定。它与软手动状态不同，只要不移动 RP_H 的位置，输出便永远地保持确定的数值。

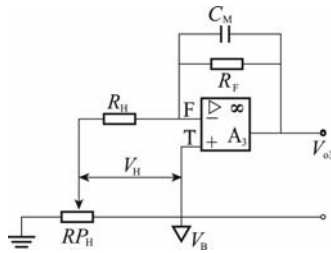


图 3.16 硬手动操作等效电路

最后再分析一下软手动与硬手动之间的切换过程。当调节器由软手动切向硬手动时，其输出值将由原来的某一数值很快变到硬手动电位器 RP_H 所确定的数值，要使这一切换是无扰的话，必须在切换前先调整手动电位器 RP_H ，使其与当时的调节器输出值一致，也就是说，必须先平衡再切换，方可保证无扰动；当调节器由硬手动切向软手动时，由于切换后放大器呈保持状态，即保持切换前的硬手动输出值，故切换时无需平衡即可做到无扰动。

综上所述，DDZ—III型调节器的切换过程可描述如下：

自动(无平衡无扰动)软手动(需平衡才能无扰动)硬手动(无平衡无扰动)软手动(无平衡无扰动)自动。

3.3.7 指示电路

输入信号指示电路与给定信号指示电路完全一样，下面仅以输入信号指示电路为例进行讨论。

调节器使用双针电表，全量程地指示测量值与给定值。偏差的大小由两个指针间的距离反映出来，当两针重合时，偏差为零。

图 3.17 所示为全刻度指示电路，它是一个具有电平移动的差动输入式比例运算放大器，将以零伏为基准的 DC 1V~5V 输入信号转换为以 V_B 为基准的 DC 1mA~5mA 电流信号。若放大器是理想的，其传递关系为

$$V_T = \frac{1}{2}(V_B + V_i)$$

$$V_F = \frac{1}{2}(V_B + V_o)$$
(3-37)

由于 $V_T = V_F$ ，可得 $V_o = V_i$

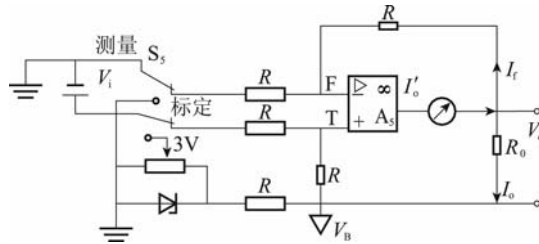


图 3.17 全刻度指示电路

反馈支路电流 I_f 很小，可以忽略，故流过表头的电流

$$I'_o \approx I_o = \frac{V_o}{R_o} = \frac{V_i}{R_o}$$

若 $R_o = 1k\Omega$ ，则 $V_i = 1V \sim 5V$ 时， I'_o 即为 $1mA \sim 5mA$ 。

为了便于对指示电路的工作进行校验，图 3.17 中设有测量—标定切换开关 S_5 ，当 S_5 置于标定位置时，就有 3V 的电压输入指示电路，这时流过表头的电流应为 3mA。电表指针应指在 50% 的位置上。如果不准，应调整仪表的机械零点，或检查其他故障。

至此，图 3.2 所示的调节器各部分工作原理已基本介绍完毕。最后说明一下该图中正反作用开关 S_7 的作用，当 S_7 置于正作用时，随着测量信号的增加，调节器的输出也增加；当 S_7 置于反作用时，随着测量信号的增加，调节器的输出减少。正反作用的选择，由执行器和调节对象的特性决定。

本章小结

调节器是自动化仪表控制系统的核心装置，传统的调节器为模拟调节器，其理论也是古典控制理论。本章主要介绍 PID 调节器的阶跃响应和频率特性，详细地分析了 PID 调节器实例线路，得出了 PID 调节器的整机传递函数。要求掌握电路结构及电路原理。

思考题与习题

- 3-1 过程控制仪表有哪些仪表？它又可分为哪几种类型？气动单元组合仪表与电动单元组合仪表各有何优缺点？它们各单元之间的标准统一信号又是如何规定的？
- 3-2 试简述 DDZ—III 全刻度指示调节器的组成、工作状态以各开关的作用。
- 3-3 DDZ—III 型全刻度指示调节器的输入电路有何功能？
- 3-4 什么是调节器的调节规律？PID 调节器的数学表达式是怎样的？比例、积分、微

分三种调节规律各有什么特性？为什么工程上不用数学上理想的微分算式？

3-5 试给出 DDZ—III型调节器的基本组成结构及其主要运算电路。

3-6 PID 调节器中，比例度 P 、积分时间常数 T_i 、微分时间常数 T_d 、积分增益 K_i 、微分增益 K_d 分别具有什么含义？在调节器动作过程中分别产生什么影响？若令 T_i 取 ∞ ， T_d 取 0，分别代表调节器处于什么状态？

3-7 什么叫无平衡无扰动切换？全刻度指示调节器是怎样保证由自动到软手动、由软手动到硬手动、再由硬手动到软手动、由软手动到自动之间的无扰切换的？

3-8 在 DDZ—III型调节器中，为了在软手动状态下具有良好的保持特性，在设计 PID 电路时要注意采取了哪些措施？

3-9 什么是调节器的正反作用？调节器的输入电路为什么要采取差动输入方式？输出电路是怎样将输出电压转换成 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 电流的？

第 4 章 数字控制仪表

现代化的工业过程正朝着大型化、综合化、连续化的方向发展，当今自动控制的范畴不断被扩展，工业生产对生态环境的影响、生产的安全性和可靠性、生产企业的经济效益等要素都逐渐被纳入到自动控制的范围内来。因此，仅用常规仪表已不能满足现代化企业的控制要求。而数字计算机具有快速的计算能力、长期和大容量的记忆能力、严密的逻辑判断能力、丰富的人机对话方式，不仅能实现高级复杂的控制算法，获得更快更准的控制效果，还能把生产控制与生产管理有机结合起来，从而实现对整个企业、工厂的自动化控制和管理。因此以计算机为核心的数字控制系统成为社会发展的需要。

微电子技术和计算机技术和通信技术的迅猛发展，为数字控制系统的发展和应用创造了物质条件。20 世纪 70 年代以后，计算机的功能和可靠性已经完全可以满足实际需求，数字控制系统的广泛应用成为可能。

强烈的实际需要和坚实的物质基础相结合，使数字化控制成为迅速发展和广泛使用的新热点。现在，在国防、工业生产、交通管理等社会生活的各个方面，都可以看到数字控制系统的身影。

作为数字控制系统的重要组成部分，数字控制仪表也得到了迅速发展。根据控制系统和被控对象的特殊要求，数字控制仪表正在向着专用化、小型化、灵巧化的方向发展，逐渐形成了若干主流机型。它不仅仅是常规模拟仪表的简单数字化，而是根据要求重新设计和制造的新兴仪表，具有和常规仪表区别很大的新特性，值得相关人员去深入探讨和细心研究。本章主要介绍以可编程序逻辑控制器为代表的数字控制仪表的特点和功能。

4.1 数字控制仪表

4.1.1 数字控制技术的发展

从 20 世纪 50 年代末期计算机诞生以来，其突飞猛进的发展势头给科学技术和人类生活带来了翻天覆地的变化，计算机技术已经深入到了当今社会生活的各个层面。自动化技术是与计算机技术结合较早的学科之一，数字控制技术就是这两个学科相结合的产物，它已经成为当今工业自动化的重要支柱。随着计算机功能的不断增强和对数字控制技术研究的不断深化，数字控制系统得到了飞速发展和广泛应用。从简单的小型工业装置到复杂的大型工业生产过程，都希望利用计算机进行自动控制和管理。数字控制系统已经渗透到各个工业部门和生产过程，使工业自动化技术发展到一个崭新的阶段。随着信息管理系统、经营管理系统逐步溶入控制系统，自动控制的概念范畴也在不断扩大，正在从传统的对生产过程参数的控制扩展到对信息资源、人力资源、物质资源的全方位控制和管理方面，可以说，控制系统的发展正面临着巨大的机遇，它将成为自动控制发展历程上一个新的里程碑。

数字控制是自动控制的一个分支，其发展历程与计算机技术密切相关。数字控制技术及系统的发展大体上经历了以下几个阶段：

1) 试验阶段

1965 年以前是数字控制系统的试验阶段。1946 年，世界上第一台电子计算机问世，经过十几年的探讨，在 1958 年，计算机第一次被应用在工业生产现场，那是美国 Louisiana 公司的一个安全监视系统。第二年，美国 Texaco 公司安装了第一个计算机闭环控制系统。1960 年，美国 Monsanto 公司的数字监督控制系统投入运行。1962 年，美国 Monsanto 公司开始使用直接数字控制系统。当时的计算机被认为具有非常强大的功能和非常昂贵的价格，为了使计算机控制系统能与常见仪表控制系统竞争，人们试图用一台计算机来取代最大数量的常规调节器，实现系统的集中检测、集中控制和集中管理，这就对计算机可靠性提出了很高的要求。但不幸的是，当时计算机技术还不成熟，硬件上全部采用电子管，可靠性差，软件功能弱，整机出错几率大，常常由于计算机故障或一个回路的故障，就要对全厂或整个装置停车抢修，使计算机控制系统的应用显得得不偿失，所以那时的计算机主要用于监视系统或监督指导系统，实际控制使用并不多见。

2) 实用化阶段

1965—1969 年是实用化阶段。这个阶段的计算机开始使用半导体技术与集成电路技术制造，出现了工业控制专用的小型计算机，解决了价格问题。但整机可靠性还不够高，特别是当所有的监视和控制任务都由一台计算机来完成时，必然造成危险集中。为了提高可靠性，常常需要另外设置一套备用常规控制系统或备用计算机，又在一定程度上造成投资过高、资源浪费，因而限制了其广泛应用。

3) 成熟阶段

20 世纪 70 年代以后，数字控制系统逐渐走向成熟。大规模集成电路技术的应用促使了微型计算机的出现，其运算速度快、可靠性高、价格便宜，从而开创了数字控制的新时代，从传统的集中控制系统革新为分散控制系统。几种成功的分散控制系统相继面世，使数字控制系统真正得以广泛使用，其中有代表性的是美国霍尼威尔公司的 TDC—2000 系统和日本横河公司的 CENTUM 系统等。20 世纪 80 年代超大规模集成电路技术的飞速发展，使计算机进一步向微型化、智能化方向发展。这个时期主要是对分散控制系统进行进一步的完善和提高，出现了只控制 1~2 个回路的数字调节器，系统的通信能力、显示能力、控制能力都已达到较高水平。80 年代后期，专家系统、预测控制、模糊控制、神经网络等智能控制技术的应用使控制系统能够将控制、管理和经营较好地融为一体，从而实现了自动控制系统的一次飞跃。

未来的计算机技术、通信技术必将有大幅度的提高，而融合了计算机技术、控制技术的新型数字控制系统也必然层出不穷，从而把自动化的水平提升到更高的层次。

4.1.2 数字控制系统的常用机型

在数字控制技术的发展过程中，为满足不同行业、不同设备、不同规模的需求，逐渐形成了几种典型的机型，成为现在数字控制系统的主力军，现就其结构原理、应用特点方面作一些简单介绍。

1. 数字调节器

数字调节器，又称可编程调节器或智能调节器，其主要组成部件有微处理器(MPU)单元、过程 I/O 单元、通信单元、面板单元、硬手操单元和编程单元等。作为一种仪表化的超小型控制计算机，数字调节器采用了传统仪表面板的人机界面，使现场人员无需接受大量培训接受就可以顺利操作；又能够发挥计算机在运算速度、处理能力方面的优势，采用丰富的算法灵活地构成各种过程控制系统。

与一般的计算机不同的是，使用数字调节器设计控制系统可以无需考虑常见的硬件接口问题、信号传输和转换问题，软件调试问题，使系统设计过程得到很大的简化。这得益于数字调节器在硬件上采用了标准过程输入输出通道、在信号上采用了标准 DDZ—III 型信号、在软件上采用了面向问题的组态语言。这种组态语言为用户提供了几十种常用的运算函数和控制模块。用户只需要通过对运算函数和控制模块的调用就能组织成各种复杂的控制过程，诸如 PID、串级、比值、前馈、选择、非线性、程序控制等。这种系统组态方式简单易学、便于调试，极大地提高了系统设计的效率和可靠性。

数字调节器通常还具有把关器电路、断电保护功能和自诊断功能，使系统的可靠性大为提高。它的通信单元能够方便地通过 RS232 标准总线或以太网与上位机通信，组成多级计算机控制系统，实现各种高级控制和管理。因此，数字调节器既可以作为分散控制系统中的基本控制器使用，还能在一些特殊场合独立组成复杂控制系统，完成 1~4 个回路的控制任务，所以数字调节器在工业过程控制中得以广泛的应用。

2. 可编程控制器(PLC)

如果说数字调节器是计算机内核与传统操作面板相结合的产物的话，那么可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)就是计算机技术和继电逻辑控制相结合的产物。可编程逻辑控制器常被简称为可编程控制器(Programmable Controller, PC)，是一种工业控制专用计算机。

国际电工委员会(IEC)对 PLC 的定义是，PLC 是一种数字运算操作的电子系统，专为工业环境下应用而设计。PLC 的典型结构为模块式结构，其基本组成包括：CPU 模块、数字量输入输出模块、模拟量输入输出模块、通信模块等。PLC 的性能主要取决于其 CPU 和存储器。PLC 的 CPU 大多采用通用处理器，有较强的位处理能力。存储器分为程序存储器和数据存储器。程序存储器用来存放用户控制程序，一般是可擦除只读存储器；数据存储器用来存放程序运行过程中产生中间结果或过程输入输出通道对应的变量值，采用随机存储器。PLC 的工作过程是一个不断循环的过程，每一个循环称为一个扫描周期。在一个扫描周期中，PLC 顺序完成过程通道输入、用户程序执行、过程通道输出等任务，以此控制各种类型的机械设备动作或生产过程参数。

可编程控制器自身及其附属设备都按照满足工业控制任务的宗旨来设计和生产，具有以下的特点：

- (1) 硬件组态完全根据控制任务确定，构成灵活，扩展方便；
- (2) 内部逻辑决定其特长在于开关量控制，但连续过程的 PID 控制功能也很强；

(3) 编程语言采用梯形图、功能图和语句表等多种形式，无论是电气工程师还是软件工程师都可以方便地进行软件组态，可以在线编程、在线调试；

(4) 强大的通信功能实现 PLC 之间、PLC 与上位机之间的快速数据交换, 从而组成复杂的控制系统, 实现生产过程的综合自动化;

(5) 能适应各种工作环境, 可靠性强, 平均无故障时间远高于其他机型。

PLC 的这些优点使其成为工业控制中使用最广、用量最大的机型。

3. 单片机

单片机的产生也得益于微电子技术与超大规模集成技术的发展, 它没有采用通用微处理器的结构, 而是将 CPU 和其他常用硬件全部结合到一个大规模集成电路芯片中, 比如存储器、串并行 I/O 接口、定时/计数器等, 构成了一个完整的具有相当功能的微控制器。根据对存储器编址方式的差别, 单片机可以分为两种类型: 一种是将程序存储器和数据存储器分开, 分别独立编址的 Harvard 结构, 如 MCS51 系列; 另一种是对两者不作上区分, 统一编址的 Princeton 结构, 如 MCS98 系列。单片机的特点是体积小、功耗低、性能可靠、价格低廉、扩展容易、使用方便、容易内嵌, 特别是具有强大的面向控制的能力。但由于单片机自身专用性强、内存容量小、人机接口功能不强, 因此, 单片机本身不具备自开发功能, 必须借助于仿真器或开发装置, 才能进行软硬件的开发与调试。

与 PLC 相比, 单片机的编程语言比较单一, 主要是使用汇编语言, 这就对开发人员的素质有较高的要求, 需要较深的计算机软件和硬件知识, 而且汇编语言的可读性与可移植性都相对较差。不过这种局面已经得以改善, 市场上已经出现了面向单片机结构的高级语言, 如可以直接写入单片机的 C 语言。

单片机的字长一般在 8 位、16 位和 32 位, 目前主流单片机以 16 位和 32 位居多。单片机的突出特点使其在工业控制、智能仪表、家用电器、机器人等方面得到了极为广泛的应用。

4. 总线式工控机

与常用的 PC 相比, 以上三种机型存在的共同缺点就是显示功能都很弱。特别是 PLC, 一般没有现成的显示模块可以选用, 而单片机和数字调节器的显示工作主要依靠数码管或液晶来完成, 这就给操作人员及时准确地了解现场工作状况带来了不小的困难。总线式工控机不仅能够完成控制任务, 而且具有前三种机型无法比拟的显示功能方面的优势, 所以在一些需要集中显示的场合, 常使用总线式工控机作为控制器, 充分利用它的显示功能。

所谓总线是一组具有明确功能定义的信号线的集合, 是一种传送标准信息的公共通道。它定义了固定格式的引线数量和引线的信号特性、电气特性和机械特性, 此格式往往被称为标准。按照统一的总线标准, 计算机厂商可以设计制造出不同功能的模板, 而系统设计人员则根据不同的生产过程和控制要求, 选用具有符合自己要求的功能模板组合成所需的数字控制系统。

这种采用总线技术生产的计算机系统就称是总线式工控机, 它是由一块无源底板上和数量不等各种功能模板构成。这些功能模板全部插接在无源底板的插槽中, 模板种类包括 CPU 模板、RAM/ROM 模板、人机接口板等计算机基本部件, A/D、D/A、DI、DO、电动机驱动、WMA 驱动等工业控制用模板, 还有各类通信模板。模板之间通过总线相连, 在 CPU 的控制下通过总线直接控制现场生产。

总线式工控机的开放性系统结构既方便计算机厂商的生产, 又方便用户的选择, 从而

大大提高了系统的通用性、灵活性和扩展性。用于构成系统的模板都采用了小型化结构和单一性功能，前者使模板机械强度好，抗振动能力强；后者则有利于对系统故障的诊断与维修。在模板的电路设计上采用由总线缓冲模块到功能模块再到 I/O 驱动模块的流程，使信号流向基本为直线，这就大大提高了系统的可靠性和可维护性。另外还采取了许多措施进一步提高系统的可靠性，如密封机箱正压送风、使用工业电源、设计把关器电路等。这些措施拓宽了工控机的使用范围，使工控机能够在工业现场的恶劣环境中稳定地工作。

根据引线的定义方式，总线类型分为 STD 总线、多总线、PC 总线等，也对应生产了各种类型的工控机。PC 总线工控机的软硬件结构与一般 PC 完全相同，能够运行流行的个人操作系统或网络操作系统和其他各种控制软件，这些独特优势使 PC 总线工控机得到了欢迎，使用范围也在不断扩大。

4.1.3 数字控制系统的分类

数字控制系统的分类方法很多，例如从被控参数类型角度可分为流量控制系统、液位控制系统等，从被控变量的变化情况可分为定值控制系统、随动控制系统。这里所讨论的数字控制系统的分类主要是从系统对被控对象的控制方式出发的。

1. 数据采集系统(DAS)

数据采集系统是应用最早、也是最基本的一种数字控制系统。在数据采集系统中，计算机只起对过程数据的集中采样和集中显示的作用，真正的控制任务并不是由计算机完成的。这主要是由于当时的计算机稳定性和可靠性都较差，还达不到生产的要求。生产过程中的数据经 A/D 通道或 DI 通道采集后送入计算机，由计算机对这些数据进行分析处理，再按要求进行屏幕显示、制表打印和越限报警，如图 4.1 所示。该系统可以代替大量的常规显示、记录和报警仪表，对整个生产过程进行集中监视。虽然没有将控制任务纳入到计算机的工作任务中来，该系统对于指导生产以及建立或改善生产过程的数学模型还是有重要作用的，特别值得一提的是它为计算机真正介入自动控制领域奠定了良好的基础，使人们看到了计算机在自动控制领域的良好发展前景。

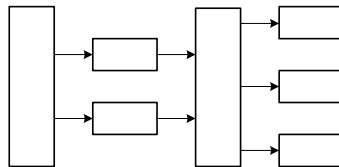


图 4.1 数据采集系统

2. 指导控制系统(OGC)

指导控制系统是基于数据采集系统的，采用开环控制方式数字控制系统。系统根据采集到的现场数据、工艺要求和控制算法计算出相应的控制量，这个控制量并不直接通过输出通道控制生产过程，而是显示或打印出来，由现场操作人员按照得出的控制量去改变各控制器的给定值或直接操作执行器，以此来完成控制，如图 4.2 所示。可见，计算机系统

此时起到的是对操作人员的指导作用，显然，这是计算机控制的一种离线形式。操作指导控制系统的优点是结构简单，控制灵活，同时也避免了因计算机可靠性差给生产带来的潜在危险。它的缺点是控制过程必须由人工完成，控制速度受到限制，而且不能同时控制多个回路。

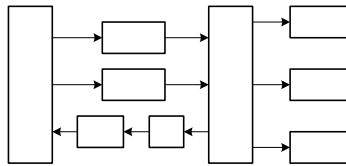


图 4.2 指导控制系统

指导控制系统现在仍然有它的使用价值，在数字控制系统投运的初期或试验新的数学模型、调试新的控制程序等场合常常要用到该系统。

3. 直接数字控制系统(DDC)

直接数字控制系统是用计算机完成对多个被控参数的数据采集后再按给定的控制算法进行实时决策，并通过过程输出通道发出控制信号，实现对生产过程的实时闭环控制，如图 4.3 所示。为了充分发挥计算机的能力，一台计算机往往要控制多个回路。直接数字控制系统中不仅完全取代了多个模拟调节器，而且只需通过改变控制程序就能有效地实现各种复杂控制策略，因此直接数字控制系统成为最普遍的一种数字控制系统，但是它也存在危险集中的缺点。

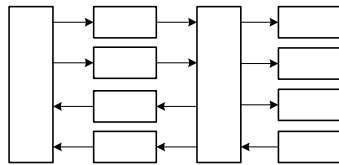
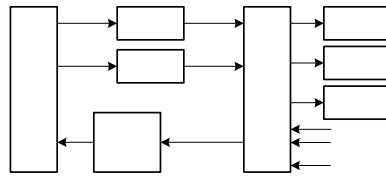


图 4.3 直接数字控制系统

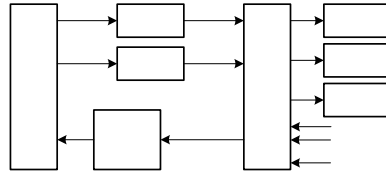
4. 监督数字控制系统(SCC)

监督数字控制系统是 OGC 系统与常规仪表控制系统或 DDC 系统综合而成的两级系统，如图 4.4 所示。监督计算机作为上位机，按照生产过程的数学模型，根据原始工艺数据与实时采集的现场数据计算出最佳的控制回路设定值，送给作为下位机的模拟调节器或 DDC 计算机，由下位机直接控制生产过程。这样，系统就可以根据生产工况的变化，不断地修正给定值，使生产过程始终处于最优工况。显然，这是在线优化控制的一种形式。

监督数字控制系统的可靠性比直接数字控制系统也有一定的提高。当上位机出现故障时不会影响到下位机的操作，系统的基本控制任务不会受到任何影响。由于上位机承担着优化控制与高级管理任务，需要实时处理的数据量比较大，所以应选用数据处理能力强、存储容量大的高配置计算机；下位机直接参与生产过程的控制，对它的要求是稳定可靠、实时性好，因此要选择抗干扰能力强、稳定性好的机型。



(a) SCC+模拟调节器控制



(b) SCC+DDC 控制

图 4.4 监督计算机控制系统

5. 分散控制系统(DCS)

随着控制规模的扩大，许多管理信息也逐渐融入到控制系统中来，一台计算机不可能完成所有的控制和管理任务。于是，人们设计出多台计算机联网的分散控制系统(DCS)，如图 4.5 所示。分散控制系统采用分散控制、集中操作、分级管理和综合协调的设计原则，从下而上可以分为若干级，如现场控制级、监控级、管理级等，每一级都有各自的控制和管理权限，各级之间任务明确，搭配合理，能够有效地发挥控制系统的作用，成为目前数字控制系统的主流系统。

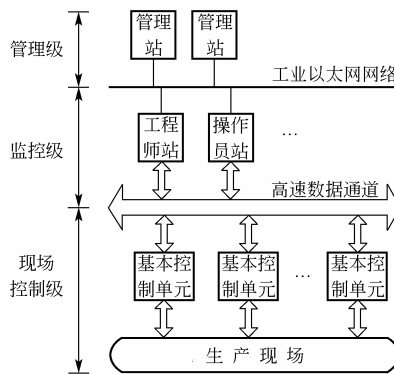


图 4.5 分散控制系统(DCS)

4.2 数字控制算法

常规模拟控制系统的设计已经形成了一整套成熟的设计方法，并在控制领域为人们所熟知和掌握。因此，进行数字控制算法的设计时，仍然沿用模拟系统的设计方法，设计出模拟系统的调节器 $D(s)$ ，再将 $D(s)$ 所描述的连续调节规律进行数字化，转变为数字调节器

能够实现的数字调节规律 $D(z)$ ，这种方法称为模拟化设计方法。而数字 PID 控制算法正是利用上述方法求得的。不过，用数字调节器实现 PID 控制，不能简单地把 PID 控制规律数字化，而需要进一步结合数字调节器的强大功能，使 PID 控制更加灵活多样，以满足生产过程中提出的更为复杂灵活的要求。

本节主要讨论数字 PID 控制算法的设计、改进及其他相关问题。

4.2.1 基本数字 PID 控制算法

在数字控制系统中，受到广泛应用的基本数字 PID 控制算法有两种：理想 PID 控制算法和实际 PID 控制算法。在这两种 PID 控制算法的输出量中，比例项及积分项的运算都是相同的，两者的差别主要体现在微分项的运算。

1. 理想 PID 控制算法

在模拟控制系统中，PID 控制系统框图如图 4.6 所示，由图容易得到控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4-1)$$

式中， K_p ——比例增益， K_p 与比例带 σ 成倒数关系，即 $K_p = \frac{1}{\sigma}$ ；

$u(t)$ ——控制量；

$e(t)$ ——系统的控制偏差；

T_i ——积分时间；

T_D ——微分时间。

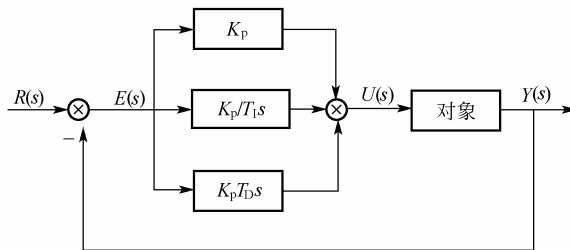


图 4.6 PID 控制系统框图

数字式 PID 控制算法是模拟控制系统 PID 控制规律的数字化形式。为了用程序实现 PID 控制规律，必须将微分方程式(4-1)离散化为差分方程，故需要作如下近似：

$$t = kT \quad (4-2)$$

$$\int e(t) dt \approx \sum_{j=0}^k Te(j) \quad (4-3)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (4-4)$$

式中， T ——采样周期。

为使算式简便，把 $e(kT)$ 记为 $e(k)$ 。

根据输出量表达方式的不同，理想 PID 控制算法的表达式可以分为位置式、增量式和

速度式三种。

1) 位置式

在数字控制系统中, 偏差经 PID 运算后, 如果调节器的输出表明了调节阀开度(位置)的大小, 则此时的数字 PID 算式称为位置式算式。

将式(4-2)、(4-3)和(4-4)代入式(4-1), 可得差分方程

$$u(k) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \quad (4-5)$$

或

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (4-6)$$

式中 $u(k)$ —— $t = kT$ 时的控制量;

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \text{ —— 积分系数;}$$

$$K_D = \frac{K_p T_D}{T} \text{ —— 微分系数。}$$

式(4-5)或式(4-6)就是理想 PID 控制的位置式算式, 它的输出 $u(k)$ 同调节阀的开度(位置)是一一对应的。

2) 增量式

在数字控制系统中, 偏差经 PID 运算后, 如果调节器的输出表明了调节阀开度(位置)的改变量, 则此时的数字 PID 控制算式称为增量式算式, 即

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (4-7)$$

式(4-7)表明增量式算式的输出为相邻两次采样时刻所计算的位置值之差。

由式(4-5)可知

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (4-8)$$

将式(4-5)和式(4-8)代入式(4-7), 得

$$\Delta u(k) = K_p \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad (4-9)$$

或

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4-10)$$

式(4-9)或式(4-10)就是理想 PID 控制算法的增量式算式, 其输出 $\Delta u(k)$ 表示阀门开度的增量。

由于增量式算法输出的是增量, 所以在系统手自动切换时的冲击较小。另外, 即使偏差长期存在使执行器达到极限位置, 但只要偏差换向, 输出增量 $\Delta u(k)$ 也立即换向, 使输出脱离饱和状态, 减小了发生积分饱和的危险。增量式算法的另外一个优点是计算机误动作对系统产生的影响较小。因为增量式算法具有这些优点, 所以它在数字控制系统中得到了最广泛的利用。

3) 速度式

在数字控制系统中, 偏差经 PID 运算后, 如果调节器输出表明的是直流伺服电机的转动速度, 则此时的数字 PID 算式称为速度式算式。

将式(4-9)两边同除以采样周期 T , 得

$$v(k) = \frac{\Delta u(k)}{T} = K_p \left\{ \frac{1}{T} [e(k) - e(k-1)] + \frac{1}{T_1} e(k) + \frac{T_D}{T^2} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad (4-11)$$

式(4-11)就是理想 PID 控制的速度式算式, 其输出 $v(k)$ 表示直流伺服电机的转速。

2. 实际 PID 控制算法

在实际数字控制系统中, 其输入通道极有可能存在高频干扰信号, 所以绝大多数数字控制系统的输入通道都设置有低通滤波器(通常是一阶惯性环节)来将高频干扰信号滤掉。

一阶惯性环节的传递函数是

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{T_2 s + 1}{\gamma T_2 s + 1} K_1 \left(1 + \frac{1}{T_1 s}\right) \quad (4-12)$$

因此低通滤波器和理想 PID 算式相结合后的传递函数为

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{T_F s + 1} \left(1 + \frac{1}{T_1 s} + T_D s\right)$$

设 $T_F = \gamma T_2$, 得到实际 PID 算式为 $\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_1 (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_1 s (\gamma T_2 s + 1)}$, 或表示为

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{T_2 s + 1}{\gamma T_2 s + 1} K_1 \left(1 + \frac{1}{T_1 s}\right) \quad (4-13)$$

式中, $U(s)$ ——输出(至调节阀);

$E(s)$ ——偏差;

T_1 ——实际积分时间;

T_2 ——实际微分时间;

γ ——微分放大系数;

K_1 ——放大倍数。

其中: $K_p = K_1 \frac{T_1 + T_2}{T_1}$, $T_1 = T_1 + T_2$, $T_D = \frac{T_1 T_2}{T_1}$ 。式(4-13)可用图 4.7 的框图来表示。

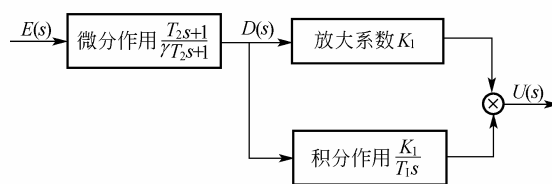


图 4.7 实际 PID 算式框图

先分别推导出每个方框输出函数的差分算式, 然后按图 4.6 进行叠加, 从而得到实际 PID 的差分算式。

微分作用框图的传递函数为

$$\frac{D(s)}{E(s)} = \frac{T_2 s + 1}{\gamma T_2 s + 1} \quad (4-14)$$

式中, $D(s)$ ——微分作用框图的输出。

将式(4-14)转换为差分方程

$$\gamma T_2 \frac{dD}{dt} + D = T_2 \frac{de}{dt} + e \quad (4-15)$$

$$\gamma T_2 \frac{D(k) - D(k-1)}{T} + D(k) = T_2 \frac{e(k) - e(k-1)}{T} + e(k)$$

$$(\gamma T_2 + T)D(k) = \gamma T_2 D(k-1) + T_2 [e(k) - e(k-1)] + T e(k)$$

$$D(k) = \frac{\gamma T_2}{\gamma T_2 + T} D(k-1) + \frac{T_2}{\gamma T_2 + T} [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{\gamma T_2 + T} e(k) \quad (4-16)$$

式(4-16)还可以写成如下的形式:

$$D(k) = \frac{\gamma T_2}{\gamma T_2 + T} D(k-1) + \frac{T_2 + T}{\gamma T_2 + T} e(k) - \frac{T_2}{\gamma T_2 + T} e(k-1) \quad (4-17)$$

或

$$D(k) = \Phi_1(k-1) + \Phi_2 e(k) + \Phi_3 e(k-1) \quad (4-18)$$

式中, $\Phi_1 = \frac{\gamma T_2}{\gamma T_2 + T}$, $\Phi_2 = \frac{T_2 + T}{\gamma T_2 + T}$, $\Phi_3 = \frac{T_2}{\gamma T_2 + T}$ 。

积分作用方框的传递函数为

$$\frac{U_2(S)}{D(S)} = \frac{K_1}{T_1 s} \quad (4-19)$$

将式(4-19)写成差分形式为

$$\frac{u_2(k) - u_2(k-1)}{T} = \frac{K_1}{T_1} D(k)$$

$$u_2(k) = u_2(k-1) + K_1 \left(\frac{T}{T_1} \right) D(k) \quad (4-20)$$

放大系数方框的表达式很简单, 直接写出:

$$u_1(k) = K_1 D(k) \quad (4-21)$$

实际 PID 控制算法的表达式也有三种形式, 即位置式、增量式和速度式。

1) 位置式

将式(4-17)代入式(4-20)和(4-21)并相加, 即得到位置式的算式(见图 4.7)

$$\begin{aligned} u(k) &= u_1(k) + u_2(k) = K_1 D(k) + u_2(k-1) + K_1 \frac{T}{T_1} D(k) \\ &= u_2(k-1) + K_1 \left(1 + \frac{T}{T_1} \right) D(k) \\ &= u_2(k-1) + K_1 \left(1 + \frac{T}{T_1} \right) \left[\frac{\gamma T_2}{\gamma T_2 + T} D(k-1) + \frac{T_2 + T}{\gamma T_2 + T} e(k) - \frac{T_2}{\gamma T_2 + T} e(k-1) \right] \end{aligned} \quad (4-22)$$

理想 PID 数字控制算法和实际 PID 数字控制算法在阶跃输入作用下的阶跃响应分别如图 4.8 和 4.9 所示，比较这两种 PID 数字控制算法的阶跃响应，可以看出：

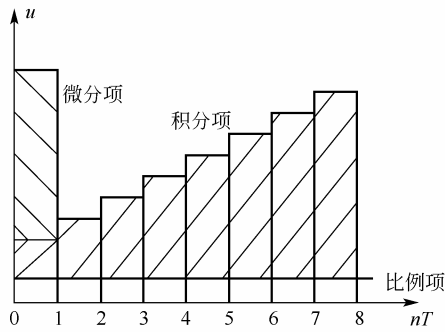


图 4.8 理想 PID 数字算法的阶跃响应

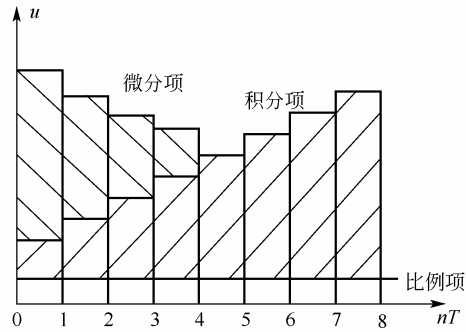


图 4.9 实际 PID 数字算法的阶跃响应

(1) 理想 PID 数字控制算法的控制品质较差。第一个原因是因为微分作用仅限于第一个采样周期有一个大幅输出，而一般工业执行机构无法在较短的时间内跟踪较大的微分作用输出；第二个原因在于理想的微分作用容易引进高频干扰。

(2) 实际 PID 数字控制算法的控制品质较好。其原因是克服了理想 PID 的弱点，微分作用能持续多个采样周期，使得执行机构能够比较好地跟踪微分作用输出；同时实际 PID 算法式中的一阶惯性环节具有数字滤波的能力，因此，能克服高频干扰信号。

2) 增量式

与理想 PID 相类似，增量式由两次位置式输出相减得 $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ ，即

$$\Delta u(k) = \Delta u_2(k-1) + K_1(1 + \frac{T}{T_1})[\frac{\gamma T_2}{\gamma T_2 + T} \Delta D(k-1) + \frac{T_2 + T}{\gamma T_2 + T} \Delta e(k) - \frac{T_2}{\gamma T_2 + T} \Delta e(k-1)] \quad (4-23)$$

式中， $\Delta u_2(k-1) = u_2(k-1) - u_2(k-2)$ ；

$\Delta D(k-1) = D(k-1) - D(k-2)$ ；

$\Delta e(k-1) = e(k-1) - e(k-2)$ 。

3) 速度式

速度式输出由增量式输出除以采样周期得

$$v(k) = \frac{\Delta u(k)}{T} = \frac{1}{T} \{ \Delta u_2(k-1) + k_1(1 + \frac{T}{T_1})[\frac{\gamma T_2}{\gamma T_2 + T} \Delta D(k-1) + \frac{T_2 + T}{\gamma T_2 + T} \Delta e(k) - \frac{T_2}{\gamma T_2 + T} \Delta e(k-1)] \} \quad (4-24)$$

4.2.2 改进型数字 PID 控制算法

在实际使用中，基本 PID 控制算法还存在着某些缺陷，使其使用范围受到很大的限制。所以必须在基本 PID 控制算法的基础上进行一些变换，使它能满足实际的控制要求。

1. 积分分离 PID 控制算法

基本 PID 控制算法的一个重要缺陷就是积分饱和问题。由数字化的积分运算规律可知，积分运算其实就是对系统偏差的不断累加，积分器的积分值代表着系统偏差对时间的积累效应。由于数字输出接口(D/A 转换器)的字长是有限的，其输出量的最大值是固定的，如果某

些因素使系统的偏差较大且短时间内无法消除，那么积分环节就会努力去消除偏差，进行长时间的运算，经过若干个采样周期后，其计算结果就会超过数字输出接口所能表示的最大值，从而使调节器从线性工作区进饱和区。进入饱和区以后，调节器便失去了调节能力，系统在调节器饱和输出值的作用下，以最大的加速度运动，一直到系统出现较大幅度的并且较长时间的超调以后，在较大的反向偏差作用下，才能将积分环节的输出从饱和区拉回到线性区，这就是积分饱和问题。积分饱和现象使系统长时间不受控制，而且超调量较大，其危害是显而易见的，而且被控对象的惯性越大，这种积分饱和现象就越严重。为了避免出现积分饱和，使数字调节器尽可能工作在线性区，应该采用积分分离办法，具体思路是：在系统的给定值附近划出一个区域，其宽度为积分作用投入或切除的切换点，如图 4.10 所示。

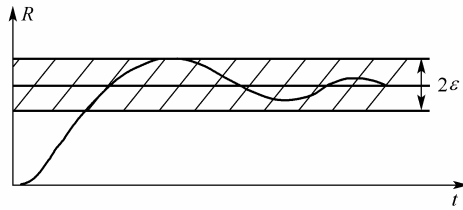


图 4.10 积分分离 PID 切换原理图

当系统的偏差较大时，暂时切除积分作用；当系统的输出接近给定值(进入到 $\pm\epsilon$ 区内)时，再投入积分作用，即

$$u(k) = \begin{cases} K_p e(k) + K_D [e(k) - e(k-1)] & |e(k)| \geq \epsilon \\ K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] & |e(k)| < \epsilon \end{cases} \quad (4-25)$$

从式(4-25)可知，积分分离算法是将系统的偏差 $e(k)$ 的绝对值与 ϵ 进行比较，然后根据比较结果作出是否使用积分调节的决定。由于 ϵ 与系统其他参数之间没有固定的函数关系，所以 ϵ 的值要在调试过程中，根据系统的实际情况而灵活确定。由式(4-25)可见，如果 ϵ 的值选得太大，调节器将无法完成积分分离的任务；如果 ϵ 的值选得太小，调节器将无法正常调用积分作用。由此可见， ϵ 的大小将决定积分分离算法的使用质量，是一个必须严肃对待、认真调整的参数，切不可掉以轻心。

2. 变速积分 PID 控制算法

在一般的 PID 控制算法中，积分系数 K_I 是一个常数，所以在整个控制过程中积分增益不变。而比较理想的情况是：系统偏差大时积分作用减弱以至全无，而在小偏差时加强；否则，积分系数取大了容易产生超调甚至积分饱和，取小了又长时间不能消除静差。因此，根据系统的偏差大小改变积分的速度，这对于提高调节品质是有益的。根据这个思想设计出的变速积分 PID 算法有较好的控制品质，变速积分 PID 的积分项表达式为

$$u_1(k) = K_I \left\{ \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + f[e(k)]e(k) \right\} \quad (4-26)$$

从式(4-26)可见，变速积分 PID 就是设法改变积分项的累加速度，使其与偏差的大小相对应：偏差越大，积分越慢，反之则越快。积分项的累加速度是由 $e(k)$ 的函数 $f[e(k)]$ 决

定的, 当 $|e(k)|$ 增大时, $f[e(k)]$ 减小, 反之增大。

$f[e(k)]$ 与偏差当前值 $|e(k)|$ 的关系可以是线性的或高阶的, 例如可以是

$$f[e(k)] = \begin{cases} 1 & |e(k)| \leq B \\ \frac{A - |e(k)| + B}{A} & B < |e(k)| \leq A + B \\ 0 & |e(k)| > A + B \end{cases} \quad (4-27)$$

$f[e(k)]$ 值在 $0 \sim 1$ 区间内变化, 当偏差大于给定的分离区间 $A + B$ 时, $f[e(k)] = 0$, 暂停对当前 $e(k)$ 的累加; 当偏差 $|e(k)| < B$ 时, 累加全部当前 $e(k)$, 即积分项变成了 $u_1(k) = K_i \sum_{j=0}^k e(j)$, 与一般的PID相同, 积分动作达到全速; 而当偏差 $|e(k)|$ 在 B 与 $A + B$ 之间时, 则累加的是部分当前 $e(k)$, 其值在 $0 \sim |e(k)|$ 之间, 随 $|e(k)|$ 的大小而变化, 因此其积分速度在 $K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j)$ 和 $K_i \sum_{j=0}^k e(j)$ 之间。将式(4-26)代入位置型PID算式, 可得变速积分PID算式的完整形式:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \left\{ \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + f[e(k)]e(k) \right\} + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (4-28)$$

变速积分PID与普通PID相比, 具有如下一些优点:

- (1) 完全消除了积分饱和现象;
- (2) 明显减小超调, 容易使系统稳定;
- (3) 适应能力强, 适用于大多数控制过程;
- (4) 参数整定容易, 对 A 和 B 两参数的要求不是很精确。

变速积分与积分分离两种控制方法比较类似, 都可以达到避免积分饱和的目的。但二者调节方法有明显区别。积分分离对积分项采用的是所谓“开关”控制, 只能是全部使用或全部切除。而变速积分则是缓慢变化, 积分作用的强弱比较灵活。两者相比, 后者的思想更为先进, 控制品质也大为提高。

3. 混合过程PID控制算法

在许多化工生产过程中要将几种中间产品按一定比例混合, 再作为最终产品出厂, 如炼油厂生产的部分石油产品就是这样的。这种得到最终产品的混合过程一般是在输出管道中直接进行的, 如图4.11所示。这种生产过程的控制目标不在于各管道内瞬时流量的是否准确, 而在于混合物中各种组成成分的准确比例。因此, 在这种场合下不适用普通的PID控制算法, 否则将带来产品组分比例的失调。对这个问题分析如下: 假设扰动作用使某一组分的流量发生如图4.12(a)所示的变化。被控量一旦偏离设定值, 调节器便尽快使其瞬时流量向设定值靠近, 结果是使混合产品总量中该组分比例减小, 减小的数量是图中阴影部分面积所对应的数量。这样的过渡过程是不能满足要求的。

从上面的分析过程容易看出, 混合过程中看重的是使某一组分瞬时流量的正负偏差积分为零, 即过渡过程中的累积流量不变, 如图4.12(b)所示。当扰动作用使某组分的流量改变时, 调节器应使流量作补偿性的反向变化以补偿前一时刻改变的流量。

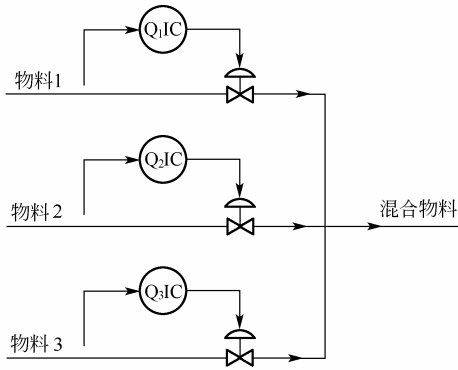


图 4.11 管道混合的例子

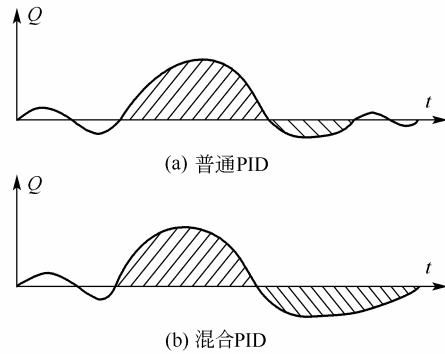


图 4.12 两种 PID 的比较

这种混合 PID 算法的框图如图 4.13 所示，这是在对偏差信号进行积分运算后再作 PID 运算，其表达式为式(4-29)所示，由此可推得混合 PID 算法的离散表达式为式(4-30)。

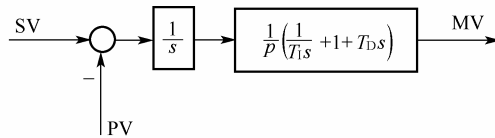


图 4.13 混合 PID 算法框图

由式(4-30)可知，当偏差的积分到零之前，调节器将不断动作，因而能保证总量中各组分比例的准确性。

$$M(s) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{s} \left(\frac{1}{T_I s} + 1 + T_D s \right) E(s) = \frac{T_D}{p} \left(\frac{1}{T_I T_D s^2} + \frac{1}{T_D s} + 1 \right) E(s) \quad (4-29)$$

$$M(k) = \frac{T_D}{p} \left(\frac{\Delta T^2}{T_I T_D} \sum_{i=1}^n e_i + \frac{\Delta T}{T_D} \sum_{i=1}^n e_i + e_n \right) \quad (4-30)$$

需要说明的是，混合 PID 算法中整定的参数 p ， T_I ， T_D 的作用与普通 PID 中的参数作用是不同的。由式(4-29)传递函数可知，这里 T_D/p 的作用是比例增益， T_D 是积分时间常数， $T_I T_D$ 为双重积分时间常数，在应用中应注意这些差别。特别需要注意的是，由于双重积分对系统稳定性有不利影响，调整这种调节器的参数时应选择 $T_I \gg T_D$ 。

4. 带死区的 PID 控制算法

有些控制过程并不要求被控量准确地控制在设定值上，允许有小范围波动，例如大多数的液位控制系统就是这样。此时，为避免调节阀频繁动作以及由此引起的系统振荡，就可以采用带死区的 PID 控制算法，其控制算式为

$$\Delta u(k) = \begin{cases} 0 & |e(k)| > B \\ \Delta u(k) & |e(k)| \leq B \end{cases} \quad (4-31)$$

其中， B ——系统死区宽度，应根据被控对象情况确定。如果 B 值太大，则系统会有很大的滞后，反应太慢，控制精度受影响；而 B 值太小又起不到应有的作用；当 $B=0$ 时，则

化为标准的 PID 算法。

式(4-31)表明, 当 $|e(k)| \leq B$ 时, 系统不进行控制, 输出增量为零。当 $|e(k)| > B$ 时, 系统进行 PID 运算, 调节过程与一般 PID 相同。

5. 微分先行 PID 控制算法

在一些随动控制系统中, 被控变量的设定值会有较大幅度的变化, 就会给系统带来较大的冲击, 使超调量过大、调节阀剧烈动作。这种情形下应该使用微分先行 PID 控制算法, 其框图如图 4.14 所示。微分先行 PID 控制算法中, 控制通道的正向通道中值包含了比例积分算法, 同时把微分算法提前到了反馈回路中, 其含义是只对被调量 $y(k)$ 采用微分, 不对偏差微分, 即对设定值 $r(k)$ 无微分作用。微分先行 PID 的算式为

$$\Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)] \quad (4-32)$$

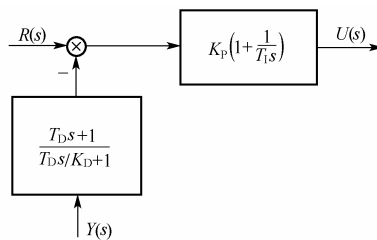


图 4.14 微分先行 PID 算法框图

4.2.3 字长与采样周期的选择

在数字控制系统中, 选定的控制算法是否能够充分地发挥作用, 不止取决于算法的优劣, 还与控制仪表性能、采样精度等其他因素有关。只有做到了各方面的相互协调, 才能真正保证系统的控制品质。

1. 数字控制系统控制精度的影响因素

影响数字控制系统的控制精度的因素主要有: 控制系统字长、系统采样周期、系统采用的控制策略和算法等。A/D 转换器件和微处理器的字长是由系统设计过程中的硬件环节决定的, 系统采样周期一般由被控参数的特性决定, 而对控制策略和算法的选择往往灵活性较大, 没有固定的选择方法。所以在讨论数字控制系统的控制精度时, 一般仅限于对系统字长和采样周期的讨论。

2. 数字控制系统字长的选择

衡量对计算机系统的性能时, 微处理器的字长是一个首要的因素, 它反映了计算机系统的处理能力。但是对于数字控制系统来说, 控制精度不仅决定于微处理器的字长, 还与 A/D 转换器的字长密切相关, 两者应该协调考虑。

选择微处理器字长的原则就是要满足用户对控制系统提出的精度要求。8 位微处理器足够胜任一些控制精度要求不高的场合; 当前的主流机型大多是 16 位或 32 位的, 而且常用的各类编程工具或组态软件也要求工作在 16 位以上的系统中, 所以 16 位以上的微处理器成为设计大中型数字控制系统时的首选。

选择 A/D 转换器的字长也要满足精度要求。常见的 A/D 转化器的字长有 8 位、12 位、16 位、24 位、32 位等。选取 A/D 转换器字长一般原则是：A/D 转换器的精度必须高于测量装置的精度，相对误差控制在 0.01%~0.1%，由此得出的字长为 10 位~13 位；A/D 转换器的精度要与微处理器的精度综合考虑，8 位微处理器配用 8 位 A/D 转换器是低精度要求时的常用选择，而 16 位以上的微处理器则选用 12 位以上的 A/D 转换器。

3. 采样周期的选择

采样周期是两次采样之间的时间间隔。为了能够准确地复现输入信号，采样周期应该足够的小，或者说采样频率不能过低。根据香农采样定理，采样频率大于等于输入信号所含的最高频率的两倍。从提高信号精度和控制性能的角度来考虑，采样周期应该越短越好，但缩小采样周期也就意味着增加计算机的工作负担。要从技术和经济两个角度综合考虑采样周期的大小，每个控制回路都应该选择一个最佳的采样周期，既要满足精度要求，又不能使计算机的负担太重。

1) 影响采样周期的因素

采样周期的大小与下列因素有关：

- (1) 对象的扰动信号频率越高，则采样频率也应提高，即减小采样周期；
- (2) 当对象的纯滞后较大时，采样周期可以适当增大，但不能大于纯滞后时间；如果纯滞后或容量滞后不太显著，则可以选择采样周期接近对象的时间常数；
- (3) 系统控制的回路数量越多，则采样周期应该越大；
- (4) 用户对控制质量的要求越高，采样周期越小；
- (5) A/D 转换器的转换速度直接限制采样周期的大小；
- (6) 如果选择 PID 控制算法，则应该综合积分时间、微分时间的整定来考虑采样周期。

由于现在的微处理器的性能已经得到了大幅提高，足以满足一般对象的控制要求，所以在选择采样周期时往往可以选择较小的数值，以尽量减小控制偏差，提高控制精度。

2) 采样周期的选择原则

具体到某个控制回路时，采样周期可以采用该回路自然振荡周期的 1/8 左右。对于大多数的过程参数而言，可以按照表 4-1 给出的数据为基础先选定一个初步数值，再通过实验进行调整。

表 4-1 采样周期的选择

参数类型	采样周期/s	说 明
流量	1~5	优选 1s~2s
压力	3~5	
液位	3~8	
温度	15~20	可选择纯滞后时间作为采样周期；对串级系统， $T_{\text{副}} = (\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5})T_{\text{主}}$
分量	15~20	

表中数据表明：由于过程变量中的流量和压力变化相对较快，所以采样周期取值较小；而温度和分量变化较慢，采样周期可适当延长。

总的来讲确定采样周期的方法是比较多，而且选择余地较大，所以应根据不同场合、不同要求加以选用，最后通过实验加以验证。

4.3 可编程序控制器

4.3.1 可编程序控制器概述

可编程序控制器是一种工业控制专用的计算机，有许多与其他机型不同的独特特点。它的这种专用性使它成为人们设计数字控制系统时重点考虑甚至是首选的机型。本节将以西门子(Siemens)公司的 S7—200 系列可编程序控制器为主要对象，对可编程序控制器的工作原理、一般特性及编程语言作简要介绍。

1. 可编程序控制器的产生和定义

1968 年，美国通用汽车公司(GM)为了满足用户对产品多样性的要求，需要将生产从批量大、品种少的生产方式转变为小批量、多品种的生产方式。当时所采用的控制系统大多为继电器控制系统，这种控制系统体积大、耗电多，而且改变生产程序非常困难，无法适应新的生产方式。所以，通用汽车公司对外公开招标，要求用新的电器控制系统取代原来的继电器控制系统，以适应及时改变生产程序的需要，并提出了具体的指标要求。1969 年，美国数字设备公司(DEC)研制成功了符合上述要求的控制设备，在通用汽车公司生产线上使用并取得了成功。这种新型的控制设备具备了定时和逻辑运算功能，被称为可编程序逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)，从此开创了可编程序逻辑控制器的时代。到 80 年代初，随着微处理器技术和通信技术的迅速发展，PLC 开始采用通用微处理器为核心，功能逐渐扩展到各种数学运算，还具备了与上位机通信、实现远程控制的功能，其名称也变为可编程序控制器(Programmable Controller, PC)，为了与个人计算机(Personal Computer)相区别，可编程序控制器仍沿用 PLC 的简称。

1987 年，国际电工委员会(IEC)正式颁布了可编程序逻辑控制器的标准定义，其定义为：可编程序逻辑控制器是专为在工业环境下应用而设计的一种数字运算操作的电子装置，是带有存储器、可以编制程序的控制器。它能够存储和执行命令，进行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作，并通过数字式和模拟式的输入输出，控制各种类型的机械或生产过程。可编程序控制器及其有关的外围设备，都应按易于工业控制系统形成一个整体、易于扩展其功能的原则设计。

2. 可编程序控制器的特点

(1) 可靠性高。在 I/O 通道中 PLC 采用了光电隔离、滤波等多种措施，有极强的抗干扰能力。系统程序和大部分的用户程序都存储在 E²PROM 中，不会因系统掉电而丢失程序。PLC 所用元件都采用高精度、高质量元件，使 PLC 的平均无故障工作时间可达几万小时以上。PLC 采用模块封装结构，具有防震、防腐蚀等优点，在环境恶劣的工业现场可以正常使用。另外，现代 PLC 一般都使用了看门狗(WatchDog)电路和自诊断程序，可以在机器出现软硬件故障时及时复位或报警，避免出现因长时间死机而无法控制生产的局面。

(2) 控制功能强。PLC 内部的微处理器一般是具有较强位处理功能的位处理器。同时往往采用双 CPU 的运行方式来增强其复杂控制功能和联网通信等功能。

(3) 编程方便, 容易上手。通用的 PLC 编程语言是梯形图变成, 它是一种图形编程语言, 与以前工业现场使用的电器控制图非常相似, 理解方式也类似, 从事电气控制的工程师可以很容易地理解和编制程序, 非常适合现场人员学习。

(4) 连接方便。PLC 采用统一接线方式, 具有可拆装的活动端子排, 提供不同的端子功能, 适合于多种电气规格。

(5) 与其他控制方式相比, PLC 具有较高的性价比, 而且体积小、质量小、功耗低。

(6) 扩展能力强。PLC 可以根据现场需要灵活组成, 有扩展需求时, 只需增加相应的 I/O 模块并改写控制程序即可。

(7) 维护方便。现代 PLC 大多具有自诊断能力, 如果出现故障, 只需参照机器给出的提示按标准程序进行维修即可, 维修时间大大缩短。

3. 可编程控制器的分类和发展

1) 分类

通常, PLC 是根据 I/O 点的数量来分类的。小型 PLC 的 I/O 点数在 256 点以下; 中型 PLC 的 I/O 点数在 256~1024 点之间; 大型 PLC 的 I/O 点数在 1024 点以上。

2) 应用

可编程控制器在多品种、小批量、高质量的产品生产中得到广泛的应用, PLC 控制已成为工业控制的重要手段之一, 与 CAD/CAM, 机器人技术一起成为实现现代自动化生产的三大支柱。通常认为, 只要有控制要求的地方, 都可以用到可编程控制器。

3) 发展

在应用方向上, PLC 的发展有小型化和大型化两个发展趋势。小型 PLC 向体积更小、速度更快、功能更强、价格更低的方向发展; 同时专业化程度不断深入, 逐步向各个生产行业渗透, 使 PLC 的使用范围不断扩大。大型化指的是大中型 PLC 向着大容量、智能化、网络化、多功能方向发展, 不断提高其功能, 使之能与计算机组成集成控制系统, 对大规模的复杂过程进行综合性的自动控制。

在自身技术上, PLC 在以下几个方面得到了发展:

(1) 编程语言。开发了功能块流程图语言、与计算机兼容的高级语言、专用 PLC 语言等多种编程语言, 适合不同开发人员的使用。大多数 PLC 公司已开发了图形化编程组态软件。该软件提供了简洁、直观的图形符号及注释信息, 使得用户控制逻辑的表示更加直观明了, 操作和使用也更加方便。

(2) I/O 模块智能化和专用化。各模块本身具有 CPU, 能独立工作, 可与 PLC 主机并行操作, 在可靠性、扫描速度和控制精度等方面都对 PLC 做了补充。各种专用型模块对各自的特殊控制对象控制能力明显增强。

