

非线性动力学、振动和控制研究

Studies on Nonlinear Dynamics, Vibration and Control

第七届全国非线性动力学学术会议和
第11届全国非线性振动学术会议论文集

陆启韶 主编

主办单位: 中国力学学会
中国振动工程学会

承办单位: 南京航空航天大学
北京航空航天大学
江苏大学

江苏·南京

二〇〇四年十月二十八日至二十九日

非线性动力学、振动和控制研究

Studies on Nonlinear Dynamics, Vibration and Control

第七届全国非线性动力学学术会议和
第十届全国非线性振动学术会议论文集

陆启韶主编

会议主办单位

中国力学学会
中国振动工程学会

会议承办单位

南京航空航天大学
北京航空航天大学
江 苏 大 学

江苏·南京
2004年10月28日—29日

主 编： 陆启韶

顾 问： 陈予恕 朱位秋 徐健学 胡海岩

编 委： 张 伟 杨绍普 金栋平 王士敏 刘习军

徐 鉴 陈立群 毕勤胜 黄志龙

会议主席： 陆启韶 胡海岩

秘 书 组： 金栋平 陈卫东 刘 红

序 言

自然界和工程技术中存在丰富、复杂的非线性现象，非线性动力学为研究非线性系统的各种运动模式和演化过程提供坚实的理论基础，特别是在不同领域的振动和控制问题中有重要应用。

在二十世纪里，非线性动力学研究取得了重大进展。各种摄动方法在处理弱非线性系统的平衡态和周期运动的动力学和稳定性问题富有成效。从六十年代以来，人们运用现代数学理论和先进计算技术，通过一些典型的非线性范例，发现了包括分岔、混沌、分形、孤立子等大量新的非线性现象，建立了非线性动力学的初步理论框架，其概念、理论和方法已开始渗透到不同的学科领域。这些都为新世纪里非线性科学理论和应用的深入发展奠定了坚实的基础。

在此期间，我国在非线性动力学和非线性振动方面的研究也取得了长足的进步，学术水平迅速提高，研究队伍由小到大，由分散独立的个体逐步形成较强的协作型研究集体，研究范围已由机械振动扩展到自然科学、工程科学乃至社会科学的各个领域，已承担相关的国家级重点和重大科研项目和高科技创新计划项目，涌现了一批优秀的科研成果。尤为喜人的是，一大批中青年学术带头人和学术骨干已经脱颖而出，壮志方酬，呈现长江后浪推前浪的大好形势。可以预期，在大家的共同努力下，我国非线性动力学、振动和控制研究必将进入一个蓬勃发展、繁荣兴旺的新阶段。

在回顾非线性动力学已取得的巨大成就的时候，我们清楚地认识到非线性动力学是一门正在发展中的学科，迄今的研究主要集中在低维系统较简单的非线性动力学行为，当前正面临着复杂系统和复杂激励因素所带来的大量高难度问题的严重挑战。因此，我们应当重视复杂系统的非线性动力学研究，深入探索新现象，发现新理论和新方法，大力促进学科交叉，并加强在科学技术中的实际应用，将非线性动力学研究推向新的高度，发挥更大的作用。

从上个世纪八十年代以来，在中国力学学会和中国振动工程学会的支持和指导下，已经召开过多届有关非线性动力学、振动、稳定性和控制内容的全国性系列学术会议，在促进学科发展、交流研究成果和培养人才方面取得了显著成效，产生了广泛影响。本次会议是在中国力学学会一般力学专业委员会和中国振动工程学会非线性振动专业委员会倡导和组织下联合召开的。会议论文集收录了学术论文共 98 篇，其中大会（综述）报告 17 篇，专题性论文 81 篇，较集中地展现了自上次会议以来在非线性动力学、振动和控制研究中的一些主要的新成果。本会议的论文数量多、涉及范围广、学术水平显著提高、年青学者和研究生的工作占有重要比例。特别是一些具有我国特色的新兴研究方向崭露头角，例如随机系统动力学与控制、非线性神经动力学与信息编码、时滞系统动力学与控制、强非线性振动系统的定量方法、非光滑系统动力学、有复杂本构关系和运动关系的结构动力学等，显现精彩纷呈、方兴未艾的面貌。

本次会议由北京航空航天大学、南京航空航天大学和江苏大学联合承办，得到顾问们的热情关心和指导，编委们积极参与组稿和审稿工作，会议工作人员为会议顺利召开付出了辛勤劳动，谨向他们表示衷心感谢。在会议准备期间，广大同行热烈支持和踊跃投稿，在此亦向有关单位和个人表示深切谢意。祝会议取得圆满成功，各位代表在今后研究工作中取得更大成绩！

陆启韶

2004 年 10 月

目 录

大会报告

复杂非线性系统的一些动力学与控制问题	陆启韶, 王士敏 (1)
基于非线性动力学概念神经编码?	徐健学 (6)
非线性随机动力学与控制研究近期进展	朱位秋 (A6)
大规模神经元群自发活动时的随机非线性演化模型及动态神经编码	王如彬, 喻伟 (13)
微分代数方程中的分岔问题	唐云 (19)
约束分岔分析及应用	吴志强, 陈予恕 (27)
非线性耗散 $R(m, n)$ 方程奇异分析	毕勤胜 (29)
广义 Lorenz 系统及其规范式	陈关荣 (37)
用投影映射实现广义同步	刘曾荣, 陈 骏, 罗吉贵 (45)
高维非线性系统动力学的一些新进展	张伟 (49)
多自由度碰撞振动系统环面分岔与混沌研究	谢建华, 丁旺才 (50)
轴向运动弦线横向非线性振动研究若干进展	陈立群 (57)
轴向运动梁的非线性振动	陈树辉, 黄建亮 (62)
时滞导致的双Hopf分岔、分岔解及其分类——一种新的定性和定量方法	徐鉴 (72)
磁流变智能材料的性质及其应用	杨绍普, 郭树起 (82)
绳索系统建模、动力学和控制	金栋平, 胡海岩 (92)
振动利用机械中的若干非线性动力学问题	侯书军, 梁建术, 秦志英, 张军翠, 彭伟 (A92)

