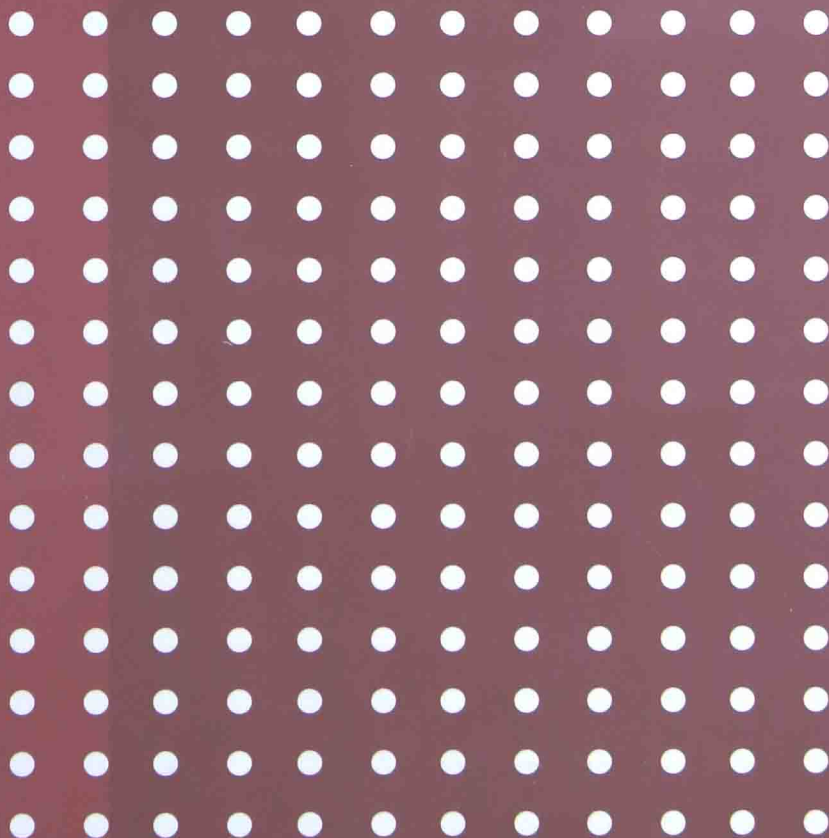


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

自动控制元件 (第二版)

