

储能电池衰减特性建模及全生命周期运维策略分析

万 泉

宁夏国运新能源股份有限公司 宁夏 银川 750021

摘 要：储能电池全生命周期的运维管理对其性能与安全至关重要，深入研究其衰减特性及运维策略意义重大。本文概述储能电池衰减特性，介绍衰减特性建模方法、参数确定及验证优化方式。分析全生命周期运维策略，涵盖运行、维护、退役阶段，还提及应急响应与安全保障、数据安全管理等，旨在为储能电池的高效运维提供理论支持与实践指导。

关键词：储能电池；衰减特性建模；全生命周期；运维策略

引言

在全球能源转型的大背景下，储能技术作为关键支撑，发挥着愈发重要的作用。储能电池作为储能系统的核心部件，其性能的稳定性和可靠性直接关系到整个储能系统的运行效率 and 安全性。然而，储能电池在长期使用过程中不可避免地会出现衰减现象，这不仅会影响其使用寿命，还会降低储能系统的性能。因此，深入研究储能电池衰减特性建模及全生命周期运维策略具有重要的现实意义。

1 储能电池衰减特性概述

储能电池的衰减是受多种因素交织影响的复杂过程，涵盖电池自身化学特性、使用环境以及充放电策略等方面。从化学特性来讲，不同类型电池衰减机制差异明显。以锂离子电池为例，在充放电时正负极材料会发生结构变化与相变，致使锂离子嵌入和脱出能力降低，最终引发电池容量衰减、内阻增加^[1]。而铅酸电池存在硫酸盐化问题，充电时部分硫酸铅无法完全转化为活性物质，会在极板上不断积累，干扰电池充放电性能。使用环境对电池衰减的影响也十分显著。温度是关键因素，高温会加速电池内部化学反应速度，使电池材料更快老化、性能加速衰退；低温则会使电解液黏度增大，离子传导速率降低，影响充放电效率和容量。湿度也不容小觑，过高湿度可能引发电池内部短路或腐蚀，降低电池可靠性和寿命。充放电策略同样起着重要作用。不合理的充放电电流、截止电压以及深度等都会加速电池衰减。过大的充放电电流会使电池内部产生大量热量，加剧材料损耗；过高的充放电截止电压易导致电池过充或过放，对电极材料造成不可逆损伤；过深的充放电深度会增加电池循环次数，缩短其使用寿命。因此，为有效减缓储能电池衰减速度，延长其使用寿命，需综合考虑这些因素，在电池选型时依据实际需求挑选合适类型，

运行过程中严格控制环境条件，同时制定科学合理的充放电策略。

2 储能电池衰减特性建模

2.1 建模方法选择

储能电池衰减特性建模中，经验模型、半经验模型和物理模型是常见方法，各有特点与适用场景。经验模型依托大量实验数据，经统计分析构建电池容量或内阻与使用时间、充放电循环次数等变量的数学关系。其优势显著，模型结构简单，理解与运用门槛低，计算量小，对计算资源要求不高，能快速得出结果。然而，它存在明显不足，仅聚焦于实验数据呈现的表面规律，未深入探究电池内部复杂的物理化学过程，难以全面准确反映电池衰减本质，导致适用范围受限，通常仅在特定类型电池、特定使用条件下有效，一旦条件改变，模型准确性会大幅下降。半经验模型巧妙融合经验模型与物理模型特性。在经验模型框架基础上，引入反映电池内部物理化学过程的参数，如电极材料反应速率、离子扩散系数等。这些参数的加入，使模型既保留对实验数据统计规律的考量，又能对电池衰减机制进行一定描述，能解释部分电池衰减原因，提高模型准确性与适用性。在描述电池容量衰减时，不仅考虑循环次数影响，还结合电极材料老化因素，使预测结果更接近实际情况，在多种类型电池和较宽使用条件范围内有较好表现。物理模型基于电池内部物理化学原理，运用微分方程或偏微分方程描述电池充放电过程与衰减机制。它能深入揭示电池衰减本质，从微观层面解析电池内部离子迁移、电极反应等过程对电池性能的影响，为理解电池衰减提供理论基础。但物理模型复杂度高，涉及众多变量与复杂数学运算，计算量大，对计算资源要求高。模型准确性依赖准确的电池参数和边界条件，而实际中电池参数受制造工艺、使用环境等因素影响存在不确定性，边界条

件也难以精确确定，这给模型实际应用带来较大难度。

2.2 模型参数确定

建立储能电池衰减特性模型时，精准确定模型参数至关重要，常见方法有实验测定法与参数辨识法。实验测定法通过精心设计一系列电池充放电实验来建模。比如，设置不同充放电倍率（0.5C、1C、2C）、温度（-10℃、25℃、50℃）等条件，准备多组电池样本开展实验。实验中，用专业设备测量电池容量、内阻等指标。

