

(原书第4版)

Fourth Edition

控制系统 设计指南

Control System Design Guide

*Using Your Computer to Understand and
Diagnose Feedback Controllers*

[美] 乔治·埃利斯 (George Ellis) 著

科尔摩根 (Kollmorgen) 公司

汤晓君 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

控制系统设计指南

(原书第4版)

[美] 乔治·埃利斯 (George Ellis) 著
科尔摩根 (Kollmorgen) 公司
汤晓君 译



机械工业出版社

本书规避了大多数控制理论教材中所采用的题材及其组织方式,也不对深遂繁琐的控制方案进行数学推导,而是遵循在工业界已被接受的习惯与实践中常见的问题处理方法相结合的设计导则。本书最大的特点是从工程需要及实践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方法,每章都将重点放在如何应用控制理论来改善控制系统的性能上。

全书分成三部分,共19章。第一部分(第1~10章):控制的应用原则,依次介绍控制理论、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、四种控制器、扰动响应、前馈、控制系统中的滤波器及实现、控制系统中的观测器;第二部分(第11~13章):建模,依次介绍了建模入门、非线性特性与时变、模型开发与校验;第三部分(第14~19章):运动控制,依次介绍编码器与旋转变压器、电子伺服电动机与驱动基础、柔性和谐振、位置控制回路、Luenberger观测器在运动控制中的应用、运动控制中的快速控制原型技术等。

本书作者还提供了独具特色的基于PC的单机图形化仿真平台Visual ModelQ,读者可在其中进行图形建模,并运行书中提及的控制系统各类有关实验,实验内容丰富且实用。本书最后还提供了借助于美国国家仪器(National Instruments)公司的LabVIEW软件及相关硬件开展快速控制原型技术的实验,它们非常贴近实际的控制系统开发及应用。

本书可作为高等院校研究生和高年级本科生的教学用书,也适合自动化专业工程技术人员作为控制系统工程设计、调试、运行、维修和实验用的指导性参考书。

Control System Design Guide: Using Your Computer to Understand and Diagnose Feedback Controllers, Fourth Edition, George Ellis. ISBN: 978-0-12-385920-4, Copyright © 2012 by Elsevier. All rights reserved. Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor. Copyright © 2016 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and China Machine Press, All rights reserved.

Published in China by China Machine Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。本书封底贴有Elsevier防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-3499号。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统设计指南:原书第4版/(美)埃利斯(Ellis, G.)著;汤晓君译. —北京:机械工业出版社,2016.4

书名原文:Control system design guide: Fourth Edition
ISBN 978-7-111-53093-0

I. ①控… II. ①埃… ②汤… III. ①控制系统设计—指南
IV. ①TP273-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第039289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:吉玲 责任编辑:吉玲 刘丽敏 责任校对:刘怡丹

封面设计:张静 责任印制:李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2016年7月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·21.25印张·515千字

标准书号:ISBN 978-7-111-53093-0

定价:84.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

控制科学与技术作为一个学科从 20 世纪前半叶发展起来已将近 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开设了这样的课程。控制原理、自动控制等控制科学与技术方面的教科书的版本在国内外已非常多，但是仍然存在一个不争的事实：一个在学校的控制理论课程方面学得很好的学生，在其毕业时依然无法设计控制系统，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。另一方面，在大学至少学过一门控制课程的工程师一旦面临工程实际控制问题，就感到从学校所学的控制原理中很难寻求到解决办法。为此，George Ellis 先生根据其多年的工程经历与教学心得，编著了本书。

本书规避了大多数控制理论教材中所采用的题材及其组织方式，以及深邃繁琐的控制方案数学推导，始终遵循着在工业界已被接受的习惯与实践常见问题处理方法相结合的设计原则。其最大特点是从工程需要与控制系统设计与调试实践中会遇到的问题出发，讲述自动控制系统的设计、建模、构建、调试，以及故障排除等方法。每章的重点都是如何应用控制理论来改善系统的性能，通过这本书不但可以获得控制理论方面的知识，同时也培养了控制系统设计与调试的感性认知。本书将控制原理与实用分析方法相结合提出问题、解决问题，并且还运用了几十个模型在作者创建的独具特色的 Visual ModelQ 建模平台中帮助读者对书中内容进行仿真实验，提供了与 NI 公司的 LabVIEW 对接的方法，介绍了新近出现的 RCP 技术。

基于本书上述特点，其不仅适合作为高等院校各类自动化相关专业的研究生、高年级本科生的教学用书，更适合自动化专业工程技术人员作为控制系统工程设计、调试、运行、维修和实验用的指导性参考书。

