



36
A2

机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：微纳能源与传感

客座编辑：张弛 研究员



中国机械工程学会 主办

万方数据

2020年56卷13期 半月刊

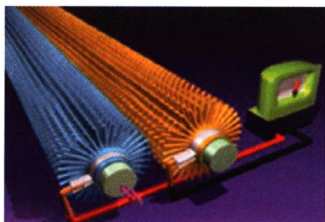
特邀专栏

微纳能源与传感

客座编辑：张弛 研究员（中国科学院北京纳米能源与系统研究所）
策划编辑：岑伟（《机械工程学报》编辑部）

1 微纳振动能量收集器研究现状与展望

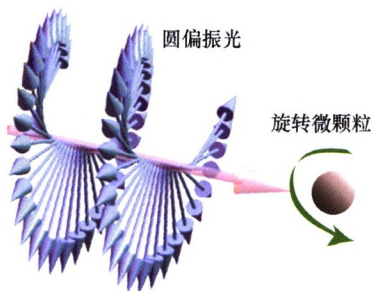
亓有超 赵俊青 张弛



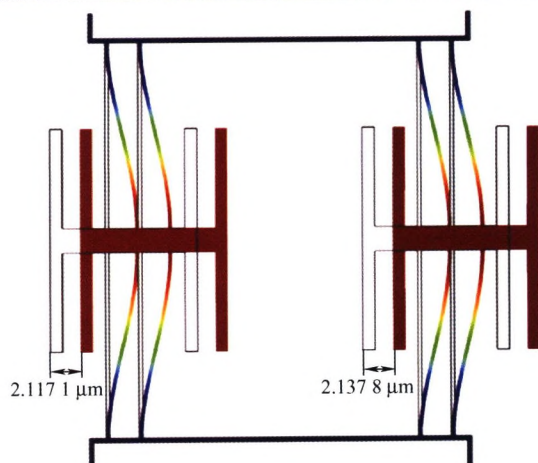
摘要：振动能量广泛分布在我们周围的环境中，比如人体运动、机器振动、微风吹动、水纹波动、声音振动等，收集环境中的振动能量对未来电子器件的自驱动化具有十分重要的意义。阐述了电磁、压电、摩擦电三种微纳振动能量收集器的工作机理和最新研究进展。对三种微纳振动能量收集器的特点和面临的挑战做出了归纳与概括。最后，对微纳振动能量收集器的发展趋势做出了展望。

16 基于光阱力的新型传感技术

路阔 李青松 周鑫 李兰 吴宇列 吴学忠 肖定邦



摘要：光场具有力学效应，光力效应是指当光子与机械振子发生相互作用时能够改变机械振子动量和角动量的能力。基于光阱力的传感技术是利用光动量以及光角动量与光场中物体相互作用产生的光势阱，通过光阱力实现对微小粒子的动力学操控和运动状态监测的新型传感技术。由于光力传感系统具有衰减时间长、检测灵敏度高、精度高、系统体积小等突出优势，在众多前沿领域中发挥着重要的作用，具有极大的发展潜力，成为近年来交叉学科研究的新热点。首先介绍了光力效应的发展历史和光阱力的基本作用原理；然后分别介绍了光阱力在基础物理、量子物理、超高速旋转、生物技术、惯性传感、极微弱力及力矩测量等领域的典型应用；最后总结了国内研究现状，分析了国内外差距和基于光阱力的传感技术的发展特点，提出了下一步我国发展新型光力传感技术的建议。



摘要: 模态局部化现象由诺贝尔奖获得者 ANDERSON 于 1958 年发现,对理解在紊乱固体中的电子传递过程具有重大意义,是固态物理领域的重要发现。近些年,模态局部化现象开始应用于传感器设计。模态局部化传感器以不同谐振器之间的幅值比作为输出量纲,实现了超高灵敏度的测量。揭示了振幅比与振动系统结构之间的关系,解释了如何提高模态局部化传感器的灵敏度。并通过典型的模态局部化传感器设计案例,给出了模态局部化传感器的设计规则。

41 煤机设备无线自供电状态监测系统

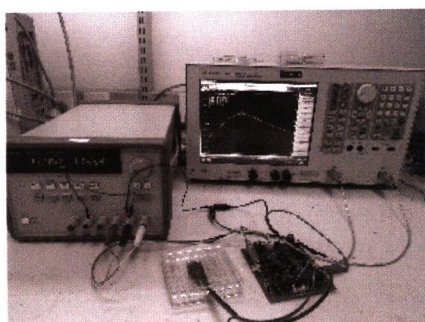
高扬 穆继亮 何剑 陈鸿 穆锦标 安站东 赵新平 丑修建



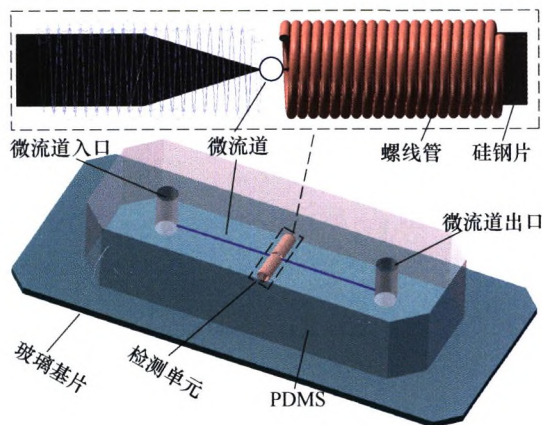
摘要: 针对当下煤机设备状态监测系统时效性差、通信电缆铺设困难、需要定期更换电池等问题,提出了一种基于无线传感器网络与自供电技术的监测系统设计方法。系统由能量采集模块、无线传感器网络及监测上位机组成,通过能量采集模块收集煤机设备振动能量为节点电路供电,采用无线传感器网络与上位机实现设备关键状态信息的采集、传输与处理。测试结果表明,系统可在 30 m 有效范围内实现对煤机设备运行状态的实时监测,能量采集模块最大输出功率可达 378 mW,能够有效收集设备振动能量实现系统能源自供给。

