

QK1818048

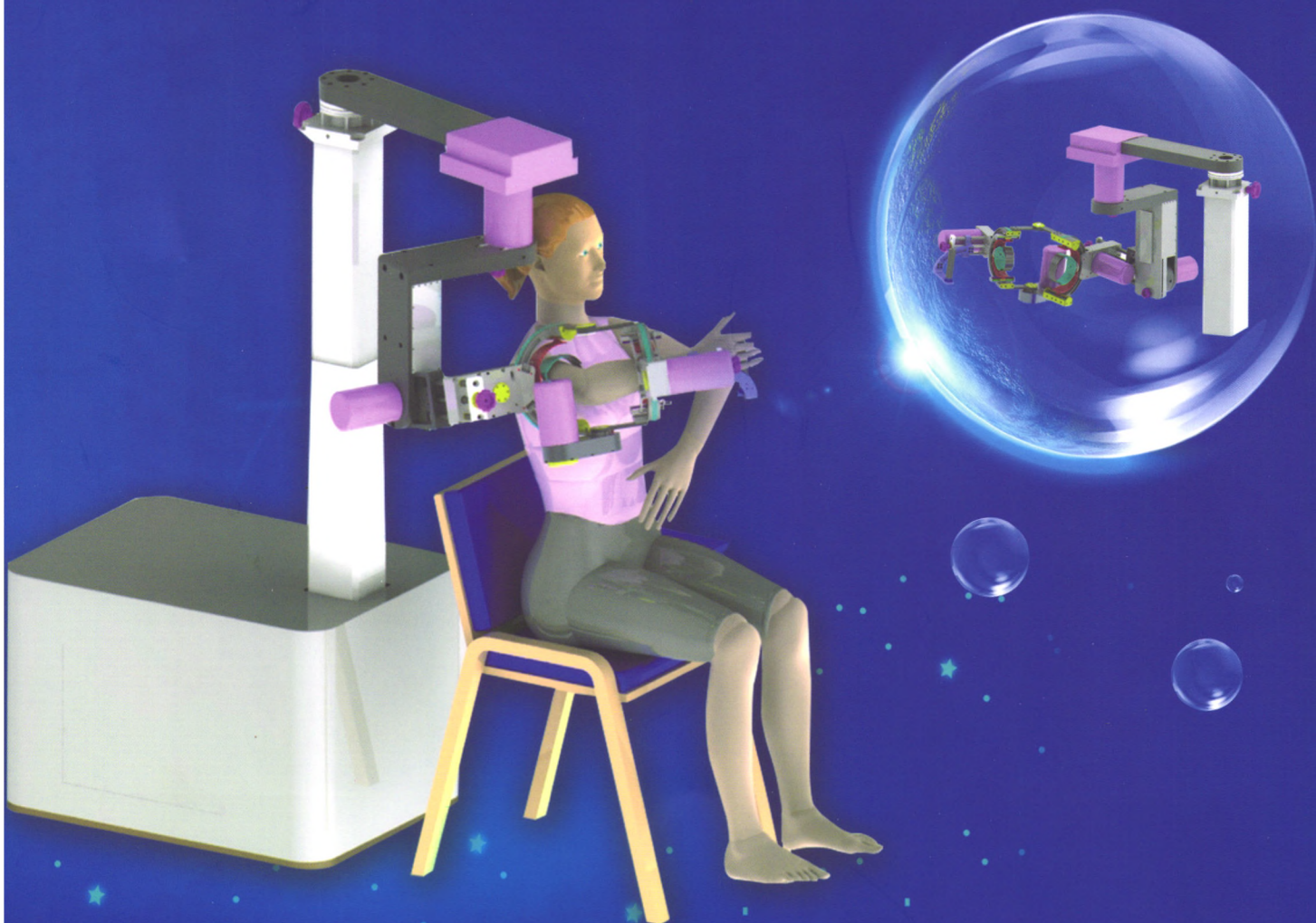
ISSN 0377-0308  
CODEN CHHKA2

# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

上肢康复外骨骼的设计与人机相容性分析

张雷雨 李剑锋 刘钧辉 侯增广 彭亮 王卫群



中国机械工程学会 主办

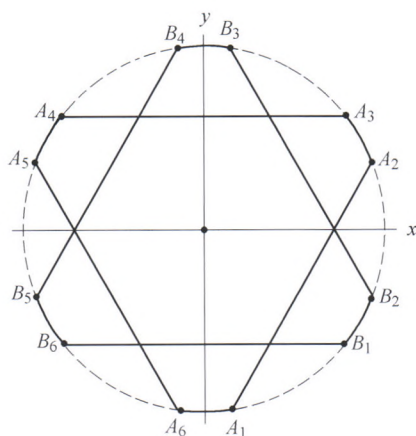
万方数据

2018年54卷5期 半月刊

## /// 机构学及机器人 ///

### 1 带位移传感器的6-UPS并联机构运动学正解

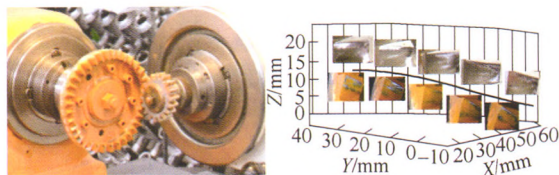
刘艳梨 程世利 蒋素荣 杨小龙 李耀 吴洪涛



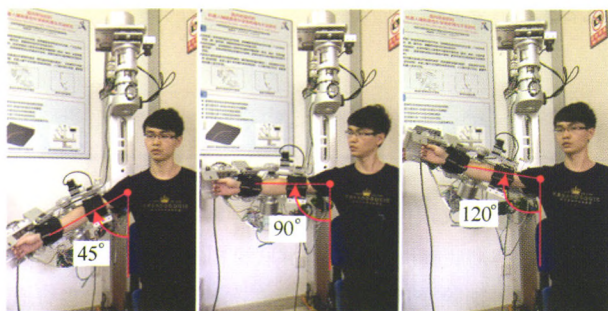
**摘要:** 闭环实时反馈控制依据运动学正解, 但是运动学正解问题一直没有彻底解决。6-UPS 并联机构(6-UPS)的运动学解析正解可通过消除变量, 获得一元高次多项式方程, 也有通过添加至少 2 个附加位移传感器方法求解, 虽然随着研究的深入有所进展, 但是仍然不足以应用于实时的闭环反馈控制。为了高性能的闭环实时反馈控制, 提出一种 6-UPS 运动学正解的解析算法: 在平面平台型 6-UPS 中心添加一个位移传感器, 通过测出第 7 个杆长, 基于四元数并采用新符号表示动平台的姿态矩阵, 结合代数消元等方法对 11 个相容方程进行降次、降次、升次处理, 最终求出面向闭环实时反馈控制所需要的 6-UPS 机构解析正解, 解决了奇异性局限, 且位置和姿态可获得唯一解, 解决了多解选择的难题。通过数值算例验证了所提算法的正确性和有效性。

