

铅酸蓄电池加酸机控制系统设计

骆海停

安徽理士电源技术有限公司, 安徽 淮北 235000

DOI: 10.61369/TACS.2025100039

摘 要 : 铅酸电池加酸工艺的精度与数据追溯能力直接影响电池性能与生产效益。针对传统人工加酸存在的精度低 ($\pm 5\%$ 误差)、数据孤岛、效率低下等问题, 本文设计了一套基于工业物联网架构, 以 PLC 为核心、集成高精度传感与数据库技术的加酸自动化系统, 突破传统工艺局限, 构建低成本、高可靠、全流程可追溯的智能加酸解决方案, 为铅酸电池制造业智能化升级提供技术支撑。本设计已应用于某电池企业产线, 年节约成本 48 万元, 为铅酸电池制造业智能化升级提供了高性价比解决方案, 具有显著的经济效益与行业推广价值。

关 键 词 : 铅酸电池; 加酸工艺; PLC 控制; 数据追溯; 工业自动化; MODBUS TCP 协议

Design of Acid Filling Machine Control System for Lead-Acid Batteries

Luo Haiting

Anhui Leoch Battery Technology Co., Ltd., HuaiBei, Anhui 235000

Abstract : The precision and data traceability of the acid filling process for lead-acid batteries directly affect battery performance and production efficiency. Aiming at the problems of low precision ($\pm 5\%$ error), data silos, and low efficiency in traditional manual acid filling, this paper designs an automatic acid filling system based on the industrial Internet of Things (IIoT) architecture, with PLC as the core and integrated with high-precision sensing and database technology. Breaking through the limitations of traditional processes, the system constructs a low-cost, high-reliability, full-process traceable intelligent acid filling solution, providing technical support for the intelligent upgrading of the lead-acid battery manufacturing industry. This design has been applied to the production line of a battery enterprise, saving 480,000 yuan annually. It provides a cost-effective solution for the intelligent upgrading of the lead-acid battery manufacturing industry and has significant economic benefits and industry promotion value.

Keywords : lead-acid batteries; acid filling process; PLC control; data traceability; industrial automation; MODBUS TCP protocol

一、绪论

铅酸电池广泛应用于新能源汽车、通信基站及储能系统, 全球年产量超 8 亿只。其核心工艺——电解液加注(加酸)的精度直接决定电池内阻与容量一致性。调研显示, 国内 80% 中小型电池厂仍采用人工加酸工艺: 操作者通过量杯手动注液, 依赖机械秤二次称重校验, 平均加酸误差达 $\pm 5\%$, 导致同批次电池容量波动超过 10%。更严重的是, 人工记录纸质表单易丢失篡改, 2022 年某企业因加酸数据缺失导致 5000 组电池召回, 直接损失超 200 万元。

行业亟需一套兼顾精度、成本与数据完整性的解决方案, 这正是本研究的现实驱动力。

(一) 本研究核心目标

以梅特勒 C6 传感器 ($\pm 0.05\%$ FS 精度) 与 PLC 闭环控制^[1], 压缩误差, 精度提升; 构建从扫码、称重到数据库存储的全链路追溯, 追溯响应时间缩短, 实现数据闭环; 设计标准自动化流程, 单工位 ≥ 500 只/班, 人力需求缩减至 1 人/班, 效率优化。最终形成一套可复制、易部署的加酸自动化系统, 填补中小型电

池厂智能化改造的技术空白。

(二) 本系统技术路线

技术路线为前端硬件设备以及传感器; 中端 PLC 处理器和嵌入式屏幕等; 末端为 MySQL 数据库。其创新性体现为: 扫码-称重双重校验机制杜绝误操作; 嵌入式 HMI 直接对接数据库, 规避传统 SCADA 系统的高成本; 轻量化通信协议保障 200ms 级系统响应。

二、系统构成

(一) 总体设计

采用“四层三通”架构, 实现数据从采集到存储的全链路闭环。“四层”为: 感知层包含梅特勒 C6 称重传感器实时采集电池重量 (RS485 输出), 新大陆 NLS-Soldier300N 扫码器读取电池条码, 数据经工业交换机整合后通过 Modbus TCP 协议传输至 PLC^[2]; 控制层三菱 FX5U-32MT/ES PLC 解析传感器数据^[3], 执行加酸逻辑, 通过 PID 算法控制电磁阀开度, 确保加酸量动态调节精度 $\pm 0.3\%$; 交互层昆仑通泰 TPC1071Gi 触摸屏显示实时

