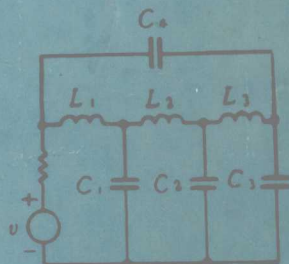
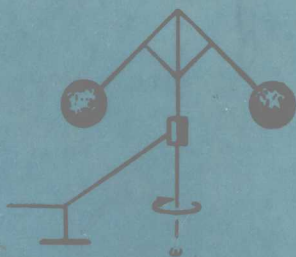


控制系统

[加] N.K. 辛赫著

徐天芳 王学勤 熊兴宇 丁萃菁译



成都科技大学出版社

Naresh K. Sinha
CONTROL SYSTEMS
CBS College Publishing, 1986

控制系统

[加]N. K. 辛赫著

徐天芳 王学勤 熊兴宇 丁萃菁 译

责任编辑 王文祥

*

成都科技大学出版社出版发行

新华书店经销

威远县印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 18.5 字数: 416 千

1992年3月第1版 1992年3月第1次印刷

印数: 1—2000

标准书号: ISBN 7-5616-1556-6 定价: 14.50 元
GP · 37

内 容 简 介

本书是加拿大 McMajser 大学控制系统课程的近期教材。本书从控制工程的实践需要出发,进行了课程改革的成功探索,以新的统一观点并行讨论了经典控制理论与现代化控制理论的基本内容,给出了采用 TURBO-PASCAL 语言在个人计算机上设计与分析控制系统的完整程序名。

全书共有十四章和四个附录,内容包括:绪论,物理系统的数学模型,状态空间方法,闭环系统特性,控制系统性能,稳定性,根轨迹法,频率响应图及其稳定性分析,控制系统的设计与校正,数字控制,用状态空间表达式的设计,非线性系统, Laplace 变换、 z 变换和矩阵论复习,用计算设计分析控制系统专题。书中列举了许多例题、附有答案的练习题和大量密切联系工程实际的习题,在书末给出答案。

本书结构新颖、选材精当、内容丰富、晓畅易懂,适于教学和自学。本书可作为高等院校电气、自动化及计算机工程各专业和有关非电专业的本科生教材,也可供广大科技人员和有关专业的研究生、大学教师参考。

译 序

控制理论是一门技术科学。它起源于实践并为工程应用服务,因而是一门应用极广,实用性很强的学科。正象一切工程科学一样,它的理论是从广泛的实践中总结、提炼并经抽象而逐步形成的。对初学者来说这既是一门趣味横溢,又较难入门的课程。Naresh K. Sinha 的书是为克服这一困难而写的,此书的主题思想是阐述反馈系统。虽然反馈控制的实例比比皆是,但作为一门技术科学史的起点,通常都用瓦特的蒸汽机飞摆控制器(1767 年)作为例子来回顾这门学科的发展历程。从 1767 年以后的近一个多世纪,早期的自动控制在理论上的进展微乎其微,这种局面持续了近一个半世纪,直到本世纪 30 年代反馈控制理论才有了飞跃的实破。大约在本世纪 30 年代及以后的 30 年里, Nyquist (1932 年), Bode (1945), Harris (1946) 及 Evans (1948 年) 等人在频率域与复域里的探索及由他们推出的研究成果:如反馈控制系统的稳定性理论及分析设计的科学方法为控制系统奠定了理论基础。直到 60 年代初期,线性控制理论一直在频率域里发展成长,且收获甚丰,效果卓著,因而称为古典控制理论。由于古典控制理论受到了工程技术界极大的赞誉与欢迎并统治了控制学术界近 30 年之久。

