[蓄电池组]

基于曲线曼哈顿距离的蓄电池组故障检测

文/蔡长兴　钟禹　谢晓帆　屠沁琳　罗超
国网江西电力有限公司赣州供电分公司

针对站用蓄电池组故障电池识别不到位等问题，提出一种基于曲线曼哈顿距离电压相关性分析的故障诊断方法。该法能够对蓄电池组的电压进行曼哈顿距离的计算及相关性分析实现对故障的检测，并通过电压比值分析法故障类型。搭建蓄电池仿真平台，验证曼哈顿距离电压相关性计算的合理性，验证电压比值分析法的有效性。能够及时发现电池潜在故障，为站用蓄电池系统精细化监测管理、远程化运维控制提供基础。

目前，有关电池故障诊断方法的研究中，主要包括三类：基于规则的故障诊断法、基于数据驱动的故障诊断法和基于模型的故障诊断法。基于规则的故障诊断是通过故障树来标识电池异常状态以及利用规则或观测专家系统识别和定位故障。文献[1]提出一种基于故障树的诊断法，通过堆叠稀疏自编码器的学习，可以从原始量中获取特征。文献[2-4]提出自适应局部离群因子的故障识别法，定义阈值选取规则，使不同车辆的电池故障阈值参数能够自适应设置。然而，由于电池自身的不确定性和复杂性，仍存在一些问题。尽管基于规则的故障诊断方法研究较少，但寻求一种简单、准确及有效的诊断方法仍有必要。

基于模型的故障诊断方法通常需要建立参数化电池组模型。文献[5]建立多个等效电路模型和改进的扩展卡尔曼滤波的故障诊断模型，描述不同多场景下的电池特性变化。文献[6]利用高保真电芯模型构建等效电路模型，通过递归最小二乘法进行参数识别。基于模型的故障诊断方法可以提供较高的准确性和可解释性，对于故障预测以及故障分析和推断等有显著优势，能够提供可靠和有效的故障诊断理论支持。

故障诊断方法

本节提出基于对电池组电压序列曼哈顿距离的评估方法，通过电压比值分析法检测蓄电池故障类型。本章将具体阐明其理论并给出诊断思路，提出蓄电池组多故障诊断方法的总体流程。

在二维空间内，两个点之间的曼哈顿距离为它们横坐标之差的绝对值与纵坐标之差的绝对值之和。二维空间中两点a、b之间的曼哈顿距离为

$$d_{(a,b)}=\left|x_a-x_b\right|+\left|y_a-y_b\right| \tag{1}$$

式中，$d_{(a,b)}$为点$(x_a,\ y_a)$和点$(x_b,\ y_b)$之间的曼哈顿距离。

对于一组数据样本来说，曼哈顿距离的大小影响着彼此之间的关联度。具体而言，距离越小，表明样本数据之间关联度越高；相反，较低的关联度意味着曼哈顿距离很大。相较于欧几里得距离直接计算两点的直线距离，曼哈顿距离在度量坐标轴内两点距离时，并未对该距离做出延伸或缩短，而是

基金项目：国网江西省电力有限公司2024年科技项目《具备故障电池识别功能的蓄电池组性能评估装置》（5218G024000G）

直接反映两点之间的真实距离。因此，可以考虑通过曼哈顿距离衡量两条直线之间关系。进一步，为量化平面内两条相同长度曲线之间的距离，将传统的曼哈顿距离进行改进，以量化两条等长度曲线之间的曼哈顿距离。如图1所示，A表示曼哈顿距离，B表示欧几里得距离，C表示等效曼哈顿距离。

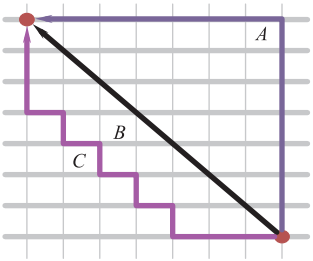

图1　欧氏距离及曼哈顿距离示意图

假设l_1和l_2是二维空间中两条等长曲线，l_1和l_2之间的距离由曲线曼哈顿距离计算，为

$$d=\left|x_1-x_1'\right|+\left|y_1-y_1'\right|+\cdots+\left|x_n-x_n'\right|+\left|y_n-y_n'\right| \tag{2}$$

