DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.196 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

电池组不一致性参数估算方法

陈智伟[1,2]，张婷婷[2]，张维戈[1,2]，张言茹[1,2]，张珺玮[1]
(1.北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心，北京 100044；2.重载快捷大功率电力机车全国重点实验室，株洲 412000)

摘要：锂离子电池不一致性问题是影响电池组整体性能输出的关键因素之一，准确的不一致性参数估计对电池组的健康管理和优化控制至关重要。针对传统复杂电池单体参数估计算法拓展至电池组内所有单体应用时存在的计算量过大问题，提出了一种基于离线电池单体仿真数据库的不一致性参数估算方法。首先，通过搭建等效电路模型仿真生成综合的电池样本数据库；然后，从目标电池充电数据中提取片段电压特性曲线与数据库进行比对，基于相似性度量锁定最佳匹配样本，从而实现对组内所有电池单体容量及内阻的快速估算；接着，考虑到方法中插值误差及实际应用中电压采样误差的干扰，提出了基于窗口滑动搜索的修正机制，提高估计精度；最后，在实验室环境搭建的60个电池单体串联而成的电池组上进行了方法验证。结果表明，容量平均绝对百分比误差MAPE(mean absolute percentage error)不超过0.40%，内阻MAPE不超过2.60%，且在模拟采样误差的噪声数据上保持了较好的稳定性。

关键词：锂离子电池；不一致性参数估算；等效电路模型；电压特性曲线

Battery Parameter Estimation Method Based on Simulation Database

CHEN Zhiwei[1,2], ZHANG Tingting[2], ZHANG Weige[1,2], ZHANG Yanru[1,2], ZHANG Junwei[1]
(1. National Active Distribution Network Technology Research Center (NANTEC), Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. National Key Laboratory of Heavy-haul, Express and High-power Electric Locomotives, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The inconsistency problem of lithium-ion batteries is one of the key factors affecting the overall performance output of battery packs, and accurate estimation of inconsistency parameters is crucial for the health management and optimization control of battery packs. The traditional complex single battery cell parameter estimation algorithm faces the problem of huge computational complexity when extended to all cells within the battery pack. A method for estimating inconsistent parameters based on an offline single battery cell simulation database is proposed. First, by building an equivalent circuit model to simulate and generate a comprehensive battery sample database. Then, segment voltage characteristic curves are extracted from the target battery charging data and compared with the sample library. Based on similarity measurement, the best matching sample is locked, thereby achieving rapid estimation of the capacity and internal resistance of all battery cells in the group. Subsequently, considering the interference of interpolation errors in the method and voltage sampling errors in practical applications, a correction mechanism based on sliding window search is proposed to improve estimation accuracy. Finally, method validation was conducted on 60 single battery-cell series connected battery packs set up in a laboratory environment. The results showed that the mean absolute percentage error (MAPE) of the capacity did not exceed 0.40%, and MAPE of the internal resistance did not exceed 2.60%, and maintained good stability on simulated sampling error noise data.

Keywords: Lithium-ion battery; inconsistency parameter estimation; equivalent-circuit model; voltage characteristic curve

收稿日期：2024-12-29；**修回日期**：2025-02-08；**录用日期**：2025-02-24；**网络首发日期**：2025-05-14
基金项目：重载快捷大功率电力机车全国重点实验室开放课题资助项目(KFKT2022-016)
This work is supported by the Open Project Program of National Key Laboratory of Heavy-haul, Express and High-power Electric Locomotive under the grant KFKT2022-016

新能源汽车行业是国家力争实现 2030 年前“碳达峰”和 2060 年前“碳中和”重大战略决策的新兴产业。作为新能源汽车的主要动力来源，锂离子电池的健康状态决定着整车的安全性能[1-2]。通常情况下，锂离子电池需要将多个单体串并联形成电池组进行使用，以满足对能量和功率的需求[3]。然而在实际运行中，电池组内各单体的工作温度和充放电程度等差异会降低电池组的可用容量[4-5]，影响电池组的工作性能。因此，快速、准确的单体不一致性参数估算变得尤为重要。

大多数研究表明，电池当前状态下的最大可用容量及内阻参数是反映电池健康状态的重要指标[6]。此外，单体容量不一致性和内阻不一致性也是直接影响电池组整组可用容量的关键因素[7]。国内外对电池容量及内阻的估算方法较多[8-10]。文献[11]提出了充电容量增量曲线特征峰半峰面积与电池最大可用容量的关系，采用递推更新算法在线计算半峰面积，进而估算电池容量，结果表明容量估计误差小于 3%；文献[12]使用实验中完整的充电曲线和相应的容量作为电池的训练数据，通过构造目标函数，利用粒子群算法确定最优固定电压窗口。然后通过在线计算固定电压窗口期间的充电容量估算出电池容量，结果表明容量估计的均方根误差 RMSE(root mean square error)为 1.91%，平均绝对误差 MAE(mean absolute error)为 3.37%。这些方法往往依赖复杂的运算模型，在面对由大量单体串联成的电池组时，对组内所有单体进行估计将会消耗大量的时间和运算成本。

