

降低地铁列车火灾报警系统误报率策略研究

张 潜 徐少红 薛宏全

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘 要 [目的] 地铁列车火灾报警误报率高, 为了减少因误报导致的运营干扰和资源浪费, 提升地铁运营的安全性和乘客的出行体验, 有必要研究有效降低地铁列车火灾报警系统误报率的策略。[方法] 介绍了火灾报警系统; 调研地铁列车火灾报警系统历史数据, 分析火灾误报警主要类型及潜在原因。[结果及结论] 环境因素影响、探测器选型、探测器检测原理、软件算法是导致误报警的主要原因。通过增加防尘过滤装置、采用双光源探测器、多参量气体探测器、热解粒子式探测器等硬件优化方式可以降低误报率; 通过优化软件算法(优化建模法、报警阈值自动调整法、机器自学习算法等)可以降低误报率。结合多参量采集单元探测与智能分析算法, 区分灰尘、水汽、烟雾粒子等干扰因素也可以降低误报率, 提高火灾探测系统的抗干扰能力与可靠性。

关键词 地铁; 列车; 火灾报警系统; 误报率

中图分类号 U231.96

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.047

Research on False Alarm Rate Reducing Strategies for Subway Train Fire Alarm System

ZHANG Qian, XU Shaohong, XUE Hongquan

(CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Given the high false alarm rate in subway train fire alarm systems, it is necessary to study strategies of effectively reducing the false alarm rate, so as to minimize operational disruptions and resource waste caused by false alarms, enhancing subway operation safety and passengers' travel experience. [Method] Through the introduction of fire alarm system and the investigation of subway train fire alarm system historical data, main types and potential causes of false fire alarms are analyzed. [Result & Conclusion] Environmental factors, detector type selection, detector detection principle, and software algorithm are identified as main causes for false fire alarms. The false alarm rate can be reduced by hardware optimization methods such as adding dust filter devices, adopting dual light source detectors, multi-parameter gas detectors and pyrolysis particle detectors; the rate can also be reduced by optimizing software algorithms (optimization model-

ing method, automatic adjustment of alarm thresholds, machine self-learning algorithm, etc.). Combining multi-parameters acquisition unit detection with intelligent analysis algorithms, distinguishing interference factors such as dust, water vapor, and smoke particles can also reduce the false alarm rate and improve the anti-interference ability and reliability of the fire detection system.

Key words subway; train; fire alarm system; false alarm rate

地铁列车空间相对封闭, 且人流量密集, 若地铁列车车厢中发生火灾, 与地面火灾相比, 其更具有危险性和复杂性, 因此大部分地铁列车设置有火灾报警系统。当列车车厢内发生火灾时, 火灾报警系统会及时发出报警信号给司乘人员或运营控制中心人员, 以减少人员伤亡和财产损失。但在实际应用中, 火灾报警系统误报警的情况时有发生, 频繁发生误报警会影响列车正常运营, 造成乘客恐慌, 给地铁运营带来不良影响。针对火灾误报问题, 本文通过调研现状问题及原因分析, 研究降低火灾误报率的对策方法。本文研究可为列车火灾报警系统降低误报率提供理论基础。

1 火灾报警系统

地铁列车的火灾报警系统主要由火灾报警控制器、火灾探测器通过总线连接成一个完整的系统。其中, 火灾报警控制器安装在电气柜内, 火灾探测器安装在电气柜内和客室的侧顶板内。一列地铁列车配置两台火灾报警控制器, 互为冗余。每个客室中配置数量不等的火灾探测器, 通过烟雾传感器及温度传感器采集周围环境烟雾浓度及温度变化情况, 火灾探测器将感烟或感温报警信号发送至火灾报警控制器, 由火灾报警控制器输出报警信号。

2 火灾误报警情况调研

统计调研某地铁项目列车火灾报警系统的误

报次数,并拆解误报警火灾探测器,初步分析误报警原因。2020年1月、2月、3月是冬季,灰尘聚集是误报警的主要诱因。2020年6月和8月,该地铁项目列车火灾报警系统各发生1次误报警,气候急剧变化而形成较大的颗粒灰尘是误报警的主要诱因。2021年另一条地铁线路试运行期间,2021年6月发生3次误报警,灰尘前期聚集在火灾探测器内部造成了误报警。2021年9月、12月该地铁项目列车火灾报警系统各发生1次季节温度变化和灰尘聚集造成的误报警。拆解火灾探测器后,均发现了探测器污染严重的情况。根据调研现状判断,灰尘和水雾等污染是导致误报警的主要原因。

