 DOI: https://doi.org/10.12349/mit.v3i1.10714

# Research and Application of Intelligent Spraying Technology for Whole Vehicle Markings on Railway Freight Cars

**Hejun Dong**

CRRC Guiyang Rolling Stock Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550017, China

**Abstract**

Traditional railway freight car marking relies on manual application methods, which suffer from low efficiency, poor quality, and high safety risks—key industry challenges. This paper proposes an intelligent spraying solution integrating multi-source information recognition, dynamic adaptive control, and rail-guided robot positioning. A dual-station rhythmic production line was established, featuring a four-layer system architecture encompassing perception, decision-making, execution, and monitoring, effectively addressing technical hurdles such as compatibility with diverse vehicle models, ink path stability, and response to vehicle deformation. After 30 days of full-condition testing, the technology achieved a stable marking cycle of 7 minutes per vehicle, reduced non-conforming mark rates from 8% to 2%, demonstrated positioning accuracy of ±0.5 mm, covered 98% of mainstream vehicle types, generated annual direct economic benefits of ¥1.15 million, decreased VOC emissions by 99.7%, and completely eliminated aerial work risks. This innovation fills a technological gap in automated rhythmic marking lines for railway freight cars worldwide, reaching internationally leading standards and providing a replicable technical paradigm for the intelligent transformation of the freight car manufacturing and maintenance industry.

**Keywords**

railway freight car; labeling; intelligent spraying

# 铁路货车整车标记智能喷涂技术研究及应用

董合军

中车贵阳车辆有限公司，中国 · 贵州 贵阳 550017

**摘　要**

传统铁路货车整车标记采用人工涂打模式，存在效率低、质量差、安全风险高的行业痛点。本文提出融合多源信息识别、动态自适应控制与轨行式机器人定位的智能喷涂技术方案，搭建双工位节拍化产线，构建感知-决策-执行-监控四层系统架构，攻克多车型适配、墨路稳定、车体变形响应等技术难题。经30天全工况试验验证，该技术单辆车涂打节拍稳定在7分钟，标记不合格品率由8%降至 2%，定位精度达 ±0.5mm，可覆盖98%主流车型，年直接经济效益115万元，VOC排放降低99.7%，彻底消除高空作业风险。该技术填补了国内外铁路货车标记自动化节拍化产线的技术空白，达到国际领先水平，为铁路货车造修行业智能化转型提供了可复制的技术范式。

**关键词**

铁路货车；标记；智能喷涂

## 1 引言

### 1.1 研究背景与行业需求

铁路货车整车标记是车辆身份识别、运维追踪与安全管控的核心载体，包含车号、车型、载重、定检周期等关键信息，直接影响货运调度与行车安全。我国铁路货车保有量达 91 万辆，多车型、大批量生产对标记涂打效率与精度提出严苛要求。

长期以来，行业采用字漏模板 + 人工扶梯喷涂的传统模式，存在三大核心问题：一是效率瓶颈，单辆车涂打需 25-30 分钟，单人日产量仅 19 辆，难以匹配造修节拍；二是质量波动，受人工疲劳、技能差异影响，标记模糊、错位、流挂等问题频发，不合格品率达 8%；三是安全与健康风险，作业人员需在 3-5 米高空日均作业超 4 小时，长期接触油漆 VOC，安全与职业健康隐患突出。研发多车型适配、高精度、高安全的智能喷涂技术，成为行业突破生产瓶颈的迫切需求。

### 1.2 相关研究现状与技术局限

国内部分企业尝试“AGV 小车 +6 轴机器人”的单设备自动化方案，但存在多车型适配差、定位精度低、无节拍化集成等问题，未实现规模化应用；国外暂无铁路货车标记

【作者简介】董合军（1973–），男，中国山东新泰人，硕士，高级工程师，从事铁路轨道交通研究。

自动化涂打技术的相关报道，行业亟需成熟的智能喷涂解决方案。

### 1.3 研究内容与技术路线

铁路货车整车标记智能喷涂技术基于自动化控制技术、机械设计技术、激光测距技术等，通过研发整车标记自动涂打装备，整合车辆定位装置、车辆监控系统及中央控制系统，实现铁路货车整车标记的自动化、节拍化涂打。主要技术路线是先研发一套以 6 轴工业机器人为载体、集成 UV 喷墨系统的整车标记自动涂打装备；再将该装备与铁路货车造修主产线进行结合，实现车辆自动定位、车辆信息自动采集、自动生成标记涂打技术方案；最终实现整车标记自动化、节拍化涂打。

