

黄从智 白 焰 著

智能控制算法及其应用



科学出版社

智能控制算法及其应用

黄从智 白 焰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍各种典型智能控制算法的基本内容、设计与实现方法及其在函数优化、电力系统中的应用。书中首先阐述智能、智能控制的基本概念,介绍智能控制与传统的经典控制理论、现代控制理论的联系和区别。然后从四种典型智能控制算法(专家系统、模糊控制、神经网络和进化计算)入手分别阐述它们的发展历史、基本内容、实现方法及其应用。最后介绍混沌模拟退火动态烟花优化算法,并将其用于优化离散时间微分平坦自抗扰控制律的参数,通过计算机仿真和基于智能优化算法试验平台开展试验以验证该算法的有效性;介绍递减步长果蝇优化算法,并将其应用于风电机组齿轮箱的故障诊断;介绍云粒子群布谷鸟融合算法,通过联合循环发电机组典型热工过程模型参数辨识实例验证该算法的有效性。

本书可作为自动化、控制科学与工程等专业本科生、硕士生智能控制相关课程的教材,也可供从事相关专业教学与科研工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制算法及其应用/黄从智,白焰著. —北京:科学出版社,2019.6
ISBN 978-7-03-061416-2

I. ①智… II. ①黄… ②白… III. ①智能控制-算法-研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 108537 号

责任编辑:朱英彪 赵晓廷/责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹/封面设计:蓝正设计

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>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:290 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

21 世纪的今天,人类社会的发展日新月异,国内外人工智能的发展更是如火如荼,各种智能控制算法在各行各业的应用成果层出不穷。作者在从事“智能控制”的本科生、硕士生和留学生硕士课程教学,以及智能控制算法及其在电力系统中的应用研究中,一直致力于探索构建集各种典型智能控制算法的发展历史、基本内容、算法的 MATLAB 仿真实现、半实物仿真试验验证、电力系统工程实际应用案例于一体的新型教学体系,这也是本书的写作缘由。

本书涵盖专家系统、模糊控制、神经网络和进化计算四种经典的智能控制算法,介绍其基本理论、计算机仿真实现、工程实现及其应用等内容。首先阐述智能控制的发展历史,介绍其起源和发展过程;然后介绍基本智能控制算法及其基本含义;接着分析如何采用 MATLAB 软件仿真实现这些智能控制算法,再结合实际装置介绍如何在 PLC、DCS、FCS 中通过组态设计实现各种智能控制算法;最后结合实际工程应用案例阐述如何在实际工程中设计实现智能优化算法,以获得更优良的系统性能。

本书内容相关的研究得到国家自然科学基金项目(61304041)、北京高等学校青年英才计划项目(YETP0703)、中央高校基本科研业务费重大项目(2016ZZD03)、中央高校基本科研业务费军民融合项目(2019JG004)、桂林电子科技大学智能综合自动化高校重点实验室基金项目(智自 201502)和华北电力大学研究生优质课程“智能控制”建设项目等的资助,特此致谢。

衷心感谢美国克利夫兰州立大学 Zhiqiang Gao 教授、加利福尼亚浸会大学 Qing Zheng 副教授、密西西比大学 Chaomin Luo 副教授、康涅狄格大学 Peter B. Luh 教授、新泽西理工学院 Mengchu Zhou 教授,墨西哥高等研究院 Hebertt Sira Ramiréz 教授,加拿大康考迪亚大学 Youmin Zhang 教授,意大利都灵理工大学 Enrico Canuto 教授、米兰理工大学 Hamid Reza Karimi 教授,英国利兹大学 Kang Li 教授、拉夫堡大学 Wenhua Chen 教授等国际知名自动化专家对作者开展本书相关研究工作给予的启发和帮助。

本书由华北电力大学控制与计算机工程学院黄从智副教授、白焰教授撰写。感谢杨国田教授、李新利副教授、朱耀春博士、秦宇飞博士、申忠利博士、蒋毅恒博士、袁晓磊博士、李小缤硕士等对本书写作的指导和帮助,同时还要感谢本课题组的硕士研究生杜斌、李岩、李景、穆士才、张天阳、张松涛、殷月、盛歆歆、梁伟峰和可寅的辛勤工作和鼎力相助,协助完成本书的部分内容和编辑修改工作。本书付

