

三维模糊控制器的分析

李 娟

(莱阳农学院工程系, 山东莱阳 265200)

[摘 要] 本文从剖析传统 PID 控制出发, 阐述了基于 T-S 模型的三维模糊控制器的实质, 详细分析了三维模糊控制器的动态性能和稳态性能, 对模糊控制的理论研究和应用有一定的指导意义。

[关键词] PID 控制; 三维模糊控制器; 稳态性能; 动态性能

[中图分类号] TP273.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-0682(2002)01-0003-03

An analysis of a three-dimensional fuzzy controller

LI Juan

(Dept. of Engineering Laiyang Agricultural College, Shandong Laiyang 265200, China)

Abstract: From analyzing the traditional PID control, this paper sets forth the essence of a three-dimensional fuzzy controller based on the T-S model and discusses its steady-state and dynamic performance in detail, which may give a certain instruction on the theoretic study and application of the fuzzy control.

Key words: PID control; Three-dimensional fuzzy controller; Steady-state performance; Dynamic performance

1 引 言

自 1965 年美国控制论专家 L. A. Zadeh 创立模糊数学以来, 模糊控制得到了极为广泛的应用, 但由于模糊控制诞生较晚, 其理论还不成熟, 因此许多学者对模糊控制进行了理论上的探讨, 文献[1]利用相平面对二维模糊控制器进行了性能分析, 文献[2]利用 Stone-Weierstrass 定理对结构为普遍的模糊系统进行了精度逼近研究, 文献[3]则对三维模糊控制器进行了结构研究。本文则对三维模糊控制器的性能进行分析。由于模糊控制理论的不成熟性, 我们无法用模糊控制自身的理论来证明这个问题, 但经典控制理论却很成熟和完善, 因此我们另辟捷径, 在此从一个新颖的角度——剖析传统 PID 控制的实质出发, 阐述三维模糊控制器的性能。

2 常规的 PID 控制

众所周知, PID 控制作为一种最基本最常用的控制方式之所以经久不衰, 是因为这种控制算法中包含着一些深刻的和本质的东西, 认识和总结它, 对

于研究智能控制是十分必要的, 而且从 PID 的角度来设计模糊控制器, 也为模糊控制许多方面的理论研究和完善提供了一条新的思路, 因此我们首先来看常规的 PID 控制。一个典型的闭环控制如图 2-1 所示:

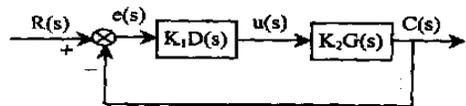


图 2-1 一个典型的闭环控制系统

其中: $K_1 D(S)$ 表示控制器, $K_2 G(S)$ 表示广义对象。

该系统的闭环传递函数为:

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{K_1 D(S) K_2 G(S)}{1 + K_1 D(S) K_2 G(S)} \quad (2-1)$$

式中 K_1 、 $D(S)$ 分别为控制器的静态、动态增益; K_2 、 $G(S)$ 分别为广义对象的静态、动态增益。

在通常情况下, 人们期望给定指令 $R(S)$ 与控制参数 $C(S)$ 之间的传递函数为 1。然而, 信息的获取、传递以及执行命令等都需要有一个过程, 即需要一定的时间, 这个过程用传递函数可描述为:

$$\frac{C(S)}{R(S)} = e^{-s} \quad (2-2)$$

式中 e^{-s} 表示指令的传递时间, 即纯滞后时间。大量的工业过程, 如化工、热工、轻工、冶炼、电

收稿日期: 2001-05-08

作者简介: 李娟 (1969-), 女, 山东海阳市人, 硕士, 讲师; 主要从事计算机过程控制和模糊控制等智能控制的研究和教学工作。

站等许多生产过程,都可用具有纯时间滞后的二阶传递函数近似描述为:

$$K_2 G(S) = \frac{K_2 e^{-s}}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)} \quad (2-3)$$

式中 T_1 、 T_2 分别为二阶对象的惯性时间常数,为纯滞后时间。

若使闭环传递函数满足理想系统的条件式(2-2),则根据式(2-1)和(2-3)可得:

$$K_1 D(S) = \frac{e^{-s}}{K_2 G(S)(1 - e^{-s})} = \frac{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)}{K_2(1 - e^{-s})} \quad (2-4)$$

由于 $1 - e^{-s}$ 可以用 s 近似表示,所以可得:

$$K_1 D(S) = \frac{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)}{K_2 S} = \frac{T_1 + T_2}{K_2} \left(1 + \frac{1}{T_1 + T_2} \cdot \frac{1}{S} + \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \cdot S\right) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S\right) = K_P + K_i \frac{1}{S} + K_d S$$

