

## 预测 PID 控制算法的基本原理及研究现状

邵惠鹤 任正云

邵惠鹤先生，上海交通大学自动化系教授；任正云先生，博士。

关键词：模型预测控制 预测 PID 控制算法

在现今全球竞争日益激烈的市场环境下，通过先进控制获取经济效益来提高企业竞争力，已成为一种趋势。据有关文献报道(薛美盛等，2002)，各种不同石油化工装置实施先进控制后，其每年净增效益如表 1 所示。虽然各公司所报出的年效益有所不同，但其数据出入不大，而实施先进控制所需成本只占其产生效益的很小一部分比例。

国外发达国家经验表明(孙德敏等，2003)：采用先进控制理论和过程优化将增加 30%的投资，但可提高产品层次和质量，降低能源和原材料消耗，从而增加 85%的效益，如图 1 所示。投资 70%的资金购置 DCS，换来的是 15%的经济效益；再增加 30%的投资，可以换来 85%的经济效益。其中增加的 8%用于传统的先进控制(TAC)，得到的经济效益是 8%；增加的 13%用于预测控制(DMC)，得到的经济效益为 37%；增加的 9%用于在线闭环优化(CLRTO)，换来的经济效益是 40%！因此，实施先进控制与优化是不用投资的技术改造。

然而，控制理论本身也面临着一些问题和困难，需要不断改进和提高。尽管大量新的控制算法不断涌现，但常规的 PID 及改进的 PID 控制算法仍广泛应用于工业控制领域。一些先进控制算法专用性强、适应性差、鲁棒性能差、算法复杂、实施和维护成本高，这些都限制了它们的推广和发展。据日本控制技术委员会(SICE)对 110 家企业和 150 位控制工程师调查显示(Huruo, 1998)，近 20 年来，工业界迫切需要解决的控制难题分别是：大滞后、强耦合、时变、严重干扰以及非线性对象的控制，这些问题始终都没有得到切实有效的解决。部分先进控制理论理论性太强，实际应用需做大量的改进和简化，使先进控制具备鲁棒性是当前重要的发展方向。

在先进控制技术中，最有应用前途的是模型预测控制，该技术经历了 4 代发展，已非常完善和成熟了。第一代模型预测技术以 DMC(Cutler, 1979)和 IDCOM(Richalet, 1978)两种商业产品为标志；QDMC(Garcia, 1986)标志着第二代

模型预测技术；IDCOM-M(Froisy, 1990)、SMCA 和 SMOC(Yous, 1991)代表着第三代模型预测技术的产生；第四代模型预测技术就是人们熟悉的 DMC-plus 和 RMPCT, 分别是 Aspen 和 Honeywell 公司的最新商业化软件。现今模型预测控制技术不仅能处理硬、软约束、病态排除、多目标优化, 而且能通过 Kalman 滤波器消除不可测干扰和噪声的影响(Lundström, 1995), 同时采用鲁棒控制技术和先进的辨识技术处理模型的不确定性, 大大增强了模型预测技术的适应能力。

正因为模型预测控制的强大功能, 它是一些具有非最小相位、积分、不稳定、多变量强耦合(包括方系统、胖系统、瘦系统)等特殊动态特性过程的理想控制工具。

据统计, 2002 年全世界共成功实施 4600 例模型预测控制算法(Qina, 2003), 是 1997 年的两倍多, 短短 5 年时间比过去近 20 年应用的还多, 可见其发展速度之快。因此, 它被誉为 20 世纪 80 年代“最有前途的先进控制算法”, 一点也不过分。

像所有先进控制算法一样, 模型预测控制也有着自身的缺点:

(1)预测控制算法比较复杂, 计算量比较大。正因为复杂, 在算法实现上要考虑多方面因素, 既要保证算法简洁, 又要使算法具有足够的可靠性和稳定性, 同时也提高了硬件要求。而且不能在 DCS 或其他监控软件中直接实施, 需要复杂的冗余机制, 实施很不方便, 并提高了成本费用。

(2)实施周期长, 参数整定复杂, 即便是有丰富经验的工作人员, 也得花费较长时间进行在线或离线参数整定过程。

(3)需要过程对象较为精确的模型, 对于一些不允许作阶跃测试的过程对象, 虽然可以运用其他方法进行建模, 但建模的精确度会受到很大影响, 或者不能完全反应过程的动态特性。

