

Report on Advances
in Mechanical
Engineering

湖南大学

机械科技发展报告

2010—2020

机械与运载工程学院 主编

湖南大学出版社

**Report on Advances
in Mechanical
Engineering**

湖南大学

机械科技发展报告

2010—2020

机械与运载工程学院 主编

湖南大学出版社

内 容 简 介

本书以国家中长期科技发展规划、国家需求和学科发展为背景,以湖南大学的发展规划为指南,结合本校本领域科技研究的实际状况,比较分析了各领域的国内外研究动态、前沿和发展趋势;明确了湖大各相关领域的优势、特点和差距。《报告》采用调查研究和科学分析方法,对湖大相关学科领域的未来发展趋势、重点研究方向、队伍和学科平台建设、重要的科学技术问题、发展对策建议等进行了阐述。不仅可作为湖南大学机械学科发展规划的重要内容,而且可为国家相关部门、行业及从事机械工程科学研究的专家学者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

湖南大学机械科技发展报告(2010—2020)/机械与运载工程学院主编.

—长沙:湖南大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-81113-756-9

I. ①湖… II. ①机… III. ①湖南大学—机械工程—技术发展—研究报告—2010~2020

IV. ①TH

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第241548号

湖南大学机械科技发展报告(2010—2020)

Hunan Daxue Jixie Keji Fazhan Baogao (2010—2020)

主 编:机械与运载工程学院

责任编辑:卢宇陈别

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山 邮 编:410082

电 话:0731-88822559(发行部),88820008(编辑室),88821006(出版部)

传 真:0731-88649312(发行部),88822264(总编室)

电子邮箱:presschenb@hnu.cn

网 址: <http://press.hnu.cn>

印 装:衡阳顺地印务有限公司

开本:889×1194 16开

印张:14.5

字数:450千

版次:2010年6月第1版

印次:2010年6月第1次印刷

书号:ISBN 978-7-81113-756-9/TH·39

定价:平装:48.00元 精装:58.00元

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

编写委员会

学术顾问：钟志华 郭孔辉 范滇元

主 任：韩 旭

副 主 任：李光耀 袁巨龙 雷源忠

撰写委员会委员（按姓氏笔画排序）

王文格	文桂林	尹韶辉	邓朝晖	邓乾旺
刘敬平	李落星	李光耀	陈根余	何莉萍
杨济匡	杨沿平	杨旭静	张见明	周志雄
赵江洪	姜 潮	袁巨龙	黄 智	韩 旭
程军圣	雷源忠	熊万里	戴 勇	

学术秘书：周长江

序

我们正处在一个伟大的时代。中国像一轮朝阳，升起在世界的东方，照耀着全世界。制造业是创造国家财富和社会文明的源泉；是使中国走向富强、实现现代化的支柱产业；是国家创造力、竞争力和综合国力的重要体现。据统计，我国国民经济增加值的三分之一来源于制造业。经过三十多年的改革、开放和发展，我国制造业取得了举世瞩目的成就，经济规模和综合实力大幅增长，装备制造业技术水平和生产能力大幅提升，国际竞争力显著增强。中国已成为世界第二制造大国和出口大国，多种产品产量列居世界第一位，全球制造中心正在向我国等发展中国家转移。

但是，目前的中国并非制造强国，其制造业及其制造科学技术还比较落后，主要表现在：具有国际影响力的名牌产品和企业还很少、许多高端产品的核心技术仍然没有掌握在自己手中、严重缺乏具有原创性和国际影响力的制造科学技术成果。要实现从“制造大国”向“制造强国”的战略转变，关键在于制造科学技术及其产品的自主创新。

制造业的强盛依赖于制造技术的创新，而制造技术的创新来源于机械学和制造科学的基础研究。国家的需求、学科的发展，人才的培养，迫切需要大力推进科学技术的创造性发展，迫切需要大量自主创新的科学技术成果。

湘水滔滔入长江，枫叶正红岳麓山。湖南大学自建校以来，就把自己的命运和国家的命运连在一起，曾经发生过许多动人的故事，出现了许多杰出的英才。湖南大学机械系已经有了百年历史，是中国大学中最早的机械系。近年来，湖南大学在机械工程领域，拥有了汽车车身先进设计制造国家重点实验室和国家高效磨削中心两个国家级研究平台。在车辆系统的分析与设计、汽车车身先进设计与制造、高速高效超精密磨削、激光加工等领域的科学技术研究方面，取得了在国内外有一定影响的进展和成果，培养和造就了一批国内外知名的高水平学术人才。

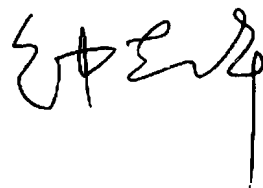
“春江浩荡暂徘徊，又踏层峰望眼开”。湖南大学 and 我们的祖国一样，正处在一个大发展的时期，面临着健康快速发展的机遇和挑战。和国内外许多名校相比，在科学研究、教书育人、社会服务等方面，湖南大学还存在不少差距。我们要发扬“惟楚有材，于斯为盛”的自信自强精神，在灿烂光辉的新时代，要有所作为，有所贡献，有所创造，有所前进。应当在解决国家重大科技需求、培养国家科技人才，在现代科学技术的创造性研究和建设中国一流大学中发挥更大作用。

“凡事予则立，不予则废”，说明了做事情要先做计划的重要性。学院要又好又快地发展，首先要抓好学院的科技发展规划，抓好科学研究和学科建设。《湖南大学机械科技发展报告》对于机械学院未来5—10年的科学研究和学科建设非常必要而及时。

培养和造就千万个新世纪高科技人才是湖南大学的主要任务。湖南大学的优势学科应该起到骨干作用。创造优秀的科技教学平台、培养和造就高水平师资队伍、创造高水平科技和教学成果，也应当要有规划，也要以学科的发展报告为基础。我相信，《湖南

大学机械科技发展报告》对于机械学院师资队伍建设和人才培养也将起到重要的作用。

“乘风破浪今是时，直挂云帆济沧海”，21 世纪中华民族的伟大复兴事业为我们每一个学者提供了展现才华的极好机遇，让我们行动起来，用自己的双手，献出我们的智慧和力量，共同描绘我们伟大祖国壮阔美丽的现代化蓝图。



