



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

Computer Control Systems

# 计算机控制系统

高金源 夏 洁 编著

Gao Jinyuan, Xia Jie

张宇河 主审

Zhang Yuhe

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

Computer Control Systems

# 计算机控制系统

北京航空航天大学 高金源 夏洁 编著

Gao Jinyuan, Xia Jie

北京理工大学 张宇河 主审

Zhang Yuhe

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统地讲述计算机控制系统基本原理与实现技术问题。全书共 10 章,分为三部分:(1)计算机控制的基础理论,包括计算机控制概述、系统信号分析、计算机控制系统数学描述、离散系统分析;(2)计算机控制系统设计,包括连续域离散化设计、直接离散域设计(如根轨迹设计、 $w'$ 域设计)和状态空间设计等;(3)计算机控制系统工程实现技术,包括计算机控制系统的构建、工程实现的某些问题(如量化误差分析、采样周期的选取以及抗干扰和可靠性等)、嵌入式系统、可编程控制器、集散控制系统、总线控制系统及控制网络系统。最后一章介绍了三个应用实例。书末附有  $z$  变换的常用表,全书各章的习题均放在附录中。在所附光盘中,给出本书所涉及的 MATLAB 常用指令表和符号语言工具箱、部分习题解答、基于本书内容的教师用电子教案。

本书可作为高等学校自动控制(自动化)、电气工程、仪器仪表及机电一体化专业的教材,也可作为研究生教学的基础教材,同时也是有关工程技术人员的有效参考资料。

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 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统/高金源,夏洁编著. —北京:清华大学出版社,2007.1

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-13600-2

I. 计… II. ①高… ②夏… III. 计算机控制系统—高等学校—教材  
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 091697 号

责任编辑:王一玲 王敏稚

责任校对:时翠兰

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:31.5 字 数:612 千字

(附光盘 1 张)

版 次:2007 年 1 月第 1 版

印 次:2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:45.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:017416-01

# 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)

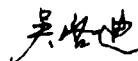
---

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。

 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、课程实验指示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。

吴炯 院士

2005年10月于清华大学



计算机在实时控制领域中获得了广泛的应用。在国民经济及国防等各个领域中,采用计算机控制是现代化的重要标志。计算机控制学科涉及计算机控制的基本理论、分析、设计与工程实现等多方面内容。

本书是依照“全国高等学校自动化专业系列教材编审委员会”审定的教材大纲编写的。

本书兼顾计算机控制基本原理和实现技术两大方面的教学要求。通过本书的学习,读者可在计算机控制基本原理和实现技术方面获得较全面的培养和锻炼。全书除第1章外,其余各章可分为三部分:(1)计算机控制的理论基础(第2~4章)。考虑到这部分内容较为成熟,在前修课的基础上,将简练、系统、深入地讲述一些基础性的内容;(2)计算机控制系统设计(第5~6章)。遵循经典与现代设计方法并重的原则,重点讨论连续离散化设计、离散域根轨迹设计、 $\omega'$ 域设计和状态空间设计等相关内容;(3)计算机控制系统工程实现技术(第7~10章)。由于计算机软硬件技术发展日新月异,因此,在论述基本工程实现技术的基础上,重点介绍了现代先进计算机控制的实现技术。除第7章介绍一些基本的工程实现技术外,第8~9章分别讨论了嵌入式系统、可编程控制器、集散式系统、现场总线和网络控制等先进控制技术。第10章介绍了3个计算机控制系统实例,以增强读者的感性认识。鉴于自动控制专业学生在微机原理及接口技术等相关课程中对计算机系统硬件已有较系统的学习,本书将不再重复,但在论述计算机控制系统构建及实现技术时,从应用的角度上讨论了相关问题。为了加强教材理论联系实际和实践能力的培养,本书在组织教材的基本内容时,特别注意论述工程中常用的方法和解释实践中比较关心的问题。此外,各章节将结合具有典型工程背景的实例进行相关内容的论述,大部分例题和习题均有各种实际应用背景,并且结合工程实例和配合典型实验系统设置习题作业,使学生在初级阶段就可以从事一些简单系统的设计和实现任务。本书在论述计算机控制系统分析、设计时,充分恰当地使用了现代的计算工具 MATLAB 及 Simulink 软件,特别是,应用了其中的符号语言工具箱,将有效地帮助学生完成复杂计算,实现系统的分析和设计。

