

智能网联汽车背景下汽车修补涂装技术的革新与影响研究

刘 飞

(江苏汽车技师学院, 江苏 扬州 225000)

摘要: 在智能网联汽车技术加速迭代的当下, 汽车修补涂装行业正经历着结构性变革。本文系统剖析了汽车修补涂装在材料体系、工艺逻辑及质控标准等维度对智能网联汽车的多维影响, 重点探讨了涂层性能与车载智能设备的兼容性, 涂装工艺对车辆安全系统的潜在作用机制, 以及行业应对技术变革的转型路径。研究旨在为构建适配智能网联汽车的修补涂装技术体系提供理论支撑与实践参考。

关键词: 智能网联汽车; 汽车修补涂装; 材料兼容性; 工艺革新; 质量控制

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)07-0041-03

Study on the Innovation and Influence of Automobile Repair Coating Technology in the Context of Intelligent and Connected Vehicles

LIU Fei

(Jiangsu Automotive Technician College, Yangzhou 225000, Jiangsu, China)

Abstract: With the accelerated iteration of intelligent and connected vehicle technology, the automobile repair coating industry is undergoing structural changes. This paper systematically analyzes the multi-dimensional impacts of automobile repair coating on intelligent and connected vehicles in terms of material systems, process logic, and quality control standards. It focuses on the compatibility between coating performance and vehicle-mounted intelligent devices, the potential mechanism of coating processes on vehicle safety systems, and the transformation path of the industry in response to technological changes. The study aims to provide theoretical support and practical references for constructing a repair coating technology system suitable for intelligent and connected vehicles.

Key words: intelligent and connected vehicles; automobile repair coating; material compatibility; process innovation; quality control

0 引言

智能网联汽车作为新一代交通运输工具, 正以年均 23.5% 的市场增长率重塑汽车产业生态。据中国汽车工业协会数据显示, 2024 年国内智能网联汽车渗透率已达 41.7%, 预计 2025 年将突破 50%。这一技术变

革对汽车修补涂装行业产生了深远影响——传统以外观修复为核心的涂装体系, 正面临向功能化涂装转型的关键期。智能网联汽车通过 V2X 通信、环境感知、决策控制三大系统实现智能化运行, 其搭载的激光雷达、毫米波雷达、视觉摄像头等精密设备, 对车身涂层的光学特性、电磁屏蔽性能、表面粗糙度等指标提出了严苛要求。美国汽车工程师学会(SAE)发布的 J 3016 标准明确指出, 智能网联汽车的涂层需满足 $\pm 1.5\Delta E$ 的色差控制、 $\leq 0.8 \mu\text{m}$ 的表面粗糙度以及 -40 dB 以上的电磁屏蔽效能。这种技术需求的升级, 使得汽车修补涂装行

收稿日期: 2024-03-09

作者简介: 刘飞(1986—), 男, 本科, 一级实习指导教师, 汽车维修高级技师, 主要从事汽车钣金与喷涂方面的研究工作。E-mail: tongshan007@163.com。

业必须重新构建技术体系。本文将从智能网联汽车的技术特性出发,分层解析修补涂装对车辆感知系统、安全性能及耐久性的作用机制,并基于行业调研数据,提出包含材料创新、工艺优化、标准重构在内的系统性解决方案,为产业升级提供路径参考。

1 智能网联汽车技术架构与发展现状

1.1 技术定义与系统构成

智能网联汽车是融合了环境感知、智能决策、协同控制等技术的复杂系统,其技术架构可划分为三横两纵体系:横向包括车载电子系统、网络通信系统、数据应用系统;纵向涵盖整车控制系统和信息安全系统。这种架构使得车辆能够实现 L2+级别的辅助驾驶,并逐步向 L4 级自动驾驶演进。以典型的 L3 级智能网联汽车为例,其传感器配置包括 1 个激光雷达(测距范围 200 m,角分辨率 0.1°)、5 个毫米波雷达(覆盖 270° 探测范围)、12 个超声波传感器以及 8 路高清摄像头。这些设备通过车载以太网(传输速率 100 Mb/s)与中央计算单元连接,形成每秒处理量达 24 TOPS 的运算系统。

