

·学科进展与展望·

重大项目“大型旋转机械非线性动力学问题” 取得重要进展

孟庆国 詹世革 汲培文

(国家自然科学基金委员会数理科学部,北京 100085)

[摘要] 国家自然科学基金重大项目“大型旋转机械非线性动力学问题”(编号 19990510)经过各参加单位的共同努力,顺利完成了研究计划,通过了国家自然科学基金委员会数理科学部和工程与材料科学部组织的结题验收。该项目获得国家自然科学奖二等奖 1 项、省部级自然科学奖一等奖 1 项、科技进步奖一等奖 1 项及科技进步奖二等奖 2 项。该项目所取得的研究成果使我国在非线性动力学、转子动力学、机械故障诊治等研究领域处于国际前沿水平,部分成果在国际上产生了影响,为推动我国电力工业的科技进步发挥了重要作用。

[关键词] 大型旋转机械,非线性动力学,转子动力学,高维动力系统,非线性动力学设计

20 世纪 60 年代,在确定性动力学系统中混沌现象的发现,被认为是 20 世纪科学的重大发现之一。从此,动力学研究进入了非线性分析的阶段,至今已形成了一门新的学科——非线性科学或混沌动力学。非线性动力学理论及其应用已成为非线性科学研究的前沿和热点。虽然非线性振动力学求周期解的理论已经比较完善,然而,还有大量的问题有待解决。解的拓扑结构与系统参数之间的关系尚无理论方法可以确定,有时,不同的方法会得到相互矛盾的结论。同时,在 Lorenz 系统中已经发现的分岔和混沌现象,在非线性振动领域中是否存在及其揭示方法的问题,成为突破和发展传统非线性振动理论的关键。

从应用方面看,大型高速旋转机械是国民经济的关键装备之一,其突发重大动力学故障在国内外实际运行中时有发生。如:日本及前苏联 600 MW 火电机组;我国大同电厂、秦岭电厂、阜新电厂 200 MW 机组和哈尔滨第三发电厂近年引进的 600 MW 机组造成灾难性后果和巨大的经济、社会损失。要解决这些动力学问题,原有的线性理论已无能为力。因此,研究高维系统的非线性动力学理论,进而对重大故障进行控制的要求十分迫切。

为此,国家自然科学基金委员会于 1999 年设立了数理科学部和工程与材料科学部交叉的重大项目“大型旋转机械非线性动力学问题”,由天津大学陈予恕教授主持,天津大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、东北大学、北京大学、大连理工大学、天津电力局、北京航空航天大学、清华大学、复旦大学等单位共同承担,以期从基础理论和应用基础两方面,攻克非线性科学的某些前沿和热点问题,建立高维非线性动力学的新理论,揭示复杂非线性系统的新现象,研究大型旋转机械的非线性动力学设计和控制机理及其重大故障的预测和治理方法。

1 该项目取得的创新性进展

经过课题组 4 年的努力,该项目取得的主要研究进展可概括为以下 7 个方面:

(1) 非线性动力学的新理论、新方法

将我国力学家陈予恕教授与加拿大 Langford 教授提出的 C-L 方法推广到两个模态和三个模态耦合的高维非线性系统的分岔研究;在退化情况下,对于对称系统和非对称系统的余维 4 和余维 5 分岔方程,导出并证明了其所有可能的普适开折形式;提出了约束分岔理论、时变参数系统的安全域侵蚀理论、

本文于 2004 年 3 月 4 日收到。

高维非线性动力学系统的切比雪夫多项式求解方法、非线性转子系统稳定性量化分析方法、Poincare型胞映射法;阐明了混沌吸引子与内部不稳定周期轨道碰撞产生混沌激变的新机理;在具有间隙的转子系统计算中,在超临界转速下发现了混沌吸引子和周期吸引子的分岔序列;在双圆盘柔性转子系统的计算中发现了奇怪吸引子的倍周期分岔等新现象。

(2)微小间隙约束自激源非线性动力学分析

围绕国产 300 MW 汽轮发电机组所涉及的滑动轴承的运动稳定性问题,提出了一类新的非线性油膜力模型;建立了适合于非线性动力学分析的约束力表征和识别方法;分析了轴承、密封和叶顶间隙与弹性转子的耦合效应以及热弹效应、边界条件、流态等对油膜、气(汽)流非线性激振力的影响规律,进行了数字仿真和部分模拟实验验证。

(3)大型转子系统故障的非线性动力学机理分析

提出了大型转子系统非线性动力学建模准则、直接建模法和降维建模法;应用非线性动力学方法,研究了转子系统的亚谐振动、自激振动、分岔、混沌、慢变、突变等异常振动行为;针对 Jeffcott 转子和实际汽轮发电机组,建立了几种典型故障(油膜振荡、碰摩、转轴裂纹、基座松动等)及其耦合故障的系统非线性动力学模型,对轴系横向振动和某些重大振动故障的发生与发展及其破坏过程进行分析,总结了故障的频响特征。

(4)转子系统的模型实验及抑制振动方法研究

建立了比较接近实际机组的大型多跨转子模拟实验台等装置,进行了碰摩、裂纹、基础松动、油膜振荡等单一故障转子及耦合故障转子的非线性动力学实验研究,并验证了部分理论结果;研究了多种抑制旋转机械振动的有效方法:例如电流变阻尼、反向气流、调整基础刚度或改变支承位置等方法来抑制振动。

