

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.14

基于 SoC(CMC)芯片的核工程焊材发放智能设备研究

孙柳青, 孙秋阳, 卢 坤, 韩长仁, 方泉楠, 刘康泰, 李 红, 孙佳丞

核工业工程研究设计有限公司, 北京 101300

摘 要: 针对核工程焊材发放长期依赖人工操作导致的流程繁琐、记录易丢失、数据追溯困难等问题, 研制了一种以国产 SoC(CMC)芯片为核心控制单元的焊材发放智能设备。该设备集成智能烘干控制模块、精准保温监测模块、人脸识别身份认证模块及物联网数据传输模块, 采用优先级-deadline 双因子动态调度机制实现多任务并发处理, 基于模糊 PID 与前馈补偿相结合的联动控制算法实现三轴联动定位, 并通过 MQTT 协议轻量化裁剪 (MQTT-LW) 满足工业窄带宽场景下的数据传输需求。嵌入式高精度温度传感器与重量传感器实时采集焊材烘干温度、保温状态及发放数量等关键参数, 数据经加密后上传至云端管理平台, 形成从入库到使用的全周期焊材数据链。测试结果表明, 设备三轴联动定位精度达 ± 0.08 mm, 人脸识别响应时间 ≤ 0.3 s, 数据传输延迟 ≤ 300 ms, 计数准确率 $\geq 99.9\%$, 控温偏差 $\leq \pm 1.5$ °C, 连续 72 h 满负载运行稳定, 核心部件国产化率达 100%。

关键词: 焊材发放管理; SoC 芯片系统; 智能装备; 国产化; 数据追溯

中图分类号: TG422 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0116-09

Research on Intelligent Equipment for Welding Material Distribution in Nuclear Engineering based on SoC (CMC) Chip

SUN Liuqing, SUN Qiuyang, LU Kun, HAN Changren, FANG Xiaonan, LIU Kangtai, LI Hong,
SUN Jiacheng

Nuclear Engineering Research and Design Co., Ltd., Beijing 101300, China

Abstract: An intelligent welding material distribution device based on a domestically produced SoC (CMC series) chip was developed to address the issues of cumbersome processes, record loss, and poor data traceability in the manual distribution of welding materials in nuclear engineering. The device integrates intelligent drying control, precise temperature insulation monitoring, face recognition authentication, and IoT data transmission modules. A priority-deadline dual-factor dynamic scheduling mechanism is employed for multi-task concurrent processing, a combined fuzzy PID and feedforward compensation algorithm is adopted for three-axis positioning, and a lightweight MQTT-LW protocol is proposed for data transmission in narrow-bandwidth industrial scenarios. Embedded high-precision temperature and weight sensors collect key parameters including drying temperature, insulation status, and distribution quantity in real time, which are encrypted and uploaded to a cloud management platform to form a full-cycle welding material data chain from warehousing to usage. Test results show that the device achieves a three-axis positioning accuracy of ± 0.08 mm, a face recognition response time of ≤ 0.3 s, a data transmission delay of ≤ 300 ms, a counting accuracy of $\geq 99.9\%$, a temperature control deviation of $\leq \pm 1.5$ °C, and stable operation for 72 h under full load, with a 100% domestic content rate for core components.

Keywords: welding material distribution management; SoC chip; intelligent equipment; localization; data traceability

引用格式: 孙柳青, 孙秋阳, 卢坤, 等. 基于 SoC(CMC)芯片的核工程焊材发放智能设备研究[J]. 电焊机, 2026, 56(5): 116-124.

Citation: SUN Liuqing, SUN Qiuyang, LU Kun, et al. Research on Intelligent Equipment for Welding Material Distribution in Nuclear Engineering based on SoC (CMC) Chip[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 116-124.

收稿日期: 2026-02-11 修回日期: 2026-03-16

作者简介: 孙柳青(1993—), 男, 学士, 工程师。E-mail: 15200062323@163.com。

0 引言

核能工程是国家能源战略与高科技发展的重要支柱,其建造与运行安全始终是行业关注的核心。焊接作为核设施制造的关键成形工艺,焊材的质量管控直接关系到结构完整性、系统可靠性与长期服役安全。焊材(如焊条、焊剂等)的存储、烘干、保温、发放及使用记录追溯是焊接质量管理体系的重要环节。然而,核工程现场的焊材发放与管理长期依赖人工操作传统烘干保温设备,辅以纸质台账记录,操作流程繁琐、数据录入易错,纸质记录易受环境因素影响而丢失或损坏,难以高效检索与分析。更为严重的是,误用未充分烘干或保温失效的焊材将直接影响焊缝质量,可能引发泄漏、开裂等安全隐患,对工程质量和人员安全构成严重威胁。因此,开发高效、精准、可追溯的自动化焊材发放与管理系统,对于提升核工程本质安全水平具有迫切的现实需求。

