

轨道交通激光脱漆除锈系统

中数智科(杭州)科技有限公司

一、背景与挑战

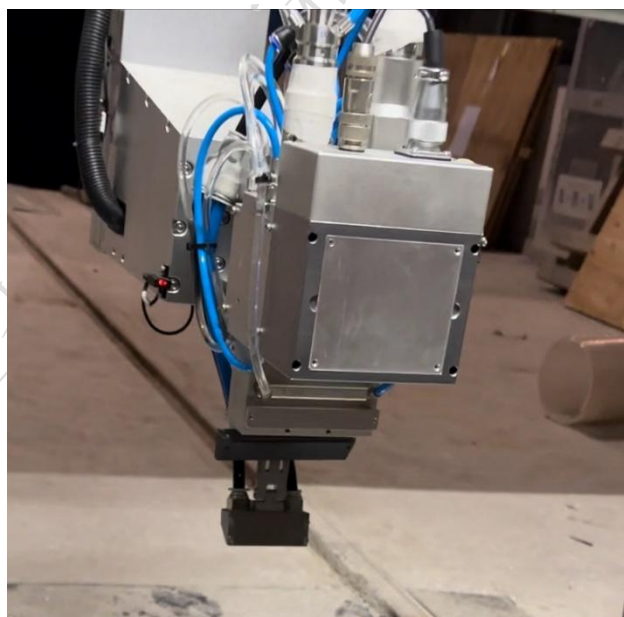
当前轨道交通行业在轮对、零部件等工件的脱漆除锈作业中，面临多重技术与应用难题：其一，零部件表面漆层多为多层结构，各漆层物化性质差异大、厚度不均、分布不规则，传统单一形制激光难以实现理想脱漆除锈效果，易出现漆层残留或基材损伤；其二，待清洗零部件类型多样（如轴箱、转向架、定位转臂、抗侧滚扭杆等）、材质各异，清洗对象涵盖油漆、锈蚀、胶、油污等，传统清洗方式难以实现针对性匹配，清洗效率低下；其三，传统化学清洗依赖大量化学试剂，机械打磨易产生粉尘、废液，对环境造成严重污染，且缺乏有效的“三废”回收机制，不符合绿色发展需求，作业过程中对员工职业健康造成危害；其四，随着我国城市轨道交通运行里程和时长不断增加，大部分人工+少部分设备的作业方式无法满足新的要求，传统方式难以实现零部件正反面自动识别、清洗路径动态调整及多部件批量化同步清洗，无法满足轨道交通“机器换人”及“灯塔工厂”建设的发展趋势，多品类全自动激光清洗设备是轨道交通设备维护的重要发展方向；其五，激光清洗过程中子系统复杂、电能转化不完全，易产生大量碳排放，与绿色低碳发展要求存在差距。

轨道交通智能激光清洗系统成功克服了多品类全自动激光清洗技术的难题，为轨道交通车辆维护提供高效环保智能的解决方案，并将成为轨交行业维护保养的新趋势。

二、解决方案与创新点

（1）复合激光无损智能增效清除关键技术

在零部件激光除漆中，漆层一般为多层结构，各漆层存在物化性质差异，厚度不同，分布不均匀等问题，在激光清洗除漆方面，采用单一形制激光很难实现理想的除漆效果，而复合激光则可以通过对激光参数的调控，更容易实现分层除漆，提升除漆效率，改善除漆效果。以转向架基体表面不同种类、不同厚度漆层为清洗对象，建立了组合激光分层除漆的理论模型，采用仿真与实验相结合的方法，分析了连续激光和连续-纳秒组合激光两种不同形制激光除漆过程的温度变化、去除深度变化和激光除漆效果，给出了不同形制激光清洗阈值，针对清洗阈值的变化特点，分析了激光除漆作用机理的差异。

