

国外电子信息科学经典教材系列

现代控制工程

(第三版)

Modern Control Engineering
(Third 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
URL: <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 (第三版)

Modern Control Engineering
(Third Edition)

[美] Katsuhiko Ogata 著

卢伯英 于海勋 等译

JSB1/05

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,李亚普诺夫稳定性分析及模型参考控制系统设计。书中所有计算方面的问题,都采用 MATLAB 求解。

本书适合高年级本科生、研究生、工程技术人员及计算机开发人员使用。

Translation Copyright ©1999 by Publishing House of Electronics Industry.

Modern Control Engineering (Third Edition)

Copyright ©1998 Prentice Hall, Inc.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Prentice Hall, a Simon & Schuster Company.

本书中文简体专有翻译出版权由美国 Simon & Schuster Company 下属的 Prentice Hall, Inc. 授予电子工业出版社。该专有出版权受法律保护。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制工程:第三版/(美)尾形克彦(Ogata, K.)著:卢伯英等译.—北京:电子工业出版社,2000,5

国外电子信息科学经典教材系列

ISBN 7-5053-5395-0

I. 现… II. ①尾… ②卢… III. 自动控制-高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 06293 号

丛 书 名:国外电子信息科学经典教材系列

书 名:现代控制工程(第三版)

原 书 名:Modern Control Engineering (Third Edition)

著 者:[美] Katsuhiko Ogata

译 者:卢伯英 于海勋等

责任编辑:徐堃

排版制作:电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者:北京市朝阳区隆华印刷厂

装 订 者:三河市金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社 URL: <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:59.75 字数:1520 千字

版 次:2000 年 5 月第 3 版 2000 年 5 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5053-5395-0
TN·1274

印 数:8000 册 定价:90.00 元

版权贸易合同登记号 图字:01-2000-0099

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页,请向购买书店调换。

若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 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,且内容新颖、丰富,物理概念阐述得比较清楚,并配有大量的例题和习题,很适合于学生使用。该书第二版在原书基础上增加了许多新内容,诸如极点配置、状态观测器和控制系统的计算机仿真等。译者受台湾儒林图书有限公司约请,翻译了该书第二版,并于 1993 年在台湾以繁体字形式出版发行。该书第三版于 1998 年出版发行,译者很高兴能有机会将此第三版翻译出来奉献给读者。第三版在保持原书特点的基础上,做了大量修改,并融入 MATLAB 的应用。目前,国际上的许多新版科技书籍(特别是高校教材),都把 MATLAB 作为一种基本工具,用于分析、计算、设计和仿真研究,有很好的效果。我国科技界和高等学校也开始重视 MATLAB 的应用。本书的出版将会在这方面起到很好的示范作用。此外,本书还增加了设计方面的新内容,如 PID 控制器设计、鲁棒控制器设计等。

《现代控制工程》在国际上是一部有影响的教科书。该书已经译成中、法、俄、日、西班牙等多国文字出版发行。

译者在翻译过程中对书中的重要定理和公式进行了推导和验证,并修正了书中的错误和疏漏之处。

本书第 1 章至第 10 章及附录由北京航空航天大学卢伯英教授翻译。第 11 章至第 13 章由西北工业大学于海勋教授翻译,由佟明安教授审校。卢伯英教授全面审校本书。

本书在翻译过程中得到了肖顺达、黄俊钦、杨晨阳、张英娟、李雅萍等教授的支持和帮助。特别是电子工业出版社的徐堃小姐,对译稿进行了精心的修改和加工。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,读者应具备有关微分方程、向量矩阵分析、电路分析和力学等课程的基础知识。

在本书第三版中,作者融入了 MATLAB 的应用。所有有关计算方面的问题,都采用 MATLAB 求解。此外,在第三版中还加强了设计方面的内容,增添了一些新课题,并且增加了例题和习题。

本书由 13 章和一个附录组成。全书内容概括如下:第 1 章介绍有关控制系统的基础。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(如果读者已经具备适当的拉普拉斯变换方面的知识,可以跳过本章)。第 3 章研究动态系统的数学模型,并且导出传递函数模型和状态空间模型。第 4 章阐述一阶和二阶系统的瞬态响应分析,以及应用 MATLAB 对瞬态响应的计算、分析。第 5 章介绍工业自动控制器中的基本控制作用,并且讨论了气动、液压和电子控制器。这一章还讨论了高阶系统的响应和劳斯稳定判据。

