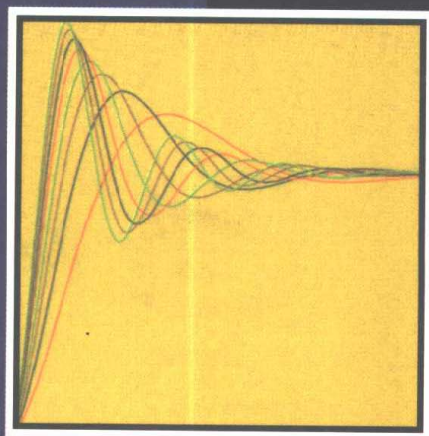


THOMSON
LEARNING
汤姆森学习出版集团



BookWare 系列丛书



反 馈 控 制 问 题

► 使用 *MATLAB*[®]
及其控制系统工具箱

〔美〕迪安·K·弗雷德里克
乔·H·周

张彦斌 译 韩崇昭 审校

西安交通大学出版社

THOMSON
LEARNING
汤姆森学习出版集团

 Book Ware 系列丛书

反馈控制问题

——使用 MATLAB 及其控制系统工具箱

Feedback Control Problems

using MATLAB[®] and the Control System Toolbox

[美] 迪安·K·弗雷德里克

乔·H·周

张彦斌 译

韩崇昭 审校



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

内 容 提 要

本书旨在帮助那些控制系统工程的初学者,使他们能够借助 MATLAB 及其控制系统工具箱的强大功能,迅速解决大量的数字计算问题,以增强学习的效果。书中第一部分,即第 2,3,4 章论述系统模型的建立,处理的对象包括传递函数模型和状态空间模型。第二部分,即第 5,6,7 章介绍时域和频域中的分析方法和性能评测。第三部分,即第 8,9,10 章讨论控制系统设计的技巧和方法。书中各部分包含了大量的可用 MATLAB 和控制系统工具箱求解的各类例子和各种问题,因而可将其作为一般控制系统教科书的辅助教材。该书不仅适合于正在学习连续时间反馈控制系统设计的高年级学生,同样也适合于学习该类课程的研究生。此外,对于工程技术人员来说,该书也可作为他们用于计算机辅助设计控制系统的一本很好的参考书与工具书。

First published by Brooks/Cole Publishing Company, a division of Thomson Learning, United States of America.

All Rights Reserved.

Authorized Translation/Adaptation of the edition by Thomson Learning and XJUP. No part of this book may be reproduced in any form without the prior written permission of Thomson Learning and XJUP.

(*Feedback Control Problems: Using MATLAB and the Control System Toolbox* /

Dean K. Frederick & Joe H. Chow)

本书中文简体字版由美国 Thomson Learning 出版集团授权西安交通大学出版社出版发行,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

图书在版编目(CIP)数据

反馈控制问题:使用 MATLAB 及其控制系统工具箱/
(美)弗雷德里克(Frederick, D. K.), (美)周(Chow, J. H.); 张彦斌译. —西安:西安交通大学出版社,
2001.11

书名原文:Feedback Control Problems using MATLAB
and the Control System Toolbox

ISBN 7-5605-1429-4

I. 反… II. ①费…②周…③张… III. 计算机
辅助计算-软件包, MATLAB IV. TP391.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 076423 号

*

西安交通大学出版社出版发行
(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)
西安建筑科技大学印刷厂印装
各地新华书店经销

*

开本:787mm×960mm 1/16 印张:13 字数:198 千字

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月第 1 次印刷

印数:0001~5 000 定价:19.00 元

陕版出图字:25-2001-005

发行科电话:(029)2668357,2667874

中译本出版者的话

Brooks/Cole 出版公司(Thomson Learning 出版集团的下属子公司)于 2000 年推出的系列丛书 BookWare Companion Series,大致涵盖的都是电子信息 and 电气工程类等大学本科的主干课程。参加这套丛书编撰工作的大多是一些目前仍活跃在教学第一线的知名教授。组织出版这套丛书的初衷和每一位作者的想法可在“出版者的话”和每本书的作者“前言”中略见其详,这里不再赘述。

