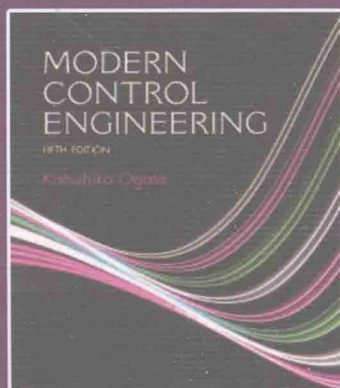


现代控制工程 (第五版)

Modern Control Engineering
Fifth Edition



[美] Katsuhiko Ogata 著

卢伯英 佟明安 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外计算机科学教材系列

现代控制工程

(第五版)

Modern Control Engineering

Fifth Edition

[美] Katsuhiko Ogata 著

卢伯英 佟明安 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为自动控制系统的经典教材,详细介绍了连续控制系统(包括电气系统、机械系统、流体动力系统和热力系统)的数学模型建模方法,动态系统的瞬态和稳态分析方法,根轨迹分析和设计方法,频率域的分析 and 设计方法,以及 PID 控制器和变形 PID 控制器的设计方法;同时还比较详细地介绍了现代控制理论中的核心内容,即状态空间分析和设计方法。最后还简要地介绍了 20 世纪 80 年代至 90 年代发展起来的称为“后现代控制理论”的鲁棒控制系统。全书自始至终贯穿了用 MATLAB 工具分析和设计各类控制系统问题。

本书可作为高等学校工科(电气、机械、航空航天、化工等)高年级学生自动控制系统课程的教材,也可供与自动控制系统知识相关的教师、研究生、科研和工程技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled Modern Control Engineering, Fifth Edition, 9780136156734 by Katsuhiko Ogata, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2010 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD, and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY. Copyright © 2011.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。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:01-2009-7067

图书在版编目(CIP)数据

现代控制工程:第5版/(美)尾形克彦(Ogata, K.)著;卢伯英,佟明安译. —北京:电子工业出版社,2011.8
(国外计算机科学教材系列)

书名原文:Modern Control Engineering, Fifth Edition

ISBN 978-7-121-12314-6

I. 现… II. ①尾… ②卢… ③佟… III. ①现代控制理论-高等学校-教材 IV. ①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 224585 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚 特约编辑:马爱文

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:43.25 字数:1163 千字

印 次:2011 年 8 月第 1 次印刷

定 价:85.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

出版说明

21 世纪初的 5 至 10 年是我国国民经济和社会发展的关键时期,也是信息产业快速发展的关键时期。在我国加入 WTO 后的今天,培养一支适应国际化竞争的一流 IT 人才队伍是我国高等教育的重要任务之一。信息科学和技术方面人才的优劣与多寡,是我国面对国际竞争时成败的关键因素。

当前,正值我国高等教育特别是信息科学领域的教育调整、变革的重大时期,为使我国教育体制与国际化接轨,有条件的高等院校正在为某些信息学科和技术课程使用国外优秀教材和优秀原版教材,以使我国在计算机教学上尽快赶上国际先进水平。

电子工业出版社秉承多年来引进国外优秀图书的经验,翻译出版了“国外计算机科学教材系列”丛书,这套教材覆盖学科范围广、领域宽、层次多,既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。这些教材涉及的学科方向包括网络与通信、操作系统、计算机组织与结构、算法与数据结构、数据库与信息处理、编程语言、图形图像与多媒体、软件工程等。同时,我们也适当引进了一些优秀英文原版教材,本着翻译版本和英文原版并重的原则,对重点图书既提供英文原版又提供相应的翻译版本。

在图书选题上,我们大都选择国外著名出版公司出版的高校教材,如 Pearson Education 培生教育出版集团、麦格劳-希尔教育出版集团、麻省理工学院出版社、剑桥大学出版社等。撰写教材的许多作者都是蜚声世界的教授、学者,如道格拉斯·科默(Douglas E. Comer)、威廉·斯托林斯(William Stallings)、哈维·戴特尔(Harvey M. Deitel)、尤利斯·布莱克(Uyless Black)等。

