

科学基金

# 力学处 2012 年度重点项目结题审查情况简要介绍

张攀峰<sup>1)</sup> 詹世革 王立峰 许向红

(国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

**摘要** 对 2012 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 2012 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综合意见.

**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 2013 年 3 月 14 日至 15 在北京召开会议组织专家对 2012 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综合意见.

表 1 2012 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
10832001	王晋军	尾迹引起的边界层旁路转换机理及其控制的实验研究	北京航空航天大学、天津大学
10832002	胡更开	电磁波/声波超材料物理力学理论与多功能设计原理	北京理工大学、西安交通大学
10832003	黄风雷	非均质含能材料损伤及起爆耦合机理研究	北京理工大学、中国工程物理研究院化工材料研究所
10832004	李俊峰	深空探测中若干非线性动力学与控制问题	清华大学、北京航空航天大学、哈尔滨工程大学
10832005	郑泉水	范德华纳机电器件和系统的力学和创制	清华大学、南昌大学
10832006	刘曾荣	复杂网络动力学与控制及其在航空航天中的应用	上海大学、北京大学、杭州电子科技大学
10832007	鲁传敬	超空泡流动结构与稳定性研究	上海交通大学、哈尔滨工业大学
10832008	张清杰	高效热电材料及其应用中的关键力学问题研究	武汉理工大学、中国科学院力学研究所
10832009	杨卫	多铁性材料的多物理场耦合力学研究	浙江大学、清华大学
10832010	陆夕云	鱼类整体游动特性和流动控制机理研究	中国科学技术大学、中国科学院研究生院
10832011	虞钢	车用发动机高密度激光制造熔凝过程中的力学问题	中国科学院力学研究所、中国兵器工业集团第 70 研究所
10832012	张西正	骨重建的生物力学机理及其在骨相关疾病诊治中的应用	中国人民解放军军事医学科学院、吉林大学

基于专家组的综合意见, 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 尾迹引起的边界层旁路转换机理及其控制的实验研究 (负责人: 王晋军)

(1) 提出了具有自主知识产权的单相机三维流场

测速新方法, 创造性地用三棱面特效透镜获得不同视角在单相机上成像, 经过三维图像重构, 实现了三维体视速度测量.

(2) 提出了一种低采样频率下类周期流动的相位辨识方法——基于 POD 时间系数的相位辨识, 提供了一种方便和稳定的相位识别方法, 在低采样频率

本文于 2013-06-04 收到.

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

下有更好的适用性。

(3) 提出了基于拉格朗日体系的旋涡辨识方法,应用该方法对湍流边界层和转捩后期的主要拟序结构进行旋涡辨识,分辨出广义马蹄涡结构。

(4) 将 DMD 方法应用于实验结果的分析,揭示了边界层对不同频率的扰动在边界层转捩过程中的感受性机制及其演化和增长规律。

(5) 研究了圆柱体在平板上方和上游位置对边界层转捩的影响。在水槽中用 TRPIV 完成的测量表明,在圆柱尾迹影响下旁路转捩的末期,由于尾迹涡诱导作用的影响形成了超级发卡涡包结构。

(6) 研究了粗糙元对转捩的影响。结果表明粗糙减小了马蹄涡的尺寸,将原来较大尺度的涡分割成为多个较小尺度的涡,有利于旋涡的耗散,从而降低流场湍流度。这些小的马蹄涡在向下游发展的过程中,又会发生马蹄涡合并等复杂的现象。

(7) 研究了非定常激励对圆柱体涡脱落的影响,通过增加非定常激励的频率,可以改变圆柱体涡脱落的模式,并影响边界层旁路转捩的进程。

此外,还研究了湍流脉动速度空间多尺度、多方向分解,层流边界层中半球诱导的发卡涡包结构,边界层转捩后期发卡涡包空间三维拓扑结构的层析。

## 2 电磁波/声波超材料物理力学理论与多功能设计原理 (负责人:胡更开)

(1) 基于平均场方法建立了颗粒夹杂型声波超材料的动态均匀化模型,揭示了负等效材料参数的实现机制;提出了具有手性特征的声波超材料,并基于微极弹性理论建立了相应的动态均匀化模型;研究了电活性聚合物和多级点阵周期结构的能带特性和动态等效性质。

