

无线电静默计时报警装置的设计与应用研究

郑鑫鑫 李少靖 蔡园 傅孙柯

中国铁路上海局集团有限公司上海动车段，浙江省杭州市，310000；

摘要：铁路天窗修作业存在人工计时精度不够、安全联控时效性欠佳等明显问题，本研究设计了一种基于嵌入式系统的无线电静默计时报警装置。采用高灵敏度 SA868 无线电接收模块（灵敏度达-136dBm）实时监测 UHF 频段（400–480MHz）信号，结合 STM32F103 单片机作为核心处理器构建闭环控制系统，实现通信静默时长精确计量与智能报警功能。装置运用动态阈值调整算法和自适应滤波技术，在复杂铁路电磁环境中保持稳定工作，检测到信号中断时，装置 800ms 内即可快速触发声光报警。装置人机交互界面基于迪文 2.8 寸触控串口屏开发，支持 7 个标准通信频段（包括 467.2MHz、457.2MHz 等）实现一键切换，此外还可以灵活设置静默时间，其标准范围是 0–999 秒。经上海动车段杭州动车运用所现场测试验证，该装置能够使天窗修作业安全执标率达到 100%，联络遗漏率从 18.6% 降到 0%，平均作业时间缩短 15%–20%，装置单次充电续航时间为 10 小时。现场试验后结果显示，该装置能够有效解决传统人工计时方式的固有缺陷，其创新性闭环控制架构和智能化报警机制可为铁路天窗修作业提供可靠技术保障，有较高的经济效益、安全效益和推广应用价值，有效提升运用所上道作业管理水平。

关键词：天窗修；嵌入式系统；无线电静默计时报警；STM32F103 单片机；人机交互；闭环控制架构；智能化报警

DOI: 10.69979/3041-0673.25.11.013

引言

铁路天窗修作业属于保障行车设备安全运行的关键技术举措，其核心安全要求为驻站联络员与现场防护员务必严格按照规定时间间隔（V型天窗不超过 3 分钟、垂直天窗不超过 10 分钟）维持通信联络^[1-3]。依据杭州动车运用所 2024 年 12 月天窗修作业数据统计，传统人工计时方式存有明显缺陷：计时平均偏差达到了±22 秒（V型天窗 3 分钟联络周期）及±90 秒（垂直天窗 10 分钟联络周期），极大地影响了安全联控的时效性。铁路通信技术的稳定性、真实性以及时效性等因素，直接关系到列车的正常运行与乘客的生命安全^[4]。

当前相关研究大多聚焦于通信设备自身的优化改良之处，文献^[5]给出了基于 GSM-R 的铁路通信系统改进办法，文献^[6]说明了 5G 技术给铁路系统通信效率带来的提升，虽说这两项技术让通信质量有了提高，然而却没能从根源上解决人工计时不可靠这一问题，文献^[7]设计了一种基于嵌入式技术的参数语音装置，不过其适用场景存在局限，难以契合复杂电磁环境下的作业要求。现有技术方案一般都忽略了人因工程学因素，使得操作复杂度上升，反倒有可能带来新的安全隐患。

本研究依靠嵌入式系统技术，创新性地研发出一款智能化无线电静默计时报警装置，借助构建“信号感知-逻辑决策-状态反馈”的闭环控制架构，达成通信状态的实时监测以及精确计时，与现有技术相较，本研究的

创新之处主要呈现在以下五个方面，其一提出一种融合高灵敏接收模块、自适应滤波以及动态阈值算法的信号监测机制，此机制可在复杂电磁环境里精准识别通信静默状态，并且借助蜂鸣器预警有效规避因人为计时误差引发的安全隐患；其二集成亚音编码匹配与多信道跳频功能，达成对铁路作业多频段无线电信号的高效兼容以及一键切换，提升现场通信灵活性与可靠性；其三开发基于触摸屏的可视化人机交互界面，借助模块化设计降低操作复杂度；其四装置外壳采用 ABS 材质并结合 3D 打印技术，有良好耐候性与机械强度，内部集成抗震组件与多级电磁滤波电路，能在高温、高振动、电磁干扰等复杂铁路环境下稳定运行；其五系统配备 2000mAh 锂聚合物电池与快充模块，支持长达 10 小时续航及 4 小时快速补能，同时配备三重电源保护与功耗动态管理，保障设备在长时作业期间的稳定性与安全性。这些技术创新解决了铁路安全作业中的关键难题，其技术路线和方法论对其他工业领域的计时监控系统开发也有关键参考价值。