### 8 端曲面齿轮副的传动匹配模式

林超 蔡志钦 吴小勇 朱才朝



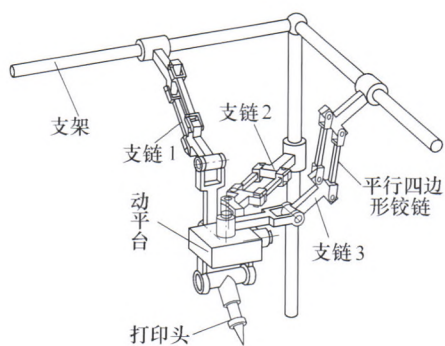
**摘要:** 端曲面齿轮副是在非圆柱齿轮、非圆锥齿轮及面齿轮的基础上, 提出的一种新型空间非圆齿轮传动机构。针对目前该齿轮副传动形式多样化, 没有统一设计理论及方法的问题, 通过引入圆柱滚子直动从动件圆柱端面凸轮副的运动关系, 探讨了端曲面齿轮副的传动原理, 建立了该齿轮副的传动比、移动速度和转速的通用化表达式。通过设定位移曲线, 满足非圆齿轮节曲线设计要求, 对传动比、齿顶和齿根曲线、轮齿分配、加工刀具最小齿数和齿宽等进行了设计。采用齿轮空间啮合原理, 结合齿面方程和虚拟仿真技术, 提出了一种端曲面齿轮副的通用化设计方法。重点分析了四种类型的端曲面齿轮副传动匹配模式、运动学特性及齿宽变化规律, 统一了端曲面齿轮副的传动匹配模式。通过试验和检测验证了该设计方法的正确性。此设计方法可推广应用到任意位移曲线及任意偏心距的端曲面齿轮副, 从而实现端曲面齿轮的通用化及参数化设计。



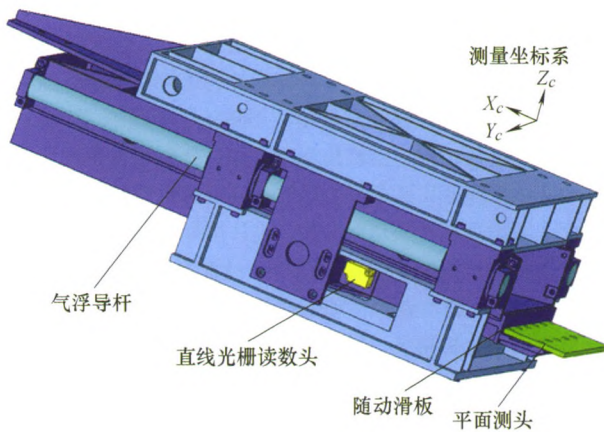
**摘要:** 对于上肢运动障碍的脑卒中患者, 上肢康复外骨骼是弥补人工康复训练不足、降低医师工作强度的关键设备。针对盂肱关节的瞬变转心属性, 采用高等机构学理论, 对上肢康复外骨骼进行构型综合, 综合出多种肩关节环链  $\Theta_s$  和肘前臂环链  $\Theta_{ef}$  构型组合, 基于构型优选原则, 遴选出人机相容性较好的兼容型外骨骼构型。在此基础上, 设计并研制含重力平衡系统的上肢康复外骨骼 Co-Exos, 将弹性元件引入被动滑动副, 以改善引入被动关节而产生的不确定性和运动协同性。基于盂肱关节的运动学模型, 建立了肩关节环链  $\Theta_s$  的人机相容性模型, 同时, 提出一种追踪和补偿盂肱关节竖直方向位移的方法, 将外骨骼 Co-Exos 与上臂简化为变杆长的导杆机构, 推导出被动副的运动学模型。搭建人机相容性试验平台, 测量人体上肢在抬升过程中被动副的位移曲线, 通过与被动副的理论位移曲线对比可知, 肩关节环链  $\Theta_s$  和兼容型人机闭链均可补偿与追踪盂肱关节大部分空间位移变化, 尤其对竖直方向位移补偿效果最佳, 因此, 外骨骼 Co-Exos 与人体上肢具有较好的人机相容性。

## 29 完全各向同性五自由度混联机构型综合

曹毅 周睿 秦友蕾 葛姝翌 丁锐



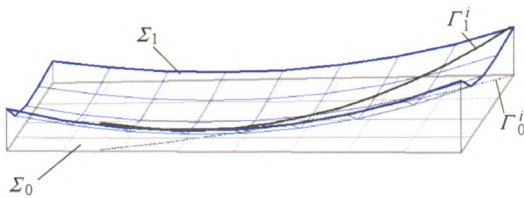
**摘要:** 针对混联机构内部耦合性带来运动学分析困难的问题, 基于  $G_F$  集理论提出了一种简单而有效的三移动两转动 (3T2R) 完全各向同性构型综合方法。介绍了  $G_F$  集的基本概念和运算法则。通过分析混联机构组成特点, 提出了将并联、串联模块按照  $G_F$  集求和运算以及  $G_F$  集元素组合原则构造完全各向同性混联机构的方法, 建立了混联机构数综合方程。同时给出了机构输入运动副选择原则和支链设计准则, 确保了混联机构中各模块运动的解耦性。按照完全各向同性混联机构设计步骤, 得到了构成完全各向同性 3T2R 混联机构各模块单元的组合形式。以其中一种组合形式为例, 综合出了完全各向同性 3T2R 五自由度混联机构。基于约束螺旋理论, 分析了所综合出的一种混联机构的自由度, 通过 ADAMS 建模得以验证, 通过对模型运动仿真, 绘制出机构末端输出速度曲线, 验证了完全各向同性构型综合方法的正确性。



