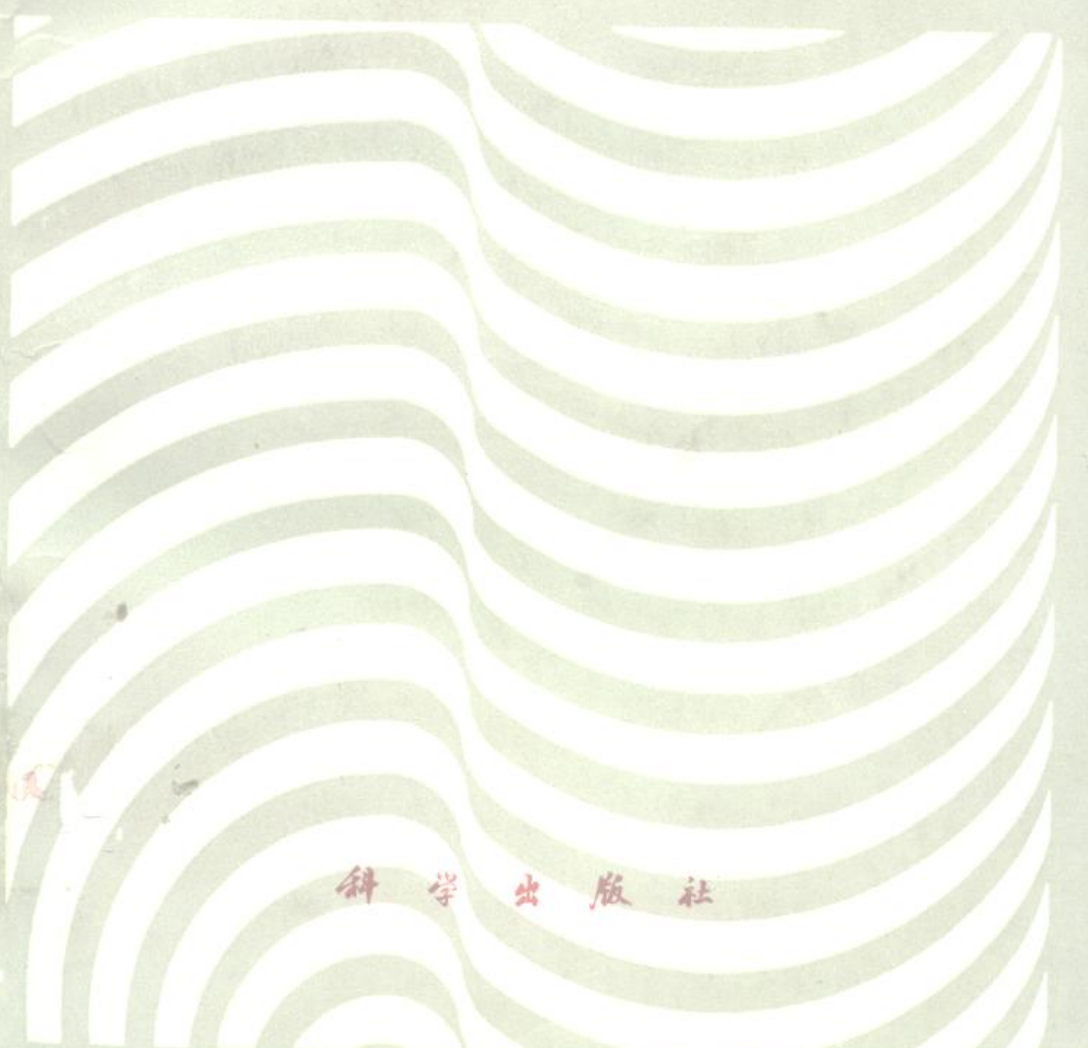


大系统建模与控制

〔美〕 M. 詹姆希迪 著



科学出版社

73.222
759

大系统建模与控制

〔美〕 M. 詹姆希迪 著

陈中基 黄昌熙 译

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书全面地介绍了大系统理论的现状、发展概况和潜在应用的前景。书中对于大系统理论中重要的定理都有证明,附有实用算法和解题程序,并引用许多数字实例来说明它们的具体应用。每章都有详尽的参考文献和典型的习题,书末附有习题的解法或答案,便于自学。

