



全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材

智能控制

李士勇 李 研 编著



清华大学出版社

全国工程类

教育国家级规划教材



智能控制

李士勇 李 研 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

智能控制被誉为继经典控制、现代控制理论之后创立的第三代控制理论,它研究应用计算机模拟人类智能对难以建模的复杂对象进行自动控制的理论、方法与技术。本书内容包括:从传统控制到智能控制,模糊控制,神经控制,专家控制,仿人智能控制,递阶智能控制,学习控制,智能优化算法,智能控制与智能优化的融合,智能控制的工程应用实例。全书由浅入深、深入浅出地阐述智能控制的基本概念、原理、方法及其应用。

本书是全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材,既可作为自动化及相关专业工程硕士研究生教材,也可作为相关专业高年级本科生及科技人员学习参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

智能控制/李士勇,李研编著.--北京:清华大学出版社,2016

全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材

ISBN 978-7-302-43656-0

I. ①智… II. ①李… ②李… III. ①智能控制—研究生—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084675 号

责任编辑:王一玲

封面设计:何凤霞

责任校对:时翠兰

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:15.5 字 数:330千字

版 次:2016年6月第1版 印 次:2016年6月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:39.00元

前言

智能控制对许多人来说,既熟悉又陌生。说熟悉是因为当代“智能”这个词很时髦,说陌生是因为即使从事控制的专业人员也未必对智能控制的内涵理解得很深刻。

自动控制的产生来源于人们对生产过程自动化的需求,既可以减轻人们的劳动强度,又可以提高生产效率和产品质量。随着科学技术的迅猛发展,被控对象变得日益复杂,以至于人们难以用精确的数学模型加以描述,即使建立了非常复杂的数学模型,也难以用于实际的控制系统设计。因此,对于具有不确定性复杂对象的控制难题,基于被控对象精确数学模型的传统控制——经典控制理论及现代控制理论都面临着严峻的挑战。

面对难以用传统控制理论控制的复杂对象,具有一定操作经验的人员采用人工控制方法往往取得满意的控制效果。这些操作人员既不需要对象的数学模型,也不需要控制专家的指导,而是凭借他的操作经验,借助于仪器、仪表等传感器对被控对象隐含在输入输出数据中的动态行为不断观测与分析,并根据控制过程的要求,不断通过执行机构对被控过程加以调节,从而实现了对复杂对象的有效控制。

随着计算机技术的飞速发展和性能的不断提高,使得用机器模拟人的智能决策行为对复杂对象进行控制变得易于实现,这样的控制形式被称为智能控制。因此,智能控制是借助于计算机模拟人(包括操作人员及控制专家)对难以建立精确数学模型的复杂对象的智能控制决策行为,基于控制系统的输入输出数据的因果关系推理,实现对复杂对象计算机闭环数字控制的形式。

本书第一作者李士勇教授早在 20 世纪 80 年代就开始了模糊控制、智能控制的教学和科研工作。编著《模糊控制和智能控制理论与应用》(1990);《模糊控制·神经控制和智能控制论》(1996 第一版,1998 第二版)荣获 1999 年“全国优秀科技图书奖”暨“科技进步奖(科技著作)三等奖”。本书跻身于十大领域中国科技论文被引频次最高的前 50 部专著与译著排行榜(见《中国科学计量指标:论文与引文统计》2000 卷、2001 卷,中国科学院文献情报中心出版);据中国知网“中国期刊全文数据库”、“中国博士硕士论文全文数据库”、“中国重要会议全文数据库”检索结果,截至 2015 年 11 月该书已被十大领域 6232 篇论文引用。美国 IEEE Fellow、田纳西大学 J. H. Hung (洪箴)教授 1997 年看过作者上述两本著作后曾指出:

Foreword

“李教授在模糊控制、神经网络控制和智能控制方面有深入的理论研究和特殊的学术造诣和贡献。”