基于现有技术路线，考虑到电池的实际使用情况，本文提出了一种基于片段充电数据快速、精确估算电池组内单体不一致性参数的方法。首先，搭建了单体等效电路模型，通过手动配置容量及内阻参数，生成了覆盖电池全寿命周期下不同健康状态的仿真样本数据库。然后，在电池组实测数据中，截取能够表征电池健康状态的充电电压曲线段，与仿真数据库样本进行比对，并采用欧氏距离作为曲线相似性的度量指标，通过遍历仿真数据库对电池容量、内阻进行快速估计。接着，提出了基于窗口滑动搜索的修正机制，以解决方法中存在的插值误差及实际情况中电压采样误差的干扰。最后，在实验室环境搭建的 60 个单体串联而成的电池组上进行了方法验证。在面对成组电池的单体不一致性问题时，所提方法借助离线构建的仿真数据库，不仅提升了参数估算的准确性，还显著减少了在线运算量，为电池组层面的一致性评估和系统维护提供了参考。

1　单体不一致性参数估算方法

1.1　基于数据库遍历的单体容量、内阻估算流程

采用数据库遍历的方法估算组内单体参数的具体流程如图 1 所示，主要分为 3 个单元：数据段提取，样本匹配度计算与容量、内阻估算。图中：$S_{\mathrm{SOC},i0}$ 为充电起始时刻单体 i 的荷电状态 SOC(state of charge)；$S_{\mathrm{SOC},ij}$ 为单体 i 所截取片段在数据库中样本 j 上对应的窗口起始位置 SOC；$U_{\mathrm{OCV},i0}$ 为电池组充电开始前单体 i 的静态开路电压 OCV(open circuit voltage)；q_{ch} 为窗口起始位置电池组充电容量；Q_j 为数据库中第 j 个样本的电池最大可用容量；

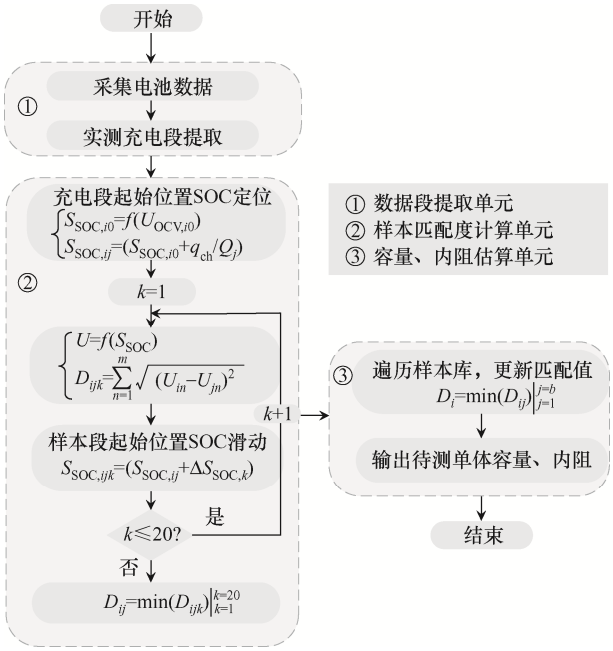


图 1　电池容量、内阻估算方法流程

Fig. 1 Flow chart of battery capacity and internal resistance estimation method

$f(S_{SOC})$为外电压曲线与 SOC 之间的映射关系；D_{ijk}为在窗口滑动搜索中计算的单体 i 电压曲线段与样本 j 电压曲线段的曲线距离；k 为滑动次数；m 为所截取窗口中包含的总电压点数；U_{in}、U_{jn} 分别为电池组内第 i 个单体、数据库中第 j 个样本在截取的窗口电压曲线上的第 n 个电压点；D_{ij} 为滑动过程相似度最高的窗口所对应的电压曲线欧氏距离；D_i 为单体 i 与数据库中匹配度最高的样本之间的电压曲线欧氏距离；b 为库中样本总数。

数据段提取单元用于电池数据的采集和处理。本文所提出的容量、内阻估算方法主要依赖充电过程局部的电压特性曲线，因此截取指定窗口下的实测电池组充电段作为目标数据。窗口位置及窗口大小的选取对估计结果的影响将在第 3.2 节展开讨论。样本匹配度计算单元用于判断目标电压曲线片段与数据库中样本电池电压曲线片段的相似度。具体来说，基于电池 OCV-SOC 拟合关系对目标单体的充电起始 SOC 进行辨识，并结合实际充电容量情况，获取所截取电压曲线段在数据库中对应样本上的大致窗口起始位置，具体表达式为

$$\begin{cases} S_{SOC,i0} = f(U_{OCV,i0}) \\ S_{SOC,ij} = (S_{SOC,i0} + q_{ch} / Q_j) \end{cases} \tag{1}$$

