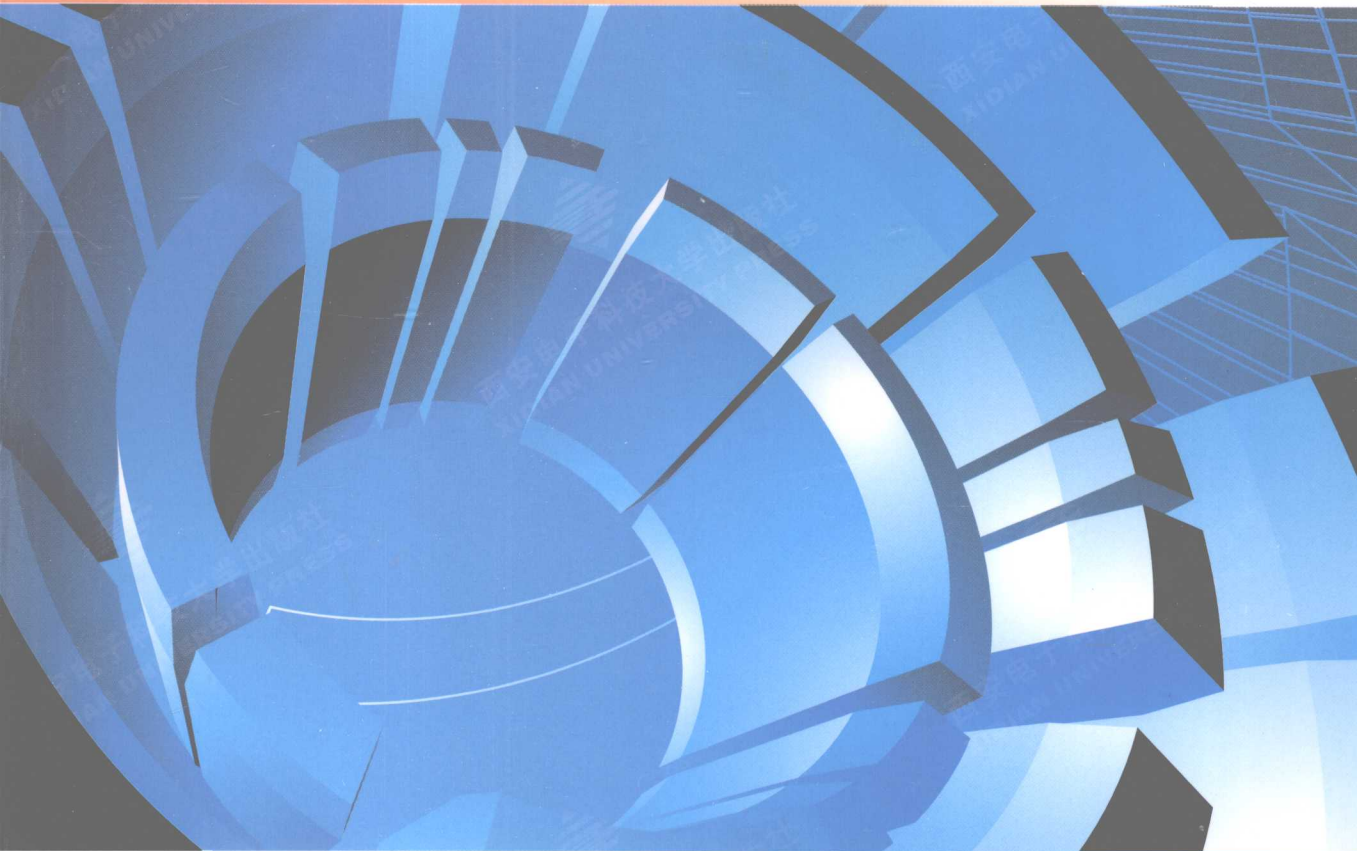


- 中国高等职业技术教育研究会推荐
- 高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

运动控制系统

主 编 尚 丽
副主编 马 青
主 审 党宏社



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

□ 中国高等职业技术教育研究会推荐

高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

运动控制系统

主 编 尚 丽

副主编 马 青

参 编 戴桂平 陈 杰 陆 斌

主 审 党宏社

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书共 8 章, 主要内容包括运动控制理论的基本知识, 单闭环直流调速系统, 转速、电流双闭环直流调速系统, 直流脉宽调速(PWM)系统, 交流调压调速系统和串级调速系统, 交流异步电动机变压变频调速系统, 变频器应用技术和数字控制交直流调速系统等。

本书将交、直流调速运动控制技术和 MATLAB/Simulink 仿真技术有机结合在一起, 着重体现高等职业教育以应用型教育为主导培养方向的办学理念, 遵循理论和实际相结合的原则, 强调工程应用, 将实践内容与理论教学内容相结合。

本书可作为高等职业技术学校、高等专科学校、继续教育学院等专科层次学校的电气技术、工业电气自动化、机电应用技术等相关专业的教材, 也可作为本科院校的学生及广大电气爱好者和从事现场工作的工程技术人员的参考书。

★ 本书配有电子教案, 需要者可登录出版社网站, 免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统/尚丽主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2009. 8