梓之际，由衷感谢家人对我们的理解和鼎力支持，以及夜以继日的艰辛付出。没有你们的无私奉献，我们就无法全身心地投入到工作中。

本书配套 PPT 可发邮件到 hc2190@ncepu.edu.cn 索取，同时配有相应的慕课课程《智能控制》(学堂在线网址 <http://www.xuetangx.com/>，搜索“智能控制”，即可学习本书相关教学视频)。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评、指正。

作 者

2019 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 智能控制的发展历史	1
1.2 智能及智能控制的基本概念	3
1.3 PID 控制策略	5
1.4 传统控制面临的挑战	7
1.5 智能控制与传统控制的联系和区别	8
1.6 本书主要内容	11
参考文献	12
第 2 章 专家系统	15
2.1 专家系统的发展历史	15
2.2 基于搜索的问题求解	16
2.2.1 搜索的基本概念	16
2.2.2 逐个搜索	18
2.2.3 基于人工智能的搜索	24
2.3 基于 MATLAB 的 A* 算法程序设计与仿真实例	32
2.4 专家系统简介	40
2.5 专家 PID 控制	43
2.6 本章小结	45
参考文献	45
第 3 章 模糊控制	50
3.1 模糊控制的发展历史	50
3.2 模糊控制的数学基础	51
3.2.1 模糊集合	52
3.2.2 模糊关系	55
3.2.3 模糊推理	56
3.3 模糊控制器	58
3.4 模糊控制算法的 MATLAB 仿真设计与实现	61
3.4.1 MATLAB 模糊逻辑工具箱简介	61
3.4.2 模糊控制算法的仿真程序设计与实现	67

3.5 基于基金会现场总线的模糊 PID 控制试验验证	71
3.6 本章小结	81
参考文献	81
第 4 章 神经网络	84
4.1 神经网络的发展历史	84
4.2 神经网络的基本结构	85
4.3 感知器	89
4.3.1 感知器的基本思想	89
4.3.2 感知器的应用	91
4.4 BP 神经网络	98
4.5 基于 MATLAB 的神经网络应用仿真实例	103
4.5.1 基于 MATLAB 的感知器应用仿真实例分析	103
4.5.2 基于 MATLAB 的 BP 神经网络应用仿真实例分析	107
4.6 本章小结	119
参考文献	119
第 5 章 进化计算	124
5.1 进化计算概要	124
5.2 遗传算法	124
5.2.1 遗传算法的基本思想	125
5.2.2 基于 MATLAB 的遗传算法应用实例分析	128
5.2.3 遗传算法的模式理论	136
5.2.4 遗传算法的收敛性分析	139
5.2.5 遗传算法的改进	139
5.3 遗传编程	140
5.3.1 遗传编程的基本思想	141
5.3.2 遗传编程算法的工作步骤	146
5.3.3 基于 MATLAB 的遗传编程算法实例分析	146
5.4 本章小结	147
参考文献	148
第 6 章 基于 CSAD_FWA 的离散时间微分平坦自抗扰控制律参数优化	152
6.1 离散时间微分平坦自抗扰控制律	152
6.1.1 引言	152
6.1.2 微分平坦系统的概念	153
6.1.3 微分平坦自抗扰控制律	155
6.1.4 微分平坦自抗扰控制律离散化	157

6.2 混沌模拟退火动态烟花优化算法及仿真实例	164
6.2.1 动态烟花算法	164
6.2.2 混沌模拟退火动态烟花算法	166
6.2.3 优化算法的仿真实例	167
6.3 基于 PLC 的智能优化算法试验平台简介	169
6.3.1 系统结构示意图	169
6.3.2 人机界面的设计	170
6.4 基于 CSAD_FWA 的离散时间 DFADRC 参数优化仿真验证	173
6.5 基于 CSAD_FWA 的离散时间 DFADRC 参数优化试验验证	175
6.6 本章小结	177
参考文献	177
第 7 章 递减步长果蝇优化算法及其在风电机组齿轮箱故障诊断中的应用 ..	180
7.1 递减步长果蝇优化算法简介	180
7.2 支持向量机简介	182
7.3 基于 DS-FOA 的支持向量机在风电机组齿轮箱故障诊断中的应用 ..	186
7.3.1 风电机组齿轮箱振动数据的预处理	186
7.3.2 基于 DS-FOA 的支持向量机在风电机组齿轮箱故障诊断中的应用实例 ..	197
7.4 本章小结	202
参考文献	202
第 8 章 基于云粒子群布谷鸟融合算法的典型热工过程模型参数辨识	206
8.1 火电机组热工过程模型参数辨识简介	206
8.2 云粒子群布谷鸟融合算法	207
8.2.1 粒子群优化算法简介	207
8.2.2 布谷鸟搜索算法简介	209
8.2.3 云粒子群布谷鸟融合算法简介	210
8.2.4 函数优化仿真实例分析	212
8.3 基于 CPSO-CS 的典型热工过程模型参数辨识	214
8.4 本章小结	220
参考文献	220

