

# 机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：高速铁路钢轨检测监测与应用

客座主编：田贵云

客座编辑：刘秀波 石永生



57卷 **18**期 半月刊  
2021年9月

## /// 特邀专栏 ///

### 高速铁路钢轨检测监测与应用

客座主编: 田贵云(电子科技大学)

客座编辑: 刘秀波(中国铁道科学研究院集团有限公司)

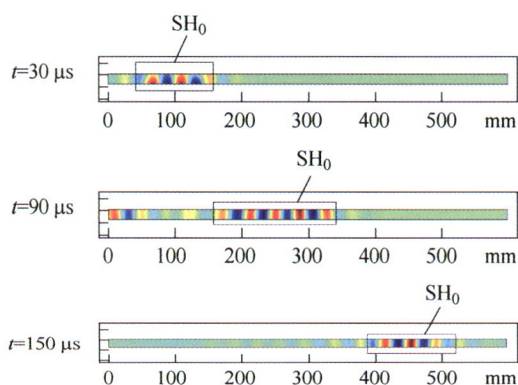
石永生(中国铁道科学研究院集团有限公司)

策划编辑: 张 强(《机械工程学报》编辑部)

## 1 序

## 2 高速铁路道岔尖轨轨底伤损 SH 导波原位检测方法研究

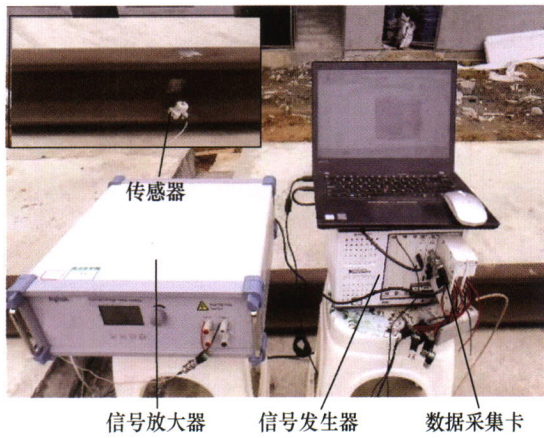
胡松涛 石文泽 卢 超 陈 果 沈功田



**摘要:** 道岔是铁路轨道的最薄弱环节, 高速列车在经过道岔钢轨时, 急剧地改变运行方向, 对道岔产生巨大的竖向和横向冲击力, 使得道岔钢轨轨底容易产生伤损。现有的高速铁路轨道无损检测技术难以对道岔钢轨轨底伤损实施原位不拆卸检测, 给高铁安全运行带来重大隐患。本文考虑道岔钢轨的变截面特性以及弹扣垫板等道岔部件对检测的影响, 选用 SH 模态导波, 将道岔尖轨轨底简化为变截面窄板, 基于 Bloch-Floquet 边界和域约束的有限元特征频率法, 分析了道岔变截面轨底结构的 SH 导波频散特性, 绘制了 SH<sub>1</sub> 导波在变截面窄板内相速度和群速度变化曲线。通过建立 SH 导波在变截面窄板中的传播有限元模型, 研究了 SH<sub>0</sub>/SH<sub>1</sub> 导波在变截面窄板中的传播与模态转换特性。设计并制作了 SH<sub>0</sub> 导波电磁超声换能器 (Electromagnetic acoustic transducer, EMAT), 并对道岔变截面轨底裂纹进行 SH<sub>0</sub> 导波检测对比, 采用同步挤压小波变换 (Synchrosqueezed wavelet transform, SWT) 对导波检测信号进行导波模态分离和噪声滤除。SH 检测模式波质点横向振动, 受弹扣和垫板等道岔部件影响小。将 SWT 应用于道岔尖轨轨底导波检测信号处理, 减小了信号处理的同步平均次数、实现了导波模态分离和大提高快速检测。经过 SWT 处理后, SH<sub>0</sub> 导波检测信号信噪比提高了 10.69 dB。

## 15 不同磨耗状态钢轨中弹性波传播特性研究

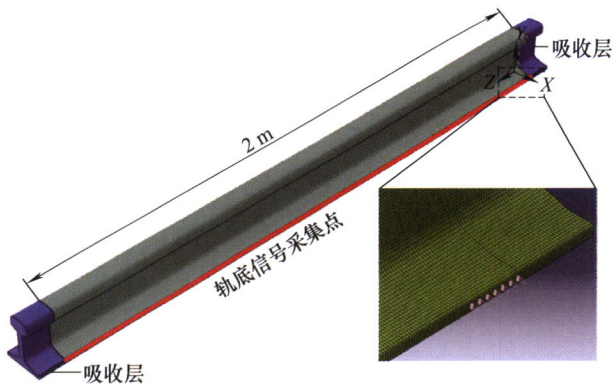
陈 嵘 江文强 李浩然 徐井芒 胡辰阳 田雨虹



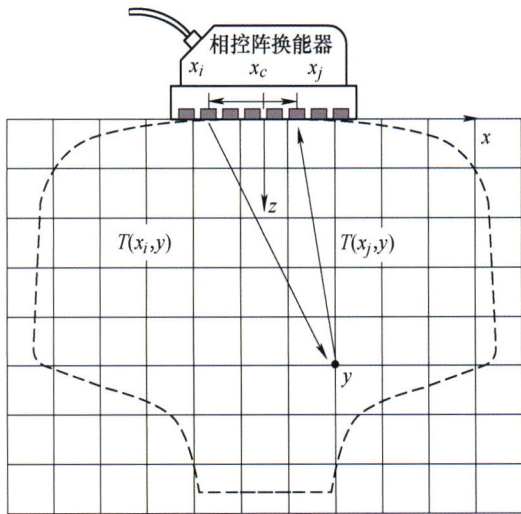
**摘要:** 区间线路钢轨若发生磨耗将会对弹性波传播产生影响, 继而影响弹性波对伤损的识别。采用现场试验, 验证半解析有限元方法的正确性; 基于该理论方法, 对五种不同垂直磨耗量的钢轨求解得到频散曲线, 结合波结构对比分析了磨耗后钢轨的频散特性; 以群速度变化为指标分析了对垂直磨耗敏感和不敏感的波结构特征, 并仿真进行验证。研究表明: 在不同垂直磨耗条件下, 同一频率附近发生频散曲线相交或偏转的频率随着垂直磨耗量增大而增大, 而曲线相交或偏转处的相速度随着垂直磨耗量增大而减小; 非敏感波模式主要通过轨腰和轨底传播, 而敏感波模式主要通过轨头或全断面传播; 轨头垂向振动波模式对钢轨垂直磨耗敏感, 选择该波模式进行钢轨缺陷检测需要考虑钢轨磨耗的影响。

