



力学科学处 2010 年重点项目结题审查情况的简要介绍

詹世革 张攀峰 吕守芹 张文明

国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085

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的完成情况进行审查. 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 2011 年 3 月 15 日至 16 日在北京召开会议组织专家对 2010 年结

题的重点项目进行了集中审查, 会议采取分学科进行的方式. 力学科学处共有 10 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, 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 2010 年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
10632010	邓小燕	动脉系统中的旋动流现象 —— 它对血小板运动、粘附和物质 (LDL) 输运的影响及其在临床中的应用	北京航空航天大学、北京大学、大连大学
10632020	汪越胜	声带隙材料和结构的波动力学特性分析及设计	北京交通大学、北京工业大学
10632030	钟万勰	分析结构力学与相关问题的研究	大连理工大学、西北工业大学、上海交通大学
10632040	陈予恕	超超临界汽轮发电机组转子系统的若干非线性动力学问题	天津大学、哈尔滨工业大学
10632050	罗纪生	以数值计算为基础的超及高超声速边界层转捩及湍流研究	天津大学、中国科学院力学研究所
10632060	卢天健	物理波在超轻多孔材料和结构中的传播和吸收	西安交通大学、清华大学
10632070	林建忠	超常颗粒多相流动力学模型	浙江大学、清华大学、中国计量学院
10632080	李永池	陶瓷材料的动态力学特性和抗侵彻机理研究	中国科学技术大学、北京理工大学、中国工程物理研究院流体物理研究所
10632090	姜宗林	高焓非平衡流动气动力/热关键基础问题研究	中国科学院力学研究所
10632100	李世海	强冲击荷载及内部气体集聚条件下地质体材料的力学行为研究	中国科学院力学研究所

基于专家组的评价意见, 下面将这 10 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. 动脉系统中的旋动流现象 —— 它对血小板运动、粘附和物质 (LDL) 输运的影响及其在临床中的应用 (负责人: 邓小燕)

(1) 研究发现, 人体颈动脉中轴线的曲率存在明显个体差异; 这种个体差异可能是导致颈动脉狭窄发生个体差异的主要原因.

(2) 研究表明, 主动脉的空间螺旋构形是导致旋动流态的根源; 旋动流可以抑制血小板在血管壁的粘附、减小血液中低密度脂蛋白在动脉中的浓度极化, 增强主动脉内氧气的输运; 旋动流对动脉壁的光滑冲刷, 为防止动脉粥样硬化提供了血液动力学依据.

(3) 动物实验研究和计算分析表明, 该项目根据旋动流原理设计出的新型小口径人工血管、血管吻合器、血管内支架旋流导引装置和腔静脉滤

器以及新的搭桥手术方案等能有效改善血管内流场,抑制血细胞粘附和血管内膜增生,降低急性血栓堵塞和血管再狭窄的风险,具有重要的潜在临床应用价值。

2. 声带隙材料和结构的波动力学特性分析及设计 (负责人:汪越胜)

(1) 分别发展了基于小波理论、基于 (ABAQUS) 有限元法、基于边界元法和 Dirichlet-Neumann 映射方法,适用于固/固、流/固、流/流等体系的体波、表面波及缺陷态能带结构计算方法。

(2) 设计并加工制作了若干典型晶体声带隙材料试验样品;基于超声浸水投射技术,建立了固-流体系的带隙测试试验系统;测试了正方晶格结构、蜂窝晶格结构的带隙,揭示了晶格结构在带隙调节中的重要作用。

(3) 主要采用数值方法研究了多种体系中材料组合参数、多种晶体结构的对称性以及孔隙声带隙材料的几何拓扑结构等对带隙的影响;揭示了多种固/液、固/固和液/液阿基米德复式晶格体系的带隙特征,含 Helmholtz 共振器声带隙材料的带隙特征,声带隙材料板中 Lamb 波模态的带隙特征;探索了缺陷态对波传播的操控并应用于分离器、耦合器等声学器件设计,还进行了超声试验测试。

(4) 针对单一方向随机失谐一、二维声带隙材料,引入局部化因子,系统研究了波传播和局部化特性;研究了单一方向准周期排列声带隙材料波传播特性,表明局部化是其固有特性.利用平面波展开法结合超胞技术计算了二维随机失谐声带隙材料的频带结构和位移分布。