在确定样本窗口起始位置时，由于采用 OCV-SOC 拟合关系插值来获取单体起始 SOC，不可避免地会引入计算误差，特别是在电压变化率较小的充电电压平台期。此外，在实际应用中受传感器精度影响所带来的电压采集误差也会干扰这一过程，使得窗口起始位置获取不准确，进而影响后续的单体参数估计精度。因此，本文采用窗口滑动搜索的方式对窗口起始位置 SOC 进行修正。根据式(1)选定样本窗口起始位置，以 0.1%SOC 为步进值，双向各滑动 1.0%SOC 形成搜索区间，生成附近位置的多个候选子窗口，继而计算每个子窗口电压曲线段与目标电压曲线段的匹配度，选取匹配度最佳的窗口用于后续估算。窗口起始位置 SOC 修正的滑动搜索过程可表示为

$$S'_{SOC,ij} = S_{SOC,ijh} \big| (h = h_{best}) \tag{2}$$

式中：$S'_{SOC,ij}$ 为修正后的窗口起始位置 SOC；$S_{SOC,ijh}$ 为在数据库中样本 j 上滑动的第 h 个子窗口的起始 SOC；h_{best} 为在滑动过程中匹配度最高的子窗口。

容量、内阻估算单元通过遍历数据库，循环执行样本匹配度计算单元，找到匹配度最高的样本，继而将该样本对应的容量、内阻作为估计结果输出。

1.2 样本匹配度指标

在衡量 2 段曲线之间相似性的方法中，较为常用的是计算样本曲线与目标曲线之间的距离。常见的曲线距离表达方式较多[13-14]，如欧氏距离、曼哈顿距离、切比雪夫距离等。欧氏距离是指 2 个点之间的线段长度，主要用于低维数据的运算，且随着数据维度的增加，其使用效果会越来越小；曼哈顿距离又称城市街区距离，主要用于计算 2 点之间的实值向量距离，虽不涉及对角线运动，但有可能不是最短路径；切比雪夫距离是指 2 个向量在任意坐标维度上的最大距离，通常在特定用例中使用。本文在样本匹配度计算过程中关注的是 2 条窗口电压曲线之间的电压差异，属于一维方向上的距离计算。因此，采用欧氏距离作为样本匹配度指标，表达式为

$$\begin{cases} U = f(S_{SOC}) \\ D_{ijk} = \sum_{n=1}^{m} \sqrt{(U_{in} - U_{jn})^2} \\ D_{ij} = \min(D_{ijk}) \big|_{k=1}^{k=20} \end{cases} \tag{3}$$

D_{ij} 越小，表示相似度越高。通过遍历数据库，获取最小的欧氏距离，表达式为

$$D_i = \min(D_{ij}) \big|_{j=1}^{j=b} \tag{4}$$

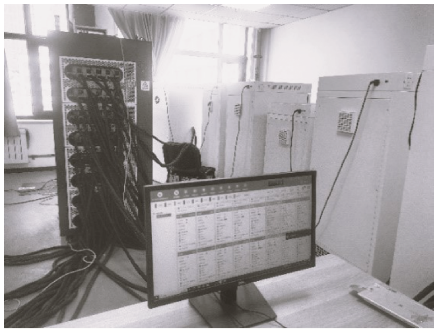
根据式(3)与式(4)可得目标单体与欧氏距离最小的样本具有较高的相似性，进而认为目标单体的电池容量、内阻参数与该样本的参数近似一致。

2 等效电路模型搭建及离线数据库生成

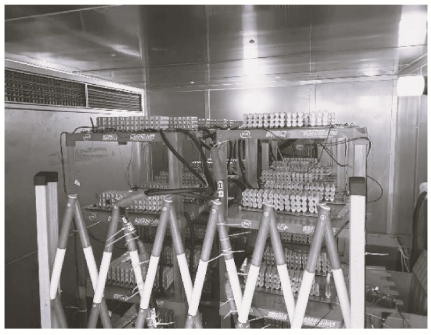
2.1 动力电池测试平台

为模拟电池组中串联单体容量及内阻的不一

致性，搭建了如图 2 所示的电池组测试平台，电池组由 60 个单体串联而成，每个单体由多节型号为 18650、材料为镍钴锰酸锂($Li(NiCoMn)O_2$)的圆柱形电芯并联组成，电芯型号为 LR1865SK，额定容量为 2.6 A·h,额定电压为 3.65 V,工作电压为 2.75 V~4.20 V。通过控制电芯并联节数实现对各串联单体容量和内阻的不一致配置。以 48 节小电芯并联的单体作为标准单体，额定容量为 124.8 A·h。本文采用 MACCOR Series 4000 电池标准单体测试系统和恒温箱设备对电池进行包括 OCV-SOC 和集总内阻的参数测试与数据采集，构建单体等效电路模型，保证数据精准度。



