

ISSN 0577-6686  
CODEN CHHKA2

# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏

精准微创手术器械创成与制造基础

客座主编：王树新教授

特邀专栏

智能制造装备

客座主编：孙容磊教授  
李国民教授

中国机械工程学会 主办

万方数据

2018年54卷17期 半月刊



/// 特邀专栏 ///

精准微创手术器械创成与制造基础

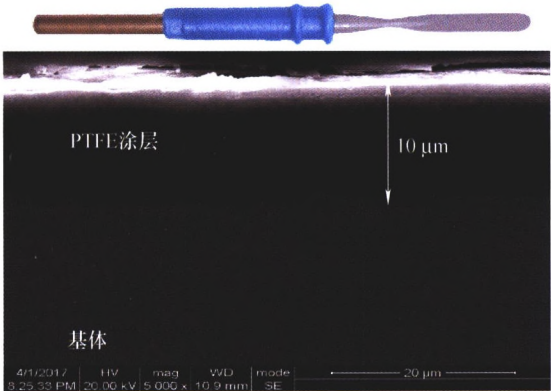
客座主编：王树新教授（天津大学）  
策划编辑：罗晓琪 岑 伟（《机械工程学报》编辑部）

1 精准微创手术器械创成与制造

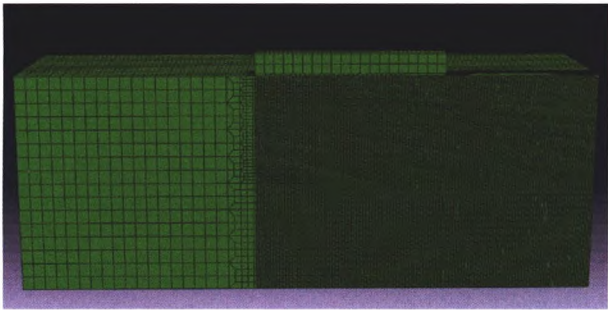
王树新

2 PTFE 涂层抗粘附电极切割效率和抗粘附性能的时变性研究

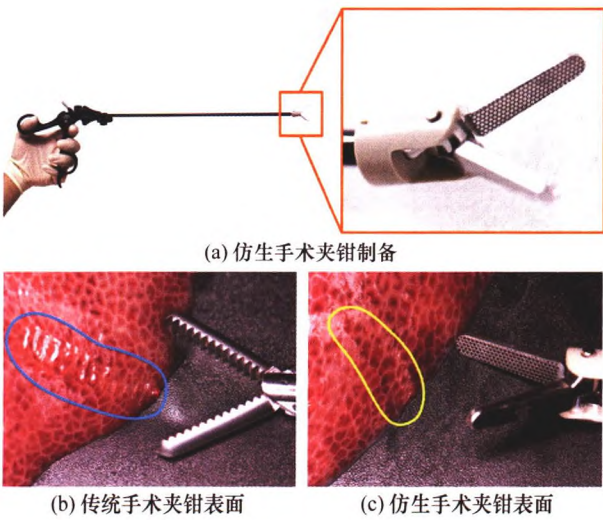
万健飞 郝汝飞 龙运江 郑 良 郑 靖 周仲荣



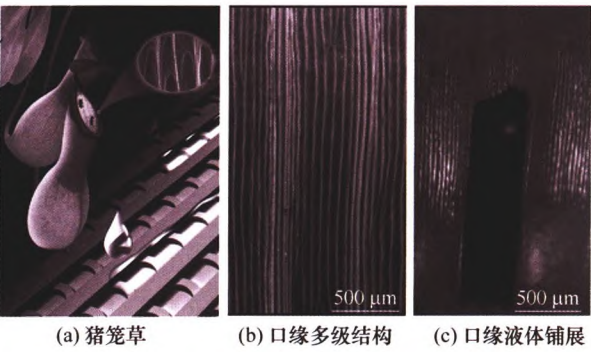
**摘要：**电外科手术过程中高频电刀手术电极表面的组织粘附会导致电极变“钝”、变粗，切割效率和操作精度降低。近年来，低表面能的 PTFE 涂层电极被临床用作抗粘附手术电极，然而，这种抗粘附电极的切割效率和抗组织粘附耐久性尚不清楚。因此，利用摩擦学手段实时测量电切割离体猪肝组织试验过程中 PTFE 涂层电极-组织界面的切割阻力，结合微观形貌和组织切片分析，研究了 PTFE 涂层电极切割效率和抗粘附性能的时变性。结果表明，PTFE 涂层电极的切割效率与抗粘附能力呈负相关。在切割初期，电极表面的 PTFE 涂层完整涂覆，抗组织粘附效果明显，组织热损伤轻，但切割阻力大，切割效率低；随着切割时间增加，PTFE 涂层变薄、局部被电弧烧蚀击穿，切割阻力显著减小，但电极的抗粘附性能急剧下降，组织热损伤加重；随着切割时间继续增加，PTFE 涂层完全破坏，抗粘附效果丧失，切割阻力降低到最低值。增大高频电刀输出功率能提高 PTFE 涂层抗粘附手术电极的切割效率，但涂层破坏加剧，涂层的有效抗粘附时间缩短，组织损伤也显著加剧。可见，在复杂的电外科手术工况下，PTFE 涂层电极的切割效率低，抗组织粘附耐久性差。



**摘要：**在多功能摩擦磨损试验机上模拟微创手术中的组织夹持牵引操作，研究了钳头与猪肝组织间的摩擦学行为，并基于钳头与组织间的夹持应力分布数值模拟结果，探讨了不同的腹腔镜开窗钳头与肝脏组织的相互作用行为。结果表明：在接触系数相同的情况下，开窗数量的增加有助于增大滑动摩擦力；三正方形开窗钳头由于开窗轮廓最长，在与组织相互作用过程中，使组织在轮廓边缘产生了更多的变形，有利于嵌入组织，与肝脏组织之间产生的能量耗散及滑动摩擦力最大，夹持稳定性最好；对于相同类型的矩形开窗钳头，接触系数存在一个阈值，当接触系数小于该阈值时，随着接触系数的减小，摩擦力减小，夹持稳定性会降低；钳头与肝脏组织接触过程中，较大的接触应力集中在钳头端部边缘和开窗轮廓边缘与肝脏组织接触处。



**摘要：**手术夹钳是外科手术中常用的夹持器具，传统的手术夹钳主要通过齿形结构使湿滑的软体器官变形产生机械互锁来提高夹持稳定性，这往往会带来严重的组织损伤。为了降低夹钳夹持损伤，需要发展以强湿黏附增摩来取代强夹持增摩的技术，实现湿环境下“松夹而不滑脱”功能。树蛙经过千万年的进化，其脚掌形成了优异的湿摩擦功能。通过表征发现树蛙脚掌表面结构多为密排六棱柱。且随着界面间液量减少，树蛙脚垫由湿变干过程中液膜会出现碎化分散，摩擦力出现近百倍增大的现象，即称为边界强摩擦状态。通过对仿生表面的测试发现，液膜的碎化现象由其特殊的密排棱柱结构所决定，液膜碎化会使液膜更为均匀铺展，产生极强表面张力，从而能够在无任何外界压力的情况下仍能产生极高的摩擦力，有助于达到手术夹钳“松夹而不滑脱”的效果。此外，棱柱结构的各向异性与沟槽的方向性分布使得摩擦力表现出各向异性，鲜猪肝夹持测试发现，与传统齿形夹钳相比仿生六棱柱表面具有更优异的摩擦性能，更适合于仿生手术夹钳表面。基于树蛙脚垫强摩擦机制，提出了仿生手术夹钳设计制造方法，并验证了其降低组织损伤的有效性。