全书主要分两部分:第一部分研究大系统的建模问题,详细介绍了大系统的时域建模方法和频域建模方法;第二部分研究大系统的控制问题,详细讨论了大系统的递阶控制和分散控制,以及大系统的次优化设计问题。对于大系统的随机控制和鲁棒控制,大系统的稳定性、可控性和可观测性,以及大系统的辨识和估计等问题,书中也有适当的介绍。

本书可作为自动控制 and 系统工程等专业的大学生和研究生的教材或教学参考书。对于上述专业的教师、工程师和研究人员也有重要参考价值。

Mohammad Jamshidi
LARGE-SCALE SYSTEMS
MODELING AND CONTROL
North-Holland, 1983

大系统建模与控制

[美] M. 詹姆希迪 著
陈中基 黄昌熙 译
责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986 年 12 月第 一 版	开本: 850×1168 1/32
1986 年 12 月第一次印刷	印张: 18 7/8
印数: 0001—3,300	字数: 493,000

统一书号: 15031·761

本社书号: 4877·15—8

定价: 5.30 元

译者前言

自动控制理论的发展经历了三个阶段：第一阶段是经典控制理论，用来解决单输入单输出系统的分析和综合问题。第二阶段是现代控制理论，用来解决多输入多输出系统的分析和综合问题。第三阶段是大系统理论，用来解决多层次分散结构的复杂大系统（包括工程系统、信息系统、社会系统、经济系统、管理系统、交通运输系统、能源系统、水资源系统、生态系统和人体系统等）的分析和综合问题。

现在向读者介绍的《大系统建模与控制》这本著作，是美国新墨西哥大学对系统工程研究生开设大系统理论正规课程的教材。本书内容新颖丰富，比较全面地总结了大系统理论的现状和发展概况。书中对大系统理论的重要定理都有严格的证明，提供了大量实用算法和解题程序，并引用了许多数字实例来说明它们的实际应用。每章都有详尽的参考文献和典型的习题，书末附有习题的解法或答案，便于读者自学。

本书作者穆罕默德·詹姆希迪 (Mohammad Jamshidi)，是美国新墨西哥大学电气工程与计算机工程系教授，国际《大系统——理论与应用》杂志 (Large-Scale Systems—Theory and Applications) 的编委，是国际上大系统理论的著名专家之一。本书是北荷兰出版公司出版的《系统科学和系统工程丛书》的第九卷，于1983年在荷兰阿姆斯特丹出版。本书的出版填补了大系统理论教材的空白，出版后受到各国学者的好评。

由于大系统理论是正在迅速发展的学科，学术名词尚待统一，限于译者水平，译文中难免有不当之处，欢迎读者批评指正。

本书中译本的迅速出版，是由于中国大百科全书出版社、知识出版社和科学出版社编辑部的热情支持，特此表示衷心感谢。今

年三月,知识出版社就决定出版本书中译本,后来为了排印方便,
改由科学出版社出版,特此向读者说明。

陈中基 黄昌熙

1984年8月于北京

序

世界各国面临的许多实际问题都是由于现代技术及社会和环境问题所引起的,这些问题高度复杂,维数“大”,而且是随机性质的。“大系统”这个概念是一个含有主观性的概念。人们可以提出这样的问题:怎样大的系统才算是“大系统”呢?本文将介绍关于这个问题的几种不同的观点。一种观点认为:如果一个系统可以解耦,即分解成许多互相关联的子系统,而使计算简化或实现方便,那末这样的系统就可以认为是大系统。另一种观点认为:所谓大系统就是这样的系统,它的维数非常大,以致常规的建模方法,分析方法,控制设计和最优化,都不能通过合理的计算步骤得到合理的解答。