第 6 章研究根轨迹分析,以及用 MATLAB 方法做根轨迹图。第 8 章涉及到控制系统的频率响应分析,并讨论了伯德图、极坐标图、奈魁斯特稳定判据和闭环频率响应,包括采用 MATLAB 方法获得频率响应曲线。第 9 章阐述应用频率响应法进行设计和补偿的技术,详细讨论了如何用伯德图方法设计超前、滞后和滞后-超前校正器。第 10 章涉及到基本的和变形的 PID 控制,并讨论了二自由度控制和有关鲁棒控制的设计。

第 11 章介绍控制系统的状态空间基本分析,以及可控性和可观测性概念,还介绍了采用 MATLAB 进行的系统模型变换(从传递函数模型变换到状态空间模型,或者进行反变换)。第 12 章介绍控制系统的状态空间设计方法。这一章首先介绍极点配置设计问题,接着介绍状态观测器设计。基于极点配置方法的 I 型伺服系统设计,包括利用 MATLAB 求解,也在这一章内介绍。第 13 章先介绍李亚普诺夫稳定性分析,接着介绍模型参考控制系统设计。其中,首先以定理形式建立了李亚普诺夫稳定性条件,然后在这些约束条件下进行系统设计。最后,研究了二次型最佳控制问题,由李亚普诺夫稳定性方程导出二次型最佳控制理论。本章还介绍了一种用 MATLAB 求解二次型最佳控制问题的方法。

本书没有涉及有关 MATLAB 的预备知识。如果读者尚不熟悉 MATLAB,建议先阅读本书的附录,然后再学习书中提供的有关 MATLAB 的参考材料。

本书自始至终强调基本概念,而在材料的阐述过程中,力求避免高深的数学论证。但是,当数学证明能够帮助读者加深对有关内容的理解时,本书也会提供相应的证明。书中所有材料都是按照控制理论逐渐发展的过程来组织和编排的。

书中提供的例题是从全局出发统一安排,因此可以使读者比较好地理解书中讨论的有关内容。此外,在每一章的最后都提供了一些带有解答的例题(A 类题),是本书的有机组成部分。建议读者认真地学习所有例题,从而获得对所讨论的课题更为深入的理解。除此之外,书中还提供了许多待解的习题(B 类题),它们可以作为家庭作业,或者作为测验题。

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

如果本书作为每周 4 小时的季度课程教材(共计 40 学时),或者作为每周 3 学时的学期课程教材(共计 42 学时),可以讲授前 10 章的大部分内容(作为控制系统的第一门课程,前 10 章包含了通常要求的全部基础知识)。如果把本书作为每周 4 小时的学期课程教材(共计 52 学时),则书中的大部分内容均可以讲授,只要灵活地删除部分内容即可。对于双季度课程(共计 60 学时或者更多),书中的全部内容均可讲授。对于希望学习控制理论基础知识的工程技术人员,本书也可以作为其自学书籍。

我衷心地感谢得克萨斯农业机械大学的苏哈达·贾亚苏里亚(Suhada Jayasuriya)教授,他审阅了我的书稿,并且提出了许多建设性的意见。同时,我还要向琳达·拉特思·恩格尔曼(Linda Ratts Engleman)表示感谢,她热情地支持了本书第三版的出版工作。在本书修订初期,许多无名的评阅者为本书提出过宝贵的建议。我的学生曾对本书的大量例题和习题进行了求解,在此也一并向他们表示感谢。