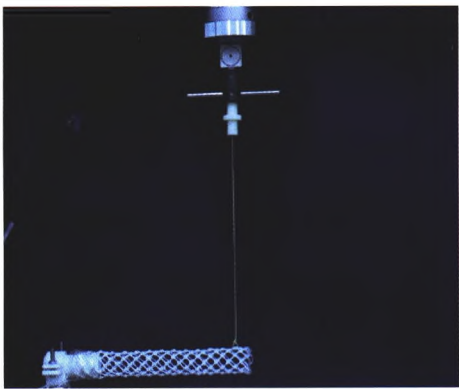


**摘要：**微创手术具有创伤小、疼痛轻、恢复快等优点已逐渐成为外科手术主流。微创手术组织的切割、止血常采用载能手术器械如电刀、电凝钩来完成，组织粘刀严重，会引起结痂、粘刀撕裂，造成二次创伤引起医疗事故。如何解决载能手术刀粘刀是微创手术器械面临的重要技术难题，本研究师法自然，从自然中汲取表面超滑防粘创新灵感，在揭示猪笼草湿滑防粘机制的基础上，提出液膜式防粘新策略，研究了仿生防粘表面结构高温防粘机理以及制备工艺方法。通过软组织载能切割试验测试了仿生防粘表面防粘性能、以及组织热损伤与耐久性，试验结果证实了仿生防粘表面的防粘效果得到显著提升，组织粘附力降低 80%、组织粘附量降低 88%、创口损伤面积减小 82.6%、热损伤面积减小 71%，满足了载能微创手术器械防粘技术要求。



28 具有折展与变刚度特征的 NOTES 手术器械臂

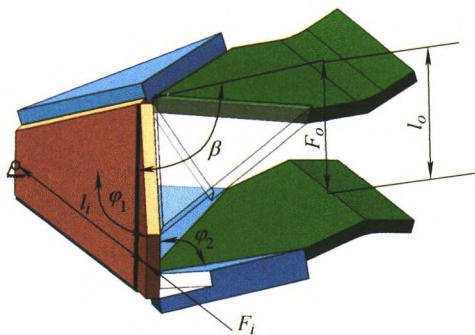
张国凯 马家耀 尚祖峰 陈 焱 由 衷 易 波 王树新



**摘要：**自然腔道手术(Natural orifice transluminal endoscopic surgery, NOTES)具有恢复快、创伤小、疼痛轻等优点，在临床应用潜力巨大。为适应人体复杂腔道环境，NOTES 中常采用长器械臂为手术工具提供通路及支撑。现有的器械臂往往尺寸较大且刚度低，不能满足 NOTES 的要求。提出一种可折展、变刚度的器械臂，采用编织结构作为骨架实现径向折展，同时借助包覆在编织结构交叉点处的热熔胶实现刚度调节。建立了器械臂的数学模型，得到了柔态和刚态下的刚度解析表达式。试验结果表明，通过加热及冷却热熔胶，器械臂可以实现刚柔两态转化，其刚度比接近 20，并且转换时间小于 30 s，同时可以实现约 2 倍的径向展开比。

36 基于厚板折纸理论的微创手术钳

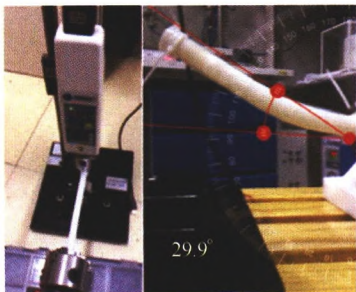
杨名远 马家耀 李建民 陈 焱 王树新



**摘要：**微创手术操作器械，作为微创手术机器人的重要组成部分，其性能的优劣直接影响手术的质量。目前的微创手术器械大多是针对手术过程中的夹取、缝合等基本操作设计的，但由于它们通常是通过简单地将传统外科手术工具小型化获得的，造成现有微创器械普遍存在着机械效益低、磨损严重、运动不协调等问题。为了提高手术操作的高效性和稳定性，基于厚板折纸理论设计了一种专门用于微创手术的新型手术钳，分析与试验表明其可提供多于传统微创手术钳 1.5 倍的夹持力，并具有更大的张角和更好的运动协调性，同时增加了手术操作的灵活性。动物试验表明其夹持组织更加稳定可靠。

46 基于纤维包覆式气动结构的柔性手术臂刚度调节性能研究

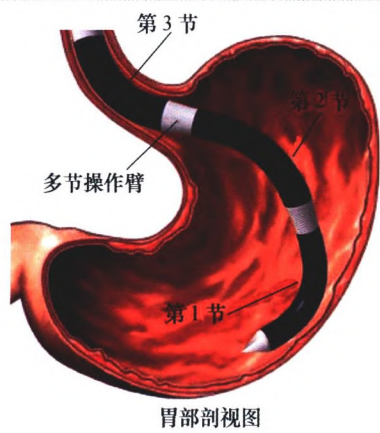
徐晓亮 王永泉 温 坤 陈花玲 王树新 李涤尘



**摘要：**针对未来微创手术操作臂的发展需求，提出了一种利用负压原理来增强离散结构间相互作用以实现柔性手术操作臂刚度调节的方法。据此设计制作了可包覆于管状柔性手术臂外表面的气动型多层纤维束编织结构，可通过抽真空使被密封的纤维束夹层内产生负压，增大轴向交错叠加的纤维丝之间的挤压力与摩擦力，从而起到刚度增强的作用。研究了大变形手术臂抗弯刚度的半解析计算方法。开展了该变刚度柔性手术臂结构性能的试验研究，探索了真空度、纤维丝结构参数(丝径和纤维丝表面粗糙度)、封装膜厚度及纤维层截面等因素对手术臂刚度的影响规律，为柔性手术臂的变刚度设计、优化提供了依据。

53 柔性驱动与刚度可调结构/功能一体化微创手术操作臂设计制造与性能研究

陈煜宇 刘 磊 李 博 魏 超 王树新 李涤尘



**摘要：**现有手术操作臂多采用刚性直杆结构，难以满足未来自然腔道微创手术的需求。为解决这一关键问题，结合气动人工肌肉技术及纤维堵塞刚度调节机理，设计一种具有多自由度运动和刚度可调能力的手术操作臂。研究获得操作臂单元的一体化制造工艺。搭建试验测试系统，测试获得气动人工肌肉驱动器弯曲变形及输出力与驱动气压的非线性关系。进一步研究操作臂单元的抗弯能力与负压、纤维疏密程度及纤维排布方式等参数的关系，得到优化的设计方案。实现操作臂在复杂环境下的多自由度绕障及刚度调节功能。

62 便携式手术机器人主手附加力位移补偿方法研究

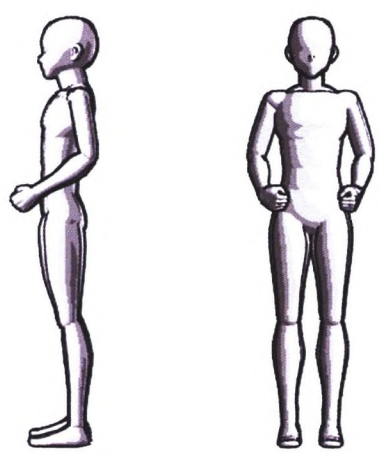
凌 颢 王国慧 李 政 李建民 易 波 孔 康 王树新 朱晒红



**摘要：**采用拉格朗日方程和 Stribeck 摩擦模型，根据便携式手术机器人主手的杆件重力、各关节摩擦力、惯性力对术者真实力感知的影响，建立了含关节摩擦力的动力学模型。基于机器人主手动力学模型，分别建立重力、摩擦力和惯性力三项的补偿模型，通过分析机器人主手力补偿反馈和附加位移的产生原因及补偿原理，提出了相应的补偿反馈力和附加位移补偿方法。通过对初步研究结果进行对比试验，验证该力补偿控制方法可用以平衡主手因自身所带的重力、关节摩擦力和惯性力产生的影响，最终实现术者真实的力感知，提高手术操作精准性。

