



大型动力系统的理论与应用 卷11

# 滞后分布参数系统的 稳定与变结构控制

刘永清 谢胜利 著

---

THEORY AND

---

APPLICATION

---

OF LARGE-SCALE

---

DYNAMIC SYSTEMS

---

华南理工大学出版社

大型动力系统的理论与应用 卷 11

# 滞后分布参数系统的 稳定与变结构控制

刘永清 谢胜利 著

华南理工大学出版社  
· 广州 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

滞后分布参数系统的稳定与变结构控制/刘永清,谢胜利著. —广州:华南理工大学出版社,1998.12

(大型动力系统的理论与应用:11)

ISBN 7-5623-1400-4

I. 滞…

II. ①刘…②谢…

III. 时滞系统:分布参数系统-自动控制

IV. N94

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮编 510640)

责任编辑 杨昭茂

各地新华书店经销

广州新光明印刷厂印装

\*

1998年12月第1版 1998年12月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:12.5 字数:305千

印数:1—500册

定价:43.00元

## 作者简介



**刘永清** 华南理工大学电子信息学院自动控制工程系教授、博士生导师、系统工程研究所所长,电子与自动控制学科群学术带头人。1955年毕业于复旦大学数学系。1973~1976年间在广东化工学院学习化工自动化仪表第二专业;1978年后又学习了系统工程。先后在中国科学院数学研究所(1955~1962)、暨南大学(1962~1970)、华南师范学院(1970~1972)、广东化工学院(1972~1978)、华南理工大学(1978~1998)数学系与自动化系工作。1984~1998年间,先后获得国家与广东省自然科学基金、教委高校博士点基金11项,学术著作出版基金3项,应用开发项目9项。独立

或与人合作,在国内外发表论文600多篇,收录入世界四大索引(SCI、EI、ISTP)130多篇;1988~1998年间出版学术著作16部;1981~1998年间获得省部委奖16项,国家科委三等奖1项。1984年10月,被国务院人事部授予首批国家级中青年有突出贡献的专家;1990年12月,被国家教委、国家科委授予全国高等学校先进科技工作者称号;1991年经国务院人事部批准享受政府特殊津贴。他是国家自然科学基金委员会第六届(1996~1997)、第七届(1998~1999)评审组成员;《华南理工大学学报》副主编,《控制理论与应用》、《控制与决策》、《微分方程》年刊(英文刊物)、《应用数学》等期刊编委;德国数学文摘(控制论、系统论)、美国数学评论(控制论、系统论领域)的评论员,法国AMSE的仿真进展、建模分析进展、建模仿真与控制(A.B.C)、AMSE评论的编委,国际电子电气工程师学会IEEE及其控制系统学会IEEE-CSS的会员,法国企业的建模仿真技术学会(AMSE)理事;中国系统工程学会理事、广东系统工程学会副理事长、广州系统工程学会理事长,中国自动化学会智能自动化专业委员会委员、中国系统工程学会系统理论专业委员会委员、教育与普及专业委员会委员。



**谢胜利** 中共党员,湖北公安人;控制理论与控制工程博士、通信与电子学博士后,华南理工大学电子与信息工程学院教授,华南理工大学研究生处副处长,广东省博士后联宜会副理事长、广东省首届十佳优秀博士、湖北省有突出贡献中青年专家、湖北省首批跨世纪学科带头人。1974年上山下乡,1976年返城进厂,1977年高考入学,1982年高校任教至今。1992年获华中师范大学运筹学与控制专业硕士学位。1997年获华南理工大学自动控制理论与应用专业博士学位,1998年于华南理工大学电子学与通信博士后流动站出站。曾担任湖北荆州高等师范专科学校教务处

副处长、学生工作处副处长、学生工作处处长、学生工作处处长兼校团委书记、校长助理等职。1989年破格晋升副教授,1992年破格晋升教授。多年来一直从事动力系统稳定性理论、定性理论、振动理论、控制理论与应用及电子学与通信的教学和研究工作。在国内外有影响

的学术刊物上发表论文 60 多篇,收录入世界四大索引(SCI、EI、ISTP)近 30 篇。5 次主持、4 次参与国家、省(部委)关于数学、自动控制、电子与通信等领域的自然科学基金项目,6 次获得省(部委)级学术科技奖励。其事迹先后被《湖北教育报》、《广州日报》、《广东电视台》专题报导。

## 前 言

本书是《大型动力系统的理论与应用》卷 1~10 的续篇,也是国家新闻出版署(1997 年 59 号文)批准的“九五”期间国家重点图书《大型动力系统的理论与应用》中的《滞后分布参数系统的稳定与变结构控制》卷。

分布参数系统或者离散形式的 2-D 离散系统有着极其丰富的工程实际背景,如柔性机器人、化学反应器、种群动力学、非均匀温度交换、多维数字滤波器、多变量网络实现、多维数字图像处理、卫星气象云图的分析等等。因为客观事物的演化发展是复杂多样的,受诸多方面的影响,在系统描述的状态方程中总是不可避免地存在着滞后,从而滞后分布参数系统与滞后 2-D 离散系统也就应运而生。由于相应于此类系统的解空间是无穷维的,解结构的复杂性给工程控制的分析与设计带来了相当大的难度,尤其是在变结构控制这一目前控制领域中强有力的控制方法的应用上带来诸多的不便。