用计算机模拟人脑的智能决策行为通常有三种模拟途径：符号主义；联结主义；行为主义。基于上述三种模拟形式，分别创立和发展了实现智能控制的三种基本形式——基于模糊逻辑推理的智能控制（简称模糊控制）；基于神经网络推理的智能控制（简称神经控制）；基于专家知识推理的智能控制（简称专家控制）。本教材以主要篇幅阐述模糊控制、神经控制和专家控制系统的组成、原理、设计及应用等内容。此外，也用一定的篇幅介绍递阶智能控制，学习控制，智能优化算法及智能控制与智能优化融合方面的内容。

全书共8章，第1章从传统控制到智能控制；第2章基于模糊逻辑的智能控制；第3章基于神经网络的智能控制；第4章专家控制与仿人智能控制；第5章递阶智能控制与学习控制；第6章智能优化算法；第7章智能控制和智能优化的融合；第8章智能控制的工程应用实例。

参加本书部分章节中部分内容编写工作和提供素材的还有李浩（第2章）、李盼池（第3章）、李巍（第3、4章）、黄忠报（第6、7章）、左兴权（第6章）。

本书是全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材。教学参考学时40学时，建议教学时数分配如下：第1章2学时；第2章10学时；第3章8学时；第4章6学时；第5章4学时；第6章6学时；第7章4学时；第8章供学生自学。如果教学时数定为30学时，建议重点讲授第1~5章或第1~3章的内容，教师也可根据教学需要选讲部分章节的内容。

为了满足工程硕士研究生的教学需求，编者在撰写过程中尽可能采取由浅入深，深入浅出，启发思维的写作方法，旨在通过本教材的学习达到理解和掌握智能控制最基本的概念、原理、设计方法及其应用方面的知识。作者为各章都精心设计了一些启迪思考题，旨在激发学生的学习积极性和增强创新思维意识。

本书的出版工作始终得到清华大学出版社王一玲责任编辑的关心和重视，对她的热诚和为本书编辑加工付出的辛劳表示衷心感谢！

本教材在编写中引用了部分国内外有关智能控制的理论与应用成果，向被引用的文献的作者致以诚挚的谢意！由于智能控制涉及知识面广且处在不断发展过程中，所以书中难免存在一些不足，恳请广大读者给予指正。

作者 2016年3月

于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 从传统控制到智能控制	1
1.1 自动控制的基本问题	1
1.1.1 自动控制的概念	1
1.1.2 自动控制的目的及要求	2
1.1.3 自动控制中的矛盾问题	2
1.2 自动控制的基本原理	2
1.2.1 控制论的创立	2
1.2.2 反馈是自动控制的精髓	3
1.2.3 反馈在闭环控制中的作用	3
1.2.4 反馈控制的基本模式	4
1.3 控制理论发展的历程	5
1.3.1 经典控制理论	5
1.3.2 现代控制理论	6
1.3.3 智能控制理论	7
1.4 智能控制理论的基本内容	8
1.4.1 智能控制的基本概念	8
1.4.2 智能控制的多学科交叉	10
1.4.3 智能控制的基本原理	11
1.4.4 智能控制的基本功能	12
1.4.5 智能控制的基本要素	13
1.4.6 智能控制系统的结构	13
1.4.7 智能控制的类型	15
启迪思考题	15

Contents

第 2 章 基于模糊逻辑的智能控制	16
2.1 模糊控制概述	16
2.1.1 模糊控制的创立与发展	16
2.1.2 模糊控制器的分类	17
2.2 模糊逻辑基础	18
2.2.1 基于二值逻辑的经典集合	18
2.2.2 模糊集合与模糊概念	18
2.2.3 模糊集合及其运算	19
2.2.4 模糊矩阵与模糊向量	23
2.2.5 模糊关系	26
2.2.6 模糊逻辑推理	28
2.2.7 模糊系统的万能逼近特性	31
2.3 模糊控制的原理	32
2.3.1 模糊控制系统的组成	33
2.3.2 模糊控制的工作原理	33
2.3.3 模糊控制器的控制性能	38
2.4 经典模糊控制器的设计方法	39
2.4.1 模糊控制器的结构设计	39
2.4.2 模糊控制规则的设计	40
2.4.3 Mamdani 模糊推理法	43
2.4.4 精确量的模糊化及量化因子	44
2.4.5 模糊量的清晰化及比例因子	46
2.4.6 查表式模糊控制器设计	46
2.4.7 解析式模糊规则自调整控制器	51
2.5 T-S 型模糊控制器设计	52
2.5.1 T-S 模糊模型	52
2.5.2 基于 T-S 模型的模糊推理	53
2.5.3 \hat{T} -S 型模糊控制系统设计	54
2.6 模糊-PID 控制	55
2.6.1 模糊-PID 复合控制	55
2.6.2 基于模糊推理优化的 PID 控制	55
2.7 自适应模糊控制	57
2.7.1 模糊系统辨识	57
2.7.2 自适应模糊控制的基本原理	59