George Ellis 先生的《控制系统设计指南》一书在十余年的时间内出版了 4 版，受到了广大控制学科学者及工程师们的广泛关注与热烈欢迎，表明这是一本对他们很有用处的书。本书第 3 版出版后，译者就在刘君华教授和万百五教授指导下将其译成了中文版，并以其为教材开设了相应的研究生课程。在此过程中，译者更感觉到本书对一个控制工程师的重要性。本书不但可以让控制领域的工程技术人员很快将大学课程上学到的知识应用于实践，甚至对于一个并未涉及控制领域的技术人员，也可以让其速成为一名有一定水平的控制工程师，解决他所在领域需要解决的问题。于是，在这本书的第 4 版出版后，译者决定再次将其译成中文奉献给我国的广大读者。

开设这门课程后，译者在教学过程中，和历届学生对其进行了诸多的探讨。考虑到第 4 版与第 3 版相比每一章都已做了修改，本书是在第 3 版的基础上逐字逐句重新翻译的。翻译稿完成后，又经过了一届学生的核对，才最后整理定稿。需要说明的是，书中涉及许多专业术语，有许多符号用来表示物理量及其单位，其中有些已经在正文直接译成了中文，有些不便于在图中译成中文，否则，书中的图和仿真实验的图将不一致。为便于读者比对，在翻译时，译者尽可能在其第一次出现时将其译成中文，并将对应的英文一并给出。对于有些初学者，可能希望以后能直接阅读英文版书籍，为此，书中所涉及的专业术语、公司名称等第一次出现时，也尽可能将英文词汇一并给出。

在书稿的校对过程中，得到了西安交通大学外国语学院张蕾博士的帮助，她对科技英语语

法方面的把控，让我受益良多，在此对她表示衷心的感谢。感谢万百五教授、杨旭教授，以及我的博士生导师刘君华教授。万老师和刘老师把我带进了控制系统设计这个圈子，对我进行了诸多的培养。杨老师在专业词汇的核对方面给了我许多支持。最后，机械工业出版社吉玲对本书的出版给予了大力支持与帮助，我的学生赵明、张徐梁、寇福林、张海林和李萱建楠在我的教学过程中协助我开设了课程实验，并协助我指导其他学生完成实验，对本书的翻译与校对提供了帮助，在此一并表达谢意。

由于译者水平有限，若读者发现书中有错误与不当之处，欢迎批评指正。并敬请通过我的电子邮箱 xiaojun_tang@mail.xjtu.edu.cn 和我联系探讨。在随后的教学中，如果译者发现了不当之处，会在主页“http://gr.xjtu.edu.cn/web/xiaojun_tang/5”上予以公布，敬请读者关注。

译者

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。我们的前辈们用于大炮瞄准和浴池保暖的理念中，许多与我们现在所用的理念是相同的。当然，时间与技术已经促使了很大的进步。数字处理器改变了我们实施控制律的方式，但在许多情况下，并没有改变控制律本身，比例-积分-微分（Proportional-Integral-Differential, PID）控制现在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，有些学校甚至还要求学生从事适量的这个学科方面的训练。由于控制原理存在的时间很长，从事控制原理应用的、训练有素的工程师数量也不少，人们可能认为该行业大多数从业者对控制基础都感到满意。不幸的是，情况往往并非如此。

在过去的数年里，我有机会向约 1500 名工程师进行了一天的研讨班形式的授课，标题为“如何改进伺服系统”。这些工程师富有激情，愿意花时间聆听对他们所面临的问题可能会提供见解的人的讲解。他们大多是服务于工业的、有学位的工程师，大概有一半学过一两门控制课程。在研讨班上，我通常会花上几分钟问：“你们当中有多少人规范用过在学校所学的控制原理？”一般情况下，不会超过 1/10 的人举手。很明显，在所教的内容和所应用的东西之间存在一条鸿沟。

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过多地把重点放在了数学上。在学生如何计算一种接一种的结果，并将其画出来的时候，忽略了直觉方面的信息，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当中的一员。我喜欢控制学科，在我的各门控制课的课堂上，我表现得也很好，但我却逐渐变得没有能力设计，甚至无法调试一个简单的 PI 控制系统。

事情并非非要这样不可，你可以培养设计控制系统的直觉！本书致力于帮助你这样做。本书中，控制原理是与实用分析方法一道呈现出来的，用了几十个模型来帮助你对这些材料进行实践，因为实践是达到熟练的最可靠方式。每一章的目标都是为了培养感性认知。

本版的新内容

第 4 版《控制系统设计指南》增加了快速控制原型技术（Rapid Control Prototyping, RCP），这是一种允许设计者在物理硬件上运行控制律模型的技术。第 13 章做了扩展，介绍了这个主题；增加了第 19 章，提供了为数众多的快速控制原型技术示例。此外，每一章都重新审视并做了更新。与文本相配的软件 Visual ModelQ 也做了更新，包括所有模型的修改。

本书的组织安排

本书分为三部分：第一部分是控制的应用原理，包含 10 章。第 1 章控制理论简介，讨论了工业中控制技术和控制工程师的作用；第 2 章频率域研究法，复习了控制系统的基础 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实践机会，对于大多数人来说，这是控制系统试车最难的部分；第 4 章数字控制器中的延迟，精选出了数字控制器与模拟控制器在应用中的重要区