非线性动力学理论和应用

强非线性振动的多尺度法及其应用	蔡建平, 李怡平 (93)
同伦摄动法在非线性振动方程中的应用	刘红梅, 何吉欢 (97)
用参数摄动法求解板的大挠度自由振动	刘灿昌, 彭建设 (98)
关于多尺度法的一个注记	王怀磊, 胡海岩 (102)
激光等离子体方程组的分岔与孤立子解	化存才, 谢柏松 (106)
六维非线性动力系统三阶规范型的计算	陈祎, 张伟 (112)
高维 Hopf 分岔系统的最简规范形	张琪昌, 胡兰霞, 何学军 (117)
部分充液卫星的非线性稳定性和动力学分析	朱金林, 岳宝增 (122)
变速粘弹性传送带非线性动力稳定性与分岔	张清泉, 李映辉 (127)
碰磨转子稳定性分析及反向涡动失稳条件确定	江俊 (134)
非光滑非线性动力系统的稳定性分析	金俐, 陆启韶 (139)
两端铰支输流管道的稳定性和参数共振	金基铎, 张宇飞 (142)
受圆柱面约束弹性杆的平衡与稳定性	刘延柱, 薛纭 (147)
具有非线性出生率的时滞 Lasota-Ważewska 模型的稳定性分岔	马苏奇, 陆启韶 (152)
一个非线性力学模型的分岔	李群宏, 陈良, 梁海花, 卢家宽 (158)

具有时滞反馈 Stuart-Landau 系统非共振双 Hopf 分叉	裴利军, 徐鉴 (163)
时滞 van der Pol-Duffing 系统非共振双 Hopf 分岔分类及其分岔解计算	张研研, 徐鉴 (169)
一类广义 Camassa-Holm 方程的分岔	张正娣, 毕勤胜 (181)
汽车分段线性非线性悬架振动系统的分叉行为	贾启芬, 李芳, 于雯, 刘习军, 王春敏 (186)
The Chaotic Behavior of Two-Dimensional Cross Coupling Logistic Mapping	Liu Yan, Qiu Dongchao, Li Yi, Luan Ling, Du Zeng (193)
油水两相流流型的混沌时间序列分析	郭伯和, 金宁德, 胡亚范, 胡秧利 (196)
基于混沌科学的压实现理论与实践	龙运佳 (202)
一个时滞反馈受控机电系统中的暂态混沌	王在华, 胡海岩, 王怀磊 (206)
舰船摇荡运动的混沌动力学分析	蔡烽, 石爱国, 周波 (210)
粘弹性传动带的多脉冲同宿轨道和混沌动力学分析	姚明辉, 张伟 (215)
压电超声电机的非线性动力学研究进展	曹树谦 (220)
参外联合激励下直齿齿轮副的非线性动力学	申永军, 杨绍普, 潘存治, 邢海军 (227)
弦-梁耦合系统的非线性动力学研究	曹东兴, 张伟 (232)
复合材料层合板 1:1 内共振的非线性动力学的进一步研究	宋春枝, 张伟, 叶敏, 姚明辉 (238)
损伤对粘弹性板非线性动力学行为的影响	郑玉芳, 傅衣铭 (243)
扁锥面单层网壳的非线性动力学特性	王新志, 梁从兴, 栗蕾, 韩明君, 丁雪兴 (248)
振动圆锥破碎机的耦合动力学研究	赵月静, 侯书军 (252)
高维含间隙系统动力学行为的数值分析	李万祥, 丁旺才 (256)
结构和气动非线性机翼颤振分析	丁千, 王冬立 (262)
两自由度 1:1 内共振系统的复杂性分析	季颖, 邹勇, 潘建强, 毕勤胜 (266)
两种非线性模型轴向运动梁自由振动的比较	陈立群, 杨晓东 (273)
滚动轴承-转子系统支承松动时的复杂运动	陈恩利, 何田, 郑猛, 于雪梅 (279)
双摆与单侧刚性约束面之间的斜碰撞振动	韩维, 胡海岩, 金栋平, 侯志强 (283)
非线性蛇簧联轴器对机械系统的振动特性分析	殷玉枫, 李质芳 (289)

非线性振动控制

Hindmarsh-Rose 神经模型的混沌控制	于洪洁, 彭建华, 刘延柱 (292)
近非双曲混沌系统的控制及应用	黄德斌, 陈付广 (297)
Bonhoeffer-van der Pol 方程的混沌控制	梁建术, 陈予恕 (301)
Feedback Stabilization of Hopf Bifurcation with $SO(2)$ Symmetry	Y Wang, R M Murray (305)
磁流变阻尼隔振系统分析	郭树起, 杨绍普, 潘存治, 郭京波 (312)
磁流变阻尼器的一种机电耦合模型	潘存治, 杨绍普, 申永军 (323)
基于多级磁流变阻尼器的操纵面振动半主动抑制	孙伟, 胡海岩 (330)
基于磁流变阻尼器整车主动悬架的开关控制	王昊, 胡海岩 (337)
弹性倒立摆控制系统数学模型研究	许超, 刘丽萍, 林建英 (343)
倒立摆数学模型及其模糊控制实现	张丽娟, 刘晓平 (346)
部分可观测非线性系统的随机最优控制	应祖光, 朱位秋 (350)

非线性神经动力学与信息编码

神经元模型中的分叉及放电区域的研究	段利霞, 陆启韶 (354)
噪声在慢变系统中的随机 Chay 神经元模型的自共振	王青云, 陆启韶 (357)
调节参数提高神经放电信号的信噪比	古华光, 任维, 杨明浩, 李莉, 刘志强 (361)
神经放电的动力学规律和神经信息编码的关系	任维, 古华光, 杨明浩, 李莉, 刘志强 (367)
两个电耦合 Hindmarsh-Rose 神经元的完全同步	石霞, 陆启韶 (374)
一类食饵-捕食者系统脉冲状态反馈控制的动力学分析	蒋贵荣, 陆启韶 (378)
WLC 模型的电位发放与脑电地理图和软体动物的应用	刘深泉, 范涛, 陆启韶 (382)
脑中的空时编码问题	彭建华, 于洪洁, 刘延柱 (390)
无混沌簇放电的加周期簇放电序列的产生机理	杨卓琴, 陆启韶, 李莉 (394)

