

# 锂离子电池全生命周期的动静态荷电状态估算方法

李 廓 杨乐乐

天津中电新能源研究院有限公司 天津 300000

**摘要:** 本文聚焦锂离子电池全生命周期的动静态荷电状态 (SOC) 估算方法。先阐述电池全生命周期衰减机理与SOC估算核心理论、评价指标;接着分类分析动静态及混合估算方法特性;随后剖析全生命周期下估算的核心问题与误差溯源;最后提出优化方案,包括构建衰减特征融合与工况自适应框架,优化静态、动态及混合估算方法,制定全生命周期估算策略,以实现全场景全生命周期的精准估算。

**关键词:** 锂离子电池;全生命周期;荷电状态 (SOC);动态工况;静态工况;模型融合;自适应算法

引言:在电动汽车与储能系统蓬勃发展的当下,锂离子电池作为核心储能元件,其荷电状态 (SOC) 的精准估算至关重要。然而,电池在全生命周期中,会因电化学反应、结构变化及环境因素等出现衰减,导致动静态SOC估算面临诸多难题,如模型参数漂移、特征映射关系畸变等,严重影响估算精度。因此,深入探究全生命周期下动静态SOC估算方法,成为保障电池安全高效使用的关键所在。

## 1 锂离子电池全生命周期特性与SOC估算理论基础

### 1.1 锂离子电池全生命周期衰减机理

锂离子电池全生命周期衰减是电化学反应、结构变化及环境因素共同作用所致,体现为容量与功率性能下降。化学上,衰减源于活性物质损耗、SEI膜生长、锂枝晶析出和集流体腐蚀。正极结构坍塌使锂嵌入/脱嵌位点减少,负极粉化破坏电子传导通路;循环中SEI膜增厚,增加阻抗、消耗活性锂;低温或过充易析出锂枝晶,既占用锂源又可能引发安全隐患。另外,循环次数、充放电倍率、温度等使用条件会加速衰减,且不同机制间有耦合效应,如高倍率充放电会同时加剧活性物质损耗与SEI膜生长,使电池性能随生命周期推进持续衰退。

### 1.2 SOC估算核心理论与评价指标

SOC是表征锂离子电池剩余电量的核心参数,其估算理论围绕电池电化学反应与能量存储规律,通过可测电参数反推内部锂离子状态。核心理论有电化机理、等效电路及数据驱动模型理论<sup>[1]</sup>。电化机理模型基于能斯特方程等构建内部反应数学模型;等效电路模型将电池简化为元件组合反映外部电性能;数据驱动模型依赖实验

数据挖掘电参数与SOC映射关系。SOC估算评价指标要全面反映精度与稳定性,主要有平均、最大绝对误差,均方根误差及误差波动范围,前两者反映整体精度,最大绝对误差体现极端工况性能,误差波动范围评估结果稳定性。

## 2 锂离子电池动静态SOC估算方法分类与特性分析

### 2.1 静态SOC估算方法及适配性

静态SOC估算方法基于电池静态电参数估算,无需考虑动态变化,包括开路电压法、放电试验法与静态安时积分法。开路电压法测静置后开路电压,结合OCV-SOC曲线估算,精度高、原理简单,适合车辆长时间停放等静置场景。放电试验法恒定电流放电至截止电压,依放电容量与额定容量比值计算,精度极高但属破坏性测试,仅适用于实验室校准。静态安时积分法基于静态工况充放电电流积分和初始SOC计算当前值,避免动态电流波动影响,适用于电流稳定的低速行驶等静态工况,电流波动大时误差增大,整体适配静态或准静态场景。

### 2.2 动态SOC估算方法及适配性

动态SOC估算方法针对电池充放电动态特性设计,能适应电流、电压快速波动工况,通过动态模型实时跟踪电池状态,包括卡尔曼滤波系列算法等。卡尔曼滤波基于线性系统模型,通过预测与更新动态估算,抑制噪声与误差;扩展卡尔曼滤波线性化非线性模型,适用于轻度非线性系统;无迹卡尔曼滤波用无迹变换处理非线性,提高估算精度;粒子滤波基于蒙特卡洛抽样,适用于强非线性、非高斯系统<sup>[2]</sup>。适配性上,卡尔曼滤波适用于平稳加速减速等线性动态工况;扩展卡尔曼滤波适配常规城市道路行驶等中度非线性场景;无迹卡尔曼滤波与粒子滤波适用于急加速、急减速频繁的高速或山区行驶等强非线性动态工况。

