

磷酸铁锂电池管理技术及安全防护技术研究现状

周喜超¹, 王楠¹, 徐街明², 赵梦欣³, 张晨光⁴

(1. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100050; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310000;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 4. 国网信息通讯产业集团有限公司, 北京 102200)

[摘要] 储能作为战略性新兴产业, 是增强能源系统供应安全性、灵活性、综合效率的重要环节。然而, 随着储能产业的快速发展, 电池的安全性成为阻碍其发展的关键问题之一。本文以磷酸铁锂电池为例, 基于应用现状, 从电池管理技术角度, 介绍了磷酸铁锂电池现有的状态检测技术; 接着从安全防护技术角度, 介绍了磷酸铁锂电池的主动安全防护技术和被动防护技术; 最后, 从技术标准、状态监测和安全防护等方面, 给出了磷酸铁锂电池集成化发展的建议。

[关键词] 磷酸铁锂电池; 储能电池; 电池管理技术; 安全防护技术; 集成化发展

[中图分类号] TM911 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlfid.202011265

[引用本文格式] 周喜超, 王楠, 徐街明, 等. 磷酸铁锂电池管理技术及安全防护技术研究现状[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 9-17. ZHOU Xichao, WANG Nan, XU Jieming, et al. Research status of management technology and safety protection technology of lithium iron phosphate battery[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 9-17.

Research status of management technology and safety protection technology of lithium iron phosphate battery

ZHOU Xichao¹, WANG Nan¹, XU Jieming², ZHAO Mengxin³, ZHANG Chenguang⁴

(1. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100050, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 4. State Grid Information & Telecommunication Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: As a strategic emerging industry, energy storage is an important part of enhancing the security, flexibility, and overall efficiency of energy system supply. However, with the rapid development of the energy storage industry, the safety of batteries has become one of the key issues hindering its development. By taking lithium iron phosphate battery as an example, based on the application status, this article introduces the current state detection technologies of lithium iron phosphate battery from the perspective of battery management technology. Then, from the perspective of safety protection technology, it introduces the active safety protection technology of lithium iron phosphate battery and passive protection technology. Finally, from the aspects of technical standards, condition monitoring and safety protection, it gives recommendations for the integrated development of lithium iron phosphate batteries.

Key words: lithium iron phosphate battery, energy storage battery, battery management technology, safety protection technology, integrated development

近年来, 储能市场规模处于不断增长态势。储能电池作为电化学储能系统重要组成部分受到广泛关注。随着国家政策的实施以及新能源汽车、储

能行业的需求不断增加, 结构稳定、循环及安全性好的磷酸铁锂电池逐渐被大众所接受并广泛应用于各场景中^[1-4]。

收稿日期: 2020-11-04

基金项目: 国网科技项目: 并联式磷酸铁锂直流电源系统集成及应用技术研究

Supported by: State Grid Technology Project: Research on Integration and Application Technology of Parallel Lithium Iron Phosphate DC Power Supply System

第一作者简介: 周喜超(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源并网、储能系统集成等技术, 306292745@qq.com。

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

磷酸铁锂电池是以磷酸铁锂作为正极的锂离子电池,不同于其他类型的锂电池,磷酸铁锂电池因其特殊的材料,具有循环次数多、成本低、安全性高等特点^[5-6]。自 2010 年以来,电动汽车的市场需求迅速增长,促使锂电池成本降低了 85% 以上。2020 年,以磷酸铁锂电池为储能电池的福建晋江储能电站试点项目一期(30 MW/108 MW h)并网成功以及通信业三大运营商提出的关于储能基站的需求等一系列有益的尝试使得磷酸铁锂电池的商业模式日益清晰,发展前景逐渐明朗^[7]。

随着应用范围、场景逐渐广泛,电池的安全防护、管理系统作用凸显。磷酸铁锂电池需要相应的电池管理系统、安全防护系统以及相关政策、标准来保障其在建设、应用方面的发展。对此,本文总结了磷酸铁锂电池的应用现状,并介绍了目前已有的磷酸铁锂电池管理系统及安全防护系统的研究现状,最后针对已整理的相关资料对磷酸铁锂电池的发展给出了相应建议,希望对今后磷酸铁锂电池的发展提供一定参考。

1 磷酸铁锂电池应用现状

目前,电化学储能主要采用锂电池和铅蓄电池^[8-10]。其中,磷酸铁锂电池因具有工作电压高、能量密度大、循环寿命长、安全性能好、自放电率小、无记忆效应等优点,已经被广泛应用在 5G 基站、电动汽车以及储能电站等场景中。国家通过颁布政策、

制定标准等方式保证磷酸铁锂电池稳定有序的发展。

1.1 配套政策及规范标准

相比三元锂电池,磷酸铁锂电池的成本优势较为明显,尤其是财政部、工业和信息化部、科技部和发展改革委 4 部委联合发布的《关于完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》(财建〔2020〕86 号),将新能源汽车推广应用财政补贴实施期限延长至 2022 年底,并对动力电池成本及续航提出了更高要求,使得磷酸铁锂电池的应用更加广泛。