中国高等职业技术教育研究会推荐. 高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材
ISBN 978-7-5606-2255-2

I. 运… II. 尚… III. 运动控制系统—高等学校: 技术学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 091757 号

策 划 张晓燕

责任编辑 张晓燕

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 18.375

字 数 430 千字

印 数 1~4000 册

定 价 26.00 元

ISBN 978-7-5606-2255-2/TP·1148

XDUP 2547001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

序

进入 21 世纪以来,高等职业教育呈现出快速发展的形势。高等职业教育的发展,丰富了高等教育的体系结构,突出了高等职业教育的类型特色,顺应了人民群众接受高等教育的强烈需求,为现代化建设培养了大量高素质技能型专门人才,对高等教育大众化作出了重要贡献。目前,高等职业教育在我国社会主义现代化建设事业中发挥着越来越重要的作用。

教育部 2006 年下发了《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》,其中提出了深化教育教学改革,重视内涵建设,促进“工学结合”人才培养模式改革,推进整体办学水平提升,形成结构合理、功能完善、质量优良、特色鲜明的高等职业教育体系的任务要求。

根据新的发展要求,高等职业院校积极与行业企业合作开发课程,根据技术领域和职业岗位群任职要求,参照相关职业资格标准,改革课程体系和教学内容,建立突出职业能力培养的课程标准,规范课程教学的基本要求,提高课程教学质量,不断更新教学内容,而实施具有工学结合特色的教材建设是推进高等职业教育改革发展的重要任务。

为配合教育部实施质量工程,解决当前高职高专精品教材不足的问题,西安电子科技大学出版社与中国高等职业技术教育研究会在前三轮联合策划、组织编写“计算机、通信电子、机电及汽车类专业”系列高职高专教材共 160 余种的基础上,又联合策划、组织编写了新一轮“计算机、通信、电子类”专业系列高职高专教材共 120 余种。这些教材的选题是在全国范围内近 30 所高职高专院校中,对教学计划和课程设置进行充分调研的基础上策划产生的。教材的编写采取在教育部精品专业或示范性专业的高职高专院校中公开招标的形式,以吸收尽可能多的优秀作者参与投标和编写。在此基础上,召开系列教材专家编委会,评审教材编写大纲,并对中标大纲提出修改、完善意见,确定主编、主审人选。该系列教材以满足职业岗位需求为目标,以培养学生的应用技能为着力点,在教材的编写中结合任务驱动、项目导向的教学方式,力求在新颖性、实用性、可读性三个方面有所突破,体现高职高专教材的特点。已出版的第一轮教材共 36 种,2001 年全部出齐,从使用情况看,比较适合高等职业院校的需要,普遍受到各学校的欢迎,一再重印,其中《互联网实用技术与网页制作》在短短两年多的时间里先后重印 6 次,并获教育部 2002 年普通高校优秀教材奖。第二轮教材共 60 余种,在 2004 年已全部出齐,有的教材出版一年多的时间里就重印 4 次,反映了市场对优秀专业教材的需求。前两轮教材中有十几种入选国家“十一五”规划教材。第三轮教材 2007 年 8 月之前全部出齐。本轮教材预计 2009 年全部出齐,相信也会成为系列精品教材。

教材建设是高职高专院校教学基本建设的一项重要工作。多年来,高职高专院校十分重视教材建设,组织教师参加教材编写,为高职高专教材从无到有,从有到优、到特而辛勤工作。但高职高专教材的建设起步时间不长,还需要与行业企业合作,通过共同努力,出版一大批符合培养高素质技能型专门人才要求的特色教材。