不用说,许多实际问题作为大系统处理,都是根据系统的性质,而不是任意决定的。按照我的看法,大系统有两个重要的属性:(1)大系统常常代表复杂的实际系统;(2)大系统的递阶(多级)和分散的信息结构可以描述有关社会、企业、行政机构、经济、环境、数据通信、电力、交通运输、航空与航天(包括空间结构)、水资源,以及能源等系统。由于这两个重要的性质和潜在的应用前景,一些研究人员对大系统的各个方面做了大量的研究工作,如建模、模型降阶、控制、稳定性、可控性、可观测性、最优化和稳定化等。这些概念已经应用到各种各样的问题上,并且帮助建立了有关系统分析、设计、控制和最优化等方面的各种概念。在控制和系统方面的主要期刊中已经出现了如递阶控制、分散控制、估计和滤波、模型降阶、鲁棒控制、摄动法和分解法等各种论题。

大系统的论题已经成为几个全国性学术会议和国际性学术会议的议题,其中包括国际自动控制联合会(IFAC)召开的两届大系统学术会议(第一届是1976年在意大利乌第纳召开的,第二届

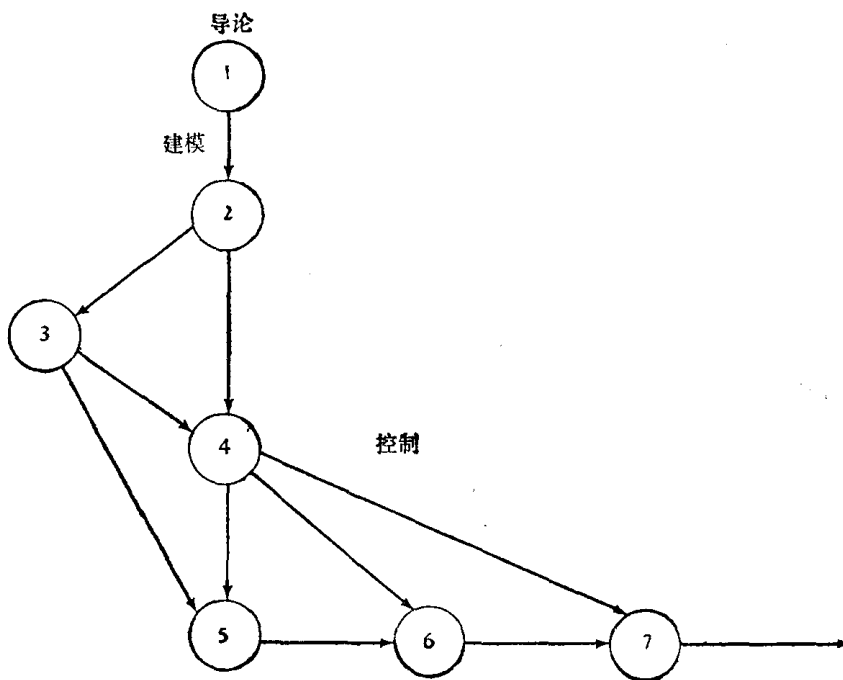
是 1980 年在法国图鲁兹召开的)。1982 年 10 月在美国弗吉尼亚州弗吉尼亚海滩举行了一次国际大系统专题讨论会, 这次会议是美国电气与电子工程师学会 (IEEE) 发起的。大系统的论题在许多其它的全国性学术会议上也穿插着进行讨论, 如美国电气与电子工程师学会决策与控制年会 (CDC)、联合自动控制会议 (JACC) 和美国控制学术会议 (ACC) 等。然而, 比较完整而详细地论述大系统的著作却出版得较少。在这一方面值得注意的著作有: 辛写的《动态递阶控制》(M. G. Singh, Dynamical Hierarchical Control, North-Holland, 1st ed., 1977; rev. ed., 1980)*¹, 塞奇写的《大系统的研究方法》(A. P. Sage, Methodologies for Large-Scale Systems, McGraw-Hill, 1977), 西利亚克写的《动态大系统——稳定性与结构》(D. D. Šiljak, Large-Scale Dynamic Systems——Stability and Structure, Elsevier North-Holland, 1978), 以及辛写的《分散控制》(M. G. Singh, Decentralized Control, North-Holland, 1981)。1980 年北荷兰出版公司出版了一种新的期刊, 《大系统——理论与应用》(Large-Scale Systems——Theory and Applications), 这也许是一项最令人鼓舞的成果。令人遗憾的是, 大系统方面极少数的著作中, 只有塞奇的那本著作, 是为了加强教员和学员之间的实际联系而写的。这也许是无可非议的, 因为大系统方面的许多论题都是最近研究出来的, 这一学科还没有纳入系统工程研究生正规教育的课程。美国新墨西哥大学电气工程与计算机工程系实际上是开设大系统理论正规课程的少数系科之一。

