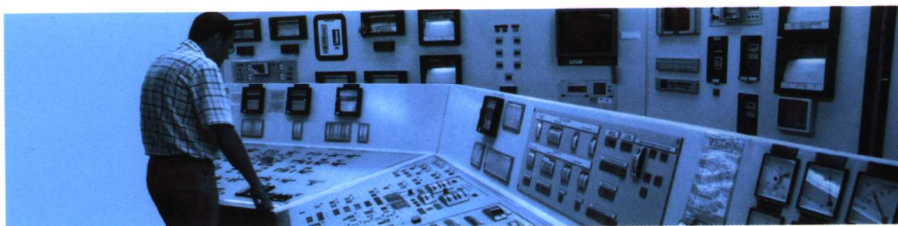
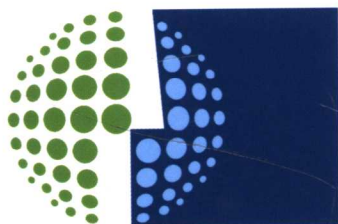


现代测试与控制丛书

控制系统设计指南 (第3版)

Control System Design Guide (Third Edition)

[美] George Ellis 著 刘君华 汤晓君 译 万百五 审校



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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

现代测试与控制丛书

控制系统设计指南（第3版）

Control System Design Guide (Third Edition)

[美]George Ellis 著

刘君华 汤晓君 译

万百五 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书避开大多数控制理论教材的组织方式以及深邃烦琐的数学推导,始终遵循在工业中已接受的与实际常见问题处理方法相结合的设计原则,最大的特点是从工程需要与实践中遇到的问题出发来讲述自动控制系统的设计、建模、构建、调试以及故障排除等问题。每章的重点都在于如何应用控制理论来改善控制系统的性能。

全书分成三部分,共 18 章。第一部分(1 章~10 章):控制原理;依次介绍控制理论简介、频率域研究法、控制系统的调试、数字控制器中的延迟、z 域研究法、6 种控制器、扰动响应、前馈、控制系统中的滤波器、控制系统中的观测器。第二部分(11 章~13 章):建模,依次介绍时间域与频率域建模的方法、时变与非线性、控制系统建模的七步法。第三部分(14 章~18 章):运动控制,依次介绍编码器和旋转变压器、电子伺服电动机与驱动基础、柔顺性与谐振、位置控制回路、运动控制中的 Luenberger 观测器等。

本书还提供了独具特色的基于 PC 的单机图形化仿真环境 Visual ModelQ,读者可在其中进行图形建模并运行控制系统的各类有关实验。

本书可作为高等院校各类自动化专业或相关专业的研究生和高年级本科生的教学用书,特别适合自动化专业工程技术人员从事控制系统工程设计、调试、运行、维修和实验时用做指导性参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统设计指南:第 3 版/(美)埃里斯(Ellis, G.)著;刘君华,汤晓君译. —北京:电子工业出版社,2006.9

书名原文:Control System Design Guide, 3e

(现代测试与控制丛书)

ISBN 7-121-02113-7

I. 控… II. ①埃… ②刘… ③汤… III. 控制系统—系统设计—指南 IV. TB271-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 145598 号

责任编辑:高买花 特约编辑:陈宁辉

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:三河市万和装订厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:22.75 字数:582 千字

印 次:2006 年 9 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:39.00 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,联系电话:(010) 68279077;邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

出版说明

测试与控制（以下简称测控）技术是光、电、自动控制、计算机与信息技术多学科相互融合和渗透而形成的一门高新技术密集型综合学科，目前已成为 21 世纪关键的信息技术之一。随着光、机、电、算、生、化、医、材料等新技术的不断涌现，以及科学技术尤其电子信息技术的飞速发展，测控技术将迎来创新发展的新机遇，微型化、集成化、智能化、虚拟化和网络化成为以计算机为核心的现代测控技术的一个发展趋势。

随着测控技术的飞速发展，以及知识更新的速度日益加快，社会对综合素质高的测控人才的需求不断加大，各测控技术开发单位、科研院所的研发人员都急需一套针对性强、具有实际指导意义的现代测试与控制技术类书籍；各高等院校相关专业的本科生、研究生也迫切希望学习、掌握现代测控技术及其应用，以推动测控技术在各领域的广泛应用和快速发展。