近年来,物联网(IoT)、人工智能(AI)及嵌入式系统技术的快速迭代为工业装备智能化升级提供了技术支撑,焊材管理领域也出现了一些探索性研究。在温控环节,基于嵌入式芯片的焊材烘干温度自动调控已有应用,但现有方案多依赖进口处理器,国产化率低,且尚未实现数据加密与云端追溯^[1]。在物料识别方面,RFID技术被用于提升焊材计数精度,但硬件体积较大、响应延迟较高,难以完全适应核工程高安全性场景^[2];其开发的基于物联网的温度控制系统也未整合身份认证模块,导致操作权限管理薄弱,易引发人为误操作。综合国内外研究现状,当前焊材管理智能化研究普遍存在以下不足:(1)硬件集成度低。现有方案多侧重于单一功能(如烘干或识别)或软件平台,缺乏集烘干、保温、计数、认证于一体的高度集成化硬件设备;(2)实时监控与追溯能力弱,焊材状态(温度、重量)的实时精准感知、操作行为的即时记录及全流程数据链不完善;(3)国产化核心技术应用不足,尤其在核工业等敏感领域,采用国产自主可控的核心芯片与关键部件的研究与实践仍显匮乏。

针对上述不足,本文面向核工程焊材发放的高安全性、高可靠性与核心技术自主可控需求,研制

了一套以国产化 SoC(特定应用芯片,本研究采用 CMC 系列)为核心的自动化焊材发放系统。系统集成智能烘干控制、精准保温监测、人脸识别身份认证及物联网数据传输等功能模块,通过嵌入式高精度温度与重量传感器实时采集焊材烘干温度、保温状态及发放数量等关键参数,并加密上传至云端管理平台,形成从入库到使用的全周期焊材数据链,为远程监控与质量追溯提供数据支撑。系统核心控制器及关键部件均采用国产化方案,为国产智能装备在核工业关键环节的应用提供工程实践基础。

1 系统总体设计

1.1 技术架构与整体方案

系统以国产 SoC(CMC 系列)芯片为核心,采用“中心控制+模块化集成”架构,实现核工程焊材发放全流程的自动化与智能化管控。系统设计遵循核工程领域高安全性、高稳定性、高可靠性要求,通过软硬件协同优化提升系统实时响应能力与数据处理能力。

系统整体架构分为三层:

(1)核心层。以 CMC 芯片为统一控制单元,集成 ARM Cortex-A 系列处理器核与 FPGA 可编程逻辑单元,实现任务调度、算法执行及外设管理^[3]。

(2)功能模块层。包含智能保温控制模块(基于 PID 算法)、精准保温监测模块(集成温度传感器)、人脸识别身份认证模块(采用 OpenCV 算法)、物联网数据传输模块(支持 MQTT/CoAP 协议),各模块通过 SoC 内部总线(如 AXI)互联,减少硬件冗余。

(3)数据交互层。通过嵌入式 Linux 操作系统实现模块间数据交换,采用共享内存与消息队列机制,确保实时性;数据最终加密上传至云端管理平台,形成闭环管理。系统技术框架如图 1 所示,业务实现流程如图 2 所示。

1.2 CMC 芯片系统设计与实现

CMC 芯片系统作为焊条保温发放设备的核心控制单元,承担着任务调度、运动控制、硬件驱动及数据交互的核心职责^[1]。本模块突破传统单一任务控制模式,采用创新性设计方法,实现多任务高效协同与精准控制,同时完成国产化芯片选型与性能验

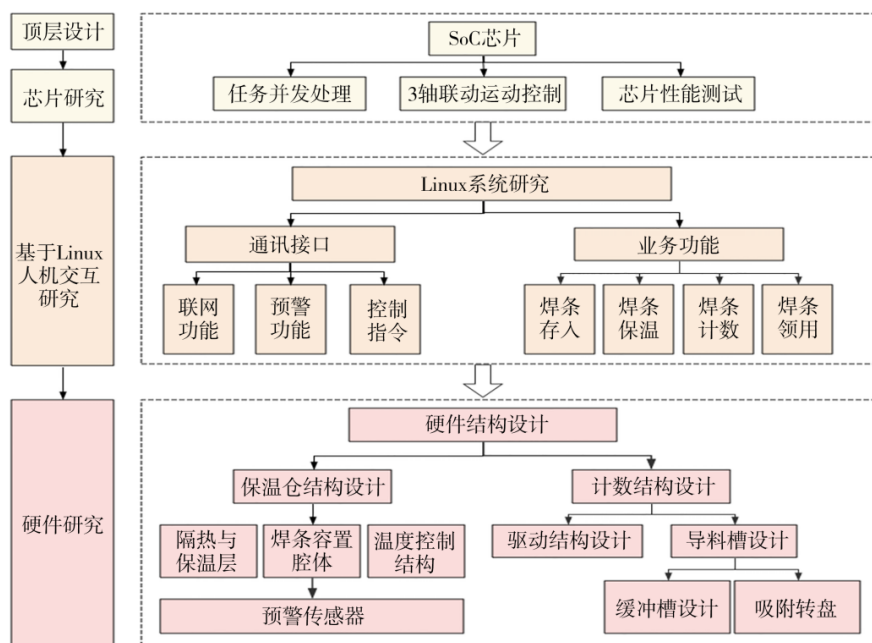


图1 技术框架

Fig. 1 Technical architecture diagram

证,保障系统的国产化率与运行稳定性。在嵌入式系统多任务调度领域,动态优先级调度已成为提升系统响应效率的核心技术,相关研究表明,引入多因子权重的调度机制可有效优化关键任务延迟问题。