国家发改委、工业和信息化部印发的《关于组织实施 2020 年新型基础设施建设工程(宽带网络和 5G 领域)的通知》中明确提出,5G 是新型基础设施建设的重要内容,在稳投资、促消费、助升级、培育新动能等方面潜力巨大。推动磷酸铁锂电池在通信基站的使用,对于促进通信行业绿色与高质量发展具有积极意义。2018 年 12 月,河北省工信厅发布了《关于发布〈京津冀地区新能源汽车动力蓄电池回收利用试点实施方案〉及征集试点示范项目的通知》,确定在京津冀等 17 个地区及中国铁塔公司开展试点。中国移动在 2018 年发布的《关于推广应用磷酸铁锂电池的指导意见》提出,在各类基站、汇聚机房和重要末端节点等推广应用磷酸铁锂电池。

伴随着国家政策的颁布,各行业、地方纷纷设立标准加强对磷酸铁锂电池的管控和发展,明确提出了磷酸铁锂电池应用于各个场景的技术规范和要求,具体见表 1。

表 1 应用于各场景的磷酸铁锂电池标准
Tab.1 Lithium iron phosphate battery standards applied in various scenarios

发布单位	标准号	标准名称	适用范围
	YD/T 3768.1—2020	《通信基站梯次利用车用动力电池的技术要求与试验方法 第 1 部分:磷酸铁锂电池》	退役车用动力电池单体在成组或模块再成组的集成式、分立式通信用梯次磷酸铁锂电池
工业和信息化部	YD/T 2344.1—2011	《通信用磷酸铁锂电池组 第 1 部分:集成式电池组》	适用于电池模块与电池管理系统集成为一体的通信用磷酸铁锂电池组
	YD/T 2344.2—2015	《通信用磷酸铁锂电池组 第 2 部分:分立式电池组》	适用于通信用锂电池组的技术要求、检验方法、规则、标志、包装、运输、储存等
	YD/T 3408—2018	《通信用 48 V 磷酸铁锂电池管理系统技术要求和试验方法》	适用于具有自主限流充电功能的通信用 48 V 磷酸铁锂电池组管理系统
山东省质量技术监督局	DB 37/T 2752—2016	《通讯基站及储能用磷酸铁锂电池组通用技术条件》	适用于通信基站及储能用磷酸铁锂电池组
	DB 37/T 1940—2011	《电动车用磷酸铁锂电池模块通用技术条件》	适用于电动汽车用磷酸铁锂电池组
中国铁塔股份有限公司	Q/ZTT 2218.3—2016	《蓄电池检测规范 第 3 部分:磷酸铁锂电池组(集成式)》	适用于磷酸铁锂蓄电池组产品的质量检测
中国电力企业联合会	T/CEC 373—2020	《预制舱式磷酸铁锂电池储能电站消防技术规范》	适用于新建、扩建、改建户外无人值班的系统容量 10 MW h 及以上的电网侧预制舱式磷酸铁锂电池储能电站

1.2 磷酸铁锂电池应用

近年来,磷酸铁锂电池已被广泛应用在 5G 基站、新能源电动车以及储能电站的建设^[11]。图 1 给出了 2018—2019 年各行业磷酸铁锂电池需求总量。

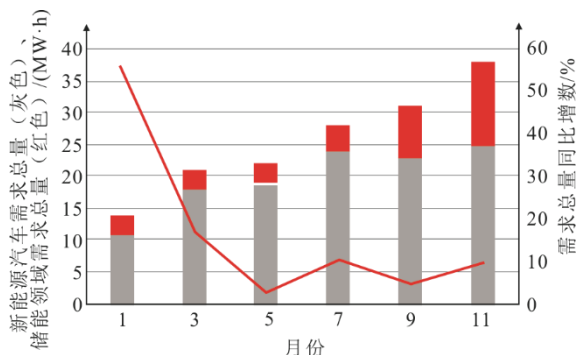


图 1 新能源汽车及储能领域对磷酸铁锂电池的需求总量
Fig.1 Total demand for lithium iron phosphate batteries in the field of new energy vehicles and energy storage

5G 基站的需求为磷酸铁锂电池的发展提供了发展契机。由于 5G 基站的整体功耗提升,所以电源系统必须扩容,意味着必须通过改造保证电力供给。此外,还需考虑储能电池的安全问题。而高安全性、高能比、小体积、轻重量、长寿命的磷酸铁

锂电池正好满足 5G 基站的需求。2020 年以来,磷酸铁锂电池的需求量上升。

伴随着新能源汽车各种车型的完善,磷酸铁锂电池已经在该行业占据一席之地^[12]。例如,比亚迪目前已经成为全球产能最大的磷酸铁锂电池供应商,其电池技术已经得到全世界认可,并与包括戴姆勒、丰田等在内的多家全球重量级汽车制造商建立了联系合作。2020 年,“刀片电池”的推出再次引发全球瞩目,推动国产磷酸铁锂电池迈向国际。

相比于电动汽车,电动船舶的应用则更加体现了现代技术的先进,电动船舶“君旅号”采用配套的磷酸铁锂电池,相比同尺度燃油动力船舶,每年可省油近百吨,无碳、硫等废弃污染物排放,具有大功率、高效率、高清洁度的优点,其搭载的电池容量相当于 50 辆纯电动汽车的电池容量,晚上充电 4~5 h 即可满足白天 8 h 的续航需求。

作为储能电池,磷酸铁锂电池在全国各地的储能电站中均有使用,表 2 列出了我国目前已经建成的部分磷酸铁锂电池储能电站。由于磷酸铁锂电池应用较为广泛,所以配套的电池管理技术以及安全防护技术已经成为目前的重点研发问题^[13-14]。

