



基于电化学阻抗谱和弛豫时间分析的铅酸电池老化状态诊断研究

张馨怡¹, 刘巍², 陈德波¹, 寿泽冰¹, 程豪¹, 陆盈盈¹

(¹浙江大学化学工程与生物工程学院, 浙江 杭州 310027; ²阿里云计算有限公司, 浙江 杭州 310024)

摘要: 铅酸电池作为数据中心后备电源的关键部件, 在长期浮充工况下易发生硫酸盐化、板栅腐蚀等老化现象, 导致容量衰减和早期失效, 传统的内阻测试方法难以准确评估其健康状态。为此, 本研究提出一种基于电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)与弛豫时间分布(distribution of relaxation times, DRT)的联合分析方法, 系统研究浮充状态下铅酸电池的老化机制。实验选取GFM-360E阀控式铅酸电池, 涵盖未服役、服役合格与服役不合格3类老化状态, 在不同荷电状态(state of charge, SOC)下进行EIS测试, 并利用DRT技术对阻抗数据进行反卷积解析, 提取欧姆电阻(R_{ohm})、特征峰位(P1~P4)及峰面积等关键参数。研究表明, EIS曲线在低频区出现扩散斜线、DRT谱图中P3与P4峰耦合形成宽大巨峰(峰面积大于150%)、 R_{ohm} 增幅超过30%等特征, 可有效识别活性物质硫酸盐化、电解液干涸与板栅腐蚀等老化模式。通过构建“同SOC不同老化状态”与“同老化状态不同SOC”的对比分析框架, 建立了基于EIS-DRT的老化判定指标体系, 实现了对铅酸电池老化状态的多维度量化诊断。本方法克服了传统等效电路模型的主观性, 提升了老化判断的精度与可靠性, 为浮充场景下铅酸电池的精准健康管理提供了有效的技术手段。

关键词: 铅酸电池; 电化学阻抗谱; 弛豫时间分布; 老化诊断; 浮充

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0988

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1425-13

Aging diagnosis of lead-acid batteries based on electrochemical impedance spectroscopy and relaxation time analysis

ZHANG Xinyi¹, LIU Wei², CHEN Debo¹, SHOU Zebing¹, CHENG Hao¹, LU Yingying¹

(¹College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

²Alibaba Cloud Computing Ltd., Hangzhou 310024, Zhejiang, China)

Abstract: As key components of backup power systems in data centers, lead-acid batteries are prone to sulfation, grid corrosion, and other aging phenomena under long-term float charge conditions, resulting in capacity attenuation and early failure. The traditional internal resistance test method cannot accurately evaluate the health status of acid-lead batteries. Therefore, a joint analysis method based on electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and the distribution of relaxation times (DRT) is proposed to systematically study the aging mechanism of lead-acid batteries under float charge conditions. The GFM-360E valve-

收稿日期: 2025-11-03; 修改稿日期: 2025-12-25。

基金项目: 国家自然科学基金(22578392), 阿里巴巴创新研究计划(31881498 CRS71DHZ11240002)。

第一作者: 张馨怡(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电池寿命预测、无损检测, E-mail: zhangxinyizxy@zju.edu.cn; 通信作者: 陆盈盈, 教授, 研究方向为锂离子电池、电化学催化转化、新型电池, E-mail: yingyinglu@zju.edu.cn。

引用本文: 张馨怡, 刘巍, 陈德波, 等. 基于电化学阻抗谱和弛豫时间分析的铅酸电池老化状态诊断研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1425-1437.

Citation: ZHANG Xinyi, LIU Wei, CHEN Debo, et al. Aging diagnosis of lead-acid batteries based on electrochemical impedance spectroscopy and relaxation time analysis[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1425-1437.

regulated lead-acid battery was selected for the experiments, which covered three aging states: not in service, qualified in service, and unqualified in service. EIS measurements were conducted at different states of charge (SOC). Subsequently, DRT was used to deconvolute the impedance data and extract the ohmic resistance (R_{ohm}), characteristic peak positions (P1—P4), peak areas, and other key parameters. The results show that the EIS curve exhibits a diffusion slant in the low-frequency region, coupling the P3 and P4 peaks in the DRT spectrum to form a wide giant peak (peak area > 150%), and an increase of R_{ohm} of more than 30%. These can effectively identify aging modes such as the sulfation of active substances, electrolyte drying, and grid corrosion. By constructing the comparative analysis framework of "different aging states with the same SOC" and "different SOC values with the same aging state," the aging judgment index system based on EIS-DRT was established, and the multi-dimensional quantitative diagnosis of the aging state of lead-acid batteries was realized. This method overcomes the subjectivity of the traditional equivalent circuit model, improves the accuracy and reliability of aging predictions, and provides an effective technical means for the precise health management of lead-acid batteries under floating charge conditions.

Keywords: lead-acid battery; electrochemical impedance spectroscopy; distribution of relaxation times; aging diagnosis; floating charge

铅酸电池因安全性高、成本低、技术成熟及回收效率高等优势,在储能系统、通信基站、不间断电源等领域仍具有不可替代的地位^[1]。尤其是在长期浮充工作状态下,铅酸电池作为后备电源的核心部件,其可靠性直接关系到整个供电系统的稳定运行^[2]。然而,在长期浮充工况下,铅酸电池易发生硫酸盐化、板栅腐蚀、活性物质软化与脱落等多种老化现象,导致容量衰减、内阻增加,进而引发早期失效,严重威胁系统的供电安全^[3]。随着储能电站、变电站直流系统以及通信后备电源等场景对供电可靠性要求的不断提高,铅酸蓄电池的荷电状态(state of charge, SOC)和健康状态(state of health, SOH)进行在线评估与失效预警的需求也日益迫切。

目前,浮充场景下铅酸电池的运维与状态诊断仍主要依赖电压、电流和内阻(如手持式内阻仪)等传统手段^[4]。尽管这些方法实施简便,但其准确性易受温度波动、历史充放电状态、电解液分层等因素干扰,难以反映电池内部微观结构的变化^[5]。尤其值得注意的是,传统内阻仪通常仅在单一频率(如1 kHz)下进行阻抗测量,难以全面捕捉电池在不同频段下的电化学行为变化,因此其老化判断结果易存在较大误差^[6]。

电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)技术通过施加不同频率的小幅

交流扰动信号,测量电池的阻抗响应,能够无损地获取电池内部的欧姆电阻、电荷转移电阻、双电层电容及扩散过程等关键信息^[7-9]。近年来,EIS在锂离子电池健康状态评估中已展现出显著优势^[10-11],并逐步应用于铅酸电池领域^[12-15]。在铅酸蓄电池运维场景中,近两年国内已逐步涌现出面向工程实践的EIS诊断研究。有研究^[16,16-19]针对变电站直流系统后备电源,提出了基于EIS的铅酸蓄电池SOH快速检测思路,并进一步推进了装置的集成化设计,以缓解传统容量核验周期长、成本高的问题。同时,面向智能变电站的应用场景,也有研究^[5,20-24]将EIS用于蓄电池SOC与SOH的在线评估,在不中断电力系统运行的前提下实现状态监测,并对在线测量中的扰动幅值选择、噪声数据处理、结果后处理以及模型拟合等关键问题进行了探讨。上述研究表明,EIS在铅酸电池的在线监测与工程诊断中展现出显著潜力,然而其诊断结果的可靠性仍高度依赖于阻抗特征提取与参数辨识的客观性与稳健性。因此,发展更具可解释性与可重复性的分析框架仍是当前的重要方向。

