

机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

封面文章：超声振动辅助磨削加工技术及装备研究的现状与展望

作者：丁文锋 曹洋 赵彪 徐九华

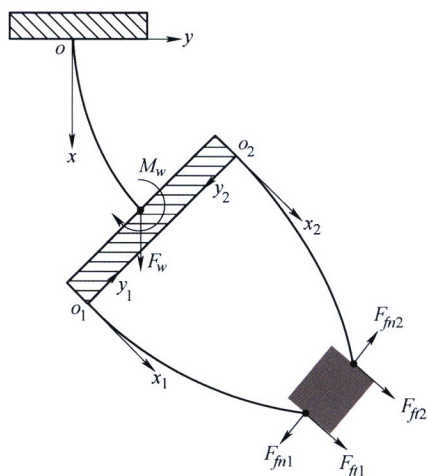


58卷 **9** 期 半月刊
2022年5月刊

/// 机器人及机构学 ///

1 多功能软体机械手的设计与建模

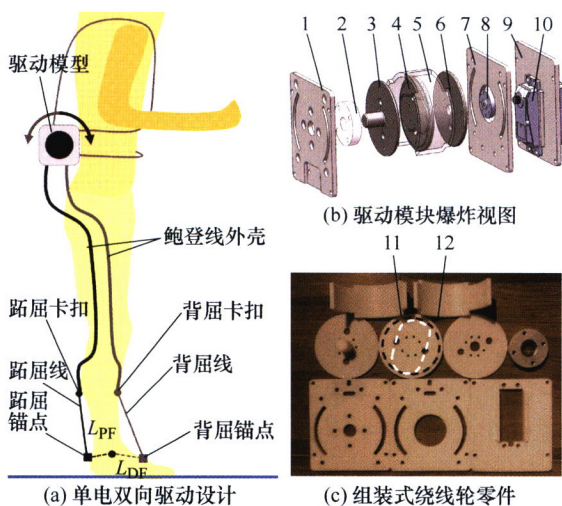
刘佳鹏 王江北 赵 威 费燕琼



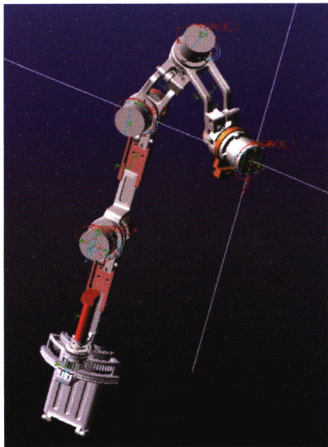
摘要:设计了一款新颖的多功能软体机械手,其由两个软体手指和一个软体手腕集成一体。软体手指由四个并联的双向弯曲气动软体驱动器组成;软体手腕主要由一个双轴双向弯曲气动软体驱动器构成,软体手指、软体手腕协同动作,可以实现软体机械手的多方位、多任务操作。根据软体机械手所需运动范围和抓取力确定了软体机械手的尺寸参数。基于欧拉-伯努利梁理论,建立了上述两个双向弯曲软体驱动器的欧拉梁弯曲模型和悬臂梁弯曲模型,获得了双向弯曲软体驱动器弯曲曲率、弯曲力矩和充气气压三者之间的解析表达式,以及双向弯曲软体驱动器受到载荷时的弯曲变形曲线,通过双向弯曲软体驱动器的自由弯曲试验和弯曲变形试验验证了上述模型的正确性。通过软体机械手的闭合抓取试验和张开提起试验说明了软体机械手的实用性。

10 轻量化自适应柔性踝关节康复机器人设计与评估

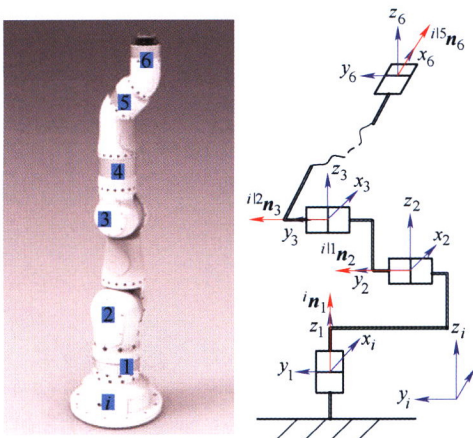
尹 帅 石 斌 孙逸凡 槐雅萍 王 晶



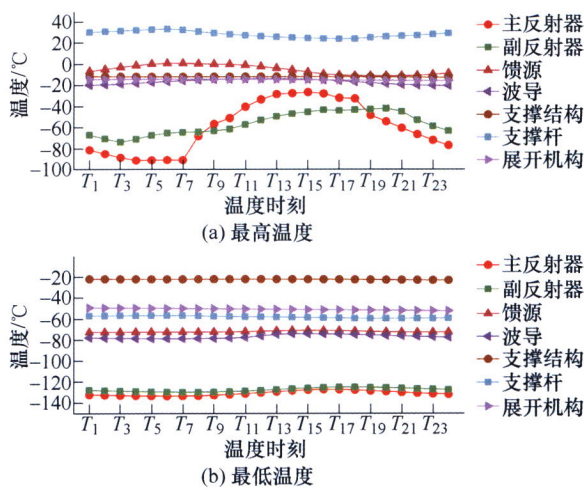
摘要:针对脑卒中患者步行过程中踝关节背屈力不足而造成足下垂和踝关节跖屈力下降而造成站立末期推进力不足,进而导致步态不稳及容易摔倒等问题,设计一款新型柔性踝关节康复机器人。首先,鉴于刚性踝关节机器人增加了脑卒中患者新陈代谢及心理不适感,本研究采用功能性纺织物与鲍登线传输装置相互作用实现踝关节力辅助,轻质且隐蔽,同时,采用单电机双向驱动方式,减少了驱动模块的质量和体积,研制嵌入鞋套的拉力传感器,轻质且实现了辅助力实时检测。然后,为适用于不同体型的穿戴者,采用分级控制,上层控制包括步态运动意图识别及鲍登线轨迹生成算法,下层控制参照鲍登线轨迹实现踝关节跖屈与背屈辅助,提出了一种基于步态事件的鲍登线轨迹生成算法,实现了控制参数自适应调整,提高了系统鲁棒性。最后,搭建试验测试平台验证了机器人辅助效果,在机器人提供动力辅助时,踝关节站立末期跖屈角度与摆动期背屈角度均提高,站立末期地面推进力增加;相比之下,在机器人不提供动力辅助时,跖屈侧被动拉力在站立末期提供跖屈辅助,提高地面推进力。结果表明该柔性康复机器人具有增加站立末期地面推进力和改善摆动期离地间隙的作用,是一种前景良好的踝关节康复设备。