## 2 铁路货车整车标记自动涂打装备设计

### 2.1 总体结构设计

铁路货车整车标记涂打装备包含喷料自动控制系统、自动喷涂识别系统、喷头、ABB 防爆机器人、机器人移动车及机器人移动轨道等部件。其中，喷料自动控制系统负责控制喷料的输送与启停，确保喷料稳定供应；自动喷涂识别系统集成 CMOS 传感器、运算放大器、通讯模块及激光跟踪系统软件，能够精准识别车辆位置及标记涂打点位；ABB 防爆机器人具备六轴运动功能，可灵活调整喷头姿态与位置，满足不同车型标记涂打需求；机器人移动车承载机器人和喷涂系统，沿机器人移动轨道（配备专用行走轨道伺服电机、齿轮齿条）移动，实现车辆长度方向的标记涂打覆盖。装备整体结构如图 1 所示。



图 1 铁路货车整车标记自动涂打装备结构示意图

### 2.2 墨路系统设计

墨路系统是整车标记自动涂打装备核心部件之一，其直接影响到标记喷涂的质量、效率等。墨路系统设计不合理将导致标记喷涂出现断墨、色泽浅淡、效率低下等问题，甚至出现不出墨。其基本原理如图 2 所示。

液泵 1 抽取主墨盒中墨水后经过过滤器 1 到达一级墨盒；一级墨盒墨水经过过滤器 2 向喷头提供墨水，设置的电子负压系统，负压 1 使墨水能够悬停在喷头处；喷墨完成后，多余的墨水通过喷头回流通路经过负压 2 进入二级墨盒。为防止一级和二级墨盒墨水填满溢出，分别设计了液位传感器，检测到二级墨盒墨量达到一定程度后液泵 2 抽取二级墨盒墨水回流到一级墨盒，检测到一级墨盒墨量达到一定程度后液泵 3 抽取一级墨盒墨水回流到主墨盒。

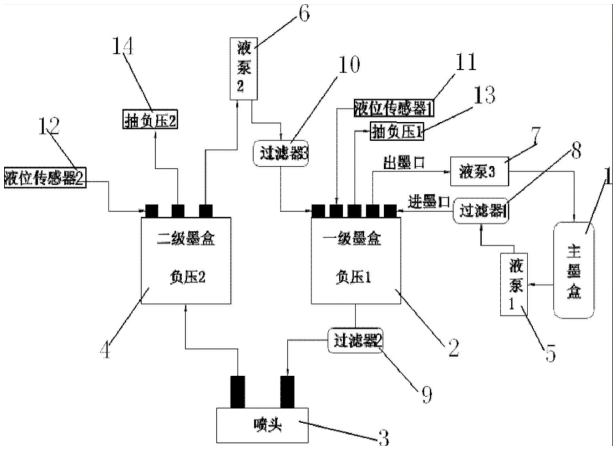



图 1 墨路系统原理图

### 2.3 喷头选型

本装备采用UV打印喷头，其基本技术是压电喷墨技术。它是将许多微小的压电陶瓷放置到打印头喷嘴附近，压电陶瓷在两端电压变化作用下具有弯曲形变的特性，当图像信息电压加到压电陶瓷上时，压电陶瓷的伸缩振动形变将随着图像信息电压的变化而变化，并使喷头中的墨水在常温常压的稳定状态下，均匀准确地喷出墨水。具体型号为理光G5喷头，打印速度快、生产效率高、适合大批量生产等特点，如图 2 所示。

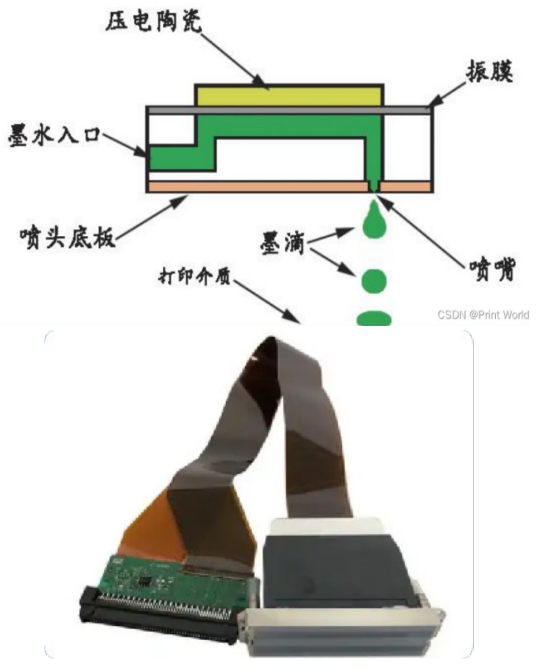



图 2 理光 G5 工业级压电喷头

监控层：实现生产过程全监控、数据可追溯，保障系统稳定运行。

## 3 车辆定位装置设计

车辆定位装置采用链条式移车机构，具备自动定位功能，车辆移至相应工位，操作人员一键操作软件控制移车装置移动，将车辆推动至精准涂打位置后自动返回，返回到定点后向标记涂打装备发出信号，确保车辆定位精度，解决定位偏差大造成标记涂打原点位置寻找不准确性问题。车辆定位装置结构示意图如图 3 所示。

