

力学与工程

——21世纪工程技术发展与力学前沿研究



主编 刘 桦 仲 政

上海交通大学出版社

力学与工程

——21 世纪工程技术发展与力学前沿研究

主编 刘 桦 仲 政

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是为庆祝上海市力学学会成立 50 周年而组织编辑的文集。全书分为力学与航空航天、力学与船舶海洋、力学与生命科学、力学与城市建设、力学与先进制造、力学与先进材料六个单元,从各个侧面回顾总结了重大工程建设与力学前沿研究的现状和进展。本书可供力学及相关工程技术领域的科技人员和大专院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

力学与工程:21 世纪工程技术发展与力学前沿研究/刘桦,仲政主编. —2 版. —上海:上海交通大学出版社,2009
ISBN978-7-313-02250-9

I. 力... II. ①刘... ②仲 III. ①力学 ②工程力学
IV. 03 TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 120585 号

力学与工程

——21 世纪工程技术发展与力学前沿研究

刘桦 仲政 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市华通印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:26.25 字数:491 千字

1999 年第 8 月第 1 版 2009 年 9 月第 2 版 2009 年 9 月第 2 次印刷

印数:1~1530

ISBN978-7-313-02250-9/O 定价:98.00 元

版权所有 侵权必究

编委会

主任 刘 桦 仲 政

编委 (按姓氏笔画为序)

丁光宏 朱 雷 朱德祥 许金泉

孙 庆 陆 鹏 周文波 贺鹏飞

顾倩燕 翁培奋 高承勇 蒋东红

戴 韧 戴世强

校 对 吴慧玲

序

白驹过隙，一晃十年。为庆祝上海力学学会成立 50 周年，在新一届理事会的鼎力组织下，出版了本集《力学与工程——21 世纪工程技术发展与力学前沿研究》。它记载了上海力学界努力拼搏的足迹，也反映了近 10 年来上海市在能源、航空航天、交通运输、生命科学、土建工程等方面的长足进步，特别高兴的是作者们大都年华正茂，他们已是学科发展和研究工作中的领军者和顶梁柱，挑起了历史的重任，不愧“江山代有人才出”，一代胜似一代。

经济在发展，产业在升级，根据全国布局，上海首先应建成国际金融和国际航运两个中心，上海和长三角地区的支柱产业众多，先进制造业、新能源、新材料、电子信息、航空航天、生物技术……这些都为力学工作者提供了施展才华的广阔天地。在解决工程技术问题中，力学虽是配角，却起着关键或核心的作用，犹如画龙点睛，创意适在其中。

新文集的出版，不禁让我们十分怀念李国豪老师等前辈们，正是他们创建了本学会并为《力学与工程——21 世纪工程技术的发展对力学的挑战》作序。

但我深信生命虽短暂，事业却永存！

何友声

2009 年 7 月 10 日

前 言

值此上海市力学学会成立 50 周年之际,我们组织出版了《力学与工程——21 世纪工程技术发展与力学前沿研究》文集。它是上海市力学学会成立 40 周年时由力学界前辈李国豪院士和何友声院士主编的《力学与工程——21 世纪工程技术的发展对力学的挑战》的续本。

正如那本书的序言中所说:“近代力学的蓬勃发展,一个根本原因在于主动与工程技术发展相结合,为生产、经济、军事服务,获得巨大推动力,于是如一轮红日,喷薄而出。”在过去的 10 年中,上海力学界在传统的工程技术领域中一如既往走创新之路,并孕育新的生长点,为新兴产业和高新技术的发展作出贡献,与此同时也进一步推动了力学的前沿研究。

未来的 10 年是我国科技事业发展的重要战略机遇期,胡锦涛同志曾在全国科学技术大会上指出,我们必须围绕建设创新型国家的奋斗目标,进一步深化科技改革,大力推进科技进步和创新,大力提高自主创新能力,推动我国经济社会发展切实转入科学发展的轨道。最近,根据全国布局,上海应首先建成国际金融和航运两个中心。作为力学人,我们始终为力学学科对人类社会的进步所作的重要贡献而骄傲,如今,时代向力学工作者提出了更高的要求也提供了更广阔的用武之地。我们希望本文集的出版有助于力学界的学术交流,并将老一辈把力学研究与工程技术紧密结合的学术思想和传统继承下去、发扬光大。

