



轨道交通车载动力电池电压异常 预警方法研究

陈祖航¹, 林文彪¹, 孙皓然², 许凯文²

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 中车大连机车车辆有限公司, 辽宁 大连 116045)

摘要: 针对轨道交通车载动力电池系统的电压异常预警问题, 文章提出了一种基于多参数融合的电压一致性评估方法。通过在系统层面分析电池的电压特性, 构建了包含平均电压、电压极差、电压均方差、电压变异系数以及电压变化极值等关键指标的评估体系, 并建立了电压一致性评估模型。该模型能够对电池系统、电池支路和电池包三个层级的电压一致性进行量化评价, 同时基于模型系数在不同电池单体间的对比分析, 可实现异常电池单体的快速定位。文章提出的电压异常预警方法为轨道交通车载动力电池的安全稳定运行提供有力保障, 具有重要的理论价值和工程指导意义。

关键词: 新能源机车; 动力电池; 电压一致性; 异常预警; 统计分析

中图分类号: U267.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)03-0074-07

0 引言

在全球绿色低碳发展浪潮下, 交通运输领域的能源转型已成为实现可持续发展的关键突破口。2024年6月28日, 中国中车面向全球发布新一代系列化新能源机车, 涵盖“内燃+电池”混合动力、纯动力电池以及氢燃料电池3种动力配置, 具备低排放、低噪声和高效率运行的优势^[1]。在这一发展进程中, 锂离子电池技术的进步起到了至关重要的推动作用。随着性能的持续提升以及制造成本逐步下降, 锂电技术在商业应用中的可行性大大增强。中车株洲电力机车研究所有限公司(简称中车株洲所)等企业积极顺应行业发展趋势, 在锂电储能领域取得了显著成绩, 并在新能源机车领域与多家主机厂展开合作, 成功开发出多款混合动力机车和纯电动车产品^[2]。

锂离子电池内部具有复杂的化学体系和反应机理, 在使用过程中会出现不可逆转的性能老化, 甚至可能

发生不可控的快速衰减现象。这种变化过程会直接对机车的运行效率、环保效果以及安全生产造成影响^[3-4], 但当前主流企业的电池产品已实现极高的可靠性, 以宁德时代为例, 其动力电池的安全失效率可控制在十亿分之一^[5]。

构建监测和预警体系是提升电池系统安全性的重要途径。在动力电池的监测指标中, 电压作为最常用且关键的指标之一^[6], 能够直接反映电池的能量状态和运行特性。理论上, 同一电池包内的单体电池由于生产批次相近且工作环境一致, 其电压特性应具有良好的-一致性^[7]。基于这一特性, 研究学者提出了多种电压异常检测方法: 文献[8]利用电压一致性差异进行内短路诊断, 当某单体电池电压显著低于其他电池单体时, 即判定该单体发生了内短路; 文献[9]提出了一种基于DBSCAN聚类的三元锂离子电池动力电池诊断方法; 然而文献[10]指出该方法存在计算复杂度高、数据依赖性强-的局限性。目前的电池监测和预警体系多属于异常发生后的被动报警机制, 在主动预警的精准性和前瞻性

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技开发计划项目(N2024J032-B(JB))

通信作者: 陈祖航, 男, 硕士, 主要从事电池系统的电气结构设计和故障预警等方面的研究; E-mail: 1156650741@qq.com

引用格式: 陈祖航, 林文彪, 孙皓然, 等. 轨道交通车载动力电池电压异常预警方法研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 74-80.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.106.

Citation: CHEN Zuhang, LIN Wenbiao, SUN Haoran, et al. Research on early warning methods for voltage anomalies in on-board power batteries of rail transit systems[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 74-80.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.106.

