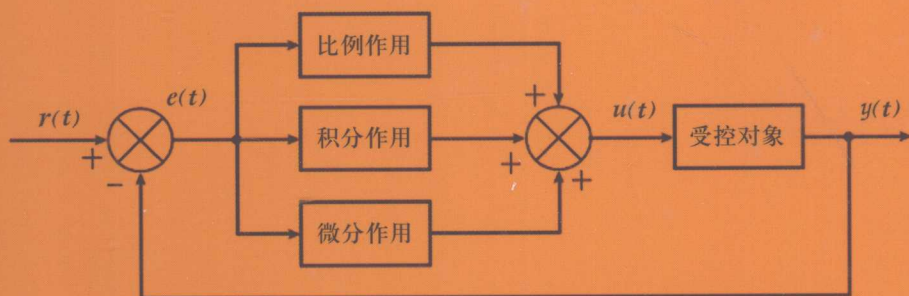


# PID控制器参数整定与实现

黄友锐 曲立国 著



科学出版社  
www.sciencep.com

# PID 控制器参数整定与实现

黄友锐 曲立国 著

科学出版社

北京

TP273

1-915

## 内 容 简 介

本书是作者多年来在基于自然计算的 PID 控制器参数整定与实现方面进行深入研究的基础上撰写而成的。在吸收国内外许多具有代表性的最新研究成果的基础上,本书着重介绍作者在这一领域的研究成果,主要包括:PID 控制器参数整定方法;分数阶 PID 控制器的参数整定;基于 QDRNN 的多变量 PID 控制器参数整定;数字 PID 控制器的 FPGA 实现;基于 BP 神经网络的 PID 控制器的 FPGA 实现;基于遗传算法的 PID 控制器的 FPGA 实现;基于粒子群算法的 PID 控制器的 FPGA 实现;主要算法的基本程序。

本书可作为与自动化相关专业的师生、研究人员以及工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

PID 控制器参数整定与实现/黄友锐、曲立国著. —北京:科学出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-03-026733-7

I. P… II. ①黄… ②曲… III. PID 控制-研究生-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 019679 号

责任编辑:贾瑞娜/责任校对:桂伟利

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 1 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 1—2 500 字数: 272 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

PID 控制器自产生以来,一直是工业生产过程中应用最广、也是最成熟的控制器。目前大多数工业控制器都是 PID 控制器或其改进型。尽管在控制领域,各种新型控制器不断涌现,但 PID 控制器还是以其结构简单、易实现、鲁棒性强等优点,处于主导地位。对 PID 控制器的设计和应用,核心问题之一是参数的整定与实现。

自然计算是通过模拟或揭示某些自然现象或过程发展而来的,其思想和内容涉及数学、物理学、生物学和计算机科学等方面,为解决复杂问题提供了新的思路 and 手段。自然计算具有全局的、并行高效的优化性能,鲁棒性、通用性强,无需问题特殊信息等优点。已广泛用于优化调度、运输问题、组合优化、工程优化设计等领域,引起了国内外学者的广泛重视并掀起了该领域的研究热潮。

本书是作者多年来在基于自然计算的 PID 控制器参数整定与实现方面进行深入研究的基础上撰写而成的,同时吸纳了国内外许多具有代表性的最新研究成果。感谢国内外本领域的各位专家所做的工作为本书提供了部分素材。全书取材新颖,覆盖面广,深入浅出,注重理论联系实际,力图体现国内外在这一学术领域的最新研究进展。

