

第2版

新型 PID 控制 及其应用

陶永华 主编

电气自动化
新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



● ISBN 7-111-06299-X/TM·729

封面设计 / 电脑制作 : 姚毅

ISBN 7-111-06299-X



定价: 24.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号
联系电话: (010) 68326294

邮政编码: 100037

网址: <http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com

9 787111 062998

电气自动化新技术丛书

新型 PID 控制及其应用

第 2 版

陶永华 主编



机械工业出版社

PID控制是迄今为止最通用的控制方法,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。随着现代控制理论和微处理机技术的发展,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。

本书自1998年出版以来,深受广大读者欢迎,已多次重印。这次修订,在介绍数字PID控制、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控制器自整定技术的基础上,增加了PID控制器的设计方法和工程应用,包括LQ最优控制、频域法、极点配置设计、TS-PID、基于遗传算法的PID控制器设计、鲁棒PID控制器和非线性PID控制器设计等,并列举了工程应用实例。

本书适宜于从事工业过程控制、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/陶永华主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2002.9

(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(2002)第065233号

机械工业出版社(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:冉晓华 责任校对:李汝庚

封面设计:姚毅 责任印制:闫焱

北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年11月第2版·第1次印刷

850mm×1168mm 1/32·12印张·320千字

10001-14000册

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

《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

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭

王志良 王 炎 牛新国 尹力明

刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅

李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊

陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰

赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠

涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者、读者的支持下，至今已出版发行丛书38种33万余册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此，本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已出版的丛书，根据技术的发展，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间，为加快与支持丛书出版，成立了丛书出版基金，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持，在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新
技术丛书》编辑委员会
2002年10月12日

第2版前言

本书自1998年出版以来，深受广大读者欢迎，已多次重印。《新型PID控制及其应用》第2版是在第1版的基础上编写而成的。对第1版作了适当修订，并增加了第1.5、2.6、4.4节和第8~10章。第8、9章介绍PID控制器的设计方法，内容包括基于线性二次最优控制的PID参数优化方法、基于频域法的PID控制器设计、状态反馈的极点配置设计法、TS-PID控制器的系统设计、基于遗传算法的PID控制器设计，鲁棒PID控制器和非线性PID控制器设计。第10章列举了八个工程应用实例。全书由安徽工业大学陶永华教授主编，其中第5、6章由北京科技大学尹怡欣执笔，第4、7章由安徽工业大学葛芦生执笔，其余各章以及修订和增加的内容均由陶永华执笔。

在修订过程中，始终得到机械工业出版社孙流芳编审的关心和指导，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和学者所写的论文与著作，作者在此一并致谢，并表示最诚挚的谢意。同时也要感谢安徽工业大学教务处在修订工作中给予的热情支持，感谢岚岚、媛媛在文献收集、整理过程中所做的大量具体工作，并再次感谢北京科技大学舒迪前教授对本书第1版的审阅。

由于时间匆促，加上作者水平所限，书中难免存在缺点和错误，热忱欢迎广大读者批评指正。

作者

2002年8月

第 1 版前言

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. Åström 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（现改为安徽工业大学）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

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

第2版前言

第1版前言

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 数字PID控制技术的应用实例	21
1.5.1 直线电动机的数字PID控制	21
1.5.2 运动控制系统中位置环数字PID控制算法的改进实现	26
第2章 自适应PID控制	31
2.1 自适应控制	31
2.1.1 自适应控制的含义	31
2.1.2 自适应控制的类型	32
2.1.3 自适应控制的理论	34
2.2 自适应PID控制	36
2.2.1 引言	36
2.2.2 参数自适应PID控制	37

2.2.3	基于过程特征参数的自适应 PID 控制	39
2.3	基于非参数模型的自适应 PID 控制	40
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	40
2.3.2	模糊自适应 PID 控制系统	43
2.3.3	单神经元自适应 PID 控制器	43
2.3.4	专家自适应 PID 控制器	47
2.4	基于参数模型的自校正 PID 控制	49
2.4.1	最小方差自校正 PID 控制	49
2.4.2	极点配置自校正 PID 控制	53
2.4.3	自校正 PID 控制器的极点配置设计	55
2.5	自校正 PID 控制技术中的应用实例	58
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	58
2.5.2	时变大滞后极点配置最优预报自校正 PID 控制器	62
2.5.3	自校正 PID 控制在电力系统中的应用	66
2.6	基于模型参考的自适应 PID 控制器	72
2.6.1	基于模型参考的自适应控制方法	72
2.6.2	模型参考自适应 PID 控制器	73
第 3 章	智能 PID 控制	75
3.1	智能控制	75
3.1.1	智能控制的含义	75
3.1.2	智能控制系统	77
3.1.3	智能控制的类型	79
3.2	智能 PID 控制器	82
3.3	基于规则的智能 PID 自学习控制器	85
3.4	加辨识信号的智能自整定 PID 控制器	86
3.5	专家式智能自整定 PID 控制器	87
3.5.1	专家控制	87
3.5.2	专家式智能自整定 PID 控制器的典型结构	88
3.6	智能 PID 控制的实际应用	92
3.6.1	专家 PID 控制在伺服系统中的应用	92
3.6.2	智能 PID 控制在电阻加热炉温控系统中的应用	95

