

反馈控制理论

[美] J. C. 多伊尔

[加拿大] B. A. 弗朗西斯 著

[美] A. R. 坦嫩鲍姆

慕春棣 译



清华大学出版社

反馈控制理论

[美] J. C. 多伊尔

[加拿大] B. A. 弗朗西斯 著

[美] A. R. 坦嫩鲍姆

慕春棣 译

陈通文 陈德刚 校

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是关于鲁棒控制的一本最新著作. 主要阐述了鲁棒稳定性、鲁棒性能以及优化设计等问题, 反映了 80 年代这一理论领域的最新研究成果.

全书共十二章, 第一章至第七章主要讲述反馈系统设计的基本知识, 包括反馈设计的数学表述, 鲁棒稳定性和鲁棒性能的权衡问题以及适于稳定的最小相位对象的图形设计方法. 第八章扩展了回路成形方法并把它与最优化问题联系起来, 第九章到第十二章以解析函数的插值理论作为数学工具, 全面阐述了最优控制器的设计方法.

本书可作为自动控制理论与应用专业的大学高年级本科生和研究生的教材, 也可供有关专业的科学工作者、教师和工程技术人员参考.

Authorized translation from the English language edition published by Macmillan Publishing Company, a division of Macmillan Inc., U. S. A.

Copyright ©1991 Macmillan Publishing Co., a division of Macmillan Inc., U. S. A.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

本书中文版由麦克米伦出版公司授权清华大学出版社出版。

本书英文版版权为美国麦克米伦公司的分公司麦克米伦出版公司所有 (1991)。

版权所有, 不得翻印。

译者的话

本书是关于鲁棒控制理论的最新著作. 三位作者都是当今控制界的著名学者. 本书反映了他们 80 年代的研究成果.

本书主要针对输入输出关系中的结构不确定性提出了一套严密的数学方法, 解决了鲁棒稳定性、鲁棒性能以及优化等一系列问题, 是对经典控制理论与状态空间理论的拓宽和发展, 反映了当代控制理论的前沿水平.

本书在内容编排上既注重基础知识又强调了最新研究成果; 既保持了理论的严密性又体现了理论的实用性. 在讲述方法上吸取了频率域物理概念清晰的优点, 以单输入单输出系统作为基本设置, 特别适合于教学和自学. 每章之后都有练习与注释, 便于读者加深理解有关内容, 查询有关参考文献.

该书内容丰富精炼, 叙述简明扼要. 第一章至第七章主要讲述了反馈系统设计的基本知识, 包括不确定性的数学表述, 鲁棒稳定性和鲁棒性能权衡问题以及适于稳定和最小相位对象的回路成形的图形设计方法. 第八章到第十二章是提高部分, 其中第八章将回路成形方法加以扩展并与最优化联系起来. 第九章至第十二章以解析函数的插值理论作为数学工具全面阐述了最优控制器的设计方法. 这种数学方法更适用于多变量系统, 在具体实现上采用的是基于状态空间的计算方法.

本书的英文版本于 1991 年 8 月首次出版发行. 目前在加拿大和美国的一些大学里正在作为控制科学和工程专业的高年级本科生和研究生课程的教材. 它的翻译出版可望对丰富和更新我国的控制理论教学起到积极的促进作用, 同时也为广大科学工作者了

解和跟踪控制理论的最新研究动向提供了一本有益的参考书。

1991年至1992年我作为访问学者在加拿大多伦多大学电机工程系曾与本书的主要作者 Francis 教授共事。他的严谨的科学态度和认真的治学精神，一丝不苟的工作作风和乐于助人的品德使我深为钦佩。Francis 教授自始至终对我的翻译工作给予了热情的帮助与支持。他及另外两位作者都十分关注和盼望这本书能尽快与中国读者见面，并以此作为他们与中国同行的学术交流。在本书出版之际，首先我要向 Francis 教授及另外两位作者表示衷心的感谢。

