



王顺晃 舒迪前 编著

# 智能控制系统 及其应用

电气自动化  
新技术  
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

# 智能控制系统及其应用

王顺晁 舒迪前 编著

机械工业出版社

(京)新登字 054 号

本书是作者多年来从事工业生产过程建模,智能控制和自适应控制等方面的教学和科研工作的总结。书中深入浅出地介绍了智能控制系统的构成原理和设计理论,并将智能控制和控制理论紧密结合构成新型智能控制系统。同时通过几个应用实例,深入地介绍了智能控制系统的具体设计和实现方法,并给出了软件和硬件设计的全过程,供读者学习参考。全书内容新颖,突出理论联系实际,实用性强。

本书适宜于从事过程自动化工程技术人员阅读,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、计算机应用等专业的教材和教学参考书

电气自动化新技术丛书  
**智能控制系统及其应用**

王顺晃 舒迪前 编著

\*

责任编辑:孙流芳 版式设计:李松山

封面设计:姚毅 责任校对:丁丽丽

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行,新华书店经售

\*

开本 850×11681/32·印张 10.125·字数 272 千字  
1995年1月北京第1版·1995年1月北京第1次印刷

印数 00 001-4650·定价 15.8 元

\*

ISBN 7-111-04449-5/TP·249

# 《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,推动人类社会向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术既是多种学科的交叉综合,又是全面提高国民经济水平的有力手段,在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在建设“四化”,实现到2000年使国民生产总值比1980年翻两番的宏伟目标中发挥重要的作用。

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,负责丛书的组稿与定稿工作。丛书将由机械工业出版社分期分批陆续出版。

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,并适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,结合应用阐述理论,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。

本丛书的读者将以工程技术人员为主,但也可作为科研人员及大专院校教师、研究生和大学生的参考书。

编写出版《电气自动化新技术丛书》,对于我们是一种尝试,肯定会存在不少问题和缺点,希望广大读者给予支持和帮助,并欢迎大家批评指正。

本书选题将随新技术的发展不断扩充,凡属电气自动化领域新技术均可作为专题撰写。我们面向社会公开征稿,欢迎自列选题投稿,来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号中国自动化学会电气自动化专业委员会《电气自动化新技术丛书》编辑委员会。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员:夏德铃

副主任委员:喻士林 胡慎敏 陈亚鹏

委 员:(按姓氏笔画顺序)

王 炎 王永珠 许广锡

李序葆 刘宗富 孙流芳

冷增祥 陈伯时 李鹤轩

周国兴 陶近贤 涂 健

夏遂华 黄 俊 韩素琴

秘 书:杨 斌

## 前 言

智能控制系统是近 10 年来发展起来的一门新兴学科,它简化了建模手续,算法简单,明显地提高了控制系统的品质,引起国内外学者的广泛关注,已成为当前国内外控制领域研究热点之一。但目前国内外涉及这方面的参考书不多,为了交流经验,推动应用,使智能控制系统尽快为生产服务,作者根据近年来在智能控制方面科研和教学工作中的经验和体会,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)着重从应用角度出发,突出理论联系实际,实用性强。列举几个典型工业生产过程的智能控制系统,全面阐述了系统的软件和硬件设计全过程,以期读者在读完本书后能独立分析和设计智能控制系统。(2)将智能控制与控制理论有机地结合起来,构造一类新型的智能控制系统,实现对生产过程的多模态复合智能控制。(3)将神经网络引入过程控制中,探讨应用神经网络的新型自适应智能控制系统。(4)对智能控制系统的稳定性和鲁棒性进行了初步探讨。

本书提供的大量数据和资料均经过实践考验,适合于从事生产过程自动化、计算机应用等方面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、计算机应用等专业本科生、研究生的教材和教学参考书。

本书共分 9 章。前 3 章介绍智能控制系统的国内外发展概况、研究内容,智能控制系统的结构及其设计理论,初步探讨了智能控制系统的鲁棒性问题。第 4 至 9 章结合 6 个典型工业生产过程智能控制系统的应用实例,系统地介绍了智能控制系统的具体设计

