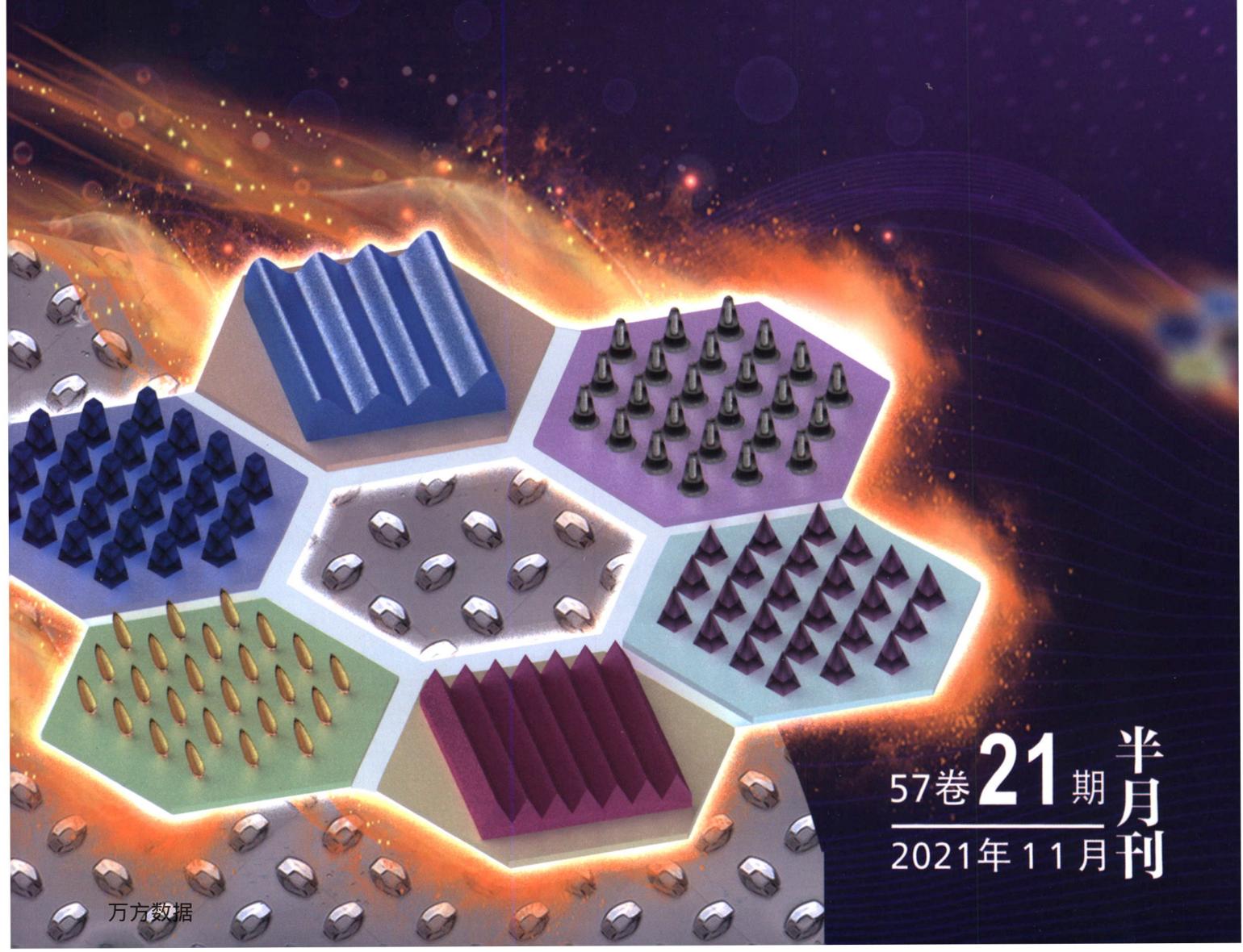


# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

聚合物基表面微结构的逐面式制造技术研究进展

汪延成 刘佳薇 盘何旻 梅德庆

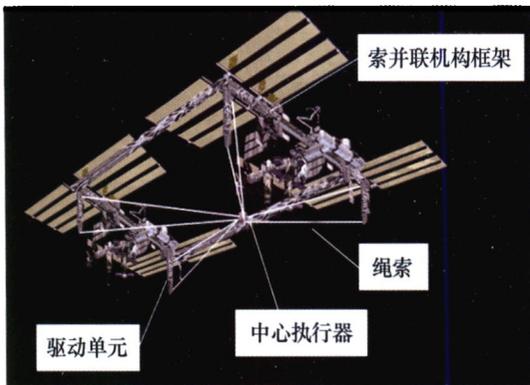


57卷 **21** 期 **半月刊**  
2021年11月

## // 机器人及机构学 //

### 1 面向在轨装配的八索并联机构构型设计与工作空间分析

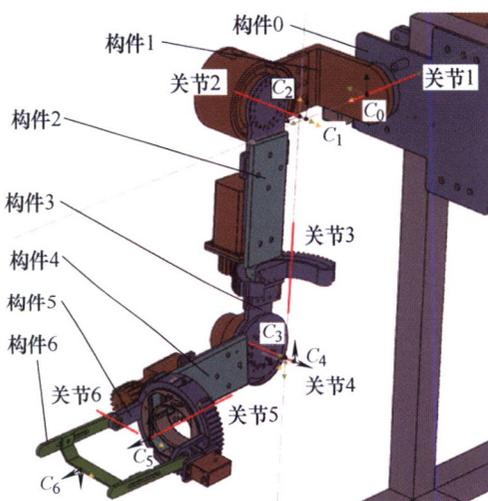
于金山 李 潇 陶建国 王浩威 孙 浩



**摘要:** 针对大型空间结构的在轨装配任务, 提出了由八根绳索驱动的索并联机构, 具有结构简单、质量轻、工作空间大的特点; 针对绳索并联机构的构型综合问题, 定义了出线点和绳索与中心执行器连接点的关联矩阵, 在此基础上考虑约束条件综合出了八索并联机构的 18 种有效构型; 计算了不同构型的力封闭工作空间以及针对在轨装配任务时的力螺旋可行工作空间, 以工作空间体积为指标筛选出了最佳构型; 分析了绳索拉力范围以及绳索与中心执行器连接点的位置变化对机构力螺旋可行工作空间的影响, 并且对连接点的位置参数进行了优化。

