

PID控制器参数整定 方法及应用

杨平 邓亮 徐春梅 李芹 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

PID控制器参数整定

方法及应用

杨平 邓亮 徐春梅 李芹 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书遵循合理性、通用性和工程实用性的原则提出了PID控制器参数整定方法的五分类方案；分析了两类7种PID控制器参数整定常用方法并指出其应用局限性；给出了被控过程的分类模型（可涵盖42种常见传递函数模型）及高阶模型等效简化方法；提出了依据MCP标准传递函数推导MCP-PID控制器参数整定公式的方法并针对34种被控模型分别推导P、PI、PID和PD控制器的MCP-PID控制器参数整定公式，共推导出104套有效公式。本书所提出的PID整定方法适用范围基本覆盖了常见的被控过程模型类型。除了可适用传统的单容时滞模型和单容积分模型以外，还可适用双容、三容、多容、振荡、右零点、超前，以及各种组合类型的模型。本书已用2个实际试验案例和10个仿真试验案例验证了所提方法的有效性和优越性。

本书适合于从事控制理论和应用技术研究的学者和相关专业的学生参考，也适合于从事自动化行业的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

PID控制器参数整定方法及应用/杨平等著. —北京:
中国电力出版社, 2016.10

ISBN 978-7-5123-9864-1

I. ①P… II. ①杨… III. ①PID控制-参数整定-研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第240600号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年10月第一版 2016年10月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 9.5印张 229千字

定价 38.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前言

常用的PID控制器参数整定方法在专业教材和科技书中都有介绍,但是这些常用方法在实际中应用的局限性却很少有人指出。编者在多年的专业教学和科研活动中逐渐地增强了这种意识。当面对一个双积分模型描述的被控过程的PID控制器参数整定问题时,会发现常用的PID控制器参数整定4:1衰减比振荡试验整定法无法应用。因为,无论把比例控制增益设得多么小,都得不到4:1衰减比振荡的闭环响应,只能得到等幅振荡的闭环响应。当面对一个振荡特性模型描述的被控过程的PID控制器参数整定问题时,会发现常用的PID控制器参数整定ZN法无法应用,因为,ZN法只适用于单容时滞过程。即便是面对一个最简单的单容惯性过程的PID控制器参数整定问题,也会发现PID控制器参数整定ZN法无法应用,因为ZN法不适用于零时滞过程。当试图用教科书都有介绍的PID控制器参数整定方法去解决有零点的过程、不稳定的过程或是非最小相位过程时,同样会发现这些方法不可行。事实就是常用的PID控制器参数整定方法并不能完全地解决常见的被控过程的PID控制器参数整定问题。本书的出版正是为了弥补这种缺憾。

已查阅到的关于PID控制器参数整定方法的研究文献虽然不少,但是主要集中在基于被控过程数学模型方法、基于被控过程动态响应特征方法和基于闭环控制响应特征方法这三种类型上。

近年来基于智能优化算法方法类型的研究文献出现较多，不过由于这类方法只针对具体的被控过程，其研究成果缺乏普适性意义。目前关于基于标准传递函数方法类型的 PID 控制器参数整定方法的研究文献却非常少，或许是因为应用标准传递函数推导 PID 控制器参数整定公式的好处还少有人知。本书的研究成果将表明基于标准传递函数的 PID 控制器参数整定方法与其他类型方法相比有三个优点：建立 PID 控制器参数整定公式非常简捷、所整定的系统控制品质较为优越、能够适用于多种被控过程类型。因为基于标准传递函数的方法不需要大量的优化仿真试验，也不需要专家的长期实践经验，只要知道被控过程模型和已有的标准传递函数就可以通过联立方程进行数学推导的简捷方式来建立 PID 控制器参数整定公式。由于标准传递函数本身具有最优的控制系统性能，因此基于标准传递函数方法所整定的系统控制品质的最优性就能得到基本保证，尤其是新提出的多容惯性（MCP）标准传递函数比传统的 ITAE 标准传递函数更优越，因为它具有无超调、无阶数限制、无型次限制和高鲁棒性的特性。因此，用（MCP）标准传递函数方法推导出的 PID 参数整定公式应用于多种被控过程类型的 PID 控制系统将自然有了超调小和鲁棒性高的特性。

