



信息技术和电气工程学科国际知名教材 中译本 系列

线性控制系统工程

Linear Control Systems Engineering

Morris Driels 著

金爱娟 李少龙 李航天 译



清华大学出版社

信息技术和电气工程学科国际知名教材

中译本

系列

线性控制系统工程

Linear Control Systems Engineering

Morris Driels 著

金爱娟 李少龙 李航天 译

清华大学出版社

北京

Morris Driels
Linear Control Systems Engineering
EISBN: 0-07-017824-0

Copyright © 1996 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by McGraw-Hill Education (Asia) Co., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao 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.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。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。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2004-3593

版权所有, 翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933
本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

线性控制系统工程 / 德赖斯 (Driels, M.) 著; 金爱娟, 李少龙, 李航天译. —北京: 清华大学出版社, 2005.6

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

书名原文: Linear Control Systems Engineering

ISBN 7-302-10762-9

I. 线… II. ①德… ②金… ③李… ④李… III. 线性控制系统-系统工程-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 028011 号

出版者: 清华大学出版社

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

社总机: 010-62770175

地址: 北京清华大学学研大厦

邮编: 100084

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 王一玲

文稿编辑: 魏艳春

印装者: 清华大学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开本: 175 × 245 印张: 35.75 字数: 776 千字

版次: 2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

书号: ISBN 7-302-10762-9/TP · 7166

印数: 1 ~ 3000

定价: 55.00 元

《信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列》

出版说明

三年多以前,2000年10月,为了系统地参考和借鉴国外知名相关大学教材,推进我国大学的课程改革和我国大学教学的国际化进程,清华大学出版社策划、出版了《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》,至今已经出版了30多种,深受高等院校信息技术与电气工程及相关学科师生和其他科技人员的欢迎和好评,在学术界和教育界产生了积极的影响。现在这个系列中的大部分教材都已经重印,并曾获得《2001年引进版优秀畅销丛书奖》。在此期间,我们曾收到来自各地高校师生的很多反映,期望我们选择这个系列中的一些较为基础性和较为前沿性的教材译成中译本出版,以便为更广大的院校师生和科技人员所选用。正是基于这种背景和考虑,清华大学出版社决定进一步推出《信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列》。

这套国际知名教材中译本系列所选书目的范围,限于信息技术和电气工程学科所属各专业的技术基础课和主要专业课。教材原版本除了选自《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》外,还将精选其他具有较大影响的国外知名的相关领域教材或教学参考书。教材内容适于作为我国普通高等院校相应课程的教材或主要教学参考书。

本国际知名教材中译本系列按分期分批的方式组织出版。为了便于使用这套国际知名教材中译本教材系列的相关师生和科技人员从学科和教学的角度,对其在体系和内容上的特点和特色有所了解,在每种中译本教材中都附有我们约请的相关领域资深教授撰写的推荐说明,其中的一些直接取自于《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》中的影印版序。

本国际知名教材中译本系列的读者对象为信息技术和电气工程学科所属各专业的本科生或研究生,同时兼顾其他工程学科专业的本科生或研究生。既可采用作为相应课程的教材,也可作为相应课程的教学参考书。此外,本国际知名教材中译本系列也可提供作为工作于各个技术领域的工程师和技术人员的自学读物。

感谢使用本国际知名教材中译本系列的广大师生和科技人员的支持。期望广大读者提出意见和建议。

郑大钟 教授

清华大学信息科学技术学院

译者序

“Linear Control Systems Engineering”是一本不可多得的好教材，内容新颖，题材广泛，结构别具一格，分析透彻生动，理论紧密联系实际，目前已被美国多所知名大学作为本科层次的控制理论教材或主要教学参考书。该原版教材作为首批《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》之一，已由清华大学出版社出版，并在国内多所高校的自动控制理论双语教学中得到了应用。为了在国内高校教学中进一步推广和普及该书，促进高校教学的国际化进程，译者在两年多自动控制理论双语教学基础上，将教学过程中不同章节的翻译手稿做了进一步的整理和修改，汇总为本书。

本书最大的特点是将理论与工程实践紧密联系在一起。书中的例题和习题引入了大量的实际控制系统，特别是在最后部分专门给出了7个不同专业领域的控制系统设计案例，这些系统的类型实际多样，设计方法的选择各不相同，所应用的知识综合灵活，非常有利于读者深入理解控制科学的基本理论和基本方法，并将所学知识应用到实际系统的工程设计中。