Yang等^[25]研究表明,EIS谱图在不同老化阶段的特征变化与电池的容量衰减和内阻增加具有高度相关性,尤其在中低频区域更能反映界面反应和物质传输过程的变化。然而,传统的EIS数据分析多

依赖于等效电路模型，其模型参数辨识复杂且物理意义不明确，尤其在多时间常数重叠的情况下解析困难^[26]。因此，在充分发挥EIS信息丰富这一优势的同时，提升参数辨识与机理解析的客观性，成为推动铅酸电池状态诊断技术走向工程化落地的关键环节。

弛豫时间分布(distribution of relaxation times, DRT)方法通过对EIS数据进行数学变换，将阻抗谱分解为一系列连续的时间常数分布，从而更直观地揭示电池内部不同电化学过程的弛豫特性，避免等效电路模型的主观假设，显著提高特征参数的提取精度^[27]。目前，DRT在燃料电池和锂离子电池领域已得到较为广泛的应用，但在铅酸电池老化诊断方面的研究仍处于初步探索阶段。在锂离子电池体系中，DRT已逐渐从“机理辅助分析”手段发展为面向健康状态估计与寿命诊断的特征提取工具。已有研究^[28-31]通过对EIS数据进行DRT去卷积，获得的时间常数分布被用于分析不同工况下的老化机制与状态演化，显示出其在区分重叠电化学过程、增强阻抗谱可解释性方面的显著优势。进一步地，Akram等^[32]将DRT提取的特征与数据驱动模型结合，提升了锂离子电池SOH估计的精度与模型泛化能力。此外，在锂硫电池等更为复杂的电化学体系中，DRT同样被用于对EIS谱进行定量解析，以分离多过程的极化贡献，体现了该方法良好的机理分离能力与跨体系迁移潜力^[33]。因此，将DRT引入铅酸电池的阻抗解析，有望在保留EIS信息丰富性优势的同时，降低等效电路建模的主观依赖性，并为后续将该方法拓展至锂离子电池等其他新体系提供方法学基础。

为此，本研究旨在结合EIS与DRT方法，系统研究浮充状态下铅酸电池的老化机制，提出一种基于多频率阻抗特征与弛豫时间分布的老化状态诊断方法。本研究系统地将DRT分析应用于浮充铅酸电池的多老化模式解耦诊断，构建了一套融合多SOC点EIS测试与DRT特征提取的联合分析框架，克服了传统等效电路模型的主观性。通过在不同SOC分布状态下进行EIS测试，提取DRT特征峰参数，建立与电池容量衰减的定量关系，为实现铅酸电池的精准健康管理提供理论依据和技术支持。

1 实验方法

1.1 电池样本信息

本研究以浙江南都电源动力股份有限公司生产的GFM-360E阀控式密封铅酸蓄电池为研究对象，

样本覆盖3种老化状态：未服役合格、服役合格与服役不合格，对应信息见表1与表2。

表1 GFM-360E 铅酸电池参数

Table 1 Parameters of GFM-360E lead-acid battery

参数	数值
标称电压	2 V
额定容量	360 Ah(1.8 V, 25℃)
额定功率	1100 W(1.67 V, 25℃)
电池重量	21.5 kg
参考内阻	约0.32 mΩ
充电电压	浮充: 2.25 V(25℃) 均充: 2.35~2.40 V(25℃)

表2 实验测量的铅酸电池状态信息

Table 2 The state information of lead-acid batteries measured in the experiment

电池型号	电池序号	老化状态	运行缺陷
GFM-360E	1	未服役合格	—
	2	服役合格	—
	3	服役合格	—
	4	服役不合格	放电容量不足
	5	服役不合格	放电容量不足

1.2 测试设备与条件

实验测试平台由电池、充放电仪、交流阻抗分析仪和上位机4个部分构成。GFM-360E电池连接充放电仪进行充放电，同时并联交流阻抗分析仪EIS01进行交流阻抗测试，测量数据由上位机进行储存和处理。所有测试过程均在常温(25℃)和常压(101.3 kPa)下进行，具体连接方式如图1所示。

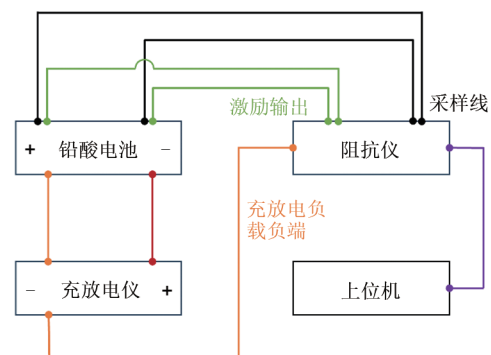


图1 测试设备连接

Fig. 1 Test equipment connection

1.3 测试流程

在电池研究和电池管理领域，SOC通常定义为剩余电量与标称(额定)容量的百分比。然而，电

池在老化过程中实际容量会发生衰减,若以变化的实际容量为基准定义SOC,则不同老化状态的电池将处于不同的实际工作点,这给基于固定外部激励的阻抗谱比较带来干扰。为剥离外部激励条件的影响,本研究统一以电池的标称容量为基准,通过恒流释放相同绝对电量的方式,确保所有被测电池经历完全一致的外部电激励。在此前提下,不同老化状态电池之间所观测到的EIS与DRT特征差异,便可直接归因于其内部健康状态的不同,从而强化了老化机理与电化学响应特征之间的对应关系。实验步骤按照以下流程进行。

(1) 电池充电及SOC标定。首先,使用充放电仪(深圳新威)将待测电池以36 A(0.1 C)恒流充电至2.25 V(25℃),静置2 h,此时待测电池SOC定为100%。在此基础上,使用交流阻抗分析仪(上海炙云新能源科技有限公司, EIS01)进行静态交流阻抗测试,激励电流为5000 mA,测试范围为0.1~10000 Hz。

(2) 不同SOC下的EIS测试。根据该型号电池的额定容量对其进行恒流放电,分别放电至电池80% SOC、60% SOC、40% SOC,每个SOC点充放电过程结束后,静置2 h以确保电池处于稳定状态。每个SOC点的EIS测试数据将在静态条件下进行采集。重复以上步骤直至所有SOC测试完成,具体流程步骤如表3所示。

表3 测试步骤
Table 3 Test steps

步骤	操作	电流	时间	截止条件
1	恒流充电	36 A	—	2.25 V
2	静置	—	2 h	—
3	静态交流阻抗测试	—	—	—
4	恒流放电	36 A	—	$Q_{放}=72 \text{ Ah}$
5	重复步骤2~3	—	—	—
6	恒流放电	36 A	—	$Q_{放}=72 \text{ Ah}$
7	重复步骤2~3	—	—	—
8	恒流放电	36 A	—	$Q_{放}=72 \text{ Ah}$
9	重复步骤2~3	—	—	—