别，采样延迟对不稳定所起的作用；第5章 z 域研究法，讨论 z 变换这一把 s 域扩展到数字控制的技术；第6章四种控制器，涵盖了四种不同PID控制的选择方法，以及应用中的实际问题；第7章扰动响应，详细讨论了控制系统如何对指令信号以外的其他输入产生响应；第8章前馈，提出了能根本性地提高指令响应速度的技术；第9章控制系统中的滤波器及实现，讨论了模拟控制器和数字控制器中滤波器的应用；第10章控制系统中的观测器，对观测器做了总体介绍。

第二部分是建模，共有3章。第11章建模入门，给出了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，介绍了处理常见非线性效应的方法，不幸的是，虽然明显的非线性效应在工业应用中普遍存在，但大多数有关控制方面的文献中遗漏了这一主题；第13章模型开发与校验，给出了逐步开发模型的步骤。

第三部分是运动控制，专注于用电子伺服电动机实现运动控制。第14章编码器与旋转变压器，讨论了伺服电动机中最为常见的反馈传感器；第15章伺服电动机与驱动基础，讨论了现代伺服电动机中转矩的产生；第16章柔性和谐振，专注于运动控制中最为普遍的问题，也就是机械柔性引起的不稳定性；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，其重点在于运动控制系统中的观测器；第19章运动控制中的快速控制原型技术，用National Instruments LabVIEW证实了建立的系统模型如何在实时控制系统中校验。

读者回馈

请随时通过电子邮箱 geogre.ellis@kollmorgen.com 或者 qxdesign@msn.com 和我联系，第4版的校正将在 qxdesign.com 网站上公布。

致谢

撰写一本书是一项艰巨的任务，需要多人的支持。首先，感谢我的母亲，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。同样感谢我的父亲，正由于他长期的坚持，我才完成了我的大学教育，而这样的特权他并没有享受到，他是一个聪明却出生在一个收入不高的家庭的人。

我感激弗吉尼亚理工学院给予我的教育，Go Hokies!^①正是在大学的几年时间中教授给我的电气工程基础使我掌握了我现在经常应用的概念。感谢 Emory Pace 先生，他是一位严厉的教授，带领我学习几门微积分学课程，在此过程中，给了我在大学生涯以及从此以后所依靠的信心。特别感激 Charles Nunnally 博士，从成功的工业生涯转到大学，他最早让我明白了我努力学习的东西的实际用途。

感谢我长期的东家 Kollmorgen 公司在我写这本书的过程中给我不断的支持。特别感谢我多年的导师 John Boyland，他是给我鼓励与指导的可依赖源泉。还要感谢 Lee Stephens、Erik Brewster、Bob Steele（均为 Kollmorgen 公司职员）以及 Kevin Craig（Marquette 公司职员），感谢他们对第4版的反馈意见。另外感谢 Christian Fritz 和他在 National Instruments 公司的团队，他们对第13章和第19章的 RCP 和 HIL 做出了许多贡献。

注①弗吉尼亚理工学院的吉祥物是一只叫作“Hokies”的拟人化火鸡。后来，“Hokies”也代称弗吉尼亚理工学院，或者该校的学生。Go Hokies 的大意是“弗吉尼亚理工学，加油！”——译者注。

对新版的表扬

反馈控制是一项普遍应用、功能强大、可实现的技术，乍一看上去，它简单明了，但在原理学习和实践过程中，它是极其复杂而令人捉摸不透的。反馈控制因其在大多数工程课程中的地位，以及其类似数学课程的教学方式，已经成了专家的领地，并且是作为一种几乎没有综合考虑的、现在回想起来只是附加的一部分被应用于多学科交叉的系统设计中。在控制领域中，有一条巨大的、必须弥合的理论-实践鸿沟。通过这本书，George Ellis 在弥合这条鸿沟，以及让每个见习工程师熟悉控制系统的设计和实施方式上已经迈出了一大步。从这本书的第1版开始，我就开始使用，既用于教学，也用于诸如宝洁（Procter & Gamble）公司和西门子（Siemens）公司等的工作。Ellis 的工作在工业实践中享有很高的声誉，这本书以及它的姊妹篇《控制系统中的观测器》展示了现代控制设计如何结合反馈、前馈、观测器一起融入到从设计到系统性能、价格和可靠性的优化整个设计过程中。他的这两本书应该放在每个见习工程师的书架上。我的那两本书由于经常用，都已经磨破了，我现在正在向出版社索要新的版本。

