



FUZA XIANGSI ZHUXITONG
DE LUBANG QUANKI KONGZHI LILUNYUSHEJI

复杂相似组合系统的鲁棒全息 控制理论与设计

严星刚 著

西北工业大学出版社

00007043

TP273

222



复杂相似组合系统的鲁棒全息 控制理论与设计

严星刚 著

西北工业大学出版基金资助出版



西北工业大学出版社



C0482684

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书是有关相似控制系统研究的第一部专著,系统地总结了作者近年来的主要研究成果。首先提出了相似系统及全息控制的概念,并给出了其背景知识描述。然后利用 Lyapunov 分析法及现代微分几何方法给出了分别用状态和输出反馈对非线性相似组合大系统镇定的鲁棒全息控制方案以及基于估计状态的镇定设计,最后研究了相似组合大系统的迭代学习控制问题。数例及实例展示了所给控制方案的有效性及其在实际工程中的应用。

复杂相似组合系统的鲁棒全息控制理论与设计

严星刚 著

责任编辑 郑永安

责任校对 耿明丽

*

©1999 西北工业大学出版社出版发行

(邮编:710072 西安市友谊西路127号 电话:8491147)

陕西新华书店经销

西安市长安第二印刷厂印装

ISBN 7-5612-1195-3/TP·166

*

开本:850毫米×1168毫米 1/32 印张:5.875 字数:136千字

1999年11月第1版

1999年11月第1次印刷

印数:1-2000册

定价:15.00元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

序

科学探索的一项根本任务,就是揭示自然规律并运用这些规律。回顾 20 世纪的重要科学发展,从研究物质结构到原子能、核能的利用,从发现遗传基因到克隆生物的诞生,无不体现这一历程以及其对于推动人类文明进步的巨大作用。

控制论未来的研究方向为何? 研究自然形成的控制系统的机理机制,应是方向之一。其中,这类系统的结构研究,又是具体可行并有重要意义的课题。

一个自然发展演化形成的控制系统,如生物系统(特别是人)、社会系统等,在其发展过程中,要适应外界环境,并力求以最佳状态运行,于是扬长汰劣,逐渐演化,故应是“自寻最优”地形成系统的结构。

对称性和相似性是这类系统结构的明显特征。生物系统的对称性是显然的。社会系统中,如一个国家,中央、省、市……不同层次的组织机构相似。

生物控制系统中的相似性在我国针灸医疗系统中早被发现并应用。人体经络的穴位分布是由不同层次的与总体(人体)相似的子系统构成的,例如人耳,形如卧婴(胎儿),其上穴位分布与人体器官分布对应,脚底穴位分布也是如此,等等。

针灸系统是中华文明中的伟大发现,这种深层次的相似结构的揭示,闪烁着中华民族的智慧 and 哲理。

当然,还可能其它形式的结构。

仅就对称性、相似性而言,一个自然形成的控制大系统,似由具有对称和相似结构的不同层次的子系统构成。若这种结构的形

式在某种意义下为“最优”，那末，其优点何在？具有那些性质功能？各层次间以何种形式具体构成以及作用机理如何？由功能不同的子系统可构成的大系统又有何种不同质的功能呢？……这些问题都远未清楚。

在工程中，也广泛存在具有这类结构的控制系统，如由多台相似机组构成的发电厂、军事 C³I 系统中的护航问题、机器人、人工神经网络、计算机网络中的星拓扑等。因此，这类系统的研究具有广泛意义。

由生物、社会等系统的相似、对称结构出发提出课题，这种观点国外似尚未见到，有我国自己的特色。

上面所提的问题，应是一个长期的涉及不同学科之间交叉研究的课题。

从 1987 年起，我和我的学生们开始了复杂控制系统对称、相似性结构的研究。10 余年来，我们使用了微分几何、图论、近世代数学方法，对线性、非线性各类系统的多种控制问题，进行了较广泛的研究。已取得了一批结果，在国内外期刊以及重要国际学术会议上发表论文 100 余篇。从这些结果中显示出一种体现对称、相似结构与控制问题间内在联系的一般性规律：即对称、相似结构可导致控制系统在多个方面对于多种问题的一系列化简，例如可分解简化为低维子系统，或得到数目减少、结构简单的修正子系统，并据此对多种控制问题得到简化的控制规律。