69 基于术中轨迹的微创手术机器人的主从映射比例评估

李 政 王国慧 凌 颢 张国凯 李 炜 周仲荣 王树新 朱晒红



**摘要：**主从式手术机器人映射关系的设计与优化是提高术者操作效率，减少手术疲劳的关键步骤之一，过去通常依靠机器人搭建完成后基于实体手术平台进行评价，延长了研发周期。以微创手术机器人映射关系为研究对象，选择胆囊切除术作为采样标本，运用微型传感通过临床手术实际测量获得典型器械运动轨迹，综合分析得出手术安全域内运动范围，并运用人机工程分析平台 DELMIA，采用我国国家标准人体测量数据为人体建模参数，建立国人典型人体运动模型，通过设定不同映射比例，基于反向运动学计算获得手术机器人环境下典型手术过程中术者姿势与上肢运动轨迹，应用 RULA 分析对不同映射比例下术者的双侧上肢的疲劳程度进行评估，从而获取特定映射关系下人机界面最佳的映射比例，为微创手术机器人针对人机界面优化的设计制造提出了新的评价方法，为缩短器械设计修改流程、加快器械开发速度提出了新的途径。

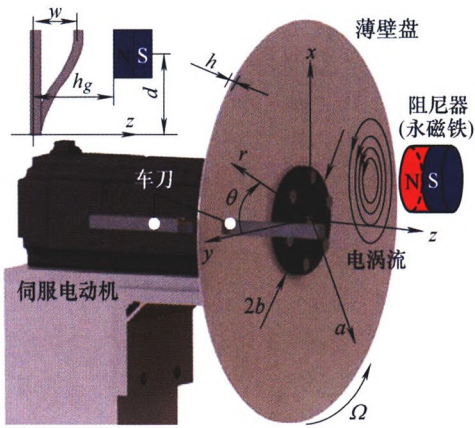


智能制造装备

客座主编：孙容磊教授（华中科技大学）  
李国民教授（华中科技大学）  
策划编辑：岑 伟（《机械工程学报》编辑部）

76 基于电涡流阻尼的薄壁盘加工振动抑制

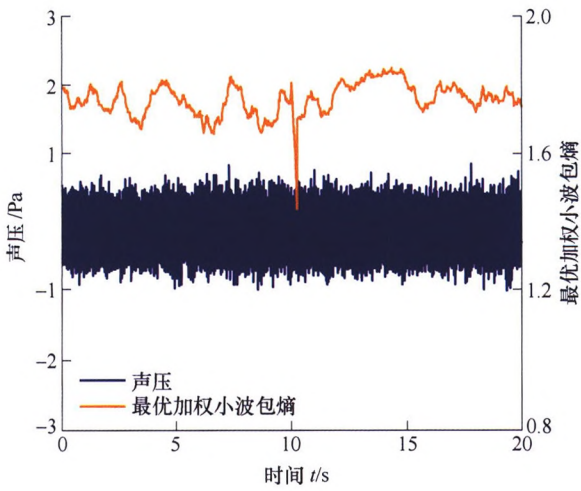
程明迪 郭家杰 李 卓 李国民



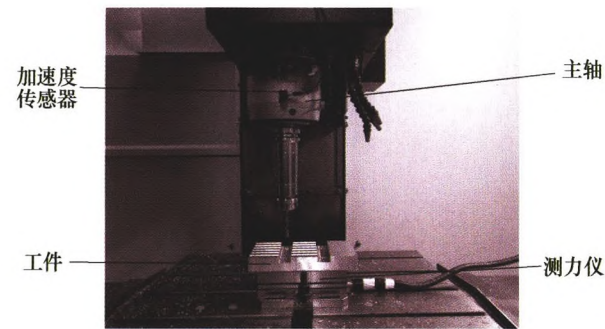
**摘要：**薄壁零件具有质量轻、相对强度高、优良特性，在航空航天等领域有着广泛应用；然而由于刚度小，薄壁工件在加工过程中容易发生变形和振动，导致产品难以满足尺寸精度和表面质量要求。为此，提出一种非接触式的电涡流阻尼器设计方法，旨在用于抑制加工过程中薄壁盘类工件的多模态振动。通过建立薄壁盘-电涡流阻尼器的耦合动力学模型，描述时空分布的系统惯量、刚度和阻尼；通过物理模型的模态降维和局部线性化，获得电涡流阻尼和薄壁盘振动位移的线性关系式。利用数值计算，分析电涡流在盘面分布的有效范围，揭示永磁铁的尺寸和位置对电涡流阻尼的影响规律，并提出永磁铁的优化布置方案，仿真分析薄壁盘-阻尼器的耦合动力学行为，为电涡流阻尼器的设计提供依据。最后，理论模型和仿真分析结果通过薄壁盘-阻尼器耦合的阶跃振动和车削加工试验验证；试验结果表明，电涡流阻尼器对薄壁盘振动有较好的抑制作用，在薄壁件加工减振应用中提供一种简单可行的有效方案。

85 智能车床的颤振实时辨识与在线抑制系统研究

熊振华 孙宇昕 丁龙杨



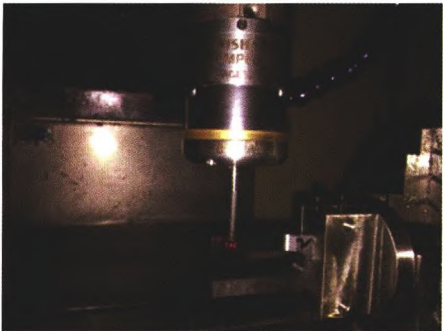
**摘要：**颤振是切削加工中的一种不稳定现象，它会对生产效率、加工表面和机床零部件造成恶劣的影响。因此，在加工过程中避免颤振的发生具有非常重要的意义。提出一种颤振的实时辨识与在线抑制系统，在不额外加装驱动部件的情况下，实现数控机床上加工颤振的智能抑制。该加工颤振智能抑振系统包括三部分：第一，以加权小波包熵作为特征实时地监测车削加工过程，并在颤振开始孕育时就将其辨识出来；第二，一旦检测到颤振，采用基于尺度因子的插值傅里叶算法，将颤振频率实时估计出来；第三，根据颤振频率，计算出主轴转速扰动的幅值和频率，使主轴转速按照指定的幅值和频率周期性变化，及时地将颤振抑制在其孕育阶段。通过薄壁圆盘端面车削试验对该系统进行验证，结果表明，所提颤振实时辨识与在线抑制系统能在颤振的孕育阶段，成功地将颤振检测出来，并及时进行抑制，实现了智能化的颤振抑制。



**摘要：**铣削是实现高速、高性能金属切削加工最主要的形式，其稳定性、加工精度和加工质量一直是研究的热点。针对柔性双自由度铣削工艺系统，建立了时滞微分动力学模型，模型中的铣削力包含基于刚体运动学的静态切削力成分和基于再生效应的动态切削力成分，并通过全离散法预测了无颤振工艺参数区域。在保证稳定加工的前提下，在频域内求解了由于断续切削引起的刀齿周期性强迫振动轨迹，利用表面位置误差和最大高度表面粗糙度评价加工精度与质量。理论和试验表明，在刀齿通过频率决定的共振转速下往往能获得较大的无颤振极限切深，而相邻两个共振转速的中间区域虽可避免共振，但较容易发生颤振。通过合理选择工艺参数，可以避免颤振的发生和实现对强迫振动的抑制。

