

# 机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：大型构件视觉测量与机器人加工

客座主编：丁 汉 院士

客座编辑：李文龙 教授 邦继贵 教授 刘辛军 教授



58卷 **14**期 **半月刊**  
2022年7月

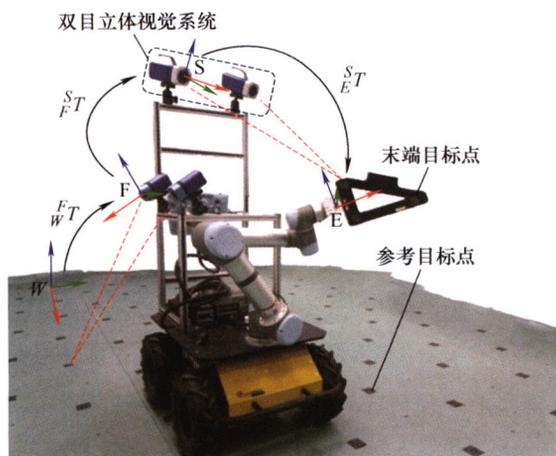
## // 特邀专栏 //

### 大型构件视觉测量与机器人加工

客座主编: 丁 汉 院士(华中科技大学)  
客座编辑: 李文龙 教授(华中科技大学)  
          郝继贵 教授(天津大学)  
          刘辛军 教授(清华大学)  
策划编辑: 张 强(《机械工程学报》编辑部)

#### 1 大型构件机器人原位加工中的测量方案概述

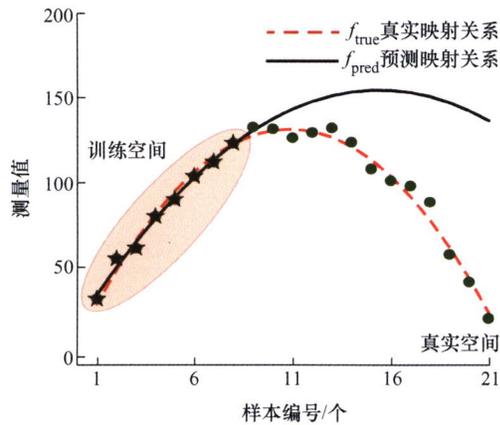
何雨鎬 谢福贵 刘辛军 张 旭



**摘要:** 面向大型构件的加工方案中, 以加工机床为代表的“包容式”加工模式和传统的“分体加工”模式已无法满足高柔性、高效率以及加工质量稳定性和一致性的要求。移动机器人具有轻量化、模块化、灵活性高等优点, 为大型复杂构件的高效高精原位加工提供了一种有效的解决方案。移动机器人原位加工过程通常包含自主寻位、精确定位加工与加工质量原位检测三个阶段, 将机器人通过自主寻位引导至待加工位置, 并精确定位加工, 在加工完成后进行原位检测以缩短生产周期。围绕上述过程, 对大型构件机器人原位加工中基于视觉和基于激光的测量方案进行综述。在移动机器人的定位导航中, 基于视觉和基于激光的测量系统分别因其成本低和数据密度大而得以应用; 精确确定刀具与工件的相对位置中, 双目视觉相关理论与应用都较成熟, 激光跟踪仪也表现出应用潜力; 零件表面质量的原位检测中, 基于激光技术的检测系统检测效率、精度高, 是该过程的理想选择。但现有测量方案仍面临诸多挑战, 且单一测量方法难以满足多变的测量需求, 随着人工智能理论的发展, 多测量手段集成是大型构件机器人原位加工中测量方法的发展趋势。

## 15 基于小样本数据驱动模型的橡胶材料机器人磨抛去除廓形预测方法

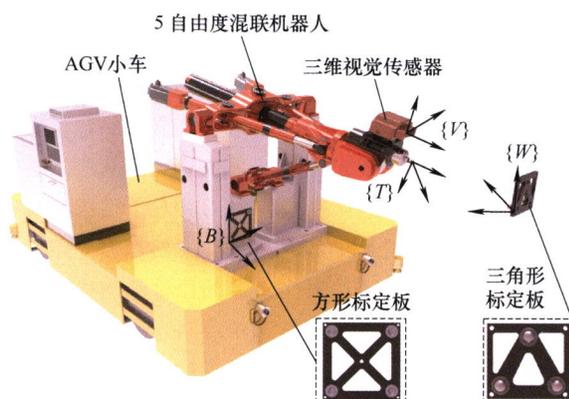
李杰 杨泽源 时强胜 匡民兴 严思杰 丁汉



**摘要:** 在机器人磨抛加工中,材料去除廓形的准确预测对提高加工形位精度、实现闭环控制具有重要意义。然而,飞机加筋壁板牺牲层等大型复杂构件采用的橡胶类材料具有高弹性与耐磨性,其磨抛后的材料去除廓形预测极具挑战。因此,提出一种基于整体趋势扩散技术与极端梯度提升算法(MTD-XGBoost)的橡胶材料机器人磨抛去除廓形预测方法。首先,分析橡胶材料磨抛去除机理,并确定影响其材料去除的独立因素。然后,提出基于三角隶属度函数的虚拟样本生成方法解决了样本稀缺、模型精度差等问题。进一步对样本数据进行了聚类去噪,并采用极端梯度提升算法建立材料去除廓形与打磨头进给速度、旋转速度、工具倾角、法向接触力以及磨粒粒度之间的非线性映射关系。最后进行了对比试验,结果表明所提虚拟样本生成方法有效解决小样本数据下的预测难题,最大预测误差降低 30.3%。相比于支持向量机、贝叶斯回归等方法,所提预测方法在小样本下具有明显优势,并最终实现了平均相对误差小于 10% 的橡胶材料去除廓形预测。

## 25 一种移动加工机器人的视觉定位方法

付津昇 丁雅斌 刘海涛 肖聚亮 黄田

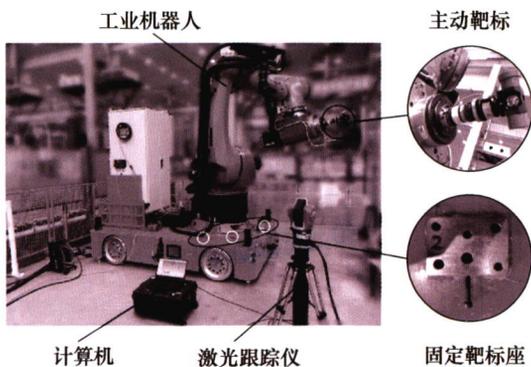


**摘要:** 针对移动机器人多站位加工需求,提出一种在加工现场仅需一次三维视觉测量便可确定移动机器人基坐标系相对工件坐标系位姿的方法。该方法首先利用激光跟踪仪和视觉传感器测量信息分别构造机器人基坐标系相对工件坐标系的齐次变换矩阵;然后以有限位形下后者相对前者偏差的二范数之和最小为目标,辨识机器人全关节运动误差的二次响应面系数。据此,在用视觉传感器获取工件坐标系相对视觉坐标系的位姿后,便可用二次响应面系数修正机器人基坐标系相对工件坐标系的位姿偏差,并通过一次在线视觉测量便可实现移动机器人的快速定位。以一台搭载在 AGV 上的混联加工机器人为例,通过试验验证了所提出方法的正确性和有效性。

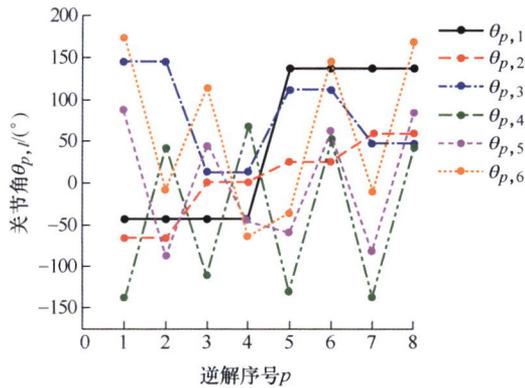


**摘要:** 机器人铣削加工是大型复杂构件的重要加工手段,然而由于机器人本体结构特点及零部件制造、安装等误差,使其在大行程运动过程中轨迹绝对精度较低,严重制约机器人铣削加工的应用工况。现有机器人精度的传感测量控制方法主要集中在基于视觉的定位误差预测和激光跟踪仪的轨迹误差测量等,前者难以考虑铣削轨迹误差,后者操作复杂且设备极其昂贵。为此,提出一种利用双目视觉系统跟踪测量的机器人铣削加工刀具端位置误差计算和加工误差补偿方法,实现机器人铣削加工误差的高效准确预测和补偿。其中通过训练粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)优化的BP神经网络建立了位姿相关的机器人加工刀具TCP位置误差预测模型,基于弦截法建立了位置误差迭代模型,制定了轨迹误差的综合补偿策略。试验结果表明机器人铣削加工最大切深误差从1.354 mm降低到0.244 mm,为机器人铣削加工工况扩展提供了理论和技术基础。