可是古典控制理论至少有若干明显的不足之处,或者说是当时的专家,学者们的眼中至少有下列三个弱点:1. 严格地

说它只适合于线性时不变系统;2. 只能用于单输入单输出系统;3. 它只能用来分析系统而难以用来综合系统。60年代初期由于空间技术发展的需要,出现了带有巨大革新色彩的时域方法-状态空间法,这种直接采用一阶微分方程组求解控制问题的控制理论被称为“现代控制理论”。人们珍视并学习现代控制理论的动机主要应归功于它逻辑推理的严密性与揭示系统特性的深刻性,例如它提出的一系列新概念中诸如:可控性、可观测性。状态反馈系统,极点配置控制器,三次型调节器综合,状态观测器与估算器及无耦合控制等等在某些工程场合特别在空间技术的控制方面有巨大的应用前景,从而显著地弥补了古典控制和许多弱点(在受控对象为确知时)。现代控制理论出现的初期,由于其推理过程比较抽象,运算过程比较繁冗,求解精确结果的过程常常掩盖了系统物理背景及其机制的透明度。除此之外也由于它采用了与古典控制完全不同的数学分析方法,从而以致多少被盖上了一层神秘的面纱。

经过二十多年来众多的学者们精心地研究与大批科技专家们辛勤的实践与总结,现代控制理论的神秘性已经完全脱去。现在可以证明现代控制理论中应用状态空间法所取得的以分析/设计结果与用古典控制理论中的变换方法(如传递函数法)所获结果完全等效[见 THOMATH KAILATH 的书“线性系统”,1980],而且在许多情况下应用后者能得到更多清晰的概念与更多透明的物理洞察力。因此,当今设计工程师或系统分析家们所面临的问题是如何根据他的任务,在两者之间作明智的选择,最大限度地发挥这两个方法各自的长处,或联合使用两者的优异特色以便更为妥切地帮助工程师们完成他们的使用。这就要求读者对古典与现代控制理论均有透彻的

理解并确切地与熟练地掌握它们并应用它们去为技术实践服务。

当然当今的控制理论已经在很大程度上不同于二十多年前的古典控制理论了,一方面是因为有了现代控制理论丰富的内容;另一方面是由于它自身也有了可观的发展[见 H. H. ROSEN BROCK, 1974],以致对这门内容日趋丰富多采的课程的教学与学两个方面都成为一项挑战性任务。Naresh K. Sinha 这本入门引论似乎是专为迎接这种挑战而写的。笔者认为此书写得简练而精辟,思路清晰,内容丰富(对一本入书而言)且能深入浅出,入深难之处不令人畏其难,遇繁复时能使人不见繁思厌,循循善诱,多以实例伴主题,反复论证不厌其烦。此实为提高学习效率,及有利于读者自学之良法,且能收到事半功倍之益。这是本书的一大特色。

本书的另一特色是编排合理,循序渐进,前后呼应,融会贯通,把古典与现代控制理论在应用中尽力融为一体,通过对问题的求解过程,对比与评价所得之结果,并让读者自己领会两种方法间的联系以深化读者对主题思想的认识与理解,从而有效地巩固所学的理论知识及应用技能。

本书的编写内容与章节安排还反映了当今国外(特别是北美)自动控制教学内容取舍的某种倾向,这就是频域法再次成为教材的支柱,并把时域方法视为一种可供选择但必须牢固掌握的基础知识以达到这两种方法的相互补充,并推动它们继续共同发展,本书通过反复应用所阐述的理论,并通过大量例题的演习来指出:一个学术领域决不应成为一堆杂乱无章的知识与技术的仓库,知识与技术必须相互关联。技术必须能够改进知识的内容与深度,而知识必须能够进一步提高技

术水平与应用范围。

sinha 的书的另一特色是学以致用思想贯穿全文。例如 Routh-Hurwitz 代数稳定性判据,根轨迹设计原理,s域传递函数与频率响应法,奈氏判据,闭环频率响应图(即 Nishols 图),灵敏度计算原理与方法等等一旦讲解清楚以后就随时在分析与设计控制系统时予以应用并进行对比。Sinha 的书不但讲法独特,而且内容也有特色,如在未讲状态空间设计法之前就在经典校正一章中引进了极点配置补偿。他还介绍了超前、滞后、滞后—超前校正方法中的解析设计法,从而抛弃了多年来这类校正的试差方法。作者在本书及其附录中提供了许多同类书籍中很少见到的新颖内容。在内容编排与引用材料方面亦颇有新意;特别是第四章中的第二、四节,第六章中的第四、五、六节,第十章中的第二、三、四、七节,第十一章中的第三、四、五节,第十二章中的第四、五、六、七节及附录 D 中的大部分内容都有特色。有的内容新颖,有的参考价值较大,它们都成为读者从本书中获得知识与技能的有力助手。所有以上特色都是在其它同类书籍中并不多见的。