1.4 DRT解析方法与特征参数提取

由于电化学系统的复杂性,其测量的EIS数据是多种内部反应共同作用的结果,这导致了特征峰相互重叠,严重影响了EIS分析的准确性和稳定性^[34]。为了解决上述问题,研究者提出DRT的方法,该方法根据电化学系统内不同反应过程和其暂

态趋于稳态的弛豫时间的相对应关系,利用反卷积运算将频域的阻抗数据转化为连续分布的时域数据,实现不同电化学反应过程的辨识^[35-36]。

DRT技术在1941年被首次应用于阻抗分析,其基于拟合一般化等效电路模型的思想,构建出体系欧姆电阻(R_{ohm})串联无数个代表极化过程的微分电容(C_i)与电阻(dR_i)的并联单元(图2),实现对任意电化学阻抗模型的逼近式拟合^[37]。

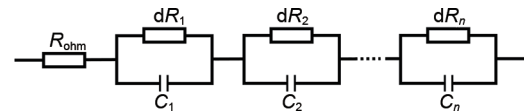


图2 一般化等效电路模型

Fig. 2 Generalized equivalent circuit model

对于该基本电路,其阻抗可表示为式(1)。当串联的极化单元数量 n 趋近于无穷时,可用积分进行表示如式(2)。考虑到EIS数据以对数进行取样,对式(2)进一步变化,以 $\ln\tau$ 为积分变量得到式(3)^[35,38]。

$$Z(\omega) = R_{ohm} + \sum_{i=1}^n \frac{dR_i}{1 + j\omega dRC_i} = R_0 + \sum_{i=1}^n \frac{dR_i}{1 + j\omega d\tau_i} \quad (1)$$

$$Z(\omega) = R_{ohm} + Z_{pol}(\omega) = R_0 + R_{pol} \int_0^{\infty} \frac{g(\tau)}{1 + j\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

$$Z_{pol}(\omega) = Z(\omega) - R_{ohm} = R_{pol} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\gamma(\ln\tau)}{1 + j\omega\tau} d\ln\tau \quad (3)$$

式中, $Z(\omega)$ 为电路总阻抗, R_{ohm} 为与频率无关的欧姆电阻, R_{pol} 为极化电阻, $g(\tau)$ 、 $\gamma(\ln\tau)$ 为弛豫时间分布函数, ω 为频率, j 为复数单位。 R_{ohm} 可通过Nyquist的高频区半圆与x轴截距获得,因此式(3)可简理解为利用离散的阻抗数据反卷积求解 $\gamma(\ln\tau)$,即获得 $\gamma(\ln\tau)$ - $\ln\tau$ 的弛豫时间分布图。式(3)中的 $\gamma(\ln\tau)$ 求解过程为数学上的反问题,即在已知结果的前提下对条件内容进行求解。目前多种方法如傅里叶变换、正则化、最大熵和遗传算法等均已被提出用于准确快速的求解。

本研究采用电化学阻抗谱EIS结合DRT技术,利用Matlab-DRTtools^[39]进行弛豫时间分布的分析计算,对不同老化阶段的铅酸电池开展了系统性测试。通过构建特征参量解析模型,成功提取了反映电池时效过程的电化学特征参数,如图3所示,具体过程如下。①电池准备与充电。按标准流程充电至浮充电压并静置,达到100% SOC基准状态。②多SOC点EIS测试。在100% SOC进行首次EIS测试,随后放电至80%、60%、40% SOC,并在每

个SOC点静置稳定后进行EIS测试。③DRT解析与参数提取。对所有EIS数据进行DRT解析，提取关键参数(R_{ohm} , P1~P4峰位、峰面积)及误差信息(幅值误差、相角误差)。④老化特征对比分析。按“同老化状态不同SOC”和“同SOC不同老化状态”两种模式组织数据进行比对。⑤老化状态诊断与输出。根据匹配到的老化特征，综合判定电池老化状态(合格/不合格)及主要老化模式。

对于相同老化状态不同SOC电池组，SOC的变化对EIS的 R_{ohm} 、低频区半圆弧度、幅值和相角的影响较大；而同SOC不同老化状态电池组，老化状态同样影响 R_{ohm} 、低频区半圆弧度、幅值和相角；此外对比未服役电池和不合格电池，发现其幅值和相角变化明显且与老化程度相关。因此，利用DRT对EIS曲线数据进行分析，通过计算特征峰个数、各峰值大小、峰面积等参数得到EIS-DRT的联合分析模型，能够实现加强老化判断，解析对应的界面老化现象，进而综合评估和获取指示铅酸电池衰退的寿命影响因子。

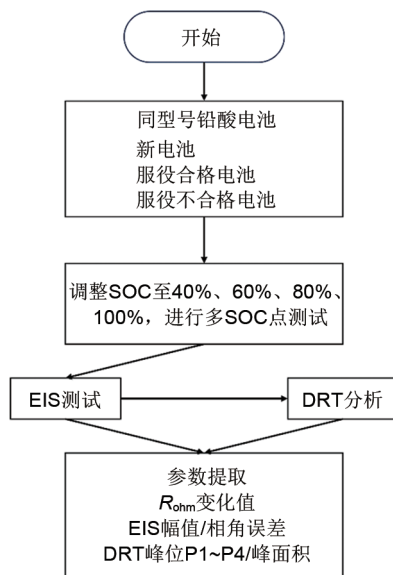


图3 特征参数提取流程

Fig. 3 Flow of characteristic parameter extraction

2 结果与讨论

本研究聚焦于铅酸电池状态的精准评估，创新地采用EIS与DRT联合分析方法。为实现这一目标，研究选取了涵盖未服役合格、服役合格及服役

不合格等不同老化状态的铅酸电池样本，并在不同SOC下进行了交流阻抗测试。随后，利用DRT方法对阻抗数据进行反卷积解析，提取 R_{ohm} 、特征峰位置(P1~P4)及峰面积等关键电化学参数，用以表征界面反应、扩散与传质过程。通过将提取的特征参数与电池实际老化状态进行关联分析，得出结论：基于EIS测试数据可精确获取电池的欧姆电阻 R_{ohm} 参数，同时EIS曲线尾部形态特征、阻抗幅值变化及相角偏移量可作为电池老化程度的初始判别依据；进一步分析DRT谱图发现，特征峰强度、峰值分布特征及峰面积等参数可为老化状态的评估提供补充依据。基于上述分析结果，研究构建了基于EIS-DRT技术的老化判定标准，旨在实现更精准的健康状态评估。本部分将围绕EIS曲线分析、DRT谱图分析、误差分析及老化指标建立四个方面展开详细阐述。

2.1 EIS曲线分析

为探究铅酸电池老化状态与电化学阻抗的关联，本研究首先对比分析了不同老化程度及不同SOC下的EIS谱图。Nyquist图形态、阻抗值大小及变化趋势为电池内部状态提供了直观的初步诊断依据。

图4为各老化状态下铅酸电池的EIS曲线图。如图4(a)，未服役新电池整体的阻抗值最低，曲线平滑且集中，表明电极界面反应活性高，离子扩散阻力小。低SOC时阻抗略升，揭示了新电池在深度放电时存在可逆的电荷传输极化现象。相较未服役新电池，如图4(b)，服役合格电池呈现中高频区容抗弧扩大的现象，预示着正极板栅腐蚀或电解液微干涸。SOC降低时，电荷转移阻力加剧。图4(c)为服役不合格铅酸电池的EIS曲线，与前两种老化状态电池相比，其整体阻抗显著增大，低频区出现了扩散阻抗斜线，揭示了活性物质硫酸盐化。各SOC下阻抗差异较大，说明老化使阻抗对SOC变化敏感度下降。