1.2 核心技术发展趋势

传感器技术正朝着高分辨率、小型化方向发展。最新的 MEMS 激光雷达体积较传统产品缩小 70%,而探测点云密度提升 3 倍;77 GHz 毫米波雷达的距离测量误差已控制在 ± 0.3 m 范围内。通信技术方面,5G-V2X 的商用部署使车辆通信延迟降至 50 ms 以下,满足了实时交互需求。人工智能算法的迭代尤为显著,基于深度学习的目标检测模型(如 YOLOv8)对交通标志的识别准确率达到 98.6%,多传感器融合算法将环境建模的置信度提升至 99.2%。这些技术进步推动智能网联汽车的功能边界持续拓展,从自适应巡航(ACC)、车道保持(LKA)等单一功能,向交通拥堵辅助(TJA)、自动泊车(APA)等复合场景进化。

1.3 产业发展面临的挑战

尽管技术发展迅速,智能网联汽车仍面临三大挑战:一是传感器在雨雾、强光等恶劣环境下的感知稳定性问题,现有激光雷达在大雨天气的探测距离会缩短 40%;二是网络安全风险,2024 年全球公开的智能汽车黑客攻击事件较上年增长 27%;三是法规标准滞后,目前仅有 12 个国家出台了 L3 级以上自动驾驶的路权政策。在车辆硬件层面,传感器与车身涂层的兼容性问题日益凸显。某主机厂测试数据显示,当车身涂层的镜面光泽度超过 90 GU 时,激光雷达的反射率波动幅度可达 $\pm 8\%$,可能导致目标识别误差。这种跨领域的技术耦合,使得汽车修补涂装成为影响智能网联汽车性能的关键环节。

2 汽车修补涂装对智能网联汽车的多维影响

2.1 涂层性能对感知系统的影响机制

2.1.1 光学特性的干扰效应

智能网联汽车的视觉感知系统对涂层颜色特性极为敏感。当涂层色差超过 $\Delta E=2.0$ 时,机器视觉的目标分类准确率会下降 15%。这是因为摄像头的色彩还原依赖于标准反射光谱,而传统修补涂装中常见的金属漆铝粉定向排列差异,会导致光谱反射率在 450~650 nm 波段产生 $\pm 5\%$ 的波动。某品牌自动驾驶测试车的案例显示,在使用非专用修补涂料后,其视觉系统对红色交通信号灯的识别距离从正常的 80 m 缩短至 55 m,这是由于涂层对 630 nm 波长光的反射率降低了 12% 所致。为此,部分主机厂已制定专用修补涂料的光谱反射率标准,要求在可见光谱范围内反射率波动不超过 $\pm 3\%$ 。

2.1.2 表面形貌的影响

涂层表面粗糙度(R_a 值)直接影响激光雷达的点云质量。当 $R_a > 1.0 \mu\text{m}$ 时,激光光斑的漫反射比例增加,导致点云密度下降 20% 以上。德国某研究机构的对比试验表明,使用传统腻子工艺($R_a=1.8 \mu\text{m}$)的车身,其激光雷达的障碍物边缘识别误差比采用精密研磨工艺($R_a=0.5 \mu\text{m}$)的车身大 40%。表面流平性不足产生的橘皮现象($\text{DOI} < 85$),会使激光反射产生漫散射,导致雷达点云出现噪点。某车型在修补涂装后进行自动驾驶测试时,因引擎盖涂层橘皮值为 78,系统误将路面阴影识别为障碍物,产生了 3 次不必要的紧急制动。

