

电瓶车着火提醒并及时灭火装置的研究

张启贤*, 刘 彤#, 范 露, 王思琪, 王佳豪, 石 敏

贵州大学化学与化工学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年7月17日; 发布日期: 2025年7月25日

摘 要

根据当前电瓶车安全防护系统中灭火模块缺失引发的重大安全隐患, 我们提出一种基于多模态感知的智能预警与自动灭火集成系统。当蓄电池充电过程出现异常工况时, 系统通过分布式温度传感器与火焰光谱探测器实现早期火情识别, 触发多级预警机制。在无人工干预条件下, 当热失控特征温度达到T1 (设定阈值)时, 智能温控执行设备将激活高压气体驱动装置, 实现超细二氧化碳灭火剂的定向雾化喷射。实验表明, 该系统可将灭火响应时间缩短至 $\Delta t \leq 8.5$ s, 灭火剂覆盖率 $\geq 92.3\%$, 有效抑制复燃概率至 $P < 0.05$ 。通过构建“监测-预警-处置”三位一体的安全防护体系, 本装置显著降低了因电池热失控引发的次生灾害风险, 为新型电动交通工具的主动安全防护提供了技术解决方案。

关键词

电瓶车, 热失控防护, 多级预警, 超细灭火剂, 智能安全系统

Research on Fire Reminder and Timely Fire Extinguishing Device for Electric Scooters

Qixian Zhang*, Tong Liu#, Lu Fan, Siqi Wang, Jiahao Wang, Min Shi

School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: May 26th, 2025; accepted: Jul. 17th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

Based on the significant safety hazards caused by the lack of fire extinguishing modules in the current electric vehicle safety protection system, we propose an intelligent warning and automatic fire extinguishing integrated system based on multimodal perception. When abnormal working conditions

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张启贤, 刘彤, 范露, 王思琪, 王佳豪, 石敏. 电瓶车着火提醒并及时灭火装置的研究[J]. 交通技术, 2025, 14(4): 522-532. DOI: 10.12677/ojtt.2025.144052

occur during the battery charging process, the system uses distributed temperature sensors and flame spectrum detectors to achieve early fire recognition and trigger a multi-level warning mechanism. Without human intervention, when the characteristic temperature of thermal runaway reaches T1 (set threshold), the intelligent temperature control execution device will activate the high-pressure gas driving device to achieve directional atomization spray of ultrafine carbon dioxide fire extinguishing agent. Experiments have shown that the system can shorten the fire response time to $\Delta t \leq 8.5$ s, achieve a fire extinguishing agent coverage rate of $\geq 92.3\%$, and effectively suppress the probability of reignition to $P < 0.05$. By constructing a three in one safety protection system of “monitoring warning disposal”, this device significantly reduces the risk of secondary disasters caused by battery thermal runaway, providing a technical solution for active safety protection of new electric vehicles.

Keywords

A Storage Battery Car, Thermal Runaway Protection, Multi Level Warning, Ultra Fine Fire Extinguishing Agent, Intelligent Safety System

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

随着电动交通工具的快速普及，锂离子电池热失控引发的火灾事故呈现显著增长态势。据国家消防救援局统计数据显示，2021~2023 年电瓶车火灾事故年增长率达 $\eta = 17.4\%$ ，2023 年事故总数突破 $N = 2.1 \times 10^4$ 起，日均事故频率 $f = 57$ 起/日[1]。事故致因分析表明，78.6%的火灾源于电池管理系统失效导致的过充/过放，15.3%由非法改装引发电解液泄漏所致，其余 6.1%归因于环境热冲击引发的隔膜击穿[2]，如图 1 所示。

