



QK1867941

ISSN 0577-6686  
CODEN CHKA2

# 机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：产品装配技术 客座编辑：刘检华教授



中国机械工程学会 主办

万方数据

2018年54卷11期 半月刊

## // 产品装配技术专栏 //

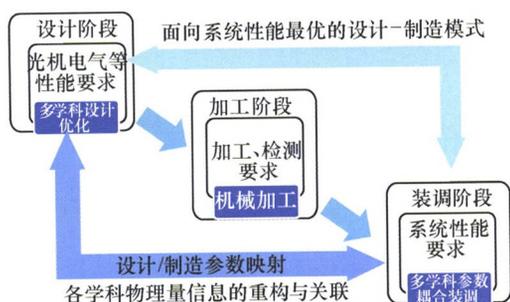
客座编辑：刘检华 教授（北京理工大学）  
策划编辑：岑 伟（《机械工程学报》编辑部）

### 1 产品装配技术

刘检华

### 2 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势

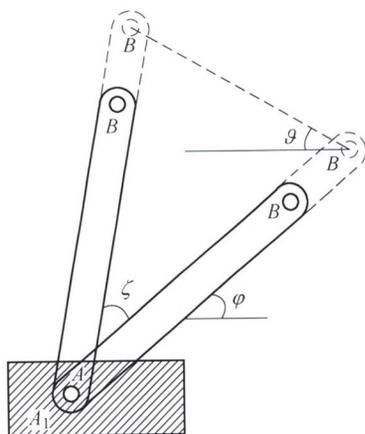
刘检华 孙清超 程 晖 刘小康 丁晓宇 刘少丽 熊 辉



**摘要：**当前国内外精密/超精密加工技术的快速发展，使得零部件加工精度和一致性得到显著提高，装配环节对产品性能的保障作用正日益凸显，相关研究越来越得到国内外学者的关注。针对目前我国产品装配技术研究相对滞后，缺乏相关研究体系的现状，在总结国内外产品装配技术的研究现状基础上，阐述了其分类和内涵，建立了产品装配技术的研究体系框架，并对其面向装配的设计、装配工艺设计与仿真、装配工艺装备、装配测量与检测、装配车间管理等主要研究方向进行了论述，最后指出了未来产品装配技术的集成化、精密化、微/纳化和智能化的发展趋势。

### 29 基于连杆机构旋转法则的平面单环闭链结构装配误差不确定性分析

赵强强 郭俊康 洪 军



**摘要：**影响平面单环闭链结构装配精度的主要误差源有杆件加工偏差、装配约束误差以及铰链间隙。而铰链间隙的随机性导致平面单环闭链结构装配误差具有不确定性。为了实现装配精度预测和获得装配误差边界，通过分析平面单环四杆结构装配特点，提出单杆件固定和双杆件连接两种装配单元，并建立两种单元的误差模型。在此基础上，完成了无间隙平面单环闭链结构装配误差建模。然后通过引入连杆机构旋转法则，以虚拟杆件表征铰链间隙并将其视为“短杆”，从而基于杆件旋转不变性建立了考虑间隙的平面单环闭链结构装配误差不确定性分析模型，并给出了装配误差边界计算方法。最后以平面五杆单环结构作为数值案例，验证了所提出方法与模型的可行性与实用性。



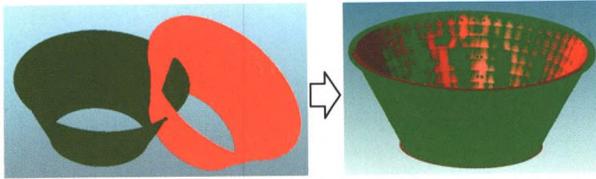
**摘要:** 传统精度设计仅考虑零部件几何公差的影响, 未涉及装配载荷作用下零部件变形的影响。为了保证机械系统在工作过程中的可靠性与稳定性, 不仅要求在产品设计与制造环节中要严格保证零部件具有良好的设计性能与制造质量, 更重要的是保证装配过程中各零部件间的配合性能。以具体的卧式加工中心为例, 通过有限元法获取零部件载荷效应下的变形数据信息, 结合小位移旋量理论、齐次坐标变换理论及表面认证思想, 建立零件载荷变形偏差的综合三维数学模型。分析结果表明: 装配载荷作用下的零件变形偏差总体上呈现出传递和累积的趋势, 系统末端变形偏差累积量达到 $-0.0249\text{ mm}$ 。因此, 零件载荷变形偏差对机械系统精度的影响不容忽视, 设计阶段的三维公差分析应该综合考虑尺寸、形位公差及载荷作用下的变形偏差对机械系统装配精度的影响, 才能形成一种面向整机精度的协调与保障机制, 为提高复杂精密机械系统的整机性能提供理论与技术支持。