1993 年高为炳院士曾指出,对分布参数系统、滞后系统、随机系统的变结构控制来说,研究工作才刚刚开始,实质性的进展尚待努力。虽然,这几年滞后系统的变结构控制有了一定的进展,但分布参数系统,尤其是滞后分布参数系统还很少有研究成果出现。

从 1994 年开始,我们着力于滞后分布参数系统及滞后 2-D 离散系统的变结构控制研究,不仅力争建立相应的理论基础和研究方法,而且同时要建立一种便于工程实现、简单易行的设计方法。我们力求探索出一种不依赖于半群理论、算子理论,而直接对系统进行分析,且设计时只依赖于描述系统特征的参数进行设计的设计方法。本书是我们在这方面多年来的研究工作总结。

全书分三部分共八章,第一部分是绪论,含第一章;第二部分是连续系统,含第二、三、四、五章;第三部分是离散系统,含第六、七、八章。因为无论是滞后分布参数系统,还是滞后 2-D 离散系统的变结构控制都是新的研究课题,故我们遵循一般控制系统的研究原则,都首先对相应系统较全面的进行各种性态分析,为其变结构控制研究奠定必要的理论基础和寻找研究方法,而后再进行变结构控制的设计研究。在系统的性态分析方面,除了将已有的 Fourier 变换方法、Liapunov 泛函方法应用到滞后分布参数系统的稳定性分析上,我们还成功的建立了“辅助泛函法”、“分域估计法”、“闭区间列逼近法”等有效的稳定性分析方法。在变结构控制方面,不仅讨论了无记忆功能的控制器设计方案,而且也给出了既无记忆功能也无局部预测功能的控制器设计方法。我们所采用的这些方法,都充分考虑了系统本身的“个性”特征,从而对系统固有信息的损失减少,尤其是对 2-D 离散系统的变结构控制问题,我们提出了一些新的基本概念,并建立了相应的研究方法。这方面的工作显然是初步的,但为其进一步发展奠定了必要的基础。本书是国内外第一部研究滞后分布参数系统变结构控制的专著,欢迎读者批评指正。

与著作有关的研究、论文撰稿工作,是在国家自然科学基金资助下完成的,特此致谢。在此还要感谢国家新闻出版署将本著作列为“九五”期间国家重点图书。

刘永清 谢胜利

1998 年 11 月

# 目 录

|            |                                |     |
|------------|--------------------------------|-----|
| <b>第一章</b> | <b>绪论</b> .....                | 1   |
| § 1.1      | 引言 .....                       | 1   |
| § 1.2      | 滞后分布参数系统的实际背景 .....            | 2   |
| § 1.3      | 研究概况及有待探讨的问题 .....             | 3   |
| § 1.4      | 本书的主要内容 .....                  | 9   |
| <b>第二章</b> | <b>滞后分布参数系统的稳定性分析</b> .....    | 12  |
| § 2.1      | 引言.....                        | 12  |
| § 2.2      | 稳定性及相关概念.....                  | 12  |
| § 2.3      | 不等式分析方法.....                   | 14  |
| § 2.4      | Fourier 变换方法 .....             | 24  |
| § 2.5      | 分域估计法.....                     | 27  |
| § 2.6      | Liapunov 泛函方法 .....            | 33  |
| § 2.7      | 辅助泛函方法.....                    | 43  |
| § 2.8      | 闭区间列逼近方法.....                  | 48  |
| § 2.9      | 小结.....                        | 55  |
| <b>第三章</b> | <b>滞后分布参数系统的振动性分析</b> .....    | 56  |
| § 3.1      | 引言.....                        | 56  |
| § 3.2      | 直接控制系统的振动性.....                | 56  |
| § 3.3      | 滞后生态系统的振动性.....                | 63  |
| § 3.4      | 具有反馈控制的生态系统.....               | 69  |
| § 3.5      | 关于非常数稳态解的振动性.....              | 72  |
| § 3.6      | 小结.....                        | 74  |
| <b>第四章</b> | <b>滞后分布参数系统的周期解与概周期解</b> ..... | 75  |
| § 4.1      | 引言.....                        | 75  |
| § 4.2      | 具有反馈控制的 Logistic 系统.....       | 75  |
| § 4.3      | 具有放牧率的竞争系统.....                | 80  |
| § 4.4      | 具有滞后的反馈控制系统.....               | 87  |
| § 4.5      | 非线性系统的概周期解.....                | 91  |
| § 4.6      | 小结.....                        | 98  |
| <b>第五章</b> | <b>滞后分布参数系统的变结构控制</b> .....    | 99  |
| § 5.1      | 问题与方法.....                     | 99  |
| § 5.2      | 关于 Liapunov 方法的注记.....         | 100 |
| § 5.3      | 滞后抛物型系统 .....                  | 104 |
| § 5.4      | 等效设计方法 .....                   | 109 |

