

PID 参数整定方法分类与概述

段力学

(武汉理工大学计算机科学与技术学院, 武汉 430063)

摘要: PID 控制是迄今为止在过程控制中应用最为广泛的控制方法。从理论研究的角度上讲, 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,但在工程实践中, PID 参数复杂繁琐的整定过程一直困扰着工程技术人员,从工程角度将 PID 参数整定方法进行分类比较,以供工程技术人员参考借鉴。

关键词: PID 控制; 参数整定; 工程整定

0 引言

PID 控制是最早发展起来且目前在工业过程控制中依然是应用最为广泛的控制策略之一^[1],偏差由比例(Proportional)、积分(Integral)和微分(Derivative)综合控制,简称 PID 控制。Desborough 和 Miller 在 2002 年的一次统计报告中指出,目前在美国有超过 11600 个具有 PID 控制器结构的调节器广泛应用于工业控制领域中,有超过 97% 的反馈回路采用了 PID 控制算法^[2],甚至在一些复杂的控制方法中,其基本控制层采用的仍然是 PID 控制算法^[3]。这是因为 PID 控制器结构简单,易于实现且综合了关于系统过去(I)、现在(P)和未来(D)三方面的信息,对动态过程无需太多的预测知识,鲁棒性强,控制效果基本令人满意^[4]。

1 PID 控制基本原理

PID 控制器由比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)组成。在连续控制系统中, PID 控制器的输出与输入之间成比例、积分、微分的关系。如式(1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式(1)中 $e(t) = \text{Setpoint} - \text{Output}$, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, K_d 为微分增益。

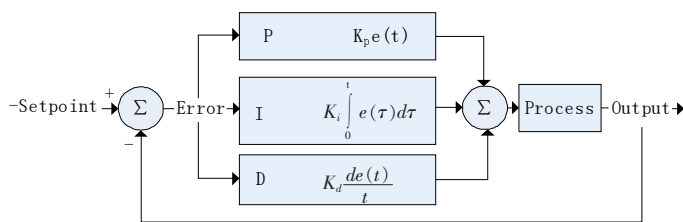


图 1 PID 控制系统原理方块图^[5]

2 参数整定方法分类

对 PID 参数整定方法的研究一直是控制领域很关注的,经过几十年的发展,很多方法都已经非常成熟且取得了广泛的应用。然而,如此之多的 PID 参数整定方法,在实际应用中如何选择才能得到更好的控制效果呢?有调查显示只有近 1/3 的 PID 控制器在实际应用过程中取得了令人满意的控制效果,也就是说有 2/3 的 PID 控制系统的控制性能达不到用户所期望的要求^[2]。这给控制理论研究和应用带来了前所未有的机遇和挑战。

Ziegler-Nichols Method 是最早的一种整定 PID 控制器、探索其控制参数的方法。从那以后就有许多技术被应用于 PID 控制器的手动和自动整定中。

收稿日期:2012-02-14 修稿日期:2012-03-03

作者简介:段力学(1984-),男,湖南冷水江人,硕士研究生,研究方向为嵌入式系统与应用

①根据研究方法的划分,可分为基于频域的 PID 参数整定方法和基于时域的 PID 参数整定方法。

②根据发展阶段的划分,可分为常规 PID 参数整定方法和智能 PID 参数整定方法。

③按照被控对象个数来划分,可分为单变量 PID 参数整定方法和多变量 PID 参数整定方法,前者包括现有大多数整定方法,后者是最近研究的热点及难点^[6]。

④按控制量的组合形式来划分,可分为线性 PID 参数整定方法和非线性 PID 参数整定方法,前者适用于经典 PID 调节器,后者适用于由非线性跟踪微分器和非线性组合方式生成的非线性 PID 控制器。

以上分类都是从理论方面考虑的,但 PID 参数复杂繁琐的整定过程一直困扰着工程技术人员,所以,研究 PID 参数整定技术就具有了十分重大的工程实践意义。在典型工业过程应用中,通常选择工程整定的方法。这些方法,不需要获得调节对象的准确动态特性,直接在闭合的调节回路中进行整定,方法简单、计算方便、容易掌握,适合在工程中实际应用。根据这一实践情况,可分为被控对象参数已知和被控对象参数未知两种情况。

2.1 被控对象参数已知情况下的 PID 参数整定法

(1) Ziegler-Nichols 方法

它是由 1940 年代早期两位泰勒仪器公司的工程师提出的,这个方法也因此以二人的名字命名^[7]。其调试方式为,首先将积分和微分增益设置为 0,然后比例增益从零开始逐渐增加,知道到达极限增益 K_u ,此时控制器输出值以恒定值振荡^[8]。被控对象大多可近似用一阶惯性加纯滞后环节来表示。

(2) ISTE 最优设定方法^[9]

