

## 关于加强针对国家重大装备的动力学与控制研究的建议

孟光<sup>1</sup> 孟庆国<sup>2</sup> 詹世革<sup>2</sup> 胡海岩<sup>3</sup>  
张伟<sup>4</sup> 赵跃宇<sup>5</sup> 褚福磊<sup>6</sup> 徐鉴<sup>7</sup> 杨绍普<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 上海交通大学, 上海 200240

<sup>2</sup> 国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085

<sup>3</sup> 南京航空航天大学, 南京 210016

<sup>4</sup> 北京工业大学, 北京 100022

<sup>5</sup> 湖南大学, 长沙 410082

<sup>6</sup> 清华大学, 北京 100084

<sup>7</sup> 同济大学, 上海 200092

<sup>8</sup> 石家庄铁道学院, 石家庄 050043

**摘要** 随着《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的发布和实施, 一系列重大装备和工程建设计划将陆续启动, 如: 载人航天、大型运输飞机和客机、高档数控机床、集成电路制造装备、先进燃气轮机、高速轨道交通、深海钻井平台和大跨度桥梁等. 上述重大装备和工程在设计建造和运行使用过程中的高效、可靠、安全对动力学与控制学科提出了迫切需求. 本文以《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中的战略需求为背景, 结合国家自然科学基金委员会力学学科发展规划的要求, 针对航空航天飞行器、先进制造装备与系统、先进动力装备、高速轨道交通、深海平台和大跨度桥梁中的若干关键动力学与控制问题, 提出了动力学与控制学科“十一五”重点研究建议方向.

**关键词** 动力学与控制, 重大装备, 中长期规划, 研究建议

### 1 前言

力学是研究力与运动规律的科学, 是一门应用性强的重要基础科学, 受学科自身发展和国家需求的双重驱动. 钱学森指出: “力学是工程科学的基础, 以工程和自然界的真实介质和系统为研究对象, 成为技术科学中贡献特别多的一个部门”. 建国以来, 我国的力学工作者为两弹一星、载人航天为代表的重大装备和工程的发展做出了突出的贡献, 造就了以钱学森、周培源、郭永怀、钱伟长为代表的一批杰出的力学家. 力学正是由于在实现国家目标、面向国家重大战略需求中的重要作用, 而奠定了其在我国国民经济和国防建设中的重要地位, 也使力学在我国被认为是自然科学和技术科学的先导学科之一.

动力学与控制(一般力学)是力学的主要分支学科之一. 近年来, 国内该学科的基础研究发展势头良好, 并呈现与数学、物理、生命科学紧密交叉的趋势, 但面向国家重大战略需求的应用基础研究尚不足. 2006年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》<sup>[1]</sup>促使我们必须认真思考动力学与控制学

科今后的发展方向. 紧密结合国家重大战略需求和工程实际对动力学与控制学科的发展是至关重要的, 只有加强结合国家重大战略需求的动力学与控制基础研究, 发挥其在技术创新中的引领和支撑作用, 才能在解决工程技术问题及与其它学科的交叉中找到自己的发展方向, 才能不断丰富学科内涵, 拓展学科发展空间, 保持旺盛的生命力. 《国家中长期科学和技术发展规划纲要》制定了“自主创新, 重点跨越, 支撑发展, 引领未来”的科技工作的指导方针, 重点安排了16个重大专项、11个国民经济和社会发展重点领域的68项优先主题、8个技术领域的27项前沿技术、18个基础科学问题和4个重大科学研究计划. 其中同动力学与控制学科直接相关的计划安排有:

(1) 面向国家重大战略需求的基础研究: 复杂系统、灾变形成及其预测控制, 极端环境条件下制造的科学基础, 航空航天重大力学问题.