《现代测试与控制丛书》正是针对当前技术与市场需求，由国内站在测控技术前沿并有实践应用经验的专家和学者，以实用技术为主线，理论联系实际，将他们在理论研究与实践工作中积累的大量经验和体会有机地融为一体，以丛书的形式奉献给广大读者！本套丛书立足现代测控技术的发展趋势及其主要应用领域，将技术热点与实践应用紧密结合，以实际应用为主线，围绕现代测控技术基础理论、实践应用、发展趋势等方面进行深入浅出的讲解和论述。

读者群定位于高等院校测控相关领域的学生，科研开发及设计人员等，可作为测控领域学习、开发人员的参考资料，也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

本套丛书的出版得到了业界许多专家、学者的鼎力相助，对此表示衷心的感谢！同时，热切欢迎广大读者提出宝贵意见，或者推荐更多优秀选题（gmholife@hotmail.com）。

电子工业出版社
2006 年 5 月

译者序

控制系统作为一门学科从 20 世纪前半叶发展起来，至今将近有 100 年的历史了。控制系统应用的广泛程度使大多数工程类大学都开设了这样的课程。有关控制原理、自动控制等控制系统的教科书在国内国外已非常多，但是仍然存在一个不争的事实：一个在学校控制课上学得很好的学生，在其毕业时依然无法设计一个控制系统，甚至无法将一个简单的 PI 控制系统调试到最佳状态下运行。而另一方面，在大学至少学过一门控制课程的工程师在面临工程实际控制问题的时候，仍感到很难寻求到合适的解决办法。

在短短五六年时间内，George Ellis 教授的《控制系统设计指南》一书于 2004 年出版了第 3 版，受到了美国广大控制学科学者及工程师们的广泛关注与热烈欢迎，这表明它是一本很有用的书。因此我们很高兴将这本书译成中文奉献给我国的广大读者。

本书避开了大多数控制理论教材中的材料与组织方式，以及深邃烦琐的数学推导，始终遵循在工业中已接受的与实际常见的问题处理方法相结合的设计原则，其最大特点是从工程中会遇到的问题出发，讲述自动控制系统的的设计、建模、构建、调试以及故障排除等问题。每章的重点都在于如何应用控制理论来改善系统的性能，通过这本书不但获得了控制理论的知识，同时也培养了一种适合于控制的感性知识。本书将控制理论与实用分析方法相结合，提出问题并解决问题，而且还运用了几十个模型，在作者创建的独具特色的 Visual ModelQ 建模环境中帮助读者对书中内容进行仿真实践。

基于上述特点，本书不仅适合作为各类自动化相关专业大专院校研究生、高年级本科生的教学用书，更适合于自动化专业工程技术人员在从事控制系统工程设计、调试、运行、维修和实验时用做指导性参考书。

万百五教授详细校阅了全部译稿，并提出了许多宝贵的建议与修改意见，对译者帮助极大，译者对此表示衷心感谢！研究生钱凌影同学协助进行了大量校对工作，电子工业出版社对本书出版给予了大力支持与帮助，也在此深表谢意。全书初稿由汤晓君完成，最后由刘君华进行整理、修改与定稿。由于译者水平有限，书中若有错误与不当之处，欢迎读者批评指正。

译者

2005 年 12 月于西安交通大学

前 言

控制系统的基础是在 20 世纪前半叶发展起来的。我们的前辈在大炮瞄准和浴池保暖时用到的许多概念与现在所用的概念是相同的。当然，随着时间的推移，技术已经取得了很大的进步。数字处理器改变了我们实现控制的方式，但在许多情况下并没有改变控制的规律本身，现在 PID 控制所起的作用与四五十年前是一样的。

控制系统应用广泛，因此与教学系统结合紧密。在大多数工程类大学已经开设了这样的课程，有些学校甚至要求学生适量从事这个学科的训练。控制原理长期被讲授，该领域中训练有素的工程师也不少，人们可能期望大多数从业者对控制基础知识感到满意，遗憾的是情况往往并非如此。

