

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.11.002

磷酸铁锂电池内短路检测方法研究综述

董志国¹, 韩长江², 孙浩然^{2*}, 唐茂林¹, 王 溯¹

(1. 国家能源集团青海电力有限公司, 青海 西宁 810001; 2. 北京交通大学, 北京 海淀 100044)

摘要: 锂离子电池内短路是锂离子电池热失控事故中最常见的诱因之一,也是机械滥用、电滥用、热滥用等不当使用行为的共性环节,它是潜在的安全威胁,已成为制约储能系统安全运行的重要隐患。本研究首先从电池内部结构缺陷、机械滥用、电滥用和热滥用四种情形出发,详细分析储能电池内短路的形成机理。随后,综述当前国内外在储能电池内短路检测领域的研究进展,并对常见的检测方法进行归纳总结,这些方法主要包括模型驱动法、数据驱动法、多方法融合内短路检测法以及新技术内短路检测法,同时,对这些方法的适用场景、优势与局限性进行了对比。最后,总结分析目前锂电池内短路检测方法存在的不足,并对未来的内短路诊断方法的研究进行展望。

关键词: 储能锂电池; 内短路; 发生机理; 故障检测

中图分类号: TM911

文献标志码: B

文章编号: 1007-9904(2024)11-0015-12

A Review of the Research on the Detection Dethod of Short Circuit in Lithium Iron Phosphate Battery

DONG Zhiguo¹, HAN Changjiang², SUN Haoran^{2*}, TANG Maolin¹, WANG Su¹

(1. Qinghai Electric Power Co., Ltd., National Energy Group, Xining 810001, China;

2. Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

Abstract: Internal short circuit in lithium-ion batteries is one of the most common causes of thermal runaway accidents in lithium-ion batteries, and it is also frequently associated with improper use behaviors such as mechanical abuse, electrical abuse, and thermal abuse. It is a potential safety threat and has become an important hidden danger that restricts the safe operation of energy storage systems. This study first analyzes the formation mechanism of internal short circuit in energy storage batteries from four scenarios: internal structural defects, mechanical abuse, electrical abuse, and thermal abuse. Subsequently, this paper reviews the current research progress in the field of short circuit detection in energy storage batteries, both domestically and internationally. It summarizes the common detection methods, which primarily include model-driven method, data-driven method, multi-method fusion internal short circuit detection method and new technology internal short circuit detection method, and compares the application scenarios, advantages and limitations of these methods. Finally, the shortcomings of the current internal short circuit detection methods of lithium batteries are summarized and analyzed, and the future research of internal short circuit diagnosis methods is prospected.

Keywords: lithium battery; internal short circuit; mechanism; fault detection

0 引言

随着能源需求的不断增长和可再生能源的快速发展,储能技术逐渐成为解决能源存储和供应不稳

定性的关键领域。储能电池,作为一种重要的储能技术,具有高能量密度、长寿命和环境友好等优点,已经广泛应用于电动汽车、可再生能源系统和电网储能等领域。2023年全球储能市场的累计装机功率达到294.1 GW,市场发展异常迅猛。在总量中,新型储能技术的装机量约为88.2 GW,占比30%,显示出强劲的增长势头。值得关注的是,锂离子电池技术在新型储能装机领域占据了92.7%的比例^[1],其市场

基金项目: 国家能源集团科技项目“千万千瓦级全清洁能源安全自主可控智能管控系统研究与工程示范项目”(GJNY-22-108)。
Science and Technology Project of National Energy Group “Research and Engineering Demonstration Project on Safe, Autonomous and Controllable Intelligent Control System of Clean energy”(GJNY-22-108).

主导地位在行业竞争中遥遥领先。

然而,锂离子电池在实际应用中仍面临着一系列的安全隐患,其中最为严重的安全问题之一就是内短路。锂离子电池内短路是指电池内部正负极之间或正负极与电池壳体之间发生直接接触,导致电流短路流过的现象。内短路的发生可能会引发电池的过热、爆炸甚至火灾等严重后果,对人身安全和财产造成巨大威胁。

本文旨在综述磷酸铁锂电池内短路形成机理和检测方法的研究进展,通过对已有文献的综合分析和总结,介绍磷酸铁锂电池内短路的形成机理和当前已经研发的各种短路检测方法,并评估其优缺点。最后,对目前技术的不足和未来的研究方向进行分析,以期为磷酸铁锂电池的安全性和可靠性提供有益的参考。

1 磷酸铁锂内短路发生机理

内短路故障的诱因多种多样,既可以是内部缺陷、机械挤压,也可以是过充电、过放电和过热使用等。结合已有的相关研究,可将引发内短路的主要因素分为:内部缺陷、机械滥用、电滥用和热滥用,如图1所示^[2]。

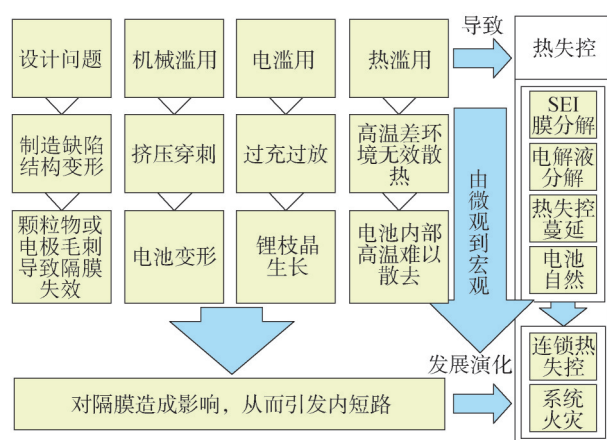


图1 内短路故障诱发因素

Fig.1 Inducing factors of internal short circuit faults

1.1 内部缺陷引发内短路

电池内部缺陷与电芯的设计结构和制造工艺密切相关,在生产过程中出现电池内部的物理或化学缺陷,如颗粒结构不均匀、电极材料结构变形、电解

质渗漏等^[3],这些缺陷可能导致电池内部的直接接触或电池组件之间的短路,因此研究电池内部缺陷具有重要的意义。

1.1.1 金属颗粒异物导致的电池内短路

金属颗粒缺陷并不像热滥用、机械滥用一样,可以在外部特性上显示出明显的异常变化^[4],这些金属颗粒可能来自电池制造过程中的杂质,或者是在使用过程中由外部环境引入的。金属颗粒异物导致内短路的机理主要包括两个方面:

1)物理短路。较大的金属颗粒可能直接刺穿隔膜,导致正负极之间发生短路。这种情况下,金属颗粒的尺寸是一个关键因素。如果颗粒足够大,它们可以穿透隔膜并直接接触到对面的电极,从而形成短路通道。

2)化学溶解短路。在充电过程中,正极电位升高,金属颗粒可能会溶解。溶解后的金属离子通过电解液扩散到负极,在负极表面析出并堆积。随着时间的推移,这些沉积物可能会增长并最终刺穿隔膜,形成短路。这种机理涉及金属颗粒的溶解、离子的迁移和沉积过程。

