

煤矿井下风门电磁闭锁装置的研发与应用

时东文, 张英超, 吕庆山

兖矿能源集团南屯煤矿通防部, 山东 邹城

收稿日期: 2025年6月4日; 录用日期: 2025年8月11日; 发布日期: 2025年9月30日

摘要

本文针对传统机械闭锁装置在煤矿井下风门控制中的安全隐患与运维难题, 提出并研发了一种基于电磁锁和LoRa无线通信的智能化风门电磁闭锁系统。该系统集成了电磁防爆磁力锁、干簧管磁性接近开关、声光报警器、STC12微控制器、PLC逻辑单元及LoRa无线模块, 具备状态实时监测、自动闭锁、互锁联动和异常报警等功能。系统采用模块化设计, 结合本安电源与防爆结构, 实现高可靠性与易维护性。在南屯煤矿的实际应用表明, 该装置显著减少风门双开事件, 实现报警清零、维护成本降低、系统响应灵敏, 具备良好的安全性、稳定性与推广前景。

关键词

风门控制, 电磁闭锁, PLC

Research and Application of Electromagnetic Interlocking Device for Air Doors in Underground Coal Mines

Dongwen Shi, Yingchao Zhang, Qingshan Lyu

Ventilation and Flood Control Department, Nantun Coal Mine, Yankuang Energy Group, Zoucheng Shandong

Received: Jun. 4th, 2025; accepted: Aug. 11th, 2025; published: Sep. 30th, 2025

Abstract

This paper aims at the safety hazards and operation and maintenance difficulties of traditional mechanical interlocking devices in the control of air doors in underground coal mines, and proposes and develops an intelligent electromagnetic interlocking system for air doors based on electromagnetic locks and LoRa wireless communication. This system integrates electromagnetic explosion-proof magnetic locks, reed switch magnetic proximity switches, sound and light alarms, STC12 microcontrollers,

PLC logic units and LoRa wireless modules, and is equipped with functions such as real-time status monitoring, automatic locking, interlock linkage and abnormal alarm. The system adopts a modular design, combining intrinsically safe power supply and explosion-proof structure to achieve high reliability and easy maintenance. The practical application in Nantun Coal Mine shows that this device significantly reduces the event of double opening of air doors, achieves alarm zeroing, reduces maintenance costs, and has a sensitive system response. It has good safety, stability and promotion prospects.

Keywords

Damper Control, Electromagnetic Interlock, PLC

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤矿井下通风系统是保障安全生产的基础性环节，而风门作为调控风流分布的重要设施，其闭锁可靠性的低直接关系到矿井通风系统的稳定性与安全性。当前普遍使用的传统机械式闭锁装置如钢丝绳软闭锁等存在诸多不足，严重制约了通风系统的运行效率与安全水平。

首先，传统机械闭锁设计存在结构性缺陷，其允许两道风门在特定角度(约 45°)范围内同时开启，容易引发风流短路，从而导致局部通风量不足、瓦斯积聚，进而增加爆炸风险。其次，该类闭锁装置报警频发，增加了运行管理负担。以南屯煤矿为例，现有风门 172 组，单周内报警次数高达 176 次。尽管采取了人工巡检与现场看护等措施，但由于交接班期间人员流动频繁，仍难以彻底规避风门双开问题。此外，机械闭锁装置运行可靠性较低，易出现磨损，导致维护频率高、故障排查难度大，从而显著提升了矿井运营成本。

上述问题在深井开采或通风阻力较大的矿井中表现尤为突出。因此，研发一种具备高可靠性、智能化水平的风门闭锁装置，已成为提升矿井通风系统安全性与智能化管理能力的迫切需求。

2. 风门控制系统研究现状

近年来，随着煤矿智能化建设的不断推进，风门作为井下通风系统与辅助运输系统的重要设施，其智能化监控技术也得到了广泛关注。国外煤炭工业起步较早，井下监测技术和风门控制系统相对成熟，已形成完善的监控理论与技术体系。然而，由于我国煤矿井下环境复杂、开采条件特殊，国外技术难以直接适配，我国风门监控系统主要是在引进与吸收的基础上进行本土化改进与再创新[1]。