随机系统动力学与控制、其他

拟广义哈密顿系统的随机平均法	黄志龙, 朱位秋 (399)
非线性时间序列的符号化分析方法研究	金宁德, 李伟波 (405)
变分迭代算法在非线性和微分方程中应用	唐杰 (411)
一类向量奇摄动边值问题解的存在性	王海侠, 周明儒 (416)
高速铁路接触网-受电弓系统受流稳定性	郭京波, 杨绍普, 高国生 (422)
有界噪声激励下拟可积哈密顿系统的随机稳定性	刘中华, 朱位秋, 黄志龙 (426)
谐和与白噪声作用下两个耦合 Duffing 振子的概率为 1 渐近稳定性	吴勇军, 朱位秋 (432)
随机激励下高维振动系统的可靠性分析	甘春标 (438)
有界噪声对软弹簧杜芬振子倍周期分叉的影响	郭云松, 甘春标 (442)
纳米铜线的动力屈曲	王立峰, 胡海岩 (447)
单向耦合光学系统的随机同步和非周期随机共振	康艳梅, 徐建学 (450)
受控磁悬浮系统非线性随机响应分析	姚宏, 邹毅, 李颖 (454)
铁磁梁式板磁弹塑性动力特征研究	高原文, 周又和, 郑晓静 (459)
确定 LE_1 的新准则应用于砂岩全应力应变曲线分段特征研究	刘传孝 (465)
振动磨的发展及刚散耦合动力学	秦志英, 彭伟, 侯书军 (472)
振动破碎技术的进展及其中的动力学问题	张军翠, 侯书军, 张新聚 (476)
复合材料层板的低速冲击损伤数值模拟	陈丽华, 张伟 (480)
风沙运动的散体动力学模型及其动力学过程研究	闫民, 孙保平, 鹿振友, 姚立红, 郭士怀 (486)
弹性直杆热弹耦合的非线性振动与奇异性	杨志安, 席晓燕 (491)
非线性弹性地基上矩形薄板的主参数振动	杨志安, 赵雪娟 (496)
非线性弹性地基上受简谐激励矩形薄板的主共振	杨志安, 李志永 (504)
节理刚度对岩体爆破振动传播影响的数值分析	郭易园 (509)

复杂非线性系统的一些动力学与控制问题*

陆启韶 王士敏

(北京航空航天大学 理学院 北京 10083)

E-mail: qishaolu@hotmail.com

摘 要 本文根据非线性动力学的研究现状和发展趋势, 对复杂非线性系统动力学与控制的理论和应用研究中的一些重要问题进行探讨和展望

关键词 非线性, 复杂系统, 动力学, 控制

前 言

非线性动力学研究非线性系统丰富的运动模式和演化过程, 是非线性科学技术的重要理论基础。非线性动力学研究的最终目的在于深刻揭示非线性世界的复杂性和多样性。非线性系统运动的复杂性来源于多个方面, 例如几何关系、本构关系、约束条件、拓扑结构、激励因素、耦合方式、时空尺度、演化机理等, 它们都会带来复杂的运动模式。30 多年来, 尽管非线性动力学对单自由度简单振动系统和低维映射系统的研究已经取得一系列重要成果, 发现了大量新的非线性现象, 提出并发展了基本的理论方法, 但是面对在理论和应用研究中遇到的高维复杂系统问题往往束手无策, 仍然缺乏有效的分析策略和手段。因此, 复杂非线性系统研究已成为当务之急。

本文根据当前非线性动力学的研究现状和发展趋势, 针对复杂非线性系统动力学与控制的理论和应用研究中的一些重要问题进行探讨和展望, 希望引起同行关注, 共同开创该方面研究的新局面。

1. 多自由度非线性系统组合振动、全局分析和同步

实际非线性振动系统通常是多自由度的, 且存在多种外界激励, 因此组合振动和模态相互作用是普遍的重要现象。对单自由度系统来说, 组合共振只能在多种激励并存的情形下出现。但是对多自由度系统, 由于可以存在内共振和自参数共振机理, 因

此在单个激励作用下也可能发生组合共振。内共振(或自参数共振)发生在其线性化系统的各模态的固有频率可以通约或接近通约的情况, 其类型依赖于非线性项形式和相应的分岔类型。在没有内共振时, 系统的共振响应只包含由外部激励直接激发的主共振或亚/超谐共振模态。但是内共振会引起与非线性项有关的间接激发模态, 并导致多模态相互作用, 产生诸如饱和、跳跃、锁相、周期调制、混沌调制等复杂现象, 造成弹性结构中由高频激励引起的低频大幅共振事故。现在对多自由度系统的组合振动和模态相互作用动力学研究已经取得一些重要成果, 并且扩展到梁、板、壳、弦线、悬索、传送带、流-固耦合结构等系统, 涉及不同的本构关系(包括粘弹性材料、复合材料、智能材料等)、约束条件和控制方式, 成为十分活跃的研究方向。但是, 目前这方面的研究主要局限于具体问题, 对于组合振动的一般规律和分析方法仍有待于深入探讨。

高维非线性振动系统的全局动力学分析是十分重要且难度很大的问题, 目前仍然主要依靠数值模拟手段, 成功地用于全局分析的理论方法不多, 主要是高维 Melnikov 方法和 Shilnikov 方法。近年来, 人们发现了大量新的非线性动力学现象, 除了混沌激变、瞬态混沌、奇怪混沌不变集之外, 还有超混沌、Wada 吸引域、筛形吸引域、混沌鞍等, 需要从机理上予以明确阐述。因此, 当务之急是将动力系统理论、强非线性系统

* 国家自然科学基金(10172011)资助项目

的定量方法和数值方法等有机地结合起来,这样才能有效地研究同、异宿分岔、环面分岔、吸引子和吸引域结构及演化等全局分析问题。

同步是耦合振子系统的一种常见现象,在机械、电路、控制、生物系统中具有重要意义。在历史上,同步研究只涉及振子周期运动的相位和频率关系。但是近年来,同步研究已经扩展到非周期运动,特别是混沌和随机运动;同步的含意也包括完全同步、相位同步、滞后同步、不完整的相位同步、广义同步、测度同步、随机同步等不同概念。此外,不同形式的激励和噪声对于同步的耦合作用也有不同的影响。在应用上,目前混沌同步研究以电路和信息系统偏多,其它领域仍然较少。因此,全面研究各个领域的不同类型的同步现象的机理、存在性和稳定性判据、实现同步的方法和实际应用,这也是十分引人注目的课题。