(3) 网络通信功能标准化。PLC 的通信能力大大增强, 可以用于工业以太网、现场总线等新型网络中, 各种 PC、小型机等都可以作为 PLC 的监控机, 提供屏幕显示、数据采集、记录保持及信息打印功能。

4.3.2 可编程控制器基本工作原理

1. 可编程控制器的结构

1) 可编程控制器的组成

可编程控制器的硬件系统主要由以下几部分组成：电源、CPU、存储器、基本 I/O 接口电路，外设接口等。各部分的主要功能如下。

电源：采用开关式稳压电源，特点是输入电压范围宽、效率高、抗干扰能力强。

CPU：它是 PLC 的核心，控制整个 PLC 的工作过程。

存储器：分为系统存储区、用户存储区、数据存储区。系统存储区中主要存储 PLC 的操作系统、基本指令和中断表等内容，用户不能更改其内容；用户存储区中存放的是根据控制要求编制的用户控制程序；数据存储区主要用来存放输入输出电路的映像值、计算过程中的中间变量值等。

基本 I/O 接口电路：由 PLC 输出接口及外围现场设备构成。该电路与现场设备直接连接，周期性采集现场信号或输出 PLC 控制量。输入部分负责将各种开关信息和操作台上的操作命令转换成可编程控制器的标准输入信号；输出部分负责将 CPU 的运算结果转换为现场标准信号后提供给被控制装置。

外设接口：提供通信接口，包括 PLC 之间的通信接口、人机通信接口、编程器接口等。

PLC 各组成部分的逻辑连接如图 4.15 所示。由于可编程控制器的 CPU、存储器和基本 I/O 单元对其性能有重要影响，所以在下面做进一步说明。

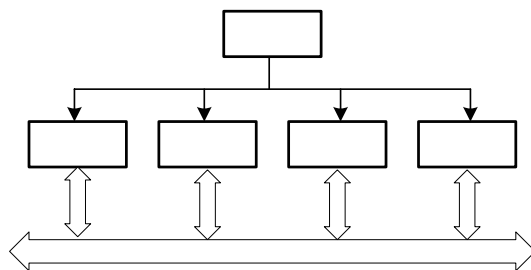


图 4.15 PLC 的基本结构

2) CPU

CPU 是 PLC 中最重要的部件，起核心控制作用，指挥 PLC 按预定的系统程序完成各种任务。其作用有以下几点：

(1) 故障诊断。诊断电源和 PLC 的内部故障，根据故障或错误的类型显示出相应的信息，提示用户及时排除故障或纠正错误。

(2) 检查、校验用户程序。对正在输入的用户程序进行检查，发现语法错误立即报警，并停止输入；在程序运行过程中若发现错误，则立即报警或停止程序的执行。

(3) 接收、调用现场信息。将接收到的现场输入数据保存起来，在需要该数据的时候将其调出并送到需要的地方。

(4) 执行用户程序。在运行状态下，CPU 根据用户程序的存储顺序，逐条读取、解释

和执行用户程序，完成规定的各种操作，并将程序执行的结果送至输出端口，以驱动 PLC 的外部负载。

3) 存储器

PLC 中的存储器按用途分为系统程序存储器、用户程序存储器及工作数据存储器。

(1) 系统程序存储器中存放的是厂家根据其选用的 CPU 的指令系统编写的系统程序，它决定了 PLC 的功能。系统程序存储器采用只读存储器，用户不能更改其内容。

(2) 用户程序存储器用来存储根据控制要求而编制的用户应用程序。为防止掉电时丢失用户程序，用户程序存储器采用可擦写只读存储器或随机存储器加后备电池，其容量随机型的不同而差别很大。

(3) 用来存储工作数据的区域称为工作数据区。工作数据是经常变化、经常存取的，一般采用随机存储器，它包括输入输出映像区、定时器状态字等内容，还有程序执行过程中产生的中间结果或可变参数等。

4) 基本 I/O 接口

PLC 通过 I/O 接口识别和接受描述现场设备的过程量，同时发出控制信号控制一些执行设备，以便对现场设备进行控制。I/O 单元成为 PLC 与外部设备相互联系的通道，能输入、输出多种形式和驱动能力的信号，以实现被控设备与 PLC 的 I/O 接口之间的电平转换、电气隔离、串/并转换、A/D 与 D/A 转换等功能。输入单元接收现场设备向 PLC 提供的信号，包括人为的控制信号和能描述现场状态的过程信号，例如由按钮、操作开关、继电器触点、接近开关等提供的开关量和温度、流量等模拟量。这些信号经过输入电路进行滤波、光电隔离、电平转换等处理后，变成 CPU 能够接收和处理的信号。输出单元将经过 CPU 处理的弱电信号通过光电隔离、功率放大等处理，转换成外部设备所需要的强电信号，以驱动各种执行元器件，如接触器、调节阀、调速装置等。由此可知，I/O 单元的信号源和输出对象的种类非常多，信号格式千差万别，PLC 的 I/O 接口必须以不同的电路形式与之相对应，才能得到令人满意的效果。模拟量信号是必须经过 A/D 或 D/A 转换以后才能进入 PLC 内部电路的，由于 A/D 和 D/A 转换电路及其原理在很多资料中都有阐述，这里就不再加以说明，只对 PLC 的数字量输入输出电路作简要介绍。

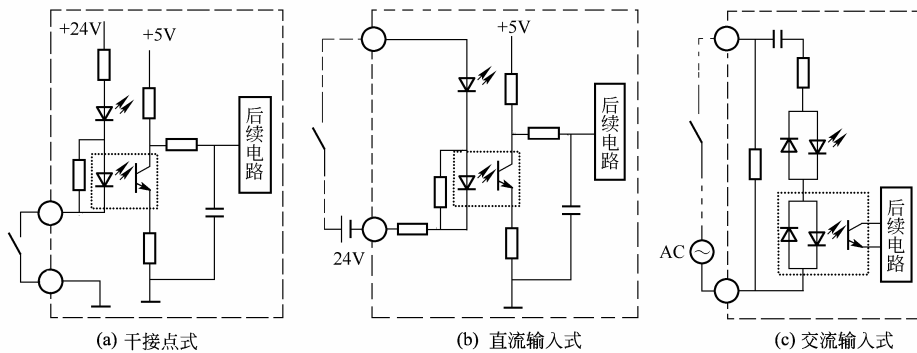


图 4.16 PLC 的 I/O 接口输入电路

数字量输入单元的作用是将 PLC 外部信号送至 PLC 内部电路。根据信号源的特点,通常把输入接点分为干接点式、直流输入式和交流输入式 3 大类,这 3 类输入方式已经能够代表绝大多数情况下的输入信号类型。PLC 的这 3 类典型输入电路如图 4.16 所示。图中,虚线框内的电路为 PLC 输入电路,点线框表示密封的光电耦合器件,虚线框外是用户接线。

(1) 干结点输入电路。当外围触点闭合时,光电耦合器导通,LED 点亮,表示输入触点处于接通状态。注意此时的 24V 电源是由 PLC 提供的,用户电路仅提供一个触点,因此称之为干触点式。光电耦合器件导通后使晶体管集电极变为高电平,该电平经滤波器送到后续电路中。当 CPU 在循环的输入阶段锁入该路信号时,将该输入点对应的映像寄存器状态置 1。触点断开时情况相反。

(2) 直流输入电路。直流输入电路与干触点输入电路的区别在于用户不仅要提供触点,还要提供 24V 电源。电路原理与干接点输入电路相同。

(3) 交流输入电路。交流输入电路中的电容为隔直电容,对交流相当于短路。这里的光电耦合器中是两个反向并联的发光二极管,任意一个二极管发光均可以使光电晶体管导通。用于显示的两个发光二极管 LED 也是反向并联的。该电路可以接收外部的交流输入电压,电路原理不再赘述。

数字量输出单元的作用是将 PLC 的输出信号传给外部负载,并将 PLC 内部的电平信号转换为外部所需要的电平等级输出信号。每个输出点的输出电路可以等效成一个输出继电器。与输入电路类似,输出电路也要按照负载的不同进行分类,根据输出电路所用的开关器件,PLC 的数字量输出单元可分为继电器式、晶体管式和晶闸管式,它们所能驱动的负载类型、负载的大小和响应时间各不相同。这三类输出单元的电路如图 4.17 所示。

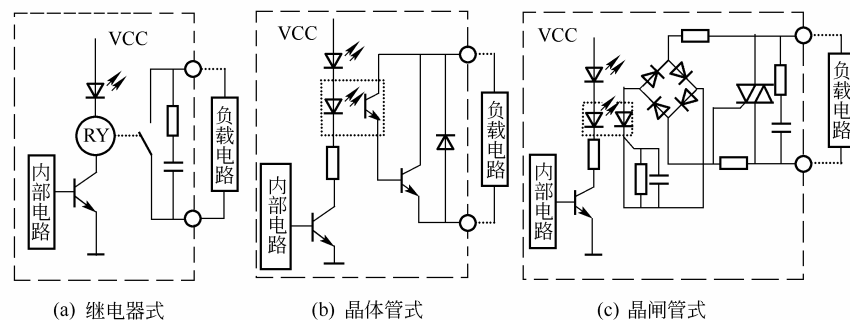


图 4.17 PLC 的 I/O 接口输出电路

(4) 继电器输出电路。当对应本通道的 PLC 输出位状态为 1 时,继电器线圈得电,常开触点闭合,负载得电,LED 点亮,表示该输出点接通。PLC 输出位状态为 0 时情况相反。继电器输出型 PLC 的负载电源可以根据需要选用直流或交流电源,是有触点开关。继电器触点的寿命一般为 10~30 万次,低于晶体管和晶闸管型的寿命,因此在需要输出点频繁通断的场合(如高频脉冲输出),应选用晶体管或晶闸管输出型的输出单元。另外,继电器从线圈得电到触点动作之间存在延迟时间,响应时间较长,存在一定的输出滞后。

(5) 晶体管输出电路。当对应本通道的 PLC 输出位状态为 1 时,通过内部电路使光电耦合器导通并点亮 LED 表示该路输出点有输出,从而使晶体管饱和导通,则负载得电。PLC 输出位状态为 0 时情况相反。如果负载是感性的,则必须给负载并接续流二极管,使负载

关断时，可通过续流二极管释放能量，保护输出晶体管免受高电压的冲击。由于晶体管为无触点开关，所以晶体管输出单元使用寿命长、响应速度快、可关断次数多。晶体管输出单元只能带直流负载，属于直流输出模块。

(6) 晶闸管输出电路。当对应于本通道的 PLC 输出位状态为 1 时，发光二极管导通发光，无论外接电源极性如何，都能使双向晶闸管导通，使负载得电，同时输出指示灯 LED 点亮，表示该输出点接通。PLC 输出位状态为 0 时情况相反。双向晶闸管为无触点开关，输出的负载电源可以根据负载的需要选用直流或交流电源。双向晶闸管多用于交流负载，负载驱动能力比继电器大，可直接驱动小功率接触器。其响应时间介于晶体管型与继电器型之间。

从上述简单分析可知，PLC 的输入输出电路一般都采用了光电耦合器件，使 PLC 具备了很强的抗干扰能力，这为它适应恶劣的工业环境提供了有力支持。

2. 可编程控制器的工作方式

可编程控制器在内置的操作系统控制下，周而复始地重复相同的工作过程，每执行一次工作过程被称为完成一次扫描。PLC 完成一次扫描所需要的时间叫做扫描周期，它是可编程控制器的一个重要指标。扫描周期包括读输入、执行用户程序、处理通信请求、自诊断测试及写输出等内容，其运行方式如图 4.18 所示。从图 4.18 中可以看出，用户程序只是扫描周期的一个组成部分，即使没有编制用户程序，PLC 也要正常执行扫描工作，只是在一个周期中缺少了执行用户程序、读输入和写输出等步骤。各步骤的具体说明如下。

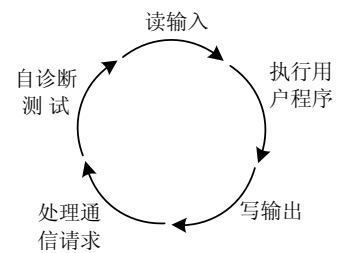


图 4.18 PLC 的循环扫描周期

(1) 自诊断测试过程。为保证设备的可靠性，及时反映所出现的故障，PLC 都具有自监视功能。自监视功能主要由把关[定时]监视器(Watchdog Timer, WDT)完成。WDT 是一个硬件定时器，每一个扫描周期开始前都被复位。WDT 的定时周期可由用户修改，一般在 100ms~200ms 之间。自诊断测试只针对 PLC 的硬件、系统软件的状态字等对象，不会测试用户程序，所以用户程序的错误不能依靠自诊断测试去发现。

(2) 网络通信过程。一般小型系统无此过程，只有在配有网络的 PLC 系统才有通信过程，这一过程用于 PLC 之间及 PLC 与上位计算机或终端设备之间的通信。

(3) 读输入与写输出过程。机器在正常运行状态下每个扫描周期内都包含这两个过程。这两个过程在机器运行中是否被执行是可控的。PLC 在存储器中专门开辟了一段空间用于存放输入扫描过程中读到的实际输入端子的状态，这段存储区叫做输入映像区；类似地，另外一段用于存放程序执行结果并准备送给输出端子的存储区叫做输出映像区。输入过程中，PLC 把输入端子的状态读入输入映像区并锁存；输出过程中，CPU 把输出映像区的值锁定到实际输出端子。为了现场调试方便，PLC 具有 I/O 控制功能，用户可以通过编程器封锁或开放 I/O。封锁 I/O 就是关闭 I/O 扫描过程。

(4) 用户程序执行过程。用户对控制对象的控制算法在这里具体化，PLC 按照一定的顺序逐条执行用户程序。用户程序中如果有输入指令时，使用的输入值是从输入映像区读

取的；遇到输出指令时，运算的结果也不直接送到输出端子，而是送到输出映像区。该过程在机器运行中是否执行是可控的，即用户可以通过软件进行设定。用户程序的长短，会影响过程所用的时间。

对一般用户来讲，最为关心的是 PLC 对被控对象的控制过程，也就是扫描周期中的用户程序执行、读输入和写输出 3 个步骤。这 3 个步骤的具体执行过程如图 4.19 所示。

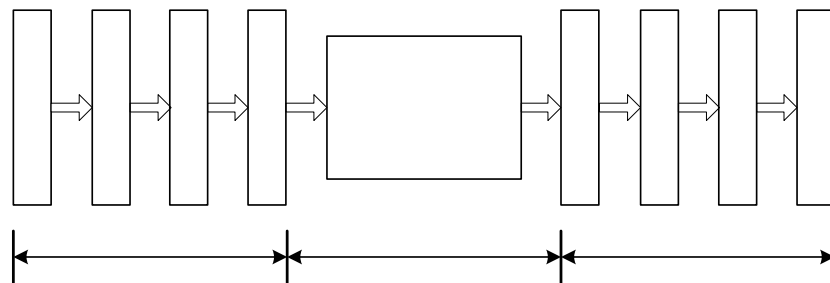


图 4.19 PLC 的控制过程

在读输入阶段，CPU 对各个输入端子进行扫描，通过输入电路将各点的状态锁入输入映像区。转入用户程序执行阶段后，CPU 按照先左后右、先上后下的顺序执行每条指令，根据输入映像区和输出映像区的状态执行用户程序，同时将执行结果写入输出映像区。在程序执行期间，即使输入端子状态发生变化，输入映像区的内容也不会改变(输入端子状态的变化将在下一个工作周期的输入阶段才被读入)；而输出映像区的内容可能会随着程序的执行多次改变。在写输出阶段，输出电路将输出映像区的状态驱动到输出端子。

3. 可编程控制器的编程语言

可编程控制器的实质是工业控制专用的计算机，它的所有动作也都是在程序的命令下完成的，为了适应工业控制领域的要求，一定有其专用的语言。PLC 的编程语言有多种，如梯形图、语句表、功能图、逻辑方程等。本书中采用梯形图和语句表编程语言对照介绍 PLC 的功能和使用。梯形图编程语言是一种图形语言，具有继电器控制电路形象、直观的优点，熟悉电气控制的工程技术人员很容易掌握，因此把它作为 PLC 的第一编程语言；语句表编程语言类似计算机的汇编语言，用助记符来表示各种指令的功能，是 PLC 用户程序的基础元素。两种语言各有优缺点：梯形图编程语言易被广大的现场技术人员所接受，一般的控制功能都可以实现，但对于特别复杂的逻辑控制或对实时性有严格要求的场合稍显不足；语句表编程语言是 PLC 的基础编程语言，可以实现 PLC 提供的各种控制功能，执行速度快，程序执行时间短。一般来讲，梯形图编程语言可以对应地转化为语句表编程语言，但语句表编程语言却不一定能转化为梯形图。

1) 梯形图

梯形图语言简称为 LAD，来源于继电器控制电路图。如果在 PLC 里引入输入继电器、内部继电器和输出继电器的概念，将它们对应成计算机寄存器里的一个比特位。如果寄存器位的数值为 1 表示按钮、继电器触点的闭合状态和继电器线圈的得电状态，数值 0 表示按钮、继电器触点的断开状态和继电器线圈的失电状态，则 PLC 就完全可以仿照继电器执行控制任务。区别仅在于寄存器与继电器的驱动方式不同、功能不同。在 PLC 中，这些按

钮的触点和线圈对应的就是寄存器中的存储单元，又称为操作数。PLC 首先采集操作数的状态，然后通过对梯形图的理解对这些操作数进行操作，最后输出操作结果，以达到控制的目的。

一般而言，PLC 执行梯形图程序时，是在仿真来自电源的电流(通常被称为能流)通过一系列逻辑条件，根据结果决定逻辑输出。所有的逻辑条件被组合成容易理解的片，这些片通常被称为梯级或网络。一个网络必须是从电源开始，到输出结束。程序执行的顺序是从左到右、从上到下。当 CPU 执行到程序的结尾时，就又重新回到程序开始处重新从上到下执行程序。在每一个网络中，指令以列为基础被执行，从第一列开始由上而下、从左到右依次执行，直到本网络的最后一个线圈列。除了普通的逻辑运算外，为充分发挥 CPU 的功能，PLC 还内置了大量称为盒的附加指令，如定时器、计数器、格式转换、模拟量 I/O、PID 调节或数学运算指令等，它们与逻辑运算指令一起完成 PLC 的各种复杂控制功能。

虽然 PLC 的梯形图程序与电气控制的梯形图程序在外观上十分相近，而且也能类似的理解，但两者之间还是有本质区别的，主要体现在：

(1) 电气控制中的继电器是物理元件，而 PLC 继电器的实质是寄存器位，只能看作“软继电器”。继电器有实际电流流过，而寄存器位只作为条件供程序判断，所谓的能流也只是为容易理解而假想的概念。

(2) PLC 的继电器可以不受限地读取其内容，包括个数和读取次数，而实际继电器的触点个数和开关次数是都有限的。

(3) PLC 的输入继电器是由外部信号驱动的，在梯形图中只使用其触点，这对实际继电器中而言是不可能的。

(4) 电气控制系统中继电器是按照触点的动作顺序和时间延迟逐个动作的，动作顺序与电路图的编写顺序无关。PLC 则先采集输入信号，然后对所有梯级按顺序计算，实际执行顺序与梯形图的编写顺序有关。

(5) PLC 梯形图中的母线只表示梯级的起始和终止，无实际电流通过，能流只能从左向右流。

2) 语句表

这种编程语言简称为 STL，它类似计算机的汇编语言，用助记符来表示各种指令的功能，是 CPU 直接执行的语言，梯形图语言程序和其他语言需要转换成语句表语言后才能由 CPU 执行。由于其他的图形语言必须遵守一些特定的规则，因此语句表语言可以实现一些其他图形语言不能实现的功能，它是 PLC 用户的基本要素。如果设计人员有计算机编程基础，学习语句表语言会容易一些。掌握语句表编程语言的关键是对各指令含义的理解，要将其理解为位逻辑、标志位，就可以像书写计算机程序一样来编写 PLC 的控制程序了。PLC 将通过一个逻辑堆栈分析器对语句表程序进行解释和执行。

4.3.3 S7—200 可编程控制器系统组成

S7 系列 PLC 分为 S7—400、S7—300 和 S7—200 等大、中、小 3 个子系列。这里对 S7—200 系列小型 PLC 的系统组成作具体介绍。

从 CPU 模块功能来看，SIMATIC S7—200 系列可编程序控制器大致经历了两代：

第一代产品其 CPU 模块为 CPU21X，主机都可进行扩展，它具有四种不同结构配置的

CPU 单元: CPU212、CPU214、CPU215、CPU216, 相对而言, 第一代产品的功能比较弱, 正在逐步淡出市场, 这里就不再对第一代 PLC 产品作具体介绍。

第二代产品其 CPU 模块为 CPU22X, 是在 21 世纪初投放市场的, 速度快, 具有较强的通信能力。它具有四种不同配置的基本 CPU 单元: CPU221、CPU222、CPU224 和 CPU226, 除 CPU221 之外, 其他都可加扩展模块。另外, 在 CPU224 基础上还衍生出 CPU224XP, 它比 CPU224 增加了两路模拟量输入和一路模拟量输出, 其他参数与 CPU224 完全相同。

SIMATIC S7—200 系统由硬件系统和软件系统两大部分构成, 如图 4.20 所示。软件系统一般运行在与 PLC 连接的上位机, 它是为更好地管理和使用所有的硬件设备而开发的与硬件配套的程序、文档及其规则的总和, 主要由标准工具、工程工具、运行软件和人机接口等几大类构成, 其功能是控制系统开发、监控系统运行等。硬件系统由主机、I/O 单元、特殊功能模块和外部设备等组成, 各部件都采用不同的封装形式, 成为一个个独立的模块。

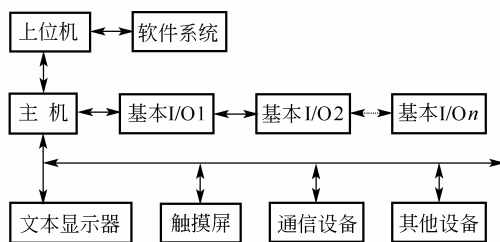


图 4.20 S7—200PLC 的系统组成

1. 主机模块

PLC 的主机通常都被封装在主机模块中, 也常常被人们称为 CPU 模块。它是 PLC 系统中最重要模块, PLC 的输入、输出、运行都离不开该模块。S7—200 PLC 的主机主要包括 CPU、存储器、通信口和其他元件, 它决定了该 PLC 的主要功能。

S7—200 PLC 是一个系列, 由多种型号的 CPU 可供选择, 不同型号的 CPU 功能各不相同, 其中 CPU22X 系列 CPU 的主要指标见表 4-2。

表 4-2 S7-22X 系列主机的主要指标

型 号	CPU221	CPU222	CPU224	CPU226
主机输出类型	DC/继电器	DC/继电器	DC/继电器	DC/继电器
主机 I/O 点数	6 入/4 出	8 入/6 出	14 入/10 出	24 入/16 出
可扩展模块数	0	2	7	7
数字量 I/O 点数	128 入/128 出	128 入/128 出	128 入/128 出	128 入/128 出
模拟量 I/O 点数	0	16 入/16 出	32 入/32 出	32 入/32 出
程序存储器	4KB	4KB	8KB	8KB
数据存储器	2KB	2KB	5KB	5KB
用户存储器类型	EEPEOM	EEPEOM	EEPEOM	EEPEOM
通信口数量(RS485)	1	1	1	2

S7—200 PLC 的存储器系统由 RAM 和 E²PROM 构成, 用于存放系统程序、用户程序和状态数据。从表 4-2 可以看出, 不同的 CPU 模块所含的存储器容量也不相同, 用户可以根据需要进行选择。为防止故障时丢失重要数据, 用户可以编制程序定时将 RAM 中的数据备份到 E²PROM 存储器。PLC 自身也采取了一些安全措施, 例如系统掉电时, PLC 将自动把 RAM 中位存储区的有关内容保存到 E²PROM 存储器; 此外, 主机还提供一个超级电容器, 可使 RAM 中的程序和数据在断电后保持几天之久。用户还可选配外接电池, 当超级电容器中的电量完全耗尽时, 由电池继续为内部 RAM 存储器供电, 以延长数据所存的时间。

CPU 模块上的通信口可以与编程器、计算机或其他外围设备的连接, 实现编程、运行、监视、数据传输等功能。CPU 模块上设置的少量 I/O 端子, 可以和外接 I/O 端子配合使用; LED 指示器用于状态指示或报警。S7—200 系列 CPU 模块上还配有专用锂离子电池, 用于掉电状态的数据保护。

2. I/O 模块

PLC 的 I/O 模块分为数字量输入输出模块和模拟量输入输出模块, 分别针对不同参数。

1) 数字量模块

数字量输入模块采用了很多措施来提高可靠性, 如光电隔离、输入保护、高频滤波等, 减少了对外部输入的要求, 只需提供开关触点即可。每一个输入通道上都有对应的 LED, 根据 LED 指示, 用户可以随时了解通道的工作状态。数字量输出模块有继电器、晶体管、晶闸管 3 种类型, 用于适应不同的负载。从响应速度看, 晶体管最快、晶闸管次之、继电器最慢; 从与外部电路的隔离效果看, 继电器最好; 从负载电源来看, 晶体管用于直流输出、晶闸管多用于交流输出、继电器可用于交直流两种电源。用户可以根据实际需要选择不同的输出类型。S7—200PLC 提供了九种数字量 I/O 模块, 见表 4-3。

表 4-3 S7—200 的数字量 I/O 模块

序号	型号	用途	规格
1	EM221	数字量输入模块	8 点输入, 24VDC
2	EM222	数字量输出模块	8 点输出, 24VDC
3			8 点输出, 继电器输出
4	EM223	数字量输入/输出模块	4 点输入, 24VDC; 4 点输出, 24VDC
5			4 点输入, 24VDC; 4 点输出, 继电器输出
6			8 点输入, 24VDC; 8 点输出, 24VDC
7			8 点输入, 24VDC; 8 点输出, 继电器输出
8			16 点输入, 24VDC; 16 点输出, 24VDC
9			16 点输入, 24VDC; 16 点输出, 继电器输出

2) 模拟量模块

模拟量模块的主要功能是完成模数或数模转换, 一般自身具备 CPU 和存储器。PLC 上电后, PLC 的主控 CPU 将控制字装入模拟量模块的 CPU, 模拟量模块的 CPU 就按照主

控 CPU 的要求独立工作，并与主控 CPU 共享存储器，主控 CPU 只需通过读写指令就可对模拟量模块进行操作。S7—200 的模拟量 I/O 模块特性见表 4-4。

表 4-4 S7—200 的模拟量 I/O 模块

型 号	用 途	规 格
EM231	模拟量输入模块	4 路输入
EM232	模拟量输出模块	4 路输出
EM235	模拟量输入/输出模块	4 路输入， 2 路输出(实际只有 1 路输出)

模拟量输入模块一般有 2 路、4 路、8 路等规格，每路输入信号都要经过前置放大、多路选择、A/D、光电隔离等环节后送入缓存器并锁存。模拟量输入模块可接纳的信号类型非常丰富，可以是：0V~5V、1V~5V、-10V~10V、0mA~20mA、4mA~20mA、-20mA~20mA 等。为防治现场的干扰，模拟量信号线应采用屏蔽线缆，达到屏蔽干扰的目的。

模拟量输出模块由输出缓存器、多路开关、光电隔离、A/D 转换、驱动电路组成。当 PLC 有模拟量输出时，相应通道的数字量经数模转换后从端子送出。模拟量输出模块也有 2 路、4 路等规格。

3. 特殊功能模块

为适应现代工业对控制系统提出的快速、复杂的控制要求，PLC 还配有各种专用的特殊功能模块，适于在特殊控制场合的使用。常见的特殊模块有：温度控制模块、位置控制模块、高速计数模块、通信模块等。这里仅对它们作概要介绍。

温度控制模块可直接与热电偶、热电阻等工业测温元件直接相接。这样，温度控制模块其实起到了温度变送器和 A/D 转换器的作用。温控模块把温度信号送给 PLC，经 PLC 处理后通过模拟量输出模块控制现场温度。

位置控制模块用于对步进电机或伺服电机的控制。它向电机驱动器直接输入脉冲信号，控制单坐标部件的位置和速度。有些高档模块还能进行多坐标控制，实现二轴或三轴联动。

高速计数模块用来监视和控制一些高速变化的变量，如速度、位置、流量等，它不受 CPU 模块处理速度的限制，输入信号的变化频率可以达到 50kHz。

通信模块用于 PLC 之间、PLC 与计算机之间、PLC 与其他设备之间的通信，接口形式可以是 RS232/485/422、MPI 网络等多种形式。这些设备通过通信接口构成复杂的控制网络，完成复杂的控制和管理任务。

4.3.4 S7—200 可编程控制器的指令系统

1. 基本概念

1) 指令的基本格式

SIMATIC S7 的指令通常由助记符和操作数组成，其格式为：

助记符 操作数

指令中，助记符表示进行何种操作，操作数表示对谁进行操作。PLC 的这种指令无论在表示方法上还是执行效果上都与微型计算机的汇编语言表示方法十分类似。除此之外，

PLC 还采用其他的指令表示方法，如功能图、梯形图等。梯形图是电气工程人员熟悉的工具，它用规定的图形符号来表明该指令将要完成的操作，并在梯形符号上注以必要的参数，以表明该指令要对什么样的操作数进行操作。

2) 操作数的表示方法

S7 系列 PLC 中，操作数由操作数标识符和操作数标识参数这两部分组成，格式为：

标识符 标识参数

标识符指出了该操作数存放在存储器的哪个区域及操作数的位数。标识参数则进一步指明了操作数所在的存储区的具体位置。通常标识符又可以由两部分所组成：

区域标识符 操作数长度(字节/字/双字)

其中区域标识符与对应存储区间的关系见表 4-5，操作数长度符号与其含义见表 4-6。

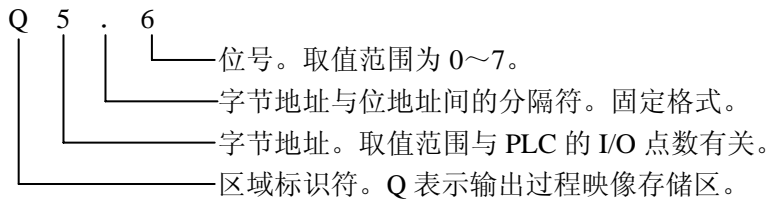
表 4-5 区域标识符及其对应存储区

标识符	对应存储区	标识符	对应存储区	标识符	对应存储区
I	输入过程映像存储区	AI	模拟量输入	HC	高速计数器
Q	输出过程映像存储区	AQ	模拟量输出	M	位存储区
S	顺序控制继电器存储区	AC	累加器	C	计数器存储器区
L	局部变量存储区	HM	特殊存储器区	V	变量存储区
T	定时器存储器区				

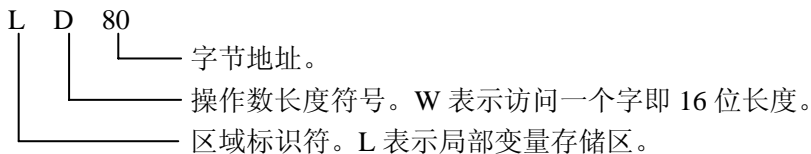
表 4-6 操作数长度符号与含义

X	B	W	D
位	字节	字	双字

按照以上格式，可以对 S7 系列 PLC 的存储区以位、字节、字、双字进行读写。如：



本例表示对输出过程映像存储区第 5 字节的第 6 位进行读或写。又如：



本例表示对局部变量存储区的第 80 字节开始的两个字节进行读或写。如果要改变读写内容的字节数，只需将其中的 D 改为 B 或 W。这里需要注意的是存储器地址的排列是由低到高的，但对其读写的顺序却是由高到低的，如图 4.21 所示。在本例中，低位内容在 LB83 中，高位内容在 LB80 中。

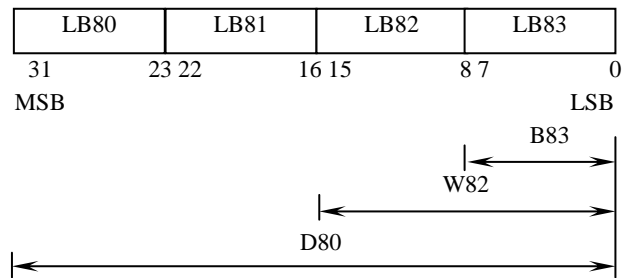


图 4.21 存储器地址排列与存储器内容读写顺序

3) S7—200PLC 的基本数据类型

S7—200PLC 的基本数据类型见表 4-7。

表 4-7 S7—200PLC 的基本数据类型

基本数据类型	所占位数	类型说明	数据范围
BOOL	1	布尔型	0 或 1
BYTE	8	无符号型	0~255
WORD	16	无符号整数	0~65535
INT	16	有符号整数	-32768~+32767
DWORD	32	无符号双整数	0~ $2^{32}-1$
DINT	32	有符号双整数	$-2^{31} \sim +2^{31}-1$
REAL	32	IEEE32 浮点数	$-10^{38} \sim +10^{38}$

4) S7—200PLC 的寻址方式

所谓寻址方式是指寻找操作数的方式。操作数可以直接给出，也可以间接给出。直接给出的寻址方式称为直接寻址。间接给出的寻址方式称为间接寻址，按照上述定义，SIMATIC 指令的寻址方式可分为两种：存储器直接寻址、存储器间接寻址。

(1) 存储器直接寻址。所谓存储器直接寻址是指在指令中操作数直接以存储器地址的形式给出。如以下几句指令：A I0.0；LD M8.0；= Q5.5。这些指令中，直接表明了操作数的存储区域和地址，PLC 可以直接对其内容进行读写。

(2) 存储器间接寻址。为了更加灵活地改变操作数的存储器地址，SIMATIC 还提供存储器间接寻址的方式。在这种寻址方式中，指令中的操作数并不是操作数本身而是操作数所在存储单元的地址。

在 S7—200PLC 中，为了能对存储器的某一地址进行间接寻址，首先必须建立起一个存储器的双字长地址指针，然后再利用指针来存取存储器内的数据。这样在程序执行过程中，只需修改地址指针，就可进行存储器的存取。例如，要将存储器单元 VB200 和 VB201 的内容取出来送往累加器 AC0，可使用下列指令实现。

MOVD &VB200, AC1 //建立指针。这是一条双字传送指令，将 VB200 的地址送到 AC1 中，建立起地址指针。注意：VB200 前必须加前缀“&”。

MOVW *AC1, AC0 //利用指针来存储 VB200、VB201 的内容。将指针所指的存储单元内容送到 AC0。注意：指针 AC1 前必须加前缀“*”以表示 AC1 为一个指针。

显然，若欲存取新的存储单元 V202 和 V203 的内容，只需修改地址指针即可。

2. S7—200 PLC 基本指令

S7—200 PLC 指令系统包含的指令很多，这里只介绍一些主要指令，当掌握了这些基本指令以后，再去阅读有关的手册就容易理解了。

1) 位逻辑指令

位逻辑指令包括位逻辑运算指令、输入输出指令、置位/复位指令及位正负跳转指令等。

(1) 输入输出指令。见表 4-8。

表 4-8 输入输出指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型	存储区
LD bit	bit 	输入(常开接点)	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L
LDN bit	bit 	输入(常闭接点)	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L
=bit	bit 	输入(常闭接点)	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L

(2) 位逻辑运算指令。见表 4-9。

表 4-9 位逻辑运算指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型	存储区
A bit	bit 	逻辑“与”	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L
AN bit	bit 	逻辑“与”(常闭接点)	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L
O bit	bit 	逻辑“或”	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L
ON bit	bit 	逻辑“或”(常闭接点)	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L
NOT		逻辑“非”			

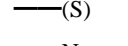
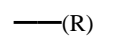
(3) 正负跳转指令。见表 4-10。

表 4-10 正负跳转指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型	存储区
EU		检测到一次正跳变(从 off 到 on)时, 进行跳变, 接通一个扫描周期	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L
ED		检测到一次正跳变(从 off 到 on)时, 进行跳变, 接通一个扫描周期	位地址	BOOL	I、Q、M、SM、T、C、V、S、L

(4) 置位复位指令。见表 4-11。

表 4-11 置位复位指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型	存储区
S bit ,N	bit  N	置位输出 N: 1~255	位地址	BOOL	bit: I、Q、M、SM、T、C、V、S、L N: VB、IB、QB、MB、SMB、SB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD
R bit ,N	bit  N	复位输出 N: 1~255	位地址	BOOL	bit: I、Q、M、SM、T、C、V、S、L N: VB、IB、QB、MB、SMB、SB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD

2) 定时器指令

使用定时器指令可以完成基于时间的计数功能, S7—200 提供了三种定时器指令。

- (1) TON: 接通延时定时器, 用于单一间隔的定时;
- (2) TONR: 有记忆接通延时定时器, 用于累计多个时间间隔;
- (3) TOF: 断开延时定时器, 用于故障时间后的时间延时。

定时器指令见表 4-12。

表 4-12 定时器指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
TON Txxx,PT	Txxx 	接通延时定时器	Txxx: 常数 PT: V、IW、QW、UW、SW、SHW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD	Txxx: WORD PT: INT
TONR Txxx,PT	Txxx 	有记忆接通延时定时器	Txxx: 常数 PT: V、IW、QW、UW、SW、SHW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD	Txxx: WORD PT: INT
TOF Txxx,PT	Txxx 	断开延时定时器	Txxx: 常数 PT: V、IW、QW、UW、SW、SHW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD	Txxx: WORD PT: INT

说明:

- (1) 符号 Txxx 中, T 表示对定时器操作, xxx 表示定时器号, 如 T32 表示 32 号定时器;
- (2) PT: 预置定时值, IN: 使能端, 当且仅当 IN 端信号有效时, 定时器开始工作。
- (3) S7—200PLC 的定时时间等于时基与定时值的乘积。当定时器运行时, 定时值会不断自增, 直到最大值 32767。当定时器的当前值大于等于设定值, 定时器被置位。
- (4) 复位指令 R 用来对定时器复位。复位指令执行如下操作:

定时器位=OFF
定时器当前值=0

TONR 定时器只能通过复位指令进行复位操作。复位后如需再启动, TOF 定时器需要使能端有一个从 ON 到 OFF 的跳转。

(5) 定时器各有不同的分辨率(PLC 能分辨的最小时间), 分辨率大小与定时器号有关。定时器号与分辨率关系, 见表 4-13。用户可以根据控制要求选择合适的定时器。

表 4-13 定时器号与分辨率关系

定时器类型	分辨率/ms	最大当前值/s	定时器号
TONR	1	32.767	T0、T64
	10	327.67	T1~T4、T65~T68
	100	3276.7	T5~T31、T65~95
TON、TOF	1	32.767	T32、T96
	10	327.67	T33~T36、T97~T100
	100	3276.7	T37~T63、T101~T255

与 BOOL、BIT 等基本数据类型不同, 定时器是由若干基本数据类型的数据组合而成的, 已属于复杂数据类型。下面出现的 CTU、CTD、CTUD、TP、SP、RS 等也都属于复杂数据类型。

3) 计数器指令

S7—200 计数器指令有三种: 递增计数器指令、增/减计数器指令和递减计数器指令, 见表 4-14。

表 4-14 S7—200 计数器指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
CTU Cxxx, PV		递增计数器对 CU 输入的每个上升沿递增计数。当当前计数值大于或等于预置数 PV 时, 计数器被置位。当复位输入 R 置位时, 计数器被复位	Cxxx: C0~C255 预置数 PV: W、IW、QW、MW、SUW、LW、AIW、AC、TC、常数、*VD、*AC、*LD、SW	Cxxx: WORD PV: INT

(续)				
STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
CTUD Cxxx, PV		递增/减计数器对 CU 输入的每个上升沿递增/减计数。当当前计数值大于或等于预置数 PV 时，计数器被置位。当复位输入 R 置位时，计数器被复位	Cxxx: C0~C255 预置数 PV: W、IW、QW、MW、SUW、LW、AIW、AC、TC、常数、*VD、*AC、*LD、SW	Cxxx: WORD PV: INT
CTD Cxxx, PV		递减计数器对于 CD 输入的每个上升沿递减计数。当当前计数值减为 0 时停止计数，计数器被置位；当置入 LD 输入时，计数器将预设值 PV 装入，当计数值达到时，停止计数	Cxxx: C0~C255 预置数 PV: W、IW、QW、MW、SUW、LW、AIW、AC、TC、常数、*VD、*AC、*LD、SW	Cxxx: WORD PV: INT

4) 程序控制指令

程序控制指令可以控制 PLC 程序执行的顺序，使 CPU 依据不同的具体情况，改变程序执行的走向或者按照不同的需要调用不同的子程序等。

SIMATIC 指令系统中程序控制指令主要包括有：跳转及标号指令、子程序及子程序返回指令、循环指令、顺序控制继电器指令、条件结束指令、暂停指令和把关器复位指令等。

(1) 跳转及标号指令

跳转及标号指令像计算机中的无条件转移指令，它无条件中断正常的程序执行，迫使程序转移至同一程序中标号所在处继续执行。跳转及标号指令只能在同一个程序的范围内，不允许跨程序段跳转。跳转及标号指令见表 4-15。

表 4-15 跳转及标号指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
JMP <i>n</i>		改变程序的正常执行，无条件跳转至标号所在处继续执行	<i>n</i> : 常数, 0~255	WORD
LBL		标记跳转的目的位置	无	无

(2) 子程序调用和子程序返回指令。见表 4-16。

表 4-16 子程序调用和子程序返回指令

STL 指令	LAD 指令	功 能
CALL <i>n</i>		改变程序的正常执行，调用子程序 <i>n</i> 。 <i>n</i> : 子程序号
CRET		从子程序 <i>n</i> 返回主程序

子程序的调用可以带参数或不带参数。参数是指主程序要向子程序传递的参数。参数

可以在子程序的局部变量表中定义，但要注意：定义时，要注意变量类型(IN 为传入子程序型、INOUT 为传入和传出子程序型、OUT 为传出子程序型)。调用时所带参数最多只能有 16 个，并且每个参数都必须有一个符号名(最多 8 个字符)，有规定的变量类型和数据类型。带参数调用子程序指令的格式为：

CALL 子程序号, 参数 1, 参数 2, ……., 参数 n

子程序调用可以嵌套，但最多只能嵌套 8 层。子程序可调用自己，形成递归调用，但要慎重使用。子程序的返回可以是有条件或无条件的，这取决于该指令之前的逻辑关系。

(3) 循环指令。见表 4-17。

表 4-17 循环指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
FOR INDX INIT FINAL		循环 执行 循环体	INDX: VW、IW、QW、MW、 SW、SMW、LW、T、C、AC、 *VD、*AC、*LD INIT: VW、IW、QW、MW、SW、 SMW、LW、T、C、AC、AIW、 常数、*VD、*AC、*LD FINAL: VW、IW、QW、MW、 SW、SMW、LW、T、C、AC、 AIW、常数、*VD、*AC、*LD	INDX: IHT INIT: INT FINAL: INT
NEXT				

循环语句的格式要求 FOR 和 NEXT 必须成对使用，否则会产生语法错误。循环指令也可以嵌套，但最多只允许嵌套 8 层。

本指令的 LAD 形式中，有一个 ENO 输出端，它表示指令的执行情况。若 ENO=1，表明指令正确执行；若 ENO=0 说明指令执行出错，并且中断指令的运行。本指令 ENO 为零的条件是 SM4.3(运行时间)或者 0008(循环嵌套超过 8 层)

(4) 顺序控制继电器指令。见表 4-18。

表 4-18 顺序控制继电器指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
LSCR n		顺序控制继电器(SCR)段的开始	n S	BOOL
SCRT n		执行 SCR 段的转移		
SCRE		SCR 段的结束		

顺序控制继电器指令，可以对控制程序进行逻辑分段执行。LSCR 指令表示个 SCR 段的开始，而 SCRE 指令则表示一个 SCR 段的结束，在它们之间的所有指令则构成 SCR 段。SCR 段是否被执行取决于 SCR 堆栈的值，即当 n=1 时，允许该段 SCR 工作。为了能顺序执

行 SCR 段的转移执行,在段中可以设置 SCRT 指令。当 $n=1$ 时,一方面可以激活下一个 SCR 段,使使能端(S 位)置位,以便能转移到下一个 SCR 段执行;另一方面又同时使现在正在执行的 SCR 段的 SCR 使能端复位。以便使本 SCR 段停止工作。总之, SCRT 指令的功能就是对下一个 SCR 使能端置位,以使下一个 SCR 段工作,同时对本 SCR 的使能位复位,以使本 SCR 段停止工作。SCR 指令的另外一个作用是实现分支控制和合并控制使用本指令是应该注意不能把相同的 S 位用于不同的程序中,例如在主程序中使用了 S0.1,那么在子程序中就不能再使用 S0.1;同时在 SCR 段中不能使用转移和标号指令、循环指令、END 指令。

5) 有条件结束和暂停指令。见表 4-19。

表 4-19 有条件结束和暂停指令

STL 指令	LAD 指令	功 能
END	—(END)	根据本条指令前的逻辑关系终止执行主程序
STOP	—(STOP)	立即终止程序的执行,并引起 CPU 从 RUN 到 STOP 的转变

有条件结束指令的助记符位 END,该指令用于根据本条指令前的逻辑关系结束主程序的执行,它只能在主程序中使用,不能在子程序或中断程序中使用。如果用户在主程序结束前没有使用 END 指令,则 S7-200 的编程软件会自动加上无条件结束指令。STOP 指令叫做暂停指令,可以立即终止程序的执行,并引起 CPU 从 RUN 到 STOP 工作方式的变化,它的使用范围不受限制。如果 STOP 在中断程序中使用,会立即终止中断,并且忽略所有的挂起的中断,继续扫描程序余下的部分。在本次扫描的最后,使 CPU 从 RUN 变为 STOP。

2. S7-200 PLC 基本指令

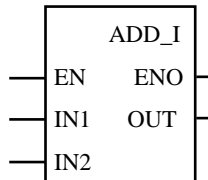
1) 数学运算指令

S7-200 指令系统中,数学运算指令包括:整数算术运算指令、实数算术运算指令和数学功能指令。

(1) 整数算术运算指令。见表 4-20。

SIMATIC 指令系统除有提供 16 位整数的加、减、乘、除指令外,还提供了 32 位的整数指令,如(ADD_DI, +D)、减(SUB_DI, -D)、乘(MUL_DI, *D)与除(DIV_DI, /D)接续令和加一、减一指令,它们在格式和功能上与 16 位运算基本相同。

表 4-20 整数算术运算指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
+I IN1,OUT		16 位整数加法运算 对于 LAD 指令: $IN1+IN2=OUT$; 对于 STL 指令: $IN1+OUT=OUT$	IN1, IN2: VW、IW、QW、 MW、SW、SMW、LW、 AIW、T、C、AC、常数、 *VD、*AC、*LD OUT: VW、IW、QW、 MW、SW、SMW、LW、T、 C、AC、*VD、*AC、*LD	INT

(续)				
STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
-I IN1 ,OUT		16 位整数减法运算 对于 LAD 指令： $IN1- IN2=OUT$ ； 对于 STL 指令： $OUT-IN1=OUT$	IN1, IN2: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、T、C、AC、*VD、*AC、*LD	INT
*I IN1 ,OUT		16 位整数乘法运算 对于 LAD 指令： $IN1*IN2=OUT$ ； 对于 STL 指令： $IN1*OUT=OUT$	IN1, IN2: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、T、C、AC、*VD、*AC、*LD	INT
/I IN1 ,OUT		16 位整数除法运算 对于 LAD 指令： $IN1/IN2=OUT$ ； 对于 STL 指令： $OUT/IN1=OUT$	IN1, IN2: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、T、C、AC、*VD、*AC、*LD	INT
INCB OUT		执行加一操作 对于 LAD 指令： $IN+1=OUT$ ； 对于 STL 指令： $OUT+1=OUT$	IN: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VD、IB、QB、MB、SB、SMB、IB、AC、*VD、*AC、*LD	BYTE
DECB OUT		执行减一操作 对于 LAD 指令： $IN-1=OUT$ ； 对于 STL 指令： $OUT-1=OUT$	IN: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VD、IB、QB、MB、SB、SMB、IB、AC、*VD、*AC、*LD	BYTE

整数算术运算指令的执行将影响特殊存储器(SM)标志位。对于加、减运算指令将影响标志位 SM1.0(0 标志位)，SM1.1(溢出标志位)，SM1.2(负数标志位)，若是对于除运算指令，

除了影响上述标志位，还将影响 SM1.3(除数为 0 标志位)。特殊存储器(SM)的 SMB1 定义见表 4-21。

表 4-21 特殊存储器字节 SMB1

SM 位	定 义
SM1.0	运算结果等于 0 时，该位置 1
SM1.1	运算结果溢出或查出非法数值时，该位置 1
SM1.2	运算结果为负时，该位置 1
SM1.3	除数为 0 时，该位置 1
SM1.4	执行 ATT(Add to Table)指令中，若超出表范围，该位置 1
SM1.5	当执行 LIFO 或 FIFO 指令时，若从空表中读数时，该位置 1
SM1.6	当把一个非 BCD 数转换为二进制数时，该位置 1
SM1.7	当 ASCII 码不能转换为有效的 16 进制数时，该位置 1

使整数算术运算指令的 ENO=0 的条件是 SM1.1、SM4.3(运行时间)、0006(间接寻址)。

(2) 实数算术运算指令。见表 4-22。

实数算术运算指令的执行如同整数的运算指令一样，也将影响特殊存储器的标志。与整数运算不同的是，实数运算的操作数都是 32 位的实数，运算结果也是 32 位的实数；同时，如果在除法操作过程中 SM1.3 被置位，则其他的算术标志位保持不变；若 SM1.1 置位(溢出或非法值)，则 SM1.0 和 SM1.2 的状态无效，原操作数不变；若 SM1.1 和 SM1.3(对于除法运算)不置位，则 SM1.0 和 SM1.2 的状态则可以反映算术运算的结果。

表 4-22 实数算术运算指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
+RIN1 ,OUT		32 位实数加法运算 对于 LAD 指令： $IN1+IN2=OUT$ ； 对于 STL 指令： $INI+IN2=OUT$	IN1, IN2: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、AC、LD、*VD、*AC、*LD	REAL
-RIN1 ,OUT		32 位整数减法运算 对于 LAD 指令： $IN1-IN2=OUT$ ； 对于 STL 指令： $OUT-IN1=OUT$	IN1, IN2: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、AC、LD、*VD、*AC、*LD	INT

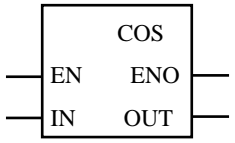
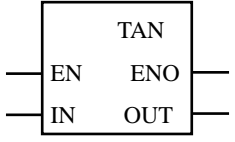
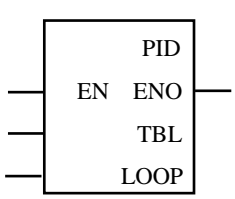
(续)				
STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
*RIN1 ,OUT		32 位整数乘法运算 对于 LAD 指令： $IN1 \cdot IN2 = OUT$; 对于 STL 指令： $IN1 \cdot OUT = OUT$	IN1, IN2: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、AC、LD、*VD、*AC、*LD	INT
/RIN1 ,OUT		32 位整数除法运算 对于 LAD 指令： $IN1 / IN2 = OUT$; 对于 STL 指令： $OUT / IN1 = OUT$	IN1, IN2: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、AC、LD、*VD、*AC、*LD	INT

(3) 数学函数指令。

所有的数学函数指令都将影响特殊存储器的标志。S7—200 的数学函数指令见表 4-23。

表 4-23 数学函数指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
SORT IN,OUT		对输入 IN 作开方运算并输出到 OUT	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、*VD、*AC、*LD	REAL
LN IN, OUT		对输入 IN 求自然对数并输出到 OUT	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、*VD、*AC、*LD	REAL
EXP IN, OUT		对输入 IN 求以 e 为底的指数并输出到 OUT	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、*VD、*AC、*LD	REAL
SIN IN, OUT		对输入 IN(弧度)求正弦并输出到 OUT	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、*VD、*AC、*LD	REAL

(续)				
STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
COS IN, OUT		对 输 入 IN(弧度)求 余弦并输 出到 OUT	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、 LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、 SMD、LD、*VD、*AC、*LD	REAL
TAN IN, OUT		对 输 入 IN(弧度)求 正切并输 出到 OUT	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、 LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、 SMD、LD、*VD、*AC、*LD	REAL
PID IN, LOOP		根据回路 参数表偏 移地址 TBL 和输 入 IN 进行 PID 运算	TBL: VB LOOP: 常数, 0~7	BYTE

PID 回路指令是指控制算法中的比例积分微分运算。其参数 TBL 是回路参数表偏移地址，回路参数表见表 4-24；参数 LOOP 表示回路号，范围 0~7，即程序中最多能有 8 个 PID 回路指令，且回路号不能重复。为准确定时控制，应将该指令用在定时中断程序中或用定时器控制执行。该指令 ENO 为 0 的条件是 SM1.1(溢出)或 0006(间接寻址)

表 4-24 PID 回路参数表

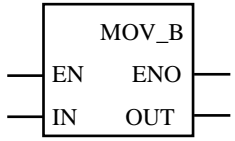
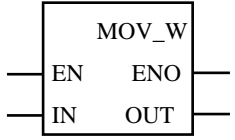
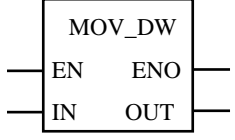
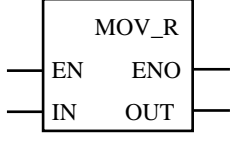
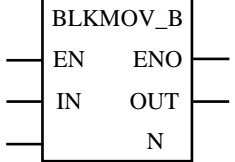
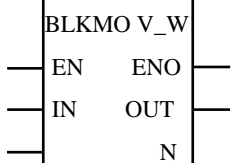
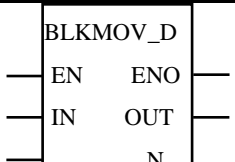
偏移地址	域	格 式	类 型	描 述
0	过程变量(PVn)	实数(双字)	输入	过程变量，必须在 0.0~1.0 之间
4	设定值(SPn)	实数(双字)	输入/输出	给定值，必须在 0.0~1.0 之间
8	输出值(Mn)	实数(双字)	输入	输出值，必须在 0.0~1.0 之间
12	增益(KC)	实数(双字)	输入	比例增益，可正可负
16	采样时间(TS)	实数(双字)	输入	必须为正数，单位为秒(s)
20	积分时间(TI)	实数(双字)	输入	必须为正数，单位为分(min)
24	微分时间(TD)	实数(双字)	输入	必须为正数，单位为分(min)
28	积分项前项(MX)	实数(双字)	输入/输出	积分项前项，必须在 0.0~1.0 之间
32	过程变量前值(PVn-1)	实数(双字)	输入/输出	最近一次 PID 运算的过程变量值

2) 传送指令

S7—200 传送指令包括：字节、字、双字和实数传送指令，字节、字和双字的块传送指令，交换字节指令、传送字节立即读写指令。这些指令可以在存储区之间或存储区与输入/输出映像寄存器之间进行数据的传送或交换。

(1) 传送和块传送指令 S7—200 传送指令和块传送指令。见表 4-25。

表 4-25 传送指令和块传送指令

STL 指令	LAD 指令	功能	操作数	数据类型
MOVB IN, OUT		字节 传送	IN: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、 LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、 LB、AC、*VD、*AC、*LD	BYTE
MOVW IN, OUT		字传 送	IN: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、 LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、 *AC、*LD OUT: VW、IW、QW、MW、SW、 SMW、LW、AIW、T、C、AC、*VD、 *AC、*LD	WORD INT
MOVD IN, OUT		双字 传送	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、 LD、HC、&VB、&IB、&QB、&MB、 &SB、&T、&C、AC、常数、*VD、*AC、 *LD OUT: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、 LD、AC、*VD、*AC、*LD	DWORD INT
MOVR IN, OUT		实数 传送	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、 LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、 LD、AC、*VD、*AC、*LD	REAL
BMB,IN,OUT,N		字节 块传 送	IN, OUT: VB、IB、QB、MB、SB、 SMB、LB、AC、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、 LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD	BYTE
BMW,IN,OUT,N		字块 传送	IN, OUT: VW、IW、QW、MW、SW、 SMW、LW、T、C、AIW/AQW、*VD、 *AC、*LD、AC、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、 LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: WORD N: BYTE
BMD IN,OUT,N		双字 块传 送	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、 LD、*VD、*AC、*LD OUT: VC、ID、QD、MD、SD、SMD、 LD、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: DWORD N: BYTE

块传送指令比传送指令多一个操作数 N，它用来说明传送的块数，取值范围 0~255。

(2) 交换指令

交换指令 SWAP 是字节交换指令，用来将输入字(IN)的高位字节与低位字节的内容进行交换。

3) 比较指令

比较指令包括有：字节比较、整数比较、双整数比较和实数比较。这些指令虽然所针对的操作对象各有不同(字节、整数、双整数和实数)，但是它们执行的操作都基本上一致，即比较两个输入值 IN1 和 IN2 的大小。比较关系可以是等于、大于、大于等于、小于、小于等于和不等于。比较指令见表 4-26

表 4-26 比较指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
LDB=IN1,IN2 AB=IN1,IN2 OB=IN1,IN2	IN1 —┤ ==B ┤ — IN2	字节比较指令 在 LAD 中，若比较式为真，该接点闭合； 在 STL 中，使用 LD、A、O，当比较式为真时，栈顶置 1	输入：IB、QB、MB、SMB、VB、SB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD 输出(FBD)：I、Q、M、SM、T、C、V、S、L、能流	输入：BYTE 输出：BOOL
LDB<>IN1,IN2 AB<>IN1,IN2 OB<>IN1,IN2	IN1 —┤ <>B ┤ — IN2			
LDB<IN1,IN2 AB<IN1,IN2 OB<IN1,IN2	IN1 —┤ <B ┤ — IN2			
LDB<=IN1,IN2 AB<=IN1,IN2 OB<=IN1,IN2	IN1 —┤ <=B ┤ — IN2			
LDB>IN1,IN2 AB>IN1,IN2 OB>IN1,IN2	IN1 —┤ >B ┤ — IN2			
LDB>=IN1,IN2 AB>=IN1,IN2 OB>=IN1,IN2	IN1 —┤ >=B ┤ — IN2			
LDW=IN1,IN2 AW=IN1,IN2 OW=IN1,IN2	IN1 —┤ ==W ┤ — IN2	整数比较指令 在 LAD 中，若比较式为真，该接点闭合； 在 STL 中，使用 LD、A、O，当比较式为真时，栈顶置 1	输入：IW、QW、MW、SW、SMW、VW、T、C、LW、AIW、AC、常数、*VD、*AC、*LD 输出(FBD)：I、Q、M、SM、T、C、V、S、L、能流	输入：INT 输出：BOOL