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	96
第 4 章	模糊 PID 控制	101
4.1	模糊控制	101
4.1.1	模糊控制的基本原理	101
4.1.2	模糊控制器	102
4.1.3	模糊控制器结构	105
4.2	模糊 PID 控制	117
4.2.1	引入积分因子的模糊 PID 控制器	118
4.2.2	Fuzzy-PID 混合控制	119
4.3	模糊自适应 PID 控制	125
4.3.1	在线实时模糊自整定 PID 控制器	126
4.3.2	基于 Fuzzy 推理的自调整 PID 控制器	129
4.3.3	单参数模糊自适应 PID 控制器	134
4.4	模糊 PID 控制技术的研究探讨	142
4.4.1	模糊 PID 控制器的基本形式	142
4.4.2	模糊 PID 控制技术研究中所面临的几个重要理论问题	146
第 5 章	神经网络 PID 控制	149
5.1	神经网络基础	150
5.1.1	单神经元模型	150
5.1.2	神经网络的拓扑结构——神经元的连接形式	152
5.1.3	神经网络的学习规则	153
5.1.4	误差反向传播 (BP) 神经网络	154
5.1.5	Hopfield 神经网络	159
5.2	基于单神经元的 PID 控制	160
5.2.1	单神经元自适应 PID 控制器及其学习算法	160
5.2.2	单神经元自适应 PID 控制器应用实例	170
5.3	基于神经网络的 PID 控制	171
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	172
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	176
5.4	神经网络模糊 PID 控制	183

5.4.1	基于神经网络的模糊 PID 控制	183
5.4.2	基于神经网络的模糊推理 PID 控制	189
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	193
5.5.1	神经网络隐式 PID 控制结构	194
5.5.2	自学习算法	195
5.5.3	实时控制	196
第 6 章	预测 PID 控制	198
6.1	模型算法 PI 控制 (MAPIC)	200
6.1.1	模型算法控制 (MAC)	200
6.1.2	模型算法 PI 控制 (MAPIC) 实现	205
6.2	动态矩阵 PI 控制 (DMPIC)	208
6.2.1	动态矩阵控制 (DMC)	208
6.2.2	动态矩阵 PI 控制 (DMPIC) 实现	212
6.3	广义预测 PI 控制 (GPPIC)	214
6.3.1	广义预测控制 (GPC)	214
6.3.2	广义预测 PI 控制 (GPPIC) 实现	219
6.4	广义预测极点配置 PI 控制 (GPPPIC)	220
6.4.1	广义预测极点配置控制 (GPPC)	220
6.4.2	广义预测极点配置 PI 控制 (GPPPIC) 实现	224
6.5	预测-PID 串级控制及其在合成氨厂变换工段上的应用	226
6.5.1	动态矩阵预测-PID 串级控制	226
6.5.2	动态矩阵预测-PID 串级控制的数字仿真	227
6.5.3	动态矩阵预测-PID 串级控制在变换工段中的应用	228
第 7 章	PID 控制器的自整定技术	233
7.1	PID 控制器参数整定的原理和方法	233
7.1.1	Ziegler-Nichols 设定方法	233
7.1.2	ISTE 最优设定方法	234
7.1.3	临界灵敏度法	235
7.1.4	基于增益优化的整定法	235
7.1.5	基于总和和时间常数的整定法	237
7.1.6	基于交叉两点法的 PID 参数整定规则	238
7.2	自整定 PID 控制策略和技术	242