电池内部出现铜颗粒物是最常见和最危险的内部缺陷之一,铜颗粒在正极溶解后,沿隔膜孔隙沉积到负极,最终连接正负极引发内短路^[5]。Kong等人为了制造出符合实际的电池制造产生的缺陷,在电池导流线上将颗粒异物植入电池内部来进行实验,最终揭示了不同粒径的异物对电池造成的内短路损坏结果^[6],需要指出的是由于异物引起的内短路也可能受到电池材料体系、环境温度等因素的影响,因此本文提出的预警方法需要更多的验证。

1.1.2 形态缺陷导致的电池内短路

形态缺陷可以包括电极材料的结构变形、颗粒聚集、孔隙形成等。这些形态缺陷可能导致电池内部的电流集中、电解质渗透或电极分离,从而引发内短路。Heo等人研究得出,在分析锂电池内部的微观结构的稳定性和演化动力学时必须考虑界面缺陷^[7],这是导致内短路的一个重要因素。Xia等人研究得出,电池内部的形态缺陷将会导致电池发生潜在的故障风险,这些内部形态缺陷的发展需要与电池内部机械应力相关的多尺度化学-机械相耦合。机械应力通过裂纹处释放,破坏了电子和离子的扩散途径,并更容易使得电极与电解液发生副反应,严

重时可能导致内短路^[8]。

1.2 机械滥用引发内短路

储能电站发生事故后会对电池造成挤压、穿刺和碰撞等^[9]。挤压和碰撞是机械滥用的两种常见形式,在发生机械滥用过程中可能会使电池内部隔膜失效发生内短路。从而引起电池内部发生剧烈的电化学反应,导致内部温度急剧升高,最终发生热失控(thermal runaway, TR)现象。

碰撞发生时,电池之间、电池和外部机械结构之间会产生挤压导致电池外部发生形变。随着进一步发展,电池的內部结构也会发生改变,使电池内部结构失效,发生严重的内短路事故。当外部挤压力超过电池材料的承受极限时电极材料就会产生裂纹,裂纹进一步扩散会导致集流体层发生断裂^[10]。Shao等^[11]通过碰撞实验说明电池包局部会产生挤压形变,从而研究单体电池在底板被破坏情况下内短路的产生机理,分别对单体电池和电池组进行了碰撞试验,比较两种情况下电池的失效阈值的大小以及承载能力的强弱。

穿刺也是常见的一种机械滥用。穿刺导致的内短路通常有:正极集流体和负极、正极集流体和负极集流体、正极和负极以及正极和负极集流体接触导致的内短路。Yin等^[12]采用一种省时、经济的钉子穿透实验的研究方法,建立了耦合一维电池模型、三维力学模型和内短路模型的综合模型。通过改变钉子的大小、形状、针刺位置以及电池容量对不同情况下的穿刺现象进行了较为全面的仿真研究。冯旭宁等人^[13]对不同材料的单体锂离子电池进行了针刺实验,对不同容量下的电池的内短路情况进行了对比分析。

1.3 电滥用引发内短路

电滥用是锂离子电池使用时常见的安全隐患之一,首先,引起电滥用的主要因素是电池的过充电和过放电^[14]。

1) 过充电。

过充电是锂离子电池最严重的安全问题之一,过充电是指电池在达到截止电压后仍继续充电,通常由于电池充电器故障或电池管理系统(battery management system, BMS)对电池状态检测不准确,这就导致电池过充电十分常见却不易被察觉。电池经过多次充放电循环后,过充电的电池内部会出现

微短路,若内短路进一步扩大成TR会导致安全事故发生,因此需要对电池过充电特性进行研究。现有针对电池过充电的研究有很多, Ren等^[15]分析了电池在1/3C至1C低倍率充电时,散热条件有约束和无约束情况下的过充电行为和失效机理,研究表明,低倍率充电电流对电池的过充电行为影响很小,电池上的泄压阀以及良好的散热性能可以改善电池的过充电性能。Wang等^[16]对4种正极材料锂电池的过充电实验中,研究发现磷酸铁锂电池的TR时间相较于其他电池较短,这表明其耐过充电性能相对较差。欧阳明高等人^[17]研究发现过充电会导致电池内阻增加、产热增多,当温度达到一定程度时,电解质会发生氧化、隔膜被破坏,从而形成内短路。Mao等^[18]利用先进的扫描电镜和电感耦合等离子体-发射光谱仪,对锂离子电池在过充电循环后的热行为、结构和电极材料进行了深入研究,研究发现,过充电会导致电池内部结构发生变化,电极材料出现裂纹和脱落等现象造成内短路。大量研究表明,电池在过充电情况下会发生内短路,进一步发展可能会导致电池过热而发生TR,造成不可控的局面。

2) 过放电。

过放电是指电池的电压降低到低于规定的截止电压时,电池仍然在放电的状态。电池过放电导致的内短路初期产热不明显,电压变化也很小,不易通过常规的方法进行检测。为解决电池过放电造成的内短路问题,国内外的学者做了大量的研究。Ouyang等^[19]研究表明,在过放电过程中,电池隔膜可能会被不断生长的金属枝晶穿透,从而导致电池内部短路。叶佳娜^[20]研究探讨了在特定条件下电池过放电的热特性及失效机制,解释了电池在过放电过程中如何产生热量以及为何会失效,实验结果表明,在过放电过程中,负极的温度始终高于正极,这种温度差异可能导致电池内部发生内短路。郑岳久、孙林等^[21]研究了过放电程度不同的电池内短路变化规律,结果表明,随着过放电程度的加深,电池内短路的严重程度呈现非线性增长的趋势。

1.4 热滥用引发内短路

当锂电池被过度加热或温度异常时,其内部组件可能会受到损坏或变形,导致正负极之间出现短路。文献[22]表明,在高温环境下,电池负极上的一些不稳定物质会发生分解反应,产生热量和氧气。

产生的热量进一步加剧了温度上升,而氧气则会氧化电解质,加重了副反应的发生^[23]。这个过程导致电池温度升高,促使电池内部发生水解反应和热解反应,进而加速隔膜分解,最终可能引发内部短路。Feng等人^[24]提出了TR的3个特征温度, $\{T_1, T_2, T_3\}$,表征锂电池关键TR特性, T_1 代表产热异常的起始温度,即发生产热异常的时刻; T_2 为电池TR的触发温度,选择缓慢升温 and 急剧升温临界点; T_3 为电池在TR过程中达到的最高温度。在高温条件下,锂电池内部相继发生一系列放热反应,进一步产生大量热量,形成自加速的"热-温度-反应"循环,最终导致电池TR^[25],这种循环被称为HTR回路,是导致电池发生TR的主要原因,热滥用是电池TR的直接原因^[26]。

2 内短路检测方法

锂离子电池发生内短路,会对电池安全带来极大的威胁,内短路不仅可以使电池的性能下降,而且在发展到一定时期会引发TR等难以控制的故障,极大程度地损害电池。为了对内短路进行全面、综合检测与识别,本文将分别对基于模型驱动、基于数据驱动和多方法融合的内短路检测方法进行阐述,如图2所示^[27]。

