




陶永华 尹怡欣 葛芦生 编著

新型 PID 控制 及其应用



电气自动化
新技术
丛书



机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

新型 PID 控制及其应用

陶永华 尹怡欣 葛芦生 编著



机械工业出版社

7/10/02

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一，但应用常规 PID 控制器对于具有非线性、时变不确定性的系统，无法达到理想的控制效果。随着现代控制理论，诸如智能控制等技术的研究发展，出现了许多新型 PID 控制器，为解决复杂无规则系统的控制开辟了新途径。

本书在介绍数字 PID 控制的基础上，分别阐述了自适应 PID 控制、智能 PID 控制、模糊 PID 控制、神经网络 PID 控制、预测 PID 控制和 PID 控制器自整定技术。在介绍这些控制时都附有应用实例。

本书适宜于从事生产过程自动化、计算机应用和电气自动化领域的工程技术人员阅读，也可作为大专院校自动化等相关专业的教材和教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型 PID 控制及其应用/陶永华等编著. —北京: 机械工业出版社, 1998.9

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-06299-X

I. 新… II. 陶… III. PID 控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 12828 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 版式设计: 张世琴 责任校对: 罗凤书

封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·9.125 印张·234 千字

0 001—4 000 册

定价: 18.50 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东

委 员：(以姓氏笔划为序)

王 炎 王文瑞 王正元

刘宗富 孙 明 孙武贞

孙流芳 过孝瑚 许宏纲

朱稚清 夏德铃 陈伯时

陈敏逊 李永东 李序葆

张 浩 张敬民 周国兴

涂 健 蒋静坪 舒迪前

喻士林 霍勇进 戴先中

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究中心

天津普辰电子工程有限公司

中国电工技术学会

前 言

PID控制是最早发展起来的控制策略之一，由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高，被广泛应用于工业过程控制，尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。而实际工业生产过程往往具有非线性、时变不确定性，难以建立精确的数学模型，应用常规PID控制器不能达到理想的控制效果；在实际生产现场中，由于受到参数整定方法烦杂的困扰，常规PID控制器参数往往整定不良、性能欠佳，对运行工况的适应性很差。针对这些问题，长期以来，人们一直在寻求PID控制器参数的自动整定技术，以适应复杂的工况和高指标的控制要求。随着微处理机技术的发展和数字智能式控制器的实际应用，这种设想已变成了现实。同时，随着现代控制理论（诸如智能控制、自适应模糊控制和神经网络技术等）研究和应用的发展与深入，为控制复杂无规则系统开辟了新途径。近年来，出现了许多新型PID控制器，如瑞典著名学者K.J.Astrom等人推出的智能型PID自整定控制器，对于复杂对象，其控制效果远远超过常规PID控制。

有关智能PID控制等新型PID控制理论及其工程应用，近年来已有大量的论文发表。为了系统地总结并论述国内外及作者在这一领域的最新理论和技术研究成果与工业应用情况，促进PID控制和自动化技术的进步，并使广大工程技术人员能了解、掌握和应用这一领域的最新技术，我们编写了这本书，抛砖引玉，供读者学习参考。

本书有下列特点：①取材新颖，内容先进，重点置于学科交叉部分的前沿研究和介绍一些有潜力的新思想、新方法和新技术。②系统论述各种新型PID控制的理论和技术，取材着重于基本概念、基本理论和基本方法。③着重从应用角度出发，突出

理论联系实际,具有面向广大工程技术人员的特点,因而具有很强的工程性、实用性。④结构合理,力求深入浅出,便于自学。

本书适宜于从事生产过程自动化、计算机应用和电气自动化领域工作的工程技术人员阅读,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、自动化仪表、计算机应用等专业的教材和教学参考书。

本书共分7章。第1章介绍数字PID控制,是全书的基础。第2~6章分别阐述自适应PID控制、智能PID控制、模糊PID控制、神经网络PID控制和预测PID控制。第7章介绍PID控制器的自整定技术。本书的第1~3章由华东冶金学院陶永华执笔,第5~6章由北京科技大学尹怡欣执笔,第4、7章由华东冶金学院葛芦生执笔。全书由陶永华教授主编,舒迪前教授审阅了全书。

