

“十二五”国家重点图书·航空航天精品系列图书



国防特色教材·控制科学与工程

智能控制

李士勇 李巍 著

Intelligent Control



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

“十二五”国家重点图书·航空航天精品系列图书



国防特色教材·控制科学与工程

智能控制

Intelligent Control

李士勇 李 巍 著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

前 言

随着科学技术的飞速发展,被控对象变得越来越复杂,以至于人们难以建立其精确的数学模型,即使建立了非常复杂的数学模型,也难以用于控制系统设计。因此,面对具有高度非线性、时变性及不确定性等复杂被控对象的控制问题,基于被控对象精确数学模型的控制理论,无论是经典控制理论还是现代控制理论都受到了极大的挑战。

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作类比,他发现了反馈的重要概念。维纳等人认为,目的性行为可以用反馈来代替,从而突破了生命体与非生命体——机器控制的界限,把目的性行为这个生物所特有的概念赋予机器,这就为创立控制论奠定了重要基础。不难看出,维纳创立控制论一开始就和作为高级生物——人的智能决策行为联系在一起,只不过是后来由于控制领域专家、学者把控制论应用到工程的过程中,乃至在创立经典控制理论和现代控制理论的过程中,过分依赖于被控对象的精确建模,而忽视了在控制过程中对人的智能决策行为的利用;另一方面,由于在过去较长时期内计算机技术还不够发达,即使控制工作者想到利用人的智能控制决策行为,也难以实现。

国际控制界享有盛誉的瑞典奥斯特隆姆(K. J. Åström)教授指出,控制论是维纳在研究动物(包括人)和机器内部的通信与控制时创立的,当时提出了许多新概念,目前,这一领域似乎又回到了发现新概念的时代;美国乔治(F. H. George)教授在《控制论基础》一书中指出,控制论的基本问题之一就是模拟和综合人类智能问题,这是控制论的焦点。

近30多年来,计算机技术的飞速发展,带动了人工智能技术、计算智能方法、信息科学与技术、自动化技术等学科的迅猛发展,促进了模糊数学、神经网络、专家系统等新兴交叉学科的诞生。同时,促使广大科学工作者又在维纳控制论的思想指引下,在一个新的高度上进行控制理论、人工智能、计算机科学、神经生理学、系统科学、信息科学、计算智能等多学科的密切合作,以期更有效地模拟和综合人的智能控制决策行为,实现对缺乏精确模型的被控对象进行有效的智能控制。

作者长期从事模糊控制、神经控制、智能控制、智能优化、非线性科学及复杂

适应系统理论与应用方面的科研及教学工作。曾作为高级访问学者在日本从事模糊控制、神经控制、智能控制方面的合作研究工作。在模糊控制、智能控制领域,作者先后出版过《模糊控制与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)两部著作。美国 IEEE Fellow、田纳西大学洪箴(J. C. Hung)教授 1997 年曾指出:“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及贡献。”专著《模糊控制·神经控制和智能控制论》1999 年获全国优秀科技图书奖。根据中科院信息中心提供的数据表明,该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;由中国知网“中国期刊全文数据库”、“中国博士学位论文全文数据库”、“中国优秀硕士学位论文全文数据库”及“中国重要会议论文全文数据库”联网进行跨库高级检索获悉,该书自 1997 年至 2010 年底已被国内 4 700 余篇论文引用。引用该书论文的学科领域涉及之广、涉及期刊种类之多达 600 余种,即使在 2010 年一年之内还有多达 376 篇论文引用,令作者始料不及!

本书在撰写过程中,汲取了作者《模糊控制·神经控制和智能控制论》一书的精华,并增加和更新一些有关理论、设计及应用方面的内容。如第 1 章智能控制引论从全新的视角论述三代控制理论的产生、发展及其本质特性的对比;对第 2~5 章的模糊控制、神经控制、专家控制与仿人智能控制、递阶智能控制与学习控制的内容进行了适当的增减,并重新组织、撰写;第 6 章基于多智能体智能控制和第 7 章基于智能优化的智能控制两章为新增加的反映作者新成果的内容;第 8 章智能控制的工程应用中增加了部分最新的应用实例。

