

机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

封面文章：智能上肢假肢感觉反馈研究进展

作者：胡雅雯 姜力 杨斌

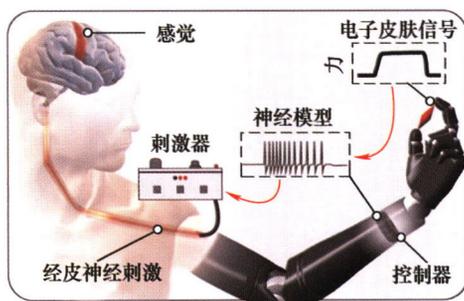


59卷 5 期 半月刊
2023年 3 月 刊

// 机器人及机构学 //

1 智能上肢假肢感觉反馈研究进展

胡雅雯 姜 力 杨 斌



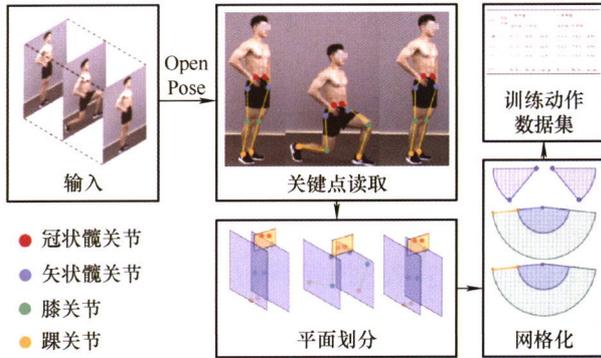
摘要:近年来,具有神经控制和感觉反馈能力的双向生机接口成为智能上肢假肢的发展趋势。目前,大部分的研究集中在上肢假肢的机构、传感器设计和神经控制等领域,而在感觉反馈方面的研究较少,缺乏合适的感觉反馈降低了智能假肢的操作性能并限制了假肢的实际应用。首先概述了智能假肢双向生机接口的现状,然后详细介绍了基于经皮神经电刺激、振动刺激、压力刺激等感觉反馈方法,以及感觉替代、模态匹配、躯体特定区匹配等感觉反馈策略,在此基础上对上肢假肢感觉反馈的自然性和交互信息的多模态等发展趋势进行了展望。

11 爬壁机器人研究现状及发展趋势

马吉良 彭 军 郭艳婕 陈雪峰

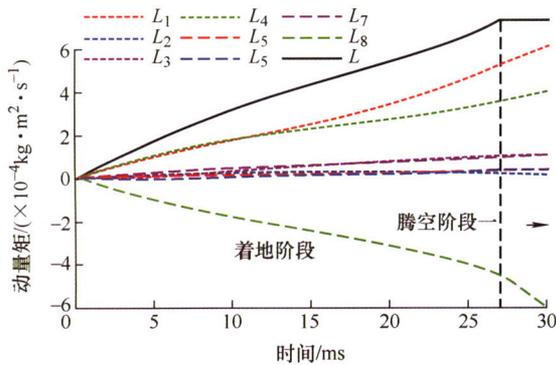


摘要:爬壁机器人是指能够依附在物体的表面进行多自由度移动并完成作业的机电系统,特别适用于执行特殊任务,因而具有良好的应用前景和广泛的市场需求。根据黏附机理的不同,爬壁机器人可分为负压吸附、静电黏附、仿壁虎干黏附、仿生湿黏附等类型。从黏附机理、应用范围以及黏附特点三个方面概述了爬壁机器人领域的国内外研究现状,为统一分析比较不同种类爬壁机器人的负载性能,提出基于比黏附能密度的机器人整体黏附性能分析方法,并为解决其大负载和小体积之间的矛盾提出新的材料和结构设计思路,分析微型爬壁机器人在航空发动机故障检测领域的应用前景,总结出其在材料智能化、驱动新型化、体积小型化和黏附机理协同化等方向的发展趋势。

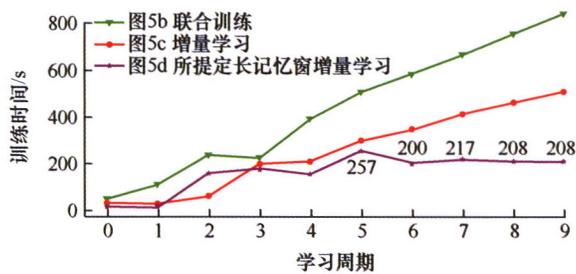


摘要: 目前关注辅助下肢提升身体素质训练的可穿戴设备研究存在缺失, 而外骨骼与虚拟现实的协同研究是近几年的新兴方向, 多模态信息融合的外骨骼系统能有效优化训练效果和训练体验。因此, 开发了一套面向竞技训练的下肢外骨骼多模态交互系统, 不仅提供了丰富多样且标准规范的辅助训练, 并且实现了多感官的沉浸体验。首先, 设计一种多自由度分步动作规划方法, 基于下肢运动动作点实现训练动作的复现。其次, 提出下肢外骨骼多模态交互系统, 通过虚拟现实竞技训练模拟器实现信息空间中规范动作的呈现与指示, 构建动作数据集和下肢外骨骼机器人实现物理空间中基础训练的辅助与矫正。系统基于多模态交互执行策略, 实时给予训练者视觉、听觉、触觉的多感官反馈, 实现符合安全规范的沉浸体验。最后, 通过系统功能与用户体验两项实验进行系统验证。功能性实验证明, 与原有传统训练相比, 该系统平均可提升动作准确率 27.62%, 且具有一定通用性。用户体验的实验结果表明, 该系统功能符合设计预期, 舒适性相对其他指标有待提高。

41 基于起跳稳定性的仿蝗虫八杆跳跃机器人设计



摘要: 通过模仿蝗虫起跳过程中的后足胫节末端的直线运动轨迹和起跳稳定性, 提出了一种仿蝗虫八杆跳跃机器人设计方法。建立运动学模型并利用天牛须搜索算法对机构的尺寸参数进行优化设计, 优化后的八杆跳跃机构的等效胫节末端轨迹和蝗虫后足胫节起跳过程的末端轨迹吻合, 基本为一条斜直线。基于拉格朗日方程对八杆跳跃机构的起跳动力学进行建模, 并分析了身体所在杆的质心位置对起跳过程的影响, 发现通过增大等效胫节杆的质量能提高起跳动力学稳定性。根据运动学和动力学分析的结果, 设计了仿蝗虫八杆跳跃机器人, 并利用高速摄像机搭建实验平台记录其起跳过程, 验证了等效胫节杆的质量对起跳动力学稳定性具备有效的调节效果。