若将本书与原版教材相结合进行学习，可以提高读者专业英语水平和英文科技文献的阅读能力。

本书适用于普通高等院校控制类专业本科生，对自动控制课程有较高要求的非控制类本科生和研究生作为教材或参考书之用，也可供相关领域的工程师和技术人员作为自学参考之用。

本书的第26~29单元由上海理工大学电气工程学院的李少龙翻译，第30~32单元由广东省电信公司广州市分公司的李航天翻译，其余部分由广东工业大学自动化学院的金爱娟博士翻译。南京理工大学的杨成梧教授对本书进行了审阅。全书由金爱娟博士进行统稿。

本书在翻译过程中得到了清华大学出版社、广东工业大学教务处和

自动化学院以及其他老师的大力支持和帮助。清华大学出版社的王一玲老师、广东工业大学自动化学院的邓则名副教授和陈林康副教授对本书的翻译提出了很多宝贵的意见和建议。另外，还有几名硕士研究生和本科生在翻译过程中做了很多具体工作。在此，译者对这些单位和个人表示衷心的感谢！

原版教材中有个别错误，译者已经做了纠正。由于译者的水平所限，错误和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。若有什么宝贵意见和建议也请直接和译者联系，电子信箱是 ajjin@126.com。

金爱娟

2005年3月

前言

在过去的二十来年中，尽管我一直在向机械工程的本科生讲授线性控制系统工程，但却从未激起过撰写有关该学科教科书的念头，直到我第一次有机会在一个学期中同时讲授控制学和动力学。这使我能够直接比较这两门学科的结构、风格以及学生对指定教科书的使用情况。这样的比较是相当有启发性的。

这两本书都已经面世十几年，并且已经出版了几个版本。当时，控制学课本和动力学课本都是最畅销的，然而，它们的风格却很不一样。动力学课本是按以下格式撰写的：

- 每个主题由相对独立的专题内容组成，每个专题的内容刚好适合在一次课中讲解；
- 接着，用两三道例题向学生讲解如何应用这个专题内容来解决工程问题；
- 最后，给出几道作业题，使学生能够测试自己对这些内容的理解情况。

而控制学课本则是以比较传统的风格撰写的，即由几章组成，每章有 50 页左右的内容，随后有 20 道左右的习题。

在讲授这两门课程时，学生明显会更多地使用动力学课本。他们没有被每次课所包含的大量内容所吓倒，丰富的例题与习题不仅保证了他们可以对内容的理解程度进行自我评估，而且使得学生对该学科结构有更好的构想。从教师的角度来看，使用已经分成适合授课量的内容会使得课程计划的编排更加容易。

在本书中，我设法使用了与刚描述过的动力学课本相同的方法。我希望内容的模块化特点能使这本书与授课课程紧密关联，尽管仍然有足够的灵活性允许教师增加其他的主题或者略过他（她）认为学生们已经掌握的内容。基于学生对我讲授过的控制学课程的评论，关于解题的同

感看起来是：①例题越多越好；②学生喜欢例题中有更详细的解法。在本书中，我已经设法解决了这两个问题。特别是在每个单元的末尾包含了具有详细解法的例题，这样学生就可以看到前面内容的应用。为了使学生理解如何利用控制系统分析这种基本手段来进行复杂工程系统的设计，我还在第 25 单元后面增加了几个设计案例的研究。在许多案例中，它们展示了几种可供选择的方法来达到要求的性能，而且向学生提供了一种构想，即本书中描述的各种分析题如何才能使用、综合和应用到实际工程系统中。

当初，本书主要是打算针对机械工程的本科生，尽管其他工程学科的学生会发现这些内容与他们的领域区别不大。在大多数领域中，传统的系统分支包括：

- 介绍性的系统建模课程——大学二年级；
- 线性控制系统课程——大学三年级；
- 先进控制课程——大学四年级。

本书针对的是大学三年级的课程，并假设学生已经熟悉系统建模。本书包含了一些这方面的内容，但仅仅是为了提供向控制学的平滑过渡而非讲授建立物理模型的方法。

关于为本书提供软件应用的问题，目的是强调控制学的基础，而不是侧重于计算方法或计算工具。鼓励学生在适当的地方使用任何一种可利用的软件，所举例子中已使用了 FORTRAN, BASIC 代码和像 MATLAB 那样的商用软件包。对于课本中涉及的一些虽然不难但处理费时的问题，强烈推荐使用像 MATLAB 或 MATRIX 这样的商业软件包。