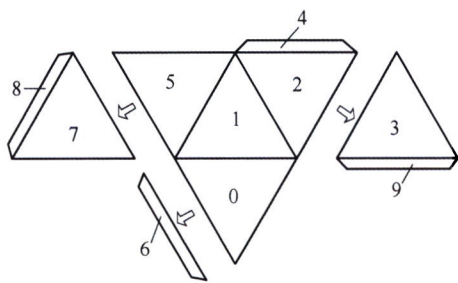
摘要: 为满足脑卒中患者康复训练的需求, 康复外骨骼机械臂需要具有多个自由度。项目采用的康复外骨骼机械臂具有 5 个自由度, 排除运动相对独立的腕关节, 仍需要对机械臂剩余 4 自由度进行高精度控制, 从而保证患者康复的安全性、舒适性及康复的有效性。多自由度串联机械臂具有高度的非线性, 增加了其建模控制的复杂程度。利用虚拟分解控制理论, 将复杂系统分解为几个简单的子系统进行分析及控制, 再将所有子系统控制器组建成系统虚拟分解控制器, 降低其动力学建模复杂程度, 大大控制减少计算量, 便于提高系统响应性。采用 Simulink 与 ADAMS 对机械臂进行联合控制仿真及实物试验, 与采用固定重力补偿的 PID 控制方法进行了对比。结果表明, 对于高度非线性系统, 虚拟分解理论的控制效果比 PID 方法好。



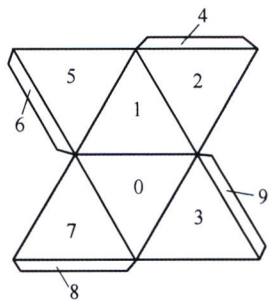
摘要: 为解决现有 6R 串联机械臂实时高精度逆运动学问题, 提出一种新的分析四元数, 用于 6R 机械臂逆运动学建模与求解。通过建立 6R 机械臂的坐标系和轴矢量, 提出一种与传统 Euler 四元数同构的分析四元数, 及与方向余弦矩阵同构的类方向余弦矩阵, 以推导无冗余、二阶的机械臂逆运动学模型。基于机械臂的结构矢量分解, 提出一种 6R 通用解耦机械臂建模的方法, 分析机械臂的解耦条件, 用于求解三轴解耦、偏置及正交解耦的 6R 机械臂逆运动学解析解。仿真试验结果表明, 对于三种腕型的机械臂, 所提出的方法单次求解速度在 5.7 ms 以下, 位置精度优于 10^{-15} m, 方向精度优于 $10^{-8} (^{\circ})$, 可以有效保证机械臂在线精密操作的性能。



摘要: 大口径高精度星载天线在轨运行时, 受太阳辐照、进出地影或遮挡影响, 会周期性经历各种极端温度环境, 导致天线的型面恶化和指向偏差。基于此, 进行了某大口径高精度星载天线的热变形优化设计与仿真计算, 首先针对高精度天线的结构组成特点, 开展热变形影响分析, 找出部件变形对天线型面和指向的影响机理。随后, 给出了天线型面误差和指向误差的计算方法, 研究了天线在轨温度变化情况及温度与热变形的评价关系。通过天线热变形误差敏感性分析, 找出了影响天线热变形的关键因素, 并在此基础上开展了热变形优化设计。最终的电性能仿真结果显示, 在三个特征频率下, 天线实际相位中心与理论相位中心偏差很小, 均在允许偏差范围内, 验证了热变形优化的有效性。



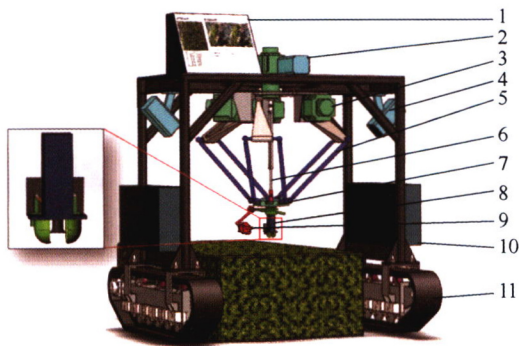
(a) 正六面体重组过程示意图



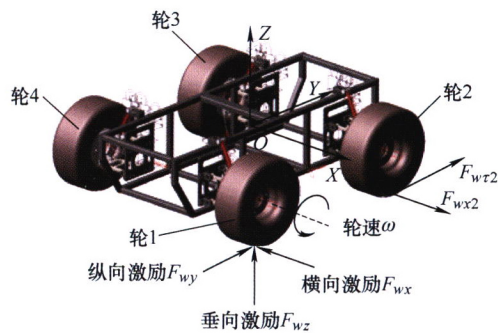
(b) 重组后正六面体纸盒展开图

摘要：针对变胞机构的变拓扑特性，以拓扑学和多体系统动力学理论为基础，提出一种可由变胞源机构动力学模型自动生成任意子机构动力学模型的建模方法。首先，从变胞机构的拓扑组成和所受约束角度出发，重新定义了变胞源机构的内涵，将变胞源机构向子机构的切换方式简化为构件数减少和构件数不变两种情况。其次，运用关联矩阵描述变胞机构的构态切换过程，提出实现构态切换所需的单位消元矩阵 E_{ij} 、关系消去矩阵 I_j 和关联关系变化矩阵 G ，将变胞机构的拓扑结构变化转化为一系列的矩阵运算，并给出了统一的数学模型。最后，建立关联矩阵、Huston 低序体阵列和通路矩阵三者之间的转换关系，结合 R-W 方法分析变胞机构子构态动力学模型的自动生成机理，以具有 3 个构态的闭环五杆变胞机构为例，建立变胞源机构动力学模型，通过编程自动生成所有子构态动力学模型，并对机构的动力学特性进行分析，验证所提方法的有效性和实用性。