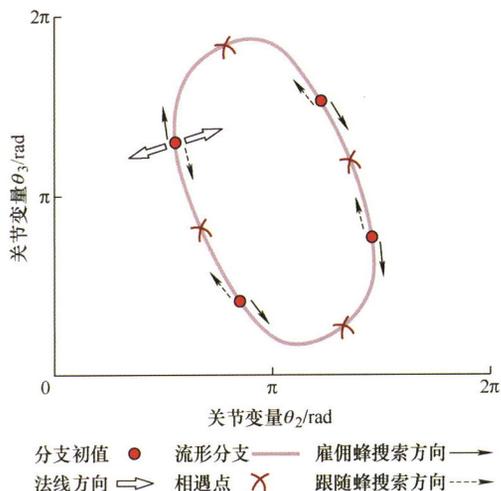


摘要: 受工业机器人本体结构几何及非几何误差因素的影响, 机器人执行末端的实际运动轨迹与其理论规划轨迹往往不一致, 这严重限制了机器人在加工领域的拓展应用。另外, 通过研究发现机器人除在工作空间上定位误差等级存在差异分布外, 在服役时间上随着机器人工作性能的退化也会显著恶化其定位精度。为解决该问题, 提出了一种基于定长记忆窗增量学习的机器人定位误差在线自适应补偿方法。在该方法中, 首先定量分析机器人定位误差与位姿的相关关系, 将工作空间划分为多个位姿区块并创建校准样本库, 建立了位姿映射模型的自适应优化机制以克服空间中误差等级差异分布的问题; 然后设计了定长记忆窗增量学习算法, 克服神经网络模型的灾难性遗忘缺陷, 并平衡了在线模式下建立机器人新、旧位姿数据映射关系的精度和效率, 解决了机器人性能退化加剧定位误差影响位姿映射模型适用性的问题, 从而确保算法的补偿精度稳定在目标精度水平线以上; 最后, 利用 Stäubli 机器人和 UR 机器人对所提方法进行了精度在线补偿实验验证。实验结果表明该方法可将 Stäubli 机器人的定位误差从 0.85 mm 降至 0.13 mm, 将 UR 机器人的定位误差从 2.11 mm 降至 0.17 mm, 明显提高了机器人的定位精度, 且通过对比发现所提方法的性能明显优于其他同类已发表方法。

67 非圆面齿轮差速器的构型原理与动态防滑机制

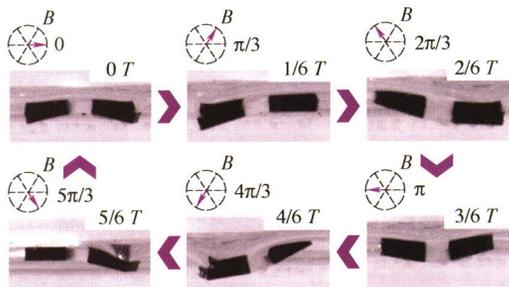


摘要: 针对变传动比差速器核心元件制造难度大、动态防滑机制不明确的问题, 提出一种基于非圆面齿轮的新型变传动比差速器, 并针对该差速器的构型原理与动态防滑机制展开研究。在阐明圆柱齿轮与非圆面齿轮的传动原理的基础上, 给出非圆面齿轮差速器的构型原理; 针对单侧驱动车轮打滑, 整车陷入困境的工况, 根据机构旋转法得到非圆面齿轮差速器的运动学表达式, 利用高等动力学理论, 构建非圆面齿轮差速器各构件的力学平衡方程, 推导出整车牵引力公式, 进而建立非圆面齿轮差速器驱动下整车水平移动的动力学模型; 通过试验和仿真相结合的方法, 对差速器在两驱动轮上的扭矩分配, 动态牵引力变化以及整车的脱困行为进行研究, 结果表明: 非圆面齿轮差速器使单侧打滑车轮产生周期惯性扭矩, 有利于提升车辆的最大牵引力, 它是变传动比差速器动态防滑的根本原因; 增加差速器输入转速, 能够有效提升车辆脱困的平均速度, 同时对车辆产生的柔性冲击幅值也会增大, 研究结果为变传动比差速器的设计提供一定的理论依据。



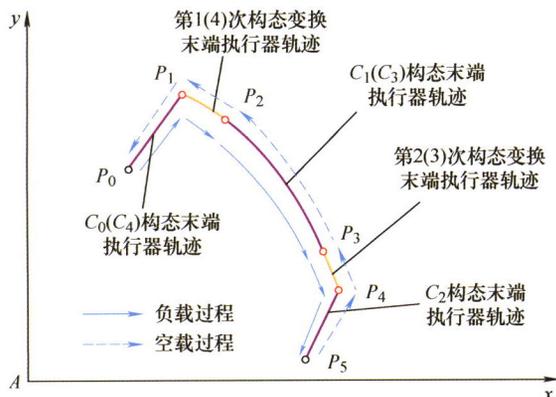
摘要: 为了解冗余度机械臂的全部逆运动学解,以计算包含全部逆运动学解的自运动流形为目标,提出了一种新的自运动流形计算方法。该方法基于人工蜂群算法完成自运动流形各分支初值的搜索,解决了分支初值难以确定的问题,并提出了分支搜索策略,实现了完整流形分支的搜索。在此基础上,为提高自运动流形的计算效率,定义了自运动流形的全等性与渐变性并建立了流形库,通过索引流形库内的自运动流形能够快速计算工作空间任意位置的自运动流形。利用流形库对机械臂进行全局性能分析,得到了各流形分支的局部最优位形;以每条分支的局部最优位形作为初始位形进行关节轨迹规划,实现了给定末端轨迹的全局最优关节轨迹规划,并通过4R机械臂和7R机械臂验证了方法的有效性。该方法还可用于超冗余度机械臂自运动流形的计算,具有较好的通用性。

89 复杂环境下磁弹性微型游泳机器人的路径规划与识别跟踪

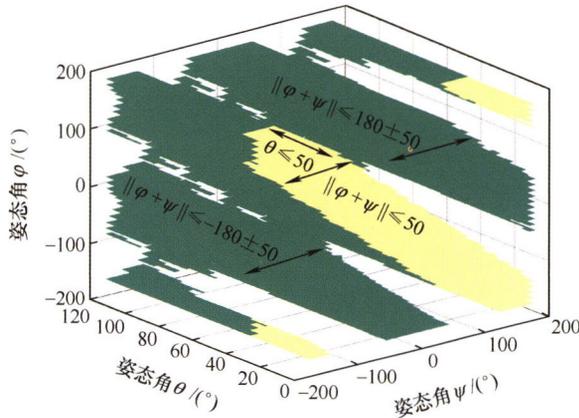


摘要: 磁弹性材料设计的毫米级微型游泳机器人可通过外部均匀磁场实现连续形变来完成游泳动作,通过视觉反馈能提高机器人的路径跟随精度,但在复杂背景下机器人的视觉闭环控制易发生识别错误、跟踪失败等现象。针对上述问题,首先获取复杂环境下的障碍物信息,提出改进RRT*算法(IIC-RRT*)进行路径规划,同时基于环形平滑标签的YOLOv5识别跟踪算法(CSL-YOLOv5),在复杂背景下对微型游泳机器人的中心位置与旋转角度进行实时更新。在此基础上进行微型游泳机器人在障碍物复杂背景下的位置与角度的双闭环伺服控制,试验结果表明,提出的路径规划算法改善了路径生成的效率与平滑性,识别跟踪算法提高了微型游泳机器人的识别稳定性与精确性,为磁控微型游泳机器人在复杂背景下的精确控制提供了新思路。

