

文章编号 1000-5013(2005)01-0069-03

# 不同结构 PID 控制性能的分析 and 比较

郑义民 王永初

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** PID 控制器具有鲁棒性及人工智能性的特点, 广泛应用于工业过程自动化. 近 10 多年来在机电一类快速响应的非传统应用领域, 尤其普遍采用 PID 控制器, 并移植为人工智能控制器的基本结构模式. 文中分析 4 种典型的 PID 控制器, 研究其控制品质、参数整定及其控制模式的相互关系, 同时进行仿真试验和讨论.

**关键词** PID 控制器, 不完全微分型, 参数整定, 鲁棒性

**中图分类号** TP 273

**文献标识码** A

PID 控制经历 60 多年至今仍被广泛应用, 说明 PID 控制是有很强的生命力. 以往人们认为 PID 仅适用于慢过程控制, 但近一二十年来的电气传动, 机电工程都较普遍采用了 PID 控制. 大量的智能控制领域都应用 PID 控制的基本模式或算法, 如基于神经网络的 PID 控制器、基于模糊规律的 PID 控制, 基于遗传算法的自适应 PID 控制等. PID 控制器具有系统的鲁棒性与初步人工智能的特点, 且算式实现简单. PID 控制器的这些特点, 足以证明 PID 控制在当前及今后相当一段时间内的重要性.

## 1 PID 的几种典型结构算式

PID 有两种基本结构, 即完全微分型 PID 与不完全微分型 PID. 不完全微分型 PID 又有 3 种变异法. 完全微分型 PID 的传递函数为  $D(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$ . 不完全微分型 PID 的传递函数为

$$D_1(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d s}{r} + 1}), \quad (1)$$

$$D_2(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s}) (\frac{T_d s + 1}{\frac{T_d s}{r} + 1}), \quad (2)$$

$$D_3(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s + 1}{\frac{T_d s}{r} + 1}). \quad (3)$$

为了达到最优调节效果, PID 的调整参数  $K_p$  (比例增益)、 $T_d$  (微分时间)、 $T_i$  (积分时间), 以及微分增益  $r$  必须设置, 即进行系统参数整定. 当前许多控制手册, 如日本的《自动制御便览》, 中国的《电机工程手册》都可以查到 PID 的最优整定参数, 不少教材专著也均有这方面的介绍. 但能查到或看到的 PID 参数整定都是针对完全微分型 PID 控制的, 几乎很少提及式 (1) ~ (3) 不完全微分型 PID 参数的整定. 这就说明有关 PID 的参数整定还有一些问题值得研究.

这些不同类型的 PID 控制有什么差别, 也是正确认识 PID 控制的一个重要方面. 完全微分型 PID 与不完全微分型 PID, 主要差别是在微分作用方面. 完全微分型 PID 在阶跃输入的作用下, 其输出会发生突然跳动. 即  $u(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) e(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \frac{a}{s}$ , 以及

**收稿日期** 2004-02-23

**作者简介** 郑义民 (19-) , 男, 硕士研究生, 主要从事检测技术与自动化装置的研究. E-mail: zh\_even@sina.com

$$u(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{K_p a}{s} + \frac{a}{T_i} \cdot \frac{K_p}{s^2} + K_p T_d a \right] = K_p a + \frac{a K_p}{T_i} t + (t) \cdot K_p T_d a, \quad (4)$$

其中  $(t) = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}$  且  $\int_0^\infty (t) dt = 1$ . 由于  $(t)$  的存在, 使  $u(t)$  产生跳动, 同样由于  $(t)$  的存在使微分作用功能  $[ (t) \cdot K_p T_d a ]$  部分很快就消失. 这些都不利于微分作用的发挥. 相比之下, 不完全微分型 PID 却能较好发挥  $D$  的功能, 如式(1). 有  $u(s) = K_p (1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{r s + 1}) e(s)$ , 以及

$$u(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{K_p a}{s} + \frac{a K_p}{T_i s^2} + \frac{K_p T_d a}{r s + 1} \right\} = K_p a + \frac{a K_p}{T_i} t + r K_p a e^{-\frac{r}{T_d} t}. \quad (5)$$

式(5)与式(4)相比, 不包含  $(t)$  函数, 而包含指数衰减函数  $e^{-\frac{r}{T_d} t}$ . 这说明不完全微分型 PID 在阶跃输入信号作用下不会突跳, 而且其微分作用不会在短期内消失, 因此有利于微分作用的发挥<sup>[1]</sup>.