本书旨在综合运用控制论中的反馈思想和模糊推理系统、神经网络系统、专家系统、仿人系统、递阶系统、学习系统、智能体系统、智能优化算法的融合,系统地阐述模糊控制、神经控制、专家控制、仿人控制、递阶智能控制、自学习控制、基于智能体的控制、智能优化控制的基本概念、原理、设计及应用问题。与国内外同类书相比,本书具有如下鲜明特色:

1. 本书将智能控制视为控制论与系统论、信息论、人工智能、计算智能的五元交集。其基本思想是在已有的智能控制结构描述中增加了系统论,将“自动控制”用“控制论”取代,将“运筹学”用“计算智能”取代。这样描述的智能控制结构更为完善、更为合理。

2. 本书将智能控制器对复杂对象的直接控制过程,看做对被控对象逆模型的逼近过程,这样有利于深刻揭示智能控制的本质特征。

3. 本书提出智能信息、智能反馈、智能决策是智能控制三要素的新观点,这样有利于提高设计智能控制器的智能性,也便于分析传统控制和智能控制的区别与联系。

4. 本书突出智能控制中的智能来源于对人脑左半球模糊思维与右半球形象思维以及对人控制行为的模拟,并强调定性变量、定量变量及定性定量综合集成推理在智能控制中的重要作用。

5. 本书提出智能优化控制的新概念。其基本思想认为,一个好的智能控制系统不仅应该有好的智能控制器,而且智能控制器自身的控制参数乃至结构在控制过程中应该进行自适应的优化,以获得最佳的控制效果。这种优化应该是不基于精确模型的,且要实时的。因此,必须采用智能优化算法,于是基于智能优化的智能控制,简称为智能优化控制。

作者必须指出,智能控制与传统线性控制有本质的区别:传统的线性控制理论满足叠加原理,它的思想方法源于确定论(决定论);智能控制理论属于非线性控制范畴,不再满足叠加原理,它的思想方法是整体论(综合论),非线性科学与复杂适应系统理论是研究智能控制的强有力的工具。

对于研究智能控制的目的,本书还要特别强调以下观点。

研究模糊控制的目的是不是要把控制理论变得模模糊糊,而是要通过引入模糊语言变量及其同它们之间构成的模糊关系进行模糊逻辑推理,从而使微机控制进入那些基于被控对象精确模型无法控制的禁区,以便获得基于精确模型控制无法达到的精确控制效果。

研究神经控制的目的是不是要把控制理论变得神乎其神,而是要利用人工神经网络所具有的信息分布存储、并行处理与推理、自组织与自学习的功能,以及非常强的非线性映射(逼近)能力,使它对难以精确描述的复杂非线性对象进行建模,或充当控制器,或优化控制器参数,或故障诊断等,从而对复杂非线性对象实现基于神经网络智能控制。

研究专家控制与仿人智能控制的目的是不是要把控制理论倒退回只凭人的经验控制的境地,而是要进一步深刻认识、研究和利用专家或人工控制过程的经验、知识、直觉推理等,在对难以建模的复杂对象控制决策中所具有的重要作用,从而更好地利用微机模拟专家的智能控制决策行为,根据复杂被控动态过程提供的定性信息和定量信息,进行定性定量综合集成推理决策,从而实现对复杂非线性不确定系统的有效控制。

本书在撰写过程中,为满足教学和科研人员自学的需要,不仅每一章内容都相对独立、自成系统,而且各章之间有相互联系、有机结合。在每一部分内容的撰写过程中,特别突出由浅入深、深入浅出,强调概念、理论与工程应用之间的联系,注重启发、诱导读者的创新思维。

本书除了可供信息、控制、自动化、计算机应用、人工智能及相关领域科技人员使用外,也可作为自动化类及相关专业研究生或高年级本科生智能控制的教材。其中第1~5章是智能控制的基本内容,建议授课为30学时;第6~8章为智能控制的深入研究及应用举例的内容,选讲这部分内容建议为10学时,或者作为学生自学、阅读内容。

参加本书编写的和提供素材的还有李研、班晓军、张筱磊、黄忠报、章钱、左兴权、黄金杰、袁丽英、栾秀春、李浩。书中引用了部分国内外有关智能控制的理论与应用成果,向被引用文献的作者致以诚挚的感谢!