表 2 我国部分已建成磷酸铁锂电池储能电站

Tab.2 Some built lithium iron phosphate battery energy storage power stations in China

项目地点	容量	作用
酒泉瓜州布隆吉乡	1.5 GW h	解决弃风弃光问题,辅助市场服务,延缓网架结构建设
江苏镇江	40 MW/80 MW h	提高镇江东部电网的调峰调频能力,为可再生能源的规模开发提供支撑
山西长治	9 MW/4.5 MW h	该系统将联合火电机开展电网 AGC 调频业务,大幅度提高热电厂发电机组 AGC 调频水平
江苏连云港	5 MW (1 MW 超级电容+4 MW 锂电)	通过移动充电方式满足港口作业的用能需求
青海省海西州格尔木市	50 MW/100 MW h	“风、光、热、蓄、调、荷”于一体多能互补,进一步推动青海实现清洁能源完全供给,推动区域能源结构优化
湖南长沙	24 MW/48 MW h	具有削峰填谷、负荷响应、黑启动等作用,缓解长沙地区局部高峰期供电电压,提升新能源供电稳定性,提高祁韶直流特高压输送能力

2 磷酸铁锂电池管理技术

电池管理系统 (battery management system, BMS) 是电池保护和管理的核心组成部分,不仅要保证电池的安全可靠,还要充分发挥电池的性能和延长使用寿命。该系统可以实时采集、处理、存储电池运行过程中的重要信息^[15-16],主要对电池运行状态 (电压、电流、温度等) 进行检测,进而对电池荷电状态 (state of charge, SOC)、电池健康状态 (state of health, SOH) 进行分析和评估,对电池组 (堆) 实现均衡管理、控制、故障告警、保护及通

信管理。一些发达国家很早就投入大量资金对电池管理系统进行研究,例如:美国 Aerovironment 公司生产制造的 Smart Guard 系统可以自动搜寻不一致性最差电池,自动检测电池深度放电、过度充放电及自动记录电池运行数据;美国公司生产的 EVI 系统由 26 块电池组成,主要功能是获得电池运行时的端电压、端电流;还有德国 B.Hauck 生产的 BATTMAN 系统,可以根据电池的不同特点,在硬件上将多个线路进行变换,软件上对多个参数进行设置。

2.1 电池状态监测与分析

二次电池用于储能系统存在存储能量少,寿命

短,使用过程中的安全性、电池电量等难以估计等难题,且不同类型的电池特性相差很大。电池状态监测系统可以监控储能电池在运行过程中的一些特征参数,实时采集蓄电池组中每一块电池的端电压、端电流、温度等参数,通过检测出的电池特性参数求取 SOC、SOH 等并对其进行分析、评估,同时给出电池的运行状况,选出有问题的电池,保证整组电池运行的可靠性、高效性^[17-18]。

对于状态监测系统的研究目前尚不发达,其应用范围也不广泛。文献[19]提出了一种监测风电储能中的磷酸铁锂电池温度的新方法,并对实际工程进行测试。SOC 是用于表示电池荷电状态的参数,目前对 SOC 的定义尚不统一,其中认可度较高的一种为:在一定的温度环境中,电池剩余电量与其

在相同条件下可用容量的比值^[20-22],如式(1)所示。

$$S_{\text{SOC}} = S_{\text{SOC},0} - \frac{1}{Q_N} \int_0^t \eta I d\tau \quad (1)$$

式中: $S_{\text{SOC},0}$ 表示电池初始 SOC; Q_N 为电池容量; η 表示放电倍率,一般情况下为 1; I 为流过电池的电流,放电时 I 为正值,充电时 I 为负值。

电池荷电状态目前已成为储能技术研究的重要组成部分。由于动力电池在不同工况下表现出的工作特性大为不同,其内部动态特性复杂,掌握起来较为困难。对于电池荷电状态的估算国外研究的时间比国内更久,目前比较成熟的方法有安时积分法、开路电压法、数据驱动法、多方法融合、观测器法等,各方法原理及优缺点汇总于表 3,其中多方法融合应用最多。

表 3 SOC 估算方法原理及优缺点
Tab.3 Principles and advantages and disadvantages of SOC estimation methods

方法	原理	优缺点
安时积分法	在初始时刻 $S_{\text{SOC},0}$ 的基础上估算电池的 SOC。通过计算一定时间内充放电电流和对应时间的积分,计算变化电量的百分比,最终求出初始 SOC 和变化的 SOC 之间的差,即剩余电量	由于安时计量存在误差,随着使用时间的增加,累计误差会越来越大,所以单独采用该方法对电池 SOC 进行估算并不能取得很好的效果
开路电压法	利用电池在长时间静置条件下开路电压与 SOC 存在相对固定的函数关系,通过开路电压估算 SOC	实际工况下不适用
多方法融合	采用闭环工作形式,基于电池等效模型,利用双扩展卡尔曼滤波技术、双自适应扩展卡尔曼滤波技术、鲁棒扩展卡尔曼滤波技术、粒子滤波技术等对电池荷电状态进行估算	计算精度较高,多种方法有机结合可以各取所长,保证估算结果的有效性
卡尔曼滤波法	建立状态和观测方程, SOC 是状态分量,可以用卡尔曼滤波算法进行 SOC 估算	卡尔曼滤波算法在经过多次更新后可以使估计结果很好地趋近真值,并很好地修正容量初值,抗干扰能力强,利用该方法理论上可以实现系统的动态估计
BP 神经网络法	使用最速下降法,通过反向传播不断调整网络的权值和阈值,使网络的误差平方和最小	实际中,由于算法复杂度导致硬件要求极高,所以将该方法应用到嵌入式的 BMS 产品中还有一段距离

