



大型动力系统的理论与应用

滞后·稳定与控制
卷3

刘永清 唐功友 著
华南理工大学出版社

THEORY AND
APPLICATION
OF LARGE-SCALE
DYNAMIC SYSTEMS

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)——建模、镇定与控制(卷2)》的续篇。

书中系统地介绍了作者近期研究的滞后大系统的稳定、镇定与控制,及滞后大系统的建模和工程应用的新成果。

本书可作为理工、师范院校的应用数学、自动控制、系统工程、管理工程等专业的高年级学生,研究生教材;也可供有关工程技术人员参考。

大型动力系统的理论与应用(卷3)的研究和撰稿工作,是在国家自然科学基金的第三次连续性资助下完成的。

责任编辑 黄 敏

封面设计 吴俊卿

〔粤〕新登字 12 号

大型动力系统的理论与应用

——滞后、稳定与控制

卷 3

刘永清 唐功友 著

华南理工大学出版社出版发行

各地新华书店经销

广州红旗印刷厂印装

787×1092 毫米 16 开本 印张: 19.5 字数: 437 千

1992 年 6 月第 1 版 1992 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—3000

ISBN 7-5623-0334-7/TP·22 (课)

定价: 5.00 元

献 给

秦元勋教授七十寿辰

纪 念

作者简介



刘永清 华南理工大学教授,博士生导师。1955年毕业于复旦大学数学系;1973—1976年在华南工学院学习化工仪表自动化第二专业。先后曾在中国科学院数学研究所(1955—1962)、暨南大学(1962—1970)、华南师范大学(1970—1972)、华南理工大学(1973—)数学系、自动化系工作。1957—1992年间在国内外发表论文236篇,其中34篇收入美国工程索引(EI),40篇收入英国科学文摘(SCA)。已出版《大型动力系统的理论与应用》卷1和卷2、现代科学管理与计算机程序(包括合作者)等著作。1980—1991年间获省部委八项科技奖。1984年10月被国家人事部授予国家级首批中青年有突出贡献专家;1990年12月被国家教委、国家科委授予“全国高校先进科技工作者”称号,并经国家人事部批准享受政府特殊津贴。1988年国家科委、光明日报将他的“小传”编入《中国科技人物辞典》、《建国四十周年当代中国科学技术成就大典》中。1986年法国企业的建模与仿真技术学会吸收他为会员及AMSE建模、仿真与控制等五个学术刊物编委;及美国数学译论的评论员;IEEE会员。他还被吸收为美国传记研究会(ABI)理事、英国剑桥国际传记学会理事(IBC)。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年第2版;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年第1版。此外,他还被列入“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”等名人录辞典中。



唐功友 青岛海洋大学计算机科学系讲师。1982年1月毕业于山东化工学院自动化系,毕业后留校任教。1982年至1984年在华南理工大学自动化系进修硕士研究生课程。1988年考入华南理工大学自动化系的博士研究生,于1991年获得博士学位。1982年在导师刘永清教授的指导下开始从事大系统稳定性与控制研究。10年来,在国内外发表学术论文40余篇。1986年和1989年分别获得国家教委科技进步二等奖和山东省科协优秀学术成果二等奖(包括合作)。

ABD 52/06

前 言

《大型动力系统的理论与应用——滞后、稳定性与控制》(卷3),是《大型动力系统的理论与应用——分解、稳定与结构》(卷1)和《大型动力系统的理论与应用——建模、镇定与控制》(卷2)的续篇。

著名科学家钱学森指出:“研究大系统控制理论是十分必要的,这是因为在我们建设社会主义改造客观世界的伟大实践中,许多问题涉及到大系统的控制理论。”“大系统控制论作为一门技术科学,它的目的就是为了解决实际问题。”(见《系统工程》(增订本),湖南科技出版社,1988年增版)

与本书有关的课题研究及成书是1957—1960年间,秦元勋、刘永清、王联从研究火箭发动机燃烧滞后控制系统的不稳定性,及1959年秦元勋、王慕秋、刘永清从工程实际首次开展的大型动力系统稳定性领域研究的深化与扩大,包括刘永清在滞后大系统的稳定、镇定与控制方面的近期研究工作、唐功友讲师在博士学位期间的研究工作以及刘永清与外籍博士生 Paul K. C. Chian 等人的研究工作。其中有:多组多滞后连续系统的比较原理;多组实数滞后离散系统的比较原理;多组多滞后连续、离散系统的无条件稳定性、无条件镇定与鲁棒性;比较原理结合李雅普诺夫方法、大系统李雅普诺夫函数分解法、分解等价法在带有滞后的线性、非线性、不确定性、定常、时变、区间系数、连续、离散、控制大系统的稳定、镇定、鲁棒性;滞后大系统的稳定、镇定的计算机算法、仿真;以及对滞后大系统的应用;滞后复合系统的变结构控制的稳定性与综合等方面的研究工作,给出了系统的总结。其中已有34篇论文被收入美国工程索引(EI),40篇论文被收入英国科学文摘(SCA),多篇收入苏联文摘杂志、美国计算机与控制文摘及美国数学评论的控制论主题域中。