为确保教材的选题质量和翻译质量,我们约请了清华大学、北京大学、北京航空航天大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、西安交通大学、国防科学技术大学、解放军理工大学等著名高校的教授和骨干教师参与了本系列教材的选题、翻译和审校工作。他们中既有讲授同类教材的骨干教师、博士,也有积累了几十年教学经验的老教授和博士生导师。

在该系列教材的选题、翻译和编辑加工过程中,为提高教材质量,我们做了大量细致的工作,包括对所选教材进行全面论证;选择编辑时力求达到专业对口;对排版、印制质量进行严格把关。对于英文教材中出现的错误,我们通过作者联络和网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订。

此外,我们还将与国外著名出版公司合作,提供一些教材的教学支持资料,希望能为授课老师提供帮助。今后,我们将继续加强与各高校教师的密切联系,为广大师生引进更多的国外优秀教材和参考书,为我国计算机科学教学体系与国际教学体系的接轨做出努力。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	杨芙清	北京大学教授 中国科学院院士 北京大学信息与工程学部主任 北京大学软件工程研究所所长
委 员	王 珊	中国人民大学信息学院院长、教授
	胡道元	清华大学计算机科学与技术系教授 国际信息处理联合会通信系统中国代表
	钟玉琢	清华大学计算机科学与技术系教授、博士生导师 清华大学深圳研究生院信息学部主任
	谢希仁	中国人民解放军理工大学教授 全军网络技术研究中心主任、博士生导师
	尤晋元	上海交通大学计算机科学与工程系教授 上海分布计算技术中心主任
	施伯乐	上海国际数据库研究中心主任、复旦大学教授 中国计算机学会常务理事、上海市计算机学会理事长
	邹 鹏	国防科学技术大学计算机学院教授、博士生导师 教育部计算机基础课程教学指导委员会副主任委员
	张昆藏	青岛大学信息工程学院教授

译者序

Modern Control Engineering 是美国明尼苏达大学 Ogata 教授撰写的一部控制系统的国际通用教材。它可以作为大学工科高年级本科生或研究生用的控制系统教材。该书第一版曾于 1976 年在我国由译者翻译成中文,并由科学出版社出版发行。该书首次成功地将 20 世纪 40~50 年代发展起来的经典控制理论,与 20 世纪 60~70 年代发展起来的现代控制理论融为一体,形成了一部新型的控制系统教材。由于其内容新颖、丰富,物理概念阐述得比较清楚,联系实际广泛、密切,并配有大量的例题和习题,所以受到了读者的欢迎。随后,译者又先后对该书第二版至第四版进行了翻译。该书第二版的特点是增加了极点配置、状态观测器和控制系统的计算机仿真研究内容,并且于 1993 年由中国台湾地区儒林图书有限公司出版发行繁体中文版。第三版和第四版分别于 2000 年和 2003 年由电子工业出版社出版发行。第三版的特点是融入了 MATLAB 应用的内容。第四版的特点是删去了李雅普诺夫稳定性分析,增加了二自由度控制的内容,并且扩展了 MATLAB 的应用范围。

该书第五版于 2010 年初问世,译者受电子工业出版社之约,为能有机会将该书新版译成中文而感到荣幸。与第四版相比,第五版在内容上进行了较大的修订。首先,删减了一些人们比较熟悉的内容,如信号流图和拉普拉斯变换等,并且将原书的 12 章精简到了 10 章,突出了控制系统中的特色内容;其次,进一步充实和完善了 MATLAB 应用方面的内容;第三,增加了 20 世纪末发展起来的所谓“后现代控制理论”的内容,作为代表,初步介绍了鲁棒控制理论及 H_∞ 无穷大控制概念;最后,应当指出,第五版继承了前版本的原有特点。

