

运动控制系统



教育部高等学校自动化专业
教学指导分委员会规划
工程应用型自动化专业系列教材

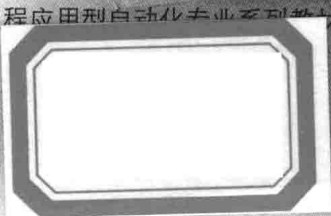
薛安克 周亚军 主编

薛安克 周亚军 吴秋轩 孙曜 吴茂刚 刘栋良 俞武嘉 编著



教育部高等学校自动化专业
教学指导分委员会规划

工程应用型自动化专业系列教材



运动控制系统

Yundong Kong

薛安克 周亚军 主编
薛安克 周亚军 吴秋轩 孙曜
吴茂刚 刘栋良 俞武嘉 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书结合工程实例,介绍运动控制系统的基本控制原理、分析和设计方法。全书共7章,第1章为绪论,介绍运动控制系统的基本概念,构成和技术背景;第2、3、4、5、6章针对相关知识点,首先引出一个典型工程应用案例,提出设计任务,通过对任务的功能技术需求分析,明确要解决的问题,进而以应用例子为解决目标,较深入地介绍了交直流调速系统、交流伺服系统、多轴运动控制系统等运动控制系统的基础理论知识、控制原理、静态特性分析、Matlab仿真设计、常用的工程设计和实现方法;第7章介绍了数控系统、机器人等代表性运动控制系统的构成和设计思想,以加深读者对运动系统的应用认识。

本书理论深度适中,将物理描述应用于复杂公式推导过程,增加了仿真设计和工程设计方法。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化等专业的教材或教学参考书,也可作为工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统/薛安克,周亚军主编;薛安克等编
著. --北京:高等教育出版社,2012.12
ISBN 978-7-04-035142-2

I. ①运… II. ①薛…②周… III. ①自动控制系统
-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第301678号

策划编辑 王耀锋
插图绘制 尹莉

责任编辑 王耀锋
责任校对 胡晓琪

封面设计 张雨薇
责任印制 赵义民

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 大厂益利印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 14
字 数 300千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012年12月第1版
印 次 2012年12月第1次印刷
定 价 22.30元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 35142-00

工程应用型自动化专业 课程体系研究与教材建设委员会

主任委员： 吴 澄(清华大学)

副主任委员：韩九强(西安交通大学)

萧德云(清华大学)

薛安克(杭州电子科技大学)

专 家 委 员(按姓氏笔画)：

王 普(北京工业大学)

刘小河(北京信息科技大学)

吴晓蓓(南京理工大学)

赵光宙(浙江大学)

彭 瑜(上海工业自动化仪表研究院)

韩力群(北京工商大学)

任德祥(上海宝钢集团)

吴重光(北京化工大学)

张德江(长春工业大学)

凌志浩(华东理工大学)

谢克明(太原理工大学)

戴先中(东南大学)

委 员(按姓氏笔画)：

于微波(长春工业大学)

王 俊(合肥学院)

王再英(西安科技大学)

王建华(上海应用技术学院)

艾 红(北京信息科技大学)

张丽香(山西大学工程学院)

李现明(山东大学)

陈在平(天津理工大学)

周亚军(杭州电子科技大学)

胡向东(重庆邮电大学)

聂诗良(西南科技大学)

黄 坚(南京工程学院)

韩 颖(高等教育出版社)

孔亚广(杭州电子科技大学)

王万良(浙江工业大学)

王存旭(沈阳工程学院)

白 晶(北华大学)

许晓峰(沈阳工程学院)

李全利(哈尔滨理工大学)

汪贵平(长安大学)

陈桂友(山东大学)

罗 敏(湖北汽车工业学院)

徐昱琳(上海大学)

崔桂梅(内蒙古科技大学)

黄江平(华东交通大学)

薛为民(北京联合大学)

秘 书：韩 颖(兼)(高等教育出版社)

出版说明

为了适应高等工程教育改革,满足社会对工程应用型自动化专业人才的需要,在“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”主任委员吴澄院士的领导下,设立了“工程应用型自动化专业课程体系研究与教材建设”专项研究课题,从全国高等院校遴选了既有工程研究实践背景、又有教材编写经验的专家教授,以及企业界知名特邀代表共40余人,对工程应用型自动化专业的课程体系、教学内容进行系统深入的调查、分析和研究,提出了工程应用型自动化专业课程体系结构和系列教材的三级目录。采用个人报名、专家推荐、“工程应用型自动化专业课程体系研究与教材建设委员会”匿名评审相结合的方式,组织编写出版一套工程应用特点明显、国内一流的工程应用型自动化专业系列教材。