2.7.3	模型参考自适应模糊控制	61
2.8	模糊控制的实现技术	62
2.8.1	模糊控制软件开发工具	62
2.8.2	模糊控制芯片	63
2.9	基于 MATLAB 的模糊控制系统设计	64
2.9.1	MATLAB 模糊逻辑工具箱	64
2.9.2	基于 MATLAB 的模糊控制系统仿真	67
	启迪思考题	71
第 3 章	基于神经网络的智能控制	72
3.1	神经网络系统基础	72
3.1.1	神经网络研究概述	72
3.1.2	神经细胞结构与功能	73
3.1.3	人工神经元模型	74
3.1.4	神经网络的特点	75
3.1.5	神经网络结构与模型	77
3.1.6	神经网络训练与学习	78
3.1.7	神经网络的学习规则	80
3.2	控制中的常用神经网络	82
3.2.1	感知器	82
3.2.2	前向神经网络	83
3.2.3	径向基神经网络	85
3.2.4	反馈神经网络	87
3.2.5	小脑模型神经网络	90
3.2.6	大脑模型自组织神经网络	92
3.2.7	Boltzmann 机	95
3.3	基于神经网络的系统辨识	96
3.3.1	神经网络的逼近能力	96
3.3.2	神经网络系统辨识的原理	97
3.3.3	基于 BP 网络的非线性系统模型辨识	98
3.4	基于神经网络智能控制	99
3.4.1	神经控制的基本原理	99
3.4.2	基于神经网络智能控制的类型	100
3.4.3	基于传统控制理论的神经控制	102
3.5	神经 PID 控制	103

3.5.1	神经元 PID 控制	103
3.5.2	自适应神经元 PID 控制	105
3.6	神经自适应控制	107
3.6.1	模型参考神经自适应控制	107
3.6.2	神经自校正控制	108
3.7	基于 MATLAB 的神经控制系统设计	110
3.7.1	MATLAB 神经网络工具箱	110
3.7.2	基于 MATLAB 的模型参考神经自适应控制系统仿真	114
	启迪思考题	119
第 4 章	专家控制与仿人智能控制	120
4.1	专家系统的基本概念	120
4.1.1	专家与专家系统	120
4.1.2	专家系统的基本结构	121
4.2	专家系统的结构与原理	122
4.2.1	专家控制系统的特点	122
4.2.2	专家控制系统的结构	122
4.2.3	专家控制系统的原理	124
4.2.4	实时过程控制专家系统举例	124
4.3	专家控制器	125
4.3.1	专家控制器的结构	126
4.3.2	一种工业过程专家控制器设计	127
4.4	仿人智能控制	128
4.4.1	从常规 PID 控制谈起	128
4.4.2	仿人智能控制的基本思想	129
4.4.3	系统动态行为的特征识别	130
4.4.4	仿人智能控制原理	132
4.5	仿人智能控制的多种模式	133
4.5.1	仿人智能积分控制	134
4.5.2	仿人智能采样控制	136
4.5.3	基于极值采样的仿人智能控制	138
	启迪思考题	140
第 5 章	递阶智能控制与学习控制	142
5.1	大系统控制的形式与结构	142