方面仍有提升空间^[11]。为此, 文献[12]提出基于专家知识的诊断算法, 通过持续完善故障知识库来实现诊断能力的迭代优化。鉴于准确的电池电压监测和预警能有效降低维护成本、避免设备停机和维修成本增加、优化电池更换策略^[13], 开发更高效的主动预警方法仍是当前研究的重点方向。

本文从电压一致性角度出发, 构建了系统层级的电压一致性评估模型。首先通过电池包级别的电压一致性评估系数快速定位可能存在异常的电池模组, 再根据各单体电池电压与“标准电池”的参考电压差值实现精确故障定位。试验结果表明, 该方法能够有效识别早期电压异常的电池, 相比传统监测方式展现出更优的预警时效性, 对提升电池系统可靠性具有重要应用价值。

1 电压一致性评估模型

1.1 动力电池拓扑结构

轨道交通车载动力电池系统作为新能源车辆的重要能源单元, 主要承担着为牵引系统供电以及为空调、照明等低压辅助设备提供电能的双重功能。动力电池系统采用模块化设计架构, 由上千个单体电池组成, 如图1所示。该拓扑结构具有以下特征: 系统由多个并联支路构成, 每个支路由12个电池包串联组成, 而每个电池包又包含36个串联的单体电池。从电气连接角度来看, 单个支路实质上是由432个单体电池串联构成的电路, 其中每36个单体电池组成一个功能模块(即电池包)。基于这种层级化的结构特点, 本文分别在电池支路和电池包两个层级上开展电压一致性的深入分析。

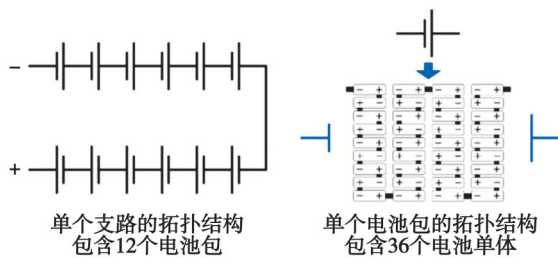


图1 动力电池的拓扑结构
Fig. 1 Topology of power batteries

1.2 电压一致性指标选择

由引言可知, 电池异常属于小概率事件, 当系统中个别电池出现电压异常时, 绝大多数电池仍保持正常工作状态。通过电压一致性分析识别系统中的异常电池, 就能实现电池的电压异常预警^[14]。基于以上分析, 本文构建了三级架构的电压一致性评估模型。采用“目标-指标-数据”的分层设计: 目标层聚焦系统安全预警, 指标层集成平均电压、极差电压、电压标准差、电压变异系数和电压变化最值这5个关键评估指

标, 数据层则负责实时监测数据的采集与处理^[15]。这种多维度指标体系能够全面反映电池系统的电压一致性特征, 为异常预警提供量化依据, 具体分析如下:

①平均电压: 平均电压反映系统内各单体电压的总体情况。计算公式如下:

$$V_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad (1)$$

式中: V_{avg} 为平均电压; V_i 为电池单体的电压; N 为电池总数。

②极差电压: 极差电压反映系统内单体电压最大差异, 直观地反映系统内电池电压的不一致性。计算公式如下:

$$V_r = V_{\text{max}} - V_{\text{min}} \quad (2)$$

式中: V_r 为极差电压; V_{max} 为系统最大单体电压; V_{min} 为系统最小单体电压。

③电压标准差: 电压标准差反映了各单体电压相对于平均电压的分散情况。电压标准差越大, 说明电压分布越离散。计算公式如下:

$$V_{\text{std}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_{\text{avg}})^2}{N}} \quad (3)$$

式中: V_{std} 为电压标准差。

④电压变异系数: 变异系数反映了各单体电压的相对波动情况, 不仅仅是绝对离散程度。作为无量纲参数, 可以消除不同数据集之间的量纲影响和避免绝对离散度指标受数据平均水平干扰的问题。计算公式如下:

$$V_{\text{cv}} = \frac{V_{\text{std}}}{V_{\text{avg}}} \quad (4)$$

式中: V_{cv} 为电压变异系数。

⑤电压变化最大值: 正常工作状态下, 电池电压会随着电流激励产生即时变化, 这主要源于欧姆内阻的快速响应特性; 而极化内阻的迟滞效应则会导致充放电结束后电压仍持续变化直至稳定。这种动态响应特性实际上反映了电池的内阻特性组合。当电池出现异常时, 如内部短路, 其电压变化速率会显著加快, 表现出与正常电池的明显差异。因此, 电压变化也是判断电池电压一致性的重要指标。计算公式如下:

$$V_{\text{diff}} = \max |V_i^t - V_i^{t-1}| \quad (5)$$

式中: V_i^t 为电池单体在 t 时刻的电压; V_i^{t-1} 为电池单体在 $t-1$ 时刻的电压。

1.3 电压一致性评估系数构建

对指标层5个指标间的重要程度进行比较, 结合九级标度法构建比较矩阵, A_{ij} 为指标 i 与指标 j 重要性的比较结果。

从电压一致性评估的角度分析, 各指标具有不同的表征特性: 极差电压直接反映全体电池的最大压差, 平均电压表征整体水平却无法体现电池之间的压差水平; 电压标准差的计算包含全体电池, 从统计意义上

来说比极差电压更能反应全体电池的电压一致性情况；电压变异系数在电压标准差的基础上更进一步排除了在电压曲线不同位置处电压均值的影响；而电压变化最值则通过动态特性分析得到，是比绝对值更有影响力的指标。综上，基于各指标的特性差异构建如式(6)的比较矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1/4 \\ 2 & 1 & 2/3 & 1/2 & 1/2 \\ 3 & 3/2 & 1 & 3/4 & 3/4 \\ 4 & 2 & 4/3 & 1 & 1 \\ 5 & 2 & 4/3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

各系统的指标矩阵如式(7)。式(7)中每一行代表了一个时刻下电池系统的各项指标。

$$B = \begin{bmatrix} V_{avg,1} & V_{r,1} & V_{std,1} & V_{cv,1} & V_{diff,1} \\ V_{avg,2} & V_{r,2} & V_{std,2} & V_{cv,2} & V_{diff,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{avg,end-1} & V_{r,end-1} & V_{std,end-1} & V_{cv,end-1} & V_{diff,end-1} \\ V_{avg,end} & V_{r,end} & V_{std,end} & V_{cv,end} & V_{diff,end} \end{bmatrix} \quad (7)$$

需要指出的是，采用的5个电压一致性指标（平均电压、极差电压、电压标准差、电压变异系数和电压变化最值）的数量级不同，其中平均电压和电压变异系数的数值范围相差达7个数量级。为消除量纲差异对评估结果的影响，在进行综合计算前需对各指标进行归一化处理。使用的归一化公式计算见式(8)。

$$x'_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (8)$$

式中： x_i 为原始值； x'_i 为归一化后的值。

单体电池电压一致性指标矩阵的计算见式(9)。

$$\gamma = \frac{B}{|B|} \times a^T \quad (9)$$

式中： a 为比较矩阵 A 的单位特征向量； B 为电池系统的指标矩阵。

2 基于评估模型的真实工况分析

本文根据某机车动力电池的运营数据进行研究，该机车共装载8个电池支路。基于数据完整性和典型性考虑，选取由中车株洲所提供的4个支路（5~8支路）作为分析对象，采集周期覆盖130个完整运营日。图2为该时段内的电流工况特征曲线，由于机车工作的随

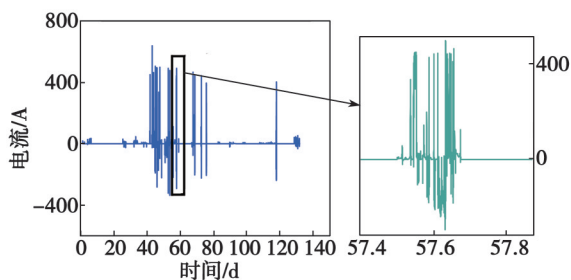


图2 观察时段内的电流情况(框选区域为挑选的大电流工作时段)

Fig. 2 Current conditions during the observation period (the selected area indicates the period of high current operation)

机性，各支路电池的充放电并不具有规律性。考虑电流激励对电池电压影响最大，研究重点分析各支路在典型大电流工况（第57天12:00:00—17:00:00时）下的电压响应特性。该时段电流强度达到峰值，最能体现电池系统的电压特性。

