

第2版

# 智能控制系统 及其应用

王顺晃 舒迪前 编著

电气自动化  
新技术丛书



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



● ISBN 7-111-04449-5/TP·249

封面设计 / 电脑制作 : 姚毅

ISBN 7-111-04449-5



9 787111 044499

定价: 30.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号

邮政编码: 100037

联系电话: (010) 68326294

网址: <http://www.cmpbook.com>

E-mail: [online@cmpbook.com](mailto:online@cmpbook.com)

电气自动化新技术丛书

# 智能控制系统及其应用

第 2 版

王顺晃 舒迪前 编著



机械工业出版社

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而构成新型智能控制系统。同时通过几个典型实例，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。

本书自1995年出版以来，曾多次重印，深受读者欢迎。本次修订增加了遗传算法、混沌及其应用的内容，对原版个别地方也作了一定的增删。

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。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

智能控制系统及其应用/王顺晃, 舒迪前编著. —2版.

—北京: 机械工业出版社, 2005. 7

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-04449-5

I. 智... II. ①王... ②舒... III. 智能控制—控制系统  
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 061209 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 版式设计: 霍永明 责任校对: 魏俊云

封面设计: 姚毅 责任印制: 洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年8月第2版第1次印刷

850mm×1168mm 1/32·15.625印张·418千字

0001—4000册

定价: 30.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

# 《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，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

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，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

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和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，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。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免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。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

## 第4届《电气自动化新技术丛书》

### 编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭

王志良 王 炎 牛新国 尹力明

刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅

李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊

陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰

赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠

涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

## 第4届《电气自动化新技术丛书》

### 编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者、读者的支持下，至今已出版发行丛书38种33万余册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此，本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已出版的丛书，根据技术的发展，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间，为加快与支持丛书出版，成立了丛书出版基金，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持，在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会

2002年10月12日

## 第 2 版前言

本书 1995 年出版后曾多次重印，深受读者欢迎。随着时间的推移，智能控制理论的研究已向深度和广度发展，新型智能控制系统结构和类型不断涌现，本书有必要增补一些新内容，以满足广大读者的需求。经作者与机械工业出版社协商，决定修订再版本书。

本书新版增加内容有：（1）第 8 章高炉、焦炉混合煤气压力和热值智能复合控制系统；（2）第 11 章遗传算法及其应用；第 12 章混沌及其应用。其中第 8、12 章由王顺晃执笔，第 11 章由舒迪前执笔，全书由舒迪前统稿。原书的个别处也有所增删。

本书修订过程中，一直得到机械工业出版社孙流芳编审的关心和指导，作者在此表示衷心的感谢。本书编写过程中曾参考国内外许多专家和学者的论文和著作，作者也表示真诚的谢意。同时再版时所增加内容的编写过程中研究生王峰、陈宏纲、郭江、周建国等同志提供了一些实验数据和资料，对此表示感谢。

由于编者水平有限，书中有不妥之处在所难免，真诚希望广大读者批评指正。

王顺晃 舒迪前

2005 年 3 月于北京科技大学



## 第 1 版前言

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的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问题。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

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

第2版前言

第1版前言

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 .....	12
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 .....	18
2.3.4 神经网络控制和智能控制的关系 .....	21
2.4 遗传算法和智能控制 .....	21
2.5 混沌和智能控制 .....	22
第3章 智能控制系统的设计理论 .....	23

3.1	知识表达	23
3.1.1	知识的含义	23
3.1.2	知识的分类	24
3.1.3	产生式知识表示	25
3.1.4	框架知识表示	30
3.1.5	谓词逻辑知识表示	36
3.1.6	状态空间知识表示	39
3.1.7	语义网络知识表示	42
3.1.8	不精确知识表示	44
3.1.9	知识的发展	46
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	49
3.2.4	自动知识获取	49
3.2.5	动态特征辨识和模式识别	54
3.3	智能控制器一般结构的设计理论	57
3.3.1	知识库	57
3.3.2	数据库(上下文)	58
3.3.3	黑板问题	58
3.3.4	自学习环节	59
3.3.5	推理和决策机构	60
3.4	智能决策和控制理论的结合问题	69
3.4.1	问题的引入	69
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	70
3.5	智能控制系统的鲁棒性	75
3.5.1	问题的提出	75
3.5.2	自动控制系统的稳定鲁棒性问题	76
3.5.3	智能控制系统的鲁棒性问题	82
第4章	随动系统的智能控制	85
4.1	旋转变压器式的精粗测随动系统	85