50 基于 Duffing 系统的谐振式微悬臂梁传感器微弱谐振信号检测

戴 荣 于海涛 王 权



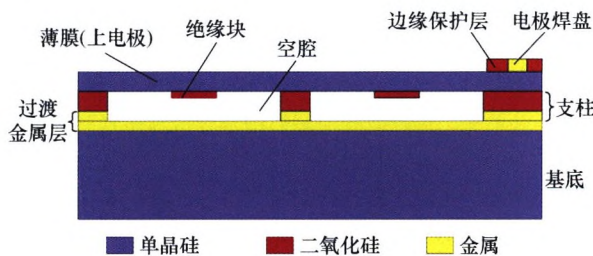
摘要: 研究了基于 Duffing 振子系统的微弱信号检测在谐振式微悬臂梁传感器中的应用。根据待测信号频率的不同,通过时间尺度变换建立了任意频率下的 Duffing 振子数学模型。利用 RHR 改进算法求解最大 Lyapunov 指数,并确定系统相变临界阈值,通过监测最大 Lyapunov 指数符号的变化来检测微弱谐振信号。详细介绍了两种幅值检测算法,通过试验验证了减法算法比加法算法更具优越性,不受大范围幅值的影响。评价了 Duffing 振子系统在不同噪声水平下检测微弱谐振信号的能力,添加噪声方差 0.000 1 和 0.001 后,检测相对误差控制在 0.005 2% 以内;当添加噪声方差到 0.01 时,原有 Duffing 方程模型无法检测到最大 Lyapunov 指数符号的变化,检测失效。最后,通过改变原有 Duffing 方程非线性恢复力项系数,在添加噪声方差到 0.5 时,依然能够通过求取所测信号频率的平均值准确提取微弱谐振信号。



摘要: 为丰富螺线管型传感器对液压油污染物的检测内容, 提出并制作一种基于微流体芯片的对置螺线管型多功能检测传感器。理论推导了对置螺线管线圈的金属颗粒电感检测模型和非金属颗粒电容检测模型。为进一步提高检测灵敏度, 试验对比分析了硅钢片对对置螺线管线圈的电感检测和电容检测的灵敏度。试验结果表明, 硅钢片能够显著提升对置螺线管线圈的金属颗粒检测灵敏度, 60~70 μm 铁颗粒和 160~170 μm 铜颗粒的检测信噪比分别提升 127.44%、222.07%, 也能提高对置螺线管线圈的非金属颗粒检测灵敏度, 但不显著, 140~150 μm 水滴和 240~250 μm 气泡的检测信噪比分别提升 21.92%、7.95%。该研究对提高螺线管型传感器的液压油污染物检测能力提供了技术支撑, 对液压系统健康状态监测以及故障诊断具有重要意义。

67 基于共晶键合技术的 CMUTs 结构与试验测试

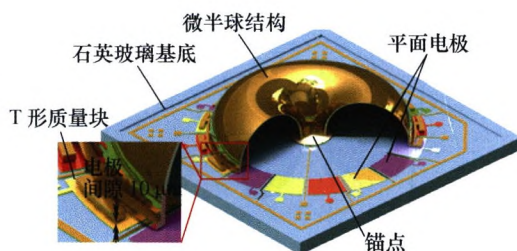
李支康 赵立波 赵一鹤 李杰 郭帅帅 罗国希 徐廷中 刘子晨 李雪娇 蒋庄德



摘要: 电容式微加工超声换能器(Capacitive micromachined ultrasonic transducers, CMUTs)在超声成像与治疗、3D 超声姿态识别等领域具有广泛应用需求。将 CMUTs 与 ICs 进行集成是减小寄生电容、提高信噪比的重要途径, 然而目前基于熔融键合的 CMUTs 制备技术需要高温条件(>1 000 $^{\circ}\text{C}$), 无法实现与 ICs 的集成制备。开发基于共晶键合的 CMUTs 制备工艺是解决上述问题的有效途径。针对该低温工艺, 设计了圆形和正六边形空腔 CMUTs 单元及相应的阵列结构, 利用有限元仿真和理论公式分析了 CMUTs 结构的塌陷电压、谐振频率以及其薄膜在热应力、大气压力条件下的变形。分析结果表明 CMUTs 塌陷电压及谐振频率在预期范围内, 其薄膜在热应力、大气压力作用下不会发生塌陷。对所制备的 CMUTs 芯片的形貌、结构尺寸、电容以及阻抗频率特性开展试验研究。结果表明芯片形貌、结构参数、电容以及阻抗频率特性与设计预期一致, 芯片能正常工作; 测试结果验证了 CMUTs 结构与制备工艺的可行性。这些研究对进一步实现 CMUTs 与 ICs 的集成设计与制备提供了基础。

