



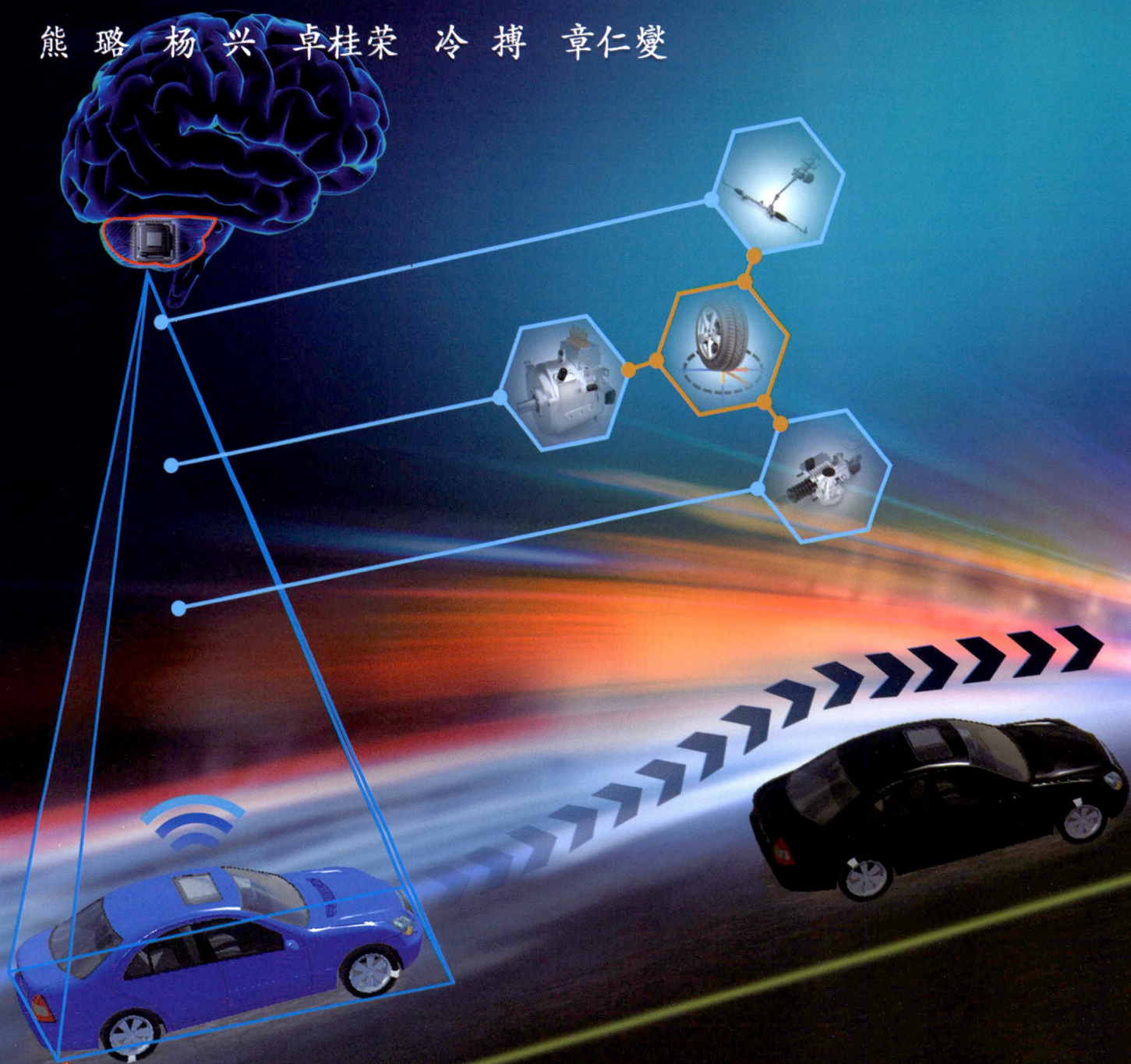
6  
2

# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述

熊璐 杨兴 卓桂荣 冷搏 章仁燮



 中国机械工程学会 主办

2020年56卷10期 半月刊

万方数据

## /// 仪器科学与技术 ///

### 1 在役大型游乐设施健康评价方法研究

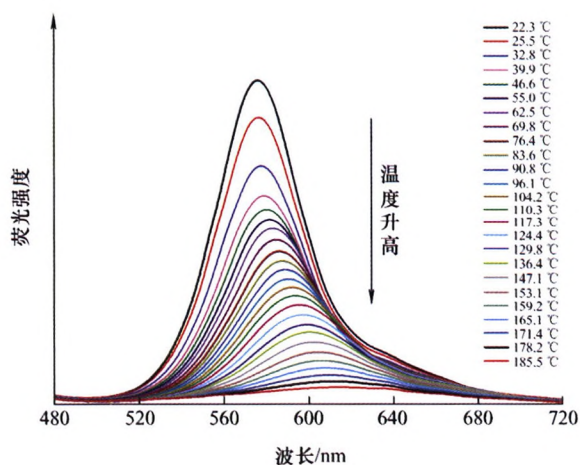
沈功田 刘渊 张君娇 胡斌



**摘要:**大型游乐设施是人们追求美好生活的重要工具和弘扬传统文化的有力平台,其安全性、可靠性和经济性受到了社会的广泛关注。实施健康管理是保障大型游乐设施在服役期间能安全、可靠、经济运行的一种先进手段。围绕大型游乐设施健康管理中健康评价这一核心环节,第一,从健康状态的本质出发,建立健康状态的数学模型;第二,通过分析在役大型游乐设施的损伤发展和功能退化规律以及游乐园的实际需求,提出了大型游乐设施健康状态分级的概念,并划分为“健康”、“亚健康”、“微病态”和“病态”4个等级;第三,针对国内外大型游乐设施的技术现状,提出一种综合利用对设备的定期检验、日常维护保养和设备实时状态监测三方面信息的定量健康评价方法;最后,通过典型大型游乐设施进行综合应用及分析,验证了该方法的有效性和实用性,实现由静态的安全评价向动态的健康评价转变和升级,为今后进行更加深入的大型机电设备健康管理研究提供可以借鉴的思路。

### 12 面向旋转部件监测的耐高温量子点传感器研究

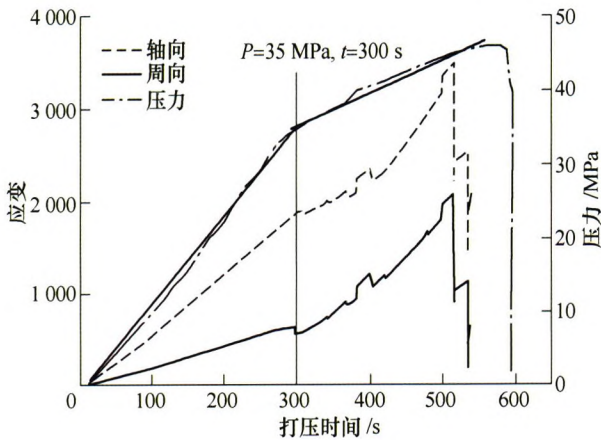
张盼 闫柯 朱永生 洪军 梁潘婷



**摘要:**航空发动机支撑轴承的内圈、保持架等旋转部件的温升特性在线监测对于轴承乃至整机装备的服役状态评估、预警至关重要。面向航空发动机极端工况下轴承内部旋转部件热状态监测需求,在基于碲化镉(Cadmium telluride, CdTe)量子点传感器在线测温原理及技术研究基础上,通过工艺优化提升传感器性能,使其适用于高温、高速等极端工况下航空发动机支撑轴承旋转部件的运行温度监测。控制制备 CdTe 量子点试验条件(制备时间、配体),通过结构表征探讨量子点的微观形态、平均粒径对其荧光特性的影响机制。搭建高温环境下量子点光致发光温度依赖特性监测试验平台,研究不同量子点传感器光致发光光谱的温度依赖特性及耐高温性能。基于聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)包覆,制备了 CdTe/PVA 高稳定性传感器,实现了量子点荧光强度、最高耐受温度、灵敏性以及稳定性的显著提升,为航空发动机支撑轴承旋转部件的在线温度监测奠定了基础。