Kevin Craig

机械工程教授

威斯康辛州，密尔沃基市，卡凯特大学工程学院

这本书是为那些设计或调试伺服回路，并有急迫问题需要解决的人撰写的。这本书同其他书稿不同，有一种清新的感觉，因为它不教大理论，让读者自己学会如何使用。作者对他的读者的想法有着不可思议的感觉，对帮助他的读者找到答案很有耐心和怜悯之情。例如，他曾多次提醒他们现在身处何处，他们正在带着问题往哪里走，所以他们不曾迷路。此外，作者避免使用行业术语，如果不能，他就不说。我还发现这一版新增加的内容，运动系统的快速控制原型技术，都及时而有效地使得从仿真过渡到嵌入式硬件方案的过程平稳顺利。

Zhiqiang Gao

副教授、主任

俄亥俄州，克利夫兰州立大学，先进控制中心

目 录

译者序

前言

第一部分 控制的应用原则

第 1 章 控制理论简介	3	3.2.1 积分器	22
1.1 Visual ModelQ 仿真环境	3	3.2.2 功率变换器	23
1.1.1 Visual ModelQ 的安装	3	3.2.3 PI 控制律	23
1.1.2 正误表	4	3.2.4 反馈滤波器	24
1.2 控制系统	4	3.3 开环设计法	25
1.2.1 控制器	4	3.4 稳定裕度	25
1.2.2 被控机器	4	3.4.1 量化 PM 与 GM	26
1.3 控制工程师	5	3.4.2 实验 3A: 理解开环设计法	26
第 2 章 频率域研究法	6	3.4.3 开环、闭环与阶跃响应	28
2.1 拉普拉斯变换	6	3.5 分段调试的步骤	29
2.2 传递函数	6	3.5.1 段一: 比例段	30
2.2.1 s 是什么	7	3.5.2 段二: 积分段	31
2.2.2 线性化、时不变性与传递函数	7	3.6 被控对象增益的变化	31
2.3 传递函数举例	8	3.6.1 应对变化的增益	32
2.3.1 控制器单元的传递函数	8	3.7 多(级联)控制回路	33
2.3.2 功率变换器的传递函数	9	3.8 功率变换器饱和与同步	33
2.3.3 物理元件的传递函数	9	3.9 相位与增益图	36
2.3.4 反馈的传递函数	10	3.10 问题	38
2.4 框图	11	第 4 章 数字控制器中的延迟	40
2.4.1 组合框	11	4.1 如何采样	40
2.4.2 Mason 信号流图法	12	4.2 数字系统中的延迟源	40
2.5 相位与增益	13	4.2.1 采样-保持延迟	40
2.5.1 传递函数的相位与增益	14	4.2.2 计算延迟	41
2.5.2 伯德图: 相位、增益与频率的 关系	14	4.2.3 速度估计延迟	42
2.6 性能测量	15	4.2.4 延迟之和	42
2.6.1 指令响应	15	4.3 实验 4A: 数字控制中延迟的理解	43
2.6.2 稳定性	17	4.4 选择采样时间	44
2.6.3 与频率域对应的时间域	18	4.4.1 一般系统的激进假设	45
2.7 问题	18	4.4.2 基于位置运动系统激进的假设	45
第 3 章 控制系统的调试	20	4.4.3 适度假设与保守假设	45
3.1 闭合控制回路	20	4.5 问题	46
3.2 模型的详细回顾	22	第 5 章 z 域研究法	48
		5.1 z 域初步	48