5.1.1	大系统控制的基本形式	142
5.1.2	大系统控制的递阶结构	143
5.2	递阶控制的基本原理	144
5.2.1	协调的基本概念	144
5.2.2	协调的基本原则	145
5.3	递阶智能控制的结构与原理	145
5.3.1	递阶智能控制的结构	145
5.3.2	递阶智能控制的原理	146
5.4	蒸汽锅炉的递阶模糊控制	147
5.4.1	模糊变量与规则间的数量关系	147
5.4.2	递阶模糊控制规则	148
5.4.3	蒸汽锅炉的两级递阶模糊控制系统	149
5.5	学习控制系统	150
5.5.1	学习控制的基本概念	150
5.5.2	迭代学习控制	151
5.5.3	重复学习控制	152
5.5.4	其他学习控制形式	153
5.6	基于规则的自学习控制系统	155
5.6.1	产生式自学习控制系统	155
5.6.2	基于规则的自学习模糊控制举例	156
	启迪思考题	158
第6章	智能优化原理与算法	160
6.1	智能优化算法概述	160
6.1.1	模糊计算与神经计算	160
6.1.2	进化计算	161
6.1.3	人工免疫算法	162
6.1.4	群智能优化算法	163
6.1.5	模拟退火算法	164
6.1.6	禁忌搜索算法	164
6.2	智能优化算法的理论基础	164
6.2.1	系统科学	164
6.2.2	复杂适应系统理论	165
6.2.3	复杂适应系统的运行机制	167
6.2.4	复杂适应系统理论的特点	168

6.2.5	智能优化算法的原理	169
6.3	RBF 神经网络优化算法	170
6.3.1	RBF 神经网络	170
6.3.2	RBF 网络学习算法	171
6.3.3	RBF 神经网络在控制中的应用	172
6.4	遗传算法	173
6.4.1	生物的进化与遗传	173
6.4.2	遗传算法的基本概念	173
6.4.3	遗传算法的基本操作	174
6.4.4	遗传算法实现步骤	175
6.4.5	遗传算法用于函数优化	177
6.4.6	遗传算法和模糊逻辑及神经网络的融合	178
6.5	粒子群优化算法	181
6.5.1	粒子群优化的基本思想	181
6.5.2	粒子群优化算法原理	181
6.5.3	PSO 算法步骤	182
6.5.4	PSO 算法的改进及应用	184
6.6	免疫优化算法	185
6.6.1	免疫学的基本概念	185
6.6.2	免疫系统的组织结构	186
6.6.3	免疫机制与克隆选择理论	186
6.6.4	人工免疫模型与免疫算法	188
6.6.5	免疫应答中的学习与优化	189
6.6.6	克隆选择算法	192
6.6.7	免疫优化算法的应用	193
	启迪思考题	194
第 7 章	智能控制和智能优化的融合	196
7.1	智能控制和智能优化的融合	196
7.2	智能优化的快速算法	197
7.3	粒子群优化的模糊控制器设计	197
7.3.1	PSO 基本算法	197
7.3.2	模糊控制器的设计原理	199
7.3.3	PSO 优化的模糊控制器在主汽温控制中的应用	200
7.4	基于 RBF 神经网络优化 PID 控制参数	203

7.4.1	RBF 神经网络对被控对象的辨识	203
7.4.2	RBF 网络优化 PID 控制参数的算法实现	204
7.5	基于免疫克隆优化的模糊神经控制器	205
7.5.1	基本的免疫克隆算法	205
7.5.2	改进的免疫克隆选择算法	206
7.5.3	基于免疫克隆算法优化的模糊神经控制器设计	207
7.5.4	仿真结果及结论	208
	启迪思考题	209
第 8 章	智能控制的工程应用实例	210
8.1	基于神经网络推理的加热炉温度模糊控制	210
8.1.1	基于神经网络推理的模糊控制	210
8.1.2	模糊控制器的神经网络实现	212
8.1.3	现场运行效果	213
8.2	神经网络在车底炉燃烧控制中的应用	214
8.2.1	燃烧控制系统的设计	215
8.2.2	神经网络模型的建立	216
8.2.3	神经网络的训练过程	218
8.2.4	神经网络在车底炉燃烧控制中的应用实例	219
8.3	专家控制在静电除尘器电源控制系统中的应用	221
8.3.1	高压直流静电除尘电源控制系统	222
8.3.2	专家控制系统控制器设计	222
8.3.3	控制结果及其分析	225
8.4	学习控制在数控凸轮轴磨床上的应用	226
8.4.1	FANUC 数控系统学习控制功能	226
8.4.2	学习控制的实现	227
8.4.3	学习控制效果	229
	启迪思考题	231
参考文献	232