## 19 基于超声导波的压力容器健康监测 III: 纤维缠绕压力容器的在线监测

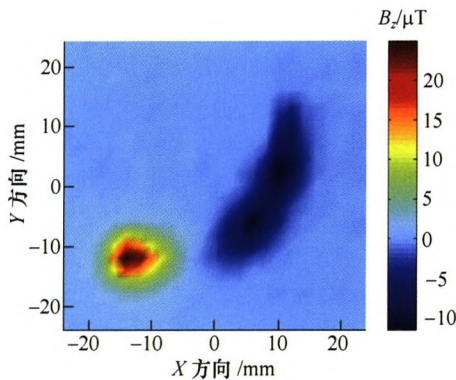
杨斌 胡超杰 轩福贞 肖飏 项延训 罗承强



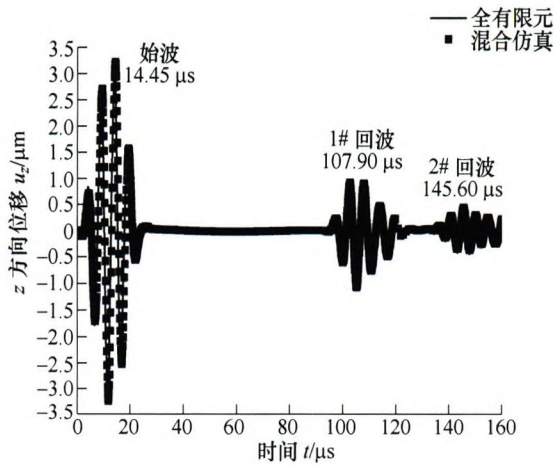
**摘要:** 基于超声导波的压力容器健康监测研究的第三部分, 主要考察所研究的健康监测技术在纤维缠绕压力容器损伤定位中的应用。开展纤维缠绕压力容器的疲劳和打压爆破试验, 设计远程在线监测系统以实时获取不同工况中纤维缠绕压力容器损伤定位结果。在打压和疲劳试验过程中, 采集压力容器在不同状态中的导波信号, 并分别测量金属内胆和复合材料层的应变变化, 建立导波幅值与压力容器疲劳状态和受压状态之间的关联。开展纤维缠绕压力容器在打压爆破过程中的损伤定位, 研究疲劳对损伤定位精度的影响规律。结果表明, 在疲劳试验中, 应变片能够连续记录并反映压力容器的应变状态, 但疲劳周期随残余应变的变化趋势不明显, 而导波幅值随疲劳周次的增加而线性下降; 对经过 5 700 周疲劳和未经过疲劳的纤维缠绕压力容器, 导波幅值随着其内部压力的增加而线性下降, 而应变值随着压力的增加线性增加, 二者的对应关系可用于判定纤维缠绕压力容器的受压状态; 利用所研发的在线监测系统可以远程获取纤维缠绕压力容器损伤位置信息, 5 700 周的疲劳在很大程度上影响定位精度, 而未经疲劳试验的压力容器的损伤定位误差较小。

## 27 基于 ACFM 的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构方法研究

袁新安 李伟 殷晓康 陈国明 赵建明 蒋维宇 张展 薛瑞琪

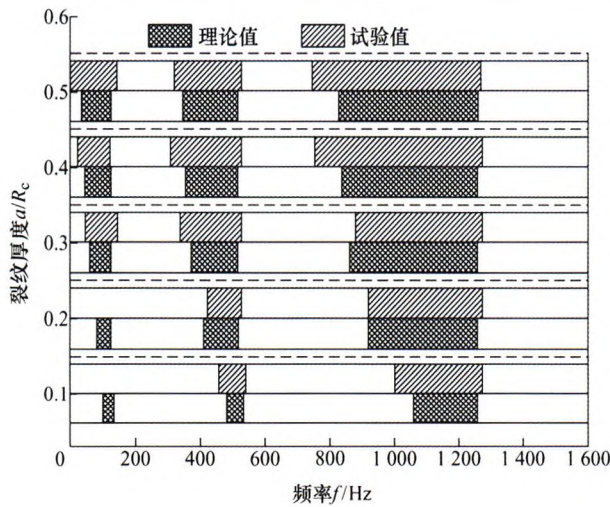


**摘要:** 奥氏体不锈钢具有良好的耐腐蚀性、高韧性和塑性, 在石化特种装备和海洋结构中有着广泛应用。奥氏体不锈钢通常在高温、高压、强腐蚀介质中服役, 结构表面可产生各种类型不规则裂纹缺陷, 威胁结构安全服役。由于不导磁、弱导电、晶粒粗大的特性, 传统无损检测对奥氏体不锈钢表面不规则裂纹检测和评估存在诸多挑战。提出基于交流电磁场检测(Alternating current field measurement, ACFM)技术的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构方法, 建立奥氏体不锈钢不规则裂纹 ACFM 有限元仿真模型, 分析不规则裂纹周围电磁场畸变规律, 提出垂直方向磁场(垂直于试块方向磁场, 称为  $B_z$ )图像梯度场的不规则裂纹表面轮廓可视化重构方法, 利用不规则裂纹检测试验验证可视化重构方法的效果。结果表明, ACFM 探头感应电流可在奥氏体不锈钢不规则裂纹端点聚集, 聚集电流引起垂直方向磁场  $B_z$  畸变,  $B_z$  图像梯度场可反映电流聚集位置,  $B_z$  图像梯度场可视化重构方法能够实现奥氏体不锈钢不规则裂纹表面轮廓可视化成像显示及精确评估。



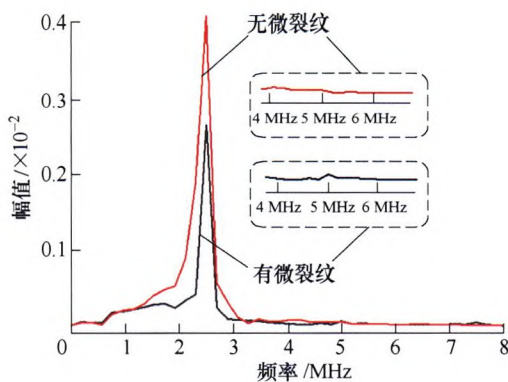
**摘要:** 金属小径管广泛应用于航空航天、化工等工程领域关键结构中, 对其进行定期无损检测至关重要。作为一种先进电磁无损检测方法, 电磁超声导波检测在金属小径管损伤定量评估中具有优势。目前, 金属管道缺陷电磁超声导波检测的仿真主要采用有限元等数值模拟方法, 涉及电磁场和结构场计算。然而, 电磁超声导波检测通常采用激励电流的频率为几百千赫兹, 在管道中激发的涡流趋肤深度极小, 导致仿真需大量网格进行求解域剖分以确保仿真精度, 检测信号计算时间较长。鉴于此, 提出一种集成解析法和有限元法的金属小径管缺陷电磁超声导波检测混合仿真方法, 采用解析法求解电磁场相关场量, 将所求洛伦兹力导入有限元仿真中求解结构场, 实现电磁场量和结构场量的快速计算, 高效求取检测信号, 对金属小径管缺陷定位时, 精度高达约 98%。在通过全有限元仿真验证所提混合仿真方法正确性的基础上, 结合系列仿真和试验研究, 对所提导波换能器激发的超声导波模式进行了识别, 对该换能器在金属小径管损伤检测和定位方面进行了可行性验证。

42 基于弹性波传播特性的变截面转轴横向裂纹检测方法

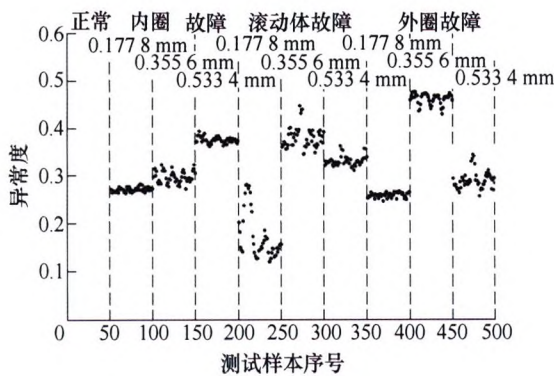


**摘要:** 转轴不同的受力条件使裂纹具有不同的裂纹模式, 在利用弹性波传播特性对横向裂纹进行检测时需要考虑裂纹模式的影响。在不同裂纹模式下推导得出裂纹的局部柔度系数, 随后建立不同的裂纹模式下弹性波的传递矩阵, 搭建转轴裂纹试验台, 分析出其裂纹模式为模式 III, 同时定性分析裂纹深度对转轴中弹性波传播特性的影响。试验结果验证了理论分析出的裂纹模式的正确性, 而裂纹深度主要影响弹性波阻带带宽和中心频率。研究结果可为变截面转轴裂纹模式的选取提供参考, 也为横向裂纹的检测提供了一种方法。

