

国外电子信息科学经典教材系列

现代控制工程

(第四版)

Modern Control Engineering
(Fourth Edition)

[美] Katsuhiko Ogata 著
卢伯英 于海勋 等译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[http:// www.phei.com.cn](http://www.phei.com.cn)

国外电子信息科学经典教材系列

现代控制工程 (第四版)

Modern Control Engineering
(Fourth Edition)

[美] Katsuhiko Ogata 著

卢伯英 于海勋 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

这是一本为工科高年级学生写的教科书,可以作为控制系统领域的首门课程的教材。本书详尽地论述了连续控制系统的分析和研究方法,包括常用时间函数的拉普拉斯变换和基本的拉普拉斯变换定理,动态系统的数学模型,一阶和二阶系统的瞬态响应分析,工业自动控制器(如气动、液压、电子控制器)的基本控制作用,根轨迹分析,控制系统的频率响应分析,基本的和变形的PID控制,应用频率响应法进行设计和补偿的技术,控制系统的状态空间分析及可控性和可观测性,控制系统的状态空间分析法。书中所有计算方面的问题,都采用MATLAB求解。

本书适合于工科高年级本科生、研究生、工程技术人员及计算机开发人员阅读。

Simplified Chinese edition copyright © 2003 by PEARSON EDUCATION NORTH ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Modern Control Engineering, Fourth Edition, ISBN: 0-13-060907-2 by Katsuhiko Ogata, Copyright © 2002. All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和 Pearson Education 培生教育出版北亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education 培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号:图字:01-2002-1399

图书在版编目(CIP)数据

现代控制工程:第4版/(美)尾形克彦(K. Ogata)著;卢伯英,于海勋等译.—北京:电子工业出版社,2003.7
(国外电子信息科学经典教材系列)

书名原文:Modern Control Engineering

ISBN 7-5053-8847-9

I. 现… II. ①尾… ②卢… ③于… III. 自动控制理论—教材 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第050359号

责任编辑:沈艳波

印刷者:北京东光印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:56.75 字数:1452千字

版 次:2003年7月第4版 2003年7月第1次印刷

印 数:5000册 定价:79.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

译者的话

《现代控制工程》是美国明尼苏达大学 K. Ogata 教授撰写的一部控制系统国际通用教材。它可以作为大学高年级学生或研究生的首门控制系统课程的教材。该书第一版曾于 1976 年在我国由译者翻译出版。该书是首次将现代控制理论与经典控制理论融为一体的教材,内容新颖、丰富,物理概念阐述得比较清楚,并配有大量的例题和习题,很适合于学生阅读。该书第二版在原书基础上增加了极点配置、状态观测器和控制系统的计算机仿真等内容。译者受中国台湾儒林图书有限公司约请,翻译了该书第二版,并于 1993 年在中国台湾以繁体字形式出版发行。本书第三版在保持原书特点的基础上,进行了大量修改,并且融入了 MATLAB 应用。目前,国际上许多新版科技书籍(特别是高等学校教材),都把 MATLAB 作为一种基本工具,用于分析、计算、设计和仿真研究,具有很好的效果。本书第三版中译本已于 2000 年在国内由电子工业出版社出版发行。

本书第四版(英文)已于 2002 年问世,译者能够再次受电子工业出版社之约,将该书译成中文而感到荣幸。与该书第三版比较,第四版有如下特点:第一,对全书内容进行了合理调整,删减了诸如李亚普诺夫稳定性分析和 MATLAB 应用的基础知识等有关内容;第二,增加了有关二自由度控制系统方面的内容,实现了高性能控制系统的设计;第三,增加了许多新的例题,扩展了 MATLAB 方法在控制系统分析和设计中的应用。全书共给出经过详解的例子和例题 310 道,其中许多例题具有重要的工程应用背景,还有不少例题是书中重要定理和公式的证明。书中还提供了 140 个有用的 MATLAB 应用程序供读者参考。