2010 年 5 月

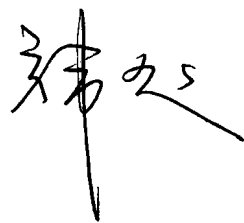
前 言

《湖南大学机械科技发展报告》(以下简称《报告》)是根据湖南大学科技发展规划和钟志华校长的意见,由机械与运载工程学院组织本院的教授撰写而成的。《报告》成立了编写委员会,下设20个专题撰写小组。编写委员会委员基本上是《报告》各部分第一撰稿人,由其负责制定该章的学术方向并校稿。共有50多位学者教授参加了《报告》的研讨及撰写工作。编写者在收集资料、调查研究和充分掌握信息的基础上,经过多次开会研讨和修改,形成了现有的报告。

《报告》主要包含了CAE先进计算理论与算法、薄板成形工艺与模具、先进动力与总成、汽车造型与空气动力学、汽车底盘与车身电控技术、车辆安全与人体生物力学、汽车生态内饰材料、汽车技术与产业发展战略、工程机械设计与分析、特种运载装备设计与分析、高速高效磨削技术与装备、超精密加工技术与装备、微纳机械加工与成形、激光加工技术与装备、复杂刀具设计与制造、复杂曲面非接触三维测量、轻合金成形工艺与装备、机械系统故障诊断与维护、机床系统动力学、工业工程等主要研究方向。

《报告》以国家中长期科技发展规划、国家需求和学科发展为背景,以湖南大学的发展规划为指南,结合本校本领域科技研究的实际状况,比较分析了各领域的国内外研究动态、前沿和发展趋势;明确了湖大各相关领域的优势、特点和差距。《报告》采用调查研究和科学分析方法,对湖南大学相关学科领域的未来发展趋势、重点研究方向、队伍和学科平台建设、重要的科学技术问题、发展对策建议等进行了阐述。不仅可作为湖南大学机械学科发展规划的重要内容,而且可为国家相关部门、行业及从事机械工程科学研究的专家学者提供参考。

由于时间、信息和撰写水平的局限,《报告》中难免存在遗漏和错误之处,欢迎读者指正。特别需要指出的是,《报告》涉及的研究方向较多,引用资料数量较大,参考文献及相关数据引处标注若有疏漏之处,敬请原文作者指正。编写委员会一并表示感谢,并在后续修订出版中予以改正。



2010年5月

目 录

第一章	CAE 先进计算理论与算法	姜 潮, 韩 旭, 胡德安(1)
第二章	机床系统动力学	熊万里, 刘子建(12)
第三章	高速高效磨削技术与装备	邓朝晖, 盛晓敏(21)
第四章	超精密加工技术与装备	袁巨龙, 戴 勇(33)
第五章	微纳机械加工与成型	尹韶辉, 范玉峰(47)
第六章	复杂刀具设计与制造	周志雄, 胡思节, 周秦源(61)
第七章	复杂曲面非接触三维测量	王文格(72)
第八章	机械系统故障诊断与维护	程军圣, 于德介, 杨 宇(80)
第九章	激光加工技术与装备	陈根余, 金湘中, 刘继常(90)
第十章	薄板冲压成形工艺与模具	杨旭静, 李光耀(102)
第十一章	轻合金成形工艺与装备	李落星, 刘金水(120)
第十二章	产品开发管理与生产系统设计	邓乾旺, 刘 坚, 范 叶(133)
第十三章	工程机械设计与分析	张见明, 吴长德(140)
第十四章	汽车造型与空气动力学	赵江洪, 谷正气, 谭政宇(150)
第十五章	车辆安全与人体损伤生物力学	杨济匡, 张维刚, 宋晓琳(158)
第十六章	先进动力总成技术	刘敬平, 韩志玉, 杨 靖(172)
第十七章	汽车底盘与车身电控技术	黄 智, 周云山(185)
第十八章	汽车生态环保内饰新材料与工艺	何莉萍(193)
第十九章	特种运载装备设计与分析	文桂林, 韩 旭, 周长江(201)
第二十章	汽车技术与产业发展	杨沿平, 范 叶, 唐 杰(210)

第一章 CAE 先进计算理论与算法

姜 潮, 韩 旭, 胡德安

摘 要:制造业是我国国民经济的支柱产业,我国要在未来完成从制造业大国到制造业强国的转变,则需要以工程科学前沿 CAE(计算机辅助工程)技术为主要设计手段,适应新时代,掌握新技术,满足新需求,切实提高我国产品和工程的创新设计能力和市场竞争力,占领国际制造业未来发展的先机和制高点。湖南大学 CAE 学科多年来一直追踪国际前沿研究和热点,紧扣国家和社会发展的客观需求,在多个研究方向上做出了出色的成果,形成了一套较为完整和较具特色的 CAE 理论与技术体系。随着我国重大高新技术民用装备和国防特种装备的发展,很多装备的制造和运行处于高温、高压、高速、高频等极端条件和多物理场耦合的环境下,对数字化设计工具提出了诸多前沿性和挑战性课题,也为涉及的学科提供了前所未有的发展机遇。在新的环境下,湖南大学如何巩固已有研究基础,挖掘和发展 CAE 领域新的学术增长点,适应国家重点装备和工程的发展需要,从而全面提高 CAE 学科的整体水平,成为一个亟需思考的问题。本报告结合当前 CAE 学科国内外的发展水平、发展趋势及湖南大学在该领域的特点,对未来学校在该学科的发展重点及发展思路提出了一些建议。报告的主要内容包括:分析了 CAE 学科的重要性、范围及主要科学问题;从 5 个方面分析了 CAE 学科的研究现状及发展趋势;分析了湖南大学在该领域的发展状况,及与世界一流水平的差距,并且给出了湖南大学该学科发展的一些建议和思路。

1 本领域的定义、范围和重要性

目前,以计算力学为核心的 CAE 技术已经在重大工程与装备结构的数字化设计中占据重要地位。美国等西方国家长期以来对此高度重视,近年来又将其密切相关的计算科学评价为“经济竞争力和国家安全的键”。随着我国重大高新技术民用装备和国防特种装备的发展,很多装备的制造和运行处于高温、高压、高速、高频等极端条件和多物理场耦合的环境之下,对数字化设计工具提出了诸多前沿性和挑战性课题,也为涉及的学科提供了前所未有的发展机遇。加强面向现代重大工程与装备设计、制造与运行过程中具有共性的 CAE 基础理论、核心算法及软件平台的研究,对于打造我国现代化工业体系的“智能化软装备”和工业化创新设计支撑平台,从根本上提高我国装备制造业产品核心竞争力和自主创新能力,突破发达国家的禁运壁垒,保证国家战略安全和实施国家中长期科技发展规划都具有重大意义,其对国家经济和社会发展的的重要性如图 1 所示。