最后，我要感谢许多帮助我撰写本书的人们。McGraw-Hill 的员工使得本书的出版过程如任何作者所期盼的那样令人愉快。我在爱丁堡大学、罗德艾兰州大学、德州 A&M 和海军研究生院的学生及同事都应得到我的致意，这是由于多年来他们审阅内容和研讨问题的热心以及对我工作的广泛支持。特别值得一提的是 Alan Linnett, Fotis Papoulias 和 Tony Healey。以下审阅者提供了许多有用的意见和建议：西维吉利亚大学的 Larry Banta, Drexel 大学的 Neyram Hemati, 阿林顿德州大学的 David Hullendar, 新墨西哥州大学的 Leo LaFrance, 威斯康星州大学的 Ronald A. Perez, 以及俄克拉荷马州大学的 Milwaukee 和 Gary Young。本文中所有的错误皆属于我本人。最后，最大的谢意献给我的妻子珍妮和孩子 Joanne, Chris 和 Fiona。他们给予我无限的鼓励、帮助、动力和能力，使我能够以正确的观点去看待生命中所有的快乐和失望。

Morris Driels

作者介绍

作者 Morris Driels 在 Surrey 大学获得机械工程的硕士学位，在伦敦的城市大学获博士学位。在航空航天工业工作了一段时间后，他进入苏格兰的爱丁堡大学任教。1982 年到了美国，同时任职于罗德艾兰州大学和德州 A&M。Driels 博士现在是位于加州蒙特里的海军研究生院机械工程系的教授，并且是 ASME、IEEE 和机械工程协会的会员。

目 录

译者序	II
前言	IV
作者介绍	VI
第 1 单元 反馈控制引论	1
习题	14
第 2 单元 传递函数和方框图代数	19
1. 传递函数	19
2. 方框图代数	20
习题	29
第 3 单元 一阶系统	32
1. 脉冲响应	34
2. 阶跃响应	35
3. 斜坡响应	36
4. 谐波响应	37
5. 一阶反馈系统	38
6. 复平面表示法: 极点和零点	40
7. 一阶系统的极点和零点	41
8. 主导极点	42
习题	47

第4单元 二阶系统	50
1. 二阶电气系统.....	54
2. 阶跃响应.....	55
习题	61
第5单元 二阶系统的时域响应	65
1. 斜坡响应.....	65
2. 谐波响应.....	66
3. 系统极点和暂态响应的关系	68
4. 时域性能指标.....	71
习题	79
第6单元 二阶系统: 干扰抑制和速度反馈	82
1. 开环和闭环干扰抑制.....	85
2. 速度反馈的影响.....	87
习题	95
第7单元 高阶系统	99
1. 降为低阶系统.....	99
2. 三阶系统.....	100
3. 闭环零点的影响.....	102
4. 闭环零点的出现.....	105
习题	109
第8单元 系统的型: 稳态误差	111
1. 脉冲输入.....	112
2. 阶跃输入.....	114
3. 斜坡输入.....	115
4. 加速度输入.....	116
5. 非单位反馈控制系统.....	119
习题	128
第9单元 劳斯方法、根轨迹: 幅值和相角方程	131
1. 劳斯稳定判据.....	131
2. 根轨迹方法: 幅值和相角方程	134

习题	151
第 10 单元 画根轨迹的规则	155
习题	173
第 11 单元 应用根轨迹设计系统	177
1. 多环系统	177
2. 复平面上的系统设计	180
3. 性能要求描述为复平面上的约束	180
4. 稳态误差	180
5. 对应“好”响应的复平面上的期望区域	182
习题	194
第 12 单元 频率响应和奈奎斯特图	198
1. 频率响应	199
2. 由传递函数转化为奈奎斯特图	200
习题	211
第 13 单元 奈奎斯特稳定判据	215
1. 保角映射: 柯西定理	215
2. 用于稳定性判定	219
3. 奈奎斯特稳定性的一些说明	224
4. 奈奎斯特稳定判据的另一种方法	225
习题	235
第 14 单元 奈奎斯特分析和相对稳定性	239
1. 条件稳定性	239
2. 增益裕度和相位裕度	241
习题	250
第 15 单元 伯德图	253
1. 简单传递函数的伯德图	253
2. 复合传递函数的伯德图	257
3. 各环节的伯德图	260
习题	277