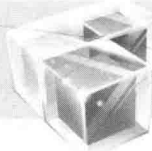
本书针对 34 种被控模型分别推导 P、PI、PID 和 PD 控制器的 MCP-PID 控制器参数整定公式，共推导出 104 套有效公式。相比于传统的 ZN 法针对 2 种模型所得到的 6 套公式而言，已经是大大地扩展了 PID 整定公式的适用领域。一方面是本书增添了 PD 型控制器的整定公式；另一方面是本书将 PID 整定公式适

用的被控过程模型类型范围几乎覆盖了常见的被控过程模型类型。除了传统的单容时滞模型和单容积分模型以外，还增加了双容、三容、多容、振荡、右零点、超前，以及各种组合类型的模型。本书已用 2 个实际试验案例和 10 个仿真试验案例验证了所提出的 MCP - PID 控制器参数整定公式的有效性和优越性。

由于编者水平所限，书中难免存在缺点和不足，欢迎广大读者批评指正。

杨 平

2016 年 6 月



前言

1 概述 1

1.1 PID控制器的发明及发展历程/1

1.2 PID控制器参数整定方法研究综述/3

1.2.1 基于被控过程数学模型的PID控制器参数整定方法研究/4

1.2.2 基于被控过程动态响应特征的PID控制器参数整定方法研究/5

1.2.3 基于闭环控制响应特征的PID控制器参数整定方法研究/6

1.2.4 基于智能优化算法的PID控制器参数整定方法研究/6

1.2.5 基于标准传递函数的PID控制器参数整定方法研究/7

2 PID控制器及常用参数整定方法 9

2.1 PID控制器结构/9

2.2 PID控制器参数整定常用方法/13

2.2.1 基于被控过程模型的PID控制器参数整定工程计算方法/14

2.2.2 基于闭环控制试验的PID控制器参数整定工程计算方法/18

2.3 PID控制器参数整定常用方法的局限性/20

3 被控过程模型类型和等效简化方法 22

3.1 基本特性模型/22

3.2 比例特性和时滞特性模型/23

3.3 惯性特性模型/24

- 3.4 含超前因子特性模型/24
- 3.5 积分特性模型/25
- 3.6 微分特性模型/26
- 3.7 振荡特性模型/27
- 3.8 右零点(非最小相位)特性模型/27
- 3.9 高阶多容惯性模型的等效简化方法/28

4 MCP标准传递函数理论简述

34

- 4.1 MCP标准传递函数的构建/34
- 4.2 MCP标准传递函数的特性分析/40
 - 4.2.1 MCP标准传递函数的无超调特性/40
 - 4.2.2 MCP标准传递函数的无系统型次限制特性/46
 - 4.2.3 MCP标准传递函数的无系统阶数限制特性/47
 - 4.2.4 MCP标准传递函数的高鲁棒性/47
 - 4.2.5 MCP标准传递函数的典型动态响应/49
- 4.3 惯性单元时间和调整时间的函数关系/53

5 MCP-PID控制器及参数整定基本方法

56

- 5.1 MCP-PID控制器参数整定公式的推导方法/57
- 5.2 惯性单元时间参变量型PID参数整定公式/60
- 5.3 调整时间参变量型PID参数整定公式/60
- 5.4 无参变量型PID参数整定公式/62

6 惯性特性及惯性时滞特性过程的PID参数整定

63

- 6.1 惯性特性及惯性时滞特性过程的PID参数整定公式推导/63
 - 6.1.1 单容惯性过程(C1)/63
 - 6.1.2 双容惯性过程(C2)/66
 - 6.1.3 三容惯性过程(C3)/71

- 6.1.4 单容时滞过程 (C1Dy)/77
- 6.1.5 双容时滞过程 (C2Dy)/83
- 6.1.6 多容惯性过程 (Cn)/89
- 6.1.7 多容时滞过程 (CnDy)/94
- 6.2 惯性特性及惯性时滞特性过程的PID参数整定公式及适用条件/98
- 6.3 惯性特性及惯性时滞特性过程的PID参数整定应用案例/103
 - 6.3.1 永磁同步电动机电流环 MCP-PI 控制案例/103
 - 6.3.2 双容时滞过程的 MCP-PID 控制案例/106
 - 6.3.3 过热汽温串级 MCP-PID 控制案例/113
 - 6.3.4 直流电动机转速的 MCP-PID 控制案例/119

