

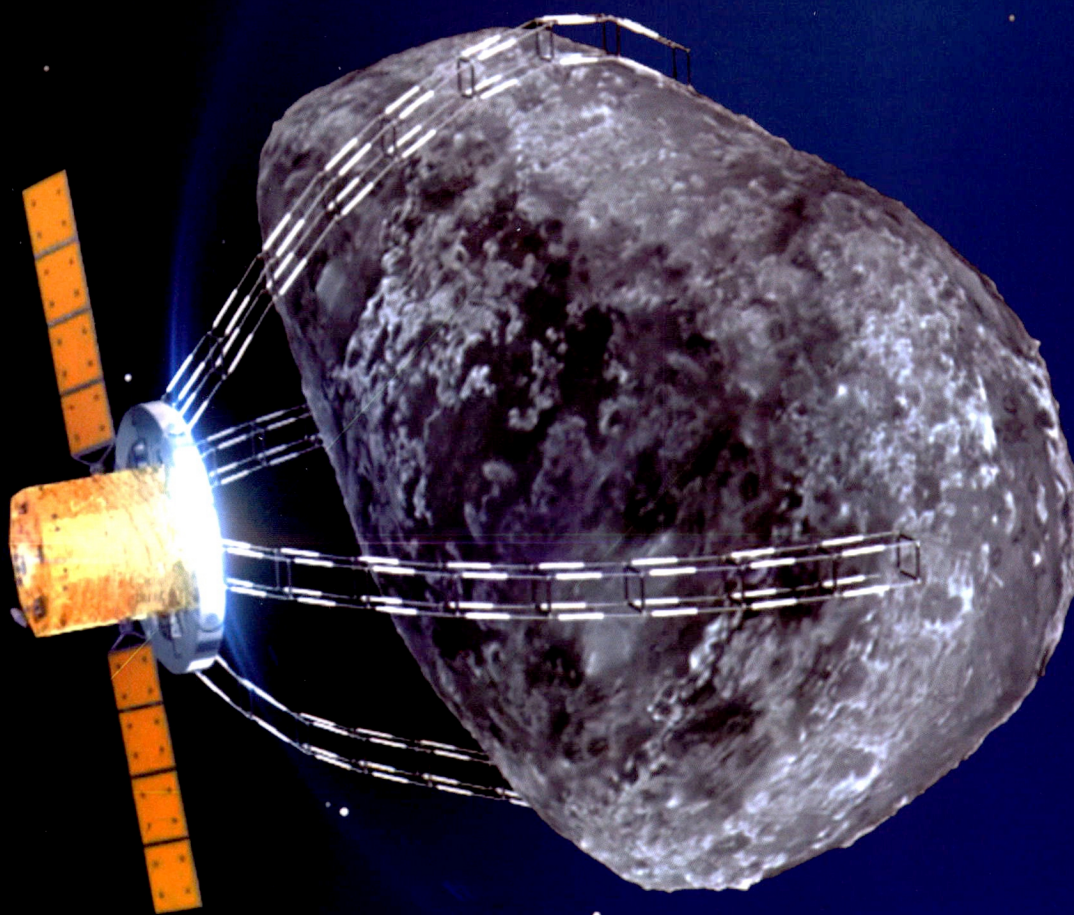


机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

3-DOF索杆桁架式欠驱动机械手运动控制

乔尚岭 刘荣强 郭宏伟 丁戌辰 李 兵 邓宗全



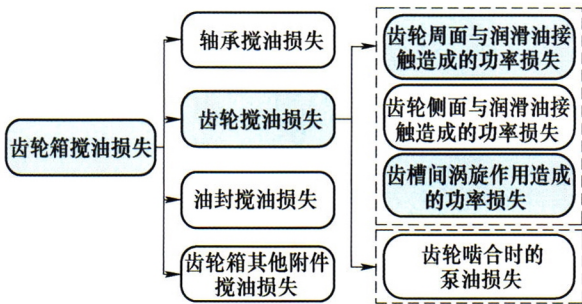
中国机械工程学会 主办

56卷 **23**期 **半月刊**
2020年12月

机器人及机构学

1 齿轮传动搅油功率损失的研究进展

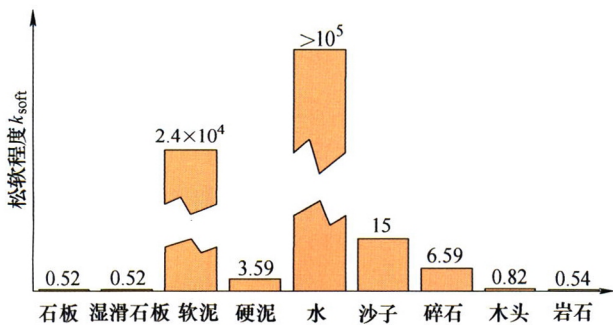
王 斌 宁 斌 陈辛波 吕红明



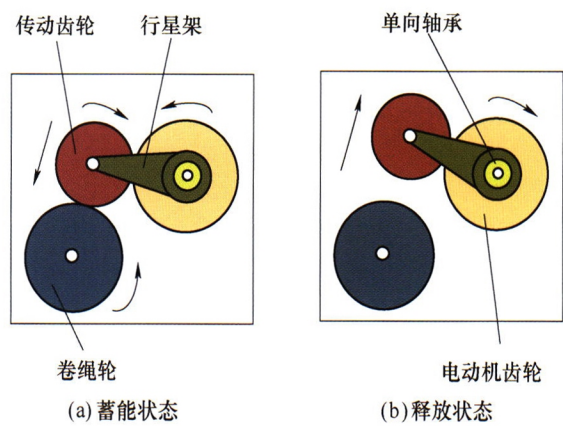
摘要：齿轮搅油损失(Oil churning losses)对传动系统的润滑性能、传动平稳性和节能经济性有着显著的影响。研究齿轮搅油损失的预测和控制方法，对传动系统的优化设计和节能减排有着重要意义。研究表明：高速工况下的搅油损失可达减/变速箱功率总损失的 50%以上，且齿轮搅油损失随润滑环境、几何结构和运动工况条件变化显著。搅油损失机理复杂，涉及因素多，探索齿轮系搅油损失机理和掌握搅油能耗特性的变化规律，是国内外研究的难点和热点。至今已有大量齿轮搅油损失建模研究和应用，但主要都是针对某一特定工况或传动条件下的研究，鲜有全面的、完善的理论来分析搅油损失，因此对齿轮搅油损失进行全面的论述和总结很有必要。结合国内外的研究进展，从理论、仿真和试验三方面来综述齿轮搅油损失各影响因素的定性和定量研究，重点分析了搅油损失建模方法及应用场合，并指出了降低搅油损失的方法。

21 考虑足地作用的足式机器人环境表征与路径规划

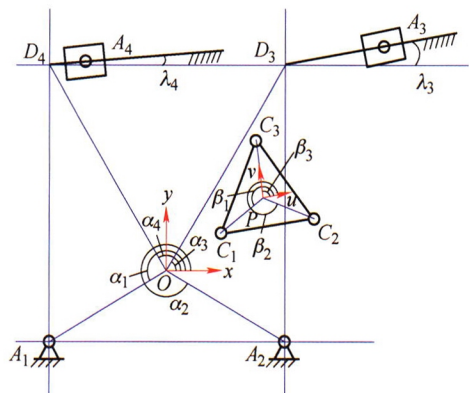
徐 鹏 丁 亮 高海波 周如意 李 楠 邓宗全



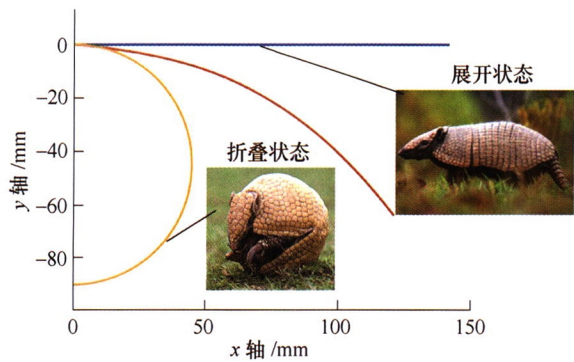