第1章 绪 论

数据、信息、知识、智能分别从不同的层次描述了人类认识自然和改造自然的能力。智能控制理论针对传统控制理论的不足,为解决未知环境下的不确定性控制问题开辟了新的思路和途径。本章从 PID 控制策略入手,详细分析智能控制理论与传统控制理论的联系和区别。

1.1 智能控制的发展历史

1948 年,美国麻省理工学院的 Wiener 教授在《控制论:或关于在动物和机器中控制和通信的科学》一书中断言,机器将比人类更加聪明,工业革命将造成大脑的贬值^[1]。目前,新一轮科技革命和产业变革正在孕育。随着移动互联网、大数据、超级计算、物联网、脑科学等新理论与新技术的不断涌现以及我国经济社会发展需求的增强,大数据的积聚、理论算法的革新、计算能力的提升及网络设施的演进,都在驱动人工智能发展进入新阶段^[2-4]。国内外人工智能理论和技术研究迅猛发展,逐渐呈现出深度学习、跨界融合、人机协同、群智开放和自主操控等复杂特征,为智能科学与技术的发展带来了巨大的挑战和机遇^[5]。

未来,“人工智能”将“无时不有,无处不在”。智能化已成为国际社会技术和产业发展的重要方向,人工智能具有显著的溢出效应,正在成为推进供给侧结构性改革的新动能、振兴实体经济的新动力、建设制造强国和网络强国的新引擎^[6]。随着人工智能技术的迅猛发展及相关产业的革新性进展,可以预见,在不远的将来,它会显著促进人类社会经济的持续发展。人工智能与传统的控制理论相结合,将会迸发出更多智能控制的智慧火花,形成更多更先进的能够广泛应用于工程实践的智能控制理论和技术,例如,适用于复杂有色冶金生产过程的智能建模、控制与优化理论体系和实际应用^[7],已经在航空航天领域得到广泛应用的基于特征模型的智能自适应控制理论和方法^[8],基于自适应动态规划的智能优化控制理论和方法^[9],基于关联规则的智能优化模型及智能优化方法^[10],机器智能的自适应系统^[11],柔性智能控制理论和方法^[12]等。关于智能控制理论 and 技术的专著、教材等参见文献^{[13]~文献[31]},基于 MATLAB 仿真软件设计与实现智能控制算法的内容参见文献^{[32]~文献[34]},基于 LabVIEW 仿真软件设计与实现智能控制算法的内容参见文献^[35]。近年来,智能控制理论和技术更是在工业、交通等诸多领域得到了广泛的应用,典型应用包括 3D 打印^[36]、家用锂离子电池储存系统^[37]、智

能交通 [38,39]、智能微网控制 [40,41]、工业过程 [42-44]、假肢踝关节 [45]、直流-直流降压变换器 [46]、太阳能斯特林泵 [47]、并网风力-光伏混合动力系统 [48] 等。最新研究进展详见文献 [49]。

在人工智能发展的早期,人们普遍认为智能控制 (intelligent control, IC) 是二元论,也就是人工智能 (artificial intelligence, AI) 和自动控制 (automatic control, AC) 交互作用的结果,即 $IC=AI \cap AC$ 。后来,又加入了运筹学 (operational research, OR), 形成三元论的智能控制,即 $IC=AI \cap AC \cap OR$ 。智能控制的三元论表明,智能控制是应用人工智能的理论与技术和运筹学的优化方法,将其同控制理论方法与技术相结合,可在未知环境 (广义的被控对象或过程及其外界条件) 下仿效人或生物的智能,实现对系统的控制。