从传统控制到智能控制

智能控制理论是在经典控制理论和现代控制理论面临缺乏精确模型的被控对象挑战的形势下创立起来的新一代控制理论。智能控制是人工智能、智能优化和反馈控制理论相结合的一种计算机数字控制形式。

本章在阐述自动控制的概念、问题、思想和原理的基础上,论述经典控制、现代控制及智能控制的发展历程,它们的区别与联系及主要特征。最后,阐述智能控制的概念、原理、功能、结构、分类等内容。

1.1 自动控制的基本问题

1.1.1 自动控制的概念

所谓控制,就是控制(调节)可支配的自由度(调节变量)使系统(对象或过程)达到可接受的运行状态。

自动控制是指在无人参与的情况下,利用控制装置使被控对象按期望的规律自动运行或保持状态不变。例如,利用离心球对蒸汽机速度的控制;浮球机构对水箱水位的控制;对卫星、飞船、空间站、空天飞机等航天器飞行轨道与姿态的精确控制等。从家用空调、冰箱的温度控制,到工业过程控制,再到现代武器系统、运载工具及深空探测等都离不开自动控制。

被控对象期望的运行规律通常称为给定信号(输入信号),一般分为三类:一是阶跃信号,即给定一个常值信号,使被控对象的输出保持某常值或某状态不变;二是斜坡信号,使被控对象的输出跟踪给定的斜坡信号;三是任意变化的信号,如斜坡信号和阶跃信号的任意组合,或正弦周期信号等。

自动控制系统根据输入为阶跃信号、斜坡信号和任意信号三种基本形式,分别称为自动

调节系统(自动调整系统、恒值调节系统)、随动系统(跟踪系统、伺服系统)和自动控制系统,统称它们为自动控制系统。

1.1.2 自动控制的目的是要求

人们期望通过自动控制不断地减轻人的体力和脑力劳动强度,提高控制效率和控制精度,提高劳动生产率和产品质量;通过远离危险对象进行遥控实现自动化。总之,通过自动控制可以实现自动化,实现机器逐步代替人的智力,走向智能自动化。

人们总是期望在输入信号的作用下,使被控对象能快速、稳定、准确地按预定的规律运行或保持状态不变。即使在有干扰和被控对象参数变化的不利情况下,控制作用仍能保持系统以允许的误差按预定的规律运行。因此,可以把对自动控制的基本要求概括为快速性、稳定性和准确性,简言之“快、稳、准”。

1.1.3 自动控制中的矛盾问题

要想通过自动控制系统实现对被控对象“快、稳、准”的控制,这三个指标之间往往存在着矛盾。要快,就要加大控制作用,易导致系统超调而不易稳定;要稳,就要限制控制作用,这样又会使控制过程变慢,也会降低稳态精度;要准,也要加大控制作用,但这样会出现较大超调而使响应时间变长。下面来分析一下控制过程中“快、稳、准”之间的矛盾问题。

被控对象无论是装置、过程,还是系统都是由物质构成的,物质的基本属性是具有一定的质量,因而具有惯性。因此,要使被控对象的运动过程不需要时间发生突变是不可能的。如果这样,就会要求控制的能量或功率无穷大,这是不现实的。此外,有些被控对象,如某些齿轮传动系统、化工反应过程等不允许变化太快,否则可能导致部件损伤或化学反应过程发生爆炸等。由于有些被控对象的时变性、非线性、死区、不确定性及强干扰等都不利于实现控制的“快、稳、准”。因此,自动控制是在约束的条件下,对被控对象施加控制,使其尽可能“快、稳、准”地按期望的规律运行或保持状态不变。

解决控制过程中“快、稳、准”之间的矛盾问题,需要控制理论工作者应用不同控制理论和方法所要研究解决的共性问题。

1.2 自动控制的基本原理

1.2.1 控制论的创立

控制论的创始人维纳 14 岁毕业于塔夫茨学院,18 岁获得哈佛大学的博士学位。他曾师从哲学大师罗素,数学家哈迪和希尔伯特研究哲学、数学,并酷爱生物学。20 世纪 40 年

