

# 机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

封面文章：现代科技创新研究模式探讨

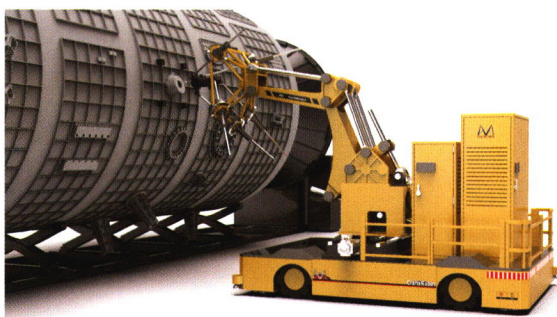
作者：刘辛军 谢福贵 杨迪 解增辉 孟齐志

58卷 **11**期 半月刊  
2022年6月刊

## /// 机器人及机构学 ///

### 1 现代科技创新研究模式探讨

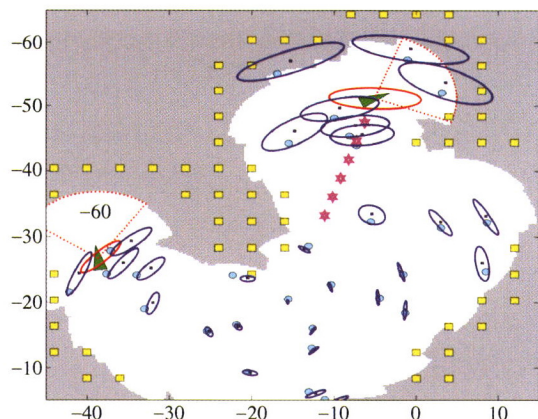
刘辛军 谢福贵 杨迪 解增辉 孟齐志



**摘要:** 科技创新是人类社会生产力发展的源泉,是社会进步的重要动力,开展科技创新方法论研究并探索科技创新研究模式,对于推动科技进步具有重大意义。基于古典哲学思想和辩证唯物主义方法论,探讨一种以揭示规律、创造发明、改造世界为指导思想的科技创新研究模式,表现为“寻其道、谋其术、求其魂、索其变、用其精”的辩证统一过程。在该模式的指导下,围绕航空航天等重点领域大型复杂构件的高效高质量加工重大需求,开展了科技创新研究实践,研制了移动式混联机器人并应用于此类大型复杂构件的原位柔性加工中。实践结果表明,该科技创新研究模式遵循了辩证唯物主义思想,在科技创新实践中是有效的,可作为科技创新的一种模式。

### 11 多机器人视觉同时定位与建图技术研究综述

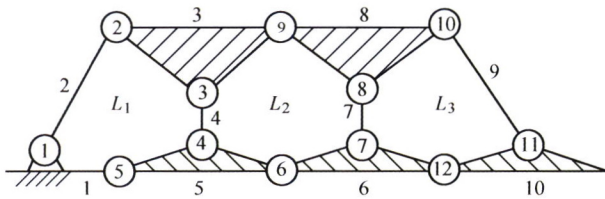
阴贺生 裴硕 徐磊 黄博



**摘要:** 同时定位与建图(Simultaneous localization and mapping, SLAM)技术是复杂、动态且GPS失效环境下多机器人系统(Multi-robot system, MRS)协同工作的基础和关键技术,对于提高机器人的自主化、智能化等具有重要意义。视觉传感器凭借其高分辨率、信息丰富、成本低廉等优点在SLAM中得到了广泛应用。首先简要回顾视觉SLAM理论基础,概括了多机器人视觉SLAM(Multi-robot visual SLAM, MR-VSLAM)的本质及优势,并基于该研究领域的应用需求总结归纳了当前MR-VSLAM技术存在的重点科学问题:如何进行视觉SLAM的全局关联,如何分配机器人资源执行SLAM驱动的协作建图策略,以及如何实现鲁棒的主动SLAM。其次,针对每个核心问题,对现有的解决方法进行了分类,提供了现有方法的全面综述,并讨论了其优缺点,分析了当前MR-VSLAM关键技术存在的问题。最后,基于上述分析总结展望了MR-VSLAM技术的热点问题及发展趋势。

### 37 基于人机共融的外骨骼机构构型综合及优选方法

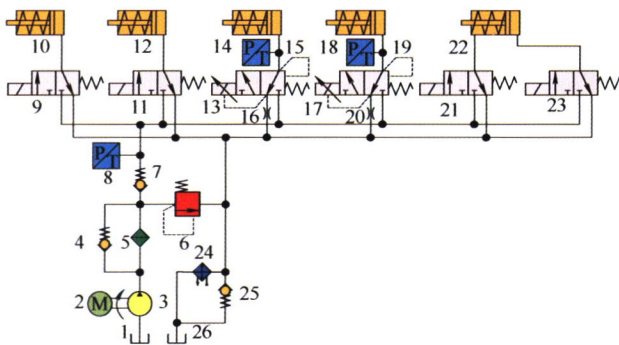
张立杰 于金须 闫建华 杜义浩 谢平 李永泉



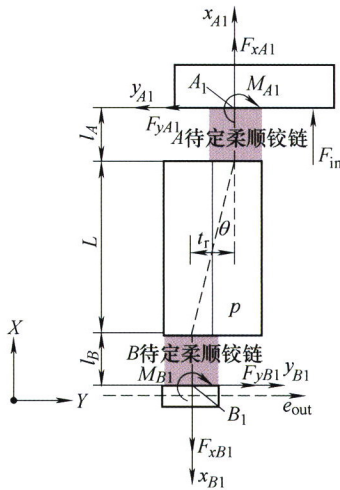
**摘要:** 针对当前穿戴式外骨骼机构设计缺少系统流程和具体方法,且较少考虑人机共融的问题,提出了基于人机共融的外骨骼机构构型综合及优选方法。在构型综合方面,根据人机共融中穿戴性要求,构建人体肌骨构型(Musculoskeletal configuration, MC),应用“最小闭链单元组合法”建立人机构型(Human-machine configuration, HMC);根据人机共融中运动灵活性要求,利用“二连杆单元插入法”提升 HMC 自由度并进行构型变换,结合邻接矩阵和“环路顺逆标注法”建立了构型综合的数学模型;在构型优选方面,根据人机共融中人机运动一致性要求,利用复用杆和复用因子指标优选出符合自由度要求的构型。选取食指为例,建立了食指 HMC 并综合出 15 种拓扑构型,优选出自由度为 3、复用因子总数为 4 的构型,该构型满足穿戴式外骨骼机构设计中人机共融要求,验证了上述方法的有效性。