### 11 基于人机耦合模型的上肢康复外骨骼闭环 PD 迭代控制方法

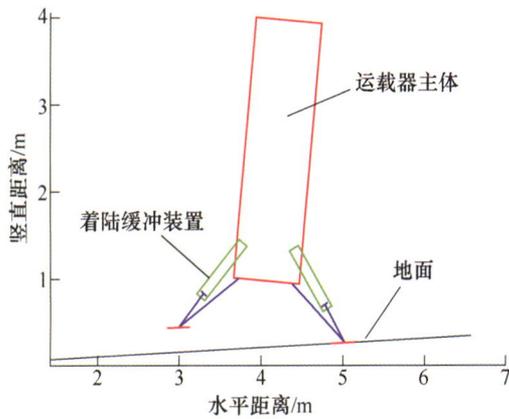
王文东 肖孟涵 孔德智 郭 栋 袁小庆 张 鹏



**摘要:** 针对多关节上肢外骨骼重复性康复训练非线性求解困难问题, 提出了一种闭环 PD 迭代学习控制方法。基于人体工学确定了六自由度上肢外骨骼康复机械臂的参数、自由度配置与关节运动范围。以人机交互力为耦合方式, 建立了基于牛顿-欧拉法的人机耦合模型, 完成了人机耦合动力学模拟分析。基于迭代学习控制理论提出外骨骼康复机械臂的闭环 PD 迭代学习控制方法, 通过建模仿真分析了肩关节/肘关节迭代学习控制的轨迹误差、人机交互力和驱动力矩。第三次迭代后的轨迹误差小于 0.05 rad, PD 迭代学习控制器的输出对系统控制进行了有效的补偿, 提高了系统状态的稳定性。研制了六自由度上肢外骨骼康复机械臂样机, 开展试验测试。试验结果表明, 随着控制试验在迭代域上的运行, 系统的输出向着期望的系统状态转化, 所提出的迭代学习控制算法可以提高上肢外骨骼康复训练重复性运动的控制精度, 进而提高人机交互性能。

## 22 运载器准三维着陆动力学与极限工况缓冲性能研究

岳 帅 林 轻 杜忠华 聂 宏 张 明



**摘要:** 为满足垂直降落重复使用运载器多工况着陆分析时模型精度与求解效率相兼顾的需求, 搭建了对称着陆模式下的准三维动力学模型, 模型中考虑了运载器主体平面运动、足垫空间运动及支柱侧向载荷, 同时基于集中参数法建立了油液缓冲力模型, 并引入了含 Stribeck 效应的滑移-粘滞摩擦力及非线性接触力来构建地面作用力模型。在此基础上, 开发出运载器着陆动力学分析程序, 结合径向基函数代理模型与模拟退火优化方法给出了以着陆倾角、结构过载、缓冲行程、支柱载荷及反弹高度为指标的七种极限着陆工况, 分析了各工况下的缓冲性能及着陆稳定性能, 得到了不同冲击条件对运载器着陆动力学行为的影响规律。研究表明: 在四腿同时触地时运载器过载峰值大, 在 2-2 着陆模式下运载器姿态易倾斜, 在 1-2-1 着陆模式下先触地支腿受载恶劣且主体易反弹。

## 34 并联六轮腿机器人机身平稳性控制方法研究

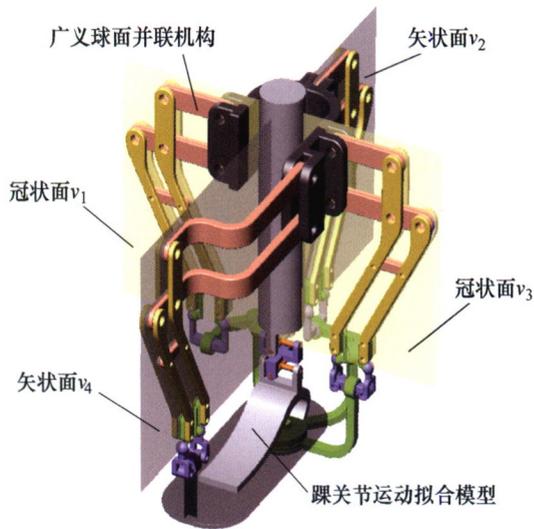
雷 涛 徐 康 汪首坤 王军政 刘冬琛 刘鹏涛



**摘要:** 轮腿式机器人在非结构化路面运动时, 机身平稳性控制对于提高运动平稳性、降低系统能耗、提高定位与建图精度等具有重要意义。针对并联式六轮腿机器人在通过不规则地形时足端悬空、姿态倾斜、机身晃动等问题, 提出一种融合足端力控制器、姿态控制器及重心高度控制器的机身平稳性控制框架。其中, 足端力控制器通过阻抗控制算法抑制机器人足端受力因地形变化带来的突变扰动; 机身姿态控制器对机身倾斜角进行解耦, 并控制各腿的长度补偿机身的偏移量; 重心高度控制器根据各腿的伸长量自适应地调节机身高度, 保证腿部执行机构具有足够的运动空间。针对三种控制器相互耦合、对外部扰动抑制效果不佳等问题, 利用串级控制的思想将三种控制目标统一为力跟踪控制, 降低机身振荡的风险。在并联式六轮腿机器人上进行了实验验证, 结果表明所提出的控制算法框架能有效抑制外部地形扰动, 当机器人以大约 0.6 m/s 的速度前进时, 机身的俯仰角及横滚角保持在  $-0.7^{\circ} \sim 0.7^{\circ}$  范围内, 足端接触力维持在期望力附近, 且机身重心高度随地面起伏自适应地调整, 确保了机器人的运动平稳性。

## 45 面向踝关节康复的四自由度广义球面并联机构运动学性能

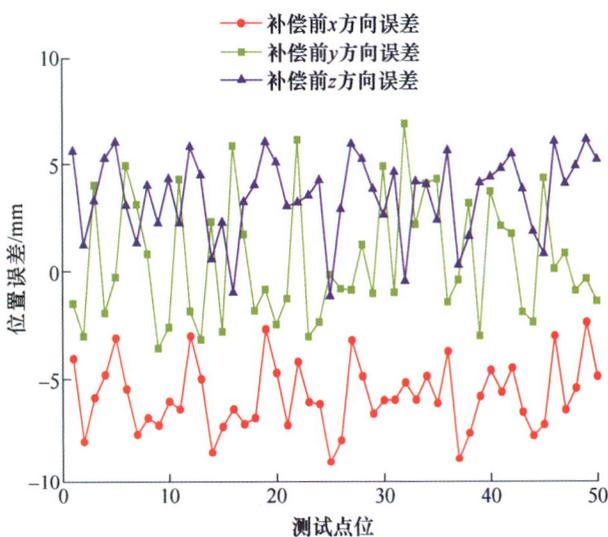
刘承磊 张建军 牛建业 刘 腾 戚开诚 郭士杰



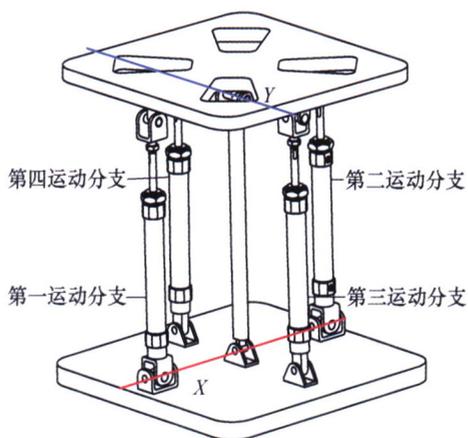
**摘要:** 针对现有踝关节康复机器人运动特性与人体踝关节实际运动特性存在明显差异, 导致人机相容性不理想的问题, 基于高匹配度的  $U_1U_2$  型踝关节运动拟合模型, 提出一种适用于踝关节康复且结构紧凑的四自由度广义球面并联机构。基于螺旋理论分析其运动及约束特性, 论证其与踝关节运动拟合模型运动的一致性; 分别建立机构的位置及姿态运动学模型, 证明了该机构的位置与姿态之间运动学完全解耦; 基于雅可比矩阵极其条件数分析, 阐明该机构在纯背伸趾屈和纯内外翻运动中均具有运动学的完全各向同性性质, 且在踝关节工作空间内具有较好的灵巧性及可操作度, 并无奇异位形等病态位置存在, 通过数据对比验证该机构具有较好的运动学特性, 适用于踝关节康复。