4.1.1	概述 .....	85
4.1.2	自整角机在变压器工作状态下的随动系统 .....	85
4.1.3	旋转变压器式随动系统 .....	87
4.1.4	旋转变压器式精粗测随动系统 .....	87
4.2	用微机控制的旋转变压器式精粗测随动系统 .....	90
4.2.1	随动系统计算机控制的特点 .....	90
4.2.2	微机化随动系统的硬件结构 .....	91
4.2.3	被控对象数学模型的建立 .....	92
4.2.4	常用控制算法 .....	94
4.2.5	系统软件设计 .....	97
4.3	随动系统智能控制 .....	99
4.3.1	随动系统智能控制框图 .....	99
4.3.2	智能控制器的设计 .....	99
4.4	实时控制结果的分析 .....	101
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
<b>第5章</b>	<b>非晶制带钢水液位智能控制 .....</b>	<b>105</b>
5.1	非晶制带生产工艺及对自动控制提出的要求 .....	105
5.1.1	非晶态合金薄带生产工艺 .....	105
5.1.2	对自动控制提出的要求 .....	106
5.1.3	控制方案 .....	107
5.2	非晶制带生产被控对象的特性分析和数学模型 .....	108
5.2.1	电液伺服驱动装置 .....	108
5.2.2	差动变压器 .....	109
5.3	非晶制带钢水液位计算机控制 .....	110
5.3.1	硬件结构 .....	110
5.3.2	常用控制算法和软件设计 .....	110
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 .....	126
5.4.2	系统软件的设计 .....	128
5.5	系统实时控制的结果 .....	129
<b>第6章</b>	<b>罩式退火炉自适应预测智能控制 .....</b>	<b>132</b>
6.1	概述 .....	132

6.2	罩式退火炉计算机温控系统的设计与构成	133
6.3	罩式退火炉数学模型的建立	135
6.3.1	系统建模的基本步骤	135
6.3.2	罩式退火炉的模型类型与结构	136
6.3.3	实验信号的设计与产生	137
6.3.4	实验过程、数据滤波及预处理	141
6.3.5	参数估计	142
6.3.6	模型的校验和确认	144
6.4	离散系统模型与连续系统模型间的转换	146
6.4.1	离散系统模型转换为连续系统模型	146
6.4.2	连续系统模型转换为离散系统模型	150
6.5	罩式退火炉的前馈补偿零极点配置自适应 PID 预测 智能控制	153
6.5.1	零极点配置 PID 预测控制	153
6.5.2	前馈补偿零极点配置自适应 PID 预测控制	158
6.5.3	智能控制器的设计	163
6.5.4	实时控制结果	165
<b>第 7 章</b>	<b>电加热炉炉温智能控制</b>	<b>167</b>
7.1	电加热炉结构及对自动控制系统提出的要求	167
7.1.1	电加热炉结构	167
7.1.2	对自动控制提出的要求	168
7.2	电加热炉对象模型及控制策略的研究	168
7.2.1	电加热炉对象模型	168
7.2.2	电加热炉控制策略的研究	174
7.3	电加热炉炉温计算机控制	175
7.3.1	硬件结构框图	175
7.3.2	常用控制算法	176
7.3.3	系统软件设计	191
7.4	电加热炉炉温智能控制	191
7.4.1	智能控制器的设计	191
7.4.2	智能控制器的学习环节和修正环节	200
7.5	电加热炉炉温实时控制结果	204
7.5.1	随机最优控制结果	204

7.5.2	非线性 PID 控制结果 .....	205
7.5.3	智能控制结果 .....	207
第 8 章	高炉、焦炉混合煤气压力和热值智能复合 控制系统 .....	209
8.1	高炉、焦炉混合煤气生产工艺及对自动控制提出的要求 .....	209
8.1.1	高炉、焦炉混合煤气生产工艺 .....	209
8.1.2	对自动控制提出的要求 .....	211
8.1.3	控制方案选择 .....	211
8.2	智能复合控制算法 .....	214
8.2.1	单神经元自适应 PSD 控制算法和仿人规则控制算法 .....	214
8.2.2	模糊解耦控制算法 .....	215
8.3	智能复合控制系统的硬件配置和软件设计 .....	219
8.3.1	系统硬件配置 .....	219
8.3.2	系统软件设计 .....	220
8.4	高炉、焦炉混合煤气智能复合控制系统运行结果 .....	223
8.5	结束语 .....	225
第 9 章	电弧炉炼钢过程智能控制 .....	226
9.1	电弧炉炼钢工艺过程及对自动控制提出的要求 .....	226
9.1.1	电弧炉结构 .....	226
9.1.2	工艺特点 .....	226
9.1.3	对自动控制提出的特殊要求 .....	227
9.2	电弧炉炼钢过程电极升降智能复合控制系统 .....	228
9.2.1	快速最优 (Bang-Bang) 控制 .....	229
9.2.2	模糊控制 .....	233
9.2.3	PID 控制 .....	235
9.2.4	智能复合控制问题 .....	236
9.2.5	电极升降控制系统平衡问题 .....	236
9.2.6	电极升降控制系统实验结果 .....	237
9.3	电弧炉炼钢过程的数学模型及终点自适应预报系统 .....	238
9.3.1	氧化期数学模型的建立与终点预报方程 .....	239
9.3.2	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 .....	249
9.3.3	氧化期预报系统运行结果 .....	249