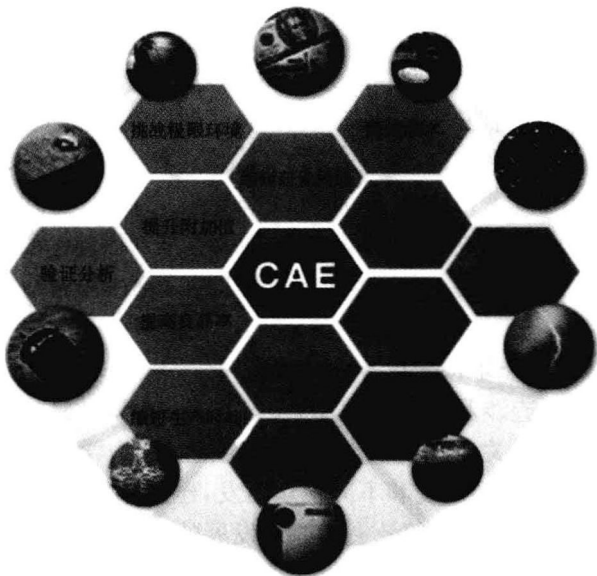


图 1 CAE 技术对国家经济和社会发展的的重要性

当前,CAE 领域所涉及的关键科学问题主要包括:①复杂装备设计、制造和极端环境下的模拟方法。装备设计、制造和极端环境下的模拟方法将为现行有限元法提供许多关键技术的补充和升级,为最终实现“自适应”计算模拟提供有效的手段。②复杂系统的反演理论和方法。计算反演技术是提高计算技术可靠性的关键,它对计算技术在工程中的推广应用起着举足轻重的作用,因为基于反分析技术能对复杂结构的材料、边界等关键特性参数进行精确识别。③先进而实用的结构优化设计理论和方法。结构优化理论和方法是进行工程实际结构与系统最优设计的前提,成功的优化设计往往能大幅度地提高产品质量,降低成本和消耗,更有效地利用资源。④考虑不确定性的结构响应分析及设计方法。考虑不确定性的结构响应分析及设计方法使得计算模型与实际复杂工况更为相符,并极大程度上地提高了结构和装备的可靠性或鲁棒性。⑤多尺度、多学科和多功能的计算理论和方法。多尺度、跨学科和多功能的计算理论和方法是在复杂结构的设计中必不可少的,它的研究范围包括从埃量级的量子力学计算到连续介质层次的模拟和分析,从而实现由温度场、流场、应力/应变场、组织场等耦合集成的复杂结构的计算仿真。⑥大规模实时计算技术的基本理论和方法。实时计算技术的开发将突破大规模计算问题的瓶颈,使得大型复杂结构的快速设计成为可能,同时为有效地开发其他类型的计算技术和方法打下坚实的基础。

2 本领域国内外发展现状及比较分析

2.1 国内外发展现状

CAE 技术作为人类历史上最领先、最成功的工程应用计算科学,在 20 世纪取得了令人瞩目的成就。今天各类工程的成功,无不有着 CAE 技术的影子。但伴随着高技术装备面临越来越多的多物理场耦合和多时空尺度效应,以及产品设计向数字化、精细化、智能化、轻量化快速转型的趋势,作为现代工业装备设计数字化工具的支柱——CAE 技术的前沿也在快速向前推进。CAE 技术的理论、方法与软件平台的研制正面临众多的挑战性课题,除了要考虑不同尺度材料/结构力学行为的数值模拟及跨尺度的关联,要面对高温、高压、高速与高频等计算的新挑战,也需要在传统的强度、振动、疲劳、损伤等方面提高计算效能。这其中,有些问题的数学物理机制尚不完全清楚,有些问题的数值模型和求解方法还远不完善。诸多科学问题需要从数学、物理、力学、材料科学等方向提出新的适用于数值计算的机理、模型以及计算方法。以下针对计算力学若干前沿问题的研究进展和现状进行具体阐述。

2.1.1 多物理场作用下结构力学行为的建模和计算技术

传统的计算方法对多物理场作用下结构行为进行模拟时,通常对不同控制方程所描述的物理量依次单独建模和分析,忽略强耦合效应而只考虑不同场量之间的单向耦合。在复杂工业装备精细化数值仿真等需求的牵引下,能够完全实现应力应变、流动、声、热、电磁等多物理场双向耦合的数值模拟方法是目前计算力学研究的热点。随着新材料和新工艺(如复合材料热压、摩擦搅拌焊、高强度钢板温热处理等)的不断出现,在材料科学和加工工艺的研究中也出现了很多力学与其他学科相耦合的问题,这已成为最近一个时期计算力学的研究热点。目前与结构多场耦合行为仿真相关的研究主要包括:①把传统的有限元法的思路与物理前沿概念相结合,解决反映局部区域力学行为的多尺度计算模拟问题;②针对有限元法依赖网格的弱点,借鉴有限元技术发展无网格法、扩展有限元方法等新型数值计算方法;③采用新技术发展常规有限元法,构造新型高性能单元模型和算法,发展适应多时空尺度的网格生成新技术。

2.1.2 多尺度材料与结构的一体化分析与计算技术

材料与结构一体化设计和制造涉及多尺度模型,多尺度算法和软件技术。近二十多年来,关于多尺度模型与算法的研究愈来愈受到关注和重视,在凝聚态物理学、力学、应用数学、材料科学等学科领域已形成多个独立的研究方向,从不同尺度和不同视角出发,建立和发展了许多理论的或半理论-半经验性的关联模式和算法。如基于 Eshelby 等效夹杂原理发展的各种细观力学模型与算法,在数学均匀化方法基础上发展的多尺度有限元算法和 HMM 方法等为复合材料与结构的性能预测和行为分析提供了重要的理论依据和实用算法。20 世纪 90 年代以来,为探讨材料与结构的蠕变、损伤和破坏机理,

描述微观裂尖区与宏观约束条件、受荷状态的关联机制,提出了量子力学、分子动力学、有限元相连接的多种模型和方法。由于不同区域采用不同的数学表述和求解方法,效率不高而且易在交界处产生误差,一个主要挑战是如何将多时间尺度与多空间尺度的模拟结合起来,真正做到“握手”区域的无缝连接,并且保持离散数值模型在不同尺度分析区域交界面上的连续性。

