

第十一届全国现代数学和力学学术会议

2009年7月23日-25日 兰州

现代数学和力学

(MMM-XI)

主编 李世荣 马连生



兰州大学出版社

03-53
2
:2

第十一届全国现代数学和力学学术会议

2009年7月23日-25日 兰州

03-53/2

:2

2009

现代数学和力学

(MMM-XI)

主编 李世荣 马连生



兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代数学和力学(MMM - XI):第十一届全国现代数学和力学学术会议文集 / 李世荣,马连生主编. —兰州:兰州大学出版社,2009.7

ISBN 978-7-311-03367-5

I. 现… II. ①李…②马… III. ①数学—学术会议—文集②力学—学术会议—文集 IV. 01-53 03-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 117902 号

责任编辑 魏春玲

封面设计 张友乾

书 名 现代数学和力学(MMM - XI)

作 者 李世荣 马连生 主编

出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路 222 号 730000)

电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)

网 址 <http://www.onbook.com.cn>

电子信箱 press@onbook.com.cn

印 刷 兰州德辉印刷有限责任公司

开 本 880×1230 1/16

印 张 6.5

字 数 175 千

版 次 2009 年 7 月第 1 版

印 次 2009 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-311-03367-5

定 价 20.00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

第十一届全国现代数学和力学学术会议

学术委员会

主 任 周哲玮

副主任 何国威 郑泉水 何陵辉 缪国平

委 员	黄筑平	程昌钧	郭兴明	余振苏	张洪武	李存标
	树学锋	符 松	张若京	王铁军	王 彪	宁建国
	周又和	霍永忠	彭向和	张 伟	罗纪生	鞠 扬
	唐少强	陈少华	魏德敏	杨 骁	刘 桦	胡元太

秘 书 张俊乾

第十一届全国现代数学和力学学术会议

组织委员会

主 任 邱 平

副主任 周又和 夏天东 李世荣

委 员 毛开富 王省哲 马连生 宋 曦 赵永刚

秘 书 何天虎 张靖华

内容简介

本书是中国力学学会理性力学和力学中的数学方法专业委员会的系列会议——第十一届全国现代数学和力学学术会议(MMM-XI)的论文摘要集。共收录了近代力学和力学中的数学方法等研究领域的论文摘要 91 篇,其中大会报告和邀请报告 13 篇,固体力学类文章 37 篇,一般力学类文章 14 篇,流体力学类文章 9 篇,其它文章 18 篇。内容涉及理论与应用力学以及力学中的数学方法等领域的若干前沿问题。例如,多场耦合;流-固耦合;微重力流动;多尺度和跨尺度问题;微结构线性和非线性分析;新型复合材料力学、计算力学、试验力学等。针对这些复杂的挑战性问题,探索了一系列的新方法和原方法的新发展,例如, LBM 方法;微分求积法;虚拟边界法;反问题解法等。会议论文还针对一些亟待解决的实际问题,探索了新的求解途径,如, MEMS; 智能材料分析; 晶体材料分析; 沙尘暴; 传染病传播; 肿瘤诊治; DNA 分析; 神经动力学; 地震预测; 防爆抗爆; 桩基分析; 煤层顶板分析; 边界层控制; 高超声速飞行; 随机振动等。

本摘要集大致反映了我国力学和力学中的数学方法研究的近况和水平,是相关学科的研究者了解我国在该领域的最新进展必读的重要资料。

关于每篇摘要涉及的详细内容可以通过所提供的电子邮件和通讯地址向作者索取。

本书读者范围:理工科大学生、研究生、教师、科研工作者和技术人员。

第十一届全国现代数学和力学学术会议 (MMM-XI)文集序言

兰州是我国理性力学和力学中的数学方法专业委员会的发祥地。1978年8月,钱伟长院士在兰州大学主持举办了理性力学讲习班。那时,他审时度势,认为有必要加强现代数学与现代力学的互动和促进,推动理性力学和应用数学的发展,发起成立理性力学和力学中的数学方法专业组,翌年,中国力学学会批准成立该专业组(后来扩展为专业委员会),钱先生亲任组长,专业组成员共13人。此后,专业组分别在上海、合肥、无锡、武汉举办了四次全国性学术会议(主题分别为奇异摄动、非线性波、非线性力学和分叉突变混沌与稳定性)。1985年,专业委员会决定召开系列性会议——现代数学和力学学术会议(即MMM会议),1986年7月,郭仲衡教授在北大主持召开了MMM-I会议,以后各届会议分别在上海、庐山、兰州、徐州、苏州、上海、广州、上海、太原举行。