智能控制是控制理论发展的高级阶段。随着研究对象规模的进一步扩大,大系统智能控制、分级递阶智能控制和分布式问题求解等各种新方法、新思想不断涌现,而认知心理学、神经网络技术、进化论、遗传算法和混沌论等新学科异军突起,可从更高层次上研究智能控制,从而形成智能控制的多元论。换句话说,智能控制是多门学科领域相互交叉融合的结果。

一般地,智能控制具有如下一些共同显著的特点。

(1) 非线性特性。与传统的比例积分微分 (proportion integration derivation, PID) 控制器和现代控制理论中的线性状态反馈和输出反馈控制律不同,智能控制器往往呈现出典型的非线性控制器结构,处理的被控对象是非线性的。

(2) 智能控制具有变结构特点。传统的 PID 控制律、状态反馈和输出反馈控制律的控制器结构一般都是固定不变的,而智能控制器的结构是随时变化的。

(3) 智能控制器具有总体自寻优特性。智能控制器总能跳出局部优化范围,在全局范围内自动寻求到全局最优的结果。

(4) 智能控制器能满足多样性目标的高性能要求。传统的自动控制系统通过一定的优化设计往往能满足系统某些方面的性能要求,但难以满足设定值跟踪能力、扰动抑制能力、鲁棒性等多方面的性能要求。智能控制系统则可以通过优化设计同时满足系统多样性目标的高性能要求。

(5) 智能控制是一个新兴的跨学科研究领域,涉及人工智能、模糊控制、神经网络、专家系统、进化计算和优化算法等,是一个典型的交叉学科。

(6) 智能控制是一个应用广泛的高科技工具,可应用于工业过程控制、智能仪器仪表研发、机器人控制、智能家居系统、智能交通、智慧农业、智能建筑和智慧城市等诸多领域。

1985 年 8 月,电气和电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 在纽约召开第一届智能控制学术研讨会,主题是智能控制原理和智能控制系统。这一次会议决定在 IEEE 控制系统协会下设立一个 IEEE 智

能控制专业委员会。这标志着智能控制这一新兴研究领域的正式诞生。1987年1月, IEEE 控制系统协会与计算机协会主办的第一届智能控制国际会议在美国费城召开; 1987年以来, IEEE、国际自动控制联合会 (International Federation of Accountants, IFAC) 等国际学术组织定期或不定期举办各类有关智能控制的国际学术会议或研讨会。

近年来, IEEE 相继成立了 IEEE 计算智能协会、IEEE 智能交通系统协会, 中国自动化学会相继成立了智能自动化专业委员会、综合智能交通专业委员会、智能制造系统专业委员会、混合智能专业委员会等, 中国人工智能学会相继成立了智能空天系统专业委员会、智能机器人专业委员会等, 中国指挥与控制学会相继成立了智能控制与系统专业委员会、智能指挥调度专业委员会、空天大数据与人工智能专业委员会等, 中国仿真学会相继成立了智能仿真优化与调度专业委员会、智能物联系统建模与仿真专业委员会等, 这些学术组织通过出版 *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*、*IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*、*IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*、*IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence* 等重要期刊, 主办 IEEE Conference on Decision and Control、中国自动化大会、中国控制会议、中国控制与决策会议、中国人工智能大会、中国智能自动化大会、中国智能系统会议等一系列有国际影响力的重要学术交流会议, 极大地促进了国内外在智能控制相关领域科学研究、人才培养、工程应用等的蓬勃发展。因此, 可以预见在不久的将来, 智能控制理论作为一种跨学科的新工具一定可以在各行各业的理论研究、工程应用中大放异彩。

1.2 智能及智能控制的基本概念

在知识经济时代, 数据、信息、知识和智能等概念经常出现, 但它们的含义是什么呢? 要了解“智能”的基本含义, 必须从“数据”的基本概念出发, 逐步深入到“信息”和“知识”, 才能领会“智能”的真正含义, 实现从“是什么”、“怎么样”到“为什么”、“怎么办”认识上的飞跃。

1. 数据

数据, 即来自测量仪表的孤立的测量值。例如, 火电厂过程控制中, 为实现对发电机组锅炉、汽轮机和发电机等主要设备, 以及送风机、引风机、空气预热器、省煤器和给水泵等辅助设备的实时在线远程自动监控, 现场设备附近一般安装有各种各样的热工测量仪表, 对温度、压力、流量、液位、物位、料位、pH、浓度、成分、位移、速度、加速度、转速、频率、电压、电流和功率等各种重要变量的主要参