书中以作者研究工作为主,也介绍了 Valek—Zavarei 及 Jamshidi 等在滞后系统的可控性、可观测性、最优及次优控制。

书中既突出了滞后大系统的工程应用,也兼顾了数学理论上的严密性,缩小了大系统理论与应用之间的“巨大间隙”。我们相信本书的出版,将有助于推动大系统控制理论研究的深化及在国家建设中的应用,并有利于该学科教学工作的开展。

在华南理工大学领导以及华南理工大学出版社的支持帮助下,本书能在较短的时间内出版,及时地提供1992年8月在烟台举行的第三次大系统讲习班应用。对此,在此表示深切感谢。

与本书有关的课题的研究和撰稿工作,是在国家自然科学基金第三次连续性资助下完成的,在此表示衷心谢意。

多年来在大系统的研究工作中,得到了秦元勋教授的热情指导与帮助,愿以此书作为对老师秦元勋教授七十寿辰纪念。

刘永清 1992年6月

目 录

第一章 滞后大系统总论	(1)
§ 1-1 概况	(1)
§ 1-2 滞后大系统的工程问题实例	(2)
§ 1-3 系统的分类与本书基本内容	(4)
§ 1-4 滞后大系统的稳定、镇定与次优控制方法	(7)
参考文献	(9)
第二章 滞后大系统的建模	(10)
§ 2-1 控制工程中滞后大系统的建模	(10)
§ 2-2 滞后控制大系统的状态空间模型	(12)
§ 2-3 滞后控制大系统的频域模型	(14)
§ 2-4 滞后非线性控制系统的线性化	(18)
§ 2-5 滞后大系统的建模	(19)
参考文献	(30)
第三章 多组滞后连续系统的比较原理与无条件稳定性	(31)
§ 3-1 多组滞后连续系统的比较原理	(31)
§ 3-2 比较原理在多滞后时变连续系统稳定性中的应用	(40)
§ 3-3 滞后线性定常连续系统无条件稳定的频域法	(43)
§ 3-4 在稳定性理论中多组多滞后连续系统与单一滞后连续大系统的关系	(46)
参考文献	(48)
第四章 整数多组滞后离散系统的比较原理、无条件稳定性、计算机算法与仿真 ..	(49)
§ 4-1 非整数多组滞后离散系统的比较原理	(49)
§ 4-2 比较原理在多组非整数滞后时变离散系统无条件稳定性中的应用	(54)
§ 4-3 多组实数滞后离散系统无条件稳定性的频域法	(56)
§ 4-4 非整数滞后线性定常离散系统的稳定性的计算机算法与仿真	(60)
§ 4-5 在稳定性理论中多组非整数滞后离散系统与单一滞后离散大系统的关系 ..	(63)
参考文献	(64)
第五章 多组滞后连续控制系统的镇定	(65)
§ 5-1 多组滞后连续控制系统的镇定	(65)
§ 5-2 多组滞后连续控制系统的无条件镇定	(70)
§ 5-3 滞后中立型连续控制系统的镇定	(74)
§ 5-4 多组滞后区间系数线性连续控制系统的鲁棒镇定	(77)

参考文献	(80)
第六章 多组非整数滞后离散控制系统的镇定与计算机仿真	(82)
§ 6-1 多组非整数滞后线性定常离散控制系统的无条件镇定	(82)
§ 6-2 多组非整数滞后线性时变离散控制系统的无条件镇定	(85)
§ 6-3 多组实数滞后区间系数线性离散控制系统的鲁棒镇定	(91)
§ 6-4 多组非整数滞后线性定常离散控制系统镇定的计算机仿真	(96)
参考文献	(98)
第七章 滞后系统的最优控制	(100)
§ 7-1 滞后线性系统的可控性与可观测性	(100)
§ 7-2 滞后控制系统中的极大值原理	(106)
§ 7-3 广义 Riccati 方法	(108)
§ 7-4 滞后控制系统最优控制中的动态规划法	(112)
§ 7-5 滞后控制系统的时间最优控制	(114)
参考文献	(118)
第八章 滞后控制系统的次优控制	(119)
§ 8-1 滞后线性控制系统次优控制中的灵敏度法	(119)
§ 8-2 滞后线性控制系统次优控制中的无滞后转换法	(129)
§ 8-3 滞后线性控制系统次优控制中的李雅普诺夫泛函法	(133)
§ 8-4 滞后非线性控制系统的次优控制	(138)
§ 8-5 奇摄动法在滞后线性定常控制系统次优控制中的应用	(141)
§ 8-6 滞后线性最优控制系统参数偏差的灵敏度	(143)
参考文献	(145)
第九章 滞后大系统的稳定性	(147)
§ 9-1 滞后系统稳定性的新判据	(147)
§ 9-2 滞后大系统的稳定性	(158)
参考文献	(174)
第十章 有滞后的不确定性大系统的鲁棒稳定性	(175)
§ 10-1 滞后区间系数连续大系统的鲁棒稳定性	(175)
§ 10-2 滞后不确定性连续系统的鲁棒稳定性	(177)
§ 10-3 滞后不确定性连续大系统的鲁棒稳定性	(183)
§ 10-4 非整数滞后区间系数线性离散大系统的鲁棒稳定性	(189)
参考文献	(192)
第十一章 滞后控制大系统的镇定	(194)
§ 11-1 滞后连续控制大系统的分散镇定	(194)
§ 11-2 具有小滞后控制大系统的镇定	(199)
§ 11-3 滞后区间系数控制大系统的无条件鲁棒镇定	(204)
§ 11-4 多组滞后区间系数线性控制大系统的鲁棒镇定	(208)
参考文献	(214)