(续)				
STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
LDW<>IN1,IN2 AW<>IN1,IN2 OW<>IN1,IN2	IN1 —┤ <W ┤ — IN2			
LDW<IN1,IN2 AW<IN1,IN2 OW<IN1,IN2	IN1 —┤ <W ┤— — IN2			
LDW<=IN1,IN2 AW<=IN1,IN2 OW<=IN1,IN2	IN1 —┤ <=W ┤ — IN2			
LDW>IN1,IN2 AW>IN1,IN2 OW>IN1,IN2	IN1 —┤ >W ┤— — IN2			
LDW>=IN1,IN2 AW>=IN1,IN2 OW>=IN1,IN2	IN1 —┤ >=W ┤ — IN2			
LDD=IN1,IN2 AD=IN1,IN2 OD=IN1,IN2	IN1 —┤ ==D ┤ — IN2	双整数比较指令 在 LAD 中, 若比较式为真, 该接点闭合; 在 STL 中, 使用 LD、A、O, 当比较式为真时, 栈顶置 1	输入: ID、QD、MD、SMD、VD、SD、LD、HC、AC、常数、*VD、*AC、*LD 输出(FBD): I、Q、M、SM、T、C、V、S、L、能流	输入: DINT 输出: BOOL
LDD<>IN1,IN2 AD<>IN1,IN2 OD<>IN1,IN2	IN1 —┤ <D ┤ — IN2			
LDD<IN1,IN2 AD<IN1,IN2 OD<IN1,IN2	IN1 —┤ <D ┤— — IN2			
LDD<=IN1,IN2 AD<=IN1,IN2 OD<=IN1,IN2	IN1 —┤ <=D ┤ — IN2			
LDD>IN1,IN2 AD>IN1,IN2 OD>IN1,IN2	IN1 —┤ >D ┤— — IN2			

(续)				
STL 指令	LAD 指令	功 能	操作数	数据类型
LDD>=IN1,IN2 AD>=IN1,IN2 OD>=IN1,IN2	IN1 —┆┆>=D┆┆ — IN2			
LDR=IN1,IN2 AR=IN1,IN2 OR=IN1,IN2	IN1 —┆┆==R┆┆ — IN2	实数比较指令 在 LAD 中, 若比较式为真, 该接点闭合; 在 STL 中, 使用 LD、A、O, 当比较式为真时, 栈顶置 1	输入: ID、QD、MD、SD、SMD、VD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD 输出(FBD): I、Q、M、SM、T、C、V、S、L、能流	输入: REAL 输出: BOOL
LDR<>IN1,IN2 AR<>IN1,IN2 OR<>IN1,IN2	IN1 —┆┆<>R┆┆ — IN2			
LDR<IN1,IN2 AR<IN1,IN2 OR<IN1,IN2	IN1 —┆┆<R┆┆ — IN2			
LDR<=IN1,IN2 AR<=IN1,IN2 OR<=IN1,IN2	IN1 —┆┆<=R┆┆ — IN2			
LDR>IN1,IN2 AR>IN1,IN2 OR>IN1,IN2	IN1 —┆┆>R┆┆ — IN2			
LDR>=IN1,IN2 AR>=IN1,IN2 OR>=IN1,IN2	IN1 —┆┆>=R┆┆ — IN2			
LDS>=IN1,IN2 AS>=IN1,IN2 OS>=IN1,IN2	IN1 —┆┆==S┆┆ — IN2	ASCII 字符串比较指令 在 LAD 中, 若比较式为真, 该接点闭合; 在 STL 中, 使用 LD、A、O, 当比较式为真时, 栈顶置 1	输入: VB、LB、*VD、*LD、*AC	输出: BOOL
LDS>=IN1,IN2 AS>=IN1,IN2 OS>=IN1,IN2	IN1 —┆┆<>S┆┆ — IN2			

4) 移位和循环移位指令

(1) 移位指令。见表 4-27。

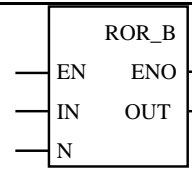
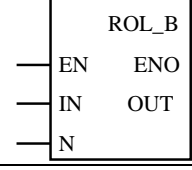
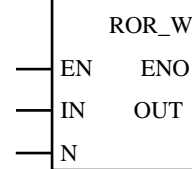
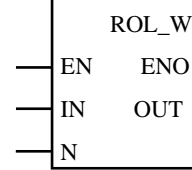
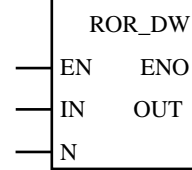
表 4-27 移位指令

STL 指令	LAD 指令	功 能	操 作 数	数据类型
SRB OUT, N		字节右移	IN, N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、*VD、*AC、*LD	BYTE
SLB OUT, N		字节左移	IN, N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、*VD、*AC、*LD	BYTE
SRW OUT, N		字右移	IN: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、T、C、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: WORD N: BYTE
SLW OUT, N		字左移	IN: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、T、C、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: WORD N: BYTE
SRD OUT, N		双字右移	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、AC、LD、HC、常数、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: DWORD N: BYTE
SLD OUT, N		双字左移	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、AC、LD、HC、常数、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: DWORD N: BYTE

移位指令的作用是将输入端(IN)的内容(字节、字、双字)右移或左移 N 位后,再将结果以字节、字、双字的形式送到输出端(OUT)。在执行过程中,移位指令会对移出的位自动计零,并把最近一次移出的位值保存在溢出位(SM1.1)。如果移位操作的结果为零,则零存储器位(SM1.0)就置位。如果需要移位的次数 N 大于实际输入位数,则移动次数为实际输入位数。使移位指令的 ENO 为零的条件是 SM4.3(运行时间)或 0006(间接寻址)。

(2) 循环移位指令。见表 4-28。

表 4-28 循环移位指令

STL 指令	LAD 指令	功能	操作数	数据类型
RRB OUT, N		字节循环右移	IN, N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、*VD、*AC、*LD	BYTE
RLB OUT, N		字节循环左移	IN, N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、*VD、*AC、*LD	BYTE
RRW OUT, N		字循环右移	IN: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、T、C、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: WORD N: BYTE
RLW OUT, N		字循环左移	IN: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、AIW、T、C、AC、常数、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VW、IW、QW、MW、SW、SMW、LW、T、C、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: WORD N: BYTE
RRD OUT, N		双字循环右移	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、AC、LD、HC、常数、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: DWORD N: BYTE

(续)				
STL 指令	LAD 指令	功能	操作数	数据类型
RLD OUT, N		双字循环左移	IN: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、AC、LD、HC、常数、*VD、*AC、*LD N: VB、IB、QB、MB、SB、SMB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD OUT: VD、ID、QD、MD、SD、SMD、LD、AC、*VD、*AC、*LD	IN, OUT: DWORD N: BYTE

循环移位指令与移位指令的区别在于要将移出的位值再写回到移出方向的最末位，最近移动的位值写入到溢出位(SM1.1)。如果需要移位的次数 N 大于等于实际输入位数，则移动次数为 N 除实际位数所得余数。使循环移位指令的 ENO 为零的条件是 SM4.3(运行时间)或 0006(间接寻址)。

4.3.5 可编程控制器控制系统设计

1. 系统设计的主要内容

系统设计的主要内容如下：

(1) 拟定控制系统设计的技术条件。技术条件一般以设计任务书的形式出现，它是整个设计的依据；

(2) 选择电气传动形式和电动机、电磁阀等执行机构；

(3) 选定 PLC 的型号；

(4) 编制 PLC 的输入/输出分配表或绘制输入/输出端子接线图；

(5) 根据系统设计的要求编写软件规格说明书，然后再用相应的编程语言(常用梯形图)进行程序设计；

(6) 设计人机界面；

(7) 设计操作台、电气柜及非标准电器元部件；

(8) 编写设计说明书和使用说明书。

在具体设计过程中，根据任务的不同，可以对设计内容作适当调整。

2. 系统设计的基本步骤

系统设计主要步骤如下：

(1) 深入了解被控对象的工艺条件和控制要求。要了解对象的基本流程和工艺条件，从而获得对控制的具体要求，如控制方式、应完成的动作、必要的保护和联锁等。对较复杂的控制系统，还可将控制任务分成几个独立部分，这种可化繁为简，有利于编程和调试。

(2) 确定 I/O 设备。根据控制要求确定系统所需的外围输入输出设备，如按钮、选择开关、行程开关、传感器、继电器、接触器、指示灯、电磁阀等。

(3) 选择合适的 PLC 类型。根据已确定的外围设备，统计所需的输入信号和输出信号的点数，选择合适的 PLC 类型，包括机型的选择、容量的选择、I/O 模块的选择选择等。

(4) 分配 I/O 点。分配 PLC 的输入/输出点，编制 I/O 点分配表或者画出输入/输出端子

接线图。

(5) 编制控制程序。根据控制要求选择合适的采样周期和控制周期，采用合适的编程语言编制控制程序。

(6) 软件调试。初步完成的控制软件一般都会有一些语法或逻辑错误，需要将程序下载到 PLC 中进行实际测试，一旦发现错误，可以离线或者在线修改调试，直到最终完成。

(7) 系统整体调试。在软硬件设计全部完成后，就可以进行全系统的联机调试，调试中发现问题，要逐一排除，直至调试成功。

(8) 编制技术文件。需要编制的技术文件包括系统说明书、电气原理图、器件布置图、元件明细表、程序清单等。

3. 硬件系统设计

(1) 确定 PLC 型号

机型的选择要以满足系统功能需要为宗旨，可以从以下几个方面来考虑。

(1) 对 I/O 点的选择

先确定控制系统的 I/O 实际点数，再按实际所需点数的 15%~20% 留出备用量后确定所需 PLC 的点数。由实际点数与备用点数之和即可确定 CPU 点数。

(2) 对存储容量的选择

对存储容量的选择只能建立在粗略估算的基础上，可以用下面的经验公式进行估算。

总存储量 = [(数字量 I/O 点数) × 8 + (模拟量 I/O 点数) × 100 + (计数器或定时器数量) × 10 + (通信口数量) × 100] × (150%~200%) 字

2) 确定 I/O 模块

(1) 确定 I/O 点数。根据实际需要的数字量输入、数字量输出、模拟量输入、模拟量输出点数再加上 30% 的备用量后计算出总的输入输出点数，注意以上四项要分开计算。

(2) 确定数字量输入模块。由(1)计算出的数字量输入点数选择模块数。另外，输入设备距离越远，越应该选择输入电压较高的模块；高密度输入模块同时接通的输入点不得超过总输入点的 60%。

(3) 确定数字量输出模块。由(1)计算出的数字量输出点数选择模块数。还应该注意对不同的输出对象要用不同的输出方式(继电器、晶体管、晶闸管)与之对应；输出端子要有足够的输出电流以驱动负载，还要留有一定的裕量防止接通时的冲击电流。

(4) 确定模拟量输入输出模块。由(1)计算出的模拟量输入输出点数选择模块数。在实时性要求比较高的场合要注意对 A/D、D/A 转换时间的选择。

(5) 当系统由其他特殊要求时，选择必要的特殊模块或智能模块。

3) 确定电源模块

(1) 确定输入输出电压。一般为输入交流 220V，输出直流 24V。

(2) 确定输出电流。将 CPU 模块所需电流和所有其他模块所需背板电流相加计算实际电流，再加上 30%~50% 的裕量后计算出总电流。

根据以上两步的结果选择电源模块。

4. 编制控制程序

1) 程序编制方法

编制 PLC 控制程序的方法很多，这里主要介绍几种典型的编程方法。

梯形图法。梯形图法是用梯形图语言去编制 PLC 程序，这是一种由继电器控制系统发展而来的编程方法。这种方法很容易把继电器控制电路移植成 PLC 的梯形图语言，这对于熟悉电气控制的人来说，是最方便的一种编程方法。

逻辑流程法。逻辑流程法是用逻辑框图来表示系统的工艺流程，最终形成逻辑流程图，这样的逻辑流程图可以表示程序的执行过程，反应输入输出关系，也能很方便地转化为梯形图。用逻辑流程法编制的 PLC 程序思路清晰、输入与输出的因果关系及联锁条件明确，便于分析控制程序、查找故障，程序调试。

时序流程法。时序流程法是首先画出控制系统的时序图，再根据时序关系画出对应的控制任务的程序框图，最后把程序框图写成 PLC 程序。时序流程法很适合于以时间为基准的控制系统。

步进顺控法。步进顺控法是在顺控指令的配合下设计复杂的控制程序。一般比较复杂的程序，都可以分成若干个功能比较简单的程序段，一个程序段可以看成整个控制过程中的一步。从这个角度看，一个复杂系统的控制系统都是由这样若干个步组成的，系统控制的任務就是在不同时刻或者在不同进程中去完成对各步的控制。为此，不少 PLC 生产厂家在自己的 PLC 中增加了步进顺控指令。在画完各个步进的状态流程图之后，可以利用步进顺控指令方便地编写控制程序。

经验法。经验法是运用自己的或别人的经验进行设计。多数情况下，先选择与工艺要求相近的程序作为试验程序，再将试验程序进行修改、组合，使之符合新的控制要求。编程过程有较大的随意性，编程效率与编程者的经验密切相关，适合于比较简单的控制系统。

2) 编程步骤

编写 PLC 程序和编写其他计算机程序一样，都需要经历如下过程。

(1) 任务分块。分块可以把复杂的工程分解成多个比较简单任务，有利于复杂问题的解决。

(2) 编制逻辑关系图。逻辑关系图可以反应某一逻辑关系的结果，这一结果又应该导出哪些动作。这个逻辑关系可以以控制顺序为基准，也可以以时间顺序为基准。逻辑关系图反映了控制过程中控制作用与被控对象的活动，也反映了输入与输出的关系。

(3) 绘制电路图。绘制电路图的目的是，把系统的输入输出地址和名称联系起来。这是很关键的一步。在绘制 PLC 的输入电路时，不仅要考虑到信号的连接点是否与命名一致，还要考虑到输入端的电压和电流是否合适，也要考虑到在特殊条件下运行的可靠性与稳定性等问题。特别要考虑到是否会把高压引入到 PLC 的输入端，从而造成对 PLC 的伤害。在绘制 PLC 的输出电路时，不仅要考虑到输出信号的连接点是否与命名一致，还要考虑到 PLC 输出模块的带负载能力和耐电压能力。此外，还要考虑到电源的输出功率和极性问题。因此，在绘制电路图时要做到通盘考虑。

(4) 编制程序并模拟调试。可以用上述编程方法中的任何一种编制程序。在编程时，除了要注意程序要正确、可靠之外，还要考虑程序的效率。编程中要注意做好注释，便于阅读和修改。每完成一个程序块都要进行模拟实验，这样便于查找问题，便于及时修改。

(5) 现场调试。现场调试是整个控制系统完成的重要环节。任何程序的设计很难说不

经过现场调试就能使用的。只有通过现场调试才能发现程序的错误和不足，才能真正得以应用。

(6) 编写技术文件。技术文件包括电路图、PLC 程序、使用说明及帮助文件。

4.3.6 S7—200 可编程控制器应用实例

随着城市高层建筑日益增多，传统的水塔、高位水箱及气压供水方式已经无法满足供水要求，供水问题成为现代城市急需解决的一个重要问题。供水系统要求保持供水压力的恒定、提高供水质量；同时要求保证供水的可靠性和安全性。本供水系统是针对上述问题设计的供水方式和控制系统，供水方式为变频恒压供水，控制系统的核心为具有丰富功能的 PLC 和变频器。整个系统由主供水回路、备用回路、清水池及泵房组成。其中，泵房装有 1#~3# 共三台泵机，还有多个电动阀门控制各供水回路和水流量。与以前的供水方式相比，不论是设备的投资，运行的经济性，还是系统的稳定性、可靠性、自动化程度等方面都具有无法比拟的优势，而且具有显著的节能效果。

1. 工艺要求

(1) 供水压力要求恒定，波动一定要小，尤其在换泵时。

(2) 三台泵根据压力的设定，采用“先开先停”的原则。

(3) 为了防止一台泵长时间运行，需设定运行时间。当时间到时，自动切换到下一台泵，以防止泵长时间不用而锈死。

(4) 当自来水压力持续低于 $2.94 \times 10^4 \text{Pa}$ 或出现确切负压信号时，应立即转换成抽水池加压，但此时应保证水池水位高于最低限水位的条件。

(5) 当采用直抽水或抽水池加压供水时，应能自动调节其总出口水压为给定值。

2. 设计思路

供水系统的控制一般有两种方案：一是节流调节，通过改变给水阀的开度调节水流；二是调速调节，通过改变给水泵转速调节水流量。本课题所针对的生活供水问题属于用水量经常变化的问题，采用调速调节具有优良的节能效果。

控制系统的基本策略是：采用可编程控制器和变频器构成控制系统，对泵组运行台数和转速进行自动优化控制，完成供水压力的闭环控制，在管网流量变化时达到稳定供水压力和节约电能的目的。这样的系统称为变频恒压供水系统控制系统原理图如图 4.22 所示。变频恒压供水节能的效果主要取决于用水流量的变化情况及水泵的合理选配，为了使变频恒压供水具有优良的节能效果，系统宜采用多泵并联的供水模式，多台泵中一台是变频泵，其余全是工频泵。多泵并联恒压供水，在设计上可做到在恒压条件下各工频泵的效率不变(因工况不变)，并使之处于高效工作状态；变频泵的流量是变化的，其工作效率随流量而改变。

多泵并联恒压供水系统宜采用具有自动睡眠功能的变频器，当用水量接近零时，变频器能自动睡眠停泵，做到无用水需求时自动停泵，减少能量损耗，具有最佳的节能效果。当用水量减少，各并联工频泵按次序关系，关系顺序按先投入先超出的原则由变频器控制。

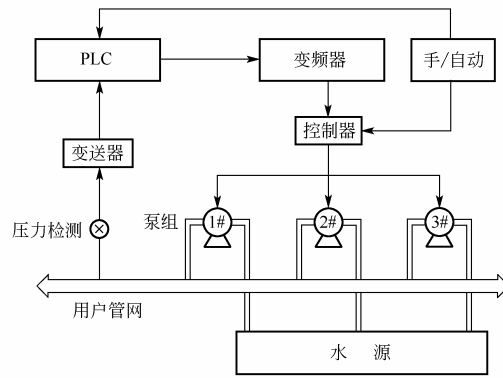


图 4.22 控制系统原理图

系统基本控制过程如下。在用户管道的压力最低点安装压力检测元件，该压力值经变送器转换为标准信号后送入到 PLC 模拟量输入通道。PLC 将实际输入压力与设定压力相比较得到偏差量，经 PID 运算后得出工频运行的电动机台数和变频运行的电动机转速，分别由数字量输出通道和模拟量输出通道送到变频器的输入端。变频器将该信号转换为各电动机对应的频率信号后调节电动机转速。控制框图如图 4.23 所示。

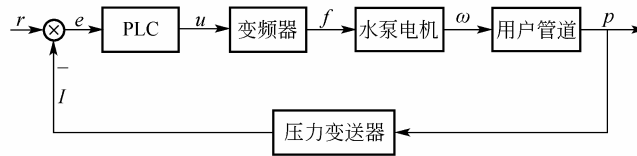


图 4.23 系统控制框图

3. 硬件选型

根据系统在供水质量和节能方面的要求和功能，本系统由 S7—200 系列 PLC、ABB 系列变频器为核心组成。经统计，本系统共需要 4 个数字量输入点、8 个数字量输出点和 1 个模拟量输入点、1 个模拟量输出点。S7—200 系列的 CPU 中，CPU224XP 具有 14 个数字量输入点、10 个数字量输出点和 2 个模拟量输入点、1 个模拟量输出点，能够满足要求。对变频器的选择主要考虑其带负载能力，即负载电动机的功率。这里选择 ACS400 型 7.5kW 变频器。

4. 资源分配与参数设置

PLC 的 I/O 资源分配见表 4-29。

表 4-29 PLC I/O 资源分配

输入	功能	输出	功能
I0.0	变频器高频到达 RO1	O0.0	KM1(1#电动机接变频)
I0.1	变频器低频到达 RO2	O0.1	KM4(1#电动机接工频)

(续)			
输 入	功 能	输 出	功 能
I0.3	启动	O0.2	KM2(2#电动机接变频)
I0.7	水池水位下限信号	O0.3	KM5(2#电动机接工频)
AI0	水压信号	O0.4	KM3(3#电动机接变频)
		O0.5	KM6(3#电动机接工频)
		O0.7	DI1
		O1.0	DI2
		AQ0	转速调节信号

变频器的参数设定见表 4-30。

表 4-30 变频器参数设定

代 码	功 能	设定值	代 码	功 能	设定值
9902	APPLIC MACRO	0	2102	STOP FUNCTION	1
1001	EX1COMMANDS	3	3201	SUPERV1 PARAM	0103
1102	DIRECTION	1	3202	SUPERV1 LIM LO	15HZ
1102	EXT1/EXT2	6	3203	SUPERV1 LIM HI	50HZ
1103	EXT RFF1 SEL	0	3204	SUPERV2 PARAM	0103

5. 电器系统原理图

1) 主电路图

电气控制系统主回路图如图 4.24 所示。图中，M 表示 3 台电动机，交流接触器 KM1~KM3 控制 3 台电机的变频运行，KM4~KM6 控制 3 台电机的工频运行，KH1、KH2、KH3 分别为电动机过载保护用的热继电器。QF1、QF2 分别为主电路和变频器的空气开关。其他的辅助器件未在图中表示。

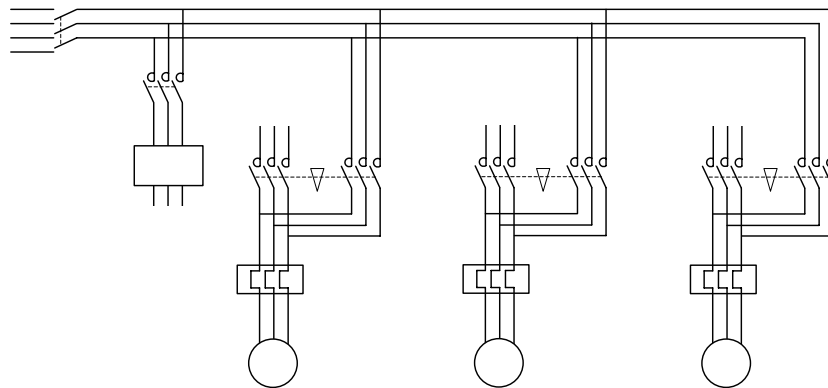


图 4.24 电气控制系统主回路图

2) PLC 接线图

PLC 的接线图如图 4.25 所示。

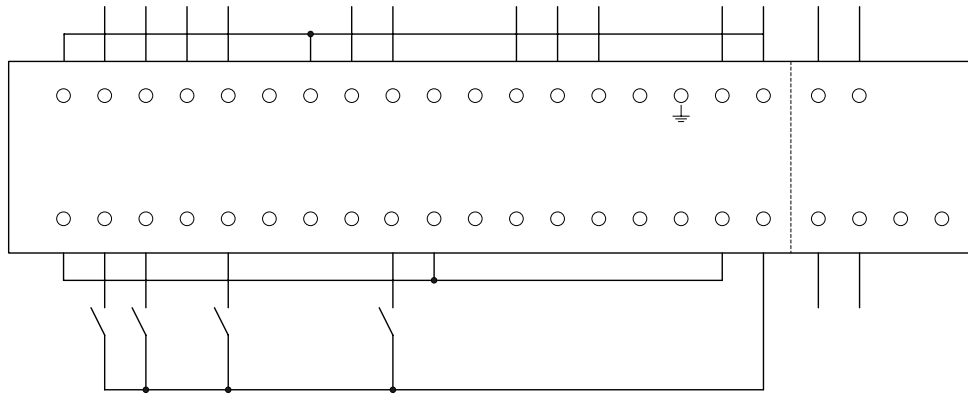


图 4.25 PLC 接线图

数字量输出点 Q0.0~Q0.5 用于 3 台电机的变频或工频控制，接到相应的交流接触器；Q0.7、Q1.0 接变频器的 DI1、DI2，3L 接到变频器 DCOM1。数字量输入点 I0.0、I0.1 接变频器 RO1、RO2；I0.3 接手自动转换开关 KA；I0.7 接水池缺水信号。模拟量输入通道 AI0 接入用户管道内的水压信号；模拟量输出通道 AQ0 作为转速调节信号接到变频器模拟量输入端 AI2。

6. 程序设计

根据控制要求可以绘制主程序流程图，如图 4.26 所示。由程序流程图即可编制控制程序，程序清单略。其他子程序流程不再赘述。

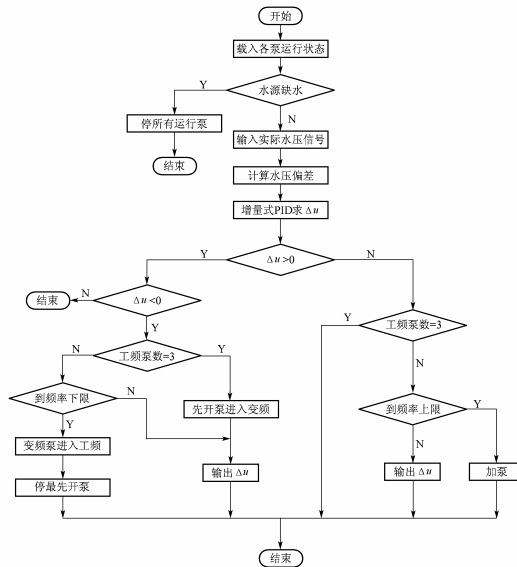


图 4.26 变频恒压供水 PLC 控制系统主程序流程

4.3.7 S7—300 可编程控制器简介

1. S7—300PLC 的组成

S7—300PLC 功能强、速度快、扩展灵活,它具有紧凑的、无槽位限制的模块化结构,其系统构成如图 4.33 所示。它的主要组成部分有导轨(RACK)、电源模块(PS)、中央处理单元模块 CPU、接口模块(IM)、信号模块(SM)、功能模块(FM)等。S7—300PLC 可以通过 MPI 网的接口直接与编程器 PG、操作员面板 OP 和其他 S7PLC 相连。导轨是安装 S7—300 各类模块的机架,电源模块、CPU 及其他信号模块都可方便地安装在导轨上。各模块在物理和电气上的连接是通过背板总线完成的,除 CPU 模块外,每块信号模块都带有总线连接器,安装时先将总线连接器装在 CPU 模块并固定在导轨上,然后依次将各模块装入。

CPU 模块有多种型号,如 CPU312IFM、CPU313、CPU314、CPU315、CPU315—2DP 等。CPU 模块除完成执行用户程序的主要任务外,还为 S7—300 背板总线提供 5V 直流电源,并通过 MPI 多点接口与其他中央处理器或编程装置通信。

S7—300 的编程装置可以是西门子专用的编程器,如 PG720, PG740 等,也可以用 PC 配以 STEP 7 软件包,并加 MPI 卡或 MPI 编程电缆构成。

信号模块 SM 使不同的过程电子信号和 S7—300 的内部信号电子相匹配,主要有数字量输入模块 SM321、数字量输出模块 SM322、模拟量输入模块 SM331、模拟量输出模块 SM332。每个信号模块都配有自编码的前连接器,外部过程信号可方便地连在信号模块的前连接器上。其模拟量输入模块独具特色,它可以接入热电偶、热电阻、4mA~20mA 电流、0~10V 电压等 18 种不同的信号,输入量程范围很宽。

功能模块 FM 主要用于实时性强、存储计数量较大的过程信号处理任务,属于智能型模块,具有相对独立的功能,可以在 CPU 的控制下完成特殊的控制任务,例如步进电机定位模块 FM353、伺服电机位控模块 FM354 等。

通信处理器是一种智能模块,它用于 PLC 间或 PLC 与其他装置间的通信与组网,例如 RS—232C 接口的 CP340、现场总线接口的 CP342—5 DP 等。

S7—300 的编程装置可以是西门子专用的编程器,如 PG720, PG740 等,也可以用 PC 机配以 STEP 7 软件包,并加 MPI 卡或 MPI 编程电缆构成。

信号模块 SM 使不同的过程电子信号和 S7—300 的内部电子信号相匹配,主要有数字量输入模块 SM321、数字量输出模块 SM322、模拟量输入模块 SM331、模拟量输出模块 SM332。每个信号模块都配有自编码的前连接器,外部过程信号可方便地连在信号模块的前连接器上。其模拟量输入模块独具特色,它可以接入热电偶、热电阻、4mA~20mA 电流、0~10V 电压等 18 种不同的信号,输入量程范围很宽。

功能模块 FM 主要用于实时性强、存储计数量较大的过程信号处理任务,属于智能型模块,具有相对独立的功能,可以在 CPU 的控制下完成特殊的控制任务,例如步进电动机定位模块 FM353、伺服电动机位控模块 FM354 等。

通信处理器是一种智能模块,它用于 PLC 间或 PLC 与其他装置间的通信与组网,例如 RS—232C 接口的 CP340、现场总线接口的 CP342—5 DP 等。

2. S7—300PLC 编程方式

S7—300PLC 的编程语言是 STEP 7，它用文件块的形式来管理用户程序及数据。如果这些文件块是子程序，可以通过调用语句，将它们组成结构化的用户程序。这样，PLC 的程序组织明确，结构清晰，易于修改。

通常，用户程序由组织块(OB)、功能块(FB, FC)、数据块(DB)构成。OB 是系统操作程序与用户应用程序在各种条件下的接口，用于控制程序运行，它内置在 CPU 中，数量和功能随 CPU 的类型不同而有所差异。不同的 OB 块执行特定的功能，如 OB1 是主程序循环块，是每个程序所必需的，用户既可将所有程序放入 OB1 中进行线性编程，也可编制功能不同的子程序，最后通过 OB1 调用这些子程序组成结构化控制程序；又如 OB35 是定时中断，可以用于各种定时操作。OB 块具有不同的优先级，高优先级的 OB 可以中断低优先级的 OB。

功能块(FB, FC)实际上是用户子程序。FB 有一个数据结构与该功能块的参数表完全相同的数据块(DB)附属于该功能块，并随功能块的调用而打开，随功能块的结束而关闭。该附属数据块叫做背景数据块(Instance DataBlock)，存放在背景数据块中的数据在 FB 块结束时继续保持，在下次功能块被调用时向功能块提供数据，类似于高级语言中的静态变量。功能块 FC 没有背景数据块，当 FC 完成操作后数据不能保持。

数据块(DB)是用户定义的数据存储区，可以是属于某个 FB 的背景数据块，也可以是通用的全局数据块，由 FB 或 FC 调用。

S7—300CPU 还提供标准系统功能块(SFB, SFC)，它们是预先编好的，经过测试集成在 CPU 中，用户可以直接调用，其功能类似于高级语言编程工具中的库函数。SFB 与 SFC 的区别在于 SFB 有自身的背景数据块。

3. S7—300 CPU 模块简介

1) CPU 模块主要特性

S7—300 系列 PLC 的 CPU 型号有 CPU312IFM、CPU313~CPU315，CPU315—2DP 等。其中 CPU312IFM 模块上集成有 10 个数字量输入点和 6 个数字量输出点。其他 CPU 模块上未集成 I/O 接口。CPU 的存储器容量、指令执行速度、可扩展的 I/O 点数、计数器/定时器数量、软件块数量等随型号的递增而增加。CPU315—2DP 与 CPU315 的区别是 CPU315—2DP 具有现场总线扩展接口。各种型号的 CPU 主要特性见表 4-31。

表 4-31 S7—300CPU 主要特性

型 号	CPU312IFM	CPU313	CPU31	CPU315/315DP—2
程序存储器	内置 20KB RAM 内置 20KB EEPROM	内置 20KB RAM 最大扩展 256KB FLASH—EPROM	内置 20KB RAM 最大扩展 512KB FLASH—EPROM	内置 20KB RAM 最大扩展 512KB FLASH—EPROM
数据存储器	6KB	12KB	24KB	48KB
位存储器	1024	2048	2048	2048

(续)				
型 号	CPU312IFM	CPU313	CPU31	CPU315/315DP—2
位操作耗时	0.6 μs	0.6 μs	0.3 μs	0.3 μs
字操作耗时	2 μs	2 μs	1 μs	1 μs
定点数加耗时	3 μs	3 μs	2 μs	2 μs
浮点数加耗时	60 μs	60 μs	50 μs	50 μs
最大数字量 I/O 数	144(含 CPU 集成)	128	512	1024
最大模拟量 I/O 数	32	32	64	128
时钟类型	软件时钟	软件时钟	硬件时钟	硬件时钟
定时器	64	64	64	64
计数器	32	64	64	64

2) CPU 模块的测试功能

S7—300CPU 提供了一系列的测试功能，通过编程装置和 STEP 7 软件可以查看这些信息，其主要内容有“状态变量”、“强制变量”、“状态块”等。“状态变量”用于监视用户程序执行过程中所选定的过程变量的数值。“状态块”监视一个和程序执行顺序有关的块，用来支持启动和故障诊断。“强制变量”可以给所选定的过程变量强制赋值，强制改变用户程序的执行条件。

3. S7—300 I/O 模块简介

S7—300PLC 提供了多种基本 I/O 模块和特殊功能模块，这里主要对数字量输入模块 SM321、数字量输出模块 SM322、模拟量输入模块 SM331、模拟量输出模块 SM332 作简要介绍。

数字量输入模块 SM321 将外部数字信号经过光电隔离和滤波后，转换为 S7—300 内部电平信号，送到输入缓冲器等待 CPU 采样。信号输入方式也分为干接点式、直流输入式、交流输入式 3 种。SM321 有 4 种型号供用户选择，分别是直流 16 点输入、直流 32 点输入、交流 16 点输入、交流 32 点输入，每个输入点都有对应的 LED 指示，当外部开关闭合时 LED 点亮。

数字量输出模块 SM322 将 S7—300 内部电平信号转换为现场需要的外部信号电平，用于驱动不同的现场设备。信号输出方式也分为晶体管式、晶闸管式、继电器式 3 种。SM322 的型号有 7 种，分别是晶体管 8 点输出、晶体管 16 点输出、晶体管 32 点输出、晶闸管 8 点输出、晶闸管 16 点输出、继电器 8 点输出、继电器 16 点输出，每个输出点都有对应的 LED 指示，当输出逻辑“1”时 LED 点亮。

模拟量输入模块 SM331 的核心是 ADC，其他部件还有多路开关、恒流源、补偿电路等。ADC 转换器采用双积分型原理，转换时间越长则转换精度越高。SM331 有 4 个可选的转换时间 2.5ms、16.7ms、20ms、100ms，对应精度为 9 位、12 位、12 位、14 位。为了抑制工频干扰，选择 20ms 是比较合适的。SM331 有两种型号可供选择，分别是 2 路输

入和 8 路输入，由于每一路的采样都会有延迟，所以在采样时间要求较快时优先选择 2 路输入形式。SM331 每 2 路通道构成一个通道组，可以用来接入四线制仪表。SM331 可接入的仪表类型很多，包括热电偶、热电阻、电压型传感器、电流型传感器等，具体的接线方法、量程设置等信息可查阅相关手册。

模拟量输出模块 SM332 的输出精度为 12 位，核心部件为 D/A 转化器，其响应时间受负载影响。SM332 可以输出电压或电流，可以使用四线制或二线制。在电压输出时采用四线制方式可以获得较高的精度。SM332 有二通道和四通道两种型号，每个通道都可设置为电压输出或电流输出。为提高抗干扰能力，SM332 对背板总线和负载均采用了光电隔离。

4. S7—300 通信接口

1) CPU 内置 MPI 接口

S7—300 系列 PLC 全部内置了用 MPI 接口，可构成低成本的 MPI 网，实现网上各 S7PLC 间数据共享。MPI 网在内置的 S7 协议(S7 Protocol)支持下工作，在 S7 系统内，对编程器、CPU 和 I/O 等进行内部数据交换。MPI 接口的用途之一是把各种具有 MPI 的设备连接起来组成 MPI 网，这些设备有：PG(编程器)、OP(操作面板)、S7—300、S7—400PLC 等。MPI 接口的用途之二是以全局数据通信方式实现网上 CPU 间的少量数据交换。MPI 网络的部分指标如下：站点总数 32、传输速度 187.5kbit/s、站间最大距离 50m、使用光纤最大距离 23.8km。

2) 专用通信模块

(1) CP340 通信模块。CP340 是一种经济型的串行通信处理器模块，数据通过 RS—232C 接口进行传输，适合于点到点设备的连接。通过 CP340 不仅能实现 S7 系列 PLC 的互联，而且能与来自其他制造商的系统或设备互联，如打印机、Modems、条码阅读机等。CP340 的前面板有数据发收和错误指示，内部固化有 ASCII 和 3964 两种标准协议，可以与多种设备进行数据交换。ASCII 协议是与外部系统相连接的简单协议，带有文本字符的起停或块检查字符，接口的握手信号由用户程序查询和控制。3964 协议用于连接西门子设备及第三方设备的协议，它是由西门子公司进行标准化的并且对外开放的协议。

CP340 通信模块参数设定十分简便，用集成在 STEP 7 软件中的参数配置功能即可完成，用户可以很方便地设定 CP340 的通信协议及参数。参数配置有 3 种途径：一个是手工配置，一个是填写参数表格，一个是用标准功能块。

CP340 通信模块的技术数据如下：接口标准 RS—232C(信号对 S7 电源隔离)；数据传输率为 2.4/4.8/9.6(kbit/s)；传输距离为 15m；通信协议位 ASCII 或 3964。

(2) CP342—5 DP 通信模块。CP342—5 DP 是一个智能化的通信模块，能大大减轻 CPU 的通信负担。CP342-5 DP 提供给用户 SINEC L2 网的各种通信服务，既可以作为主机或从机将 ET200 远程 I/O 系统连接到符合 DIN E 19 245, Part 3 的 PROFIBUS 现场总线中去，也可以与编程装置或人机接口(HMI)通信，还可以与其他 S7PLC 通信，并且可以与其他的具有 FDL(Field Bus Link)接口的系统建立连接。CP342—5 DP 也能与 MPI 分支网上的其他 CPU 进行全局数据通信。使用 NCM S7—L2 组态软件可以为实现上面功能进行参数配置。

CP342—5 DP 内部有 128KB 的 Flash—EPROM，可以可靠地进行参数后备，在掉电

时也能保持参数。CP342—5 DP 主要技术数据如下：用户存储器(Flash EPROM)128KB；SINEC L2LAN 标准符合 DIN 19 245；传输方式 RS—485；传输速度 9.6kbit/s~1500kbit/s；站点数 127 台。

本章小结

前已述及，以计算机为核心的数字控制系统正在控制系统中占据越来越重要的地位，对数字控制系统的控制模式，使用方法等正得到深入探讨和积极使用。但是，无论在被控对象的动态模型精度方面，还是在先进策略的实际应用方面，都还不能适应高等控制策略的需要，而且，控制过程的优化操作等手段的在线应用也受到比较大的限制。所以，开发运算能力更强、算法更灵活、策略更先进的数字控制仪表就成为迫在眉睫的问题。

本章讨论的主要是各种数字控制系统的类型、常用的数字控制算法和数字控制仪表。重点在于常规模拟式 PID 的数字化实现和以西门子 S7—200 为代表的可编程逻辑控制器的原理和应用，这种控制算法和控制器在控制领域得到了广泛使用，具有很强的代表意义。

应该指出，小型 PLC 只具备了可编程逻辑控制器简单功能和特点，大中型 PLC 将具备更加完善的功能和处理能力。但是，小型 PLC 更适合初学者的学习，比较容易理解和记忆。在熟悉了小型 PLC 之后，学习和使用大中型 PLC 就会更加方便和简捷。

思考题与习题

- 4-1 常用的数字控制仪表的机型有哪些？各有何特点？
- 4-2 常见的数字控制系统有哪些？各有何功能？
- 4-3 数字化 PID 的位置式和增量式分别是什么？试比较二者优缺点。绘制增量式数字 PID 算法的程序框图，并编写源程序。
- 4-4 理想 PID 算法和实际 PID 算法的区别体现在哪里？
- 4-5 数字控制系统中，如何消除积分饱和现象？
- 4-6 各种改进型数字 PID 算法适用于什么场合？
- 4-7 采样周期 T 对控制系统性能的影响是什么？应该如何确定？
- 4-8 PLC 有何主要特点？
- 4-9 PLC 有何外部设备？各有何作用？
- 4-10 简述 PLC 的工作过程。说明 PLC 在输入输出过程的特点。
- 4-11 简述 PLC 的各种输入输出类型单元的特点。说明它们的使用场合。
- 4-12 PLC 梯形图与电气控制梯形图的区别在哪里？
- 4-13 PLC 的寻址方式有哪些？如何使用？
- 4-14 PLC 的存储区域是如何划分的？读写方式有何区别？
- 4-15 S7—200PLC 的指令系统包含哪几类指令？各有何功能？

- 4-16 简述 PLC 系统的设计原则和步骤。
- 4-17 简述 PLC 控制软件的开发方法和步骤。
- 4-18 S7—300PLC 的程序块有哪些？各有何作用？
- 4-19 S7—300PLC 的通信方式有哪些？

第 5 章 执行器和防爆栅

执行器由执行机构和调节机构(调节阀)两部分组成。在过程控制系统中,它接受调节器输出的控制信号,直接控制能量或物料等被调介质的输送量,达到调节温度、压力、流量等工艺参数的目的,对于建筑电气来讲可以实现断路器的分合闸以及发出报警信号等,从而实现对过程参数的自动控制。

执行器安装在生产现场,代替了人的操作,人们常形象地称之为实现自动化的“手脚”,同时执行器直接与介质接触,通常在高温、高压、高黏度、强腐蚀、易结晶、易燃易爆、剧毒等场合下工作,如果选用不当,将直接影响过程控制系统的控制质量。

仪表安装在生产现场,如果现场存在易燃易爆的气体、液体或粉末,一旦发生危险火花,就可能引起燃烧或爆炸事故。因此,必须构建一个安全火花防爆系统,才能完成完全意义上的过程控制,而构成一个安全火花防爆系统的要素之一是防爆栅。

本章主要对执行器和防爆栅这两个内容加以讲述。

5.1 执 行 器

根据使用能源不同,执行器可分为 3 大类:以压缩空气为能源的气动执行器(即气动调节阀);以电为能源的电动执行器(即电动调节阀);以高压液体为能源的液动执行器(即液动调节阀)。在过程控制中,气动执行器应用最多,其次是电动执行器。气动执行器的输入信号为 20kPa~100kPa;电动执行器的输入信号为 DC0~10mA(DDZ—II 型)或 DC4~20mA(DDZ—III 型)。

气动执行器的结构简单,维修方便,价格便宜,并具有防火防爆特点,因此,广泛应用于石油、化工、冶金、轻工等工业部门,尤其适用于易燃易爆的生产过程。

电动执行器动作迅速,其信号便于远传,并便于与计算机配合使用,但不适用于防火、防爆等生产场合。

液动执行器的推力最大,但目前使用不多。

本节介绍电动和气动执行器,着重介绍工业自动化中最常用的气动执行器的结构原理、特性和选用等。应该指出,上述 3 种执行器除执行机构不同外,所用的调节机构(调节阀)都相同,所以本节介绍的气动调节阀的特性及其选用方法均适用于其他类型。

5.1.1 气动执行器

气动执行器是指以压缩空气为动力的执行器,一般由气动执行机构和调节阀两部分组成。在工作条件差或调节质量要求高的场合,还配上阀门定位器等附件。

目前使用的气动执行机构主要有薄膜式和活塞式两大类。其中,气动薄膜执行机构使用弹性膜片将输入气压转变为推力,由于结构简单,价格便宜,使用最为广泛。气动活塞

式执行机构以气缸内的活塞输出推力，由于气缸允许压力较高，可获得较大的推力，并容易制成长行程的执行机构。

图 5.1 所示为典型的气动执行器的结构示意图。它可以分为上、下两部分，上半部分是产生推力的薄膜式执行机构，下半部分是调节阀。其中，薄膜式执行机构主要由弹性薄膜、压缩弹簧和推杆等组成。当 $20\text{kPa}\sim 100\text{kPa}$ 的标准气压信号 P 进入薄膜气室时，在膜片上产生向下的推力，克服弹簧反力，使推杆产生位移，直到弹簧的反作用力与薄膜上的推力平衡为止。因此，这种执行机构的特性属于比例式，即平衡时推杆的位移与输入气压大小成比例。图中的调节螺钉可用来改变压缩弹簧的起始压力，从而调整执行机构的工作零点。

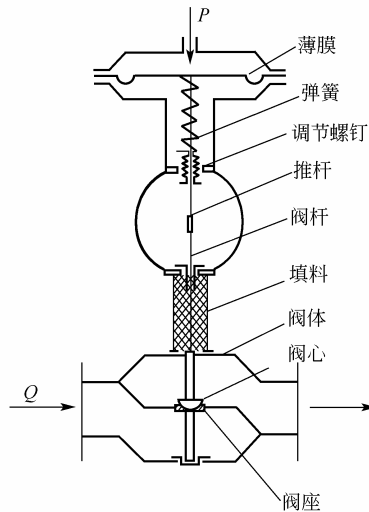


图 5.1 气动执行器

调节阀部分主要由阀杆、阀体、阀心及阀座等部件所组成。当阀心在阀体内上下移动时，可改变阀心与阀座间的流通面积，控制通过的流量。图 5.1 表示的执行器常称为气闭式单座调节阀。“单座”是说它只有一套阀心阀座，“气闭式”是说这种气动执行机构当信号气压 P 增加时，阀门开度减小，趋向关闭。从图中可以看到，这种调节阀的各个部分是用螺钉连接的，其阀体和阀心一起上下倒装，很容易改装成“气开式”调节阀。气开、气闭的选择主要从生产安全角度考虑。当工厂发生断电或其他事故引起信号压力中断时，调节阀的开闭状态应避免损坏设备和伤害操作人员，如阀门在此时打开危险性小，则宜选气闭式执行器；反之，则选用气开式执行器。

单座调节阀的缺点是被调节流体对阀心有作用力。如图 5.2(a)中，流体由下向上流动时，阀心将受到一定的向上推力，在阀门全关时此推力最大；在图 5.2(b)中，流体由上向下通过，由于流体对阀心的抽吸作用，在阀心上将受到一个向下的作用力。在阀前后压差高或阀尺寸大时，这一作用力可能相当大，严重时会使调节阀不能正常工作。因此，在自动调节系统中有时采用双座阀，其示意图如图 5.3 所示。它有两套阀心、阀座，流体同时从上下两个阀座通过，由于流体对上下阀心的作用力方向相反而大致抵消，因而双座阀的

不平衡力小, 适宜于作自动调节之用。双座阀的缺点是上下两组阀心不易保证同时关闭, 因而关闭时泄漏量比单座阀大。此外, 其价格也比单座阀贵。

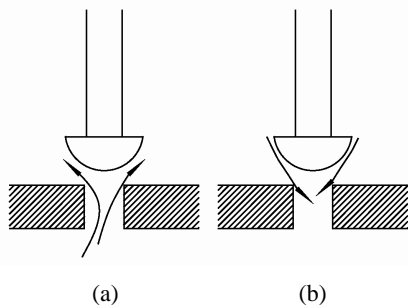


图 5.2 流体对阀心的作用力

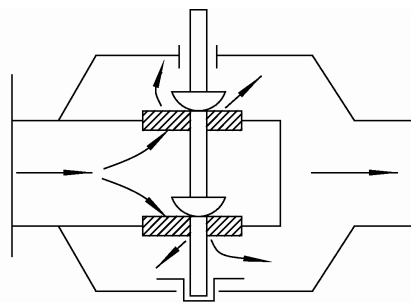


图 5.3 直通双座阀

从自动控制的角度看, 调节阀一个最重要的特性是它的流量特性, 即调节阀阀心位移与流量之间的关系。值得指出, 调节阀的特性对整个自动调节系统的调节品质有很大的影响。实际上不少调节系统工作不正常, 往往是由于调节阀的特性选择不合适, 或阀心在使用中受腐蚀磨损, 使特性变坏而引起的。

通过调节阀的流量大小不仅与阀的开度有关, 还和阀前后的压差高低有关。工作在管路中的调节阀, 当阀开度改变时, 随着流量的变化, 阀前后的压差也发生变化。为分析方便, 在研究阀的特性时, 先把阀前后压差固定为恒值进行研究, 然后再考虑阀在管路中的实际情况进行分析。

1. 固有流量特性

在调节阀前后压差固定的情况下得出的流量特性称为固有流量特性, 也叫理想流量特性。显然, 这种流量特性完全取决于阀心的形状, 不同的阀心曲面可得到不同的流量特性, 它是一个调节阀固有的特性。

在目前常用的调节阀中, 有三种典型的固有流量特性。第一种是直线特性, 其流量与阀心位移成直线关系; 第二种是对数特性, 其阀心位移与流量间成对数关系, 由于这种阀的阀心移动所引起的流量变化与该点原有流量成正比, 即引起的流量变化的百分比是相等的, 所以也称为等百分比流量特性; 第三种典型的特性是快开特性, 这种阀在开度较小时, 流量变化比较大, 随着开度增大, 流量很快达到最大值, 所以叫快开特性, 它不像前两种特性可有一定的数学式表达。

上述三种典型的固有流量特性示于图 5.4, 在作图时为便于比较, 都用相对值, 其阀心位移和流量都用自己的最大值的百分数表示。由于阀常有泄漏, 实际特性可能不经过坐标原点。从流量特性来看, 线性阀的放大系数在 any 一点上都是相同的; 对数阀的放大系数随阀的开度增加而增加; 快开阀与对数阀相反, 在小开度时具有最高的放大系数。从阀心的形状来说, 如图 5.5 所示, 快开特性的阀心是平板形的, 加工最为简单; 对数和直线特性的阀心都是柱塞形的, 两者的差别是对数阀阀心曲面较胖, 而直线特性的阀心较瘦。阀

心曲面形状的确定，目前是在理论计算的基础上，再通过流量试验进行修正得到的。三种阀心中以对数阀心的加工最为复杂。

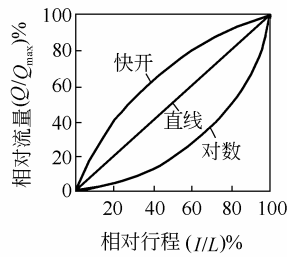


图 5.4 调节阀的典型固有特性

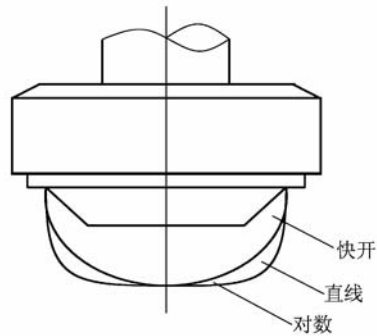


图 5.5 三种阀心形状

2. 工作流量特性

调节阀在实际使用时，其前后压差是变化的。在各种具体的使用条件下，阀心位移对流量的控制特性，称为工作流量特性。在实际的工艺装置上，调节阀由于和其他阀门、设备、管道等串联或并联，使阀两端的压差随流量变化而变化。其结果使调节阀的工作流量特性不同于固有流量特性。串联的阻力越大，流量变化引起的调节阀前后压差变化也越大，特性变化得也越厉害。所以阀的工作流量特性除与阀的结构有关外，还取决于配管情况。同一个调节阀，在不同的外部条件下，具有不同的工作流量特性，在实际工作中，使用者最关心的也是工作流量特性。

下面通过一个实例，看看调节阀怎样在外部条件影响下，由固有流量特性转变为工作流量特性的。图 5.6(a)表示的是调节阀与工艺设备及管道阻力串联的情况，这是一种最常见的典型情况。如果外加压力 P_0 恒定，那么当阀开度加大时，随着流量 Q 的增加，设备及管道上的压降 ΔP_g 将随流量 Q 的平方增加，如图 5.6(b)所示。随着阀门的开大，阀前后的压差 ΔP_T 将逐渐减小。因此在同样的阀心位移下，此时的流量变化与阀前后保持恒压差的理想情况相比要小一些。特别是在阀开度较大时，由于阀前后压差 ΔP_T 变化厉害，阀的实际控制作用可能变得非常迟钝。如果用固有特性是直线特性的阀，那么由于串联阻力的影响，实际的工作流量特性将变成图 4.7(a)中表示的曲线。该图纵坐标是相对流量 Q/Q_{max} ， Q_{max} 表示串联管道阻力为零时，阀全开时达到的最大流量。图上的参变量 $s = \Delta P_{Tmin} / P_0$ 表示存在管道阻力的情况下|阀全开时阀前后最小压差 ΔP_{Tmin} 占总压力 p_0 的百分数。

从图 5.7 可看到，当 $s=1$ 时，管道压降为零，阀前后的压差始终等于总压力，故工作流量特性即为固有流量特性；在 $s<1$ 时，由于串联管道阻力的影响，使流量特性产生两个变化：一个变化是阀全开时的流量减小，也就是阀的可调范围变小；另一个变化是使阀在大开度时的控制灵敏度降低。例如图 5.7(a)中，固有流量特性是直线的阀，工作流量特性变成快开特性。图 5.7(b)中，固有特性为对数的趋向于直线特性。参变量 s 的值愈小，流量特性变形的程度愈大。

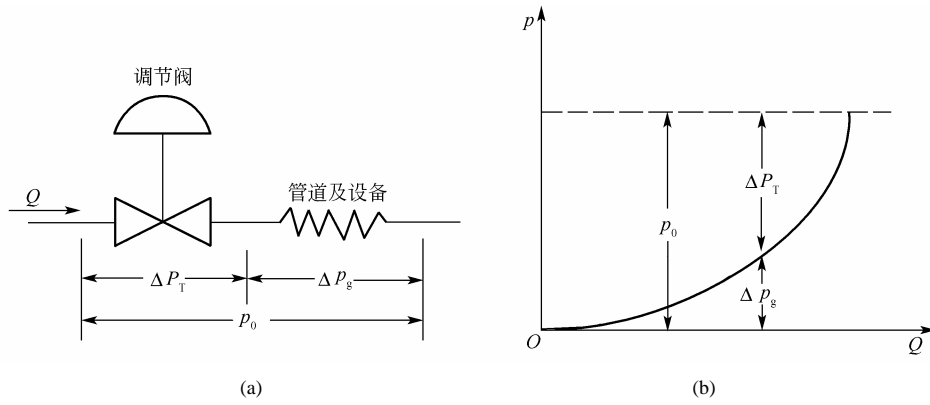


图 5.6 调节阀和管道阻力串联的情况

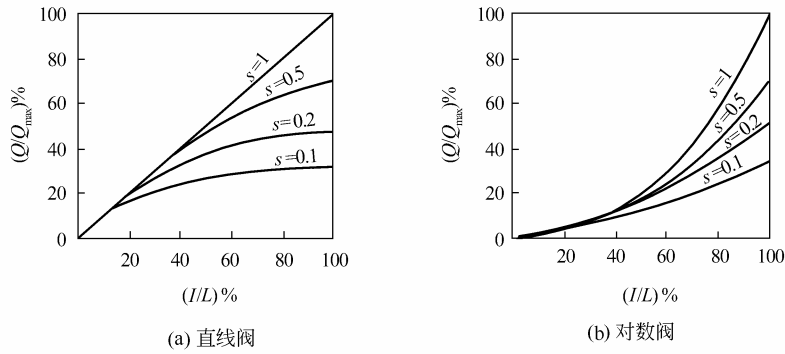


图 5.7 串弹簧管道中调节阀的工作特性

在实际工作中，调节阀特性的选择是一个重要的问题。从调节原理来看，要保持一个调节系统在整个工作范围内都具有较好的品质，就应使系统在整个工作范围内的总放大倍数尽可能保持恒定。通常，变送器、调节器和执行机构的放大倍数是常数，但调节对象的特性往往是非线性的，其放大倍数常随工作点变化。因此选择调节阀时，希望以调节阀的非线性补偿调节对象的非线性。例如，在实际生产中，很多对象的放大倍数是随负荷加大而减小的，这时如能选用放大倍数随负荷加大而增加的调节阀，便能使两者互相补偿，如图 5.8 所示，从而保证整个工作范围内都有较好的调节质量。由于对数调节阀具有这种类型的特性，因此得到广泛的应用。

若调节对象的特性是线性的，则应选用具有直线流量特性的阀，以保证系统总放大倍数保持恒定。至于快开特性的阀，由于小开度时放大倍数高，容易使系统振荡，大开度时调节不灵敏，在连续调节系统中很少使用，一般只用于两位式调节的场合。

必须说明，按上述原则选择的调节阀特性是实际需要的工作流量特性。在确定调节阀时，必须具体地考虑管道、设备的连接情况以及泵的特性，由工作流量特性推出需要的固有流量特性。例如，在一个其他环节都具有线性特性的系统中，按上述非线性互相补偿的原则，应选择工作流量特性为线性的调节阀，但如果管道的阻力状况 $S=0.3$ ，则由图 5.7 知，此时固有流量特性为对数特性的阀，工作特性已经变形为直线特性，故必须选用固有特性为对数特性的阀。

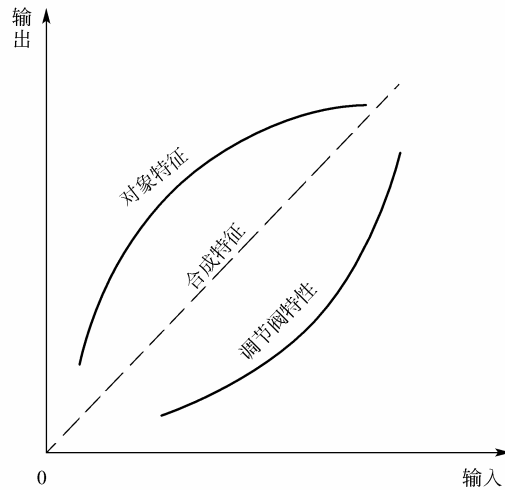


图 5.8 阀和对象性的非线性互相补偿

最后再简要介绍一下调节阀口径的选择方法。在控制系统中，为保证工艺操作的正常进行，必须根据工艺要求，准确计算阀门的流通能力，合理选择调节阀的尺寸。如果调节阀的口径选得太大，将使阀门经常工作在小开度位置，造成调节质量不好。如果口径选得太小，阀门完全打开也不能满足最大流量的需要，就难以保证生产的正常进行。

