

EI COMPENDEX
核心期刊

ISSN 0459-1879

CN 11-2062/O3

力学学报

Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics

第 54 卷 第 6 期 2022 年 6 月



中国科学院力学研究所 主办
中国力学学会
力学学报期刊社 出版

6
2022



力学学报 (月刊)

Chinese Journal of Theoretical and
Applied Mechanics

1957 年 创刊

2022 年

第 54 卷 第 6 期

目 次

研究综述

多体空气动力学研究进展 宋 威 艾邦成 (1461)

流体力学

$k-\omega$ SST 湍流模式三维激波分离流动修正 杜一鸣 高正红 舒博文 邱福生 宋辰星 (1485)

基于修正光滑粒子流体动力学算法的低能量耗散数值波浪水池开发 黄晓婷 孙鹏楠 吕鸿冠 钟诗蕴 (1502)

中性润湿平板上液膜的惯性收缩 万其文 陈效鹏 胡海豹 杜 鹏 (1516)

气动载荷下防热材料剥离颗粒输运特性的直接数值模拟研究 李婷婷 李 青 涂国华 袁先旭 周 强 (1523)

碳氢燃料超声速燃烧分区实验研究 孟凡钊 周芮旭 李忠朋 连 欢 (1533)

高马赫数下超声速燃烧的自点火查表方法 张锦成 王振国 孙明波 汪洪波 王亚男 刘朝阳 (1548)

绕水翼空化流动多尺度数值研究 田北晨 李林敏 陈 杰 黄 彪 曹军伟 (1557)

三维圆柱型颗粒堆坍塌问题的全相态数值模拟 陈福振 李亚雄 史腾达 严 红 (1572)

固体力学

基于准点缺陷理论探索非晶合金蠕变机制 徐宗睿 郝 奇 张浪淳 乔吉超 (1590)

功能梯度材料明德林矩形微板的热弹性阻尼 李世荣 (1601)

准脆性材料抗压强度能量平衡尺寸效应模型 刘小宇 杨 政 张慧梅 (1613)

多孔泡沫牺牲层的动态压溃及缓冲吸能机理研究 范东宇 苏彬豪 彭 辉 裴晓阳 郑志军 张建勋 秦庆华 (1630)

基于近场动力学的单晶冰弹性各向异性数值模拟方法 黄 焱 王建平 孙剑桥 (1641)

土的各向同性化变换应力方法 姚仰平 唐科松 (1651)

片状颗粒间液桥力变化规律的计算研究 刘奉银 姜景希 李栋栋 (1660)

动力学与控制

剪切流作用下层合梁非线性振动特性研究 刘 昊 瞿叶高 孟 光 (1669)

爬壁机器人系统的 Noether 对称性和守恒量 傅景礼 陆晓丹 项 春 (1680)

基于信号分解和切比雪夫多项式的多体系统区间不确定性分析方法 蒋 鑫 白争锋 宁志远 王思宇 (1694)

多个柔性梁 V 型集群行为节能机理研究 张 磊 敖 雷 裴志勇 (1706)

生物、工程及交叉力学

基于恒等映射多层极限学习机的高速列车踏面磨耗预测模型 王美琪 王 艺 陈恩利 刘永强 刘鹏飞 (1720)

一类面向高阶精度自适应流动计算的流场插值方法 周 帅 肖周芳 付 琳 汪丁顺 (1732)

深海采矿系统中悬臂式立管涡激振动分析 金国庆 邹 丽 宗 智 孙 哲 王 浩 (1741)

Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics

(Monthly)

Vol. 54, No. 6, 2022

CONTENTS

Research Review

Research progress on multibody aerodynamics Song Wei, Ai Bangcheng (1461)

Fluid Mechanics

Three-dimensional shock separated flow corrections of $k-\omega$ SST model
..... Du Yiming, Gao Zhenghong, Shu Bowen, Qiu Fusheng, Song Chenxing (1485)