7 积分特性及积分时滞特性过程的PID参数整定

126

- 7.1 积分特性及积分时滞特性过程的PID参数整定公式推导/126
 - 7.1.1 积分过程 (I)/126
 - 7.1.2 单容积分过程 (C1I)/128
 - 7.1.3 双容积分过程 (C2I)/132
 - 7.1.4 三容积分过程 (C3I)/137
 - 7.1.5 双积分过程 (I2)/143
 - 7.1.6 时滞积分过程 (DyI)/145
 - 7.1.7 单容时滞积分过程 (C1DyI)/150
 - 7.1.8 双容时滞积分过程 (C2DyI)/155
 - 7.1.9 多容积分过程 (CnI)/161
 - 7.1.10 多容时滞积分过程 (CnDyI)/164
- 7.2 积分特性及积分时滞特性过程的PID参数整定公式及适用条件/167
- 7.3 积分特性及积分时滞特性过程的PID参数整定应用案例/173
 - 7.3.1 核电站蒸汽发生器水位过程的 MCP-PID 控制案例/173
 - 7.3.2 倒立摆位移过程的 MCP-PID 控制案例/175

- 8.1 微分特性过程的PID参数整定公式推导/179
 - 8.1.1 单容微分过程 (C1D) /179
 - 8.1.2 双容微分过程 (C2D) /181
 - 8.1.3 三容微分过程 (C3D) /184
 - 8.1.4 二阶通用微分过程 (G2D) /189
 - 8.1.5 三阶通用微分过程 (G3D) /192
- 8.2 微分特性过程的PID参数整定公式的适用条件/197
- 8.3 案例: 300MW 单元机组汽轮机功率过程的MCP-PID控制/200

- 9.1 含超前因子特性过程的PID参数整定公式推导/202
 - 9.1.1 单容含超前因子过程 (C1L) /202
 - 9.1.2 双容含超前因子过程 (C2L) /204
 - 9.1.3 三容含超前因子过程 (C3L) /207
 - 9.1.4 二阶通用含超前因子过程 (G2L) /213
 - 9.1.5 三阶通用含超前因子过程 (G3L) /216
- 9.2 含超前因子特性过程的PID参数整定公式的适用条件/221
- 9.3 案例: 检定炉温度过程的MCP-PID控制/224

- 10.1 振荡特性过程的PID参数整定公式推导/226
 - 10.1.1 二阶振荡特性过程 (O2) /226
 - 10.1.2 含振荡特性的三阶过程 (O3) /231
- 10.2 振荡特性过程的PID参数整定公式的适用条件/236

- 10.3 案例：具有弹性负载的电液位置伺服过程的 MCP-PID 控制/238

11 右零点(非最小相位)特性过程的PID参数整定 240

- 11.1 右零点(非最小相位)特性过程的PID参数整定公式推导/240
- 11.1.1 单容右零点过程(C1N)/240
 - 11.1.2 双容右零点过程(C2N)/242
 - 11.1.3 三容右零点过程(C3N)/246
 - 11.1.4 二阶通用右零点过程(G2N)/252
 - 11.1.5 三阶通用右零点过程(G3N)/256
- 11.2 右零点(非最小相位)特性过程的PID参数整定公式的适用条件/261
- 11.3 案例：磁悬浮列车空气隙过程的MCP-PID控制/264

12 MCP-PID控制器参数整定实际应用案例 266

- 12.1 管式检定炉炉温MCP-PID实时控制/266
- 12.1.1 管式检定炉数学模型/267
 - 12.1.2 PID整定参数计算/269
 - 12.1.3 检定炉温度控制仿真试验/270
 - 12.1.4 检定炉MCP-PID温度实时控制试验/270
- 12.2 单容水箱水位MCP-PID实时控制/272
- 12.2.1 单容水箱水位数学模型/272
 - 12.2.2 PID整定参数计算/274
 - 12.2.3 单容水箱水位控制仿真试验/274
 - 12.2.4 单容水箱水位MCP-PID实时控制试验/275

13 结论与展望 277

- 13.1 结论/277

- 13.1.1 PID 参数整定方法的五分类方案/277
- 13.1.2 常用 PID 参数整定方法的局限性/278
- 13.1.3 被控过程的分类模型及高阶模型等效简化方法/278
- 13.1.4 MCP 标准传递函数的定义和特征/279
- 13.1.5 MCP-PID 控制器参数整定公式类型及推导方法/279
- 13.1.6 针对 34 种被控模型的 136 套 MCP-PID 控制器参数整定公式推导/281
- 13.1.7 MCP-PID 控制器的实际应用案例/281
- 13.2 展望/282