这样的结果是很有意义的。首先，上述用降维简化的子系统寻求总体系统的控制规律，对比针灸系统，也正是用与总体相似的子系统控制调节总体系统，两者吻合。这正是我们所希望看到的。另外，近年来出现分形(fractal)理论，研究自然界自相似几何图形，如云层边界、雪花外形等，并揭示：自相似性可导致用少量本质信息及简单规律，描述这些复杂外形。对于控制系统，对称相似结构也导致用少量本质信息，描述控制过程，这又与分形规律吻合。其

次,复杂控制系统由于其非线性特性及高维数,使得研究难度增大,此方向给出一种研究途径,而降维简化,又是有重要的实际意义的。

此方向的研究已经展开,已开展的研究尚有大量问题亟待深入。另外,新型系统、新的对称相似概念正在扩展,新问题又涌现,如全息控制,协调控制,例如人的行走需手足运动的协调,体操运动是更高级的协调,设计高性能的机器人须发展协调控制理论,而协调运动又是和对称结构密切相关的,等等。可以看到,这是一个有丰富内容并有发展前景的方向。

严星刚在攻读博士学位期间及其以后,在此方向进行了深入研究,取得了突出成果,丰富了上述研究内容,例如他给出“结构全息控制器”的设计,即任一子系统的控制器的结构,含有其它子系统及总体系统控制器的全部结构信息,从而只须设计一个子系统的控制器,这又使控制设计问题大为简化。

严星刚将他的研究成果整理成书,这将是此研究方向出版的第一本专著,这是一个可喜的开端,希望此书的出版,能够引起更多科技工作者的兴趣和参与,进一步推动此方向研究的深入。

张嗣瀛

1999年3月4日

前 言

相似系统是现实世界中广泛存在的一类具有特定结构的系统。无论是数学,物理,化学,天文学,系统科学,还是人体科学,生物、生态学以及社会科学和管理科学都不同程度地涉及系统的相似特性。

考察现实世界中的大量自然现象,不难发现,“自然发展形成的系统,由于要适应其外部环境,并力求以最佳状态运动,于是用进废退,扬长劣汰,‘自寻最优’地逐渐演化而形成其结构。”^[3]现实世界中许多自然发展而形成的系统,为了与其它系统共存,不断彼此适应,日趋和谐,形成一种最佳结构——相似结构。系统之间的共适性成为相似结构演变的原动力。九大行星各自的运动系统具有明显的相似特征;全息生物学指出^[20]:一个全息元的各部位的生物特性是大致相似的。全息元上每一部位都包含着整体或其它全息元上所对应部位的生物学特性的信息,有神经中枢的动物在各全息元的对应部位之间以及这些部位与主体之间,通过中枢为介,体现出极高的全息相似性;一个国家及其下辖的省、市、县都具有相类似的组织部门和管理机构,且这些相应部门的运行机制也完全相似……这一切表明,深入探索相似现象,进一步研究相似系统,对于揭示自然规律,最终服务于人类是非常有意义的。

我的博士导师,中国科学院院士张嗣瀛教授通过考察分析大量自然现象,提出了复杂控制系统的对称性及相似性的结构研究这一全新的研究方向,受到了国内外学者的极大关注。这一研究课题自1986年以来一直受到国家自然科学基金的连续资助。1993年之前,其主要任务是复杂控制系统对称性的研究。在这一时期,