我们殷切希望广大从事高职高专教育的教师,面向市场,服务需求,为形成具有中国特色和高职教育特点的高职高专教材体系作出积极的贡献。

中国高等职业技术教育研究会会长
2007 年 6 月



高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

编审专家委员会名单

主任：温希东（深圳职业技术学院副校长 教授）

副主任：马晓明（深圳职业技术学院通信工程系主任 教授）

余 华（武汉船舶职业技术学院电子电气工程系主任 副教授）

电子组 组长：余 华(兼)（成员按姓氏笔画排列）

于宝明（南京信息职业技术学院电子信息工程系副主任 副研究员）

马建如（常州信息职业技术学院电子信息工程系副主任 副教授）

刘 科（苏州职业大学信息工程系 副教授）

刘守义（深圳职业技术学院 教授）

许秀林（南通职业大学电子系副主任 副教授）

高恭娴（南京信息职业技术学院电子信息工程系 副教授）

余红娟（金华职业技术学院电子系主任 副教授）

宋 烨（长沙航空职业技术学院 副教授）

李思政（淮安信息职业技术学院电子工程系主任 讲师）

苏家健（上海第二工业大学电子电气工程学院 教授）

张宗平（深圳信息职业技术学院电子通信技术系 高级工程师）

陈传军（金陵科技学院电子系主任 副教授）

姚建永（武汉职业技术学院电信学院院长 副教授）

徐丽萍（南京工业职业技术学院电气与自动化系 高级工程师）

涂用军（广东科学技术职业学院机电学院副院长 副教授）

郭再泉（无锡职业技术学院自动控制与电子工程系主任 副教授）

曹光跃（安徽电子信息职业技术学院电子工程系主任 副教授）

梁长垠（深圳职业技术学院电子工程系 副教授）

通信组 组长：马晓明(兼)（成员按姓氏笔画排列）

王巧明（广东邮电职业技术学院通信工程系主任 副教授）

江 力（安徽电子信息职业技术学院信息工程系主任 副教授）

余 华（南京信息职业技术学院通信工程系 副教授）

吴 永（广东科学技术职业学院电子系 高级工程师）

张立中（常州信息职业技术学院 高级工程师）

李立高（长沙通信职业技术学院 副教授）

林植平（南京工业职业技术学院电气与自动化系 高级工程师）

杨 俊（武汉职业技术学院通信工程系主任 副教授）

俞兴明（苏州职业大学电子信息工程系 副教授）

项目策划 马乐惠

策 划 张 媛 薛 媛 张晓燕



运动控制技术是当代发展迅速、应用广泛、最引人瞩目的技术之一，是推动新的技术革命和新的产业革命的核心技术，是自动化领域的重要组成部分。它包含了运动控制系统中所有元器件的构造原理和性能，以及控制对象或被控过程的特性等方面的知识，还包括运动控制系统的分析与综合、控制用计算机的构造原理和实现方法等。运动控制技术有很强的应用背景，它在炼钢、轧钢、化工、石油、电力、造纸、纺织、皮革、食品、航空、航海、汽车、铁路和国防工业领域，以及图书资料的管理、实验室技术设备中都得到广泛应用。目前，运动控制技术正向着网络化、集成化、分布化、节能化等方向发展。

本书主要介绍了运动控制系统的直流电动机和异步电动机调速技术，以及面向电气原理的交直流调速系统的仿真技术。本书将交直流调速运动控制技术和 MATLAB/Simulink 仿真技术有机结合在一起，着重体现了高等职业教育以应用型教育作为主导培养方向的办学理念。本书遵循理论和实际相结合的原则，强调工程应用，具有如下特点：

- (1) 突出实用性，淡化理论概念，简化公式推导和分析过程；
- (2) 注重实例分析，有利于进一步理解和巩固理论知识，做到学以致用；
- (3) 每章开头有内容提要，章尾有本章小结、习题与思考题，以便学生抓住重点，方便自学；
- (4) 附录中安排了实验指导，将实践内容与理论教学内容相结合；
- (5) 重点章节均采用了基于调速系统电气原理结构图的 MATLAB 仿真技术，仿真实验方法与实物实验方法相似，与实物实验结果相比较，仿真结果的可信度很高。

全书共分为八章。第一章绪论，主要介绍运动控制的基本概念和交直流调速系统的发展概况，以及运动控制技术仿真的基本概念；第二章介绍单闭环直流调速系统及其仿真技术，重点突出单闭环控制系统的基本概念、系统工程实现、调速分析方法和 MATLAB 仿真技术的实现；第三章介绍转速、电流双闭环直流调速系统及其仿真，重点介绍双闭环直流调速系统的组成和常用的工程设计方法，并给出了双闭环直流调速系统的 MATLAB 仿真；第四章介绍直流脉宽调速(PWM)系统及其仿真，主要介绍 PWM 调速原理和机械特性、PWM 变换器和控制电路，并实现了 PWM 直流调速系统的 MATLAB 仿真；第五章介绍交流调压调速系统和串级调速系统及其仿真，注重与直流调速系统进行对比分析，给出了交流调压调速系统和串级调速系统的 MATLAB 仿真；第六章介绍交流异步电动机变压变频调速系统及其仿真，着重分析变压变频调速的基本控制方式、压频协调控制的机械特性和基于稳态模型的变压变频调速系统，实现了转速开环恒压频比控制的调速系统的 MATLAB 仿真；第七章介绍变频器应用技术，重点讨论了各种变频器及其选择、安装、调试、应用等问题，最后实现了 SPWM 变频技术的 MATLAB 仿真；第八章介绍数字控制交直流调速系统，主要概述了数字控制系统的总体结构、设计方法和步骤、总体设计方案、

微处理芯片的选择和数字控制系统的特点、微机控制双闭环直流调速系统和交流调速系统等。本书各章中的仿真部分可以自成体系，即将各章最后仿真部分的内容组合起来，就是运动控制调速系统的 MATLAB 仿真技术的内容，可以独立为仿真实验指导书。

本书由苏州市职业大学电子信息工程系尚丽任主编，江阴技术职业学院的马青任副主编。尚丽编写了第一章到第五章和第七章，并完成这些章节中的 MATLAB 仿真建模及分析；第六章由戴桂平负责编写，并完成该章的 MATLAB 仿真实验；陈杰编写了第八章，并协助完成书中全部调速系统的 MATLAB 仿真实验；实验指导部分由马青和陆斌负责编写。全书由尚丽统稿。

本书由陕西科技大学的党宏社教授主审，对本书提出了许多中肯和建设性的意见；山东曲阜师范大学信息技术与传播学院的郑春厚博士后、华侨大学计算机科学与技术系的杜吉祥博士后也审阅了本书并提出了修改意见；本书在编写过程中也得到本系多年担任该课程教学任务的老师们的指导，在此一并表示诚挚的谢意。在编写本书的过程中，参阅和利用了部分兄弟院校的教材和国内外文献资料，在此对原作者也一并致谢！