刘 桦 仲 政

2009 年 7 月 14 日

目 录

力学与航空航天

- 多系统动力学研究进展 / 3 洪嘉振
- 微型飞行器机翼在低雷诺数下的气动力特性研究进展 / 15 刘 洁 翁培奋
- 航空应用力学——大客机主要核心技术 / 37 乐卫松 仲 政
- 空间可延展壳体结构的构造及双稳态力学特性 / 61 聂国华
- 基于小波分析的机翼结构健康监控研究 / 73
- 万 婧 万方义 宋笔锋 艾剑良

力学与船舶海洋

- 关于船舶流体力学技术发展的若干思考 / 85 缪国平 朱仁传 范余明
- 基于 RANS 方程的数值波浪水池开发 / 103 吴乘胜 朱德祥 顾 民
- 同伦分析方法:求解强非线性问题的一个新途径 / 129 廖世俊
- 海啸预警与近海水波数值模拟 / 151 刘 桦 赵 曦 王本龙

力学与生命科学

- 力学与生命 / 165 丁光宏 杨 琳 张 迪
- 血管力学生物学研究新进展 / 185 姜宗来

力学与城市建设

建筑物鉴定、改造加固中的新技术与力学 / 203

王孔藩 朱 雷

移动荷载引起饱和土体动力响应与排桩隔振研究进展 / 222

王建华 王卫东 徐 斌 陆建飞

力学在隧道工程中的应用

——面向施工的隧道工程施工力学发展中的若干问题 / 239

郑宜枫 周文波 丁志诚

力学与先进制造

压水堆核电厂主设备力学分析和研究:从设计到寿命管理 / 257

姚伟达 贺寅彪 窦一康 谢永诚 张 明 梁星筠

新的双波长电子散斑干涉法及其应用研究 / 271

张 熹 陆 鹏 吴君毅

时滞吸振器:一种新的减振技术 / 298

徐 鉴

船坞工程结构设计技术的创新与实践 / 310

顾倩燕

转子-轴承系统的非线性动力学模型及动力学分析 / 333

张 文 郑铁生

力学与先进材料

复合材料非线性本构桥联理论的发展与应用 / 351

黄争鸣

材料强度学及其在固体力学工程应用中的作用 / 371

许金泉

复杂流体的耗散颗粒动力学 / 385

李 振 胡国辉 周哲玮

微细纤维及微小复合材料制备中的力学问题 / 398

张若京

Contents

Mechanics and Aerospace Engineering

- Review of Multibody System Dynamics / 3 HONG Jia-zhen
- Aerodynamic Properties of Airfoils for Micro Air Vehicle
with Low Reynolds Number / 15 LIU Jie, WENG Pei-fen
- Applied Mechanics in Aviation—Major Core Technologies
for Airlines / 37 LE Wei-song , ZHONG Zheng
- Configurations of Space Deployable Composite Shell
Structures and Bi-Stable Behaviors / 61 NIE Guo-hua
- The Application of Wavelet Analysis in Health
Monitoring of Wing's Structure in Aircraft / 73
WAN Jing, WAN Fang-yi, SONG Bi-feng, AI Jian-liang

Mechanics and Ocean Engineering

- Some Considerations on the Technical Developments of Ship
Hydrodynamics / 85
MIAO Guo-ping, ZHU Ren-chuan, FAN She-ming
- Development of a Numerical Wave Tank Based
on RANS Equations / 103

- WU Cheng-sheng, ZHU De-xiang, GU Min
Homotopy Analysis Method: A New Analytic Approach
for Strongly Nonlinear Problems / 129 LIAO Shi-jun
- Tsunami Warning System and Water Wave Modelling in
Coastal Waters / 151 LIU Hua, ZHAO Xi, WANG Ben-long

Mechanics and Life Science

- The Mechanics and Life / 165
- DING Guang-hong, YANG Lin, ZHANG Di
Recent Advances in Vascular Mechanobiology / 185 JIANG Zong-lai

