DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.131 **中图分类号**：TM912.9 **文献标志码**：A

基于修正安时积分法的锂离子电池荷电状态估算

梁 叶[1](中国电源学会学生会员)，蔡孟冶[1]，姜岩峰[1]，王会刚[2]
(1.江南大学集成电路学院，江阴 214442；2.无锡华润微电子有限公司先进技术研究院，无锡 214061)

摘要：锂离子电池的荷电状态 SOC(state-of-charge)是反映该电池剩余电量状态的重要参数。针对安时积分法 SOC 初值无法确定、累积误差逐渐变大的问题，提出一种修正安时积分法误差的算法。通过研究磷酸铁锂电池的充放电特性，得到开路电压−荷电状态 OCV-SOC(open circuit voltage-SOC)曲线及直流内阻−端电压曲线。所提算法在锂离子电池充电状态下，电量达到判饱条件时进行校准；放电状态下，电量为 7%时基于电池特性曲线在线校准误差。试验结果显示，所提算法在 SOC 估算的过程中可以有效减小误差，并将误差控制在 2.00%以内，具有较高的估算精度。

关键词：锂离子电池；荷电状态；安时积分法；电池管理系统；误差修正

State-of-charge Estimation of Lithium-ion Battery Based on Modified Ampere-hour Integral Method

LIANG Ye[1], *Student Member, CPSS*, CAI Mengye[1], JIANG Yanfeng[1], WANG Huigang[2]
(1. School of Integrated Circuits, Jiangnan University, Jiangyin 214442, China; 2. Advanced Technology Research Institute, Wuxi China Resources Microelectronics Co., Ltd., Wuxi 214061, China)

Abstract: The state-of-charge (SOC) of a lithium-ion battery is an important parameter that reflects the state of its remaining energy. To address the issues of the initial SOC being indeterminate and the cumulative error increasing over time in the ampere-hour integral method, an algorithm is proposed to correct the error in the ampere-hour integral method. Through the study of the charge and discharge characteristics of a lithium-ion iron phosphate battery, the open circuit voltage-SOC (OCV-SOC) curve and the DC internal resistance-terminal voltage curve are obtained. The proposed algorithm calibrates the SOC when the battery reaches the full charge condition during charging, and it performs online error calibration based on the battery's characteristic curves when the values of capacity are 7% in the discharge state respectively. The experimental results show that it can effectively reduce the error in the SOC estimation process and control it within 2.00%, indicating a high estimation accuracy.

Keywords: Lithium-ion battery; state-of-charge (SOC); ampere-hour integral method; battery management system (BMS); error correction

锂离子电池在电动自行车和储能领域的广泛应用，使得电池管理系统 BMS(battery management system)性能得到不断提升。BMS 通过采集锂离子电池的电压、电流和温度等参数来估算电池荷电状态 SOC(state-of-charge)、寿命等[1]。SOC 的精确估算可以充分发挥锂离子电池的综合性能，对提高电动自行车和电动汽车的安全性和可靠性具有重要的意义[2]。

目前，SOC 估算算法主要有安时积分法[3]、开路电压 OCV(open circuit voltage)法[4]、内阻法[5]、

收稿日期：2024-11-15；**修回日期**：2024-12-30；**录用日期**：2025-01-21；**网络首发日期**：2025-02-14
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2024YFB4505400)
This work is supported by National Key Research and Development Program of China under the grant 2024YFB4505400

神经网络法[6]、卡尔曼滤波法[7]等。安时积分法是一种开环方法，通过累积电池的充放电电流计算SOC，但该方法受初始状态误差和电流累积误差的影响，使得 SOC 估算精度不高[8]。OCV 法要求锂离子电池在非工作状态下静置足够长的时间以获取 OCV，不适用于电池实时 SOC 的计算，且电池电压采样存在误差，该误差足以使 SOC 估算结果产生较大偏差[9]。内阻法根据电池阻抗随 SOC 变化的特性来计算 SOC，但在实际应用中受温度、充放电电流等因素的影响较大，且内阻的测量对设备的精度要求较高[10]。神经网络法具有良好的非线性特性，适用于多种电池 SOC 的估算，在足够多的样本数据训练下能够实现 SOC 的准确计算，但该方法需要大量的原始数据与长时间的网络融合。卡尔曼滤波法通过系统输入与输出观测值的反馈，能够实时修正 SOC 估计值，提高估算精度，但由于动力电池模型的非线性，直接使用卡尔曼滤波估算电池状态并不合适。在此基础上，可运用扩展卡尔曼滤波 EKF(extended Kalman filter)将非线性模型近似线性化处理后，再进行卡尔曼滤波[11-12]。但 EKF 通常忽略非线性函数的高阶项，而采用一阶泰勒展开式，导致状态估计产生较大误差，同时 EKF 需计算雅可比矩阵，计算过程较为复杂，适用于解决局部线性化问题。因此，针对车用动力电池系统的高度非线性问题，一些学者研究并提出了基于无迹卡尔曼滤波算法的非线性系统解决方案[13-14]。上述研究着眼于模型准确性、算法可靠性等方面，忽略了测量噪声对估计精度的影响[15]。