**摘要:** 非圆轮廓随动接触测量方法研究对实现曲轴、凸轮轴等复杂轴类零件高精度、高效率检测具有重要意义, 针对复杂轴类零件非圆轮廓表面检测设计了一套接触式随动测量方案。借助头尾架环规建立工件坐标系, 提出了回转中心与顶尖几何中心相对位置关系标定方法, 建立了随动接触测量装置沿工件轴线方向运动时与回转轴线不平行引起的系统误差计算模型。利用凸轮基圆区域的转角与径向尺寸进行基圆最小二乘圆心位置寻优, 以实现凸轮偏心修正, 采用敏感点法与最小二乘法相结合的方式构建了凸轮升程误差评价模型。仿真分析了随动接触测量装置安装误差与顶尖几何中心标定误差对凸轮升程误差评定的影响。与 ADCOLE 1200SH 专用量仪的对比试验和重复性测量试验研究表明: SE13-J10 型轴类零件随动接触测量机的凸轮尺寸、形位误差测量精度和重复精度满足轴类零件高精度测量需求, 验证了接触式随动测量方案与凸轮误差评价模型的正确性。

#### 47 轮齿接触分析的分解算法与试验验证

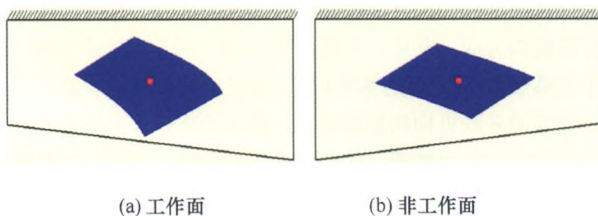
曹雪梅 杨博会 邓效忠



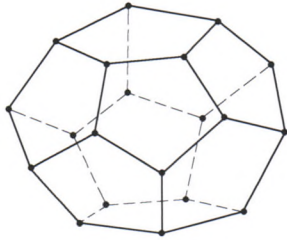
**摘要:** 目前广泛采用的轮齿接触分析算法需要分别建立齿面接触和边缘接触分析数学模型; 确定瞬时啮合点需要求解含 5 个非线性方程的方程组, 计算量大、求解性差。基于此, 提出了轮齿接触分析新算法——分解算法, 建立了统一的齿面接触和边缘接触分析数学模型, 求解非线性方程的个数减少为 2 个, 算法简单、有效, 适用于各种齿轮副的性能分析。以弧齿锥齿轮副为例, 分解算法与 Gleason 软件的齿面接触、传统算法的边缘接触分析结果对比表明: 齿面印痕一致, 传动误差在啮合转换点处幅值仅相差 0.29"; 边缘接触印痕有少许差异。磨削加工的弧齿锥齿轮副在滚检机上滚检, 滚检印痕验证了新算法的正确性。

#### 53 螺旋运动及刀具参数对双重螺旋法加工齿面特征的影响规律

张 宇 严宏志 曾 韬 王志永



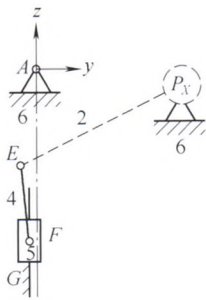
**摘要:** 双重螺旋法具有高效率、低成本、可干切削等特点是取代“五刀法”的弧齿锥齿轮未来主流加工方法。为了揭示弧齿锥齿轮双重螺旋法的切齿原理, 在分析五刀法切齿原理的基础上, 研究了刀倾角和齿形角分别在五刀法和双重螺旋法中的不同作用原理, 揭示了双重螺旋法切齿原理的本质; 分析了螺旋运动在切齿加工中的作用及对齿面几何形貌的影响规律, 推导了小轮齿面参考点处的曲率参数计算公式, 揭示了螺旋运动系数与参考处曲率的关联规律, 并利用轮齿接触分析方法研究了螺旋运动对齿轮副啮合性能的影响规律; 利用数值方法研究了刀具齿形角、刀盘半径分别对轮齿接触椭圆长、短半轴半径的影响, 建立了刀具参数与轮齿接触特征之间的作用规律。研究工作为优化双重螺旋法的切齿加工参数提供了理论依据。



**摘要:** 基于正十二面体结构的特殊性和对称性, 提出一种具有一个移动自由度的对称可展耦合机构。针对正十二面体包含的几何要素及空间布局, 建立耦合框架结构, 定义对应的构件类型并确定支链组成, 根据各构件的连接情况设计 3 种类型替代构件, 按照耦合框架结构用转动运动副(R 副)将替代构件顺次连接, 构建出机构基础模型。分析基本单元环的内部约束, 在确定其具有可动性的基础上对机构基础模型的自由度及输出运动性质进行分析, 设计出期望的对称耦合机构。建立耦合机构的三维实体模型, 设置不同的驱动条件, 通过 Matlab 获得节点构件和末端件的位移变化曲线, 得到的结果与理论分析结果一致, 表明提出的新机构是一种具有可展性的单移动自由度对称耦合机构。