本书书末有2个附录,分别为 $z$ 变换表和各章的习题。为了帮助读

者学习和运用所学知识解决问题的能力,本书给出了较多的习题。随书将附带一张光盘,其中包括本书在分析设计和仿真中涉及到的 MATLAB 常用指令表、MATLAB 软件符号语言工具箱以及本书部分习题的解答。另外还提供基于本书内容的电子教案,以便于选择该教材的教师教学时使用。

本书可供自动控制(自动化)专业本科及研究生教学使用,亦可供电气、仪器仪表及机电一体化等专业选用。为了满足学生的自主性、研究性学习要求,调动学生学习的积极性,激发学生的潜能,满足培养优秀生的要求,在组织教材内容时,适量地编入了某些较深入或前沿问题,习题中也包括了一些难度稍大的问题,教学时可以适当选用。对于普通高校自动控制专业本科生,通常可选用第1章及第2~4章的重点内容和第5、6及7、8各章。根据教学大纲及学时要求,亦可放弃第6章及第8章的学习。第9、10章可供教学和优秀生学习参考。

学习本书的知识背景是:一般连续控制理论以及微机原理和接口技术的基本知识。

本书是在北京航空航天大学计算机控制教学小组近20年教学、编写及使用多本教材所积累的经验并参阅了近年来国内外有关教材的基础上编写的。多年来本学科在计算机控制系统分析、设计和实现技术方面积累了一定的经验,这些经验在相应章节中做了一定的反映,本教材可以看作是北京航空航天大学自动控制系计算机控制教学小组集体编著的。全书由高金源教授与夏洁副教授共同编写。高金源负责编写第1~6章,夏洁负责编写第7~10章。在编写过程中教学小组的张平教授、周锐教授提供了许多章节的原始资料和意见。此外,北京航空航天大学自动控制系扈宏杰副教授等还提供了一些研究实例,在此,特向他们表示衷心的感谢。

全书由北京理工大学张宇河教授主审。张宇河教授对全书进行了详细认真的审阅,提出了许多宝贵意见。本书的出版得到了清华大学出版社王一玲女士的大力支持与帮助。在此一并对他们表示衷心的感谢。

