



大型动力系统的理论与应用 卷6

广义系统的 变结构控制

刘永清 温香彩 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 卷6

广义系统的变结构控制

刘永清 温香彩 著

華南理工大學自動化系統教授博士導師
華南理工大學系統工程研究所所長
廣東系統工程學會副理事長
廣州系統工程學會理事長
中國系統工程學會理事

图书在版编目(CIP)数据

大型动力系统的理论与应用(卷6):广义系统的变结构控制/刘永清,温香彩
著. —广州:华南理工大学出版社,1997.2

ISBN 7-5623-1092-0

I. 大…

I. ①刘…②温…

Ⅱ. 结构稳定性-受限控制-机器人控制-广义系统理论

IV. TP24

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮编 510641)

责任编辑 赖淑华

广东高要印刷有限公司印装

开本:787×1092 1/16 印张:10.875 字数:261千

1997年2月第1版 1997年2月第1次印刷

印数:1—2000

ISBN 7-5623-1092-0

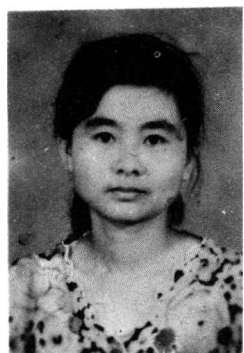
TP. 61 定价(精装):30.00元

作者简介



刘永清 华南理工大学自动化系教授, 博士导师, 系统工程研究所所长。1955年毕业于复旦大学数学系, 1973~1976年间在华南理工大学学习化工自动化仪表第二专业。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(1973~1995)数学系、自动化系工作。1984~1996年间, 先后获得国家自然科学基金资助项目五项, 广东省自然科学基金三项, 国家教委高校博士点专项基金三项, 在国内外发表论文 435 篇, 其中不完全统计收录入世界四大索引(EI、SCI、ISTP)112 篇, 1988~1995 年间出版学术著作

13 部; 1981~1996 年间获得省部委 13 项奖, 其中 1994 年度获国家教委自然科学一等奖; 1993 年获得国家科委三等奖一项。1984 年 10 月被国家人事部授予国家级首批中青年突出贡献专家; 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。1991 年经国家人事部批准享受政府特殊津贴。在国内, 他是国家自然科学基金委员会第六届评审组成员, 广东省自动化丛书评审委员会委员, 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)、应用数学等期刊编委。国外, 他是美国“数学评论”的评论员, 法国 AMSE“建模仿真进展”、“AMSE 评论”、“建模、分析进展”、“建模仿真与控制”(A、B、C)七个学术刊物的编委。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)、英国剑桥国际传记中心(IBE)理事及美国传记研究会(ABI)理事。



温香彩 华南理工大学“电子学与通信”博士后流动站博士后, 河南师范大学讲师。1984 年在河南师范大学基础数学专业获学士学位, 1989 年在西北大学基础数学专业获硕士学位, 1995 年在华南理工大学自动控制理论与应用专业获博士学位。自 1987 年以来, 对“连续微分系统和离散系统解的有界性、稳定性、镇定性”、“广义系统的稳定与镇定”、“广义系统的变结构控制及算法、仿真”、“广义非线性控制系统的混沌控制及应用”等课题进行了研究。在国内外学术期刊如《IEEE Trans Circuit System》、《Applied Math & Computation》、《J of System Science & System Engineering》、《自动化学报》、《控制理论与应用》、《控制与决策》等刊物及国际性、全国性学术会议论文集上发表论文五十余篇, 其中有十余篇被美国工程索引(EI)、科学引文索引(SCI)、科技论文录索引(ISTP)、数学评论(MR)收入。论文成果十余次获奖, 其中省级一等奖三次, 国家级三等奖一次。

前 言

《广义系统的变结构控制》是《大型动力系统的理论与应用》卷1至卷5的续篇。

广义系统也称为奇异系统、隐式系统、描述系统、半状态系统、退化系统及有代数限制的微分(差分)系统等。它产生于电力网络、电路、神经网络、受限机器人、石油催化裂化、动态投入产出、卫星重返大气层、飓风预报等科学技术及大型工程的众多领域。广义系统由微分(差分)方程描述的动态层慢变部分的子系统,以及代数方程描述的静态层的快变部分的子系统组成。它是将传统的动态与静态结合起来的由非传统数学模型描述的大系统,并具有多级、多层次、多目标、大规模与复杂性等特点。广义系统比正常系统更广泛的系统,它具有正常系统所不具有的特性,如解中含有脉冲与控制导数项、传递函数是非有理分式、具有无穷远极点、非因果性等,因而广义系统的控制问题的研究变得更为复杂。到目前为止,国内外对广义系统的控制问题的研究工作绝大多数都集中在广义线性定常控制系统,并且假定系统的参数及其结构是已知的。事实上,实际系统不可避免地存在着各种随机因素的干扰,如建模时往往忽略了许多次要因素及非线性因素的影响,因而使现有控制方法精度不够或造成系统失稳。因此,对广义系统的鲁棒控制及处于空白状态的非线性广义系统控制问题,寻求一种抗干扰性能好,又容易实现的新型控制策略与综合分析方法是十分必要的。因此,自1992年,我们就采用了具有抗干扰性和参数扰动不变性、能分解和降低系统维数等优点的变结构控制方法,系统地开展了广义系统变结构控制的研究。