此外,项目组还研究了声带隙材料的等效非局部弹性介质模型、多种压电/压磁声带隙材料系统能带结构特征和失谐引起的局部化等。

3. 分析结构力学与相关问题的研究 (负责人:钟万镞)

(1) 提出了哈密顿系统的保辛-守恒积分算法;基于对偶变量变分原理,提出了哈密顿系统的离散正则变换和对应的数值积分保辛算法;以辛理论和混合能概念为基础,提出了分层介质中非平稳随机波传播的高效精确算法等,从而建立了一整套分析结构力学的基本理论,为保辛时间有限元的构造建立了理论框架。

(2) 提出了时空混合的有限元网格,较之对时间、空间分别离散的有限元网格更加灵活;基于分

析结构动力学原理,建立了时空混合有限元方法,较之传统的差分方法具有更高求解精度和更好的数值稳定性。

(3) 提出了基于正则变换和矩阵乘法的辛矩阵保辛摄动方法,较之传统的小参数摄动法,具有更高的精度和稳定性,为短波近似和参数识别等诸多问题提供了性能良好的数值分析手段。

(4) 给出了求解多种高振荡非线性动力系统的相应的修正 Magnus 数值积分算法和显式 Magnus 算法,数值模拟表明方法有效。

(5) 提出了适用于奇异矩阵和奇异哈密顿系统矩阵等多种精细积分方法,使其更为通用和高效。

(6) 基于结构力学与最优控制理论的比拟关系,提出了求解非线性动力系统最优控制问题的保辛摄动算法,开发了相应的最优控制系统设计工具箱 (PIMCSD),并利用其设计了典型的卫星编队重构最优控制方案,在飞行控制仿真平台上通过了验证。

4. 超超临界汽轮发电机组转子系统的若干非线性动力学问题 (负责人:陈予恕)

(1) 解决了耦合复杂高维系统的一些非线性动力学理论问题,包括高维系统的基于 Galerkin 法的二次降维方法;在共振流形上的两变量的双参数分岔理论和系统参数优化问题;利用同伦分析方法研究结构参数在大范围变化时的全局分岔特性等。

(2) 开展了转子密封装置汽流激励力建模和转子系统稳定性研究,包括密封间隙激振力模型参数的确定;轴承-转子-密封系统的自激振动失稳分析;根据 600 MW 汽轮机实际结构参数设计了密封试验台,进行了密封汽流激振振动试验。

(3) 进行了超超临界汽轮发电机组的非线性动力学失稳机理分析,包括可倾瓦滑动轴承的非线性油膜力模型和转子运动分析;转子系统弯-扭耦合振动和组合振动特性分析;汽轮机叶片-转子-轴承系统的耦合非线性振动分析;叶轮转子-静子系统的轴向摩擦振动分析。

(4) 针对实际的 600 MW 超超临界汽轮发电机组的高中压转子-轴承-密封系统进行建模和动力学特性计算,验证了设计参数的合理性。

5. 以数值计算为基础的超及高超声速边界层转换及湍流研究 (负责人:罗纪生)

(1) 验证了流动稳定性理论在超音速小攻角钝锥边界层扰动演化预测的可行性,得到了超音速

边界层转捩过程中两种不稳定模态扰动的演化规律, 揭示了可压缩边界层三维性诱发的小尺度三维扰动的特征.

(2) 根据边界层转捩与边界层对外界扰动的感受性相关的特性, 提出了目前转捩预测最有效的 eN 方法的改进方法, 通过抛物化稳定性方程 (PSE) 和直接数值模拟 (DNS) 对边界层转捩的模拟研究, 提出了用 PSE 进行转捩位置预测的途径.

(3) 揭示了转捩过程中拟序结构产生和发展过程的流动机理, 分析了压缩效应对边界层的湍流特性、锥体效应对边界层湍流统计特性、以及激波 - 边界层干扰对湍流生成、耗散及扩散的影响.

(4) 基于直接数值模拟方法, 针对尖锥、球钝锥、平板和压缩折角等转捩和湍流问题, 利用迎风紧致格式发展了高精度的 CFD 计算方法, 并开发了复杂流动高精度数值模拟的计算软件, 建立了典型边界层湍流数据库.