在本书选题、编写、定稿和出版过程中得到了《电气自动化新技术丛书》编委会和机械工业出版社的大力支持与帮助。特别是天津电气传动设计研究所原总工程师喻士林教授级高级工程师、北京科技大学舒迪前教授、上海工业大学陈伯时教授,给予了许多具体指导和帮助,作者在此表示衷心的感谢。本书编写过程中曾参考和引用了国内外许多专家与学者所写的论文与著作,作者在此一并致谢。同时感谢张英杰、刘亮、郑超美等同志在本书打字、绘图等工作中给予了热情的帮助和支持。

由于时间匆促,加上作者水平所限,书中缺点和错误肯定不少,热忱欢迎广大读者批评指正。

作者

1998年4月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第 1 章 数字 PID 控制	1
1.1 PID 控制原理	1
1.2 数字 PID 控制算法	2
1.2.1 位置式 PID 控制算法	2
1.2.2 增量式 PID 控制算法	5
1.3 数字 PID 控制算法的改进	8
1.3.1 积分分离 PID 控制算法	8
1.3.2 遇限削弱积分 PID 控制算法	11
1.3.3 不完全微分 PID 控制算法	11
1.3.4 微分先行 PID 控制算法	14
1.3.5 带死区的 PID 控制算法	16
1.4 常用的数字 PID 控制系统	17
1.5 应用实例——直线电机的数字 PID 控制	22
1.5.1 控制系统的组成	22
1.5.2 直线电机的数字 PID 控制和参数选择	23
1.5.3 直线电机数字 PID 控制系统软件	26
第 2 章 自适应 PID 控制	27
2.1 自适应控制	27
2.1.1 自适应控制的含义	27
2.1.2 自适应控制的类型	28
2.1.3 自适应控制的理论	30
2.2 自适应 PID 控制	32
2.2.1 引言	32
2.2.2 参数自适应 PID 控制	33
2.2.3 基于过程特征参数的自适应 PID 控制	35

2.3	基于非参数模型的自适应 PID 控制	36
2.3.1	PID 继电自整定与神经网络相结合的自适应 PID 控制系统	36
2.3.2	模糊自适应 PID 控制系统	39
2.3.3	单神经元自适应 PID 控制器	40
2.3.4	专家自适应 PID 控制器	43
2.4	基于参数模型的自校正 PID 控制	45
2.4.1	最小方差自校正 PID 控制	45
2.4.2	极点配置自校正 PID 控制	49
2.4.3	自校正 PID 控制器的极点配置设计	51
2.5	自校正 PID 控制技术中的应用实例	54
2.5.1	极点配置自校正 PID 控制器在电阻加热炉温控系统中的应用	54
2.5.2	时变大滞后极点配置最优预报自校正 PID 控制器	57
2.5.3	自校正 PID 控制在电力系统中的应用	61
第 3 章	智能 PID 控制	69
3.1	智能控制	69
3.1.1	智能控制的含义	69
3.1.2	智能控制系统	71
3.1.3	智能控制的类型	73
3.2	智能 PID 控制器	76
3.3	基于规则的智能 PID 自学习控制器	79
3.4	加辨识信号的智能自整定 PID 控制器	80
3.5	专家式智能自整定 PID 控制器	81
3.5.1	专家控制	81
3.5.2	专家式智能 PID 控制器的典型结构	83
3.6	智能 PID 控制的实际应用	86
3.6.1	专家 PID 控制在伺服系统中的应用	86
3.6.2	智能 PID 控制在电阻加热炉温控系统中的应用	89
3.6.3	智能 PID 控制在混合煤气热值、流量串级调节系统中的应用	90
第 4 章	模糊 PID 控制	95
4.1	模糊控制	95

