DOI:10.12177/emca.2024.077 文章编号:1673-6540(2024)08-0030-09 中图分类号:TP 206+.3 文献标志码:A

基于 IC 曲线的锂电池早期 ISC 检测研究

杨 林*,陈则王,徐肇凡
(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

Research on Early ISC Detection of Lithium Battery Based on IC Curve

YANG Lin*, CHEN Zewang, XU Zhaofan
(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Internal short circuit (ISC) in lithium-ion batteries is the main cause of thermal runaway accidents, and early identification of ISC faults is crucial to reduce the risk associated with fire or explosion, and traditional detection methods based on filtered capacity increment curves are susceptible to interference. Aiming at the problem of how to extract the characteristic parameters on the capacity increment curve for early internal short circuit detection, a voltage reconstruction model based on the second-order RC equivalent circuit is proposed. Firstly, the capacity increment analysis of lithium battery is carried out using the traditional filtering method, and then the voltage reconstruction model is used for comparison. And the voltage reconstruction model is subjected to anti-noise interference experiments, and the error of the voltage reconstruction is only 0.000 8 V, which lays a foundation for the early internal short circuit detection work. Finally, experiments are carried out on publicly available experimental data to investigate the effects of different charging rates and different battery types on the capacity increment curve. Based on thus, the characteristic peaks used to diagnose short-circuit faults are obtained. The experimental results show that the proposed method based on voltage reconstruction model can effectively counteract noise interference and provide reference for early micro-inner short circuit detection.

Key words: lithium-ion battery; capacity increment curve; voltage reconstruction; early micro short circuit detection

摘 要: 锂离子电池内短路(ISC)是引发热失控事故的主要原因,ISC 故障的早期识别对于降低火灾或爆炸相关的风险至关重要,传统的基于滤波容量增量曲线的检测方法容易受到干扰。针对如何提取容量增量曲线上的特征参数进行早期内短路检测问题,提出了一种基于二阶 RC 等效电路的电压重构模型。首先,使用传统滤波方法对锂电池进行容量增量分析,然后使用电压重构模型进行对比,并对电压重构模型进行抗噪声干扰试验,电压重构的误差仅为 0.000 8 V,为早期内短路检测工作奠定了基础。最后,在公开的试验数据上进行试验,研究了不同充电速率、不同电池类型对容量增量曲线的影响。在此基础上,得到了用于诊断短路故障的特征峰。试验结果表明,所提出的基于电压重构模型的方法能够有效对抗噪声干扰,为早期微内短路检测提供了参考。

关键词: 锂电池; 容量增量曲线; 电压重构; 早期微内短路检测

0 引言

化石燃料储量的枯竭和气候变化带来的问题极大地推动了清洁交通系统、可再生能源和智能电网地发展。由于锂离子电池具有高能量密度、低自放电率、长寿命和环保性等优点,经常被应用于各个行业[1-3]。电池内短路(Internal Short Circuit, ISC)是动力电池的安全隐患之一,被认为是新能源汽车热失控的主要原因之一。

早期内短路检测主要是基于对故障电池的电压、温度等信号进行异常检测[4-5]。然而锂离子电池在发生微内短路时,电压、温度等异常信号并不明显,往往需要较复杂的算法对短路电池异常特征进行提取。

对于单体电池,Yang 等[6]基于分数阶电池故障模型,估计了实测端电压与模拟端电压之间的

基金项目: 航空科学基金资助项目(20183352030, 201933052001)
The Aeronautical Science Foundation of China (20183352030, 201933052001)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

均方根误差（Root Mean Squared Error，RMSE），通过比较两个阈值诊断电池外部短路故障。Yang 等[7]通过对充电电压曲线的变换和评分来鉴定微内短路单体电池，研究了每个单体电池内多个充电段相对位置的演变。该方法计算复杂度较低，但需要多次充电循环，且不能定量估计电阻。

对于串联电池组，Kong 等[8]提出了一种基于剩余充电容量（Remaining Charge Capacity，RCC）和充电电池电压曲线一致性假设的串联电池组微内短路故障检测方法。通过充电电池电压变换计算 RCC，然后根据 RCC 的变化计算微内短路故障的短路电流，得到微内短路故障电阻。Qiu 等[9]通过采用局部离群因子（Local Outlier Factor，LOF）法对储能系统进行故障诊断，该方法能够有效检测不同内短路严重程度的故障电池。Gao 等[10]开发了一个单体差异模型（Cell Difference Model，CDM），通过扩展的卡尔曼滤波算法来估计每个单体电池与串联电池组平均值之间的电池荷电状态（State of Charge，SOC）差异。然后，根据荷电状态差估计电容差，利用递推最小二乘（Recursive Least Square，RLS）法估计短路故障电流，从而实现对 ISC 故障电阻的定量分析。