本书可以作为高等职业技术学校、高等专科学校、继续教育学院等专科层次学校电气技术、工业电气自动化、机电应用技术等相关专业的教材，也可作为本科院校学生及广大电气爱好者和工程技术人员的参考书。

由于编写水平有限和编写时间仓促，书中疏漏和不妥之处敬请读者批评指正！

本教材由 2008 年度江苏省“青蓝工程”资助。

作者
2009 年 3 月



第一章 绪论	1
1.1 自动控制系统的基本概念	1
1.1.1 自动控制系统的一般概念	1
1.1.2 自动控制的基本方式	2
1.2 直流调速系统概况	4
1.3 交流调速系统概况	5
1.4 自动控制系统仿真基本概念	6
1.4.1 计算机仿真基本概念	6
1.4.2 MATLAB与控制系统仿真	9
1.5 本课程的任务	10
本章小结	11
习题与思考题	11
第二章 单闭环直流调速系统	13
2.1 概述	13
2.1.1 调速的定义	13
2.1.2 直流电动机的调速方法	14
2.1.3 可控直流电源	15
2.1.4 调速指标	18
2.1.5 直流电动机开环调速系统及其特性	21
2.2 有静差转速负反馈单闭环直流调速系统	25
2.2.1 单闭环调速系统的组成及其工作原理	26
2.2.2 单闭环调速系统的稳态特性	27
2.2.3 单闭环调速系统的动态特性	31
* 2.2.4 限流保护——电流截止负反馈	38
2.3 无静差转速负反馈单闭环直流调速系统	42
2.4 单闭环直流调速系统的 MATLAB 仿真	46
2.4.1 开环直流调速系统的建模与仿真	46
2.4.2 有静差转速单闭环直流调速系统的建模与仿真	55
2.4.3 无静差转速单闭环直流调速系统的建模与仿真	60
2.4.4 带限流保护的有静差转速单闭环直流调速系统的建模与仿真	63
2.4.5 带限流保护的无静差转速单闭环直流调速系统的建模与仿真	65
本章小结	68
习题与思考题	69

第三章 转速、电流双闭环直流调速系统	72
3.1 转速、电流双闭环直流调速系统的组成及其静特性	72
3.1.1 双闭环直流调速系统的组成	73
3.1.2 双闭环直流调速系统的工作原理	75
3.1.3 双闭环直流调速系统的静特性及其稳态参数计算	76
* 3.2 双闭环直流调速系统的动态特性	78
3.2.1 双闭环直流调速系统的动态数学模型	78
3.2.2 双闭环直流调速系统的起停特性	79
3.3 双闭环直流调速系统中调节器的工程设计方法	81
3.3.1 调节器的工程设计方法概论	81
3.3.2 典型 I 型和 II 型系统	82
3.3.3 典型 I 型系统性能指标和参数的关系	84
3.3.4 典型 II 型系统性能指标和参数的关系	88
* 3.4 双闭环直流调速系统调节器的设计	91
3.4.1 电流调节器的设计	92
3.4.2 转速调节器的设计	97
3.5 双闭环直流调速系统的 MATLAB 仿真	102
本章小结	107
习题与思考题	108
第四章 直流脉宽调速系统	111
4.1 概述	111
4.2 直流电动机的 PWM 调速原理	112
4.3 脉宽调制变换器	113
4.3.1 不可逆 PWM 变换器	113
4.3.2 可逆 PWM 变换器	118
4.4 直流脉宽调速系统的机械特性	120
4.5 PWM 控制与变换器的传递函数	121
4.6 PWM 调速系统的控制电路	122
4.6.1 脉宽调制器	123
4.6.2 集成电路脉宽调制器	125
4.6.3 基极驱动器	128
4.7 PWM 直流调速系统的特殊问题	129
4.8 PWM 直流调速系统的 MATLAB 仿真	130
本章小结	133
习题与思考题	133
第五章 交流调压调速系统和串级调速系统	135
5.1 交流调速系统的分类	135
5.2 异步电动机调压调速系统	136
5.2.1 交流调压器	136
5.2.2 交流调压调速电路的组成	138