和实现方法。在控制器的设计方面,突出了控制理论与智能控制的有机结合。比如在第6章罩式退火炉的自适应智能控制一章中,介绍了基于极点配置自适应PID预测控制与智能控制相结合构成新型复合智能控制器的课题。在第8章电弧炉炼钢过程智能控制一章中介绍了利用预报理论对氧化期脱碳量进行自适应预报,并将其与智能控制相结合构成智能自适应预测操作指导系统,进一步提高了钢水终点预报准确度,随着近年来神经网络研究的再度兴起,本书在第9章中结合高温力学试验机电加热炉的控制问题,建立了电加热炉的神经网络模型,研制了几种神经网络智能控制算法,并给出了其实验结果。此外,在应用实例的各章中,还给出了几种控制算法的实控结果对比,以便读者鉴别比较。本书第1~5、7、8章由王顺晃执笔,第6、9章由舒迪前执笔,全书由舒迪前统稿。

在本书选题、编写、定稿和出版过程中得到了中国自动化学会电气自动化专业委员会、中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会、机械工业出版社以及《电气自动化新技术丛书》编委会的大力支持与帮助,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给予了许多具体指导和帮助,编者对此表示衷心的感谢。另外,在本书编写过程中研究生邵启伟、张俊杰、田学锋、张志强、李晓天、李春涛等同志提供了部分实验数据和实验资料,丰富了本书内容,对此一并致谢。

由于编者水平所限,书中缺点和错误在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

王顺晃 舒迪前

1994年6月于北京科技大学



# 目 录

## 《电气自动化新技术丛书》序言

### 前 言

第 1 章 概论 .....	(1)
1.1 智能控制系统国内外发展概况 .....	(1)
1.1.1 控制理论应用面临着新的挑战 .....	(1)
1.1.2 智能控制系统的引入 .....	(2)
1.1.3 智能控制系统的定义 .....	(3)
1.1.4 智能控制系统的特点 .....	(3)
1.1.5 智能控制系统国内外进展概况 .....	(4)
1.2 智能控制系统的研究课题 .....	(5)
1.2.1 智能控制系统的理论研究 .....	(5)
1.2.2 智能控制系统的应用研究 .....	(10)
第 2 章 智能控制系统的构成原理 .....	(12)
2.1 简单的智能控制系统 .....	(12)
2.1.1 一般自动控制系统的构成 .....	(12)
2.1.2 简单的智能控制系统的构成 .....	(13)
2.2 多级递阶智能控制系统 .....	(14)
2.3 智能控制系统和神经网络(NN) .....	(15)
2.3.1 神经网络的基本概念 .....	(15)
2.3.2 神经网络输入输出之间的关系模型 .....	(16)
2.3.3 神经网络在自动控制中的应用 .....	(19)
2.3.4 神经网络控制和智能控制的关系 .....	(21)
第 3 章 智能控制系统的设计理论 .....	(22)
3.1 知识表达 .....	(22)
3.1.1 知识的含义 .....	(22)
3.1.2 知识的分类 .....	(23)

3.1.3 产生式知识表示 .....	(24)
3.1.4 框架知识表示 .....	(29)
3.1.5 谓词逻辑知识表示 .....	(36)
3.1.6 状态空间知识表示 .....	(38)
3.1.7 语义网络知识表示 .....	(41)
3.1.8 不精确知识表示 .....	(43)
3.1.9 知识的发展 .....	(45)
3.2 知识获取 .....	(46)
3.2.1 知识获取过程 .....	(46)
3.2.2 人工方式知识获取 .....	(48)
3.2.3 半自动知识获取 .....	(48)
3.2.4 自动知识获取 .....	(48)
3.2.5 动态特征辨识和模式识别 .....	(53)
3.3 智能控制器一般结构的设计理论 .....	(56)
3.3.1 知识库 .....	(57)
3.3.2 数据库(上下文) .....	(57)
3.3.3 黑板问题 .....	(57)
3.3.4 自学习环节 .....	(59)
3.3.5 推理和决策机构 .....	(59)
3.4 智能决策和控制理论的结合问题 .....	(68)
3.4.1 问题的引入 .....	(68)
3.4.2 智能自适应控制系统 .....	(69)
3.4.3 带知识库的高炉炼铁过程终点铁水含硅量和温度 自适应预报 .....	(69)
3.5 智能控制系统的鲁棒性 .....	(74)
3.5.1 问题的提出 .....	(74)
3.5.2 自动控制系统的稳定鲁棒性问题 .....	(75)
3.5.3 智能控制系统的鲁棒性问题 .....	(81)
第4章 随动系统的智能控制 .....	(84)
4.1 旋转变压器式的精粗测随动系统 .....	(84)
4.1.1 概述 .....	(84)
4.1.2 自整角机在变压器工作状态下的随动系统 .....	(84)

