

力学处 2014 年度重点项目结题审查情况简要介绍

张攀峰¹⁾ 詹世革 许向红 孙中奎

(国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

摘要 对 2014 年度国家自然科学基金委员会数理科学部力学科学处结题的 12 项重点项目结题审查情况进行了简要介绍. 给出了 12 项 2014 年度结题重点项目清单以及经评审专家组讨论形成的结题审查评价意见.

关键词 国家自然科学基金, 力学, 重点项目, 结题

按照《国家自然科学基金重点项目管理办法》的有关规定: 自然科学基金委应当自收到结题材料之日起 90 日内, 组织同行专家对重点项目完成情况进行审查. 为了促进重点项目之间的交流, 加强对比, 提高效率, 数理科学部于 2015 年 3 月 10 日至 11 在北京召开会议组织专家对 2014 年度结题的重点项目

进行了集中审查, 会议采取分学科处进行的方式. 力学科学处共有 12 项重点项目进行了结题审查 (见表 1). 各项目负责人就研究计划的完成情况、取得的成果及水平、以及人才培养和国际合作与交流的成效等进行了汇报. 评审专家进行了认真讨论, 形成了结题审查专家组评价意见.

表 1 2014 年度力学科学处结题重点项目清单

批准号	负责人	题目	依托和合作单位
11032001	杨嘉陵	新概念能量吸收装置的理论及在飞行器耐撞性设计中的应用	北京航空航天大学、宁波大学
11032002	宁建国	三维爆炸与冲击问题模型理论、高性能数值方法及软件开发	北京理工大学
11032003	张庆明	超高速碰撞产生的电磁辐射及其力电耦合机理	北京理工大学
11032004	赵跃宇	大跨度斜拉桥的非线性建模理论及其动力学研究	湖南大学
11032005	刘人怀	纤维增强先进复合材料及其结构失效机理的多尺度力学研究	暨南大学
11032006	周又和	超导电-磁-热-力多场耦合非线性力学的基础理论与实验研究	兰州大学
11032007	王道增	复杂水动力条件下水体-泥沙-污染物的动态耦合环境效应	上海大学、中国科学院力学研究所、上海市环境科学研究院
11032008	陈维毅	眼球功能相关疾患治疗机理的力学生物学研究	太原理工大学、大连理工大学、大连医科大学
11032009	徐 鉴	时滞耦合系统的非线性动力学	同济大学、南京航空航天大学
11032010	周益春	铁电薄膜及其存储器中界面与应变效应的研究	湘潭大学、广东工业大学
11032011	胡文瑞	微重力条件下几个关键力学问题	中国科学院力学研究所
11032012	杨 力	MGF 调控骨和韧带组织修复的力生物学基础研究	重庆大学、北京航空航天大学

本文于 2015-06-16 收到.

1) E-mail: zhangpf@nsfc.gov.cn

引用格式: 张攀峰, 詹世革, 许向红, 孙中奎. 力学处 2014 年度重点项目结题审查情况简要介绍. 力学学报, 2015, 47(4): 707-711

Zhang Panfeng, Zhan Shige, Xu Xianghong, Sun Zhongkui. A brief introduction of completed key program projects on mechanics in 2014. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(4): 707-711

基于专家组的评价意见,下面将这 12 个结题项目在执行期间所取得的主要研究成果介绍如下:

1 新概念能量吸收装置的理论及在飞行器耐撞性设计中的应用 (负责人: 杨嘉陵)

(1) 开展了猫科动物自主跳跃着陆运动实验,对它们的缓冲、能量吸收与转换及控制特性进行了系统深入的研究,揭示了其中的力学机理并建立了相关的理论模型,进一步探究了“仿生”缓冲吸能着陆器,为返回舱座椅系统的新概念设计提供借鉴.

(2) 提出了保持飞行器平衡的自适应液压多触角方向调节的方法,可有效改善自适应撞击方向液压多触角方向调节器的稳定性,使飞行器触地之后能够保持原先坠落前的状态,提高了能量吸收的功效.