由于本书涉及知识面广,时间较紧,加之作者水平有限,书中难免存在一些不足之处,欢迎广大读者给予批评指正。

作 者

2011年10月于哈尔滨

目 录

第 1 章 智能控制引论	1
1.1 自动控制的基本问题	1
1.1.1 什么是自动控制	1
1.1.2 为什么需要自动控制	2
1.1.3 对自动控制的基本要求	2
1.1.4 为什么控制难以实现快稳准	2
1.2 自动控制的基本原理	3
1.2.1 维纳控制论的创立	3
1.2.2 自动控制的精髓——反馈	3
1.2.3 反馈在闭环控制中的作用	4
1.2.4 反馈控制的基本模式	4
1.3 控制理论发展的三阶段论	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
1.3.4 控制理论发展的三个阶段	8
1.4 智能控制理论引论	10
1.4.1 智能控制的基本概念	10
1.4.2 智能控制的学科交叉	12
1.4.3 智能控制的基本原理	13
1.4.4 智能控制的基本功能	13
1.4.5 智能控制的基本要素	14
1.4.6 智能控制系统的结构	14
1.4.7 智能控制的基本类型	16
第 2 章 模糊控制	19
2.1 模糊控制概述	19
2.1.1 模糊控制的基本概念	19
2.1.2 模糊控制的创立与发展	20
2.1.3 模糊控制器的基本形式	20

2.2 模糊逻辑推理基础	21
2.2.1 经典集合与二值逻辑	21
2.2.2 模糊集合与模糊概念	22
2.2.3 模糊集合的表示及其运算	23
2.2.4 模糊矩阵	28
2.2.5 模糊关系	31
2.2.6 模糊逻辑推理	33
2.2.7 模糊系统的万能逼近理论	37
2.3 模糊控制的基本原理	38
2.3.1 模糊控制系统的组成	39
2.3.2 模糊控制的工作原理	39
2.4 经典模糊控制器的设计	46
2.4.1 模糊控制器的结构设计	46
2.4.2 模糊控制规则的设计	46
2.4.3 Mamdani 模糊推理方法	50
2.4.4 精确量的模糊化及量化因子	51
2.4.5 模糊量的清晰化及比例因子	52
2.5 查表式模糊控制器的设计	53
2.5.1 二维模糊控制器的推理方法	53
2.5.2 查表式模糊控制器设计举例	53
2.6 解析式模糊控制器及其规则自调整	58
2.7 T-S 型模糊控制器的设计	59
2.7.1 T-S 模糊模型	59
2.7.2 基于 T-S 模型的模糊推理	59
2.7.3 T-S 型模糊控制器的设计	61
2.8 模糊系统辨识	63
2.8.1 基于模糊关系模型的系统描述	63
2.8.2 基于模糊关系模型的系统辨识方法	64
2.8.3 基于模糊关系模型的自适应模糊建模	66
2.8.4 基于 T-S 模型的模糊系统辨识	68
2.9 自适应模糊控制	72
2.9.1 自适应控制的基本概念	72
2.9.2 自适应模糊控制的基本原理	73
2.9.3 模型参考自适应模糊控制	74

2.9.4 自校正模糊控制	75
第3章 神经控制	77
3.1 神经网络系统基础	77
3.1.1 神经网络研究概述	77
3.1.2 神经细胞结构与功能	78
3.1.3 人工神经元模型	80
3.1.4 神经网络的特点	80
3.1.5 神经网络结构与模型	82
3.1.6 神经网络训练与学习	84
3.1.7 神经网络的学习规则	85
3.2 控制中常用的神经网络模型	88
3.2.1 感知器	88
3.2.2 前向神经网络	88
3.2.3 径向基神经网络	91
3.2.4 反馈神经网络	93
3.2.5 Elman 神经网络	95
3.2.6 小脑模型神经网络	96
3.2.7 大脑模型神经网络	98
3.2.8 Boltzmann 神经网络	101
3.2.9 模糊神经网络	102
3.2.10 其他类型神经网络	103
3.3 基于神经网络的系统辨识	104
3.3.1 神经网络的逼近能力	104
3.3.2 神经网络系统辨识的原理	105
3.3.3 基于 BP 网络的非线性系统模型辨识	108
3.4 基于神经网络的智能控制	110
3.4.1 神经控制的基本原理	110
3.4.2 基于神经网络的智能控制	111
3.4.3 基于传统控制理论的神经控制	113
3.4.4 神经网络直接反馈控制	115
3.4.5 神经网络模型参考自适应控制	119
3.4.6 神经网络自校正控制	120
3.4.7 神经网络内模控制	121
3.4.8 神经元自适应 PID 控制	123

