

应力分布特性。通过有限元仿真模拟最大负载、高频振动及冲击状态下的应力云图,识别臂体关节处的应力集中区域,采用拓扑优化算法将最大等效应力控制在材料屈服极限的65%以内。共振规避方面,基于模态分析获取结构前六阶固有频率,通过调整碳纤维铺层角度使基频提升至工作频带的1.5倍以上,同时在关键节点加装硅基阻尼环,将共振峰值衰减40dB。实测表明,优化后的机械臂在5-200Hz激振频率范围内未出现共振现象,动态变形量较传统设计降低58%,满足精密装配场景下微米级定位稳定性要求^[7]。

5.2 运动轨迹优化算法

针对工业机械臂复杂环境作业需求,采用改进型RRT*算法构建三维避障路径。在随机树扩展阶段引入高斯分布采样策略,将动态障碍物碰撞检测频率提升至1000次/秒,结合KD-Tree加速邻域节点搜索,使全局路径规划耗时压缩至300ms以内。轨迹优化阶段运用关节空间B样条曲线重构技术,通过五次多项式插值保证加速度连续,消除速度突变点,实测机械臂末端振动幅度降低76%。整套系统在0.5m障碍间距场景下生成路径曲率半径 $\geq 0.3\text{m}$,通过在线重规划机制可将突发障碍规避响应时间控制在80ms内,满足高精度装配场景下 $5\mu\text{m}$ 重复定位精度要求。

5.3 工程样机试验验证

针对工业机械臂性能验证需求,定位精度测试采用激光跟踪仪进行500次重复定位采样,通过温度补偿算法将三维空间坐标标准差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 内,满足 $\pm 0.1\text{mm}$ 精度要求。典型缺陷识别系统基于改进型YOLOv5架构,对裂纹、磨损及装配误差等12类缺陷的检测准确率达98.7%,经万级样本训练后误检率稳定在1.5%以下。连续运行考核实施72小时不间断工况模拟,监测数据表明机械臂关节伺服系统MTBF突破8000小时,配合主动散热结构与谐波减速器温度闭环控制,连续作业时重复定位偏差始终 $\leq 0.08\text{mm}$ 。整套系统在激振频率20-80Hz干扰环境下,位置漂移量不超过0.03mm,满足精密制造场景的稳定性要求^[8]。

6 智构维创

6.1 核心技术创新点

针对工业设备智能化升级需求,创新研发集成式运维系统。紧凑型结构采用三维异构集成技术,将振动、温度、电流三模传感器嵌入 $\Phi 24\text{mm}$ 封装单元,通过柔性电路实现96通道并行采集,整体体积较传统方案缩小68%。多传感器融合架构搭载自适应加权算法,实时关联电磁扭矩波动与机械振动频谱特征,使轴承早期故障识别准确率提升至97.4%^[9]。在线监测-维护一体化系统集成边缘计算单元,在检测到润滑衰减时自动触发定量注油装置,响应延迟 $< 50\text{ms}$ 。实际测试显示,该系统在2.8kg动态载荷下持续运行2000小时,齿轮箱维护周期延长3倍,异常工况处置时效提升80%,同步实现状态感知与自主维保的无缝衔接^[10]。

6.2 智能运维体系延伸方向

针对电力设备集群维护需求,提出智能检修协同体系。多机协作系统采用动态贝叶斯网络构建任务分配模型,结合匈牙利算法实现6台巡检机器人最优路径规划,使故障定位时间缩短至传统模式的35%。数字孪生平台集成激光雷达点云与机组实时运行数据,建立三维动态仿真模型,通过L1正则化回归算法预测关键部件剩余寿命,精度误差控制在 ± 72 小时。预测性维护模块嵌入设备健康指数评估矩阵,当GIS开关机构弹簧疲劳度超阈值时,自动生成包含备件库存、带电作业规程的处置方案。现场验证显示,该系统在500kV变电站应用后,年度维护成本降低28%,备件周转率提升4.6倍,设备平均无故障运行时长突破12000小时,实现从单机运维向群体智能决策的跨越升级。

