

大型动力系统的理论与应用

建模、镇定与控制
卷 2

刘永清 徐维鼎 著

华南理工大学出版社

THEORY AND
APPLICATION
OF LARGE-SCALE
DYNAMIC SYSTEMS

大型动力系统的理论与应用

—— 建模、镇定与控制

卷 2

刘永清 徐维鼎 著

华南理工大学出版社

内 容 简 介

本书是《大型动力系统的理论与应用——分解、稳定与结构》(卷1)的续篇,是著名教授刘永清与徐维鼎合作的新著。

书中系统地论述了作者近年来悉心研究、发展的大系统的稳定、建模、镇定与控制的新成果。

本书可作为理工、师范院校的应用数学、自动控制、系统工程、管理工程与计算机等专业的教材,也可供有关工程技术与研究人员参考。

《大型动力系统的理论与应用》(含卷1、卷2)的研究和撰稿工作,是在国家自然科学基金的连续资助和追加科学基金下完成的。

责任编辑 赵巧山

封面设计 吴俊卿

大型动力系统的理论与应用

——建模、镇定与控制

卷 2

刘永清 徐维鼎 著

华南理工大学出版社出版发行

各地新华书店经销

广东韶关新华印刷厂印装

787×1092毫米 16开本 印张:17.25 字数:386千

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

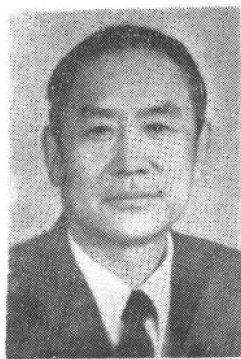
印数:1—4060

ISBN 7-5623-0107-7/TP·10

国内定价:半精装4.00元

精 装5.50元

作者简介



刘永清 华南理工大学教授。1955年毕业于复旦大学数学系；1973年后在华南工学院学习化工仪表自动化第二专业。1957—1988年间在国内外发表论文132篇；出版“大系统”、现代科学管理与计算机程序、带有时滞的动力系统的运动稳定性四部专著（包括合作者）。1980年后获得国家教委、部委、省科委、广州市17项科技成果奖。1984年10月被国务院劳动人事部、国家科委列为国家级有突出贡献的科学家。1988年国家科委、光明日报将他的传记编入“中国科技人物辞典”，以及“建国四十周年当代中国科学技术成就大典”（1989）中。1986年法国企业的建模与仿真技术（AMSE）吸收他为会员及AMSE建模、仿真与控制编委。他被聘为美国传记研究会（ABI）理事；英国剑桥国际传记学会理事。1986年9月美国传记研究所将他的小传列入“国际名人录”1987—1988年冬第2版中；1988年英国剑桥国际传记中心（IBC）将他的小传列入“世界名人录”（澳洲及远东）1988年冬第1版。此外，他被列入“国际成名者之首”第2版，“国际名人传记辞典”第21版，“国际知识界名人录”第8版，“世界奉献者IBC之书”等八个不同的“世界（国际）名人录辞典”中。



徐维鼎 上海机械学院系统工程系副研究员，1966年毕业于上海市黄浦区业余工学院。二十年来，在国内外发表常微分方程稳定性及大系统的镇定与控制学术论文十多篇。

ABD02/57

前言

《大型动力系统的理论与应用——建模、镇定与控制》；是1988年1月出版的《大型动力系统的理论与应用——分解、稳定与结构》的续篇。

书中继续介绍了1959年由秦元勋教授、王慕秋研究员和刘永清教授首次在国内外开创的大型动力系统的稳定性分解领域后，刘永清在大系统的稳定、镇定与控制方面的近期工作，徐维鼎讲师的工作，以及刘永清和刘金宪、唐功友、张鸿亮、朱学峰、李在根、冯恩波及外籍博士生Paul K. C. Chian等人的工作。如大型控制系统的镇定，具有滞后的控制系统(包括大系统)的镇定、无条件镇定与控制，离散系统的李雅普诺夫函数公式、比较原理及其在离散大系统的结构及关联稳定性中的应用，滞后连续大系统与滞后离散系统的无条件稳定性，以及大系统稳定性判定的新方法。

书中还介绍了Singh的大系统分散控制，特别是Jamshidi大系统的建模，大系统的递阶控制与分散控制，大系统的次优控制和设计。

此书初稿先后用作自动化系研究生，系统工程研究生，系统工程助教进修班教材。1988年7-8月在青岛举行的全国大系统讲习班上，作者系统地讲授了此书，随后在使用过程中进行了修改、完善和充实。

作者对秦元勋教授多年来在大系统及在任意滞后离散系统的无条件稳定性等研究中给予的热情关怀和指导表示衷心的感谢。作者也对华南理工大学科研处及有关领导对出版本书给予的支持表示感谢。特别是对华南理工大学出版社给予的大力支持，使本书能在较短的时间内出版，表示深切的感谢。