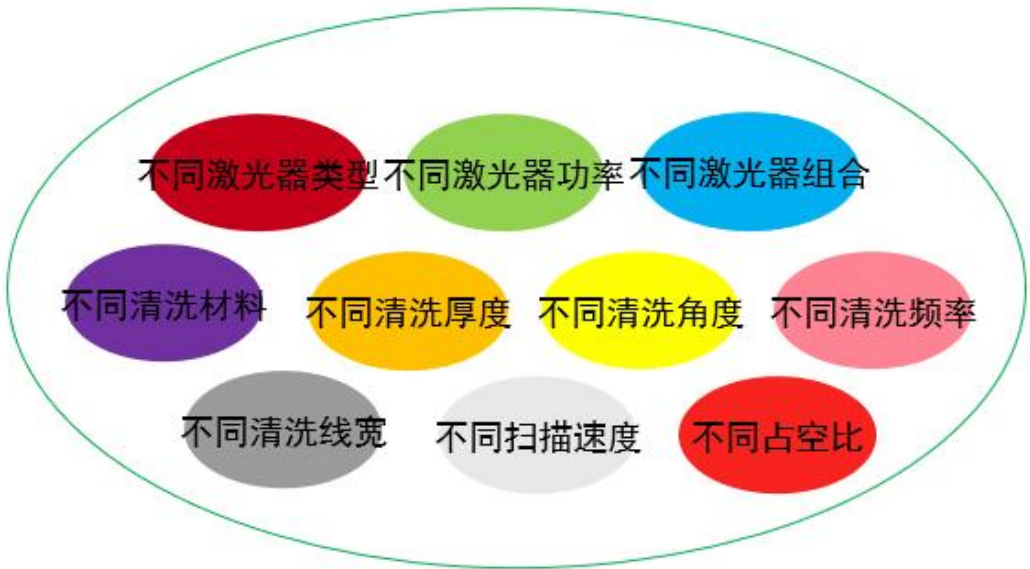


复合激光清洗头

（2）建立面向绿色化的轨道车辆部件清洗工艺数据库

确定待清洗零件、零件材质、清洗物与清洗工艺的关联规律，实现待清洗车辆部件、清洗物与清洗工艺的智能匹配。研究多样化零件

类型（轴箱、转向架、定位转臂、抗侧滚扭杆等）、多样化零件材质、多样化清洗对象（油漆、锈蚀、胶、油污等）的清洗工艺匹配方法，建立多类型零件、多样化清洗对象与最佳清洗工艺的工艺数据库，实现绿色化、低污染的高效清洗工艺智能匹配。建立全流程的绿色化清洗工艺，采用多种类光源激光器等清洗工艺进行零部件的清洗，减少清洗过程中的环境污染；开发一套全流程的污染物收集系统，实现清洗掉的油漆、铁锈等污染物的闭环收集，提高清洗装备的绿色化水平。



（3）激光清洗过程工艺参数多目标优化方法

激光清洗是依靠激光束的高能量破除附着物与基材间的作用力使之发生物理或化学反应以达到清洗的目的，在清洗过程中由于子系统众多及电能的不完全转化导致大量碳排放产生。针对激光清洗装备子系统复杂，构建激光清洗过程多目标工艺参数优化模型奠定基础，提出一种基于佳点集与协同进化框架多目标进化算法，解决基础进化算法在求解此类问题时初始解质量差、小可行域下约束和目标平衡难导致种群多样性差、易陷入局部最优等缺点，获取优化工艺参数组合，

实现绿色低碳的激光清洗工艺。为验证优化工艺参数组合的可行性与有效性，从表面形貌、粗糙度等方面对比分析优化工艺参数组合与经验工艺参数组合，提高清洗质量。

（4）开发激光清洗小部件状态检测视觉方案及算法

通过视觉传感器获取大量待清洗部件在工作台上不同状态（正反面）摆放状态下的数据。在激光清洗过程中，将完整的工作台拆分成四个视场对机械臂进行轨迹设计进行清洗工作。对各部件正反面的位置坐标信息以及部件状态类别进行标注，并建立训练集、验证集和测试集，用于零部件状态检测模型的训练和评估，在实现精准识别不同尺寸目标物的基础上保证较高的效率，提高了的实时检测准确性。由于标注时对同个部件的正反面状态进行了区分，检测结果已经包含了零部件正反面的状态信息，可以提取到零部件的位置信息和正反面状态信息，机械臂即可根据零部件是否存在、以及正反面状态选择预先设计好轨迹进行清洗工作。



（5）基于数字孪生的多类型零部件表面清洗路径智能规划

研究兼容高铁、动车、城轨等多制式轨道交通车辆的零部件清洗数字孪生平台，实现平面、曲面、阶梯面、内孔等清洗轨迹的智能仿真规划；开发虚实融合的清洗路径智能规划系统，基于实时视觉检测及数字孪生实时虚实分析，进行待清洗零部件的智能定位及清洗路径的智能调整，提高多类型零部件的清洗效率及清洗效果。研制批量化全自动智能清洗装备，实现多种类型清洗工艺的优选与智能匹配；研究多零件同步清洗工艺智能优化算法，实现多类型零部件的批量化智能清洗，提高清洗效率。