为了检测早期微内短路，有很多研究提到了容量增量分析方法[11-15]，容量增量（Capacity Increment，IC）曲线可以反映锂电池的内部变化，当锂离子电池发生内短路故障时，电池内部的电化学反应和充放电性能相比正常电池会发生变化，因此可以基于锂离子电池 IC 曲线研究针对锂离子电池微内短路故障的诊断方法。郭煜等[14]利用高斯滤波器滤波后的 IC 曲线来进行早期内短路检测。张健豪等[15]利用小波变换对 IC 曲线进行降噪，然后通过 IC 曲线进行微短路检测，并提出了锂电池微短路的量化方法。然而上述文献在提取 IC 曲线时，采用的是滤波法，滤波所需的参数由主观决定，对于提取到的故障特征，其客观性不能保证。为此，本文提出了一种容量增量曲线的方法用于早期微内短路检测，利用电压重构方法避免了滤波，并且能够有效去除噪声。试验证明，本文所提方法能够有效重构 IC 曲线，准确度远远高于普通滤波方法。

本文的主要贡献包括以下几个方面：

（1）采用二阶等效电路模型进行电压重构，并在电压重构结果的基础上重构 IC 曲线进行微内短路检测，避免了主观以及噪声干扰，具有强鲁棒性。

（2）研究了充电速率对 IC 曲线的影响。在此基础上，得到了诊断短路故障 IC 曲线上的特征峰。

（3）在公开的试验数据集中进行试验，验证本文所提方法的有效性。

1 传统滤波与电压重构模型

1.1 传统滤波算法

目前，容量增量分析（Capacity Increment Analysis，ICA）法已被广泛用于表征电池内部发生的老化机制[16]。从根本上来说，IC 曲线是通过用充电/放电容量 Q 相对于端电压 V 进行求导来确定的，即（$V-\mathrm{d}Q/\mathrm{d}V$）经过处理。$Q-V$ 曲线上难以提取的电压变化平坦区可以转化为清晰可识别的峰值，从而揭示锂离子电池的在整个生命周期内的材料级相变。传统的方法是通过选择合适的滤波器获得 IC 曲线，以充电工况为例，IC 曲线由 $Q-V$ 等式进行微分得到，具体计算如式（1）～式（3）所示：

$$Q=It \tag{1}$$

$$V=f(Q),\ Q=f^{-1}(V) \tag{2}$$

$$(f^{-1})=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V}=\frac{I\,\mathrm{d}t}{\mathrm{d}V} \tag{3}$$

式中：Q 为电池的容量；V 为电池的端电压；I 为电池的充电电流；t 为充电时间；f 为 $Q-V$ 的关系表达式。

使用差分方程对上述微分方程进行近似简化计算过程，即使用固定电压间隔 ΔV 代替 $\mathrm{d}V$，具体的计算如式（4）所示：

$$\left.\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V}\right|_n\approx\frac{\Delta Q_n}{\Delta V_n}=\frac{Q_n-Q_{n-a}}{V_n-V_{n-a}} \tag{4}$$

式中：a 为用户自定义的采样间隔，可以对原始的 IC 曲线进行粗略的平滑。

然后在此基础上，选择一个合适的滤波器对 IC 曲线进行进一步降噪，以方便后续进行内短路检测。

1.2 基于模型的电压重构方法

原始的 IC/DV 曲线包含太多的噪声，无法直

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

接从中提取有用的信息。因此,有必要对原始曲线进行滤波以降低噪声。然而,传统滤波方法所涉及的参数必须经过复杂的优化过程,实现最优化一直是一个严峻的问题。为了克服这一困难,提出了一种基于等效电路模型的电压重构方法。该方法可以有效地重塑 IC/DV 曲线,避免了传统滤波过程。

一般来说,高阶 RC 电路模型比低阶 RC 电路模型能更准确地模拟电池的动态特性。然而,高阶模型往往涉及复杂的计算。因此,为了权衡精度和计算复杂度,本文选择二阶 RC 模型来实现电压重构。二阶等效电路模型由一个开路电压、一个电阻和两组 RC 网络组成,如图 1 所示。