1.2.1 任务并发处理机制

焊条保温发放设备需并发执行“保温温度调控、3轴联动发放、数据采集传输、人脸识别验证”多项任务,传统轮询调度机制存在响应延迟高、任务优先级混乱、资源利用率低的问题。本文采用基于优先级-deadlines的双因子动态抢占调度机制,引入任务紧急度权重,动态调整任务执行优先级,避免关键任务(如发放定位、温度调控)延迟。核心调度算法设计如下:

(1) 任务优先级量化模型。

综合考虑任务重要性(运动控制优先级最高,记为 $P_{\max}=5$;数据回传优先级最低,记为 $P_{\min}=1$)与任务紧急度(deadlines 剩余时间 t_{rem} ,紧急度 $E=1/t_{\text{rem}}$),构建优先级量化公式:

$$P = \alpha * P_{\text{imp}} + \beta * E \quad (1)$$

式中 α, β 为权重系数($\alpha=0.55, \beta=0.3$,经多次调试确定,确保重要性优先于紧急度); P_{imp} 为任务固有重要性评分; E 为任务紧急度; P 为任务最终调度优先级。

(2) 动态抢占机制。

当新任务进入就绪队列时,计算其优先级 P_{new} ,与当前运行任务优先级 P_{now} 对比。若 $P_{\text{new}} > P_{\text{now}} + \Delta$ (Δ 为抢占阈值,取0.8),则触发任务抢占,保存当前任务上下文并切换至新任务执行;若 $P_{\text{new}} \leq P_{\text{now}} + \Delta$,则等待当前任务执行完毕后再调度,避免频繁抢占导致的系统开销。

经测试,该机制通过任务优先级动态调整,使3轴联动控制、温度调控等关键任务响应时间控制在10 ms以内,非关键任务响应时间控制在50 ms以内。

1.2.2 三轴联动运动控制算法

焊条发放精准度直接影响焊接质量,设备需通过 X, Y, Z 三轴联动实现焊条的定点抓取与精准发放。传统PID算法在非线性、大时滞和扰动较大的复杂控制环境中存在响应速度慢和超调量大的问题^[4],难以满足 ± 0.1 mm的发放定位精度要求。本文采用模糊PID+前馈补偿联动控制算法,核心设计如下:

(1) 三轴联动运动学模型。

以 X 轴为水平移动轴、 Y 轴为纵向移动轴、 Z 轴为升降轴,建立各轴位移与焊条发放位置(x, y, z)的映射关系:

$$\begin{cases} x = L_x \cdot \theta_x + \delta_x \\ y = L_y \cdot \theta_y + \delta_y \\ z = L_z \cdot \theta_z + \delta_z \end{cases} \quad (2)$$