#### 49 掠入射聚焦型 X 射线脉冲星望远镜装配误差分析与在轨验证

李连升 梅志武 邓楼楼 吕政欣 刘继红 孙建波 孙艳 周昊 左富昌



**摘要:** 针对掠入射聚焦型 X 射线脉冲星望远镜多源装配误差影响光学性能的问题, 提出了空间 X 射线聚焦光学产品装配误差分析方法。综合考虑偏心、倾斜、离焦以及装配应力引起面形畸变等装配误差, 基于小位移旋量理论和空间位姿变换矩阵构建产品装配误差理论分析模型。采用光矢量计算和蒙特卡洛法定量分析了装配误差对聚焦性能的影响, 倾斜误差对聚焦性能影响最大, 倾斜误差  $1'$  可导致焦斑 RMS 值增大约  $0.3\sim 0.4\text{ mm}$ 。 $0'$ 、 $3.75'$  和  $6'$  视场所允许的倾斜误差极限分别为  $5.31'$ 、 $3.14'$  和  $1.38'$ 。偏心误差和离焦误差影响较小, 视场为  $0\sim 6'$  所允许的误差极限约为  $0.45\sim 0.50\text{ mm}$ , 离焦误差允许的变化范围为  $\pm 5\text{ mm}$ 。装配应力与自重产生的最大面形误差约为  $101\text{ nm}$ , RMS 为  $14.17\text{ nm}$ ,  $6\sim 7'$  视场的面形误差对焦斑的影响最大(约  $9.46\%$ )。搭建了具有多自由度调整与图像处理算法的装调系统, 实现了焦斑 RMS 为  $0.78\text{ mm}$  的精密装配。地面装配试验与在轨遥测数据验证了装配误差理论分析与精密装配方法的有效性。该方法对空间 X 射线聚焦型望远镜的精密装配研究具有指导意义。



## 70 基于曲面约束匹配算法的装配仿真定位方法

张秋爽 金鑫 张忠清 张之敬 尚可



## 71 面向弧形框架式导引头伺服机构的摩擦力矩测量系统及精密装配工艺

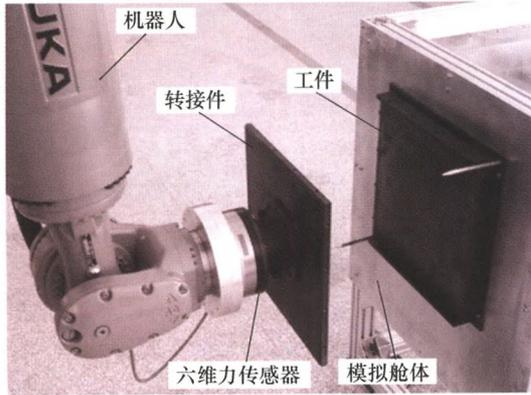
吴伟 尚建忠 罗自荣 曹玉君 于乃辉



**摘要:** 基于理想数模的虚拟装配可在设计阶段用于检查装配序列、获得装配路径、检查间隙等,然而单件、复杂大结构件产品的现场装配,一次性装配成功是目前面临的最大挑战。提出一种全新的、三维几何模型和海量测量数据互融的虚拟装配技术——“半实物虚拟装配”。探索基于胖模型的半实物装配信息模型,研究半实物装配中的几何特征模型、装配约束模型的建模方法,展开对半实物装配的模型定义、表达、融合的研究;通过全局上下文装配特征的配准规则树,揭示半实物装配的配准机理,进而获得面向实际的通用优化装配方法;最后在航天舱段结构件实际装配过程进行实际验证,试验结果证实了半实物虚拟装配技术在实际应用层面的可行性与高效性。

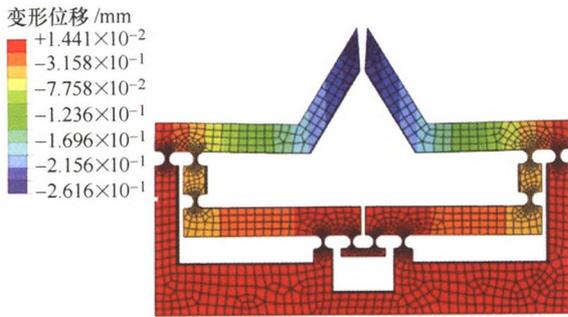
**摘要:** 随着工业科技的发展,现代制造业对零部件的装配精度提出了更高的要求,要求从系统制造的早期阶段预测最终产品的精度与性能,这有利于提高装配合格率、一致性及精度稳定性。在精密零件真实模型的装配仿真过程中,确定零件模型的装配定位是进行装配精度预测与控制首要解决的问题,其本质是两个带有几何误差的配合表面的精确匹配。提出一种基于曲面约束匹配算法的装配仿真定位方法,并通过试验验证,零件装配定位的预测值与实测值的相对误差在10%以内。该方法是准确有效的,具有很好的计算精度,可以快速准确地真实接触状态下分析和验证装配出的产品是否符合精度要求,为产品的装配分析和公差设计提供良好的校验、反馈功能以及可视化手段。

