

基于软件仿真的甲烷风电闭锁功能测试方法

何青松^{1,2}

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039; 2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037)

摘要:为高效测试煤矿安全监控系统配套分站设备的甲烷风电闭锁功能,提出了一种基于计算机软件仿真的自动化测试系统。该系统通过上位机软件配置分站的端口信息及闭锁控制逻辑,借助多串口 RS232/RS485 转换器与分站数据采集端口进行通信,实时模拟各类传感器的数据与状态。测试过程中,通过动态调整传感器模拟数据,触发不同控制逻辑,并同步采集分站的实际输出控制信号,将其与预期控制状态进行实时比对,从而判定控制逻辑执行的正确性;同时,系统自动记录从状态触发至控制响应的的时间差,实现对控制响应时间的客观评估。实验结果表明,该系统可在约 5 min 内完成甲烷风电闭锁功能的完整测试,显著减少了传统人工调节与检测所需时间,能够准确验证控制逻辑的正确性与响应时效,有效提升了测试效率与可靠性。

关键词:安全监控系统;分站;传感器;甲烷风电闭锁;测试

中图分类号:TD76

文章编号:1000-0682(2026)04-0080-04

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.013

Methane wind power interlock testing method based on software simulation

HE Qingsong^{1,2}

(1. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China)

Abstract:To achieve rapid testing of the methane-airflow interlocking function in substations supporting the supervision system of coal mine safety, this paper proposes an automated test system based on computer software simulation. The method uses host computer software to configure port parameters and interlocking logic for the substation, while multiple serial ports with RS232/RS485 converters communicate with the data acquisition ports of the substation. The system simulates real-time data and statuses of various transducers connected to the corresponding ports. By dynamically adjusting simulated transducer data according to different control logics, the actual output control states of the substation are compared with the expected states to verify the correctness of control execution. Simultaneously, the control response time is recorded and evaluated. Experimental results show that the system completes the automatic test in about 5 minutes, significantly reducing manual effort, accurately validating control logic correctness and response time, and improving testing efficiency.

Keywords:supervision system of coal mine safety;substation;transducer;methane wind power lock-out; testing

0 引言

煤矿井下环境复杂,瓦斯积聚、火灾以及通风失效等风险时刻威胁着煤矿的安全生产。煤矿安全监控系统能够在线监测采掘工作面甲烷及一氧化碳等环境气体参数的实时变化,及时准确地发出报警信息,以便快速灵敏的实施断电控制。系统中甲烷风电闭锁功能的可靠性与稳定性直接关系井下人员生命安全与生产安全^[1-2],该功能在生产测试及出厂

收稿日期:2026-02-04

基金项目:中煤科工集团重庆研究院有限公司自立重点资助项目(2023ZDYF05);中煤科工集团重庆研究院有限公司创新引导项目(2025YBXM05)

第一作者:何青松(1982—),男,重庆人,本科,高级工程师,主要从事煤矿安全监控系统相关产品的测试等工作。

E-mail:80650911@qq.com

检验中的表现,直接影响设备的合格判定。系统数字化升级前的功能测试多依赖真实传感器、模拟装置、信号发生器和秒表等设备进行人工检测^[3-5];随着《煤矿安全监控系统升级改造技术方案》的实施,分站与传感器、控制器间均普遍采用 RS485 总线通信^[6-8],系统可靠性和可维护性得到提升,同时也为数字化测试提供了条件。该文提出一种基于计算机软件仿真的甲烷风电闭锁功能自动测试方法,可仿真各类传感器信号,采集分站输出信息,并自动判断功能执行正确性与响应时间合规性,以满足高效、准确的生产调试与出厂检验需求。