77 微半球振动陀螺的装配误差分析与精密微调机构设计

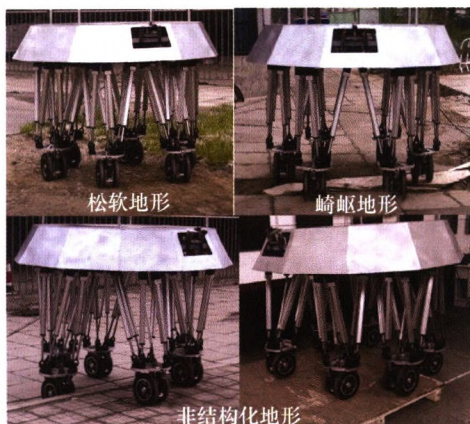
席翔 肖定邦 李微 卢坤 石岩 袁超 吴学忠



摘要: 分析了微半球振动陀螺的装配误差形成机理, 对装配精度要求进行了计算。在微半球结构锚点直径为 1 mm 的情况下, 要保证装配间隙均匀度小于 10%, 锚点面的高度偏差需要小于 0.1 μm 。通过数值计算和有限元模型, 分别研究了装配误差对电极驱动能力、静态检测电容、静电刚度调节能力, 以及 1 阶模态振型的影响。计算结果表明, 电极间隙不均匀对检测、驱动和静电刚度修调能力的影响分别呈 1、2、3 次方关系, 同时会引起微幅的结构偏摆。为提升电极装配间隙均匀性, 设计了一种基于柔性缩小单元的微位移调节机构。该机构利用螺旋调节旋钮和柔性垫块, 使石英玻璃基底产生 2 自由度微幅摆动, 从而实现较高精度的装配。测试结果表明, 微半球振动陀螺装配后平均电容误差约为 30%~40%, 但引入了较大的寄生电容, 消除该影响后, 电容平均误差为 12%。

84 基于异形 Stewart 平台的电动并联式六轮足机器人

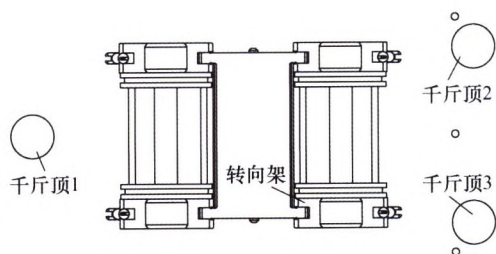
王修文 汪首坤 王军政 陈志华 徐康 刘道和



摘要: 针对现有的机器人承载能力不足、复杂环境下适应能力弱以及运行速度慢等特点, 创新性地提出了一种基于异形 Stewart 平台的电动并联式六轮足机器人, 该机器人集成了轮式运动与足式运动的优点, 可实现轮式、足式以及轮足复合式运动。首先, 对机器人的机械结构与控制系统进行设计, 然后, 为了实现在复杂环境下稳定的行走, 足式上设计三足“对角步态”、“两足步态”和“单足步态”的稳定行走算法, 实现了机器人稳定且匀速行走; 设计了一种在足式步态中调整“支撑项”与“腾空项”占空比的控制算法, 克服了足端与地面接触瞬间对机身整体速度带来的影响。轮式运动设计了 6 轮协同控制, 具备 6 轮独立驱动、独立转向等功能。轮足复合式运动模式下具有变高度、变支撑面、变轮距等功能。通过对电动并联式六轮足机器人多种运动模式进行试验, 结果验证了电动并联式六轮足机器人性能的优越性以及控制算法的有效性。

93 一种基于多并联单元协同工作均载稳定平台的设计与分析

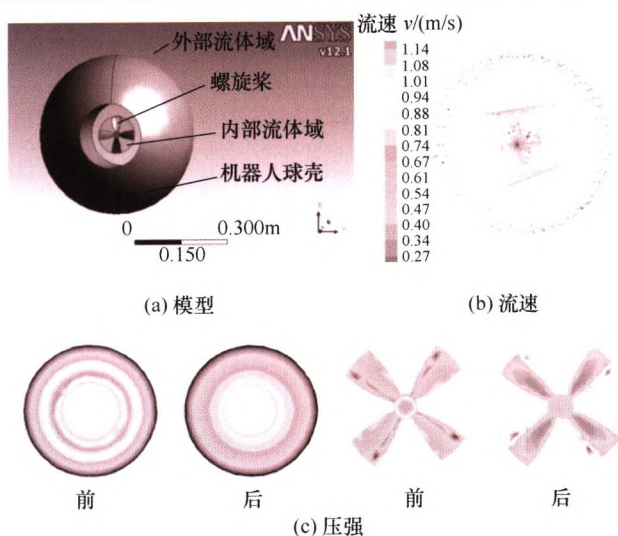
杜安 郭盛 陈亚琼



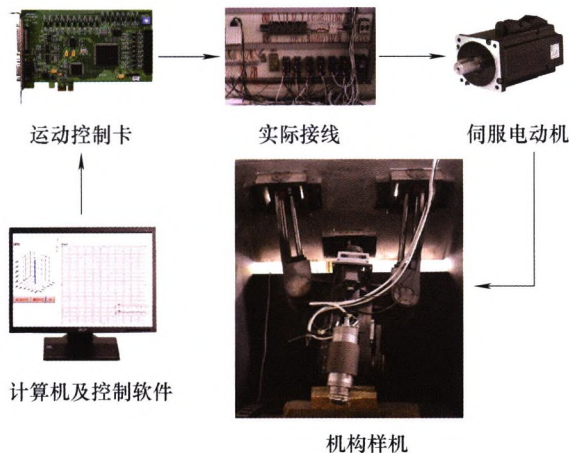
摘要: 以 6-PUS 并联机构为基本单元, 设计一种多并联单元协同工作均载稳定平台。建立均载稳定平台在特定工程问题下的受力模型, 并进行分析, 证明利用均载稳定平台可以有效改善冲击力对系统的破坏。对于构成均载稳定平台的 6-PUS 并联单元, 进行位置逆解的推导分析与仿真验证。运用旋量法对并联机构的运动学进行理论推导, 并通过雅可比矩阵给出驱动的速度、驱动力与动平台的速度、外载力之间的映射关系。针对经过改良的新型刚柔混合 6-PUS 并联机构进行冲击力学响应分析, 验证刚柔混合构造对于抵抗冲击力具有显著优势。最后, 分析了均载稳定平台在存在外部干扰和力控制延迟时模型的有效性。