2. 非线性时变参数系统或时滞系统动力学与控制

动力系统理论主要研究自治(时不变)系统的动力学行为。然而,在大量的力学、工程、控制、生物系统等实际问题中会遇到非自治系统,这里着重提及时变参数系统和时滞系统。

以往研究较多的时变参数振动系统主要是参数随时间作简谐变化的缓变系统,它们通常可以用适当的摄动方法处理,至于参数随时间作非简谐变化的一般情形研究很少。研究表明,参数时变对系统的动力学行为有很大影响,例如,当参数随时间变化经过定常分岔值时,定常分岔图一般不再保持,会出现分岔转迁的滞后或跳跃现象;振动过程对初值和参数变化规律有明显敏感性;有时产生记忆效应、双稳态、迟滞环、脉冲振动等。至于参数时变规律对吸引子、吸引域和安全盆的影响也很大。对于一般的时变参数振动系统,拟静态处理方法已不再适用,摄动方法也有很大局限性。为此,应当重视时变参数系统定性规律和定性方法的研究,才能更好地配合数值研究的开展。

许多力学、电学、控制、生物系统存在时间滞后现象,可用时滞微分方程、时滞微分-积分方程或差分方程描述。研究表明,时滞对系统的动力学行为有很大影响,即使很小的时滞量,也会导致与无时滞情形截然不同的结果。由于时滞动力系统是无

限维系统,理论分析和数值分析的难度很大,目前大多数研究是对线性、单自由度、固定参数等情形进行的。在非线性时滞系统方面,稳定性的主要研究方法有特征值法和 Lyapunov 泛函法;解的定性研究包括振动性、周期性、有界性、稳定性和渐近性等;分岔分析主要是 Hopf 分岔,对其它分岔很少涉及;混沌研究大都是数值结果,其机理和判据的理论分析极少。因此,在非线性时滞振动系统中,多自由度、多时滞、时滞参数等情形都是值得探讨的课题。此外,时滞状态控制、参数控制、鲁棒控制和最优控制等问题也是重要的内容。

3. 非光滑系统的动力学与控制

在实际系统中往往存在碰撞、冲击、干摩擦、开关、阈值、脉冲控制等大量非光滑或不连续因素,它们主要是由约束条件、本构关系和控制方式决定的。传统的动力系统理论是针对光滑系统的,而非光滑系统带来了许多新的研究特点,例如向量场的不可微性或间断性导致的强非线性和奇异性,能量耗散机理的复杂性,参数测定的困难等,使得非光滑系统的动力学研究引起广泛兴趣。目前讨论最多的是有分段光滑向量场的系统和有刚性约束的脉冲系统。

非光滑系统研究首先需要建立正确的模型,关键在于确定合适的约束力。以碰撞为例,需要在传统的刚性碰撞或弹性碰撞模型的基础上加以改进,针对单面或双面约束、完整或非完整约束等不同情况,对系统状态变量的协调性、耗能机制与碰撞过程等给出合理假设,进行细致分析和综合之后才能建立更合适的模型。

非光滑系统动力学的理论和数值分析主要依靠 Poincaré 映射去实现。虽然目前理论分析多限于低自由度简谐激励的碰振系统和电路系统,但是在冲击机械、地震、转子碰摩、航天技术、运输设备中的实际应用开始受到重视。为了透彻地认识非光滑动力学现象的本质,必须发展非光滑系统的定性理论和计算方法,特别是约束系统的降维方法、约束分岔理论和规范形计算方法、高精度数值仿真方法等。对于非光滑系统特有的擦边分岔现象和通向混沌的道路,以及相应的控

制问题更应深入探讨。

4. 非线性随机系统的动力学与控制

随机动力学主要研究动力学系统在非确定性激励（包括外部激励和参数激励）作用下的动态相应特性，在航空航天、通讯、土木工程、机械工程、海洋工程、地震等领域有重要理论意义和应用价值，现在已进一步扩展到生物、经济、信息等领域。线性随机系统的研究比较成熟。非线性随机动力学需要考虑随机激励与非线性因素的相互作用，研究难度很大。近年来虽有较大进展，但仍然远远不能满足科学技术的需要。值得指出的是，非线性随机系统的 Hamilton 体系的建立为其动力学与控制研究开辟了一条新途径。

在非线性的随机响应预测方面，传统工程上使用的统计线性化方法不再适用，FPK 方程的精确求解只有在特殊情况下才能实现。人们发展了一些近似方法，如等效非线性系统法、随机平均法等，以及 FPK 方程数值解法，但它们仍限于低维系统。多自由度非线性系统的随机响应和可靠性估计问题尚无实用可行的方法。

在非线性的随机系统定性研究方面，首先，有关随机稳定性的定义较多，比较常用的有矩稳定性、平均稳定性、概率稳定性和几乎必然稳定性等，但是它们的应用背景和合理性以及彼此之间的关系尚不够清楚；研究方法主要是 Lyapunov 函数法和最大 Lyapunov 指数法。其次，随机分岔也有不同研究思路，主要依靠最大 Lyapunov 指数或平稳概率密度去确定，目前仅对低维系统的跨临界分岔、叉形分岔和 Hopf 分岔有较多研究。至于随机混沌的概念和识别问题仍然在探索之中。

随机共振现象的研究是近 20 年来发展起来的课题，其表现为弱噪声可能诱发较强的随机响应，在电路、神经、信息等系统中有重要背景，受到人们关注。目前随机共振的理论研究主要靠 FPK 方程求解和线性随机响应特性，也有一些电路、光学和神经方面实验结果，不过迄今对随机共振的机理和特征尚未了解清楚。此外，随机自共振（相关共振）现象的研究也受到关注。

非线性随机系统的状态控制和最优控制也是十分重要的问题，目前工程上广泛应用的是先用统

计线性化方法化为等效线性系统，再应用线性控制策略处理，显然很不成熟。今后应当重视多自由度系统和非 Gauss 白噪声的随机激励作用下的非线性随机控制理论和应用研究。此外，还可进一步考虑时滞控制或脉冲控制策略在非线性的随机系统中的综合应用。

5. 分岔和混沌的控制

分岔和混沌的控制是非线性动力学的基本现象，起初人们主要关心在参数变化的条件下，非线性系统动力学性态的相应变化规律。随着研究的深入发展和实际应用的需求，人们进一步思考如何通过控制手段去改变以及利用分岔和混沌的问题。