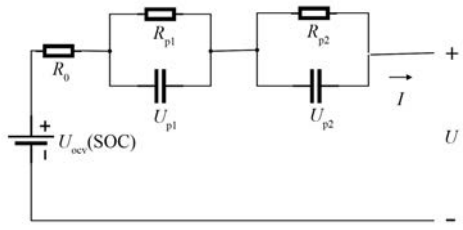


图 1　二阶 RC 等效电路图

Fig. 1　Second-order RC equivalent circuit diagram

由于锂电池的终端电压是由充电和放电时的电极电压和电阻决定的,因此终端电压曲线继承了电极电压曲线中包含的信息。因此,二阶等效电路模型可用于模拟锂离子电池的动态行为,可由式(5)计算:

$$V=V_{\mathrm{OCV}}(\mathrm{SOC})-(V_{\mathrm{p1}}-IR_{\mathrm{p1}})\mathrm{e}^{-Q/I\tau_1}-(V_{\mathrm{p2}}-IR_{\mathrm{p2}})\mathrm{e}^{-Q/I\tau_2}-I(R_0+R_{\mathrm{p1}}+R_{\mathrm{p2}}) \tag{5}$$

式中:V_{OCV} 为开路电压;V_{p} 为极化电压;R_{p} 为极化电阻;R_0 为欧姆电阻;τ_1、τ_2 为时间常数。

此外,V_{OCV}(OCV)不仅取决于电池老化的程度,还受温度的影响。为此,本文引入 Arrhenius 定律,考虑温度对 V_{OCV}(OCV)函数的影响,V_{OCV}(OCV)可由式(6)计算:

$$V_{\mathrm{OCV}}(\mathrm{SOC})=\exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}}-\frac{1}{T}\right)\right]\sum_{i=1}^{j}a_i\mathrm{SOC}^i \tag{6}$$

式中:E 为活化能;R 为气体常数;T_{ref} 为参考温度;T 为当前温度;a_i 为常数,i 为 SOC 中多项式的阶数。

其中,SOC 定义为电池剩余容量与最大可用容量的百分比,如式(7)所示:

$$S=S_0+\frac{Q}{Q_{\max}} \tag{7}$$

式中:S_0 为电池在时间 $t=0$ 时的 SOC;$Q_{\max}$ 为电池当前的最大容量。

结合 Arrhenius 定律构造二阶 RC 模型,将方程混合得到式(8),可用于拟合 $Q-V$ 曲线,实现电压重构[17]。

$$V=\exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}}-\frac{1}{T}\right)\right]\sum_{i=1}^{j}a_i\left(S_0+\frac{Q}{Q_{\max}}\right)^i-(V_{\mathrm{p1}}-IR_{\mathrm{p1}})\mathrm{e}^{-Q/I\tau_1}-(V_{\mathrm{p2}}-IR_{\mathrm{p2}})\mathrm{e}^{-Q/I\tau_2}-I(R_0+R_{\mathrm{p1}}+R_{\mathrm{p2}}) \tag{8}$$

式(8)可简化为

$$V=b_1\sum_{i=1}^{j}a_i\left(S_0+\frac{Q}{Q_{\max}}\right)^i+b_2\mathrm{e}^{b_3Q}+b_4\mathrm{e}^{b_5Q}+b_6 \tag{9}$$

式中:b_1 为式(6)中的 Arrhenius 项,它是唯一与温度相关的常数,取值在[0.5,1.5]区间内;$Q_{\max}\in[Q_{\mathrm{end}},\ Q_{\max,0}]$,$Q_{\mathrm{end}}$ 为恒流充电过程结束时的充电容量,$Q_{\max,0}$ 为电池初始最大容量;S_0 为初始 SOC,应限制在[0,1]区间;a_i 为 $U_{OCV}(OCV)$ 函数中的常数项,$a_i\in(-\infty,+\infty)$;b_2、b_3、b_4、b_5、b_6 分别表示式(9)中对应项的缩写,其取值范围应为$(-\infty,0)$。

本文将参数辨识问题简化为非线性最小二乘优化问题[17]。常数 a_i 只能通过拟合初始 $Q-V$ 曲线得到。b_1、b_2、b_3、b_4、b_5、b_6、S_0 和 $Q_{\max}$ 必须随着电池的老化而不断更新。在基于最小二乘法的参数识别过程中,必须对参数施加一定的限制。

2　试验结果验证与评估

2.1　试验数据集

本文为了实现和验证所提出的方法,使用了来自哈尔滨工业大学的内短路数据集[18]。电池参数如表 1 所示,本文用到的是 1 号、6 号、13 号和 33 号电池,充电速率分别为 0.5 C、0.7 C、1.0 C 和 0.5 C。正常测试是指电池在充电和放电时没有外部电阻,ISC 测试是指电池在充电和放电过程中通过并联电阻模拟电池的 ISC 电气性能,如图 2 所示,这是由于外短路和内短路具有相同电气特性[19]。本文主要使用了并联电阻 10 Ω、20 Ω、50 Ω、100 Ω 和 200 Ω 的数据来验证方法有效性。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