100 一种变胞式工业机器人时间最优轨迹规划

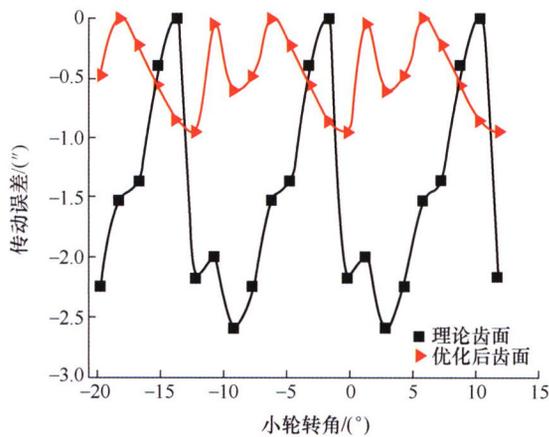


摘要: 根据变胞式工业机器人工作原理,建立了其工作轨迹模型,并基于该模型提出了一种变胞式工业机器人时间最优的轨迹规划方法。该方法着重考虑机器人构态变换过程,将轨迹规划问题转化为内外层嵌套的优化问题进行分析。分别给出该优化问题的设计变量、目标函数以及约束条件,得到了变胞式工业机器人时间最优轨迹规划问题的数学模型。运用所提出的方法对本课题组自研制的变胞式码垛机器人进行轨迹规划研究,根据其工作轨迹模型,建立了优化设计问题数学模型,在给出关节角度插值函数系数的确定方法后,采用嵌套粒子群算法对该优化问题进行求解,得到了优化后的关节角度函数以及理论工作轨迹,与实验所得的实际工作轨迹进行对比,验证了所提方法的可行性。该研究工作为变胞式机器人的运动规划研究提供了参考。

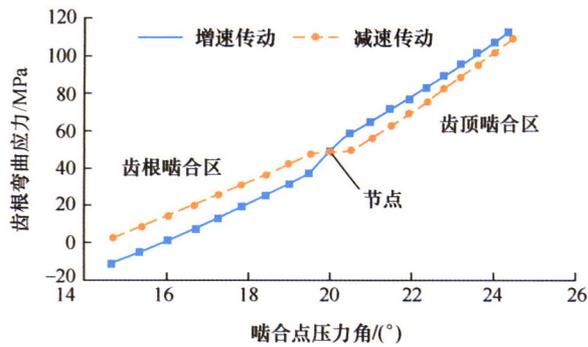


摘要: 针对球面 3-RRP 并联机构的理论分析不足以致运动学与动力学特性不明确的问题, 设计了该构型的具体结构, 分析了其运动学传递约束与驱动力矩特性。根据关于位置反解的 Panda-Kahan 理论, 明确了灵活姿态空间与可达姿态空间的分布情况。基于旋量互易积, 建立了关节的运动传递与约束能效系数。在此基础上, 应用多参数平面模型技术, 进一步揭示了参数尺度、姿态空间、性能指标之间的耦合关系, 从而确定了参数取值, 明晰了优质姿态空间范围和性能指标分布趋势。并基于虚功原理, 建立了动力学模型, 定性分析了驱动力矩特性。研究表明: 该腕关节机构兼具机构紧凑、姿态空间大、完全的运动约束性能与优秀的运动传递性能、大负载重量比的特点, 符合人体腕关节功能特性。

121 人字齿轮直线型对角修形设计及成形磨原理



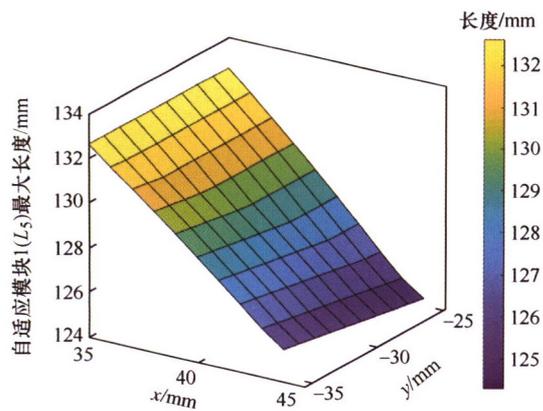
摘要: 为了降低承载传动误差波动产生的振动激励, 提出了成形磨人字齿轮直线型对角修形优化设计。根据 ISO 对角修形定义, 计算齿顶、齿根修形起始线在旋转投影面上的螺旋角, 将修形曲线设计为直线型, 给定最大修形量, 确定对角修形的齿面方程。利用齿面接触分析和轮齿承载接触分析, 以工作载荷下人字齿轮承载传动误差波动量最小为优化目标, 采用遗传算法优化对角修形参数。确定以目标修形齿面法向偏差的平方和最小的目标函数, 以螺旋角、模数、压力角为设计变量, 采用遗传算法分别对齿顶和齿根修形区域进行逼近, 从而实现对角修形的成形磨加工。结果表明, 人字齿轮直线型对角修形可以将承载传动误差波动量降低到 36.65%; 采用三截面砂轮成形磨的理论误差控制在 1 μm 以内, 获得较高的齿面精度; 试验人字齿小轮齿的检测结果控制在 4 级精度以内, 并进行了齿轮副的滚检试验, 从而验证该方法的有效性。



摘要: 增速传动齿轮是风力发电机等各类增速齿轮传动系统中的关键零件, 其设计和修形主要参考减速传动齿轮来进行。由于啮合点处滑动摩擦力的影响, 增速传动齿轮的啮合特性与减速传动齿轮存在较大的差异, 因而减速传动齿轮的设计制造经验不能直接应用于增速传动齿轮。以应用最广泛的渐开线直齿圆柱齿轮为研究对象, 运用危险截面法和有限元啮合仿真方法, 进行了增速传动和减速传动轮齿弯曲应力的对比分析研究。结果表明, 相同传动功率条件下, 与减速传动相比, 增速传动大轮在齿根啮合区对应的弯曲应力减小, 而齿顶啮合区对应的弯曲应力增大, 最大增幅达 27.8%; 增速传动小轮弯曲应力的变化趋势与大轮相反。研究工作为增速传动齿轮的设计和修形及建立面向增速传动齿轮的设计方法提供了重要的理论支撑。