全书共分 8 章。第 1 章为绪论,介绍了 PID 控制器在工业控制中的重要地位、PID 控制器的基本概念,以及目前国内外 PID 控制器参数整定的现状;第 2 章为 PID 控制器参数整定方法,介绍了常规 Z-N 的 PID 控制器参数整定方法,还详细介绍了基于模糊控制、多目标  $H_2/H_\infty$  鲁棒控制、小波神经网络、遗传算法、克隆选择算法、粒子群算法等 PID 控制器参数整定方法,并对 PID 控制器参数整定进行了仿真;第 3 章为分数阶 PID 控制器的参数整定,在分数阶 PID 控制器的数字实现的基础上,采用粒子群算法、RBF 神经网络、免疫克隆选择算法对 PID 控制器参数进行了整定和仿真研究;第 4 章为基于 QDRNN 的多变量 PID 控制器参数整定,在对角递归神经网络的基础上提出了一种基于准对角递归神经网络的多变量 PID 控制器参数在线整定的算法,同时给出一个二耦合的控制对象进行仿真,将基于此方法设计的多变量 PID 控制与基于对角递归神经网络设计的多变量 PID 控制效果进行了比较;第 5 章为数字 PID 控制器的 FPGA 实现,采用增量式 PID 控制算法来实现数字 PID 控制器,设计语言采用 VHDL;第 6 章为基于 BP 神经网络的 PID 控制器的 FPGA 实现,详细介绍了初始化模块、输入层计算模块、隐含层计算模块、输出层计算模块、隐含层权值调整模块、输入层权值调整模块、控制模块和存储模块设计与实现;第 7 章为基于遗传算法的 PID 控制器的 FPGA 实现,在

实现过程中先对系统进行模块划分,主要分为初始化模块、选择模块、交叉变异模块、控制模块等,然后利用 VHDL 语言描述各个功能模块,为了提高设计效率,利用 IP 核进行存储器设计,利用 DSP Builder 进行数学运算处理;第 8 章为基于粒子群算法的 PID 控制器的 FPGA 实现,将 PID 控制器划分为初始化模块、局部最优更新模块、全局最优更新模块、粒子速度位置更新模块、存储模块等,在硬件设计过程中对存储器的设计则采用的是 Altera 公司的 IP core 生成工具 MegaWizard Plug-In Manager 进行定制;最后,本书在附录中给出了主要算法的源代码,便于读者使用和研究.

与作者共同研究的人员有凌六一、朱君、唐超礼、章魁、段红、王爽、王鸥、黄宜庆、田一鸣、欧阳磊、李冬、胡海波、赵娜娜、涂帅、徐萍、李继云、白东翠等研究生.他们努力工作、协同进步,取得了许多具有意义的研究成果,为本书的出版贡献了他们的智慧,谨此致谢.另外,感谢作者家人的大力支持和理解.

本书可作为与自动化相关专业的师生、研究人员以及工程技术人员的参考书.由于作者学识有限,书中不妥之处在所难免,诚望读者批评指正.

著 者

2009 年 10 月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 PID 控制器参数整定的发展与现状 .....	1
1.2 PID 控制器参数整定的分类 .....	3
1.3 PID 控制的基本原理 .....	5
<b>第 2 章 PID 控制器参数整定方法</b> .....	8
2.1 常规 Z-N 整定方法及实现分析 .....	8
2.2 基于模糊控制的 PID 控制器参数整定 .....	10
2.2.1 模糊控制 .....	10
2.2.2 模糊控制器的原理与组成 .....	11
2.2.3 模糊自适应 PID 控制器参数整定原理 .....	12
2.2.4 模糊自适应 PID 控制器参数整定算法 .....	12
2.2.5 基于模糊控制 PID 控制器参数整定的仿真 .....	14
2.3 基于小波神经网络的 PID 控制器参数整定 .....	15
2.3.1 神经网络 .....	16
2.3.2 人工神经元 .....	16
2.3.3 神经网络的功能和学习方式 .....	17
2.3.4 BP 神经网络 .....	18
2.3.5 基于 BP 神经网络的 PID 控制器设计 .....	20
2.3.6 小波神经网络 .....	23
2.3.7 小波神经网络的 PID 控制器设计 .....	25
2.3.8 数例仿真 .....	25
2.4 基于遗传算法的 PID 控制器参数整定及仿真 .....	28
2.4.1 遗传算法的基本原理 .....	28
2.4.2 改进的遗传算法 .....	30
2.4.3 改进的遗传算法 PID 控制器设计 .....	32
2.4.4 数例仿真 .....	34
2.5 基于克隆选择算法的 PID 控制器参数整定 .....	35
2.5.1 克隆选择算法的基本框架 .....	35