现代微分几何方法的成功应用为对称系统的研究开辟了航向,无论是对称系统的结构研究还是控制设计都取得了许多重大成就。1993年之后,开始转向相似系统的研究。张先生经过多年辛勤耕耘,特别是受中国针灸学及全息生物学的启发,首次提出了“通过中间层次对总体进行控制调节,利用全息思想设计性能优良的控制器”这一富有创造性的独特而深刻的思想,为控制理论的发展开辟了崭新的研究领域,也从方法论的角度为控制论学者提供了一种可供借鉴的研究途径。目前,对于线性系统的研究已取得了许多优秀的成果,有关论文也分别发表在“IEEE Trans. on Automatic Control”“Automatica”“Int. J. of Control”等国际著名学术期刊。这一切表明,这一具有中国特色的研究领域已在国际上产生了一定的影响。

1994年9月,我考入东北大学自动控制系攻读博士学位,在张先生的指导下,开始进行复杂非线性相似组合大系统控制问题的探索和研究。与对称控制系统不同的是,相似控制系统的研究国内外均未曾有人涉猎,所以,每前进一步都很困难,当然每前进一步都意味着创新。由于无先前经验可借鉴,一开始仅相似系统模型的建立就感觉非常困难,至于如何将张先生的全息控制思想具体化,并给出其精确的数学描述更是无从下手。在张先生的反复启发和悉心指导下,我经过深刻思考,不断探索,终于建立了一类具有广泛代表性的非线性相似组合系统模型,提出了一种易于设计的结构全息控制方案,得到了一系列富有创造性的成果,部分已发表在“IEEE Trans. on Automatic Control”“Automatica”“IMA Journal of Mathematical Control and Information”“IFAC World Congress”“IEEE CDC”《自动化学报》等国内外重要学术刊物及重要国际学术会议上,提前9个月博士毕业,并于1997年元月进入西北工业大学航空与宇航技术博士后流动站,在著名学者、西北工业大学校长戴冠中教授指导下从事博士后研究工作。在戴先生

的精心指导下,目前已取得到了一些更为深刻的结论。这本专著就是作者近年来所取得的科研成果的归纳与总结。

全书共分八章。第一章介绍相似系统的基本概念及鲁棒控制和全息控制的有关知识,给出相应的背景描述,并指出本书的主要特色及贡献;第二章和第三章分别给出基于状态反馈的非线性相似组合大系统的集中和分散的结构全息鲁棒控制方案;考虑到实际系统的状态一般仅是部分可知的,本书的第四章利用几何法和分析法相结合,分别对满足“匹配条件”和具有较一般形式的不确定非线性相似组合大系统进行了分析,给出了相应的鲁棒渐近状态观测器的设计方案;由于非线性系统的复杂性,即便利用同一控制器,分别用估计状态和真实状态对同一系统进行镇定可能会得到不同甚至截然相反的结论,因此,本书在第五章研究了基于渐近观测器所得的估计状态对非线性相似组合大系统进行镇定的控制器设计问题,并将所得结论应用于轴盘传动系统;考虑到对有些非线性相似组合大系统,其观测器的设计是不可能的,即便可能,也须消耗较大费用,所以本书在第六章专门研究了非线性相似组合大系统的输出反馈镇定问题,给出了分散结构全息鲁棒输出反馈控制方案;第七章研究了非线性相似组合大系统鲁棒迭代学习控制问题,所得结论较好地解决了一类不确定非线性相似组合大系统的迭代初始状态问题;第八章对相似系统的研究问题及前景作了分析与展望。全书的研究结果表明,相似结构能简化非线性组合大系统的理论分析和综合设计,相似结构和全息特性密切相关。这和文献[3]的预见完全吻合。

本书的大部分内容是作者在攻读博士学位期间完成的,所以,我要特别感谢我的博士生导师、中国科学院院士张嗣瀛教授,他那深刻的思想及独特的思维方式使我终生受益。本书的另一部分内容是作者在博士后期间完成的,我由衷地感谢我的博士后合作导师、西北工业大学校长戴冠中教授,他渊博的学识、敏锐的思想给

我以巨大的启迪。如果今后在控制领域的研究中能激起一些浪花,我要首先把它献给两位尊敬的导师,以谢他们的辛勤培育之恩。我的两位导师在繁忙的工作之余审阅了全书,并提出许多宝贵的意见和建议,学生再一次表示衷心的感谢。

