



复杂非线性系统的某些动力学理论与应用

陆启韶

北京航空航天大学, 北京 100083

自然界和工程技术中存在大量的非线性因素和现象, 非线性动力学奠定了研究非线性系统丰富多样的运动模式和演化过程的定性或定量规律的坚实理论基础. 非线性动力学的研究深刻地揭示了客观世界的复杂性和多样性, 它不仅对数理科学的发展有重大理论意义, 而且与其他学科广泛交叉, 在各个科学技术领域都有十分广阔的应用前景.

20 世纪 60 年代以来, 以分岔和混沌为中心的非线性动力学研究取得了重大进展, 基本理论框架开始形成, 这些突破性成就对科学技术的蓬勃发展产生极为深远的影响. 直到 20 世纪末, 非线性动力学的研究成果集中在低维动力系统, 且以平衡态、周期运动、低余维分岔和较简单的混沌行为居多. 然而还有大量问题尚待进一步解决, 特别是对非线性系统的复杂动力学现象了解尚少, 对高维问题缺乏有效的理论方法. 因此高维复杂非线性系统的新现象新理论和新方法的研究是当前非线性动力学发展的关键和热点. 在研究中选取适当的交叉学科领域作为突破点, 通过对其中的复杂非线性动力学行为进行深入探索, 再进一步解决共性问题, 这是发展非线性动力学的很好途径.

从应用方面来看, 在国民经济、国防事业和工程技术中有大量的重要实际问题迫切需要用非线性动力学理论和方法加以解决. 大型高速旋转机械是国民经济的关键性核心装备之一, 当前我国在大型旋转机械方面存在两个重要技术问题: 一是大型机组低频振动超标和稳定性差的现象比较普遍, 以至发生重大恶性事故, 带来灾难性后果以及巨大的经济损失和社会影响, 因此机组振动故障诊断和治理是保证安全运行的关键技术问题; 二是传统的旋转机械静力学或线性动力学设计方法不能适应当前大型化和高速化的发展需要, 因此大型旋转机械的非线性动力学设计的原理和方法成为亟待解决的问题.

由于大型旋转机械是一个十分复杂的多自由度非线性振动系统, 其动力学研究可为高维复杂系统的非线性动力学理论研究提供十分广阔的空间, 而且可以带来巨大的经济效益.

项目“复杂非线性系统的某些动力学理论与应用”就是根据非线性动力学理论和应用研究领域的上述现状和发展趋势提出的. 其研究目的是建立较高维复杂非线性系统新的动力学理论和方法, 揭示新的非线性动力学现象, 完善和发展非线性振动理论, 密切联系大型旋转机械运行和设计中的动力学问题, 推动非线性动力学理论及其在重大工程中的应用研究的深入发展. 该项目的主要研究成果包括以下方面:

(1) 非线性振动系统周期分岔解的拓扑结构与系统结构参数之间关系的新理论方法 (C-L 方法)

对非线性振动系统的周期解研究, 传统的非线性振动理论只能得到某种具体响应曲线, 而且不同学者 (例如 Bogoliubov 和 Nayfeh) 用不同方法甚至得到似乎相互矛盾的结果. 陈予恕和 W. Langford 教授将 Lyapunov-Schmidt 方法与奇异性理论结合, 在 1988 年首次提出了一种研究非线性参数激励振动方程周期分岔解的新方法, 证明了在不同的参数区域内, 共有 6 种典型的分岔响应模式, 并成功地统一了长期困扰学术界的矛盾结果. 其后, 陈予恕教授又与合作者进一步将此方法推广到非线性振动系统的退化情形、非对称情形和约束情形等的高余维分岔模式和转迁集研究, 并应用于许多复杂的工程问题, 取得全面深入的结果.

(2) 高维非线性振动系统的降维约化和模态相互作用研究

为了将向量场化为尽可能简单的规范形形式, 提出了自治系统规范形的直接法和非自治系统规范形的复内积平均法, 大大简化了规范形的计算过程,

并可实现计算程序化。利用 C-L 方法、规范形方法和奇异性理论,基本解决了多自由度非线性振动系统在具有双频内共振模态相互作用情况下局部分岔的普适开折和余维分类问题。此外,还开展了三频内共振非线性模态的分岔模式研究。

(3) 有复杂激励因素(例如非光滑、时变、时滞因素)的非线性振动系统的动力学分析

基于有限时间稳定性的概念,建立了时变分岔方程的线性近似定理和 V 函数定理。通过量级平衡和线性化近似技巧,从定性观点去研究时变参数系统的分岔问题,分析了多种时变系统的分岔转迁、滞后和跃迁现象以及预测分岔转迁区间。利用时变分岔的定性方法和数值模拟,研究了慢变参数振子系统的同宿分岔及相应的安全盆侵蚀。研究了多个非线性时滞系统的平衡解稳定性,分析了时滞量和增益系数对线性化特征根分布情况的影响,给出 Hopf 分岔的存在性判据、分岔方向、周期解稳定性和时滞量对 Hopf 分岔特性的影响。得到了分段线性碰振系统的不同周期运动的存在性、共存性和稳定性的多个判据。建立了用于非光滑系统擦边运动和分岔分析的 Poincare 映射法。