陈通文、陈德刚博士为本书作了认真细致的审校工作，并提出了许多宝贵的意见。这本译著的出版是与他们的帮助分不开的，在此谨向他们表示最诚挚的谢意。

最后，我特别要向多伦多大学计算机科学系的 Tom Hull 教授，向我的先生周立柱以及所有关心和帮助过我的中外同行和朋友们表示真诚的敬意，向为本书的出版发行给予积极支持与合作的清华大学出版社表示衷心的感谢。对于译著中的错误和不妥之处敬请读者批评指正。

慕春棟

1992.7 译于多伦多。

1993.1 定稿于北京。

为中译本写的序

本书的原英文版本于 1991 年 8 月出版. 这本中译本译自原英文版但在几处作了小的改正.

本书的目的是向读者介绍鲁棒控制理论的一些现代概念.

我们三位作者对本书中译本的出版感到非常荣幸. 在此我们非常感谢慕春棣翻译了此书, 感谢陈通文、陈德刚审校了中译本. 同时也感谢清华大学出版社在中国出版和发行此书.

J. C. 多伊尔

B. A. 弗朗西斯

A. R. 坦嫩鲍姆

序

自 80 年代以来反馈控制理论取得了惊人的发展. 这门学科已经变得更严谨, 更实用. 其严密性并不是“为严密而严密”, 而是因为即使在工程领域严密也会使问题更加明确以致得到更有条理的解释. 实用性则是这些问题的新的提法及新的数学解答的结果. 此外计算机和软件的发展已经改变了过去的工程设计方法, 这些都需要对本门学科作出新的描述. 即需要反映这些新的发展, 同时又要强调它们与经典控制的联系.

控制系统的设计要保证某些指定的信号, 如跟踪误差、执行机构的输入等不得超过规定的值. 但是由于被控对象(用来表示实际物理系统的理想化的数学模型)的不确定性, 以及量测信号的误差(敏感元件量测信号只能达到一定的精度)都妨碍这一目标的实现. 尽管人们很想把对象的不确定性明确地引入到控制问题中, 但是直到 80 年代初期, 控制科学研究人员才把现代的研究与 Bode 等人的经典方法联系起来. 这种联系是通过提出一个在输入输出基础上的, 可处理的不确定性数学模型并找到相应的严格的数学工具而达到的. 本书系统地研究了一个精确的问题——鲁棒性能问题, 其目的是在对象不确定的情况下使某些信号达到规定值.

本书适合于那些已经修过本科生的信号与系统课程的工程系的学生. 该课程的内容应包括用频率域方法分析反馈系统的初步知识, 即 Bode 图和 Nyquist 判据等. 对于本书的某些选修章节^①, 先修状态空间理论课程会更有利, 但不是必要的. 为适合初学者,

^① 本书中选修章节用“*”表示. ——译者注

我们将讨论单输入单输出线性连续系统。

第一章到第七章可作为高年级一个学期课程的核心,但需要补充一些附加的例子. 这七章构成了反馈系统设计的基本内容,包括控制设计问题的详尽的表述,鲁棒稳定性和性能权衡的基本问题,以及适于稳定的和最小相位对象的回路成形的图形设计方法. 第八章到第十二章是提高部分,适合作为一年级研究生课程. 第八章连接本书前后两部分,它扩展了回路成形方法并把它和最优概念联系起来. 第九章到第十二章讨论用最优化方法设计控制器. 后几章采用的是解析法而不是图解法,其基本的数学工具是解析函数的插值理论. 对于多变量系统这种解析方法最有用,而图解法则常常是无能为力的. 尽管如此,我们依然认为应当通过单输入单输出系统来学习这种新的方法.

