



对力学科学处 2004 年和部分 2003 年重点、重大项目结题验收情况的简要介绍

孟庆国 詹世革

国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085

2004 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, 对这些项目的验收工作已在今年上半年完成.

表 1 力学科学处重点、重大需结题项目清单

资助编号	类别	项目名称	负责人	主要承担单位
19932010	重点	高维粒子输运和高温高密度流体不稳定性的数值模拟研究	袁光伟	北京应用物理和计算数学研究所
19932020	重点	城市交通流研究	戴世强	上海大学、同济大学、中国科学技术大学
19932030	重点	多向编织复合材料的力学性能及结构强度理论研究	崔俊芝	中国科学院计算数学与科学工程研究所、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学

基于验收专家组的意见, 下面将这 3 个已组织结题验收的项目在执行期间所取得的主要研究成果介绍如下:

1 重点项目“高维粒子输运和高温高密度流体不稳定性的数值模拟研究”

(1) 以多维粒子输运大规模数值模拟为背景, 研究了球谐近似与离散纵标方法, 发展了具有二阶精度、高并行度的基于界面修正的迭代方法, 该方法无条件稳定且易于实施. 研究了多种并行迭代算法和加速收敛格式, 避免了由于各向异性散射出现负通量导致计算中断的问题. 这些问题来源于实际, 所提出的方法与改进后的程序在应用中发挥了重要作用.

(2) 对三维直角坐标下的非定态中子输运方程, 开展了 S_n 有限差分方法的研究, 所得成果为进一步应用研究打下了良好的理论基础.

(3) 在界面不稳定性数值模拟中, 发现了预热情况下 Atwood 数的致稳作用, 得到了新的烧蚀 RT 线性增长率公式, 对控制 RT 不稳定性的增长有理论意义. 建立了烧蚀 RT 问题的弱非线性模式理论, 可方便于实际问题的分析.

(4) 发展了高温高密度流体不稳定性的模拟技术和方法, 研制了激光核爆模拟流体不稳定性程序, 在

激光核爆模拟研究和神光装置实验的理论设计和分析中发挥了关键作用.

(5) 针对多维多介质流体力学拉格朗日计算中网格大变形的困难, 提出了几类自适应坐标变换与网格优化调整方法, 提高了多介质大变形流体模拟能力.

2 重点项目“城市交通流研究”

(1) 对元胞自动机模型和跟车模型进行了深入的研究, 首次给出了 Fukui-Ishibashi (福井 - 石桥) 元胞自动机模型基本图的解析解, 产生了较大的国际影响; 首次建立了描述城市两层交通网络的元胞自动机模型; 改进了二维 BML 元胞自动机模型和跟车模型; 通过交通流模拟, 发现和解释了一些新现象 (如局部性交通相变、相分离、集簇效应等), 得到了比前人更符合实测数据的基本图.

(2) 提出了一种各向异性的流体力学交通流模型, 克服了以往模型的缺点; 改进了吴正的流体力学模型, 并分析了一个典型的下匝道口的交通堵塞现象, 发现了右转车对直行车流的挤压效应, 为合理设计高架道路提供了科学依据.

(3) 组织了上千人次的大小型交通调查, 积累了宝贵的数据, 分析了我国大城市机动车和行人交通流的基本特征和规律, 给出了可用于国内大城市交通干

道的交通流速度 - 密度关系, 为今后的深入工作奠定了良好的基础.

(4) 用排队论和马尔柯夫非平稳随机过程理论给出了交叉口有左转信号灯的交通过延误公式, 与实际观测结果相符合.

3 重点项目“多向编织复合材料的力学性能及结构强度理论研究”

(1) 对于周期性复合材料, 发展了热 - 力耦合问题的多尺度有限元算法; 对于振动问题, 给出了谱问题的特征值和特征函数的多尺度渐近展式; 对于多尺度裂纹 / 颗粒 / 空隙随机分布的复合材料, 进行了宏观细观耦合建模, 提出了相应的多尺度均匀化算法.

(2) 建立了三维碳 / 碳混编复合材料高温性能的实验方法, 获得了室温至 2800°C 范围内材料的力学和热物理性能随温度变化的规律; 揭示了碳 / 碳混

编复合材料的高温烧蚀机理, 并建立了描述材料烧蚀 - 相变规律的细观力学模型, 较准确地预报了材料烧蚀后退率等使用性能; 应用几何损伤理论研究了材料内部损伤对组分性能的影响, 建立了损伤细观模型和有限元算法.