在过去的几年中，我有机会为 1500 名左右的工程师授课，开办“如何改善伺服系统”的研讨班。这些工程师富有激情，大多是有一定资历的工程师，大概有一半至少学过一门控制课程。在研讨班上，我通常会花上几分钟问：“在学校所学的控制原理中，你们经常用了多少？”他们的回答明显反映出在教学和应用之间存在一条鸿沟。

为什么会形成这样的一条鸿沟呢？可能是由于控制课程的教学不适当地把重点放在了数学上。在学生如何计算结果并将其画出来的时候，忽略了直觉的知识，通常只是含糊地理解了练习的重要性。多年前，我曾经就是这样的学生，我喜欢控制学科，我在各门控制课的课堂上学得很好，但是在我毕业的时候依然无法设计甚至调试一个简单的 PI 控制系统。

事情并非这样不可，其实可以培养一种适合于控制的感觉！本书力图帮助读者培养这样的一种感觉，控制原理与实用分析方法一起被提出来，用几十个模型来帮助读者对这些材料进行实践，实践是达到熟练的最可靠方式。

本版的新内容

同前面两版相比，第 3 版《控制系统设计指南》包含了如下几个方面的改进：首先是重新编写了第 2 版中的建模环境 ModelQ，并创建了 Visual ModelQ，预排程序的模型已经被完全的图形化建模环境所取代。其次是增加了两章，这两章都是关于观测器的：第 10 章是观测器的一般表示，第 18 章的重点放在运动控制系统的观测器上。希望这些内容可以像运行软件系统一样容易地向读者传达软件系统的功用。此外，几乎每章的后面都增加了习题，并且在附录 G 中提供了答案。

本书的组织安排

本书被组织成三部分：第一部分是控制原理，包含 10 章。第 1 章，控制理论简介。第 2 章，频率域研究法，回顾控制系统的基础 s 域研究法。第 3 章，控制系统的调试，给读者一个调试控制系统的机会。对于大多数人来说，这是控制系统试运行最难的部分。第 4 章，数字控制器中的延迟，介绍数字控制器与模拟控制器应用的基本区别及采样延

迟所起的不稳定作用。第 5 章, z 域研究法, 讨论 z 变换。这是将 s 域扩展到数字控制的技术。第 6 章, 涵盖 6 种不同 PID 控制的选择与运用中的实际问题。第 7 章, 扰动响应, 详细讨论控制系统如何对除命令之外的其他输入产生响应。第 8 章, 前馈, 提出本质地改善命令响应的技术。第 9 章, 控制系统中的滤波器, 讨论模拟控制器和数字控制器中滤波器的应用。第 10 章, 介绍控制系统中的观测器。

第二部分是建模, 共有 3 章。第 11 章, 建模入门, 给出时间域建模和频率域建模方法的概况。第 12 章, 非线性特性与时变, 讨论在采用线性控制技术时如何处理非线性特性。遗憾的是, 虽然工业应用中普遍存在明显的非线性影响, 但大多数有关控制方面的文献遗漏了这一主题。第 13 章, 建立模型的 7 个步骤, 给出开发模型的每一个步骤。

第三部分是运动控制, 介绍采用伺服电动机来实现运动控制。第 14 章, 编码器与旋转变压器, 讨论伺服电动机中最普遍应用的反馈传感器。第 15 章, 伺服电动机及其驱动基础, 回顾电动机的运行。第 16 章, 柔顺性与谐振, 这是在运动控制中最普遍的问题。第 17 章, 位置控制回路, 由于大多数的应用是控制位置, 而非速度和转矩, 因此讨论的是位置控制。第 18 章, Luenberger 观测器在运动控制中的应用, 重点介绍运动控制系统中的观测器。

读者回馈

我已经尽力校正了第 2 版中的错误, 第 3 版中正误表请见 <http://qxdesign.com>。欢迎和我联系, 电子邮箱是 gellis@qxdesign.com 或 george.ellis@Danaher Motion.com。

