

科学基金

2018 年度力学学科重点项目结题审查情况简要介绍

白坤朝¹⁾ 曹东兴 王刚 雷天刚

(国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

摘要 对 2018 年度结题的 12 项力学学科国家自然科学基金重点项目结题审查情况进行了简要介绍, 给出了结题项目清单和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

A BRIEF INTRODUCTION OF COMPLETED KEY PROGRAM PROJECTS ON MECHANICS IN 2018

Bai Kuncao¹⁾ Cao Dongxing Wang Gang Lei Tiangang

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

Abstract The article briefly introduces the completion and evaluation of 12 NSFC key program projects on mechanics in 2018. The project list and the evaluation opinions of expert committee are given in detail.

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

按照国家自然科学基金重点项目管理规定的规定, 数理科学部于 2018 年 12 月 20 至 21 日组织专家在北京召开会议对 2018 年度执行期满的重点项目进行了集中审查. 会议采取分学科进行的方式, 对力学学科 12 项重点项目进行了结题审查 (见表 1). 各项目负责人汇报了研究计划执行情况、取得成果及水平、人才培养以及国际合作与交流成效, 评审专家经认真讨论形成了结题审查评价意见.

基于专家组的评价意见, 下面对 12 项结题项目执行期间取得的主要研究成果进行简要介绍.

1 高超声速机动飞行的复杂动力学建模与自主控制 (负责人: 黄琳)

(1) 针对多智能体系统, 通过竞标实现对不同目

标的自适应资源分配和任务分配, 并在协同过程中建立网络通信拓扑结构, 设计了分布式连续自适应控制律, 给出了基于不确定通信网络的鲁棒一致性控制律设计方法.

(2) 基于连续非奇异终端滑模自适应控制方法, 构造新的非线性多协调变量的分布式一致性协议, 将目标跟踪制导与姿态控制融合, 给出不确定条件下有限时间自适应协同制导律设计方法; 给出了处理协同包围、编队和攻击的完全分布式协同优化方法, 在制导律统一框架下可实现编队的一致性并保证群体性能.

(3) 提出一种高超声速飞行器平滑切换输出跟踪控制设计方法, 理论上较好解决了传统控制方法在

本文于 2019-04-17 收稿.

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

引用格式: 白坤朝, 曹东兴, 王刚, 雷天刚. 2018 年度力学学科重点项目结题审查情况简要介绍. 力学学报, 2019, 51(3): 965-969

Bai Kuncao, Cao Dongxing, Wang Gang, Lei Tiangang. A brief introduction of completed key program projects on mechanics in 2018.

Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(3): 965-969

表 1 2018 年度力学科学处结题重点项目清单

批准号	负责人	项目名称	依托和合作单位
11332001	黄琳	高超声速机动飞行的复杂动力学建模与自主控制	北京大学、中国航天科技集团公司第一研究院第十二研究所
11332003	邓小燕	血管支架植入后力学环境变化影响血管支架内再狭窄和晚期血栓形成的机制研究	北京航空航天大学、重庆大学
11332004	刘书田	面向增材制造的飞行器承力结构多功能化设计方法研究	大连理工大学、中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所
11332005	张俊乾	锂离子电池化学反应-相变-变形耦合、开裂和分层的研究	上海大学、中国科学院力学研究所
11332006	刘宇陆	复杂湍流系统中大尺度结构及其对输运特性影响的研究	上海大学、中国科学院力学研究所
11332007	曹伟	与超声速/高超声速飞行器有关的边界层转捩预测方法及湍流计算的研究	天津大学、上海应用技术学院
11332008	江俊	基于状态空间离散的高维不确定非线性系统振动与控制分析方法	西安交通大学、天津大学
11332009	彭晓星	旋涡空化流动结构及抑制机理研究	中国船舶科学研究中心、浙江大学
11332010	张青川	关键航空合金材料中动态应变时效的多尺度关联实验与机理研究	中国科学技术大学、中国科学院金属研究所
11332011	黄晨光	强激光辐照下碳纤维复合材料的破坏机理与耦合效应研究	中国科学院力学研究所
11332012	于起峰	大型工程结构沉降位移监测方法及监测预警系统研究	中国人民解放军国防科技大学、东南大学
11332013	彭向和	超硬纳米多层膜微结构与力学性能及其优化	重庆大学