5.1.1 z 的定义	48	7.2.1 扰动的时域响应	83
5.1.2 z 域传递函数	48	7.2.2 扰动的频率域响应	85
5.1.3 双线性变换	48	7.3 扰动解耦法	86
5.2 z 域相图	49	7.3.1 扰动解耦法的应用	87
5.3 混叠	50	7.3.2 实验 7B: 扰动解耦	90
5.4 实验 5A: 混叠	52	7.4 问题	92
5.4.1 z 域中的伯德图与框图	53	第 8 章 前馈	94
5.4.2 直流增益	53	8.1 基于被控对象的前馈	94
5.5 从传递函数到算法	53	8.2 前馈与功率变换器	97
5.6 数字系统的函数	55	8.2.1 实验 8B: 功率变换器的补偿	98
5.6.1 数字积分与微分	55	8.2.2 增大功率变换器带宽与前馈 补偿	100
5.6.2 数字微分	56	8.3 延迟指令信号	100
5.6.3 采样-保持	58	8.3.1 实验 8C: 指令通路上的延迟	101
5.6.4 DAC/ADC: 数模相互转换	59	8.3.2 实验 8D: 功率变换器的补偿与 指令通路上的延迟	102
5.7 计算延迟的减小	60	8.3.3 有前馈时的调试与钳位	103
5.8 量化	61	8.4 被控对象与功率变换器运行特性中的 变化	104
5.8.1 极限环与抖动	61	8.4.1 被控对象增益的变化	104
5.8.2 偏置与极限环	62	8.4.2 功率变换器运行特性的变化	105
5.9 问题	63	8.5 双积分被控对象的前馈	106
第 6 章 四种控制器	64	8.6 问题	106
6.1 本章中的调试	64	第 9 章 控制系统中的滤波器及实现	108
6.2 比例增益的使用	65	9.1 控制系统中的滤波器	108
6.2.1 P 控制	65	9.1.1 控制器中的滤波器	108
6.2.2 如何调试 P 控制器	65	9.1.2 功率变换器中的滤波器	110
6.3 积分增益的使用	67	9.1.3 反馈中的滤波器	110
6.3.1 PI 控制	67	9.2 滤波器的通带	110
6.3.2 如何调试 PI 控制器	68	9.2.1 低通滤波器	111
6.3.3 模拟 PI 控制	69	9.2.2 陷波滤波器	114
6.4 微分增益的使用	70	9.2.3 实验 9A: 模拟滤波器	115
6.4.1 PID 控制	70	9.2.4 双二阶滤波器	115
6.4.2 如何调试 PID 控制器	70	9.3 滤波器的实现	116
6.4.3 噪声与微分增益	72	9.3.1 无源模拟滤波器	116
6.4.4 Ziegler-Nichols 法	72	9.3.2 有源模拟滤波器	116
6.4.5 PID 控制中的流行术语	73	9.3.3 开关电容滤波器	117
6.4.6 PID 的模拟替代方法: 超前- 滞后	73	9.3.4 IIR 数字滤波器	117
6.5 PD 控制	74	9.3.5 FIR 数字滤波器	118
6.6 选择控制器	76	9.4 问题	119
6.7 实验 6A ~ 6D	76	第 10 章 控制系统中的观测器	120
6.8 问题	77	10.1 观测器纵览	120
第 7 章 扰动响应	78	10.1.1 观测器术语	121
7.1 扰动	78		
7.2 速度控制器的扰动响应	82		

10.1.2 创建一个 Luenberger 观测器	121	10.4.3 被控对象的估计器设计	130
10.2 实验 10A ~ 10C: 用观测器提高稳定性	124	10.4.4 设计观测器补偿器	133
10.3 Luenberger 观测器的滤波器形式	126	10.5 观测器补偿器的调试概述	134
10.3.1 低通与高通滤波器	128	10.5.1 步骤 1: 临时构建观测器以供调试	135
10.3.2 滤波器形式的框图	128	10.5.2 步骤 2: 观测器补偿器稳定性调整	135
10.3.3 回路形式与滤波器形式的比较	128	10.5.3 步骤 3: 把观测器恢复为标准 Luenberger 结构	138
10.4 Luenberger 观测器的设计	129	10.6 问题	138
10.4.1 传感器的估计器设计	129		
10.4.2 传感器的滤波作用	130		

第二部分 建模

第 11 章 建模入门	140	12.4.6 量化	164
11.1 什么是模型	140	12.4.7 确定的反馈误差	164
11.2 频域建模	140	12.4.8 功率变换器饱和	165
11.3 时域建模	142	12.4.9 脉冲调制	167
11.3.1 状态变量	142	12.4.10 滞环控制器	168
11.3.2 建模环境	144	12.5 问题	168
11.3.3 模型	145	第 13 章 模型开发与校验	170
11.3.4 时域模型的频域信息	151	13.1 模型开发的七个步骤	170
11.4 问题	152	13.1.1 确定建模目的	170
第 12 章 非线性特性与时变	153	13.1.2 SI 单位制模型	171
12.1 LTI 与非 LTI	153	13.1.3 系统辨识	172
12.2 非 LTI 特性	153	13.1.4 建立框图	174
12.2.1 慢变化	153	13.1.5 频域与时域选择	175
12.2.2 快变化	154	13.1.6 写出模型方程	175
12.3 非线性特性处理	154	13.1.7 校验模型	175
12.3.1 更换被控对象	155	13.2 从仿真到部署: RCP 与 HIL	176
12.3.2 最坏条件下的稳定性调试	155	13.2.1 RCP 技术	176
12.3.3 增益调度	156	13.2.2 RCP: 移植的中间步骤	176
12.4 非线性特性十例	157	13.2.3 RCP 与并行开发	177
12.4.1 被控对象的饱和	157	13.2.4 RCP 与实时执行	178
12.4.2 死区	158	13.2.5 LabVIEW 中的实时仿真示例	178
12.4.3 逆向漂移	159	13.2.6 硬件在环仿真技术	182
12.4.4 视在惯量的变化	161	13.2.7 RCP 和 HIL 供货商	183
12.4.5 摩擦力	161		

第三部分 运动控制

第 14 章 编码器与旋转变压器	186	14.3.2 软件 RDC	190
14.1 精度、分辨率与响应速度	187	14.3.3 旋转变压器误差与多级旋转变压器	191
14.2 编码器	188	14.4 位置分辨率、速度估计与噪声	191
14.3 旋转变压器	188	14.4.1 实验 14A: 分辨率噪声	192
14.3.1 旋转变压器信号变换	189		

