

# 工业装备结构分析国家重点实验室研究工作介绍

顾元宪 徐新生

大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024

工业装备结构分析国家重点实验室, 利用世界银行贷款建于大连理工大学, 拥有CRAYS/MP小巨型机和SGI图形工作站等计算机系统, 以及MTS New 810材料试验机等先进实验仪器设备, 1994年起对国内外开放。实验室以大连理工大学工程力学系和工程力学研究所为支撑点, 拥有一支力量雄厚的学术梯队, 其中包括钱令希教授、钟万勰教授和程耿东教授三位中科院院士以及唐立民教授等学术带头人, 九名博士生导师和七名青年教授组成的中青年学术骨干, 由闻邦椿院士担任学术委员会主任。实验室主任是顾元宪教授, 副主任是陈浩然、吴承伟、刘凯欣教授。

工业装备结构分析国家重点实验室的任务, 是针对重大工业装备、重要工程结构、高新技术产品中的关键和共性的力学问题以及相关学科交叉的耦合问题进行基础性研究, 并结合工程需求开展应用研究。实验室以工程科学的数值计算与模拟为发展方向, 以计算力学为龙头在下面五个方向开展科学研究和人才培养: 计算力学基本理论与方法, 计算力学软件系统研制开发和应, 交叉耦合力学问题, 工业装备和工程结构静动态分析与实验研究及应用, 特种载荷和环境问题。

实验室在承担国家重大基础性研究课题和解决重大工程关键技术问题中取得了一定成绩。在1995年~1997年中, 共承担科研课题99项(其中国家基础性研究课题26项, 国际合作研究课题5项), 科研经费总数超过800万元。有8项成果获国家及省部级奖励, 出版专著6部, 发表论文400多篇(据不完全统计被SCI和EI收录120多篇次)。实验室在人才培养和国内外学术交流中也发挥了重要作用, 3年来培养博士30人、硕士75人、博士后6人, 组办国际学术会议4次、国内学术会议3次, 国际学术交流58人次, 成为我国力学学科的研究生培养和学术交流的一个重要基地。

实验室的主要研究工作及其进展分下列五方面介绍

## 1 计算力学基本理论与方法的研究

实验室在工程力学哈密顿体系的研究中, 将弹性力学求解新体系选为一个突破口。引入对偶变量进入哈密顿体系后, 分离变量法、本征函数展开的直接法即可实施。一改以往只能用凑合法求解的局限性, 可以求解一些过去难以处理的问题, 如复合材料、各向异性等, 将问题归结为零本征值及其约当型和非零本征值问题。新的求解体系还可以进入数学物理方法并辐射到有关领域中去。从拉格朗日到哈密顿体系的过渡, 其意义在于从传统的欧几里得型的几何形态进入到了辛型的几何形态中, 突破了传统方法论的观念。这是一种求解体系方面的变革, 有广泛的应用。在弹性力学奇点解方面、复合板圣维南问题等方面, 都有了新的进展。发展了板弯曲与弹性平面问题统一理论, 并导向哈密顿体系, 将以往无法处理的多种边界条件条形板问题作出解答, 展示了良好的前景。在流体力学、振动与波动、复合材料力学、断裂力学、多刚体与柔体动力学等其他领域中也引入哈密顿体系。在此研究基础上, 申请得到国家自然科学基金重点项目“工程力学中的哈密顿体系”。

在结构优化设计的理论与方法研究中取得一系列新的进展。在离散结构(桁架)拓扑优化中从数学角度研究了奇异最优解问题, 首先定义了零截面杆件极限应力的概念, 指出杆件应力函数在零截面处的不连续性是出现奇异解的原因; 分析和指出奇异最优解对应的设计点并非孤立点, 而是位于设计空间的某个低维退化子域的端点, 整个设计空间仍然是连通的, 指出了用很小的截面下限代替零截面的传统方法的严重缺陷。在此基础上提出了 $\epsilon$ 放松方法, 通过对约束的放松改变了可行区的退化子域维数, 成功地将拓扑优化问题非奇异化。利用集合到点的映射理论证明了算法的收敛性。利用数学中的同伦算法, 发展了连续 $\epsilon$ 放松算法, 对于随机给定的初始解均可以比较高的概率收敛到全局最优解。上述研究成果成为第19次UTAM

大会上被列为特邀报告的部分。

研究改进了普遍采用的密度法使之有效地应用于应力约束问题,建立了在删除单元同时允许恢复单元的方法,成功地应用于二维膜、板、三维实体连续体结构的拓扑优化设计。利用优化设计理论将力学与材料科学相结合,在具有微结构的材料模型和均匀化理论基础,建立了连续体结构拓扑优化和先进工程材料设计的统一计算理论和方法。利用有限元数值方法可以准确地计算预测具有特殊微结构的材料特性,并且应用于复合材料、编织材料和缝合材料等新型材料的设计计算。