Mechanics and City Construction

- Several New Ways for Appraisalment and Strengthening
of Existing Buildings and Mechanics / 203
- WANG Kong-fan, ZHU Lei
- Advances in Studies on the Dynamic Responses of the Saturated
Poroelastic Half-space due to Moving Loads and Analysis of
Vibration Isolation Effectiveness with Pile Rows / 222
- WANG Jian-hua, WANG Wei-dong, XU Bin, LU Jian-fei
- Application of Mechanics on Tunneling—Some Problems
about Construction Mechanics in Tunneling / 239
- ZHENG Yi-feng, ZHOU Wen-bo, DING Zhi-cheng

Mechanics and Advanced Manufacturing

Structural Mechanics Research and Development for Main Components

of Chinese 300 MWe PWR NPPs: From Design to Life Management / 257

YAO Wei-da, HE Yin-biao, DOU Yi-kang,

XIE Yong-cheng, ZHANG Ming, LIANG Xing-yun

A New Bi-wavelength ESPI and Its Applied

Investigation / 271

ZHANG Xi, LU Peng, WU Jun-yi

Delayed Absorber: A New Technique for Suppressing Vibration / 298

XU Jian

Innovation and Application in Dock Structural Design / 310

GU Qian-yan

Nonlinear Modeling and Dynamic Analysis of the

Rotor-Bearing System / 333

ZHANG Wen, ZHENG Tie-sheng

Mechanics and Advanced Materials

Development and Application of Nonlinear Constitutive

Bridging Model for Composites / 351

HUANG Zheng-ming

Theory on Material Strength and Its Role in the

Application of Solid Mechanics / 371

XU Jin-quan

Dissipative Particle Dynamics for Complex Fluids / 385

LI Zhen, HU Guo-hui, ZHOU Zhe-wei

Mechanical Issues in Producing Ultrafine Fibers and Composites / 398

ZHANG Ruo-jing

力学与航空航天

多体系统动力学研究进展

洪嘉振

(上海交通大学工程力学系, 上海 200240)

摘 要: 本文对多体系统动力学的研究现状进行了概况和总结, 主要从柔性体建模方法、刚柔耦合动力学、非连续动力学、微分代数方程求解技术、多物理场耦合、控制方法、设计优化及软件开发和实验研究等几个研究方向进行总结, 并对未来的研究方向作了展望。

关键词: 多体系统; 动力学; 建模理论; 计算方法; 实验研究

Review of Multibody System Dynamics

HONG Jia-zhen

(Department of Engineering Mechanics,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper presents a survey of research in multibody system dynamics. Modeling methods of flexible body, dynamics of rigid-flexible coupling, discontinuous dynamics, solution techniques of differential algebraic equations, coupling of physic multi-field, control, design, optimization, software development, experiment studies are summarized and their future directions of research are indicated.

Key words: multibody systems; dynamics; modeling theory; numerical method; experiments

1 引言

多体系统动力学作为一般力学学科的一个分支已经历了四十多年的发展历程。多体系统动力学的早期研究对象是多刚体系统, 无论从建模理论、计算方法还是软件工程等已经发展得相当完善, 有文献已经对此有系统的叙述^[1~3]。许多成

熟的商业计算软件已经为机械系统性态的计算机辅助分析发挥了重要的作用。

随着国民经济和国防技术的发展,多体系统的构型越来越复杂,规模越来越庞大。目前工程中复杂多体系统的部分构件已采用轻质柔性材料,系统的运行速度加快,对运行精度的要求越来越高,系统的动力学性态越来越复杂。部件作刚体假设的多刚体系统动力学已无法解释系统复杂的动力学性态,因此必须考虑部件大范围运动和构件本身的变形。如何对不同的拓扑、不同的约束、不同的受力与控制环节的多体系统建立通用的程式化动力学模型及处理这些数学模型的计算方法,都已成为工程预研与设计的大难题。因此,当前多体系统动力学的研究对象已经由多刚体系统拓展到柔性多体系统。

