

中国电气工程大典编辑委员会



CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

第 15 卷

电气传动自动化

主编 仲明振 陈伯时 李崇坚
李永东 戴先中 徐殿国



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

主编委员会

CHINA ELECTRICAL

中国电气

工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第 15 卷

电气传动自动化

主编 仲明振 陈伯时 李崇坚
李永东 戴先中 徐殿国



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的。它是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等15卷。

本书为第15卷，电气传动自动化卷。主要内容包括概论、电气自动控制策略、计算机控制技术、电气传动控制系统、装备制造电气自动化、电气传动自动化的应用。

本书主要供电气工程领域技术人员和管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国电气工程大典. 第15卷, 电气传动自动化/仲明振等主编; 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-7434-5

I. 中… II. ①仲…②中… III. ①电气工程-中国②电力传动-自动化技术-中国 IV. TM TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第077265号

中国电力出版社出版发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司

各地新华书店经售

*

2009年4月第1版 2009年4月北京第1次印刷

880mm×1230mm 1/16 · 55印张 · 2486千字 · 1插页

定价 210.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放 30 年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至 2007 年底，我国发电装机容量达 7.13 亿 kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流 1000kV、直流 ±800kV 特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入 21 世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的基礎上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近 2000 位专家和学者，历

时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日

前 言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放 30 年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和运用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统和信息管理系统的广泛应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术在电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约 2000 位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。

本套书的编写工作于2004年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过4年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共15卷约5000万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放30年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌

本卷前言

电气传动的作用是以电动机作为原动机带动各种机器或部件运动,将电能转换成机械能,完成一定的任务。由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点,大多数需要运动的设备都采用电气传动,例如:工农业生产用的机床、轧钢机、卷扬机、挖掘机、钻井机、鼓风机、抽水机、印刷机、纺织机、注塑机、农业加工机械等,交通运输用的电气机车、城轨列车、电力推进船舶、电动汽车、电动自行车等,家用电器中的电冰箱、洗衣机、空调压缩机和风扇等,现代高新技术的机器人、计算机光盘驱动器、数字医疗器械的扫描式 X 光机、CT 机、核磁共振机等。总而言之,电气传动已经广泛应用于现代化生产和生活的方方面面。

自从 19 世纪 30 年代发现电磁感应现象以来,先后发明了直流电动机和交流电动机,从而出现了直流电气传动和交流电气传动。在 20 世纪的大部分年代里,鉴于直流传动具有优越的调速性能,高性能可调速传动都采用直流电动机,而约占电气传动 80% 的不变速传动则采用交流电动机,这种分工在一段时期内成为公认的格局。直到 20 世纪 70 年代初期,席卷世界工业国家的石油危机迫使人们投入大量人力和财力去研究高效节能的交流调速系统,至 70 年代末成效明显,交直流传动按调速分工的格局终于被打破,开始出现用交流传动取代直流传动的技术革新趋势。现在,交流电气传动系统的应用已经大大超过直流电气传动系统。

现代电气传动系统的组成大体是电动机、电力电子可控电源、微电子数字控制器、用于连续自动化生产过程的现场总线、数据通信和网络等。

为了论述现代电气传动自动化在各方面的技术内容、应用及其发展方向,本卷分 6 篇进行介绍:概论、电气自动控制策略、计算机控制技术、电气传动控制系统、装备制造电气自动化、电气传动自动化的应用。其中,第 1 篇是总论,第 2、3 篇是电气传动自动化的基础,第 4 篇是各种典型的电气传动控制系统,第 5、6 篇是电气传动自动化在不同领域中的应用。

目前,电气传动自动化系统的研究和发展趋势是:

- (1) 研究电气传动系统新的控制策略，提高系统的性能和效率。
- (2) 研究开发各类电动机的新型电气传动系统，例如：永磁同步电动机低速无减速箱直接传动、磁阻电动机电气传动、直线电动机电气传动等。
- (3) 对于高性能电气传动系统，实现无速度/位置传感器控制。
- (4) 应用新型电力电子器件，开发新的变换器拓扑，提高传动系统的技术经济指标（谐波含量、功率因数、效率、成本）。
- (5) 开发集成控制器芯片与机电一体化的电气传动系统。
- (6) 通过系统集成和技术融合，组成综合自动化系统，以进一步提高生产效率。
- (7) 开发或改进电气传动控制系统及其装置的数字仿真和计算机辅助设计软件包。