**摘要:** 为了在装配过程中实现对弧形框架式导引头伺服机构摩擦力矩及其不均匀性的实时监控,并对影响其摩擦力矩的主要因素(预紧力和间隙)进行在线调整,搭建了一套面向精密装配的摩擦力矩测量系统。该系统基于电测法的测量原理,采用水平立式结构设计,可适用于弧形框架类伺服机构摩擦力矩的测量。在精密装调过程中,通过实时监测驱动力矩,调整装配参数,从而达到控制产品性能的作用;对弧形框架偏心力矩的影响进行了分析及试验验证,消除了偏心力矩对测量的干扰;对偏心滚轮装配预紧力与摩擦力矩关系进行了试验验证,明确了偏心滚轮组件预紧力的数值范围;解决了自动跑合工艺问题,对减小摩擦力矩波动及不均匀性具有重要意义。基于研制的摩擦力矩测量系统对弧形框架式导引头伺服机构的装配工艺进行优化,将依赖技师经验装配的定性方法优化为依赖力矩测量的定量方法。



**摘要:** 针对航天器大部件装配需求, 给出一套基于力/位控制的机器人柔顺装配方法。基于装配界面作用力方向及机器人工具坐标系方向, 实时计算用于力/位控制的笛卡尔坐标系。为避免力控制过程中的机器人抖动, 设计了力与机器人速度的“S”型关系曲线。针对自由空间力控制、销钉导向等典型应用需求给出了力/位控制策略。针对机器人负载发生变化情况下的界面分离问题, 对机器人在装配不同阶段下负载的质量特性进行预先测量, 在界面分离时进行负载质量特性参数的切换, 实现对应负载的重力补偿, 并采用柔顺控制方法释放待分离界面的作用力, 最终实现界面安全分离。试验结果表明, 采用所设计的力/位控制方法, 在工件安装的主要过程中, 工件可以稳定顺应外部约束, 最终安装到位, 在界面分离阶段, 所述方法可以有效释放界面作用力, 实现界面安全分离。

94 二自由度开口型空间夹持机构研究

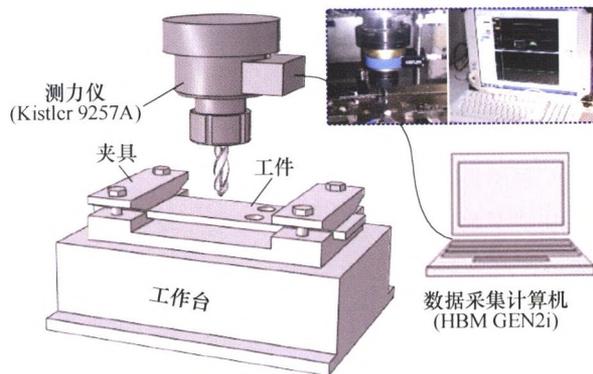


**摘要:** 为提高夹持机构夹取操作对象时的灵活性, 探索了夹持机构的实现形式, 提出一种基于柔性铰链的二自由度开口型空间夹持机构。分析了该机构基于柔度特性的位移放大倍率模型, 并通过与有限元仿真结果的对比, 验证了该模型的正确性; 其次, 以空间夹持机构的几何结构为基础, 研究了夹持姿态与输入位移之间的关系, 揭示了其夹持姿态的变化规律; 最后, 通过分析二自由度柔性铰链在各个方向上的最大转角, 得到了该空间夹持机构的可达工作空间。上述分析证明了该机构的可行性及有效性。

102 基于梯度虚拟材料的栓接结合部连接参数表征



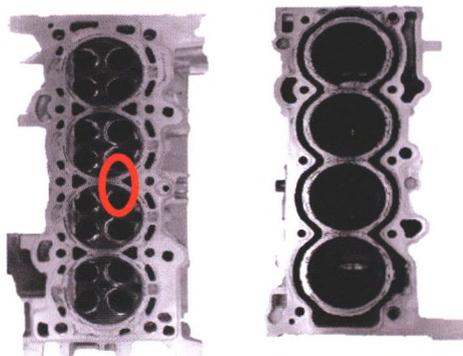
**摘要:** 螺栓连接是应用最广泛的装配形式之一, 表征栓接结合部连接参数是进行装配体结构动力学分析的关键, 针对各向同性虚拟材料模型不能准确表征结合面压力分布不均匀性的问题, 提出并开发一种基于梯度虚拟材料的栓接结合面连接参数表征模型。首先根据结合面压力分布特征, 以及结合面法向、切向刚度与压力分布间的映射关系, 建立了等效虚拟材料参数随位置坐标的变化规律模型; 分别采用等参梯度单元和高斯积分点属性梯度分布单元等效表征结合部连接参数, 采用结构静力学、动力学分析方法进行分析, 通过对比不同类型单元静力学、动力学计算结果, 验证梯度材料单元的准确性; 进而研究了基于代理模型的梯度虚拟材料参数辨识方法, 采用拉丁超立方采样来获取样本点, 采用 Kriging 模型拟合连接参数, 应用遗传算法优化虚拟材料参数。采用均匀虚拟材料模型、各向异性虚拟材料模型及梯度虚拟材料模型的仿真结果与试验数据对比, 表明梯度虚拟材料模型是一种表征栓接结合部压力/刚度分布特性的有效方法。