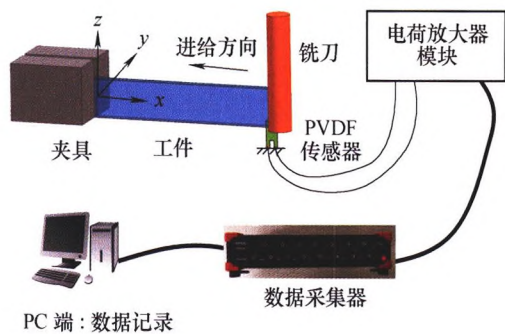


**摘要：**针对磁悬浮分子泵转子在高速运转时章动模态造成的失稳问题，提出一种基于交叉反馈的章动相位裕度跟踪补偿控制方法。利用磁悬浮转子系统的复系数建模方法，定量分析闭环控制作用下扁平转子的阻尼章动频率，确立章动频率与控制系统参数及转速间的解析关系，设计自适应滤波器跟踪提取章动频率信号，应用于交叉反馈的章动控制通道，实现全转速范围内对章动相位裕度的跟踪补偿控制。仿真结果表明，章动频率解算精确，基于交叉反馈的章动模态控制方法可有效解决磁悬浮高速转子全转速范围内的章动模态稳定控制问题。最后，将所提方法应用于所研制的大抽速磁悬浮分子泵控制系统，章动模态振动幅值被抑制在-60 dB 以下，消除了章动模态对控制系统稳定性的影响，确保了磁悬浮分子泵长期可靠运行。



**摘要：**针对薄壁件加工过程中的切削变形问题，提出了加工误差补偿学习控制方法。该方法以弹性变形为基础，建立了加工误差与名义切深的非线性函数关系，并利用补偿思想，构造了薄壁件加工误差补偿通用模型，即下次切削时名义切深的计算方法。在此基础上，利用数学原理和物理方法提出了四种具有不同收敛速度的补偿系数迭代算法。对比分析四种方法的优劣，以及多件单工步零件批量生产的特点，选择初始点割线法搭建误差补偿离散控制系统。该系统利用反馈原理实现了补偿系数的离线学习与加工误差的准确控制。最终以侧铣加工试验验证了该模型的有效性。





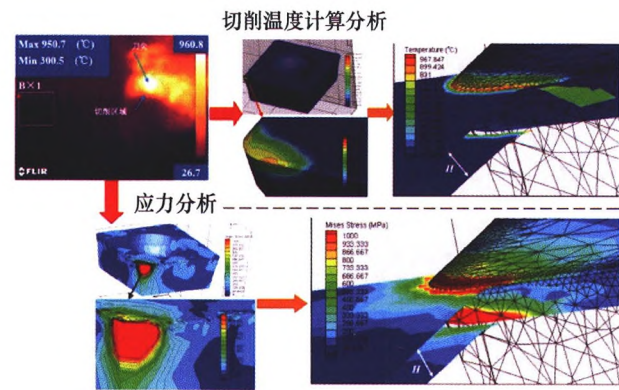
**摘要：**薄壁件的弱刚性导致其在加工过程当中容易产生振动，而薄壁件加工过程中存在的非线性问题使得加工振动难以预测，尚无法建立精确的理论模型。为了研究薄壁件铣削加工过程中的振动，提出一种基于模态理论的悬臂梁工件的动态振动监测模型，利用  $N$  个动态位移传感器监测前  $N$  阶模态下悬臂梁上任意一点的振动。以铣削加工悬臂薄板为例，采用聚偏氟乙烯(Polyvinylidene fluoride, PVDF)薄膜传感器在线监测了铣削过程中工件的振动位移。工件振动位移信号的时频域分析结果表明，PVDF 薄膜传感器能够有效监测薄壁件加工过程中周期谐振信号和高频振动信号，其中高频振动易发生在切入、切出阶段，且频率多分散在周期性切削激励倍频附近。最后，只考虑工件一阶模态，计算得到刀具在工件上动态作用点处工件的振动位移，并与工件变形引起的让刀量对比，验证了该方法的有效性。

124 应用 PCD 刀具铣削砂型的刀具磨损机理和预测模型



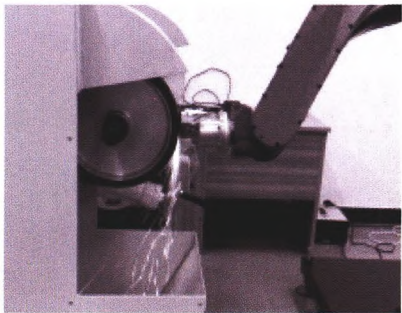
**摘要：**针对无模铸造成形技术在铸型制作中的优势，基于聚晶金刚石(Polycrystalline diamond, PCD)刀具铣削砂型试验，研究了 PCD 刀具铣削砂型的磨损机理，构建了刀具磨损率的预测模型。使用扫描电镜观察了 PCD 刀具刀面磨损带的微观形貌，研究了刀具磨损随加工时间的变化规律和磨损机理。结果表明：在砂型加工过程中，凸起的砂粒对刀具表面的高频刻划和冲击导致刀具表面金刚石颗粒解理断裂和金刚石颗粒间黏结材料被刮除，从而造成金刚石颗粒脱落；刀具中的微观缺陷和砂型中的“硬点”造成刀具微崩刃。基于支持向量机(Support vector machines, SVM)回归分析算法，应用 Matlab 软件编译了 PCD 刀具相对加工量的磨损率回归程序，以正交试验结果为训练样本，构建了刀具磨损率预测模型。应用该模型预测了工艺参数对刀具磨损率的影响，为砂型高效加工的刀具磨损控制提供了依据。

133 典型钛合金切削层相变形成机理及其影响因素研究



**摘要：**为研究钛合金已加工表面相变机理及其影响因素，首先通过分析切削过程中切削刃对切削区域的作用机制，采用能量法建立结构参数、切削三要素与切削耗能的数值描述模型，结合 Matlab 对模型进行求解，获知进给量  $f$  的变化对钛合金切削耗能  $W$  的影响最大，切削速度  $v_c$  次之，而切削深度  $a_p$  最小；为验证描述模型的正确性，采用 2 种不同几何结构不同牌号的硬质合金可转位刀片对典型钛合金 TC1、TC4、TA5 以及合金钢 30CrMnSiA 在正常空冷和氩气冷环境下进行对比试验，试验结果与描述模型间的误差较小，有效证明了描述模型的正确性，同时明确了钛合金已加工表面相变形成机理，并揭示了其发展的规律性。研究可为钛合金的高品质加工提供数据支撑。

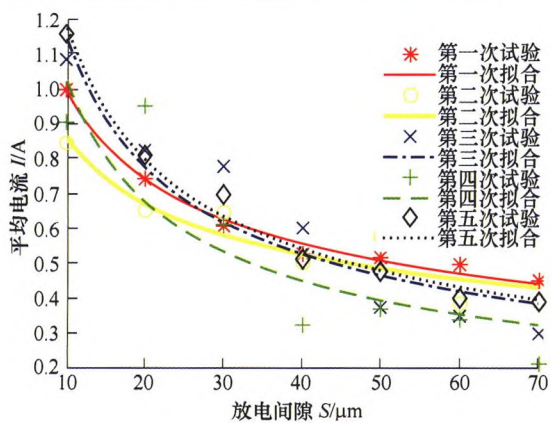




**摘要：**由于砂带打磨工序中往往存在外部因素干扰，因此研究抗干扰能力强手眼标定算法是机器人砂带打磨系统的关键问题之一。通过分析机器人打磨系统中的手眼标定数学模型，并利用带尖点的标定工具快速获取测量数据，在原有奇异值分解算法的基础上，提出基于加权的改进方案，在初次计算手眼关系后计算出各个测量数据的误差，并根据测量数据误差的大小重新分配其对应的权重，最后重新计算手眼关系。通过仿真测试可知，改进后的算法较原有算法对测量数据的误差敏感度降低，标定精度稳定性好。通过试验验证可知，改进后的算法较原有算法平均标定误差比 SVD 算法减少了 45.9%，最大误差减少了 24.4%，从而验证了改进算法的抗干扰性能，并通过实际打磨测试证实了改进算法更适用于机器人打磨系统手眼标定。