## 55 基于标定和关节空间插值的工业机器人轨迹误差补偿

高贯斌 张石文 那 靖 刘 飞

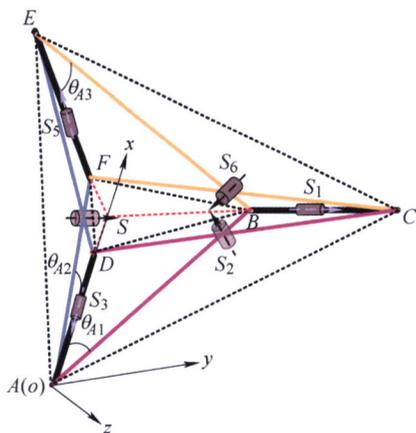


**摘要:** 轨迹精度是工业机器人重要的动态性能, 目前工业机器人的轨迹精度远低于定位精度, 提出一种基于机器人运动学标定和关节空间插值误差补偿的方法来提高机器人轨迹精度。基于 MD-H 方法建立机器人的运动学模型, 在此基础上运用机器人微分运动学理论建立末端位置误差模型和轨迹误差模型。为克服最小二乘法等传统方法在数据噪声较大且不符合高斯分布时收敛慢甚至发散的问题, 提出一种基于扩展卡尔曼滤波算法的机器人运动学参数辨识方法, 实现运动学参数辨识的快速收敛。经过分析发现机器人误差在关节空间具有连续性的特点, 为此提出一种关节空间插值误差补偿方法, 建立网格形式的误差补偿数据库, 并利用关节空间距离权重函数和已知的网格顶点误差计算各控制点的关节转角误差。通过试验对所提出的参数辨识和关节空间误差补偿方法进行了验证, 试验结果表明: 经过运动学参数辨识和补偿后机器人的绝对定位精度由 1.039 mm 提高到 0.226 mm, 轨迹精度由 2.532 mm 提高到 1.873 mm, 应用关节空间插值误差补偿后机器人的轨迹精度进一步提高到 1.464 mm。



**摘要:** 为解决解耦机构承载能力弱的问题, 提出一种具有大承载能力的环路解耦两转动并联机构型综合方法。基于螺旋理论, 提出分支传递力螺旋矩阵与输出运动螺旋矩阵的互易积为对角矩阵(主对角线元素全不为零)的机构解耦判别准则, 分析机构输出运动螺旋与传递力螺旋之间的关系, 确定出驱动螺旋和非驱动螺旋的形式, 将上述运动螺旋进行合理的排序和组合得到基础解耦分支。为使解耦机构更好的应用于工业中, 提出冗余驱动分支构造方法, 在基础解耦分支中添加冗余驱动分支, 构造环路, 实现环路内反解同步, 构造环路之间彼此解耦的环路驱动分支, 既不破坏机构的解耦特性又增加了机构的承载能力, 综合出环路解耦两转动并联机构。运动学分析和静力学分析表明, 所综合出的机构雅可比矩阵为广义对角阵、同一环路内驱动位移同步, 并且承载能力强于传统解耦机构, 验证了所提出的综合方法的正确性。通过该方法综合出来的机构, 在汽车耐久性测试台架方面具有一定的应用前景。

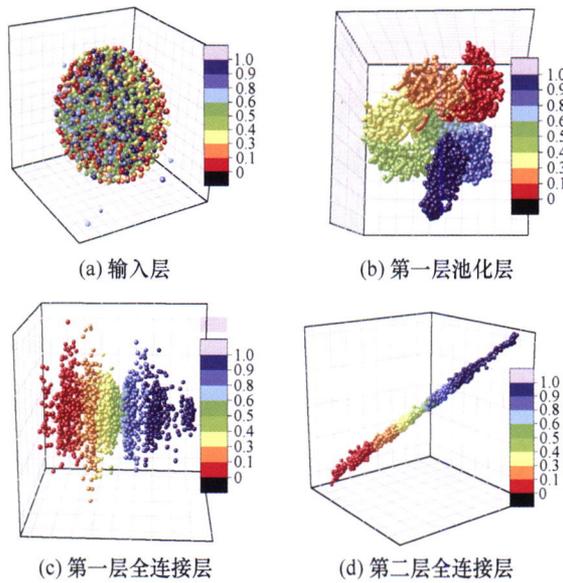
78 面对称 Bricard-like 机构的设计与研究



**摘要:** 由于空间单环机构巧妙的几何约束, Bennett 机构、Bricard 机构等被陆续提出并被广泛研究。将多个反四边形机构通过转动副回环连接, 可以构造一类新型空间机构, 该类机构具有类似空间单环机构的运动特点。提出了一种类似面对称 Bricard 机构的面对称 Bricard-like 机构。该 Bricard-like 机构由两个相同的反四边形单元和一个反平行四边形单元构成。根据反四边形单元的运动特点, 将 Bricard-like 机构简化为变杆长的面对称 Bricard 机构。而后通过分析其等价 6R 机构的 D-H 参数及闭环方程, 得到了该机构的自由度以及运动轨迹。此外, 根据运动轨迹, 分析了该机构的运动特性, 揭示了该机构能够实现内翻运动和外翻运动, 进而实现无限翻转运动。并讨论了该机构的无限翻转的可行性条件, 给出了构造无限翻转机构的约束条件。最后通过制作样机模型, 验证了构造方法的可行性和理论分析的正确性。