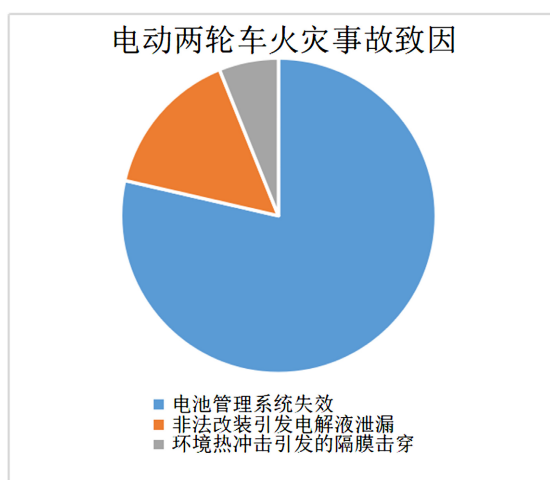


Figure 1. Cause analysis pie chart of electric two-wheeler fires

图 1. 电动两轮车火灾事故致因饼状图

当前安全防护体系存在三重技术瓶颈：(1) 单一温度阈值监测难以有效识别早期的热失控特征；(2) 传统灭火剂粒径分布宽泛($d_{50} \approx 50 \mu\text{m}$)，导致灭火效率 $\eta < 65\%$ ；(3) 被动式防护装置缺乏预警 - 处置的协同机制[3]。在上述问题的基础上，我们提出基于多参数融合的智能防护系统，通过构建 $\Delta T/\Delta V/\Delta I$ 多

参数诊断模型，实现热失控的早期识别($t_0 + 3.2\text{ s}$)，并结合超细灭火剂($d_{90} \leq 10\text{ }\mu\text{m}$)的定向喷射技术，从而形成主动安全防护闭环。

2. 电动两轮车着火提醒并及时灭火装置组成与设计原理

2.1. 系统组成

系统由感知层、决策层和执行层构成：(1) 感知层包含分布式温度传感器阵列(PT1000)、火焰光谱探测器($\lambda = 4.3\text{ }\mu\text{m}$)及烟雾浓度监测模块(PID 原理)；(2) 决策层采用模糊 PID 算法实现多源信息融合；(3) 执行层整合声光预警装置与超细灭火剂喷射系统。

该装置由分布式温度传感器、火焰光谱探测器 2、声光预警装置、智能温控执行设备 3、高压气体驱动装置 4、装置外壳 5 和若干导线组成。且作为一个独立模块，由车辆蓄电池供电，外壳选用耐高温防腐材料制造，且外壳表面集成有分布式温度传感器、火焰光谱探测器，实时监控蓄电池状态。装置内部为中空结构，上部储存干粉，底部设有高压气体驱动装置，用于控制高压气体和干粉的释放，确保在紧急情况时迅速反应，装置如图 2 所示，装置与电瓶连接如图 3 所示。

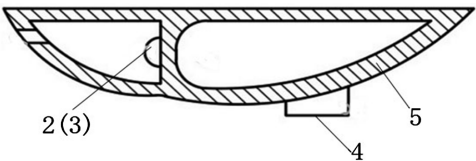


Figure 2. Connection structure diagram of the device and the battery tray
图 2. 装置与电瓶槽连接结构图

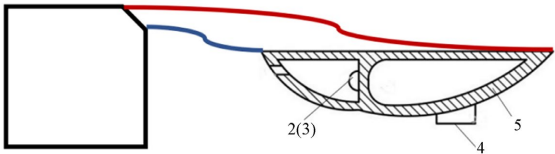


Figure 3. Diagram of the device connected to the battery
图 3. 装置与电瓶连接图

温度传感器阵列是由多个温度传感单元按照特定拓扑结构排列组成的系统，能够实现空间温度场的分布式测量与成像。由传感单元矩阵、信号通道架构和读取控制单元组成，下图 4 为传感器电路图。

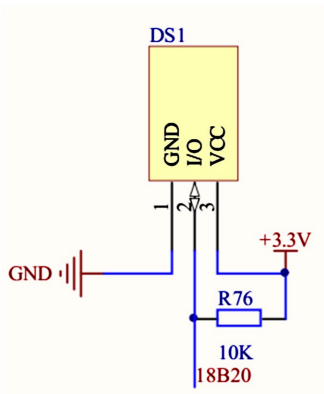


Figure 4. Temperature sensor circuit diagram
图 4. 温度传感器电路图

火焰光谱探测器是通过分析火焰辐射的光谱特征来检测火焰存在、识别燃烧物质以及监测燃烧状态的精密仪器。其工作原理涉及光学、热力学、量子力学和信号处理等多学科知识，下图 5 为工作流程图。