### 46 基于驱动电机与湿式离合器协调控制的电动装载机无动力中断换挡策略研究

蔡少乐 陈其怀 林添良 任好玲 付胜杰 许铭楷



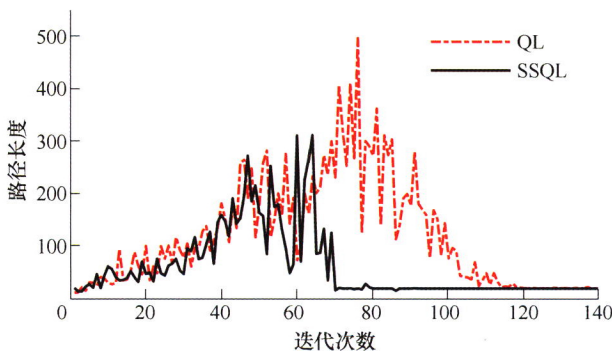
**摘要:** 电动化是工程机械理想的驱动方式之一。为了提高电动工程机械电驱动的优势和增加整车的续航,将传统机型上传动效率较低的液力变矩器与变速器进行解耦,由驱动电机直接驱动某款自主研发的动力换挡变速器。分析各阶段湿式离合器的运动状态,并建立驱动电机-动力换挡变速器换挡过程的简化动力学模型。针对该电动理想传动方案换挡过程的非线性和时变性系统,提出一种基于驱动电机与湿式离合器协调控制的电动装载机无动力中断换挡策略。由离合器压力与驱动电机转速、扭矩闭环的协调控制,实现理想建压分阶段自适应控制。惯性相阶段设计了滑摩控制器,采用 PID 算法控制驱动电机输出合适的扭矩,使结合的湿式离合器转速差跟踪期望转速差轨迹。最后,基于 AMESim-Matlab/Simulink 的联合仿真模型进行研究,并搭建试验台架,验证了控制理论和控制策略的正确性和可行性,为今后电动工程机械传动系统方案和换挡控制提供了参考。



**摘要:** 柔顺桥式位移放大机构被广泛用作精密定位与微纳操作装备的传动机构,其设计与建模问题是精密工程领域的研究热点。传统研究并未解决配置何种拓扑结构的柔顺铰链能设计出具有最优输出特性的桥式位移放大机构的问题,而现有的柔顺铰链拓扑优化研究一般不考虑实际柔顺机构的内力分布特性,影响了拓扑优化结果在实际柔顺机构中的应用效果。对基于柔顺铰链拓扑优化的桥式位移放大机构进行了设计、分析与实验测试。首先,在柔顺铰链拓扑结构未知的条件下,分析桥式位移放大机构的内力分布特性。结合内力分布特性与变密度法,以最大化柔度为目标函数,对柔顺铰链进行拓扑优化设计,从优化柔顺铰链拓扑结构层面提升机构输出特性。在不同体积约束条件下,桥式位移放大机构柔顺铰链的拓扑优化结果均呈V字型结构。然后,运用矩阵位移法、卡氏第二定理与并联机构柔度矩阵的关系,对V字型柔顺铰链进行静力学建模。结合V字型柔顺铰链柔度矩阵、桥式位移放大机构内力分布特性与串联机构柔度矩阵的关系,推导出基于柔顺铰链拓扑优化的桥式位移放大机构输出位移与输入力之间的解析关系,并对机构进行尺寸优化设计,进一步提升机构输出特性。有限元仿真与实验测试验证了桥式位移放大机构柔顺铰链的拓扑优化结果、V字型柔顺铰链静力学建模与机构尺寸优化设计的有效性。

## 72 具有光滑-直行功能的 Q-Learning 路径优化算法

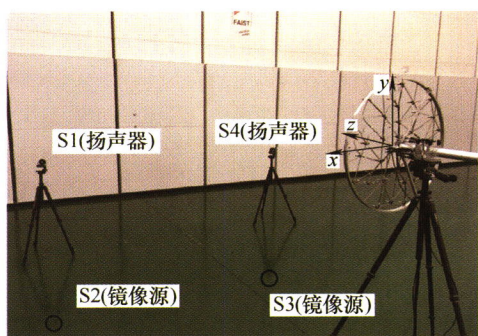
段书用 章霖鑫 韩旭 刘桂荣



**摘要:** 移动机器人作业路径的合理规划是其安全高效完成作业任务的关键。现有的路径规划算法大部分是基于已知全局环境信息后,再进行路径规划。因此,针对移动机器人在静态未知环境中的路径规划问题,提出了一种具有光滑-直行功能的 Q-Learning (SSQL)算法并将其用于移动机器人的路径规划中。该算法在提高 Agent 学习效率的同时可确保路径为光滑连续的最短曲线,以改善其行走动力学性能及效率。SSQL 算法包括三个主要新方案:首先,基于 Q-Learning 算法对未知环境进行预探索,在 Agent 首次找到目标点后,依据预探索信息,构建虚拟矩形环境,并在其内部增加引导 Q 值,以提高 Agent 学习效率。同时,将 Agent 找到的路径进行跳点优化,以达到消除冗余路径、减少路径转折点和缩短路径长度的目的。进而,在路径转折位置采用贝塞尔曲线进行路径平滑处理,并使最终路径能满足移动机器人动力学约束。将该算法与 Q-Learning 算法在不同环境下进行对比试验,研究结果表明,SSQL 路径规划算法对大型未知环境的探索表现出优异的优化效果,具有收敛速度快,规划的路径短、转折点少等优点,且能确保移动机器人沿规划路径作业的平滑性和安全性。

88 基于正交匹配追踪的二维离网压缩波束形成声源识别方法

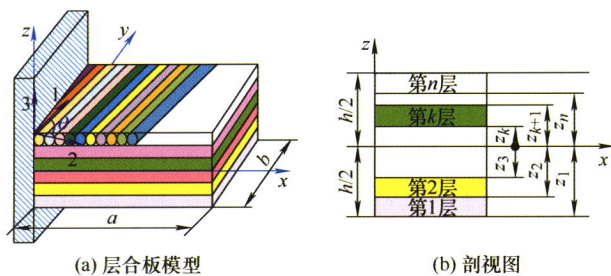
杨咏馨 褚志刚 杨洋



**摘要:** 基于平面传声器阵列的传统二维在网压缩波束形成获得准确的声源识别结果需满足两个前提: 一是声源波达方向与离散化网格点一致(基匹配); 二是相关的先验参数需被准确估计。然而, 在实际应用中上述两个前提难以满足, 此时传统二维在网压缩波束形成声源识别性能将受基不匹配和先验参数估计不准确的影响而显著下降。针对该问题, 提出了基于正交匹配追踪的二维离网压缩波束形成声源识别方法。该方法以网格点处传递向量的一阶泰勒展开近似真实离网声源传递向量, 构造以声源在网坐标、离网偏差及声源强度为未知变量的方程组, 并基于正交匹配追踪和最小二乘法求解获得声源离网坐标及强度估计。仿真和试验均表明: 提出方法能够有效缓解基不匹配问题, 获得相比传统在网压缩波束形成方法更高的波达方向估计及源强度精度, 实现更好的声源识别性能, 且享有高的计算效率; 提出方法无需信噪比或正则化参数等先验参数估计, 且对稀疏度估计和网格间距不敏感, 声源识别性能稳健。