钱伟长先生认为没有数学理论和方法的支持,力学不可能得以发展;同时数学的发展依赖于力学和物理学。因此,他认为MMM会议的目的在于促进现代力学与数学的相互结合,相互渗透,推动我国力学和数学向更深层次发展。同时也希望通过MMM会议引进国际的先进理论和方法,为培养我国一批新人创造良好条件。前十届MMM会议成功地实现了钱先生的设想,总共交流了1122篇学术论文,其中有148篇大会报告,与会者约为1350人次。MMM会议取得了巨大成功,在我国力学界产生了重大影响,被公认为学术思想有特色,科学水平上档次,探讨领域最广泛的学术会议。

第十一届全国现代数学和力学学术会议在兰州召开有着特殊意义。借着会议的契机,我们可以在这个发祥地庆祝专业委员会诞生三十周年,共同回顾它从无到有、逐渐成长的过程。尽管它的创始人钱伟长先生由于年事已高,不克莅临会场,我们可以告慰于他老人家的是:他播下的种子已在全国遍地开花,专业委员会的人数已从当初的13人增至35人;MMM会议已有一个固定的热诚的拥趸;它在现代数学与现代力学之间搭起了真正的桥梁。

本届会议保持了历届会议的基本特色,用流行的词汇来说,做到了“顶天立地”,亦即:演绎发展最先进、最前沿的理论,保持先进的学术水平;在最迫切需要的经济建设领域,探索有效的解决途径。

会议的论文中,顺应现代力学的发展潮流,抓住一系列有挑战性的理论问题,例如,多场耦合(如力—热—电—磁场耦合);流—固耦合;多尺度和跨尺度耦合;微结构分析;微流动;新型复合材料力学等等,提出了有效的理论分析和数值分析方法。针对这些复杂的新问题,探索了一系列新方法和原方法的新发展,例如,LBM方法;微分求积法;虚拟边界法;反问题解法等等,都有可圈可点之处。与此同时,会议论文还针对一些亟待解决的实际问题,探索了新的求解途径,其中涉及范围之广,在单一的中小型学术会议里较为少见。例如,MEMS;智能材料分析;晶体材料分析;沙尘暴;传染病传播;肿瘤诊治;DNA分析;神经动力学;地震预测;防爆抗爆;桩基分析;煤层顶板分析;边界层控制;高超声速飞行;随机振动;如此等等,不一而足。在这本薄薄的摘要文集里,可以传递给你大量信息。

这些学术研究成果多半是前两年取得的,却凝聚了应用数学和力学工作者多年辛勤

劳动的心血。在当今的商品经济大潮里, 能维持这样一支基础研究队伍实属不易。他们淡泊名利, 安贫乐道, 潜心钻研, 攻克了一个个难关。可以说, 他们继承了我国老一辈力学家的优秀学术传统, 是推动力学基础研究的中坚力量。

兰州理工大学和兰州大学出版社为出版本文集付出了辛勤劳动, 谨此志谢。

戴世强

2009-7-6

目 录

邀请报告

微重力流体力学	胡文瑞 1
非线性随机动力学与控制的哈密顿理论体系	朱位秋 2
Small is beautiful, and dry	Quanshui Zheng, Cunjin Lv 3
风成沙丘场模拟的尺度耦合法	郑晓静 4
微尺度力学与有限元方法	魏悦广 5
微分求积法及其在固体力学应用中的若干新进展	程昌钧 6
热力学第一定律与物理变分理论	匡震邦 7
Where is the rudder of a fish? ——The mechanism of swimming and control of self-propelled fish school	Chui-Jie WU, Liang WANG 8
镁合金裂纹顶端塑性变形和失效机理的分子动力学模拟	曾祥国, 许书生 9
颗粒增强复合材料有效性质分析的自洽和 Mori-Tanaka 混合方法	彭向和, 胡宁 10
三维介观高分子网络的变形与损伤机制	王铁军, 金英俊 11
多场耦合非线性断裂模型及解	赵明峰, 范翠英 12
新型材梁板结构的热弹性稳定性和振动响应	李世荣, 郁汶山 13