ISTE 最优参数整定法是庄敏霞与 Atherton 针对各种指标函数得出了最优 PID 参数整定的算法,下面给出的最优性能指标通式:

$$J_n(\theta) = \int_0^{\infty} [t^n e(\theta, t)^2] dt \quad (2)$$

式中 $e(\theta, t)$ 为进入 PID 控制器的误差信号。

根据设定点信号的最优自整定算法,对式(2)中给出的最优指标,着重考虑三种情况: $n=0$,简记为 ISE (Integral Squared Error); $n=1$,简记为 ISTE 准则; $n=2$,简记为 IST2E 准则。

(3) 经验法

经验法又叫现场凑试法,即先确定一个调节器的参数值 K_p 和 K_i ,通过改变给定值对控制系统施加一个扰动,现场观察判断控制曲线形状。若曲线不够理想,可改变 K_p 或 K_i ,再画控制过程曲线,经反复凑试直到控制系统符合动态过程品质要求为止,这时的 K_p 和 K_i 就是最佳值。如果调节器是 PID 三作用式,那么要在整定好的 K_p 和 K_i 的基础上加进微分作用。由于微分作用有抵制偏差变化的能力,所以确定一个 K_d 值后,可把整定好的 K_p 和 K_i 值减小一点再进行现场凑试,直到 K_p 、 K_i 和 K_d 得最佳值为止。显然用经验法整定的参数是准确的,但花时间较多。现场凑试法作为一种经验是有许多注意事项和技巧的,可以查阅相关的工程资料,参照在实际运行中的同类控制系统的参数值,使确定的初始参数尽量接近整定的理想值。

2.2 被控对象参数未知情况下的 PID 参数整定法

(1) 辨识法

通常采用模型参考自适应策略,这类方法的本质是自适应控制理论与系统辨识的结合。为解决被控对象模型获取问题,Kalman 首先将系统辨识的方法引入了控制领域。辨识法适用于模型结构已知,模型参数未知的对象,采用系统辨识的方法得到过程模型参数,并和依据参数估计值进行参数调整的确定性等价控制规律结合起来,综合出所需的控制器参数;如果被控过程特性发生了变化,可以通过最优化某一性能指标或期望的闭环特性,周期性地更新控制器参数。

在获得对象模型的基础上设计 PID 参数时常用的原理,经典的有极点配置原理、零极点相消原理、幅相裕度法^[10]等;现代的则往往借助于计算机,利用最优化方法或线性二次型指标等,寻找在某个性能指标下的控制器参数最优值。

(2) 开环阶跃响应曲线法

获得被控对象的开环阶跃响应曲线方法可以通过两种途径来实现 PID 参数的整定。

①通过被控对象的开环阶跃响应曲线识别被控对象参数,其主要策略是切线法和交叉两点法。

②通过获得被控对象的阶跃响应曲线的特征参数实现 PID 参数的整定。主要的方法是基于总和与时间常数的整定法^[11]。

(3) 闭环测试法

通过对被控对象进行闭环测试实现 PID 参数的整

定,大致有三种方法:获得闭环等幅振荡;获得闭环衰减振荡;获得闭环阶跃响应的瞬时值。对于方法一,获得被控对象的闭环等幅振荡之后,也有两种途径来整定 PID 参数。通过闭环等幅振荡识别被控对象参数和通过闭环等幅振荡直接整定 PID 参数^[9],后一种也被称为临界比例度法或者临界灵敏度法。方法二通常是用开环与闭环实验相结合的方法,利用被控对象的衰减振荡识别被控对象参数。方法三是从 PID 控制器和被控对象组成闭环系统的频率特性出发,指定在大频率范围内使幅频特性等于 1,根据测量得到的阶跃响应瞬时值去计算 PID 控制器的参数值,这种方法也被称为基于增益优化的整定法^[12]。

为了更好地描述这种 PID 整定法分类,图 2 将给我们一个直观而全面的映像。

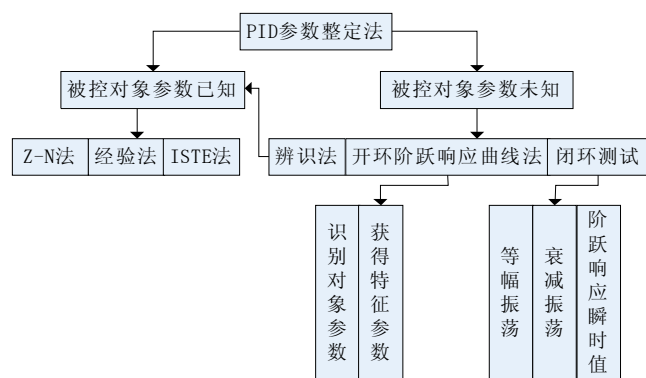


图 2 PID 整定法分类图

正如上文所述,在参数未知的情况下,通常的整定法不外乎两种,一种是辨识被控对象的参数,另一种是获得被控对象的特征参数。如果可以将被控对象辨识得很准确,那自然就可以获得很理想的 PID 参数,但辨识对象是一个复杂繁琐的过程,而且提高辨识精度并不是一件容易的事情,智能控制出现之后,研究人员将智能控制和对象辨识结合应用而生的智能 PID 整定法,取得了很好的效果。相对辨识被控对象而言,获得被控对象的特征参数就简单一些,只需要获得这些特征的参数就可以进行 PID 参数的整定。