2.1.3 结构优化理论与方法

过去的 20 年来,以提高结构经济性、改善结构性能为目标的结构优化设计技术在理论和方法上都已取得了显著进展,并已经广泛应用于重要工程结构的设计实践中。从国际上结构优化研究的现状和发展趋势来看,不确定性结构优化设计、多学科和多目标结构优化设计、结构拓扑优化设计是目前该领域的几个研究热点。不确定性结构优化问题的提法主要包括结构可靠度优化设计和结构鲁棒性优化设计等。求解系统不确定性传播问题对于揭示不确定性优化设计中输入与输出间的复杂非线性映射关系具有重要意义,而现有研究在基于降维模型的高维概率积分或者有界参数系统的响应界限分析方面仍面临着计算手段单一、计算量庞大的关键性问题。目前,不确定性的主要数学模型是概率模型,但是完整的概率分布信息在工程实际中通常难以获得。因此,基于凸集合描述或区间描述等非概率模型下的结构优化设计问题得到了国际学术界的重视,但该领域研究仍基本停留在概念阶段,在问题建模和数值算法方面尚未有公认可行和实用的研究成果。

近年来,多学科优化的研究主要集中在优化策略方面,也出现了一些可以工程实用的解耦策略,如递阶优化、并行子空间优化、协同优化、BLISS 等。另外,基于满足不同保真度要求的代理模型建立复杂系统多学科优化模型是目前的一个研究热点。最近 10 年来所发展和完善的一些优化算法为求解实际规模的优化问题提供了新的数值工具。然而,针对优化问题的不同数学物理特征,基于逐次近似技术发展具有超常规收敛性的中大规模优化问题求解算法,仍是支撑结构与多学科优化方法工程实用化的一个重要研究方向。在多目标结构优化方面,主要有两类研究途径:基于偏好的方法和产生式方法。基于偏好的方法如线性加权法,假定事先对问题各个目标的偏好信息已知并且能够用数字化的方法清楚地表示出来,因此它主要需解决的问题就是如何根据偏好信息把向量目标标量化;产生式方法如多目标遗传算法,不需要假设各个目标的偏好信息,而是先直接求得整个 Pareto 最优解集,然后再从该解集中选取最优妥协解,目前该类方法已成为多目标结构优化的主流方法。

目前,结构拓扑优化的研究按照其基本原理可以分为退化法和进化法两大类。退化法的基本思想是在优化前将结构所有可能杆件或材料都加上,然后构造适当的优化模型,通过一定的优化方法逐步删减不必要的结构元素,直至最终得到一个最优的拓扑结构形式。该类方法包括基结构法、均匀化方法、变密度法、变厚度法等。进化法则是将适者生存的生物进化论思想引入结构拓扑优化,通过模拟适者生存、优胜劣汰的自然机理来获得最优的拓扑结构。该类方法主要有遗传算法、模拟退火法、渐进结构优化法等。拓扑结构优化技术具有广阔的应用前景和较高的研究价值,目前研究问题除了线弹性结构问题外,还涉及结构的几何和物理非线性,动力优化问题以及多物理场耦合问题。

2.1.4 计算反演技术

国外关于反演问题理论和方法的研究起步较早,最早期的工作可追溯到 20 世纪 20 年代 Hadamard 在研究线性偏微分方程的 Cauchy 问题时对反演问题不适定性的陈述和研究,60 年代苏联 Tikhonov 的工作团队推出了至今仍然广泛沿用的 Tikhonov 变分正则化方法。反演理论和方法的两个重要研究方向是迭代正则化方法和广义逆方法,广义逆方法又分为内逆法和外逆法。近年来发展起来的方法有梯度型方法和 Newton 型方法。我国的研究工作者在反演理论和方法方面也进行了大量的探索,最早可追溯至 20 世纪 80 年代中国科学院院士冯康先生倡导的反演问题研究,随后有关反演理论和方法在地球物理、波动方程等领域快速展开,特别是对反演的正则化理论进行了大量的研究和扩展,以及从最优化角度对反演理论和方法进行研究等。目前,国内外关于反演的基本理论研究仍然是以 Tikhonov 为代表的学者所创立的正则化理论为框架展开的,而且有关研究大都基于线性系统,所发展出来的相关理论和技术如方程组的高效数值求解、正则化方法等也大多是对线性问题有效。

2.1.5 实时计算技术

随着工程实际和科学研究中所考虑的问题越来越复杂,相应的计算模型的规模也越来越大。虽然计算机硬件技术的发展很快,但仍然无法满足问题规模增长的需要。因此,研究、发展先进的实时计算技术,实质性地提高大规模问题的计算效率成为 CAE 领域的一个重要研究方向。

目前,国内外越来越多的人已投入到该类方法的研究中,并已经出现了一些阶段性的理论和技术成果,而且某些技术已经进入商业应用。这些方法和成果主要包括:①变分设计方法,该方法基于有限元和泰勒展开,目前只适用于较小范围内参数变动的静力学分析;②人工神经网络法,利用神经网络强大的非线性建模能力进行实时计算,但是准确的误差估计在人工神经网络法中几乎无法进行,从而大大影响了计算结果的可靠度;③模型降阶方法,将系统的高维状态空间投影到一低维的状态空间中去,从而进行快速计算,开发既能降低系统自由度以极大提高计算效率,同时又能使降阶系统继承原系统物理属性和结构特点的降阶技术是该方法需要解决的技术难点;④缩减基法,近年来发展起来的一种实时计算方法,通过系统在样本参数空间的系列解构造出一个正交归一的减缩空间,将原大型系统投影到其中,形成一减缩系统,通过快速求解新参数下的减缩系统来降低原大型问题的计算和存储费用。缩减基法已成功应用于静力学和弹性动力学问题,目前已被扩展至非线性结构分析、流体分析、非线性稳态热分析等问题,有望成为未来复杂结构快速设计的实用化计算工具。如图 2 所示,缩减基法已被应用于微电子芯片结构热场的实时计算。