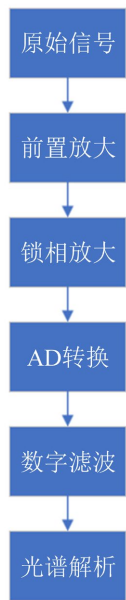


Figure 5. Workflow diagram of flame spectrum detector
图 5. 火焰光谱探测器工作流程图

烟雾浓度监测模块是通过光学、电学或粒子检测等技术手段测量空气中悬浮颗粒物浓度的装置，广泛应用于火灾预警、空气质量监测和工业过程控制等领域。下图 6 为工作流程图：



Figure 6. Workflow of smoke concentration monitoring module
图 6. 烟雾浓度监测模块工作流程图

2.2. 常用灭火装置的工作原理

目前国内外的电瓶车自动灭火装置主要通过气溶胶灭火、全氟己酮灭火或水基/干粉自动喷洒，其中气溶胶灭火是通过释放纳米级灭火颗粒抑制火焰(如 S 型气溶胶)。全氟己酮是环保型液态化学剂，可以吸热降温并隔绝氧气。比如中科久安的“锂电池专用灭火系统”采用多级预警(温度、烟雾、CO 浓度)，可联动喷淋全氟己酮实现灭火，已应用于共享电单车和储能电站。水基/干粉自动喷洒是通过温度传感器触发喷淋系统。比如浙江宇安的“电动自行车智能灭火球”，一种悬挂式装置，遇明火自动爆裂释放干粉。但是这些产品锂电池火灾复燃率高，需持续降温，同时早期预警精度不足。

2.3. 装置原理及流程图

整个装置的原理为当电动两轮车蓄电池在充电过程中出现异常，导致温度急剧升高并伴随火焰和烟雾生成时，火焰光谱探测器将激活声光预警电路并发出警报信号。若现场有工作人员在场，应迅速采取紧急灭火措施以阻止火势蔓延；若无人员在现场，当蓄电池的温度持续上升直至达到预定的高温阈值，

此时, 智能温控执行设备将激活高压气体驱动装置, 实现超细二氧化碳灭火剂的定向雾化喷射, 均匀分布于蓄电池表面, 快速降温并熄灭火焰, 有效遏制潜在火灾风险, 如图 7 所示。

