

PID 控制原理及参数整定方法^{*}

金 奇^{a, b}, 邓志杰^{a, b}

(兰州交通大学 a. 国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心;
b. 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 针对 PID 控制器参数的准确设定在实际应用中对控制效果的重要作用, 介绍了 PID 控制原理、模拟型和数字型 PID 控制器, 并详细分析了目前使用比较广泛的 3 种参数整定方法: 试凑法、经验数据法和扩充临界比例度法。

关 键 词: PID 控制; 参数整定; 过程控制

中图分类号: TP273⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-0924(2008)05-0091-04

PID Control Principle and Techniques of Parameter Tuning

JIN Qi^{a, b}, DENG Zhi-jie^{a, b}

(a. National Engineering Research Center of Green Coating Technology and Equipment;
b. Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligence Control,
Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The accurate setting of PID controller parameters plays an important role in the actual control effect. This paper introduces PID control principles, analogical and digital PID controllers, and analyzes the three methods widely used at present about parameter tuning of PID controllers: trial-and-error method, experience and data method, and extension critical proportion degree method.

Key words: PID control; parameter tuning; process control

在工程实际中, 应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制, 简称 PID 控制, 又称 PID 调节. PID 控制器问世至今已有近 70 年历史, 它以结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一。

1 PID 控制原理

当被控对象的结构和参数不能完全掌握或得

不到精确的数学模型, 控制理论的其他技术难以采用时, 系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定, 这时应用 PID 控制技术最为方便. 即使当我们不完全了解一个系统和被控对象, 或是不能通过有效的测量手段来获得系统参数时, 也适合采用 PID 控制技术. PID 控制器就是根据系统的误差, 利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的^[1-2]。

* 收稿日期: 2008-03-24

基金项目: 科技部支撑项目(2006BAE04B05-3)。

作者简介: 金奇(1981-), 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要从事真空镀膜设备控制系统的软件开发及测试研究。
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1.1 比例(P)控制

比例控制是一种最简单的控制方式,其控制器的输出与输入误差信号成比例关系.当仅有比例控制时,系统输出存在稳态误差(Steady-state error).

1.2 积分(I)控制

在积分控制中,控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系.对一个自动控制系统,如果在进入稳态后存在稳态误差,则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统(System with Steady-state Error).为了消除稳态误差,在控制器中必须引入“积分项”.积分项的误差取决于时间的积分,随着时间的增加,积分项误差会增大.这样,即便误差很小,积分项也会随着时间的增加而加大,它推动控制器的输出增大,使稳态误差进一步减小,直到等于零.因此,比例+积分(PI)控制器,可以使系统在进入稳态后无稳态误差.

1.3 微分(D)控制

在微分控制中,控制器的输出与输入误差信号的微分(即误差的变化率)成正比关系.自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳,原因是由于存在有较大惯性组件(环节)或有滞后(delay)组件,具有抑制误差的作用,其变化总是落后于误差的变化.解决的办法是使抑制误差的作用的变化“超前”,即在误差接近零时,抑制误差的作用就应该是零.这就是说,在控制器中仅引入“比例”项是不够的,比例项的作用仅是放大误差的幅值,而目前需要增加的是“微分项”,它能预测误差变化的趋势,这样,具有比例+微分的控制器,就能够提前使抑制误差的控制作用等于零,甚至为负值,从而避免了被控量的严重超调.所以对有较大惯性或滞后的被控对象,比例+微分(PD)控制器能改善系统在调节过程中的动态特性.

2 模拟型和数字型 PID 控制器

2.1 模拟 PID 控制器^[3-4]

模拟 PID 控制器的原理如图 1 所示,其中 $r(t)$ 为系统给定值, $c(t)$ 为实际输出, $u(t)$ 为控制量.

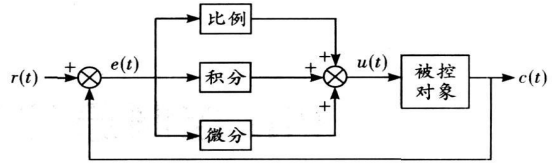


图 1 PID 控制结构框图

如图 1 所示,模拟 PID 控制器的数学表达式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

其中: $e(t)$ 为系统偏差量, $e(t) = r(t) - c(t)$; K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数.式(1)也可以整理变形为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

其中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数, $K_i = K_p / T_i$; K_d 为微分系数, $K_d = K_p T_d$.