分岔控制的本质是对系统的奇异性加以控制和改造，通常包括下列内容：镇定不稳定的分岔轨道、调整分岔点位置、改变分岔类型或分岔轨道形式（例如控制平衡点和极限环的数目及定性性态）、引进新的分岔、优化分岔行为、通过控制分岔过程去进行混沌控制等。目前采用的方法主要有：线性及非线性反馈法、差值滤波法、规范形法、频域分析法等。分岔控制对于调整实际系统在临界工作状态附近的性能，提高工作效率，避免事故等有重要意义，并在机械、电力、电路、航空航天工程、化工、医学等领域有重要应用。

混沌系统具有极端敏感性和不可预测性，从而对控制中使用的扰动也十分敏感；混沌吸引子中稠密地嵌入了大量的不稳定周期轨道，可以在广阔的范围内实现控制。因此混沌控制具有与常规控制显著不同的特色和优点。由于混沌运动在实际中广泛存在，因此混沌控制有重要理论意义和应用价值。混沌控制通常包括下列内容：抑制混沌的出现、镇定平衡态或周期运动、调整混沌吸引域、将混沌状态转换为指定的周期运动或其它混沌状态等。更进一步，还可以考虑在有耦合作用的混沌系统之间实现混沌状态同步的控制问题，以及无穷维系统的时空混沌控制问题。目前控制混沌方法的研究相当活跃，相继出现 OGY 法及其改进方法、延时反馈控制法、外力反馈控制法、脉冲控制法、自适应控制法、参数周期扰

动法等。混沌控制在道路、通讯、光学、化学、生物、经济等领域的应用也得到重视。

6. 微、纳结构系统动力学与控制

微、纳结构系统是指具有微米或纳米尺度结构的电子机械系统。与通常的宏观结构系统不同，其工作原理和制造技术中都有大量新的动力学与控制问题需要重新认识，是细观和纳观力学的重要研究内容。

微、纳结构系统的材料物理特征、结构形式、参数范围、工作环境和运行过程都与宏观结构系统存在很大差别。尺度效应、表面效应、隧道效应，以及量子效应的出现，使得微、纳结构远离宏观力学和物理定律的适用范围。例如在微尺度范围内，宏观结构的模拟原理和相似理论不再适用，表面力（如毛细现象、表面张力和分子层吸附）和电磁力的影响相对于体积力和惯性力而言渐居主导地位；流体介质中以层流为主的流动方式，表面接触的粘着、变形、摩擦的新机理等。在纳观尺度上，力学系统兼有连续介质与离散描述的特征，更需要采用连续介质力学、分子动力学与量子力学兼容的多尺度理论分析和模拟算法。对于微、纳结构的非线性动力学与控制来说，完善其力学理论体系和发展有效算法仍是关键问题。

7. 神经和信息系统动力学

生物、信息、经济等领域存在更多、更复杂的非线性系统，对这些非传统交叉学科领域的非线性问题的研究极具挑战性。

生物神经系统是由数量十分巨大的神经元相互联结的极其复杂的多层次信息网络系统。神经元通过放电活动对信息进行编码，从而实现神经信息的产生、整合和传递。神经元产生和传输电脉冲串的过程涉及大量影响因素（如各种离子通道、内外噪声、外界刺激等）和复杂的突触连接方式，因此神经元放电活动和信息编码过程中存在复杂非线性动力学行为，且与传统的机电系统的非线性动力学特性有显著差别，例如神经元放电节律模式的分岔本质和编码规律、噪声引起的随机共振和随机自

共振、耦合神经元的同步，以及神经电生理实验中发现的各种新现象等。至于大脑神经网络系统的感知、学习、思维、记忆等认知功能，以及联络和调节整个生物体活动的功能，更是典型的最复杂的非线性动力学行为。生物的其他器官系统、生态系统、流行病系统等，都有大量的复杂非线性动力学问题。

随着科学技术的发展，复杂网络的非线性动力学和控制成为迫切需要解决的问题，其中既包括信息和计算机科学领域的大型信息网络系统，也包括大型电力网络系统、大型交通网络系统、生物信息网络系统、生态网络系统、经济网络系统。这些复杂网络系统都具有时空复杂性、协同性和统计性的特征，是非线性动力学研究向超大型复杂系统进军的重要突破点，也是非线性动力学理论与应用的又一个重要结合点。

正如 S. 霍金在世纪之交时指出的：“我认为下个世纪将是复杂性的世纪”。广大非线性动力学工作者在新世纪里要继续坚持理论分析、数值计算和实验紧密结合的优良研究传统，加强理论研究与实际应用的联系，敢于开拓创新，一定可以在各个学科领域的复杂非线性系统的动力学和控制研究中做出重要贡献。

参考文献

1. 国家自然科学基金委员会. 力学. 北京: 科学出版社, 1997
2. 陆启韶, 黄克累. 非线性动力学、分岔和混沌. 《一般力学(动力学、振动与控制)最新进展》(黄文虎、陈滨、王照林主编). 北京: 科学出版社, 1994, 11-18
3. 陆启韶, 陈予恕, 徐建学. 非线性动力学及其工程应用. 《现代力学与科技进步》(第一卷)(庄逢甘主编). 北京: 清华大学出版社, 1997, 129-136
4. 陆启韶. 复杂系统的非线性动力学问题. 《力学 2000》(白以龙、杨卫主编). 北京: 气象出版社, 2000, 94-99

DYNAMICS AND CONTROL SUBJECTS ON COMPLEX NONLINEAR SYSTEMS

Qishao Lu and Shimin Wang

Science School, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083

E-mail: qishaolu@hotmail.com

Abstract: Based on the tendency and status of nonlinear dynamics researches, some important subjects and their prospects of dynamics and control in complex nonlinear systems are discussed.