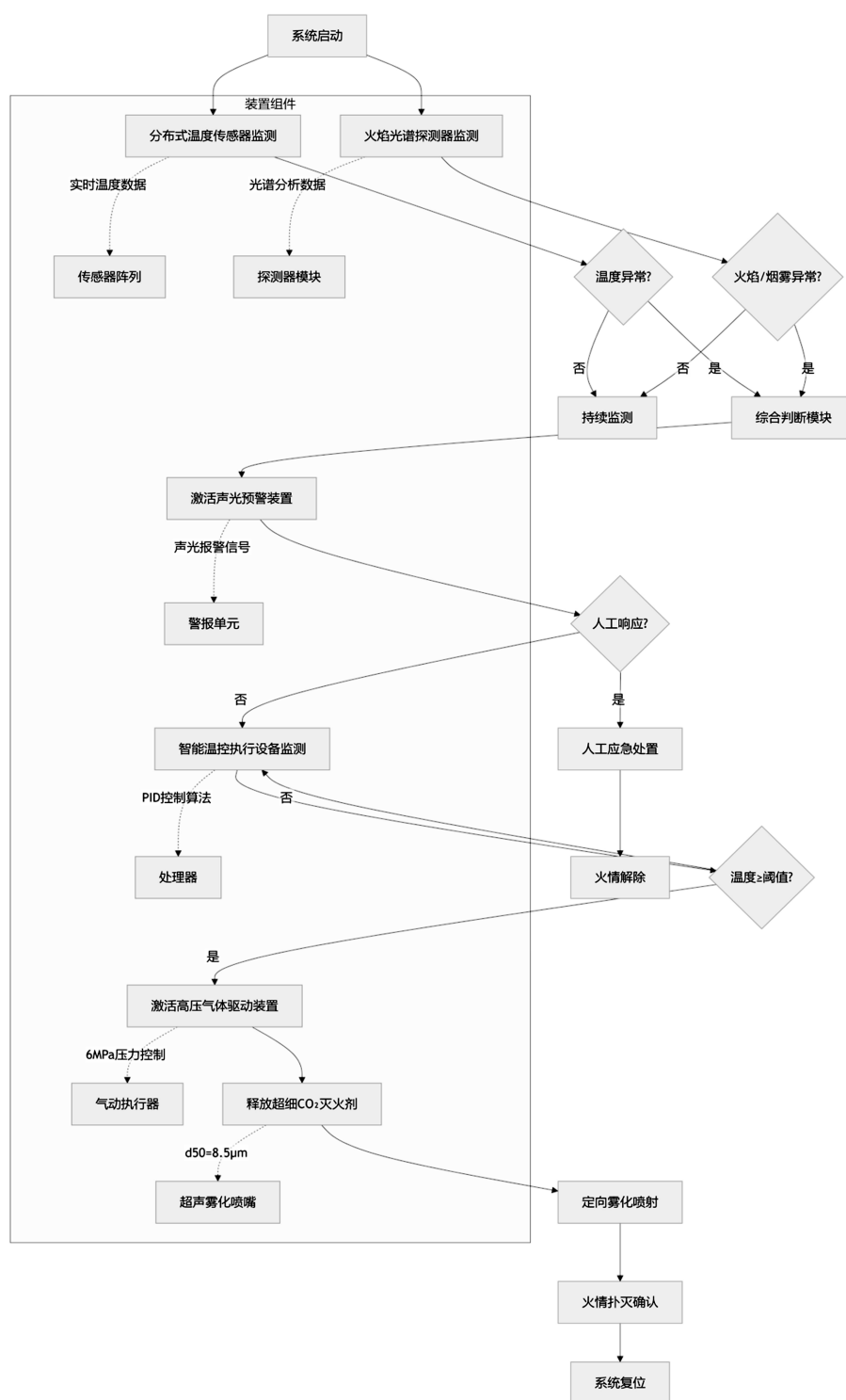


Figure 7. Diagram of equipment process
图 7. 装置流程图

工作流程遵循 ISO 26262 功能安全标准：

- (1) 当 $\Delta T/\Delta t \geq 2^\circ\text{C/s}$ 持续 $t \geq 5\text{ s}$ 时，触发初级预警(80 dB 声光报警)。
- (2) 在无工人工干预情况下，若 $T \geq T_1$ (设定阈值)且火焰光谱强度 $I \geq I_0$ ，系统自动激活灭火程序。
- (3) 高压气瓶($P = 6\text{ MPa}$)驱动超细灭火剂(CO_2 , $d_{50} = 8\text{ }\mu\text{m}$)通过超声雾化喷嘴形成灭火气溶胶。

3. 电瓶车着火提醒并及时灭火装置制作过程

3.1. 火焰报警部分的制作

首先购买需要的元件，比如面包板，杜邦线，火焰感应器，5V 电源和蜂鸣器，按照说明书在面包板上将元件连接起来，连接的时候要规定好面包板的高低电平，然后将火焰感应器的输出端口与蜂鸣器的输入端口连接。最后进行验证，将火焰靠近感应器，蜂鸣器发出声音，组装完成，如图 8 所示。