根据流体力学，对不可压缩的流体，在通过调节阀时产生的压力损失 ΔP 与流体速度之间有

$$\Delta P = \xi \rho \frac{V^2}{2} \tag{5-1}$$

式中， V ——流体的平均流速；

ξ ——流体密度；

ρ ——调节阀的阻力系数，与阀门的结构形式及开度有关。

因流体的平均流速 V 等于流体的体积流量 Q 除以调节阀连接管的截面积 A ，即 $V = Q/A$ ，代入上式并整理，即得流量表达式

$$Q = \frac{A}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

若面积 A 的单位取 cm^2 ，压差 ΔP 的单位取 kPa ，密度 ρ 的单位取 kg/m^3 ，流量 Q 的单位取 m^3/h ，则上式可写成数值表达式

$$\begin{aligned} Q &= 3600 \times \frac{1}{\sqrt{\xi}} \frac{A}{10^4} \sqrt{2 \times 10^3 \frac{\Delta P}{\rho}} \\ &= 16.1 \frac{A}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \end{aligned} \tag{5-2}$$

由上式可知，通过调节阀的流体流量除与阀两端的压差及流体种类有关外，还与阀门口径及阀心阀座的形状等因素有关。为说明调节阀的结构参数，工程上将阀门前后压差为

100kPa, 流体密度为 1000kg/m^3 的条件下, 阀门全开时每小时能通过的流体体积(m^3)称为该阀门的流通能力 C 。

根据流通能力 C 的上述定义, 由式(5-2)可知

$$C = 5.09 \frac{A}{\sqrt{\xi}} \quad (5-3)$$

在调节阀的手册上, 对不同口径和不同结构形式的阀门分别给出了流通能力 C 的数值, 可供用户选用。

这样, 式(5-2)可改写为

$$Q = C \sqrt{\frac{10\Delta P}{\rho}} \quad (5-4)$$

此式可直接用于液体的流量计算, 也可用来在已知差压 ΔP 、液体密度 ρ 及需要的最大流量 Q_{\max} 的情况下, 确定调节阀的流通能力 C , 选择阀门的口径及结构形式。但当流体是气体、蒸汽或二相流时, 以上的计算公式必须进行相应的修正。

5.1.2 电-气转换器

如上所述, 由于气动执行器具有一系列的优点, 绝大部分使用电动调节仪表的系统也都使用气动执行器。为了使气动执行器能够接收电动调节器的命令, 必须把调节器输出的标准电流信号转换为 $20\text{kPa} \sim 100\text{kPa}$ 的标准气压信号, 即使用电-气转换器。

从原则上说, 电-气转换器是前面讨论的压力变送器的逆运用。图 5.9 是一种力平衡式电-气转换器的原理图, 由电动调节器送来的电流 I 通入线圈, 该线圈能在永久磁铁的气隙中自由地上下运动, 当输入电流 I 增大时, 线圈与磁铁产生的吸力增大, 使杠杆作逆时针方向转动, 并带动安装在杠杆上的挡板靠近喷嘴, 改变喷嘴和挡板之间的间隙。

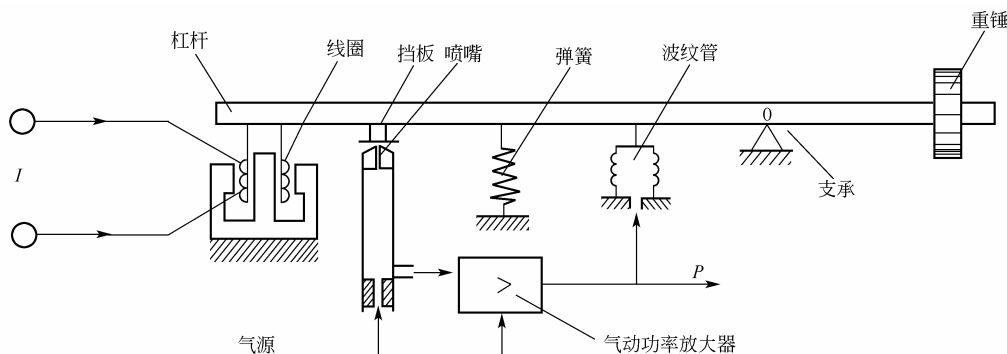


图 5.9 电-气转换器的原理图

喷嘴挡板机构是气动仪表中一种最基本的变换和放大环节, 能将挡板对于喷嘴的微小位移灵敏地变换为气压信号, 其结构如图 5.10 所示。一般由恒节流孔、背压室及喷嘴挡板三部分组成。恒节流孔在构造上是一段窄狭细长的气体通道, 当通过的气流为层流状态时, 其两端的压降与流量成线性关系, 成为一个固定的气阻, 相当于电路中的固定电阻。显然喷嘴挡板是一个可变气阻, 当挡板与喷嘴的相对距离改变时, 由背压室排入大气的气阻跟

着变化。

在图 5.10 中, 洁净的压缩空气由气源经恒节流孔进入背压室, 再由喷嘴挡板间的缝隙排入大气。当恒节流孔与喷嘴的尺寸配合适当时(相当于晶体管放大电路中集电极负载电阻与晶体管参数要配合适当一样), 这种简单的机构能得到极高的灵敏度, 挡板只要有几微米(百分之几毫米)的位移, 就可由气阻变化, 使背压室的输出压力 P 发生满幅度的变化, 其特性如图 5.10 中的曲线所示。这是一种很好的位移检测元件。

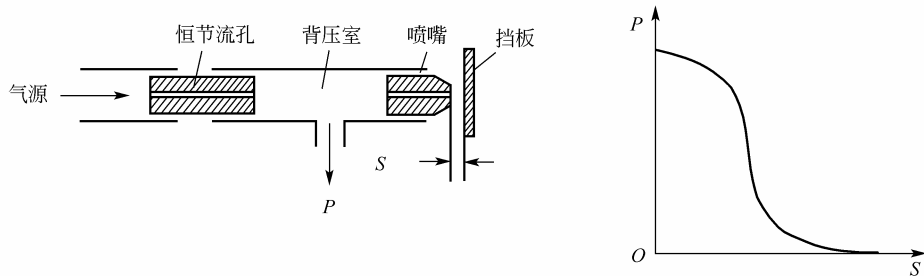


图 5.10 喷嘴挡板机构的构造和特性

由于喷嘴挡板机构中的恒节流孔的气阻较大, 因此从背压室输出的气量不大。它好像是电子线路中的电压放大器, 由于输出阻抗较高, 不能直接带动负载, 必须经过功率放大器后才能输出。

因此可知图 5.9 中表示的电-气转换器。当挡板靠近喷嘴, 使喷嘴挡板机构的背压 P 升高时, 这个压力经过气动功率放大器的放大(功率放大器在后面阀门定位器中讨论), 产生输出压力 P , 作用于波纹管, 对杠杆产生向上的反馈力。它对支点 O 形成的力矩与电磁力矩相平衡, 构成闭环系统。根据力平衡式仪表的工作原理, 只要位移检测放大器灵敏度足够高, 平衡时杠杆的位移必然很小, 不平衡力矩可忽略不计, 输入电流信号 I 必能精确地按比例转换成气压信号 P 。

在图 5.9 中, 弹簧可用于调整输出零点。该转换器的量程调节, 粗调可左右移动波纹管的安装位置, 细调可调节永久磁场的磁分路螺钉。重锤用来平衡杠杆的质量, 使其在各种安装装置都能准确工作。为减小支点的静摩擦, 和压力变送器中的做法一样, 支点都采用十字簧片弹性支承。一般, 这种转换器的精度为 0.5 级, 气源压力为 $140\text{kPa} \pm 14\text{kPa}$, 输出气压信号为 $20\text{kPa} \sim 100\text{kPa}$, 可用于直接推动气动执行机构, 或做较远距离的传送。

5.1.3 阀门定位器

在图 5.11 的气动调节阀中, 阀杆的位移是由薄膜上的气压推力与弹簧反作用力平衡来确定的。实际上, 为了防止阀杆引出处的泄漏, 填料总要压得很紧。尽管填料选用密封性好而摩擦因数小的聚四氟乙烯等优质材料, 填料对阀杆的摩擦力仍是不小的。特别是在压力较高的阀上, 由于填料压得很紧, 摩擦力可能相当大。此外, 被调节流体对阀心的作用力, 在阀的尺寸大或阀前后压差高、流体黏性大及含有固体悬浮物时也可能相当大。所有这些附加力都会影响执行机构与输入信号之间的定位关系。使执行机构产生回环特性, 严

重时造成调节系统振荡。因此，在执行机构工作条件差及要求调节质量高的场合，都在调节阀上加装阀门定位器。其框图如图 5.11 所示。借助于阀杆位移负反馈，使调节阀能按输入信号精确地确定自己的开度。

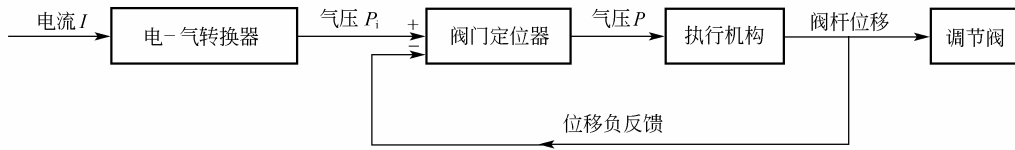


图 5.11 带定位器的气动执行器

如图 5.12 所示是气动阀门定位器与执行机构配合使用的原理图。定位器是一个气压-位移反馈系统，由调节器来的气压信号 P_i 作用于波纹管，使托板以反馈凸轮为支点转动，于是托板带着挡板靠近喷嘴，使其背压室，即气动放大器中气室 A 内压力上升。这种气动放大器的放大气路是由两个变节流孔串联构成的，其中一个为圆锥-圆柱型的，称为锥阀，另一个是圆球-圆柱型，称为球阀。球阀用来控制气源的进气量，只要使圆球有很小的位移，便可引起进气量的很大变化。锥阀是用来控制排入大气的气量的，这两个阀由阀杆互相联系成为一个统一体。当挡板移近喷嘴，使其背压室 A 中压力上升时，就推动膜片使锥阀关小，球阀开大。这样，气源的压缩空气就较易从 D 室进入 C 室，而较难排入大气，使 C 室的压力 P 急剧上升。C 室的压力 P 也就是阀门定位器的输出气压，此压力送往执行机构，通过薄膜产生推力，使推杆移动。此推杆的位移量通过反馈杆带动凸轮转动而反馈回来。凸轮的设计一般是使推杆行程正比地转变为托板下端的左右位移，这样就构成了位移负反馈。当执行机构推杆向下移动时，托板的下端向右移动，使挡板离开喷嘴，从而使气动放大器输出压力减小，最后达到平衡位置。在平衡时，由于气动放大器的放大倍数很高，喷嘴与挡板之间的距离几乎不变。根据位移平衡原理，可推知执行机构行程必与输入信号气压 P_i 成比例关系。因此，使用这样的阀门定位器后，可保证阀心按调节信号精确定位。

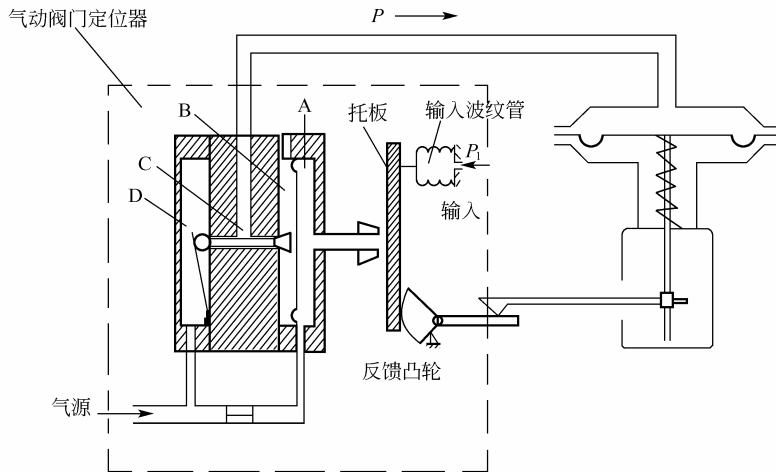


图 5.12 气动阀门定位器与执行机构的配合

这里采用的气动放大器是一种典型的功率放大器，其气压放大倍数约为 10~20 倍。它的输出气量很大，有很强的负载能力，故可直接推动执行机构。

阀门定位器除了克服阀杆上的摩擦力，消除流体作用力对阀位的影响，提高执行器的静态工作精度外，由于它具有深度位移负反馈，使用了气动功率放大器，增强了供气能力，因而也能提高调节阀的动态性能，大大加快执行机构的动作速度。此外，在需要的时候，还可改变定位器中反馈凸轮的形状，来修改调节阀的流量特性，以适应调节系统的要求。

经过上面的讨论，不难想到，可以把上述的电-气转换器与气动阀门定位器结合成一体，组成电-气阀门定位器。这种装置的结构原理如图 5.13 所示，其基本思想是直接将正比于输入电流信号的电磁力矩与正比于阀杆行程的反馈力矩进行比较，并建立力矩平衡关系，实现输入电流对阀杆位移的直接转换。具体的转换过程是这样的，输入电流 I 通入绕于杠杆外的力线圈，它产生的磁场与永久磁铁相作用，使杠杆绕支点 O 转动，改变喷嘴挡板机构的间隙，使其背压改变，此压力变化经气动功率放大器放大后，推动薄膜执行机构使阀杆移动。在阀杆移动时，通过连系杆及反馈凸轮，带动反馈弹簧，使弹簧的弹力与阀杆位移作比例变化，在反馈力矩等于电磁力矩时，杠杆平衡。这时，阀杆的位置必定精确地由输入电流 I 确定。由于这种装置的结构比分别使用电-气转换器和气动阀门定位器简单得多，所以价格便宜，应用十分广泛。

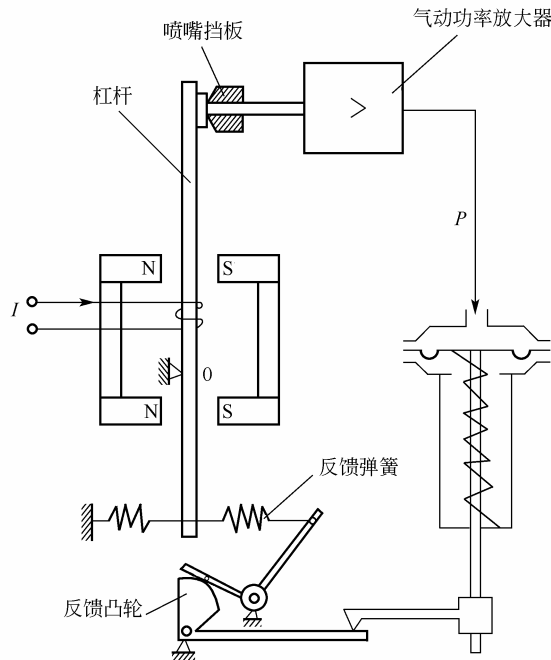


图 5.13 电-气阀门定位器的原理图

在需要防火防爆的生产现场使用电-气阀门定位器时，DDZ—III型仪表采取的安全措施是，一方面将电动调节器的输出电流经过专门的安全保持器，进行严格的限压限流及电路隔离后才送往现场；另一方面，在现场严格防止危险火花的出现。由于电-气阀门定位器的力线圈匝数多，电感量大(约 5H)，在现场是一个高储能的危险元件，故对它先用环氧树脂浇注固封，然后加以双重续流保护，如图 5.14 所示。保护稳压二极管 VD_3 、 VD_4 在正常

工作时是截止的，当发生事故时，例如当外部突然断线时，储存在力线圈中的危险能量可通过续流二极管 VD_3 、 VD_4 的正向导电而缓缓释放，从而限制断线处的火花能量在安全火花的范围之内。这些保护二极管都被安装在最靠近力线圈的地方，且焊好后，再用硅橡胶做二次灌封。实际上这种措施对于力线圈内部故障来说，采取的是密封隔爆方式，因而整套的电-气阀门定位器属于安全火花和隔爆复合型防爆结构。

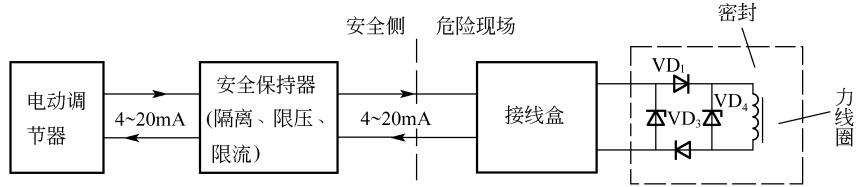


图 5.14 电气阀门定位器的安全防爆

电动执行器也由执行机构和调节阀两部分组成。其中调节阀部分常和气动执行器是通用的，不同的只是电动执行器使用电动执行机构，即使用电动机等电的动力来启闭调节阀。

电动执行器根据不同的使用要求有各种结构。最简单的电动执行器称为电磁阀，它利用电磁铁的吸合和释放，对小口径阀门进行通断两种状态的控制。由于结构简单、价格低廉，常和两位式简易调节器组成简单的自动调节系统，在生产中有一定的应用。除电磁阀外，其他连续动作的电动执行器都使用电动机作动力元件，将调节器来的信号转变为阀的开度。

电动执行机构根据配用的调节阀不同，输出方式有直行程、角行程和多转式 3 种类型，可和直线移动的调节阀、旋转的蝶阀、多转的感应调压器等配合工作。在结构上，电动执行机构除可与调节阀组装成整体式的执行器外，常单独分装以适应各方面的需要，使用比较灵活。

电动执行机构一般采用随动系统的方案组成，如图 5.15 所示。从调节器来的信号通过伺服放大器驱动电动机，经减速器带动调节阀，同时经位置发信器将阀杆行程反馈给伺服放大器，组成位置随动系统。依靠位置负反馈，保证输入信号准确地转换为阀杆的行程。

为了简单，电动执行器中常使用两位式放大器和交流鼠笼式电动机组成交流继电器式随动系统。执行器中的电动机常处于频繁的启动、制动过程中，在调节器输出过载或其他原因使阀卡住时，电动机还可能长期处于堵转状态。为保证电动机在这种情况下不致因过热而烧毁，电动执行器都使用专门的异步电动机，以增大转子电阻的办法，减小启动电流，增加启动力矩，使电动机在长期堵转时温升也不超出允许范围。这样做虽使电动机效率降低，但大大提高了执行器的工作可靠性。

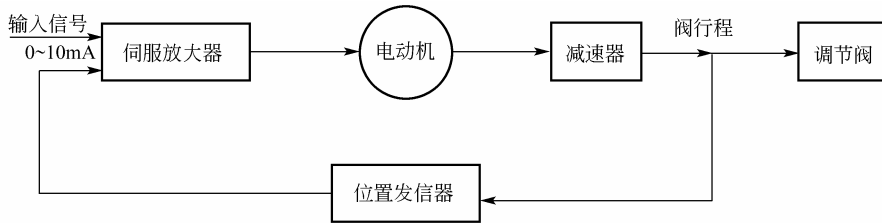


图 5.15 电动执行器的框图

与两相电机配合工作的伺服驱动电路如图 5.16 所示，它由前置放大器和晶闸管驱动电路两部分组成。前置放大器是一个增益很高的放大器，根据输入信号与反馈信号相减后偏差的正负，在 a、b 两点产生两位式的输出电压，控制两个晶闸管触发电路中一个工作，一个截止。例如，当前置放大器输出电压的极性为 a(+)、b(-) 时，触发电路 2 被截止，晶闸管 SCR_2 不通，由触发电路 1 连续地发出一系列触发脉冲，使晶闸管 SCR_1 完全导通。由于 SCR_1 接在二极管桥式整流器的直流端，它的导通使桥式整流器的 c、d 两端近于短接，故 220V 的交流电压直接接到伺服电机的绕组 I，同时经分相电容 C_F 加到绕组 II 上，这样，绕组 II 中的电流相位比绕组 I 超前 90° ，形成旋转磁场，使电机朝一个方向转动。如果前置放大器的输出电压极性和上述相反，即 a(-)、b(+)，则触发电路 1 截止， SCR_1 不通，而触发电路 2 控制 SCR_2 完全导通，使另一桥式整流器的两端 e、f 近于短接，电源电压直接加于电动机绕组 II，并经分相电容 CF 供电给绕组 I。这样，绕组 I 中的电流相位比绕组 II 超前 90° ，电动机朝相反的方向转动。由于前置放大器的增益很高，只要偏差信号大于不灵敏区，触发电路便可使晶闸管导通，电动机以全速转动，这里晶闸管起的是无触点开关的作用。当 SCR_1 和 SCR_2 都不导电时，伺服电动机不转。

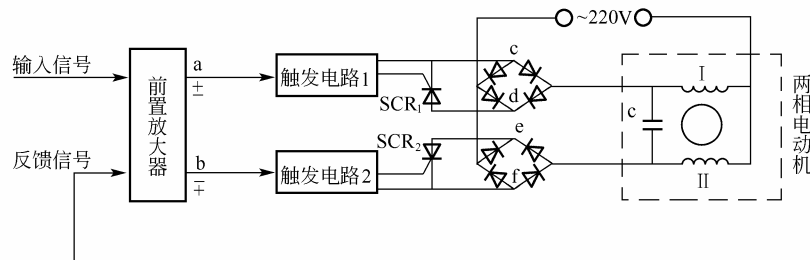


图 5.16 伺服放大器的原理示意图

在这种继电器式随动系统中，必须尽量减小伺服电动机在断电后按惯性继续“惰走”的路程，因为这种惰走现象在严重时会引起执行器产生等幅振荡。为了减小惰走，在电动机执行器的伺服电动机内部，常装有傍磁式制动机构，保证在电动机断电时，转子立即被制动，并可防止电动机断电后被负载作用力推动，发生反转的现象。

这种带傍磁式制动机构的两相伺服电动机结构如图 5.17 所示。在电动机的定子上有两组位置相隔 90° 电角度的定子绕组，借分相电容供给它们相位上相差 90° 的交流电压，使定子上建立起旋转磁场，带动鼠笼式转子旋转。在转子的右边，有两块带有簧片的衔铁。当电动机通电时，定子磁场把衔铁吸向定子的内表面，使簧片弯曲，通过杠杆把制动盘向右推开，使摩擦轮与制动盘脱离，电动机转子得以自由转动。当电动机断电时，定子磁场消失，制动盘被弹簧推向左边与摩擦轮接触，立即将转子制动。电动机右边端盖上设有手把，将它拉出可使制动盘和摩擦轮脱开，解除制动，由人工转动执行器。

电动执行机构中的减速器常在整个机构中占很大体积，是造成电动执行器结构复杂的主要原因。由于伺服电动机大多是高转速小力矩的，必须经过近千倍的减速，才能推动调节机构。目前电动执行机构中常用的减速器有行星齿轮和蜗轮蜗杆两种，其中行星齿轮减速器由于体积小、传动效率高、承载能力大、单级速比可达 100 倍以上，获得广泛的应用。近年来，人们为简化减速机构，努力研制各种低速电动机，希望直接获得低速度、大推力、小惯性的动力。但这些执行器的性能目前还不太理想。

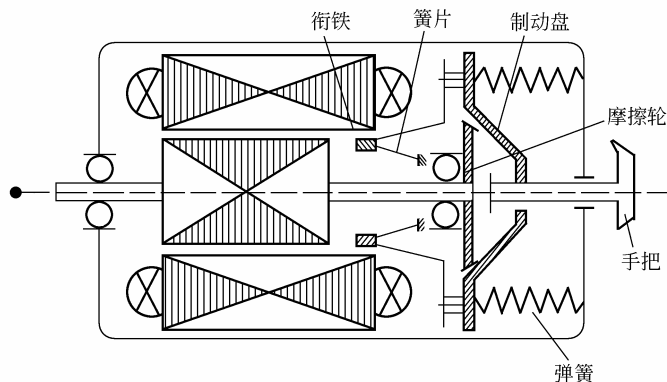


图 5.17 带制动机构的两相伺服电动机

5.2 防 爆 栅

5.2.1 安全火花防爆系统的概念

在前面讨论变送器和执行器时，曾谈到安全火花防爆措施。因为这些仪表安装在生产现场，如果现场存在易燃易爆的气体、液体或粉末，一旦发生危险火花，就可能引起燃烧或爆炸事故。

为了解决电动仪表的防爆问题，长期以来人们进行了坚持不懈的努力。在安全火花防爆方法出现以前，传统的防爆仪表类型有充油型、充气型、隔爆型等，其基本思想是把可能产生危险火花的电路从结构上与爆炸性气体隔离开来。显然，这和安全火花防爆方法截然不同。安全火花仪表从电路设计开始就考虑防爆，把电路在短路、开断及误操作等各种状态下可能发生的火花都限制在爆炸性气体的点火能量之下，是从爆炸发生的根本原因上采取措施解决防爆问题的，因而被认为可以和气动、液动仪表一样，列入本质安全防爆仪表之内。与结构防爆仪表相比，安全火花防爆仪表的优点是很突出的。首先，它的防爆等级比结构防爆仪表高一级，可用于后者所不能胜任的氢气、乙炔等最危险的场所；其次，它长期使用不降低防爆等级。此外，这种仪表还可在运行中，用安全火花型测试仪器在危险现场进行带电测试和检修，因此被广泛用于石油、化工等危险场所的控制。

但是必须清楚，安全火花防爆仪表和安全火花防爆系统是两个不同的概念。不要以为只要在现场全部选用安全火花防爆仪表，就组成了安全火花防爆系统。其实，把现场安全火花仪表与控制室简单地直接连接，构成的系统并不能保证安全防爆。因为对一台安全火花防爆仪表来说，它只能保证自己内部不发生危险火花，对控制室引来的电源线是否安全是无法保证的。如果从控制室引来的电源线没有采取限压限流措施，那么，在变送器接线端子上或传输途中发生短路、开路时，完全可能在现场产生危险火花，引起燃烧或爆炸事故。

图 5.18 是安全火花防爆系统的基本结构图。现场仪表与控制室仪表之间通过防爆栅相连。防爆栅又称安全保持器，是一种对送往现场的电压和电流进行严格限制的单元，可保

证各种状态下进入现场的电功率在安全的范围之内，因而是组成安全火花系统必不可少的环节。

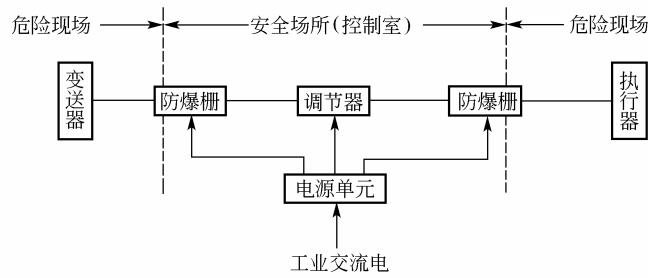


图 5.18 安全火花防爆系统的基本结构

当然，也不要误认为只要有了防爆栅，系统就一定是安全防爆系统了。因为防爆栅只能限制进入现场的瞬时功率，如果现场仪表不是安全火花型仪表，其中有较大的电感或电容储能元件，那么，当仪表内部发生短路、开路等故障时，储能元件上长期积累的电磁能量完全可能造成危险火花，引起爆炸。所以，构成一个安全火花防爆系统的充分和必要的条件是：①在危险现场使用的仪表必须是安全火花型的；②现场仪表与非危险场所(包括控制室)之间的电路连接必须经过防爆栅。只有这样，才能保证事故状况下，现场仪表自身不产生危险火花，从危险现场以外也不引入危险火花。

5.2.2 安全火花防爆的等级

安全火花防爆方法的实质就是限制火花的能量。在纯电阻电路中，这种能量主要决定于电压和电流的数值。对于不同的爆炸性气体以及它与空气的不同混合比，安全火花的能量是不同的。当电路的电压限制在直流 30V 时，大量试验表明，各种爆炸性混合物可按其最小引爆电流分为三级，见表 5-1。

表 5-1 爆炸性混合物的最小引爆电流

级 别	最小引爆电流(mA)	爆炸性混合物种类
I	$I > 120$	甲烷，乙烷，汽油，甲醇，乙醇，丙酮，氨，一氧化碳等
II	$70 < I < 120$	乙烯，乙醚，丙烯腈等
III	$I \geq 70$	氢，乙炔，三硫化碳，市用煤气，水煤气，焦炉煤气等

例如，电压 30V、电流为 70mA 以下的电路，即使在氢气中产生了火花也不会发生爆炸；电流超过 70mA，在氢气中产生爆炸的可能性就较大。氢气属于第 III 级爆炸性气体，这是爆炸性最高的级别。

安全火花型防爆仪表按防爆适应场所引爆电流的等级分为三级。例如 DDZ—III 型压力变送器的防爆等级标志为 HIIIe，这里，“H”表示防爆类型为安全火花型，“III”表示适用最小引爆电流为 III 级(即表 5-1 中 70mA)的场所，“e”表示适用于周围气体自燃温度为 e

组。这最后一项是考虑有些易燃易爆气体当仪表温升较高时，即使不发生火花，也可能由于自燃引起爆炸，为此必须限制仪表的表面温度。我国规定，易燃易爆气体按自燃温度高低分为 a、b、c、d、e 5 组，其中 e 组是自燃温度最低的一组(100℃自燃)。考虑一定的安全性，用于这种场所的仪表表面温度不得超过 80℃。上述压力变送器只要限制使用环境温度不超过 70℃，即可保证在 e 组气体中不会发生自燃起爆。

5.2.3 防爆栅的基本工作原理

防爆栅的种类很多，有电阻式、齐纳式、隔离式等。其中电阻限流式最简单，只在两根电源线(也是信号线)上串联一定的电阻，对进入危险场所的电流作必要的限制。其缺点是正常工作状况下电源电压也受衰减，且防爆定额低，使用范围不大。

齐纳式防爆栅利用齐纳二极管又称单向击穿二极管的击穿特性进行限压，用电阻进行限流，是一种应用较多的安全单元，其原理线路如图 5.19 所示。当输入电压 V_i 在正常范围(24V)内时，齐纳二极管 VD_1 、 VD_2 不动作，只有当输入出现过电压，达到齐纳二极管击穿电压(约 28V)时，齐纳管导通，于是大电流流过快速熔丝 F，使熔丝很快熔断，一方面保护齐纳二极管不致损坏，同时使危险电压与现场隔离。在熔丝熔断前，防爆栅输出电压 V_o 不会大于齐纳二极管 VD_1 的击穿电压 V_z ，而进入现场的电流被限流电阻 R_1 限制在安全的范围之内。图中为保证限压的可靠性，用了两级齐纳二极管限压电路。

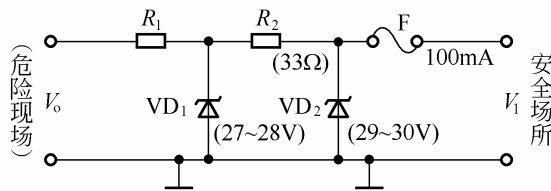


图 5.19 齐纳式防爆栅

这种简单的齐纳式防爆栅有两个不完善的地方。首先，限流电阻 R_1 、 R_2 的存在，对仪表正常范围内的工作仍有影响，这些电阻值取小了起不到限流作用，取大了影响仪表的恒流特性。理想的限流电阻在安全范围内应不起限流作用，即阻值为零；而当电流一旦超出安全范围，其阻值骤增(动态电阻值为无穷大)，起强烈的限制作用。显然，用固定电阻来限流是达不到这样的要求的。这个防爆栅的另一个不足之处是负端需要接地，通常一个信号回路只允许一点接地，若有两点以上接地会造成信号通过大地短路或形成干扰。现在如果在防爆栅上把一个端直接接了地，那么其他地方，如变送器、调节器等就不能再有接地点，这在使用中往往是不可行的。

图 5.20 是一种改进型的齐纳式防爆栅。与前面全刻度指示电路的基本电路相比，在两处做了重要改进：

(1) 这里增加了一套由齐纳二极管 VD_3 、 VD_4 和快速熔丝 F_2 、 F'_2 组成的限压电器，并取消了直接接地点，改为在背靠背连接的齐纳二极管中点接地。这样，在正常工作范围内，这些齐纳二极管都不导通，防爆栅是不接地的。在事故情况下，输入出现过电压时，

这些齐纳二极管导通，对输入过电压进行限制，并通过中间接地点，保证两根信号线上分别对地的电压不超过一定的数值。

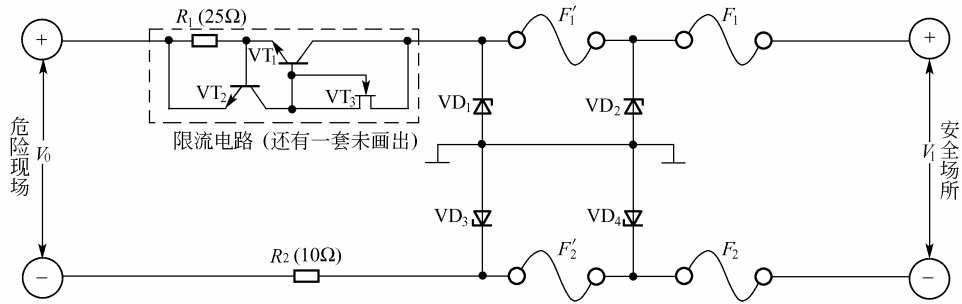


图 5.20 改进型的齐纳式防爆栅原理图

(2) 这里用晶体管限流电路取代基本电路中的固定电阻，可以达到近于理想的限流效果。图 5.20 中，限流电路用虚线框着，实际装置中为确保安全，用这样完全相同的两套电路串联，这里只画出了其中的一套。这个电路的工作原理是这样的，场效应管 VT_3 工作于零偏压，作为恒流源向晶体管 VT_1 提供足够的基极电流，保证 VT_1 在信号电流为 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 的正常范围内处于饱和导通状态。因此，在正常工作时，防爆栅的电阻很小，信号电流可十分流畅地通过。在事故状态下，如果回路电流超过 24mA ，则电阻 R_1 上的压降将超过 0.6V ，于是晶体管 VT_2 导通，使恒流管 VT_3 的电流一部分流向 VT_2 ，由于 VT_1 的基极电流被减小， VT_1 将退出饱和，在集电极-发射极间呈现一定电阻值，起到限流作用。随着回路电流的进一步加大，限流作用也愈加强烈，最终把电流限制在不超过 30mA 。

这种经过改进的齐纳式防爆栅因对上面提到的两个问题有了较好的解决，在生产上有一定的应用。

总的来说，齐纳式防爆栅结构简单，价格便宜，防爆定额可以做得比较高，可靠性也比较好，被认为是防爆栅的一个重要的发展方向。不过，这种防爆栅要求特殊的快速熔丝，由于齐纳二极管过载能力低，所以对熔丝的熔断时间和可靠性要求非常高，当电流超过安全值时，要求它能很快熔断。一般要求流过的电流为额定电流 10 倍时，应在 1ms 的时间内熔断。这种快速熔丝的制造有一定难度，对选材和制造工艺有很高的要求。即使满足了这些要求，熔丝的特性仍可能比较分散。由于熔丝是一次性使用的元件，无法进行逐个测试，所以有人认为这种防爆栅的可靠性是不理想的。

5.2.4 隔离式防爆栅

我国生产的 DDZ-III 型仪表中，在要求较高的场合，防爆栅采用隔离式的方案，以变压器作为隔离元件，分别将输入、输出和电源电路进行隔离，以防止危险能量直接窜入现场。同时用晶体管限压限流电路，对事故状况下的过电压或过电流作截止式的控制。虽然这种防爆栅线路复杂，体积大，成本较高，但不要求特殊元件，便于生产，工作可靠，防爆定额较高，可达到交直流 220V ，故得到广泛的应用。

DDZ-III 型仪表的隔离式防爆栅有两种，一种是和变送器配合使用的检测端防爆栅，一种是和执行器配合使用的执行端防爆栅。

1. 检测端防爆栅

检测端防爆栅作为现场变送器与控制室仪表和电源的联系纽带，一方面向变送器提供电源，同时把变送器送来的信号电流经隔离变压器 1:1 地传送给控制室仪表。在上述传递过程中，依靠双重限压限流电路，使任何情况下输往危险场所的电压和电流不超过 30V、30mA(直流)，从而确保危险场所的安全。图 5.21 是这种防爆栅的原理框图，24V 直流电源经直流-交流变换器变成 8kHz 的交流电压，经变压器 T_1 传递，一路经整流滤波和限压限流电路为变送器提供电源(仍为直流 24V)，另一路经整流滤波为解调放大器提供电源。从变送器获得的 4mA~20mA 信号电流经限压限流电路进入调制器，被调制成交流后，由变压器 T_2 耦合给解调放大器，经解调后恢复成 4mA~20mA 直流信号，输出给控制室仪表。所以，从信号传送的角度来看，防爆栅是一个传递系数为 1 的传送器，被传送的信号经过调制→变压器耦合→解调的过程后，照原样送出。这里电源、变送器、控制室仪表之间除磁通联系之外，电路上是互相绝缘的。

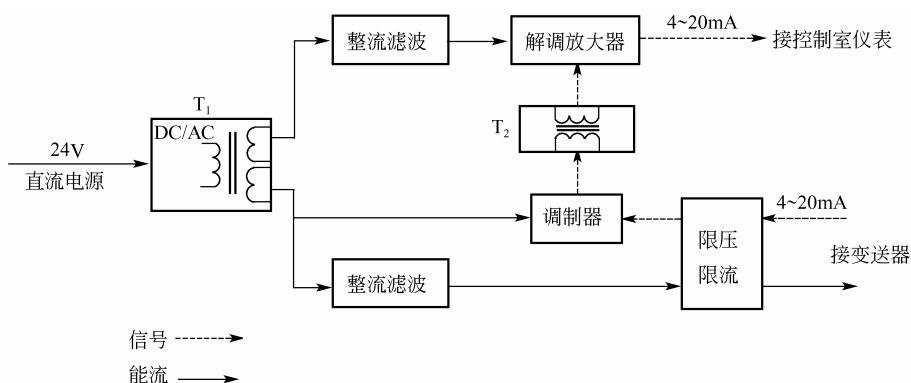


图 5.21 检测端防爆栅的框图

图 5.22 是这种检测端防爆栅的简化原理图，下面对照图 5.21，对各部分分别叙述。

电源直流-交流变换器 它由晶体管 VT_1 、 VT_2 、二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 和变压器 T_1 等组成。这是一个磁耦合自激多谐振荡器，其线路形式和第 2 章温度变送器中的振荡器完全相同。

晶体管限压限流电路 图 5.22 的防爆栅中为了可靠，串联使用了两套完全相同的限压限流电路，晶体管 VT_3 、 VT_4 、齐纳二极管 VD_{15} 等为一套，晶体管 VT_5 、 VT_6 、齐纳二极管 VD_{16} 等为另一套。

为叙述方便，图 5.23 中画出了其中的一套，晶体管 VT_4 和变送器串联，执行限压限流动作。 VT_4 的基极电路被晶体管 VT_3 控制，在正常工作中 VT_3 是不通的， VT_4 由电容 C_3 两端的整流滤波电压经电阻 R_7 VT_4 取得足够的基极电流，处于饱和导通状态，变送器的 4mA~20mA 信号电流可十分流畅地通过限压限流电路。

看一下晶体管 VT_3 的基极-发射极电路便可发现，如果电阻 R_5 、 R_6 上的压降超过 0.6V， VT_3 将开始导通，使晶体管 VT_4 的基极电流减小。若 VT_3 的电流很大，则经过 R_7 的电流将大部分或全部通过 VT_3 ，而不流入 VT_4 的基极，使晶体管 VT_4 退出饱和，进入放大或截止区。电路出现这种情况的原因可有如下两种：

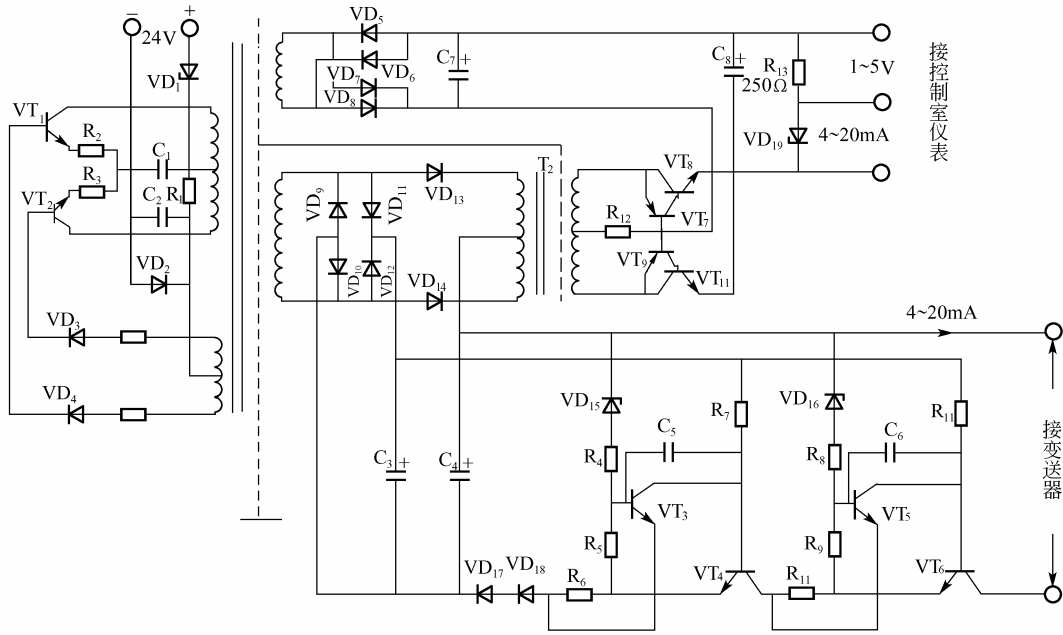


图 5.22 检测端防爆栅的简化原理图

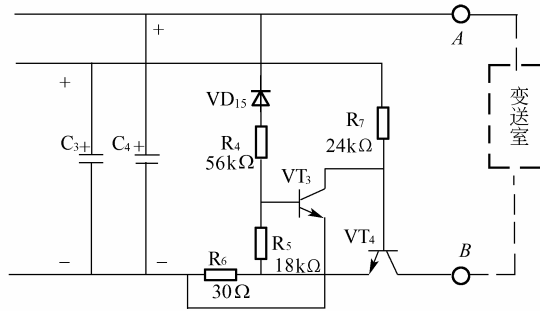


图 5.23 限压限流电路

(1) 电源出现过电压：图 5.23 中齐纳二极管 VD_{15} 的击穿电压约为 30V。如果滤波电容 C_4 上的整流电压超过 30V，则齐纳二极管 VD_{15} 导通，经电阻 R_4 向晶体管 VT_3 的基极提供电流， VT_3 导通且夺取 VT_4 的基极电流，使 VT_4 趋于关断，送往现场的电压 U_{AB} 减小，起到限制电压的作用。

(2) 变送器出现过电流：图中电阻 R_6 上信号电流在 20mA 的正常范围内时压降不超过 0.6V，另外由于电阻 R_5 (18kΩ) 的存在， R_6 上的压降即使稍微超过 0.6V， VT_3 也不会充分导通。如果变送器电流超过 25mA 左右时， R_6 上的压降将逐渐使 VT_3 充分导通，夺取 VT_4 的基极电流，使 VT_4 发挥作用，把流入现场的电流限制在 30mA 以内。

上述限压限流电路的特性如图 5.24 所示。当滤波电容 C_4 上的整流电压 U_{C4} 小于 30V 时，输出电压 $U_{AB} = U_{C4}$ ，晶体管 VT_4 不起任何限压作用。但 $U_{C4} > 30V$ 时， VT_4 很快趋于关断，随着 U_{C4} 的增大， U_{AB} 很快降为零。同理，电路的限流作用也是通过晶体管 VT_4 使

输出电压 U_{AB} 降低来实现的。

这里需要说明的是, 图 5.22 中限压限流晶体管 VT_4 、 VT_6 的耐压必须足够高。因为当电源出现过电压时, VT_4 、 VT_6 都处于关断状态, 这样全部过电压都加在这两个晶体管上。DDZ-III 型仪表防爆栅的防爆定额为交直流 220V, 当这样高的事故电压加在防爆栅的电源端时, 实验测得的变压器 T_1 副边最大峰值电压约为 100V(按原副边匝数比要超过 220V, 但由于铁氧体磁心饱和, 输出电压没有那样高)。为了安全, 设计时按 220V 直接加到限压限流电路输入端考虑; 再留一些裕量, 这些晶体的反向击穿电压 V_{cbo} 取 350V。与限压限流电路串联的二极管 VD_{17} 、 VD_{18} 是为防止电压反向而设置的。

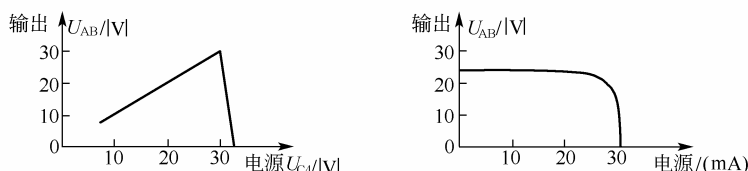


图 5.24 限压限流特性曲线

最后再讨论一下调制和解调放大部分。这部分的原理性电路可单独画出如图 5.25 所示。二线制变送器的电源是靠二极管 VD_9 、 VD_{10} 、 VD_{13} 、 VD_{14} 全波整流供给的。由于 VD_{13} 和 VD_{14} 是在电源正负半波交替工作的, 因此将变压器 B_2 初级线圈的上下两半分别接入这两个二极管支路中时, 在 VD_{13} 、 VD_{14} 的开关作用下, 变送器的 4mA~20mA 直流信号电流将交替地进入变压器初级线圈的上下两部分, 使其次级出现方波电压。这里, 变压器 T_2 工作于电流互感器的工作方式, 其次级负载阻抗很小。这样, 在初次级线圈匝数比为 1:1 的情况下, 次级方波电流大小等于初级电流。

由于信号电流是单方向的, 因此解调问题很简单, 只要对电流互感器 T_2 的次级电流进行全波整流即可。为了产生恒流输出, 这里用共基极电路作整流放大。考虑到共基极放大电路中晶体管的 β 愈大, 输入电流(发射极电流)与输出电流(集电极电流)之比愈接近于 1, 故在解调放大电路中用 VT_7 、 VT_8 和 VT_9 、 VT_{10} 组成复合管, 以增大等效 β 值, 提高工作精度。图 5.25 中, 电流互感器 T_2 的次级方波电流作为复合管的输入电流, 经共基极放大电路后, 产生的两个半波恒流输出, 相加后, 就得到与原来信号电流相等的 4mA~20mA 直流电流。此电流可直接供给控制室仪表, 也可经电阻 R_{13} (250 Ω) 转化为 1V~5V 的电压输出。齐纳二极管 VD_{19} 是电流输出端的续流二极管, 其击穿电压为 6V~7V。当电流输出端上接有正常负载时它不工作, 一旦外接负载电路切除, VD_{19} 便自动接入, 保证输出回路继续连通。

这种防爆栅的精度可达到 0.2 级。

2. 执行端防爆栅

执行端防爆栅的框图如图 5.26 所示。24V 直流电源经磁耦合多谐振荡器变成交流方波电压, 通过隔离变压器分成两路, 一路供给调制器, 作为 4mA~20mA 信号电流的斩波电压; 另一路经整流滤波, 给解调放大器、限压限流电路及执行器供给电源。

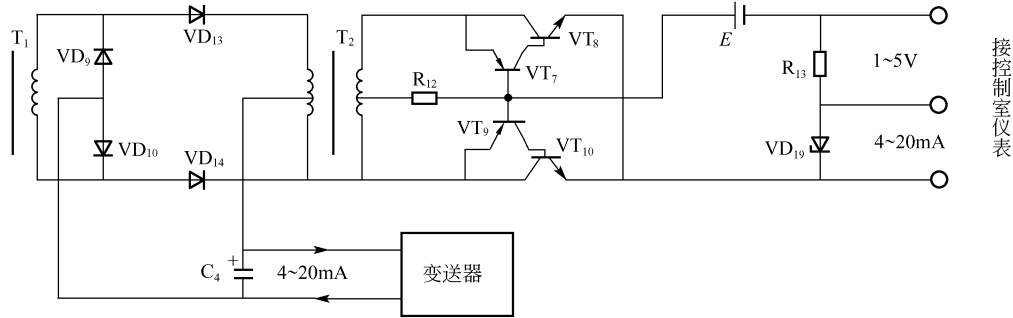


图 5.25 调制解调放大电路

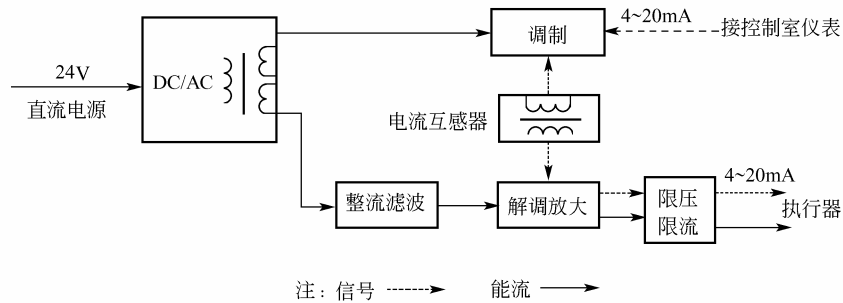


图 5.26 执行端防爆栅的框图

该防爆栅中的信号通路是这样的，由控制室仪表来的 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 直流信号电流经调制器变成交流方波，通过电流互感器作用于解调放大电路，经解调恢复为与原来相等的 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 直流电流，以恒流源的形式输出。该输出经限压限流，供给现场的执行器。从整机功能来说，它和检测端防爆栅一样，是一个传递系数为 1 的带限压限流装置的信号传送器，为了能用变压器实现输入、输出、电源电路之间的隔离，对信号和电源都进行了直流 \rightarrow 交流 \rightarrow 直流的变换处理。

由于执行端防爆栅中的各种环节和检测端防爆栅大致相同，这里不再对执行端防爆栅的线路作具体介绍。

必须说明，并非所有使用 DDZ—III 型仪表的场合都要用防爆栅组成安全火花防爆系统。系统是否需要防爆，必须根据生产场所的性质决定，如果不认真调查研究，盲目提高防爆要求，必然造成经济上的浪费和维护上的麻烦。凡没有燃烧和爆炸危险的场所，执行端就不需要防爆栅，调节器输出可直接送到执行器。这时检测端防爆栅也不需要。为了各输入回路能互相隔离以避免共地干扰，以及为防止公共电源为多台变送器供电时，万一其中一台短路造成其他仪表都断电的事故，DDZ—III 型仪表中有一种称为“分电盘”的装置，可取代检测端防爆栅，在变送器、电源、控制室仪表之间实现信号和电源的隔离传输，并具有一定的限制过电流能力。由于这种分电盘的线路比防爆栅简单得多，在不要求防爆的场合中使用，可节省投资。

本章小结

本章主要介绍了被人们形象地称之为实现自动化手脚的“执行器”的组成、工作原理及如何组成一个安全火花防爆系统等。

其中要理解气动执行器和电动执行器的组成、工作原理及防爆栅的工作原理等，重点掌握如何组成一个安全火花防爆系统。

思考题与习题

5-1 执行器在过程控制系统中起何作用？其性能对控制系统的运行有什么影响？

5-2 比较气动执行器和电动执行器的主要特点。

5-3 调节阀有哪些结构形式？分别适用于什么场合？执行机构是指执行器中的哪一部分？执行器选用气开、气关的原则是什么？

5-4 什么是调节阀的固有流量特性和工作流量特性？为什么流量特性的选择对控制系统的工作至关重要？

5-5 什么叫调节阀的流通能力 C ？为什么合理选择调节阀的口径，也就是合理确定调节阀的流通能力 C 非常重要？

5-6 电-气阀门定位器(含电-气转换器和阀门定位器)是怎样工作的？它们起什么作用？

5-7 电动仪表怎样才能用于易燃易爆场所？安全火花是什么概念？

5-8 试述安全火花防爆仪表的设计思想和实现方法。如果一个控制系统中的仪表全部采用了安全火花防爆仪表，是否就构成了安全火花防爆系统？

5-9 防爆栅的基本结构是什么？它是怎样实现限压、限流的？

第 6 章 智能仪表与虚拟仪器

随着科学技术的飞速发展，人类社会已经步入信息时代。信息技术成为推动国民经济和科学技术高速发展的关键因素。著名科学家钱学森明确指出：“信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术，测量技术是关键和基础。”现代仪器仪表是对物质世界的信息进行测量与控制的基础手段和设备，是信息产业的源头和重要组成部分。目前，现代仪器仪表在现代化工业生产、教学科研、医疗诊断、军事战争、气象预报、大地测绘、交通指挥、探测灾情等领域有着极其广泛的应用。现代仪器仪表以数字化、自动化、智能化等共性技术为特征，获得了快速发展。

本章主要内容为首先概述了智能仪表的组成、特点以及发展，接着介绍了智能仪表软硬件设计以及测量与控制算法，最后简要介绍了虚拟仪器的概念及软件开发平台 LABVIEW。

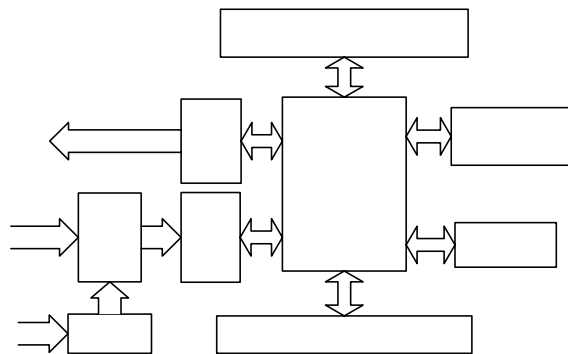
6.1 智能仪表概述

6.1.1 智能仪表的定义

智能仪表是计算机技术与测试技术相结合的产物，是内含微计算机或微处理器的测量仪表，由于它拥有对数据的存储、运算、逻辑判断以及自动化操作等功能，具有一定智能的作用，因而被称为智能仪表。近年来，智能仪表已经开始从较为成熟的数据处理向知识处理方向发展。它体现为模糊判断、故障诊断、容错技术、传感器信息融合、机件寿命预测等，使智能仪表的功能向更高层次发展。

6.1.2 智能仪表的基本组成

常用的智能仪表基本结构如图 6.1 所示。



注:存放监控程序和应用程序

图 6.1 智能仪表的基本结构

如图 6.1 所示,智能仪表由单片机或 DSP 作为核心,扩展必要的 RAM 或 ROM,构成最小系统。数据处理如算术运算、标度变换等主要由微处理器完成。仪表内存可保存仪器的监控程序、应用程序以及必要数据。输入通道包括输入放大器、抗混叠滤波器、多路转换器、采样/保持器、ADC、三态缓冲器等部分。输出通道包括 DAC、采样/保持器、低通滤波器部分。仪表的数字输出可与 LCD 等显示器相连,也可与打印机、外部存储器(如磁盘等)相接,直接获得或保存测量信息。智能仪表可通过外部通信接口实现与其他仪表的信息交换,也可与上位机组成分布式测控系统,由单片机作为下位机采集各种测量信号与数据,通过通信接口将信息传给上位机,然后上位机将进行全局管理。

6.1.3 智能仪表的功能

与传统仪表相比,智能仪表具有以下新的功能:

(1) 操作自动化。仪表的整个测量过程如量程选择、数据采集等都由单片机或 DSP 来控制,实现测量过程的全部自动化。

(2) 自测功能。包括自动调零、自动故障与状态检验、自校准、自诊断以及量程自动转换等。

(3) 强大的数据处理功能。这是智能仪表的主要优点之一。由于智能仪表采用微处理器,许多用硬件逻辑难以解决或根本无法解决的问题,现在可用软件非常灵活地加以解决。例如,传统数字万用表只能测量电阻、交直流电压、电流等,而智能型数字万用表不仅能进行上述测量,而且还具有对测量结果行取平均值、求极值、统计分析等复杂数据处理功能,不仅使用户从繁重的数据处理中解放出来,也有效提高了仪表的测量精度。

(4) 友好的人机接口。操作人员可以通过人机接口获得系统的运行状态、测量数据并实施控制。

(5) 数据通信与网络功能。一般智能仪器都配有 GPIB、RS—232C 等标准通信接口,可方便地与 PC 和其他仪表一起组成用户所需要的自动测量系统网络,来完成更复杂的测试任务。

6.1.4 智能仪表的发展概况

仪表发展主要经历了三代。第一代指针式(或模拟式)仪表,其基本结构是电磁式的,基于电磁测量原理使用指针来显示测量结果;第二代是数字式仪表,在这类仪表中,必不可少的中间环节是 A/D 转换,将模拟量转换为数字量,最终以数字方式显示或打印测量结果。第二代仪表响应速度较快,测量准确度较高。第三代为智能化仪表。

传感器是仪表进行信号检测的手段。传感器技术水平的高低直接决定了仪器仪表的设计品质。具有自检、自校、自补偿的新一代传感器——智能传感器的出现是传感器技术的一次革命,对传感器的发展产生了深远的影响。高精度、功能强大的智能传感器对提高智能仪表的测量精度起到了极大的推动作用。

微处理器技术的巨大进步也极大推动了智能仪表的发展。以微处理器为核心的微型计算机不仅具有运算、逻辑判断、记忆等功能,而且功耗低、可靠性高。特别是大规模集成

电路的巨大发展,使微处理器的计算精度、运算速度有了飞速提高,功能日益强大。微计算机技术渗透到仪器科学与技术领域,并得到了充分应用,在该领域中出现了完全突破传统概念的新一代仪器仪表——智能仪器仪表,开创了仪器仪表的崭新时代。到了 20 世纪 90 年代,高准确度、高性能、多功能的测量仪器仪表已经普遍采用了微计算机技术。

智能仪表正朝着以下几个方向发展:

(1) 微型化。综合应用微电子技术、微机械技术、信息技术,从而仪表成为体积小、功能齐全的测量装置,在工业、航天、医疗等领域起到独特作用。

(2) 多功能化。

(3) 人工智能化。智能仪表的进一步发展将含有一定的人工智能,自主地完成测控功能。显然,人工智能在现代仪表中的应用,使其不仅可以解决用传统方法很难解决的一类问题,而且可望解决用传统方法根本不能解决的问题。

(4) 网络化。伴随着网络技术的飞速发展,Internet 技术正在逐渐向工业控制和智能仪表系统设计领域渗透,实现智能仪表系统基于 Internet 的通信能力以及对设计好的智能仪表系统进行远程升级、功能重置和系统维护。