工程应用型自动化专业系列教材力求达到理论与应用相统一、教学与实际相结合、工程应用特点明显、国内一流。通过对人才市场需求、专业培养定位、自动化技术发展动态的分析研究,提出从实际工程应用自动化系统出发,结合系统中涉及的单元技术与理论方法,聚类归纳工程应用型自动化专业的课程体系结构,凝练解决自动化应用系统问题的每门课程的内容与知识点,使学生能够学以致用,能够解决工程实际应用问题。经过40多位专家教授的辛勤劳作,第一批19本工程应用型自动化专业系列教材于2010年陆续出版。为了满足不同应用背景、不同应用层次的工程需要,部分应用面广的同类教材有两种版本可供选用。

本系列教材主要内容覆盖自动化应用系统涉及的实用技术、理论与方法、器件与工具等内容。第一批教材包括针对自动化系统数据获取部分的机器视觉技术及应用、现代检测技术及应用等;系统驱动部分的电机与拖动、电力电子技术、电力拖动自动控制系统等;系统控制方法部分的自动控制原理、过程控制、运动控制等;控制器硬件设计部分的单片机原理、嵌入式系统、DSP原理、可编程控制器等;自动化系统部分的计算机控制、自动化系统集成、自动控制工程设计、自动化专业实践初步等;数据处理部分的控制工程数据库技术等。

本系列教材的主要特色在于注重课程体系的应用系统性和技术先进性,注重培养学生的自动化系统的集成组态设计能力和前瞻意识。课程体系按系统单元划分,教材章节按解决问题所需的知识安排,培养学生解决工程实际应用问题的针对性和有效性。在教材章节上尽可能引入相关新技术、新理论、新方法和新器件,培养学生利用新知识解决问题的思维方式和实际应用创新能力。

如何培养适应信息时代要求的工程师是我国高等工程教育改革的核心,也是本系列教材编写的主导思想。通过本系列教材的学习,使学生能够具备一个工程师进行自动化系统或相应系统设计开发以及选型集成的基本创新能力。本系列教材主要面向工程应用型自动化及相关专业的大学生和研究生。我们希望本套工程应用型系列教材的出版,能够有力促进我国高等院校工

程应用型自动化专业人才培养质量的提高,也能为广大科技工作者和工程技术人员提供参考和帮助。

感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持。欢迎提出宝贵批评意见和建议,请将您的建议反馈至 hanying@hep.com.cn。

工程应用型自动化专业课程体系研究与教材建设委员会

2009 年 12 月

序 一

自动化技术在我国现代化建设进程中具有重要地位。五十多年来,自动化技术对我国社会主义现代化建设的众多领域发挥了重要作用,产生了深远影响。最具代表性的两弹一星的成功发射、载人飞船的顺利返回、嫦娥探月的环绕飞行等充分体现了自动化技术在国家重大工程应用中的示范作用。自动化技术也有力地推动着我国整体工业的发展和改变着人们的生活方式,如集成制造系统的普及推广使机械加工制造自动化程度达到了更高的水平,服务机器人代替家政进入了家庭,改善了人们的生活环境,如此等等。

我国正在全面建设小康社会,走新型工业化道路,促进信息化与工业化的“两化”融合,实现工业、农业、国防和科学技术现代化。在此进程中,自动化技术起着不可替代的桥梁作用。这就迫切需要高等学校自动化专业办学机构和广大教师进行深入研究和探索,如何能够为各行各业输送大量具有工程实践能力和应用创新能力的工程应用型自动化专业高级技术人才。在“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”主任委员吴澄院士领导下,针对我国高等教育发展快、规模大、社会各行各业对工程应用型自动化专业人才需求量大的特点,按照大众化高等教育阶段分类指导的思想和原则,抓住有利时机,成立了“工程应用型自动化专业课程体系研究与教材建设委员会”,对工程应用型自动化专业的知识体系、课程体系、能力培养等进行了有益的探索,为工程应用型自动化专业人才培养、教材建设奠定了基础。