概括起来,原丛书出版者的意图大致有二:一是探讨如何将基于计算机的学习工具融于教学;二是给学生提供另外的学习空间,让他们能自主学习。总的目的就是要让学生积极主动地学习,这样会学得更好。由于课程性质和每位作者的想法有些差异,每本书在具体构成方式上会各有不同,但综合来看,这套丛书具有如下特点:

- 不求过细,而强调内容的系统性并注重相互联系。提纲挈领,注意总结,联系实际。因此,一般来说最好用作辅助性教材。

- 用“解说题”、“例题”、“强化题”、“探究题”等这些目的各异的题来演绎和深化概念,联系实际,并在重要概念的深度和广度上作适当延伸。这比“硬灌”会收到更好的效果。

- 全部题都有答案(或题解),如有必要均配有相应的 MATLAB 脚本,便于学生在学习中及时获得反馈。

- 丰富的 MATLAB 脚本资源和可随时进入的在线网站为广大读者提供了很大的学习空间。使他们的精力不再耗在编程上,而在探究上;他们可以利用这些脚本资源做他们想做的事;他们可以在计算机仿真上得到初步训练和更大的领悟,并为他们的创新意识和才能的发挥提供无限的空间。

根据我国当前高等学校的具体情况,我们组织出版这套丛书的中译本大致有如下几点考虑:

- 近几年来经国家和各级政府的重点建设和投资,高等学校的计算机硬件条件大为改善, MATLAB 软件已较为普及,有的学校已将宽带接入因特网联到学生宿舍,个人拥有一台 PC 机已不再稀罕,这都为使用这套丛书准备了必要的硬件和软件环境。

- 以 CAI 开始的教学手段现代化改革已持续了十多年,当今多媒体教学、

电子教材、网络大学和网络课程等发展势头方兴未艾,其核心问题就是如何有效地利用计算机作为辅助教学工具,改进教学方法。这套丛书提供了一种可供大家借鉴的方式。

- 减少课内学时,精简内容,重组课程体系就是为了给学生留下更多的空间让他们自主学习。这套丛书为他们提供了这方面的素材。

- MATLAB 是一种集成度很高的语言,由于其功能强,使用方便和适用的计算机平台宽而被大家所接受,已在教学、科研和工程实际中广泛采用。这套丛书为学生熟悉、掌握和熟练应用 MATLAB 提供了一个载体,丛书中所给出的各种 MATLAB 脚本和仿真软件是科学研究工作者和工程实践人员不可多得的宝贵资源。

- 对于非全日制大学的那些成人教育、继续教育和自学考试的学生来说,这也是一套很有参考价值的辅助教材。

西安交通大学出版社早在 20 世纪 80 年代中期就组织翻译出版了一套“外国教材精选”系列丛书,90 年代又陆续推出了《信号与系统》、《离散时间信号处理》等多本很有影响的外国优秀教材的中译本。这些都取得了良好的经济效益和社会效益。当前在国家教育主管部门正大力倡导在计算机等信息学科积极引进并直接采用外国优秀教材进行教学的时候,我们将一如既往,争取在较短的时间内将这套丛书的中译本奉献给大家。我们感谢广大读者过去对我社组织翻译出版的外国教材的青睐,并继续期望得到你们的支持。如有任何建议和要求,请与我们联系。E-mail: Shadwell-qin@163.com 或 Lp-zhao@Yahoo.com

西安交通大学出版社

2001.8

译者序

MATLAB 是一种面向科学和工程计算的高级语言,现已成为国际公认的最优秀的科技界应用软件,在世界范围内广为流行和使用。其强大的科学计算与可视化功能、简单易用的开放式可扩展环境以及多达 30 多个面向不同领域而扩展的工具箱支持,使 MATLAB 在许多学科领域中成为计算机辅助设计与分析、算法研究和应用开发的基本工具和首选平台。今天,在欧美各国的高等学校里, MATLAB 已成为大学生、研究生、教师必备的基本技能,国内不少高校,也正在推广应用 MATLAB 软件,用户愈来愈多。