式中，$(x_n,\ y_n)$和$(x_n',\ y_n')$分别为构成曲线l_1和l_2的n个点；d为曲线l_1和l_2之间的曼哈顿距离。

假设获取的蓄电池组的充放电阶段cell电压序列矩阵为

$$\begin{bmatrix} V_{1,1} & \cdots & V_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{n,1} & \cdots & V_{n,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{k,1} & \cdots & V_{k,m} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，1为电压采样的初始时刻；n为充放电阶段转换时刻；k为放电阶段结束时刻。

式$[V_{1,m},\ V_{n,m}]^T$和$[V_{n,m},\ V_{k,m}]^T$分别为电池组在充电阶段和放电阶段内第m个电池的电压采样；$V_{n,m}$为充电阶段第m个电池在n时刻采样电压，$V_{k,m}$为放电阶段第m个电池在k时刻采样电压。

根据每个电池的采样电压数据，计算充电阶段电池单体之间的曼哈顿距离为

$$d_{(i,j)}=\left|V_{1,i}-V_{1,j}\right|+\left|V_{2,i}-V_{2,j}\right|+\cdots+\left|V_{n,i}-V_{n,j}\right| \tag{4}$$

式中，$d_{i,j}$为蓄电池组内电池$i(i=1,2,\cdots,m)$和$j(j=1,2,\cdots,m)$之间的曼哈顿距离。

建立充电阶段锂电池组曼哈顿矩阵

$$\begin{bmatrix} d_{1,1}' & \cdots & d_{1,j}' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i,1}' & \cdots & d_{i,j}' \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$d_{(i,j)}'=\frac{d_{i,j}-d_{\min}}{d_{\max}-d_{\min}} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} d_{\max}&=\max\left\{d_{1,1},d_{1,2},\cdots,d_{i,j}\right\} \\ d_{\min}&=\min\left\{d_{1,1},d_{1,2},\cdots,d_{i,j}\right\} \end{aligned} \tag{7}$$

式中，$d_{i,j}'$为蓄电池组中i和j单体之间的标准化曼哈顿距离；电池i与电池j均为电池组内电池单体，且$d_{i,j}'=d_{j,i}'$。

对于蓄电池组中的电池，两个单体之间的距离标准化都会映射在一个较小的范围之内，标准化曼哈顿距通常在（0,1）之间。

1）对于充电阶段正常电池的曼哈顿距离通常在0.1附近，阈值的选取与正常电池的标准化曼哈顿距离有关，为能够减少故障遗漏并确保及时预警，需保证阈值不小于正常电池曼哈顿距离，经多次计算与测试，将阈值范围设置在（0,0.17）之间。

2）由于放电倍率、温度等因素的影响，使放电阶段的曼哈顿距离范围远大于正常电池的范围。采取局部加权曼哈顿距离的方法评估，保证放电阶段阈值可以与充电阶段一致。

计算蓄电池组正常电池电压序列、正常电池电压的平均值、故障电池电压与正常电池平均电压之比，公式为

$$[V_1,\cdots,V_n,\cdots,V_k]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \overline{V}_1&=\frac{V_{1,s_1}+V_{1,s_2}+\cdots+V_{1,s_u}}{u} \\ \overline{V}_n&=\frac{V_{n,s_1}+V_{n,s_2}+\cdots+V_{n,s_u}}{u} \\ \overline{V}_k&=\frac{V_{k,s_1}+V_{k,s_2}+\cdots+V_{k,s_u}}{u} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} (\frac{V_{1,f_1}}{\overline{V}_1}-1)\times100\% & (\frac{V_{1,f_2}}{\overline{V}_1}-1)\times100\% & \cdots & (\frac{V_{1,f_p}}{\overline{V}_1}-1)\times100\% \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (\frac{V_{n,f_1}}{\overline{V}_n}-1)\times100\% & (\frac{V_{n,f_2}}{\overline{V}_n}-1)\times100\% & \cdots & (\frac{V_{n,f_p}}{\overline{V}_n}-1)\times100\% \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (\frac{V_{k,f_1}}{\overline{V}_k}-1)\times100\% & (\frac{V_{k,f_2}}{\overline{V}_k}-1)\times100\% & \cdots & (\frac{V_{k,f_p}}{\overline{V}_k}-1)\times100\% \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中，$s_1,\cdots,s_u$和$f_1,\cdots,f_p$分别为锂电池组中的正常和故障电池；u和p分别为正常电池和故障电池数。