在编写过程中学习和汲取了部分国内外有关教材的内容,受益匪浅,对此表示谢意。

由于编者的知识和经验有限,不妥之处在所难免,期望得到读者的批评指正。

编 者

2006年3月

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 计算机控制导论 .....        | 1  |
| 1.1 计算机控制系统概述 .....        | 1  |
| 1.1.1 计算机控制系统组成 .....      | 1  |
| 1.1.2 计算机控制系统特点 .....      | 4  |
| 1.1.3 计算机控制系统优点 .....      | 4  |
| 1.2 计算机控制系统的发展与应用 .....    | 6  |
| 1.2.1 计算机控制系统发展概述 .....    | 6  |
| 1.2.2 计算机控制系统应用与分类 .....   | 8  |
| 1.3 计算机控制系统的理论与设计问题 .....  | 12 |
| 1.3.1 计算机控制系统的理论问题 .....   | 12 |
| 1.3.2 计算机控制系统的设计与实现 .....  | 15 |
| 本章小结 .....                 | 17 |
| 第 2 章 计算机控制系统信号分析 .....    | 18 |
| 2.1 控制系统中信号分类 .....        | 18 |
| 2.1.1 A/D 变换 .....         | 20 |
| 2.1.2 D/A 变换 .....         | 21 |
| 2.1.3 计算机控制系统中信号的分类 .....  | 22 |
| 2.2 理想采样过程的数学描述及特性分析 ..... | 23 |
| 2.2.1 采样过程的描述 .....        | 23 |
| 2.2.2 理想采样信号的时域描述 .....    | 24 |
| 2.2.3 理想采样信号的复域描述 .....    | 26 |
| 2.2.4 理想采样信号的频域描述 .....    | 29 |
| 2.2.5 采样定理 .....           | 34 |
| 2.2.6 前置滤波器 .....          | 37 |
| 2.3 信号的恢复与重构 .....         | 39 |
| 2.3.1 理想恢复过程 .....         | 39 |
| 2.3.2 非理想恢复过程 .....        | 40 |
| 2.3.3 零阶保持器 .....          | 41 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 2.3.4 后置滤波 .....              | 43        |
| 2.4 信号的整量化 .....              | 43        |
| 2.5 计算机控制系统简化结构 .....         | 44        |
| 本章小结 .....                    | 45        |
| <b>第3章 计算机控制系统的数学描述 .....</b> | <b>47</b> |
| 3.1 离散系统的时域描述——差分方程 .....     | 47        |
| 3.1.1 差分的定义 .....             | 47        |
| 3.1.2 差分方程 .....              | 48        |
| 3.1.3 线性常系数差分方程的迭代求解 .....    | 49        |
| 3.2 $z$ 变换 .....              | 50        |
| 3.2.1 $z$ 变换的定义 .....         | 50        |
| 3.2.2 $z$ 变换的基本定理 .....       | 53        |
| 3.2.3 求 $z$ 变换及反变换的方法 .....   | 56        |
| 3.2.4 差分方程的 $z$ 变换解法 .....    | 61        |
| 3.3 脉冲传递函数 .....              | 61        |
| 3.3.1 脉冲传递函数定义 .....          | 61        |
| 3.3.2 脉冲传递函数特性 .....          | 62        |
| 3.3.3 差分方程与脉冲传递函数 .....       | 63        |
| 3.4 离散系统的方块图分析 .....          | 64        |
| 3.4.1 环节连接的等效变换 .....         | 65        |
| 3.4.2 闭环反馈系统脉冲传递函数 .....      | 67        |
| 3.4.3 计算机控制系统的闭环脉冲传递函数 .....  | 69        |
| 3.4.4 干扰作用时闭环系统的输出 .....      | 72        |
| 3.5 离散系统的频域描述 .....           | 73        |
| 3.5.1 离散系统频率特性的定义 .....       | 73        |
| 3.5.2 离散系统频率特性的计算 .....       | 73        |
| 3.5.3 离散系统频率特性的特点 .....       | 77        |
| 3.6 离散系统的状态空间描述 .....         | 81        |
| 3.6.1 由差分方程建立离散状态方程 .....     | 81        |
| 3.6.2 由脉冲传递函数建立离散状态方程 .....   | 83        |
| 3.6.3 计算机控制系统状态方程 .....       | 85        |
| 3.6.4 离散状态方程求解 .....          | 89        |
| 3.6.5 脉冲传递函数阵 .....           | 90        |
| 3.7 应用实例 .....                | 90        |
| 本章小结 .....                    | 95        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第 4 章 计算机控制系统分析</b>      | 97  |
| 4.1 $s$ 平面和 $z$ 平面之间的映射     | 97  |
| 4.1.1 $s$ 平面和 $z$ 平面的基本映射关系 | 97  |
| 4.1.2 $s$ 平面上等值线在 $z$ 平面的映射 | 101 |
| 4.2 稳定性分析                   | 103 |
| 4.2.1 离散系统的稳定条件             | 104 |
| 4.2.2 稳定性的检测                | 105 |
| 4.2.3 采样周期与系统稳定性            | 108 |
| 4.3 稳态误差分析                  | 109 |
| 4.3.1 离散系统稳态误差的定义           | 109 |
| 4.3.2 离散系统稳态误差的计算           | 110 |
| 4.3.3 采样周期对稳态误差的影响          | 113 |
| 4.4 时域特性分析                  | 115 |
| 4.4.1 离散系统动态特性指标的提法及限制条件    | 115 |
| 4.4.2 极点零点位置与时间响应的关系        | 116 |
| 4.4.3 采样系统动态响应的计算           | 120 |
| 4.5 频域特性分析                  | 121 |
| 4.5.1 频域系统稳定性的分析            | 121 |
| 4.5.2 相对稳定性的检验              | 123 |
| 4.6 应用实例                    | 124 |
| 本章小结                        | 126 |
| <b>第 5 章 计算机控制系统的经典设计方法</b> | 128 |
| 5.1 连续域—离散化设计               | 128 |
| 5.1.1 设计原理和步骤               | 128 |
| 5.1.2 各种离散化方法               | 130 |
| 5.2 数字 PID 控制器设计            | 156 |
| 5.2.1 数字 PID 基本算法           | 156 |
| 5.2.2 数字 PID 控制算法改进         | 159 |
| 5.2.3 PID 调节参数的整定           | 164 |
| 5.3 控制系统 $z$ 平面设计性能指标要求     | 167 |
| 5.3.1 时域性能指标要求              | 167 |
| 5.3.2 频域性能指标要求              | 169 |
| 5.4 $z$ 平面根轨迹设计             | 170 |
| 5.4.1 $z$ 平面根轨迹             | 170 |