98 考虑热环境的复合材料层合板振动响应相似设计方法及试验研究

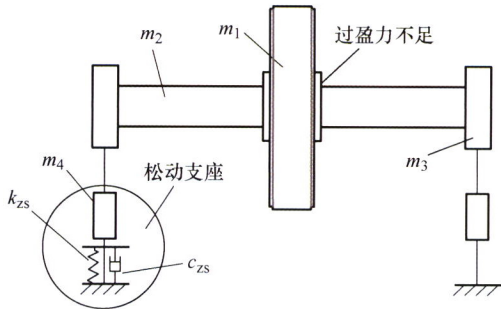
罗忠 张小霞 何凤霞 李晖 石宝龙



**摘要:** 针对高温环境下的复合材料层合板动力学试验开展困难、耗时、成本和危险性高等问题, 提出了热环境下层合板试验模型的相似设计方法(Similarity method of laminates in thermal environment, SMLTE)。首先建立热环境下悬臂层合薄板振动的理论模型, 利用最小势能原理结合 Ritz 法求解获得其固有频率和振型, 通过与文献计算结果、ANSYS 仿真结果对比验证数值求解方法的正确性。然后, 推导了复合材料层合薄板固有频率、加速度响应和温度的相似关系。分别以精确相似和考虑铺层畸变的层合板为数值案例, 验证了推导得到的相似关系的正确性。最后, 搭建热环境下的层合板振动响应测试系统, 对提出的相似方法进行试验验证。结果显示, 通过所提出的 SMLTE 方法建立的动力学相似关系能够复现原型结构的固有特性和振动响应, 为热环境下层合板的模型试验提供了有力支撑。

### 109 盘轴过盈力不足-支座松动耦合故障的转子系统的振动特性研究

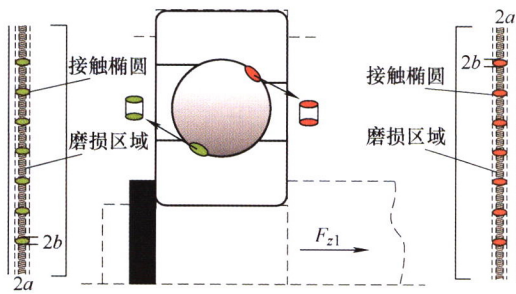
李志农 陈世尧 乔芳 周世健 王冬



**摘要:** 转子在交变载荷作用下极易产生盘轴过盈配合失效, 过盈配合失效将导致盘轴打滑、微动等, 同时还易引起其他孪生故障。针对盘轴过盈力不足-支座松动耦合故障, 建立了转子系统有限元模型。仿真分析了转速及接触过盈量对转子系统动力学特性的影响, 并搭建了盘轴过盈力不足-支座松动耦合故障转子试验台, 通过试验验证了仿真结果的合理性。结果表明: 转盘的时域振动响应有明显的拍振特性, 且随着转速的增加, 拍振现象越来越明显, 拍振周期变大; 由于盘轴间的过盈力不足, 盘和轴的转速不完全相同, 且随着转速的增加, 盘轴转速差的稳态值呈增大趋势。盘心轨迹随着转速的增加而逐渐向圆心靠拢; 随着过盈量的增加, 盘心轨迹不仅逐渐向圆心靠拢, 而且还出现了“内8字”形轨迹。

### 120 双螺母滚珠丝杠副进给系统轴向固有频率衰退预测方法研究

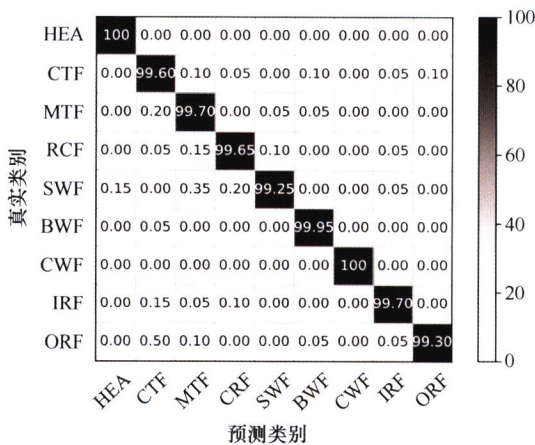
谢经伦 周长光 聂从辉 冯虎田 周华西



**摘要:** 针对双螺母滚珠丝杠副进给系统在运行过程中出现的轴向固有频率衰退现象, 首先基于分布式参数法与集总参数法构建了双螺母滚珠丝杠副进给系统的动力学方程; 然后基于 Archard 磨损理论, 建立了进给系统刚度的衰退模型; 最后将动力学方程与刚度衰退模型结合, 提出了一种双螺母滚珠丝杠副进给系统轴向固有频率衰退预测模型。通过自主搭建的滚珠丝杠副进给试验台, 测得了不同运行转数对应的进给系统频响曲线。试验结果表明: 在运行 148.5 万转后, 进给系统的轴向固有频率从 148 Hz 下降至 143.2 Hz。轴向固有频率理论值与试验值的误差在 1 Hz 以内, 证明了所提出的滚珠丝杠副进给系统轴向固有频率衰退预测方法的准确性。

### 133 基于多尺度注意力深度强化学习网络的行星齿轮箱智能诊断方法

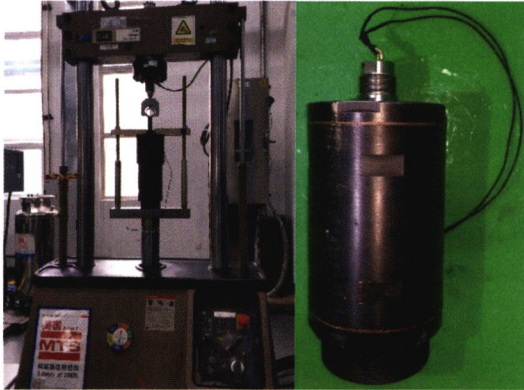
王辉 徐佳文 严如强



**摘要:** 针对行星齿轮箱在多工况下故障表征具有差异性, 现有方法中存在特征提取不足, 且泛化性和诊断准确率低的问题, 提出一种基于多尺度深度注意 Q 网络(Multiscale deep attention Q network, MSDAQN)的深度强化学习行星齿轮箱多工况智能诊断方法。首先定义分类马尔科夫决策过程描述诊断过程, 建立故障诊断模拟环境; 其次构造 MSDAQN 深度强化学习智能体结构, 其通过多尺度卷积神经网络提取多尺度故障特征, 并利用自适应通道注意力进行加权融合、突出关键信息; 最后依据所建智能体与诊断模拟环境交互的经验, 自主学习最佳诊断策略。通过行星齿轮箱的多工况试验和实际案例的测试与分析, 表明所提方法具有更高的诊断准确率和较强的工况适应性。

