



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Motion Modeling and Control System Design

运动建模与控制 系统设计

王斌锐 李璟 金英连 许宏 编著

Wang Binrui Li Jing Jin Yinglian Xu Hong



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Motion Modeling and Control System Design

运动建模与控制 系统设计

王斌锐 李璟 金英连 许宏 编著

Wang Binrui Li Jing Jin Yinglian Xu Hong

清华大学出版社

内 容 简 介

本书共 10 章,系统论述了运动起源——驱动器,实现基础——机构,分析基础——运动学和动力学建模,控制系统组成——运动感知、控制算法、控制器硬件和软件等方面的知识。主要内容有典型的仿生运动机构,坐标系变换、运动学、动力学建模,常用运动测量传感器及定位、避障,常规和智能驱动器,电动机电磁原理、伺服电动机模型及控制策略,运动控制系统建模,常用运动控制算法,运动控制器硬件和软件及操作系统、现场总线技术,柔顺运动控制以及运动控制系统设计案例等。

本书为自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、测控技术和机械设计制造及其自动化等工科专业的本科生及研究生编著,也适合作为从事运动控制相关行业的工程技术人员的参考读物。

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

运动建模与控制系统设计/王斌锐等编著. —北京:清华大学出版社,2014

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-37343-8

I. ①运… II. ①王… III. ①运动控制—控制系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 159494 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

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:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:22.25 字 数:556 千字

版 次:2014 年 10 月第 1 版 印 次:2014 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.00 元

产品编号:060708-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学	(教指委高级顾问)	郁道银	天津大学	(教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学	(特约高级顾问)	胡广书	清华大学	(特约高级顾问)
华成英	清华大学	(国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学	(国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学	(国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学	(国家级教学名师)
邹逢兴	国防科技大学	(国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学	(国家级教学名师)

编审委员会

主 任	吕志伟	哈尔滨工业大学			
副主任	刘 旭	浙江大学	王志军	北京大学	
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学	
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学	
	刘向东	浙江大学			
委 员	王志华	清华大学	宋 梅	北京邮电大学	
	韩 焱	中北大学	张雪英	太原理工大学	
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学	
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学	
	洪 伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学	
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学	
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学	
	曾 云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学	
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学	
	谢 泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学	
	吴 瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学	
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学	
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学	
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学	
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学	
	李 晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学	
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学	
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学	
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所	
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团	
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡 毅	中国兵器科学研究院	
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学	
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学	
	李勇朝	西安电子科技大学	江 毅	北京理工大学	
	章毓晋	清华大学	谢凯年	赛灵思公司	
	刘铁根	天津大学	张伟刚	南开大学	
	王艳芬	中国矿业大学	宋 峰	南开大学	
	苑立波	哈尔滨工程大学	靳 伟	香港理工大学	
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社			

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

人类已将太空探测器送上了火星和月球,数控加工中心、自动导引小车和工业机器人组成了无人制造工厂,无人驾驶汽车在高速公路上可自主超车,微纳米机器人可执行转基因操作和辅助外科手术等,所有这一切都需要精确的运动控制。运动控制是控制科学与工程学科的重点发展方向,如数控机床、机器人、卫星等,对于国民经济、社会发展和国家安全有着重要的意义。运动控制和过程控制是自动控制领域的两大分支。过程控制重点针对离散的过程量。运动控制主要针对位移、速度、加速度及姿态等,动态性和实时性强。已有运动控制相关著作偏重于电机原理和交流伺服电动机的控制,不能涵盖完整的运动控制系统知识点。对运动进行建模和控制系统分析设计,可加深对控制理论理解,更好地指导工程实践。本书秉承启发式、探究式、研讨式的理念编著,力求超越功利实用层面的工具书水平,引发人们或多或少、或深或浅地独立思考。

本书针对广义运动控制范畴,从运动的起源——驱动器,实现的基础——机构,分析的数学基础——运动学和动力学建模,控制系统的组成——运动感知、控制算法、控制器硬件和软件等方面,系统地论述。本书包括理论分析和实践案例,力求使读者能够系统地了解 and 掌握运动的基础知识和机构;明确快速连续变化运动的建模和控制方法;掌握运动控制系统的数学分析和设计方法;巩固和加强控制理论专业课程和应用技术知识,培养理论联系实际的工程实践能力。