SOH 表示电池健康状态。标准条件下,将充满电的电池以一定的放电倍率进行放电直至截止电压, SOH 等于老化电池在这种情况下可放出的最大电量与其出厂时对应的实际容量的比值,如式(2)所示。

$$S_{\text{SOH}} = \frac{C_{\text{now}}}{C_N} \times 100\% \quad (2)$$

式中, C_{now} 表示电池当前可放电量, C_N 表示出厂时实际容量。动力电池的健康状态由百分数表示,当电池的健康状态低于 80% 时,表示该电池已经不能达到正常使用标准。

目前,对于电池 SOH 的计算方法有直接放电法、电压特性曲线法、电化学阻抗法、内阻法、SOC 估算与 SOH 估算相结合法等。其中 SOC 估算与 SOH 估算相结合法应用最广,该方法通过建立等效

模型,利用卡尔曼滤波或数据训练法估计电池荷电状态,可保证 SOH 估算的可靠性。

2.2 电池状态防护与能量控制

磷酸铁锂电池在充电时需要限制电流以保证充电过程不会出现威胁人身安全的事故,如果达到额定电流或者额定电压则需停止充电以保障电池的使用寿命,在电池充电过程中还需要对充放电进行管理、控制,避免出现过充、过热等问题。

每个电池组由不同的单体电池组成,即使是同批次的电池也会在内阻、容量等方面存在差异,导致电池在充电过程出现部分电池未充满的现象,即电池不均衡现象,影响整个电池组的能效、寿命及安全性。

根据工程中能量消耗情况,电池均衡现象可以分为能量耗散型均衡系统和非能量耗散型均衡系统^[23],分类具体及应用场景如图 2 所示。

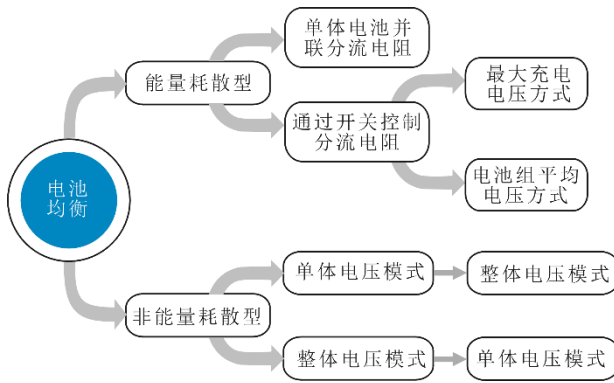


图 2 电池均衡具体分类及应用场景

Fig.2 Specific classification and application scenarios of battery balancing

由于电流的问题，能量耗散型均衡系统适用于电池容量较小的系统或能量可以及时补充的系统，例如宝马公司 ActiveE 混合动力汽车采用的就是带有能量耗散型均衡系统的 BMS。非能量耗散型均衡方式的电路结构比较复杂且能量消耗较少，由于安装成本、效率、扩展性等问题导致该系统并未完全投入生产使用。与非能量耗散型均衡系统的应用现状不同，能量耗散型均衡系统目前已经实现商业化且应用较为广泛。目前，关于电池均衡问题主要研究的是如何根据电动汽车的特点选取适用于不同应用场景的拓扑结构，并结合不同电路制定不同的均衡控制策略，最终可以在提高电池利用率的前提下缩短均衡时间、减少能量消耗。

3 磷酸铁锂电池安全防护技术

磷酸铁锂电池储能电站的能量管理系统（energy management system, EMS）负责管理电站的能量交互，管控所有锂电池单元的充放电和内部的均衡，但是目前还存在些许问题。例如：BMS 对锂电池的充放电控制阈值初始值设定无法更迭，电池老化后对电池状态估算出现偏差，电池寿命缩短，对电池老化出现异常的诊断缺乏等。这些问题均会直接或间接地造成储能电池的爆炸、失火等，所以需要 对 储能 电池的 安全 问题 提早 发现、提前 防护，保证 储能 系统 可以 安全 稳定 地 运行^[24-25]。

近年来，韩国报道的储能电站起火事件已近 30 起，经过相关事故调研及验证性测试，事故的主要原因可以分为电池系统缺陷、应对电气故障的保护系统不周、运营环境管理不足、储能系统综合管理体系欠缺 4 点。其中，电池内部及成组问题、外部电气故障、电池保护装置（直流接触器爆炸）、水分/粉尘/盐

水等造成的接触电阻增大及绝缘性能下降等问题将可能直接诱发电池热失控，而 BMS、PCS、EMS 之间信息共享不完备或不及时，PCS 和电池之间的保护配置与协调不当，PCS 故障修理后电池的异常，测量装置及管理系统之间发生冲突等系统管理问题，则可能使故障不能及时有效地得到管控而演化为事故。

由韩国储能事故可以看出，电池本体诱发安全事故的来源主要包括电池制造过程的瑕疵以及电池老化带来的储能系统安全性退化 2 个方面。外部刺激也会引起储能电站的火灾，主要包括绝缘失效造成的电流冲击及外部短路、电池外部件高温产热造成的热冲击，以及某电池热失控后触发的热失控蔓延过程等原因。