(4)控制系统完成后, 必须对操作人员进行培训。由于算法复杂, 操作人员对其的理解有深有浅, 不能最大限度地发挥该先进算法的作用, 有时甚至会引起误操作。受工艺条件、模型变化的影响, 需要专门的技术人员进行算法维护。

(5)在重要干扰变量不可测或干扰模型不可辨识时, 系统的控制性能将严重恶化, 运用反馈校正的方法虽然能够起到一定作用, 但十分有限。一般做法是将重要的不可测干扰变量进行软测量, 这样控制的精确度对软测量仪表的精确度有很大依赖性。

(6)在大干扰存在时, 输出硬约束的如果处理不当的话, 易造成可行解问题。特别是对非最小相位系统, 输出硬约束的增强, 很可能导致系统不稳定(Zafirou, 1990; Muske, 1993)。

(7)模型预测控制算法的稳定性还没有从根本上得到有效解决, 需要从理论上

得到进一步突破(席裕庚, 2000; Mayne, 2000)。

(8)生产过程的工艺改变, 负荷的波动以及中间环节引入的各种不确定性扰动, 都会造成系统模型特性的改变。到目前为止, 模型预测控制算法还没有一种可靠的模型在线校正方式, 因此, 固定的模型限制了它整体性能的提高。

模型预测控制自我性能的在线评价、耗时少且精确度高的模型建立工具、非线性和混合系统的模型预测控制都是将来需要研究的重要课题, 也是模型预测控制的发展方向。

用户对一些先进控制算法的满意程度参差不齐, 有高有低。据 1995 年调查结果表明(Hurao, 1998), 见图 2, 先进控制算法能改善和提高原有控制水平, 但仍存在一系列问题需要解决, 用户的满意程度有待进一步提高。一些现代控制技术, 如 LQ 最优控制技术、 $H_\infty$  技术、Kalman 滤波技术和自适应技术的满意度很低, 有些过程工程师甚至不愿意应用该类新技术。

一些复杂先进控制算法的成功实施, 必须是多专业、跨学科的紧密合作, 同时要求具备丰富的工程实施经验和动手能力, 需要工艺和自控专家共同合作才能完成工程项目, 如 Setpoint 公司具有化工工艺背景的工程技术人员占公司职工总数的比例高达 70%。有人进行了一项统计, 先进控制的效益由几部分组成(Huang, 2002): 基本回路控制的整定好坏, 占 20%; 是否具备在线分析仪或切实可行的软测量技术, 占 40%; 算法的维护, 占 20%; 算法本身及其他因素, 仅占 20%。

因此, 如何使先进算法结构简单、实施容易、鲁棒性能好、通用性强是控制界乃至整个工业界一直追寻的目标。人们期待有一种先进控制器能像 20 世纪初出现的 PID 控制器给现代工业的控制水平带来深刻变化。

## 一 预测 PID 控制算法的基本原理及研究现状

自 1992 年 Hagglund 提出预测 PI 控制器的思想以来, 预测 PID 算法得到了逐步发展和完善, 并成功应用在一些复杂对象的控制上。现在文献上所说的预测 PID 控制算法可以归纳为两种:

**(1)有预测功能的 PID 控制器。**本质上, 它是一种 PID 控制器, 只不过依据一些先进控制机理, 如内模原理、广义预测原理、 $H_2/H_\infty$  原理、模糊理论、遗传算法和人工智能原理来设计控制器参数, 或根据某种最优原则在线给定 PID 控制器参数, 使之具有预测功能。

**(2)预测算法和 PID 算法融合在一起的控制器。**在这种控制器中, 包括预测控制器和 PID 控制器, PID 控制器和过程的滞后时间无关, 而预测控制器则主要依赖过程的滞后时间, 根据以前的控制作用给出现在的控制作用。

从理论上讲,这两种预测 PID 算法将 PID 的简单性、实用性、鲁棒性和模型预测控制算法的预测功能有机结合起来。它是预测算法和 PID 算法的折中,具有两种算法的优点。

