

电动汽车动力锂电池安全防控系统设计

周航^{1,2}, 雷建新^{1,2}, 钟鑫豪^{1,2}, 肖业^{1,2}, 汪帆^{1,2}

(1. 中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007; 2. 中车科技创新(北京)有限公司, 北京 100080)

摘要:随着电动汽车的普及,动力锂电池自身的安全性变得愈加重要。本文在分析当前电动汽车动力锂电池起火原因的基础上,结合现有关于动力电池热失控防控的研究,提出了一种适用于三元锂电池和磷酸铁锂电池的安全防控系统架构及其控制策略。该策略旨在主动预防热失控并在热失控引发起火后实施快速抑制。测试结果表明,该装置可有效维持电池箱内部的低氧环境,抑制热失控后泄漏气体的燃烧,显著提升了三元锂电池和磷酸铁锂电池的使用安全性。

关键词:电动汽车;三元锂电池;磷酸铁锂电池;热失控;安全防控

中图分类号:U469.72; TM912 文献标志码:A DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.04.006

Design of a Safety Prevention and Control System for EV Power Lithium-ion Batteries

ZHOU Hang^{1,2}, LEI Jianxin^{1,2}, ZHONG Xinhao^{1,2}, XIAO Ye^{1,2}, WANG Fan^{1,2}

(1. CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China;

2. CRRC Technology Innovation (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: With the growing popularity of electric vehicles, the safety of lithium-ion batteries is becoming increasingly important. Based on the analysis of the current causes of fires in power lithium-ion batteries used in electric vehicles, and in combination with existing research on thermal runaway prevention and control of power batteries, this paper proposes a safety prevention and control system architecture and its control strategy that apply to both ternary lithium-ion batteries and LiFePO₄ batteries. The strategy aims to prevent thermal runaway and rapidly suppress any consequent fire proactively. The test results show that the device can effectively maintain a low-oxygen environment inside the battery box, suppress combustion of leaked gas following thermal runaway, and significantly enhance the operational safety of both ternary lithium-ion and LiFePO₄ batteries.

Key words: electric vehicle; ternary lithium-ion battery; LiFePO₄ battery; thermal runaway; safety prevention and control

随着电动汽车保有量的持续增长^[1],动力锂电池的安全性日益受到公众关注^[2-3]。与此同时,我国发布了GB 38031—2025《电动汽车用动力蓄电池安全要求》^[4],该标准从电池单体、电池包及整车层面强化了动力电池的防火与预警要求。在上述背景下,如何提高动力电池的安全性已成为电动汽车领域的重要研究方向。为此,本文提出一种适用于三元锂电池和磷酸铁锂电池的安全防控系统设计方案。

1 电池起火原因及现有措施

1.1 电池起火原因

相较于其他动力电池(如镍镉电池和铅酸电池),锂离子电池凭借能量密度高、循环寿命长、记忆效应小等优点,在电动汽车领域得到广泛应用^[5-6]。目前常用类型主要包括磷酸铁锂电池、三元锂电池和锰酸锂电池,其中三元锂电池的热失控风险比另外两类更高,且失控反应更为激烈,存在爆炸风险^[7]。

收稿日期:2025-09-24。

第一作者:周航(2000—),男,硕士,助理工程师,主要从事电动客车动力电池系统方案设计工作。E-mail:1804485546@qq.com。

热失控是指电池能量释放异常,进而触发不可控的放热链式反应,导致温升速率急剧增大的过热现象^[8]。若某单体电池发生热失控,其释放的大量热量可通过热传导、辐射、对流等方式传递至邻近单体。当邻近单体受热升温至触发阈值时,会相继发生失控,从而形成热失控蔓延。现有统计表明,热失控及随后的热失控蔓延是电动汽车起火事故的主要诱因^[9],绝大部分电池起火事件均与这两个过程相关^[10]。

造成上述热失控现象的诱因主要包括过充、过放、内部短路和物理损伤等^[11]。这些诱因会破坏电池内部结构,触发一系列副反应,产生大量热量与可燃气体。当热量与气体急剧积聚后,可引发冒烟、起火甚至爆炸。

1.2 传统动力电池防火措施及其局限性

三元锂电池因其能量密度更高、环境适应性更强的突出优点,而被应用于各类电动汽车中。目前新能源汽车搭载的动力电池以三元锂电池和磷酸铁锂电池为主。为防止动力锂电池发生热失控,汽车制造商通常采用电池管理系统(Battery Management System, BMS)对电池进行实时监控。BMS通过监测电池的电压、电流、温度等参数,当任一参数超出预设阈值时,便控制车载警报器发出声光报警,提醒人员采取应对措施。此外,部分车型在电池箱外部配备灭火器,以便在电池起火时抑制火势蔓延;同时BMS会通过警报装置通知人员紧急疏散。