摘要：足式机器人在行走过程中，足端与地面之间的相互作用影响机器人的地面通过情况。足地作用与地表的几何形状和地面的物理特性息息相关，因此仅基于几何特性地图进行路径规划难以满足野外环境下规避松软沙土等非几何危险的需求。针对该问题，考虑足地作用力学提出包含几何与物理特性的环境模型进行足式机器人路径规划。通过简化和统一软硬地面下的足地作用模型，提出表征地面法向松软特性和切向摩擦特性的参数化指标，结合几何特性构建更全面的环境模型。综合考虑影响机器人通过性的地面几何与物理特征，重构路径规划的优化目标，通过图搜索算法实现最优路径规划。以六足机器人 Elspider 为对象进行仿真和试验，验证了所提出的方法能够有效规避非几何危险，实现了更安全、通过性更强的路径规划。



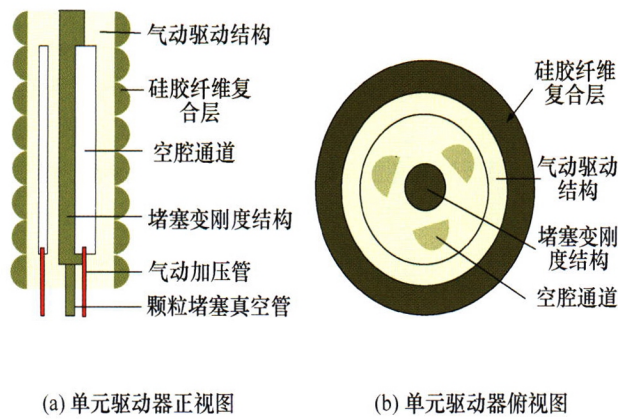
摘要：针对现有跳跃机器人跳跃时空姿态旋转问题，从结构与运动控制上入手，设计一种稳定跳跃型机器人。基于弹簧倒立摆跳跃模型在平行四杆机构的基础上设计了一种新型八连杆机构，并利用离合式行星轮结构设计了一种靠卷绳实现能量蓄积与释放装置。利用拐点圆及最小残差理论对末端轨迹进行了近似直线优化处理，并建立了跳跃结构的运动学、动力学模型，进行了跳跃仿真测试。设计了基于模糊 PID 控制理论的双闭环反馈控制系统，并搭建联合仿真模型从结构动力学及姿态控制系统上进行整体仿真测试。结果表明机器人具备结构上的稳定起跳基础，并通过空中姿态控制实现跳跃后稳定姿态的保持，整体实现了稳定跳跃。



摘要：针对一种含闭环支链的平面结构冗余并联机构进行误差敏感度分析。分析了该机构的逆运动学和正运动学。基于矩阵法建立了机构的误差模型，并通过反解、正解结合的方法对该误差模型进行了验证。基于误差模型，得到了评价机构误差敏感度的指标，绘制了各指标在工作空间内的等值线图。基于误差敏感度指标，定义了低误差敏感性工作空间，绘制了低误差敏感性工作空间在工作空间中的分布图。与平面 3-RRR 并联机构进行了误差敏感度对比分析。结果表明，该机构的低误差敏感性工作空间占比较大，同时可以通过调节其冗余支链不断扩大低误差敏感性工作空间，使机构在大范围空间中保持低误差敏感性。