(3) 研究了扇形可展式吸能装置在压溃过程中的吸能特性. 揭示了扇形能量吸收结构在正撞击时的对称渐进模式、欧拉整体屈曲模式以及混合模式,在单胞体添加铰链的工况下,分析了结构和材料参数对单胞吸能特性的影响,以及单胞的展开程度与单胞吸能特性的关系,为可展式能量吸收装置的设计提供了依据.

(4) 提出了一套较为全面的能量吸收性能的评估指标,包括有效行程比、结构承载能力、单位重量的能量吸收能力、吸能有效率和载荷波动度. 并以管状结构的能量吸收性能为例验证了提出的评估指标的有效性.

2 三维爆炸与冲击问题模型理论、高性能数值方法及软件开发 (负责人: 宁建国)

(1) 建立了基于多物质 Euler 流体弹塑性理论的适用于描述爆炸与冲击问题的数学模型,给出了陶瓷、混凝土、钛基复合材料等典型国防材料在强动载荷作用下的动态本构关系.

(2) 研究了含化学反应欧拉方程的 WENO 和 RKDG 等高精度格式的保正性,实现了爆轰过程的高精度模拟,发展了适用于冲击波强间断高分辨率计算的伪弧长算法.

(3) 开展了三维多物质流体动力学数值模拟并行化方法研究,通过对自主开发的 MMIC-3D 仿真计算软件进行并行化设计并开发相应的前处理软件 MESH-3D 和可视化后处理软件 VISC-3D,构建了欧拉型三维爆炸与冲击问题大规模高性能仿真软件

EXPLOSION-3D.

3 超高速碰撞产生的电磁辐射及其力电耦合机理 (负责人: 张庆明)

(1) 建立了超高速碰撞产生电磁辐射效应的实验系统,包括超高速碰撞产生等离子体、电磁场、碰撞闪光和微波辐射的实验加载系统和测试系统. 设计制作了弹托分离装置、延时触发装置、跟进气体隔离挡板和加装靶室.

(2) 通过实验研究,测定了超高速碰撞产生的电磁辐射特征参数,得到了超高速碰撞形成等离子体的时空分布特征、2A12 铝合金靶板和白云石靶板的闪光辐射特性、微波特性和电磁波的频域分布特性以及正碰撞、斜碰撞和不同碰撞速度条件下电场和磁场强度的时空变化规律.

(3) 揭示了超高速碰撞形成等离子体的二次碰撞物理机制,分析了超高速碰撞产生碰撞闪光的机理,建立了超高速碰撞产生等离子体的理论模型及电磁辐射的理论模型,得到了电磁辐射频谱分布特性的理论描述.

(4) 通过实验研究得到了超高速碰撞产生的等离子体对通信电路和的半导体元器件干扰和毁伤情况.

(5) 数值研究了静高压和超高速碰撞条件下等离子体相变,得到了诱发电磁场对等离子体相变的影响规律,建立了一种超高速碰撞产生等离子体的力电耦合模型,揭示了超高速碰撞过程中的力电耦合机理.

4 大跨度斜拉桥的非线性建模理论及其动力学研究 (负责人: 赵跃宇)

(1) 建立了斜拉桥中拉索的动力学模型,给出了斜拉索五个自由度的空间运动动力学模型,对斜拉索弯曲刚度、温度、弹性模量等重要参数对动力学特性的影响,以及在桥面和桥塔激励下、风荷载激励下斜拉索的内共振等动态行为进行了理论和实验研究.

(2) 建立了斜拉桥下部结构的动力学模型,研究了大跨度桥梁结构中高墩结构的抗震性能、墩顶位移计算方法、桩基础中桩与土的相互作用,为斜拉桥下部结构的设计提供了参考.