工程应用型自动化专业涉及面广、行业多,其人才培养模式与课程体系涉及的因素众多复杂,包括如何结合通识教育,拓宽应用口径、突出专业重心、强化实践教学、理论联系实际、提高应用创新能力等,其中构建既不照搬研究型、也不雷同技能训练型的工程应用型自动化专业课程体系,编写一套有利于促进面向不同行业、应对不同层次问题的工程应用型学生个性发展的一流教材尤为重要,着力培养学生由解决工程实际问题到提出新问题的探索思维方式,即运用知识的创新能力。“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”在对工程应用型自动化专业课程体系研究的基础上,从全国遴选有工程应用背景、有教材编写经验的教授与专家,组织编写了这套工程应用型自动化专业系列教材,这对工程应用型自动化专业人才的创新能力培养具有重要意义。作为长期从事自动化专业高等教育和研究队伍中的一员,在本系列教材即将付印之际,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写工作的各位老师致以崇高的敬意!

希望广大教师、学生和科技人员积极使用这套教材,并提出宝贵意见。



2009年12月于北京

序 二

工程应用型自动化专业系列教材是“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”在组织实施全国高等学校自动化专业系列教材之后,按照《自动化学科专业发展战略研究报告》分层次、多模式、多规格培养的指导思想 and 原则,结合《高等学校本科自动化指导性专业规范》实施的又一套工程应用特点明显、国内一流的自动化专业系列教材。该系列教材力求达到教学与实际相结合、理论与应用相统一、案例教学与知识传授并举,培养学生解决实际问题的能力和运用新知识的集成创新能力,使工程应用型自动化专业的学生能够真正成为解决实际工程应用问题的工程师。

我国工程应用型自动化专业以往的课程体系与知识体系基本照搬研究型自动化专业课程体系,带有浓厚的“理论的应用、应用的理论”内容,工程应用特点不明显。这也正是规划工程应用型自动化专业系列教材所面临的主要问题。为此,设立了“工程应用型自动化专业课程体系研究与教材建设”的专项研究课题,成立了以西安交通大学韩九强教授、杭州电子科技大学薛安克教授、清华大学萧德云教授负责的联合研究小组,介入的高校达 40 多所,从全国遴选出 40 多名有工程实际背景和教材编写经历的教授和企业界知名代表。通过对工程应用型自动化专业的课程体系的深入研究,提出从实际工程应用自动化系统涉及的技术与理论方法出发,按自动化系统的组成,归纳分类工程应用型自动化专业的课程体系结构;分应用层次和对象功能凝练解决自动化应用系统中工程问题的知识内容与教材体系,建立知识传授与创新能力培养相结合的课程体系结构。以此为基础,组织规划了涵盖自动化应用系统涉及的数据获取、系统驱动、控制方法、数据处理、控制器设计、系统集成等 20 多门课程内容的系列教材。从数据获取到数据处理,从控制方法到控制器设计,从系统集成到组态工具,从课程体系到三级目录起草,先后经过了 6 次全国会议的认真研讨,凝聚着 40 多位专家教授的辛劳。教材主编采取个人申请,“工程应用型自动化专业课程体系研究与教材建设委员会”匿名评审确定,至此,第一批审定通过的 19 本工程应用型自动化专业系列教材于 2010 年陆续出版问世。

工程应用型自动化专业系列教材的出版,对工程应用型自动化专业知识体系的更新、教学方式的改变、工程实践的强化将起到积极的推动作用。但本系列教材从体系结构到每本教材的三级目录组成,以至每本教材的具体内容都可能存在许多不当之处,恳请使用本系列教材的老师、学生及各界人士不吝批评指正。

教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会主任委员



2009 年 12 月于清华大学

前 言

运动控制技术在开放式数控、机器人控制、航空航天等领域有着广泛应用。针对我国高等教育发展快、规模大、社会各行各业对工程应用型人才需求量大的特点,在“工程应用型自动化专业课程体系研究与教材建设委员会”的指导下,我们对“运动控制系统”教材的内容安排、结构安排、选材和教学思想等进行了探索。为使学生在知识的学习过程中,能理论结合实践,从系统和应用角度去理解相关理论和技术,本书尝试如下教材结构和教学思想,即从现代工程应用需求提出系统需求,由系统需求引出相关理论知识,而后利用理论与工程实现方法指导实际的设计过程。同时,通过 **Matlab** 仿真对理论教学内容进行及时的验证,以加强对理论知识的理解。