东北大学的刘晓平教授及新加坡南阳理工大学的杨光红博士、西北工业大学自控系林辉教授及香港大学的 James Lam 博士曾对本书部分内容进行了多次研讨,并在学术上给作者以许多帮助。在本书的写作和出版过程中得到了西北工业大学自控系副主任栾云凤副教授以及九〇七研究室的齐蓉副教授、李玉忍副教授、谢利理副教授的热情支持和帮助,对此深表谢忱。

我还要特别感谢我的父母亲,他们从各方面给我以关怀,并一直鼓励我为攀登科学高峰而不懈努力。我由衷地感谢我的妻子苏茹和儿子家晓。我的妻子克服了诸多难以想像的困难,全力支持我从事科学研究,并帮助我整理书稿,我的儿子则一直是我从事科学研究的动力和自豪的源泉。

最后要说明一点,尽管相似控制系统的研究已取得了不少成果,但它的研究工作毕竟还处于初期,大量的问题亟待解决。本书难免有一些不妥之处,恳请有关专家不吝指正,愿与广大同仁共同探讨以开辟相似控制系统研究的新局面,为促进复杂系统研究的深入尽自己微薄之力。本书的出版,如果能对相似控制系统的研究起到抛砖引玉的作用,如果能给同行乃至其它领域的学者以启发和帮助,那将是我最大的欣慰。

严星刚

1999年初春于古城西安

符号说明

\mathbb{R}^n	n 维欧氏空间
\mathbb{R}^+	非负实数集
C	连续函数集
C^k	k 次可微函数 (C^∞ 表示无穷次可微函数) 集
$\Omega_1 \times \Omega_2$	由 Ω_1, Ω_2 组成的乘积空间 $\{(x, y) x \in \Omega_1, y \in \Omega_2\}$
$C_n^\infty(M)$	微分流形 M 上的 n 维 C^∞ 向量函数集合
$GC^\infty(E)$	定义在集合 E 上不取零值的 C^∞ 函数集合
$GC_{m \times n}^\infty(E)$	元素为定义在 E 上的 C^∞ 函数的 $m \times n$ 阶非零矩阵集合
$Gl(m, C^\infty)$	元素为 C^∞ 函数的 m 阶非奇异矩阵集合
$C_{m \times n}^\infty(E)$	定义在集合 E 上以 C^∞ 函数为元素的 $m \times n$ 阶矩阵集合
$V(M)$	M 上的 C^∞ 向量场集合
$V^*(M)$	M 上的 C^∞ 对偶向量场集合
$V_n^\omega(E)$	定义在集合 E 上的 n 维解析向量场集合
Δ	分布
$\dim(\Delta)$	分布 Δ 的维数
$\text{Span}\{X_1, X_2, \dots, X_s\}$	括号中的向量场 X_1, X_2, \dots, X_s 在 R^1 上生成的分布
$\Phi_t^X(x_0)$	向量场 X 通过 x_0 点的积分曲线

$\text{diag}\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$	A_1, A_2, \dots, A_n 依次为对角元素组成的对角阵或块对角阵
$\lambda_M(A)$	矩阵 A 的奇异值
$\lambda_{\min}(A)$	矩阵 A 的最小特征值
$\lambda_{\max}(A)$	矩阵 A 的最大特征值
$Q > 0 (< 0)$	正定(负定)阵 Q
$\text{col}(x_1, x_2, \dots, x_N)$	坐标向量 $(x_{11} \ x_{12} \ \dots \ x_{1n_1} \ \dots \ x_{N1} \ x_{N2} \ \dots$

$$x_{Nn_N})^T, \text{其中 } \mathbf{x}_i = \begin{pmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \vdots \\ x_{in_i} \end{pmatrix} \in R^{n_i}$$

本书第七章的范数用下述符号表示,其余各章节的范数均系指欧基理德范数或者其诱导范数。

$\ f\ = \max_{1 \leq i \leq n} \{ f_i \}$	向量 $f = (f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n)^T$ 的范数
$\ f\ _{\lambda T} = \sup_{t_0 \leq t \leq T} \{e^{-\lambda t} \ f\ \} (\lambda > 0)$	向量 f 在 $[t_0, T]$ 上的 λ 范数
$\ A\ = \max_{1 \leq i \leq m} \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} \right\}$	矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 的范数