对于磷酸铁锂电池，在电压平台区，较小的电压测量误差即会引起较大的 SOC 估计误差[16-17]。为了精确估计磷酸铁锂电池的 SOC，本文提出了一种基于修正安时积分法的算法。该算法采用安时积分法估算 SOC，通过空载状态下的 OCV 法进行 SOC 初值的确定，并结合充电判饱及放电动态查表计算锂离子电池直流内阻，继而计算当前 SOC；可在充满和接近放空状态下进行 SOC 的校准修正，进而解决安时积分电流累积误差的问题。此外，所提算法可使磷酸铁锂电池的 SOC 误差控制在 2%以内，通过磷酸铁锂电池充放电试验验证了算法的有效性。

1 基于修正安时积分法误差的锂离子电池 SOC 估算算法

1.1 传统安时积分法

安时积分法是一种常用的锂离子电池 SOC 估算方法。这种方法的基本原理是在电池充放电时，通过累积充进和放出的电量估算 SOC。安时积分法作为电量计算的常用方法具有简便和可操作性高的优点。若电池初始状态为 $S_{\mathrm{SOC},0}$，安时积分计算 SOC 的公式为

$$S_{\mathrm{SOC}} = S_{\mathrm{SOC},0} - \frac{1}{C}\int_0^t \eta I \mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：C 为电池额定容量；η 为充放电效率；I 为负载电流。

BMS 使用采样电阻进行电流采样，但即使选用高精度采样电阻也会存在误差，因此使用前需进行电流校准。电流校准选取放电电流 1 和放电电流 2 两个点开展采集计算，得到电流增益与偏移量，以此完成电流校准。通过设计的校准按键使 BMS 进入校准模式，分别采集放电电流 1 和放电电流 2 标准电流下的电流数值，并通过增益计算公式计算电流增益 I_{gain}，可表示为

$$I_{\mathrm{gain}} = \frac{I_{\mathrm{cal1}} - I_{\mathrm{cal0}}}{I_{\mathrm{dete1}} - I_{\mathrm{dete0}}} \tag{2}$$

式中：I_{cal1} 为校准点 1 标准放电电流 2；I_{cal0} 为校准点 0 标准放电电流 1；I_{dete1} 为校准点 1 时的电流检测值；I_{dete0} 为校准点 0 时的电流检测值。

电流偏移量 I_{offset} 的计算式为

$$I_{\mathrm{offset}} = I_{\mathrm{gain}} I_{\mathrm{dete0}} - I_{\mathrm{cal0}} \tag{3}$$

得到电流增益和偏移量后，将采集的电流数值乘以增益再加上偏移量，即可得到校准后精确的电流值。电流值的准确可保障安时积分法得到的电量的准确性。

1.2 安时积分法的初值修正

BMS 系统初始上电时负载电流为 0，电池的端

电压为 OCV，通过试验所得 OCV-SOC 曲线可计算确定初始电量。测试温度区间为−15~65 ℃，每隔 10 ℃获取 1 条 OCV-SOC 曲线；曲线中剩余电量范围为 0~4 000 mA·h，每隔 40 mA·h 对应 1 个 OCV，所有曲线以数组的形式存储在单片机内。SOC 计算方法为：确定当前温度所在区间，利用该区间上、下限温度对应的 2 条曲线，分别计算出对应 OCV 的 SOC。其中，SOC 通过插值法计算得到，插值法公式为

$$Y = Y_1 + (Y_2 - Y_1)(X - X_1)/(X_2 - X_1) \tag{4}$$

式中：Y 为剩余电量 SOC；Y_1 为下限 OCV 对应的 SOC；Y_2 为上限 OCV 对应的 SOC；X 为当前 OCV；X_1 为下限 OCV；X_2 为上限 OCV。

通过插值法得到 2 个温度下的 SOC 后，再次使用插值法计算出当前温度对应的 SOC。每次上电初始化时，BMS 均会进行电量初始值的计算判定。

1.3 安时积分法的累积误差修正

充电过程中，判饱过程通过电压、电流和时间等多个参数的变化来判断电池是否充满。当电池电压接近满电电压且充电电流减小到设定值时，判饱算法可以判定电池的 SOC 为 100%。通过充电判饱算法，可在电量充满时对安时积分法的电量估算结果进行修正。

磷酸铁锂电池在放电过程中的电压存在明显的平台区，剩余电量在 20%~80%范围内时，OCV 变化较为平缓；而当剩余电量低于 10%时，电压变化较为陡峭[18]，此区间内的 OCV 均可得到精准的 SOC。在锂离子电池放电过程中，可在 SOC 为 7%、3%和 0 三个点对安时积分法的 SOC 估算结果进行校准。因 SOC 为 3%和 0%时误差较小，故仅对 7%进行了明显校准。

算法采用 Rint 模型(欧姆模型)[19]，如图 1 所示，选取该模型的原因详见第 2.2 节。图中：U_{oc} 为电池的 OCV；U_l 为电池端电压；R_{DCIR} 为直流内阻；I_d 为放电电流，取值为正。该模型将电池等效为理想电压源 U_{oc}(OCV)与锂离子电池直流内阻的串联。放电过程中锂离子电池 OCV 的计算式为

$$U_{oc} = U_l + R_{DCIR} I_d \tag{5}$$

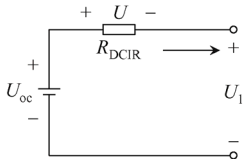


图 1　锂离子电池 Rint 模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of lithium battery