本书的目的是全面地阐述大系统学科的历史、现状和潜在的发展趋势。作者试图介绍大系统理论方面比较成熟的基本课题, 书中的一般论题都进行了算法处理, 大多数理论概念都有证明, 并附有算法以说明如何应用。然后再举出一个或几个数字实例进一步说明该理论概念。书中绝大多数数字实例都在 HP-9845 型计

*¹ 本书中译本已由科学出版社 1983 年出版。——译者注

计算机上用 BASIC 程序求解。为此开发了一些有关的程序和子程序。因为书中大多数习题(题号前标有“C”的习题)要用计算机求解,所以感兴趣的读者可直接写信给作者,索取有关源程序的拷贝*,我们收费合理。其中值得注意的是第六章,该章中介绍了较多的面向研究方面的课题。

本书讲两个主要问题:(1)建模和模型降阶;(2)关于最优控制、次优控制和系统性质,如稳定性、可控性、可观测性、极点配置、递阶控制和分散控制等方面的一些基本概念。下图描述了本书的详细规划。



第一章是大系统导论,介绍两类重要的大系统,递阶(多级)控制系统和分散控制系统。如同其它各章一样,本章部分材料取自《美国电气与电子工程师学会自动控制学报》大系统专辑(1978年

*) 我们尚未收到源程序的拷贝,请读者暂勿来信索取,待收到后另行通知。——译者注

5 月号) (IEEE Transactions on Automatic Control), 该专辑是迈克·阿瑟斯 (Mike Athans)、尼尔·桑德尔 (Nil Sandell) 及其同事们的精心杰作。大部分模型和控制策略都是专门用于线性时不变连续时间大系统的。然而, 也有一些涉及时变、非线性、时滞和离散时间的大系统。

第二章和第三章研究大系统的模型和模型降阶问题。第二章讨论时域建模方法, 包括集结法、摄动法和描述变量法。这里介绍的集结法和摄动法概况取自下列学者的研究成果, 即 M. Aoki, E. J. Davison, P. V. Kokotović, R. E. Larson, D. L. Luenberger, W. R. Perkins 等。第三章介绍单输入单输出系统和多输入多输出系统在频域中的模型降阶方法。这里综述了几种模型降阶方法, 并举出许多数字实例。文中采用了下列学者的研究成果, 即 C. F. Chen, B. Friedland, T. C. Hsia, S. S. Lamba, A. S. Rao, A. S. S. R. Reddy, V. Seshadri, Y. Shamash, L. S. Shieh 等。

第四章至第六章讨论大系统的控制、分析、设计和最优化问题。第四章研究递阶控制问题。讨论连续时间和离散时间的开环和闭环递阶控制系统。这一章的材料取自下列学者的研究成果, 即 A. P. Sage, M. G. Singh, A. Titli 等。第五章的主题是分散控制。在这一章中讨论了分散稳定化、分散鲁棒伺服机构、顺序稳定控制器和分散随机控制等问题。这一章的材料主要来源于下列学者的先驱工作, 即 E. J. Davison, D. D. Šiljak 等。第六章介绍最优控制理论在线性、非线性和时滞大系统中的应用。这里开发了许多次优控制方法, 其中有一部分是采用第二章和第三章中介绍的模型降阶方法, 第四章和第五章中介绍的递阶控制和分散控制方法, 以及参数灵敏度法、参数嵌入法和线性化方法。这里还详细讨论了在每一种情况下最优性能指标退化的问题。这些讨论有一部分汇集了下列学者的研究成果, 即 M. Aoki, J. B. Cruz, Jr., E. J. Davison, P. V. Kokotović, M. G. Singh 等。