## 23 钢轨中高频超声导波单模态激励技术研究

廖 林 袁懋诞 纪轩荣 戴安帮



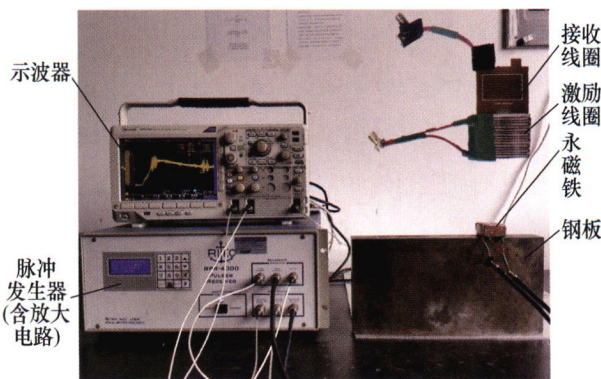
**摘要:** 超声导波由于其长程传播和全截面覆盖等特性而在铁路轨道结构安全检测和监测领域中受到密切关注。而由于其频散和多模态特性, 现有钢轨超声导波技术研究和应用主要集中于 0~90 kHz 的相对低频范围, 从而导致其对微小缺陷的分辨力不足。对钢轨中的道岔等关键位置的检测, 通常不需要长距离监测, 对微小缺陷的灵敏度有更高要求。为提高钢轨中超声导波的缺陷检测能力, 故提出基于阵列传感技术激励高频范围的单模态超声导波。首先基于半解析有限元法研究钢轨超声导波的传播特性, 得到 CHN60 型钢轨的频散曲线和模态振型。根据模态振型信息选取出对特定位置敏感的导波模态并确定其激励位置。通过三维有限元仿真, 对激励传感器的阵元间距、阵列总长、激励周期和窗函数等参数进行学习和优化, 实现了轨底 100 kHz 单模态超声导波的激励。该模态对轨底内部和表面缺陷(小至 3 mm)都具有较高灵敏度。试验测试也表明, 利用优化的激励条件可以在钢轨中激励出高信噪比的单模态超声导波。本研究所提出的钢轨高频单模态导波技术, 可以实现多模态交错复杂高频区(高于 100 kHz)模态的选择性激励, 将为铁路轨道的关键区域(如道岔)微小缺陷的检测和监测提供理论基础和技术支撑。



**摘要:** 用相控阵全聚焦(Total focusing method, TFM)技术复核钢轨缺陷的超声检测结果时, 存在缺陷定量不够准确的问题。对此本研究将传统的距离幅值校正(Distance amplitude correction, DAC)方法引入到了 TFM 技术中: 结合声场模型、系统函数和缺陷散射模型, 建立超声测量模型以预测钢轨缺陷的全矩阵回波信号集; 通过延时叠加模拟了 TFM 成像结果; 对缺陷位置和尺寸进行遍历, 构建超声相控阵 TFM-DAC 图谱。试验结果表明, 用 TFM-DAC 图谱对钢轨缺陷进行定量时精度优于 6%, 而传统-6 dB 法的定量精度高达 13%。本研究还进一步揭示了坏晶片对 TFM 声能分布和钢轨缺陷定量的影响规律, 模拟了存在 25%坏晶片的两种工况, 探明了坏晶片分布方式和 TFM-DAC 图谱之间对应性质, 发现钢轨缺陷的定量精度并没有降低, 对于延长相控换能器的经济使用寿命有重要指导意义。

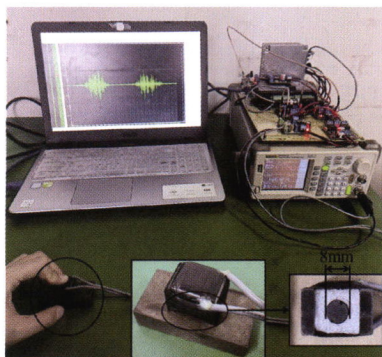
42 钢轨电磁超声 SV 波与表面波多维集成检测

**摘要:** 中国铁路总运营里程近 14 万 km, 大量钢轨服役时间较长, 可能存在较多安全隐患。电磁超声作为一种非接触式、高穿透性的检测技术, 可实现对钢轨的高效全面在线检测。然而, 由于电磁超声存在换能效率低的问题, 通常需要使用大功率激励装置来驱动其正常工作, 单通道体积与功耗均较大。而钢轨由于承受恶劣环境的影响, 需要一种能全面覆盖的高效低耗检测技术。因此, 提出了一种面向钢轨的电磁超声垂直偏振剪切(Shear vertical, SV)波与表面波多维集成检测方法。结合 SV 波和表面波的共性, 在单一电磁超声曲折线圈中加载含有两个不同频率段的脉冲信号进行激励, 同时产生 SV 波和表面波, 分别完成对钢轨轨头表面和轨腰缺陷的多维检测。通过有限元仿真和试验得出, 本方法对人工加工的轨头表面刻槽和轨腰横通孔实现了同时检测, 并利用分频滤波完成了两种缺陷信号的分离。所提出的电磁超声 SV 波与表面波多维集成检测不仅实现了对钢轨检测的低成本、高效率检测, 还能够相互消除两种超声波检测技术的盲区, 达到优势互补的目的。



## 49 基于磁巴克豪森噪声的钢轨白层无损检测研究

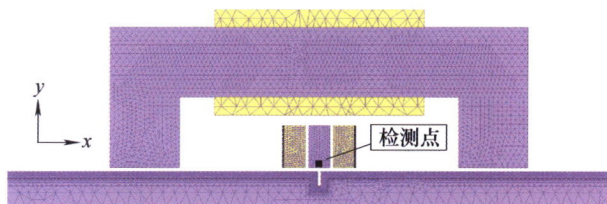
蒋生辉 丁昊昊 张翔 彭建平 王文健 刘启跃 郭俊



**摘要:** 设计搭建了基于磁巴克豪森噪声 (Magnetic Barkhausen noise, MBN) 的钢轨白层无损检测系统, 打磨 U75V 钢轨以预制白层, 使用 1 Hz, 8 V 的正弦信号磁化打磨钢轨试样并收集表面产生的 MBN 信号, 研究了钢轨白层几何特征、微观组织与 MBN 信号特征值的关系, 并分析了白层对 MBN 信号的影响机理。结果表明: 白层作为磁硬性组织, 会降低钢轨表面 MBN 信号强度。试样无明显白层时, 打磨产生的残余拉应力使得 MBN 信号的峰峰值( $V_{PP}$ )和方均根值( $V_{RMS}$ )较高, 当试样出现明显白层后, 信号峰峰值和方均根值迅速减弱。白层中的马氏体晶粒细小, 大量晶界的存在对磁畴有很强的钉扎作用, 在有效检测区域内, 当白层厚度增加, 次表层可发生偏转的磁畴数量会减少, 进而削弱传递到表面的 MBN 信号强度。MBN 信号特征值与白层厚度( $\delta_{WEL}$ )、白层面积( $S_{WEL}$ )都呈现较好的线性负相关变化关系, 其中方均根值与白层面积的线性拟合结果最佳, 皮尔森系数为-0.896 9, 线性拟合度达 0.794 1。MBN 信号特征值对钢轨白层的厚度、面积等几何特征具有定量分析能力, 试验结果对服役钢轨的维护作业具有一定的指导意义。

## 57 基于复合电磁的高速轨道缺陷检测方法研究

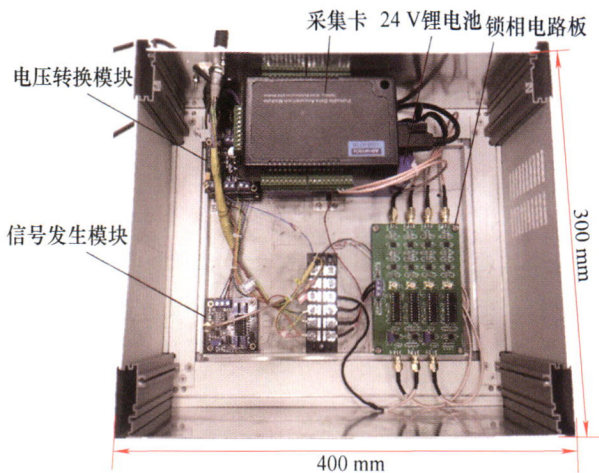
许鹏 耿明 方舟 朱晨露 曾泓茗 王平



**摘要:** 钢轨表面和埋藏缺陷的检测与分类, 对于保障铁路运输安全有着重要的意义。提出了一种将漏磁与涡流检测相结合的高速轨道缺陷检测方法, 对表面和埋藏缺陷进行了识别与分类。设计了一种复合电磁检测探头, 采用差分线圈同时检测涡流和漏磁信号。建立了复合电磁检测系统, 在 20~300 km/h 速度下对高速铁路转台样例进行了检测。根据高频涡流更适用于表面缺陷的检测而直流漏磁能同时检测表面开口和近表面埋藏缺陷的特点, 对涡流和漏磁的检测信号进行处理与对比, 分别得到了表面和埋藏缺陷的信号。试验结果表明, 该方法对钢轨样例上所有表面和埋藏缺陷都实现了检出与分类。