图5为相同SOC下各老化状态铅酸电池的EIS曲线图。其中，图5(a)为40% SOC下各老化状态铅酸电池的EIS曲线图；图5(b)为60% SOC下各老化状态铅酸电池的EIS曲线图；图5(c)为80% SOC下各老化状态铅酸电池的EIS曲线图；图5(d)为100% SOC下各老化状态铅酸电池的EIS曲线图。从各个SOC下的EIS曲线图可以看出，老化严重的不合格电池阻抗显著高于未服役新电池和服役合格电池。

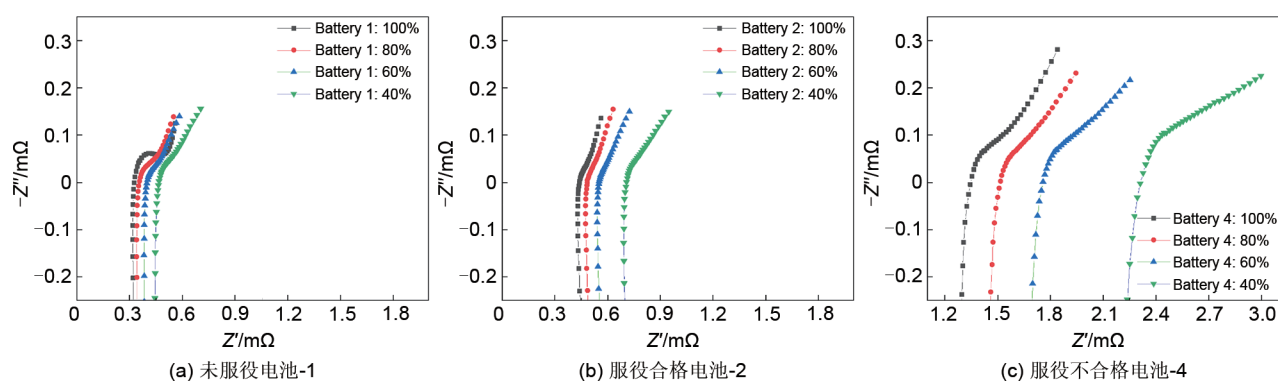


图4 相同老化状态下各SOC状态EIS曲线

Fig. 4 The EIS of each SOC state under the same aging state

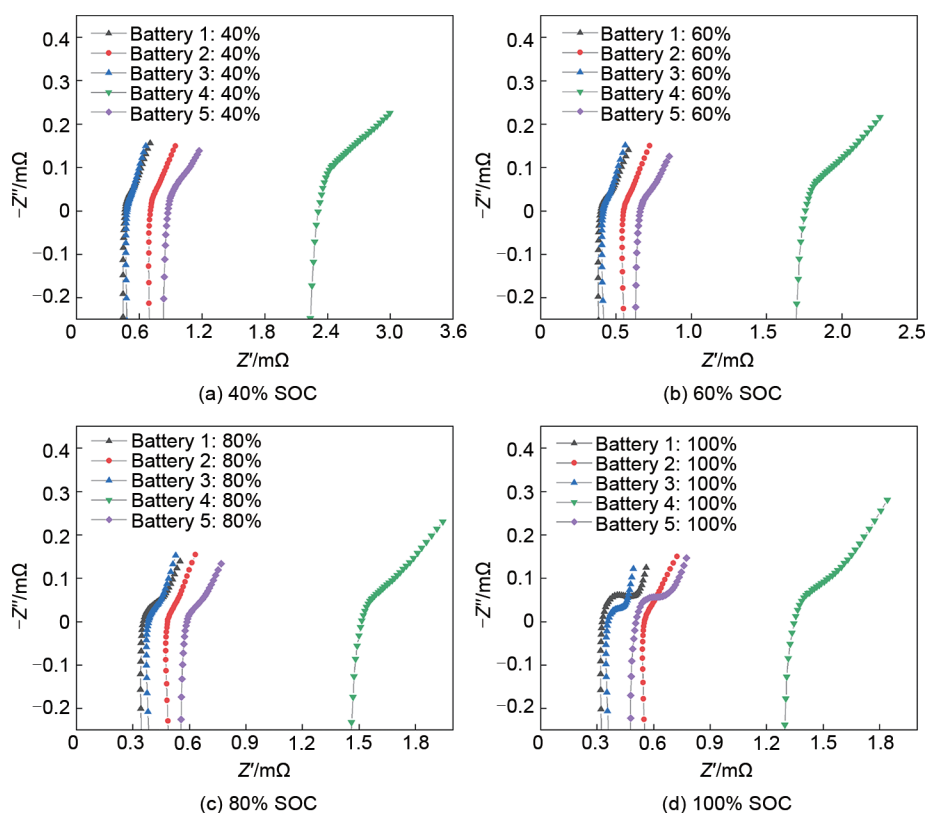


图5 相同SOC下各老化状态的EIS曲线

Fig. 5 The EIS of each aging state under the same SOC

2.2 DRT谱图分析

EIS曲线反映了电池的整体阻抗特性，但其作为多个电化学过程叠加的结果，难以直接解析具体的老化机理。为进一步解耦这些重叠的过程并精确定位老化根源，本研究对EIS数据进行了DRT分析。DRT技术将频域阻抗转换为时域弛豫时间分布，能够清晰地分离并识别不同时间常数的电极过程，从而为老化模式的判定提供更精准的特征参数。在铅酸电池体系中，DRT谱图中的特征峰与特

定的电化学过程相对应。通常，P1峰与电极/电解液界面双电层电容相关；P2峰可归因于阳极铅的溶解反应；P3峰与阴极二氧化铅的还原反应有关；而P4峰则反映了离子在电解液和多孔电极中的扩散过程(浓差极化)^[14-15]。通过分析这些特征峰的位置、强度和形状变化，可以直观地揭示电池内部界面结构、反应动力学及传质过程的演变，进而关联到具体的老化模式。

图6为100% SOC下各老化状态铅酸电池的

DRT 曲线图。未服役新电池 P1~P4 四个峰分别代表：界面电容、阳极 Pb 溶解反应、阴极 PbO₂ 还原反应和浓差极化扩散过程。相较于未服役新电池的 DRT 分峰图，服役合格电池的 P1 界面峰消失，代表着电极/电解液界面钝化；P2 阳极峰峰位右移且强度衰减，代表着阳极板栅腐蚀老化；P3 阴极峰分裂为双峰，代表正极 PbO₂ 活性物质分层；P4 扩散峰强度倍增且峰位右移，代表着电解液渗透受阻，离子扩散通道阻塞，电池老化。而相较合格电池，服役不合格电池 P1 峰显著左移，意味着电极/电解液界面电容失效；P2 峰峰位右移且强度倍增，代表着阳极板栅腐蚀老化；P3 峰转为超宽强峰，代表不可逆 PbSO₄ 结晶；P4 峰与重组 P3 峰耦合形成巨峰，代表着超大晶粒 PbSO₄ 堵塞孔隙。如图 6 (d) 所示，服役不合格电池的 DRT 谱图中，P3 峰与