2.5.2	基于克隆选择算法的 PID 控制器参数整定	37
2.5.3	仿真结果	38
2.6	基于粒子群算法的 PID 控制器参数整定及仿真	39
2.6.1	粒子群算法基本原理	39
2.6.2	基于 PSO 的 PID 控制器参数整定	43
2.6.3	标准的 PSO 算法在 PID 控制器参数整定中的应用	44
2.6.4	仿真结果	44
2.6.5	改进的 PSO 算法原理	46
2.6.6	基于改进 PSO 的 PID 控制器参数整定	46
2.6.7	仿真结果	47
2.6.8	改进的 PSO 与标准 PSO 仿真结果比较	48
2.7	多目标 $H_2/H_\infty$ 鲁棒 PID 控制器参数整定	50
2.7.1	线性矩阵不等式理论	50
2.7.2	LMI 区域与 $H_2/H_\infty$ 性能	51
2.7.3	LMI 区域的描述	52
2.7.4	$H_2$ 性能指标	53
2.7.5	$H_\infty$ 性能指标	53
2.7.6	系统数学模型的建立	54
2.7.7	多目标 $H_2/H_\infty$ PID 控制器设计	55
2.7.8	多目标最优 $H_2$ PID 控制器的设计	58
2.7.9	数例仿真	58
<b>第 3 章</b>	<b>分数阶 PID 控制器的参数整定</b>	<b>61</b>
3.1	分数阶微积分的定义	61
3.2	分数阶控制器	62
3.3	分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的数字实现	64
3.4	基于粒子群算法的分数阶 PID 控制器参数整定	65
3.5	基于神经网络的分数阶 PID 控制器参数整定	67
3.6	基于免疫克隆选择算法的分数阶 PID 控制器参数整定	70
<b>第 4 章</b>	<b>基于 QDRNN 的多变量 PID 控制器参数整定</b>	<b>72</b>
4.1	对角递归神经网络	72
4.2	对角递归神经网络 Jacobian 信息辨识	73
4.3	准对角递归神经网络	75
4.4	准对角递归神经网络 Jacobian 信息辨识	76
4.5	基于准对角递归神经网络多变量 PID 控制算法	77
4.6	数例仿真	78

<b>第 5 章 数字 PID 控制器的 FPGA 实现</b> .....	83
5.1 数字 PID 控制器的硬件架构设计 .....	83
5.2 各模块功能设计与实现 .....	84
5.2.1 控制模块的设计与实现 .....	84
5.2.2 加法器与乘法器设计与实现 .....	84
5.3 数字 PID 控制器的开环仿真 .....	86
<b>第 6 章 基于 BP 神经网络的 PID 控制器的 FPGA 实现</b> .....	88
6.1 硬件架构 .....	88
6.2 各功能模块的设计及实现 .....	89
6.3 仿真实验及结果分析 .....	101
<b>第 7 章 基于遗传算法的 PID 控制器的 FPGA 实现</b> .....	110
7.1 基于 GA 的 PID 控制器的硬件架构 .....	111
7.2 各个功能模块设计与实现 .....	113
7.2.1 控制模块设计与实现 .....	113
7.2.2 随机数模块设计与实现 .....	115
7.2.3 存储器模块设计与实现 .....	118
7.2.4 适应度模块设计与实现 .....	120
7.2.5 初始化模块设计与实现 .....	124
7.2.6 选择模块设计与实现 .....	125
7.2.7 交叉变异模块设计与实现 .....	126
7.2.8 存储模块设计与实现 .....	128
7.3 仿真实验及结果分析 .....	129
7.3.1 各模块的功能仿真 .....	129
7.3.2 基于遗传算法的 PID 控制器闭环仿真 .....	133
<b>第 8 章 基于粒子群算法的 PID 控制器的 FPGA 实现</b> .....	138
8.1 粒子群算法运行参数的选择 .....	138
8.2 基于粒子群算法的 PID 控制器的硬件架构 .....	138
8.3 各功能模块设计与实现 .....	141
8.3.1 控制模块设计与实现 .....	141
8.3.2 存储器模块设计与实现 .....	142
8.3.3 全局最优模块设计与实现 .....	143
8.3.4 局部最优模块设计与实现 .....	144
8.3.5 惯性因子模块设计与实现 .....	146
8.3.6 速度位置更新模块设计与实现 .....	146
8.3.7 其他模块设计与实现 .....	148