储能事故也与电站管理因素密切相关。管理系统因素不仅包括 BMS、PCS、EMS 以及对应的联动管控逻辑，也包括管理规章制度等人为因素。韩国储能系统安全事故大都是在充电完成后的高 SOC 状态下发生的，存在局部过充的可能性，这与管理系统的可靠性直接相关^[26]。

磷酸铁锂电池储能的整体安全可分为高安全电池本体、储能系统集成和应用过程安全管理以及配套设施等，具体如图 3 所示。其中，电池本体安全是目前研究的热点问题，储能电池预警、热失控、安全防护、消防技术均建立在电池本体安全管理的基础之上。

3.1 磷酸铁锂电池故障诊断技术

针对磷酸铁锂电池的安全性研究主要集中在分析电池安全影响因素以及故障诊断方面。通过研究电池本体、防护装置及监控装置，可以确保储能电池在出厂及后续使用过程中正常稳定运行。一般情况下，储能电池释放的能量和安全性成正比，放电越多，其风险越大。磷酸铁锂材料在温度达到 250 °C 以上才会出现放热现象，所以目前磷酸铁锂电池的应用较为广泛，尤以电动汽车行业应用最广泛、发展最迅速^[27]。

近年来，无论是储能电站还是新能源汽车的电池都发生过安全事故，尽管储能电站、新能源汽车的消防安全事故的起因并非全部来自电池，但电池本身必然是问题之一。因此，2019 年发布的《电力储能用锂离子电池》（GB/T 36276—2018），对于规范产业发展、引导电池制造企业技术转型与升级、消除信息不对称具有重要意义。该标准对于电力储

能用锂离子电池的评价以功率-能量参数体系为基准，与传统动力电池的电流-容量的参数体系大不

相同，提出对电池单体和电池模组热特性的检测及评价技术要求（表 4）。

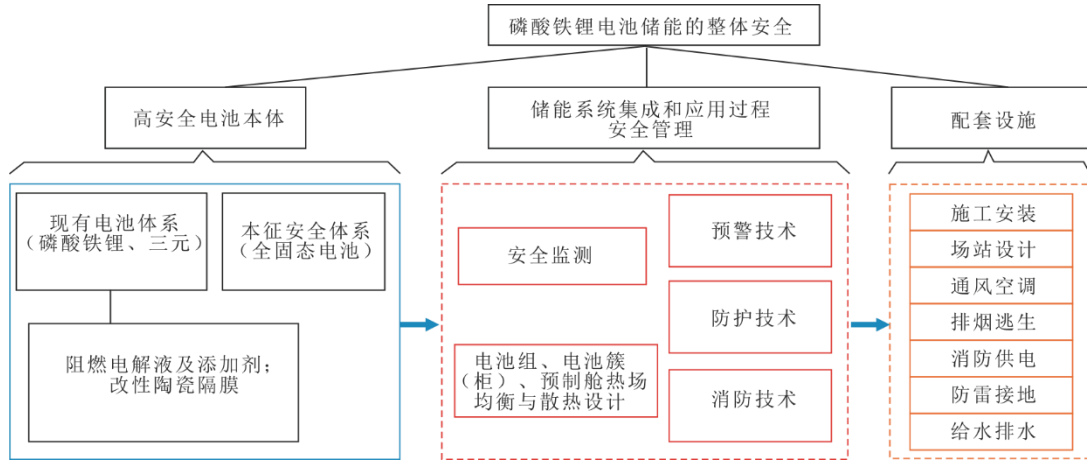


图 3 磷酸铁锂电池储能整体安全分类

Fig.3 Overall safety classification of lithium iron phosphate battery energy storage

表 4 GB/T 36276—2018 对电池单体和电池模组热特性的检测及评价技术要求

Tab.4 Technical requirements of test and evaluation for thermal characteristics of battery cells and battery modules in GB/T 36276—2018

产品类型	安全性能测试	技术要求	备注
电池单体	过充电	不应起火、爆炸	电触发热失控
	过放电		
	短路		机械触发热失控
	挤压		
	跌落	环境触发热失控	
	低气压		不应起火、爆炸、漏液
加热	不应起火、爆炸	热触发热失控	
热失控			
电池模块	过充	不应起火、爆炸	电触发热失控
	过放		
	短路		机械触发热失控
	挤压		
	跌落	环境触发热失控	
	盐雾与高温		不应起火、爆炸、漏液、外壳无破裂
	高湿		
热失控扩散	热触发热失控		

电池应用领域出现的安全问题并不只是电池本身的问题，而包括从电芯化学体系的设计、生产过程的一致性，电芯全生命周期管理，到配套 BMS 设计与实施，电芯、电池包连接结构设计，甚至包括应用中的消防安全措施等一系列问题。文献[28]分析了影响电池使用寿命及安全的相关因素，制定了温度控制策略保证电池的安全。文献[29]通过对锂离子特性进行研究，建立了成组电池模型，讨论