9.3.4	还原期操作 .....	251
9.4	电弧炉炼钢过程智能自适应预测操作指导系统的设计 .....	252
9.4.1	问题的引入 .....	252
9.4.2	IPOGS 总结构流程图及设计 .....	253
9.4.3	系统运行结果 .....	265
9.5	电弧炉炼钢过程闭环控制研究 .....	267
9.5.1	组织级 .....	268
9.5.2	协调级 .....	268
9.5.3	知识库构成 .....	268
9.5.4	电弧炉炼钢过程自动控制程序总流程图 .....	269
9.5.5	结束语 .....	269
<b>第 10 章</b>	<b>高温力学试验机的神经网络自适应智能控制 .....</b>	<b>270</b>
10.1	概述 .....	270
10.2	高温力学试验机电加热炉的结构及计算机控制系统构成 .....	271
10.3	电加热炉神经网络模型的建立 .....	273
10.3.1	反向传播学习算法原理 .....	273
10.3.2	电加热炉的神经网络模型 .....	280
10.4	使用单神经元的电加热炉自适应智能控制 .....	283
10.4.1	神经网络学习规则 .....	284
10.4.2	单神经元自适应 PID 智能控制器 .....	285
10.4.3	单神经元自适应 PSD 智能控制器 .....	299
10.4.4	电加热炉单神经元自适应智能控制 .....	304
10.5	使用多神经元的电加热炉前馈补偿内模控制 .....	306
10.5.1	内模控制器的设计 .....	306
10.5.2	神经网络的前馈补偿内模控制 .....	311
10.5.3	电加热炉的神经网络前馈补偿内模控制 .....	313
<b>第 11 章</b>	<b>遗传算法及其应用 .....</b>	<b>314</b>
11.1	概述 .....	314
11.2	基本遗传算法 .....	315
11.2.1	遗传算法的基本原理 .....	316
11.2.2	遗传算法的基本操作 .....	317
11.2.3	遗传算法的特点 .....	323
11.3	模式定理 .....	325



11.3.1	模式 .....	325
11.3.2	选择对模式的影响 .....	327
11.3.3	交叉对模式的影响 .....	328
11.3.4	变异对模式的影响 .....	330
11.3.5	模式定理 .....	331
11.3.6	积木块假设 .....	333
11.4	遗传算法实现中的几个问题 .....	334
11.4.1	编码的评估准则与方法 .....	334
11.4.2	初始群体的产生 .....	339
11.4.3	适应度函数 .....	340
11.4.4	遗传操作 .....	344
11.4.5	关键参数的确定 .....	351
11.5	遗传算法与人工神经网络的结合 .....	352
11.5.1	基于遗传算法优化神经网络连接权 .....	352
11.5.2	基于遗传算法优化神经网络的结构 .....	360
11.5.3	遗传算法与神经网络相结合在电炉控制中的应用 .....	365
11.6	遗传算法与模糊控制的结合 .....	371
11.6.1	基本模糊控制器 .....	372
11.6.2	基于遗传算法优化量化和比例因子的力学持久机电 加热炉模糊控制器 .....	381
11.6.3	基于遗传算法优化隶属函数和融合因子的大容量输油泵 模糊控制器 .....	388
11.7	遗传算法在函数最优化的应用 .....	395
11.8	遗传算法在建模及预报中的应用 .....	400
11.8.1	遗传算法在人体能量代谢分析系统辨识中的应用 .....	400
11.8.2	遗传算法在 $\text{SO}_2$ 催化氧化反应动力学非线性模型参数 估计中的应用 .....	406
11.8.3	遗传算法在水泥强度预测中的应用 .....	412
11.9	遗传算法在自动控制系统中的应用 .....	416
11.9.1	遗传算法在平整机电控制系统参数整定和控制中的 应用 .....	416
11.9.2	遗传算法在力学持久机 PID 控制系统中的应用 .....	423
11.10	结束语 .....	430