142 一种新型仿生变胞膝关节外骨骼机器人及其多体运动尺度综合方法研究

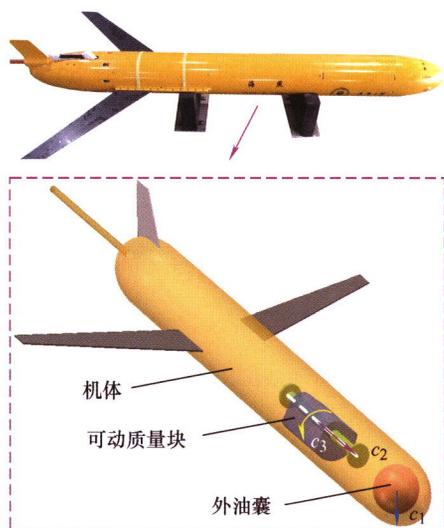
李照童 杨玉维 李 彬 赵 磊 刘 凉 马 跃 刘 祺



摘要: 针对人体步态周期的摆动相与承载相生物力学特征, 创新性的提出一种集变胞仿生膝关节外骨骼机器人与具有“J”型轨迹特征运动副人体等效下肢为一体的人-机并联研究原型, 在深入解析其变胞运动承载仿生工作机理的基础上, 系统提出一种多体运动尺度综合方法。该方法首先基于多体运动学, 系统构建人-机并联运动学模型; 其次针对该外骨骼对其穿戴位置滑移与下肢个体差异的有效几何包容, 提出一种新型运动学综合性能评价指标——仿生灵巧包容度; 再次将多体运动尺度综合问题归结为一类多目标优化问题; 最后计及不同人群的步态差异性, 采用压缩粒子群算法, 深入开展膝关节外骨骼系统多体运动尺度综合数值仿真。通过仿真数据对比与参数敏感性分析, 佐证该膝关节外骨骼机器人所具有的变胞仿生运动学综合性能, 以及多体运动尺度综合方法的合理性与有效性, 为后续研究原型承载有效性的相关研究, 提供理论基础。

156 水下滑翔机多点探测能耗最低路径的规划方法

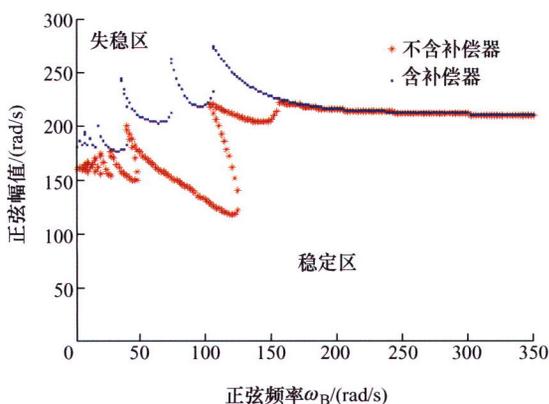
吴宏宇 牛文栋 张玉玲 王树新 阎绍泽



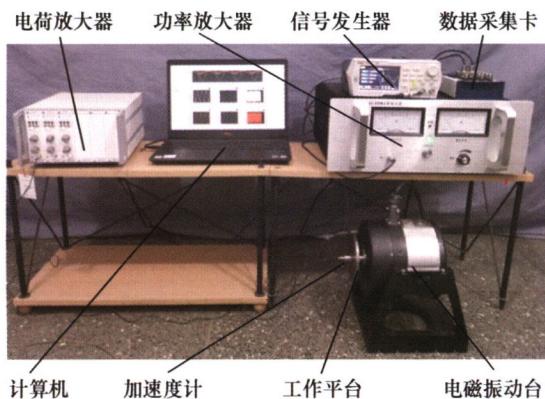
摘要: 作为一种有前途的海洋现象自主观测平台, 水下滑翔机通过调节自身净浮力和姿态实现空间运动。由于低能耗的驱动方式, 水下滑翔机非常适合执行长期海洋探测任务。针对水下滑翔机的多点探测任务, 本文提出一种能耗最低路径的规划方法。首先, 建立了滑翔机整机动力学模型, 推导了单剖面滑翔运动能耗模型。基于仿真结果, 采用多项式拟和方法确定了滑翔机的能耗、航程、控制参数值和目标下潜深度之间的近似函数表达式。在运动路径给定条件下, 研究了滑翔机能耗与剖面数之间的关系。在此基础上, 将多点探测任务的路径规划抽象为旅行商问题(Traveling salesman problem, TSP), 并基于遗传算法给出了该问题的求解方法。数值算例表明, 该路径规划方法可有效降低滑翔机在执行多点探测任务时所需能耗。

167 基础摆动条件下主动电磁轴承-柔性转子系统的稳定性

张鹏 祝长生



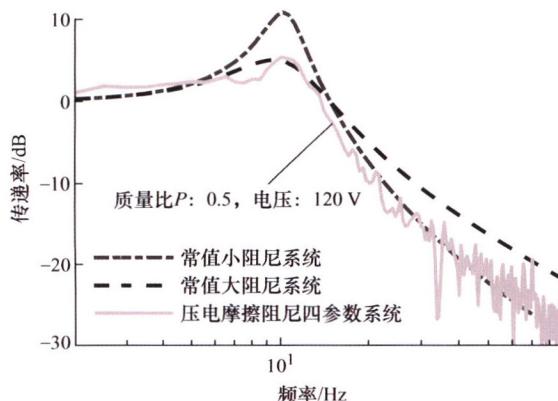
摘要: 与基础平动不同, 基础摆动不仅会给转子系统产生额外的激励力, 而且还会改变转子系统的阻尼及刚度特性, 对系统的稳定性产生影响。以电磁轴承支承的柔性转子系统为例, 研究了基础摆动条件下转子系统的稳定性。首先, 用有限元法建立了基础摆动条件下电磁轴承-柔性转子系统的动力学模型, 然后基于 Routh-Hurwitz 准则推导了基础恒定摆动条件下转子系统的稳定性条件, 并用特征根轨迹进行分析。之后, 基于 Floquet 理论研究了基础正弦摆动对电磁轴承柔性转子系统稳定性的影响, 得到了系统的稳定性边界, 并利用转子系统响应进行了验证。最后, 研究了 PID 控制器参数对基础摆动条件下电磁轴承-柔性转子系统稳定性的影响, 针对基础正弦摆动, 提出了使用相位补偿器补偿转子系统稳定性的方法。研究表明, 基础恒定摆动条件下, 主动柔性转子系统的稳定性与摆动的幅值有关; 基础正弦摆动条件下, 转子系统的稳定性与摆动的幅值和频率有关。合理地选择 PID 控制器的参数能够改善转子系统的稳定性。PID 控制器串联相位补偿器, 对于基础正弦摆动条件下电磁轴承-柔性转子系统的稳定性具有良好的补偿效果。