50 基于非线性表面波检测奥氏体不锈钢应力腐蚀早期损伤的仿真研究



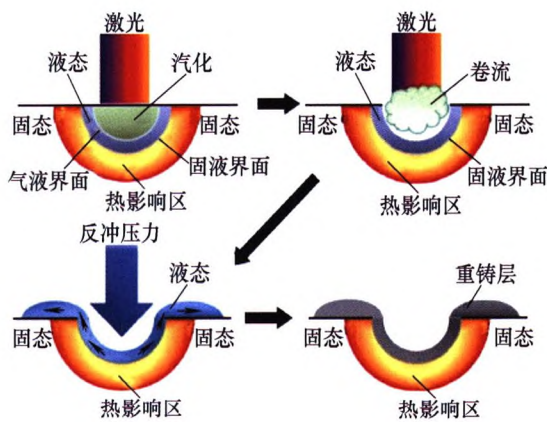
**摘要:** 为了探索利用非线性表面波检测奥氏体不锈钢应力腐蚀早期损伤的方法, 应用 ANSYS 和 ABAQUS 有限元数值模拟软件, 基于弹塑性变形本构关系, 采用重构的方法, 实现应力场与超声场的耦合, 进一步探讨恒应力状态下微裂纹的宽度与深度、受力方向(拉/压)与大小对非线性超声表面波传播特性的影响。结果表明, 恒载荷作用下, 微裂纹宽度与非线性系数呈负相关, 深度与非线性系数呈正相关; 拉应力作用下, 微裂纹变宽, 透射表面波能量降低, 界面周期性振动引发的拍击和滑移效应减弱, 抑制高次谐波的产生, 而且微裂纹极限宽度随着拉应力的增大而减小; 压应力的作用效果与之相反。所以非线性表面波与恒应力状态下微裂纹之间交互作用的研究对应力腐蚀早期损伤的检测有重要的工程应用价值。



**摘要:** 针对机械设备缺少故障样本时如何高效检测其异常度问题, 在分析训练样本的分布情况以及其在自己空间边界状态的基础上, 优化训练样本半径, 提出一种变径边界样本界面检测器。利用变径边界样本界面检测器异常检测方法分析了轴承状态数据, 不仅能反映出轴承的各种故障状态, 而且能通过异常度函数反映出故障的轻重程度。变径边界样本界面检测器的设备异常度检测方法, 是在学习设备正常运行数据的基础上, 优化训练样本半径, 利用边界样本及其方位信息, 构建界面检测器, 对设备的运行状态进行检测。变径边界样本界面检测器在构建过程中不需要使用设备的故障数据, 适用于对缺少故障数据的机械设备进行异常状态检测。

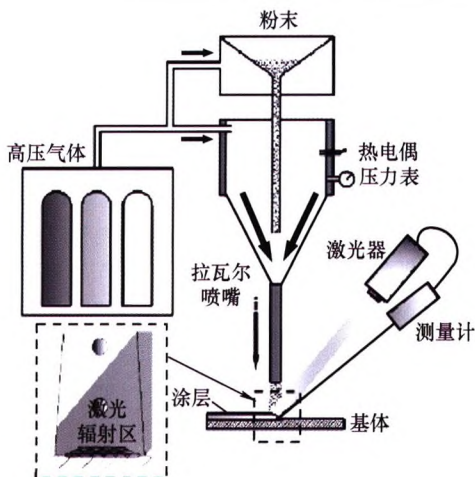
/// 材料科学与工程 ///

64 热喷涂涂层/基体异质界面结合强度优化理论与方法现状研究

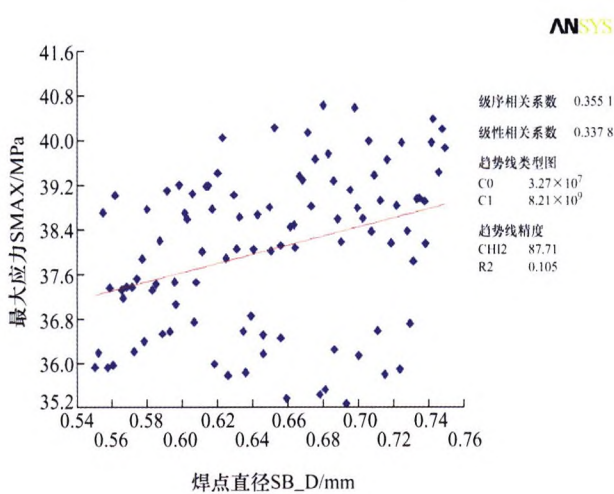


**摘要:** 结合强度是评价热喷涂涂层质量的重要指标之一, 直接影响装备零部件的服役安全与寿命。由于涂层本质上是由大量高速飞行的熔融态喷涂粒子撞击基体迅速铺展凝固、逐层堆垛所形成的, 无法在基体界面形成微熔池或有效的元素扩渗, 因而涂层/基体界面通常以机械结合为主, 冶金结合的含量则相对较少。分别从基体表面粗化预处理、原位元素扩渗及重熔后处理三个角度, 详细综述不同处理工艺对涂层/基体界面机械与冶金两种结合机理提升的影响规律。结果表明, 粗化后的基体能够增加界面锚合、嵌合及咬合的机械结合程度, 同时增大熔滴与基体表面的润湿程度, 减小界面裂纹及热应力; 通过调节粒子飞行特性(包括速度、熔融状态、物相成分、几何结构、空间分布等)与基体表面状态(温度、化学成分等)等, 降低撞击基体后的凝固速度, 促进界面元素扩渗, 有利于形成微冶金结合; 原位激光辅助喷涂及各类重熔后处理技术则可以通过引入的热源, 进一步促进涂层内各组元的充分混合、消除微裂纹及孔隙等结构缺陷、调控整体热应力, 提升涂层结合强度。

78 超音速激光沉积 WC/Cu 复合涂层的微观结构及耐磨性能表征

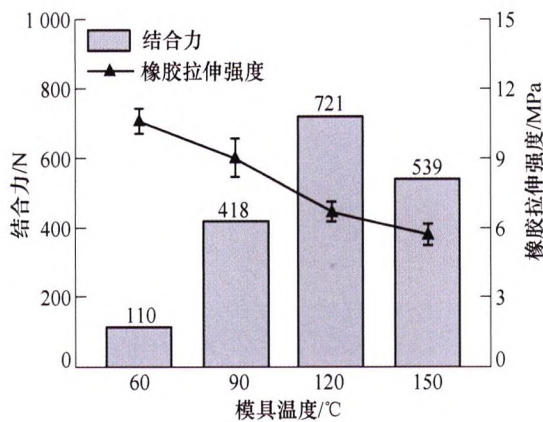


**摘要:** 针对纯铜具有良好的导电、导热和加工性能, 但同时也具有硬度低, 耐磨性能差的特点。采用超音速激光沉积 (Supersonic laser deposition, SLD) 和冷喷涂 (Cold spray, CS) 技术在纯铜表面制备了 WC/Cu 复合涂层, 并对所制备涂层的微观结构、相组成、显微硬度和摩擦磨损性能进行了对比分析。研究表明, CS 涂层的厚度约为 1 128 μm, WC 含量为 7.73%, 显微硬度为 147.4 HV<sub>0.2</sub>, 但涂层/基体结合处存在明显间隙。SLD 涂层厚度随着激光功率的逐渐升高而增加, 最高涂层厚度达 2 344 μm, WC 含量可高达 17.22%, 显微硬度可达 161.3 HV<sub>0.2</sub>, 且涂层/基体结合良好。SLD 涂层能基本保留原始粉末的相组成, 但高激光功率下制备的样品存在轻微氧化。SLD 涂层相比于 CS 涂层和铜基体具有更小的摩擦因数、磨损宽度以及磨损量, 表现出更好的耐磨性能, 为铜及其合金的表面性能优化提供了一种新方法。



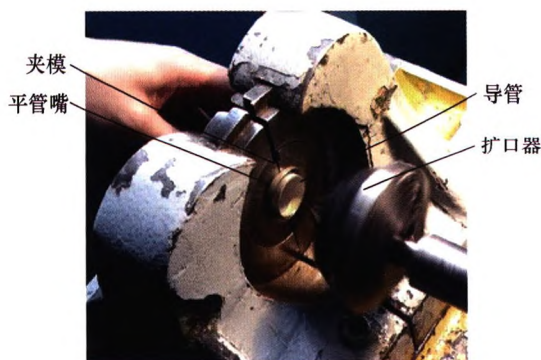
**摘要:** 建立 BGA 无铅焊点再流焊焊后残余应力有限元分析模型, 对其进行热结构耦合条件下的焊后残余应力分析; 基于钻孔应变法设计并完成了焊后残余应力测量验证性试验; 基于灵敏度法分析焊点高度、焊点直径、焊盘直径和焊点间距对焊点残余应力影响的显著性及大小排序; 以对残余应力影响显著的因素为变量, 采用响应面-遗传算法对焊点结构参数进行了优化。结果表明, 验证试验结果证明了仿真分析结果的有效性; 置信度为 90% 时, 焊点直径、焊点间距和焊点高度对焊点残余应力影响显著, 灵敏度从大到小排序为焊点直径>焊点间距>焊点高度; 焊点焊后残余应力最小的最优结构参数水平组合如下: 焊点直径 0.55 mm、焊点高度 0.36 mm、焊点间距 1.07 mm; 对该焊点仿真验证表明最大焊后残余应力下降了 0.998 MPa。研究结果对减小 BGA 焊点焊后残余应力具有一定的指导意义和参考价值。