62 基于时间与急动度最优的并联式采茶机器人轨迹规划混合策略

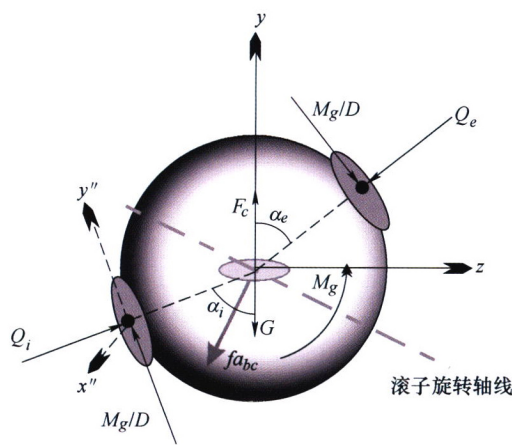


摘要：提出一种基于时间与急动度最优的速度曲线模型方法。分析了当前名优茶的叶芽采摘工作背景，提出一种 Delta 并联机构与视觉识别技术相结合的名优茶采摘机器人。建立名优茶的采摘轨迹周期并应用了改进的速度曲线模型，采用了 Lamé 曲线优化采摘轨迹改善 Delta 机构工作过程中存在的由于竖直水平运动切换引起的加速度突变问题。对调和急动模型完成适应性改进，应用适用于采茶特殊性的粒子群优化算法求解模型中最优的时间间隔参数，从而优化采茶轨迹周期中的工作时间。该模型遵守运动学约束，对采摘轨迹的时间与急动度综合优化，保持良好的轨迹平滑性。试验结果表明，该方法能够缩短采摘时间，提高效率，在急动度抑制方面有更好的性能，为名优茶采摘机器人路径规划提供了一种有效的方式。

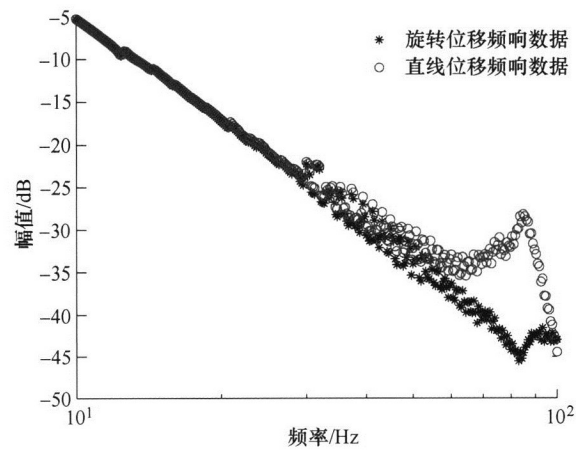


摘要: 针对全地形移动机器人多地形行走需要, 满足其路面的通过性与减振需求, 设计了一种双叉臂悬架减振机构, 建立了基于动力学参数分析的数学模型; 通过 ADAMS-Simulink 联合仿真, 分析了多路面谱函数激励下移动机器人悬架机构的振动情况, 优化了所选取的阻尼器阻尼比、刚度参数和摆臂角等悬架特性参数, 确定了悬架特性参数和驱动力矩等主要设计参数范围; 进一步地, 开展了户外多地形行走试验, 包括鹅卵石、青石板、土壤、草地等较为代表性路面, 对比了两种阻尼器参数测试, 结果表明, 所设计的悬架机构及特性参数优化, 显著改善了减振效果和越障性能, 提升了车轮驱动力矩转化输出为牵引力的效果, 验证了悬架减振机构动力学建模描述与仿真分析的正确性, 有效改善了全地形移动机器人路面适应性、通过性和行走稳定性。

机械动力学

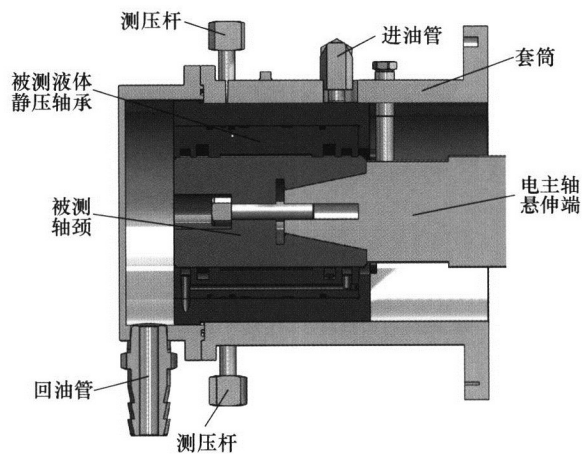


摘要: 轴承滚珠-滚道之间的打滑易使滚动体滚道划伤并导致明显的温升。为讨论打滑现象及其导致的问题, 提出一种热流固耦合动力学模型。模型引入了轴承部件的热变形, 打滑导致的温升, 供油区的润滑油混合模型, 保持架-引导圈之间的流体动压模型, 以及作用在滚珠和保持架上的碰撞力和切向摩擦力, 并考虑了保持架及滚珠的打滑程度、轴-轴承-轴承座组件的温升分布、热弹性变形等动静态参数的影响。通过对比 7307AC 轴承在一系列运行工况(运行速度, 轴向载荷和润滑油量)下的打滑试验结果, 验证了热流固耦合模型的准确性和有效性。结果表明, 相同轴向预载时转速升高打滑程度显著加剧; 最高温升及热变形也随之增加。乏油润滑下(0.4 L/min), 保持架总体打滑率低于满油润滑(1.2 L/min), 但轴承滚道的局部最大热变形达到滚珠-滚道径向游隙的 4 倍。基于润滑油混合模型发现, 喷嘴水平对称布置相较于垂直布置冷却效果更好。

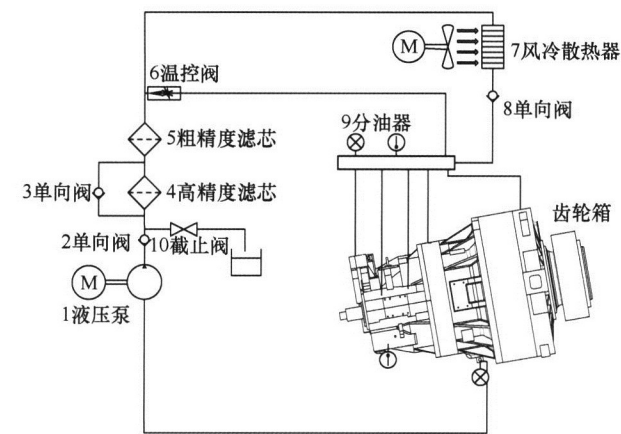


摘要：准确建立滚珠丝杠传动系统动力学模型是实现高速、高加速度和高精度运动控制的基础。滚珠丝杠传动系统的动力学特性具有不确定性，实际是随位置、负载质量等变量变化的，数学上应描述为变参数模型。因此，一种滚珠丝杠传动系统线性变参数(Linear parameter varying, LPV)动力学模型试验建模方法被提出。通过局部频域辨识方法获得非参数模型，并采用非线性最小二乘方法得到模态叠加形式的传递函数模型。采用傅里叶级数形式的正交基函数拟合方法，对不同位置下的局部传递函数模型参数进行拟合，获得与位置相关的参数模型。基于拟合结果，选择合适的工况点进行三次样条插值，得到与位置、负载质量相关的 LPV 模型。所提出方法应用于滚珠丝杠试验台，获得了一个与全局位置、负载质量相关性高的 LPV 模型，为实现基于 LPV 模型的高速、高精度运动控制提供了基础。