《大型动力系统的理论和应用》(含卷1，卷2)的研究和撰稿工作，是在国家自然科学基金的连续资助和追加科学基金下完成的，对此也深表感谢。

刘永清

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1-1 概况	(1)
§ 1-2 大系统的稳定性	(2)
§ 1-3 离散大系统的稳定性	(3)
§ 1-4 滞后大系统的稳定性	(4)
§ 1-5 大系统稳定性理论的应用	(5)
§ 1-6 结束语	(6)
第二章 大系统建模: 时域方法	(13)
§ 2-1 引言	(13)
§ 2-2 集结法	(14)
§ 2-2-1 精确集结法和模态集结法	(15)
§ 2-2-2 举例	(17)
§ 2-3 摄动法	(18)
§ 2-3-1 弱耦合模型	(18)
§ 2-3-2 强耦合模型	(20)
§ 2-4 描述变量法	(21)
第三章 大系统建模: 频率域方法	(24)
§ 3-1 引言	(24)
§ 3-2 矩匹配法	(24)
§ 3-3 帕德(Padé)近似法	(26)
§ 3-4 连分式法	(28)
§ 3-5 混合法: 帕德-模态法	(30)
§ 3-6 MIMO系统的简化(降阶)	(31)
§ 3-6-1 矩阵连分式法	(31)
§ 3-6-2 模态-连分式法	(32)
§ 3-6-3 帕德-模态法	(32)
§ 3-7 关于模型简化(降阶)理论的几点评注	(34)
第四章 大系统的递阶控制	(35)
§ 4-1 引言	(35)
§ 4-2 连续时间系统的开环递阶控制	(37)
§ 4-2-1 线性系统的二级协调	(38)
§ 4-2-2 关联预估法	(42)
§ 4-2-3 目标协调法与奇异性	(47)

§ 4-3 连续时间系统的闭环递阶控制	(50)
§ 4-3-1 用关联预估法的闭环控制	(50)
§ 4-3-2 用结构摄动法的闭环控制	(52)
§ 4-4 离散时间系统的递阶控制	(57)
§ 4-4-1 离散时间系统的三级协调	(57)
§ 4-4-2 具有时滞的离散时间系统	(62)
§ 4-4-3 离散时间系统的关联预估法	(64)
§ 4-4-4 结构摄动法	(67)
第五章 大系统分散控制	(72)
§ 5-1 引言	(72)
§ 5-2 分散镇定	(73)
§ 5-2-1 集中控制中关于镇定的主要结果	(73)
§ 5-2-2 问题的叙述	(74)
§ 5-2-3 固定多项式和固定模	(75)
§ 5-2-4 用动态补偿使系统镇定	(78)
§ 5-2-5 用多级控制使系统镇定	(81)
§ 5-2-6 指数镇定	(85)
§ 5-3 分散鲁棒控制	(89)
§ 5-3-1 问题的叙述	(89)
§ 5-3-2 约束与定义	(90)
§ 5-3-3 稳态跟踪增益矩阵及其计算	(90)
§ 5-3-4 分散鲁棒控制器的存在性	(93)
§ 5-3-5 分散鲁棒控制器的综合	(96)
第六章 大系统的次优设计	(100)
§ 6-1 线性定常大系统的次优控制	(100)
§ 6-1-1 集结法	(100)
§ 6-1-2 摄动法	(102)
§ 6-1-3 分散控制法	(111)
§ 6-2 非线性大系统的次优控制	(114)
§ 6-3 时滞大系统的次优控制	(121)
§ 6-3-1 耦合时滞大系统的次优控制	(122)
§ 6-3-2 串联时滞系统的次优控制	(129)
第七章 大型控制系统的镇定理论	(134)
§ 7-1 问题的提出	(134)
§ 7-2 大型定常线性控制系统的镇定理论	(135)
§ 7-3 大型时变线性控制系统的镇定理论	(142)
第八章 具有滞后的控制系统的镇定	(152)
§ 8-1 问题的提出	(152)