## 74 机构自由度和构件自由度的关系及本质区别

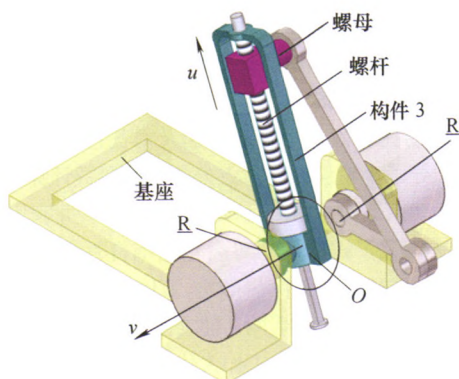
牟德君 张一同 张兴



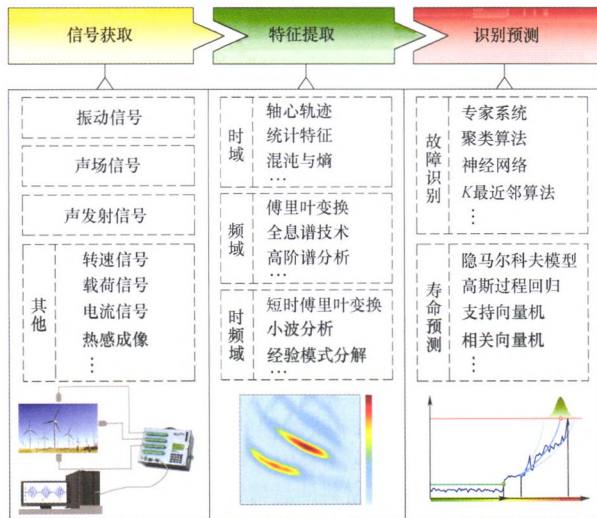
**摘要:** 为了避免产生机构自由度和构件自由度两个基本概念混淆, 对它们的本质属性和区别进行了详细的讨论。用广义杆组和虚拟环路的概念, 给出了单环路和多环路中任意选定构件的自由度计算方法。通过对平面单环 7R 机构、滚子从动件凸轮机构、不同自由度的 Sarrus 机构、2-3RC 等典型机构的分析, 按机构自由度和构件自由度的关系, 把机构分成三类: 第一类是机构自由度为 1 的机构, 机构自由度等于所有构件自由度; 第二类是机构自由度等于构件最大自由度的机构; 第三类是机构自由度大于构件最大自由度的机构。分析结果表明, 构件(包括输出构件)自由度是独立位移参数的数目, 具有运动形式性质。而机构自由度是使机构所有构件都具有确定位置的全部独立参数的数目, 仅仅是一个自然数, 没有运动性质可言, 机构的自由度与输出构件的选择无关。机构自由度是反映机构整体性能的一个属性, 构件自由度反映的是机构局部中某个构件性能的一个属性, 两者有着本质区别, 在使用这两个概念时要严格区分, 不能混为一谈。

## 84 基于动平台铰接的概念设计一类含有螺旋副的并联机构

汪从哲 张毅



**摘要:** 通过总结含有铰接动平台的并联机构的共同特点, 提出含有铰接动平台的并联机构的一般拓扑布局。该拓扑布局将并联机构分成了基座、铰接动平台和一级支链等三部分。基于位移子群/子流形的基本理论, 提出一种用于综合具有该拓扑布局的并联机构构型的方法。设计了数种含有螺旋副且可实现两转动自由度或三转动自由度的铰接动平台, 并根据所提出的构型综合方法, 综合设计了一类 2R、2R2T 和 3R 并联机构。结果表明, 所综合的并联机构的部分构型可以实现多个方向的整周转动, 同时也验证了该综合方法的有效性。结合具有虚拟转动中心的机构的设计要求, 简要讨论了所综合的并联机构在此条件下的应用方法。

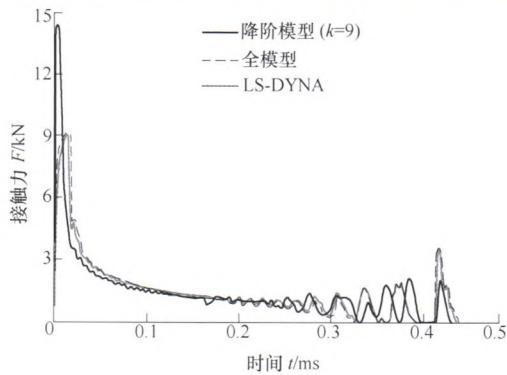


**摘要:** 机械故障是风力发电设备、航空发动机、高档数控机床等大型机械装备安全可靠运行的“潜在杀手”。故障诊断是保障机械装备安全运行的“杀手锏”。由于诊断的装备量大面广、每台装备测点多、数据采样频率高、装备服役历时长，所以获取了海量的诊断数据，推动故障诊断领域进入了“大数据”时代。而机械智能故障诊断有望成为大数据下诊断机械装备故障的“一把利器”。与此同时，大数据给机械智能故障诊断的深入研究和应用提供了新的机遇：“数据为王”的学术思想有望成为主流、诊断整机或系统级对象成为可能、全面解析故障演化过程成为趋势等；但也遇到了新的挑战：数据大而不全呈“碎片化”、故障特征提取受制于人为经验、浅层诊断模型诊断精度低等。阐述了机械智能故障诊断大数据的特点；从信号获取、特征提取、故障识别与预测三个环节，综述了机械智能故障诊断的国内外研究进展和发展动态；指出了机械智能故障诊断理论与方法在大数据背景下的挑战；最后讨论了应对这些挑战的解决途径与发展趋势。

105 齿轮系统振动响应信号调制边频带产生机理



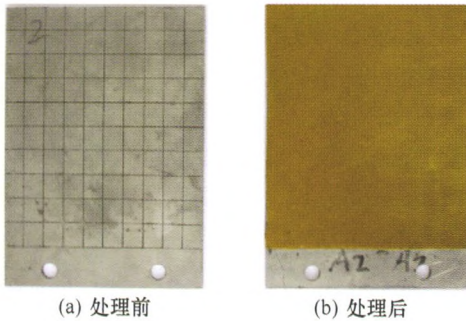
**摘要:** 齿轮传动系统的振动频率成分复杂多变，许多频率成分难于进行力学解释。建立定轴齿轮系统啮合点处的单自由度动力学模型，并将模型激励划分为线性激励和非线性激励，分别推导正常状态和平稳型故障下的频率响应特性及诱导因素。正常状态下，齿轮振动响应频率成分为啮合频率及其倍频，由齿轮受载后产生的静弹性变形位移和啮合动刚度共同诱发，并由非线性反馈进一步形成更高阶啮合频率成分。平稳型故障下，响应频率成分除正常运行特有的频率成分外，还包括：故障齿轮转频及其倍频，由平稳型位移误差函数与系统参数作用产生的惯性激励力、阻尼激励力和弹性激励力共同诱发；啮合频率及其倍频两侧间隔为转频的调制边频带，是由位移误差函数与啮合动刚度产生的弹性激励力引起的，并经非线性反馈进一步形成更高阶啮合频率及调制边带。有限元仿真和试验均有效地验证了推导和分析的振动响应频率特征规律。



**摘要:** 结合塑性力学理论和模态综合技术, 提出一种快速分析柔性结构在冲击载荷下的弹塑性瞬态响应的求解方法。该方法基于“伪力”思想, 通过引入预测参数将弹塑性变形导致的非线性特征近似等效为一具有力量纲的外载荷, 并置于控制方程右边保持方程左边线性, 而后采用模态综合技术建立原系统的降阶模型, 并给出相关方程的求解方法。经此变换后, 用于建立降阶模型的模态变换矩阵只需计算一次, 且在整个响应计算过程中保持不变, 有效地提高了计算效率。通过计算柔性简支梁在谐振载荷和碰撞载荷下的弹塑性响应, 并与全模型的计算结果对比, 验证了该方法求解柔性结构弹塑性瞬态响应的准确性和高效性。