本书是国内外第一本广义系统变结构控制的专著,全书分11章。除在第一章中介绍了广义系统的实际背景和国内外研究现状外,第二章至第九章、第十一章主要取材于作者自1993年以来在国内外学术刊物上发表的研究成果。在第二章中介绍了广义不确定性定常线性系统的变结构控制,建立了广义系统新的受限等价分解——控制分解,设计了广义系统不确定性项满足匹配条件和不满匹配条件时的变结构控制;在系统状态不可测的情况下,设计了系统的输出变结构控制;第三、四、六、七、八、九章中分别介绍了广义不确定性时变系统、滞后广义线性不确定性系统、广义非线性系统、大型广义关联系统、广义离散时间系统及广义分布参数系统的变结构控制。第五章中介绍了广义非线性系统的模型跟踪及状态观测器;第十章中介绍了广义非线性系统的线性化和输入—输出

解耦;第十一章中介绍了变结构控制在一类特殊的广义非线性系统——受限机器人中的应用。

与本著作有关的课题研究和论文的撰稿工作,是在国家教育委员会高等院校博士学科点专项科研基金、国家教育委员会博士后科研基金资助下进行和完成的,特此致谢!

刘永清 温香彩
1996年10月18日

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 广义系统的实际背景	(2)
§ 1.3 广义系统的研究概况	(3)
§ 1.4 本专著的主要内容	(5)
第二章 广义线性定常不确定系统的变结构控制	(7)
§ 2.1 问题与方法	(7)
§ 2.2 广义线性定常不确定系统的变结构控制理论	(7)
§ 2.2.1 预备知识	(7)
§ 2.2.2 滑动模的不变性	(9)
§ 2.2.3 实际滑动模的近似	(10)
§ 2.3 广义线性定常不确定系统的变结构控制.....	(12)
§ 2.3.1 广义线性定常控制系统的新的受限系统等价分解	(12)
§ 2.3.2 不确定项满足匹配条件时的变结构控制	(14)
§ 2.3.3 不确定项不满足匹配条件时的变结构控制	(19)
§ 2.4 广义线性定常不确定系统的动态输出变结构控制.....	(25)
§ 2.4.1 问题的提出及研究方法	(25)
§ 2.4.2 研究对象与假设	(25)
§ 2.4.3 系统结构的受限分解	(26)
§ 2.4.4 综合设计	(28)
第三章 广义线性时变系统的变结构控制	(33)
§ 3.1 问题与方法.....	(33)
§ 3.2 广义线性时变系统的模型参考变结构控制(MRVSC)	(34)
§ 3.2.1 系统的描述与假设.....	(34)
§ 3.2.2 系统的模型参考变结构控制设计	(35)
§ 3.2.3 仿真结果	(38)
§ 3.3 广义线性时变不确定系统的变结构控制设计.....	(40)
§ 3.3.1 预备知识	(40)
§ 3.3.2 系统的解析等价分解	(41)
§ 3.3.3 控制器设计	(43)
第四章 滞后广义系统的变结构控制	(51)
§ 4.1 问题的提出及研究方法.....	(51)