103 小型球形水底观测机器人设计分析与实现

李艳生 孙汉旭



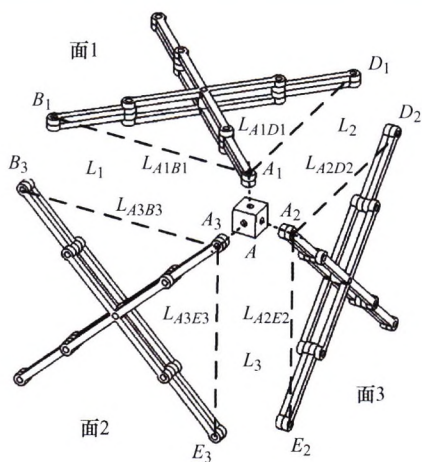
摘要: 面向水底信息获取和环境观测需求, 基于球壳壳体抵抗水压能力强, 转动水阻力小, 便于姿态控制特点, 提出球形水底观测机器人构型, 由螺旋桨推进、姿态调节和复合滚动装置组成欠驱动六自由度水下移动平台, 球壳作为密闭舱保护内部电子器件, 结合重摆以滚动形式实现水底滚动。通过对机器人体流体力学仿真计算出水动力系数并建立水下动力学方程, 进一步对机器人的螺旋桨推进、飞轮转向和球壳滚动进行分析, 得出球壳优化尺寸以及飞轮匹配惯量和球壳滚动特性。基于球形机器人水下移动平台和地面监控软件的水底观测系统架构, 研制出球形水底观测机器人原理样机, 结合机器人的构型和运动特点制定出降落、滚动和调姿三段式水底运动观测策略, 水池试验表明设计的球形水底观测机器人水中推进速度可达到 1.4 m/s, 水底移动速度可达到 0.5 m/s, 姿态调节速度可达到 30°/s, 能够实现水底图像采集, 辅助岸上科研人员执行水底观测任务。



摘要: 动力学建模和性能分析是并联机器人设计中的研究重点。以 2-UPR-RPU 三自由度并联机器人(U: 虎克铰, P: 移动副, R: 转动副)为研究对象, 采用螺旋理论对其进行动力学建模与性能分析。基于闭环矢量法建立 2-UPR-RPU 并联机器人的运动学逆解模型。采用螺旋理论分析 2-UPR-RPU 并联机器人分支中各个关节和杆件的速度和加速度, 结合虚功原理计算 2-UPR-RPU 并联机器人运动时的驱动力, 并通过 ADAMS 软件进行数值仿真验证。基于动力学模型分析 2-UPR-RPU 并联机器人的动态可操作度椭圆指标, 获得 2-UPR-RPU 并联机器人在不同操作高度下的转动和移动动态性能分布图谱, 为机构的样机设计提供参考依据。2-UPR-RPU 并联机器人的动力学建模和性能分析为实现机构在实际操作中的高效高精度控制提供了重要的基础保证。

120 可重构立方体机构的设计与运动模式分析

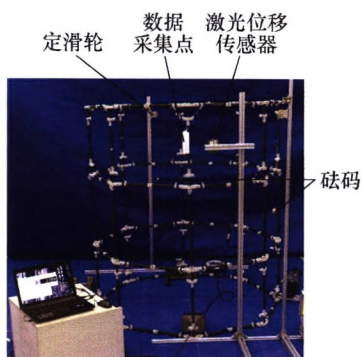
郝艳玲 李锐明 孙学敏 姚燕安



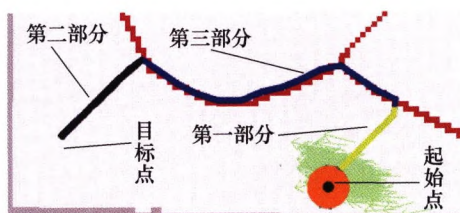
摘要: 随着航空航天技术的飞速发展, 大型空间折展机构的功能需求越来越多样化, 具有多种展开模式的可重构可展机构应运而生。以可展立方体机构作为研究对象, 介绍了其机构组成以及分层构造方法。通过分析立方体机构的相邻面单元间约束, 绘制了面单元的机构简图, 得到了面单元在正方形和长方形外轮廓下的几何约束条件。分析了三个相邻面单元的耦合运动情况, 得到了三个面的可能运动模式, 并在此基础上得到了立方体机构的可能运动模式。通过顶点连接、边连接、面连接, 得到了两个立方体机构的组合机构, 并开展了各种连接条件下的多模式分析。最后通过制作原理模型样机, 搭建了边连接和面连接的立方体组合机构的典型构型, 验证了理论分析的正确性。