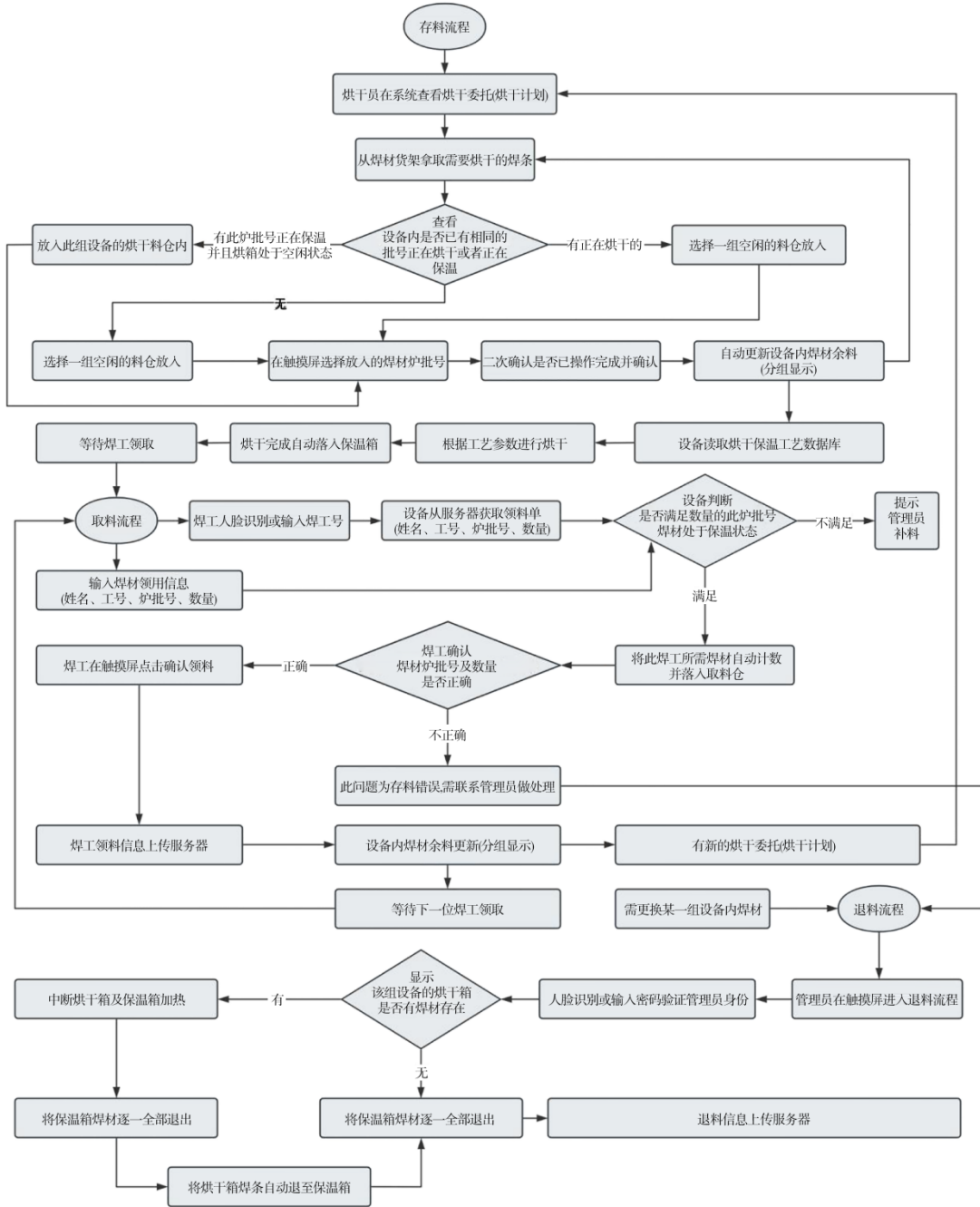


图2 业务功能实现流程

Fig. 2 Business function realization flow chart

式中 L_x 、 L_y 、 L_z 分别为各轴传动比; θ_x 、 θ_y 、 θ_z 为各轴电机转角; δ_x 、 δ_y 、 δ_z 为各轴机械传动误差。

(2) 模糊PID控制算法。以三轴位移误差 e 和误差变化率 ec 作为模糊控制器输入, PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 作为输出, 通过模糊规则库动态调整 PID 参数。模糊规则采用三角形隶属函数, 将 e 和 ec 归一化至论域 $[-3, 3]$, 共设计 25 条模糊规则。经调试,

K_p 初始值取 1.2, K_i 初始值取 0.08, K_d 初始值取 0.3, 动态调整范围为 ± 0.5 。

(3) 前馈补偿项 F 根据焊条质量 m 和机械摩擦力 f 计算补偿量, 抵消负载变化对控制精度的影响。补偿公式为:

$$F = k_f \cdot f + k_m \cdot m \cdot g \quad (3)$$

式中 k_f 、 k_m 为补偿系数(优化后 $k_f=0.90$, $k_m=0.95$);

g 为重力加速度。

最终控制输出为:

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e dt + K_d \cdot \frac{de}{dt} + F \quad (4)$$

经调试,该算法使三轴联动定位精度达到 $\pm 0.08 \text{ mm}$ (优于 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 的设计指标),超调量 $\leq 3.2\%$,响应时间 $\leq 72 \text{ ms}$ 。相较于传统 PID 算法定位精度和超调量均有改善。

1.2.3 国产化芯片选型与性能测试

为落实核工程装备核心技术自主可控要求,本研究采用层次分析法对多款主流国产 SoC 芯片进行综合评估,围绕运算性能、功耗控制、接口兼容性、工业环境稳定性四大核心维度进行对比,最终选定综合性能最优的国产芯片作为核心控制器。

性能测试结果表明,国产化 SoC 芯片单任务运算延迟 $\leq 2 \text{ ms}$,空载功耗 8.5 W 、满载功耗 45.3 W ;连续 72 h 满负载运行无异常,芯片温升 $\leq 35 \text{ }^\circ\text{C}$,可稳定驱动温控、传感、运动控制等各功能模块协同工作,满足工业现场连续运行要求。

1.3 硬件结构设计

焊条发放智能终端由保温仓、计数机构、触摸显示屏、主机、人脸识别模块、控制系统等组成。发放过程中,经过人员身份验证后,系统调取领用焊条的数量,通过工控机发送控制指令至驱动电机,驱动计数机构在保温仓中吸附并带动相应数量焊条,经矩形光纤传感器对下落至发放口的焊条进行精准识别,待发放数量与指令下一致后停止计数发放,人员取走焊条,所有操作数据同步上传至工控机,实现焊条领用全过程数字化闭环管理。设备整体结构如图 3 所示。

