



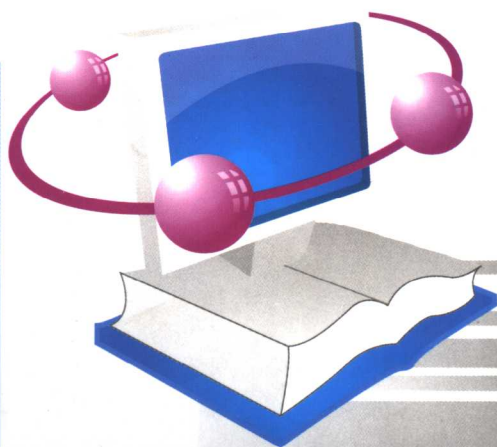
21st CENTURY

十一五规划教材

21世纪全国高等院校

自动化系列

实用规划教材



# 自动控制原理

主 编 潘 丰 张开如  
副主编 白文峰 雷 霞

中国林业出版社  
China Forestry Publishing House



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

TP13  
201

21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

# 自动控制原理

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 主 编 | 潘 丰 | 张开如 |
| 副主编 | 白文峰 | 雷 霞 |
| 参 编 | 申欲晓 | 雷宇凌 |
|     | 彭生祥 |     |

中国林业出版社  
China Forestry Publishing House



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书是 21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材, 本书的内容以经典控制理论为主, 为了适应不同专业和不同层次教学的需要, 本书各章所述的各种基本分析方法尽可能做到相对独立, 以便使用者根据具体情况灵活选择。

全书全面系统地介绍了自动控制理论的基本内容, 着重于基本概念、基本理论和基本的分析方法。全书共分 8 章, 主要内容有: 引论、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、控制系统的校正、非线性控制系统、离散控制系统等。本书内容新颖、实用性强、重点突出、叙述深入浅出、文字简练流畅。书中除有一般性的例题外, 还附有一定数量的综合性例题分析以及 MATLAB 在控制系统分析和计算方面的应用。

本教材既可作为普通高校电气工程自动化、通信、计算机、自动控制等专业的教材, 也可作为成人教育和继续教育的教材, 还可作为科技人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/潘丰, 张开如主编. —北京: 中国林业出版社; 北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4396-9

I. 自… II. ①潘… ②张… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 090038 号

书 名: 自动控制原理

著作责任者: 潘 丰 张开如 主编

策 划 编 辑: 李娉婷

责 任 编 辑: 李 虎 曹 岚 张 敏

标 准 书 号: ISBN 7-5038-4396-9

出 版 者: 中国林业出版社(地址: 北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号 邮编: 100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 总编室 66180373 营销中心 66187711

北京大学出版社(地址: 北京市海淀区成府路 205 号 邮编: 100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup\_6@163.com

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 507 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

# 《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

## 专家编审委员会

主任委员 张德江

副主任委员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈 静 丁坚勇 侯媛彬

纪志成 任庆昌 吴 斌

秘书长 于微波

委 员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈志新 戴文进 段晨旭 樊立萍

范立南 公茂法 关根志 嵇启春

蒋 中 雷 霞 刘德辉 刘永信

刘 原 马永翔 孟祥萍 孟彦京

聂诗良 王忠庆 吴旭云 燕庆明

杨新华 尤 文 张桂青 张井岗

# 总 序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学与技术的迅速发展和广泛应用,深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学与技术的发展。自动化科学与技术涉及到信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面,是信息科学与技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中,工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标,党和国家提出走新型工业化道路的战略决策,这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化,就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中,自动化科学与技术起着不可替代的重要作用,高等学校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣的历史使命。

我国高等教育中工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%~40%,其中自动化类的学生是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天,人才培养模式多样化已成为必然的趋势,其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养,发挥院校之间相互合作的优势,北京大学出版社组织了此套《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者,由此确定了教材的使用范围,也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点:

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养规格大多定位在高级应用型,对这一大类人才的培养要注重面向工程实践,培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发,本系列教材注重实用性,注意引用工程中的实例,培养学生的工程意识和工程应用能力,因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容,跟进时代,加入一些新的先进实用的知识,同时淘汰一些陈旧过时的内容。

(3) 院校间合作交流的成果。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北大出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会,来自各院校的教师比较充分地交流了情况,在相互借鉴、取长补短的基础上,形成了编写大纲,确定了编写原则。因此,这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和做法。

(4) 这一系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程,到目前为止,列入计划的已有 30 多门,教材门数多,参与的院校多,参加编写人员多。

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学之用，将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性，在审纲会上强调了“质量第一，明确责任，统筹兼顾，严格把关”的原则，要求各位主编加强协调，认真负责，努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责，密切合作，努力使自己的作品受到读者的认可和欢迎。尽管如此，由于院校之间、编者之间的差异性，教材中还是难免会出现一些问题和不足，欢迎选用本系列教材的教师、学生提出批评和建议。

张德江

2006年1月

# 前 言

自动控制原理是自动化学科的重要理论基础,是专门研究有关自动控制系统中基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,是高等学校自动化类专业的一门核心基础理论课程。学好自动控制理论对掌握自动化技术有着重要的作用。