1 规程及行业标准要求

(1)《煤矿安全规程》(2025 版)第五百二十八条规定,安全监控系统必须具备甲烷电闭锁和风电闭锁功能^[9-10],体现了该功能在安全监控系统中的重要性。

(2)《煤矿安全监控系统通用技术要求》(AQ6201—2019)第 5.5.2.2 条规定,系统就由现场设备完成甲烷风电闭锁功能,并对具体的功能进行了明确的规定,《煤矿安全规程执行说明》(2025 版)中对现场设备进行了详细的说明,现场设备是指设备在煤矿井下的甲烷、风筒、分站、断电控制器等设备。第 5.7.5 条中对控制执行时间进行了规定,就地控制执行时间不大于 2 s^[11-12]。

(3)《煤矿安全监控系统及检测仪器使用管理规范》(AQ1029—2019)第 6.3.1、第 8.3.6 和第 10.2.1 条分别对掘进工作面甲烷风电闭锁的实现、测试和记录进行了规定,明确了掘进工作面甲烷传感器的设置及调校周期等^[13]。

2 甲烷风电闭锁具体功能

AQ 6201—2019 第 5.5.2.2 条共有 6 条,其中 a)~d)条款分别对掘进工作面甲烷(T_1)、掘进工作面回风流甲烷(T_2)、被串掘进工作面入风流甲烷(T_3)以及局部通风机开停和风筒状态等传感器的报警值、断电值、恢复值、断电状态和断电范围进行了明确规定,共涉及各类传感器及断电控制器等 10 余个,现场实际使用时还涉及馈电状态传感器等,文中未列出,具体控制逻辑定义见表 1~表 3,断电范围见表 4 所示。e)条款主要是为了防止局部通风机停止运行,掘进巷道内瓦斯浓度大于 3.0%时,有人擅自启动局部通风机“一风吹”而设置的条款^[14-16],与《煤矿安全规程》(2025)第一百九十七

条中的规定相呼应,此条需要对多个传感器的数据及状态进行综合判断。f)条款主要对与闭锁控制相关的设备在故障、断电、通电 1 min 内的报警、断电情况进行了规定。

表 1 模拟量传感器控制关系定义表

通道	报警值及控制口	断电值及控制口	恢复值	故障控制口	对应条款
A1	$\geq 1.0\%$, C5	$\geq 1.5\%$, C2	$< 1.0\%$	C2、C5	a
A2	$\geq 1.0\%$, C5	$\geq 1.0\%$, C2	$< 1.0\%$	C2、C5	b
A3	$\geq 0.5\%$, C5	$\geq 0.5\%$, C3	$< 0.5\%$	C3、C5	c

注:模拟量传感器设置地点为:A1 掘进工作面甲烷传感器、A2 掘进工作面回风流中的甲烷传感器、A3 被串掘进工作面入风流中的甲烷传感器。

表 2 开关量传感器控制关系定义表

通道	报警状态及控制口	故障控制口	对应条款
D4	无风, C4、C5	C4、C5	d
D5	停, C4、C5	C4、C5	
D6		C5	

注:开关量传感器设置地点为:D4 风筒风量开关传感器、D5 局部通风机设备开停传感器(主)、D6 局部通风机设备开停传感器(备)。

表 3 组合控制逻辑关系定义表

控制逻辑	恢复逻辑	控制口	对应条款
D5 和 D6 停止运行, 且 $A1 > 3.0\%$ 或 $A2 > 3.0\%$	$A1 < 1.5\%$ 、 $A2 < 1.5\%$	C7、C8	e

表 4 控制量断电范围表

通道	断电器断电范围	故障闭锁
C2	控制掘进巷道内的全部非本质安全型动力电源	开启
C3	控制被串掘进巷道内的全部非本质安全型动力电源	
C4	控制供风区域内的全部非本质安全型动力电源	
C5	控制声光报警器	关闭
C7、C8	控制局部通风机的电源启动	

3 功能测试分析

针对表 1 所列模拟量控制逻辑的测试,在分站正常启动并完成初始化后,首先将所有传感器通道的模拟值设定至正常数值区间,以确认分站各控制输出处于预设的初始正常状态。随后,系统将依次对各通道的模拟量数值进行单独调节,分别模拟其