在此我们要感谢很多人对本书给予的帮助: Dale Enns 提供了他在回路成形方面的宝贵经验; Raymond Kwong 和 Boyd Pearson 在本书出版之前作了试讲; Munther Dahleh, Ciprian Foias 和 Karen Rudie 阅读了本书的初稿. 还有许多加州理工学院的学生认真研究了有关材料的各种初稿,特别是 Gary Balas, Carolyn Beck, Bobby Bodenheimer 和 Roy Smith 提出了许多有益的建议. 最后我们要感谢美国航空科学研究部、美国陆军研究部、加拿大自然科学和工程研究委员会以及美国海军研究部在我们写作此书过程中所给予的部分财政支持.

J. C. D.

B. A. F.

A. R. T.

目 录

第一章 绪论	1
1.1 控制系统设计的一些问题	1
1.2 本书的主要内容	9
注释和文献	15
第二章 信号和系统的范数	16
2.1 信号的范数.....	16
2.2 系统的范数.....	19
2.3 输入-输出关系	21
2.4* 功率分析	23
2.5* 表 2.1 和表 2.2 的证明	25
2.6* 用状态空间方法计算	29
练习	33
注释和文献	36
第三章 基本概念	37
3.1 基本反馈回路.....	37
3.2 内稳定.....	41
3.3 渐近跟踪.....	45
3.4 性能.....	48
练习	52
注释和文献	53
第四章 不确定性和鲁棒性	54
4.1 对象的不确定性.....	54
4.2 鲁棒稳定性.....	60

4.3	鲁棒性能	65
4.4	更一般的鲁棒性能	71
4.5	结论	72
	练习	73
	注释和文献	76
第五章	镇定	77
5.1	控制器参数化: 稳定对象	77
5.2	互质分解	80
5.3*	用状态空间方法作互质分解	84
5.4	控制器参数化: 一般对象	86
5.5	渐近性质	89
5.6	强镇定和同时镇定	91
5.7	车摆例子	98
	练习	102
	注释和文献	104
第六章	设计约束	105
6.1	代数约束	105
6.2	解析约束	106
	练习	119
	注释和文献	121
第七章	回路成形	122
7.1	回路成形的的基本方法	122
7.2*	相位公式	127
7.3	举例	131
	练习	138
	注释和文献	140
第八章	高等回路成形	141
8.1	最优控制器	141

8.2	对控制器 C 的回路成形	143
8.3	含右半平面极点和零点的对象	151
8.4	成形 S, T 或 Q	164
8.5	最优概念的进一步讨论	167
	练习	180
	注释和文献	181
第九章	模型匹配	182
9.1	模型匹配问题	182
9.2	Nevanlinna-Pick 问题	183
9.3	Nevanlinna 算法	188
9.4	模型匹配问题的解	193
9.5*	状态空间解	196
	练习	198
	注释和文献	198
第十章	性能设计	200
10.1	P^{-1} 稳定	200
10.2	P^{-1} 不稳定	206
10.3	设计举例: 柔性臂	208
10.4	2-范数最小化	214
	练习	217
	注释和文献	218
第十一章	稳定裕量优化	220
11.1	最优鲁棒稳定性	220
11.2	保角映射	224
11.3	增益裕量优化	227
11.4	相位裕量优化	233
	练习	235
	注释和文献	236

第十二章 鲁棒性能设计	237
12.1 修改后的问题.....	237
12.2 谱分解.....	238
12.3 修改后的问题的解.....	240
12.4 设计举例: 柔性臂(续).....	247
练习.....	251
注释和文献.....	252
参考文献	253
索引	259

第一章 绪 论

没有控制系统就没有生产制造,就没有运载工具,就没有计算机,就没有受调节的环境——简而言之,就没有技术.控制系统就是让机器(广义上的含义而言)按预期要求运转的系统.大部分控制系统是基于反馈原理,即比较被控制信号与所要求的参考信号,然后用其差来计算所需的校正作用.本书的目的是介绍一种反馈控制系统设计的理论,它既要能抓住根本问题,又要能广泛应用到实际问题中,而且还要尽可能简单.

