



全国高等学校自动化专业系列教材  
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Motion Control Systems

# 运动控制系统

阮毅 陈维钧 主编

Ruan Yi      Chen Weijun

陈伯时 主审

Chen Boshi

清华大学出版社





全国高等学校自动化专业系列教材  
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Motion Control Systems

# 运动控制系统

上海大学

阮毅

Ruan Yi

主编

上海交通大学

陈维钧

Chen Weijun

上海大学

陈伯时

主审

Chen Boshi

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书按照《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会制定的要求编写,适用于高等院校自动化专业以及电气工程与自动化、电气工程及其自动化专业本科“运动控制系统”课程,也可供电力电子与电力传动研究生和从事运动控制系统的工程技术人员参考。

本书共3篇7章,内容涵盖:可控电源-电动机系统的特殊问题及机械特性,开环调速系统的性能指标,交、直流调速系统及伺服系统的工作原理、系统结构,静态和动态性能指标及分析方法,反馈控制的基本特点,调节器结构及参数的设计方法,控制系统的实现,计算机仿真软件在运动控制系统中的应用等。本书以控制规律为主线,按照从直流到交流、从开环到闭环、从调速到伺服循序渐进的原则编写。

本书反映了技术进步与发展的4个特征:全控型电力电子器件取代半控型器件,变换技术由相位控制转变成脉宽调制;模拟电子控制基本上让位于计算机数字控制;交流运动控制系统逐步取代直流运动控制系统;计算机仿真与辅助设计逐步融入运动控制系统的性能分析与设计中。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统/阮毅,陈维钧主编. —北京:清华大学出版社,2006.9

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 7-302-13218-6

I. 运… II. ①阮… ②陈… III. 运动控制—控制系统—高等学校—教材 IV. TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第064849号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:王一玲

文稿编辑:刘彤

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:175×245 印张:20.75 字数:423千字

版 次:2006年9月第1版 2006年9月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-13218-6/TN·334

印 数:1~3000

定 价:29.00元

# 出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》

为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版了一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层面、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的参考资料。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,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

## 《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

---

**顾问** (按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

**主任委员:** 吴澄(清华大学)

**副主任委员:** 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

**委员** (按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

**工作小组**(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)  
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)  
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)

陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

**责任编辑:** 王一玲(清华大学出版社)

---

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20世纪50年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创

建精品教材,重视实践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师,致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴怡迪 教授

2005年10月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教学,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设



基础知识与最新知识有机融合的教材? 如何充分利用现代技术, 适应现代大学生的接受习惯, 改变教材单一形态, 建设数字化、电子化、网络化等多元形态、开放性的“广义教材”? 等等, 这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版, 对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境, 一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限, 本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处, 还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴俊 院士

2005年10月于清华大学



本书属于《全国高等学校自动化专业系列教材》，按照系列教材编审委员会制定的要求编写，适用于高等院校自动化专业以及电气工程与自动化、电气工程及其自动化专业本科“运动控制系统”课程，也可供电力电子与电力传动硕士研究生和从事运动控制系统的工程技术人员参考。

“运动控制系统”是电气工程与自动化专业、电气工程及其自动化专业和自动化专业的专业主干课，综合利用前期课程“自动控制理论”、“电力电子技术”、“电机与拖动基础”、“计算机控制系统”的基础知识，培养学生理论联系实际的能力，掌握运动控制系统的工作原理和设计方法。课程的要点是：从实际出发，深入地进行理论分析，应用理论解决运动控制系统中的实际问题，以计算机仿真和实验等手段验证理论分析结果，提高学生分析问题和解决问题的能力。因此，“运动控制系统”是培养自动化专业学生理论联系实际的关键课程。

本书反映了技术进步与发展的4个特征：1. 全控型电力电子器件取代半控型器件，变换技术由相位控制转变成脉宽调制；2. 模拟电子控制基本上让位于计算机数字控制；3. 交流运动控制系统逐步取代直流运动控制系统；4. 计算机仿真与辅助设计逐步融入运动控制系统的性能分析与设计中。