## 121 频率依赖性对黏弹性复合结构振动特性的影响分析

孙伟 闫宪飞 王苗

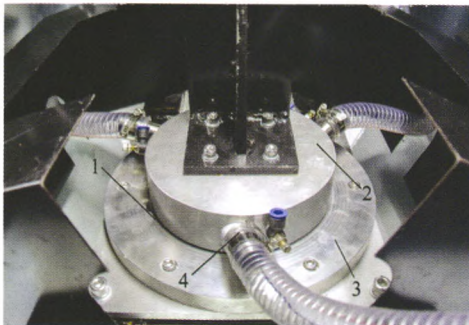


**摘要:** 获取黏弹性材料频率依赖性对复合结构振动特性的影响, 对于黏弹性复合结构建模及阻尼减振具有重要的意义。在合理引入黏弹性材料力学特性参数的基础上, 创建了处于基础激励状态并且考虑频率依赖性的黏弹性复合结构动力学分析模型, 并获得了复合结构固有特性和振动响应的求解公式。以贴敷黏弹性阻尼材料的悬臂钛板为例, 用试验对所研发的模型进行了验证。最后, 基于所创建的模型, 分析了悬臂板贴敷两种不同的阻尼材料时, 黏弹性材料的频率依赖性对复合结构振动特性的影响。具体可描述为: 求解复合结构固有频率和非共振响应时可忽略黏弹性材料的频率依赖性, 而求解模态损耗因子和共振振动响应时, 需要引入黏弹性材料的频率依赖特性; 假如不考虑频率依赖性, 取黏弹性材料参数所考虑频率范围的平均值获得的结算结果与考虑频率依赖性时的结果更为接近。

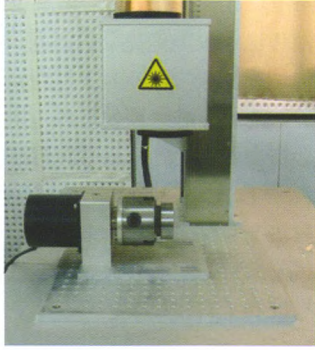
## // 摩擦学 //

## 129 基于 CFD-DEM 耦合的面约束软性磨粒流加工特性研究

计时鸣 葛江勤 高涛 谭大鹏 陈国达 李琛



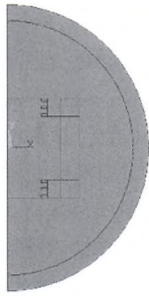
**摘要:** 软性磨粒流加工能有效解决复杂结构曲面的抛光问题。基于该技术特点, 针对硬脆性材料加工存在的技术问题, 提出一种面约束软性磨粒流加工方法, 即通过在工件表面设置窄缝约束流道, 利用多向磨粒流注入法, 在流道中形成高速涡旋磨粒流抛光工件。同时, 针对传统磨粒流建模无法描述磨粒-壁面碰撞行为的不足, 提出一种基于计算流体力学与离散元法耦合的磨粒流建模方法(Computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM), 并通过该方法得到了磨粒-壁面碰撞分布及工件表面材料去除分布, 在此基础上研究了面约束软性磨粒流加工的均匀性。结果表明: 入口直径是影响磨粒-壁面碰撞均匀性的关键因素, 随着直径的增大, 碰撞分布存在最优值; 当磨粒流处于不同的流态时, 流体黏度对材料去除的作用原理不同, 低黏度流体下材料去除均匀性有明显提升。最后搭建试验平台, 通过对比试验验证了建模方法及抛光方法的有效性, 试验结果显示, 面约束软性磨粒流抛光方法能够使得单晶硅表面粗糙度从 506.71 nm 降低到 10.17 nm。



**摘要:** 结合基于表面形貌频谱分析的预测方法和润滑理论对线接触弹流状态下表面形貌的弹性变形进行了研究。制造了4种表面形貌高度算术平均值 $S_a$ 相同但结构不同的织构表面形貌,通过对表面形貌的频率分量进行降幅处理,并结合弹流润滑模型建立相应的算法,获得了不同载荷和转速工况下接触界面的表面形貌弹性变形结果。在此基础上,选用ISO 25178中的三维形貌高度参数 $S_a$ 、功能参数 $V_{vv}$ 和特征参数 $S_{ds}$ 对弹性变形前后的表面形貌进行了表征和分析,并通过计算膜厚比对比了4种织构表面在考虑弹性变形前后的润滑特性。结果表明,弹流接触过程中表面形貌发生明显的弹性变形,且随着载荷和转速变化呈现不同的规律;不同结构的表面形貌弹性变形程度不同,弹性变形导致的表面形貌的变化对接触表面间润滑性能有明显影响。

### 149 分瓣式密封装置磁性液体平面密封研究

张惠涛 李德才



(a) 划分网格前



(b) 划分网格后

**摘要:** 为解决现有密封装置在试验、装配、使用中需要更换极靴造成的成本增加、效率降低等问题,设计一种磁性液体旋转密封与磁性液体平面密封相结合的分瓣式磁性液体密封结构,并且基于基尔霍夫第一定律和磁路欧姆定律理论,推导了磁性液体平面密封耐压性能理论,采用有限元分析法,针对不同密封间隙以及不同极靴齿宽,对平面密封结构间隙内磁场强度进行了模拟计算。结果表明:该结构具有很好的密封能力,密封间隙和齿宽都是影响密封性能的关键参数,密封间隙越大,漏磁现象越严重,密封性能越低;齿宽为0.4 mm时密封性能最佳,超过1.6 mm后,密封性能很低。理论分析与模拟结果能为不同密封装置性能的评价以及界面失效临界压力的预估提供参考。