5.2.3	调压调速系统的工作原理	139
5.2.4	闭环调压调速系统的组成及其静特性	142
5.3	绕线式异步电动机串级调速系统	145
5.3.1	串级调速系统的原理及基本类型	145
5.3.2	异步电动机串级调速系统的机械特性	148
5.3.3	双闭环控制的串级调速系统	153
* 5.3.4	双闭环串级调速系统中调节器参数的设计	156
5.4	交流调压调速系统和串级调速系统的 MATLAB 仿真	157
5.4.1	交流调压调速系统的 MATLAB 仿真	157
5.4.2	转速、电流双闭环串级调速系统的 MATLAB 仿真	162
	本章小结	166
	习题与思考题	168
第六章	交流异步电动机变压变频调速系统	169
6.1	变压变频调速的基本控制方式	169
6.1.1	基频以下调速	169
6.1.2	基频以上调速	170
6.2	异步电动机电压和频率协调控制时的机械特性	171
6.2.1	恒压恒频控制异步电动机的机械特性	171
6.2.2	基频以下恒压变频时的机械特性	171
6.2.3	基频以上恒压变频时的机械特性	175
6.3	基于异步电动机稳态模型的变压变频调速系统	176
6.3.1	转速开环恒压频比控制调速系统	176
6.3.2	转速闭环转差频率控制变压变频调速系统	183
6.4	转速开环恒压频比控制调速系统的 MATLAB 仿真	189
	本章小结	195
	习题与思考题	196
第七章	变频器应用技术	197
7.1	概述	197
7.1.1	变频调速概况	197
7.1.2	通用变频器概况	199
7.2	变频器装置主要类型	201
7.2.1	交-直-交变频器	201
7.2.2	交-交变频器	202
* 7.2.3	通用变频器中的逆变器	205
7.2.4	通用变频器中的脉宽调制(PWM)技术	207
7.2.5	变频器主要功能	213
7.3	变频器的选择	213
7.3.1	变频器类型的选择	213
7.3.2	变频器容量的选择	214
7.3.3	变频器外围设备的选择	214
7.4	变频器与 PLC 及上位机的连接	216

7.4.1	变频器的输入输出电路	216
7.4.2	使用时注意的问题	220
7.4.3	接地和电源系统	221
7.5	变频器的安装、调试和使用	221
7.5.1	通用变频器的安装	221
7.5.2	变频器的接线	222
7.5.3	通用变频器的调试	223
7.5.4	通用变频器的使用方法	224
7.6	正弦波脉宽调制(SPWM)变频器的 MATLAB 仿真	225
	本章小结	228
	习题与思考题	229
*	第八章 数字控制交直流调速系统	230
8.1	数字控制交直流调速系统概述	230
8.1.1	数字控制系统	230
8.1.2	数字控制交直流调速系统总体结构	230
8.1.3	数字控制交直流调速系统总体结构设计	231
8.1.4	微处理芯片的选择	233
8.1.5	数字调速系统的特点	234
8.2	数字控制直流调速系统	235
8.2.1	系统的硬件结构	236
8.2.2	系统的软件结构	236
8.2.3	数字控制直流调速系统的原理	237
8.3	数字控制交流调速系统	241
8.3.1	系统的硬件结构	241
8.3.2	系统的软件结构	243
	本章小结	246
	习题与思考题	246
	附录 实验指导	248
	DZ01 电源控制屏使用说明	248
	实验一 晶闸管直流调速主要单元的调试	250
	实验二 晶闸管直流调速系统参数和环节特性的测定	255
	实验三 转速开环 V-M 不可逆直流调速系统	264
	实验四 转速单闭环不可逆有静差直流调速系统	268
	实验五 双闭环晶闸管不可逆直流调速系统	272
	实验六 双闭环三相异步电动机串级调速系统	277
	参考文献	282

第一章 绪 论

运动控制技术以“自动控制原理”作为其理论基础。根据运动控制技术发展不同阶段，运动控制理论一般可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。经典控制理论的内容主要以传递函数为基础，研究单输入单输出类自动控制系统的分析和设计问题。由于其发展较早，现已十分成熟，而且在工程上相当成功地解决了大量实际问题，因此它是研究运动控制系统的重要理论基础。根据原动机的传动方式来分，运动控制系统可分为直流调速控制系统和交流调速控制系统两大类。MATLAB 软件的诞生，使控制系统的分析与设计由繁琐变得简单，它为控制系统的设计与仿真提供了一个强有力的工具。本书大部分章节中都涉及到 MATLAB 软件在运动控制技术中的应用

本章简要介绍自动控制系统的基本概念、自动控制的基本方式、直流调速系统的发展概况、交流调速系统的发展概况、数字控制系统的发展状况以及本课程的基本任务。

1.1 自动控制系统的基本概念

1.1.1 自动控制系统的一般概念

所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置，使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。例如，无人驾驶飞机按照预定的飞行航线自动升降和飞行，这是典型的自动控制技术应用的结果。

何谓自动控制系统，为了说明这个概念，下面先简单介绍一下自动控制理论中常用的几个术语。

(1) 被控对象：在自动控制技术中，通常把工作的机器设备称为被控对象，如汽车、飞机以及炼钢和化工生产中使用的锅炉等。

(2) 被控量：把表征机器设备工作状态的物理参量称为被控量，如电压、电流、进给量、炉温等。

(3) 给定输入：对物理参量的要求值称为给定值(给定输入)或希望值(或参考输入)；

(4) 控制装置：也称为控制器，能起控制作用的设备装置。控制器发出的控制输出信号称为控制量。

(5) 系统：为达到某一目的，由相互制约的各个部分按一定规律组成的、具有一定功能的整体。

掌握上述几个概念后，不难理解自动控制系统的含义了。一般地，被控对象和控制装置(控制器)的总体称为自动控制系统。现以无人驾驶飞机为例，进一步理解上述几个概念。

无人驾驶飞机按预先给定的飞行航线参数(高度、方向等)飞行，则预先给定的飞行航线参数称为给定输入或参考输入；在飞行过程中受到大气气流的影响使飞机偏离预定的航线，大气气流使飞行参数改变称为扰动；飞机的测量比较装置测出实际飞行参数与预定飞行参数存在偏差，就会对飞机的某些设备装置进行控制调节，这些起控制作用的设备装置称为控制器；飞机称为被控对象；飞机实际飞行参数称为被控制量；在控制器作用下使飞机回到预定的航线或偏差在允许范围内，这就形成了无人驾驶飞机的自动控制系统。