综上所述 Naresh K. Sinha 的《控制系统》既是一本另具一格,内容丰富,可读性强的自学丛书,用作教材则可收到内容精炼,重点突出之裨益。本书又是一本可供工程师们随时翻阅的好书,笔者认为所谓好书就是:言之有物,论之成理,易读易懂,学而能悟的书。以上诸言实属个人一孔之见,挂一漏万,谬误之处亦属难免,挚望读者批评指正!

周其鉴

1992. 2. 于重庆大学

译者的话

本书是加拿大 McMaster 大学执教多年的 N. K. Sinha 在其讲义的基础上,吸取了八所大学著名教授的意见而写成的控制系统课程教材,并被列入为 Holt, Rinehart and Winston 电气及计算机工程丛书之一。

著者一直致力于课程改革的探索,他面对控制理论教学落后于控制工程实践这一挑战性局面,率先写出了这本篇幅小、信息量大,在结构、选材、论述诸方面都刻意求新的开拓性教材。按照著者的构思,本书首先应用 CAD 技术,在一个 13 周的学期内给学生如何去深刻领会、融会贯通并灵活运用频域、复频域和时域,经典控制理论与现代控制理论的基本概念、方法来完成控制系统的设计分析任务。

本书与国内外同类教材相比较,其主要特点是:第一,基于著者的独特见解,以新的统一观点,并行阐述了经典控制理论与现代控制理论的基本原理。在引入现代控制理论的概念和方法的同时,特别注意突出经典控制理论的概念和方法的应用。既讲清楚基本控制策略的优点,又不回避其缺点;第二,给出用 TURBO—PASCAL 语言写成的控制系统 CAD 完整的程序名,从而突破了以往教材止步于二阶以下控制系统的局限;第三,选材新颖,介绍了近年来提出的新方法取代以往教材中落后的旧方法。叙述简明扼要,深入浅出。书中编排了 111 道详解实例和附有答案的 87 道练习题,使基本概念和方

法更加清晰易懂。全书共有 207 道习题,其中有确定解答的 185 题在书末给出答案。许多习题具有实际背景,其内容覆盖了航空航天、工业生产、医学生物等领域,有助于启发学生拓宽思路;第四,考虑到没有学过 Laplace 变换、 z 变换的矩阵理论的读者的需要,在附录里给出积分变换与矩阵论的概要。

全书由十四章和四个附录组成,包括绪论,物理系统的数学模型,状态空间方法,闭环系统特性,控制系统性能,稳定性,根轨迹法,频率响应图及其稳定性分析,控制系统的设计与校正的直接方法,数字控制系统设计,运用状态空间表达式设计校正装置,非线性系统分析等章节和数学复习、计算专题等四个附录。

本书不仅适于工科和专业本科生学习和有关专业研究生、教师参考,而且对于不熟悉控制理论的广大工程技术人员而言,这是一本极好的自学参考书,有助于他们尽快地入门。翻译出版这本反映国外控制工程教育改革的新趋势,锐意实践、与众不同的教材,对于我国的教学改革和教材建设可资参考与借鉴。周其鉴教授对译稿进行了认真细致的审校,提出了许多宝贵意见,对翻译工作给予了多方面的指导,并赐予译序。译者在此表示衷心的感谢。