以容量衰减模型($C = C_0 - k \cdot n$)为例，记录不同循环次数 n 下的容量 C ，通过线性回归确定 k 值。（ C ：可用容量， C_0 ：初始额定容量 k ： n 容量衰减系数充放电循环次数）此方法参数准确可靠，能反映特定实验条件特性，但工作量大、成本高，且实验条件难完全模拟实。际环境，参数应用或有偏差^[2]。参数辨识法将电池视为动态系统，利用输入输出数据估计参数常用最小二乘法（所有点到模型曲线的距离平方和最小），通过最小化误差平方和确定参数使模型输出接近实际数据；极大似然法基于概率统计，找使观测数据出现概率最大的参数值。

以下为两种方法对比表格：

表 实验测定法与参数辨识法对比分析表

方法	优点	缺点
实验测定法	参数准确可靠，反映特定条件特性	工作量大、成本高，条件难完全模拟实际
参数辨识法	无需大量实验，减少成本、提高效率	对数据质量要求高，受模型结构和初始值影响

2.3 模型验证与优化

模型构建完成后，为验证模型预测精度与泛化能力，需采用科学的验证与优化方法。常用数据集验证方法包含留出法、K折交叉验证法、留一法，其中留出法操作简便，小样本数据划分误差较大；留一法数据利用率高，但计算成本高昂；K折交叉验证结果稳健、算力适中，综合性能最优。本文选取均方根误差（RMSE）、决定系数（ R^2 ）、K折交叉验证三种核心方式完成模型验证，同时通过智能算法优化模型参数，提升电池衰减模型的工况适应性与预测精度。各核心指标及算法公式、符号含义如下：

（1）均方根误差（RMSE）公式：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

符号含义： N 为样本总数； y_i 为真实值； $\hat{y}_i$ 为模型预测值。数值越小，代表模型预测误差越小、精度越高。

（2）决定系数（ R^2 ）公式：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

符号含义： $\bar{y}$ 为所有样本真实值均值；其余符号同上。 R^2 取值趋近于1，说明模型拟合效果越好。

（3）K折交叉验证（最优验证算法）公式：

$$CV_K = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Err_k$$

符号含义： K 为数据集划分折数（常用5、10折）； Err_k 为第 k 折样本的预测误差。通过多轮交叉验证取平均误差，可有效规避过拟合、样本划分不均问题。

最优算法选取：综合对比三类验证方法，本文选用10折交叉验证法作为最优验证算法，兼顾模型验证精度与计算效率，适配电池衰减模型的数据分析需求。

3 储能电池全生命周期运维策略分析

3.1 运行阶段运维策略

储能电站运行中，以持久无故障为导向的运维策略，是延缓磷酸铁锂电池衰减的关键所在，其中温度与电压控制是核心要点。温度对磷酸铁锂电池性能影响显著。其适宜工作温度为20-30℃，在此区间电池性能稳定。温度过高时，会加速SEI膜持续增厚，破坏正极晶格结构，使电池容量衰减加快、内阻增长速率大幅提升。而温度过低，电解液黏度增大，锂离子扩散受阻，充放电效率明显降低^[3]。为维持适宜温度，储能电站需配置空调、冷却装置等温控设备。同时，湿度控制也不容忽视，应将相对湿度控制在40%-70%，防止高湿环境引发电池内部腐蚀或短路，保障电池安全稳定运行。电压管理同样至关重要。过充与过放对电池损伤极大。过充时，当单体电压超过3.65V，正极铁锂脱锂过度，晶格坍塌，造成不可逆的容量损失。过放时，单体电压低于2.5V，铜集流体溶解，负极碳结构被破坏。电极材料损伤有上下限度，轻度损伤如SEI膜微量增厚，可通过小电流充放电部分修复；但晶格发生不可逆相变或活性物质大面积脱落，就达到损伤下限临界点，电池将无法恢复。此外，过放还会导致极板硫化，硫酸铅结晶在极板表面形成致密层，阻塞离子传输通道，进一步降低电池容量与寿命。因此，要借助电池管理系统（BMS）实时监控单体电压，将荷电状态（SOC）控制在5%-96%，避免触达损伤上下限。此外，采用智能充放电管理系统，依据电压、电流、温度自动调整充放电策略，减少不合理充放电带来的循环损耗。同时在线上实时监控电压、