Development of a numerical wave tank with a corrected smoothed particle hydrodynamics scheme to reduce nonphysical
energy dissipation Huang Xiaoting, Sun Pengnan, Lü Hongguan, Zhong Shiyun (1502)

Inertial retraction of liquid film on moderately wettable plate Wan Qiwen, Chen Xiaopeng, Hu Haibao, Du Peng (1516)

Direct numerical simulation of single ablative particle dynamics in near-wall Couette flow under aerodynamic load
..... Li Tingting, Li Qing, Tu Guohua, Yuan Xianxu, Zhou Qiang (1523)

Experimental investigation on the regimes of hydrocarbon supersonic combustion
..... Meng Fanzhao, Zhou Ruixu, Li Zhongpeng, Lian Huan (1533)

Auto-ignition tabulated method for supersonic combustion at high Mach number
..... Zhang Jincheng, Wang Zhenguo, Sun Mingbo, Wang Hongbo, Wang Yanan, Liu Chaoyang (1548)

Numerical study of multiscale cavitating flow around a hydrofoil
..... Tian Beichen, Li Linmin, Chen Jie, Huang Biao, Cao Junwei (1557)

Numerical simulation of full phases of collapse of three-dimensional cylindrical granular pile
..... Chen Fuzhen, Li Yaxiong, Shi Tengda, Yan Hong (1572)

Solid Mechanics

Probing into the creep mechanism of amorphous alloy based on quasi-point theory
..... Xu Zongrui, Hao Qi, Zhang Langting, Qiao Jichao (1590)

Thermoelastic damping in functionally graded Mindlin rectangular micro plates Li Shirong (1601)

Energy balance size effect model of compressive strength for quasi-brittle materials
..... Liu Xiaoyu, Yang Zheng, Zhang Huimei (1613)

Research on dynamic crushing and mechanism of mitigation and energy absorption of cellular sacrificial layers
..... Fan Dongyu, Su Binhao, Peng Hui, Pei Xiaoyang, Zheng Zhijun, Zhang Jianxun, Qin Qinghua (1630)

A numerical simulation method for the elastic anisotropy of single crystal ice based on peridynamics
..... Huang Yan, Wang Jianping, Sun Jianqiao (1641)

Isotropically transformed stress method for the anisotropy of soils Yao Yangping, Tang Kesong (1651)

Study on the evolution of liquid bridge force between flaky particles Liu Fengyin, Jiang Jingxi, Li Dongdong (1660)

Dynamics, Vibration and Control

A numerical study on flapping dynamics of a composite laminated beam in shear flow Liu Hao, Qu Yegao, Meng Guang (1669)

Noether symmetries and conserved quantities of wall climbing robot system Fu Jingli, Lu Xiaodan, Xiang Chun (1680)

Interval uncertainty analysis methods for multibody systems based on signal decomposition and Chebyshev polynomials
..... Jiang Xin, Bai Zhengfeng, Ning Zhiyuan, Wang Siyu (1694)

Energy saving mechanism of hydrodynamic collective behavior of multiple flexible beams in V formation
..... Zhang Lei, Ao Lei, Pei Zhiyong (1706)

Biomechanics, Engineering and Interdisciplinary Mechanics

High-speed train tread wear prediction model based on I-ML-ELM
..... Wang Meiqi, Wang Yi, Chen Enli, Liu Yongqiang, Liu Pengfei (1720)

Solution interpolation for high-order accurate adaptive flow simulation
..... Zhou Shuai, Xiao Zhoufang, Fu Lin, Wang Dingshun (1732)

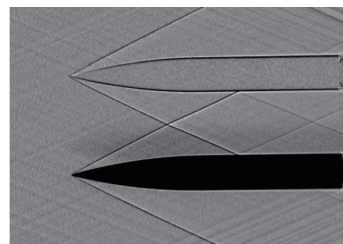
Analysis of vortex-induced vibration for a cantilever riser in a deep-sea mining system
..... Jin Guoqing, Zou Li, Zong Zhi, Sun Zhe, Wang Hao (1741)