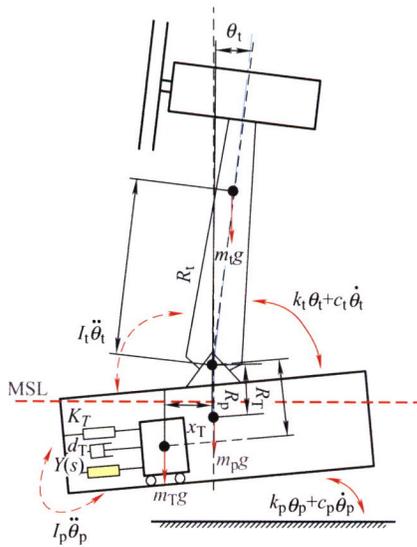
摘要: 针对低频电磁标准振动台输出振动受刚度非线性影响而产生严重谐波失真问题, 首先基于非线性特性幂级数等效原理, 分析了输出振动的加速度失真特性。然后, 为克服振动台逆模型辨识样本传统均匀采样法存在的效率低及精度差等问题, 提出了最近邻均匀设计输入输出样本提取方法, 由均匀设计法在传统采样点中选择小样本数据集, 再依据最近邻法将不能准确辨识的其他样本点加入数据集, 构成最优训练样本集。进一步, 辨识得到待控制振动台的神经网络逆模型, 将其与原振动台模型串联后构建了谐波失真开环控制系统。最后, 仿真及实验分析表明, 神经网络控制可将整个工作频段内不同位移幅值振动加速度失真控制在标准要求的2%以内, 而提出的最近邻均匀设计样本优化神经网络控制具有更优的谐波失真抑制效果。

192 基于压电摩擦阻尼的四参数隔振系统等效建模与频变阻尼特性分析

王敏 廖松泉 孙翊 丁基恒 蒲华燕 罗均 刘清宇



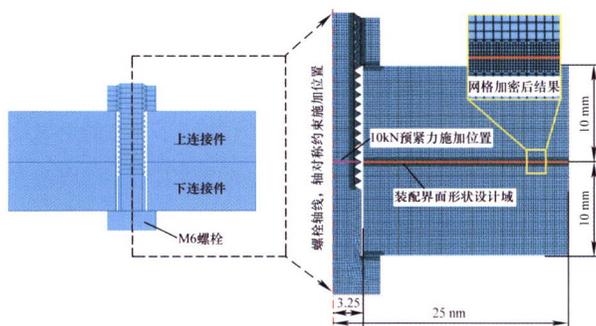
摘要: 在轨卫星搭载的高精度有效载荷对环境微振动异常敏感, 从而对隔振系统的振动衰减性能提出了更高的要求。传统两参数被动隔振系统提高隔振性能时, 常采用添加定常阻尼进行能量耗散的方式, 但存在低频共振峰抑制与高频快速衰减不能兼顾的固有矛盾问题。为了解决这一问题, 一种能够实现阻尼特性基于频率变化的四参数隔振系统被提出, 采用归一化方法建立其系统传递率与等效阻尼理论模型, 并与两参数和三参数隔振系统进行对比分析。基于四参数系统的频变阻尼等效理论, 设计一种基于压电陶瓷致动器产生摩擦阻尼的具象化四参数隔振系统, 考虑非线性摩擦阻尼的融合问题, 并分析中间等效质量参数对阻尼频变特性的影响规律, 最后对其频变阻尼特性和隔振性能进行了仿真与实验验证。结果表明: 时域上, 四参数隔振系统对随机信号的隔振率达到91.1%; 频域上, 相较常值小阻尼系统, 四参数隔振系统在低频共振处的峰值性能提升5.46 dB, 且高频段保持相近的快速衰减, 表现出低频大阻尼、高频小阻尼的频变阻尼特性。仿真与实验结果均表明, 系统能够解决被动隔振系统中存在的高低频隔振性能之间的矛盾问题。



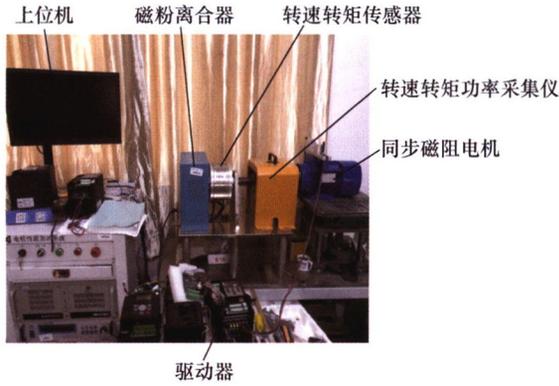
摘要: 机电惯容是一种新型惯容装置,可利用电路网络实现高阶机械阻抗,具有性能和空间上的优势。由于海上风力机的机舱空间有限,研究了位于浮式平台中的机电惯容系统对漂浮式海上风力机载荷的影响。根据直流电机的特性,电机轴的转矩输出与电机回路中的电流呈线性关系,因此针对所建立的机电惯容,重点研究了所有由单个电阻、电容、电感组成的电路网络对漂浮式风力机减振性能的影响。为了降低优化过程中的复杂度,首先建立了 3 自由度(Degree of freedom,DOF)漂浮式海上风力机模型,随后优化了含有电路网络模型的输入输出传递函数的 H_2 范数,得到电路网络最优参数。最后,基于美国可再生能源实验室的 5 MW 基准风力机模型对优化结果进行了仿真分析。仿真结果表明,在不考虑装置工作行程的情况下,所建立的机电惯容调谐质量阻尼器(Mechatronic inerter tuned mass damper,MITMD)系统可以有效减少风力机系统的结构载荷。相较于减振装置位于机舱中的情况,建立在平台中的 MITMD 系统可以同时减轻塔基和塔顶转轴处的载荷。MITMD 的控制效果以运动位移为代价,因此在实际应用中需要折中考虑减振效果和装置的工作行程。

/// 数字化设计与制造 ///

212 自适应参数驱动的装配界面形状主动设计方法

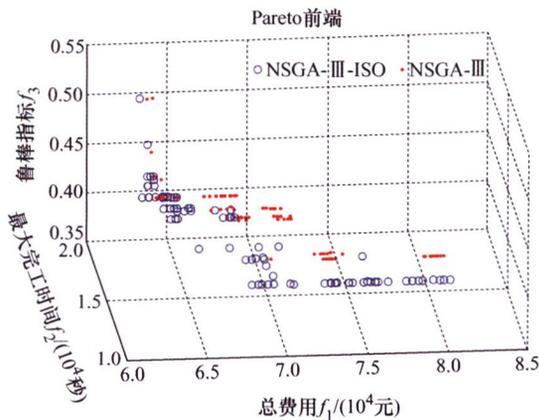


摘要: 应力分布均匀程度是衡量精密机电产品装配精度和性能稳定性的重要指标,均匀的应力分布也是当前精密机电产品装配过程所追求的目标之一。形状设计是改善装配界面接触应力分布的重要途径,针对当前基于应力分布的装配界面形状主动设计方法中初始参数取值难以确定,且相关参数对优化过程计算效率、数值计算稳定性影响较大的问题,提出了一种根据优化过程中接触应力分布均匀程度变化信息来调节优化参数的自适应参数计算方法。并以典型单螺栓连接结构为设计对象,对比了采用自适应参数设计方法与采用固定参数设计方法分别进行装配界面形状主动设计后的结果。理论分析结果表明:该方法可以很好地解决基于应力分布的装配界面形状主动设计方法中初始参数难以确定的问题,同时提高了优化效果、计算效率和优化过程中的数值计算稳定性。