陈伯时

目 录

序	
前言	
本卷前言	
第 1 篇 概论	1
第 1 章 概述	3
1 电气自动化系统及其结构	3
1.1 电气自动化系统	3
1.2 两类电气自动化系统	3
1.3 电气传动自动化系统结构	3
1.4 数据通信和网络	4
1.5 电气传动、电力电子和数字控制	5
2 本卷内容概述	5
第 2 章 技术标准	6
1 电气传动系统与设备的现行标准体系	6
1.1 电气传动系统与设备专业的标准体系	6
1.2 电气传动系统与设备的国际标准体系	7
1.3 常用的国内外技术标准对照简况	7
2 电气控制设备	8
2.1 范围	8
2.2 技术要求	8
2.3 主要试验	8
3 交流电动机电力电子软起动装置	8
3.1 范围	8
3.2 技术要求	8
3.3 主要试验	9
4 低压直流调速电气传动系统	9
4.1 范围	9
4.2 技术要求	9
4.3 专门试验	9
5 低压交流变频电气传动系统	9
5.1 范围	9
5.2 技术要求	10
5.3 专门试验	10
6 1~35kV 交流调速电气传动系统	10
6.1 范围	10
6.2 技术要求	10
6.3 主要试验项目	10
7 调速电气传动系统的电磁兼容	10
7.1 范围	10
7.2 技术要求	11
8 调速电气传动系统的安全要求	11
8.1 范围	11
8.2 技术要求	11
9 调速电气传动系统带负荷运行和对应额定 电流形式的选择	11
9.1 范围	11
9.2 技术要求	11
10 船用电气传动控制设备	11
11 热带用电气传动控制设备	11
11.1 气候防护类型及使用环境条件	11
11.2 热带电工产品环境的技术要求	12
11.3 热带电工产品的结构与设计简要要求	12
11.4 材料的选用简要要求	12
11.5 工艺防护简要要求	12
12 电工电子产品的产品认证	12
12.1 产品质量认证的三个层级	12
12.2 合格认证和安全认证	12
12.3 自愿性认证和强制性认证	12
12.4 质量认证的基本原则	12
12.5 我国产品认证概况	13
12.6 中国强制性产品认证的基本环节	13
12.7 申请产品认证需提供的主要技术资料	13
附表: 常用标准目录	13
第 3 章 电磁兼容性与可靠性	21
1 电磁兼容性概述	21
1.1 静电放电	21
1.2 辐射电磁场	23
1.3 电快速瞬变脉冲群	23
2 抗干扰技术	25
2.1 抗干扰设计的基本原则	25
2.2 噪声的分类	25
2.3 噪声的传递方式	26
2.4 抗干扰的基本措施	27
2.5 抗干扰设计的检查细则	27
3 常见噪声的抑制	28
3.1 电网噪声的抑制	28
3.2 直流电源噪声的抑制	32
3.3 静电放电噪声的抑制	33
3.4 模拟电路噪声的抑制	33
3.5 数字电路的抗干扰设计	35
4 设备安装的抗干扰技术	37
4.1 设备的内部装配要求	37
4.2 设备的外部安装要求	37
4.3 系统的接地技术	37
5 可靠性	40
5.1 可靠性的定义	40
5.2 可靠性的指标	41
5.3 系统可靠性的预计	43
5.4 冗余系统	46
5.5 提高设备可靠性的措施	47
参考文献	49
第 2 篇 电气自动控制策略	51
第 1 章 概论	53
1 自动控制的基本原理	53
1.1 控制系统实例	53
1.2 控制系统框图	54
2 自动控制系统的分类	54
2.1 基于系统的控制结构分类	54
2.2 基于传输信号的性质分类	55
2.3 基于输入信号的变化规律分类	55

2.4 基于系统的数学模型分类	55	2.4 期望频率特性法校正	123
2.5 其他分类方法	55	3 根轨迹法校正	125
3 对控制系统的基本要求	56	3.1 串联超前校正	125
3.1 稳定性	56	3.2 串联滞后校正	126
3.2 动态性能	56	3.3 并联校正	126
3.3 稳态性能	56	4 PID 控制器	127
4 自动控制理论的发展	56	4.1 PID 控制器的概念	127
4.1 经典控制理论	57	4.2 PID 控制器参数的工程整定方法	128
4.2 现代控制理论	57	4.3 采样系统的校正	128
4.3 大系统理论	57	第 5 章 基于状态空间模型的自动控制	
4.4 智能控制	57	系统分析与设计	131
第 2 章 自动控制系统的建模	58	1 线性系统的运动分析	131
2.1 导论	58	1.1 线性定常连续系统状态方程的解	131
2.1.1 数学模型	58	1.2 线性时变连续系统状态方程的解	132
2.1.2 系统建模	58	1.3 线性离散系统的运动分析	133
2.2 控制系统的微分方程	58	2 线性系统的能控性与能观性分析	134
2.2.1 微分方程的建立	58	2.1 线性系统的能控性分析	134
2.2.2 非线性方程的线性化	61	2.2 线性系统的能观性分析	135
2.3 控制系统的传递函数	62	2.3 对偶系统与对偶性原理	137
2.3.1 传递函数的概念及性质	63	2.4 能控标准形与能观标准形	137
2.3.2 典型环节的开环传递函数	64	2.5 系统能控性、能观性与传递函数(矩阵)	139
2.3.3 控制系统的结构图	65	2.6 线性系统的结构分解	139
2.3.4 控制系统的闭环传递函数	69	3 线性定常系统的综合	141
2.4 控制系统的频率特性	70	3.1 系统的综合问题	141
2.4.1 频率特性的概念	70	3.2 状态反馈及极点配置	141
2.4.2 开环频率特性	71	3.3 系统镇定问题	144
2.4.3 闭环频率特性	80	3.4 系统渐近跟踪问题	146
2.5 采样控制系统的数学模型	85	3.5 系统解耦控制问题	147
2.5.1 采样过程及其信号恢复	85	3.6 状态重构问题与状态观测器	151
2.5.2 z 变换	88	3.7 引入状态观测器的状态反馈控制系统	153
2.5.3 脉冲传递函数	91	3.8 线性二次型最优控制	154
2.6 控制系统的状态空间模型	93	第 6 章 智能控制	158
2.6.1 状态空间和状态方程	93	1 智能控制概述	158
2.6.2 控制系统状态空间表达式的建立	94	1.1 智能控制的发展历史与现状	158
第 3 章 自动控制系统的性能分析	99	1.2 智能控制与传统控制的关系	159
3.1 控制系统的瞬态响应及性能指标	99	1.3 智能控制的主要内容与当前的研究热点	159
3.1.1 系统基本概念	99	2 模糊控制	160
3.1.2 二阶系统的瞬态响应及性能指标	99	2.1 模糊关系及其模糊推理	160
3.1.3 添加零点对二阶规范系统瞬态特性的影响	104	2.2 模糊控制系统原理	163
3.2 反馈控制系统的稳态误差	106	2.3 模糊控制器设计	164
3.2.1 稳态误差的概念及计算	106	2.4 模糊控制应用示例	166
3.2.2 主扰动输入引起的稳态误差	110	3 神经网络控制	168
3.2.3 降低稳态误差问题	112	3.1 神经网络基本概念及学习算法	168
3.3 控制系统的稳定性分析	113	3.2 常用神经网络及学习算法	169
3.3.1 劳斯-赫尔维茨稳定性判据	113	3.3 神经网络智能 PID 参数最优控制	173
3.3.2 奈奎斯特稳定判据	114	3.4 液位系统实时控制示例	175
3.3.3 采样系统的稳定性分析	115	4 仿人智能控制	176
3.3.4 李雅普诺夫稳定性理论	116	4.1 专家控制	176
第 4 章 基于经典控制理论的自动控制系统设计	119	4.2 仿人智能控制的原理	178
4.1 校正与综合的概念	119	4.3 仿人比例控制算法	178
4.1.1 校正的基本方式	119	4.4 仿人智能积分控制算法	178
4.1.2 串联校正的基本控制规律	120	5 遗传算法	179
4.2 频率法校正	122	5.1 遗传算法的基本原理	179
4.2.1 串联超前校正	122	5.2 遗传算法的特点	180
4.2.2 串联滞后校正	123	5.3 遗传算法的构成要素	180
4.2.3 串联滞后-超前校正	123	5.4 遗传算法在控制器参数整定中的应用	181