本书共分为 10 章。

第 1 章讲解了完整的广义运动概念,运动基础包含的内容以及完整的运动控制系统的组成,使读者对运动有完整的初步认识。

第 2 章给出了运动机构的类型、组成,典型机构、仿生机构、量子运动等,并给出了机构优化设计案例,为运动建模提供基础。

第 3 章阐述了运动体坐标系、运动学建模、动力学建模、模型的正逆问题求解等,并给出了双足行走机器人建模过程,为运动的数学分析提供方法。

第 4 章分析了常用的位移、角度、速度、角速度、位置及高精密度测量传感器,为闭环反馈控制中传感器的选择提供基础。

第 5 章讲解了多种致动方式,常用的驱动器及智能材料驱动器等,便于开阔运动控制系统设计视野。

第 6 章建立了伺服电动机模型,分析了电动机的特性,并结合电磁场理论,阐述了电动机运动控制策略,为运动控制算法设计提出了思路。

第 7 章详细给出了运动控制对象的建模方法,讲解了常用的运动控制算法设计,并给出了案例和虚拟样机仿真技术,为控制算法设计和有效性验证提供了方法。

第8章阐明了实际工程中运动控制器开发所涉及的硬件和软件及操作系统问题,广域控制系统中的现场总线技术等,为工程应用提供参考。

第9章分析了柔性运动机构及柔顺运动控制算法,为高性能柔顺运动控制提供基础。

第10章给出了典型的运动控制系统设计案例,及其在计量检测领域的应用,便于读者进一步认识和掌握实际的运动控制系统设计和实施方法。

本书的特点:逻辑关系明确,按照完整的运动控制系统设计的思路展开;知识点完整,涵盖运动机构、驱动器、感知和控制器等运动体必需部分,注重多种专业知识的交叉融合;描述通俗易懂;理论与实际应用案例相结合,以机器人、数控机床和交流伺服电动机为典型运动控制对象来进行案例分析;基础与领域前沿相融合,紧跟运动控制相关领域科技最新前沿;难易结合,既可用于本科生教学,部分深入研究内容也可用于研究生教学;针对专业教育,注重学生所学知识的融会贯通。本书对专业术语给出了英文,便于学习中查阅国外文献。本书给出了公式中物理量的单位,便于掌握标准计量单位和计算准确。多数习题为需通过查阅资料、根据不同情况进行测量、分析和计算的综合题,利于学生理解知识的应用情况。

本书读者对象为自动化、电气工程及其自动化和机械设计及其自动化等工科专业学生。第4章由金英连、许宏编著,第6章由王斌锐、李璟编著,其他章由王斌锐编著。感谢孙冠群老师以及严冬明、方水光、程苗、鲍春雷、冯伟博、陈杭升、任杰、干苏、高国庆等研究生对本书编著工作所作出的帮助。感谢东北大学的徐心和教授引领我进入了机器人及其运动控制研究领域,本书部分内容来源于徐教授所授课程。本书得到了国家级“具有计量、质量、标准化特色的机电类专业复合型创新人才培养实验区”、“自动化国家特色专业建设”和“自动化卓越工程师教育培养计划”项目的支持。

由于运动控制系统的发展迅速,相关的理论和方法不断发展。因此,本书很难做到全面和翔实的讲解运动控制系统的知识。由于编著者的学识水平有限,难免存在不妥当之处,恳请广大读者及同行专家不吝赐教,以促进本书的不断更新和完善。

王斌锐

2014年9月

于田纳西大学(University of Tennessee, Knoxville, USA)

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 运动的基本概念与分类	1
1.2 运动控制系统的组成和分类	2
1.3 运动控制系统的特点	4
1.4 小结	5
习题	5
第 2 章 运动机构分析	6
2.1 运动副	6
2.2 基座固定的运动	9
2.3 无基座的运动	10
2.3.1 轮式移动机构	10
2.3.2 履带式移动机构	12
2.3.3 混合越障式移动机构	14
2.3.4 腿式移动机构	14
2.3.5 地面爬行机构	15
2.3.6 爬壁机构	15
2.4 水下运动	16
2.5 空中运动	16
2.6 随动运动机构	17
2.7 传动机构	18
2.7.1 减速方式	18
2.7.2 滚珠丝杠	20
2.7.3 链条和皮带传动	22
2.7.4 多连杆机构	22
2.7.5 制动器	22
2.7.6 联轴器	23
2.7.7 齿轮传动	24
2.8 运动机构的串并联与开闭链	25
2.8.1 开闭链机构	25
2.8.2 串联机构	26
2.8.3 并联机构	26
2.9 人体的骨骼运动	27