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 机器人控制系统	(3)
1.2.3 温度控制系统	(4)
1.2.4 汽车客舱的温度控制	(5)
1.2.5 业务系统	(5)
1.3 闭环控制和开环控制	(6)
1.3.1 反馈控制系统	(6)
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 控制系统设计	(7)
1.5 本书概貌	(8)
例题和解答	(8)
习题	(10)
第 2 章 拉普拉斯变换	(12)
2.1 引言	(12)
2.2 复变量和复变函数	(12)
2.2.1 复变量	(12)
2.2.2 复变函数	(12)
2.2.3 尤拉定理	(14)
2.3 拉普拉斯变换	(15)
2.3.1 拉普拉斯变换的存在	(15)
2.3.2 指数函数	(16)
2.3.3 阶跃函数	(17)
2.3.4 斜坡函数	(17)
2.3.5 正弦函数	(17)
2.3.6 说明	(18)
2.3.7 平移函数	(20)
2.3.8 脉动函数	(21)

2.3.9 脉冲函数	(21)
2.3.10 $f(t)$ 与 e^{-at} 相乘	(22)
2.3.11 时间比例尺的改变	(22)
2.3.12 关于拉普拉斯积分下限的说明	(23)
2.4 拉普拉斯变换定理	(23)
2.4.1 实微分定理	(24)
2.4.2 终值定理	(25)
2.4.3 初值定理	(26)
2.4.4 实积分定理	(27)
2.4.5 复微分定理	(28)
2.4.6 卷积积分	(29)
2.4.7 两个时间函数乘积的拉普拉斯变换	(30)
2.4.8 小结	(30)
2.5 拉普拉斯反变换	(32)
2.5.1 求拉普拉斯反变换的部分分式展开法	(32)
2.5.2 只包含不同极点的 $F(s)$ 的部分分式展开	(32)
2.5.3 包含多重极点的 $F(s)$ 的部分分式展开	(34)
2.5.4 说明	(35)
2.6 用 MATLAB 进行部分分式展开	(36)
2.7 解线性定常微分方程	(38)
例题和解答	(40)
习题	(49)
第 3 章 动态系统的数学模型	(52)
3.1 引言	(52)
3.1.1 数学模型	(52)
3.1.2 简化性和精确性	(52)
3.1.3 线性系统	(53)
3.1.4 线性定常系统和线性时变系统	(53)
3.1.5 非线性系统	(53)
3.1.6 非线性系统的线性比	(54)
3.1.7 本章要点	(54)
3.2 传递函数和脉冲响应函数	(54)
3.2.1 传递函数	(54)
3.2.2 传递函数的说明	(55)
3.2.3 机械系统	(55)
3.2.4 卷积积分	(56)
3.2.5 脉冲响应函数	(56)
3.3 方块图	(57)
3.3.1 方块图简介	(57)

3.3.2 闭环系统的方块图	(58)
3.3.3 开环传递函数和前向传递函数	(59)
3.3.4 闭环传递函数	(59)
3.3.5 扰动作用下的闭环系统	(59)
3.3.6 画方块图的步骤	(60)
3.3.7 方块图的简化	(61)
3.4 状态空间模型	(63)
3.4.1 现代控制理论	(63)
3.4.2 现代控制理论与传统控制理论的比较	(63)
3.4.3 状态	(63)
3.4.4 状态变量	(63)
3.4.5 状态向量	(64)
3.4.6 状态空间	(64)
3.4.7 状态空间方程	(64)
3.4.8 传递函数与状态空间方程之间的关系	(67)
3.4.9 传递矩阵	(69)
3.5 动态系统的状态空间表达式	(69)
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	(69)
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 机械系统	(73)
3.6.1 质量	(74)
3.6.2 力	(75)
3.6.3 说明	(75)
3.6.4 机械系统	(75)
3.7 电气系统	(79)
3.7.1 LRC 电路	(80)
3.7.2 复阻抗	(80)
3.7.3 状态空间表示	(81)
3.7.4 串联元件的传递函数	(82)
3.7.5 无负载效应串联元件的传递函数	(83)
3.8 液位系统	(84)
3.8.1 液位系统的液阻和液容	(84)
3.8.2 液位系统	(86)
3.8.3 相互有影响的液位系统	(87)
3.9 热力系统	(88)
3.9.1 热阻和热容	(89)
3.9.2 热力系统	(89)
3.10 非线性数学模型的线性化	(91)
3.10.1 非线性数学模型的线性近似	(91)

