



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press  
Taylor & Francis Group

# 基于MATLAB的线性 控制系统分析与设计 (原书第5版)

## Linear Control System Analysis and Design with MATLAB

John J. D'Azzo

(美) Constantine H. Houpis 著

Stuart N. Sheldon

张武

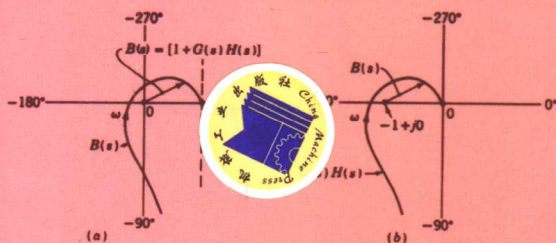
王玲芳 译

孙鹏



本书附光盘

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



TP273/484D

2008

国际电气工程先进技术译丛

# 基于 MATLAB 的线性 控制系统分析与设计

(原书第 5 版)

John J. D' Azzo

(美) Constantine H. Houpis 著

Stuart N. Sheldon

张 武 王玲芳 孙 鹏 译

机械工业出版社

本书第1版出版于1975年,本书是其第5版,内容涵盖了经典控制理论和现代控制理论的基础部分;在控制对象上包括了连续控制系统和数字控制系统;同时兼顾频率响应法、根轨迹法和状态空间法的分析方法,详细论述了控制系统模型的建立、系统特性和性能分析以及基于状态反馈和输出反馈的控制器设计等基本部分。本书结构清晰、论述细腻、实例生动、例题习题广博,并以MATLAB等CAD控制问题的软件求解贯穿始终。

本书既适合作为工科高年级本科生、研究生自动控制理论课程的教材和参考书,由于配有大量的习题,本书也可以供低年级控制专业本科生选作教材,同时也适合研究人员和工程技术人员作为控制系统的分析和设计的自学读物。

Authorized translation from the English language edition, entitled **LINEAR CONTROL SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN WITH MATLAB, Fifth Edition, Revised and Expanded**, ISBN: 0-8247-4038-6, edited by John J. D' Azzo, Constantine H. Houpis, Stuart N. Sheldon, published by Marcel Dekker, Inc., 270 Madison Avenue, New York, NY 10016, U.S.A.

Copyright©2003 by Marcel Dekker, Inc. All Rights Reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字01-2006-6051号

## 图书在版编目(CIP)数据

基于MATLAB的线性控制系统分析与设计(原书第5版)/(美)阿兹欧(Azzo, J. J. D.)等著;张武等译. —北京:机械工业出版社,2008.3  
(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Linear Control System Analysis and Design with MATLAB  
ISBN 978-7-111-23224-7

I. 基… II. ①阿… ②张… III. 线性控制系统-计算机辅助计算-软件包, MATLAB IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第001746号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:顾谦

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明 责任印制:李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷

2008年4月第1版第1次印刷

169mm×239mm·21印张·818千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-23224-7

ISBN 978-7-89482-545-2(光盘)

定价:88.00元(含1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

## 译者序

由 John J. D' Azzo、Constantine H. Houpis 和 Stuart N. Sheldon 著的《Linear Control System Analysis and Design with MATLAB》一书，第 1 版出版于 1975 年。先后在 1981 年、1988 年和 1995 年 3 次再版，本书是其第 5 版，内容涵盖了经典控制理论和现代控制理论的基础部分；在控制对象上包括了连续控制系统和数字控制系统；同时兼顾频率响应法、根轨迹法和状态空间法的分析方法，详细论述了控制系统模型的建立、系统特性和性能分析以及基于状态反馈和输出反馈的控制器的设计等基本部分。本书经历了 5 个版本的锤炼，既保留了基础的内容和严谨的论述的特点，又不断将最新的 CAD 软件引入控制系统的分析与设计之中。因此，美国多所著名大学采用本书作为控制理论与控制工程专业方向的控制理论教材或主要教学参考书。