7.2.1	继电型 PID 自整定控制策略	242
7.2.2	基于过程特征参数的 PID 控制器参数自整定技术	244
7.2.3	基于给定相位裕度的 PM 法自整定公式	246
7.2.4	基于给定相位裕度和幅值裕度的 SPAM 法自整定公式	248
7.2.5	基于递推参数估计的 PID 控制器参数自整定技术	251
7.3	多变量 PID 控制器自整定技术	256
7.3.1	多变量 PID 控制器的在线自整定技术	256
7.3.2	多变量非线性自整定 PID 控制器	258
7.4	具有 PID 参数自整定功能的智能调节器	260
7.4.1	富士 MICREX 智能控制器	260
√7.4.2	东芝 TOSDIC 2 自由度 PID 自整定调节器	267
7.4.3	FOXBORO-EXACT 自整定 PID 调节器	274
7.4.4	YEW SERIES-80 自整定调节器	277
第 8 章 PID 控制器的设计方法 (一)		
——LQ 最优控制、频域法、极点配置设计、		
	TS-PID	282
8.1	基于线性二次最优控制的 PID 参数优化方法	282
8.1.1	LQ 最优控制设计算法	282
8.1.2	LQR 系统与 PID 控制系统的联系	284
8.2	基于频域法的 PID 控制器设计	286
8.2.1	基于相位裕度的 PID 参数优化方法	286
8.2.2	基于相位裕度和幅值裕度的 PID 控制器设计新方法	290
8.3	状态反馈的极点配置设计法	292
8.3.1	基于多项式拟合的内环状态反馈参数优化	292
8.3.2	基于极点配置调节 PID 控制器参数	295
8.4	TS-PID 控制器的系统设计	297
8.4.1	TS 模糊模型	297
8.4.2	TS-PID 控制器的结构设计	297
8.4.3	TS-PID 控制器的参数确定	299
第 9 章 PID 控制器的设计方法 (二)		
——遗传算法、鲁棒 PID、非线性 PID 控制		
9.1	基于遗传算法的 PID 控制器设计	300

9.1.1	遗传算法	300
9.1.2	基于遗传算法的 PID 参数优化设计	302
9.1.3	PID 设计的自适应遗传算法	305
9.1.4	基于遗传算法的预测自整定 PID 控制算法	308
9.1.5	基于改进遗传算法的二自由度 PID 控制器设计	311
9.1.6	基于遗传算法的 PID 神经网络解耦控制器的设计	315
9.2	鲁棒 PID 控制器设计	317
9.2.1	鲁棒控制	317
9.2.2	基于 μ 分析的鲁棒 PID 控制器设计	319
9.2.3	基于 H_{∞} 控制理论的 PID 控制器设计	321
9.2.4	基于闭环增益成形控制算法的鲁棒 PID 控制器	323
9.3	非线性 PID 控制器设计	325
9.3.1	非线性 PID 控制器	325
9.3.2	可控串联电容补偿非线性 PID 控制器的设计	327
9.3.3	发电机组汽门的新型非线性 PID 控制器设计	329
9.3.4	非线性 PID 算法在电加热炉集散控制系统中的应用	330
第 10 章	新型 PID 控制的工程应用	333
10.1	对偶自校正 PID 控制在大型目标模拟器方位伺服电动机中的 应用	333
✓10.1.1	控制对象分析	333
10.1.2	对偶自校正 PID 控制系统	334
10.2	实时专家 PID 控制在锅炉汽包水位控制中的应用	335
10.2.1	循环流化床锅炉汽包水位专家 PID 控制原理	335
10.2.2	循环流化床锅炉汽包水位专家 PID 控制算法和控制 结构	337
✓10.3	单片机控制的智能 PID 控制器在液压系统中的应用	339
10.3.1	系统的结构原理	339
10.3.2	智能 PID 控制器设计原理	339
10.4	Fuzzy-PID 控制在无刷直流电动机交流伺服系统中的应用	341
10.4.1	无刷直流电动机交流伺服系统	341
10.4.2	速度环 Fuzzy-PID 控制算法	342
10.5	Fuzzy-PID 控制在智能人工腿位置伺服系统中的应用	344
10.5.1	智能人工腿位置伺服系统	344

10.5.2	Fuzzy-PID 控制策略	345
10.6	神经模糊逆模-PID 复合控制在连续搅拌型化学反应器中的应用	347
10.6.1	连续搅拌型化学反应器系统简介	347
10.6.2	神经模糊逆模-PID 复合控制策略	347
✓10.7	智能 PID 控制器在工业对象中的应用	348
✓10.7.1	基于 RBF 网络与 Smith 预估器相结合的智能 PID 控制	348
10.7.2	在纯滞后工业对象中的应用研究	350
10.8	基于非线性跟踪微分器的电力系统 PID 励磁控制器	352
10.8.1	NPSS 和 S_{ω} NPID 控制方案	352
10.8.2	数字仿真和物理动态模拟实验研究	353
	参考文献	356