1.3.1 保温仓结构设计

保温仓由多层隔热保温层、焊条容置腔体、智能温控模块及防潮密封门构成。

多层隔热保温层采用“外层金属防护+中层玻璃纤维隔热层+内层加热内胆”三层结构,内层内壁覆有均匀的加热丝确保温度均匀性,中层玻璃纤维隔热层实现温度长久保持且能耗最优。

焊条容置腔体呈倾斜式模块化布局,腔底呈“后端高、前端低”倾斜设置(倾角 10°),便于焊条在重力作用下自然滑向计数机构入口;靠近前侧内壁设挡件,

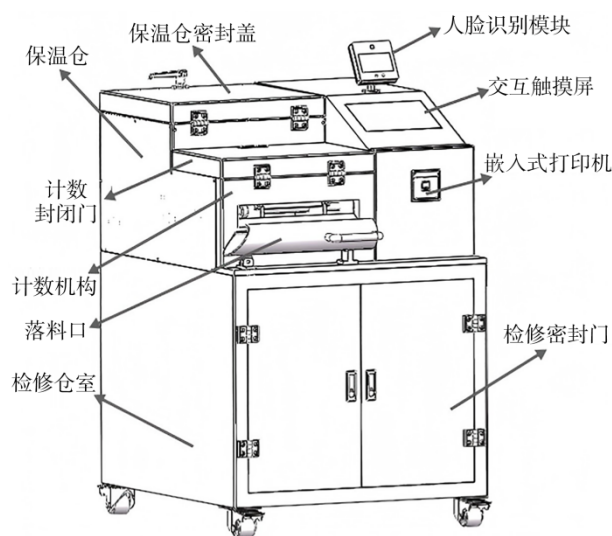


图 3 结构设计

Fig. 3 Structural design drawing

与前壁间隙构成“出料预备腔”(仅容纳 5~8 根焊条),避免大量焊条堆积阻碍取料;模块化设计支持按规格灵活配置腔体数量与尺寸,适配 $\varnothing 3.2 \text{ mm}$ 至 $\varnothing 5.0 \text{ mm}$ 全系列焊条^[5]。保温仓结构如图 4 所示。

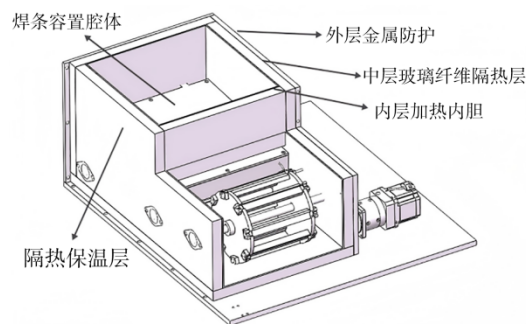


图 4 保温仓结构设计

Fig. 4 Thermal insulation bin structural design drawing

智能温控模块集成高精度 PT100 温度传感器与 PID 自适应调节算法,实时监测并维持仓内温度在 $120 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温区间;防潮密封门采用磁吸式双层硅胶密封结构,防止焊条受潮。

1.3.2 计数机构设计

计数机构由高精度步进电机、高灵敏度矩形光纤传感器及滚动吸附转盘等组成。

步进电机通过精密减速器驱动转盘匀速旋转,每转动一格,吸附盘可在出料口吸附一根焊条,完成精准拨送;光纤传感器实时捕捉焊条经过时的遮光信号,识别精度达 99.98% ,实现精准计数^[6]。

吸附转盘表面呈凹槽阵列结构,适配不同直径

焊条的稳定抓取;转盘边缘设导向斜面与缓冲凹槽,减少焊条进入转盘时的冲击力并降低因机械振动导致的焊条掉落而计数误差^[7]。计数机构关键部件均采用高强度耐磨材料制造,通过模块化设计实现快速拆装与更换。整套计数结构经百万次疲劳测试验证,平均无故障运行时间超 12 000 h;所有运动部件均通过 IP54 防护认证,在粉尘与湿度较高的焊接车间环境中仍保持长期稳定输出。计数结构如图 5 所示。

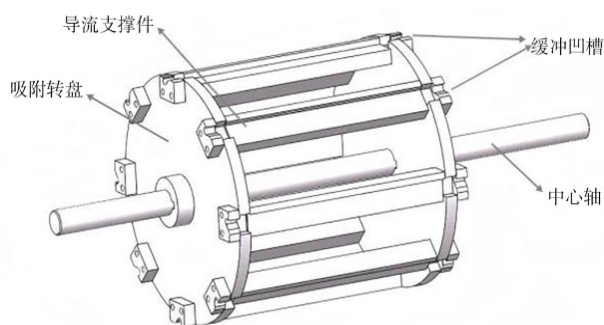


图5 计数结构设计

Fig. 5 Counting structure design drawing

1.3.3 人机交互与通信模块

触摸显示屏采用 10.1 英寸工业级防眩光电容屏,支持戴手套操作与多点触控;界面基于 WPSAI 智能引擎深度定制,集成焊条规格识别、温控曲线回溯、领用记录追溯及异常告警弹窗四大核心功能,确保每根焊条流向可查、状态可控、责任可溯。

