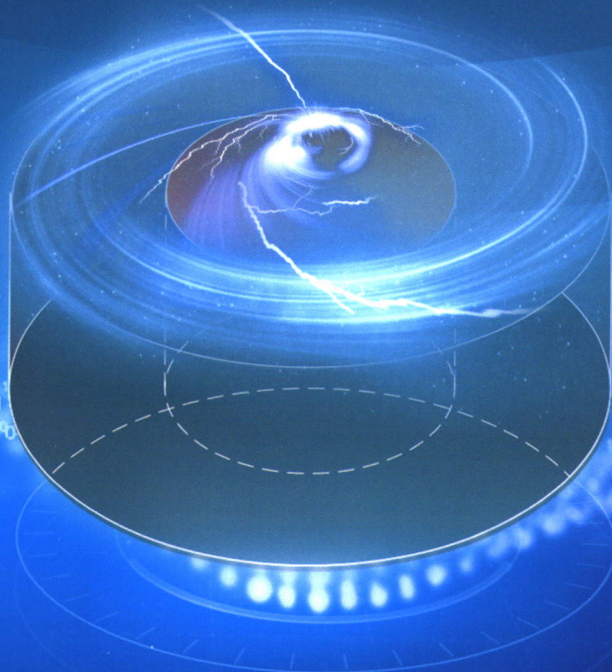
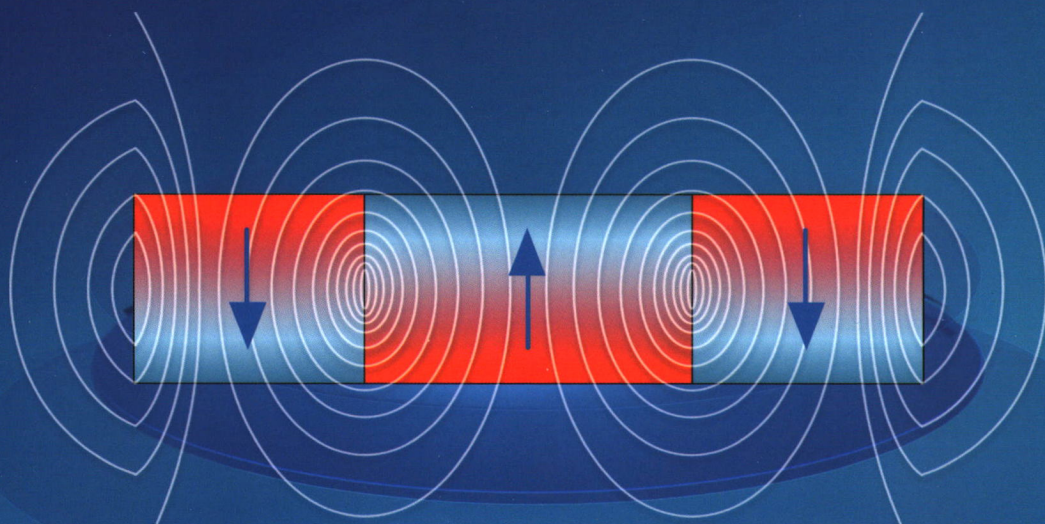


机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

封面文章：抗磁悬浮静电电机悬浮与驱动特性研究

作者：徐园平 凌日旺 周瑾 金超武

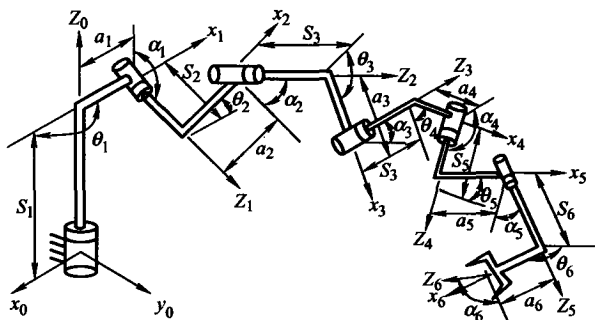


58卷 **19** 期 半月刊
2022年10月刊

机器人及机构学

1 空间 6R 串联机械手逆运动学分析的新方法研究

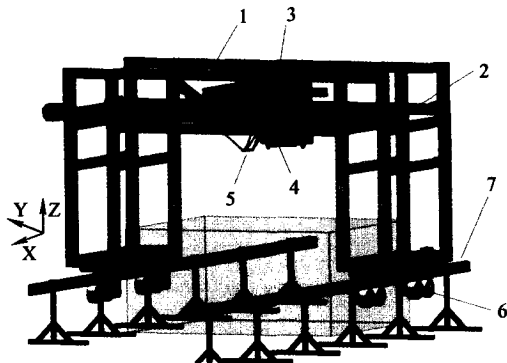
张 英 黄起能 廖启征 杨 旭 魏世民



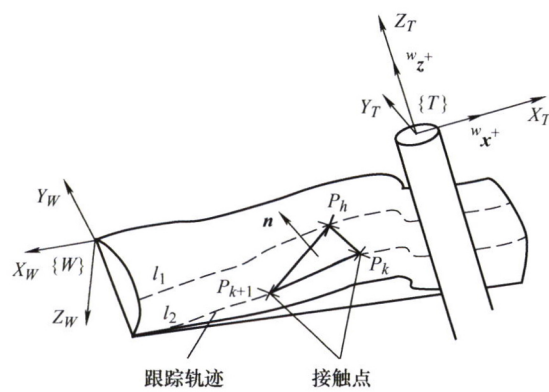
摘要：为了解决空间 6R 串联机械手的逆运动学问题使用矩阵方法建模时，需要进行矢量运算或投影运算的问题，基于四维旋转矩阵和倍矩阵，提出了一种建模新方法。根据三维空间刚体变换的四维旋转矩阵和倍矩阵表示，建立空间 6R 串联机械手的正运动学方程。通过变量分离，直接得到 14 个逆运动学基本约束方程；通过线性消元和 Sylvester 结式消元，将其转化为求解一个 16 阶矩阵的特征值问题，得到该问题的 16 组解。采用数值实例和 SolidWorks 仿真验证了新方法的正确性。新方法的优势在于可以直接得到 14 个逆运动学约束方程，不需要进行矢量运算或者投影等，并且由于新方法将三维空间中的平移变换近似为四维空间中的旋转变换，故而可以统一求解含有 R、P 和 C 副的空间串联机械手逆运动学问题。

12 名优茶采摘机器人的系统设计与试验

周宇杰 吴 强 贺磊盈 赵润茂 贾江鸣 陈建能 武传宇



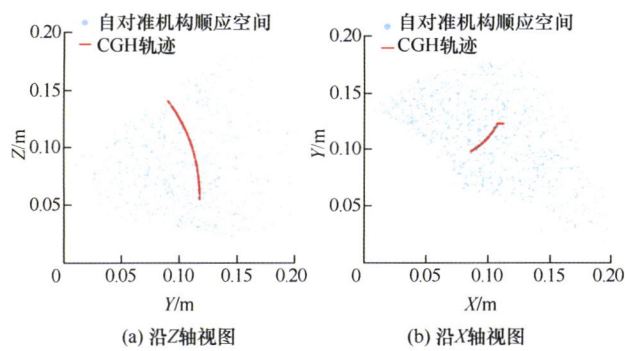
摘要：针对名优茶采摘劳动力短缺的现状，设计了一种适用于自然环境下作业的名优茶采摘机器人。系统由采摘机械手、3P-Delta 机械臂、视觉系统和主控系统构成。机器人通过深度相机获取茶蓬图像，利用深度学习和骨架法计算采摘点。从名优茶的生长特征出发，建立了机械臂采摘轨迹模型，采用 Bézier 曲线对茶叶采摘路径进行优化，降低了机械臂在快速运动过程中的加速度突变，提高了采摘运动的平滑性。利用虚功原理建立机械臂动力学模型，基于滑模控制设计了机械臂采摘控制策略，优化了控制算法中的指数趋近律，有效地抑制了滑模面在快速趋近时的抖振现象。实地测试结果表明，采摘机器人能够实现名优茶的采摘，采摘率和完整率分别为 75.53% 和 54.68%，平均采摘速度为 0.451 颗/s。