---

8.4 仿真实验及结果分析 .....	148
附录 .....	151
附录 A 主要算法的基本程序 .....	151
A.1 基于 BP 神经网络的 PID 控制器参数整定源程序 .....	151
A.2 基于小波神经网络的 PID 控制器参数整定源程序 .....	155
A.3 基于改进遗传算法的 PID 控制器参数整定源程序 .....	159
A.4 基于准对角递归神经网络多变量 PID 控制器参数整定源程序 .....	162
A.5 实数编码的粒子群算法源程序 .....	168
附录 B 基于粒子群算法的 PID 控制器的 FPGA 实现源程序 .....	173
附录 C Modelsim SE 的使用简介 .....	190
C.1 添加 Altera 仿真库的步骤 .....	191
C.2 功能仿真步骤 .....	194
参考文献 .....	203

# 第 1 章 绪 论

自 20 世纪 30 年代以来,生产自动化技术取得了惊人的成就.工业自动化涉及的范围极广,过程控制是其中最重要的一个分支,工业生产对过程控制的要求是安全性、经济性和稳定性.过程控制的任务就是在了解、掌握工艺流程和生产过程的静态和动态特性的基础上,根据上述三项要求,应用理论对控制系统进行分析和综合,最后采用适宜的技术手段加以实现.在很多情况下,只需采用商品化的常规调节器进行 PID 控制就可以实现其控制任务.PID 控制器自产生以来,一直是工业生产过程中应用最广、也是最成熟的控制器<sup>[1,2]</sup>.目前大多数工业控制器都是 PID 控制器或其改进型.尽管在控制领域,各种新型控制器不断涌现,但 PID 控制器还是以其结构简单、易实现、鲁棒性强<sup>[3~5]</sup>等优点,处于主导地位.对 PID 控制器的设计和应用,核心问题之一是参数的整定.控制器的参数整定就是对一个已经设计并安装就绪的控制系统,通过控制器参数的调整,使得系统的过渡过程达到最为满意的质量指标要求.一个控制系统的质量取决于对象特性、控制方案、干扰的形式和大小,以及控制器参数的整定等各种因素.然而,一旦系统按所设计的方案安装就绪,对象特性和干扰值等基本固定下来,这时系统的质量主要取决于控制器参数的整定.合适的控制器参数会带来满意的控制效果,不合适的控制器参数会使系统的质量变坏.因此,在方案设计合理和仪表选型合适的基础上,控制器参数整定的合适与否对控制器质量具有重要的影响.

## 1.1 PID 控制器参数整定的发展与现状

PID 控制的参数整定方法和技术也处于不断发展中,特别是近年来,国际自动控制领域对 PID 控制的参数整定方法的研究仍在继续,许多重要国际杂志不断发表新的研究成果.

早在 1942 年,Ziegler 与 Nichols 针对一阶惯性加纯延迟的对象提出了 PID 控制器参数整定的 Z-N 法,对于常规的控制对象,可以用曲线拟合的方法将阶跃响应数据拟合成近似的一阶惯性加纯滞后环节模型.此方法的提出很快便应用于实际.同年,Ziegler 根据对象频域响应曲线上的信息,提出了 PID 控制器参数整定的临界振荡法.随着控制理论的发展,越来越多的学者开始致力于 PID 控制器的参数整定,随之而来也出现了许多经典的参数整定方法,如庄敏霞与 Atherton 针对各种指标函数得到了最优化 PID 参数整定的方法.此方法相对在理论分析上较为方

便, 但与工程化的性能指标间还缺乏明显的对应关系, 从而影响了其在工业实际中的应用. 1993 年, 陈福祥等提出了增益优化的 PID 参数整定方法, 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. 1995 年, 德国学者 UdoKuhn 提出了基于总和和时间常数的整定方法. 此方法适用于阶跃响应曲线为 S 形的自衡对象. 1996 年, 胡晚霞等提出了一种新的确定被控过程动态特性方法, 通过计算机仿真相应的 PID 参数整定规则, 这种方法被称为交叉两点法. 1998 年, 夏淑艳将拉盖尔级数应用于 PID 参数整定中, 提出了利用拉盖尔级数辨识和整定的方法. 此方法简单可靠, 得到了广泛的应用.

