

工业装备结构分析国家重点实验室

武金璜

大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023

工业装备结构分析国家重点实验室, 是世界银行贷款重点学科发展项目建设的第 2 批国家重点实验室. 于 1988 年开始可行性论证, 1989 年 6 月经国家计委确认, 1991 年启动建设, 1995 年 5 月通过国家教委验收并正式对外开放.

实验室的任务是: 面向工业装备制造和重大结构工程, 以力学和计算科学为学科基础, 主要研究计算力学和工程科学计算中的科学问题、关键算法、软件技术以及它们在大规模计算工程软件系统中的实现. 以自行开发的具有自主知识产权的计算工程软件作为主要工具, 结合实验技术及其它软件的应用, 解决重大工业装备和工程结构分析中的关键力学问题以及相关学科耦合问题, 开展创新性应用基础研究, 获取原始创新成果和自主知识产权; 聚集和培养优秀科学家和高层次人才; 开展国内外学术交流与合作研究, 发挥重点实验室的国家基地作用.

国家重点实验室的主要研究方向有:

- (1) 计算力学与工程科学计算的理论和计算方法;
- (2) 结构优化设计的现代理论和计算方法;
- (3) 大规模计算工程软件系统研究开发和应用;
- (4) 结构与多场耦合问题的理论、计算与实验方法;
- (5) 特殊环境下的材料与结构性能研究.

实验室现有固定人员 35 人、客座人员 14 人、博士后 10 人、博士研究生 143 人、硕士研究生 188 人. 固定研究人员中有中国科学院院士 2 人 (钟万勰院士、程耿东院士), 钱令希院士是重点实验室的顾问, 有长江学者奖励计划特聘教授 1 人 (张洪武教授), 国家杰出青年科学基金获得者 2 人 (张洪武教授, 陈震教授); 有 2 人担任 3 个国际学术组织执委 (或执委会副主席), 5 人担任 15 个国际学术期刊的编委, 在国内外同行领域中具有比较重要的影响.

实验室在 2001 年至 2005 年期间, 共承担国家重要科研课题 117 项, 其中国家重点基础研究发展规划项目 4 项, “863” 计划项目 6 项, 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目 1 项, 国家自然科学基金重大和重点项目 10 项、国家杰出青年科学基金 3 项、国家自然科学基金面上项目 52 项, 国家攻关项目 1 项, 国家教育部资助项目 23 项、辽宁省科技项目 17 项. 另外, 还承担了横向协作项目 143 项, 其他项目 23 项. 其中纵向研究项目经费占 57%.

目前在研重要课题 52 项, 其中国家重点基础研究发展

规划项目 3 项、“863” 计划课题 2 项、国家自然科学基金项目共 33 项、国家教育部资助项目 4 项、辽宁省科技项目 10 项.

2001 年至 2005 年期间, 实验室研究成果获得省部级奖励 9 项 (其中一等奖 3 项), 获得发明专利 3 项, 2 项软件获国家计算机软件著作权, 通过教育部鉴定的研究项目 5 项; 出版学术专著和教材 14 部, 编辑出版国际会议论文集 3 本, 在国际期刊和国内重要刊物共发表论文 687 篇.

实验室是培养人才的重要基地, 博士后和研究生已成为一支重要的科研力量. 2001 年至 2005 年, 出站博士后 11 人, 毕业博士研究生 47 人、硕士研究生 110 人. 2005 年, 已出站的徐新生博士获得全国优秀博士后称号. 林家浩教授指导的博士研究生孙东科的学位论文《长跨桥梁二维风振分析》被评为 2002 年全国百篇优秀博士学位论文. 2001 年至 2005 年, 有 4 篇博士学位论文被评为辽宁省优秀博士学位论文.

实验室的学术交流, 特别是国际学术交流与合作研究十分广泛和活跃, 已与 10 多个国家和地区的高校及研究机构建立了合作关系. 2001-2005 年, 主办国际及国内学术会议 22 次, 开展国际合作研究项目 13 项, 接待海外来访学者 97 人次; 研究人员出国进行合作研究及参加国际会议 131 人次, 在国际学术会议上做特邀报告 26 人次.

实验室近年来取得的主要研究成果有:

- 应用力学对偶体系理论及计算方法;
- 结构拓扑优化中奇异最优解的研究;
- 工程结构随机振动精确高效算法研究;
- 结构与多学科耦合系统仿真优化软件系统及工程应用;
- 多孔多相材料力学及其耦合问题的模拟方法;
- 冰荷载与抗冰结构研究;
- 高性能有限元理论和方法;
- 复合材料结构分析的理论和计算方法;
- 结构分析与优化的并行计算方法;
- 大型水工结构物的关键技术问题;
- 爆炸加工技术及其工业应用;
- 电流变材料的工作机理研究.