(2) 重大专项: 极大规模集成电路制造技术及成套工艺, 高档数控机床与基础制造技术, 大型先进压水堆及高温气冷堆核电站, 大型运输飞机和客机, 载人航天与探月工程, 高分辨率对地观测系统, 3个

国防重大专项。

(3) 优先主题: 重型燃气轮机, 高参数超超临界机组, 大型风力发电设备, 交通运输基础设施建设与养护技术及装备, 高速轨道交通系统, 低能耗与新能源汽车, 高效运输技术与装备, 大型海洋工程技术与装备, 重大生产事故预警与救援, 重大自然灾害监测与防御。

(4) 前沿技术: 智能材料与结构技术, 极端制造技术, 智能服务机器人, 重大产品和重大设施寿命预测技术, 深海作业技术, 空天技术。

上述计划安排中有很多是国家战略需求的重大装备和工程, 这些重大装备和工程在设计、制造和使用中如果不能满足动力学与控制的性能要求, 可能导致运行效率不高、寿命减少、精度降低等问题, 甚至可能造成难以预料的重大事故, 对国家财产、人民生命安全和国民经济造成重大损失。这些重大装备和工程所反映出的多场耦合、多尺度、多参数、非线性、快时变、复杂载荷、复杂和极端环境等特点为动力学与控制学科带来了很大的挑战和发展机遇。因此, 开展对重大装备和工程的动力学与控制研究对国家安全、经济建设、学科发展具有重要的意义。

本文以《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中的战略需求为背景, 结合国家自然科学基金委员会力学学科发展规划的要求, 针对航空航天、先进制造装备与系统、先进动力装备与系统、高速轨道交通列车、深海平台和大跨度桥梁中的若干关键动力学与控制问题, 提出了动力学与控制学科“十一五”重点研究建议方向。

## 2 航空航天中的若干关键动力学与控制问题

航空航天科技工业是国家的战略性支柱产业, 是国民经济的重要组成部分。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》在重大专项中列入了大型运输飞机和客机、载人航天与探月工程、高分辨率对地观测系统; 在前沿技术中列出了智能材料与结构技术, 重大产品和重大设施寿命预测技术; 在面向国家重大战略需求的若干基础研究中明确指出了航空航天重大力学问题, 包括多维动力系统及复杂运动控制理论。因此, 以航空航天飞行器结构, 尤其是智能结构为背景的动力学与控制问题非常值得关注。

### 2.1 大型空间可展开结构动力学与控制

载人航天器、高分辨率对地观测系统均以大型空间可展开结构作为重要组成部分, 并对其展开尺度、位形精度、环境适应性具有非常高的要求。以美欧国家正在研制的天基高分辨率对地观测系统为例, 其

天线是展开尺度达 20 m 以上的柔性网架、或充气/硬化后尺度 50 m 以上的薄膜结构, 形面误差控制在 0.2~1 mm, 并要能很好地适应空间微重力环境、热冲击环境、电磁环境<sup>[2,3]</sup>。这些指标比我国现有技术的指标高出近一个量级。为了实现大型空间可展开结构技术的跨越发展, 需要解决以下科学问题:

#### (1) 大型空间结构的展开动力学与控制

针对天线、太阳帆等大型空间结构, 研究其在轨的多维展开过程动力学, 揭示非对称、非链式展开过程与航天器姿态运动的耦合规律; 研究基于新型功能材料和驱动器的展开过程, 建立主动展开控制理论和方法。

#### (2) 大型空间结构在非线性和温变、电磁环境联合作用下的位形变化与控制

针对具有密集耦合模态、上百个展开间隙的大型空间结构, 研究其在轨的非线性动力学建模和降维理论; 揭示结构非线性和温变、电磁环境联合作用下的结构位形变化和补偿规律, 建立随机位形场的描述与控制理论; 分析其非线性振动及多模态耦合效应, 提出超低频振动控制方法。

#### (3) 大型空间结构在极端欠驱动条件下的瞬态响应及其控制

针对环境温度差 250 K、具有变轨和调姿需求的大型空间结构, 揭示其热冲击响应和波传播规律, 建立极端欠驱动条件下的瞬态响应控制理论和方法。

## 2.2 大型飞机结构的动态健康监测与控制

大型运输飞机和客机不仅需要严格的适航认证, 而且必须达到波音公司、空客公司的同类产品性能, 才能具有市场竞争力。大型飞机的竞争力在于其安全性、经济性和舒适性。目前, 大量采用复合材料是实现飞机减重及降低成本的有效途径, 而结构健康监测则是保障复合材料安全使用的关键技术。但大型飞机的结构尺度和复杂形式对结构健康监测提出极为严峻的挑战。大型飞机的舒适性则对结构振动与噪声水平提出苛刻要求, 欧美国家正在开展“安静飞行器”研究, 试图引入主动控制来获得理想的减振降噪效果。因此, 以健康监测和减振降噪为主要功能的智能结构是大型飞机结构技术的重要发展方向<sup>[4]</sup>, 其发展需要解决以下科学问题:

#### (1) 大型、复杂飞机结构的健康监测

建立具有大尺度、复杂构形的复合材料飞机结构的弹性波传播分析方法, 揭示结构损伤对弹性波传播的影响规律; 建立基于主动 Lamb 波激励的大型复合材料结构健康监测的理论和方法, 揭示其损伤监测和评估机理。

## (2) 大型机舱的多源振动与噪声控制

建立多个振源、噪声源相耦合条件下的结构振动与噪声分析方法,揭示振动和噪声传播、振动/声场分布及其耦合规律;建立满足实时性和鲁棒性要求的振动和噪声控制理论及方法。

(3) 以健康监测和减振降噪为目标的智能结构一体化技术

探索性能大幅度提高的传感器/驱动器新概念及设计理论;研究复合材料结构基体、传感器、驱动器、控制器的一体化分析与设计方法。

## 3 先进制造装备与系统中的若干关键动力学与控制问题

制造业是国民经济的主要支柱,装备制造业是为国民经济发展和国防建设提供技术装备的战略性产业,大力振兴装备制造业是我国的一项重要国策。以先进制造装备为代表的装备制造业技术集中度高,是基础科学、应用科学和工程技术相结合的系统工程,是信息化和高新技术的基础和载体。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》在发展目标中明确指出到 2020 年我国要掌握一批事关国家竞争力的装备制造核心技术,制造业技术水平进入世界先进行列。为此,《国家中长期科学和技术发展规划纲要》在面向国家重大战略需求的基础研究、重大专项、优先主题和前沿技术中都列入了很多与先进制造装备相关的研究计划,充分体现了对先进制造装备的高度重视。而先进制造装备在设计、建造和运行使用全寿命周期过程中的高效、节能、可靠、安全等要求对动力学与控制提出了迫切需求。

### 3.1 高速、高精数控机床的动力学、振动与控制

高档数控机床是实现制造技术和装备制造业现代化的重要基础装备,其性能、质量和拥有量已经成为衡量一个国家装备制造业实力和综合国力的重要标志之一。航空航天、船舶和兵器等国防工业需要的高速、高效、高精度、专业化数控装备和汽车制造业等需要的高效、柔性、成套自动化数控装备中的关键动力学、振动与控制问题,是影响高档数控机床加工精度和加工质量的关键因素。考虑高速加工过程,从动态设计的角度,重点突破机床本体设计技术,解决关键高性能部件的动力学、振动与控制问题,对我国高档数控机床整体技术水平的发展具有重要意义<sup>[5~7]</sup>。为此,需要解决以下科学问题:

#### (1) 考虑摩擦时高速切削过程中再生颤振问题

建立考虑摩擦时高速切削过程中再生颤振的动力学模型,分析摩擦对于再生颤振的影响,研究再生

颤振的预报与控制问题,高速切削过程中工件-刀具在力场与温度场耦合作用下的再生颤振和振动问题。

#### (2) 高速主轴主动、半主动振动控制及动平衡问题

研究 20000 转/min 以上的高速电主轴主动、半主动振动控制,研究电磁轴承在高速主轴中的应用和动力学分析,高速电主轴的在线动平衡问题。

#### (3) 全静压导轨接触面刚度分析及油膜动力学问题

研究全静压导轨接触面刚度对于高档数控机床动态特性的影响,给出接触面刚度的计算方法,分析油膜对于高档数控机床振动的影响规律。

#### (4) 高档数控机床动力学与振动问题的实验研究

利用先进的实验手段研究高档数控机床的动力学和振动特性,发现影响振动的因素,对振动进行相应的控制,提高加工精度,用实验方法研究刀具-工件-刀具耦合系统动力学、振动与控制问题。