2.10	运动机构的性能	28
2.11	仿生机构设计案例	28
2.11.1	4 连杆仿生膝关节机构优化设计	28
2.11.2	气动肌肉仿生关节机构模型	31
2.11.3	关节机构优化设计仿真	34
2.12	量子运动	39
2.13	小结	40
	习题	40

第 3 章 运动学和动力学建模 41

3.1	基本术语	41
3.1.1	完整系统和非完整系统	41
3.1.2	保守力和非保守力	41
3.1.3	广义坐标	41
3.1.4	刚体与柔性体	42
3.1.5	直角坐标系	42
3.1.6	圆柱坐标系	42
3.1.7	球坐标系	43
3.1.8	固定坐标系与移动坐标系	43
3.2	运动学建模	43
3.2.1	坐标变换	43
3.2.2	D-H 参数	45
3.2.3	位置运动学分析	49
3.2.4	速度运动学分析	53
3.3	动力学建模	56
3.3.1	动力学建模方法	56
3.3.2	6 自由度步行机器人的动力学建模	58
3.4	12 自由度步行机器人案例	61
3.4.1	12 自由度步行机器人的运动学	61
3.4.2	12 自由度步行机器人的动力学	67
3.4.3	步行机器人拉格朗日法动力学	72
3.5	倒立摆案例	79
3.5.1	牛顿-欧拉法倒立摆动力学建模	79
3.5.2	拉格朗日方程法倒立摆动力学建模	81
3.5.3	拉格朗日函数法倒立摆动力学建模	82
3.6	小结	83
	习题	83

第 4 章 运动测量传感器 86

4.1	测量系统的基本组成	86
4.2	常用的运动测量传感器	88
4.2.1	旋转变压器	88
4.2.2	光电传感器	89

4.2.3	脉冲编码器	90
4.2.4	光栅	92
4.2.5	感应同步器	94
4.2.6	磁尺	97
4.2.7	限位开关	100
4.2.8	电位计	100
4.3	运动的避障感知	101
4.3.1	红外传感器	101
4.3.2	超声波传感器	101
4.3.3	激光传感器	103
4.3.4	图像传感器	104
4.4	全局运动检测	105
4.4.1	GPS 定位	105
4.4.2	陀螺仪	109
4.4.3	电子罗盘	109
4.5	高精密位移检测案例	112
4.6	小结	113
习题		113
第 5 章	致动方式与驱动器	114
5.1	驱动器的发展	114
5.2	致动方式	115
5.3	伺服电动机驱动器	119
5.3.1	直流伺服电动机结构	120
5.3.2	交流伺服电动机结构	123
5.3.3	直线电动机结构	129
5.3.4	电动机的驱动放大器	130
5.4	液压驱动器	130
5.5	气压驱动器	131
5.6	压电陶瓷驱动器	132
5.7	形状记忆合金驱动器	133
5.7.1	形状记忆合金驱动器模型	133
5.7.2	形状记忆合金丝的应用	135
5.8	人工肌肉驱动器	137
5.8.1	气动肌肉	137
5.8.2	电活性聚合物人工肌肉	139
5.8.3	离子交换膜金属复合材料	140
5.8.4	导电聚合物人工肌肉	140
5.8.5	碳纳米管人工肌肉	141
5.8.6	MR 阻尼器	143
5.9	小结	144
习题		144