致谢

撰写这本书是一项艰巨的任务, 需要多人的支持, 这些人应该得到感谢。首先, 感谢我深爱 25 年有余的妻子 LeeAnn。她是我一个忠贞不渝的追随者、顾问和要求严格的编辑。我曾设法去学会在写作中如何表达一个思想, 她教了我很多的东西。感谢我的妈妈, 在现实可能让她绝望的时候, 她依然确信我可以成长为一个让她感到骄傲的人。感谢我的父亲, 正是由于他长期的坚持, 我才完成了大学教育。

我感谢在 Go Hokies 的弗吉尼亚技术学院提供的教育, 正是在大学几年中打下的电气工程基础使我掌握了经常应用的概念。感谢 Emory Pace 先生, 他是一个了不起的教授, 带领我学习几门微积分学课程, 给了我在大学生涯以及从此以后所具有的信心。特别感谢 Charles Nunnally 博士, 他最早给我提供了学习材料的实践应用方向。

感谢麦迪逊威斯康星大学的 Robert Lorenz 博士, 他的指导非常有见地, 有启发, 十分的实用。他的课程中有几门是采用录像形式, 并被推荐给打算扩展控制知识的人。我有 ME 746 课程的录像版, 非常有用, 本书第 7 章扰动响应中的大多数材料就是从这门课程中获得的。

感谢 Danaher 公司 (Kollmorgen 产品的生产商), 在我写这本书的过程中给了我不断的支持。我对每个人的感激之情都是真诚的。

George Ellis

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第一部分 控制原理

第 1 章 控制理论简介	(3)
1.1 Visual ModelQ 环境	(3)
1.1.1 Visual ModelQ 的安装	(4)
1.1.2 正误表	(4)
1.2 控制系统	(4)
1.2.1 控制器	(4)
1.2.2 被控机器	(5)
1.3 控制工程师	(5)
第 2 章 频率域研究法	(7)
2.1 拉普拉斯变换	(7)
2.2 传递函数	(7)
2.2.1 拉普拉斯算子	(8)
2.2.2 线性化、时不变性与传递函数	(8)
2.3 传递函数举例	(9)
2.3.1 控制器单元的传递函数	(10)
2.3.2 功率变换器的传递函数	(10)
2.3.3 物理元件的传递函数	(10)
2.3.4 反馈的传递函数	(12)
2.4 框图	(12)
2.4.1 组合框	(12)
2.4.2 Mason 信号流图	(13)
2.5 相位与增益	(15)
2.5.1 传递函数的相位与增益	(16)
2.5.2 Bode 图	(16)
2.6 性能测量	(17)
2.6.1 指令响应	(17)
2.6.2 稳定性	(19)
2.6.3 与频率域对应的时间域	(20)
2.7 问题	(21)
第 3 章 控制系统的调试	(23)
3.1 闭合控制回路	(23)
3.2 模型的详细回顾	(25)

3.2.1	积分器	(25)
3.2.2	功率变换器	(27)
3.2.3	PI 控制律	(27)
3.2.4	反馈滤波器	(28)
3.3	开环设计法	(29)
3.4	稳定裕度	(30)
3.4.1	GM 与 PM 的确定	(30)
3.4.2	实验 3A: 开环设计法的理解	(31)
3.4.3	开环、闭环与阶跃响应	(32)
3.5	分段调试的步骤	(34)
3.5.1	段一: 比例段	(35)
3.5.2	段二: 积分段	(36)
3.6	被控对象增益的变动	(36)
3.7	多(级联)控制回路	(38)
3.8	饱和与同步	(39)
3.9	问题	(41)
第 4 章	数字控制器中的延迟	(43)
4.1	如何采样	(43)
4.2	数字系统中的延迟源	(43)
4.2.1	采样-保持延迟	(43)
4.2.2	计算延迟	(45)
4.2.3	速度估计延迟	(45)
4.2.4	延迟之和	(45)
4.3	实验 4A: 数字控制中延迟的理解	(46)
4.4	采样时间的选择	(48)
4.4.1	一般系统的激进假设	(48)
4.4.2	基于位置运动系统激进的假设	(49)
4.4.3	适度假设与保守假设	(49)
4.5	问题	(50)
第 5 章	z 域研究法	(51)
5.1	z 域初步	(51)
5.1.1	z 的定义	(51)
5.1.2	z 域传递函数	(51)
5.1.3	双线性变换	(52)
5.2	z 域相图	(52)
5.3	混叠	(54)
5.4	实验 5A: 混叠	(55)
5.4.1	z 域中的 Bode 图与框图	(56)