**摘要：**碳纤维增强复合材料(Carbon fiber-reinforced polymers, CFRPs)制孔轴向力与多种损伤形式密切相关，描述整个制孔过程中以及钻头在任意旋转周期内轴向力的分布规律，对于揭示制孔损伤的产生与演化过程具有重要意义。介绍切削比功率的概念，用于描述单位时间内去除单位体积材料的效率；分别对主切削刃和横刃进行微元划分，利用钻削比功率对产生的局部微元力进行经验表示，计算各切削刃上任意位置切削微元的工作角度，构建局部微元力与整体钻削力的转换矩阵，进而建立切削比功率与轴向力的关系。最后，通过试验测量单向 CFRP 板制孔轴向力与扭矩，提取数据信息对切削比功率进行标定，实现了对钻头处于任意状态时轴向力的描述。利用所建立的轴向力模型研究了：单向铺层 CFRP 板制孔轴向力分布规律、孔周损伤产生的位置与轴向力分布的关系以及两向和多向铺层的制孔轴向力叠加效应。

## 121 基于高精度点云的密封平面装配质量评价

张小兵 刘海江



**摘要：**密封平面在工业现场中有重要的应用，为保证其密封性必须要严格控制密封平面的加工及装配质量。旨在通过密封性来评价密封平面的装配质量，同时要满足密封平面装配质量评价对高精度、高效、可视化的要求，提出一种基于高精度点云数据采用中轴变换对密封平面进行装配质量评价的方法。首先利用 High-definition metrology(HDM)系统获取密封平面上的高精度点云数据，点云要保留波纹度特征；然后依据密封平面的装配定位基准对点云进行配准；最后基于中轴变换模拟密封平面上的泄漏通道，从而对密封平面的装配质量进行评价。对如何通过中轴变换法提取泄漏通道进行了研究，并对点云数据在法矢量估计中的快速定向方法进行了改进。为验证该方法的有效性，以某泄漏内燃机的缸体缸盖结合面为例进行了试验，结果证明该方法可以准确识别泄漏的位置并能够基于不同的分割阈值模拟泄漏通道的形状，说明该方法可以对密封平面的密封性进行定性、定量的理论预报和评价。

## 129 啮合相位对人字齿行星齿轮传动系统均载的影响

张霖霖 朱如鹏



**摘要:** 基于集中参数法建立了人字齿行星齿轮传动系统平移-扭转耦合非线性动力学模型, 模型中考虑了人字齿行星齿轮传动系统多重啮合间相位关系, 提出了计入啮合相位的时变啮合刚度, 综合考虑了各构件的支撑刚度、误差激励。研究了啮合相位对人字齿行星齿轮均载的影响, 结果表明: 理想啮合状态下, 均布式人字齿行星齿轮系统中, 啮合相位系数为 0 时, 系统均载系数为 1, 同时抑制了系统平移振动; 非均布式人字齿行星齿轮系统中, 啮合相位系数为 0 时, 系统均载系数为 1, 同时抑制了部分平移振动。无啮合相位差的人字齿行星齿轮系统均载系数较相位差不为 0 时小。微调行星齿轮的几何相位, 不改变系统传动比及尺寸; 调整行星齿轮齿数关系, 虽系统的传动比及尺寸略有变化, 但系统的均载系数更小, 同时抑制了系统平移振动。在单级人字齿行星齿轮试验台上对不同啮合相位的行星齿轮系统进行了均载试验研究, 验证了理论分析结果的有效性。