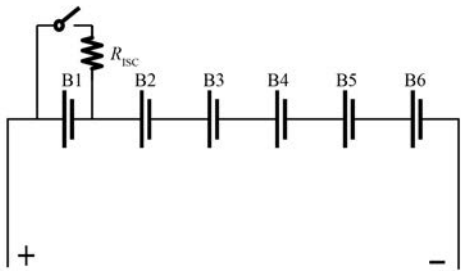


图 2　串联电路原理图

Fig. 2　Series circuit schematic diagram

充电方式：在正常和 ISC 测试中，电池在均匀恒流恒压（Constant-Current-Constant-Voltage，CC-CV）模式下，以不同充电速率从 2.75 V 充电至 4.2 V，并在 C/5 的电流截止下，以不同的 CC 速率下从 4.2 V 放电至 2.75 V，环境温度保持在 25 ℃。

表 1　电池参数

Tab. 1　Battery parameters

参数名称	18650	18650
负极材料	石墨	石墨
正极材料	$LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$	$LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O_2$
额定电压/V	3.7	3.7
截止电压/V	2.75～4.2	2.75～4.2
额定容量/Ah	2.7	2.4

根据试验集的数据做出如图 3 所示的充电时间-电压图像。

从图 3 中可以看出，并联了内短路电阻的电池需要充电更长的时间才能达到相同电压，原因是充电时内电路电阻消耗了额外的能量，且电阻越小，消耗的能量越多[8]。

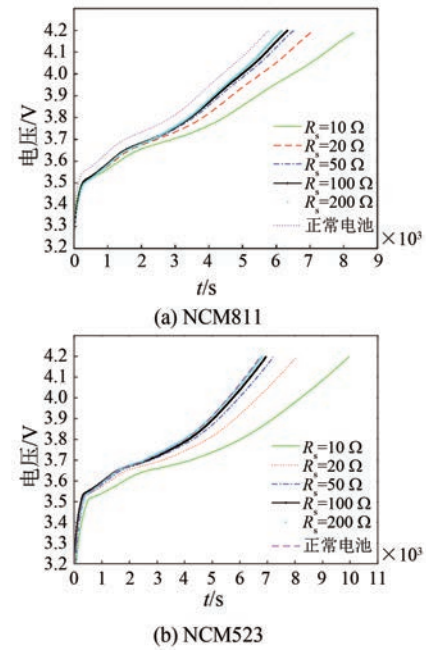
2.2　传统滤波方法试验结果分析

如图 4 所示，先使用平滑滤波计算窗口内数据点的均值来减少噪声并平滑信号，这里使用的窗口大小为 30，然后再使用高斯平滑滤（Gaussian Smoothing Filter，GSF）波器进行滤波，GSF 处理 IC 曲线。GSF 根据高斯函数取得数据的加权平均值来实现滤波，其表达式为

$$G(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{10}$$

式中：x 为输入数据；σ 为控制滤波窗口大小的标准差；μ 为均值。

本文高斯滤波器的 x 设为 30、σ 为 10，选取 0.5 CC 充电速率下不同内短路电阻的电池充电数据，最终得到如图 4 所示经过滤波处理后的不同内短路电阻的 IC 曲线图。



(a) NCM811

(b) NCM523

图 3　不同电池类型的充电时间

Fig. 3　Charging time for different battery types

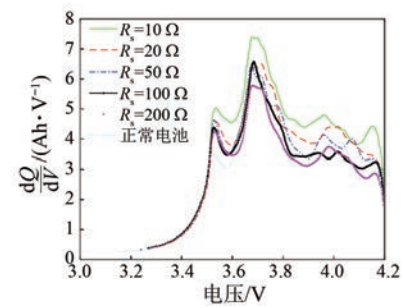


图 4　传统滤波方法

Fig. 4　Conventional filtering method

从图 4 中可以看出，当阻值为 10 Ω 时，IC 曲线的峰值较明显，阻值越大，峰值出现失真，只有从左到右的第一个峰比较明显。由此可以看出，滤波处理后的 IC 曲线也可以进行内短路检测，但是峰值信息容易失真，造成误判等。