§ 4.2	预备知识	(51)
§ 4.3	变结构控制设计	(52)
§ 4.3.1	切换函数的设计	(52)
§ 4.3.2	变结构控制律的设计	(55)
第五章	广义非线性控制系统的模型跟踪及状态观测器	(57)
§ 5.1	问题的提出与方法	(57)
§ 5.2	广义非线性系统的模型跟踪问题	(57)
§ 5.2.1	系统的描述及预备知识	(57)
§ 5.2.2	广义非线性系统的模型跟踪	(59)
§ 5.3	广义非线性系统的状态观测器	(63)
§ 5.3.1	广义非线性确定系统的奇异状态观测器	(63)
§ 5.3.2	广义不确定非线性系统的正常状态观测器	(64)
§ 5.3.3	广义不确定非线性系统的干扰解耦状态观测器	(67)
第六章	广义非线性系统的变结构控制	(69)
§ 6.1	问题的提出与方法	(69)
§ 6.2	指标为 1 的广义非线性系统的变结构控制	(69)
§ 6.2.1	系统的描述及预备知识	(69)
§ 6.2.2	指标为 1 的广义非线性系统的变结构控制设计	(70)
§ 6.3	广义仿射非线性系统的变结构控制	(72)
§ 6.3.1	系统的描述及预备知识	(72)
§ 6.3.2	系统的受限等价分解	(72)
§ 6.3.3	广义仿射非线性系统的变结构控制设计	(74)
§ 6.4	高指标的广义非线性系统的模型参考变结构控制设计	(77)
§ 6.4.1	系统的描述及假设	(77)
§ 6.4.2	高指标广义非线性系统的变结构控制设计	(78)
§ 6.5	广义不确定非线性系统的自适应变结构控制	(81)
§ 6.5.1	系统的模型及预备知识	(81)
§ 6.5.2	广义不确定非线性系统的自适应变结构控制设计	(82)
第七章	大型广义关联系统的变结构控制	(88)
§ 7.1	问题的提出及方法	(88)
§ 7.2	大型广义线性不确定系统的变结构控制	(88)
§ 7.2.1	系统的描述与假设	(88)
§ 7.2.2	大型广义线性不确定系统的变结构控制设计	(89)
§ 7.2.3	仿真例子	(95)
§ 7.3	大型广义非线性系统的变结构控制	(100)
§ 7.3.1	系统的描述及假设	(100)
§ 7.3.2	大型广义非线性系统的变结构控制设计	(101)
§ 7.4	具有输入关联的大型广义系统的变结构控制	(105)
§ 7.4.1	系统的描述及预备知识	(105)

§ 7.4.2 具有输入关联的大型广义系统的变结构控制设计	(106)
§ 7.4.3 仿真例子	(108)
第八章 广义离散时间系统的拟滑动模控制	(112)
§ 8.1 问题的提出及研究方法	(112)
§ 8.2 广义离散时间系统拟滑动模控制的等价有效性及实现条件	(112)
§ 8.3 广义离散时间系统的拟滑动模控制设计	(115)
§ 8.4 仿真结果	(118)
第九章 广义分布参数系统的变结构控制	(121)
§ 9.1 引言	(121)
§ 9.2 全局分布变结构控制	(121)
§ 9.3 区域分布变结构控制	(125)
第十章 广义非线性系统的线性化及输入—输出解耦	(128)
§ 10.1 引言	(128)
§ 10.2 广义非线性系统的线性化	(128)
§ 10.3 广义非线性控制系统的线性化	(132)
§ 10.4 广义非线性控制系统的输入—输出解耦	(138)
§ 10.4.1 问题的提出及一些基本结果	(138)
§ 10.4.2 静态反馈输入—输出解耦	(143)
第十一章 变结构控制在受限机器人中的应用	(145)
§ 11.1 引言	(145)
§ 11.2 受限机器人的变结构控制	(145)
§ 11.2.1 受限机器人的动态模型及性质	(145)
§ 11.2.2 受限机器人的变结构控制设计	(146)
§ 11.2.3 仿真例子	(148)
§ 11.3 受限机器人的变结构模型参考自适应控制	(150)
§ 11.3.1 受限机器人机械手模型和一些性质	(151)
§ 11.3.2 控制器设计	(153)
附录 A	(155)
附录 B	(157)
参考文献	(158)

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

随着现代控制理论应用于工程系统的深入和向其他学科如生态、人口、能源、经济和社会管理系统的渗透,出现了所谓大规模系统.一般地,大规模系统都含有若干个子系统,每个子系统都有自己的动态特性,诸子系统之间又存在着非常复杂的联系与制约,通常可归结为如下系统:

$$E(x, t)\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1.1.1)$$

$$y = g(x, u, t) \quad (1.1.2)$$

这里 $x \in R^n$ 为系统的状态, $u \in R^r$ 为控制输入, $y \in R^m$ 为系统的输出, f, g 为 x, u, t 的矢值函数, $E(x, t) \in R^{n \times n}$ 为函数矩阵. 当 $\text{rank}E = n$ 时, 式(1.1.1)即为正常系统, 当 $\text{rank}E = r < n$ 时, 称式(1.1.1)为广义系统.