数进行实时在线测量,得到的量测信号对应的实际物理量的多少都是数据,也就是说数据解决了某些变量“是什么”的问题。根据数据与时间序列的对应关系,数据又可分为历史数据和实时数据,历史数据是由工业过程运行之前时刻对应的一段时间内的某些数据组成的,在监控画面上呈现出来的就是以过去的一段时间为横坐标、以变量的测量值的历史记录为纵坐标形成的变量历史趋势,一旦选定时间范围,历史数据所反映的历史趋势是静态的,而实时数据则是反映当前时刻变量的变化趋势,在监控画面上一般反映的是实时趋势,随着时间的推移它是不断变化的,所以它是动态的,随着时间不同而不断地实时发生变化。

2. 信息

工业过程中存在着海量的历史数据和不断更新的实时数据,单独讨论孤立的测量值往往不能发现有价值的线索。将数据在时间轴上进行横向的比较,或幅值上进行纵向的比较,就能形成信息。信息,可定义为相关数据之间的关系。例如,火电机组生产过程中,过程运行设定值与被控变量之间的偏差的正负及相对大小,就能体现反馈控制回路控制性能的优劣,以及控制器参数的整定是否合适或最优。机组正常运行时,锅炉炉膛压力一般维持在微负压,约为 -100Pa ,锅炉炉膛的实际压力测量信号又分为模拟量和开关量(即 0 和 1 等数字量),用压力测量仪表测量的锅炉炉膛负压的模拟量数值与规定的额定值 -100Pa 进行比较得出的炉膛负压偏高、偏低或适中等结论就是反映锅炉炉膛负压实际情况,进而反映锅炉是否运行正常的信息。压力开关测量仪表测量得到的炉膛压力低(低一值)、低低(低二值)、低低低(低三值),或高(高一值)、高高(高二值)、高高高(高三值)等开关量信息也是从另一个定性的角度反映炉膛负压的实际情况的信息,即反映锅炉炉膛是否接近某些不正常的状态的临界信息。从海量的工业过程运行历史数据中,通过对相关数据进行分析 and 比较,采用某种时间序列分析方法或大数据处理方法,可以挖掘出蕴含在工业过程运行海量历史数据中的信息,得到“怎么样”的信息,从而为工业生产过程的控制、调度、运行和决策等提供研究基础和相关依据。

3. 知识

然而,仅通过海量数据挖掘出信息还远远不能解决实际工程应用中的实际问题,需要进一步深入挖掘隐含在信息后面的根本原因,发现“为什么”。例如,根据测量仪表显示的数据结果判断得到“炉膛压力偏高”的信息,就要研究炉膛压力为什么偏高,背后的这个原因就是隐含在信息中的知识,也就是人们在长期生产生活实践中总结或发现的经验或规律。知识,可以定义为结构化信息之间的关联。例如,炉膛压力偏高的原因有很多,加大给煤量或提高燃料发热值导致炉膛燃烧更旺盛,使得炉膛压力偏高;减少给水量,导致炉膛压力偏高;机组运行人员操作

调整不当,导致炉膛压力偏高。通过分析这些不同的原因,就可形成炉膛压力偏高的原因这一知识,找到背后的原因,就能进一步提出解决问题的方法途径或有效措施。

4. 智能

挖掘知识后要解决的问题就是如何利用有用的知识来解决工程中的实际问题,解决“怎么办”的问题,这就是“智能”,可以定义为利用知识解决实际问题的能力。目前为止,有且只有人类唯一具有利用知识解决实际问题的能力,也就是说只有人类才具有智能。发现炉膛压力偏高的原因这一知识后,人们就可以发挥自己的聪明才智和主观能动性,通过减少给煤量或降低燃料发热值,增大给水量,或对机组锅炉运行进行更优的精细调整,以降低炉膛压力,从而恢复炉膛压力使其稳定在期望的设定值附近。

以房间温度为例,通过温度测量仪表测量出的房间温度实际值 32°C 是一个孤立的测量值,所以它是一个数据。一般地,人们往往感觉舒服的理想温度是 23°C ,将仪表测量出的房间温度与期望的理想温度进行比较,得出房间温度偏高的结论,这就是信息。房间温度为什么偏高呢?房间温度偏高的原因可能有很多,如夏天环境温度偏高、室内通风量不足、室内有加热炉或很多发热设备等。导致房间温度偏高的原因就构成了结构化信息之间的关联,也就是知识。为解决房间温度偏高这个问题,利用这些已有知识,提出通过增大通风量等措施解决房间温度偏高的办法,就形成了智能。