然而,上述措施均为被动防护手段。BMS仅能实现异常监测与报警,无法主动干预以阻止热失控的发生。箱外灭火器仅能在起火后进行抑制,同样无法预防热失控。为实现对热失控的事前主动防控,本文提出一种适用于三元锂电池和磷酸铁锂电池的安全防控系统方案。

2 系统架构设计及布置

2.1 系统功能模块

本文设计的三元锂和磷酸铁锂电池安全防控系统架构如图1所示。该系统包含惰性气体防控模块、灭火模块、警报与求救模块。

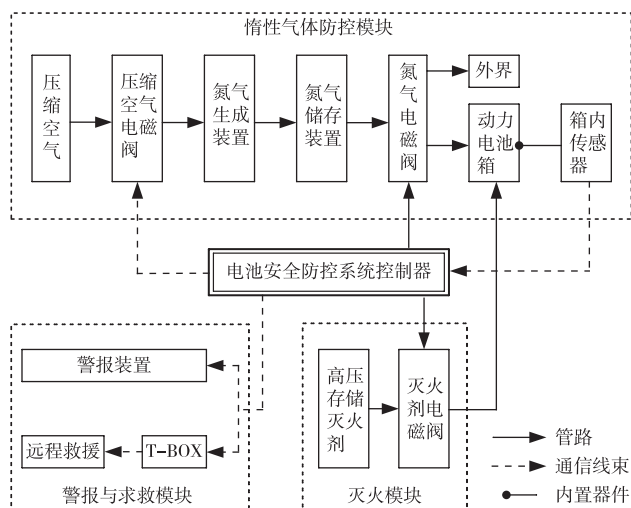


图1 动力电池安全防控系统结构

2.1.1 惰性气体防控模块

氧气浓度显著影响锂电池热失控过程中的放热反应及燃烧特性^[12]。研究表明,低氧环境可抑制锂电池与氧气的反应,降低电池表面峰值温度、热释放速率及总释热量,从而延缓热失控进程^[13]。

基于上述原理,本文设计了惰性气体防控模块(见图1),其核心功能是向电池箱注入惰性气体以置换空气,从而形成并维持低氧环境。该环境可在电池发生热失控时延缓反应速度,进而抑制明火产生,防止火灾蔓延。该模块可利用电动客车现有的压缩空气气瓶或空压机作为气源,通过氮气制取装置(如膜空分制氮装置)分离出氮气。电池箱内部安装的气压传感器实时监测箱内压力,当需要维持低氧环境时,控制器自动开启阀门,将氮气充入箱体内部。

然而,动力锂电池箱并非完全密封,充入氮气后,当箱内气压略高于外界大气压时,气体会逐渐向外渗透。动力电池安全防控装置可通过持续或间歇性充气,在该电池箱内维持稳定的低氧环境,实现对锂电池热失控的主动预防。

2.1.2 灭火模块

当电池箱内某一单体电池发生热失控时,其释放的大量热量会迅速传递至邻近单体,温度升至触发阈值后,邻近单体相继失控,继而导致热失控蔓延。对故障单体进行快速降温,可有效减少其向周围单体的热量传递,从而抑制热失控蔓延^[14-15]。

基于上述思路,灭火模块(见图1)在电池箱内部设置温度传感器与烟雾传感器。当检测到箱内温度急剧升高或箱内出现烟雾时,控制器自动开启灭火剂电磁阀,将灭火剂喷入电池箱内,以降低电池箱温度,

阻止热失控的发生与蔓延。

常见降温灭火剂及其特点如下:

1) 水具有较好的冷却效果,通常用水量越大降温效果越显著。但水具有导电性,若电池箱未彻底断电,喷水可能引发电气短路或触电,且与电池内部物质接触后可能产生有毒气体^[16-18]。

2) 干粉灭火剂可快速扑灭电池箱内的明火,但无法抑制电池内部热失控反应,复燃风险较高,且部分成分可能对电池造成腐蚀,灭火后需及时清理残留灭火剂。

3) 二氧化碳灭火剂能扑灭电池箱内的明火,但降温效果有限,灭火后电池表面温度易迅速回升,复燃风险高,难以抑制已发生热失控的锂电池火灾。

4) 全氟己酮灭火剂电绝缘性好,无腐蚀性且无残留,对锂电池火灾具有一定抑制效果,适用于储能电站、电动汽车及锂电池生产车间等场景,且其在规范设计浓度下对人体无害,具有良好的环境可接受性,适用性较强。因此,本文优先选择全氟己酮作为降温灭火剂。