国内风门监控系统的研究起步相对较晚，但发展迅速。目前，各类研究主要围绕系统的自动控制、远程监控、信息融合及安全响应等方向展开。以中国矿业大学为代表的苗双涛[2]研究团队提出基于 PLC 的风门自动控制系统，能够实现灾害自动监测与远程控制，显著提升了风门的智能响应能力与煤矿的自动化水平。相关研究还探索了风门的远程遥控和可视化监控手段，使管理人员能够实时掌握风门状态，提高通风系统的稳定性[3][4]。

此外，为解决多模块功能间相互独立、系统集成度不高等问题，部分研究[5]采用了以太网和 OPC 协议，实现了不同系统之间的高效通信，推动监控系统朝向信息融合、协同联动方向发展。也有学者[6]在智能化风门系统的基础上，将音频控制与环境控制融合，实现了对矿井灾害事故的监测与控制，有效的

预防了灾害的发生。

尽管当前风门监控系统研究取得了积极进展，但在实际应用中仍暴露出诸多问题。为此，本文提出采用电磁闭锁装置替代传统机械闭锁结构，以提升风门控制系统的智能化与可靠性。电磁闭锁方式通过电信号精确控制闭锁状态，能够快速响应上位机指令，实现对风门启闭过程的实时监控与智能决策。表 1 为目前智能风门监控系统及相关特点。

Table 1. Comparative analysis of various types of damper control systems

表 1. 各类风门控制系统对比分析

对比项目	基于 PLC 的本地控制系统	以太网 + OPC 协议系统	电磁闭锁 + LoRa 系统
通信方式	有线连接，抗干扰性强，但布线复杂	有线以太网通信，需依赖网络交换系统	LoRa 无线通信，传输距离远，部署灵活
系统结构	控制器 + 继电器 + 有线传感器	PLC + 服务器 + OPC 平台，结构复杂	STC12 单片机 + PLC + 无线模块，模块化设计
互锁逻辑	基于继电器或 PLC 逻辑实现，灵活性一般	基于网络逻辑配置，适应性需定制	单片机 + PLC 协同判断，联锁更可靠
部署难度	初期布线复杂，安装周期长	对施工要求高，实施成本大	无需布线，即插即用，施工周期短
运维成本	接线老化或磨损导致维护频繁	系统调试复杂，需专业维护人员	热插拔维护，模块替换简单，人工成本低
适应性	适用于环境相对整洁、有固定结构的场所	适用于现代化高集成矿井	适用于高湿、高粉尘、布置多变等井下环境
安全性能	有接触点，可靠性受磨损影响	逻辑联控强，但物理闭锁方式依赖定制组件	电磁吸附闭锁 + 互锁判断，双重保障
典型应用场景	中浅部煤矿、人工检修方便区域	高度自动化示范矿井	中小型煤矿、通风复杂区域、改造项目优选

3. 风门电磁闭锁装置系统组成

系统分为四个子单元模块，硬件功能单元模块；中央控制单元模块；无线收发传输系统模块；工作电源与外壳。该风门电磁闭锁装置的整体系统架构图如图 1 所示。

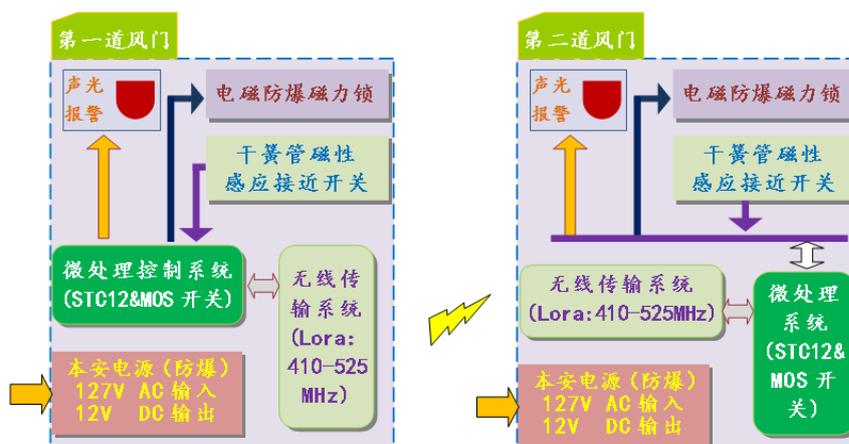


Figure 1. Overall system architecture diagram of the electromagnetic interlock device
图 1. 电磁闭锁装置整体系统架构图