近年来, PID 控制器的参数整定越来越被人们所重视, 国内随之出现了许多较为完备的参数整定理论. 2004 年, 曾振平等<sup>[6]</sup>提出了一种基于改进的广义平方误差积分准则的 PID 参数整定的新方法, 用对象响应特征时间来平衡准则中误差项与误差变化率项的数量级, 得到较好的控制效果. 同年, 王振滨提出了一种新型的分阶 PID 控制器参数整定方法, 把传统的 PID 控制器的阶次推广到分数领域, 它不但适合分数阶系统, 也适合某些整数阶系统, 设计方法新颖. 另外, 上海交通大学的李勇男等提出了反应响应时滞过程 PID 控制器设计新方法, 通过提出期望闭环传递函数, 解析地推导出 PID 控制器的形式. 2005 年, 张立群等<sup>[7]</sup>将  $H_\infty$  控制理论应用于 PID 控制器的参数整定中, 提出了一种基于  $H_\infty$  混合灵敏度约束的 PID 控制器设计方法, 该方法使 PID 控制器具有更好的鲁棒性, 闭环系统具有良好的瞬态性能. 随着群智能优化算法的发展, 许多学者开始将各种群智能优化算法运用于 PID 控制器的参数整定. 在国内较为典型的代表文章为 2006 年李丽香等提出的基于混沌蚂蚁群算法的 PID 控制器<sup>[8]</sup>参数整定, 将蚂蚁混沌动力学、群组织和优化机制巧妙地结合形成了一种新的参数整定方法. 同时, 中国科学院自动化研究所的张怀相等提出了一种基于迭代学习控制的 PID 参数整定方法. 该算法首先利用 PD 型迭代学习控制来进行期望轨迹的跟踪控制, 然后根据迭代学习控制的输入输出数据序列, 通过强跟踪滤波器来进行参数辨识, 可获得对应于期望轨迹的优化的 PID 控制参数. 2007 年, 出现了多目标满意 PID 控制器<sup>[9]</sup>, 如马建伟博士在其论文中首次较为全面地阐述了多目标满意 PID 的概念以及具体的参数整定方法, 设计后的 PID 满足多项指标, 提高了 PID 控制器的控制性能. 与此同时, 李银伢等<sup>[10]</sup>在此基础上提出了一种基于参数空间图解法的多目标满意 PID 控制器, 此方法主要针对任意阶线性定常系统具有区域极点指标与  $H_\infty$  指标约束的 PID 控制问题. 另外, 量子遗传算法开始运用于 PID 控制器的参数寻优, 如张兴华等<sup>[11]</sup>提出了量子遗传算法的 PID 控制器参数整定. 到 2008 年, 出现了许多关于 PID 控制器参数整定的新成果, 许多学者将混沌理论与 PID 控制算法结合. 例如, 明学星等提出基于混沌理论的预测 PID 控制器参数整定方法<sup>[12]</sup>, 通过混沌优化算法对 PID 的参数进行在线优化. 另外, 一些改进的 PID 控制器开始出现, 如王传峰等设计了一种

基于概率鲁棒的分散 PID 控制器; 吕建婷等<sup>[13]</sup>设计的一种新型滑模 PID 控制器, 此方法根据 Lyapunov 方法, 推导出采用 PID 形式的切换面的滑模 PID 控制器。

另外, 随着智能控制理论的发展, 模糊理论、神经网络理论开始运用于 PID 的参数整定, 许多学者和研究人员在此方面进行了大量的研究工作, 得到了许多的研究成果并积累了丰富的经验。

从目前 PID 参数整定方法的研究和应用现状来看, 以下几个方面将是今后一段时间内研究和实践的重点。

(1) 对于单输入单输出被控对象, 需要研究针对不稳定对象或被控过程存在较大干扰情况下的 PID 控制器参数整定方法, 使其在初始化、抗干扰和鲁棒性能方面进一步增强, 使用最少量的过程信息及较简单的操作就能较好地完成整定。

(2) 对于多输入多输出被控对象, 需要研究针对具有显著耦合的多变量过程的多变量 PID 控制器参数整定方法, 尽可能减少所需先验信息量, 使其易于在线整定。

(3) 智能 PID 控制技术有待进一步研究, 将自适应和自整定有机结合, 使其具有自动诊断功能; 结合专家经验知识、直觉推理逻辑等专家系统思想和方法对原有 PID 控制器设计思想及整定方法进行改进; 将模糊控制、神经网络、遗传算法、免疫算法、粒子群算法、蚁群算法、DNA 计算、量子计算等自然计算和 PID 控制器相结合, 进一步提高控制系统性能。这些都是智能 PID 控制器发展的极有前途的方向。