(3) 针对三维四步正规编织材料, 建立了一种三维实体单胞几何模型, 数值结果与实验结果吻合; 获得了叠层复合材料结构固有振动特性的一类半解析解.

(4) 运用上述研究成果, 通过建立细观模型, 数值模拟了典型复合材料的力学行为及结构强度.

因受“非典”疫情影响, 2003 年有 2 项重点项目和 1 项重大项目的结题验收工作推迟到了 2003 年下半年完成 (见表 2). 基于验收专家组的意见, 下面将这 3 个项目在执行期间所取得的主要研究成果介绍如下:

表 2 力学科学处 2003 年底组织结题验收重点、重大项目清单

资助编号	类别	项目名称	负责人	主要承担单位	验收方式
19832020	重点	冲压成形与模具设计的基础理论、计算方法和关键技术	胡平	吉林大学、湖南大学	会议
19832050	重点	液晶高分子流变学及其流体力学研究	韩式方	中国科学院成都计算机应用研究所、复旦大学、四川大学	通讯评议
19990510	重大	大型旋转机械非线性动力学问题	陈予恕	天津大学、西安交通大学、天津大学、北京大学、哈尔滨工业大学、东北大学	会议

1 重点项目“冲压成形与模具设计的基础理论、计算方法和关键技术”

(1) 提出了率相关弹黏塑性大变形拟流动角点本构理论. 该理论实现了由正交性法则的流动理论向非正交性法则的形变理论以及由塑性加载向弹性卸载的连续光滑过渡, 从而解决了工业成形压机速度敏感性对板材成形及失稳、起皱与破裂的模拟预示的疑难.

(2) 提出了基于等分矩阵方法的逆矩阵 n 因子和 $2n$ 因子乘积形式以及相应的大型有限元方程组双分解算法, 显著提高了求解速度, 减少了计算机存储量.

(3) 提出了适合于弹塑性大应变板材成形分析的 3 种新单元: 无零能模式的拟弯曲膜单元、离散 Kirchhoff 理论的位移协调 DKT 壳单元、以及基于交叉降阶积分格式的新型壳单元.

(4) 在弹塑性大变形有限元分析中, 提出了可进行应力平衡修正的动力半显式速度迭代格式. 该格式考虑了阻尼因素, 建立了基于速度和应力场的平衡迭代, 保证了应力场的模拟精度, 为显式算法做回弹分

析奠定了基础.

(5) 提出了局部质量密度因子法和与显式算法相容的精确拉格朗日乘法, 克服了传统的罚函数法计算接触力引起的误差和数值稳定性问题.

(6) 采用有限元离散化思想, 提出了计及板材的面内各向异性的内曲拉伸 / 外曲收缩翻边数学解析模型和坯料形状展开预示解析模型. 进而提出了基于网格映射方法的更精确的反算求解毛坯的计算方法.

(7) 提出了利用模具 CAM 数控编程获得的 NC 轨迹数据作为网格生成的几何数据源的 CAE 自动建模技术, 该技术利用最大弦长偏差法确定每条数控轨迹线上的特征点, 并根据相邻特征曲线插值法进行曲线插值以获得高质量的四边形网格.

2 重点项目“液晶高分子流变学及其流体力学研究”

(1) 在综合分析当代非牛顿流体本构方程理论、随体共转时间导数的观点的基础上, 引入取向物质函数, 建立和发展了液晶高分子流体的速率型本构方程. 应用该速率型本构方程较好地解释了第一和第

二法向应变差的特殊流变学现象。

(2) 研究了共转 Oldroyd B 流体纺丝拉伸流动, 得到了测粘 - 拉伸流动的应力和拉伸黏度的解析表达式、主拉伸速率与纺程本构方程。研究了天然大分子溶致液晶 - 壳聚糖的特征。制备了不同的壳聚糖样品, 借助偏光显微镜研究了该样品在三氯乙酸中的液晶相转变和液晶状态及其热致相变机理。

(3) 发展了计算机智能解析方法和计算解析谱方法, 成功地研究了管内非牛顿流体和旋转运动。研究了外场下的大分子链伸展效应对溶致液晶相的取向和流体力学行为的影响, 证实了实验所观察到的 3 种取向方式等。