## 2 基于经典手册为基础的 PID 参数整定<sup>[2]</sup>

手册一般给出的 PID 参数整定是指完全微分型 PID 的参数整定, 如用临界振荡法. 关闭  $I$  与  $D$  的作用, 仅使  $P$  起作用, 调整  $K_p$  使系统出现等幅振荡, 记录此时的  $K_p$  (记为  $K_{ps}$ ) 及振荡周期 (记为  $T_s$ ),  $K_p$ ,  $T_i$  和  $T_d$  的最优整定参数为  $K_p = 0.6 K_{ps}$ ,  $T_i = 0.5 T_s$ ,  $T_d = 0.125 T_s$ . 除用临界振荡法外, 还有动态特性参数法、衰减曲线法<sup>[3]</sup>等多种的整定方法. 不完全微分型 PID 式(1)~(3)可写为  $D_i(s) = K_p (1 + \frac{1}{T_i s} +$

$T_d s) Q(s)$ ,  $i = 1, 2, 3$ . 这里,  $Q(s)$  为一阶低通滤波器,  $Q(s) = \frac{1}{\frac{T_d}{r} s + 1}$ . 如式(2), 有

$$D_2(s) = K_p (T_d s + 1 + \frac{T_d}{T_i} + \frac{1}{T_i s}) \cdot \frac{1}{\frac{T_d}{r} s + 1} = K_p F \left[ 1 + \frac{T_d}{F} s + \frac{1}{F T_i s} \right] Q(s) = K_p \left[ 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right] Q(s), \quad (6)$$

其中  $F = 1 + \frac{T_d}{T_i}$ ,  $K_p = K_p F$ ,  $T_d = \frac{T_d}{F}$ ,  $T_i = F T_i$ . 当  $r$  较大, 如  $r = 20$ ,  $Q(s) \approx 1$ , 则式(6)变成完全微分型

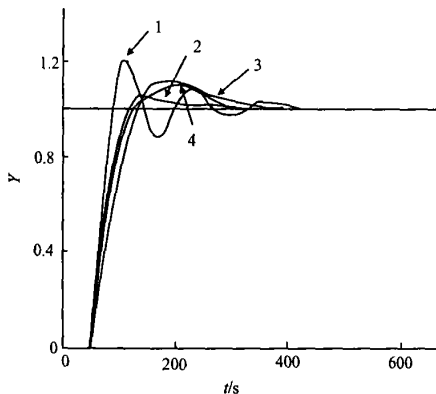
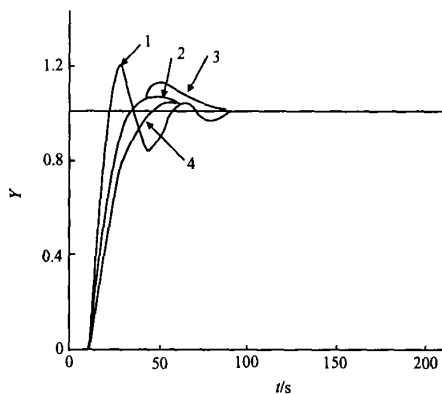
PID 算式. 其参数整定有如下关系  $K_p = K_p F$ ,  $T_i = F T_i$ ,  $T_d = \frac{T_d}{F}$ . 同样, 其它的算式也可通过上述方法求得参数整定关系. 表 1 是 3 种不同结构不完全微分型 PID 与完全微分型 PID 的参数整定关系通列表. 表中不完全微分型  $1$ ,  $2$ ,  $3$ , 分别代表式(1), (2), (3)的 3 种不完全微分型的式子.