§ 8-2 在闭环情形下, 定常线性控制系统与具有滞后的定常线性控制系统 在镇定理论中的等价性	(153)
§ 8-3 在闭环情形下, 时变线性控制系统与具有滞后的时变线性控制系统 在镇定理论中的等价性	(157)
§ 8-4 在开环情形下, 定常线性控制系统与具有滞后的定常线性控制系统 在镇定理论中的等价性	(161)
§ 8-5 在开环情形下, 时变线性控制系统与具有滞后的时变线性控制系统 在镇定理论中的等价性	(166)
§ 8-6 具有滞后的控制系统的无条件镇定	(172)
第九章 大系统稳定性的新方法	(180)
§ 9-1 代数方程的根具有负实部的判定	(180)
§ 9-2 $n \leq 8$ 时, 可取 α_n^* 的数值估计	(183)
第十章 离散系统李雅普诺夫函数的构造	(187)
§ 10-1 几个辅助定理	(187)
§ 10-2 常系数线性离散系统李雅普诺夫函数的存在性	(192)
§ 10-3 线性离散系统的李雅普诺夫函数公式	(195)
§ 10-4 例子	(199)
§ 10-5 时变离散系统的李雅普诺夫函数公式	(203)
第十一章 离散系统的比较原理及其在离散大系统稳定性中的应用	(209)
§ 11-1 线性与非线性离散系统的比较原理	(209)
§ 11-2 比较原理在离散大系统稳定性中的应用	(211)
§ 11-2-1 n 阶线性定常离散大系统的稳定性	(211)
§ 11-2-2 非线性离散大系统的稳定性	(214)
§ 11-3 比较原理在时变离散大系统的稳定性中的应用	(216)
§ 11-3-1 三阶线性时变离散大系统的模型集结及其不稳定性	(216)
§ 11-3-2 n 阶线性时变离散大系统的模型集结及其不稳定性	(218)
第十二章 离散大系统的结构与关联稳定性	(224)
§ 12-1 离散大系统的结构与关联稳定性的概念	(224)
§ 12-2 几个辅助引理	(226)
§ 12-3 线性离散大系统的关联稳定性	(229)
§ 12-3-1 线性定常离散大系统的关联稳定性	(229)
§ 12-3-2 线性时变离散大系统的关联稳定性	(232)
§ 12-4 具有缓变系数的线性离散大系统的关联稳定性	(234)
§ 12-4-1 $n=2$ 时具有缓变系数的线性离散系统的关联稳定性	(234)
§ 12-4-2 一般具有缓变系数的线性离散大系统的关联稳定性	(236)
第十三章 具有无穷滞后的离散大系统的无条件稳定	(240)
§ 13-1 问题的提出	(240)
§ 13-2 具有滞后的离散大系统的无条件稳定性	(240)

§ 13-2-1 滞后离散系统的比较原理	(240)
§ 13-2-2 滞后离散大系统的无条件稳定性的充分条件	(241)
§ 13-3 具有无穷滞后离散大系统的无条件稳定性的充要条件及其 代数判定	(244)
第十四章 滞后大系统的无条件关联稳定性	(254)
§ 14-1 多滞后线性系统的无条件稳定性的代数判定	(254)
§ 14-2 具有滞后时变大系统的结构与无条件的关联稳定性	(258)
§ 14-2-1 预备知识	(259)
§ 14-2-2 具有滞后时变大系统的无条件关联稳定性	(261)
§ 14-3 具有滞后时变大系统的结构与关联不稳定性	(265)

第一章 概 论

在工业、能源、交通、水利、经济组织及管理中,有许许多多比较复杂的大规模的生产和管理系统,我们把这种系统称为大系统。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)大系统有递阶(多级)和分散的信息结构。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、模型简化、控制、稳定性、最优化和镇定等。能否解决这样的大系统的问题,对发展国民经济有重大的意义。但是这些问题的整体一揽子式的解决方法在数学上是难以对付的;退一步讲,一揽子式解决方法即便在数学上是可行的,在技术上往往是不可取的。随着工业过程的改变和进步,一揽子式解决办法不一定是最优的解决办法。

在国际上,从1962年起,尤其是70年代以来,很多人在探索能否简化大系统的稳定性和最优控制等问题;能否通过分别解决大系统中各自较为独立且又相互制约的子系统的稳定性和最优化等问题,来达到整个系统的整体稳定性和整体最优化等的目的。所以,大系统的论题已经成为一些国际性学术会议的议题,如1975年在美国召开的第六届国际自控联(IFAC)大会,在331篇论文中与大系统有关的就有90篇;1978年在芬兰召开的第七届IFAC大会,在300多篇论文中涉及大系统的有1/4;国际自控联召开了三届大系统学术会议(第一届是1976年在意大利乌第纳;第二届是1980年在法国图鲁兹;第三届是1986年在瑞士泽里奇)。1987年前的上述有关文献可在下列著作中找到。Singh^[1], Singh和Titli^[2], Siljak^[3], Michel和Miller^[4], Vidyasagar^[5], Jamshidi^[6], Mahmoud^[7]等。但上述作者几乎没有了解我国学者在大系统理论与应用方面的成果,如万百五^[8,9]、高为炳、刘永清等人。所以,本书除了介绍Singh、Jamshidi等人在大系统理论方面的近代成果外,本书着重介绍我国大型动力系统稳定性理论与应用的最近工作,特别是作者本人的工作。为此,下面我们只介绍国内大型动力系统稳定性和镇定方面的研究成果。

§ 1-1 概 况

1959年秦元勋在研究飞机的自动驾驶仪的设计中,从工程技术工作者的处理方法中提升出大型动力系统的稳定性分解概念^[10]:

- (1) 由子系统的稳定性代替等于大系统的稳定性;
- (2) 由部分子系统为稳定或部分不稳定,如何通过参数选取,推出整个大系统为稳定。

1959年王慕秋给出了线性常微分方程组的分解^[10]。同年,刘永清在研究升船机的

电力拖动控制的非线性系统时,首次提出了标量和李雅普诺夫函数分解法^[11, 12]。以秦元勋教授为主的大系统稳定性的研究,当时,在国内外属开创性的工作。

“文革”期间,国内中断了这个课题的研究。国外,1966年Bailey^[13]首次用向量李雅普诺夫函数法研究了大系统的稳定性。Thompson提出了加权和的标量李雅普诺夫函数法^[14],在1970年之后,国际上对大系统稳定性研究便活跃起来了。1983年Michel作了“关联稳定性研究的现状”的重要综述^[15]。

在我国,与大系统稳定性有关的专著有:刘永清、宋中昆著:大型动力系统的理论与应用——分解、稳定与结构^[16];刘永清、徐维鼎著:大型动力系统的理论与应用——建模、镇定与控制^[17];廖晓昕著:稳定性的数学理论及应用^[18](其中10-12章);王联、王慕秋、孙振绮、唐贤英编著:离散动力系统的稳定性中部分章节。^[19]综述性论文有:大系统在稳定性理论中的分解问题^[20]及化工大系统的稳定性^[21];大系统最优控制和稳定性分析的某些方法^[22];涉及大系统稳定性的综述有:近十年来李雅普诺夫稳定性理论的发展^[23];近年来国内常微分方程稳定性理论的发展^[24];应用李雅普诺夫直接方法研究电力系统的暂态稳定性(综述)^[25],大型动力系统稳定性理论与应用^[176-177]等。

§ 1-2 大系统的稳定性

1975年王慕秋应用向量李雅普诺夫函数法给出了稳定性参数域之扩大^[26],并在^[27]中得到了向量李雅普诺夫函数法较标量和李雅普诺夫函数分解法参数稳定域更大的论断。1985年钱振英得到对滞后定常线性大系统的稳定参数域向量法最大,加权法和的标量法次之,李雅普诺夫函数分解法最小的类似结论^[28]。张泽绵^[29]、陈潮填^[30]分别用向量法、加权法和的标量法扩大了多台电机大系统的参数稳定域。郭齐斌也用向量法给出了大型控制系统镇定参数域之扩大^[31, 32]。此外,许多作者采用向量李雅普诺夫函数法给出了很多成果,如田秀恭考虑了缓变系数的情形^[33],王慕秋、田秀恭还考虑了时变对称子矩阵的情形^[34],王慕秋、王联^[35-37]、钟益林^[38]、辜建德^[39]、徐道义^[40]、田秀恭、王慕秋^[41]、陈彭年^[42]、吴文珍^[43]、苏美玉^[44]、徐维鼎^[45]、阮士贵^[46]等给出了大系统稳定性的一些研究结果。

1985年刘永清提出了大系统参数稳定域的最优化问题。刘永清、陈潮填给出了参数稳定域最优的一种解决方法^[47, 48],即关联参数满足大系统的路斯霍尔维茨条件时,所表达的参数域就是大系统最优参数稳定域。并且得到了加权法和的标量李雅普诺夫函数法稳定域最大,向量法次之,李雅普诺夫函数分解法更次之。我们称具有最优参数稳定域的大系统为强关联大系统;否则称为弱关联大系统。它的保守性较大。并就二维定常线性复合系统为例,用加权法和的标量李雅普诺夫函数法得到了关联参数最优稳定域为: $a_{12} \cdot a_{21} < a_{11} a_{22}$;向量法得到的关联参数稳定域为: $|a_{12} a_{21}| < a_{11} a_{22}$ 。高为炳利用矩阵范数与测度^[49],廖晓昕应用迭代法^[50-52],张炳根、张鸿亮对随机复合系统的稳定性^[53, 54]分别做了工作。1984年王联、王慕秋给出了线性缓变系统的平稳振荡^[55]。同年,吕绍明、陆志奇、苏美玉、王美娟也研究了大系统的平稳振荡^[56-58],叶大卫研究了鲁里

叶型大系统全局指数稳定性^[61]。其后王联、王慕秋^[62]、叶大卫^[63]研究了大系统部分变元稳定性。郑列列、贺建勋用平衡结构法^[64]；张毅用常数变易法^[65]；唐贤英、刘会成用代数运算^[66]也给出了大系统稳定性的工作。陈彭年研究了连续大系统的实用稳定性^[42]，贺建勋较系统地研究了不连续大系统的实用稳定性及强实用性^[67-71]。此外，腾志东^[72]、廖晓昕、邓宗琦^[73]、章毅^[74]、林小东^[75]分别研究了大系统的稳定性。张泽绵、张鸿亮^[76]，刘永清、宋中昆^[77]，刘永清、刘金宪^[78, 79]，唐功友、刘永清^[80-83]，唐功友^[84]，刘金宪、刘永清、唐功友^[85]分别在线性、非线性、时变大系统的稳定性给出了一些研究结果。