5.5 应用示例	181	5.1 概述	245
第7章 非线性系统控制与先进控制技术	183	5.2 ARM的体系结构	247
1 导论	183	5.3 ARM基本编程模型	249
1.1 非线性系统的复杂性及特征	183	5.4 其他嵌入式微处理器	251
1.2 非线性系统控制的经典方法及局限性	183	第6章 多处理器与总线控制	253
1.3 非线性系统控制技术的新发展及存在的问题	184	6.1 概述	253
2 经典控制理论中的非线性系统分析与控制	185	6.2 总线控制与仲裁	253
2.1 描述函数法	185	6.3 基于共享存储器的多处理器结构	254
2.2 相平面法	188	6.4 基于SPI总线的多处理器结构	256
3 反馈线性化控制	191	6.5 基于 \mathcal{P} C总线的多处理器结构	256
3.1 非线性系统精确线性化方法	192	7 数据保护与人机接口	257
3.2 非线性系统的近似线性化方法	193	7.1 电源电压监视	257
3.3 应用实例	194	7.2 存储器与数据保护	257
4 预测控制	196	7.3 人机接口(MMI)	258
4.1 预测控制基本原理	196	第3章 总线与通信接口	263
4.2 动态矩阵预测控制	197	1 总线及其分类	263
4.3 应用实例	199	1.1 总线的概念	263
5 滑模变结构控制	200	1.2 总线的分类	263
5.1 滑模变结构控制的基本概念	200	2 并行总线	264
5.2 滑模变结构控制的数学描述	201	2.1 并行总线的基本特性	264
5.3 不确定系统的滑模变结构控制	202	2.2 总线与总线信号	266
5.4 应用实例	202	2.3 典型总线的接口方式	268
6 鲁棒控制	203	3 串行通信	270
6.1 稳定鲁棒性	204	3.1 通信的基本概念	270
6.2 基于频域的鲁棒控制	205	3.2 异步串行通信	271
6.3 基于线性矩阵不等式的鲁棒控制	206	3.3 同步串行通信	271
6.4 应用实例	206	3.4 通信控制器	272
参考文献	208	4 串行总线接口	273
第3篇 计算机控制技术	209	4.1 串行总线及其分类	273
第1章 绪论	211	4.2 串行总线接口标准	274
1 计算机与计算机控制系统	211	第4章 计算机输入/输出接口技术	281
1.1 计算机技术的发展	211	1 开关量输入接口技术	281
1.2 计算机控制系统	211	1.1 开关量输入信号	281
2 计算机控制系统组成与特点	213	1.2 开关量输入接口电路	281
2.1 计算机控制系统基本结构	213	2 开关量输出接口技术	282
2.2 数字控制器与控制计算机	213	2.1 开关量输出接口的功能	282
2.3 计算机控制系统的特点	214	2.2 开关量输出接口电路	282
3 计算机控制系统的开发	215	3 开关量I/O隔离与保护	283
4 计算机控制技术与本篇章节安排	215	3.1 光电耦合器件	283
第2章 控制计算机与处理器	216	3.2 大功率开关量输入接口电路	284
1 概述	216	3.3 典型开关量输出接口电路	284
2 工业控制计算机(IPC)	216	3.4 继电器型开关量输出接口电路	284
2.1 IPC组成及特点	216	3.5 双向晶闸管隔离驱动电路	284
2.2 CPU模板	217	3.6 远距离信号的隔离传送	284
2.3 I/O模板	217	4 模拟量输入接口技术	284
3 微控制器	220	4.1 A/D转换器的主要技术指标	285
3.1 8位微控制器	220	4.2 A/D转换的方法和原理	285
3.2 16位微控制器	225	4.3 A/D转换集成芯片的选择要点	286
3.3 MCU的中断技术	226	4.4 A/D转换器与微机系统的连接	287
4 DSP控制器	229	4.5 典型A/D转换器简介	287
4.1 概述	229	4.6 电压/频率型A/D转换器	289
4.2 DSP结构与工作原理	232	4.7 多路模拟开关及采样保持电路	289
4.3 DSP的中断技术	238	5 模拟量输出接口技术	290
5 嵌入式微处理器	245	5.1 D/A转换器的主要技术指标	290
		5.2 D/A转换的方法和原理	291
		5.3 D/A转换集成芯片的选择要点	291