本书是为适应自动化学科的发展,拓宽专业面、优化整体教学体系的教学改革形势,按照“理论讲透、重在应用”的原则,总结了作者多年的教学经验和课程教学改革的成果,参考了国内外控制理论及应用发展的方向,经反复讨论编写而成的。

全书共分 8 章及 2 个附录。主要内容分为 4 大部分:第 1 部分包括基本概念、线性系统的数学模型、时域响应分析、根轨迹分析、频域特性分析、控制系统设计与校正,这些内容属于线性定常连续控制系统问题,阐明自动控制的 3 个基本问题,即模型、分析和控制;第 2 部分阐述非线性系统的基本理论和分析方法,包括相平面法和描述函数法,目的是为学生进一步学习后续课程打下一定的基础;第 3 部分有意加强作为数字控制理论基础的采样控制系统的讨论,重点介绍采样系统的数学模型、稳定性分析与响应分析;第 4 部分包括在 MATLAB 与 Simulink 支持下对控制系统的计算机辅助分析与设计,设置于附录 A 及各章的最后一节中。

第 1 章介绍了自动控制的基本概念,将控制理论研究的对象和任务做了整体的介绍,引出了自动控制系统的常用术语,并给出了从系统到方框图的定性分析方法,简述了自动控制理论的发展历史。

第 2 章是控制系统数学描述方法,详述了数学模型作为理论研究的重要意义,系统地介绍了作为定量分析控制系统的两种数学模型和两种数学图形,突出强调参数模型的必要性及基本要素与其表达,并着重对传递函数分析和基于方框图、梅逊公式的数学模型的简化方法进行了详细讨论。

第 3 章介绍了线性系统的时域分析方法,并重点对系统的稳定性、快速性、准确性的分析方法进行了讨论。

第 4 章介绍了线性系统根轨迹分析方法,编入了根轨迹作图的基本内容,并引进了 MATLAB 方法绘制根轨迹。

第 5 章介绍了频率法,频率法是工程上重点应用的方法,对频率域作图、分析的原理进行了详细讨论,并给出了截止频率、相位裕量等频域指标的分析计算方法。

第 6 章介绍了线性系统的校正方法,重点介绍工程中常用的频率法校正,对反馈校正、复合校正的内容,也做了介绍,并给出了各种校正装置的设计方法和性能指标的验算方法。

第 7 章介绍了非线性系统的描述函数法和相平面法,讨论了工程实际中常见的非线性特性及解决的一般方法。

第 8 章介绍了离散控制系统理论,详细讨论了  $z$  变换理论对离散信号的分析基础,指出了应用线性理论分析系统性能的方法与连续系统的相似性。

本书是根据目前本科院校自动化专业“自动控制原理”的教学大纲而编写的,适用于自动化专业及其他电气信息类专业本科生使用。在编写过程中,作者充分注意到以下几点:

(1) 注重体系的基本结构, 强调控制理论的基本概念、基本原理和基本方法, 内容精练、重点突出、不以细节为主。

(2) 以学生为本, 加强能力培养, 遵循认识规律, 内容叙述力求深入浅出、层次分明; 注意理论的完整性与工程实用性相结合, 培养学生的工程意识。

(3) 引入了风靡世界的 MATLAB 软件实现控制系统的辅助分析和设计, 以培养学生现代化的分析与设计能力, 以适应 21 世纪教学现代化的发展要求。

(4) 为了便于不同层次的学生和读者自学, 各章都附有较丰富的、有难度层次的典型例题和习题, 并有部分习题要求应用 MATLAB 求解。

(5) 给出了本书主要专业术语的中英文对照, 以方便学生阅读相关的英文文献。

书中各部分内容占全书的比例: 经典控制理论的线性部分约为 90%, 非线性部分为 10%。按照参考学时 72 来设计: 理论课的学时为 64, 实验课的学时为 8。

为了在较少的学时内能使学生较系统地掌握控制理论中最基本的理论和分析设计方法, 并对一些新的理论和方法有初步了解, 本书在内容的组织上, 力求做到突出重点, 删去经典控制理论中一些不常用的内容, 增加 MATLAB 在控制系统分析和计算方面的应用等内容。在内容的叙述上, 侧重于基本概念和实际应用。为了加深学生对控制理论基本概念的理解和分析综合问题能力的提高, 除第 1 章外, 在其余各章均附有一定数量的综合性例题分析。

本书由江南大学潘丰(第 2 章、附录 A 和附录 B)、山东科技大学张开如(第 5 章)任主编, 长春工业大学白文峰(第 4 章)、吉林工程技术师范学院雷霞(第 6 章)任副主编。参加编写的人员有: 中北大学分校申欲晓(第 3 章)、东北电力大学雷宇凌(第 8 章)、西南大学彭生祥(第 1 章和第 7 章)。

在此对在本书编写过程中给予过帮助的单位 and 同志表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限, 加之时间仓促, 书中错误和不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。