锂离子电池的直流内阻是在直流电路中通过电池时，电池内部与外部电路之间产生的电阻。它的产生原理为电极内部和电极与电解液之间的电荷传递。直流内阻数据通过放电测试法得到，所得数据经过插值法计算处理，具体流程如图 2 所示。BMS 实时采集电池的温度、端电压和放电电流。为了得到当前状态下的直流内阻，执行如下步骤：①判断采样后的电池温度、端电压和放电电流区间；②通过式(4)多次插值计算，得到当前温度、电压和电流下的直流内阻，然后通过式(5)计算得到电池 OCV；③通过试验所得 OCV-SOC 曲线插值计算出当前温度 OCV 对应的 SOC。

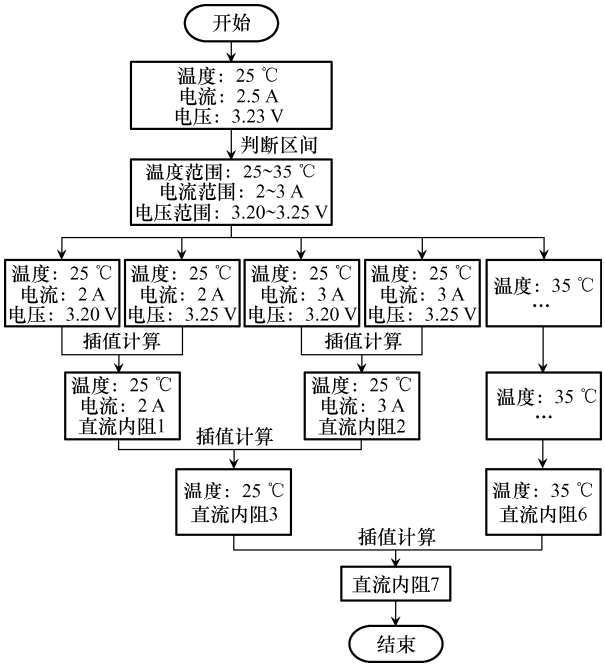


图 2　插值法计算直流内阻的流程

Fig. 2 Flow chart of calculating DC internal resistance by interpolation method

2　基于锂离子电池特性的 SOC 估算

2.1 锂离子电池的性能参数

SOC 估算涉及的电池性能参数主要包括电压、

容量、内阻、充放电倍率、循环寿命、SOC 等。为了校准安时积分法估算的 SOC,需要在有放电电流的情况下进行 OCV 计算。直流内阻是锂离子电池端电压与 OCV 之间的桥梁，可通过放电测试法得到。影响直流内阻的因素较多,如电池的材料性质、充放电状态、温度等。BMS 可以实时监控电池的电流、电压和温度等参数，通过这些参数可以准确计算出对应的直流内阻。使用当前的直流内阻即可计算出当前的 OCV，从而计算得到准确的 SOC。

OCV 在修正安时积分法中起到了关键作用，锂离子电池的 SOC 与 OCV 存在对应关系[20]。在剩余电量低于 10%的区间内，OCV 和 SOC 具有能够区分且较为合理的对应关系，故使用该区间内的 OCV 可以准确地校准安时积分法的 SOC。影响 OCV 的因素较多，如温度条件、正负极材料活性、几何结构和电解质等。为了获取较为准确的 OCV，本文进行了不同温度、不同放电电流下的放电试验。

2.2 电池模型的选取

锂离子电池在工作过程中其内部会发生复杂的化学反应，为了简化锂离子电池的工作过程，使用建模的方式对电池特性进行分析。常见的电池模型有 3 种，分别为神经网络模型、电化学模型和等效电路模型[21]。其中：神经网络模型通过模仿人类的神经网络关系特征结合大量的实验数据集建立数学模型，该模型的精度受数据质量影响大且抗干扰能力较弱，不适用于实际的动态工况；电化学模型通过考虑锂离子电池内部的电化学状态建立模型，对锂离子电池的充放电过程的还原度高，但存在计算量大、计算过程复杂等问题，不适于工业应用；等效电路模型通过多种电路元件模拟电池外部特性，具有结构简单、计算量小、应用性强等特点，适用于电动自行车的工作工况。综合分析后，算法选用等效电路模型。

常用的等效电路模型主要有电压源模型、欧姆模型、Thevenin 模型、PNGV 模型和电压回弹模型[22]等。其中，欧姆模型的数学模型易于建立，可与直流内阻紧密结合，在工程上易于实现且能够满足精度要求，因此算法使用基于欧姆模型的等效电路模型。

3 磷酸铁锂电池特性曲线研究

选用某型号的 27600 磷酸铁锂电池作为试验对象，该电池的额定标称容量为 4 000 mA·h，额定标称电压为 3.20 V，详细参数见表 1。搭建的测试系统平台如图 3 所示，包括 BMS 测试系统、计算机、电池充放电测试系统、恒温恒湿机。该系统可以对锂离子电池进行恒流充、放电操作，并通过使用测试管理软件对充、放电过程中的相关参数进行观测和记录。