研究综述

多体空气动力学研究进展 (1461-1484, doi: 10.6052/0459-1879-22-096)

宋威, 艾邦成

多体飞行器在飞行和分离过程中存在相互流场干扰或作用, 使其具有不同于孤立体飞行器的流动物理及特征, 特别对于超/高超声速的多体流动, 多体间存在多重激波反射、衍射以及激波与边界层相互干扰等流动现象, 这些复杂流动能显著地改变多体飞行器间的空气动力学特性, 作者引入“多体空气动力学”概念对该类问题进行概括并论述, 在国内学术界尚属首次。

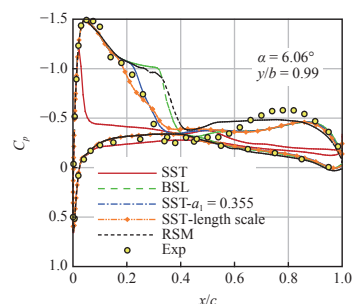


流体力学

 $k-\omega$ SST 湍流模式三维激波分离流动修正 (1485-1501, doi: 10.6052/0459-1879-22-065)

杜一鸣, 高正红, 舒博文, 邱福生, 宋辰星

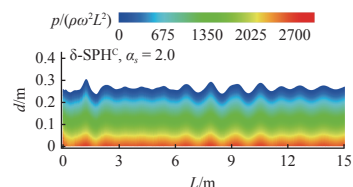
文章针对 $k-\omega$ SST 模式分别提出了基于 Bradshaw 假设和基于长度尺度的两种激波分离流动修正方法, 前者通过提高 Bradshaw 常数的方式放宽了对雷诺应力生成的限制, 后者则从湍流长度尺度概念出发, 利用混合长度理论和一种新定义的长度尺度之比构造了 ω 方程耗散项修正函数, 提高了模式的建模长度尺度. 两种方法均能明显改善原始模式的模拟效果。



基于修正光滑粒子流体动力学算法的低能量耗散数值波浪水池开发 (1502-1515, doi: 10.6052/0459-1879-22-041)

黄晓婷, 孙鹏楠, 吕鸿冠, 钟诗蕴

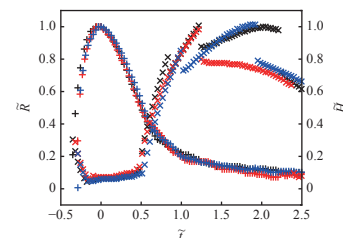
采用一种 SPH 核函数修正算法, 改进压力梯度离散项的计算精度, 减少了 SPH 模拟中的能量耗散. 结果表明, 基于该算法建立的数值波浪水池具有较好的抗能量衰减效果, 减少了波高的沿程衰减, 能实现长时间、远距离波浪传播模拟. 此外, 本算法提高了低光滑长度系数下的模拟精度, 将极大缩减三维 SPH 模拟的时间, 大幅提高效率。



中性润湿平板上液膜的惯性收缩 (1516-1522, doi: 10.6052/0459-1879-21-663)

万其文, 陈效鹏, 胡海豹, 杜鹏

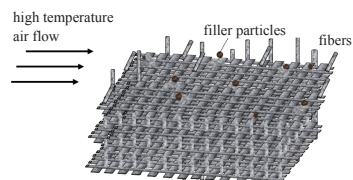
液滴撞击平板过程是自然、工业界的重要现象, 其中的收缩运动决定了液滴的最终状态. 本文对平板上液滴的收缩过程机理进行研究, 发现在中性润湿平板上液滴经历传统毛细-惯性收缩后, 会有一个慢匀速收缩过程. 后者收缩速度与液体密度、液膜初始形状有关; 而与液体黏性、壁面润湿条件无关, 因此仍然满足惯性收缩机制。