## /// 数字化设计与制造 ///

### 156 SLM制备的Ti6Al4V轻质点阵结构多目标结构优化设计研究

柏龙 熊飞 陈晓红 易长炎 张俊芳 陈锐



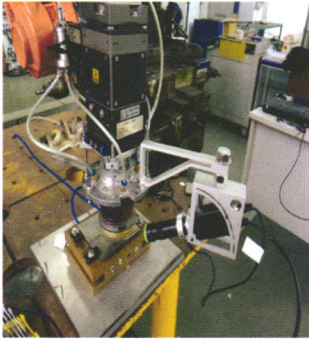
(a) AM250 激光熔融快速成型机



(b) 万能材料试验机

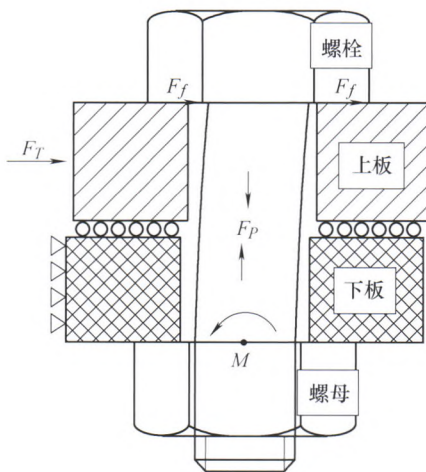
**摘要:** 体心立方(Body-centered cubic, BCC)点阵结构作为目前被广泛关注的点阵材料构型,其拓扑类型简单、SLM(Selective laser melting, SLM)成型可靠性好、压缩失效形式单一,但存在着承载能力相对较差的缺点。为探寻兼具轻质与高强性能的点阵构型,首先解除BCC点阵单胞各向尺寸相同的约束,提出体心四方(Body-centered tetragonal, BCT)点阵结构一般模型。然后,以BCT单胞构型尺寸为设计变量,以点阵材料尺寸与成型工艺为约束条件,以相对密度、初始刚度、塑性破坏强度为多目标评价函数,建立BCT点阵结构构型尺寸的多目标优化数学模型,采用理想点法求解得到BCT点阵单胞综合最优构型尺寸,并与BCC参照结构进行实例仿真对比分析,论证BCT优化结构相比BCC参照结构在性能上的优势。最后,采用Ti6Al4V材料通过SLM方法制备BCT优化结构与BCC参照结构的实验样件,并进行准静态单向压缩性能实验,验证理论分析结果的正确性,为轻质点阵结构材料的设计与研究提供了理论参考。





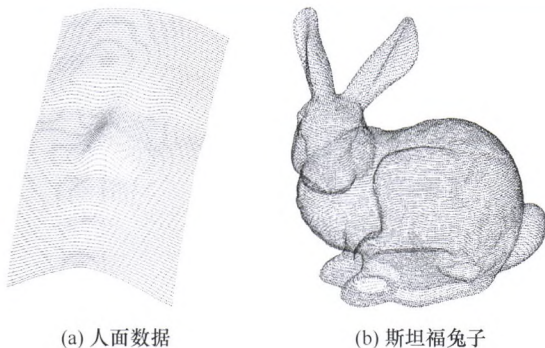
**摘要:** 针对激光熔覆过程中存在弧光、熔融金属液滴等干扰导致激光熔覆熔池边缘难以准确提取的问题, 提出了基于相位一致模型的熔池边缘提取方法。为了得到完整、精准的熔池边缘, 对获取的熔池图像进行预处理后, 使用基于阈值的方法, 对熔池进行初步分割, 对剪裁后的熔池图像采用相位一致性模型进行边缘检测, 将其边缘在粗分割区域进行标记, 对标记图进行进一步分割并用 sobel 算子对精分割区域进行边缘提取。相关试验的对比分析表明, 该方法具有良好的熔池边缘提取精度和干扰鲁棒性。

## 173 横向载荷作用下螺栓临界松动载荷数值计算方法研究

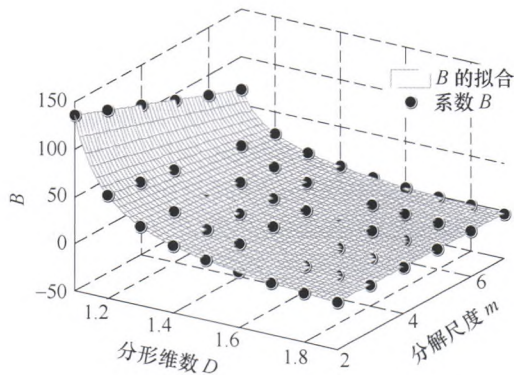


**摘要:** 为明确螺栓抵抗松动的能力, 指导螺栓在使用中的选型, 以抑制螺纹面局部滑移为防松条件, 通过对同一螺纹面周向不同位置的受力进行分析, 推导得到了横向载荷作用下螺栓临界松动载荷的数值计算公式。采用横向振动试验装置和该数值计算方法, 分别测试和计算了尺寸规格为 M5 的螺栓在夹紧力为 2 000 N、2 500 N 时的临界松动载荷。结果表明, 夹紧力为 2 000 N 时临界松动载荷的试验与计算结果分别为 302.5 N、280.3 N, 2 500 N 时试验与计算结果分别为 372.5 N 和 350.4 N。两种夹紧力条件下试验与计算结果相对误差分别为 7.3% (2 000 N) 和 5.9% (2 500 N), 这验证了该数值计算方法的准确性及可靠性。基于该公式, 分析了螺栓结构参数对临界松动载荷的影响。结果表明, 增大夹紧力、螺纹面摩擦因数、螺栓直径以及牙型角, 降低螺栓夹紧长度、螺纹升角, 可以增大临界松动载荷, 提高螺栓抵抗松动的能力。

## 179 一种基于能量函数和矢量场的点集曲面构造方法



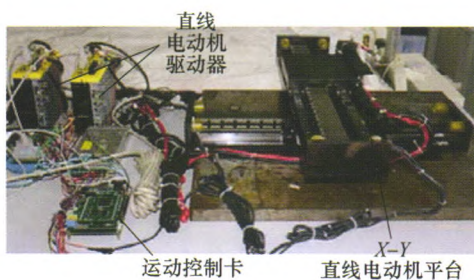
**摘要:** 点集曲面是直接离散点构造的光滑曲面, 在计算机图形学、计算机视觉、几何建模等领域都有应用。提出一种新的点集曲面构造方法。所构造的点集曲面被称为加权平方极值曲面。该方法采用到二次曲面的代数距离的加权平方和定义能量函数, 采用一致法矢量的加权和定义矢量场。然后将加权平方极值曲面定义为能量函数沿矢量场的局部极小点的集合, 并给出空间一点向加权平方极值曲面的投影过程。与传统点集曲面相比, 加权平方极值曲面能在去除数据噪声的同时更好地逼近理想曲面。