## 141 一种并联机器人机电耦合多能域系统动力学参数辨识、控制及试验

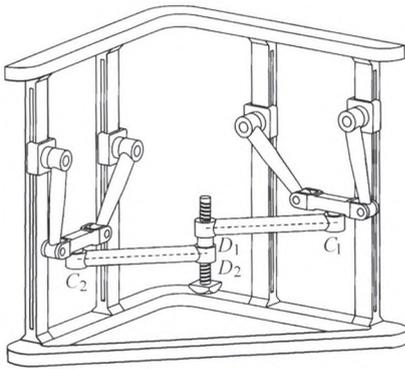
李永泉 王立捷 刘天旭 张阳 张立杰



**摘要:** 以平面 2-DOF 冗余驱动并联机器人为研究对象, 结合拉格朗日方程和键合图两种方法, 建立了该机器人机电耦合多能域系统动力学模型。针对该机构特点, 提出了一种将动力学模型线性化的待定系数法, 通过该方法, 经过严密的数学推导, 得到了机电耦合多能域系统动力学模型的线性化形式, 避免了传统的简化方法得到动力学模型线性化形式带来的误差。以五次多项式改进的傅里叶级数优化并联机构末端激励轨迹。搭建了动力学参数辨识试验平台, 以加权最小二乘法对其机电耦合多能域系统的动力学参数进行了基于试验的辨识研究。所提的辨识策略不仅可以辨识出机器人机构本体的惯性参数与关节摩擦参数而且还可以辨识出电动机和减速机的等效转动惯量以及等效阻尼系数。设计了基于计算力矩的力位混合控制策略, 并将辨识出的动力学参数应用到控制策略中, 通过试验验证了机电耦合多能域系统动力学参数辨识的实用性与基于计算力矩的力位混合控制策略的有效性。

## 151 一种可整周回转的新型 3T1R 并联机构运动学分析

贺磊盈 涂叶凯 叶伟 李秦川



**摘要:** 具有 3 移动 1 转动(3T1R)4 自由度并联机构在工业领域具有广泛的应用潜力。然而绝大多数现有的 3T1R 并联机构的动平台转动范围小于  $90^\circ$ 。提出一种具有整周回转能力的 3T1R 并联机构。该机构动、静平台通过两根相同的混联分支( $PRR$ )<sub>2</sub>RH 相连接。通过两个共轴、反向的等螺距螺旋副来实现动平台的整周回转能力。运用李群理论分析了机构的自由度。建立闭环约束方程对机构进行了位置正、反解计算。通过速度分析建立了雅可比矩阵,并在此基础上对机构进行了奇异分析,找到了所有的奇异位形。分析了机构的工作空间,以条件数作为性能指标,绘制了机构在工作空间内的性能分布图。研究结果为该机构后续的优化设计、动力学建模提供了理论基础。

## 161 四级行星齿轮减速器耦合系统动态性能优化

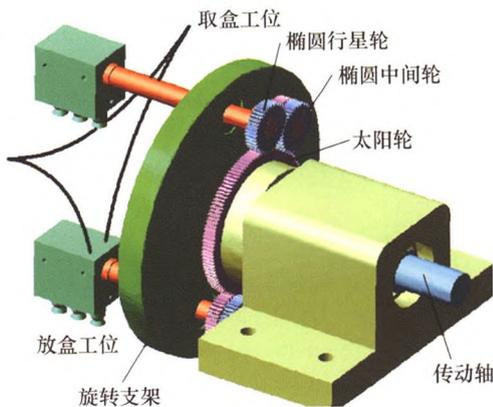
林腾蛟 曹洪 谭自然 何泽银 吕和生



**摘要:** 为研究复杂激励作用下多级行星齿轮减速器的耦合振动响应及动态性能优化方法,以某型海洋平台升降齿轮箱为对象,建立了包含时变啮合刚度、传动误差、啮合阻尼、齿侧间隙、摩擦力矩、结合部刚度和阻尼等因素的四级行星耦合系统动力学集中参数模型,采用龙格库塔法对额定工况下的动力学方程进行求解,并将计算所得的振动响应与实测结果进行对比,两者吻合较好。在此基础上,提出了基于谐波平衡法的多级行星齿轮耦合系统动态优化方法,以减速器壳体尺寸参数和齿轮副基本参数为设计变量,减速器总传动比、实际中心距、轮齿强度等为约束条件,振动加速度均方根值和总体质量最小为目标,建立多目标混合离散优化模型,基于分枝定界算法编写程序求解模型,获得最优设计变量。结果表明,优化后减速器总质量减小 8.2%,传动系统振动加速度降低 33.4%,壳体振动加速度降低 70.5%,优化效果明显。

## 172 自动装盒机椭圆-圆齿轮行星轮系取盒机构轨迹分析与设计

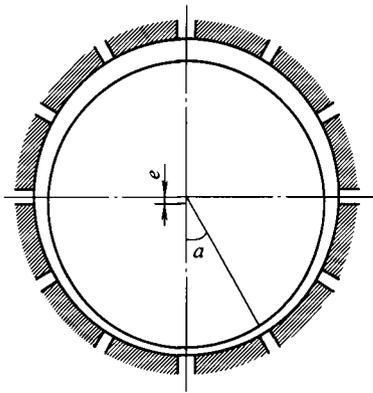
童俊华 唐曲曲 武传宇 姜海峰 程培林 李祥



**摘要:** 自动装盒机连续旋转式行星轮系取盒机构与间歇式往复摆杆取盒机构相比,机构振动小,速率更高。基于行星轮系取盒机构输出末端内摆线运动特性要求和非圆齿轮传动比可变的特点,提出一种椭圆-圆齿轮行星轮系代替现有的圆齿轮行星轮系取盒机构,使输出末端运动轨迹和特性得到优化。建立圆齿轮行星轮系取盒机构和椭圆-圆齿轮行星轮系取盒机构的运动学模型,分析两种机构的工作原理和运动特性,对机构进行轨迹仿真和运动特性求解,分析出机构主要参数对机构运动轨迹和特性的影响。利用人机交互的方法,对椭圆-圆齿轮行星轮系取盒机构的参数优化,得到一组较优的结构参数,并建立三维仿真模型。参数优化后的椭圆-圆齿轮行星轮系取盒机构运动特性与圆齿轮行星轮系取盒机构对比,在取盒和放盒工位的速度变化减小 14.3%,最大加速度减小 9.9%。上述研究可为行星轮系高速吸盒机构的设计提供理论依据。