第 16 单元 伯德分析、稳定性、增益裕度和相位裕度	280
1. 条件稳定	280
2. 伯德图中的增益裕度和相位裕度	283
3. 系统的型和由伯德图得出的稳态误差	284
4. 进一步讨论增益裕度和相位裕度	286
习题	296
第 17 单元 由频率响应得到时域响应	299
1. 由根轨迹得到伯德图	299
2. 由开环相位裕度得到闭环时间响应	301
3. 高阶系统的时间响应	304
习题	313
第 18 单元 频域指标和闭环频率响应	315
1. 频域指标	315
2. 由奈奎斯特图得到闭环频率响应	319
3. 由伯德图得到闭环频率响应	325
4. 由奈奎斯特图得到期望 M_p 的增益	328
5. 由尼科尔斯图得到期望 M_p 的增益	329
6. 非单位反馈增益系统	330
习题	342
第 19 单元 相位超前校正	346
1. 多约束设计	346
2. 相位超前环节的传递函数	349
3. 相位超前校正过程	351
4. 相位超前校正的结果及适用性的评论	358
习题	372
第 20 单元 相位滞后及超前-滞后校正	375
1. 相位滞后环节的传递函数	375
2. 相位滞后校正过程	376
3. 相位滞后校正的几点说明	379
4. 超前-滞后校正	380

5. 超前-滞后环节的传递函数	381
6. 超前-滞后校正过程	382
习题	400
第 21 单元 多模态控制器	403
1. 比例控制	403
2. 比例积分控制	405
3. 比例微分控制	407
4. 比例积分微分控制	410
习题	420
第 22 单元 状态空间系统描述	424
1. 由传递函数转化为状态空间形式	428
2. 由状态空间形式转化为传递函数	431
3. 状态变量的变换和系统特征向量的不变性	432
4. 标准形和解耦系统	433
5. 特征值和系统极点之间的关系	435
习题	447
第 23 单元 状态空间系统的响应、能控性和能观性	451
1. 状态方程的直接数值解	451
2. 用状态转移矩阵求解	452
3. 用拉普拉斯变换求解	453
4. 系统稳定性	454
5. 能控性和能观性	454
习题	464
第 24 单元 状态空间控制器的设计	467
1. 通过与特征方程比较来直接计算增益	468
2. 通过状态方程的控制标准形实现极点配置	469
3. 通过阿克曼公式实现极点配置	474
习题	482
第 25 单元 状态空间观测器的设计	485
1. 观测器的合成	485

2. 校正器设计	489
习题	500
第 26 单元 波浪能吸收装置	503
第 27 单元 导弹姿态控制器	507
1. 模型的构造	507
2. 方框图表示	508
3. 多模态控制器设计	510
4. 状态空间控制器的设计	512
第 28 单元 机械手设计	515
第 29 单元 抽水蓄能流量控制系统	521
第 30 单元 船舶操纵控制系统	529
第 31 单元 巡航导弹高度控制系统	538
第 32 单元 具有柔性的机床动力驱动系统	545
附录 A 复习拉普拉斯变换及其在求解微分方程中的应用	552
1. 线性特性	553
2. 平移定理	553
3. 时间微分	553
4. 终值定理	553
5. 逆变换	553
6. 求解线性微分方程	553

第 1 单元

反馈控制引论

在我们周围到处运转着反馈控制系统。控制系统的研究不会涉及太多新元件或机器的开发，而是通过组合现有硬件以实现预定目标。一个控制系统是为了在系统运行区域的特定方面起到控制作用而以某种方式连接起来的一组元件的集合。控制系统几乎运行在人类活动的方方面面，包括走路、交谈和搬运物体等。此外，控制系统的存在不需要人的交互作用，如飞机的自动驾驶仪和自动车的巡航控制系统。