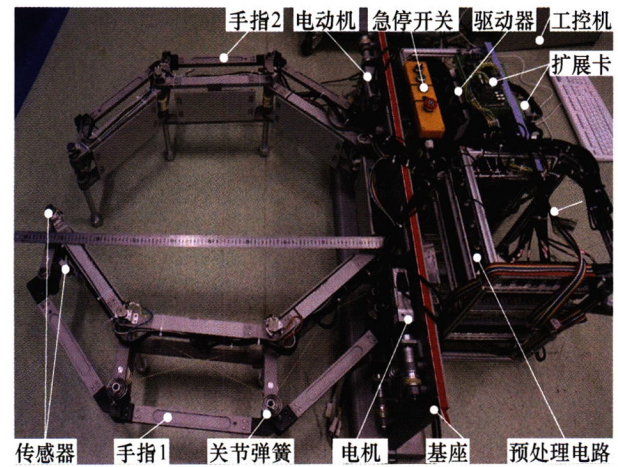


摘要：单自由度八杆仿生机构杆长参数较多，是仿生机器人领域研究的难点之一。为提高设计效率，提出一种构型与尺度同步设计方法。在选定的运动链和机架的基础上，以不等式形式分步给出运动可行性及外形约束条件，使得上一步的杆长可作为下一步求解的已知值。通过该过程，在得到八杆仿生机构构型的同时，快速得到所有杆长的初步可行域。循环上述过程，逐步缩小约束条件的范围，可使得八杆机构的杆长快速接近目标值。在此基础上，分类讨论了连杆搭接顺序、约束条件及基本运动链的差异对求解难度及构型结果的影响。利用所提出的单自由度八杆仿生机构的设计方法，在对初始条件进行合理选取的前提下，可在初步得到构型的同时将杆长限定在较小范围内，实现了构型与尺度的同步设计。该方法还可应用于其他单自由度机构的设计当中，具有较好的借鉴意义。



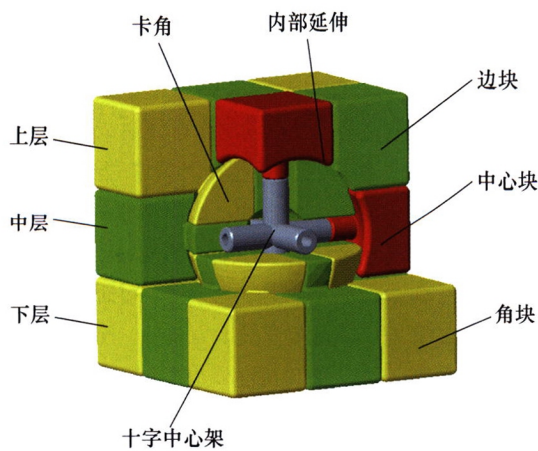
摘要：软体机器人运动时具有高柔性，执行任务时又能展示出强刚度，在军事侦察、灾难救援等复杂环境探索与检测方面具有重要的应用价值。结合主动驱动的网络气动结构与被动驱动的堵塞机构的优势，提出实时变刚度的软体驱动器，研究其变刚度机理和动态建模方法。首先，提出了气动-堵塞机构耦合的软体驱动器模型；其次，利用赫兹接触模型，建立机器人运动数学模型，从理论上研究其变刚度形成机理；再次，利用有限元对气动驱动结构进行分析，研究空腔内压强、形状和大小对软体机器人弯曲角度的影响，并进行了优化；最后，制作了变刚度软体机械臂样机，验证了软体驱动器的变刚度性能与运动性能。该研究有望为变刚度软体机器人设计与刚度调控提供新的理论和技术支持。

78 3-DOF 索杆桁架式欠驱动机械手运动控制

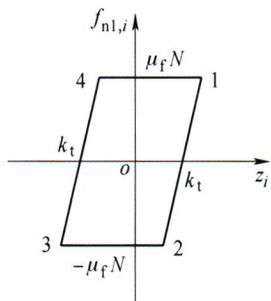


摘要：索杆桁架式机械手是将绳轮传动系统和平行四边形机构结合而提出的一种新型欠驱动机械手。绳索驱动力同时驱动手指关节耦合运动，而手指关节运动又会直接改变绳拉力在各指节单元的驱动力分布，导致索杆桁架式欠驱动系统具有强非线性运动和耦合特点。针对该问题，利用虚功原理，将绳轮传动系统等效为耦合的关节驱动力矩，并建立 3-DOF 手指准静态运动学模型。根据手指最大运动空间约束条件，确定关节弹簧配置分布并开展手指准静态运动空间分析。采用拉格朗日方程法建立手指一般动力学方程，并转换为“A-P”型等效动力学模型。在此基础上，开展预变形阶段运动控制研究。通过仿真分析和样机试验验证所提分析方法和运动控制策略的有效性。