(2) 给出了一种基于 MPI 的并行多层快速多极子算法;提出了一种基于不完全 LU 分解的高效预处理技术,并结合 Krylov 子空间方法应用于合元极技术中有限元矩阵的快速求解,实现了电磁波快速数值计算。

(3) 提出了基于变形理论的波传播控制设计方法,用于对具有任意形状、无奇异参数和准各向同性参数波控制器件进行功能设计;基于局部仿射变换和能量守恒,提出了对弹性波传播进行控制设计的一种近似方法。

(4) 基于中性夹杂的概念提出了一种动态预测金属柱透明条件的方法,并通过实验对设计的结构进

行了验证;对电磁波隐身涂层和电磁波“黑洞”介质进行了理论设计和实验验证。

(5) 提出了基于零质量和共振隧穿效应的凋落波传播机制,并对声波超材料的超分辨率成像功能进行了数值仿真和实验验证;设计出同时具有负的体积模量和质量的声波手性超材料,对其负折射功能进行了数值仿真研究;设计了具有宽频低频隔声效果的声波超材料,并进行了隔声性能测试。

## 3 非均质含能材料损伤及起爆耦合机理研究 (负责人:黄风雷)

(1) 成功制备出高品质 RDX 和 HMX 大尺寸单晶,提出了炸药单晶弹性常数测定的纳米压痕方法,获得了 HMX, RDX 单晶体各向异性弹性模量、硬度和断裂韧性等基础数据。

(2) 建立了含能单晶动高压各向异性热力学本构关系,在状态方程中引入单斜晶系晶体塑性,模拟了含能晶体力/热耦合效应及各向异性波结构。

(3) 突破了炸药单晶冲击加载与测试技术,得到了不同压力作用下 RDX 单晶的界面粒子速度,解决了含能单晶冲击起爆测试的技术难题。

(4) 建立了低速撞击下多热点机制的颗粒炸药力-化学细观模型,实现了颗粒炸药撞击热点火火的定量预测,并将点火与宏观燃烧相联系,获得了点火发生及形成大范围剧烈燃烧的临界条件。

(5) 建立了非均质炸药损伤与起爆耦合模型,提出了 PBX 炸药反应区本构方程的整体标定方法,得到了炸药密度、颗粒度、粘接剂强度及含量对 PBX 炸药冲击起爆的影响规律。

(6) 建立了率相关弹粘塑性损伤热力耦合模型,预测得到了典型侵彻战斗部装药点火危险位置,为解决炸药装药抗高过载难题提供了技术支撑。

## 4 深空探测中若干非线性动力学与控制问题 (负责人:李俊峰)

(1) 针对深空探测器轨道设计问题,给出了基于连续小推力的轨道优化方法和引力甩摆路径。

(2) 针对小行星附近的轨道动力学问题,在动力学模型的基础上,给出了平衡点、周期轨道的动力学特性及相应的控制方法。

(3) 提出了一种太阳帆太阳同步冻结轨道方法,其特点是轨道面与太阳光保持同步;给出了姿态控

制下太阳帆人工拉格朗日点附近编队的运动稳定性条件.

(4) 将不变流形概念引入太阳帆研究, 提出了相应的转移轨道设计方法.

(5) 研究了太阳帆的姿态轨道耦合稳定性问题, 给出了姿态稳定性与轨道稳定性的关系.

(6) 针对高性能太阳帆, 提出一种新型周期逆向轨道.

(7) 提出了太阳帆轨道优化方法和太阳帆改变小行星轨道方法.

## 5 范德华纳机电器件和系统的力学和创制 (负责人: 郑泉水)

(1) 针对范德华型纳机电器件和系统的回复机制、设计、耗散和结构稳定性, 提出了若干范德华型震荡器的新构型和电磁驱动设计方案; 研究了这些器件的耗散, 阻尼系数和品质因子, 研究了与分子构型相关的层间相互作用对震荡频率的影响和非谐效应; 研究了石墨片的磨损、结构强度、结构稳定性和材料修饰.