参考文献/284

后记/290

概 述

著名学者 Astrom 曾指出^[1]：“在过程控制应用领域，95% 的控制器是 PID 类型的控制器”。这表明了 PID 控制器在过程控制应用领域中的统治地位。另一方面，控制工程师都知道，PID 控制系统的控制品质优劣取决于 PID 控制器的参数整定。最佳的 PID 控制器参数整定工作将能保证控制系统具有优秀的控制品质。因此，PID 控制器参数整定的方法和应用技术已成为确保过程控制系统优良品质的关键技术。

PID 控制器的出现已有 80 多年的历史，但是依旧展示着强大的生命力。尽管新的控制器的发明不断涌现，但是都难在实际工程应用领域与 PID 控制器相抗衡。关于 PID 控制器参数整定的研究文献还在不断涌现。许许多多新方法和新技术正被用来发展和完善 PID 控制器参数整定的理论和应用技术。

1.1 PID 控制器的发明及发展历程

PID 控制器是在 1900~1940 年间被逐渐地发明的^[2]。1907 年美国 C. J. Tagliabue 公司发明了一台气动比例温度控制器。1929 年，Leeds&Northrup 公司生产了电子机械式 PI 控制器。1939 年，Taylor 仪器公司发明一台具有微分作用的控制器，这

就是完整的PID控制器。然而，PID控制器的发明专利却是由英国人 Albert Callender 和 Allan Stevenson 于 1935 年在英国首先申请，后来又在 1939 年获得美国专利的。

PID控制器的实现机理也随时间与俱进^[2]。1933年，Taylor 公司生产出气动比例调节器。1940年，Taylor 公司生产出气动PID调节器。1951年，Swartwout 公司生产出用真空电子管的电子PID调节器。1959年，Bailey Meter 公司生产出全固态电子PID调节器。1975年，Process System 公司生产出基于微处理器的PID调节器。

在我国，PID控制器的实现方式也是随时代的发展而发展^[3]。从20世纪60年代起，电动单元组合式仪表（DDZ型）和气动单元组合式仪表（QDZ型）是PID控制器的用于实际过程控制的主要实现设备。电动单元组合式仪表从DDZ-I型开始，发展到DDZ-II型（统一信号制为0~10mA）时最为成熟，曾经是工业控制的最主流的产品。以后，又发展到DDZ-III型（统一信号制为4~20mA）。从20世纪80年代起，电动单元组合式仪表逐渐被电子组装式仪表、数字式仪表和微处理器式仪表所取代。现在的PID控制器的实现硬件，对于大型系统已是以PLC、DCS和FCS设备为主；而对于小型系统则是以智能型仪表或专用仪表为主。

关于PID控制器的结构，一直有研究发展，除了基本结构以外，还出现许多变化。

首先是数字PID控制器出现后，许多人喜欢用并联的独立作用的PID结构，这时PID控制器参数改用 K_p 、 K_i 和 K_d 表示。其实，PID控制作用并没有变化。而且 K_p 、 K_i 和 K_d 的表示不如 K_p 、 T_i 和 T_d 的表示更科学、更有物理意义和更便于参数整定。

第二，为了有针对性地改善控制系统性能而改变了PID控制

器的基本结构^[4]。例如,为避免设定值阶跃冲击带来的过大超调量的PI-D(微分先行)结构或I-PD(比例微分先行)结构;为调节性能和跟踪性能俱佳的双自由度PID结构。对这些结构有变的PID控制器进行参数整定时,一般是简化为基本结构的PID控制器后再处理。

第三,许多新原理的先进控制器与PID控制器相结合而产生了新的、较复杂的新型PID结构^[5],例如自适应PID、自校正PID、智能PID、模糊PID、神经网络PID、预测PID、内模PID等。这些与新原理结合的PID从本质上已不是原来的PID,所以其参数整定已不能参照基本PID的方法。所以,本书后述部分将不再论及这类与新原理结合的PID的参数整定问题。

1.2 PID 控制器参数整定方法研究综述

PID控制器自发明并广泛应用后,关于PID控制器参数整定问题的研究一直没有中断过。关于PID控制器参数整定方法的分类,已出现多种说法。

文献[6](王伟2000)提出,把PID控制器参数整定方法分为两类:基于模型方法(ZN法、继电反馈、PM)和基于规则方法(控制响应时域特征、控制响应频域特征)。文献[7](杨智2005)提出,把PID控制器参数整定方法分为三类:非模型方法、非参数模型方法和参数模型方法。文献[8](周宝林2001)提出,把PID控制器参数整定方法分为三类:传统整定方法(临界比例度法、衰减曲线法、动态特性法、ZN公式法)、最优整定方法(ISE、IAE、ISTE、ITAE)和智能整定方法(专家智能PID、模糊推理PID、遗传算法PID)。文献[9](刘镇1997)提出,把PID控制器参数整定方法分为五类:①基于对象参数辨识方法(阶跃响应建模后用ZN、CC、Lopez公式);②抽取过程对象输出响应特征值方法(临界比例度法、继电反馈法);