**摘要:**通过对 W-M 函数模拟轮廓进行 db2 小波分解,发现其小波分解系数呈现出明显的规律性这一重要特点,基于此,提出由小波分解来识别粗糙表面轮廓特征长度尺度参数  $G$  的一种新方法,并与功率谱密度法等 4 种方法对 W-M 函数模拟轮廓、分形布朗运动模拟轮廓以及实际机械加工表面轮廓特征长度尺度参数的计算结果进行对比,结果表明,由于所采用计算方法不同,导致计算结果表现出极大的差异性,不在同一个数量级上。对 W-M 函数模拟轮廓,提出的小波识别法计算结果最接近于理论值,其余方法在数量级上不同于理论值,都有随分形维数减小而误差增大的趋势。功率谱密度法计算误差最大,远超过理论值,方程组法次之,其次是结构函数法,文献[6]的公式计算误差较小。对分形布朗运动模拟轮廓,小波识别法与文献[6]的公式以及结构函数法计算结果接近。对实际轮廓的计算,小波识别法与文献[6]的公式计算结果相近。总体上,小波识别法与文献[6]的公式计算结果较为接近,说明分形粗糙表面轮廓特征长度尺度参数小波识别法是一种非常有效的方法。

## 193 直线伺服系统时滞参数辨识与补偿研究

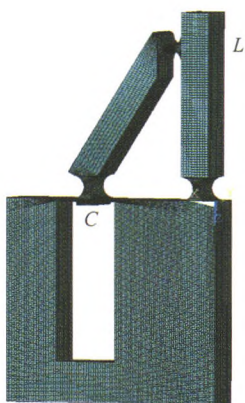
杨亮亮 时军 鲁文其 史伟民



**摘要:**为解决直线伺服固有时滞特性对轨迹跟踪性能的影响,以典型的前馈加反馈二自由度控制结构为基础,分析直线伺服时滞特性对其轨迹跟踪精度的影响。在此基础上设计了前馈环节上的时滞控制器,之后针对时滞控制器位于前馈通道时作为一个超前环节控制上无法实现的问题,将时滞参数分为两部分,分别调节理想轨迹指令按照整数倍伺服周期延时及前馈控制信号滤波延时以达到时滞补偿的目的,引入牛顿迭代寻优进行最优时滞参数辨识。仿真与试验结果表明,在前馈加反馈二自由度控制的基础上加入时滞控制器可以有效减小直线伺服系统的闭环位置跟踪误差,特别是显著减小非零加速度段的闭环位置跟踪误差,提高轨迹跟踪性能。

## 202 基于约束置换的双驱动微夹持器刚度分析

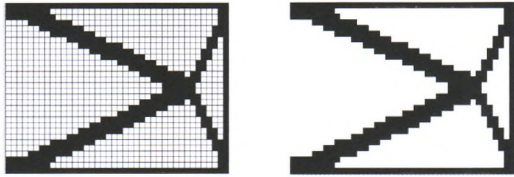
官金良 贾国朋 张彦斐



**摘要:**刚度是微动机构重要的性能指标之一,准确且简便的刚度求解方法是进一步对微动机构分析与优化的重要前提。为寻找更优的刚度求解方法,根据结构力学中的力法原理探讨了一种新的刚度求解思路:将微动机构视为超静定结构,并用未知力来置换其冗余约束,转化为相应的静定结构。然后通过位移协调求得未知约束力,对外力已知的静定结构进行位移求解,从而得到微动机构的刚度。同时根据平面型微动机构的结构特点对其进行了规范化与简化处理,最终建立了一种适用于平面型微动机构刚度求解的一般性方法,并实现了基于 Matlab 的规范化求解程序。最后,为验证该程序的求解精度,应用该程序求解了一种结构对称型双驱动微夹持器的整体刚度。通过与有限元方法分析结果的对比试验,表明该方法的刚度误差控制在 5% 以内,验证了方法的有效性和高精度特性。

210 多工况载荷下连续体结构柔顺度拓扑优化问题的新的求解方法

俞燎宏 荣见华 赵志军 陈一雄 李方义

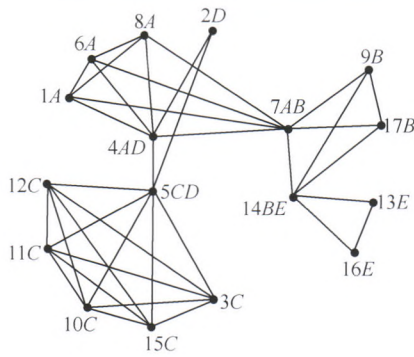


(a) 结构拓扑提取前 (b) 结构拓扑提取后

摘要：针对以多工况载荷下结构柔顺度最小为目标函数，结构体积为约束条件的优化问题，提出了一种新的拓扑优化求解方法。首先，参考限界公式法，通过一个限界变量将原多个目标函数转化为约束条件，引入一个新的该限界变量的二次函数作为目标函数。同时，结合变体约束限技术，建立新的近似拓扑优化模型。然后，基于有理近似材料模型和移动渐进线方法，给出了目标函数和约束函数及其导数的显式近似式。利用光滑化对偶算法，构建了具有收敛性的多工况载荷下连续体结构的柔顺度拓扑优化算法。给出的算例结果表明，与现有方法比，该方法可获得更优解或可高效地获得相同的优化解。且所提方法可稳健地获得清晰 0/1 分布的优化结构拓扑。

220 装配尺寸最短路径生成树的建立及应用

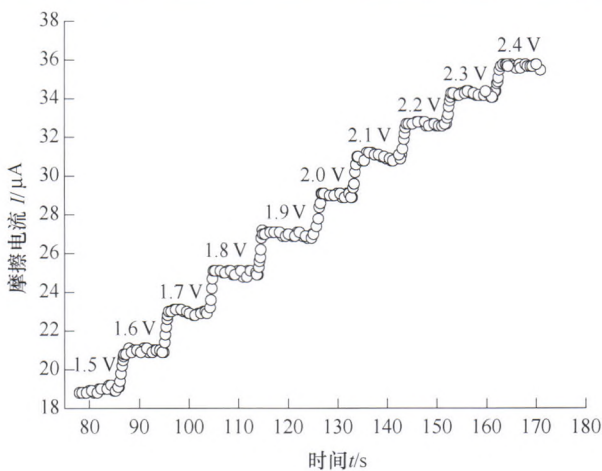
王友利 王晓慧 张学良



摘要：零件尺寸可能的标注模式千变万化，为获得最优的标注模式，将装配体中的每一个要素看成一个顶点，建立装配体全部尺寸的联系路径图。以功能尺寸形成路径最短为出发点，按照功能尺寸精度排序，对尺寸联系路径图进行多条最短路径的求解，最终获得一棵装配尺寸的最短路径生成树。根据标注习惯对最短路径生成树进行修正，可以确定零件最优的自动标注模式，并建立装配体全相关尺寸模型。该方法易于计算机辅助实现，并且适用于复杂装配体中零件尺寸自动标注和尺寸模型的建立。