1.1.2 自动控制的基本方式

自动控制系统有两种最基本的形式，即开环控制和闭环控制。闭环自动控制系统是工业生产中应用最为广泛的系统，也是本书讨论的主要内容。

1. 开环控制

开环控制是一种最简单的控制方式，其特点是：在控制器与被控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用，即系统的输出量对控制量没有影响。常见的开环控制系统有以下两种。

1) 按给定值操作的开环控制系统

这种控制方式的特点是：需要控制的是被控对象的被控量，而控制装置(即控制器)只接收给定值信号。按给定值操作的开环控制系统原理方框图如图 1-1 所示。系统中，给定值经计算、执行部件和被控对象转变为被控量，这是一个单向传递过程，故称为开环控制。

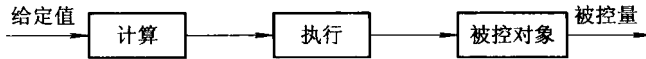


图 1-1 按给定值操作的开环控制系统原理方框图

这种开环控制方式有明显的缺陷，它对可能出现的被控量偏离给定值的偏差没有任何修正能力，抗干扰能力差，控制精度不高。当系统的结构参数稳定、干扰极弱或控制精度要求不高时，可采用这种开环控制方式。

2) 按干扰补偿的开环控制系统

这种控制方式的特点是：需要控制的仍是被控对象的被控量，而控制装置(即控制器)接收的是干扰信号(破坏正常运行的干扰信号)。抗干扰补偿的开环控制系统原理方框图如图 1-2 所示。利用干扰信号产生控制作用，以及时补充干扰对被控量的直接影响，称为干扰补偿控制。干扰信号经测量、计算、执行等部件至被控对象变换为被控量，这也是一个单向传递过程。

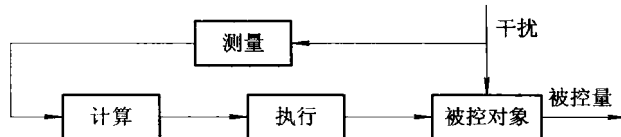


图 1-2 按干扰补偿的开环控制系统原理方框图

这种系统只能对可测干扰进行补偿,对不可测干扰,系统自身无法控制,因此控制精度受到原理上的限制。在存在强干扰且变化比较剧烈的场合,可以采用这种开环控制方式。

2. 闭环控制

闭环控制方式的特点是:在控制器与被控对象之间不仅存在着正向作用,而且存在着反馈作用,即系统的输出量对控制量有直接影响,其原理方框图如图 1-3 所示。闭环控制系统中,控制信号经计算比较、执行部件至被控对象,然后又经过测量部件反馈回来,形成一个闭路传递,故称闭环控制。将检测出来的输出量(即被控量)送回到系统的输入端,并与输入量(即给定值)比较的过程称为反馈。若反馈信号与输入信号相减,则称为负反馈;反之,若相加,则称为正反馈。输入信号与反馈信号之差称为偏差信号。偏差信号作用于控制器上,使系统的输出量趋向于给定的数值。闭环控制的实质就是利用负反馈的作用来减小系统的误差,因此闭环控制又称为反馈控制。

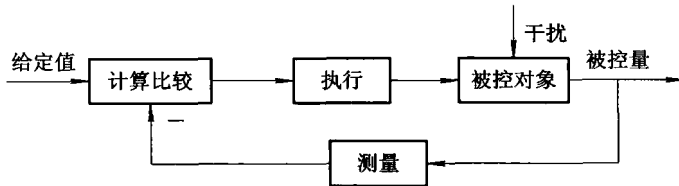


图 1-3 按偏差调节的闭环控制系统原理方框图

闭环控制系统从原理上提供了实现高精度控制的可能性。因为无论是干扰的作用,还是系统结构参数的变化,只要被控量偏离给定值,系统就会自行纠偏。但是闭环控制系统的参数如果匹配得不好,会造成被控量的较大摆动,甚至使系统无法正常工作。

例 1-1 一个简单的水位控制系统如图 1-4 所示,试分析系统的工作原理,并画出系统的原理方框图。

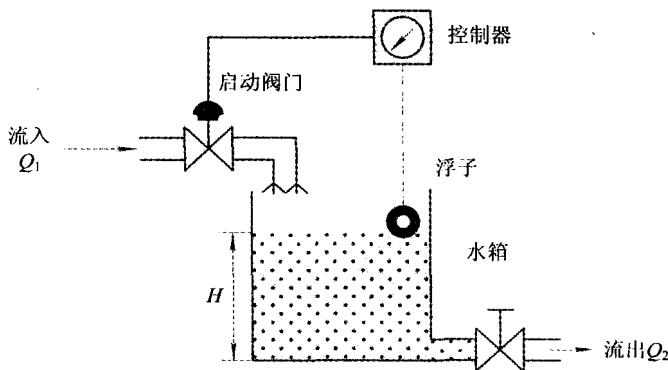


图 1-4 水位控制系统原理图

解 系统的任务是控制水箱内的水位高度 H 使其等于预先设定的水位高度 H_0 。因为最终需要控制的是水箱内的水位,使其维持恒定,故首先应明确下列问题:

(1) 受控对象——水箱、供水系统;

- (2) 被控量——水箱内水位的高度；
- (3) 给定量——控制器刻度盘指针标定的预定水位高度；
- (4) 控制装置——启动阀门、控制器；
- (5) 测量装置——浮子；
- (6) 比较装置——控制器刻度盘；
- (7) 干扰——水的流出量 Q_2 和流入量 Q_1 的变化都将破坏水位的恒定，故 Q_1 、 Q_2 是干扰输入。

由上述分析可知系统的工作原理如下：假定水位 H 恰好等于控制器刻度盘指针标定的预定水位高度，则水位偏差为零，启动阀门保持一定开度，进水量一定，水箱处于平衡工作状态。

如果流出量 Q_2 突然增大，而进水启动阀门一时没变，则水位下降，浮子下移，使得进水阀门开度增大，水位偏差不为零，进水量增加，水位逐渐升高，直至水位 H 又恢复到预先设定的值，系统重新进入平衡状态。

水位控制系统的原理方框图如图 1-5 所示。

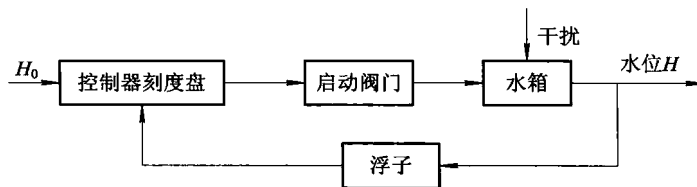


图 1-5 水位控制系统的原理方框图

闭环控制系统是否能很好地工作，将取决于被控对象和控制装置之间、各功能部件的特性参数之间是否匹配得当。在工程实际应用中，控制精度是衡量自动控制系统技术性能的重要指标。一个高质量的控制系统，在整个运行过程中，被控量对给定值的偏差应该是很小的。一般地，考虑到自控系统的动态过程（控制被控量变化的全过程称为系统的动态过程）在不同阶段中的特点，工程上常从稳、准、快三个方面来评价总体精度。稳和快反映了系统动态过程性能的好坏。既快又稳，表明系统的动态精度高。准是衡量稳态精度的指标，反映了系统后期稳态的性能。稳、快、准三方面的性能指标往往由于被控对象的具体情况不同，各系统要求也有所侧重，而且在同一个系统中，稳、快、准的要求是相互制约的。

1.2 直流调速系统概况

调速控制系统是通过控制对电动机的控制，将电能转换成机械能，并且控制工作机械按给定的运动规律运行的装置。用直流电动机作为原动机的传动方式称为直流调速。直流调速系统具有良好的起、制动性能，宜于在大范围内平滑调速，在许多需要调速或快速正反向的电力拖动领域中得到了广泛的应用。虽然近年来交流电动机的调速控制技术发展很快，但就其闭环控制的机理来说，直流电动机的调速与控制理论和实现都是交流电动机调速控制的基础。从根本上说，由于直流电动机电枢和磁场能独立进行激励，而且转速和输出转

矩的描述是对可控电压(或电流)激励的线性函数,因此,容易实现各种直流电动机调速控制,也容易实现对控制目标的“最佳化”。这也是直流电动机长期主导调速领域的原因。

在生产过程中,控制系统的运行速度不可能一成不变,需要根据生产机械的工艺要求或实际情况进行速度调节。调速的方法一般有几种:机械调速、电气调速和机械电气配合调速。机械调速通过改变传动比来实现调速;电气调速则通过改变电动机的电气参数,从而改变电动机运行的工作点来实现调速。采用何种方案调速,要根据实际情况,以获得最佳性价比为目标来决定。在很多情况下,采用电气调速在技术、经济等各项指标上都优越得多。

由于晶闸管供电的直流调速系统具有良好的技术经济指标,目前国内多数调速系统仍然沿用晶闸管电动机传动结构,但是晶闸管存在着控制的非线性及较低的功率因数等缺点,难以实现高精度、宽范围的速度控制。随着 GTO 晶闸管、GTR、P-MOSFET、IGBT 和 MCT 等全控型功率器件的问世,这些有自关断能力的器件逐步取代了原来普通晶闸管系统所必需的换向电路,简化了电路结构,提高了效率和工作频率,降低了噪声,缩小了电力电子装置的体积和重量。谐波成分大、功率因数差的相控变流器逐步被斩波器或脉冲宽度调制型(PWM)变流器所代替,明显地扩大了电动机控制的调速范围,提高了调速精度,改善了快速性、效率和功率因数。PWM 电源终将取代晶闸管相控式可控功率电源,成为电源的主流。一种称为软性 PWM 的电源将主宰传动控制领域,成为理想的功率电源。