## 1.2 PID 控制器参数整定的分类

PID 控制器广泛地应用于工业过程中, 但是 PID 控制器的参数整定是一个令人困扰的问题。一般需要经验丰富的工程技术人员来完成, 既耗时又费力, 加之实际系统千差万别, 又有滞后、非线性等因素, 使得 PID 参数的整定有一定的难度。许多实际控制系统无法工作在令人满意的状态, 很大一部分是由于控制器的自整定参数没有达到最优, 由此人们提出自整定 PID 控制器。将过程对象动态性能的确定和 PID 控制器参数的计算方法结合起来就可以实现 PID 控制器的自整定, 自整定的含义是控制器的参数可根据用户的需要自动整定, 用户可以通过按动一个按钮或给控制器发送一个命令来启动自整定过程<sup>[14]</sup>。PID 控制器参数自动整定过程包括三个部分: 一是过程扰动的产生; 二是扰动响应的评估; 三是控制器参数的计算。从目前的资料和应用情况来看, 根据研究方法, 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; 按照控制对象的输入和输出个数可分为单变量 PID 控制器参数整定方法和多变量 PID 控制器参数整定方法; 按照控制量的组合形式, 可分为常规 PID 控制器参数整定方法与智能 PID 控制器参数整定方法。但是总体来说, PID 控制器参数自整定的方法主要归结为: 基于模型的 PID 控制

器参数整定方法; 基于规则的 PID 控制器参数整定方法和基于在线模式识别 PID 控制器参数整定方法。

### 1. 基于模型的 PID 控制器参数整定方法

此方法适用于模型结构已知的情况, 当模型参数未知时, 可以采用系统辨识的方法得到过程模型参数, 同时将其与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, 当被控过程特性发生了变化, 可以通过最优化某个性能指标周期性地更新控制器参数。另外, 根据辨识方法和内容的不同, 可以分为下面两类: 一是辨识过程对象的数学模型, 另一个是辨识闭环系统的临界增益和临界周期或多点频率特性。在此方法中, 较为典型的有: 2006 年, 徐世彬等将基于辨识的自校正 PID 运用于实时控制系统<sup>[15]</sup>; 2007 年, 邵伍周等<sup>[16]</sup>提出了一种基于 RBF 神经网络在线辨识的单神经元 PID, 并成功应用到永磁同步电机中; 2008 年, 李明河等提出了一种基于动态神经网络在线辨识的 PID 控制器<sup>[17]</sup>, 通过优化的动态 RBF 辨识神经网络更好地描述了控制对象的动态行为, 获得 PID 控制器参数在线调整信息, 实现系统的智能控制。

### 2. 基于规则推理的 PID 控制器参数整定方法

基于规则推理的 PID 控制器参数整定方法是人们把长期的实践经验通过某种方式在机器上实现, 可以方便地实现 PID 控制器的参数整定。近几年, 智能控制在理论上取得了一系列重大的突破, 这些成就引入控制领域, 引起了学者的广泛关注, 其中模糊数学、神经网络、专家系统已成为在 PID 参数整定方面解决控制难题的新方法, 这三个方面出现了许多最新的成果。例如, 2006 年, 金毅彬将专家规则与 PID 复合控制相结合时成功应用于压缩机系统; 2007 年, 李可等提出一种专家-模糊 PID 控制器<sup>[18]</sup>, 将其运用到风洞风速控制系统; 2008 年, 赵俊、陈建军提出混沌粒子群优化的模糊神经 PID 控制器<sup>[19]</sup>的参数整定方法, 以整个神经网络的权值为优化参数, 利用基于混沌策略的粒子群全局优化算法离线优化和误差反传算法在线调整相结合的方法获得控制器参数。

### 3. 在线模式识别 PID 控制器参数整定方法

模式识别的思想根据实际响应波形, 抽取出一些能表征系统的特征值, 由此来判断系统的动态特性, 进而调整控制器参数, 即将波形分析与人工智能结合起来, 开辟了参数整定的一条新路, 实际应用中获得了很大的成功。该方法的一个优点是不用对系统模型进行辨识、节省时间, 而且能够适应过程的变化, 对于非线性变结构的系统有效。例如, 在 2006 年, 浙江大学的潘文斌等提出一种改进的在线模式识别 PID 参数整定方法, 加快了 PID 控制器的参数收敛速度, 提高了算法整定的效率; 2007 年, 靳斌等<sup>[20]</sup>将基于模式识别 PID 控制应用于色谱仪的温度控制, 达到

了较好的控制效果。

### 1.3 PID 控制的基本原理

在模拟控制系统中, 控制器最常用的控制规律是 PID 控制. PID 控制系统原理框图如图 1.1 所示.