2.2 材料体系对车辆安全性的影响

2.2.1 电磁兼容性问题

智能网联汽车的电子设备密集,修补涂装材料的电磁屏蔽性能至关重要。传统溶剂型涂料的电磁屏蔽效能(SE)通常低于 20 dB,无法满足车载雷达(工作频段 76~81 GHz)的抗干扰需求。当使用未添加导电填料的涂料时,毫米波雷达的信号衰减可达 15 dB,导致探测距离缩短 30%。某新能源车企的测试数据显示,在车身 A 柱部位使用非导电涂层后,其 77 GHz 雷达的目标检测概率从 99% 降至 82%,虚警率上升至 12%。为此,部分高端车型已采用添加银包铜粉的导电涂料,使 SE 值提升至 40 dB 以上,确保雷达信号传输稳定。

2.2.2 防腐性能与结构安全

智能网联汽车的电子元件对潮湿环境更为敏感。当涂层的盐雾测试(NSS)出现第 1 个锈点的时间 < 1000 h 时,车身电子线束的腐蚀概率增加 3 倍。某品牌在沿海地区的售后数据显示,因涂层防腐不足导致的传感器故障,占智能系统维修案例的 28%。电化学阻抗谱(EIS)测试表明,采用锌镍合金底漆+水性色

漆+双组分清漆的三层体系,其涂层电阻在 3 000 h 盐雾试验后仍能保持 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上,而传统溶剂型涂层体系的电阻会降至 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下,失去对电子设备的屏蔽保护。

2.3 工艺过程对智能系统的潜在风险

2.3.1 温度敏感性影响

智能网联汽车的传感器通常不耐高温,激光雷达的工作温度范围多为 $-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$,而传统涂装烘干工艺(如中涂烘干 $140 \text{ }^\circ\text{C} \times 30 \text{ min}$)可能导致传感器内部元件老化。某车型在修补涂装后,因雷达模块长时间处于高温环境,其内部 MEMS 振镜的偏转精度下降了 5%,导致测距误差增大。为解决这一问题,部分车企开发了低温修补工艺,采用 UV 固化清漆(固化温度 $60 \text{ }^\circ\text{C} \times 10 \text{ min}$),使传感器周边区域的温度控制在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,确保设备性能稳定。测试数据显示,使用低温工艺后,雷达模块的各项参数在 1 000 次循环测试中波动不超过 1%。

2.3.2 污染物沉积问题

涂装过程中产生的漆雾颗粒(粒径多在 $1 \sim 10 \text{ } \mu\text{m}$)可能沉积在传感器表面,影响感知精度。某自动驾驶测试车在喷涂作业后,摄像头镜头上沉积的漆雾颗粒使图像清晰度下降 25%,导致车道线识别准确率从 95% 降至 78%。采用干式喷漆房+高效过滤系统(过滤效率 $\geq 99.97\% @ 0.3 \text{ } \mu\text{m}$)可将空气中的漆雾浓度控制在 5 mg/m^3 以下,配合传感器保护罩(采用聚四氟乙烯材质,表面能 $< 18 \text{ mN/m}$),可使颗粒沉积量减少 80% 以上,有效降低对感知系统的影响。

3 智能网联汽车时代修补涂装行业转型策略

3.1 材料体系的创新发展

3.1.1 功能型涂料的开发

针对智能网联汽车的特殊需求,需开发具备多重功能的涂料体系。1)电磁屏蔽涂料:通过添加石墨烯/银纳米线复合填料,在 $30 \text{ MHz} \sim 10 \text{ GHz}$ 频段实现 $\text{SE} \geq 35 \text{ dB}$,同时保持涂层附着力 $\geq 5 \text{ N/mm}$ (ISO 4624 标准)。某企业研发的水性电磁屏蔽涂料,其屏蔽效能较传统产品提升 20 dB,且 VOC 含量 $< 50 \text{ g/L}$ 。2)光学稳定涂料:采用核壳结构色浆,使涂层在 60° 光泽度变化 $\pm 2 \text{ GU}$ 时, $\Delta E < 1.0$ 。经测试,该类涂料在 800 h 氙灯老化后,颜色变化 $\Delta E < 3.0$,满足智能网联汽车的长期使用需求。3)自清洁涂层:利用超疏水技术(接触角 $> 150^\circ$,滚动角 $< 10^\circ$),使雨水对涂层表面的污染物去除率达 90% 以上,减少传感器表面的杂质沉积。