固体力学

考虑界面热阻效应的夹杂复合材料的微尺度热传导	冯蕾蕾, 高原文 14
微态电弹性固体的广义变分原理	杨新华, 操卫忠 15
压电体中孔边多裂纹的反平面问题	郭俊宏, 卢子兴 16
具有一般属性的功能梯度材料(非均匀材料)断裂力学模型研究	果立成, 于红军 17
梯度材料的黏附接触解析解	陈少华 18
热超弹性材料中的空穴塌陷问题	任九生 19
非保守集中力作用下饱和多孔悬臂梁的非线性弯曲	杨晓, 周冬华 20
陶瓷及碳纤维增强泡沫铝夹芯梁抗爆性能	康建功, 石少卿 21
声子晶体材料在低频噪声阻隔中的应用	宿星亮, 高原文 22
DNA-微悬臂梁的纳米力学分析	李晶晶, 谭邹卿 23
热局部非平衡下饱和多孔弹性柱体的热一流一固耦合分析	杨洋, 何录武 24
功能梯度磁电梁在任意载荷作用下的解析解	黄德进, 丁皓江 25
玻璃钢/复合材料管落锤冲击的理论分析	周祝林, 叶进峰 26
轴对称横观各向同性热弹性圆柱的精化理论	赵宝生, 高阳 27
一维正方准晶椭圆孔口平面弹性问题的解析解	于静, 刘官厅 28
一维六方准晶中带三条不对称裂纹的圆形孔口问题的解析解	杨丽星, 刘官厅 29

再论梁的非线性力学行为	马连生, 徐刚年	30
部分边界受力情形下带裂纹的圆形孔口问题的解析研究	赵新平, 刘官厅	31
聚合物物理老化热动力学模型	贺耀龙, 胡宏玖	32
双相介质界面附近衬砌与裂纹对 SH 波的散射与动应力集中	杨在林, 许美娟	33
初始后屈曲理论在浅埋煤层顶板稳定性分析中的应用	杨治林	34
电子焊点的粘塑性热损伤本构模型与演化方程	黄再兴	35
H 型钢柱压弯弹塑性失稳分析	钮鹏, 杨刚	36
利用修正的 Born 近似法对非均匀介质中缺陷脉冲回波响应的预测	郑钢丰, 吴斌	37
层合复合材料开孔圆柱壳中的热-机应力分析	邵珠山, 于澍	38
电话性聚合物薄膜的大变形分析	陈程, 何天虎	39
弹簧-介电弹性体薄膜系统的大变形分析	崔磊磊, 何天虎	40
直接有限元法求解广义磁热弹耦合二维问题	关明智, 何天虎	41
功能梯度材料截顶圆锥壳在冲击载荷作用下的动力屈曲	张靖华	42
一维六方准晶中螺形位错与楔形裂纹的相互作用	李联和, 刘官厅	43
Size-dependent elastic fields of semi-infinite body with a nanosized spheroidal cavity under biaxial loading at infinity .. Z.Y.Ou, G.F.Wang		
均匀嵌入 SMA 丝复合材料简支梁的固有频率特性	滕兆春, 付小华	45
悬臂梁在轴向随动均布载荷作用下的过屈曲	李清禄, 李世荣	46
点间隙约束下弹性梁的过屈曲问题	郭锐, 李世荣	47
有限差分求解非均匀梁在轴向力作用下的自由振动	张立达, 李世荣	48
基于物理中面 FGM 梁的非线性分析	马连生, 牛牧华	49
孔内气体压力对闭孔多孔材料弹塑性性能的影响: 二阶矩估计理论 ..	张伟旭, 王铁军	50
流体力学		
超声速来流与喷流干扰数值模拟	王振清, 吕红庆	51
周期性壁面吹吸扰动在湍流边界层内的演化	郝刚立, 姜楠	52
各向同性湍流中的多尺度作用与能量级串过程	冉政	53
机室密闭时土工离心机的风阻功率	尹益辉, 余绍蓉	54
具有病人特异性的脑动脉瘤的血流动力学的数值模拟研究	王盛章, 陈家亮	55
润湿性梯度驱动液滴运动的 LBM 模拟	胡国辉, 石自媛	56
内置障碍物的方腔驱动流的数值模拟	曹洪建, 查晶晶	57
用多重网格虚拟边界法数值模拟三维多圆柱立管涡激运动	万德成	58
高温高超声速边界层流动转捩问题研究	曹伟	59
一般力学		
铺层方向对复合材料层合板热颤振特性的影响	杨青, 夏巍	60
时滞神经元系统的反馈控制研究	靳伍银, 冯瑞成	61
指数多项式闭合法分析在泊松白噪声激励下的非线性随机动力系统 ..	朱海涛, 鄂国康	62