(2) 针对范德华型纳器件非线性震荡行为、力电热耦合和信号问题, 研究了范德华型纳机电器件的非线性震荡、驱动、操控和优化; 研究了石墨和碳纳米管的力电磁热耦合性能; 进一步研究了范德华型纳器件的频率、位移、受力、电磁信号的发生和采集.

(3) 针对范德华型纳机电器件和系统的发明和制备, 完成了特定构型石墨台/滑片的 MEMS 加工技术研究和制作; 实现了范德华震荡器的实验验证; 成功实现了范德华型振荡器的启动、加载、控制和测试技术.

## 6 复杂网络动力学与控制及其在航空航天中的应用 (负责人: 刘曾荣)

(1) 基于生物进化论基本原理, 重点研究了生物网络的建模和网络功能模块的相互作用. 提出了由节点复制、增边、删边以及节点之间两聚所构成的网络进化模型, 并依据生物实验数据以及生物对环境的适应性, 在 4 个步骤中加入了小偏爱性、对称性和适应性的要求, 获得的结果说明生成的生物网络几乎包括实测生物网络的所有统计特征. 按照网络拓扑特征和节点本身特性, 给出了刻画网络中 2 个模块之间相互作用的新定量描述.

(2) 结合图论和矩阵稳定性理论, 重点研究复杂

网络的同步能力, 指出同步化能力不但与网络连接矩阵特征值有关, 而且还与内关联函数和节点动力学有关. 建立了一种研究复杂网络同步与多智能体一致性的统一框架.

(3) 研究了变结构混杂网络系统的动力学与控制问题. 利用 Lyapunov 函数方法并结合 Razumikhin 技术, 建立了几个关于具有任意时滞的动力系统的全局指数稳定性判断准则; 针对多个个体时滞网络系统的脉冲一致性问题, 提出了在通讯时滞环境中具有固定与切换拓扑下网络的脉冲一致性协议以及分布式协议, 并给出了寻求相应平均一致性问题简单一般的判据; 针对复杂时滞动力网络的牵引控制问题, 提出了同步稳定性新的分析方法.

此外, 还对神经网络系统和包含 microRNA 的生物调控网络的动力学进行了研究, 将复杂网络动力学和控制理论应用于多运动体的编队问题以及航空航天飞行过程中的各种信息输送问题, 得到了具有指导价值的结论.

## 7 超空泡流动结构与稳定性研究 (负责人: 鲁传敬)

(1) 开展了超空泡流动结构和稳定性的试验研究, 设计了空化器和航行体模型, 研制了能够稳定供气的宽量程通气装置和实时记录设备, 设计了适当的通气孔布置方案、压力传感器布置方案和三分力天平测量系统.

(2) 采用高速摄影技术测量空泡形态, 为建立空泡界面动力学数学模型和分析界面稳定特性提供试验数据. 测量了空泡穴内和空泡尾流区的压力分布, 分析其特征和通气空泡数的确定方式. 开展了超空泡流场的初步测量与分析.

(3) 进行了航行体在通气超空泡穴内的强迫振荡的空泡水洞试验, 设计了测力天平以保证所测流体动力能正确给出模型尾部结构所承受的流体动力. 研究了击水过程的超空泡形态稳定性和水动力特性.

(4) 在高速射弹试验水槽中进行了有动力自由航行试验, 设计了小型的带安定翼面的实验模型, 用内置气源作为动力或通气气源. 采用高速摄影捕捉带空泡航行体的运动图像和计算运动速度, 在炮口附近采用光电靶来测速.

(5) 建立了气、汽、液多相超空泡流动的数学模型和数值计算方法, 可以用于通气空泡(气、液两相)流动以及自然空泡与通气空泡组合的气、汽、液三相流动的数值模拟, 自主开发了适合于模拟三维非定

常自然空泡流与三维非定常气、汽、液多相湍流超空泡流的计算软件。

(6) 研究了超空泡流动稳定性、超空泡流动结构、超空泡航行体的尾击水特性及运动稳定性,深化了对于复杂气、汽、液多相超空泡流动现象与机理的认识,完善了超空泡流动结构与稳定性实验的试验平台和测试技术,建立了超空泡稳定性的分析方法和控制方法。