#### 44 移动机器人定位精度实时补偿策略研究

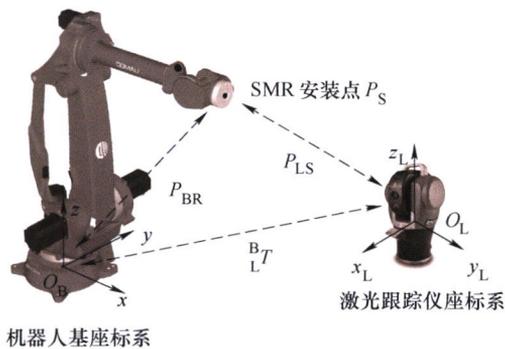


**摘要:** 移动机器人作为解决大型复杂构件原位加工的有效技术途径,其定位精度直接影响产品加工质量和效率。为此,基于数控系统驱动工业机器人的控制架构,提出一种定位精度实时补偿方法。通过拉丁超立方体采样实现机器人关节空间采样点选取,并通过计算采样点集偏差优化采样点集的空间均匀性;建立机器人关节空间与末端位置误差多元非线性映射模型,通过回归系数的求取实现模型结构的简化,基于采样点集完成模型预测精度评估;基于商用数控系统实现机器人工具中心点(Tool center point, TCP)度实时补偿,验证机器人工作空间内不同位姿下TCP点位置误差,通过直线插补轨迹准确度验证了补偿实时性和稳定性。试验结果表明,数控系统驱动的工业机器人定位精度综合误差的最大值由补偿前的1.635 mm降低到补偿后0.334 mm,降低了79.6%,补偿前后的轨迹准确度并未发生明显变化,证明上述方法的有效性和正确性,为移动机器人的应用推广奠定基础。

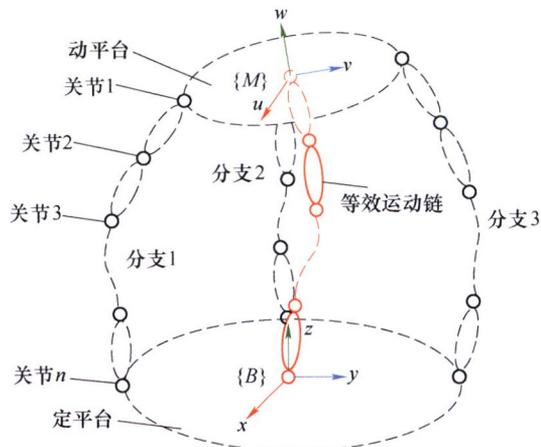


**摘要:** 串联机械臂关节空间路径求解是机器人研究领域的热点。然而, 现有研究往往欠虑串联机械臂自身弱刚性, 致使串联机械臂在给定操作空间路径下关节空间路径选择不当, 影响运动精度。为提升串联机械臂在实际工作时刚度, 提出一种串联机械臂关节空间刚度最优路径求解方法。首先基于 Levenberg-Marquardt(LM)算法求取串联机械臂关节空间路径可行解, 进而通过定义串联机械臂刚度性能指标, 以刚度性能最大为目标, 实现串联机械臂关节空间刚度最优路径求解, 最后在 6 轴串联机械臂上进行方法验证。结果表明, 面向相同操作空间路径, 提出方法得到的串联机械臂关节空间路径刚度与基于连续迭代的数值法相比提高了 50%以上, 证明提出方法可有效提升给定操作空间路径下串联机械臂运动刚度, 对提高串联机械臂运动精度, 抑制变形和颤振, 进而实现串联机械臂在机械加工领域的推广与应用具有重要意义。

62 基于扰动观测器的工业机器人高精度闭环鲁棒控制



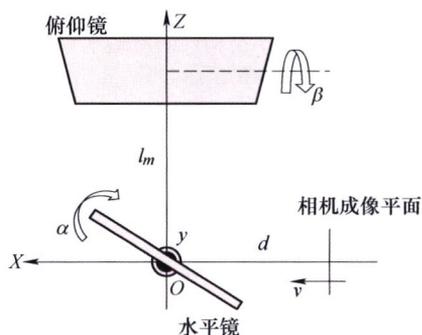
**摘要:** 工业机器人具有很高的重复定位精度但绝对定位精度较低, 这限制了其在高精度加工中的应用。提高绝对定位精度的传统方法有几何参数标定和离线误差补偿, 但它们的绝对定位误差仍有数百微米, 往往不能满足要求。更有效的绝对定位精度提升手段是在线补偿, 但目前相关研究大多基于简单的 PID 控制, 难以在复杂工况下实现精确的轨迹跟踪。因此提出一种高精度鲁棒控制方法以提高工业机器人在线补偿中的位置控制精度和对于外界扰动的抵抗能力。该方法使用激光跟踪仪实时测量机器人末端位置, 通过二阶扰动观测器识别外部扰动, 并在扰动观测的基础上以滑模控制器完成机器人的鲁棒控制, 其中扰动观测器观测误差的有界性和闭环系统的渐进稳定性均通过李雅普诺夫方法得到证明。该方法在 COMAU 工业机器人上得到验证, 试验结果表明使用基于扰动观测器的闭环鲁棒控制进行在线补偿时, 笛卡儿空间内追踪误差模值的方均根值为 0.037 mm, 仅为基于 PID 在线补偿方法的 39%。



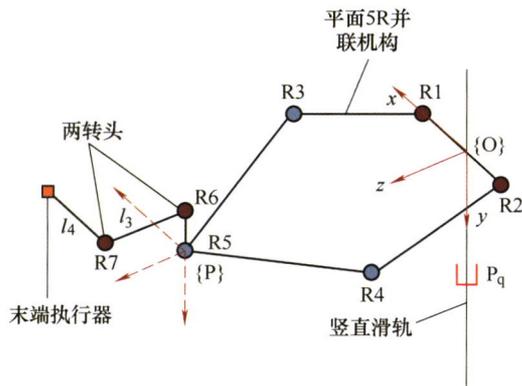
**摘要:** 为了解决并联机器人结构复杂难以准确求解误差模型的问题, 提出一种基于等效运动链的并联机器人运动学标定方法。首先通过并集和交集算子求解动平台上的运动空间解析表达式, 构建与动平台运动空间等效的虚拟串联运动链, 并对其进行误差模型, 再将末端误差补偿到等效运动链的末端, 最后通过并联机器人运动学反解计算出误差补偿后动平台末端位姿对应的驱动值, 并将其补偿到并联机器人的驱动关节中。以 2-UPR-RPU 并联机器人和冗余驱动的 2-UPR-2-RPU 并联机器人为例, 二者的运动空间都等效于一个 RPR 串联运动链, 对虚拟串联 RPR 运动链进行误差建模, 并对误差模型进行仿真与标定试验验证。试验结果表明, 标定后的 2-UPR-RPU 并联机器人和冗余驱动的 2-UPR-2-RPU 并联机器人位置误差和姿态误差平均值下降明显, 均验证了该方法的正确性。所提方法将并联机器人的误差建模转化为等效的串联运动链的误差建模, 直接将等效运动链补偿的末端位姿代入并联机器人的运动学反解即可得到驱动关节的补偿值, 无需进行并联机器人的运动学正解, 具有计算简单的优点。