|             |                                |            |
|-------------|--------------------------------|------------|
| § 5.5       | 无预测、无记忆功能的控制器·····             | 118        |
| § 5.6       | 滞后关联分布参数系统的分散变结构控制 ·····       | 127        |
| § 5.7       | 小结 ·····                       | 133        |
| <b>第六章</b>  | <b>滞后 2-D 离散系统的稳定性分析 ·····</b> | <b>134</b> |
| § 6.1       | 问题的提出 ·····                    | 134        |
| § 6.2       | 不等式分析方法 ·····                  | 134        |
| § 6.3       | Liapunov 方法 ·····              | 149        |
| § 6.4       | 降维方法 ·····                     | 154        |
| § 6.5       | 小结 ·····                       | 162        |
| <b>第七章</b>  | <b>滞后 2-D 离散系统的振动性分析 ·····</b> | <b>163</b> |
| § 7.1       | 引言 ·····                       | 163        |
| § 7.2       | 滞后 2-D 离散直接控制系统 ·····          | 163        |
| § 7.3       | 外力的强迫振动 ·····                  | 170        |
| § 7.4       | 小结 ·····                       | 178        |
| <b>第八章</b>  | <b>滞后 2-D 离散系统的变结构控制 ·····</b> | <b>179</b> |
| § 8.1       | 1-D 离散系统的状况 ·····              | 179        |
| § 8.2       | 模型的描述 ·····                    | 180        |
| § 8.3       | 拟-滑动模控制的定义 ·····               | 180        |
| § 8.4       | 滑动模的设计 ·····                   | 181        |
| § 8.5       | 变结构控制器的设计 ·····                | 182        |
| § 8.6       | 小结 ·····                       | 183        |
| <b>参考文献</b> | ·····                          | <b>184</b> |

# 第一章 绪 论

## § 1.1 引 言

变结构控制在前苏联学者 С. В. Емльянов<sup>[1]</sup>, В. И. Уткин<sup>[2]</sup>, В. А. Таран<sup>[3]</sup>等用相平面方法对继电系统的滑动运动进行研究而产生后, 当时并没有引起世界控制界的普遍关注. 因对线性系统已有比较成熟的理论及综合方法, 从而用不着采用变结构控制这种较复杂的非线性控制器. 但是后来人们逐渐发现变结构控制系统与常规控制系统的不同之处, 即在于系统的“结构”可以在瞬变过程中, 根据系统当时的状态(偏差及其各阶导数等), 以跃变方式, 有目的地变化, 迫使系统沿预定的“滑动模态”的状态轨迹运动. 而且该“滑动模态”可以设计又与控制对象的参数及扰动无关, 即对系统摄动、不确定性以及干扰有着“完全的自适应性”. 这就使得变结构控制系统具有快速响应、对参数及外扰变化不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等许多本质优点. 所以, 近十多年来, 这一控制方法重新受到人们的重视而获得巨大的发展<sup>[4~10]</sup>. 其基本理论在不断完善<sup>[11~14]</sup>, 如运动跟踪<sup>[15]</sup>、模型跟踪<sup>[16]</sup>、自适应控制<sup>[17]</sup>及不确定控制系统<sup>[18]</sup>等, 且应用领域也在逐渐扩大, 如在机器人操作器<sup>[19~23]</sup>、柔性空间飞行器<sup>[24]</sup>、弧焊电源<sup>[25~27]</sup>、水下推进器<sup>[28]</sup>、电力系统<sup>[29~33]</sup>、航空航天飞行器<sup>[34~36]</sup>、数字实现<sup>[37]</sup>、车摇控<sup>[38]</sup>、导航<sup>[39]</sup>、机动车<sup>[40]</sup>、连续加热炉<sup>[41]</sup>、化学反应器<sup>[42]</sup>、热交换器<sup>[43]</sup>等方面的控制.

状态方程的描述形式也是多样的. 如滞后系统<sup>[44~47]</sup>、模糊系统<sup>[5,7]</sup>、随机系统<sup>[50]</sup>、中立型系统<sup>[48,49]</sup>、分布参数系统<sup>[51~54]</sup>、离散系统<sup>[55,56]</sup>、广义系统<sup>[57,58]</sup>等.

最近, 随着神经网络、模糊控制理论不断发展<sup>[59~64]</sup>, 智能变结构控制系统也正在萌生之中. 如 R. Palm<sup>[5]</sup>、A. Ishigame<sup>[65]</sup>、金耀初和蒋静坪<sup>[66]</sup>、S. W. Kim<sup>[67]</sup>、冯纯伯等<sup>[69,70]</sup>、A. Suyitno<sup>[68]</sup>均对模糊变结构控制进行了研究. 在模糊控制中按滑模及带边界层的滑模要求进行设计, 这样既可保持变结构控制系统对参数摄动和干扰不灵敏的优点, 而且比用于削弱高频颤动的带边界层的滑模控制具有更平滑的控制性能, 以及较少模糊规则数. 这些方法都在电力系统和机器人等方面进行了实验.