以下给出 6 项典型性成果介绍。

1 应用力学对偶体系理论及计算方法

钟万勰院士研究组关于结构力学与控制理论的模拟理论指出, 它们的数学基础是相同的, 有一个公共的理论体系——即对偶变量体系。该成果以弹性力学的哈密顿体系为重点和主线, 建立了一整套通用、理性的求解体系。别开生面、统一的方法论是其一大特色, 它更易于促进力学与现代控制等交叉学科领域的相互渗透与结合。

将对偶变量体系应用于弹性力学, 就改变了传统求解思路, 而导向理性求解方法。如完善了平面弹性与板弯曲问题的相似性原理, 将平面弹性的辛求解体系直接引入到板弯曲问题, 形成了板弯曲的辛求解体系; 借用平面弹性元的方法与列式, 放弃传统 C^1 类连续性要求, 构造了高效实用的板单元。

模拟理论的进一步发展表明鲁棒控制 H_∞ 理论的参数 γ_{cr}^2 正相应于结构振动本征值的 Rayleigh 商等, 于是结构力学的优秀成果也可用于控制领域。如模拟子结构消元法形成的精细积分法既可用于初值问题, 又可用于两端边值问题的积分。对于动力方程以及控制理论中的 Riccati 方程, 精细积分法都给出了几乎是计算机上的精确解。

该研究引起了国内外许多学者密切关注, 钟万勰院士等曾先后得到美国、英国等 10 余所著名大学、美国国家科学基金会的多次邀请, 做了 50 多场学术报告。

2 结构拓扑优化中奇异最优解的研究

自 20 世纪 80 年代以来, 拓扑优化就一直工程结构优化设计领域中的一个最受瞩目的研究方向。但传统的结构拓扑优化算法对于某些问题, 往往只能得到并非最优的拓扑。这就是所谓的奇异最优解现象, 程耿东院士等对奇异最优解现象进行了深入的研究, 首次指出所谓奇异最优解其实并非设计空间中的孤立点, 而是位于设计空间中某个低维子域的端点。这一论断纠正了文献中长期存在的错误, 正确揭示了产生奇异最优解的根本原因, 被评价为是“处理由奇异拓扑导致的计算困难的相当大的进展”, “是在正确方向上前进的一大步”。该项研究还提出了处理结构拓扑优化奇异性问题的 Epsilon- 放松以及延拓、外推等改进算法, 并严格证明了算法的收敛性, 从而成功地将结构尺寸和拓扑优化统一在了同一求解框架之下。该项工作受到结构优化及数学界学者的重视, 被认为是求解奇异最优解问题的“流行的数值方法”(popular approach)。著名结构优化专家、国际结构与多学科优化协会创始人 Rozvany 教授在综述文章中指出: 该研究关于奇异最优解本质的全新诠释以及所发展的 Epsilon- 放松算法是对拓扑优化奇异解研究“非常重要”而且“具有里程碑意义的贡献”。

该项目研究成果被他人引用 150 余次。并于 2003 年和 2005 年分别获得教育部提名国家自然科学一等奖以及辽宁

省自然科学一等奖。

3 工程结构随机振动精确高效算法研究

随机振动理论框架已建立半个多世纪, 但在工程中却始终难以推广。我们创建的虚拟激励算法系列对平稳 / 非平稳, 完全相干 / 部分相干, 均匀调制 / 非均匀调制激励下各种随机分析方法进行了系统更新。在获得精确解的同时, 对复杂问题计算速度比传统方法提高 2~4 个数量级。当国外抗震界的权威还在认为“随机振动尚未成为工程师能够接受的分析方法”, “仅对于只有少量自由度和支点的简单结构可以使用”之时, 我们中国多个领域的学者已经在南京长江二桥、洞庭湖斜拉桥、东海大桥、新疆石门子拱坝、小湾拱坝、瀑布沟拱坝等国家级工程上应用虚拟激励算法成功地进行了抗震分析。分析规模和难度远远超过了国外同行已达到的程度。林家浩教授与香港理工大学合作指导博士生针对香港青马大桥的风振分析在国际刊物发表多篇论文, 首先实现了大跨度悬索桥的三维气动弹性耦合颤抖分析。目前已有 80 多位国内外专家学者在多个领域中实际应用虚拟激励法。许多工程专家是在采用传统方法遇到重重困难的情况下改用虚拟激励法后才取得重要进展的。美国 CRC 出版社 2005 年出版的《振动与冲击手册》(Vibration and Shock Handbook) 第 30 章“大跨度结构的随机地震响应”重点介绍了独具特色的虚拟激励法的原理和应用。

