

## /// 特邀专栏 ///

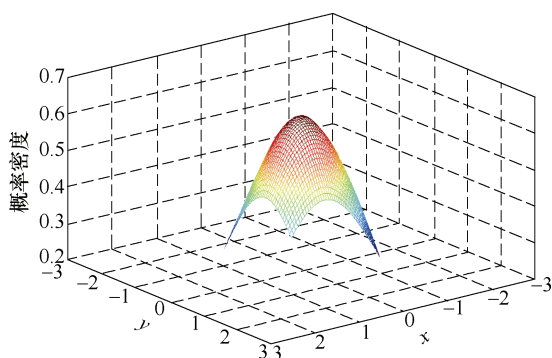
### 航天工程中机构可靠性及其动力学和系统控制基础研究

客座编辑: 姚建涛老师 (燕山大学)

策划编辑: 罗晓琪 (《机械工程学报》编辑部)

#### 1 基于时变区间和穿阈模型的机械时变可靠性分析方法

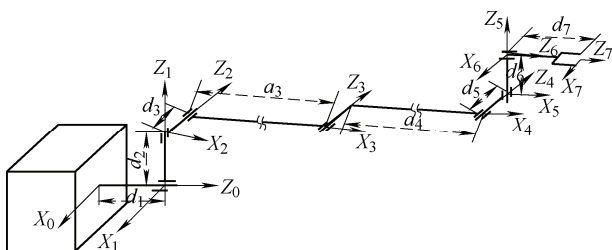
王丕东 张建国 阚琳洁 杨乐昌



**摘要:** 现有机械时变可靠性模型主要以概率论为基础, 依赖于基本随机变量的大样本空间, 当没有足够的数据来验证这些随机变量的概率密度正确性时, 分析结果的准确性和置信度值得怀疑, 概率可靠性方法存在局限性。在航天机构中, 由于成本高, 在复杂服役环境中可观测性差、检测难, 积累信息难、统计类信息往往难以获得, 主要存在区间类信息, 为保证分析结果更加精确, 考虑时变区间变量, 研究并提出非概率时变可靠性分析方法: 将时变区间转化为服从截断正态分布的随机过程, 求出在时变区间内的上穿率, 针对正态截断分布变量, 利用改进的非概率 PHI 方法, 求得累积失效概率。解决区间变量随时间变化下的非概率时变可靠性问题。利用算例和工程实例验证本方法的准确性和可行性。

#### 10 基于多层映射模型的空间机械臂运动可靠性影响因素灵敏度分析

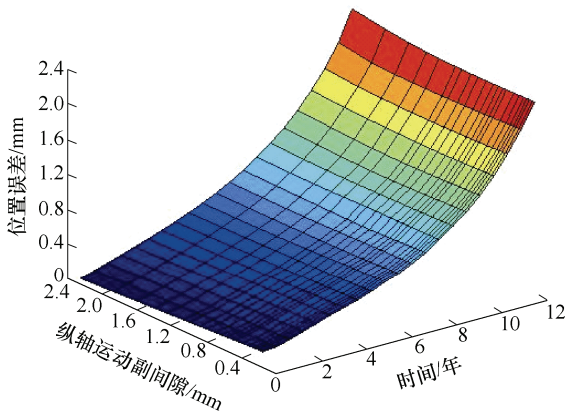
贾庆轩 李彤 陈钢 孙汉旭 张健



**摘要:** 面向空间机械臂在轨操作任务的高可靠性需求, 基于运动可靠性影响因素多层映射模型开展灵敏度分析, 为空间机械臂任务规划和控制决策制定提供理论依据。综合考虑空间机械臂几何参数、控制变量和柔性因素对运动可靠性的影响, 建立运动可靠性影响因素的多层映射模型, 实现各因素耦合关系和对运动可靠性递推关系的表征; 以此为基础, 融入在轨任务约束构造极限状态函数, 引入非线性响应面方法实现灵敏度的快速求解, 在避免传统方法中多维积分连续偏导问题的同时满足了在轨实时应用需求。通过仿真试验, 实现了对各类运动可靠性因素的灵敏度求解, 验证了多层映射模型的准确性和非线性响应面方法对求解运动可靠性灵敏度的有效性, 并对灵敏度在任务周期内的时变性进行了探讨。

## 20 基于性能退化和通用发生函数的在轨空间机构系统多状态可靠性分析

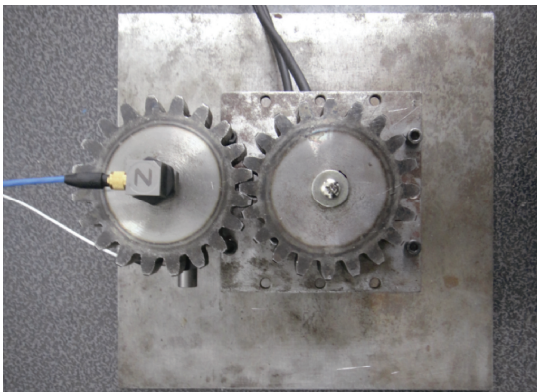
阚琳洁 张建国 王丕东 王 茜



**摘要:** 在轨空间机构在服役期间, 其性能参数往往会因为损耗性机理(如磨损)发生退化, 是具有多性能参数输出的多状态系统。因此, 基于“两态性”假设的传统可靠性分析方法并不能准确的分析在轨空间机构的多状态可靠性。针对此问题, 提出了性能退化和通用生成函数(Universal generating function, UGF)相结合的系统多状态可靠性分析方法。建立了性能参数分布矢量模型, 在此基础上利用 UGF 建立了多性能参数退化下的在轨空间机构系统多状态可靠性模型。分别给出了已知退化机理模型和未知退化机理模型两种情况下的状态概率计算方法, 并提出了多性能参数退化下的系统可靠度分析方法。结合双轴驱动机构系统的实例分析, 验证了所提方法的有效性, 具有工程应用的指导意义。