2.1.3 警报与求救模块

当传感器检测到电池箱内温度急剧升高或箱内出现烟雾时,控制器自动开启灭火剂电磁阀,向箱内喷入灭火剂,通过吸热降温抑制电池热失控蔓延。与此同时,警报与求救模块(见图1)触发警报器发出声光报警,并通过车载远程终端以最高优先等级向调度中心发送求救信号。

2.2 电池安全防控系统布置

本文提出的电池安全防控系统在电动客车上的布置情况如图2所示。

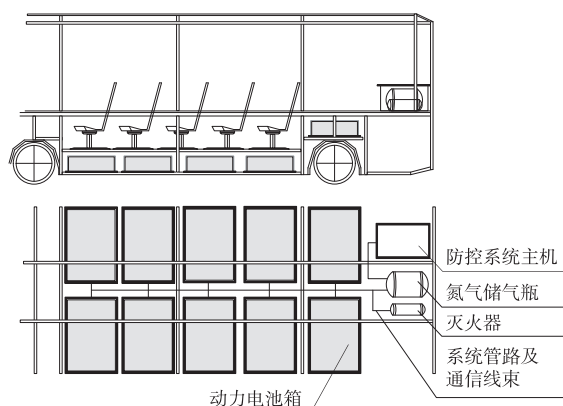


图2 电池安全防控系统布置示意图

图2中的每个动力电池箱内部均装有压力传感器、温度传感器和烟雾传感器,各传感器通过通信线

与防控系统主机相连。防控系统主机集成了压缩空气电磁阀、氮气生成装置、氮气储存装置、氮气电磁阀、系统控制器,以及各元器件之间的管路和通信线束。电池安全防控系统主机与电动客车自带的压缩空气储气瓶相连,以压缩空气为原料制取高浓度氮气。

控制器根据电池箱内状态执行不同策略。正常工况下,控制器开启氮气储气瓶阀门,将高浓度氮气充入动力电池箱,维持箱内低氧环境。当系统检测到电池箱内部温度超出阈值或箱内出现烟雾时,控制器启动降温灭火剂,向动力电池箱喷入灭火剂以迅速降温,防止热失控的发生与蔓延,保障车辆及乘员安全。

3 系统控制策略设计

本文设计的动力锂电池安全防控系统通过电池箱内的压力、温度及烟雾传感器,对电池箱内部环境进行实时监测,并根据监测结果执行相应的控制逻辑。控制策略总体分为氮气充入控制与降温灭火控制两部分,其流程如图3所示,图中符号含义见表1。

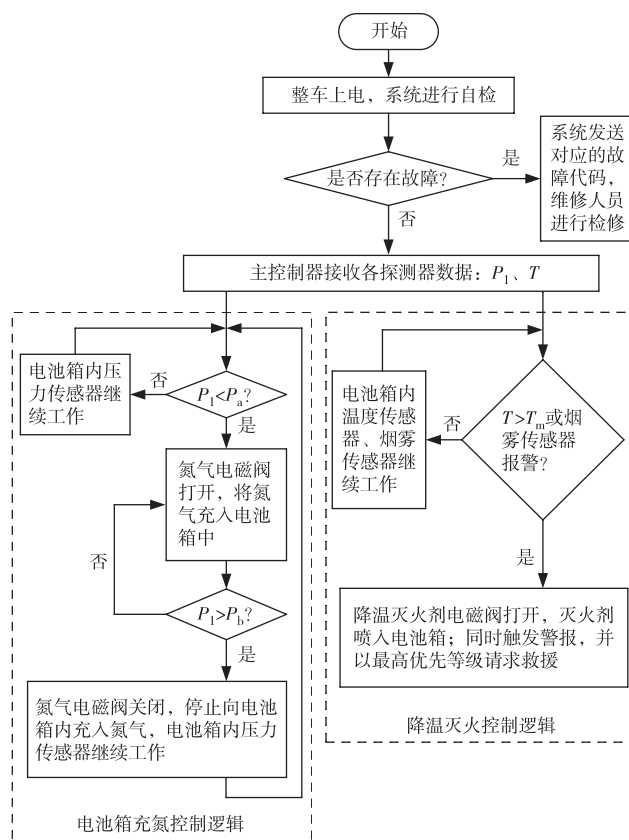


图3 动力电池安全防控系统控制策略流程图

表1 控制策略中各个符号的对应说明

符号	单位	说明
P_1	kPa	电池箱内部气体压力
P_a	kPa	开始充氮时的压力阈值
P_b	kPa	停止充氮时的压力阈值
T	℃	电池箱内部温度
T_m	℃	电池箱内部温度阈值