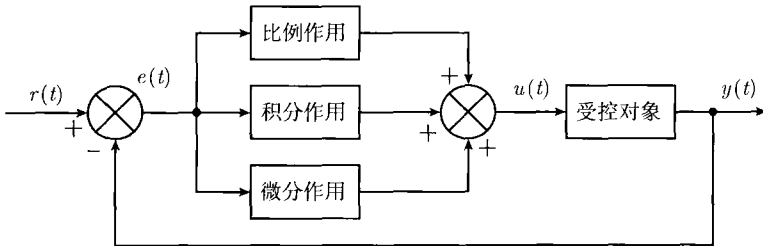


图 1.1 PID 控制系统原理框图

PID 控制是一种线性控制方法, 它根据给定值  $r(t)$  与实际输出值  $y(t)$  构成控制偏差  $e(t)$ , 即  $e(t) = r(t) - y(t)$ . 对偏差  $e(t)$  进行比例、积分和微分运算, 将三种运算的结果相加, 就得到 PID 控制器的控制输出  $u(t)$ . 在连续时间域中, PID 控制器算法的表达式如下:

$$u(t) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d(t)}{dt} \right] \quad (1.1)$$

式中:  $k_p$  为比例系数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_d$  为微分时间常数.

PID 控制器各个校正环节的作用如下:

**比例环节:** 成比例的反应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.

**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.

**微分环节:** 反映偏差信号的变化趋势 (变化速率), 调节误差的微分输出, 误差突变时, 能及时控制, 并能在偏差信号变得太大之前, 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, 减少调节时间. 通过组合三者的优势, 就可以得到优化的控制性能.

数字控制系统中进行的是一种采样控制, 只能根据采样时刻的偏差值计算控制量, 因此式 (1.1) 中的积分和微分项不能直接使用, 需要进行离散化处理. 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:

$$t \approx kT \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (1.2)$$

$$\int_0^t e(t)dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \quad (1.3)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (1.4)$$

为书写方便, 将  $e(kT)$  简化表示成  $e(k)$ , 即省去  $T$ . 于是可得离散的 PID 表达式:

$$\begin{aligned} u(k) &= k_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \\ &= k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j)T + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中:  $k_p$  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,  $k_d = k_p T_d$ ;  $u(k)$  为第  $k$  次采样时刻控制器的输出值;  $e(k)$  为第  $k$  次采样时刻输入控制系统的偏差值;  $e(k-1)$  为第  $(k-1)$  次采样时刻输入控制系统的偏差值;  $T$  为采样周期.

因为每次输出的  $u(k)$  值直接与执行装置的位置一一对应, 所以式 (1.5) 称为位置型 PID 算法. 采用此种算法, 每次输出均与过去的状态有关, 计算时要对  $e(k)$  进行累加. 如此一来, 不仅计算烦琐, 而且还会占用许多的内存空间. 计算机输出的  $u(k)$  对应的是执行机构的实际位置, 如果计算机出现故障,  $u(k)$  的大幅度变化, 会引起执行机构位置的大幅度变化. 这种情况往往是生产实践中不允许的, 在某些场合, 还可能造成重大的生产事故, 因而产生了增量式 PID 控制的控制算法. 所谓增量式 PID 是指数字控制器的输出只是控制量的增量  $\Delta u(k)$ . 由式 (1.5) 推导出增量式 PID 控制算法. 根据递推原理可得

$$u(k-1) = k_p e(k-1) + k_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j-1)T + k_d \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T} \quad (1.6)$$

用式 (1.5) 减去式 (1.6) 可得增量式 PID 控制算法的表达式

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \\ &= (k_p + k_i + k_d)e(k) - (k_p + 2k_d)e(k-1) + k_d e(k-2) \end{aligned} \quad (1.7)$$