3 误报警原因分析

分析火灾探测器选型、结构、灵敏度设置等设计因素,以及火灾探测器工作环境、通信传输及维护等方面对误报警的影响,并对可能存在的原因逐项分析。分析结果表明,环境因素、探测器选型、探测器检测原理、软件算法是导致误报警的主要原因。

3.1 环境因素

地铁列车的运行环境较为复杂,火灾探测器会受到灰尘、水汽、光线、风、气流、昆虫、电磁、高频信号、静电干扰、高湿等因素的影响。在被干扰的情况下,火灾探测器无法精确感知周边环境参数的变化,导致发生误报警。火灾探测器安装在侧顶板内,由于其处在列车空调的回风区域,极易受气流影响,将客室灰尘带入火灾探测器内部。火灾探测器错把灰尘、水雾、蒸气等杂质当成真正的烟雾进行报警处理。

3.2 探测器选型

目前,大多数地铁列车上采用的是单光源光电火灾探测器,其具有烟雾浓度探测功能。单光源光电火灾探测器的探测原理为:火灾探测器在无烟状态(正常环境下)时,烟室内部很洁净,红外接收管不会接收到发射管发出的红外光。当烟室中进入烟雾粒子或其他颗粒物时,这些粒子飘过发射管发出的红外光光路时会产生漫反射,红外接收管可感受到发射管发出的红外光。火灾探测器的CPU(中央处理器)根据接收管的电参数变化值可量化出某一时刻的烟雾值(此值为烟雾光电转换后的信号转换采样值),进而判断是否有烟雾进入烟室及烟雾浓度。但火灾探测器不能识别灰尘、水雾等干扰因素,容易发生误报。

3.3 探测器检测原理

地铁列车所选用的火灾探测器的烟雾探测传感器功能,以检测空气中的烟雾浓度作为检测目标,火灾探测器的温度传感器以检测环境温度为检测目标,火灾检测算法采用门限法和变化率法。门限法是火灾检测最基本的算法,其原理是为火灾探测器的探测信号设定一个门限值,当火灾探测器探测到的信号高于这一门限值时就发出报警信号。而变化率检测法则是通过检测信号变化的速度,即单位时间内的信号变化量来决定是否发出报警信号。这两种算法功能均较为简单,电路也比较单一,必然会导致漏报或者误报。

火灾探测器在工作时,其探测信号不仅是一种火灾参数的函数,同时也是一种环境参数的函数,火灾检测算法的智能化程度直接决定了火灾探测器误报率的高低。系统智能水平低、软件不成熟、火场环境数据库不完善、火灾报警控制器及火灾探测器算法智能性不高,均是造成系统误报的原因。

4 防误报对策探索

4.1 增加防尘过滤装置

为了应对环境灰尘、毛絮等对火灾探测器误报的影响,考虑对火灾探测器加装一定过滤目数的过滤装置,并周期性更换防尘过滤装置,以减少大颗粒灰尘进入火灾探测器探测烟室内,进而减少误报。另外,火灾探测器出厂装车时考虑配带外壳保护罩,以防止装车施工及调试过程中的灰尘及装修毛絮状物质过早污染火灾探测器,开通运营前再摘除火灾探测器防尘罩。

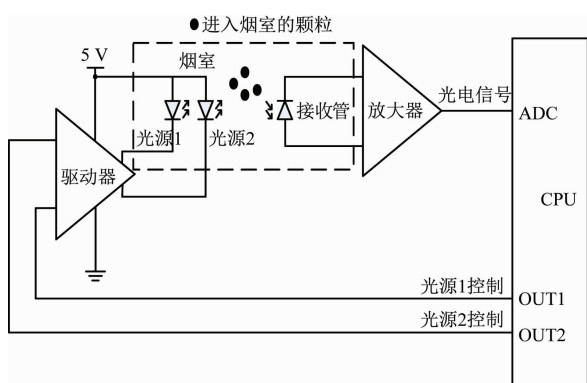
4.2 采用新型火灾探测器

4.2.1 双光源探测器

双光源探测器通过两种不同波长的光源(红外光源和蓝光)探测火灾探测器烟室的颗粒物。由于灰尘粒子、水雾粒子、烟雾粒子的大小不同,对不同波长光源的散射状态也有所不同,能够形成不同的受光曲线,进而根据不同条件区分灰尘粒子、水雾粒子、烟雾粒子。最后,通过软件运算结果判断粒子浓度变化趋势,达到降低误报警次数的目的。