## 1. 带有预测功能的 PID 控制器

这种类型的控制器有相当一部分基于广义预测控制(GPC)算法设计而成。Miller(1995)提出一种随机预测 PID 控制算法,其在数学上等于稳态加权广义预测控制(GPC)算法。主要优点是能借助普通工业计算机或 DCS 上的 PID 模块,无需添加新的算法,实施方便,并成功应用在化肥厂热交换器的温度控制上。Miller(1996)又提出了长范围的预测 PID 控制算法,也是基于稳态加权广义预测控制(GPC)算法设计而成的,在废水装置溶氧浓度的控制上取得了成功。Moradi(2001)运用广义预测模型,根据最优性能指标在线给定 PID 控制器的最佳参数。

De(1993)提出一种鲁棒预测 PI 控制器,并分析了控制器参数和系统稳定性间的关系。这种控制器适合于大滞后对象,是内模控制器(IMC)的一种特例。灰色预测 PID 控制算法(Chian, 2002),是将遗传算法引入到 PID 控制器,在线为 PID 控制器提供最佳参数。该算法应用在电力系统稳定装置的控制上,对白噪声和干扰都有很好抑制作用。Sakaguchi(2002)运用遗传算法和数据分组处理方法给定 PID 控制器的参数,达到预测控制效果。模糊逻辑(Georgescu, 1993)和神经网络(Asano, 1999)都可作为在线给定 PID 参数工具,达到时滞补偿和预测控制的目的。

Katebi(2001)将预测 PID 控制算法设计成具有模型预测控制(MPC)算法的功能,这种控制器由  $M$  个 PID 控制器组成,其中  $M$  为预测长度。第  $i$  个控制器仅对未来  $(t+i)$  时刻误差信号进行操作,这样控制器就具有滞后补偿功能。采用抗积分饱和技术和通过解约束的模型预测控制问题,使该控制器能处理输入约束问题。与普通 PID 控制算法不同,该算法能对未来设定值轨迹进行全局优化,十分适合过程的开、停车处理及批量过程控制。在实施环境方面,只要能实施常规 PID 的工控环境就可实施该算法,无需添加新的软、硬件,并且可利用现存的 PID 自整定方法,对其进行参数整定,十分方便。模型预测控制算法能控制的具有特殊动态特性的过程,它都能控制,如非最小相位系统、大滞后系统以及不稳定系统。对于一阶加纯滞后对象和二阶加纯滞后对象,运用 Pade 近似进行处理,该算法便分别简化为常规的 PI 控制器和 PID 控制器。

Vega(1991)运用回归算法对预测 PID 算法参数进行了自整定,取得了一定成果,但这种整定方法对大滞后过程能力非常有限。无模型自适应预测 PI 控制器(Tan, 1999),不需要对过程模型进行辨识,只需要过程的输入输出数据来设计 PI 控制器的参数,但这种控制器在干扰和噪声存在时的控制效果差。

## 2. 预测算法和 PID 算法融合在一起的控制器

这是一种真正意义上的预测 PID 控制算法，也是本文研究的重点。1992 年 Hagglund 第一次提出预测 PI 控制器，其由独立的两部分组成：PI 部分和预测部分。它包括 5 个参数，其中仅有 3 个可调参数。控制器的输入输出关系可表示为：

$$u(t)=K(1+\frac{1}{pT_i})e(t)-\frac{1}{pT_i}[u(t)-u(t-L)]$$

式中， $p$  为微分算子， $e(t)$ 、 $u(t)$  分别为控制器的输入、输出；上式右边第一项为 PI 控制器，第二项为预测控制器；在控制器参数选取上， $K$  一般选为过程增益的倒数， $T_i$  为过程的主导时间常数， $L$  为过程的滞后时间。

因此，这种控制器结构十分简单，参数调整也比较方便。和普通的 PID 控制器相比，它具有预测大滞后过程的输出信号与抑制测量噪声的优点，适合于大滞后对象平稳控制。

Cox(1997)运用 CAD 软件包对 Hagglund 预测 PI 控制器参数进行了快速整定，给出了参数选取的原则和方法，并得出一个结论：当过程的滞后时间和时间常数相近时，预测 PI 控制器的控制性能和传统的 PI 控制器相似；当过程的滞后时间大于时间常数时，预测 PI 控制器的控制性能优于传统的 PI 控制器。