本书全面地论述了连续控制系统的分析、设计方法，具体包括常用时间函数的拉普拉斯变换和拉普拉斯变换定理、动态系统的数学模型、一阶和二阶系统的瞬态响应分析、工业自动控制器的基本控制作用、根轨迹分析、控制系统的频率响应分析、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及数字系统设计。书中列举了大量的用于控制系统分析与设计的 MATLAB 计算程序。

本书适合于工科高年级本科生、研究生、工程技术人员阅读，本书配有大量的习题，也适用于低年级控制专业本科生选作教材。

本书的翻译分工如下：第 1 章~第 10 章由张武博士翻译，第 11 章~第 14 章、第 15 章的部分内容由孙鹏博士翻译，第 15 章的部分内容、第 16 章以及附录等其他部分的内容由王玲芳博士后翻译，全书由王玲芳统稿并整理。感谢肖春虹、张薇薇、马俊婷、马凤华、朱晓勇、武蓓、么刚、陈君、韩红波、胡琳琳、李传经、游庆珍、王娣英、吴璟、李虹、赵志强、李挺屹、姚琼、驾鹏程、肖琳、张辉、史岩、任晓青、李雷、王铮、刘磊、匡振国、齐卫宁、宋磊、张睿、孙蓉、王莉、邓忠强、杨江波和李刚等同志为本书所做的编排、校对等大量的工作。感谢机械工业出版社相关工作人员对翻译工作过程中提供的各方面支持。在此向伟大的控制理论的学者和教育学家 John J. D' Azzo 先生致以最诚挚的敬意。

另外，需要指出：译者严格遵照原文语义开展翻译工作，本书的内容并不代表译者及其所在单位的观点。由于译者水平有限，难免有误，敬请广大读者批评指正。

译者  
2008 年 2 月

# 前 言

20 世纪的技术进步要求未来的工程教育把重点放在如何架起理论世界和现实世界之间的桥梁上。本书更加关注本科生的需求，特别针对志在追求控制理论坚实基础、提高跨越控制理论与实际应用鸿沟能力的本科生。为帮助读者实现目标，本书通篇采用了计算机辅助的设计精度检验 (CADAC) 方法，以此鼓励良好的计算机使用习惯。每个 CADAC 实例都使用了基本概念，确保了使用计算机解决方法的旺盛生命力。

本书被充实为一本适用于本科生和研究生的教材，更重视将控制理论基础知识应用到基于模拟和采样数据的单输入单输出 (SISO) 反馈控制系统中，同时最大限度地扩展到数字控制领域。为了简化设计过程，扩展的参考资料被集成到计算机辅助设计 (CAD) 软件包中。而运算结果是控制系统及设计的全面呈现，相关结果已经得到课程测试，确保了其对于课堂教育和自学研究的价值。

本书的特色在于广泛地使用了注释、图表、计算、表格和符号。精确的数学表达对于高级的控制应用设计工作是非常必要的。坚实的基础是建立在现代控制概念和经典控制基本原理之上的，所有这些都是与控制系统的分析与设计密切相关的。各种技术的介绍都是为了帮助读者理解 A. F. Fuller 所谓的“高深莫测的控制系统”。

为了提供本课程的连贯性，我们避开了正式的定理及证明，而采用了另外的组织形式——将具有理解能力的学生吸引到苛求理论的多变量系统中。为了增强学生对于教材的理解，每章都包含了设计实例。达到该水平的学生完全具备理解高级控制理论课本介绍的高级控制的理解能力。

第 2 章开始介绍描述物理系统、网络和设备相对应的差分方程。同时介绍了方框图、传递函数和状态空间 (现代控制理论中必不可少的概念)。对于给定的物理系统，状态空间所使用的方法是使用 SISO 差分方程联立推导出来的状态向量差分方程。本章也论述了如何利用拉格朗日方程。

第 3 章介绍了求解差分方程的经典方法。在引出状态变量方程之后，详细地解释了其求解过程。第 14 章将介绍传递函数与状态方程间的关系。另外，本章还论述了状态转换矩阵的重要性，并推导出了状态转换方程。接下来解释了特征根的思想并利用凯莱 - 哈密尔顿定理和西尔维斯特定理来评估状态转换方程。