P4 峰耦合形成显著的宽大巨峰，其峰面积远大于 150%，同时图 4(c) 显示其在各 SOC 下 EIS 曲线低频区出现明显扩散斜线，符合表 5 所述老化判定指标。因此，可判定该电池因严重硫酸盐化而老化失效，属于不合格电池。相比之下，如图 6(e) 所示，该不合格电池在 100% SOC 下的 DRT 峰形与未服役新电池样本接近，且图 5 中也未观察到明显的低频扩散斜线特征，说明不合格样本可能存在不同的主导老化路径，仅凭单一 SOC 点的 DRT 峰形难以覆盖全部失效模式。基于此，本研究后续将结合多 SOC 点的阻抗谱特征与 DRT 参数进行综合判定与阈值量化。相比之下，图 6(b)~(c) 所示服役合格电池仅表现为 P1 峰消失、P3 峰分裂，符合“电极界面钝化”特征，但未出现 P3/P4 耦合巨峰或 R_{ohm} 显著增加等更严重的老化指标，结合其容量仍满足要求，故判定为合格。

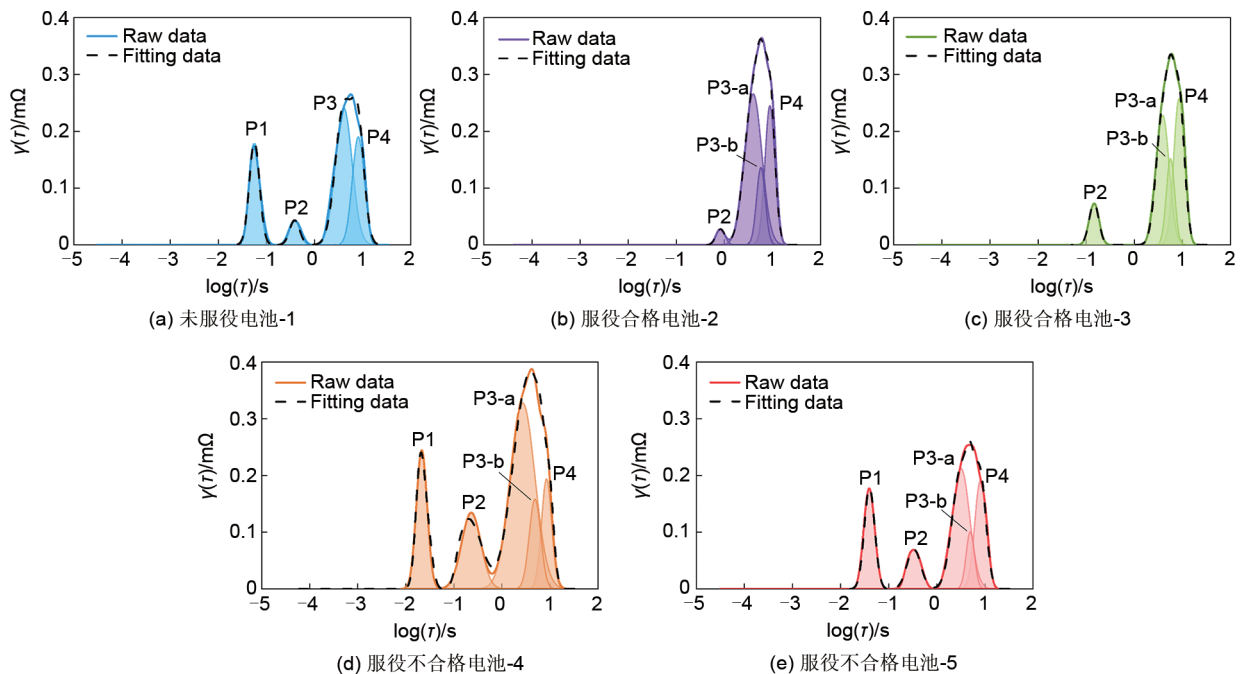


图6 100% SOC下各老化状态的DRT曲线

Fig. 6 The DRT of each aging state under 100% SOC

2.3 误差分析

电池由于老化程度和 SOC 不同导致内部化学状态和荷电状态的改变，在 EIS 测试数据上表现为不同程度的幅值和相角误差。该现象是特异性分析电池内部结构和反应动力学变化的有利依据。

图 7 为不同老化程度下的电池各自进行不同 SOC 的 EIS 数据幅值误差对比。图 7(a) 中未服役电池在低 SOC 下表现出 40% 的最大幅值误差，该现

象源于新电池极板活性物质孔隙率导致的浓差极化效应；随着 SOC 的提升，误差值迅速降低至 10% 以下，对比其他老化状态电池该结果验证了新电池在高 SOC 下具有更加优异的电荷分布均匀性。图 7 (b) 表明服役合格电池各 SOC 下幅值误差主要集中在中低频区域，该结果符合服役后电极表面固体电解质界面膜(solid electrolyte interphase, SEI)膜的增厚导致的轻微容量衰减现象，而整体幅值随

SOC的降低而增大,说明循环过程SEI的周期性变化影响体系总阻抗。图7(c)表示服役不合格电池在各SOC下的幅值误差,其结果在全频段均有体现,并且低SOC时误差最高,证实在深度放电过程中老化导致的活性物质利用率下降严重影响电池性能。

图8为不同SOC状态下相角误差图,图8(a)中未服役新电池的相角误差在SOC最低状态时较大,这与其幅度误差结果相符,反映出新电池在深度放电时浓差极化效应导致的电荷转移动力学轻微延

迟;图8(b)中服役合格电池的相角误差对SOC的依赖性减弱,在中低频区域误差很小证明稳定SEI膜结构的形成,高频区仍存在SOC依赖性,这与SEI膜增厚所导致电极界面电容均匀衰减的现象一致;对比合格电池,图8(c)中服役不合格电池在高频区的相角误差明显增大,中低频区仍然没有SOC依赖性,证明老化彻底破坏界面反应动力学,荷电状态对离子迁移速率的影响减弱,离子迁移能垒达到极限。