了单一的电池不一致性对电池寿命的影响，指出在出厂时需要对电池进行筛选，并时常对电池进行维护、加装均衡系统保证电池电压的一致性^[30-31]。

电池系统一般由多个单体电池构成单节电池，再将单节电池组成电池组，以满足系统电压要求。储能系统需要配备故障诊断系统、故障应急措施来实现电池的安全防护。国内对于故障诊断系统已有相应研究：文献[32]通过最小二乘法估算电池阻值，基于信息熵表征电池连接故障；文献[33]通过在线估算电池内阻来诊断电池故障；文献[34]假设在恒定电流下单节电池充放电电压曲线相近，利用充放电曲线的变化来表征电池故障。但这些方法只是基于电池本身分析电池故障，并未考虑实际情况中外界因素对电池的影响。

3.2 磷酸铁锂电池热失控检测技术

锂电池热失控问题的防控是系统工程，是多种技术措施共同作用的结果。热失控防控应秉持预防为主、灭火为辅的设计理念。动力电池是储能单元，其火灾是由内存的电能和化学能转化而来，当电能和化学能消耗未尽时，其热量处于持续释放阶段，特别是发展后热失控扩展阶段，灭火效果极为有限^[35]。热失控阶段的控制非常重要，如阻燃材料的使用、电解液中阻燃剂的添加、热失控阶段电池的使用策略、热管理措施等。这些措施的目的是保障电池的状态不再持续恶化。

磷酸铁锂的橄榄石结构具有高温稳定性。在热失控的化学反应中，在电解液喷出前大量发生的是

分解反应，而非氧化反应，该过程产生气体少且慢，电池发生鼓包胀气而非剧烈燃烧，因此磷酸铁锂电池相对安全，但这并不意味着磷酸铁锂电池不发生热失控和燃烧。当热失控导致防爆膜破裂，继而电解液喷出，温度快速达到电解液燃点，电解液燃烧，继而引燃电芯包裹材料等其他可燃物，进而加剧热量的散发，导致其他电芯发生热失控连锁反应。易燃物燃烧过程中，热失控电芯持续发生反应放热，产生大量有毒可燃烟气，具有爆炸风险。

对于电池的热失控状态预警技术目前国内已有相应研究，由于引发电池热失控的因素很多，根据其不同特点可以通过不同监控系统来判断储能电池是否处于热失控状态，具体如图 4 所示。

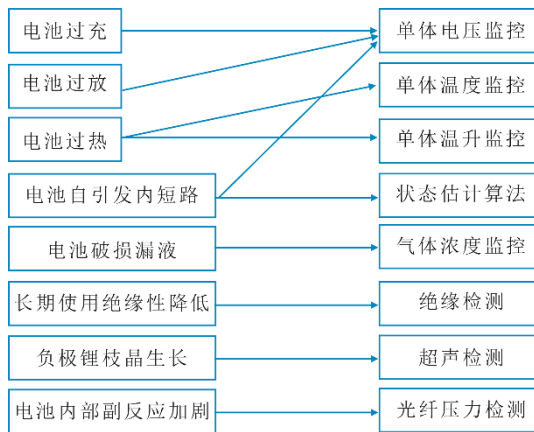


图 4 不同因素引发的热失控采用的不同监控系统
Fig.4 The monitoring systems used for thermorunaway caused by different factors

对于磷酸铁锂电池的热失控，多采用热管理技术确保电池系统工作在适宜温度范围，该系统由导热介质、测控单元及温控设备构成。

导热介质与电池组接触后通过介质的流动将电池系统内产生的热量散发至外界环境中，通过调节磷酸铁锂电池的工作温度，尽量使其工作在最适宜温度范围，发挥电池组的能力，延缓电池老化。导热介质主要有空气、液体与相变材料 3 大类。

动力电池的散热系统可以分为空气散热系统、液冷散热系统、固体相变材料散热和热管散热等方式。空气散热系统通过使空气流经电池表面带走动力电池所产生的热量，达到对动力电池组散热的目的。空气散热系统可分为自然对流散热和强制通风散热 2 种方式。当前动力电池空气散热系统主要有串联式和并联式 2 种系统，但该种方式效果较差，很难达到较高的电池均温性，目前应用并不广泛。

动力电池的液冷散热系统是指制冷剂直接或间接地接触动力电池，然后通过液态流体的循环流动将电池包内产生的热量带走，从而达到散热效果的一种散热系统。其制冷剂可以是水、水和乙二醇的混合物、矿物质油、R134a（1，1，1，2-四氟乙烷）等。这些制冷剂因具有较高的导热率，散热效果明显，应用较为广泛。特斯拉的电池包采用水和乙二醇的混合物的液冷方式散热，宝马系列车型采用 R134a 进行散热。

空气散热系统和液冷散热系统各有特点，具体见表 5。

表 5 空气散热系统和液冷散热系统的优缺点对比
Tab.5 Comparison of advantages and disadvantages of air cooling system and liquid cooling system

项目	空气散热系统	液冷散热系统
优点	①结构简单，重量较小； ②发生漏液的可能性小； ③有害气体产生时能有效通风； ④成本较低	①传热更有效； ②电池包温度均匀性好； ③可与电动汽车的冷区系统集成在一起； ④与电池壁面之间热交换系数高、冷却快； ⑤体积小
缺点	①空气与电池组内部分布复杂； ②与电池壁面之间热交换系数低，冷却、加热速度慢； ③吸入的空气必须滤掉路面上的尘土和水； ④受环境温度影响较大	①存在漏液的可能； ②重量相对较大； ③维修和保养复杂； ④架构相对复杂； ⑤系统设计复杂