第 4 章的前一部分介绍了拉普拉斯变换方法和极点-零点映射的全面描述。介绍了矩阵代数，作为拉普拉斯变换求解状态方程的背景资料。最后，清晰地描

述了转换矩阵的求解。

第5章首先以传统方框图方法开始描述系统表示。接下来介绍了利用信号流图进行图形仿真和状态转移矩阵的确定。本章也论述了如何从系统传递函数推导出并联状态图，以获得解耦状态形式的优势。

第6章介绍了反馈系统的基本特性。这包括系统类型和系统跟随或跟踪多项式输入能力之间的关系。

第7章论述了根轨迹方法。第8章、第9章介绍了利用对数和极坐标图描述频率响应。这些章节论述了如下主题：奈奎斯特稳定性标准； $s$ 平面、频率域和时间域间的相互关系；通过设定增益来获得预定的输出响应峰值来跟踪多项命令输入。第10章、第11章论述了提高系统性能的方法，其中包括串联和反馈校正器，全面论述了根轨迹和频率响应的校正器设计方法。

第12章研究了具有品质因数的期望控制比的建模方法，其目的是满足系统性能指标。系统的输入通常可被分成两类：①系统的输出（跟踪系统）将要跟踪的输入信号；②使之对系统输出影响最小的输入信号（干扰抑制系统）。对于上述两类系统，通过正确设置极点位置可以综合出期望的控制比，必要时，也应该考虑零点的位置。第12章还介绍了 Guillemin - Truxal 设计流程，列举了一个设计跟踪系统的流程实例和一个以强调干扰抑制为主的设计流程。

第13章解释了利用完全状态变量反馈求出期望的系统性能。该章利用简单明了的方式介绍了现代控制的两个重要概念——可控性和可观性。

第14章介绍了随着系统变化的博德图敏感度的概念。其他的方法还包括利用反馈传递函数来构建状态反馈中不可访问状态的估计，以及振荡点附近的非线性系统的线性化方法。

第15章介绍了数字采样（S-D）控制系统的基础理论。第16章描述了数字控制系统设计，并以实例证明了数字补偿方式的有效性。数字系统的伪连续时间（PCT）模型使数字系统设计可以使用连续时间模型。

本书经过精心地考虑，以便在各领域（电子、航空和机械等）工作的工程师用以开展相关的自学研究。为了保证本书对所有研究人员都具有价值，本书使用了各种控制系统的实例，并利用通用的数学和方框图模型统一地处理各种物理实体的控制系统。

目前，有许多可用的计算机辅助设计（CAD）软件包（如 MATLAB [见附录 C]、Simulink 和 TOTAL - PC）可以帮助学生和工程师分析、设计和仿真控制系统。本书通篇强调了 MATLAB 的使用，介绍了大量的作为实例的 m 文件。

我们感谢使用过本书前几版的同学及其导师们，他们已经审阅了本版本，并提出了许多有益的评价和建议。我们特别感谢美国空军技术学院的电气工程学名誉教授 R.E. Fontana 博士，他们为本书提供了前几个版本。本版本是专门感谢威

斯康星大学的工程学名誉教授 T.J.Higgins 博士，他通篇审阅了早期的草稿。

我们也感谢英格兰南安普敦大学的 Donald McLean 名誉教授，他曾经作为空军技术学院的客座教授。与他的合作是富有启迪性的经历，与他的个人关系也是灵感的源泉，在此表示深深的敬意。

John J.D' Azzo  
Constantine H. Houpis  
Stuart N. Sheldon

## 关于作者

John J. D'Azzo是俄亥俄州Wright-Patterson空军基地空军技术研究所工程和管理研究生院的荣誉退休教授。作为电气与电子工程师学会的会员、美国航空与航天学会的联系会员和美国工程教育学会的成员，他是杰出国民生涯服务奖的获得者(1998年)。D'Azzo博士从纽约城市学院(纽约)获得电子与电气学士学位(1941)，从俄亥俄州州立大学(哥伦布)获得电子与电气学士学位(1950年)，并从英国索尔福德大学获得博士学位(1978年)。