1.1 控制系统设计的一些问题

设计一个控制系统通常要包括很多步骤,典型过程如下:

1. 研究被控系统,决定采用哪种敏感元件和执行机构以及它们放置的位置.
2. 建立所得到的被控系统的模型.
3. 如果需要,简化模型以便于处理.
4. 分析得到的系统模型,确定它的性质.
5. 确定性能指标.
6. 确定所采用的控制器的类型.
7. 如可能,设计控制器以满足性能指标;否则,修改性能指标或拓宽欲寻求的控制器的类型.
8. 在计算机上或在实验模型上仿真被控系统.
9. 如有必要从第1步开始重复.
10. 选择硬件和软件并实现控制器.

11. 如需要,在线调整控制器.

必须记住控制工程师的职责并不仅仅是对给定的对象进行控制系统设计,或简单地“加一点反馈”到给定的物理系统上.他必须从系统整体的性能出发,帮助选择和设置硬件.正是由于这个原因,所以反馈理论尤为重要.它不仅能指导我们在可能的条件下作出好的设计,还能直截了当地预见在什么情况下性能指标是不能达到的.

我们有必要从处理问题的一开始就认识到,实际问题中总是包含不确定的非最小相位对象(非最小相位指的是存在右半平面的零点,所以其逆是不稳定的);总是不可避免地存在由未建模动态产生的通常在高频下不可忽略的不确定性;总是有敏感元件的噪声以及输入信号的限制,它们都影响反馈达到预期的效果.我们希望有一种不考虑这些实际问题的影响,但仍然能用于某些有限的应用领域的理论.例如,在许多过程控制问题中,对象的不确定性和右半平面零点的作用如此之大,以致敏感元件的噪声和输入信号的限制可以忽略不计.另一方面,某些空间飞行器主要受敏感元件的噪声、抗干扰性和输入信号大小(如燃料消耗)诸关系所支配,以致对象的不确定性和非最小相位的影响可以忽略不计.尽管如此,任何一种通用理论必须能够准确地处理上述问题并能定性地和定量地给出它们对系统性能的影响.

本节我们来考察设计过程中的两个问题:选择性能指标和建立模型.我们用一个例子来说明这两个问题.

例 一个很有趣的工程系统是目前在夏威夷 Mauna Kea 建设中的 Keck 天文望远镜.它建好后将是世界上最大的.这个望远镜的任务是利用一个大的凹面镜来收集和聚焦星光.镜子的形状决定所观察到的图像的质量.镜子愈大,收集到的光线愈多,就可以观察到较暗的星球.Keck 望远镜直径 10m,用一块玻璃来制造这么大的高精度镜子是很困难而且很昂贵的.因此这面 Keck 望

远镜由 36 片马赛克式的六角形小镜子拼成. 这 36 片镜片必须调准, 以保证整体具有所要求的形状.

完成这一任务的控制系统参见图 1.1. 如图所示, 镜片受两种类型的力: 干扰力(下面将说明)和来自执行机构的力. 在每一镜片后是三个活塞形的执行机构, 在镜片的三点上施力以影响它的定位. 为了控制整体镜的形状, 只需控制每相邻镜片之间的错位. 在每相邻镜片的间隙中(电容型的)敏感元件可测量出两镜片之间的位移. 这些局部的位移组成向量 y , 即是所要控制的量. 为了使镜面达到理想的形状, 这些位移量应当具有预先能计算出来的理想值, 它们就是向量 r 的分量. 所设计的控制器要能保证在干扰存在的条件下, 闭环系统输出 y 一直保持接近 r . 注意, 这里信号是向量, 这样的系统是多变量的.