第十二章 滞后系统的变结构控制	(215)
§ 12-1 变结构系统的基本概念	(215)
§ 12-2 滞后系统的变结构控制	(219)
§ 12-3 滞后变结构控制系统的镇定与综合	(224)
参考文献	(230)
第十三章 滞后大系统的次优控制	(232)
§ 13-1 滞后耦合大系统的次优控制	(232)
§ 13-2 串联滞后大系统的次优控制	(241)
§ 13-3 非串联滞后大系统的递阶控制	(244)
§ 13-4 关联预估法在滞后大系统递阶控制中的应用	(251)
§ 13-5 共态预估法在滞后大系统递阶控制中的应用	(258)
参考文献	(263)
第十四章 滞后大系统的应用	(264)
§ 14-1 冷轧机控制系统	(264)
§ 14-2 交通控制	(277)
§ 14-3 水资源系统的最优控制	(283)
§ 14-4 河流污染控制系统	(290)
参考文献	(293)

第一章 滞后大系统总论

§ 1-1 概 况

一般说来,任何实际系统(包括大系统)或多或少地都存在着滞后。实际系统中的滞后主要是由以下原因产生的:

1. 实际系统变量的测量;
2. 用于实际系统中设备的物理性质;
3. 物质及信号的传递。

例如多层、递阶、多回路、反馈、多输入控制和大系统的多输出响应之间,是具有多组滞后的控制大系统。其中滞后的出现是由于大系统中元器件本身有滞后、控制作用将滞后引入,及多层、递阶、多回路、反馈、多输入、多输出的信号的传递等。滞后经常产生于电子、机械、金属、化工、生命科学及经济系统与管理系统中;也产生于地球的地震波、血液中的内分泌、空间中的电磁雷达,或计算中的视象表层处理、用遥控设备分析电视图象、数字控制计算机的输出及对化学组分反应进行分析等等。而且,有时为了便于系统的正常运行,故意将滞后引入系统,房间温度控制系统就是这方面的一个典型例子,如果不将滞后引入控制系统,恒温控制继电器将连续不断地产生抖动,从而不可能实现房间温度控制的目的。可有时也因滞后对系统的影响不大,在系统的设计与模型中往往将滞后略去,以无滞后的动力(大)系统来代替实际系统中有滞后的系统。但小滞后有时对系统产生重大的影响,这时的实际系统一定要研究有滞后的大系统的特性。这方面的典型例子是下面介绍的例4。从地球发出一个信号去控制宇宙中的航天飞机或空间飞行器(宇宙飞船),要用一秒钟时间,这一秒钟的时间滞后,将对宇宙飞船或航天飞机的有滞后控制大系统产生很大的影响。可是,对化工过程中的锅炉温度控制,输入一个控制信号,有时经过2~3小时也不见有响应信号输出。这就需要考虑实际系统中的大滞后对工程系统的影响。有时在过程控制中,滞后是一个时间 t 的函数,如输油管道中的滞后,就是因季节不同出现滞后是时间 t 的陡升曲线的情形,这就要考虑无穷滞后、相关滞后对控制大系统镇定的影响。另外,一个连续的最小相位(稳定的)被控对象,经过采样和离散化后,其脉冲传递函数有可能成为非最小相位(不稳定的)。这是因为被控对象的传输滞后如果不是计算机采样周期的整数倍时,其中分数部分经过 Z 变换后可能产生一个绝对值大于1的零点,控制系统就变为非最小相位了。对于一部分慢过程控制的化工、热工对象,分数滞后对离散控制(大)系统的影响可以忽略不计;但对于快过程控制的机电对象,分数滞后对离散控制(大)系统的影响

就不可能忽略,解决的方法之一,是在工程上采取极点配置与自校正器。在经济大系统的预测决策,及政府部门采用政策控制经济发展的经济控制大系统中出现的分数滞后,都需要研究不能进行迭代运算的分数滞后离散(迭代)控制(大)系统的镇定。