128 空间太阳能电站大折展比体展开桁架机构

肖洪 成正爱 郭宏伟 周璐 王立 楼云江 刘海婷 刘荣强



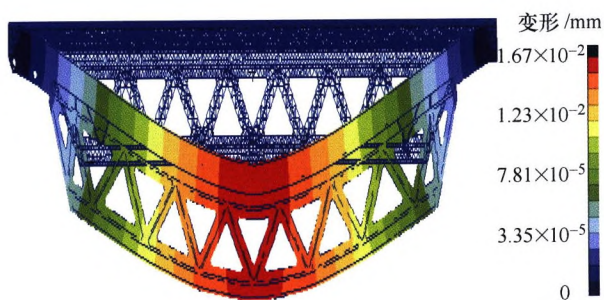
摘要: 发展空间太阳能电站技术具有极其重要的战略意义, 受运载火箭运输能力的限制, 提出了一种可实现三维体展开的桁架机构作为空间太阳能电站的主结构。通过多方案对比分析, 构建了可展桁架基本组成单元, 在确定了驱动原理的基础上, 进行了可展桁架运动学分析, 验证了驱动方案的可行性。基于能量相等原理, 建立了桁架连续梁等效模型, 分析了运动学特性, 并进行了参数优选。最后, 研制了缩比原理样机, 进行了展开试验、刚度测试试验及动力学试验。结果表明, 该可展桁架具有较大的折展比及较轻的质量, 铰链间隙是影响系统刚度的关键因素。



摘要: 针对目前基于栅格地图的路径规划算法, 机器人导航无法同时满足实时性与精确性要求, 以及原始 Voronoi 图算法生成的全局路径过于臃肿和现有骨架提取的方式生成的路线过于冗余, 导致过多占用机器人存储量的问题, 提出一种改进的骨架提取算法, 先对已知先验信息的栅格地图进行二值化、腐蚀、膨胀预处理, 再生成全新的精简骨架, 之后对每一次导航规划的路径进行基于改进的三次样条平滑处理, 在此基础上结合局部路径规划器 DWA 算法, 实现机器人导航。通过多次仿真试验和真实环境试验, 结果表明, 利用所设计的算法得到的精简骨架比原始 Voronoi 图以及现有骨架更为简洁, 优化之后的路径也更加平滑, 提高了移动机器人运动的稳定性及移动效率, 并以最安全的方式指导机器人移动。

149 气浮悬吊式太阳翼重力补偿装置的设计与验证

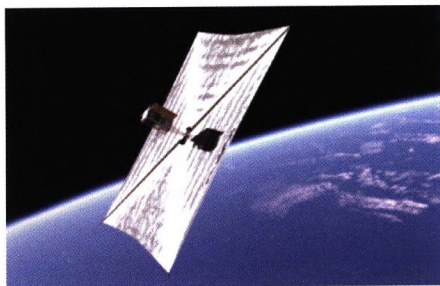
吴跃民 罗强 王喆 刘颖 孙建辉



摘要: 针对滚轮滑车悬吊式重力补偿装置运行阻力大、气浮支撑式补偿装置无法满足机构向气浮平台方向运动的问题, 提出了基于龙门架式支撑结构与横、纵双向气浮导轨相结合的悬吊式重力补偿装置设计方案。采用多段拼接技术解决了超长纵向导轨生产与装调难题; 采用在纵向导轨拼缝两侧增设节流孔的方法, 提升了纵向滑车在拼缝处的运行平稳性; 在纵向导轨上采用倒“V”形工作表面, 解决了因外力未通过质心可能引起横向导轨运行偏转的问题; 采用挤压成型中空铝型材与碳纤维增强梁相结合的方法实现了大跨距横向导轨的减重与抗弯刚度的提升。经分析与试验验证, 在单个悬吊点处悬挂 90 kg 负载, 该装置最大运行阻力系数不超过 0.037%, 运行范围可达 2 m × 20 m, 在速度不超过 1 m/s, 加速度不超过 0.3 m/s² 的使用条件下, 具有良好的动态跟随能力, 可满足太阳翼、天线等大型空间可展开机构地面展开试验与性能测试的需求。

156 空间增阻薄膜结构研究进展及关键技术

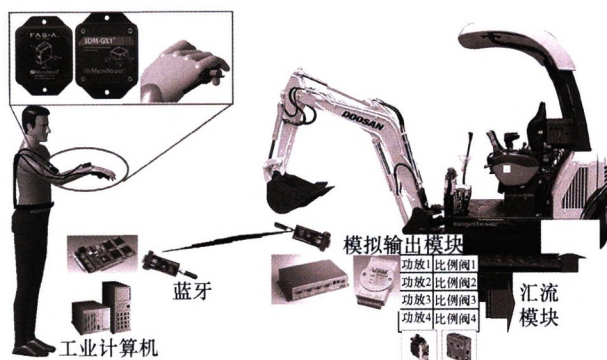
彭福军 恽卫东 耿海峰



摘要: 概述空间碎片的严峻形势和碎片减缓领域未来趋势, 梳理国内外小卫星星座计划, 介绍卫星离轨规范问题最新进展; 提出空间增阻薄膜结构技术因成本低、技术成熟度高, 对不同规格低轨道类航天器具有很好适用性, 最易于推广应用于空间碎片减缓; 对空间增阻薄膜结构技术国内外发展现状进行梳理, 并提出空间增阻薄膜结构主要关键技术, 对增阻薄膜结构构型设计技术、长寿命材料技术、折叠展开技术和低成本设计技术等进行分析。分析表明, 未来星座计划迅速发展将进一步加剧空间碎片严峻形势; 现有的碎片减缓规则不能满足要求, 新的规则将很快推出, 对增阻离轨薄膜结构技术提出了迫切需求; 目前空间增阻薄膜结构的主要关键技术都取得了突破, 并完成搭载验证, 具备用于卫星离轨的条件。