编 者  
2006 年 6 月

## 《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

### 联合编写学校名单 (按拼音顺序排名)

- |               |             |
|---------------|-------------|
| 1 安徽建筑工业学院    | 30 南昌工程学院   |
| 2 安徽科技学院      | 31 平顶山工学院   |
| 3 北华大学        | 32 平顶山学院    |
| 4 北京工商大学      | 33 青岛科技大学   |
| 5 北京建筑工程学院    | 34 山东建筑工程学院 |
| 6 长春大学        | 35 山东科技大学   |
| 7 长春工程学院      | 36 陕西科技大学   |
| 8 长春工业大学      | 37 陕西理工学院   |
| 9 长春理工大学      | 38 沈阳大学     |
| 10 成都理工大学     | 39 沈阳工程学院   |
| 11 东北电力学院     | 40 沈阳工业大学   |
| 12 福州大学       | 41 沈阳化工学院   |
| 13 广东工业大学     | 42 四川理工学院   |
| 14 桂林工学院      | 43 太原科技大学   |
| 15 合肥工业大学     | 44 潍坊学院     |
| 16 河南工业大学     | 45 武汉大学     |
| 17 河南科技学院     | 46 武汉理工大学   |
| 18 河南农业大学     | 47 西安工程科技学院 |
| 19 华东交通大学     | 48 西安建筑科技大学 |
| 20 黄石理工学院     | 49 西安科技大学   |
| 21 吉林工程技术师范学院 | 50 西安理工大学   |
| 22 吉林化工学院     | 51 西安石油大学   |
| 23 吉林建筑工程学院   | 52 西安外事学院   |
| 24 江南大学       | 53 西安邮电学院   |
| 25 焦作大学       | 54 西南大学     |
| 26 兰州理工大学     | 55 西南科技大学   |
| 27 聊城大学       | 56 浙江大学     |
| 28 辽宁大学       | 57 中北大学     |
| 29 内蒙古大学      | 58 中北大学分校   |

# 目 录

|                        |    |                          |    |
|------------------------|----|--------------------------|----|
| 第 1 章 引论.....          | 1  | 2.3 线性系统的复域数学模型          |    |
| 1.1 自动控制系统的一般概念.....   | 1  | ——传递函数.....              | 19 |
| 1.2 开环控制和闭环控制.....     | 4  | 2.3.1 传递函数的定义.....       | 19 |
| 1.2.1 开环控制.....        | 4  | 2.3.2 传递函数的性质.....       | 20 |
| 1.2.2 闭环控制.....        | 4  | 2.3.3 传递函数的零点和极点.....    | 20 |
| 1.2.3 闭环控制系统的基本组成..... | 6  | 2.3.4 典型环节的传递函数.....     | 21 |
| 1.3 自动控制系统的类型.....     | 6  | 2.4 结构图.....             | 23 |
| 1.3.1 按信号流向划分.....     | 6  | 2.4.1 结构图的组成和绘制.....     | 23 |
| 1.3.2 按输入信号变化规律划分..... | 7  | 2.4.2 结构图的等效变换和简化.....   | 24 |
| 1.3.3 线性系统和非线性系统.....  | 7  | 2.5 信号流图和梅逊增益公式的应用.....  | 27 |
| 1.3.4 定常系统和时变系统.....   | 8  | 2.5.1 信号流图的术语和性质.....    | 28 |
| 1.3.5 连续系统和离散系统.....   | 8  | 2.5.2 信号流图的绘制.....       | 28 |
| 1.3.6 单输入单输出系统与        |    | 2.5.3 信号流图的简化.....       | 30 |
| 多输入多输出系统.....          | 9  | 2.5.4 信号流图的梅逊增益公式.....   | 31 |
| 1.4 控制系统性能的基本要求和       |    | 2.6 MATLAB 中数学模型的表示..... | 33 |
| 本课程的主要任务.....          | 9  | 2.6.1 传递函数.....          | 33 |
| 1.4.1 控制系统性能的基本要求..... | 9  | 2.6.2 控制系统的结构图模型.....    | 33 |
| 1.4.2 本课程的主要任务.....    | 10 | 2.6.3 控制系统的零极点模型.....    | 33 |
| 1.5 自动控制系统实例.....      | 11 | 本章小结.....                | 34 |
| 1.5.1 烘烤炉温度控制系统.....   | 11 | 习题.....                  | 34 |
| 1.5.2 传动控制系统.....      | 12 |                          |    |
| 本章小结.....              | 13 | 第 3 章 控制系统的时域分析.....     | 38 |
| 习题.....                | 13 | 3.1 控制系统的时域响应及其性能        |    |
|                        |    | 指标.....                  | 38 |
| 第 2 章 线性系统的数学模型.....   | 15 | 3.1.1 时域响应.....          | 38 |
| 2.1 线性系统的时域数学模型        |    | 3.1.2 稳态性能指标.....        | 39 |
| ——微分方程.....            | 15 | 3.1.3 动态性能指标.....        | 39 |
| 2.1.1 列写系统微分方程的        |    | 3.2 典型输入信号.....          | 40 |
| 一般方法.....              | 15 | 3.2.1 阶跃函数.....          | 41 |
| 2.1.2 线性系统的特点.....     | 16 | 3.2.2 斜坡函数.....          | 41 |
| 2.1.3 线性定常微分方程求解.....  | 16 | 3.2.3 抛物线函数.....         | 41 |
| 2.1.4 运动的模态.....       | 17 | 3.2.4 脉冲函数.....          | 42 |
| 2.2 非线性数学模型的线性化.....   | 18 | 3.2.5 正弦函数.....          | 42 |