2.1 基于模型驱动的内短路检测方法

基于模型的故障诊断是一种通过测量或应用自适应滤波器/观测器的方法,将系统模型与故障模型进行比较,以获取残差信号并对其进行评估,这种评估包括状态评估、参数辨识和等价空间等方面的处理。

1) 基于等效电路模型的内短路检测技术。

等效电路电池模型专门针对BMS开发和功率管理控制等应用进行了研究,等效电路模型不考虑锂电池内部的化学部分,采用理想电路元件不同组合方式,模拟锂电池的充放电过程和动态特性^[28],常见的锂电池等效电路有Rint模型、一阶RC模型、二阶RC模型等,电路模型如图3所示^[28]。虽然Rint模型是一个基本且简单的模型,但并不是所有电池的动态行为都可以用这个模型来表示,因此它不适合于任何动态操作中荷电状态(state of charge, SOC)的精确测定;Thevenin模型不能很好地表征锂离子电池的动态特性;通过附加一个二级RC网络,可以非常精确地估计锂离子电池的动态特性^[29]。Wang等

人^[30]建立了一个考虑温度和SOC变化的锂离子电池二阶等效电路模型,提出了一个新的SOC估计策略,能够在广泛的温度范围内获得高估计精度,但在低温条件下模型参数识别的准确性较低,在实际应用中对大量数据的需求可能会限制其应用范围。

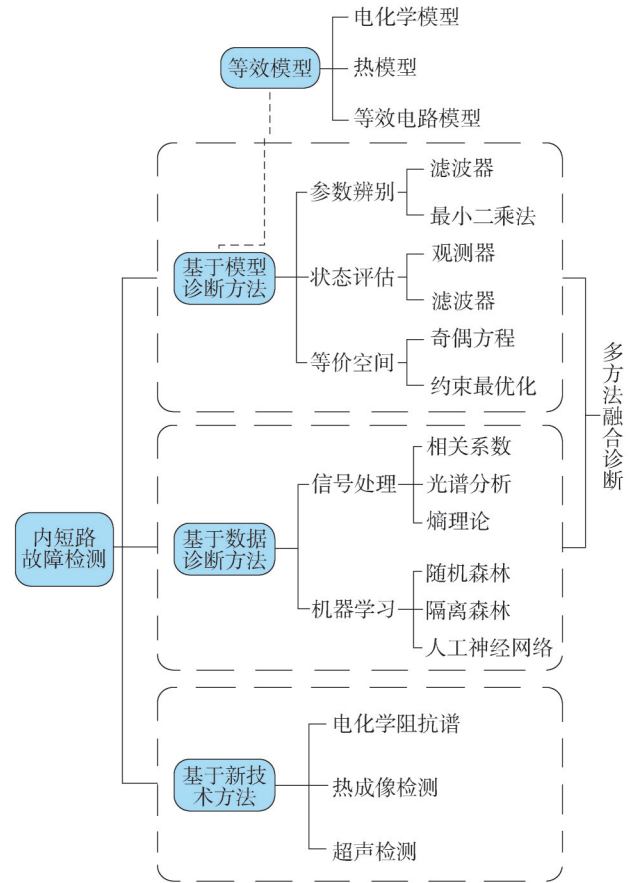


Fig.2 Internal short circuit detection method

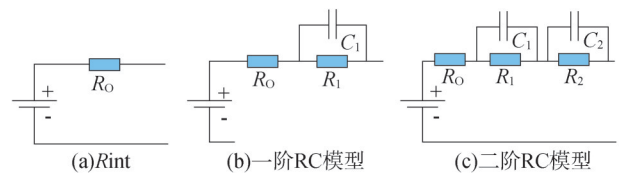


图3 电路等效模型

Fig.3 Equivalent circuit model

健康状态(state of health, SOH)和SOC等参数无法通过传感器直接测量。因此,需要基于模型的估计算法来确定这些参数。Ouyang等人^[31]提出了一种基于电池一致性的内部短路(internal short circuit,

ISCr)检测方法,使用等效电路模型来分析ISCr的电气特性,采用递归最小二乘算法,基于均值差异模型来估计ISCr的特征参数,但该方法需要一定的时间来检测ISCr,特别是在高内阻ISCr的情况下,并可能会出现误检测。Cao等人^[32]构建了考虑自放电效应的SDE-2-RC模型,结合基于有限记忆多创新最小二乘法算法和自适应卡尔曼滤波算法,实现了SOC的快速收敛和强跟踪性能,但该算法计算的复杂性有待简化。

2) 基于电化学和热模型的内短路检测方法。

基于电化学和热模型的内短路检测方法结合了电池的电化学特性和温度变化的监测,以实现电池内部短路情况的监测和诊断。Geng等人^[33]提出了一种新的P2D模型实现方法,通过传输线电路结构来模拟电池内部的电流分布,同时保留了物理模型的准确性,模型可以帮助理解电池内部不同过程对过电位的贡献,为电池设计和诊断提供了有用的工具。

Yang等^[34]介绍了一种利用变换矩阵的内短路检测方法和改进的状态空间模型的内短路电阻计算方法。通过变换矩阵的描述能力,可以捕捉电池组中内短路单体的倾斜和向下的电压模式,同时实现了内短路检测和内短路评估。何晋等人^[35]选取极化内阻作为电池内短路的特征参量,采用带遗忘因子的递归最小二乘法对极化内阻进行在线辨识,实现对整个生命周期的内短路判别。可以在退役电池等已经老化的电池组中将发生内短路的磷酸铁锂电池挑选出来。Hu J等人^[36]提出一种基于模型的自诊断方法,利用实测终端电压和负载电流进行锂电池在线内短路检测,使用系统的传递函数,为故障单元模型创建了一个离散时间回归模型,并在此基础上实时调整电学模型参数,以确保模型的准确性。Feng等人^[37]提出了一种基于模型的估计算法,将内短路检测转化为一个参数估计问题,并对该算法进行了评估。该股及算法能够实时跟踪参数变化,使得跟踪内短路发展状态或检测瞬间触发的内短路变得可行。此外,观察到记录的温度剖面不受内短路发生位置的影响,这是由于电池芯各向异性热传导引起的温度分布呈椭圆形。因此该算法可以检测出内短路,且不论内短路在电池内部的具体物理位置如何,并没有进行实验以验证内短路检测算法。

Liu等人^[38]建立了三元电池电化学-热-内短路耦合机理模型,并结合深度学习算法建立锂电池内短路诊断模型,但该模型无法进行实际准确性的验证。Zheng等人^[39]提出了一种基于交互信息的故障识别方法,针对微短路(micro short circuit, MSC)、低容量和初始SOC差异电池,建立了基于决策树的故障诊断方法,通过扩展卡尔曼滤波算法定量计算SOC偏差和平均SOC之间的相关性,来识别MSC单元和低容量单元。但是对大容量储能电池方面的检测还不完善。