(5) 虚拟仪器是智能仪表发展的新阶段。测量仪器的主要功能都是由数据采集、数据分析和数据显示等三大部分组成。在虚拟现实系统中,数据分析和显示完全用 PC 的软件来完成。因此,只要额外提供一定的数据采集硬件,就可与 PC 组成测量仪器。这种基于 PC 的测量仪器称为虚拟仪器。在虚拟仪器中,使用同一个硬件系统,只要应用不同的软件编程,就可得到功能完全不同的测量仪表。

总之,智能仪表是计算机科学、电子学、数字信号处理、人工智能、VLSI 等新兴技术与传统仪表技术的结合。随着专用集成电路、虚拟仪器等相关技术的发展,智能仪表将会得到更加广泛的应用。

6.2 智能仪表硬件设计

硬件设计是智能仪表设计的基础。在设计过程中,必须根据被测信号的特征量及其大小、系统的关键指标要求、成本因素等方面做出综合考虑,这样才能设计出合理的硬件系统。在对于高精度、多功能、快速数据采集系统,更要深入研究系统的各个环节,从理论与实践上做出分析、判断,这样才能获得可靠的品质指标。本节主要介绍输入通道的一般形式以及前置通道接口、A/D 接口、D/A 接口设计。

6.2.1 模拟量输入通道形式

由传感器输出的模拟量进入模拟量输入通道,完成电平转换、滤波、放大、采样保持、模数转换,然后送入单片机或 DSP 中进行处理。一般地,完整的模拟量输入通道由滤波器、放大器、采样/保持器、ADC。不同的测量系统需要采集的输入量不同,且所要求的转换精度、工作速度也不尽相同,故输入通道的形式也多种多样。概括起来,模拟量输入通道形式有如下几种类型:

1. 单通道采集系统

图 6.2 为单通道采集系统的原理框图。这种转换电路转换精度很高，速度较快，适合于高精度的数字转换电路。如果输入信号变化缓慢，如温度、压力、流量、转速等，则输入通道可省去采样保持器。

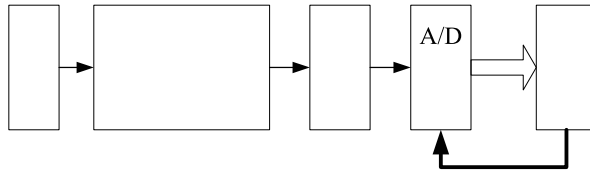


图 6.2 单通道采集系统

2. 多通道同步采集系统

数据采集系统往往要同时处理多路信号，最常见的有 8 路、16 路、32 路等。同步采集是指各路信号的瞬时值同时获得。多路同步采集系统的形式之一如图 6.3(a)所示，各个通道都是独立的，所有采样保持器和 ADC 都是同步进行的。这种方式的系统采集速度快，但是成本高。多路同步采集系统的形式之二如图 6.3(b)所示，这种方式的采集系统每个通道都设有采样保持器，所有的采样保持器用同一信号控制，共用一个 ADC，通过多路模拟开关进行通道切换。当忽略采样保持器对各路信号的衰减时，可认为是同步采样(或准同步采样)，这种方式省去了大量 ADC，使系统成本大大降低。

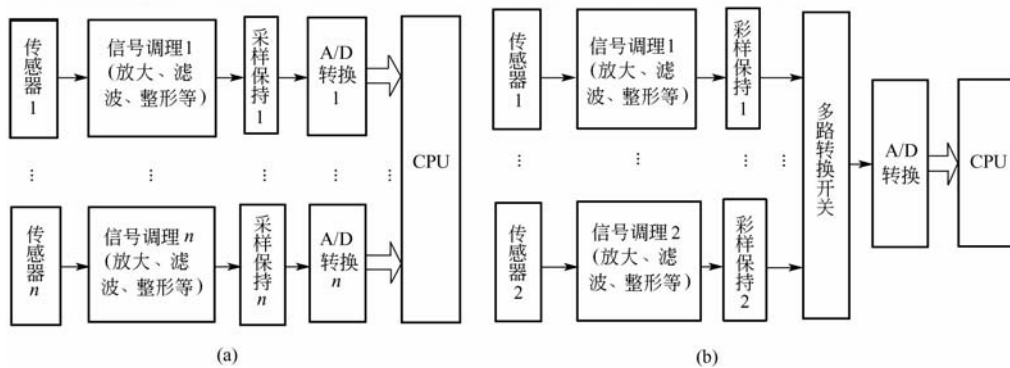


图 6.3 多通道同步采集系统

3. 多通道异步采集系统

异步采集是指各路输入信号的瞬时值不是同时获取的。这种方式往往用多路模拟开关选择所要进行 A/D 转换的通道，各通道是分时进行采样的。其结构形式如图 6.4 所示。这类系统的特点是比较经济，占用 CPU 资源较少，尤其适合于对同一信号不同量程的 A/D 转换。

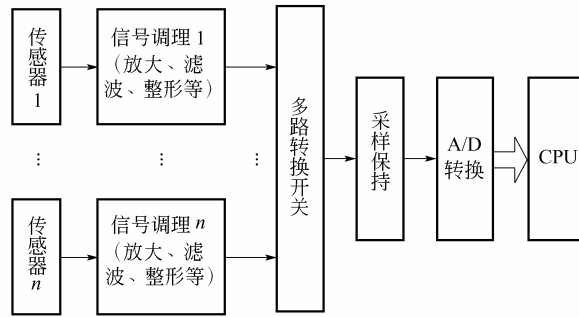


图 6.4 多通道异步采集系统

6.2.2 前置通道接口设计

1. 前置放大器

由于大多数传感器的输出信号都比较小，必须选用前置放大器对输入进行放大处理。前置放大器一般采用集成运算放大器。集成运放有通用型(如 μ A741 等)和专用型两种。专用型有低漂移型(如 DG725、ICL7605)、高阻型(如 LF356、CA3140)、高速型(如 LF318、NE530)、低功耗型(如 LM4250、 μ A335)等，使用时应根据实际需要来选择集成运放。选择依据是运放的性能参数，如差模输入电阻、输出电阻、输入失调电压/电流、温漂、开环差模增益、共模抑制比等。应用较多的放大器有仪用放大器、程控增益放大器以及隔离放大器等。

2. 仪用放大器

仪用放大器是一种精密的差动电压增益器件，其特点是：高输入阻抗、低偏置电流、低失调和低漂移、高共模抑制比、平衡的差动输入和单端输出，放大器的增益可以由用户选择电阻来设定，容易实现程控。因此，仪用放大器特别适合在恶劣环境中实现精密测量。

仪用放大器的内部基本结构如图 6.5 所示，它由三个低漂移、低失调的运算放大器构成，第一级为两个对称的同相放大器，第二级为一个差动放大器。电路为上下对称结构。当 $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_4 = R_5 = R_7$ ，则仪用放大器的闭环增益为

$$A_v = -(1 + 2R_1/R_G) \tag{6-1}$$

式中，通常 R_1 为定值， R_G 为外接电阻，通过改变 R_G 可改变仪用放大器闭环增益。

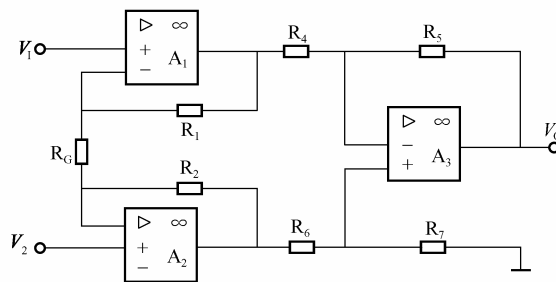


图 6.5 仪用放大器的内部基本结构

1) 程控放大器

程控放大器是智能仪表的常用器件之一。在很多实际应用中，特别是在通用测量仪表中，为了在整个测量范围内获取合适的分辨力，常采用可变增益放大器。在智能仪表中，可变增益放大器的增益是由仪表内置 CPU 的程序控制。这种由程序控制增益的放大器，称为程控放大器。程控放大器一般由放大器、可变反馈电阻网络和控制接口 3 部分组成，其原理框图如图 6.6 所示。程控放大器与普通放大器的区别在于反馈电路网络可变且受控于控制接口的输出信号。不同控制信号将产生不同反馈系数，从而改变放大器闭环增益。可变电阻网络有多种形式，如权电阻网络、T 型网络、反 T 型网络、有源网络或无源网络等。

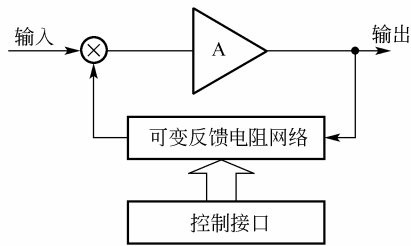


图 6.6 程控放大器原理图

2) 隔离放大器

隔离放大器是一种将输入、输出和电源在电流和电阻上进行隔离，使之没有直接耦合的测量放大器。由于隔离放大器采用浮离技术，消除了输入/输出之间的耦合，具有很高的共模抑制比，保护系统元器件不受高共模电压的损害，防止高压对低压信号系统的损坏。因此，隔离放大器主要用于要求共模抑制比高的模拟信号传输。例如，在有强电或强电磁干扰环境中，为了防止电网电压等对测量回路的破坏，待测的微弱信号输入通道常采用隔离放大器。目前，隔离放大器采用的耦合方式主要有 3 种，即变压器耦合、光电耦合以及电容耦合。利用变压器耦合实现载波调制，通常具有较高的线性度和隔离性能，但带宽一般在 1kHz 以下。利用光电耦合方式实现载波调制，可获得 10kHz 带宽，但隔离性能不如变压器耦合方式。

3. 多路模拟信号转换器(多路模拟开关)

在巡回检测或多路自动测量系统中，需要设置多路转换器来切换各路模拟信号输入。多路模拟信号转换器在智能仪表中应用很广。理想多路模拟开关的开路电阻为无穷大，导通电阻为零。在选用多路模拟开关时，总是希望其切换速度足够快、工作可靠以及功耗小。常用的多路模拟开关有普通型和精密型两种。普通型的产品为 CD4000 系列，如 CD4051/4052/4053 等；精密型产品为 AD 系列，如 AD7501、AD7503 等。选择多路模拟开关主要考虑以下因素：所需通道数、通道寻址方式、切换时间、电源电压范围等。

图 6.7 为 CD4051 的原理图。CD4051 是单端 8 路模拟开关，A、B、C 为二进制的控制输入端。INH 为禁止输入端，高电平有效。片内有二进制译码器，控制输入 CBA 经过译码后，用于选择 8 路通道中的一路。INH 为高电平时，不论 C、B、A 为何值，8 个通路均不通。为提高抗共模能力，可将 CD4051 连接成差动输入方式。

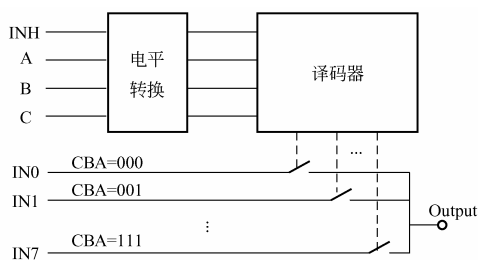


图 6.7 CD4051 原理图

4. 采样保持器(S/H, Sample/Hold)

采样保持器的作用是在 A/D 转换期间保持 ADC 输入信号不发生改变。采样保持器有两种工作方式，即采样方式和保持方式。在采样方式下，采样保持器的输出必须跟踪模拟输入电压。在保持方式下，采样保持器的输出将保持采样命令发出时刻的电压输入值，直到保持命令撤销为止。

采样保持器的原理框图如图 6.8 所示。图中 A_1 为高输入阻抗的场效应管组成的放大器， A_2 为输出缓冲器，开关 K 为工作方式控制开关。当开关 K 闭合时，输入信号 V_{IN} 经过放大器 A_1 向电容器 C 充电，此时采样保持器工作在采样方式下；当开关 K 断开时，采样保持器工作在保持方式下，由于运放的输入阻抗很大，因而在理想情况下，电容器 C 能保持充电的最终值。

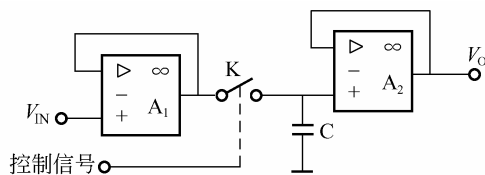


图 6.8 采样保持器的原理图

目前，实际应用多采用集成采样保持器。集成采样保持器是将采样电路、保持器集成在一个芯片上，保持电容器外接，由用户选用。电容器的容量大小与采样频率以及要求的采样精度有关。一般地，采样频率越高，保持电容越小，但此时衰减也快，精度较差。反之，若采样频率比较低，但要求精度较高时，可选用较大电容。保持电容器一般选用聚苯乙烯电容或聚氟乙烯电容，容量选择应综合考虑精度、衰减误差、采样频率等参数。

常用的集成采样保持器芯片有普通型、高速型、高分辨率型等几类。普通型 S/H 如 LF198/298/398、AD582/583 等，高速型 S/H 如 HTS-0025、SHA-2A 等，高分辨率型 S/H 如 SHA114 等。

6.2.3 A/D 接口技术

1. ADC 简介

A/D 转换器是将模拟量转换为数字量的器件，简写成 ADC。它在智能仪器仪表数据采集系统中重要环节。A/D 转换接口设计必须根据被测对象的变化速度、系统要求的精度等

因素综合考虑。ADC的种类繁多，从工作原理上，ADC可划分为如下四种类型：

(1) 逐次逼近式 ADC。这种 ADC 转换速度、精度较高，抗干扰能力不强。但由于其兼顾了转换速度与精度，逐次逼近式 ADC 是目前工业过程控制系统中应用最多的一种。8 位逐次逼近式 ADC 有 ADC0801、ADC0802、ADC0804、ADC0808/0809 等，12 位 ADC 有 ADC574、ADC1210 等，16 位 ADC 有 ADC0816/0817 等。

(2) 双积分式 ADC。它的转换速度较慢，但精度高，抗干扰能力强，成本低，适用于速度要求不高的场合。常用双积分式 ADC 集成芯片有 13 位的 CMOS 产品 AD7550、AD7552 及 $\pm 4\frac{1}{2}$ BCD 的 AD7555、ICL7135 等。

(3) 并行式和并/串式 ADC。转换速度比其他几种 ADC 都要高，但电路复杂，一般是 8 位以下。并/串式 ADC 是并行与串行相结合的 ADC，其速度也很高，电路较并行式 ADC 要简单些，价格也低一些，应用场合比较多。

(4) 计数比较式 ADC。也称为计数式 ADC 或反馈比较式 ADC。这种 ADC 电路简单，价格低廉，但是转换速度慢，精度不高，抗干扰能力差，故很少使用。

在各种 ADC 中，以并行式 ADC 工作速度最高，转换时间可小到数十毫微秒，而双积分式 ADC 速度最慢，转换时间约 200ms。在抗干扰能力方面，双积分式 ADC 最强，共模抑制比可达 140dB，计数式 ADC 最弱。从成本上，并行式 ADC 最高，双积分式 ADC 较低。双积分式 ADC 和逐次比较式 ADC 都可达到较高精度。总的来说，逐次逼近式 ADC 较好地兼顾性能与成本因素，因此在控制系统中得到广泛应用。

2. 典型 ADC 的接口设计

1) ADC0809 接口电路设计

(1) ADC0809 的引脚功能。ADC0809 具有 8 路模拟量输入通道，单极性输入，分辨率 8 位，转换时间 $100\mu\text{s}$ ，总的不可调误差为 $\pm 1\text{LSB}$ 。ADC 具有较高转换速度和精度，受温度影响较小，功耗低，适合于多路采集系统。表 6-1 列出了 ADC0809 引脚功能。

表 6-1 ADC0809 引脚功能表

引脚名称	功能描述
$\text{IN}_7 \sim \text{IN}_0$	8 路模拟量输入端，可输入 $0\text{V} \sim 5\text{V}$ 模拟电压
$\text{D}_7 \sim \text{D}_0$	8 位数字量输出， D_7 是最高位， D_0 是最低位
ADDA、ADDB、 ADDC(CBA)	通道地址输入端。当 $\text{CBA} = 000$ 时，模拟量 IN_0 输入到 ADC0809；当 $\text{CBA} = 001$ 时，输入 IN_1 ，依此类推
START	启动转换的脉冲输入端。在此引脚输入一个完整正脉冲信号，脉冲上跳沿复位转换器，下跳沿启动 ADC。在时钟脉冲频率为 640kHz 时，START 脉冲宽度应不小于 $100\text{ns} \sim 200\text{ns}$
ALE	地址锁存允许端。当 ALE 为高电平时，地址信号进入地址锁存器，在该信号的下降沿，地址被锁存
CLOCK	外部时钟输入端。典型值是 640kHz
EOC	转换结束信号输出。在转换期间， $\text{EOC} = 0$ ，表示正在转换，输出数据不可信； $\text{EOC} = 1$ ，表示转换已经完成，输出数据可信

(续)

引脚名称	功能描述
OE	输出允许信号。当 OE 端输出高电平时，打开三态输出锁存器，将转换结果输出到数据总线上
REF ₍₊₎ 、REF ₍₋₎	正负基准电压输入端。正负基准电压的典型值分别为 0V 和 5V $V_{CC} \geq \text{REF}_{(+)} > \text{REF}_{(-)}$ ，且 $\text{REF}_{(+)} + \text{REF}_{(-)} = V_{CC}$
GND、V _{CC}	接地端、电源电压输入端

(2) ADC0809 与 8051 的接口。ADC0809 与 8051 的接口电路如图 6.9 所示。由于 ADC0809 具有输出三态锁存器，因此其 8 位数据输出引脚可直接与数据总线相连。ADDA、ADDB、ADDC 分别与地址总线的低三位 A₀、A₁、A₂ 相连，用于选通 IN₇~IN₀。8051 的 P2.7 作为片选信号，启动 A/D 转换时，由单片机的写信号 $\overline{\text{WR}}$ 和 P2.7 控制 ADC0809 地址锁存和启动转换。由于 ALE 与 START 连在一起，故地址锁存和启动转换是同时进行的。在读取转换结果时，用单片机的读信号 $\overline{\text{RD}}$ 和 P2.7 引脚经过或非门后，产生的正脉冲作为 OE 信号，用以打开输出锁存器。

将 ADC0809 的 EOC 与 8051 的 $\overline{\text{INT}}_1$ 相连，利用 EOC 信号作为向 8051 的中断申请。主程序完成启动 A/D 转换以及通道号管理的任务。在检测到 EOC 的中断请求后，则跳转到中断服务子程序中，读取转换结果，并启动下一次 A/D 转换，并返回到主程序中。ADC0809 的通道 IN₀~IN₇ 地址为 7FF8~7FFF。

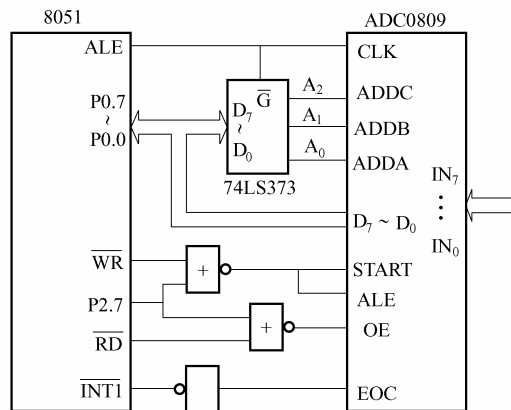


图 6.9 ADC0809 与 8051 的接口电路

2) AD574A 接口电路设计

在某些应用场合中，系统要求测量精度较高，因此需要更多位数的 ADC，如 10 位、12 位 ADC 等。由于 A/D 转换输出的数字量位数不同，因而和 CPU 的接口电路以及程序设计方法也不同。下面以 AD574A 为例，介绍 12 位 ADC 的转换原理、接口技术以及程序设计方法。

(1) AD574A 引脚功能。AD574A 为 28 脚 DIP 封装，单极性或双极性输入，转换时间 35 μs。各引脚功能见表 6-2。

表 6-2 AD574A 引脚功能表

引脚名称	功能描述
DB ₁₁ ~DB ₀	12 位数据输出引脚
12/ $\bar{8}$	数据模式选择引脚
A ₀	字节选择端
CE	CE=1 时转换或读取数据, 至于转换还是读取结果, 与 R/ \bar{C} 有关
\bar{CS}	片选信号输入, 低电平有效
R/ \bar{C}	读/转换选择
STS	状态信号。STS 为高电平时, 表示正在进行 A/D 转换
REFOUT、REFIN	+10V 基准电压输出、输入端
BIP OFF	双极性补偿。可实现单极性或双极性输入
10V _{IN} 、20V _{IN}	10V 和 20V 量程模拟信号输入端
DGND、AGND	数字地、模拟地
V _{CC} 、V _{EE}	正负工作电源输入端
V _{LOG}	逻辑电路工作电源输入

转换器的启动和数据读出是由 \bar{CS} 、CE 和 R/ \bar{C} 来控制的。当 CE=1, $\bar{CS}=0$, R/ $\bar{C}=0$ 时, 转换过程开始; 当 CE=1, $\bar{CS}=0$, R/ $\bar{C}=1$ 时, 可读出数据。

当数据模式选择端 12/ $\bar{8}=1$ 时, 12 位数据并行输出, 这种方式主要用于 16 位微计算机系统中。当 12/ $\bar{8}=0$ 时, 这种方式可与 8 位微处理器兼容。AD574A 采用向左对齐的数据格式。12/ $\bar{8}$ 与 A₀ 配合使用, 控制数据分两次输出。当 12/ $\bar{8}=0$, A₀=0 时, 高 8 位有效; 当 12/ $\bar{8}=0$, A₀=1 时, 读取低 4 位数据, 并在后面附加 4 位 0 组成一个字节。

此外, 字节选择端 A₀ 功能有两个, 一是选择字节长度, 二是与 8 位微处理器兼容时, 用来选择读出字节。转换前, 若 A₀=1, 则按 8 位 A/D 转换; 若 A₀=0, 则按 12 位 A/D 转换, 与 12/ $\bar{8}$ 状态无关。在读周期中, A₀=0 时高 8 位数据有效; A₀=1 时低 4 位有效。注意, 如果 12/ $\bar{8}=1$, 则 A₀ 不起作用。综上所述, AD574 的控制真值表如表 6-3 所示。

表 6-3 AD574 控制功能实现

CE	\bar{CS}	R/ \bar{C}	12/ $\bar{8}$	A ₀	功 能
0	×	×	×	×	不工作
×	1	×	×	×	不工作
1	0	0	×	0	启动 12 位 A/D 转换
1	0	0	×	1	启动 8 位 A/D 转换
1	0	1	接+5V	×	12 位数据并行输出
1	0	1	接地	0	高 8 位数据输出
1	0	1	接地	1	低 4 位数据尾接 4 位 0 输出

(2) AD574A 模拟量输入方式。AD574A 可实现单极性输入和双极性输入两种工作方式。输入信号均以模拟地 AGND 为基准。模拟输入信号的一端必须与 AGND 相连，并且接点应该尽量靠近 AGND 引脚。

① 单极性输入。单极性输入电路如图 6.10(a)所示。输出数字量 D 与输入间的关系为 $D = 4096V_{IN}/V_{FS}$ ，其中 V_{IN} 为输入模拟量， V_{FS} 为满量程。图中电阻器 RP_1 用于调零，保证在 $V_{IN}=0$ 时，输出数字量 D 为全 0。

② 双极性输入。双极性输入电路如图 6.10(b)所示。当输入电压为 V_{IN} 为 $-5V \sim +5V$ 时，应从引脚“ $10V_{IN}$ ”输入。当 V_{IN} 为 $-10V \sim +10V$ 时，应从引脚“ $20V_{IN}$ ”输入。图中电阻器 RP_1 用于调整双极性输入电路的零点。输出数字量 D 与输入间的关系为

$$D = 2048(1 + 2 \cdot V_{IN}/V_{FS}) \quad (6-2)$$

其中， D 为 12 位偏移二进制码。

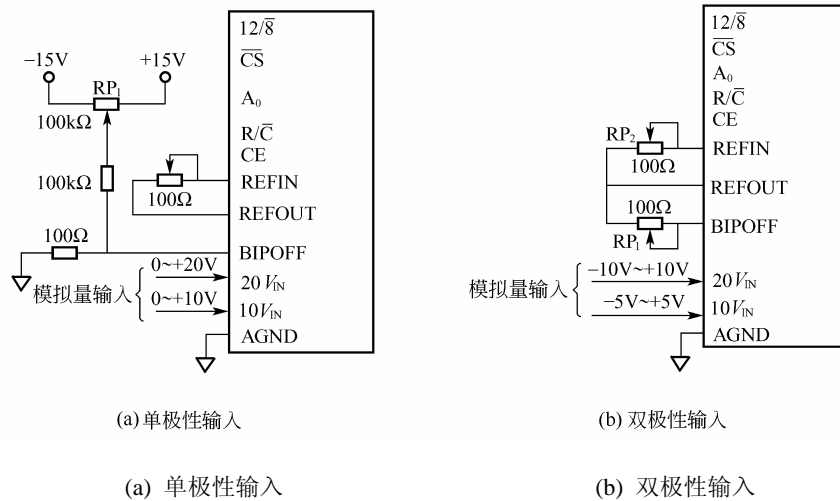


图 6.10 AD574A 模拟量输入电路

(3) AD574A 与 8051 的接口。接口电路如图 6.11 所示。由于 AD574A 内含三态锁存器，故可直接与单片机的数据总线相连。数据总线连接方式为 $DB_{11} \sim DB_4$ 与 $P0.7 \sim P0.0$ 相连，同时 $DB_3 \sim DB_0$ 与 $P0.7 \sim P0.4$ 相连。STS 直接与 8051 的 $P1.0$ 相连，查询 $P1.0$ 的状态以判断转换是否完毕。 $12/\bar{8}$ 接地，故 12 位数据分两次读出。 $\overline{CS}=0$ ，芯片始终被选中。 \overline{CE} 由单片机的 \overline{WR} 和 \overline{RD} 经一个与非门来控制，无论在写状态还是读状态， \overline{CE} 均为 1。 $\overline{R/C}$ 由 $P0.1$ 来控制，当 $P0.1=0$ 时，启动 A/D 转换；当 $P0.1=1$ 时，读取 A/D 转换数据。 A_0 由 $P0.0$ 位控制，在 A/D 转换过程中， $A_0=0$ ，按 12 位转换；读数时， $P0.0=0$ ，则读取高 8 位数据， $P0.0=1$ 时，读取低 4 位数据。

AD574A 可视作外部 RAM，由于单片机高 8 位地址 $P2.7 \sim P2.0$ 闲置，故可以采用寄存器间接寻址方式。根据以上控制信息，可以得到启动 A/D 地址为 FCH，读出高 8 位数据的地址为 FEH，读低 4 位数据的地址为 FFH。

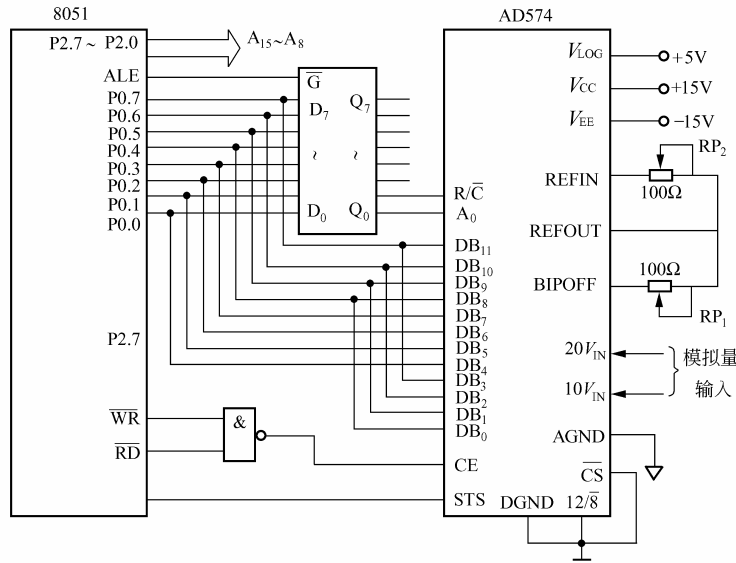


图 6.11 AD574A 与 8051 的接口

6.2.4 D/A 接口技术

DAC(Digital to Analog Converter)是模拟输出通道的重要器件之一，其作用是将计算机内的数字量转换为连续变化的电压或电流信号。DAC 种类很多，其输入数字量多为 8 位、10 位、12 位。按数字量传输方式，可以分为并行的和串行的 DAC 两类；就其工作原理而言，可分为权电阻型(电流输出型)和 R-2R 电阻网络型(电压输出型)。近年来，由于集成电路技术不断完善，DAC 性能迅速提高，与微型计算机接口也越来越方便。

这里主要介绍 8 位电流输出型 DAC0832 的结构及其接口设计方法。该器件采用先进 CMOS 工艺，功耗低，输出漏电流误差较小。这种 DAC 采用二次缓冲方式，这样可在输出当前数据的同时，采集下一个数据，从而提高转换速度；更重要的是能在多个 DAC 同时工作时，实现多通道 D/A 的同步输出。它可用来设计各种波形发生器，如正弦波、三角波、方波等。

1. DAC0832 的内部结构及原理

DAC0832 结构如图 6.12 所示，它由两级输入寄存器和一个 R-2RT 型电阻网络组成的 8 位 DAC。使用两个寄存器(输入寄存器和 DAC 寄存器)的好处是可进行两次缓冲器操作，使器件操作具有更大灵活性，满足不同应用的要求。

如图 6.12 所示， \overline{LE}_1 和 \overline{LE}_2 是寄存器控制信号。当 $\overline{LE}_1 = 1$ 时，输入寄存器的输出随输入而变化； $\overline{LE}_1 = 0$ 时，将数据锁存在寄存器中，不随数据总线上的数据变化而变化。 I_{LE} 为高电平， $\overline{CS} = \overline{WR}_1 = 0$ 时，使 $\overline{LE}_1 = 1$ ；当 $\overline{WR}_1 = 1$ 时，8 位输入寄存器便将输入数据锁存。 $\overline{XFER} = \overline{WR}_2 = 0$ 时， $\overline{LE}_1 = 1$ ；当 $\overline{WR}_1 = 1$ 时，8 位输入寄存器便将输入数据锁存。 $\overline{XFER} = \overline{WR}_2 = 0$ 时， $\overline{LE}_2 = 1$ ，8 位 DAC 寄存器输出随寄存器输入而变化。 \overline{WR}_2 上升沿将

输入寄存器的信息锁存在 DAC 寄存器中。欲将数字量转换为模拟量，只要使 $\overline{WR}_2 = \overline{XFER} = 0$ ，DAC 寄存器为不锁存状态，即 $I_{LE} = 1$ ， \overline{CS} 和 \overline{WR}_1 端接负脉冲信号即可完成一次转换；或 $\overline{WR}_1 = \overline{CS} = 0$ ， $I_{LE} = 1$ ，输入寄存器为不锁存状态，而 \overline{WR}_2 和 \overline{XFER} 端接负脉冲信号，可达到同样目的。

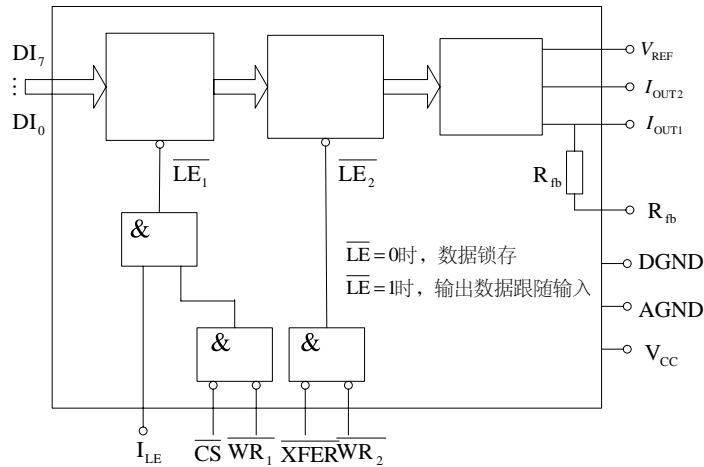


图 6.12 DAC0832 的结构示意图

2. DAC0832 的引脚功能

DAC0832 的主要引脚功能见表 6-4。

表 6-4 DAC0832 引脚功能

引脚名称	功能描述
$DI_7 \cdots DI_0$	数字量数据输入
I_{LE}	数据锁存允许，高电平有效
\overline{CS}	输入寄存器选择信号，低电平有效
\overline{WR}_1	输入寄存器“写”选通信号，低电平有效
\overline{XFER}	数据传送信号，低电平有效
\overline{WR}_2	DAC 寄存器选通信号
V_{CC} 、 V_{REF}	工作电源、基准电压输入
R_{fb}	反馈信号输入，片内已有反馈电阻
DGND、AGND	数字地、模拟地
I_{OUT1} 、 I_{OUT2}	电流输出， $I_{OUT1} + I_{OUT2} = \text{常数}$ ， I_{OUT1} 随 DAC 寄存器的内容线性变化。在单极性输出时， I_{OUT2} 接地

DAC 的输入是数字量，输出为模拟量，模拟信号很容易受到工作电源和数字信号等干扰而发生波动。为提高模拟输出的稳定性和减小误差，模拟部分必须采用高精度基准电源 V_{REF} 和独立地线，一般把数字地和模拟地分开。

3. DAC0832 与 8051 的接口设计

DAC0832 的常用输入接口方式有两种，即单缓冲与双缓冲方式，而输出接口有单极性和双极性两种。

1) 单缓冲方式

这种接口电路适用于只有一路 D/A 转换或多路转换不同步输出的场合。接口电路如图 6.13 所示。 I_{LE} 接 +5V， \overline{CS} 和 \overline{XFER} 都与 P2.7 相连，两级寄存器的写信号都由 8031 的 \overline{WR} 来控制。当选通 DAC0832 后，只要输出控制信号，DAC0832 就能一步完成数字量的输入锁存和 D/A 转换输出。

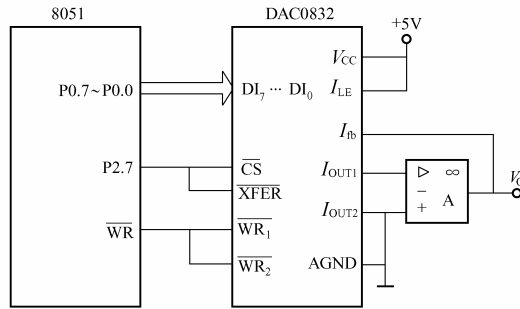


图 6.13 DAC0832 单缓冲方式输入电路

2) 双缓冲器同步方式

对于多路 D/A 转换接口，要求同步进行 D/A 转换输出时，必须采用双缓冲器同步方式接法。DAC0832 采用这种接法时，数字量的输入锁存和 D/A 转换输出是分两步完成的，即 CPU 的数据总线分时地向各路 DAC 输入要转换的数字量，并锁存在各自输入寄存器中，然后 CPU 对所有 DAC 发出控制信号，使各 DAC 输入寄存器中的数据同时送入 DAC 寄存器，实现同步转换输出。图 6.14 是一个二路同步输出的 D/A 转换接口电路。8051 的 P2.6 分别选择两路 DAC 的输入寄存器，控制输入锁存；P2.7 连到两路 DAC \overline{XFER} 来控制同步输出；8051 单片机的写信号 \overline{WR} 与所有的 \overline{WR}_1 、 \overline{WR}_2 端相连，在执行 MOVX 指令时，8051 自动输出 \overline{WR} 信号。

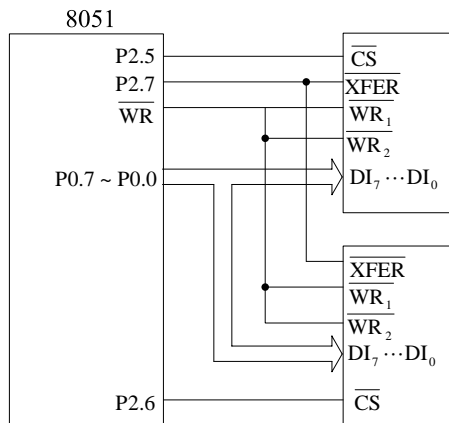


图 6.14 DAC0832 双缓冲方式输入两路同步输出电路

2) 单极性和双极性输出电路

DAC0832 的单极性输出电路和双极性输出电路如图 6.15 所示。图中给出了模拟量输出与 DAC0832 数字量之间的关系。

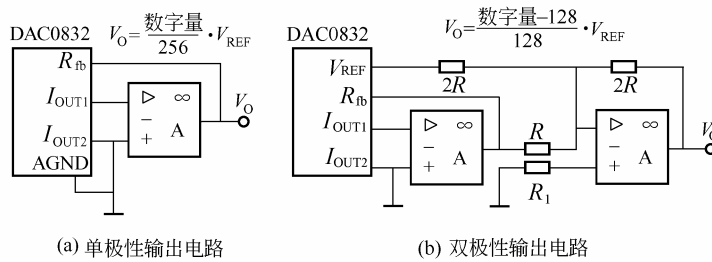


图 6.15 DAC0832 输出电路

6.2.5 数据通信及接口设计

数据通信是指不同设备之间进行的数字量传输或交换。在自动化测量和控制系统中，仪表之间需要不断的进行各种信息的交换和传输。数据传送方式有并行传输和串行传输，串行传输与并行传输相比，所用的导线数少，传输距离要远得多。而通信接口是仪表之间或仪表与计算机之间交换信息的桥梁。这里主要介绍 RS—232C 和 GPIB 总线。

1. RS—232C 总线

RS—232C 是串行通信总线标准。串行通信是指数据一位一位地按顺序传送的通信方式。为保证可靠的通信，在选择接口标准时，必须考虑抗干扰能力、通信速度以及通信距离的要求。标准串行通信接口的电气特性都有满足可靠传输时的最大通信速度和传输距离指标，这两个指标具有相关性。适当降低通信速度，可提高通信距离，反之亦然。

1) RS—232C 总线标准

RS—232C 是美国电子工业协会 EIA(Electronic Industry Association)指定的一种串行接口标准。其中，RS 是“推荐标准”Recommended Standard 的英文缩写，232 是标识符，C 表示经过了三次修改。RS-232C 标准接口的全称为“使用二进制进行交换的数据终端设备(Data Terminal Equipment, DTE)和数据通信设备(Data Communication Equipment, DCE)之间的接口”。

RS—232C 接口为 25 针或 9 针的 D 型插座，而常用的是 9 针插座，其引脚功能如表 6-5 所示。在电气特性方面，RS—232C 采用负逻辑，逻辑“1”电平在 -5V ~ -15V 范围内，逻辑“0”电平则在 +5V ~ +15V 范围内。RS—232C 的最大传输速率为 20KB/s，最大传输距离限制在 15m 以内。对于长距离传输，需要用 MODEM 通过电话线连接。

表 6-5 9 针串口信号脚功能

引脚号	功能说明	缩写
1	数据载波检测	DCD
2	接收数据	RXD

(续)		
引脚号	功能说明	缩 写
3	发送数据	TXD
4	数据终端准备	DTR
5	信号地	GND
6	数据设备准备号	DSR
7	请求发送	RTS
8	清除发送	CTS
9	振铃指示	DELL

表 6-6 RS-232C 的电气特性

特 性	参 数
不带负载时驱动器输出电平 U_o	$-25V \sim 25V$
负载电阻 R_L 范围	$3k\Omega \sim 7k\Omega$
驱动器输出电阻 R_o	$<300\Omega$
负载电容(包括线间电容) C_L	$<2500pF$
逻辑 0 时驱动器输出电平	$+5V \sim +15V$
逻辑 0 时驱动器接收电平	$>+3V$
逻辑 1 时驱动器输出电平	$-15V \sim -5V$
逻辑 1 时驱动器接收电平	$<-3V$
输出短路电流	$<500mA$
驱动器转换速率	$30V/\mu s$

2) 电平转换

由于 RS-232C 规定的逻辑电平与一般的微处理器、单片机的逻辑电平不一致, 故在设计通信接口时, 必须进行电平转换。MAX232 是常用的电平转换芯片之一。其典型应用电路如图 6.16 所示。注意, 单片机的串口的接收端 RXD、发送端 TXD 必须分别与 PC 的串口的 TXD、RXD 相连, 错误的接线会导致串口的硬损坏。

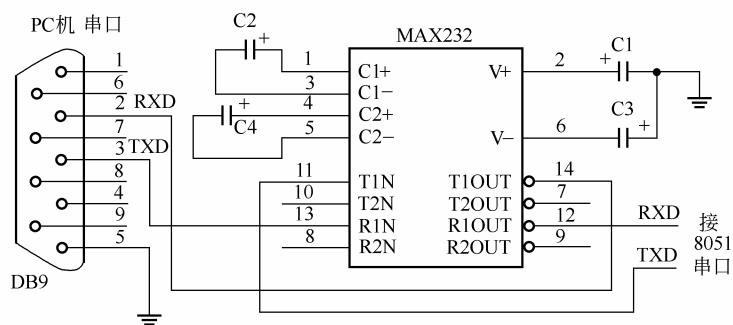


图 6.16 MAX232 典型应用电路

2. GPIB 总线

惠普公司在 20 世纪 60 年代末和 70 年代初开发了 GPIB 通用仪器控制接口总线标准。IEEE 在 1975 年对 GPIB 进行了标准化，由此 GPIB 变成了 IEEE 488 标准。术语 GPIB、HP-IB 和 IEEE 488 都是同义词。GPIB 的原始目的是对测试仪器进行计算机控制，然而，GPIB 的用途十分广泛，现在广泛用于计算机与计算机之间的通信以及对扫描仪和图像记录仪的控制。

GPIB 是一个数字化的 24 线并行总线。它包括 8 条数据线、5 条控制线(ATN、EOI、IFC、REN 和 SRQ)、3 条握手线和 8 条地线。GPIB 使用 8 位并行、字节串行的异步通信方式。也就是说，所有字节都是通过总线顺序传送，传送速度由最慢部分决定。GPIB 的数据单位是字节(8 位)，数据一般以 ASCII 码字符串方式传送。采用 3 种方式来表明传送数据结束。通常，GPIB 包括一根连接线(EOI)，用来传送数据完毕信号，也可以在数据串结束处放入一个特定结束符(EOS)。有些仪器用 EOS 方法代替 EOI 信号线方法，或者两种方法一起使用。还有一种方式，听者(数据接收方)可以计数已传送的数据字节，当达到限定的字节数时停止读取数据。只要 EOI，EOS 和限定字节数的逻辑“或”值为真，数据传输就停止。一般字节计数法作为默认的传送结束方法，典型的字节数限定值等于或大于需要读取的数据值。

6.3 智能仪表的软件设计

智能仪表是将人工智能的理论、方法和技术应用于仪表，使其具有拟人智能特性或功能的检测装置。软件设计的质量决定了仪表智能高低。一个好的软件程序不但能实现预定功能，其程序应该结构化，简单易读，调试方便，而且占用系统资源少，运行速度快。软件设计就成为智能仪器仪表设计中工作量最大、任务最繁重、最复杂的工作。因此，设计者必须掌握正确的软件设计方法，才能高效率、高质量地完成智能仪表软件设计任务。

6.3.1 软件设计方法

常用的软件设计方法有结构化设计、自顶向下设计、模块化设计等。

1. 结构化程序设计

结构化程序设计的基本思想是任何程序都可以采用以下 3 种基本结构来实现，即顺序结构、选择结构、循环结构。这 3 种基本结构如图 6.17 所示，它们可以任意组合嵌套，从

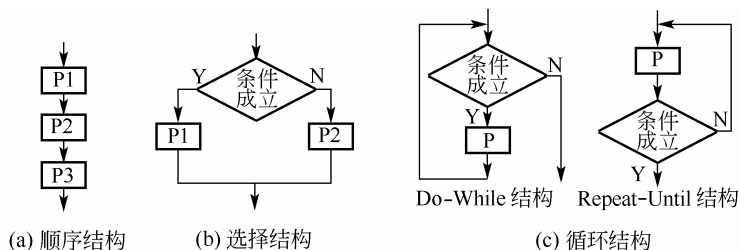


图 6.17 结构化程序设计的 3 种基本结构

而构造出任何复杂程序。结构化程序设计的目的是保证程序逻辑结构清晰,层次分明,易读、易调试,从而提高程序设计的质量和效率。结构化程序设计应遵循如下原则,即每个程序模块只能有一个入口、一个出口,不使用或严格限制使用转移语句。

在顺序结构中,程序被顺序连续地执行。选择结构也称为分支结构。在选择结构中,根据给定的条件进行判断,由判断结果决定在两个或多个程序段中选择一个执行。循环结构有两种类型,即 REPEAT-UNTIL 结构和 DO-WHILE 结构。REPEAT-UNTIL 结构先执行过程后判断条件,而 DO-WHILE 结构是先判断条件再执行过程。前者至少执行一次过程,后者可能一次都不执行。两种结构选取的循环参数的初值也不同。如果循环 N 次,往下计数,到零时出口,则在 REPEAT-UNTIL 结构中,循环参数初值等于 N ,而 DO-WHILE 结构中的循环参数初值等于 $(N+1)$ 。

2. 模块化程序设计

模块化程序设计是将一个复杂系统的设计任务分成若干模块,每个模块功能单一,而且相对独立,以便能够分别进行独立设计、编程、调试,最终配置在一起,由主模块协调控制。由于每个模块在逻辑复杂性上相对简化,模块程序编制的工作量减少,可以显著提高编程效率,便于利用成熟的软件包。

3. 自顶向下设计

“自顶向下”(Top-Down)设计和“自底向上”(Bottom-Up)设计是两种截然不同的软件设计方法。所谓自顶向下的设计方法,就是从系统总体要求出发,自上而下地逐步将设计任务细化为一个个子任务,分析各个子任务之间的关系,拟定各个子任务的设计细节。而自底向上的设计方法是先解决细节问题,再把各个细节结合起来,完成整体任务的设计。采用自底向上设计方法在设计各个细节时,对整体任务没有进行透彻的分析。因而在设计过程中很可能出现一些没有预料到的情况,以至于要修改甚至重新设计某些程序模块,最终影响整个系统设计进度。因此,目前都趋向于采用自顶向下的设计方法。

6.3.2 软件系统组成

智能仪表的软件通常由监控程序、中断程序、测量程序 and 数据处理程序组成。

1. 监控程序

系统的监控程序是控制单片机系统按预定操作方式运行的程序,是整个软件系统的核心。监控程序起着引导仪表进入正常工作状态,并协调各部分软硬件有条不紊地工作的重要作用。其主要功能有:管理键盘和显示器;接收输入/输出接口、内部电路等发出的中断请求信号,并按照中断优先级的顺序进入相应的服务程序;对定时器进行管理;实现仪表的初始化和自检等。

2. 测量控制程序

测量控制程序主要完成测量以及测量过程的控制等任务。例如,多路切换、采样、A/D 转换、D/A 转换、越限报警、可编程放大器增益控制等。这些程序可以由若干程序模块实现,供监控程序或中断服务程序调用。

3. 数据处理程序

数据处理程序主要实现各种数值运算(如算术逻辑运算和各种函数运算)、非数值运算(如查表、排序等)和数据处理(如非线性校正、温度补偿、数字滤波、标度变换等)。

4. 中断处理程序

用来处理各种中断服务请求,可能会调用测量控制程序或数据处理程序。

6.4 抗干扰技术

6.4.1 硬件抗干扰技术

智能仪器仪表主要用于工业生产过程中,而工业现场的环境往往比较恶劣,存在着严重的干扰。这些干扰混杂在信号里,会降低仪器的有效分辨能力和灵敏度,影响测量结果,可能导致系统工作紊乱,有的甚至会严重损坏仪表的器件或程序。但是干扰是不可避免的。为了保证仪表能在实际应用中可靠地工作,必须提高智能仪表的抗干扰能力,这是智能仪表设计中必须考虑的问题。

干扰信号的来源很多,性质也不一样。干扰窜入仪表内部的途径主要有3个,即电磁感应、传输通道、电源线。干扰存在的3个要素是存在干扰源、耦合通道、有对干扰敏感的接收电路。要有效抑制干扰,必须分析干扰的来源、性质、传播途径、耦合方式、进入电路的形式以及接收干扰的电路等。抑制干扰的方法必须从形成干扰的三要素出发,在干扰源、耦合通道和干扰接收电路方面采取有效措施。对于不同的干扰,采用的抑制方法也不同。对于电磁感应干扰可以采用良好的屏蔽和正确的接地来解决。在仪器仪表系统中,抑制干扰的基本措施有屏蔽、接地、浮置、隔离、滤波等。下面将介绍在传输通道存在的串模干扰、共模干扰和电磁干扰的抑制方法。

1. 串模干扰的抑制

串模干扰是由外接条件引起的、叠加在被测电压上的干扰信号,主要来自于高压输电线、与信号线平行铺设的输电线以及大电流所产生的空间电磁场。例如,如果与输电线平行铺设的信号相当长,信号线上的电磁感应电压和静电感应电压可达到毫伏级,而来自传感器的有效信号电压的动态范围通常仅有几十毫伏甚至更小,这样干扰信号有可能完全“淹没”了有效信号,使测量仪器无法正常工作。除了信号线引入的串模干扰之外,信号源本身固有的漂移、纹波和噪声以及电源变压器不良屏蔽或稳压滤波效果不良等也会引入串模干扰。

常用的抗串模干扰措施有如下几种:

1) 采用输入滤波器

当串模干扰频率比被测信号频率高时,采用输入低通滤波器可以抑制高频串模干扰;当串模干扰频率比被测信号频率低时,采用输入高通滤波器可以抑制低频串模干扰。如果串模干扰频率落在被测信号频谱两侧时,则可采用带通滤波器。

常用的低通滤波器有 RC 滤波器、LC 滤波器、双 T 滤波器以及有源滤波器等,如图

6.18 所示。RC 滤波器结构简单，成本低，但是它的串模抑制比较低，一般需要 2~3 级串联使用才能达到规定的串模抑制比指标。同时，时间常数 RC 较大，有可能影响放大器的动态性能。LC 滤波器的串模抑制比较高，但需要绕制电感线圈，体积大，成本高。双 T 滤波器对某一固定频率的干扰具有很高的抑制比，但在偏离该频率后抑制比迅速减小。它主要用来滤除工频干扰，对高频干扰无能为力，其结构虽然简单，但调整比较麻烦。有源滤波器可获得较理想的频率特性，但作为仪表输入级，有源器件的共模抑制比一般难以满足要求，本身带来的噪声也较大。

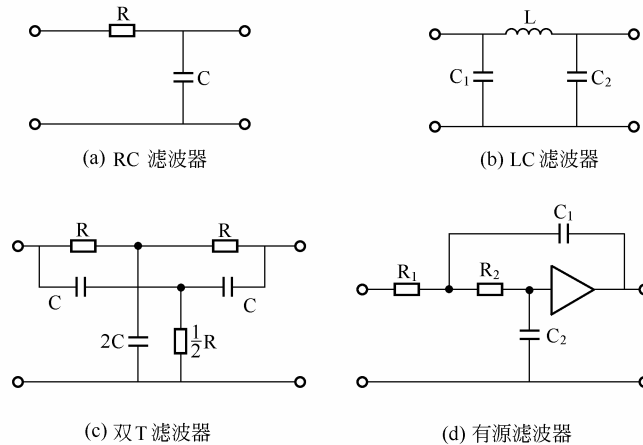


图 6.18 各种滤波器原理图

通常情况下，仪表的输入滤波器都采用 RC 滤波器。在选择电阻和电容参数时，除了要满足串模抑制比指标外，还要考虑信号源的内阻抗，兼顾共模抑制比和放大器动态特性的要求。因此，常用二级阻容低通滤波网络作为输入通道的滤波器。

2) 选择合适的器件

用双积分式 ADC 可以削弱周期性的串模干扰。这是由于此类器件是对输入信号的平均值进行转换的。如果取 ADC 积分周期等于主要串模干扰周期的整数倍，则抑制效果会更好。此外，选择高抗扰度的逻辑器件，通过提高阈值电平来抑制低噪声的干扰；也可人为附加电容器，降低某个逻辑电路的工作速度以抑制高频干扰。

3) 对信号的预处理

对于主要来自电磁感应的串模干扰，应尽早对被测信号进行前置放大，以提高信噪比；或者尽早完成 A/D 转换；采取隔离屏蔽措施等

4) 电磁屏蔽

对测量元件或变送器进行良好的电磁屏蔽，且信号线选用带屏蔽层的双绞线或电缆线，并有良好的接地系统。

2. 共模干扰的抑制

共模干扰是同时叠加在两条被测信号线上的外界干扰信号。在测量现场，被测信号与仪器相距较远，造成两者的地电位不等，就会带来共模干扰。抑制共模干扰方法有如下

几种:

(1) 利用双端输入的差分放大器作为仪表输入通道的前置放大器。

(2) 利用隔离放大器、变压器或光电耦合器将各种模拟负载和数字信号隔离开,也就是将数字地和模拟地断开。被测信号通过变压器耦合或光电耦合获得通路,而共模干扰由于形成不了回路而得到有效抑制。在信号源与仪表间插入隔离放大器,既可以抑制共模干扰,同时又提高了传输信号的信噪比。

(3) 利用浮地输入双层屏蔽放大器来抑制共模干扰。

3. 接地技术

接地设计有两个基本目的,即消除各电路电流流经公共地线阻抗时所产生的噪声电压和避免磁场与地电位差的影响,使其不形成地环路。如果接地方式不好就会形成环路,造成噪声耦合。正确接地是仪表系统抑制干扰所必须注意的重要问题,理想情况是一个系统的所有接地点与大地之间阻抗为零,但这是不可能做到的。实际接地中总存在着连接阻抗和分散电容,所以如果地线不佳或接地点不当,不但不能抑制干扰,反而会带来新的干扰。

接地设计应注意以下方面:

(1) 一点接地与多点接地的使用原则。一般情况下,高频电路应就近多点接地,低频电路应一点接地。在低频电路中接地形成的环路的干扰影响很大。因此,常以一点作为接地点。但一点接地不适用于高频。这是因为在高频时,地线上具有电感,因而增加了地线阻抗,同时各地线之间又产生电感耦合。一般来说,频率在 1MHz 以下,可用一点接地;高于 10MHz 时,采用多点接地;在 1MHz~10MHz 之间可用一点接地,也可用多点接地。

(2) 交流地与信号地不能共用。由于在一段电源地线的两点间会有数毫伏甚至几伏的电压,会严重干扰低电平信号的电路。因此必须采取隔离措施。

(3) 数字地与模拟地分开,仅在一点接地。数字信号一般较强,而且是交变的脉冲,数字电路的地电流也呈现脉冲变化。如果两者共用一根地线,数字信号会通过地线电阻对模拟信号构成干扰。因此这两种地必须分开设置,但最后汇集到一点上。

(4) 采取屏蔽措施。在控制系统中为了减少信号中电容耦合噪声、准确检测和控制,对信号采用屏蔽措施是十分必要的。根据屏蔽目的不同,屏蔽地的接法也不一样。电场屏蔽解决分布电容问题,一般接大地;电磁场屏蔽主要避免雷达、电台等高频电磁场的辐射干扰。地线用低阻金属材料高导流而制成,可接大地。磁场屏蔽用以防磁铁、电机、变压器、线圈等磁感应,其屏蔽方法是用高导磁材料使磁路闭合,一般接大地。当信号电路是一点接地时,低频电缆的屏蔽层也应该一点接地。如果电缆的屏蔽层有一个以上时,将产生噪声电流,形成噪声干扰源。当一个电路有一个不接地的信号源与系统中接地的放大器相连时,输入端的屏蔽应接至放大器的公共端,相反,当接地的信号源与系统中不接地的放大器相连时,放大器的输入端也应接到信号源的公共端。

6.4.2 软件抗干扰技术

在实际应用中,干扰信号可能影响到智能仪表的 CPU、程序计数器 PC 或 RAM 等,导致程序运行失常。因此,在设计智能仪表时除了在硬件方面采取抗干扰措施外,必须考虑软件的抗干扰措施。

干扰对软件的影响有两个方面,即程序运行失常和数据受干扰而发生变化。单片机系统受到干扰后,会使 RAM、程序计数器或总线上的数字信号错乱,从而引发一系列不良后果。CPU 得到错误的数,就会使运行操作出错,导致错误结果,并将错误一直传递下去,形成一系列错误。如果 CPU 获得错误地址信息,会使程序失控,即便此后程序恢复到正常状态,但是已经造成不良后果,埋下隐患,最终导致后续程序出错。同时,如果干扰改变 RAM 以及特殊功能寄存器的状态,可能导致数值误差,改变程序状态,引起误动作。

软件抗干扰的任务在于 CPU 抗干扰技术和输入输出的抗干扰技术两方面。前者主要是防止因干扰造成的程序“跑飞”,后者主要是消除信号中的干扰以便提高系统精度。这里主要介绍 CPU 抗干扰技术。

1. 把关器技术

程序运行监视系统 WDT(Watch Dog Timer)直译为“把关器”,其术语为把关[定时]器,它是一种软硬件结合的防程序“跑飞”措施。微机测控系统的应用程序通常以循环方式运行,循环时间基本不变的。“把关器”技术就是不断监视程序循环时间。如果发现时间超过把关器的定时时间,则认为系统进入了死循环,于是把关器强迫程序返回主程序入口,使系统重新运行。把关器技术可以用硬件实现,也可以用软件实现。

硬件把关器技术实际上是一种软件与片外专用电路相结合的技术。专用硬件把关器是指一些集成化的专用把关器电路,它实际上是一个特殊的定时器。在硬件电路连接好以后,在程序中适当插入把关器复位的指令(俗称“喂狗”指令),保证在程序正常运行时把关器不会溢出,而在程序陷入死循环时,把关器发出溢出脉冲,使单片机复位。目前常用的集成把关器电路有 MAX705~MAX708、MAX791、X5043~5045 等。

软件把关器是利用单片机内部闲置的定时器作为把关器,在单片机程序中插入“喂狗”指令,在程序运行出现异常或进入死循环时,利用软件将程序计数器 PC 赋予初始值,强制性地使程序重新开始运行。软件把关器技术的最大特点是无须外加硬件电路,比较经济。在实际应用中,通常会将软件把关器技术和硬件把关器技术结合起来使用,以获得更好的抗干扰效果。