3.4.9 神经元自适应 PSD 控制	127
3.4.10 基于神经网络的模糊逻辑控制	129
3.4.11 基于模糊神经网络的自组织控制	139
第 4 章 专家控制与仿人智能控制	146
4.1 专家系统基础	146
4.1.1 专家系统概述	146
4.1.2 专家系统的结构原理	147
4.2 专家控制系统	148
4.2.1 专家控制系统的特点	148
4.2.2 专家控制系统的结构	149
4.2.3 专家控制系统的原理	150
4.2.4 实时过程控制专家系统举例	151
4.3 专家控制器	152
4.3.1 专家控制器的结构	152
4.3.2 一种工业过程专家控制器设计	153
4.4 仿人智能控制	154
4.4.1 常规 PID 控制剖析	154
4.4.2 仿人智能控制的基本思想	155
4.4.3 系统动态行为特征识别	156
4.4.4 仿人智能控制原理	159
4.5 仿人智能控制的多种模式	159
4.5.1 仿人智能积分控制	160
4.5.2 仿人智能采样控制	162
4.5.3 仿人极值采样智能控制	165
第 5 章 递阶智能控制与学习控制	167
5.1 大系统控制的递阶结构	167
5.1.1 大系统控制的基本形式	167
5.1.2 大系统控制的递阶结构	168
5.2 递阶控制的基本原理	169
5.2.1 协调	169
5.2.2 协调的基本原则	170
5.3 递阶智能控制的原理	170
5.3.1 递阶智能控制的结构	170
5.3.2 递阶智能控制的原理	171

5.4 蒸汽锅炉的模糊递阶控制	173
5.5 学习控制系统	175
5.5.1 学习控制系统	175
5.5.2 迭代学习控制	176
5.5.3 重复学习控制	178
5.5.4 其他学习控制形式	179
5.6 基于规则的自学习控制系统	180
5.6.1 产生式自学习控制	181
5.6.2 基于规则的自学习模糊控制算法	182
第6章 基于多智能体的智能控制	185
6.1 多智能体系统基础	185
6.1.1 智能体的基本概念	185
6.1.2 Agent 的分类	186
6.1.3 多智能体系统	188
6.2 基于多智能体的控制系统	189
6.2.1 多智能体控制系统的结构	189
6.2.2 多智能体控制系统的设计	191
6.3 多智能体在模糊控制器设计中的应用	192
6.3.1 多 Agent 倒立摆模糊控制系统	193
6.3.2 系统内 Agent 功能设计	193
6.3.3 Agent 间的协作策略	195
6.3.4 仿真结果及结论	196
第7章 基于智能优化的智能控制	198
7.1 智能优化控制系统	198
7.2 智能优化方法	199
7.2.1 智能优化算法的主要形式	199
7.2.2 智能优化的复杂适应系统理论基础	201
7.2.3 智能优化的快速算法	202
7.3 基于 RBF 神经网络优化的模糊制导律	203
7.3.1 RBF 网络的学习算法	203
7.3.2 RBF 网络优化 α 的公式推导	204
7.3.3 仿真结果	205
7.4 基于免疫克隆优化的模糊神经控制器	205
7.4.1 基本的免疫克隆算法	205