## 66 交流电磁场检测技术钢轨表面裂纹高速检测研究

葛玖浩 杨晨开 胡宝旺 王平 李伟 袁新安 叶云飞

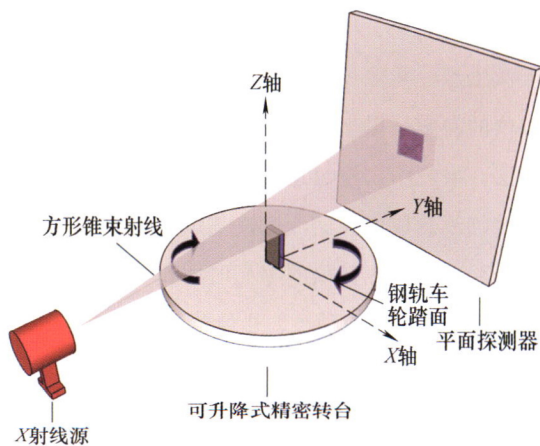


**摘要:** 滚动疲劳裂纹等钢轨表面裂纹的存在会掩盖钢轨深层的核伤而导致漏检,同时,表面裂纹趋向于向水平和竖直方向扩展,造成钢轨表面掉块或钢轨断裂。为缩短检测空窗期,进一步提高高铁运行效率,实现钢轨表面裂纹的高速检测,基于交流电磁场检测技术开展钢轨表面裂纹高速检测技术研究。针对钢轨检测过程中存在的抖动和过高低轨现象,提出“滑靴”结构交流电磁场检测探头,根据钢轨表面裂纹分布特点,采用有限元法分析和优化探头排布;探究“滑靴”厚度对信号的影响。研发交流电磁场检测技术高速钢轨检测车模块,采用高速转盘试验和真实滚动疲劳裂纹检测试验分别验证所研发模块的速度敏感性和检测能力。高速转盘试验结果表明:所研发模块在高速 80 km/h 和低速 0.72 km/h 条件下具有相同的检测能力和灵敏度;高速检测条件下交流电磁场检测技术信号对不同深度裂纹具有较好的线性规律。真实滚动疲劳裂纹检测结果表明:采用“滑靴结构”交流电磁场检测探头可实现真实滚动疲劳裂纹检测。

## 75 基于电涡流脉冲热成像偏度特征的钢轨自然裂纹量化评估

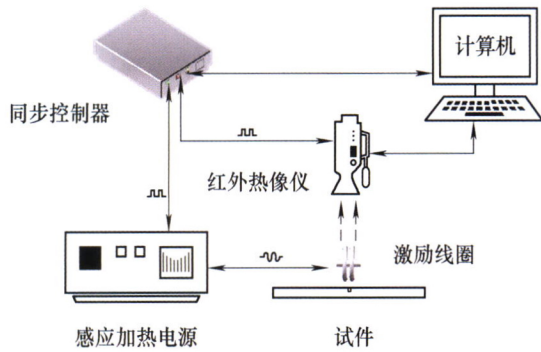
严伊 刘怡 朱俊臻 苗玲 陈笑天 周宇 卢艳平 高斌 田贵云

**摘要:** 钢轨在服役过程中长期承受列车轮对的压力和冲击载荷,会使其表面及浅层区域产生滚动接触疲劳裂纹。该种裂纹具有典型的三维空间特征,常规无损检测方法难以对裂纹的三维特征进行量化评估。以不同承载的钢轨试件中含有的滚动接触疲劳裂纹为研究对象,采用基于多物理场耦合的电涡流脉冲热成像检测技术,分析钢轨车轮踏面加热及冷却阶段的热图像序列偏度分布,表征裂纹三维特征,并与工业计算机层析成像扫描得到的裂纹形貌进行校验。试验结果表明,热图像序列的偏度特征能有效表征钢轨滚动接触疲劳裂纹的位置、走向、长度以及深度信息,偏度表征的裂纹沿钢轨表面走向角度与工业计算机层析成像扫描所得的结果线性相关,相关系数约 0.97;偏度表征裂纹沿钢轨内部纵向扩展的空间角度与工业计算机层析成像扫描空间角度相关系数约 0.89;偏度表征的钢轨内部闭合裂纹长度值与工业计算机层析成像扫描结果相关系数约 0.94;偏度值与对应裂纹深度呈近似线性关系,相关系数约 0.98。因此,基于电涡流脉冲热成像技术的偏度特征提取可用于钢轨滚动接触疲劳裂纹的量化评估,并得到工业层析成像结果校验。电涡流热成像及偏度量化评估方法对在役钢轨滚动接触疲劳裂纹的早期诊断、量化评估、三维可视化以及运营维护具有广阔的应用前景。



## 86 基于电涡流热成像的钢轨滚动接触疲劳裂纹动态检测研究

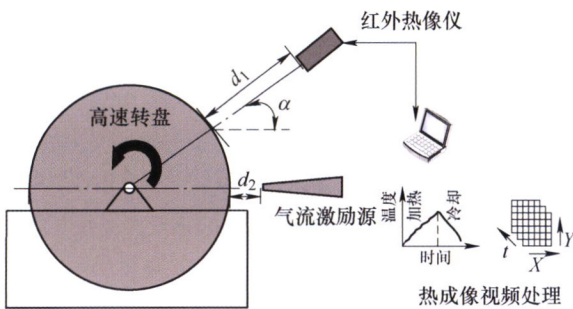
苗玲 高斌 石永生 李浩然 黎潇枫 吴同乐 张喜源 田贵云



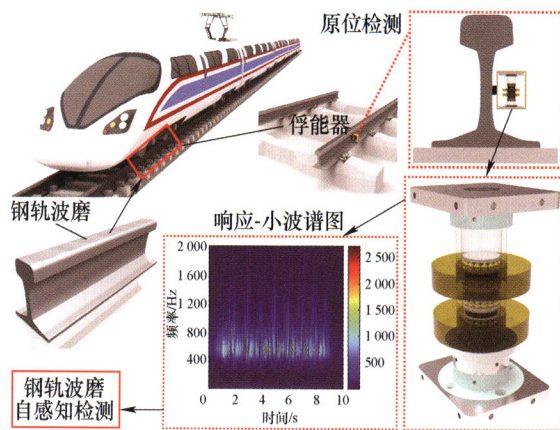
**摘要:** 针对钢轨滚动接触疲劳裂纹检测挑战, 提出了新型传感结构下的多物理电涡流热成像技术。通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件, 分析了圆柱形磁芯结构、弧形磁轭结构和 U 形磁轭结构的电磁场特性, 并研究了在不同传感架构下对疲劳裂纹的检测效果。针对实际应用条件, 在 U 形磁轭结构的基础上研制了 L 形磁轭和梭形磁轭结构并集成开发了感应激励源系统。静止状态下铣平钢轨试块缺陷检测试验表明自主研发的系统对钢轨表面微小缺陷的检测灵敏度高, 能够实现 0.5 mm 宽缺陷的定量分析, 且最小能识别钢轨表面 0.2 mm 宽的缺陷。通过圆盘缺陷检测试验对速度效应下疲劳裂纹的检测进行了研究, 提出的鲁棒低秩张量裂纹分解算法极大地消除了原始热图像的背景噪声并提升缺陷检测分辨率。最后搭建并集成了钢轨低速巡检试验平台, 验证了对钢轨踏面复杂滚动接触疲劳裂纹检测的有效性。