3.1.2 材料兼容性测试体系

建立完善材料-传感器兼容性测试流程。1)电磁兼容性测试:使用微波暗室测量涂层对雷达信号的

影响,要求在工作频段内信号衰减 $< 3 \text{ dB}$ 。2)光学特性测试:采用光谱仪测量涂层反射率曲线,确保与原厂涂层的匹配度 $> 95\%$ 。3)环境适应性测试:通过温湿度循环($-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 95%)测试涂层性能稳定性,要求各项指标变化 $< 5\%$ 。

3.2 工艺技术的升级路径

3.2.1 精密涂装工艺

1)数字化调漆技术:引入 AI 调色系统,通过光谱分析和机器学习,将色差控制在 $\Delta E < 1.0$ 的水平。某调色中心的数据显示,使用 AI 系统后,调色准确率从 85% 提升至 98%,返工率降低 70%。2)自动化喷涂工艺:采用六轴机器人进行喷涂,配合激光测距仪实时调整喷涂距离(精度 $\pm 0.5 \text{ mm}$),使涂层厚度均匀性控制在 $\pm 5\%$ 以内。某主机厂的修补车间引入机器人喷涂后,涂层厚度合格率从 88% 提升至 99.5%。3)低温固化技术:开发紫外光(UV)+红外(IR)复合固化工艺,使清漆在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下 10 min 内固化,满足传感器周边区域的低温要求。测试表明,该工艺下涂层的铅笔硬度可达 2H,与传统高温固化涂层相当。

3.2.2 传感器保护工艺

1)可移除保护罩:在喷涂作业时使用磁吸式保护罩,材质为聚碳酸酯(PC),透光率 $> 92\%$,可有效防止漆雾沉积。某维修案例显示,使用保护罩后,传感器表面的漆雾颗粒减少 95% 以上。2)防雾涂层处理:在摄像头镜头表面镀制纳米二氧化硅防雾膜,使雾气凝结点降低 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,确保在高湿度环境下的清晰成像。对比试验表明,处理后的镜头在 95% 湿度环境中,起雾时间延迟 30 min 以上。

3.3 质量控制体系的重构

3.3.1 多维检测指标的建立

构建包含传统指标与智能网联专属指标的检测体系。1)传统指标:附着力(ISO 2409,划格法 0 级)、铅笔硬度(ISO 15184, $\geq 2\text{H}$)、耐候性(ISO 16474-3,氙灯老化 1 000 h, $\Delta E < 3$)。2)智能专属指标:电磁屏蔽效能($\text{SE} \geq 30 \text{ dB}@77 \text{ GHz}$)、表面粗糙度($R_a < 0.8 \text{ } \mu\text{m}$)、光学反射匹配度(与原厂涂层光谱曲线偏差 $< 3\%$)。

3.3.2 智能化检测手段

1)光谱共焦测量:使用光谱共焦仪检测涂层厚度,精度可达 $\pm 1 \text{ } \mu\text{m}$,满足智能网联汽车对局部区域厚度的严格要求。某检测中心的数据显示,该技术使厚度检测效率提升 5 倍,误差率 $< 0.5\%$ 。2)太赫兹成像检测:利用太赫兹波穿透涂层的特性,检测内部缺陷(如气泡、分层),可识别直径 $> 0.5 \text{ mm}$ 的缺陷。对比传统目视检测,缺陷检出率从 65% 提升至 98%。3)AI 视觉检测:通过深度学习模型识别涂层表面缺陷,(下转第 51 页)