随着信息、控制与系统学科以及电力电子技术的发展,电力拖动控制系统获得了迅猛发展,从旋转交流机组(交流电动机带动直流发电机)到水银整流器静止变流装置、晶闸管整流装置,再到众多集成电力模块。目前完全数字化的控制装置已成功应用于生产,以微机作为控制系统的核心部件,并具有控制、检测、监视、故障诊断及故障处理等多功能的电气传动系统正处在形成和不断完善之中。

1.3 交流调速系统概况

交流调速系统的多种方案虽然早已问世,但是长期以来一直没有理想的调速方案,只能被用于恒速拖动领域。晶闸管等功率元件的出现使交流电动机调速的发展出现了一个飞跃,使得采用半导体变流技术的交流调速得以实现。尽管交流电动机具有体积小、重量轻、没有电刷和换向器、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠、易于维修等优点,但是由于交流电动机调速系统具有控制比较复杂、调速性能差、装置价格高、效率低等缺点,因而仍然未能得到推广。自从微处理器出现以后,在绕线转子异步电动机串级调速、无换向器电动机调速、笼型异步电动机的矢量控制以及 PWM 技术方面都已经获得了重大突破与发展,并已进入工业应用阶段。目前,以大功率半导体器件、大规模集成电路为基础的交流电动机调速系统已具备了较宽的调速范围、较高的稳态精度、较快的动态响应、较高的工作效率以及可以四象限运行等优异性能,其静、动态特性均可以与直流电动机调速系统相媲美。而这时,直流电动机和交流电动机相比其缺点也日益显露出来。例如,直流电动机存在换向问题,其最大供电电压受到限制,机械强度也限制了转速的进一步提高,结构的影响使其不适于腐蚀性、易爆性和含尘气体的特殊场合。因此,交流电动机越来越受到人们的重视,可以说,交流调速逐步取代直流调速已成为明显的发展趋势。特别是节能

型交流调速技术,已得到很快发展。在过去大量应用的所谓不变速拖动系统中,有相当一部分是风机、水泵等拖动系统,这类负载约占工业电力拖动总量的一半。其中有些并不是真的不需要变速,只是由于过去的交流电动机不能调速,因而不得不依赖挡板和阀门来调节流量,同时也消耗掉大量的电能。如果采用交流电动机调速来改变风量或流量,则效率将会大大提高。从各方面来看,改造恒速电动机为交流调速电动机,每台月节能 20% 以上,总体的节能效益是可观的。

1.4 自动控制系统仿真基本概念

系统仿真作为一种特殊的试验技术,在 20 世纪 30 年代到 90 年代的半个多世纪中经历了飞速发展,到今天已经发展成为一种真正的、系统的试验科学。伴随着第一台电子管电子计算机的诞生和以相似理论为基础的模拟技术的应用,仿真作为一种研究和发展新产品、新技术的科学手段,在航空、航天、造船、兵器等与国防科研相关的行业中首先发展起来,并显示了巨大的社会效益和经济效益。

以武器的作战使用训练为例,1930 年左右,美国陆、海军航空队就使用了林克式仪表飞行模拟训练器。当时其经济效益相当于每年节约 1.3 亿美元,而且少牺牲 524 名飞行员。此后,固定基座以及三自由飞行模拟座舱陆续大量投入使用。1950~1953 年,美国首先利用计算机来模拟战争,防空兵力或地空作战被认为是具有最大训练潜力的应用范畴。20 世纪 60 年代,目标探测、捕获、跟踪和电子对抗已经进入了仿真系统。70 年代利用放电影方式,在大银幕内实现了多目标、飞机—导弹作战演习。随着 80 年代数字计算机的高速发展,训练仿真开始蓬勃发展,甚至呈现了两个新概念,即武器系统研制与训练装置的开发同步进行以及训练装置作为武器系统可嵌入的组成部分而进入整个计算机软件系统。至于武器的控制与制导(C&G)系统研制、试验与定型中仿真技术的应用则更为普遍。在 20 世纪 80 年代对于导弹的研制中,由于采用仿真使飞行试验数量减少了 30%~40%,节约研制经费 10%~40%,缩短周期 30%~60%,这足以说明系统仿真在工程应用中的重大意义。

仿真的基本思想是利用物理的或数学的模型来类比模仿现实过程,以寻求对真实过程的认识,它所遵循的基本原则是相似性原理。

1.4.1 计算机仿真基本概念

随着计算机技术的发展,仿真技术逐步发展,现已形成完整的学科,渗透到各个领域,为应用系统的研究提供了强大的工具。

系统仿真利用系统模型研究一个存在的或设计中的系统。仿真技术以控制论、系统论、相似性原理和信息技术为基础,是工程技术人员进行系统分析、设计和评估的重要手段。根据自动控制理论,我们已经知道,在电动机调速控制系统中,使用框图组织系统又省时又省力,如果采用计算机仿真技术来实现电动机调速,则在提高调速系统运行精度、减少累积误差等方面大有益处。

计算机仿真是基于所建立的系统仿真模型,利用计算机对系统进行分析与研究的技术及方法。模型是对现实系统有关结构信息和行为的某种形式的描述,是对系统特征与变化