气动载荷下隔热材料剥离颗粒输运特性的直接数值模拟研究 (1523-1532, doi: 10.6052/0459-1879-21-604)

李婷婷, 李青, 涂国华, 袁先旭, 周强

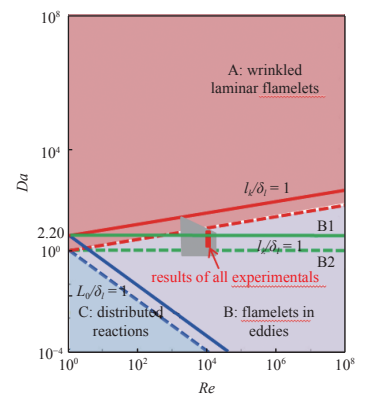
高超声速飞行器隔热材料在气动载荷下发生机械剥蚀, 烧蚀颗粒进入下游, 影响绕流流态、气动性能、热载荷等. 本研究通过对近壁流动量纲分析, 将烧蚀颗粒剥离过程模化为单个圆球惯性颗粒在 Couette 流动中的动力学问题, 并采用颗粒解析的直接数值模拟方法开展研究, 获得了关键特征参量对烧蚀颗粒输运特性的影响规律。



碳氢燃料超声速燃烧分区实验研究 (1533-1547, doi: 10.6052/0459-1879-21-686)

孟凡钊, 周芮旭, 李忠朋, 连欢

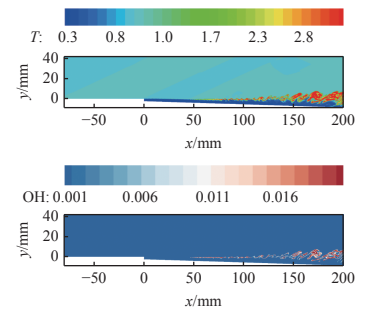
本文基于自主研发的 MHz 发动机内窥光纤传感器, 针对单边扩张双模态冲压发动机超声速燃烧火焰分区开展实验研究, 通过化学自发光信号的最小香农熵定义超声速燃烧的特征时间, 验证了碳氢燃料超燃冲压发动机典型飞行条件下燃烧室内超声速燃烧处于旋涡小火焰区域 ($Re \approx 50\,000$; $Da \in 1.80 \sim 2.60$, B 区), 并给出了当量比、通量比以及来流马赫数对燃烧特征时间和分区的影响规律。



高马赫数下超声速燃烧的自点火查表方法 (1548-1556, doi: 10.6052/0459-1879-21-635)

张锦成, 王振国, 孙明波, 汪洪波, 王亚男, 刘朝阳

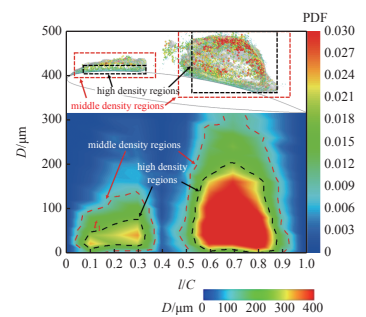
超燃冲压发动机工作在高马赫数高总焓工况时, 自点火成为维持燃烧室内火焰稳定的重要过程. 本文借鉴火焰面/进度变量模型的降维思路, 发展了一种基于化学动力学的自点火建表方法. 该方法能够对超声速条件下包含自点火模式的反应流场进行高效的仿真。



绕水翼空化流动多尺度数值研究 (1557-1571, doi: 10.6052/0459-1879-22-022)