## 8 高效热电材料及其应用中的关键力学问题研究(负责人:张清杰)

(1) 发展和建立了  $\text{CoSb}_3$  热电材料的原子间相互作用的作用势(Morse 对势、多体势),系统模拟了这种材料的结构演化、单晶块体破坏、及拉伸、压缩载荷下的力学行为,揭示了  $\text{CoSb}_3$  基热电材料应力诱导纳米化现象产生的机理。

(2) 进行了  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  纳米膜和纳米线的分子动力学模拟,揭示了其弹性模量、极限强度和破坏应变随温度变化的力学特性。

(3) 提出了针对  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$  晶体的包含二体项和三体项的原子间相互作用势,计算了这种材料的单晶的摩尔热容和热导率;分析了影响晶格以及多晶材料热导率的因素;模拟了不同晶格结构下的相结构稳定性;计算了不同结构的弹性模量、晶格常数和拉伸性能。

(4) 利用纳米复合技术,发展了同质和异质微纳复合热电材料。在保持材料高热电性能的同时,大幅度提高了材料的抗弯强度和断裂韧性。在此基础上,建立了宽温域梯度材料热电性能的分析模型和宽温域级联热电器件设计理论。

(5) 针对热电材料在太阳能热电-光电复合发电技术中应用的服役环境,系统研究了热循环、低周应力循环和实际服役条件下热电材料的服役行为,揭示了热循环作用下材料性能与微结构的演化规律和失效机制,研究并揭示了服役过程中纳观缺陷对材料热电性能和力学性能的影响规律,获得了方钴矿热电材料低周应力疲劳的 P-S-N 曲线和剩余强度的理论模型。

## 9 多铁性材料的多物理场耦合力学研究(负责人:杨卫)

(1) 对磁电层合材料在谐振状态下的磁电响应进行了理论分析,建立了磁电层合材料谐振磁电电场

系数和一阶纵向振动频率的显式表达。

(2) 在原子、细观和宏观尺度上进行了多铁性材料的第一性原理、相场模拟和有限元模拟研究,发展了第一性原理/分子动力学耦合的多尺度材料模拟方法。

(3) 开展了磁致变形及磁电耦合机理研究。发现了 Terfenol-D/PZT/Terfenol-D、Terfenol-D/P(VDF-TrFE)/Terfenol-D 多铁性层状复合材料中的磁电多峰现象。

(4) 搭建了多铁性多物理场加载与磁电性能测试系统,制备了多铁性复合材料,并对其进行了热-力-磁-电性能研究,并制备了一种新型的镶嵌型磁电复合材料,观测到四态磁电效应。

(5) 进行了介电高弹聚合物力电耦合行为的研究。基于力电耦合大变形模型,对介电高弹聚合物换能器在各种工作模式下的具体问题进行了理论分析和数值模拟。

此外,还研究了多铁性板壳简化结构理论的基本方程和表面理论。

## 10 鱼类整体游动特性和流动控制机理研究(负责人:陆夕云)

(1) 对鲫鱼的肌电、形态和鱼体材料力学性能进行了测试;对运动链一体化研究中“数字鱼”模型进行了探索;研究了鳗鱼波状游动的机械能产生、传递与耗散;建立了运动链末端的流体力学与鱼体动力学耦合计算平台。

(2) 研究了鱼类 C 型快速逃逸行为的动力学机理;探讨了鱼类自主推进的巡游优化特性;对给定肌肉力矩条件下的鱼体主动游动进行了模拟;获得了柔性体在均匀来流中对外部激励的响应特性;揭示了波状摆动柔性体和被动拍动尾鳍整体推进特性。

(3) 对鱼类游动和柔性板摆动之间的相似性进行了研究;给出了具有柔性效应的被动拍动平板自主推进特性;获得了柔性体在来流中的流固耦合响应特性,包括均匀来流中柔性板的响应特性、形状对柔性体振动的影响特性、不同展长比的柔性体振动特性;开展了流固耦合模拟的计算方法研究。

(4) 实验观察了鱼类集群的游动;揭示了鱼类在物体前后的游动模式及减阻效应,包括柔性体在圆柱尾迹涡街中的响应模式、柔性体在流动回旋区域的动力学模式、柔性体和下游刚体的相互作用及减阻特性;研究了模拟鱼类群游时并联拍动尾鳍的相

互作用; 获得了并排柔性三体的耦合摆动模态及动力学特性.