## 85 可变视角下大范围视觉高分辨率快速测量

钟雨君 陈宇璇 范鑫 阚艳 金一 竺长安

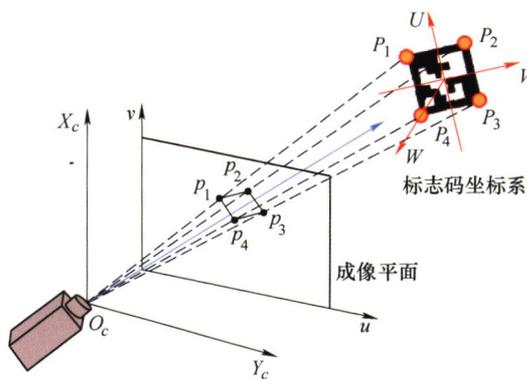


**摘要:** 现有大范围视觉装置往往存在图像畸变严重、成像系统结构复杂、成本高、体积庞大等问题, 给大范围视觉装置的实际应用造成不可忽视的困难。针对这一问题, 提出一种面向大视场的高分辨率轻量化测量系统, 该系统利用二维振镜扫描方式实现对相机视角的控制, 无需改变相机数量和姿态即可实现小型系统下大范围视觉的高分辨率成像, 具有低成本、快速性等优点。同时利用拓扑结构约束构造代价函数, 有效提高了图像匹配的快速性、稳健性及精度。试验结果表明, 基于上述方法, 系统能够实现原相机视场 5 倍以上的大范围成像, 同时, 在测量距离 100 cm 和 70 cm 处分别达到 131.12  $\mu\text{m}/\text{像素}$  和 93.31  $\mu\text{m}/\text{像素}$  的成像分辨率, 该系统的鲁棒性和优化算法在特征点对匹配上的有效性、快速性均得到验证, 为大型构件的高精度视觉测量提供新思路。



**摘要：**中大型铸造件合模线、浇冒口等残留特征具有尺寸随机、形貌随机、分布随机的特点，其安全高效高质量去除存在巨大挑战。对于此，提出以兼备高刚度和高灵活性的五自由度混联机器人为从动加工机器人、以具有力反馈信息的三平动并联机器人为主动操控机器人、以及基于主动和从动机器人的遥操作加工方法。首先，通过构造参数化、在线可调的禁止型虚拟夹具(Forbidden region virtual fixture, FRVF)，解决了遥操作过程中由于抖动、通讯延迟等因素导致的过度加工问题。其次，建立了基于增量式位置跟随与人工势场法的遥操作控制模型，以便对主动和从动机器人进行约束与引导。最后，进行仿真分析与试验验证。结果表明，FRVF对空间复杂曲面的贴合度高，遥操作控制模型可确保加工区域不越过虚拟夹具表面，2.32 m×1.65 m×1.24 m灰铸铁铸造件残留特征的去除率达95%以上，一次加工后的表面粗糙度2.1 μm，加工效率较人工方式提升了4倍。所提出的主从机器人系统及其遥操作加工方法，可有效实现中大型铸造件残留特征的高质量高效率去除加工，为其他中大型零部件高效加工提供新的解决思路。

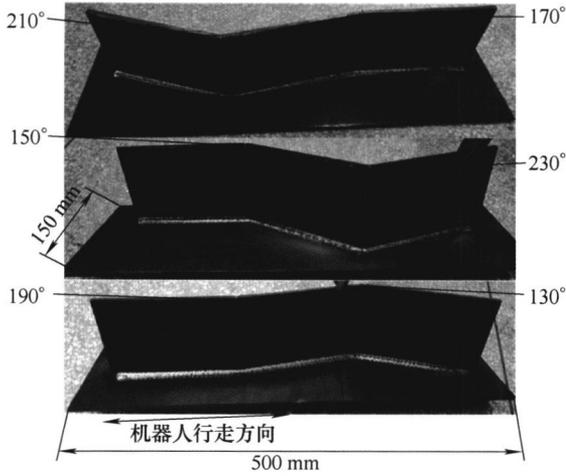
104 特征关联异形构件机器人原位一体化加工技术



**摘要：**特征关联异形构件往往是航空航天、船舶、能源等重大工程领域高端装备的关键件。由于此类构件具有结构异形、待加工特征间具有强关联性等特点，常规数字化加工装置难以满足其一体化制造要求，特别是待加工关联特征间精度往往难以保证。为提升该类构件的制造水平，提出一种集激光刻蚀加工、加工质量原位检测为一体的机器人原位一体化加工系统。系统主要由机器人激光刻蚀单元、视觉测量单元及监测控制软件组成，采用机器视觉实现机器人系统空间定位与激光加工起始点的精准对刀；通过激光刻蚀技术结合机器人轨迹规划，实现特征关联异形构件特征加工；进而通过双目体式显微镜对工件加工质量进行原位高精检测，最终实现特征关联异形构件原位一体化加工。研究成果为实现特征关联异形构件的高质高效加工提供了一种新的技术与装备。

## 116 基于轨迹在线识别的 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW 实时跟踪方法

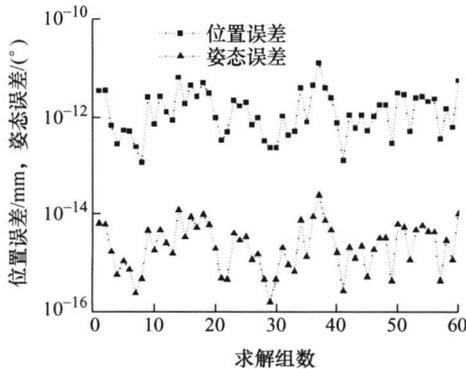
贾爱亭 洪波 李湘文 高佳篷 吴格飞 屈原缘



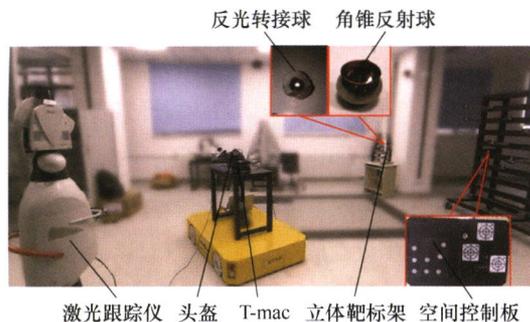
**摘要:** 3D 折线焊缝大量存在于海工装备、大型起重装备、物流运输装备等制造领域中,属于典型的复杂轨迹焊缝,主要通过示教再现的方式进行自动焊接。大量的重复示教工作严重限制了焊接效率和质量,实现焊缝实时跟踪是提高焊接质量和效率的有效途径。针对 3D 折线焊缝实时跟踪问题,建立一种基于轨迹在线识别的机器人摆动熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)实时跟踪系统。首先,提出一种基于点云数据处理的 3D 折线焊缝起焊点焊枪位姿检测方法,获取焊缝起焊点焊枪位姿;利用 3D 折线焊缝位姿信息在线快速提取方法获取焊接过程中焊缝位姿信息,实现焊缝轨迹在线识别。然后,利用摆动电弧偏差识别方法获取焊缝偏差。最后,提出一种基于轨迹在线识别的 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW 实时跟踪方法,利用模糊 PID 控制方法实现焊缝实时跟踪。针对折角范围为  $130^{\circ} \sim 230^{\circ}$  的典型 3D 折线焊缝的焊接试验表明,起焊点寻位位置检测误差小于  $0.4 \text{ mm}$ ,姿态估计误差小于  $1.8^{\circ}$ ,焊缝跟踪误差不超过  $0.4 \text{ mm}$ ,满足 3D 折线焊缝实时跟踪的要求。

## 126 面向轮毂磨抛的手腕偏置机器人运动学快速求解方法

刘志恒 赵立军 李瑞峰 葛连正 夏毅 朱奎

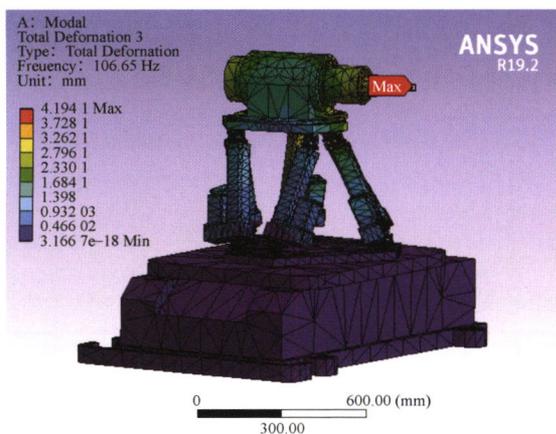


**摘要:** 为了提高轮毂加工的质量和效率,设计并研制手腕偏置的磨抛机器人,该手腕机构关节 5 可实现  $360^{\circ}$  旋转、提高了末端灵活性。但机器人不满足 Pieper 准则,逆运动学方程复杂、高度非线性、耦合性强,有效准确地求解逆运动学困难。为解决这一问题,提出了一种逆运动学快速求解方法,该方法构建了新型的非线性方程,将传统的六个关节角度求解简化为三个关节角度求解。基于该方程,提出了由粗到精的两步法求解逆运动学,第一步估算多组关节角度初始值,基于当前关节角度选取初始值,可避免局部最优问题,提高求解稳定性;第二步根据初始值精确求解所有关节角度值,并对 4、6 轴共线时的多组解问题,给出了机器人特殊状态的解析解。仿真试验从精度、效率、多组解等指标验证了逆运动学算法满足轮毂磨抛加工要求,并在轮辐加工路径中进一步证明了其有效性。