88 一种基于空间卷积长短时记忆神经网络的轴承剩余寿命预测方法

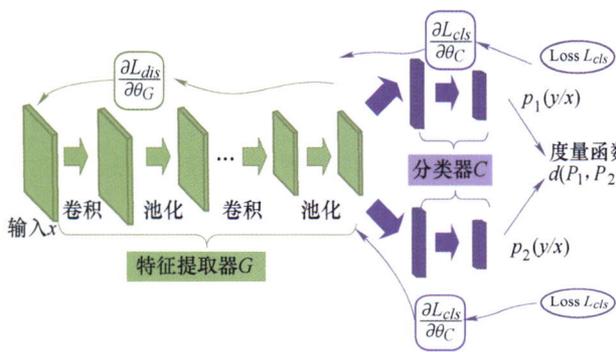
王久健 杨绍普 刘永强 文桂林



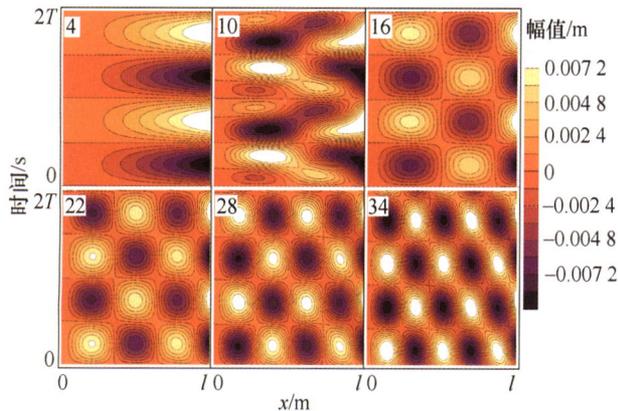
摘要: 传统的基于数据驱动的轴承剩余预测方法仍需要一定的先验知识, 比如: 特征指标选取、健康指标构建、失效阈值选定等等。预测结果严重依赖人工经验, 为了克服这一缺点, 基于深度学习提出了一种用于轴承剩余寿命预测的新方法, 该方法的核心包括健康指标构建和剩余寿命计算。首先提出了一种无需先验知识的基于空间卷积长短时记忆神经网络(Convolutional long short-term memory neural network, ConvLSTM)的健康指标生成网络模型, 该网络利用卷积神经网络的局部特征提取能力和长短时记忆网络的时间依赖特性, 可直接从采集到的原始信号中挖掘反映退化程度的特征, 构建健康指标, 实现了高维原始数据向低维特征的映射转化, 并利用 Sigmoid 函数将其归至[0,1]区间内, 实现了阈值的统一; 然后, 利用粒子滤波更新双指数寿命模型, 实现剩余寿命结果的输出。利用轴承全寿命试验对所提方法进行了验证, 并与其它相关方法进行对比, 结果表明本文方法所构建的健康指标具有更好的趋势性、单调性和鲁棒性, 同时剩余寿命预测的准确率更高。

96 基于增强迁移卷积神经网络的机械智能故障诊断

陈祝云 钟琪 黄如意 廖奕校 李霖蒲 李巍华



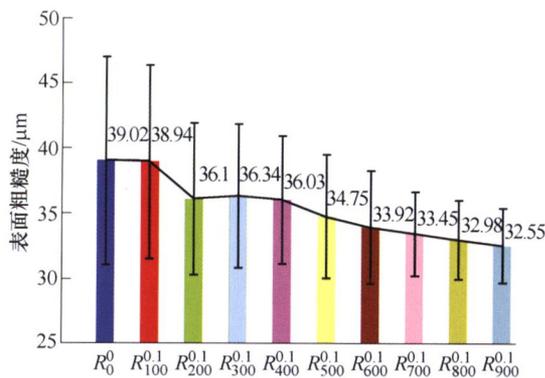
摘要: 现有的基于深度迁移学习的智能诊断方法通常对源域和目标域特征对齐来减少两者分布差异, 没有考虑源域类别决策边界对目标域特征匹配的影响, 针对此不足, 提出了一种增强迁移卷积神经网络(Enhanced transfer convolutional neural network, ETCNN)来改进机械设备在变工况下的诊断精度和泛化能力。为充分利用标签信息和提取高维特征, 构建卷积神经网络和两个独立的分类器对源域数据分别训练, 用于检测远离决策边界的目标域样本。为有效减少不同决策边界处样本的误匹配, 进一步构建分类损失函数和分类器判别损失函数, 并引入对抗训练策略, 最大两个分类器的分类差异, 同时最小化源域与目标域特征分布差异, 实现目标域样本与源域样本自适应匹配, 从而有效改进故障的分类性能。在滚动轴承数据集上对所提方法进行充分评估, 并与其他三种深度迁移学习方法: 域适配网络(Domain adaptive network, DAN), 多层域适配网络(Multi-layer DAN, MLDAN), 以及深度对抗卷积神经网络(Deep adversarial convolutional neural network, DACNN)进行充分比较, 结果表明, 所提方法不仅具有良好的分类能力和泛化能力, 同时明显优于其他方法。



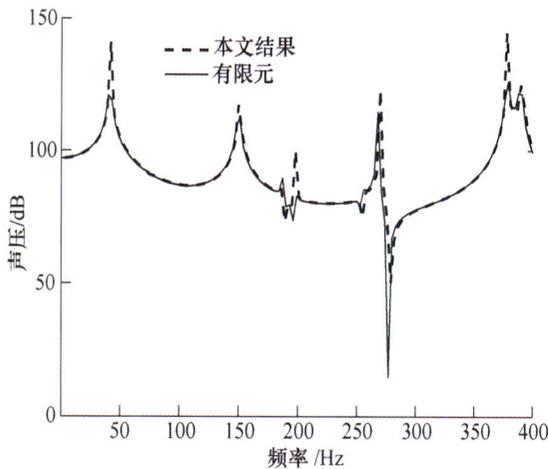
**摘要:** 研究受有多点横向非定常约束梁的动态响应问题。利用横向非定常约束为周期函数梁的微分代数方程的线性特点, 确定出多基频周期性非定常约束激励下梁稳态响应的解析解; 利用截断模态的微分代数方程确定出受有横向非定常约束梁的瞬态响应。为此, 首先利用无阻尼截断模态微分代数方程的齐次形式, 将欧拉-伯努利梁的等效多跨梁模态表示为简单边界条件下模态函数的线性组合, 再利用得到的模态函数与位移影响函数重新将微分代数方程表示为常微分方程的形式, 进而得到横向非定常约束作用下梁的瞬态响应的积分形式。在此过程中, 研究了微分代数方程齐次式的特征值及其数量、求解方法等相关问题。通过单点多频率的横向非定常约束作用的梁及多点单频横向非定常约束作用梁的算例, 重点分析了非定常约束位置与基频对梁稳态响应的影响。结果表明: 在欠阻尼下, 两种梁模态响应的极大值均在等效多跨梁的各个主频附近; 单点横向非定常约束作用响应极小值在简单边界条件梁的各个主频附近, 而多点横向非定常约束作用梁响应极小值的分布比较复杂。算例也说明了所提出的方法是正确、有效的。

## 119 利用中低频振动改善熔丝制造产品表面加工质量研究

姜世杰 胡科 董天阔 战明 戴卫兵



**摘要:** 熔丝制造技术(Fused filament fabrication, FFF)因其操作简单、适用性强和成本低廉等特点, 已经成为当今使用最为广泛的增材制造技术之一。然而, 由于逐层累加的工艺特点, 与传统加工方式相比 FFF 产品的表面质量存在着明显的缺陷。利用中低频振动在改善 FFF 产品表面质量方面有着很大的潜力, 为此, 将压电陶瓷与增材制造设备相结合, 首先将普通 FFF 设备改装成振动式 FFF 设备; 然后通过控制输入信号和电压, 以控制压电陶瓷的输出振动参数, 从而制备施加振动前和不同形式振动后的试验样件, 并完成表面粗糙度测试; 通过对比分析不同样件的试验结果, 阐明引入振动对 FFF 产品表面质量的影响规律。结果表明, 利用中低频振动能够有效改善 FFF 产品的表面质量, 且随着振动频率或幅值的增大, 表面质量将进一步提高。