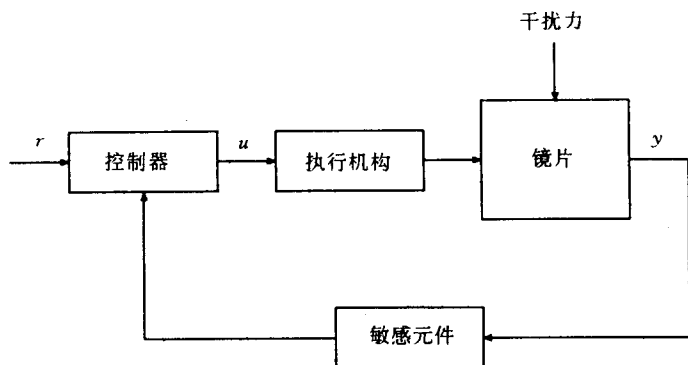


图 1.1 Keck 望远镜控制系统方框图

对象的不确定性来自干扰源:

- (1) 当望远镜跟踪星球时, 重力相对于镜片的的方向是变化的.
- (2) 在夜间作天文观察时, 望远镜周围的温度是变化的.

(3) 望远镜受风的影响.

来自不确定的对象动特性:

各组成部分——镜片、执行机构、敏感元件——的动特性模型都不可能无限精确. ■

现在我们继续讨论一般性的问题.

控制目标

一般来说,控制系统的目标就是通过控制某些输入(如 u)使某些输出(如 y)达到所要求的形式. 最简单的目标就是使 y 尽量小(或接近某些平衡点)——调节问题,或使 $y-r$ (r 为参考或指令信号)尽量小——伺服或随动问题. 例如:

(1) 民用飞机的垂直方向的加速度应当小于一定值以使乘客舒适.

(2) 音频放大器输出噪声信号的功率必须足够小,以使其具有高保真度.

(3) 造纸中的湿度含量必须保持在预定值之间. 可能还有其他一些附加的限制,如保持 u 尽量小,因为它本身可能已被限定(如阀门的流量就有个最大值,这取决于阀门全开的状态),或是因为采用大输入时成本可能太贵. 对于一个信号来说什么是小?这就自然引出了信号的范数;因此说“ y 小”意指 y 的范数 $\|y\|$ 小. 至于哪一种范数合适,这取决于特定的应用.

总之,由控制系统的性能指标自然引出了范数;而性能指标则以某些我们感兴趣的重要信号的范数的界给出.

模型

在讨论一个物理系统的建模问题以前,首先有必要区分四个不同的对象:

1. 实际的物理系统: 客观存在的系统.

2. 理想的物理模型：通过把一个实际的物理系统按结构分解成理想的结构块(如电阻器、质量、臂杆、窑、各向同性介质、牛顿流体、电子器件等)而得到的模型。

3. 理想的数学模型：把自然法则应用到理想的物理模型上而得到的模型，典型的是用非线性偏微分方程所表示的。

4. 简化的数学模型：由理想的数学模型通过线性化、合并处理等方法而得到的简化模型，通常用有理传递函数来表示。

有时语言本身在区分实际的物理系统与理想的物理模型时是模糊的。如电阻这个词既可用于实际的陶瓷片和金属片，也可用在满足欧姆定律的理想物体上。当然形容词实际的和理想的可用来防止模棱两可。

没有一个数学系统可用来准确地作为一个实际物理系统的模型，因为总是有不确定性。不确定性意味着即使我们知道一个实际系统的输入也不能准确地预计其输出，因此对这个系统我们是不能确定的。不确定性有两个来源，一是未知的或不可预计的输入(干扰、噪声等)，二是不可预计的动态特性。

那么模型应当提供什么呢？它应当能预计输出对输入的响应，以便我们能够依据它设计一个控制系统，且有充分的把握使设计的结果能够成功地用于实际的物理系统。当然这是不可能的。然而我们总是需要工程师的直觉和自信。这是很必要的，而且通过有效的建模、分析和设计技术会使问题更易于处理。

本书的数学模型

本书中的数学模型是有限维的、线性时不变的。其主要理由在于它们是可用于处理控制系统设计的基本问题的最简单的模型。由此得出的设计方法可很好地适用于大量工程实际问题。其部分原因是由于大多数系统都尽可能建成接近线性时不变的，以便容易控制。同时，一个好的控制器可以保持系统在它的线性范围内运