《现代控制工程》在国际上是一部有影响的教科书。该书早已被译成了中、法、俄、日、西班牙等国文字出版发行。

译者在翻译过程中保留了原书的部分书写规则,并且对书中的重要定理和公式进行了推导和验证,修正了发现的错误和疏漏之处。

本书第 1 章至第 10 章由北京航空航天大学卢伯英教授翻译,第 11 章和第 12 章由西北工业大学于海勋教授翻译,卢伯英教授对全书进行了统一审校。

本书在翻译过程中得到了佟明安、肖顺达、黄俊钦、张英娟、李雅萍等教授的支持和帮助,译者在此向他们表示衷心感谢。

由于译者水平有限,难免有错误与不当之处,敬请读者批评指正。

序 言

这是一本为工科(机械、电子、航天、化学等)高年级学生所写的教科书,可以作为控制系统学习的入门教材。本书详尽论述了控制系统的分析与设计。读者应具备有关微分方程、向量矩阵分析、电路分析和机械学等课程的基础知识。

本书第四版所作的主要改动有:高性能的二自由度控制系统设计,这种系统可使稳态误差在阶跃、斜坡和加速输入时为零;利用计算方法(MATLAB)来确定控制器的极点位置,从而获得预期的瞬态响应特性,如将阶跃响应中的最大过调量和设置时间限制在特定的范围内。这两部分内容主要在第10章中介绍。第5章(瞬态响应分析)和第12章(极点配置和观测器设计)添加了MATLAB应用的内容。这些章节中新增的许多新的解决方案,有助于加深读者对控制系统分析与设计中所采用的MATLAB方法的理解。全书的计算问题均采用MATLAB求解。

本书共12章,其内容概括如下:第1章介绍控制系统的基础知识。第2章阐述常用时间函数的拉普拉斯变换和基本的拉普拉斯变换定理(如果读者已经具备了拉普拉斯变换方面的知识,可以跳过本章)。第3章研究动态系统(大多为机械的,电气的和电子系统)的数学模型,并推导出它们的传递函数模型和状态空间模型。本章还介绍了信号流程图以及非线性数学模型的线性化技术。

第4章介绍流体系统(如液体系统、气动系统和水力系统)和热力系统的数学建模。第5章研究具有阶跃、斜坡和脉冲输入的动态系统瞬态响应分析,其中大量使用了MATLAB。本章还介绍了用于高阶系统稳定性分析的劳斯稳定判据以及单位反馈控制系统中的稳态误差分析。

第6章研究控制系统的根轨迹分析并详细讨论了使用MATLAB作根轨迹图的方法。本章还对正反馈系统、条件稳定系统和传递延迟系统进行了根轨迹分析。第7章介绍采用根轨迹法的超前、滞后和超前-滞后校正装置的设计,并讨论了串联和并联校正技术。

第8章介绍频率响应的基本知识,讨论了伯德图、极坐标图、奈奎斯特稳定判据和闭环频率响应,包括用MATLAB获取频率响应曲线。第9章研究采用频率响应法的设计和校正技术,特别详细地介绍了采用伯德图方法的超前、滞后以及超前-滞后校正装置的设计。

第10章首先阐述了基本的和变形的PID控制,然后介绍了对控制器的参数值进行优化选取,从而满足阶跃响应特性要求的MATLAB方法。另外,本章还介绍了二自由度控制系统。总结了伴随阶跃、斜坡和加速输入而没有稳态误差的高性能控制系统的设计,此设计采用了零点配置方法。

第11章介绍控制系统的状态空间基本分析,提出了可控性和可观测性的概念。本章还讨论了采用MATLAB的系统模型的转换(从传递函数模型到状态空间模型及其反变换)。第12章首先介绍了极点配置技术以及状态观测器的设计,全阶和最小阶状态观测器均被涉及。其次,详细讨论了第1类伺服系统设计。本章还包括了带有观测器的调速器系统和控制系统设计。最后讨论了二次最优调速器系统。