#### (5) 高加速度移动部件的动力学与控制问题

包括双摆角铣头、数控转台、刀库、数控转塔刀架、高速液压动力卡盘等的动力学与振动分析,给出动力学与振动控制的方法。

### 3.2 集成电路(IC)制造装备的动力学与控制

成为世界电子制造强国是我国 21 世纪发展的战略目标,实现这一目标的关键是必须能自主地提供支撑电子产业持续发展的先进制造工艺、技术和装备。为了从整体上提升我国 IC 产业和 IC 装备制造水平,必须研究具有自主知识产权的 IC 装备制造技术。集成电路超精细微加工涉及多道工序,工艺非常复杂,而每一道工序对设备的运动精度和定位精度都要求极高<sup>[8,9]</sup>。在所涉及的核心技术和关键共性技术中,制造装备的动力学与控制问题是保证设备的运动精度和定位精度、提高加工质量的核心技术。因此研究 IC 制造装备的动力学与控制问题对我国 IC 装备制造领域实现跨越式发展具有重大意义。该领域所涉及的主要动力学与控制科学问题包括以下方面:

#### (1) 高速、高加速度及高精度的多轴运动平台的多体动力学建模与仿真

满足极限工况要求的运动平台的结构形式的多体动力学建模与拓扑结构优化,动态特性仿真与机电耦合动力学分析。

#### (2) 非线性、强耦合、快时变高加速度运动系统的自适应减振与动力学补偿

基于新型智能材料的高精度、快反馈振动主动控制方法,包括智能材料和结构动态特性分析、结构动

态模型降阶、控制器设计等. 研究运动非线性和不确定性参数控制补偿的新方法.

(3) 多能域耦合、多参数时滞非线性系统的非线性响应与动力学控制

包含电气、机械、阻尼、时滞滤波器和控制器中诸多设计参数的机电系统耦合非线性动态建模与非线性响应分析. 研究多参量协同混合控制方法, 以及控制稳定性、鲁棒性及自律性的研究.

(4) 超精密工作台的定位精度和非线性扰动控制

研究多耦合结构系统的动态特性及参数识别, 各种非线性和不确定性参数耦合的动力学特征及其对控制性能的影响规律, 研究复杂多耦合参数动力学特征对运动控制性能的敏感性, 扰动的稳定性及控制.

### 3.3 微机电系统 (MEMS) 的动力学与控制

微机电系统 (MEMS) 是 21 世纪高科技市场的、影响未来世界的、关系到国家科技发展、国防安全和经济繁荣的关键技术, 微尺度效应所带来的微科学问题和多能域耦合所导致的多学科交叉问题是 MEMS 研究中的关键科学问题, 对它的研究及其应用将会带动生物学、航空航天、汽车工业等领域的科技进步和事业发展. 微机电系统中呈现出的尺度效应和新特征, 对动力学与控制的理论和方法提出了新的挑战, 如静电驱动 MEMS 中静电力引起的吸合效应, 微转子系统中动力润滑边界的滑流效应等. 随着高精度、复杂 MEMS 的快速发展, 对动力学与控制学科提出了许多值得关注的科学问题, MEMS 的动力学与控制正逐渐成为力学的一个新的研究领域和前沿方向<sup>[10~12]</sup>, 对促进我国 MEMS 的基础研究、技术进步和产业发展具有重大意义. 为此, 需要解决以下科学问题:

(1) MEMS 的动力学建模与分析方法

建立充分考虑微尺度下阻尼特性和多能域耦合效应时 MEMS 的非线性动力学模型, 发展相应的复杂非线性动力学模型降阶方法和多能域耦合非线性系统动力学模拟仿真技术.

(2) MEMS 的动力学特性与振动控制

研究微尺度下具有弹簧硬化或软化、突跳、迟滞、黏滑、接触等非线性的微机电系统的非线性动力学特性与稳定性, 研究微尺度下 MEMS 的摩擦、磨损和动力润滑特性及控制, 探索微尺度下 MEMS 运动姿态自适应控制和非线性振动及稳定性控制方法.

(3) MEMS 的动态监测与可靠性技术

建立微尺度下 MEMS 的故障特性、特征信号提取和可靠性分析方法, 揭示 MEMS 的失效机理、失

效模式及损伤机制, 开发 MEMS 的动态监测系统和可靠性数据库.