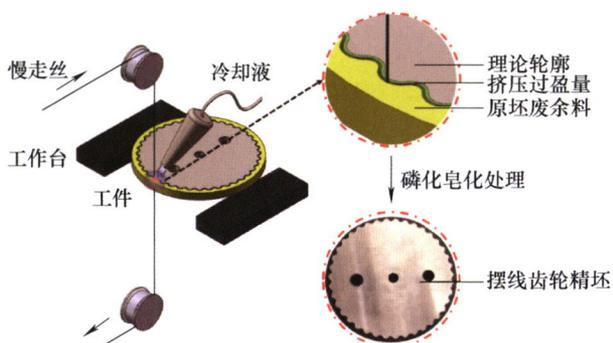
**摘要:** 针对环境复杂的工业现场中自主定位精度低、适应性差的问题, 提出一种结合人工信标和视觉的同时定位与地图构建 (Simultaneous localization and mapping, SLAM) 的双相机定位系统。人工信标无需覆盖全空间布置, 无需具备 ID 信息, 通过两台相机分别拍摄信标及运行视觉 SLAM 算法完成全空间定位, 利用信标定位算法恢复单目 SLAM 的尺度不确定因子并且建立起两种定位算法坐标系之间的关系, 因此当相机视场由信标组成的控制场覆盖范围外再次移回其覆盖范围内时, 可通过 SLAM 算法得到的系统位姿初值实现信标和像点的快速匹配, 从而再次精确定位。将双相机定位系统安装在可穿戴的头盔上, 测量人员头戴头盔便可实现高精度定位。分析了双相机头盔定位系统的工作原理, 并进行了试验验证。试验结果表明, 该方法精度较高、适应性强, 可满足在信标无法全空间覆盖的复杂工业环境下的自主定位需求。

## 146 移动并联加工机器人仿真研究

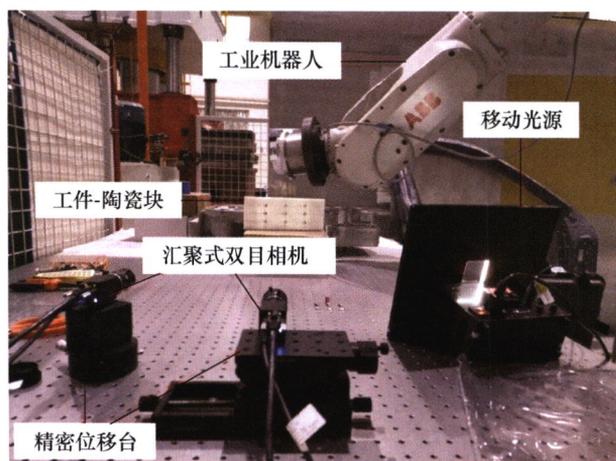


**摘要:** 不同于传统数控加工中工件依次装夹在机床上完成加工, 在基于柔性加工的移动机器人加工中工件固定不动而各种加工机器人移向工件进行加工。针对这种新的加工范式提出一种由并联机器人、电主轴和全方位移动平台组成的自主移动机器人加工单元。首先利用 SolidWorks 搭建三维虚拟样机模型, 并建立运动学正反解的理论模型, 通过对比基于理论模型的 Matlab 仿真结果和基于虚拟样机的 ADAMS 仿真结果验证了虚拟样机的准确性, 之后在 ANSYS 中基于虚拟样机进行了力学和模态仿真分析, 发现所设计的加工单元薄弱部件为紧邻机器人上平台的虎克铰、电主轴刀柄和移动平台保险杠, 为其结构优化提供了依据, 同时所构建的虚拟样机为其数字孪生平台的搭建提供了基础。

## 154 摆线齿轮低成本冷精整加工关键工艺研究

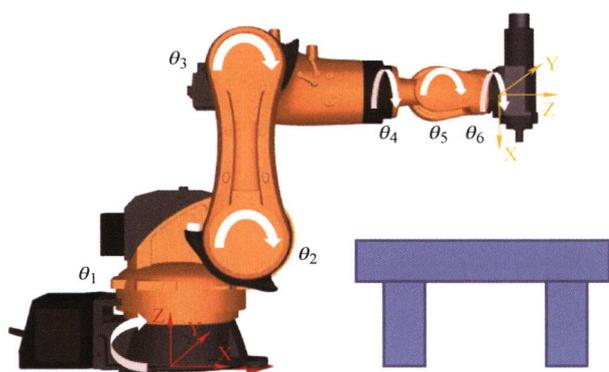


**摘要:** 精密减速器, 尤其是 RV 减速机, 是工业机器人中最为关键的功能部件, 其精密制造成形已经成为当代工业机器人研发与应用的一项重大技术挑战。在此基础上针对工业机器人产业对高精度、高可靠性 RV 减速机需求, 开展精密摆线轮冷精整挤压加工成形工艺研究, 分析挤压精整量和挤压次数对摆线轮廓精度的影响。研究表明, 采用冷精整加工工艺可以制造出高精度的摆线轮, 精整量是摆线轮廓精度最主要的影响因素, 最优精整量参数为 0.05 mm。此外, 结合正反两次挤压能够进一步提升摆线轮廓精度。该工艺能够显著提升生产效率, 大幅度降低制造成本, 为摆线齿轮低成本快速精密加工成形提供了具有重要价值的指导。

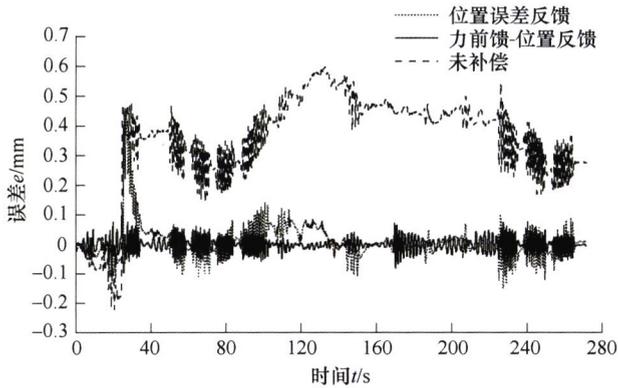


**摘要:**大型复杂构件机器人加工品质高度依赖于视觉引导的机器人定位精度。针对现有平行式双目相机视场范围有限、扫描-重构算法复杂等问题,提出一种汇聚式双目立体视觉算法用于引导加工型机器人进行精确定位。具体包括利用小孔成像原理结合三角形相似性建立汇聚式双目相机间成像模型,实现自主标定、特征匹配以及标记点空间位置信息提取;将数据通过手眼标定算法转换到机器人基坐标系下用于校正工件三维模型;进而自动规划运动路径,引导机器人对工件待加工区域进行精准定位加工。分别以规则陶瓷块和复杂铁轨两种工件进行试验验证,结果表明在视场范围内任意位姿摆放的工件平均定位误差均可控制在4%以内,与传统双目视觉算法相比具有定位精度高、运行速度快等优点,具有很好的应用前景。