5.4.2	直流 (DC) 增益	(56)
5.5	从传递函数到算法	(56)
5.6	数字系统的函数	(58)
5.6.1	数字积分与微分	(58)
5.6.2	数字微分	(60)
5.6.3	采样-保持	(63)
5.6.4	数/模相互转换	(64)
5.7	计算延迟的减小	(65)
5.8	选择处理器	(65)
5.8.1	定点与浮点运算	(66)
5.8.2	超采样时间运行	(67)
5.8.3	其他算法	(67)
5.8.4	编程的难易	(67)
5.8.5	处理器的未来	(67)
5.8.6	处理器的选择	(67)
5.9	量化	(68)
5.9.1	极限环与抖动	(68)
5.9.2	偏移与极限环	(69)
5.10	问题	(70)
第 6 章	控制器	(72)
6.1	本章中的调试	(72)
6.2	比例增益的使用	(73)
6.2.1	P 控制	(73)
6.2.2	如何调试 P 控制器	(74)
6.3	积分增益的使用	(76)
6.3.1	PI 控制	(76)
6.3.2	PI+控制	(78)
6.4	微分增益的使用	(83)
6.4.1	PID 控制	(83)
6.4.2	PID 控制中的流行术语	(87)
6.4.3	PID 的模拟备用: 超前-滞后	(87)
6.5	PID+控制	(88)
6.6	PD 控制	(90)
6.7	选择控制器	(92)
6.8	实验 6A~6F	(94)
6.9	问题	(94)
第 7 章	扰动响应	(95)
7.1	扰动	(95)

7.2	速度控制器的扰动响应	(100)
7.2.1	时间域扰动响应	(101)
7.2.2	扰动的频率域响应	(103)
7.3	扰动解耦法	(105)
7.3.1	扰动解耦法的应用	(105)
7.3.2	实验 7B: 扰动解耦	(109)
7.4	问题	(112)
第 8 章	前馈	(114)
8.1	基于对象的前馈	(114)
8.2	前馈与功率变换器	(117)
8.2.1	实验 8B: 功率变换器的补偿	(118)
8.2.2	扩展带宽与前馈补偿	(121)
8.3	延迟指令信号	(121)
8.3.1	实验 8C: 指令路径上的延迟	(121)
8.3.2	实验 8D: 功率变换器的补偿与指令路径上的延迟	(123)
8.3.3	有前馈时的调试与钳位	(125)
8.4	被控对象与功率变换器运行特性的变化	(125)
8.4.1	被控对象增益的变化	(125)
8.4.2	功率变换器运行特性的变化	(126)
8.5	双积分被控对象的前馈	(127)
8.6	问题	(128)
第 9 章	控制系统中的滤波器	(129)
9.1	控制系统中的滤波器	(129)
9.1.1	控制器中的滤波器	(129)
9.1.2	功率变换器中的滤波器	(132)
9.1.3	反馈中的滤波	(132)
9.2	滤波器的通带	(132)
9.2.1	低通滤波器	(133)
9.2.2	陷波滤波器	(136)
9.2.3	实验 9A: 模拟滤波器	(137)
9.2.4	双二阶滤波器	(138)
9.3	滤波器的实现	(139)
9.3.1	无源模拟滤波器	(139)
9.3.2	有源模拟滤波器	(139)
9.3.3	开关电容滤波器	(139)
9.3.4	IIR 数字滤波器	(140)
9.3.5	FIR 数字滤波器	(141)
9.4	问题	(142)