综合分析,模型方法基于电池内部物理和化学过程的建模,可以提供对内短路形成机制的物理解释,通常基于电池的电压、电流和温度等常规测量数据,无需对电池进行特殊的操作或干预,因此具有非侵入性。这使得模型方法可以在实际应用中方便集成到BMS中,可以监测电池内部物理和化学状态的变化,并识别潜在的内短路风险,相比其他传感器或测试设备,模型方法通常具有更高的效率和较低的成本,特别是在大规模应用中。尽管基于模型的方法在锂电池内短路检测方面具有潜力,但是由于电池使用环境的变化和老化等因素,参数估计可能存在误差,影响检测的准确性,并且,建立和使用复杂的电化学和热模型需要较高的计算资源和算法复杂度,这可能限制了模型方法在实时应用和嵌入式系统中的可行性。

2.2 基于数据驱动的内短路检测方法

1) 基于机器学习的内短路检测方法。

基于机器学习的内短路检测方法是基于数据驱动检测方法的一种。由于储能电池BMS的存在,在电池使用过程中采集了大量的运行数据以及数据精度的提升。在电池内短路、一致性检测等方面采用机器学习算法已经较为普遍。但是其中大多是采用实验数据和仿真数据,能够把实际电池运行数据应用其中的算法较少。基于机器学习的内短路算法如图4所示。

基于机器学习的内短路检测方法都具有较高的准确率。潘岳等^[40]提出一种锂离子电池在处于长周期运行时的内短路检测方法,借助聚类算法通过识别发生内短路时电路的异常温升以及自放电效应等,实现发生内短路电池的准确定位。此方法具有较高的准确率和较低的出错率。Yang等^[41]提出了

一种基于随机森林的有效分类算法,用于检测外部短路故障实验中电解液的泄漏问题。Naha等^[42]利用实验数据集对随机森林模型进行训练,将其应用在电池的内短路检测中,并验证模型的准确性达到了97%。

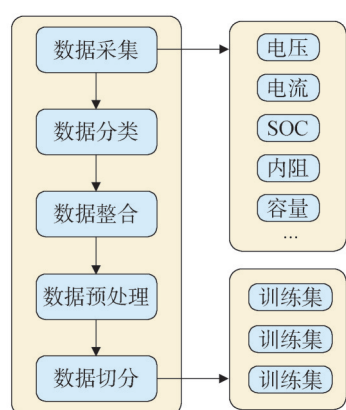


图4 基于机器学习内短路故障检测方法

Fig.4 Machine learning based internal short circuit fault detection method

Yang等^[43]提出了一种基于人工神经网络的短路电池单元电流估计方法,该方法仅利用电压信息来估计短路电池单元电流。在恒流充电和恒功率放电条件下,分别进行了两组实验,验证了该方法的稳定性和准确性。Gao等^[44]提出一种斯皮尔曼秩相关结合神经网络的算法用于电池内短路的检测,同时借理想环境下的仿真分析和实际运行数据实现内短路的准确检测。两种基于机器学习的内短路检测方式仅对电压这一单一量进行采集便可以对电池的内短路情况做出准确检测。

Jiang等^[45]提出基于隔离森林算法的电池内短路检测方法,对所采集的电压信号进行处理然后提取动态、静态分量的特征参数,借助隔离森林算法对电池进行故障检测。Zhang等^[46]提出了一种快速、准确的在线电压预测方法,采用超参数优化方法使预测电压误差最小,通过对预测电压的综合评估和比较,验证了预测的准确性和及时性,并针对蓄电池电压异常诊断问题,提出了一种结合隔离林和Boxplot技术的故障诊断方法。

2) 基于信号处理的内短路检测方法。

基于信号的电池内短路检测是通过监测并及时

分析处理电池工作时的电流、电压或其他电气信号来检测电池内短路的方法。当电池发生早期内短路时,其内部结构发生变化进而引起部分物理量的变化,如温升、电压异常、不一致性增强。通过采集和分析这些信号的变化,可以识别出电池内短路故障。基于信号处理的内短路检测方法主要包括光谱分析、熵理论、相关系数分析等,这些方法各有千秋,在电池内短路检测领域整发挥重要作用。

石磊等人^[47]提出一种基于交错量测拓扑的储能电池组初期短路故障检测和定位方法,通过对数据集进行处理分析,并得到故障指标,量化关联故障检测阈值和故障可检测幅值,从而评估异常特征贡献度确定短路位置。Yan等人^[48]采用X射线与CT相结合的方法揭示了锂离子电池温度上升到110℃与其排气具有一定同时性,为储能电站事故预警提供了思路,但该方法并未对160℃以上的电池温度时排气情况进行研究,并没有完整展示内短路导致的TR的全过程。

熵是指系统中无序程度的量度,即系统的混乱程度。当电池发生内短路时,其内化学反应和电子传输过程会变得更加复杂和混乱,增加系统熵值。监测电池中熵的变化,可以及时发现早期内短路。Qiu等人^[49]提出了一种基于熵的故障诊断和不一致性评估方法,为储能电站的安全性和可靠性提供了有益的探索。Shang等人^[50]通过检测移动窗口内电池电压序列的修正样本熵,有效地诊断和预测电池短路、开路等不同类型的早期故障,并能预测故障发生的时间。该方法具有高效性、鲁棒性,为大型串联锂离子电池构成的储能系统早期内短路检测提供指导。

在电池内短路检测中,利用相关系数分析探索电池运行状态与可能存在的内短路之间的关系。Lai等人^[51]利用移动窗口计算相邻电池单元之间的相关系数,确保了估计的每个电池单元的SOC准确性。当目标电池单元相邻两个单元的相关系数均低于预设阈值时,认为电池处于早期内短路,但该方法所选取的内短路检测因子单一,在精度和检测速度上均有较大的提升空间。Xia等人^[52]提出了一种基于电池电压测量的短路故障检测方法,通过计算电压曲线的相关系数来识别故障,该方法为在线监测的方法,通过递推移动窗口保持高敏感度,并通过附

加方波避免误报,有效隔离故障单元。相较于Lai等人的方法,该方法对电池老化或一致性具有更好鲁棒性。同样选取电压为内短路检测健康因子,Wang等人^[53]提出一种基于电压相关性的统计方法检测内短路,基于正常情况下相关系数模型设计合成统计量和基于核密度估计的阈值并将其用于同时监测每个采样时刻的所有测量信号,通过交叉定位策略定位故障单元,在并行处理能力、对微弱短路故障的敏感性以及对窗宽的鲁棒性方面,表现优于现有的相关系数检测方法。

综上,基于信号分析的电池内短路检测方法是通过对监测和分析电池运行时的SOC、电压等信号来及时识别内短路故障的技术手段。光谱分析更偏向于采用光信号的手段来判断电池内部的温度场分布,找出局部温度异常,进而为内短路判别提供手段;熵检测更多的是对电池组的不一致性进行分析,找寻出异常单体电池,在储能电站的运维中可发挥重要作用;在进行相关系数分析前,需根据实际研究对象,选取适合的表征电池健康状态的电气量,相较

于前面两种方法,该方法理论性更强,检测的灵敏性大,分辨率高。以上方法的应用,有效检测早期内短路,有助于增强电池储能系统的安全性和稳定性在未来,随着信号处理技术的不断发展和完善,检测方法将会更加综合、多样、准确、高效。