另外, J. X. Xu, J. Donre<sup>[71]</sup>研究了一种用于非线性和不确定性系统, 并以神经网络为超前补偿的反馈线性化和变结构合成的控制方法. 该法使变结构控制减弱了不必要的高增益.

随着智能控制与传统控制方法的交叉综合<sup>[72,73]</sup>, 一些新的变结构控制方法, 如自适应模糊变结构控制、自适应神经网络变结构控制、模糊神经网络变结构控制也有望产生.

以上的各种方法研究, 主要集中在集中参数系统上, 而对分布参数系统, 虽有一些结

果(如 Utkin<sup>[53]</sup>、刘永清、胡跃明、岳东<sup>[51,54]</sup>等),无论是理论上还是方法上都远远不及集中参数系统. 正如参考文献[11]中所指出的那样,此类系统的变结构控制是十分困难的. 暂且不计分布参数系统理论的不完善,分布参数系统的变结构控制的每一个概念、定义等等都需要发展.

此外,对滞后分布参数系统及 2-D 离散系统的变结构控制研究,目前仍处于空白状态.

## § 1.2 滞后分布参数系统的实际背景

在工程实际及其他一些领域中,用分布参数系统所描述的状态方程是多式多样的,如柔性机器人<sup>[74~76]</sup>,大型冷轧带钢连续镀锌退火过程<sup>[77]</sup>,双通道逆流式热交换器流体的温度分布<sup>[43]</sup>,种群动力学<sup>[78~80]</sup>,柔性空间飞行器<sup>[24]</sup>,化学反应器<sup>[42]</sup>等等. 但由于客观事物的演化发展是复杂和多样的. 如实际系统中信息、数据等变量的测量、采集、处理;用于实际系统中设备的物理性质;物质、能量及信号的传递;为使系统具有所期望的性态,在系统设计中人为地引入延迟部件. 故状态方程中总是不可避免地存在着滞后<sup>[56]</sup>. 下面仅举几例.

例 1.1 考虑如图 1.1 所示的连续加热炉。

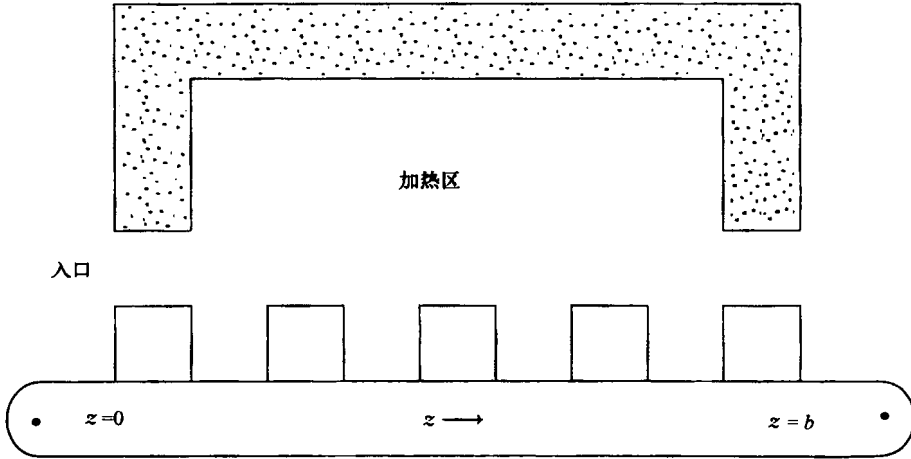


图 1.1 连续加热炉示意图

设炉区宽度为  $b$ ,  $x(t, z)$  是加热材料在炉内的温度分布;  $z$  是加热材料在炉区内的位置.  $u_1(t)$  是加热炉的温度, 假定与空间参数变量  $z$  无关(即炉内温度是均匀分布的), 热传导系数为  $a$ . 而加热材料的传送速度为  $u_2(t)$ . 显然, 在此问题中, 传送速度  $u_2(t)$  及炉温  $u_1(t)$  都是可以调节的量. 由于炉温  $u_1$  的调节往往存在相当大的时间滞后  $T$ , 则加热材料的温度分布可描述为

$$\frac{\partial x(t, z)}{\partial t} + u_2(t) \frac{\partial x(t, z)}{\partial z} = a(u_1(t) - x(t - T, z)), \quad 0 \leq z \leq b, t \geq t_0 \quad (1.2.1)$$

在上例中, 我们没有考虑加热材料的厚度. 事实上, 在加热材料的上层与下层, 其温度分布是不同的. 下面考虑带钢连续热镀锌退火过程.

**例 1.2** 将立式退火炉按炉长方向展开, 设  $x$  和  $y$  分别代表带厚和炉长方向,  $L$  和  $d$  分别为等效炉长和带厚. 记  $T(x, y, t)$  和  $z(y, t)$  分别为带温和炉温分布,  $t$  为时间,  $c, \rho$  和  $K$ , 分别为带钢比热容、密度和导热系数,  $v(t)$  为机组的传热速度. 于是, 由建模假设和导热定律, 可得到描述全炉带温分布的二维导热方程<sup>[77]</sup>

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} + v(t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} = \frac{1}{c\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ K, \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K, \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right] \right\} \quad (1.2.2)$$

其中  $0 \leq x \leq d(y), 0 \leq y \leq L, t \geq 0$ .