Keywords: nonlinearity, complex systems, dynamics, control

基于非线性动力学概念神经编码? *

徐健学

西安交通大学建筑工程与力学学院, 西安, 710049

摘要 神经科学的研究对象表现出非线性性质, 使它与非线性科学迅速地交叉融合. 本文介绍了生物神经学科领域中作为神经活动的量度和测度的神经编码概念和方法; 在非线形动力学理论广泛用于神经活动机理的分析的基础上, 提出了基于严格非线性动力学概念和理论的神经编码类型和机制的观点及问题。

关键词 分岔, 周期加分岔, 混沌, 不稳定周期轨道, 混沌鞍, 瞬态混沌, 稳态响应, 瞬态响应, 神经放电脉冲间期, 簇放电, 整数倍放电, 神经编码, 突触可塑性,

引言

神经活动的基本过程和基于神经系统生长、传导和学习记忆机制的脑功能是神经科学研究的重大课题; 具有重要科学意义。

非线性科学(非线性动力学)当代新的巨大成就, 深化了对事物非线性普遍性质的认识, 推进了广泛自然科学学科的发展。作为自然科学最复杂的生命科学的一个分支—神经科学基于它的研究对象已表现出的非线性性质, 与非线性科学迅速地交叉融合, 方兴未艾。

生命体感受外界信息、调节适应并影响变更客观世界都是通过神经系统达到的, 是神经活动基本过程的重要方面。其中, 外界信息是如何由感觉神经元传导到中枢神经、中枢神经指令如何由感觉神经元传导到外周器官的问题一直是神经生理学家研究的要课题; 并且已经引入非线性动力学分析。

细胞(包括神经细胞)跨膜离子通道机制的研究成果: 生物活组织电信号、枪乌贼神经突触离子通道、测定离子通道通透性的膜片钳技术、细胞膜上的蛋白泵和水通道蛋白五次获得诺贝尔奖[1], 它使得前面第一个问题, 外界信息是如何

由感觉神经元传导到中枢神经, 即感觉神经元刺激与反应关系, 得以变为如何由离子运转机制产生神经元脉冲放电和电位脉冲间期(Interspike interval, ISI)序列及其集合模式(Assembly pattern)的物理化学问题; 并为生理学家看作是神经信息编码。当前, 已经由线性和随机变量统计分析进入非线性动力学分析。

控制论中香农(Shannon)理论基于概率论给出信息的编码和解码。仿照它, 神经编码被赋予又一层含义。然而, 它却是模拟的, 规则松弛的, 定义粗糙的[2]; 尽管涉及这个概念, 理论和实验研究和成果已有数十年。生理学、医学领域应用非线性动力学理论来研究和认识神经编码、神经信息传递则是更迟的事。

非线性动力学理论可以更正确描述生物神经活动。能否构造一种基于非线性动力学严格概念的神经编码体系? 如何将生理学家关于神经编码的提法用非线性动力学语言解读或数学意义上的精确化? 这里, 希望提出一些看法。

2 非线性科学(非线性动力学)对神经生理学推动

用非线性动力学理论建立神经元放电活动的模型方面, 在 1952 年 Hodgkin 和 Huxley 两人最

* 国家自然科学基金重点项目资助的课题

早建立神经元数学模型,为实验证实,成功地解释神经兴奋产生机制。以后,Chay报导了一个三维可兴奋细胞模型中的确定性混沌现象。在Chay,HR,和FHN神经元模型的ISI序列中存在周期,拟周期和不规则混沌节律,以及经周期加或倍周期分岔和准周期阵发转化为混沌等多种时间模式。Holden、Chay和Rinzel等人研究作为一种高效的信息传递方式簇(Bursting)放电,得到胰腺 β 一细胞放电简单的节律形式经过周期加、倍周期分岔转化为簇放电和混沌放电复杂模式过程。Fan和Chay研究了模型中的阈下振荡。

国内郭爱克、王伟、胡三觉、任维、陆启韶、古华光、彭建华、刘延柱、王如彬、杨福生、刘秉正等的研究都取得重要进展。我们研究所与第四军医大学神经生理研究所合作研究,得到了区分周期、混沌和随机三种时间序列运动的预报演化曲线方法,大鼠神经放电脉冲间期序列是确定性的、混沌的,局部动力学降噪方法,用于皮层脑电时间序列分析,阈下振荡妨碍神经元通过随机共振检测弱信号,兴奋系统动态双极限环随机共振机制,损伤背根节神经元的整数倍放电的确定性、混沌行为和不变环上鞍结分岔的机制,动物癫痫皮层脑电相空间重构分析,不稳定周期轨道(UPO)分析“非周期敏感“,抛物线簇放电和方波簇放电发生的分岔机制,藜芦碱诱发慢变钠电流等结果[3-11]。第四军医大学神经生理研究所关于加周期分岔[12],整数倍,慢波振荡等时间模式和不稳定周期轨道还决定了其热力学特征,的实验发现和“非周期敏感“假说的提出受到很大的重视。

以上研究进展深化了神经活动动力学机制的认识为神经编码准备了基础。

3 生物神经学科领域的神经编码

在生物神经学科领域,神经编码是一种神经活动的量度和测度,它可以参与脑不同区域间的有目的的有意义的处理执行(transactions),即能表现其相互依赖关系,及统计的、可预测的关系。

有多种神经编码定义[13]:

时间编码,基于准确确定一孤立放电脉冲发生时间及将脉冲系列视为点的时间过程。

率编码(Rate coding),考虑脉冲系列是随机过程,但其一阶矩定义了一个表现神经相互作用的空间。

同步编码,参与一个感觉的编码的神经元集群响应转变为通过时间相互作用的组织达到同步放电。

瞬态编码,神经相互作用由在一短时间区间内(瞬态)可再生的高度结构化的时空动力学的表达和诱发而调整,并无振荡的和同步的依赖关系,谱密度相关性来表示。

神经生理学家的研究着眼于刺激与反应的敏感关系;着眼于刺激的类型和效用,如药物,电,别的神经元脉冲间期序列输出信号;着眼于神经元放电脉冲间期序列的模式,如整数倍放电间期、抛物线已经其他的簇放电;着眼于编码的时间方式和频率方式,以及着眼于脑作为信息处理器的神经编码和解码机制。