Astrom(1995)提出的预测 PI 控制器和上述控制器结构类似，但多了一个大于 0 可调参数 $\lambda$ ，其目的是为了调整系统的闭环响应速度。 $\lambda$ 越大闭环响应速度越慢，反之则越快。控制器的输入输出的传递函数关系可表示为：

$$u(s)=K(1+\frac{1}{\lambda T_{is}})e(s)-\frac{1}{\lambda T_{is}}[u(s)-u(s-L)]$$

以上两种预测 PI 控制器均基于内模原理设计而成，可以说是内模控制算法的一个特例，PID 控制器的参数调整方法“试差法”也适合这两类控制器参数的调整。它们的结构易于被过程操作者理解，相应地提高其应用价值。

Rad 在 1994 年提出了另一种类型的预测 PI 控制器，见图 3。在这种控制器中，不可实现的预测项  $eT_p s$  借助于麦克劳林级数进行展开，并引入克服噪声的滤波部分，即：

$$e^{T_p s} B \frac{1 + T_p s + (T_p s)^2 / 2 + L(T_p s)^k / k!}{[1 + \frac{T_p}{N} s]^k}$$

可实现的预测 PI 控制系统见图 4，可看出，该控制器实际上是预测功能增强了的 PI 控制器。

Rad 的预测 PI 控制器的整定方法也非常简单和直观。假如过程为一阶滞后对象

$\frac{ke^{-Ts}}{\tau s + 1}$ ，则控制器的参数可设置如下：

$$K_p = \frac{2\tau}{3K(T - T_p)}, \quad T_i = t, \quad T_p \leq 0.65T$$

如果过程对象不是一阶滞后环节，可以将其简化为一阶滞后环节，再对控制器进行参数设置。为了分析过程对象参数不确定时系统的鲁棒稳定性，运用 Monte-Carlo(Ray, 1993)方法可以确定对象参数摄动的允许范围。结果表明：预测 PI 控制算法比常规的 PID 控制算法的鲁棒稳定性要好。

该控制器的缺陷是在设定值跟踪时，有一定幅度的超调，滞后时间越长，超调越明显。

## 二 理论与应用之间的差距

从理论研究的角度上讲，预测 PID 控制系统的设计、分析和综合已经形成了比较完整的体系。它把模型预测算法的功能和简单的 PID 控制结构结合起来，具有设计方便、实施快捷、实用性广、鲁棒性能好、便于整定、易于操作等特点，但仍存在下列问题需要解决。

### 1. 稳定性分析

在过程参数同时摄动时，对控制系统的稳定性分析是控制理论研究的一大难点，特别是对滞后对象的稳定性分析，更加困难。过程参数同时在一定区间变化时，如何判别预测 PID 控制系统是否稳定，是控制理论工作者当前研究的重要课题。现有分析方法，无论是频率法还是时域法，都不能给出稳定的充分必要条件，或者给出的充分必要条件难以在实际中应用，仅仅具有理论研究的价值。Lyapunov 稳定性理论仍然是解决此类问题的主要依据，问题在于如何寻找 Lyapunov 函数，一大部分问题是找不到合适的 Lyapunov 函数的。

### 2. 实用范围

大部分预测 PID 控制算法是针对某一特定对象设计的，或者需要将复杂模型进行简化后，才能设计控制器参数，专用性强。如何在预测 PID 的总体框架下设计出一种通用型的控制器，使其适合所有的过程对象，如：反向过程对象、积分对象、不稳定对象、多变量对象等，也是需要考虑的重要问题之一。在工程实施方面，如何使算法简单化、模块化，能直接在现有的 DCS、PLC 及监控平台软件中方便地实现等一系列的问题，是缩小理论和实践差距亟待解决的问题。

### 3. 控制器参数整定

虽然利用过程传递函数来设计控制器参数非常容易，但有些实际过程对象的传递函数模型很难精确获得。运用传统自整定方法，如继电反馈方法设计预测 PID 控制器的参数，提供设置控制器参数的经验公式，将辨识和控制有机地结合起来，是需要深入研究的课题。

### 4. 输入、输出约束问题

当前控制领域所面临的一个严峻挑战，是要在不精确知道被控对象模型前提下，设计出快速、准确的自适应控制算法，以满足对象特性在较大范围内变化时的控制要求。因此，如何利用计算科学中的各种先进模型，如模糊逻辑模型、知识向量机模型、神经网络模型、粗糙集模型、小波模型、非参数预测模型、叠代学习模型等，使预测 PID 控制系统具有解决复杂系统控制的自适应功能，是今后我们研究重要而迫切的方向。

（全文完）

来源：《世界仪表与自动化》

出版日期：2004 年 6 月