3.10.2 液压伺服系统的线性化	(92)
例题和解答	(95)
习题	(117)
第 4 章 瞬态响应分析	(124)
4.1 引言	(124)
4.1.1 典型试验信号	(124)
4.1.2 瞬态响应和稳态响应	(124)
4.1.3 绝对稳定性、相对稳定性和稳态误差	(124)
4.1.4 本章要点	(125)
4.2 一阶系统	(125)
4.2.1 一阶系统的单位阶跃响应	(125)
4.2.2 一阶系统的单位斜坡响应	(127)
4.2.3 一阶系统的单位脉冲响应	(128)
4.2.4 线性定常系统的重要特性	(128)
4.3 二阶系统	(131)
4.3.1 直流伺服马达	(131)
4.3.2 伺服系统	(131)
4.3.3 负载对伺服马达动特性的影响	(134)
4.3.4 二阶系统的阶跃响应	(134)
4.3.5 瞬态响应指标的定义	(137)
4.3.6 关于瞬态响应指标的几点说明	(139)
4.3.7 二阶系统及其瞬态响应指标	(139)
4.3.8 带速度反馈的伺服系统	(144)
4.3.9 二阶系统的脉冲响应	(146)
4.4 用 MATLAB 进行瞬态响应分析	(147)
4.4.1 引言	(147)
4.4.2 线性系统的 MATLAB 表示	(147)
4.4.3 传递函数系统单位阶跃响应的求法	(148)
4.4.4 在图形屏幕上书写文本	(152)
4.4.5 脉冲响应	(152)
4.4.6 求脉冲响应的另一种方法	(155)
4.4.7 斜坡函数	(157)
4.4.8 在状态空间中定义的系统的单位斜坡响应	(158)
4.4.9 对初始条件的响应(传递函数方法)	(160)
4.4.10 对初始条件的响应(状态空间方法,情况 1)	(162)
4.4.11 对初始条件的响应(状态空间方法,情况 2)	(163)
4.5 用 MATLAB 解题举例	(165)
4.5.1 机械振动系统	(165)
4.5.2 计算机仿真(连续时间方法)	(168)

4.5.3 计算机仿真(离散时间方法)	(171)
例题和解答	(173)
习题	(192)
第5章 控制系统的基本控制作用和响应	(196)
5.1 引言	(196)
5.2 基本控制作用	(196)
5.2.1 工业控制器的分类	(196)
5.2.2 自动控制器、执行机构和传感器(测量元件)	(197)
5.2.3 自操作控制器	(197)
5.2.4 双态或继电器型控制作用	(198)
5.2.5 比例控制作用	(199)
5.2.6 积分控制作用	(200)
5.2.7 比例-加-积分控制作用	(200)
5.2.8 比例-加-微分控制作用	(201)
5.2.9 比例-加-积分-加-微分控制作用	(201)
5.2.10 传感器(测量元件)对系统性能的影响	(202)
5.3 积分和微分控制作用对系统性能的影响	(203)
5.3.1 积分控制作用	(203)
5.3.2 液位控制系统的积分控制	(204)
5.3.3 对转矩扰动的响应(比例控制)	(205)
5.3.4 利用 MATLAB 求响应	(206)
5.3.5 对转矩扰动的响应(比例-加-积分控制)	(207)
5.3.6 微分控制作用	(209)
5.3.7 带惯性负载系统的比例控制	(209)
5.3.8 具有惯性负载系统的比例-加-微分控制	(209)
5.3.9 二阶系统的比例-加-微分控制	(210)
5.4 高阶系统	(211)
5.4.1 高阶系统的瞬态响应分析	(211)
5.4.2 闭环主导极点	(213)
5.4.3 复平面内的稳定性分析	(213)
5.5 劳斯稳定判据	(215)
5.5.1 劳斯稳定判据简介	(215)
5.5.2 特殊情况	(217)
5.5.3 相对稳定性分析	(219)
5.5.4 劳斯稳定判据在控制系统分析中的应用	(219)
5.6 气动控制器	(220)
5.6.1 气动系统和液压系统之间的比较	(220)
5.6.2 气动系统	(221)
5.6.3 压力系统的气阻和气容	(221)