第七章研究大系统的结构特性(稳定性、可控性和可观测性)。这里把李亚普诺夫稳定性方法与输入输出稳定性方法放在一个一

致的基础上进行研究.这一章还介绍了有关“联结稳定性”的概念,并对几种主要的稳定性方法进行了比较.这里还研究了复合系统的可控性和可观测性,包括它们与系统可联结性和结构可控性的关系.有关稳定性的大量资料来源于这一领域的先驱者的研究成果,如 M. Araki, F. N. Bailey, L. T. Grujić, A. N. Michel, D. D. Šiljak 等.关于可控性和可观测性的讨论则取自下列学者的研究成果,即 E. J. Davison, J. B. Pearson, B. Porter, H. H. Rosenbrock 等.

教员和学员可按几种不同的方式使用本书.关于大系统的分析和控制,阅读第一、二、三、五、七章.关于大系统的最优化,学习第一、二、四章.关于大系统的最优控制,阅读第一、二、四、五、六章.关于大系统的结构特性和建模,则汇集在第一至五章及第七章.本书可用作大系统最优控制,大系统最优化或大系统专题等研究生二年级课程的教本.本书也可供电气工程、系统工程和控制工程方面的研究生,以及合格的经济学和商学院的研究生作为教材.本书对大系统领域的研究人员也很有用,因为本书介绍的大部分课题都是综合最新的研究成果,每章均有详尽的参考文献.

作者应当感谢对本书的出版作出贡献的人们.首先要感谢伊利诺斯大学的 Joe Cruz, Petar Kokotović, Bill Perkins, 他们对我在控制工程和系统工程方面的教学工作曾经给予种种帮助.我还应当感谢新墨西哥大学电气工程与计算机工程系主任 Peter Dorato 和加利福尼亚大学的 Lotfi Zadeh, 他们经常鼓励我,并帮助我成为大系统的专业研究人员.我要特别感谢许多大系统方面的研究人员,没有他们大量的研究工作,这本书就无法完稿.其中我要特别感谢多伦多大学的 Ted Davison, 圣地克拉拉大学的 Drago Šiljak, 曼彻斯特大学工学院的 Mandan Singh 和弗吉尼亚大学的 Andy Sage, 他们在大系统方面的研究成果在这里起了很大作用.我还应当从另一个角度再次感谢 Andy Sage, 因为他是埃尔塞维尔《系统科学与系统工程丛书》的主编,他把本书列入这一

丛书出版,并对原稿进行了审阅.

我很幸运,可以利用许多协作研究人员的成果.其中我应当感谢贝尔实验室的 Manu Malek-Zavarei 和俄亥俄州立大学的 Ümit Özgüner. 本书作为教本是新墨西哥大学电气工程与计算机工程系主任 Peter Dorato 提出来的,开设关于大系统的新课程也是他第一个倡议的.为此,我对他非常感激,并感谢他此后不断给我的种种鼓励.我还要感谢我的同事 Schlomo Karni 和我过去的同事、亚利桑那公用事业公司的 Mehdi Etezadi. 我应当特别感谢我的同事 Ruben Kelly,他允许我使用新墨西哥大学的计算机设备,特别是 HP-9845 型计算机,并得到主管人的帮助.我非常感谢埃尔塞维尔出版公司高级责任编辑 Louise Calabro Schreiber,她提出了许多宝贵的建议.