第 6 章 伺服电动机模型及控制策略	146
6.1 伺服电动机控制系统概述	146
6.2 直流伺服电动机的稳态特性和控制方式	147
6.2.1 直流伺服电动机工作原理	147
6.2.2 直流伺服电动机的稳态特性	148
6.2.3 直流伺服电动机的控制方法	150
6.2.4 直流伺服电动机的应用案例	154
6.3 旋转磁场与交流伺服电动机控制方式	158
6.3.1 旋转磁场理论	158
6.3.2 幅值控制方式	160
6.3.3 相位控制方式	160
6.3.4 幅值-相位控制方式	161
6.3.5 双相控制方式	162
6.4 交流异步伺服电动机运行剖析	162
6.4.1 交流异步伺服电动机的对称分量分析	162
6.4.2 等效电路和电压方程	164
6.4.3 励磁绕组和控制绕组中的电流方程	166
6.4.4 电磁功率和电磁转矩	167
6.5 交流异步伺服电动机的静态特性	167
6.5.1 交流异步电动机机械特性	167
6.5.2 交流异步电动机调节特性	169
6.5.3 交流和直流伺服电动机的性能比较	170
6.5.4 交流异步伺服电动机的应用案例	171
6.6 永磁同步伺服电动机及其控制	174
6.6.1 永磁同步伺服电动机工作原理	174
6.6.2 永磁同步伺服电动机的数学模型	175
6.6.3 永磁同步伺服电动机的稳态性能	184
6.6.4 永磁同步伺服电动机的控制策略概述	187
6.6.5 永磁同步伺服电动机的矢量控制策略分析	188
6.7 伺服电动机发展趋势	192
6.8 小结	193
习题	194
第 7 章 运动控制算法设计与仿真	197
7.1 运动控制对象建模	197
7.1.1 运动控制对象的传递函数	197
7.1.2 运动控制对象的状态空间	200
7.1.3 运动负载分析	202
7.2 常用伺服控制策略	203
7.2.1 运动伺服控制策略概述	203
7.2.2 伺服运动控制系统的采样周期	206
7.2.3 采样周期 T 对运动控制器的影响	208
7.3 PID 控制算法剖析	209

7.4	滑模变结构控制基本原理	216
7.5	永磁同步伺服电动机的控制系统设计	218
7.5.1	PMSM 伺服系统设计	218
7.5.2	PMSM 驱动控制设计	223
7.5.3	PMSM 控制算法设计算例	227
7.5.4	PMSM 控制系统仿真分析	232
7.6	复杂运动控制算法案例分析	236
7.6.1	双腿行走机器人的迭代学习运动控制	236
7.6.2	仿生膝关节的力矩控制算法案例分析	237
7.6.3	倒立摆的最优控制器设计	239
7.7	运动控制系统的虚拟样机控制联合仿真	241
7.8	小结	244
	习题	245

第 8 章	运动控制器的硬件和软件	246
8.1	运动控制器类型	246
8.1.1	单片机	246
8.1.2	PLC	246
8.1.3	ARM	247
8.1.4	DSP	248
8.1.5	专用控制器	249
8.1.6	工控机	249
8.1.7	通用程序设计语言	251
8.1.8	专用程序设计数控编程	256
8.2	基于微处理器的直流伺服电动机驱动器案例	257
8.3	基于 DSP 的全数字直流伺服电动机控制系统案例	259
8.4	数控机床运动控制系统	260
8.4.1	数控机床结构	261
8.4.2	数控机床的分类	262
8.4.3	数控机床的工作原理	262
8.4.4	数控机床的坐标系	264
8.4.5	数控插补概述	265
8.4.6	逐点比较插补方法	266
8.4.7	数控机床 NC 编程	268
8.5	工业机器人控制器案例	274
8.5.1	Staubli 工业机器人编程软件	274
8.5.2	工业机器人控制器硬件	276
8.6	操作系统	278
8.7	现场总线	280
8.7.1	现场总线的发展现状	280
8.7.2	CAN 总线简介	280
8.7.3	基于 CAN 总线的分布式跟随运动控制系统	281
8.8	小结	283
	习题	283