## 98 气流热成像钢轨滚动接触疲劳裂纹在线检测与速度影响研究

陆小龙 田贵云 熊龙辉 高斌 伍剑波 苗玲



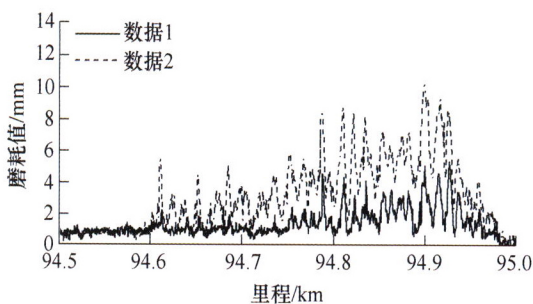
**摘要:** 已有研究表明随着铁路行业对钢轨表面缺陷检测速度要求的不断提高, 速度已经成为影响主动成像检测结果评定的主要因素。针对该问题, 基于前期气流热成像在静态和低速下检测钢轨表面缺陷的研究, 通过优化气流激励源、热像仪和试件之间的空间布局, 激励源和热像仪的参数, 提出以空间换时间策略消除速度影响抑制方法。研究不同检测速度下选择不同采样帧频和曝光时间时气流热成像和涡流脉冲热成像的速度影响。试验结果表明, 红外热像仪的曝光时间和采样帧频选择与速度有关, 通过优化激励源、热像仪和试件的空间位置, 选择合适的曝光时间和采样帧频, 结合热像处理算法可以消除速度和试件表面发射率的影响, 在高达 81.6 km/h 的检测速度下, 气流热成像可以准确地检测出转盘边缘圆柱面上 6 种倾斜角度的人工裂纹, 验证了以空间换时间策略的可行性。气流热成像具有较大的提高距离, 与涡流脉冲热成像在表面及亚表面检测形成互补, 在钢轨滚动接触疲劳裂纹在线快速检测有较好的应用前景。



**摘要:**城市轨道交通中钢轨周期性的波浪形磨耗频发,已严重影响列车的运营安全。钢轨波磨会产生高分贝的噪声,同时引起地基和附近建筑物的振动。目前的轨道波磨检测仪只能在列车停运的状态下(离线)执行检测,且检测设备需要外部供电。基于钢轨振动能量的钢轨波磨原位检测方法是在线检测且无需外部供电,该系统采用三悬浮磁体互斥布置以增强对钢轨振动能量的宽频带俘获,通过仿真和试验确定俘能系统的最佳起始点。借助宽频扫频试验和实测钢轨振动数据验证系统的感知性能,结合小波理论分析钢轨波磨的时频分布特性。结果表明:所提出的原位检测系统能够在宽频带内俘获波磨激励下的钢轨振动能量,进而依据所产生电信号的时频特性来判断钢轨波磨状态。该钢轨波磨原位检测新方法,可实现在线无源检测,减少轨道检测的人工参与度和工作量,有望加速轨道检测技术的智能化进程。

## 118 朔黄重载铁路曲线钢轨侧磨预测研究

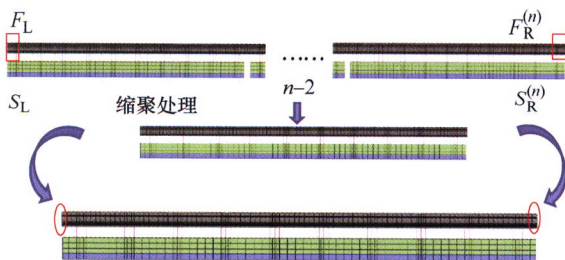
马帅 刘秀波 任松斌 陈茁 刘玉涛



**摘要:**钢轨侧磨是决定重载铁路小半径曲线钢轨服役寿命的关键因素。为研究朔黄重载铁路曲线钢轨侧磨发展规律,基于钢轨磨耗和线路设备、运营、修理等数据,分析不同半径曲线的钢轨侧磨发展规律特征,建立基于非线性自回归神经网络的曲线钢轨侧磨发展预测模型,并提出适用于朔黄重载铁路的曲线钢轨换轨策略。研究表明,朔黄重载铁路曲线钢轨侧磨满足先慢后快的分段发展规律;钢轨侧磨发展受多种因素影响,在相同曲线半径、相同钢轨材质下钢轨侧磨也可能具有不同的发展规律;对于半径大于800m的曲线钢轨,侧磨不是换轨大修的决定因素;模型预测的均方根误差和相关系数分别为0.74 mm、0.84,预测值与实际值具有强相关性;提出状态修与周期修相结合的朔黄重载铁路曲线钢轨换轨策略,为提前制定换轨计划、保障钢轨合理使用提供帮助。

## 126 钢轨动力吸振器对轮轨振动噪声的影响分析

徐泫文 杜星 韩健 刘谋凯 肖新标 金学松

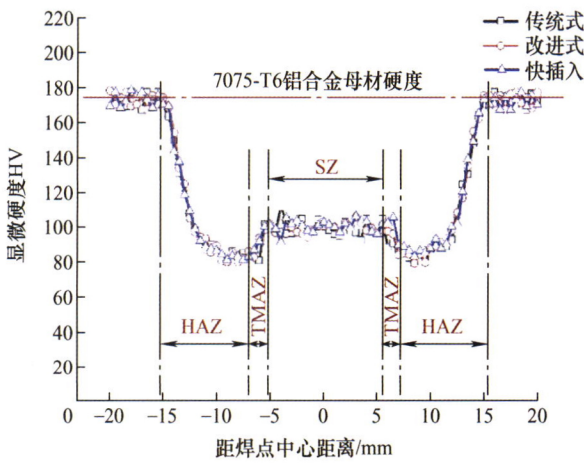


**摘要:**针对有限截取长度轨道结构边界反射波干扰的问题,基于轨道的周期结构特性,采用子结构迭代法建立轨道有限元模型,研究了不同钢轨动力吸振器安装位置、动力吸振器橡胶结构在钢轨上的覆盖面积以及橡胶结构参数对轮轨振动噪声的影响,并对钢轨动力吸振器橡胶结构黏贴失效情况下的降噪性能进行分析。结果显示,轨腰位置安装钢轨动力吸振器对轮轨振动噪声降低效果较好,降噪量为3.2 dBA。采用全包钢轨动力吸振器(橡胶结构覆盖轨头下部,轨腰和轨脚)能够在一定程度上衰减钢轨和钢轨动力吸振器质量块的振动能量,但对钢轨动力吸振器的降噪效果提升不明显。橡胶结构弹性模量对钢轨动力吸振器的减振降噪性能影响较大,选择合理的弹性模量能够有效地降低轮轨振动噪声,降噪量最大为3.9 dBA。橡胶结构部分黏贴失效会对钢轨动力吸振器的降噪性能有较大影响。