Constantine H. Houpis是俄亥俄州Wright-patterson空军基地空军技术研究所工程和管理研究生院的荣誉退休教授和控制科学分部的荣誉退休的资深副研究员。他是60多篇期刊文章和书籍章节的作者，还是10本教材的作者。他是拉勒米市怀俄明大学杰出工程校友奖的获得者(2002年)，并是国民生涯服务奖的获得者(1997年)。作为电气与电子工程师学会的会员，Houpis博士从厄巴纳-尚佩恩的伊利诺斯大学获得管理工程学士学位(1982年)，从俄亥俄州Wright-Patterson空军基地空军技术研究所获得硕士学位(1986年)和博士学位(1989年)。





## 关于本书第5版

本书通篇透彻的课堂验证并被证明是有价值的自学伙伴。本书就现代控制理论和常规控制系统设计的精深综述而言，其特征是深入的解释、图、计算和表格——将数学保持在最小限度，而强调真实世界的工程挑战。本书强调CAD软件包的使用，以改善并简化有效控制系统的设计。

本书每章给出了广泛收集的新的和实践的练习材料，本版保证可以作为工程教学的标准教材——对前1版中出现的问题，修订了80%，以增强当前电子、航空、航天和机械应用所必要的概念。

完全最新的和精简的内容具有学生友好的特征，第5版给出了使用MATLAB和TOTA-PC的广范示例，也给出了一个附录，列出了优化控制系统分析和设计的MATLAB函数；针对离散时间控制系统的设计，详细讲解了对伪连续时间控制系统的分析；强调计算机辅助设计的准确度检查(CADAC)；考虑设计灵敏度、可控性和可观性的重要性；并说明了设计变化对系统性能的影响。

# 目 录

译者序

前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 控制系统简介 .....	1
1.3 定义 .....	9
1.4 历史背景 .....	10
1.5 数字控制的发展 .....	14
1.6 数学背景 .....	16
1.7 工程控制问题 .....	17
1.8 计算机知识 .....	20
1.9 本书要点 .....	20
<b>参考文献</b> .....	21
<b>第 2 章 系统的方程描述</b> .....	24
2.1 引言 .....	24
2.2 电子元件与电路 .....	25
2.3 状态的概念 .....	29
2.4 传递函数和方框图 .....	34
2.5 机械传动系统 .....	35
2.6 模拟电路 .....	40
2.7 旋转运动机械系统 .....	41
2.8 齿轮传动的有效转动惯量和阻尼 .....	43
2.9 热力学系统 .....	45
2.10 液压线性执行器 .....	47
2.11 液位系统 .....	50
2.12 旋转功率放大器 .....	52
2.13 直流伺服电动机 .....	53
2.14 交流伺服电动机 .....	55
2.15 拉格朗日方程 .....	56
2.16 小结 .....	59

参考文献 .....	59
<b>第 3 章 微分方程的解</b> .....	<b>61</b>
3.1 引言 .....	61
3.2 控制系统的标准输入 .....	61
3.3 稳态响应: 正弦输入 .....	62
3.4 稳态响应: 多项式输入 .....	64
3.5 瞬态响应: 经典法 .....	66
3.6 时间常数的定义 .....	69
3.7 二阶机械系统实例 .....	69
3.8 二阶电系统实例 .....	71
3.9 二阶系统的瞬态响应 .....	72
3.10 时间常数的详细说明 .....	75
3.11 CAD 精确度检验 (CADAC) .....	76
3.12 状态变量方程 .....	77
3.13 特征值 .....	78
3.14 状态转移矩阵的计算 .....	79
3.15 状态方程式的完全解 .....	81
3.16 小结 .....	83
参考文献 .....	83
<b>第 4 章 拉普拉斯变换</b> .....	<b>85</b>
4.1 引言 .....	85
4.2 拉普拉斯变换的定义 .....	85
4.3 简单函数拉普拉斯变换的推导 .....	86
4.4 拉普拉斯变换理论 .....	87
4.5 CAD 精确度检测 (CADAC) .....	90
4.6 拉普拉斯变换在微分方程中的应用 .....	90
4.7 反变换 .....	91
4.8 赫维赛德 (Heaviside) 部分分式展开定理 .....	92
4.9 部分分式展开的 MATLAB 实例 .....	98
4.10 求部分分式的捷径方法 .....	100
4.11 部分分式系数的图形解释 .....	102
4.12 通过零极点图确定频率响应 .....	105
4.13 极点位置与稳定性 .....	108
4.14 脉冲函数的拉普拉斯变换 .....	108
4.15 脉冲激励的二阶系统 .....	110
4.16 状态方程的解 .....	111