6. 物理波在超轻多孔材料和结构中的传播和吸收 (负责人: 卢天健)

(1) 开展了冲击载荷下泡沫材料夹芯结构能量传播及吸收特性研究, 建立了临界应力与空隙率的关系以及冲击加速度与泡沫厚度的关系, 并将研究成果成功地应用于运输机空投货台吸能结构、神舟系列飞船返回舱隔振吸能结构的设计、反恐和公共安全领域的新型泡沫铝复合防爆罐的研制及重要目标地下防护工程轻型高抗力复合防护门的研制.

(2) 将均匀化等效理论引入于点阵夹层结构动态性能预测, 研究了点阵结构陶瓷材料复合夹芯板抗侵彻性能, 进行了相关的试验验证.

(3) 提出了一种非稳态线性声学模型, 研究了通孔泡沫金属材料的声波传递特性; 建立了正交加筋三明治夹层板结构的声辐射理论模型和结构传声理论模型, 分析了其声振耦合特性.

(4) 研究了多孔金属材料在高温环境下的吸声及阻尼机理, 研制了高温吸声性能的测试平台, 开展了不同温度条件下材料的吸声性能理论分析, 探讨了烧结金属纤维材料高温条件下吸声性能.

(5) 提出了一种复合二维点阵夹层结构承载 - 吸波的综合设计概念, 进行了梯度轻质吸波泡沫材料及玻璃纤维增强二维点阵结构吸波材料电磁参数和反射率的测量及其计算模拟, 给出了可透过声波和弹性波的超材料设计方法.

(6) 提出了一种轻质多功能一体化热防护材料

的设计方案, 开展了复杂结构流动传热数值求解算法、超轻多孔金属泡沫池沸腾传热及强制对流传热特性研究. 研制了电子器件的超声波射流冷却设备.

7. 超常颗粒多相流动力学模型 (负责人: 林建忠)

(1) 建立了适用于自由分子区、Stokes 区和连续区的求解纳米颗粒矩方程的泰勒展开矩方法, 该方法已经成功地应用于多种流场的模拟, 为求解纳米颗粒多相流场提供了一条很好的途径.

(2) 建立了模拟布朗运动作用下纳米颗粒运动的格子 Boltzmann 模型, 拓展了格子 Boltzmann 方法的应用范围.

(3) 提出了在范德华力、弹性力和布朗力作用下颗粒的碰撞效率模型, 揭示了碰撞效率与颗粒粒径的关系, 以及在复杂物理化学过程和复杂流动条件下, 颗粒数密度、体积密度、平均粒径、粒径标准偏差等参数的分布规律和颗粒的沉积特性.

(4) 建立了泡状雾化冲击射流的数值模型和适用于短波破碎的气泡一次雾化模型, 揭示了工况条件及液体物性对雾化效果的影响; 得到了适用于不同雾化液体的液雾平均粒径沿轴向变化的预测公式.

(5) 建立了描述湍流场中圆柱形颗粒平均取向的概率分布函数的理论模型; 建立了包含圆柱形颗粒悬浮流附加应力的雷诺平均运动方程、湍动能方程和湍流耗散率方程的理论模型. 根据这些模型, 在典型流场中给出了颗粒的取向分布、流变特性以及颗粒对流场特性影响的规律.

(6) 研究了轴对称和非轴对称扰动下的泰勒 - 库特圆柱形颗粒悬浮流中的稳定性, 给出了较宽圆柱半径比和转速比之下的临界分叉阈值.

(7) 将确定圆柱形颗粒取向分布的 Jeffery 轨道理论由简单剪切流拓展到一般剪切流, 发展了 Jeffery 轨道理论; 对多种非球形颗粒的沉降进行了研究, 建立了不同形状颗粒沉降时的曳力表达式.

8. 陶瓷材料的动态力学特性和抗侵彻机理研究 (负责人: 李永池)

(1) 在陶瓷材料的动态本构关系和破坏特性研究方面, 开展了 AD95 和 AD86/10 的单轴应力动态压缩试验和平板冲击压缩试验, 得到了材料的基本性能数据和模型参数; 改进了材料的冲击损伤型动态本构模型, 较好地反映了实验中观察到的现象和测量结果.