### 143 磁流变液阻尼器分阶段建模与流道参数敏感性分析

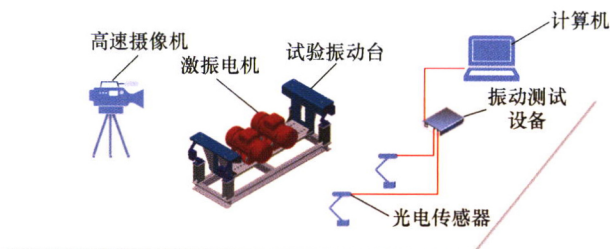
李嘉豪 张永浩 杜新新 卢军 李星照 廖昌荣



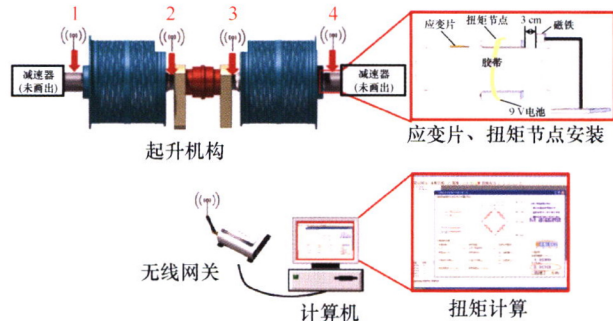
**摘要:** 作为电流调节阻尼参数的器件,磁流变液阻尼器在车辆悬架减振和航空振动隔离等领域具有广泛的应用前景。针对磁流变液阻尼器非牛顿流体建模,其存在不能预测阻尼器速度特性中存在滞回效应的问题,以及目前缺乏流道参数对阻尼器调节范围影响的研究。分析了环形流道混合工作模式下磁流变液的链化特征,采用了颗粒链化模型推导了预屈服阶段下的理论阻尼力表达式;利用 Newton 流体模型与 Herschel-Bulkley 模型分别描述无磁化区域与磁化区域磁流变液的本构关系,推导理论阻尼力表达式,在应用有限元方法对磁路仿真分析的基础上,建立了基于流道加权平均磁场叠加集成模型。根据研究的结果,设计并制作了磁流变液阻尼器,使用 MTS 试验机验证了预屈服阶段的颗粒链化模型与屈服阶段的准静态模型的有效性;利用预屈服链化模型与叠加集成模型分析了线圈匝数、活塞速度、阻尼流道间隙、阻尼流道长度等参数对磁流变液阻尼器调节范围的影响。研究表明,预屈服阶段的颗粒链条模型能够有效地预测速度特性的滞回效应,屈服阶段的叠加集成模型能够有效地预测其示功特性,线圈匝数与阻尼流道长度相对其他参数影响对阻尼器调节范围影响更为显著,为同类型设计提供有效参考。

### 156 双电机反向驱动振动系统自同步理论研究

苏明 黄旭 孙易森 谢志平 李荣 郑继明 朱东敏



**摘要:** 针对传统双电机驱动振动系统自同步理论中同步性判据不能求出同步点相位与同步角速度、稳定性判据没有参数化等问题,在闻邦椿院士提出的“在同步时,两台电机平均角速度恒定”的近似条件下,采用周期系数小参数积分均值变量法对双电机反向驱动振动系统进行研究。将振动力矩平衡方程转化为以电机为单元的周期系数微分方程,得出了同步运转平衡点的相位公式。据此构建同步性方程,将同步性判据转化为同步性方程解的存在性问题,并对稳定性判据进行了参数化表达。应用同步性判据可以对双电机反向驱动振动系统自同步的同步角速度进行求取,并对稳定性进行预判。通过 Matlab/Simulink 仿真和试验验证了理论结果的正确性。研究成果补充和完善了机械振动系统自同步理论。

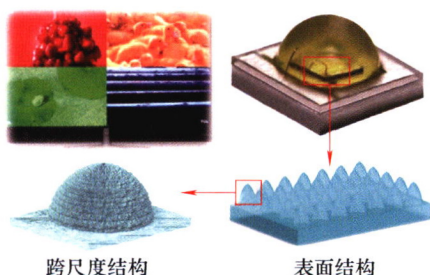


**摘要:** 为研究桥式起重机双边驱动起升机构的机电耦合动力学特性, 考虑双边驱动起升机构的结构特性和载荷特点, 建立了双边驱动起升机构机电耦合的垂直平面-扭转动力学模型, 分析了电机及其调速控制系统与机械系统的相互影响机制, 搭建了服役条件下某双边驱动起升机构的动力学参数测试平台, 仿真得到了双边驱动起升机构的载荷分布, 并进行了动态试验测试。研究表明, 在启动、调速、制动和负载变化等运行过程, 以及电机拖带、电机上电不同步、制动器闭合不同步等特殊工况, 双边驱动起升机构电机输出的电磁转矩均存在明显超调和振动, 给减速器、卷筒等传动结构和负载带来极大的动载。测试结果显示, 测试用双边驱动起升机构的两台电机存在拖带现象, 测点扭矩值及其振动规律与仿真结果存在一致性, 双边驱动起升机构动力学仿真模型及结果有效性得到验证。