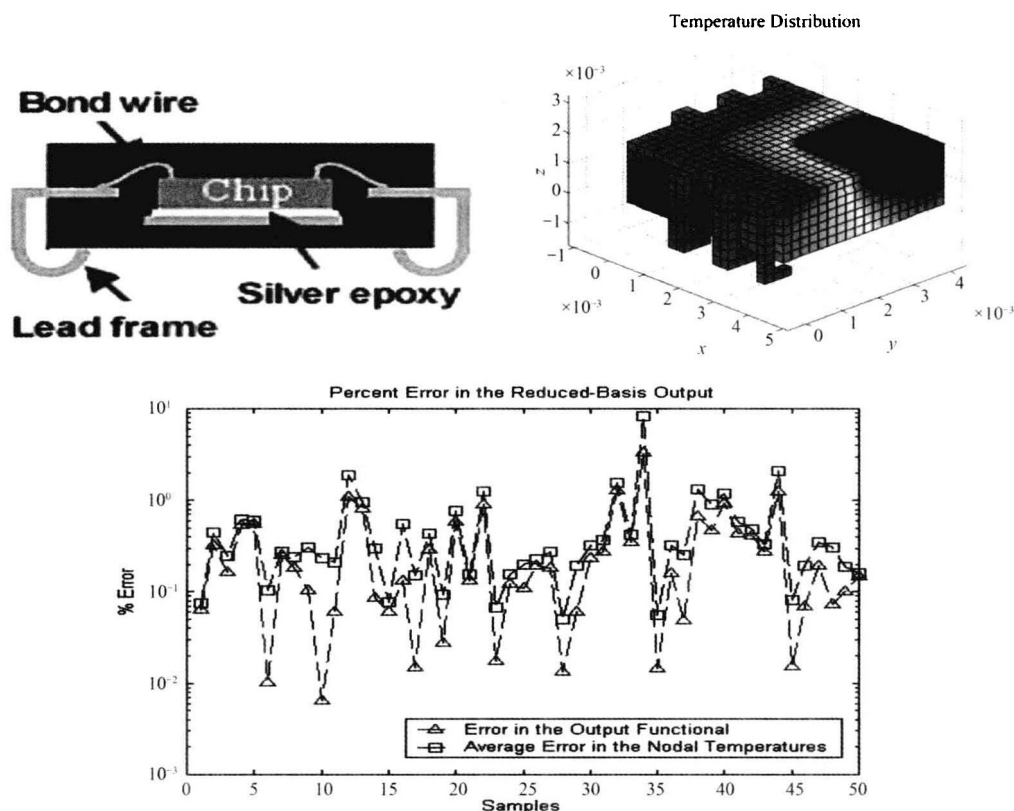


图 2 某微电子芯片结构热场的实时分析^[12]

2.2 学科未来发展趋势

基于 CAE 技术新理论与新方法研究的共性基础和应用需求,及存在的关键科学问题,按照上述 5 个研究方向总结出该领域的未来发展趋势:

2.2.1 多物理场作用下结构力学行为的建模和计算技术

复杂结构和装备的制备、运行过程通常是在高温、高压和高速等极端环境下进行的,由此为结构分析带来许多新的前沿科学问题,未来该领域的主要研究内容将包括:①高温条件下合金材料的性质演

化、蠕变损伤与断裂的宏、微观机理,高温断裂的宏、细、微观多层次耦合模型的建立,缺陷局域(如位错芯区、裂纹尖区等)与宏观约束条件和受荷状态的关联机制;②可以克服网格畸变影响的复杂结构在强冲击载荷作用下破碎、融化和汽化等行为的建模理论与高效数值方法;③高压大变形不同介质间运动界面的高效精确数值模拟方法;④大面积防-隔热结构热、力耦合行为的模型与算法研究,基于相变动力学和热力学的热弹塑性本构理论和热接触边界约束的多物理场大变形有限元计算方法,相变膨胀应力及相变塑性应力、材料性质的温度相关性、率相关性、相变塑性及相变潜热等因素相关的依赖方程的求解方法;⑤强动载荷作用下结构动力响应的多尺度模型,包括连接(焊接与粘接)结构与材料的弱边界层理论和吸附理论、动力响应及破坏预测;⑥考虑不确定性和多功能性复杂结构的非线性多场耦合分析的模型与算法;⑦高维高波数声波和高频振动问题精确计算的快速算法。

2.2.2 多尺度材料与结构的一体化分析与计算技术

材料与结构一体化分析与模拟是重大装备的自主设计、制造和运行监控的前沿研究课题,未来该领域的主要研究内容将包括:①材料宏观力学本构的微/纳米模型和非线性行为机理;②材料与结构瞬态热力耦合行为的非线性多尺度关联模型及算法;③材料微结构与宏观物性的关联机制;④考虑随机性和不确定性材料与结构力学行为的多尺度统计模型与算法;⑤基于分子动力学/有限元跨尺度连接模型的时-空多尺度计算方法的构建,并由此探索材料与结构的蠕变、损伤和破坏机理;⑥基于非线性动力学手段发展材料与结构一体化性能评价方法、多尺度关联模型与算法。

2.2.3 结构优化理论与方法

考虑不确定性和多功能的结构与多学科优化设计将是未来结构优化领域的一个研究重点,主要研究内容将包括:①不确定性度量与传播理论、结构可靠性与鲁棒性(或称稳健性)优化理论和方法;②多物理场耦合条件下考虑多学科功能的材料与结构创新构型优化设计问题的建模和算法;③多学科优化中满足不同保真度要求的代理模型和空间映射的构造方法;④基于非概率模型的不确定性度量、传播及优化设计理论与算法;⑤考虑连接和接触的运载结构力学行为与性能的多目标优化方法。

面向 CAD 的结构尺寸、形状、拓扑联合优化的理论与方法将是该领域另一重要研究方向,主要研究内容将包括:①针对特定的 CAD 造型系统拓扑操作的解析化方法;②基于给定特征(给定结构内孔的大小、位置、多少、形状等)的结构优化算法;③以产品设计中的代表性问题为对象,研究相应拓扑导数(包括开孔以及增加构件等拓扑变化)的构造;④针对 CAD 造型系统的具体特点,研究基于欧拉描述固定网格的结构形状优化算法以及相应的灵敏度分析技术;⑤发展具有严格数学基础的尺寸、形状以及拓扑联合优化的最优性必要条件。

2.2.4 计算反演技术

在计算反演领域,多宗量反演技术、高性能反演求解器技术及非线性反演正则化技术将是未来的主要研究重点。多宗量反演技术方面的主要研究内容将包括:精度与效率兼顾,适合于多宗量反演求解的正演建模技术;多宗量情形下测量信息(位置/多少)、迭代初值的选取以及信息“噪声”对反演结果的影响;稳定、收敛性好并具有足够抗噪能力的多宗量反演方法;研究在使用敏度类算法求解多宗量反演问题时,如何降低或克服目标函数对各宗量敏度差异对反演造成的不便;研究相应的实验验证技术。高性能反演求解器技术方面的主要研究内容将包括:开发及改进收敛性好的、具全局优化性的快速高效优化算法;研究适合于高维复杂结构的近似模型技术,并基于模型管理工具开发自适应的高效反演求解器;研究正问题的实时计算技术,包括高维空间向低维空间的映射、基空间的构造及误差的估计和控制等,并开发相应的实时反演求解技术。非线性反演正则化技术方面的主要研究内容将包括:根据问题的不确定性、非敏感性和稳定性,研究复杂结构反问题过程中的病态性分类技术及误差传播技术;研究基于 Tikhonov 泛函的非线性反演的极值化处理和正则化参数选择技术;研究基于非线性最优化方法的反演正则化技术;研究适合于大规模复杂非线性结构的高效正则化技术。