4.1.3 旋转变压器式随动系统 .....	(86)
4.1.4 旋转变压器式精粗测随动系统 .....	(86)
4.2 用微机控制的旋转变压器式精粗测随动系统 .....	(89)
4.2.1 随动系统计算机控制的特点 .....	(89)
4.2.2 微机化随动系统的硬件结构 .....	(90)
4.2.3 被控对象数学模型的建立 .....	(91)
4.2.4 常用控制算法 .....	(93)
4.2.5 系统软件设计 .....	(96)
4.3 随动系统智能控制 .....	(98)
4.3.1 随动系统智能控制框图 .....	(98)
4.3.2 智能控制器的设计 .....	(98)
4.4 实时控制结果的分析 .....	(100)
4.4.1 数字全波整流波形 .....	(101)
4.4.2 系统各种指标测试比较 .....	(101)
第5章 非晶制带钢水液位智能控制 .....	(104)
5.1 非晶制带生产工艺及对自动控制提出的要求 .....	(104)
5.1.1 非晶态合金薄带生产工艺 .....	(104)
5.1.2 对自动控制提出的要求 .....	(105)
5.1.3 控制方案 .....	(106)
5.2 非晶制带生产被控对象的特性分析和数学模型 .....	(107)
5.2.1 电液伺服驱动装置 .....	(107)
5.2.2 差动变压器 .....	(108)
5.3 非晶制带钢水液位计算机控制 .....	(109)
5.3.1 硬件结构 .....	(109)
5.3.2 常用控制算法和软件设计 .....	(109)
5.4 非晶制带钢水液位智能控制 .....	(125)
5.4.1 智能控制器的设计 .....	(125)
5.4.2 系统软件的设计 .....	(128)
5.5 系统实时控制的结果 .....	(128)
第6章 罩式退火炉自适应预测智能控制 .....	(130)
6.1 概述 .....	(130)
6.2 罩式退火炉计算机温控系统的设计与构成 .....	(131)

6.3 罩式退火炉数学模型的建立 .....	(133)
6.3.1 系统建模的基本步骤 .....	(133)
6.3.2 罩式退火炉的模型类型与结构 .....	(134)
6.3.3 实验信号的设计与产生 .....	(135)
6.3.4 实验过程、数据滤波及预处理 .....	(139)
6.3.5 参数估计 .....	(141)
6.3.6 模型的校验和确认 .....	(142)
6.4 离散系统模型与连续系统模型间的转换 .....	(145)
6.4.1 离散系统模型转换为连续系统模型 .....	(145)
6.4.2 连续系统模型转换为离散系统模型 .....	(149)
6.5 罩式退火炉的前馈补偿零点配置自适应 PID 预测智能控制 .....	(151)
6.5.1 零点配置 PID 预测控制 .....	(152)
6.5.2 前馈补偿零点配置自适应 PID 预测控制 .....	(157)
6.5.3 智能控制器的设计 .....	(162)
6.5.4 实时控制结果 .....	(164)
第 7 章 电加热炉炉温智能控制 .....	(165)
7.1 电加热炉结构及对自动控制系统提出的要求 .....	(165)
7.1.1 电加热炉结构 .....	(165)
7.1.2 对自动控制提出的要求 .....	(166)
7.2 电加热炉对象模型及控制策略的研究 .....	(166)
7.2.1 电加热炉对象模型 .....	(166)
7.2.2 电加热炉控制策略的研究 .....	(172)
7.3 电加热炉炉温计算机控制 .....	(173)
7.3.1 硬件结构框图 .....	(173)
7.3.2 常用控制算法 .....	(173)
7.3.3 系统软件设计 .....	(187)
7.4 电加热炉炉温智能控制 .....	(187)
7.4.1 智能控制器的设计 .....	(187)
7.4.2 智能控制器的学习环节和修正环节 .....	(196)
7.5 电加热炉炉温实时控制结果 .....	(199)
7.5.1 随机最优控制结果 .....	(200)
7.5.2 非线性 PID 控制结果 .....	(200)