Modern Control Engineering 于 20 世纪 70 年代初问世,至今已历经 40 年。由于作者对该书的不断修订和更新,该书在国际上一直受到好评。该书已被翻译成中、法、俄、日、西班牙等多种文字出版。并且,据作者统计,早在 20 世纪末,世界上已有 100 多所大学将该书选为控制系统教材,是一本名副其实的国际通用教材。该书 1976 年在我国翻译出版以来,多年来一直受到众多读者的欢迎。为了满足市场需求,到 2007 年为止,该书第一版至第四版的累计印刷次数已达 15 次之多。

译者在翻译过程中,保留了原书的部分书写规则,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 8 章及附录部分由北京航空航天大学卢伯英教授翻译,第 9 章和第 10 章由西北工业大学佟明安教授翻译,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罗维铭、肖顺达、章再贻、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。

前 言

本书介绍了控制系统分析和设计中的一些重要概念。读者将会发现，这是一本清晰易懂，适用于高等院校控制系统课程的教科书。它是为学习电气、机械、航空航天或化学工程的大学高年级学生编写的。读者在学习本书之前，应具备下列预备知识：微分方程方面的基础课程，拉普拉斯变换，向量矩阵分析，电路分析，力学和热力学基础。

在这一版中，本书进行了下列主要修订：

- 增加了利用 MATLAB 求控制系统对各种输入量响应的内容。
- 证明了利用 MATLAB 实现计算最佳化方法的有效性。
- 全书增加了一些新的例题。
- 删去了前一版中较次要的材料，以便为更重要的主题提供必要的空间。书中删去了信号流程图，也删去了拉普拉斯变换一章，但新增了拉普拉斯变换表及利用 MATLAB 的部分分式展开(分别见附录 A 和附录 B)。
- 在附录 C 中，提供了对向量矩阵分析的简短概括。这将有助于读者求解 $n \times n$ 矩阵的逆矩阵，而这种求解有可能包含在控制系统的分析和设计中。

本书的这一版编排成 10 章。其内容可以概括如下。第 1 章是对控制系统的简介。第 2 章涉及控制系统的数学模型，并且介绍了非线性数学模型的线性化方法。第 3 章导出了机械系统和电系统的数学模型。第 4 章讨论流体系统(诸如液位系统、气动系统和液压系统)和热力系统的数学模型。

第 5 章处理控制系统的瞬态响应和稳态分析，广泛采用 MATLAB 获取瞬态响应曲线。为了进行控制系统的稳定性分析，本章介绍了劳斯稳定判据和赫尔维茨稳定判据。

第 6 章讨论了控制系统的根轨迹分析和设计，包括正反馈系统和条件稳定系统。关于用 MATLAB 绘制根轨迹，在本章中进行了详细讨论。本章还包括了利用根轨迹法设计超前、滞后和滞后-超前校正装置。

第 7 章讨论控制系统的频率响应分析和设计，并且以容易理解的方式，介绍了奈奎斯特稳定判据。用来进行超前、滞后和滞后-超前校正装置设计的伯德图法，也在本章中进行了介绍。

第 8 章涉及基本的和变形的 PID 控制器。本章详细地讨论了为获得 PID 控制器的最佳参数值，特别是为满足阶跃响应特性的要求而采用的计算方法。

第 9 章介绍控制系统的状态空间分析。本章详细地讨论了可控性和可观性概念。

第 10 章涉及控制系统的状态空间设计。讨论包括极点配置、状态观测器和二次型最佳控制。本章最后对鲁棒控制系统进行了初步讨论。

本书的编排有助于学生逐步地理解控制理论。在知识的介绍过程中，精心地避开了高深的数学论证。书中也提供了一些命题的证明，这些证明过程有助于深入理解书中介绍的主要内容。