1 系统总体设计

1.1 系统架构设计

此装置运用分层模块化的设计思路，搭建起一个完整的、覆盖信号感知、逻辑决策以及状态反馈的闭环控制系统，该架构主要含有以下四个核心模块：

(1) 信号采集模块：选用 SA868 无线电接收模块作为信号检测单元，该模块接收灵敏度可达 -136dBm ，可支持 400–480MHz 的宽频段接收^[8]，这一频段范围可完全覆盖铁路作业所使用的 7 个标准频段 (467.2MHz、457.2MHz 等)。模块内部设置了高速微控制器以及高性能射频收发芯片，借助这些部件可将有效通信距离拓展至 5 公里，契合露天作业时远距传输的需求。

(2) 控制核心模块：选择以 STM32 单片机作为主控制器，该芯片是基于 ARM Cortex-M 内核构建的，有丰富的外设接口以及强大的实时处理能力^[9]。经由精心设计的中断服务程序，可达成微秒级的事件响应。

(3) 人机交互模块：所采用的是迪文 2.8 寸 TFT 触控串口屏 (型号 DMG32240C028-03WTR)，这款屏幕有色彩较为鲜艳、对比度比较高的特性，在复杂的光线条件下也可清晰地显示相关信息，足以契合天窗修作业对于显示效果提出的高标准要求。并且该屏幕可借助 UART 接口与 STM32 控制器进行通信，实现无缝兼容。

(4) 电源管理模块：该模块采用的是 2000mAh 锂聚合物电池来供电，同时搭配了 5V/2A 的快充芯片，其可支持 4 小时快速补电，续航时间达到了 ≥ 10 小时，可有效覆盖全天天窗修作业所需。

1.2 工作原理

装置工作时，无线电接收模块通过增益天线持续监测空间电磁信号。当检测到预设频率的匹配信号时，模块输出端产生 3.3V 高电平脉冲。STM32 单片机通过外部中断实时捕获该脉冲信号，并执行以下控制逻辑：

- (1) 若信号持续时间 $\geq 200\text{ms}$ ，判定为有效通信，立即通过 UART 接口发送复位指令，重置倒计时器；
- (2) 若倒计时归零时仍未检测到有效信号，则触发报警流程：启动蜂鸣器（鸣响频率 2Hz）并点亮 LED 报警指示灯。

当无线电信号中断时长超过设定阈值时，装置将在信号丢失 800 毫秒内触发声光报警，从而有效应对突发情况，符合“关键节点时间误差 ≤ 5 秒”的强制性规定^[10]。

1.3 主要技术指标

装置的主要性能指标如下：

- (1) 无线电性能：
 - (a) 接收频段：400–480MHz（支持 7 个预设信道）
 - (b) 接收灵敏度： $\leq -118\text{dBm}$
 - (c) 有效通信距离： $\geq 3\text{km}$
- (2) 计时性能：
 - (a) 计时范围：0–999 秒可设

- (b) 计时误差： $\leq \pm 50\text{ms}$
- (c) 报警响应时间： $\leq 800\text{ms}$
- (3) 电源性能：
 - (a) 电池容量：2000mAh 锂聚合物电池
 - (b) 充电时间： ≤ 4 小时 (0–100%)
 - (c) 续航时间： ≥ 10 小时

2 系统详细设计与实现

2.1 装置电控设计

本装置的电控设计以基础计时单元和电源管理模块搭建起核心框架，还配备了完善的功能扩展接口，时钟晶振电路作为核心计时单元，借助匹配低误差率的晶振元件来生成精准的脉冲信号，其频率参数经优化配置后能保证时间计量的一致性，防止因累积偏差对装置整体运行效果产生影响。基于此，电源模块采用多级稳压设计：主电路借助电池供电与 Type-C 快充双模架构来实现能源供给，其中 PD3.0 协议快充芯片支持 20W 功率输出，协同 AD 分压采集电路实时监测蓄电池及其他模拟信号状态，经由分压电阻与 ADC 模块把模拟信号转换为数字信号供 STM32 单片机处理，另外针对 3.3V 供电需求，增设 AMS1117-3.3 线性稳压器构建 5V-3.3V 转换通道，保证单片机及外围元器件稳定运行。在信号完整性保障方面，电源与核心信号通道设置了多频段滤波电容电路，根据电路特性选取的电容参数组合形成梯度过滤机制，有效消除供电波动与高频杂波干扰。

2.2 装置机械设计

装置结构组成建模由上盖板、下壳体、串口屏、天线、复位按钮、电源按钮、屏幕开关、电路板、蓄电池、绝缘板等部件组成，设计充分考虑了实用性、耐用性和易加工性，能够为内部蓄电池和电路板提供稳固的支撑和有效的保护。

2.3 装置软件设计

2.3.1 UI 界面设计

该装置选用迪文 2.8 寸触控串口屏并开发了模块化交互界面，其整体布局运用模块化信息架构来达成高效的人机交互，界面主体可划分成状态显示、频道管理以及报警控制这三大功能区。此界面支持触屏操作以及静默阈值自定义设置 (0–999 秒)，可实时显示倒计时与频段参数，简化操作流程。当报警触发的时候，会同步启动声光提示（蜂鸣器报警+指示灯闪烁），以此保证在嘈杂环境里依然可对驻站防护人员进行有效警示。