本书的内容涵盖：可控电源-电动机系统的特殊问题及机械特性，开环调速系统的性能指标，交、直流调速系统及伺服系统的工作原理、系统结构，静态和动态性能指标及分析方法，反馈控制的基本特点，调节器结构及参数的设计方法，控制系统的实现，计算机仿真软件在运动控制系统中的应用等。本书以控制规律为主线，按照从直流到交流、从开环到闭环、从调速到伺服循序渐进的原则编写。

在内容的安排上，本书避免与前期课程简单的重复，对前期课程的交叉点、复合面，结合本课程的需要做必要的论述，引导读者综合利用前期基础知识，分析与解决新的问题。在经典或传统内容中融入新的方法或新的特点，如计算机数字控制，用计算机仿真来分析和设计系统。

直流控制系统，是运动控制系统的基础，所以本书从直流系统入门，建立了扎实的控制系统设计概念和能力以后，再进入交流系统的学习。鉴于篇幅与学时上的限制，删去转差功率消耗型和转差功率馈

送型异步电动机调速系统等内容,着重论述交流电动机的变频调速。考虑到高性能的交流调速系统已被广泛应用,根据实际教学经验,诸如异步电动机的动态模型、矢量控制系统与直接转矩控制系统等内容教学难度较大,在实际教学中应灵活掌握。在掌握调速系统的基本规律和设计方法的基础上,进一步学习伺服系统的分析与设计方法。

本书共3篇7章,按照48学时编写。

第1篇直流调速系统,包含第1章可控直流电源—电动机系统,第2章闭环控制的直流调速系统,第3章可逆直流调速系统。

第2篇交流调速系统,包含第4章基于稳态模型的感应电动机调速,第5章基于动态模型的感应电动机调速,第6章同步电动机调速系统。

第3篇伺服系统包含第7章伺服系统。

根据编者的教学经验,在48学时内,难以完成全部7章内容的教学。考虑到各个学校相应专业对课程的要求不同,在实际教学中可选用部分内容,对于学时较少的学校,可删去带\*的选学内容。本书每章附有思考题和习题,其中思考题难度较大,供教学参考,读者不必全部求解。

本课程是一门实践性很强的课程,实验是学好本课程必不可少的重要环节,可以随课堂教学过程进行,也可以开设单独的实验课,其目的在于培养学生掌握实验方法和运用理论分析并解决实际问题的能力。

本书由上海大学阮毅教授和上海交通大学陈维钧副教授主编,第1篇直流调速系统共3章和直流调速系统的实验由上海交通大学陈维钧副教授编写,其余各章由阮毅教授编写,并负责全书的统稿。

为了便于使用本书实施教学,减少板书的时间,缓解学时少、内容多的矛盾,我们编制了课堂教学演示软件,供任课教师和读者使用。直流调速系统由陈维钧副教授编制,交流调速系统和伺服系统由阮毅教授编制。

本书由上海大学陈伯时教授主审,陈伯时教授认真仔细地审阅了书稿,在内容编排、概念论述、文字润饰等方面提出了许多宝贵而中肯的修改意见,在此谨致深切的感谢。

本书编写工作得到《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,清华大学萧德云教授,上海交通大学陈敏逊教授,上海大学龚幼民教授、高艳霞副教授和沙立民副教授,清华大学出版社王一玲主任的关心和支持,在此表示谢意。