数据（条码、重量曲线、合格状态），并通过 VBS 脚本将数据打包为 SQL 指令；存储层为 MySQL 数据库采用主从备份架构，设计包含5个核心字段的数据表，通过定时任务实现数据持久化与统计分析。“三通”则为：RS485通讯、MODBUS TCP 通讯^[4]、Internet IP 通讯。

（二）硬件系统介绍

1. 称重模块校准

称重系统中采用 JB/T 10095-2021 称重传感器标准的单点式传感器^[1]，校准采用工业中通用的三点标定法，通过空载、标准负载和满量程三个关键点建立重量 - 电压的线性关系，其实现过程为：第一空载归零，系统上电后，在无负载状态下采集传感器输出信号（模拟量4-20mA 或数字量 RS485），通过 PLC 程序将当前 AD 值（如 D100=8000）定义为 0kg 基准点，消除传感器零点漂移误差。第二中间量程校准，施加标准砝码（25kg，精度等级 M1），待数值稳定后记录 AD 值（如 D101=24000），计算标定系数 $K=25/24000-8000(Kg/AD)=0.0015625(Kg/AD)$ 。第三满量程验证，加载满量程砝码（50kg），校验实际测量值（PLC 显示 49.98kg）与理论值的偏差（-0.02kg），若误差超出 $\pm 0.05\%FS$ ，自动触发线性补偿算法修正 K 值^[9]。

2. 扫码器安装规范

工业扫码器需按以下规范安装，以确保高效稳定的条码读取性能^[9]：关于安装参数配置，要求安装高度要求镜头中心距传送滚筒上的蓄电池条码表面 $200 \pm 20mm$ ；倾斜角要求光轴与传送滚筒上的蓄电池，偏差 $\leq \pm 1.5^\circ$ ；景深范围要求 50-400mm（支持大景深扫描）；以及读码速度要求 $\leq 0.1s/次$ （高速模式）。光学环境设计要求，照明方采用多光源融合技术，分档可调，根据亮度自动切换；抗干扰措施为加装遮光罩，抑制环境光干扰；镜面采用漫反射板（漫射率 $\geq 85\%$ ），消除反光；屏蔽高频电磁设备，间距 $\geq 1m$ 。调试与验证则是把通讯协议配置定为 Modbus TCP；数据格式 ASCII 码，波特率自适应（支持 1.2Mbps）；触发模式依靠光电传感器联动；超时设置为无条码停留超时 3s 自动复位；标准测试把 GB/T 23704-2017 条码^[10]，倾斜 45° 、遮挡 20% 仍可解码作为性能验证；极端测试中条码表面沾油污、划痕，读码率 $\geq 99.5\%$ 。

（三）PLC 控制程序

铅酸蓄电池加酸机控制系统是以三菱 FX5U PLC 为核心控制器 [8]，其程序编写采用三菱 GX Works3 软件，基于结构化梯形图语言开发，支持多任务并行执行与模块化封装；PLC 同时运行 ModbusTCP 与 SLMP 协议，满足 HMI 与码号读取双向通讯。

（四）人机交互设计

1. 触摸屏界面规划

触摸屏使用昆仑通态嵌入式触摸屏 TPC1071Gi，界面设计符合 ISO 9241-210 人机交互标准，并通过 EMC 抗干扰测试^[11]。界面划分为四大功能区域：报警显示区、操作功能区、实时数据区、数据库状态区。

2. 数据上传脚本

利用嵌入式触摸屏自带的脚本函数可以实现对数据库

增、删、改、查以及导入导出的基本操作，例如：调用函数 !DatabaseConnect 即可实现对数据库的连接。

三、数据库系统

（一）数据库设计

系统采用 MySQL 8.0 数据库，设计核心数据表 acid_weigh，表结构其字段包含：主键、电池码号、前称重重量值、后称重重量值、电池加酸量值、合格标志、数据时间等重要内容。

（二）数据库安全策略

本系统数据库安全策略合规性的设计，符合了 ISO 27001 信息安全管理体系要求^[6]；并满足《网络安全法》及 GDPR 数据保护规范。数据库安全策略主要为：传输、储存加密，采用 SSL/TLS 1.3 协议建立数据库连接，强制加密通信；使用 OpenSSL 生成 CA 证书，防止攻击。字段应用 AES-256 算法加密，密钥动态获取；启用 MySQL 透明数据加密（TDE），对表空间文件（.ibd）进行实时加密，防范物理介质窃取。权限分级管理，基于 RBAC 模型定义操作员、工程师、管理员三类角色划分；并启用 General Log 和 Binlog，记录所有的 SQL 操作。容灾与备份机制，主从数据库通过 GTID 同步的双活架构以及备份策略。