本书强调基本概念,在知识的介绍过程中力求避免高深的数学论证。本书也提供了一些数学证明以加深读者对有关内容的理解。书中的材料都是按照控制理论的逐步发展过程来组织编排的。

书中的例题经过精心安排,使读者可以很好地理解书中讨论的相关内容。除第1章外,每章后面都提供了带有解答的习题(A类题),它们是本书的有机组成部分。建议读者认真地学习所有习题,从而获得对所讨论课题的深入理解。此外,书中还提供了许多不同难度的待解习题(B类题),它们可以作为家庭作业或者测验题。

本书介绍的大部分内容都在明尼苏达大学的本科高年级或研究生一年级的控制系统课上进行过教学实践。

如果本书作为季度课程教材(共40课时),可以讲授前10章(除第4章外)的大部分内容。(作为控制系统的入门教材,前9章涵盖了控制系统的全部基本内容。很多学生喜欢学习第10章中介绍的MATLAB,因此,建议教师高度重视本章内容的讲授。)如果本书作为学期课程教材(共56课时),书中的大部分内容都可以讲授,只需根据情况取舍部分内容。由于书中包括大量例题(A类型),因而读者也可以把本书作为学习控制理论基础知识的自学教材。

我衷心感谢罗彻斯特工学院的 Athimoottil V. Mathew 教授,密西西比大学的 Richard Gordon 教授,乔治马森大学的 Guy Beale 教授和得克萨斯 A&M 大学的 Donald T. Ward 教授,他们在本书修订过程中提出了宝贵建议。此外,许多无名的评阅者也提出了许多建设性意见,我以前的学生解答了本书中大量的 A 类题和 B 类题,在此一并表示感谢。

Katsuhiko Ogata

目 录

第1章 控制系统简介	(1)
1.1 引言	(1)
1.1.1 历史的回顾	(1)
1.1.2 定义	(2)
1.2 控制系统举例	(2)
1.2.1 速度控制系统	(3)
1.2.2 温度控制系统	(3)
1.2.3 业务系统	(4)
1.3 闭环控制和开环控制	(5)
1.3.1 反馈控制系统	(5)
1.3.2 闭环控制系统	(6)
1.3.3 开环控制系统	(6)
1.3.4 闭环与开环控制系统的比较	(6)
1.4 本书概貌	(7)
第2章 拉普拉斯变换*	(8)
2.1 引言	(8)
2.2 复变量和复变函数	(8)
2.2.1 复变量	(8)
2.2.2 复变函数	(8)
2.2.3 尤拉定理	(10)
2.3 拉普拉斯变换	(11)
2.3.1 拉普拉斯变换的存在	(11)
2.3.2 指数函数	(12)
2.3.3 阶跃函数	(13)
2.3.4 斜坡函数	(13)
2.3.5 正弦函数	(14)
2.3.6 说明	(14)
2.3.7 平移函数	(16)
2.3.8 脉动函数	(17)
2.3.9 脉冲函数	(17)
2.3.10 $f(t)$ 与 e^{-at} 相乘	(18)
2.3.11 时间比例尺的改变	(18)
2.3.12 关于拉普拉斯积分下限的说明	(19)
2.4 拉普拉斯变换定理	(19)