95 铝合金-丁腈橡胶复合密封件的界面结合性能

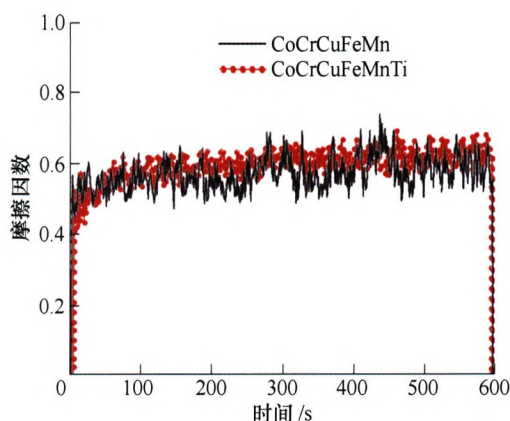


**摘要:** 硫化粘成型金属-橡胶复合密封件存在环境污染、效率低、难以形成复杂构件的缺点。提出一种利用阳极氧化和硅烷偶联剂处理铝合金表面, 再通过控制注塑工艺参数直接成型铝合金-丁腈橡胶(Aluminum alloy-nitrile butadiene rubber, Al-NBR)复合密封构件的方法。研究了阳极氧化电解液温度、偶联剂浓度和注塑成型时模具温度与成型构件界面力学性能的对应关系。利用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)和傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrometry, FTIR)对不同条件处理的铝合金基材表面形貌和成分进行表征, 探讨了铝合金表面结构形态和成分对铝合金-丁腈橡胶界面结合强度的影响规律以及铝合金-丁腈橡胶密封构件的失效原因和机理。试验结果表明, 在优化后的成形参数下制得的复合构件其界面结合强度高于橡胶基体强度, 研究所取得的结果对拓展金属-橡胶复合密封构件的成型方法和应用领域具有重要作用。

102 航空扩口导管轴向收缩量快速预测方法



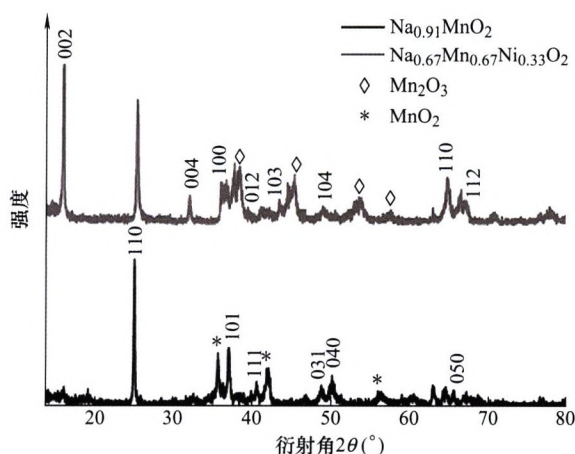
**摘要:** 航空扩口导管的轴向收缩量是影响管路装配质量的重要因素, 对于扩口段轴向长度不合格的管件, 只能凭工人经验现场调整。常用的有限元法需多次模拟才可求得轴向收缩量, 效率较低。自主开发扩口管一步逆成形程序, 提出径向投影法获得初始解, 并采用网格光顺算法提高初始解精度, 经全量理论的塑性迭代获取初始管坯尺寸, 从而在几秒内快速预测出精确的轴向收缩量, 为设计阶段管坯尺寸的确定提供依据。将扩口管一步逆成形程序的轴向收缩量预测过程与商用有限元软件 LS-DYNA、Abaqus 对比, 一步逆成形程序极大地简化了前处理操作, 提高了计算效率。选取多个不同规格的典型航空用导管进行冲压扩口成形试验, 一步逆成形程序模拟量相对于试验值的误差在 6.33% 以内。扩口管一步逆成形程序计算速度快, 求解精度高, 可准确预测扩口管轴向收缩量, 具有工程应用意义。



**摘要:** 高熵合金由于具有众多优异性能, 有可能突破传统合金的性能极限, 被认为是下一代金属材料的发展方向。CoCrCuFeMn 作为一种重要的高熵合金体系, 目前关于 Ti 掺杂对其组织结构与性能影响的报道较少。采用熔铸法制备等摩尔比的 CoCrCuFeMn 和 CoCrCuFeMnTi 高熵合金, 利用 XRD、OM、SEM、EDS、显微硬度计和摩擦磨损试验机分别测试 Ti 掺杂前后对其物相结构、显微组织和耐磨性的影响。结果表明, CoCrCuFeMn 由 FCC1 和 FCC2 双相组成, Ti 掺杂使其物相结构转变成 BCC 和 HCP 相的双相组织。两种合金均为典型的树枝晶结构, Cu 元素在晶间富集, Mn 元素的偏析系数最小。Ti 掺杂并未改变合金元素的富集区域, 但使所有元素偏析系数降低。Ti 掺杂使合金的硬度从 219.6 HV 提高到 693.8 HV, 摩擦因数和质量损失率分别从 0.57、4.14% 降低到 0.55、1.28%。Ti 掺杂合金硬度和耐磨性的提高主要是由于相转变、固溶强化、细晶强化和内应力降低的综合作用所致。研究成果不仅有助于完善和丰富 Ti 元素掺杂对 CoCrCuFeMn 合金性能影响的相关理论, 同时也为该合金后续的科学研究和工程应用提供理论支撑。

## 117 多金属共掺杂制备 $\text{Na}_{0.67}\text{Mn}_{0.67}\text{Ni}_{0.33-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ 钠离子电池正极材料及电化学性能优化机理研究

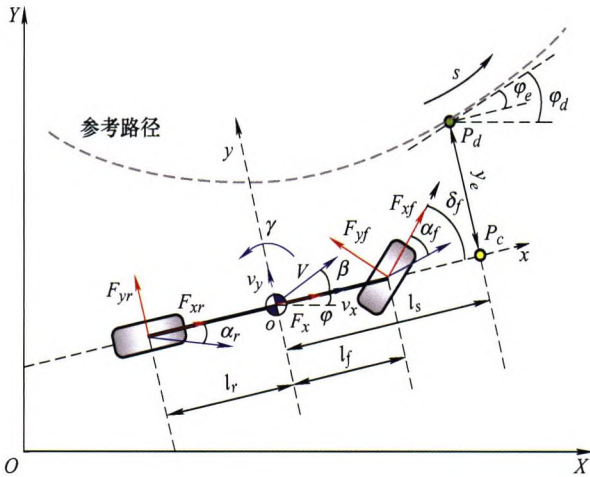
张远朋 赵方晖 张国举 杨洁 段连峰



**摘要:** 利用简单的水热结合煅烧法制备  $\text{Na}_{0.91}\text{MnO}_2$ , 并以此为前驱体材料, 在相同条件下进行 Ni 掺杂制备  $\text{Na}_{0.67}\text{Mn}_{0.67}\text{Ni}_{0.33}\text{O}_2$  纳米颗粒有效地提高了比容量。进一步地, 又对  $\text{Na}_{0.67}\text{Mn}_{0.67}\text{Ni}_{0.33}\text{O}_2$  进行 Co 掺杂制得  $\text{Na}_{0.67}\text{Mn}_{0.67}\text{Ni}_{0.33-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ , 发现得到的电极材料具有更高的循环稳定性。通过微观结构及成分分析所合成的样品成分均一、形貌均匀, 粒径大约 300 nm。其中 Ni、Co 共掺杂的  $\text{Na}_{0.67}\text{Mn}_{0.67}\text{Ni}_{0.33-x}\text{Co}_x\text{O}_2$  在电流密度 0.1C 时, 首次充、放电比容量均为  $160 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$  以上, 经过 200 次循环的放电比容量保持在  $120 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 。电流密度 1C 时可逆容量可达到  $90 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 。研究表明, 通过 Ni 的掺杂提高了纳米颗粒的比容量, Co 掺杂可提高电极材料的钠离子扩散系数, 减小电荷转移阻抗, 双掺杂可有效提高电极材料的比容量、倍率与循环性能。