事实上, 在不同的领域, 对 $\text{rank}E < n$ 的系统有不同的术语. 例如: 控制理论家和数学家称之为“奇异系统(singular system)^(1~4)”(这是因为状态导数的系数矩阵是奇异的)或“广义状态空间系统(generalized state space system)^(5~7)”、“扩展的状态空间系统(extended state space system)⁽⁸⁾”; 工程经济领域称之为“描述器系统(descriptor system)^(9~10)”(因为它给出了系统的自然描述); 数值分析领域称之为“微分-代数方程(differential-algebraic equation)^(11~14)”或“具有代数限制的微分方程⁽¹⁵⁾”; 在电路领域, 称之为“半状态系统(semi-state system)^(16~17)”等.

正常系统和广义系统之间有本质的区别, 以广义连续线性定常系统

$$Ex = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (1.1.3)$$

为例, 主要体现在以下几个方面⁽³⁾:

(1) 解的结构. 由附录 A 知, 广义系统(1.1.3)的解中不仅含正常线性系统所具有的指数解(对应于有限极点), 而且含有正常线性系统解中不出现的脉冲和控制导数有关项(对应于无穷远极点), 因此, 欲确定解不仅需要直到 t 时刻系统的信息, 还需要 t 以后系统的信息, 即广义系统不再具有传统的因果性.

(2) 正常系统有 n 个自由度, 而广义系统仅有 $\text{rank}E$ 个自由度.

(3) 正常系统的输入输出之间的传递函数阵为真有理分式阵, 而广义系统的传递函数阵中包含多项式矩阵.

(4) 正常系统的齐次初值问题的解存在且唯一, 但对广义系统, 齐次初值问题可能是不相容的. 即可能不存在解, 如果有解, 也不一定唯一(见附录 A).

(5) 广义系统具有层次性, 一层为对象的动态特性(由微分或差分方程描述), 另一层为管理特征的静态特性(由代数方程描述), 而正常系统没有静态特性.

(6) 广义系统的极点,除了有 $\deg(\det(sE - A)) = n_1$ 个有限远极点外,还有正常系统不具有的 $(n - n_1)$ 个无穷远极点,在这些无穷远极点中又有动态无穷远极点和静态无穷远极点.

(7) 在系统结构参数任意扰动下,广义系统不再具有结构稳定性.

十几年来,广义系统的普遍性、简便性、可实行性和实用性已受到国内外数学界、工程界、物理界、经济界等学者的重视.由于它本身的特性,处理正常系统的方法和手段对大多数高指标广义系统不再适用,因而需要提出、建立新方法.

§ 1.2 广义系统的实际背景

广义系统理论的发展受实际应用的驱动.下面介绍几个例子:

例 1: 含管理在内的石油催化裂化过程,其简化模型为^[19]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_{11}\mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{12}\mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_1\mathbf{u} + \mathbf{F}_1f \\ 0 = \mathbf{A}_{21}\mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{22}\mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_2\mathbf{u} + \mathbf{F}_2f \end{cases} \quad (1.2.1)$$

其中 $\mathbf{x}_1 \in R^{n_1}$ 为被调节量,如再生温度、滑阀位置、鼓风机能力等; $\mathbf{x}_2 \in R^{n_2}$ 由影响企业效益和反映企业管理政策的一些量组成,如压力、油浆回收率、重油回收率等; $\mathbf{u} \in R^r$ 为调节量, f 是外干扰.

式(1.2.1)为典型的广义连续线性不确定系统.

例 2: 根据经济的需求平衡原理,考虑市场环境时,已知多部门的一步延滞的 Leontief 动态投入产出模型^[20]:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k)) + \mathbf{w}(k) + \mathbf{d}(k) \quad (1.2.2)$$

其中 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$ 为消耗系数阵, $\mathbf{B} = (b_{ij})_{n \times n}$ 为投资系数阵, $\mathbf{x}(k) \in R^n$ 为 k 时刻的产量, $\mathbf{d}(k) + \mathbf{w}(k)$ 为 k 时刻的最终产品量,其中 $\mathbf{d}(k)$ 为确定性的,被称为计划中的最终消费, $\mathbf{w}(k)$ 为市场波动对消费的影响. b_{ij} 表示第 j 部门每增加单位产量需要第 i 个部门的投资.由于在多部门的经济系统中,某一部门的增产并不需其他所有部门的投资,另外从实际系统出发,能够向其他部门提供投资的部门也是少数,因此在 \mathbf{B} 中除少数行具有非负外,其他皆为零,从而是降秩阵.

系统(1.2.2)是典型的广义不确定离散系统.此类系统即所谓的宏观经济模型,在我国早已受到重视,并在实际中应用.随着我国社会主义市场经济的建立和完善,对动态投入产出模型的研究必须进一步深入考虑到在市场经济条件下的各种不确定因素对系统的影响.在变化的市场环境中,对产出作出准确的调节和估计是很必要的,可以为宏观经济调控提供科学的决策依据,促使经济稳定发展.