4.1.1	模糊控制的基本原理	95
4.1.2	模糊控制器	96
4.1.3	模糊控制器结构	99
4.2	模糊 PID 控制	111
4.2.1	引入积分因子的模糊 PID 控制器	111
4.2.2	Fuzzy-PID 混合控制	113
4.3	模糊自适应 PID 控制	118
4.3.1	在线实时模糊自整定 PID 控制器	119
4.3.2	基于 Fuzzy 推理的自调整 PID 控制器	123
4.3.3	单参数模糊自适应 PID 控制器	128
第 5 章	神经网络 PID 控制	136
5.1	神经网络基础	137
5.1.1	单神经元模型	137
5.1.2	神经网络的拓扑结构——神经元的连接形式	139
5.1.3	神经网络的学习规则	140
5.1.4	误差反向传播 (BP) 神经网络	141
5.1.5	Hopfield 神经网络	146
5.2	基于单神经元的 PID 控制	147
5.2.1	单神经元自适应 PID 控制器及其学习算法	147
5.2.2	单神经元自适应 PID 控制器应用实例	157
5.3	基于神经网络的 PID 控制	158
5.3.1	基于 BP 神经网络 K_P 、 K_I 、 K_D 参数自学习的 PID 控制器	159
5.3.2	改进型 BP 神经网络 K_P 、 K_I 、 K_D 参数自学习 PID 控制器	163
5.4	神经网络模糊 PID 控制	170
5.4.1	基于神经网络的模糊 PID 控制	170
5.4.2	基于神经网络的模糊推理 PID 控制	176
5.5	神经网络隐式 PID 控制及其在脉冲 TIG 焊接熔池控制中 的应用	180
5.5.1	神经网络隐式 PID 控制结构	181
5.5.2	自学习算法	182
5.5.3	实时控制	183

第 6 章 预测 PID 控制	185
6.1 模型算法 PI 控制 (MAPIC)	187
6.1.1 模型算法控制 (MAC)	187
6.1.2 模型算法 PI 控制 (MAPIC) 实现	192
6.2 动态矩阵 PI 控制 (DMPIC)	195
6.2.1 动态矩阵控制 (DMC)	195
6.2.2 动态矩阵 PI 控制 (DMPIC) 实现	199
6.3 广义预测 PI 控制 (GPPIC)	201
6.3.1 广义预测控制 (GPC)	201
6.3.2 广义预测 PI 控制 (GPPIC) 实现	206
6.4 广义预测极点配置 PI 控制 (GPPPIC)	207
6.4.1 广义预测极点配置控制 (GPPC)	207
6.4.2 广义预测极点配置 PI 控制 (GPPPIC) 实现	211
6.5 预测-PID 串级控制及其在合成氨厂变换工段上的应用	213
6.5.1 动态矩阵预测-PID 串级控制	213
6.5.2 动态矩阵预测-PID 串级控制的数字仿真	214
6.5.3 动态矩阵预测-PID 串级控制在变换工段中的应用	215
第 7 章 PID 控制器的自整定技术	220
7.1 PID 控制器参数整定的原理和方法	220
7.1.1 Ziegler-Nichols 设定方法	220
7.1.2 ISTE 最优设定方法	221
7.1.3 临界灵敏度法	222
7.1.4 基于增益优化的整定法	222
7.1.5 基于总和与时间常数的整定法	224
7.1.6 基于交叉两点法的 PID 参数整定规则	225
7.2 自整定 PID 控制策略和技术	229
7.2.1 继电器型 PID 自整定控制策略	229
7.2.2 基于过程特征参数的 PID 控制器参数自整定技术	231
7.2.3 基于给定相位裕度的 PM 法自整定公式	233
7.2.4 基于给定相位裕度和幅值裕度的 SPAM 法自整定 公式	235
7.2.5 基于递推参数估计的 PID 自整定技术	238
7.3 多变量 PID 控制器自整定技术	243

7.3.1	多变量 PID 控制器的在线自整定技术	243
7.3.2	多变量非线性自整定 PID 控制器	245
7.4	具有 PID 参数自整定功能的智能调节器	247
7.4.1	富士 MICREX 智能控制器	247
7.4.2	东芝 TOSDIC2 自由度 PID 自整定调节器	254
7.4.3	FOXBORO-EXACT 自整定 PID 调节器	261
7.4.4	YEWSERIES-80 自整定调节器	264
	参考文献	269

第 1 章 数字 PID 控制

数字 PID 控制在生产过程中是一种最普遍采用的控制方法，在冶金、机械、化工等行业中获得广泛应用。本章介绍 PID 控制的基本原理、数字 PID 控制算法及其改进和几种常用的数字 PID 控制系统，并给出应用实例。

1.1 PID 控制原理^{[1][8]}

在模拟控制系统中，控制器最常用的控制规律是 PID 控制。常规 PID 控制系统原理框图如图 1-1 所示。系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成。