本书主要有以下特点:

(1) 本书在交直流调速和伺服系统各章节中,根据相关知识点,首先引出典型工程应用实例,以典型实例为主线,通过功能技术需求分析,提出设计任务和系统解决方案,引导学生建立系统概念,明确要解决的问题,使学生能带着问题、带着对知识和技术的需求学习相关知识。进而以应用例子为解决目标,引出交直流调速系统、交流伺服系统、多轴运动控制系统等应用较广的运动控制系统的基础知识、**Matlab** 仿真设计、常用系统设计方式及工程实现方法。

(2) 本书理论深度适中,将物理描述应用于复杂公式的推导过程。在分析设计方面,重视工程上常用仿真平台和设计分析手段的引入。每个应用实例都给出基于单片机、**PLC** 或自动化装置的控制系统的设计与实现,加深读者对运动控制系统设计的直观性和可操作性的认识,加深理解运动控制系统理论和设计方法。

(3) 在运动控制系统应用中,多轴、分布式、伺服运动控制系统有非常广泛的应用,本书把这些知识独立成章(第5章、第6章),进行详细讲解。第7章分析介绍数控、机器人、雷达伺服控制系统等典型应用系统,以加深读者对运动控制系统的应用认识。

本书共7章。第1章为绪论,对运动控制系统的基本结构和组成,运动控制系统涉及的相关学科和运动控制系统应用作了简单介绍。第2章转速闭环直流调速系统,以智能车直流闭环调速系统为设计目标,对直流开环调速、直流转速闭环系统动、静态结构进行原理分析和知识点讲解,进而引导学生应用所学知识,结合单片机实现方法,进行系统结构、控制参数等设计、仿真和实现。第3章转速、电流双闭环直流调速系统,针对转速单闭环直流调速系统应用于轧机、车床等经常处于起动、制动、正反转工作状态的设备时存在的问题,提出转速、电流双闭环直流调速系统的控制思想,并以一种冷轧机的转速、电流双闭环直流调速系统设计为例,对双闭环直流调速系统的知识进行讲解,着重阐明其控制规律、性能特点和设计方法。第4章交流调速系统,以变频调速在恒压供水系统中泵的控制应用为案例,讨论了电压频率协调控制的变频调速方式、通用变频器原理和 **SPWM** 调制方法,以及以高速数控机床电主轴调速为案例,引出交流电动机矢量

控制原理、SVPWM调制技术方法和工程实现。第5章交流伺服系统,针对数控机床对伺服控制的要求,介绍永磁同步伺服电动机的位置伺服控制理论、控制系统构成原理、系统分析;无刷直流电动机伺服控制系统结构,以及在电动自行车上的速度伺服控制应用;直线电动机伺服控制系统的构成、原理。第6章多轴运动控制系统,从两个典型的多轴运动控制任务开始,逐步建立和完善多轴运动控制系统的特征概念,介绍典型多轴运动系统的体系结构,软硬件实现方法,包括基于PC的多轴运动控制系统,基于CAN总线和PROFIBUS总线的多轴运动控制系统。第7章从系统角度出发,通过对数控系统、工业机器人伺服系统、雷达天线伺服控制系统的分析介绍,展示伺服运动控制系统的应用,并给出系统基本结构和系统设计思想。

本书由薛安克教授和周亚军教授级高级工程师担任主编。吴秋轩、孙曜、吴茂刚、刘栋良、俞武嘉参加了本书的编著。全书由白晶教授主审。

本书编写过程中参阅了许多教授编写的同类教材,在此表示感谢。由于我们水平有限,错误和不当之处在所难免,殷切期望读者批评指正并与编者联系,E-mail:zyj@hdu.edu.cn。