2.3　电压重构方法试验结果分析

为了对拟合效果进行评估，引入均方根误差（RMSE），如式（11）所示：

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[h(x_i)-y_i]^2} \tag{11}$$

式中：n 为电池内短路试验循环充放电次数；$h(x_i)$、y_i 分别为预测值与实际值。

针对滤波方法得到的 IC 曲线容易出现失真

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

等问题，本小节采用二阶 RC 等效电路模型进行电压重构，并在电压重构结果的基础上重构 IC 曲线进行微内短路检测，可以避免噪声干扰，具有强鲁棒性。

本节以并联 20 Ω 内短路电阻电池数据为例，构建二阶 RC 模型，实现电压重构。因此，在本文中，根据 $Q-V$ 曲线的拟合精度，将式(9)中的 j 值设为 10，其余参数通过最小二乘辨识得到[20]。拟合电池初始 $Q-V$ 曲线得到的参数辨识结果如表 2 所示。

图 5 列出了基于二阶 RC 等效电路模型的 $Q-V$ 曲线拟合结果与误差的对比。可以看出，二阶 RC 模型得到的 $Q-V$ 拟合曲线非常接近电压测量曲线，RMSE 仅为 0.000 8 V。这说明了本文提出的基于二阶 RC 模型的电压重构方法能较好地拟合电压，这为后续基于 IC 曲线检测内短路奠定了基础。

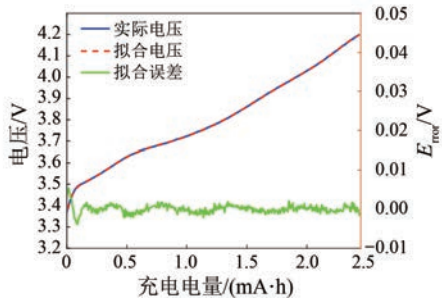


图 5　20 Ω 内短路电阻电池的 $Q-V$ 拟合曲线

Fig. 5　$Q-V$ fitting curves of a battery with a 20 Ω ISC resistance

表 2　通过对电池初始 $Q-V$ 曲线拟合得到的参数辨识结果

Tab. 2　Parameters identification results obtained by fitting the initial $Q-V$ curves of the battery

参数名称	参数值	参数名称	参数值
a1_est	−2.13	a10_est	72.8
a2_est	20.24	b1_est	1.00
a3_est	−54.9	b2_est	−0.125
a4_est	26.5	b3_est	−16.3
a5_est	136.6	b4_est	3.58
a6_est	−225.95	b5_est	−20.0
a7_est	−7.94	b6_est	−0.01
a8_est	296.4	S_0	0.006 9
a9_est	−261.1	Q_{max}	2.243 1

为了评估电压重构方法对噪声破坏的鲁棒性，使用包含人工噪声的测量值实现电压重构。噪声通过以下方式添加到测量的电压和电流中。

$$I_{noise}=I(1+10\sigma\cdot G) \tag{12}$$

$$I_{noise}=V(1+\sigma\cdot G) \tag{13}$$

式中：σ 为噪声率；G 为正态分布的高斯噪声。

不同噪声率下的拟合结果如图 6 所示。结果表明，在不同噪声强度下，估计电压与实测电压仍较吻合，误差为 0.004 9 V 和 0.01 V，表明所提方法对噪声破坏具有鲁棒性。

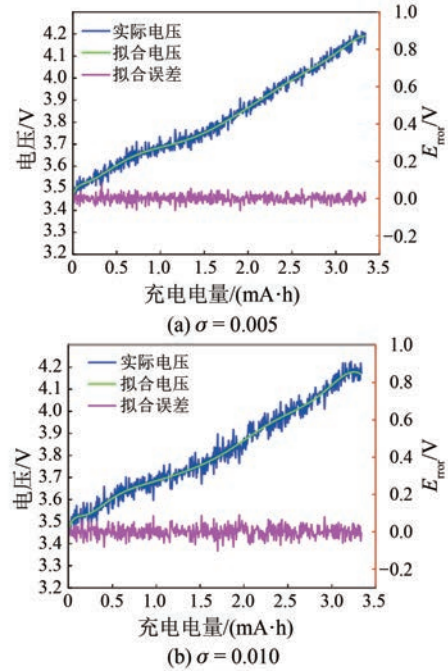


图 6　模拟具有不同噪声率的 $Q-V$ 曲线

Fig. 6　Simulation of $Q-V$ curves with different noise levels

在得到二阶模型的 $Q-V$ 关系后，可由式(3)得到重构后的 IC 曲线。图 7 为重构的充电过程中不同内短路电阻的 IC 曲线。

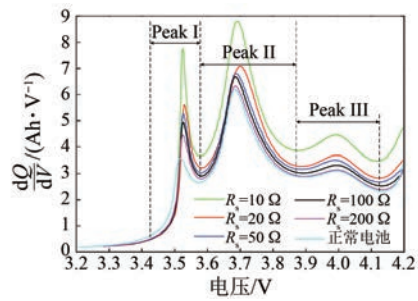


图 7　电压重构方法

Fig. 7　Voltage reconfiguration method

从图 7 中可以看到，随着内短路电阻阻值的减小，各个峰的峰值在增加，从左往右的三个峰都很

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

明显，并且 IC 曲线整体在渐渐上移。这是因为内短路电阻的存在，内短路电池的充电电量会大于普通电池，从而造成 IC 曲线峰值上移，这给通过 IC 曲线特征峰进行内短路检测奠定了基础[21]。