2.4.1	实微分定理	(20)
2.4.2	终值定理	(21)
2.4.3	初值定理	(22)
2.4.4	实积分定理	(23)
2.4.5	复微分定理	(24)
2.4.6	卷积积分	(25)
2.4.7	两个时间函数乘积的拉普拉斯变换	(26)
2.4.8	小结	(26)
2.5	拉普拉斯反变换	(27)
2.5.1	求拉普拉斯反变换的部分分式展开法	(28)
2.5.2	只包含不同极点的 $F(s)$ 的部分分式展开	(28)
2.5.3	包含多重极点的 $F(s)$ 的部分分式展开	(30)
2.5.4	说明	(31)
2.6	用 MATLAB 进行部分分式展开	(31)
2.6.1	用 MATLAB 进行部分分式展开	(31)
2.6.2	用 MATLAB 求 $B(s)/A(s)$ 的零点和极点	(34)
2.7	解线性定常微分方程	(35)
	例题和解答	(37)
	习题	(45)
第3章	动态系统的数学模型	(49)
3.1	引言	(49)
3.1.1	数学模型	(49)
3.1.2	简化性和精确性	(49)
3.1.3	线性系统	(50)
3.1.4	线性定常系统和线性时变系统	(50)
3.1.5	本章要点	(50)
3.2	传递函数和脉冲响应函数	(50)
3.2.1	传递函数	(50)
3.2.2	传递函数的说明	(51)
3.2.3	卷积积分	(52)
3.2.4	脉冲响应函数	(52)
3.3	自动控制系统	(53)
3.3.1	方块图	(53)
3.3.2	闭环系统的方块图	(54)
3.3.3	开环传递函数和前向传递函数	(55)
3.3.4	闭环传递函数	(55)
3.3.5	用 MATLAB 求串联、并联和反馈(闭环)传递函数	(55)
3.3.6	自动控制器	(57)
3.3.7	工业控制器分类	(57)

3.3.8	双位或开-关控制作用	(58)
3.3.9	比例控制作用	(59)
3.3.10	积分控制作用	(59)
3.3.11	比例-加-积分控制作用	(60)
3.3.12	比例-加-微分控制作用	(60)
3.3.13	比例-加-积分-加-微分控制作用	(60)
3.3.14	扰动作用下的闭环系统	(60)
3.3.15	画方块图的步骤	(61)
3.3.16	方块图的简化	(62)
3.4	状态空间模型	(64)
3.4.1	现代控制理论	(64)
3.4.2	现代控制理论与传统控制理论的比较	(64)
3.4.3	状态	(64)
3.4.4	状态变量	(64)
3.4.5	状态向量	(64)
3.4.6	状态空间	(65)
3.4.7	状态空间方程	(65)
3.4.8	传递函数与状态空间方程之间的关系	(68)
3.4.9	传递矩阵	(69)
3.5	动态系统的状态空间表达式	(70)
3.5.1	线性微分方程作用函数中不包含导数项的 n 阶系统的状态空间表达式	(70)
3.5.2	线性微分方程作用函数中包含导数项的 n 阶系统的状态空间表达式	(71)
3.6	用 MATLAB 进行数学模型变换	(75)
3.6.1	由传递函数变换为状态空间表达式	(76)
3.6.2	由状态空间表达式变换为传递函数	(77)
3.7	机械系统	(78)
3.8	电气和电子系统	(82)
3.8.1	LRC 电路	(82)
3.8.2	状态空间表示	(83)
3.8.3	串联元件的传递函数	(83)
3.8.4	复阻抗	(84)
3.8.5	无负载效应串联元件的传递函数	(86)
3.8.6	电子控制器	(87)
3.8.7	运算放大器	(87)
3.8.8	反相放大器	(88)
3.8.9	非反相放大器	(88)
3.8.10	求传递函数的阻抗法	(90)
3.8.11	利用运算放大器构成的超前或滞后网络	(91)
3.8.12	利用运算放大器构成的 PID 控制器	(92)