## 29 多间隙耦合齿轮转子系统动力学与试验研究

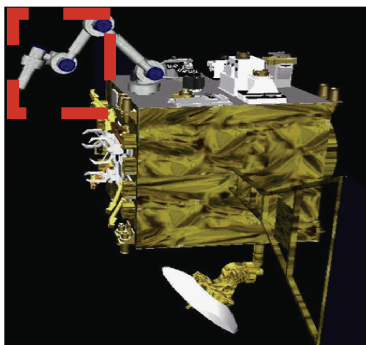
张慧博 田 健 周 峻 赵 阳 游斌弟



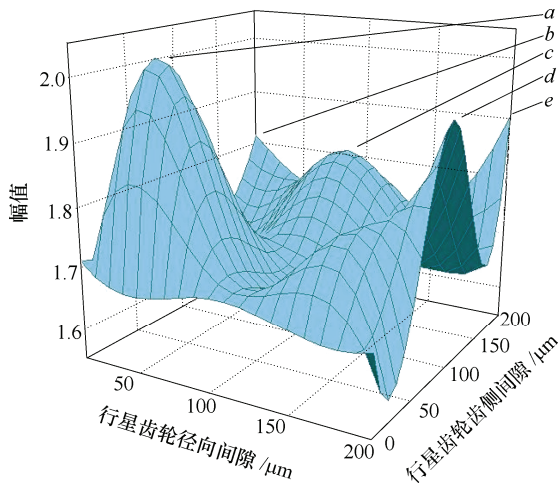
**摘要:** 为了研究多间隙对齿轮转子系统动力学特性的影响, 提出一种考虑多间隙耦合的齿轮转子系统动力学建模方法, 并利用相应的动力学试验验证了建模方法的准确性。在动力学模型中, 考虑了轴承径向间隙、动态齿侧间隙以及时变啮合刚度。分析转速和间隙大小对系统振动特性的影响规律。结果表明: 从动轮加速度振动频谱主要包含径向振动频率和啮合振动频率。随着转速的提高, 径向振动幅值增大, 啮合振动也更为剧烈。径向间隙增大导致径向振动与啮合振动幅值升高, 而齿侧间隙增大会导致机构回差增大。通过动力学验证试验, 从频率和幅值上验证了理论计算和分析结果的正确性, 但试验数据与理论计算之间仍存在一定误差, 尤其是幅值误差较大, 这些误差的主要来源是模型参数误差和测量误差。

## 38 复杂对象参数辨识的一种复合评价策略

李文皓 马 欢 张 珩 肖歆昕



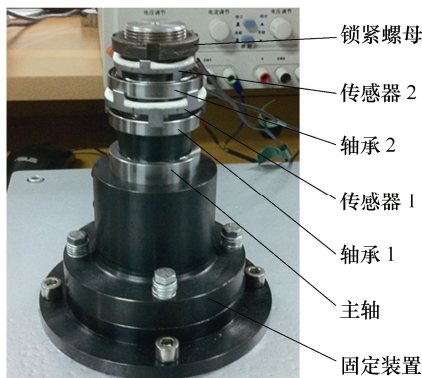
**摘要:** 提出一种针对复杂对象参数辨识问题的复合评价策略, 通过分层设计优化指标评价函数, 降低了迭代搜索计算对分辨局部极小值与全局最优值的需求, 在少量增加计算消耗的条件下, 显著提高辨识精度。以搭载多关节机械臂的空间机器人为复杂对象代表, 配合一种改进型粒子群算法, 在无须线动量测量信息和仅使用历史数据的条件下, 对机器人抓取的目标的惯性参数进行参数辨识。115 组辨识仿真实例的统计结果表明, 使用该复合评价策略, 基本不增加计算消耗, 而辨识精度得到大幅提升。定性分析认为群体智能算法与该策略配合更易发挥效果, 有望在更宽泛的对象和领域中得到应用。



**摘要:** 为了分析含间隙航天机构传动关节的振动特性,以行星齿轮传动系统为研究对象,提出考虑多间隙耦合的行星齿轮传动关节动力学建模方法。模型中考虑了轴承径向间隙、齿侧间隙以及时变啮合刚度等非线性因素。并通过数值仿真,研究转速、间隙大小以及负载对系统振动特性的影响规律。分析结果表明:由于多间隙的影响,导致系统间各部件的振动存在耦合关系。同时,转速和间隙大小的变化,都有可能引发谐振现象。惯性负载较大时,关节的回转精度和稳定性较好,但处于空载或轻载状态时,系统内部振动幅值增大。