双光源探测器检测原理示意图如图1所示。双光源探测器烟雾的检测原理为:在探测器烟室内部设计两套不同波长光源的发射管和一套光接收管,组成两条发射和接收光路,利用蓝光(波长为470 nm)及红外光(波长为850~940 nm)两种波长差异

大的光源,以非常高的频率交替发射,火灾探测器烟室内的颗粒通过发射光束产生散射光,散射光通过透镜被光接收器接收。对于不同波长的发射光,分布于检测光路上的不同粒径颗粒物的漫反射特性是不同的,双光源探测器从接收电路检测到的采样信号也有所不同,通过对所接收到的采样值进行特征比较,可以区分出普通烟雾颗粒(粒径一般小于 $1\text{ }\mu\text{m}$)和其他粒径相对较大的颗粒物(灰尘颗粒、细小液滴,粒径大于或远大于 $1\text{ }\mu\text{m}$),从而使双光源探测器不再对灰尘颗粒敏感,达到防止灰尘颗粒物引起火警误报的目的。



注:ADC为模数转换器;OUT1为光源1控制电路输出信号;OUT2为光源2控制电路输出信号。

图1 双光源探测器检测原理示意图

Fig. 1 Detection principle diagram of the dual light source detector

4.2.2 双烟室探测器

双烟室探测器具有两个独立的烟室,两个烟室间隔一定的距离。双烟室探测器每个烟室均有独立的红外光发射和接收装置,由同一处理器协调控制。一个探测器配备两个烟室可以起到协同判定的作用,如:一个烟室采集初判断,另一个烟室进行确认;一个烟室采用红外光光源,另一个烟室采用蓝光光源,可结合不同波长算法综合判断。此外,双烟室探测器也可以设计为,在仅有一个探测组件检测到烟雾浓度值达到火灾报警阈值并输出报火警信号的情况下,对该探测组件进行复位,再结合复位前后的烟雾浓度值,输出预警信号和火警信号,有效防止出现漏报和误报火警的情况。双烟室探测器检测原理和结构均有再报警冗余校验功能,可降低火警误报率。

4.2.3 多参量气体探测器

CO和CO₂是物质燃烧生成气体的主要成分,

正常情况下它们的体积浓度均较低。但是当火灾发生时,它们在空气中的体积浓度高于正常情况下许多倍,CO在封闭空间中的扩散速度较慢,导致封闭区域内的CO体积浓度急剧上升。因此,这两种气体可以作为检验火灾发生的火灾特征参量。由于CO₂同样也是人和动物呼吸的产物,在相对密闭的环境下,随着时间的推移,局部的CO₂体积浓度也会高于正常水平,甚至达到设计的报警阈值。正常情况下,空气中无CO,火灾在早期阴燃阶段燃烧不充分情况下会产生CO,可以将CO作为有无火灾发生的重要指标,且CO气体比空气轻,扩散性比烟雾强,故用CO作为检测误报的重要性是不言而喻的。在现有火灾探测器的基础上,采集并融合CO参量判断条件^[1],同时通过多信息融合算法综合判断模糊推理输出正确的火灾报警信号^[2],可降低火警误报率。目前,此类探测器尚处在研究初期阶段,还未应用于地铁列车。

4.2.4 热解粒子式探测器

热解粒子式探测器能够利用动态权重算法实现多参数、多重信息的综合检测,是一种复合型监控探测器,主要用于监控被保护区域(如高低压配电柜、输电开关柜、服务器机柜、发电机柜等相对封闭的场所)的热解粒子变化情况。该种探测器不受电压等级的限制,可以置于任意相对密闭环境进行检测,且其报警温度可取决于被测材料。热解粒子式探测器的监测内容包括:温度及其变化率、受热分解气体的质量浓度及其变化率、PM1.0粒子质量浓度、PM2.5粒子质量浓度、PM10粒子质量浓度等7项检测参数。热解粒子式探测器能够测量聚氯乙烯绝缘电缆、铅酸电池、断路器、负荷开关等用电设备过热分解产生的粒子和气体质量浓度,判断绝缘体发热情况,防患于未然^[3]。热解粒子式探测器一般放置于电气柜中。

4.2.5 优化算法

除了采用上述这些新型火灾探测器降低火警误报率外,还可以采用优化算法,尽可能排除干扰因素,使判断结果更为准确。

目前,应用于火灾报警信息的优化算法主要有以下几种:

1) 软件优化建模法。通过积累大量的、不同的燃烧物质试验模型数据,不断优化算法。

2) 阈值自动调整法。通过防火系统的软件设计,使防火系统具备环境自适应功能。随着环境中的灰尘量缓慢增加,逐步提升防火系统的判定阈值。

3) 基于机理模型的火灾判断法。通过选用不同波长的入射光分别测量气溶胶的体积浓度和表面积浓度,以排除非火灾气溶胶的误报警。气溶胶的体积浓度主要由大颗粒物贡献,表面积浓度则主要由小粒子贡献。平均粒径能够直观地区分火灾烟雾和非火灾气溶胶。

4) 神经网络结构及算法。根据神经网络算法建立火灾模型,采用遗传算法和适应度函数优化神经网络的初始权值和阈值。通过遗传算法选择适应性稍好的个体进入下一代,通过适应度函数模拟自然界中生物优胜劣汰的适应方式,综合不同采样参量,基于神经网络自学习算法,多层分析研判输出判定结果。

5) 模糊逻辑法。通过模糊逻辑法处理火灾报警信号,如模糊处理烟雾探测信号,以适当控制报警延时时间,几秒钟后再次轮询报警探测器,根据轮询结果及环境模糊变量判断。模糊判断变量可以设置为:烟雾浓度减光率从1%上升至5%、烟雾浓度减光率从5%上升至10%、报警前1 min的平均烟雾浓度、报警前3 min的平均烟雾浓度、报警前1 min内的前30 s和后30 s的平均烟雾浓度差、报警前3 min烟雾浓度从0.10%提升至0.25%的次数、报警前3 min烟雾浓度从0.25%提升至0.50%的次数。采用综合模糊判断法可有效降低瞬间干扰引起的误报警次数。

6) 模糊逻辑和神经网络结合算法。目前,处理火灾探测多参量的信息网络融合方法最常用的是神经网络方法,其次为模糊逻辑法,但这两种方法都有各自的优缺点,采用神经网络和模糊逻辑结合的方法进行信息融合已成为研究趋势^[4]。结合主从型结构,使得模糊控制系统与神经网络融合可以互相取长补短,采用神经网络提取模糊控制系统,使模糊控制系统具有神经网络的自学习能力。在实现模糊逻辑推理的同时,输入量和权值可用精确值的神经网络表示。利用模糊推理提高神经网络的学习速率,再用神经网络使模糊系统拥有更高的

性能。

5 结语

研发更可靠的新型智能火灾探测器是未来解决地铁列车火灾误报的研究热点方向,应结合多参量采集单元探测与智能分析算法,区分灰尘、水汽、烟雾粒子等干扰因素以降低误报率,提高火灾探测系统的抗干扰能力,进而提高火灾探测系统的可靠性。随着深度自学习及强化自学习训练算法的开发应用,可以考虑将其应用于列车火灾探测分析,为轨道交通发展提供更广阔的发展空间。

参考文献

- [1] 张永刚,张玺,刘杰,等.舰船多参量火灾探测技术方案[J].船海工程,2017,46(3):11.
ZHANG Yonggang, ZHANG Xi, LIU Jie, et al. On the fire detection technology of multi-parameter for ships[J]. Ship & Ocean Engineering, 2017, 46(3): 11.
- [2] 苏醒,李鸿,姜俊彤.基于CAN和模糊推理的一款地铁列车火灾报警系统的设计与仿真研究[J].计算机应用与软件,2021,38(6):94.
SU Xing, LI Hong, JIANG Juntong. Design and simulation of a subway train fire alarm system based on can and fuzzy reasoning[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(6): 94.
- [3] 邢国新,赵海龙,吴志强.热解粒子式电气火灾探测器在地铁中的应用[J].消防科学与技术,2021,40(11):1695.
XING Guoxin, ZHAO Hailong, WU Zhiqiang. Application of pyrolytic particle electric fire detector in subway[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(11): 1695.
- [4] 汪书苹,王海超,范明豪,等.基于多信息融合的电力火灾综合探测技术研究[J].消防科学与技术,2017,36(2):213.
WANG Shuping, WANG Haichao, FAN Minghao, et al. Research on electric power fire integrated detection technology based on multi-information fusion[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(2): 213.

· 收稿日期:2023-03-07 修回日期:2023-05-02 出版日期:2025-05-10

Received:2023-03-07 Revised:2023-05-02 Published:2025-05-10

· 第一作者:张潜,高级工程师,Luvirson@126.com

通信作者:徐少红,高级工程师,xushaohong_1983@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license