5.6.4	压力系统	(222)
5.6.5	气动喷嘴-挡板放大器	(223)
5.6.6	气动接续器	(224)
5.6.7	气动比例控制器(力-距离型)	(225)
5.6.8	气动比例控制器(力-平衡型)	(228)
5.6.9	气动执行阀	(229)
5.6.10	获得微分控制作用的基本原理	(230)
5.6.11	获得气动比例-加-积分控制作用的方法	(232)
5.6.12	获得气动比例-加-积分-加-微分控制作用的方法	(234)
5.7	液压控制器	(235)
5.7.1	液压系统	(235)
5.7.2	液压系统的优缺点	(235)
5.7.3	说明	(235)
5.7.4	液压积分控制器	(235)
5.7.5	液压比例控制器	(237)
5.7.6	缓冲器	(238)
5.7.7	获得液压比例-加-积分控制作用的方法	(240)
5.7.8	获得液压比例-加-微分控制作用的方法	(241)
5.8	电子控制器	(242)
5.8.1	运算放大器	(242)
5.8.2	反相放大器	(243)
5.8.3	非反相放大器	(243)
5.8.4	求传递函数的阻抗法	(246)
5.8.5	利用运算放大器构成的超前或滞后网络	(246)
5.8.6	采用运算放大器的 PID 控制器	(248)
5.9	正弦响应中的相位超前和相位滞后	(249)
5.10	单位反馈控制系统中的稳态误差	(253)
5.10.1	控制系统的分类	(253)
5.10.2	稳态误差	(253)
5.10.3	静态位置误差常数 K_p	(254)
5.10.4	静态速度误差常数 K_v	(255)
5.10.5	静态加速度误差常数 K_a	(256)
5.10.6	小结	(257)
5.10.7	开环控制系统与闭环控制系统中稳态误差的比较	(258)
	例题和解答	(259)
	习题	(285)
第 6 章	根轨迹分析	(294)
6.1	引言	(294)
6.1.1	根轨迹法	(294)

6.1.2 本章要点	(295)
6.2 根轨迹图	(295)
6.2.1 辐角和幅值系统	(295)
6.2.2 示例	(297)
6.3 根轨迹作图的一般规则	(305)
6.3.1 作根轨迹图的一般规则	(306)
6.3.2 关于根轨迹图的说明	(309)
6.3.3 $G(s)$ 的极点与 $H(s)$ 的零点的抵消	(310)
6.3.4 典型的极-零点分布及其相应的根轨迹	(311)
6.3.5 小结	(312)
6.4 用 MATLAB 作根轨迹图	(312)
6.5 特殊情况	(322)
6.5.1 变量参数不以乘法因子形式出现时的作根轨迹的方法	(322)
6.5.2 正反馈系统的根轨迹	(326)
6.6 控制系统的根轨迹分析	(330)
6.6.1 根轨迹与定常增益轨迹的正交性	(330)
6.6.2 条件稳定系统	(330)
6.6.3 非最小相位系统	(332)
6.7 具有传递延迟的系统的根轨迹	(332)
6.8 根轨迹族曲线	(336)
例题和解答	(340)
习题	(370)
第7章 控制系统设计的根轨迹法	(375)
7.1 引言	(375)
7.1.1 性能指标	(375)
7.1.2 系统的校正	(375)
7.1.3 串联校正和反馈(或并联)校正	(375)
7.1.4 校正装置	(376)
7.1.5 设计步骤	(377)
7.1.6 本章要点	(377)
7.2 初步设计研究	(377)
7.2.1 控制系统设计的根轨迹法	(378)
7.2.2 增加极点的影响	(378)
7.2.3 增加零点的影响	(378)
7.3 超前校正	(379)
7.3.1 超前网络	(379)
7.3.2 基于根轨迹法的超前校正技术	(380)
7.3.3 说明	(385)
7.3.4 校正与未校正系统阶跃响应的比较	(385)