单元刚度矩阵分解法求解随机平面框架问题的效率分析	鄂国康, 蓝双文	63
GaN 量子点压电性能的分子力学模拟	徐凯宇, 唐珺	64
脉冲磁场下导电圆板的耦合振动分析	徐榜, 高原文	65
角铺设的复合材料层合板的动力学分析	郭翔鹰, 张伟	66
非线性孔隙热弹性梁的变分原理和动力学行为	李莹, 程昌钧	67
四维非线性动力系统的 Bogdanov-Takens 规范形的计算	陈淑萍, 张伟	68
轴向流中两端支承圆柱体的动态特性分析	金基铎, 秦朝红	69
饱和土中端承桩的动力学特性分析	朱媛媛, 胡育佳	70
超临界轴向运动梁耦合平面静平衡分岔	丁虎, 陈立群	71
具有脉冲和时滞微分方程的全局指数稳定性	周进, 吴泉军	72
Comments on the Hamiltonian geometrical criterion for chaos	Xin Wu	73

其它相关领域

多裂纹应力强度因子的本征 COD 边界积分方程解法	马杭, 郭钊	74
修正 Szabo 模型与空间分数阶导数的耗散声波方程的比较分析	陈文, 张晓棣	75
具张弛项的圣维南方程组整体解	刘法贵, 聂大勇	76
二维准晶的两种不同平面弹性的复变方法研究	刘官厅, 杨丽星	77
基于神经网络的随机刚架结构热参数辨识	徐健, 陈建军	78
基于 Carleman 估计的非定常传输方程源项的辨识	马晨明	79
全方位多信息动态综合优化随机模拟是未来随机模拟的可持续发展方向	肖彼南	80
关于兰州城市大气环境数值模拟研究中存在问题的探讨	王恩涌, 陈翔	81
工程设计中多因素的数学表达式评论	周祝林, 周新宇	82
科学地震预报的数理方程	周祝林, 吴妙生	83
单元刚度矩阵分解法分析随机平面应力问题	鄂国康, 汪明昌	84
高压电缆终端橡胶应力锥应变能函数的实验分析	马永其, 鲁中亚	85
一种耦合的有限元—无网格方法	柳军, 严波	86
二阶矩随机 Cauchy 型积分的 Plemelj 公式	林峰	87
BA 网络上的混合传染病动力学	吴庆初, 傅新楚	88
多尺度计算数值界面条件的设计与分析	唐少强	89
混纺材料中传热传质的数值模拟	杨静, 朱庆勇	90
一类急性乙肝病毒感染数学模型	张双德, 谢奇之	91

微重力流体力学

胡文瑞^{1, 2}

1 中国科学院力学研究所, 北京 100190

2 兰州理工大学能源与动力学院, 兰州 730050

微重力流体物理是微重力科学的重要领域, 它是微重力应用和工程的基础, 人类空间探索过程中的许多难题的解决需要借助于流体物理的研究。微重力流体物理大体上可分为三个主要部分, 即微重力环境中简单流体的对流和扩散、多相流、和复杂流体运动。

具有液/气或液/液界面的流体体系普遍地存在于自然科学和工程应用中, 研究热毛细对流的规律, 对于空间材料加工、生物技术、燃烧等过程中热毛细对流控制都有重要意义, 并对地面电子装置的热控制, 食品加工过程, 化学工程微电子机械系统(MEMS), 薄膜等小尺度的流动问题也有指导作用。微重力环境中流体的晃动、流体的运动与固体结构的相互耦合是航天工程中经常遇到的问题。对微重力环境中简单流体的传热和传质过程, 人们主要研究毛细系统中临界现象和浸润现象, 热毛细对流的转换过程和振荡机理, 液滴热毛细迁移和相互作用规律等方面。流体管理研究也是微重力工程中的重要课题。

微重力气/液两相流动与传热研究的主要对象包括两相流动的流型、沸腾与冷凝传热、混合与分离等现象, 对我国载人航天技术(如航天器热与流体管理系统、空间站与深空探测器等大型航天器动力系统、载人航天器环控生保系统以及空间材料制备与空间生物技术实验等)的发展有直接的应用价值。在微重力环境中, 重力作用被极大地抑制甚至完全消除, 更能凸显气、液、固相间的传递机制, 便于更深刻地揭示其流动与传热机理。借助于微重力气液两相流动与传热的深入研究, 对我国实现能源战略需求和地面常重力环境中的石油、化工、制造等相关技术开发与应用也有重要指导意义。