2.3.2 关键算法

该装置借助高灵敏度无线电接收模块实时捕捉目标频段信号，将自适应滤波以及动态阈值调整算法相结

合，精准识别通信静默状态，运用时域分析技术，在复杂电磁环境里滤除铁路多径干扰，达成远距离信号稳定接收，保障通信链路的完整性与可靠性。系统集成自适应跳频算法，支持CTCSS/DCS亚音编码匹配，兼容作业现场所有标准通信频段，实现多信道一键切换，提高作业灵活性。

3 应用与效益分析

3.1 装置现场应用

该装置项目已通过上海动车段杭州动车运用所现场验证，适用于上道作业，应用以来天窗修作业安全执标率提升至100%，强化运用所上道作业安全防护联控，消除安全风险隐患，其理念可广泛应用于地铁等轨交行业，具有较强的推广性。

3.2 经济效益分析

相较传统计时方式引发的联络不及时造成作业秩序紊乱问题，该装置可有效缩短天窗修作业时间约15%-20%，从而减少减少线路封锁时长。以每次天窗修作业2小时核算，采用新装置后可节约24分钟/次。以24年天窗修作业数据统计，全年需要完成天窗修作业累计240次，累计节约5760分钟，即96小时。根据工时节约效益公式：节约价值=(原定额工时-改进后定额工时)×前一年平均工时费用×新工艺实际产量-工艺改革费用，按130元的时薪来算，一年可节约1.248万元。该数据仅为一个车间数据，若统计全段乃至全局，其效益量将更高。

3.3 安全效益分析

装置通过高精度计时与智能报警机制，彻底解决了传统人工计时误差问题，确保驻站联络员与现场防护员严格按照联络标准执标。同时通过自动化计时复位报警、频段切换与状态反馈功能，将驻站联络员从高频次多任务操作中解放，降低因疲劳或分神导致的误判、漏联控等问题，从根本上消除了因通信延迟引发的安全漏洞。

4 结论

本研究成功设计并且实现了一款基于STM32的无线电静默计时报警装置，该装置借助嵌入式技术以及闭环控制架构，有效地解决了铁路天窗修作业过程中的安全联控难题。此装置有计时精准、响应速度快、操作便捷、抗干扰能力强、续航时间久等特性，通过时域分析技术滤除铁路多径干扰，解决人工计时偏差，实现天窗修作业时间卡控从“人工粗放”向“智能精准”的跨越。

未来的研究工作可朝着以下几个方向来推进：1)开展基于机器学习的环境自适应技术研究，以此来提高系统的鲁棒性；2)研发云端监控平台，达成多装置协同工作的目标；3)对电源管理系统进行优化，将续航时间延长到72小时以上，依靠这些改进措施，强化上道作业安全防护联控，消除安全风险隐患，其装置理念可广泛应用于地铁等轨交行业，具有较强的推广性。

参考文献

- [1]中国铁路上海局集团有限公司.《中国铁路上海局集团有限公司关于重新公布中国铁路上海局集团有限公司车辆轨旁设备施工、维修作业管理办法的通知》(上铁辆〔2021〕364号)[EB/OL].上海:中国铁路上海局集团有限公司,2021.
- [2]中国铁路上海局集团有限公司上海动车段.《中国铁路上海局集团有限公司上海动车段关于重新印发中国铁路上海局集团有限公司上海动车段车辆轨旁设备施工、维修作业管理实施细则的通知》(上动技〔2022〕19号)[EB/OL].上海:中国铁路上海局集团有限公司上海动车段,2022.
- [3]中国铁路上海局集团有限公司.《关于印发<中国铁路上海局集团有限公司上海动车段车辆轨旁设备施工、维修作业管理实施细则>的通知》(上动技〔2019〕286号)[EB/OL].上海:中国铁路上海局集团有限公司,2019.
- [4]钟盼.铁路通信技术对铁路运输安全的影响与探索[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(6):0169-0172.
- [5]李雷,杨志斌,贾贺芝.铁路GSM-R无线网络质量状态预警监测装置研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(3):72-78.
- [6]谷洪君.5G技术在铁路通信中的应用[J].集成电路应用,2025,42(02):82-83.
- [7]顾亮.嵌入式在铁路接触网参数语音装置的实现与应用[J].甘肃科技,2017,33(7):10-13.
- [8]SA868Datasheet.SA868 2WEMBEDDEDWALKIETALKIE module[Z].2020.
- [9]STMicroelectronics. STM32F051C8T6Datasheet [Z].2012.
- [10]中华人民共和国上海铁路局.《铁路行车组织规则》(上铁运函〔2007〕183号)[EB/OL].上海:中华人民共和国上海铁路局,2007.