§ 1-3 离散大系统的稳定性

离散系统的稳定性就是迭代系统的收敛性，它也是计算技术的机理。1980年采用标量化的李雅普诺夫函数法，刘永清给出了定常离散大系统的稳定性^[86]。1981年王慕秋、刘永清、王联将定常离散系统 $X(k+1) = PX(k)$ 的二次型 V 函数的构造和连续系统 $\dot{x} = Ax$ 联系起来，建立了线性定常离散系统的二次型李雅普诺夫函数公式，并给出了线性定常离散大系统的稳定性^[87]。1982年唐功友直接由离散型李雅普诺夫线性矩阵方程： $P^TRP - R = C$ 及其降阶法，分别构造了二次型正定 V 函数，并证明了二次型 V 函数的存在性、唯一性基本定理^[88, 89]。1984年刘永清、刘金宪建立了定常线性离散系统的 m 次派生行列式的根 λ 与基本行列式的根 μ 之间的关系 $\lambda = \mu_1^{n_1}\mu_2^{n_2}\cdots\mu_r^{n_r} - 1$ ，并证明了 m 次型 V 函数的存在性、唯一性及其明显公式的构造^[90, 91]。1984年刘永清、唐功友给出了线性时变离散系统的二次型 V 函数的存在性、唯一性基本定理及明显公式^[92, 93]，刘金宪建立了范数型 V 函数公式^[94]。1982年冯恩波^[95]、徐道义^[96]分别在不同地方采用不同方法都建立了相同的线性定常离散系统的比较原理。1983年他们又建立了非线性离散系统的比较原理^[97]，张钟俊、钱振英进而建立了滞后离散系统的比较原理^[98]。

1983年7—8月全国大系统稳定性与应用讲习班上，刘永清提出了对时变线性离散系统稳定性的反例问题。刘允生、林海明^[99]等分别构造了时变离散系统稳定性的反例。特征根都在单位圆内，由通解公式给出时变离散系统的零解是不稳定的；特征根可以在单位圆外，由通解公式给出零解是渐近稳定的。因此，这就指出了时变线性系统的稳定性也像时变线性连续系统一样具有复杂性及难度。刘永清、王慕秋、王联、唐功友、刘金宪、冯恩波应用作者构造的李雅普诺夫函数公式、比较原理、结合标量化的李雅普诺夫函数法和向量李雅普诺夫函数法给出了线性、非线性、时变、定常离散大系统的一系列的结果^[100-108]。

1984年刘永清从实际问题提出了离散大系统的结构与关联稳定性概念，并与张鸿亮一起系统地研究了线性、非线性、定常、时变、缓变、含小参数、系数有界、模型集结等离散大系统的结构与关联稳定性^[109-117]。

王慕秋、王联给出了离散大系统在结构扰动下的稳定性^[118]。1986年刘永清提出了离散系统在临界情形下的第一、二临界情形概念，并与唐功友、刘金宪一起给出了非线性

性定常离散系统在第一临界情形下稳定的充分必要条件^[119]。

§ 1-4 滞后大系统的稳定性

1974年刘永清从化工测量仪表系统提出了变滞后的离散系统,并证明了解的存在性、唯一性、收敛性^[120];又在1978年提出研究具有变滞后的化工多变量控制系统的解的存在性、唯一性、收敛性^[121]。1976年刘永清提出将标量和的李雅普诺夫函数分解法与1957—1960年间秦元勋、刘永清、王联创建的在稳定性理论中微分方程与微分差分方程等价性两类方法相结合的“李雅普诺夫分解等价法”,研究具有滞后的定常、时变、缓变(与宋中昆合作)大系统的稳定性^[122-126]。1985—1987年刘永清、刘金宪利用1958—1959年间秦元勋、刘永清创建的任意滞后系统无条件稳定的方法结合导数不连续的 V 函数,研究了具有任意滞后的时变大系统的模型集结的无条件稳定性^[127-129],及任意滞后的时变大系统的无条件稳定性^[130, 131]。刘永清、唐功友给出多滞后大系统的无条件稳定性^[132]。蔡维旋研究了滞后大系统的稳定性及关联结构稳定性^[133]。廖晓昕给出了中立型大系统的稳定性^[134]。田秀恭、王慕秋^[135]、章毅^[136]也分别给出时变、非线性滞后大系统的稳定性。谢胜利、葛嘉浩、张鸿亮、张泽绵、钟守铭也分别研究了中立型、调节型滞后大系统的稳定性^[137]。斯力更对中立型系统进行了系统的研究^[138]。