从战略角度出发，本书在提供例题方面做出了特别努力，从而使读者能够更清楚地理解书中讨论的主题。此外，除第 1 章以外，每一章后面都提供了一些有解答的习题(A 类题)，建议读者认真地学习所有这些带有解答的习题，这将有助于读者深入地理解所讨论的课题。另外，除第 1 章

以外,在每一章的后面还提供了许多待解的习题,这些待解的习题(B类题)可以作为课后作业或者测验题。

如果本书作为一学期的课程教材(共计约 56 学时),则书中的大部分内容都可以讲授,只需根据情况略去部分内容。由于书中包括大量例题和带解答的习题(A类题),它可以回答读者可能产生的许多问题,所以对于希望学习控制理论基础知识的实际工程人员,本书也可以作为自学教材。

我衷心感谢本书这一版的评阅人,美国康奈尔大学的 Mark Campbell,亚利桑那大学的 Henry Sodano和艾奥瓦大学的 Atul G. Kelkar。最后,我要对副编辑 Alice Dworkin 女士、高级总编辑 Scott Disanno 先生及所有参与这项出版计划的人们,表示诚挚的谢意,感谢他们为本书迅速和高质量的出版所做的工作。

Katsuhiko Ogata

目 录

第 1 章 控制系统简介	1
1.1 引言	1
1.1.1 控制理论和实践发展史的简单回顾	1
1.1.2 定义	2
1.2 控制系统举例	3
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
1.2.4 鲁棒控制系统	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 控制系统的设计和校正	7
1.4.1 性能指标	7
1.4.2 系统的校正	8
1.4.3 设计步骤	8
1.5 本书概况	8
第 2 章 控制系统的数学模型	10
2.1 引言	10
2.1.1 数学模型	10
2.1.2 简化性和精确性	10
2.1.3 线性系统	11
2.1.4 线性定常系统和线性时变系统	11
2.2 传递函数和脉冲响应函数	11
2.2.1 传递函数	11
2.2.2 传递函数的说明	12
2.2.3 卷积积分	12
2.2.4 脉冲响应函数	12
2.3 自动控制系统	13
2.3.1 方框图	13
2.3.2 闭环系统的方框图	14
2.3.3 开环传递函数和前向传递函数	14
2.3.4 闭环传递函数	14
2.3.5 用 MATLAB 求串联、并联和反馈(闭环)传递函数	15
2.3.6 自动控制器	16
2.3.7 工业控制器分类	17
2.3.8 双位或开-关控制作用	17

2.3.9	比例控制作用	18
2.3.10	积分控制作用	18
2.3.11	比例-加-积分控制作用	19
2.3.12	比例-加-微分控制作用	19
2.3.13	比例-加-积分-加-微分控制作用	19
2.3.14	扰动作用下的闭环系统	19
2.3.15	画方框图的步骤	20
2.3.16	方框图的简化	21
2.4	状态空间模型	22
2.4.1	现代控制理论	22
2.4.2	现代控制理论与传统控制理论的比较	23
2.4.3	状态	23
2.4.4	状态变量	23
2.4.5	状态向量	23
2.4.6	状态空间	23
2.4.7	状态空间方程	23
2.4.8	传递函数与状态空间方程之间的关系	26
2.4.9	传递矩阵	27
2.5	纯量微分方程系统的状态空间表达式	28
2.5.1	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	28
2.5.2	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	29
2.6	用 MATLAB 进行数学模型变换	31
2.6.1	由传递函数变换为状态空间表达式	31
2.6.2	由状态空间表达式变换为传递函数	32
2.7	非线性数学模型的线性化	33
2.7.1	非线性系统	33
2.7.2	非线性系统的线性化	33
2.7.3	非线性数学模型的线性近似	34
例题和解答		35
习题		45
第3章	机械系统和电系统的数学模型	49
3.1	引言	49
3.2	机械系统的数学模型	49
3.3	电系统的数学模型	55
3.3.1	LRC 电路	55
3.3.2	串联元件的传递函数	56
3.3.3	复阻抗	56
3.3.4	无负载效应串联元件的传递函数	58
3.3.5	电子控制器	59
3.3.6	运算放大器	59
3.3.7	反相放大器	59
3.3.8	非反相放大器	60
3.3.9	求传递函数的阻抗法	61