2.1 各分项指标的应用

在研究周期内，各支路电池的平均电压、极差电压、电压标准差、电压变异系数和电压变化最值结果如图3~图5所示。为突出支路间的差异性，采用对比展示方式：其中图3(a)展示的是5支路的原始监测数据，图3(b)~图3(d)则分别显示6、7、8支路各项指标与5支路的相对差值[其横坐标、左右侧纵坐标的标目、标值与图(a)分图相同，图4、图5、图7类似]。该方式能直观反映各支路相对于基准支路（5支路）的偏差程度。图4、图5、图7延续了相同的对比展示方式，便于横向比较分析。

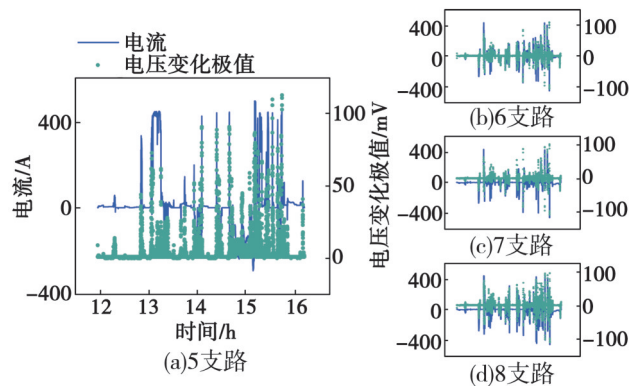


图3 4个支路在观察期内的电流和电压变化极值

Fig. 3 Extreme current and voltage changes in four branches during the observation period

选定观察时段内，电压变化极值的数据趋势与电流的数据趋势同步，如图3所示。当系统工况发生变化时，如12:15:00和13:00:00，电池从静置状态切换至放电状态，电压变化极值也从较小的值迎来了突增。在接近16:00:00处，各支路的电压变化极值均超过100 mV。

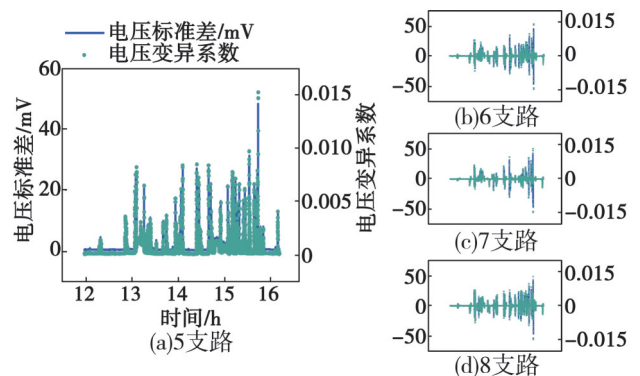


图4 4个支路在观察期内的电压标准差和电压变异系数

Fig. 4 Voltage standard deviation and coefficient of voltage variation in four branches during the observation period

由图4可知,电压标准差在观察时段内的最大峰值超过了40 mV。电压变异系数展现出与电压标准差的相似的数据变化趋势,这是由于电压变异系数为电压标准差和平均电压之比,该时段平均电压稳定在3.1~3.4 V内,相当于电压标准差乘以0.294~0.323的缩放因子(相对变化幅度为9.4%)。这种比例关系导致两个指标虽数值量级不同,但波动形态保持高度一致。

各支路在观察时段内同时存在充电和放电工况,平均电压波动范围为3.1~3.4 V,如图5所示。各支路的极差电压最大值分别为115 mV、115 mV、108 mV和107 mV,整体极差电压最大值超过100 mV。数据分析显示,极差电压与平均电压之间未呈现显著相关性。基于电压极差与电流变化趋势的对应关系,推测极差电压可能主要受电流激励强度的影响。

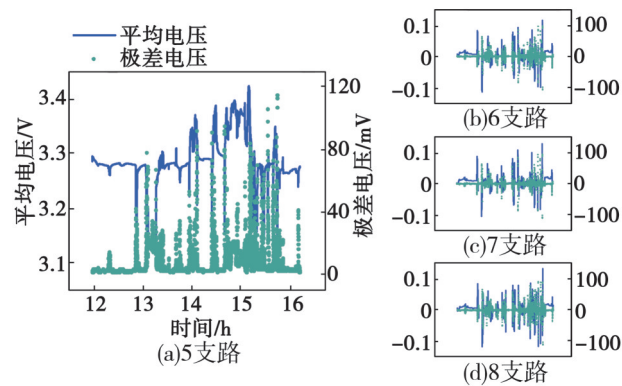


图5 4个支路在观察期内的平均电压和极差电压
Fig. 5 Mean voltage and voltage range in four branches during the observation period