## // 数字化设计与制造 //

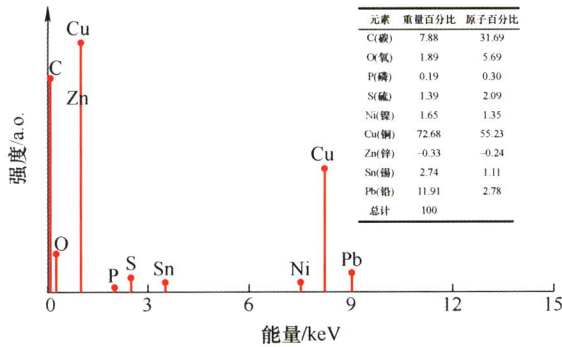
### 183 表面功能结构制造研究的新进展与发展趋势

唐恒 汤勇 伍晓宇 袁伟 孙亚隆 鲁艳军 彭锐涛



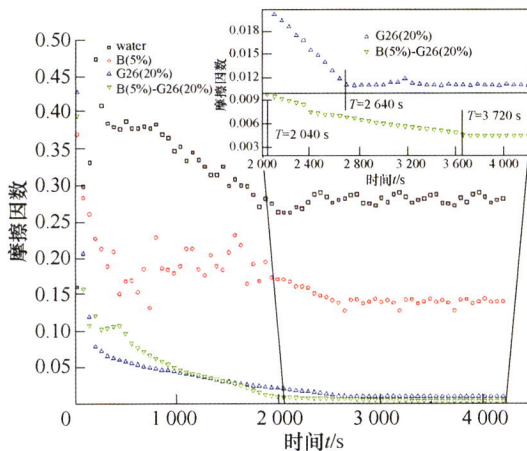
**摘要:** 表面功能结构是在物体表面加工出不同形貌、不同尺度且具有特定功能的结构, 其制造有别于传统机械加工。表面功能结构种类繁多、性能独特, 目前已在航空航天、生物医疗、光电、新能源等众多领域得到广泛应用。随着研究的不断深入以及加工技术的快速发展, 表面功能结构制造已从局部工艺性研究转变为多学科交叉的整体性设计、制造及关键技术研究。详细介绍了表面功能结构的特点以及在不同领域的应用和发展, 重点综述了近十年表面功能结构制造方法的国内外研究进展, 分析讨论了表面功能结构制造目前所存在的问题, 并进行科学预测与展望。



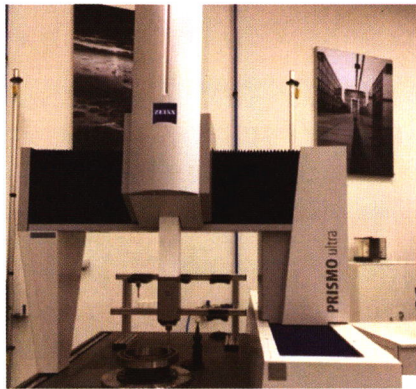


**摘要:** 轴向柱塞泵配流副是一种典型盘式摩擦副, 其对柱塞泵性能有重要影响; 摩擦副表面织构具有良好的减摩抗磨功能, 与通常研究的凹坑状织构相比, 沟槽状织构具有明显的贯通性, 润滑、冷却和排屑效果好等优点。为改善配流副摩擦磨损性能, 根据前期研究结果设计并制作了 16 槽及 32 槽两种类型盘式摩擦副, 探讨沟槽状织构化配流副的摩擦磨损特性, 分析织构基体硬度、织构角度, 以及载荷等对其性能影响。研究表明: 盘式摩擦副表面沟槽状织构可有效改善摩擦特性, 基体材料硬度、织构角度与实验压力均会对织构化摩擦副的摩擦磨损特性产生影响; 在 3 MPa 压力下, 与无织构试样对比, 32 槽、60° 织构角的软材料与未处理硬材料组成配对副时, 表现出最优的摩擦磨损特性, 摩擦因数仅为 0.038, 磨损量降低了 57.48%, 磨损表面也未出现严重磨损现象。上述研究结果将为轴向柱塞泵配流副的优化设计提供参考依据。

210 一种可实现超滑的混合溶液的摩擦学研究

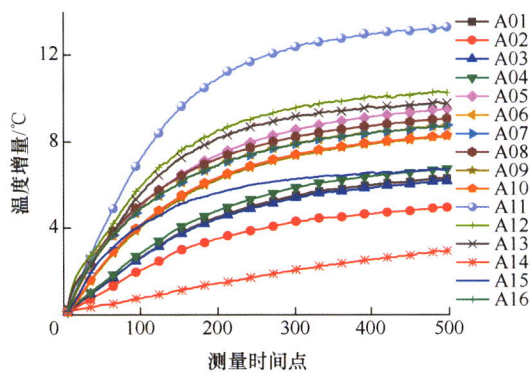


**摘要:** 硼酸是一种弱酸, 其化学反应生成的硼酸盐常被用作润滑脂极压添加剂。在本研究中, 以硼酸作为添加剂, 制备了与甘油聚醚混合形成的水溶液。随后, 对混合水溶液的减摩抗磨性能和流变性能等进行试验研究, 通过 Hamrock-Dowson 公式对成膜性能和润滑机理进行了分析, 并讨论了溶液浓度, 滑动速度, 加载载荷, 以及甘油聚醚分子量等参数对混合溶液摩擦性能的影响。结果表明: 硼酸的加入, 在降低了 20% 甘油聚醚溶液黏度(降低 25%)的基础上, 获得了稳定的最小摩擦因数为 0.004 5。膜厚比的计算结果显示在混合润滑条件下进入了超滑状态。分析发现: 硼酸和甘油聚醚在摩擦副表面发生酯化反应, 生成的含氮化合物可形成稳定的摩擦化学反应膜, 同时随着甘油聚醚浓度的提高, 其分子碳链末端的羟基可在摩擦副表面形成更稳定的吸附膜, 表现出润滑性能的提升, 生成的硼酸盐也可进一步改善抗磨性能。作为提高运动系统能量利用率的有效方法, 这种改进的混合溶液的液体超滑对于传统机械工程领域和精密机械结构有着巨大的应用价值。



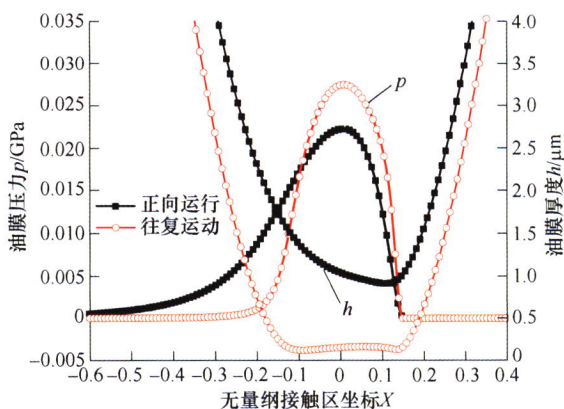
**摘要:** 为解决数控机床的精度优化设计问题,以数控内圆复合磨床为例,在分析磨床结构参数和运动形式的基础上,基于多体系统理论建立了磨床的空间运动误差模型。基于建立的空间运动误差模型,利用区间数学理论,定义了区间扩张因子,研究了该磨床涉及到的 36 项几何误差对空间运动误差的区间灵敏度作用规律,将区间灵敏度分析结果表示为矢量图形式,得到随着磨床运动轴的变化,各个几何误差对空间运动误差的影响。定义了各误差灵敏度指标在全域内的最大值,经过计算得到了全域最大区间灵敏度分析的归一化结果。最后,利用三坐标测量机对磨床进行两种不同补偿策略后,对所加工出来的两个轴类零件的三个高度的圆度误差分别进行了测量,验证了所提出的灵敏度分析方法的正确性,为后续的精度优化设计奠定了基础。