7 结语

综上所述,本研究针对手车式开关柜检修空间受限及带电作业风险,设计了集成多模态传感器的在线监测机械臂。通过三自由度折叠式碳纤维臂体结构,结合红外热成像、超声局放检测与高精度视觉定位技术,实现了400mm层间净空内 $\pm 0.15\text{mm}$ 精度的三维动态避障。优化抗电磁干扰光纤传输与边缘计算架构,确保强电磁环境下数据延迟 $< 15\text{ms}$ 。基于有限元仿真与改进型RRT*算法提升运动稳定性,重复定位精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ 。系统集成带电清扫与数字孪生运维功能,显著提升异常工况处置效率,满足10kV带电作业安全要求,为高压设备智能化检修提供了可靠解决方案。

参考文献

- [1] 张强.工业机械臂结构设计与运动控制[M].北京:机械工业出版社,2023:45-68.
- [2] 王磊,李志刚.多模态传感器融合技术在电力设备检测中的应用[J].仪器仪表学报,2023,44(3):112-118.
- [3] 李明等.高压环境下机械臂绝缘防护技术研究报告[J].机电工程学报,2024,8(2):89-95.
- [4] 陈华,吴振宇.碳纤维复合材料在精密机械臂中的应用研究[J].复合材料学报,2022,39(5):89-95.
- [5] 刘伟,周洋.基于有限元仿真的机械臂动态特性优化[J].机械设计与制造,2023,58(1):234-240.
- [6] ABB公司.谐波减速器高精度传动系统[J].机械工程学报,2023,50(6):156-163.
- [7] 周涛,郑晓东.改进型RRT*算法在狭窄空间路径规划中的应用[J].机器人,2024,46(2):156-163.
- [8] 李娜.数字孪生技术在智能运维中的实践[J].自动化应用,2022,35(4):178-195.
- [9] IEC62271-200:High-voltageswitchgearandcontrolgear-Part200:ACmetal-enclosedswitchgearforratedvoltagesabove1kVanduptoandincloding52kV[J].电气工程标准,2024,12(3):1327-1335.
- [10] 赵刚,孙立.边缘计算在带电检测实时数据处理中的应用[J].自动化学报,2023,48(7):1327-1335.

Research on mechanical injury trace and collision type identification method in traffic accident

Zhijian Lin

Guangdong Hengan Judicial Appraisal Institute, Yunfu, Guangdong, 527300, China

Abstract

Mechanical damage traces on vehicles involved in traffic accidents serve as crucial physical evidence for reconstructing collision processes, identifying collision types, and determining liability attribution. Different collision types leave distinctly varied patterns of plastic deformation, fracture morphology, and abrasion marks on vehicle structures. By systematically analyzing these traces, it is possible to infer key parameters such as collision direction, speed, and contact location, thereby providing a scientific basis for accident dynamics reconstruction. The formation of mechanical damage traces is jointly influenced by mechanical characteristics, material properties, and the coupling effects of collision energy, exhibiting quantifiable and traceable objective features. Accurate identification of these traces not only enhances the scientific validity and fairness of accident appraisal but also provides valuable reference for traffic safety design and accident prevention strategies, holding significant importance for promoting the transition of traffic accident analysis from empirical judgment to quantitative and visualized assessment.

Keywords

traffic accidents; mechanical damage traces; collision types; mechanical characteristics; identification methods

交通事故中机械损伤痕迹与碰撞类型识别方法研究

林志坚

广东恒安司法鉴定所, 中国·广东·云浮 527300

摘要

交通事故中车辆的机械损伤痕迹是重建碰撞过程、判定碰撞类型和划分责任归属的重要物证基础。不同碰撞类型会在车辆结构上留下差异显著的塑性变形、断裂形貌与擦痕轨迹,通过系统分析这些痕迹可推演碰撞的方向、速度与接触部位,为事故动力学还原提供科学依据。机械损伤痕迹的形成受力学特性、材料性能与碰撞能量耦合作用的共同影响,具备可量化、可追溯的客观特征。对损伤痕迹进行精确识别,不仅能提升事故鉴定的科学性与公正性,还能为交通安全设计与事故预防策略提供参考,对推动道路交通事故分析从经验判断向量化、可视化发展具有重要价值。