## 170 基于迁移学习的铣削机器人定位误差补偿方法



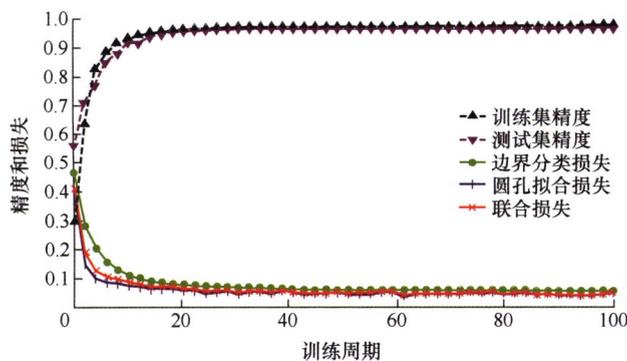
**摘要:**空间网格补偿法是提高机器人定位误差的有效方法之一,然而由于所需采样位姿多导致误差测量环节非常耗时,为提高机器人定位误差补偿效率,提出了一种机理分析与数据驱动的铣削机器人定位误差补偿方法,基于迁移学习来预测机器人工作空间内不同区域的定位误差。首先建立机器人刚柔耦合误差模型,研究立方体与柱体工作空间内不同区域的误差分布特性;之后,考虑误差区域相似性将机器人工作空间分为源域空间与目标域空间,在源域空间基于分级采样策略将完备的机器人采样位姿及误差测量数据作为源域数据,对于目标域空间只需要将少量的采样位姿及误差数据作为目标域数据,源域数据与目标域数据均用于训练高斯过程回归模型,通过基于加权拟合误差的子空间对齐和自适应权重迭代方法提升迁移学习模型预测精度,根据指定机器人位姿参数预测并补偿机器人定位误差;最后,使用KR160铣削机器人系统进行了误差补偿试验以验证该方法的可行性和有效性,试验结果表明,经过补偿后机器人定位误差1.499 mm降低到0.182 mm,所需机器人采样位姿数目减少了70%,使用铣削机器人加工法兰孔,其轮廓误差和位置误差达到0.269 mm和0.331 mm,该方法可以提高补偿效率和机器人定位精度。



**摘要:**工业机器人关节刚度较低,在外负载干扰下加工精度较低,阻碍机器人在加工系统中的进一步推广和应用。为解决该问题,提出一种力前馈控制-位置反馈控制复合补偿方法,其中力前馈控制可超前补偿由外部负载力引起的位置偏差,位置反馈部分用于补偿机器人内部因素导致的位置偏差。利用六维力传感器和激光跟踪仪构建了轨迹误差在线补偿闭环控制系统,进行轨迹精度在线补偿试验,验证该方法的轨迹误差补偿效果。综合考虑机器人因内部参数和外部环境因素引起的误差,提高机器人的轨迹精度,能够实现机器人的精准控制。试验结果表明,该方法具有较强的鲁棒性,在外负载下依然可保持较高的轨迹跟踪精度,200 N冲击载荷下路径轨迹误差峰值为0.082 mm,稳态误差为0.047 mm,为复杂工况下高精度机器人加工奠定了基础。

## 190 基于三维点云深度学习的飞机表面多圆孔基元提取方法

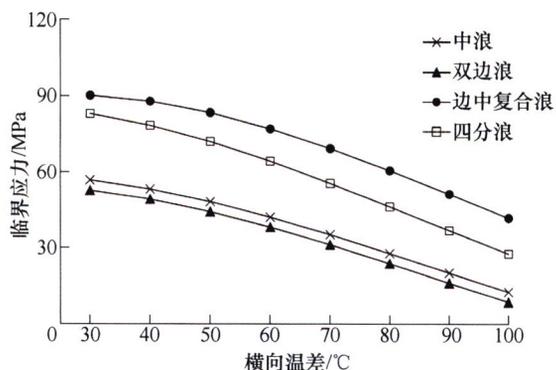
陈红华 魏泽勇 谢乾 魏明强 汪俊



**摘要:**在飞机部件自动制孔系统中,快速、精确检测飞机表面圆孔对飞机装配质量具有重要作用,但从大规模三维测量点云数据中自动化、精确、快速检测所有圆孔特征依旧是一个难点。鉴于此,提出一种基于三维点云深度学习的飞机表面多圆孔基元提取方法。使用三维点云深度学习网络预测三维测量点云中初始圆孔边界点,并基于初始圆孔边界点,学习圆孔法向。同时,设计基于学习的加权最小二乘(Weighted least square, WLS)方法拟合圆孔参数,并将圆孔边界点检测误差、圆孔参数估计误差、圆孔法向学习误差作为多任务联合损失进行网络训练。通过在不同噪声、不同分辨率的模拟点云数据和实测点云数据上进行测试,并与现有先进边界提取、圆孔拟合方法进行对比。试验结果表明,所提出的方法在边界点识别准确度、圆孔参数计算准确度等方面获得了优越的综合性能。

203 宽幅薄规格热轧带钢纵向屈曲变形行为解析研究

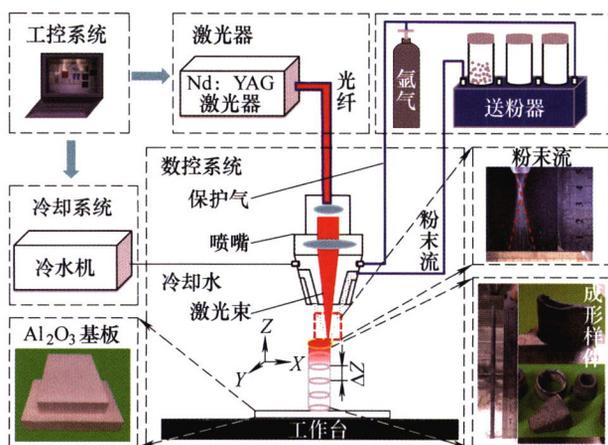
孙文权 何安瑞 刘超 徐日石 袁铁衡



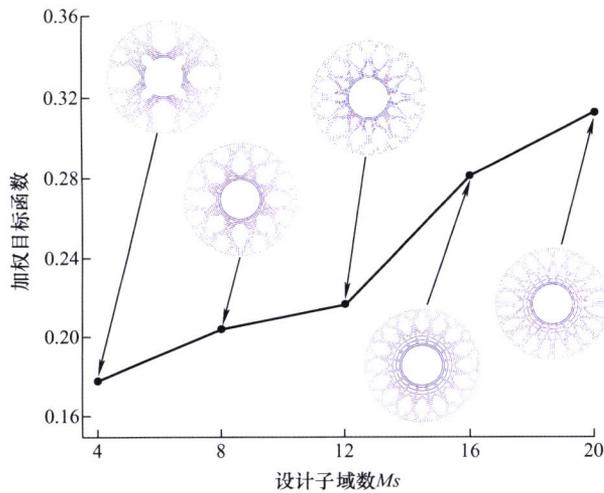
**摘要:** 对于宽幅热轧带钢板形控制成套技术, 完善的带钢屈曲生成机理是高精度板形控制模型建立的必要前提, 也是板形质量改进研究的重要基础。针对目前超薄规格宽幅热轧带钢生产时的浪形问题, 研究热轧中常见的纵向屈曲变形行为, 建立统一形式的高次三角函数描述复杂多变的带钢纵向屈曲应力场和浪形挠曲模态, 同时创新性引入局部系数  $n$  描述全宽和局部纵向屈曲浪形。根据弹性薄板小挠度理论的能量原理建立纵向屈曲力学模型, 获得热轧带钢纵向屈曲的临界屈曲应力表达式, 同时运用 ABAQUS 有限元软件, 对纵向屈曲变形行为进行仿真计算, 验证解析模型的正确性。最后结合热轧带钢高温特性, 考虑分析不均匀分布的温度场、张应力、局部系数等多因素耦合作用对临界屈曲的影响。该解析模型进一步揭示了热轧带钢高次板形生成机理, 并能够快速获得不同纵向屈曲浪形的临界屈曲应力, 为宽幅薄规格热轧带钢的板形控制提供理论和数据基础, 可应用于热轧带钢在线板形控制系统中。