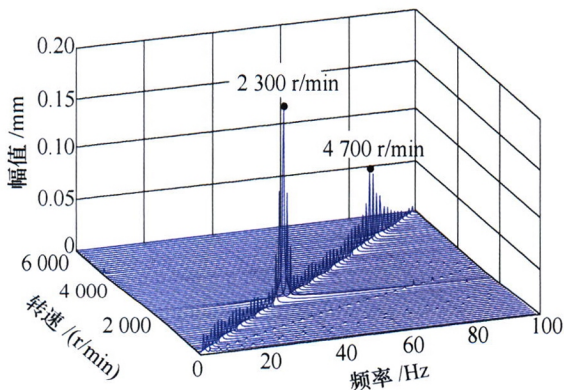
89 三阶魔方机构的拓扑与运动简图



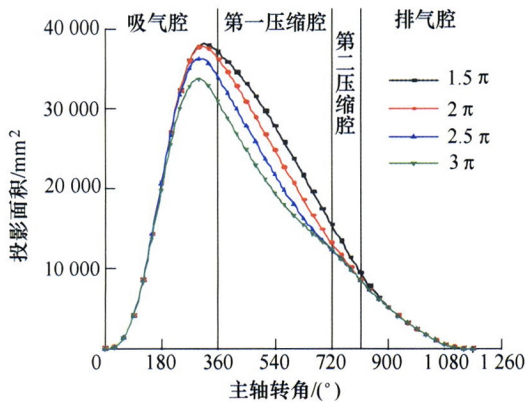
摘要：表面上简单、紧凑的魔方机构，实际上却可以实现着运动的千变万化，这种奇妙的模型远超出了传统机构学的概念和 design 方法。以经典三阶立方体魔方为对象，从建立魔方机构的运动简图突破口探索魔方世界中的机构学问题。分析魔方机构中的构件和运动副，提出了两种新的运动副以描述魔方在运动过程中构件间的连接在可动与相对固定之间切换的问题；提出了正位状态和非正位状态的概念，表达魔方机构在转动过程中构态的变化，用机构拓扑图分别描述该两种构态下构件间的连接关系，采用邻接矩阵反映构件间的位置关系和拓扑特征，从而将魔方机构的图表达转换为数学表达的方法。为将复杂的魔方机构模块化，采取对魔方整体的约束关系进行内外划分并提取魔方运动单元机构的方法，结合抽离出的单元机构子邻接矩阵，以第一卦限单元机构为例，分别建立了正位和非正位状态时外部环路魔方机构的运动简图。研究工作为非传统、变拓扑、多构态、多环路机构的结构分析提供模型，为魔方机构后续的自由度分析与运动特性分析提供模型。



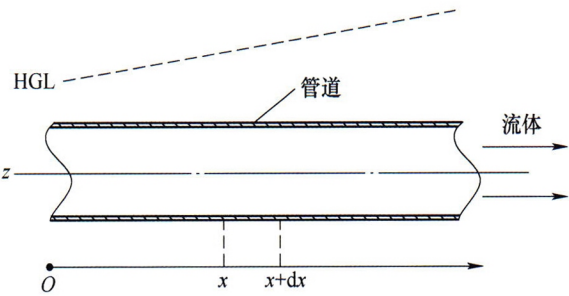
摘要：工程界采用阻尼环抑制飞轮的发射段振动放大和在轨微振动，其抑振机理之一为动力吸振器。受飞轮工作环境的宽域温差影响，阻尼环中采用的黏弹性材料的阻尼和刚度性能将发生变化，破坏有阻尼动力吸振器工作的最优参数条件。针对该问题，进一步研究阻尼环各界面可能存在的干摩擦阻尼的影响机理。建立了黏弹性-干摩擦阻尼环-飞轮系统的多自由度集中参数模型，首先不考虑干摩擦阻尼，根据飞轮系统的有效模态质量确定了黏弹性阻尼环的最优参数；然后以该最优参数为初值，利用遗传算法得到了干摩擦阻尼环和黏弹性-干摩擦阻尼环的最优参数。对比分析了黏弹性阻尼环、干摩擦阻尼环和黏弹性-干摩擦阻尼环在最优参数及非最优参数下飞轮传递到基础的扰动力响应。结果表明，干摩擦阻尼能进一步拓宽黏弹性阻尼环的抑振频率范围，并提高其鲁棒性。



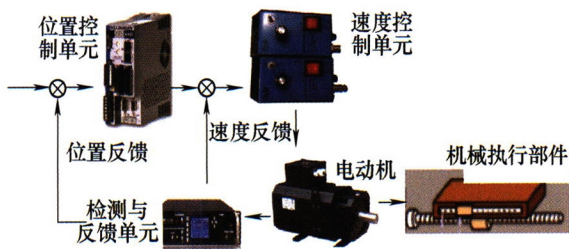
摘要：动力学相似理论广泛应用于大型结构的振动试验，其中畸变相似用于解决结构的设计参数不满足等比例缩放时的相似问题，针对畸变相似关系中幂数为定值导致预测精度低的问题，提出考虑变幂数的畸变动力学相似试验模型设计方法。首先，在敏感性分析与中心差分理论推导的幂数表达式的基础上，将中心差分的范围不断扩大得到一组随相似比变化的幂数。采用最小二乘法将这组幂数拟合为关于相似比的函数并建立相似关系。然后，在多盘转子系统的数值算例中将变幂数法与文献中的两种方法进行对比，结果表明，变幂数法的预测精度较文献中的方法有很大提高。最后，通过试验研究验证了数值算例中动力学模型及临界转速求解的正确有效性。相似关系的建立是以模型的临界转速为基础，因此也验证了数值算例中的相似预测结果。