14.4.2	高增益产生大噪声	193	15.6.2	正弦换相	216
14.4.3	噪声滤除	193	15.6.3	永磁无刷电动机的相位控制	217
14.5	提高分辨率的选择方法	194	15.6.4	永磁无刷电动机的DQ控制	220
14.5.1	1/T插值法	194	15.6.5	DQ磁方程	222
14.5.2	正弦编码器	195	15.6.6	DQ控制与相控制的比较	223
14.6	周期误差与转矩/速度纹波	196	15.7	永磁无刷电动机的六步控制	224
14.6.1	速度纹波	197	15.7.1	换相的位置传感	224
14.6.2	转矩纹波	197	15.7.2	有刷电动机与无刷电动机的比较	225
14.7	实验14B:周期误差与转矩纹波	199	15.8	感应电动机与磁阻电动机	226
14.7.1	误差幅值与纹波的关系	199	15.9	问题	226
14.7.2	速度与纹波的关系	199	第16章 柔性和谐振		227
14.7.3	带宽与纹波的关系	200	16.1	谐振方程	228
14.7.4	惯量与纹波的关系	200	16.2	调谐谐振与惯量-减小不稳定性	229
14.7.5	改变误差谐波的影响	200	16.2.1	调谐谐振	229
14.7.6	提高旋转变压器速度的影响	200	16.2.2	惯量-减小不稳定性	231
14.7.7	实际速度中的纹波与反馈速度中的纹波之间的关系	200	16.2.3	实验16A和16B	233
14.8	选择反馈装置	201	16.3	整治谐振	233
14.8.1	供货商	202	16.3.1	增大电动机/负载惯量的比值	233
14.9	问题	203	16.3.2	增强传动刚性	235
第15章 电子伺服电动机与驱动			16.3.3	增大阻尼	237
基础		204	16.3.4	滤波器	238
15.1	驱动器的定义	204	16.4	问题	239
15.2	伺服系统的定义	205	第17章 位置控制回路		241
15.3	磁学基础	205	17.1	P/PI位置控制	241
15.3.1	电磁学	207	17.1.1	P/PI传递函数	242
15.3.2	右手定则	207	17.1.2	调试P/PI回路	243
15.3.3	形成磁通路	207	17.1.3	P/PI回路中的前馈	245
15.4	电子伺服电动机	208	17.1.4	调试有速度前馈的P/PI回路	245
15.4.1	转矩评定等级	208	17.1.5	P/PI回路中的加速度前馈	246
15.4.2	旋转运动与直线运动	209	17.1.6	调试具有加速度/速度前馈的P/PI回路	247
15.4.3	直线电动机	209	17.2	PI/P位置控制	248
15.5	永磁有刷电动机	210	17.2.1	调试PI/P回路	249
15.5.1	生成绕组磁通	210	17.3	PID位置控制	249
15.5.2	换相	211	17.3.1	PID位置控制器调试	250
15.5.3	转矩的产生	211	17.3.2	速度前馈与PID位置控制器	251
15.5.4	电角与机械角的关系	211	17.3.3	加速度前馈与PID位置控制器	251
15.5.5	电动机转矩常数 K_T	212	17.3.4	PID位置环的指令响应与扰动响应	252
15.5.6	电动机的电气模型	212	17.4	位置环的比较	253
15.5.7	永磁有刷电动机的控制	213	17.4.1	定位、速度与电流驱动器	
15.5.8	有刷电动机的优点与缺点	215			
15.6	永磁无刷电动机	216			
15.6.1	永磁无刷电动机的绕组	216			

配置	253
17.4.2 比较表格	254
17.4.3 双环位置控制	254
17.5 位置轮廓发生器	255
17.5.1 梯形分段计算	256
17.5.2 逐点产生	256
17.5.3 S 曲线	257
17.5.4 多轴协调	259
17.6 定位系统的伯德图	259
17.6.1 采用速度驱动的系统的 伯德图	259
17.6.2 采用电流驱动器的系统的 伯德图	260
17.7 问题	260
第 18 章 Luenberger 观测器在运动 控制中的应用	262
18.1 可能从观测器中获益的应用	262
18.1.1 性能需求	262
18.1.2 可采用的计算资源	262
18.1.3 位置反馈传感器	262
18.1.4 运动控制传感器中的相位 滞后	263
18.2 观测速度, 减小相位滞后	263
18.2.1 消除由简单差分引入的相位 滞后	263
18.2.2 消除变换引起的相位滞后	269
18.3 加速度反馈	273
18.3.1 使用观测加速度	274
18.3.2 实验 18E: 使用观测加速度 反馈	275
18.4 问题	276