摘要：工业机器人执行接触性作业任务时，通常需要稳定控制接触力，比如在磨抛过程中，不平稳的法向接触力容易影响表面质量。为解决力跟踪控制时法向控制速度易超调和不确定环境造成法向接触力不平稳的问题，提出一种基于模型预测控制的工业机器人曲面跟踪方法。首先，根据工件模型几何信息计算出末端工具的运动轨迹，再结合机器人当前位姿求解末端工具的笛卡儿速度；然后，建立末端工具与工件接触时的状态空间模型，并依据末端工具的姿态变化对法向阻尼系数进行在线调节；最后，根据实时力信号的反馈，利用模型预测控制算法对法向速度进行修正，实现曲面恒力跟踪。基于 Staubli TX90 工业机器人，在末端工具姿态不变和姿态改变的情况下分别进行了曲面跟踪实验，结果显示法向接触力波动范围分别为 $\pm 1\text{ N}$ 和 $\pm 2\text{ N}$ ，方差分别为 0.038 N^2 和 0.105 N^2 ，能够达到较好的力跟踪效果。

34 基于肩部协同运动特征的康复外骨骼设计与人机相容性分析

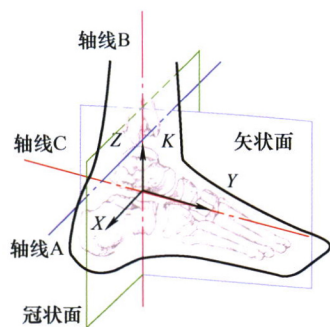
申慧敏 葛瑞康 葛 迪 李炳初 甘 屹 秦龙辉 杨 赓



摘要：受盂肱关节浮动转动中心的生理运动学属性影响，在基于外骨骼的肩部康复中，人体与外骨骼的兼容性将直接影响康复的效果甚至危及患者的安全。通过分析肩部协同运动特征，提出一种结构紧凑的顺应性肩关节自对准机构，并能够实现独立的锁骨和肩胛骨协同驱动锻炼。基于建立的人机闭链系统，提出 4 种完整的外骨骼构型，以肩部外骨骼运动空间灵巧性为评价标准，确定了最佳构型，设计并开发肩部外骨骼原型样机。穿戴性能测试试验结果表明，前伸和外摆时人机耦合界面相互作用力从 20 N 和 35 N 降低至 1 N 以下，人体自主外展轨迹和外骨骼穿戴对应点外展轨迹具有良好的吻合性，所提出的顺应性肩部康复外骨骼具有良好的人机相容性。

45 驱动支链完全解耦的可重构踝关节康复并联机构型综合

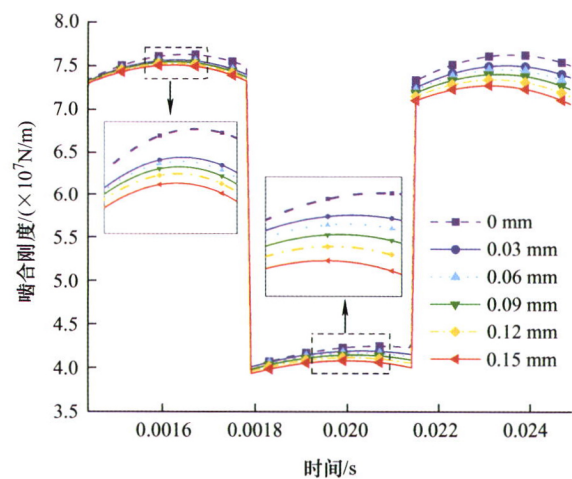
魏 俊 贾维涵 刘承磊 张建军 黄海晶 郭士杰



摘要：基于术后 6~12 周内的前、中、后期踝关节扭伤的康复运动需求，提出具有三种康复运动模式的可重构踝关节康复并联机构。首先，针对胫距关节和距下关节的轴线运动特征，研究踝关节康复运动切换机理和“双心”特性，提出符合踝关节自由度和轴线运动特性的六种融合支链；根据构型约束支链的选取方案，筛选出四种无约束支链。其次，基于旋量理论对六种融合支链进行过约束设计，验证符合实际需求的融合支链；根据传递力旋量与动平台运动轴线关系，提出一种驱动支链完全解耦优化方法，得到三种无约束驱动支链以及十二种机构构型，使得机构在三种康复模式中实现完全解耦。最后，通过 ADAMS 仿真验证机构的三种运动分支及完全解耦的正确性。可重构踝关节康复机器人依据患者康复需求采取对应康复模式，适用范围广，针对性强，控制简单。

57 机器人关节裂纹传动系统机电耦合动态特性研究

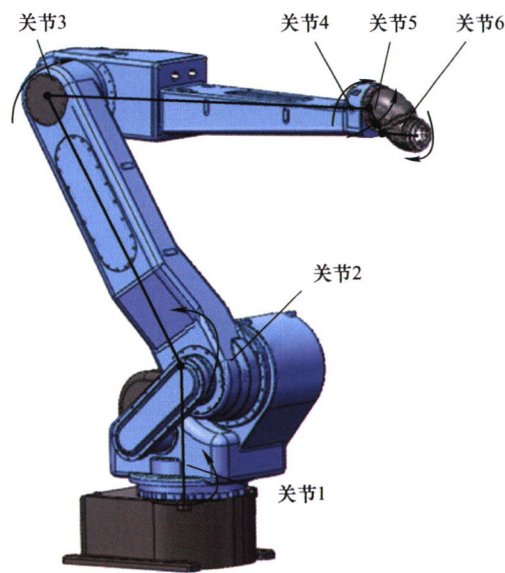
莫 帅 周长鹏 王 楠 胡庆森 高瀚君 岑国建



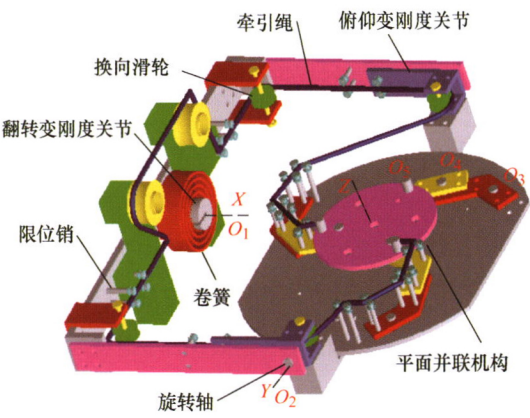
摘要：服务机器人关节采用驱控一体化集成设计，并且传动系统采用小模数变位齿轮。关节频繁运动容易导致齿轮传动系统产生裂纹，裂纹引起刚度变化从而影响整个系统的动态特性。根据变位齿廓建立变位齿轮裂纹刚度计算模型，分别研究变位系数、多种裂纹形式对时变啮合刚度的影响；其次利用集中参数法构建了机器人关节机电耦合平移—扭转动力学模型，并将驱动电机的电磁特性、齿侧间隙等因素考虑入方程中；最后通过统计学分析裂纹对传动系统的影响。研究表明：正变位使刚度增大，负变位反之；双侧裂纹对刚度的影响明显大于单侧；随着裂纹加深，时变啮合刚度加速降低；随着传动系统级数的增加，裂纹对传动系统的影响逐渐减弱。研究结果为变位齿轮传动系统裂纹故障诊断提供理论基础。