(4) MEMS 的动力学测试与实验研究

研究微尺度下 MEMS 非线性动力学特性与振动的动态测试技术, 开发用于 MEMS 单体 / 多体微结构动力学特征参数分析的实验方法和分析技术, 研究微尺度下的传感与信号传输技术及微弱信号的处理和参数识别技术.

## 4 先进动力装备中的若干关键动力学与控制问题

以燃气轮机、航空发动机为代表的先进动力装备在国民经济建设和国防安全中具有重要的战略地位. 相比火力发电和水力发电机组, 燃气轮机和航空发动机的工作温度、工作压力和工作转速更高, 不仅对材料和制造学科提出了更高的要求, 也对动力学与控制学科提出了新的挑战. 《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中的相关计划包括: 极端环境条件下制造的科学基础和航空航天重大力学问题等面向国家重大战略需求的基础研究, 大型运输飞机和客机及国防重大专项, 重型燃气轮机等优先主题, 重大产品和重大设施寿命预测技术等前沿技术. 开展先进动力装备的动力学、振动与控制的研究对减少事故、保障安全、延长寿命、提高效益具有重要的意义.

### 4.1 重型燃气轮机

燃气轮机是装备制造业的高端产品, 燃气轮机技术取得突破可能带来整个制造业的突破. 能源是制约国民经济发展的重大因素, 发电厂建设将是相当长时间内的重要任务. 燃气轮机电厂的需求十分巨大, 目前我国已经引进并正在生产的燃气轮机达 1600 万千瓦, 预计 2020 年燃气轮机发电装机容量将达到 6000 万千瓦. 以燃气轮机为核心还能发展成湿空气透平、燃煤联合循环、燃料电池燃气轮机混合装置等多种先进的能源动力装备. 燃气轮机技术在国防工业中也有重大影响, 海陆空武器平台都离不开燃气轮机. 过去 30 年, 燃气轮机技术发展迅猛, 主要表现在: 气动学的完善使压气机和涡轮的气动热力学性能提高到崭新的阶段 (压气机效率  $\eta_K = 88\%$ , 涡轮效率  $\eta_T = 92\% \sim 94\%$ ); 材料科学的发展使燃气轮机的最高进口温度达到  $1500^\circ\text{C}$ , 这就意味着燃气轮机热效率可达 40%. 但高压、高温和联合循环带来的动力学、振动和控制问题也越来越突出<sup>[13~15]</sup>.

(1) 多场耦合环境下燃气轮机的非线性动力学与振动

强温度场、压力场、电磁场环境下燃气轮机的动

力学建模与非线性振动特性分析, 关键部件与系统的稳定性分析和失稳模式, 非稳定电磁激励激发的和转子横截面温度不对称及温度场不稳定引起的转子系统非线性振动特性.

#### (2) 系统的非线性气封力建模与非线性气流激振

建立燃气轮机密封的非线性气封力模型和转子系统非线性气流激振的力学模型, 研究密封结构形式、可变几何参数(如间隙、齿高、齿距等)和转子结构形式的影响, 分析系统的非线性气流激振响应特性.

#### (3) 燃气轮机转子系统非线性故障特征分析

燃气轮机转子系统多种单一故障及耦合故障的建模, 设计和研制用于燃气轮机转子系统非线性故障特性实验的多跨转子模拟试验台, 理论和实验研究碰摩、裂纹、基础松动、油膜振荡、气流激振等单一故障及耦合故障导致的转子非线性振动特性和故障发生机理与演化规律, 建立故障数据库.

#### (4) 燃气轮机振动抑制方法

研究抑制燃气轮机非线性振动的结构参数和载荷参数优化, 利用已有的电/磁流变阻尼器技术、挤压油膜阻尼器技术和可变支承刚度技术, 结合模型试验研究燃气轮机转子系统非线性振动的主/被动控制方法.