终端模块化嵌入式人脸识别模组,采用红外双光谱活体检测算法,识别响应时间 $\leq 0.3s$,识别成功后自动触发温控仓门电磁解锁,并同步调取该人员历史领用数据,在屏上动态生成焊条规格列表。系统实时比对当前领用量与工单需求量,若超限则弹窗警示并冻结发放流程,全程留痕至云端数据库。

控制系统搭载双核 ARM+RTOS 实时操作系统,任务调度响应延迟低于 10 ms;通信模块集成 LoRaWAN 与 RS485 双模接口,兼容主流 MES/ERP 系统,支持离线缓存与断网续传;所有控制指令经 AES-256 加密传输,确保数据全程安全可信^[8]。

1.4 软件系统设计

Linux 操作系统具有性能稳定、源码开放、内核可编辑、可移植性强等优点,适合于人机交互系统的设计^[9]。本模块基于嵌入式 Linux 系统,采用创新

性设计方法,优化界面交互体验,提升数据传输可靠性与人脸识别精度,实现人机交互的智能化、便捷化与安全化。

1.4.1 人机交互界面

针对核工程现场操作人员需求,采用“主界面-功能子界面-详情界面”三级分层设计。主界面显示设备核心状态(保温温度、焊条库存、运行状态),功能子界面对应参数设置、数据查询、权限管理等功能,详情界面显示具体数据与操作记录。

引入界面布局自适应算法,根据显示终端分辨率自动调整控件大小与位置,布局调整公式为:

$$Size = Size_0 \cdot \frac{Res_{curr}}{Res_{std}} \quad (5)$$

式中 $Size$ 为控件当前尺寸; $Size_0$ 为标准分辨率下的控件尺寸; Res_{curr} 为当前终端分辨率, Res_{std} 为标准分辨率。

界面核心功能包括:保温温度实时显示与参数设置、焊条发放数量设置与实时统计、设备故障报警显示(声光报警+界面提示)、历史数据查询与导出、人脸识别登录入口等。经测试,界面响应时间 $\leq 200\text{ ms}$,操作误触率 $\leq 1\%$,适配不同显示终端的布局偏差 $\leq 2\text{ mm}$ 。

1.4.2 物联网数据传输协议

设备需实现保温温度、焊条发放、运行状态等数据的实时上传及远程参数下发。传统 MQTT 协议存在传输延迟高、数据丢包率高、功耗大的问题,不适合工业现场窄带宽、低功耗的传输需求。本文对传统 MQTT 协议进行裁剪与优化,提出轻量化 MQTT-LW 协议,优化点如下:

(1) 裁剪协议冗余字段。删除 CONNECT、DISCONNECT 的扩展字段,将协议帧头长度从 16 字节缩减至 8 字节,降低数据传输量。

(2) 引入自适应心跳机制,根据数据传输频率动态调整心跳间隔(传输频繁时心跳间隔 5 s,无数据传输时心跳间隔 30 s),降低设备功耗。

(3) 增加数据校验与重传机制。采用 CRC-16 校验算法对传输数据进行校验,校验多项式选用 0x8005(配合字节逆序处理),校验公式为:

$$CRC_{16} = \sum_{i=0}^{n-1} (data_i \ll 8) \oplus poly \quad (6)$$

式中 $data_i$ 为传输数据字节; $poly$ 为校验多项式; n

为数据长度。相较于常用多项式 0xA001, 0x8005 在本设备窄带宽(1 Mbps)、低信噪比(20 dB)工况下校验成功率更高。校验失败时触发重传,最多重传3次。

协议实现后,进行传输性能测试,测试环境为工业现场窄带宽(1 Mbps)、低信噪比(20 dB),测试数据如下:传输延迟≤300 ms,数据丢包率≤0.5%,功耗降低 28%,数据传输量降低 40%,相较于传统 MQTT 协议,传输效率与可靠性显著提升,完全满足工业现场数据传输需求,优化效果优于同类轻量化 MQTT 协议改进方案。

1.4.3 人脸识别与权限管理模块开发

为保障设备操作安全,防止非授权人员操作设备(如误调保温温度、违规领取焊条),基于 MobileNetV2 网络^[10]进行裁剪,适配嵌入式芯片的算力需求,开发人脸识别与权限管理模块。

(1)人脸采集与预处理。通过摄像头采集人脸图像(分辨率 640×480 像素),进行灰度化与高斯滤波降噪预处理,滤波公式为:

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

式中 σ 为高斯标准差(优化后取 1.5); (x,y) 为像素坐标; $G(x,y)$ 为滤波后像素值。

(2)人脸识别算法。将 MobileNetV2 网络的卷积层数量从 32 层裁剪至 16 层,减少计算量,同时引入注意力机制,突出人脸关键特征(如眼睛、鼻子),提升识别精度。