149 单晶硅的电火花线切割过程建模与控制

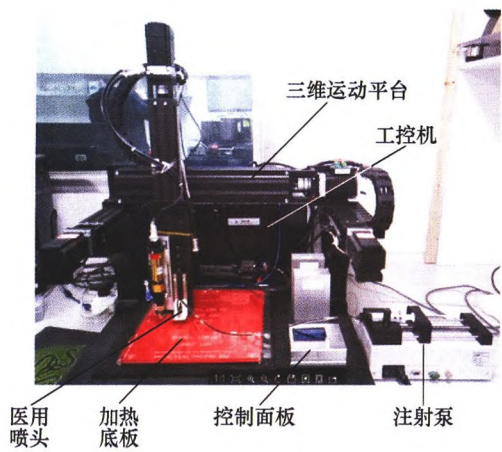
路 雄 李淑娟 辛 彬 武小宇 赵子瑜 李 言 蒋百灵 李玉玺



**摘要：**电火花线切割半导体加工过程中，工件与钼丝之间的间隙是保证工件表面质量和切割效率的关键参数。分析了单晶硅和钼丝之间的间隙与极间电流的关系，由于该间隙在钼丝切入工件后，无法实时测量，根据电流的变化来实时预估间隙的瞬时变化，从而实时调整工件进给速度以间接保证该间隙。采用系统辨识方法建立极间电流与工件进给速度的控制模型，并利用 F 检验法估计模型的阶次，选择遗忘因子递推最小二乘在线预估模型参数。设计最小方差自校正控制器对切割过程进行实时控制。试验结果表明所设计的控制器增强了加工系统的稳定性，在保证加工效率的前提下，工件表面有了明显提高。

157 离子凝胶材料的三维打印工艺

罗 斌 夏华翅 陈花玲 朱子才 何西铭 李涤尘



**摘要：**将 3D 打印技术应用于电活性聚合物材料——离子凝胶材料，采用离子凝胶的材料热压工艺所用的溶液配置方法，重点研究了在不同流量、不同扫描速度组合下，离子凝胶芯层与电极层单点成线、线拼成面后特征尺寸分布规律。实验结果表明：挤出流量的和扫描速度影响单点成线的线宽数值大小，进而影响线拼成面的单层质量。在得到单层质量最佳工艺参数及单层层厚参数的基础上，以圆柱环为例，通过多层叠加打印了厚度为 0.5 mm 的离子凝胶立体结构，给该结构的测点该施加 500 mN 的压力，该结构上下表面可产生 0.35 mV 的电压；采用复合打印技术制造出了离子凝胶的三明治结构，将打印出来的离子凝胶试件在 3.5 V 的直流电压下驱动，该试件末端 18 s 内可以发生 1.5 mm 的变形，传感驱动性能测试结果证明离子凝胶三维打印工艺可行，从而为后续该材料的复杂结构制造以及在软体机器人中的应用奠定基础。



165 基于激光选区熔化的功能零件结构设计优化及制造关键技术研究

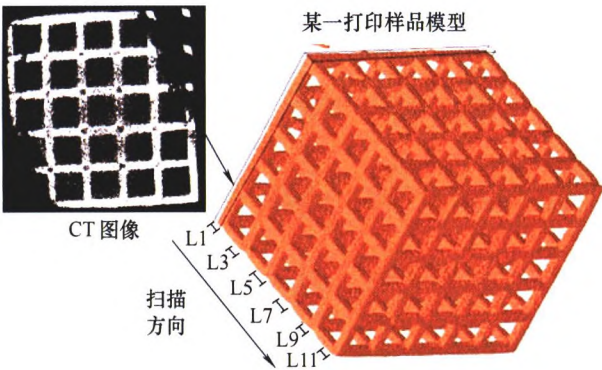
王 迪 陈晓敏 杨永强 肖泽锋 王安民 张明康 王艺锰 叶光照 宋长辉



**摘要：**为优化现有的门把手功能零件，采用了受力分析及拓扑优化的方法，设计出符合零件内部力场分布特点的功能件，通过激光选区熔化技术(Selective laser melting, SLM)获得打印成型件，并经过尺寸精度、力学性能及质量等方面的测试，获得减重 52.5%轻量化效果，力学性能达到传统铸铝件及尺寸精度符合需求的优化设计成品。SLM 加工获得的功能件应用于密封舱门，在真空度-30 kPa、氧含量浓度 10 ppm 条件下测试，模拟分析变形位移 6.9 μm。证明基于激光选区熔化技术进行优化设计能使得优化功能零件过程中拥有极高的自由度，故基于激光选区熔化技术，采用拓扑与布局优化、结构类型优化等结构优化设计方法，达到减轻产品重量并改善性能等目标的思路是可行的。

173 激光选区烧结马氏体时效钢多孔框架的微结构缺陷及力学性能影响分析

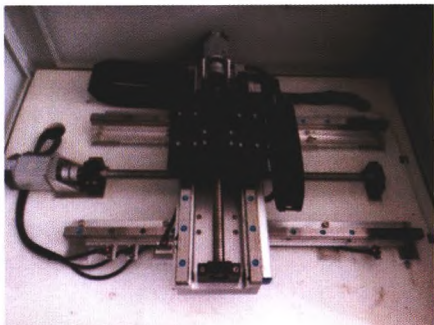
文 聘 叶红玲 杨庆生



**摘要：**针对 SLS 快速成型产生的结构内部缺陷问题，利用检测与统计手段建立基于试验数据的仿真预测。对同一多孔结构的 CAD 模型，提出了设置两种打印方向进行多次成型制备，通过 CT 分层扫描技术，对 3D 打印结构进行微结构检测，可以发现微结构中存在缺口、翘曲、孔洞为主的缺陷，其几何方向与打印方向具有一致性。利用三维图像重建模型技术，统计微结构缺陷的几何参数概率分布，研究 SLS 打印工艺参数对缺陷几何参数统计规律的影响，发现样品放置方向设置为 45° 时容易引起结构发生翘曲，设置为 0° 时孔洞容易形成。基于统计建立具有随机缺陷的数值仿真模型，分析随机缺陷引起力学宏观刚度和渗透率、微观应力的性能误差，结果表明随机缺陷使结构刚度变小，使得最大微观应力变动非常大。通过压缩试验验证了宏观刚度数值模拟结果。本研究中关于 SLS 几何缺陷的统计数据也适用于其他多孔结构的分析和数值计算，对研究 SLS 打印工艺引起微结构缺陷，及评估对力学性能影响具有重要价值。