(a) 电池测试系统



(b) 电池组测试平台

图 2　动力电池测试平台示例

Fig. 2 Example of power battery testing platform

OCV-SOC 测试步骤包括：①0.500C 倍率放电至截止电压 2.75 V；②切换至 0.020C 倍率放电至截止电压 2.75 V;③充分静置 2 h 后以 0.050C 倍率充电至截止电压 4.20 V；④静置 2 h 后再以 0.050C 倍率放电至截止电压 2.75 V。对 0.050C 倍率下的充、放电外电压曲线取平均,作为电池的 OCV-SOC 特性曲线。

集总内阻测试步骤包括:①0.500C 倍率放电至截止电压 2.75V;②切换至 0.020C 倍率放电至截止电压 2.75V；③充分静置 2 h 后以 0.500C 倍率充电至截止电压 4.20 V；④以恒压模式充电至电流降为 0.020C 以下。基于 0.500C 恒流充电数据及 OCV-SOC 曲线可以辨识得到电池集总内阻随 SOC 的变化关系。

对电池组进行整组充、放电测试，用作不一致性参数估计的实测数据。具体测试步骤为：①分别以 0.500C、0.020C 倍率放电至最低单体电压 2.75 V；②静置 2 h 后分别以 0.500C、0.250C、0.125C、0.020C 充电至最高单体电压 4.20 V；③静置 2 h。

由于内阻会随 SOC 的改变而变化，在考虑构建不同内阻情况的样本数据时，以测试的标准单体充电内阻-SOC 数据为基准，使用内阻增量作为体现内阻变化的表征参数，具体可表示为

$$\begin{cases} r_{\mathrm{ch}} = f_1(S_{\mathrm{SOC}}) \\ r'_{\mathrm{ch}} = r_{\mathrm{ch}} + d_{\mathrm{r}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：r_{ch} 为充电内阻基准；r'_{ch} 为待配置样本电池的内阻；$f_1(S_{\mathrm{SOC}})$ 为充电内阻与 SOC 的对应关系；d_{r} 为内阻增量。

为了方便后续对内阻估计结果的验证，选用 60 个单体在 50%SOC 时对应的内阻增量作为内阻估计的参考值，具体表达式为

$$d_{r_0} = \frac{U_0 - U_{\mathrm{OCV}}}{I} - r_{\mathrm{ch}} \left| (S_{\mathrm{SOC}} = 50\%) \right. \tag{6}$$

式中：d_{r_0} 为单体在 50%SOC 时对应的内阻增量；U_0、I 分别为充电测试时的单体外电压和电流；$r_{\mathrm{ch}} \left| (S_{\mathrm{SOC}} = 50\%) \right.$ 为单体在 50%SOC 时对应的内阻基准，为 2.056 mΩ。

2.2 单体数据库生成

2.2.1 模型选取及验证

通过电池测试获取多种不同容量、内阻耦合情况的单体充、放电数据需要消耗大量的时间成本，因此，本文搭建了电池单体等效电路模型，并通过仿真生成单体数据样本。

常见的等效电路模型可分为 Thevenin 模型、二阶 RC 等效电路模型、Rint 模型等[15-16]。本文对

组内单体不一致性参数的估算仅关注恒流工况下的充电电池响应，不涉及动态工况下的电池特性分析。因此，在模型精度、时间成本和计算成本等方面的综合考虑下，选用了锂离子电池的 Rint 等效电路模型，如图 3 所示。图中：U_{OCV}为开路电压；U_R为直流内阻 R_0 上的电压。

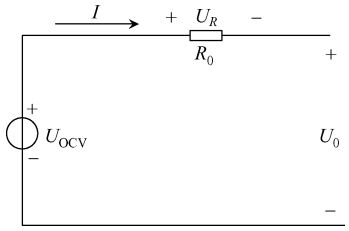


图 3 电池单体 Rint 等效模型

Fig. 3 Rint equivalent model of a single battery

电池仿真模型的准确性是保证研究正确开展的必要前提。为了对模型精度进行验证，对串联电池组中的 60 个单体依次进行了恒流充电工况仿真，并与实验测试数据进行对比。基于第 2.1 节对电池基本参数的测试，本文将测试得到的 OCV-SOC 及内阻-SOC 对应关系作为单体等效电路模型的基本参数，将每个单体的容量和内阻增量作为输入，通过控制充、放电电流进行充、放电仿真。具体步骤为：①以 0.500C 倍率充电至 4.20 V；②分别以 0.500C、0.020C 倍率放电至 2.65 V；③记录每个单体的充电外电压数据，与实际测试数据比较。为了避免偶然性，随机选取组内 6 个单体进行模型准确性的验证，将实验测试的单体外电压充电数据与电池等效模型仿真得到的充电数据进行比较，结果如图 4 所示。