(5) 对圆盘涡环启动和旋涡动力学特性进行了研究. 说明了尾鳍形状和尾迹旋涡结构对推进特性的影响; 分析了尾鳍拍动推进的受力和功耗特性.

## 11 车用发动机高密度激光制造熔凝过程中的力学问题 (负责人: 虞钢)

### (1) 激光作用下熔池形成及演化过程

考虑了激光与材料的相互作用, 热传递、熔池热流体的不可压黏性流动, 熔池形成的驱动力, 气-液、液-固相变等复杂的物理和力学现象, 针对不同激光束功率密度作用下的激光制造过程, 建立了相应的高密度激光制造熔池形成与演化的物理和数学模型. 运用水平集 (level-set) 方法追踪气-液界面来模拟匙孔的形状和效应, 以及激光熔覆道的表面形状.

### (2) 熔池凝固过程物理机制的力学建模

建立了熔池凝固过程中结构-热应力-变形关系的宏观数值模型, 结合第一部分描述激光-粉粒-熔池相互作用及传热过程的微观数值模型, 计算了激光制造结构件的三维瞬态应力和变形场, 并从焊接热循环的角度解释应力变形的特点. 同时, 对不同功率密度下激光制造过程的微结构演化与缺陷形成进行了系统的分析.

(3) 激光制造过程中工艺参数优化控制与性能检测利用等应变法获取了激光异种焊接焊缝材料的准静态应力应变关系. 针对焊接结构特征设计了适用于 SHTB 装置的卡套式连接方式, 研究了焊接构件在高温高应变率加载条件下的动态变形特征. 对母

材应变率及温度相关的 Johnson-Cook 本构方程参数进行了测试和拟合. 对发动机若干部件的激光表面处理, 进行了工艺力学分析与评价.

此外, 还根据上述的研究成果, 对发动机若干关键部件激光制造进行了样件的研制.

## 12 骨重建的生物力学机理及其在骨相关疾病诊治中的应用 (负责人: 张西正)

(1) 研发了骨组织生长的灌注式三维培养生物反应器, 建立了载荷作用下的 Micro-CT 扫描组织的重建方法, 有限元计算确定三维支架材料内部细胞的应变、力学刺激对成骨细胞和破骨细胞以及培养体系的研究方法.

(2) 力学载荷三维细胞培养中, 低应变载荷促进成骨细胞增殖和细胞分化, 高应变载荷则产生抑制. 实验证实:  $2500\mu\epsilon$  会促进在体骨质疏松小鼠尺骨形成并改善小梁骨结构, 对抗雌激素缺乏所致骨丢失; 而  $3000\mu\epsilon$  会促进细胞凋亡, 抑制骨形成. 同时发现力学生理载荷与玉米赤霉素联合作用, 可更好地促进或维持成骨细胞分化状态.

(3) 构建了力学-生物学耦合骨重建因素的定量计算模型, 松质骨的力学和激素水平的功能适应性的统一模型, 基于 CT 影像股骨近端动态非线性有限元模型. 预测了股骨近端骨折载荷和位置, 股骨强度, 及骨密度和分布、几何形态间的关系. 研究了股骨近端骨折患者股骨头内部松质骨纤维形态结构和力学性能.

(4) 发现高频低载振动能促进实验动物模型的骨质形成, 提高骨组织相关蛋白表达量, 改善骨的力学性能, 可有效对抗骨质疏松与骨丢失.

DOI: 10.6052/0459-1879-13-216

## A BRIEF INTRODUCTION OF COMPLETED KEY PROGRAM PROJECTS ON MECHANICS IN 2012

Zhang Panfeng<sup>1)</sup> Zhan Shige Wang Lifeng Xu Xianghong

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

**Abstract** The paper brief introduced the completion and evaluation of 12 NSFC key program projects on mechanics in 2012. The detail projects list and the evaluation assessments provided by expert committee are given.

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

Received 4 June 2013.

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