3 重大项目“大型旋转机械非线性动力学问题”

(1) 非线性动力学的新理论、新方法

将 C-L 方法推广到两个模态和 3 个模态耦合的高维非线性系统的分岔研究; 在退化情况下, 对于对称系统和非对称系统的余维 4 和余维 5 分岔方程, 导出并证明了其所有可能的普适开折形式; 提出了约束分岔理论、时变参数系统的安全域侵蚀理论、高维非线性动力学系统的切比雪夫多项式求解方法、非线性转子系统稳定性量化分析方法、Poincare 型胞映射法; 阐明了混沌吸引子与内部不稳定周期轨道碰撞产生混沌激变的新机理; 在具有间隙的转子系统计算中, 在超临界转速下发现了混沌吸引子和周期吸引子的分岔序列; 在双圆盘柔性转子系统的计算中发现了奇怪吸引子的倍周期分岔等新现象。

(2) 微小间隙约束自激源非线性动力学分析

围绕国产 300MW 汽轮发电机组所涉及的轴承, 提出了一类新的非线性油膜力模型; 建立了适合于非线性动力学分析的约束力表征和识别方法; 分析了轴承、密封和叶顶间隙与弹性转子的耦合效应以及热弹效应、边界条件、流态等对油膜、气(汽)流非线性激振力的影响规律, 进行了数字仿真和部分模拟实验验证。

(3) 大型转子系统故障的非线性动力学机理分析

提出了大型转子系统非线性动力学建模准则、直接建模法和降维建模法; 应用非线性动力学方法, 研究了转子系统的亚谐振动、自激振动、分岔、混沌、慢变、突变等异常振动行为; 针对 Jeffcott 转子和实际汽轮发电机组, 建立了几种典型故障(油膜振荡、碰摩、转轴裂纹、基座松动等)及其耦合故障的系统非线性动力学模型, 对轴系横向振动和某些重大振动

故障的发生与发展及其破坏过程进行分析, 总结出了故障的频响特征。

(4) 转子系统的模型实验及抑制振动方法研究

建立了比较接近实际机组的大型多跨转子模拟实验台等装置, 进行了碰摩、裂纹、基础松动、油膜振荡等单一故障转子及耦合故障转子的非线性动力学实验研究, 并验证了部分理论结果; 研究了多种抑制旋转机械振动的有效方法: 例如电流变阻尼、反向气流、调整基础刚度或改变支承位置等方法来抑制振动。

(5) 高维非线性动力系统数值分析

对高维非线性动力系统的数值求解格式进行了多方面的改进: 包括非线性微分方程组的精细积分算法, 分段积分算法; 发展了有限条方法; 对无限自由度动力系统发展了低耗散的差分格式; 进一步发展了求解高维非线性动力系统的弧长算法, 改进了 Hopf 分岔问题的数值算法, 并将上述方法嵌入进了大型非线性结构分析程序中。

(6) 大型转子系统的非线性动力学设计

针对大型转子可能出现的非线性问题, 在线性设计的基础上, 编制了能反映大型旋转机械系统非线性动力学特征的计算程序, 为转子系统的非线性动力学设计提供了工具; 基于各种小间隙约束激励源(油膜力、密封力等)的非线性力学模型, 研究了高维非线性转子系统的模型降阶; 对模型转子及实际机组(200MW 和 300MW)轴系进行非线性动力学分析, 分析了多种参数变化对非线性动力学特性的影响, 为转子设计提供了参考依据。

(7) 解决大型发电机组疑难振动故障

提出了轴系支撑内共振综合治理技术, 偏心润滑参数综合治理技术, 综合类比技术, 非线性传递函数法等, 用于根治转子系统的低频分量故障。这些技术已应用于工程实际, 解决了六省市十余个发电厂发电机组轴系的疑难振动问题, 取得了 3 亿多元的直接经济效益, 并产生了显著的社会效益。

该项目所取得的学术成果使我国在非线性动力学、转子动力学、机械故障诊治等研究领域处于国际前沿水平, 部分成果(如 C-L 方法、稳定性量化分析方法等)在国际上产生了影响, 为推动我国电力工业的科技进步发挥了重要作用。

该项目的成果获 2004 年度国家自然科学奖二等奖。