212 直接激光沉积熔体自生氧化铝/钛酸铝复合陶瓷微观组织及力学性能

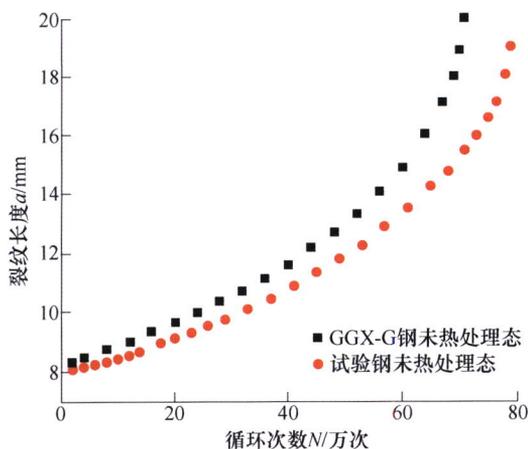
吴东江 黄云飞 赵大可 牛方勇 马广义



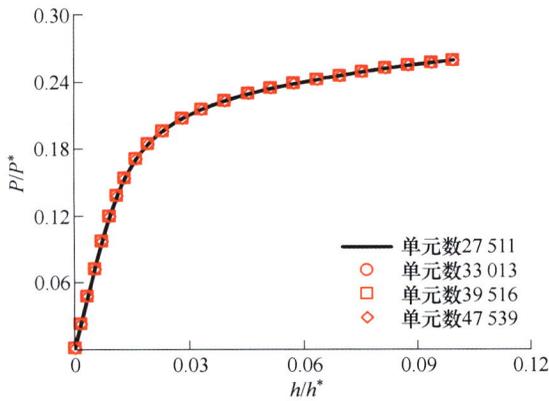
**摘要:** 熔体自生陶瓷因具有接近熔点的超高温性能而成为两机系统热端部件重要的候选高温结构材料之一。熔体凝固条件对熔体自生陶瓷的微观组织及力学性能影响显著, 而工艺条件则是调控凝固条件的重要手段。然而, 目前关于工艺条件对直接激光沉积熔体自生陶瓷影响规律的研究尚不充分。为此, 利用该技术制备了熔体自生  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_6\text{Ti}_2\text{O}_{13}$  陶瓷, 研究了层间提升量对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_6\text{Ti}_2\text{O}_{13}$  陶瓷成形质量的影响。结果表明, 凝固陶瓷主要由  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_6\text{Ti}_2\text{O}_{13}$  相组成, 占主要体积分数的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  相弥散分布于连续的  $\text{Al}_6\text{Ti}_2\text{O}_{13}$  基体相中。由于凝固条件的改变,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  相尺寸随层间提升量的增加逐渐降低且其形态逐渐由胞状枝晶向等轴枝晶转变。层间提升量处于  $0.4\sim 0.6\text{ mm}$  范围内时凝固陶瓷具备精细的微观组织及优异的综合性能, 是较好的工艺窗口。



**摘要:** 基于网格类方法的结构拓扑优化易出现网格依赖性和棋盘格等数值不稳定现象。采用无网格伽辽金(Element-free galerkin, EFG)法建立了正交各向异性材料热力耦合周期性结构的多目标拓扑优化模型,以结构柔度和散热弱度的加权函数为目标函数,并通过重新分配不同子域内对应节点处的目标函数灵敏度保证结构的周期性。研究了权系数、设计子域数、泊松比因子、热导率因子及材料方向角对 EFG 最优多目标周期性拓扑结构和目标函数的影响,并得到了上述参数的合理范围。与有限元拓扑优化结果对比验证了模型的正确性,结果表明该模型不使用灵敏度过滤技术也能获得清晰的结构轮廓边界,并利用 3D 打印技术加工了最优周期性结构。最后,选取了一组最优参数对正交各向异性材料结构进行了 EFG 多目标周期性拓扑优化设计,并与各向同性材料结构对比发现,正交各向异性材料最优周期性拓扑结构的温度场、位移场和应力场均有明显改善,加权目标函数、结构柔度和散热弱度分别降低了 6.5%、32.6%和 48.6%,体现了正交各向异性材料多目标周期性结构的性能优势。建立的无网格法拓扑优化模型,为复合材料周期性结构的轻量化设计提供了重要的理论指导。



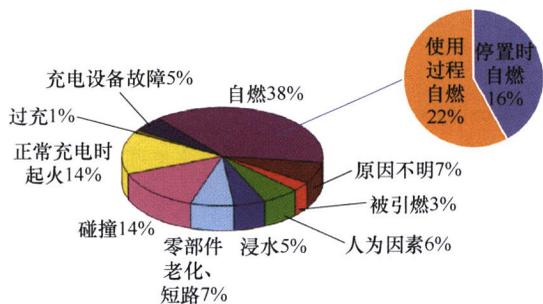
**摘要:** 为量化分析微合金化与淬火工艺、裂纹扩展的关联性,寻找修正钢轨淬火时所产生自回火现象的方法,通过对 GGX-G 重轨钢和自行开发设计的微合金元素重轨试验钢在 8 °C/s 淬火冷速与 8 °C/s 淬火冷速自回火后展开疲劳裂纹扩展试验,结果表明:未热处理态下,试验钢疲劳寿命优于 GGX-G 钢 11 万次;在经 8 °C/s 冷速及 8 °C/s 冷速自回火工艺后,由 77 万次均提升至 107 万次,自回火未影响试验钢的疲劳寿命,仍有良好的疲劳性能;淬火后试验钢在 II 区均出现的慢速扩展区,且自回火后试验钢的  $\Delta K$  范围更高,微合金化后的钢轨对自回火所造成的疲劳性能降低有着优良的抗性;淬火工艺后的试验钢均优于国标要求,且 8 °C/s 淬火冷速与 8 °C/s 淬火冷速自回火的疲劳断口未见差异,同样表明自回火对试验钢的综合疲劳性能影响甚微,有着良好的抗自回火能力。通过向钢轨中添加一定的微合金元素,不仅提升了淬火后钢轨的疲劳性能,同时也修正了自回火对钢轨性能的影响。



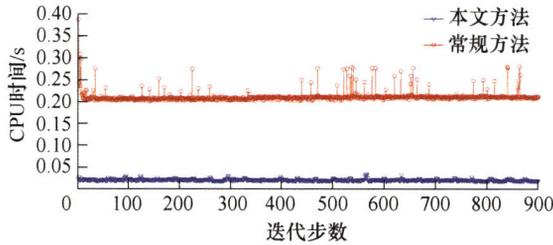
**摘要:** I 型裂纹是工程中最常见也是最主要的裂纹类型, 半个世纪以来, 弹塑性断裂力学多是基于平面的 I 型裂纹问题展开的。然而, 对于含有限尺寸三维约束的断裂力学 I 型裂纹问题, 具有解析表征的三维 I 型裂纹试样的  $J$  积分求解至今仍然是难题。基于能量密度等效方法, 针对具有三维尺寸的 I 型裂纹试样, 分别提出了用于描述载荷- $J$  积分关系和载荷-位移关系的半解析模型, 模型的 7 个理论常数可以由有限元分析简单获得。针对 6 种 I 型裂纹试样进行了三维有限元分析, 结果表明, 新模型对不同材料、不同构形、不同尺寸的受载试样预测的载荷- $J$  积分曲线和载荷-位移曲线与有限元分析结果密切吻合, 之间的比较优度均超过 0.94。新模型可用于发展包括小试样试验的断裂性能非传统试验方法。

/// 运载工程 ///

252 新能源汽车动力电池“机械滥用-热失控”及其安全防控技术综述

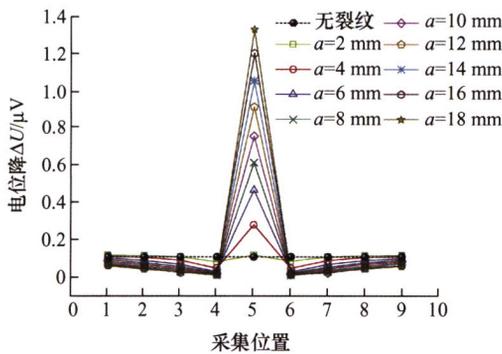


**摘要:** 动力电池热失控是电池故障和失效的终极形式, 也是制约新能源汽车大规模推广和应用的主要行业痛点。对动力电池机械滥用失效形式及其引发的热失控特性、机理与防控技术进行全面综述, 并指出当前研究中存在的局限性。通过总结归纳典型车辆事故案例和机械滥用热失控防控措施, 提出结合实车运行数据复现历史运行工况的研究思路, 并提出“故障-冒烟-漏气-起火-爆炸”的动力电池热失控五级演化风险评估模型, 通过热失控特征参数指标临界阈值的判定和识别进行机械滥用热失控的预测预警, 并根据事故特征采取相应措施抑制热失控的触发和扩散。研究内容和结果对新能源汽车动力电池系统及整车安全性设计具有重要指导意义与推广应用价值。