68 一种 6R 非球型手腕机器人逆运动学算法研究

罗任峰 王旭浩 张大卫 张培伦 赵 臣

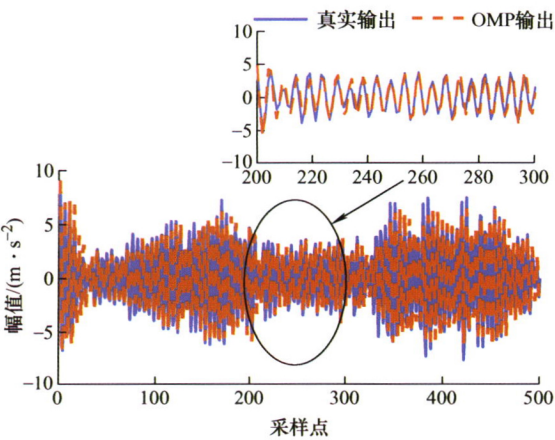


摘要：6R 非球型手腕喷涂机器人得到了越来越广泛的应用，然而这种机器人的结构不满足 Pieper 准则，导致该机器人的逆运动学求解困难。对此，提出了一种近似解析法和数值迭代法相结合的 6R 非球型手腕机器人逆运动学组合算法。首先，根据 6R 非球型手腕机器人的结构特点近似转化为 6R 球型手腕机器人，并以等效球型手腕机器人的逆运动学解析解作为近似解，采用基于运动学雅可比矩阵的数值迭代法求解 6R 非球型手腕机器人的逆运动学精确解。其次，针对等效变换引起机器人有效工作空间减小，从而导致算法失败的问题进行了分析，提出了基于目标位姿偏置的方法提高逆运动学算法的鲁棒性。最后，通过数值仿真验证了所提出的 6R 非球型手腕机器人逆运动学算法的可靠性和实时性。

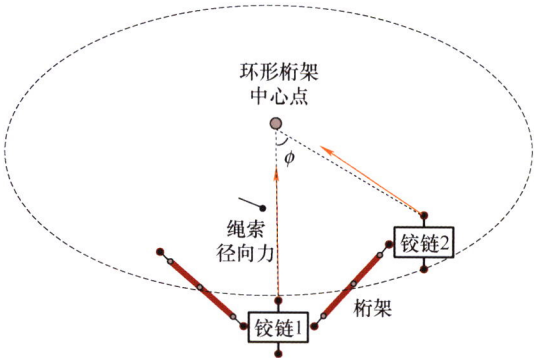


摘要：在柔顺装配装夹过程中，不同工序对机器人手腕刚度要求不同。在刚性定位工序中，大的手腕刚度可保证机器人搬运工件定位到作业位置的精度。在装配装夹工序中，小的手腕刚度可柔顺补偿机器人装配装夹工件的位姿误差。提出了一种大范围变刚度的五自由度手腕，可实现工件的翻转、俯仰、偏转和平移。研究通过调节弹性张力改变手腕刚度的机理，实现手腕关节刚度随弹性张力的增加而线性增加。分析手腕弹性张力和几何参数对手腕变刚度特性和刚度分布的影响，通过设计手腕关节的几何参数实现手腕刚度分布保持不变。研究变刚度手腕刚性定位与柔顺装配装夹的机理，建立手腕装配装夹过程中的形变位姿模型和补偿工件位姿误差的空间模型，得到手腕刚度随手腕位姿的变化模型，实现手腕克服阻力完成装配装夹作业。实验结果表明机器人手腕可大范围变刚度，满足刚性定位与柔顺装配装夹要求。

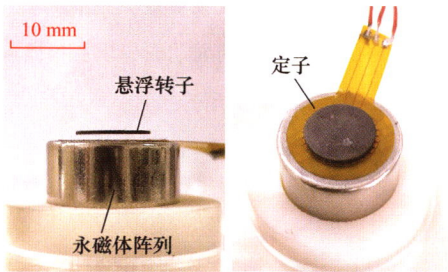
// 机械动力学 //



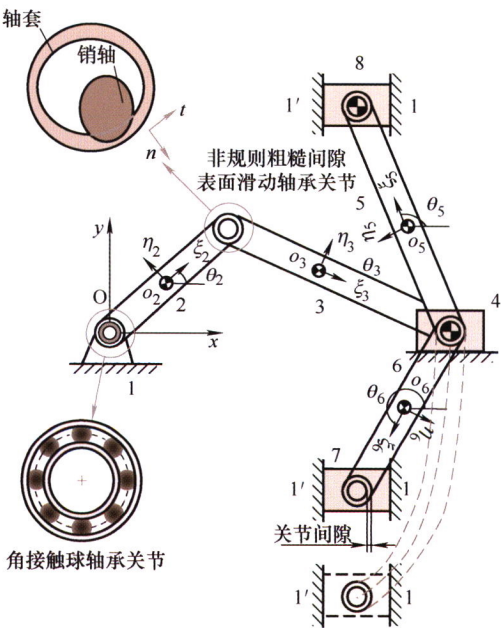
摘要：针对非线性系统模型的辨识问题，通过引入正交匹配追踪(Orthogonal matching pursuit, OMP)算法实现快速非线性系统建模。该方法旨在解决非线性有源自回归(Nonlinear autoregressive with exogenous inputs, NARX)模型针对大型数据建模时效性差的问题。首先，说明了正交最小二乘(Orthogonal least squares, OLS)算法存在正交次数多、耗时较长的问题，采用 OMP 算法可有效解决，通过与 OLS 算法对比正交差异性证明了 OMP 算法计算效率提升的理论基础，采用模型预报方法验证 OMP 算法所得 NARX 模型的动力学特性。其次，以单自由度非线性系统为例，说明了 OMP 算法系统建模的有效性。最后，利用 OMP 算法建立悬臂梁 NARX 模型，并分别将 NARX 模型预报输出与试验实测输出，NARX 模型固有频率与悬臂梁实际固有频率进行对比。结果表明，与 OLS 算法相比，所提方法的建模效率平均提升了 10 倍，且模型可有效反应系统动力学特性。



摘要：针对新型张力-杆系结构展开过程复杂导致动力学分析困难的问题，采用多柔体动力学方法，提出了张力-杆系结构的全新多体系统模型，实现了结构的展开过程仿真，研究了不同的绳索加载方式对桁架展开动力学行为的影响，总结了绳索力光滑加载方式的优势，揭示了桁架壁厚和绳索张紧力大小对张力-杆系结构展开过程的影响机理，结果表明杆件壁过薄及绳索张紧力过大均对结构展开过程中桁架受力产生显著影响。在此基础上，提出了张力-杆系结构的理论驱动力矩，给出了力矩与桁架杆件展开角度之间的关系，可以为电机选型提供参考。新型张力-杆系结构动力学分析为实际工程应用提供一种新的建模与仿真方法。

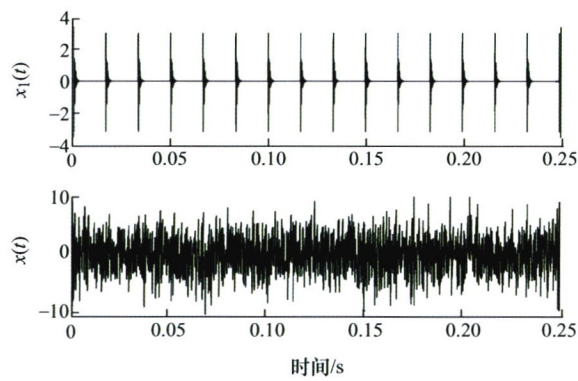


摘要：微型电机随着特征尺度的降低，其表面效应凸显，摩擦问题急剧突出。抗磁悬浮技术具有无摩擦、被动自稳定、尺度效应下浮重比显著提升等特点，是解决微型电机机械摩擦问题的一种有效途径。提出了一种基于抗磁悬浮静电驱动的微型电机方案，研制了转子直径为 10 mm 的定子下置式微型抗磁悬浮静电电机；基于永磁体电流等效模型，推导了抗磁悬浮静电电机磁通密度表达形式，建立了抗磁悬浮力的数学模型，获得了悬浮力与悬浮高度的关系并进行了实验验证；基于电容静电原理，建立了抗磁悬浮静电电机的驱动力矩数学模型，获得了静电驱动力与定子输入电压、悬浮高度的关系并进行了实验验证；开展了旋转实验研究，分析了输入电压、环境湿度对转速的影响规律，获得了抗磁悬浮静电电机的驱动特性。本研究将会为高性能微型抗磁悬浮静电电机的研究提供支撑。