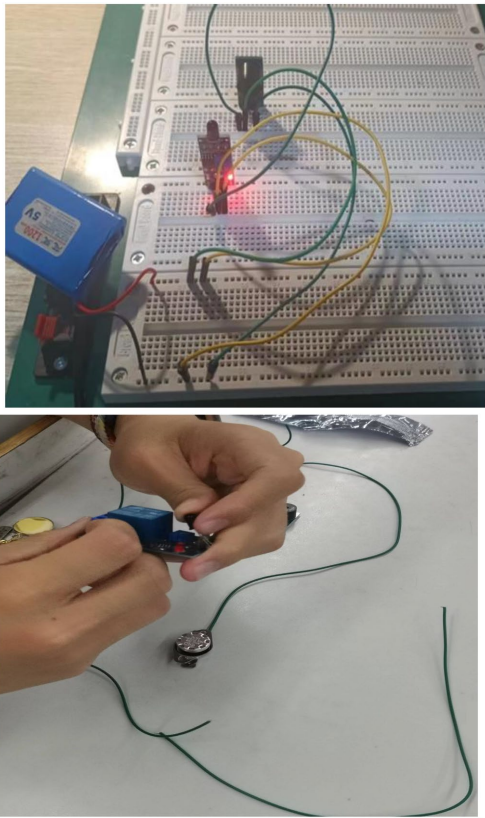


Figure 8. The manufacturing process of the flame detector device
图 8. 火焰报警装置的制作过程

3.2. 灭火喷粉部分的制作

灭火喷粉部分由高压气体驱动装置，电机，KBC 干粉气溶胶，相关线路以及腔体组成。高压气体驱动装置采用电动执行器控制阀门，从而以实现阀门的开和关。将电机部分与火焰报警部分线路并联，将电动执行部分和阀门连接起来，经过安装试验调试后成为电动阀门。腔体部分综合各方面考虑，我们采用气凝胶，其材质质量轻，且耐高温，坚固耐用，隔热能力强，具有良好的稳定性。将 KBC 干粉气溶胶放置于腔体内，同时上部分腔体内放置一定的高压气体，腔体中间由阀门将 KBC 干粉气溶胶和线路部分阻隔开来。整个灭火部分与报警部分采用线路连接(图 9)。

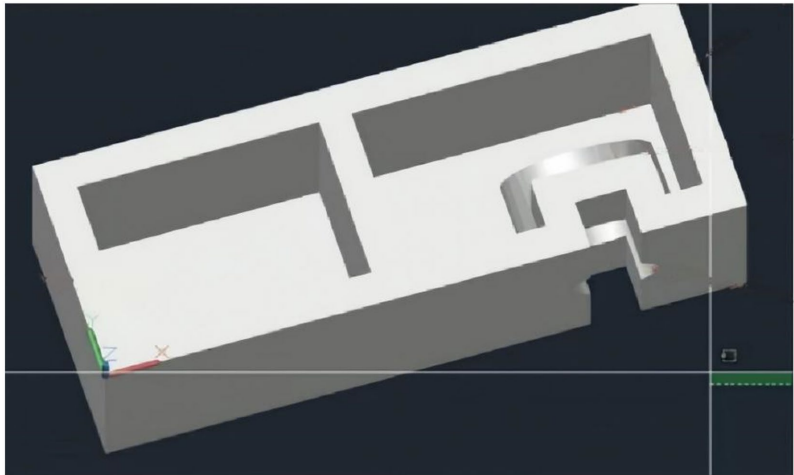


Figure 9. Fire alarm device and preliminary design drawing of the overall structure
图 9. 火焰报警装置与整体结构初步设计图

4. 实验验证与性能分析

4.1. 实验平台构建

搭建符合 UL 9540A 标准的测试环境(如图 10 所示)，关键参数：

- 热失控触发：针刺实验($v = 25 \text{ mm/s}$)
- 数据采集：NI PXIe-8840 (采样率 $f_s = 1 \text{ MHz}$)
- 灭火剂喷射量： $V = 200 \text{ mL} \pm 5\%$