控制系统的信号传递总是有滞后,描述它们的模型是控制函数的微分方程,一般是无穷维问题,故难度较大。工程师们常常采用理论上和方法上已经成熟的不带滞后的控制系统来代替它们,但在什么条件下,在多大范围内可以代替是缺乏理论根据的。1982年刘永清将秦元勋等价性的思想方法扩展到滞后线性闭环控制系统上来,给出了滞后线性控制系统

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + A_2 x(t - \tau) + Bu(t) \quad (\tau = \tau_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

与无滞后的控制系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad y(t) = Cx(t)$$

在镇定(稳定化)理论上的等价性 (A 、 B 、 C 为定常或时变矩阵)^[139, 140]。在实际情形中不仅有闭环控制系统产生滞后;而且还有开环控制系统产生滞后,如物料作为控制量时,控制量产生滞后,由于检测仪表的成份分析及间歇取样也可使输出产生滞后。因此,刘永清、朱学峰研究了滞后开环控制系统:^[141, 142]

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + A_2 x(t - \tau^{(1)}) + B_1 u(t) + B_2 u(t - \tau^{(2)})$$

$$y(t) = C_1 x(t) + C_2 x(t - \tau^{(3)})$$

与无滞后的开环控制系统在镇定理论中的等价性 (其中 $\tau^{(1)} = \tau_{ij}^{(1)} \geq 0$, $\tau^{(2)} = \tau_{ij}^{(2)} \geq 0$, $\tau^{(3)} = \tau_{ij}^{(3)} \geq 0$, $i, j = 1, 2, \dots, n$, $s = 1, 2, \dots, m$, $r = 1, 2, \dots, p$; A , B , C 是定常或时变矩阵)。并将上述等价性问题推广到非线性滞后控制系统及滞后控制大系统上去^[143-147]。在实际情形中,控制系统的滞后有时是未知的或不确切已知的或是大滞后的情形,这就

需要研究任意滞后或无穷滞后的情形。1986年刘永清提出了无条件镇定的概念,并与郭齐斌、唐功友一起研究了在任意滞后下控制系统的无条件镇定^[148]。

对滞后控制系统镇定问题的另一种研究方法是把这个问题化归到抽象代数环上,代数系统拓扑结构的问题国际上已有不少工作。如 Sontag、Kamen 分别给出了这方面的总结性论文^[149-151];国内的涂逢生和由克伟都有系统的工作。

1979年Haderler给出生物学中的滞后方程^[152]。1979年Hale给出无穷滞后型方程^[153]及Corduneanu 和 Lakshmikantham 给出无穷滞后方程的综述^[154]。这些都刊在湖南大学科技译丛泛函微分方程译文专辑上。

§ 1-5 大系统稳定性理论的应用

1981年刘永清给出了化工大系统及反应器的稳定性^[155]。陈潮填研究了带夹套的连续搅拌槽反应器大系统的稳定性^[156]。蔡广基给出了带夹套的 n 个连续搅拌槽反应器大系统的稳定性^[157]。

刘永清、宋中昆给出了多台电机大系统的稳定性^[158]。张泽绵^[28]、陈潮填^[80]分别用向量法及加权标量的李雅普诺夫函数给出了多台电机大系统的稳定性。刘永清、陈潮填^[159]、刘永清、张鸿亮、韩玲展、陈维汉、冯镜祥分别考虑了均匀调速的多机组电力大系统^[160]、一致阻尼的电力大系统^[161]、非一致阻尼的电力大系统的稳定性^[162]。

1983—1984年刘永清考虑了秦元勋提出的大系统稳定性的第二个特性:即部分子系统稳定;部分不稳定,如何通过选取参数使整个大系统稳定。对孤立子系统的的状态方程:

$$\dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t)$$

部分子系统稳定,部分不稳定,总可以选取控制函数 $u_i(t) = K_i x_i(t)$,由孤立控制子系统的

$$\dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_i u_i(t)$$

的稳定性推出大系统

$$\dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_i u_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^m A_{ij}x_j(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^m B_{ij}u_j(t)$$

的稳定性(分定常、时变两种情况)。这里采用了标量李雅普诺夫函数分解法及由Riccati矩阵方程或Riccati矩阵微分方程的对称正定解 P ,构造了定常、时变二次型 V 函数,使大系统达到镇定^[163-165]。高为炳研究了大系统的多层结构、稳定性与镇定^[166, 167]及分散控制^[168]。徐维鼎研究了多重反馈大系统的镇定及其稳定域之估计^[169]。