神经信息编码是神经系统功能活动的基础,也是重大难题。长时间以来,研究主要沿不同感觉传导途径,分析感受器和不同水平感觉神经元刺激的反应关系,取得重要进展。

确定放电节律时间模式的动力学过程分别与不同通道活动相关。进而发现传递刺激信息的时间编码方式。

推测可能构成神经元混沌节律传递信息的一种载体。

神经元ISI序列与生物效应联系的编码方式,由依赖于频率的递质释放的不完备,到依赖于ISI时间模式的研究。

在包含编码信息的脉冲间期序列分析中,长时间以来认为是一种随机过程,非线性动力学的进展,使人们进一步认识到脉冲间期序列的确定性方面。

但是对神经元脉冲序列携带信息的方式(时间编码)了解很少,神经编码机制非线性动力学分析还很不够。

4 基于非线性动力学行为特性的神经编码

对于神经元(纤维)刺激与反应或激励与响应间的对应关系。神经系统是否能够在反应中包含和反映刺激的某些特征?神经系统是怎样用最

小数目的最简单元素编制多样信息？正面的回答才能体现感觉神经元信息生成加工传导的功能。这表现了生物神经编码的能力。大家知道，Duffing 系统，同样简谐激励不同参数系统可以发生周期的或混沌的响应。从非线性动力学概念上看，非线性系统可以表现出丰富的动力学现象和行为，而它们却是由某种简单动力学单元多样组合所成。例如，不稳定周期轨道作为混沌运动轨道的骨架形成多样的混沌运动。显然，非线性动力学行为特征可以列举很多。

4.1 稳态情形

这种想法使生物神经编码表现了两种含义：神经纤维刺激与反应间对应关系，和对于各种响应如何用确定和随机非线性动力学不同种类单元的整合来表征。

4.1.1 对于神经纤维刺激与反应间对应关系的编码非线性动力学看，神经纤维的刺激即激励，形式有：连续波形、矩形方波脉冲序列、尖峰脉冲序列；运动特征有：相空间轨道不稳定不变集合、相空间轨道稳定不变集合。

神经纤维的响应，形式有：尖峰脉冲时间间期 (ISI) 序列、簇放电时间间期 (IBI) 序列、放电事件时间间期 (IEI) 序列；运动特征有：相空间轨道不稳定不变集合、相空间轨道稳定不变集合。

激励与响应对应方式有：

(1) 同步、完全同步、相位同步

这时有信息全同或基本全同的对应。

Hodkin-Huxley (H-H) 神经元在正弦激励作用下神经元放电的峰峰间期 (ISI) 序列随刺激频率的变化呈同步、周期和混沌交错变化。在一些频率附近神经元的 ISI 出现为“拍”和准周期谐波振荡现象，以及阵发是通向混沌的一般性道路。[14]

对于由突触单向耦合的一对 Locus Ceruleus (LC) 神经元，受到外激励（刺激电流）的第一个神经元的响应膜电位按一定方式作为第二个神经元激励（输入），驱动第二个神经元发生膜电位响应。在耦合强度和激励幅值确定范围内，第一个神经元外激励（刺激电流）是混沌激励时，两

个神经元的膜电位响应可表现为完全同步振荡。还可以发生第一个神经元外激励同时与两个神经元的膜电位响应同步。Lyapunov 指数谱、分形维数和不稳定周期轨道相同，以及激励强度和耦合强度对神经元输入和输出的关系影响。[15]

(2) 镜像反映

对于上述由突触单向耦合的一对 Locus Ceruleus (LC) 神经元，在另一些参数条件下，Lorenz 混沌激励信号波形与既与第一个神经元响应 ISI 序列波形成镜像反映 又与第二个神经元响应 ISI 序列波形成镜像反映。后两者又完全同步。[15]

以上两种情形表现了神经纤维刺激与反应间对应的简单编码关系。

(3) 整数倍尖峰脉冲时间间期响应，有确定性和随机性非线性动力学机制。基础周期与激励和神经元非线性性质有关，如激励和阈下振荡的频率。

(4) 分岔

分岔使这种对应关系发生突然变化。会出现许多复杂情形。下面看一种代表的情形。

周期加分岔

许多受到激励（刺激）的神经元模型和神经起步点生理实验都可以发生和记录到动力学周期加分岔。这时，依赖分岔参数的改变，系统运动连续发生间隔混沌的周期数加一的周期运动的分岔现象。它表现了神经一种典型电活动。显然，各周期运动都含有同一基本周期，它表达了激励的信息。

对于实验数据记录到周期加一分岔过程，在间隔的混沌区内与周期 n 相邻的一端可以检测出不稳定的周期 n 轨道，而与周期 $n+1$ 相邻的一端则同时可以检测出不稳定的周期 $n+1$ 轨道和周期 n 轨道。这时可以认为混沌运动以嵌于其中的不稳定周期轨道反映激励的信息。通过胰腺 β 细胞模型的分析，这不同的不稳定周期轨道结构是由鞍结分岔和倍周期分岔分别产生的[16]。

从周期加分岔和间隔的混沌区两端的分岔分析可以看到，分岔导致多样运动出现，以不同方式表达激励与响应的关系，也表达了神经元复杂的信息编码能力。

(5) 簇放电序列

簇放电序列是产生多样图象班图的神经元典型放电,受到很大重视。它可以是不同周期数周期的尖峰脉冲间期放电和混沌的尖峰脉冲间期放电,乃至簇放电序列自身是混沌的情形。簇放电序列的统计直方图更能表现出十分多样图象班图:抛物线型、迷散型等。

(6) 激励与响应的互信息

体现激励与响应的多样相关性。是重要的一种表达。同时适用于确定性系统和随机性系统。已为生理学界所常用。互信息用于借助随机共振来检验测量脉冲间期序列[17]。刺激所包含的信息可以可靠地通过神经元传递被反应脉冲序列所包含。

4.1.2 表征响应的差异的编码

神经系统信息活动或演化主要表现为在环境和神经内部自身刺激下神经系统放电(激活,兴奋或产生动作电位)反应电位脉冲间期(ISI)序列(也称为动作电位序列或脉冲序列)的时间过程。这个神经系统事件可以看作是一个非线性动力学系统,它的反应脉冲间期(ISI)序列的时间过程,在确定性运动情形下,可以表现为稳态响应运动:平衡、周期运动、准周期运动、混沌运动;在随机性运动情形下,有平稳、非平稳和其他更复杂的运动。表征响应的差异有:

(1) 确定性和随机性。

(2) 神经系统 ISI 图象、IBI 图象班图 (Pattern)。

(3) 神经系统演化轨道几何特征量: Lyapunov 指数、测度熵、拓扑熵、分数维数[3,19]。

(4) 神经系统复杂度: Kolmogorov 复杂性比特数、近似熵。

(5) 互信息和信噪比。

(6) 周期轨道特征作为编码元素。所有稳态运动用周期轨道特性来区分:不动点是周期为零的周期轨道,周期轨道是周期不同的周期轨道,准周期轨道是周期数不可通约的多周期轨道叠加,混沌周期轨道是周期无穷大的周期轨道。

