



力学科学处 2005 年重点项目结题验收情况的简要介绍

孟庆国 詹世革 刘青泉

国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085

2005 年力学科学处共有 3 项重点项目需进行结题验收(见表 1). 按照《国家自然科学基金重点项目管理办法》的有关规定: 重点项目执行期结束后, 应组织专家完成项目验收工作. 为了促进重点项目之间的交流, 加强对比, 提高效率, 数理科学部力学科学处于 2006 年 2 月 20 日至 22 日在

北京召开会议对这 3 个重点项目进行了集中验收. 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. 验收专家组进行了认真讨论, 形成了验收组综合意见.

基于验收专家组的意见, 下面将这 3 个结题验收的项目

表 1 2005 年力学科学处需结题验收重点项目清单

批准号	负责人	题目	主要承担单位
10032020	余振苏	非均匀可压缩湍流层次结构研究	北京大学, 北京空气动力研究所
10132010	匡震邦	固体电磁介质力学及其应用	上海交通大学, 西安交通大学, 兰州大学
10132020	姜宗来	血管重建的生物力学研究	上海交通大学, 四川大学, 复旦大学

在执行期间所取得的主要研究成果介绍如下:

1 非均匀可压缩湍流层次结构研究

(1) 发展了非均匀湍流层次结构分析的层次相似系数 β 检验和最高激发态的奇异标度指数 γ 检验方法, 完善了层次结构理论. 通过一些已有的湍流数据, 对该方法进行了验证.

(2) 与国外教授合作, 将上述的方法应用于 Taylor - Couette 旋转湍流的分析, 发现 β 不依赖雷诺数, 而在 Re 为 10^5 附近, γ 值发生明显改变, 这对应于 Taylor 涡的破碎, 表明 γ 对流动结构的依赖性. 对快速旋转环中形成的非均匀准二维湍流进行的研究表明, 层次相似律在从三维向二维转变的各种湍流状态下普遍成立.

(3) 通过与香港中文大学合作, 建立了湍流中广义扩展自相似性质 (GESS) 与广义层次结构 (GHS) 的等价性, 从理论上推广了原始的层次结构模型, 并提出了从 GESS 性质预测传统层次结构和提取最高激发态的系统方法. 证明了, 如果最高激发态与尺度无关, 则由 GESS (或 GHS) 可以推出扩展自相似性质 (ESS). 提出了在热对流系统中提取羽流结构的方法, 研究发现, 羽流结构是导致垂直速度分量的 β 与水平速度涨落差别的原因.

(4) 对绕方柱群和圆柱群湍流尾迹流场的速度脉动时间序列信号进行了系统测量和统计分析. 结果表明, 从近场到远场, β 和 γ 随距离的变化而变化. 对圆管中从壁面到圆管中心的湍流流动进行了层次结构分析. 研究发现, 层次结构参数能刻画从壁面到中心区的湍流流动结构的转化. 层次结

构参数的变化揭示了对数区有大涨落的脉动结构的产生, 以及到中心区的破灭过程.

(5) 对多探头多分量速度测量的数据进行层次结构分析检验, 结果表明, 在自由混合层的湍流中, 层次结构普遍存在, 层次相似参数与流动结构相对应, β 在剪切层中具有普适性, 而 γ 成为湍流结构性质的定量指标, 流向涡是流场中间歇性最强的结构.

(6) 对直接数值模拟得到的可压缩槽道湍流的研究表明, 在 $10 < y^+ < 100$ 区域有很好的标度性质, 此区域的纵向速度的间歇性比横向速度的间歇性强得多, 与不可压缩流对比, 最强间歇结构偏向对数区.

(7) 用纹影显示和米氏散射显示的实验方法对超音速混合层做了实验研究, 进行了准周期条带结构的识别分析.