7.4 滞后校正	(387)
7.4.1 采用运算放大器的电子滞后校正装置	(387)
7.4.2 应用根轨迹法进行滞后校正	(387)
7.4.3 用根轨迹法进行滞后校正设计的步骤	(388)
7.5 滞后-超前校正	(395)
7.5.1 利用运算放大器构成的电子滞后-超前校正装置	(395)
7.5.2 基于根轨迹法的滞后-超前校正方法	(396)
例题和解答	(405)
习题	(433)
第8章 频率响应分析	(438)
8.1 引言	(438)
8.1.1 系统对正弦输入信号的稳态输出	(438)
8.1.2 用图形表示频率响应特性	(439)
8.1.3 本章要点	(439)
8.2 伯德图	(440)
8.2.1 伯德图或对数坐标图	(440)
8.2.2 $G(j\omega)H(j\omega)$ 的基本因子	(440)
8.2.3 增益 K	(440)
8.2.4 积分和微分因子 $(j\omega)^{\mp 1}$	(441)
8.2.5 一阶因子 $(1+j\omega T)^{\mp 1}$	(442)
8.2.6 二阶因子 $[1+2\zeta(j\omega/\omega_n)+(j\omega/\omega_n)^2]^{\mp 1}$	(446)
8.2.7 谐振频率 ω_r 和谐振峰值 M_r	(448)
8.2.8 绘制伯德图的一般步骤	(449)
8.2.9 最小相位系统和非最小相位系统	(451)
8.2.10 传递延迟	(452)
8.2.11 系统类型与对数幅值曲线之间的关系	(454)
8.2.12 静态位置误差常数的确定	(454)
8.2.13 静态速度误差常数的确定	(455)
8.2.14 静态加速度误差常数的确定	(456)
8.3 用 MATLAB 作伯德图	(457)
8.3.1 在一定的频率点上增益变成无穷大时对伯德图的影响	(464)
8.3.2 求状态空间中的系统的伯德图	(466)
8.4 极坐标图	(468)
8.4.1 积分和微分因子 $(j\omega)^{\mp 1}$	(468)
8.4.2 一阶因子 $(1+j\omega T)^{\mp 1}$	(469)
8.4.3 二阶因子 $[1+2\zeta(j\omega/\omega_n)+(j\omega/\omega_n)^2]^{\mp 1}$	(470)
8.4.4 传递延迟	(472)
8.4.5 极坐标图的一般形状	(474)
8.5 用 MATLAB 作奈魁斯特图	(476)

8.5.1 注意	(479)
8.5.2 定义在状态空间的系统的奈魁斯特图画法	(481)
8.6 对数幅-相图	(484)
8.7 奈魁斯特稳定判据	(486)
8.7.1 预备知识	(487)
8.7.2 映射定理	(490)
8.7.3 映射定理在闭环系统稳定性分析中的应用	(490)
8.7.4 奈魁斯特稳定判据	(491)
8.7.5 关于奈魁斯特稳定判据的几点说明	(492)
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	(493)
8.8 稳定性分析	(495)
8.8.1 条件稳定系统	(499)
8.8.2 多回路系统	(499)
8.8.3 应用于逆极坐标图上的奈魁斯特稳定判据	(501)
8.8.4 利用改变的奈魁斯特轨迹分析相对稳定性	(504)
8.9 相对稳定性	(506)
8.9.1 通过保角变换进行相对稳定性分析	(506)
8.9.2 相位裕量和增益裕量	(508)
8.9.3 关于相位裕量和增益裕量的几点说明	(510)
8.9.4 谐振峰值幅值 M_r 和谐振峰值频率 ω_r	(512)
8.9.5 标准二阶系统中阶跃瞬态响应与频率响应之间的关系	(513)
8.9.6 一般系统中的阶跃瞬态响应与频率响应之间的关系	(515)
8.9.7 截止频率和带宽	(516)
8.9.8 剪切率	(517)
8.10 闭环频率响应	(518)
8.10.1 单位反馈系统的闭环频率响应	(518)
8.10.2 等幅值轨迹(M 圆)	(519)
8.10.3 等相角轨迹(N 圆)	(520)
8.10.4 尼柯尔斯图	(522)
8.10.5 非单位反馈系统的闭环频率响应	(525)
8.10.6 增益的调整	(525)
8.11 传递函数的实验确定法	(528)
8.11.1 正弦信号产生器	(528)
8.11.2 由伯德图求最小相位传递函数	(529)
8.11.3 非最小相位传递函数	(530)
8.11.4 关于实验确定传递函数的几点说明	(531)
例题和解答	(533)
习题	(565)
第9章 控制系统设计的频率响应法	(571)