3.9 信号流图	(93)
3.9.1 信号流图	(94)
3.9.2 定义	(95)
3.9.3 信号流图的性质	(95)
3.9.4 信号流图代数	(96)
3.9.5 线性系统的信号流图表示法	(97)
3.9.6 控制系统的信号流图	(98)
3.9.7 信号流图的梅逊增益公式	(98)
3.9.8 小结	(101)
3.10 非线性数学模型的线性化	(102)
3.10.1 非线性系统的线性化	(102)
3.10.2 非线性数学模型的线性近似	(102)
例题和解答	(104)
习题	(132)
第4章 流体系统和热力系统的数学模型*	(140)
4.1 引言	(140)
4.2 液位系统	(140)
4.2.1 液位系统的液阻和液容	(141)
4.2.2 液位系统	(142)
4.2.3 相互有影响的液位系统	(143)
4.3 气动系统	(144)
4.3.1 气动系统和液压系统之间的比较	(144)
4.3.2 气动系统	(146)
4.3.3 压力系统的气阻和气容	(146)
4.3.4 压力系统	(148)
4.3.5 气动喷嘴-挡板放大器	(148)
4.3.6 气动接续器	(149)
4.3.7 气动比例控制器(力-距离型)	(151)
4.3.8 气动比例控制器(力-平衡型)	(153)
4.3.9 气动执行阀	(155)
4.3.10 获得微分控制作用的基本原理	(156)
4.3.11 获得气动比例-加-积分控制作用的方法	(158)
4.3.12 获得气动比例-加-积分-加-微分控制作用的方法	(159)
4.4 液压系统	(161)
4.4.1 液压系统	(161)
4.4.2 液压系统的优缺点	(161)
4.4.3 说明	(162)
4.4.4 液压伺服系统	(162)
4.4.5 液压积分控制器	(166)

4.4.6	液压比例控制器	(167)
4.4.7	缓冲器	(168)
4.4.8	获得液压比例-加-积分控制作用的方法	(169)
4.4.9	获得液压比例-加-微分控制作用的方法	(170)
4.4.10	获取液压比例-加-积分-加-微分控制作用的方法	(171)
4.5	热力系统	(172)
4.5.1	热阻和热容	(173)
4.5.2	热力系统	(173)
	例题和解答	(175)
	习题	(193)
第5章	瞬态响应和稳态响应分析	(200)
5.1	引言	(200)
5.1.1	典型试验信号	(200)
5.1.2	瞬态响应和稳态响应	(200)
5.1.3	绝对稳定性、相对稳定性和稳态误差	(200)
5.1.4	本章要点	(201)
5.2	一阶系统	(201)
5.2.1	一阶系统的单位阶跃响应	(202)
5.2.2	一阶系统的单位斜坡响应	(203)
5.2.3	一阶系统的单位脉冲响应	(203)
5.2.4	线性定常系统的重要特性	(204)
5.3	二阶系统	(204)
5.3.1	伺服系统	(204)
5.3.2	二阶系统的阶跃响应	(205)
5.3.3	瞬态响应指标的定义	(209)
5.3.4	关于瞬态响应指标的几点说明	(210)
5.3.5	二阶系统及其瞬态响应指标	(210)
5.3.6	带速度反馈的伺服系统	(215)
5.3.7	二阶系统的脉冲响应	(217)
5.4	高阶系统	(218)
5.4.1	高阶系统的瞬态响应	(218)
5.4.2	闭环主导极点	(220)
5.4.3	复平面上的稳定性分析	(220)
5.5	用 MATLAB 进行瞬态响应分析	(221)
5.5.1	引言	(221)
5.5.2	线性系统的 MATLAB 表示	(222)
5.5.3	在图形屏幕上书写文本	(225)
5.5.4	标准二阶系统的 MATLAB 描述	(227)
5.5.5	求传递函数系统的单位阶跃响应	(227)