我应当特别感谢我现在的学生和许多过去的学生,特别是阿尔布奎克国立圣地亚实验室的 Emil Kadlec,伯克利加利福尼亚大学的 Ching-An Lin 和新墨西哥大学的 Richard Owen,他们提供了第四章中两个计算机仿真程序和第六章中的一个计算机仿真程序,他们能坚持听讲也是难能可贵的.最后,也是很重要的一点,我应当感谢许多帮助准备手稿的人们所进行的打印和编辑辅助工作,特别感谢我的编辑助理 Gladys Ericksen,她打印的手稿很好,并对原稿进行了耐心的校对和修改.我也应当感谢 Marilyn Smiel, Joan Lillie, Mirium Arnold,他们进一步完善了原稿的打印工作.

穆罕默德·詹姆希迪

1982年5月10日于新墨西哥州阿尔布奎克

目 录

译者前言

序

第一章 大系统导论	1
1.1 历史背景	1
1.2 递阶结构	2
1.3 分散控制	4
1.4 本书范围	5
习题.....	6
第二章 大系统建模: 时域方法	7
2.1 概述	7
2.2 集结法	9
2.2.1 精确集结法和模态集结法	12
2.2.2 连分式集结法	21
2.2.3 链式集结法	26
2.3 摄动法	34
2.3.1 弱耦合模型	34
2.3.2 强耦合模型	40
2.3.2.a 边界层校正	43
2.3.2.b 时标分离	44
2.3.2.c 多重建模	51
2.4 描述变量法	52
2.4.1 描述变量系统	53
2.4.2 可解性和可条件性	55
2.4.3 时不变性	57
2.4.4 正移算法	58
2.5 讨论和结论	60

习题	63
第三章 大系统建模: 频域方法	68
3.1 概述	68
3.2 矩量匹配法	69
3.3 帕德近似法	74
3.4 劳斯近似法	78
3.5 连分式法	83
3.6 误差极小化法	87
3.7 混合方法和不稳定系统	90
3.7.1 帕德-模态法	91
3.7.2 帕德-劳斯法	91
3.8 多输入多输出系统的降阶	93
3.8.1 矩阵连分式法	94
3.8.2 模态-连分式法	95
3.8.3 帕德-模态法	96
3.9 频率响应的比较	98
3.10 讨论和结论	101
习题	105
第四章 大系统的递阶控制	107
4.1 概述	107
4.2 递阶结构的协调	110
4.2.1 模型协调法	111
4.2.2 目标协调法	112
4.3 连续时间系统的开环递阶控制	114
4.3.1 线性系统的二级协调	116
4.3.2 相互作用预测法	125
4.3.3 目标协调法和奇异性	134
4.3.3.a 重新表达形式 1	136
4.3.3.b 重新表达形式 2	137
4.4 连续时间系统的闭环递阶控制	138
4.4.1 用相互作用预测法的闭环控制	139

4.4.2 用结构摄动法的闭环控制	143
4.5 离散时间系统的递阶控制	156
4.5.1 离散时间系统的三级协调	156
4.5.2 有时滞的离散时间系统	165
4.5.2.a $k=0$ 的问题	166
4.5.2.b $k=1, 2, \dots, K-1$ 的问题	167
4.5.2.c $k=K$ 的问题	168
4.5.3 相互作用预测法	170
4.5.4 结构摄动法	174
4.5.5 共态预测法	180
4.6 讨论和结论	190
习题	194
第五章 大系统的分散控制	197
5.1 概述	197
5.2 分散问题的表达方式	198
5.2.1 问题 1——分散稳定化	199
5.2.2 问题 2——分散伺服机构	199
5.2.3 问题 3——分散随机控制	201
5.3 分散稳定化	202
5.3.1 固定多项式和固定模式	202
5.3.2 用动态补偿的稳定化	207
5.3.3 用局部状态反馈的稳定化	213
5.3.4 用多级控制的稳定化	223
5.3.5 指数稳定化	229
5.3.6 用动态递阶控制的稳定化	235
5.3.7 用局部状态反馈的一般稳定化	238
5.3.7.a 时变系统和反馈控制	238
5.3.7.b 时不变系统和反馈控制	242
5.3.7.c 时不变系统和时变反馈控制	245
5.4 分散鲁棒控制	247
5.4.1 约束和定义	248
5.4.1.a 校正控制综合约束	248
5.4.1.b 分散鲁棒控制问题	248