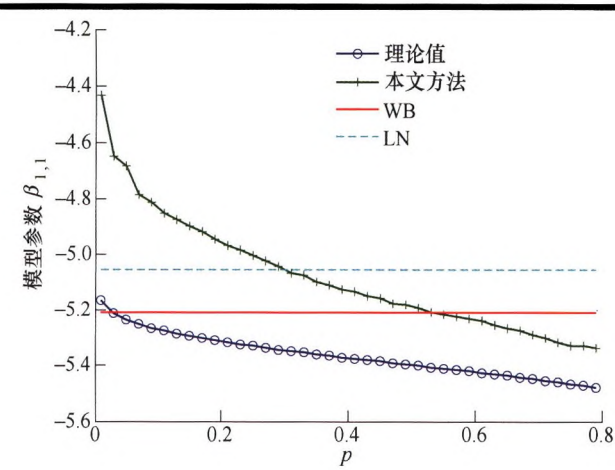
181 基于性能退化的数控机床剩余寿命预测

邓 超 陶志奎 吴 军 钱有胜 夏 爽



**摘要：**数控机床寿命预测技术是数控机床健康管理和维修维护的关键技术，面向数控机床研究基于性能退化的剩余寿命预测方法。在分析了剩余寿命与性能退化规律和性能阈值分布有关的基础上，建立单性能退化的维纳过程模型和融合多性能退化的维纳过程模型，从而得到数控机床的多性能退化量分布模型。依据失效原则，得到数控机床的性能阈值分布模型。由此，建立基于阈值分布的剩余寿命预测模型得到剩余寿命概率密度函数。在数控机床进给系统试验平台上进行试验，验证了融合多性能退化的维纳过程模型和剩余寿命预测方法的正确性和有效性。



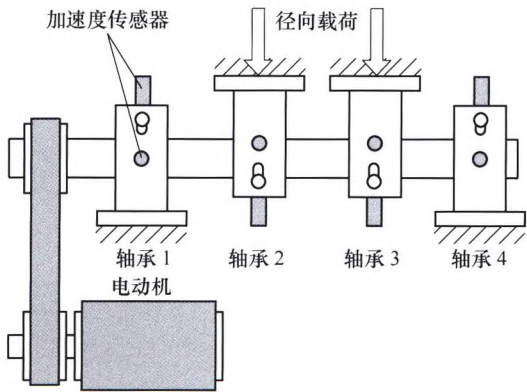


**摘要：**利用加速寿命试验的失效数据对产品的分位数寿命进行统计推断时，需要对统计模型做具体的假设。但是在工程实际中，错误的模型设定会严重影响估计精度。针对这个问题，提出了一种基于分位数回归的竞争失效产品分位数寿命的统计分析方法。分位数回归模型不受寿命分布假设的约束，且描述产品寿命与加速应力的关系时更加灵活。考虑到由于逐步 II 型截尾和竞争失效模式而产生的试验数据非完整性，采用基于 cause-specific hazard (CSH)的鞅方法为待估的分位数回归模型构造无偏估计方程，并将方程的求解等价于凸函数的极小值的求解。同时采用扰动重抽样方法得到参数的区间估计值。最后应用实例验证了方法的有效性。



**摘要：**随着光学电子设备在航天航空、仪器仪表和消费电子等领域的广泛应用，其显示屏及装饰面板的设计形式多样，且 3D 曲面玻璃更是一种潮流。因此，热压成型就成为量大面广的曲面玻璃制造的核心技术。针对精密成型设备的温度分布与控制及其压力控制等问题，开展精密热压成型关键技术研究，建立多工位成型工艺的仿真模型和加热板传热模型，模拟了玻璃在成型过程中温度变化历程以及加热板表面的温度分布，优化设计出一种新型蛇管式加热管；并研制了精密温控系统和精密压力控制系统，测试结果表明，该温控系统精度在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，压力控制响应精度为  $0.001\text{ MPa}$ ，能满足热压成型的要求。开发了多工位精密热压成型样机，建立一套可靠的工艺流程，并利用该样机开展了曲面玻璃的热压工艺试验研究。试验结果表明：压型温度为  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，压力为  $0.6\text{ MPa}$  时，可实现成型玻璃轮廓度 $<0.010\text{ mm}$ ，表面粗糙度  $R_a<0.02\text{ }\mu\text{m}$ ，良品率达 90% 以上。

机械动力学

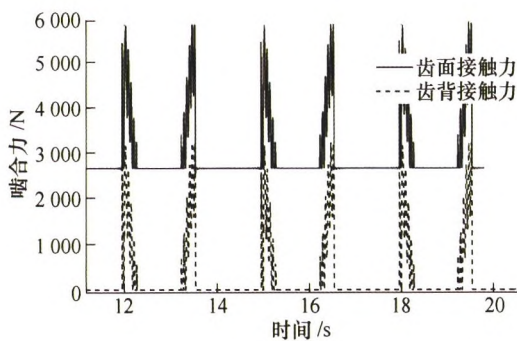


**摘要：**滚动轴承微弱故障信号往往包含在二阶循环平稳信号中，但容易受到噪声干扰。对循环平稳信号进行基于短时傅里叶变换的循环周期谱分析可以提高周期故障的识别能力，但其结果受到窗函数大小的影响且对于微弱故障的诊断效果不佳，提出最优小波尺度循环谱进行滚动轴承的早期故障诊断。首先利用连续小波变换对信号进行处理获得小波系数；接着采用相关峭度方法选择最优的分析尺度；然后沿着时间轴对该尺度范围内的小波系数进行循环谱分析；最后对最优尺度下的循环谱平均进行特征提取。与循环周期谱的分析结果进行对比，验证了该方法在早期故障特征提取方面的有效性。





**摘要：**为研究非线性接触力的影响，提出一种新型螺栓结合部接触区域动态特征的建模方法。基于混合坐标模态缩减技术，将螺栓联接模型中线性自由度的特征模态进行截断，仅保留接触区域的非线性动态特征模态。通过引入可等效表征非线性特征的接触耦合凝聚点，利用坐标变换将接触区域耦合面的非线性接触力凝聚到该作用点上，使得对螺栓结合部的非线性界面接触力转化为凝聚作用点的非线性刚度，从而在保证计算精度的前提下有效降低非线性耦合结合部求解的自由度数，节约计算资源。通过理论计算与试验对比，验证结合部耦合凝聚建模方法的有效性与可行性，这将为精准、高效地预测结构联接体的动态特征与性能评价奠定基础。



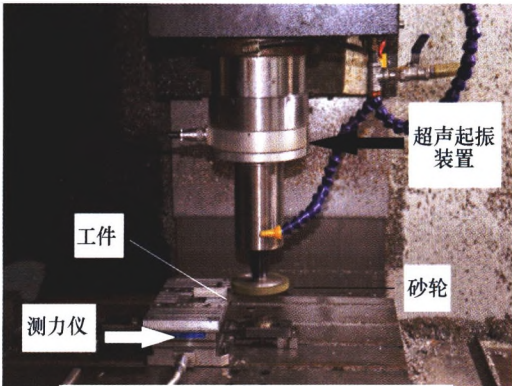
**摘要：**在舰船摇摆作用下，利用拉格朗日方程建立滑动轴承-齿轮副系统动力学模型。模型中引入非线性油膜力，将齿面、齿背侧啮合力同时考虑。计算了不同输入转速、扭矩作用下齿轮轴静平衡位置，及船体纵横摇摆下齿轮副的振动响应。为研究齿轮副相对于摇心偏置位置的影响作用，计算了不同偏置位置下系统的位移、啮合力及油膜力变化情况，发现随着偏置距离的增加，齿轮的振动响应、轴承油膜力幅值明显增大，油膜力方向大范围波动。此外观察了较小齿侧间隙下摇摆引起的挤齿现象，发现挤齿现象可仅在一侧偏置方向上发生。从齿轮及轴承安全性角度，为舰船设计中齿轮箱布置位置提供理论参考。