2.2 各分项指标的相关性系数

为更直观地分析各指标间的关联性,计算得到皮尔逊相关系数矩阵,如图6所示。矩阵图6中颜色深度与指标间相关性强弱成正比,颜色越深表示相关性越强。

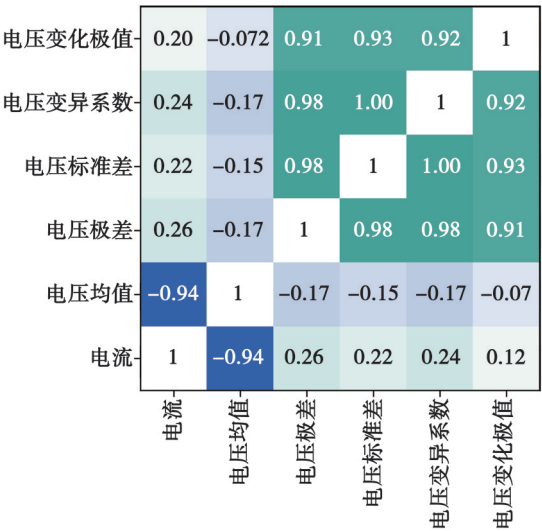


图6 各指标之间的相关系数矩阵
Fig. 6 Correlation coefficient matrix across various metrics

电压极差、电压标准差、电压变异系数和电压变化极值这4个指标之间存在较强的相关性,两两相关系数均大于0.9。其中电压变异系数和电压标准差的相关系数为0.999 7,四舍五入后接近为1,表明二者存在明显的参数冗余问题。补充试验结果也验证这两个指标在异常检测中具有相同的效果。为简化模型并避免信息重复,选择删除其中一个指标。考虑到电压标准差作为基础性指标能保留更多原始数据信息,因此决定保留电压标准差,剔除电压变异系数。

2.3 电压一致性评估系数的应用

根据式(9)计算各支路在观察期内的电压一致性评估系数。在前文分析中,由于电压变异系数指标被剔除,其对应权重也将被移除。为确保权重归一化,剩余各项指标的权重将重新调整使得权重和为1。

电压一致性评估系数是通过对各分项指标进行加权计算得出的,能够直观反映支路电池的电压一致性状况。图7为4个支路在观察期内的电压一致性评估系数,在大部分运行时段内,5支路的电压一致性评估系数维持在较低水平。当系统受到电流激励时,该系数会出现明显上升。这种变化特征源于5个分项指标中,仅平均电压对电流激励不敏感,其余4项指标均会随电流激励而显著增大。在反复的电流激励作用下,5支路的电压一致性评估系数在接近15:45:00达到峰值0.918。其他支路与5支路的电压一致性评估系数差异也在该时段达到最大值。

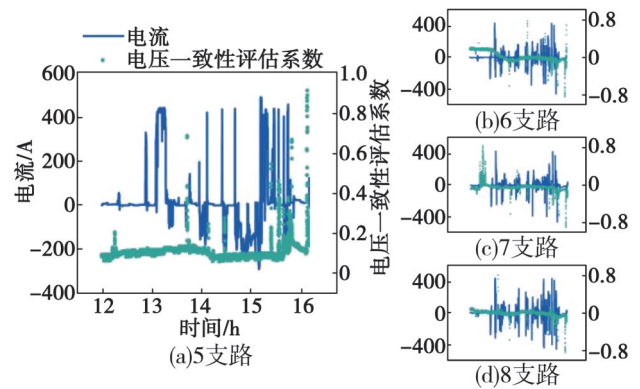


图7 4个支路在观察期内的电压一致性评估系数
Fig. 7 Voltage consistency evaluation coefficient of four branches during the observation period

本节通过将各分项指标和评估系数应用于动力电池系统的4个支路,证明了其能有效反映电池系统的电压一致性,并能体现出不同电池系统间的差异,为后文进行异常电池定位提供了依据。