为确定带钢下表面的边界条件, 由有关传热定律并注意调节炉温  $z(y, t)$  所需的时间滞后  $\tau$ , 可导出带钢下表面的热流密度  $q(y, t)$  之关系式

$$q(y, t) = \epsilon(y)F_a\sigma[z^4(y, t) - T^4(0, y, t - \tau)] + h_iF_a[z(y, t) - T(0, y, t - \tau)] \quad (1.2.3)$$

其中各参数所代表的意义见<sup>[77]</sup>. 从而下表面的边界条件为

$$\left. \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \epsilon(y)F_a\sigma[z^4(y, t) - T^4(0, y, t - \tau)] + h_iF_a[z(y, t) - T(0, y, t - \tau)] \quad (1.2.4)$$

**例 1.3** 1994 年, Michael 和 Ryszard 在研究细胞复制过程中, 建立了如下模型<sup>[81]</sup>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(v(m)M)}{\partial m} = c(t)[-M(t, m) + k'(m)M(t - \tau, k(m))] \quad (1.2.5)$$

**例 1.4** 1982 年, Скубачевский 在光谱理论分析中, 提出了如下模型<sup>[82]</sup>

$$Lu(x) = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} a_{ij}(x) \frac{\partial R}{\partial x_j} + L_1(u(x)) = f(x), \quad x \in \Omega \quad (1.2.6)$$

其中  $L$  是  $\Omega$  上的一致椭圆算子, 而

$$Ru(x) = \sum_{i,j=1}^n b_{ij}u(x_1 + j, x_2, \dots, x_n), \quad b_{ij} \in R \quad (1.2.7)$$

**例 1.5** 1982 年, Volterra 在研究某种弹性材料动力学时, 建立了如下模型<sup>[83]</sup>

$$U_t(x, t) - \Delta U(x, t) + \int_0^t \sum_{i,j=1}^n U_{x_i x_j}(x, \tau) \Phi_{ij}(t, \tau) d\tau = f(x, t), \quad (1.2.8)$$

$$U_t(x, t) - \Delta U(x, t) + R(x, t)U(x, \omega(t)) = f(x, t), \quad \forall t, \omega(t) \in [0, t] \quad (1.2.9)$$

从上面例子我们足以看出, 滞后分布参数系统在实际中存在的广泛性和普遍性.

## § 1.3 研究概况及有待探讨的问题

### 1.3.1 开关控制与变结构控制的差异

变结构控制的一个本质特征就是, 存在一个滑动模态(或滑模, 或切换面), 使得其外

的相轨线将于有限时间内到达滑动模态上,然后在滑动模态上按预定的方式运动. 如图 1. 2.

从而滑动模态的存在是很关键的,它使得系统发生结构的改变. 但目前有些研究中忽视了这些特点,而考虑了滑动模态的“形式”存在及系统的渐近稳定. 如将切换函数设计为

$$S_i = C_i x_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.3.1)$$

其中  $C_i$  设计为

$$C_i \in \{N; N(B_i K_i + A_i) = 0, \quad NB_i \text{ 可逆}\} \quad (1.3.2)$$

其中  $\sigma(A_i + B_i K_i) \subset C^-$  为左半复平面.

因为  $D_i = A_i + B_i K_i$  可逆, 则满足上述设计要求的  $C_i$  只有零矩阵, 此时的切换面退缩为原点.

另外一种切换函数的设计为  $S = B^T V_1 x$ , 其中  $V_1$  是某一矩阵方程的解. 而事实上, 这个矩阵方程确没有解, 从而切换面是不存在的.

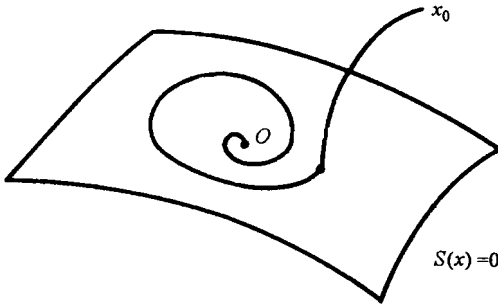


图 1.2 相轨线运动示意图

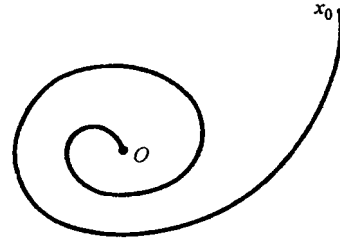


图 1.3 相轨线运动示意图

虽然以上两种方案都使得系统渐近稳定,但它们不能属于变结构控制的范畴. 系统在运行的过程中没有发生结构上的改变(如图 1. 3), 只是起到了“开关控制”的镇定作用.

下面举例说明开关控制与变结构控制的区别.

图 1. 4 所示的定值温度控制系统就是一种最简单的开关控制系统, 其中, 控制对象(炉温等)是一个具有自衡的稳定对象.