房间温度这个实例充分阐述了数据、信息、知识和智能在不同层次上对事物的系统、全面、深入的描述,反映了人类对自然的认识和改造也是通过从现象出发不断观察、持续深入思考并长期实践的过程,体现出人作为具有智能的高等动物利用智能解决实际问题的基本思路。

从它们的表现形式上来看,工业过程控制中的数据可以是时间序列,也可能是一些重要变量一段时间的历史趋势曲线,信息是将现场测量数据经过一系列适当处理后得到的结果,知识则是横跨历史和各门学科的相关经验的总结,可以存储在一个计算机里,而智能则只存在于人类大脑中。它们的表现形式反映了不同的层次特点。

1.3 PID 控制策略

要全面深入理解智能控制策略及其工程实现方法,首先要全面深刻地理解并掌握传统控制策略,尤其是 PID 控制策略的精髓及其工程实现方法,否则研究和设计先进控制策略甚至智能控制策略将无从谈起。PID 控制器自诞生以来,因其物

理意义明确、鲁棒性强、工程应用简便等突出优点,一直是工业过程控制中广泛应用的控制策略。在火电厂热工自动化领域中,绝大部分控制回路采用的控制策略就是 PID 控制器,但由于微分控制作用可能会放大噪声,实际工程应用中很多控制回路采用的是比例积分 (proportion integration, PI) 控制策略 [36-39]。

为理解一个最简单的单回路自动控制系统的 basic 组成,下面从室温的调节控制生活场景入手进行分析。

在房间温度控制这个实例中,房间是被控制的设备或过程,称为被控过程。而房间温度是被控过程的某一个需要观测并进行实时调节的变量,称为被控变量或过程变量 (process variable, PV)。实现房间温度的自动控制,就是要想办法通过自动调节空调的制冷或制热功率来改变房间的温度值,使其稳定在期望的数值上。一般地,人们期望房间温度稳定在比较理想的 23°C 左右,这就是期望的被控变量房间温度的设定值 (set point, SP),也称为参考输入。设计一个自动控制系统的目的是使被控变量房间温度在尽可能短的时间内迅速跟踪参考输入,对控制系统的性能要求就是稳、准、快。要达到这样的设计目标,就需要采用合适的测量变送仪表,对被控变量如房间温度等进行准确的测量,并采用适当的信号变送方式将测得的信号转换为 $4\sim 20\text{mA}$ 或 $1\sim 5\text{V}$ 的直流信号,反馈给 PID 控制器。PID 控制器采用一定的控制算法自动计算控制指令,这个算法也称为控制律、控制规律、控制策略。PID 控制器计算出来的控制指令发送给空调或调节阀等执行器以对空调的制冷功率或制热功率,或暖气的流量进行调节,从而改变房间温度。这样,采用测量变送仪表、控制器和执行器分别替代人眼、人脑和人手,可实现对房间温度的实时在线自动控制。

实际工业过程控制中,控制回路一般设置有手动和自动两种控制模式。在手动控制模式时,运行人员通过在监控画面上操作调节控制指令,通过键盘输入控制指令或通过单击操作变量“增”、“减”按钮直接向现场的调节阀、变速给水泵、风机动叶等发出控制指令,从而进一步改变被控过程的状态,达到控制被控变量的目的。实际工程应用中,还需要考虑 PID 控制器与手动控制之间的手自动无扰切换问题。这是因为,一方面,手动控制作为自动控制系统的后备手段在系统局部发生某些故障或异常运行时显得至关重要,对于确保系统安全稳定运行具有重要意义;另一方面,当系统从手动切换到自动时,为确保执行器接收的指令不在瞬间发生较大的变化,需要采取一定的措施。工程中的具体做法一般为:一旦系统从自动切换到手动,就让设定值强制跟踪过程变量,让 PID 控制器的输出跟踪运行人员通过监控画面向执行器发出的手动指令,或执行器的阀位反馈信号,也就是执行器的实际开度。此时,也就意味着系统在手动方式运行时,PID 控制器停止运算,其输入侧的设定值始终等于过程变量,这样一旦系统再从手动模式切回自动模式,就可以无扰平稳地切换到自动状态。