未知被控对象参数的情况下进行 PID 参数的整定,总是要经过两个过程,一是测试阶段,或者是辨识被控对象的过程,又或者是获得被控对象特征参数的

过程;另一个阶段是调节阶段,就是说将整定好的 PID 参数带入到系统中。传统的 PID 整定法都是将这两个阶段分离开来,先测试,再整定,这也就是所谓的离线整定随着工业的不断发展,对 PID 参数在线自整定的要求越来越迫切。现在,通常是要求将测试和调节两个阶段通过一个自动的切换结合在一起,测试一定的时间之后,获得足够的信息,就马上切换到整定状态。

3 结 语

从理论研究的角度上讲,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,但在工程实践中仍存在许多问题,例如稳定性分析,控制器参数整定,输入、输出约束问题,所以本文也是基于工程角度来行文的。在理论研究,特别在应用方面,国内与国外差距明显。Yokogawa 电气和 Fuji 电气的温度控制器,它们把模糊逻辑与标准的 PID 控制集成在一起抑制超调,取得了成功。而国内重复研究的多,创造性研究的少,停留于仿真成果的多,能够在工程上应用的少,尤其是运行时间较长的智能 PID 控制器可以说微乎其微。这一状况需要广大理论工作者和工程技术人员共同努力,尽快转变这一局面。

PID 控制受到广泛重视,和智能控制等方法结合,形成新一轮的研究热潮。国际著名学术刊物 Control Engineering Practice 和 IEEE Control Systems Magazine 分别于 2001 和 2006 年出版了 PID 控制特辑。2000 年,IFAC 数字控制工作组在西班牙 Terrassa 举行了专题为“Past, Present and Future of PID Control”的 PID 控制学术会议。2012 年 3 月 IFAC 将在意大利的 Brescia 举行“The IFAC Conference on Advances in PID Controllers”,时隔 12 年,PID 控制在飞速发展,这次会议旨在组织在该领域有研究的学术界和工业界的专家,以呈现 PID 控制最近的研究发展状况,除了提供当前状况,会议还将提供一个全新的视角——PID 控制器在未来工业领域的需求和应用。

参考文献

- [1]Astrom K J, Hangglund T, Hang C C, HO W K. Automatic Tuning and Adaptation for PID Controllers—A Survey[J]. Control Engineering Practice, 1993, (1): 699~714
- [2]Desborough L, Miller R. Increasing Customer Value of In-

- dustrial Control Performance Monitoring-Honeywell's Experience[C]. Proceedings of the 6th International Conference on Chemical Process Control,2002:172~192
- [3]Wendell S.R.Take Control of PID Tuning[J]. Plant Engineering,2005,59(9):57~60
- [4]Hang,C C,WK Ho,LS Cao. A Comparison of Two Design Methods for PID Controllers[J]. ISA TRANS,1994,33 (2):147~151
- [5]<http://zh.wikipedia.org/wiki/File:Pid-feedback-ncf-int-correct.png>
- [6]何颖,鹿蕾,赵争鸣. PID 参数自整定方法概述[J]. 现代电子技术,2004(24):21~23
- [7]Terry Bartelt.工业控制电子学(设备系统与应用)(第2版)[M]. 清华大学出版社,2005
- [8]Ziegler, J.G, Nichols, N.B.. Optimum Settings for Automatic Controllers,Transactions of the ASME,64.1942: 759~768
- [9]黄友锐,曲立国. PID 控制器参数整定与实现[M]. 科学出版社,2010
- [10]Hang, C C, WK Ho,L S Cao. Getting More Phase Margin and Performance Out of PID Controllers[J]. Automatica,1999, 35:1579~1585
- [11]Udo Kuln. Ein praxisnahe Einstellregel fuer PID-Regler:Die T-Summen-Regel. Automatisier Umgste Chmische Praxis, 1995,37(5)
- [12]蔡自兴. 智能控制原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2007

Category and Summarization of PID Parameters Tuning Methods

DUAN Li-xue

(School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

Abstract: PID control is the most common control method used in process control. From the view of theoretical point, PID control system's design, analysis and synthesis have formed a relatively complete system. But in engineering practice, the complicated process of the PID parameters tuning has perplexed engineers and technicians. Gives a brief category and summary from the view of engineering point, and engineers and technicians can refer to it.

Keywords: PID Control; Parameter Tuning; Engineering Tuning