田北晨, 李林敏, 陈杰, 黄彪, 曹军伟

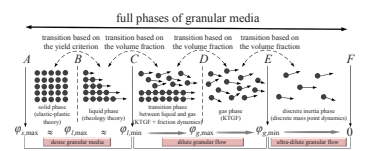
本文基于欧拉-拉格朗日联合算法, 通过 VOF (Volume of fluid) 法求解大尺度空穴演化特征, 通过离散空泡模型 (DBM) 求解微尺度空泡的形核、生长、运动及溃灭过程. 针对绕 NACA66 水翼多尺度空化流动过程开展数值模拟. 研究了湍流与多尺度空泡结构演变间的相互作用规律、离散气泡分布与空泡结构演变间的关系以及各空化发展阶段的离散空泡粒径分布规律。



三维圆柱型颗粒堆坍塌问题的全相态数值模拟 (1572-1589, doi: 10.6052/0459-1879-22-001)

陈福振, 李亚雄, 史腾达, 严红

定义了颗粒介质全相态的概念并进行了区域划分, 建立了描述颗粒介质经历全部相态的耦合模型理论, 采用光滑离散颗粒流体动力学方法和离散单元法相耦合的策略, 对颗粒介质物理模型求解, 实现了对不同长径比下的三维圆柱型颗粒堆坍塌过程的数值模拟, 捕捉到了不同参数影响下颗粒堆坍塌后沉积的不同现象, 获得了铺展规律。

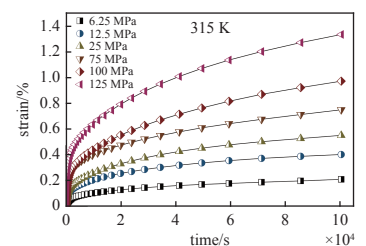


固体力学

基于准点缺陷理论探索非晶合金蠕变机制 (1590-1600, doi: 10.6052/0459-1879-22-059)

徐宗睿, 郝奇, 张浪淳, 乔吉超

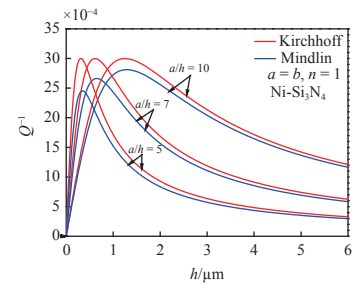
本文以 LaCe 基非晶合金作为研究载体, 通过开展宽温度应力窗口蠕变实验, 考查了蠕变柔量、准稳态蠕变速率、特征弛豫时间及蠕变应力指数演变规律, 研究了非晶合金蠕变行为与蠕变机制. 基于准点缺陷理论分析了非晶合金蠕变行为由弹性向黏弹性及黏塑性逐步转变过程, 从微观结构演化角度构建了非晶合金蠕变行为完整物理图像。



功能梯度材料明德林矩形微板的热弹性阻尼 (1601-1612, doi: 10.6052/0459-1879-22-055)

李世荣

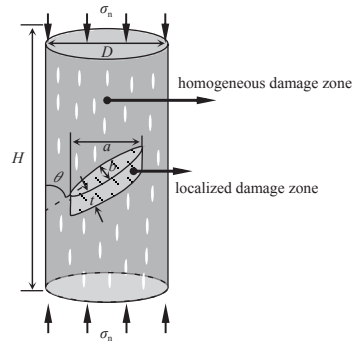
基于一阶剪切变形板理论和单向耦合热传导理论研究了功能梯微板的热弹性阻尼. 获得了材料性质沿板厚按幂函数变化的陶瓷-金属功能梯度简支矩形微板的热弹性阻尼解析解. 地分析了横向剪切变形、材料梯度变化等因素对热弹性阻尼的影响规律. 结果表明, 对于中厚度微板剪切变形板理论预测的热弹性阻尼明显小于经典板理论的预测值.