代初,在维纳和罗森布莱特周围聚集了一批不同领域的杰出科学家,如计算机创始人诺依曼,数学家别格罗、戈德斯丁,神经生理学家麦克卡洛,数理逻辑学家匹茨等,他们每月举行一次讨论会,来自不同学科的青年科学家相互切磋,探讨科学方法论问题,为维纳控制论的诞生奠定了重要基础。1948年,维纳发表了《控制论》一书,标志着自动控制的诞生。

维纳把控制论定义为“在动物和机器中控制和通讯的科学。”不难看出,控制论的创立是以维纳为代表的多学科领域科学家学术思想交叉融合的产物。

21世纪,控制理论的发展似乎又回到了维纳的时代,正面临着多种新兴学科交叉融合的数字化、网络化、智能化的方向快速发展。

1.2.2 反馈是自动控制的精髓

维纳在创立控制论的初期参加了火炮自动控制系统的研究工作,通过将火炮自动瞄准飞机与狩猎行为做类比,他提出了反馈的新概念,概括了动物和机器中控制和通信的共同特征。他指出,目的性行为可用反馈来代替的精辟思想。因此,反馈是维纳控制论思想的精髓。

尽管维纳在创立控制论的过程中并没有直言运用了哲学思想,但他师从大哲学家罗素有着深厚的哲学底蕴,他提出的反馈概念用于解决控制问题饱含着对立统一的哲学思想。由上述分析可知,被控系统的输出由于各种原因(对象参数变化、干扰等)总是企图背离给定的期望输出,即输入和输出之间构成了矛盾的双方,它们之间是对立的。既然输入和输出有矛盾,那么如何暴露出这一矛盾呢?维纳将输出反馈到输入一侧并比较二者的差异——误差,这就是发现矛盾的过程。

如何消除误差呢?这就是解决对立的矛盾双方如何统一的问题。设计一个以误差(还可包括误差的导数、积分等)为变量的控制律,通过控制器对被控对象不断地施加负反馈控制作用,使被控对象的输出与输入的误差就会不断地减小,直到误差减小到工程上所允许的程度。

综上所述不难看出,通过反馈发现系统误差,利用误差等来设计某种控制律,进而通过控制器对被控对象不断地施加负反馈控制作用去消除误差的过程,正是把输入和输出的矛盾双方统一起来的过程。基于误差去消除误差的负反馈控制思想遵循着矛盾双方对立统一的哲学思想。这种对立双方实现统一的过程,正是通过负反馈闭环控制自动实现的。也就是说,要想使矛盾对立的双方实现统一,就必须创造实现统一的转化条件。正如维纳指出,目的性行为可用反馈来代替,反馈就是矛盾对立双方实现统一的转化条件。所以说,没有反馈就没有自动控制。

1.2.3 反馈在闭环控制中的作用

反馈在控制系统中用来改变系统的快速且稳定的动态行为,降低系统对扰动信号的不确定性和模型不确定性的灵敏度。根据自动控制原理开环系统引入负反馈后,通过对闭环

传递函数的分析可知给控制系统带来以下四点好处：

- (1) 可以通过调节反馈环节的参数获得预期的瞬态响应，而开环控制则不能。
- (2) 控制系统引入反馈后可以控制或部分消除外部干扰信号、噪声的影响。
- (3) 反馈可以使灵敏度减小，即对被控对象参数变化更不敏感，这意味着反馈系统可以减少对象参数变化对输出的影响。
- (4) 当开环增益足够大时，通过反馈可以实现高精度控制。

控制系统引入反馈后给控制系统带来的不利方面主要表现在以下两点：

- (1) 反馈可以改变系统的动态性能，使系统响应加快，但稳定性降低甚至导致系统不稳定。
- (2) 反馈使系统的总增益受损失。

1.2.4 反馈控制的基本模式

从实现控制系统“快、稳、准”三个性能指标的要求出发，反馈控制需要比例控制、积分控制、微分控制三种基本模式。

1. 比例控制

比例控制又称为比例反馈控制。比例控制器的输出信号正比于系统误差，当误差一旦出现比例控制就发生作用。为了使被控对象快速达到期望的状态，就需要很大的比例增益使控制作用足够大以尽快克服对象的惯性。