2.2 数字 PID 控制器

计算机控制是一种离散的采样控制,在计算机控制系统中所使用的是数字 PID 控制器,而式(1)和式(2)均为模拟 PID 控制器的控制表达式.通过将模拟 PID 表达式中的积分、微分运算数值计算方法来逼近,便可实现数字 PID 控制,只要采样周期 T 取值足够小,这种逼近就可以相当精确.

将积分项用矩形和代替,微分项用差分代替,使模拟 PID 离散化为差分方程,可作如下近似:

$$\begin{aligned} u(t) &\approx u(k); \\ e(t) &\approx e(k); \\ \int_0^t e(t) dt &\approx \sum_{j=0}^k T e(j); \\ \frac{de(t)}{dt} &\approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T}; \end{aligned}$$

其中: T 为采样周期; k 为采样序号.使用这种近似方法,就可以得到 2 种标准的数字 PID 控制算法.

2.2.1 数字 PID 位置型控制算法

数学表达式为:

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] \quad (3)$$

可将式(3)整理变形为:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + \\ &K_d [e(k) - e(k-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $K_i = K_p / T_i$, $K_d = K_p T_d / T$.

2.2.2 数字 PID 增量型控制算法

根据式(4)可以推导出第 $k-1$ 时刻 PID 调节的表达式 $u(k-1)$, 即

$$u(k-1)=K_p e(k-1)+K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j)+K_d[e(k-1)-e(k-2)] \quad (5)$$

用式(4)减去式(5), 即得到数字 PID 增量型控制算法:

$$\begin{aligned} \Delta u &= u(k)-u(k-1)= \\ &K_p[e(k)-e(k-1)]+K_e(k)+ \\ &K_d[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $K_i=K_p/T_i$, $K_d=K_p T_d/T$.

3 PID 控制器参数的整定

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容, 也是最困难的部分. 它是根据被控过程的特性确定 PID 控制器的比例系数 K_p 、积分时间常数 T_i 和微分时间常数 T_d 的大小. PID 控制器参数整定的方法很多, 目前使用广泛的有 3 种^[9].

3.1 试凑法确定 PID 控制器参数

试凑法是根据控制器各参数对系统性能的影响程度, 边观察系统的运行, 边修改参数, 直到满意为止. 一般情况下, 增大比例系数 K_p 会加快系统的响应速度, 有利于减少静差. 但过大的比例系数会使系统有较大的超调, 并产生振荡使稳定性变差. 减小积分系数 K_i ($K_i=K_p/T_i$) 将减少积分作用, 有利于减少超调使系统稳定, 但系统消除静差的速度慢. 增加微分系数 K_d ($K_d=K_p T_d/T$) 有利于加快系统的响应, 是超调减少、稳定性增加, 但对干扰的抑制能力会减弱. 在使用试凑法时, 可根据以上参数对控制过程的影响趋势, 对参数实行先比例、后积分、再微分的步骤逐一进行整定.

1) 确定比例系数 K_p . 在确定比例系数 K_p 时, 首先去掉 PID 的积分项和微分项, 可以令 $T_i=0$, $T_d=0$, 使之成为纯比例调节. 输入设定为系统允许输出最大值的 60%~70%, 比例系数 K_p 由 0 开始逐渐增大, 直至系统出现振荡; 再反过来, 从此时的比例系数 K_p 逐渐减小, 直至系统振荡消失. 记录此时的比例系数 K_p , 设定 PID 的比例系数 K_p .

为当前值的 60%~70%.

2) 确定积分时间常数 T_i . 在比例系数 K_p 确定之后, 设定一个较大的积分时间常数 T_i , 然后逐渐减小 T_i , 直至系统出现振荡, 再反过来, 逐渐增大 T_i , 直至系统振荡消失. 记录此时的 T_i , 设定 PID 的积分时间常数 T_i 为当前值的 150%~180%.

3) 确定微分时间常数 T_d . 微分时间常数 T_d 一般不用设定, 取 0 即可, 此时 PID 调节转换为 PI 调节. 如果需要设定, 则与确定 K_p 的方法相同, 取其不振荡时值的 30%.

3.2 用经验数据法确定 PID 控制器参数

PID 控制器的参数整定不是唯一的, 事实上比例、积分和微分 3 部分的作用相互影响. 从应用的角度看, 只要被控对象主要指标达到设计要求即可. 为此根据长期的实践经验, 人们发现, 各种不同被控对象的 PID 参数都有一定的范围. 这就给现场调试提供了一个基准. 表 1 给出了几种常见被控量 PID 参数的经验数据, 仅供参考.