我们在编写过程中虽然花了不少精力,仍难免有错误与不足之处,殷切期望广大读者批评指正。

编者

2006年6月

# 常用符号表

## 一、元件和装置用的文字符号

A	放大器、调节器,电枢绕组
ACR	电流调节器
AE	电动势运算器
AER	电动势调节器
AFR	励磁电流调节器
APR	位置调节器
AR	反号器
ASR	转速调节器
ATR	转矩调节器
AVR	电压调节器
A $\Psi$ R	磁链调节器
BQ	位置传感器,转子位置检测器
C	电容器
CD	电流微分环节
CU	功率变换单元
DLC	逻辑控制环节
DSP	数字转速信号形成环节
F	励磁绕组
FA	具有瞬时动作的限流保护
FBC	电流反馈环节
FBS	测速反馈环节
G	发电机
GD	驱动电路
GE	励磁发电机
GT	触发装置
GTF	正组触发装置
GTR	反组触发装置
HBC	滞环控制器
K	继电器,接触器

L	电感,电抗器
M	电动机(总称)
MA	异步电动机
MD	直流电动机
MS	同步电动机
R	电阻器、变阻器
RP	电位器
SA	控制开关,选择开关
SAF	正组电子模拟开关
SAR	反组电子模拟开关
SM	伺服电机
T	变压器
TA	电流互感器,霍尔电流传感器
TAF	励磁电流互感器
TG	测速发电机
TI	逆变变压器
U	变换器,调制器
UCR	可控整流器
UI	逆变器
UPE	电力电子变换器
UPW	PWM波生成环节
UR	整流器
V	晶闸管整流装置
VB	晶体三极管
VD	二极管
VF	正组晶闸管整流装置
VR	反组晶闸管整流装置
VST	稳压管
VT	功率开关器件

## 二、常用缩写符号

CFPWM	电流跟踪 PWM(Current Follow PWM)
CHBPWM	电流滞环跟踪 PWM(Current Hysteresis Band PWM)
CVCF	恒压恒频(Constant Voltage Constant Frequency)
GTO	门极可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor)

IGBT	绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor)
PD	比例微分(Proportion, Differentiation)
PI	比例积分(Proportion, Integration)
PID	比例积分微分(Proportion, Integration, Differentiation)
P-MOSFET	场效应晶闸管(Power Mos Field Effect Transistor)
PWM	脉宽调制(Pulse Width Modulation)
SHEPWM	消除指定次数谐波的 PWM(Selected Harmonics Elimination PWM)
SPWM	正弦波脉宽调制(Sinusoidal PWM)
SVPWM	电压空间矢量 PWM(Space Vector PWM)
VR	矢量旋转变换器(Vector Rotator)
VVVF	变压变频(Variable Voltage Variable Frequency)

### 三、参数和物理量文字符号

$A_d$	动能
$B$	磁通密度
$C$	电容; 输出被控变量
$C_e$	直流电机在额定磁通下的电动势系数
$C_m$	直流电机在额定磁通下的转矩系数
$D$	调速范围; 摩擦转矩阻尼系数; 传递函数分母
$E, e$	反电动势, 感应电动势(大写为平均值或有效值, 小写为瞬时值, 下同); 误差
$e_s$	系统误差
$e_{st}$	扰动误差
$e_{sr}$	给定误差
$F$	磁动势, 扰动量
$f$	频率
$f_t$	开关频率
$g$	重力加速度
$GD^2$	飞轮惯量
$GM$	增益裕度
$h$	开环对数频率特性中频宽
$I, i$	电流, 电枢电流
$I_a, i_a$	电枢电流
$I_d, i_d$	整流电流, 直流平均电流
$I_{dL}$	负载电流