## 54 减缓空间机械臂热预紧力的研究

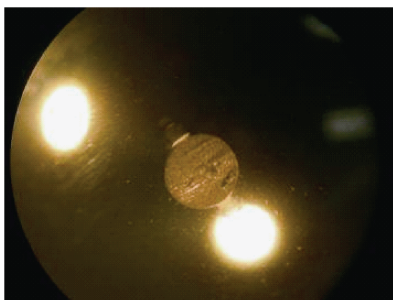
宁峰平 姚建涛 安静涛 赵永生



**摘要:** 通过研究隔套材料热学特性对空间机械臂热预紧力的影响,为空间机械臂热预紧力建模和解决交变温度可能诱发的失效提供理论指导。以空间机械臂中的主轴-轴承系统为研究对象,构建空间机械臂热预紧力预测模型,提出一种选取最佳隔套材料来减缓或消除空间机械臂热预紧力的方法。在不改变主轴-轴承系统结构的基础上,基于变形协调关系,依据隔套材料热学特性对热预紧力的影响规律,研究不同热膨胀系数的隔套对空间机械臂热预紧力的减缓效果。研究表明:施加于轴承上的轴向力增加,经轴承配合处摩擦拦截之后,预紧力依然增加;交变温度升高,航天轴承上的预紧力增加但内圈过盈量降低,与此同时分析了空间机械臂潜在失效模式。进一步研究发现:当热膨胀系数小于  $7 \times 10^{-6} \text{ m}^{\circ}\text{C}$  时,热膨胀系数增加,热预紧力随交变温度的变化率减小;当热膨胀系数大于  $8 \times 10^{-6} \text{ m}^{\circ}\text{C}$  时,热膨胀系数增加,热预紧力随交变温度的变化率增大。隔套材料热膨胀系数在  $7.6 \times 10^{-6} \sim 7.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{\circ}\text{C}$  之间时,交变温度引起的热预紧力被大幅度减缓或消除。

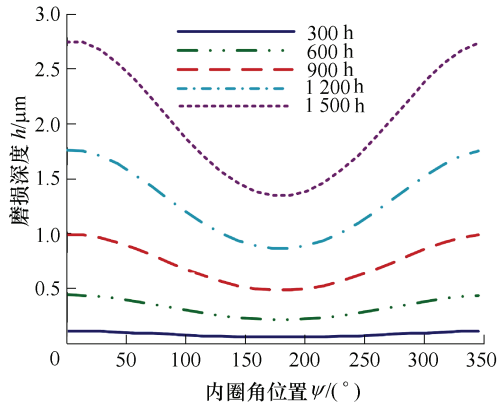
## 61 空间机构 MoS<sub>2</sub> 固体润滑真空摩擦特性研究

韩建超 李云 高鹏 袁宝峰 谭春林 汪龙



**摘要:** 研究超高强度不锈钢 CF170 材料上 MoS<sub>2</sub> 固体复合润滑膜的真空摩擦特性和耐湿热性能,为空间机构产品选用可靠的 MoS<sub>2</sub> 润滑膜提供理论基础和试验数据。在 CF170 材料的表面分别制备有机黏结 MoS<sub>2</sub> 复合润滑膜、无机黏结 MoS<sub>2</sub> 复合润滑膜和溅射 MoS<sub>2</sub> 复合润滑膜,进行摩擦磨损试验和耐湿热性能试验,结合光学显微镜和电子扫描显微镜对摩擦磨损形貌进行微观分析。通过分析可知,有机黏结 MoS<sub>2</sub> 复合润滑膜在摩擦过程中形成滑移面以降低摩擦系数;无机黏结 MoS<sub>2</sub> 复合润滑膜在摩擦过程中使摩擦偶件与试件之间的摩擦转换为滚动摩擦降低摩擦系数和延长耐磨寿命;溅射 MoS<sub>2</sub> 复合润滑膜在摩擦过程中被摩擦偶件剪切剥离,摩擦由点接触逐步过渡到面接触,增强了摩擦副之间的润滑效果。试验结果表明:溅射 MoS<sub>2</sub> 复合润滑膜平均摩擦系数较小,耐磨寿命较长,磨损率很低,并且具有良好的耐湿热性能,适用于空间机构的润滑。

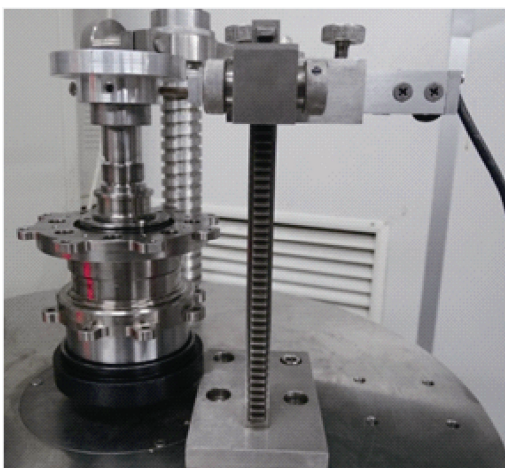




**摘要:** 以航天机构中的精密球轴承为研究对象, 考虑轴向预紧力和装配位置偏差, 研究了航天精密轴承磨损演化规律。基于轴承静力学和 Archard 磨损模型, 分析轴承内圈各个角位置的磨损状况, 预测润滑膜磨损导致润滑失效位置。建立轴承静力学平衡方程, 获得轴向预紧力与轴向位移、径向装配位置偏差与其引起径向力的关系。利用 Archard 磨损模型, 结合各个滚珠受力和在接触区的运动状况, 分析轴承不同角位置磨损的状况。分别分析轴承各角位置磨损随轴向力、径向力和磨损时间的演化规律。研究表明: 在单考虑轴向预紧力时, 内圈各角位置磨损相同, 且磨损深度与轴向预紧力呈线性关系; 综合考虑轴向预紧力和装配位置偏差时, 装配位置偏差导致轴承内部径向力呈指数趋势变化; 径向位置偏差导致内圈各角位置磨损深度差距很大; 径向位置偏差增大, 靠近偏差方向的位置磨损加剧, 背离偏差方向的位置磨损减弱; 随着磨损时间延长, 各角位置的磨损深度差距越来越大; 径向位置偏差导致各角位置的接触角差别很小, 而是各角位置的径向力差异却较大。