3.1. 硬件功能单元模块

硬件功能单元模块由电磁防爆磁力锁、干簧管磁性接近开关和声光报警器组成，是系统执行闭锁与状态反馈的核心部件。电磁防爆磁力锁采用 DC 12 V 供电，吸合力达 800 N，防护等级为 IP67，通过磁吸力实现风门硬性闭锁，确保门体在井下负压环境下稳定闭合；干簧管磁性接近开关通过非接触式磁感应原理检测风门状态，门体闭合时输出高电平信号，开启时输出低电平信号，具有无机械触点、抗粉尘腐蚀、寿命长等优势；声光报警器集成高亮 LED 与 100 dB 蜂鸣器，在风门异常时通过 2 Hz 红光闪烁与高分贝警报提示人员，其供电与电磁锁共享 DC 12 V 电源。三者协同工作：风门闭合时，干簧管触发锁闭并关闭报警；双门异常开启时，控制单元切断电磁锁供电并激活声光报警，形成闭环控制。硬件功能单元模块如图 2 所示。



Figure 2. The display diagram of the hardware function module
图 2. 硬件功能模块展示图

3.2. 中央控制单元模块

中央控制单元模块以 STC12 微处理器为核心，辅以 PLC 逻辑控制板，承担信号处理与指令执行功能。STC12 微处理器主频 11.0592 MHz，配备 8 路数字输入接口(接收干簧管信号)和 4 路 MOSFET 输出接口(驱动电磁锁)，通过 UART 与无线模块通信，实时解析风门状态并执行闭锁逻辑；PLC 逻辑控制板作为冗余单元，与 STC12 协同实现复杂判决，其编程逻辑包含条件判断，若双门同时开启则强制闭锁并触发报警。信号处理流程涵盖信号采集(经光耦隔离)、消抖滤波(20 ms 时间窗口)、逻辑判决(比对双门状态)及指令输出(控制电磁锁通断)，确保响应速度 ≤ 50 ms，误判率 $< 0.1\%$ 。图 3 为 STC12 单片微处理系统以及单片晶体管输入输出控制板部分原理图以及 PCB 图。

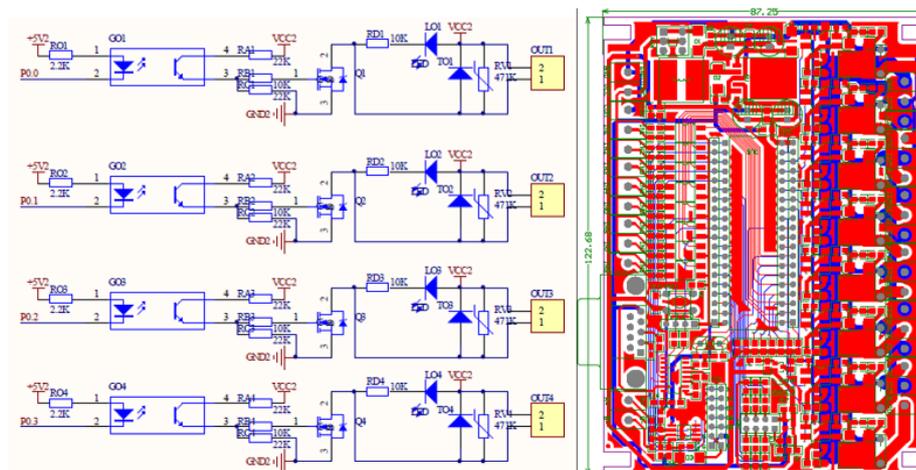


Figure 3. The schematic diagram and PCB diagram of the control board part
图 3. 控制板部分原理图及 PCB 图