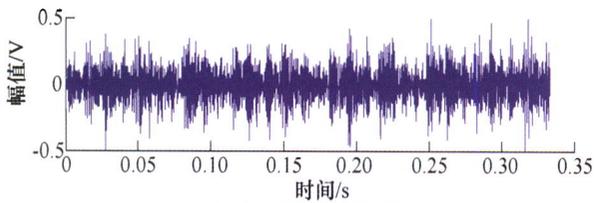


(a) 腔体内(0.44 m,0.44 m,0.1 m)点的声压比较

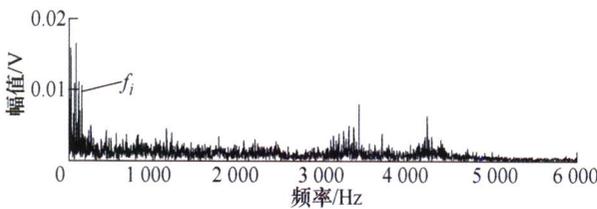
**摘要:** 以声腔-弹性板声振耦合模型为研究对象,对比分析该模型在点力激励和点声源激励下,激励位置、声腔厚度以及弹性边界等对弹性板声辐射功率、表面振速和腔内声压的影响及两种情况下的区别。弹性板的振动位移函数通过谱几何方法得到,并采用 Hamilton 原理,充分考虑了板的振动与板两侧声场之间的耦合。利用 Rayleigh 积分,可计算出弹性板的声辐射特性参数。结果表明,在简支约束情况时,点力和点声源两种激励下,激励位置、声腔厚度和弹性边界对板的声辐射功率、表面振速和腔内声压有不同的变化。在薄声腔时,点力激励下,声腔个别模态对板有明显影响。点声源激励下,模型耦合作用明显,弹性板的声辐射功率、表面振速和腔内声压主要受到耦合模态的影响,且点声源的耦合作用明显强于点力作用。相较于扭转刚度,直线刚度对声辐射的影响更大。

## 138 相关奇异值比的 SVD 在轴承故障诊断中的应用

李 华 刘 韬 伍 星 李少波



(a) 内圈故障时域波形

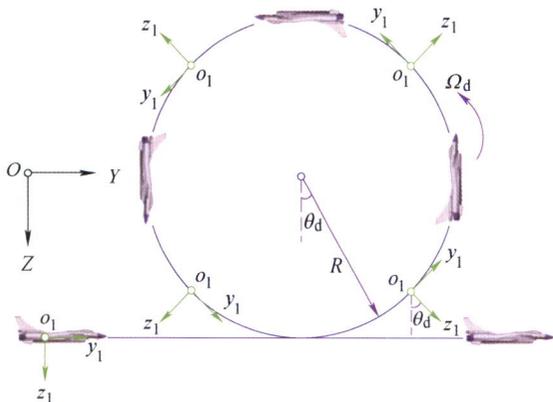


(b) 内圈故障包络谱

**摘要:** 基于 Hankel 矩阵的奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)方法在信号处理、故障诊断领域得到了广泛应用。其降噪性能受选取的重构分量、Hankel 矩阵结构、分析的数据点数的影响,对此进行了系统的研究,提出了基于相关奇异值比的 SVD (Correlated singular value ratio SVD, C-SVR SVD)方法,并成功应用于轴承故障诊断。首先,针对 SVD 的重构分量的确定问题,提出了奇异值比(Singular value ratio, SVR)和互相关系数相结合的方法;其次,对 Hankel 矩阵的结构进行研究,提出了基于 SVR 和峭度指标的结构优化方法。然后,对分析的数据点数进行了分析讨论,给定了约束。最后,将 C-SVR SVD 方法应用于轴承故障仿真信号和实际轴承故障案例分析,验证了 C-SVR SVD 方法的有效性和优越性。

## 150 时变位姿下行星齿轮传动系统动应力计算模型及其参数影响研究

魏 静 姜 东 张爱强 程 浩



**摘要:** 考虑行星轮系内部非惯性和机体时变位姿外部非惯性的综合影响,推导了任意时变位姿下带有机匣的行星轮系构件运动方程,计入时变啮合刚度、啮合误差、侧隙和啮入冲击,建立了时变位姿下行星齿轮传动系统级动力学模型,并采用精细积分时程法(Precision integration method, PIM)求解得到了动态啮合力序列。根据齿间载荷分配关系进一步得到单齿啮合力序列。最后结合修正 Heywood 公式与 Hertz 公式构建了时变位姿下行星齿轮传动系统齿根弯曲动应力和接触动应力计算模型,并研究了机体平飞、滚转和筋斗位姿参数对接触动应力、弯曲动应力的影响规律。结果表明:不同时变位姿参数对弯曲、接触动应力影响显著,且对不同齿轮副影响不同,即加剧了齿轮副间承载不均;筋斗运动角速度对动应力影响比平飞加速度、滚转角速度以及筋斗回转半径对其影响复杂;机匣对动应力影响随加速度增大而增加。研究成果为时变位姿下行星齿轮传动动应力计算与高可靠性设计提供了理论依据。

## 160 固-液摩擦纳米发电机

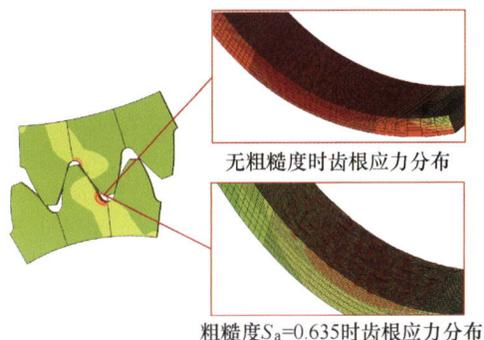
禹 健 郭艳婕 杨雷



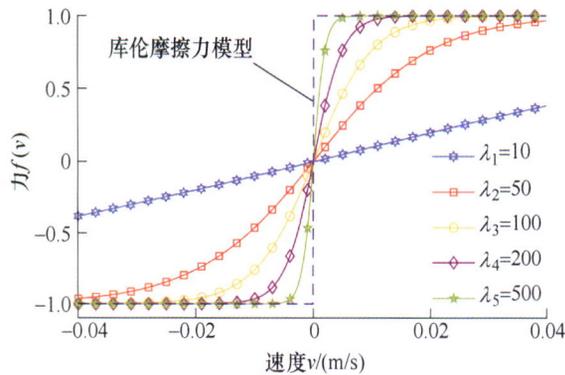
**摘要：**摩擦纳米发电机的发明为人们在能量收集领域开辟了新道路。固-液摩擦纳米发电机是基于固-液界面摩擦起电与静电感应效应耦合的发电装置，因其制造简单、成本低、能有效地收集多种形式的低频率水能，使其在摩擦纳米发电机中占有重要的地位。详述了固-液界面的起电机理，概括了固-液摩擦纳米发电机的典型结构和工作模式。分析了液体、固体摩擦材料的特性对摩擦纳米发电机输出性能的影响，介绍了常用的提高摩擦发电性能的微纳制造方法。综述了一系列固-液摩擦纳米发电机在自驱动型传感器和微机械自供电系统中的应用。总结了固-液摩擦纳米发电机目前存在的挑战，展望了其未来发展的趋势。