(3) 建立了斜拉桥的索-梁耦合动力学模型,给出了索-梁结构的运动微分方程,对整体振动、局部振动以及联合振动进行了理论和实验研究,揭示了

索与梁间的多种共振行为,提出了时滞反馈控制策略.对斜拉桥整桥动力学建模理论及特性进行了研究,给出了斜拉桥的多梁-离散弹簧动力学模型以及有限元分析模型.

(4) 对高维非线性系统动力学理论进行了研究,分析了无限维非线性系统中 3 类典型的静态分岔及其控制问题,提出了基于双曲函数的平均法方法,揭示了大跨度斜拉桥各部分之间相互作用的动力学机理.

5 纤维增强先进复合材料及其结构失效机理的多尺度力学研究 (负责人: 刘人怀)

(1) 发展了描述复杂环境下纤维增强复合材料及其结构失效机理的理论分析模型和数值模拟方法,用以预测复杂环境、冲击损伤等对纤维增强复合材料及其结构性能和寿命的影响规律.特别是提出一种新的能描述 FRP-混凝土界面开裂前后性质的弹性、滑移、软化、剥离模型,即三线性粘结-滑移本构模型.

(2) 研究了含脱层纤维增强复合材料板的弯曲、屈曲问题;分析了纤维增强复合材料层合板在的疲劳寿命;建立了纤维增强复合材料和结构的冲击响应、损伤和破坏容限评价方法.

(3) 建立了纳米粒子增强聚合物基复合材料和填充纳米粒子的纤维增强聚合物基复合材料和添加纳米粒子的纤维增强半结晶聚合物基复合材料力学性能的多尺度分析模型,提出了复合材料宏观弹性模量的预测方法,得到了复合材料宏观力学性能与各组分材料参数的定量关系,分析各组分材料参数对复合材料力学性能的影响.

(4) 发展了纤维增强复合材料结构的仿生优化设计和蜂窝夹芯复合材料层合板的协同优化设计方法.

(5) 研究了热、电及机械载荷的共同作用下复合材料板的力学行为,建立了含非均匀界面层纤维增强复合材料在径向约束下的热弹性细观分析模型及损伤检测的热传导细观模型.

6 超导电-磁-力多场耦合非线性力学的基础理论与实验研究 (负责人: 周又和)

(1) 在超导材料与结构的力学性能表征方面开展了较为系统的研究,揭示了变形对超导电学特性的影响机制与规律,发展了超导线材、股线直到磁体

的力学检测分析方法.

(2) 研制出具有自主知识产权的一套低温/变温环境下超导材料力学性能测试系统,为超导力学研究提供了实验基础和手段.

(3) 针对超导材料与结构多场耦合、跨尺度、非线性力学等基础科学问题,提出了非线性高精度的小波封闭解法,率先实现了从弱非线性到强非线性问题的统一解法,具有计算精度高、计算量小的优点.

7 复杂水动力条件下水体-泥沙-污染物的动态耦合环境效应 (负责人: 王道增)

(1) 研究了泥沙对污染物的吸附解吸问题,开展了系统的实验研究,给出了泥沙表面微观形貌、泥沙粒径对污染物吸附解吸特性的影响规律,掌握了不同粒径泥沙的吸附动力学特性和多孔介质底泥层的污染物解吸释放特性.

(2) 发展了动水条件下污染底泥运动和污染物释放的水槽实验方法,揭示了动态水流条件下污染底泥的扩散释放机理,建立了水体悬浮泥沙输移和污染物分布的动力学模型,获得了非恒定水流作用下泥-水界面污染物扩散释放规律.

(3) 构建了考虑水体和沉积底泥耦合的多功能波流数值水槽以及污染物在沉积底泥和上覆水体界面区域扩散迁移的动态耦合模型,通过理论建模和数值模拟,给出了多孔介质底泥中污染物微粒迁移机理及其影响因素.