但比例增益太大会使系统不稳定，而限定最大增益又不利于提高系统的稳态精度。因此，一般比例控制不能单独使用，因为纯比例控制不能使稳态误差减小到零，当给定值改变后总存在稳态误差——残余偏差。

比例控制作用主要是快速消除大的误差，主要满足自动控制性能对“快”的要求。比例控制作用是最基本的控制作用，一般应保持经常性的工作。

2. 积分控制

在控制作用中通过对误差信号的积分产生积分控制作用，去消除系统稳态误差，即使误差为零。由于积分控制作用，常值干扰信号也不会影响系统的稳态特性。通常将积分控制作用和比例控制作用联合使用，即所谓PI控制。由于积分的滞后作用易导致被控系统产生振荡；持续对误差积分使得积分过大导致控制器输出饱和。这是积分控制作用的两个缺点。

积分控制作用主要是消除稳态误差，主要用于满足自动控制性能对“准”的要求。

3. 微分控制

微分对变化越快的信号越敏感，微分控制作用是通过误差的变化率预报误差信号的未

来变化趋势。将微分环节引入反馈回路可以改善控制系统的动态性能。例如,为了提高快速性,需要比例控制作用的增益取得很大,这样势必造成超调。微分控制环节敏感于输入信号的变化率,使微分控制作用在不至于影响快速性的情况下却在很大程度上削弱了超调。微分控制作用不能单独使用,要与比例控制作用一起使用,即所谓的PD控制。

微分控制用于削弱比例控制造成的超调,主要满足自动控制性能对“稳”的要求。

经典PID控制是基于误差的比例(P)、积分(I)和微分(D)的线性组合进行控制的,它们的控制作用分别源于误差的现在、过去和将来的信息。

1.3 控制理论发展的历程

从1948年维纳(N. Wiener)创立控制论至今,尤其是近半个世纪以来,由于科学技术和生产力的迅猛发展,特别是计算机技术和自动化技术的飞速发展,推动了控制理论的快速发展。控制理论的发展历程可以概括为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个阶段。

1.3.1 经典控制理论

自动控制思想的产生可追溯到18世纪中叶英国的第一次工业革命,在1769—1788年间瓦特(J. Wate)发明蒸汽机和气球调节器。1868年,马科斯威尔(J. C. Maxwell)为一类蒸汽机调节器建立数学模型,并完成了稳定性分析。1872年,劳斯(E. J. Routh)和1890年霍尔维兹(Hurwitz)先后提出了系统稳定性的代数判据。1892年,俄国学者李雅普诺夫(Lyapunov)的《论运动稳定性的一般问题》博士论文,提出用能量函数研究系统稳定性问题的一般方法。20世纪初叶,1927年,美国贝尔实验室布莱克(H. S. Black)发明反馈放大器,1932年,伯德(H. W. Bode)分析了反馈放大器,利用频率特性,形成了奈奎斯特·伯德法。同年,瑞典奈奎斯特(H. Nyquist)研究出了系统稳定性分析方法。1946年,伊文思(W. R. Evans)提出根轨迹法。

第二次世界大战期间,维纳参加了火炮自动控制系统的研究工作,通过将火炮自动瞄准飞机与狩猎行为做类比,他发现了反馈的重要概念。在系统地总结前人研究成果的基础上,1948年他发表的《控制论》一书被作为形成经典控制系统的起点。1954年,钱学森《工程控制论》英文著作出版,推动了工程领域控制系统的研究。从20世纪40年代中期至50年代末期是经典控制理论的形成期。

在经典控制理论中,被控对象的频率特性是设计系统的主要依据,整个系统的性能指标也是通过引入控制来整定开环系统频率特性的方法实现的。由于对象频率特性靠实验测试等手段获得,不可避免带有不确定性,这导致经典控制理论所设计的控制器在很大程度上靠