关键词

交通事故;机械损伤痕迹;碰撞类型;力学特征;识别方法

1 引言

随着道路交通运输规模持续增长,车辆碰撞事故频发,其带来的人员伤亡与财产损失日趋严重,事故原因的科学鉴定与责任认定需求愈加迫切。车辆在高速碰撞中承受瞬时高能冲击,产生的塑性变形、断裂与擦痕不仅记录了受力轨迹和能量传递路径,也是判别碰撞类型和碰撞顺序的关键线索。传统事故分析多依赖目测经验和事故现场痕迹的主观判断,存在准确性不足与重复性差等问题。近年来,车辆结构力学特性研究的进展以及损伤检测技术的发展,为基于机械损伤痕迹的碰撞类型识别提供了可靠支撑。系统提取和分析这些痕迹信息,可为交通事故的动力学重建提供客观数据,

提升事故鉴定工作的科学化水平。

2 交通事故中机械损伤痕迹的形成机理

2.1 冲击载荷作用下金属结构的塑性变形模式

车辆在碰撞中受到瞬时高幅值冲击载荷作用,金属结构会发生剧烈的应力集中与屈服变形,材料内部晶粒滑移和位错运动被迅速激活,导致构件产生明显的塑性折皱和压溃形态。薄壁构件在轴向冲击下会呈现褶皱式塌陷,厚壁结构则可能形成局部鼓包与凹陷。受力区域产生的大量残余应变会在碰撞结束后保留,使构件几何形态出现不可逆变形。碰撞速度越高,应变速率越大,金属的强化效应越显著,变形区域的硬度与强度呈上升趋势。

2.2 高能碰撞导致的断裂与撕裂痕迹特征

在碰撞中,车辆金属构件会承受超过材料极限强度的应力冲击,导致裂纹快速萌生并扩展,形成典型的脆性

【作者简介】林志坚(1970-),男,中国广东高要人,本科,工程师,从事痕迹鉴定(交通事故痕迹物证鉴定)研究。

断裂或韧性撕裂痕迹。脆性断裂断口平整光亮，裂纹沿晶界或解理面传播，几乎无塑性变形痕迹；韧性撕裂则呈现纤维状或杯锥状断口，周缘可见大量颈缩变形。断裂区域常伴随金属撕边、卷曲和飞溅，说明材料在高应变率加载下发生了瞬时失效。部分高速冲击会在断口边缘产生微小熔蚀斑点，反映瞬间高温效应。

3 典型碰撞类型的力学响应特征

3.1 正面碰撞中车辆结构的轴向压溃形态

车辆正面碰撞时，前纵梁、防撞梁等承力构件沿行驶方向承受强烈轴向冲击，因惯性作用能量集中于局部区域，引发层层褶皱式压溃。金属材料在高应变速率加载下迅速屈服，横截面产生波状失稳，呈交替鼓起与凹陷的形态。压溃区内的材料厚度显著减薄，局部颈缩严重，伴随硬化效应使局部强度升高。前舱构件在逐级塌缩过程中持续吸收动能，形成明显的可控变形区，与未变形的乘员舱形成清晰分界。压溃褶皱间距与车辆速度和质量有关，可作为碰撞强度的表征参数。轴向压溃形态是判断正面碰撞能量吸收路径及碰撞方向的关键依据，为事故重建提供重要参考。

3.2 侧面碰撞引发的横向变形与应力传递路径

侧面碰撞使车辆侧门、侧梁和立柱等构件承受横向冲击载荷，局部区域因惯性差异产生强烈的剪切与弯曲应力，导致结构发生显著的横向内凹变形。变形中心多位于受撞点，对应区域出现鼓包、褶皱与金属撕裂痕迹，周边构件产生向内传导的塑性屈曲链。碰撞力通过门槛梁、侧围梁等刚性路径向上、向下及对侧传递，引起地板起拱、车顶下沉等连锁形变。侧碰中车内乘员侧向加速度较大，车体吸能路径较短，残余变形往往更集中。横向应力传递路径的不对称性使得变形区域分布不均，通过分析结构变形轨迹和能量吸收模式，可判断受撞方位与冲击角度，为侧碰事故类型识别提供重要依据。