例 3: 具有非线性负载的电力系统模型为^[22~24]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}}_g = -S[P_g(\mathbf{a}_g, \mathbf{a}_l, \mathbf{v}) - P_M] \\ \dot{\mathbf{a}}_g = \mathbf{r}_g \\ 0 = P_l(\mathbf{a}_g, \mathbf{a}_l, \mathbf{v}) + P_d \\ 0 = [\mathbf{v}]^{-1}[Q_l(\mathbf{a}_g, \mathbf{a}_l, \mathbf{v}) + Q_d(\mathbf{v})] \end{cases} \quad (1.2.3)$$

\mathbf{a} 为与一参考总线有关的总线角向量, \mathbf{r} 为相关发电机的频率向量, \mathbf{v} 是总线电压的振幅向

量, P, Q 为实电抗功率, 下标 g 和 l 分别表示网络中的发电机和负载总线, P_M 为机械输入电力, $S = T_g M_g^{-1} T_g^T$, M_g 为惯性常对角矩阵, T_g 为元素为 1 或 -1 的相关矩阵, 电力 P_g, P_l 和 P_b 由

$$\begin{aligned} P_b &= (P_l, P_g) \\ P_{br}(\mathbf{a}, \mathbf{v}) &= \sum_{j=1}^n V_i V_j B_{ij} \sin(a_i - a_j) \\ Q_{br}(\mathbf{a}, \mathbf{v}) &= - \sum_{j=1}^n V_i V_j B_{ij} \cos(a_i - a_j) \end{aligned}$$

给出, 系统(1.2.3)为典型的广义非线性系统.

例 4: 神经网络系统^[25]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{a}_i(\mathbf{x}_i) \left(\mathbf{b}_i(\mathbf{x}_i) - \sum_{k=1}^L \mathbf{w}_{ik} \frac{d_i(k)}{s(\mathbf{x}_i)} \prod_{j \in I_k} y_j^{d_j(k)} \right) \\ 0 = \mathbf{a}_L(\mathbf{z}_L) \left(\mathbf{b}_L(\mathbf{z}_L) - \sum_{k=1}^L \mathbf{w}_{Lk} \frac{d_L(k)}{s(\mathbf{z}_L)} \prod_{j \in I_k} y_j^{d_j(k)} \right) \end{cases} \quad (1.2.4)$$

这里, $\mathbf{x}_i, \mathbf{z}_L$ 为第 i 个神经元的状态, $i=1, 2, \dots, n$, \mathbf{a}_i 对应神经细胞相关生存期标度, $\mathbf{b}_i(\cdot)$ 对应接受力和时延, 也可能包括细胞的自我反馈, $s(\cdot)$ 为神经元的输入, \mathbf{w}_{ik} 为网络的连接权, $\{I_1, \dots, I_L\}$ 为 $\{1, 2, \dots, m+n\}$ 的 L 个无序子集.

式(1.2.4)是典型的大型广义连续系统.

再如, 空间运载卫星重返大气层模型^[26] 为高非线性高指标的广义连续系统, 飓风的预报^[27] 模型(飓风形成过程的描述方程中有动态(由于空气和水的运动)和代数限制(由于气体和热力学定律及毗邻环境的关联条件)), 受限机器人模型^[28] 等皆为广义系统, 因此, 现实世界为广义系统的研究提供了深远的实际背景.

另外, 从理论角度看, 广义系统也有广泛的应用. 例如, 正常系统的最优控制问题^[3], 指定输出问题^[3], 奇摄动问题等, 都可化归为一广义系统, 因此, 研究广义系统不仅具有理论价值, 而且也有广泛的应用价值.

§ 1.3 广义系统的研究概况

对广义系统的研究, 始于 Rosenbrock^[19], 他是在研究复杂的电网络系统中首先提出该问题的. 后来, Luenberger^[20] 发现经济中的动态投入产出模型, 具有快、慢变生产过程的冯·纽曼模型也属此范畴. 在 60 年代末和 70 年代初, 对广义系统感兴趣的主要是数值界. 考虑的问题主要是指标为 1 的广义非线性系统的数值解^[30]. 进入 80 年代后, 由于它作为处理具有多级、多目标、多维数和多层次的大规模复杂系统的一个恰当的工具, 在大系统理论、奇摄动理论、电路系统、计量经济学、控制理论、决策理论等其他领域得到了广泛的应用, 引起了各界的关注. 但直到 80 年代末期, 才进入 IEEE 领域, 在短短的几年内, 国内外控制理论家们发表了不少论文, 主要将已有的控制系统中的能控性、能观性、调节与优化等问题相应地推广到了广义线性定常系统中. 下面对与本书相关的问题作一简单介绍, 有兴趣的读者可参看有关文献.