达到报警阈值、触发断电条件、恢复至正常范围及进入故障状态等多种工况,并同步监测分站相应控制输出的实时变化。通过对比实际输出状态与预设控制逻辑,可验证系统在各类单一异常条件下的响应正确性;同时,测试系统会记录从状态变化到控制输出的时间差,从而完成对各场景下控制响应时间的精确测定。

表 2 所示开关量控制逻辑的测试方法与模拟量测试原理相似,但侧重开关信号的离散状态变化。测试时,通过依次模拟各开关量通道处于正常、触发及故障等不同状态,实时监测对应控制器的输出动作,判断其是否遵循预定的逻辑关系。该过程同样可记录并评估控制回路的响应时间,确保开关量控制系统在状态切换时满足实时性要求。

表 3 涉及的组合逻辑测试在复杂度上显著高于前述 2 类。与表 1、表 2 仅针对单一传感器通道的独立测试不同,组合逻辑测试需同步模拟多个传感器或开关量通道的复合工况,构造诸如多参数同时越限、顺序触发或交叉影响等典型场景,进而综合分析分站在复杂耦合条件下的控制输出是否符合系统预设的综合逻辑规则。该测试能够有效验证系统在真实井下多因素交织环境下的可靠性与协调控制能力。

4 硬件连接及仿真软件测试流程

测试系统硬件连接如图 1 所示,被测监控分站通过网线直接与计算机相连,用于仿真软件与分站间的主通讯,主要仿真对分站的参数及控制逻辑配置,手动控制等,另外监控分站采集传感器的端口(RS485-1~RS485-4)与 RS232/485 转换器相连,转换器通过一个 USB 转 4 端口 RS-232 串行适配器与计算机相连(如果计算机自带 RS232 串口足够多,也可以不使用 USB 转 RS232 转换器,直接与计算机 RS232 串口连接),由于监控分站一般可挂接传感器为 16 台或 32 台,该文以接 16 台传感器的监控分站为例,利用计算机多线程编程技术及多串口通讯技术等,实现 4 个计算机串口各负责 4 台传感器信号的仿真和数值模拟,并同时监测分站输出的控制状态信息。通过对监控分站输入模拟数据,并将输出控制状态与预设控制逻辑状态进行对比,分析其控制逻辑的正确性,并在此过程中对控制执行时间进行计算。针对表 1 和表 2 中的单一传感器控