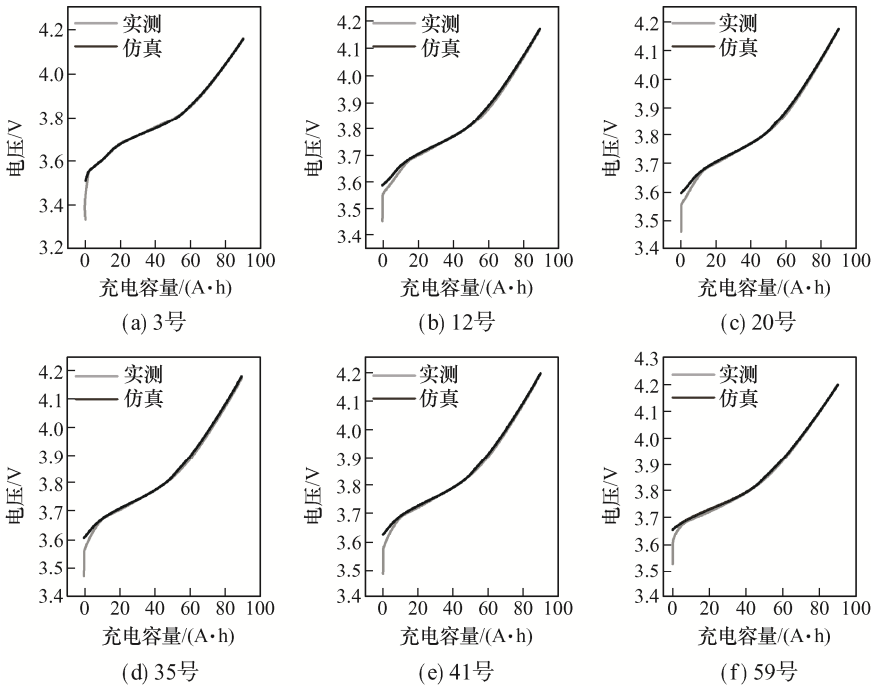


图 4 单体充电电压对比结果

Fig. 4 Comparison results of single-cell charging voltage

由图 4 可以清晰地看出，除充电初期受电池极化过程建立的影响导致电压偏差稍大外，其余时段实测数据与仿真数据基本一致。这表明该单体等效电路模型能够较好地反映电池的充电响应，进而为开展进一步研究提供了前提。

2.2.2 *数据库建立*

基于第 2.2.1 节的单体等效电路模型，通过不同单体的不一致性参数组合生成不同健康状态下的电池单体充电响应曲线，从而建立单体充电数据库。配置的不一致性参数包括单体容量和单体内阻，2 种参数的分布情况见表 1，通过正交组合的方式共生成 21×11=231 个电池单体充电样本，其中：21 为容量分布参数数量，其以 124.800 A·h 为基准，每间隔−1%计数至−20%；11 为内阻增量

参数数量，以 0 为基准，每间隔 0.1 mΩ 计数至 1.0 mΩ。

表 1　容量、内阻增量分布

Tab. 1 Distribution of capacity and internal resistance increments

容量分布/(A·h)	内阻增量/mΩ
124.800	0
123.552	0.1
⋮	⋮
99.840	1.0

3　结果分析

3.1　评估指标

对于估计结果精度的评估，采用 MAE、RMSE、平均绝对百分比误差 MAPE(mean absolute percentage error)指标进行评价，表达式分别为

$$\delta_{\mathrm{MAE}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\hat{y}_i-y_i\right| \tag{7}$$

$$\delta_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-y_i)^2} \tag{8}$$

$$\delta_{\mathrm{MAPE}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\hat{y}_i-y_i}{y_i}\right|\times 100\% \tag{9}$$

式中：n 为串联单体个数；y_i、$\hat{y}_i$ 分别为第 i 个单体参数的实测值和估计值。误差指标的范围均为[0, +∞)，值越小表示预测值与实际值越吻合。