127 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述

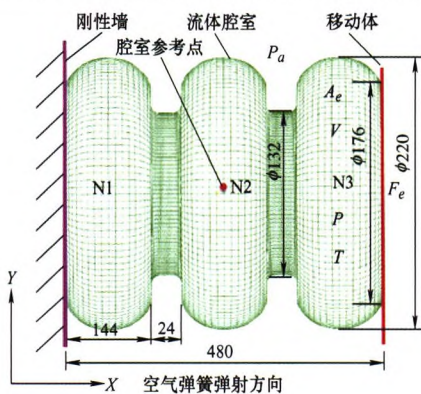
熊璐 杨兴 卓桂荣 冷搏 章仁燮



**摘要:** 回顾无人驾驶车辆的运动控制问题。从系统模型、控制方法以及控制结构等角度切入, 分别在纵向运动控制、路径跟踪控制和轨迹跟踪控制三个层面对国内外的研究进展进行综述, 并提出对无人驾驶车辆运动控制技术的发展展望。当前运动控制研究多集中于常规工况, 为实现无人驾驶车辆在处理人类驾驶员认为具有挑战性或缺乏操纵能力的复杂动态场景下的潜力, 运动控制研究须从常规工况向极限工况拓展, 但是极限工况下车辆的非线性和多维运动耦合特征显著增强, 对系统建模以及算法的自适应性和鲁棒性的要求进一步提高。同时, 为应对复杂场景下的多目标协调优化问题, 考虑环境不确定性的运动规划与控制集成设计需要深入研究。增加执行器手段可以提升极限工况下车辆的侧向响应速度和控制裕度, 但是冗余异构执行器的控制分配研究仍有待突破。运动控制的实现依赖于路面附着系数、质心侧偏角等信息输入, 因此基于多源传感信息融合的关键状态与参数估计问题亟需解决。此外, 将机器学习应用到车辆运动控制领域也是一个重要的发展方向。

144 空气弹簧弹射冲击性能影响因素研究

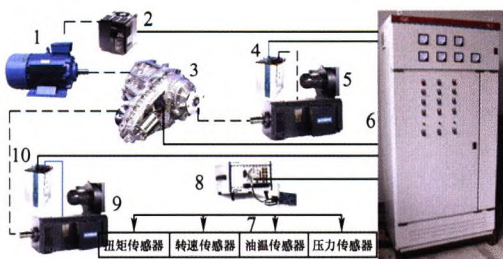
李玉如 杨冰 谢君科 肖守讷 阳光武 朱涛 肖世德 柳忠彬



**摘要:** 基于空气弹簧的非线性特性, 建立一种流固耦合弹射模型, 并通过弹射碰撞试验系统验证模型的准确性。基于该模型, 研究初始压强、压缩位移对空气弹簧弹射冲击性能的影响, 再现了空气弹簧在弹射过程中的往复振荡现象, 同时表明通过调整初始压强和压缩位移能够显著提高弹射冲击性能。进一步, 通过改变模型加强筋参数, 分析帘线角、帘线层、帘线间距、帘线直径和距中性面距离等参数对空气弹簧弹射冲击性能的影响。结果显示, 帘线参数对弹射冲击性能的影响有限, 但帘线层数的增加可显著提高空气弹簧稳定性。分析结果有助于拓宽空气弹簧的工程应用范围, 促进相关碰撞测试的开展和车辆被动安全性能提升。

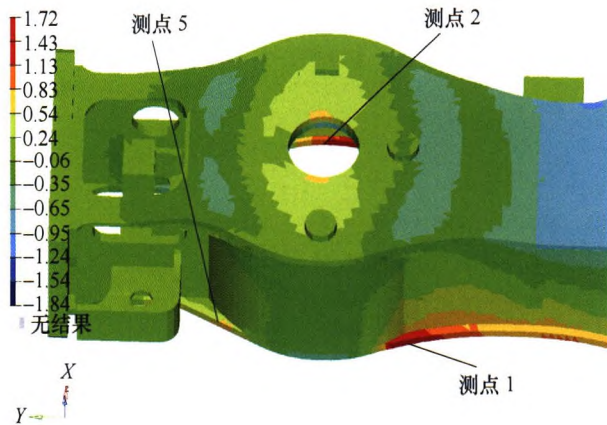
154 摩擦迟滞影响下分动器动力传递特性模型

王钰明 李洪亮 陈黎卿 王其东 吕先洋



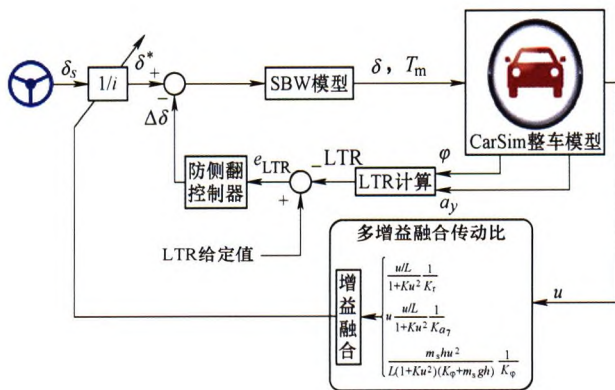
**摘要:** 分动器是智能四驱汽车的关键部件, 关于其性能研究较多从机械传动角度考虑, 对摩擦片与对偶钢片接触引起的微观性能研究不多。针对这一问题, 建立分动器静力学和动力学模型, 分析润滑油挤压力和流体弹性动力学模型对摩擦因数的影响, 计算出分动器在摩擦片与对偶钢片接合和分离过程中的转矩变化情况。结果表明, 摩擦片与对偶钢片接合和分离过程中摩擦因数并非定值, 而是会随接合和分离产生一定的波动, 导致分动器传递的转矩产生将近  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$  的差距。分析挤压力和油膜厚度的关系, 得到在加速过程中, 油膜挤压力对油膜厚度产生消极的作用, 导致加速过程中的油膜厚度相对于恒定状态下的油膜厚度较小; 在减速过程中情况相反, 油膜挤压力对油膜厚度产生积极的影响, 从而导致传递的粗糙转矩变小, 最终形成了摩擦迟滞环。摩擦迟滞环的面积代表加速和减速过程中两者传递转矩的差值, 其结果将为分动器的精确控制提供了理论依据。





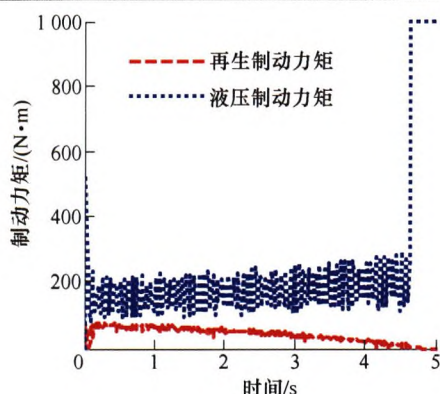
**摘要：**利用载荷标定方法制作轴箱弹簧力传感器和一系减振器力传感器，线路测试得到动车转向架构架的垂向载荷时间历程。结合车载 GPS 信号和陀螺仪信号，分析列车起动加速、高低速直线运行、线路曲线通过、电机扭矩波动、制动停车等典型工况下构架载荷的变化特征。采用有限元仿真分析的方法确定构架端部的疲劳危险区域及载荷与应力的传递关系，进而编制构架在轴箱弹簧载荷、一系减振器载荷和耦合载荷作用时的应力幅值谱，最后依据疲劳损伤线性累计准则计算得到构架的疲劳损伤分布。研究表明，与构架非动力侧相比，构架动力侧轴箱弹簧载荷受电机输出扭矩的影响较大，尤其在列车起动、制动、电机扭矩波动等工况载荷变化明显。在轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷单独作用时，构架端部的应力较大位置分布基本一致，最大载荷-应力传递系数为 6.56 MPa/kN。在耦合载荷作用下，构架端部各测点处的疲劳损伤值均高于轴箱弹簧载荷、一系减振器载荷的单独作用。列车由速度 200 km/h 增大至 350 km/h 时，构架一位侧疲劳危险点的累计损伤值由 0.078 增大至 0.435，增大了约 4.6 倍。在同一速度级下，一系减振器载荷产生的疲劳损伤影响参数大于轴箱弹簧载荷。研究结果可为焊接构架的优化设计及仿真分析提供一定理论参考。

172 汽车多增益融合线控转向传动比及防侧翻控制

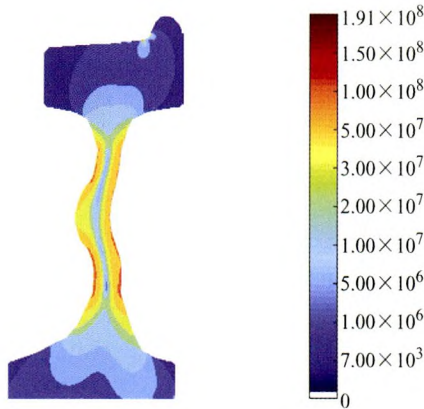


**摘要：**转向传动比是汽车操纵稳定性及主动安全性的重要影响因素，理想转向传动比忽略转向执行机构影响，仅考虑汽车单一运动稳定性，难以实现汽车主动转向防侧翻实际要求。考虑线控转向执行机构动力学特性，提出融合汽车横摆、横向及侧倾运动增益的线控转向传动比，设计多增益融合转向传动比的主动转向防侧翻控制策略。建立线控转向系统模型，分析线控转向系统动力学特性；由汽车系统动力学理论求解横摆运动、横向运动及侧倾运动的转向传动比增益，采用遗传算法进行不同工况的转向传动比优化，获得多增益融合线控转向传动比；根据典型工况汽车稳定性分析规律，设计多增益融合线控转向传动比的汽车主动转向防侧翻控制策略。实例仿真结果表明，多增益融合线控转向传动比能同时改善车辆低速转向灵活性和高速转向稳定性，设计的控制策略在绊倒型及非绊倒型工况均能够有效地防止汽车侧翻，减少控制器对驾驶员转向意图的干预。