含有滞后的(大)系统,与含有滞后的控制(大)系统在数学理论上与工程实际中都有其特殊的困难。甚至于有滞后的一阶线性定常系统,也因其特征超越方程有无穷多个特征根,其解空间是无穷维的。有滞后的一阶非线性控制系统,那就有更加复杂的动态响应行为。这就是18世纪在弦振动中产生了滞后系统以来到今天,虽然在滞后系统的研究中发表了大量的论文,出版了多本著作,但滞后系统的基本理论、稳定、镇定、振动、渐近性等研究一直处于方兴未艾的美好前景,形成国际前沿“热门”的研究学科、领域。特别是在工程实际中不断提出滞后(大)系统研究的新领域,如一个特别重要的情形是用于波动方程的边界稳定化(镇定)反馈回路中含有滞后。某些严重的病态联系已经被发现,如一些其它类型的边界稳定化反馈方案中,“几乎”对任意的滞后都会产生失稳现象。这些事实表明一些已知的边界稳定化方法,可能没有足够的鲁棒性以适应回路中控制用微处理机所产生的滞后。含有滞后与观测的分布参数控制(大)系统,也是困难的理论问题。

到目前为止,在国内于1963年出版了秦元勋、刘永清、王联的著作《带有时滞的动力系统的运动稳定性》^[1];该书于1989年三位原作者与郑祖庠一起修订再版^[2]。1987年,李森林、温立志出版了《泛函微分方程》^[3]。在国际上出版了:1958年 Pinney^[4];1963年 Bellman Cooke^[5];1966年 Halanay^[6];Oguztoreli^[7];1971年 Dhrymes^[8];1977年 Driver^[9];Hale^[10];1985年 Burton^[11]及苏联麦西克斯^[12]等等著作(书),都是从数学观点出发来介绍滞后系统,都缺乏对工程实际的应用。1973年,El'sgol'ts^[13],1989年 Gapalsamy^[14]涉及了滞后生态系统。1979年 Marshall^[15]研究了频域中的滞后控制系统。1987年 Zavarei, Jamshidi^[15]的时间滞后系统是突出了工程应用特点的著作,但书中又不强调数学理论的严密性。

近代科学技术的迅猛发展,大规模工程的开发与“攻关”,迫使及需要开展滞后大系统的研究。到目前为止,在国内外尚未见到有关滞后大系统著作出版。为此,以此书系统地总结了我们在这方面的工程应用特点,同时也兼顾了数学理论方法上的严密性。

§ 1-2 滞后大系统的工程问题实例

例1 冷轧机的多滞后的连续控制大系统

冷轧机中的滞后是由两个机架间钢板的高速输送引起的。考虑均匀厚度的钢板生产过程,这一控制过程是将滚压平整的钢板通过进料口送给多机架冷轧机。钢板厚度是根据离开滚轮后钢板厚度的测量(用 Z 射线测厚)值由调整滚轮间隙来控制(如图1.1所示)。但是,这个测量不能在钢板离开滚轮时马上进行,必须等到钢板冷却后其厚度达到平衡值时才能进行。因此,这就产生了一个钢板离开第 i 个机架和到达第 $i+1$ 个机架的时刻间的

滞后,此调整间隙的滚轮就安装在此机架上。

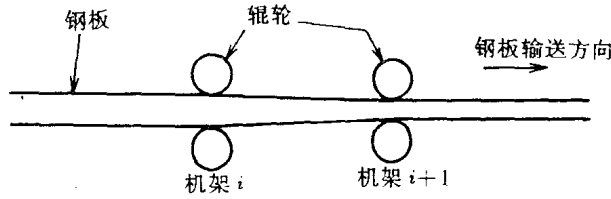


图 1.1 冷轧机

在滞后大系统的应用这一章中,我们建立了冷轧机多机架轧钢过程的滞后控制大系统的模型

$$\dot{x}(t) = A(\tau)x(t) + B(\tau)U(t) + A_1x(t - \tau) + A_{11}x(t - 2\tau) \quad (1.1)$$

采用奇异摄动法给出了冷轧机滞后控制大系统的最优控制设计;采“ ϵ 耦合”法给出了计算过程;并采用反馈增益矩阵法给出了冷轧机多滞后控制的大系统的数值解。

例 2 水资源的有滞后的离散控制大系统

考虑如图 1.2 所示的水资源系统。从图 1.2 中可以看到,此系统是由两个水库、两个

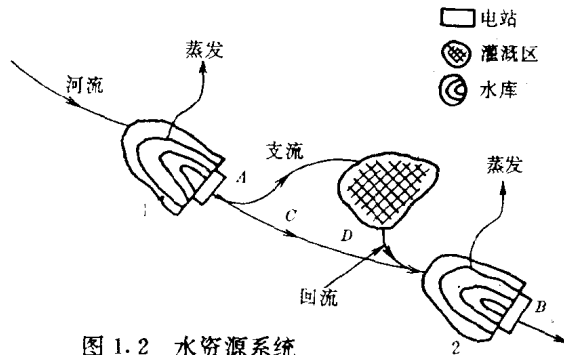


图 1.2 水资源系统

发电站、一条河流和一个灌溉区组成。这一系统的数学模型是基于水库出口处的水流量的连续性(图 1.2 中的 A、B 两点)和系统的各节点(C 和 D 两点)建立的,通常它是非线性系统。水资源系统的精确模型,包括从灌溉区渠道流回的水量,一般要经过一个月的灌溉周期的滞后时间。在滞后大系统的应用这一章中,我们建立了它的模型:

$$x(k+1) = A_1x(k) + A_2y(k) + B_1u(k) + B_2u(k - \tau) \quad (1.2)$$

这是一个有整数滞后的离散控制大系统,也是一个多个水库、多个发电站及多个灌溉区的水资源综合利用整数滞后离散控制大系统。为了克服大系统的“维数灾难”,书中引用了离散决策动态规划及 Fortran 语言的 DDDP 算法给出次优解及其仿真结果。

例 3 城市交通控制中整数滞后离散控制大系统。

城市交通系统由交叉路口和街道马路组成。令水平方向和垂直方向分别用 i, j 表示。令 $a_i(t)$ 和 $d_i(t)$ 分别为 i 方向上车辆的到来数量和平均局部车流率。又令 $s_i(t)$ 为 i 方向上的车辆饱和和车流率,即在每个周期中,当 i 方向上全部为有效绿灯时,能通过此交叉路口的最大车辆数。如果 G_i 是一个周期中 i 方向上绿灯亮的时间, L 是黄灯时间损失,周期时间 $C = G_i + L$ 。令 $u_i(t)$ 是控制 i 方向绿灯时间比率的控制变量 $u_i(t) = \frac{d_i(t)}{s_i(t)} = \frac{G_i}{C - L}$ 。在复杂

的交叉路口,要转弯的车辆排队长度部分也可作为状态变量。在通常的交通工程系统中,一般将转弯车辆排队长度部分与不转弯车辆排队部分之比视为常数。在这些条件下,可以把相连接的街道作为纯滞后元素。所以如图 1.3 中所示:沿第 i 个方向到 $(i+1, j+1)$ 交

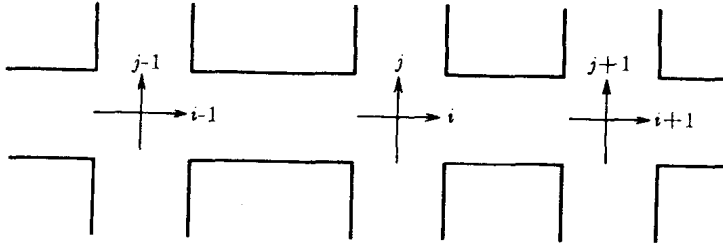


图 1.3 三交叉路口交通区段

叉路口的车辆率为 $a_{ii+1} = s_{ii} u_{ii}(k-h)$ 这里 $h > 0$ 是整数滞后量。这样建立的城市交叉路口和街道网络的动态模型为:

$$x(k+1) = x(k) + \sum_{j=0}^h B_j u(k-j) + z(k) \quad (1.3)$$

式中: x 是状态向量(车辆排队长度); $u(k)$ 是控制向量(绿灯时间比率); $z(k)$ 是外部输入向量。城市交通整数滞后离散控制大系统问题,是寻找满足一定约束条件和边界条件的最优控制绿灯信号周期序列 $u_i(k)$,使得交通控制系统的费用函数二次性能指标极小。下面在滞后大系统的应用一章中给出详细的计算仿真结果。

例 4 航天飞船的滞后控制大系统。

时间滞后有时是由于信号的传送(传递)引起的。虽然信号在太空中是以 $3 \times 10^8 \text{ km/s}$ 的电磁波速度传送(传递),但这个滞后可能足以使系统的动态特性受到很大的影响。例如,对一个飞行月球的航天飞船来说,从地球发出一个控制信号到航天飞船要用 1s 时间,这个 1s 时间滞后,对航天飞船的滞后控制大系统就会产生很大的影响。

§ 1-3 系统的分类与本书基本内容

关于系统的分类,对某些理论研究工作者可能认为是肤浅的,但对工程技术人员来说还是必要的。

书中所说的“系统”一词,是指用数学表达式表示的系统模型。因此,系统可以根据描述它的数学模型来进行分类。本书主要采取控制工程的观点给出系统的分类。

1. 集中参数系统与分布参数系统

采用常微分方程或常差分方程描述的系统,也称为连续系统和离散系统,总称为集中参数系统。根据系统的特性需要用偏微分方程描述的系统,称为分布参数系统。

在常微分方程或常差分方程中包含控制函数描述的系统,称为集中参数控制系统;而在偏微分方程中包含控制函数描述的系统,称为分布参数控制系统。

控制理论在传统上所研究的系统涉及到被定义的实数变量,它们由微分、偏微分或差分方程所支配。然而,在许多情况下,这种模型是不适用的,至少有两类其它的动力系统需要数学描述和控制理论结果的发展。这两类系统是:

(1)连续离散动力系统 该系统既含有实数变量,也含有离散(差分、迭代)变量或含有逻辑或布尔变量,例如机器人机器人手、变结构系统和伴随许多故障模态系统、大型电力网络等。

(2)离散事件动力系统 该系统中的变量仅在不同步的离散时刻发生变化,如计算机通讯网络和制造系统。这方面的模型有:有限状态马尔科夫链、Petri 网、排队网络、广义半马尔科夫过程、有限状态机、通讯顺序过程、扰动分析、以时间序列或模态逻辑模型、离散事件仿真模型等。

有时也将连续离散动力系统与离散事件动力系统,统称为“离散事件动态系统”。

含有控制函数变量(连续、离散)的离散事件动态系统,被称为离散事件动态控制系统。

系统还有其它的分类方式,如确定性系统与不确定性系统等

所有参数、变量及表达式模型,可以“精确”地描述的系统,称为确定性系统。参数、变量涉及环境和建模的不确定性,如区间系数、概率参数、随机变量等描述表达的不确定性模型,称为不确定性系统或随机系统。

在确定性模型中包括了控制函数的确定性系统,称为确定性控制系统;而在不确定性模型中包括了控制函数的不确定性系统称为不确定性控制系统或随机控制系统。

对于由带偏差变元的微分方程和带偏差变元的差分方程描述的系统,按照偏差特点也给出一种分类法。先考虑一个简单的例子。

例 5 对常系数线性偏差变元的微分方程

$$a_1 \dot{x}(t) + a_2 \dot{x}(t-1) + a_3 x(t) + a_4 x(t-1) + a_5 x(t+1) = 0 \quad (1.4)$$

这里偏差变元为 1,按其系数的不同取值,进行系统分类。

(1) $a_1 \neq 0, a_4 \neq 0, a_2 = 0, a_5 = 0$ 时, (1.4) 称为滞后型。

$$a_1 \dot{x}(t) + a_3 x(t) + a_4 x(t-1) = 0 \quad (1.4)_1$$

(1.4)₁ 描述的系统,称为有滞后的线性定常系统。

(2) $a_1 \neq 0, a_2 \neq 0, a_5 = 0$ 时,称(1.4)为中立型。

$$a_1 \dot{x}(t) + a_2 \dot{x}(t-1) + a_3 x(t) + a_4 x(t-1) = 0 \quad (1.4)_2$$

(1.4)₂ 描述的系统,称为中立型线性定常系统。

(3) $a_1 \neq 0, a_2 = 0, a_4 = 0, a_5 \neq 0$ 时,称(1.4)为时超型(或超前)

$$a_1 \dot{x}(t) + a_3 x(t) + a_5 x(t+1) = 0 \quad (1.4)_3$$

(1.4)₃ 描述的系统,称为时超型线性定常系统。

(4) $a_i \neq 0$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$); 或 $a_i \neq 0$ ($i = 1, 3, 4, 5$) 时, (1.4) 称为混合型。

(1.4)及

$$a_1 \dot{x}(t) + a_3 x(t) + a_4 x(t-1) + a_5 x(t+1) = 0 \quad (1.4)_4$$

描述的系统,称为混合型线性定常系统。如:

$$a_1 \dot{x}(t) + a_2 \dot{x}(t-1) + a_3 x(t) + a_4 x(t - \sin t) = 0 \quad (1.5)$$

也称为混合线性系统。

由于混合型系统分类较复杂,只简述上面这些。

如果有偏差变元的方程,改写为

$$a_1\dot{x}(t) + a_2\dot{x}(t-1) + a_3x(t) + a_4x(t-1) + a_5x(t+1) = u(t) \quad (1.6)$$

其中 $u(t)$ 为输入的控制变,带有控制函数的偏差变元方程(1.6)对应于(1.4)₁, (1.4)₂, (1.4)₃, (1.4)₄ 及(1.4)来说,就是有滞后的一阶线性定常控制系统;中立型一阶线性定常控制系统;时超一阶线性定常控制系统及混合一阶线性定常控制系统。

在说到以上方程的阶、次、线性、非线性时,必须把未知函数的过去值、超前值、当前值,如 $x(t-1)$, $x(t+1)$, $x(t)$ 的次数、导数的阶应同等看待。如:

$$\dot{x}(t) - ax(t)x(t-1) = 0 \quad (1.7)$$

便是非线性系统。

在说到定常系统时要特别小心。例如一个滞后系统,

$$\dot{x} = f(t, x(t), x(t-\tau)) \quad \tau \geq 0 \quad (1.8)$$

f 显含 t , 不言而喻是有滞后的非定常系统。若 f 不显含 t , τ 又是常数,自然(1.8)是有滞后的定常系统。又如 f 不显含 t , 而 $\tau(t)$ 是 t 的连续函数。