在学习、使用 MATLAB 的实践中,大家感觉到 MATLAB 脚本式的语言其实不难掌握,难点在于如何理解和掌握 MATLAB 及其工具箱中大量函数的功能及用法,避免重复性的劳动,尽快地“站在巨人肩上”开展工作。《反馈控制问题——使用 MATLAB 及其控制系统工具箱》一书,正是借助了 MATLAB 及其控制系统工具箱的强大功能,围绕许多示例说明在控制系统的分析和设计过程中如何使用 MATLAB 及控制系统工具箱,特别是它们所提供的大量函数,使学习和从事该方面研究的各个层次的科技工作者可直观、方便地进行分析、计算及设计工作,从而大大地节省了时间。所以,该书可供自动控制类专业的研究人员参考,也可作为高校该类专业的研究生与高年级本科生控制计算机辅助设计课程的教材和参考书。还可供其它专业的学生与科技工作者、教师作为自动控制原理、系统仿真等课程的实验辅助教材,以及科学计算与图形绘制等方面的工具。

本书在翻译过程中自始至终得到了西安交通大学电子信息与控制工程学院副院长韩崇昭教授的精心指点,并由他审校了全部译稿。该院赵广社副教授认真阅读了原稿,并提出了许多建设性的宝贵意见,对保证该书质量起了很大作用。西安交通大学工业自动化专业硕

士研究生周荣亮、皮海峰、王敬等同学围绕本书也做了大量工作,译者在此一并深表谢意。

由于译者水平有限,书中的缺点错误在所难免,欢迎读者批评指教。

张彦斌

2001年8月于西安交通大学

出版者的话

——关于这套丛书

计算的目的在于它的内涵,而不在数字。

—— R·W·海明(Hamming), 选自《面向工程师和科学家的数值方法》(*Numerical Methods for Engineers and Scientists*, McGraw-Hill, Inc.)

正是由于心灵的驱使,我们才推出了这套“BookWare 系列丛书”(BookWare Companion Series™)。

新技术和现代方法正日益融入业已浓缩并具有重要理论的课程,因此,很多教师现在要问:“我们只是将这些最新技术教授给学生呢?还是教会他们如何推理”?我们深信,这两方面不应互相排斥。事实上,本丛书就是基于这样的信念:计算机求解和基本理论是能够互补的。应用恰当,计算结果可以阐明理论,并帮助学生以各种富有意义的方式进行思考、分析和推理。它也能够帮助学生理解新的信息和现有知识之间的关系和联系,以及培养他们解决问题的技巧、感性认识和积极主动思考的能力。为此使命,这套“BookWare 系列丛书”便应运而生了。

具体地说,本丛书是专为这样的教师——他们想要把计算机辅助学习融合到课程之中去——而编写的;也是为想比仅从教科书中学到更多知识的学生编写的。教师可以从中发现,功能很强的软件工具是支撑他们课程活动的各种手段,而不会限制他们的应用。学生会发现,可以迅速获得各种相关的习题和例题,并具有电子接入方法。对教师和学生来说均为重要的是这套丛书基于这样的前提:如果学生积极主动地学习,他们会学得更好。“BookWare 系列丛书”定会受到学生的青睐,为他们提供一种对现实问题的感受,展示解决实际问题的清晰方法,并在理解和应用这些方法上挑战自我。

为了更好地满足你的需要,我们将继续寻找使这套丛书日臻完善的方法。为达此目的,请加入到我们的“BookWare Companion Resource Center”中来,我中

心的网址是:<http://www.brookscole.com/engineering/bookware/>^①。

你推荐的方法都会使这套丛书更加令人满意,在课堂教学中与同仁们分享你如何使用技术的见解,为下一版提出具体的习题或例题,或者将你的想法告诉我们。务请不吝赐教。

我们恭候你的回音,谢谢你的持续不断地支持。

Bill Stenquist	出版人	<i>bill.stenquist@brookscole.com</i>
Heather Woods	责任编辑	<i>heather.woods@brookscole.com</i>
Nathan Wilbur	市场经理	<i>nathan.wilbur@brookscole.com</i>
Christina DeVeto	市场助理	<i>christina.deveto@brookscole.com</i>

① 译者注:原书提供的网址是 <http://www.brookscole.com/engineering/ee/bookware.html>

前言

本书的目的在于帮助那些控制系统工程的初学者,使他们能够运用计算机迅速解决大量的数值问题,以增强学习的效果。书中围绕许多示例说明了系统分析和设计过程中涉及到的各个步骤。并由范例引导出各种各样的思考题,包括紧接范例的“如果……将会怎样”式的问题,简单的课本式问题,开放式的探讨性问题以及实际的综合性应用问题。