181 轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制

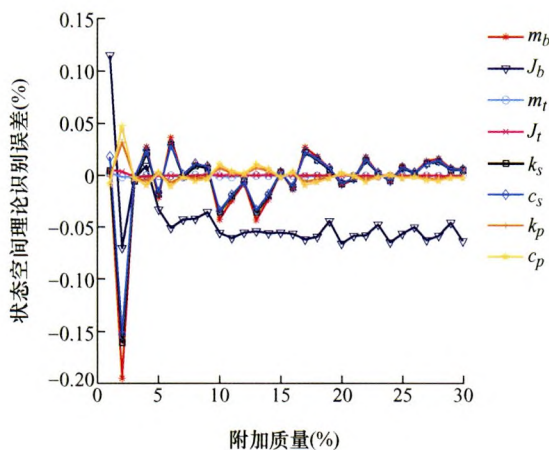


**摘要：**为提升再生制动系统能量回收效率以及平衡动力电池包中单体动力电池的性能差异，提出一种基于 BMS 的轮毂电机变压充电结构，并对变压充电再生制动控制方法进行深入研究。介绍基于 BMS 的轮毂电机变压充电结构组成方式以及变压充电再生制动控制方法的工作原理；在建立轮毂电机变压充电理论模型的基础上，探索轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制规律；采用最小二乘法设计充电电压求取控制算法，并通过台架试验验证充电电压求取公式的拟合精度；通过 Matlab/Simulink 仿真，模拟在不同制动工况下采用再生-液压复合制动系统进行防抱死控制的仿真过程。结果表明，变压充电再生制动控制方法能够精确实施轮毂电机的再生制动行为。



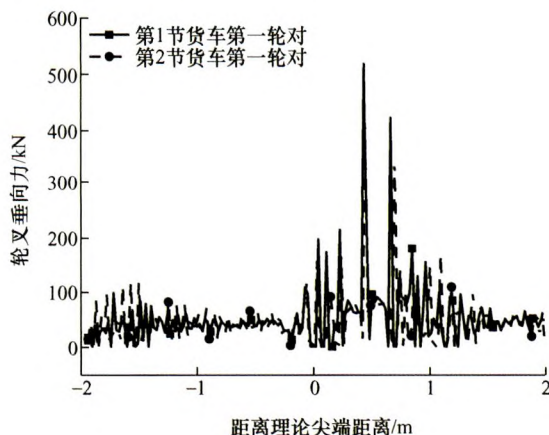
**摘要:** 城市轨道交通车轮的结构优化大多集中于参数优化, 设计空间普遍有一定的局限性。以降低城市轨道交通车轮辐板处的结构应力为目标, 利用双向渐进结构优化算法对直辐板车轮进行拓扑优化建模, 提出一种新颖的城市轨道交通车轮辐板结构。重点针对城市轨道交通车轮受力最恶劣的曲线工况, 对直辐板车轮的设计域进行 2D 拓扑设计, 在满足体积约束条件下, 通过对删除率、进化率、增加率进行设定, 使体积比经过反复振荡从而达到较好的性能优化指标, 提高了城市轨道交通车轮的应力性能, 获得了城市轨道交通车轮的优秀拓扑结构。通过与成熟有限元软件计算结果对比, 优化后的静强度和疲劳强度均满足要求, 证明了双向渐进结构优化算法的有效性和可靠性。研究表明, 双向渐进结构优化算法对城市轨道交通车轮的优化设计是适用的; 优化车轮的辐板形式由直辐板进化为曲辐板, 且单元向中间圆弧处靠拢, 辐板具有不等厚特征; 在不增加车轮重量的前提下, 优化车轮在辐板处的最大结构应力降低了 17%。所做工作对城市轨道交通车轮结构应力性能的提升具有重要的参考价值。

200 铁道车辆物理参数识别方法研究

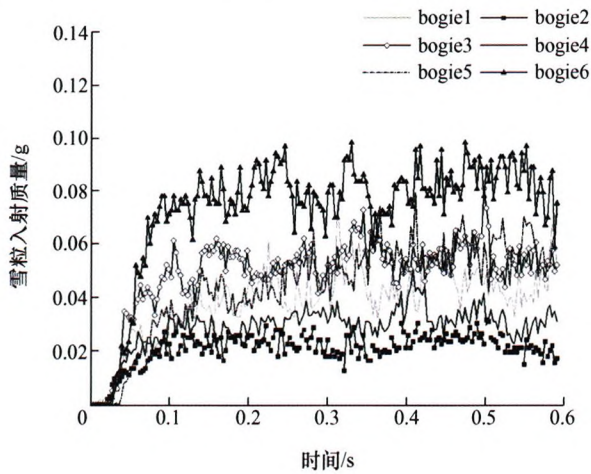


**摘要:** 针对铁道车辆物理参数识别问题, 首先通过状态空间理论和模态空间理论获得了车辆系统状态矩阵, 接着分别提出了附加质量法和比例关系法两种铁道车辆物理参数识别方法。附加质量法可识别车辆全部物理参数, 但需要将特定的质量附加到车辆系统中。比例关系法无需附加质量, 以构架质量参数已知为前提条件来对车辆其余物理参数进行识别。设计了用于物理参数识别的车辆定向激励工况, 并通过仿真试验对两种物理参数识别方法进行了验证及对比分析。结果表明, 采用附加质量法进行车辆物理参数识别时, 附加质量大小选取为车辆系统质量的 3% 识别精度最高; 附加质量法和比例关系法在识别精度和测试实施难度方面各有优缺点, 因此, 在实际车辆物理参数识别中, 可根据现场情况, 合理选择识别方法。

208 车轮型面演变对重载固定辙叉磨损的影响



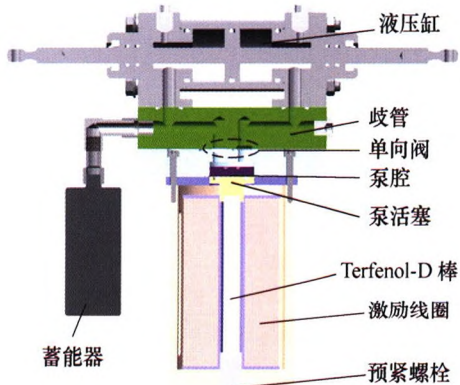
**摘要:** 为研究大秦线路上列车车轮型面演变对固定辙叉动力学性能的影响, 建立重载列车-辙叉动力学模型, 分析重载列车通过固定辙叉的动力学性能和磨损规律。结果表明, 车轮通过理论尖端后, 滚动圆半径不断变化使得轮叉接触点线速度发生改变, 轮叉间滚动与滑动摩擦并存, 对翼轨磨损较大; 不同车轮对心轨冲击位置相对集中, 心轨该区段损伤严重; 车轮演变使轮叉接触状态发生变化, 磨损初期车轮的列车动力学性能优于标准车轮, 列车平顺性更好, 磨损初期机车与货车轮叉垂向力较标准车轮分别降低了 39% 和 56%, 该磨损阶段车轮与辙叉匹配时, 辙叉的磨损最轻微。随着车轮型面演变, 车轮磨损加深, 列车动力学性能逐渐恶化, 磨损后期车轮对辙叉磨损掉块伤损的影响最剧烈。



**摘要:** 高速列车在风雪等极端环境下的运行性能日益被人们关注, 而雪粒在列车转向架区域堆积会影响列车的行车安全。基于非定常雷诺平均 Navier-Stokes 方程和欧拉-拉格朗日多相流模型, 将雪粒视为球形颗粒, 采用三车编组形式, 研究雪粒进入转向架区域的途径, 并研究雪粒密度和直径变化对转向架区域雪粒堆积的影响。研究表明, 大部分雪粒是从列车底部进入转向架区域的。随着雪粒直径和密度的增加, 大部分转向架的雪粒堆积量减少。而位于头车一位端转向架的雪粒堆积量增加, 这是由头车一位端转向架区域流场和几何结构复杂所导致的。雪粒较易堆积在转向架的构架、制动系统和驱动系统上。而且随着雪粒直径或密度的增加, 这些部位上的积雪量占转向架积雪总量的比例越来越大。