5.4	D/A 转换器与微机系统的连接	292	10.2	基于中断技术的实时控制软件任务分配	328
5.5	多路数字量的转换	293	10.3	基于 RTOS 的实时控制软件	329
5.6	典型 D/A 转换器简介	293	10.4	基于 MS-Windows 的准实时软件	330
6	模拟量调理与功率放大	294	10.5	实时控制软件的故障监测	330
6.1	模拟量输入信号的滤波	294	11	实时控制软件分析设计方法	330
6.2	模拟量放大技术	296	11.1	软件生命周期	330
7	模拟量隔离技术	298	11.2	软件分析设计方法	331
7.1	电磁耦合隔离放大器	298	11.3	面向对象的程序设计	331
7.2	光耦合隔离放大器	299	11.4	基于构件技术的程序设计	332
第 5 章	系统软件与控制软件	301	12	实时控制软件开发	332
5.1	概述	301	12.1	目标定义与可行性研究	333
5.1.1	软件与控制系统	301	12.2	需求分析	333
5.1.2	控制计算机软件分类	302	12.3	计算机控制系统软件的设计	333
5.2	实时系统与实时软件	303	12.4	编码与测试	334
5.2.1	实时系统及其特点	303	12.5	任务与系统集成	334
5.2.2	实时系统的性能	303	12.6	软件应用与系统测试	334
5.2.3	实时系统的特征	304	12.7	软件系统维护	334
5.2.4	实时操作系统 RTOS	304	第 6 章	基本控制单元	335
5.2.5	编程语言与实时软件	306	6.1	基本控制单元及其特点	335
5.2.6	实时控制与软件	307	6.2	多功能控制器	335
5.3	系统软件与控制软件结构	307	6.2.1	多功能控制器原理与发展	336
5.3.1	简单应用系统的软件结构	307	6.2.2	面向 DCS 的多功能控制器	336
5.3.2	控制软件的中断机制	308	6.2.3	多功能控制器的应用	337
5.3.3	复杂应用系统的软件结构	308	6.3	可编程逻辑控制器 PLC	339
5.3.4	基于客户端/服务器 (C/S) 模式的结构	309	6.3.1	PLC 简介	339
5.4	实时软件任务调度	310	6.3.2	PLC 系统基本原理	341
5.4.1	实时任务与线程	310	6.3.3	PLC 系统应用编程	345
5.4.2	实时控制软件中的任务调度	310	6.4	嵌入式控制单元	350
5.4.3	实时系统中的任务同步与通信	310	6.4.1	采用微控制器的控制单元	350
5.5	控制与处理软件	310	6.4.2	采用 DSP 控制器的控制单元	352
5.5.1	基本要素	310	6.4.3	采用嵌入式系统的控制单元	356
5.5.2	输入信号转换与离散化	311	6.5	可编程自动控制器 PAC	358
5.5.3	信号输入预处理	312	6.5.1	概述	358
5.5.4	常用数字滤波	313	6.5.2	可编程自动控制器 PAC 定义	358
5.5.5	输入异常监测报警	313	6.5.3	PAC 的特点	358
5.5.6	输出信号处理	313	6.5.4	PAC 硬件的两种结构	358
5.6	常规数字控制算法	314	第 7 章	分布式控制系统	359
5.6.1	控制运算概述	314	7.1	工业控制网络概述	359
5.6.2	数字 PID 及其改进算法	314	7.1.1	工业控制网络的特点	359
5.6.3	软件控制模块的典型结构	316	7.1.2	工业控制网络的基本要素	359
5.6.4	常用算法模块	316	7.1.3	开放系统互连参考模型	359
5.6.5	控制参数整定	317	7.1.4	DCS 与 FCS	362
5.7	高级控制技术	318	7.2	现场通信总线与 DCS 组网	362
5.7.1	自整定 PID	318	7.2.1	长线收发器	362
5.7.2	模糊逻辑控制	319	7.2.2	调制解调器	363
5.7.3	多模块的软连接与回路切换	320	7.2.3	DCS 组网	364
5.8	系统组态与组态软件	321	7.3	基于自组网 (Ad-hoc) 技术的分布式控制系统	365
5.8.1	控制组态	321	7.3.1	中低速现场通信系统	365
5.8.2	监控组态	323	7.3.2	基于工业以太网的控制系统	368
5.8.3	组态软件与系统生成	324	7.4	现场总线及其电气自动化系统	368
5.9	实时数据库技术	326	7.4.1	现场总线概述	368
5.9.1	实时数据库的定义	326	7.4.2	典型现场总线——控制器局域 网总线 CAN	370
5.9.2	实时数据库体系结构	326	7.4.3	典型过程现场总线 Profibus	373
5.9.3	实时数据库访问与管理	327	7.4.4	基金会现场总线 FF	377
5.10	实时多任务控制软件	328	7.5	分布式电气自动化应用系统	382
5.10.1	MS-DOS 操作系统下的任务调度	328			