Components in Automatic Control Systems, Second Edition

池海红 单蔓红 王显峰 编著



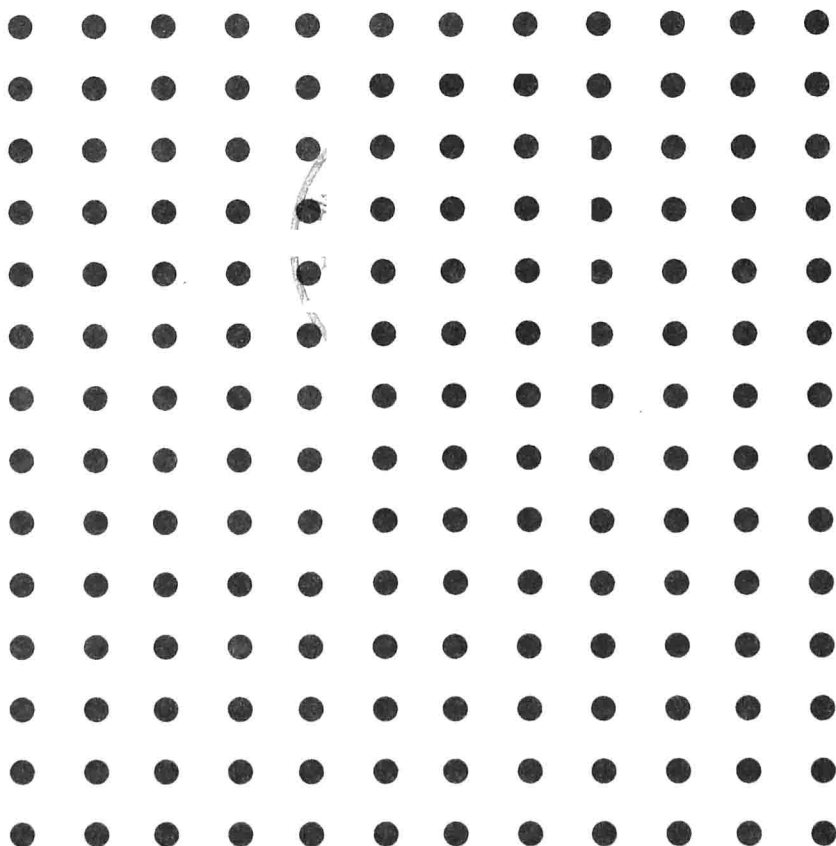
清华大学出版社

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材

自动控制元件 (第二版)

Components in Automatic Control Systems, Second Edition

池海红 单蔓红 王显峰 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍自动控制系统中常用电磁元件的结构、工作原理、工作特性、元件的数学建模以及国内外的相关技术应用。

本书主要内容分为四篇。第一篇(包含第1、第2章)为基于稳恒磁场的元件,主要介绍直流伺服电动机、直流测速发电机;第二篇(包含第3、第4章)为基于脉振磁场的元件,主要介绍旋转变压器、自整角机;第三篇(包含第5~第7章)为基于旋转磁场的元件,主要介绍步进电动机、交流伺服电动机、无刷直流电动机。第四篇为新型元件(包含第8、第9章),介绍直线电动机和超声波电动机。书中还提供了大量思考题及习题供课后复习。

本书为配合教育部卓越工程师计划,可作为自动化、测控技术与仪器、探测制导与控制、生物医学与工程等专业的基础课;也可作为电气工程、机器人自动化、计算机视觉、电子医疗设备等领域科技人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制元件/池海红,单蔓红,王显峰编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2015

21世纪高等学校电子信息工程规划教材

ISBN 978-7-302-39552-2

I. ①自… II. ①池… ②单… ③王… III. ①自动控制—控制元件 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第041388号

责任编辑:黄 芝 薛 阳

封面设计:常雪影

责任校对:梁 毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:22.75

字 数:564千字

版 次:2009年8月第1版

2015年2月第2版

印 次:2015年2月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:44.50元

产品编号:053455-01

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用的培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合的方法,使产品性价比很高。如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程

设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,可提高学生兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会
联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言(第二版)

2009年出版本书第一版到如今已经过去5年。由于科学技术的不断发展,新型元件不断涌现,在现代工业中,其应用也日趋广泛。控制元件已不再由单纯的交直流电直接供电,而是由电力电子驱动器驱动。因此教材进行周期性的修订是十分必要的。编者从事“自动控制元件”课程教学多年,根据一些院校在使用过程中的建议以及在教学过程中学生的反馈,对于书中每一章的内容进行了有针对性的修改。书中按照元件的工作原理分为四大部分,共9章。第一部分为基于稳恒磁场的元件(第1、第2章)、第二部分为基于脉振磁场的元件(第3、第4章)、第三部分为基于旋转磁场的元件(第5~7章),第四部分为新型元件(第8、第9章)。在每一章中增加了元件结构图、应用实例及每种元件的控制模型,为今后系统地学习自动控制理论打好基础。

由于本教材主要用于教学之中,因而在每一章中增加了思考题,力求使读者通过习题和思考题加深对教材中基本概念和原理的理解和掌握。每一章的实例来自于实际的工业应用,可使读者了解元件在行业中使用的情况。本书的第1、第2、第4章由单蔓红编写,第3、第6、第7、第9章由池海红编写,第5、第8章及各章节中元件建模及应用部分由王显峰编写,全书由池海红统稿。