## 182 齿根三维粗糙表面的应力集中系数计算研究

何玉辉 胡航 唐进元 周炜



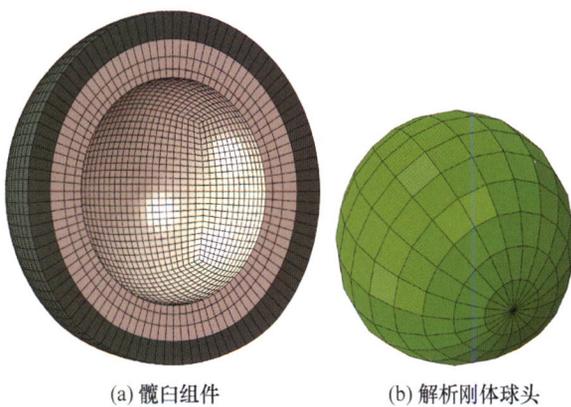
**摘要：**考虑粗糙表面影响因素的齿轮齿根处应力集中系数计算是齿轮弯曲疲劳寿命精准预估的难题，以磨削喷丸后的直齿轮为研究对象，研究粗糙表面下的齿根应力与应力集中计算问题。采用白光干涉仪 Wyko NT9100 对磨削喷丸齿根粗糙表面进行测量，得到粗糙表面形貌数据，基于空间坐标变换原理，使用 Python 对有限元软件进行二次开发，通过调整齿根细化网格节点坐标实现了齿根表面粗糙形貌的添加工作，建立了齿根过渡曲面三维粗糙表面有限元模型并进行仿真分析。通过数值计算得到三维粗糙表面参数下的齿根应力分布与应力集中系数，对粗糙表面参数与应力集中系数的关联规律进行非线性回归分析，建立粗糙表面参数与应力集中系数的关联规律。结果表明，粗糙表面参数  $S_a$ 、 $S_v$ 、 $S_{10z}$  拟合应力集中系数得到拟合公式的相关系数分别为 0.799，0.784，0.914，十点区域高度参数  $S_{10z}$  能较好地表征齿根表面的应力集中。



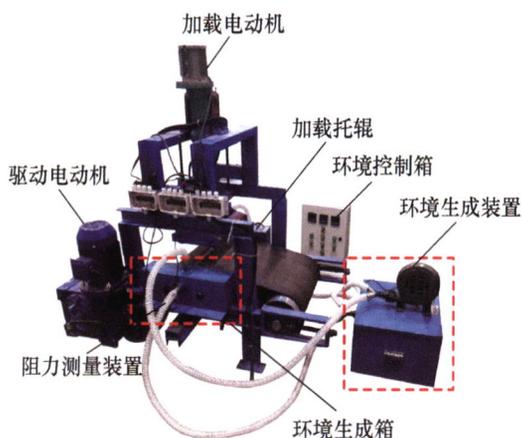
**摘要:** 针对带有从动轮的蛇形机器人, 考虑实际结构中从动轮在蛇形机器人关节连杆上的安装位置, 建立蛇形机器人蜿蜒运动的动力学模型。提出一种库伦-粘滞混合摩擦力模型, 整体的库伦摩擦力特性和临界点处的粘滞摩擦力特性, 避免了库伦摩擦力模型本身的非光滑性, 以提高动力学模型的求解效率与计算稳定性。基于改进的动力学与摩擦力模型, 利用摩擦系数比来表征法向与切向摩擦力的各向异性程度, 通过对蜿蜒运动的仿真分析, 讨论了摩擦系数比对前向运动速度与推进效率的影响规律, 并对运动过程中蛇形机器人各个关节模块的速度和摩擦力变化进行了分析, 明确了蛇形机器人蜿蜒运动的摩擦学机理, 解释了蛇的蜿蜒抬起运动能够有效减少摩擦阻力而适用于高速运动的原因。最后通过带从动轮的蛇形机器人样机实验, 对实现蜿蜒运动的摩擦学推进条件进行了验证。研究对于实现蛇形机器人的结构优化, 步态规划与运动控制具有重要的理论意义与实际指导价值。

## 202 交联超高分子量聚乙烯人工髌关节磨损仿真模拟

高子瑞 刘峰 刘瑶 焦朵朵 李宏伟

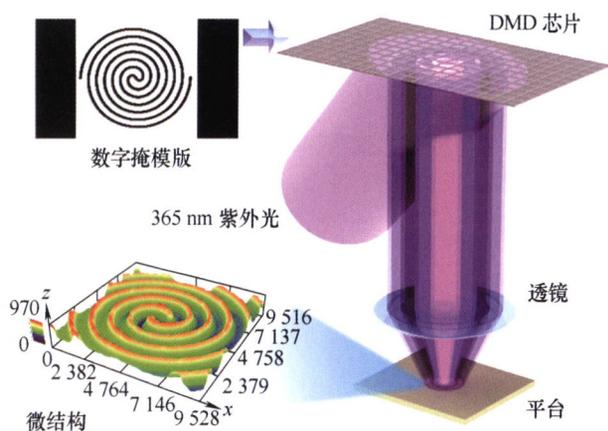


**摘要:** 人工髌关节超高分子量聚乙烯(UHMWPE)关节面磨损仍是影响置换关节远期寿命的主要因素, 其仿真建模是对关节模拟机磨损测试手段的重要补充, 也是实现置换关节临床前性能评估的有效方法。由多向运动产生的交叉剪切效应是影响 UHMWPE 磨损的主要原因之一, 也是仿真建模的关键。现有理论方法将磨损深度确定为滑动距离的函数, 并将  $90^\circ$  交叉剪切运动条件下的磨损作为度量基准计算不同角度下的交叉剪切效应, 但尚未考虑接触应力变量对磨损深度的影响。针对以上问题, 提出了在垂直交叉剪切运动条件下将磨损深度表示为摩擦功函数的方法。该方法利用 UHMWPE 摩擦因数与接触压力的定量关系计算摩擦因数并确定摩擦功, 解决了 UHMWPE 磨损交叉剪切效应中滑动距离与接触应力的耦合问题。基于磨损仿真新模型研究了 36 mm 直径的交联 UHMWPE 髌关节, 并与已有 ProSim 模拟机试验结果进行了验证。结果显示该仿真模型可准确计算体积磨损和线性磨损等磨损量以及髌关节载荷方向改变对磨损的影响。磨损新模型为进一步仿真模拟奠定了有效基础。