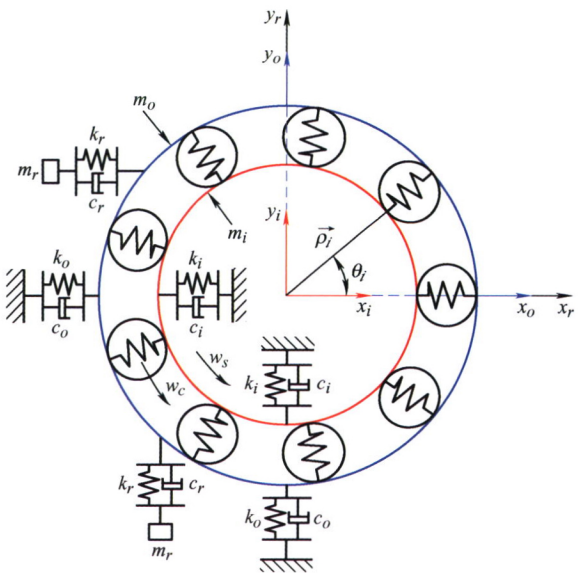
摘要：传统旋转间隙关节接触模型假定销轴和衬套接触面形状是规则的并忽略了磨损效应的影响，降低了机构动力学模型预测精度。提出了一种含非规则粗糙间隙表面铰链关节的平面柔性多连杆机构多体动力学建模、磨损预测和动态误差分析方法。为准确描述运动副元素间碰撞行为，考虑滑动轴承间隙关节的磨损效应，提出了一种非规则粗糙间隙表面铰链关节的改进接触模型。在此基础上，考虑柔性杆的影响，基于绝对节点坐标法建立了含非规则粗糙间隙表面铰链关节的平面柔性多连杆传动系统多体动力学模型。与基于传统光滑间隙模型的结果相比，基于非规则粗糙间隙改进模型的多连杆机构动态响应更接近于试验值，验证了所提出计算方法的有效性。仿真结果表明，选用 CuSn10P 和 CuPb30 作为铰链衬套材料能够有效降低多连杆机构滑块动态响应偏差和提高机构的运动精度；表面粗糙度过高会导致运动副磨损加剧，过低则会降低间隙表面微凸体对碰撞能量的吸收。此外，磨损加剧了间隙表面轮廓不规则度，导致机构动态响应的不稳定性增大，运动精度降低。

程 健 程军圣 李 鑫 邵海东 杨 宇

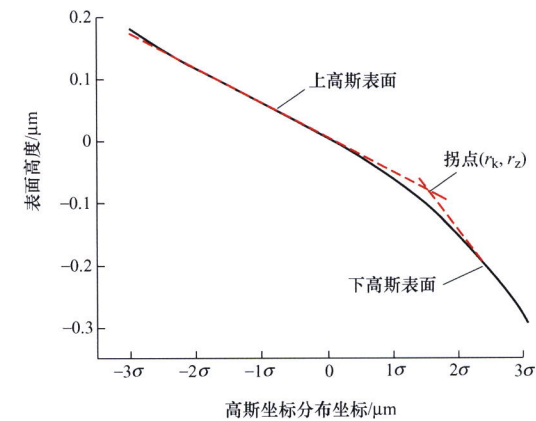


摘要：针对现有的滚动轴承故障诊断方法（例如：小波变换和集合经验模态分解）的周期识别能力并不稳定等问题，我们提出了具有良好的周期分量提取能力的自适应周期模态分解(Adaptive periodic mode decomposition, APMD)方法。然而该方法所采用的最大似然估计方法在强噪声背景下估计周期时常出现错误，这导致 APMD 在强背景噪声下的周期提取性能并不稳定。为此，我们定义了自适应频率加权能量算子(Adaptive frequency weighted energy operator, AFWEO)，并将其用于增强周期脉冲。然后，提出了一种新的周期估计策略以提高周期估计的准确性，并在此基础上提出了增强 Ramanujan 模态分解 (Enhanced Ramanujan mode decomposition, ERMD)方法。滚动轴承仿真和实验信号分析结果表明，新的周期估计策略在强背景噪声下依然有效，同时也说明了 ERMD 具有优良的周期成分识别和提取能力，是一种有效的滚动轴承故障诊断方法。

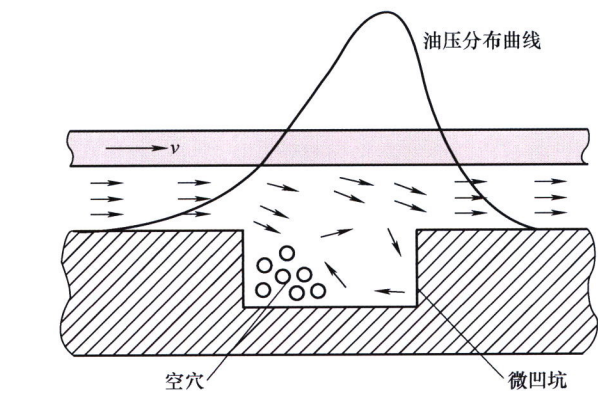
胡爱军 吉新星 向 玲 王立勇



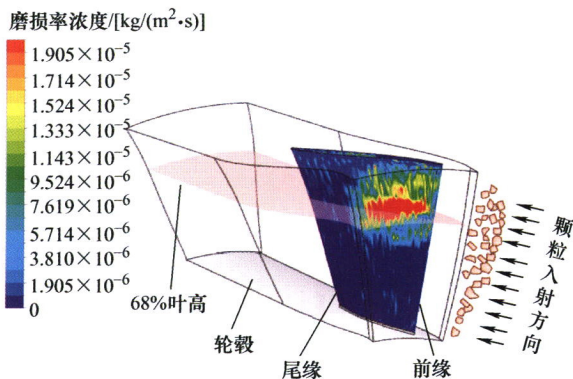
摘要：基于滚动轴承故障动力学模型研究其振动特性及故障机理是实现轴承故障准确诊断的基础。为描述滚动轴承缺陷对其振动响应特性的影响，考虑滚动体与缺陷的相对几何关系，提出了时变接触变形与时变刚度耦合的滚动轴承故障非线性动力学模型。以 NSK6205 深沟球轴承为对象，通过建立 $6+N_b$ 自由度非线性时变参数动力学模型，分析了滚动体通过外圈缺陷区域时接触变形、接触刚度以及振动响应的变化过程，得到了不同缺陷尺寸下滚动轴承故障冲击振动响应特征变化规律。理论分析和实验研究结果表明，随着缺陷尺寸的增加，滚动轴承故障振动响应产生由双冲击到多冲击的变化特征，不同缺陷尺寸下，滚动体进入和离开缺陷过程中产生的冲击响应明显不同。研究成果为基于振动信号实现滚动轴承故障尺寸判断提供了理论依据。