感谢我的同事们在本书编写期间富有建设性的讨论,感谢清华大学出版社编审人员对于教材出版的大力支持,同时真诚感谢中国电力出版社允许使用本书第一版的内容。对于书中列出的参考文献的作者表示诚挚谢意。哈尔滨工业大学郑萍教授和哈尔滨工程大学赵文常教授详细审阅了本书全部底稿,并提出了宝贵意见,在此表示感谢。

限于作者的知识水平以及编写经验不足,书中难免还存在一些缺点和错误,恳请广大读者批评指正,意见和建议请至:chi_h_h@sina.com。如果对我们制作的与本教材配套的多媒体获奖课件感兴趣,也请来信咨询。对于未经许可而部分或全部抄袭本书中内容的行为我们保留追究的权利。

在教学中经常听到的反应是学习这门课太难了,尽管这是一本技术类的书籍,在这里还是要说一句感性的话——希望大家能像一个科学家而不是像技术员那样思考问题,只有站得高,才能看得远。让我们以此共勉。

池海红

2014.6 于哈尔滨工程大学

前 言

本教材是根据哈尔滨工程大学新版“自动控制元件”课程的教学大纲要求,在原教材(叶瑰昀 2002 版、赵文常 1993 版)的基础上重新编写而成的,主要供自动化、测控技术与仪器、探测制导与控制技术等专业的师生作为教材使用,也可为从事自动控制专业的工程技术人员提供参考。

本书的编写结合了编者多年的教学经验,详细分析了自动控制系统中常用的以电磁理论为基础的元件的基本结构、工作原理、静态特性和动态特性,以及选择和使用方法,并且介绍了一些常用的新型元件,从而扩大教材的信息量,使教材具有知识面宽等特点。

由于本教材主要用于教学之中,因而在每一章中均配有适当的习题和思考题,力求使读者通过解答这些习题加深对教材中基本概念和原理的理解和掌握。

本书由哈尔滨工程大学池海红和单蔓红主编,书中第 1、第 2、第 5 章由单蔓红编写,第 4、第 6、第 7 章由池海红编写;第 3 章及第 6 章部分章节由刘涛编写,由池海红统稿。哈尔滨工程大学赵文常教授和哈尔滨工业大学尚静教授详细审阅了本书全部底稿,并提出了宝贵意见,在此表示感谢。

在编写过程中,得到哈尔滨工程大学自动化学院领导的大力支持和帮助,在此致以诚挚的谢意。

本教材在编写过程中,参阅了大量相关中外文献,并引用了许多参考文献中的有关内容,对此编者表示感谢。

限于作者的知识水平以及编写经验不足,书中难免还存在一些缺点和错误,恳请广大读者批评指正,意见和建议请至:chi_h_h@sina.com.

编 者

2009.6 于哈尔滨工程大学

目 录

绪论	1
0.1 控制元件在自动控制系统中的作用	1
0.1.1 自动控制的应用及定义	1
0.1.2 自动控制元件在控制系统中的作用	3
0.1.3 自动控制元件的定义及分类	6
0.2 本书的主要内容及编排	7
0.3 自动控制元件的理论基础	8
0.3.1 基本物理量	8
0.3.2 铁磁性材料的主要特性	9
0.3.3 磁路及其基本定律	10
思考题	15
参考文献	15

第一篇 基于稳恒磁场的元件

第 1 章 直流伺服电动机	19
1.1 概述	19
1.1.1 直流伺服电动机的发展历程	19
1.1.2 直流伺服电动机的概念	19
1.1.3 直流伺服电动机的作用	20
1.1.4 直流伺服电动机的分类及特点	21
1.2 直流电动机基本原理和结构	23
1.2.1 直流电动机基本原理	23
1.2.2 直流电机的结构	25
1.2.3 直流电机的励磁方式	27
1.2.4 直流电机的电枢绕组	28
1.2.5 直流电机的磁场	31
1.2.6 换向过程	32
1.2.7 直流电机的电磁转矩和感应电动势	33
1.2.8 静态四大关系式	35