制逻辑测试流程如图 2 所示,同步对控制响应时间进行测试,表 3 中的组合传感器控制逻辑流程如图 3 所示,同步对控制响应时间和软件人工解锁功能进行测试。

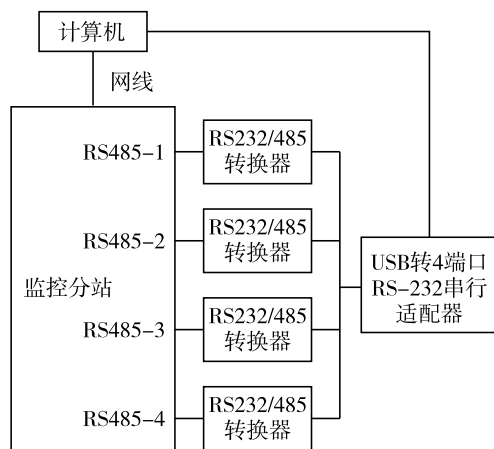


图 1 测试系统硬件连接图

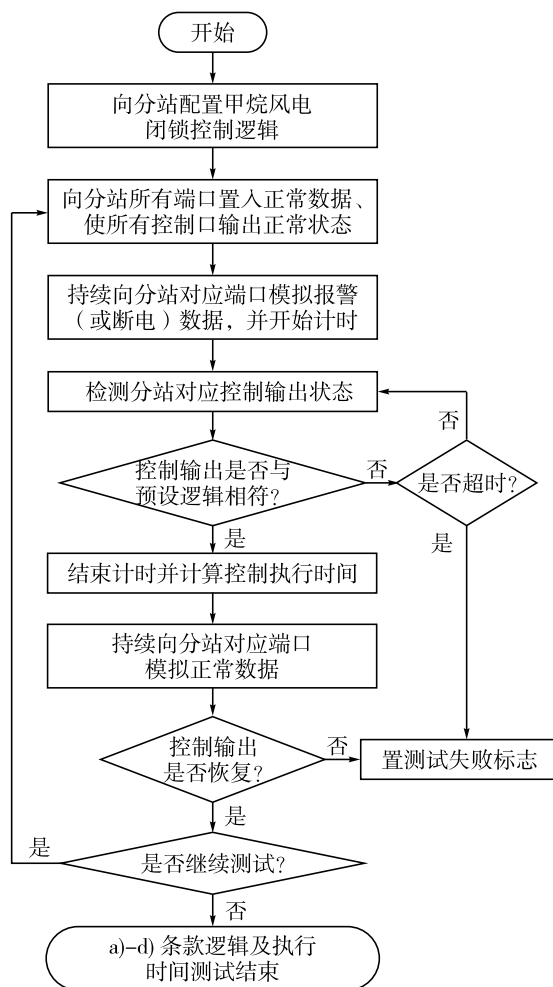


图 2 a)~d) 条款功能测试软件设计流程图

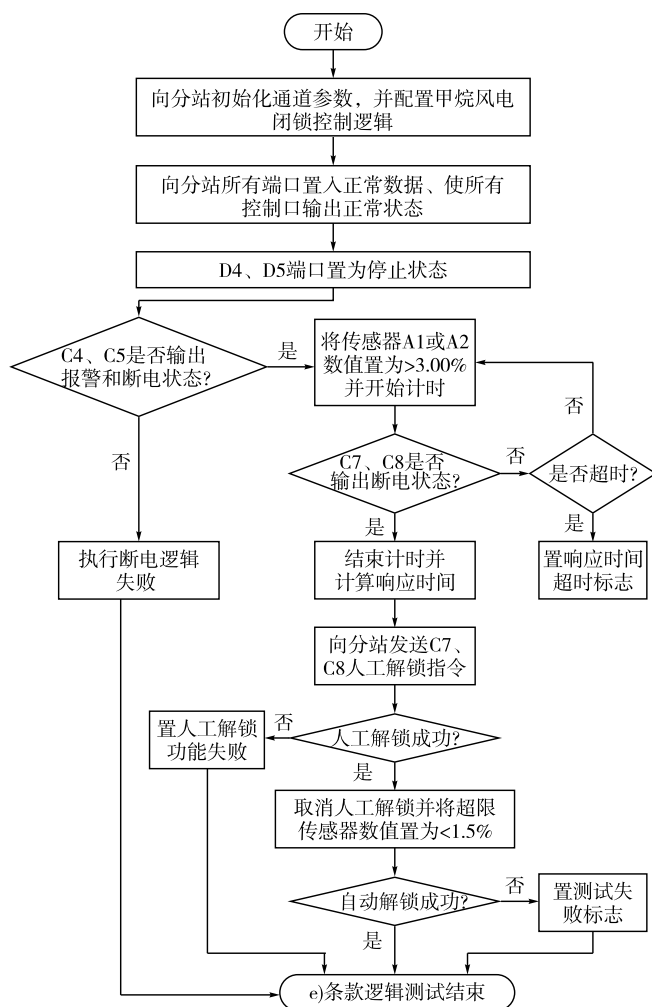


图3 e)条款功能测试软件设计流程图

5 实验验证

为了验证该文提出的测试系统的准确性,以中煤科工集团重庆研究有限公司研制生产的 KJ90 - F16(C) 矿用本安型分站为测试对象,端口定义及控制逻辑按表 1 ~ 表 4 进行定义,并按测试系统连接图进行连接,对各通道传感器的报警、断电控制、自动解锁和响应时长等功能进行了测试,测试结果记录表 5 和表 6。