2. 软件陷阱

在仪表工作过程中,干扰信号会使程序脱离正常运行轨道。为了使“跑飞”的程序安定下来,可在程序中设置软件陷阱。所谓软件陷阱,就是一条引导指令,强行将捕获的程序引向一个指定的地址,在那里有一段专门对出错程序处理的程序。当程序因受干扰而发生混乱时,错误的 PC 指针可能落在多字节指令中间,进而执行更加不可知的指令。而单字节指令可使混乱的 PC 指针理顺,使程序按正确的顺序执行。尽管此时不该执行到这里,但是混乱的情况得到抑制。软件陷阱就是根据这个原理设计的。以单片机 8051 为例,设出错处理程序入口标号为 ERROR,软件陷阱就是一条长跳转指令 LJMP ERROR。为了加强捕捉效果,一般还在它前面加两条 NOP 指令,即

```
NOP  
NOP
```

LJMP ERROR

一般地，软件陷阱可以安排在下列四种地方：

- (1) 程序中未使用的中断向量区；
- (2) 未使用的大片程序存储器空间；
- (3) 在程序存储器的数据表格的头尾处；

(4) 程序区的“断裂处”。所谓断裂处，是指程序中的跳转指令，如无条件转移指令 SJMP、子程序返回指令 RET 等。

6.5 智能仪表的测量与控制算法

6.5.1 数字滤波算法

随机干扰会使仪表产生随机误差。随机误差是指在相同条件下测量某一量时，其大小符号作无规律变化的误差，但随机误差在多次测量中服从统计规律。在硬件设计中可以模拟滤波器来削弱随机误差，但是它在低频、甚低频时实现较困难。数字滤波可以完成模拟滤波的功能，而且与模拟滤波相比，它具有如下优势有：数字滤波是用程序实现的，无需添加硬件，可靠性高，稳定性好，不存在阻抗匹配的问题，而且多个输入通道可以共用，从而降低系统硬件成本；可以根据需要选择不同的滤波方法或改变滤波器的参数，使用灵活方便；数字滤波器可以对频率很低的信号进行滤波，而模拟滤波由于受电容容量的限制，频率不能太低。

常用的数字滤波算法有一阶惯性滤波、程序判断滤波、中值滤波、算术平均值滤波、滑动平均值滤波、加权滑动平均滤波等。

1. 程序判断滤波

经验说明，许多物理量的变化都需要一定时间的，相邻两次采样值之间的变化有一定的限度。程序判断滤波的方法，便是根据生产经验，确定出相邻两次采样信号之间可能出现的偏差 ΔY 。若超过此偏差值，表明该输入信号是干扰信号，应该去掉；若小于此偏差值，则信号作为本次采样值。当采样信号由于随机干扰，如大功率用电设备的启动或停止，造成电源的尖峰干扰或误测，以及变送器不稳定而引起的严重失真等，可分为限幅滤波和限速滤波两种。

1) 限幅滤波

限幅滤波就是将两次相邻的采样值相减，求出其增量(以绝对值表示)，然后与两次采样允许的最大差值 ΔY 进行比较，若小于或等于最大差值 ΔY 则取本次采样值；若大于最大差值 ΔY ，则取上次采样值作为本次采样值，即当 $|Y(k) - Y(k-1)| \leq \Delta Y$ ，则 $Y(k) = Y(k)$ ，取本次采样值；当 $|Y(k) - Y(k-1)| > \Delta Y$ ，则 $Y(k) = Y(k-1)$ ，取上次采样值，其中 $Y(k)$ 为第 k 次采样值； $Y(k-1)$ 为第 $(k-1)$ 次采样值。

这种程序滤波方法，主要用于变化比较缓慢的参数，如温度、物理位置等测量系统。

2) 限速滤波

限幅滤波是用两次采样值来决定采样结果，而限速滤波则最多可用三次采样值来决定采样结果。设顺序采样时刻 t_1 、 t_2 、 t_3 所采集的参数分别为 $Y(1)$ 、 $Y(2)$ 、 $Y(3)$ ，则

当 $|Y(2) - Y(1)| \leq \Delta Y$ 时， $Y(2)$ 输入计算机；

当 $|Y(2) - Y(1)| > \Delta Y$ 时， $Y(2)$ 不能采用，但保留，继续采样得到 $Y(3)$ ；

当 $|Y(3) - Y(2)| \leq \Delta Y$ 时， $Y(3)$ 输入计算机；

当 $|Y(3) - Y(2)| > \Delta Y$ 时，则取 $\frac{Y(2) + Y(3)}{2}$ 输入计算机。

限速滤波程序流程如图 6.19 所示。限速滤波是一种折中的方法，既照顾了采样的实时性，又顾及了采样值变化的连续性。在实际使用中，可用 $[|Y(2) - Y(1)| + |Y(3) - Y(2)|] / 2$ 取代 ΔY ，这样也可基本保持限速滤波的特性，虽然增加了运算量，但灵活性大为提高。

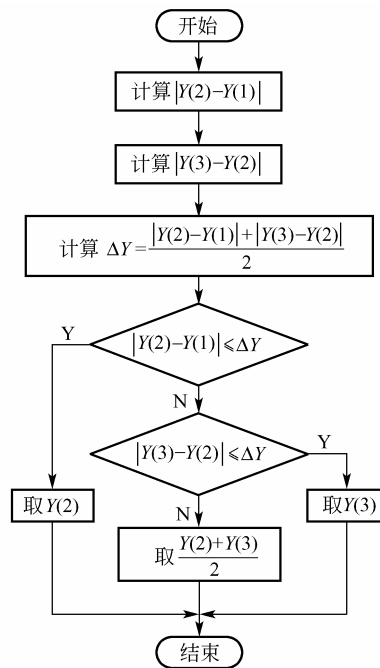


图 6.19 限速滤波程序流程图

2. 中值滤波

所谓中值滤波是对某一参数连续采样 n 次(取 n 为奇数)，然后把 n 次的采样值从小到大，或从大到小排队，再取其中间值作为本次采样值。对于变化缓慢的变量，采用中值滤波效果比较好，但对快速变化的参数则不宜采用。

中值滤波程序设计的实质是，首先把 N 个采样值从小到大或从大到小进行排队，然后再取中间值。其中采样值的排序可以采用冒泡法、沉底法等。程序流程如图 6.20 所示，连续采样次数 $N=3$ ，且 M 为所获得的中间值， Y_1 、 Y_2 、 Y_3 为依次连续采样三次的数据。

3. 算术平均值滤波

算术平均值法数字滤波公式为

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \tag{6-3}$$

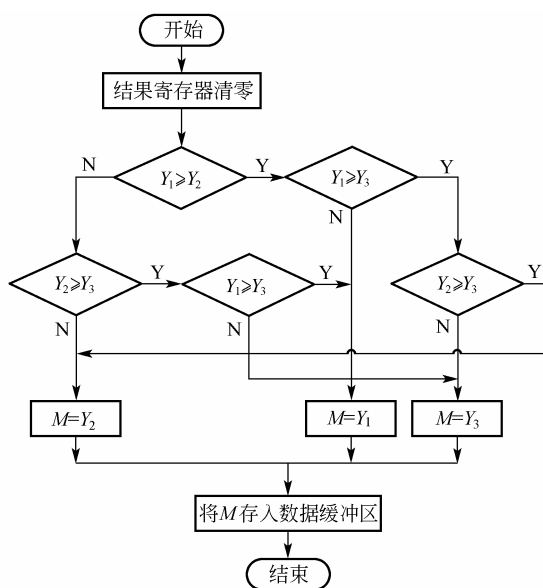


图 6.20 中值滤波流程图

由此可见，算术平均值法滤波是把一个采样周期内 N 次采样值 X_i 相加，然后再除以采样次数 N ，得到该周期内的采样值 Y 。算术平均值滤波的平滑度和灵敏度取决于 N 的大小。当 N 较大时，平滑度高，但灵敏度低；当 N 较小时，平滑度低，但灵敏度高。应根据具体情况选取 N ，一般为 2 的整数幂，对于一般流量测量，取 $N=8$ 或 16 ，对于压力等测量，取 $N=4$ 。算术平均值滤波特别适用于信号本身在某一数值附近上下波动的情况，但不能用于脉冲干扰严重的场合。

4. 滑动平均值滤波

算术平均值滤波需要连续采样 N 个数据，然后求算术平均值。由于必须采样 N 个数据，需要的时间较长，因而检测的速度较慢。为了克服这个缺点，可以采用滑动平均值滤波法。所谓的滑动平均值滤波法就是在 RAM 区建立一个数据缓冲区，依次存放 N 次的采样数据，每采进一个新的数据，就将最早采集的那个数据丢掉，然后求包括新数据在内的 N 个数据的算术平均值。这样，每采进一个新的数据，就可以计算出一个新的平均值，大大加快了数据的处理速度。这种滤波程序设计的关键是，每采样一次，移动数据块一次，然后求出新一组数据的和，再求平均值。

5. 加权滑动平均滤波

在算术平均值滤波和滑动平均滤波算法中， N 次采样值在输出结果中的权重是均等的。对于时变信号采用这种的滤波算法，会引入滞后， N 越大，滞后越严重。为了增加新的采样数据在滑动平均中的比重，以提高系统对当前采样值的灵敏度，可采用加权滑动平均滤波法。它是对滑动平均滤波的一种改进，即对不同时刻的数据加以不同的权。通常越接近现时刻的数据，权系数越大。这种滤波算法为

$$Y_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} C_i X_{n-i} \quad (6-4)$$

式中, Y_n ——第 n 次采样值经滤波后的输出;

X_{n-i} ——经过滤波的第 $n-i$ 次采样值;

C_i ——常数, 且满足以下关系式:

$$C_0 + C_1 + \dots + C_{N-1} = 1, \quad C_0 > C_1 > \dots > C_{N-1} > 0 \quad (6-5)$$

6. 一阶惯性滤波

RC 低通滤波器的传递函数为 $G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}$, 将其离散化处理后得到差分方程为

$$Y(k) = (1 - \alpha) \cdot Y(k-1) + \alpha \cdot X(k-1) \quad (6-6)$$

式中, 常数 $\alpha = T_s / \tau$, T_s ——采样周期;

τ ——RC 滤波器的时间常数;

$X(k)$ ——第 $k-1$ 次采样值;

$Y(k-1)$ 、 $Y(k)$ ——分别为第 $k-1$ 、 k 次滤波输出值。

一阶惯性滤波算法对周期性干扰具有良好的抑制作用, 其不足之处是带来相位滞后, 灵敏度低, 滞后的程度取决于 α 值的大小。

6.5.2 量程自动转换与标度变换

1. 量程自动转换

为了使测量系统具有较高的分辨力测量精度, 总希望测到的值尽可能达到 A/D 转换的满量程。自动改变系统的增益, 对幅值小的信号采用大增益, 对幅值大的信号改用小信号, 获得合适的量程, 使输入信号最大值不同的信号可以达到满量程的测量精度, 这一过程称为自动量程转换。例如, 假设通道产生的绝对误差为 5mV, 则对于满刻度 10V 输出时, 通道相对精度为 0.05%, 而对于 0.1V 的测量, 相对精度只有 5%, 显然对于小信号测量精度不能保证, 必须提高增益, 切换量程。

自动量程切换可采用程控放大器或选用不同量程的传感器来实现。其原理图如图 6.21 所示。图 6.22 是两种自动量程切换的程序流程。在图 6.22(a)中, 假设采用程控放大器的电路有三档量程, 设 1 档为最大量程挡, 2 档为第二大量程挡, 依次类推。在图 6.22(b)中, 采用两个不同量程的传感器 A 和 B, 设传感器 A 的测量范围 M_1 大于传感器 B 的测量范围 M_2 , 两者满量程输出相同。启动时, 总先接入大量程传感器, 小量程传感器处于过载保护状态, 待软件判别确认量程后, 再置标志位, 选取传感器 A 或 B。

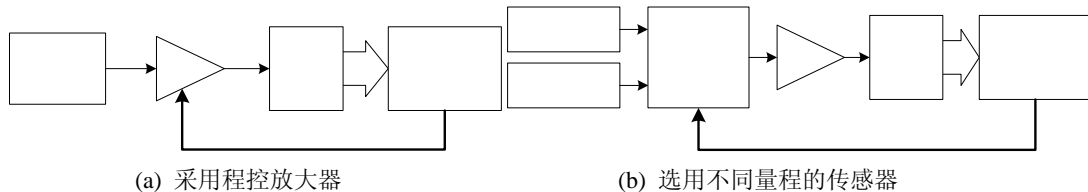


图 6.21 自动切换量程的电路原理图

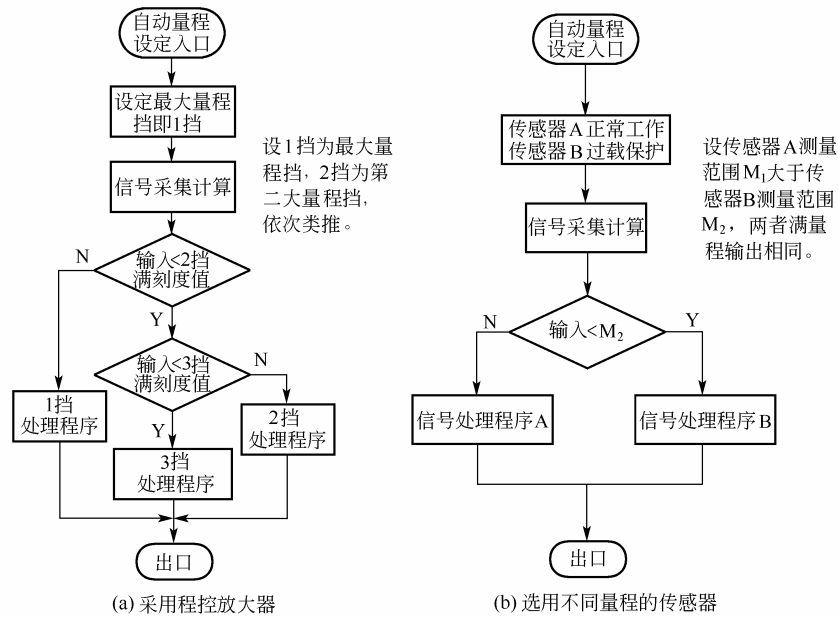


图 6.22 自动量程切换的程序流程

2. 标度变换

智能仪器检测的物理量，一般均通过传感器转换为电量，再经数据采集系统后得到与被测量相对应的数字量。在不同智能仪表或同一台仪器不同的测量通道中，相同的数字量所代表的物理量及其大小是不同的。例如，某测温系统的传感器输出为 0~16.716mV，经过放大、8 位 A/D 转换为 00~FFH 的数字量；而在某压力测量系统中，当压力在 0~100N 间变化时，压力传感器输出 0~10mV，经过放大、8 位 A/D 转换后同样得到 00~FFH 的数字量。也就是说，通常采用一定的数据处理技术将这些数字量转换成具有不同量纲的相应物理量，这一技术常被称作标度变换(或工程量变换)。

1) 线性标度变换

线性参数标度变换是最常用的标度变换。被测物理量变化范围为线性标度变换的式为

$$A_x = A_0 + (A_{max} - A_0) \frac{N_x - N_0}{N_{max} - N_0} \tag{6-7}$$

- 式中， A_x ——物理量的实际测量值；
- N_x ——测量值所对应的数字量；
- A_0 ——传感器输出的下限；
- N_0 —— A_0 对应的数字量；
- A_{max} ——传感器输出的上限；
- N_{max} —— A_{max} 对应的数字量。

其中，对某一固定的被测参数或仪器的某一档量程来说， N_{max} 、 N_0 、 A_{max} 、 A_0 都是常数。对于不同的参数或量程会有着不同的值。在大多数情况下，将被测参数起点 A_0 做某

些处理, 使得其对应 A/D 转换值为 0, 即 $N_0=0$ 。于是, 上式可写成

$$A_x = A_0 + (A_{\max} - A_0) \frac{N_x}{N_{\max}} \quad (6-8)$$

【例 6.1】 某压力测量仪表的量程为 500Pa~1500Pa, 采用 12 位 ADC, 设经过采样及数字滤波后得到的数字量为 0BFF, 求此时的压力值。

解: 根据题意, 已知 $A_0=500\text{Pa}$, $A_{\max}=1500\text{Pa}$, $N_x=0\text{BFFH}=3071\text{D}$, $N_{\max}=0\text{FFFH}=4095\text{D}$, $N_0=0$, 则

$$A_x = A_0 + (A_{\max} - A_0) \frac{N_x}{N_{\max}} = (1500 - 500) \times \frac{3071}{4095} + 500 \approx 1250 \text{ Pa}$$

2) 非线性参数的标度变换

上面介绍的标度变换公式, 只适用于线性变化的参量, 如果被测参数为非线性, 上面的三个公式均不适用, 需重新建立标度变换公式。一般而言, 非线性参数的变化规律各不相同, 故标度变换公式亦需根据具体情况来建立。但是在某些情况下, 输出信号与被测量之间有明确的数学关系, 则没有必要先进行非线性校正, 再进行标度变换, 可一次完成计算过程。

以流量测量为例加以说明。在流量测量中, 流量与差压之间的关系为

$$Q = k \cdot \sqrt{\Delta P} \quad (6-9)$$

式中, Q ——流量;

k ——刻度系数, 与流体性质及节流装置的尺寸相关;

ΔP ——节流装置的差压。

从上式可看出, 流体的流量与被测流体流过节流装置前后所产生的压力差的平方根成正比, 于是得到测量流量时的标度变换式为

$$Q_x = (Q_{\max} - Q_0) \sqrt{\frac{N_x - N_0}{N_{\max} - N_0}} + Q_0 \quad (6-10)$$

式中, Q_x ——被测物体的流量值;

Q_{\max} 、 Q_0 ——分别为流量仪表的上限值、下限值;

N_x ——差压变送器测得的差压值(数字量),

N_{\max} 、 N_0 ——分别为差压变送器上限、下限对应的数字量。

6.5.3 PID 控制算法

控制算法是智能仪表软件系统的主要组成部分, 整个仪表的控制功能主要由控制算法来实现。比例、积分、微分控制(PID 控制)是工业控制中应用最广泛的一种控制规律。传统 PID 控制是通过硬件电路实现的, 参数容易受到外部环境的影响, 灵活性较差。用软件来实现 PID 控制, 参数易于修改, 不需要附加硬件, 降低成本, 提高系统的可靠性。

PID 调节器的基本输入/输出关系为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6-11)$$

式中, $u(t)$ ——调节器的输出信号,

$e(t)$ ——调节器的输入偏差信号, 即 $e(t) = r(t) - c(t)$;

$r(t)$ ——输入给定值;

$c(t)$ ——被控参数;

K_p ——比例系数;

T_I ——积分时间常数;

T_D ——微分时间常数。

将式(6-11)离散化, 即令 $t = nT$ (T 为采样周期), 用矩形法数值积分代替积分项, 导数项用后向差分逼近, 即可得到

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} + u_0 \quad (6-12)$$

式中, u_0 ——偏差为零时的初值。

增大比例系数 K_p , 可以提高系统响应速度, 减少稳态误差, 但是过大的 K_p 会导致系统振荡, 破坏系统的稳定性。

积分作用的引入, 有利于消除静差。但是积分作用会导致调节器的相位滞后, 出现积分饱和现象, 使系统出现超调, 影响系统的动态响应速度。

微分作用是按偏差的变化趋势进行控制的。故引入微分作用后, 有利于改善高阶系统的调节品质。微分作用使系统相位超前, 提高了系统的稳定性, 改善系统的动态品质。同时, 微分作用对输入信号的噪声很敏感, 因此在一些噪声较大的系统中一般不引入微分作用, 或者首先对信号滤波, 再加入微分作用。

1. 完全微分型 PID 算法

完全微分型 PID 算法有位置型、增量型两种不同差分方程形式。

1) 位置型算式

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} + u_0 \quad (6-13)$$

2) 增量型算式

增量型算式的输出值与执行机构的变化量相对应, 即是前后两次采样所计算的位置值之差。令 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, 根据位置型算式, 可得到

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p \left\{ \Delta e(k) + \frac{T}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T} [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \right\} \quad (6-14)$$

由式(6-14)可得到位置输出值

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (6-15)$$

整理式(6-14)可得

$$\Delta u(k) = a_0 e(k) + a_1 e(k-1) + a_2 e(k-2) \quad (6-16)$$

式中, $a_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right)$, $a_1 = K_p \left(1 + \frac{2T_D}{T} \right)$, $a_2 = K_p \cdot \frac{T_D}{T}$ 。

根据式(6-16)可画出完全微分型 PID 算法程序流程图, 如图 6.23 所示。按增量型 PID

算法计算 $\Delta u(k)$ 只需要保留当前时刻 $e(k)$ 以及以前的两个偏差值 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 。初始化程序置初值 $e(k-1) = e(k-2) = 0$ ，中断服务程序对过程变量进行采样，根据参数 a_0 、 a_1 、 a_2 以及 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 计算出 $\Delta u(k)$ 。

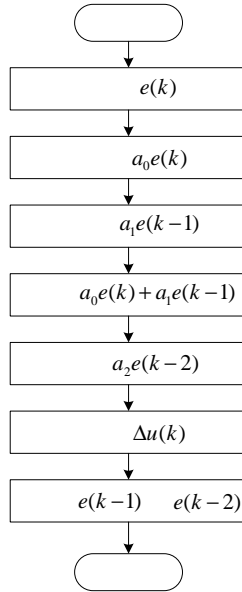


图 6.23 完全微分型 PID 算法程序流程图

2. 不完全微分型 PID 算法

在实际控制系统中，往往采用不完全微分型 PID 算法。不完全微分是用实际 PD 环节来替代理想 PD 环节，使微分作用在偏差变化较快时不致太强烈。在 PID 算法中，比例、积分 I 和微分 D 是独立的，故可在比例积分控制的基础上串接一个 $(T_D s + 1)/(T_D s / K_D + 1)$ 环节，如图 6.24 所示。 K_D 为微分增益，一般为 5~10。

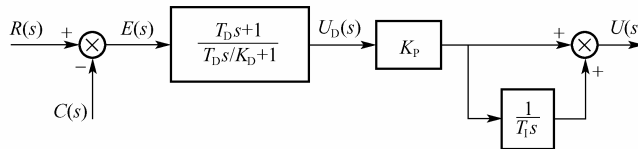


图 6.24 不完全微分型 PID 算法传递函数框图

不完全微分型 PID 算法可用下面两式表示，即

$$U_D(s) = \frac{T_D s + 1}{T_D s / K_D + 1} E(s) \quad (6-17)$$

$$U(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) U_D(s) \quad (6-18)$$

对上面两式离散化处理得到

$$u_D(k) = u_D(k-1) + K_{D1} [e(k) - e(k-1)] + K_{D2} [e(k) - u_D(k-1)] \quad (6-19)$$

$$\Delta u(k) = K_p \frac{T}{T_i} u_D(k) + K_p [u_D(k) - u_D(k-1)] \quad (6-20)$$

式中, $K_{D1} = \frac{T_D}{T + T_D/K_D}$, $K_{D2} = \frac{T}{T + T_D/K_D}$ 。根据式(6-19)和式(6-20)可得到不完全微分型 PID 算法程序流程图, 如图 6.25 所示。

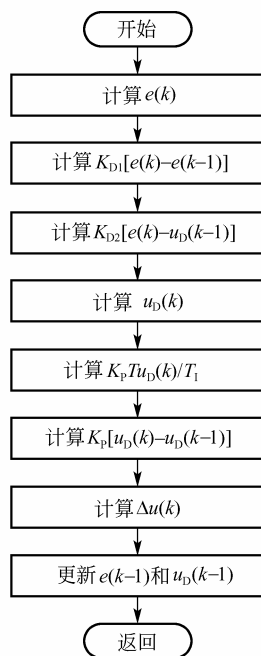


图 6.25 不完全微分型 PID 算法程序流程图

3. PID 算法的改进

1) 抗积分饱和

积分作用虽能消除控制系统的静态误差, 但会出现积分饱和的现象, 这是由于在偏差始终存在的情况下, 输出 $u(k)$ 将达到上下极限值。此时虽然对 $u(k)$ 进行了限幅, 但积分项 $u(k)$ 仍在累加, 从而造成积分饱和。当偏差方向改变后, 因积分项的累积值很大, 超出输出值的限幅范围, 故需经过一段时间后, 输出 $u(k)$ 才脱离饱和区。这样就造成控制滞后, 使系统出现明显的超调, 恶化控制品质。

抑制积分饱和的方法如下:

(1) 积分限幅法。消除积分饱和的关键在于不能使积分项过大。积分限幅法的基本思想是当积分项输出达到输出限幅值时, 立即停止积分项的计算。这时积分项的输出取上一时刻的积分值。

(2) 积分分离法。积分分离法的基本思想是在大偏差时不进行积分, 此时相当于 PD 控制器; 当偏差的绝对值小于预定门限值时积分部分才起作用。这样既防止了偏差大时出现过大的控制量, 也避免了过积分现象。

(3) 变速积分法。积分的目的是为了消除静差。这就要求在偏差较大时积分速度慢一

些,使其作用相对弱一些,以免产生超调;而在偏差较小时,积分快一些,作用强一些,以尽快消除静差。

2) 微分先行与输入滤波

微分先行的基本思路是将对偏差的微分改为对被控量的微分,在给定值变化时,不会产生输出的大幅度变化,而且由于被控量一般不会突变,即使给定值已发生改变,被控量也是缓慢变化的,从而不致引起微分项的突变。

输入滤波是克服偏差突变引起微分项输出大幅度变化的另一种方法。所谓输入滤波就是在计算微分项时,不是直接应用当前时刻的误差 $e(k)$,而是采用滤波值 $\overline{e(k)}$,即用过去三个采样时刻和当前时刻的四个误差,计算它们的平均值而得到的。

$$\overline{e(k)} = [e(k) + e(k-1) + e(k-2) + e(k-3)]/4 \quad (6-21)$$

6.6 智能仪表设计实例——智能温度测控仪

温度测量与控制是科研与生产中最常见的一类控制。为了保证生产过程正常安全进行,提高产品质量,降低工人的劳动强度以及节约能源,要求能对加热对象(如加热炉)的温度进行有效控制。采用微处理器的智能温度测控仪与传统的温控系统相比,功能更强大,结构灵活,可靠性更高,性能更好。

1. 智能温度测控仪的设计要求

实现 n 段温度可编程调节,能恒速升温调节、温度保持和恒速降温调节。

(1) 具有四路模拟量输入。输入传感器为热电偶,对输入信号采取冷端温度自动补偿、线性化处理以及数字滤波,从而提高测量精度。

(2) 一路模拟量(0~10mA)输出和8路开关量输出。模拟量输出用于控制变频调速器、伺服电机等,开关量用于控制各种阀门、接触器等。

(3) 6位LED数码显示。具有超限报警功能。

(4) 采用PID控制,具有输出限幅与防止积分饱和的功能,并能够在线设置或修改系统参数和状态,如PID参数的修改、开关量状态等。

(5) 具有掉电保护功能。

2. 系统的组成

图6.26是智能温度测控仪的原理框图,控制对象为电炉,检测元件为热电偶,执行器为晶闸管。控制系统工作过程如下:热电偶输出信号经过前置通道(多路转换、放大、A/D转换),再通过光电隔离后进入主机。单片机对采集的数据进行必要的判断、分析处理和计算,并对偏差按PID规律运算后输出数字控制量。数字信号经过光电隔离,由D/A电路转换成模拟量,通过V/I变换输出0~10mA的直流电流。该电流送入晶闸管电压调整器,触发晶闸管,对炉温进行控制。通过光电耦合器输出开关量信号,控制阀门等执行器。

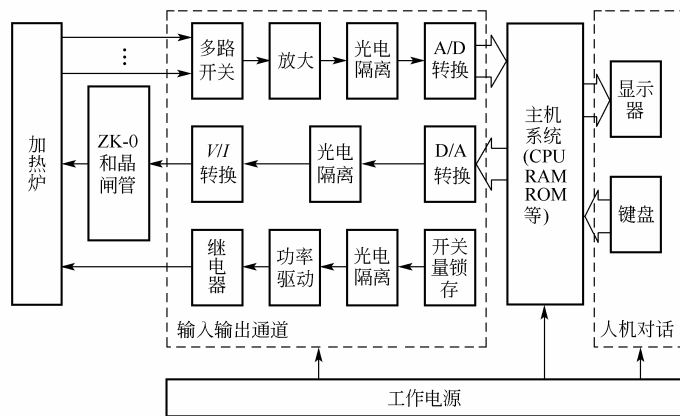


图 6.26 智能温度测控仪的原理框图

智能温度测控仪的软件设计采用结构化和模块化设计方法。图 6.27 是温度测控仪的监控主程序流程图。监控程序包括初始化模块、显示模块、键盘输入处理模块、自诊断模块和人工操作处理模块等软件模块。

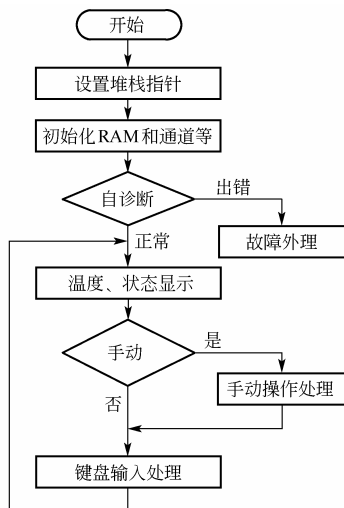


图 6.27 温度测控仪的监控主程序流程图

6.7 虚拟仪器技术

6.7.1 虚拟仪器的概念

自 20 世纪 90 年代以来，计算机技术迅猛发展，电子仪器与计算机技术在更深层次上结合，使电子仪器突破了传统仪器模式，产生了新的测试仪器——虚拟仪器。虚拟仪器的外部特征与传统仪器大不相同，其中最突出的特点是仪表面板不再由一些物理实体构成，而是被借助计算机内部强大的图形编程环境建立起来的虚拟面板所替代。虚拟仪器技术强

调软件的作用，提出了“软件就是仪器”的概念，原来由硬件实现的很多功能如存储、显示等，在虚拟仪器中用软件来实现。虚拟仪器允许用户自定义仪器功能，通过编制不同的软件测试系统，可构造出任意功能的仪器，而且虚拟仪器资源具有良好的可再用性。

典型的虚拟仪器系统如图 6.28 所示。传统的测试仪器通常由数据采集、数据分析与处理、存储显示和输出 3 部分组成。虚拟仪器把测试技术和计算机技术结合起来，将仪器的三大功能放到计算机上来实现，即在计算机内插入数据采集卡，经过 ADC 或 DAC，用软件对信号进行分析处理，并在计算机屏幕上生成仪表面板，完成仪表的控制和显示，最终实现传统测试仪器的全部功能。

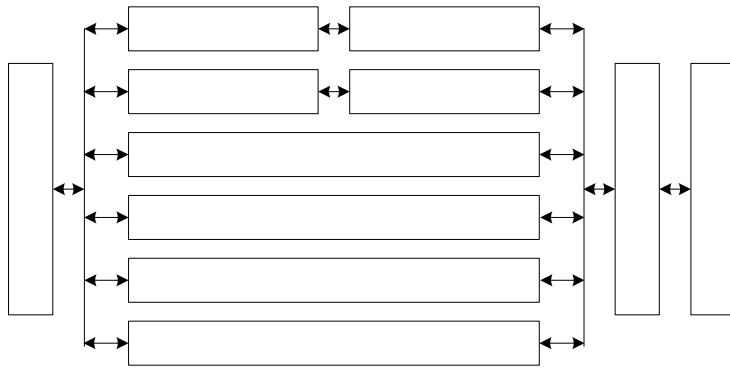


图 6.28 典型的虚拟仪器系统

虚拟仪器的主要特点有：

- (1) 尽可能采用了通用的硬件，各种仪器的差异主要是软件。
- (2) 可充分发挥计算机的能力，有强大的数据处理功能，可创造出功能更强的仪器。
- (3) 用户可以根据自己的需要来定义和制造各种仪器。

虚拟仪器实际上是一个按照仪器需求组织的数据采集系统。虚拟仪器的研究中涉及的基础理论主要有计算机数据采集和数字信号处理。目前在这一领域内，使用较为广泛的计算机语言是美国 NI 公司的 LABVIEW，此外还有 HP 公司的 VEE 及 TEKTRONIX 公司的 Ez-Test 等。

普通的 PC 有一些不可避免的弱点，用它构建的虚拟仪器或计算机测试系统性能不可能太高。目前作为计算机化仪器的一个重要发展方向是制定了 VXI 标准，这是一种插卡式的仪器。每一种仪器是一个插卡，为了保证仪器的性能，又采用了较多的硬件，但这些卡式仪器本身都没有面板，其面板仍然用虚拟的方式在计算机屏幕上出现。这些卡插入标准的 VXI 机箱，再与计算机相连，就组成了一个测试系统。VXI 仪器价格昂贵，目前又推出了一种较为便宜的 PXI 标准仪器。

虚拟仪器研究的另一个问题是各种标准仪器的互联及与计算机的连接。目前使用较多的是 IEEE 488 或 GPIB 协议。未来的仪器也应当是网络化的。

6.7.2 LABVIEW 简介

实验室虚拟仪器集成环境(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, LABVIEW)，是美国国家仪器公司(National Instrument, NI)研制的一种功能强大的仪器系

统开发平台，也是目前应用最广、发展最快、功能最强的图形化软件开发集成环境。它具有直观的界面，便于开发，易于学习，且具有多种仪器驱动程序和工具包。LABVIEW 是一种图形化程序设计语言，它采用了工程人员熟悉的术语、图标等图形化符号来替代常规的基于文字的程序语言，把复杂烦琐、费时的语言编程简化成简单、直观、易学的图形编程，可以大大减少程序开发时间。LABVIEW 不但能够完成一般的数学运算与逻辑运算和输入/输出功能，它还带有专门的用于数据采集和仪器控制的库函数和开发工具，尤其还带有专业的数学分析程序包，基本上能满足复杂的工程计算和分析要求。

LABVIEW 作为开发环境有以下特点：

- (1) 图形化编程降低了对使用者的编程经验的要求，易于工程师使用。
- (2) 采用面向对象的方法和概念，便于软件的开发和再利用。
- (3) 图元、框图及构成的虚拟仪器在 Windows、Windows NT、UNIX 等多台之间兼容，便于软件的移植。
- (4) 支持串行口、GPIB、VXI 等标准总线及各种数据采集卡。

使用 LABVIEW 开发平台编制的程序称为虚拟仪器程序，简称为 VI。VI 包括 3 个部分：前面板(Front Panel)、流程图(Block Diagram)以及图标/连接器(Icon/Connector)。程序前面板用于设置输入数值和观察输出量，用于模拟真实仪表的前面板。在程序前面板上，输入量被称为控制(Controls)，输出量被称为显示(Indicators)。控制和显示是以各种图标形式出现在前面板上，如旋钮、开关、按钮、图表、图形等，这使前面板直观易懂。下面以温度计程序作为一个简单实例对 VI 的三部分加以说明。图 6.29 是一个温度计程序(Thermometer VI)的前面板。

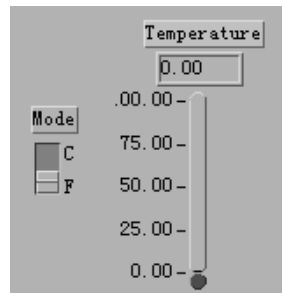


图 6.29 温度计程序(Thermometer VI)的前面板

每一个程序前面板都对应着一段框图程序。框图程序用 LABVIEW 图形编程语言编写，可把它理解成传统程序的源代码。框图程序由端口、节点、图框和连线构成。其中端口被用来同程序前面板的控制和显示传递数据，节点被用来实现函数和功能调用，图框被用来实现结构化程序控制命令，而连线代表程序执行过程中的数据流，定义了框图内的数据流动方向。上述温度计程序(Thermometer VI)的框图程序如图 6.30 所示。

图标/连接器是子 VI 被其他 VI 调用的接口。图标是子 VI 在其他程序框图中被调用的节点表现形式；而连接器则表示节点数据的输入/输出口，就像函数的参数。用户必须指定连接器端口与前面板的控制和显示一一对应。图 6.31 为温度计程序(Thermometer VI)的图标和连接器。连接器一般情况下隐含不显示，除非用户选择打开观察它。

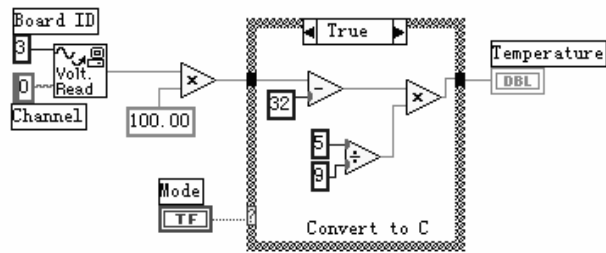


图 6.30 温度计程序的框图程序

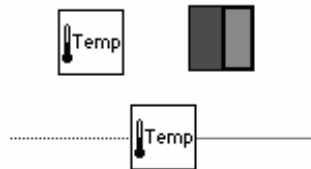


图 6.31 温度计程序的图标和连接器

LABVIEW 的强大功能归因于它的层次化结构,用户可把创建的 VI 程序当作子程序调用,以创建更复杂的程序,而这种调用的层次是没有限制的。

本章小结

智能仪表是计算机科学、电子学、数字信号处理、人工智能、VLSI 等新兴技术与传统仪表技术的结合。随着微电子技术、信息技术的发展以及现代控制理论的应用,智能仪表朝着小型化、多功能化、网络化、人工智能化方向发展。

在智能仪表硬件设计过程中,必须根据被测信号的特征量及其大小、系统关键指标的要求、成本因素等方面做出综合考虑,这样才能设计出合理的硬件系统。在对于高精度、多功能、快速数据采集系统,更要深入研究系统的各个环节,从理论与实践上做出分析、判断,这样才能获得可靠的品质指标。硬件设计内容主要涉及输入通道、输出通道设计以及数据通信接口设计等。在设计过程中,为了保证仪表能在实际应用中可靠地工作,必须采取必要的抗干扰技术,如滤波、正确的接地等。

智能仪表是将人工智能的理论、方法和技术应用于仪表,使其具有拟人智能特性或功能的检测装置。智能仪表的软件通常由监控程序、中断程序、测量程序和数据处理程序组成。软件设计的质量决定了仪表智能高低。因此,设计者必须掌握正确的软件设计方法,才能高效率、高质量地完成智能仪表软件设计任务。为了防止程序运行失常,设计者必须考虑采用合理的软件抗干扰措施,如把关器技术、软件陷阱等。

智能仪表的测量与控制算法主要有数字滤波、量程自动转换与标度变换以及 PID 控制算法。数字滤波可靠性高,稳定性好,而且多个输入通道可以共用,使用灵活方便,具有模拟滤波无可比拟的优势。自动量程切换技术可以提高测量系统的测量精度,可采用程

控放大器或选用不同量程的传感器来实现。在标度变换实现过程中,采用一定的数据处理技术将数字量转换成具有不同量纲的相应物理量。PID 控制是工业控制中应用最广泛的一种控制规律。数字 PID 控制,参数易于修改,不需要附加硬件,降低成本,提高系统的可靠性。

虚拟仪器是智能仪表发展的新阶段。虚拟仪器技术强调软件的作用,提出了“软件就是仪器”的概念,原来很多由硬件实现的功能如存储、显示等,在虚拟仪器中用软件来实现。虚拟仪器允许用户自定义仪器功能,通过编制不同的软件测试系统,可构造出任意功能的仪器,而且虚拟仪器资源具有良好的可再用性。

思考题与习题

6-1 简要叙述智能仪表的概念、特点以及发展趋势。

6-2 试画出智能仪表的基本结构,并叙述各个组成部分的功能。

6-3 在数据采集系统中输入通道有几种,并画出它们的结构示意图,简述它们各自的特点以及应用场合。

6-4 试简述采样保持器的原理以及选择采样保持器的依据。

6-5 设有 8 路(0~5V)模拟量输入信号,要求每次从 0 号通道开始,按顺序将 8 路模拟量输入转换成数字量,连续采集 8 次,并存放在片外数据存储器中,数据存储单元的首地址为 7800H。A/D 转换采用中断方式,即每次 A/D 转换结束时立即向单片机 8051 发出中断请求。

(1) 若 ADC 选择 ADC0809 时,根据题意,试画出 ADC0809 与 8051 的接口电路。

(2) 根据第 1 小题的接口电路,编写相应的数据采集程序。

(3) 如果 ADC 采用 AD574A,同样也实现上述功能,此时需要增加什么器件。试画出 AD574A 与 8051 的接口电路,编写相应的数据采集程序。

6-6 试利用图 6.32 的 DAC0832 单缓冲方式输入电路编写一个阶梯波程序。具体要求如下:该阶梯波每隔 1ms 输出的幅值递增一个恒定值,经过 10ms 后循环,波形如图 6.32 所示。

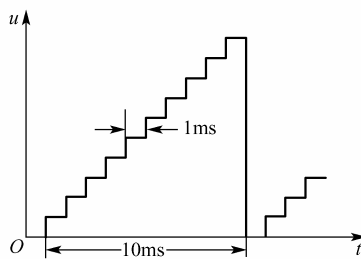


图 6.32 阶梯波

6-7 试简述 RS—232C 串行通信标准的电气标准,它的接口信号有哪几类?其中主要

信号是哪些?

6-8 简述在智能仪表软件设计中常用的设计方法以及智能仪表软件系统的组成。

6-9 干扰窜入仪表内部的途径有哪些? 如何有效地抑制干扰?

6-10 什么是串模干扰和共模干扰? 如何有效地抑制这两种干扰?

6-11 在软件抗干扰中如何对付程序“跑飞”? 试简述每种方法的原理及其特点。

6-12 与模拟滤波相比, 数字滤波的优点有哪些? 常用的数字滤波算法有哪几种? 这些算法分别适用于哪些场合?

6-13 试画出限速滤波和中值滤波的程序流程图, 并编写相应的汇编程序。

6-14 某温度测量仪表的量程为 $500\sim 1000^{\circ}\text{C}$, 采用 8 位 ADC, 设经过采样及数字滤波后的数字量为 BFH, 求此时的温度值。

6-15 试简述 PID 控制算法中比例、积分和微分分别对系统动静态性能的影响。

6-16 如何有效地抑制 PID 控制中的积分饱和?

6-17 结合教材和其他相关资料, 试说明与传统仪器相比虚拟仪器所具有的特点以及虚拟仪器技术的发展现状。

6-18 虚拟仪器软件开发平台 LABVIEW 有哪些主要特点?

第 7 章 自动化仪表应用实例

控制方案的确定是实现企业自动化生产的重要环节，对提高企业的生产效率和节约资源有着重要意义。要设计出一个好的控制方案，不仅要有深厚的控制理论、仪器仪表等方面的功底，还必须深入了解生产工艺，按照工艺流程的内在机理来制定最为合适的控制方案。过程控制是自动控制的重要组成部分，往往被用在能量传递过程、质量传递过程、物质组分传递过程或者是化学反应过程中，这些生产过程的特点是设备种类繁多、被控对象复杂，被控变量数量大等，所以控制方案的制定过程比较繁复。本章不对具体工艺流程和被控设备的知识与原理做细致探讨，主要是从自动控制的角度出发，根据对象特性和控制要求，结合简单的工艺流程介绍来分析某些典型过程的控制方案的确定方法，从中阐明设计控制方案时的一般原则和思路。

7.1 大中型工业锅炉汽包液位的检测与控制

大中型工业锅炉是化工、炼油、发电等工业生产过程中必不可少的重要动力设备，它的作用是生产出高温高压的蒸汽，给后续工段提供作功活加热用的原料。大中型锅炉的控制是相当典型的一个控制系统，它包括汽包液位控制、燃烧过程控制、蒸汽压力控制等多个控制回路，属于比较复杂的控制对象，而其中的汽包液位控制由于对象特性特殊，控制方法有效成为经典的控制系统实例。

7.1.1 大中型工业锅炉的工艺流程

常见的锅炉设备的主要工艺流程如图 7.1 所示。由图可知，燃料和热空气按一定比例送入燃烧室燃烧，生产的热量传递给蒸汽发生系统，产生饱和蒸汽 D_s 。饱和蒸汽经过热器后形成一定气温的过热蒸汽 D ，汇集至蒸汽母管。压力为 p_m 的过热蒸汽，经负荷设备控制供给负荷设备用。与此同时，燃烧过程中产生的烟气，除将饱和蒸汽变成过热蒸汽外，还分别经过省煤器和空气预热器对锅炉给水和燃烧用空气进行预热，以充分利用热能，最后经引风机送往烟囱，排入大气。

从锅炉的生产过程和设备情况看，它是一个比较复杂的被控对象，其输入变量主要有：负荷、锅炉给水、燃料量、减温水、送风和引风等；输出变量主要有：汽包水位、蒸汽压力、过热蒸汽温度、炉膛负压、过剩空气(烟气含氧量)等。如果将锅炉等效为一个黑匣子，那么就可以用如图 7.2 所示的简图表达它的输入输出变量之间的关系。由图可以看出，这些输入输出变量之间并非简单的一一对应的关系，而是相互关联的，具有一定的耦合特性，所以锅炉设备是一个多输入、多输出且相互关联的复杂被控对象。假设其外部设备的用汽负荷发生变化，必将会引起汽包水位、蒸汽压力和过热蒸汽温度等的变化；而燃料量的变化不仅影响蒸汽压力，同时还会影响到汽包水位、过热蒸汽温度、过剩空气和炉膛负压等

参数；给水量的变化将直接影响汽包水位，同时还对蒸汽压力、过热蒸汽温度等产生间接影响。所以，要想精确地对锅炉的所有输出量进行控制是一个比较困难的事。在目前控制系统中，大多数情况是对锅炉进行适当的假设后，将锅炉设备控制划为若干独立个子系统，通过各个子系统的分别对相应的变量进行控制，一般不需考虑变量之间的相互影响，从而是锅炉控制变得比较简单。本节仅就其中汽包的液位检测与控制作相应的讨论。

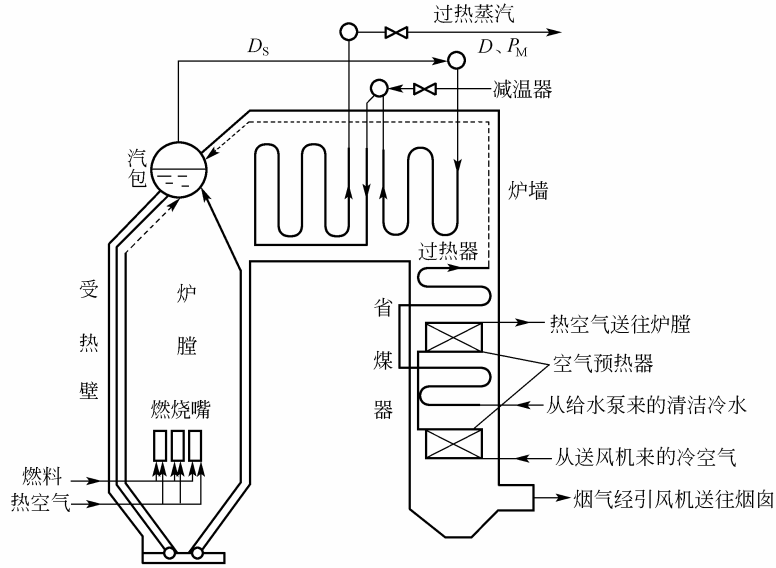


图 7.1 锅炉设备主要工艺流程图

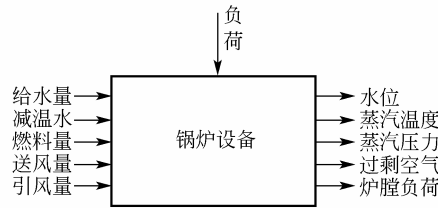


图 7.2 锅炉对象简图

7.1.2 锅炉汽包水位的检测与控制

1. 汽包水位的控制要求

汽包是锅炉的重要组成部分，其水位高低会影响整个系统的安全性。如果水位过低，则由于汽包内的水量较少，而气化速度快，若控制不及时，就会在很短的时间内使汽包内的水全部气化，导致锅炉烧坏和爆炸；水位过高将会影响汽包的水汽分离效果，产生蒸汽带液现象，会使过热器管壁结垢导致损坏，同时过热蒸汽温度急剧下降，该蒸汽作为汽轮机动力的话，还会损坏汽轮机叶片，如果有大量的水进入蒸汽管道，还会导致蒸汽管道爆管的严重后果。可以看出，汽包的水位直接影响锅炉运行的安全性与经济性，是锅炉运行的一个非常重要的指标，无论过高或过低都会引起极为严重的后果，对它的控制必须是及

时而又准确的。

2. 汽包水位的动态特性

对汽包水位控制的研究已经经历的很长时间，逐渐形成了一套行之有效的控制方法。之所以对它进行大量的研究，不仅是由于它的重要性，还在于它的对象特性具有很强的特殊性，主要表现在其水位在外界扰动作用下的变化过程与一般液位对象存在明显区别，需要进行特殊的分析。汽包内的水位高低与蒸汽负荷量 D 、补充给水量 W 、补充水温 T 、汽包蒸汽压力 P_D 等参数都有关系，而其中影响作用比较大的主要是蒸汽负荷和给水量。一般而言，通常用给水量来直接影响水位，所以把给水量对水位的影响称为控制通道影响，把蒸汽负荷对水位的影响称为干扰通道影响。

1) 干扰通道的动态特性

蒸汽负荷(向外提供的蒸汽流量)对水位的影响主要指在燃料量不变的前提下，蒸汽流量突然变化导致的水位变化情况。假设给水量没有同时变化，如果按照常规的物料平衡原则来考虑，必然是物料流出量大于流入量，水位应该随之下降。但是汽包是一个特殊对象，水位的变化情况远比常规对象来得复杂。由于蒸汽流量突然增加，就使短时间内汽包内饱和和蒸汽压力迅速下降，造成汽包内水的沸点突然降低，汽化过程加剧，水面以下气泡不仅数量迅速增加而且体积增大，将水位整体抬高，形成虚假的水位上升现象，与一般对象的水位变化恰恰相反，这种现象被称为假水位现象。

在蒸汽流量扰动下，水位变化的阶跃响应曲线如图 7.3 所示。当蒸汽流量突然增加时，由物料平衡原理得出的水位变化如曲线 H_1 所示，而由于假水位导致的水位变化如曲线 H_2 所示，整体水位 H 的变化则为二者的叠加，即

$$H = H_1 + H_2$$

其变化情况如曲线 H 所示。从图 7.3 中可以看出，在水位变化的初始阶段水位不仅不会下降，反而先上升，过一段时间后才开始下降(反之，当蒸汽流量突然减少时，则水位先下降，然后上升)。

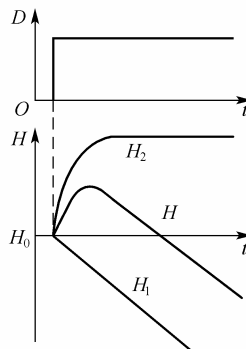


图 7.3 蒸汽流量扰动下水位阶跃响应曲线

曲线 H 的传递函数为

$$\frac{H(s)}{D(s)} = \frac{H_1(s)}{D(s)} + \frac{H_2(s)}{D(s)} = -\frac{\varepsilon_t}{s} + \frac{K_2}{T_2s + 1} \quad (7-1)$$

式中, ε_1 ——曲线 H_1 的飞升速度;
 K_2 ——曲线 H_2 的放大倍数;
 T_2 ——曲线 H_2 的时间常数。

假水位变化的大小与锅炉的工作压力和蒸发量等有关, 一般蒸发量为 100~300T/h 的中高压锅炉在负荷突然变化 10% 时, 假水位可达 30mm~40mm。对于这种假水位现象, 在设计控制方案时必须加以重视。

2) 控制通道的动态特性

在给水量作用下, 汽包也不能仅仅当作常规单容对象来考虑, 其阶跃响应曲线如图 7.4 所示。对于常规单容无自衡对象而言, 水位响应曲线如图 7.4 中曲线 H_1 所示; 但由于给水温度要大大低于比汽包内饱和水的温度, 所以给水量增加后, 汽包内的水温必然随之下降, 导致水中气泡含量减少、体积下降, 引起水位下降。因此实际的水位响应曲线如图中曲线 H 所示, 即当突然加大给水量后, 汽包水位并不立即增加, 而要呈现出一段起始惯性段。用传递函数来描述时, 它相当于一个积分环节和一个纯滞后环节的串联, 可表示为:

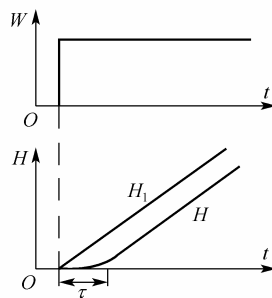


图 7.4 给水流量作用下水位的阶跃响应曲线

$$\frac{H(s)}{W(s)} = \frac{\varepsilon_0}{s} e^{-\tau s} \quad (7-2)$$

式中, ε_0 ——曲线 H_1 的飞升速度;
 τ ——纯滞后时间。

一般而言, 纯滞后时间 τ 与给水温度相关, 水温越低, 滞后时间越长。一般 τ 约在 15s~100s 之间。如采用省煤器, 则由于省煤器本身的延迟, 会使 τ 增加到 100s~200s。

3) 其他干扰因素的影响

除了上述两个比较主要的影响之外, 给水温度变化、锅炉排污、吹灰等过程也会对汽包水位造成影响。给水温度会影响水面下的气泡数量和体积; 锅炉排污则要排出汽包的部分陈水; 吹灰时要使用锅炉自身的蒸汽, 这些都对是水位有影响, 但都属于短时间的扰动, 可以很快被抑制下来, 无需做特殊处理。

3. 汽包水位的控制方案

1) 单冲量控制系统

控制汽包水位时常选给水量作为操作变量, 由此可组成如图 7.5 所示的普通单冲量控制系统。这里指的单冲量即汽包水位。这种控制系统是典型的单回路控制系统。对于部分

小型锅炉来说，由于蒸发量少，水在汽包内停留时间较长，所以在蒸汽负荷变化时，假水位的现象并不显著，如果使用单冲量控制系统配用联锁报警装置，也能够保证系统的安全性操作，满足生产的要求。而大中型锅炉的蒸发量相当大，当蒸汽负荷突然大幅度增加时，假水位现象比较明显，调节器收到错误的假水位信号后，不但不开大给水阀增加给水量，以维持锅炉的物料平衡，满足蒸汽量增大的要求，反而关小调节阀的开度，减少给水量。这种情况被称为调节器的误动作，是由假水位引起的。等到假水位消失后，由于蒸汽量增加而送水量减少，将使水位显著下降，严重时甚至会使汽包水位降到危险程度以致发生事故。因此单冲量系统不能胜任对大中型锅炉的控制，水位得不到保证。

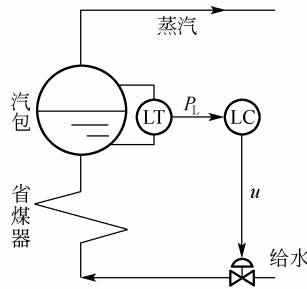


图 7.5 单冲量控制系统

2) 比值控制系统

从物料平衡的角度来看，只要保证任时刻蒸汽流出量与给水流入量之间是等量关系，就能够保证水位的恒定，如图 7.6 所示的比值控制系统就是建立在这样的控制思想上的。这样，给水量随着蒸汽负荷的变化而变化，而且变化方向和数量是完全相同的，可以以此来避免在单冲量方案中出现的调节器误动作。

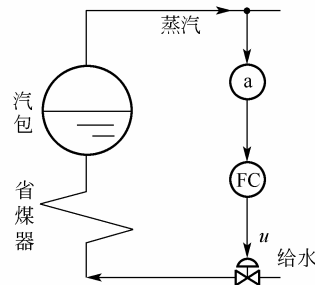


图 7.6 比值控制系统

当对蒸汽流量的测量是直接测量质量时，图中的比值系数 α 可以定为 1 或稍大于 1，此时就可以满足给水量跟随蒸汽量变化的要求。

从图中可以看出，这种方案也可视为一种前馈补偿方案，补偿器就是比值器 α 。此方案对于蒸汽负荷方面的扰动具有很好的抑制作用，但是由于没有真正监视水位的变化情况，所以由其他扰动引起的水位变化完全不得而知，也就不可能对其他的扰动影响进行调节，所以只能是一种探讨型方案，不能应用在实际系统中。

3) 双冲量控制系统

综合单冲量控制系统和比值控制系统的特点，不难设计出如图 7.7 所示的双冲量控制系统。该系统是在单冲量控制系统的基础上适当引入了对蒸汽流量的监视，起到对水位的补充校正作用，就可以大大减弱假水位引起的调节器误动作。图 7.7(a)是双冲量控制系统的原理图，图 7.7(b)是其框图。由图知，这其实是一个前馈与单回路的复合控制系统。其控制思路是：测量出蒸汽负荷的大小，根据物料平衡原理，只要给水量与蒸发量完全相等，那么水位将保持不变，从而克服假水位的影响，也就是利用前馈控制抑制负荷扰动；其他干扰因素引起的水位变化则由反馈控制来克服。这样的设计思路不仅能削弱调节器的误动作，还能使调节阀动作及时、水位波动减弱，起到改善控制品质的作用。图 7.7(a)中的加法器输出是

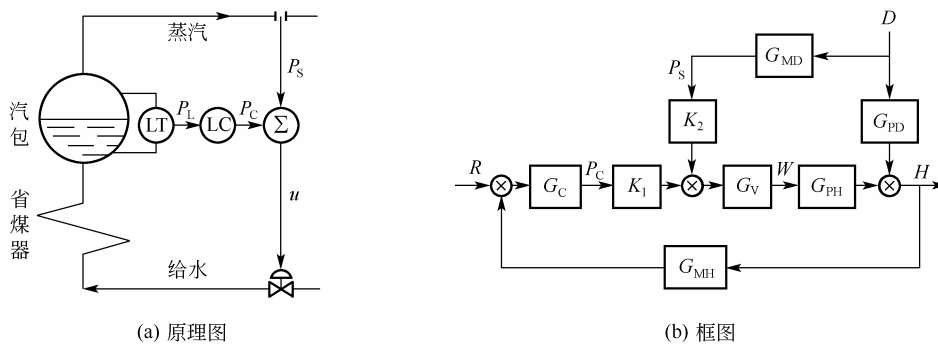


图 7.7 双冲量控制系统原理图与框图

$$P_0 = K_1 P_c + K_2 P_s + C_0 \tag{7-3}$$

- 式中， P_c ——液位调节器的输出；
- P_s ——蒸汽流量变送器(一般经开方器)的输出；
- C_0 ——加法器初始偏置；
- K_1, K_2 ——加法器系数。

由框图可知， K_2 起着静态前馈控制器的作用，按前馈控制器设计原理，有

$$K_2 = - \frac{G_{PD}(s)}{G_{MD}(s)G_V(s)G_{PH}(s)} \Big|_{s=0} = - \frac{K_{PD}}{K_{MD}K_VK_{PH}} \tag{7-4}$$