四、系统测试

（一）通讯测试

本设计通讯系统满足工业现场实时性（延迟 $\leq 200ms$ ）与可靠性（丢包率 $\leq 0.1\%$ ）要求，异常恢复能力达到 99% 以上，具备规模化部署条件。通讯测试聚焦系统关键节点间的数据传输可靠性^[7]，主要包含三类测试：基础通讯测试，验证 Modbus TCP 协议握手成功率；检查 HMI 与 PLC 的寄存器映射一致性。实时性测试，抓取数据流，测量端到端延迟；模拟高负载场景，记录 PLC 处理周期波动范围。异常容错测试，人为制造网络中断，验证断点续传功能；注入错误报文，检测系统纠错与报警机制。

（二）加酸精度测试

本设计系统加酸精度实测 $CPK=1.67$ （行业标准 $CPK \geq 1.33$ ），单次最大偏差 0.23kg，符合设计目标（ $\pm 0.25kg$ ），具备高精度、高稳定性特点，满足工业化生产需求。为验证系统加酸精度，采用重复性测试与对比分析法：第一使用标准砝码校准称重传感器，消除设备误差；第二选取同批次铅酸电池 100 只，按工艺标准设定目标加酸量；第三实验室恒温恒湿，避免温漂影响传感器精度；第四通过 PLC 记录实际加酸量，并同步至数据库进行统计分析。

五、结论与展望

（一）经济效益

本系统在某铅酸电池厂试点应用后，经济效益显著，具体体现为以下三方面：第一直接成本节约，节省人力成本约 28.8 万元

(按人均月薪6000元计算);年减少电解液浪费1.2万升(单价15元/L),节省18万元;年维护费由12万元降至4.8万元。第二生产效率提升,日产能提升150%以上,年新增产值720万元;系统故障率降至0.5%,挽回产值损失约54万元。第三隐性效益增值,数据化管控使质量问题定位时间压缩至5分钟,年避免召回损失超100万元;减少过量注液,年节电3.6万度,节省2.88万元;减少电解液挥发,满足碳中和政策要求。

(二) 综合测算与推广价值

初期投资为单套系统含硬件/软件部署成本9.8万元;年净收

益计算为直接节约+增值收益=28.8+18+7.2+54+2.88=110.88万元;资回收周期为9.8万元/(110.88万元/年) $\approx$ 1.06个月,具备极高经济可行性。

行业推广价值,以全国中小型铅酸电池企业(约500家)估算^[12]。若30%企业采用本系统可以年节约人力成本 $500 \times 30\% \times 28.8 = 4,320$ 万元;减少电解液浪费 $500 \times 30\% \times 18 = 2,700$ 万元,合计年经济效益超7,000万元,推动行业整体利润率提升2-3个百分点。

参考文献

- [1] 梅特勒-托利多.工业称重传感器技术白皮书[R].上海:梅特勒-托利多中国,2021.
- [2] 刘洋,吴昊.基于Modbus TCP的工业物联网系统设计[J].计算机工程与应用,2020,56(14):235-240.
- [3] 三菱电机自动化有限公司.FX5U可编程控制器用户手册[Z].上海:三菱电机,2022.
- [4] 王建国,李志强.工业通信协议设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2020:156-182.
- [5] 新大陆自动识别技术有限公司.NLS-Soldier 300N工业扫描器用户手册[Z].福州:新大陆,2023.
- [6] 赵刚.数据库系统安全防护技术研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [7] 肖军,王丽.工业自动化系统可靠性测试方法研究[J].测控技术,2022,41(2):88-92.
- [8] 田村隆一.三菱PLC高级编程技术[M].东京:オーム社,2019.
- [9] 国家市场监督管理总局.JJG 539-2016数字指示秤检定规程[S].北京:中国质检出版社,2016.
- [10] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 18284-2000 二维码符号印制质量要求[S].北京:中国标准出版社,2000.
- [11] 周明,黄涛.工业人机界面设计原理与实践[M].北京:电子工业出版社,2019.
- [12] 中国电池工业协会.2023年中国铅酸蓄电池行业发展报告[R].北京:中国轻工业出版社,2023.