

# 基于 PLC 的地铁列车清洗机自动控制策略分析

郭涵

福州地铁集团有限公司运营事业部, 中国·福建 福州 350000

**摘要:**城市轨道交通蓬勃发展促使地铁列车清洗效率与安全标准不断攀升, 传统人工清洗模式显现出流程紊乱、能耗浪费、风险隐患等诸多问题, PLC 自动控制技术成为清洗机智能化升级的关键解决途径。本研究面向复杂作业工况, 深入探究基于 PLC 的控制策略, 详细阐释机械构造与控制系统架构, 着重研讨清洗流程逻辑管控、传感器协同检测以及安全防护机制的具体实现。依托西门子 S7-1200 PLC 结合博途软件平台, 设计模块化程序架构, 搭建一体化控制系统体系, 经现场实践验证, 该策略成功达成清洗作业全程自动化, 降低人工介入程度与能源损耗, 为清洗设备智能化改造提供理论支撑与工程实践经验, 有力助推轨道交通运维的数字化转型进程。

**关键词:** PLC; 地铁列车清洗机; 自动控制策略; 传感器融合; 安全保护

## Analysis of Automatic Control Strategy of Subway Train Washing Machine Based on PLC

Han Guo

Operation Division of Fuzhou Metro Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian, 350000, China

**Abstract:** The vigorous development of urban rail transit has led to continuous improvement in the efficiency and safety standards for subway train washing. The traditional manual washing mode has revealed numerous problems such as disordered processes, energy consumption waste, and potential risks. The PLC (Programmable Logic Controller) automatic control technology has become a key solution for the intelligent upgrading of the train washing machine. This study focuses on complex operating conditions and delves deeply into the control strategy based on PLC. It elaborates in detail on the mechanical structure and the architecture of the control system. Special emphasis is placed on discussing the specific implementation of the logical control of the washing process, the collaborative detection of sensors, and the safety protection mechanism. Relying on the Siemens S7-1200 PLC and combining with the TIA Portal software platform, a modular program architecture is designed, and an integrated control system is established. Through on-site practical verification, this strategy has successfully achieved the full automation of the washing operation, reducing the degree of manual intervention and energy consumption. It provides theoretical support and practical engineering experience for the intelligent transformation of the washing equipment, strongly promoting the digital transformation process of rail transit operation and maintenance.

**Keywords:** PLC; subway train washing machine; automatic control strategy; sensor fusion; safety protection

## 0 前言

在经济和社会飞速发展的今天, 地铁作为一种新兴的交通形式被越来越多的人所接受。为了更好的服务乘客, 车辆的出车率提高, 运行时间延长, 车辆清洁时间就相对减少, 以前人工清洗的方式时间长、不彻底、作业效率低, 并且造成水资源浪费及车体二次污染。因此, 对列车外部的清洗提出了更高的要求, 清洗过程应该快速高效。PLC 所具备的可靠性能、出色抗干扰特质以及编程灵活优势, 使其在工业控制范畴得以普遍应用, 将其融入地铁列车清洗机运作, 可按预设逻辑有序调度清洗流程, 配合传感器数据对执行机构实施动态调控, 保障清洗作业品质与安全性, 论文打造闭环控制体系, 攻克动态定位、压力调节等关键技术要点, 为设备智能化改造奉献可资借鉴、便于复制的实践方案。

## 1 地铁列车清洗机系统架构与工作原理

### 1.1 机械系统组成与功能

地铁列车清洗机机械系统由轨道支撑构造、清洗刷组

模块、喷水组件、烘干设备及辅助定位部件组成, 轨道支撑构造采用高刚性 H 型钢材质, 承载列车行进负载与清洗机设备重量, 轨距契合 1435mm 地铁线路标准, 保障列车平稳进入清洗区域<sup>[1]</sup>。清洗刷组模块含顶部弧形刷、侧部直立刷、底部轮对刷, 选用尼龙纤维与弹性橡胶复合材质, 兼具高效去污与接触缓冲性能, 喷水组件集成 0.8~1.2MPa 高压水枪和 0.3~0.5MPa 低压喷淋装置, 前者冲洗车轮底盘顽固污渍, 后者配合清洗剂软化车身表面污垢。烘干设备采用热风机组结合导流风道设计, 15~20m/s 出口风速实现车体表面快速干燥, 车头红外对射传感器与轨边限位开关构成辅助定位部件, 精准识别列车停靠位置, 避免刷组与车头导流罩刚性碰撞。

### 1.2 控制系统硬件架构

西门子 S7-1200 PLC 作为控制系统核心, 搭配信号采集模块、驱动模块及人机界面 (HMI) 构建整体架构, 信号采集层面, 12 组红外测距传感器监测列车与刷组间距, 8 路压力变送器感知刷组接触压力, 6 个流量传感器实时采集水