第 10 章 控制系统中的观测器	(143)
10.1 观测器纵览	(143)
10.1.1 观测器术语	(144)
10.1.2 创建一个 Luenberger 观测器	(144)
10.2 实验 10A~10C: 用观测器提高稳定性	(147)
10.3 Luenberger 观测器的滤波器形式	(150)
10.3.1 低通与高通滤波器	(151)
10.3.2 滤波器形式的框图	(152)
10.3.3 回路形式与滤波器形式的比较	(152)
10.4 Luenberger 观测器的设计	(153)
10.4.1 传感器的估计器设计	(154)
10.4.2 传感器的滤波	(154)
10.4.3 被控对象的估计器设计	(155)
10.4.4 设计观测补偿器	(158)
10.5 观测补偿器的调试概述	(159)
10.5.1 步骤 1: 临时构建观测器以供调试	(160)
10.5.2 步骤 2: 观测补偿器稳定性调整	(160)
10.5.3 步骤 3: 把观测器恢复为标准 Luenberger 结构	(163)
10.6 问题	(163)

第二部分 建 模

第 11 章 建模入门	(167)
11.1 什么是模型	(167)
11.2 频率域建模	(167)
11.3 时间域建模	(169)
11.3.1 状态变量	(169)
11.3.2 建模环境	(171)
11.3.3 模型	(173)
11.3.4 时间域模型的频率信息	(180)
11.4 问题	(180)
第 12 章 非线性特性与时变	(181)
12.1 LTI 与非 LTI	(181)
12.2 非 LTI 特性	(181)
12.2.1 慢变	(182)
12.2.2 快变	(182)
12.3 非线性特性的处理	(183)
12.3.1 更换被控对象	(183)
12.3.2 最坏条件下的稳定性调试	(183)

12.3.3	增益调度	(184)
12.4	非线性特性十例	(185)
12.4.1	被控对象的饱和	(185)
12.4.2	死区	(186)
12.4.3	逆向移动	(187)
12.4.4	视在惯量的变动	(188)
12.4.5	摩擦力	(189)
12.4.6	量化	(192)
12.4.7	确定性的反馈误差	(192)
12.4.8	功率变换器的饱和	(193)
12.4.9	脉冲调制	(195)
12.4.10	回线控制器	(196)
12.5	问题	(197)
第 13 章	建立模型的步骤	(198)
13.1	确定建模目的	(198)
13.1.1	训练	(198)
13.1.2	故障检修	(198)
13.1.3	试验	(199)
13.1.4	预测	(199)
13.2	SI 单位制模型	(199)
13.3	系统辨识	(200)
13.3.1	被控对象的辨识	(200)
13.3.2	功率变换器的辨识	(201)
13.3.3	反馈辨识	(202)
13.3.4	控制器的辨识	(202)
13.4	建立框图	(203)
13.5	频率域或时间域的选择	(203)
13.6	写出模型方程	(203)
13.7	模型的检验	(204)

第三部分 运动控制

第 14 章	编码器与旋转变压器	(207)
14.1	精度、分辨率与响应速度	(208)
14.2	编码器	(209)
14.3	旋转变压器	(209)
14.3.1	旋转变压器的信号变换	(210)
14.3.2	软件旋转变压器-数字变换器	(211)
14.3.3	旋转变压器误差与多速旋转变压器	(212)

14.4	位置分辨率、速度估计与噪声	(213)
14.4.1	实验 14A: 分辨率噪声	(214)
14.4.2	高增益产生大噪声	(215)
14.4.3	噪声滤除	(216)
14.5	提高分辨率的其他方法	(217)
14.5.1	1/T 插值法或时钟脉冲计数法	(217)
14.5.2	正弦编码器	(218)
14.6	周期误差与转矩/速度纹波	(218)
14.6.1	速度纹波	(220)
14.6.2	转矩纹波	(221)
14.7	实验 14B: 周期误差与转矩纹波	(222)
14.7.1	误差幅值与纹波间的关系	(223)
14.7.2	速度与纹波间的关系	(223)
14.7.3	带宽与纹波间的关系	(223)
14.7.4	惯量与纹波间的关系	(224)
14.7.5	改变误差谐波的影响	(224)
14.7.6	提升旋转变压器速度的影响	(224)
14.7.7	实际速度中的纹波与反馈速度中的纹波间的关系	(224)
14.8	选择反馈装置	(225)
14.9	问题	(227)
第 15 章	电子伺服电动机及其驱动	(229)
15.1	驱动器的定义	(230)
15.2	伺服系统的定义	(230)
15.3	磁学基础	(230)
15.3.1	电磁学	(232)
15.3.2	右手定则	(232)
15.3.3	磁路径的闭合	(233)
15.4	电气伺服电动机	(233)
15.4.1	转矩的额定值	(234)
15.4.2	旋转运动与直线运动	(235)
15.4.3	直线电动机	(235)
15.5	有刷永磁电动机	(236)
15.5.1	绕组磁通的生成	(237)
15.5.2	换向	(237)
15.5.3	转矩的产生	(238)
15.5.4	电角与机械角的关系	(238)
15.5.5	电动机转矩常数	(239)
15.5.6	电动机的电气模型	(239)
15.5.7	有刷永磁电动机的控制	(240)