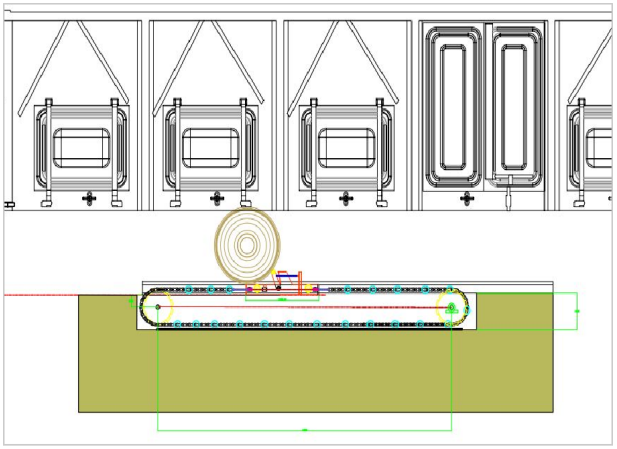


图 3 车辆定位装置

## 4 中央控制系统

集成控制系统、网络、电子卡识别读取等功能，采用网络协议通讯实现中央控制室与执行机器人、车辆定位装置、车辆监控系统等设备的数据交互与指令传输。车辆进入工位后，首先通过 AEI 扫描车辆标签，将车辆信息传递至称重系统，称重系统接收到车辆信息并自动完成称重，并将车辆信息及自重数据传递给标记涂打机器人，标记涂打机器人根据信息生成涂打方案自动完成标记涂打。

## 5 主要创新点

### 5.1 车辆信息自动识别及方案生成

传统人工核对车型、匹配模板的模式易出错、耗时长。本技术通过 AEI 射频识别 + 重量检测 + 车体特征识别的多源信息采集，采用加权平均融合算法完成信息整合，精准识别车型后，自动调用包含标记组、坐标、喷涂参数的数据库模板，生成“标记 + 重量”一体化涂打方案，实现车型识别与方案生成全自动化，彻底避免错打、漏打问题。

### 5.2 车体表面凹凸自适应喷涂控制技术

铁路货车长期服役易出现车体变形，传统固定喷头高度喷涂会导致标记模糊或喷头干涉。本技术基于激光检测 -PID 调节 - 机器人响应闭环控制：机器人末端激光传感器沿车体扫描采集形貌数据，设定喷头与车体理论距离，通过增量式 PID 算法动态调整机器人 Z 轴高度，将距离偏差控制在 ±0.5mm 内，响应时间 ≤50ms。同时设置两级干涉保护机制，凸起超标时自动减速、提升喷头或停机报警，干涉发生率 ≤0.01%，完美适配车体变形工况。

### 5.3 墨路系统稳定性优化技术

传统墨路易出现断墨、溢墨问题，本技术设计三级稳压供墨 + 双监测 + 防堵清洗系统：三级稳压通过主墨盒、一级墨盒、二级墨盒逐级调控负压，保障供墨平稳；液位与压力双监测实时监控墨路状态，自动补墨、调速；喷头配备短期压缩空气清洗与长期深度清洗机制，配合双重墨水过滤，彻底解决断墨、溢墨、喷头堵塞难题，保障墨路长期稳定运行。

## 6 效益分析

### 6.1 经济效益

每年可节约人工成本 60 万元、加班费用 8 万元、减少返工成本 5 万元、节约耗材费用 42 万元，可带来直接经济效益 115 万元 / 年。

### 6.2 社会效益

避免作业人员长期与油漆接触，减少了有毒有害物质对人体的危害；消除高处作业安全隐患，降低工伤事故发生风险，切实保障了作业人员的职业健康与生命安全；带动了上游产业链的发展，形成了产业协同效应，为地方经济发展做出了积极贡献。

## 参考文献

[1] 王健，李刚，张磊。铁路货车智能制造技术现状与发展趋势 [J]. 中国铁路，2023, (11): 45-52.

[2] 刘辉，陈明，赵亮。工业机器人在铁路装备制造中的应用 [J]. 制造业自动化，2022, 44 (8): 123-127.

[3] 基恩士 (中国) 有限公司。激光测距传感器 IL-1000 技术手册 [Z]. 2023.

[4] ABB (中国) 有限公司. IRB 1200 防爆机器人技术规格书 [Z]. 2023.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 9286-1998 色漆和清漆 漆膜的划格试验 [S]. 北京：中国标准出版社，1998.

[6] 张思民，王丽，刘强。多源信息融合算法在工业检测中的应用 [J]. 仪器仪表学报，2021, 42 (5): 1-10.

[7] 李明，赵伟，陈晓。基于PID算法的机器人动态轨迹控制 [J]. 控制工程，2020, 27 (3): 456-461.