流量数据, 4 组编码器反馈电机转速信息; 各类传感器信号经 SM1231 模拟量模块转换为数字信号, 传输至 PLC 处理器进行逻辑运算处理<sup>[2]</sup>。驱动层面, 伺服电机、变频水泵、电磁换向阀协同作业, PROFINET 总线传输 PLC 控制指令, 伺服电机驱动刷组实现  $\pm 2\text{mm}$  定位精度的升降与水平移动, 变频器依指令调节水泵转速达成水压动态调控, 电磁换向阀负责切换喷水系统管路通断。HMI 采用 TP1200 Comfort 触摸屏, 集清洗流程监控、参数设定、故障诊断功能于一体, 支持中文交互界面, 实时呈现列车运行轨迹、机组工作状态、系统能耗等数据, 操作人员可通过触控操作对异常工况实施手动干预。

## 2 基于 PLC 的核心控制策略设计

### 2.1 清洗流程逻辑控制策略

清洗流程实施分段式时序管控, 分为预定位、预处理、主清洗、精洗烘干四个环节, 各环节动作由 PLC 内置定时器与状态标志位共同触发, 预定位时, 列车以不超  $5\text{km/h}$  速度驶入清洗区, 车头红外对射传感器感应信号后, PLC 操控轨边限位装置动作, 将列车位置限定在  $\pm 50\text{mm}$  误差区间。预处理阶段,  $0.4\text{MPa}$  压力的低压喷淋装置开启, 持续 30 秒喷洒中性清洗剂软化车身污垢, 与此同时顶部与侧部刷组预先抬升至距车体表面  $200\text{mm}$  安全高度, 主清洗遵循“先底部后顶部”顺序, 先启动转速  $1200\text{r/min}$  的轮对刷电机, 搭配  $0.8\text{MPa}$  高压水枪冲洗车轮与转向架 60s; 接着顶部弧形刷和侧部直立刷缓缓下降, 借压力变送器实时反馈接触压力, PLC 运用 PID 算法调节伺服电机扭矩, 维持刷组与车体  $80\sim 100\text{N}$  接触压力, 刷组以  $0.5\text{m/s}$  速度横向移动完成整车外表面刷洗<sup>[3]</sup>。精洗烘干阶段, 低压喷淋装置切换为清水冲洗 40s 清除残留清洗剂, 热风机组随即启动, 烘干时长依环境湿度动态调整, 湿度超 80% 时延长至 90s, 湿度低于 50% 时缩短至 60s。

### 2.2 传感器融合检测与自适应调节策略

地铁列车车型繁杂, A 型车、B 型车、市域车车宽相差达  $300\text{mm}$ , 且表面曲率复杂多变, 对此运用多传感器融合检测手段实现刷组位置动态校准。清洗机轨道两侧对称布设红外测距传感器, 每隔  $500\text{mm}$  设置一组, 实时采集列车侧面各点与刷组间距数据, PLC 借助三次样条插值算法拟合车体轮廓曲线, 进而自动调节侧刷横向移动轨迹, 保障刷组始终与车体表面垂直贴合。顶部弧形刷搭载重力传感器, 一旦检测到接触压力突变 (超  $150\text{N}$  或不足  $50\text{N}$ ), 即刻启动刷组升降补偿机制,  $300\text{ms}$  内完成压力校准, 考虑到不同季节水温波动对清洗效果的影响, 于喷水系统管道加装温度传感器, 水温低于  $10^\circ\text{C}$  时, PLC 自动开启  $50\text{kW}$  功率电加热装置, 将水温稳定在  $15^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$  范围, 确保清洗剂活性不受低温抑制。

### 2.3 安全保护与故障诊断策略

针对清洗作业中的突发风险, 构建三级安全防护体系,

一级防护采用物理限位装置, 于刷组升降轨道与水平移动导轨末端设置机械挡块, 并结合限位开关信号, 有效规避执行机构超限运行。二级防护依赖实时数据监测, PLC 持续追踪电机电流、刷组压力、水压等参数, 一旦电机电流达额定值 1.5 倍且持续 2s, 或刷组压力超过  $200\text{N}$ , 即刻启动紧急停机程序, 切断动力电源并锁定当前位置, 同步通过 HMI 发出声光报警信号。三级防护聚焦防撞预警, 在清洗区域出入口部署激光雷达, 实时扫描列车行进速度与姿态, 当检测到列车偏航角度超  $5^\circ$  或运行速度  $> 8\text{km/h}$  时, PLC 向车控系统发送指令, 强制列车减速至安全速度, HMI 集成故障诊断模块, 可自动存储近 30 天故障信息, 涵盖故障代码、发生时间、触发参数等内容, 支持时间与类型双维度检索, 并通过以太网将故障数据传输至运维管理平台, 为远程故障分析及备件调度提供数据支撑。