15.5.8	有刷电动机的优点与弱点	(242)
15.6	无刷永磁电动机	(243)
15.6.1	无刷永磁电动机的绕组	(243)
15.6.2	正弦换向	(244)
15.6.3	无刷永磁电动机的相位控制	(244)
15.6.4	无刷永磁电动机的 DQ 控制	(249)
15.6.5	DQ 的磁学方程	(251)
15.6.6	DQ 控制与相位控制的比较	(251)
15.7	无刷永磁电动机的控制	(252)
15.7.1	用于换向的位置检测	(253)
15.7.2	有刷电动机与无刷电动机的比较	(254)
15.8	感应式电动机与磁阻式电动机	(255)
15.9	问题	(255)
第 16 章	柔顺性与谐振	(257)
16.1	谐振方程	(258)
16.2	调谐谐振与惯量-减小型不稳定	(260)
16.2.1	调谐谐振	(260)
16.2.2	惯量-减小型不稳定	(262)
16.2.3	实验 16A 和 16B	(264)
16.3	消除谐振	(265)
16.3.1	增大电动机惯量/负载惯量的比值	(265)
16.3.2	加强刚性传动	(267)
16.3.3	增大阻尼	(269)
16.3.4	滤波器	(270)
16.4	问题	(272)
第 17 章	位置控制回路	(274)
17.1	P/PI 位置控制	(274)
17.1.1	P/PI 传递函数	(275)
17.1.2	调试 P/PI 回路	(276)
17.1.3	P/PI 回路中的前馈	(278)
17.1.4	调试有速度前馈的 P/PI 回路	(279)
17.1.5	P/PI 回路中的加速度前馈	(280)
17.1.6	具有加速度前馈与速度前馈的系统调试	(281)
17.2	PI/P 位置控制	(282)
17.3	PID 位置控制	(284)
17.3.1	PID 位置控制器的调试	(284)
17.3.2	速度前馈与 PID 位置控制器	(286)
17.3.3	加速度前馈与 PID 位置控制器	(287)

17.3.4	PID 位置环的指令响应与扰动响应	(287)
17.4	位置环的比较	(288)
17.4.1	位置、速度和电流驱动配置	(289)
17.4.2	比较表	(289)
17.4.3	双环位置控制	(290)
17.5	位置系统的 Bode 图	(291)
17.5.1	采用速度驱动的系统 Bode 图	(291)
17.5.2	采用电流驱动的系统 Bode 图	(292)
17.6	问题	(293)
第 18 章	Luenberger 观测器在运动控制中的应用	(294)
18.1	可能从观测器中获益的应用	(294)
18.1.1	性能需求	(294)
18.1.2	可采用的计算资源	(294)
18.1.3	用户具有的控制知识	(295)
18.1.4	传感器噪声	(295)
18.1.5	运动控制传感器中的相位滞后	(295)
18.2	消除相位滞后	(295)
18.2.1	消除由简单差分引入的相位滞后	(295)
18.2.2	消除由变换产生的相位滞后	(302)
18.3	加速度反馈	(307)
18.3.1	观测加速度的使用	(309)
18.3.2	观测加速度反馈的使用	(309)
18.4	问题	(311)
附录 A	控制器元件的有源模拟实现	(313)
附录 B	欧洲框图符号	(317)
附录 C	龙格-库塔法	(319)
附录 D	双线性变换研究	(324)
附录 E	数字算法的并行形式	(326)
附录 F	基本矩阵运算	(328)
附录 G	习题答案	(330)
参考文献	(341)