③参数优化方法；④基于模式识别的专家系统方法；⑤基于控制器自身控制行为方法（模糊整定、神经网络整定）。文献 [10]（李剑 2001）提出，把 PID 控制器参数整定方法分为两类：常规 PID 方法（ZN 法、临界灵敏度法、继电反馈、PM）和智能 PID 方法（神经网络的学习、IMC - PID、模糊 PID、遗传算法 PID）。

仔细分析上述五种关于 PID 控制器参数整定方法的分类方法，不难发现其共性和个性特征。不妨从五种分类方法的相异特征点分析开始。文献 [9] 提出的“基于控制器自身控制行为”一类比较独特，它是指模糊自整定 PID 一类，但是仔细分析模糊自整定 PID 的工作原理后却发现，其自整定并非一般所论的自整定。模糊自整定 PID 实际上是一种按照某种特定的非线性函数关系在线依据误差量调整 PID 参数的控制器。由于这种在线参数调整机理的存在，其控制规律已不是线性 PID 控制规律，其自整定结果并不是一套最优 PID 参数。所以，模糊自整定 PID 控制器应当不属于 PID 控制器之列；自然也不应有“基于控制器自身控制行为”分类方法。类似的分析还可用于文献 [10] 所提出的“智能 PID”分类。因为“智能 PID”的控制规律已不是线性 PID 控制规律，所以神经网络 PID 和 IMC - PID 控制器同样也不能算作 PID 控制器了，从而也没必要划分 PID 控制器参数整定方法的“智能 PID”分类。

从合理性、通用性和工程实用性出发，本书将采用以下 PID 控制器参数整定方法的五分类方案：基于被控过程数学模型方法、基于被控过程动态响应特征方法、基于闭环控制响应特征方法、基于智能优化算法方法和基于标准传递函数方法。

1.2.1 基于被控过程数学模型的 PID 控制器参数整定方法研究

PID 控制器参数整定方法中基于被控过程数学模型的方法是最基本和最传统的方法。被控过程数学模型一般用传递函数或微

分方程表示，正是属于参数模型一类。

用于PID控制器参数整定的被控过程数学模型，最常见的就是单容时滞模型和积分时滞模型。最早提出的PID控制器参数整定开环ZN法^[11]（Ziegler, Nichols, 1942）也是针对这两类模型。人们在应用针对单容时滞模型的开环ZN法时发现，在时延时间和惯性时间之比 $\left(\frac{\tau}{T}\right)$ 较大时会出现控制品质下降的问题。于是有了PID控制器参数整定CC法^[12]（Cohen, Coon, 1953）提出。ZN法和CC法均是以四分之一衰减比的衰减振荡响应为优化目标，结合人工经验设计的。针对使控制系统的调节性能和跟踪性能均佳的优化目标，又有了改进型ZN法：R-ZN法^[13]（Hang, 1991）。不过R-ZN法应用时，PID控制器引入了设定值加权计算，PID控制器结构有变化。

针对ZN法的改进研究还有很多。例如，采用积分型性能指标为优化函数的方法^[14]（Zhuang, 1993），针对不稳定被控过程模型的方法^[15]等。

1.2.2 基于被控过程动态响应特征的PID控制器参数整定方法研究

基于被控过程动态响应特征的PID控制器参数整定方法其实可以与基于被控过程数学模型的方法归为一类。因为，知道了被控过程动态响应特征量后，很容易换算出相应的数学模型参数，从而得到被控过程数学模型。不过，强调工程实用性时，直接根据被控过程动态响应特征量做PID控制器参数整定计算的方法更受欢迎。事实上，开环ZN法也可以看成基于被控过程动态响应特征的PID控制器参数整定方法。因为，它的基本陈述是：先从被控过程的阶跃响应曲线上用图解法提取出 K 、 T 、 τ （ K 为增益； T 为时间常数； τ 为时延时间），再按整定公式计算PID控制器参数。这种方法是从被控过程的阶跃响应曲线出发的，如果把 K 、 T 、 τ 看成是被控过程动态响应特征量，那就理应当是基