1.2.9 动态四大关系式	35
1.3 直流伺服电动机的静态特性	36
1.3.1 直流伺服电动机的能量关系	37
1.3.2 直流伺服电动机的静态关系式	38
1.3.3 电枢控制时的机械特性	39
1.3.4 直流伺服电动机的控制特性	41
1.3.5 机械特性曲线上的工作点和负载线	44
1.3.6 直流伺服电动机的工作状态	44
1.4 直流伺服电动机的动态特性	47
1.4.1 阶跃控制电压作用下直流伺服电动机的过渡过程	47
1.4.2 过渡过程的讨论	49
1.5 直流伺服电动机的选择	53
1.5.1 直流伺服电动机的额定值	53
1.5.2 直流伺服电动机型号	54
1.5.3 直流伺服电动机的选择	56
1.6 直流力矩电动机	59
1.6.1 概述	59
1.6.2 直流力矩电动机的结构特点和运行性能	61
1.6.3 直流力矩电动机的额定指标及其选择	65
1.7 直流伺服电动机的应用实例——运动目标检测与跟踪系统	68
1.7.1 利用自动控制元件构建控制系统的基本思想	68
1.7.2 系统的组成及工作原理	68
1.7.3 各元件的工作原理	69
1.7.4 系统中各元件的控制数学模型	73
思考题	75
习题	76
参考文献	77
第2章 直流测速发电机	78
2.1 概述	78
2.1.1 直流测速发电机的发展历程	78
2.1.2 直流测速发电机的分类及特点	79
2.2 直流测速发电机的特性	80
2.2.1 静态特性	81
2.2.2 动态特性	81
2.2.3 能量关系	82
2.3 输出特性的误差分析	82
2.3.1 电枢反应	83
2.3.2 温度	84

2.3.3	电刷与换向器的接触电阻	85
2.3.4	延迟换向	86
2.3.5	纹波	86
2.3.6	火花和电磁干扰	87
2.4	直流测速发电机的选择	87
2.4.1	技术性能指标	87
2.4.2	技术数据	88
2.4.3	直流测速发电机的选择	89
2.5	直流测速发电机的应用	90
2.5.1	恒速控制中的应用	91
2.5.2	作为系统的校正元件	92
2.5.3	作为微分或积分解算元件	93
2.6	直流测速发电机的应用实例——冷轧机控制系统	93
2.6.1	系统组成、工作原理、技术指标	94
2.6.2	主轧机调速控制系统	95
2.6.3	主轧机调速系统各元件工作原理	96
2.6.4	主轧机调速系统的数学模型	98
	思考题和习题	99
	参考文献	100

第二篇 基于脉振磁场的元件

第3章	旋转变压器	103
3.1	概述	103
3.1.1	旋转变压器的发展历程	103
3.1.2	旋转变压器的分类	104
3.2	变压器工作原理	105
3.2.1	变压器结构及种类	105
3.2.2	变压器的运行	106
3.2.3	变压器的额定值	112
3.3	正余弦旋转变压器的结构和工作原理	113
3.3.1	旋转变压器的结构	113
3.3.2	正余弦旋转变压器的空载运行	114
3.3.3	正余弦旋转变压器的负载运行	117
3.4	线性旋转变压器	122
3.4.1	空载时线性旋转变压器的输出电压表达式	122
3.4.2	负载时的线性旋转变压器	123
3.5	旋转变压器的应用	123
3.5.1	旋转变压器测量角差	124

3.5.2	用旋转变压器求反三角函数	125
3.5.3	比例式旋转变压器	126
3.6	旋转变压器的选用	127
3.6.1	旋转变压器型号	127
3.6.2	旋转变压器的误差特性	127
3.6.3	使用条件对误差特性的影响	129
3.7	多级旋转变压器及其在随动系统中的应用	130
3.7.1	双通道测角线路	130
3.7.2	多级旋转变压器的结构	133
3.8	磁阻式旋转变压器	134
3.9	感应同步器(Inductosyn)	137
3.9.1	直线式感应同步器的结构和工作原理	137
3.9.2	圆盘式感应同步器的结构和工作原理	141
3.10	旋转变压器应用实例——平台式惯导系统稳定回路	141
3.10.1	惯导系统的组成及工作原理	141
3.10.2	稳定回路的组成及工作原理	142
3.10.3	元件的工作原理	143
3.10.4	系统各元件的控制数学模型	148
思考题		149
习题		149
参考文献		150