表 1 几种常见被控量 PID 参数的经验数据

物理量	特点	K_p	T_i/s	T_d/s
温度	对象有较大的滞后, 常用微分	1.6~5	180~600	30~180
液位	允许有静差, 也可用积分和微分	1.25~2.5		
压力	对象的滞后不大, 可用微分	1.4~3.5	25~180	
流量	时间常数小, 并有噪声, K_p 和 T_i 都较小, 不用微分	1.0~2.5	5~60	

3.3 扩充临界比例度法确定 PID 控制器参数

这种方法适用于有自平衡的被控对象, 是模拟系统中临界比例度法的扩充. 整定步骤为:

1) 选择一个足够短的采样周期 T . 在选取采样周期 T 时, 应使它远远小于系统阶跃响应的纯滞后时间和上升时间. 为使采样值能及时反映模拟量的变化, T 越小越好, 但是太小会增加 CPU 的

运算工作量, 相邻两次采样的差值几乎没什么变化, 所以也不宜将 T 取得过小.

2) 让系统作纯比例控制, 并逐渐缩小比例度 n ($n = 1/K_p$), 使系统产生临界振荡. 此时的比例度和振荡周期就是临界比例度 n 和临界振荡周期 T_k .

3) 选定控制度. 所谓控制度, 就是以模拟调节器为基准, 将系统的控制效果与模拟调节器的控制效果相比较, 其比值即控制度. 表 2 为扩充临界比例度法的参数整定.

表 2 扩充临界比例度法参数整定

控制度	控制规律	T	K_p	T_i	T_d
1.05	PI	$0.03 T_k$	$0.55 n$	$0.88 T_k$	
	PID	$0.014 T_k$	$0.63 n$	$0.49 T_k$	$0.14 T_k$
1.2	PI	$0.05 T_k$	$0.49 n$	$0.91 T_k$	
	PID	$0.044 T_k$	$0.47 n$	$0.47 T_k$	$0.16 T_k$
1.5	PI	$0.14 T_k$	$0.42 n$	$0.99 T_k$	
	PID	$0.09 T_k$	$0.34 n$	$0.43 T_k$	$0.20 T_k$

这样 4 个参数的整定问题就简化为一个参数 K_p 的整定问题了. 改变 K_p 值, 观察控制效果, 直到满意为止, 就可以确定 K_p 值.

综上所述, PID 控制器中参数 K_p , T_i , T_d 的取值对系统工作状态的影响作用可以简单概括为 3 点:

1) K_p 的影响. 比例控制能迅速产生与误差成正比的调节作用, 从而减少稳态误差. 但是, 比例控制不能消除稳态误差. K_p 的加大会引起系统的不稳定, 容易产生振荡, 使得调节时间延长. 相反, 若 K_p 太小会使系统动作缓慢, 灵敏度降低. 在系统稳定的情况下, 如果加大 K_p , 可提高控制精度, 减小误差.

2) T_i 的影响. 积分控制主要用于消除静差. T_i 太小, 积分作用强, 系统将不稳定; T_i 偏小, 振荡次数较多, 超调量较大; T_i 太大, 积分作用弱, 对

系统性能的影响减小; T_i 合适时, 过渡过程特性比较理想. 在系统稳定的情况下, T_i 太大时, 消除静差太慢; T_i 太小, 系统不稳定.

3) T_d 的影响. 微分控制可以根据误差变化的速度, 提前给出较大的调节作用. 微分部分反映了系统变化的趋势, 它较比例调节更为及时, 所以微分部分具有超前和预测的特点. 当 T_d 增大时, 超调量减少, 动态性能得到改善. 但当 T_d 太大时, 会引起过大的超调, 系统不稳; T_d 太小, 调节质量改善不大.

4 结 束 语

PID 控制器是整个控制系统的核心, 它的控制作用和参数对控制品质有着直接的影响. PID 控制器的参数整定方法很多, 以上介绍的参数整定方法, 只是其中比较具有代表性的方法, 可供有关工程技术人员在实际应用时借鉴参考. 笔者相信, 面对每一个工作对象, 每个工作者都可以摸索出一种最适合自己的实际控制方法及参数, 不拘一格, 开创属于自己的创新之路.

参考文献:

[1] 李华, 范多旺, 魏文军, 等. 计算机控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[2] 王树青. 工业过程控制工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[3] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[4] 朱麟章. 过程控制系统及设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

[5] 李少远, 王景成. 智能控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(责任编辑 陈 松)