能控性和能观性方面: 研究的方法有几何方法和代数方法, 但以代数方法——矩阵分析

为主. 由于可以从不同侧面反映广义系统的性质, 因而有各种能控(观)定义. 例如: 脉冲能控(观)、极点能控(观)、强能控(观)、完全能控(观)、 R -能控(观)等. 此方面的研究已相当完善, 但却都限于广义定常线性系统^[31, 32, 18].

广义系统的反馈和极点配置: Cobb^[33]利用几何方法首先讨论了这个问题, 得出在脉冲能控条件下, 存在反馈, 可把系统的所有无限远极点带到有限远的位置. Armentano 给出了构造状态反馈的过程^[34]. 1986年后, 人们对极点配置问题的讨论多采用矩阵方法, 提出了各种各样的反馈形式^[35~45], 其中最有效的为 PD 反馈, $u = Kx + L \dot{x}$, $u = Ky + L \dot{y}$. PD 控制器的应用在工业实践中已有很久的历史, 但对广义系统 PD 反馈中两个增益矩阵的确定需要复杂的计算过程. Crow 和 Ilic 在文献[11]中提出了利用常比率比例的导数反馈(CRPD). 与 PD 反馈相比, CRPD 设计较简单(因为只需设计一个控制参数).

广义系统的状态观测器问题: 同正常系统一样, 广义系统观测器在状态反馈控制中有着特殊的作用. 目前, 对广义线性定常系统和在一定条件下的干扰线性定常系统的观测器设计已有很多文献论及^[46~58], 人们或采用扩展正常系统观测器方法^[47~50]或用奇异值分解方法^[46, 51, 52]设计了全阶奇异 Luenberger 型观测器或降价的正常状态观测器. 国内学者王朝珠等在观测器设计方面作了不少工作^[56, 58], 他们所用的方法与上述方法不同, 没有把控制系统分解成快、慢变子系统, 而是通过引入正常化概念或直接从系统本身或构造性地给出一种输入、输出可逆变换结构分解进行设计. 至今为止, 关于非线性广义系统的观测器设计问题除本书的有关结论外, 尚无人问津.

广义系统的稳定与镇定: 由于广义系统本身的特殊结构, 对其进行的数学分析相当复杂和棘手. 目前, 还没有形成一套完整的稳定性理论, 所得结果或是针对无干扰的线性定常广义系统, 或是针对实际问题中的某一类具体特殊非线性模型(例如神经网络模型^[25]、电网络模型^[21~24]), 或是局部性地利用嵌入化为常微分方程, 方法皆为 Lyapunov 函数方法. 对于镇定问题, Campbell 和 Dai 分别在专著^[3, 4, 18]中详细地对线性定常广义系统进行了研究. 杨成梧等^[59]用几何方法研究了脉冲能控线性定常广义系统的输入输出稳定化问题, 提出了适用于脉冲能控系统的 FASA 解法, 即先通过快反馈配置好系统的无穷远极点, 其次把配置好的系统化为受限等价系统, 最后利用慢反馈将系统输出稳定化, 之后, 作者又在文献[60]中讨论了无干扰的确定广义时变线性系统

$$E(t)\dot{x}(t) = A(t)x(t) + u(t)$$

在参数 $E(t)$ 、 $A(t)$ 缓变时的运动稳定化问题, 采用的方法为冻结系数法, 所得结果表明: 与正常系统不同, 广义系统的运动稳定性不仅与其参数的缓变有关, 而且与其解在其“冻结系统簇”的慢子系统的解空间上的投影密切相关, 冻结系数法一般已不再能保证广义时变线性系统(充分缓变时)的稳定性, 而只能保证其具有某种意义下的弱稳定性. 初学导在文献[62]的基础上利用分散控制和固定模的概念讨论了系统

$$E\dot{x} = Ax + \sum_{j=1}^N B_j u_j$$

$$y_j = C_j x, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

存在形如

$$\dot{z}_i = S_i z_i + R_i V_i$$

$$u_i = Q_i z_i + K_i y_i + V_i$$

的动态补偿器使闭环系统稳定的条件.

综上所述,可知大量结果皆是对确定的广义线性定常系统而言.而在实际中,系统不可避免地要受到各种随机因素的影响,所建立的数学模型总是近似描述实际情况的理想模型.因此,当我们对理想模型进行综合设计时,必须要考虑到一些不确定因素,以便所作的综合设计更适于实际情况.