137 套筒设计对异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头成形的影响

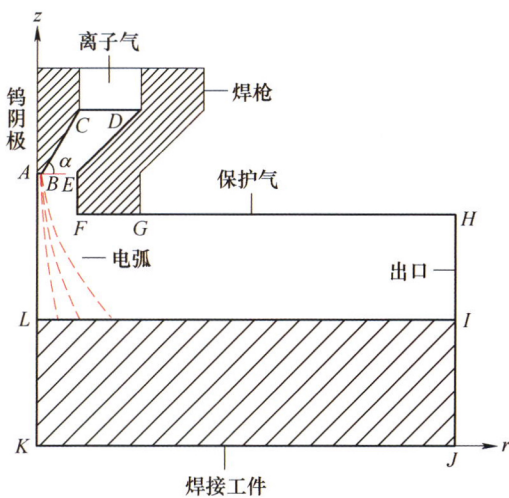
申志康 李文亚 蔡自强 葛世鹏 吴玲璐 刘小超



**摘要:** 焊接效率低和焊接缺陷多是回填式搅拌摩擦点焊(Refill friction stir spot welding, Refill FSSW)工业化应用的主要瓶颈问题。分别采用加工有螺纹和凹槽的套筒对 6022 和 7075 异种铝合金进行 Refill FSSW 试验。结果表明, 与加工有螺纹的套筒(传统式 Refill FSSW)相比, 采用加工有凹槽的套筒(改进式 Refill FSSW)进行焊接时, 在套筒下方形成了材料充分混合的楔形结构。采用加工有螺纹的套筒, 通过快速插入的方式(快插式 Refill FSSW)可提高材料在板厚方向上的流动性, 在接头界面处形成了冶金连接和机械连锁机制。此外, 采用加工有凹槽的套筒, 并通过快速插入的方式(凹槽套筒快插式 Refill FSSW)获得的楔形结构内的材料混合程度随着焊接时间的延长而增加。改进式 Refill FSSW 工艺焊接过程中的最高温度为 504.3 °C, 液化裂纹的形成与低熔点相  $MgZn_2$  的熔化有关。根据热量产生原理, 提出的改进式和快插式 Refill FSSW 工艺有助于提高接头力学性能及其稳定性, 而凹槽套筒快插式 Refill FSSW 工艺可在 1 s 焊接时间内获得满足工业使用要求的无缺陷接头。

144 基于电弧-熔池耦合的小孔型等离子弧焊接简化模型

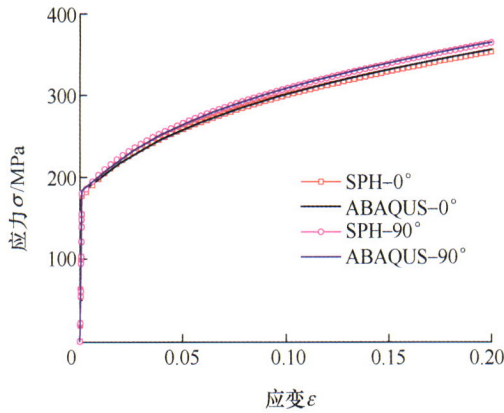
李岩 王领 张冀翔 武传松



**摘要:** 基于电场、磁场、温度场和流场的多物理作用, 建立电弧与熔池耦合的等离子弧焊接模型, 揭示小孔型模式的焊接熔池形成机制。计算结果表明电弧热流密度和压力均呈现高斯分布形式, 并且压力作用范围比热作用范围小一半。发现焊接熔池形成过程具有明显的阶段性, 前期增长较快, 后期增速变缓, 增速下降 60% 以上。等离子弧受到电磁力压缩作用, 能量密度集中, 电弧区的电磁力比熔池区高 2 个数量级。受电弧压力和 Marangoni 力、曳力等共同作用, 熔池底部和顶部边缘分别出现对称分布的环流, 熔池横截面逐渐形成“倒喇叭”状的焊缝。进行焊接试验, 计算的焊缝熔合线和电弧压力均与试验结果吻合良好。模型能够简便快捷地为等离子弧焊接工程应用提供指导。

## 153 各向异性弹塑性有限变形的无网格 SPH 计算方法

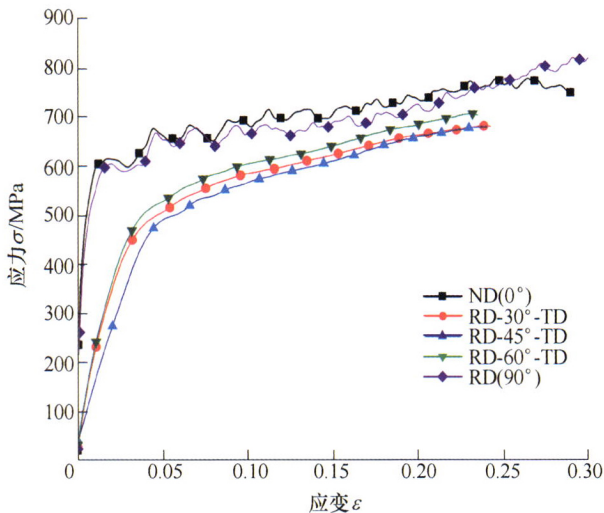
李 姣 富芳艳 王广春 管延锦 赵国群 林 军



**摘要：**基于无网格光滑粒子动力学方法(Smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法，建立了各向异性弹塑性变形分析模型。首先利用移动最小二乘函数构建了 SPH 近似函数，提高了 SPH 方法计算精度；通过完全拉格朗日框架下的 SPH 形式不仅节约了计算时间，同时消除了传统 SPH 方法中的拉伸失稳现象。通过分析零能模式产生原因，引入了惩罚力来减小沙漏现象，提高了 SPH 方法的稳定性。利用上述修正的 SPH 方法离散了质量、动量及能量守恒方程，并采用一般的图形返回算法建立了基于 Hill48 屈服准则和 Swift 等向强化材料模型的各向异性本构关系，从而建立了各向异性弹塑性 SPH 分析模型。利用该模型进行各向异性材料的弹塑性变形分析，将获得的应力应变与有限元计算结果进行对比，验证了本文数值模拟模型稳定性和可靠性。

## 164 基于各向异性特征的 7050-T7451 铝合金位错密度及其演变规律

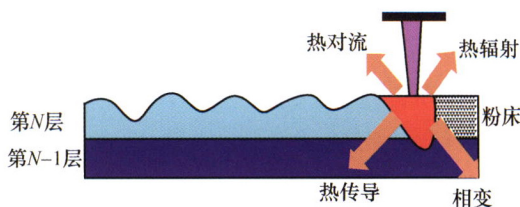
王 慧 潘永智 付秀丽 门秀花 张泽文



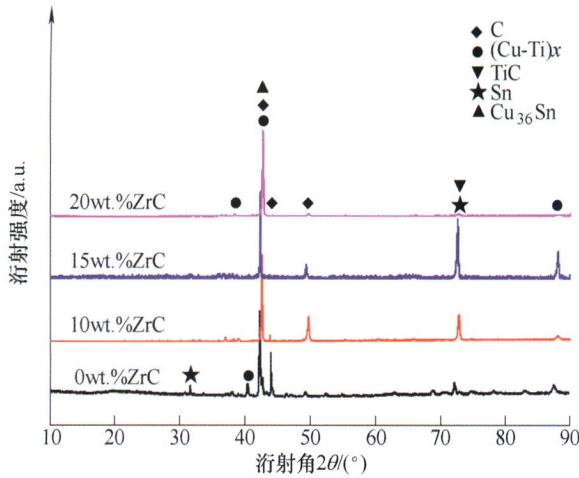
**摘要：**7050-T7451 铝合金被广泛用于制造具有轻量化、薄壁化需求的航空航天结构件。作为多晶体金属材料，铝合金塑性变形行为呈现出明显的各向异性特征，不同的加载路径直接影响薄壁扁宽件的服役性能，因此考虑各向异性特征深入分析材料力学性能的微观响应机制具有重要的工程意义。以 7050-T7451 铝合金为研究对象，结合试验与 X 射线衍射线形分析方法，采用位错密度值定量表征并研究位错在不同空间角度取向、不同加载条件下的演化规律。结果表明：晶粒取向随着变形过程而发生变化，且具有(111)晶面择优取向现象；不同加载条件、成形角度下位错密度取值范围介于  $0.2752 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$  ~  $1.5818 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ；不同成形角度下的位错密度随应变率的提高均先增大后减小，随温度的变化则具有明显差异；不同加载条件下，位错密度在成形角度  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内均呈现出先减小后增大再减小后增大的趋势，室温下成形角度为  $45^\circ$  时，位错密度达到最大值  $1.5818 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 。7050-T7451 铝合金微观变形机制的研究为掌握材料各向异性变形行为及其在航空航天领域的工程应用提供了理论支撑。