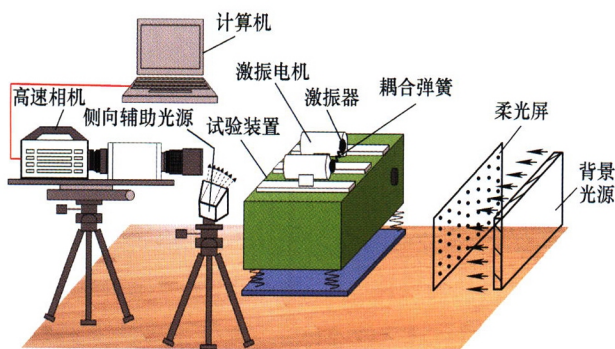
摘要：提出一种由不同基圆半径的圆渐开线组成的新型变截面涡旋压缩机型线，组成形式为圆渐开线Ⅱ+圆渐开线Ⅰ。论述型线的生成方法，给出型线的一般方程，建立一系列圆渐开线变截面涡旋压缩机的几何模型。针对建立的几何模型，分析控制系数 θ 、 φ^* 、 R_{or} 对变截面涡旋压缩机几何性能的影响。以圆渐开线Ⅰ为基础，构建圆渐开线Ⅰ+高次曲线+圆渐开线Ⅰ的变截面涡旋压缩机的几何模型，综合分析两类变截面涡旋压缩机的几何性能。结果表明： θ 取中值 θ_M ， φ^* 取 $\varphi_{end}-2(n_1+1)\pi$ ，控制系数 R_{or} 取较大值，对应的几何性能较优。高次曲线变截面涡旋压缩机与中值 θ_M 对应的圆渐开线变截面涡旋压缩机相似，可相互替代。



摘要：以管道机器人(Pipeline inspection gauge,PIG)为载体的内检测技术是保障油气管道安全运输的重要手段。针对管内高压流体作用下，管道机器人在冲击管内环焊缝过程中产生的动力学行为突变问题。建立了管道周向受限空间中基于 Kelvin 弹簧阻尼的管道机器人密封盘等效动力学模型，结合管道机器人本体建立了多体系管道机器人动力学模型；详细推导了管道机器人轴向振动微分方程，以及管内流体的流动方程；并使用 Matlab/Simulink 与 Adams 进行流固耦合仿真，作为重要的工艺参数之一，研究了管道机器人速度改变时，其在冲击环焊缝过程中的动力学响应情况。结果表明：所建立的密封盘及管道机器人动力学模型能够很好地表征密封盘在管道轴向、径向以及周向的力学特性；运行速度越快，管道机器人通过环焊缝引起的轴向振动越剧烈，冲击振动越明显；而垂向和俯仰振动现象随运动速度增大而显著减弱。

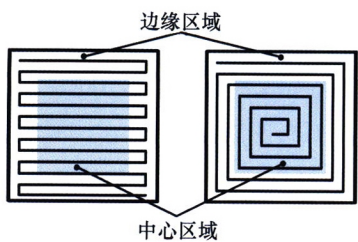


摘要：制造设备故障智能诊断与维护是保障制造系统安全运行的重要手段。为准确地诊断制造设备的健康状态、识别设备故障的关键因素，建立高效的健康维护系统，提出了基于脆弱性的设备故障智能诊断与维护方法。该方法将考虑脆弱性的设备故障智能诊断与维修决策模块嵌入到设备的过程控制系统(Process control system, PCS)中，它基于系统脆弱性的定义和性能劣化理论建立了设备脆弱性评估模型实时判断设备的脆弱状态，利用非线性核映射方法实时监测制造设备的运行参数是否超出预设边界，建立设备参数的高斯核函数模型准确识别故障的关键因素，将设备的脆弱性状态与维护模式相结合建立维修决策模型避免维修过度和维修不足。以某机器人的伺服系统为例,证实了所提方法能有效提高故障诊断效率、智能化诊断故障因素，优化设备维修决策。

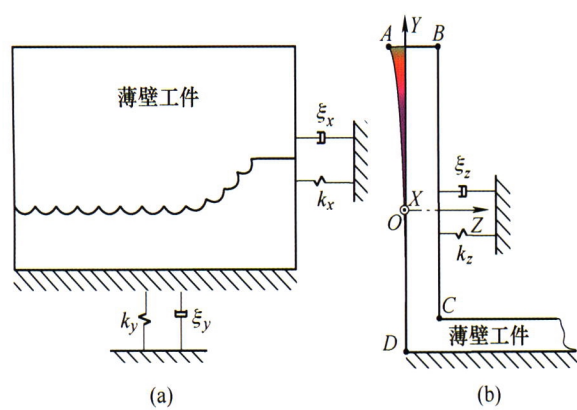


摘要：随着振动系统逐渐朝着大型化、重型化的方向发展，大激振力振动系统是未来发展一个较热的趋势。基于这一特殊背景，提出了非线性(拉簧)耦合同向回转的双偏心转子振动系统及其同步问题。首先基于拉格朗日方程建立了系统动力学方程;随后采用运动分离法建立系统慢变参数的积分方程，推导出了系统实现同步的同步条件和稳定性准则;其次，通过数值分析研究了系统结构参数对系统同步能力及同步特性的影响;继而，采用龙格库塔法建立了非线性耦合同向回转的双偏心转子振动系统的机电耦合仿真模型，开展了系统的同步状态与系统机电耦合的动力特性的仿真分析;最后设计了相关试验装置，开展了同步试验测试。研究表明，系统的同步行为主要受拉簧和支撑弹簧的刚度系数、激振电机的位置参数等的影响;激振电机的相位差随着拉簧刚度系数的增加逐渐稳定在零度附近，相应地系统同步状态从反相同步逐渐变成同相同步，理论研究和试验结果能较好吻合。所有研究为研发高效节能的大型振动机械提供指导作用，同时研究成果也对振动同步领域共性问题的解决具有促进作用。