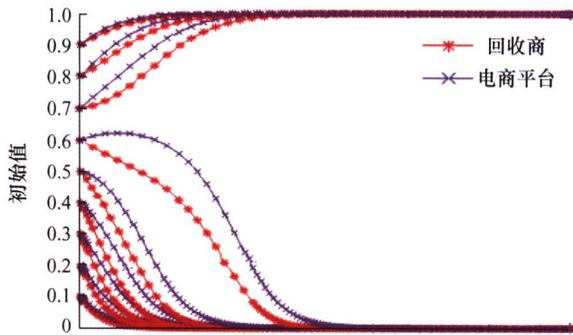


摘要: 针织大圆机的特殊运动状态要求其驱动电机具有较大的启动和带载能力以及较高的稳态运行精度, 同步磁阻电机是一种应用于针织大圆机的理想电机, 但现有同步磁阻电机无传感器控制, 存在转子位置估计误差大、速度切换不平滑等问题。对此, 提出一种基于全速域混合控制的同步磁阻电机无传感器矢量控制系统, 零速和低速时采用脉振高频电流注入法, 通过在估计坐标系的 d 轴注入一个幅值恰当的高频电流信号, 使用估计 q 轴的高频电压信号估计转子位置; 中速和高速时采用模型参考自适应法, 通过建立数学模型并对其进行稳定性分析来估计转子位置; 为了实现零速和低速到中高速的速度切换, 提出一种改进的过渡区域融合观测方案, 采用正弦型饱和函数代替传统的线性切换函数进行位置融合。为了验证方案的有效性, 搭建了平台进行测试。由结果表明, 该方案启动过程带载能力强, 切换过程平滑且稳定, 稳态运行过程波动小, 是一种较适合大圆机电机驱动的无传感器矢量控制方法。

235 面向不确定性的车间布局调度集成建模与优化

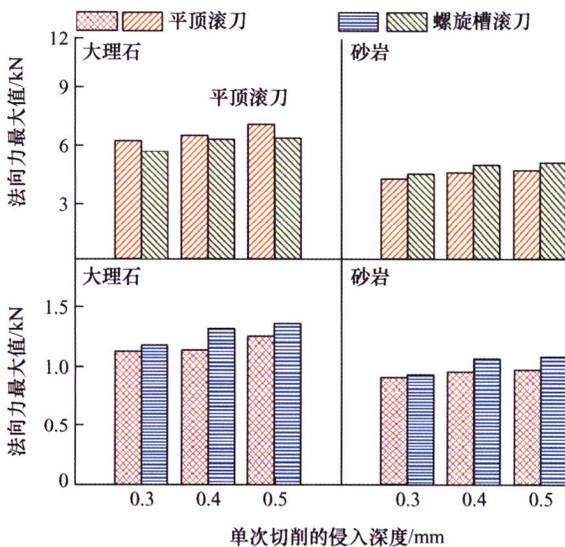


摘要: 针对制造系统的不确定性和车间布局调度协同优化难题, 研究了不确定环境下车间布局调度集成优化问题, 旨在耦合车间布局调度中的不确定因素, 实现制造系统的高效有序运作。选取工件需求、工序加工时间和设备故障作为影响布局调度集成优化的不确定因素, 构建以制造过程中总费用、总完工时间最小和鲁棒指标最大为优化目标的面向不确定性的车间布局调度集成优化模型。设计了一种具有改进选择算子的 NSGA-III(NSGA-III with improved selection operator, NSGA-III-ISO), 改进选择算子增强了算法的全局搜索能力和稳定性, 同时引入 PBI 距离并改进其极小值取值方法。通过基准函数测试结果表明, 新算法具有更好的前端分布性和收敛性。将集成模型和改进的求解算法应用于车间布局调度工程实例, 其结果进一步验证了模型和算法的有效性和可行性。



摘要：产品回收是绿色制造体系的重要组成部分，废旧家电回收在其中占有很大份额，在废旧家电回收中，电商平台将专业回收商与回收需求用户连接起来的回收模式已成为一个新的发展方向，双方群体之间不可避免的会出现复杂的利益冲突问题，阻碍回收行业的发展。基于此，研究家电回收商与电商平台双方群体在协作回收业务上的复杂利益分配和投资决策问题，构建演化博弈模型，分析双方群体均“加大投资”的演化稳定均衡状态和演化稳定路径，结合数值分析研究各影响因素对模型演化结果的影响。研究发现：电商平台和回收商双方都选择“加大投资”的理想状态为演化稳定策略的前提下会存在一个次优情况；投资成本与额外回收量之间的函数是一个较为关键的因素，当这一因素呈现出某种特定的函数关系时一定不会出现次优情况；平台为回收商设定合理的佣金率有助于达成合作；相比较于提升回收价格来吸引更多消费者参与回收，提高双方合作时的投资利用率以换取更多的回收量带来的效果更好。

259 新型 TBM 螺旋槽滚刀破岩性能及接触行为研究



摘要：全断面隧道掘进机(TBM)是用于长大隧道建设的关键装备，在川藏铁路等国家重大战略工程中发挥着重要作用。但 TBM 在硬岩地层施工中仍然面临所需推力大、掘进速度慢、滚刀损耗严重等问题，亟待解决。尝试探索基于滚刀表面结构设计调控刀-岩接触的可行性，设计了一种新型螺旋槽盘形滚刀。使用直线切割破岩实验研究不同贯入度和岩石种类下新型滚刀的破岩性能，并利用颗粒流离散元数值仿真对其破岩机理进行阐释。结果表明，滚刀表面的螺旋槽设计可以显著地降低破岩时切削力，而对生成的岩石碎片总体积无明显影响，因此可以显著减小滚刀做功，降低破岩比能，提高破岩过程的能量利用效率。其机理在于螺旋槽有效地优化了岩石内应力分布，使得同一滚刀前后相邻的刃齿在沟槽下方岩石中形成拉应力区，该部分岩石未与滚刀直接接触形成岩石粉末，而是由拉裂纹互相贯通形成岩石碎片，即减少了岩石粉末数量、缓解了岩石过度破碎程度，最终达到了降低切削载荷和破岩能耗的效果。