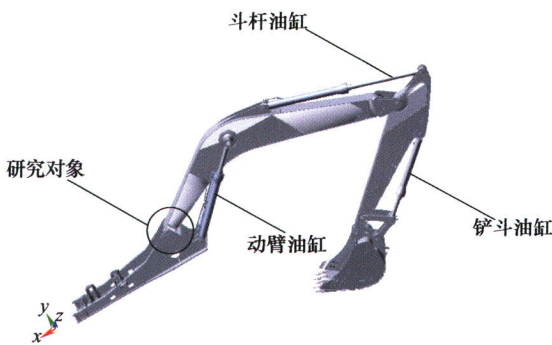
摘要:粗糙表面在自然界普遍存在。在研究表界面现象时，粗糙表面往往是重要的输入信息。实际测量和数值仿真是获取粗糙表面的两种常用方法。与实际测量相比，数值仿真无需昂贵的测量设备和大量机时，即可根据给定的表面特征信息高效地批量生成粗糙表面。目前，表面仿真已有近五十年的发展历史，基于不同表面形貌特征形成了采用多种表面特征参数的多种仿真方法，在摩擦学研究中应用广泛。梳理和总结表面仿真方法利于方法的高效、准确应用以及进一步发展。考虑到表面仿真方法与表面形貌特征及其表征参数密切相关，为了系统全面地综述表面仿真方法，首先介绍与表面仿真相关的形貌特征表征方法及特征参数。随后，以不同特征为线索对相应的表面仿真方法的原理、算法、优缺点进行梳理，初步提出了方法选用建议，并整理了其在摩擦学研究中的典型应用，最后展望了未来粗糙表面仿真的可能研究方向。



摘要:多孔储液介质是启发自关节软骨的仿生摩擦材料，因具有良好的自润滑性能，在工业生产中发挥着重要作用。早期多孔储液介质多是针对不同基体材料及骨架结构进行优化设计，或是根据单因素理想边界建立润滑数值模型，对多孔储液介质的润滑机理缺乏系统的理论描述，限制了其大规模的工业应用。根据不同的结构形式和润滑机理，将多孔储液介质分为有限直孔储液介质和随机多孔储液介质，总结了有限直孔储液介质中空化现象、流体运动、惯性效应、气-液耦合对润滑性能的影响，论述了基于渗流力学、流-固耦合作用的随机多孔储液介质自润滑理论的发展，以及多孔储液介质的应用现状。分析和讨论了多孔储液介质自润滑机理研究的难点问题，对推动多孔储液介质润滑机理的研究和工程实践应用具有重要的参考意义。



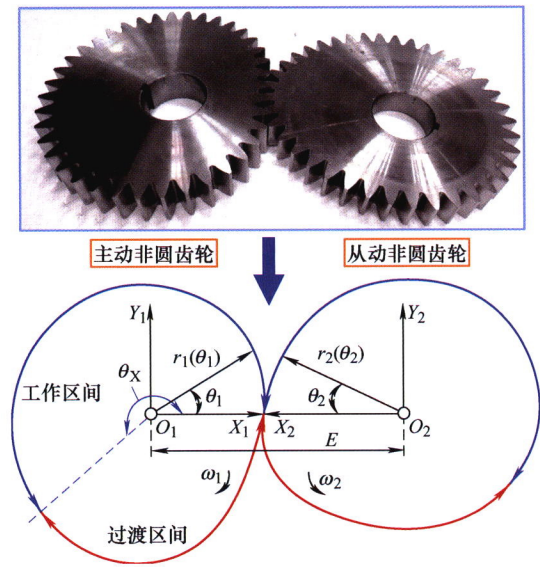
摘要：高原、沙漠和沿海等服役环境中不同粒径的砂粒不可避免地会对涡轴发动机压气机叶片造成冲蚀磨损，破坏叶片叶型和动力学特性，严重危及涡轴发动机使用寿命和直升机飞行安全。基于 Finnie 冲蚀磨损理论推导了颗粒对金属表面的磨损率表达式，分析颗粒粒径对材料冲蚀磨损率的影响，以某型涡轴发动机压气机动叶和静叶为研究对象，设计搭建砂粒冲击速度测试装置和钛合金冲蚀磨损实验装置，通过典型砂粒粒径下冲蚀磨损实验获取磨损率表达式中与靶材材料和冲击速度相关的关键参数，结合气固两相流动力学分析开展砂粒粒径对压气机动叶和静叶冲蚀磨损的影响研究。结果表明：砂粒粒径与冲击速度存在内在关联，材料冲蚀磨损率与砂粒冲击速度呈幂函数关系。实验条件下，砂粒粒径由 177 μm 增至 423 μm 时，其冲击速度平均降低约 17%。压气机动叶和静叶的磨损集中区域不随砂粒粒径的改变而变化，但磨损程度差异明显，其中 177 μm 砂粒对动叶和静叶造成的最大冲蚀磨损率浓度值相比 423 μm 砂粒分别增加 91%和 131%。研究结果为涡轴发动机压气机叶片抗磨损设计提供了理论参考。



摘要：机械动力装备中常因为作业工况恶劣导致关节端面摩擦副间隙处磨损严重，为了探讨关节端面摩擦副间隙处作业过程中磨损变化行为及作用机理，以某型号挖掘机为例，基于动力学模拟分析两种典型工况下得到动臂关节处动态载荷数据基础上，利用有限元数值模拟技术并修正 Archard 磨损模型计算得出端面摩擦副间隙处磨损深度与磨损次数的关系，在端面磨损试验机上验证两种工况下关节间隙处耐磨垫片磨损变化过程，在扫描电镜下观察磨损后的表面形貌分析磨损作用机理。结果表明：两种工况下，磨损区域均为环形区域；偏载工况磨损主要与接触应力值大小和偏载角度有关，磨损过程中表面产生锥刺凹坑和交叉犁沟等，磨损机制由疲劳磨损向黏着磨损转化，同时伴随有少量的磨粒磨损；满载启动回转工况磨损主要与接触碰撞程度有关，磨损形式主要为黏着磨损与磨粒磨损。此分析方法对工程机械行业分析其它动力装备关节摩擦副和工程应用具有较好的参考价值。

206 不同重合度非圆齿轮设计及弯曲应力分析

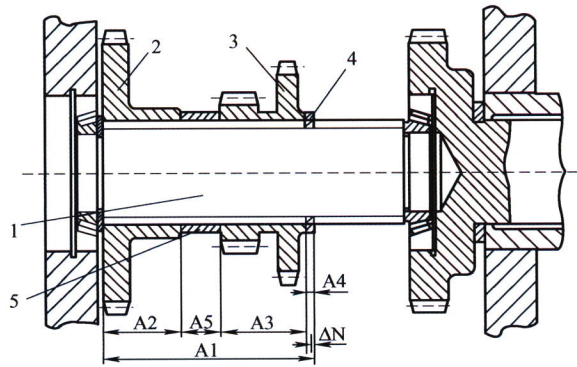
喻永权 林 超 胡亚楠



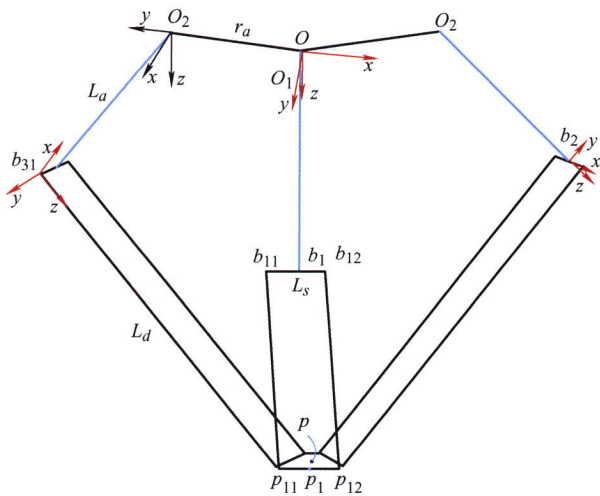
摘要：非圆齿轮传动具有广泛的应用场景。针对非圆齿轮传动，采用齿轮啮合原理和材料力学等原理及方法，提出了大重合度非圆齿轮设计方法。探讨了非圆齿轮传动原理和节曲线构建方法，计算了其节曲线曲率半径和重合度方程。建立了不同重合度非圆齿轮轮齿时变啮合刚度与载荷分配率计算模型，推导了不同重合度非圆齿轮齿根弯曲应力方程。探讨了不同结构参数下非圆齿轮副重合度、时变啮合刚度、时变载荷分配率及齿根弯曲应力变化规律，确定了轮齿所受最大载荷位置。开展了不同重合度非圆齿轮齿根弯曲应力仿真分析和实验测量，与理论计算结果进行了对比分析，最大误差分别约为 4.8%和 5.9%，验证了理论方法的合理性与正确性，为大重合度非圆齿轮传动的工程应用奠定了基础。