表 5 单一传感器功能测试记录表

通道	控制功能是否正常	是否自动恢复	响应时长/ms
A1	正常	是	1213
A2	正常	是	685
A3	正常	是	863
D4	正常	是	939
D5	正常	是	1347
D6	正常	是	635

表 6 组合传感器功能测试记录表

参与通道	控制功能是否正常	是否自动恢复	软件能否解锁	响应时长/ms
A1、A2 D5、D6	正常	是	能	1227

从实验结果来看,所有传感器通道的控制功能均符合预设逻辑要求,能够准确执行预期控制动作。需特别说明的是,根据煤矿安全监控系统行业标准规定,就地控制执行时间应不超过 $2\text{ s}^{[11]}$,且矿用断电控制器从接收到控制信号至输出相应状态的时间须在 $0.5\text{ s}^{[17]}$ 。因此,分站设备自身的控制响应时间通常应控制在 1.5 s 以内,以确保系统整体执行时间满足标准要求;否则,在系统集成后可能引起控制延迟超限。值得注意的是,若实际使用的断电控制器响应时间小于 0.5 s ,分站响应时间的合格判定阈值可结合实际适当放宽。

在测试效率方面,系统完成单台分站全部控制功能的自动化测试总用时不超过 5 min ,且能够直接输出响应时间的精确测量结果。相比之下,传统人工测试方法需操作真实传感器并依赖秒表计时,通常耗时超过 10 min ,且人工计时易引入较大误差。该系统显著提升了测试工作效率,同时保证了响应时间数据的准确性与可靠性。

6 存在问题及注意

测试系统目前存在以下两方面的功能性局限:

第一,系统暂不支持对分站显示界面(包括液晶屏控制状态、指示灯等)的自动化验证,仍需人工介入进行视觉确认与评判;

第二,在分站发生故障、断电或重新上电的情况下,依据相关行业标准,须在 1 min 内闭锁监控区域内所有非本质安全型电气设备电源。由于此时系统无法实时获取分站的控制输出状态,相关闭锁功能的有效性需通过人工测试方式进行补充验证。

此外,在所有功能测试结束后,应当对分站执行恢复出厂设置操作,或清除其所有通道定义信息及控制逻辑配置,避免残留的定义信息在后续使用中引发非预期的误控制。

7 结语

甲烷风电闭锁功能是煤矿安全监控系统中的关键环节,其执行准确性与控制可靠性对保障井下安全具有至关重要的作用。该研究围绕该功能的自动

(下转第 109 页)

热电偶平均使用寿命仅4个月,年更换频次达3~4次。每次更换均需配合停炉降温,单次备件、人工及停炉减产损失合计超2万元,单套系统年运维成本超过6万元,单个炉子年运维成本预计50万元。

黑体测温系统为非接触式测量,传感器无高温损耗件,设计使用寿命 ≥ 5 年,日常运维仅需定期检查吹扫压缩空气的压力与洁净度,无备件更换需求,全生命周期成本远低于传统热电偶方案,经济效益显著。

4.6 安全性能对比

传统热电偶套管需深入炉体内部,在长期高温交变工况下,安装孔处的耐火材料易开裂、脱落,引发炉壳发红、高温气体泄漏等严重的安全隐患;同时套管断裂后的脱落部件会损伤炉内蓄热体与燃烧器,威胁设备安全运行。

黑体测温系统仅需开设小型光学观测孔,没有部件深入炉体内部,最大程度保障了炉体结构的完整性,从根本上消除了炉体泄漏、部件脱落的安全隐

患;同时传感器安装在炉体外部,日常巡检、维护无需接触高温区域,大幅降低了运维作业的安全风险。

5 结论与展望

5.1 结论

该文以江苏沙钢集团2#高炉热风炉为工程应用对象,开展黑体测温技术与传统热电偶测温技术的现场对比试验,得出以下结论:

(1)该文提出的仿热电偶安装形式+全密封结构黑体测温方案,外形、安装、接口与传统热电偶完全一致,可直接替换、免现场改造。

(2)系统采用超工况等级密封处理,气密与承压能力远高于热风炉正压运行要求,从根本上解决正压泄漏、密封失效等安全难题。

(3)正压工况实测:测量偏差 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,响应时间 $\leq 200\text{ ms}$,寿命 ≥ 5 年,整体性能显著优于传统热电偶,是正压气密热风炉理想的测温升级技术。

(下转第115页)

(上接第83页)

化测试方法展开,提出一种基于软件仿真的测试方案,能够自动完成监控分站相关功能参数的配置,并对其控制逻辑执行情况与响应时间进行系统化评估。该方法以较低成本显著提升了测试效率,尤其在出厂批量测试等场景下,工作效率提高1倍以上,且能够直接输出精确的控制响应时间数据。需要说明的是,当前系统在部分显示状态与特殊工况下的功能验证仍需人工辅助完成。未来工作中,将进一步优化测试逻辑与实施方案,推动测试流程的全自动化,减少人工干预,为煤矿安全监控设备的可靠运行提供更高效的技术支撑。

参考文献:

- [1] 邓飞. 煤矿安全监控系统研究现状与展望[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 14-19.
- [2] 孙东玲. 煤矿瓦斯灾害防治实用新技术及应用实例[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2020.
- [3] 陈向飞. 煤矿安全监控系统逻辑控制自动检测装置设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(06): 154-158.
- [4] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 煤矿监控系统主要性能测试方法: MT/T772—1998[S]. 北京: 国家煤炭工业局, 1999-04-01.
- [5] 煤炭行业煤矿专用设备标准化技术委员会. 矿用分站: MT/T 1005—2006[S]. 北京: 中国煤炭工业出版社, 2006-11-01.
- [6] 张雪梅, 梁光清. 基于抗干扰技术的催化式甲烷传感器

设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2024(04): 47-51.

- [7] 谭凯, 邵严. RS485 动态调控主动传输技术在安全监控系统的应用[J]. 煤矿机械, 2025, 46(8): 181-185.
- [8] 邵严. 不定期受控 RS485 总线通信方式在煤矿安全监控系统中的应用[J]. 煤矿安全, 2020, 51(7): 117-120.
- [9] 中华人民共和国应急管理部, 国家矿山安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 应急管理出版社, 2025.
- [10] 《修改条款专家解读》编写组. 煤矿安全规程解读[M]. 北京: 应急管理出版社, 2025.
- [11] 中华人民共和国应急管理部. 煤矿安全监控系统通用技术要求: AQ6201—2019[S]. 北京: 中华人民共和国应急管理部, 2020-02-01.
- [12] 国家矿山安全监察局. 煤矿安全规程执行说明[M]. 北京: 应急管理出版社, 2025.
- [13] 中华人民共和国应急管理部. 煤矿安全监控系统及检测仪器使用管理规范: AQ1029—2019[S]. 北京: 中华人民共和国应急管理部, 2020-02-01.
- [14] 何青松. 高瓦斯煤矿双巷掘进工作面甲烷风电闭锁分析[J]. 煤矿安全, 2015, 46(01): 71-72+75.
- [15] 郝宏伟. 煤矿双巷掘进甲烷风电闭锁本地断电方案设计[J]. 煤矿现代化, 2020(01): 85-86+90.
- [16] 黄伟. 煤矿安全监控实用技术[M]. 北京: 应急管理出版社, 2021.
- [17] 国家安全生产监督管理总局. 矿用断电控制器: MT/T 1079—2008[S]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2009-01-01.