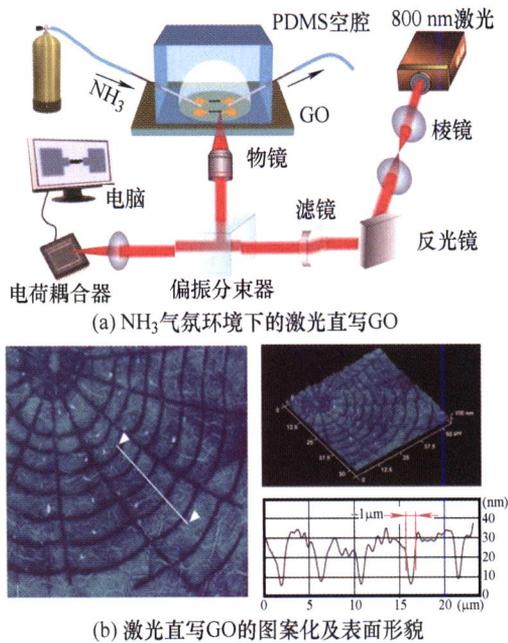
**摘要:** 托辊密封不可靠会引发轴承润滑失效, 进而导致托辊旋转阻力急剧增加直至完全卡阻, 已成为煤矿井下带式输送机的主要故障原因之一, 提高托辊密封与润滑性能对于提升带式输送机工作效率具有重要现实意义。基于纳米磁性液体密封与润滑理论设计了新型托辊样机, 利用可模拟井下环境的托辊旋转阻力试验台在不同试验条件下与普通托辊进行了性能对比试验。结果表明, 常规环境定载荷试验中, 磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力较普通托辊最大降低 45%, 平均降低 17%; 常规环境定带速试验中, 磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力较普通托辊最大降低 73%, 平均降低 54%; 模拟井下煤尘环境试验中, 磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力较普通托辊平均降低 26%; 煤泥水淋水 24 h 试验后, 普通托辊的旋转阻力增大至原来的 7 倍, 而磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力基本无变化。采用磁性液体密封润滑的托辊在不同试验条件下具有低旋转阻力、高抗水淋性等优异性能, 可为井下带式输送机向低能耗、高可靠、长寿命方向发展提供有力技术支撑。。

// 制造工艺与装备 //



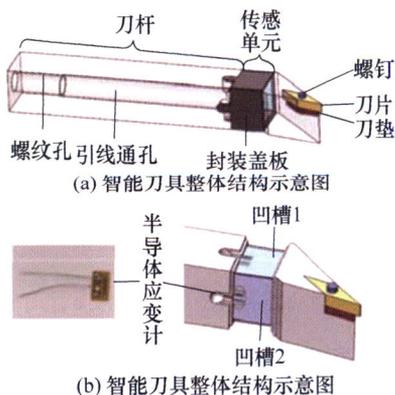
(a) 数字光投影式 3D 打印系统原理图

**摘要:** 聚合物基表面微结构在软体机器人、柔性电子器件、仿生机械、生物医学、组织工程等领域有着广泛的应用, 将逐面式制造技术应用于聚合物基表面微结构的制造过程可解决传统微压印、光刻、逐点和逐线式制造方法加工周期长、效率低、大面积表面微结构制造脱模难等问题。发展聚合物基表面微结构的逐面式制造技术是当前先进制造技术的研究热点之一, 具有广阔的应用前景。首先在阐述了常见的聚合物基表面微结构设计及其制造材料的基础上, 重点论述了光刻、纳米压印、数字光投影式 3D 打印、能场辅助制造、自组装制造等五类逐面式成形制造技术方面的最新研究进展, 包括各种制造技术的制造原理、工艺特点及表面微结构的典型应用等。最后, 总结预测了聚合物基表面微结构设计、制造及应用方面的发展趋势, 并对聚合物基表面微结构的逐面式成形制造技术的未来发展进行了展望。

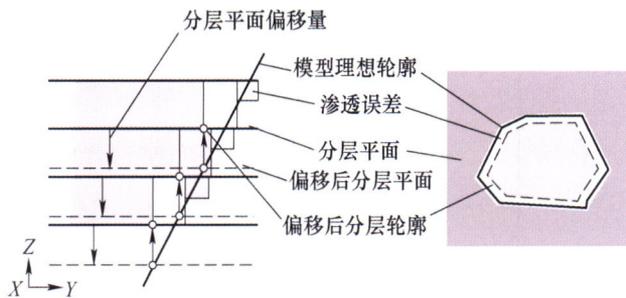


**摘要:** 柔性电子器件相对于传统电子器件, 拥有独特的柔性和延展性, 能够在一定程度上适应不同的工作环境, 满足设备的形变需求。石墨烯是开发柔性电子器件的理想材料。然而, 传统的石墨烯加工技术大多涉及到高温和化学溶剂, 存在着成本高, 工艺线路复杂和环境污染等问题, 并不适合未来产业发展。激光直写(Laser direct writing, LDW)技术具有加工速度快, 扫描面积大和空间分辨率高等优点, 且无需掩模和后处理, 在现代工业中广泛应用。最新研究表明, 激光直写技术可以从氧化石墨烯、多种聚合物甚至天然材料中衍生出石墨烯, 这无疑进一步提升了石墨烯基柔性电子器件的应用潜力。本文对现有激光直写技术制备石墨烯的前驱体进行了归纳分类, 并详细介绍了相应的演变过程、加工原理及辅助加工设备, 总结了基底转印、表面应变结构、剪纸拓扑结构这三种常见的柔性化制造策略, 并重点阐述了其在超级电容器、传感器、纳米发电机和致动器等石墨烯基柔性电子器件中的最新应用, 最后对其发展趋势及挑战进行讨论。

248 智能刀具研究综述



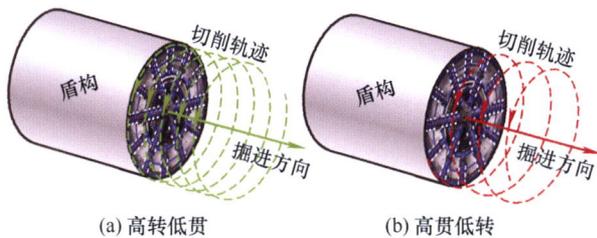
**摘要:** 智能刀具根据加工中具体用途的不同, 可实现对切削状态在线监测、数据处理、切削过程优化控制等功能, 通过智能刀具的使用可改善加工过程, 提高加工质量与效率, 到目前为止学者们对于智能刀具的研究已取得大量研究成果。对智能刀具切削状态监测和切削过程控制两个方面的研究进展进行论述, 梳理了学者们应用智能刀具对切削力、切削温度、刀具振动进行监测与控制的研究成果, 对刀具结构、监测方式、控制原理、缺点不足、发展方向进行了总结与讨论。对智能刀具涉及的关键技术进行探讨, 由于智能刀具涉及多学科交叉, 实现的功能及采用的原理各不相同, 关键技术多样, 需进行多学科交叉融合, 并通过产学研协同合作, 推进智能刀具关键技术的深入研究及实际应用。



**摘要:** 在微滴喷射 3DP 工艺中, 由于粘结剂渗透引起的误差是影响打印模型精度的主要因素之一, 为了得到高精度的打印模型, 减小渗透误差的影响, 需要对渗透误差进行补偿。因此, 针对微滴喷射工艺渗透误差提出了一种补偿算法, 将渗透误差分解成为 Z 方向以及 XY 方向的两个分量后, 依次对它们进行补偿。采用基于点偏移的补偿方法对 Z 方向渗透误差分量进行补偿, 保证了 STL 模型补偿前后的完整性, 简化了计算模型, 实现了 Z 方向误差的补偿。然后采用基于分层平面偏移的分层补偿方法对 XY 方向渗透误差分量进行补偿, 在分层过程中依据 STL 模型每个层面上三角面片角度特征进行相对应的分层平面偏移的补偿计算, 实现了 STL 模型 XY 方向渗透误差分量的补偿。经过试验验证: 通过先后对设计样件进行 Z 方向渗透误差分量补偿与 XY 方向渗透误差分量补偿计算, 实现了对 STL 模型的渗透误差补偿功能。补偿后的尺寸误差以及圆度误差明显减少, 综合补偿后打印样件尺寸更加接近设计尺寸, 使其精度得到了提升。