准脆性材料抗压强度能量平衡尺寸效应模型 (1613-1629, doi: 10.6052/0459-1879-21-460)

刘小宇, 杨政, 张慧梅

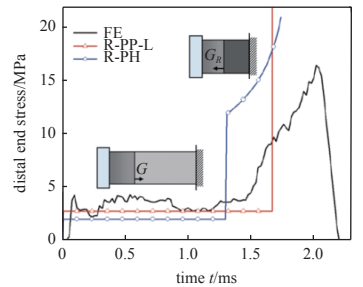
通过分析准脆性材料单轴压缩破坏过程中能量输入、储存、整体和局部能量耗散, 建立体现整体和局部损伤的力学模型及描述上述能量演化过程的双线性名义和真实应力应变曲线, 在此基础上确定了名义应力最大时输入能量、储存弹性能、整体和局部能量耗散的表达式, 最后基于能量平衡原理建立抗压强度尺寸效应模型.



多孔泡沫牺牲层的动态压溃及缓冲吸能机理研究 (1630-1640, doi: 10.6052/0459-1879-22-047)

范东宇, 苏彬豪, 彭辉, 裴晓阳, 郑志军, 张建勋, 秦庆华

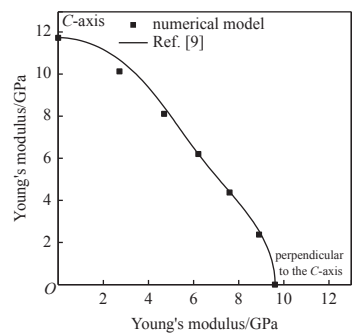
考虑多孔泡沫材料塑性硬化影响的理论分析模型能够预测入射波在远端的反射及对牺牲层的二次压缩过程和端部应力增强现象; 相比较存在界面的多孔泡沫牺牲层, 连续设计的牺牲层可增强其缓冲吸能能力, 但在界面处增加设计刚性面板则能够降低界面胞元不完整对缓冲吸能的影响; 冲击波的反射可能是端部应力增强的主要诱因.



基于近场动力学的单晶冰弹性各向异性数值模拟方法 (1641-1650, doi: 10.6052/0459-1879-22-064)

黄焱, 王建平, 孙剑桥

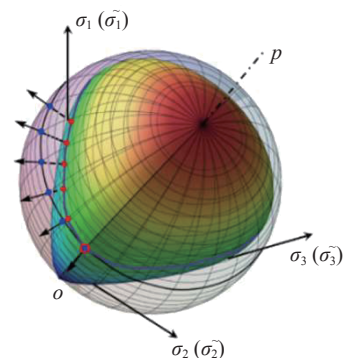
为了准确模拟单晶冰的弹性各向异性特征, 本文采用近场动力学理论, 以前人实验测试得到的杨氏模量值为参考, 将单晶冰杨氏模量沿不同加载方向的变化规律引入到近场动力学力密度向量的影响函数中, 提出了针对该影响函数的修正和辅助参数标定方法, 并以此形成了基于影响函数的单晶冰弹性各向异性近场动力学数值模拟方法.



土的各向同性化变换应力方法 (1651-1659, doi: 10.6052/0459-1879-21-651)

姚仰平, 唐科松

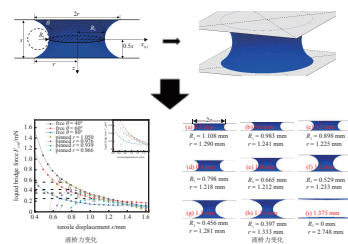
材料各向异性的合理描述对于本构关系研究具有重要理论意义. 对此, 郑泉水院士提出了著名的材料各向同性化定理, 而作者等针对岩土材料提出的变换应力方法同样遵循此思路, 也是各向同性化定理的继承与发展. 论文表明: 在岩土弹塑性本构模型中采用变换应力方法可在不损失材料屈服特性的同时给出合理的塑性应变流动方向. 而屈服和流动的合理兼顾也是岩土本构理论的一个难题.