目 录

第一章 绪论	1
1.1 复杂控制系统概述	1
1.2 复杂非线性组合系统的相似结构	3
1.3 鲁棒控制及其发展.....	10
1.4 结构全息控制器及其背景.....	12
1.5 现代微分几何基础.....	13
1.6 本书的特色及主要学术贡献.....	19
第二章 非线性相似组合大系统的结构全息状态 反馈集中控制	22
2.1 时变非线性相似组合系统的全息稳定化.....	23
2.2 一类结构不确定相似大系统的鲁棒镇定设计.....	28
2.3 参数不确定非线性相似大系统的鲁棒控制.....	39
第三章 非匹配不确定非线性相似组合大系统的分散 控制	47
3.1 引言.....	47
3.2 一般非匹配条件下的分散控制.....	48
3.3 广义匹配条件下的结构全息分散鲁棒控制.....	57
3.4 例证.....	66
第四章 非线性相似组合大系统的观测器设计	70
4.1 概述.....	70

4.2	非线性控制系统研究·····	71
4.3	一类相似组合系统的变结构鲁棒观测器设计·····	74
4.4	一般非线性相似组合大系统的渐近观测器·····	81
第五章	基于状态观测器的非线性相似组合大系统的 镇定设计及应用 ·····	90
5.1	问题的研究背景·····	90
5.2	系统描述及预备知识·····	91
5.3	基于观测器的相似系统镇定设计·····	93
5.4	轴盘传动系统的镇定研究·····	101
第六章	非线性相似组合系统的全息分散输出反馈 鲁棒控制 ·····	106
6.1	输出反馈镇定的研究现状·····	107
6.2	非匹配不确定大系统的大增益分散控制·····	109
6.3	完全时变非线性组合大系统的分散控制·····	118
6.4	数例仿真·····	126
第七章	非线性相似组合系统的迭代学习控制 ·····	132
7.1	迭代学习控制概述·····	133
7.2	基于相关度的非线性相似系统的迭代学习控制···	136
7.3	互联结构未知的相似组合系统的迭代学习控制···	146
第八章	复杂相似系统的研究展望 ·····	159
	参考文献 ·····	164

第一章 绪 论

1.1 复杂控制系统概述

当代科学技术的几项重大变革,如航天技术革命,信息技术革命,制造工业革命等,都要求控制理论能够处理更为复杂的控制系统和提供更为有效的控制策略,于是,复杂控制系统的研究逐渐引起了控制理论界的高度重视^[1~4]。

近年来,非线性分析、非线性泛函、物理学中的非线性动力学等学科的迅速发展及现代微分几何方法、微分代数方法在非线性控制系统理论上的成功应用,引起了人们对非线性控制系统研究的高度重视。更多的控制学专家开始转入对非线性系统的研究,更多的工程师力图用非线性系统理论设计控制工程系统,从而促进了非线性控制理论的发展与深入。特别是高新技术的发展,生产系统的规模越来越大,形成了复杂大系统。复杂非线性控制大系统的研究向人们提出了严峻的挑战。同时,非线性系统理论的发展及计算机仿真技术的提高为研究复杂非线性大系统提供了可能性,复杂系统的研究已成为控制理论界的一个重要研究课题。

复杂控制系统问题包含被控对象、环境条件和控制手段三方面的复杂性,也有不确定性导致的复杂性,同时还有系统多模式集成和控制策略方面的复杂性。这类系统的典型实际背景有复杂大工业生产过程、计算机集成制造系统、空间飞行器中的各种复杂设施、柔性机器人系统、电力系统、化工系统、军事指挥系统以及一些自然发展形成的系统(如生物、社会等系统)。对这类系统的研究,