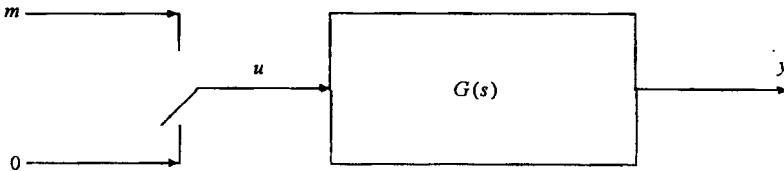


图 1.4 简单的开关控制

这种对象的传递函数  $G(s)$  常可写为

$$G(s) = \frac{k}{s^n + \sum_{i=1}^n a_i s^{i-1}} \quad (1.3.3)$$

式中，所有的极点都是负实数。设温度定值为  $r$ ，开关切换法则为

$$u = \begin{cases} m > 0 & y < r \\ 0 & y > r \end{cases} \quad (1.3.4)$$

这种控制系统也可用图 1.5 的闭环系统表示，其中引入了一个具有开关特性非线性环节。此时开关控制法则为

$$u = \begin{cases} m > 0 & e > 0 \\ 0 & e < 0 \end{cases} \quad (1.3.5)$$

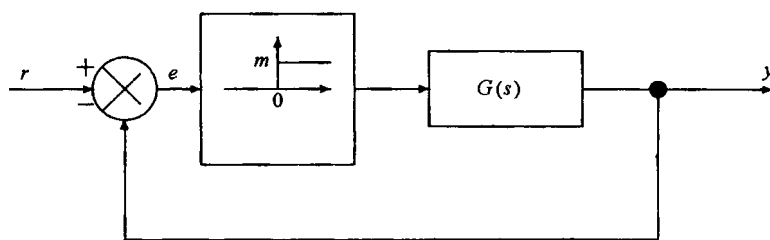


图 1.5 简单的开关控制系统

上述的开关切换并不改变系统的结构。例如沿

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 3s + 2} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (1.3.6)$$

控制对象的微分方程可表为

$$y^{(2)} + 3y^{(1)} + 2y = u \quad (1.3.7)$$

令系统的误差  $e = r - y$ ，则误差的微分方程为

$$e^{(2)} = -3e^{(1)} - 2e + 2r - u \quad (1.3.8)$$

再设状态变量  $x_1 = e$ ,  $x_2 = \frac{dx_1}{dt} = \frac{de}{dt}$ ，状态空间表达式为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -2x_1 - 3x_2 + v \\ e = x_1 \end{cases} \quad (1.3.9)$$

其中

$$v = 2r - u = \begin{cases} 2r - m > 0 & e > 0 \\ 2r & e < 0 \end{cases} \quad (1.3.10)$$

(1.3.9)可求解，且可简记为

$$\begin{cases} x_1(t) = p_1 e^{-t} + p_2 e^{-2t} + p_3 \\ x_2(t) = p_4 e^{-t} + p_5 e^{-2t} \end{cases} \quad (1.3.11)$$

式中  $p_1, \dots, p_5$  均为常数。

当  $p_1 p_5 - p_4 p_2 \neq 0$  时, 可消去(1.3.11)中的时间  $t$  得状态轨迹方程

$$[(x_1 - p_3)p_5 - x_2 p_4]^2 = -[(x_1 - p_3)p_5 + x_2 p_4](p_1 p_5 - p_4 p_2)$$

这是一抛物线方程, 故状态轨迹有一致的稳定结点的结构. 故开关控制(1.3.4)只是使原系统稳定, 而没有产生滑模运动.

再考虑如图 1.6 所示的更一般的开关控制, 设

$$\frac{dx}{dt} = Ax + bu \quad (1.3.12)$$

开关动作表为

$$u(t) = M \text{sign} f(x) \quad (1.3.13)$$

其中  $M$  是一个常数值, 且

$$f(x) = -k_1 x_1 - \dots - k_n x_n = -kx \quad (1.3.14)$$

于是方程(1.3.12)变为

$$\frac{dx}{dt} = Ax + bM \text{sign}(kx) \quad (1.3.15)$$

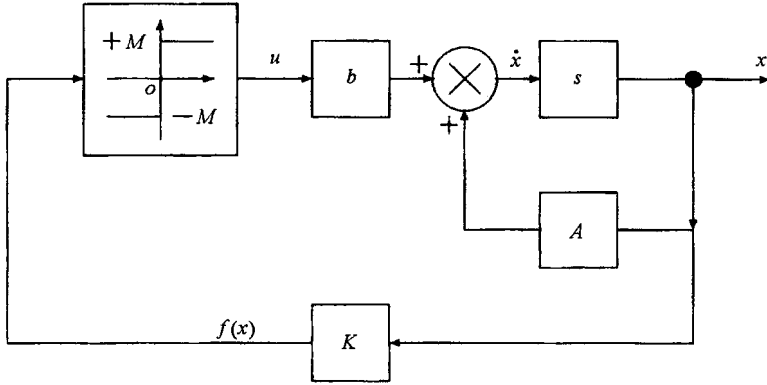


图 1.6 较一般的开关控制系统

设

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

并取开关切换函数  $f(x) = -k_1 x_1 - k_2 x_2$ , 则

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -x_2 + M \text{sign}(kx) \end{cases} \quad (1.3.16)$$