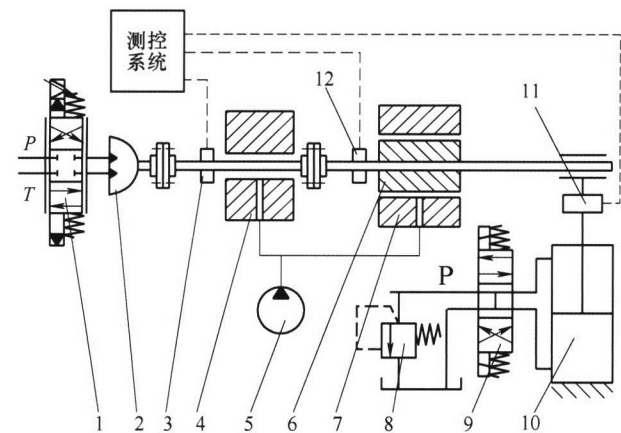
107 液体静压主轴液膜剪切模型重构与试验反求研究



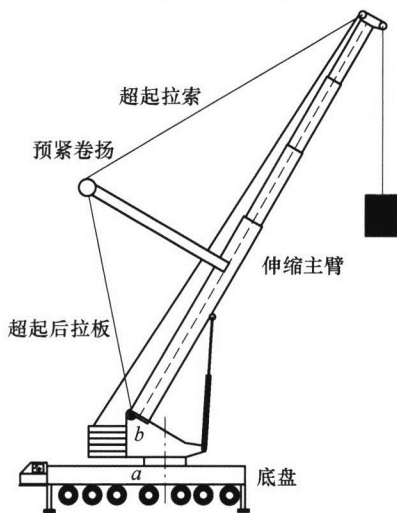
摘要：液体静压轴承由于具有精度高、刚度高、减振性好和无磨损等优点，在精密超精密机床主轴中获得了广泛应用。但现有的基于液膜牛顿剪切假设的液体静压轴承设计理论在实际应用中与测试结果存在显著的差别，难以满足液体静压主轴精确定量设计的需要。在对液体静压主轴长期研究并跟踪其实际应用发现，按照最佳节流比原则设计的液体静压主轴，理论上的节流间隙和轴承流量等参数往往与实际采用或测试的参数存在显著差异，部分案例的差异达到 40% 以上。为了建立更精确的液体静压轴承设计理论，有必要对其基本假设——液膜牛顿剪切模型，进行重新研究。利用滚动轴承电主轴和液体静压轴承作为动力源和测试对象，建立了带回油槽的 4 腔液体静压轴承原理性试验台，利用该试验台进行了不同液膜间隙、不同轴颈表面粗糙度、不同转速和供油压力等条件下的轴承流量等参数试验，发现了不同参数条件下理论设计值和实际测试值的偏离规律。在此基础上，逆向重构了与试验测试结果吻合度高的液体静压轴承液膜压力流量模型，进而反求得到了数学形式上可能的液体静压轴承液膜剪切新模型；进一步通过对各类新模型物理意义的解读，选择确认了轴颈表面带滑移的液膜剪切模型。研究工作为进一步建立可准确进行液体静压轴承设计的新理论奠定了模型基础。



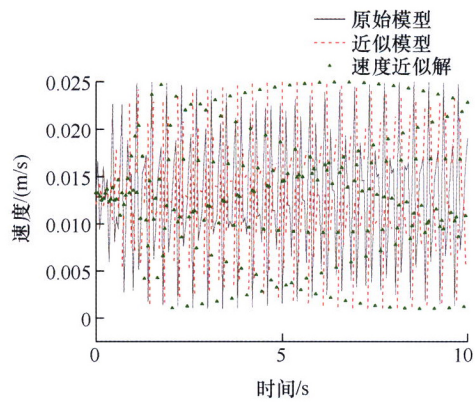
摘要：风电齿轮箱油温超限是风力发电场中发生频率较高的故障。针对该问题，在分析风电齿轮箱结构、运行控制策略的基础上，研究了风电齿轮箱内部及其外循环冷却系统的热力学行为，构建了风电齿轮箱热网络模型。该模型中，各节点温度由所建立的瞬态温度和稳态温度热力学方程组计算确定。结合风电齿轮箱的热力学行为，研究了热力学方程组中热量计算模型和热交换中节点间的热阻计算方法，形成了风电齿轮箱热网络模型计算流程。应用热网络模型及其计算流程，仿真计算了某 1.5 MW 风电齿轮箱实际工况下的齿轮箱油温、高速级 HSS-ABC 轴承温度和齿轮箱入口油温。对比了仿真计算值和实测值，结果表明热网络模型应用于风电齿轮箱油温超限具有有效性。计算值和实测值的误差分析也为进一步精细建模提供了方向。



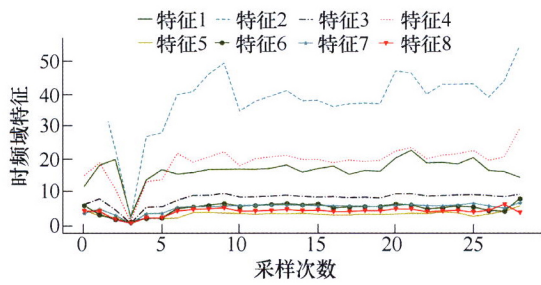
摘要：机械系统中，铰接处接触力受铰链间隙量大小、运动副各部件的材料属性、运动过程中的接触状态等因素的影响，表现出很强的非线性。传统的间隙铰摩擦理论模型主要关注对摩擦现象描述的普适性，而难以精确地描述摩擦过程中摩擦力的非线性特征。基于物理样机试验获得的数据，使用深度学习建立了间隙铰非线性接触力神经网络模型，通过摩擦试验生成接触摩擦力数据集，结合旋转铰间隙接触碰撞力混合模型生成接触碰撞力数据集，对模型进行训练和测试，得到了旋转铰的神经网络动力学模型。在此基础上，结合拉格朗日方程对含间隙铰的曲柄滑块机构进行建模，建立了“多刚体系统-间隙铰-多刚体系统”的动力学模型，通过仿真分析得到系统关键参数的动力学响应，并与物理试验结果进行了对比，验证了基于深度学习获得的间隙铰模型的正确性，为深度学习在非线系统动力学建模方向上的应用提供了一个可行的思路。