165 智能化挖掘机的研究现状与发展趋势

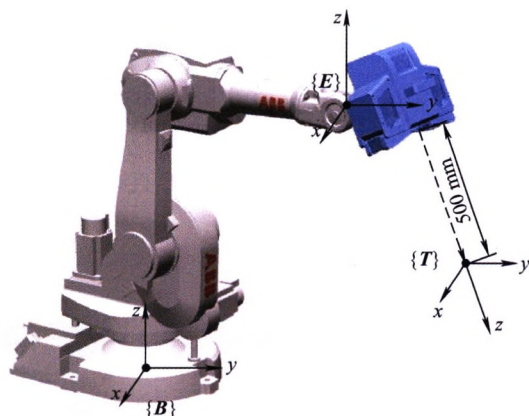
李运华 范茹军 杨丽曼 赵斌 权龙



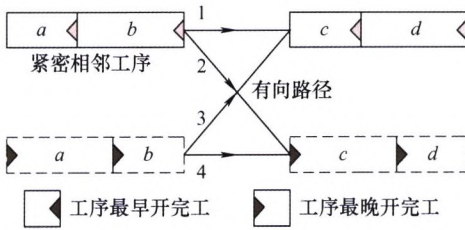
摘要: 智能化挖掘机是传统挖掘机与人工智能、自动控制和信息物理网络等技术深度融合的产物。相对于传统挖掘机,其拥有更高的功率利用率及作业精度,集远程作业、环境感知、智能诊断为一体,在抗震救灾、太空及水下作业等领域都有广阔的应用前景。然而挖掘机液压系统具有强非线性、流量耦合、时变等特点,而工作装置又存在动力学耦合和负载不确定性,结构简单、参数依赖度低、高精度的智能控制算法将提高挖掘机自主作业精度;由于视觉传感器易受光照、气象条件影响,研究多传感器融合及其智能算法将提升挖掘机的环境感知能力;液压系统故障模式隐藏性高,受机载设备硬件限制,探索非冗余小规模深度学习网络和压缩感知技术是实现在线智能故障诊断的关键。从轨迹控制、环境感知、远程控制与智能故障诊断四个方面,综述了挖掘机智能化的国内外研究现状;指出了智能化挖掘机发展存在的问题与发展趋势;最后根据现有研究成果得出了五点结论。

179 核主泵复杂零件机器人在位自动光学检测系统开发

李文龙 李中伟 毛金城 王刚



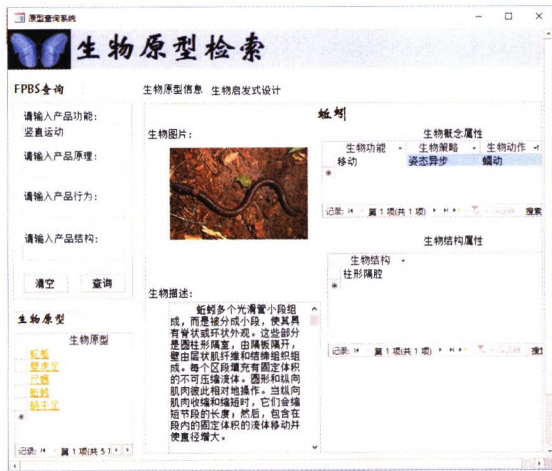
摘要: 采用机器人在位光学检测系统实现法兰密封型面误差检测与表面缺陷识别是解决核电现场人工检修可靠性差、存在核辐射伤害等问题的有效途径,但如何在狭小空间生成无干涉碰撞扫描测量路径、实现多次测量数据融合与型面误差计算是目前面临的主要难题。为此设计了具有6自由度运动功能的机器人在位自动光学检测系统,单幅测量范围 $200\text{ mm} \times 160\text{ mm} \sim 800\text{ mm} \times 640\text{ mm}$ 、测量景深 $400 \sim 800\text{ mm}$ 、机器人工作半径 $1\ 200\text{ mm}$,研究了测量系统手-眼标定矩阵计算与扫描位姿优化方法,并根据法兰密封型面完整测量需求生成扫描工位与机器人运动路径,提出面向法兰密封型面特定结构的测量数据融合与型面误差计算方法,开发出具备机器人测量路径控制、大规模测量点云预处理、三维匹配与色谱显示、型面误差计算与技术报告输出等功能的 RobotScan 软件。按照德国 VDI/VDE 标准对机器人检测系统精度进行了验证,单球直径、双球球心距的最大偏差小于 0.025 mm 、平均偏差小于 0.02 mm ,可满足核主泵复杂零件在位自动光学检测应用需求。



摘要: 针对作业车间调度问题(Job shop scheduling problem, JSP), 以优化最大完工时间为目标, 提出一种有效的多工序联动邻域结构。邻域结构真正将 JSP 求解算法的盲目搜索变得更加科学有效, 同时移动多个工序是进一步提升邻域结构性能的关键。针对交换两个工序邻域结构, 从理论上剖析了如何进行多工序联动能够优化最大完工时间。对已有多工序联动邻域结构存在的不足进行了分析, 提出了科学有效的最多同时交换 3 对工序的多工序联动邻域结构。在交换关键工序块边缘工序的同时, 根据最早开完工时间查找前移工序的工件前序工序, 对其进行前移交换操作, 根据最晚开完工时间查找后移工序的工件后序工序, 对其进行后移交换操作。提出了更为宽泛的针对 2 个工序交换操作的可行解保障条件, 在此基础上, 扩展了同时交换 2 对工序和 3 对工序的可行解保障条件。对 JSP 基准算例进行测试, 验证了所提邻域结构具有良好的性能, 对于设计更为高效的 JSP 求解算法具有重要意义。