### 4.2 航空发动机

随着飞机向高速、重载、经济、舒适、节能和轻量化方向的快速发展, 对航空发动机性能的要求越来越高. 一方面是军用发动机的推重比将达到 20, 耗油率降低 50%, 涡轮前温度已接近  $1800^{\circ}\text{C}$ ; 另一方面是民用发动机要满足载客 500 人、节能 25%、续航力明显增加的要求, 此外, 发动机的转速达到数万转. 随着推重比、涡轮前温度和转速的不断提高, 压气机和涡轮级数逐渐减少, 单级负荷不断增大, 转子、叶片等关键零件的结构越趋复杂, 系统和零部件的应力水平越来越高, 工况更加恶劣, 动力学与振动问题越来越突出<sup>[16]</sup>. 另外, 随着服役时间延长, 老龄发动机由于振动引起的疲劳损伤问题经常导致恶性事故发生. 因此对动力学、振动与控制的方法和技术有迫切的需求, 需要特别关注以下科学问题:

#### (1) 发动机整体动力学建模与高速非线性柔性转子动力学

具有弹性边界的发动机整体结构的动力学建模, 转子系统在升、降速通过 1 阶、2 阶临界转速过程和 2 阶临界转速以上运行时的非线性动力学行为与振动特性, 非线性柔性支撑、非线性油膜力、非线性气动力和多场耦合作用对高速柔性转子系统稳

定性和非线性响应的影响.

#### (2) 压力脉动引起的发动机转子系统的非线性喘振特性

分析流量、压力比和压力脉动等特征量与发动机转子系统喘振的关系, 研究系统喘振的动态响应特性和抑制方法.

#### (3) 发动机转子系统典型故障的非线性振动特性

研究多场耦合作用下转子系统在升、降速通过 1 阶、2 阶临界转速过程和 2 阶临界转速以上运行时转子系统多种单一故障及耦合故障引起的非线性响应特性, 分析诸如转子裂纹、转静子碰摩、密封故障和叶片失调等故障的非线性响应特征.

## 5 高速轨道交通中的动力学与控制

高速铁路以其运量大、速度快、能耗低、运价廉、占地少和安全可靠等一系列技术经济优势引起了世界范围的普遍重视, 《国家中长期科学和技术发展规划纲要》在优先主题中专门列入了高速轨道交通系统. “十一五”期间, 中国铁路将完成 9800 km 客运专线建设任务, 其中时速在 300 km 以上的达 5457 km. 随着列车运行速度的提高, 高速列车与轨道结构之间的动态相互作用加剧, 由此而引发的动力学、振动与控制问题将更加严重<sup>[17,18]</sup>. 因此, 高速轨道交通的动力学与控制已成为保证运行安全和改善乘客舒适性的重要内容. 所涉及的科学问题包括:

#### (1) 高速轨道交通系统的动力学建模与振动控制

研究高速轨道交通中的机车车辆、轮轨、路基组成的复杂非线性振动系统的动力学建模和大型、复杂、多场耦合环境下的整车动力学建模与动力学响应, 开展非线性控制理论与方法在高速轨道交通振动控制中的应用研究, 设计有效可靠的智能化控制器.

#### (2) 高速列车阻尼悬架系统的非线性动力学与控制

研究基于磁流变智能阻尼器的高速机车悬架系统分岔与混沌动力学、智能悬架系统时滞非线性动力学与控制. 研究空气弹簧、金属-橡胶复合减振器和其它弹性元件在复杂载荷和激励下的非线性动力学与振动问题.

#### (3) 高速轨道交通系统的非线性振动与稳定性

研究高速轮轨相互碰摩、空气动力、车辆动力系统激励及其复合作用导致的复杂非线性振动问题和机车蛇行运动的生成机理与控制方法. 研究高速列车受电弓系统由动载、摩擦、悬索、电、磁耦合作用导致的强非线性振动问题和受电弓振动与稳定性主动控制方法.