221 尺寸精度约束下再制造产品零部件选配优化方法研究

邢世雄 江志刚 朱 硕 张 华

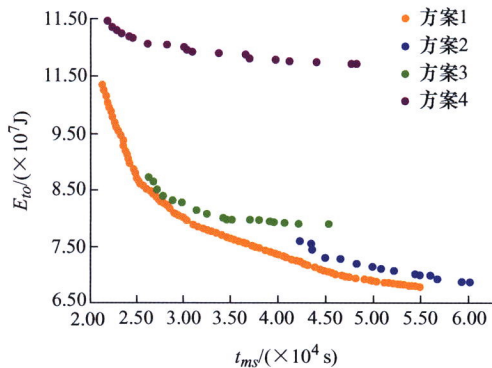


摘要：合理选配再利用件、再制造件、新件等不同来源形式的零部件，是保障再制造产品质量与成本的关键环节。针对待选配零部件尺寸公差对再制造产品质量损失、成本的双重影响特征，通过设计零部件尺寸公差的精度分级机制，实现再制造产品各零部件尺寸精度不低于原新品，获取可行选配方案集；进一步以产品尺寸链精度不低于原新品为约束，建立关于零部件尺寸公差的再制造产品尺寸链精度损失函数、再制造产品总成本函数，构建面向再制造产品成本与质量协同优化的多目标选配优化模型，采用协同进化算法获取最终的选配优化方案，实现在全面提升再制造产品及其零部件尺寸精度的同时，降低产品成本。最后以某机床的再制造进给箱零部件优化选配为例，验证了所提出方法能够有效解决零部件来源形式多、尺寸精度与成本差异性大环境下，以不低于新产品尺寸精度为约束的再制造零部件选配优化问题。



摘要: 为了解决并联机构全局性能指标高计算成本引起的敏感性分析和多目标优化设计困难,提出了一种结合多项式响应面模型、基于方差的敏感性分析方法和智能优化算法的高效计算方法。首先,确定并联机构的目标函数和设计参数,增加节点密度以提高目标函数的计算精度,基于拉丁超立方体抽样方法和最小二乘多项式拟合技术建立全局目标函数与设计参数之间的响应面解析映射模型,并结合基于方差的Sobol’敏感性分析方法得到对目标函数有重要影响的设计参数。然后,结合敏感性分析结果简化设计参数并建立并联机构的多目标优化设计模型,包括目标函数、约束函数和设计参数,结合响应面模型与智能优化算法开展并联机构多目标优化设计。最后,考虑规则工作空间体积、运动学性能和动力学性能指标为目标函数,以 DELTA 并联机构为例实现了本文提出的方法。优化前后的结果对比证明了算法的有效性。

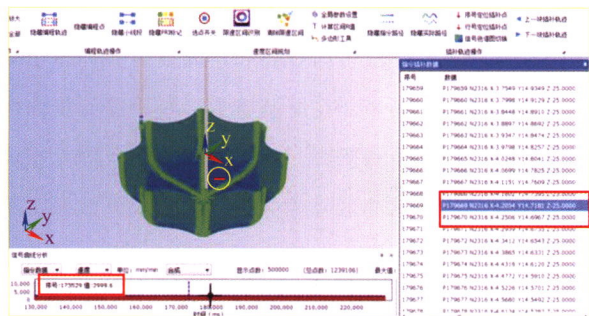
242 考虑扰动事件的机械加工工艺参数与车间动态调度综合节能优化



摘要: 随着能源消耗和环境问题的不断加剧,机械加工车间的高效节能生产越来越受到制造业的关注。传统动态调度优化时每道工序的工艺参数固定,未考虑工艺参数与车间调度之间的关联关系,限制了调度优化的潜力。为了更好地实现柔性作业车间节能增效,并快速有效地应对车间生产过程中出现的突发扰动事件,提出一种考虑扰动事件的加工工艺参数与车间动态调度综合优化方法。首先详细分析订单插入与机床故障下柔性作业车间的能耗特性,以总能耗与最大完工时间为目标,建立工艺参数与动态调度综合优化模型,然后设计一种面向扰动事件的动态决策机制,并提出改进的自适应形状估计进化算法(AGE-MOEA)进行优化求解,最后通过案例分析与算法对比,验证了所提出方法的有效性。

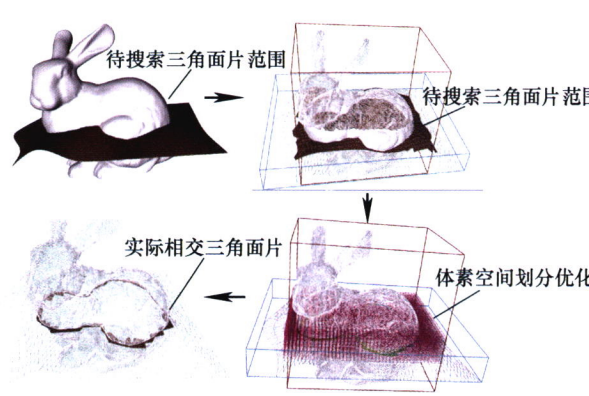
吴继春 周天旨 许可 胡柱 周会成 范大鹏

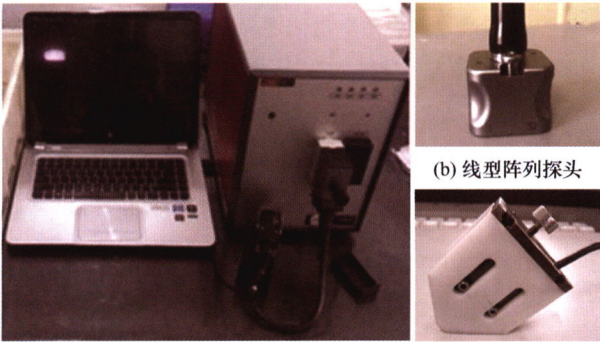
摘要: 针对过渡曲面加工表面质量往往比普通曲面更难控制的特殊性,开展与过渡面适应的速度规划、加工轨迹的局部优化等研究来改善过渡面的表面质量,并通过运动参数可视化来预测过渡面的加工质量。在一定变化范围内,使空间曲率、挠率具有连续性的连续程序段属于一个区间,以建立过渡面的刀具轨迹“同速区间”。在同速区间内建立弧长参数化、拟合递推式 Akima 样条曲线,实现刀具轨迹的局部优化。通过数控模拟软件采集运动参数(速度、加速度及电流等),生成的插补文件导入自主开发的运动参数可视化软件,形成可视化图以此来预估加工表面质量。分别对可乐瓶底与变曲率曲面的过渡面进行同速区间规划与轨迹优化,得到了优化前后的可视化图。进一步,验证预估表面质量的有效性,通过对变曲率过渡面和五指山零件实际加工,验证了加工表面质量提高与否与可视化图好坏的一致性。因此建立过渡面同速区间及运动参数可视化,以实现过渡面的质量预估及提升效果。



郭强强 张李超 王森林 杨 蕾 史玉升

摘要: 随着多自由度增材制造技术的发展,直接基于曲面的分层处理和路径规划方法被广泛研究。针对目前曲面分层算法通用性不强、效率低下等问题,提出基于多信息体素空间划分的高效鲁棒的自由曲面分层算法。通过将三角面片表面体素化,快速筛选出相交三角面片,算法时间复杂度由传统算法的平方复杂度降低为线性复杂度,解决了以往曲面分层算法难以处理大尺寸复杂模型的问题。根据三角网格邻接边的拓扑连续性避免同一轮廓环交点在不同求交条件下的重复计算,解决交点重复求交过程因为浮点数计算误差导致的点扩散问题,获取正确曲面轮廓交线环。最后对交线环内部的曲面进行三角剖分,获取曲面内部信息,得到曲面分层结果。测试了不同模型的圆柱面、球面、自由曲面等类型的曲面分层处理以及算法运行时间,验证了本算法的高效性和正确性。在 6 轴 KUKA 机器人和 2 轴变位机组合装备上对螺旋桨模型进行加工试验,证明了本算法的实用性。