3.2　不同充电段对结果影响

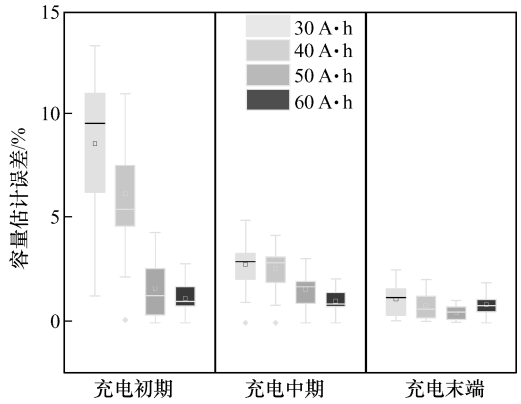
数据截取窗口的位置及窗口大小对电池评估结果的准确性影响各不相同，为了探究不同数据段对评估结果的影响，分别在充电初期、中期以及末端截取不同窗口大小的充电段(见表 2)，对电池的容量及内阻进行估算。

基于表 2 得到的容量及内阻估计误差分布情况如图 5 所示。可以看出：在整个充电过程中，电压截取段越靠近充电末端，容量估计结果越准确；充电末端容量估计结果除了在 50 A·h 时略优于 60 A·h 窗口，其余结果随着窗口的增大，估计精度逐渐增加。可以认为，充电末端外电压特性曲线的变化近乎呈线性，等效模型可更好地替代真实的充电过程。此外，越大的窗口所保留的外电压特性越多，从而使单体健康状态估计的结果越准确。考虑实际应用中的充电过程往往不完整，为了兼顾算法的实用性和估算精度，选定充电末端 60 A·h 窗口进行单体容量与内阻参数的估算。

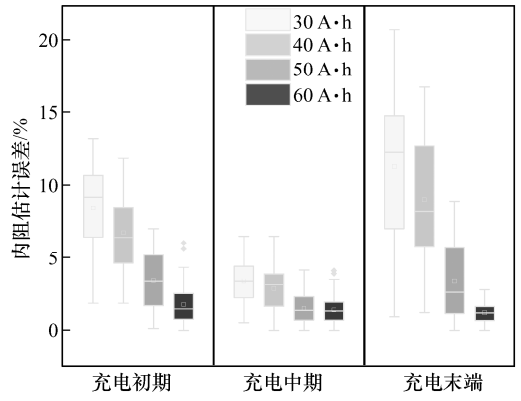
表 2　充电段位置及窗口大小分布

Tab. 2 Charging segment location and window size distribution

充电段位置	窗口大小/(A·h)			
初期	30	40	50	60
中期	30	40	50	60
末端	30	40	50	60



(a) 容量估计误差



(b) 内阻估计误差

图 5　不同窗口位置及窗口大小估计结果

Fig. 5 Estimation results of different window positions and window sizes

3.3　考虑 OCV-SOC 插值误差对估算结果的影响

当充电起始位置位于电压平台期，使用 OCV-SOC 插值确定起始 SOC 会带来一定的误差。本文采用样本窗口滑动(滑窗)搜索策略，在窗口起始点

以 0.1%SOC 为步长，左右移动窗口。对每个滑动得到的子窗口，计算样本匹配度，继而开展单体电池容量及内阻参数的估算，以降低 OCV-SOC 插值对估算结果的影响。表 3 展示了在考虑 OCV-SOC 插值误差的基础上，有、无滑窗的估算结果的对比情况。

表 3 考虑 OCV-SOC 插值误差的估算结果

Tab. 3 Estimation results considering OCV-SOC interpolation error

有、无滑窗	容量估计误差			内阻估计误差		
	MAE/(A·h)	RMAE/(A·h)	MAPE/%	MAE/mΩ	RMAE/mΩ	MAPE/%
无	1.15	1.34	0.97	0.03	0.03	1.27
有	0.40	0.51	0.34	0.05	0.06	2.51

由表 3 可知，采用样本窗口滑动搜索策略可以有效降低 OCV-SOC 插值对估算结果的影响。单体容量估计 MAPE 由 0.97%降低至 0.34%；内阻估计误差虽然有所增加，但 MAE 较小，仅增大 0.02 mΩ，可以忽略。

3.4 考虑设备采样误差对估算结果的影响

在实际应用中，电压数据采集设备的不精准，往往会带来采样误差。为了降低采样误差对估算结果的影响，在实验测试得到的电压数据基础上，采用高斯分布模拟了均值为 0、标准差为 5 mV 的采样误差。此外，采用样本窗口滑动搜索策略估算单体参数，其估算结果与窗口未滑动的估算结果见表 4。

由表 4 可知，采用样本窗口滑动搜索策略能有效降低设备采样误差对单体容量与内阻估算精度的影响，最大可用容量 MAPE 由 1.06%降低至 0.37%，内阻 MAPE 由 1.45%降低至 1.29%。

表 4 考虑设备采样误差的估算结果

Tab. 4 Estimation results considering equipment sampling error

有、无滑窗	容量估计误差			内阻估计误差		
	MAE/(A·h)	RMAE/(A·h)	MAPE/%	MAE/mΩ	RMAE/mΩ	MAPE/%
无	1.25	1.37	1.06	0.03	0.04	1.45
有	0.44	0.55	0.37	0.03	0.03	1.29