228 磁盘高速运行过程中磁头运行状态的监测方法

石德全 康凯娇 高桂丽



摘要：随着磁头磁盘间有效距离的不断降低，磁头可能以飞行、冲浪和滑行三种状态工作，为了使磁头能够稳定工作，必须实时监测和识别磁头所处的状态。提出一种利用摩擦电流来实时监测磁头工作状态的方法。利用空气轴承电动机、热飞高控制磁头、功率加载控制单元、静电计、加载/卸载单元、静电屏蔽箱等组建了摩擦电流的测试系统。通过每隔 0.1 V 逐步给飞高控制磁头加载电压的方式，改变磁头磁盘间的距离，测量了不同磁头磁盘间距时的摩擦电流，得出了区分三种工作状态的摩擦电流区间。当摩擦电流值在  $10^{-4}\mu\text{A}$  以下时，磁头工作在稳定的飞行状态；当摩擦电流值在  $6\sim 50\mu\text{A}$  时，磁头工作在冲浪状态；当摩擦电流值在  $140\mu\text{A}$  以上时，磁头工作在滑行状态。

**CONTENTS**

- 1 Forward Kinematics of 6-UPS Parallel Manipulators with One Displacement Sensor**  
LIU Yanli CHENG Shili JIANG Surong YANG Xiaolong LI Yao WU Hongtao
- 8 Transmission Mode for Curve-face Gear Pair**  
LIN Chao CAI Zhiqin WU Xiaoyong ZHU Caichao
- 19 Design and Human-machine Compatibility Analysis of Co-Exos for Upper-limb Rehabilitation**  
ZHANG Leiyu LI Jianfeng LIU Junhui HOU Zengguang PENG Liang WANG Weiqun
- 29 Structural Synthesis of Fully-isotropic Five Degree-of-freedom Hybrid Kinematic Mechanisms**  
CAO Yi ZHOU Rui QIN Youlei GE Shuyi DING Rui
- 38 Tracing Measurement Method for Non-circular Contour of Complex Shafts**  
LI Jing GAO Huayu SHEN Nanyan DENG Yang YAN Junfan
- 47 Novel Decomposition Methodology for Tooth Contact Analysis and Experiment Tests**  
CAO Xuemei YANG Bohui DENG Xiaozhong
- 53 Influence Mechanisms Between Helical Motion Velocity Coefficient and Cutter Parameters and Characteristics of Tooth Surface Generated by Duplex Helical Method**  
ZHANG Yu YAN Hongzhi ZENG Tao WANG Zhiyong
- 62 Design of a 1-DOF Symmetrical Deployable Coupled Mechanism**  
GAO Huifang LIU Jingfang YU Yueqing
- 74 Relations between DOF of Mechanism and DOF of Links and Their Essential Differences**  
MU Dejun ZHANG Yitong ZHANG Xing
- 84 Design a Series of Parallel Mechanisms with a Helical Joint Based on the Concept of Articulated Moving Platform**  
WANG Congzhe ZHANG Yi
- 94 Opportunities and Challenges of Machinery Intelligent Fault Diagnosis in Big Data Era**  
LEI Yaguo JIA Feng KONG Detong LIN Jing XING Saibo
- 105 Modulation Sidebands of the Vibration Signal of Gearbox**  
LI Yongzhuo DING Kang HE Guolin LIN Huibin
- 113 Analysis of Elastic-plastic Transient Response Based on Reduced Model**  
QIAN Pengbo QIAN Linfang YIN Xiaochun
- 121 Analysis of the Effects of Frequency Dependent Characteristic on the Vibration of Viscoelastic Composite Structure**  
SUN Wei YAN Xianfei WANG Zhuo

- 129 Study on Machinability of Surface-constrained Softness Abrasive Flow Based on CFD-DEM Coupled Method**  
JI Shiming GE Jiangqin GAO Tao TAN Dapeng CHEN Guoda LI Chen
- 142 Elastic Deformation of Surface Topography under Line Contact and Sliding-rolling Conditions**  
LI Zhi CHEN Jian SHEN Jinlong LIU Kun
- 149 Studies of Magnetic Fluid Plane Sealing in Split Sealing Device**  
ZHANG Huitao LI Decai
- 156 Multi-objective Structural Optimization Design of Ti6Al4V Lattice Structure Formed by SLM**  
BAI Long XIONG Fei CHEN Xiaohong YI Changyan ZHANG Junfang CHEN Rui
- 166 New Method Based on Phase Congruency for Weld Pool Edge Extraction in Laser Cladding**  
LIU Jian XIANG Chaoqian WANG Fanghua YI Huaian
- 173 Research on Numerical Calculation Method of Critical Load for Bolt Loosening under Transverse Loading**  
ZHANG Mingyuan LU Liantao TANG Mingming ZENG Dongfang
- 179 Point Set Surface Reconstruction Method Based on Energy Functions and Vector Fields**  
LIU Yu HOU Liang XI Wenming
- 185 Wavelet Method Identifying the Characteristic Length Scale Parameter of Fractal Rough Surface**  
WANG Yusong ZHANG Xueliang WEN Shuhua FAN Shirong
- 193 Research on Identification and Compensation of Linear Servo System Time Delay Parameter**  
YANG Liangliang SHI Jun LU Wenqi SHI Weimin
- 202 Rigidity Analysis of the Double Actuators Micro-gripper Based on Constraint Substitution**  
GONG Jinliang JIA Guopeng ZHANG Yanfei
- 210 A New Solving Method of the Compliance Topology Optimization Problem of Continuum Structures under Multiple Load Cases**  
YU Liaohong RONG Jianhua ZHAO Zhijun CHEN Yixiong LI Fangyi
- 220 Establishment of the Shortest Spanning Tree of Assembly Dimensions and Its Application**  
WANG Youli WANG Xiaohui ZHANG Xueliang
- 228 Method of Monitoring the Working Status of the Magnetic Head during High Speed Revolution of Hard Disk**  
SHI Dequan KANG Kaijiao GAO Guili

# 《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)  
宋玉泉(院士) 陈学俊(院士) 林尚扬(院士) 周孔穴(教授) 周尧和(院士) 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) 陈绍彰(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

05>