两式相除可得

$$\frac{dx_2}{dx_1} = -1 + \frac{(\pm M)}{x_2}$$

对于  $+M$  及  $-M$ , 两组状态轨迹如图 1.7 所示. 这样的开关系统是变结构系统, 它的滑动模态为

$$-k_1 x_1 - k_2 x_2 = 0$$

而系统在滑动模态上的运动是渐近稳定的。

可见变结构控制与通常的开关控制是完全不同的。它有开关的切换动作,也有逻辑判断的功能,这些动作和功能是在系统的整个动态过程中都在进行的,不断地改变系统的结构。其目的是使系统运动达到和保持一种具有预定滑动模态的开关控制。最好能称其为滑模变结构控制或变结构滑模控制。

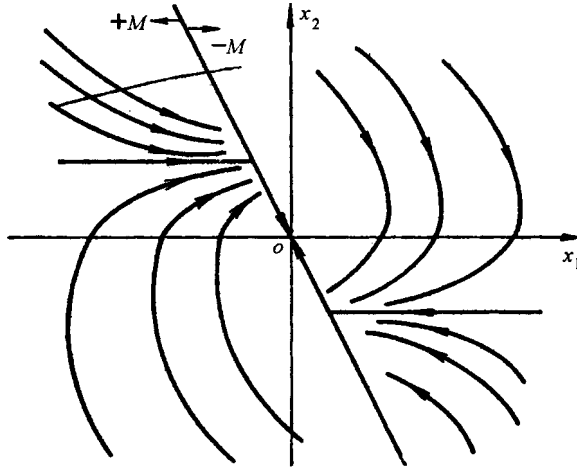


图 1.7 系统表达式(1.3.16)的状态轨迹

### 1.3.2 滞后分布参数系统的 VSC

目前关于分布参数系统的变结构控制虽已有了很多结果<sup>[51~54,84~86]</sup>,且最近出了专著<sup>[14]</sup>,但在方法上基本是单一的半群方法。且对一些具体的实际系统也是通过先转化成抽象的发展方程,然后利用半群方法得出相应结论,再将此结论又转化回原系统。这样很有可能在两个转化的过程中丢失具体系统本身的一些特性,即系统的“个性”没有得到充分的考虑。另外,用半群方法设计中,一般都要求算子的一些可逆性和可交换性,虽然文献[189]在一定程度上减弱了文献[190]的可逆性和可交换性条件,但仍需要系统算子系数  $A$  与另一算子  $P$  满足交换条件。这些条件都严重限制了文献[189,190]中方法的应用范围。其次,对无限维分布参数系统而言,采用有限维近似方法虽然给工程设计带来了很大的方便和实用性,但要考虑保证系统具有良好的动态品质,必须慎重考虑因近似所造成的偏差对系统性能的影响。如果维数  $N$  小,虽然模型简单,但精度差。如果维数  $N$  太大,虽然精度高,但又会给离线分析与在线实现带来困难。因此建立一种适用工程设计人员简单易行的设计方法是十分必要的。尤其是对滞后分布参数系统,目前对变结构控制的设计没有任何讨论。

### 1.3.3 滞后 2-D 离散系统的 VSC

要深入考虑 2-D 离散系统,有必要首先认识相应的 1-D 离散系统.目前关于 1-D 离散系统的变结构控制已出现有关结果<sup>[87~91]</sup>,如 D. Milosavijevic<sup>[92]</sup>于 1985 年研究了单输入离散系统,提出了准滑动模态的概念,并给出了到达条件

$$\lim_{S(k) \rightarrow 0^+} \Delta S(k) \leq 0, \quad \lim_{S(k) \rightarrow 0^-} \Delta S(k) \geq 0$$

其中  $S(k) = C^T x(k)$  是切换函数,  $\Delta S(k) = S(k+1) - S(k)$ . 这个到达条件并没有反映准滑动模态的现象,不能保证有限时间到达. Surpturk S<sup>[93]</sup>于 1987 年认为,把  $\dot{S}_i S_i < 0$  这种连续时间系统的到达条件推广到离散时间系统为  $(S(k+1) - S(k))S(k) < 0$  并不充分. 它提出了比较苛刻的条件,即  $|S(k+1)| < |S(k)|$  或等价形式

$$(S(k+1) - S(k))\text{sgn}S(k) < 0, \quad (S(k+1) + S(k))\text{sgn}S(k) > 0$$

但这种形式上复杂的充分条件,使得求解变结构控制十分困难,求得的控制形式也相应复杂,而且甚至求不出来. 后来, Furuta K<sup>[94]</sup>于 1990 年对标量输入离散系统提出了新的到达条件

$$v(k+1) - v(k) < 0$$

其中  $v$  是 Liapunov 函数:  $v = \frac{1}{2}S^2$ ,但是所给出的变结构控制都比较复杂,难于推广到多输入情形.