表 1 磷酸铁锂电池参数

Tab. 1 Parameters of lithium iron phosphate batteries

电池参数	数值
额定标称容量/(mA·h)	4 000
额定标称电压/V	3.20
充电截止电压/V	3.65±0.05
放电截止电压/V	2.0±0.05

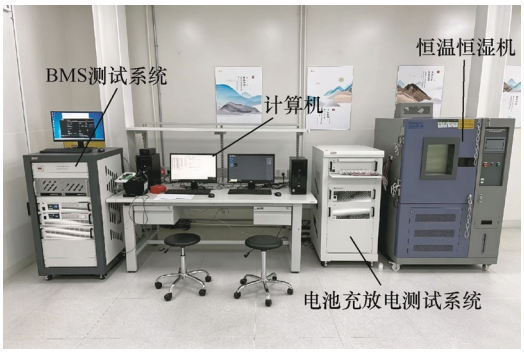


图 3 测试系统平台实物

Fig. 3 Physical of test system platform

3.1 OCV 特性

为获取电池的 OCV，进行以下试验。

(1)充电试验。恒温恒湿机设定固定温度，将待测电池在 0.5C 以 2 A 充电到电压为 3.65 V 后，以 3.65 V 的恒压充电直到电流小于 50 mA,静置 20 min。

(2)放电试验。电池充满静置后,使用 0.5C~5.0C 的 1~8 A 放电电流对电池进行恒流放电，当电池电压下降到 3.50 V 时停止放电，静置 20 min，记录此时的 OCV，以 0.05 V 为间隔重复放电步骤和静

置步骤，直到电池电压下降到 2.00 V。

具体的试验流程如图 4 所示，在−15~65 ℃范围内重复完成试验，得到的不同温度下 OCV 与 SOC 曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出：电池在不同温度和不同放电电流下均有明显的平台区，在剩余电量小于 400 mA·h 时，曲线出现明显转折，斜率急剧增大，该区间内的数据可适用于修正安时积分法的算法；同一温度下，不同放电电流的曲线几乎重合。通过数据拟合将不同的放电电流曲线拟合成一条曲线，所有曲线最终以离散数组的形式存储于单片机。

3.2 直流内阻特性

为获取直流内阻，进行与 OCV 特性相同的试验，先进行充电试验再进行放电试验。直流内阻的计算式为

$$R_{\mathrm{DCIR}}=\frac{U_1-U_0}{I_1-I_0} \tag{6}$$

式中：U_1 为静置后的 OCV；U_0 为停止放电时的端电压；I_1 为静置时的电流，数值为 0；I_0 为放电电流，数值为负。

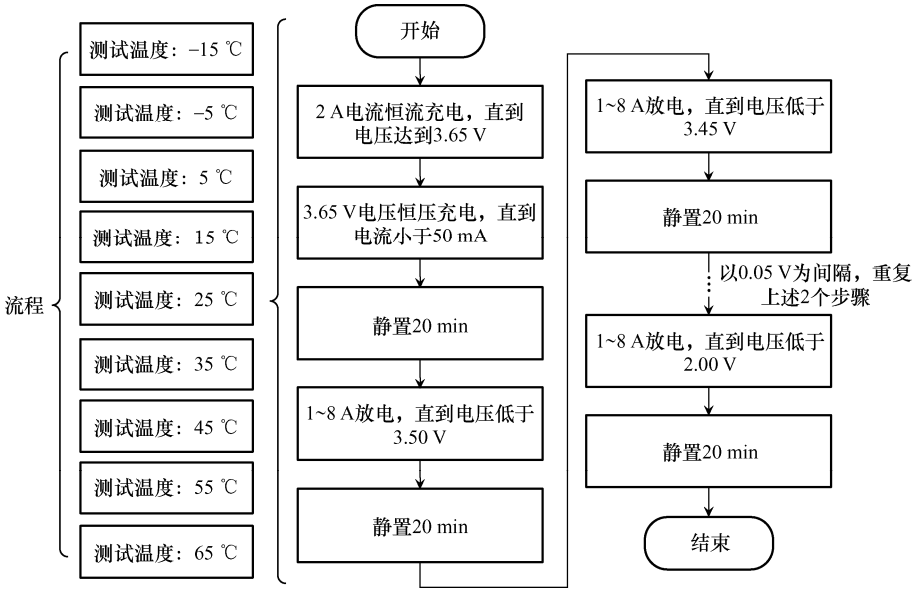
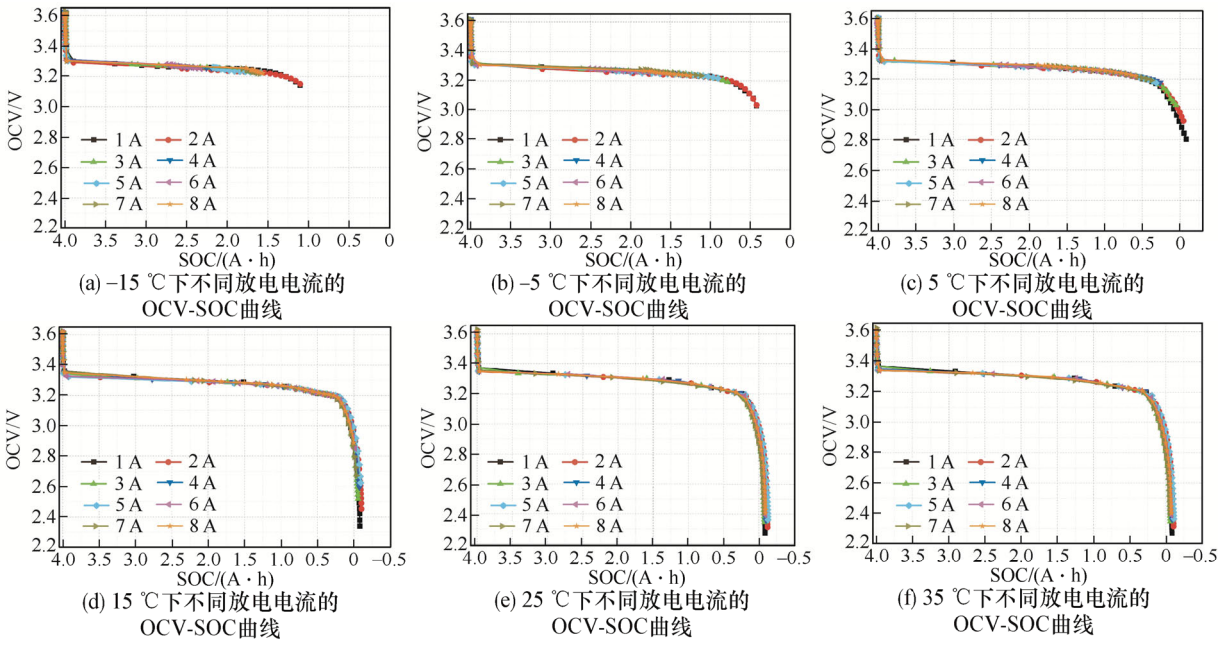