式 (1.7) 称为增量式 PID 控制算法. 可以看出, 由于一般计算机控制系统采用恒定的采样周期  $T$ , 一旦确定了  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ , 只要使用前后 3 次测量值的偏差, 即可由式 (1.7) 求出控制增量. 采用增量式算法时, 计算机输出的控制增量  $\Delta u(k)$  对应的是本次执行机构位置 (如阀门开度) 的增量. 对应阀门实际位置的控制量, 即控制

量增量的积累  $u(k) = \sum_{j=0}^k \Delta u(j)$  需要采用一定的方法来解决. 例如, 用有积累作用的元件 (如步进电动机) 来实现, 而目前较多的是利用算式  $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$  通过执行软件来完成.

由式 (1.5) 和式 (1.7) 可以看出, 就整个系统而言, 位置式与增量式控制算法并无本质区别, 或者仍然全部由计算机承担计算或者一部分出去由其他部件完成. 增量式控制虽然只是算法上作了一点改进, 但带来了不少优点:

- (1) 由于计算机输出增量, 所以误动作时影响小, 必要时可用逻辑判断的方法去掉.
- (2) 手动 / 自动切换时冲击小, 便于实现无扰动切换. 此外, 当计算机发生故障时, 由于输出通道或执行装置具有信号的锁存作用, 故能仍然保持原值.
- (3) 算式中不需要累加, 控制增量  $\Delta u(k)$  的确定仅与最近三次的采样值有关, 所以比较容易通过加权处理而获得比较好的控制效果.



## 第 2 章 PID 控制器参数整定方法

### 2.1 常规 Z-N 整定方法及实现分析

常规 Ziegler-Nichols 整定方法<sup>[21~23]</sup>是 Ziegler 和 Nichols 于 1942 年提出的,它是基于受控过程的开环动态响应中某些特征参数而进行的 PID 参数整定,其整定经验公式是基于带有延迟的一阶惯性模型提出的,这种对象模型如下:

$$G(S) = \frac{K}{TS+1}e^{-LS} \quad (2.1)$$

式中:  $K$  为放大系数;  $T$  为惯性时间常数;  $L$  为延迟时间。

在实际过程控制系统中,有大量的对象模型可以近似地由这样的一阶模型来表示,如果无法建立对象模型,可以由实验提取其相应特征参数  $K$ 、 $L$ 、 $T$  或  $K_c$ 、 $\omega_c$  ( $K_c$  为临界振荡增益,  $\omega_c$  为临界振荡角频率)。

特征参数的提取方法有以下两种。

(1) 通过实验方法测取过程开环阶跃响应曲线,也可以通过控制对象的动态仿真得到,如图 2.1 所示。设  $u(t) = u_0l(t)$ , 其中  $P$  点是特征曲线(阶跃响应)的拐点,  $AB$  为过  $P$  点的切线,则可以从图 2.1 中直接求取过程的特征参数  $K = y(\infty)/u_0$ 。

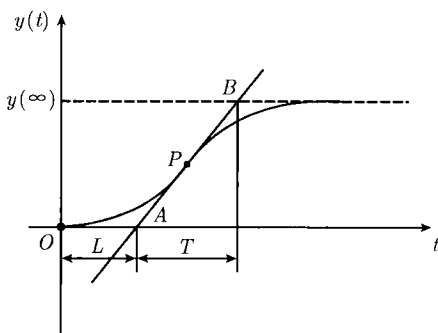


图 2.1 切线法求取特征参数

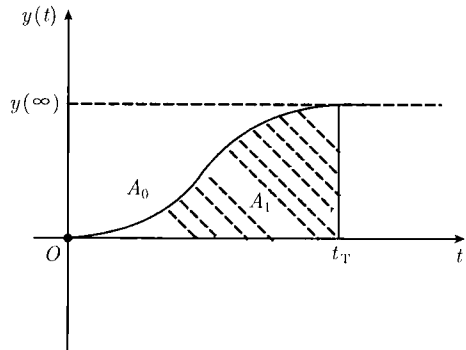


图 2.2 面积法求特征参数

用切线法求取特征参数很难自动化,且不够精确,可采用面积法,如图 2.2 所示。设  $u(t) = u_0l(t)$ , 其中

$$A_0 = \int_0^{\infty} [y(\infty) - y(t)]dt \quad (2.2)$$