已经发现的原书中的疏误,译者与校者共同讨论后加以改正或作了注释。但对于原书里排印错误在改正后不予加注。

本书第一章至第三章及第七章由丁萃菁翻译,第四章至第六章及附录 D 由王学勤翻译,第八章至第十章,第十三章的 13.10 节及附录 A、附录 B、附录 C、选题答案由徐天芳翻译,原序、第十一章、第十二章的 12.1~12.4 和第十四章由熊兴宇翻译。全书最后由徐天芳、熊兴宇统稿。限于译者水平,书

中难免出现错误与不妥之处,欢迎读者予以批评和指正。

译 者

1992年2月于重庆大学

原 序

讲授控制理论从来就是一项挑战性任务。虽然实际控制系统常常是十分复杂的,但是它们必须表达为简单的形式使它们易于数学处理。在过去常有一种过分简化的趋势,其主要原因是解决现实生活中的问题需要大量的计算。现在,对于使用微型计算机很方便的工程师和工科大学生们来说,这样的大计算量不再是一个限制。在尽量利用计算机的情况下,存在的主要问题就是缺乏能让学习控制理论的大学生运用的合适的计算机程序。本书试图补救这一局面,既提供了合适的程序,并为读者在掌握理论的过程中应用这些程序提供了一些挑战性的问题。

这本书拟作控制系统的一个引论。本书旨在为读者提供多年来发展了的频域和时域控制理论的两类基本概念。并试图在引入现代思想的同时,仍然保留经典概念。书中突出了现有廉价微型计算机的作用。

本书为了有助于理论的阐述和方法的推导,在每章里都包含有大量的详解例题。第二章和第三章给出了系统动力学模型的统一处理,包括传递函数模型和状态空间模型。关于控制系统校正的第十章是以合乎逻辑与统一的方式介绍的。特别是在很多书里可找到的设计超前校正装置的试差法,已代之以新近提出的直接方法。而且与观测器与状态反馈控制器结合的设计方法完全相当的设计极点配置校正装置的传递函

数方法是首次写进这样一本大学生和开业工程师们阅读的书里第十一章为数字控制,是这个迅速发展和普及的领域的最新论述,选用了许多启发性实例以一种对于初次接触数字控制课题的读者合适的方式介绍。第十二章对状态空间方法作了很好的分析,它以一种对大学生和在职科技人员两者都具有吸引力的方式撰写。引入能控性和能观测性的概念时,运用了第十一章里已介绍的离散时间系统理论。接着介绍状态反馈理论。状态空间方法和传递函数法这两类方法都被用来确定状态反馈向量。然后引入渐近状态观测器和讲述它的设计。还讨论了状态反馈和观测器相结合的设计方法并把它们与第十章里介绍的传递函数法联系起来。

可以这样说,在大多数工程领域中,为了学习各种细节和技巧以便能处理工程设计问题,都必须解算许多数字习题。作为启发,在每一章的结尾编入了大量的实际问题。附录 D 讨论了计算专题。对于许多计算课题给出了按完整文件编制的程序清单。可以顺便指出,在过去关于控制系统的许多书里,由于没有计算工具,涉及的问题仅局限于二阶系统问题。大约直到 1978 年,如果某个问题需要求解高于二次的多项式的根,我们通常就中止了。了解到目前每个工程师能接触到可编程计算器或微型计算机这一实际情况,补救上述局面的一种尝试就是编撰包括能用于 HP-41C 可编程计算器*或 IBM 个人计算机上的程序清单,来为读者提供应付现实生活中的问题。

* 由于国内使用 HP-41C 可编程计算器尚不普遍,本书将 HP-41C 程序略去,需要此程序的读者可向译者索取或查阅原著。——译者注

本书面向工科各专业高年级大学生和开业工程师,而不偏向某个特定的工程部门。虽然希望读者具备 Laplace(拉普拉斯)变换, z 变换和矩阵理论的某些基础知识,但这些内容的复习仍安排在附录里。本书在给出许多实例来作为启发的同时,为图保持一定的数学严格性。