4 磷酸铁锂电池集成化发展机制建议

1) 磷酸铁锂电池从生产到应用应统一技术标准，且设计的方案应该通用化，以保证储能电池在全寿命周期内的正常使用。

2) 实际应用过程中影响电池性能的因素包括电池外包装、电池包、结构设计、制造工艺、电热管理等，需要根据实际工程的需求以安全为首要因素设计电池及其系统结构。

3) 应采用高精度设备制造电池，加强生产全过程监测，开发智能化电池管理系统，并根据实际使用条件设计、利用磷酸铁锂电池。

4) 磷酸铁锂电池管理系统的整体设计需要结合电芯使用情况并做好热管理系统研制与开发，且在电芯的成组阶段就需要良好的结构设计以保证机械安全和热安全性。

5) 磷酸铁锂电池的安全防护应从电池本体开始检测，贯穿到全寿命周期，以免在使用过程中发生安全事故，危及储能电站的总体安全。

[参考文献]

- [1] 汪伟伟, 丁楚雄, 高玉仙, 等. 磷酸铁锂及三元电池在不同领域的应用[J]. 电源技术, 2020, 44(9): 1383-1386. WANG Weiwei, DING Chuxiong, GAO Yuxian, et al. Application of LFP and NCM batteries in different fields[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(9): 1383-1386.
- [2] 郝晋阳. 锂电池储能系统直流侧短路保护方案研究[J]. 自动化应用, 2020(8): 85-87. HAO Jinyang. Research on the short-circuit protection scheme of the DC side of the lithium battery energy storage system[J]. Automation Application, 2020(8): 85-87.
- [3] 张超. 储能技术在电力系统中的应用现状与前景[J]. 现代工业经济和信息化, 2019, 9(11): 70-71. ZHANG Chao. Application status and prospect of energy storage technology in power system[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2019, 9(11): 70-71.
- [4] 刘洋, 陶风波, 孙磊, 等. 磷酸铁锂储能电池热失控及其内部演变机制研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1333-1343. LIU Yang, TAO Fengbo, SUN Lei, et al. Research of thermal runaway and internal evolution mechanism of lithium iron phosphate energy storage battery[J]. High-Voltage Technology, 2021, 47(4): 1333-1343.
- [5] 张宝锋, 童博, 冯仰敏, 等. 电化学储能在新能源发电侧的应用分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 13-18. ZHANG Baofeng, TONG Bo, FENG Yangmin, et al. Application analysis of electrochemical energy storage technology in new energy power generation side[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 13-18.
- [6] 龙云波, 张曦, 张持. 一种采用 DAB 接口的锂电池储能不间断电源[J]. 电工技术, 2020(15): 97-99. LONG Yunbo, ZHANG Xi, ZHANG Chi. A Li-battery based uninterrupted power supply with DAB interface[J]. Electric Engineering, 2020(15): 97-99.
- [7] 汪惟源, 朱寰, 高正平, 等. 储能锂离子电池高温循环衰减机制分析[J]. 电源技术, 2020, 44(7): 948-951. WANG Weiyan, ZHU Huan, GAO Zhengping, et al. Analysis of high temperature cycle attenuation mechanism of energy storage lithium ion battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(7): 948-951.
- [8] 林鸿业, 康龙云, 卢楚生, 等. 基于电感储能的新型锂离子电池组 C2C 均衡电路[J]. 电力电子技术, 2020, 54(7): 39-41. LIN Hongye, KANG Longyun, LU Chusheng, et al. A novel lithium-ion battery pack C2C equalization circuit based on inductive energy storage[J]. Power Electronics, 2020, 54(7): 39-41.
- [9] 石琼林, 郭东旭, 杨耕, 等. 具有磷酸铁锂电池负极特征的 SOC 区间的确定方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4097-4105. SHI Qionglin, GUO Dongxu, YANG Geng, et al. A method to determine characteristic region of negative electrode with state of charge for lithium-ion battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4097-4105.
- [10] 秦凯, 孙新华, 杨良君, 等. 高比能磷酸铁锂电池电解液浸润性能改善研究[J]. 电源技术, 2020, 44(8): 1099-1101. QIN Kai, SUN Xinhua, YANG Liangjun, et al. Improvement of electrolyte wettability of high specific energy LiFePO₄ battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(8): 1099-1101.
- [11] 吕品. 储能技术在现代电力系统中的应用研究[J]. 南方农机, 2017, 48(23): 82-83. LYU Pin. Research on application of energy storage technology in modern power system[J]. Southern Agricultural Machinery, 2017, 48(23): 82-83.
- [12] 闫丹. 电流波动下锂离子电池模型参数与荷电状态估计算法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 12-14. YAN Dan. Research on model parameters and state-of-charge estimation algorithms of Li-ion battery under current fluctuation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 12-14.
- [13] 刘畅. 锂电池与超级电容混合储能系统的优化配置与能量管理[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 10-20. LIU CHANG. Optimal configuration and energy management of lithium battery and supercapacitor hybrid energy storage system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 10-20.
- [14] 彭建华, 潘继雄, 周幼华. 磷酸铁锂电池能量转移均衡策略及其电路研究[J]. 电源技术, 2020, 44(6): 875-879. PENG Jianhua, PAN Jixiong, ZHOU Youhua. Study on energy transfer equalization strategies and its circuit implementation for lithium iron phosphate battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(6): 875-879.
- [15] LIAO X P, MA C, PENG X B, et al. A framework of optimal design of thermal management system for lithium-ion battery pack using multi-objectives optimization[J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2020, 18(2):1-24.
- [16] KIANI M, OMIDDEZYANI S, HOUSHFAR E, et al. Lithium-ion battery thermal management system with Al₂O₃/AgO/CuO nanofluids and phase change material[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115840.
- [17] 周洪宇, 肖佳鹏. 基于高斯过程回归组合核函数的磷酸铁锂电池荷电状态估算[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(8): 87-91. ZHOU Hongyu, XIAO Jiapeng. Estimation for state of charge of lithium iron phosphate battery based on gaussian process regression with composite kernel function[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020, 58(8): 87-91.
- [18] 陈勇军. 磷酸铁锂电池建模及 SOC 算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 20-36. CHEN Yongjun. Research on modeling and SOC algorithm of lithium iron phosphate battery[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 20-36.
- [19] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5. ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5.
- [20] 刘红锐, 张昭怀. 锂离子电池组充放电均衡器及均衡策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 186-192. LIU Hongrui, ZHANG Zhaohuai. The equalizer of charging and discharging and the balancing strategies for lithium-ion battery pack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 186-192.
- [21] 冯飞, 宋凯, 逯仁贵, 等. 磷酸铁锂电池组均衡控制策略及荷电状态估计算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 22-29. FENG Fei, SONG Kai, LU Rengui, et al. Equalization control strategy and SOC estimation for LiFePO₄ battery pack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 22-29.