高为炳<sup>[95]</sup>于 1995 年指出,所有以往的研究都有以下不足:

1. 对准滑动模态没有建立数学模型;

2. 没有研究准滑动模态的稳定性;

3. 有些到达条件过于严格,要求的太多而实际上不必要,这就导致了求控制的困难,从而得到的控制过于复杂;

4. 没有给出简单的也适用于多输入离散系统变结构控制的设计方法.

虽然文献[11]对以上问题给出了一些修正,提出了一些新的概念且给出了一个变结构控制设计的方案,但对其丰富和更深入的探讨仍是值得注意的问题.

关于 2-D 离散系统从 Givone 和 Roesser<sup>[97]</sup>于 1974 年创建最基本的理论至今有 22 年了,由于它有着深刻的工程物理背景,使得它成为控制系统理论的一个具有强大生命力和发展前景的学科分支. 如在多维数字滤波器,多变量网络实现,多维数字图像综合处理,地震检测数据处理, X-射线图片增强,卫星气象云图的分析及分子轨道的能级和载波<sup>[96]</sup>等. 此外,模型的工程实现也要用到 2-D 离散系统<sup>[77]</sup>.

目前 2-D 离散系统研究已有了较大的发展<sup>[98~100,103~105,107~113]</sup>,如 2-D 系统的 Roesser 模型<sup>[101]</sup>、Attasi 模型<sup>[102]</sup>、Fornasini-Marchesini 模型<sup>[106]</sup>. 对各种模型的状态转移矩阵的定义;一般状态响应公式及特征值计算和传递函数矩阵计算;对几种主要的能达性、能控性及能观性和可重构性概念;最小能量控制;由传递函数矩阵和状态空间方程描述的 2-D 系统稳定性定义及有关判据;线性系统的特征值配置问题;渐近观测器和有限拍观测器以及精确型匹配及解耦问题等都有了相应的讨论.

由于 2-D 系统与 1-D 系统有着十分本质的差异,在理论上要困难得多,对其深入分析

需要运用多种数学工具. 就目前而言, 2-D 系统理论还存在着大量的问题有待解决<sup>[114]</sup>, 有些甚至是最基本的问题, 就研究手段与方法上都有待进一步完善. 而且目前对所有相应的滞后情形尚没有研究, 且对变结构控制更是没有任何讨论结果, 一些相应概念都要重新定义.

#### 1.3.4 VSC 的理论基础

对系统的控制问题可分为两个部分, 其一是系统的分析问题, 而另外一个则是系统的设计问题. 对于分析问题, 主要是假定已设计好某个闭环系统, 其目的是想要确定该系统的特性. 对于设计问题, 主要是给出某个受控装置以及闭环系统特性的一些技术要求. 其任务是要建造一控制器, 以便使该系统满足所需要的特性. 当然, 设计问题和分析问题在实际上是不能截然分开的. 因为控制系统的设计往往包含分析和设计的交互过程. 不过, 一般来说, 在进行系统设计之前, 先讨论系统的分析问题. 这是因为, 第一, 理论分析通常是探求系统特性的最经济的方法. 第二, 仿真在系统控制中固然十分重要, 但它必须有理论来指导. 尤其是对非线性系统的盲目仿真很可能得不到什么好结果, 甚至可能误入歧途. 第三, 控制器的设计总是以分析方法为基础的, 因为设计方法通常是以分析方法为基础, 所以不首先研究分析工具而想掌握设计方法, 这几乎是行不通的. 第四, 分析工具还允许我们在作出控制设计之后对该设计进行评价, 而且当出现不合适的性能时, 还可能对修改控制设计指明方向.

我们要对滞后分布参数系统和滞后 2-D 离散系统进行变结构控制研究, 首先就要对两类系统的各种性态, 尤其是稳定性态进行全面、深入的研究. 对于滞后分布参数系统来说, 在理论上, 这类系统较之通常的分布参数系统更复杂, 目前有许多问题还不清楚, 较全面的理论和方法还远未形成. 关于这类系统所开展的理论研究, 大多数问题的讨论目前仅限于解的存在性、唯一性上, 解的渐近性也有一些. 而采用的方法也基本上是单一的半群方法<sup>[115, 116]</sup>. 这些远远不能满足对滞后分布参数系统变结构控制设计的要求. 而对滞后 2-D 离散系统也有类似的问题.

虽然滞后分布参数系统和滞后 2-D 离散系统的变结构控制是二个崭新的问题, 但是对两类相应系统的各种性态分析及其进行分析的方法和手段的探讨是最基本的理论问题.

### § 1.4 本书的主要内容

本书介绍滞后分布参数系统的稳定及变结构控制问题. 全书分三部分共八章, 第一部分是绪论, 含第一章; 第二部分是连续系统, 含第二、三、四、五章; 第三部分是离散系统, 含第六、七、八章. 因为无论是滞后分布参数系统, 还是滞后 2-D 离散系统的变结构控制都是崭新的课题, 故我们遵循一般控制系统研究的原则, 都首先对相应系统(无论是连续系统还是离散系统)较全面的进行各种性态分析, 为相应的变结构控制研究奠定必要的理论基础和寻找研究方法, 而后再进行变结构控制的设计研究.

本书的目的, 不仅在于介绍作者所建立的开创新的课题及相应的理论和研究方法, 而