## 6 深海平台中的若干动力学与控制问题

能源危机使人们认识到必须加强资源勘探开发装备的自主研制。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》在重点领域、优先主题和前沿技术中明确指出要使我国的资源勘探开发重大装备达到国际先进水平,要高效开发利用海洋资源,重视发展多功能、多参数和作业长期化的海洋综合开发技术,发展深海作业装备制造技术和深海空间站技术,以提高深海作业的综合技术能力。深水以及超深水的油田开发工程技术在我国尚属空白,特别是对张力腿平台(tension leg platform)和柱筒式平台(SPAR),没有设计、建造和使用的经验,需要通过自主创新 and 集成创新进行研制。因此,探讨深海平台设计和使用中的动力学与控制问题,对我国海洋油气开发具有重要意义<sup>[19,20]</sup>。为了实现这样的目的,需要开展以下研究:

### (1) 立管系(油气管)的稳定性和动力响应研究

针对内部输送气体和黏性液体超长油气管,研究流体诱发的管道失稳机理和立管系外部流体极限环境载荷引起的碰撞动力学响应,揭示非极限海况下形成的海水涡诱发的流固耦合振动规律。

### (2) 系泊系统的动力学稳定性及张力突变特性

研究海洋环境中的流体连续扰动对浮体平衡位置以及缆绳构形的影响,建立缆绳非线性刚度、时变刚度模型,研究系泊系统缆绳张力的突变特性。

### (3) 深海平台的整体结构和动力响应

针对深海平台的整体结构,研究流和黏性影响的低频慢漂响应,探索高频响应中的2阶和频力(springing)以及高阶脉冲力(ringing)等问题,考虑极限海况下波浪、风、流耦合对平台的作用以及晃动问题。

### (4) 深海平台结构振动控制方法和策略

针对深海平台的整体结构,揭示水箱不同大小、形状、频率比等参数对减振效果的影响规律,研究在结构和系泊系统控制中由于传感器测量、计算机分析计算、作动器动作等出现的时滞对控制效果的影响,研究基于智能阻尼器和作动器的深海平台结构振动控制方法。

## 7 大跨度桥梁的若干动力学与控制问题

交通工程是国民经济、国家安全的生命线工程,《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中把大跨度桥梁的设计、建造和安全运营列为交通工程的重要内容之一。大跨度桥梁主要有3种桥型:悬索桥、斜拉桥和拱桥。4000 m以上的悬索桥、1000 m以上

的斜拉桥以及各种造型别致的组合桥梁造价巨大,大量采用新技术、新材料和新工艺,结构跨度大,受力非常复杂。其在设计、建造和运营中所受到的复杂的结构载荷、车辆荷载、风雨荷载和地震作用导致了大量的动力学与控制问题<sup>[21,22]</sup>。深入研究大跨度桥梁的动力学与控制问题对减少建设投入、预防重大事故、提高安全及可靠性具有重要的意义。主要的科学问题包括:

### (1) 索、索-梁组合结构的非线性动力学

研究索及索-梁结构的参数激励和强迫激励响应特性,索的风雨振动产生机理及其抑制方法,索的截面形式、抗弯、抗扭等对动力学特性的影响,运动空间中的索的多模态耦合作用特性和单梁多索结构的动力学特性,索-梁组合结构的非线性动力学分岔与混沌和索-梁组合结构的振动控制方法。

### (2) 大跨度桥梁的非线性动力学与控制

研究桥面-索-桥塔的耦合动力学建模与动力学行为,桥面-索-桥塔系统的主/被动振动控制,复杂载荷和地震载荷作用下大跨度桥梁的动态响应和控制方法,大跨度桥梁的动力学特征及整体模态与局部模态的耦合作用。

### (3) 大跨度桥梁的智能监控

研究大跨度桥梁的损伤力学特性和结构动应力、动应变与损伤的映射规律,基于结构性能、适用性、抗震、防风雨等要求的结构动力学设计方法,嵌入式智能传感网络的动力学行为与动态特征信号提取,基于振动和加速度等动态特征的健康监测方法。

## 8 结 论

动力学与控制学科的发展必须紧密结合国家重大需求,而《国家中长期科学和技术发展规划纲要》为动力学与控制学科提出了新的任务和挑战。本文针对航空航天飞行器、先进制造装备与系统、先进动力装备、高速轨道交通、深海平台和大跨度桥梁中的若干关键动力学与控制问题,提出了相关的科学问题和动力学与控制学科“十一五”重点研究建议方向,可供力学工作者参考。

## 参 考 文 献

- 1 国家中长期科学和技术发展规划. 北京: 科技部, 2006. 3
- 2 Chodimella S P, Moore J D, Otto J, et al. Design evaluation of a large aperture deployable Antenna. In: Proceedings of 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Newport, Rhode Island, USA, 2006, AIAA 2006-1603
- 3 Murphy D M, McEachen M E, Macy B D, et al. Demonstration of a 20-m solar sail system. In: Proceedings of 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dy-