5.1	基于工业以太网的电气自动化应用系统	382	4.1	电动机的能量损耗与发热	417
5.2	典型 DCS 控制系统	384	4.2	电气传动系统的工作制	418
5.3	现场总线控制系统应用	386	4.3	复杂传动机构的转矩与功率折算	419
第 8 章	互联网技术在计算机控制系统中的应用	388	4.4	电动机的选择	420
1	互联网及其接入	388	5	典型生产机械的工艺要求及其电气传动	422
1.1	局域网与互联网	388	5.1	电气传动的应用范围	422
1.2	互联网协议	389	5.2	风机和泵类设备	422
1.3	常见互联网接入方式	390	5.3	调速控制类	423
1.4	互联网交换技术	390	5.4	多电动机协调控制类	423
1.5	互联网路由技术	391	5.5	伺服(随动)类	423
2	基于互联网技术的控制系统结构与特点	391	5.6	张力控制类	423
2.1	客户机/服务器模式	391	5.7	升降控制类	423
2.2	浏览器/服务器模式	391	5.8	牵引推进类	423
2.3	基于互联网的测控系统数据交换	392	第 2 章	直流电动机调速系统	425
2.4	基于互联网的数据传输	393	1	直流电动机调速系统的类型和指标	425
2.5	互联网控制的网络延迟	393	1.1	直流电动机调速系统的类型	425
3	基于互联网的控制系统	394	1.2	调速系统指标	427
3.1	网络化远程控制	394	2	转速单闭环控制的直流调速系统	428
3.2	控制数据的互联网发布	394	2.1	系统的组成和静态性能	428
3.3	面向互联网的 SNMP 设备远程监控	395	2.2	动态性能	429
3.4	面向互联网的远程视频监控	396	2.3	无静差直流调速系统	429
第 9 章	计算机控制系统中的可靠性技术	398	2.4	限流保护	429
1	可靠性的基本概念	398	3	转速、电流双闭环直流调速系统	430
2	软件可靠性设计	398	3.1	系统的组成和静态性能	430
2.1	软件容错技术	398	3.2	动态性能	430
2.2	编码检错技术	399	4	可逆直流调速系统	431
2.3	数字滤波技术	399	4.1	可逆直流脉宽调速系统	431
2.4	故障自诊断技术	400	4.2	晶闸管相控可逆直流调速系统	431
3	硬件可靠性设计	400	5	弱磁控制的直流调速系统	433
3.1	硬件可靠性及提高	400	5.1	调压与弱磁配合控制	433
3.2	单元可靠性设计	401	5.2	非独立控制励磁直流调速系统	433
4	控制系统的可靠性设计	402	5.3	弱磁过程中直流调速系统的动态数学模型和转速调节器设计	433
4.1	可靠性保障的解决方法	402	6	模拟控制和数字控制	434
4.2	双工结构与工作流程	402	6.1	模拟控制系统	434
4.3	双工控制系统的设计与实现	402	6.2	数字控制系统	434
4.4	功能分布式下的多机系统冗余设计	403	7	调速系统中的信号检测	436
参考文献		405	7.1	连续的模拟量检测	436
第 4 篇	电气传动控制系统	407	7.2	数字量的检测	436
第 1 章	电气传动基础	409	第 3 章	交流异步电动机调速系统	439
1	电气传动系统的结构与组成	409	1	交流异步电动机调速系统的分类	439
1.1	电气传动系统的基本结构	409	1.1	按用途分类	439
1.2	电气传动系统的组成与分类	409	1.2	按转差功率分类	439
1.3	电气传动系统的基本问题	410	2	转差功率消耗型变压调速系统	439
2	电动机与负载的机械特性和运行状态	410	2.1	异步电动机变压调速系统的主电路及机械特性	439
2.1	直流电动机的机械特性	410	2.2	闭环控制的异步电动机变压调速系统	440
2.2	交流电动机的机械特性	411	2.3	在软启动器和轻载减压节能中的应用	440
2.3	生产机械的负载类型及机械特性	412	3	转差功率馈送型绕线转子异步电动机调速系统	441
2.4	电动机与负载特性的匹配	413	3.1	绕线转子异步电动机串级调速系统	441
2.5	电动机的各种运行状态	413	3.2	绕线转子异步电动机双馈调速系统	445
3	电气传动系统的动力学	415	4	转差功率不变型变压变频调速系统	447
3.1	电气传动系统的运动方程	415	4.1	转速开环变压变频调速系统	447
3.2	电气传动系统的稳定条件	416	4.2	转速闭环转差频率控制调速系统	448
3.3	电气传动系统的过渡过程	416	5	异步电动机的动态数学模型和坐标变换	449
4	电动机的发热与冷却规律和容量选择	417			