3.3.10	利用运算放大器构成的超前或滞后网络	61
3.3.11	利用运算放大器构成的 PID 控制器	62
	例题和解答	65
	习题	73
第 4 章	流体系统和热力系统的数学模型	76
4.1	引言	76
4.2	液位系统	76
4.2.1	液位系统的液阻和液容	76
4.2.2	液位系统	78
4.2.3	相互有影响的液位系统	79
4.3	气动系统	80
4.3.1	气动系统和液压系统之间的比较	80
4.3.2	气动系统	81
4.3.3	压力系统的气阻和气容	81
4.3.4	压力系统	83
4.3.5	气动喷嘴 - 挡板放大器	83
4.3.6	气动接续器	84
4.3.7	气动比例控制器(力 - 距离型)	85
4.3.8	气动比例控制器(力 - 平衡型)	88
4.3.9	气动执行阀	89
4.3.10	获得微分控制作用的基本原理	90
4.3.11	获得气动比例 - 加 - 积分控制作用的方法	91
4.3.12	获得气动比例 - 加 - 积分 - 加 - 微分控制作用的方法	92
4.4	液压系统	94
4.4.1	液压系统	94
4.4.2	液压系统的优缺点	94
4.4.3	说明	94
4.4.4	液压伺服系统	95
4.4.5	液压积分控制器	98
4.4.6	液压比例控制器	99
4.4.7	缓冲器	100
4.4.8	获得液压比例 - 加 - 积分控制作用的方法	101
4.4.9	获得液压比例 - 加 - 微分控制作用的方法	102
4.4.10	获取液压比例 - 加 - 积分 - 加 - 微分控制作用的方法	103
4.5	热力系统	103
4.5.1	热阻和热容	104
4.5.2	热力系统	104
	例题和解答	106
	习题	116
第 5 章	瞬态响应和稳态响应分析	121
5.1	引言	121
5.1.1	典型试验信号	121
5.1.2	瞬态响应和稳态响应	121

5.1.3	绝对稳定性、相对稳定性和稳态误差	122
5.2	一阶系统	122
5.2.1	一阶系统的单位阶跃响应	123
5.2.2	一阶系统的单位斜坡响应	123
5.2.3	一阶系统的单位脉冲响应	124
5.2.4	线性定常系统的重要特性	124
5.3	二阶系统	125
5.3.1	伺服系统	125
5.3.2	二阶系统的阶跃响应	125
5.3.3	瞬态响应指标的定义	129
5.3.4	关于瞬态响应指标的几点说明	130
5.3.5	二阶系统及其瞬态响应指标	130
5.3.6	带速度反馈的伺服系统	134
5.3.7	二阶系统的脉冲响应	135
5.4	高阶系统	137
5.4.1	高阶系统的瞬态响应	137
5.4.2	闭环主导极点	138
5.4.3	复平面上的稳定性分析	138
5.5	用 MATLAB 进行瞬态响应分析	139
5.5.1	引言	139
5.5.2	线性系统的 MATLAB 表示	139
5.5.3	在图形屏幕上书写文本	143
5.5.4	标准二阶系统的 MATLAB 描述	143
5.5.5	求传递函数系统的单位阶跃响应	144
5.5.6	用 MATLAB 绘制单位阶跃响应曲线的三维图	145
5.5.7	用 MATLAB 求上升时间、峰值时间、最大过调量和调整时间	147
5.5.8	脉冲响应	148
5.5.9	求脉冲响应的另一种方法	149
5.5.10	斜坡响应	150
5.5.11	在状态空间中定义的系统的单位斜坡响应	151
5.5.12	求对任意输入信号的响应	153
5.5.13	对初始条件的响应	155
5.5.14	对初始条件的响应(状态空间法,情况1)	156
5.5.15	对初始条件的响应(状态空间法,情况2)	158
5.5.16	利用命令 Initial 求对初始条件的响应	159
5.6	劳斯稳定判据	162
5.6.1	劳斯稳定判据简介	162
5.6.2	特殊情况	164
5.6.3	相对稳定性分析	165
5.6.4	劳斯稳定判据在控制系统分析中的应用	166
5.7	积分和微分控制作用对系统性能的影响	166
5.7.1	积分控制作用	166
5.7.2	系统的比例控制	167
5.7.3	系统的积分控制	168