化工测量仪表系统、化工多变量控制系统、滞后控制系统及滞后控制大系统已在上一节中给出了简述。

在社会经济系统中,经济决策不仅影响当前的行为,对今后相当长的一段时间内的经济情况也有不同程度的影响。经济系统的动态特性可用下述滞后离散系统来描述

$$X(k+1) = f(k, X(k), X(k-1), \dots, X(k-N))$$

这里采样周期与滞后 N 成整数倍。1985年张钟俊、钱振英用 M 矩阵法给出了滞后离散大

系统无条件稳定的充分条件。当连续控制对象经过离散化时,传递滞后不与采样周期成整数倍时,就可能出现非最小相位问题。也就是可能为不稳定的,为此,刘永清、李才根考虑了

$$X(k+1) = AZ(k) + BZ(k-\mu) \quad (\mu = \mu_{ij} \geq 0, i, j = 1, \dots, n)$$

给出了当滞后 μ 与采样周期成整数倍、分数倍、无理数倍时,滞后离散系统无条件稳定的充分必要条件^[170],并把它的超越特征方程的根在单位园内的判定化归为代数方程来解决。

周之铭、王寿松对生态大系统的稳定性进行了系统的研究。周之铭应用有向图法研究了 n 维捕食与被捕食的广义Valterra型极限集与周期解^[171, 172]。王寿松给出对两个相互作用的群落大系统的稳定性^[173]。朱思铭、周之铭给出Valterra型捕食与被捕食者系统的计算机处理^[174]。王寿松研究了一类生态系统的稳定性^[175],以及Hadelier介绍了生物学中的滞后系统。

§ 1-6 结 束 语

总结以上成果看来,尽管大系统稳定性的研究工作尚在进行,但大系统稳定性理论工作从国际上来看,已达到了一个相当全面和本质的水平。今后对大系统稳定性的工作理论上应赋予新思想、新观点、新方法,从而开辟研究的新课题、新领域。不是强调一般适用性的理论研究,而是向着减少关联项的保守性与实际应用相结合的研究,特别是和计算机辅助设计、计算方法结合起来的研究。使大系统的稳定性理论研究真正在工程实际中发挥效益。

参 考 文 献

- [1] Singh M.G., Decentralised Control, North-Holland Publishing Company 1981.(有中译本)
- [2] Singh M.G., Titli A., Systems, Decomposition, Optimization and Control, Pergamon Press. 1978.(有中译本)
- [3] Siljak D.D., Large-Scale Dynamic Systems, Elsevier North-Holland, 1978.
- [4] Michel A.N., Miller R.K., Qualitative Analysis of Large-Scale Dynamics Systems, 1977.
- [5] Vidyasagar M., Input-Output Analysis of Large-Scale Interconnected Systems, 1981.
- [6] Jamshidi, M., Large-Scale Systems Modelling and Control, North-Holland, 1983.
- [7] Mahmoud M.S. etc., Large-Scale Control Systems—Theories and Techniques, 1985.

- [8] 万百五, Roberts P.D., 稳态大系统中采用局部反馈的价格协调,《控制理论与应用》Vol.1.1984.34—44.
- [9] 万百五, 大系统理论中的波兰 Findeisen 学派.《自动化学报》Vol10;2, 1984, 173—181.
- [10] 王慕秋, 科学纪录, 新辑Vol4, No.1 1960(俄文).
- [11] 刘永清等, 北京第一届全国微分方程学术会议宣读.
- [12] 刘永清, 自动化学报, Vol3;2, 1965, 178—182.
- [13] Bailey F.N., J.SIAM Control. SerA, 1966, 443—462.
- [14] Thompson W.E. IEEE Trans A.C., Vol15, 1970, 504—506.
- [15] Michel A.M. IEEE Trans A.C., Vol28;6 1983 639—653.
- [16] 刘永清、宋中昆著, 大型动力系统的理论与应用——分解、稳定与结构, 华南工学院出版社, 1988.
- [17] 刘永清、徐维鼎著, 大型动力系统的理论与应用——建模、镇定与控制 华南理工大学出版社, 1989.3. .
- [18] 廖晓昕著, 稳定性的数学理论及应用, 华中师大出版社, 1988.
- [19] 王联、王慕秋、孙振绮、唐贤英编著, 离散动力系统的稳定性, 天津科技出版社, 1988.
- [20] 刘永清, 化学工程第三届全国学术会议及全国化学工程学会会议 1981.
- [21] 刘永清, 控制理论与应用, Vol3;3, 1986, 13—23.
- [22] 贺建勋、曾昭盘, 应用数学与计算数学, 1981, No.5—6.
- [23] 朱思铭、叶思源, 应用数学与计算数学, 1981, No.3.
- [24] 朱思铭, 常微分方程稳定性与控制论学术会议, 1987.11.武汉.
- [25] 徐维鼎, 上海机械学院学报, 1982, 93—108.
- [26] 王慕秋, 数学学报, Vol18;2, 1975, 107—122.
- [27] 秦元勋、王慕秋、王联著, 运动稳定性理论与应用, 科学出版社, 1981.
- [28] 钱振英, 上海交大自控系博士学位论文, 1985. 16—17.
- [29] 张泽绵, 华南工学院学报, Vol12;12, 1984, 91—107.
- [30] 陈潮填, 控制理论与应用, Vol3;3, 1986, 107—113.
- [31] 郭齐斌, 山东化工学院学报, 1984第2期, 1—13.
- [32] 郭齐斌, 控制理论与应用, Vol2;4, 1985, 21—33.
- [33] 田秀恭, 南开大学学报, 1982第2期, 33—47.
- [34] 王慕秋、田秀恭, 应用数学学报, Vol6;4, 1986.
- [35] 王慕秋、王联, 科学通报, Vol29;3, 19849.
- [36] 王慕秋、王联, 数学研究与评论, Vol5;4, 1985.
- [37] 王慕秋、王联, 控制理论与应用, Vol1;3.1984.
- [38] 钟益林, 常德师专学报, 1983, 1—19.
- [39] 辜建德, 控制理论与应用, Vol2;2, 1985, 108—113.
- [40] 徐道义, 科学通报, Vol28;3, 1983.
- [41] 田秀恭、王慕秋, 应用数学学报, Vol8;2, 1985.
- [42] 陈彭年, 控制理论与应用, Vol1;3, 1984, 48—59.
- [43] 吴文珍, 控制理论与应用, Vol2;4, 1985, 21—33.
- [44] 苏美玉, 新乡师院学报, 1984第一期.
- [45] 徐维鼎, 上海机械学院学报, 1983第2期, 89—104.