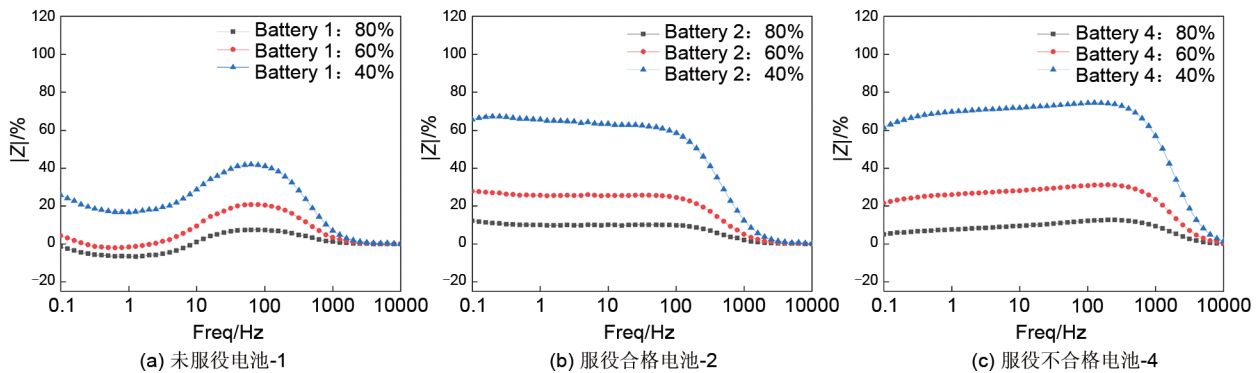


图7 相同老化状态下各SOC状态幅值误差

Fig. 7 The amplitude errors of each SOC state under the same aging state

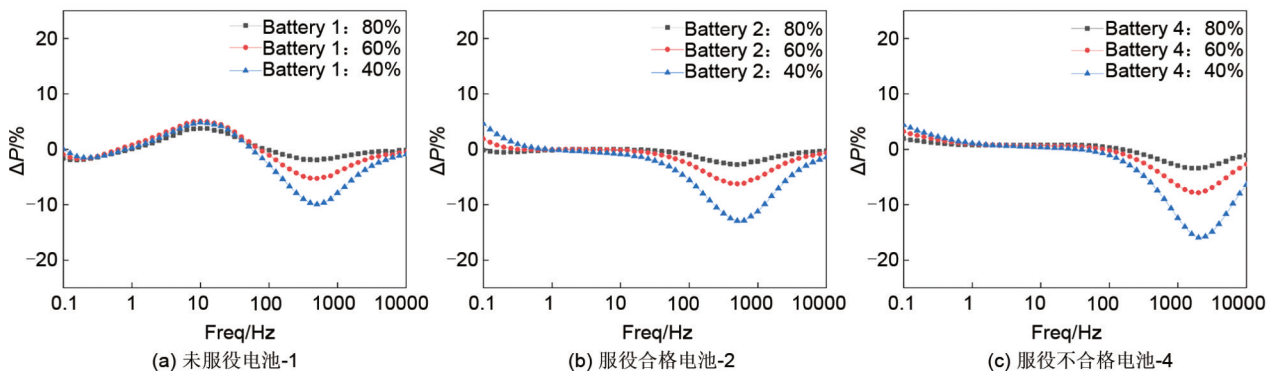


图8 相同老化状态下各SOC状态下相角误差

Fig. 8 The phase angle error of each SOC state under the same aging states

为了进一步对比不同老化程度对幅值和相角误差影响,分别绘制了相同SOC下不同老化程度电池的幅值、相角误差变化,如图9、10所示。图9(a)~(c)分别为80%、60%、40% SOC下各老化状态铅酸电池的幅值误差。从各图中可以看出,随着老化程度的增加,中低SOC下幅度误差显著增加,而高SOC时电池的幅值误差较小,这可归因于高SOC下电荷分布的均匀性。低SOC(40%)时铅酸电池幅值误差更为显著,这主要与铅酸电池在低SOC下极板表面 PbSO_4 覆盖率提高、电解液酸浓

度降低以及孔隙传质受限有关,电荷转移与浓差极化过程对SOC变化更敏感,从而在中低频段产生更大的幅值偏差。图10(a)~(c)分别为80%、60%、40% SOC下各老化状态铅酸电池的相角误差图。整体来看,相角误差在高频区域对SOC变化更敏感,低SOC时误差幅度增大。该现象可归因于电解液电导、极板和连接件接触电阻及电极/电解液界面双电层特性随SOC与老化状态变化而引起的相位响应差异。相比之下,低频区域以传质/扩散控制过程为主,即电解液中 H^+ 、 SO_4^{2-} 在多空电极

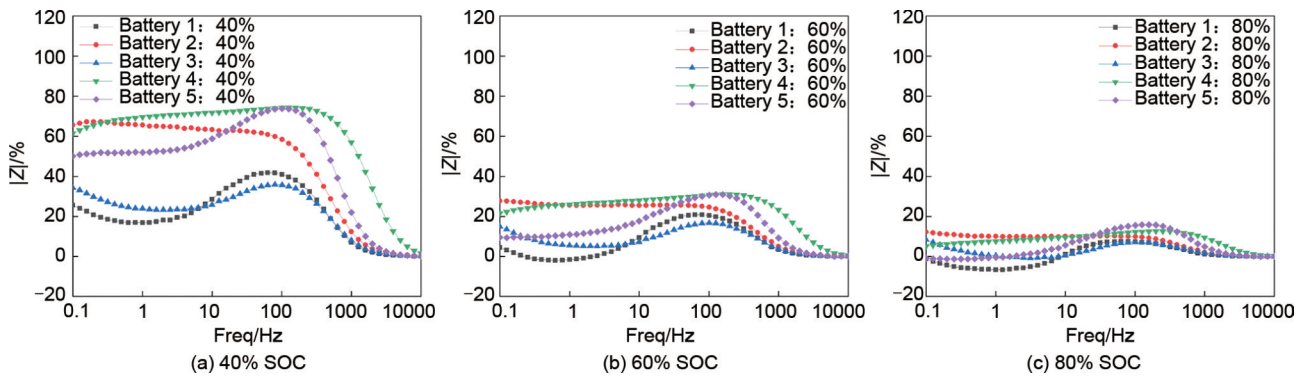


图9 相同SOC下各老化状态的幅值误差

Fig. 9 The amplitude error of each aging state under the same SOC

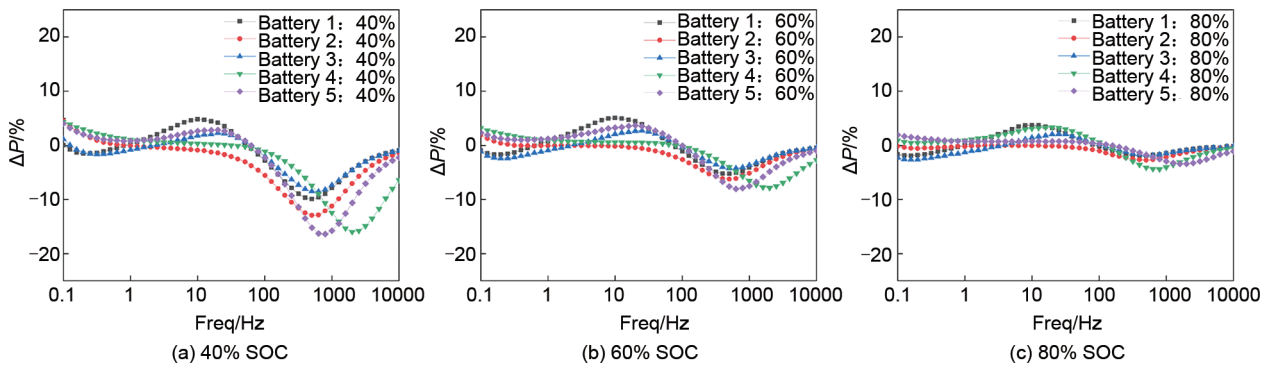


图10 相同SOC下各老化状态的相角误差

Fig. 10 The phase angle error of each aging state under the same SOC

中的迁移与扩散、酸分层等，其相角误差随 SOC 变化的幅度相对有限，部分样本在深度放电条件下呈现扩散受限趋于饱和的特征，导致不同 SOC 间的相位差异减弱。

综合上述分析，可以总结出 SOC 与老化状态对 EIS 测试误差的影响规律：对于幅值误差，其 在高 SOC 下普遍较小，但随着 SOC 降低而显著增大，且老化越严重，增幅越明显，尤其在不合格电池中表现为全频段误差提升。对于相角误差，其 在高频区对 SOC 变化最为敏感，随 SOC 降低而剧增；而老化主要导致高频区相角误差的整体抬升，当中低频区相角误差对 SOC 的依赖性减弱时，往往预示着界面反应动力学的严重衰退。这些误差规律本身可作为辅助判断电池内部状态变化的敏感指标。