5.5.6	用 MATLAB 作单位阶跃响应曲线的三维图	(228)
5.5.7	用 MATLAB 求上升时间、峰值时间、最大过调量和调整时间	(230)
5.5.8	脉冲响应	(231)
5.5.9	求脉冲响应的另一种方法	(234)
5.5.10	斜坡响应	(235)
5.5.11	在状态空间中定义的系统的单位斜坡响应	(236)
5.5.12	求对任意输入信号的响应	(238)
5.5.13	对初始条件的响应	(240)
5.5.14	对初始条件的响应(状态空间方法,情况 1)	(243)
5.5.15	对初始条件的响应(状态空间方法,情况 2)	(244)
5.5.16	利用命令 Initial 求对初始条件的响应	(246)
5.6	用 MATLAB 解题举例	(248)
5.6.1	机械振动系统	(248)
5.6.2	用 MATLAB 求解	(251)
5.7	劳斯稳定判据	(253)
5.7.1	劳斯稳定判据简介	(253)
5.7.2	特殊情况	(255)
5.7.3	相对稳定性分析	(257)
5.7.4	劳斯稳定判据在控制系统分析中的应用	(257)
5.8	积分和微分控制作用对系统性能的影响	(258)
5.8.1	积分控制作用	(258)
5.8.2	系统的比例控制	(258)
5.8.3	系统的积分控制	(259)
5.8.4	对转矩扰动的响应(比例控制)	(260)
5.8.5	对转矩扰动的响应(比例-加-积分控制)	(261)
5.8.6	微分控制作用	(262)
5.8.7	带惯性负载系统的比例控制	(262)
5.8.8	具有惯性负载系统的比例-加-微分控制	(263)
5.8.9	二阶系统的比例-加-微分控制	(263)
5.9	单位反馈控制系统中的稳态误差	(264)
5.9.1	控制系统的分类	(264)
5.9.2	稳态误差	(265)
5.9.3	静态位置误差常数 K_p	(265)
5.9.4	静态速度误差常数 K_v	(266)
5.9.5	静态加速度误差常数 K_a	(267)
5.9.6	小结	(268)
	例题和解答	(269)
	习题	(302)
第 6 章	根轨迹分析	(310)

6.1 引言	(310)
6.1.1 根轨迹法	(310)
6.1.2 本章要点	(311)
6.2 根轨迹图	(311)
6.2.1 辐角和幅值系统	(311)
6.2.2 示例	(312)
6.3 根轨迹作图的一般规则	(322)
6.3.1 根轨迹作图的一般规则	(322)
6.3.2 关于根轨迹图的说明	(326)
6.3.3 $G(s)$ 的极点与 $H(s)$ 的零点的抵消	(326)
6.3.4 典型的极-零点分布及其相应的根轨迹	(327)
6.3.5 小结	(328)
6.4 用 MATLAB 作根轨迹图	(329)
6.4.1 用 MATLAB 作根轨迹图	(329)
6.4.2 定常 ζ 轨迹和定常 ω_n 轨迹	(335)
6.4.3 根轨迹与定常增益轨迹的正交性	(338)
6.4.4 求根轨迹上任意点的增益 K 值	(340)
6.4.5 非最小相位系统	(341)
6.5 正反馈系统	(342)
6.6 条件稳定系统	(347)
6.7 具有传递延迟的系统的根轨迹	(348)
6.7.1 传递延迟和停歇时间的近似	(351)
6.7.2 停歇时间的 MATLAB 近似计算	(352)
例题和解答	(352)
习题	(380)
第7章 控制系统设计的根轨迹法	(383)
7.1 引言	(383)
7.1.1 性能指标	(383)
7.1.2 用根轨迹法进行设计	(383)
7.1.3 系统的校正	(383)
7.1.4 串联校正和并联(或反馈)校正	(384)
7.1.5 校正装置	(385)
7.1.6 设计步骤	(385)
7.1.7 本章要点	(385)
7.2 初步设计研究	(386)
7.2.1 控制系统设计的根轨迹法	(386)
7.2.2 增加极点的影响	(386)
7.2.3 增加零点的影响	(387)
7.3 超前校正	(388)