通过分析充放电全过程故障电池的电压比变化特征和趋势，判断故障类型。

（1）充电时刻电池电压比变化

电池容量反映电芯老化程度，内阻也随着容量高低而不同，随着内部电化学反应的变化，内阻的升高会使电池更快的升温。

（2）电压比的位置和趋势分析

电池的SOC和终端电压之间存在线性关系，电压比的位置反映当前时刻SOC状态，以此诊断SOC故障。一些故障的产生会迅速引起电池电压变化，表现异于正常电压的变化趋势。

仿真验证

在恒流充电和动态工况放电条件下，针对给定的内阻故障、连接故障和外部短路故障进行电池组仿真模型搭建。

依据测试需求，选择经不同规格的电池测试，所选电池的SOC、欧姆内阻和实际容量见表1。充电阶段以0.5C恒流充电，放电阶段采用WLTC（World Light Vehicle Test Cycle，WLTC）工况电流放电。

表1　所需电池的容量、内阻、SOC参数

电池	1	2	3	4	5	6
容量/（A·h）	100	99.5	99.6	98.9	100	100
欧姆内阻/mΩ	1.41	1.23	1.11	1.21	1.20	1.20
SOC(%)	100	100	100	100	100	100

1）蓄电池组渐进性故障。对2号电池正极处进行虚焊处理，以满足内阻故障。

2）蓄电池组外部故障。外部故障包括连接故障和外部短路故障。在5号电池两端并联一个阻值为10Ω电阻器的开关，开关允许手动闭合，模拟外部短路故障；在6号和7号电池之间加装连接片，附加外部固定阻值为0.2Ω的电阻器，模拟连接故障。

本文选择二阶RC模型（Second-order RC model，RC-2）作为锂电池模型，其电路方程式为

$$\begin{cases} I=\dfrac{U_1}{R_1}+C_1\dfrac{\mathrm{d}U_1}{\mathrm{d}t}=\dfrac{U_2}{R_2}+C_2\dfrac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}t} \\ U=U_{\mathrm{oc}}-U_1-U_2-R_0I \end{cases} \tag{11}$$

式中，U_{oc}为开路电压；R_0为欧姆内阻；R_1、R_2为极化电阻；C_1、C_2为极化电容。

按实验要求进行仿真搭建：1号电池模拟低SOC、低容量故障；2号电池模拟内阻故障；5号电池、7号电池分别模拟外部短路故障、连接故障。仿真所用电池额定容量为100 A·h，额定电压为2.0 V，以0.5C电流进行恒流充电，WLTC工况电流进行放电，在25 ℃为初始温度下进行仿真验证。

结果分析

1. 蓄电池组充放电电压曲线

当只存在渐进故障时，1号电池和2号电池已经表现出异于其他电池的充放电特性。1号电池由于存在多故障情况，表现出非单一故障特性。加入外部故障之后，5号电池和7号电池均呈现出明显异常的端电压情况。当闭合外部短路的开关后，5号电池会形成自回路，电压剧烈变化并伴随迅速强烈的自放电现象。采用10Ω的电阻，使电压效果更加明显。

2. 基于充放电局部加权曼哈顿距离多故障检测

将实验采集的数据通过SVD及KD-Tree-MLLE法处理，提取相关特征参数，进行曼哈顿距离和异常分析下的电压比计算。同时，需要对所得到曼哈顿距离进行标准化处理，便于对故障评估和分析。图2为电池单体之间的曼哈顿距离，经计算本文设置阈值为0.17。标准化曼哈顿距离值在0～1之间，反映各个电池单体之间相似度的变化。其越接近0值，说明电池之间相似程度越高，电池差距越小；反之，越接近1，电池相似度越差，可能存在故障。

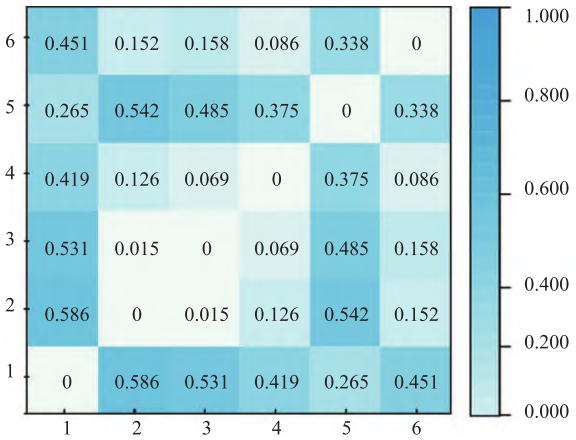

图2　曼哈顿距离

如图2所示，在电池组充电阶段时，可以看到1号电池、2号电池和7号电池与其他电池的距离存在明显差异。其余电池的曼哈顿距离均在阈值范围内，判段3号电池、4号电池、5号电池、6号电池和