2.3 多方法融合的内短路检测方法

模型驱动方法可以基于物理原理提供深入的理解和解释,而数据驱动方法可以通过大量的实际数据进行学习和分析,实现更高的检测准确性。融合这两种方法可以弥补彼此的不足,提高内短路检测的可靠性和准确性。

Zhou等人^[54]提出了一种结合反向传播神经网络、卷积神经网络和长短期记忆神经网络的多模型融合诊断方法,用于电池故障诊断并输出故障类型,提出的多级决策算法能够根据设定的决策阈值进行多级决策投票,如图5所示,计算每个分类模型诊断结果的投票因子,并根据设定的决策阈值进行多级决策投票,以提高诊断准确性。Zhang等人^[55]结合基于模型的方法和熵方法,用于检测和隔离锂离子电

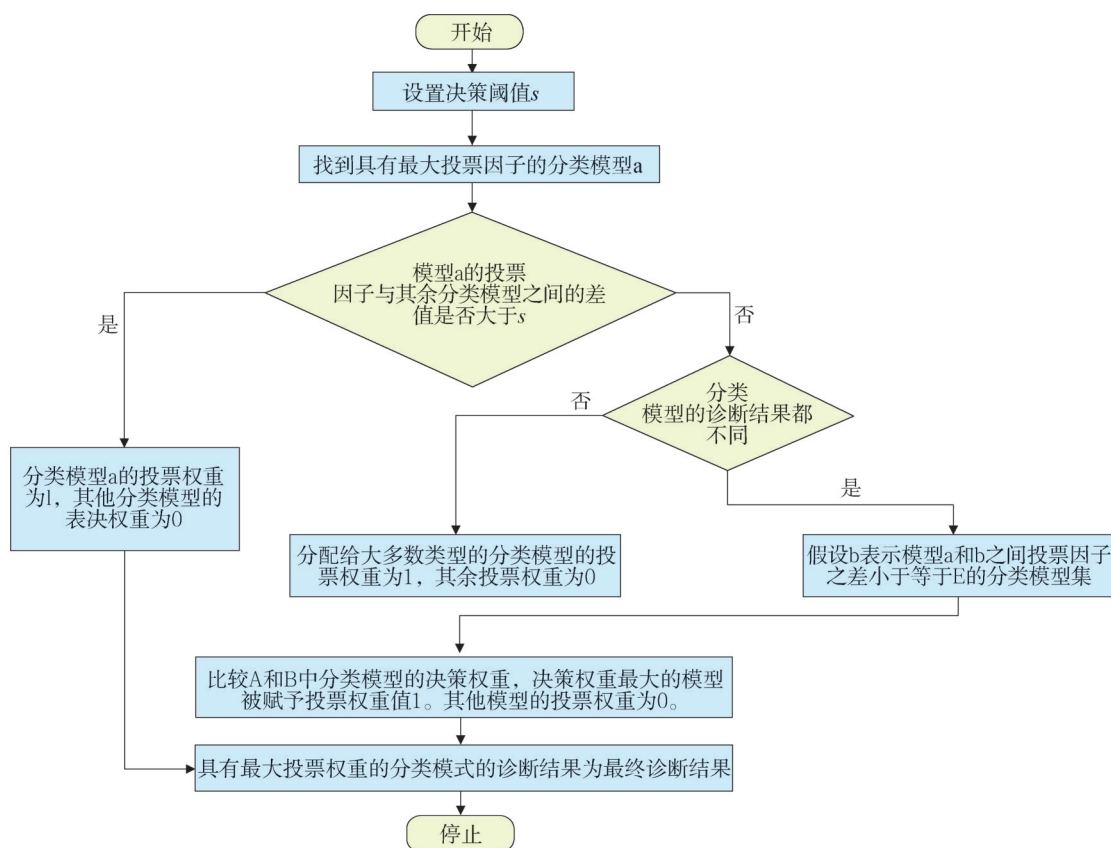


图5 多级决策算法流程图

Fig.5 Multi-level decision algorithm flowchart

池系统中的多种故障类型,采用交错电压测量拓扑,能够区分电压传感器故障和电池短路或连接故障,该方法对噪声和电池状态的不一致性具有良好的鲁棒性。Zheng 等人^[56]通过应用初始偏差校正和异常信号识别方法,对原始数据进行降噪和预处理,基于等效电路模型和数据驱动算法,从3个维度设计了13个特征,将多个特征与随机森林算法结合,以提高泛化能力并抑制算法过拟合风险。Li^[57]结合了长短期记忆递归神经网络和等效电路模型,使用实际运行数据进行测试,证明了该方法的鲁棒性、可靠性和优越性。

通过特征选择、降维、加权等方法将模型驱动和数据驱动方法提取的特征进行整合和优化,以得到更全面和准确的特征描述,然后采用逻辑运算、加权投票、置信度评估等方法综合考虑不同方法的结果,得到最终的内短路检测结果。

2.4 基于新技术的内短路检测方法

随着新检测技术和检测装备的不断发展,针对锂电池内短路的检测方法也得到了显著改进和拓展。下面重点介绍基于电化学阻抗谱、热成像技术和超声技术等新检测技术和装备的锂电池内短路检测方法。

1) 电化学阻抗谱检测内短路。

张闯等人^[14]通过对不同内短路程度的电池进行电化学阻抗谱测量,结果表明,电池电化学阻抗谱的欧姆电阻基本不受电池温度、SOC的影响,但是对电池内短路程度较为敏感,监测到1 000 Hz 频率阻抗实部值变化可有效检测出电池过放电诱发的内短路。田爱娜等人通过电化学阻抗谱为基础,采用单频阻抗实现电池内部阻抗的实时检测。在不同充电倍率、环境温度和健康状态下进行验证,实现对电池内短路的检测^[58]。

2) 热成像技术检测内短路。

Qi W 等人^[59]提出利用热成像技术,高频记录内部短路起始点周围的时空温度变化以及电压和表面温度,表征锂离子电池内部从内部短路到TR的演化过程的新方法。田璐羽等人^[60]研究提出了锂离子电池智能感知来处理电池的热成像图像,对问题电池进行识别,并进行问题电池的定位与分割,可以对检测电池的内短路提供有效方法。Shan H 等人^[61]研究发现内短路和TR期间的温度分布高度不均匀,通过

原位测量捕获了TR 如何从内短路位置开始并在几秒钟内扩散到整个电池的详细信息。

3) 超声技术检测内短路。

Appleberry 等人^[62]利用超声波用于通过诱导与TR 内短路相关的条件来检测 0.950 Ah 锂离子电池的物理变化,当电池在基线条件下循环并随后承受恒定电流和电压过充电时,提取超声信号特征。定义了识别故障的两个条件:检测过度充电开始的警告和紧急停止,提供早期、可操作的警告。Zhang H 等人^[63]通过外部功率超声在电解液中诱导空化效应,这可以有效地破坏电池内的Li 枝晶,降低枝晶高度并防止短路现象,从而可以实现检测电池内短路。