复杂流体是一种分散体系, 它指的是具有一种或几种分散相的物质体系, 也有人称之为软物质。在重力条件下, 复杂流体的许多行为会受对流、沉降、分层等干扰, 而微重力条件则有助于研究在地面上被重力作用所掩盖的过程, 特别是分子间的相互作用力。微重力复杂流体研究包括: 胶体的聚集和相变研究; 悬浮液和乳状液的稳定性研究; 复杂等离子体的结晶研究; 气溶胶的稳定性和聚集行为研究; 对颗粒体系本征运动行为的研究; 临界点现象的研究; 以及材料制备、石油开采和生物流体的相关问题研究。随着人类深空探测活动的展开, 对不同重力场中分散体系物质的操作与运输的要求, 以及对其运动规律认知的需求十分迫切。空间科学实验不仅能够使我们获得新的科学知识, 而且其科学成果对于地面材料及器件制备工艺的创新具有重要指导意义。对复杂流动现象的研究在材料设计中起到了切实的作用, 如对复杂流体自组织现象的研究成果已经应用于纳米结构材料和器件的研制。近年来, 复杂流体(软物质)的力学和物理学, 接触角、接触线和浸润现象等与物理化学密切相关的领域也越来越受到关注[8]。

中国的微重力实验计划也安排了一批空间微重力流体物理实验。这些实验包括空间热毛细对流、具有蒸发界面的对流、颗粒材料物理、沸腾传热、复杂流体的结晶、半浮区液桥的热毛细对流、多液滴相互作用、复杂流体稳定性等流体物理空间实验项目。

关键词: 微重力, 流体力学, 流型, 沸腾与冷凝传热

E-mail: wrhu@imech.ac.cn

非线性随机动力学与控制的哈密顿理论体系

朱位秋

浙江大学, 杭州 310027

本报告简要介绍近十几年来作者及其合作者在非线性随机动力学与控制的哈密顿理论体系方面的研究成果, 包括高斯白噪声激励下耗散的哈密顿系统的精确平稳解与等效非线性系统法, 分别在高斯白噪声、宽带噪声、有界噪声、谐和及其组合激励下拟哈密顿系统随机平均法、随机稳定性、随机分岔、首次穿越及非线性随机最优控制理论方法。最后指出今后有待进一步研究的问题。

关键词: 随机激励; 哈密顿系统; 精确平稳解; 等效非线性系统法; 随机平均法; 随机稳定性; 随机分岔; 动态可靠性; 随机最优控制。

参考文献

- 1 朱位秋, 非线性随机动力学与控制—Hamilton 理论体系框架, 科学出版社, 2003
- 2 Zhu WQ. Nonlinear Stochastic Dynamics and Control in Hamiltonian Formulation. ASME Applied Mechanics Reviews, July 2006, 59 (4): 230-248.
- 3 朱位秋. 非线性随机动力学与控制的哈密顿理论体系及其应用, 《随机振动理论与应用新进展》, 同济大学出版社, 2009, 3-40.

Small is beautiful, and dry

Quanshui Zheng^{1,2}, Cunjin Lv¹, Penfei Hao¹, John Sheridan²

¹ Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing
100084, China

² Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Monash
University, VIC 3800, Australia

Thousands of plant and animal species have been observed to have superhydrophobic surfaces that lead to various novel behaviors. These observations have inspired attempts to create artificial superhydrophobic surfaces, given such surfaces have multitudinous applications. Superhydrophobicity is an enhanced effect of surface roughness with water contact angle relations being defined by prescribed relationships. These recognize the level of roughness but a little about the effect of its scale, and thus are not capable to explain why naturally occurring such surfaces commonly have micron-submicron sizes. The new relation presented here takes into account the previously overlooked but key fact that the accumulated line energy arising from the numerous solid-water-air intersections that can be distributed in the apparent contact area when air packets are trapped at small scales on the surface can dramatically increase as the roughness scale shrinks. This term can in fact become the dominant contributor to the surface energy and so becomes crucial for accomplishing superhydrophobicity. Predictions made using the model are in excellent agreement with experimental results. We further show that scaling-down roughness into the micro-submicron range is a unique and elegant strategy to achieve not only superhydrophobicity, but also increasing its stability against environmental disturbances. These findings guide fabrication of stable super water-repellant surfaces.