## 172 Inconel718 微环形零件激光增材制造残余应力数值分析

张 嘉 龙连春 吴 奇



**摘要：**选区激光熔化技术由于产生局部高温，材料发生不均匀变形，残余应力极大影响成型件质量。含空腔微型环形零件为数值模型研究对象，运用热弹塑性材料模型、金属粉末-固体两相转化及生死单元重启技术，建立选区激光熔化过程热-力顺序耦合数值仿真模型，研究选区激光熔化增材中，零件残余应力分布规律及尺寸效应。计算结果与文献试验值对比验证有效性。研究表明，选区激光熔化加工微型环形零件，残余应力随着零件的曲率减小而增大，且压缩残余应力主要分布在零件的内、外壁，而拉伸残余应力主要分布在零件中径附近。残余应力随着增材高度的增加先减小后增大，并逐渐趋于稳定。

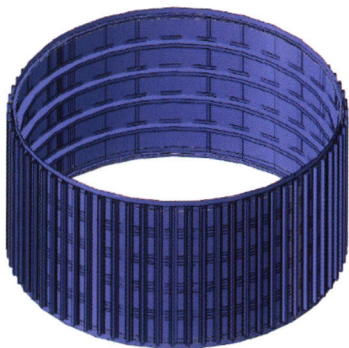


**摘要:** 采用 Cu-Sn-Ti-xZrC 增强相复合钎料钎焊金刚石/45 钢, 实现其高强度连接。用扫描电镜, 能谱仪、X 射线衍射仪对真空钎焊后的金刚石和钎料界面层的宏观形貌和微观组织进行分析, 同时通过维氏硬度计和磨擦磨损试验机对钎焊后金刚石的力学性能进行表征。结果表明: 添加 15wt.%ZrC 的 Cu-Sn-Ti 钎料真空钎焊金刚石结合界面钎料铺展较均匀, 金刚石的出露度较高, 并且未出现明显裂纹等缺陷; 金刚石表面有碳化物和少量的金属间化合物生成; 随着 ZrC 含量的增加, 界面处的硬度逐渐提高, 且界面处的硬度高于基体和钎料层部分; 添加 15wt.%ZrC 的钎焊接头磨损试验后的摩擦因数、磨削阻力及金刚石掉落率相对其他成分的较低, 且被磨件的被去除量更大、这表明添加 15wt.%ZrC 的钎焊金刚石接头具有最佳的性能。

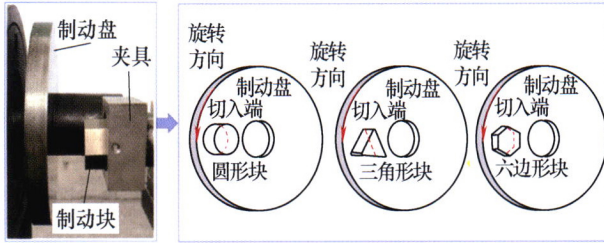
## /// 运载工程 ///

### 190 考虑加工误差的大型运载火箭框桁加强薄壁圆柱壳优化设计

王志祥 雷勇军 张大鹏 欧阳兴 王 婕

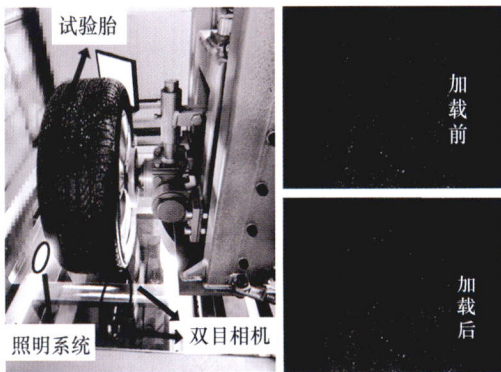


**摘要:** 为提高加工误差影响下大型运载火箭框桁加强薄壁圆柱壳的可靠性和安全性, 开展考虑加工误差的框桁加强圆柱壳优化设计。探究框桁加强柱壳整体压溃破坏的主要机理, 分析总结典型截面加强桁失稳模式及关键参数对结构承载性能的影响规律, 颠覆传统以提高桁条横向弯曲刚度为主的设计理念。提出基于探索策略和开发策略的并行序列近似优化方法, 提高框桁加强薄壁圆柱壳后屈曲优化效率, 并获得相对初始设计减重 482 kg 的优化结构。提出基于序列近似优化方法和最大加工误差分析法的结构优化方法, 显著降低加工误差影响下该优化结构提前失效的发生几率, 提高该优化结构的可靠性和安全性。结果表明, 桁条弯扭耦合翘曲失稳是导致框桁加强薄壁圆柱壳发生整体压溃破坏的主要因素; 降低桁条翼缘板宽厚比以及在腹板不提前发生局部失稳下增加腹板高厚比, 可提高结构承载效率; 考虑加工误差下获得的优化结构具有更高的桁条翼缘板厚度  $t_{yy}$ , 加工误差影响下其承载性能可靠性更高, 表明所提优化方法的有效性。



**摘要:** 磨损是铁路列车制动块的主要损伤形式之一, 目前对制动块磨损的研究主要以试验手段为主。提出一种求解列车制动块磨损问题的数值方法, 该方法利用有限元软件 ABAQUS 及其磨损子程序, 将 Archard 磨损模型嵌入到制动界面摩擦学问题的求解中, 通过在相邻增量步间计算磨损状态以实现磨损累积与动态演变过程的模拟。同时, 应用任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary lagrangian-eulerian, ALE)技术实现网格重绘, 克服单元质量和最大磨损深度对计算效率和收敛性的限制。最后, 在后处理中通过 Matlab 和 Fortran 对 ABAQUS 进行二次开发, 直接获取磨损信息, 并与制动台架试验结果对比验证了该方法的有效性。利用该方法, 研究了制动块几何形状对摩擦力、接触倾角、接触区域、接触压力和制动块磨损等制动界面摩擦学行为的影响。结果表明, 合适的制动块形状可以改善列车摩擦制动系统的服役摩擦学行为, 减缓制动块磨损, 提高制动系统服役可靠性。该研究成果可为今后铁路制动块形状的优化设计提供参考。

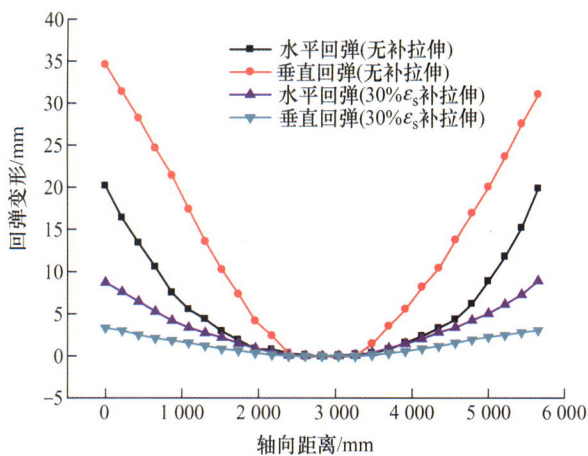
214 基于胎面接地变形特性的轮胎噪声和抓地性能研究



**摘要:** 为研究胎面接地变形特性与轮胎噪声和抓地性能的关联关系, 选取 10 条型号相同但胎面花纹结构不同的 PCR 轮胎作为研究对象, 通过 VIC-3D 全场非接触应变测量系统获得了试验轮胎额定载荷下的接地变形特性参数, 随后采用相关性分析法筛选出与轮胎噪声、抓地性能呈高相关性的接地变形特性参数, 并借助 ISIGHT 软件构建了表征轮胎噪声和抓地性能的 Kriging 近似模型。结果表明, 轮胎的噪声性能主要与胎面径向变形量呈高正相关性; 抓地性能主要与胎面 X 方向应变呈高正相关性, 与胎面 Y 方向应变呈高负相关性。对轮胎噪声性能影响较大的胎面接地子区域为胎面中心区, 其次为外过渡区、内过渡区、外胎肩区和内胎间区, 权重值依次为 0.843、0.576、0.522、0.149 和 0.087; 对轮胎抓地性能影响较大的胎面接地子区域为外胎肩区, 其次为外过渡区、内过渡区、中心区和内胎肩区, 权重值依次为 0.587、0.487、0.354、0.311 和 0.286。