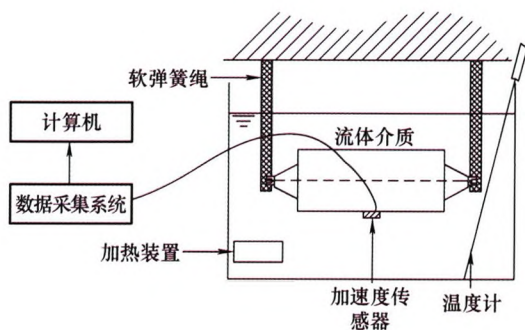
交叉与前沿

225 考虑流体体积模量变化的 M-EHA 非线性动力学模型

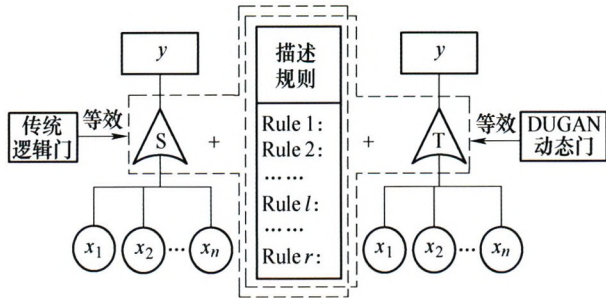


**摘要:** 为能够准确预测超磁致伸缩电静液作动器(M-EHA)的动态输出特性, 提出一种考虑流体体积模量和密度变化的非线性动力学建模方法。采用 Jiles-Atherton 磁滞模型对超磁致伸缩材料的本征非线性进行描述, 并通过整流阀振动方程、流量方程、管路压降方程和液压缸动力学方程对流体整体传动特性进行建模。为研究流体体积模量和密度变化的影响, 将流体有效体积模量处理为压力的函数, 并结合电液模拟理论研究了管路中流体的可压缩性、惯性以及黏性对于 M-EHA 输出性能的影响, 最终建立了其非线性动力学模型。采用 4 阶龙格库塔法对模型进行迭代求解, 并结合试验对比分析, 研究了驱动频率、偏置压力以及负载与作动系统输出性能之间的关系。研究表明, 作动系统输出性能随驱动频率呈双峰变化趋势, 且随着偏置压力增加, 峰值频率上升, 在 2.6 MPa 偏压时, 达到最佳输出水平, 为高性能 M-EHA 的设计开发与优化奠定了理论基础。

235 流体介质中沉浸辊模型附加质量和附加阻尼试验研究



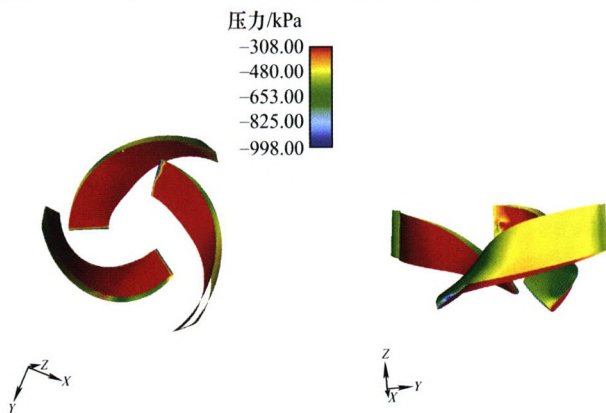
**摘要:** 为准确分析不同流体介质中沉浸辊模型附加质量和附加阻尼的变化规律, 建立理论计算分析模型, 对 4 种模型在 4 种流体中进行模态试验。利用锤击法, 分别对加杆和不加杆的沉浸辊模型进行空气中模态试验, 两者结果一致性较高。加杆沉浸辊模型的试验结果分析可知, 水和液压油中前六阶的频响函数曲线峰值明显, 甘油中仅前三阶明显; 甘油的黏度变化对模型固有频率的影响较小, 但随其黏度的增大其附加阻尼因数增加; 随着液体密度增加, 模型各阶振型对应的附加质量因数均呈线性增加, 且当结构的质量和刚度增大时, 其增加的斜率减小; 随着结构密度增大, 模型附加质量因数减小; 所有模型(1, 2)和(2, 2)振型的附加质量因数大于弯曲振型。



**摘要:** 相对于 DUGAN 动态故障树分析方法, 离散时间 T-S 动态故障树分析方法增强了故障树描述静、动态失效行为的能力, 且可以直接定量分析, 但存在分析计算误差、且不能反映系统可靠度变化趋势。为此, 提出连续时间 T-S 动态故障树分析方法。定义描述静、动态失效行为的连续时间 T-S 动态门, 提出基于下级事件时序关系及事件发生冲激函数描述与上级事件发生可能性的连续时间 T-S 动态门描述规则构建方法, 利用冲激函数冲激点的积分特性, 进而提出基于描述规则执行度与上级事件发生可能性及冲激函数积分的上级事件故障概率密度函数和故障概率分布函数的分析计算方法。所提连续时间 T-S 动态故障树分析方法具有相对于 DUGAN 动态故障树分析方法更强的失效行为描述能力, 解决了离散时间 T-S 动态故障树分析方法的分析计算误差问题、且能反映系统故障概率变化。通过与基于 Markov 链、离散时间贝叶斯网络、连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法及离散时间 T-S 动态故障树分析方法进行对比, 验证了所提出的连续时间 T-S 动态故障树分析方法具有可行性, 且更有优势。

257 基于 DEM-CFD 颗粒体积分对深海扬矿电泵工作性能的影响

刘少军 李渊文 胡小舟



**摘要:** 在以往的 CFD 研究中很少考虑颗粒在固液两相流流动中的碰撞。为了弥补不足, 采用 DEM-CFD 耦合的方法进行数值模拟, 充分考虑颗粒的碰撞以及颗粒与流体之间的相互作用, 更加接近实际工况。研究表明, 在泵内随着颗粒体积的增加泵内流动紊乱, 碰撞增加, 流道中固液两相流混合不均匀, 导致泵的扬程, 效率下降。试验数据与模拟数据相近, 证明了模拟方法的可行性。通过 DEM-CFD 的方法对未来深海采矿固液两相流的研究提供参考。

77 第 9 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

171 第 9 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

243 第 9 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

**CONTENTS**

- 1 Research on Health Evaluation Method for In-service Large-scale Amusement Rides**  
SHEN Gongtian LIU Yuan ZHANG Junjiao HU Bin
- 12 Research on the Heat Resistant Quantum Dots Sensor for Rotating Components Monitoring**  
ZHANG Pan YAN Ke ZHU Yongsheng HONG Jun LIANG Panting
- 19 Structural Health Monitoring of Pressure Vessel Based on Guided Wave Technology. Part III: Online Monitoring of Filament Wound Pressure Vessel**  
YANG Bin HU Chaojie XUAN Fuzhen XIAO Biao XIANG Yanxun LUO Chengqiang
- 27 Visual Reconstruction of Irregular Crack in Austenitic Stainless Steel Based on ACFM Technique**  
YUAN Xinan LI Wei YIN Xiaokang CHEN Guoming ZHAO Jianming JIANG Weiyu  
ZHANG Zhan XUE Ruiqi
- 34 A Hybrid Method for Efficient Simulation and Feasibility Study of Guided-wave Electromagnetic Acoustic Transducers for Inspection of Metallic Tubes with Small Diameters**  
CAI Rui LI Yong LIU Tianhao PEI Cuixiang CHEN Zhenmao
- 42 Transverse Crack Detection for a Rotating Shaft with Variable Cross-section Based on Propagation Characteristics of the Elastic Waves**  
WEI Yimin LIU Qi CHEN Wenhua YANG Shixi
- 50 Simulation Study on Early Stress Corrosion Damage Detection of Austenitic Stainless Steel Based on Nonlinear Surface Wave**  
SHI Yuanyuan LI Ping ZHAO Jie CHENG Congqian
- 57 Equipment Abnormal Degree Detection Approach Based on Interface Detector with Variable-sized Boundary Samples**  
LI Dong SUN Xin LIU Shulin
- 64 Research Status of Optimization Theory and Method of Thermal Spraying Coating / Substrate Heterogeneous Interface Bonding**  
LIU Ming CHEN Shuying MA Guozheng XING Zhiguo HE Pengfei WANG Haidou  
HUO Mingliang
- 78 Microstructure Characterization and Tribological Properties Evaluation on WC/Cu Composite Coating Prepared by Supersonic Laser Deposition**  
HUANG Xuanjie WU Lijuan LI Bo WANG Weilin ZHANG Qunli VOLODYMYR S. Kovalenko  
YAO Jianhua