摘要: 针对双轴直驱平台伺服系统中存在同步进给的问题,提出一种交叉耦合迭代学习控制器与自适应加速度控制器相结合的新型同步控制方法。首先,构建同步误差,利用交叉耦合控制器解决双轴的耦合问题;设计自适应 PD 型学习律减小同步误差,实现双轴协调同步。采用模型前馈控制补偿系统的参数不确定性,提高系统的响应速度。自适应加速度控制器抑制系统中外部扰动、摩擦力等不确定性因素,实现系统的渐近跟踪控制。加速度积分后形成反馈控制律,保证了控制信号的稳定性和连续性。设计自适应更新律,使鲁棒增益实现指数收敛并削弱测量噪声对系统的影响,增强系统的鲁棒性。系统实验结果表明,该方法能够明显地提高系统的同步性能,改善双轴直驱平台伺服系统的控制精度。

280 微型飞行昆虫降落/起飞过程微牛级接触力测试系统设计

闫征 王立新 董世运 闫世兴

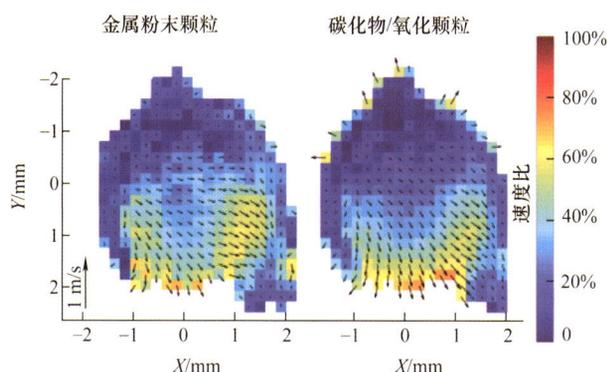


摘要: 现阶段微型仿生飞行器降落/起飞过程的机动灵活性与仿生原型存在差异,降低了其作业过程的安全性与应用范围的普遍性,无干扰状态下仿生原型降落/起飞过程接触力的精确表征是解决该问题的必要前提。为此设计了微型飞行昆虫降落/起飞过程微牛级接触力测试系统,以碳纤维弹簧 T300 为接触力的感知器件并对其标定获取接触力-挠度-接触点位置的数学方程(拟合优度 $R^2=0.979$),选用高帧数摄像机记录微型飞行昆虫在碳纤维弹簧降落/起飞过程的图像信息。选用苍蝇(*Musca domestica*)进行了接触力测试系统的运行调试,采用基于 Matlab 编写的图像分析处理程序提取碳纤维弹簧挠度、接触点位置等信息,计算求解接触力并进行修正以消除碳纤维弹簧重力的影响,结果显示苍蝇降落/起飞过程的接触力介于 $0.121\sim 0.772$ mN,为其体重(17.38 mg)的 $0.71\sim 4.53$ 倍。对于所设计的接触力测试系统,分辨力可达 0.001 mN,并从模拟/实际标定、挠度精准获取、接触力修正、降落/起飞过程无干扰等 4 方面来提升准确度。研究结果为微型飞行器仿生原型运动行为的定量、准确表征提供了可借鉴的技术与方法。

291 激光材料加工熔池流动行为实验研究进展

付艳恕 卢 聪 叶小军 肖先锋 成满平 宋立军

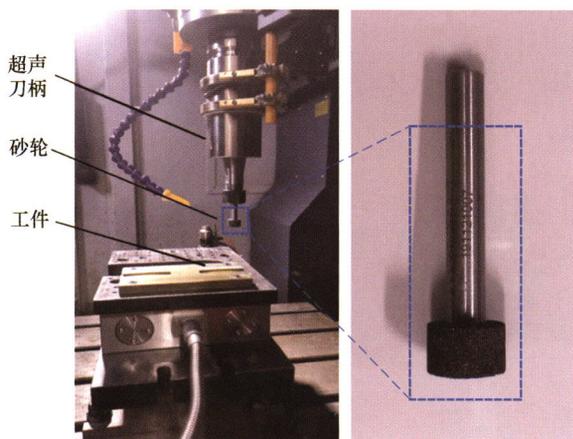
摘要：熔池作为激光与材料相互作用过程的基本单元，其内部传热、传质过程对微观凝固组织和宏观缺陷的形成有重要影响。掌握激光材料加工熔池流动行为机制，并采取有效的调控手段是获得高质量激光材料加工成形件的关键。随着试验设备与技术的不断发展，激光材料加工熔池流动研究正朝深度化和精细化方向发展，并取得了大量研究成果。系统介绍了熔池流动行为实验研究方法的发展和重点应用，重点综述了激光焊接和激光增材制造过程熔池/匙孔流动行为国内外研究进展。首先介绍了熔池流动的受力机制及其主要影响因素；然后回顾和讨论了使用直接法和间接法对熔池流动的可视化实验研究进展，并对目前熔池流动行为的主要调控手段进行了总结。最后，对进一步熔池流动行为机理研究和更高效的熔池流动调控手段进行展望。

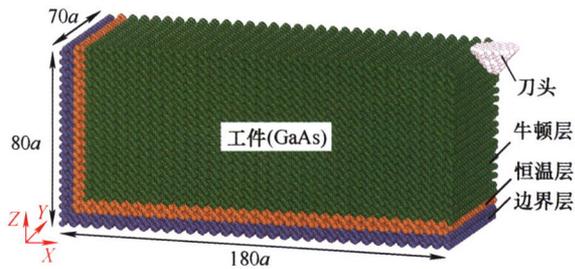


307 轴向超声辅助端面磨削金属表面形貌及粗糙度预测

张 园 徐念伟 鲍 岩 董志刚 韩 松 郭东明 康仁科

摘要：轴向超声辅助端面磨削被广泛应用于难加工材料加工，而磨削后的表面粗糙度对构件摩擦、疲劳等服役性能有重要影响。超声振幅的大小对轴向超声辅助端面磨削金属表面形貌和粗糙度有较大影响，但是现有模型中并未考虑实际加载对振幅的影响，因此提出了一种考虑加载状态下振幅变化的轴向超声辅助端面磨削金属表面形貌及粗糙度预测方法。根据砂轮粒度及尺寸建立了考虑磨粒随机分布的砂轮端面模型，并对轴向超声辅助端面磨削磨粒的三维磨削轨迹进行了数学描述，生成了加工后的表面三维数据矩阵并对表面粗糙数值进行了计算。在此基础上，研究了粗糙度随振幅的变化规律，提出了振幅衰减形貌映射系数这一概念，并给出了其标定方法。通过振幅衰减形貌映射系数近似计算出加载状态下的振幅并代入到所建立的轴向超声辅助端面磨削表面形貌及粗糙度预测模型中，实现了金属表面形貌模拟及粗糙度预测。最后，通过试验对所建模型的正确性进行了验证。