## 222 非对称高铁列车车头窗口下梁的三维拉压复合弯曲精确成形

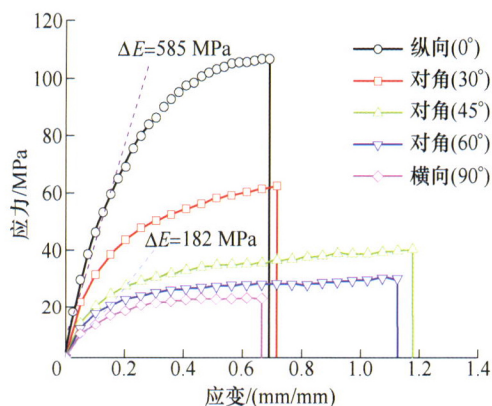
高嵩 孙茨力 李奇涵 何童贵 梁继才 徐传伟



**摘要:** 高性能铝合金型材三维弯曲构件具有几何造型流畅、空气动力学性能优、结构强度高特点,因而广泛应用于高端装备的制造当中。该类制件往往具有几何非对称的特点,一般呈镜面对称的安装在载运工具上。对于此类零件的成形加工往往需要多套模具和设备,成形效率低下,且回弹变形难以预测和控制。为提高此类零件的成形效率,基于提出的多点三维拉压弯曲成形技术,以高铁列车车头窗口下梁的成对成形制造为例,将非对称三维结构件连接为整体对称构件,实现了镜面对称结构件的成对一次成形,提高了材料利用率 6.79%,并提高生产效率一倍。此外,为实现该零件的精确成形,建立三维拉压复合弯曲成形过程回弹变形的数值仿真模型,在施加补拉伸的情况下,回弹预测误差小于 2 mm,仿真结果较好地预测了回弹变形的整体趋势。最后,通过利用提出的回弹测量误差的直接补偿方法,通过两次计算迭代,将成形水平和垂直方向的最大误差降低至 1.33 mm 和 0.73 mm,实现了高铁列车窗口下梁的成对一次弯曲精确成形。

## 229 方形锂离子电池内芯层集式模型方法及细观变形失效分析

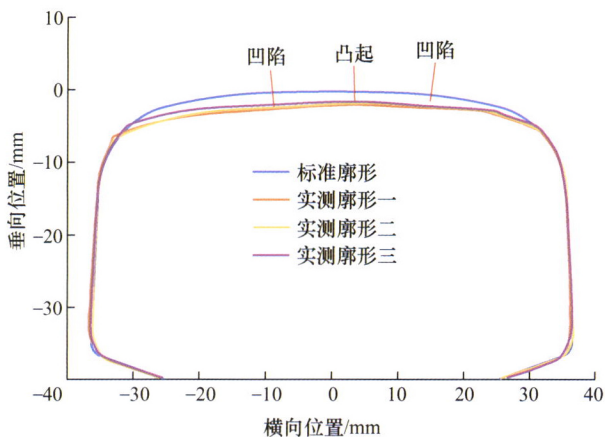
李志杰 陈吉清 兰凤崇 周云郊



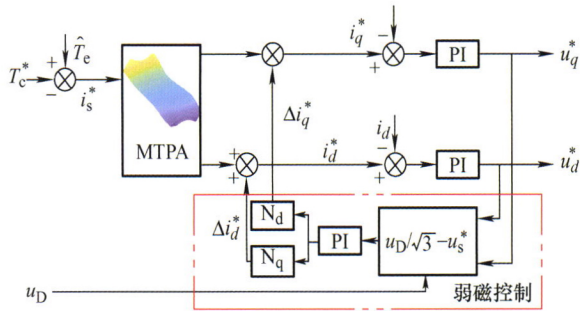
**摘要:** 方形锂电池内芯的变形失效是引发内部短路和热失控的主要因素。根据方形锂电池内部组分材料的力学试验,构建隔膜-正极-隔膜-负极相互堆叠的细观芯层单元模型。通过不同荷载条件下的模拟结果可知,芯层单元模型能够有效地表征宏观力学响应和细观变形失效。进一步构建芯层单元模型连接均质化模型的层集式耦合模型,并且定义了模型的计算架构。通过方形锂电池实例模拟的结果表明,层集式模型能较好地预测局部荷载下的力-位移曲线和内部短路位置。此外,层集式模型在不同的隔膜材料模型下出现了不同的峰值荷载。该建模方法不仅提升了精细化模型 75% 的计算效率,还增加了机械内部失效方面的深入理解,对于提高方形锂电池安全性设计有指导意义。

## 240 地铁车辆车轮踏面双光带形成机理分析

许世杰 关庆华 张雄飞 赵长雨 温泽峰 陆文教

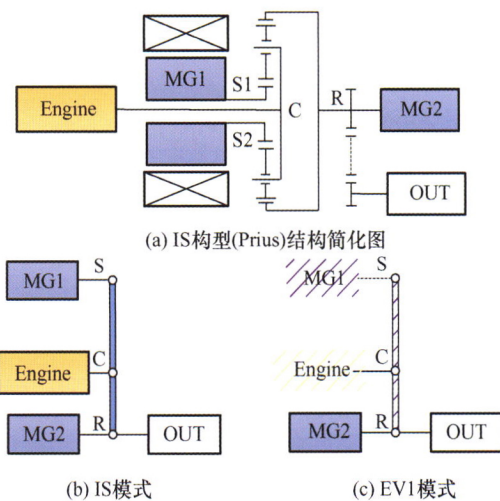


**摘要:** 接触光带是轮轨接触关系的直观反映,体现车轮在轨道上的运行轨迹,影响着车辆的动力学性能。在对国内某直线电机地铁线路的车轮测试时发现,车轮踏面上出现明显的双光带现象,光带分别位于车轮名义滚动圆两侧。基于建立的考虑机电耦合的直线电机地铁车辆动力学模型与 Archard 磨损模型,结合现场测试的试验数据,对车轮踏面双光带形成机理进行分析。结果分析表明,车辆通过小半径曲线时在左右车轮踏面上形成不同接触区,同时,直线上不良轮轨廓形匹配引起两点接触,是导致车轮踏面形成双光带现象的原因;仅通过车轮镟修不能从根本上消除车轮双光带,钢轨打磨还应注意维持合理的钢轨廓形,避免车轮双光带的形成和发展。在小半径曲线以及实测现场钢轨廓形的组合工况下,仿真计算的车轮踏面磨损峰值位置与实测双光带位置相符。



**摘要：**为提高电传动装甲车辆驱动系统的运行可靠性，开展永磁同步电机无位置传感器控制策略研究。针对传统脉振高频注入法包含多个滤波器，算法及程序复杂冗余的问题，提出一种改进的位置辨识方法，节省了控制系统的软、硬件资源；此外，为优化轮毂电机的转矩动态跟随性能，采用基于全阶滑模观测器的观测方法对转矩进行实时观测。在此基础上，搭建基于转矩给定的轮毂电机无位置传感器控制系统并开展了快速控制原型试验验证。结果表明，与传统脉振高频注入法相比，改进后的算法同样具有优越的辨识性能，能够确保电机在多种工况下实现稳定运行；所设计的转矩观测器辨识精度较高，观测误差基本控制在 1% 以内；电机整体转矩控制性能良好，稳定运行时实际转矩与给定转矩的误差保持在 2% 以内，能够满足轮毂电机的高性能控制需求。