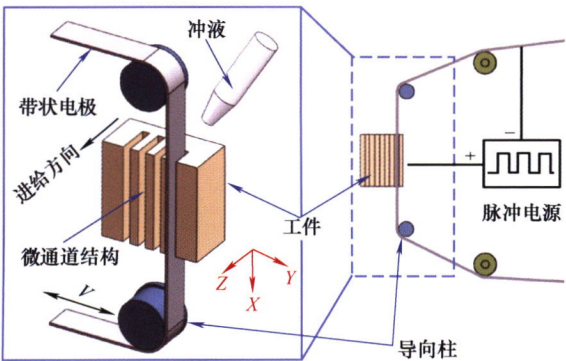




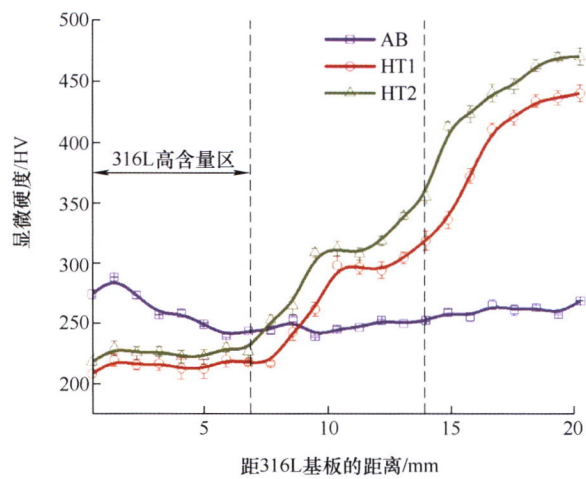
(a) M2M Multi 2000相控阵超声仪 (b) 探头保持架

摘要：采用相控阵超声结合表面契合法(Surface adaptive ultrasonic, SAUL)检测复合材料曲面结构过程中周向缺陷检测分辨力低，给缺陷定量带来困难。为提高 SAUL 的检测能力，以 T700/环氧树脂 T 形长桁为研究对象，建立弹性各向异性有限元模型，并对照弹性各向同性情况分析其声传播规律，发现弹性各向异性和层间反射共同作用导致肋板处形成明显噪声。在此基础上，基于阵元指向性开展曲面结构成像检测研究，结果表明：引入阵元指向性校正系数对声源脉冲信号幅值进行优化，降低探头频率，可使阵元声场更适应曲面结构，从而减弱两侧肋板反射，提高成像质量。针对周向长度 4.5 mm、深 1.5 mm 的分层缺陷，改进后的 SAUL 方法对应仿真和试验中周向缺陷长度定量误差较常规 SAUL 结果分别减小 7.4%和 13.1%，表明优化阵元指向性可有效改善 SAUL 周向检测分辨力，提高复合材料曲面结构超声检测缺陷定量水平，具有推广应用价值。

// 制造工艺与装备 //

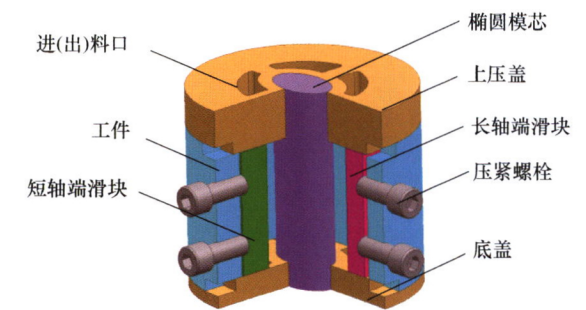


摘要：针对大厚度、高深宽比金属微通道结构加工的难题，提出一种带状电极电火花加工方法，利用厚度 30~100 μm 的带状电极，在金属基体上高效制造微通道结构。研究了带状电极电火花加工机理，建立了带状电极在加工间隙中的运动模型，分析了影响带状电极运动的主要因素，搭建了带状电极电火花加工装置，开展了微通道结构带状电极加工实验研究，获得了带状电极电火花加工基础工艺规律。利用带状电极电火花加工方法成功加工出的具有 200 条微通道的反应器结构和 44 $\times$ 45 微换热器阵列结构，表明带状电极电火花加工可以实现窄宽度(100 μm 以下)、大厚度(35 mm 以上)、高深宽比(10 以上)和高精度(缝宽标准差 3 μm 以内)的大批量微通道结构的高效加工，相关方法和技术有望在微模具、微散热器、微反应器等领域获得推广和应用。

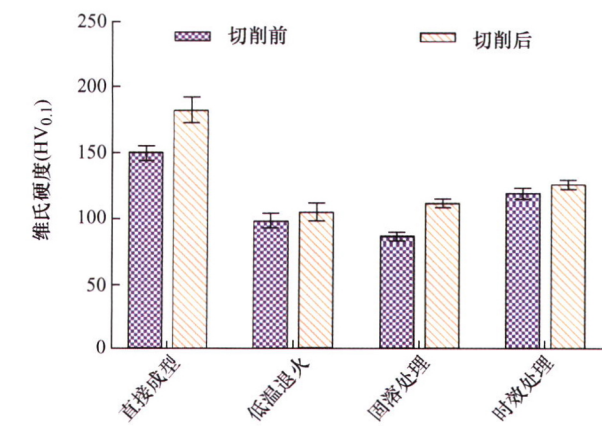


摘要：研究 1 080 ℃ (HT1)和 980 ℃ (HT2)固溶温度的固溶双时效处理对激光定向能量沉积(Laser directed energy deposition, LDED)的 In718/316L 功能梯度材料(Functionally gradient material, FGM)微观组织的影响，以揭示热处理诱导的微观组织演变对 In718/316L FGM 硬度和拉伸性能的影响机理。结果表明，随着 In718 粉末含量的增加，In718/316L FGM 的微观组织沿增材方向呈现由等轴晶向柱状晶的转化，固溶双时效热处理后，In718/316L FGM 中的铁素体含量降低，同时在靠近 In718 的区域析出大量的 γ' 、 γ'' 和 δ 强化相。HT2 试样的晶粒比 HT1 试样的更细。随着 In718 粉末含量的增加，In718/316L FGM 的硬度呈现出先减后增的趋势，热处理后，随着 γ' 和 γ'' 等强化相的析出，In718/316L FGM 的整体显微硬度、抗拉强度和塑性得到显著提高。热处理前后试样都以韧性断裂为主，但热处理后韧性特征更为显著。相比之下，HT2 热处理后 In718/316L FGM 的强塑性配比更佳。

306 椭圆内腔表面磨粒流均匀化光整加工研究



摘要：针对磨粒流加工中椭圆孔腔表面加工质量因表面曲率半径变化而不一致的问题，提出通过置入相似模芯实现磨粒流均匀化光整加工的新方法。运用非牛顿流体的幂律方程，建立了磨粒流加工的微元体动力模型，分析磨粒流加工中表面剪切应力分布不均的影响因素，而后通过 COMSOL 软件进行了数值计算与模拟仿真论证；最后，开展实验研究，对椭圆孔腔壁面压力及表面粗糙度等进行相关数据测量。研究结果显示：置入相似模芯后，椭圆流道的长、短轴方向剪切应力的理论值误差由置入模芯前的 9.87%降为 0.39%，长、短轴方向剪切应力分布趋于一致；椭圆流道的轴向、径向平均压力差仅为 0.03 MPa、0.11 MPa，且表面粗糙度(Ra)差值由置入芯轴前的 0.212 μm 下降为 0.005 μm ，加工压力与表面粗糙度的变化趋势均趋于一致。置入相似模芯的方法改善了磨粒流加工中剪切应力分布不均的状况，为椭圆孔的高质量精密加工提供了重要参考依据。