通过将优化问题的寻优过程模拟为热力学系统实现热平衡的过程,将最大熵方法引入优化算法研究,解决了大型优化问题中不等式约束多的困难以及与极大值函数有关的一类不可微优化问题。并且导出了求解大型优化问题的一系列有效算法,包括非线性极大极小问题的光滑化方法、非线性规划的乘子法和精确罚函数方法、多目标优化问题的中心法、大规模线性规划的不可行内点法及二次规划代理对偶问题的内点法等。

此外,研究和实现了大型组合结构的动态特性优化、屈曲稳定性优化、复合材料结构优化的数值方法和应用程序。

在有限元基础理论及方法研究方面,提出了理性有限元的思想和构造方法,在弹性平面问题和板弯曲问题求解中给出了更高的单元精度和性能,并研究了长期困扰人们的分片试验的充分必要条件,推进了有限元理论研究。在精化有限元方法研究中,对精化不协调有限元的收敛问题和多种精化不协调元的构造方法进行了深入研究,形成系统的方法和理论。在非线性和精化有限元、精化杂交元、连续体非线性低阶高精度混合应变元、接触问题的互补变分原理和非线性互补模型及其算法、几何非线性变分原理以及非协调单元的研究中也取得重要进展。

在动力学数值方法的研究方面,在大型结构平稳/非平稳随机激励动力响应计算方法研究中,提出了一套极其高效的虚拟激励法。其特点是对于平稳/非平稳多点随机激励建立起一族确定性的虚拟激励,从而将难度很大的非确定性响应分析转化为简单的确定性响应分析,可以采用常规方法进行计算,计算效率可提高两个数量级。在此基础上,将虚拟激励法作了逆向推广,从而用确定性方式求解平稳随机振动的载荷谱识别问题,成为逆虚拟激励法,形成一个完整的体系。这对于随机振动领域的研究成果更广泛地应用于实际工程起到重要的推动作用。从哈密顿体系出发,在 $2^N$ 类

算法计算指数矩阵的基础上,对于常微分方程暂态历程问题发展了一套高精度精细积分法,其数值结果可以比拟于精确解的数值结果。该方法不仅可用于动力学问题的时程积分,也可用于两点边值问题对空间坐标积分,以及对黎卡提方程的积分,显示了广泛的应用前景。

关于应力波在结构中传播效应的研究,建立了一种新的特征分析方法,可以广泛应用于分析和数值求解复杂的非线性应力波问题,揭示复杂结构应力波传播规律。采用分叉的观点,研究了应力波在结构中的传播、透射和反射过程中,结构发生的局部动态屈曲等问题,得到了应力波传播效应、物理参数和几何参数对结构屈曲的规律和一些屈曲机理,结果表明了理论分析与实验现象的一致性。

## 2 计算力学软件研制开发和应用

实验室紧密结合计算力学理论和方法研究发展自主知识产权的软件系统,为工业装备和工程结构分析提供软件工具和计算支持,同时为理论方法研究提供数值实验基础,形成有特色的一个研究方向。在过去三年中,一方面的工作是对已有的一批有限元软件维护和应用,另一方面的重要进展是新一代有限元分析与优化设计软件系统JIFEX95的研制开发。JIFEX95采用了先进的计算机软件技术和开发工具:标准的Microsoft Windows 95/NT 软件开发平台,C/C++ 语言及其32位编程工具,AutoCAD 软件平台上的CAD 设计与有限元建模一体化,Windows 95/NT 环境的计算机图形与实时计算可视化。在奔腾计算机上实现了多功能的有限元分析、优化设计及其前后置处理的软件集成,具有全新的交互式图形用户界面、全自动的模型数据生成、实时的可视化计算,以及10万有限元节点量级的大型工程问题计算能力。JIFEX95软件适用于各种大型工业装备及工程结构的力学性能分析与优化设计,其应用范围覆盖了航空、航天、机械、车辆、土木、水利、电力、石化等各个工业领域。近年来完成了一批重要的工业装备与工程结构的分析计算及优化设计的任务,将理论研究成果应用于工程实践,在经济与国防建设中发挥了作用。

## 3 交叉耦合力学问题研究

实验室将力学研究与大型水利工程结构建设结合,研究提出的丰满水电站坝体防渗加固工程的浮式施工方案,填补了国内外工程施工超过40m 水深的空白,被丰满水电站采用实施,具有重要的理论与应用价值和社会经济效益。方案主要归结为:大坝上游坝面支