3 基于评估模型的异常电池定位

3.1 电压异常数据介绍

在新能源机车的运营数据分析中未发现异常电池。

为验证本文所提模型的异常电压预警效果,采用了电池厂家提供的一段异常充放电数据进行测试。2024 年 11 月 21 日对该电池柜进行容量测试时,发现其中一个单体电池的电压异常偏低,如图 8 所示。

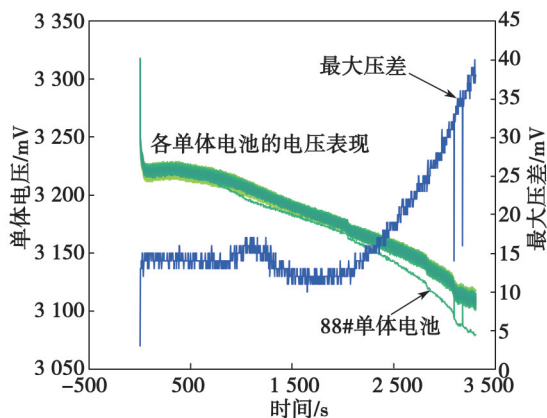


图 8 放电过程中 88 号单体电池的电压异常偏低

Fig. 8 Abnormally low voltage of cell No. 88 during the discharge process

3.2 异常电池定位

将模型应用于该电池柜在容量测试之前的运行数据,数据记录日期为 2024 年 10 月 21—23 日。计算得到各电池包在观察期内的电压一致性评估系数,结果如图 9 所示。

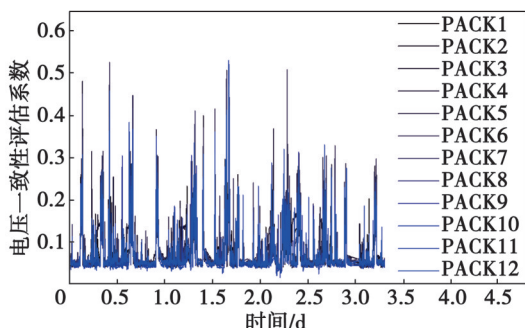
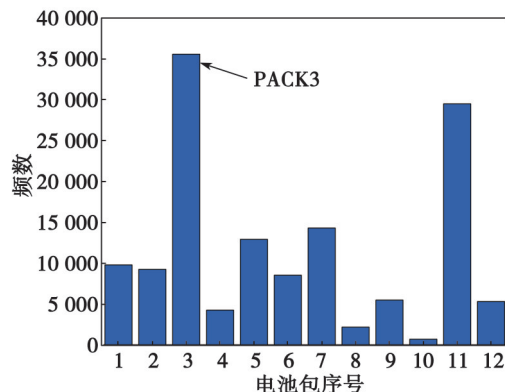


图 9 观察期内各电池包的电压一致性评估系数

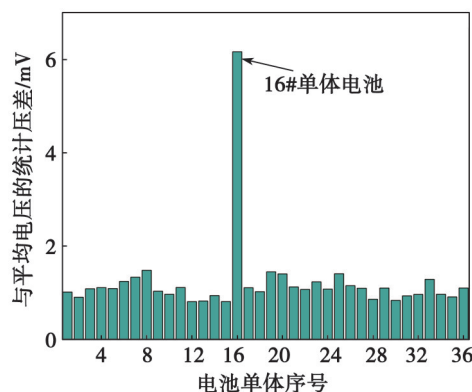
Fig. 9 Voltage consistency evaluation coefficient of various battery packs during the observation period

根据上一章的分析结果可知,电压一致性评估系数与电池包的一致性呈负相关性,即系数越大表明一致性越差。观察图 9 运行数据可以发现各电池包的一致性表现呈现动态变化特征,并未出现某个电池包始终维持较高或较低一致性的情况。这说明电池包的一致性在时间上和不同工况上并不具有连贯性,增加了分析难度。观察期内数据记录间隔为 2 s,共计 138 000 条有效数据记录。通过统计每时刻一致性最差的电池包次数,得到如图 10(a)所示的统计结果,其中 3 号电池包出现一致性最差的频数最高,11 号电池包次之。基于此,针对 3 号电池包进行数据统计分析。首先计算每个采样时刻各单体电池电压与平均电压的差值,然后将观察期内全部 321 931 个时间步的差值进行累加统