5.1	坐标变换	449	3.1	稳态性能指标	513
5.2	异步电动机的动态数学模型	451	3.2	动态性能指标	513
6	异步电动机矢量控制系统	455	4	伺服系统的设计	513
6.1	矢量控制系统的基本原理	455	4.1	伺服系统的稳态设计	513
6.2	转差型间接矢量控制系统	458	4.2	伺服系统的动态设计	515
6.3	磁链闭环直接矢量控制系统	459	4.3	伺服系统的复合控制	519
7	异步电动机直接转矩控制系统	461	4.4	现代控制理论在伺服系统设计中的应用	520
7.1	直接转矩控制原理	461	第6章 电气传动控制系统调节器的		
7.2	磁链和转矩的控制性能	462	工程设计方法		525
7.3	全数字化直接转矩控制系统	464	1	典型系统	525
8	无速度传感器异步电动机调速系统	467	1.1	典型Ⅰ型系统	525
8.1	基于电动机模型的直接算法	468	1.2	典型Ⅱ型系统	525
8.2	基于闭环控制作用的自适应控制法	469	2	典型系统性能指标与参数的关系	526
8.3	利用电动机特征的谐波信号处理法	471	2.1	典型Ⅰ型系统性能指标与参数的关系	526
9	异步电动机调速系统的非线性控制和智能控制	472	2.2	典型Ⅱ型系统性能指标与参数的关系	527
9.1	异步电动机的非线性控制	472	3	非典型系统的典型化	528
9.2	异步电动机的智能控制	475	3.1	控制对象传递函数的近似处理	528
第4章 交流同步电动机调速系统		479	3.2	调节器结构的选择	529
1	交流同步电动机调速的优点和类型	479	4	直流调速系统设计举例	529
1.1	交流同步电动机的类型	479	4.1	电流调节器的设计	529
1.2	交流同步电动机与直流电动机、		4.2	转速调节器的设计	530
	异步电动机的比较	479	4.3	转速退饱和和超调量的计算	531
1.3	交流同步电动机调速系统的类型	480	4.4	对转速超调的抑制——转速微分负反馈	531
2	交流同步电动机的数学模型	481	5	交流调速系统设计举例	532
2.1	交流同步电动机在 dq 坐标系上		5.1	转速调节器的设计	532
	的数学模型	481	5.2	磁链调节器的设计	533
2.2	同步电动机的时空矢量图	482	6	调节器最佳整定设计法	533
2.3	同步电动机的动态参数	483	6.1	模最佳(二阶最佳)整定	533
3	负载换流同步电动机变频调速系统	484	6.2	对称最佳(三阶最佳)整定	533
3.1	负载换流同步电动机调速系统的工作原理	484	6.3	对“调节器最佳整定设计法”的评价	533
3.2	负载换流同步电动机的基本关系	485	参考文献		535
3.3	负载换流同步电动机调速控制	486	第5篇 装备制造电气自动化		537
4	转子励磁同步电动机调速系统	487	第1章 装备制造电气自动化概述		539
4.1	交流同步电动机磁场定向控制原理	488	1	装备制造电气自动化的作用及范畴	539
4.2	交流同步电动机磁场定向控制系统	491	1.1	装备制造电气自动化的作用	539
4.3	交流同步电动机直接转矩控制系统	493	1.2	装备制造电气自动化的范畴	539
5	永磁同步电动机调速系统	495	1.3	数控系统的基本概念	539
5.1	永磁同步电动机	495	1.4	数控机床的组成与工作原理	540
5.2	永磁同步电动机的数学模型	496	1.5	数控机床的分类与适用范围	540
5.3	永磁同步电动机的控制策略	497	1.6	数控机床的特点	543
5.4	永磁同步电动机控制系统	499	2	国外装备制造电气自动化的现状	543
5.5	永磁同步电动机的自控式变频调速系统	501	2.1	现代数控机床的两个基本评定指标	543
6	开关磁阻电动机调速系统	502	2.2	国外数控机床技术现状	544
6.1	开关磁阻电动机调速系统的工作原理	502	2.3	国外数控机床伺服驱动技术现状	545
6.2	开关磁阻电动机基本关系分析	503	3	国内装备制造电气自动化的现状	546
6.3	开关磁阻电动机控制系统	504	3.1	我国装备工业的技术现状	546
第5章 伺服系统(随动系统)		507	3.2	我国工业控制自动化技术的现状	547
1	伺服系统的特征、分类和结构	507	3.3	中国数控机床技术发展现状	550
1.1	伺服系统的特征	507	3.4	国内数控机床伺服驱动技术现状和趋势	552
1.2	伺服系统的分类	507	4	装备制造电气自动化的关键技术	552
1.3	伺服系统的结构	507	4.1	数控机床的关键技术	552
2	伺服系统的主要组成部分	507	4.2	永磁交流运动控制系统的关键技术	555
2.1	位置反馈装置	508	4.3	SERCOS 接口技术	557
2.2	执行电动机	512	5	装备电气自动化的发展方向	559
2.3	功率放大装置	512	5.1	数控机床发展的新趋势	559
3	伺服系统的性能指标	512			