231 基于热误差混沌演化的机床运动精度劣化预示

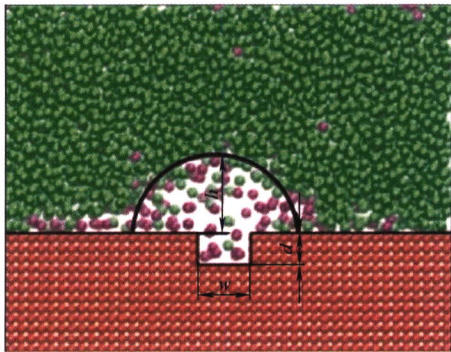


**摘要:** 热误差恶化是导致数控机床精度衰退的主要因素之一,提出利用机床热误差的混沌特性揭示隐藏在无序和复杂表象中的温升过程内在规律,对机床运动精度劣化进行早期预示。对机床温度测点历史数据进行混沌相空间重构,用 Lyapunov 指数证明数控机床温升过程实际为一种具有混沌特性的复杂非线性系统演化运动,从多维空间和视角来辨识系统,挖掘系统中蕴藏的热误差规律;提出一种混沌演化和长短时记忆网络(Chaotic phase space evolution and long short term memory neural, CPSE-LSTM)热误差预测模型,以相空间重构后的混沌温升序列为输入,提取动态混沌时间序列的时空特征,提高机床热误差演化模型在不同条件下的准确性和泛化能;定义温升过程的圆运动重复定位误差,利用机床主轴热误差与圆运动精度的映射关系评估机床的运动误差,对数控机床运动精度衰退进行早期预示。实验结果表明,CPSE-LSTM 模型在不同条件下均有较高的预测精度和泛化能力,对机床运动精度的评估值与实测值高度吻合。

241 换向工况下非对称聚合物齿轮瞬态弹流润滑分析



**摘要:** 齿轮的换向过程造成齿轮系统工作情况的恶化,不利于齿轮润滑的保持。为探究非对称齿轮在换向工况下的润滑性能,采用多重网格法对非对称聚合物齿轮进行了换向工况下的瞬态弹流润滑分析,比较了非对称齿轮和对称齿轮在换向工况下的弹流润滑特性以及非对称齿轮在正向运行与换向运行情况下的弹流润滑特性,分析了换向过程中不同形式的转速变化以及冲击对非对称聚合物齿轮在换向工况下的瞬态弹流润滑的影响。结果表明,齿轮在换向工况下换向点润滑油膜厚度大幅减小,是齿轮润滑失效的危险点。非对称齿轮能改善换向过程的润滑性能,换向过程中的正弦减速后正弦加速的变速形式对换向工况下的齿轮弹流润滑性能更为有利,冲击会对非对称齿轮换向时的润滑状态造成不利影响。

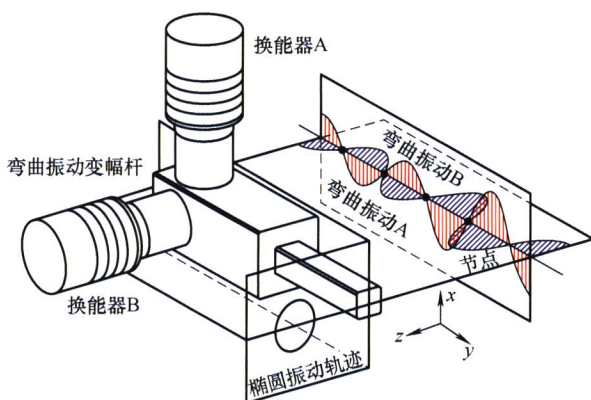


**摘要:** 通过分子动力学(MD)模拟研究纳米气泡的成核,以探究微结构耦合温度因素在仅由简单伦纳德·琼斯流体组成的三元(固体,液体,气体)系统中起到的作用。首先该模型揭示了静态流体中温度耦合结构影响下,纳米气泡的成核特征,其次研究了纳米气泡在动态滑移起到的作用。结果显示:首先温度对纳米气泡的成核以及高度具有显著影响,一定程度增加系统温度,促进了纳米气泡成核,然后高于一定温度时成核受到限制,同时纳米气泡高度随温度的增加而降低。其次纳米凹槽尺寸以及相对位置改变对于气泡成核具有重要意义。保持系统温度不变以及凹槽相对位置不变,逐渐增加凹槽深度时,气体更容易在凹槽内聚集从而形成气泡,并且气泡高度会随之减小;当仅增加凹槽之间相对位置时,纳米气泡的覆盖范围会被拉长,相应地,纳米气泡高度也会随之减小;另外,由于纳米气泡的存在,纳米通道内流体流动性能以及界面滑移现象也会发生改变。

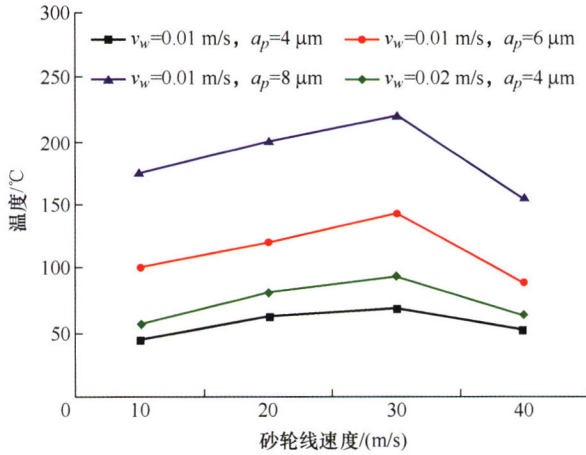
## /// 制造工艺与装备 ///

### 260 具有多级放大功能的超声椭圆振动切削装置的设计

殷 森 鲍 岩 潘延安 董志刚 金洙吉 康仁科

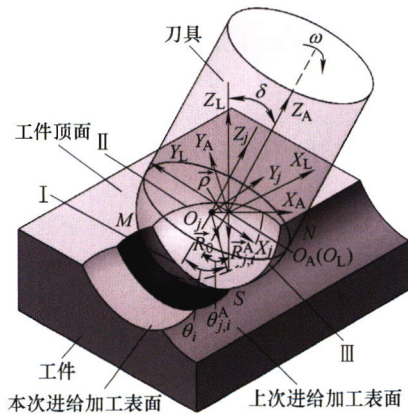


**摘要:** 超声椭圆振动切削可有效降低刀具磨损,提高零件表面加工质量,被广泛的应用于难加工材料的超精密加工。为提高超声椭圆振动切削的加工效率,设计了一种具有多级放大功能的超声椭圆振动切削装置,有效提高了输出振幅。利用解析法设计阶梯式纵向振动换能器,实现了对振幅的第一次放大;结合 Timoshenko 理论及有限元仿真,简便设计了一种阶梯式弯曲振动变幅杆,对振幅进行第二次放大。利用纵向振动换能器在弯曲振动变幅杆的  $x$  方向和  $z$  方向分别激励,使其处于双弯曲振动模态,利用超声椭圆振动发生器调整两个激励的相位差,从而在安装在弯曲振动变幅杆前端的刀具上合成超声椭圆振动。对装置进行振动性能测试,其谐振频率为 35.3 kHz,振幅最高可达 8  $\mu\text{m}$ ,可有效提高“刀-工分离”的临界切削速度。利用该装置及单晶金刚石刀具对纯铁进行切削,分析了振幅和切削速度对表面粗糙度的影响,得到粗糙度 22 nm 的加工表面。