关键词: 微纳结构表面、超疏水性、尺度效应

风成沙丘场模拟的尺度耦合法

郑晓静

兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000

风沙地貌系统中的沙波纹、沙丘和沙山, 尽管它们在尺度和形成机理上是不同的, 但它们不仅在形态上有着一定的相似性, 而且还都来源于尺度在微米量级的沙粒在风力作用下的运动。研究风沙地貌的形态和形成机制, 揭示其形成、发育、分布和演变规律, 不仅有助于对地表风蚀、沙尘物质在风力作用下的传输和沉积过程的认识, 而且也可以为防沙固沙措施以及某些工程 and 设施的设计提供必要的理论指导。

然而, 无论是实际测量还是遥感或航拍观测, 目前还难以给出这种方圆数百甚至上千平方公里的风成沙丘场形成和发展的全过程。而现有的一些基于连续模型的模拟方法和基于计算机模拟的离散方法, 如: 元胞自动机方法, 都无法给出与实际时空尺度相一致的定量结果。为此, 本文提出了一种尺度耦合方法, 首次实现了对这种具有随机性、非线性、跨尺度复杂系统特征的风成沙丘场形成和发展过程的定量模拟。

该方法在确定虚拟设立的“沙片”的厚度时, 不仅考虑了沙床表面不同位置处的摩阻风速变化和所对应的输沙率, 而且基于沙粒的沉积概率给出了位于沙床表面不同位置出的“沙片”的侵蚀概率; 在确定“沙片”的传输距离时, 也同时考虑了所受变化的摩阻风速以及输沙率的影响等。由此将微米尺度下的沙粒在数秒尺度内所完成的跃移运动与数百平方公里的沙丘场的长达百年以上的形成和发展过程有机地衔接起来。

由该方法所定量给出的沙丘场形成和发展过程发现: 沙源厚度直接影响沙丘场中的沙丘形态。沙源厚度较少时的沙丘场中的沙丘以新月形为主, 而沙源厚度较大时则以横向沙丘为主, 其临界沙源厚度大约在小于 $1.1\sim 1.3\text{m}$; 沙丘最大高度和平均高度增加的速度随时间逐步减缓, 其值随风速按指数规律增大、随粒径线性减小, 且沙源厚度对高度影响明显; 风向对沙丘场中的沙丘形态有明显影响。当风向分别为两个、三个和四个主方向时, 沙丘形态分别为线形、星形和穹状沙丘, 且在风力作用下线性和穹状沙丘几乎不发生移动; 沙丘场中的沙丘在风力作用下有着丰富的动力行为。新月形沙丘链在移动中会发生形态变化和断开并形成新的沙丘, 新月形沙丘间不仅存在着相互的正碰和侧碰撞行为, 而且碰撞后的结果有吞噬和衍生以及一种“类孤波行为”等。

基于沙丘场定量模拟的尺度耦合法, 还可以定量模拟火星上风成沙丘场的形成过程并预测沙丘的移动速度。同时, 还有可能进一步推广用于对沙漠化扩展速度的预测及其对有关防治措施有效性的预测和分析。

关键词: 风成地貌; 沙丘场; 尺度耦合法; 定量模拟; 沙丘移动

资助基金: 国家科技部项目 (No.2009CB421304, No.2006DFA03640) 和国家自然科学基金项目 (No.10532040, No.10872082) 以及教育部项目 (No.308022)