7.4.2	改进的免疫克隆选择算法流程	206
7.4.3	基于免疫克隆算法优化的模糊神经控制器设计	207
7.4.4	仿真结果及结论	208
7.5	控制参数组合优化的模糊控制器	209
7.5.1	递推调整规则的解析描述规则法	209
7.5.2	解析描述规则法的性能分析	210
7.5.3	时变修正函数及控制量的表达式	211
7.5.4	模糊控制器参数的组合优化	212
7.5.5	仿真结果及结论	213
第8章	智能控制的工程应用实例	215
8.1	倒立摆的 FUZZY-PD 复合控制	215
8.1.1	单级倒立摆的数学模型	215
8.1.2	FUZZY-PD 复合控制器的设计	216
8.1.3	两种控制器性能的仿真比较	219
8.1.4	倒立摆控制的实测曲线	219
8.1.5	结论	220
8.2	锅炉过热气温的自适应模糊神经网络控制	220
8.2.1	自适应神经模糊推理系统	220
8.2.2	自适应模糊神经控制器设计	222
8.2.3	现场实际应用结果	224
8.3	仿人智能温度控制器在加热炉中的应用	225
8.3.1	概述	225
8.3.2	仿人智能温度控制算法	225
8.3.3	实际应用性能对比及结论	227
8.4	仿生手臂的递阶智能控制	228
8.4.1	概述	228
8.4.2	自组织控制级	229
8.4.3	控制协调级	230
8.4.4	智能组织级	231
8.5	位置伺服系统的模糊学习控制	231
8.5.1	模糊学习控制器的设计	231
8.5.2	学习控制律对模糊控制规则的修正	233
8.5.3	双拇指手爪单关节的模糊学习位置伺服控制实验系统	234
8.6	基于多智能体的交通协调控制	234

8.6.1 交通流模型	235
8.6.2 多智能体控制结构	237
8.6.3 交通流优化控制	238
8.6.4 实例分析	241
8.6.5 结论	242
参考文献	243

第1章 智能控制引论

控制理论经历了经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个发展阶段。本章首先对自动控制的基本概念、基本问题、基本思想、基本原理进行了精辟阐述;然后,对三种控制理论的发展历程、它们的区别、关系及其本质特征深刻地进行了剖析,这些内容是系统学习、深入研究智能控制理论的重要基础。最后,论述了智能控制的概念、原理、结构、功能、分类等内容。

1.1 自动控制的基本问题

1.1.1 什么是自动控制

所谓控制是指某个主体使其他客体(对象)按一定的目的来动作(运行)。

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自动地按期望的规律运行或保持状态不变。例如,人们利用抛掷石块击打猎物,这是人对石块运动(轨迹)的一种控制;利用离心球对蒸汽机速度的控制;卫生间中浮球机构对水箱水位的控制;今天人们对卫星、飞船、空间站飞行轨道与姿态的精确控制等等。从民用的儿童电子玩具、家电产品到国防现代化的武器系统,航海、航空、航天运载工具及太空探索等都离不开自动控制。

上述的自动控制的定义包括三个要素:一是被控对象,二是控制装置,三是期望的目标及约束条件。被控对象可以小到元件、器件、装置,也可以大到一个系统,一个生产过程等;控制装置指控制器及相关设施;期望的目标指运行规律及性能指标,约束条件指无人参与控制,被控对象及环境所允许的运行条件。这里的“自动控制”是区别于手动控制的。因此,“自”字就有两层含义:一是“自己”指控制装置本身;二是“自动”指无需人参与。但须指出,有些高级的自动控制系统——人机系统是在部分有人参与下进行的,如空间站与飞船交会对接过程的测控系统就是这样的人机自动控制系统,有些指令是在运行过程中由专家给出的。

被控对象期望的运行规律又称为给定信号。给定信号通常可分为三类:一类是阶跃信号,即给定一个常值信号,目的是使被控对象的输出保持某一个常值或某一状态不变;二是斜坡信号,目的是使被控对象的输出跟踪这个变化的斜坡信号;三是任意变化的信号,如斜坡信号和阶跃信号的组合,或正弦周期信号等。

自动控制系统根据上述输入信号是阶跃信号、斜坡信号和任意变化信号的三种不同形式,分别称它们为自动调节系统(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。一般而言,把它们统称为自动控制系统。

1.1.2 为什么需要自动控制

人类认识世界和改造世界的根本目的是要把人们从生产活动、科学实验和社会实践等一切复杂、繁重、繁琐、危险的劳动(体力和脑力)环境中解放出来,并极大地提高劳动生产率,满足人们日益增长的物质文明和精神文明的需要。自动控制可以在很大程度上节省体力和脑力;可以提高控制效率和控制精度,提高劳动生产率和产品质量;为了安全起见,有些场合必须远离危险对象实行遥控,便于实现自动化。显然,自动控制是实现自动化的需要,没有自动控制就没有自动化,没有自动化就实现不了现代化。