2.2.5 实时计算技术

实时计算中最关键和核心的问题是提高计算速度和获得精确的误差估计,并且将相关技术扩展至非线性分析,这样,产品快速设计、优化设计和反演等才能有效地对复杂系统展开。未来该领域的主要

研究内容将包括:①研究实时计算过程中误差的来源和传播,并开发相应的误差精确估计和控制方法;②在线性系统实时算法的基础上结合相应的数值模拟方法深入研究非线性系统,开发能真正解决复杂结构和系统的实时计算方法;③对实际工业产品设计进行实时计算仿真分析,对其分析结果进行实时误差分析,并实时给出准确的误差上下限;④将实时计算方法与优化方法和反演技术相结合实现实际工业产品的最优设计和制造。

2.3 湖南大学在该领域的发展状况

湖南大学在接触碰撞问题仿真实理论、非均质结构中弹性波动数值算法、结构优化、计算反演等方面已取得了一批较有影响的科研成果,形成了一些较有特色的理论和算法体系,在国内外同行中享有较大的知名度。

2.3.1 接触碰撞问题的仿真实理论和方法体系

通过对接触碰撞问题物理学本质的深入探索和计算理论与方法研究,提出了系统、完整的接触碰撞过程仿真实理论与方法,解决了一系列国际性难题,为汽车碰撞安全技术和冲压成型技术的创新提供了扎实的理论基础;提出了接触搜寻级域理论与方法,实现了大规模多体复杂接触体系的自动定义和接触面自动搜寻,其基本思想成为国际同行从事相关研究的工具;提出了接触力计算的防御节点法,在国际上率先突破显式算法中不能应用拉格朗日乘子法的禁区,不仅消除了传统罚函数法引起的计算误差,还在不增加计算量的同时,具备不影响仿真稳定性的优越性能;提出了薄壳接触体系壳体大变形计算的交叉降阶积分法,既克服了常规积分法计算工作量大和引起剪切锁死的缺点,又避免了全阶降积分法导致的零能量变形模式;提出了能方便处理接触碰撞过程中大变形畸变的无网格计算格式,包括稳定可靠的基于“应力点”的积分方法、三维问题的低阶积分格式、改进的一体化接触搜寻法、接触力计算的质点质量因子法以及节点的自适应加密方法等,在国际上较早实现了三维复杂体积成形过程的无网格仿真,如图3所示;在国内较早开展了超大规模接触碰撞系统并行计算方法研究,提出了初始化分区的优化多层次谱二分法和顶点平衡策略。

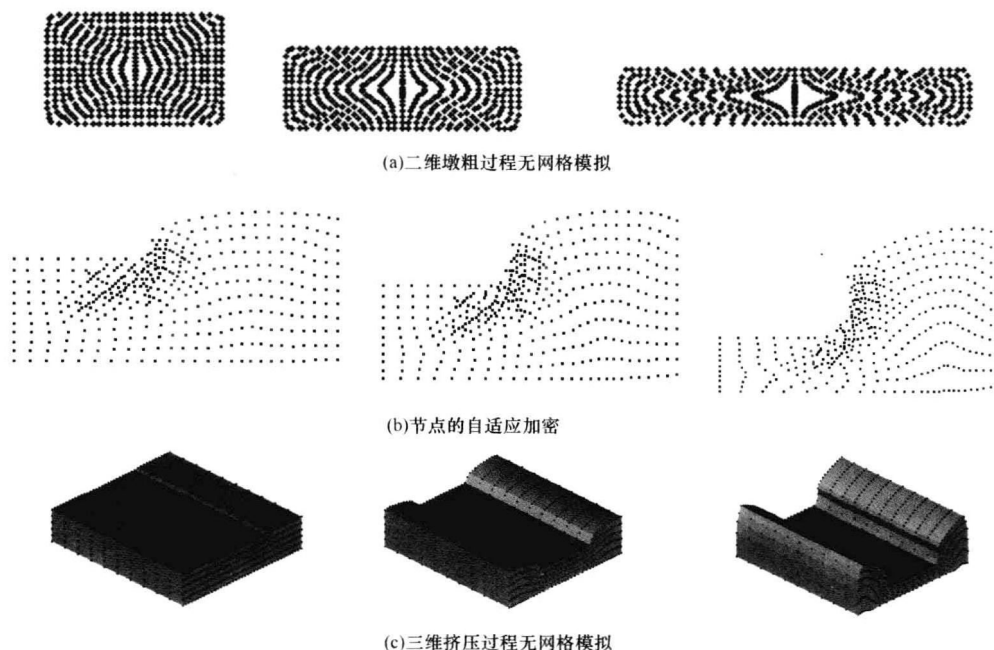


图3 二维和三维接触问题的非线性无网格分析系统^[18]

2.3.2 非均质各项异性介质结构中弹性波动理论和算法

提出了线性非均质单元和非均质二次元用于解决连续变化的非均匀材料特性;从三维弹性理论出发提出了二维和三维的功能梯度板、三维功能梯度壳的瞬态波混合数值法,具有很高的计算效率和精度,如图4所示为应用该方法进行功能梯度材料板的瞬态波动分析;完善了奇异积分技术用于点载荷

下层合板复合材料和功能梯度材料的弹性波动问题,该技术对高扰动被积函数的积分问题有很高的计算效率和精度;采用六波面的概念来研究并解释功能梯度结构的复杂波场,并分析了功能梯度板的波动特性;首次提出了一种数值方法来分析功能梯度圆柱壳的波动特性;提出了数值分析方法用于分析功能梯度压电板、壳的波动特性,解决了板、壳结构中机械和电的耦合波动问题;开发了复合材料层合和功能梯度材料结构的瞬态响应分析软件包和复合材料层合结构的波动特性分析软件包。