在处理控制系统，尤其是工程控制系统时，要处理各种各样的元件，这表明控制系统理论是一门多学科性的学科。控制工程师要掌握机械学、电子学、电机学、流体力学、热力学、结构学和物质属性等方面的有用知识。显然，并不是每个控制系统都需要包含来自上面每个领域的元件，但是大多数有用的控制系统都包含来自不只一门学科的元件。

控制系统分析包含对不同工程元件的统一处理。这里是指设法以相同的格式表示系统的各个环节，并且以相同的方式标识各个环节之间的连接。当做了这些处理以后，以示意图形式表示的大多数控制系统看上去都是相同的，并适用于相同的分析方法。这个过程通常涉及一种称为方框图表示法的技术，这将在第 2 单元中加以讨论，每个元件简化为包含一个输入变量和一个输出变量的基本函数，输入和输出之间的关系称为传递函数。

现在，最好集中讨论一个简单的例子，即假设分析淋浴时调节水温的运行机理。系统的主要元件如图 1.1 所示。当我们进入淋浴间时，在我们的头脑里面有一个期望水

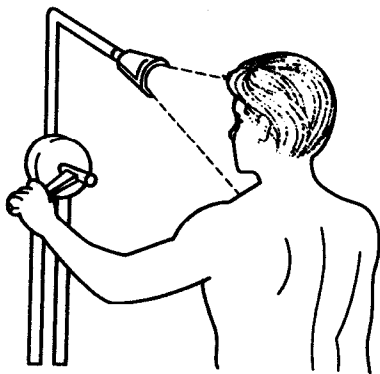


图 1.1 水温控制系统

温。这个温度不是一个已知的绝对读数，如 82°F ，而是定性的，如冷的、温的或热的。我们皮肤中的温度传感器会非常有效地测出水温，并把这一信息传给大脑，将它与我们的期望水温进行比较，大脑计算出其差值并用“太热”或“太冷”来表示，如果太热就用手操纵冷热混合阀来调低温度，或者如果太冷就调高温度。一旦采取校正动作，就要重复这个过程直到得到期望的水温为止。

系统的操作及主要组成部分如图 1.2 所示。图中的各个方框表示执行总目标下的子任务的过程，如测量水温或控制（转动）阀门。这些方框用前面提及的传递函数的方式将输入变量传递到输出变量。一些传递函数易于计算，如混合阀。此环节具有作为输入变量的阀门手柄转动角 θ 和作为输出变量的水温 T 。假设考虑阀门是线性的，可导出如下关系：

$$T = K_T \theta \quad (1.1)$$

其中 K_T 可定义为阀门温度常数。其余传递函数，如通过大脑和手之间的神经信号与混合阀手柄的转动之间的关系，就很难用简单的数学形式来表示。

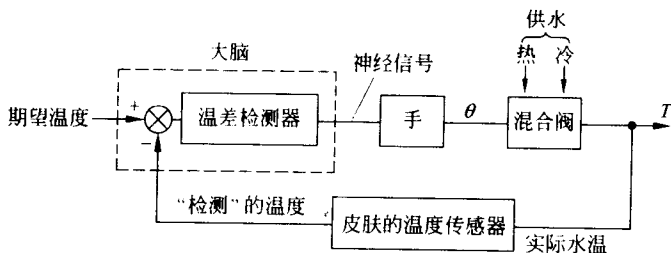


图 1.2 温度控制的系统示意图

现在将上述系统以稍微抽象的形式来表示，如图 1.3 所示。这样做的原因是，因为大多数控制系统都可表示为图 1.3 的形式，所以所研究的用于这个系统的分析方法将会适用于大多数控制问题而不用参考各种环节的具体物理特性。图 1.3 中的术语在全书中都是通用的，通常对象表示被控的主要元件，并且它的传递函数通常是固定的。控制器是工程师使用本书后面总结的方法设计的一个元件，这

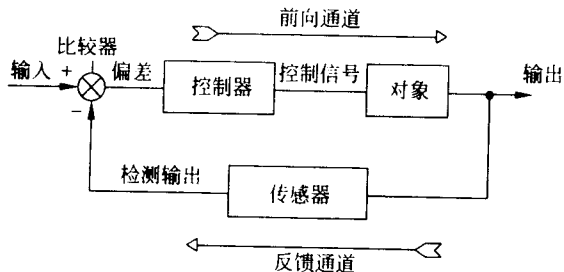


图 1.3 一般的反馈控制系统