1) 电池箱充氮控制逻辑如下: 当系统控制器检测到 $P_1 < P_a$ 时, 控制器开启储气瓶电磁阀, 向电池箱内注入氮气, 待 $P_1 > P_b$ 时停止充气, 以此维持箱内低氧环境。

2) 降温灭火控制逻辑如下: 当温度传感器检测到 $T > T_m$ 或烟雾传感器检测到箱内出现烟雾时, 控制器立即开启灭火剂电磁阀, 将高压存储的灭火剂喷入电池箱内, 快速降低电池温度。与此同时, 控制器触发警报器发出警报, 并通过车载远程终端向调度中心发送求救信号。

4 系统的阈值设定及测试

本文提出的电池安全防控系统已在我司某 8.5 m 样车上进行加装测试。该款车型共有 10 个电池箱, 编号为 1~10 号, 本次仅对 6 号和 7 号两个电池箱加装防控系统, 并采用图 3 中的控制策略。

P_a 和 P_b 的取值无强制性要求, 可根据实际情况确定。系统向电池箱充入氮气, 使箱内压力高于外界, 利用压差置换箱内原有气体。为避免箱内外压差过大导致气密性降低而引发安全问题, P_a 和 P_b 均应略高于外界大气压, 且 $P_a < P_b$ 。文献[19]指出锂离子电池的安全温度范围为 $-20 \sim 60$ ℃, 故设 $T_m = 60$ ℃。

因灭火模块测试涉及锂离子电池热失控反应, 我司暂无安全可控的实验环境, 故本次测试仅针对惰性气体防控模块。测试过程如下: ①向电池箱充入氮气, 置换原有气体; ②利用抽气泵抽取箱内气体, 通过氮气浓度传感器检测初始氮气体积分数; ③为模拟电动客车断电后停靠车站的场景, 将电池箱静置 12 h; ④再次检测箱内氮气体积分数。

测试结果表明, 置换后 6 号和 7 号电池箱的初始氮气体积分数分别为 95.8% 和 92.1%, 对应的氧气体积分数分别为 4.2% 和 7.9%。文献[20]表明, 当氧气体积分数低于 13% 时, 可抑制磷酸铁锂电池的明火燃烧; 文献[21]表明, 当氧气体积分数为 10.64% 时,

三元锂电池热失控后仅喷射火星, 无法形成连续火焰。由此可知, 置换后形成的低氧环境能够延缓两类电池的热失控反应进程, 并抑制明火燃烧。

将电池箱静置 12 h 后, 6 号和 7 号电池箱的氮气体积分数分别为 93.8% 和 90.7%, 对应的氧气体积分数约为 6.2% 和 9.3%。该结果表明, 车辆断电后, 电池箱内部仍可维持低氧环境, 同样能够抑制磷酸铁锂电池和三元锂电池的明火燃烧。

5 结束语

本文在分析现有动力电池热失控研究的基础上, 提出了一种适用于三元锂电池和磷酸铁锂电池的安全防控系统架构及其控制策略。该系统在热失控发生前, 通过惰性气体置换箱内原有气体以维持电池箱低氧环境, 实现了主动预防; 当热失控发生时, 启动灭火装置, 向箱内喷入灭火剂以抑制热失控反应, 从而防止其蔓延, 有效提升了两类电池的使用安全性。

相较于传统防火方案, 本系统具备主动防控能力, 但系统复杂度与成本有所增加。后续研究将围绕系统简化和成本优化, 设计更加经济高效的安全防控装置。

参考文献:

- [1] 周毅鹏. 插电混合动力客车锂离子电池布置与防火设计[J]. 机电技术, 2017(2): 81-84.
- [2] 陈碧毅. 纯电动城市客车动力电池防火应用方案[J]. 客车技术与研究, 2017, 39(1): 37-39.
- [3] 刘超, 周元, 李兵. 纯电动客车动力电池的防火设计[J]. 客车技术与研究, 2016, 38(6): 39-40.
- [4] GB 38031—2025 电动汽车用动力蓄电池安全要求[S].
- [5] 孙大明, 崔洁, 王晓杰, 等. 磷酸铁锂在锂离子电池中的研究进展[J]. 工程科学学报, 2025, 47(5): 1055-1066.
- [6] 唐娉婷, 巩文龙, 鲍欢欢, 等. 一种基于势场理论的锂离子电池运行安全状态模型[J]. 电池工业, 2025, 29(2): 129-134.
- [7] 王兵. 车用锂离子电池热失控规律及预警方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021: 22.
- [8] Wang Xiaoxue, Li Qitong, Zhou Xiaoyan, et al. Monitoring thermal runaway of lithium-ion batteries by means of gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024(411): 135703.
- [9] 张敏. 车用锂离子电池火灾及细水雾灭火关键参数模拟研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2023: 17.
- [10] 芮新宇, 冯旭宁, 韩雪冰, 等. 锂离子电池热失控蔓延问题

- 研究综述[J]. 电池工业, 2020, 24(4): 193-201.
- [11] Li Ning, Zhang Yu, He Fuxing, et al. Review of lithium-ion battery state of charge estimation[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 619-630.
- [12] Meng Di, Weng Jingwen, Wang Jian. Experimental investigation on thermal runaway of lithium-ion batteries under low pressure and Low temperature[J]. Batteries, 2024, 10(7): 243.
- [13] 陈现涛, 赵一帆, 张旭, 等. 不同外部热源及气压对软包装锂离子电池热失控影响[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(1): 15-20.
- [14] 柯巧敏, 郭剑, 王亦伟, 等. 液冷式热管理对动力电池热失控阻隔性能[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1634-1640.
- [15] Zhang Guowei, Li Zheng, Wang Hongyu, et al. Study on the suppression effect of cryogenic cooling on thermal runaway of ternary lithium-ion batteries[J]. Fire, 2022, 5(6): 182.
- [16] 陈甜甜, 李伟英. 基于锂离子电池光伏储能电站消防系统设计及探讨[J]. 电力勘测设计, 2024(11): 33-36.
- [17] 毛思远, 肖修昆, 梁天水, 等. 锂离子电池热失控特性及电池火抑制过程[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(15): 6519-6525.
- [18] 黄江, 金建泉, 赵梁, 等. 锂离子电池火灾灭火剂及灭火策略研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(11): 2121-2132.
- [19] 刘巧云, 贝新卫, 刘晓敏, 等. 锂离子电池的热效应分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 18-26.
- [20] 周驰, 李盼, 陈洲, 等. 储能空间内不同氧浓度下锂电池热失控特性分析[J]. 船海工程, 2025, 54(2): 106-110.
- [21] 张少禹, 董海斌, 姜学磊, 等. 三元锂离子电池低氧环境热失控特性研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(2): 161-163.

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] 刘宗巍, 史天泽, 郝瀚, 等. 中国燃料电池汽车发展问题研究[J]. 汽车技术, 2018(1): 1-9.
- [2] 王丙虎, 陈振国, 刘康, 等. 基于自适应特性的燃料电池客车能量管理策略研究[J]. 客车技术与研究, 2023, 45(5): 1-5.
- [3] 刘康, 齐洪磊, 王丙虎, 等. 燃料电池客车散热系统控制策略研究[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(3): 1-5.
- [4] 王骞, 李顶根, 苗华春. 基于模糊逻辑控制的燃料电池汽车能量管理控制策略研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(12): 1347-1355.
- [5] 元勇伟, 许思传, 万玉. 燃料电池汽车动力总成方案分析[J]. 电源技术, 2017, 41(1): 165-168.
- [6] 蒋永琛. 增程式电动客车能量管理控制策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 9.
- [7] 王旭峰. 燃料电池混合动力机车建模及能量管理策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 2.
- [8] 张来云. 增程式燃料电池汽车动力系统匹配及能量管理策略研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016: 10.
- [9] 刘新天, 李强, 郑昕昕, 等. 基于多目标优化的燃料电池汽车能量管理策略[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6): 81-89.
- [10] 朱东彬, 王喜洋, 李艳文. 混合动力电动汽车能量管理策略研究进展[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 293-296.
- [11] 虞铭. 燃料电池汽车动力系统参数匹配及控制策略初步研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 8.
- [12] 何洪文, 林逸, 魏跃远. 燃料电池混合动力汽车控制策略研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(3): 223-226.
- [13] 牛继高, 徐春华, 牛丹彤, 等. 增程式电动汽车规则型能量管理策略对比[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 266-272.
- [14] 陈景夫. 面向动力电池衰减的增程式电动客车能量管理策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016: 14.