E-mail: xjzheng@lzu.edu.cn

微尺度力学与有限元方法

魏悦广

中国科学院力学研究所, 北京 100190

随着纳微电子、纳微机械以及纳米材料技术的迅猛发展, 人们迫切需要发展系统的微尺度力学理论以建立适合纳微电子产品和纳米新材料的力学性能设计标准和质量标准。

微尺度力学理论的建立既可基于大量的微尺度力学实验, 又可基于微观物理分析等途径。大量的实验研究显示: 当固体的特征尺度小于百微米时, 固体材料及结构的力学性能表现出强烈的尺度效应, 而这种尺度效应由传统连续介质理论无法预测。代表性实验现象包括: 当金属薄膜厚度在微纳米尺度时, 薄膜/陶瓷基体体系在薄膜脱胶时展现出了超强的界面断裂特征, 其断裂强度接近甚至超过宏观屈服强度的十倍, 而由传统弹塑性理论预测出的断裂强度仅为材料屈服强度的3至5倍; 在微压痕实验中, 当压入深度小于微米时, 测量的硬度随压入深度的减小急剧升高, 而传统情况为硬度与深度无关; 在使用扭转实验测量材料的剪应力—应变关系时, 当试样的直径小到几十微米时的测量结果随尺寸的减小迅速上升, 等等。特别是近年来, 人们采用FIB(聚焦离子束)微加工先进技术制做出了更小的试样尺寸——亚微米甚至百纳米尺度的单晶柱, 压缩试验中测量出具有强烈尺度效应的应力应变关系以及无尺度效应的杨氏模量。为了表征尺度效应, 有两种研究思路: 一种是从微观物理方法(量子、原子模拟; 统计连续及准连续等)出发进行研究(Bottom-Up方法); 另一种思路是Top-Down方法, 即基于连续介质力学框架建立和发展的表征尺度效应的微尺度力学理论。在本文中, 将同时介绍两种理论和方法, 主要包括: 应变梯度理论、表面界面能理论、同时考虑应变梯度效应和表面效应的微纳米理论、统计热力学的连续与准连续理论以及Cauchy-Born法则等。

针对微尺度力学理论, 在很多情况下传统的有限元方法失效, 如何建立有效的有限元方法是一个十分具有挑战性的问题。在本文中, 主要针对应变梯度理论的有限元方法展开分析。指出Zienkiewicz的C1连续单元法对于应变梯度理论失效的原因, 提出有效的适合应变梯度理论的有限元方法。

关键词: 微尺度力学; 有限元法; 尺度效应

微分求积法及其在固体力学应用中的若干新进展

程昌钧

上海大学理学院, 上海 200444

微分求积法(简称DQM)是Bellman等人于上世纪70年代初提出的一种新的数值计算方法。这种算法由于不依赖泛函和变分原理, 具有数学原理简单、计算精度高, 计算量和内存需求量少等优点, 能以较少的网格点和较小的计算量求得微分方程的高精度的数值解, 具有很好的发展前景。

自DQM提出之后, 许多研究者对DQM及其应用都做了重要的贡献。目前该方法已广泛应用于众多领域, 如生物学和医学问题、系统识别和响应问题、非线性扩散问题、非线性热传导问题、化学反应问题等。同时在流体动力学、固体力学、化学工程、润滑、声学、接触等问题中也得到了广泛的应用, 成功解决了许多非线性问题。

传统的DQM在应用上存在的主要困难是不适应非规则区域和具有间断性的问题, 这方面许多研究者进行了有效的工作。近年来, 我们将DQM应用固体力学中具有复杂本构关系、或复杂边界条件、或复杂结构系统、或复杂求解区域、或具有各种间断性条件的复杂问题的非线性分析, 推广DQM为相应的微分求积单元法(DQEM), 得到了系统的结果。主要包括:

1. 系统发展了正交各向异性高阶剪切粘弹性板的非线性响应分析的DQM, 给出了这类矩形板的非线性弯曲、准静态响应、动力稳定性和非线性振动等问题的DQ近似解;
2. 发展了具有初始位移、弹性接头的梁—柱结构大变形分析的DQM和DQEM, 提出了处理具有间断性条件的有效方法, 分析了不同基础中受复杂载荷作用的桩基的力学行为, 以及梁、框架和组合框架在复杂加载下的大变形, 得到了精确可靠的结果。
3. 发展了桩—土耦合系统非线性分析的DQM和DQEM, 提出处理间断性条件的有效方法, 给出了桩—土耦合系统非线性静动力学分析的DQ解, 拓宽了DQEM的应用领域, 使之适合于岩土力学这类具有大范围计算区域的问题;
4. 发展了流体饱和多孔介质空间轴对称问题的DQM和DQEM, 求解了流体饱和多孔弹性和粘弹性空间轴对称问题、流体饱和土中端承桩在阶梯载荷和周期载荷作用下的动力学特性。

研究表明, 不管是1-维梁—柱结构非线性分析的DQM和DQEM还是2-维桩—土耦合系统分析的DQM和DQEM, 与解析结果或者FEM比较, DQM和DQEM解不仅具有结果可靠、精度高、收敛性好、计算工作量少等特点, 而且具有理论概念明确, 物理概念清晰, 实用范围广并且操作简单等特点, 因此是一种有潜力的数值计算方法, 并可望发展成与FDM、FEM和BEM等求解微分方程的强有力的数值方法。