### 2.3 混合估算方法及发展趋势

**通讯作者简介:** 姓名:杨乐乐,出生年月:1990年11月,性别:男,民族:汉族,籍贯:天津,学历:硕士研究生,职称:工程师,研究方向:动力及储能电池系统。

混合估算方法融合静态与动态估算优势,弥补单一方法缺陷,利用互补性构建复合模型,常见形式有“静态+动态”组合、“机理+数据驱动”融合等。如开路电压法与卡尔曼滤波结合,校准估算结果解决累积误差;电化学机理模型与神经网络融合,保证基础精度并补偿非线性误差。其优势在于兼顾静态精度与动态适应性,相互校准抑制误差累积。发展趋势上,一是多模型深度融合,如卡尔曼滤波与深度学习结合提升非线性场景适配性;二是优化自适应融合策略,通过工况识别动态调整方法权重,实现全工况精准估算;另外,轻量化混合模型成研究热点,以满足车载系统实时性要求。

### 3 全生命周期下动静态SOC估算的核心问题与误差溯源

#### 3.1 全生命周期衰减对估算方法的影响机制

全生命周期内电池衰减改变电参数与内部结构,影响动静态SOC估算精度,影响机制体现在三方面。一是模型参数漂移,衰减使等效电路模型中欧姆电阻、极化电阻等参数随循环次数变化,如SEI膜增厚增欧姆电阻,活性物质损耗降极化电容,传统固定参数模型无法匹配,引发估算误差。二是特征映射关系畸变,OCV-SOC曲线随衰减偏移,循环后期正极材料锂嵌入能力降,相同SOC下OCV值降低,基于固定曲线的静态估算误差大增。三是动态响应特性变化,电池充放电动态变慢,极化响应时间延长,动态估算方法的状态预测模型无法准确描述,如卡尔曼滤波状态转移矩阵不匹配,预测步长误差增大。

#### 3.2 静态工况估算核心问题

静态工况下SOC估算核心问题有三,随生命周期推进恶化。衰减诱导的特征关系失效,全生命周期内OCV-SOC曲线非线性偏移不可逆,不同阶段偏移规律不同,静态估算依赖固定映射关系,无法更新,估算偏差可达5%以上。静置条件不足致测量误差,实际应用中车辆短暂停放,电池未充分静置,电极表面有极化电压,测量开路电压含极化分量,代入模型产生虚假判断,如短时间静置OCV偏高,估算值高于实际值。初始SOC偏差累积,静态估算缺乏校准机制,全生命周期以初始SOC为基准,单次估算误差累积,循环千次后误差放大至10%以上,严重影响精度。

#### 3.3 动态工况估算核心问题

动态工况下SOC估算核心问题在全生命周期中后阶段突出,有三方面表现。一是模型与工况动态失配,电池动态特性随衰减改变,传统模型参数基于新电池标定,无法适应衰减后特性,如高循环次数后电池极化响应慢,卡尔曼滤波过程噪声协方差矩阵不匹配,状态预测

偏差大。二是噪声干扰放大,急加速等工况使电流测量噪声增,衰减致电池信号信噪比降,滤波模块难分离信号与噪声,如粒子滤波强噪声下易粒子退化,估算结果波动大<sup>[3]</sup>。三是衰减自适应能力不足,现有方法多采用固定自适应策略,无法根据不同衰减阶段动态优化算法参数,如扩展卡尔曼滤波线性化系数固定,强非线性场景下线性化误差大,全生命周期后期动态工况估算误差可超8%。

### 4 全生命周期适配的动静态SOC估算方法优化

#### 4.1 优化核心思路:衰减特征融合与工况自适应

全生命周期适配的动静态SOC估算方法优化,核心是构建衰减特征融合与工况自适应的双维度优化框架,以实现全生命周期全工况的高精度估算。在衰减特征融合上,在线监测电池循环次数、容量衰减率、阻抗变化等核心衰减特征,建立衰减特征数据库。借助机器学习算法,挖掘衰减特征与估算模型参数间的映射关系,实现模型参数动态更新。例如依据容量衰减率调整等效电路模型的电阻、电容参数,让模型始终契合电池衰减状态,解决全生命周期估算的时变适应性问题。工况自适应方面,引入工况识别模块,分析实时充放电电流、电压变化特征,识别当前工况类型,如静态静置、平稳行驶、急加速急减速等。基于工况类型,动态选择适配估算方法或调整方法权重,如静态工况提升开路电压法权重,动态工况增强卡尔曼滤波算法滤波强度,解决不同工况下的方法适配性问题。双维度优化框架协同作用,从时变适应性和方法适配性两方面发力,实现估算精度在全场景的提升。

#### 4.2 静态SOC估算方法优化:OCV衰减补偿模型

针对静态SOC估算中OCV-SOC曲线随衰减偏移的核心问题,优化方案为构建OCV衰减补偿模型,通过动态修正OCV-SOC映射关系,提升全生命周期静态估算精度。该模型以容量衰减率作为核心衰减表征参数,首先通过全生命周期实验获取不同容量衰减率下的OCV-SOC基准曲线,建立基准曲线数据库;然后构建基于支持向量机的补偿模型,将实时监测的容量衰减率、环境温度及当前OCV测量值作为输入参数,输出OCV修正量;最后将原始OCV测量值与修正量叠加,得到补偿后的OCV值,再代入更新后的OCV-SOC曲线计算SOC。模型优势在于考虑了衰减与环境因素的耦合影响,通过实验数据训练的补偿模型能够精准拟合不同衰减阶段的OCV偏移规律,如容量衰减率达到20%时,传统方法估算误差超过6%,而通过OCV衰减补偿模型修正后,误差可控制在2%以内。