2.3.3 计算反演技术理论与算法

湖南大学一直追踪该领域的国际前沿研究和热点,以车身设计和制造中的反演问题为研究对象,着重实用化计算反演技术理论与算法的开发,形成了一套较为完整和较具特色的计算反演技术理论与方法体系。结合工程实际问题,系统性地归纳出解决反演问题的一般方法。对基于离散求解的正则化方法进行了系统的研究并提出了具体的实施方法,由于大多数的工程问题求解采用离散(有限元、边界元、线条元等)的方法,因此该正则化方法对解决工程反演问题非常有效。提出了各类改进的遗传算法,如:微型遗传算法,避免过早收敛和比普通遗传算法更好的寻优性能;实参数遗传算法,计算加快的同时提高了稳定性;隔代映射遗传算法,提高了收敛性和效率。提出了常规优化技术与遗传算法结合的混合优化算法,结合了常规优化技术的高收敛性和遗传算法的全局寻优性能,非常适合复杂工程实际问题的求解。如图 4 所示,相关反求理论与方法已被应用于车身分析和制造的实际问题中。

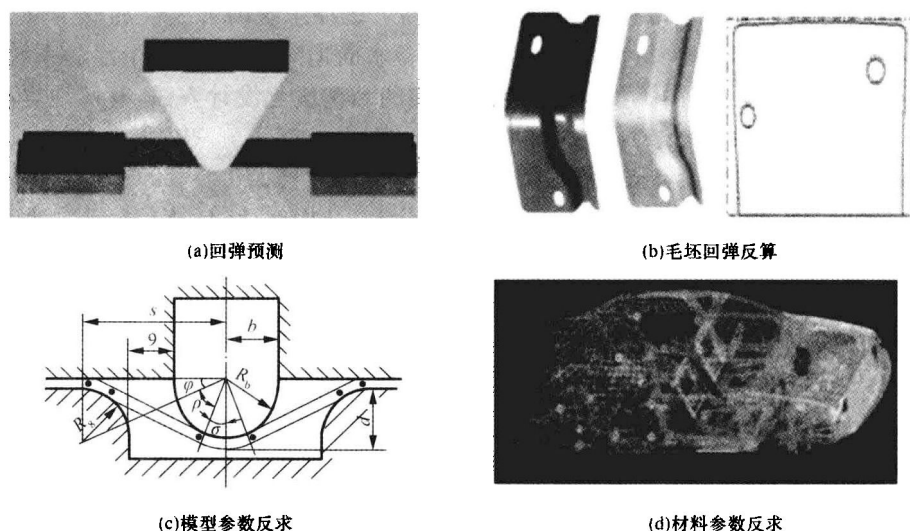


图 4 车身分析和制造过程中的若干反演问题应用^[19,23]

2.3.4 先进结构优化设计技术

对多目标结构优化和不确定性结构优化问题进行了系统研究,开发了多种高效算法;针对复杂多目标设计中解集分布较差的问题,提出了一种新的微型多目标遗传算法,成功地提高了复杂结构多目标优化设计中解的分布均匀性,保证了设计精度,如图 5 所示为将该方法应用于冲压模具变压边力的设计;提出了并行化的微型多目标遗传算法,解决了多目标优化在求解复杂结构问题时出现的大规模计算问题,保证了复杂装备多目标优化的设计效率;针对复杂结构和系统中不确定性难以度量的问题,提出了两种非线性区间结构优化的数学转换模型,保证了复杂结构设计中不确定性度量的方便性和经济性;提出了基于序列线性规划和基于局部加密近似模型技术的两种高效区间不确定性结构优化算法,有效解决了复杂结构设计过程中由多层嵌套优化造成的大规模计算问题,实现了高效的可靠性最优设计。

2.3.5 特种装备毁伤与防护的计算分析与设计技术

以穿透问题的模拟仿真为目的,对无网格光滑粒子法以及相关的无网格技术进行了系统研究,提出了多种改进的无网格法、SPH 法、无网格与有限元结合方法等;开展了穿甲和反穿甲的理论研究、数值模拟和工程应用,建立了穿甲与反穿甲的设计与实验技术,包括基于无网格方法的穿甲模拟仿真软

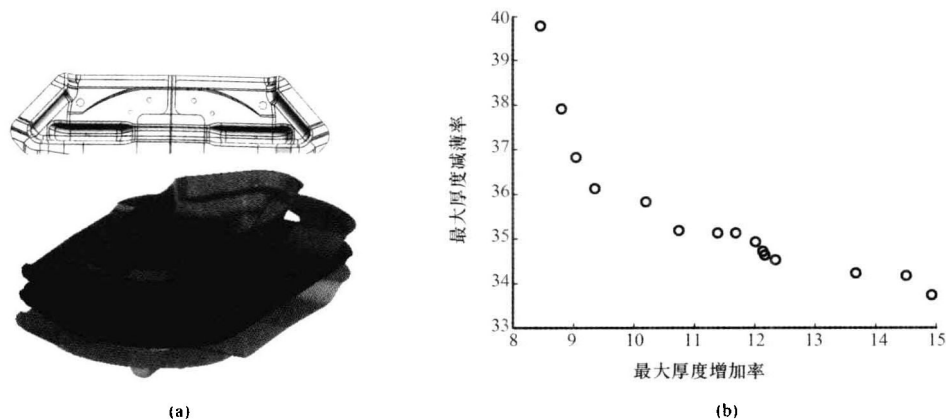


图5 冲压模具变压边力的多目标优化设计^[23]

件、关键材料与结构的大型数据库等。提出了特种装备着陆缓冲系统和乘员防护系统的计算分析与设计技术;针对载人特种装备着陆过程的极端工况和全方位的乘员防护要求,创新性地提出了人体气囊座椅及相应的计算分析技术;针对特种装备空投问题,提出了基于缓冲气囊的防护分析技术,及相应的气囊结构优化技术,有效地降低了特种装备的过载,提高了缓冲系统的可靠性和稳定性。提出了特种装备应急浮囊系统的建模与计算分析技术;针对特种装备水面迫降问题,提出了浮囊系统高精度的固、液、气三态多场耦合建模方法;提出了重型特种装备浮囊的结构优化设计方法,有效地提高了浮囊的综合性能。