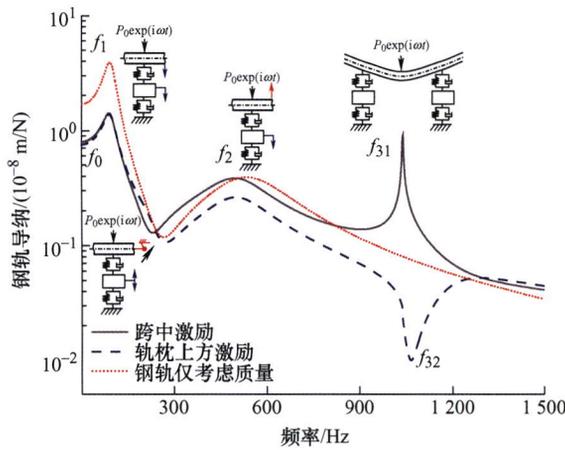


**摘要:** 针对现有智能车辆轨迹规划方法在结构化道路中、高速场景中因均匀采样产生的计算时间浪费问题, 提出一种基于采样区域优化的轨迹规划方法。该方法综合考虑道路环境信息和障碍物信息, 将采样区域划分为基础代价区和障碍代价区, 分别计算两个区域内采样点的代价值并依据该代价值对采样点进行筛选, 高代价点将被忽略, 低代价点将用于计算最优轨迹, 从而避免均匀采样造成的计算量浪费。为进一步缩短规划时间并提高轨迹选择合理性, 将候选轨迹按轨迹代价值进行排序, 依次对候选轨迹进行碰撞检测, 将不满足检测的轨迹剔除并将第一条通过检测的轨迹选为最优轨迹。为检验算法的可靠性, 通过构建仿真道路及设计多个场景, 对规划算法进行仿真验证。研究结果表明, 所提出方法在有效降低单步轨迹规划时间的同时, 保证了最优轨迹的安全性、合理性和可靠性。

288 基于直流电位降的高铁车轴裂纹检测研究



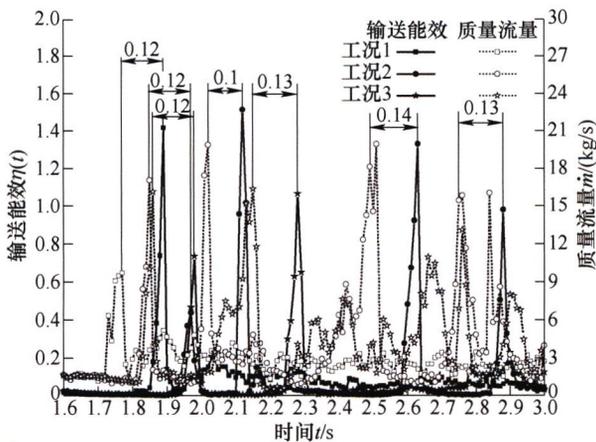
**摘要:** 车轴是高铁车辆走行部重要的部件之一, 其在服役过程中产生的裂纹会严重影响车辆运行的安全性。目前还未实现实时在线检测, 现场检修时采用超声和磁粉方法存在检测效率低、操作复杂等问题。直流电位降(Direct current potential drop, DCPD)检测方法可靠方便, 能够克服上述问题。基于DCPD检测原理, 建立裂纹检测数学模型, 结合稳定直流电场的Laplace方程, 运用ABAQUS建立带裂纹的全尺寸车轴三维有限元模型, 对一系列带不同深度半椭圆裂纹的车轴进行仿真。分析裂纹区域电位降信号, 研究全尺寸高铁车轴电位降与裂纹深度的关系, 并绘制电位降随裂纹深度变化的校准曲线, 讨论影响校准曲线的相关因素, 发现裂纹面相对于轴线的偏转角度和探针的相对位置均会影响校准曲线选择。该研究结果为高铁车轴裂纹的实时检测提供了实现思路和方法。



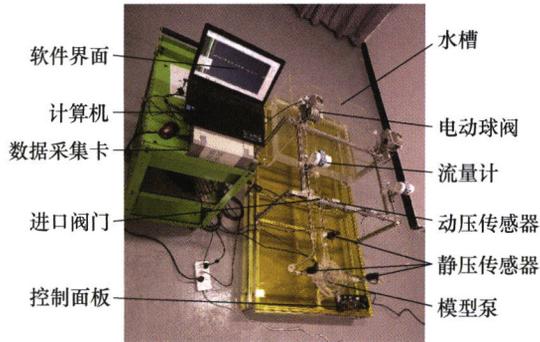
**摘要:** 考虑高速移动载荷作用下轨道结构的离散轨枕支撑、钢轨剪切变形及转动惯量对轨道振动响应的影响, 建立基于 Timoshenko 梁的双层黏弹性离散支撑轨道振动模型, 利用 Fourier 变换法求解具有周期性支撑的轨道响应, 通过与文献中试验结果对比, 验证其在固定简谐载荷下计算结果的正确性。研究表明, 轨枕的离散支撑使得轨道刚度呈现周期性变化, 跨中最小, 轨枕上方最大, 形成高速轮轨系统的参数激励; 移动载荷作用使轨道系统呈现以速度为变量的共振特性, 载荷原点导纳随车速提高先增大后减小, 此外, 低速时轨道振动响应最大值出现在载荷点位置, 随着速度提高, 最大轨道振动响应滞后于载荷点; 移动载荷使得轨道系统各阶振动主频出现变化: 低阶振动主频随速度提高而降低, 达到一定速度时降低为 0, 之后又随速度提高而上升; 高阶振动主频也随速度提高而非线性下降; 由于移动载荷的多普勒效应, 轨枕离散支撑引起 pinned-pinned 共振和反共振出现上、下分叉, 分叉频率偏移量为轨枕通过频率之半。基于 Fourier 变换法实现高速移动载荷下的轨道振动响应分析, 为高速轨道系统设计提供参考。

交叉与前沿

308 粗重颗粒轻介共流气力输送机理及特性



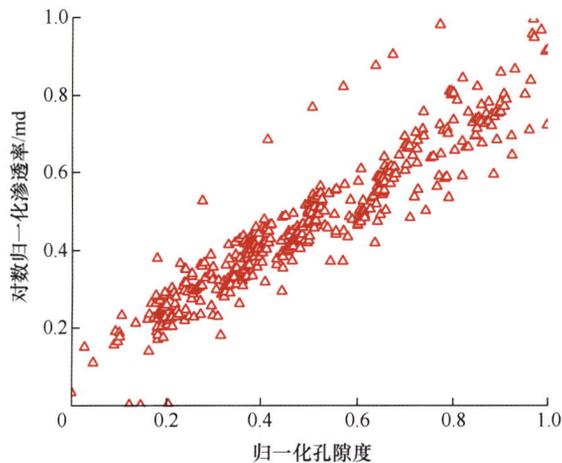
**摘要:** 密相气力输送是散体物料清洁高效输送技术发展的趋势, 粗重颗粒受物料属性限制难以形成稳定密相输送。提出适用于粗重颗粒密相输送的轻介共流气力输送方法, 在粗重颗粒动理分析基础上对输送系统进行设计, 然后从输送机理上阐明该方法较于传统气力输送技术的理论优势, 最后采用计算流体力学-离散元(Computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM)耦合数值模拟方法, 从输送流态、颗粒分布自组织行为和入口压力波动与料栓形态关联等方面研究粗重颗粒轻介共流气力输送过程的颗粒输运特性。研究表明: 颗粒密度和粒径是影响轻介共流气力输送系统流态的主要因素, 颗粒密度影响更为显著, 轻介共流输送可形成散栓与固栓行为并存的准周期动态稳定栓流输送状态; 轻介共流输送过程中, 存在粗重颗粒在上、轻介颗粒在下的混合颗粒分聚自组织行为和轻细颗粒润滑混合移动颗粒床现象; 入口压力波动与混合颗粒的输送流态和质量流量具有强关联, 输送能效与颗粒质量流量变化图可联合估算料栓速度和长度。研究有利于拓宽气力输送适用领域, 为粗重颗粒密相气力输送提供了新途径。