鲁棒控制是当今控制领域的热门课题,但在广义系统中,这方面的研究结果很少,其原因是由于脉冲行为的存在.大家知道,广义系统的模有三种:有限动态模、无限动态模和无限非动态模.无限动态模可能产生不希望的脉冲行为,因此,消去或避免产生无限动态模是广义控制系统的主要工作,当系统具有扰动时,此扰动可能改变系统的结构性质.以扰动线性定常广义系统为例,假设系统为

$$E\dot{x}(t) = Ax(t) + \Delta Ax(t) \quad (1.3.1)$$

$\deg(\det(zE - A)) = r = \text{rank} E$, 则当 $\Delta A \equiv 0$ 时,式(1.3.1)有 r 个有限动态模,没有无限动态模,有 $(n-r)$ 个无限非动态模.然而,若 $\Delta A \neq 0$,式(1.3.1)可能出现无限动态模,即 $\deg(\det(zE - A))$ 改变.进一步,扰动 ΔA 也可能摧毁系统的正则性,例如:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 4 & 4.2 \end{bmatrix}, \quad \Delta A_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0 & -0.2 \end{bmatrix}$$

$$\deg(\det(zE - A)) = 1 = \text{rank} E, \quad \deg(\det(zE - A - \Delta A_2)) = 0 < \text{rank} E$$

$$(\det(zE - A - \Delta A_1)) \text{ 的度不存在}$$

因此,在广义系统的鲁棒控制设计中,不仅要考虑鲁棒稳定性,而且还要考虑正则性和消去脉冲,而在正常系统中,后面两个问题不存在,因此广义系统的鲁棒控制设计要比正常系统困难得多.王朝珠等^[66]和张庆灵^[99]分别用连续的状态反馈控制考虑了形如

$$E\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u$$

$$E\dot{x} = (A + \Delta A)x + Bu$$

的鲁棒镇定问题,设计过程比较复杂.另外,文献[91]把文献[92]中正常系统的频域根轨迹法推广到了广义分散控制系统的鲁棒镇定问题.

在正常系统鲁棒镇定问题的确定设计方法中,变结构控制是一种强有力的方法,它的设计过程简单,易于工程实现,且具有高速响应、瞬时性能良好、对系统参数不敏感、与外部扰动无关等优点.这种控制是由苏联学者 Utkin 等提出的,目前已被广泛应用在化工、机械中.但对广义系统,国内外研究结果很少,且研究对象皆是对具体的实际系统(比如受限机器人^[136~139]).本书基于广义系统和正常系统的基本结构,对广义系统的变结构控制进行了研究,设计了适用于广义系统的动态补偿切换函数.

§ 1.4 本专著的主要内容

本专著主要研究广义系统(连续和离散)的变结构控制理论及其应用.目标是给出可以应用于实际工程的变结构系统的设计方法.因而,对每一类系统(不确定广义线性定常系统、不确定广义线性时变系统、不确定广义非线性系统、不确定广义离散时间系统、广义分布参数系统),研究了系统在所有状态信息均可测量得到的情况下或系统只有部分状态信息可以

测量得到的情况下,相应的变结构控制系统的设计问题.本书共有十一章,主要取材于温香彩、刘永清的近期研究工作^[11~137,155~159].全书概况如下:

第二章研究了广义不确定线性定常系统的变结构控制理论.首先给出了广义系统滑动模不变条件及实际滑动模的近似定理.从所得结论可知:与正常系统不同,等效控制法对广义系统不再成立,它仅能保证动态状态变量稳定,而对静态状态变量不一定能保证稳定性.接着,建立了系统的新的受限系统等价分解,把原来的系统化为两个低阶子系统:一个是与控制无关的正常系统,另一个是与控制有关的广义系统,实现了控制变量的完全分离,从而把复杂的高阶系统的设计问题化为简单的低阶子系统的设计问题.然后,根据正常系统的控制理论与广义系统本身的结构特点,设计了不确定项满足匹配条件和不能满足匹配条件时的变结构控制.最后,在系统状态不可测量得到的情况下,设计了系统的状态输出变结构控制.

第三章讨论了广义不确定线性时变系统的变结构控制问题,分别利用模型参考法和建立的系统解析等价分解形式,对广义线性时变系统设计了模型参考变结构控制和变结构控制,并给出了广义线性时变系统的实际滑动模近似定理.

第四章通过建立的滞后广义系统的受限系统等价分解和动态补偿器,利用滞后正常系统的理论和无滞后广义系统的理论,讨论了滞后广义线性不确定系统的变结构控制设计问题,所提供的研究方法为进一步研究滞后广义系统的其他问题,开辟了一条新的途径.