摘要：以单元两节点的矢径与切矢量作为描述变量，对空间悬索进行单元离散，采用 Hermite 插值建立悬索单元。基于空间悬索曲率连续这一物理事实，单元公共节点处矢径的二阶导数连续，将悬索中间节点的切矢量用两端节点矢径与切矢量表达，实现系统自由度缩减。依据虚功率原理，建立空间悬索非线性平衡方程，对平衡方程求时间导数，得到系统方程的雅可比矩阵。采用三点抛物线近似悬链线的方式建立悬索初始形状，得到非线性方程的初值。对于仅承受重力且已知无应变原长的悬索，采用端部载荷与重力平衡的方式，计算出悬索两端的载荷。在此基础上，实现在已知悬索一端载荷大小的情况下，计算悬索无应变原长。提出了一种空间柔性悬索的几何非线性计算方法，通过数值算例，验证了方法的可靠性，为空间静态悬索计算，提供一种新的计算途径。



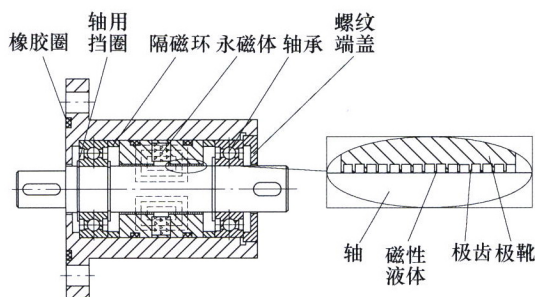
摘要：摩擦负阻尼与伴生阻尼耦合作用于低速液压缸，诱发液压缸振动、冲击，制约了液压装备的精密性能。考虑低速工况下摩擦的负阻尼与伴生阻尼效应，建立了液压缸运动非线性模型，基于摄动理论推导了液压缸速度脉动率解析表达式，分析了液压缸振动幅度与频率的变化特征，揭示了负阻尼与伴生阻尼对振动的耦合作用机制。研究表明：负阻尼促进系统振动，伴生阻尼抑制系统振动，负阻尼与伴生阻尼存在对立竞争关系。当系统速度低于 0.61 倍 Stribeck 速度 v_s 时，负阻尼效应增强，伴生阻尼效应降低，振动随运行速度增大逐渐加剧；当运行速度高于 0.71 v_s 时，负阻尼效应减小，伴生阻尼效应先增大后减小，振动幅度逐渐下降直至平稳运行；当系统工作在 0.61 v_s 至 0.71 v_s 区间时，负阻尼效应达到最大，伴生阻尼效应达到最低，振动幅度急剧增大，频率下滑，形成尖脉冲冲击。研究结果揭示了摩擦对液压缸振动特征的影响机制，为精密液压装备的稳定运行与控制提供了理论参考。



摘要：刀具故障预测与健康管理(Prognostic and health management,PHM)是机床制造领域的关键问题。作为数控机床的“牙齿”，刀具的健康状态直接影响着机床加工效率和产品质量。借助大数据与人工智能(AI)技术实现对刀具运行状态的实时精准监测，目前已成为学术界和工业界关注的热点问题。然而，刀具高质量全寿命周期数据的匮乏，严重制约了机械装备 PHM 技术的理论研究与工程应用。为解决上述问题，开展了面向刀具全寿命周期的数控加工中心立铣刀多工况试验与数据采集工作，并将获取的试验数据集面向全球学者公开发布。该数据集共包含 2 种工况下的立铣刀全寿命周期振动信号，且明确标注了刀具主后刀面最大 VB 值、主后刀面 $1/2a_p$ (背吃刀量)处 VB 值、主后刀面 S_{VB} 值，副后刀面最大 VB 值、副后刀面 S_{VB} 值等 5 种标签，可为 PHM 领域基于 AI 的刀具故障诊断与预测性维护研究提供数据支撑。

172 磁性液体密封与迷宫密封组合密封的结构设计及优化

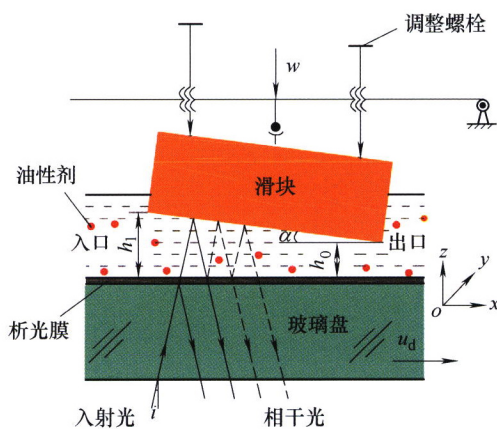
张 彤 李德才 李艳文



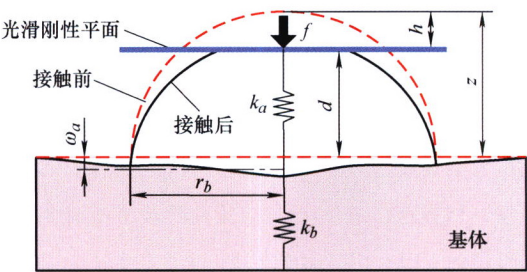
摘要：目前，磁性液体密封作为一种新型密封方式，具有零泄漏、无污染、寿命长等优点，但存在着耐温差和耐压差能力相对较弱，高速工况下容易失效的问题。而迷宫密封作为传统密封方式，具有泄漏量大的缺点，但适用于高温、高压和高速的工况，可以很好地弥补磁性液体密封的缺点。因此，设计了磁性液体密封与迷宫密封组合密封的结构，对极靴和轴套的结构尺寸进行正交试验和响应曲面法优化，得到了使组合密封结构耐压值最大的结构尺寸，为高温、高压、高速工况实现零泄漏密封提供了理论基础。

182 硬脂酸界面修饰对油膜润滑影响的试验研究

韩露娟 郭 峰 栗心明 李书义

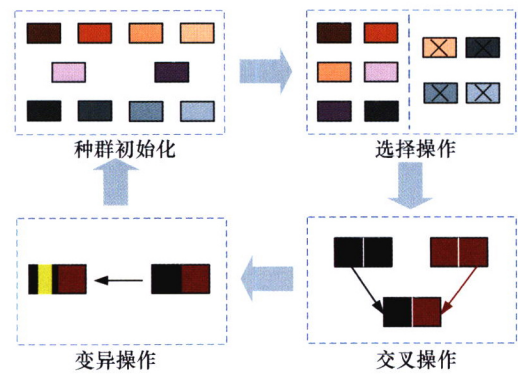


摘要：研究了有限量供油条件下，硬脂酸界面修饰对滑块-玻璃盘面接触条件下油膜润滑的影响。利用面接触润滑油膜测量系统，作者测量了 PAO10、甲基硅油基础油以及添加了 0.1%硬脂酸的同种基础油产生的润滑油膜厚度随速度的变化曲线，理论计算了连续双侧脊薄油层和离散液滴供油条件下的油膜厚度，并对硬脂酸在盘表面的吸附进行了表征。结果表明，硬脂酸吸附层使润滑轨道表面能降低，其上润滑油发生“反润湿”呈现液滴状分布，该分布能够增高润滑膜厚；硬脂酸吸附使固体表面产生致密膜，表面粗糙度降低；离散油滴经接触区被压塌成为连续油层分布，再次恢复到离散态需要一定时间，这与固体表面吸附层密切相关；此外，二甲甲基硅油能够促进硬脂酸吸附，增大玻璃盘基体改性程度和润滑油膜厚度。