为了实现上述目的,本书借助了 MATLAB 及其控制系统工具箱的强大功能。由于本书只是对一些重要的结果进行了总结和说明,推导过程并没有从基本原理开始,所以本书无意成为反馈控制的唯一参考书,而是希望和它附带的文件一起作为众多介绍反馈控制导论的教科书的有益补充。附带的文件可从 Brook/Cole 的网站下载。

学习本书时,读者可以在合适的计算机上运行 MATLAB 及其控制系统工具箱来配合练习线性系统的分析技巧,而这些技巧是分析和设计反馈控制系统的基础。由于可使用高性能的计算机,读者就不必再拘泥于可手工计算出结果的一阶和二阶问题,也不必承担求解有意义的问题所需要的繁重计算任务,而是可以集中精力解读通过计算机得到的分析和设计结果,从而提高学习效果。

书中的问题适合正在学习连续时间反馈控制系统设计的高年级学生。除了基于传递函数模型的经典控制系统设计方法,本书还包含状态空间模型问题的设计方法。所以本书同样适用于控制系统的研究生课程。此外,对工程技术人员来说,本书也可作为他们了解计算机辅助设计控制系统的综述和导论。

本书内容的组织方式与多数控制系统导论的教科书类似。在第 4 章较早地介绍了系统的状态空间模型,强调了它对完成实际问题建模的重要性。课目中沒有状态空间模型的读者可直接跳过第 4 章,这样并不会影响学习的连续性。

本书的编写基于如下考虑:先分析例子,再研究渐趋复杂的问题,以利于控制系统的学习。书中每个例子都是为了说明某个特定的概念而设计的,通常例子还提供了建模和计算所需的 MATLAB 源程序。有的例子后附有“如果……将会怎样”式的问题,使读者马上就能通过解决相关的问题来深入掌握该概念。接着给出一些强化训练题,以帮助读者将方法技巧应用到课本式的习题中去。在每章末尾,本书会提出一到两个探讨性问题,读者可在用户定义的系统进一

步应用所学的方法和技巧。从第 2 章开始会出现有关实际系统分析和设计的综合性问题,实际系统的模型在附录 A 中列出。读者在解决综合问题时,要用到该章讨论过的所有概念。

为了有效地使用本书,读者应该对 MATLAB 比较熟悉,包括数据输入,绘图和简单的计算。相关的 MATLAB 的 M 文件可以从 Bookware 公司资源中心得到,其网址是 <http://www.Brookscole.com/engineering/ee/bookware.html>。这些文件可以复制到你的计算机中,用于求解书中所有的例题、强化题和综合题。其中还包含解决探讨性问题的 M 文件和几种特殊 RPI 函数的 M 文件,RPI 函数能完成 MATLAB 和控制系统工具箱中所不具备的计算功能。

致 谢

能有机会参加 BookWare 公司系列丛书的部分工作,我们要衷心感谢曾在 PWS 出版公司任职的 Tom Robbins,他在本书原稿准备工作期间,经常给我们以鼓励。海军研究生院的 Bob Strum 是该丛书的编辑,他对丛书的组织和交互式软件提出了许多有益的见解。下列书稿评审者,在确定本书的范围和定位方面提供了有益的帮助:

MA 的 Steve Adams, Swampscott

萨斯塞克斯大学的 Derek Atherton

麻省理工学院的 William Durfee

德克萨斯 A&M 大学的 John. A. Fleming

西安大略大学的 Jin Jiang

马凯特大学的 Mark Nagurka

凯斯西部保留地大学的 Stephen Philips

Didaktikzentrum ETH 的 Walter Schaufelberger

PRI 函数中的某些程序代码由当时在 Rensselaer 任助教的 Jim O'Donnell 编写。Catherine Yadlon, Hades Shragai 和 Shaopeng Wang 编辑并校对了 M 文件,而 Craig Borghesani 则运用他的 MATLAB 专业知识对 M 文件进行了改进,以确保其功能。在本书的第 8 章和第 9 章中,我们应用了 ETH 的 Walter Schaufelberger 提出的增益扫描(gain-sweep)法。