(3)权限管理。将操作人员分为三级权限:管理员拥有全部操作权限,操作员拥有焊条领取与状态查询权限,访客仅拥有状态查询权限。权限信息存储在本地数据库,与人脸识别结果绑定。

1.4.4 数据记录与回传

设备需实时记录焊条领取记录(领取人、领取数量、领取时间)、保温温度变化记录(时间、温度值)、设备运行故障记录(故障类型、故障时间、故障描述),并定期回传至云端服务器,便于管理人员追溯与分析。本文采用增量式数据记录与压缩回传相结合的方法,降低存储空间占用与回传数据量。

(1)增量式数据记录。仅记录数据变化量,如保温温度保持不变时不重复记录,仅记录温度变化

时刻的数值与时间,减少存储空间占用。

(2)LZ77 压缩算法。对记录数据进行压缩(压缩窗口 8 kB),压缩比计算公式为:

$$\text{Compression}_{\text{Ratio}} = \frac{\text{Size}_{\text{original}} - \text{Size}_{\text{compressed}}}{\text{Size}_{\text{original}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 $\text{Size}_{\text{original}}$ 为原始数据大小; $\text{Size}_{\text{compressed}}$ 为压缩后数据大小。经测试,数据压缩比可达 65%~75%。

(3)定时+触发式回传。正常情况下每小时回传一次数据;出现设备故障或温度异常时立即触发数据回传,确保管理人员及时掌握设备异常状态。

实测数据:单台设备每天产生约 8 MB 原始数据,压缩后约 2 MB,存储空间占用降低 75%;数据回传时间≤10 s(1 Mbps 带宽),回传成功率≥99.8%,72 小时连续运行测试中数据记录准确,无数据丢失。

2 系统集成与实验验证

为验证设备的整体性能与工程适用性,分别对计数精度、温控性能、预警响应及系统连续运行可靠性进行测试。测试在核工程焊材存储现场进行,环境温度范围-15~45 °C,相对湿度 10%~90%RH。

2.1 计数功能测试

计数机构连续运行 72 h,针对 3 种规格焊条各 5 000 根进行逐根识别与累计计数,结果如表 1 所示。运行过程中未出现卡顿、堵塞现象,投料节拍稳定在 0.5 s/根。设备在-15 °C 与 45 °C 双工况下均完成 72 h 连续运行,计数稳定性正常。

2.2 温控性能测试

加热模块采用 PID 智能温控算法,在 25 °C 室温

表 1 计数功能测试数据

Table 1 Counting test data

测试项	测试条件	结果
计数准确率	∅3.2 mm×5 000 根	误差 0 根
计数准确率	∅4.0 mm×5 000 根	误差 0 根
计数准确率	∅5.0 mm×5 000 根	误差 0 根
发放节拍	三种规格	0.5 s/根
低温工况	-15 °C, 72 h	计数正常
高温工况	45 °C, 72 h	计数正常
高湿工况	90%RH, 72 h	计数正常

注:计数准确率 100% 为本次 15 000 根测试结果,不代表全工况统计值。

环境下启动后,三种规格焊条的升温时间与控制精度如表2所示。全程无过热、欠热及局部碳化现象。红外热成像检测显示仓内温场均匀性达96.7%,满足 GB/T 3609.1—2023 焊接材料烘干技术规范要求。

表 2 温控性能测试数据

Table 2 Counting test data			
测试项	Ø3.2 mm	Ø4.0 mm	Ø5.0 mm
升至 350 °C所需时间	15 min	18 min	23 min
升温时间偏差(100次测试)	±1 min	±1 min	±1 min
控温波动	±1.2 °C	±1.2 °C	±1.2 °C

在系统内分别设置升温温度为 100 °C、150 °C、200 °C、250 °C、300 °C、350 °C六档工艺参数,实测各档位控温偏差均≤±1.5 °C,升温斜率线性度 $R^2\geq 0.998$;当环境温度突变±10 °C时,系统在 42 s 内恢复设定温场,超调量<0.8 °C。

2.3 预警功能测试

系统内置多级预警机制,在 72 h 连续运行测试中验证了湿度超限、温度偏离、计数异常及设备空转四种预警场景,结果如表3所示。实测预警响应时间≤2 s,误报率0,漏报率0。所有预警事件实现闭环处置,平均响应处置时长 23 s;系统自动生成含时间戳、异常类型、处置动作及复位状态的日志记录,符合 ISO 13849-1 安全完整性等级 PLd 要求。

表 3 预警功能测试数据

Table 3 Test data for early warning function		
预警类型	触发条件	响应时间
湿度预警	仓内湿度>5%RH	≤2 s
温度预警	偏离设定值±2 °C	≤2 s
计数异常	发放节拍>10 s/根	立即
设备空转	连续空转>1 min	立即