8号电池均为正常电池。

由图2可知，在充电阶段2号电池与正常电池之间的曼哈顿距离的最小值超出阈值；在放电阶段2号电池距离最小值0.186大于阈值，由此推断2号电池存在故障。图3为串联电池渐进故障电压比结果。

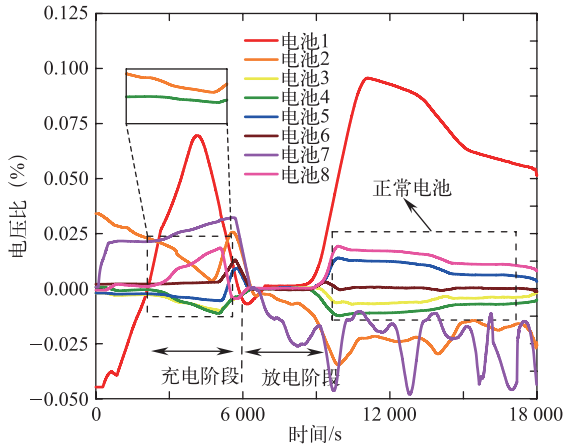

图3　串联电池渐进故障电压比结果

在图3中，渐进故障中包含了两个故障电池单元，分别为1号电池和2号电池。1号电池在充电起始时刻的电压比位于正常电池下方，依据电池的端电压与SOC的线性关系，可判断1号电池具有低SOC故障。若只含有低SOC故障，则电池电压比应随着充放电时间的推移在邻近正常范围之外浮动。但实际上，电压比曲线有明显且异常的升高。1号电池内部表现出非单一故障波动，推断该电池存在混合故障。

如上述所示，当电池组内存在不同的故障时，故障单体会表现出与正常相异的电压偏离现象。通过对电池组充放电阶段使用不同的曼哈顿距离方法进行评估，量化其偏差，可以简便、迅速可靠地定位和检测故障。

结束语

本文针对传统曼哈顿距离在充电阶段研究的单一性及锂电池组电池单体存在混合故障的问题，提出基于局部加权曼哈顿距离及电压比异常综合分析的故障诊断方法，主要贡献为：①提出一种通过KD-Tree-MLLE结合算法进行数据处理，在加快数据筛选速度的同时提高数据处理准确度。相较于MLLE缩短了0.23 s的计算时间，计算效率提升1.3%；②提出一种基于局部加权曼哈顿距离的评估方法，解决放电阶段电池的电压放电倍率差异，以此达到与充电阶段相同的阈值评估标准。综合充放电阶段，保证了曼哈顿距离评估的完整性。量化故障电池单体的完整充放电电压曲线与正常曲线的偏差，对电池组中存在的故障单体进行定位和检测。**EA**

（收稿日期：2025-03-25）

参考文献

[1] 申江卫，岩川，刘永刚，等．基于数据挖掘与大数据分析的电池故障诊断与异常检测[J/OL]．电工技术学报，2024，39（24）：7979-7994。

[2] 段双明，徐超．基于改进残差网络的锂离子电池故障诊断[J]．电池，2023，53(3)：257-261．

[3] 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．

[4] XU J，WANG D．A dual-rate sampled multiple innovation adaptive extended Kalman filter algorithm for state of charge estimation[J]．Energy，2022(46)：18796-18808．

[5] ZHANG K，HU X，Liu Y，et al．Multi-fault detection and isolation for lithium-ion battery systems[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2021，37(1)：971-989．

[6] Zhang F，Xing Z，Wu M．Fault diagnosis method for lithium-ion batteries in electric vehicles using generalized dimensionless indicator and local outlier factor[J]．Journal of Energy Storage，2022(52)：104963．

[7] 张闯，杨浩，刘素贞，等．基于阻抗在线测量的锂离子电池过放电诱发内短路识别研究[J]．电工技术学报，2024，39(6)：1656-1670．