3.3. 无线收发传输系统模块

无线收发传输系统模块基于 LoRa 技术构建，采用 410~525 MHz 频段与扩频调制(SF = 10, BW = 125 kHz)，支持 2 km 直线传输与中继扩展，具备 CRC 校验和前向纠错功能，误码率 < 10⁻⁵。系统采用主从架构：主节点部署于调度室，接收各风门状态并下发指令；从节点集成于风门端，定时上传状态数据并支持紧急事件实时上报。数据帧格式包含帧头、设备 ID、状态码及校验位，确保通信可靠性。部署时，天线外置于防爆箱顶部以减少屏蔽效应，并采用动态信道切换算法规避同频干扰，功耗优化至休眠模式 < 1 mA，适应矿井长时运行需求。图 4 为 Lora 无线传输模块的收发频率、发射功率等参数的配置图。



Figure 4. Configuration diagram of LoRa wireless transmission module
图 4. LoRa 无线传输模块配置图

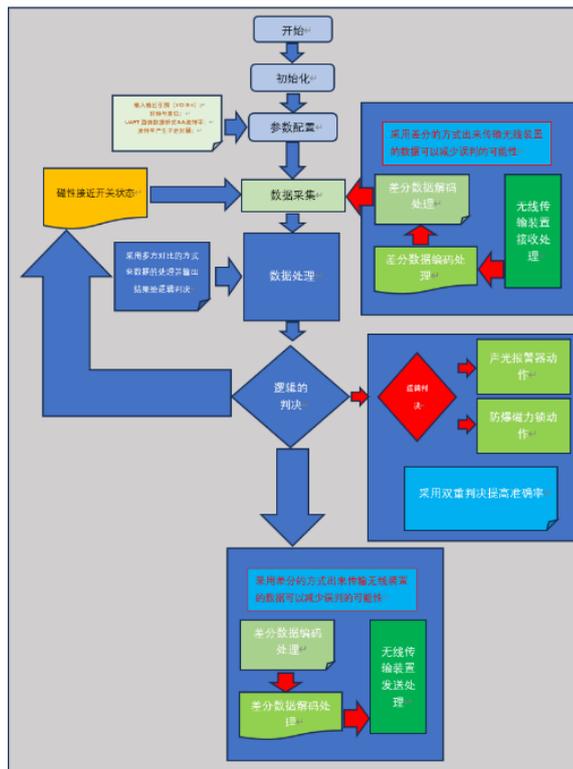


Figure 5. Flowchart of program design
图 5. 程序设计流程图

本软件系统基于 Keil 开发环境进行开发，程序采用 C 语言编写。系统的整体运行流程如下：

(1) 在系统上电后进行初始化操作；随后进入传感器数据采集阶段。系统需连接与风门状态相关的多个传感器，并实时采集其数据，这些数据将作为后续分析与控制逻辑的输入。

(2) 进入数据处理与分析模块。系统对采集到的原始传感器数据进行预处理与特征提取，包括消抖处理、信号滤波等算法操作，以提升数据的准确性与稳定性，并据此判断风门的当前状态。

(3) 根据分析结果进行逻辑决策，即驱动控制模块。该模块依据处理后的传感器信息作出风门控制的逻辑判定，并控制相关驱动器执行相应的操作指令，从而实现对风门的智能管理。

(4) 程序通过串口通信方式进行固化下载，使用 CH340 驱动将编译生成的可执行程序写入控制器芯片中，完成系统部署。

程序的整体设计流程如图 5 所示。

3.4. 工作电源与外壳模块

工作电源与外壳模块为系统提供安全供电与物理防护。防爆电源箱输入 AC 127 V，输出 DC 12 V/5 A 本安电源，转换效率 > 85%，配备 6A 自恢复保险丝防止过载；电源分配方案中，电磁锁占用 12 V/3 A(峰值)，微处理器与无线模块分别通过 LDO 降压至 5 V 和 3.3 V。外壳采用厚度 2 mm 的 304 不锈钢材质，尺寸 35 cm × 45 cm × 19 cm，防爆等级 Ex d IIB T4，密封设计包含硅胶垫圈与 IP68 防爆螺纹接口。散热通过内置防尘网的自然对流孔与温度监控实现，同时模块间通过 16 AWG 电源线、屏蔽双绞信号线及快插端子连接，支持热插拔维护，并通过 LED 指示灯区分电源、通信及传感器故障，满足井下高可靠性与易维护性需求。图 6 为工作电源与外壳模块展示图。