5.4.2	稳态跟踪增益矩阵及其计算	249
5.4.2.a	$T_1(i, j)$ 的计算	250
5.4.2.b	$T_1(i, j, K_i)$ 的计算	250
5.4.3	分散鲁棒控制器的存在性	252
5.4.4	控制结构和算法	260
5.4.5	顺序稳定鲁棒控制器	267
5.5	分散随机控制	274
5.5.1	非分散解	274
5.5.2	分散解	275
5.5.3	连续时间系统的解	279
5.5.3.a	非分散情况	280
5.5.3.b	分散情况	281
5.6	讨论和结论	282
	习题	286
第六章	大系统的次优设计	290
6.1	概述	290
6.2	线性时不变大系统的次优控制	291
6.2.1	集结法	291
6.2.2	摄动法	300
6.2.2.a	正则摄动法	300
6.2.2.b	奇异摄动法	305
6.2.2.c	多重时标法	315
6.2.3	递阶控制与分散控制法	318
6.2.3.a	用无约束极小化的最优分散控制	321
6.2.3.b	用顺序最优化的分散控制	325
6.3	非线性大系统的次优控制	328
6.3.1	用灵敏度法的次优控制	328
6.3.2	用相互作用预测法的递阶控制	336
6.3.3	用摄动和灵敏度法的次优控制	348
6.3.3.a	两点边值问题的嵌入解法	352
6.3.3.b	摄动法的一种应用	356
6.4	时滞大系统的次优控制	365
6.4.1	耦合时滞大系统的次优控制	367
6.4.2	串联时滞大系统的次优控制	380

6.4.3 非串联时滞大系统的递阶控制	386
6.5 次优费用泛函的边界	394
6.5.1 集结引起的次优性	395
6.5.2 摄动引起的次优性	397
6.5.3 递阶控制的次优性	400
6.5.3.a 结构摄动	400
6.5.3.b 拉格朗日对偶性	404
6.5.4 时滞大系统的次优性	406
6.5.5 非线性大系统的次优性	411
6.6 大系统的状态估计	414
6.7 讨论和结论	428
习题	432
第七章 大系统的结构特性	434
7.1 概述	434
7.2 李亚普诺夫稳定性方法	437
7.2.1 定义和问题表述	437
7.2.2 稳定性准则	440
7.2.3 联结稳定性	445
7.2.3.a 系统结构和摄动	445
7.2.3.b 联结稳定性准则	448
7.3 输入输出稳定性方法	453
7.3.1 问题开发和表述	453
7.3.2 输入输出稳定性准则	457
7.4 复合系统的可控性和可观测性	459
7.4.1 频域法	460
7.4.1.a 串并联系统	461
7.4.1.b 闭环复合系统	464
7.4.2 广义合成法	466
7.4.3 系统可联结性法	473
7.4.3.a 基本定义	473
7.4.3.b 可控性和可观测性的条件	477
7.5 结构可控性和可观测性	479
7.5.1 矩阵的结构和秩	480

7.5.2 结构可控性的条件	483
7.5.3 用系统可联结性的结构可控性和可观测性	488
7.6 奇异摄动系统的可控性	490
7.6.1 线性时不变奇异摄动系统的可控性	490
7.6.2 线性时变奇异摄动系统的可控性	492
7.6.3 拟线性系统的可控性	497
7.7 讨论和结论	501
7.7.1 大系统稳定性的讨论	501
7.7.2 大系统可控性和可观测性的讨论	506
习题.....	508
习题选解和答案.....	512
符号表.....	539
索引.....	542
参考文献.....	563