高超飞行控制切换过程的稳定性和性能指标,给出一种控制受限下的异类混合作动系统混合控制方法,可实现控制增益设计的优化配置和重构。

(4) 针对气动非定常不确定性问题,给出了大攻角机动飞行下合成射流改变翼面流场的计算方法,建立了利用合成射流进行气动与控制交互一体化布局鲁棒自适应控制方法,理论上可实现飞行器大攻角急速滚转机动的无舵面飞行控制。

2 血管支架植入后力学环境变化影响血管支架内再狭窄和晚期血栓形成的机制研究(负责人:邓小燕)

(1) 研究显示血管支架植入会改变血管壁内应力分布,血管壁应力分布受动脉粥样硬化斑块成分影响,大脂质斑块可引起严重应力集中,钙化斑块位于血管狭窄处且靠近血管内表面时破裂的危险性高。

(2) 建立了一种支架近生理测试装置,可测量血管应变,能清晰观察到血管的中膜和内膜在不同压力下的位移和应变分布。

(3) 分析表明支架植入会产生扰流,影响一氧化氮的分泌与运输,导致支架区域一氧化氮浓度下降;提出了一种带孔的新型支架设计理念,可有效抑制支架植入所导致的血流扰动;力学环境改变可影响血管细胞的生物学行为,影响血管损伤的修复;血管内皮细胞糖萼可能是感受血流变化的重要位点,有可能作为一种潜在靶点,用于抑制支架植入后血管再狭窄的发生。

(4) 研究表明支架植入后其炎症应答主要由巨噬细胞引起,炎症小体 NLRP3 在支架植入血管的修复中起重要作用。

3 面向增材制造的飞行器承力结构多功能化设计方法研究(负责人:刘书田)

(1) 发展了一种面向 SIMP 方法、从拓扑优化结果到 3D 打印模型的快速生成策略,实现了拓扑优化模型和 3D 打印模型的直接转化;通过虚拟温度场比拟的连通性约束描述,建立了考虑增材制造连通性约束及尺寸限制等工艺约束的结构拓扑优化方法。

(2) 提出了多层级结构构型的协同设计理论和方法, 发展了一种有限元网格快速构造含微桁架填充的 3D 打印点阵模型生成方法, 设计了包括给定频点或特定频段的电磁超材料、带隙材料、吸声材料、黏弹性阻尼材料、高刚度可调热膨胀材料等性能的微结构构型。

(3) 提出了多个典型零部件创新构型, 包括含流道的多层微桁架夹芯面板一体化热防护面板、双向多拱形大口径空间反射镜结构构型、增材制造飞行器环形散热器创新构型与增材制造的航天桁架接头。

4 锂离子电池化学反应-相变-变形耦合、开裂和分层的研究 (负责人: 张俊乾)

(1) 在 Butler-Volmer 方程基础上, 在考虑力学对电化学的影响效应后, 建立了应力-电化学反应的耦合动力学方程, 所得理论结果获得了实验证实; 发展了弹塑性变形-离子扩散双向耦合理论模型, 阐明了应力-扩散双向耦合机制。

(2) 提出了电极脱层时空演化的分析方法, 给出了脱层起始 SOC 公式和脱层临界尺度公式, 揭示了粘结剂对电化学循环性能产生明显影响的力学原因。

(3) 通过对塑性变形、应力调控与抑制裂纹等因素对电池性能影响的研究, 为高能量长寿命新型锂离子电池的研发设计和优化提供了新途径。

(4) 建立了电池原位测量系统和电极材料测量新方法, 实现了电极材料参数和应力演化特征的实时测量, 相应的数据处理结果揭示出了新的特征规律。

5 复杂湍流系统中大尺度结构及其对输运特性影响的研究 (负责人: 刘宇陆)

(1) 开展了相干结构时空发展演化特征、主被动减阻壁面湍流边界层相干结构特征的实验研究, 提出了用空间多尺度局部平均速度结构函数和多尺度局部平均涡量的新概念, 并在此基础上发展了检测壁湍流发卡涡包的新方法。