关键词: 微分求积法; 进展; 结构非线性分析; 桩—土耦合系统; 饱和多孔介质

主要参考文献 75 篇 (略)。

热力学第一定律与物理变分理论

匡震邦

上海交通大学, 上海 200240

热力学第一定律既是能量守恒和转换定律, 又包含了普适的物理变分原理。现有的物理和力学变分理论大都可以从热力学普适变分原理推出。物理变分原理是 $\delta U = \delta W + \delta Q$, 其中 δW 包含惯性力所做的功, 在静力学中, 它就是虚功原理, 在动力学中, 由它可推出 Hamilton 原理, 它代表动量原理。作者利用这一理论, 导出了电致伸缩材料的控制方程, 简单而又自然地导出了 Maxwell 应力的表达式, 避免了从 Maxwell 方程直接导出 Maxwell 应力时的不确定性, 也避免了从微观理论导出 Maxwell 应力时的复杂性。作者环利用这一理论导出温度波的惯性熵理论。

I. 电致伸缩材料的电 Gibbs 函数变分原理 因为电场存在于所有介质中, 所以一般情况下需要考虑环境的影响, 此时电介质需要和环境一起考虑。电 Gibbs 函数变分原理是

$$\begin{aligned}\delta \Pi_g &= \delta \Pi_{g1} + \delta \Pi_{g2} - \delta W_g^{\text{int}} = 0 \\ \delta \Pi_{g1} &= \delta \int_V g dV - \int_V (f_k - \rho \ddot{u}_k) \delta u_k dV + \int_V \rho_e \delta \varphi dV - \int_{a_\sigma} T_k^* \delta u_k da + \int_{a_\rho} \sigma^* \delta \varphi da \\ \delta \Pi_{g2} &= \delta \int_{V^{\text{env}}} g^{\text{env}} dV - \int_{V^{\text{env}}} (f_k^{\text{env}} - \rho^{\text{env}} \ddot{u}_k^{\text{env}}) \delta u_k^{\text{env}} dV + \int_{V^{\text{env}}} \rho_e^{\text{env}} \delta \varphi^{\text{env}} dV \\ &\quad - \int_{a_\sigma^{\text{env}}} T_k^{*\text{env}} \delta u_k^{\text{env}} da + \int_{a_\rho^{\text{env}}} \sigma^{*\text{env}} \delta \varphi^{\text{env}} da \\ \delta W_g^{\text{int}} &= \int_{a^{\text{int}}} T_k^{*\text{int}} \delta u_k da - \int_{a^{\text{int}}} \sigma^{*\text{int}} \delta \varphi da\end{aligned}$$

应用位移的变分会影响电势的变分的理论, 由此自然导出 Maxwell 应力。

II. 温度波的惯性熵理论 温度随时间变化将影响热流, 这便构成一个温度动力学问题。为此引入惯性熵 $\dot{s}^{(a)} = C\varpi \ddot{T}/T_0$, $s^{(a)} = C \int_0^t \varpi \ddot{T} d\tau / T_0 = C\varpi \dot{T}/T_0$ 。现有的熵关系修改为

$$T\dot{s} + T\dot{s}^{(a)} = \dot{r} - q_{i,i} = \dot{r} - (T\dot{\eta}_i)_{,i}, \quad \dot{h} = T\dot{s}^{(i)} = -T_{,i}\dot{\eta}_i$$

提出的变分理论是

$$\begin{aligned}\delta \Pi &= \int_V \delta(g + h') dV - \delta Q^* - \delta W^* = 0 \\ \delta Q^* &= - \int_0^t \int_V \left(\frac{\dot{r}}{T} \right) \delta T dV d\tau + \int_0^t \int_{a_{q^*}} \eta^* \delta T da d\tau - \int_0^t \int_V \dot{s}^{(i)} \delta \vartheta dV d\tau + \int_0^t \int_V C \frac{1}{T_0} \varpi \ddot{T} \delta T dV d\tau \\ \delta W^* &= \int_V (f_k - \rho \ddot{u}_k) \delta u_k dV - \int_V \rho_e \delta \varphi dV + \int_{a_\sigma} T_k^* \delta u_k da - \int_{a_q} \sigma^* \delta \varphi da\end{aligned}$$

由此导出的温度波方程为

$$\dot{s} + \frac{C}{T_0} \varpi \ddot{\vartheta} = \frac{\dot{r}}{T} - \frac{q_{i,i}}{T}, \quad s = \alpha_{ij} \varepsilon_{ij} + \tau_i E_i + C\vartheta/T$$

由上式环可推出无需对温度变化范围作限制的精确的热弹性变分理论。

关键词: 热力学; 变分; 惯性熵理论