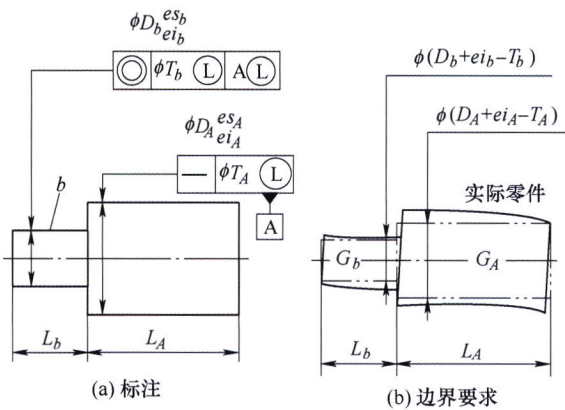
摘要：针对螺栓结合面，提出一种新的弹塑性接触刚度建模方法。该模型不仅延续了微凸体具有连续光滑接触特性的思想，还揭示了基体变形和微凸体相互作用的耦合关系，提出一种新的弹塑性接触刚度建模方法。首先，根据多尺度理论和数理统计方法，建立了具有连续光滑接触特性的结合面法向接触模型；然后，通过建立单个微凸体-基体系统模型和多微凸体接触模型，探究了基体变形和微凸体相互作用的作用机理和耦合关系，并对结合面接触模型进行修正；最后，对比仿真结果和已有试验数据，验证了修正模型的正确性，并分析了基体变形和微凸体相互作用的影响程度。仿真结果表明：基体变形不仅影响了微凸体的接触变形，还会进一步引起微凸体间相互作用的发生；微凸体相互作用使得微凸体高度分布发生偏移，导致结合面局部高度平面下移；相比于基体变形，微凸体相互作用对接触刚度的影响显著，但表面粗糙度的影响依旧占主导地位。

数字化设计与制造



摘要：磨抛加工作为复杂曲面制造的最后关键工序，直接决定着零件的轮廓精度与表面质量。机器人具有运动范围大、通用灵活与智能化等优势，结合砂带磨抛工艺被广泛应用于大型复杂曲面零件的加工。但机器人多轴耦合、末端响应速度慢与定位精度低等弊端导致磨抛加工接触力精准控制困难，难以实现机器人柔顺力控加工。针对机器人磨抛加工接触稳态力跟踪问题，在阻抗控制与基于环境参数估计的参考轨迹自适应生成方法上，提出采用遗传算法对位置误差引起的接触力误差进行补偿。结果表明，所提出的方法提高了机器人磨抛加工接触力的跟踪精度，接触稳态力跟踪误差降低约 85.7%，具有较好的稳定性与可靠性，可以实现机器人在未知环境下的柔顺自适应加工。

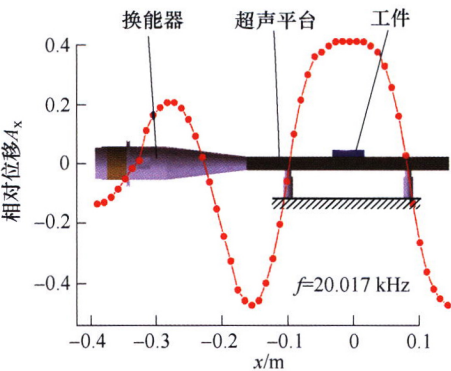
秦 玲 黄美发 唐哲敏 钟艳如 覃裕初 刘廷伟



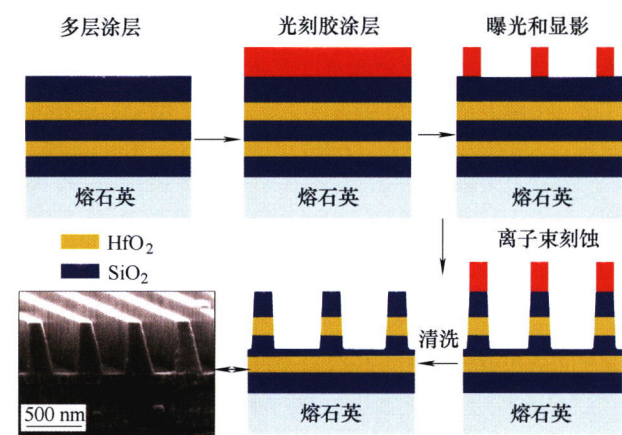
摘要：如果同轴度公差的可测要素和基准要素上都有最小实体要求(LMR)，那么，这种同轴度公差被称为双重最小实体要求的同轴度(DLMR 同轴度)。DLMR 同轴度能在保证轴件整体装配精度的同时降低制造成本。目前，DLMR 同轴度缺乏准确的误差模型，这使其难以准确检测，因此，研究了 DLMR 同轴度的一种数学评定方法。分析了 DLMR 同轴度的公差要求和评定特性，建立了边界可以膨胀的自适应虚拟量规；分析了自适应虚拟量规的几何构造和运动过程，通过自适应虚拟量规与实际零件的运动评定实际零件的综合误差；分析了自适应虚拟量规法的计算偏差，通过“再定位”提高了自适应虚拟量规法的精度。最后，给出了这种方法在阶梯轴评定中的应用实例。