(2) 发现了局部耗散尺度的分布对系统大尺度各向异性不敏感, 而且不依赖于混合区的位置及其时间演化。

(3) 发现了纳米颗粒群的演化过程可分为扩散、混合和充分混合 3 个阶段; 对于大气湍流中尺度旋涡运动的调控, 所得结果表明 PM2.5 等颗粒污染物在 50~500 km 范围内存在标度行为。

6 与超声速/高声速飞行器有关的边界层转捩预测方法及湍流计算的研究 (负责人: 曹伟)

(1) 研究了边界层的感受性问题、Gortler 涡的发展及二次稳定性, 给出了涡扰动及其卷入过程的数学分析方法, 建立了转捩位置与来流扰动之间的关联关系, 揭示了一种新的高超声速边界层感受性机理。

(2) 提出了“透射系数”的概念用于定量刻画壁面特性对边界层的影响, 通过改进 e^N 方法扩展了该方法的应用范围; 给出了抛物化稳定性方程展开解的方法及其进一步改进, 使之在流动非平行性较强时, 具有很好的预测效果。

(3) 研究了超声速边界层中扰动的非线性演化, 给出了不同模态间“基本共振”的作用及其变化规律; 通过高超声速椭圆锥短轴处的全局稳定性分析, 揭示了不稳定模态的产生机理。

(4) 通过数值模拟分析经典湍流模式的局限性, 提出了新的计及壁面压力梯度效应的修正型 BL 模式, 使分离区附近的计算精度得到了明显改善。

7 基于状态空间离散的高维不确定非线性系统振动与控制分析方法 (负责人: 江俊)

(1) 提出了状态空间中子域合成方法, 实现了胞尺度和子域尺度下并行的胞映射算法, 建立了高维、高分辨率的非线性动力系统全局分析的数值方法。

(2) 发展了短时高斯近似解方法和隶属函数短时近似的自适应插值方法, 给出了高效求解不确定非线性系统瞬态和稳态响应分布演化的定量结果。

(3) 提出了基于频闪法的非线性非自治系统的随机敏感度函数方法, 给出了基于置信椭圆的噪声诱发分岔临界值的估算方法, 发展了非线性随机系统稳态响应的闭合半解析解求解方法, 在较强随机激励情形下仍具有高的求解效率和精度。

(4) 给出了随机搜索和胞映射相结合的多目标优化算法和抗噪性能的工程系统控制设计方法, 在非线性系统的控制设计中取得较好的效果。

8 旋涡空化流动结构及抑制机理研究 (负责人: 彭晓星)

(1) 采用多种测量手段系统地测量了典型水翼梢

涡全湿流场和空化流场, 获得了水翼梢涡的速度分布、涡核半径、最低压强、雷诺应力等流场特征.

(2) 研究了水翼梢涡空化初生特征及其尺度效应, 通过翼梢涡空化初生的空泡水洞实验和涡流场中气泡运动的数值模拟, 分析了不同来流气核进入梢涡并空化的过程, 建立了考虑气核影响的梢涡空化初生预报模型.

(3) 开展了梢涡空化形态演化与空泡噪声的实验研究, 再现了可控的梢涡空化“涡唱”生成, 通过柱形空泡演化的理论分析揭示了“涡唱”发生机理.

(4) 开展了三维水翼空化流动的数值模拟与水洞实验研究, 基于空化流动的高速摄像和 LES 数值模拟, 定量给出了水翼片空泡与云空泡的演化过程, 阐明了空化与涡流的相互作用特性.

9 关键航空合金材料中动态应变实效的多尺度关联实验与机理研究 (负责人: 张青川)

(1) 研发了宏观拉伸和微观测量的试验平台, 优化了 3D-DIC 的高精度高效率算法, 分析了 DIC 中插值偏差的影响因素, 提出了一种误差评价标准.

(2) 制备了多种系列的高温合金材料, 开展了不同温度、不同加载应变率、不同试件尺寸(厚度)PLC 效应实验观测, 捕获到高温下 PLC 带的动态应变演化过程, 揭示了高温合金锯齿形屈服和局域化变形带的特征规律.

(3) 进一步完善了锯齿形屈服的临界应变机制, 并基于蒙特卡罗方法建立了“多位错 - 溶质原子”二维动力学模型, 给出了位错和溶质原子的演化过程, 再现了锯齿形屈服的行为特征.