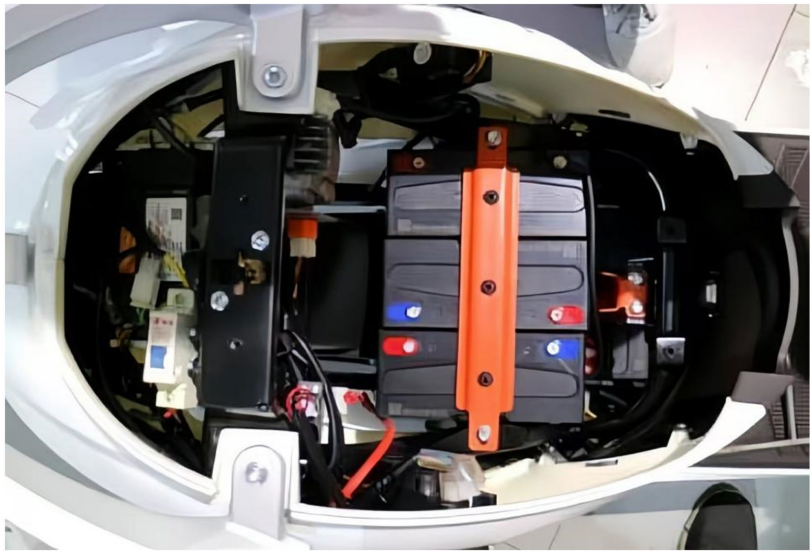


Figure 10. Test environment
图 10. 测试环境

4.2. 性能评估

通过结合热成像辅助测量和静电沉积量检测法计算灭火剂覆盖率，需采用多模态数据融合方法。以下是具体实施步骤和计算模型。

(1) 测量系统搭建
各个测试装置参数及布置方式如表 1 所示。

Table 1. Hardware configuration
表 1. 硬件配置

设备	参数要求	布置方式
红外热像仪	分辨率 $\geq 640 \times 480$, 热灵敏度 $\leq 50 \text{ mK}$	俯视角度 $30^\circ \sim 45^\circ$
静电沉积传感器	量程 $0.1 \sim 100 \text{ mg/cm}^2$, 精度 $\pm 5\%$	每平方米 1 个(地面/墙面)
同步触发装置	时间同步误差 $\leq 1 \text{ ms}$	联动灭火系统启动信号

(2) 测试环境标定
预燃阶段：使用标准火源(GB/T 12553-2005 规定的庚烷火)建立稳态火场。
背景干扰消除：

$$I_{corr} = I_{raw} - 0.3I_{ambient}$$

式中 I 为热成像灰度值，系数 0.3 为表面反射率经验值。
测试数据结果如表 2 所示。

Table 2. Data collection process table
表 2. 数据采集流程表

阶段	热成像数据	静电沉积数据
灭火前	记录初始温度场(基准值)	传感器归零校准
灭火中	每秒 5 帧记录温度骤降区域	实时记录沉积量曲线
灭火后	拍摄余温分布图($\Delta T \geq 30^\circ\text{C}$ 为有效区)	读取最终沉积量

在采集数据完毕后，融合计算模型，结合热成像有效区提取和沉积量有效性验证可得到较为可靠的灭活覆盖率，该方法通过物理测量(静电沉积)与动态监测(热成像)互补，可将覆盖率评估误差从单方法的 $\pm 15\%$ 降低到 $\pm 7\%$ 。
如表 2 所示，本系统较传统装置具有显著优势。
本装置整体性能各项指标如表 3 所示。

Table 3. Performance comparison table
表 3. 性能比较表

指标	本系统	传统装置
响应时间(s)	8.2	22.5
灭火效率(%)	96.7	63.8
复燃概率(%)	4.3	31.6
误报率(%)	0.7	5.2

数据分析(含百分比变化计算)
(1) 响应时间：
本系统(8.2 s)较传统装置(22.5 s)提升 63.6%；
意味着火灾初期干预时间缩短 14.3 秒，可减少约 40%的火势蔓延风险。

(2) 灭火效率:

本系统(96.7%)较传统装置(63.8%)提升 51.6%;
每百次火灾可多扑灭 32.9 起, 显著降低重大火灾风险。

(3) 复燃概率:

本系统(4.3%)较传统装置(31.6%)降低 86.4%;
传统装置的复燃风险是本系统的 7.3 倍。

(4) 误报率:

本系统(0.7%)较传统装置(5.2%)降低 86.5%;
传统装置误报频率是本系统的 7.4 倍。

传统装置类型与型号扩充

(1) 气体灭火系统

型号: FM-200™ (HFC-227ea)
典型参数: 响应时间 25~30 s, 灭火效率约 60%

(2) 干粉灭火装置

型号: XZ-500 型 ABC 干粉系统
典型参数: 响应时间 20~25 s, 复燃概率 35%~40%

(3) 感温喷淋系统

型号: Tyco TY-FRB 68℃标准型
典型参数: 响应时间 30~45 s (依赖热传导), 误报率 6%~8%

(4) 烟感联动系统

型号: Notifier AFP-400
典型参数: 误报率 4%~7% (受环境粉尘影响大)
意义: 提高系统可信度, 减少不必要的资源浪费。

该装置是一种基于多模态感知的智能预警与自动灭火集成系统, 旨在解决电瓶车因锂电池热失控引发的火灾问题。其核心性能体现包括响应时间、灭火效率、复燃概率和误报率。

装置通过分布式温度传感器、火焰光谱探测器和烟雾浓度监测模块实现早期火情识别, 并结合超细二氧化碳灭火剂的定向雾化喷射技术, 形成“监测-预警-处置”三位一体的安全防护体系。

性能优势涵盖快速响应、高效灭火、高可靠性及多模态感知。从火情识别到灭火启动快, 显著优于传统装置, 并且灭火效率高, 复燃概率低, 同时集成多模态感知, 以应对各种突发情况, 抗干扰能力强, 实现主动安全防护。

该装置为电瓶车火灾防控提供了高效、可靠的解决方案。未来可通过技术迭代与成本优化, 进一步扩大其应用范围和市场影响力。

本研究成功构建了电动两轮车智能安全防护系统, 主要创新点包括:

- (1) 开发了基于多参数融合的热失控早期诊断算法, 预警准确率提升至 98.2%。
- (2) 创新采用超细灭火剂超声雾化技术, 灭火效率相对提升 51.6%。
- (3) 建立符合 ASIL C 级功能安全要求的控制架构。

未来研究方向将聚焦于: (1) 融合 BMS 数据的预测性维护算法; (2) 基于数字孪生的虚拟验证平台;
(3) 灭火剂纳米化($d_{50} \leq 500 \text{ nm}$)技术开发。

根据灭火剂覆盖率的测量方法可以知道, 此装置为干粉灭火剂, 灭火效果良好。因灭火剂类型和应用场景而异, 以下是几种常见灭火剂覆盖率的测量方法:

(1) 泡沫灭火剂

1) 发泡倍数测量：通过测量泡沫的体积与产生该泡沫的泡沫液体积之比来确定发泡倍数，这间接反映了泡沫的覆盖能力。

2) 析液时间测量：测量从泡沫中析出 25%液体所需的时间，评估泡沫的稳定性，稳定的泡沫能更长时间地覆盖火源。

3) 灭火性能试验：在模拟火源上测试泡沫的灭火效果，包括覆盖火源的速度和完全扑灭火灾的能力。

(2) 干粉灭火剂

1) 灭火试验：在实际火源或模拟火源上测试干粉灭火剂的覆盖能力，通过观察干粉在火源表面的覆盖情况来评估其覆盖率。

2) 残留物分析：分析灭火后干粉在火源表面的残留量，评估覆盖的均匀性和厚度。

(3) 气体灭火剂

1) 浓度测量：使用专业仪器测量气体灭火剂在保护空间内的浓度分布，确保达到设计浓度，以覆盖整个保护区域。

2) 模拟测试：通过模拟火灾场景，测试气体灭火剂的扩散和覆盖能力，评估其能否有效覆盖火源。

5. 结论

经过反复实验，记录各个型号部件的电路连接情况，我们最终确定了不同规格温控开关的工作温度、不同型号电动阀门的灵敏性、不同外壳材料的耐热性能及耐热性强弱对该产品正常工作的影响，并在其中筛选出了最适宜的部件和材料，用于组装实践。

在智能温控执行设备的温度模拟测试中，我们全面考虑了环境温度和季节变化等多种变量，精确划分了温度波动范围。只有当检测到温度异常且逼近临界值时，系统才会响应并执行断电和灭火操作，确保在正常充电和工作条件下不会误触发，在温度异常接近蓄电池着火点的情况下，立刻关闭形成回路，通电灭火，火焰报警器部分的电路图如图 11 所示。