**摘要：**磨削加工过程中交变的力、热载荷会改变材料的微观晶粒结构，导致其发生相变，进而影响航空航天高端零件的使用性能。以微观晶粒与相变的关系为切入点，通过对惯性导航元件制造材料马氏体时效钢 3J33 进行磨削试验，分析了工艺参数对材料微观晶粒的影响规律，研究了晶粒尺寸与取向差角对不同物相成分转变比例的作用机制，探讨了影响相变的关键工艺因素，并建立了考虑微观晶粒的相变预测模型。结果表明，该模型能够更为准确地计算材料物相成分的转变比例，其结果优于基于温升率和应变率的传统相变模型。在此基础上，定量地计算了工艺参数对各相成分转变的敏感性，提出了面向晶粒细化及相变控制的工艺优化方案，为马氏体时效钢的高性能磨削加工提供了理论依据与工程指导。

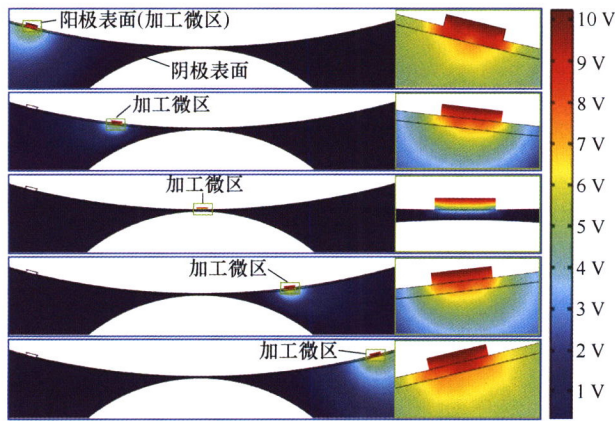
282 基于半解析法的球头铣刀静态铣削力的建模



**摘要：**提出球头铣刀静态铣削力的半解析建模方法。基于齐次坐标变换原理建立考虑刀具姿态调整的刀具切削运动轨迹方程。用球面代替刀具扫掠面，将加工过程中刀具和工件瞬时接触区域(简称刀-工切触区域)的识别转换为其三条边界线和三个交点的求解问题，基于齐次坐标逆变换原理提出刀-工切触区域的半解析求解方法。通过 Newton-Raphson 数值法计算出参考线与刀具实际扫掠面的交点，获得瞬时未变形切屑厚度。基于改进机械建模法求得微元铣削力，借助齐次坐标变换原理将微元铣削力转化至主轴随动坐标系，并通过积分法求解出瞬时静态铣削力。切削力验证试验表明，所提出的球头铣刀铣削力求解方法可以有效地预测铣削力，与改进 Z-MAP 法相比具有更高的计算效率。

## 295 转印掩膜电解加工宏量金属微结构

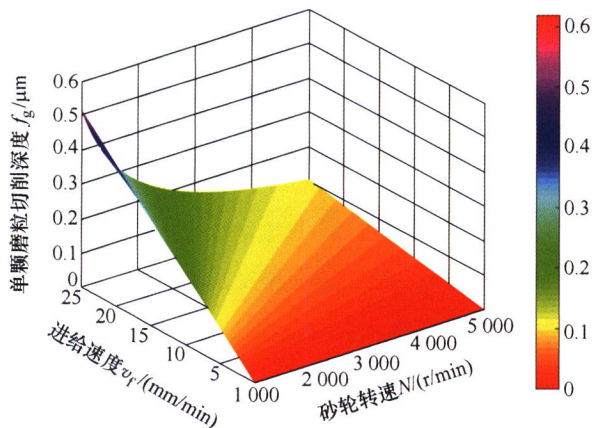
申继文 明平美 张新民 牛 岫 夏亚坤 张云燕 王 伟 李冬冬



**摘要:** 金属宏量微结构的高效、高质量、整体无缝电化学加工至今仍面临重大技术挑战。对此,提出了转印掩膜电解加工技术,以滚动印制方式克服传统面对面静印式掩膜电解加工在制备金属微结构方面的局限性和不足。数值仿真分析了新技术加工微坑结构过程中的电场分布特性及时空变化规律、廓形演变规律,开展了阵列微结构制备的试验研究,探究了主要工艺参数对阵列微结构表面与几何轮廓特征、成形精度等的影响,评测了在平面和圆柱面工件上加工宏量微结构的工艺效果。结果表明:转印掩膜电解加工时,阳极、阴极和掩膜虽均处于运动状态,但是各加工微区的电场时空分布保持较高的一致性,且其轮廓演变过程与最终廓形特征主要受工件旋转速度、极间电压的影响;基于优选工艺参数,在不锈钢圆柱面和平面上均能高效加工出廓形特征一致性高的宏量阵列微坑/微孔结构,360°圆柱面上2 266个深度89  $\mu\text{m}$ 的阵列微坑用时仅250 s,直径和深度CV值分别低至3.21%和3.68%,表面粗糙度Ra小于0.65  $\mu\text{m}$ ,加工平面分布8 360个深度50  $\mu\text{m}$ 的阵列微孔用时仅460 s,其直径CV值低至2.19%,入口与出口直径偏差仅1.06%~3.22%。转印掩膜电解加工技术在圆柱面和大尺寸(超长、宽幅)平面工件上高效、高精度制备微结构方面具有很强工艺能力与发展潜能。