5.2	数控机床的未来展望	561	3.3	微机控制系统	643
5.3	数控系统技术的发展趋势	563	3.4	传感器技术	644
第2章	数控机床的电气系统	567	3.5	数据采集及信息处理技术	651
2.1	数控机床的产生、发展和定义	567	4	人工智能和专家系统	660
1.1	数字控制技术与数控机床的产生和发展	567	4.1	人工智能的基本原理	660
1.2	数控机床的主要技术指标	567	4.2	故障诊断技术	662
1.3	机床数控技术的发展趋势	568	4.3	专家系统在装备制造中的应用	667
2.2	数控机床的电气组成	570	4.4	专家系统的基本构成	667
2.1	概述	570	5	虚拟现实及仿真技术	667
2.2	数控机床的伺服系统	571	5.1	虚拟现实简介	667
2.3	位置检测装置	576	5.2	系统仿真基本原理	668
2.4	位置控制	581	6	模糊和神经网络技术	671
3	数控机床的发展趋势	582	6.1	模糊逻辑基本理论	671
3.1	电主轴的高速化和一体化	582	6.2	模糊控制器	672
3.2	直线电动机直接驱动进给技术	583	6.3	神经网络基本理论	673
3.3	人工智能控制技术的应用	584	6.4	神经网络控制及其软件实现	674
3.4	计算机集成制造(CIMS)技术	584	6.5	模糊和神经网络技术在装备制造中的应用	674
3.5	开放式网络化数控技术	585	第5章	装备制造中的新型驱动技术	678
第3章	工业机器人控制系统	587	5.1	直接驱动技术	678
3.1	工业机器人的定义	587	1.1	直接驱动技术概论	678
1.1	工业机器人诞生的背景	587	1.2	直接驱动旋转电动机技术	679
1.2	工业机器人的定义	587	1.3	直线电动机	680
1.3	工业机器人和一般自动机的区别	587	1.4	直线电动机技术在装备制造中的应用	682
2	工业机器人的发展历史、现状与趋势	588	2	磁悬浮驱动技术	682
2.1	工业机器人的发展历史与现状	588	2.1	磁悬浮技术概论	682
2.2	工业机器人市场现状	590	2.2	磁悬浮轴承技术	683
2.3	工业机器人的技术方向和发展趋势	591	2.3	磁悬浮旋转电动机	684
3	工业机器人系统的组成、运动及分类	593	2.4	磁悬浮直线电动机	684
3.1	工业机器人系统的组成	593	2.5	磁悬浮控制系统	684
3.2	工业机器人的运动系统	594	2.6	磁悬浮电动机的应用领域	684
3.3	工业机器人的分类	597	3	非电磁类驱动技术	685
4	工业机器人的控制系统	597	3.1	磁致伸缩驱动	685
4.1	工业机器人控制功能的基本要求	597	3.2	压电驱动	686
4.2	开放式工业机器人控制器	598	3.3	超声驱动	691
4.3	工业机器人的编程及仿真	601	3.4	记忆合金驱动	691
4.4	工业机器人控制系统	603	3.5	静电驱动	691
5	工业机器人在装备制造中的应用	607	3.6	光驱动	691
5.1	工业机器人的主要应用及分布情况	607	3.7	超导驱动	691
5.2	焊接机器人	608	3.8	其他驱动技术	691
5.3	喷漆机器人	611	4	新型驱动技术在装备制造中的应用	691
5.4	装配机器人	611	4.1	新型驱动技术在机床设备中的应用	691
5.5	搬运机器人	612	4.2	新型驱动技术在磁悬浮列车驱动中的应用	692
第4章	柔性加工自动化	616	4.3	新型驱动技术在现代物流中的应用	692
4.1	柔性加工自动化的发展和组成	616	4.4	在军事、航天、医学及其他方面的应用	692
1.1	柔性加工自动化现状和发展趋势	616	与国内外的发展	692	
1.2	柔性制造系统	616	4.5	新型驱动技术在信息及自动化中的应用	692
1.3	集成制造系统	618	参考文献	693	
1.4	控制系统和通信结构	626	第6篇	电气传动自动化的应用	695
2	计算机辅助设计	629	第1章	电动机调速节能的应用	697
2.1	概述	629	1	电动机的调速节能	697
2.2	数据库技术	629	1.1	电动机调速节能的意义	697
2.3	计算机辅助设计优化方法	633	1.2	电动机调速节能的方法	697
2.4	计算机图形学	635	2	电动机节能系统设计及应用	700
3	机电一体化	640	2.1	选择调速节能注意事项	700
3.1	总论	640	2.2	风机、水泵电动机节能应用	700
3.2	系统部件的选择与设计	643			