## 75 航天器驱动机构轴系摩擦力矩建模与分析研究

胡华君 潘博 孙京

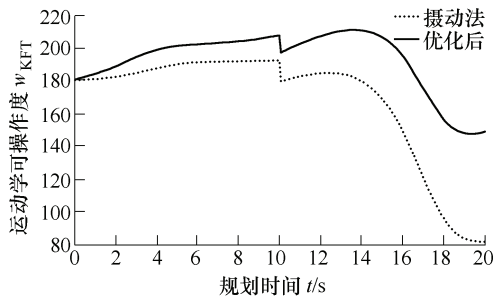


**摘要:** 基于接触力学、摩擦学及角接触轴承拟静力学理论, 建立了固体润滑角接触轴承摩擦力矩理论计算模型, 并在航天器驱动机构的边界条件下, 研究了航天器驱动机构轴系摩擦力矩与预紧力之间的关系, 从理论上分析了轴系预紧力对轴系摩擦力矩的影响并进行了试验验证。研究表明, 固体润滑角接触轴承摩擦力矩随着轴向载荷的增大而增大, 当轴系拧紧力矩达到临界值后, 摩擦力矩随着拧紧力矩的增大而增大; 且理论分析值和试验值的趋势一致, 数值接近; 说明基于拟静力学建立的摩擦力矩计算模型能较好地实现低速下的固体润滑轴承和轴系摩擦力矩预测。



## 81 空间机械臂末端力/位容错过程中关节参数突变抑制

陈 钢 李 彤 贾庆轩 孙汉旭 张 健



**摘要:** 为了实现空间机械臂关节失效后容错操作, 提出了空间机械臂末端力/位容错过程中关节参数突变抑制方法。基于机械臂关节空间和操作空间的力/速度映射关系, 分析空间机械臂末端力/位容错条件, 建立机械臂末端容错运动学和动力学方程; 进而将运动学可操作度和动力学可操作度分别引入机械臂容错运动学和动力学方程, 在此基础上建立机械臂末端力/位容错过程中的关节参数突变抑制优化函数, 并利用粒子群算法实现对优化函数的求解。仿真结果表明, 该算法能够在实现空间机械臂末端力/位容错的同时有效抑制关节速度和力矩突变。

## 90 大时延环境下空间机器人的可靠遥操作策略

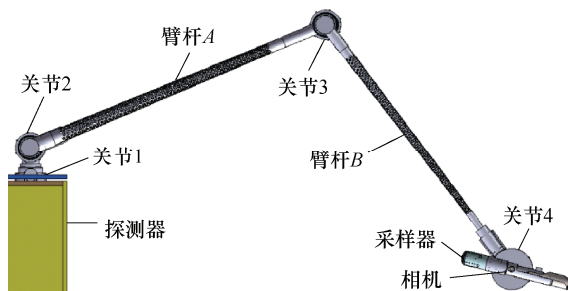
李文皓 张 珩 马 欢 肖歆昕



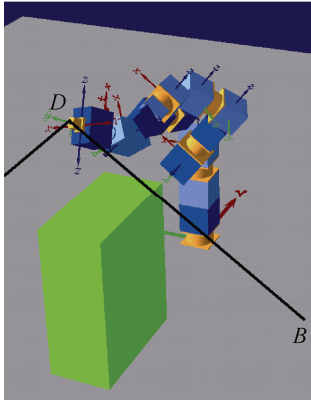
**摘要:** 在分析大时延环境下遥操作特点的基础上, 从使用可靠性角度提出一种可靠遥操作的多层策略集。将各可靠遥操作策略分解在数据层、算法层、操作层、策略层以及系统层并分别展开说明, 涵盖了大时延环境下的数据交互、空间机器人关节指令序列的嵌套位置/速度规划、操作员与遥操作系统交互、遥操作任务运行流程与应急和遥操作系统监测/在线维护等方面的策略。此外, 对可靠遥操作中尚待解决的动作反演、操作引导和共享遥操作技术进行了分析和展望。开展了某不确定大时延环境下的空间机器人遥操作试验, 试验的数据分析结果说明不同层次的遥操作可靠性策略均十分必要, 以操作员为对象的可靠性提升策略和设计方法是可靠遥操作技术发展的重要方向。

## 97 基于柔性补偿的行星表面采样机械臂控制策略研究

唐 玲 梁常春 王耀兵 姜水清 袁宝峰



**摘要:** 为了适应行星表面较大范围采样及系统减重需求, 行星表面采样机械臂通常由细长的臂杆和多个旋转关节串联组成, 柔性特征明显。针对 4 自由度行星采样机械臂, 提出基于柔性补偿的控制策略, 以提高机械臂的运动精度。基于混合坐标法建立考虑关节和臂杆弯曲变形的机械臂运动学模型, 计算机械臂末端柔性偏差; 设计机械臂末端笛卡尔空间加速度连续平滑的变加速-匀速-变减速的运动路径, 并在期望路径中实时补偿柔性偏差项; 基于 simulationX 软件, 建立精细的动力学和关节控制器模型, 对机械臂的典型任务进行仿真, 验证控制算法的有效性。结果表明, 采用柔性补偿的控制策略能够明显提高机械臂的动态跟踪精度及末端定位精度。