$I_f, i_f$	励磁电流
$J$	转动惯量
$K$	控制系统各环节的放大系数(以环节符号为下角标); 闭环系统的开环放大系数; 扭转弹性转矩系数
$K_e$	直流电机电动势的结构常数
$K_m$	直流电机转矩的结构常数
$K_s$	电力电子变换器放大系数
$k$	谐波次数; 振荡次数
$k_N$	绕组系数
$L$	电感, 自感; 对数幅值
$L_l$	漏感
$L_m$	互感
$M$	闭环系统频率特性幅值; 调制度
$M_r$	闭环系统频率特性峰值
$m$	整流电压(流)一周内的脉冲数; 典型 I 型系统两个时间常数之比
$N$	匝数; 载波比; 传递函数分子
$n$	转速
$n_0$	理想空载转速; 同步转速
$n_{syn}$	同步转速
$n_p$	极对数
$P, p$	功率
$p = \frac{d}{dt}$	微分算子
$P_m$	电磁功率
$P_s$	转差功率
$P_{mech}$	机械功率
$R_s$	采样电阻
$R$	电阻; 电枢回路总电阻; 输入变量
$R_a$	直流电机电枢电阻
$R_l$	电抗器电阻
$R_{pc}$	电力电子变换器内阻
$R_{rec}$	整流装置内阻
$R_o$	限流电阻
$s$	转差率; 静差率
$s = \sigma + j\omega$	Laplace 变量
$T$	时间常数; 开关周期

$t$	时间
$T_e$	电磁转矩
$T_1$	电枢回路电磁时间常数
$T_L$	负载转矩
$T_m$	机电时间常数
$t_m$	最大动态降落时间
$T_0$	滤波时间常数
$t_{on}$	开通时间
$t_{off}$	关断时间
$t_p$	峰值时间
$t_r$	上升时间
$T_s$	电力电子变换器平均失控时间, 电力电子变换器滞后时间常数
$t_s$	调节时间
$t_v$	恢复时间
$U, u$	电压, 电枢供电电压
$U_2$	变压器二次侧(额定)相电压
$U_{bs}$	自整角机输出电压
$U_c$	控制电压
$U_d, u_d$	整流电压; 直流平均电压
$U_{d0}, u_{d0}$	理想空载整流电压
$U_f, u_f$	励磁电压
$U_g$	栅极驱动电压
$U_m$	峰值电压
$U_s$	电源电压
$U_x$	变量 $x$ 的反馈电压( $x$ 可用变量符号替代)
$U_x^*$	变量 $x$ 的给定电压( $x$ 可用变量符号替代)
$v$	速度, 线速度
$W(s)$	传递函数; 开环传递函数
$W_{cl}(s)$	闭环传递函数
$W_{obj}(s)$	控制对象传递函数
$W_m$	磁场储能
$W_x(s)$	环节 $x$ 的传递函数
$X$	电抗
$Z$	电阻抗
$z$	负载系数
$\alpha$	转速反馈系数; 可控整流器的控制角



$\alpha_m$	机械角加速度
$\beta$	电流反馈系数; 可控整流器的逆变角
$\gamma$	电压反馈系数; 相角裕度; PWM 电压系数
$\delta$	转速微分时间常数相对值; 脉冲宽度
$\Delta n$	转速降落
$\Delta U$	偏差电压
$\Delta \theta_m$	角差
$\xi$	阻尼比
$\eta$	机械传动比
$\theta$	电角位移; 可控整流器的导通角
$\theta_m$	机械角位移
$\lambda$	电机允许过载倍数
$\rho$	占空比; 电位器的分压系数
$\sigma$	漏磁系数; 转差功率损耗系数
$\sigma$	超调量
$\tau$	时间常数, 积分时间常数, 微分时间常数
$\Phi$	磁通
$\Phi_m$	每极气隙磁通量
$\omega_c$	开环频率特性截止频率
$\varphi$	相位角, 阻抗角; 相频
$\omega_m$	机械角转速
$\Psi$	磁链
$\omega_n$	二阶系统的自然振荡频率
$\omega$	角转速, 角频率
$\omega_s$	转差角转速
$\omega_b$	闭环频率特性带宽
$\omega_1$	同步角转速, 同步角频率

#### 四、常见下角标

add	附加(additional)
av	平均值(average)
bl	堵转, 封锁(block)
c	环流(circulating current); 控制(control)
cl	闭环(closed loop)
com	比较(compare); 复合(combination)