## 3 PLC 程序设计与系统实现

### 3.1 硬件选型与网络架构

西门子 S7-1215C DC/DC/DC 作为 PLC 主机, 工业级设计赋予其 IP20 防护等级, 能在  $-25^\circ\text{C}$  至  $+55^\circ\text{C}$  宽温环境稳定运行。设备集成 14 路数字量输入, 支持高速脉冲捕获, 10 路继电器型数字量输出每点负载能力达  $2\text{A}$ , 还有 2 路 12 位分辨率模拟量输入, 凭借 PROFINET 实时以太网与 Modbus RTU 串口双通信协议, 可同时连接传感器总线与传统仪表设备, 满足清洗机多类型信号混合处理要求。SM1231 AI  $8\times\text{U/I}$  模拟量模块采用  $\Delta-\Sigma$  型 ADC 芯片, 结合硬件滤波电路, 将传感器信号采集误差限制在 0.3% 以内, 精准适配刷组压力、水压等动态信号监测, 驱动层配置  $1.5\text{kW}$  额定功率、 $3000\text{r/min}$  峰值转速的西门子 V90 伺服电机, 搭配 1000 线增量式编码器构建位置闭环, 借脉冲 + 方向控制模式实现刷组移动  $\pm 1\text{mm}$  定位精度<sup>[4]</sup>。网络架构采用三级分布式设计, 底层 PLC 以  $100\text{Mbps}$  传输速率的 PROFINET 总线与 HMI 实时交互, 中层 HMI 搭载支持 TCP/UDP 协议的 4G DTU 模块与云端运维平台通信, 顶层平台可远程下载 PLC 程序、配置 HMI 参数, 实时监控设备能耗曲线与故障日志, 构建起“现场控制—本地监控—远程管理”立体化网络体系。

### 3.2 软件模块化设计

于 TIA Portal V16 平台开发控制程序, 遵循 IEC 61131-3 标准编程语言, 将功能拆解为五大模块化单元, 系统调度核心主程序 OB1, 以  $50\text{ms}$  循环周期调用各功能子程序, 借助全局数据块 DB1 实现跨模块数据交互, 存储列车类型、清洗模式、传感器标定参数等超 200 个运行变量。初始化子程序 FC1 集成传感器零点校准算法, 驱动刷组触碰机械基准面, 自动采集 10 组基准数据取均值, 消除传感器安装偏差; 执行机构归零程序 3 秒内完成刷组、喷水阀等部件原点复位, 保障系统启动安全。

清洗流程控制子程序 FC2 运用有限状态机 (FSM) 架构,

设定“待机”“预定位”“预处理”“主清洗”“精洗”“烘干”“复位”“故障”八大状态,各状态配置专属输入条件(像传感器信号、时间阈值)与输出操作(例如电机启停、阀门切换)。经 SIL2 级功能安全认证的状态转移逻辑,规避因流程错乱引发的设备碰撞隐患。传感器数据处理子程序 FC3 融合窗口大小 8、响应时间 40ms 的滑动平均滤波,搭配  $3\sigma$  异常值检测算法,有效滤除电机启停等高频电磁干扰产生的尖峰噪声,保障压力、流量等关键数据可靠。安全保护子程序 FC4 依托硬件中断 OB40,一旦捕获紧急停机信号,10ms 内迅速切断动力电源、激活制动抱闸,并向 HMI 发送声光报警指令,响应速度契合 EN 60204-1 安全标准。

### 3.3 人机界面功能实现

HMI 界面配备 12 英寸 TP1200 Comfort 触摸屏,依据用户操作习惯构建三层交互架构。主界面以动态流程图为主体,能够实时呈现列车位置(精度可达 0.1m)、刷组三维姿态(含 X/Y/Z 轴坐标信息)以及水压、水温、电流等超 20 项关键参数。对于重要指标,采用颜色编码方式进行区分(绿色代表正常、黄色表示预警、红色意味着故障),并通过闪烁提醒引起注意,同时结合趋势曲线(可回溯过去 24 小时数据),助力操作人员迅速察觉异常工作状态。

操作员密码验证后可调清洗时间、烘干温度等常用参数,工程师输高级密码才能配置传感器标定系数、PID 控制参数,管理员有权限进行系统配置与用户管理。所有参数修改记录自动存进 1GB 历史日志,可追溯 90 天数据。故障诊断界面以树状结构呈现,点击“传感器类”“驱动类”“通信类”等节点展开故障列表,各故障条目关联触发时实时数据曲线,像压力突变 100ms 波形记录,支持故障一键复位、Excel 数据导出,便于故障复现分析。界面集成操作引导,刷组压力异常就弹出图文排查步骤,降低运维技术门槛,实测故障处理时间缩短一半。