2.4 微内短路故障时 IC 曲线特性分析

2.4.1 同一电池类型不同充电速率对比

通过 2.3 的分析可以看出，不同程度的短路故障导致了 Peak I 和 Peak II 的差异，也就是说，可以通过 IC 曲线的 Peak I 和 Peak II 进行故障诊断，不需要完整的充电电压曲线，相对更有利于早期 ISC 故障诊断。在应用中，充电方式分为快充、慢充和脉冲充电等，即充电电流不同。基于电压重构模型，研究了不同充电速率下的 IC 曲线特性，如图 8 所示。

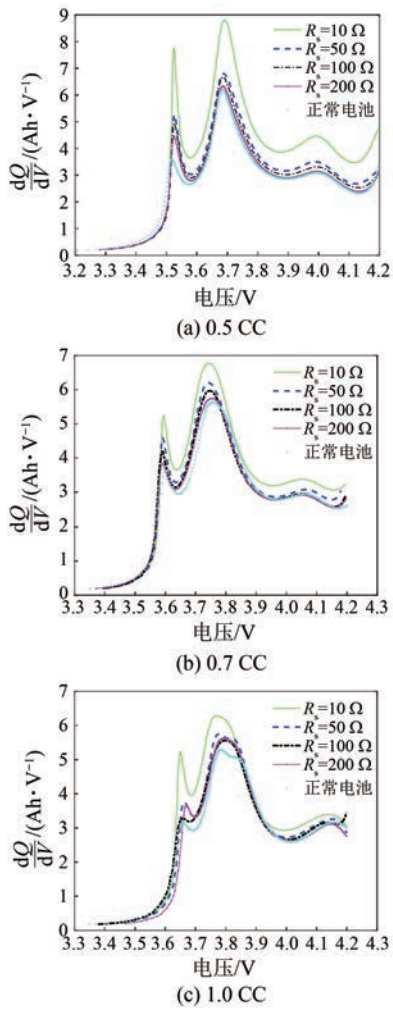


图 8 不同充电速率下的 IC 曲线

Fig. 8 IC curves at different charge rates

从图 8 中可以看出，在 1 C 充电速率下，有部分 IC 曲线的峰出现失真，尤其是 Peak II，Peak I 依然比较明显。在 0.7 C 速率下，IC 曲线峰差比较明显，峰也没有出现失真。当充电速率降低到 0.5 C 时，如图 8(a)所示，IC 曲线的特征峰差更为明显。这意味着小充电速率更适合于微内短路故障的诊断。

从图 8 中可以看出，当内短路严重程度为 200 Ω 时，电压重构方法仍然能够重构出该电池 IC 曲线的峰值，并且 Peak I 和 Peak II 与正常电池存在比较明显的差异，后续可提取峰值之间的平均绝对误差来进行高精度的内短路故障诊断。

2.4.2 同一充电速率不同电池类型对比

根据前面介绍的电压重构方法，作出不同电池类型的不同内短路电阻的 IC 曲线，其充电倍率都是 0.5 CC，结果如图 9 所示。从图中可以看出 NCM811 的 IC 曲线特征峰差异更明显，而且具有三个峰，而 NCM523 只有两个峰，Peak I 和 Peak II，Peak I 仍然可以用于进行内短路检测。

本小节在不同类型的电池上进行了 IC 曲线重构，重构的 IC 曲线特征峰 Peak I 和 Peak II 在不同的内短路电阻下具有明显差异，为内短路检测提供了参考。由此也可以说明基于二阶 RC 等效电路的电压重构模型可以重构不同电池类型的 IC 曲线，具有普适性。

3 结语

本文首先提出了基于二阶 RC 等效电路的电压重构，在电压重构的基础上重构了 IC 曲线，然后探究了不同内短路电阻下、不同充电速率以及不同电池类型的 IC 曲线从而得到故障特征，得出了以下结论。

(1) 本文建立的基于二阶 RC 等效电路的电压重构方法能够重构电池的 $Q-V$ 曲线，误差仅为 0.000 8 V，从而有效得到电池 IC 曲线，而无需进行滤波，能抵抗强噪声干扰。

(2) 锂离子电池在不同充电速率下表现出的 IC 曲线不一样，充电速率越小 IC 曲线峰值差异越明显，不容易失真，且 Peak I 更不容易失真，更适合作为故障特征。