柔性多体系统的大幅慢变和小幅快变的变量耦合在严重非线性和时变的动力学方程中,数值严重的病态使计算结果的效率与稳定发生问题。这个问题还将严重影响复杂机械系统的非连续动力学问题的全局仿真。此外非常短暂接触碰撞过程突变条件的判断,在数值实现上也极为困难。因此,数值问题已经成为处理柔性多体系统动力学问题的主要矛盾之一^[1]。

对于零次近似耦合意义上的柔性多体系统连续动力学问题,单向递推组集建模方法已经具有良好的数值计算性态与程式化的特征。一次近似耦合模型揭示了“动力刚化”现象产生的本质,能够解决简单规则柔性体(如直梁和矩形板)的刚柔耦合动力学问题。但该模型在通用性和程式化上,离工程应用的要求尚有一定的距离。对于多体系统接触碰撞问题,基于刚体假设的冲量方法和弹簧阻尼模型都具有较高的计算效率。然而,由于定义碰撞参数的随意性,可能因选取不同的参数而得到截然不同的动力学仿真结果。可见,目前急需研究符合柔性构件接触碰撞动力特性的较为精确而又通用的接触碰撞力学模型。

近二十多年,国内外的学者在柔性多体系统的建模理论、计算方法、实验研究等方面做了大量的工作。尽管目前已经有不少处理柔性多体系统动力学问题的方法与软件,但是在解决较复杂工程问题的原理、效率与通用程度等方面都面临很多问题,导致这些方法的可信度与实用价值降低。本文以期较为全面地总结和概括近年来国内外柔性多体系统动力学的研究现状,对该领域的发展提出一些看法。

2 研究现状与展望

2.1 柔性体建模方法

柔性体建模根据参考坐标系选取的不同,可以归为三类^[4]:浮动坐标系方法、随转坐标系方法和惯性坐标系方法。浮动坐标系方法是将多刚体动力学与结构动

力学结合的一种方法,这种方法使多刚体动力学软件扩展应用于柔性多体系统成为可能,是目前柔性多体系统建模使用最广泛的方法。随转坐标系方法源于计算结构动力学,随转坐标系随弹性体内部的每个单独的有限元的平均刚体运动而运动。这种方法被用于大位移、大转角和小应变结构的建模。惯性坐标系方法源于大变形非线性有限元和连续体力学原理。惯性坐标系方法又称为绝对节点坐标方法,不再区分物体的刚体运动和变形,采用一致质量有限元对柔性体进行离散。与浮动坐标系方法比较,随转和惯性坐标系方法有一些共同的优点:惯性张量的平动部分是线性的常量;考虑了运动的非线性,如大转动和动力刚化等自动得到满足。但是直到 20 世纪 80 年代后期,计算效率低是使用这两种方法的瓶颈。随着计算机速度的几何量级的提高与并行处理技术的发展,这两种方法有可能很经济地应用于实际的柔性多体系统。近年来还有研究者综合这几类方法进行研究:Garcia-Vallejo, Sugiyama^[5,6]等在浮动坐标系上采用绝对节点坐标法的建模理论,研究了大范围运动已知的平面梁的动力刚化问题;刘锦阳等^[7]在浮动坐标系上采用绝对节点坐标法的建模理论,在小变形的假设下,建立了做大范围空间运动的柔性梁的刚柔耦合动力学模型。尤超蓝^[8]基于有限元技术,在浮动坐标系上使用随转坐标系建模方法,建立了做大范围运动的平面梁和板的刚柔耦合动力学模型。

根据力学的基本原理,基于不同的建模方法,得到形式不同的动力学方程,尽管在理论上等价,但是其数值性态的优劣不尽相同。显然,评价一个柔性多体系统动力学模型优劣的重要标准应该是该模型是否能够可靠与快速处理各种动力学现象。通常解的精确与计算所要付出的代价是一对矛盾,因此有必要对各种建模方法进行对比研究,研究它们适合应用的范围,探讨更加高效、精确的建模方法,建立准确和高效的做大范围运动的梁、板、壳和体单元模型。