编者

2012年10月

目 录

第1章 绪论 1

- 1.1 什么是运动控制系统 1
- 1.2 运动控制系统的组成 2
- 1.3 运动控制系统的运动方程 3

第2章 转速闭环直流调速系统 5

- 2.1 转速闭环直流调速案例——智能车调速控制 5
 - 2.1.1 需求描述 5
 - 2.1.2 性能要求 5
- 2.2 直流电动机调速方法及调速性能指标 6
 - 2.2.1 直流电动机调速方法 6
 - 2.2.2 转速控制的要求和调速性能指标 7
- 2.3 直流电动机开环调速及特性 10
 - 2.3.1 晶闸管整流器-电动机系统特性 11
 - 2.3.2 直流脉宽(PWM)电源供电下的调速特性 15
 - 2.3.3 开环调速系统及其存在的问题 19
- 2.4 转速闭环有静差直流调速系统 21
 - 2.4.1 转速闭环直流调速系统组成 21
 - 2.4.2 比例控制的转速闭环直流调速系统数学模型 22
 - 2.4.3 比例控制的直流调速系统

特性分析 26

2.5 比例积分控制的无静差直流调速系统 31

- 2.5.1 积分调节器和积分控制规律 31
- 2.5.2 比例积分控制规律及单闭环无静差调速系统 33

2.6 转速闭环直流调速系统的限流保护 34

2.7 单闭环直流调速系统仿真与设计 36

- 2.7.1 转速闭环调速系统框图及参数 37
- 2.7.2 数字测速 38
- 2.7.3 直流调速系统 Matlab/Simulink 仿真 40
- 2.7.4 智能车直流调速系统设计 43

思考题与习题 46

第3章 转速、电流双闭环直流调速系统 48

3.1 转速、电流双闭环直流调速系统案例——轧机直流调速系统 48

- 3.1.1 案例描述 48
- 3.1.2 转速单闭环直流调速系统在工程应用中所存在问题分析与解决思路 49

3.2 转速、电流双闭环直流调速系统的组成及动态过程分析 50

- 3.2.1 转速、电流双闭环直流调速系统的组成 50

3.2.2 起动过程分析	51	4.2.1 变压变频调速案例——变 频调速在恒压供水系统中的 应用	92
3.2.3 抗扰性能分析	54	4.2.2 通用变频器	94
3.3 转速、电流双闭环直流调速系 统的稳态分析	54	4.2.3 脉宽调制 (SPWM、CFPWM) 技术	96
3.3.1 稳态结构图与静特性	54	4.2.4 变压变频调速的控制方式 及其机械特性	98
3.3.2 稳态参数计算	56	4.2.5 转速开环恒压频比控制的 变频调速系统	105
3.3.3 转速调节器和电流调节器在双 闭环直流调速系统中的作用	56	4.2.6 转速闭环转差频率控制的 变频调速系统	106
3.4 转速、电流双闭环直流调速 系统的设计方法	57	4.2.7 恒压供水变频调速系统的 工程设计	108
3.4.1 系统设计的基本原理和方法	57	4.3 交流异步电动机矢量控制	111
3.4.2 基于“典型系统工程设计 方法”的轧机工作辊传动系统 调节器参数设计	64	4.3.1 矢量控制案例——数控机床中 电主轴调速	111
3.4.3 转速、电流双闭环直流调速 系统的仿真	71	4.3.2 异步电动机数学模型	113
3.4.4 一种双闭环直流调速系统调 节器的设计方法	73	4.3.3 坐标变换	116
3.5 直流调速装置	77	4.3.4 异步电动机在两相坐标系 上的数学模型	120
3.6 可逆直流调速系统	80	4.3.5 按转子磁链定向的矢量控 制系统	121
3.6.1 晶闸管-电动机可逆直流调速 系统	80	4.3.6 电压空间矢量 PWM (SVPWM) 技术	128
3.6.2 基于 PWM 控制的可逆直流 调速系统	82	4.3.7 电主轴矢量变频控制工程 设计	133
3.6.3 无环流控制的可逆直流调速 系统	84	4.4 异步电动机直接转矩控制 技术	136
思考题与习题	87	4.5 交流调压调速系统	139
第 4 章 交流调速系统	89	4.5.1 调压调速工作原理及机械 特性	139
4.1 概述	89	4.5.2 闭环控制的调压调速系统	140
4.1.1 交流运动控制系统的主要 应用领域	89	4.5.3 调压控制在异步电动机软 起动中的应用	141
4.1.2 交流调速系统分类	90	思考题与习题	142
4.1.3 变频调速控制方法	91		
4.2 交流异步电动机变压变频 调速	92		