实际工程应用中,系统投运时首先默认以手动方式运行,由运行人员观测被控变量的变化趋势,根据设定值的实际需求通过在监控画面上手动调整控制器的控制指令直接改变执行器指令,进而迅速改变被控变量的数值,使其尽快逼近设定值。当被控变量稳定在设定值附近时,可由运行人员在监控画面上通过选择操作切换为自动运行方式。但由于各种原因,正在自动运行的系统有时会自动切换到手动方式,主要原因如下。

(1) 设定值与反馈值之间的偏差的绝对值过大。控制策略选择不当或控制器参数不合适导致 PID 反馈控制效果较差,此时系统将会自动切换到手动状态。

(2) 控制指令与阀位反馈之间的偏差的绝对值过大。由于执行机构卡涩、故障等原因,控制器向执行机构发出的控制指令和执行机构实际的阀位反馈信号之间的偏差的绝对值大于一定的阈值,此时系统将会自动切换至手动状态。

(3) 测量反馈信号故障。测量变送仪表信号故障导致被控变量的测量反馈信号发生故障,此时系统无法进行 PID 反馈控制,将会自动切换至手动状态。

(4) 阀位反馈信号故障。执行机构的阀位反馈信号发生故障时,系统无法进行 PID 反馈控制,也会自动切换至手动状态。

(5) 其他一些原因,如火电机组自动控制系统设计方案中,为确保锅炉运行的安全性,由于主燃料跳闸 (main fuel trip, MFT),送风机、引风机和一次风机相关控制系统自动切换为手动方式。

在一个典型自动控制系统中,智能控制器的作用就是要取代传统 PID 控制器,根据设定值与过程变量的反馈信号按照智能控制算法自动计算出相应的控制指令,以获得比传统 PID 控制器更加满意的控制性能。

1.4 传统控制面临的挑战

传统的经典控制理论包括 PID 控制理论、伯德 (Bode) 图和奈奎斯特 (Nyquist) 曲线等频域分析方法、劳斯 (Routh) 稳定性判据等,采用的是微分方程和传递函数等工具,具有较完善的分析和综合理论体系,提供了一套较完善的自动控制系统分析和设计工具及方法。为了满足空间探索控制技术的发展需求,以状态空间表达式为核心的现代控制理论应运而生,包括状态反馈控制和输出反馈控制、李雅普诺夫 (Lyapunov) 稳定性定理、状态观测器、极点配置等方法,已经在火箭发射、飞船控制、运动控制等领域得到了极其广泛的应用。

但是,随着经济和社会的不断发展,自动控制系统对性能和指标的要求日益苛刻,传统的经典控制理论和现代控制理论往往无法满足控制系统分析和设计的需求,主要原因如下。

(1) 实际工业系统由于存在一定的复杂性、非线性、时变性、不确定性和不完整性等, 往往无法获取被控对象精确的数学模型。

(2) 传统的经典控制理论在进行系统分析和设计之前做了一些比较苛刻的线性化假设, 例如, 传递函数被定义为线性定常系统在零初始条件下系统输出与输入的拉普拉斯变换之比, 如果是非线性系统, 就无法采用传递函数的概念。严格地说, 由于实际的工业系统被控对象大多数是非线性的, 所以需要先对实际工业系统被控对象在某些工作点附近设置一些线性化假设条件, 然后进行一定的线性化处理, 才能开展分析和综合。但是, 这些线性化假设条件往往和实际情况有一定的差异, 不一定符合实际情况。

(3) 传统的经典控制理论和方法在解决大范围变工况、异常工况等问题时往往无法满足要求。例如, 大型火电机组为适应电网调度的需要, 其负荷需要经常变动, 在一个较大的范围随时发生变化, 机炉协调控制系统中的燃料、送风、汽温和给水等子系统的动态特性也随之发生变化, 采用固定结构和参数的 PID 控制方法或状态空间方法往往无法获得满意的控制效果。

(4) 由于被控对象所处的环境和被控对象的未知与不确定性, 可能无法建立被控对象的模型, 这超出了传统的经典控制理论所能解决的问题范畴。

1.5 智能控制与传统控制的联系和区别

一般地, 经典控制理论主要用于分析线性定常单输入-单输出系统, 其分析工具主要是微分方程或传递函数。而现代控制理论除了可分析线性定常单输入-单输出系统之外, 还可用于分析非线性时变多输入-多输出系统, 其分析工具是状态方程和输出方程。智能控制理论是模仿人类智能所形成的一类控制策略, 可用来处理各种复杂系统, 求解过程主要依靠搜索、自学习、模拟进化等手段。