表 1 参数整定关系通列表

完全微分型 PID	-	$K_p$	$T_i$	$T_d$
不完全微分型 PID	$F = 1 + \frac{T_d}{r T_i}$	$K_p = K_p F$	$T_i = F T_i$	$T_d = \frac{(1+r) T_d}{r F}$
不完全微分型 PID	$F = 1 + \frac{T_d}{T_i}$	$K_p = K_p F$	$T_i = F T_i$	$T_d = \frac{T_d}{F}$
不完全微分型 PID	$F = 2 + \frac{T_d}{r T_i}$	$K_p = K_p F$	$T_i = F T_i$	$T_d = \frac{(1+r) T_d}{r F}$

## 3 仿真试验

在这里分别用上面 4 种不同 PID 结构算法为例, 被控对象为工业上较难控制的典型一阶、二阶时滞系统, 其传递函数分别为  $G_1(s) = \frac{e^{-50s}}{40s + 1}$ ,  $G_2(s) = \frac{2e^{-10s}}{(5s + 1)(2.5s + 1)}$ . 采用完全微分时 PID 的参数由临界振荡法确定, 得出 PID 的 3 个参数分别为  $K_{p1} = 1.2$ ,  $T_{i1} = 75$ ,  $T_{d1} = 18.75$ ,  $K_{p2} = 0.465$ ,  $T_{i2} = 16$ ,  $T_{d2} = 4$ . 加上一阶低通滤波器后变成不完全微分型. 在仿真过程中取  $r = 20$ , 用上面的整定关系通列表可以得到 3 种不同的不完全微分型 PID 的参数. 在 MATLAB 里的仿真结果, 如图 1, 2 所示. 图中曲线 1, 2, 3, 4

图 1 对象为  $G_1(s)$  的阶跃响应图 2 对象为  $G_2(s)$  的阶跃响应

分别代表完全微分型 PID 和不完全微分型  $\pi$ 、 $\delta$ 、 $\delta\pi$ ，纵坐标为输出  $Y$ 。从图中可以看出，3 种的不完全微分型 PID 明显要比完全微分型 PID 的效果好的多。我们知道完全微分型 PID 算式的缺点是对微分作用响应过于灵敏，容易引起控制过程振荡，降低调节品质。使用不完全微分 PID 算法后，可以大大改善控制性能<sup>[4]</sup>。从图中还可以看出，3 种不完全微分型 PID 都减少了振荡频率，系统的调节时间要相对较短，而从超调量上看比完全微分型 PID 算法也要小。

## 4 结束语

通常，调节器应根据对象的特性、负荷变化、主要扰动和系统控制要求等具体情况来选择。例如，广义对象控制通道时间常数较大，应引入微分作用；工艺容许有残差时，可选用 PI；工艺要求无残差时，则选用 PID 控制<sup>[5]</sup>。完全微分型的 PID 算式中的微分作用只在第一个采样周期里起作用，而且作用很强；反之，不完全微分算式的输出在较长的时间内保持微分作用，因而可以获得较好的控制作用。

## 参 考 文 献

- 1 王永初. 自动调节系统工程设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1983. 232 ~ 249
- 2 程与仁, 王永初, 吕勇哉等. 电机工程手册: 第 9 册[M]. 上海:机械工业出版社, 1984. 50 ~ 119
- 3 金以慧. 过程控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1993. 57 ~ 58
- 4 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2003. 29 ~ 31
- 5 Hägglund T, Åström KJ. Revisiting the Ziegler-Nichols tuning rules for PI control[J]. Asian Journal of Control, 2002, 4(4): 364 ~ 380

## Analysing and Comparing the Performance of PID Controllers with Different Structures

Zheng Yimin      Wang Yongchu

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** PID controller has been widely applied to the automation of industrial process due to its robustness and artificial intelligence architecture. Since 1990, PID controller has been generally adopted by unconventional electromechanical field of fast response and has been transplanted to be the basic structural mode of controller with artificial intelligence. Four typical controllers are analysed here. The authors investigate the interrelationship of their control quality, parameter tuning; and carry on simulation test and discussion.

**Keywords** PID controller, incomplete differential form, parameter tuning, robustness