3 技术展望

随着模型电路结构复杂度的提高,模型的精确度也相应提高,但在工程实际应用的难度和计算量也大幅提高,为了平衡计算精度和收敛速度,需要研究各种改进的等效电路模型结构及参数辨识方法,例如电路拓扑结构自适应和计算时间自适应等方法,并引入非线性特性,用于描述电池的主要电化学行为,提高计算模型精度。进一步改进非线性滤波算法,如自适应扩展卡尔曼滤波法、自适应无迹卡尔曼滤波法等算法。为进一步提高管理技术和功能,将等效电路模型与热模型和电化学模型相结合,兼顾电化学模型精度高和等效电路模型计算成本低的双重优点,同时考虑锂电池的热特性,用于储能系统热管理等方面,是未来等效电路模型的研究方向。

在利用机器学习算法进行锂离子电池内短路故障诊断时,根据具体的故障诊断任务,选择适合的算法,如支持向量机、神经网络、决策树等,以提高故障诊断的准确性和效率。同时,核主成分分析可用于重构包括欧姆内阻、端电压、开路电压等电池参数的故障波形,将这些参数组合作为故障指标,提高内短路故障诊断的可靠性。在进行故障诊断之前,对原始数据进行预处理是必要的,这包括数据清洗、特征提取和特征选择等步骤,以消除噪声和冗余信息,提高模型的泛化能力。例如,考虑到电阻和电荷状态不一致对相关系数的影响,可以对信号进行故障诊断,通过采用信号分析、特征提取、特征融合和降维等方法,消除不一致状态对时间序列特征的影响。在异常检测的基础上,可以通过聚类方法识别异常

信号特征。在建立内短路故障诊断模型时,考虑到电池参数具有时间序列特性,可以采用循环神经网络等算法进行建模,以提高预测的准确性。通过捕捉时间依赖性和序列信息,循环神经网络可以更好地解决时间序列数据的特征提取和建模问题。

当将模型驱动的方法和数据驱动的方法融合时,可以使用数据来校准和优化模型,同时使用模型来分析和解释数据。但在当前仍面临一些问题,比如数据的不完整或不准确、模型的复杂性以及模型与数据集成困难。不平衡的数据会导致模型在决策中受到过拟合和欠拟合的影响。强化学习可以根据实时数据和模型的反馈,动态调整决策策略,提高系统的性能和适应性,将强化学习与模型驱动和数据驱动的方法相结合,可以实现自适应的内短路检测和诊断。针对模型驱动方法和数据驱动方法的集成困难,可以研究模型和数据的联合优化方法,通过联合优化模型和数据的特征提取、模型校准等过程,可以更好地利用两种方法的优势,提高内短路检测的性能。

新的检测技术和检测装备在当前的研究和应用中仍存在问题,电化学阻抗谱的准确性容易受到电极与电解质之间接触的影响,如果电极接触不良或存在其他故障,可能会导致检测结果的不准确性,在使用电化学阻抗谱检测时应减小测量误差,提高各频段检测时的抗干扰能力,使得到的数据更加精准。热成像技术的温度分辨率和精度对于准确检测微小的温度变化至关重要,因此需要优化热成像设备和算法以提高温度测量的精度,同时需要更高的空间分辨率和准确定位的能力。超声波在物质中传播时会发生衰减和散射,因此对于深层的短路可能会受到检测深度限制,需要研究电池内部不同组件的声波反射率和散射率特性,并建立准确的声学模型,以提高短路检测的准确性。

4 结束语

针对磷酸铁锂电池内短路的发生机理和检测技术进行了综合分析,首先对引发内短路的4种情况(内部缺陷、电滥用、热滥用、机械滥用)的研究现状分别进行了分析,发现造成电池内短路的共性原因是电池本身制造缺陷或者使用过程中过充电/过放电、高温以及受到挤压变形之后,电池内部隔膜受

损,导致正负极短接,从而导致内短路;然后,介绍基于模型驱动、基于数据驱动、多方法融合以及基于新技术的内短路检测方法,并针对上述4种检测方法存在的问题进行技术展望。

为了平衡计算精度和收敛速度,需要改进等效电路模型结构和参数辨识方法,引入非线性特性和改进非线性滤波算法。同时,将等效电路模型与热模型和电化学模型相结合,以提高锂电池管理技术和功能。在锂离子电池内短路故障诊断中,选择适合的机器学习算法(如支持向量机、神经网络、决策树)和核主成分分析进行故障波形重构和特征提取,进行数据预处理和特征选择,以提高故障诊断的准确性和效率,特别是对电池参数的时间序列特性可以采用循环神经网络等算法建模。当采用模型驱动和数据驱动方法融合的内短路检测方法时,利用数据优化模型和模型分析数据,结合强化学习调整决策策略,提高内短路检测性能。

当前新的检测技术和装备还存在问题:电化学阻抗谱受电极接触影响准确性下降,热成像需要提高温度和空间分辨率,超声波检测受限于深层短路。需要优化技术和建立准确模型以提高检测准确性。

参考文献

- [1] 陈海生,李泓,徐玉杰,等.2023年中国储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2024,13(5):1359-1397.
CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2023 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1359-1397.
- [2] LAI X, JIN C Y, YI W, et al. Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: recent advances and perspectives [J]. Energy Storage Materials, 2021, 35: 470-499.
- [3] ZOU B S, ZHANG L S, XUE X Q, et al. A review on the fault and defect diagnosis of lithium-ion battery for electric vehicles [J]. Energies, 2023, 16(14): 5507.
- [4] YI M C, JIANG F C, LU L G, et al. Ultrasonic tomography study of metal defect detection in lithium-ion battery [J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 806929.
- [5] SUN Y K, YUAN Y B, LU L G, et al. A comprehensive research on internal short circuits caused by copper particle contaminants on cathode in lithium-ion batteries [J]. eTransportation, 2022, 13: 100183.
- [6] KONG X D, LU L G, YUAN Y B, et al. Foreign matter defect battery and sudden spontaneous combustion [J]. eTransportation,