1.1.3 对自动控制的基本要求

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三个字:快,稳,准,即快速性、稳定性和准确性。

实际上,快、稳、准这三个指标之间往往存在着矛盾。要快,就要加大控制作用,导致超调而不易稳定;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,就要加大控制作用,但这样会出现较大超调而使响应时间变长。因此,一般对被控对象难以实现又快、又稳、又准的控制。

1.1.4 为什么控制难以实现快稳准

被控对象无论是装置、过程,还是系统都是由物质构成的,物质都具有一定的质量,因而具有惯性。因此,要使被控对象的运动过程不需要时间,即发生突变是不可能的。如果这样,就会要求控制作用(能量或功率)无穷大,这是不现实的。此外,有些被控对象,如齿轮传动系统、化工反应过程等不允许变化太快,如果变化太快、太剧烈则可能导致部件损伤或化学反应过程易发生爆炸等。还有些被控对象具有时变性、非线性、死区、不确定性及强干扰等不利于控制的特性。因此,自动控制就是要在允许的条件下,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。如何解决控制过程中“快、稳、准”之间的矛盾问题,就成了控制理论工作者研究应用不同控制理论和方法所面临的共同问题。基于传统的控制理论设计控制系统时,往往把快、稳、准性能指标视为对立的,采取折中的方法来处理三者的关系。因此,难以获得期望的控制性能,而如何将三者对立统一起来正是智能控制要解决的一个关键问题。

1.2 自动控制的基本原理

1.2.1 维纳控制论的创立

维纳(N. Wiener)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(B. A. W. Russell),数学家哈迪(J. Hardy Wikinson)和希尔伯特(D. Hilbet)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(J. L. von Neumann),数学家别格罗(J. Bigelow)、戈德斯丁,神经生理学家麦克卡洛(W. S. McCulloch),数理逻辑学家匹茨(W. Pitts)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1948年《控制论》的诞生奠定了重要基础。维纳把控制论定义为:在动物和机器中控制和通信的科学。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。

1.2.2 自动控制的精髓——反馈

维纳在创立控制论的初期,他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,他高度概括了动物和机器中控制和通信的共同特征,提出了反馈的科学新概念,成为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应用了哲学思想,但是作为师从大哲学家罗素、有着深厚哲学底蕴的他提出的反馈概念用于解决控制问题,这一思想饱含着丰富的哲学思想。由前面的分析不难看出,被控对象由于各种原因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?维纳提出的反馈思想就是将输出反馈到输入一侧并和输入进行比较,其差异就是矛盾,即为误差。那么如何解决这一矛盾、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不断地减小,直到误差减小到所允许的程度。

综上不难看出,通过反馈发现误差,利用误差构造某种控制律,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。因此,反馈是自动控制的精髓,没有反馈就没有自动控制。反馈是获取控制信息的重要手段,如何利用反馈获取对控制决策有用的信息,是控制工作者必须认真研究的至关重要的问题。

1.2.3 反馈在闭环控制中的作用

通过对闭环传递函数的分析易知,引入反馈后给控制系统带来以下四点的好处:

- (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消除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

从对控制系统快、稳、准三个基本性能指标的要求出发,可以将反馈控制概括为比例控制、积分控制、微分控制三种基本模式。

1. 比例控制

为了使被控对象快速达到期望的状态,就要使控制作用足够大以克服对象的惯性。就如同给一个 RC 电路中的电容器充电一样,若 RC 电路中的元件参数不能改变,又要快速对电容器充电,只能在条件允许的情况下增大充电电压。同样,为了提高控制系统的快速性,必须施加一个比例放大环节,用以实现比例控制。

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,当误差一旦被检测到比例控制作用就发生作用。为了提高控制的快速性,就需要较大的比例增益,但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。

如果用一句话来概括比例控制的主要作用,可以认为比例控制作用主要是快速消除大的误差,即比例控制作用主要满足自动控制性能对“快”的要求。

2. 积分控制

在控制作用中引进积分控制,只要系统误差不为零,可以通过对误差的积分达到一定的程