感谢 Beacon 集团的 Theresa Buffington, Cheryl Graves 和 Michelle Thompson,他们修正了 LATEX 和图形文件,感谢 Greg Hubit 书行的 Greg Hubit,他协调了本书的创作过程;对 Brooks/Cole 出版公司,我们要感谢 Bill Stenquist, Shelley Gesicki, Mary Vezilich, Marlene Thom 和 Vernon Boes。

感谢我们可敬的雇主(Unified Technologies 公司和伦塞尔工学院),他们为本书的准备工作提供了必不可少的设备和软件。特别感谢 David Kassover,在安装编写本书所需的 LATEX 软件时,他给了我们强有力的帮助。

最后,衷心感谢我们的家庭,在我们长时间准备文稿和 M 文件的过程中,他们给予了大力支持。

D. K. Frederick J. H. Chow 于纽约,特洛伊 1999 年 7 月

目 录

第 1 章 导论

引言 (1)

MATLAB 和控制系统工具箱 (1)

课目之间的相互参照 (2)

本书的使用方法 (3)

第 2 章 单方框模型及其响应

引言 (6)

传递函数 (6)

例 2.1 创建 $G(s)$ 为 TF 对象 (7) 源程序 2.1 (8)

例 2.2 创建 $G(s)$ 为 ZPK 对象 (8) 源程序 2.2 (9)

强化习题 (9) P2.1~P2.4 (9)

留数与脉冲响应 (9)

例 2.3 求部分分式展开式和 $g(t)$ (10) 源程序 2.3 (11)

强化习题 (12) P2.5~P2.6 (12)

互异极点的时间响应 (12)

例 2.4 单个极点引起的时间响应 (12) 源程序 2.4 (13)

交叉检查 (13)

强化习题 (13) P2.7~P2.8 (13)

重极点引起的时间响应 (14)

例 2.5 重极点 (14) 源程序 2.5 (15)

强化习题 (15) P2.9~P2.10 (15)

阶跃响应 (15)

例 2.6 $G(s)$ 的阶跃响应 (15) 源程序 2.6 (16)

强化习题 (17) P2.11~P2.12 (17)

对一般输入的响应 (17)

例 2.7 脉冲输入响应 (17) 源程序 2.7 (18~19)
强化习题 (19) P2.13~P2.14 (19)
极点和稳定性 (19)
例 2.8 极点和系统稳定性 (20) 源程序 2.8 (20)
交叉检查 (20)
强化习题 (21) P2.15~P2.18 (21)
零点对系统响应的影响 (22)
例 2.9 阻塞零点 (22) 源程序 2.9 (23)
强化习题 (24) P2.19~P2.20 (24)
例 2.10 右半平面零点 (24) 源程序 2.10 (25)
探究 (25) E2.1 (25)
综合问题 (25) CP2.1~CP2.5 (26~27)
小结 (27)
本章所使用的 MATLAB 函数 (27~29)
习题答案 (29~30)

第 3 章 建立和分析多方框模型

引言 (31)
串联连接 (31)
例 3.1 两个系统的串联连接 (32) 源程序 3.1 (33)
强化习题 (33) P3.1~3.6 (33~34)
并联连接 (34)
例 3.2 并联连接 (34) 源程序 3.2 (35)
强化习题 (35) P3.7~P3.10 (36)
例 3.3 串联/并联连接 (36) 源程序 3.3 (37)
强化习题 (38) P3.11~P3.12 (38)
反馈连接 (38)
例 3.4 反馈连接 (39) 源程序 3.4 (39)
强化习题 (40) P3.13~P3.19 (40~41)
控制器传递函数 (41)
双输入反馈系统 (42)
例 3.5 双输入反馈系统 (42) 源程序 3.5 (45)
探究 (45) E3.1 (45)
综合问题 (46) CP3.1~CP3.5 (46~48)

小结 (48)
本章所使用的 MATLAB 函数 (48~49)
习题答案 (49~50)