2.2 刚柔耦合动力学研究

柔性多体系统刚柔耦合动力学建模理论的研究大致分为如下四个阶段:①运动-弹性动力学(KED)方法,该方法不计构件大范围运动与弹性变形运动的耦合;②混合坐标方法,该方法考虑了构件弹性变形与大范围运动的相互耦合,但是在对柔性体离散时没有考虑大范围运动对其的影响,实质上这种方法是柔性多体系统动力学精度在一种零次近似意义上的耦合;③动力刚化问题的研究^[9],1987 年 Kane 发现上述模型在处理高速旋转的悬臂梁动力学时会得到错误结论;④刚柔耦合问题研究^[10,11],上海交大课题组在刚柔耦合动力学建模理论研究过程中,放弃国内外学者采用的一些假定,即捕捉“动力刚度项”的修正模式,认为造成零次近似耦合动力学方程缺陷的主要原因是在对柔性体变形运动描述时没有考虑大范围运动对其的影响。基于连续介质力学的基本原理,得到精度在一阶量级上的刚柔耦合

项,建立了精度在一次近似意义耦合动力学方程。一次近似模型已经从数值仿真和物理实验两方面验证了变形场的高阶耦合项将对刚柔耦合系统的动力学特性产生大的影响,这也是“动力刚化”现象产生的本质。

一次近似模型揭示了刚-柔耦合的本质,但是其对非线性变形场的描述并不完美。一次近似模型的耦合形函数从梁的端点沿整个轴积分,这就限制了其应用范围只能是直梁等具有规则外形的柔性体,对于像中间有孔或不规则形状的板等一般柔性构件,基于整轴积分的一次耦合模型则无能为力。

笔者认为可以从以下几个指标来考核刚柔耦合动力学建模理论:①科学性,应该从严格的理论推导得到,而不是通过猜测捕捉得到;②通用性,即可以推广到不同连续柔性体构件,而不能像传统一次耦合模型依赖于沿整个轴积分;③识别性,能够区分刚体运动和弹性变形;④兼容性,能够退化为零次耦合模型;⑤高效性,即具有较快的计算速度。已有的建模理论都无法同时满足以上指标,因此需要发展能同时满足以上要求的新的刚柔耦合动力学建模理论。此外,对于有多个柔性体与多种铰形式的多体系统的刚柔耦合问题也有待进行深入研究。

2.3 非连续动力学问题

近二十多年,国内外的学者在柔性多体系统的建模理论、计算方法、实验研究等方面做了大量的工作,在柔性多体系统连续动力学的研究方面取得了重要的成果。然而,在实际工程领域中存在着大量非连续动力学问题。接触碰撞是典型的非连续动力学问题,广泛地存在于机械工程、土木工程等领域,一直是学术界研究的一个热点^[12]。如在航天领域,卫星太阳帆板的在轨展开与锁定;航天器的交会对接。包装机械构件的间歇运动相当普遍,构件做非连续的运动;机械的磨损、构件间的间隙与撞击也是常见的非连续动力学问题。在机器人研究领域,机器人的抓取过程使系统的构型发生突变,系统动力学同样是一个不连续的过程。这种非连续的动力学过程产生的动力学响应是工程设计中必须考虑的因素。对柔性多体系统非连续动力学问题进行快速准确求解,较精确地预测系统的整体性态,是对柔性多体系统动力学领域的一个重要挑战。它是关系到国家重要行业发展的应用基础问题,解决此项问题具有十分重大的理论意义和实际应用价值。

接触碰撞动力学模型主要有三类:冲量方法、弹簧阻尼模型、约束变形方法。冲量方法是在接触碰撞期间采用刚体假定,运用牛顿、泊松或者 Stronge 恢复系数,利用冲量的概念,解决碰撞前和碰撞后系统的速度层面上的变化。冲量方法具有较高的计算效率,但是无法反映碰撞过程中力的关系。弹簧阻尼模型采用集中参数模型来计算接触问题,将接触碰撞问题作为连续过程进行处理,用弹簧阻尼器这一力元来描述碰撞过程,计算方法简单,处理方便,计算效率高,在工程中得到比