264 一种单行星排功率分流式混合动力系统构型优化设计方案



**摘要：**基于行星齿轮机构的功率分流式混合动力系统可利用双电机分别对发动机进行转速调节和转矩补偿，从而使得混合动力汽车(Hybrid electric vehicle, HEV)的燃油经济性和排放性能得到显著提升。然而，单行星排功率分流式混合动力系统在行驶过程中会频繁产生功率循环现象，降低了系统整体工作效率。为了进一步提升燃油经济性，提出一种单行星排功率分流式混合动力系统构型优化设计方案。首先，对单行星排功率输出/输入式混合动力系统的运行特征以及拓扑结构进行分析，拆分并重组两种拓扑结构的连接关系，以生成基础拓扑结构方案。其次，基于基础拓扑结构方案探索全部的可行性拓扑结构，并对可行性拓扑结构进行组合以生成新的构型方案。最终采用基于动态规划(DP)算法的全局最优的控制策略对所生成的构型方案的最佳经济性和最佳动力性能进行仿真分析。结果表明，所提出的单行星排功率分流式混合动力系统构型优化方案能够有效提升整车综合行驶性能。

## **CONTENTS**

- 2 Research on In-Situ Detection of Damage in the High-speed Railway Turnout Bottom Based on Shear Horizontal Guided Wave**  
HU Songtao SHI Wenze LU Chao CHEN Guo SHEN Gongtian
- 15 Investigation on Propagation Characteristics of Elastic Wave in Different Wear Rail**  
CHEN Rong JIANG Wenqiang LI Haoran XU Jingmang HU Chenyang TIAN Yuhong
- 23 Research on Excitation of Single-Mode Ultrasonic Guided Wave in High-Frequency Range along Rail**  
LIAO Lin YUAN Maodan JI Xuanrong DAI Anbang
- 32 Quantitative Method of Rail Flaws Based on Ultrasonic Phased Array and Total Focusing DAC Mappings**  
LI Tianji SHI Yongsheng CHEN Feng HU Hongwei LI Xiongbing
- 42 Multi-dimensional Integrated Detection of Electromagnetic Acoustic SV Wave and Surface Wave for Steel Rail**  
TU Jun CAI Zhuoyue ZHANG Xu SONG Xiaochun
- 49 Research on Non-destructive Testing of Rail White Etching Layer Based on Magnetic Barkhausen Noise**  
JIANG Shenghui DING Haohao ZHANG Xiang PENG Jianping WANG Wenjian LIU Qiyue GUO Jun
- 57 Study on High-Speed Rail Defect Detection Method Based on Combination of EC and MFL Testing**  
XU Peng GENG Ming FANG Zhou ZHU Chenlu ZENG Hongming WANG Ping
- 66 High-speed Detection of Surface Crack on Rail Using Alternating Current Field Measurement Technique**  
GE Jiuhaoyang YANG Chenkai HU Baowang WANG Ping LI Wei YUAN Xinan YE Yunfei

- 75 Quantification of Rolling Contact Fatigue Cracks in Rails Based on Eddy Current Pulsed Thermography with Skewness Feature**  
YAN Yan LIU Yi ZHU Junzhen MIAO Ling CHEN Xiaotian ZHOU Yu LU Yanping GAO Bin  
TIAN Guiyun
- 86 Research on Dynamic Detection of Rail Rolling Contact Fatigue Crack Based on Eddy Current Thermography**  
MIAO Ling GAO Bin SHI Yongsheng LI Haoran LI Xiaofeng WU Tongle ZHANG Xiyuan  
TIAN Guiyun
- 98 Study on the On-line Detection and Speed Effect of Rail RCFs Using Airflow Thermography**  
LU Xiaolong TIAN Guiyun XIONG Longhui GAO Bin WU Jianbo MIAO Ling
- 107 Experimental Study of Self-powered and Self-sensing System for the Rail Corrugation In-situ Inspection**  
SUN Yuhua WANG Ping XU Jingmang WANG Yuan WANG Peigen GAO Mingyuan
- 118 Research on Side Wear Prediction of Curve Rail in Shuohuang Heavy Haul Railway**  
MA Shuai LIU Xiubo REN Songbin CHEN Zhuo LIU Yutao
- 126 Study on the Influence of Rail Vibration Absorber on Wheel/Rail Vibration and Noise**  
XU Hanwen DU Xing HAN Jian LIU Moukai XIAO Xinbiao JIN Xuesong
- 137 Role of Sleeve Design on Weld Formation of Refill Friction Stir Spot Welded Dissimilar Al Alloys**  
SHEN Zhikang LI Wenya CAI Ziqiang GE Shipeng WU Linglu LIU Xiaochao
- 144 Simplified Keyhole Plasma Arc Welding Model Based on the Coupling of Arc and Weld Pool**  
LI Yan WANG Ling ZHANG Jixiang WU Chuansong
- 153 Meshless SPH Method for Anisotropic Elasto-plastic Analysis**  
LI Jiao FU Fangyan WANG Guangchun GUAN Yanjin ZHAO Guoqun LIN Jun
- 164 Dislocation Density and Its Evolution of Aluminum Alloy 7050 Based on Anisotropy**  
WANG Hui PAN Yongzhi FU Xiuli MEN Xiuhua ZHANG Zewen
- 172 Simulation of Residual Stress of SLM Additive Manufactured Micro-annular Inconel718 Components**  
ZHANG Jia LONG Lianchun WU Qi
- 182 Research on Microstructure and Grinding Performance of Vacuum Brazed Diamond with ZrC Reinforced Cu-Sn-Ti Composite Alloys**  
YIN Xiaohui XU Fan XU Dong DING Jianxiang CHEN Ji DING Zichao CUI Bing



- 190 Optimization of Cylindrical Stiffened Shells in Large Launch Vehicles Considering Manufacturing Tolerance**  
WANG Zhixiang LEI Yongjun ZHANG Dapeng OUYANG Xing WANG Jie
- 204 Analysis of Wear Behavior Dynamic Evolution on Railway Brake Pad**  
YIN Jiabao LU Chun QUAN Xin MO Jiliang
- 214 Study on Tire Noise and Grip Performance Based on Tread Ground Deformation Characteristics**  
MEI Ye LIANG Chen ZHOU Haichao WANG Guolin
- 222 Precision Forming of the Asymmetric 3D Stretch-press Bending Parts for the Windows of the High Speed Trains**  
GAO Song SUN Yingli LI Qihan HE Tonggui LIANG Jicai XU Chuanwei
- 229 Internal Layer-stacking Model Method of Prismatic Lithium-ion Batteries and Mesoscale Failure Analysis**  
LI Zhijie CHEN Jiqing LAN Fengchong ZHOU Yunjiao
- 240 Analysis on the Formation Mechanism of the Double Contact Bands on the Wheel Tread of Metro Vehicle**  
XU Shijie GUAN Qinghua ZHANG Xiongfei ZHAO Changyu WEN Zefeng LU Wenjiao
- 252 Torque Observation and Improved Sensorless Control of Hub Motor for Armored Vehicles**  
ZHAO Qijin WEI Shuguang LIAO Zili MIAO Chenglin
- 264 Optimization Design Scheme of Power-split Hybrid Electric Powertrain Configuration with Single Planetary Gear**  
HU Jianjun LIU Zirui MEI Bo PENG Hang

# 《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) 张峥 (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 668217

18