7.3.1 超前校正装置	(388)
7.3.2 基于根轨迹法的超前校正技术	(389)
7.4 滞后校正	(395)
7.4.1 采用运算放大器的电子滞后校正装置	(395)
7.4.2 基于根轨迹法的滞后校正	(395)
7.4.3 用根轨迹法进行滞后校正设计的步骤	(396)
7.5 滞后-超前校正	(404)
7.5.1 利用运算放大器构成的电子滞后-超前校正装置	(404)
7.5.2 基于根轨迹法的滞后-超前校正方法	(405)
7.6 并联校正	(413)
7.6.1 并联校正系统设计的基本原理	(414)
7.6.2 速度反馈系统	(415)
例题和解答	(419)
习题	(448)
第8章 频率响应分析	(454)
8.1 引言	(454)
8.1.1 求系统对正弦输入信号的稳态输出	(454)
8.1.2 用图形表示频率响应特性	(458)
8.1.3 本章要点	(458)
8.2 伯德图	(458)
8.2.1 伯德图或对数坐标图	(458)
8.2.2 $G(j\omega)H(j\omega)$ 的基本因子	(458)
8.2.3 增益 K	(459)
8.2.4 积分和微分因子 $(j\omega)^{\mp 1}$	(460)
8.2.5 一阶因子 $(1 + j\omega T)^{\mp 1}$	(461)
8.2.6 二阶因子 $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{\mp 1}$	(464)
8.2.7 谐振频率 ω_r 和谐振峰值 M_r	(466)
8.2.8 绘制伯德图的一般步骤	(467)
8.2.9 最小相位系统和非最小相位系统	(469)
8.2.10 传递延迟	(471)
8.2.11 系统类型与对数幅值曲线之间的关系	(473)
8.2.12 静态位置误差常数的确定	(473)
8.2.13 静态速度误差常数的确定	(474)
8.2.14 静态加速度误差常数的确定	(475)
8.3 用 MATLAB 作伯德图	(476)
8.4 极坐标图	(483)
8.4.1 积分和微分因子 $(j\omega)^{\mp 1}$	(484)
8.4.2 一阶因子 $(1 + j\omega T)^{\mp 1}$	(484)
8.4.3 二阶因子 $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{\mp 1}$	(486)

8.4.4	极坐标图的一般形状	(489)
8.5	用 MATLAB 作奈奎斯特图	(491)
8.5.1	注意事项	(493)
8.5.2	定义在状态空间的系统的奈奎斯特图画法	(495)
8.6	对数幅-相图	(498)
8.7	奈奎斯特稳定判据	(501)
8.7.1	预备知识	(501)
8.7.2	映射定理	(503)
8.7.3	映射定理在闭环系统稳定性分析中的应用	(504)
8.7.4	奈奎斯特稳定判据	(505)
8.7.5	关于奈奎斯特稳定判据的几点说明	(506)
8.7.6	$G(s)H(s)$ 含有位于 $j\omega$ 轴上的极点和(或)零点的特殊情况	(506)
8.8	稳定性分析	(508)
8.8.1	条件稳定系统	(512)
8.8.2	多回路系统	(513)
8.8.3	应用于逆极坐标图上的奈奎斯特稳定判据	(515)
8.8.4	利用改变的奈奎斯特轨迹分析相对稳定性	(517)
8.9	相对稳定性	(518)
8.9.1	通过保角变换进行相对稳定性分析	(518)
8.9.2	相位裕量和增益裕量	(520)
8.9.3	关于相位裕量和增益裕量的几点说明	(521)
8.9.4	用 MATLAB 求增益裕量、相位裕量、相位交界频率和增益交界频率	(524)
8.9.5	谐振峰值幅值 M_r 和谐振峰值频率 ω_r	(526)
8.9.6	标准二阶系统中阶跃瞬态响应与频率响应之间的关系	(526)
8.9.7	一般系统中的阶跃瞬态响应与频率响应之间的关系	(528)
8.9.8	截止频率和带宽	(529)
8.9.9	剪切率	(530)
8.9.10	获得谐振峰值、谐振频率和带宽的 MATLAB 方法	(531)
8.10	单位反馈系统的闭环频率响应	(533)
8.10.1	闭环频率响应	(533)
8.10.2	等幅值轨迹(M 圆)	(533)
8.10.3	等相角轨迹(N 圆)	(535)
8.10.4	尼柯尔斯图	(536)
8.11	传递函数的实验确定法	(541)
8.11.1	正弦信号产生器	(541)
8.11.2	由伯德图求最小相位传递函数	(541)
8.11.3	非最小相位传递函数	(543)
8.11.4	关于实验确定传递函数的几点说明	(543)
例题和解答		(545)