片状颗粒间液桥力变化规律的计算研究 (1660-1668, doi: 10.6052/0459-1879-21-628)

刘奉银, 姜景希, 李栋栋

非饱和土中固液相互作用极大影响土的宏观性质, 研究颗粒间液桥力有助于揭示非饱和土持水特性和固液相互作用内在机理. 以片状颗粒及其间液桥为研究对象, 使用 Surface Evolver 软件构建出一对平行片状颗粒间的三维液桥模型, 分析了液桥拉伸过程中液桥力的影响因素及其变化规律, 同时, 针对拉伸过程中的液桥形态进行了简单分类.

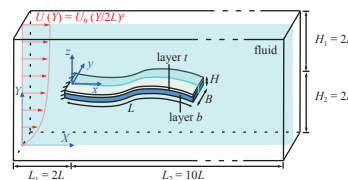


动力学与控制

剪切流作用下层合梁非线性振动特性研究 (1669-1679, doi: 10.6052/0459-1879-22-114)

刘昊, 瞿叶高, 孟光

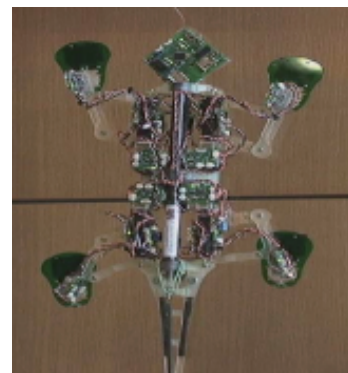
复合材料弹性结构广泛应用于船舶舰艇、海洋工程等领域. 本文基于高阶剪切锯齿理论, 建立了不可压缩黏性剪切流中层合梁的非线性流固耦合动力学数值模型, 研究了不同剪切流动下不同刚度比、铺层厚度及铺层角度层合梁的大变形非线性振动行为与机理. 发现剪切流作用下尾部流场中的涡结构发生改变; 层合梁存在定点稳定模式、周期极限环振动模式和非周期振动模式.



爬壁机器人系统的 Noether 对称性和守恒量 (1680-1693, doi: 10.6052/0459-1879-22-084)

傅景礼, 陆晓丹, 项春

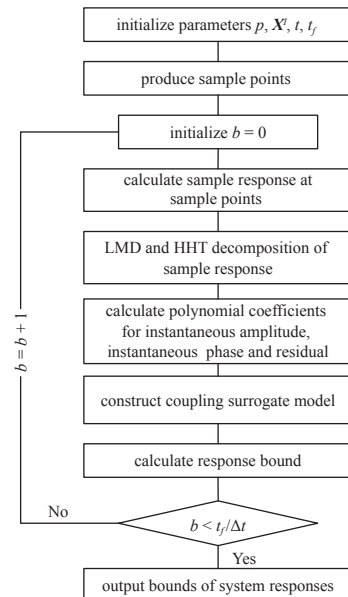
采用 Lagrange 力学的方法建立爬壁机器人系统的运动方程, 并运用 Lie 群分析方法建立该系统的 Noether 对称性理论, 给出爬壁机器人的运动规律; 以圆锥面上爬壁机器人为例, 给出整体运动的精确解和四肢运动的数值解; 这个工作, 为 Lie 群分析方法应用于复杂的机器人系统以及柔性机器人系统提出了一种新的对称性求解方法.



基于信号分解和切比雪夫多项式的多体系统区间不确定性分析方法 (1694-1705, doi: 10.6052/0459-1879-22-092)

蒋鑫, 白争锋, 宁志远, 王思宇

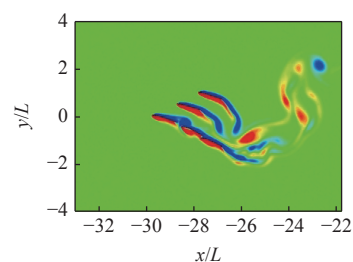
为了改进切比雪夫区间方法 (Chebyshev interval method, CIM) 在分析多体系统长周期区间响应边界精度低的问题. 本文将信号分解技术与切比雪夫多项式结合, 采用切比雪夫多项式对 HHT 变换和局域均值分解 (local mean decomposition, LMD) 得到的瞬时幅值和瞬时相位近似, 提出 CIM-HHT 方法和 CIM-LMD 方法. 仿真算例验证了本文方法的有效性, 且具有较高的计算精度.