- 86 Analysis and Optimization of Residual Stress after Reflow Soldering of BGA Lead Free Solder Joints**  
ZHAO Shengjun HUANG Chunyue LIANG Ying KUANG Bing TANG Xiangqiong
- 95 Interface Properties of Aluminum Alloy-Nitrile Butadiene Rubber Composite Sealing Part**  
MAO Jian LIN Weichao GONG Ningning LI Xiping
- 102 Fast Prediction Method of the Axial Contraction of Aviation Flared Tube**  
BAO Yidong QIAN Wenqing CHEN Xiaoyu CUN Wenyuan SHU Yang
- 110 Effect of Ti Doping on Microstructure and Wear Resistance of CoCrCuFeMn High-entropy Alloys**  
MA Mingxing WANG Zhixin ZHOU Jiachen LIANG Cun ZHU Dachuan ZHANG Deliang
- 117 Preparation of  $\text{Na}_{0.67}\text{Mn}_{0.67}\text{Ni}_{0.33-x}\text{Co}_x\text{O}_2$  as Cathode Material for Sodium Ion Battery by Multi-metal Substitution and Electrochemical Performance**  
ZHANG Yuanpeng ZHAO Fanghui ZHANG Guoju YANG Jie DUAN Lianfeng
- 127 Review on Motion Control of Autonomous Vehicles**  
XIONG Lu YANG Xing ZHUO Guirong LENG Bo ZHANG Renxie
- 144 Study of Influence Factors on Ejection Impact Performance of Air Spring**  
LI Yuru YANG Bing XIE Junke XIAO Shoune YANG Guangwu ZHU Tao XIAO Shide LIU Zhongbin
- 154 Transfer Case Transmission Performance Model under the Influence of Friction Lag**  
WANG Yuming LI Hongliang CHEN Liqing WANG Qidong LÜ Xianyang
- 163 Load Characteristics and Fatigue Damage Assessment of High Speed Train Bogie Frame**  
ZHANG Yayu SUN Shouguang YANG Guangxue LI Guangquan
- 172 Multi-gains Ratio of Steer-by-wire System and Anti-rollover Control for Vehicle**  
JIN Zhilin LIANG Weihe ZHAO Wanzhong
- 181 Voltage Variable Charging Regenerative Braking Control Strategy for In-wheel Motors Driven Vehicle**  
WANG Juncheng HE Ren
- 191 Topology Optimization of Urban Rail Wheel Based on BESO Algorithm**  
WEN Yongpeng ZHENG Xiaoming WU Aizhong LIU Yuejie
- 200 Research on Identification Method of Railway Vehicle Physical Parameters**  
CHEN Jiangxue ZHOU Jinsong GONG Dao
- 208 Influence of Wheel Profiles Evolution on Wear of Fixed Frog in Heavy Haul Railway**  
ZHU Huangshi ZOU Xiaochun MA He ZHANG Jun
- 216 Effect of Snow Parameters on Snow Accumulation in High-speed Train Bogies**  
ZHANG Le LI Tian CAI Lu ZHANG Jiye AN Chao

- 225 Nonlinear Dynamic Model of M-EHA Considering Fluid Bulk Modulus Variation**  
LI Bo ZHU Yanchao SHU Liang YANG Jiabin CHEN Dingfang
- 235 Experimental Investigation of Added Mass and Damping on Model of Sink Roll in Fluid Media**  
WANG Xingdong HU An HU Li TU Qirui LI Yourong WU Zongwu
- 244 Continuous-time T-S Dynamic Fault Tree Analysis Method**  
YAO Chengyu WANG Chuanlu CHEN Dongning WEI Xing LÜ Shijun
- 257 Effect of Particle Volume Fraction on the Performance of Deep-sea Mining Electric Lifting Pump Based on DEM-CFD**  
LIU Shaojun LI Yuanwen HU Xiaozhou

# 《机械工程学报》第十一届编委会

## 名誉主任

钟群鹏 (院士) 路甬祥 (院士) 潘际銮 (院士)

## 名誉委员

王玉明 (院士) 石治平 (研高) 叶声华 (院士) 宁汝新 (教授) 过增元 (院士) 刘大响 (院士)  
刘友梅 (院士) 刘宏民 (教授) 李圣怡 (教授) 周祖德 (教授) 胡正寰 (院士) 柳百成 (院士)  
钟掘 (院士) 闻邦椿 (院士) 耿荣生 (教授) 徐金梧 (教授) 徐滨士 (院士) 熊有伦 (院士)

## 主 任

陈学东 (院士)

## 副 主 任

王国彪 (教授) 邓宗全 (院士) 李 奇 (编审) 陈超志 (教授级高工) 邵新宇 (院士)  
黄 田 (教授) 黄庆学 (院士)

## 国内委员

丁 汉 (院士) 王 雪 (教授) 王田苗 (教授) 王华明 (院士) 王庆丰 (教授) 王时龙 (教授)  
王树新 (教授) 王海斗 (教授) 王润孝 (教授) 王耀南 (院士) 孔祥东 (教授) 卢秉恒 (院士)  
史玉升 (教授) 冯吉才 (教授) 权 龙 (教授) 曲兴华 (教授) 朱 胜 (教授) 朱 荻 (院士)  
朱向阳 (教授) 华 林 (教授) 刘 强 (教授) 刘少军 (教授) 刘军山 (研究员) 刘志军 (教授)  
刘辛军 (教授) 刘检华 (教授) 刘雪峰 (教授) 刘献礼 (教授) 刘德顺 (教授) 孙 伟 (教授)  
孙汉旭 (教授) 孙逢春 (院士) 严新平 (院士) 杜 雪 (教授) 杜朝辉 (教授) 李大勇 (教授)  
李荣德 (教授) 李涤尘 (教授) 杨永强 (教授) 杨华勇 (院士) 杨兆军 (教授) 杨绍普 (教授)  
何存富 (教授) 沈功田 (研究员) 张 崢 (教授) 张义民 (教授) 张卫红 (教授) 张立军 (教授)  
张宪民 (教授) 陈 新 (教授) 陈文华 (教授) 陈兵奎 (研究员) 陈雪峰 (教授) 苑世剑 (教授)  
苑伟政 (教授) 范志超 (研究员) 林 京 (教授) 林 峰 (教授) 林忠钦 (院士) 周仲荣 (教授)  
周华民 (教授) 单忠德 (院士) 项昌乐 (院士) 赵 杰 (教授) 赵 继 (教授) 赵 韩 (教授)  
赵丁选 (教授) 赵宏伟 (教授) 赵国群 (教授) 柯映林 (教授) 钟志华 (院士) 段吉安 (教授)  
段宝岩 (院士) 姜 澜 (教授) 洪 军 (教授) 宫声凯 (院士) 姚建华 (教授) 姚振强 (教授)  
袁巨龙 (教授) 袁寿其 (教授) 都 东 (教授) 贾振元 (院士) 夏长亮 (院士) 钱林茂 (教授)  
徐西鹏 (教授) 殷国栋 (教授) 高金吉 (院士) 郭万林 (院士) 郭东明 (院士) 涂善东 (院士)  
陶 飞 (教授) 黄卫东 (教授) 黄传真 (教授) 黄明辉 (教授) 梅雪松 (教授) 彭 艳 (教授)  
彭芳瑜 (教授) 葛世荣 (教授) 韩 旭 (教授) 焦宗夏 (教授) 温激鸿 (研究员) 谢建新 (院士)  
雒建斌 (院士) 廖维新 (教授) 谭建荣 (院士) 翟婉明 (院士) 熊蔡华 (教授) 融亦鸣 (教授)  
戴一帆 (教授)

## 国际委员

Bi Zhang (美国)	Denis Cavallucci (法国)	Dong-Pu Cao (英国)
Duc Truong Pham (英国)	Erhan Budak (土耳其)	Guang-Bo Hao (爱尔兰)
Gui-Yun Tian (英国)	Hai-Jun Su (美国)	Han Huang (澳大利亚)
Hong-Chao Zhang (美国)	Jian-Sheng Dai (英国)	Jie (Peter) Liu (加拿大)
Jin Wang (英国)	Jorge Angeles (加拿大)	Jun Wang (澳大利亚)
Kai Cheng (英国)	Kazushi Sanada (日本)	Lian-Xiang Yang (美国)
Li-Hui Wang (瑞典)	Marco Ceccarelli (意大利)	Ming-Jian Zuo (加拿大)
S.S. Park (加拿大)	Shao-Ping Bai (丹麦)	Shin Usuki (日本)
Tamás Insperger (匈牙利)	Wei Gao (日本)	Wei-Dong Li (英国)
Wei-Ming Shen (加拿大)	Xian-Wen Kong (英国)	Xiao-Ping Du (美国)
Xi-Chun Luo (英国)	Xu-Dong Zhao (英国)	Xun Chen (英国)
Y. Lawrence Yao (美国)	Yan Jin (英国)	Ye-Hwa Chen (美国)
Yong Huang (美国)	Yong-Bo Deng (德国)	Yu-Chun Xu (英国)
Zhao-Jie Ju (英国)		



ISSN 0577-6686



9 770577 668200