第 19 章 运动控制中的快速控制原型 技术	278
19.1 为什么使用 RCP	278
19.1.1 用 RCP 来改进、验证模型	279
19.1.2 用 RCP 获取物理元部件访问权, 并取代模型	279
19.2 具有硬耦合负载的伺服系统	280
19.2.1 建立系统模型	281
19.2.2 LabVIEW 模型和 Visual ModelQ 模型的比较	282
19.2.3 将 LabVIEW 模型转换为 RCP 控制器	283
19.2.4 验证 RCP 控制器	284
19.3 具有柔性耦合负载的伺服系统	286
19.3.1 在 Visual ModelQ 中建立系统 模型	287
19.3.2 在 LabVIEW 中建立系统模型	288
19.3.3 转换 LabVIEW 模型为 RCP 系统	288
附录	291
附录 A 控制器元件的有源模拟实现	291
附录 B 欧洲框图符号	293
附录 C 龙格-库塔法	295
附录 D 双线性变换研究	299
附录 E 数字算法的并行形式	300
附录 F 基本矩阵论	302
附录 G 习题答案	303
术语中英对照表	312
参考文献	321
后记	325

第一部分

控制的应用原则

给读者的重要安全导则

第1章 控制理论简介

第2章 频率域研究法

第3章 控制系统的调试

第4章 数字控制器中的延迟

第5章 z 域研究法

第6章 四种控制器

第7章 扰动响应

第8章 前馈

第9章 控制系统中的滤波器及实现

第10章 控制系统中的观测器

给读者的重要安全导则

本书讨论控制系统的正常操作、试车与故障排除方法。工业控制器的运转可能产生危害，例如：

- 大量的热；
- 高电压电动势；
- 物体或机械装置的移动可能带来伤害；
- 有毒化学品的流动；
- 火焰；
- 爆炸或者向内破裂。

危险的操作很可能导致发生事故。事故可能给你和你的同事以及其他带来人体伤害，也可能毁坏设备。通过安全操作控制系统，可以使得发生事故的可能性非常小，因此一定要安全操作控制系统！

采用以下步骤，可以提高控制系统的安全性。

- 1) 只允许接受过与安全相关的工作实践训练和上锁挂牌程序训练的人对控制系统进行安装、试车或维护；
- 2) 总是遵从生厂商推荐的程序；
- 3) 总是遵循国家、州、当地的以及专业的安全规程条例；
- 4) 总是遵循就要操作的设备所在工厂制定的安全导则；
- 5) 总是使用合适的安全设备，例如，保护眼罩、听力保护、安全鞋以及其他保护衣物；
- 6) 从不企图无视安全器件，如限位开关、紧急制动开关、光帘或者物理障碍；
- 7) 总是保持操作的机器干净，过程清晰；
- 8) 提供可靠的保护，如机械停止开关、紧急断电开关，使得控制器意想不到的特性不会伤害你和其他人，也不会损坏设备。

记住，系统参数、元部件、接线或者控制系统的其他功能的任何变化可能导致意外的结果，如系统不稳定，或者失控的系统激励。

记住，控制器和其他控制系统部件会失灵。例如，控制器中的微处理器任何时间都可能经历灾难性的失灵，与反馈装置相连的或其内部的导线随时可能短路或者断路。控制器的失灵可能导致意想不到的结果，如系统不稳定性，或者失控的系统激励。

本书提出了观测器，在控制系统中采用它会经受一定的风险，包括观测器可能不稳定，或者无法为合适的系统运转提供所需精确度的观测信号。要确保观测器在所有运转条件下有合适的特性。

如果有关于设备安全操作方面的问题，和设备生产商、工厂安全员，或者当地政府官员联系，如职业健康与安全管理部。

总是要安全操作控制系统！

第 1 章

控制理论简介

控制理论用于分析和设计反馈系统，如调节温度、液流、运动、力、电压、压力、张力和电流。控制理论的熟练使用，可以在产品与过程设计环节的每个阶段给工程师予以指导，能够帮助工程师预知性能，预见问题，并提供解决问题的方案。

大学的控制理论教学很少把重点放在日常问题上，学术界专注于先进控制方案的数学推导和研究，却忽略了工业中常用的控制方法，以至于学生能够完成包括控制理论课程在内的工程程序，但是对于一个基本的控制系统在如何设计、建模、构建调试以及故障排除方面，仍然显得很稚嫩。这种不幸的结局就是，许多施工工程师在履行他们的本职工作时，搁置了对系统的分析，却依赖于公司的历史记录与试凑法。

本书避开了大多数控制理论教材中的材料与组织方式，例如，本书从头至尾提到的设计导则，这些导则将工业中已接受的惯例与常见缺陷的告诫相结合。本书还提出了一些非传统题材，如滤波与建模，因为它们对理解与实现工作场所中的控制系统是必要的。本书中每一章的重点是教会读者如何应用控制理论来改善运转的机器或过程的性能。