/// 制造工艺与装备 ///

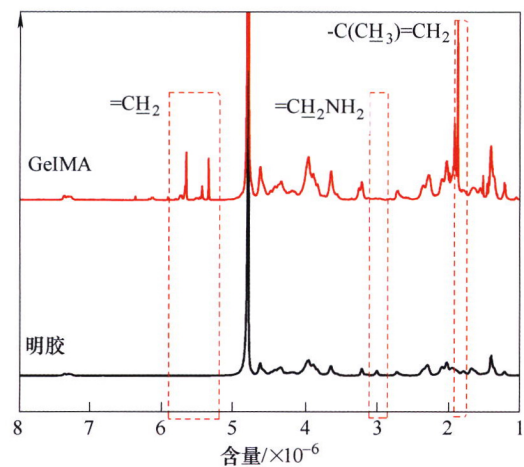
丁文锋 曹 洋 赵 彪 徐九华



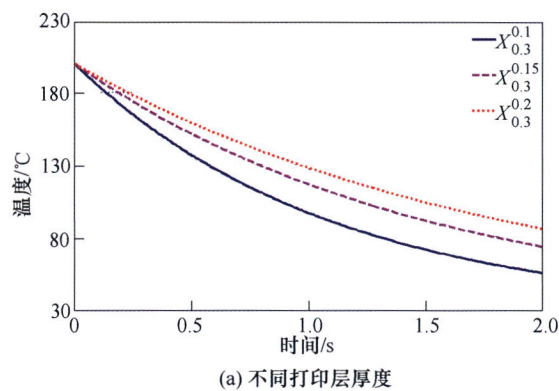
摘要：超声振动辅助磨削加工技术通过传统磨削加工基础上叠加高频微幅超声振动，可以减小磨削力，降低磨削温度，提高材料去除率，改善工件表面质量，在航空航天、高档机床、高速列车、能源动力等高端装备高效高品质制造方面具有显著优势和广阔应用前景。现阶段，国内外已经开展了众多超声振动辅助磨削加工技术及装备的研究工作，相关成果已在多种难加工材料关键部件加工中得到工程应用。在概述超声振动辅助磨削加工技术的基本原理、加工优势、主要分类和发展趋势的基础上，系统总结了国内外学者在超声振动辅助磨削装备及设计方法、材料去除机制和表面形成机制方面的研究成果，并对超声振动辅助磨削加工技术未来发展趋势和重要研究问题进行了展望。



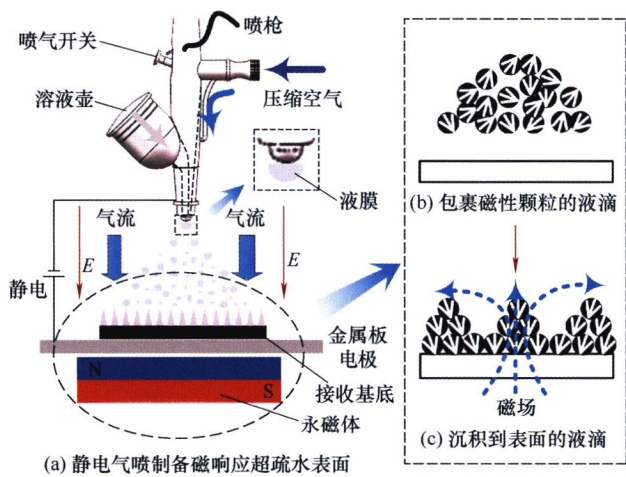
摘要：大口径衍射光栅的污染损伤是目前限制超短超强脉冲激光系统输出能量提升的瓶颈问题。围绕光栅损伤与洁净，分析了衍射光栅的工作原理和结构特性，探究了光栅性能改进措施，得出污染是造成光栅损伤的重要原因之一。在光栅污染损伤过程中，脉冲长度和污染物种类对光栅的损伤特性产生重要影响。并对光栅表面污染物的来源和成分进行分析，认为光栅表面的污染主要分为制作运输污染和运行环境污染两类。多种清洗技术组合是未来发展的重要趋势。分析比较了大口径衍射光栅清洗技术的特点，认为等离子体在线清洗方法可以有效地去除装置运行过程中产生的有机污染物，是未来超短超强脉冲激光系统优选的在线清洗技术。在对比光栅表面污染物表征方式的基础上，综合光栅激光诱导损伤阈值、衍射效率和棱柱机械性能等指标来评价光栅的污染状态和清洗效果。旨在通过大口径衍射光栅的污染损伤特性分析与研究，突破激光系统能量输出的技术瓶颈，拓展大口径光学元件的污染物在线去除思路，为超短超强脉冲激光系统的性能提升奠定基础。



摘要：挤出式 3D 打印水凝胶用于组织修复是近年的研究热点。然而，高形状保真度的水凝胶打印过程仍然离不开复杂的交联策略，这大大增加了打印难度，限制了水凝胶材料在组织工程领域的应用。制备一种室温下可打印水凝胶，其打印过程不需要任何辅助交联便可实现高保真度打印。水凝胶由甲基丙烯酰胺酯化明胶(Gelatin methacrylate, GelMA)，纳米黏土 (Laponite XLG，LPN) 和 甲基纤维素 (Methylcellulose, MC)组成。通过挤出测试筛选出适合打印的复合材料配比，打印工艺试验分析了挤出速度、喷头移动速度对出丝连续性和微丝线宽的影响。当喷头内径为 400 μm 时，GelMA/LPN/MC 水凝胶实现顺畅出丝($\phi 400\sim 600\ \mu\text{m}$) 的条件为挤出速度在 8.6~13 mm/h，喷头移动速度在 6~10 mm/s。流变结果表明 LPN 和 MC 的加入赋予了材料优异的剪切稀化特性，使其具备室温下打印并维持结构稳定的性能。压缩结果表明改变交联时间，GelMA/LPN/MC 水凝胶的压缩模量提高 5 倍，压缩强度提高 3 倍。细胞试验显示 GelMA/LPN/MC 水凝胶具有良好的生物相容性。



摘要：熔丝成型(Fused-filament fabrication, FFF)是当今应用最广泛的 3D 打印技术之一，构成 FFF 产品的挤出材料丝之间的结合颈对其成型质量及机械性能有着至关重要的影响，然而相应的机理仍不明确。将理论与试验相结合，针对不同打印层厚度及路径宽度对 FFF 样件结合颈的影响规律进行研究，首先基于挤出材料丝的粘性烧结现象创建结合颈的理论模型；然后，完成 FFF 样件的制备以及试验准备工作，进而使用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)对样件的结合颈进行分析及测量；最后，对比分析理论与试验结果，确定打印层厚度及路径宽度对 FFF 样件结合颈的影响规律，验证理论模型的正确性。结果表明增大打印层厚度会增大纵向结合颈，减小横向结合颈；而增大路径宽度可以增大横向结合颈，减小纵向结合颈。总体上，增大打印层厚度或路径宽度可以提高 FFF 样件的层间结合质量，并阐明相应的机理。研究成果将为 FFF 技术在改善成型质量方面提供理论参考和技术支持。