第 9 章 柔性体建模与柔顺运动控制	285
9.1 柔性体建模	285
9.1.1 柔性机构	285
9.1.2 机器臂刚柔耦合动力学建模	285
9.1.3 柔性机器臂参数及形函数矩阵	288
9.1.4 柔性机械臂运动仿真	288
9.2 柔顺运动控制	291
9.2.1 力/位混合控制	291
9.2.2 阻抗控制	292
9.3 柔顺控制案例	297
9.3.1 阻抗控制仿真	297
9.3.2 自适应阻抗控制仿真	299
9.4 小结	301
习题	301
第 10 章 案例分析	302
10.1 永磁同步伺服电动机的 DSP 控制电路	302
10.1.1 主回路电路	302
10.1.2 检测电路	303
10.1.3 保护电路	304
10.1.4 驱动电路	306
10.1.5 LCD 显示电路	307
10.1.6 电源设计	307
10.2 焊接机器人控制系统	307
10.3 集控式足球机器人控制系统	313
10.4 湖水环境自主监测船	314
10.4.1 自主监测船结构	314
10.4.2 船体运动控制系统设计	315
10.4.3 自主监测船实验平台	317
10.4.4 自主监测船的导航	317
10.5 腿式机器人的运动控制建模与仿真	319
10.6 智能巡线小车设计	321
10.6.1 智能车整体布局设计	321
10.6.2 摄像头	323
10.6.3 测速编码器	324
10.6.4 开发工具及调试	324
10.7 爬壁机器人控制系统设计	325
10.8 家居安防机器人控制系统设计	328
10.9 计量检测领域运动控制案例	332
10.9.1 三坐标测量机	332
10.9.2 储料罐料位自动测量仪	333
10.9.3 科氏力秤粉体物料计量	334

10.9.4 基于运动控制卡的超声检测控制	336
10.9.5 “计控管”一体化运动控制技术	336
10.10 小结	338
习题	338
参考文献	339

1.1 运动的基本概念与分类

科学技术的发展就是人类认识自然和改造自然的过程。自然界的一切都处于运动状态,静止只是相对的状态。对自然界物体的运动进行有效的控制,也就成了科学技术研究的重要内容。

广义的运动可分为机械运动、物理运动、化学运动、生物运动和社会运动等,其中机械运动是最基础的运动模式,社会运动是最复杂的、综合的运动模式。本书所述的运动特指机械运动。所谓机械运动,即物体的空间维坐标随时间维坐标的变化。运动控制系统利用自动控制技术对物体的运动进行调节,从而使运动轨迹符合人类需要的理想要求。

多数运动系统本体上有基点与固定的大地坐标(相对)连接,运动系统作业环境相对稳定,作业空间相对有限,避碰问题容易处理。由于固定在特定位置,所以运动系统机动性差,通常用于工厂中,如焊接机器人、喷漆机器人、码垛机器人等工业机器人。无固定基座的运动系统可以在大范围内运动,机动性好,能够适应复杂的任务。但面临的难点是环境相对变化大,避碰问题难以处理,运动需要对环境建模,且需要复杂的运动轨迹规划。例如自主机器人(autonomous robot)、自动导引车(autonomous guide vehicle, AGV)、火星车、足球机器人等。随着通信和网络技术的发展,无固定基座的运动成为发展趋势。在已知环境中的运动相对比较简单,在未知环境中的运动,由于存在过多的不确定因素,控制更加困难,例如无人驾驶车辆的自动控制和导航研究。

单独个体的运动由独立的运动机构系统完成。随着作业任务的复杂化,独立个体往往不能满足任务需要。此时,出现了多个运动体协作完成复杂任务的情况,即多智能体(agent)协调运动控制系统,例如队列、阵型、对接作业、机器人化工程机械等。

从运动空间距离上,运动可分为局部运动、全局运动和空间运动。前两者的运动范围基本在人眼可视范围内。空间运动特指外太空的运动,例如空间站、火星探测机器人、月球探测机器人等。

从运动的控制方式上可分为程序控制、全自主控制、半自主控制和遥控操作等。程序控制是指运动个体的运动是由预先编制好的程序控制,例如数控加工中心的运动;遥控运动模式是指运动完全由人为遥控操作;半自主控制是指运动个体的运动部分由人控制,部分是由自主控制。全自主控制是指运动个体的运动完全由自主确定,例如火星车。

从运动参量变化的剧烈程度上,可将运动分为普通的运动控制系统和伺服运动控制系统。所谓伺服运动即运动的位置、速度和加速度变换范围广、变化剧烈、响应要求快、精度要求高的运动控制。目前伺服运动控制是本领域的研究方向和热点。