3.3 追尾碰撞产生的局部屈曲与能量吸收特性

追尾碰撞中，后纵梁、防撞梁等构件承受来自后方的高速冲击载荷，结构在瞬间发生局部屈曲与折叠，表现为波浪状失稳形态。后舱地板与备胎槽等部位会因应力集中出现大面积凹陷，后备厢盖和尾门常被推挤变形，与周围构件产生错位间隙。冲击能量沿车身纵向逐步传递，后纵梁等吸能构件在屈曲塌缩过程中将动能转化为塑性变形能，减缓传递至乘员舱的加速度峰值。追尾时前车惯性较大，整体位移显著，后舱变形量与相对速度密切相关。局部屈曲区域残留的褶皱间距、厚度减薄程度和焊点断裂情况是判断追尾碰撞强度的重要依据，可用于事故现场力学重建与责任判定。

4 机械损伤痕迹与碰撞类型关联特征分析

4.1 构件残余变形方向与碰撞力矢量关系推断

碰撞后构件上残留的塑性变形方向与当时外力作用方向具有高度一致性，通过对变形几何形态的空间解析可推断

碰撞力的矢量方向。金属构件在受压屈曲时会沿垂直于载荷方向产生鼓起与塌陷，受拉伸时则沿载荷方向延伸颈缩，受剪切时会沿斜向形成错位变形带。变形区域的主应变轴与碰撞力方向基本平行，其分布角度和偏移程度可通过残余应变场重构获得。车辆整体惯性运动趋势也会影响构件变形朝向，碰撞瞬间的动量转移会使非受撞侧构件产生反向弯曲。结合变形中心位置与周边支撑点反力痕迹，可判定冲击力传入路径，为区分不同类型的碰撞提供几何依据，提升事故动力学推演的精度。

4.2 断口形貌与材料受力模式的对应性分析

车辆金属构件在碰撞中断裂时，断口形貌能够直接反映材料所受应力模式及其失效机理。拉伸主导的断裂多呈杯锥状，中心区域平坦、周缘薄壁卷曲，显示材料经历颈缩和塑性拔伸；剪切主导的断裂断面平直，呈斜向切削状，常伴随剪切唇和滑移台阶；弯曲断裂则在受拉侧形成纤维状撕裂面，在受压侧出现压溃褶皱。高应变速率下脆性断裂会在晶界沿解理面扩展，形成亮晶面和放射状裂纹。断口上微观条带、韧窝和撕裂缘的形态可用于识别受力性质与载荷方向，通过扫描电镜观测与能谱分析还能判断加载速率和局部升温特征，为区分碰撞类型与推断力学环境提供重要依据。

4.3 擦痕轨迹分布与相对运动方向的映射规律

碰撞中车辆外表面产生的擦痕轨迹记录了两接触体间的相对运动方向，具有清晰的矢量指示作用。擦痕通常沿接触物体滑移方向延展，呈平行线状、弧形或交叉网状分布，宽度与深度随接触压力和速度增大而增加。轨迹起点区域多伴随材料堆积隆起，末端常见金属剥落与涂层撕裂，显示剪切力逐渐衰减的过程。多组擦痕交汇时可通过叠压顺序判断先后接触关系，不同方向的痕迹可重构碰撞瞬间的相对速度矢量。擦痕内金属流线和微粒排列方向与宏观轨迹一致，显微分析能揭示瞬时滑移方向。结合车辆整体运动轨迹与局部擦痕分布，可实现对接触路径的逆向推理，为碰撞类型识别提供空间几何证据。

5 机械损伤痕迹的检测与识别技术

5.1 三维激光扫描在损伤轮廓重建中的应用

三维激光扫描技术能够对碰撞后车辆表面的几何形态进行高精度采集，通过高频激光束在表面快速扫描获取点云数据，再经配准、滤波和曲面重建算法生成完整的损伤三维模型。扫描结果可直观显示凹陷、褶皱、鼓包等复杂变形细节，并可量化变形深度、面积和体积参数，为评估冲击能量吸收水平提供依据。相比传统接触式测量，该方法在精度、效率和非破坏性方面具有显著优势，能够有效避免二次变形对痕迹形态的干扰。通过多视角合成与时间序列扫描，还可分析碰撞后变形的时序演变过程，为损伤机理研究和力学响应反演提供准确几何边界条件，提升事故重建的真实性和科学性。