5.7.4	对转矩扰动的响应(比例控制)	168
5.7.5	对转矩扰动的响应(比例-加-积分控制)	169
5.7.6	微分控制作用	170
5.7.7	带惯性负载系统的比例控制	170
5.7.8	带惯性负载系统的比例-加-微分控制	171
5.7.9	二阶系统的比例-加-微分控制	171
5.8	单位反馈控制系统中的稳态误差	171
5.8.1	控制系统的分类	172
5.8.2	稳态误差	172
5.8.3	静态位置误差常数 K_p	173
5.8.4	静态速度误差常数 K_v	173
5.8.5	静态加速度误差常数 K_a	174
5.8.6	小结	175
	例题和解答	176
	习题	199
第6章	利用根轨迹法进行控制系统的分析和设计	205
6.1	引言	205
6.2	根轨迹图	206
6.2.1	辐角和幅值条件	206
6.2.2	示例	207
6.2.3	根轨迹绘图的一般规则	214
6.2.4	关于根轨迹图的说明	217
6.2.5	$G(s)$ 的极点与 $H(s)$ 的零点的抵消	218
6.2.6	典型的零-极点分布及其相应的根轨迹	219
6.2.7	小结	219
6.3	用 MATLAB 绘制根轨迹图	220
6.3.1	用 MATLAB 绘制根轨迹图	220
6.3.2	定常 ζ 轨迹和定常 ω_n 轨迹	224
6.3.3	在根轨迹图上绘制极网格	225
6.3.4	条件稳定系统	227
6.3.5	非最小相位系统	228
6.3.6	根轨迹与定常增益轨迹的正交性	229
6.3.7	求根轨迹上任意点的增益 K 值	231
6.4	正反馈系统的根轨迹图	231
6.5	控制系统设计的根轨迹法	234
6.5.1	初步设计考虑	234
6.5.2	用根轨迹法进行设计	235
6.5.3	串联校正和并联(或反馈)校正	235
6.5.4	常用校正装置	236
6.5.5	增加极点的影响	236
6.5.6	增加零点的影响	237
6.6	超前校正	237
6.6.1	超前校正装置和滞后校正装置	237