(3) 本文所建立的 IC 曲线能够为微内短路检测提供参考，精度高，能够准确提取出故障特征。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

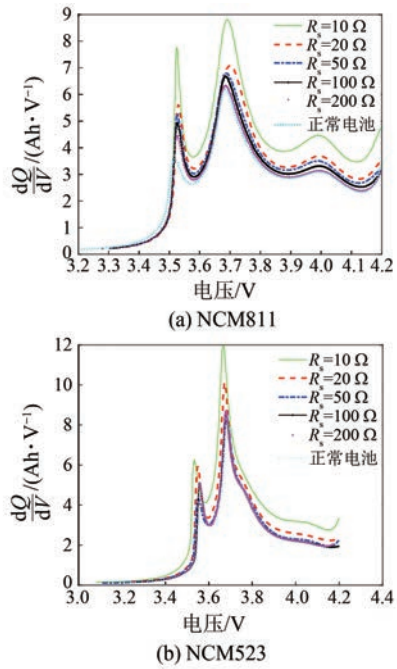


图 9　不同电池类型的 IC 曲线

Fig. 9　IC curves of different battery types

参 考 文 献

[1] 王晗蕊，陈则王，徐肇凡. 基于 ICA 的锂电池 SOH 估计曲线确定方法研究[J]. 电机与控制应用，2024，51(2)：71-79.
WANG H R，CHEN Z W，XU Z F. Research on ICA-based method for determining SOH estimation curve of lithium battery [J]. Electrical Machines & Control Application，2024，51(2)：71-79.

[2] 刘怡，穆苗苗，张友琅，等. 退役动力电池在光伏储能中应用[J]. 电源技术，2019，43(1)：126-128+132.
LIU Y，MU M M，ZHANG Y L，et al. Energy storage application of EV retired batteries in distributed PV generation [J]. Chinese Journal of Power Sources，2019，43(1)：126-128+132.

[3] 吴志程，朱俊杰，许金，等. 电磁发射用“锂电池-超级电容”混合储能技术研究综述[J]. 电机与控制应用，2021，48(3)：1-6.
WU Z C，ZHU J J，XU J，et al. Research overview of "lithium-ion battery-supercapacitor" hybrid energy storage technology for electromagnetic emission [J]. Electric Machines & Control Applications，2021，48(3)：1-6.

[4] 王其钰，王朔，周格，等. 锂电池失效分析与研究进展[J]. 物理学报，2018，67(12)：279-290.
WANG Q Y，WANG S，ZHOU G，et al. Analysis and research progress of lithium-ion battery failure [J]. Acta Physica Sinica，2018，67(12)：279-290.

[5] 苟琦智，许冀阳，孟妮. 锂离子电池内部短路研究综述[J]. 小型内燃机与车辆技术，2022，51(4)：89-92.
GOU Q Z，XU J Y，MENG N. Research progress on internal short circuit of lithium-ion battery [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle，2022，51(4)：89-92.

[6] 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.

[7] YANG Q，SUN J，KANG Y，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.

[8] KONG X D，ZHENG Y J，OUYANG M G，et al. Fault diagnosis and quantitative analysis of micro-short circuits for lithium-ion batteries in battery packs [J]. Power Sources，2018，395：358-368

[9] QIU Y S，DONG T，LIN D，et al. Fault diagnosis for lithium-ion battery energy storage systems based on local outlier factor [J]. Journal of Energy Storage，2022，55：105470.

[10] GAO W K，ZHENG Y J，OUYANG M G，et al. Micro-short-circuit diagnosis for series connected lithium-ion battery packs using mean-difference model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2018，66(3)：2132-2142.

[11] ZHANG K，JIANG L L，DENG Z W，et al. An early soft internal short-circuit fault diagnosis method for lithium-ion battery packs in electric vehicles [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2023，28(2)：644-655.

[12] LIAO L，HU X T，CHEN H，et al. Quantitative diagnosis of micro-short circuit for lithium-ion batteries considering aging based on incremental capacity curve [J]. Journal of Energy Storage，2024，79：110240.

[13] ZHAO X L，WANG J Z，ZHAO M M，et al.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Micro-short circuit fault diagnosis of the parallel battery module based on increment capacity curve [J]. Journal of Energy Storage，2024，86：111201.

[14] 郭煜，王亦伟，钟隽，等. 基于增量容量曲线的锂离子电池微内短路故障诊断方法[J]. 储能科学与技术，2023，12(8)：2536-2546.
GUO Y，WANG Y W，ZHONG J，et al. Fault diagnosis method for microinternal short circuits in lithium-ion batteries based on incremental capacity curve [J]. Energy Storage Science and Technology，2023，12(8)：2536-2546.