|                                            |    |                                      |     |
|--------------------------------------------|----|--------------------------------------|-----|
| 3.3 一阶系统的时域响应 .....                        | 43 | 3.8.3 用 MATLAB 求系统的<br>斜坡响应 .....    | 88  |
| 3.3.1 一阶系统数学模型 .....                       | 43 | 3.8.4 任意函数作用下系统<br>的响应 .....         | 89  |
| 3.3.2 一阶系统的单位阶跃响应 .....                    | 44 | 3.8.5 Simulink 中的时域<br>响应举例 .....    | 92  |
| 3.3.3 一阶系统的单位脉冲响应 .....                    | 46 | 本章小结 .....                           | 95  |
| 3.3.4 一阶系统的单位斜坡响应 .....                    | 47 | 习题 .....                             | 96  |
| 3.4 二阶系统的时域响应 .....                        | 48 | <b>第 4 章 根轨迹法</b> .....              | 100 |
| 3.4.1 二阶系统的数学模型 .....                      | 48 | 4.1 根轨迹的基本概念 .....                   | 100 |
| 3.4.2 二阶系统的单位阶跃响应 .....                    | 49 | 4.1.1 根轨迹概念 .....                    | 100 |
| 3.4.3 二阶系统的阶跃响应的<br>性能指标 .....             | 53 | 4.1.2 根轨迹方程 .....                    | 101 |
| 3.4.4 二阶系统的动态校正 .....                      | 56 | 4.2 根轨迹绘制的基本法则 .....                 | 102 |
| 3.5 高阶系统的时域响应 .....                        | 60 | 4.2.1 绘制根轨迹的基本法则 .....               | 103 |
| 3.5.1 高阶系统的时域响应 .....                      | 60 | 4.2.2 根轨迹绘制举例 .....                  | 109 |
| 3.5.2 闭环主导极点 .....                         | 61 | 4.3 广义根轨迹 .....                      | 114 |
| 3.5.3 零极点对阶跃响应的影响 .....                    | 63 | 4.3.1 参数根轨迹 .....                    | 114 |
| 3.6 线性定常系统的稳定性 .....                       | 65 | 4.3.2 零度根轨迹 .....                    | 115 |
| 3.6.1 稳定性的概念 .....                         | 65 | 4.4 控制系统的根轨迹法分析 .....                | 118 |
| 3.6.2 线性定常系统稳定的充分<br>必要条件 .....            | 66 | 4.4.1 控制系统的稳定性分析 .....               | 118 |
| 3.6.3 劳斯稳定判据 .....                         | 67 | 4.4.2 控制系统的暂态性能分析 .....              | 119 |
| 3.6.4 赫尔维茨判据 .....                         | 72 | 4.4.3 系统的稳态性能分析 .....                | 121 |
| 3.6.5 控制系统参数对稳定性<br>的影响 .....              | 73 | 4.4.4 利用 MATLAB 绘制系统<br>的根轨迹 .....   | 122 |
| 3.6.6 相对稳定性和稳定裕量 .....                     | 75 | 本章小结 .....                           | 122 |
| 3.7 控制系统的稳态误差 .....                        | 76 | 习题 .....                             | 123 |
| 3.7.1 误差及稳态误差 .....                        | 76 | <b>第 5 章 控制系统的频域分析法</b> .....        | 126 |
| 3.7.2 系统类型 .....                           | 77 | 5.1 频率特性 .....                       | 127 |
| 3.7.3 应用静态误差系数计算给<br>定信号作用下的稳态误差 .....     | 78 | 5.1.1 频率特性的基本概念 .....                | 127 |
| 3.7.4 扰动信号作用下的稳态误差<br>与系统结构的关系 .....       | 82 | 5.1.2 频率特性的求取 .....                  | 131 |
| 3.7.5 提高系统稳态精度的方法 .....                    | 85 | 5.1.3 频率特性的几何表示法 .....               | 132 |
| 3.8 用 MATLAB 和 Simulink 进行<br>瞬态响应分析 ..... | 85 | 5.1.4 开环系统的典型环节分解 .....              | 133 |
| 3.8.1 用 MATLAB 求系统的<br>脉冲响应 .....          | 85 | 5.2 控制系统的对数频率特性图 .....               | 134 |
| 3.8.2 用 MATLAB 求系统的<br>阶跃响应 .....          | 86 | 5.2.1 典型环节的 Bode 图 .....             | 134 |
|                                            |    | 5.2.2 开环系统的对数频率<br>特性图(Bode 图) ..... | 141 |