多个柔性梁 V 型集群行为节能机理研究 (1706-1719, doi: 10.6052/0459-1879-21-688)

张磊, 敖雷, 裴志勇

V 型排列是鸟类常采用的集群模式. 本文通过简化柔性梁表征生物个体, 对集群涉及的多柔性梁-流体介质相互作用问题展开数值研究, 发现领头和跟随梁的速度和推进效率增幅均超过 14%. 研究给出了集群节能的数据证据, 并通过流场细节分析指出, 其节能机理为梁表面分离涡挤压混合造成的压力场变化和柔性体自身形变的耦合作用.

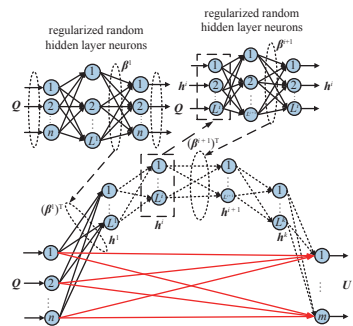


生物、工程及交叉力学

基于恒等映射多层极限学习机的高速列车踏面磨耗预测模型 (1720-1731, doi: 10.6052/0459-1879-21-692)

王美琪, 王艺, 陈恩利, 刘永强, 刘鹏飞

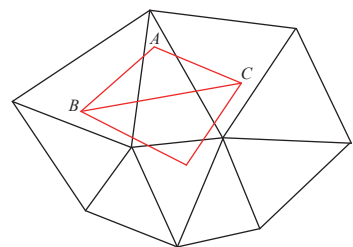
针对高速列车车轮踏面磨耗单一模型无法对复杂工况下车轮踏面磨耗进行定量计算的问题, 提出一种基于恒等映射多层极限学习机的车轮踏面磨耗测量方法. 并结合高速列车车轮踏面磨耗的实际测量值对 I-ML-ELM 预测模型进行了进一步的验证, 结果表明基于 I-ML-ELM 的车轮踏面磨耗预测模型能较好地反映不同参数对高速列车车轮踏面磨耗值的影响规律.



一类面向高阶精度自适应流动计算的流场插值方法 (1732-1740, doi: 10.6052/0459-1879-22-060)

周帅, 肖周芳, 付琳, 汪丁顺

针对高阶精度自适应流动计算, 提出一类满足物理量守恒和高精度的物理量插值方法, 将前一迭代步网格中流场数值解插值到当前迭代步网格中, 以延续前一迭代步中的计算状态. 为实现插值物理量守恒, 先计算新旧网格的重叠区域, 然后将物理量从重叠区域的旧网格中转移到新网格中. 为满足高阶精度要求, 先采用 k -exact 最小二乘方法对旧网格上的数值解进行重构, 得到满足精度要求的物理量分布多项式, 随后采用高斯数值积分实现物理量精确地转移到新网格的各单元上.



深海采矿系统中悬臂式立管涡激振动分析 (1741-1754, doi: 10.6052/0459-1879-21-679)

金国庆, 邹丽, 宗智, 孙哲, 王浩

不同于传统的海洋立管, 深海采矿系统中的垂直提升管道可以被视为一个底部无约束的柔性悬臂式立管, 工作过程中同样面临涡激振动问题. 本文采用一种无网格离散涡方法和有限元耦合的准三维时域求解数值模型, 系统性地研究了不同流速下悬臂式立管的涡激振动问题, 并比较了两端支撑立管与悬臂式立管的涡激振动响应特征的异同.