207 基于 C-K 理论的产品仿生创新设计研究

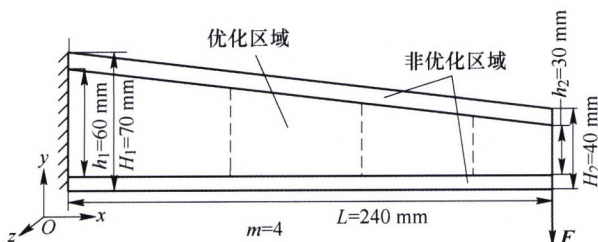
刘晓敏 罗林辉 陈亮 李娇蓉



摘要: 为响应复杂设计的动态演变问题, 构建一种基于 C-K(Concept-Knowledge, C-K)理论的产品仿生创新过程模型。首先, 研究设计元素的转化, 规范问题空间-生物空间-技术空间(Problem-biology-technology, PBT)的描述。其次, 利用生物学趋同理论及类比转移方法, 提取生物原型的功能-策略-动作-结构各层次的知识属性, 并获得解决工程问题的灵感启示。然后, 基于 C-K 理论定义仿生设计空间概念及其算子操作, 建立仿生算子操作流程模型。最后, 通过多生物体知识各属性之间的融合, 获取工程问题的多层次描述, 进而得到多生物原型的可行方案。以管道机器人为例, 验证了基于 C-K 理论的产品仿生创新过程模型具有良好的可行性。

218 基于导重法的结构类周期性布局优化方法研究

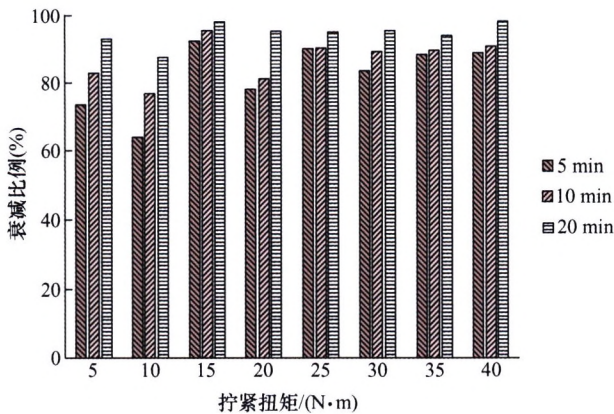
焦洪宇 李英 胡顺安 左克生 林玲 姜正义 于照鹏



摘要: 受外形尺寸限制, 一些结构的优化区域无法划分为均匀一致的有限元网格。由此产生的单元体积依赖性, 常规周期性拓扑优化无法求解。提出一种基于导重法的结构类周期性布局优化方法。以最小柔度为目标函数, 结构质量为约束条件, 构建结构类周期性布局优化的数学模型。利用导重法推导出结构类周期性布局优化的迭代准则, 解释其物理意义并给出其优化流程。以单元应变能密度为基础, 提出一种改进的过滤方案以解决结构类周期性布局优化中单元体积依赖性问题。利用所提出的方法, 对循环对称结构、二维汽车轮毂结构和梯形结构进行结构类周期性布局优化研究。研究表明, 子域数目不同时均可以得到具有类周期性布局的最优拓扑形式。通过性能指标和相对应应变能两个指标来评价三个算例的最优拓扑形式, 验证了利用导重法求解结构类周期性布局优化的可行性和有效性。

231 拧紧策略对航空发动机单螺栓连接预紧力的影响

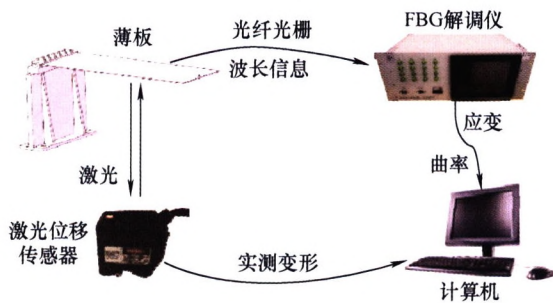
李小强 孟庆阔 杜一凡 陈飞宇 王辉 赵兵



摘要: 针对航空发动机装配过程中出现的螺栓预紧力误差大、控制精度低等问题, 基于 TC4 钛合金单螺栓连接工艺实验, 分析了不同拧紧策略对装配预紧力大小及稳定性的影响, 具体包括扭矩法、扭矩-转角法等拧紧方法和拧紧速度。在扭矩法的基础上, 研究了分步拧紧对预紧力的影响。以单螺栓连接结构和航空发动机典型的法兰螺栓连接结构为研究对象, 探索了螺栓预紧力短时衰减规律。结果表明, 重复拧紧时扭矩-转角法预紧力标准差大致是扭矩法的三分之一, 使用扭矩-转角法、采用分步拧紧和提高拧紧转速均可使拧紧扭矩系数 K 值趋于平稳, 降低预紧力分散程度, 提高预紧力控制精度; 预紧力在拧紧完成后的短时间内会发生衰减, 前 5~10 min 衰减最快, 大致占总衰减量的 80%, 20~30 min 后预紧力保持稳定。