2.4 老化判定流程与指标验证

基于对 3 种不同老化状态电池样本的 EIS-DRT 数据系统性分析，本研究归纳并明确了各老化模式相关联的特征参数变化区间。为定量展示阈值确定的统计基础，表 4 汇总了在 100% SOC 下，各老化

状态组关键参数的统计结果[表中数据格式为“均值(最小值~最大值)”， n 为样本数量]。其中， R_{ohm} 增幅以未服役电池为基准计算，P3/P4 峰面积为 DRT 谱中相应峰的积分面积占比，低 SOC 幅值误差取 40% SOC 下、1 Hz 频率附近的幅值误差最大值。判定“不合格”需满足“活性物质硫酸盐化”或同时满足“电解液干涸/板栅腐蚀”及“一般老化信号”中的多个关键指标。

表 4 不同状态电池诊断指标统计结果

Table 4 Statistics of diagnostic indicators for batteries with different health states

指标	合格($n=3$, 电池 1、2、3)	不合格($n=2$, 电池 4、5)
R_{ohm}	0.408(0.348~0.496)	0.898(0.505~1.290)
R_{ohm} 增幅	0.173(0~0.423)	1.575(0.450~2.700)
40% SOC 幅值 (1 Hz)	6.42×10^{-4} (5.49×10^{-4} ~ 8.06×10^{-4})	1.87×10^{-3} (1.02×10^{-3} ~ 2.72×10^{-3})
40% SOC 幅值 误差	35.40(16.77~65.57)	60.80(51.98~69.63)
P3~P4 峰面积	186.93(164.49~213.69)	241.02(173.85~308.19)
峰值增幅	0.136(0~0.299)	0.465(0.057~0.874)

表5 老化现象及判定指标一览表

Table 5 List of aging phenomena and judgment indicators

老化现象	判定指标
电极界面钝化	DRT 谱图中 P1 峰消失 EIS 中高频区容抗弧扩大
活性物质硫酸盐化	EIS 低频区出现明显扩散斜线 DRT 谱图中 P3 峰与 P4 峰耦合形成宽大巨峰(峰面积增幅>50%)
电解液干涸/板栅腐蚀	欧姆电阻 R_{ohm} 显著增加(增幅>30%) DRT 谱图中 P4 峰右移且峰面积倍增 低 SOC 下幅值误差剧增(>40%)
一般老化信号	相同 SOC 下, 与未服役电池相比, 整体阻抗显著增大 相角误差在全频段发散, 尤其高频区增大明显

分析表4可知,“服役不合格”组所有参数的均值与波动范围均显著高于“服役合格”组,表明这些参数对严重老化状态敏感。基于此统计规律,表5所列出的关键判定阈值,其数值范围大致位于服役合格组参数上限与服役不合格组参数下限之间,构成了能够有效区分两类状态的经验性分界。作为方法学探索研究,本研究所提阈值为基于EIS-DRT的老化诊断提供了可量化的初步判据,其普适性与精确性有待在未来扩大样本库的研究中通过统计方法进一步验证与校准。

老化状态诊断与输出详细操作如图11所示,主要包括以下步骤。①数据输入。获取待测电池在100%、80%、60%、40% SOC下的EIS曲线及解析得到的DRT谱图参数(R_{ohm} , P1~P4峰位及峰面积)。②SOC敏感性筛查。比较待测电池在不同SOC下的EIS幅值误差和相角误差。若低SOC(如40%)下幅值误差大于40%或相角误差在高频区剧增,提示存在老化敏感点。③老化特征匹配。将待测电池在相同SOC点的EIS曲线和DRT谱图,与同型号未服役新电池或已知合格电池的对应数据进行对比,重点检查是否有表5中列出的核心指标,如低频扩散斜线、P1消失、P3/P4耦合巨峰、 R_{ohm} 增幅大于30%等。④综合判定。若检测到“活性物质硫酸盐化”的核心指标即EIS低频扩散斜线、DRT的P3/P4耦合巨峰等,则直接判定电池老化不合格;若检测到“电解液干涸/板栅腐蚀”的核心指标即 R_{ohm} 增幅大于30%、P4峰右移/面积倍增、低SOC幅值误差大等,并结合“一般老化信号”

如整体阻抗显著增大,可判定电池老化不合格;若仅检测到“电极界面钝化”如P1消失及中高频容抗弧扩大,且其他指标在合格范围内,可能提示电池处于早期老化但仍合格,需结合容量测试进一步验证;若未检测到上述显著老化特征,且SOC敏感性符合新电池或合格电池规律,则判定电池合格。

基于上述诊断流程与指标体系,本研究为浮充铅酸电池的状态检测提供了一种新思路。在诊断能力上,相较于传统单频内阻法仅提供单一的欧姆内阻信息,本方法通过全频段EIS与DRT解耦,能够具体识别硫酸盐化、板栅腐蚀、界面钝化等多种老化模式,显著提升了诊断维度与针对性。与同样基于频域响应的等效电路模型拟合方法相比,DRT技术避免了对电路拓扑结构的人为主观预设,其解耦得到的弛豫时间峰与特定电化学反应具有更直接的物理关联,从而增强了分析结果的客观性与机理可解释性。在应用场景适应性上,相较于需要完整充放电曲线以提取特征如增量容量分析曲线(incremental capacity analysis, ICA),或依赖大量历史数据构建的机器学习模型,本方法的最大优势在于其静态诊断能力,仅需在电池静置或浮充状态下进行短时EIS测试即可完成评估,无需中断系统运行或进行深度放电,较好地契合了数据中心、变电站等后备电源系统对实时和无损检测的运维要求。

3 结论

本研究面向数据中心后备电源的浮充场景,提出并验证了一种基于EIS和DRT联合分析的铅酸电池老化状态诊断方法,构建了一套兼具可解释性与实践操作性的判据体系与流程。研究表明,在针对不合格样品的检测中,低频Nyquist图呈现显著扩散斜线特征,DRT谱中P3/P4峰发生耦合,形成宽大巨峰且峰面积增幅超过50%,同时 R_{ohm} 阻抗增幅超过30%。这些特征在同SOC对比及跨SOC对比中均表现出稳定性,可作为铅酸电池老化的强效指示标志。凭借这些特征,该诊断方法可在不依赖容量测试的前提下识别出电池失效问题,对浮充场景下的电池健康管理具有显著的工程应用价值。为进一步提升诊断的鲁棒性,本研究采用同SOC不同老化状态与同老化状态不同SOC的双轴对比