第4章 自整角机

151

4.1	概述	151
4.1.1	力矩式自整角机	151
4.1.2	控制式自整角机	152
4.1.3	自整角机的结构	152
4.2	力矩式自整角机	153
4.2.1	力矩式自整角机的结构	153
4.2.2	力矩式自整角机的工作原理	155
4.2.3	力矩式自整角机的主要技术指标	161
4.3	力矩式自整角机的故障分析	162
4.3.1	发送机或接收机的励磁绕组断路	162
4.3.2	励磁绕组错接	164
4.3.3	整步绕组错接	164
4.3.4	整步绕组一相断路	167
4.3.5	整步绕组两相短路	169
4.4	控制式自整角机	171
4.4.1	控制式自整角机的结构及分类	171

4.4.2	控制式自整角机的工作原理	172
4.4.3	控制式自整角机的主要技术指标	175
4.5	自整角机的选择	176
4.5.1	自整角机类型的选择	176
4.5.2	选用自整角机时对电源的要求	177
4.5.3	选用自整角机时对精度的要求以及各类误差间的区别	177
4.5.4	多台力矩式自整角接收机的并联使用	178
4.5.5	多台控制式自整角变压器的并联使用	179
4.5.6	自整角机的基准电气零位的正确选用	180
4.6	控制式自整角机的应用实例——舰炮火控系统	180
4.6.1	系统的组成及工作原理	180
4.6.2	火炮伺服系统	181
4.6.3	元件的工作原理与输入输出特性	182
4.6.4	系统各元件的控制数学模型	186
	思考题	187
	习题	187
	参考文献	189

第三篇 基于旋转磁场的元件

第5章	步进电动机	193
5.1	概述	193
5.1.1	步进电动机的发展历程	193
5.1.2	步进电动机的分类及特点	193
5.2	反应式步进电动机的工作原理	196
5.2.1	反应式步进电动机的结构特点	196
5.2.2	反应式步进电动机工作原理	197
5.3	反应式步进电动机的静态特性	201
5.3.1	电角度	201
5.3.2	能量关系	201
5.3.3	矩角特性	203
5.4	反应式步进电动机的动态特性	207
5.4.1	单脉冲作用下的运行	208
5.4.2	连续运行时步进电动机的动态特性	213
5.5	永磁式和混合式步进电动机	218
5.5.1	永磁式步进电动机	219
5.5.2	混合式步进电动机	220
5.6	步进电动机的驱动电路	222
5.7	步进电动机的选择	226