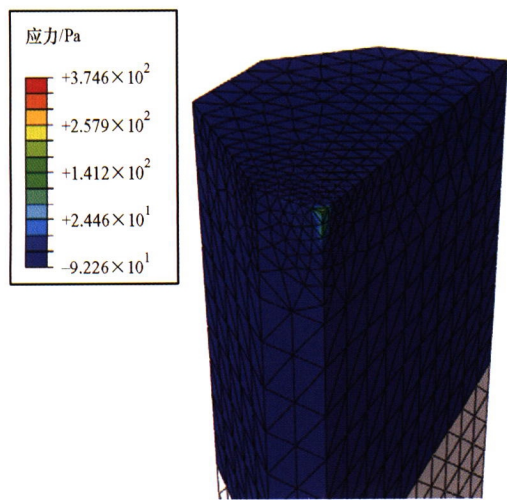
/// 数字化设计与制造 ///



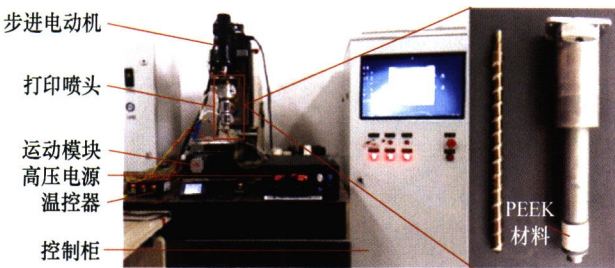
摘要：在工业生产中，喷涂是重要的加工过程，喷涂机器人已经广泛应用于喷涂行业，但复杂工件的内表面喷涂还多依赖人工完成。针对多腔室多障碍的大型构件内壁的喷涂，提出一种新型九自由度喷涂机器人。根据多腔室多障碍大型构件的结构特点，按功能将此机器人结构划分为工作定位装置、工作执行装置和辅助支撑装置;基于 D-H 参数法，建立此机器人的数学模型，进行正解的求取;给出一种冗余机器人计算反解的方法:根据喷涂不同方位的腔壁对前三个关节进行角度预设，从而保证喷涂目标面处于工作执行装置的灵活工作空间;根据关节 7 工作空间的特性，采用正向求解和逆向求解分别得到关节 7 的位置坐标，并反推关节 6 的位姿，进而得到其他关节角度值完成反解。此求解方法得到的反解能够保证机器人在对同一壁面喷涂时具有相似的构型姿态，解决了反解过多、求解难度大、解筛选困难的问题，极大地提高反解的求解速度。



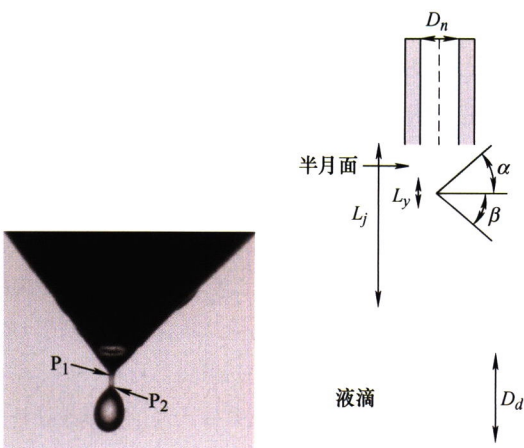
摘要：为减小加工振动对薄壁件平铣(端面盘铣)加工质量及效率的影响，提出一种实时铣削振动数据驱动平铣工艺参数自适应优化方法。首先根据再生效应原理建立薄壁件平铣颤振稳定性模型。其次将薄壁件平铣过程中前一个工步内的实测振动数据分为若干段，以此模拟其材料去除过程，对各段铣削振动数据进行分析，由有限元单位力法和优化 STD 法分别识别出薄壁件刚度和各材料去除阶段模态频率及阻尼比，并由此导出薄壁件单模态频响函数，将其代入颤振稳定性模型求解稳定域叶瓣图并做插值处理后即可确定包含材料去除信息的薄壁件三维颤振稳定域叶瓣图。基于此，以避免铣削颤振、共振和满足机床性能要求为约束条件，以材料去除率最大为目标，利用遗传算法计算薄壁件下一个工步较优的工艺参数，如此循环进行，直到完成薄壁件加工。最后，通过某型飞机垂尾薄壁装配界面平铣试验验证该方法的可行性和有效性。由试验结果可看出，采用优化后的加工工艺参数，能使薄壁装配界面粗加工过程表面粗糙度从 $Ra\ 3.2$ 提升为 $Ra\ 1.6$ ，加工效率提高 33%。



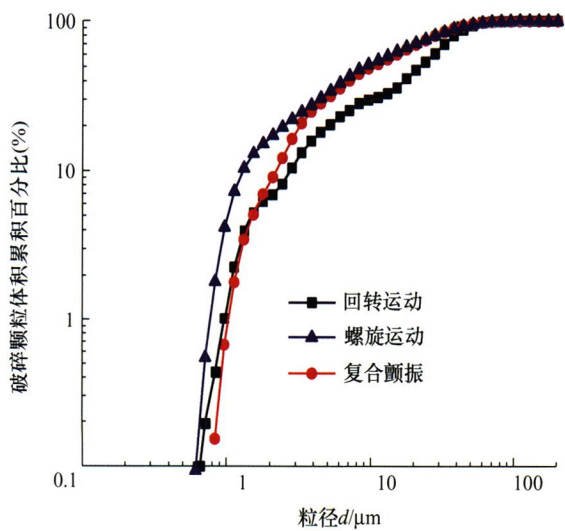
摘要：现阶段，尖端装备对高精密复杂微型结构件的需求越来越大，微铣刀的专用化需求挑战着刀具设计的灵活性和准确性。目前，微铣刀设计领域存在以下问题：由于尺度差异导致传统铣刀设计方法已不再适用、切削工艺优化过程与刀具设计过程相分离。针对以上问题开展了微铣刀设计方法的研究，并开发了微铣刀参数化设计系统。首先基于 UG/Open 平台建立了微铣刀三维模型样板文件并对其几何特征进行解构，通过表达式功能串联刀具几何特征，借助程序编程实现驱动，完成微铣刀三维模型的快速设计；最终基于 UG 二次开发平台，以加工需求为驱动，以工件材料、加工结构、加工工艺等多种因素限制为约束条件，通过刀具设计特征，将刀具的设计参数与切削效果结合起来，开发了微铣刀参数化设计系统。