/// 制造工艺与装备 ///

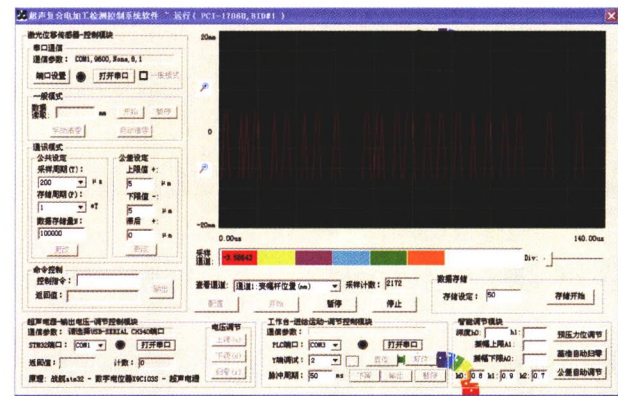


**摘要：**再制造工程作为一项战略性新兴产业，已经得到社会越来越多的重视；而再制造毛坯损伤检测与评估技术是制约再制造产业发展的瓶颈之一。磁记忆检测技术因其具有的金属材料早期损伤评价优势，在再制造检测与质量控制的研究与工程应用方面得到了较多关注。概述了金属磁记忆检测技术的理论研究现状，并总结其在再制造工程中的应用；结合车桥桥壳和液压油缸等典型结构件的再制造工程实例，详细介绍磁记忆检测技术在铁磁性结构件损伤程度判定和修复质量评价方面所发挥的关键作用；在此基础上指出该技术目前仍存在的一些问题和难点，并对面向再制造应用的金属磁记忆检测技术发展前景进行展望。





**摘要：**金属材料 12CrNi4A 是一种高强度合金钢，研究 12CrNi4A 材料轴向超声干磨削(Ultrasonic dry grinding, UDG)下的残余应力计算问题。运用逆热法构建一种新的非高斯热源模型，基于有限元软件 COMSOL，计算出金属材料 12CrNi4A 超声磨削温度场分布。用打孔埋布嵌入式热电偶方法测出 UAG 的磨削区温度历程及分布，通过有限元计算与实测结果进行对比，磨削区温度误差值在 5%以内。加载运动学硬化函数，耦合磨削热及磨削力对超声磨削残余应力场进行有限元计算，得到超声磨削表层残余应力分布，与实测值进行对比，误差在 10%以内。研究表明：1) 超声磨削可有效降低磨削区温度，降低幅值为 24.1%；2) 超声磨削可有效减少磨削残余拉应力，增加磨削残余压应力。所提出的预测超声干磨削残余应力的方法，对超声磨削的深入研究有借鉴参考价值。



**摘要：**超声复合电加工技术将超声、电解或放电作用有机复合，是难加工材料、异形面零部件微精加工的一种有效方法，但因影响加工过程的参数多而复杂，加工效率与精度常难以保持稳定。分析复合电加工系统机、电、液等参数变化特性，确定各类参数测量、控制或补偿策略；采用激光微位移等多种精密传感器、数字存储示波器及 PCI-1706U 同步数据采集卡，进行参数在线检测与处理；采用中心计算机、STM32 单片机及数字电位器，实时调节超声振幅、设置激光微位移传感器工作参数、调节电加工加电区间；根据极间电参数评定加工状态，进行电参数实时优化调节。利用虚拟仪器技术及 LabVIEW 平台，开发超声复合电加工实时测控、优化软件。利用研发的测控、参数优化及加工系统，进行微结构超声复合电加工试验，结果表明：加工系统工作稳定，可实现小间隙超声复合同步电加工，在保证加工精度同时，显著提高加工效率。



CONTENTS

2     **Research on the Variations of the Incision Efficiency and Anti-sticking Performance of PTFE-coated Electrode with Operation Time**  
WAN Jianfei   HAO Rufe   LONG Yunjiang   ZHENG Liang   ZHENG Jing   ZHOU Zhongrong

8     **Effect of Fenestrations in Laparoscopic Grasper on the Clamping Stability**  
MA Li   WANG Bingrui   LI Wei   WANG Guohui   ZHU Shaihong   ZHOU Zhongrong

14    **Bioinspired Surgical Grasper Based on the Strong Wet Attachment of Tree Frog's Toe Pads**  
ZHANG Liwen   CHEN Huawei   WANG Yan   ZHANG Pengfei   ZHANG Guokai   ZHANG Deyuan

21    **Bio-inspired Anti-adhesion Surfaces of Electrosurgical Scalpel**  
LIU Guang   ZHANG Pengfei   CHEN Huawei   HAN Zhiwu   ZHANG Deyuan

28    **Deployable Manipulator with Tunable Stiffness for Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery**  
ZHANG Guokai   MA Jiayao   SHANG Zufeng   CHEN Yan   YOU Zhong   YI Bo   WANG Shuxin

36    **Thick-panel Origami Inspired Forceps for Minimally Invasive Surgery**  
YANG Mingyuan   MA Jiayao   LI Jianmin   CHEN Yan   WANG Shuxin

46    **Research on the Rigidity Adjustment Performance of Flexible Surgical Arm Based on Fiber-coated Pneumatic Structure**  
XU Xiaoliang   WANG Yongquan   WEN Kun   CHEN Hualing   WANG Shuxin   LI Dichen

53    **Design, Fabrication and Performance of a Flexible Minimally Invasive Surgery Manipulator Integrated with Soft Actuation and Variable Stiffness**  
CHEN Yuyu   LIU Lei   LI Bo   WEI Chao   WANG Shuxin   LI Dichen

62    **Compensation Method of Main Force Additional Force of Portable Surgical**  
LING Hao   WANG Guohui   LI Zheng   LI Jianming   YI Bo   KONG Kang   WANG Shuxin   ZHU Shaihong

69    **Evaluation of Master / Slave Mapping Proportion of Minimally Invasive Surgery Robot Based on Intraoperative Trajectory**  
LI Zheng   WANG Guohui   LIN Hao   ZHANG Guokai   LI Wei   ZHOU Zhongrong   WANG Shuxin   ZHU Shaihong

76    **Vibration Suppression for Thin-wall Plate Machining Using Eddy Current Damping**  
CHENG Mingdi   GUO Jiajie   LI Zhuo   LEE Kok-Meng



**85 Online Chatter Detection and Suppression System for Intelligent Machine Tool**  
XIONG Zhenhua SUN Yuxin DING Longyang

**94 Research on Suppression of the Forced Vibration of the Cutter Based on the Milling Dynamics**  
ZHANG Jie LIU Chengying ZHENG Feng YIN Tengfei

**100 Nutation Phase Margin Tracking Compensation Control for High-speed Magnetically Suspended Rotor**  
ZHENG Shiqiang CHEN Cheng LIU Gang YANG Jingyu

**108 Error Compensation Modeling and Learning Control Method for Thin-walled Part Milling Process**  
HOU Yaohua ZHANG Dinghua ZHANG Ying

**116 On-line Vibration Monitoring and Analysis of Thin-walled Workpiece Based on PVDF Film Sensor in Milling Process**  
LIU Dongsheng ZHANG Dinghua LUO Ming LUO Huan

**124 Wear Mechanism and Prediction Model of Polycrystalline Diamond Tool in Milling Sand Mould**  
SHAN Zhongde ZHU Fuxian

**133 Study on the Formation Mechanism of Phase Transformation and the Influencing Factors of Cutting Layer of the Typical Titanium Alloy**  
HE Genghuang WU Mingyang LI Lingxiang ZOU Lingli CHENG Cheng

**142 Weighted Hand-eye Calibration Algorithm for Robot Grinding**  
ZHANG Tie YE Jingyang LIU Xiaogang

**149 Modeling and Control of WEDM Process of Silicon Single Crystal**  
LU Xiong LI Shujuan XIN Bin WU Xiaoyu ZHAO Ziyu LI Yan JIANG Bailing LI Yuxi