4 结构与多学科耦合系统仿真与优化软件系统及工程应用

CAE 是工业装备和产品数字化创新设计与精细化设计的核心技术。将创新性理论研究和自主知识产权软件开发相结合, 研制了具有中国自主知识产权的大型通用有限元分析与优化设计软件 JIFEX5.0, 2004 年获国家计算机软件著作权。主要技术内容: (1) 高性能有限元计算方法——热弹塑性接触耦合分析的参数二次规划算法, 传热与动力分析的自适应精细积分; (2) 若干新的先进实用的结构优化方法——热结构优化、温度场优化、三维参数化形状优化、动力响应优化和组合结构屈曲优化; (3) 先进的有限元前后处理技术——复杂三维实体和组合曲面有限元网格生成, 参数化 CAD/CAE 软件集成与跨平台图形环境与体绘制计算可视化。

本项成果已在工业装备和国防工业中应用。在透平机械、特种水下器材等装备产品优化设计中创造经济效益超过 1 亿元人民币; 在神舟飞船、通信卫星等国家重大工程中解决了关键技术问题, 创造了重大社会效益, 为我国装备制造以及国防工业做出了重要贡献。

JIFEX5.0 在多功能实用化的结构优化设计、热弹塑性接触分析、CAD/CAE 集成的参数化有限元建模、基于造型的三维实体和组合曲面网格剖分、跨平台统一图形界面和体绘制计算可视化等方面体现出显著的特色, 达到国际先进水平。在技术水平、软件功能和工程应用方面, 均处于国内

领先地位.

5 多孔多相材料力学及其耦合问题的模拟方法

李锡夔等在国际上首先提出了计及大应变效应的梯度塑性连续体理论的有限元模型. 得到了法、日、美、德、荷、澳、瑞典、新加坡学者 (SCI 检索引用 26 次) 对该项工作的积极评价, 较详细介绍了工作的学术创新.

他们在特征线 Galerkin 方法的工作是该方法的代表性论文. 美国 T.F.Russell 和 M.A.Celia 教授在他们的综述论文中把他们的工作作为该方法 5 篇重要论文中的两篇介绍.

李锡夔等建立了描写多孔多相介质中化学 - 热 - 液 - 蒸汽 - 气 - 力学多场耦合过程的两级数学模型, 发展了多孔多相介质中包含不同类型耦合控制方程的离散化过程和非线性混合元方法. 在 *Int. J. Numer. Methods Eng.* 和 *Int. J. Numer. & Anal. Methods Geomechanics* 上分别发表了 42 页与 47 页的长篇论文.

在灾害环境下饱和非饱和土动力失稳与破坏的理论和数值方法研究方面, 李锡夔等在国际期刊上发表的成果包括: 饱和非饱和土中波传播的驻值间断与颤振失稳; 饱和多孔介质强脉动下动力分析的非线性时域间断 Galerkin 方法; 非线性 Cosserat 连续体的有限元法及应变局部化; 离散颗粒模型与离散元法.

以上工作为多孔多相介质结构物 (如边坡、混凝土构件、隧洞等) 在化学 (污染物)、热 (火灾或高温辐射)、水 (暴雨或水害)、机械等不同环境荷载下的不同破坏模式及以

应变局部化为特征的渐进破坏过程分析提供了基础研究成果.

成果“岩土与环境耦合问题研究及工程应用”2003 年通过国家教育部组织的技术鉴定, 达国际领先水平, 武文华同学的博士学位论文“非饱和土中热 - 水力 - 力学 - 传质耦合过程模拟及土壤环境工程中的应用”获得辽宁省优秀博士学位论文.

6 冰荷载与抗冰结构研究

岳前进教授领导的科研团队在抗冰结构研究方面承担了多项研究课题, 其中包括重点基金项目“河冰, 海冰生消灾害与防护对策研究”, 863 重大专项“新型抗冰振平台技术”, 欧共体项目“冰与柔性结构相互作用”等. 主要研究成果包括:

(1) 建立了利用具有目前国际先进水平的抗冰结构监测系统, 室内抗冰结构实验基地, 平台振动与控制实验装置等;

(2) 建立了直立结构与锥体结构的动冰力模型, 其中直立结构的冰激自激振动的机理, 锥体结构的冰力函数与冰力谱为国际上首先提出;

(3) 提出了抗冰结构的疲劳分析方法, 基于多年的实验研究, 解决了抗冰结构疲劳分析的关键问题;

(4) 提出了适合于我国冰区边际油田的经济型抗冰平台, 基于该研究成果设计的独腿抗冰平台已经于投产;

(5) 建立了平台冰激振动隔振的试验系统, 研制了抗冰平台冰激振动控制的 ATMD 装置与室内振动控制试验系统.