6.6.2	基于根轨迹法的超前校正方法	238
6.6.3	已校正与未校正系统阶跃响应和斜坡响应的比较	243
6.7	滞后校正	244
6.7.1	采用运算放大器的电子滞后校正装置	245
6.7.2	基于根轨迹法的滞后校正方法	245
6.7.3	用根轨迹法进行滞后校正设计的步骤	246
6.8	滞后-超前校正	252
6.8.1	利用运算放大器构成的电子滞后-超前校正装置	252
6.8.2	基于根轨迹法的滞后-超前校正方法	253
6.9	并联校正	261
6.9.1	并联校正系统设计的基本原理	261
6.9.2	速度反馈系统	262
	例题和解答	265
	习题	297
第7章	用频率响应法分析和设计控制系统	302
7.1	引言	302
7.1.1	求系统对正弦输入信号的稳态输出	302
7.1.2	用图形表示频率响应特性	306
7.2	伯德图	306
7.2.1	伯德图或对数坐标图	306
7.2.2	$G(j\omega)H(j\omega)$ 的基本因子	306
7.2.3	增益 K	306
7.2.4	积分和微分因子 $(j\omega)^{\mp 1}$	307
7.2.5	一阶因子 $(1+j\omega T)^{\mp 1}$	308
7.2.6	二阶因子 $[1+2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{\mp 1}$	311
7.2.7	谐振频率 ω_r 和谐振峰值 M_r	313
7.2.8	绘制伯德图的一般步骤	314
7.2.9	最小相位系统和非最小相位系统	315
7.2.10	传递延迟	316
7.2.11	系统类型与对数幅值曲线之间的关系	318
7.2.12	静态位置误差常数的确定	318
7.2.13	静态速度误差常数的确定	318
7.2.14	静态加速度误差常数的确定	319
7.2.15	用 MATLAB 绘制伯德图	320
7.2.16	绘制定义在状态空间中的系统的伯德图	323
7.3	极坐标图	324
7.3.1	积分和微分因子 $(j\omega)^{\mp 1}$	324
7.3.2	一阶因子 $(1+j\omega T)^{\mp 1}$	324
7.3.3	二阶因子 $[1+2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{\mp 1}$	325
7.3.4	极坐标图的一般形状	327
7.3.5	用 MATLAB 绘制奈奎斯特图	329
7.3.6	注意事项	331
7.3.7	绘制定义在状态空间中的系统的奈奎斯特图	333

7.4	对数幅 - 相图	335
7.5	奈奎斯特稳定判据	337
7.5.1	预备知识	338
7.5.2	映射定理	340
7.5.3	映射定理在闭环系统稳定性分析中的应用	340
7.5.4	奈奎斯特稳定判据	341
7.5.5	关于奈奎斯特稳定判据的几点说明	341
7.5.6	$G(s)H(s)$ 含有位于 $j\omega$ 轴上的极点和(或)零点的特殊情况	342
7.6	稳定性分析	344
7.6.1	条件稳定系统	347
7.6.2	多回路系统	347
7.6.3	应用于逆极坐标图上的奈奎斯特稳定判据	349
7.7	相对稳定性分析	350
7.7.1	相对稳定性	350
7.7.2	通过保角变换进行相对稳定性分析	350
7.7.3	相位裕量和增益裕量	351
7.7.4	关于相位裕量和增益裕量的几点说明	354
7.7.5	用 MATLAB 求增益裕量、相位裕量、相位交界频率和增益交界频率	354
7.7.6	谐振峰值幅值 M_r 和谐振峰值频率 ω_r	356
7.7.7	标准二阶系统中阶跃瞬态响应与频率响应之间的关系	357
7.7.8	一般系统中的阶跃瞬态响应与频率响应之间的关系	358
7.7.9	截止频率和带宽	359
7.7.10	剪切率	360
7.7.11	获得谐振峰值、谐振频率和带宽的 MATLAB 方法	360
7.8	单位反馈系统的闭环频率响应	361
7.8.1	闭环频率响应	362
7.8.2	等幅值轨迹 (M 圆)	362
7.8.3	等相角轨迹 (N 圆)	363
7.8.4	尼柯尔斯图	366
7.9	传递函数的实验确定法	368
7.9.1	正弦信号产生器	368
7.9.2	由伯德图求最小相位传递函数	368
7.9.3	非最小相位传递函数	369
7.9.4	关于实验确定传递函数的几点说明	370
7.10	利用频率响应法设计控制系统	371
7.10.1	从开环频率响应可以获得的信息	372
7.10.2	对开环频率响应的要求	372
7.10.3	超前、滞后和滞后 - 超前校正的基本特性	373
7.11	超前校正	373
7.11.1	超前校正装置特性	373
7.11.2	基于频率响应法的超前校正	374
7.12	滞后校正	380
7.12.1	滞后校正装置的特性	380
7.12.2	基于频率响应法的滞后校正	381