4.17 传递函数矩阵的计算 .....	113
4.18 MIMO 系统的 MATLAB m 文件 .....	114
4.19 小结 .....	117
<b>参考文献</b> .....	118
<b>第 5 章 系统的描述</b> .....	120
5.1 引言 .....	120
5.2 方框图 .....	120
5.3 总传递函数的确定 .....	124
5.4 标准的方框图术语 .....	127
5.5 位置控制系统 .....	129
5.6 仿真图 .....	133
5.7 信号流图 .....	136
5.8 状态转移信号流图 .....	141
5.9 以传递函数求并联状态图 .....	144
5.10 矩阵的对角化 .....	146
5.11 利用状态变换求解状态方程 .....	156
5.12 具有复数特征值的矩阵变换 .....	158
5.13 将矩阵变换成友型 .....	160
5.14 使用 MATLAB 求友矩阵 .....	163
5.15 小结 .....	165
<b>参考文献</b> .....	165
<b>第 6 章 控制系统的特性</b> .....	167
6.1 引言 .....	167
6.2 劳斯稳定判据 .....	167
6.3 数学和物理形式 .....	172
6.4 反馈控制系统的类型 .....	173
6.5 系统类型的分析 .....	175
6.6 “2 型”系统实例 .....	180
6.7 稳态误差系数 .....	181
6.8 CAD 精确度检测 (CADAC) .....	184
6.9 稳态误差系数的应用 .....	185
6.10 非单位反馈系统 .....	186
6.11 小结 .....	187
<b>参考文献</b> .....	187
<b>第 7 章 根轨迹</b> .....	189
7.1 引言 .....	189

7.2	特征方程根轨迹的绘制 .....	190
7.3	根轨迹的定性分析 .....	192
7.4	根轨迹的绘制流程 .....	195
7.5	开环传递函数 .....	195
7.6	控制比 ( $C(s)/R(s)$ ) 的极点 .....	196
7.7	幅值和相角条件的应用 .....	198
7.8	根轨迹图的几何特性 (构造规则) .....	202
7.9	CAD 精确度检测 (CADAC) .....	210
7.10	根轨迹的实例 .....	210
7.11	7.10 节实例的 MATLAB 根轨迹 .....	214
7.12	右半平面零点的根轨迹实例 .....	217
7.13	性能指标 .....	219
7.14	传递滞后 .....	223
7.15	综合 .....	225
7.16	负反馈系统根轨迹作图规则的总结 .....	225
7.17	小结 .....	227
<b>参考文献</b> .....		227
<b>第 8 章 频率响应</b> .....		228
8.1	引言 .....	228
8.2	正弦函数和时间响应的相互关系 .....	228
8.3	频率响应曲线 .....	229
8.4	博德图 .....	231
8.5	通用频率传递函数关系 .....	232
8.6	博德图的绘制 .....	233
8.7	绘制博德图的实例 .....	238
8.8	利用 MATLAB 生成博德图 .....	241
8.9	系统类型和增益与对数幅频特性的关系 .....	242
8.10	CAD 精确度检测 (CADAC) .....	244
8.11	传递函数的实验确定方法 .....	245
8.12	直接极坐标图 .....	245
8.13	小结: 直接极坐标图 .....	251
8.14	奈奎斯特稳定判据 .....	252
8.15	使用极坐标图的奈奎斯特判据应用实例 .....	258
8.16	用于具有时间滞后系统的奈奎斯特稳定判据 .....	262
8.17	相位裕度、增益裕度的定义及其与稳定性的关系 .....	263
8.18	对数幅度、相位特性的稳定特性 .....	265
8.19	利用尼克尔斯图确定系统的稳定性 .....	266