摘要： 由于激光选区熔化(增材制造)直接成型的 AlSi10Mg 合金零件表面相对粗糙，很难满足对表面精度要求高的行业需求。而具有获取纳米级表面精度能力的超精密加工为提高激光选区熔化零件的表面质量提供了有前景的后处理解决方案。采用金刚石刀具分别对直接成型、低温退火、固溶处理以及时效处理后的 AlSi10Mg 合金的微量切削特性进行研究，讨论微观组织演变与切削参数对 AlSi10Mg 合金的超精密切削特性的影响机理，揭示热处理状态对切削力、切削表面质量与切屑形貌等的影响规律。以探索快速高效地将成型零件表面质量提高到镜面水平的方法。结果表明：激光选区熔化直接成型的 AlSi10Mg 合金微观组织以微米级的网格结构为主，其显微维氏硬度和切削力均大于热处理后的样品；切削力同时受到合金的微观组织和力学性能的综合影响；直接成型的样品沟槽表面质量最好，低温退火样品次之，固溶处理样品最差；高温热处理后形成的大块的 Si 颗粒会增加切屑的脆性，并降低样品的 X 轴切削力；增加切削深度和切削速度均会导致切削力的增加和表面质量的恶化，且切削深度对切削力和表面质量的影响更大；直接成型样品的镜面加工质量最好，表面粗糙度(Ra)数值可降低到 11.2 nm，远低于直接成型样品的~10 μm。本研究为实现激光选区熔化成立铝合金零件的表面质量提升到镜面水平提供了理论和应用参考。

CONTENTS

1	Research on the Novel Method for Inverse Kinematics Analysis of Spatial 6R Serial Manipulators	ZHANG Ying HUANG Qineng LIAO Qizheng YANG Xu WEI Shimin
12	Design and Experiment of Intelligent Picking Robot for Famous Tea	ZHOU Yujie WU Qiang HE Leiyang ZHAO Runmao JIA Jiangming CHEN Jianneng WU Chuanyu
24	Research on Surface Tracking Method of Industrial Robot Based on Model Predictive Control	YANG Zhenzhen LI Mingfu ZHANG Liming DENG Xukang
34	Exoskeleton Design and Human-Machine Compatibility Analysis for Shoulder Rehabilitation Based on Synergy Characteristic	SHEN Huimin GE Ruikang GE Di LI Bingchu GAN Yi QIN Longhui YANG Geng
45	Type Synthesis of Reconfigurable Parallel Mechanisms for Ankle Rehabilitation with Completely Decoupled Actuated Limb	WEI Jun JIA Weihai LIU Chenglei ZHANG Jianjun HUANG Haijing GUO Shijie
57	Research on Dynamic Characteristics of Electromechanical Coupling of Robot Joint Crack Transmission System	MO Shuai ZHOU Changpeng WANG Lei HU Qingsen GAO Hanjun CEN Guojian
68	Inverse Kinematics Solution Algorithm of a 6R Robot with Non-spherical Wrist	LUO Renfeng WANG Xuhao ZHANG Dawei ZHANG Peilun ZHAO Chen
77	Research on Variable-stiffness Mechanisms of Robot Wrists for Compliant Assembling-clamping	LI Kangkang HU Jinyang XING Pu ZHANG Xukun XIA Qingguo
88	Modelling and Analysis of Complex System Dynamics Based on Orthogonal Matching Pursuit Algorithm	LUO Zhong ZHOU Guangze ZHU Yunpeng GAO Yi LI Lei

95 **Deployment Dynamics Simulation of a Novel Tension/Rod Structural System**
ZHANG Dayu MA Xiaofei WANG Hui LUO Jianjun WANG Kun LI Yang WU Di

104 **Research on Levitation and Driven Characteristics of Diamagnetic Levitation Electrostatic Motor**
XU Yuanping LING Riwan ZHOU Jin JIN Chaowu

115 **Analysis of Dynamic Error and Wear Cycle Behavior of Kinematic Pair for Planar Flexible Multi-link Transmission System Including Revolute Clearance Joints with Irregular Rough Surfaces**
HAN Zhao LIAN Zihao ZHENG Enlai JIANG Shuyun ZHU Songqing SHI Jinfei

130 **Enhanced Ramanujan Mode Decomposition Method and Its Application to Rolling Bearing Fault Diagnosis**
CHENG Jian CHENG Junsheng LI Xin SHAO Haidong YANG Yu

139 **Nonlinear Time-varying Parameter Dynamic Model of Rolling Bearing and Failure Mechanism Research**
HU Aijun JI Xinxing XIANG Ling WANG Liyong

148 **A Review of Rough Surface Simulation Methods**
WANG Yuechang LIU Ying LI Hongju

166 **Research Progress on the Self-lubrication Mechanism of Liquid-porous Medium**
QIN Hongling XU Xing SHU Xianwei ZHANG Xiaolong LI Xiang

180 **Influence of Sand Particle Size on the Erosive Wear of Compressor Blade in an Aero-turboshaft Engine**
LI Chao BIN Guangfu LI Jian WANG Weimin

191 **Excavator Working Device Based on Dynamic Characteristics Analysis of Clearance Wear Mechanism of End Face Friction Pair**
CHEN Xuehui LI Wei LIU Wei LI Hao HUANG Lei WANG Zijian HE Hongbin

206 **Design and Bending Stress Analysis of Non-circular Gears with Different Contact Ratio**
YU Yongquan LIN Chao HU Yanan

221 **Research on Optimization Method for Parts Selection of Remanufactured Products Under Dimensional Accuracy Constraints**
XING Shixiong JIANG Zhigang ZHU Shuo ZHANG Hua

229 **Sensitivity Analysis and Multi-objective Optimization Design of Parallel Manipulators**
YANG Chao YE Wei CHEN Qiaohong

242 Comprehensive Energy Saving Optimization of Processing Parameters and Job Shop Dynamic Scheduling Considering Disturbance Events
LÜ Yan XU Zhengjun LI Congbo LI Lingling YANG Miao

256 Research on Speed Planning in the Constant Speed Interval and Quality Prediction on the Transition Surface
WU Jichun ZHOU Miezi XU Ke HU Zhu ZHOU Huicheng FAN Dapeng

265 An Efficient Free-form Surface Layering Algorithm Based on Multi-information Voxel Space Division
GUO Qiangqiang ZHANG Lichao WANG Senlin YANG Lei SHI Yusheng

275 Research of Surface Adaptive Ultrasonic Testing on Defects in Curved Composite Structures Based on Beam Directivity
LUO Zhongbing LIU Zhenhao SU Huimin CAO Huanqing LIN Li

283 Study on EDM Method Based on Strip Electrode for Micro-channel Structure
CHU Xuyang ZHOU Kesheng ZHUANG Weihuang ZHOU Wei

293 Effects of Heat Treatment on Microstructure and Tensile Properties of Laser Additive Manufactured In718/316L Functionally Gradient Material
WU Runbao XU Gang LUO Kaiyu WANG Changyu LU Jinzhong

306 Research on Uniformity Precise Finishing Process of Abrasive Grain Flow for Ellipse Inner Cavity Surface
WANG Chengwu DING Jinfu YUAN Julong XU Yongchao ZHANG Kehua LU Huizong E Shiju YAO Weifeng WU Zhe HE Xinsheng WANG Huadong

315 Influence Mechanism of Heat Treatment on Ultra-precision Turning Characteristics of Additively Manufactured AISi0Mg Parts
BAI Yuchao CHEN Jie LIU Linqing WEI Xiongmin WANG Di

《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 (院士) 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 (院士) 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) 官声凯 (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 (院士) 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 668224

19>