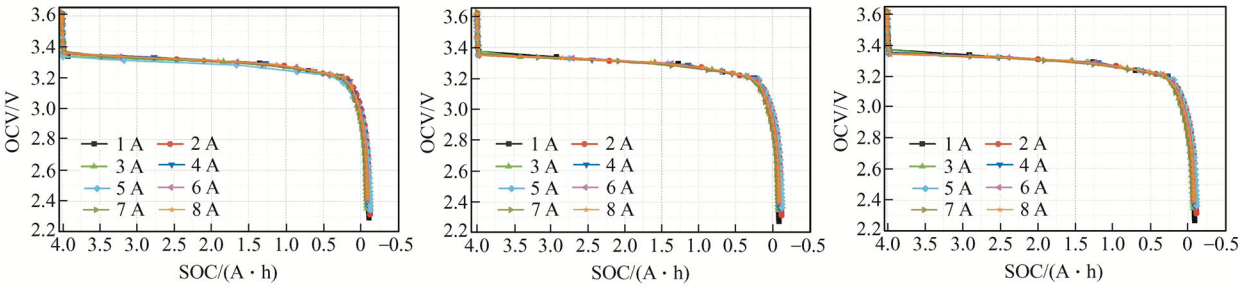
图 4　不同温度、不同放电电流下的电池测试流程

Fig. 4 Flow chart of battery test at different temperatures and discharge currents



(a) −15 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线　(b) −5 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线　(c) 5 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线

(d) 15 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线　(e) 25 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线　(f) 35 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线