649	2.3 节能效果的工程计算和测量方法	701	192	3.1 铜铝冷轧机生产设备的组成	783
643	3 通用低压交流调速节能控制系统设计	701	867	3.2 生产设备对电气传动自动化系统的要求	783
169	3.1 交流调速节能系统的容量计算	701	552	3.3 电气传动自动化系统配置方案	784
192	3.2 外围设备及选择	703	552	3.4 控制系统功能描述	785
644	4 异步电动机中压变频的应用实例	704	552	3.5 生产过程自动化和计算机控制	787
588	4.1 单元串联变频器特点	704	第4章 在采矿工业中的应用		789
588	4.2 应用实例	704	881	矿井提升机械的应用	789
515	5 大功率同步电动机静止变频的实例	705	052	1.1 矿井提升机对电气传动系统的要求	789
589	5.1 同步电动机变频起动原理	705	052	1.2 矿井提升机直流电气传动系统	791
706	5.2 SFC的功率单元	706	132	1.3 矿井提升机交流电气传动系统	796
409	5.3 SFC控制单元	706	818	1.4 矿井提升机的综合自动化控制	797
137	5.4 SFC的运行	706	142	矿山挖掘机械的应用	798
137	5.5 某蓄能水电厂二期工程SFC的特点	707	868	2.1 矿山挖掘机设备及特点	798
516	5.6 结束语	707	482	2.2 矿山挖掘机电气传动系统的特点	799
第2章 在钢铁工业中的应用		708	482	2.3 矿山挖掘机全数字直流传动系统	800
61	1 钢铁工业电气传动设备和特点	708	482	2.4 矿山挖掘机全数字交流传动系统	800
432	2 电力电子变流器的发展与应用	709	第5章 在石油钻井机械中的应用		803
416	2.1 大功率晶闸管整流装置的应用	709	741	钻机的组成和分类	803
452	2.2 同步电动机静止变频装置的应用	711	482	1.1 钻机的组成	803
417	2.3 异步电动机中压变频装置的应用	714	552	1.2 钻机的分类	804
413	3 高炉炼铁的应用	715	512	2 钻机的负载特性和电气传动控制系统	804
582	3.1 高炉生产工艺特点	715	062	2.1 主要钻井机械工作与负荷特性	804
583	3.2 高炉电气传动控制系统	716	782	2.2 钻机电控设备的工作特点	805
584	3.3 高炉基础自动化控制系统	719	483	3 钻机电气传动系统	806
586	3.4 高炉过程自动化控制系统	721	882	3.1 直流模拟控制系统	806
420	3.5 高炉三电自动化的典型控制系统	723	062	3.2 直流全数字控制系统	807
144	4 转炉炼钢中的应用	725	167	3.3 交流变频控制系统	807
183	4.1 转炉炼钢生产设备的组成和生产工艺要求	725	062	3.4 新型钻机控制系统的功能的发展	809
183	4.2 转炉倾动机构的传动自动化系统	726	第6章 在港口和起重机械中的应用		810
183	4.3 转炉氧枪升降传动自动化系统	727	141	港口机械设备的组成及分类	810
882	4.4 转炉基础自动化系统	727	782	1.1 翻车机	810
285	5 轧钢工业的应用	728	782	1.2 堆/取料机	810
489	5.1 轧机设备的组成及电气传动自动化系统	728	782	1.3 装船机	810
112	5.2 轧制力计算和电动机容量选择	731	809	1.4 连续卸船机	810
188	5.3 控制性能和各类传动方案的比较	734	112	1.5 输送机	811
188	5.4 轧钢传动的典型控制系统	737	426	1.6 港口起重机械	812
188	5.5 轧钢生产过程自动化和计算机控制系统	766	702	2 港口机械设备电气传动自动化系统	812
188	的应用举例	766	702	2.1 港口设备的供电系统	812
第3章 在有色金属工业中的应用		775	209	2.2 港口机械的电气传动系统	813
61	1 铝电解工业的应用	775	112	2.3 港口机械设备自动化系统	814
183	1.1 铝电解整流机组的基本类型	775	112	3 港口设备综合管理自动化系统	815
183	1.2 二极管整流机组	775	512	3.1 功能描述	815
183	1.3 晶闸管整流机组	775	812	3.2 港口综合管理自动化系统	815
183	1.4 三相五柱整流变压器	776	614	起重机械电气传动系统	815
588	1.5 同相逆并联整流技术	777	416	4.1 起重机类型及工作分类	815
588	1.6 整流器的散热和结构方式	777	416	4.2 电动机容量计算	816
588	1.7 整流机组的稳流控制系统	777	812	4.3 常用电气传动系统	817
588	1.8 多相整流和电力电子元件的均流技术	779	第7章 在造纸工业中的应用		820
588	1.9 整流机组的运行监控和故障保护	779	851	生产线设备组成及生产工艺	820
706	1.10 工业应用	780	420	1.1 造纸生产过程	820
612	2 铝板轧机电气传动系统	780	420	1.2 制浆工艺流程	820
612	2.1 铝轧机生产设备的组成	780	826	1.3 造纸工艺流程	820
612	2.2 粗轧机可逆主动传动系统	781	582	1.4 精整部分	821
612	2.3 精轧连轧机主动传动系统	782	012	制浆设备及电气设备	821
612	2.4 生产过程自动化和计算机控制	782	012	2.1 磨木机及电气设备	821
003	铜铝冷轧机电气传动系统	783	826	2.2 削片机及电气设备	821