|                                   |            |                                              |            |
|-----------------------------------|------------|----------------------------------------------|------------|
| 5.2.3 最小相位和非最小<br>相位系统.....       | 144        | 6.2 线性系统的基本控制规律 .....                        | 196        |
| 5.3 控制系统的极坐标图 .....               | 146        | 6.2.1 比例(P)控制作用.....                         | 196        |
| 5.3.1 典型环节的极坐标图.....              | 146        | 6.2.2 比例微分(PD)控制作用.....                      | 197        |
| 5.3.2 开环系统的极坐标图.....              | 151        | 6.2.3 积分(I)控制作用 .....                        | 198        |
| 5.4 奈奎斯特稳定判据 .....                | 154        | 6.2.4 比例积分微分(PID)<br>控制作用 .....              | 199        |
| 5.4.1 幅角原理.....                   | 155        | 6.3 校正装置及其特性 .....                           | 200        |
| 5.4.2 奈奎斯特稳定判据.....               | 157        | 6.3.1 超前校正装置 .....                           | 201        |
| 5.5 控制系统的相对稳定性 .....              | 162        | 6.3.2 滞后校正装置 .....                           | 203        |
| 5.5.1 增益裕量.....                   | 163        | 6.3.3 滞后-超前校正装置 .....                        | 206        |
| 5.5.2 相角裕度.....                   | 163        | 6.4 频率法进行串联校正 .....                          | 207        |
| 5.5.3 相对稳定性与对数幅频<br>特性中频段关系.....  | 164        | 6.4.1 频率法的串联超前校正 .....                       | 208        |
| 5.6 闭环系统的频率特性 .....               | 166        | 6.4.2 频率法的串联滞后校正 .....                       | 211        |
| 5.6.1 闭环频率特性.....                 | 166        | 6.4.3 频率法的串联滞后-超前<br>校正 .....                | 213        |
| 5.6.2 等 $M$ 圆 .....               | 167        | 6.4.4 按期望特性对系统进行<br>串联校正 .....               | 216        |
| 5.6.3 等 $N$ 圆 .....               | 168        | 6.5 反馈校正 .....                               | 220        |
| 5.6.4 等 $M$ 圆和等 $N$ 圆的应用.....     | 169        | 6.5.1 反馈校正的原理与特点 .....                       | 220        |
| 5.6.5 尼柯尔斯图.....                  | 169        | 6.5.2 综合法反馈校正 .....                          | 223        |
| 5.7 用频率特性分析系统品质 .....             | 171        | 6.6 复合校正 .....                               | 226        |
| 5.7.1 闭环频域指标与时域<br>指标的关系.....     | 171        | 6.6.1 复合校正的基本概念 .....                        | 226        |
| 5.7.2 开环频率特性与时域响应<br>的关系.....     | 176        | 6.6.2 按扰动补偿的复合校正 .....                       | 226        |
| 5.7.3 开环频域指标和闭环频域<br>指标的关系.....   | 178        | 6.6.3 按输入补偿的复合校正 .....                       | 228        |
| 5.8 传递函数的实验确定 .....               | 179        | 6.7 基于 MATLAB 和 Simulink 的<br>线性控制系统校正 ..... | 229        |
| 5.9 MATLAB 频域特性分析.....            | 181        | 6.7.1 相位超前校正 .....                           | 229        |
| 5.9.1 用 MATLAB 绘制对数<br>频率特性图..... | 182        | 6.7.2 相位滞后校正 .....                           | 231        |
| 5.9.2 用 MATLAB 绘制<br>极坐标图.....    | 183        | 6.7.3 Simulink 下的系统校正.....                   | 234        |
| 本章小结 .....                        | 184        | 本章小结 .....                                   | 236        |
| 习题 .....                          | 185        | 习题 .....                                     | 237        |
| <b>第 6 章 控制系统的校正</b> .....        | <b>191</b> | <b>第 7 章 非线性控制系统分析</b> .....                 | <b>240</b> |
| 6.1 概述 .....                      | 191        | 7.1 非线性系统概述 .....                            | 240        |
| 6.1.1 系统的性能指标.....                | 191        | 7.1.1 常见非线性特性 .....                          | 241        |
| 6.1.2 系统的校正方法.....                | 194        | 7.1.2 非线性系统的特点 .....                         | 245        |
|                                   |            | 7.1.3 非线性系统的分析与<br>设计方法 .....                | 247        |
|                                   |            | 7.2 相平面法 .....                               | 247        |