180 静压气体轴颈轴承力学特性分析的解析-CFD 混合方法

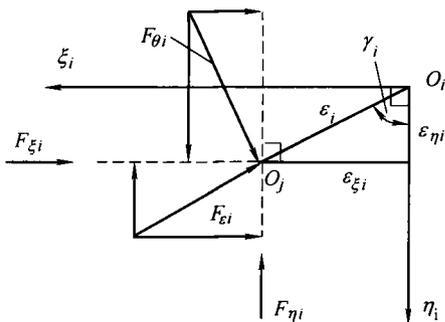
李一飞 尹益辉 阳 红 陈大林 刘信恩



**摘要:** 在静压气体轴颈轴承的力学性能分析中, 工程解析方法使用方便, 但由于众多假设的引入而使分析精度不足, 单纯计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法精度较高, 但因数值建模复杂、模型规模巨大且计算难于收敛而使用不便。针对这两种方法各自的不足, 建立小孔节流静压气体轴颈轴承力学特性分析的解析-CFD 混合方法, 该方法综合解析方法与 CFD 方法的优点, 可在考虑详细气膜流场特性影响的情况下求出轴颈轴承的承载力与刚度。以特定的小孔节流空气静压支承轴颈轴承为例, 分别基于解析-CFD 混合方法和传统的工程解析法进行计算, 并进行相应的试验测试。根据计算结果得到静压气体轴颈轴承的承载力与径向刚度, 同时对工程解析方法、解析-CFD 混合方法和实测结果进行比较, 表明解析-CFD 混合方法的计算结果更加接近实测值。

187 固定瓦-可倾瓦动压气体轴承-转子系统的非线性运动分析

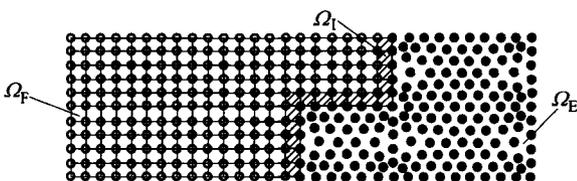
张永芳 肖良君 李贤伟 赵晶群 李 莎



**摘要:** 针对固定瓦-可倾瓦组合动压气体轴承-柔性转子系统, 研究了系统的非线性动力学行为。运用微分变换法求解了可压缩气体润滑的 Reynolds 方程, 得到了单块瓦的非线性气膜力, 通过组装技术获得了固定瓦-可倾瓦动压气体轴承非线性气膜压力的分布。基于 Newmark 积分法, 运用轴颈中心的运动轨迹图、时间历程图和 Poincaré 映射图, 研究了组合动压气体轴承支承的柔性转子系统的非线性不平衡动力响应。在此基础上, 进一步分析了瓦块不同支点比和预负荷系数对转子系统稳定性的影响, 结果表明, 选取合适的支点比和较大的预负荷系数时, 有助于提高转子系统的运动稳定性。

197 FE-EFG 耦合法的 GPU 并行加速及应用研究

龚曙光 廖宇梨 谢桂兰 张建平



**摘要:** 有限元(Finite element, FE)-无网格 Galerkin 法(Element-free Galerkin, EFG)耦合能充分发挥有限元和无网格法各自具有的优势, 为进一步提高 FE-EFG 耦合法在大规模工程应用中的计算效率, 提出了一种 FE-EFG 耦合法的图形处理器(Graphic processing unit, GPU)并行加速算法, 通过采用局域搜索法搜索 EFG 区域中节点影响域内的节点或积分点, 以及积分点定义域内的节点; 利用统一计算架构(Compute unified device architecture, CUDA)特点, 在全求解域内引入交叉节点法实现了总体刚度矩阵的并行组装及按行压缩(Compress sparse row, CSR)存储; 利用 CUDA 库函数并结合预条件共轭梯度(Preconditioned conjugate gradient, PCG)法对总体离散方程进行了迭代求解, 2 个数值算例验证了所提方法的可行性和计算精度, 所得结果显示 FE-EFG 耦合法的计算效率得到显著提高, 且其加速比会随计算规模的增加而增大, 从而为大规模工程计算提供了一种高效的耦合算法。