- 2022, 12: 100170.
- [7] HEO T W, TANG M, CHEN L Q, et al. Defects, entropy, and the stabilization of alternative phase boundary orientations in battery electrode particles [J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6 (6): 1501759.
- [8] XIA S H, MU L Q, XU Z R, et al. Chemomechanical interplay of layered cathode materials undergoing fast charging in lithium batteries [J]. *Nano Energy*, 2018, 53: 753–762.
- [9] 杨梦洁, 杨爱军, 叶奕君, 等. 基于气体分析的锂离子电池热失控早期预警研究进展 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38 (17): 4507–4538.
- YANG Mengjie, YANG Aijun, YE Yijun, et al. Research progress on early warning of thermal runaway of Li-ion batteries based on gas analysis [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38 (17): 4507–4538.
- [10] ZHU J E, WIERZBICKI T, LI W. A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 378: 153–168.
- [11] SHAO J H, LIN C J, YAN T, et al. Safety characteristics of lithium-ion batteries under dynamic impact conditions [J]. *Energies*, 2022, 15 (23): 9148.
- [12] LIU B H, YIN S, XU J. Integrated computation model of lithium-ion battery subject to nail penetration [J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 278–289.
- [13] 何向明, 冯旭宁, 欧阳明高. 车用锂离子动力电池系统的安全性 [J]. *科技导报*, 2016, 34 (6): 32–38.
- HE Xiangming, FENG Xuning, OUYANG Minggao. On the safety issues of lithium ion battery [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34 (6): 32–38.
- [14] 张闯, 王泽山, 刘素贞, 等. 基于电化学阻抗谱的锂离子电池过放电诱发内短路的检测方法 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38 (23): 6279–6291.
- ZHANG Chuang, WANG Zeshan, LIU Suzhen, et al. Detection method of overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectroscopy [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38 (23): 6279–6291.
- [15] REN D S, FENG X N, LU L G, et al. Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions [J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 323–332.
- [16] WANG Z P, YUAN J, ZHU X Q, et al. Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials: a comparison study [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 55: 484–498.
- [17] OUYANG M G, REN D S, LU L G, et al. Overcharge-induced capacity fading analysis for large format lithium-ion batteries with $\text{Li}_y\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2 + \text{Li}_y\text{Mn}_2\text{O}_4$ composite cathode [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 279: 626–635.
- [18] MAO N, WANG Z R, CHUNG Y H, et al. Overcharge cycling effect on the thermal behavior, structure, and material of lithium-ion batteries [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163: 114147.
- [19] OUYANG D X, WENG J W, CHEN M Y, et al. Impacts of current rates on the degradation behaviors of lithium-ion batteries under over-discharge conditions [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166 (14): 3432–3440.
- [20] 叶佳娜. 锂电子电池过充电和过放电条件下热失控(失效)特性及机制研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [21] 孙林, 郑岳久, 周龙, 等. 三元锂电池的过放电诱发内短路实验研究 [J]. *电源技术*, 2018, 42 (10): 1454–1457.
- SUN Lin, ZHENG Yuejiu, ZHOU Long, et al. Experimental study on overdischarge induced internal short circuit of NCM batteries [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42 (10): 1454–1457.
- [22] GACHOT G, RIBIÈRE P, MATHIRON D, et al. Gas chromatography/mass spectrometry As a suitable tool for the Li-ion battery electrolyte degradation mechanisms study [J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83 (2): 478–485.
- [23] 来鑫, 李彬, 孟正, 等. 基于剩余充电电量的锂离子电池模组内短路在线定量诊断算法 [J]. *工程科学学报*, 2023, 45 (1): 158–168.
- LAI Xin, LI Bin, MENG Zheng, et al. Online quantitative diagnosis algorithm for the internal short circuit of a lithium-ion battery module based on the remaining charge capacity [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45 (1): 158–168.
- [24] FENG X, ZHENG S, REN D, et al. Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database [J]. *Applied Energy*, 2019, 246: 53–64.
- [25] REN D S, FENG X N, LIU L S, et al. Investigating the relationship between internal short circuit and thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition [J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 34: 563–573.
- [26] FENG X N, OUYANG M G, LIU X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review [J]. *Energy Storage Materials*, 2018, 10: 246–267.
- [27] 陈萌, 赵谏, 王亚林, 等. 大规模电化学储能系统故障监测与诊断研究综述 [J/OL]. *中国电机工程学报*: 1–17. [2024-02-20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=sAMp-nZqXjwcChnKIB9qmMrLTV6EmcaZxssv2Hl6TUPFh9AD4dE7q9-s89KH3B6AV-J56ImmmqJyAj9esrnRHn0Svla_W133mnJzlZV_wGg5h2KzIjz0RHvzLADvTrgSqZU-EssbhmkL3fLhTaerwVRl8qb5bhT6SS119aJfDN492R5GMZS1jF9CCqPjA2NVG2_xvKop8A=&uniplatform=NZKPT&language=CH.
- CHEN Meng, ZHAO Su, WANG Yalin, et al. A review of fault monitoring and diagnosis of large-scale electrochemical energy storage systems [J]. *Proceedings of the CSEE*: 1–17. [2024-02-20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=sAMp-nZqXjwcChnKIB9qmMrLTV6EmcaZxssv2Hl6TUPFh9AD4dE7q9-s89KH3B6AV-J56ImmmqJyAj9esrnRHn0Svla_W133mnJzlZV_wGg5h2KzIjz0RHvzLADvTrgSqZU-EssbhmkL3fLhTaerwVRl8qb5bhT6SS119aJfDN492R5GMZS1jF9CCqPjA2NVG2_xvKop8A=&uniplatform=NZKPT&language=CH.

- s89KH3B6AV - J56lmmmqJyAj9esrnRHn0SvlaI_W133mnJzlZV_wGg5h2KzIjz0RHvzLADvTrgSqZU_EssbhmKl3fLhTaerwVRl8qb5bhT6SS119aJfDN492R5GMZS1jF9CCqPjA2NVG2_xvKop8A= &uniplatform=NZKPT&language=CH.
- [28] 岳永胜,孙冬,许爽,等.锂离子电池等效电路模型的研究进展[J].电池,2023,53(6):682-686.
YUE Yongsheng, SUN Dong, XU Shuang, et al. Research progress in equivalent circuit model for Li-ion battery [J]. Battery Bimonthly, 2023, 53(6): 682-686.
- [29] MADANI S S, SCHALTZ E, KÆR S K. A review of different electric equivalent circuit models and parameter identification methods of lithium-ion batteries [J]. ECS Transactions, 2018, 87(1): 23-37.
- [30] WANG Q, GAO T, LI X C. SOC estimation of lithium-ion battery based on equivalent circuit model with variable parameters [J]. Energies, 2022, 15(16): 5829.
- [31] OUYANG M G, ZHANG M X, FENG X N, et al. Internal short circuit detection for battery pack using equivalent parameter and consistency method [J]. Journal of Power Sources, 2015, 294: 272-283.
- [32] CAO J, WANG S L, XIE Y X, et al. Research on the state of charge estimation method of lithium-ion batteries based on novel limited memory multi-innovation least squares method and SDE-2-RC equivalent model [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2023, 51(4): 1902-1917.
- [33] GENG Z Y, WANG S Y, LACEY M J, et al. Bridging physics-based and equivalent circuit models for lithium-ion batteries [J]. Electrochimica Acta, 2021, 372: 137829.
- [34] YANG Q F, SUN J L, KANG Y Z, et al. Internal short circuit detection and evaluation in battery packs based on transformation matrix and an improved state-space model [J]. Energy, 2023, 276: 127555.
- [35] 何晋,马睿飞,蔡琦琳,等.基于递推最小二乘法的锂电池内短路全寿命周期辨识[J].机械工程学报,2022,58(17):96-104.
HE Jin, MA Ruifei, CAI Qilin, et al. Life cycle identification of internal short circuits of lithium-ion battery based on recursive least square method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(17): 96-104.
- [36] HU J, WEI Z B, HE H W. An online adaptive internal short circuit detection method of lithium-ion battery [J]. Automotive Innovation, 2021, 4(1): 93-102.
- [37] FENG X N, WENG C H, OUYANG M G, et al. Online internal short circuit detection for a large format lithium ion battery [J]. Applied Energy, 2016, 161: 168-180.
- [38] LIU Y Y, LIAO C L, ZHANG W J, et al. Internal short circuit diagnosis of lithium-ion battery based on mechanism model and deep learning [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(10): 100514.
- [39] ZHENG Y J, LU Y F, GAO W K, et al. Micro-short-circuit cell fault identification method for lithium-ion battery packs based on mutual information [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4373-4381.
- [40] 潘岳,韩雪冰,欧阳明高,等.锂离子电池内短路检测算法及其在实际数据中的应用[J].储能科学与技术,2023,12(1):198-208.
PAN Yue, HAN Xuebing, OUYANG Minggao, et al. Research on the detection algorithm for internal short circuits in lithium-ion batteries and its application to real operating data [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(1): 198-208.
- [41] YANG R X, XIONG R, HE H W, et al. A fractional-order model-based battery external short circuit fault diagnosis approach for all-climate electric vehicles application [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187: 950-959.
- [42] NAHA A, KHANDELWAL A, AGARWAL S, et al. Internal short circuit detection in Li-ion batteries using supervised machine learning [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 1301.
- [43] YANG R X, XIONG R, MA S X, et al. Characterization of external short circuit faults in electric vehicle Li-ion battery packs and prediction using artificial neural networks [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114253.
- [44] 高明裕,蔡林辉,孙长城,等.一种基于斯皮尔曼秩相关结合神经网络的电池组内部短路故障检测算法[J].电子与信息学报,2022,44(11):3734-3747.
GAO Mingyu, CAI Linhui, SUN Changcheng, et al. An internal short circuit fault detecting of battery pack based on spearman rank correlation combined with neural network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(11): 3734-3747.
- [45] JIANG J C, LI T Y, CHANG C, et al. Fault diagnosis method for lithium-ion batteries in electric vehicles based on isolated forest algorithm [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50: 104177.
- [46] ZHANG Z S, DONG S J, LI D, et al. Prediction and diagnosis of electric vehicle battery fault based on abnormal voltage: using decision tree algorithm theories and isolated forest [J]. Processes, 2024, 12(1): 136.
- [47] 石鑫,尹建光,李方伟,等.储能电池组初期短路故障检测与定位方法研究[J].山东电力技术,2023,50(4):64-71.
SHI Xin, YIN Jianguang, LI Fangwei, et al. Research on incipient short-circuit fault detection and location method of energy storage battery pack [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(4): 64-71.
- [48] LI Y, WANG Q, LIAN X X, et al. X-ray computed tomography and simultaneous multi-signal detection for evaluation of thermal runaway of lithium-ion battery [J]. Materials Technology, 2022, 37(14): 3041-3050.
- [49] QIU Y S, CAO W J, PENG P, et al. A novel entropy-based fault diagnosis and inconsistency evaluation approach for lithium-ion battery energy storage systems [J]. Journal of Energy Storage, 2021,