2.4 湖南大学本领域研究的主要特点、优势及差距

经过多年的建设与积累,湖南大学在计算力学数值仿真、结构优化、计算反演等方面已取得了一批较有影响的研究成果,如接触碰撞理论与算法、新型壳单元技术、非均质各项异性结构弹性波动算法、高效结构优化与反演技术等,在国内外同行中享有较大的知名度。近年来,又在特种装备的毁伤与防护方面进行了深入研究,奠定了较好的研究基础,并且承担了一批较有影响力的军工科研项目,有望成为湖南大学在CAE领域的未来学术增长点。然而,应该看到的是,目前湖南大学在该领域的研究成果和基础与国家需求和学科发展相比仍然存在一定差距,主要表现在:①尽管部分研究方向享有一定的国际声誉,但确立整体学科的国际地位尚需努力;②本学科已经取得一批高水平的研究成果,在现代数值计算方法方面取得了一定的突破,然而相关理论成果仍然未有效转换为商业化的软件产品;③本学科通过人才引进和培养,建成一支知识结构合理、具有国内国际影响的年轻学科队伍,但整体队伍仍然较小,需要进一步引进和培养优秀人才;④本学科虽然有一些新方向崭露头角,但是仍需进一步扩展和完善,从学科层面提高整体实力。

3 湖南大学本领域科技发展的展望与面对的问题

3.1 湖南大学本领域未来的重要发展方向

针对当前CAE领域的关键科学问题及未来制造业的实际需求,同时结合湖南大学在CAE领域的研究基础和相关学科发展要求,拟将以下三个方面作为未来湖南大学在该领域的重要发展方向。

3.1.1 复杂装备设计、制造的先进模拟技术

当前,有限元法是计算机数值模拟仿真的主要方法,但它在模拟大规模、极端环境下的复杂装备和结构的设计、制造问题时,在效率、精度及收敛性等方面存在严重的缺陷和困难。因此,针对复杂装备和结构在设计、制造和运行过程中的关键科学问题和技术难点,研究和开发更为高效和可靠的数值模拟技术,将是湖南大学掌握CAE核心技术并占领未来学科制高点的重要手段。具体研究内容将包括:针对极端环境下复杂装备设计和制造工艺的模拟问题建立新型高效实用的数值分析方法及其对几何非线性、材料非线性和边界条件非线性问题的数值求解格式;将所建立的新型无网格技术引入有限元法中,建立有限元法和无网格法的统一理论框架,为现行有限元法在极端环境下复杂装备设计和制造

工艺的模拟方面提供关键技术的补充和升级;研究基于 GPU 或缩减基的有限元快速计算方法,及在板料冲压和汽车碰撞安全性设计中的应用技术;研究各种新方法的并行计算技术;研究新一代的集成化 CAE 软件平台的开发技术。

3.1.2 计算反演和结构优化设计技术

主要开展多学科多目标优化、计算反演理论与方法、不确定性优化和可靠性设计等方面的研究。多学科多目标是未来优化问题的一个基本特征,需研究多学科和多目标耦合模型的解耦优化策略;同时,在现有算法基础上,进行基于模糊逻辑的多目标遗传算法和多目标遗传算法并行技术的研究,形成具有快速求解能力的优化设计成套技术。不确定结构优化和可靠性设计方面的主要研究内容包括:多源不确定性建模理论与不确定性传播数值算法;大规模复杂结构的不确定性优化设计理论与方法;多层嵌套优化的高效求解策略;非概率不确定度量模型下的可靠性指标定义等。计算反演理论和方法方面将着重解决以下几个关键技术问题:反问题的正确建模,及解决病态问题的正则化方法;快速有效并且保证全局优化性能的反求技术;反分析实验装置的建立;反演理论和方法在重大装备和结构关键参数识别中的实际应用技术等。

3.1.3 特种装备结构毁伤与服役过程安全性的数值仿真技术

主要针对特种装备毁伤与服役安全性的两个代表性问题进行研究,一是含有含能材料(如炸药)的特种装备结构的服役过程的力学分析;二是在爆炸冲击载荷作用下的装备结构力学分析。由于这两类问题的研究国际上发达国家均予以高度重视,并将成果作为机密而加以保护,故其对国家装备结构的研制有着特殊的意义,同时对于湖南大学掌握尖端国防技术并参与国家大型国防项目具有重要作用。主要研究内容包括:①高冲击过载环境下缓冲装备组合结构中的缓冲材料(如泡沫塑料、木材、金属泡沫等)的静、动态力学性能与本构关系研究;②机械撞击载荷作用下含有含能材料的结构安全性分析理论与方法;③强动载荷作用下结构毁伤过程中的多介质界面相互作用机理及强间断处理方法;④强动载荷作用下流体与结构相互作用的时间多尺度模型和计算方法;⑤侵彻爆炸过程的高效模拟方法;⑥特种装备结构毁伤与服役过程安全性模型中关键力学参数的精确识别技术等。

3.2 未来 5~10 年将面临的重要科学技术问题

3.2.1 复杂装备设计、制造与运行控制问题

有限元法是目前求解科学和工程问题的有效方法,成功地解决了一大批复杂工程问题。但有限元法在模拟极端环境下的复杂装备设计和制造问题时存在严重的缺陷和困难。无网格法是近年来兴起的一种新的求解微分方程的数值方法。不同于有限元法,无网格法利用一系列均匀或非均匀分布在求解区域中的离散点直接构造试函数,而不需要借助于网格,从而避免了有限元法受网格畸变影响的缺点,同时也避免了由重分网格和不同网格间相互映射而引入的计算量和误差。无网格法在具有多尺度、多物理场耦合的先进制造技术模拟分析中有望发挥重要作用。因此,无网格法与有限元法结合将有望成为极端环境下复杂装备设计和制造的有效模拟方法。特别是在特种装备的结构毁伤分析中,这类结合方法将发挥更为重要的作用。

3.2.2 产品的反演设计和最优优化设计问题

面向国家重大需求的自主创新产品设计,与结构优化关系十分密切。为了实现基于先进制造的创新产品设计,仅仅考虑单一系统力学性质的简单优化是远远不够的,必须进行同时考虑多目标、多物理场、不确定性的复杂系统综合优化,才能有所突破。随着制造业观念的改变,国际制造业的生产特征也正在转变,一方面由原来的单一产品、大批量、长周期生产逐步转向个性产品、小批量、短周期生产,另一方面由原来相对简单的产品生产逐步转向越来越复杂的产品生产,产品设计的复杂性在迅速地膨胀。为了适应国际制造业的这些转变,发展适合大规模、复杂系统的高效反演技术已经是国际制造业向我们提出的迫在眉睫的问题。到目前为止,反演方法已广泛应用于地球物理,材料科学,医学,航空航天航海工程,土木工程,水利工程,水资源及水环境研究等一系列自然科学和工程技术中,并在解决实际问题中获得了丰硕的成果。但是传统反演技术庞大的计算量制约了它在大型复杂工程与系统中的应用。另外,同样由于计算量的因素,现有的反演技术能够处理的参数个数也十分有限,更不用说系统与