3.5 与其他估算方法的对比

文献[11]研究了充电容量增量曲线中的特征峰半峰面积与电池最大可用容量之间的关联，并采用递推更新算法实现半峰面积的在线计算。通过选取电化学阻抗谱的中低频段部分，提取了 5 个健康特征，提出了一种专门针对特定设备优化的锂离子电池快速容量估算方法。实验结果表明，该方法能够将容量估计误差控制在 3%以内。但是，该方法仅适用于电池在 100%SOC 条件下，实际应用中可能需要考虑在电池补电后使用该方法。相较于本文提出的基于离线数据库的参数估算方法，其优点在于不需要建立单体数据库，节省了运算内存；缺点在于精度略低，且不适用于成组电池的单体参数估算。

文献[17]基于最优差分电压选取的容量增量曲线，采用斯皮尔曼相关性系数来分析并确定容量增量曲线峰值与电池可用容量之间的关联性，然后将提取出的容量增量曲线峰值作为特征量，用于表征锂离子电池的容量衰退情况，并结合门控循环单元神经网络算法构建了一个锂离子电池容量估算模型，实现对电池容量的预测。该方法的最大相对误差在 4.53%以下。在使用小电流获取容量增量曲线时，该方法表现出能耗较高和耗时较长的缺点，使其在批量成组电池容量估算的应用中实用性不足。而本文提出的基于离线数据库的参数估算方法可同时估算出组内单体的容量和内阻参数，且具有较好的精度。

4 结论

本文提出了一种基于离线仿真数据库迅速估

算电池组内单体不一致性参数的计算方法。首先通过单体等效电路模型构建不同容量、内阻参数组合的单体仿真数据库；接着采用遍历的方式，计算实测电压曲线段与数据库各样本间的相似度，实现目标单体容量及内阻的快速估算；然后考虑 OCV-SOC 插值误差对估算结果准确性的影响，采用窗口滑动搜索策略提高估计精度。测试平台实验结果的最大可用容量 MAPE 不超过 0.40%，内阻 MAPE 不超过 2.60%，有效提高了估算精度。最后考虑实际设备采样误差带来的影响，采用高斯分布模拟了均值为 0、标准差为 5 mV 的采样误差，并对比了采用样本窗口滑动搜索策略前、后的估算结果。最大可用容量 MAPE 由 1.06%降低至 0.37%，内阻 MAPE 由 1.45%降低至 1.29%。该方法通过预先生成的单体离线仿真数据库，在估算过程中仅需要遍历计算 2 组电压数据之间的方差，降低了估算过程中的运算压力。与传统的基于复杂过程的参数估算方法相比，其提高了计算效率。此外，由于离线数据库中包含了多种不同不一致性参数状态下的电池充电响应，保证了估算精度。

本文所提方法的估算结果可以满足实际使用中对电池不一致性参数计算精度的需求，为海量电池组不一致性参数估算提供了新的理论依据，同时对电池组的均衡策略研究具有积极意义。

参考文献：

[1] 郭剑锋, 张雪美, 曹琪, 等. 电动汽车助力我国能源安全与“碳达峰、碳中和”协同推进[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(2): 397-407.
Guo Jianfeng, Zhang Xuemei, Cao Qi, et al. Electric vehicles contribute to China’s energy security and carbon peaking and carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(2): 397-407. (in Chinese)

[2] Zhang Junwei, Zhang Weige, Sun Bingxiang, et al. A novel method of battery pack energy health estimation based on visual feature learning [J]. Energy, 2024, 293: 130656.

[3] 侯健敏, 钱海峰, 李紫祥, 等. 基于三阶段参数辨识的锂离子电池 SOC-SOH 联合估计[J/OL]. 电源学报, 1-12 (2025-03-26)[2025-03-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250326.1606.012.
Hou Jianmin, Qian Haifeng, Li Zixiang, et al. Joint SOC-SOH estimation of lithium-ion batteries based on three-stage parameter identification [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12. (2025-03-26)[2025-03-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250326.1606.012.(in Chinese)

[4] 梁叶, 蔡孟冶, 姜岩峰, 等. 基于修正安时积分法的锂电池荷电状态估算[J/OL]. 电源学报, 1-13. (2025-02-14)[2025-03-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250214.1637.004.
Liang Ye, Cai Mengye, Jiang Yanfeng, et al. Estimation of lithium battery state of charge based on the modified adams method [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-13 (2025-02-14)[2025-03-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250214.1637.004.(in Chinese)