**摘要:** 针对空机械臂在轨环境复杂、约束繁多、任务多样的特点, 提出了一种基于分层结构的多约束任务规划方法。将任务规划过程划分为任务剖面分析与任务中间点规划两个层次分别进行。根据空机械臂的工作特点, 提出一种采用状态矩阵结合状态掩码的工作环境表征方式。在此基础上, 定义了三种空机械臂原任务及其算子。基于分层任务网络(Hierarchical task network, HTN)进行任务剖面分析, 将复杂任务拆解为原任务序列。系统梳理空机械臂规划参数集, 针对因各类约束条件导致无法直接执行的原任务, 在考虑资源优化的同时利用改进的 A\* 算法对原任务进一步划分为多段简单路径, 并给出代价最小的任务中间点序列。以物体转移任务为例通过仿真试验验证了基于分层结构的空机械臂任务规划方法的可行性与有效性。

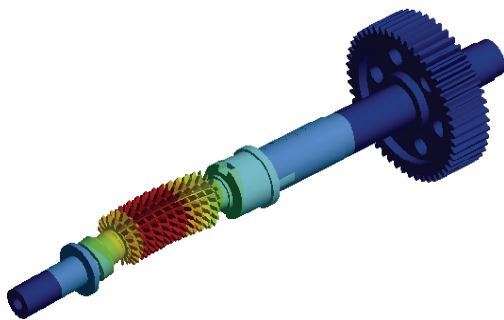
## /// 特邀专栏 ///

### 绿色制造技术

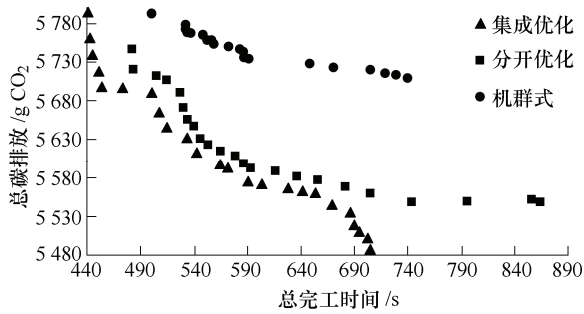
客座编辑: 曹华军教授(重庆大学) 李聪波教授(重庆大学)  
策划编辑: 岑伟(《机械工程学报》编辑部)

### 113 交变冲击载荷下高速干切滚刀主轴系统振动响应特性研究

雷 涛 曹华军 朱利斌 杨 潇 李先广

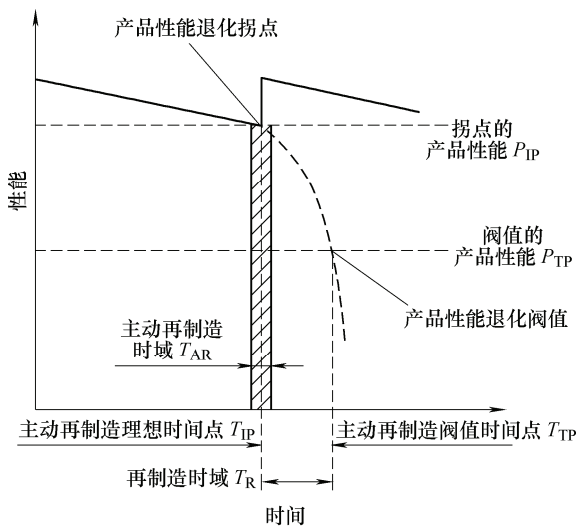


**摘要:** 与传统湿切滚齿相比, 高速干切滚齿更加绿色高效, 但其主轴转速大且加工参数变化范围广的特性直接影响着滚刀主轴系统的动态特性。为了解不同主轴转速和进给量对高速干切滚刀主轴系统加工过程中振动响应的影响规律, 进行多参数混合影响的切削载荷作用下滚刀主轴系统振动响应分析。建立高速干切滚刀主轴系统的有限元模型并进行模态分析, 得到各阶固有频率和振型。通过试验获得了在不同主轴转速和进给量下的主切削力, 并将其对滚刀主轴系统的激励简化为单频谐波激励。根据不同的加工参数对激励切削载荷的频率和幅值进行设置, 采用分频段的振动谱响应分析方法, 得到了滚刀主轴系统的振动响应规律。进行了主轴敲击试验获得了滚刀主轴系统的频响曲线, 开展了不同加工参数组合下的加工过程振动响应测试, 试验结果验证了仿真分析的可靠性。所得到的振动响应规律可以指导高速干切滚刀主轴系统的加工参数优化。