|                                   |            |                                        |            |
|-----------------------------------|------------|----------------------------------------|------------|
| 7.2.1 相平面的基本概念.....               | 248        | 8.3.2 $z$ 变换性质.....                    | 294        |
| 7.2.2 相轨迹的绘制.....                 | 249        | 8.3.3 $z$ 反变换.....                     | 297        |
| 7.3 二阶系统的相轨迹.....                 | 252        | 8.4 离散系统的数学模型.....                     | 299        |
| 7.3.1 二阶线性系统的相轨迹.....             | 252        | 8.4.1 线性常系数差分方程.....                   | 299        |
| 7.3.2 奇点.....                     | 252        | 8.4.2 差分方程求解.....                      | 299        |
| 7.3.3 奇线.....                     | 254        | 8.4.3 脉冲传递函数.....                      | 301        |
| 7.3.4 非线性系统的相平面分析.....            | 255        | 8.4.4 开环系统脉冲传递函数.....                  | 303        |
| 7.4 描述函数法.....                    | 261        | 8.4.5 闭环系统脉冲传递函数.....                  | 305        |
| 7.4.1 描述函数定义.....                 | 261        | 8.5 离散系统的性能分析.....                     | 307        |
| 7.4.2 描述函数的计算.....                | 263        | 8.5.1 离散系统的稳定性分析.....                  | 308        |
| 7.4.3 非线性系统的描述<br>函数分析.....       | 269        | 8.5.2 离散系统的稳定性判据.....                  | 308        |
| 7.5 基于 Simulink 的非线性系统<br>分析..... | 273        | 8.5.3 采样周期与开环增益对<br>稳定性的影响.....        | 310        |
| 本章小结.....                         | 276        | 8.5.4 离散系统的稳态误差.....                   | 311        |
| 习题.....                           | 277        | 8.5.5 闭环极点与瞬态响应<br>的关系.....            | 313        |
| <b>第 8 章 线性离散系统分析</b> .....       | <b>281</b> | 8.6 MATLAB 在采样系统中的应用.....              | 316        |
| 8.1 离散系统概述.....                   | 281        | 8.6.1 连续系统的离散化.....                    | 316        |
| 8.1.1 采样控制系统.....                 | 281        | 8.6.2 求离散系统响应.....                     | 317        |
| 8.1.2 数字控制系统.....                 | 283        | 本章小结.....                              | 318        |
| 8.1.3 离散控制系统的特点.....              | 283        | 习题.....                                | 318        |
| 8.2 信号的采样与复现.....                 | 283        | <b>附录 A MATLAB 和 Simulink 简介</b> ..... | <b>322</b> |
| 8.2.1 采样过程.....                   | 284        | <b>附录 B 控制理论术语中英文对照表</b> .....         | <b>325</b> |
| 8.2.2 采样定理.....                   | 285        | <b>参考文献</b> .....                      | <b>337</b> |
| 8.2.3 零阶保持器.....                  | 287        |                                        |            |
| 8.3 $z$ 变换.....                   | 289        |                                        |            |
| 8.3.1 $z$ 变换定义.....               | 289        |                                        |            |

# 第 1 章 引 论

本章描述自动控制的基本概念、任务、控制方式及控制过程的简单分析,建立对本学科的一个较为明确的认识。

对自动控制的理解可以从物理规律及数学本质两方面进行。物理规律考察控制过程中各物理量(信号)的运动变化过程及各项性能指标;数学本质则将控制过程归结为对信号(给定与反馈等)的一种变换,从而使控制过程能够满足相应的要求。

## 1.1 自动控制系统的一般概念

所谓自动控制,就是指在没有人直接参与的情况下,利用控制器使被控对象(如机器、设备和生产过程)的某些物理量(或工作状态)能自动地按照预定的规律变化(或运行)。完成这一过程的所有元件与装置组成的整体就称为自动控制系统。

例如人造卫星按指定的轨道运行,并始终保持正确的姿态,使他的太阳能电池一直朝向太阳,无线电天线一直指向地球……,电网的电压和频率自动地维持不变;金属切削机床的速度在电网电压或负载发生变化时,能自动保持近似地不变。以上这些,都是自动控制的结果。

现代数字计算机的迅速发展,为自动控制技术的应用开辟了广阔的前景。使它不仅大量应用于空间技术、科技、工业、交通管理、环境卫生等领域,而且它的概念和分析问题的方法也向其他领域渗透。例如政治、经济、教学等领域中的各种体系;人体的各种功能;自然界中的各种生物学系统,都可视为是一种控制系统。自动控制系统的广泛应用不仅能使生产设备或过程实现自动化,极大地提高了劳动生产率和产品的质量,改善了劳动条件。

自动控制是一门理论性很强的科学技术,一般泛称为“自动控制技术”。把实现自动控制所需的各个部件按一定的规律组合起来,去控制被控对象,这个组合体叫做“控制系统”。分析与综合控制系统的理论称之为“控制理论”。

自动控制系统的种类较多,被控制的物理量有各种各样,如温度、压力、流量、电压、转速、位移和力等。组成这些控制系统的元、部件虽然有较大的差异,但是系统的基本结构却相类同,且一般都是通过机械、电气、液压等方法代替人工控制。为了了解自动控制系统的结构,首先来分析一下图 1.1 所示的直流电动机转速开环控制系统(V-M 系统)。人若参与该系统的控制,应起哪些作用?