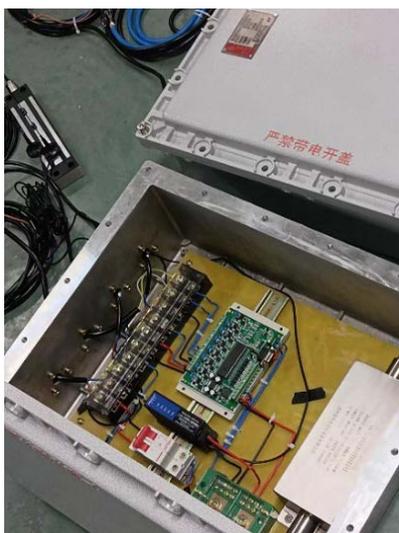


Figure 6. Display of working power supply and shell module

图 6. 工作电源与外壳模块展示图

4. 风门电磁闭锁装置工作原理

煤矿风门电磁闭锁装置通过多模块协同工作，实现风门的智能化控制与硬性闭锁，其核心原理如下：

(1) 状态检测：风门关闭时，干簧管磁性开关感应门体磁铁，输出高电平至中央控制单元(STC12)，表明风门关闭；若风门开启，磁场消失，输出低电平。

(2) 闭锁执行：控制单元接收到关闭信号后，立即给电磁锁通电，在 12 V 直流电下产生大于 800

N吸力，紧密吸附门体与门框，形成物理闭锁。

(3) 互锁逻辑：系统通过 LoRa 模块实时监测相邻风门状态，当一道风门被合法开启，另一道将被强制闭锁，实现“一开一闭”互锁机制，防止双开。

(4) 异常处理：如检测到两道风门同时尝试开启，系统自动断电解锁，并触发 100 dB 蜂鸣器与红色 LED 报警，同时通过无线模块发送紧急信号至调度室。

(5) 电源与通信保障：防爆电源箱将 AC 127 V 转为 DC 12 V 本安电源，LoRa 模块基于 410~525 MHz 频段，支持 2 km 内状态回传，保障远程监控与控制。

5. 井下应用情况分析

该电磁闭锁装置在南屯煤矿井下实际应用中表现出显著效果，有效解决了传统机械闭锁的痛点。具体应用成效如下：

(1) 报警次数清零：装置投用后，原单周 176 次的双风门报警彻底消除，实现“零报警”目标，避免了因风流短路导致的局部微风或无风问题。

(2) 互锁可靠性提升：通过 LoRa 410~525 MHz 频段无线通信与电磁硬性闭锁协同，确保相邻风门无法同时开启，彻底杜绝人为误操作或设备失效引发的双开风险。

(3) 维护成本降低：电磁锁无机械磨损，干簧管传感器寿命达 107 次以上，较传统钢丝绳闭锁维护频率减少 80%，年运维成本下降约 35%。

(4) 适应性验证：在井下高湿、高粉尘环境中，装置连续运行 6 个月无故障，IP68 防爆电源箱与 304 不锈钢外壳有效抵御腐蚀与冲击。

(5) 操作便捷性提高：模块化设计支持热插拔更换，故障平均修复时间缩短至 15 分钟，井下人员经 1 天培训即可熟练操作。

参考文献

- [1] 许欢. 矿井辅助运输系统中风门监控系统设计及相关技术研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- [2] 苗双涛, 蒋曙光, 邵昊. 基于 PLC 的煤矿救灾自动风门监控系统设计[J]. 煤矿安全, 2011, 42(5): 80-82.
- [3] 马兆渊, 高锰, 刘宝勇. 基于 PLC 的煤矿救灾自动风门监控系统设计[J]. 机电信息, 2011(21): 177+183.
- [4] 段志勇. 煤矿井下风门智能闭锁控制系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2023(3): 207-208+211.
- [5] 林梦华. 基于 PLC 和工业以太网通讯的分布式监控系统的信息融合技术实验研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [6] 司海波. 智能采煤工作面自动风门系统的设计[J]. 机械管理开发, 2021, 36(11): 246-247+254.