9.1 引言	(571)
9.1.1 控制系统设计的频率响应法	(571)
9.1.2 从开环频率响应可以获得的信息	(571)
9.1.3 对开环频率响应的要求	(572)
9.1.4 超前、滞后和滞后-超前校正的基本特性	(573)
9.1.5 本章要点	(573)
9.2 超前校正	(573)
9.2.1 超前校正装置的特性	(573)
9.2.2 基于频率响应法的超前校正	(574)
9.3 滞后校正	(581)
9.3.1 滞后校正装置的特性	(581)
9.3.2 基于频率响应法的滞后校正	(582)
9.3.3 关于滞后校正的一些说明	(588)
9.4 滞后-超前校正	(589)
9.4.1 滞后-超前校正装置的特性	(589)
9.4.2 基于频率响应法的滞后-超前校正	(591)
9.5 结论	(595)
9.5.1 超前、滞后和滞后-超前校正的比较	(595)
9.5.2 图形对比	(595)
9.5.3 反馈校正	(596)
9.5.4 不希望极点的抵消	(596)
9.5.5 不希望的共轭复数极点的抵消	(597)
9.5.6 结束语	(598)
例题和解答	(598)
习题	(622)
第10章 PID控制与鲁棒控制	(625)
10.1 引言	(625)
10.2 PID控制器的调节律	(625)
10.2.1 控制对象的PID控制	(625)
10.2.2 用来调整PID控制器的齐格勒-尼柯尔斯法则	(626)
10.2.3 第一种方法	(626)
10.2.4 第二种方法	(628)
10.2.5 说明	(629)
10.3 PID控制方案的变形	(634)
10.3.1 PI-D控制	(635)
10.3.2 I-PD控制	(636)
10.3.3 从I-PD控制方案推广到带状态反馈的积分控制方案	(367)
10.3.4 二自由度PID控制	(638)
10.4 二自由度控制	(638)

10.5 关于鲁棒控制的设计研究	(640)
10.5.1 小结	(643)
10.5.2 表示在伯德图上的鲁棒设计要求	(644)
10.5.3 结束语	(644)
例题和解答	(644)
习题	(656)
第 11 章 控制系统的状态空间分析	(664)
11.1 引言	(664)
11.2 传递函数的状态空间表达式	(664)
11.2.1 状态空间标准形的表达式	(664)
11.2.2 $n \times n$ 维矩阵 A 的特征值	(668)
11.2.3 $n \times n$ 维矩阵的对角线化	(668)
11.2.4 特征值的不变性	(671)
11.2.5 状态变量组的非唯一性	(671)
11.3 用 MATLAB 进行系统模型变换	(671)
11.3.1 传递函数系统的状态空间表达式	(672)
11.3.2 由状态空间表达式到传递函数的变换	(673)
11.4 定常系统状态方程的解	(675)
11.4.1 齐次状态方程的解	(675)
11.4.2 矩阵指数	(677)
11.4.3 齐次状态方程的拉普拉斯变换解法	(678)
11.4.4 状态转移矩阵	(679)
11.4.5 状态转移矩阵的性质	(679)
11.4.6 非齐次状态方程的解	(680)
11.4.7 非齐次状态方程的拉普拉斯变换解法	(681)
11.4.8 初始状态为 $x(t_0)$ 的解	(682)
11.5 向量矩阵分析中的若干结果	(683)
11.5.1 凯莱-哈密尔顿定理	(683)
11.5.2 最小多项式	(683)
11.5.3 矩阵指数 e^{At}	(684)
11.5.4 向量的线性无关	(689)
11.6 可控性	(690)
11.6.1 可控性和可观测性	(690)
11.6.2 连续时间系统的状态完全可控性	(690)
11.6.3 状态完全可控性条件的另一种形式	(692)
11.6.4 在 s 平面上状态完全可控的条件	(694)
11.6.5 输出可控性	(695)
11.7 可观测性	(695)
11.7.1 连续时间系统的完全可观测性	(696)