模水下浇筑不散碎防渗层, 设置可重复使用的浮式钢支架和水面钢平台, 将水下施工水面化。方案中关键的设施和施工过程均以力学分析为依据, 增加了可靠性。例如, 采用三维有限元进行大坝水下防渗层的温度应力分析, 计算了砼防渗层浇注过程中水化热产生的温度应力和浇注相当长时间后的大坝运行过程中气温、水温、水位变化情况下防渗层内的应力分布; 在大坝上游面防渗工程渗流分析中, 采用正则化数值反演方法, 利用大坝原型有关观测数据, 对大坝典型坝段的砼与基岩渗透系数进行分区识别, 采用三维有限元对典型坝段进行渗流分析。验证了所提方案的防渗效果好, 其渗水量(排水孔中)仅为原渗水量的13%。

在复合材料层合板固化过程的工艺力学分析和数值模拟研究中, 提出一种基于哈密顿体系和精细积分的半解析方法; 在复合材料强韧化机制细观力学研究中, 提出了研究复合材料微结构和其宏观力学性能问题关系的广义自洽有限元迭代平均化方法; 对自由-移动边界问题中的有摩擦接触、大变形及大滑移、变形和渗流局部化等问题提出了有效的数学模型和数值求解方法; 在与美国北卡罗州立大学合作进行的关于电流变液的导电和介电效应研究中, 首次提出了直流电场下的导电模型及任意频率交流电场下的电流变效应预报模型。

#### 4 工业装备和工程结构静动态分析与实验研究及应用

在动态载荷参数识别方法及应用研究中, 采用频域函数求逆和模态坐标变换两种方法, 结合工程实例进行冲击载荷识别应用研究, 对动态载荷识别时域正演方法进行了实验验证和实际应用。完成了大量的各类动力基础动态特性测试分析和承载能力预测, 开发了桩基质量无损检测技术并在百余项工程中应用, 如国家重点工程20万吨级船坞的坞墙灌注桩动测鉴定、火力发电厂辅机基础动力特性测试、宝钢一号高炉供料系统大钟拉杆的测试。

应用振动时效技术有效地消除焊接结构的残余应力, 成功地解决了一批重要的工程技术关键问题, 在振动焊接技术机理与工艺研究中也取得进展。在现代光测力学研究中, 发展了实验与计算相结合的结构应力

分析光塑性方法, 开展了板壳大挠度屈曲和弯曲特性光测实验等研究。

研究了爆炸焊接、爆炸粉末烧结、爆炸合成等爆炸加工理论与技术, 将爆炸力学理论及实验方法与工程应用技术相结合。在导电类复合材料爆炸焊接技术的研究中, 发展了双金属爆炸焊接理论, 解决了超厚爆炸焊接、不等面积爆炸焊接等难题, 研制了多种双金属导电复合材料, 解决了电解加工工艺设备性能与耗能的关键技术问题。在超薄非晶膜爆炸焊接研究中, 将200层非晶膜焊接成功; 在爆炸合成金刚石的研究中, 发明了“膨胀石墨法”, 使金刚石转化率达到27%以上水平。

#### 5 工业装备与工程结构特种载荷和环境问题研究

冰力学与海洋环境荷载研究是工程环境的重要研究方向, 也是新发展的一门学科交叉研究领域, 其中海上石油平台的冰荷载是一个重要问题。实验室针对海洋石油平台结构的环境荷载分析与设计、以及特殊环境荷载引起的结构分析开展研究, 关于海冰引起的冰荷载问题研究, 取得了工程界与国内外学术界认可的成果已在工程中应用。在冰荷载研究的基础上, 开展风、浪、流、冰及地震荷载共同作用的环境荷载评估研究。

实验室开展了土壤污染等环境问题研究。在非饱和和区地下水中溶合污染物输运过程的模拟研究中, 研究了非饱和粘土结构性屏障和周围非饱和土中变形-渗流-传质等耦合过程之间的相互作用, 提出了在时空域内基于多孔介质中的不溶和多相流理论的数值模拟模型和有限元求解方法, 确定饱和-非饱和土壤中的孔隙流速场和饱和度分布。在实验研究方面, 对非饱和土的水动力学性质参数和污染物运移模型参数的实验测定作了基础性的研究, 研制了相应的实验装置, 发展了根据实验测定数据确定材料参数的反分析技术。

实验室的以上研究工作还有待于进一步展开和深入, 并将根据学科发展和工程建设的需要调整和充实研究内容。本实验室每年有一批开放基金课题向全国开放, 自由申请。我们欢迎国内外学术界和工程界的同行利用实验室这一研究基地, 共同推进工业装备和工程结构分析领域的科学研究与工程应用。