摘要：提出一种静电气喷法制备磁响应超疏水复合微结构表面以实现微流控液滴传输与驱动应用。首先利用静电气喷法将微米级羰基铁粉和 PDMS (Polydimethylsiloxane) 混合喷涂到置于磁场中的基底以构建磁响应超疏水表面，热固化后再在表面喷涂纳米碳粉以形成磁响应超疏水复合微结构表面；通过扫描电镜和显微镜分析复合微结构表面形貌，通过接触角测量仪检测功能表面的湿润性，利用液滴与表面的接触和碰撞试验测试表面的黏附性能，以磁响应特性为基础的复合微结构功能表面进行液滴驱动和定向分配应用测试。磁响应超疏水表面和复合微结构表面表现出不同的形貌和性能，喷涂纳米碳粉可以获得微纳米复合结构从而显著提升表面的疏水性和降低表面的黏附性。利用静电气喷法简单有效地制备出的磁响应超疏水复合微结构表面具有优异的超疏水性能和极低的粘附性，从而能实现不同液滴操作，具有广泛的应用前景。

CONTENTS

- 1 Design and Modeling of Multifunctional Soft Manipulator**
LIU Jiapeng WANG Jiangbei ZHAO Wei FEI Yanqiong
- 10 Design and Evaluation of Lightweight Adaptive Flexible Ankle Rehabilitation Robot**
YIN Shuai SHI Bin SUN Yifan HUAI Yaping WANG Jing
- 21 Virtual Decomposition Control of a Multi-degree-of-freedom Rehabilitation Exoskeleton Robotic Arm**
CHENG Yang PAN Shangfeng
- 31 An Analytical Quaternion and its Applications to Inverse Kinematics of 6R Manipulators**
CHEN Feifei JU Hehua YU Meng KANG Jie SUN Shuai
- 41 Thermal Distortion Optimization Design and Simulation of a Large High Precision Satellite Antenna**
WANG Pengpeng LIU Jia WANG Feng MA Xiaofei
- 49 Mathematic Description Method of Variable Topology Configuration for Dynamic Modeling of Metamorphic Mechanism**
ZHOU Yang CHANG Boyan JIN Guoguang LIANG Dong
- 62 Hybrid Strategy of Parallel Tea Picking Robot Trajectory Planning Based on Optimal Time and Jerk**
YANG Hualin ZHONG Yan JIANG Yuanzheng DENG Fang CHEN Long
- 71 Characteristics Analysis and Optimization Design of Suspension Mechanism of All-terrain Mobile Robot**
WANG Buyun PENG Wen LIANG Yi CHENG Jun HU Hanchun XU Dezhang
- 87 Analysis of Dynamic Characteristics and Skidding State of Angular Contact Bearing by Thermo-hydro-elasto-dynamic Coupling Model**
GAO Shuai HAN Qinkai CHU Fulei
- 98 Experimental Modeling of Linear Parameter Varying Dynamics Model of Ball Screw Drive System**
HUANG Tao DU Shuangjiang ZHANG Qian CAO Huajun

- 107 Reconstruction of a New Shearing Hypothesis of Liquid Film by Reverse Establishing Based on Experimental Study**
XIONG Wanli YUAN Shuai WU Shuang ZHANG Hanqian YE Ying TANG Xiuqing
- 119 Research on Thermal Network Modeling and Temperature Calculation Method for Wind Turbine Gearbox Lubrication Oil Temperature Overrun Fault**
XIANG Dong WEI Yaozhong SHEN Yinhua SUN Xinyu
- 136 Dynamic Modeling and Analysis of Rigid Multi-body System with Clearance Joints Based on Deep Learning**
LIU Zhen HU Sanbao HU Junhua XIANG Chao
- 147 A Geometric Nonlinear Calculation Method for Spatial Suspension Cable**
XU Jinshuai QI Zhaohui ZHUO Yingpeng ZHAO Tianjiao TENG Rumin
- 157 Coupling Effects of Negative and Associative Friction Damping on the Vibration of Hydraulic Cylinder Running at Low Speeds**
WANG Zhineng BIN Guangfu GONG Rizhao LONG Hui PAN Yang
- 166 SDU-QIT End Milling Cutter Accelerated Life Test Datasets**
XIN Miaomiao CAO Feng JIANG Mingyan LI Xiangbao LI Dongyang ZHANG Mingqiang
LEI Tengfei YUAN Dongfeng
- 172 Design and Optimization of Combined Magnetic Fluid Seal and Labyrinth Seal**
ZHANG Tong LI Decai LI Yanwen
- 182 Effect of Interface Modification of Stearic Acid on Oil Film Lubrication**
HAN Lujuan GUO Feng LI Xinming LI Shuyi
- 190 Stiffness Model of Joint Surface Based on Coupling of Substrate Deformation and Asperity Interaction**
WANG Jingjing LI Ling SUN Litai ZHANG Jinhua CAI Anjiang
- 200 Research on Contact Steady-state Adaptive Force Tracking of Robot Grinding and Polishing**
LI Zhen ZHAO Huan WANG Hui DING Han
- 210 Negotiation Scheduling Algorithm for Multi-agent Job Shop with Private Information**
SUN Shudong ZHOU Xinmin CHANG Shengbo
- 218 Research on Comprehensive Evaluation Method of CNC Machine Tools Based on RAMS**
HUANG Zuguang WANG Shuhui WANG Jinjiang ZHANG Fengli
- 231 Coaxiality Evaluation Method of Shaft Parts for Double Least Material Requirements**
QIN Ling HUANG Meifa TANG Zhemin ZHONG Yanru QIN Yuchu LIU Tingwei

- 244 Research Status and Future Prospects of Ultrasonic Vibration-assisted Grinding Technology and Equipment**
DING Wenfeng CAO Yang ZHAO Biao XU Jiuhua
- 270 Research Progress on Contamination Damage and Cleaning Technology of Large-aperture Diffraction Grating**
LI Yuhai BAI Qingshun SUN Hao ZHANG Peng LU Lihua DU Yunlong MIAO Xinxiang YUAN Xiaodong LIU Hao HAN Wei
- 283 Extrusion 3D Printing Processes and Performance Evaluation of GelMA/LPN/MC Hydrogel**
DONG Lanlan LI Gen XIONG Yinze ZHANG Hang WANG Lei LI Xiang
- 291 Theoretical and Experimental Study on the Bonding Neck of Fused Filament Fabrication Parts**
JIANG Shijie CHEN Pifeng HU Ke ZHAN Yang LI Changyou
- 298 Fabrication of Magnetic Responsive Surface with Multiscale Microstructures by Electrostatic Air Spray Deposition**
CHEN Fengjun XIANG Wang HU Tian

《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)



ISSN 0577-6686