第 4 章 状态空间模型

引言 (51)
模型的创建、变换和互连 (51)
例 4.1 建立状态空间模型 (52) 源程序 4.1 (54)
强化习题 (54) P4.1~P4.2 (54)
例 4.2 串联、并联和反馈连接 (54) 源程序 4.2 (55)
强化习题 (56) P4.3~P4.5 (56)
极点、零点、特征值和稳定性 (56)
例 4.3 特征值和传递零点 (57) 源程序 4.3 (57)
强化习题 (57) P4.6~P4.8 (57)
时间响应 (58)
例 4.4 脉冲、阶跃和一般响应 (58) 源程序 4.4 (59)
强化习题 (59) P4.9~P4.11 (59~60)
状态变换 (60)
例 4.5 标准变换 (60) 源程序 4.5 (61)
强化习题 (61) P4.12~P4.13 (61)
探究 (62) EP4.1 (62)
综合问题 (62) CP4.1~CP4.4 (62~63)
小结 (63)
本章所使用的 MATLAB 函数 (63~64)
习题答案 (64~66)

第 5 章 根轨迹图

引言 (67)
绘制根轨迹图 (67)
例 5.1 纯实数极点 (68) 源程序 5.1 (68)
例 5.2 实数和复数极点 (70) 源程序 5.2 (70~71)
强化习题 (72) P5.1~P5.9 (72~74)
任意参数的变化 (74)

例 5.3 可变零点位置 (74) 源程序 5.3 (75)
强化习题 (76) P5.10~P5.12 (76~77)
交叉检验 (77)
探究 (77) E5.1~E5.2 (77)
综合问题 (77) CP5.1~CP5.4 (77~79)
小结 (79)
本章所使用的 MATLAB 函数 (80)
习题答案 (80~81)

第 6 章 频率响应分析

引言 (82)
正弦稳态响应 (82)
例 6.1 正弦稳态响应 (83) 源程序 6.1 (83)
强化习题 (84) P6.1~P6.5 (84~85)
频率响应曲线 (85)
例 6.2 伯德图、尼柯尔斯图和奈奎斯特图 (86) 源程序 6.2 (86)
例 6.3 转角频率和渐近线 (88) 源程序 6.3 (88~89)
强化习题 (89) P6.6~P6.11 (89~90)
频域稳定性分析 (91)
例 6.4 穿越频率、裕量和稳定性 (91) 源程序 6.4 (92)
交叉检验(93)
强化习题 (93) P6.12~P6.14 (93)
探究 (93) E6.1 (93)
综合问题 (94) CP6.1~CP6.4 (94)
小结 (95)
本章所使用的 MATLAB 函数 (95~96)
习题答案 (96)

第 7 章 系统性能

引言 (97)
时域性能 (97)
例 7.1 阶跃响应性能 (99) 源程序 7.1 (99)
强化习题 (100) P7.1~P7.3 (101)

稳态调节 (101)

例 7.2 速度误差系数 (101) 源程序 7.2 (102)

强化习题 (102) P7.4~P7.5 (102~103)

频域性能 (103)

例 7.3 频域性能 (104) 源程序 7.3 (104)

强化习题 (106) P7.6~P7.7 (106)

探究 (106) E7.1 (106)

综合问题 (107) CP7.1~CP7.3 (107)

小结 (108)

本章所使用的 MATLAB 函数 (108~109)

习题答案 (109)

第 8 章 比例-积分-微分控制

引言 (110)

比例控制 (110)

例 8.1 比例控制 (111) 源程序 8.1(a) (112) 源程序 8.1(b) (113~114)

源程序 8.1(c) (115)

比例+积分控制 (115)

例 8.2 PI 控制 (116) 源程序 8.2(a) (117) 源程序 8.2(b) (118)

比例-积分-微分控制 (120)

例 8.3 PID 控制 (120)

探究 (124) E8.1~E8.2 (124~125)

综合问题 (125) CP8.1~CP8.3 (125)

小结 (126)

本章所使用的 MATLAB 函数 (126~127)

第 9 章 频率响应设计

引言 (128)

滞后控制器设计 (128)

方法 1——提高低频幅值 (128)

例 9.1 滞后控制器设计方法 1 (130) 源程序 9.1(a) (130~131)

源程序 9.1(b) (132)

方法 2——减小中频和高频幅值 (133)