因为 K_{PD} 一般为负、 K_{MD} 和 K_{PH} 均为正，所以 K_2 的符号取决于调节阀的符号。当采用气开阀时， K_V 为正，则 K_2 为正；当采用气关阀时，则相反。调节阀气开与气关的选用，一般从生产安全角度考虑。如果高压蒸汽是供给蒸汽透平压缩机或汽轮机，那么为保护这些设备选用气开阀为宜；如果蒸汽仅用作加热剂，为保护锅炉采用气关阀为宜。

式(7-4)提供了求取 K_2 的原理算式。事实上，由于锅炉的情况特殊， K_2 一般不按照该式求取，而是按以下思路求取。设阀门安装特性工作点斜率为 K_V ，则

$$K_V = \frac{\Delta W}{\Delta P} \tag{7-5}$$

- 式中， ΔP ——阀门输入信号变化量；
- ΔW ——阀动作后引起的给水流量变化量。

假定蒸汽流量的测量变送为线性(如孔板加开方器), 则

$$\Delta P_S = \frac{\Delta D}{D_{\max} - D_{\min}} (Z_{\max} - Z_{\min}) \quad (7-6)$$

式中, ΔD ——蒸汽流量变化量;

$D_{\max} - D_{\min}$ ——蒸汽流量变送范围;

ΔP_S ——蒸汽流量变送信号的变化量;

$Z_{\max} - Z_{\min}$ ——变送器输出的变化范围。

由物料平衡关系可以得到静态补偿关系, 即在蒸汽量负荷变化时, 应使

$$\Delta W = \alpha \Delta D \quad (7-7)$$

式中的 α 是一个系数, 其大小由 W 和 D 确定, 如果 W 和 D 均为质量流量, α 应等于 1 或稍大于 1(考虑到锅炉排污要多放走一部分水)。

将式(7-6)代入式(7-7)得

$$\Delta W = \alpha \cdot \Delta P_S \frac{D_{\max} - D_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (7-8)$$

而由框图 7.7(b)知

$$\Delta W = \Delta P_S K_2 K_V \quad (7-9)$$

由上述两式可得

$$K_2 = \frac{\alpha(D_{\max} - D_{\min})}{K_V(Z_{\max} - Z_{\min})} \quad (7-10)$$

K_1 的设置比较简单, 可取 1, 也可小于 1。不难看出, K_1 与调节器的放大倍数的乘积相当于简单控制系统中控制器放大倍数 K_C 的作用。 C_0 是个恒值, 设置 C_0 的目的是在正常负荷下, 使调节器和加法器的输出都能有一个比较适中的数值。最好在正常负荷下 C_0 值与 $K_2 P_S$ 接近抵消。

需要说明的是, 蒸汽流量信号的引入只是削弱了由假水位现象引起的调节器误动作, 并没有削弱假水位现象, 假水位现象是大中型锅炉汽包必然存在的物理过程, 想要对它进行限制或削弱是很困难的。同时, 负荷扰动引起的水位变化速度比给水变化引起的水位变化速度要快得多, 所以即使利用给水对符合扰动进行调节, 也会产生较大的水位波动, 因此必须对符合变化的幅度加以限制。

4) 三冲量控制系统

在双冲量控制系统中, 还存在一些问题: 对蒸汽流量的测量不可能完全准确; 给水流量是否与蒸汽流量相等无法得知; 控制阀的工作特性不一定成为线性, 对蒸汽负荷变化要做到静态补偿比较困难; 不能克服给水扰动等。所以, 就需要在双冲量方案的基础上再引入给水流量信号, 构成三冲量控制系统, 如图 7.8 所示。可以看出, 这是前馈与串级控制组成的复合控制系统。串级系统的主回路直接控制水位, 用于抑制除负荷扰动之外的其他扰动; 副回路是流量随动系统, 与蒸汽流量的静态前馈系统一起控制负荷扰动。与一般的串级控制系统类似, 主回路采用比例积分调节规律, 副回路采用纯比例或比例积分调节规律。在这样的三冲量复合控制系统中, 串级控制和前馈控制组成了一个完善的整体, 能够比较全面、准确地完成控制任务。

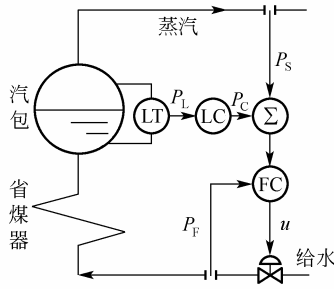


图 7.8 三冲量控制系统

图 7.9 所示是三冲量控制系统的连接图和框图。

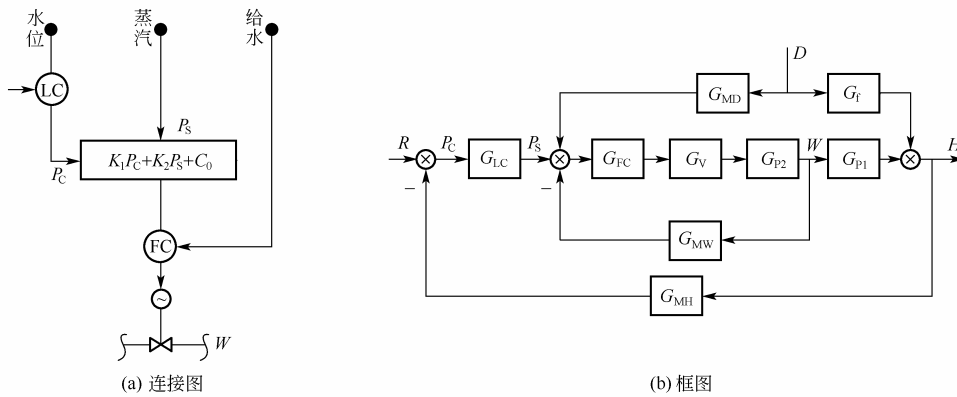


图 7.9 三冲量控制系统的连接图和框图

系数设置：系数 K_1 通常可取 1 或稍小于 1； K_2 可按式(7-11)取值；至于 C_0 的设置与双冲量控制系统相同。水位调节器和流量调节器的参数整定方法与一般串级控制系统相同。

$$K_2 = \alpha \frac{D_{\max} - D_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \quad (7-11)$$

式中， $D_{\max} - D_{\min}$ ——蒸汽流量测量范围；

$W_{\max} - W_{\min}$ ——给水流量测量范围。

无论是双冲量控制方案还是三冲量控制方案，都利用了蒸汽负荷作为前馈控制信号，所以，对蒸汽流量的检测成为非常重要的环节。一般地，对蒸汽流量的检测可以采用测体积或者测质量两种方式，从保持物料平衡的角度来看，采用测质量的方法相对好一些。由于目前大多数场合下测量蒸汽流量都是使用孔板式差压流量计测体积，所以可以在孔板后再增加一个测量蒸汽密度的装置，利用体积流量和蒸汽密度计算出蒸汽的质量流量，将它作为前馈信号来使用。如果不增加密度计，也可利用过热蒸汽的压力和温度查出当前状态下饱和蒸汽的密度，把它作为系数与蒸汽体积流量相乘得到质量流量。这两个方案中，前者的实时性较好，能比较及时地反应蒸汽质量流量的变化；而后的投资较小，但不能保证蒸汽质量流量的瞬时准确性。由于蒸汽流量的检测精度对汽包水位的控制有着特殊意义，所以应该在允许的情况下尽可能地提到蒸汽流量的检测精度。

7.2 石油蒸馏装置中的检测与控制

7.2.1 连续精馏的工艺流程和装置

精馏过程是化工、炼油生产过程中一个十分重要的环节，对精馏过程的控制质量直接影响到企业的产品质量、产量和能量的消耗量，因此精馏过程的控制一直是受到高度重视的典型控制系统之一。精馏过程是把混合液体中的不同组分利用各组分自身挥发度的不同实现组分分离的过程，一般把混合液中的轻质组分分离成汽态，重质组分分离为液态。被精馏的原料可以是两种或两种以上的组分的混合液，称为二元组分或多元组分。由于多元组分精馏在一定情况下可以简化为二元组分精馏，所以一般以二元组分混合液作为模型讨论精馏过程。为简便起见，本节所讨论的精馏过程均以二元组分为对象。简单来讲，精馏的过程就是迫使混合物的汽、液两相在精馏装置中作逆向流动，在相互接触的过程中，液相中的轻质组分逐渐吸收热量转入汽相，而汽相中的重质组分释放热量转入液相，所以精馏过程实质上是一种伴随有传热过程的传质过程。传质是精馏的目的，传热是精馏的手段。在精馏过程中混合液在精馏装置里反复地进行部分汽化和部分冷凝，转变为预期的多种产品。完成精馏过程的主要装置叫做精馏塔，此外还有再沸器、冷凝器、回流罐和回流泵等辅助设备。目前，工业上一般所采用的连续精馏装置的流程如图 7.10 所示。

原料 F 从精馏塔中段某一块塔板上进入，这块塔板称为进料板。精馏塔在进料板以上的部分称为精馏段，进料板以下部分称为提馏段。进入塔内的混合液中的低沸点组分(易挥发组分)较易汽化而向塔顶流动；高沸点组分(难挥发组分)则更多地以液体形态向塔底流动，在流动过程中不断地与塔内上升蒸汽在各层塔板上充分接触并且传热和传质。向下流动的液体到达塔釜后，一部分被连续地引出成为塔底产品 B ；另一部分则在再沸器中被加热，汽化后又返回塔中循环传质。塔内上升的蒸汽依次经过所有的塔板，蒸汽中易挥发组分的浓度逐渐增高，上升到塔顶后进入冷凝器被冷凝成为液体，经回流罐和回流泵后一部分作为塔顶产品 D 连续引出，另一部分则引回到顶部的塔板上用作为塔内冷却液，称为回流量 L 。

精馏过程的产品是从混合液中分离出来的，无论精馏过程多么细致，其产品中不可避免地留有其他组分，所以各种产品的纯度就成为精馏过程重点关注的指标。

7.2.2 精馏过程的控制目标

精馏塔控制的首要目标就是要满足产品质量，即保证各种产品的纯度；同时还应该考虑生产过程的经济效益问题，要使总的收益最大或总的成本最小。因此，精馏塔的控制要

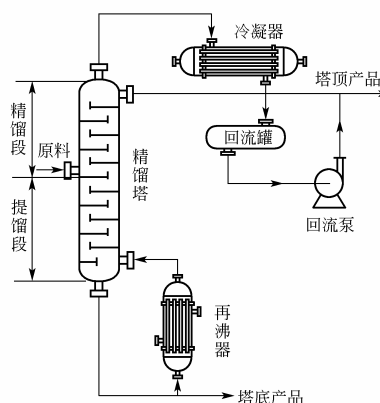


图 7.10 连续精馏装置的工艺流程

求, 体现在质量指标(产品纯度)、产品产量和能量消耗三个方面, 这三个方面又是相互影响、相互制约的, 因此必须进行综合考虑。除了这三个主要指标之外, 还有一些附加的控制要求需要考虑。

1. 质量指标

精馏的过程是非常复杂的, 要做到它的所有产品纯度都是完全满足要求是相当困难的。一般地, 只要保证塔顶或塔底产品之一应该保证达到规定的纯度, 而另一产品也应保证在规定的范围内就可以了。只有在非常精细的精密精馏过程中, 才要求做到塔顶、塔底产品纯度都满足规定值。

在二元组分精馏中, 情况较简单, 质量指标就是使塔顶产品中轻组分纯度符合技术要求或塔底产品中重组分纯度符合技术要求。在多元组分精馏中, 情况较复杂, 一般仅控制关键组分。所谓关键组分, 是指对产品质量影响最大的组分。塔顶产品中挥发度较大的关键组分称为轻关键组分, 塔底产品中挥发度较小的关键组分称为重关键组分。有时, 对多元组分的分离可简化为对二元关键组分的分离, 也相应地简化了精馏操作。

应当指出, 对产品质量的控制应该要求在刚好能满足规定值即可, 即处于“卡边”生产状态, 完全没有必要超出规定值。超过规格的产品并不能提高售价, 反而会导致能耗的增大和产量的降低, 对提高经济效益是不利的。

2. 产品产量和能量消耗

为保证企业的经济效益, 精馏塔不仅要保证产品质量, 还要保证一定的产量和尽量降低能量消耗。精馏塔的能量消耗主要来自混合液的分离过程, 包括再沸器的加热和冷凝器的冷却耗能。此外, 塔的其他附属设备及管线也要散失一部分热量和冷量。

分析可知, 产品纯度越高, 产品产量越大, 则所消耗的能量越多。产品产量、产品纯度及能量消耗三者之间存在着一定的数值关系。有数据表明, 在一定的能耗下, 随着产品纯度的提高, 会使产品的产量迅速下降, 纯度越高, 下降速度越快。如果保持纯度不变, 增加能耗可以提高产品产量, 但只在初始阶段有明显效果, 一旦当能耗达到一定程度以后, 产量的增加幅度就明显下降。

3. 其他要求

为保证系统的正常平稳运行, 应该尽可能在进塔之前的主要可控干扰都抑制下来, 还要缓和一些不可控的主要扰动。例如原料的温度、加热剂和冷却剂的压力、保证进料量与引出量的平衡关系等。这些参数的变化都会引起传质和传热过程的稳定和效率, 对这些参数的变化应及早克服。

7.2.3 精馏过程的静态和动态特性

精馏是一个传热和传质的过程, 它必然遵循基本的能量和物料守恒原则, 所有的影响因素也通过这两个基本原则影响精馏过程。精馏塔的静态特性就反映了影响因素与精馏效果之间的定量关系; 动态特性则反映了精馏塔各参数变化时这些参数之间的动态关系以及对精馏过程的动态影响。这里仅以二元精馏过程为对象讨论精馏塔的静态和动态特性。

1. 精馏塔的静态特性

1) 全塔物料平衡

在稳态工况下, 进塔原料量必须等于引出产品量, 即

$$F = D + B \quad (7-12)$$

轻组分的物料平衡关系为

$$Fx_F = Dx_D + Bx_B \quad (7-13)$$

式中, F 、 D 、 B ——分别为进料量、塔顶采出量和塔底采出量;

x_F 、 x_D 、 x_B ——分别为进料、塔顶采出物和塔底采出物中轻组分的质量浓度。

从式(7-12)和式(7-13)可解得

$$\frac{D}{F} = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} \quad \text{或} \quad \frac{B}{F} = \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} \quad (7-14)$$

式(7-14)表明, 进料量 F 在产品中的分配量(D/F 或 B/F)是决定塔顶和塔底产品中轻组分质量浓度 x_D 和 x_B 的主要因素。 D/F 的改变将直接导致 x_D 和 x_B 的改变。另外, 进料组分质量浓度 x_F 也是一个影响 x_D 和 x_B 的重要因素。

2) 能量平衡

在稳态工况下, 通过传热和进料带入精馏塔的所有能量必然与通过传热和产品带出的离开塔的能量相平衡。如果不考虑能量损失, 能量平衡关系式为

$$Q_H + FH_F = Q_C + DH_D + BH_B \quad (7-15)$$

式中, Q_H ——再沸器加热量;

Q_C ——冷凝器冷却量;

H_F 、 H_D 、 H_B ——分别为进料、塔顶和塔底产品的焓。

上式并未明确表示能量与产品纯度的直接关系, 但是式(7-15)中的每一项都将影响塔内上升蒸汽量 V , 而 V 与产品纯度的关系近似为

$$\frac{V}{F} = \beta \ln \left[\frac{x_D(1-x_B)}{x_B(1-x_D)} \right] \quad (7-16)$$

式中, β ——精馏塔特性因子, 对给定的精馏塔而言, β 近似为常数。

式(7-16)表示了精馏塔的能量关系, 反映了 V/F 对塔分离结果的影响。因而由式(7-13)和式(7-16)可知, 只要保持 D/F 和 V/F 一定(或者 F 一定时, 保持 D 及 V 一定), 这个塔的分离结果 x_D 、 x_B 就完全确定。

3) 内部物料平衡

对精馏塔内部的物料平衡, 主要考虑进料板、精馏段和提馏段 3 部分的状态。由于精馏过程的影响因素很多, 这里只对如图 7.11 所示的二元精馏塔在以下假设的前提下进行讨论。

(1) 在精馏段内, 通过各层塔板的上升蒸汽流量 V_i 均相等;

(2) 在提馏段内、通过各层塔板的上升蒸汽流量 V_s 均相等; $V_s = V$ (V 为再沸器内蒸汽量);

(3) 在精馏段内, 通过各层塔板的下流液体流量 L_i 均相等; L_i 称为内回流, 当回流温度等于塔顶温度时, 内回流 L_i 等于外回流 L ;

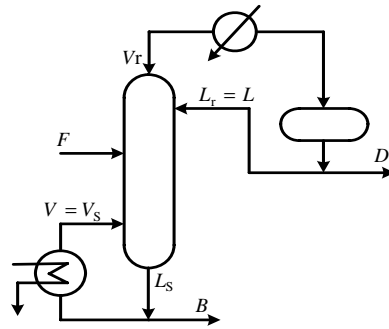


图 7.11 二元精馏塔各项物料情况

- (4) 在提馏段内，通过各层塔板的下流液体流量 L_s 均相等；
 (5) 回流罐和塔底液位不变；
 (6) 塔压保持不变。
 在以上这些条件下，有下述平衡关系。

(1) 加料板上的物料平衡为

$$F + L + V = L_s + V_r \quad (7-17)$$

对于液相泡点进料

$$L_s = F + L, \quad V = V_r$$

对于气相露点进料

$$V_r = F + V, \quad L = L_s$$

对于其他情况下的进料，则需依据热量平衡关系作相应的考虑。

(2) 精馏段的物料平衡。精馏段的物料平衡关系如图 7.12 所示。对精馏段内任一塔板 i 以上作物料平衡计算，轻组分的物料平衡关系式为

$$V_r y_{i+1} = L_i x_i + D x_D \quad (7-18)$$

式中， y_{i+1} ——来自下方第 $i+1$ 层塔板的气相中的轻组分的质量浓度；

x_i ——塔板 i 上液相中的轻组分的质量浓度。

式(7-18)可改写为

$$y_{i+1} = \frac{L_i}{V_r} x_i + \frac{D}{V_r} x_D \quad (7-19)$$

上式表明了精馏段内任一塔板的气相浓度与气液比 L_i/V_r 和 D/V_r 之间的关系。改变气液比必将使塔板上浓度发生变化。然而，气液比除了决定于再沸器上升蒸汽量 V_r 以外，还决定于回流量 L_r 与塔顶采出量 D 。通常将回流量与采出量之比称为回流比 R ，即

$$R = \frac{L}{D} \quad (7-20)$$

当 $D=0$ 时称为全回流。由此可知，要改变精馏塔的操作工艺，应操作精馏塔的回流比和再沸器上升蒸汽量，通过内部平衡关系，使每块塔板上的浓度改变，从而导致最终产品纯度的变化。

塔顶和冷凝器的物料平衡关系为

$$D = V_r - L \tag{7-21}$$

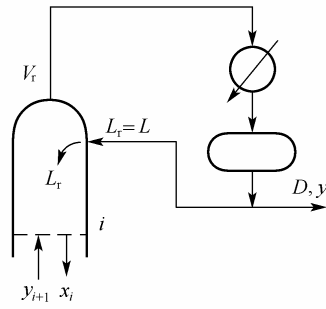


图 7.12 精馏段的物料平衡关系

(3) 提馏段的物料平衡。其平衡关系如图 7.13 所示。对提馏段内任一塔板 j 以下作物料平衡计算，轻组分的物料平衡关系式为

$$V_s y_j = L_s x_{j-1} - B x_B \tag{7-22}$$

式中， y_j ——塔板 j 上气相中的轻组分的质量浓度；

x_{j-1} ——是从第 $j-1$ 块塔板流下的液相中的轻组分的质量浓度。

式(7-22)亦可改写为

$$y_j = \frac{L_s}{V_s} x_{j-1} - \frac{B}{V_s} x_B \tag{7-23}$$

式(7-23)表明了提馏段内任一塔板上的气相浓度与气液比的关系。同样，要使塔的操作工况改变，应操作塔的回流比和再沸器上升蒸汽量，从而通过内部平衡关系最终改变产品的纯度。

塔底和再沸器的物料平衡关系为

$$B = L_s - V \tag{7-24}$$

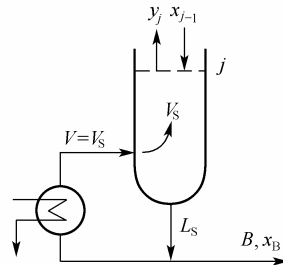


图 7.13 提馏段物料平衡关系

通过以上对进料板、精馏段、提馏段物料平衡关系的分析，可知影响精馏过程的主要因素有：进料量、进料中轻、重组分各自的质量浓度、进料温度和进料状态、再沸器的加热量、冷凝器的冷却量、回流量、塔顶引出量、塔底引出量、塔压。上述各种影响因素中有些是可控制的，有些是不可控制的。一般情况下，进料量和进料浓度是不可控制的。进料温度和状态对塔的操作影响较大，所以在单相进料时采用进料温度控制来克服这种扰动，

而在两相进料时,则利用控制产出物的焓以克服扰动。对于冷凝器的冷却量和再沸器的加热量,一般都用定值控制系统来加以稳定。

总之,从前面对塔的静态特性和内部平衡关系的分析,不难看到,为了克服塔的主要扰动,可以通过对以下参数的控制保证精馏过程的正常进行:塔顶采出量、塔底采出量、回流罐排气量、回流量、再沸器加热量、冷凝器冷却量。前三个量是通过影响全塔的物质平衡与塔的内部物料平衡来起到控制作用;后三个量直接改变塔的能量平衡关系和改变塔内气液比,从而起到控制质量的作用。

2. 精馏塔各参数的动态影响分析

精馏过程受到干扰后上述各参数对塔操作的影响速度是各不相同的,因此在设计控制方案时,必须考虑参数间的动态影响,才能使控制系统及时克服各参数对塔操作的影响。由于精馏塔是一个多变量、时变和非线性的对象,各变量之间又存在相互关联,因此定量分析参数间动态影响并且建立其数学模型是比较困难的,这里仅定性地从几个侧面分析塔的动态影响。

1) 上升蒸汽和回流的影响

在精馏塔内,上升蒸汽流量变化的响应是相当快的。由于上升蒸汽只需克服塔板上极薄覆盖的液相阻力,而塔内气相蓄存量的变化在塔压一定时可忽略不计,因此上升蒸汽量的变化几秒内就可影响到塔顶。

与上升蒸汽造成的影响相比,向下流动的液相的滞后是相当大的。这是因为回流量增加时,必须先使塔板上的液相蓄存量增加,然后在增加的液体静压作用下,才使离开塔板的液相速度增加,因此时回流量变化的响应存在着滞后。

由此可见,除顶部塔板外,要使塔的任何一点的气液比发生变化,用再沸器的加热量作为操作变量得到的响应要比用回流量作操作量是来得快。

2) 组分滞后的影响

无论是改变上升蒸汽量变化还是改变回流量,都必须通过改变每块塔板上组分之间的平衡,最终才引起顶部产品或底部产品组分的质量浓度的变化。由于组分要达到静态平衡需要较长时间,因此尽管上升蒸汽量变化可以很快影响到塔顶组分的质量浓度,但要使塔顶组分的质量浓度变化并达到一个新的平衡仍需花费相当长的时间。回流变化时花费的时间更多。这就是说,塔板上的组分平衡要等到影响组分的液相或气相流量稳定相当时间后才能建立。

组分滞后是必然存在的,它随着塔板上液相蓄存量的增加而增加,因而随塔板数的增加而增加,也随着回流比的增加而增加,因为回流比的增加就意味着塔板上蓄液量的增加。由于再沸器加热量的增加引起上升蒸汽量增加,将会改善气、液接触,从而使组分滞后减小。

3) 回流罐蓄液量和塔釜蓄液量引起的滞后影响

由式(7-21)可知,回流量 L 总是等于塔顶汽相流量 V_r 和塔顶采出量 D 之差。因此,恒定 V_r 时,控制 D 实质上就是改变了回流量 L 。从工艺过程看, D 必须要经过回流罐才能影响到 L ,而回流罐有一定的蓄液量,会使从 D 的变化到 L 的变化产生滞后。液位变化引起

蓄液量变化,也会严重影响 L 和 D 之间的关系。为此要使 V_r , L 和 D 的关系式成立而且不存在滞后,回流罐的液位必须严格保持恒定,这样在采用改变 D (或 D/F)来控制塔顶产品质量的方案中,才能在 V_r 不变时使回流量 L 及时跟踪采出量 D 的变化,否则将引起滞后,影响控制品质。

类似的过程也发生在提馏段。塔釜液位变化引起蓄液量变化,从而引起 V 和 B 的变化。要使 L_s , V 和 B 间的关系式(7-24)成立,塔釜液位必须严格保持一定。这样在采用改变 B 来控制塔底产品质量的方案中,才能在 L_s 不变时使再沸器加热量所引起的上升蒸汽量 V 及时跟踪塔底采出量 B 的变化,否则将引起滞后,影响控制品质。

上述动态影响因素主要影响系统过渡过程的品质指标,一定要在系统设计阶段充分考虑到对这些因素的克服。

7.2.4 精馏塔质量指标的选取

精馏塔最直接的质量指标是产品纯度。由于直接检测产品纯度的难度很大,而且测量过程滞后大、检测仪表可靠性差,所以一般不采用单纯测纯度的办法来衡量产品质量。目前工业上常用的方案是通过保证温度间接保证产品质量。这是因为对于二元组分精馏塔来说,固定压力下的温度与产品纯度间存在着单值的函数关系。因此,如果保证压力恒定,则塔板温度就能间接反映浓度。对于多元精馏塔来说,虽然情况比较复杂,但总体上仍然和二元组分精馏塔类似,可以采用温度指标来反映质量。那么到底采用塔内哪一点的温度作为间接指标才能有效控制产品的质量呢?以下介绍几个常用方案。

1. 灵敏板温度控制

从位置上看,似乎塔顶或塔底的温度最能代表产品质量,这种思路在产品纯度不高时是合理的。但是,当产品纯度接近质量要求的给定值时,在邻近塔顶或塔底的各板之间的温度差已经很小。这时,即使塔顶或塔底温度仅变化 0.5°C 就可能造成产品质量不合要求。因而,对温度检测仪表的灵敏度和控制精度都提出了很高的要求,这往往很难满足的。解决这一问题的方法是在塔顶或塔底与进料板之间选择灵敏板的温度作为间接质量指标。所谓灵敏板是指塔的操作受扰动或受控制时,塔内各板上的物料中各组分的质量浓度和温度都将发生变化,变化程度各不相同,在达到新的稳态后,温度变化最大的那块塔板即称为灵敏板。灵敏板位置可以通过逐板计算或静态模型仿真计算,依据不同操作工况下各塔板温度分布曲线比较得出。但是由于塔板效率不易估准,所以最后还须根据实验予以确定。

2. 温差控制

温差控制适用于精密精馏过程,此时产品纯度要求很高,而且塔顶塔底产品的沸点差较小。

采用温差作为衡量质量指标的参数,是为了消除压力波动对产品质量的影响。因为,在精馏塔控制系统中虽设置了压力定值控制,但压力也总难免有些微小波动,这对一般产品纯度要求不太高的精馏塔是可以忽略不计的。但如果是精密精馏,产品纯度要求很高,微小的压力波动对纯度的影响就不能再忽略了。也就是说,精密精馏时若用温度作质量指

标就不能很好地代表产品的质量,温度的变化可能是产品纯度和压力都变化的结果,为此应该考虑补偿或消除压力波动对浓度的影响。

在选择温差信号时,一个检测点仍然放在灵敏板附近,即浓度和温度变化较大的位置;另一个检测点放在主要产品引出点附近(重视塔顶产品质量时放在塔顶附近,重视塔底产品时放在塔底附近),即温度变化较小的位置;另然后取上述两测点的温度差 ΔT 作为被控变量。这里,塔顶或塔底温度实际上起参比作用,由于压力变化对两点温度都有相同影响,相减之后其压力波动的影响就几乎相抵消。温差控制其实是灵敏板温度控制的变形,用来消除压力波动对产品质量的影响。

值得注意的是,温差与产品纯度之间并非单值关系。

如图 7.14 所示的正丁烷和异丁烷分离塔的温差 ΔT 和塔底产品中轻组分质量浓度 x_D 之间关系的示意图。由图可见,曲线有最高点,其左侧表示塔底产品纯度较高(即轻组分 x_D 浓度较小)情况下,温差随着产品纯度的增加而减小;其右侧表示在塔底产品不很纯的情况下,温差随产品纯度的降低而减小。为了使控制系统能正常工作,温差与产品纯度应该具有单值对应关系。为此,一般将工作点选择在曲线的左侧,并采取措施使工作点不至进入曲线的右侧。

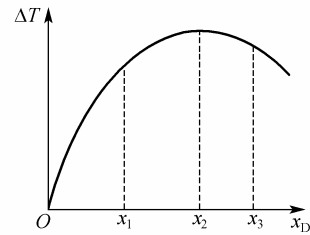


图 7.14 温差—纯度关系曲线

为了使控制器的正常工作范围在曲线最高点的左侧,在使用温度控制时,控制器的给定值不能太大,干扰量(尤其是加热蒸汽量的波动)也不能太大,以防止工作状态变到如图 7.14 所示的曲线最高点的右侧,致使控制器无法正常工作。

3. 双温差控制

温差控制可以克服由于塔压波动对塔顶(或塔底)产品质量的影响,但是它还存在一个问题:就是当负荷变化时,会导致塔板间的压降产生变化,而且任意两块相邻塔板间的压降也不相同。塔板间压降的分布将会影响两块塔板间温差的不同。这时温差和组分间就不呈单值对应关系,温差控制方案就无法发挥作用,在这种情况下可以采用双温差控制。

工艺分析表明,如果塔顶的重组分质量浓度较高,就会使全塔温度偏高,在负荷变化时精馏段的温度变化更为明显,其中又有一块塔板温度变化最快,称此块塔板为精馏段的灵敏板,该板位于进料板之上。如果在精馏段灵敏板处测量温度并组成温差控制,则可以得到高纯度的塔底产品。相反,如果塔底的轻组分质量浓度较高,灵敏板就位于进料板之下,称为提馏段灵敏板。无论负荷怎样变化,塔内温度变化最明显的地方总在这两块灵敏板上。再把塔顶和塔底出温度变化最不明显的塔板分别叫作精馏段参照板和提馏段参照板。如果能分别将塔顶、塔底两个参照板与两个灵敏板之间的温度梯度控制稳定,就能达到质量控制的目的,这就是双温差控制方法的基础。

双温差控制亦称温差差值控制,其控制原理图如图 7.15 所示。设 T_{11} 、 T_{12} 分别为精馏段参照板和灵敏板的温度; T_{21} 、 T_{22} 分别为提馏段灵敏板和参照板的温度,构成精馏段温差 $\Delta T_1 = T_{12} - T_{11}$ 与提馏段温差 $\Delta T_2 = T_{22} - T_{21}$,将这两个温差的差值 $\Delta T_d = \Delta T_1 - \Delta T_2$ 作为控制

指标。从实际应用看，只要合理选择灵敏板和参照板位置，可使塔两端达到最大分离度。从工艺上来看，双温差法是一种控制精馏塔进料板附近的组分分布，使得产品质量合格的办法。它以保证工艺上最好的温度分布曲线为出发点去控制全塔的温度，而不是单纯地控制塔的某一端温度或温差，可以取得较好的效果。

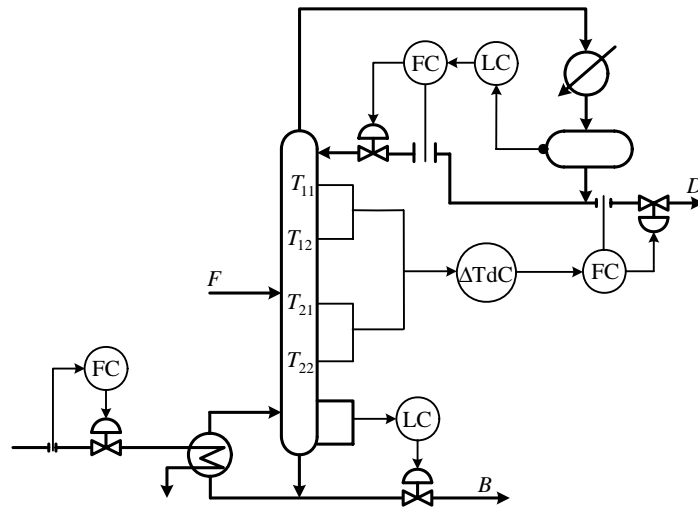


图 7.15 双温差控制方案

7.2.5 精馏过程的基本控制方案

精馏塔内的精馏过程是一个非常复杂的过程，牵涉到的变量很多，可以选择为被控变量的数量很大，可以选择为操作变量的也很多，这样就形成了各式各样的控制方案。但无论这些控制方案的形式如何，其的控制目标都是使塔顶和塔底的产品满足规定的质量要求，用到的基本原理也仍然是能量和物料平衡的基本原理。这里将这些控制方案进行分类讨论。为使问题简化，这里仅讨论塔顶和塔底产品均为液相时的基本控制问题。

1. 物料平衡控制

物料平衡控制方式并不对塔顶或塔底产品质量进行直接的控制，而依据精馏塔的物料平衡及能量平衡关系进行间接控制。其基本原理是：当进料成分和进料温度(单相进料时)或焓(两相进料)一定时，在维持全塔物料平衡的前提下，保持进料量 F 、再沸器加热量 Q_h (或塔底上升蒸汽量 V)、塔顶产品量 D 一定；或者说保持 D/F 和 V/F 一定，由式(7-14)和式(7-16)可知，就可保证塔顶、塔底产品的质量指标一定。为了维持全塔的物料平衡，就需要对塔底液位 L_b 与回流罐液位 L_r 进行有效的控制。按照物料平衡原则可以设计出如图 7.16~图 7.18 所示的几种控制系统。

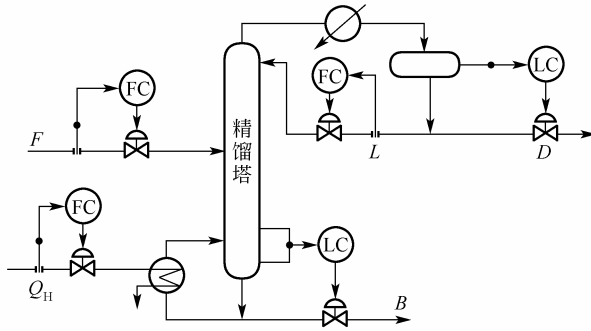


图 7.16 精馏塔物料平衡控制方案之一

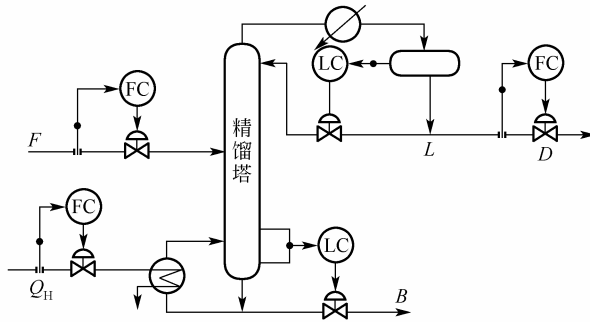


图 7.17 精馏塔物料平衡控制方案之二

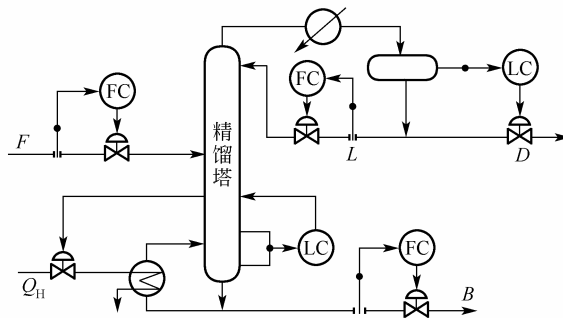


图 7.18 精馏塔物料平衡控制方案之三

对这三种方案的选取原则为：如果下一工序是以本工序的产品作为进料时，应该把本工序的产品输出进行流量控制或流量比值控制，以维持产品流量稳定，减少对下一塔的进料扰动。此时需要根据 D 和 B 的大小关系来决定选择哪个方案。当 $D \leq B$ 时，由于 $D = F - B$ ，如果采用方案三，则对 F 和 B 进行测量控制所引起的小误差，必然会引起 D 的相当大的误差，而且由于 D 的可调范围窄，对回流罐液位的控制能力弱；因而，此时最可取的方案为方案二。反之，当 $B \leq D$ 时，最可取的方案为方案三。

而当 D ， B 接近并且对 D ， B 的波动要求宽松时，可考虑选用方案一。与方案二、三

相比, 由于 L 与 V (或 Q_H) 均在流量控制下, 精馏塔本身与回流罐或塔底液位对象之间几乎不存在关联, 系统的稳定性最强。但是, 这种方案缺乏对塔顶冷凝器或塔底再沸器的波动补偿作用, 对产品质量的控制能力较弱。

显然, 上述物料平衡控制适用于进料成分恒定或变化不大的场合, 同时, 要求进料温度或焓变化不大。当进料温度或焓的变化足以影响塔的产品质量时, 则需要设置相应的温度或焓控制系统; 而当进料成分波动较大时, 则需要对产品的质量进行直接控制。

2. 控制一端产品质量

对于具有两个液相产品的精馏塔, 可采用严格控制一端产品质量, 而让另一端产品质量浮动(即不加以控制)的办法。该方案的原理是: 根据物料平衡原则, 一端产品的浓度固定后, 另一端产品的浓度也应该是可知的, 若固定塔顶产品的纯度 x_D , 塔底产品纯度 x_B 的变动也不会太大; 反之亦然。当然, 该方案没有考虑塔内物料的存储量变化, 所以, 它只适合于扰动不很大的情况。对没有进行控制的一端的产品质量可用静态特性关系估计出它的变化范围。根据控制的产品不同, 该方案可分为对精馏段指标控制和对提馏段指标控制

1) 按精馏段指标控制

当塔顶采出液为主要产品时, 往往对精馏段指标进行控制。这时, 可取精馏段某灵敏板温度作为被控变量, 而以回流量 L 、塔顶采出量 D 或再沸器上升蒸汽量 V 作为操纵变量。系统可以采用单回路控制或者温度-流量串级控制。串级控制方式虽较复杂, 但可迅速有效地克服进入副环的扰动, 并可降低对控制阀特性的要求, 适合精密控制的要求。

采用这类控制方案时, 在 L , D , V (或 Q_H) 和 B 四者之中, 选择一个作为控制产品质量的手段, 选择另一个保持流量恒定, 其余两个变量则按回流罐和塔底的物料平衡关系由液位控制器加以控制。对应的控制流程图如图 7.19 和图 7.20 所示。

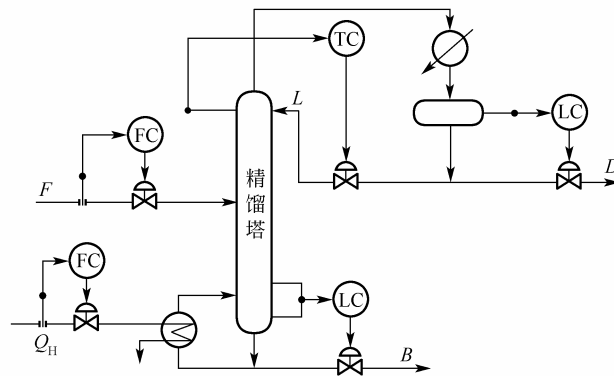


图 7.19 精馏段能量平衡控制方案

图 7.19 所示方案的特点是控制作用滞后小, 反应迅速, 对克服进入精馏段的扰动和保证塔顶产品是有利的, 这是精馏塔控制中最常用的方案。此方案通过直接控制塔内能量平衡关系以实现分离精度的控制, 称为“精馏段能量平衡控制方案”。回流量 L 波动不利于精馏塔的稳定操作, 所以方案中由温度控制器对回流量进行控制。在确定温度调节器的控制算法时, 要避免使用微分控制, 只须比例积分控制即可, 防止由微分调节规律引起波动。

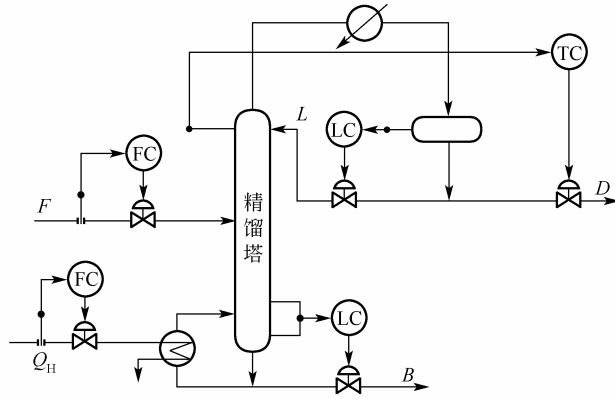


图 7.20 精馏段物料平衡控制方案

此外，再沸器加热量需要保持恒定而且要有足够的量值，以便塔在最大负荷时仍能保证产品的质量指标。

图 7.20 所示的方案则通过调整全塔物料平衡关系以控制塔顶产品的纯度，被称为“精馏段物料平衡控制方案”。该方案的优点是有益于精馏塔的稳定操作，这是因为在回流比较大时控制 D 要比控制 L 灵敏。此外还有一个优点，当塔顶产品质量不合格时，如采用有积分作用的控制器，则塔顶采出量 D 会自动暂时中断，进行全回流，这样可保证得到的产品是合格的。然而该方案温度控制回路滞后较大，反应较慢，从采出量 D 的改变到温度变化，要通过回流罐液位控制回路来实现，必然引入滞后，特别是回流罐容积较大时，反应更慢，给控制质量的提高带来了困难。此外，同样要求再沸器加热量足够大，以使塔在最大负荷时仍能保证产品的质量指标。

2) 按提馏段指标控制

当主要产品为塔底液时，就要按提馏段指标控制。如果是液相进料，也常采用这类方案。这是因为在液相进料时，进料量 F 的变化，首先影响到塔底产品浓度 x_B ，塔顶或精馏段塔板上的温度不能很快地反映浓度的变化，所以用提馏段控制比较及时。可以采用的控制方案如图 7.21 和图 7.22 所示。

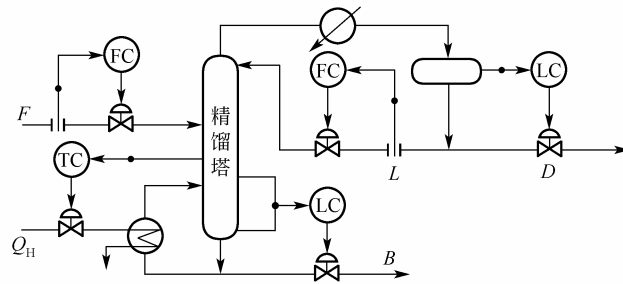


图 7.21 提馏段能量平衡控制方案

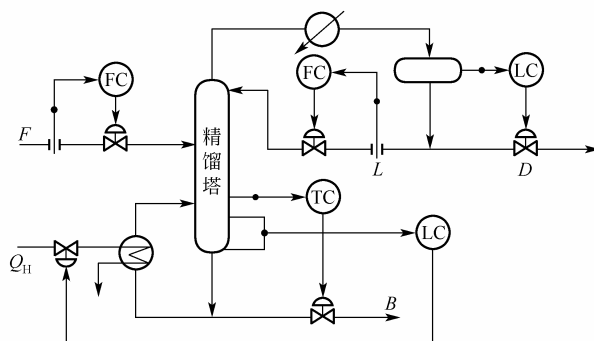


图 7.22 提馏段物料平衡控制方案

图 7.21 所示的方案通过控制再沸器加热量来控制塔内上升蒸汽量 V ，同时保持回流量 L 为定值。此时， D 和 B 都是按物料平衡关系，由液位控制器控制。

对于提馏段灵敏板温度而言，该方案采用再沸器加热量 Q_H 作为操纵量，在动态响应上要比操作回流量的滞后小，反应迅速，对克服进入提馏段的扰动和保证塔底产品质量有利，因此该方案成为应用最广的精馏塔控制方案。可是该方案中的回流量采用定值控制，并且要保持足够的量值，以便当塔的负荷最大时仍能保证产品质量。一旦回流量不足就容易引起液泛，造成塔的操作异常。

图 7.22 所示的方案控制塔底采出量 B ，同时保持回流量 L 为定值。此时， D 是按回流罐的液位来控制，再沸器蒸汽量由塔釜液位来控制。该控制方案正像前面所述的按精馏段温度来控制 D 的方案那样，有其独特的优点和一定的弱点。优点是当塔底采出量 B 较少时，操作比较平稳；当采出量 B 不符合质量要求时，会自行暂停出料。缺点是滞后较大且液位控制回路存在反向特性。此外，同样要求回流量应足够大，以保证在最大负荷时的产品质量。

如上所述，无论是按精馏段指标还是按提馏段指标进行控制，虽然都可用改变物料或能量平衡的方法最终达到控制灵敏板温度的目的，但由于它们有各自的特点，因此应用的场合也有所不同。

首先，回流比较高时，顶部产品量与塔内部的气相和液相流量相比较小，若采用能量平衡控制系统，则再沸器加热量或回流量的微小波动都会引起顶部采出量很大变化(百分比)，严重影响产品质量。而且用很小的顶部产品流量也不能使回流罐液位得到有效的控制。可见，当顶部产品流量很小或回流比很高时，应当采用以顶部产品流量为操纵变量的物料平衡控制方案。根据同样的理由，当底部产品采出量很小时，应该采用以底部产品流量为操纵变量的物料平衡控制方案。

其次，采用改变物料平衡来控制温度的控制方案，具有使温度对再沸器加热量和进料热焓等能量扰动不灵敏的优点，使塔的抗扰动能力提高，它减少了这些能量扰动对塔内部能量关系的影响，也就减小了这些能量扰动对产品质量的影响。

再次，在对进料流量等扰动设置前馈控制系统时，采用物料平衡控制的方案，可以方便地按塔的物料平衡和能量关系式建立静态前馈模型。

最后，用改变物料平衡来控制温度的方案，类似于传统的物料平衡控制方案。两者的区别是前者用温度控制器来改变物料量，后者是保持该物料量一定。因此，从温度控制切换

到传统的物料平衡控制非常方便。这给实际生产中灵活地应用和改变控制方案带来了方便。

然而，与能量平衡控制方案相比，物料平衡控制方案也有其弱点。

首先，用改变物料平衡来控制温度(或其他质量指标)要比用改变能量平衡控制温度来得缓慢。这是因为从物料平衡改变到温度变化要间接地通过液位控制回路来实现。当液位控制器使用比例控制时，液位控制回路相当于一个一阶滞后环节，从而使温度(或质量)控制不够及时。容器容积越大，滞后的影响也就更严重。减小液位回路滞后的方法可以是增大液位控制器的增益，然而这样做会使液位测量中的噪音放大，所以放大倍数的增加是有限的。更好的方法是采用图 7.23 所示的方案。在这个方案中，温度控制非常及时，克服了液位回路滞后对温度(或质量)控制的影响。此方案也可看做是物料平衡和能量平衡控制方案的结合。

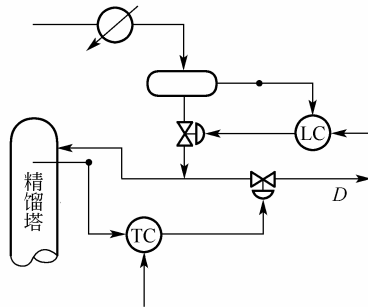


图 7.23 克服回流罐滞后的控制方案

3. 按两端质量指标控制

当顶部和底部产品均需符合质量规格时，有两个选择：一是用两个质量控制系统分别对两个产品质量指标加以控制；二是只对一端产品质量进行控制的方案，同时通过增大回流比(或再沸比)保证另一端产品质量。两者的区别在于前一个方案可以使操作成本特别是能耗减小。两端质量控制可使用的方案有 3 种，其控制流程图如图 7.24~图 7.26 所示。

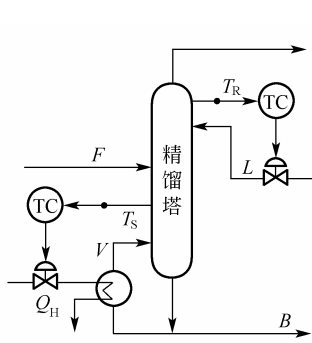


图 7.24 两端产品质量控制方案之一

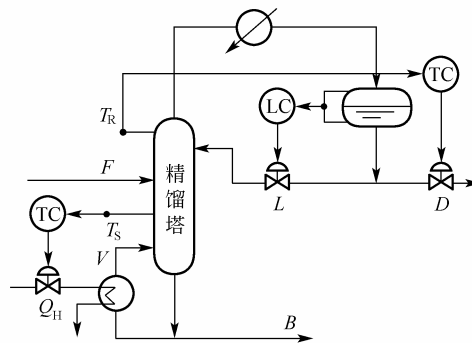


图 7.25 两端产品质量控制方案之二

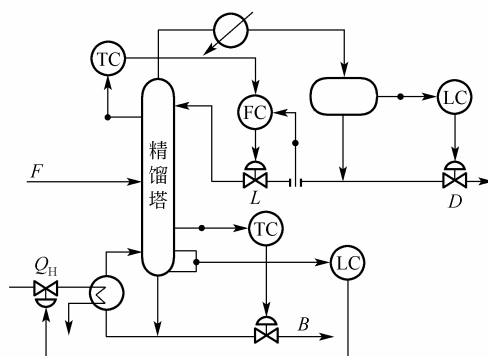


图 7.26 两端产品质量控制方案之三

在图 7.24 所示的控制方案中，塔顶、塔底产品质量均采用能量平衡加以控制。由精馏工艺可知，当改变回流量时，不仅影响塔顶温度，同时也引起塔底温度的变化。同样，控制塔底再沸器加热量时，也将影响到塔顶温度的变化。所以塔顶和塔底两个温度控制系统之间存在着耦合关系。在另外两种质量控制方案中，控制回路之间同样会存在明显的耦合。当耦合程度不严重时，可以通过调节器的参数整定使耦合回路的工作频率拉开，以减弱耦合强度；如果耦合严重，则必须进行解耦。由于精馏塔是一个非线性严重的多变量过程，精确求取动态特性相当困难，有时甚至是不可能的，所以一般只实施静态解耦，然后再作必要的动态补偿。

7.3 传热设备的控制

7.3.1 传热设备的结构和特性

在工业生产中，有许多生产过程都要求物料产生必要的物理或化学变化，这些变化中往往会对物料的温度提出一定的要求。例如，蒸馏、干燥、蒸发、结晶等过程都需要根据工艺要求使物料维持一定的温度；还有某些化学变化过程，为了保证反应的正常进行，更需要严格控制反应物或者催化剂的温度。在这些控制温度的场合，不可避免地要对物料进行加热或散热，这个过程统称为传热过程。它是工业生产过程中常见的环节，对保证产品质量和生产正常运行有重要的意义。传热过程通常是在被称为传热设备的装置中进行的，只要对传热设备实施了有效地控制，也就能使传热过程的效果满足要求，最终保证物料温度。本节将先针对比较简单的间接换热过程中传热设备控制问题作讨论，然后介绍工业过程中常用的加热炉设备及其控制方式。

1. 传热设备的结构类型

从物理上讲，热量的交换有直接和间接两种方式。直接换热是指加热流体与被加热流体直接接触，以达到加热或冷却的目的。间接换热是指两种流体被换热设备的器壁所间隔，不直接接触。在间接换热中，热量首先高温流体传给器壁，器壁再把热量传向低温流体。在化工生产过程中，一般以间接换热较为常见。换热设备的常见结构类型有列管式、蛇管式、夹套式和套管式等四种，如图 7.27 所示。

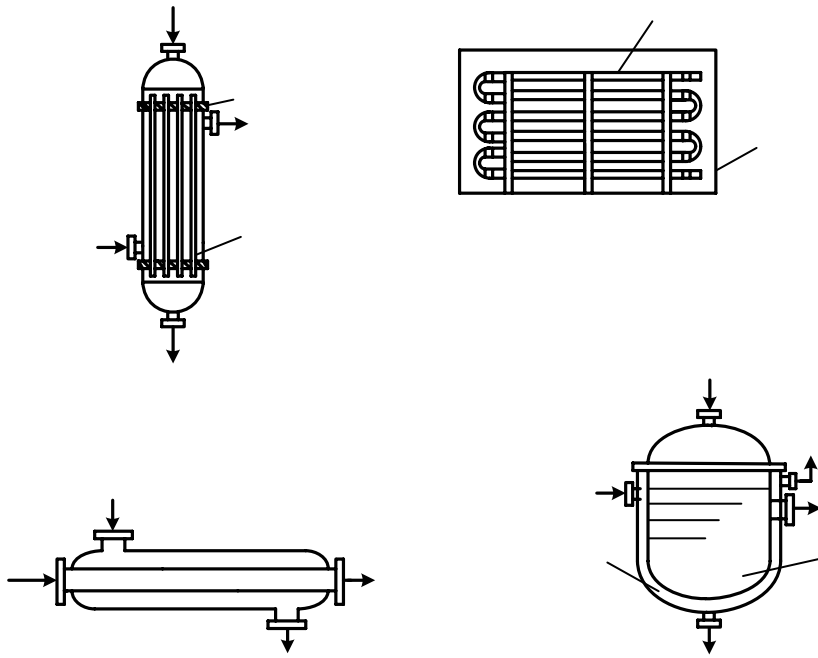


图 7.27 传热设备的结构类型

2. 热量传递的三种方式

热交换过程中, 热量的传递方向总是由高温物体传向低温物体, 热传递的动力来自于物体之间的温度差, 温度差越大, 传热速率(单位时间内传递的热量)也就越大。众所周知, 热传递的基本方式有 3 种: 传导、对流、辐射。下面要讨论这 3 种热传递方式的机理和特点。

1) 热传导

热传导的稳定导热(导热量不随时间而变化)基本定律为:

$$q = -\lambda F \frac{\partial T}{\partial n} \quad (7-25)$$

式中, q ——传热速率, 单位为 W ($1W=1W J/s$);

λ ——导热系数, 单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$;

F ——垂直于热流方向的截面积, 单位为 m^2 ;

$\partial T/\partial n$ ——温度梯度, 单位为 $^\circ C/m$ 。

式(7-1)称为傅里叶定律。它表明单位时间内传导的热量与温度梯度和垂直于热流方向的截面积成正比。式中负号表示热流方向总是与温度梯度的方向(即温度上升的方向)相反。

对于单层平壁的稳态导热, 对应的传热速率为

$$q = \frac{\lambda}{b} \times F \times \Delta t \quad (7-26)$$

式中, b ——单层平壁的厚度, 单位为 m ;

Δt ——平壁两侧壁面上的温度差，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

由此式可知，在单位时间内通过单层平壁传导的热量与导热系数、传导面积和平壁两侧的温差成正比，而与平壁的厚度成反比。

如果令 $R = b/\lambda F$ ，并称其为导热过程的热阻，则上式又可改写成

$$q = \frac{\Delta t}{R} \quad (7-27)$$

上式为传热过程速率与其过程推动力及阻力之间关系的一般表达式，从形式上可以看出，它和电学中的欧姆定律非常相似，所以该式又被称为传热过程的欧姆定律。

对于由不同厚度、不同导热系数的材料所组成的多层平壁，假设每层的热阻分别为 R_1, R_2, \dots, R_m ，则总的热阻可以认为是所有热阻的串联。如果热阻最内侧与最外侧的表面温度分别为 t_1, t_{m+1} ，则通过各层的传热速率为

$$q = \frac{t_1 - t_{m+1}}{R_1 + R_2 + \dots + R_m} \quad (7-28)$$

2) 对流传热

对流传热在工业生产中多见于流体与固体壁之间的传热，其传热速率与流体性质及流动边界的状况密切相关。为便于分析和计算，牛顿首先提出了壁面与流体间对流传热速率的表达式：

$$q = \alpha F \Delta t \quad (7-29)$$

式中， q ——对流传热速率，单位为 W ；

α ——传热膜系数，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

F ——传热面积，单位为 m^2 ；

Δt ——壁面温度与壁面法线方向上流体平均温度之差，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

根据式(7-5)，冷流体与壁面之间的对流传热速率为

$$q_1 = \alpha_1 F (t_w - t) \quad (7-30)$$

同样，热流体与壁面之间的对流传热速率为

$$q_2 = \alpha_2 F (T - t_w) \quad (7-31)$$

式中， q_1 、 q_2 ——对流传热速率，单位为 W ；

F ——与热流体(或冷流体)相接触的壁面积，单位为 m^2 ；

t_w ——壁面的温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

t ——冷流体的温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

T ——热流体的温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

α_1 、 α_2 ——相应的对流传热膜系数，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

影响对流传热膜系数的因素很多，包括流体的种类、性质、运动状况以及流体对流状况(自然对流或强制对流)。例如，考虑流体的种类时，就会注意到蒸汽冷凝传热膜系数较大，液体的传热膜系数较小，而气体的传热膜系数最小。这个特性直接要求设计人员在蒸汽加热器中必须注意冷凝水与蒸汽中不凝性气体的排除，防止这些低传热系数的物质阻碍传热过程，降低传热效率。

3) 热辐射

热传导和对流的过程都需要靠物体的直接接触来传递热量，也就是说，传导与对流必

需有物质作为媒介才能发生。而热量的另外一种传递方式——辐射传热则完全不同，它不需要通过任何介质来传递，可以穿越真空进行，典型的例子就是太阳向地球表面的辐射能量过程就是热辐射。热辐射指的是热能以辐射能的形式向空间发射，到达另一物体后，被吸收一部分同时又反射一部分，被吸收的能量将转变为热能，这样的热传递过程就称为热辐射。因此，热辐射在热量的传递过程中伴有能量形式的转化过程，即热能转化为辐射能，辐射能又转化成热能。事实上，任何物体都能辐射向外能量，物体的温度越高，其热辐射现象就越明显。当物体的温度较低时，辐射能很小，热辐射现象可以忽略。