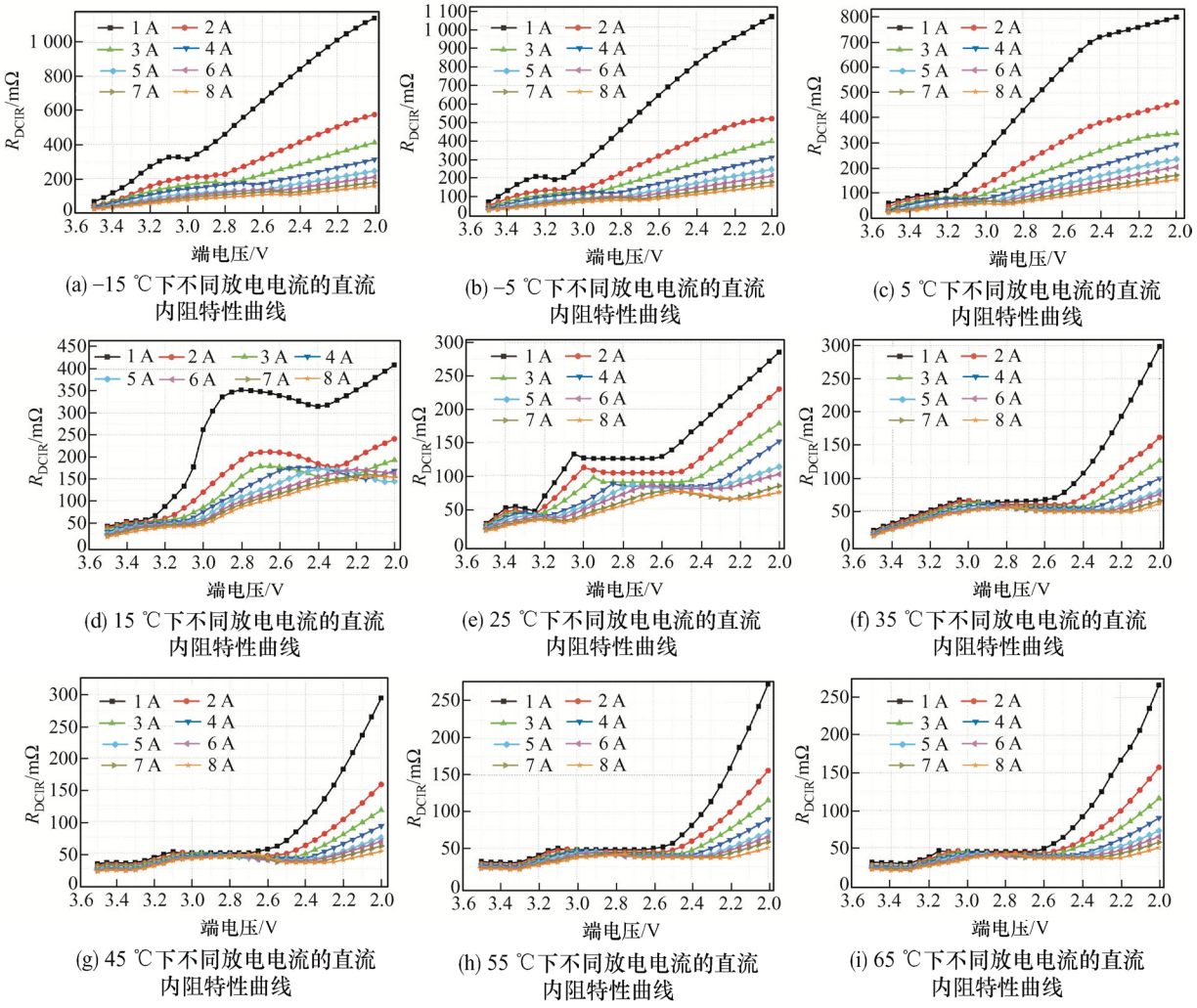


(g) 45 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线　(h) 55 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线　(i) 65 ℃下不同放电电流的OCV-SOC曲线

图 5　不同温度、不同放电电流下 OCV 与 SOC 的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of OCV-SOC at different temperatures and discharge currents

磷酸铁锂电池的直流内阻主要由欧姆内阻和极化内阻 2 部分组成。欧姆内阻包括电极材料、隔膜电阻及各部分元件的接触电阻，主要受电池温度的影响。极化内阻由电化学极化内阻和浓度差极化内阻组成，受电流、时间等因素的影响较大[23]。不同温度、不同放电电流下的直流内阻曲线如图 6 所示。从图中可以看出，直流内阻随端电压和放电电流的变化呈现出一定的规律性，具体如下。



(a) −15 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线　(b) −5 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线　(c) 5 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线

(d) 15 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线　(e) 25 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线　(f) 35 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线

(g) 45 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线　(h) 55 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线　(i) 65 ℃下不同放电电流的直流内阻特性曲线

图 6　不同温度、不同放电电流下直流内阻与端电压的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of DC internal resistance and terminal voltage at different temperatures and discharge currents

(1)直流内阻随端电压的下降呈增长趋势，并在较高温下存在 1 个平台区。这种变化与电池内部的化学反应和物质的扩散过程有关。

(2)相同温度下，电流越大直流内阻越小。电池的电化学极化内阻随电流的变化符合 Butler-Volmer 方程，当电流增大时，电池的电化学极化内阻近似呈指数式减小[24]，浓度差极化内阻也随之减小。这主要由于电流密度变化对电池液相扩散影响较大。随着电池电流密度增大，产生过电势，加速电池的液相传递，使得电池浓度差极化内阻快速减小。

(3)相同电流下，温度越高直流内阻越小。电池的直流内阻随温度的变化符合阿伦尼乌斯公式，电池的化学反应速率与温度成正比。随着温度的升高，电池的固相反应速率变高，如电池锂离子的嵌入和脱嵌，以及电解液导电率的提高，均会使电池的欧姆阻抗减小。同样，温度的升高也会加速电池的电荷转移速率和液相扩散传质速率，使电池的电化学极化内阻和浓度差极化内阻减小[25]。

4　试验验证与结果讨论

锂离子电池特性曲线研究得到的数据经过离散化处理存储于单片机，使用时通过插值法得到实时的直流内阻、OCV 与 SOC。通过搭建图 3 所示的试验平台进行算法功能的验证。其中， BMS 电路板如图 7 所示，工控机控制 BMS 测试系统模拟实际充、放电工况。不同温度下 SOC 估算的结果和误差分别如图 8(a)和(b)所示。由图可知：10 ℃下 SOC 在 7%时，误差由 1.37%减小到 0.79%；30 ℃下 SOC 在 7%时，误差由 1.29%减小到 0.75%；50 ℃下 SOC 在 7%时误差由 1.24%减小到 0.73%。整个放电过程中，不同温度下 SOC 的估算误差均能控制在 2.00%以内，SOC 为 7%时出现明显的校准过程，校准过程使得安时积分的累积误差减小。