7.5.3 智能控制结果 .....	(202)
第8章 电弧炉炼钢过程智能控制 .....	(205)
8.1 电弧炉炼钢工艺过程及对自动控制提出的要求 .....	(205)
8.1.1 电弧炉结构 .....	(205)
8.1.2 工艺特点 .....	(205)
8.1.3 对自动控制提出的特殊要求 .....	(206)
8.2 电弧炉炼钢过程电极升降智能复合控制系统 .....	(207)
8.2.1 快速最优(Bang-Bang)控制 .....	(208)
8.2.2 模糊控制 .....	(213)
8.2.3 PID控制 .....	(214)
8.2.4 智能复合控制问题 .....	(214)
8.2.5 电极升降控制系统平衡问题 .....	(214)
8.2.6 电极升降控制系统实验结果 .....	(215)
8.3 电弧炉炼钢过程的数学模型及终点自适应预报系统 .....	(216)
8.3.1 氧化期数学模型的建立与终点预报方程 .....	(217)
8.3.2 氧化期钢液温度、含碳量和含磷量终点预报系统程序 流程图 .....	(227)
8.3.3 氧化期预报系统运行结果 .....	(228)
8.3.4 还原期操作 .....	(229)
8.4 电弧炉炼钢过程智能自适应预测操作指导系统的设计 .....	(230)
8.4.1 问题的引入 .....	(230)
8.4.2 IPOGS 总结构流程图及设计 .....	(230)
8.4.3 系统运行结果 .....	(242)
8.5 电弧炉炼钢过程闭环控制研究 .....	(244)
8.5.1 组织级 .....	(245)
8.5.2 协调级 .....	(246)
8.5.3 知识库构成 .....	(246)
8.5.4 电弧炉炼钢过程自动控制程序总流程图 .....	(246)
8.5.5 结束语 .....	(246)
第9章 高温力学试验机的神经网络自适应智能控制 .....	(248)
9.1 概述 .....	(248)
9.2 高温力学试验机电加热炉的结构及计算机控制系统构成 .....	(249)

9.3 电加热炉神经网络模型的建立 .....	(250)
9.3.1 反向传播学习算法原理 .....	(251)
9.3.2 电加热炉的神经网络模型 .....	(257)
9.4 使用单神经元的电加热炉自适应智能控制 .....	(261)
9.4.1 神经网络学习规则 .....	(261)
9.4.2 单神经元自适应 PID 智能控制器 .....	(262)
9.4.3 单神经元自适应 PSD 智能控制器 .....	(276)
9.4.4 电加热炉单神经元自适应智能控制 .....	(281)
9.5 使用多神经元的电加热炉前馈补偿内模控制 .....	(283)
9.5.1 内模控制器的设计 .....	(283)
9.5.2 神经网络的前馈补偿内模控制 .....	(288)
9.5.3 电加热炉的神经网络前馈补偿内模控制 .....	(289)
附录 A 随动系统智能控制程序清单 .....	(291)
附录 B 电弧炉炼钢过程终点含碳量、含磷量及温度的预报 结果与实测结果比较表 .....	(299)
参考文献 .....	(305)

# 第 1 章 概 论

## 1.1 智能控制系统国内外发展概况<sup>[1,2,3]</sup>

### 1.1.1 控制理论应用面临着新的挑战

从 1932 年奈魁斯特(H. Nyquist)发表反馈放大器的稳定性论文以来,控制理论学科的发展已走过 60 年的历程,其中前 30 年是经典控制理论的成熟和发展阶段,后 30 年是现代控制理论的形成和发展阶段。它和其他学科一样,也是由于社会发展的需要,从解决重大工程和技术问题的实践中产生发展起来,而它的发展水平则受到人类技术手段和知识水平的限制。

经典控制理论是一种单回路线性控制理论,只适用于单输入单输出控制系统。主要研究对象是单变量常系数线性系统,系统数学模型简单,基本分析和综合方法是基于频率法和图解法。若引入等效的线性化环节,把相应线性控制系统的概念和分析方法进行修正和开拓,经典控制理论也可以有效地处理简单的非线性控制系统。经典控制理论的研究对象、数学方法和计算手段的特点与当时社会技术水平和需要密切相关。尽管如此,经典控制理论不仅推动了当时自动化技术的发展和普及,而且在当今许多工程和技术领域仍继续得到应用。