[5] 彭自然, 王顺豪, 肖伸平, 等. 基于 KA Informer 的电动汽车动力电池荷电状态和健康状态估算[J]. 电工技术学报, 2025, 40(19): 6378-6394.
Peng Ziran, Wang Shunhao, Xiao Shenping, et al. Estimation of EV power battery SOC & SOH based on KA informer [J]. Transactions of Electrical Engineering, 2025, 40(19): 6378-6394. (in Chinese)

[6] 陈智伟, 张维戈, 张珺玮, 等. 基于视觉特征的动力电池组综合健康评估及分筛方法[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2211-2219.
Chen Zhiwei, Zhang Weige, Zhang Junwei, et al. Comprehensive health assessment and screening method of power battery pack based on visual characteristics of charge curves [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2211-2219. (in Chinese)

[7] Jiang Yan, Jiang Jiuchun, Zhang Caiping, et al. A Copula-based battery pack consistency modeling method and its application on the energy utilization efficiency estimation [J]. Energy, 2019, 189: 116219.

[8] 范兴明, 吴润玮, 封浩, 等. 基于变窗口自适应无迹卡尔曼滤波的锂离子电池荷电状态预测[J]. 电工技术学报, 2025, 40(6): 1974-1983.
Fan Xingming, Wu Runwei, Feng Hao, et al. Lithium-ion battery state of charge prediction based on variable-window adaptive unscented Kalman filter [J]. Transac-

tions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(6): 1974-1983. (in Chinese)

[9] Zheng Yuejiu, Lu Languang, Han Xuebing, et al. $LiFePO_4$ battery pack capacity estimation for electric vehicles based on charging cell voltage curve transformation [J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 33-41.

[10] Zhang Junwei, Zhang Weige, Zhang Yanru, et al. Capacity estimation for series-connected battery pack based on partial charging voltage curve segments [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 95: 112576.

[11] 孙丙香, 庞俊峰, 苏晓佳, 等. 基于中低频阻抗谱的锂离子电池容量快速估计方法[J]. 中国公路学报, 2024, 37(2): 293-303.
Sun Bingxiang, Pang Junfeng, Su Xiaojia, et al. A rapid capacity estimation method for lithium-ion batteries based on medium-low frequency electrochemical impedance spectroscopy [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(2): 293-303. (in Chinese)

[12] Zheng Yuejiu, Wang Jingjing, Qin Chao, et al. A novel capacity estimation method based on charging curve sections for lithium-ion batteries in electric vehicles [J]. Energy, 2019, 185: 361-371.

[13] 孙刚, 伍江江, 陈浩, 等. 一种基于切比雪夫距离的隐式偏好多目标进化算法[J]. 计算机科学, 2022, 49(6): 297-304.
Sun Gang, Wu Jiangjiang, Chen Hao, et al. Hidden preference-based multi-objective evolutionary algorithm based on Chebyshev distance [J]. Computer Science, 2022, 49(6): 297-304. (in Chinese)

[14] 徐慧颖, 陈琦鹏, 刘耀辉, 等. 多分属性的非参数诊断分类: 18 种距离判别法的对比[J]. 心理科学, 2023, 46(6): 1486-1494.
Xu Huiying, Chen Qipeng, Liu Yaohui, et al. Nonparametric diagnostic classification for polytomous attributes: A comparison of 18 distance discriminant methods [J]. Journal of Psychological Science, 2023, 46(6): 1486-1494. (in Chinese)

[15] 吕晓俊. 基于等效电路模型的电池荷电状态估计方法综述[J]. 电子质量, 2024(6): 9-13.
Lü Xiaojun. A review of battery charge state estimation methods based on equivalent circuit model [J]. Electronics Quality, 2024(6): 9-13. (in Chinese)

[16] Tao Zhen, Zhao Zhenyu, Wang Changdong, et al. State of charge estimation of lithium batteries: Review for equivalent circuit model methods [J]. Measurement, 2024, 236: 115148.

[17] 王梦, 孙晓辉, 李景康, 等. 锂离子电池容量预测方法研究[J]. 电源技术, 2024, 48(11): 2201-2208.
Wang Meng, Sun Xiaohui, Li Jingkang, et al. Research on lithium-ion battery capacity prediction methods [J]. Power Technology, 2024, 48(11): 2201-2208.



陈智伟

作者简介：

陈智伟(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：锂离子动力电池健康状态估计研究。E-mail：22121439@bjtu.edu.cn。

张婷婷(1987—)，女，硕士，高级工程师。研究方向：轨道交通动力电池集成技术与安全性研究。E-mail：010200034378@crrcgc.cc。

张维戈(1971—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：动力电池应用技术，电力电子技术。E-mail：wgzhang@bjtu.edu.cn。

张言茹(1990—)，女，博士，实验师。研究方向：动力电池成组技术。E-mail：yr_zhang@bjtu.edu.cn。

张珺玮(1996—)，女，博士研究生。研究方向：锂离子动力电池健康管理。E-mail：20117024@bjtu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)