2 固体电磁介质力学及其应用

(1) 提出了固体电磁介质若干新的本构理论和破坏理论; 合理地分析了电致伸缩材料中的应力和电场; 得到了电磁弹性介质在广义外载荷作用下的通解; 进行了大量的含缺陷的电磁体的应力 - 电场分析; 对非线性磁弹性体, 建立了力 - 磁 - 热耦合的广义变分原理.

(2) 给出了固体电磁介质有限变形下表而波的基本方程, 讨论了 Lamb 波、Love 波、BG 波等的传播特性; 求解了裂纹和压电柱体的弹性波散射问题.

(3) 提出了时间微尺度下电磁热弹性多场耦合的控制方程及其解法, 并对若干问题进行了解析求解和有限元数值求

解.

(4) 进行了压电和铁磁板壳的动力行为、非线性多场耦合行为等方面的分析, 研究了功能梯度材料和结构的静态和动态力电耦合行为.

(5) 研制成功国内外先进水平的力磁耦合加载与测量系统. 进行了大量的电-力-磁的耦合实验, 发现了磁致伸缩的伪弹性效应; 在位实时观测了铁电单晶体裂纹尖端的电畴演化; 在铁电块体材料的穿透裂纹电致疲劳实验观测的基础上建立了新的电致疲劳的 Paris 公式.

(6) 对超导悬浮体和超导载流线圈、磁悬浮列车动力响应等电磁结构和系统的多场耦合行为进行了定量模拟.

(7) 建立了在晶粒和晶界内的声子输运模型, 较好地预测了块状热电材料的晶粒尺寸效应.

此外, 还研究了流固耦合系统的振动和噪声的智能控制, 发展了智能结构控制的反馈理论.

3 血管重建的生物力学研究

(1) 研究了血管残余应力、不同构型血管的血液流动和血管壁应力分布特征; 比较了牛顿流、Casson 流及其混合流体对颈动脉分叉血管非正常流动特性的影响; 建立了计算动脉脉动流壁面切应力和周向应力及其协同作用的分析方法.

(2) 进行了平板流动腔脉动流场、切应力场的数值计算与实验研究. 分析了圆形管腔离体循环系统装置中的流体力学问题, 首次考虑剪切力诱发内皮细胞 (EC) 释放 ATP 的时变特性, 建立了相应的数学模型.

(3) 建立了低切应力下兔颈总动脉动脉粥样硬化模型, 研究了动脉粥样硬化形成过程中低切应力对血管平滑肌细胞 (VSMC) 凋亡的影响及其有关机制, 表明低切应力可直接或间接作用于动脉 EC 和 VSMC, 影响细胞增殖能力和 P53、bcl-2、Bax 和 c-Myc 等多种生物活性物质的分泌, 通过影响 VSMC 凋亡而调控血管重建.

(4) 建立了大鼠颈总动脉在体受力模型, 观察了高压对 VSMC 形态、 α -actin 等蛋白分布与表达的影响, 探讨它们在 VSMC 的机械应力信号转导中的作用. 应用体外应力环境培养系统, 探讨高压对动脉 VSMC 增殖与凋亡的影响.

(5) 应用 VSMC 和 EC 联合培养流动腔系统, 研究了切应力对联合培养 EC 和 VSMC 粘附、迁移的作用及其机制. 结果表明, 生理范围的切应力明显抑制了 EC 对 VSMC 迁移. 切应力通过以整合素介导的信号传递途径, 调节了与 VSMC 联合培养的 EC 的黏附与迁移能力的变化.

(6) 研究了张应变对 VSMC 迁移的影响及其机制和不同频率张应变对大鼠 VSMC 表型和细胞外基质的影响. 结果表明, 高张应变促进了 VSMC 的迁移, 与 F-actin 在细胞内的排列变化有关. 一定频率张应变的作用可促进 VSMC 由合成表型向收缩表型转换, 并可调节细胞外基质的合成与分泌.

(7) 建立了可模拟多种应力状态的血管体外应力环境培养系统, 以及细胞力学实验图像处理平台. 发展了 EC 和 VSMC 联合种植的全生物化人工血管构建技术.