60 年代前后,由于计算机技术的成熟和普及,促使控制理论由经典控制理论向现代控制理论过渡。现代控制理论的形成使控制理论从深度上和广度上进入一个崭新的发展时期,现代控制理论形成显示如下特点:

1. 控制对象结构的转变 控制对象结构由简单的单回路模式向多回路模式转变,即从单输入单输出向多输入多输出转变。它必

须处理极为复杂的工业生产过程的优化和控制问题。

## 2. 研究工具的转变

(1) 积分变换法向矩阵理论、几何方法转变,由频率法转向状态空间的研究;

(2) 计算机技术的发展,由手工计算转向计算机计算。

3. 建模手段的转变 由机理建模向统计建模转变,开始采用参数估计和系统辨识的统计建模方法。

由上述分析可知,控制理论研究不再局限于简单常系数线性系统模式,而是研究更为复杂的各类系统。由于航天技术、信息技术和制造工业技术的革命,要求控制理论能处理更加复杂的系统控制问题,提供更加有效的控制策略。这些大型复杂的系统有大型工业生产过程、计算机集成制造系统、柔性机器人系统和空间飞行的各类复杂设施等。这些系统既有系统运行行为和特性上的复杂性,也有不确定性导致的复杂性,同时也有系统多模式集成和控制策略方面的复杂性。对这类系统的研究涉及到非线性、鲁棒性、具有柔性结构的系统和离散事件动态系统等,并且需要对它们进行相对独立研究,也必须按照具体工程问题把他们中几个方面集加以研究。对上述复杂系统的控制理论已进行了不同程度的研究,但从总体来看,其研究十分有限,有的问题甚至还难以研究,特别是那些难以用数学模型描述的问题,单纯的数学工具显得无能为力,这对控制理论应用无疑是一个新的挑战。

### 1. 1. 2 智能控制系统的引入

当代科学技术的重大变革和发展,已突破旧的自动控制系统框架向复杂的自动控制系统框架发展。这些复杂的自动控制系统凭单一控制模式,仅采用数学工具或计算机仿真都难以解决。人们在生产实践中看到,许多复杂的生产过程难以实现的目标控制,可是熟练的操作工、技术人员或专家却操作自如,可以获得较满意的控制效果。而这些熟练的操作工、技术人员或专家的经验知识若能和控制理论结合,把它作为控制理论解决复杂生产过程的一个补



充手段,那将使控制理论解决复杂生产过程有一个突破性进展。事实上,计算机控制技术的发展为其提供一个有效的工具。计算机在处理图象、符号逻辑、模糊信息、知识和经验等方面的功能,完全可以承担起将熟练的操作工、技术人员和专家的知识经验、操作方法等付诸对生产过程的操作和控制,使之达到或超过人的操作水平。这相当于人的知识经验直接参与生产过程的控制,这样的自动控制系统称为智能控制系统。

### 1.1.3 智能控制系统的定义

智能控制系统是一门新兴学科,目前还没有统一的定义,以下提出粗略定义有待进一步讨论。

(1)智能控制系统是智能机自动地完成其目标的控制过程。其中智能机可在熟悉或不熟悉的环境中自动地或人机交互地完成拟人任务。

(2)由智能机参与生产过程自动控制的系统称智能控制系统。根据上述定义,带有模糊控制规则和带有知识控制规则所构成的自动控制系统一般称为智能控制系统。

### 1.1.4 智能控制系统的特点

(1)智能控制系统一般具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程。它适用于含有复杂性、不完全性、模糊性、不确定和不存在已知算法的生产过程。它根据被控动态过程特征辨识,采用开闭环控制和定性定量控制结合的多模态控制方式。

(2)智能控制器具有分层信息处理和决策机构。它实际上是对人神经结构或专家决策机构的一种模仿。复杂的大系统中,通常采用任务分块、控制分散方式。智能控制核心在高层控制,它对环境或过程进行组织、决策和规划,实现广义求解。要实现此任务需要采用符号信息处理、启发式程序设计、知识表示及自动推理和决策的相关技术。这些问题求解与人脑思维接近。低层控制也属智能控制系统不可缺少的一部分,一般采用常规控制。