- [46] 阮士贵, 武汉工学院学报, 1982, 第1期, 33—47.
- [47] 陈潮填、刘永清, 广州应用数学学会宣读, 1986.6.
- [48] Chen Chao-Tian and Liu Yongqing, Inquiry into the Optimal Domain of Stability. 西德 Karlsruhe, 1987.7 召开的建模与仿真国际会议论文集、第1卷. Advance in Modelling and Simulation Vol12:4, 1988 47—63.
- [49] 高为炳, 控制理论与应用, Vol3:1, 1986, 16—24.
- [50] 廖晓昕, 科学通报, Vol27:1~2, 1982, 1027—1032, 151—154.
- [51] 廖晓昕, 数学研究与评论, Vol4:3, 1984, 64—68.
- [52] 廖晓昕, 高等数学及计算数学学报, 1983, 第1期, 68—70.
- [53] 张炳根, 数学研究与评论, Vol3:4, 1983, 55—62.
- [54] 张鸿亮, 华南工学院学报, Vol11:3, 1983, 103—112.
- [55] 王联、王慕秋, 中国科学院研究生学报, 1984.
- [56] 吕绍明、王联、王慕秋, 新乡师院学报, 1984, 第1期.
- [37] 吕绍明、陆志奇, 新乡师院学报, 1984, 第3期.
- [58] 吕绍明、苏美玉, 新乡师院学报, 1985, 第2期.
- [59] 王美娟, 应用数数学报, Vol8:4, 1955.
- [60] 王美娟, 上海机械学院学报, Vol8:4, 1986.
- [61] 叶大卫, 数学杂志, Vol4:4, 1984.
- [62] 王联、王慕秋, 东北师大学报, 1983, 第4期.
- [63] 叶大卫, 数学研究与评论, Vol6:3, 1986.
- [64] 郑列列、贺建勋, 厦门大学学报, Vol25:4, 1986.
- [65] 张毅, 控制理论与应用, Vol4:3, 1987.
- [66] 唐贤英、刘会成, 湖南数学年刊, Vol6:1, 1986.
- [67] Huao Jianxun, 第九届国际自控联大会, 1984.
- [68] Huao Jianxun, Proceeding of IEEE International Conference on SMC, 1985, Tucson, 286—290.
- [69] Huao Jianxun, Large Scale Systems Theory and Applications 1986, Vol I, Zurich, 200—204.
- [70] 贺建勋, 中国科学A辑, 1987, 第4期.
- [71] 贺建勋, 控制理论与应用全国第六届学术会议论文集上册, 349—352, 1986.9.
- [72] 腾志东, 新疆大学学报, 1986年第4期, 38—43.
- [73] 廖晓昕、邓宗琦, 华中师大学报, Vol21:1, 1987.
- [74] 章毅, 辽宁师大学报, 1985第3期, 5—12.
- [75] 林小东, 福州大学学报, 1985第3期, 16—22.
- [76] 张泽绵、张鸿亮, 华南工学院学报, Vol10:2, 1982, 39—50.
- [77] 刘永清、宋中昆, 中美双边国际控制会议论文集, 1982, 460—468.
- [78] Liu Yongqing, Liu Jinxian, Stability of Linear Time Dependent Continuous Large Scale Systems, Inter. Conf. on Modelling and Simulation, Italy, 1986 Advances in Modelling & Simulation, Vol 9:2, 1987, 29—37.
- [79] Liu Yongqing Liu Jinxian, 同[78]. Advances in Modelling & Simulation, Vol9:2, 1987, 37—47.
- [80] Tang Gongyou Liu Yongqing, The Application of Comparison Principle in the