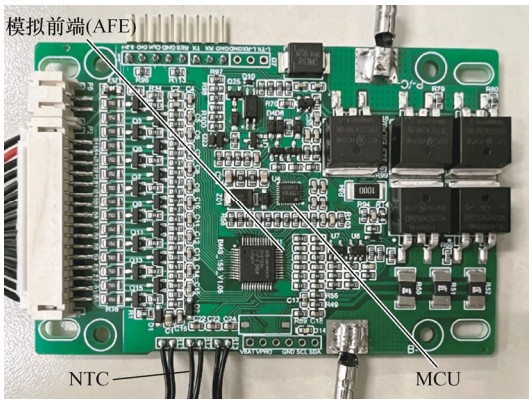
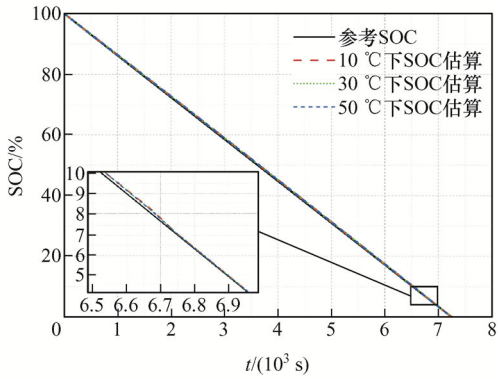
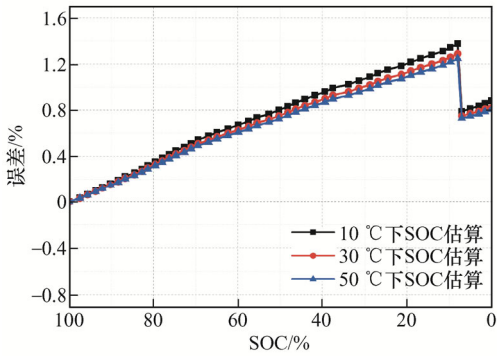


图 7　BMS 电路板实物

Fig. 7 Physical of BMS circuit board



(a) 不同温度下SOC估算



(b) 不同温度下SOC估算误差

图 8　不同温度下 SOC 估算

Fig. 8 SOC estimation at different temperatures

充电过程同样实现了校准功能，当充电过程中的电量达到 98%时，电池的电压、电流和时间均达到判饱条件，可及时将 SOC 校准为 100%，实现对安时积分法的修正。

在极低温度时，由于电池直流内阻较大，电池无法输出正常的负载电压，且电流还会影响输出的容量，特性较为复杂，必要时需进行容量衰减处理。

结果验证了试验所使用的锂离子电池与其充、放电特性曲线研究所使用的电池属于同一类型

与型号，试验结果达到预期效果，但锂离子电池具有差异性，不同型号的电池，甚至不同批次的电池均会得到不尽相同的电池特性结果。因此，所提算法存在一定的局限性，需要进行大量的锂离子电池特性试验来保证电池 SOC 估算的准确性。

5 结语

锂离子电池 SOC 估算使用安时积分法具有算法使用便捷的优点，但存在初值无法确定和累积误差的缺点。通过研究锂离子电池 OCV 和剩余容量的关系、直流内阻和 OCV 的关系可以得到电池在不同温度、电压和电流下的放电特性；通过上电查找 OCV-SOC 曲线确定 SOC 初值；通过充电时判饱校准 SOC 及放电时插值计算在 SOC 为 7%时校准 SOC，以减小累积误差，并将误差保持在 2.00%以内。

参考文献：

[1] 董春伟, 苏志江, 潘广宏, 等. 全固态锂硫电池研究进展与展望[J]. 电源技术, 2026, 50(4): 593-600.
Dong Chunwei, Su Zhijiang, Pan Guanghong, et al. Research progress and prospects of all-solid-state Li-S batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2026, 50(4): 593-600. (in Chinese)

[2] Wu Longxing, Lü Zhiqiang, Huang Zebo, et al. Physics-based battery SOC estimation methods: Recent advances and future perspectives [J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 89: 27-40.

[3] Ng K S, Moo C S, Chen Yiping, et al. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1506-1511.

[4] 申彩英, 左凯. 基于开路电压法的磷酸铁锂电池 SOC 估算研究[J]. 电源技术, 2019, 43(11): 1789-1791.
Shen Caiying, Zuo Kai. Research on SOC estimation of $LiFePO_4$ batteries based on open circuit voltage method [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(11): 1789-1791. (in Chinese)

[5] Tan Xiaojun, Tan Yuqing, Zhan Di, et al. Real-time state-of-health estimation of lithium-ion batteries based on the equivalent internal resistance [J]. IEEE Access, 2020, 8: 56811-56822.

[6] 成燕, 郑林弘, 刘江. 基于模态分解和时间序列的锂电池健康状态估计[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 241-250.
Chen Yan, Zheng Linhong, Liu Jiang. Estimation of state-of-health of lithium-ion batteries based on modal decomposition and time series [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 241-250. (in Chinese)

[7] 许傲然, 戴菁, 谷彩莲, 等. 基于 WOA 优化扩展卡尔曼算法的锂离子电池 SOC 估算研究[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 232-239.
Xu Aoran, Dai Jing, Gu Cailian, et al. Research on SOC estimation of lithium-ion battery based on WOA optimized extended Kalman algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 232-239. (in Chinese)

[8] 汪伟, 黄河, 龙宇舟, 等. 基于改进安时积分法的动力电池 SOC 估算[J]. 客车技术与研究, 2021, 43(3): 12-14.
Wang Wei, Huang He, Long Yuzhou, et al. SOC estimation of power battery based on improved ampere-hour integration method [J]. Bus & Coach Technology and Research, 2021, 43(3): 12-14. (in Chinese)

[9] Bavand A, Ali Khajehoddin S, Ardakani M, et al. Online estimations of Li-ion battery SOC and SOH applicable to partial charge/discharge [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(3): 3673-3685.