[15] 张健豪，高兴奇，张莉. 基于容量增量曲线与充电容量差的电池组微短路诊断方法[J]. 汽车工程，2023，45(2)：191-198＋230.
ZHANG J H，GAO X Q，ZHANG L. Micro short circuit diagnosis method of battery pack based on capacity increment curve and charge capacity difference [J]. Automotive Engineering，2023，45(2)：191-198＋230.

[16] FAN Y X，XIAO F，LI C R，et al. A novel deep learning framework for state of health estimation of lithium-ion battery [J]. Journal of Energy Storage，2020，32：101741.

[17] BIAN X L，WEI Z B，HE J T，et al. A novel model-based voltage construction method for robust state-of-health estimation of lithium-ion batteries [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2020，68(12)：12173-12184.

[18] CUI B H，WANG H，LI R L，et al. Long-sequence voltage series forecasting for internal short circuit early detection of lithium-ion batteries [J]. Patterns，2023，4(6)：100732.

[19] 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.

[20] XIA F，WANG K G，CHEN J J. State of health and remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on a disturbance-free incremental capacity and differential voltage analysis method [J]. Journal of Energy Storage，2023，64：107161.

[21] QIAO D D，WANG X Y，LAI X，et al. Online quantitative diagnosis of internal short circuit for lithium-ion batteries using incremental capacity method [J]. Energy，2022，243：123082.

收稿日期：2024-04-23
收到修改稿日期：2024-05-21

作者简介：

杨林(1999－)，男，硕士研究生，研究方向为失效故障预测，nuaayanglin@nuaa.edu.cn；

＊通信作者：杨林(1999－)，男，硕士研究生，研究方向为失效故障预测，nuaayanglin@nuaa.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

 DOI: 10.12177/emca.2024.077

Research on Early ISC Detection of Lithium Battery Based on IC Curve

YANG Lin*, CHEN Zewang, XU Zhaofan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Key words: lithium-ion battery; capacity increment curve; voltage reconstruction; early micro short circuit detection

The depletion of fossil fuel reserves and the problems posed by climate change have greatly contributed to the development of clean transportation systems, renewable energy and smart grids. Lithium-ion batteries are widely used in various industries due to their high energy density, long service life and environmental friendliness. Internal short circuit (ISC) of lithium-ion batteries is considered a safety hazard for power batteries and one of the main causes of thermal runaway in new energy vehicles. Thermal runaway of Li-ion batteries may lead to disasters, causing property damage and even casualties. Therefore, researchers have been trying to prevent thermal runaway of Li-ion batteries. The initial stage of internal short-circuiting in lithium-ion batteries has almost no visible indicators and is difficult to recognize. Methods utilizing incremental capacity curves can be effective in detecting early internal short circuits, however, research on detecting internal short circuits in lithium-ion batteries using the characteristic parameters of incremental capacity (IC) curves is relatively limited.

In this paper, the IC curves under different degrees of short circuit are obtained using both traditional filtering methods and a voltage reconstruction method based on a second-order RC circuit. When using the filtering method, the parameters required for filtering are subjectively determined, and the objectivity of the extracted fault features cannot be guaranteed. Additionally, the filtering parameters lack robustness, as tuning parameters for one charging process may not be applicable to another, especially when lithium batteries are nearing their end of life. The proposed method in this paper for obtaining the interference-free capacity increment curve utilizes the voltage reconstruction method, which avoids filtering and effectively combats subjectivity and noise interference. It exhibits higher robustness compared to traditional filtering methods and avoids subjectivity and uncertainty in feature parameter extraction.

Experiments are carried out on the open source dataset of Harbin Institute of Technology, and the reconstruction error of the $Q-V$ curve by the voltage reconstruction proposed method in this paper is only 0.000 8 V. Experiments are carried out on the datasets with different charging rates and different battery types respectively, and the IC curves obtained by the voltage reconstruction method showed different characteristics in different degrees of battery short-circuiting, which is conducive to the extraction of fault characteristics and provide reference for early ISC detection lays the foundation.

Given that constant-current-constant-voltage charging is the standard charging protocol for lithium-ion battery systems, the voltage reconstruction proposed method in this paper has a wide range of application scenarios. However, since the IC curve may distort under high charging rates, the proposed method in this paper is more suitable for scenarios with low charging rates. Additionally, normal aging of batteries also leads to an increase in internal resistance, so distinguishing between battery aging and ISC is an area that requires further effort

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

DOI: 10.12177/emca.2024.077

in the future.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.