电流、温度等数据,通过EMS监控实时分析并计算电池荷电状态、健康状态,判断电池使用寿命,为维护决策提供科学依据。

3.2 维护阶段运维策略

维护阶段针对储能电站新投运的磷酸铁锂电池包,以减少衰减、保障持久无故障运行为目标开展定期维护。外观检查是基础:查看电池包是否漏液、变形、腐蚀。漏液表明密封失效,会导致电解液流失、内阻升高;变形可能源于内部压力异常或外力冲击;腐蚀会降低导电性与密封性。发现问题须及时更换或修复。表面清洁不可忽视,灰尘积累影响散热导致局部温升,加速衰减,须定期擦拭保持良好散热。均衡充电是核心维护措施:新电池包中各单体因制造工艺与使用环境差异会产生电压不一致^[4],长期不平衡将导致部分电池过充过放,加速正极相变与负极损伤。电池组日常由BMS管理,被动均衡范围仅 $\pm 0.1\text{V}$,难以消除大压差。推荐采用主动均衡,借助外部仪器将高电压电池能量转移至低电压电池,效率更高,可有效消除压差,防止个别电池率先触达损伤下限。定期容量与内阻测试可量化衰减程度,对容量低于额定值80%或内阻增大超过初始值20%的电池及时更换,保证电池组整体一致性,从根本上延缓木桶效应导致的加速衰减,确保电池包长期稳定运行。

3.3 退役阶段运维策略

储能电池达到退役标准时,合理处理处置至关重要。对退役电池评估是首要环节。判断其剩余价值和可再利用性,若剩余容量和性能能满足低要求场景,如储能电站备用电源、低速电动车等,可进行梯次利用,提高资源利用率,降低储能成本。若无法梯次利用,则需回收处理。回收过程要采用环保、安全方法,分离回收有价金属和其他材料。如锂离子电池中含有锂、钴、镍等有价金属,回收这些金属既能减少对环境 的污染,又能实现资源循环利用。加强对回收企业监管,确保回收处理符合标准和规范,防止二次污染和资源浪费。在储能电池全生命周期中,建立完善运维管理体系不可或缺。制定详细运维计划和操作规程,明确运维人员职责和 工作流程,使运维工作有章可循。加强对运维人员培 训,提高其专业技能和运维水平,确保能正确处理各种 运维问题。建立运维档案,记录电池运行、维护和退役 等信息,为全生命周期管理提供数据支持,便于分析电 池性能变化规律,优化运维策略。

3.4 应急响应与安全保障策略

储能电站运行中,电池热失控、电气故障、自然灾害等突发状况频发,建立完善的应急响应机制至关重

要,它是保障人员安全、减少财产损失、确保电池稳定运行的关键。应急预案制定是首要环节,需明确不同紧急场景的应对措施与责任分工。以电池热失控为例,要立即切断上级电源防跳闸,灭火分三级处理,从电池包内自动释放灭火介质,到气体灭火系统手动启动,再到水消防作为最后手段。同时,防汛与地基下陷也不容忽视。储能电站多建于室外或低洼处,暴雨积水可能使电池舱室浸水,导致绝缘失效甚至短路,因此要配备排水泵与防水挡板,雨季前全面检查排水系统与应急防汛物资,遇积水及时断电排水并检测绝缘。地基不均匀沉降会使电池舱室包受力不均,引发壳体变形等问题,需定期监测地基沉降,发现异常及时加固。定期组织涵盖多种场景的应急演练,能提高运维人员处理突发事件的能力,还要根据演练反馈与实际 情况评估更新预案。安全是运维工作的重中之重,电池室设计与建设要充分考虑安全因素,采用防火、防爆、防雷等设施,保证良好通风,安装火灾自动报警和气体灭火系统^[5]。加强安全监测,增加气体泄漏等安全指标监测。运维人员要配备安全防护装备。

结语

储能电池衰减特性建模及全生命周期运维策略研究是一个复杂且系统的工程。通过对储能电池衰减特性的深入分析,建立科学合理的模型,并制定针对性的运维策略,能够有效延长储能电池的使用寿命,提高储能系统的性能和安全性。在实际应用中,应充分考虑不同类型储能电池的特点和使用环境,不断优化建模方法和运维策略,以适应储能技术快速发展的需求,推动储能行业朝着更加高效、安全、可持续发展的方向发展。

参考文献

- [1]赵泽渊,王川,常晓慧,王立国,张蕾.面向光伏电站的储能电池设计与系统电压控制研究[J].电子元件与材料,2026,45(2):180-190.
- [2]顾志斌,张海龙,姚宁,鲁军,朱绪跃,孟磊.液冷储能电池系统热管理的研究应用[J].电力安全技术,2026,28(1):42-45.
- [3]刘辉,陈彦桥,王荣,王础,马悦,赵富鑫,陈来,闫康,苏岳峰.储能电池老化机制多维度评价综述[J].电池,2026,56(1):208-214.
- [4]于洪峰,曹阳阳,许成林,邵宇杰,栗欢欢.储能电池热管理及控制策略研究进展[J].电源技术,2026,50(1):20-32.
- [5]田刚领,叶晖,张柳丽,崔美琨,李爱魁.基于数据挖掘的电池储能电站运维技术综述[J].太阳能,2022(5):23-32.