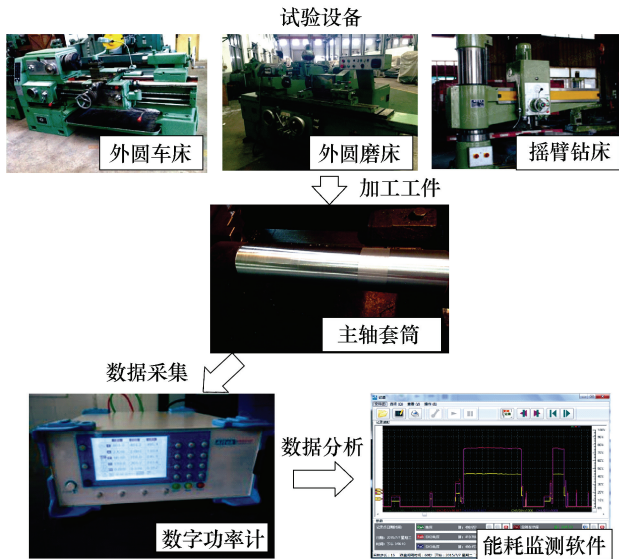
**摘要：**以往车间布局和调度优化都是各自分开进行的，单独车间布局优化时一般假设待加工工件各工序的加工设备已经确定；而单独调度优化则在车间布局确定后进行的，这种分开优化的方式忽略了不同布局对工序加工设备间距离的影响，由此影响工序间的搬运时间，从而影响调度结果。为此，提出以车间制造过程总碳排放和总完工时间最小为优化目标的车间布局和调度集成优化模型。为了求解该模型，设计多目标果蝇优化算法(Multi-objective fruit fly optimization algorithm, MFOA)。为了增强 MFOA 全局搜索能力和维持算法的稳定性，设计一种基于混合步长的嗅觉搜索；为了增大果蝇种群的协作，避免陷入局部最优引入了全局协作机制。将非支配等级排序方法引入 MFOA 处理多目标问题，并用算例验证了多目标果蝇优化算法的有效性。将集成优化结果与车间机群式布局下的调度优化结果和将车间布局、调度分开优化的结果分别进行对比，说明提出的集成优化模型可以得到更低的碳排放，验证了模型的有效性。

134 产品全生命周期主动再制造时域抉择方法



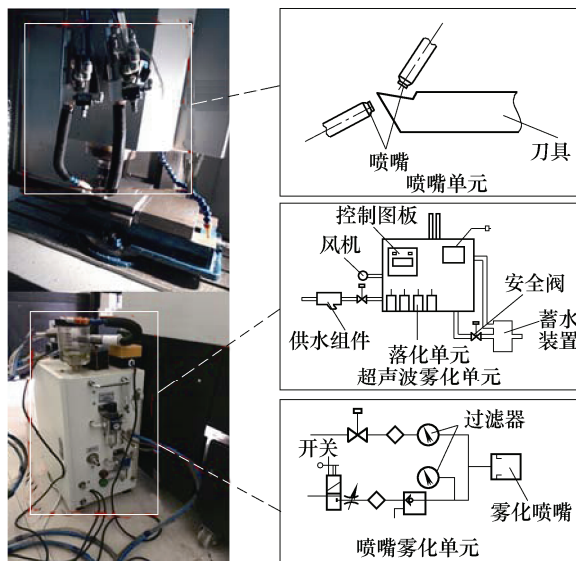
**摘要：**再制造是目前制造业中高价值机电产品循环利用的最佳方式，但传统再制造工程中再制造毛坯所存在的不确定性一定程度上阻碍了再制造工程的产业化应用。针对这一问题，阐述了机电产品在服役期间主动实施再制造的理念及内涵，并通过分析机电产品全生命周期服役价值，提出其主动再制造时域抉择方法。量化分析产品在制造、服役、再制造、再生服役等生命周期各阶段中服役性能演化规律，提出产品服役性能演化与服役价值的量化关系。基于产品在产品性能变化拐点的再制造性演化规律，建立产品主动再制造时域抉择模型。以某型号的六缸柴油机中关键零部件为对象，分析其主动再制造时机，以验证该方法有效性。



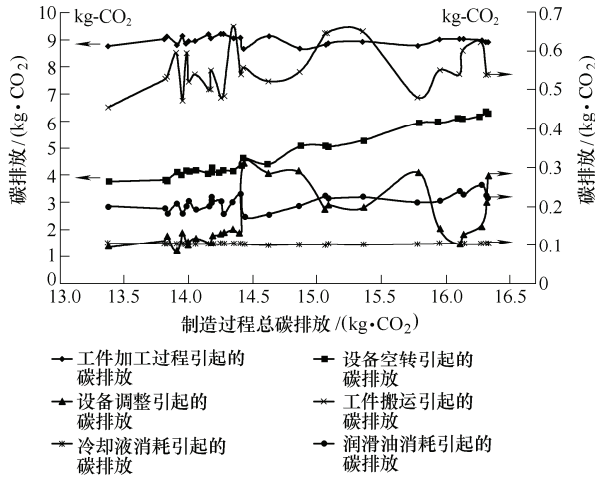


**摘要：**制造业是我国碳排放的主要源头，机床作为制造业的工作母机，减少其主要零部件制造关键环节的碳排放，是实现我国 2020 年减排任务的关键。针对机床典型零部件的全生命周期过程及其关键碳排放环节，分析机床零部件生产阶段、加工阶段、使用阶段、回收处理阶段、运输阶段的碳排放情况，提出了基于机床零部件生命周期的碳排放系统运行模型。并重点分析了包括零部件毛坯生产工艺、热处理工艺以及机械加工工艺的整个生产加工过程碳排放情况，建立了基于物料流、能量流、环境排放流的碳排放量化模型，可用于识别和分析各个阶段的碳排放情况。以某企业常用的机床典型零部件主轴套筒作为实例开展研究，计算其生命周期过程的碳排放；基于碳排放对生产加工工艺参数、加工工艺方案进行了分析与优选，提出了相应的减排策略可为我国机床零部件碳排放提供量化方法和思路，进行有针对性的节能减排。