第 5 章 交流伺服系统 144

5.1 伺服系统概述 144

5.1.1 位置伺服系统案例——数控
进给伺服系统 1445.1.2 位置伺服系统的组成及其
工作原理 145

5.1.3 伺服系统的分类 146

5.1.4 伺服系统分析及设计的基
本方法 147

5.2 位置检测与信号处理 148

5.3 永磁同步电动机(PMSM)伺服
系统设计与应用 1515.3.1 永磁同步伺服电动机数学
模型 151

5.3.2 伺服系统的三环设计 153

5.3.3 伺服系统仿真分析 157

5.4 无刷直流电动机(BLDC)伺服
系统 1615.4.1 无刷直流电动机伺服系统
组成 1615.4.2 无刷直流电动机在电动自行车
上的速度伺服控制应用 162

5.5 直线电动机伺服控制 165

思考题与习题 167

第 6 章 多轴运动控制系统 169

6.1 多轴运动控制系统设计分析 169

6.1.1 多轴运动控制系统典型
结构 169

6.1.2 系统分析 170

6.1.3 多轴控制策略选择 171

6.2 基于 PC 的多轴运动控制
系统 172

6.2.1 多轴运动控制器 172

6.2.2 PC+运动控制器硬件方案 173

6.2.3 软件系统设计 174

6.2.4 轨迹控制原理 176

6.2.5 轨迹插补基本方法 178

6.3 基于 CAN 总线的多轴运动控制
系统 180

6.3.1 CAN 现场总线 180

6.3.2 控制系统构建 183

6.3.3 系统主要硬件 184

6.3.4 系统软件设计 185

6.4 基于 PROFIBUS 总线运动控制
系统 187

6.4.1 PROFIBUS 现场总线 187

6.4.2 基于 PROFIBUS 的分布式
运动控制系统 188

思考题与习题 190

第 7 章 典型应用系统分析 191

7.1 数控系统 191

7.1.1 数控机床原理及功能分析 191

7.1.2 系统总体设计和方案比较 192

7.1.3 专用数控控制装置的应用 193

7.1.4 PID+速度前馈+加速度前馈的
伺服控制 194

7.1.5 经济型数控系统 194

7.2 工业机器人伺服控制系统 196

7.2.1 工业机器人控制原理及伺服
控制系统 1967.2.2 机器人对关节驱动伺服电动
机及伺服系统的要求 197

7.3 雷达天线伺服控制系统 198

7.3.1 雷达天线伺服控制系统组成 198

7.3.2 雷达天线伺服控制系统原理 200

7.3.3 车载雷达天线伺服控制系统 200

参考文献 203

第1章 绪 论

1.1 什么是运动控制系统

运动控制是自动控制领域的一个分支。运动控制系统是以电动机为控制对象,采用电力电子功率变换装置构成驱动,综合应用计算机控制、自动控制理论、信号检测与处理等相关理论和技术,构筑相应的控制系统,通过控制电动机的转矩、转速和转角,实现对运动机械进行运动位置、运动速度、运动轨迹和各种运动参数实时的控制和管理。因此,运动控制技术是集电机学、电力电子技术、计算机控制技术、自动控制理论、信号检测与处理等多门课程相互交叉的综合性学科,如图1-1所示。

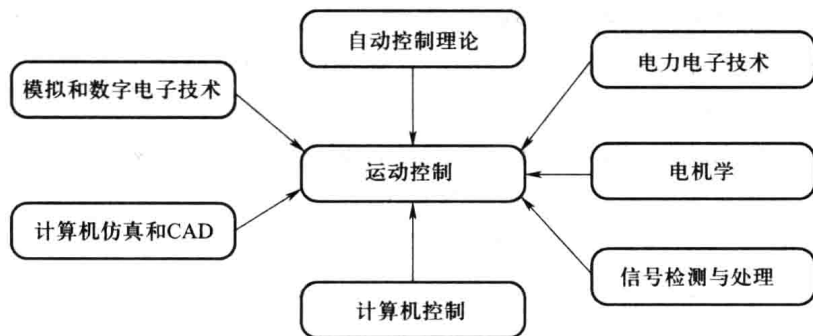


图 1-1 运动控制及其相关课程

运动控制技术主要研究运动控制系统的结构、控制对象模型建立、基本控制原理和系统设计方法、系统性能分析等,是工业机械设备(包括数控机床)控制、机器人控制、飞行器姿态控制等方面的重要技术基础。