## 279 基于 PFC3D 的北京砂卵石地层盾构刀盘选型及刀具布置数值模拟研究

江 华 张晋勋 苏一冉 张靖翎 殷明伦 朱家辰



**摘要:** 砂卵石地层是一种典型的力学不稳定地层及强磨蚀性地层, 盾构在该类地层中掘进通常会面临刀盘、刀具磨损严重, 盾构推力与刀盘扭矩偏高且波动幅度大、地层变形不易控制等问题。砂卵石地层盾构掘进效率的高低及地层控制的好坏, 刀盘选型及刀具配置是关键。以北京地铁新机场线“磁各庄站~1#风井”盾构区间为工程依托, 利用 PFC3D 数值模拟及现场测试相结合的手段, 研究刀盘开口率、刀具组合高差、先行刀刀间距布设等参数对盾构掘进效率及地层变形的影响。研究表明: 相同掘进参数下大开口率辐条式刀盘比小开口率辐板式刀盘具有更好的掘进速度, 而小开口率辐板式刀盘掘进时引起的地表变形更小, 对周围地层的扰动范围也更小; 先行刀与切削刀的组合高差为 70 mm 时盾构掘进效率较高且扭矩较低; 先行刀刀间距设定为 300 mm 时, 盾构有较好的掘进效率和较低的刀盘扭矩; 工程实践表明: 要实现砂卵石地层盾构的长距离高效掘进、大开口率辐条式刀盘设计及大高差梯次化刀具布置是基础, 高贯入度, 低转速的掘进掘进控制是关键。研究结果可为类似工程的盾构刀盘选型与刀具布设提供借鉴。

## CONTENTS

- 1 Configuration Design and Workspace Analysis of Parallel Mechanism Driven by Eight Cables for On-orbit Assembly**  
YU Jinshan LI Xiao TAO Jianguo WANG Haowei SUN Hao
- 11 Closed-loop PD Iterative Control Method for Upper Limb Rehabilitation Exoskeleton Based on Human-robot Coupling Model**  
WANG Wendong XIAO Menghan KONG Dezhi GUO Dong YUAN Xiaoqing ZHANG Peng
- 22 Analysis of Quasi-three-dimensional Landing Dynamics and Attenuation Performance under Extreme Conditions for Launch Vehicle**  
YUE Shuai LIN Qing DU Zhonghua NIE Hong ZHANG Ming
- 34 Research on Stability Control Method of Parallel Six-wheel-legged Robot**  
LEI Tao XU Kang WANG Shoukun WANG Junzheng LIU Dongchen LIU Pengtao
- 45 Kinematic Performance of 4-DOF Generalized Spherical Parallel Mechanism for Ankle Rehabilitation**  
LIU Chenglei ZHANG Jianjun NIU Jianye LIU Teng QI Kaicheng GUO Shijie
- 55 Compensation of Trajectory Error for Industrial Robots by Interpolation and Calibration Method in the Joint Space**  
GAO Guanbin ZHANG Shiwen NA Jing LIU Fei
- 68 Research on Synthesis Method of a Loop Decoupling Two-rotation Parallel Mechanism with Large Load Bearing Capacity**  
WANG Sen HAN Xueyan LI Haotian LI Haoran LI Shihua
- 78 Design and Research of Plane-symmetric Bricard-like Mechanism**  
SUN Xuemin LI Ruiming YAO Yanan
- 88 A Method of Bearing Remaining Useful Life Estimation Based on Convolutional Long Short-term Memory Neural Network**  
WANG Jiujian YANG Shaopu LIU Yongqiang WEN Guilin

- 96 Intelligent Fault Diagnosis for Machinery Based on Enhanced Transfer Convolutional Neural Network**  
CHEN Zhuyun ZHONG Qi HUANG Ruyi LIAO Yixiao LI Jipu LI Weihua
- 106 On the Steady and Transient Responses of the Beam with Many Transverse Rheonomic Restraints**  
DING Weigao WEI Wei GUO Yue XIE Jin
- 119 Investigation on Improving the Surface Quality of Fused Filament Fabrication Products by Low and Medium Frequency Vibration**  
JIANG Shijie HU Ke DONG Tiankuo ZHAN Ming DAI Weibing
- 126 Acoustic Radiation Characteristics of Cavity-elastic Plate Model under Different Excitation**  
KONG Deyu WANG Gang NI Junfang
- 138 Application of SVD Based on Correlated Singular Value Ratio in Bearing Fault Diagnosis**  
LI Hua LIU Tao WU Xing LI Shaobo
- 150 Dynamic Stress Calculation Model of Planetary Gear Transmission System under Time-varying Posture and its Parameter Influence Research**  
WEI Jing JIANG Dong ZHANG Aiqiang CHENG Hao
- 160 Solid-Liquid Triboelectric Nanogenerator**  
YU Jian GUO Yanjie YANG Lei
- 182 Stress Concentration Calculation Factor of Tooth Root with 3D Rough Profile**  
HE Yuhui HU Hang TANG Jinyuan ZHOU Wei
- 189 Tribological Mechanism and Propulsion Conditions for Creeping Locomotion of the Snake-like Robot**  
LIU Xupeng GAO Zhiying ZANG Yong ZHANG Liyuan
- 202 Computational Wear Simulation on Cross-linked Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Artificial Hip Joints**  
GAO Zirui LIU Feng LIU Yao JIAO Duoduo LI Hongwei
- 211 Magnetic Fluid Lubrication and Sealing Performance of Mining Belt Conveyor Roller**  
ZHAO Shaodi BAO Jiusheng XU Hao YIN Yan XIE Houkang LIU Tonggang
- 220 Recent Progress on Manufacturing Technologies in Layer-by-layer Mode for the Fabrication of Polymer-based Surface Microstructures**  
WANG Yancheng LIU Jiawei PAN Hemin MEI Deqing

**234 Recent Advances in the Fabrication of Graphene-based Flexible Electronic Devices by Laser Direct Writing**

LU Longsheng WANG Wentao XIE Yingxi TANG Yong

**248 A Review of Research on Intelligent Cutting Tools**

LIU Qiang ZHANG Haijun LIU Xianli GAO Dayong ZHANG Mingjian

**269 The Compensation Algorithm of Infiltration Error of the Droplet Injection in 3DP Technique**

YANG Weidong GAO Xiangyu LIU Weisheng TAN Runhua ZHANG Zhengyan

**279 Numerical Simulation of the Type Selection of Cutterhead Selection and Tool Arrangement in Beijing Sandy Pebble Stratum Based on PFC3D**

JIANG Hua ZHANG Jinxun SU Yiran ZHANG Jingling YIN Minglun ZHU Jiachen

# 《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 668217

2.1>