5.8 步进电动机的应用实例——直角坐标机器人控制系统	228
5.8.1 系统的组成及工作原理	229
5.8.2 步进电机系统组成及工作原理	230
5.8.3 步进电机控制系统中元件的工作原理	232
思考题	235
习题	236
参考文献	236
第6章 交流伺服电动机	237
6.1 概述	237
6.1.1 交流伺服电动机的发展历程	237
6.1.2 交流伺服电动机的分类	238
6.2 两相异步伺服电动机的结构和工作原理	238
6.2.1 两相异步伺服电动机的结构(Two-phase induction motor)	238
6.2.2 两相异步伺服电动机的工作原理	240
6.3 两相绕组的圆形旋转磁场	241
6.3.1 圆形旋转磁场的产生	241
6.3.2 圆形旋转磁场的特点	245
6.4 圆形旋转磁场作用下的电动机特性	246
6.4.1 转速和转差率	246
6.4.2 定转子导体中感应电动势的频率	246
6.4.3 电压平衡方程式	247
6.4.4 异步电动机的等效电路	249
6.4.5 对称状态时定子两相绕组电压之间的关系	252
6.4.6 电磁转矩	254
6.4.7 机械特性	256
6.5 椭圆旋转磁场及其分析方法	258
6.5.1 椭圆旋转磁场的形成	258
6.5.2 椭圆旋转磁场的特点	261
6.5.3 椭圆旋转磁场的分析方法——分解法	262
6.5.4 椭圆旋转磁场作用下电动机的机械特性	264
6.6 两相异步伺服电动机的控制方法及静态特性	267
6.6.1 两相异步伺服电动机的控制方法	267
6.6.2 两相异步伺服电动机的静态特性	270
6.7 永磁同步伺服电动机(Permanent Magnet Synchronous Motor)	276
6.7.1 概述	276
6.7.2 永磁式同步电动机的结构	276
6.7.3 正弦波驱动的永磁式伺服电动机工作原理	278
6.7.4 永磁式伺服电动机的能量关系	279

6.8 永磁同步伺服电动机的动态特性	280
6.8.1 坐标系	280
6.8.2 坐标变换	281
6.8.3 矢量控制	284
6.9 交流伺服电动机的选择	284
6.9.1 两相交流伺服电动机的选择	284
6.9.2 永磁同步伺服电动机的选择	287
6.10 直接编码器	288
6.10.1 增量式码盘	288
6.10.2 绝对式码盘	290
6.11 交流伺服电动机的应用实例——工业机器人(机械臂)控制系统	291
6.11.1 系统的组成及工作原理	291
6.11.2 伺服驱动系统组成及工作原理	293
6.11.3 伺服驱动器及电机	295
6.11.4 系统的控制数学模型	298
思考题	299
习题	300
参考文献	300
第7章 无刷直流电动机	302
7.1 概述	302
7.1.1 无刷直流电动机发展历程	302
7.1.2 无刷直流电动机的基本结构	302
7.2 无刷直流电动机的工作原理	305
7.2.1 位置传感器	305
7.2.2 无刷直流电动机的工作原理	307
7.3 无刷直流电动机的运行特性	311
7.3.1 无刷直流电动机的数学模型	311
7.3.2 反电动势	311
7.3.3 电磁转矩	312
7.3.4 机械特性及控制特性	312
7.3.5 无刷直流电动机的电枢反应	313
7.3.6 改变无刷直流电动机转向的方法	314
7.4 无刷直流电动机的应用实例——电动汽车的电机驱动控制系统	315
7.4.1 系统的组成及工作原理	315
7.4.2 电力驱动子系统构成及工作原理	317
7.4.3 系统硬件设计及功能	318
7.4.4 系统各元件的控制数学模型	322
思考题	324

参考文献	324
------------	-----

第四篇 新型元件

第 8 章 直线电动机	327
8.1 概述	327
8.2 直线感应电动机	327
8.3 直线直流电动机	329
8.4 直线步进电动机	332
8.5 直线同步电动机	334
思考题及习题	335
参考文献	335
第 9 章 超声波电动机	336
9.1 概述	336
9.1.1 超声波电动机的发展历程	336
9.1.2 超声波电动机的优点	337
9.2 超声波电动机的常见结构与分类	337
9.2.1 环状或盘式行波型超声波电动机	338
9.2.2 直线式行波型超声波电动机	338
9.2.3 驻波型超声波电动机	339
9.3 超声波电动机的工作原理	340
9.3.1 逆压电效应	340
9.3.2 行波型超声波电动机	340
9.3.3 驻波型超声波电动机	343
9.4 超声波电动机的应用	344
思考题	345
参考文献	345