205 内齿强力珩齿与蜗杆砂轮磨齿切削机理对比分析与试验研究

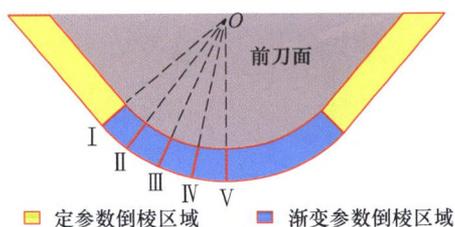
韩江 袁彬 王东岭 梁惠 夏铨



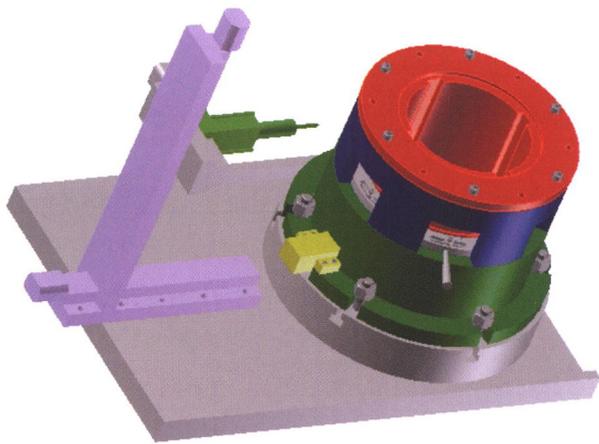
**摘要:** 内齿强力珩齿与蜗杆砂轮磨齿是实现齿轮精加工的主要工艺方法, 系统深入地研究两种齿轮精加工工艺的工艺原理, 洞悉二者在齿面磨削纹路的形成机理, 成为齿轮精加工工艺研究的热点问题。基于空间曲面啮合原理, 提出一种离散点齿面模型构建方法, 分别建立内齿珩磨轮与蜗杆砂轮的齿面接触方程, 并依据接触区离散点处的相对滑擦速度建立珩削纹路模型。经过滚齿、渗碳淬火的工件齿轮作为精加工的毛坯件, 给定相应的珩齿和磨齿工艺参数, 在内啮合强力珩齿机与蜗杆砂轮磨齿机上进行精加工试验, 并对齿轮的轮齿进行三维形貌检测试验, 通过对比分析试验结果与预测模型, 两种工艺的齿面纹路的预测模型与试验结果高度吻合, 结合对三维形貌数据指标的对比分析, 得出两种工艺对齿面几何精度的影响规律, 研究结果为齿轮精加工工艺的提升提供了理论依据。

214 渐变倒棱 PCBN 刀具设计制造及磨削精度检测

陈涛 王道源 李素燕 刘献礼



**摘要:** 刀具刃口上的定值倒棱能够提高刀具刃口强度、延长刀具寿命, 但也会使切屑积聚, 增大了切削阻力和切削区温度。为改善硬态切削过程中的排屑散热、降低切削阻力, 提出渐变倒棱 PCBN 刀具结构; 建立刀具刃线的数学模型, 并对所建立的模型进行了数值模拟; 针对渐变倒棱 PCBN 刀具的特征, 结合端面磨削方式和化归思想, 提出了逼近式磨削轨迹规划方案, 通过轨迹仿真和磨削试验优选了磨削次数, 实现了渐变倒棱刀具的精确磨制; 提出了渐变倒棱刀具刃口缺陷、倒棱宽度和角度等参数的精度检测方法, 完成了所开发刀具磨削精度的定量评价。磨削精度检测结果表明, 刃口半径、倒棱宽度和角度的磨削值接近于设计值, 符合精密磨削要求和硬切削加工要求。最后通过对比试验完成了对所设计刀具切削性能的验证。



**摘要:** 针对圆周四等分深孔内键槽加工精度不高、加工键槽与基准通槽对称度较难控制及加工对称度较差等问题,在分析产生对称度超差的基础上,运用形位公差测量原理,结合空间对称度误差测量及评定方法,提出利用投影直线与基准直线夹角的方式确定对称度误差及基于对称度在线检测及补偿的新式加工方法。设计双层组合式手动自定心夹具,实现径向自定心定位和轴向端面定位,同时,将内置基准通槽参考基面导出并确保其精度能够被有效检测和控制;设计联机式多自由度对称度检测装置,提出利用该装置实现对称度误差量的检测及装置有效控制的基本方法,并在此基础上开发了自动检测对称度误差量的数控程序;通过采用数控插齿机伺服控制回转轴的角度补偿及斜向让刀的平移补偿方法,并结合数控系统程序控制定角度加工的方式实现了高对称度深孔内键槽的批量加工。深孔内键槽加工实例证明,夹具结构及联机式多自由度对称度检测装置具有较好的可靠性,且基于对称度检测及补偿的深孔内键槽插削加工方法能够稳定的控制加工对称度在 0.03 mm 以内,从而验证了此方法的合理性和准确性,为高对称度深孔内键槽的加工提供了一种新的途径。