运动控制系统有如下特点:(1) 被控量的过渡过程较短,一般为秒级甚至毫秒级;(2) 传动功率范围宽,可从几毫瓦到几百兆瓦;(3) 调速范围宽,宽调速系统的调速范围可达到1:10000;(4) 可获得良好的动态性能和较高的稳速精度或定位精度;(5) 可四象限运行,制动时能量回馈电网;(6) 可以控制单台电动机运行,也可以多台协调控制运行。

运动控制系统在国防、航天、冶金自动化、数控机床、纺织机械、机器人、办公自动化和家用电器等领域广泛应用。例如:轧钢厂的连轧机,造纸厂的纸机,纺织厂的纺织机,化工厂的搅拌机和离心机,搬运场的起重机和传送带,矿山的卷扬机,田间的抽水泵等各种生产机械的控制;冰箱、空调、洗衣机以及电脑等家用电器的驱动;交通运输中电动汽车的控制;数控机床的主轴传动的

控制及伺服轴的运动协调形成轨迹的控制;雷达自动跟踪系统中,通过控制天线的方位和俯仰,迅速准确地跟踪运动目标的控制;在三维空间内,通过多台电动机协调控制,对摄像头位置进行精确地控制;各种机器人的动作协调与控制,例如,两足步行机器人的走动,适用于各种管道内特定作业的爬行机器人在管道内的移动,三指机器人拿起了桌上的鸡蛋,装配机器人协调拾取工件准确地插进了台面上的孔进行装配、拧螺丝。以上这些都是运动控制系统的典型应用。

1.2 运动控制系统的组成

运动控制系统一般由控制器、功率放大与变换装置、电动机、传动机构、生产机械及相应传感器等组成。根据生产机械工艺要求,运动控制系统可分成位置随动系统(也称伺服系统)和调速系统。按照电动机的类型,运动控制系统可分为直流和交流两大类,因此伺服系统又可分为交流伺服系统和直流伺服系统,而调速系统可分为交流调速系统和直流调速系统。按照控制结构,运动控制系统可分为开环和闭环系统。开环控制系统主要用于对起、制动和调速无特殊要求,以及不要求精确调速的场合,如磨碎机、输送机、电弧炉、泵类等;闭环运动控制系统具有自动控制和闭环调节的功能,它把传感器实时测量到的参数作为反馈信息量,与位置或速度控制指令进行比较,误差信号输入至控制器,控制器按相应的控制算法或控制策略输出控制信号,控制变流装置以改变输入到电动机的电源电压、频率等,使电动机改变转速或位置,驱动生产机械按照动态性能指标和生产工艺要求运动。图 1-2 为闭环运动控制系统基本结构图。

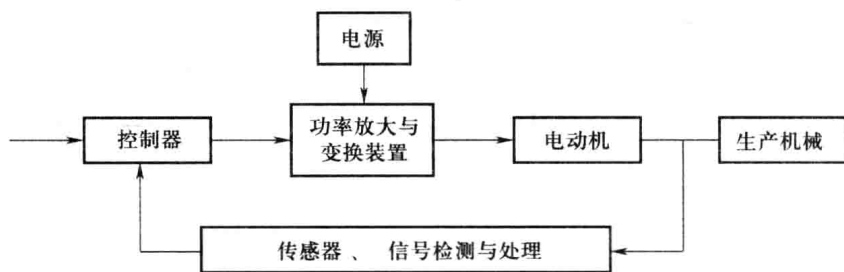


图 1-2 闭环运动控制系统基本结构

根据应用场合和对控制性能的要求不同,运动控制系统在组成部件的选择和系统的构成方面有多种形式。

1. 控制器

与所有自动控制系统一样,运动控制系统要取得良好性能,基本思路就是引入信号反馈,对系统的主要参数,如位置、转速、电流、磁场等实现闭环控制,而控制器成为实现系统自动控制的关键。控制器主要由硬件、软件和控制算法组成。

就控制算法而言,目前最为经典的仍为 PID 控制算法。PID 调节器的参数直接影响系统性能。采用微机数字控制后,衍生出多种改进的 PID 算法,如积分分离算法、分段 PI 算法、参数自