计,得到图 10(b)。分析表明该电池包中的 16 号电池为异常单体。后续容量测试定位到的异常电池 88 号,经计算正是 3 号电池包内的 16 号单体,这一结果与前述电压一致性分析结论完全吻合。



(a) 各电池包在观察期内一致性最差的统计频数



(b) 观察期内 3 号电池包各单体与平均电压的统计压差

图 10 定位异常电池的所在位置

Fig. 10 Locating the anomalous battery

综上,本节基于电压一致性评估系数实现了对各电池包的一致性的定量评估。通过在时间域上进行累积统计分析,准确识别出时间域上一致性表现最差的电池包,从而完成从定量计算到定性判断的分析过程。在确定电池包后,进一步计算该电池包内各单体电池电压与平均电压的统计压差,同样采用定量分析结合定性判断的方法,定位到异常电池单体。经验证,使用发现对故障电池(2024 年 11 月 21 日)前一个月(2024 年 10 月 21—23 日)的历史数据进行回溯分析,即可提前发现异常单体电池。

4 结束语

轨道交通车载动力电池系统因其特殊的应用场景而具有显著特点:相较于储能电池系统,其电池倍率输出要求更高;相比电动汽车电池系统,其装机能量更大。针对这一特点,本文提出了电压一致性评估模型,并通过实际运行数据验证了模型的有效性,主要研究结论和贡献如下:

①构建的电压一致性评估模型综合了平均电压、

电压极差、电压标准差、电压变异系数和电压变化极值, 经过在实车数据上的验证, 可实现对系统级、支路级和电池包级电压一致性的多维度精准评价。

②在验证模型一致性评价能力的基础上, 提出“定量分析-定性判断”的异常定位方法。当电池包电压差仅为 40 mV 时即可准确识别异常电池, 较传统电池管理系统 0.3 V 的电压差报警阈值显著提升了预警灵敏度。

③该方法的突出优势在于提前准确识别异常电池, 且计算复杂度相较于神经网络等算法大大减小, 兼具高准确性和工程实用性, 适用于大规模电池系统的在线监测需求。

参考文献:

- [1] 中国新闻网. 中国中车全球首发 7 款新能源机车[EB/OL]. (2024-06-28) [2025-02-04]. <https://www.chinanews.com.cn/cj/2024/06-28/10242123.shtml>. ChinaNewsNetwork.ChinaCNRLaunchessevennew-energylocomotives worldwide[EB/OL]. (2024-06-28) [2025-02-04]. <https://www.chinanews.com.cn/cj/2024/06-28/10242123.shtml>.
- [2] 蒋奉兵, 曹影, 张宾, 等. 基于储能增程式多流制牵引系统设计[J]. 机车电传动, 2021(4): 64-69. JIANG Fengbing, CAO Ying, ZHANG Bin, et al. Design of range extend multi-current traction system based on energy storage[J]. Electric drive for locomotives, 2021(4): 64-69.
- [3] 马帅, 齐志刚, 李学明. 混合动力内燃机车动力电池系统可靠性分析与设计优化[J]. 机车电传动, 2020(5): 114-117. MA Shuai, QI Zhigang, LI Xueming. Reliability analysis and design optimization of hybrid locomotive power battery system[J]. Electric drive for locomotives, 2020(5): 114-117.
- [4] 彭长福, 王平华, 何国福. 机车和动车组用大功率锂离子电池系统安全性设计技术[J]. 机车电传动, 2020(5): 123-127. PENG Changfu, WANG Pinghua, HE Guofu. Research on safety design technology of high-power lithium ion traction battery system for locomotive and EMU[J]. Electric drive for locomotives, 2020(5): 123-127.
- [5] 曾毓群. 共创动力电池的「高标准」时代[EB/OL]. (2024-09-01) [2025-02-04]. <https://www.catl.com/news/8022.html>. ZENG Yuqun. The era of co creating high standards for power batteries[EB/OL]. (2024-09-01) [2025-02-04]. <https://www.catl.com/news/8022.html>.
- [6] 段双明, 常智博. 基于充电电压的串联电池组早期多故障诊断[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(10): 3221-3229. DUAN Shuangming, CHANG Zhibo. Early multiple-fault diagnosis of series battery pack based on charging voltage [J]. Energy storage science and technology, 2023, 12(10): 3221-3229.
- [7] 潘岳. 缺陷电池的失效机理、建模与故障诊断[D]. 北京: 清华大学, 2023. PAN Yue. Battery failure caused by manufacturing defects: mechanism, modeling and fault diagnosis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2023.
- [8] HERMANN W A, KOHN S I. Response to over-current in a battery pack: US9257729 B2[P]. 2016-02-09.
- [9] LI Da, ZHANG Zhaosheng, LIU Peng, et al. DBSCAN-based thermal runaway diagnosis of battery systems for electric vehicles[J]. Energies, 2019, 12(15): 2977.
- [10] 刘鹏, 吴志强, 张照生, 等. 基于电压频域特征和异常系数的动力电池故障诊断方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(8): 89-104. LIU Peng, WU Zhiqiang, ZHANG Zhaosheng, et al. Fault diagnosis for battery systems based on voltage frequency-domain indicator and abnormal coefficient[J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(8): 89-104.
- [11] 张晖, 丰红霞, 陈枫, 等. 电动汽车动力电池电压异常故障诊断方法[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(6): 148-156. ZHANG Hui, FENG Hongxia, CHEN Feng, et al. A diagnosis method for abnormal battery voltage of electric vehicles [J]. Journal of transport information and safety, 2022, 40(6): 148-156.
- [12] 张扬, 李晓杰, 马兹林, 等. 锂离子电池故障诊断算法研究综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(9): 49-61. ZHANG Yang, LI Xiaojie, MA Zilin, et al. A review of fault diagnosis algorithms for lithium ion batteries[J]. Journal of Chongqing university of technology(natural science), 2023, 37(9): 49-61.
- [13] 廖力, 杨达, 李勋波, 等. 基于电压曲线诊断锂离子电池的故障[J]. 电池, 2024, 54(5): 655-659. LIAO Li, YANG Da, LI Xunbo, et al. Fault diagnosis method for Li-ion battery based on voltage curve[J]. Battery bimonthly, 2024, 54(5): 655-659.
- [14] 张大峰, 刘炜, 刘丽. 磷酸铁锂电池电压一致性改善研究[J]. 电源技术, 2021, 45(3): 289-290. ZHANG Dafeng, LIU Wei, LIU Li. Study on voltage consistency of LiFePO₄ Li-ion batteries[J]. Chinese journal of power sources, 2021, 45(3): 289-290.
- [15] 靳文涛, 李煜阳, 贾学翠, 等. 储能电站电池一致性综合评估方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(5): 23-28. JIN Wentao, LI Yuyang, JIA Xuecui, et al. Research on comprehensive evaluation method of battery consistency in energy storage power station[J]. Electrical & energy management technology, 2022(5): 23-28.

Research on early warning methods for voltage anomalies
in on-board power batteries of rail transit systems

CHEN Zuhang¹, LIN Wenbiao¹, SUN Haoran², XU Kaiwen²

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. CRRC Dalian Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116045, China)

Abstract: To address the challenges associated with early warning of voltage anomalies in the traction battery systems of new-energy locomotives, a multi-parameter fusion-based approach is proposed to assess voltage consistency. By systematically analyzing the voltage characteristics of battery packs, we established an evaluation framework that incorporates key metrics—mean voltage, voltage range, root mean square deviation of voltage, coefficient of voltage variation, and extreme voltage changes—and developed a voltage consistency evaluation coefficient model. The model enables quantitative evaluation of voltage consistency at three hierarchical levels: battery system, battery branch, and battery pack. Cross-comparison of the coefficients across different battery cells allows rapid localization of anomalous cells. The proposed method for early warning of voltage anomalies provides strong assurance for the safe and stable operation of new-energy locomotives, offering significant theoretical value and practical engineering guidance.

Keywords: new energy locomotive; power battery; voltage consistency; warning of anomalies; statistical analysis

收稿日期：2025-03-14；修回日期：2025-04-10