7.12.3	关于滞后校正的一些说明	385
7.13	滞后 - 超前校正	386
7.13.1	滞后 - 超前校正装置的特性	386
7.13.2	基于频率响应法的滞后 - 超前校正	386
7.13.3	用频率响应法设计控制系统小结	390
7.13.4	超前、滞后和滞后 - 超前校正的比较	390
7.13.5	图形对比	391
7.13.6	反馈校正	391
7.13.7	不希望极点的抵消	391
7.13.8	不希望的共轭复数极点的抵消	392
7.13.9	结束语	393
	例题和解答	393
	习题	424
第8章	PID 控制器和变形 PID 控制器	430
8.1	引言	430
8.2	PID 控制器的齐格勒 - 尼柯尔斯调节法则	430
8.2.1	控制对象的 PID 控制	430
8.2.2	用来调整 PID 控制器的齐格勒 - 尼柯尔斯法则	431
8.2.3	第一种方法	431
8.2.4	第二种方法	432
8.2.5	说明	433
8.3	用频率响应法设计 PID 控制器	438
8.4	利用计算最佳化方法设计 PID 控制器	442
8.5	PID 控制方案的变形	447
8.5.1	PI-D 控制	447
8.5.2	I-PD 控制	449
8.5.3	二自由度 PID 控制	449
8.6	二自由度控制	450
8.7	改善响应特性的零点配置法	452
8.7.1	零点配置	453
8.7.2	对系统响应特性的要求	453
8.7.3	确定 G_{c2}	454
	例题和解答	465
	习题	485
第9章	控制系统的状态空间分析	491
9.1	引言	491
9.2	传递函数的状态空间表达式	491
9.2.1	状态空间标准形的表达式	491
9.2.2	$n \times n$ 维矩阵 A 的特征值	494
9.2.3	$n \times n$ 维矩阵的对角化	494
9.2.4	特征值的不变性	496
9.2.5	状态变量组的非唯一性	497
9.3	用 MATLAB 进行系统模型变换	497

9.3.1	传递函数系统的状态空间表达式	497
9.3.2	由状态空间表达式到传递函数的变换	498
9.4	定常系统状态方程的解	500
9.4.1	齐次状态方程的解	500
9.4.2	矩阵指数	501
9.4.3	齐次状态方程的拉普拉斯变换解法	502
9.4.4	状态转移矩阵	503
9.4.5	状态转移矩阵的性质	504
9.4.6	非齐次状态方程的解	505
9.4.7	非齐次状态方程的拉普拉斯变换解法	506
9.4.8	初始状态为 $x(t_0)$ 的解	506
9.5	向量矩阵分析中的若干结果	507
9.5.1	凯莱-哈密顿定理	507
9.5.2	最小多项式	507
9.5.3	矩阵指数 e^{At}	508
9.5.4	向量的线性无关	511
9.6	可控性	512
9.6.1	可控性和可观测性	512
9.6.2	连续时间系统的状态完全可控性	512
9.6.3	状态完全可控性条件的另一种形式	514
9.6.4	在 s 平面上状态完全可控的条件	516
9.6.5	输出可控性	516
9.6.6	不可控系统	517
9.6.7	可稳定性	517
9.7	可观测性	517
9.7.1	连续时间系统的完全可观测性	518
9.7.2	在 s 平面上完全可观测性的条件	519
9.7.3	完全可观测性条件的另一种形式	520
9.7.4	对偶原理	521
9.7.5	可检测性	522
	例题和解答	522
	习题	545
第 10 章	控制系统的状态空间设计	549
10.1	引言	549
10.2	极点配置	549
10.2.1	极点配置设计	549
10.2.2	任意配置极点的充分必要条件	551
10.2.3	用变换矩阵 T 确定矩阵 K	553
10.2.4	用直接代入法确定矩阵 K	554
10.2.5	用阿克曼公式确定矩阵 K	554
10.2.6	调节器系统和控制系统	556
10.2.7	选择希望的闭环极点的位置	556
10.2.8	说明	558