- 41:102852.
- [50] SHANG Y L, LU G P, KANG Y Z, et al. A multi-fault diagnosis method based on modified Sample Entropy for lithium-ion battery strings[J]. Journal of Power Sources, 2020, 446: 227275.
- [51] LAI X, YI W, KONG X D, et al. Online detection of early stage internal short circuits in series-connected lithium-ion battery packs based on state-of-charge correlation[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30: 101514.
- [52] XIA B, SHANG Y L, NGUYEN T, et al. A correlation based fault detection method for short circuits in battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2017, 337: 1-10.
- [53] WANG G, YANG J H, JIAO J F. Voltage correlation-based principal component analysis method for short circuit fault diagnosis of series battery pack[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(9): 9025-9034.
- [54] ZHOU J, WU Z H, ZHANG S, et al. A fault diagnosis method for power battery based on multiple model fusion[J]. Electronics, 2023, 12(12): 2724.
- [55] ZHANG K, HU X S, LIU Y G, et al. Multi-fault detection and isolation for lithium-ion battery systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 971-989.
- [56] ZHENG Y F, ZHANG Z J, ZHOU S D, et al. Innovative fault diagnosis and early warning method based on multifeature fusion model for electric vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 78: 109681.
- [57] LI D, ZHANG Z S, LIU P, et al. Battery fault diagnosis for electric vehicles based on voltage abnormality by combining the long short-term memory neural network and the equivalent circuit model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1303-1315.
- [58] 田爱娜, 潘壮壮, 吴铁洲, 等. 基于单频阻抗的锂离子电池热失控分级预警[J]. 电池, 2024, 54(2): 194-199.
- TIAN Aina, PAN Zhuangzhuang, WU Tiezhou, et al. Graded early warning of thermal runaway of lithium-ion battery based on single-frequency impedance[J]. Battery Bimonthly, 2024, 54(2): 194-199.
- [59] WU Q, YANG L, LI N, et al. In-situ thermography revealing the evolution of internal short circuit of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2022, 540: 231602.
- [60] 田璐羽, 董朝宇, 穆云飞, 等. 基于热成像的锂离子电池智能故障定位技术[J/OL]. 高电压技术, 2024: 1-10. [2024-02-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=sAMp-nZqXjzMcOFIqJ7EKzUTlyw91bTqlxsJZWwbzCFK5BhukLJ24I3Qc247-Qjl9ldfvnjg4In5NEcdVHbHOOctNFFGcM4YVMJk2QA6nLVc7ua585gD_vlkdz4pFi1T-Ysxve35DOWMIoer3klhi9pDud1pjdHZorBfFoKXTl4DvZv8UkBfrZWT5Yjyb06M&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- TIAN Luyu, DONG Chaoyu, MU Yunfei, et al. Intelligent fault location technology for lithium-ion battery based on thermal imaging[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-10. [2024-02-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=sAMp-nZqXjzMcOFIqJ7EKzUTlyw91bTqlxsJZWwbzCFK5BhukLJ24I3Qc247-Qjl9ldfvnjg4In5NEcdVHbHOOctNFFGcM4YVMJk2QA6nLVc7ua585gD_vlkdz4pFi1T-Ysxve35DOWMIoer3klhi9pDud1pjdHZorBfFoKXTl4DvZv8UkBfrZWT5Yjyb06M&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [61] HUANG S, DU Z J, ZHOU Q, et al. In situ measurement of temperature distributions in a Li-ion cell during internal short circuit and thermal runaway[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(9): 090510.
- [62] APPLEBERRY M C, KOWALSKI J A, AFRICK S A, et al. Avoiding thermal runaway in lithium-ion batteries using ultrasound detection of early failure mechanisms[J]. Journal of Power Sources, 2022, 535: 231423.
- [63] ZHANG H Y, ZHANG X R, SHEN Z Y, et al. Ultrasound overcomes dendrite puncture in Li metal batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 85: 110976.
- 收稿日期: 2024-04-27
修回日期: 2024-07-22
作者简介:
董志国(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力企业管理及新能源消纳利用技术;
韩长江(2001), 男, 硕士在读, 主要研究方向为动力电池安全性评估与电池BMS管理;
孙浩然(2001), 通信作者(23126347@bjtu.edu.cn), 男, 硕士在读, 主要研究方向为动力电池安全性评估与电池BMS管理;
唐茂林(1984), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火电优化调控、电力企业安全管理;
王 溯(1982), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新能源调控技术。
- (责任编辑 姜婷婷)