242 基于分布应变的薄板变形重构算法研究

谭跃刚 黄兵 刘虎 谢志超 毛健



摘要: 针对薄板变形重构问题, 结合应变与曲率、曲线与曲率的关系, 提出了一种带误差补偿的曲率积分递推算法。根据累计误差的特点, 给出了误差补偿系数的选取方法, 以及误差补偿因子的优化原则, 通过选取合适的补偿因子, 获得一组与补偿因子相对应的补偿系数。建立 $600 \times 200 \times 2.45$ mm 的铝合金薄板模型, 通过仿真和实验分析, 提取薄板上一条变形曲线的分布应变数据和变形数据, 采用带误差补偿的曲率积分递推算法对试验数据进行重构, 并引入均方根误差(Root mean square error, RMSE)评判算法在不同分段数和不同载荷情况下的重构精度。结果表明, 提出的带误差补偿的变形重构算法可以精确地重构薄板的变形曲线, 重构误差及相对误差均比较小。并且在载荷相同的条件下, 分段数越多, 所提出的曲线重构算法的重构精度也越高。

CONTENTS

- 1 Review and Prospect of Micro-nano Vibration Energy Harvesters**
QI Youchao ZHAO Junqing ZHANG Chi
- 16 Advanced Sensing Technology Based on the Optical Trapping Force**
LU Kuo LI Qingsong ZHOU Xin LI Lan WU Yulie WU Xuezhong XIAO Dingbang
- 32 The Research Progress on Mode-localized Sensors**
ZHANG Zhao CHANG Honglong
- 41 Wireless Self-powered Condition Monitoring System for Coal Machine Equipment**
GAO Yang MU Jiliang HE Jian CHEN Hong MU Jinbiao AN Zhandong ZHAO Xinping
CHOU Xiujian
- 50 Weak Resonant Signal Detection of Resonant Microcantilever Sensors Based on Duffing System**
DAI Rong YU Haitao WANG Quan
- 60 Research on Multi-functional Detection Model and Sensitivity of Opposed Solenoid Coil**
MA Laihao ZHANG Hongpeng XU Zhiwei QIAO Weiliang CHEN Haiquan
- 67 Design and Experimental Characterization of CMUTs Based on Eutectic Bonding Technology**
LI Zhikang ZHAO Libo ZHAO Yihe LI Jie GUO Shuaishuai LUO Guoxi XU Tingzhong
LIU Zicheng LI Xuejiao JIANG Zhuangde
- 77 Analysis of Assembly Errors and Design of Precise Micro-regulator for Micro-hemispherical Resonator Gyroscope (mHRG)**
XI Xiang XIAO Dingbang LI Wei LU Kun SHI Yan YUAN Chao WU Xuezhong
- 84 Parallel Electric Six-wheeled-foot Robot Based on Special-shaped Stewart Platform**
WANG Xiuwen WANG Shoukun WANG Junzheng CHEN Zhihua XU Kang LIU Daohe
- 93 Design and Analysis of a Load Balancing Stabilized Platform Based on Multi-parallel Units Cooperative Work**
DU An GUO Sheng CHEN Yaqiong
- 103 Design and Development of Small Spherical Underwater Observation Robot**
LI Yansheng SUN Hanxu
- 110 Dynamic Modeling and Performance Analysis of a 2-UPR-RPU Parallel Manipulator**
CHAI Xinxue YANG Yong XU Lingmin LI Qinchuan

- 120 Design and Motion Pattern Analysis of Reconfigurable Cube Mechanism**
HAO Yanling LI Ruiming SUN Xuemin YAO Yanan
- 128 Large Folding Ratio 3D Deployable Truss Mechanism For Space Solar Power Station**
XIAO Hong CHENG Zhengai GUO Hongwei ZHOU Lu WANG LI LOU Yunjiang LIU Haiting
LIU Rongqiang
- 138 Voronoi Path Planning Based on Improved Skeleton Extraction**
JIANG Lin LI Jun MA Xianzhong NIE Wenkang ZHU Jianyang LEI Bin
- 149 Design and Verification of Air-floating Suspension Gravity Compensation Device for Solar Wing**
WU Yuemin LUO Qiang WANG Xian LIU Ying SUN Jianhui
- 156 Advancement and Key Technologies of Deployable Membrane Structure for Space Debris Removal**
PENG Fujun YUN Weidong GENG Haifeng
- 165 Research Status and Development Trend of Intelligent Excavators**
LI Yunhua FAN Rujun YANG Liman ZHAO Bin QUAN Long
- 179 The Development of Onsite-Automatic-Optical Inspection System with Robot for Complex Parts of Nuclear Main Pump**
LI Wenlong LI Zhongwei MAO Jincheng WANG Gang
- 192 Research on Multi-operation Joint Movement Neighborhood Structure of Job Shop Scheduling Problem**
ZHAO Shikui
- 207 Research on Bio-inspired Design Based on C-K Theory for Product Innovation**
LIU Xiaomin LUO Linhui CHEN Liang LI Jiaorong
- 218 Study of Structural Periodic-like Layout Optimization Based on Guide-weight Method**
JIAO Hongyu LI Ying HU Shunan ZUO Kesheng LIN Ling JIANG Zhengyi YU Zhaopeng
- 231 Influence of Tightening Strategy on Pre-tightening Force of Aero-engine Single-bolt Connection**
LI Xiaoqiang MENG Qingkuo DU Yifan CHEN Feiyu WANG Hui ZHAO Bing
- 242 Research on Deformation Reconstruction Algorithm of Thin Plate Based on Distributed Strain**
TAN Yuegang HUANG Bing LIU Hu XIE Zhichao MAO Jian

《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)		