(4) 原位观察了 Ni-Co 基高温合金材料在加载过程中原子排序的变化、位错与层错的形成. 通过高分辨透射电子显微镜观察了塑性变形后样品的原子序数及相应的 X 射线能谱分析, 发现了溶质原子 Co 元素在位错周围偏聚的现象.

10 强激光辐照下碳纤维复合材料的破坏机理与耦合效应研究 (负责人: 黄晨光)

(1) 建立了含烧蚀多尺度本构模型与热力失效准则, 获得了热解动力学参数、热物及力学性能参数, 结合渐进损伤模型获得了含温升、温升速率的破坏强度, 模型预报与实验结果吻合良好; 建立多层材料热响应分析模型, 得到了瞬态温度场解析解及热力

响应.

(2) 建立了激光诱导的热力损伤分析模型与含烧蚀的流 - 热 - 固耦合数值分析方法, 引入内聚力模型及热阻模型表征脱层与热解的影响; 分别建立了热解、氧化、相变和机械剥蚀模型, 考虑流场与结构的耦合, 分析了烧蚀形貌演化对流动特性与传热特性的影响.

(3) 揭示了激光破坏的环境、缺陷和激光模式敏感的特性, 发现了超声速风洞烧蚀速率远大于静态及冷气流侧吹条件、高超声速来流与表面损伤耦合导致的力/热环境失稳恶化并加速破坏的现象和 3 种不同激光模式中长脉冲激光更有利于能量吸收与破坏的现象.

(4) 提出了两种新型抗激光加固机制, 即采用高热导率涂层的疏导型抗激光技术以及采用填充烧蚀材料夹层板的吸收型抗激光技术, 均获得了较好的抗激光加固效果.

(5) 建立了激光与超声速/高超超声速风洞联合实验方法与多场测量技术, 获得了高超超声速风洞(5 马赫以上)条件下激光破坏效应实验数据; 建立了短脉冲激光驱动的加载/加速实验手段, 拓展了 STF 等新材料冲击、驱动颗粒冲击、空泡演化等方面的应用.

11 大型工程结构沉降位移监测方法及监测预警系统研究 (负责人: 于起峰)

(1) 提出了新型串联像机网络方法, 包括单头串联像机链, 闭环像机串联网和串并联像机网络.

(2) 提出了多种精确标定多头像机关联的新途径、标识点精确提取的算法、多种高精度高效的位姿估计方法, 有效提高了位置和姿态的测量精度.

(3) 研制开发了沉降位移监测系统, 通过无线网络和 GPS 实现了同步控制及图像传输, 系统具有图像数据的实时计算和分析功能.

(4) 将所研制的测量系统应用于多种工程, 包括南京长江大桥火车通过时桥面挠曲变形的测量、隧道冻土顶管施工过程中机头位置和方向的自动测量等, 取得了很好的成效.

12 超硬纳米多层膜微结构与力学性能及其优化 (负责人: 彭向和)

(1) 制备了系列超硬纳米多层膜, 分析了薄膜质量, 表征了界面形态; 获得了多层膜硬度与调制参数

间的关系; 分析了界面的原子构型、电子态、化学键和电荷分布特性及界面特性; 明确了模版效应和互促效应及作用范围.

(2) 分析了微结构与典型界面间的相互作用, 阐明了与界面相关的强弱化机理和孪晶界对提高典型硬质陶瓷力学性能的作用及机理, 建立了材料硬度与孪晶厚度间的关系.

(3) 揭示了纳米孪晶金刚石和孪晶 Si 在剪应力下的原子重组, 明确了孪晶界对纳米孪晶金刚石/c-BN 孪晶强度影响, 预测了其超高的强度和延性.

(4) 基于广义层错能概念建立了典型硬质陶瓷的势函数, 提出了基于 MD 模拟的硬质陶瓷非弹性力学特性分析方法; 给出了具有不同晶格结构的硬质陶瓷在压痕过程中的微结构变化和缺陷运动, 揭示了典型硬质陶瓷塑性变形的的主要机制.

(5) 构建了计及非弹性变形的纳米多层膜的微-宏观模型和基于损伤耗散功与能量释放率的损伤模型, 结合第一性原理、分子动力学分析和实验结果, 获得了材料特性参数和能量释放率及其尺度依赖性.

doi: 10.6052/0459-1879-19-097