(4) 通过环境机理实验和现场观测,研究了长江河口青草沙水库水体磷的形态分布和淀山湖底泥对磷营养盐积聚及释放问题,揭示了河口地区浅水湖泊和水库底泥对磷营养盐积聚及释放的影响机理,为水环境工程的规划设计和调度管理提供了科学依据.

8 眼球功能相关疾患治疗机理的力学生物学研究 (负责人: 陈维毅)

(1) 建立了 LASIK 术实验动物模型,获得了术后角膜组织及细胞的生物力学特性.探索了正常及圆锥角膜成纤维细胞对力学刺激的生物学响应,观察到小于 10% 应变的力学刺激可促进角膜基质的强化,15% 应变的作用可使角膜基质降解.

(2) 发现机械牵拉与 IL-1 β 共同作用促使细胞外

基质的降解现象; $\text{TNF-}\alpha$ 与机械牵拉联合作用可使圆锥角膜成纤维细胞 MMP1,2,3,9 表达升高, 细胞外基质的降解加快; ERK1/2 参与了损伤性机械牵拉介导的角膜成纤维细胞 MMP-2 的表达调控.

(3) 修正了通用的细胞微管吸吮的半无限体模型, 为细胞力学测试提供了新的分析方法.

(4) 建立了考虑眼外肌 (pulley) 存在的眼球运动模型, 从生物力学角度说明了 pulley 的存在有利于保持视觉图形不变形, 还可使眼外肌用较小的力完成同样的运动; 对眼动进行了定位, 提出了新的算法, 得到了人体旋转时眼动与角加速度之间的关系, 以及用来确定眩晕体征的前庭眼动参数, 提出了对运动型眩晕症的判定依据.

(5) 构建了豚鼠和人内耳生物力学模型; 分析了体位变化和环境温度激励下人双耳前庭半规管力学响应; 发现人内耳 Bast 瓣膜在前庭平衡机制中起着重要作用.

9 时滞耦合系统的非线性动力学 (负责人: 徐鉴)

(1) 提出了研究时滞耦合系统非共振和共振分岔及其分类的多尺度方法和研究时滞振动系统的积分迭代法, 得到了判断时滞依赖系统特征根穿越方向的简单条件以及时滞诱发周期解稳定性的判据. 揭示了时滞耦合有强耦合和弱耦合的特性, 证明了强和弱共振具有本质区别的中心流形.

(2) 建立了快慢变时滞系统慢变流形和快变流形与系统动力学行为的关系, 揭示了快慢变耦合时滞弹性关节系统多种复杂振荡的产生机理和时滞耦合可以改变系统首次发生脉冲响应的时间和位置, 给出了相应的解析计算公式和分岔滞后逃逸条件.

(3) 得到了有别于 Lyapunov 方法的耦合系统广义同步的充分必要条件、周期解正向和反向同步的解析判据, 发现时滞反向同步和 Stick-slip 联合效应可提高蠕虫型移动系统的运动速度.

(4) 提出了利用时滞和非线性对振动系统进行吸振和隔震的方法, 设计和构造了时滞动力吸振器和准零刚度时滞隔震器.

(5) 针对多自由度非线性耦合时滞系统, 提出了具有鲁棒性的时滞辨识算法, 该算法不仅在理论上保证收敛性, 并具有较强的抗噪能力, 解决了频域时滞辨识结果的多值性问题.

10 铁电薄膜及其存储器中界面与应变效应的研究 (负责人: 周益春)

(1) 发展了铁电存储器中界面缺陷、畴演化和应变分布的实验表征方法. 实时观测了畴的演化、畴壁构型、原子尺度缺陷和应变, 并用超高速飞秒激光观测了畴的翻转等微观演化过程.

(2) 建立了铁电薄膜存储器的器件多变量耦合关系. 提出了在考虑铁电薄膜的多因素影响的极化翻转模型, 从而建立了铁电场效应晶体管极化、应力、应变、电场、源漏电流等 5 个参量之间的耦合关系, 建立了挠曲电力-电耦合模型, 模拟了力场作用下铁电畴的演化过程.