摘要: 针对 GaAs 基半导体激光芯片谐振腔面的超精密解理制造技术需求, 开展 GaAs 材料解理加工分子动力学仿真及加工工艺实验研究。首先建立 GaAs 材料划片过程的分子动力学模型, 研究[100]和[110]晶向的表面微观形貌及亚表面损伤深度, 分析材料各向异性对划片形貌的影响机制; 然后开展解理工艺实验对 MD 模型进行了验证, 并分析解理面形貌的变化情况。仿真结果表明: 相比于[100]晶向, [110]晶向上最大损伤宽度、划片宽度和亚表面损伤深度平均值分别降低 5.23%、3.98% 和 2.61%, 沿该晶向所得划片质量更优, 此外最大损伤宽度、划片宽度和亚表面损伤深度均随划片深度增加而增加, 而划片速度对 GaAs 表面形貌及亚表面损伤影响较小; 通过工艺实验验证了 MD 仿真结果, 并确认[110]为 GaAs 最佳解理加工晶向。

CONTENTS

- 1 Research Progress of Sensory Feedback for Intelligent Upper-limb Prosthesis**
HU Yawen JIANG Li YANG Bin
- 11 Research Status and Development Trend of Wall Climbing Robot**
MA Jiliang PENG Jun GUO Yanjie CHEN Xuefeng
- 29 Research on Multimodal Interaction System of Lower Limb Exoskeleton Oriented to Competitive Training**
QI Wenqian SUN Shouqian CHEN Chao ZHANG Yebingqing ZHAO Dongwei
- 41 Design of Locust-inspired Eight-bar Jumping Robot Based on Take-off Stability**
MO Xiaojuan GE Wenjie REN Yifei ZHAO Donglai WEI Dunwen
- 53 Adaptive Online Compensation for Industrial Robot Positioning Error**
ZHOU Jian ZHENG Lianyu FAN Wei ZHANG Xuexin CAO Yansheng
- 67 Configuration Principle and Dynamic Antiskid Mechanism of Non-circular Face Gear Differential**
LIU Dawei LI Bingbing FU Zhanglei JIN Xin
- 77 Self-motion Manifolds Calculation and Joint Trajectory Planning of Redundant Manipulators**
ZHAO Jing ZHOU Zhenyong ZHANG Ziqiang
- 89 Path Planning and Recognition Tracking of a Magnetoelastic Miniature Swimmer in Complex Environment**
XIANG Hongbiao YANG Dahu YANG Lu WANG Shoujun ZHANG Mian HUANG Xian
HUO Wenxing
- 100 A Time Optimal Trajectory Planning of the Metamorphic Industrial Robot**
WANG Rugui DONG Yichen CHEN Huiqing
- 112 Design and Analysis of Wrist Joint Based on 3-RRP Parallel Mechanism**
SUN Peng DAI Xianyong LI Yanbiao YANG Kui

- 121 Design and Form Grinding Principle of Linear Triangular End Relief for Double Helical Gears**
SU Jinzhan LI Xudong YIN Xunmin JIA Haitao GUO Fang
- 130 Comparison of Tooth Bending Strength of Speed-increasing and Speed-reducing Involute Spur Gears**
WANG Peng YANG Ce GUO Zhuo LIN Jiachun SHI Zhaoyao
- 142 A New Type of Knee Exoskeleton Bionic Metamorphic Robot and Its Optimal Dimensional Synthesis Based on Multi-body Kinematics**
LI Zhaotong YANG Yuwei LI Bin ZHAO Lei LIU Liang MA Yue LIU Qi
- 156 Path Planning Method for Multi-point Exploration of Underwater Glider to Minimize Energy Consumption**
WU Hongyu NIU Wendong ZHANG Yuling WANG Shuxin YAN Shaoze
- 167 Stability of Active Magnetic Bearing Flexible Rotor System under Base Swing Condition**
ZHANG Peng ZHU Changsheng
- 180 Research on Harmonic Control of Electromagnetic Standard Vibrator Based on Neural Network Inverse Model of Nearest Neighbor Uniform Design**
ZHANG Xufei LIU Xinchao MA Jie ZHANG Fengyang QUAN Long
- 192 Equivalent Modeling and Frequency-dependent Damping Characteristics Analysis of a Four-parameter Isolator Based on Friction Damping**
WANG Min LIAO Songquan SUN Yi DING Jiheng PU Huayan LUO Jun LIU Qingyu
- 202 Passive Vibration Control of Floating Offshore Wind Turbine Based on Mechatronic Inerter**
HU Yinlong XU Jin CHENG Changjun ZHOU Hui CAI Xuhao
- 212 Active Design of Assembly Interface Shape Using Self-adaptive Parameters**
ZHOU Yicong LIN Qiyin WANG Chen HUANG Weixuan ZHANG Guoyue HOU Qiao HONG Jun
- 223 Sensorless Vector Control System of Synchronous Reluctance Motor Based on Hybrid Control in Full Speed Domain**
ZHANG Yongfei LU Wenqi YANG Liangliang WU Wenjun ZHU Qixin
- 235 Uncertainty-oriented Workshop Layout and Scheduling Integration Optimization**
WANG Yaliang GAO Kanghong FAN Xinyu JIN Shousong
- 247 Research on Cooperative Recycling Investment Mechanism between Waste Household Appliances Recyclers and E-commerce Platforms Based on Evolutionary Game**
NI Lin JIA Yunan WANG Sen LIU Nana
- 259 Cutting Performance and Contact Behavior of a Novel TBM Cutter with Surface Spiral Grooves**
ZHANG Mengqi GOU Bin DENG Yu DUAN Wenjun MO Jiliang ZHOU Zhongrong

- 271** Design of a Novel Synchronous Asymptotic Tracking Control for Dual Axis Direct Drive Platform
YUAN Hao ZHAO Ximei
- 280** Design of Micro-Newton Scale Contact Force Measurement System for Small Flying Insect during Landing/take-off Process
YAN Zheng WANG Lixin DONG Shiyun YAN Shixing
- 291** Review of Experimental Study on Melt Pool Flow Dynamics during Laser Material Processing
FU Yanshu LU Cong YE Xiaojun XIAO Xianfeng CHENG Manping SONG Lijun
- 307** Surface Topography and Roughness Prediction of Axial Ultrasonic Assisted Facing Grinding Metal
ZHANG Yuan XU Nianwei BAO Yan DONG Zhigang HAN Song GUO Dongming
KANG Renke
- 317** Molecular Dynamics Simulation and Experimental Investigation of Mechanical Cleavage of GaAs
JIANG Chen GAO Rui ZHENG Zexi

《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)

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) 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 (院士) 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) 张峥 (教授) 张义民 (教授) 张卫红 (院士) 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 (院士) 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 668231

05