按照运动所遵循的力学原理,运动可分为经典力学运动和量子力学运动。通常机械运动都是符合牛顿定律的经典力学运动,尤其是宏观运动、人眼可以看到的运动。对于微观的运动,如分子、原子及亚原子颗粒等细小物体的运行,需要用量子力学来描述。

从科学的角度研究运动,首先就要用科学的语言和方法,尤其是数学,来对运动进行定义和量化分析。为明确运动的各个主动驱动部分与末端执行器之间的运动关系,需研究运动学模型。为明确各个驱动器如何驱动运动,需研究建立动力学模型,为运动控制系统理论分析和参数合理计算提供基础。

1.2 运动控制系统的组成和分类

随着运动的复杂性增加和控制难度增大,分层递阶运动控制系统应运而生。完整的运动控制系统可以用图 1.1 所示的框图表示。

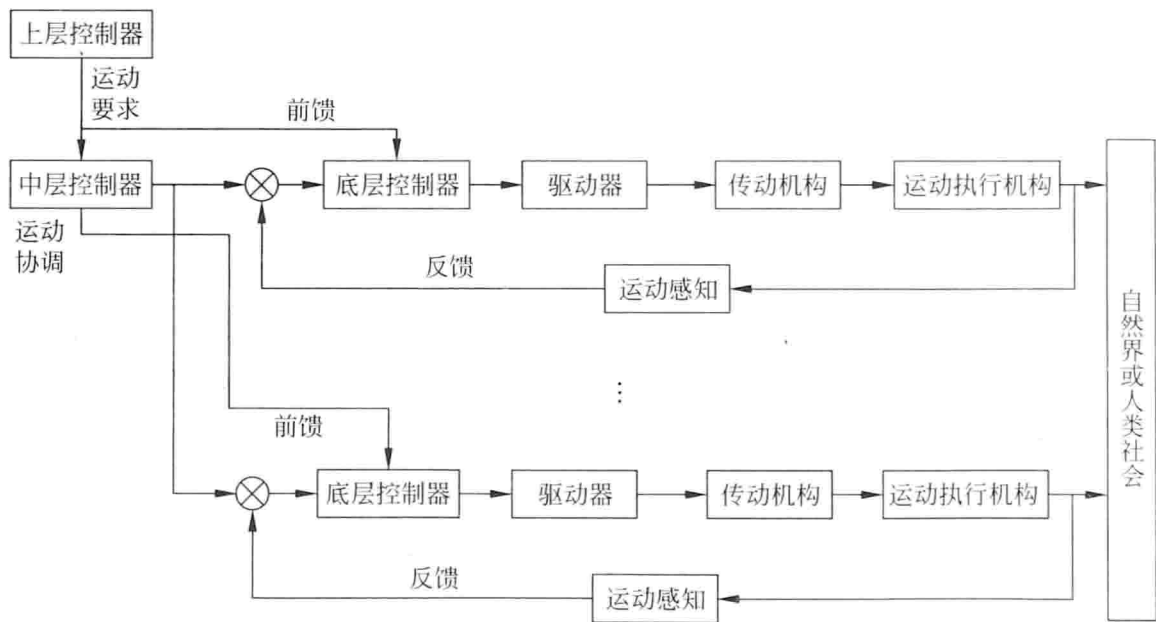


图 1.1 运动控制系统的组成

分层递阶运动控制器包含上层控制器、中层控制器和底层控制器。上层控制器需要计算能力强、智能程度高、知识粒度粗,但往往响应速度慢。底层控制器需要响应速度快,但往往智能程度低,知识粒度细。中层控制器主要完成运动的协调,计算能力和响应速度介于上层和底层之间。

运动的驱动方式多种多样。不同的驱动器性能不同,控制方式不同,适用的场合也不同。传动方式用于将驱动运动转变成人们所需要的各种作业场合下的运动形式。不同的传动方式,效率不同,精度不同。对于高精密运动控制系统,应力求减少传动环节,提高传动精度。传动系统的加入会降低整体运动控制系统的刚度。感知方式是为控制系统提供及时、准确的运动量反馈信息,主要由传感器、变送器和必要的算法组成,可安装在反馈回路的多