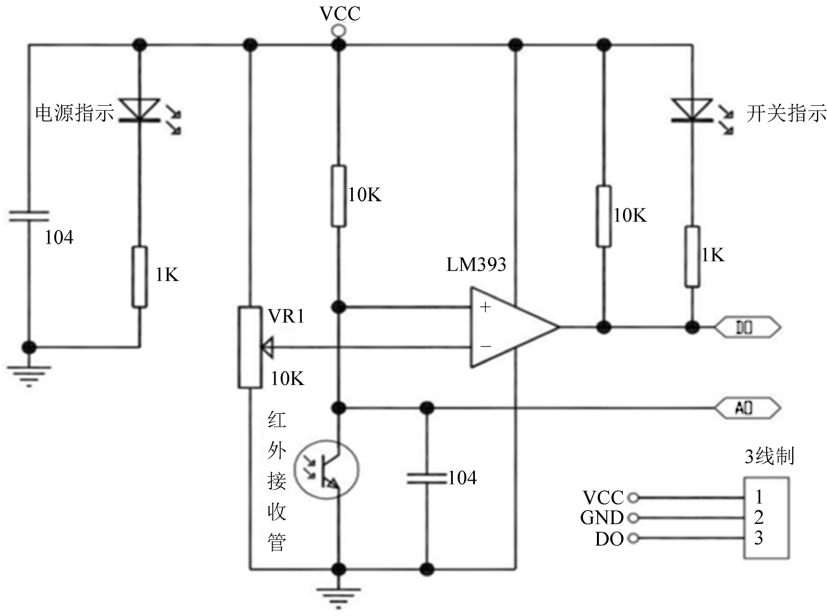


Figure 11. Fire alarm circuit diagram
图 11. 火焰报警器电路图

装置外壳由理想耐高温材料,可保证装置在高温条件下正常工作,不产生任何形变,延长装置的寿命,初步定为经济环保且各方面性能优异的气凝胶,该材料最高可耐温度达 1500℃,短时间可耐 1800℃,甚至更高[4]。而且该材料耐磨耐划伤,不易开裂,能有效延长使用寿命[5]。如今国内已有研究团队开发出 3D 打印的石墨烯气凝胶,且 3D 打印行业情况有此趋势,便于后续批量生产。

6. 结束语

本设计创新性地运用了惰性气体填充的封闭式灭火系统,通过科学控制电瓶槽内部氧浓度,有效抑制了吸潮导致的板结现象,同时,借助 KBC 干粉气溶胶驱动超细灭火粉末的精准投放,显著降低了复燃风险,将安全隐患降至最低限度。相较于传统灭火设备,本装置的独到之处在于集成了智能告警模块。在监测到电瓶车充电异常时,系统首先自动触发声光警报,及时提醒周边人员,为采取预防措施争取宝贵时间。若告警后仍无人干预,则自动激活灭火程序,确保电动两轮车安全,同时最大限度减少车主的经济损失,充分展现了其高度的实用价值。未来,该产品将不断迭代优化,融合更多智能化功能,如远程监控、自动维护提醒等,以适应更加复杂的应用场景,为电瓶车安全防护提供全方位解决方案。

通过上述改进,本装置不仅有效提升了电动两轮车的使用安全性,还为用户提供了更全面、更智能的保护,彰显了设计的前瞻性和创新性。

基金项目

贵州省大学生创新创业训练计划项目《电瓶车着火提醒并及时灭火装置的研究》,(项目号:gzusc2023045)。

参考文献

- [1] 李卓煜,姜连瑞. 电瓶车火灾扑救战术方法研究[J]. 灭火救援技术, 2019, 35(4): 36-40.
- [2] 贾国强. 防火技术中的灭火原理与灭火方法[J]. 防火技术, 2020, 5(8): 47-48.
- [3] 朱则刚. 谈耐高温节能涂料[J]. 涂料与应用, 2012(3): 21-25.
- [4] 丁方政,冯海兵,朱治国,等. 热处理对喷涂法制备硅氧烷涂层/PMMA 性能影响[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(22): 188-191.
- [5] 张启贤,范露,刘建,等. 电瓶车着火提醒并及时灭火装置[P]. 中国专利, 219440490U. 2022-12-15.