- [22] 尹安东, 张万兴, 赵韩, 等. 基于神经网络的磷酸铁锂电池 SOC 预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(5): 433-437.
YIN Andong, ZHANG Wanxing, ZHAO Han, et al. Research on estimation for SOC of LiFePO₄ Li-ion battery based on neural network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(5): 433-437.
- [23] 侯湘怡. 电动汽车磷酸铁锂电池均衡管理策略综述[J]. 内燃机与配件, 2020(4): 241-242.
HOU Xiangyi. Overview of balancing management strategies for lithium iron phosphate batteries for electric vehicles[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(4): 241-242.
- [24] 曹步德. 磷酸铁锂电池模型的研究[J]. 时代汽车, 2020(16): 149-150.
CAO Bude. Research on lithium iron phosphate battery model[J]. Auto Time, 2020(16): 149-150.
- [25] 黄军伟, 娄盼盼, 翟思捷, 等. 站用磷酸铁锂电池安全防护技术的研究[J]. 电子世界, 2020(17): 59-60.
HUANG Junwei, LOU Panpan, ZHAI Sijie, et al. Research on safety protection technology of lithium iron phosphate battery for station[J]. Electronics World, 2020(17): 59-60.
- [26] 曹文炆, 雷博, 史尤杰, 等. 韩国锂离子电池储能电站安全事故的分析及思考[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1539-1547.
CAO Wenfeng, LEI Bo, SHI Youjie, et al. Ponderation over the recent safety accidents of lithium-ion battery energy storage stations in South Korea[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1539-1547.
- [27] 韦旭芳. 石墨烯改善磷酸铁锂正极材料倍率性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 5-16.
WEI Xufang. Graphene to improve the rate performance of lithium iron phosphate cathode materials[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018: 5-16.
- [28] 王震坡, 孙逢春. 电动汽车电池组连接可靠性及不一致性研究[J]. 车辆与动力技术, 2002(4): 11-15.
WANG Zhenpo, SUN Fengchun. Study of the EV battery pack reliability and asymmetry[J]. Vehicle & Power Technology, 2002(4): 11-15.
- [29] 赵凯清. 基于电池安全与寿命的 PHEV 控制策略研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012: 7-30.
ZHAO Kaiqing. Research on PHEV control strategy based on battery safety and life[D]. Jilin: Jilin University, 2012: 7-30.
- [30] 赵翔宇. 废旧磷酸铁锂电池回收处理的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 16-19.
ZHAO Xiangyu. Research on the recovery and treatment of waste lithium iron phosphate batteries[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018: 16-19.
- [31] 李玉广. 磷酸铁锂电池仓安全报警与控制系统设计[J]. 电源技术, 2019, 43(3): 458-459.
LI Yuguang. Design of fire detection and control system for lithium iron phosphate battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(3): 458-459.
- [32] BOHLEN O, BULLER S, DONCKER R W D, et al. Impedance based battery diagnosis for automotive applications[C]. 2004 IEEE 35th Annual Conference on Power Electronics Specialists.
- [33] ZHENG Y, HAN X, LU L, et al. Lithium ion battery pack power fade fault identification based on Shannon entropy in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 223: 136-146.
- [34] 华君叶, 廖以燕, 李贵, 等. 风光互补发电系统性能实验研究[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 25-30.
HUA Junye, LIAO Yiyen, LI Gui, et al. Experimental study and optimal design on operational performance of solar wind complementary system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 25-30.
- [35] 吴静云, 郭鹏宇, 黄峥. 磷酸铁锂储能电站电池预制舱消防系统研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(4): 500-502.
WU Jingyun, GUO Pengyu, HUANG Zheng. Study on fire prevention and control strategy of battery prefabrication cabin in Lithium Iron Phosphate storage power station[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(4): 500-502.

(责任编辑 李园)