(5)高维非线性动力系统数值分析

对高维非线性动力系统的数值求解格式进行了多方面的改进:包括非线性微分方程组的精细积分算法、分段积分算法;发展了有限条方法;对无限自由度动力系统发展了低耗散的差分格式;进一步发展了求解高维非线性动力系统的弧长算法,改进了 Hopf 分岔问题的数值算法,并将上述方法嵌入进了大型非线性结构分析程序中。

(6)大型转子系统的非线性动力学设计

针对大型转子可能出现的非线性问题,在线性设计的基础上,编制了能反映大型旋转机械系统非线性动力学特征的计算程序,为转子系统的非线性动力学设计提供了工具;基于各种小间隙约束激励源(油膜力、密封力等)的非线性力学模型,研究了高维非线性转子系统的模型降阶;对模型转子及实际机组(200 MW 和 300 MW)轴系进行非线性动力学分析,分析了多种参数变化对非线性动力学特性的影响,为转子设计提供了参考依据。

(7)解决大型发电机组疑难振动故障

提出了轴系支撑内共振综合治理技术、偏心润滑参数综合治理技术、综合类比技术、非线性传递函数法等,用于根治转子系统的低频分量故障。这些技术已应用于工程实际,解决了六省市十余个发电厂发电机组轴系的疑难振动问题,取得了 3 亿多元的直接经济效益,并产生了显著的社会效益。

2 该项目的特点

(1)充分发挥项目学术领导小组,尤其是项目负责人的作用。项目学术领导小组每年认真组织学术交流。项目负责人定期到各参加单位检查研究工作,落实课题间的衔接问题。这为项目的组织实施和各课题间的交流与合作打下了基础。

(2)项目选题具有前瞻性,研究成果显著。在项目执行期间,共发表被 SCI 收录的学术论文 97 篇,被 EI 收录的论文 174 篇。其研究成果“复杂非线性系统的某些动力学理论与应用”获 2003 年度国家自然科学基金二等奖。此外,还获得省部级自然科学奖一等奖 1 项、科技进步奖一等奖 1 项、科技进步奖二等奖 2 项。

(3)理论与工程实际紧密结合,发挥理论的指导作用。课题组亲临天津电力局和大连开发区电厂等进行现场试验,采集数据,分析故障原因,解决了实际旋转机械的故障诊断问题。

(4)课题组与国际同行进行了广泛的学术交流与合作。组织国际学术会议 3 次;应邀在国际学术会议上作特邀报告 6 次,分组报告 54 次;与俄罗斯、加拿大、捷克共和国、韩国、美国、英国、日本等国的国际著名学者开展了合作研究,促进了该项目的顺利完成。

(5)培养了非线性动力学与振动领域的中青年后备人才。项目执行期间,项目负责人及各课题负责人重视对年轻人才的培养,激发他们的学术创造性。培养了 20 多名中青年学术骨干、12 名博士后、

45名博士、37名硕士。

该项目所取得的学术成果使我国在非线性动力学、转子动力学、机械故障诊治等研究领域处于国际前沿水平,部分成果(如C-L方法、稳定性量化分析方法等)在国际上产生了影响,为推动我国电力工业的科技进步发挥了重要作用。

3 思考与启示

该项目成功的组织实施,效果显著。如下几点体会将有益于我们今后更好地组织与管理交叉重大

项目:

(1)交叉重大项目选准切入点,是实施交叉研究的基础。要找到在内涵和本质上需交叉研究的问题;

(2)项目实施后,加强研讨,不怕失败,坚定信心,多做工作,是促进交叉的关键;

(3)基础理论、方法研究与工程实际问题相结合,是带动该项目交叉研究的动力;

(4)项目负责人、学术领导小组加强协调是项目成功实施的保证。

ACHIEVEMENTS OF MAJOR PROJECT "THE NONLINEAR DYNAMIC PROBLEMS OF LARGE SCALE ROTOR SYSTEMS"

Meng Qingguo Zhan Shige Ji Peiwen

(Department of Mathematical and Physical Sciences, NSFC, Beijing 100085)

Abstract The plans of the major project of National Science Funds, NONLINEAR DYNAMIC PROBLEMS OF LARGE SCALE ROTOR SYSTEMS (No. 19990510), was completed together by all partners who made great efforts during the four-year research process. The project passed the final check organized by two departments of NSFC, the department of mathematical and physical sciences and the department of engineering and material sciences. By now the project has won one secondary prize of National Natural Science and other four provincial prizes (including one first-class prize in natural science, one first-class prize and two secondary prizes in Science and Technology Progress). Its academic achievements have pushed our country in the front of the world in some scientific fields, such as nonlinear dynamics, rotor dynamics, mechanical fault diagnosis etc., and have played an important role in the Science and Technology Progress of electric power industry in China.

Key words large scale rotating machinery, nonlinear dynamics, rotor dynamics, dynamical systems of high dimension, nonlinear dynamics design

·资料·信息·

第五届全国自然科学基金委员会委员名单

主任:陈宜瑜

副主任:朱道本、朱作言、王杰、沈文庆、孙家广

委员(以下按姓氏笔划排序):

马志明、马恒儒、王淀佐、卢柯、冯长根、刘德培、许勤、李未、李济生、李家洋、陈章良、陈颀、范维澄、周其凤、赵路、席西民、程津培、谢焕忠。