8.20 小结 .....	268
<b>参考文献</b> .....	269
<b>第 9 章 基于频率响应的闭环跟踪特性</b> .....	270
9.1 引言 .....	270
9.2 直接极坐标图 .....	270
9.3 简单二阶系统的 $M_m$ 和 $\omega_m$ 确定 .....	271
9.4 正弦响应和时间响应的相互关系 .....	274
9.5 复数平面上 $C(j\omega)/R(j\omega)$ 的 $M(\omega)$ 和 $\alpha(\omega)$ 圆 (直接图) .....	275
9.6 在逆极坐标平面中的 $1/M$ 和等 $\alpha$ 圆 (单位反馈) .....	281
9.7 单位反馈系统对期望 $M_m$ 值的增益调整: 直接极坐标图 .....	282
9.8 对数幅值 - 相位图上的等 $M$ 和等 $\alpha$ 曲线 .....	285
9.9 基于 MATLAB 的博德图和奈奎斯特图的绘制 .....	287
9.10 利用对数幅值 - 相位图进行增益调节 .....	290
9.11 零极点图与频域、时域响应的相互关系 .....	292
9.12 小结 .....	295
<b>参考文献</b> .....	296
<b>第 10 章 根轨迹补偿设计</b> .....	297
10.1 引言 .....	297
10.2 瞬态响应: 主导复数极点 .....	299
10.3 附加的重要极点 .....	303
10.4 根轨迹设计考虑 .....	305
10.5 根轨迹的调整 .....	307
10.6 CAD 精确度检测 (CADAC) .....	307
10.7 理想的积分串联补偿 (PI 控制器) .....	308
10.8 基于无源元器件的串联滞后补偿 .....	309
10.9 理想的微分串联补偿 (PD 控制器) .....	314
10.10 无源元器件的超前补偿 .....	315
10.11 通用的超前补偿装置设计 .....	319
10.12 滞后 - 超前串联补偿设计 .....	321
10.13 串联补偿器间的比较 .....	323
10.14 PID 控制器 .....	325
10.15 反馈补偿引言 .....	326
10.16 反馈补偿: 设计步骤 .....	327
10.17 简化的速率反馈补偿: 设计方法 .....	328
10.18 速率反馈设计 .....	330
10.19 设计: 输出的二阶微分反馈 .....	334

10.20	反馈补偿设计的结果 .....	336
10.21	速率反馈：主导复数极点的性能指标 .....	336
10.22	小结 .....	337
<b>参考文献</b> .....		<b>338</b>
<b>第 11 章 频率响应补偿设计</b> .....		<b>339</b>
11.1	反馈补偿设计的介绍 .....	339
11.2	串联补偿器的选择 .....	340
11.3	串联滞后补偿 .....	343
11.4	设计实例：串联滞后补偿器 .....	345
11.5	串联超前补偿器 .....	349
11.6	设计实例：串联超前补偿器 .....	351
11.7	串联滞后-超前补偿器 .....	354
11.8	设计实例：串联滞后-超前补偿 .....	356
11.9	采用原坐标图的反馈补偿设计 .....	359
11.10	设计实例：反馈补偿（原坐标系） .....	360
11.11	应用指导：基本辅助环反馈补偿器 .....	365
11.12	小结 .....	366
<b>参考文献</b> .....		<b>367</b>
<b>第 12 章 控制比建模</b> .....		<b>368</b>
12.1	引言 .....	368
12.2	期望的跟踪控制比建模 .....	369
12.3	Guillemin-Truxal 设计过程 .....	372
12.4	抗干扰介绍 .....	374
12.5	一个二阶抗干扰模型 .....	375
12.6	SISO 系统的抗干扰设计准则 .....	376
12.7	抗干扰设计举例 .....	381
12.8	抗干扰模型 .....	384
12.9	小结 .....	387
<b>参考文献</b> .....		<b>387</b>
<b>第 13 章 设计：闭环零极点配置（状态变量反馈）</b> .....		<b>388</b>
13.1	引言 .....	388
13.2	可控性和可观测性 .....	388
13.3	SISO 系统的状态反馈 .....	395
13.4	采用控制标准（相位变量）形的 SISO 系统的 状态反馈设计 .....	398