(2) 在陶瓷材料抗侵彻规律和机理研究方面,进行了两种陶瓷靶的动能穿甲和射流侵彻实验,获得了重要实验数据;发展和改进了现有长杆弹侵彻力学的工程分析模型,建立了侵彻过程中弹长、弹速、侵彻速度和侵彻深度的常微分方程组,通过引入弹靶强度的应变率效应及弹体变形因素,简洁高效地分析了长杆弹体穿甲过程;建立了聚能射流形成和侵彻的新工程计算模型,具有较好的应用效果.

(3) 发展了有限元 (FEM) 和光滑粒子动力学 (SPH) 方法,实现了两者的高效结合,数值模拟了动能穿甲过程;开发了射流形成及侵彻计算的专用软件,有效再现了射流侵彻试验结果;通过分子动力学方法有效研究了陶瓷材料晶体的宏观力学性质及其在冲击波作用下的破坏特性.

此外,项目组在超硬材料动态性能的实验方法、观测技术和损伤破坏新现象研究方面做了积极探索.

9. 高焓非平衡流动气动力/热关键基础问题研究 (负责人:姜宗林)

(1) 在高焓激波风洞喷管自由流特性研究方面,澄清了喷管非平衡膨胀对实验结果的影响,提出了高总压驱动和超高速膨胀管等产生高焓流动的新方法,推动了我国高焓流动实验平台的建设.

(2) 以典型的钝头体流动为例,通过理论和计算研究了热化学与热力学过程对激波脱体距离的影响,理清了微观过程与宏观流动相互作用机理,并分析了多激波相互作用的气动热/力问题,为吸气式高超声速飞行器气动热防护设计提供关键技术依据.

(3) 开展了高温气体效应对空天飞行器俯仰力矩影响的研究,实现了近似理想气体和高温离解气体流动的对比实验,揭示了高焓高超声速流动对俯仰力矩的影响规律,评估了不同来流条件下高温气体效应对气动力的影响程度.

(4) 利用项目组研究发展的高焓激波风洞和大面积测热技术,配合数值模拟,探索了高焓来流条件下空天飞行器迎风面的热流与温度分布.并考虑表面催化效应,分析了表面催化反应对气动热流的影响规律.

(5) 发展了高焓流动与飞行器固壁热传导耦合算法,建立了气动力/热流精细计算程序,提高了对气动力与热流的预测与分析能力.

(6) 提出了一种无烧蚀热防护技术的新概念,探讨了其气动热/力规律,并完成了可信性分析,为新一代高超声速飞行器的降热减阻提供了新思路.

10. 强冲击荷载及内部气体集聚条件下地质体材料的力学行为研究 (负责人:李世海)

(1) 发展了描述非连续、非均匀材料特性的力学模型与计算方法——基于连续介质的离散单元法,采用了材料的拉伸破坏和压剪破坏的强度准则,能够模拟材料由连续到非连续演化直至整体破坏过程.建立了地质体内裂隙气体集聚的力学模型,研究了高压气体与地质体的相互作用.

(2) 研究了波在地质体中的传播规律以及声发射与地质体破坏的对应关系,主要包括岩体结构面前后波的传播规律实验、含非线性结构面的地质体中应力波传播特性的数值模拟、断裂过程中引起的冲击荷载产生的波的传播规律、爆炸应力波作用规律、冲击载荷引起的震动与岩体结构的关系、爆破地震波在结构面的传播特性与结构面倾角判断、波动探测土石混合体结构特性数值模拟、通过地下结构爆炸振动效应和破坏行为实验及数值模拟.

(3) 进行不同尺度的非均匀、非连续材料实验和数值模拟,完成了煤与瓦斯突出实验和数值模拟,完成了节理岩体地质体模型内部爆炸实验研究及相关数值模拟,探索了地质体在内部气体集聚和强冲击条件下的破坏规律.

A BRIEF INTRODUCTION OF FINISHED KEY PROJECTS ON MECHANICS IN 2010

ZHAN Shige ZHANG Panfeng LV Shouqin ZHANG Wenming

Department of Mathematical and Physical Sciences, NSFC, Beijing 100085, China