能够全部吸收辐射能量的物体被称作绝对黑体或简称黑体，其表面向外界辐射出的能量用下式表示：

$$q = C_0 F \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (7-32)$$

式中， q ——单位时间内绝对黑体的辐射能，单位为W；

C_0 ——绝对黑体的辐射系数，其值为 $5.669 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

F ——绝对黑体的辐射面积，单位为 m^2 ；

T ——绝对黑体的绝对温度，单位为K。

从上式可以看出，单位时间内黑体所发出的辐射能是与其自身温度的四次方成正比的。所以，高温黑体的辐射能比较强而低温黑体的辐射能比较弱，往往可以忽略不计。

绝对黑体是一种理想物体，自然界中是不存在绝对黑体的。在工业过程中遇到的物体大多都可以看成是灰体。灰体指的是以相同的吸收率吸收全部波长辐射能的物体，其特性体现在两方面，一是它对辐射能的吸收无选择性，能吸收全部波长范围的辐射；二是它不能吸收所有的辐射能，即吸收率小于1。经实验证明，灰体在单位时间内的辐射能量可表示为

$$q = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (7-33)$$

式中， ε ——灰体的黑度(或发射率)，在数值上等同于灰体的吸收率。

热辐射可以是单向的也可以是双向的，工业上就经常遇到两固体间相互热辐射的情况。当一个物体对外辐射出的能量被另一物体部分或全部阻挡时，被拦截的辐射能只能部分被阻挡物所吸收，其余的辐射能则被反射出去。反射出来的辐射能有一部分返回原物体，被原物体部分拦截后又又被原物体部分吸收和反射。这样，在两物体之间就存在多次反射和吸收的传热过程。从理论上讲，这样的来回反射和吸收的过程将会无休止的进行下去，但在实际情况中，多次反射后的能量已经达为减小，可以忽略不计，所以往往只计算前若干次反射过程的能量转化情况。无论在单向辐射还是双向辐射过程中，总的能量流动方向总是由高温物体指向低温物体，净传热量大小与两物体的温度、形状、相对位置以及物体本身的性质有关。

对于面积均为 F 的两平行壁面之间的辐射传热，其传热速率为

$$q = C_{1-2} \varphi F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (7-34)$$

式中， q ——单位时间内由高温物体传向低温物体的辐射传热速率，单位为W；

φ ——角系数，其数值与物体的形状、大小、相对位置以及距离有关，表示从一个

高温物体表面辐射的总能量被低温物体表面所拦截的比例系数；

T_1 ——高温物体表面的绝对温度，单位为 K；

T_2 ——低温物体表面的绝对温度，单位为 K；

C_{1-2} ——两物体净辐射系数，单位为 $W/(m^2 \cdot K^4)$ ，其数值为

$$C_{1-2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (7-35)$$

式中， ε_1 、 ε_2 ——分别为高温物体与低温物体的吸收率。

前面简单叙述了热量传递 3 种方式的主要机理。必须指出，在绝大多数传热设备内部进行的实际传热过程中，几乎没有仅以一种传热方式单独传热的情况，往往是由两种或 3 种方式综合而成的。例如：在工业过程中常用的间壁式热交换器的工作温度不是很高，这时候就可以忽略热辐射的过程，认为传热过程是对流和热传导的组合。而管式加热炉的辐射室温度相当高，这时的传热过程就以热辐射为主，辐射室的有效传热量大致为全炉总热负荷的 70%~80%；但在管式加热炉的对流室中，传热方式却又以对流传热为主。所以总体来看，管式加热炉中的传热过程是综合传导、对流及热辐射三种方式的复合过程。

3. 传热设备的动态特性

1) 传热设备的分布参数特性

分布参数特性是指影响对象输出变量大小的不仅有常规的输入变量和时间，还有对象内部各点的物理位置。根据物料相变情况，传热设备大致可以分为以下几种。

(1) 在换热过程中，传热壁面两侧流体都无相变，而且当两侧流体都没有轴向混合时，两侧的温度都将是距离和时间的函数，也就是说两侧都是分布参数对象，一般列管式换热器、套管式换热器都属于此类。

(2) 在换热过程中，传热壁面两侧流体都发生相变，则两侧的温度皆可近似为集中参数，不必作为分布参数处理，典型的例子就是精馏塔的再沸器。相变(汽化或冷凝)的特点是流体温度取决于所处压力，而不是取决于传热量。

(3) 在换热过程中，传热壁面两侧流体中如果有一侧发生相变，则发生相变的一侧视为集中参数，另一侧需视具体情况而定，例如列管式蒸汽加热器、氨冷凝器等。

由上所述，不少传热对象具有分布参数特性，这类对象的动态数学须用偏微分方程来表示，然后求解获得其特性。这样做的好处在于模型比较精确，得到的对象特性比较准确，但整个过程比较复杂和烦琐。虽然有时亦可用集中参数模型来近似以避免烦琐的求解过程，但精度会差很多，例如把当对象的进出口温度不同时，可以把各点温度的平均值作为流体的近似温度来对待。

2) 纯滞后时间及热惯性较大

在实际生产过程中，许多情况下都不允许冷热两流体直接接触，即不允许在传热过程中伴随有物质交换过程。因此，为达到传热目的，只能采用间壁式换热器。在间壁式换热器中，热流体的热量通过对流传热传给间壁，再由间壁将热量以对流方式传给冷流体。因此，间壁式传热设备属典型的多容对象，这类设备一般都带有较大的容量滞后，但可以近似地认为是具有纯滞后环节的多容对象。

传热设备的自动控制系统中的滞后不仅来自于被控对象，而且来自于测温元件。在所

有的测量仪表中,测温元件的测量滞后是比较显著的。例如常用热电偶、热电阻等测温元件,为了保护其不致损坏或被介质腐蚀,一般均加有保护套管,这样就增加了测温元件的测量滞后,因此测温元件的测量滞后也给传热设备的自动控制系统增加了滞后时间。

传热过程的与流量、压力的变化过程有明显的不同,那就是传热过程的速度相当慢,被加热(或冷却)物料的温度变化很不明显,反映出被控对象具有很大的热惯性。这种较大的热惯性对物料保持自身温度稳定是有好处的,但是对于必要的温度改变来说,却是一个缺点。为了尽快改变物料温度,在其他条件不变的情况下,必须加大传热过程的推动力即热流和冷流之间的温度差,这就会耗费更多的能量。

7.3.2 换热器的控制

在确定换热器的控制方案之前,首先要先明确换热器的工作目的,然后确定其被控变量和操作变量,最后制定控制方案。

1. 换热器的换热目的

根据工艺要求的不同,换热器的工作目的一般可以分为以下几种:

1) 调整工艺介质的温度,使之达到生产要求,为后续工段提供必要条件。例如,在合成氨生产中,脱硫、变换等生产过程的原料气体温度就有明确的要求。

2) 维持生产过程的温度范围,使生产过程能够稳定进行。这种要求经常在化学反应过程中体现出来。为达到这一目的,应该给物料增加热量或吸收物料释放的热量。例如合成氨生产中,转化反应就是一个强烈的吸热反应,必须为物料提供足够的热量,才能维持转化反应的进行。而聚氯乙烯的聚合反应则是一个放热反应,要用冷却水除去反应中释放出的热量,才能保证反应按要求进行下去。

3) 为改变物料的相态而进行换热。这种过程中必然需要热量的交换,汽化需要加热,冷凝会放热。例如常见的空气分离过程,就必须吸收因空气被液化而释放的热量。

4) 回收热量。回收热量是为了节约能源、降低成本,有利于提高经济效益。

2. 确定被控变量和操作手段

换热目的的不同决定了被控变量的不同。在大多数情况下,换热过程的被控变量是温度,例如图 7.28(a)中所示的蒸汽加热器自动控制系统。为了使被加热的工艺介质达到规定的温度,常常取换热器出口的物料温度作为被控变量,利用调节加热蒸汽量的方法使工艺介质出口温度恒定。当工艺要求不同而且温度与其他变量间的关系明确时,被控变量也可以换成流量、压力、液位等其他变量。例如被加热的工艺介质流量、入口温度及加热蒸汽的能量水平都比较稳定且对出口温度要求不是很高时,就可以根据能量守恒原则,取加热蒸汽流量(或压力)作为被控变量,组成如图 7.28(b)所示的流量(或压力)单回路定值控制系统。

绝大多数的温度控制系统都是为上述(1)、(2)两个目的服务的。而目的(3)实际上所需的变量是热量,一般可取载热体的流量作为被控变量。对于一般热量回收系统,由于不对正常生产产生明显影响,往往不需要对其参数加以自动控制。

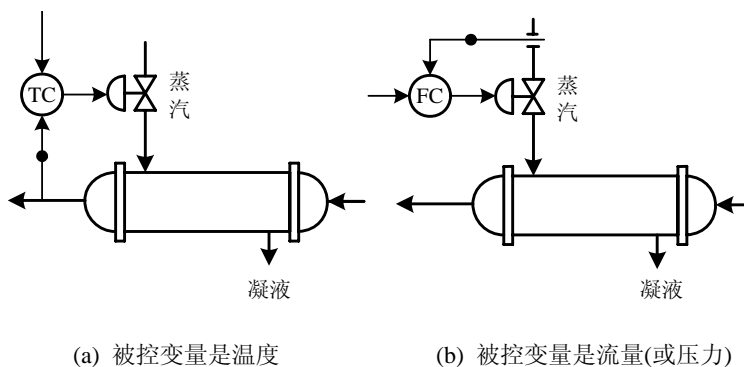


图 7.28 蒸汽加热器的控制系统

从传热过程的基本方程式可知，为保证出口温度平稳，满足工艺生产的要求，必须对传热量进行调节。调节传热量有以下几条途径。

(1) 调节加热物质流量，如图 7.29(a)所示。调节加热物质的流量大小，实质是改变传热速率方程中的传热系数 K 和平均温差 ΔT_m 。如果加热物质在加热过程中不发生相变，则主要通过改变传热速率方程中传热系数 K 来改变传热速率；如果加热物质在传热过程中发生相变，则主要是通过 ΔT_m 来改变传热速率。这种控制方案在间接加热的场合是最常见的。

(2) 调节传热平均温差 ΔT_m ，如图 7.29(b)所示。与前一种方案相比，这种控制方案的优点是滞后较小，反应迅速，所以其应用也比较广泛。图中，调节罐内存储的氨气量将改变液氨压力与对应的平衡温度，进而改变间壁两侧流体的平均温差，从而将工艺介质出口温度稳定在要求值。

(3) 调节传热面积 F ，如图 7.29(c)所示。改变罐内冷凝液的液位将引起罐内蒸汽空间大小，进而改变传热面积 F ，导致介质温度变化。这种方案的缺点是滞后较大，只有在某些必要的场合才采用。

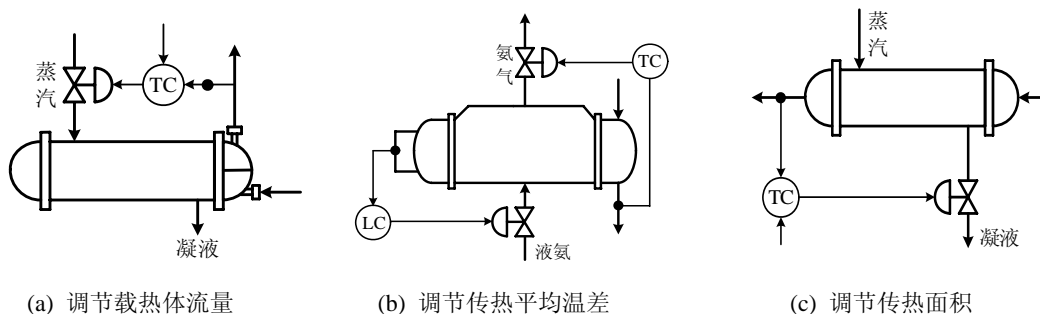


图 7.29 调节传热量的三种方案

(4) 将工艺介质部分旁路方案，如图 7.30 所示。在该方案中，一部分工艺介质经过换热，另一部分不经换热，由旁路管道越过换热器，然后与经过换热的介质混合。该方案的特点是反应迅速及时，但同时也带来了加热物质流量一直处于高负荷状态，这在采用专门的加热剂或制冷剂时是不经济的。然而当本方案用于某些热量回收系统时，加热介质是某种能量有余工艺介质，这时就可以不考虑经济性的问题了。

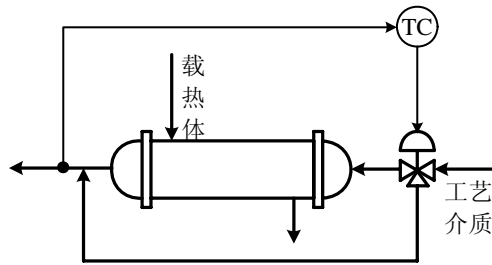


图 7.30 将工艺介质部分旁路的方案

3. 确定控制方案

在设计传热设备自动控制方案时，要视具体传热设备的特点和工艺条件而定。例如大部分蒸汽加热器的操纵变量是加热蒸汽流量。而在换热器的传热面积裕量较大时，如果被加热工艺介质的出口温度要求不高，又采用低压蒸汽作加热物质，则往往以冷凝液流量作为操纵变量来调节传热面积，这样做的好处在于能够保证出口温度稳定及冷凝液排出畅通。

大多数情况下，当被加热(或制冷)介质自身的流量和初始温度都比较稳定时，采用单回路控制方式就能较好地满足控制要求。这时，由于传热设备滞后和惯性都比较大，控制算法中引入微分作用往往是必要的，这样可以明显地加快过渡过程，减小动态误差，从而改善控制品质。如果单回路控制系统无法满足控制要求，则可以进一步引入复杂控制系统，如串级、前馈或更加复杂的复合系统。例如如图 7.29(a)所示的蒸汽加热系统中，当蒸汽阀前压力波动较大时，可采用如图 7.31(a)所示的被加热介质出口温度与加热蒸汽流量组成的串级系统，或采用如图 7.31(b)所示的介质出口温度与蒸汽压力组成的串级控制系统。串级控制系统可以快速有效地克服加热蒸汽方面的干扰。如果主要扰动来自生产负荷变化，则可以将介质流量信号作为前馈信号引入反馈系统，组成前馈-反馈控制系统。这种方案非常有效的方案，可获得更好的控制品质。例如如图 7.32 所示的变比值串级控制方案，就引入了工艺介质流量作为前馈信息，这样做的好处是一方面可大大减少生产负荷变化对出口温度控制质量的影响，另一方面可克服控制通道增益随负荷变化所造成的非线性，从而更好地满足工业生产的要求。

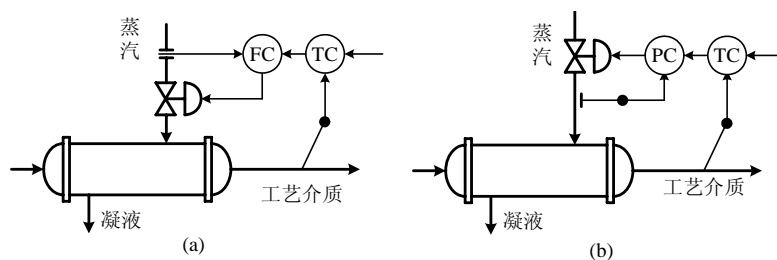


图 7.31 换热器出口温度的串级控制方案

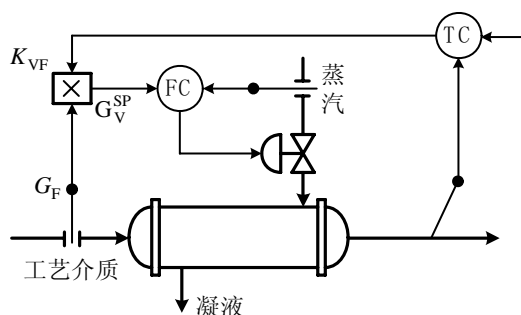


图 7.32 换热器出口温度的变比值串级控制方案

7.3.3 加热炉的控制

管式加热炉是在化工生产中常见的加热设备，为后续工序提供温度合适的原料。若加热炉的温度控制不稳，就会使被加热物料温度的高低变化，直接影响后一工序的操作工况和产品质量；如果炉子的温度太高，又会使物料在加热炉内分解，甚至造成结焦而烧坏炉管。另外，加热炉的平稳操作可以延长炉管使用寿命。因此，加热炉出口温度必须严加控制。

加热炉是传热设备的一种，其结构型式分为箱式、管式和圆筒式三种。炉内热量通过金属管壁传给工艺介质，整个过程同样符合导热与对流传热的基本规律。但加热炉还有一个燃烧室，燃料在燃烧室中燃烧，产生炽热的火焰和高温气流，主要通过辐射方式将热量传给管壁，然后再由管壁传给工艺介质。工艺介质在辐射室获得的热量约占总热负荷的 70%~80%，而在对流段获得的热量约占总热负荷 20%~30%。因此加热炉的传热过程比较复杂，想从理论上获得对象特性是很困难的。所以，加热炉的对象特性一般是基于定性分析和实验测试获得的。定性分析加热炉的传热过程可知：炉膛火焰将热量辐射给炉管，经热传导、对流传热给工艺介质。所以与一般传热对象一样，加热炉也具有较大的时间常数和滞后时间。特别是炉膛具有较大的热容量，滞后更为明显，因此加热炉属于一种多容量的被控对象。从实测数据看，加热炉的特性在经过简化后可以近似为一个一阶惯性环节加纯滞后对象，其时间常数和纯滞后时间与炉膛容量大小及工艺介质停留时间有关。炉膛容量大，停留时间长，则时间常数和纯滞后时间大，反之亦然。

1. 单回路控制方案

1) 扰动分析

被加热介质的出口温度往往是加热炉最主要的控制指标，常被作为控制系统的被控变量，而操纵变量则大多选择燃料量。很多加热炉的温度要求相当严格，允许波动范围很小，经常在几个摄氏度甚至 $\pm(1\sim 2)^\circ\text{C}$ ，这对控制系统的控制品质是个极大的考验。引起加热炉出口温度变化的扰动因素主要有：被加热介质的流量、温度、组分、燃料油(或气)的压力、燃烧值、燃料组分、燃料油的雾化情况，空气过量情况，喷嘴阻力，烟囱抽力等。在这些扰动因素中有的可控的，有的是不可控的，应该区别对待。

2) 单回路控制系统分析

图 7.33 为某一燃油加热炉控制系统示意图,其主要控制系统是以炉出口温度为被控变量、燃料油流量为操纵变量组成的单回路控制系统。其他辅助控制系统有:

- (1) 被加热介质的流量控制系统用于稳定介质流量,如图中 FC 控制系统;
- (2) 燃料油总压控制系统,稳定入炉燃料压力,对安全生产有重要意义,如图中 P_1C 控制系统;
- (3) 采用燃料油时,为改善燃烧效果,还需加入雾化蒸汽(或空气),所以设计了雾化蒸汽压力控制系统,如图中的 P_2C 系统,以保证燃料油的良好雾化。

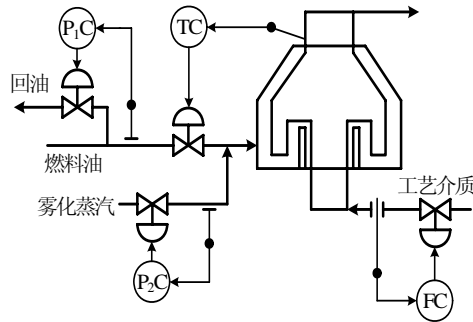


图 7.33 加热炉控制系统示意图

采用雾化蒸汽压力控制系统后,在燃油压力变化不大的情况下是可以满足雾化要求的,这是目前大多数炼油厂中采用的方案。假如燃料油压变化较大时,单采用雾化蒸汽压力控制就不能保证燃料油得到良好的雾化,这时可以采用如下控制方案。

- (1) 根据燃料油阀后压力与雾化蒸汽压力之差来调节雾化蒸汽,如图 7.34 所示。
- (2) 采用燃料油阀后压力与雾化蒸汽压力比值控制,如图 7.35 所示。

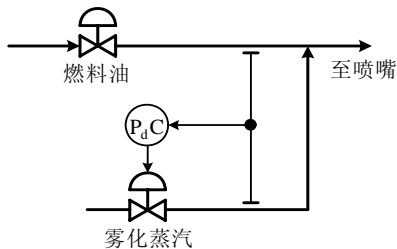


图 7.34 燃料油与雾化蒸汽压差控制系统

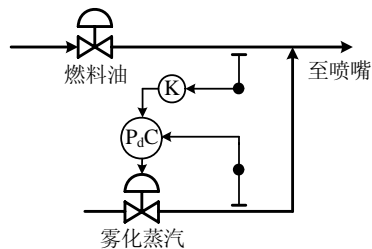


图 7.35 燃料油与雾化蒸汽压力比值控制系统

应该指出,上述两种控制压力的方案也只能保持近似的流量比,不能解决所有问题,还应注意经常保持喷嘴、管道、节流件等通道的畅通,以免喷嘴堵塞及管道局部阻力发生变化,引起控制系统的误动作。此外,如果采用对燃料油和雾化蒸汽的流量进行比值控制,就能克服上述缺点,但缺点是用仪表多、投资大且燃料油流量测量困难。

因为加热炉需要将工艺介质(物料)从几十度升温到数百度,其热负荷很大,所以单回路控制系统往往很难满足工艺要求。当燃料油(或气)的压力或燃烧值(组分)有波动时,就会造成加热量的改变。由于加热炉传递滞后和时间常数均较大,再加上一定的测量滞后,

就会使单回路控制系统的控制作用显得不够及时，造成加热炉出口介质温度波动较大，无法满足生产要求。因此单回路控制系统仅适用于下列情况：

- (1) 对介质温度要求不十分严格；
- (2) 外来扰动缓慢而较小，且不频繁；
- (3) 炉膛容量较小，滞后不大。

2. 串级控制方案

为了改善控制品质，满足生产的需要，石油化工和炼油厂中的加热炉大多采用串级控制系统。由于串级控制系统的优势主要体现在副回路的快速控制，而且主参数大多为介质出口温度，所以这里对串级控制方案的讨论以副回路为主。根据外来扰动因素以及炉子型式不同，可以选择不同的副变量。加热炉串级控制的形式，主要有以下几种：

- (1) 炉出口温度对炉膛温度的串级控制；
- (2) 炉出口温度对燃料油(或气)流量的串级控制；
- (3) 炉出口温度对燃料油(或气)阀后压力的串级控制；
- (4) 采用压力平衡式控制阀(浮动阀)的控制。

1) 炉出口温度对炉膛温度的串级控制

该控制方案如图 7.36 所示。燃料侧的扰动因素如燃料油(或气)的压力、燃烧值以及燃烧条件扰动如烟卤抽力、助燃空气等的变化将首先导致炉膛温度变化，然后才能影响到炉出口温度，而炉膛温度的滞后与介质出口温度的滞后相比要小的多。所以，采用炉出口温度对炉膛温度串级后，就把原来滞后的对象分为两部分，副回路仅包含较小的滞后，起到超前作调节的作用，能使这些扰动因素影响到炉膛温度时就迅速采取控制手段，从而抵消扰动的影响，显著改善控制质量。

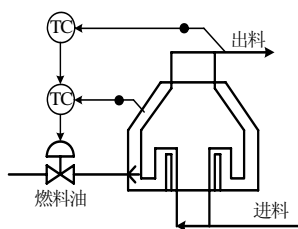


图 7.36 炉出口温度对炉膛温度的串级控制

这种串级控制方案对下述情况更为有效。

- (1) 热负荷较大，而热强度较小。这种情况下不允许炉膛温度有较大波动，以免损坏设备。
- (2) 主要扰动是燃料油或气的燃烧值(组分)变化，其他串级控制方案的副环无法感受这种扰动。
- (3) 同一个炉膛内有两组炉管，同时加热两种物料。此时虽然仅控制一组温度，但也能保证另一组的温度比较稳定。

由于把炉膛温度作为副变量，因此采用这种方案时还应注意下述几个方面：

- (1) 应选择有代表性的炉膛温度检测点，选取的关键在于反应灵敏。但实际选择时较

困难，特别是圆筒炉。

(2) 为了保护设备，炉膛温度不应有较大波动。这要求在参数整定时，副控制器不能整定得过于灵敏，且不加微分作用。

(3) 由于炉膛温度较高，测温元件及其保护套管材料必须耐高温。

2) 炉出口温度对燃料油(或气)流量的串级控制

图 7.33 所示的辅助控制系统中包含了对燃料油(或气)的压力控制，但并不能保证燃料流量的恒定。如果燃料流量的小幅波动成为主要扰动时，则可以考虑采用加热炉出口温度对燃料油(或气)流量的串级控制，如图 7.37 所示。这种方案的优点是当燃料油流量的扰动影响将马上被副环所先行调节，使之不会对介质温度产生影响或影响很小，从而改善了控制质量。

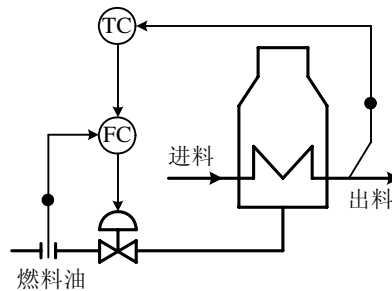


图 7.37 炉出口温度对燃料油的串级控制

在系统有特殊要求时，可组成如图 7.38 所示的炉出口温度、炉膛温度、燃料油流量的三级控制系统。该方案结合了上述两种控制方案的优点，有更好的控制效果。但该方案使用仪表多且整定困难，实用性较差。

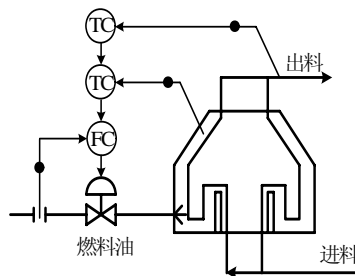


图 7.38 炉出口温度对炉膛温度及燃料油流量的串级控制

3) 炉出口温度对燃料油(或气)阀后压力的串级控制

加热炉出口温度对燃料油流量的串级控制方案并不是什么时候都能够使用的，特别是需燃料油量较少或其输送管道较小时，其流量测量较困；如果采用黏度较大的重质燃料油时更难准确测量流量。相比较而言，燃料测量较流量方便，因此可以采用炉出口温度对燃料油(或气)阀后压力的串级控制，如图 7.39 所示，该方案应用较广。采用该方案时，需要特别注意燃料喷嘴的状态。如果燃料喷嘴部分堵塞，也会使阀后压力升高，此时副控制器的动作将使阀门关小，这是不正确的。因此，在运行时必须经常检查喷嘴状态，防止调节

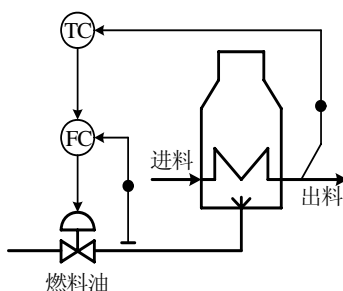


图 7.39 炉出口温度对燃料油压力的串级控制

器的误动作。特别是采用重质燃料油或燃料气中夹带着液体时更要注意。

4) 采用压力平衡式控制阀(浮动阀)的控制

当使用气态燃料时,采用压力平衡式控制阀(浮动阀)的方案颇有特色,如图 7.40 所示。这里用浮动阀代替了一般控制阀,不仅可以节省压力变送器,且浮动阀本身能够实现压力控制器功能,容易实现串级控制。

浮动阀不用弹簧、不用填料,所以没有摩擦,没有机械间隙,工作灵敏度高,反应迅速。它可以与精度较高的温度控制器配套组成的控制回路,实际上起到了串级系统副控制器的作用,能获得较好的控制效果。

浮动阀结构如图 7.41 所示。它膜片上部来自温度控制器的输出压力 p_1 ,而膜片下部接燃料气阀后压力 p_2 ,只有当 $p_1 = p_2$ 时,阀杆才静止,处于平衡状态。如果由于温度的变化而使控制器输出压力改变为 p_3 时,膜片上下出现压力差,阀杆动作,阀门开度变化,变化的结果是使燃料气压力 $p_4 = p_3$,重新达到平衡。若由于燃料气流量变化,使燃料气压改变,则阀杆动作,改变阀门开度,最终使阀后压力回到平衡状态。

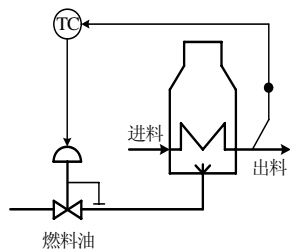


图 7.40 采用浮动阀的控制方案

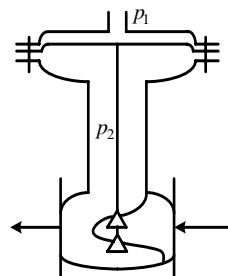


图 7.41 浮动阀示意图

采用这种方案时,被调燃料气阀后压力一般应在 0.04 MPa~0.08 MPa 之间。若被调燃料气阀后压力大于 0.08 MPa 时,为了满足平衡的要求,则需在温度控制器的输出端串接一个倍数继电器。该方案简便易行,但由于下述原因而受到限制。

- (1) 由于倍数继电器的限制,一般情况下适用于 0.04 MPa~0.4 MPa 的气体燃料;
- (2) 一般的膜片不适用于液体燃料及温度较高的气体燃料;
- (3) 当膜片上下压差较大时,膜片容易损坏。

例如,在催化裂化装置中,要求原料油的温度在 400℃ 条件下送入反应器,才能保证

催化裂化反应的顺利进行。原料油在催化剂作用下，裂化生成汽油和其他气体。对原料油的加热就经常采用圆筒式加热炉，其温度控制系统如图 7.42 所示。

这一工序采用的燃料油是自身产生的重油，但在刚开工生产时，由于燃料油尚未得到，所以用热裂化来的干气作为燃料。此处采用了浮动阀控制，由炉出口温度控制器输出直接去控制浮动阀。当生产进入正常状态后，本装置产出重质燃料油，此时炉出口温度与燃料油阀后压力组成串级控制，保证炉出口温度满足工艺要求(本图中温度控制器的输出增加了一个转换开关，用以选择燃油或燃气)。其余扰动因素采用单回路控制系统予以克服。

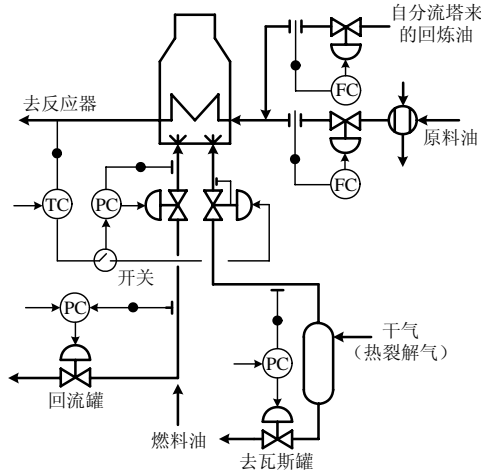


图 7.42 催化裂化装置加热炉的自动控制系统

炼油厂的常压蒸馏装置中，管式加热炉是重要设备之一，它的任务是把原油加热至一定温度，然后送到常压分馏塔分离出各种产品。加热炉出口温度是否平稳，直接影响后续工序的分馏效果。因此，炉子出口温度要求严格控制。其控制系统如图 7.43 所示。图中的加热炉采用方箱式加热炉，用两组炉管进行加热，为保证出口温度的稳定，对两组炉管均采取了出口温度对炉膛温度的串级控制系统，这里的炉膛温度波动不能很大，否则容易影响设备寿命。其余一些扰动因素采用单回路控制系统来克服。

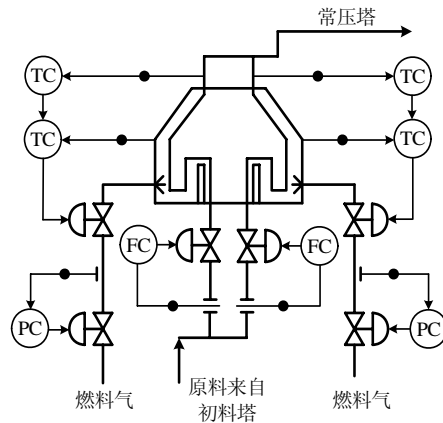


图 7.43 常压蒸馏装置加热炉的自动控制系统

在加热炉的自动控制系统中，有时遇到生产负荷变化如进料流量变化频繁或者介质初始条件改变如进料温度变化等情况，如果这些扰动幅度较大，那么串级控制方案也难以满足生产要求。此时建议采用如图 7.44 所示的前馈-反馈控制系统，利用前馈控制克服负荷扰动和原料条件扰动，其余扰动作用则交给反馈控制去克服。

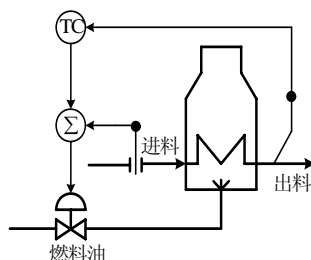


图 7.44 加热炉的前馈-反馈控制系统

3. 安全连锁保护系统

为了保证加热炉的安全生产，防止发生事故，有必要设置安全连锁保护系统。至于连锁保护系统的构成和动作顺序则应该视具体情况而定。

1) 以燃料气为燃料的加热炉连锁保护系统

在以燃料气为燃料的加热炉中，主要危险来自于：

(1) 被加热工艺介质流量过少或中断，如不采取相应措施，后果是介质管道爆管甚至损坏加热炉，造成严重的安全事故。此时必须采取措施应该是切断燃料气控制阀，停止燃烧，而且继续抽出炉膛内高温烟气，降低炉膛温度；

(2) 当火焰熄灭时，会在燃烧室里形成危险的燃料-空气混合物。此时应该及时将燃气-空气混合物抽出燃烧室，否则在下次点火时有爆炸的危险；

(3) 当燃料气压过低即流量过小时，会出现回火现象，故要保证最小燃料气流量；

(4) 当燃料气压力过高时，喷嘴会出现脱火现象，造成熄火甚至形成大量燃料气-空气混合物，造成爆炸事故。

如图 7.45 所示的安全连锁保护系统是常见的安全连锁保护系统。它包括以下几部分：

(1) 炉出口温度与控制阀后压力的选择性控制系统。正常生产时，由温度控制器工作。当外界扰动作用使控制阀后压力过高达到安全极限时，压力控制器 PC 通过低值选择器 LS 取代温度控制器工作。压力控制器的功能是关小控制阀以防止脱火。一旦燃料压力恢复正常，仍由温度控制器进行控制。

(2) 燃料流量过低连锁报警系统 GL_1 。当燃料流量达到一定低限时，则 GL_1 连锁动作，使三通电磁阀线圈失电，这样来自温度控制器的控制信号失去调节作用，燃料气阀完全关闭，防止回火。

(3) 工艺介质流量过低连锁报警系统 GL_2 。当工艺介质流量过低或中断时， GL_2 动作切断燃料气控制阀，停止燃烧。

(4) 灭火连锁报警系统 BS。当火焰熄灭时，火焰检测开关 BS 动作，切断燃料气控制阀，停止供气，以阻止燃烧室内形成燃料气-空气混合物造成爆炸事故。

上述连锁系统中，系统(1)可以在动作后，自动恢复到正常运行状态。其他三个系统动

压力又与雾化蒸汽压力组成压差控制系统，以保证燃料油雾化良好。

安全联锁保护系统如图 7.46(b)所示。该系统包含了对炼厂气和燃料油的两套保护装置。对炼厂气而言，一旦引火喷嘴用炼厂气压力过低，就会触发联锁系统，切断炼厂气供给。其动作原理如下：当炼厂气压力过低时， PL_1 的常闭触点断开，三通电磁阀线圈失电，这样由气源供给炼厂气控制阀的气压信号放空，切断了炼厂气，防止事故发生。而对燃料油的供给，只要符合以下 3 个条件中任意一个，均要切断燃料油的供给。

- (1) 引火喷嘴用炼厂气压力过低；
- (2) 循环气流量过低(为确保动作可靠采用了双套仪表)；
- (3) 雾化蒸汽压力过低。

其动作原理与上述联锁保护系统相同。

本章小结

本章以传热设备、精馏装置、锅炉汽包等实际对象的控制为例，总结了设计过程控制系统一般思路，这一思路不仅适用于过程控制系统，同时也适用于其他的普通控制系统，具有很强的代表性。对于相同被控对象而言，不同的控制要求产生不同的控制方案；相同的控制要求也有可能用不同的控制方案来实现。对控制人员来说，不仅要会设计控制方案，而且要善于比较不同方案之间的优劣，包括系统的安全性、准确性、实用性、经济性等各方面的因素都要综合考虑，选择一个最为合适的方案去满足要求。

思考题与习题

- 7-1 为什么说锅炉是一个典型的多变量被控过程？它的输入输出变量有哪些？为什么要把它分成多个部分分别设计控制系统？
- 7-2 汽包对象的假水位现象的起因在哪里？如果不能正确克服，会引起什么后果？
- 7-3 试比较双冲量和三冲量控制系统各自的特点？
- 7-4 精馏塔的自动控制有哪些基本要求？
- 7-5 如何根据工艺要求选择精馏塔的被控变量和操作变量？
- 7-6 什么是温差控制与双温差控制？说明其各自的特点和适用场合。
- 7-7 传热设备有哪些动态特性？
- 7-8 调节换热器的传热量有哪些基本途径？
- 7-9 加热炉与一般换热器在传热方式上的主要区别是什么？
- 7-10 加热炉的各种串级控制系统分别有何特点？分别适用于何种场合？
- 7-11 分别画出如图 7.36 和图 7.37 所示控制系统的系统框图，并比较两个系统的优劣。
- 7-12 加热炉的联锁保护系统主要对哪些危险进行保护？如何保护？

附表 标准化热电偶分度表

附表 1 铂铑 30-铂铑 6 热电偶分度表

分度号: B

参考端温度: 0℃

单位: mV

温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	温度/℃
0	0.000	0.033	0.178	0.431	0.786	1.241	1.791	2.430	3.154	3.957	4.833	5.777	6.783	7.845	8.952	10.094	11.257	12.426	13.585	0
10	-0.002	0.043	0.199	0.462	0.827	1.292	1.851	2.499	3.231	4.041	4.924	5.875	6.877	7.953	9.065	10.210	11.374	12.543	13.699	10
20	-0.003	0.053	0.220	0.494	0.870	1.344	1.912	2.569	3.308	4.126	5.016	5.973	6.991	8.063	9.178	10.325	11.491	12.659	13.814	20
30	-0.002	0.065	0.243	0.527	0.913	1.397	1.974	2.639	3.387	4.212	5.109	6.073	7.096	8.172	9.291	10.441	11.608	12.776		30
40	0.000	0.078	0.266	0.561	0.957	1.450	2.036	2.710	3.466	4.298	5.202	6.172	7.202	8.283	9.405	10.558	11.725	12.892		40
50	0.002	0.092	0.291	0.596	1.002	1.505	2.100	2.782	3.546	4.386	5.297	6.273	7.308	8.393	9.519	10.674	11.842	13.008		50
60	0.006	0.107	0.317	0.632	1.048	1.560	2.164	2.855	3.626	4.474	5.391	6.374	7.414	8.504	9.634	10.790	11.959	13.124		60
70	0.011	0.123	0.344	0.669	1.095	1.617	2.230	2.928	3.708	4.562	5.487	6.475	7.521	8.616	9.748	10.907	12.076	13.239		70
80	0.017	0.140	0.372	0.707	1.143	1.674	2.296	3.003	3.79	4.652	5.583	6.577	7.628	8.727	9.863	11.024	12.193	13.354		80
90	0.025	0.159	0.401	0.746	1.192	1.732	2.363	3.078	3.873	4.742	5.680	6.680	7.736	8.839	9.979	11.141	12.310	13.470		90
100	0.033	0.178	0.431	0.786	1.241	1.791	2.430	3.154	3.957	4.833	5.777	6.783	7.845	8.952	10.094	11.257	12.426	13.585		100
温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	温度/℃

附表2 铂铑10—铂铑热电偶分度表

分度号：S

参考端温度：0℃

单位：mV

温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	温度/℃
0	0.000	0.645	1.440	2.323	3.260	4.234	5.237	6.274	7.345	8.448	9.585	10.754	11.947	13.155	14.368	15.576	16.771	17.942	0
10	0.055	0.719	1.525	2.414	3.356	4.333	5.339	6.380	7.454	8.560	9.700	10.872	12.067	13.276	14.489	15.697	16.890	18.056	10
20	0.113	0.795	1.661	2.506	3.452	4.432	5.442	6.486	7.563	8.673	9.816	10.991	12.188	13.397	14.610	15.817	17.008	18.170	20
30	0.173	0.872	1.698	2.599	3.549	4.532	5.544	6.592	7.672	8.786	9.932	11.110	12.308	13.519	14.731	15.937	17.125	18.282	30
40	0.235	0.950	1.785	2.692	3.645	4.632	5.648	6.699	7.782	8.899	10.048	11.220	12.429	13.640	14.852	16.057	17.243	18.394	40
50	0.229	1.029	1.873	2.786	3.743	4.732	5.571	6.805	7.892	9.012	10.165	11.348	12.550	13.761	14.973	16.176	17.360	18.504	50
60	0.365	1.109	1.962	2.880	3.840	4.832	5.855	6.913	8.003	9.126	10.282	11.467	12.671	13.883	15.094	16.296	17.477	18.612	60
70	0.432	1.190	2.051	2.974	3.938	4.933	5.960	7.020	8.114	9.240	10.400	11.587	12.792	14.004	15.215	16.415	17.594		70
80	0.502	1.273	2.414	3.069	4.036	5.034	6.064	7.128	8.225	9.355	10.517	11.707	12.913	14.125	15.336	16.534	17.711		80
90	0.573	1.356	2.232	3.164	4.135	5.136	6.169	7.236	8.336	9.470	10.635	11.827	13.034	14.247	15.456	16.653	17.825		90
100	0.645	1.440	2.323	3.260	4.234	5.237	6.274	7.345	8.448	9.585	10.754	11.947	13.155	14.368	15.576	16.771	17.942		100
温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	温度/℃

附表3 铂铑13—铂铑热电偶分度表

分度号: R

参考端温度: 0℃

单位: mV

温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	温度/℃
0	0.000	0.647	1.468	2.400	3.407	4.471	5.582	6.741	7.949	9.203	10.503	11.846	13.224	14.624	16.035	17.445	18.842	20.215	0
10	0.054	0.723	1.557	2.498	3.511	4.580	5.696	6.860	8.972	9.331	10.636	11.983	13.363	14.765	16.176	17.585	18.981	20.350	10
20	0.111	0.800	1.647	2.596	3.616	4.689	5.810	6.979	8.196	9.460	10.768	12.119	13.502	15.006	16.317	17.726	19.119	20.483	20
30	0.171	0.879	1.738	2.695	3.721	4.799	5.925	7.089	8.320	9.589	10.902	12.257	13.642	15.047	16.458	17.866	19.257	20.616	30
40	0.232	0.959	1.830	2.795	3.826	4.910	6.040	7.218	8.445	9.718	11.035	12.394	13.782	15.188	16.599	18.006	19.395	20.748	40
50	0.296	1.041	1.923	2.896	3.933	5.021	6.155	7.339	8.570	9.848	11.170	12.532	13.922	15.329	16.741	18.146	19.533	20.878	50
60	0.363	1.124	2.017	2.997	4.039	5.132	6.272	7.460	8.696	9.978	11.304	12.669	14.062	15.470	16.882	18.286	19.670	21.006	60
70	0.431	1.208	2.111	3.099	4.146	5.244	6.388	7.582	8.822	10.109	11.439	12.808	14.202	15.611	17.022	18.425	19.807		70
80	0.501	1.294	2.207	3.201	4.254	5.356	6.505	7.703	8.949	10.240	11.574	12.946	14.343	15.752	17.163	18.564	19.944		80
90	0.573	1.380	2.303	3.304	4.362	5.469	6.623	7.826	9.076	10.371	11.710	13.085	14.483	15.893	17.304	18.703	20.080		90
100	0.647	1.468	2.400	3.407	4.471	5.582	6.741	7.949	9.203	10.503	11.846	13.224	14.624	16.035	17.445	18.842	20.215		100
温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	温度/℃

附表 4 镍铬—镍铬硅热电偶分度表

分度号: K

参考端温度: 0℃

单位: mV

温度/℃	-100	-0	温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	温度/℃
-0	-3.533	0.000	0	0.000	4.095	8.137	12.207	16.395	20.640	24.902	29.128	33.277	37.325	41.269	45.108	48.828	52.393	0
-10	-3.822	-0.392	10	0.397	4.508	8.537	12.623	16.818	21.066	25.327	29.547	33.686	37.724	41.657	45.486	49.192	52.747	10
-20	-4.138	-0.777	20	0.798	4.919	8.938	13.039	17.241	21.493	25.751	29.965	34.095	38.122	42.045	45.863	49.555	53.093	20
-30	-4.410	-1.156	30	1.203	5.327	9.341	13.456	17.664	21.919	26.176	30.383	34.502	38.519	42.432	46.238	49.916	53.439	30
-40	-4.669	-1.527	40	1.611	5.733	9.754	13.874	18.088	22.346	26.599	30.799	34.909	38.915	42.817	46.612	50.276	53.782	40
-50	-4.912	-1.889	50	2.022	6.137	10.151	14.292	18.513	22.772	27.022	31.214	35.314	39.310	43.202	46.985	50.633	54.125	50
-60	-5.141	-2.243	60	2.436	6.530	10.560	14.712	18.938	23.198	27.445	31.629	35.718	39.703	43.585	47.356	50.990	54.466	60
-70	-5.354	-2.586	70	2.850	6.939	10.969	15.132	19.363	23.624	27.867	32.042	36.121	40.096	43.968	47.726	51.344	54.807	70
-80	-5.550	-2.920	80	3.266	7.338	11.381	15.552	19.788	24.050	28.288	32.455	36.524	40.488	44.349	48.095	51.697		80
-90	-5.730	-3.242	90	3.681	7.737	11.793	15.974	20.214	24.476	28.700	32.866	36.925	40.879	44.729	48.462	52.049		90
-100	-5.891	-3.553	100	4.095	8.137	12.207	16.395	20.240	24.902	29.128	33.277	37.925	41.269	45.108	48.828	52.398		100
温度/℃	-100	-0	温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	温度/℃

附表 5 镍铬-康铜热电偶分度表

分度号: E

参考端温度: 0℃

单位: mV

温度/℃	-100	-0	温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	温度/℃
-0	-5.237	0.000	0	0.000	6.317	13.419	21.033	28.943	36.999	45.085	53.110	61.022	68.783	0
-10	-5.680	-0.581	10	0.591	6.996	14.161	21.814	29.744	37.808	45.891	53.907	61.806	69.549	10
-20	-6.107	-1.151	20	1.192	7.683	14.909	22.597	30.546	38.617	46.697	54.703	62.588	70.313	20
-30	-6.516	-1.709	30	1.801	8.377	15.661	23.383	31.350	39.426	47.502	55.498	63.368	71.075	30
-40	-6.907	-2.254	40	2.419	9.078	16.417	24.171	32.155	40.236	48.306	56.291	64.147	71.835	40
-50	-7.279	-2.787	50	3.047	9.787	17.178	24.961	32.960	41.045	49.109	57.083	64.924	72.593	50
-60	-7.631	-3.306	60	3.683	10.501	17.942	25.754	33.767	41.853	49.911	57.873	65.700	73.350	60
-70	-7.963	-3.811	70	4.329	11.222	18.710	26.549	34.574	42.662	50.713	58.663	66.473	74.104	70
-80	-8.273	-4.301	80	4.983	11.949	19.481	27.345	35.382	43.470	51.513	59.451	67.245	74.857	80
-90	-8.561	-4.777	90	5.646	12.681	20.256	28.143	36.190	44.278	52.312	60.237	68.015	75.608	90
-100	-8.824	-5.237	100	6.317	13.419	21.033	28.943	36.999	45.085	53.110	61.022	68.783	76.358	100
温度/℃	-100	-0	温度/℃	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	温度/℃

附表 6 铁-康铜热电偶分度表

分度号: J

参考端温度: 0°C

单位: mV

温度/°C	-100	-0	温度/°C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	温度/°C
-0	-4.632	0.000	0	0.000	5.268	10.777	16.325	21.846	27.388	33.096	39.310	45.498	51.875	57.942	63.777	0
-10	-5.036	-0.501	10	0.507	5.812	11.332	16.879	22.397	27.949	33.683	39.754	46.144	52.496	58.533	64.355	10
-20	-5.426	-0.995	20	1.019	6.359	11.887	17.432	22.949	28.511	34.273	40.382	46.790	53.115	59.121	64.933	20
-30	-5.801	-1.481	30	1.536	6.907	12.442	17.984	23.501	29.075	34.867	41.013	47.434	53.729	59.708	65.510	30
-40	-6.159	-1.960	40	2.058	7.457	12.998	18.537	24.054	29.642	35.464	41.647	48.076	54.431	60.293	66.087	40
-50	-6.499	-2.431	50	2.585	8.008	13.553	19.089	24.607	30.210	36.066	42.283	48.716	54.948	60.876	66.664	50
-60	-6.821	-2.892	60	3.115	8.560	14.108	19.640	25.161	30.782	36.671	42.922	49.354	55.553	61.459	67.240	60
-70	-7.122	-3.344	70	3.649	9.113	14.663	20.192	25.716	31.356	37.280	43.563	49.989	56.155	62.039	67.815	70
-80	-7.402	-3.785	80	4.186	9.667	15.217	20.743	26.272	31.933	37.893	44.207	50.621	56.753	62.619	68.390	80
-90	-7.659	-4.215	90	4.725	10.222	15.771	21.295	26.829	32.513	38.510	44.852	51.249	57.349	63.199	68.964	90
-100	-7.890	-4.632	100	5.268	10.777	16.325	21.846	27.388	33.096	39.130	45.498	51.875	57.942	63.777	69.586	100
温度/°C	-100	-0	温度/°C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	温度/°C

附表 7 镍铬-镍硅热电偶分度表

分度表: S

参考端温度: 0°C

单位: mV

温度/°C	-100	-0	温度/°C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	温度/°C
-0	-2.407	0.000	0	0.000	2.744	5.912	9.340	12.972	16.744	20.609	24.526	28.456	32.370	36.248	40.076	43.836	0
-10	-2.612	-0.200	10	0.261	3.072	6.243	9.695	13.344	17.127	20.999	24.919	28.849	32.760	36.633	40.456	44.207	10
-20	-2.807	-0.518	20	0.525	3.374	6.577	10.053	13.717	17.511	21.390	25.312	29.241	33.149	37.018	40.835	44.577	20
-30	-2.994	-0.772	30	0.793	3.679	6.914	10.412	14.091	17.896	21.781	25.705	29.633	33.538	37.402	41.213	44.947	30
-40	-3.17	-1.023	40	1.064	3.988	7.254	10.772	14.467	18.828	22.172	26.098	30.025	33.926	37.786	41.590	45.315	40
-50	-3.336	-1.263	50	1.339	4.301	7.596	11.135	14.844	18.668	22.564	26.491	30.417	34.315	38.169	41.966	45.682	50
-60	-3.491	-1.509	60	1.619	4.617	7.940	11.499	15.222	19.055	22.956	26.885	30.808	34.702	38.552	42.342	46.048	60
-70	-3.634	-1.744	70	1.902	4.936	8.287	11.865	15.601	19.443	23.348	27.278	31.199	35.089	38.934	42.717	46.413	70
-80	-3.766	-1.972	80	2.188	5.258	8.636	12.233	15.981	19.831	23.740	27.671	31.590	35.476	39.315	43.091	46.777	80
-90	-3.884	-2.193	90	2.479	5.584	8.987	12.602	16.362	20.220	24.133	28.063	31.980	35.862	39.696	43.464	47.140	90
-100	-3.99	-2.407	100	2.774	5.912	9.340	12.972	16.744	20.609	24.526	28.456	32.370	36.248	40.076	43.836	47.502	100
温度/°C	-100	-0	温度/°C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	温度/°C

附表8 铜—康铜热电偶分度表

分度表: T

参考端温度: 0℃

单位: mV

温度/℃	-200	-100	0	温度 /℃	0	100	200	300	温度 /℃
0	-5.603	-3.378	0	0	0	4.277	9.286	14.86	0
-10	-5.753	-3.656	-0.383	10	0.391	4.749	9.82	15.443	10
-20	-5.889	-3.923	-0.757	20	0.789	5.227	10.36	16.03	20
-30	-6.007	-4.177	-1.121	30	1.196	5.712	10.905	16.621	30
-40	-6.105	-4.419	-1.475	40	1.611	6.204	11.456	17.217	40
-50	-6.181	-4.648	-1.819	50	2.035	6.702	12.011	17.816	50
-60	-6.232	-4.865	-2.152	60	2.467	7.207	12.572	18.42	60
-70	-6.258	-5.069	-2.475	70	2.908	7.718	13.137	19.027	70
-80		-5.261	-2.788	80	3.357	8.235	13.707	19.638	80
-90		-5.439	-3.089	90	3.813	8.757	14.281	20.252	90
-100		-5.603	-3.378	100	4.277	9.286	14.86	20.869	100
温度/℃	-200	-100	0	温度 /℃	0	100	200	300	温度/℃

参 考 文 献

- [1] 张毅. 自动检测技术及仪表控制系统. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 候志林. 过程控制与自动化仪表. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [3] 施仁. 自动化仪表与过程控制. 北京: 电子工业出版社, 2003
- [4] 程德福. 智能仪器. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 周航慈. 智能仪器原理与设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [6] 李云志. 虚拟仪器技术及其发展趋势. 电子科学技术评论, 2005(4).
- [7] 林君. 现代科学仪器及其发展趋势. 吉林大学学报(信息科学版), 2002(1).
- [8] 林德杰. 过程控制仪表与控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] 俞金寿. 过程自动化及仪表. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [10] 王俊杰. 检测技术与仪表. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002.
- [11] 周杏鹏. 现代检测技术. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [12] 李海青. 特种检测技术. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [13] 张宏建. 自动检测技术与装置. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [14] 张凯. LabVIEW 虚拟仪器工程设计与开发. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [15] 周求湛. 虚拟仪器与 LabVIEW 7 Express 程序设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [16] 刘洋. 虚拟仪器技术及其发展趋势. 仪表技术, 2004(5).
- [17] 梁志国, 孙璟宇. 虚拟仪器的现状及发展趋势. 测控技术, 2003(12).
- [18] 孟华. 工业过程检测与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [19] 金以慧. 过程控制. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [20] 江秀汉. 计算机控制原理及其应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [21] 孙瑜. 工业自动化仪表与过程控制. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.
- [22] 张万忠. 电器与 PLC 控制技术. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [23] 周万珍. PLC 分析与设计应用. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [24] 王俊杰. 检测技术与仪表. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002.
- [25] 李新光. 过程检测技术. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [26] 邵玉森. 过程控制及仪表. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.
- [27] 俞金寿. 过程自动化及仪表. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [28] 安毓英. 光学传感与测量. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [29] 林德杰. 过程控制仪表与控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [30] 候志林. 过程控制与自动化仪表. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [31] 孟华. 工业过程检测与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [32] 向婉成. 控制仪表与装置. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [33] 周杏鹏. 现代检测技术. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [34] 李海青. 特种检测技术. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [35] 张宏建. 自动检测技术与装置. 北京: 化学工业出版社, 2004.

- [36] 王庆友. 图像传感器应用技术. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [37] 蔡萍. 现代检测技术与系统. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [38] Curtis D. Johnson. Process Control Instrumentation Technology. 北京: 科学出版社, 2002.
- [39] 赵新民. 智能仪器设计基础. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- [40] 杨欣荣. 智能仪器原理、设计与发展. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
- [41] 程德福. 智能仪器. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [42] 周航慈. 智能仪器原理与设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [43] 方彦军. 智能仪器技术及其应用. 北京: 化学工业出版社: 教材出版中心, 2004.
- [44] 凌志浩. 智能仪表原理与设计技术. 上海: 华东理工大学出版社, 2003.
- [45] 周航慈. 单片机程序设计基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [46] 徐爱钧. 智能化测量控制仪表原理与设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [47] 刘光斌. 单片机系统实用抗干扰技术. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [48] 张凯. LabVIEW 虚拟仪器工程设计与开发. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [49] 周求湛. 虚拟仪器与 LabVIEW7 Express 程序设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [50] 李云志. 虚拟仪器技术及其发展趋势. 电子科学技术评论, 2005(4).
- [51] 刘洋. 虚拟仪器技术及其发展趋势. 仪表技术, 2004(5).
- [52] 梁志慈, 孙璟宇. 虚拟仪器的现状及发展趋势. 测控技术, 2003(12).
- [53] 杨明, 甘欣辉, 张景文. 智能仪器的量程自动转换设计. 国外电子元器件, 2004(5).
- [54] 林月芳, 吉海彦. 智能仪器及其发展趋势. 仪表技术, 2003(1).
- [55] 阮勇, 熊静琪. 网络测控系统及其进展. 中国测试技术, 2003(2).
- [56] 林君. 现代科学仪器及其发展趋势. 吉林大学学报(信息科学版), 2002(1).
- [57] 刘曙光, 王斌. 智能仪器仪表的进展与展望. 自动化与仪表, 2001(4).

《21世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

联合编写学校名单（按拼音顺序排名）

- | | |
|---------------|-------------|
| 1 安徽建筑工业学院 | 30 南昌工程学院 |
| 2 安徽科技学院 | 31 平顶山工学院 |
| 3 北华大学 | 32 平顶山学院 |
| 4 北京工商大学 | 33 青岛科技大学 |
| 5 北京建筑工程学院 | 34 山东建筑工程学院 |
| 6 长春大学 | 35 山东科技大学 |
| 7 长春工程学院 | 36 陕西科技大学 |
| 8 长春工业大学 | 37 陕西理工学院 |
| 9 长春理工大学 | 38 沈阳大学 |
| 10 成都理工大学 | 39 沈阳工程学院 |
| 11 东北电力学院 | 40 沈阳工业大学 |
| 12 福州大学 | 41 沈阳化工学院 |
| 13 广东工业大学 | 42 四川理工学院 |
| 14 桂林工学院 | 43 太原科技大学 |
| 15 合肥工业大学 | 44 潍坊学院 |
| 16 河南工业大学 | 45 武汉大学 |
| 17 河南科技学院 | 46 武汉理工大学 |
| 18 河南农业大学 | 47 西安工程科技学院 |
| 19 华东交通大学 | 48 西安建筑科技大学 |
| 20 黄石理工学院 | 49 西安科技大学 |
| 21 吉林工程技术师范学院 | 50 西安理工大学 |
| 22 吉林化工学院 | 51 西安石油大学 |
| 23 吉林建筑工程学院 | 52 西安外事学院 |
| 24 江南大学 | 53 西安邮电学院 |
| 25 焦作大学 | 54 西南大学 |
| 26 兰州理工大学 | 55 西南科技大学 |
| 27 聊城大学 | 56 浙江大学 |
| 28 辽宁大学 | 57 中北大学 |
| 29 内蒙古大学 | 58 中北大学分校 |