157 面向低能耗少切削液的多目标加工参数优化

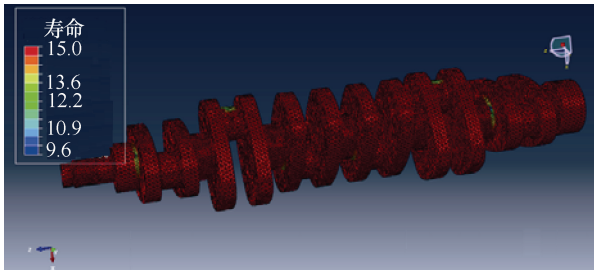


**摘要：**数控加工是一种广泛采用的机械制造加工方法，为实现数控加工的高能效，从数控铣削加工的低能耗少切削液两个方面对切削参数进行优化，建立切削加工过程能量消耗目标函数和切削液消耗目标函数。考虑加工过程中数控机床设备性能和加工质量的实际约束条件，建立以数控加工的切削速度和进给量以及切削液流速为优化变量，以最低加工能耗和最少切削液消耗为目标的多目标优化模型，并应用非支配排序遗传算法-II 对优化模型进行优化求解。最后，通过某具体实例验证了所建模型的有效性。



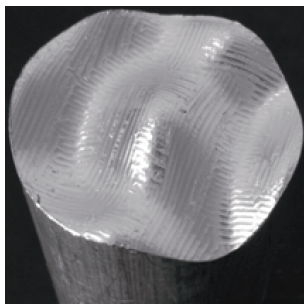
**摘要:** 为更好地减少制造过程中的碳排放, 弥补将工艺规划与车间调度分开碳排放优化时忽略了工艺规划方案中加工方法和工艺路线对调度阶段各工序加工机床分配方案、搬运距离以及工件加工顺序的影响, 提出一个集成优化工件各特征加工方法、工艺路线、工件加工顺序以及各工序的机床分配, 以实现制造过程碳排放和最大完工时间最小的多目标集成优化模型; 针对集成优化模型中优化参数较多且相互影响的特性, 提出一种前后相关联的四段式编码方法, 采用 NSGA-II 算法求解, 通过将所得的集成优化结果与先进行面向低碳的单目标工艺规划优化, 再进行面向低碳的多目标车间调度分开优化结果进行对比, 说明提出的集成优化模型可以得到更低的制造过程碳排放和完工时间, 从而验证了集成优化模型的有效性。

175 基于结构功能衍生系数的主动再制造设计

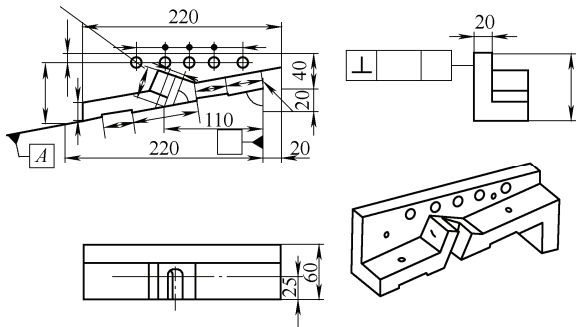


**摘要:** 针对传统产品的关键零部件由于服役时间过长、损伤严重而无法再制造的问题, 提出结构功能衍生系数的概念。通过研究不同设计参数组合下零件再制造性的变化, 建立结构再制造性与设计参数的映射函数模型。并构建衍生系数矩阵及其导数矩阵, 反映设计参数改变对结构再制造性变化及变化趋势的影响, 为关键件的参数优化设计提供依据。提出基于结构功能衍生系数的主动再制造设计方法, 通过参数优化和预设再制造时机下限, 保证产品关键零部件的可再制造性。以 6L240 型号柴油机曲轴为例, 验证该方法的有效性和可行性。

184 面向能效的曲面数控加工刀具路径优化方法

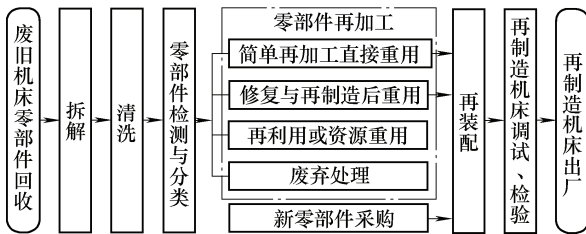


**摘要:** 刀具路径规划是曲面数控加工过程的一个重要环节, 优化的刀具路径能显著提高曲面加工效率, 降低机床能量消耗。通过对刀具路径优化问题的描述及其影响因素的分析, 建立以机床加工效率和能量消耗为目标, 以主轴转速、进给量、机床功率、主轴力矩、加工行距及表面质量为约束的刀具路径优化模型。在模型优化求解过程中, 根据待加工曲面曲率半径、刀具半径及曲面加工后的残留高度, 优化出合理的刀触点间距和加工行距以确定刀触点; 采用自适应模拟退火遗传算法对刀触点连接顺序和方式进行优化运算, 寻求最优刀具路径。通过实例加工和与传统方法的对比, 验证了本文方法的有效性和实用性。



**摘要：**针对数控机床能量源多、能量消耗动态变化复杂的特点，提出了一种基于业务流程模型和符号(Business process model and notation, BPMN)的数控机床多源动态能耗建模方法。依据数控机床不同子系统的功率特性，将其划分为时变能耗单元和非时变能耗单元，分析了其工作状态及耦合关系对数控机床能耗的影响；基于 BPMN2.0 规范，构建了能耗单元工作状态 BPMN 流程模型和 BPMN 耦合模型，提出了能耗单元工作状态能耗数据及耦合关系时序数据与 BPMN 模型的数据集成方法，构建了数控机床能耗多源动态特性模型。以某数控铣床加工过程为例验证了所述模型及方法的有效性。