## 4 应用验证与效果分析

### 4.1 现场调试与参数优化

某城市地铁车辆段 12 周现场调试,因 A 型(22.8m×3.0m)、B 型(19.0m×2.8m)列车几何不同,调试团队采用分步校准。用激光测距仪取列车标准轮廓数据(精度  $\pm 1\text{mm}$ ),构建 128 个特征点三维模型<sup>[5]</sup>。IFM O3D100 红外测距传感器配  $\pm 15^\circ$  角度调节机构,经正交试验得出  $45^\circ$  仰角、 $10^\circ$  水平偏角最佳安装倾角,减少车体玻璃反光干扰,刷组横向定位精度由  $\pm 50\text{mm}$  提至  $\pm 20\text{mm}$ ,满足不同车型曲面贴合。

PID 控制参数优化时,用示波器实时监测刷组压力曲线,借 Ziegler-Nichols 临界比例度法确定初始参数,经 200 多次迭代测试,得出  $K_p=1.2$ 、 $T_i=0.5\text{s}$ 、 $T_d=0.1$  的最佳参数组合。压力波动控制在  $\pm 5\text{N}$ ,低于国家标准的  $\pm 10\text{N}$ ,避

免高速刷洗划伤车体,以往每百次有 0.3 次划伤情况不再出现。能耗优化方面,安装  $\pm 0.5\%$  精度电磁流量计和电能监测模块,构建模糊逻辑能耗预测模型,根据  $15^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$  水温、0.3~1.2MPa 水压、10~15 分钟清洗时长动态适配,单次清洗耗水量从  $12\text{m}^3$  减至  $8.5\text{m}^3$ ,降 29.2%;耗电量从 150kWh 降至 110kWh,降 26.7%,达 GB/T 36511—2018 先进能耗标准。

### 4.2 实际应用效果评估

系统投用 18 个月,累计处理 2376 次清洗任务,其中 152 次是极端工况测试,像暴雨后泥沙附着列车这类情况,自动化成功率达 99.2%,仅 18 次需人工干预,多为临时故障复位。相比传统人工操作,效率提升 35%,单列车清洗时间从 20 分钟缩至 13 分钟,安全性能大幅突破,凭借机械限位、数据监控、激光防碰撞三级保护机制,刷组与车体导流罩刚性碰撞不再发生,改造前每年平均 5 起,紧急停机响应时间实测 0.38 秒,比 EN 60204-1 规定的 1 秒安全阈值更优。

第三方检测机构认证清洗质量,机器视觉系统以 500 万像素分辨率、 $\pm 0.1\text{mm}$  检测精度扫描车体表面,污渍残留率从 8% 降到 1.5%,轮对踏面油污去除率达 96.3%,超标准要求 90%。空调冷凝器格栅等复杂结构清洗合格率从 65% 升至 92%,运维成本大幅下降,人工干预每班从 4.8 次减到 0.3 次,设备平均无故障时间由 500 小时增至 1200 小时,年度维护费用从 65 万元降至 45 万元。远程故障诊断系统使故障处理时间缩短 40%,实现“预防性维护”到“预测性维护”转变。

## 5 结语

PLC 地铁列车清洗机自动控制策略整合传感器技术、智能算法和模块化编程,达成清洗流程全自动化与精细管理,化解传统清洗效率低、安全风险高、能耗大难题,大幅提升清洗标准化程度与运维可靠性。后续可将物联网融入构建远程监控系统,探索机器视觉与 PLC 结合实现清洗质量即时评估,开发适应极端气候的控制模块。该研究成果为轨道交通运维装备智能化升级提供技术范例,对工业自动化技术在特种清洗设备应用有积极借鉴价值。

### 参考文献:

- [1] 卞荣俊,池鹏飞,刘少磊.列车自动清洗机端刷系统可靠性分析与改进[J].机电工程技术,2020,49(12):217-220.
- [2] 刘丽华,易毅坚,何冠平.基于Internet的列车清洗机远程作业监控系统设计[J].制造业自动化,2022,44(5):5-7.
- [3] 史鸣,刘永强,郭叶星.UPS在地铁列车自动清洗机中的应用[J].机械工程与自动化,2021(5):214-215+217.
- [4] 魏鑫,林东起.WEX型列车自动清洗机端刷摆出过位故障分析与解决[J].轨道交通装备与技术,2021(3):54-56.
- [5] 苏博智,陈伊涛,陈国亮,等.地铁列车外皮清洗机空气控制系统的问题分析与改进[J].机电信息,2020(24):70-73.