习题	(566)
第9章 控制系统设计的频率响应法	(575)
9.1 引言	(575)
9.1.1 控制系统设计的频率响应法	(575)
9.1.2 从开环频率响应可以获得的信息	(576)
9.1.3 对开环频率响应的要求	(576)
9.1.4 超前、滞后和滞后-超前校正的基本特性	(577)
9.1.5 本章要点	(577)
9.2 超前校正	(577)
9.2.1 超前校正装置的特性	(577)
9.2.2 基于频率响应法的超前校正	(578)
9.3 滞后校正	(585)
9.3.1 滞后校正装置的特性	(586)
9.3.2 基于频率响应法的滞后校正	(586)
9.3.3 关于滞后校正的一些说明	(592)
9.4 滞后-超前校正	(593)
9.4.1 滞后-超前校正装置的特性	(593)
9.4.2 基于频率响应法的滞后-超前校正	(595)
9.5 结论	(599)
9.5.1 超前、滞后和滞后-超前校正的比较	(599)
9.5.2 图形对比	(600)
9.5.3 反馈校正	(600)
9.5.4 不希望极点的抵消	(600)
9.5.5 不希望的共轭复数极点的抵消	(601)
9.5.6 结束语	(602)
例题和解答	(602)
习题	(630)
第10章 PID控制与二自由度控制系统	(633)
10.1 引言	(633)
10.2 PID控制器的调节法则	(634)
10.2.1 控制对象的PID控制	(634)
10.2.2 用来调整PID控制器的齐格勒-尼柯尔斯法则	(634)
10.2.3 第一种方法	(634)
10.2.4 第二种方法	(636)
10.2.5 说明	(637)
10.3 求最佳参数值集合的计算方法	(642)
10.4 PID控制方案的修正	(650)
10.4.1 PI-D控制	(651)
10.4.2 I-PD控制	(652)

10.4.3 二自由度 PID 控制	(653)
10.5 二自由度控制	(653)
10.6 改善响应特性的零点配置法	(655)
10.6.1 零点配置	(657)
10.6.2 对系统响应特性的要求	(657)
10.6.3 确定 G_{c2}	(657)
10.6.4 零点配置	(670)
例题和解答	(672)
习题	(691)
第 11 章 控制系统的状态空间分析	(698)
11.1 引言	(698)
11.2 传递函数的状态空间表达式	(698)
11.2.1 状态空间标准形的表达式	(698)
11.2.2 $n \times n$ 维矩阵 A 的特征值	(701)
11.2.3 $n \times n$ 维矩阵的对角化	(702)
11.2.4 特征值的不变性	(704)
11.2.5 状态变量组的非惟一性	(705)
11.3 用 MATLAB 进行系统模型变换	(705)
11.3.1 传递函数系统的状态空间表达式	(705)
11.3.2 由状态空间表达式到传递函数的变换	(706)
11.4 定常系统状态方程的解	(708)
11.4.1 齐次状态方程的解	(709)
11.4.2 矩阵指数	(710)
11.4.3 齐次状态方程的拉普拉斯变换解法	(711)
11.4.4 状态转移矩阵	(712)
11.4.5 状态转移矩阵的性质	(713)
11.4.6 非齐次状态方程的解	(714)
11.4.7 非齐次状态方程的拉普拉斯变换解法	(715)
11.4.8 初始状态为 $x(t_0)$ 的解	(715)
11.5 向量矩阵分析中的若干结果	(716)
11.5.1 凯莱-哈密顿定理	(716)
11.5.2 最小多项式	(717)
11.5.3 矩阵指数 e^{At}	(717)
11.5.4 向量的线性无关	(722)
11.6 可控性	(723)
11.6.1 可控性和可观测性	(723)
11.6.2 连续时间系统的状态完全可控性	(723)
11.6.3 状态完全可控性条件的另一种形式	(725)
11.6.4 在 s 平面上状态完全可控的条件	(727)