$$\dot{x} = f(x(t), x(t-\tau(t))) \quad (1.9)$$

此时, (1.9)实质上是有滞后的非定常(时变)系统。这只要在 $\tau(t)$ 满足一定条件,实行 $t = \varphi(s)$ 的变量代换, (1.9)就可化为含滞后的时变系统

$$\frac{dy(s)}{ds} = \bar{f}(s, y(s), y(s-1)) \quad (1.10)$$

其中 $x(\varphi(s)) = y(s)$ 。滞后化为定常数,方程显含自变量 s 的有滞后的非定常系统^[2]。

同理,对于含有偏差变元的分布参数控制系统也有类似于(1.4)、(1.6)的分类。

应当注意的是,任一系统都可能属于以上不同分类中的两者之一。例如一个系统可以是集中参数的、中立型的、不确定的、线性时变的。

例1~例4中的系统,往往具有规模庞大、结构复杂、因素众多、功能综合的特点,都是有多滞后的连续或离散控制大系统。

书中内容是以总结我们在1988~1991年间的滞后大系统的研究成果为主。其基本框架为:介绍滞后大系统的总论;滞后大系统的建模;滞后大系统的应用(其它章节中也贯穿了突出工程应用这一特点);多组滞后连续系统的比较原理;多组分数、实数滞后离散系统的比较原理;采用作者自己建立的大系统李雅普诺夫函数分解等价法;滞后系统的无条件稳定方法等及应用,与在时域、频域上多滞后连续、离散控制系统的稳定、镇定、算法、仿真;多滞后控制大系统的分散镇定、鲁棒性、次优控制等。同时,保持了数学理论上的严密性。

§ 1-4 滞后大系统的稳定、镇定与次优控制方法

§ 1-4-1 滞后大系统稳定性的主要方法

1. 比较原理法

由微分差分不等式描述的滞后线性、非线性不等式系统,及其辅助比较系统,在一定条件下,由初值不等式蕴含解的不等式。这样,由辅助比较系统解的稳定性导出滞后大系统解的稳定性。本书第三章建立了多组多滞后(中立型)线性非线性整数连续系统的比较原理;第四章中建立了多组非整数多滞后(中立型)线性非线性离散系统的比较原理。

冯昭枢、刘永清建立了滞后随机系统的比较原理^[17]。

2. 微分、积分微分不等式法

由滞后微分不等式,在一定条件下,得到解的明显不等式表达,从而可直接得到滞后(中立型)大系统的稳定性。斯力更、马万彪、章毅给出了这方面的研究成果^[18]。

3. 常数变易法

由齐次微分方程组描述的孤立子系统的基本解组(状态转移矩阵)为主,其它大系统的关联项及非线性项看成为非齐次项,从而由常数变易法得到积分方程组形式的表达式。通过绝对值运算,或写成 M 矩阵,或写成主对角优势矩阵,或再解一个代数方程及其矩阵的谱半径 $\rho(C) < 1$ 等,从而得到滞后大系统、中立型大系统的稳定性。徐道义、章毅、唐功友、谢胜利等系列论文及本书第九、十一章采用了常数变易法^[18]。

4. 变结构控制法

变结构法是将一个高阶复合滞后系统的变结构控制,分解成两个子系统:一个是 m 阶的切换函数状态变量;另一个是 $n - m$ 阶的滑动模态方程。这里仅仅需要确定变结构控制 $u_i^-(s_i < 0), u_i^+(s_i > 0)$ 使得满足到达条件:切换面 $s_i = 0$ 以外的相轨线于有限时间内到达切换面; $\dot{s}_i, s_i < 0$ 切换面滑动模态区,滑动运动渐近稳定。

变结构法设计简单,抗干扰好,鲁棒性强,有迅速的完全自适应性等优点,因而近几年在机器人、电机中成功地应用。在国内,刘永清、袁付顺、胡跃明已将变结构法应用于滞后复合系统的变结构控制的稳定性与综合(见本书第 12 章)。

5. 大系统的智能稳定性与 CAD 法

在计算机上实现大系统的稳定性,就要解决大系统如何分解为孤立子系统。这与子系统的系数矩阵有关,与关联矩阵有关。分解与求解过程的好坏,反映了分析者的水平的高低,也就直接影响程序系统的效率。因此,只有具备专家水平的“计算机人工智能的专家系统”的智能技术与计算机软件智能系统,才能实现高效率、实用模拟专家分解分析能力,来进行大系统的智能稳定性研究。为此,我们首先研究了“线性定常离散(迭代)大系统的设计、算法、程序、框图;及研究了多组非整数滞后离散控制系统的无条件稳定、镇定的算法、程序、仿真,并将进行静态线性大系统的智能分解和优化、数值分解算法、并行处理算法、