绪 论

0.1 控制元件在自动控制系统中的作用

0.1.1 自动控制的应用及定义

在过去的一百多年里,工业生产的需求促使自动控制理论不断发展;而随着工艺水平和材料性能的提高,不断涌现的高性能元器件使复杂的自动控制系统成为可能。在发展起来的自动控制理论的指导下,这些控制系统又解决了大量的生产实践问题,如今高速度、高精度、高可靠性的自动控制系统成功地应用在工业生产、农业、交通、航海、航空、航天及国防等领域中。

(1) 在航空航天领域,由于自动控制的发展,我国在 20 世纪 80 年代初便成功地向太平洋发射了洲际弹道导弹,目前实现了神舟飞船的载人航行;美国核动力驱动的好奇号(Curiosity)探测器登陆火星,探索火星上的生命元素,如图 0-1 所示。

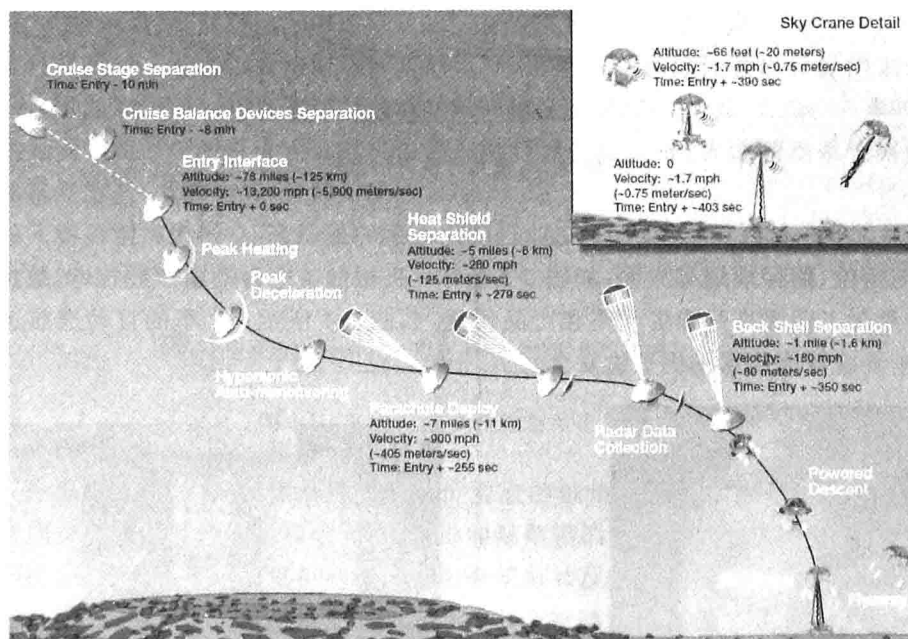


图 0-1 好奇号入降着陆全过程(来自果壳网、NASA 官网)

(2) 在航海领域,舰船的自动操舵、自动定位、自动避航和自动导航系统能保证船舶按规定的航向航行,并提高船舶航行安全。中国载人深潜器“蛟龙”号 7000m 级海试最大下潜深度达 7062m,可以完成自动航行和悬停定位,如图 0-2 所示。