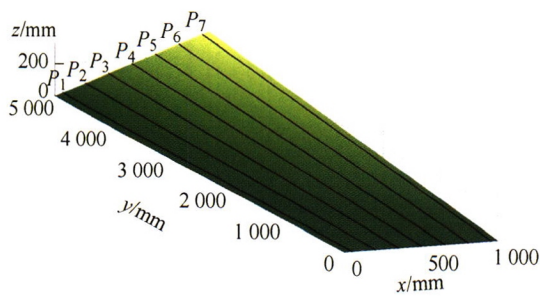
摘要：针对当前聚合物基复合材料 (Polymer matrix composites, PMC)成型存在打印分辨率低、打印材料受限、成型结构较为简单、工序复杂等方面的不足和局限性，尤其是还面临难以实现宏/微结构跨尺度高效制造的挑战性难题，提出一种基于电场驱动熔融喷射 PMC 高分辨率 3D 打印新工艺。阐述了基于电场驱动熔融喷射 PMC 高分辨率 3D 打印的基本原理和工艺流程。通过试验，揭示了主要工艺参数 (碳填料含量、施加电压、螺杆转速、打印速度、加热温度等)对于打印件分辨率(精度)和质量的影响及其规律。利用自主搭建的试验平台，并结合试验优化的工艺参数和提出的两种打印模式，实现了多层石墨烯/聚乳酸(Polylactic acid, PLA)和多壁碳纳米管/PLA 复合材料微尺度三维网格、多层石墨烯/PLA 大高宽比薄壁圆环、多壁碳纳米管/PLA 复合材料柔性导电网格以及其他聚合物复合材料 3D 结构典型工程案例的制造。研究表明，提出的电场驱动熔融喷射 3D 打印能够实现高分辨聚合物基复合材料成型(使用内径 300 μm 喷嘴，实现了分辨率为 40 μm 的 PMC 特征结构制造)，而且还具有大面积宏/微结构跨尺度集成制造的优势。



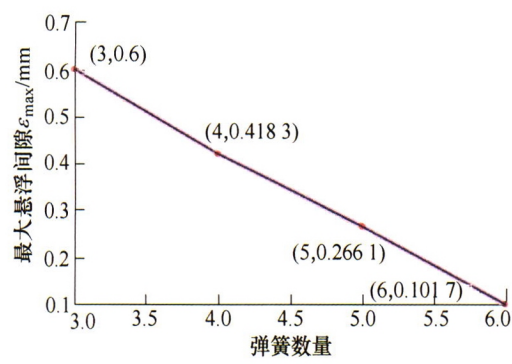
摘要：微滴喷射增材制造技术作为制造领域的新兴前沿技术有着广泛的应用前景，微滴生成特性对增材制造中微滴在基板铺展、搭接、凝固等过程影响较大，研究微滴生成特性对于提高液滴生成尺寸、频率和稳定性有重要意义。通过试验研究气动按需喷射作用下的微滴喷射行为，探究喷嘴尺寸、黏度和供给压力等因素对射流断裂过程及液滴生成稳定性的影响关系，并进一步研究形成角的变化对液桥断裂顺序及卫星液滴产生的影响关系。研究表明，随着喷嘴直径减少，韦伯数(We)显著减少，当喷嘴直径减少到 100 μm 时， We 变为 0.33，液滴尺寸与喷嘴直径的比值急剧增大；随着黏度的增加，射流颈缩段的液桥显著增长，液滴尺寸明显增大。在保证生成单个液滴的压力条件下，当供给压力较小时，液桥两端先后断裂形成卫星滴，并最终与半月面融合；随着压力的增大，液桥只发生一次断裂，剩余射流回缩到喷嘴内。在气动式喷射方式中由于上形成角始终大于下形成角，所以液桥总是在靠近液滴端首先断裂，该研究结果有助于提高气动式微滴喷射装置的液滴生成质量。



摘要：球磨过程中介质群运动状态变化对物料的破碎效率影响极大，通过对介质群运动状态进行区域划分，探究不同球磨工况下的介质群运动区域特征更能有效揭示介质群对物料的破碎方式和有效破碎区域。针对理论划分介质群运动区域过于理想、单一，试验追踪法成本过高的问题，提出了一种介质群运动区域划分的新方法—EDEM 网格划分法。首先把筒体的横截面划分为若干个微元，利用数理统计的方法得到介质群位置概率分布函数，获取介质群运动速度区域分布图和碰撞特性区域分布图。然后给出了回转运动、螺旋运动及复合颤振运动三种工况下介质群运动区域的划分实例，并与试验追踪法对比，验证了 EDEM 网格划分法的准确性和有效性。最后通过粉磨试验中进料的破碎速率和微细颗粒产率探讨了介质群运动区域特性对颗粒的破碎方式和有效破碎区域的影响效果。本研究为优化球磨过程的影响因素和操作参数提供了一种快捷、有效的方法。