涉及非线性问题、鲁棒性问题、具有柔性结构的系统及离散事件动态系统等。分析表明复杂控制系统主要有以下几个基本特征：

(1) 系统构成上常具有多模式子系统集成的特点。如多机械手的协调控制(分为两层,上层是 Petri 网,下层是多关节机械手),具有太阳能帆板的卫星控制(卫星姿态系统是刚性的,而帆板是柔性的)。

(2) 系统的不同模式之间的复杂关联特性。如非线性关联,模糊关联以及随机关联等。

(3) 系统面临复杂的工作环境和强鲁棒性的要求。

(4) 系统一般需要采取复杂的控制策略。

针对复杂控制系统的上述特点,文献[2]指出,数学工具和计算机仿真的高层次结合将是复杂控制系统理论研究的重要手段。

复杂系统的控制方法,一方面要利用现有的控制理论思想对具体的子系统进行控制,利用大系统理论等对系统进行分解,用奇异摄动法考虑快慢系统的层次性问题;另一方面,对于非线性建模、子系统联结与协调、人的因素的参与等等,都必须依靠计算机科学、智能控制、神经网络和传统的控制思想相结合,以坚实的数学理论为基础,才有可能产生一整套的适用于复杂系统的新的控制理论和方法。但是,由于一般复杂控制系统所容纳的许多复杂性,诸如受控对象模型的不确定性、高度非线性特性、子系统之间的复杂关联特性、分布式传感器和执行器、系统的动态突变、多时间标度、复杂的信息模式以及庞大的数据量等,很难找到一条处理一般复杂系统的较为有效的途径。于是,从复杂控制系统的结构出发,利用系统自身的结构属性,首先研究一些具有特殊结构的复杂系统,如具有级联结构的级联系统^[5,6]、具有对称结构的对称系统^[3,7,8]以及具有相似性结构的相似系统^[3,9]等,进而研究一般的复杂系统可能是处理复杂控制系统的一条极为有效的途径。本书将主要讨论具有相似结构的复杂非线性组合大系统的控制问题。

1.2 复杂非线性组合系统的相似结构

非线性相似组合大系统是具有特定结构——相似结构——的复杂控制系统之一。许多自然发展形成的系统,如生物系统、社会系统等,这类系统为了适应其外部环境,力求以最佳状态运行,故应是“自寻最优地”逐渐演化而形成其结构^[3]——相似结构。例如,由原始社会低级的部落演化而来的今天的高级社会系统——国家,便是一个具有相似结构的系统。事实上,一个国家的中央、省、市、县等组织机构是相似的,例如,中央设有财政部、组织部、公安部、教育部等部门,而各省、市、县也设有相类似的组织部门,它们不但组织机构相似,而且其相应机构的运行机制也是相似的。再比如,同一层次不同种类的星系、恒星系、行星系统之间都存在系统结构的相似性及运行形式的相似性。相似结构不仅存在于自然形成的系统中,而且存在于许多人为设计的系统中,如电力系统、多臂机器人系统、互联双摆系统及倒立双摆系统等。

1.2.1 复杂系统的相似结构

考虑如下两个非线性系统

$$\begin{aligned} \Sigma_1: & \begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \\ \Sigma_2: & \begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{f}(\tilde{x}, v) \\ y = \tilde{h}(\tilde{x}) \end{cases} \end{aligned}$$

其中 $x, \tilde{x} \in R^n, u, v, y \in R^m$ 分别是系统 Σ_1 和 Σ_2 的状态,输入和输出 $f(x), \tilde{f}(\tilde{x})$ 分别是其定义域上的光滑向量场, $h = (h_1 \ h_2 \ \cdots \ h_m)^T, \tilde{h} = (\tilde{h}_1 \ \tilde{h}_2 \ \cdots \ \tilde{h}_m)^T, h_i, \tilde{h}_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 是 C^∞ 函数。

定义 1.1 如果存在微分同胚 $D: x \rightarrow \tilde{x}$ 和 $\alpha(x) \in C_m^\infty(\Omega), \beta(x) \in Gl(m, C^\infty(\Omega))$ 使得系统 Σ_1 与反馈