显然,本例中的被控对象即为电动机 M, GT 和 V 分别为触发器和晶闸管整流装置。而预定的规律即为“电动机的转速  $n$  维持预期值不变”。转速  $n$  的预期值与电位器 RP1 上的给定值有着对应关系。把电位器上的电压信号称为输入量或给定量,电动机的转速  $n$  称为输出量或被控量。输入量对应期望的输出量(比如 10V 对应 1000 r/min),自动控制的过程就是力图使实际的输出量与期望的输出量相等。

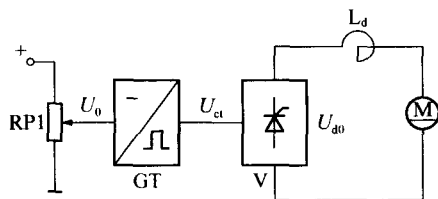


图 1.1 自动控制系统示例

在实际工作中，总有各种各样的因素会影响到控制过程。在图 1.1 所示的系统中，负载的变化、电网电压的波动等都会引起电机转速的变化。把这些妨碍控制过程顺利进行的因素称为扰动。一个好的控制系统，应将扰动所引起的输出量的变化限制在尽可能小的范围内。图 1.2 是用方块图形式表示的转速开环控制系统。从方块图中可以看出，输出量与输入量之间没有直接的联系。因而，对扰动所引起的输出的变化，系统没有调节或控制作用。

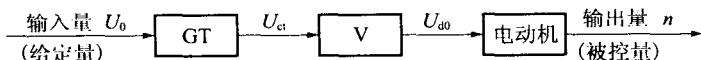


图 1.2 开环系统方块图

考察一下在人的协助下如何克服扰动的影响，实现按预定的规律(维持转速  $n$  恒定)运行。为了比较转速的实际值与预期值是否相等，要对转速进行测量。假设在电机上有一个转速表，当人眼观察到转速的实际值时，会将其与头脑中的预期值进行比较。若二者不相等，则调节电位器 RP1 触头的位置，改变整流装置的输出电压  $U_{d0}$ ，从而调节电动机的转速  $n$ 。若转速  $n$  比预期值小，则向上调节电位器触头，增大整流装置输出电压  $U_{d0}$ ，则  $n$  也会相应的增大。反之，若  $n$  比预期值大，则反方向调节。这一过程可以用图 1.3 所示的方块图来展示。

比较图 1.2 与图 1.3，可以发现，在后者中存在着比较环节。由于这一环节的存在，一旦输出发生变化，会反过来影响到系统的输入端，产生相应的调节(控制)作用。但是，这一控制作用是通过人来实现的。它不是一个自动控制系统。在图 1.3 中，将人所完成的工作由机器来代替，就可以使之成为一个自动控制系统。

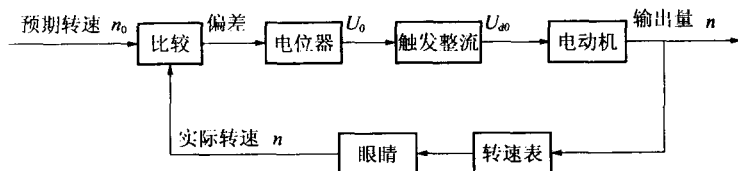


图 1.3 有人参与调节时的方块图

首先，要对输出量进行测量。然后将测量信号与输入量进行比较。这两个量应该具有同一量纲。由于转速之间不容易直接比较大小，因此，将输入与输出(即预期值与实际值)转换成相应的电压信号。测量的过程可以用测速发电机 TG 来完成，比较的过程可以用集成运算放大器方便地实现。最后，根据偏差的极性来移动电位器触头的位置。这一过程可以用小电机 M1 及减速机构来实现。由此，可以得到如图 1.4 所示的自动控制系统。

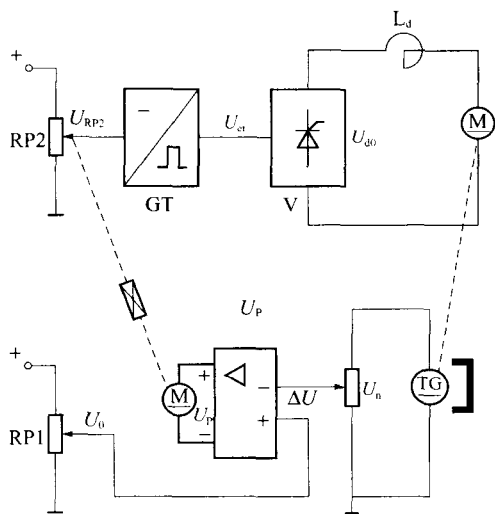


图 1.4 闭环控制的电机调速系统

为便于分析，给出系统的方块图如图 1.5 所示。图中，用符号“○”或“⊗”表示比较环节。“+”与“-”表示在比较时的各个量之间的代数运算关系。“+”号表示信号相加，“-”号表示信号相减，“+”号可以不画。请注意此图与图 1.3 之间的区别。现在来分析一下当扰动引起转速变换时系统的控制过程。