对于控制系统设计人员来说，个人计算机与工作站的广泛应用是一个重要的进步。许多经典控制方法，如根轨迹法，与其说是分析法，还不如说是图解法。这些方法是创立者寻求避免分析方法中所需要的惊人计算量而提出的。幸运的是，这些计算现在已不再是壁垒了。实际上，每台个人计算机都可以完成分析方法所需要的计算。记住，这里提到的原理与方法在本质上是解析的，而且计算是要用计算机来实现的。

1.1 Visual ModelQ 仿真环境

大部分工程师对控制理论基础有所了解。对于如传递函数、框图、 s 域以及伯德（Bode）图等概念来说，多数人都是熟悉的。但是施工工程师如何应用这些概念呢？正如在许多学科中的训练一样，必须培养直觉，这需要有扎实的基础。而要基础扎实，就需要实践。

在学习控制系统技术时，寻找一台设备来实践通常是困难的。因此，设计者通常依赖于计算机仿真。为此，作为本书的一个配套，作者开发了 Visual ModelQ，它是一个基于 PC 的单机图形化仿真环境。这个环境提供了模拟控制系统与数字控制系统的时域和频域分析。本书开发了許多 Visual ModelQ 模型，这些模型广泛用于随后的章节中。读者可以运行这些实验，以检验其结果，然后修改参数及其他条件，应用控制系统有关的概念进行实验。

Visual ModelQ 是用于控制理论教学的，它使得控制研究中必需的工作变方便了，控制律的增益很容易改变，频域响应图（伯德图）的绘制只要按一下按钮就可以实现。Visual ModelQ 中的模型持续运行，就像实时控制器一样。由于测量设备是独立运行的，因此可以改变测量设备参数，并可立即看到这些参数的改变所带来的影响。

1.1.1 Visual ModelQ 的安装

Visual ModelQ 可以从网站 www.qxdesign.com 获得，其非注册版是免费使用的。虽然非注册

版少了几个功能，但它可以运行本书中所有的模型。读者随时都可以选择注册 Visual ModelQ 的复制版，详见 www.qxdesign.com。

Visual ModelQ 可以在装有 Windows XP 或 Windows 7 操作系统的 PC 上运行。下载 Visual ModelQ V7.0 或更新版的安装包，文件一般安装在 C:\Program Files\QxDesign, Inc\Visual ModelQ7.0 目录下。Visual ModelQ 同时安装有用户手册和参考文献。安装完毕后，可阅读用户手册和参考手册。注意，也可以按 F1 键进入参考文献手册。最后，为了更新软件，请不时地检查 www.qxdesign.com。

1.1.2 正误表

检查 www.qxdesign.com 正误表。作者会有规律地更新 Web 网页，好让大家知道书中错误的修正。

1.2 控制系统

一般控制系统可以分成控制器与被控机器两部分，如图 1-1 所示。控制器又可以分成控制律与功率变换器两部分。被控机器可以是一个恒温池、一台电动机，或者电源中的电感器/电容器电路。被控机器也可以分成两部分：被控对象与反馈装置。被控对象接收两种信号：来自于功率变换器的控制器输出，以及一个或多个扰动。简而言之，控制系统的作用是在克服扰动的同时根据指令信号驱动被控对象。

1.2.1 控制器

控制器合并了控制律与功率变换器。控制律，如比例-积分-微分（Proportional-Integral-Differential, PID）控制，是控制工程师所熟悉的。调试的过程，就是设置增益以获得期望性能的过程，也是调整控制律参数的过程。大多数控制器允许设计者调整增益，许多设计灵活的控制器甚至允许设计者修改控制律本身。在调试过程中，大多数控制工程师专注于获得快速、稳定的指令响应。然而，在某些应用中，抗扰动能力比指令的响应更重要。所有的控制系统应该展示其鲁棒性性能，因为即使同样的被控机器与过程，彼此之间也会有些差异并且随着时间的变化而变化。鲁棒运行意味着控制律必须有足够的裕度，以适应被控对象与功率变换器的合理变化。

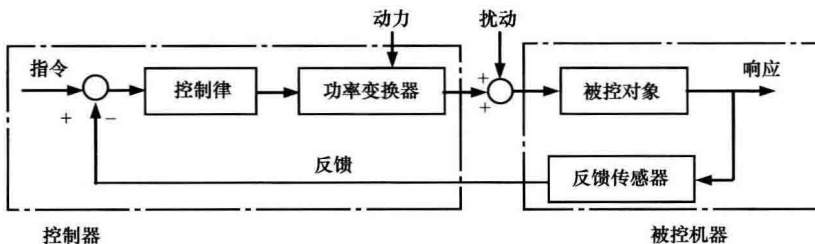


图 1-1 一般控制系统

事实上，所有的控制器都有功率变换器。控制律生成控制信息，但是必须施加能量才能控制被控对象。功率变换器可以采用任何可获得的能源来驱动，包括电、气、水压或化学能。

1.2.2 被控机器

被控机器由两部分组成，即被控对象与反馈。被控对象是产生系统响应的一个元件或元件