203 基于 GO 法的机床再制造工艺过程可靠性分析方法



**摘要：**再制造工艺过程的稳定性及可靠性是保证并提高再制造机床可靠性的基础。针对废旧机床回收、拆解、清洗、检测与分类、再加工、再装配以及再制造机床调试检验等再制造工艺过程对再制造机床可靠性的影响，提出机床再制造工艺过程可靠性的概念；在分析机床再制造工艺过程可靠性影响因素的基础上，提出一种基于 GO 法的机床再制造工艺过程可靠性分析方法，并建立机床再制造工艺过程可靠性 GO 图模型及其概率模型；最后，结合某机床再制造企业滚齿机再制造工艺过程，对所提出的方法进行应用验证。



**CONTENTS**

- 1 Time Variant Reliability Approach with Time-variant Interval and Upcrossing Model**  
WANG Pidong ZHANG Jianguo KAN Linjie YANG Lechang
- 10 Sensitivity Analysis on Factors Influencing Motion Reliability of Space Manipulator Based on the Multilayer Mapping Model**  
JIA Qingxuan LI Tong CHEN Gang SUN Hanxu ZHANG Jian
- 20 Multi-state System Reliability Analysis of Space Mechanism in Orbit Based on Performance Degradation and Universal Generating Function**  
KAN Linjie ZHANG Jianguo WANG Pidong WANG Qian
- 29 Dynamic and Experimental Investigation of Gear-rotor System with Multiple Clearances Coupled**  
ZHANG Huibo TIAN Jian ZHOU Jun ZHAO Yang YOU Bindi
- 38 Composite Evaluation Strategy for Complex Objects Parameter Identification**  
LI Wenhao MA Huan ZHANG Heng XIAO Xinxin
- 44 Vibration Characteristics Analysis of Joint with Multiple Clearances in Space Mechanism**  
ZHANG Huibo CHEN Zikun WEI Cheng ZHAO Yang YOU Bindi
- 54 Research on Mitigating the Thermal Preload of Space Manipulator**  
NING Fengping YAO Jiantao AN Jingtao ZHAO Yongsheng
- 61 Friction Performance of Space Machine with MoS<sub>2</sub> Solid Lubrication Coating in Vacuum Environment**  
HAN Jianchao LI Yun GAO Peng YUAN Baofeng TAN Chunlin WANG Long
- 68 Effect of Assembly Situation Variation on Wear of Space Precision Bearings**  
NING Fengping YAO Jiantao AN Jingtao ZHAO Yongsheng
- 75 Friction Torque Modeling of Spacecraft Driving Mechanism Shafting**  
HU Huajun PAN Bo SUN Jing
- 81 Reducing the Joint Parameter Jump during the Operation of the Force/Position Fault-tolerant of End-effector for Space Manipulator**  
CHEN Gang LI Tong JIA Qingxuan SUN Hanxu ZHANG Jian
- 90 Space Robot Reliable Teleoperation Strategy under Large Time Delay**  
LI Wenhao ZHANG Heng MA Huan XIAO Xinxin
- 97 Research on Flexible Compensation Control Strategy for Planetary Surface Sampling Manipulator**  
TANG Ling LIANG Changchun WANG Yaobing JIANG Shuiqing YUAN Baofeng

- 104 Hierarchical Task Planning for Space Manipulator with Multi-constraint**  
WANG Yifan SUN Hanxu CHEN Gang JIA Qingxuan
- 113 Vibration Response Characteristics Research for the Hob Spindle System of High-speed Dry Hobbing under Alternating Impact Load**  
LEI Tao CAO Huajun ZHU Libin YANG Xiao LI Xianguang
- 122 Integrated Optimization of Workshop Layout and Scheduling to Reduce Carbon Emissions Based on a Multi-objective Fruit Fly Optimization Algorithm**  
LIU Qiong ZHAO Haifei
- 134 Timing Decision-making Method with Life Cycle Analysis in Predecisional Remanufacturing**  
KE Qingdi WANG Hui SONG Shouxu LIU Guangfu
- 144 Assessing Carbon Emission of Machine Tool Parts from Life Cycle Perspective and Emission Reduction Strategy Research**  
DENG Zhaohui LÜ Lishu FU Yahui WAN Linlin
- 157 Multi-objective Machining Parameters Optimization for Low Energy and Minimum Cutting Fluid Consumption**  
MA Feng ZHANG Hua CAO Huajun
- 164 Integrated Optimization of Process Planning and Shop Scheduling For Reducing Manufacturing Carbon Emissions**  
LIU Qiong MEI Zhen
- 175 Optimization Design of Predecisional Remanufacturing Based on Structural Function Derivative Coefficient**  
SONG Shouxu WANG Wei KE Qingdi
- 184 Tool Path Optimization with High-efficiency and Low Energy Consumption for Surface CNC Machining**  
LI Li DENG Xingguo SHANG Chuanbo
- 195 A Multi-source and Dynamic Energy Modeling Method of Machining Tools Based on BPMN and its Application**  
YAN Wei ZHANG Hua JIANG Zhigang
- 203 Reliability Assessment Method of Remanufacturing Process for Machine Tools Based on GO Method**  
DU Yanbin LI Congbo LIU Shihao