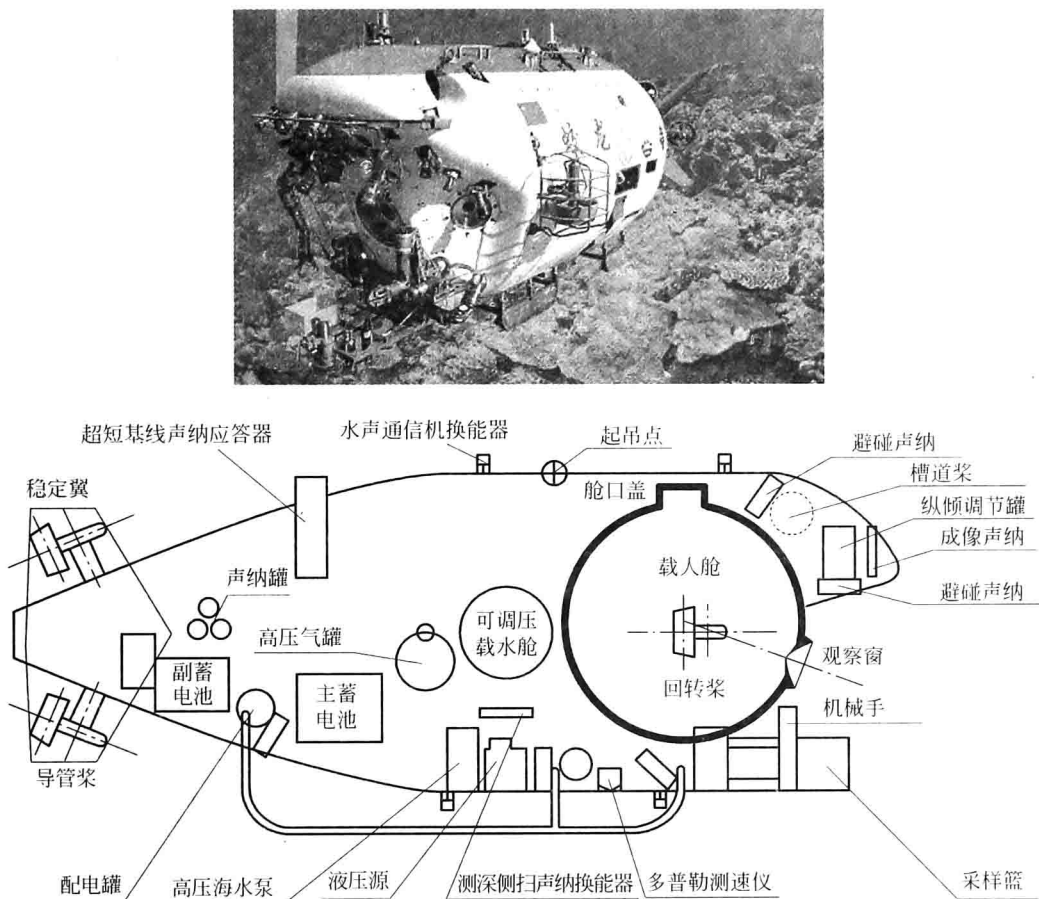


图 0-2 蛟龙号载人潜水器

(3) 在工业领域,机器人技术是工业自动化水平的最高表现,体现在对机器人的位姿控制、导航与定位、路径规划等方面,如图 0-3 所示;机械加工中自动生产线技术、数控机床对零件的自动加工能提高劳动生产率和产品质量,如图 0-4 所示;汽车的自动巡航速度控制系统、刹车系统等能使驾驶更平稳安全。

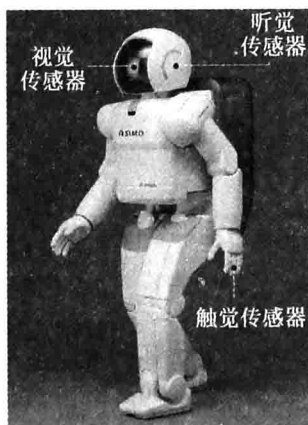


图 0-3 ASIMO 类人机器人(Honda Co., Ltd.)

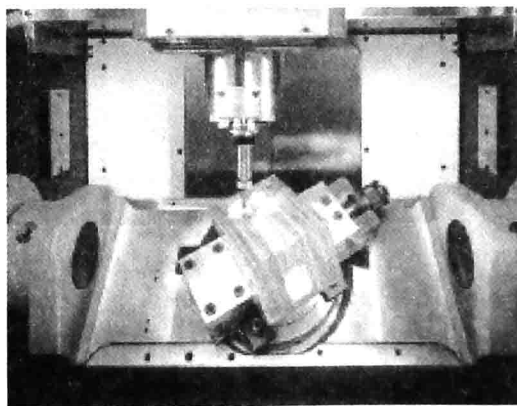


图 0-4 五轴联动加工(SIEMENS Ltd.)