适应 PID 算法等,以提高系统性能。同时,各种智能控制方法,如学习控制、专家控制、模糊控制、神经网络控制等,也在不断地进行应用研究。

控制器硬件构成可以采用基于微处理器的运动控制器,或采用专用数控控制器,对性能要求不是很高的,也可以采用 PLC(可编程逻辑控制器)等。高性能微处理器如 DSP(数字信号处理器)的应用,为采用新的控制理论和控制策略提供了良好的技术基础。

控制器软件的功能主要包括控制系统管理、信号检测与信息处理、控制算法和控制策略的实现等,以达到对控制对象的位置、速度、电流的控制。

2. 功率放大与变换装置

功率放大与变换装置根据供电电源类型以及电动机控制所需电源要求提供各种电能变换。低压小容量功率放大与变换装置采用的功率开关器件主要有功率 MOSFET(金属氧化物半导体场效应晶体管)、IGBT(绝缘栅双极型晶体管)和 IPM(智能功率模块)。中高压大容量主要采用 GTO(门极可关断晶闸管)、IGCT(集成门极换流晶闸管)、SGCT(对称门极换流晶闸管)、IEGT(注入增强栅晶体管)和高压 IGBT。目前功率放大与变换装置已经智能化,兼备控制和驱动功能,利用功率放大与变换装置就可以构成系统的位置环、速度环、电流环。但通常运动控制系统的电流环控制在变换装置中实现,而位置环、速度环控制在前述的控制器中实现。

3. 电动机

电动机是运动控制系统的控制对象,根据工作原理可分为步进电动机、直流电动机和交流电动机。交流电动机(尤其是笼型异步电动机)结构简单、制造容易,无须机械换向器,因此其允许转速与容量均大于直流电动机。随着变频器的出现,交流电动机应用越来越广,特别是永磁同步电动机根据不同电流控制方法被用作交流伺服电动机和无刷直流电动机。另外直线电动机、低速电动机、开关磁阻式电动机等新型电动机的应用也是发展趋势。

4. 信号检测与处理

运动控制系统中位置、速度、电流是被控物理量,闭环控制中这些物理量的信号需要被检测与反馈。检测元件对提高系统的精度起着重要作用。运动控制中常用的位置检测元件有自整角机、旋转变压器、光电编码器、感应同步器和磁尺等。常用的速度检测元件有测速发电机、光电编码器、速率陀螺等。电流信号是模拟量信号,电流检测通常采用电流互感器、霍尔电流传感器等。

总之,运动控制技术的发展趋势是:驱动的交流化,功率变换器的高频化,控制的数字化、智能化和网络化。

1.3 运动控制系统的运动方程

运动控制系统的运动规律可以用运动方程来描述。在忽略系统传动机构中的粘滞摩擦和扭转弹性的情况下,系统的运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (1-1)$$

式中: T_e ——电动机的电磁转矩($N \cdot m$);

T_L ——折算到电动机轴上的负载转矩($N \cdot m$);

J ——机械转动惯量($kg \cdot m$);

ω_m ——电动机的机械角速度(rad/s)。

由式(1-1)可以看出,只有当 $T_e = T_L$ 时, $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$, 系统处于静止和匀速运行,称为稳态。但

很多时候,系统根据生产工艺要求需要调节速度,或周期性地起动和停止,有的情况下负载不断变化,这就是说电动机会经常处于动态之中。有的运动控制系统,如纺织机械、造纸机械等不经不起停和调速,对动态特性没有提出特别要求。但像机器人、数控机床等伺服控制系统,则对电动机完成工序的准确性和快速性提出特别高要求(如快速跟随、准确停止)。

从式(1-1)可以看出,提高运动控制系统的动态性能的关键在于电动机的电磁转矩的控制,使转速变化率按期望的规律变化。直流电动机的转矩与电流成正比,电磁转矩容易控制,控制电流就能控制转矩。由它构成的运动控制系统性能良好。永磁同步电动机兼有电磁转矩容易控制和转动惯量小的双重优点,因而在伺服控制系统中获得了广泛应用。异步电动机的电磁转矩存在强耦合,控制比较困难,要达到好的动态性能需采取一些比较复杂的控制策略。电动机的电磁转矩与电枢电流(或定子电流)和磁通有关,在一定的电流作用下尽可能产生最大电磁转矩,以加快系统的过渡过程,因此必须在控制转矩的同时也控制磁通(或磁链)。通常在基速(额定速度)以下采用恒磁通(或磁链)控制,基速以上采用弱磁控制。