(4) 复杂非线性振动系统的一些动力学新现象

发现了包括受迫 Duffing 振子的不稳定混沌不变集合的存在;多自由度系统耦合模态的分岔激变;含间隙的非线性转子系统的加周期分岔序列;混沌吸引子与不稳定周期轨道或混沌鞍碰撞导致混沌激变的新机理;超混沌奇怪行为等新现象。

(5) 非线性转子动力学理论与实验研究

将上述高维复杂系统的非线性动力学理论用于转子动力学研究。提出了火力发电机组轴系动力学建模方法。建立了转子系统多种重大振动故障模型,包括微小间隙流体激励失稳的 1/2 亚谐共振分岔模型、轴系-轴承-基础内共振模型、转子碰摩的非光滑动力学模型、裂纹转子的参数激励振动模型等。开展旋转机械非线性振动的突发低频失稳机理、转子-基础内共振机理、转子碰摩振动机理及碰摩位置判断、转子高速动平衡的非线性传递函数方法、裂纹转子的非线性动力学分析等方面的理论研究。进行转子模型实验和发电厂现场实验,积累了大量的实际资料和数据。

(6) 大型高速转子重大振动故障综合控制治理技术及其工程应用

首次利用非线性动力学理论系统地进行大型高速转子系统(尤其是火力发电机组)的若干重大振动故障分析,提出相应的诊断治理技术,包括轴系-支承的内共振综合治理技术、偏心-润滑参数综合治理技术、综合类比治理技术、非线性传递函数技术等。

这些技术为我国旋转机械的非线性动力学设计、故障诊断和运行管理提供了坚实理论基础,有重大推广价值。

该项目系统地研究了复杂非线性振动系统的动力学控制方面的一些重要理论问题,及其在大型旋转机械非线性动力学问题中的应用。它促成并发展了新的学科方向——工程非线性动力学,同时为机械动力学与控制、结构优化设计、参数辨识、故障诊断和治理等提供重要的新途径。这是具有重要科学意义、具有广阔工程技术应用前景、而且具有国际前沿挑战性的研究领域。

该项目主要理论成果的学术论文发表在大量国际和国内著名刊物上,包括 J. Sound Vibration, Int J Nonlinear Mech, Int J Bifurcation and Chaos, ASME J Engineering, Nonlinear Dynamics, Doklady Math (Russia), Phys Rev E, J Phys A, Phys Letter A, 中国科学、力学学报等,完成国内外学术专著“Bifurcation and Chaos in Engineering”(Springer 出版社,1998 年)等 4 部。并先后 10 次在“国际非线性振动会议”等重要国际学术会议上作大会专题报告。论文被 SCI, EI, ISTP 等收录 400 余篇次,被他人引用 600 余次;专著被他人引用 160 余次。许多国际著名学者,如前苏联科学院副院长 Frolov 院士、俄罗斯应用科学院主席 Davydov 院士、捷克科学院 Pust 院士、以及 Nayfeh 教授(美)、Price 教授(英)、Huseyin 教授(加)等都对 C-L 方法给以高度评价。美国著名数学家、Fields 奖获得者 Smale 教授在 2000 年对“Bifurcation and Chaos in Engineering”一书的评价为“这是一本很高数学水平的书,它用现代数学方法深刻地揭示了分岔和混沌的动力学机理。动力学和混沌的选题是学术前沿。我强烈地向广大读者,特别是向非数学专业的读者推荐此书”。

该项目的振动故障综合控制治理技术已在天津、河北、辽宁等地电厂中得到应用,成功地解决一系列电力工程中的疑难振动故障问题,直接取得逾亿元的显著经济效益。

该项目获 2002 年度天津市自然科学一等奖(编号:ZR2001-1-001)和 2003 年度国家自然科学基金二等奖(编号:Z-109-2-01)。该项目的主要完成人是陈予恕教授(天津大学、重大项目主持人)、陆启韶教授(北京航空航天大学)、褚福磊教授(清华大学)、徐健学教授(西安交通大学)和吴志强教授(天津大学)。在研究过程中,得到国家自然科学基金“九五”重大项目“大型旋转机械非线性动力学问题”(编号:19990510,1999-2003 年)、多项国家自然科学基金面上项目、教育部高校博士点基金项目和其他省部级科研项目的资助和支持。