第五章利用变结构方法,研究了广义非线性系统的模型跟踪问题.在不同情况下,通过引入动态补偿器概念,首先设计了广义模型跟踪系统的切换函数,得到了在切换面上实现跟踪的条件.然后利用连续滑动模方法设计了变结构控制,以保证在切换面外的运动实现滑动模.最后讨论了广义非线性系统的状态观测器问题,在不同情况下,给出了系统奇异全阶状态观测器和正常降阶状态观测器的结构形式、存在条件和设计方法.

第六章首先对指标为1的广义非线性系统,利用正常系统最优控制综合的 Lyapunov 方法研究了变结构控制问题.其次通过利用引入的受限系统等价分解,根据正常系统的非线性控制理论和广义系统的性质对仿射广义非线性系统的变结构控制问题进行了研究.最后通过选取一具有指定性能的广义线性定常系统作为参考模型,根据所控系统与参考模型的误差方程,在一定条件下,设计了系统的模型参考变结构控制.

第七章首次研究了不具有输入关联的大型广义线性定常系统和大型广义非线性不确定系统的变结构控制问题.在一定条件下,分别对其设计了校正分层变结构控制和分散变结构控制.然后利用对角占优矩阵的性质和 Frobenius-Perron 定理,结合 Lyapunov 函数,对具有输入关联的大型广义线性不确定系统设计了分散变结构控制.

第八章首次研究了广义离散时间系统的拟滑动模控制问题,建立了广义离散时间拟滑动模控制理论,并通过建立的广义离散时间系统的受限系统能控标准分解,成功地设计了系统的切换超平面及有记忆的拟滑动模控制器,仿真结果验证了所建立的方法的可行性及正确性.

第九章介绍了广义分布参数系统的变结构控制问题.针对两种控制形式,即全局分布控制形式与区域分布控制形式,给出了变结构控制设计.第十、第十一章分别介绍了广义非线性系统的线性化和输入输出解耦,以及变结构控制在一类特殊广义非线性受限机器人系统中的应用.

第二章 广义线性定常不确定系统的变结构控制

§ 2.1 问题与方法

从第一章可以看出,迄今为止,对广义控制系统的研究,几乎都假定系统有确定的结构和已知的参数,而在实际中遇到的系统不可避免地要受到各种随机因素和系统未建模部分的影响,因此对广义不确定控制系统进行研究是非常有必要的.

原则上,不确定系统的控制器问题是用一个确定的控制器去控制一簇系统,而不论这些系统的参数如何选取,在此固定控制器的作用下,系统皆可正常工作.要做到这一点是非常困难的.对正常控制系统(即由常微分方程描述的系统),已有很多文献研究了其鲁棒控制器设计问题^[70,75],而对广义控制系统,很少有文章论及.这是因为广义系统的解与控制及不确定项的导数有关.在进行控制器设计时,不仅要考虑系统的鲁棒性,而且还要考虑系统的正则性与脉冲现象.王朝珠^[66]等国内学者利用经典控制方法首次对广义不确定系统

$$\dot{E}x(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t)$$

进行了鲁棒稳定化控制器设计,设计过程比较复杂,且结果对非线性扰动失效.胡跃明等^[73]在1993年把变结构控制思想引入到广义系统中,设计的控制建立在广义系统的第二种受限等价形式的基础上,设计出的切换函数使滑动模运动,一方面阶数高(等于系统的阶数),另一方面依赖于理想系统(未受系统内外部干扰的确定系统)的控制,因此给滑动模运动动态品质的研究及控制器的选取带来一定的困难.此外,文献[73]所设计的控制仅能保证闭环系统的部分状态稳定(即 E -稳定),而不能保证全状态稳定(即完全稳定).

本章首先建立了广义系统的变结构控制理论,给出了滑动模不变的充分和必要条件,讨论了实际滑动模的近似问题.从结果可看出,与正常系统的变结构控制中全状态近似不同,广义系统只有动态部分可近似.因此,广义系统的变结构控制研究比较麻烦,且有一定的适用范围.

第三节通过引入第四种受限等价分解,设计了广义不确定系统在不确定项满足或不满足匹配条件时的变结构控制.其方法为:首先根据滑动模实现条件,得出闭环系统的 E -稳定,然后由广义系统的性质对静态部分估值.

第四节从引入系统结构分解形式出发,研究了广义系统的动态输出变结构控制.

§ 2.2 广义线性定常不确定系统的变结构控制理论

§ 2.2.1 预备知识

对如下形式的广义线性定常系统