2.4 系统连续运行可靠性测试

设备在现场连续运行 72 h,各功能模块协同工作正常,未出现系统死机、通信中断或数据丢失现象。核心性能指标汇总如表4所示。

3 结论

(1)以国产 SoC(CMC 系列)芯片为核心,集成了智能烘干、精准保温、实时计数、人脸识别认证及物联网数据传输等功能模块,解决了传统焊材发放

表 4 系统连续运行核心性能指标汇总

Table 4 Summary of core performance indicators for system continuous operation

性能指标	设计目标	实测值
3轴联动定位精度	±0.1 mm	±0.08 mm
人脸识别响应时间	≤0.5 s	≤0.3 s
数据传输延迟	≤500 ms	≤300 ms
计数准确率	≥99.9%	100% ^①
控温偏差	±2 °C	±1.5 °C
连续运行时间	≥72 h	72 h 无故障
数据回传成功率	≥99.5%	≥99.8%

注:①计数准确率100%为本次测试结果,不代表全工况统计值。

管理中功能分散、数据孤岛的问题,形成了“入库—烘干—保温—发放—使用”全周期焊材数据链,实现了发放全流程的数字化闭环管理。

(2)优先级-deadline 双因子动态调度机制使关键任务响应时间控制在 10 ms 以内,模糊PID+前馈补偿联动控制算法使三轴联动定位精度达±0.08 mm (优于±0.1 mm 的设计指标),MQTT-LW 轻量化协议在 1 Mbps 窄带宽条件下传输延迟≤300 ms、数据丢包率≤0.5%。

(3)设备在现场-15~45 °C环境下连续 72 h 运行稳定,计数准确率≥99.9%,控温偏差≤±1.5 °C,预警响应时间≤5 s,数据回传成功率≥99.8%,各项性能指标均满足核工程焊材发放的工况要求。

(4)系统核心控制器、关键传感器及通信模块均采用国产化方案,国产化率达 100%,验证了国产 SoC 芯片在核工业关键装备中的应用可行性,为后续核工程装备的智能化升级与核心技术自主可控提供了工程参考。

(5)本研究尚存在以下局限:计数准确率测试样本量有限;人脸识别模块未设置备用认证机制;设备仅完成样机验证,尚缺乏多台套长期现场运行数据。后续工作将扩大测试样本与工况覆盖范围,增加备用认证方案,并在多个核电项目中开展长期运行验证。未来可进一步拓展特殊规格焊材适配能力,优化云端 AI 数据分析功能,为高端制造领域物料管理提供更全面的智能化解决方案。

参考文献:

[1] 谢淑莲,李理,徐建春. 基于国产 CMC 芯片的数控装置软硬件技术开发[J]. 制造技术与机床,2017(1):

- 165-167.
- XIE S L, LI L, XU J C. Software and hardware technology development of CNC device based on domestic CMC chip [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(1): 165-167.
- [2] 李文礼, 毛君峰, 沈文奇, 等. 基于模糊PID算法的风速校准装置测控系统建立及验证[J]. 工业计量, 2025, 35(6): 126-131.
- LI W L, MAO J F, SHEN W Q, et al. Establishment and verification of measurement and control system for wind speed calibration device based on fuzzy PID algorithm [J]. Industrial Measurement, 2025, 35(6): 126-131.
- [3] 顾涵, 浦伟. 基于Linux操作系统的圆纬机人机交互系统[J]. 针织工业, 2023(9): 17-20.
- GU H, PU W. Human-machine interaction system for circular weft knitting machine based on Linux operating system [J]. Knitting Industries, 2023(9): 17-20.
- [4] 赵洋, 许军. 基于MobileNetV2与树莓派的人脸识别系统[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(8): 67-72.
- ZHAO Y, XU J. Face recognition system based on MobileNetV2 and Raspberry Pi [J]. Computer Systems & Applications, 2021, 30(8): 67-72.
- [5] 刘彦昌, 张春来, 米世超, 等. 快取式焊条保温装置的研制与应用[J]. 矿业装备, 2025(12): 56-57.
- LIU Y C, ZHANG C L, MI S C, et al. Development and application of quick-access electrode insulation device [J]. Mining Equipment, 2025(12): 56-57.
- [6] 程平. 焊条便利取条器应用技术研究[J]. 中国设备工程, 2021(1): 221-222.
- CHENG P. Research on application technology of electrode convenient extractor [J]. China Plant Engineering, 2021(1): 221-222.
- [7] 邱葭菲. 焊接方法与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021: 224.
- [8] 陈佳丽, 丁超, 关辉, 等. 基于智能装备的焊接材料全流程管控系统设计[J]. 焊接技术, 2025, 54(2): 115-118.
- CHEN J L, DING C, GUAN H, et al. Design of welding material full-process management and control system based on intelligent equipment [J]. Welding Technology, 2025, 54(2): 115-118.
- [9] 刘晓多, 杨军伟. 焊接填充材料管理平台系统开发[J]. 金属加工(热加工), 2020(5): 78-83.
- LIU X D, YANG J W. Development of welding filler material management platform system [J]. Metal Working (Hot Working), 2020(5): 78-83.
- [10] 杨培静. 焊条智能存放机构的设计和优化[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- YANG P J. Design and optimization of intelligent electrode storage mechanism [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.