- namics and Materials Conference, 2005, Austin, USA, 2005, AIAA 2005-2126
- 4 Hu H Y, Wang X W. Advanced Structures for Future Aerospace Engineering. In: Proceedings of International Seminar, 2007, AERO-INDIA 2007, Bangalore, India
  - 5 艾兴. 高速切削加工技术. 北京: 国防工业出版社. 2003
  - 6 Insperger T, Mann B P, Stepan G, Bayly P V. Stability of up-milling and down-milling, part I: Alternative analytical methods. *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, 2003, 43: 25~34
  - 7 Namachchivaya N Sri, Beddini R. Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter. *Journal of Non-linear Science*, 2003, 13: 265~288
  - 8 雷源忠, 雒建斌, 丁汉, 钟掘. 先进电子制造中的重要科学问题, 中国科学基金, 2002, 4: 204~209
  - 9 Bayat Ahmad, Pai Eric. Advanced technology facilities - Semiconductor fabrication facilities. In: Proceedings of the 2006 Structures Congress, 2006-05-18~21. St. Louis, MO, United States. 2006. p163
  - 10 Zhang W M, Meng G. Stability, bifurcation and chaos analyses of a high-speed micro-rotor system with rub-impact. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 127(1): 163~178
  - 11 Bechtold T, Rudnyi E B, Korvink J G. Dynamic electro-thermal simulation of microsystems—a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15: R17~R31
  - 12 Sudipto K De, Aluru N R. Complex nonlinear oscillations in electrostatically actuated microstructures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(2): 355~369
  - 13 Olsson Karl-Olof. Some unusual cases of rotor instability. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 2005, 25(4): 477~481
  - 14 姚尔昶. 我国大功率燃气轮机制造业的发展前景. 汽轮机技术, 2003, 45(2): 65~67,101
  - 15 Meng G, Gasch R. Stability and stability degree of a cracked flexible rotor supported on journal bearings. *Trans ASME J of Vibration and Acoustics*, 2000, 122(2): 116~125
  - 16 Lin F S, Meng G. Study on the dynamics of a rotor in a maneuvering aircraft. *Trans ASME J of Vibration & Acoustics*, 2003, 125(3):324~327
  - 17 杨绍普, 申永军. 滞后非线性系统的分岔与奇异性. 北京: 科学出版社. 2003, 7
  - 18 翟婉明. 车辆 - 轨道耦合动力学. (第二版), 北京: 中国铁道出版社. 2002
  - 19 张大刚. 深海油田的开发 —— 当前国际应用及发展趋. 中国造船, 2005, 46(4): 41~46
  - 20 曾晓辉, 沈晓鹏, 吴应湘, 刘杰鸣. 深海平台分析和设计中的关键力学问题. 船舶工程, 2005, 27(5): 18~21
  - 21 赵跃宇, 王连华, 刘伟长, 周海兵. 悬索非线性动力学中的直接法与离散法. 力学学报, 2005, 37(3): 329~338
  - 22 丁泉顺, 陈艾荣, 项海帆. 大跨度桥梁耦合颤振的全阶分析方法, 振动工程学报, 2002, 15(4): 436~441

## SUGGESTION ON THE STUDY OF DYNAMICS AND CONTROL IN KEY EQUIPMENTS

MENG Guang<sup>1</sup>    MENG Qingguo<sup>2</sup>    ZHAN Shige<sup>2</sup>    HU Haiyan<sup>3</sup>  
 ZHANG Wei<sup>4</sup>    ZHAO Yueyu<sup>5</sup>    CHU Fulei<sup>6</sup>    XU Jian<sup>7</sup>    YANG Shaopu<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>2</sup>Department of Mathematical and Physical Sciences, NSFC, Beijing 100085, China

<sup>3</sup>Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

<sup>4</sup>Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

<sup>5</sup>Hunan University, Changsha 410082, China

<sup>6</sup>Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>7</sup>Tongji University, Shanghai 200092, China

<sup>8</sup>Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China