**摘要:** 由于复合式叶轮的复杂结构, 叶轮中会产生间隙涡、轴向旋涡等涡结构, 这些涡会严重影响流体机械的内流场及外特性。为了揭示叶片数对新型开放式水泵水力性能及内部流场的影响, 采用  $k-\varepsilon$  湍流模型, 对相同叶栅稠密度下四种不同的叶片数方案进行了数值模拟, 研究了各方案叶轮的内流特征, 结果表明蜗壳的双隔舌设计对叶轮流道内的流场产生影响, 叶轮内流动呈现交替变化的规律, 叶轮进口和出口受到较高的湍流作用而中心处涡强度相对较低。随着叶片数的增大, 复合式叶片的水力性能升高, 叶轮内压力减小但涡量明显增大, 涡的强度也随之增大。通过  $Q$  准则对涡结构的识别, 分析了不同截面处涡团的分布, 结果表明叶片尾缘脱落涡与二次流相互作用在叶轮吸力面产生大量的涡结构。叶顶间隙的泄漏涡从叶片背面向流道中间发展, 随着流动的发展, 涡的范围变大, 形状也发生改变。研究结果为复合式叶轮叶片数的选取提供了理论依据。

### 328 基于深度学习的多孔介质渗透率预测

刘浩 须颖 罗杨泉 肖海善



**摘要:** 渗透率是多孔介质的重要属性, 衡量多孔介质对流体阻碍能力。现有渗透率计算方法如有限体积法(Finite volume method, FVM)、格子玻尔兹曼(Lattice Boltzmann method, LBM)等有计算耗时缺点。因此, 基于深度学习研究了多孔介质渗透率的快速预测。利用 X 射线断层扫描成像技术获得了 40 个真实多孔介质图像, 利用人工合成多孔介质的方法扩充 400 个图像。在孔隙尺度上, 利用传统有限体积法模拟制作了图像的渗透率。数据集共 440 套, 按照 9:1 划分了训练集和验证集。建立深度学习网络并进行渗透率预测。训练完成的网络在验证集上表现良好, 误差在  $\pm 15\%$  内。结果表明, 在渗透率预测速度上, 深度学习网络预测时间是传统有限体积法的 25% 左右。验证了直接从图像到渗透率映射的可行性, 同时也有助于理解孔隙与渗透率的关系。

## **CONTENTS**

- 1 Review on Measurement Schemes for Robotic Machining of Large Components In-situ**  
HE Yuhao XIE Fugui LIU Xinjun ZHANG Xu
- 15 Small Sample Data-driven Model for Material Removal Profile Prediction in Robotic Grinding of Rubber**  
LI Jie YANG Zeyuan SHI Qiangsheng KUANG Minxing YAN Sijie DING Han
- 25 Vision Based Approach for Localization of Mobile Machining Robots**  
FU Jinsheng DING Yabin LIU Haitao XIAO Juliang HUANG Tian
- 35 Research on Vision Tracking Measurement and Compensation of Robot Milling Error**  
DI Hongcai PENG Fangyu TANG Xiaowei YAN Rong
- 44 Real-time Compensation Strategy of Mobile Robot Positioning Accuracy**  
YANG Jizhi YUE Yi ZHANG Jiabo ZHOU Yinghao ZHAO Changxi CHEN Qintao
- 54 A Solution Method for Optimal Stiffness Path in Joint Space of Serial Manipulator**  
MA Jianwei SUN Hechen YAN Huiteng LÜ Qi GAO Song
- 62 High-precision Closed-loop Robust Control of Industrial Robots Based on Disturbance Observer**  
ZHANG Zekun GUO Kai SUN Jie
- 71 Novel Kinematic Calibration Method of Parallel Mechanisms Using the Equivalent Kinematic Chains**  
XIA Chun ZHANG Haifeng LI Qinchuan CHAI Xinxue
- 85 Large-range Vision and High-resolution Rapid Measurement with Variable Viewing Angle**  
ZHONG Yujun CHEN Yuxuan FAN Xin KAN Yan JIN Yi ZHU Changan
- 93 Master-slave Robot System and Its Teleoperation Machining Approach for Medium and Large Casting Parts**  
WANG Meng SONG Yimin WANG Panfeng ZHAO Xueman LIAN Binbin  
CHEN Yuecheng SUN Tao

- 104 In-situ Integrated Robot Machining Technology for Special-shaped Components with Correlation Feature**  
MA Jianwei YAN Huiteng LÜ Qi SUN Hechen GAO Song
- 116 Real Time Tracking Method of 3D Zigzag Welding Robot Swing GMAW Based on Online Trajectory Detection**  
JIA Aiting HONG Bo LI Xiangwen GAO Jiapeng WU Gefei QU Yuanyuan
- 126 Fast Solution Method for the Kinematics of Wrist Offset Robot Oriented to Wheel Hub Grinding and Polishing**  
LIU Zhiheng ZHAO Lijun LI Ruifeng GE Lianzheng XIA Yi ZHU Kui
- 137 Autonomous Fast Localization Method Combining Artificial Beacons and Visual SLAM**  
SHEN Wenjie REN Yongjie ZHU Boyuan LIN Jiarui
- 146 Simulation Study of Mobile Parallel Machining Robot**  
ZHANG Bin DING Ruizhe SHANGGUAN Linjian SHI Jinfa
- 154 Research on Critical Technologies of Low-cost Cold Precision Extrusion of Cycloidal Gear**  
TANG Yong WANG Zhiwei CHEN Gong ZHANG Shiwei YUAN Wei
- 161 Realization of Convergent Binocular Vision Algorithm for Guiding Robot Localization**  
LIU Hongdi LÜ Rui TIAN Linli ZHU Dahu
- 170 An Efficient Error Compensation Method for Milling Robot Based on Transfer Learning**  
DENG Kenan GAO Dong MA Shoudong LU Yong
- 181 Force-Position Composite Control Method for Trajectory Accuracy Compensation of Industrial Robots**  
LU Yuan GUO Kai SUN Jie
- 190 Method for Extracting Multiple Circle Primitives Extraction of Aircraft Surface Based on 3D Point Cloud Deep Learning**  
CHEN Honghua WEI Zeyong XIE Qian WEI Mingqiang WANG Jun
- 203 Analytical Study on Longitudinal Buckling Deformation Behavior of Wide-width and Thin-size Hot Rolled Strip**  
SUN Wenquan HE Anrui LIU Chao XU Rishi YUAN Tieheng
- 212 Microstructure and Mechanical Properties of Melt Growth Alumina/Aluminum Titanate Composite Ceramics Prepared by Directed Laser Deposition**  
WU Dongjiang HUANG Yunfei ZHAO Dake NIU Fangyong MA Guangyi

- 223 Multiobjective Topology Optimization of Thermo-mechanical Coupling Periodic Structure Based on Meshless Method**  
ZHANG Jianping LIU Tingxian GONG Shuguang PENG Jiangpeng CHEN Lili
- 233 Optimization of Quenching Process and Fatigue Crack Growth Behavior of Microalloyed Rail**  
CHEN Lin DAI Yuheng CUI Jianwei ZHOU Qingfei CEN Yaodong
- 241 Semi-analytical Elastoplastic Solutions for Mode-I-Crack Specimens Based on Energy Density Equivalence and Three-dimensional Sizes**  
XIAO Huairong CAI Lixun YU Simiao BAO Chen
- 252 Overview of “Mechanical Abuse-thermal Runaway” of Electric Vehicle Power Battery and Its Safety Prevention and Control Technology**  
SHAN Tongxin WANG Zhenpo HONG Jichao QU Changhui ZHANG Jinghan ZHOU Yangjie  
HOU Yankai
- 276 Trajectory Planning Method of Intelligent Vehicle Based on Sampling Area Optimization**  
ZHANG Lipeng SU Tai YAN Yong
- 288 Research on Crack Detection of High-speed Railway Axle Based on Direct Current Potential Drop**  
ZHOU Suxia LU Junlin WU Yi DUAN Suyu SHAO Jing
- 296 Vibration Behaviour of Railway Track under High Speed Moving Load**  
GUAN Qinghua WANG Wenbo WEN Zefeng JIN Xuesong
- 308 Mechanism and Characteristics of Light Medium Mixed Flow Pneumatic Conveying for Coarse Particle**  
ZHOU Jiawei SHANGGUAN Linjian XU Langui WANG Xingxing LI Bing FAN Yisa  
JING Shuangxi
- 320 Influence of Blade Numbers at the Same Cascade Density on the Characteristics of Composite Impeller**  
NING Chao YUAN Shouqi LI Yalin XU Hui ZHENG Feng
- 328 Permeability Prediction of Porous Media Using Deep-learning Method**  
LIU Hao XU Ying LUO Yangquan XIAO Haishan

# 《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) 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) 张峥 (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 668224

142