各种典型控制策略的渗透与融合示意图如图 1.1 所示。图中, 基于自动控制理论发展起来的控制理论包括经典控制理论和现代控制理论, 经典控制理论中的控制策略主要包括传统的 PID 控制策略、针对大迟延惯性环节的 Smith 预估补偿控制器和针对多变量耦合系统的解耦控制策略。现代控制理论包括自适应控制、变结构控制、鲁棒控制和预测控制等先进控制策略。融合传统的自动控制理论, 以及运筹学、信息论、计算机、生物学和人工智能等多门学科形成的智能控制理论则涵盖模糊控制、专家系统、神经网络和遗传算法 (genetic algorithm, GA) 等基本的学科领域。传统的控制理论与智能控制理论之间相互渗透, 形成了模糊 PID、专家 PID、模糊专家 PID、神经网络 PID、模糊预测控制、遗传算法模糊控制和遗传算法预测控制等各种复合的控制策略。

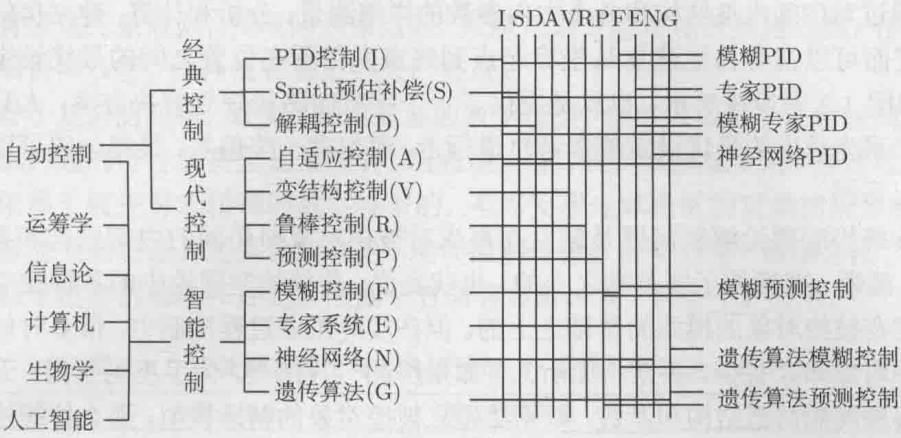


图 1.1 各种典型控制策略的渗透与融合示意图

那么，智能控制与传统控制之间有什么区别呢？一个典型路径轨迹规划问题示意图如图 1.2 所示，要解决的问题是房间内的人如何从某处角落走到终点大门处。

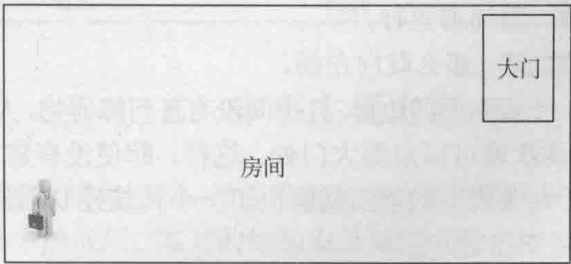


图 1.2 典型路径轨迹规划问题示意图

要解决这个问题，很容易想到必须事先了解房间的内部结构，通过数学、物理等机理建模方法建立房间的数学模型，这样才能得到该问题的一个解析解。

利用传统控制理论解决这样一个路径规划问题，自然会以人所在的地点为坐标原点，分别作一条水平线和垂直线作为横轴和纵轴，建立一个如图 1.3 所示的直角坐标系。

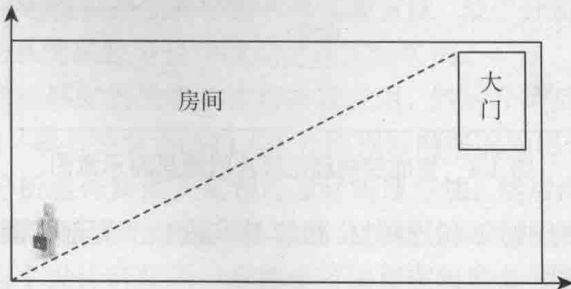


图 1.3 传统控制理论解决问题思路示意图