13.5 状态变量(物理变量)反馈 .....	400
13.6 状态反馈的一般特性(采用相位变量) .....	403
13.7 状态变量反馈:稳态误差分析 .....	406
13.8 稳态误差系数的应用 .....	408
13.9 状态变量反馈:全极点控制对象 .....	412
13.10 具有复数极点的控制对象 .....	414
13.11 包含一个零点的补偿器 .....	416
13.12 状态变量反馈:零极点控制对象 .....	417
13.13 观测器 .....	424
13.14 包含观测器的控制系统 .....	426
13.15 小结 .....	428
<b>参考文献</b> .....	428
<b>第 14 章 参数敏感性和状态空间轨迹</b> .....	430
14.1 引言 .....	430
14.2 敏感性 .....	430
14.3 灵敏度分析 .....	433
14.4 灵敏度分析举例 .....	436
14.5 参数灵敏度举例 .....	440
14.6 可用状态 .....	441
14.7 状态空间轨迹 .....	444
14.8 线性化(雅可比矩阵) .....	447
14.9 小结 .....	449
<b>参考文献</b> .....	450
<b>第 15 章 采样数据控制系统</b> .....	451
15.1 引言 .....	451
15.2 采样 .....	452
15.3 理想采样 .....	454
15.4 $z$ 变换定理 .....	458
15.5 微分过程 .....	459
15.5.1 一阶导数近似 .....	459
15.5.2 二阶导数近似 .....	459
15.5.3 $r$ 阶导数近似 .....	460
15.6 $z$ 域合成(直接法) .....	460
15.6.1 $z$ 平面的稳定性 .....	462
15.6.2 系统稳定性 .....	462
15.6.3 系统分析 .....	463



15.7 反向 $z$ 变换 .....	465
15.8 零阶保持器 .....	466
15.9 限制条件 .....	468
15.10 稳定系统的稳定状态误差分析 .....	468
15.10.1 稳定状态误差系数 .....	470
15.10.2 稳态误差系数的估计 .....	471
15.10.3 稳态误差系数的使用 .....	472
15.11 采样数据控制系统的根轨迹分析 .....	474
15.11.1 过程综览 .....	474
15.11.2 负反馈的根轨迹构造规则 .....	475
15.11.3 根轨迹设计实例 .....	477
15.12 小结 .....	483
<b>参考文献</b> .....	<b>483</b>
<b>第 16 章 数字控制系统</b> .....	<b>484</b>
16.1 引言 .....	484
16.2 补偿频谱 .....	484
16.3 双线性 (TUSTIN) 变换: $s$ 到 $z$ 平面变换 .....	485
16.3.1 双线性变换属性 .....	486
16.3.2 双线性变换映射属性 .....	488
16.4 $z$ 域到 $w$ 域和 $w'$ 域的变换 .....	490
16.5 数字化 (DIG) 技术 .....	492
16.6 数字化 (DIG) 设计技术 .....	492
16.7 伪连续时间 (PCT) 控制系统 .....	494
16.7.1 伪连续时间系统 DIG 技术介绍 .....	494
16.7.2 16.7.1 节的 MATLAB 设计 .....	496
16.7.3 简单的 PCT 实例 .....	501
16.7.4 采样数据控制系统实例 .....	502
16.7.5 图 16-1 的 PCT 系统 .....	505
16.7.6 PCT 设计小结 .....	505
16.8 数字控制系统的设计 .....	507
16.9 直接 (DIR) 补偿器 .....	507
16.10 PCT 超前串联补偿 .....	508
16.10.1 16.10 节的 MATLAB 设计 .....	511
16.11 PCT 滞后补偿 .....	514
16.11.1 16.11 节的 MATLAB 设计 .....	516
16.12 PCT 滞后-超前补偿 .....	520
16.12.1 16.12 节的 MATLAB 设计 .....	522