式中: $T_i = T_1 + T_2$ 为积分时间常数

$T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$ 为微分时间常数

$K_P = \frac{T_1 + T_2}{K_2}$ 为比例增益

$K_i = \frac{K_P}{T_i}$ 为积分系数

$K_d = K_P \cdot T_d$ 为微分系数

由此不难得出控制器的输出为:

$$u(S) = K_1 D(S) \cdot e(S) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S\right) e(S) \quad (2-6) = K_P e + K_i \int e + K_d \dot{e}$$

式(2-6)给出的是连续系统 PID 控制算式,相应的可给出增量式数字 PID 控制算式为:

$$u(n) = K_P [e(n) - e(n-1)] + K_i e(n) + K_d [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \quad (2-7)$$

式中 K_P 、 K_i 和 K_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数,其中:

$$K_i = K_P \cdot \frac{T}{T_i}; K_d = K_P \cdot \frac{T_d}{T}$$

T 为采样周期。

由上述推导不难看出,对于给定精确模型的被控对象, PID 控制是一种比较理想的控制方式,当 K_P 、 K_i 、 K_d 按上述方法取值时,可达到稳态无误差。但由于稳态性能和动态性能之间常常存在着矛盾,

因而按此取值时系统的动态性能却未必能令人满意。

3 基于 T—S 模型的三维模糊控制器

常规的三维模糊控制器的输入为 e 、 \dot{e} 和 \ddot{e} , 输出为 u , 采用 T—S 模型的模糊控制规则为:

$$R^i: \text{If } \dot{e} \text{ is } A_i \text{ and } e \text{ is } B_j \text{ and } \ddot{e} \text{ is } C_k \text{ then } u^i = b_0^i + b_1^i \dot{e} + b_2^i e + b_3^i \ddot{e}$$

当 b_0^i 、 b_1^i 、 b_2^i 、 b_3^i 均为常数时,该三维模糊控制器的控制规则就形成一张规则表,该模糊控制器就是常用的查表法的三维模糊控制器。

取特殊情况 $b_0^i = 0$, 假设当前偏差的变化率 \dot{e} , 并令 $E = \dot{e}$, 则有: $E = e$, $\dot{E} = \ddot{e}$

于是规则变为:

$$R^i: \text{If } E \text{ is } A_i \text{ and } iE \text{ is } B_j \text{ and } dE \text{ is } C_k \text{ then } u^i = b_1^i E + b_2^i E + b_3^i \dot{E} \quad (3-1)$$

假设共有 N 条规则,选取极小蕴涵关系及加权平均输出方法,可得该模糊控制器输出为:

$$u = \sum_{i=1}^N \frac{u^i}{\sum_{i=1}^N 1} \quad (3-2)$$

式中,加权系数为:

$$i = \min(\mu_{A_i}(E), \mu_{B_j}(iE), \mu_{C_k}(\dot{E}))$$

记 $P^i = \frac{i}{\sum_{i=1}^N i}$, 称之为相对加权系数,展开式(3-2)得:

$$u = \sum_{i=1}^N P^i u^i = \sum_{i=1}^N [P^i (b_1^i E + b_2^i E + b_3^i \dot{E})]$$

整理可得:

$$u = \left(\sum_{i=1}^N P^i b_1^i\right) E + \left(\sum_{i=1}^N P^i b_2^i\right) E + \left(\sum_{i=1}^N P^i b_3^i\right) \dot{E} \quad (3-3)$$

与式(2-6)比较,该模糊控制器对应于 PID 控制器的 3 个参数为:

$$K_{Fp} = \sum_{i=1}^N P^i b_1^i \quad K_{Fi} = \sum_{i=1}^N P^i b_2^i \quad K_{Fd} = \sum_{i=1}^N P^i b_3^i \quad (3-4)$$

$$\text{可简记为 } u = K_{Fp} E + K_{Fi} E + K_{Fd} \dot{E}$$

4 三维模糊控制器的实质

通过以上分析可得出:一类基于 T—S 模型的三维模糊控制器相当于输入量为 $E = (\dot{e})$ 的 PID 控制器,可称之为模糊 PID 控制器。该模糊控制器的 3 个参数 K_{Fp} 、 K_{Fi} 、 K_{Fd} 同 PID 控制器的 3 个参数 K_P 、 K_i 、 K_d 相比具有更广泛的意义。 K_P 、 K_i 、 K_d 在一般