智能算法系统;及相应的动态线性(滞后)大系统的智能分解、稳定性及控制^[18]。

此外,还有“在稳定性理论中,微分方程与微分差分方程的等价性”法^[1]、无条件稳定性的频域法^[1];及廖晓昕建立的分块迭代法^[18]等。

§ 1-4-2 滞后大系统的镇定及次优控制的主要方法

1. 滞后系统次优控制的灵敏度法

该法将滞后系统中的控制变量展成为马克劳林级数;然后求某个相关的无滞后系统的两点边值问题,获得被截断的级数的系数,从而得到滞后系统的次优控制。所得到的次优控制一部分是闭环,一部分是开环(见本书 § 8-1)。

2. 滞后系统次优控制的无滞后转换法

该法是将滞后控制系统中的滞后项,当作附加的扰动输入来处理,从而将滞后控制系统转化为无滞后控制。而在每次迭代中,无滞后系统都要进行优化,所得到的次优控制一部分是闭环,一部分是开环。此法可应用于滞后时变系统及滞后非线性系统的次优控制(见本书 § 8-2)。

3. 滞后非线性系统次优控制的柏德转换法

该法是将滞后非线性系统状态变量与控制变量展开成为台劳级数,然后采用柏德法将导致的滞后时变系统转换成无滞后的非自治系统,再将极大值原理应用于转换系统,从而得到滞后非线性系统的次优控制(见本书 § 8-4)。

4. 滞后系统次优控制的奇异摄动法

该法是将滞后分成 m 个相等时间子区间,采用新的变量代换,可化为近似的无滞后高阶奇异摄动系统。通过模型降阶及次优控制设计的奇异摄动理论,求得滞后系统的次优控制。

5. 滞后系统次优控制的李雅普诺夫泛函法

该法是通过求解一组由李雅普诺夫泛函确定的矩阵方程直接得到次优控制律,避免了反复迭代的繁琐计算。且得到的控制律是完全闭环的。从而用该法设计的控制器特别适合于实时控制,并有较好的抗干扰能力^[19]。

以上方法,有些可以推广到滞后大系统的次优控制,如奇异摄动法已应用于冷轧机滞后离散控制大系统的次优控制。

6. 在镇定理论中控制系统与滞后控制系统的等价性法

见参考文献[20]第八章。

7. 滞后控制大系统的李雅普诺夫分解等价法

见参考文献[20]第九章。

8. 多组多滞后控制大系统的模型集结法

见本书 § 3-4、§ 4-5、§ 4-11。

9. 滞后控制大系统的递阶次优控制法

10. 滞后控制大系统的分散次优控制法

此外,我们已在参考文献[20]中介绍了耦合滞后大系统的次优控制、串联滞后大系统

的次优控制等。

参 考 文 献

- [1] 秦元勋、刘永清、王联。带有时滞的动力系统的运动稳定性。科学出版社,1963
- [2] 秦元勋、刘永清、王联、郑祖麻。带有时滞的动力系统的运动稳定性。科学出版社,1989
- [3] 李森林、温立志。泛函微分方程。湖南科技出版社,1987
- [4] E. Pinncy, Ordinary Differential-Difference Equations, Univ. of California Press, 1958.
- [5] R. Bellman, &, K. Cooke, Differential-Difference Equations, Academic Press, 1963
- [6] A. Halanay, Differential Equations; Stability, Oscillations, Time Lags, Academic Press, New York, 1966
- [7] M. N. Ogztoreli, Time-Lag Control Systems, Academic Press, 1966
- [8] P. J. Dhrymes, Distributed Lags, Olliver & Boyd, London 1991
- [9] R. D. Driver, Ordinary and Delay Differential Equations, Spring-Verlag, 1977
- [10] J. K. Hale, Theory of Functional Differential Equations, Springer-Verlag, 1977
- [11] J. A. Burton, Stability and Periodic Solutions for Ordinary and Functional Differential Equations, Acaademic Press, New York, London, 1985
- [12] Ад. Мыщис, ипне ные диХХеренциальные уравнения с запаздывающим аргументом, 1951
- [13] L. E. El'sgol'ts, &, S. B. Norkin, Introduction to the Theory and Application of Differential Equation with Deviating Arguments, Academic Press, New York, 1973
- [14] K. Gapalsamy, Equations of Mathematical Ecology, 1989
- [15] J. E. Marshall, Control of Time-Delay Systems, IEE Series on Contral Engineering, Vol. 10, London, 1979
- [16] M. Malek-Zavarei, &, M. Jamshidi, Time-Delay Systems, North-Holland Press, 1987
- [17] 刘永清、冯昭枢。大型动力系统的理论与应用—随机稳定性与控制(卷4)。华南理工大学出版社, 1992
- [18] 刘永清。滞后大系统的工程实际与稳定性方法(综述)。全国常微分方程稳定性理论与应用学术会论文集,科学出版社,1992,7。
- [19] 唐功友,动态大系统的稳定性与控制,博士学位论文,华南理工大学自动化系。1992. 3
- [20] 刘永清、徐维鼎。大型动力系统的理论与应用—建模、镇定与控制(卷2)。华南理工大学出版社, 1989。