(3) 建立了界面效应和应变效应对铁电薄膜服役行为的影响. 得到了界面及其应变效应与电学失效之间的关联, 进而得到了通过界面和应变调控来优化铁电性能的方法, 并用原位透射电镜的手段观测到了电荷注入机制.

(4) 从界面调控、铁电存储单元优化的角度, 设计与制备了具有优异性能的 MFIS (金属-铁电-绝缘层-衬底) 多层结构及其原理型存储器件. 建立了 5 英寸的铁电薄膜脉冲激光沉积生长工艺方法, 制备出了铁电场效应晶体管存储器单元, 还设计和制备了薄膜晶体管等多种新型结构的铁电晶体管.

11 微重力条件下几个关键力学问题 (负责人: 胡文瑞)

(1) 系统研究了表面张力梯度驱动对流的失稳特征, 分析了流体体系的几何参数、物性参数和界面位形等参数对临界流动时空演化的影响, 获得了对失稳过程较全面的认识. 开展了表面张力梯度驱动对流向湍流转捩途径的数值研究和地基实验, 获得了混沌转捩的连续倍周期分叉途径和准周期分叉途径的精细结构.

(2) 实验研究了竖直温差下的 Bénard-Marangoni 超临界对流的转捩过程. 通过多种流场观测手段, 获得了速度场和温度场失稳转捩的物理图像. 结合非线性理论和混沌分析, 对转捩过程有了规律性的认识. 应用混沌理论分析, 发现 BM 对流向湍流转捩的过程是由倍周期分岔的道路进入湍流.

(3) 从理论上建立了接触角、容器内角以及棱和接触线夹角之间的关系, 给出了 Concus-Finn 条件的

物理机制,并以此为基础研究了广泛采用的 Surface Evolver 程序在内角处的适用性问题.

(4) 通过落塔实验研究了不同截面形状管中的毛细流动规律,分析了截面形状及尺寸对毛细流动的影响规律,建立了相关的理论模型,为深入理解微重力毛细流动规律、以及液体流动和液面的控制提供了理论和实验基础.

12 MGF 调控骨和韧带组织修复的力生物学基础研究 (负责人:杨力)

(1) 研究表明拉伸刺激可提高成骨细胞力生长因子 (MGF) 表达, MGF 具有类似于机械拉伸的生物效应. 提出 MGF 可作为应力刺激不足组织、细胞的刺激信号,促使细胞分泌组织修复所需要的细胞外基

质,实现应力刺激不足的缺损组织修复.

(2) 发现了 MGF 可通过诱导大鼠 MSCs 细胞骨架结构重构,促进 MSCs 迁移; MGF 通过调控损伤后膝关节前交叉韧带 (ACL) 细胞的细胞活力及胞外基质表达,可避免韧带撕裂损伤程度增大.

(3) 研制了抗应力遮挡效应的载 MGF 生物材料及其仿生支架,实验表明其具有抗应力遮挡效应;发现 MGF 还具有克服 BMP 引起的骨质过度增生的效果以及促进血管新生的能力.

(4) 研究了失重性骨质疏松中 MGF 对骨质形成的影响及其细胞机制,发现 MGF 能显著促进模拟微重力条件下成骨细胞增殖,并增加骨钙素表达量,减少大鼠尾吊导致的松质骨骨密度丢失.

doi: 10.6052/0459-1879-15-223

A BRIEF INTRODUCTION OF COMPLETED KEY PROGRAM PROJECTS ON MECHANICS IN 2014

Zhang Panfeng¹⁾ Zhan Shige Xu Xianghong Sun Zhongkui

(Department of Mathematical & Physical Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)

Abstract The paper briefly introduced the completion and evaluation of 12 NSFC key program projects on mechanics in 2014. The projects list and the evaluation assessments provided by expert committee have been given in detail.

Key words NSFC, mechanics, key program project, completion and evaluation