(7) 嵌于混沌中的不稳定周期轨道 (UPOs) 特征作为编码单元。非线性动力学已经揭示,动力系统做混沌运动时,运动轨道中嵌有作为混沌运动轨道的骨架无穷多不稳定周期轨道。因此,以这些不稳定周期轨道 (UPOs) 的特征量无穷的多

样组合就可以充分表征混沌运动轨道的拓扑或几何,显示它们细微的差别。正是在这个意义上,将嵌于神经系统混沌运动中的不稳定周期轨道 (UPOs) 特征作为神经信息编码元素是很恰当的 [18]。这时信息量是无穷的,是前面一些单值特征量所不能相比的。UPOs 特征量的确定有多样的做法。在二维非自治系统情形,取较低阶的 UPOs 的周期数、在 Poincare 截面上的位置、和混沌轨道在充分长的时间内足够邻近地被访问的频度三个量就可以得到很好的效果[9],说明了神经系统激活(兴奋)的“非周期敏感”现象。也可以用于区分系统相邻参数的混沌运动和激变情形的不连续混沌运动。

高维、复杂混沌情形下,UPOs 的寻找何 UPOs 特征量的扩展等会是十分困难的研究工作。也会是非线性动力学的新任务。

(8) 鞍性不稳定不变集合作为编码元素。

鞍性不稳定不变集合包括鞍点、周期鞍、混沌鞍和更复杂情形,是一种稳态现象。它们对于非线性系统的动力学行为、特性和演化以及分岔有着关键作用[20, 21]。因此也会在神经信息编码中有重要表现。目前还未见到用于神经编码研究的报道。

(9) 定义特定符号序列为神经信息编码的元素。

4.1.3 噪声对编码的影响

噪声可以使两个初始条件不同的神经系统同步[22],从而促进了刺激与反应间的编码过程。可以想到,混沌也能使两个初始条件不同的神经系统同步。

随机共振现象的发现,使噪声在感觉神经元信息传导和处理以及神经编码中的积极作用被认识。

4.2 瞬态编码

4.1 节的讨论是从神经系统反应的非线性动力学稳态运动来表现神经编码。由于初始条件多种可能,一般受刺激后,反应要经过一定时间的瞬态运动才能达到稳态。从生物神经活动看,环境的变化是立即感觉到的。因而瞬态阶段,信息也是被传递的,就也存在上述 4.1 节两层含义的神经信息编码。

事实上,由线性系统看,响应的瞬态由固有运动部分和强迫运动部分组成;而后者明显表现了激励。对于非线性系统,瞬态阶段激励与响应的对应是复杂的,但是也一定会包含稳态阶段响应所含有的激励的信息。

这时,生物实验采集的数据量小,编码分析会更困难,和会要不同的方法。

对于上述4.1节由突触单向耦合的一对Locus Ceruleus (LC)神经元,第一个神经元受到外激励(刺激电流)的情形,二个神经元稳态膜电位响应相同。这时瞬态膜电位响应也相同,并且与激励之间有象稳态情形的同步或镜像反映关系。也表现了简单编码关系。

在神经元Morris-Lecar模型情形,可以看到小于阈值的尖峰脉冲引发神经元膜电位阈下衰减振荡和单调衰减。这对应于线性系统的初始条件的触发。也包含了激励的信息。

在混沌运动情形,有时会发生瞬态混沌,由于持续时间不会很短,这时激励(刺激)的信息如像稳态情形包含于稳态混沌之中,而包含于瞬态混沌中。

文献报道可以看到,在用一些数值方法寻求不稳定不变集合时,混沌鞍和瞬态混沌会不易区分。

4.3 突触对神经信息的再加工与突触可塑性

具有各种时间结构的脉冲间期(动作电位)序列会在初级感觉神经元与中枢神经元之间进行突触传递。脉冲间期序列的突触传递由差分方程表示。

作为携带神经信息的感觉神经元的输出被认为是脉冲间期序列;而它们恰是感觉神经元和中枢神经元之间突触的输入。这种输入经突触传递,依赖于输入脉冲序列的模式可发生多样突触输出。

受刺激的神经元突触会因刺激而发生物理化学变化,表现为神经元之间能够建立联系和中断联系的性质,即受刺激的神经元突触的反应可以兴奋和抑制,被称为突触可塑性。新的报道,突触可塑性会受到决定年龄的基因的显著的影响[23]。长时间以来,突触可塑性被报道的是长时程突

触可塑性。文献[24]实验和分析结果表明初级感觉神经元与脊髓背角中枢神经元之间突触传递还表现了短时程突触可塑性。短时程突触可塑性主要表现为压抑现象,并且对突触前刺激有一定的频率依赖性。同时突触传递信息会影响混沌的脉冲序列的非线性特征,如分维数、短期可预报性。

突触对神经信息的再加工与突触可塑性使神经信息受到进一步调制和改变,是神经编码的重要机制。非线性动力学模型和机制分析有待新的研究。

人工神经网络是生物神经网络的一种简化[25, 26],其非线性动力学模型表现出的学习和记忆功能及动力学行为也会是生物神经编码的一种参考。

高维系统随机共振[27]、筛形吸引域[28]和其他非线性动力学复杂行为都维神经编码提供新认识的可能。

5 结论

综上所述,非线性动力学理论和方法是有可能在神经信息编码得到应用,而引入非线性动力学理论和方法的神经信息编码研究对非线性科学提出新的课题。神经科学与非线性科学将在相互推进中进一步发展。

参考文献

1. 麻彤辉,杨红.膜通道研究再获诺贝尔奖.生物物理学报,2003,19(4):343-346
2. Jos J. Eggermont. Is there a neural code? Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 1998, 22(2): 355-370
3. Xu Jian-xue, Gong Yunfan, Ren Wei, Hu Sanjue, Wang Fuzhou. Propagation of periodic and chaotic action potential trains along nervous fibers. Physica D., 1997, 100: 212-224.
4. Gong Yunfan, Xu Jianxue, Ren Wei, Hu Sanjue, Wang Fuzhou. Determine degree of chaos from analysis of ISI time series in nervous system: a comparison between correlation dimension and nonlinear forecasting method. Biological Cybernetics, 1998, 78(2): 159-165.
5. Yunfan Gong, Jianxue Xu, Sanjue Hu. Stochastic resonance: When does it not occur in neuronal models?