摘要：自动铺带技术是一种增量制造技术，适用于制造翼面、壁板等大尺寸、小曲率复合材料构件，具有加工成本低、效率高等特点。轨迹规划是自动铺带技术的关键环节，它直接关系到复合材料构件的成型精度与质量。现有的自动铺带轨迹规划方法难以便捷兼顾调控铺放间隙与防止铺放褶皱，保证铺带产品的最终质量。有鉴于此，提出了一种基于近似测地线的分层次铺放轨迹规划方法。主要目标是合理利用预浸带允许变形能力，在防止铺放褶皱产生的前提下，保证相邻带料不产生覆盖，且间隙不超过 2.5 mm。首先，研究了铺放间隙的产生与演化规律，给出了几种典型曲面上初始铺放间隙的优化方法。接下来，提出了近似测地线的数学模型与求解格式。然后，基于铺放褶皱的产生机制与铺放间隙的演化规律，确定了近似测地线的测地曲率大小与符号。最后，在双曲面模具以及自由曲面模具上验证了所提出方法的有效性。



摘要：针对可变流道栅板密封，以外凸变形的流道侧壁为边界条件，建立了栅板密封在弹性元件预紧力作用下适应流道侧壁变形的理论分析模型。基于合理假设，通过分析桥接元件和栅板工作状态，指出栅板密封存在泄漏间隙和悬浮间隙；提出了工作状态下栅板密封间隙大小及分布的计算方法，为研究栅板密封流固热耦合问题提供了几何边界条件；分析了栅板厚度、桥接元件刚度和弹簧参数等对栅板密封随动效果的影响，指出泄漏间隙随栅板厚度减小而单调减小，悬浮间隙随桥接元件弹性模量和截面惯性矩减小而减小，并随弹簧刚度或数量的增加而线性减小。

CONTENTS

1	Research Progress in Churning Losses of Gear Transmission
	WANG Bin NING Bin CHEN Xinbo LÜ Hongming
21	Environmental Characterization and Path Planning for Legged Robots Considering Foot-terrain Interaction
	XU Peng DING Liang GAO Haibo ZHOU Ruyi LI Nan DENG Zongquan
34	Design and Attitude Control of a Stable Jumping Robot
	CHEN Ziming LU Jie DENG Peng GUO Yu LI Yanwen
45	Sensitivity Analysis of a Planar Parallel Manipulator with Kinematic Redundancy
	LI Guanming QU Haibo GUO Sheng
58	Integration Design Method of Configuration and Dimension for One DOF Eight-bar Bio-inspired Mechanism
	ZHANG Ziqiang LIAO Jinnong ZHAO Jing WANG Lun
67	Design and Testing of a Soft Robot with Variable Stiffness Based on Jamming Principles
	XU Fengyu JIANG Quansheng JIANG Fengyou SHEN Jingjin WANG Xingsong JIANG Guoping
78	Motion Control of 3-DOF Under-actuated Cable-truss Robotic Hand
	QIAO Shangling LIU Rongqiang GUO Hongwei DING Shuchen LI Bing DENG Zongquan
89	Topology and Motion Diagram of the Third-order Cube Mechanism
	LU Wenjuan WU Huafang LIU Tianlu ZENG Daxing
98	Design of Viscoelastic-dry Friction Damping Ring for Micro-vibration Suppression of a Flywheel
	HE Xiaodong HUANG Xiuchang HUA Hongxing
107	Design Method of Distorted Dynamics Similitude Test Model Considering Variable Power and Experimental Study
	LI Lei LUO Zhong HE Fengxia ZHANG Wendi

118 Comprehensive Analysis of Geometric Performance of Circular Involute Variable Thickness Scroll Compressor
ZHANG Pengcheng PENG Bin ZHANG Yubo

129 Dynamic Modeling and Analysis of Pipeline Inspection Gauge Passing Girth Welds Considering Fluid-solid Coupling
ZHANG Hang CUI Can LIAO Ningsheng ZHANG Shimin

141 Fault Diagnosis and Maintain of Manufacturing Equipment Based on Vulnerability
GAO Guibing WANG Junshen YUE Wenhui PENG Jianhua

150 Synchronization Behavior of Two Co-rotating Rotors in a Nonlinear Coupled System
DU Mingjun HOU Yongjun WU Yi YU Cheng HOU Duyu

165 Design and Kinematics' Analying of a Series Nine-degree-of-freedom Spraying Robot
QI Youquan LI Yanwen CHEN Ziming KONG Fandong YANG Xiaokun ZHU Weiguo

172 Real-time Machining Vibration Data Driven Milling Process Parameters Adaptive Optimization
ZHAO Xiong ZHENG Lianyu FAN Wei YU Lu

185 Research on Parametric Design System of Micro-mills
CHEN Ni YAN Bo YUAN Yuan LI Liang HE Ning

193 High-resolution 3D Printing of Polymer Matrix Composites Based on Electric-field-driven Fusion Jetting
YANG Kun ZHANG Guangming LI Xiaoqiang YANG Jianjun PENG Zilong LAN Hongbo

203 Study on the Kinetic Characteristics of Droplet Formation in Pneumatic Microdroplet Injection
LIU Zhaomiao ZHONG Xixiang YANG Gang PANG Yan REN Yanlin XU Yuandi GAO Shanshan

212 Study on the Method of Dividing Media Motion Region in Ball Milling
LIANG Man SUN Weihong SUN Yi XIANG Jingcheng

226 A Multi-level Trajectory Planning Method Based on Quasi-geodesic for Automated Tape Placement
ZHANG Peng YIN Lairong ZHOU Zhenhua HUANG Long

239 Wafer Seal Servo Model under Distorted Engine Panel
LI Hongju LIU Ying HUANG Weifeng LI Guozhi MI Jie LAI Hanrong

《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) 潘际銮 (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) 张崢 (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



9 770577 668200