控制中为常数(在较复杂或时变系统中,这 3 个参数可定为分段常数);但 K_{Fp} 、 K_{Fi} 、 K_{Fd} 都是变量。从式(3—4)可知: K_{Fp} 、 K_{Fi} 、 K_{Fd} 与 E 、 \dot{E} 、 \ddot{E} 有关,即上述 3 个参数可记为:

$$K_{Fp} = f_1(E, \dot{E}, \ddot{E})$$

$$K_{Fi} = f_2(E, \dot{E}, \ddot{E})$$

$$K_{Fd} = f_3(E, \dot{E}, \ddot{E})$$

分析上式 K_{Fp} 、 K_{Fi} 、 K_{Fd} 的表达式可知,基于 T—S 模型的三维模糊控制器可看作是一种输入为 E 的变参数的 PID 控制器,由于隶属函数是非线性的,上式中映射 f_1 、 f_2 、 f_3 均为非线性映射。因此该三维模糊控制器是以 E 为输入量的一种非线性控制器。另外,由式(3—4)分析可知,只有一条规则的三维模糊控制器,实际上就是输入为 E 的一般意义上的 PID 控制器,如果 $N=1$,则 $P^1=1$,由式(3—3)可得控制输出为:

$$u = b_1^1 E + b_2^1 \dot{E} + b_3^1 \ddot{E}$$

其形式与式(2—6)相同,即单个规则的三维模糊控制器就是输入为 E 的 PID 控制器,再由式(3—2)分析可知,多条规则的三维模糊控制器是输入为 E 的多个 PID 控制器的复合作用,只是在不同的状态下,由单个规则所确定的 PID 控制器具有不同的加权因子。因此三维模糊控制器也可看作是一种输入为 E 的复合 PID 控制器:

$$u = F(u^1, u^2, \dots, u^N)$$

其中, $u^i = b_1^i E + b_2^i \dot{E} + b_3^i \ddot{E}$;

$$i = 1, 2, \dots, N$$

更确切地说,三维模糊控制器是一个特殊的变结构自适应 PID 控制器,这是因为,随着控制过程进行中 E 的不同,相当于 PID 控制器的 3 个参数 K_{Fp} 、 K_{Fi} 、 K_{Fd} 不同,从而使控制器结构随着 E 的变化而自适应地发生变化。

5 三维模糊控制器的性能分析

(1) 稳态性能

由常规的 PID 分析可知:当系统模型已知时, PID 控制可达到稳态无误差,即 PID 控制在模型已知时具有优良的稳态性能。从三维模糊控制器的分析可知,三维模糊控制器相当于输入为 \dot{e} 的变参数的 PID 控制器。对于确定的对象,在实际控制中,由于模糊控制一般是应用于未知对象模型的情况下,从概率论的角度来讲,参数设置恰好使稳态时 $\dot{e}=0$ 的特殊情况, $e=0$ 为小概率事件,概率基本为零,因

而从这个角度上讲常规三维模糊控制器不可能从原理上消除静差,即三维模糊控制器仍然克服不了模糊控制的固有缺陷:稳态有静差。因而从某种程度上讲,通过增加模糊控制器的维数来达到消除模糊控制器的静差的方法是不可取的。

(2) 动态性能

由于三维模糊控制器可看作是一种输入为 \dot{e} 的变参数 PID 控制器,故随着过程的进行,三维模糊控制器的参数随过程进行的不同阶段发生相应变化,使其系统的动态性能要优于常规 PID 控制变参数的情况。且由于引入了变量 \ddot{e} ,考虑了物理量的加速度,使得三维模糊控制器的动态性能优于二维的模糊控制器,但其代价是三维模糊控制器的规则数是相同模糊分割的二维模糊控制器的 P 倍(P 为 \ddot{e} 的模糊子集数)。但是由于三维模糊控制器的变参数特性使之对对象的参数变化不敏感,也正是因为它的变参数特性和非线性本质,使得三维模糊控制器有很好的鲁棒性,且由于引入了 \ddot{e} ,使之能较好地抑制超调,三维模糊控制器的该性质可被开发而用于特殊的场合或特定的目的。

6 仿真实验

在该实验中,系统的输入信号为 $u=100$,取对象为 $G(s) = \frac{5e^{-0.5s}}{20s+1}$,则其额定滞为: $\tau = \frac{50}{20} = 2.5$ 。该对象在三维模糊控制(TDF)、PID 控制作用下的实验曲线如图 6—1 所示。

由实验可看出,在相同被控对象的情况下,三维模糊控制的动态性能优于 PID 控制,但其稳态性能和 PID 控制相比却存在着一个小的静差。

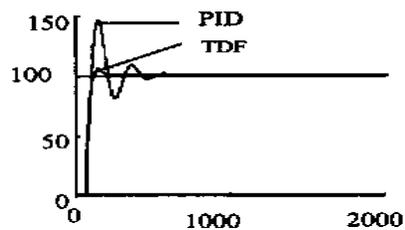


图 6—1 系统输出响应曲线

[参考文献]

- [1] 路兆梅,柏广昌,冷增详. 模糊控制系统的相平面分析[J]. 电气自动化. 1996, No. 6, P11-13.
- [2] 李锋,钱清泉. 模糊系统及其通用性[J]. 模糊系统与数学. 1998, Vol. 12, No. 1, P45-49.
- [3] 刘向杰,柴天佑,张焕水. 三维模糊控制器的结构研究[J]. 自动化学报. 1998, Vol. 24, No. 2, P230-234.