## 308 金属陶瓷的干式放电磨削表面粗糙度预测模型

鲁艳军 孙佳劲 伍晓宇 关伟锋 莫 睿 牛立群



**摘要:** 金属陶瓷兼具金属和陶瓷的耐高温、耐腐蚀等优良特性,被应用于各类飞行器外壳、发动机喷口等高端零部件,提出采用环保洁净的干式放电磨削工艺对金属陶瓷进行高效精密加工。研究了金属陶瓷放电磨削过程中单颗磨粒切削深度和放电坑深度与放电磨削工艺参数之间的关系,构建了干式放电磨削工艺参数与磨削表面粗糙度的数学模型,系统研究了砂轮转速、进给速度和磨削深度等磨削工艺参数与开路电压、脉冲宽度和脉冲间隔等脉冲放电工艺参数对金属陶瓷磨削表面质量的影响。结果表明:当磨削深度  $a_p$  小于磨粒出刃高度  $h_g$  时,轴向放电磨削表面粗糙度与磨削深度、脉冲间隔等参数无直接关系,随进给速度、开路电压和脉冲宽度的增加而增大,随砂轮转速的增加而减少。与干式放电磨削表面粗糙度的实验测量值相比,建立的数学理论模型能够有效预测其表面粗糙度,预测的最小误差为0.39%,平均误差为6.55%。当开路电压小于30 V(即单颗磨粒切削深度  $f_g$  大于放电坑有效去除深度  $h_c$ )时,金属陶瓷材料表面去除形式以磨粒机械划擦为主;反之,其材料表面以电火花放电蚀除为主。

## **CONTENTS**

- 1 Discussion on Research Mode of Advanced Scientific and Technological Innovation**  
LIU Xinjun XIE Fugui YANG Di XIE Zenghui MENG Qizhi
- 11 Review of Research on Multi-robot Visual Simultaneous Localization and Mapping**  
YIN Hesheng PEI Shuo XU Lei HUANG Bo
- 37 Synthesis and Optimization Method of Exoskeleton Mechanism Based on Human-machine Fusion**  
ZHANG Lijie YU Jinxu YAN Jianhua DU Yihao XIE Ping LI Yongquan
- 46 Power Uninterrupted Shift Strategy of Electric Loader Based on Coordinated Control of Drive Motor and Wet Clutch**  
CAI Shaole CHEN Qihuai LIN Tianliang REN Haoling FU Shengjie XU Mingkai
- 57 Design, Analysis and Experimental Test of the Bridge-type Displacement Amplification Mechanism Based on the Topology Optimization of Flexure Hinge**  
LU Qinghua KANG Shidi CHEN Weilin WEI Huiling ZHANG Yunzhi LUO Lufeng
- 72 Smoothed-shortcut Q-Learning Algorithm for Optimal Robot Agent Path Planning**  
DUAN Shuyong ZHANG Linxin HAN Xu LIU Guirong
- 88 Two-dimensional Off-grid Compressive Beamforming Based on Orthogonal Matching Pursuit for Acoustic Source Identification**  
YANG Yongxin CHU Zhigang YANG Yang
- 98 Similarity Design Method and Experimental Study of Vibration Response of Composite Laminates in Thermal Environment**  
LUO Zhong ZHANG Xiaoxia HE Fengxia LI Hui SHI Baolong
- 109 Vibration Characteristics of a Rotor System with Coupling of Insufficient Interference Fit of Disc-Shaft and Pedestal Looseness**  
LI Zhinong CHEN Shiyao QIAO Fang ZHOU Shijian WANG Dong
- 120 Research on the Degradation of the Axial Natural Frequency of the Double-Nut Ball Screw Feed Drive System**  
XIE Jinglun ZHOU Changguang NIE Conghui FENG Hutian ZHOU Huaxi

- 133 Multi-Scale Attention Based Deep Reinforcement Learning for Intelligent Fault Diagnosis of Planetary Gearbox**  
WANG Hui XU Jiawen YAN Ruqiang
- 143 On Phase Modeling and Channel Parameters Sensitivity Analysis for Magnetorheological Fluid Damper**  
LI Jiahao ZHANG Yonghao DU Xinxin LU Jun LI Xingzhao LIAO Changrong
- 156 Study on Synchronization Theory of Dual-Exciters Reverse Drive Vibration System**  
SU Ming HUANG Xu SUN Yisen XIE Zhiping LI Rong ZHENG Jiming ZHU Dongmin
- 170 Electromechanical Coupling Dynamics Model and Its Verification of Dual Path Propelled Lifting Mechanism of Bridge Crane**  
LI Yan XIANG Dong WANG Junying
- 183 New Progress and Development Trend of Manufacturing of Functional Surface Structure**  
TANG Heng TANG Yong WU Xiaoyu YUAN Wei SUN Yalong LU Yanjun PENG Ruitao
- 200 Friction and Wear Characteristics of Disc Friction Pair with Groove-shaped Texture**  
DOU Zhenhua WANG Xiangyu HAO Huimin LAN Yuan HUANG Jiahai
- 210 Tribological Investigation of a Mixed Solution with Superlubricity Achieved**  
MENG Fanjie WANG Zhongnan CHANG Qiuying WANG Zhiyuan ZHANG Jianwen GENG Xu
- 220 Study on Geometric Error Sensitivity Method of NC Internal Compound Grinder Based on Interval Theory**  
FAN Jinwei XIE Bentian YE Qian TAO Haohao
- 231 Prediction of Machine Tool's Motion Accuracy Deterioration Based on Chaotic Evolution of Thermal Error**  
DU Liuqing HU Jie YU Yongwei
- 241 Analysis of Transient Elastohydrodynamic Lubrication of Asymmetric Polymer Gear Under Reversing Condition**  
ZUO Mingyu WANG Youqiang JIAN Guangxiao HU Yu MO Jun FANG Yuxin
- 249 Slip Effect of Microchannel Nanobubbles under the Coupling of Microstructure and Temperature**  
DAI Shuangwu LU Yan
- 260 Development of Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting Device with Multi-stage Amplification Function**  
YIN Sen BAO Yan PAN Yanan DONG Zhigang JIN Zhuji KANG Renke
- 269 Research on Phase Transformation Analysis and Process Optimization of Grinding Considering Microscopic Grains**  
GUO Weicheng SUN Gaoxiang DING Zishan WU Chongjun LIU Xiao

**282 Modeling on Static Milling Force of Ball-end-milling Cutters Based on Semi-analytical Method**

DONG Yongheng LI Shujuan ZHANG Qian HONG Xiantao LI Pengyang LI Qi LI Yan

**295 Fabrication of Massive Metal Microstructures by Rotating Through-mask Electrochemical Transferring Technology**

SHEN Jiwen MING Pingmei ZHANG Xinmin NIU Shen XIA Yakun ZHANG Yunyan  
WANG Wei LI Dongdong

**308 Prediction Model of Surface Roughness in Dry Electrical Discharge Grinding of Metal Ceramics**

LU Yanjun SUN Jiajing WU Xiaoyu GUAN Weifeng MO Rui NIU Liquan



# 《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)

## 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)