|              |                        |            |
|--------------|------------------------|------------|
| 5.4.2        | $z$ 平面根轨迹设计方法          | 172        |
| 5.5          | $w'$ 变换及频率域设计          | 178        |
| 5.5.1        | $w'$ 变换                | 178        |
| 5.5.2        | $w'$ 域设计法              | 182        |
| 5.5.3        | 设计举例                   | 182        |
|              | 本章小结                   | 187        |
| <b>第 6 章</b> | <b>计算机控制系统状态空间设计</b>   | <b>189</b> |
| 6.1          | 离散系统状态空间描述的基本特性        | 190        |
| 6.1.1        | 可控性与可达性                | 190        |
| 6.1.2        | 可观性                    | 194        |
| 6.1.3        | 可控性及可观性某些问题的说明         | 196        |
| 6.1.4        | 采样系统可控可观性与采样周期的关系      | 198        |
| 6.2          | 状态反馈控制律的极点配置设计         | 200        |
| 6.2.1        | 状态反馈控制                 | 201        |
| 6.2.2        | 单输入系统的极点配置             | 203        |
| 6.2.3        | 多输入系统的极点配置             | 208        |
| 6.3          | 状态观测器设计                | 209        |
| 6.3.1        | 系统状态的开环估计              | 209        |
| 6.3.2        | 全阶状态观测器设计              | 210        |
| 6.3.3        | 降维状态观测器                | 216        |
| 6.4          | 调节器设计(控制律与观测器的组合)      | 217        |
| 6.4.1        | 调节器设计分离原理              | 218        |
| 6.4.2        | 调节器系统的控制器              | 218        |
| 6.4.3        | 控制律及观测器极点选择            | 219        |
| 6.5          | 最优二次型设计                | 222        |
| 6.5.1        | 概述                     | 222        |
| 6.5.2        | 无限时间离散最优二次型            | 223        |
| 6.5.3        | 采样系统最优二次型设计            | 225        |
| 6.5.4        | 离散最优二次型调节器             | 228        |
|              | 本章小结                   | 229        |
| <b>第 7 章</b> | <b>计算机控制系统组建以及实现技术</b> | <b>230</b> |
| 7.1          | 硬件组成及输入输出接口            | 231        |
| 7.1.1        | 控制用计算机系统的硬件要求          | 232        |
| 7.1.2        | 控制用计算机的选择              | 235        |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 7.1.3 | 计算机控制系统的模拟输出通道 .....     | 237 |
| 7.1.4 | 计算机控制系统的模拟输入通道 .....     | 242 |
| 7.1.5 | 计算机控制系统的数字输入输出通道 .....   | 248 |
| 7.1.6 | 信号的调理 .....              | 250 |
| 7.1.7 | 总线技术 .....               | 251 |
| 7.2   | 系统测试信号的处理 .....          | 256 |
| 7.2.1 | 测试信号的滤波 .....            | 256 |
| 7.2.2 | 测试信号的线性化处理 .....         | 259 |
| 7.3   | 计算机控制系统的实时软件设计 .....     | 260 |
| 7.3.1 | 软件的分类 .....              | 260 |
| 7.3.2 | 实时控制程序设计语言的选用 .....      | 262 |
| 7.3.3 | 实时控制软件的设计 .....          | 263 |
| 7.4   | 控制算法的编排实现 .....          | 266 |
| 7.4.1 | 控制算法的编排结构 .....          | 266 |
| 7.4.2 | 比例因子的配置 .....            | 268 |
| 7.5   | 量化效应分析 .....             | 272 |
| 7.5.1 | 有限字长二进制特性 .....          | 273 |
| 7.5.2 | 计算机控制系统中的量化 .....        | 277 |
| 7.5.3 | 量化误差分析 .....             | 277 |
| 7.5.4 | 量化效应的非线性分析 .....         | 281 |
| 7.5.5 | 控制算法 $\delta$ 变换描述 ..... | 284 |
| 7.6   | 采样频率的选取 .....            | 286 |
| 7.6.1 | 采样频率对系统性能的影响 .....       | 286 |
| 7.6.2 | 选择采样频率的经验规则 .....        | 289 |
| 7.6.3 | 多采样频率配置 .....            | 290 |
| 7.7   | 计算机控制系统的抗干扰及可靠性技术 .....  | 291 |
| 7.7.1 | 干扰源及抗干扰措施 .....          | 291 |
| 7.7.2 | 提高系统可靠性的措施 .....         | 297 |
|       | 本章小结 .....               | 301 |