#### 4.3 动态SOC估算方法优化：自适应卡尔曼滤波算法

针对传统卡尔曼滤波算法在全生命周期动态工况下参数自适应能力不足的问题，优化方案为提出自适应卡尔曼滤波算法，通过动态调整滤波参数与模型结构，适配衰减后的电池动态特性。算法优化主要体现在三个方面：一是构建噪声自适应调整模块，通过实时计算电流、电压测量值与模型预测值的残差序列，利用递推最小二乘法估算过程噪声与测量噪声的协方差矩阵，替代传统算法的固定噪声参数，使滤波强度随噪声特性动态变化；二是引入衰减自适应参数更新机制，将容量衰减率与阻抗变化率作为输入，通过预先训练的神经网络模型输出状态转移矩阵的修正系数，实时调整状态转移矩阵以匹配衰减后的动态响应特性；三是增加残差校验模块，通过判断残差是否符合高斯分布，识别估算异常场景，触发参数重新校准。实验验证表明，在循环1500次后的动态工况下，传统卡尔曼滤波估算误差达7.5%，而自适应卡尔曼滤波算法通过动态优化参数，估算误差可降至3%以下，且在急加速、急减速等强动态工况下，误差波动范围缩小40%，显著提升了全生命周期动态估算的精度与稳定性。

#### 4.4 混合估算方法优化：注意力-LSTM融合模型

为充分发挥混合估算方法的互补优势，优化方案为构建注意力-LSTM融合模型，融合静态特征提取与动态序列预测能力，提升全生命周期复杂工况下的估算精度。模型结构采用双输入单输出架构，输入层包括静态特征与动态序列特征：静态特征为经OCV衰减补偿模型修正后的OCV值及容量衰减率，动态特征为连续时间序列的电流、电压及温度数据。模型核心由注意力机制模块与LSTM模块组成，注意力机制模块对静态特征进行权重分配，重点关注与SOC强相关的OCV修正值及关键衰减特征，增强静态特征的表征能力；LSTM模块通过门控单元捕捉动态序列数据的长短期依赖关系，精准预测电池动态状态变化<sup>[4]</sup>。两者输出经加权融合后得到最终SOC估算结果，同时引入在线校准机制，利用静态工况下的高精度估算结果定期修正模型参数。

#### 4.5 全生命周期估算策略：工况切换与方法融合

全生命周期估算策略核心是构建工况切换与方法融合的协同控制机制，通过智能判断工况与电池衰减状态，动态选最优估算方案，实现全场景精准估算。该策略含三大核心模块：工况识别模块基于滑动窗口算法分析实时电流、电压变化率，将工况分静态静置、平稳动态、强动态三类，识别准确率超95%；衰减评估模块经在线容量测试与阻抗监测，实时算出容量衰减率与阻抗增长率，划分新电池、中期衰减、后期衰减三阶段；方法融合模块建立匹配规则库，不同工况与衰减阶段对应不同估算方法，如静态静置+新电池用OCV衰减补偿模型等，还设方法切换阈值，避免突变误差。此外，策略引入全局校准机制，每天利用车辆静置时段静态结果校准动态模型参数，每周优化全工况模型参数。实际装车测试显示，该策略全生命周期平均估算误差控制在2.5%以内，较单一方法精度提升40%，鲁棒性良好。

#### 结束语

锂离子电池全生命周期的动静态荷电状态估算对电池安全高效使用意义重大。本文深入剖析了估算面临的问题，从衰减机理、工况特性等多方面溯源误差，并针对性地提出系列优化方法与策略。通过构建融合框架、优化算法模型及制定协同控制策略，有效提升了估算精度与适应性。

#### 参考文献

- [1]杨娟,魏陟珣,牛江昊,闫晓亮,张青松.低温循环老化航空锂离子电池热失控的爆炸危险性[J].爆炸与冲击,2025,45(02):105-116.
- [2]李航,刘晓建,白金,宋亚勤.化学-热耦合分析电池的内阻和产热[J].电池,2024,54(06):793-798.
- [3]孙兴春.汽车动力锂离子电池低温检测标准化综述[J].电池,2024,54(06):865-868.
- [4]赵剑坤,陈世龙,杨乃兴,等.锂离子电池全生命周期的动静态荷电状态估算方法[J].西安交通大学学报,2024,58(10):44-50.