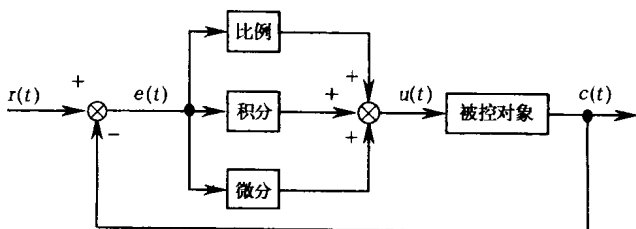


图 1-1 模拟 PID 控制系统原理框图

PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (1-1)$$

将偏差的比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制，故称 PID 控制器。其控制规律为

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt} \right] \quad (1-2)$$

或写成传递函数形式

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (1-3)$$

式中 K_P ——比例系数；

T_I ——积分时间常数；

T_D ——微分时间常数。

简单说来，PID 控制器各校正环节的作用如下：

1. 比例环节 即时成比例地反映控制系统的偏差信号 $e(t)$ ，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差。

2. 积分环节 主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_I ， T_I 越大，积分作用越弱，反之则越强。

3. 微分环节 能反映偏差信号的变化趋势（变化速率），并能在偏差信号值变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减小调节时间。

1.2 数字 PID 控制算法^{[2][4]}

在计算机控制系统中，使用的是数字 PID 控制器，数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。

1.2.1 位置式 PID 控制算法

由于计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量，因此式 (1-2) 中的积分和微分项不能直接使用，需要进行离散化处理。按模拟 PID 控制算法的算式 (1-2)，现以一系列的采样时刻点 kT 代表连续时间 t ，以和式代替积分，以增量代替微分，则可作如下近似变换：

$$\left. \begin{aligned} t &\approx kT \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \\ \int_0^t e(t) dt &\approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} &\approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 T ——采样周期。

显然，上述离散化过程中，采样周期 T 必须足够短，才能保证有足够的精度。为书写方便，将 $e(kT)$ 简化表示成 $e(k)$ 等，即省去 T 。将式 (1-4) 代入式 (1-2)，可得离散的 PID 表达式为

$$u(k) = K_P \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (1-5)$$

或

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (1-6)$$

式中 k ——采样序号， $k=0, 1, 2, \dots$ ；

$u(k)$ ——第 k 次采样时刻的计算机输出值；

$e(k)$ ——第 k 次采样时刻输入的偏差值；

$e(k-1)$ ——第 $(k-1)$ 次采样时刻输入的偏差值；

K_I ——积分系数， $K_I = K_P T / T_I$ ；

K_D ——微分系数， $K_D = K_P T_D / T$ 。

由 z 变换的性质

$$z[e(k-1)] = z^{-1}E(z)$$

$$z\left[\sum_{j=0}^k e(j)\right] = \frac{E(z)}{(1-z^{-1})}$$

式 (1-6) 的 z 变换式为

$$U(z) = K_P E(z) + K_I \frac{E(z)}{1-z^{-1}} + K_D [E(z) - z^{-1}E(z)] \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 便可得到数字 PID 控制器的 z 传递函数为

$$G(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_P + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D(1-z^{-1}) \quad (1-8)$$

或者

$$G(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} [K_P(1-z^{-1}) + K_I + K_D(1-z^{-1})^2] \quad (1-9)$$

数字 PID 控制器示于图 1-2。

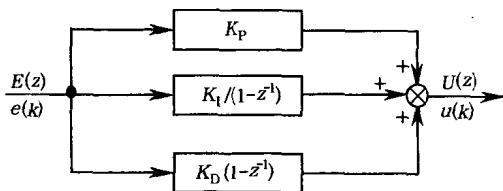


图 1-2 数字 PID 控制器的结构图

由于计算机输出的 $u(k)$ 直接去控制执行机构 (如阀门), $u(k)$ 的值和执行机构的位置 (如阀门开度) 是一一对应的, 所以通常称式 (1-5) 或式 (1-6) 为位置式 PID 控制算法。图 1-3 给出了位置式 PID 控制系统示意图。

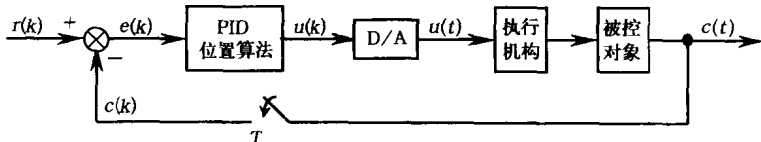


图 1-3 位置式 PID 控制系统

图 1-4 给出了位置式 PID 控制算法的程序框图。