## 第8章 嵌入式系统及可编程控制器 .....

303

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 8.1   | 嵌入式系统 .....     | 303 |
| 8.1.1 | 概述 .....        | 303 |
| 8.1.2 | 软硬件协同设计技术 ..... | 307 |
| 8.1.3 | 实时操作系统 .....    | 310 |
| 8.1.4 | 嵌入式系统的开发 .....  | 316 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 8.1.5 嵌入式控制系统设计实例 .....        | 324        |
| 8.2 可编程控制器(PLC) .....          | 327        |
| 8.2.1 概述 .....                 | 327        |
| 8.2.2 PLC的结构和工作原理 .....        | 331        |
| 8.2.3 PLC常用编程语言 .....          | 337        |
| 8.2.4 PLC的应用实例 .....           | 342        |
| 8.2.5 PLC的网络系统 .....           | 347        |
| 本章小结 .....                     | 350        |
| <b>第9章 控制网络系统及网络控制技术 .....</b> | <b>351</b> |
| 9.1 集散控制系统 .....               | 352        |
| 9.1.1 概述 .....                 | 352        |
| 9.1.2 功能分层体系及基本结构 .....        | 354        |
| 9.1.3 集散控制系统的组态性 .....         | 362        |
| 9.2 现场总线控制系统 .....             | 366        |
| 9.2.1 概述 .....                 | 367        |
| 9.2.2 现场总线类型 .....             | 371        |
| 9.2.3 典型应用系统构成 .....           | 380        |
| 9.3 以太控制网络系统 .....             | 385        |
| 9.3.1 控制网络的技术基础 .....          | 387        |
| 9.3.2 以太控制网络系统的组成及其特点 .....    | 392        |
| 9.3.3 以太网用于工业现场的关键技术 .....     | 393        |
| 9.4 控制网络与管理网络集成技术 .....        | 397        |
| 9.4.1 网络互联技术 .....             | 398        |
| 9.4.2 动态数据交换技术 .....           | 398        |
| 9.4.3 远程通信技术 .....             | 399        |
| 9.4.4 数据库访问技术 .....            | 400        |
| 9.5 网络控制系统及其时间同步 .....         | 401        |
| 9.5.1 网络控制系统定义及存在问题 .....      | 401        |
| 9.5.2 传输延迟的分析 .....            | 402        |
| 9.5.3 网络控制的时钟同步 .....          | 403        |
| 9.6 闭环网络控制系统分析 .....           | 405        |
| 9.6.1 基于事件驱动的稳定性的分析 .....      | 406        |
| 9.6.2 基于时间驱动的稳定性的分析 .....      | 408        |
| 9.7 闭环网络控制系统的控制器设计方法 .....     | 410        |
| 9.7.1 确定性控制设计方法 .....          | 410        |