**CONTENTS**

- 2 The State-of-the-art, Connotation and Developing Trends of the Products Assembly Technology**  
LIU Jianhua SUN Qingchao CHENG Hui LIU Xiaokang DING Xiaoyu LIU Shaoli XIONG Hui
- 29 Uncertainty Analysis of Assembly Error of Planar Single-loop Mechanisms Based on the Rotatability Laws of Linkages**  
ZHAO Qiangqiang GUO Junkang HONG Jun
- 39 Three-dimensional Tolerance Modeling and Precision Analysis of Flexible Body Based on the Assembly Load**  
MU Xiaokai SUN Qingchao SUN Kepeng SUN Wei
- 49 Assembly Error Analysis and In-orbit Verification of Grazing Incidence Focusing X-ray Pulsar Telescope**  
LI Liansheng MEI Zhiwu DENG Loulou LÜ Zhengxin LIU Jihong SUN Jianbo SUN Yan  
ZHOU Hao ZUO Fuchang
- 61 The Modeling, Evolutionary and Application of Quasi-physical Virtual Assembly**  
BAO Jinsong LI Zhiqiang XIANG Qian WU Dianliang ZHENG Xiaohu
- 70 Assembly Method Based on Constrained Surface Registration**  
ZHANG Qiushuang JIN Xin ZHANG Zhongqing ZHANG Zhijing SHANG Ke
- 77 Friction Torque Measurement System and Precision Assembly Process for Arc-shaped Structure Seeker Servo Mechanism**  
WU Wei SHANG Jianzhong LUO Zirong CAO Yujun YU Naihui
- 85 Robotic Assembly Technology for Heavy Component of Spacecraft Based on Compliance Control**  
HU Ruiqin ZHANG Lijian MENG Shaohua DONG Que LONG Changyu
- 94 The Research of One Two-degree-of-freedom Spatial Gripper with Opening**  
CAO Yi LIU Kai GUI Heli4 ZHOU Hui ZHANG Hong
- 102 Interface Parameter Identification of Bolted Connections Based on Gradient Virtual Material**  
SUN Qingchao HUANG Qingtao SUN Zhiyong QI Yanhua SUN Wei
- 110 Study of Thrust Force Distribution in a Drilling Cycle during Drilling of CFRP Laminates**  
MENG Qingxun JIANG Shoushan LIU Shunuan ZHANG Kaifu YAN Xiaoye
- 121 Assembly Quality Evaluation of Sealing Planar Based on High Precision Point Cloud**  
ZHANG Xiaobing LIU Haijiang
- 129 Impact of Meshing Phase on Load Sharing for Herringbone Planetary Train**  
ZHANG Linlin ZHU Rupeng

- 141 Dynamic Parameter Identification, Control and Experiment of an Electromechanical Coupling Multi-energy Domain System For a Parallel Robot**  
LI Yongquan WANG Lijie LIU Tianxu ZHANG Yang ZHANG Lijie
- 151 Kinematics Analysis of a Novel 3T1R Parallel Manipulator with Full Rotational Capability**  
HE Leiyang TU Yekai YE Wei LI Qinchuan
- 161 Dynamic Performance Optimization of Coupled System for Four-stage Planetary Gear Reducer**  
LIN Tengjiao CAO Hong TAN Ziran HE Zeyin LÜ Hesheng
- 172 Elliptical-circular Planetary Gear Train Box-taking Mechanism Design and Trajectory Analysis for Automatic Cartonng Machines**  
TONG Junhua TANG Ququ WU Chuanyu LOU Haifeng CHENG Peilin LI Xiang
- 180 Analytic-CFD Combined Method for Analysis of Mechanical Properties of Externally Pressurized Gas Journal Bearing**  
LI Yifei YIN Yihui YANG Hong CHEN Dalin LIU Xinen
- 187 Analysis of Nonlinear Motion of A Rotor System Supported by Fixed-tilting Pad Self-acting Aerodynamic Bearings**  
ZHANG Yongfang XIAO Liangjun LI Xianwei ZHAO Jingqun LI Sha
- 197 Study on GPU Parallel Speedup and Application of FE-EFG Coupling Method**  
GONG Shuguang LIAO Yuli XIE Guilan ZHANG Jianping
- 205 Comparative Experimental Study on Cutting Mechanism between Gear Honing and Grinding Process**  
HAN Jiang YUAN Bin WANG Dongling LIANG Hui XIA Lian
- 214 Design, Manufacture And Grinding Accuracy Detection of PCBN Tools with Variable Chamfer Edge**  
CHEN Tao WANG Daoyuan LI Suyan LIU Xianli
- 222 Study of Shaping Processing Method for Deep Hole Keyway Based on Symmetry Degree On-line Detection and Compensation**  
ZHAO Chunhua LIANG Zhipeng QIN Hongling

# 《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) 周孔亢(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) 陈炤彰(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)