[10] Bao Yun, Dong Wenbin, Wang Dian. Online internal resistance measurement application in lithium ion battery capacity and state of charge estimation [J]. Energies, 2018, 11(5): 1073.

[11] 贠祥, 张鑫, 王超, 范兴明. 基于联合参数辨识的粒子群优化扩展粒子滤波的锂电池荷电状态估计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 595-606.
Yun Xiang, Zhang Xin, Wang Chao, Fan Xingming. State of charge estimation of Li-ion battery using particle swarm optimization extended Kalman particle filter based on joint parameter identification [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 595-606. (in Chinese)

[12] 刘旖琦, 雷万钧, 刘茜, 等. 基于双自适应扩展粒子滤波器的锂离子电池状态联合估计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 607-616.
Liu Yiqi, Lei Wanjun, Liu Qian, et al. Joint state estimation of lithium-ion battery based on dual adaptive extended particle filter [J]. Transactions of China Electro-

technical Society, 2024, 39(2): 607-616. (in Chinese)

[13] Yu Quanqing, Xiong Rui, Lin Cheng, et al. Lithium-ion battery parameters and state-of-charge joint estimation based on H-infinity and unscented Kalman filters [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66 (10): 8693-8701.

[14] Huang Chao, Wang Zhenhua, Zhao Zihan, et al. Robustness evaluation of extended and unscented Kalman filter for battery state of charge estimation [J]. IEEE Access, 2018, 6: 27617-27628.

[15] Shu Xing, Li Guang, Shen Jiangwei, et al. An adaptive fusion estimation algorithm for state of charge of lithium-ion batteries considering wide operating temperature and degradation [J]. Journal of Power Sources, 2020, 462: 228132.

[16] Li Weihan, Cao Decheng, Jöst D, et al. Parameter sensitivity analysis of electrochemical model-based battery management systems for lithium-ion batteries [J]. Applied Energy, 2020, 269: 115104.

[17] Ramadesigan V, Chen Kejia, Burns N A, et al. Parameter estimation and capacity fade analysis of lithium-ion batteries using reformulated models [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(9): A1048.

[18] 刘伯峥, 孙馨怡, 董世佳, 等. 磷酸铁锂电池开路电压曲线特性分析[J]. 能源研究与管理, 2023, 15(1): 95-101.
Liu Bozheng, Sun Xinyi, Dong Shijia, et al. Characteristic analysis of open circuit voltage curve of $LiFePO_4$ battery [J]. Energy Research and Management, 2023, 15(1): 95-101. (in Chinese)

[19] Hu Xiaosong, Li Shengbo, Peng Huei. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2012, 198: 359-367.

[20] 陈贵升, 许杨松, 沈颖刚, 等. 基于 OCV 模型优化的磷酸铁锂电池 SOC 估计[J]. 电源技术, 2024, 48(7): 1281-1288.
Chen Guisheng, Xu Yangsong, Shen Yinggang, et al. SOC estimation of $LiFePO_4$ battery based on OCV model optimization [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(7): 1281-1288. (in Chinese)

[21] 刘志聪, 张彦会. 锂离子电池参数辨识及荷电状态的估算[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3613-3622.
Liu Zhicong, Zhang Yanhui. Parameter identification and state of charge estimation of lithium-ion batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3613-3622. (in Chinese)

[22] 刘璇, 王立欣, 吕超, 等. 锂离子电池建模与参数识别[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 145-150.
Liu Xuan, Wang Lixin, Lü Chao, et al. Modeling and parameter identification for lithium-ion battery [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(1): 145-150. (in Chinese)

[23] 鲁文凡, 吕帅帅, 李志扬, 等. 电动汽车用磷酸铁锂动力电池内阻特性研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(1): 175-177.
Lu Wenfan, Lü Shuaishuai, Li Zhiyang, et al. Characteristic study on internal resistance of $LiFePO_4$ power battery for EV [J]. New Chemical Materials, 2018, 46(1): 175-177. (in Chinese)

[24] 卢艳华. 车用三元锂离子动力电池内阻特性分析[J]. 电源技术, 2017, 41(5): 702-704.
Lu Yanhua. Impedance characteristics of lithium ion power battery with NCM cathode for electric vehicles [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(5): 702-704. (in Chinese)

[25] 刘锐, 尚丽平, 屈薇薇. 低温条件下锂电池放电特性分析[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 98-104.
Liu Rui, Shang Liping, Qu Weiwei. Analysis of discharge characteristics of lithium batteries at low temperatures [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 98-104. (in Chinese)



梁叶

作者简介：

梁叶(1994—　)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：锂离子电池 BMS 硬件设计，锂离子电池特性研究及 SOC 算法研究。E-mail：wxliangye@163.com。

蔡孟冶(1988—　)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：CMOS 模拟与射频集成电路，可植入/穿戴式生物传感 SoC 芯片，超低功耗收发机芯片。E-mail：caimengye@jiangnan.edu.cn。

姜岩峰(1972—　)，男，博士，教授。研究方向：新型集成电路设计，新型半导体器件设计，新型磁性材料和磁性器件。E-mail：jiangyf@jiangnan.edu.cn。

王会刚(1974—　)，男，硕士，高级工程师。研究方向：锂离子电池 BMS 系统设计及 SOC 算法研究。E-mail：wanghg@semi.crmicro.com。

(责任编辑：耿越)