假设由于负载的变化，引起了转速  $n$  下降，偏离了预期值，调节过程如下。

$$n \downarrow \Rightarrow U_n \downarrow \Rightarrow \Delta U \uparrow \Rightarrow U_p \uparrow \Rightarrow U_{RP2} \uparrow \Rightarrow U_{d0} \uparrow \Rightarrow n \uparrow$$

此时，偏差信号  $\Delta U > 0$ 。在调节过程中， $\Delta U$  的值在不断减小，直至  $n$  与预期值相等。同样，如果转速  $n$  上升，超过了预期值，有类似的调节过程：

$$n \uparrow \Rightarrow U_n \uparrow \Rightarrow \Delta U \downarrow \Rightarrow U_p \downarrow \Rightarrow U_{RP2} \downarrow \Rightarrow U_{d0} \downarrow \Rightarrow n \downarrow$$

此时，偏差信号  $\Delta U < 0$ ，电动机处于制动状态。在调节过程中，偏差的绝对值在不断减小，直至  $n$  与预期值相等。

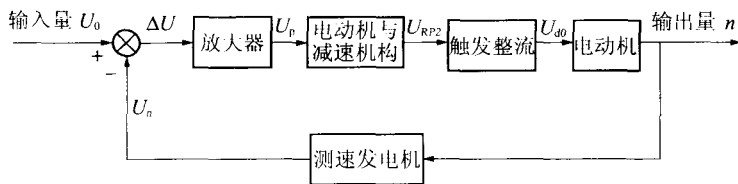


图 1.5 闭环控制的电机调速系统方块图

由以上分析可以看出，系统对转速  $n$  的变化之所以具有调节作用，是由于有比较环节的存在。也就是说，输出的变化会反过来影响系统的输入端，从而产生一个偏差信号。在偏差信号的控制作用下，输出会朝着反方向变化，即朝着减小偏差的方向运动。将输出送回输入端并与输入相比较的过程称为反馈。相应的系统称为反馈控制系统。

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的控制方式。反馈控制原理的实质就是利用偏差去控制偏差。从信号的流向来看，反馈控制系统形成了一个闭环，

因此, 反馈控制也称为闭环控制。

自动控制理论是理论性较强的工程技术科学。它的发展与计算机及数学的发展联系非常紧密。数学的发展为控制理论提供了理论上的可行性, 而计算机的发展为控制系统的具体实现提供了强有力的支持。通常将控制理论划分为两大部分, 即经典控制理论与现代控制理论。经典控制理论又称为古典控制理论, 是在二次世界大战前后, 为适应军事及工业控制的需要逐步发展起来的完整的理论体系。它是以传递函数为基础, 研究单输入-单输出、线性定常系统的分析和设计问题。20 世纪 60 年代, 为适应航空航天技术的发展, 自动控制理论迎来了新的发展阶段——现代控制理论。它以状态空间法为基础, 主要研究变参数、非线性、高精度的多输入多输出系统的最优控制问题。目前, 控制理论正朝着以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论方向发展。现代控制理论的发展并不意味着经典控制理论已经过时了。不同的理论有着不同的适用范围。同时, 随着数学与计算机的发展, 经典控制理论在其本身范畴内的研究也在不断的深入。

本书将只讨论经典控制理论。研究的系统主要是反馈控制系统。

## 1.2 开环控制和闭环控制

自动控制的基本方式有 3 种: 开环控制、闭环控制及将二者结合的复合控制。每种控制方式都有各自的特点及不同的适用场合。本节将只讨论开环控制与闭环控制, 关于复合控制将在第 6 章详细讨论。

### 1.2.1 开环控制

在这种控制方式中, 信号由输入端到输出端的传递是单向的, 没有形成一个闭环, 故称为开环控制。按这种控制方式组成的系统称为开环控制系统。这类系统的特点是系统的输出量不会对输入量产生任何影响。开环控制系统可以按给定值控制方式组成, 也可以是按扰动控制方式组成。

图 1.6 为按给定值控制的开环控制系统的方块图。这种控制比较简单。控制作用直接由系统的输入量产生。系统对于可能的干扰及工作过程中特性参数的变化都没有自动补偿的作用, 因而控制的精度完全取决于元件及校准的精度。由于其结构简单, 调整方便, 在精度要求不高或扰动影响较小的场合还是适用的。一些自动化的流水线、数控车床、自动售货机等多为这类开环控制系统。

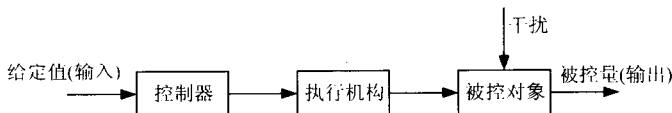


图 1.6 按给定值控制的系统方块图

### 1.2.2 闭环控制

考察图 1.5 所示的反馈控制系统可以发现, 引入反馈以后, 得到了偏差信号  $\Delta U$ , 然后由  $\Delta U$  的控制作用使系统朝着减小偏差的方向运动。具体的说, 由于  $\Delta U$  的存在, 从而驱动