三、成果与效益（质量安全、经济效益与社会效益）

（1）质量安全成果

清洗质量提升：通过复合激光分层清除技术与工艺参数优化，实现漆层/锈蚀层的彻底清除（清除率 $\geq 99.99\%$ ），且无基材损伤（基材表面硬度无下降，无划痕）；满足轨道交通零部件检修的高精度要求；

无损清洗保障：复合激光通过精准调控参数，实现“只除漆锈、不损基材”，避免传统机械打磨导致的基材磨损，延长零部件使用寿命；

安全环保管控：全流程污染物收集系统实现油漆碎屑、铁锈粉尘的闭环收集（收集率 $\geq 99\%$ ），减少粉尘扩散导致的作业环境污染，降低操作人员呼吸道健康风险；同时避免化学清洗中废液泄漏的环境风险，符合安全生产与环保要求。

（2）经济效益成果

产品已完成 9 台销售，产品均价 162.44 万，实现销售收入 1462 万。

短期产值预测：已签约 5 台订单等待交付，结合现有产能与订单情况，预计轨道交通领域年产值可达 3000 万元；

长期市场拓展：激光脱漆除锈技术可拓展至船舶、航空航天、化工等行业（如船舶甲板锈蚀清除、航空零部件漆层剥离），根据市场需求测算，跨行业应用后预计年产值可达 8000 万元，市场规模潜力巨大；

成本节约：相较于传统化学清洗，激光清洗无需耗材，单台零部件清洗成本降至 100 元以下，帮助轨道交通车辆段/主机厂降低长期运维成本，提升客户采购意愿。

（3）社会效益成果

解决传统清洗污染难题：替代传统化学清洗与机械打磨，彻底消除化学试剂泄漏、粉尘排放等环境污染问题，助力轨道交通行业实现“碳达峰、碳中和”目标，符合国家绿色制造发展战略；

推动行业智能化升级：通过机器视觉、数字孪生、人工智能等技术的融合应用，实现清洗作业“无人化、自动化、智能化”，助力轨道交通行业“机器换人”，减少人工操作强度，推动“灯塔工厂”建设，提升行业整体智能化水平；

填补行业技术空白：目前轨道交通零部件智能激光脱漆除锈领域尚无其他厂家研发成熟产品，行业头部格局未形成，本项目产品的产业化落地，填补了行业技术空白，为轨道交通检修提供全新解决方案，促进行业技术升级与产业化发展；

提升检修效率与保障出行安全：多部件批量化清洗技术使清洗效率提升 30%-40%，缩短轨道交通零部件检修周期，保障车辆快速投入运营，减少因检修延误导致的出行不便，间接提升公共交通服务质量与安全保障能力。

四、可复制性与展望

（1）可复制性

技术适配性：核心技术具备强通用性-----清洗工艺数据库可通过参数扩展，适配不同制式轨道交通（高铁、动车、城轨）及其他行业（船舶、航空航天）的零部件；数字孪生平台支持模型复用，仅需调整零部件三维模型即可适配新类型部件，无需重构系统；

场景拓展性：激光脱漆除锈技术可迁移至船舶甲板锈蚀清除、航

空发动机零部件漆层剥离、化工设备管道锈蚀处理等场景，且核心算法（参数优化、视觉检测）无需大幅改造，仅需根据场景调整参数阈值，复制成本低；

产业化推广性：全自动清洗装备已实现标准化设计，可根据客户需求（如清洗部件尺寸、产能）进行模块化组装，生产周期短，便于批量推广，目前已有多家轨道交通车辆段及主机厂表达合作意向。

（2）展望

未来将持续优化核心技术：一是提升激光清洗效率，研发更高功率、更短脉宽的激光光源，进一步缩短清洗时间；二是完善数字孪生平台，增加零部件磨损预测功能，实现“清洗+健康监测”一体化；三是拓展跨行业应用，针对船舶、航空航天等行业的特殊需求，开发定制化清洗方案。同时，推动行业标准制定，牵头编写《轨道交通零部件激光脱漆除锈技术规范》，引领行业健康发展，最终实现“绿色智能清洗”在高端装备制造领域的全面普及。

五、项目团队

张伟丰、周思杭、杜强、段佳伟、刘青青

联系人：刘青青 13047669600