**157 Research on 3D Printing Process of Ionic Gel**  
LUO Bin XIA Huachi CHEN Hualing ZHU Zicai HE Ximing LI Dicheng

**165 Study on the Key Techniques of Designing Optimization and Manufacturing of Functional Part's Structure Based on Selective Laser Melting Technology**  
WANG Di CHEN Xiaomin YANG Yongqiang XIAO Zefeng WANG Anmin ZHANG Mingkang  
WANG Yimeng YE Guangzhao SONG Changhui

**173 Microstructure Defects and Properties Analysis of Maraging Steel Porous Frame by Selective Laser Sintering**  
WEN Pin YE Hongling YANG Qingsheng

**181 Residual Life Prediction for NC Machine Tool Based on Performance Degradation**  
DENG Chao TAO Zhikui WU Jun QIAN Yousheng XIA Shuang



**190    Quantile Regression Based Accelerated Life Test Analysis for Problem with Competing Risks of Failure**  
ZHOU Yicheng   LÜ Zhenzhou   CHENG Kai   SHI Yan

**200    Research and Implementation on Critical Technology of Precision Compression Molding Tool**  
SHU Yang   ZHOU Zhixiong   HUANG Xiangming   XU Liang   CHEN Yongfu

**208    Rolling Element Bearing Incipient Fault Feature Extraction Based on Optimal Wavelet Scales Cyclic Spectrum**  
YANG Rui   LI Hongkun   HE Changbo   WANG Fengtao

**218    Condensation Modeling of Nonlinear Dynamics in Contact Region of Bolted Joint**  
JIANG Heling   KONG Lingfei   LI Chao   CUI Bo

**226    Dynamic Analysis of Journal Bearing-gear System under Swing Movement of the Ship**  
LIU Zhenxing   LIU Zhansheng   YU Xiangyu   PANG Xuejia

**235    Review on Metal Magnetic Memory Detection Technology in Remanufacturing and Case Study in Engineering**  
QIAN Zhengchun   HUANG Haihong   HAN Gang   XIONG Bin   FEI Zhiyang   ZHAO Lunwu

**246    Calculation and Experimental Study on Residual Stress in Axial Ultrasonic Dry Grinding of 12CrNi4A Material**  
TANG Jinyuan   ZHENG Jinchao   LIAO Dongri   SHAO Wen

**255    Parameters On-line Measurement and Control and Optimization Experiments of Ultrasonic Compound Electric Machining**  
ZHAO Qingqing   DENG Zhengquan   ZHU Yongwei



# 《机械工程学报》第十届编委会

## 荣誉主任

王补宣 (院士) 路甬祥 (院士) 潘际銮 (院士)

## 荣誉委员

王玉明 (院士) 王先逵 (教授) 石治平 (研高) 叶声华 (院士) 宁汝新 (教授) 过增元 (院士)  
刘 飞 (教授) 刘人怀 (院士) 刘大响 (院士) 刘友梅 (院士) 关 桥 (院士) 杨叔子 (院士)  
林尚扬 (院士) 周孔亢 (教授) 柳百成 (院士) 钟 掘 (院士) 钟秉林 (教授) 闻邦椿 (院士)  
徐金梧 (教授) 徐滨士 (院士) 郭孔辉 (院士) 温诗铸 (院士) 谢友柏 (院士) 熊有伦 (院士)  
潘健生 (院士)

## 主 任

钟群鹏 (院士)

## 副 主 任

王文斌 (编审) 王国彪 (教授) 陈学东 (院士) 陈超志 (研高) 黄 田 (教授) 雒建斌 (院士)  
MCCARTHY J Michael (教授)

## 国内委员

丁 汉 (院士) 王 雪 (教授) 王田苗 (教授) 王立平 (教授) 王庆丰 (教授) 王时龙 (教授)  
王树新 (教授) 王祖温 (教授) 王润孝 (教授) 孔祥东 (教授) 邓宗全 (院士) 卢秉恒 (院士)  
史铁林 (教授) 付铭旺 (副教授) 仪垂杰 (教授) 吕 明 (教授) 刘 强 (教授) 刘少军 (教授)  
刘宏民 (教授) 刘献礼 (教授) 刘德顺 (教授) 孙汉旭 (教授) 严新平 (教授) 李大勇 (教授)  
李永堂 (教授) 李圣怡 (教授) 李杨民 (教授) 李荣彬 (教授) 李荣德 (教授) 李剑峰 (教授)  
杨华勇 (院士) 杨兆军 (教授) 杨兆建 (教授) 何存富 (教授) 张 峥 (教授) 张士行 (教授)  
张义民 (教授) 张宪民 (教授) 张湘伟 (教授) 陈 新 (教授) 陈 鹰 (教授) 陈昭彰 (教授)  
陈朝阳 (教授) 邵新宇 (教授) 苑世剑 (教授) 苑伟政 (教授) 范光照 (教授) 林忠钦 (院士)  
周祖德 (教授) 项昌乐 (教授) 赵 继 (教授) 赵 韩 (教授) 赵丁选 (教授) 胡正寰 (院士)  
钟志华 (院士) 姚振强 (教授) 秦大同 (教授) 袁巨龙 (教授) 袁寿其 (教授) 耿荣生 (教授)  
贾振元 (教授) 顾佩华 (教授) 徐西鹏 (教授) 高咏生 (教授) 高金吉 (院士) 郭万林 (院士)  
郭东明 (院士) 黄明辉 (教授) 黄洪钟 (教授) 梅雪松 (教授) 葛世荣 (教授) 韩 旭 (教授)  
曾 攀 (教授) 谢建新 (院士) 雷源忠 (研究员) 廖运炫 (教授) 谭建荣 (院士) 谭援强 (教授)  
翟婉明 (院士) 黎 明 (研究员) 檀润华 (教授)

## 国外委员

ALGIN Vladimir (白俄罗斯) CAO Dongpu (英国) CAVALLUCCI Denis (法国)  
CECCARELLI Marco (意大利) CHEN Ye-Hwa (美国) CHEN Yongkang (英国)  
CHEN Yubao (美国) CHENG Harry H (美国) CHENG Kai (英国)  
CHETWIND Derek G (英国) CHIU George (美国) DAI Jiansheng (英国)  
DEAN Trevor Anthony (英国) DONG Zuomin (加拿大) FATIKOW Sergej (德国)  
FENG Yuntian (英国) FLEWITT Peter E J (英国) GAO Wei (日本)  
GE Qiaode Jeffrey (美国) GIOVANOLA Jacques (瑞士) GOGU Grigore (法国)  
GU Fengshou (英国) GUO Yuebin (美国) HAGIWARA Ichiro (日本)  
HUANG Yong (美国) HUANG Han (澳大利亚) IWATSUKI Nobuyuki (日本)  
JAUREGUI Juan Carlos (墨西哥) Wallaschek Jörg (德国) LI Dongyang (加拿大)  
LI Xiaoping (新加坡) LIM Teik Chin (美国) MORGAN Michael (英国)  
PARK Jong-Kweon (韩国) SINAPIUS Michael (德国) SU Chunyi (加拿大)  
SU Daizhong (英国) TIAN Guiyun (英国) WANG Jun (澳大利亚)  
XUE Deyi (加拿大) YANG Lianxiang (美国) YE Lin (澳大利亚)  
ZHANG Bi (美国) ZHANG Chun(Chuck) (美国) ZHANG Hongchao (美国)  
ZHANG Liangchi (澳大利亚) ZHAO Xudong (英国) ZHOU Libo (日本)  
ZUO Mingjian (加拿大)



ISSN 0577-6686



9 770577 668187

1.7>