本书早期的版本在过去的三年是用作 McMaster 大学的高年级一学期的控制系统课程的教材。因为我们的高年级学生在低年级时已经修完电路和系统理论课程,他们具备 Laplace 变换, z 变换,电子电路的状态方程,Bode(伯德)图和矩阵理论的充实的基础知识。因此,在一个 13 周的学期里教完全书的全部内容是不可能的。如果需要复习某些基础知识,讲完全书可能时间不够。在这种情况下,第十一章,第十三章和第十二章的部分内容可以略去不讲。

致 谢

对于我准备撰写本书时,我所接受的一些私人帮助,在此愉快地致以谢忱。我得益于 M. E. Van Valkenburg 教授,他是 Holt, Rinehart 和 Winston 电气和计算机工程丛书的编辑。还得益于几位校订者,他们在许多方面帮助提炼原稿。这几位教授是

- John Fleming of Texas A & M University
- Susan Reidel of Marquette University
- Edgar Tacker of the University of Tulsa
- Don Kirk of the U. S. Naval Postgraduate School
- Lincoln Jones of San José State University
- Madur Sundareshan of the University of Arizona

• Don Pierre of Montana State University

• Violet Haas of Purdue University

其他的朋友和同事阅读了部分原稿和提出了宝贵意见,他们是 O. Vidal 博士, S. Puthenpura 先生与 1983 年, 1984 年和 1985 年的毕业班学生们。我还感谢 Waterloo 大学的 G. J. Lastman 博士,他帮助改进了一些为 IBM 个人计算机编制的 Pascal 程序。(以下略)

N. K. 辛赫

目 录

译序

译者的话

原序

第一章 绪论 1

第二章 物理系统的数学模型 6

2.1 引言 6

2.2 物理系统的微分方程及其传递函数 6

2.3 机械系统的电模拟 9

2.4 电枢控制式直流伺服电动机的模拟 14

2.5 方框图的简化 17

2.6 直流位置控制系统 23

2.7 MASON(梅逊)法则 25

2.8 小结 28

2.9 参考文献 29

2.10 习题 29

第三章 状态空间分析法 36

3.1 引言 36

3.2 状态空间表达式 36

3.3 小结 53

3.4 习题 54

第四章 闭环系统的特性 64

4.1 引言 64

4.2 参数变化的灵敏度 65

4.3	瞬态响应	70
4.4	扰动信号的影响	71
4.5	稳态误差	73
4.6	反馈的缺点	74
4.7	小结	75
4.8	参考文献	75
4.9	习题	75
第五章	控制系统的性能	80
5.1	引言	80
5.2	标准试验输入	81
5.3	一阶系统的响应	83
5.4	二阶系统的响应	86
5.5	瞬态响应特性	91
5.6	稳态性能	93
5.7	闭环传递函数的稳态误差	96
5.8	积分性能准则	99
5.9	小结	101
5.10	习题	102
第六章	线性系统的稳定性	107
6.1	引言	107
6.2	Routh-Hurwitz(劳斯-古尔维茨)判据	108
6.3	特殊情况	110
6.4	相对稳定性	114
6.5	设计应用	116
6.6	由状态空间表达式判断稳定性	117
6.7	小结	119
6.8	习题	119
第七章	根轨迹法	124

7.1	引言	124
7.2	二阶系统的根轨迹	125
7.3	画根轨迹图的基本规则	128
7.4	根轨迹的特性	131
7.5	设计应用	146
7.6	灵敏度与根轨迹	152
7.7	小结	155
7.8	参考文献	156
7.9	习题	156
第八章	频率响应图	162
8.1	引言	162
8.2	传递函数与频率响应	163
8.3	BODE(伯德)图	167
8.4	极坐标图	181
8.5	对数幅相图	184
8.6	具有传输滞后的系统	187
8.7	根据 BODE 图估算传递函数	188
8.8	小结	192
8.9	习题	192
第九章	基于频率响应的稳定性	196
9.1	引言	196
9.2	幅角原理	197
9.3	NIQUIST 判据	202
9.4	相对稳定性	209
9.5	闭环频率响应	214
9.6	具有纯滞后的系统	221
9.7	小结	224
9.8	参考文献	224