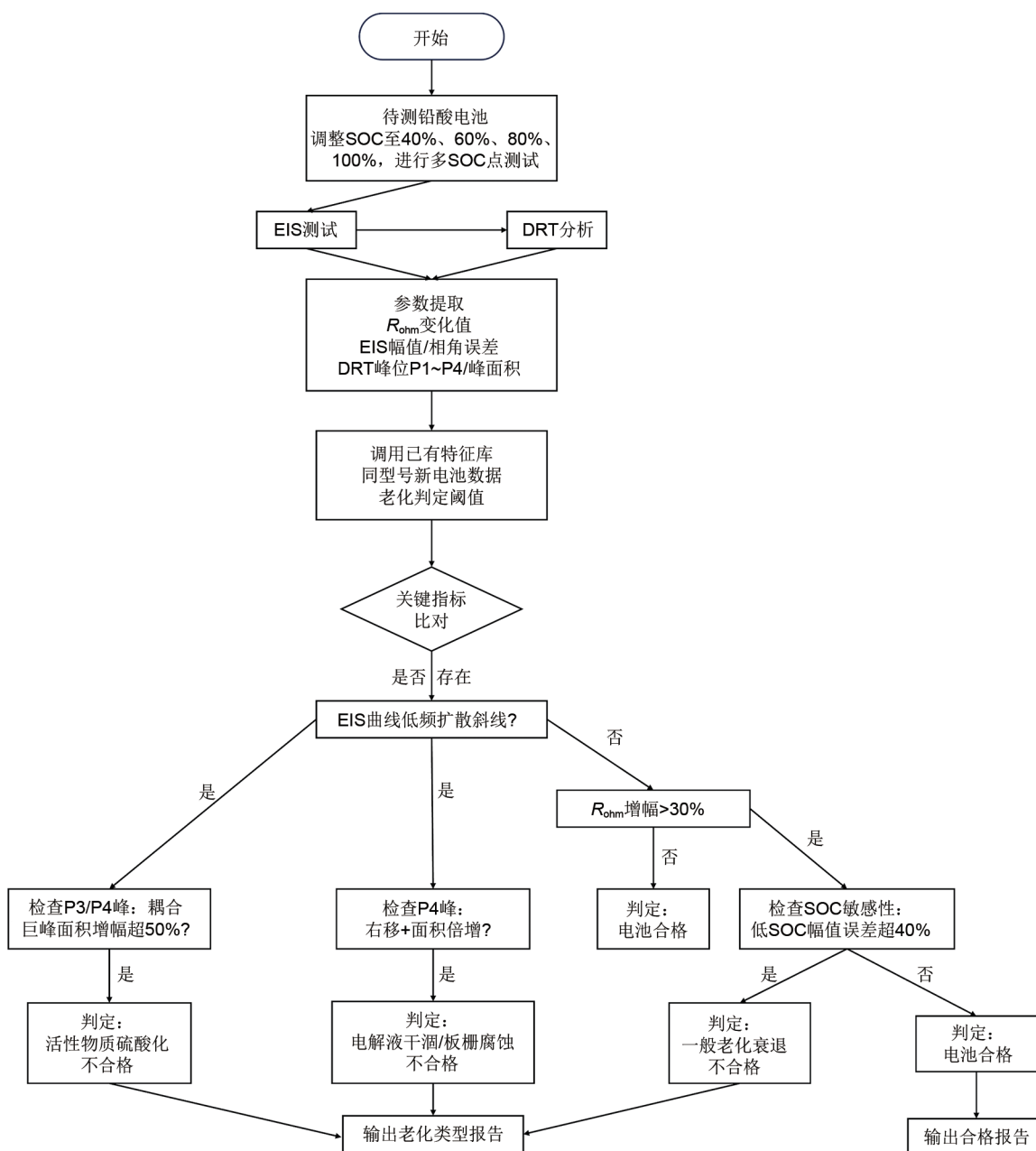


图 11 老化状态诊断方法的流程
Fig. 11 Flow of the aging state diagnosis method

框架，并结合幅值与相角误差图进行分析，发现在 40% SOC 条件下，不合格电池常出现幅值误差超过 40%、高频相角误差整体抬升的现象，该现象与界面动力学退化过程相吻合，显著增强了对电池早期与中度老化状态的分辨能力。此外，为有效规避传统 ECM 的主观性并增强结果的可解释性，DRT 技术将重叠的电化学过程解耦为 P1~P4 等多个时间常数峰。相较于传统 ECM 拟合方法，DRT 技术减少了模型假设的依赖程度，并提供了阈值化的工

程指标，便于一线运维人员执行。相较于传统单频内阻检测法，本方法提供了多维、可解释的联合特征与明确阈值，在样本内实现了对电池合格/不合格状态的稳定区分。

本研究所提出的 EIS-DRT 联合分析方法，通过 DRT 技术提升了 EIS 数据解析的客观性与可解释性。尽管目前的研究工作聚焦于铅酸电池，但该方法展现出的电化学过程解耦与特征提取能力，对于锂离子电池等其它化学体系的老化诊断同样具有潜

在的适用性与迁移价值。尽管本研究为铅酸电池老化状态诊断提供了新方法，但受限于样本数量及测试条件的局限性，该方法的普适性和鲁棒性仍有待进一步验证。未来研究将着重从以下两方面展开：一是扩大样本规模，纳入更多不同类型、品牌的铅酸电池，以全面验证 EIS-DRT 联合分析方法的普适性和泛化能力；二是将本方法拓展至锂离子电池等其他储能体系，验证其在更广泛电化学场景中的老化诊断能力，为该技术的跨体系应用奠定基础。为进一步提升诊断准确性，后续研究将结合温度、湿度等环境因素以及其他电池诊断技术如微观表面分析技术等，优化电池老化诊断的准确性和可靠性。同时，通过多传感器数据融合技术，增强 EIS-DRT 方法对复杂电池老化机制的识别能力。此外，还可将 EIS-DRT 联合分析结果与机器学习技术相结合，构建智能化的铅酸电池老化状态预测模型，实现对电池老化过程的动态建模，并根据实时监测数据进行智能预警和预测，为铅酸电池的智能运维系统提供更加精确的技术支撑。

参考文献

- [1] 栾云东, 赵键, 张代乐. 铅酸电池技术的发展历史及展望[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2023, 19(4): 6-9, 15. DOI:10.13888/j.cnki.jsie(ns).2023.04.002.
LUAN Y D, ZHAO J, ZHANG D L. Development history and prospect of lead-acid battery technology[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2023, 19(4): 6-9, 15. DOI:10.13888/j.cnki.jsie(ns).2023.04.002.
- [2] 裴增洁. 基于数据驱动的阀控式铅酸电池 SOH 估算与寿命预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
PEI Z J. Research on data-driven method for SOH estimation and life prediction of valve-regulated lead-acid batteries[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [3] 朱杰, 张金生, 顾剑锋. 长期浮充状态下铅酸电池的 SOC 和 SOH 监测[J]. 流体测量与控制, 2025, 6(2): 36-39.
ZHU J, ZHANG J S, GU J F. SOC and SOH monitoring of lead-acid batteries under long-term floating charge[J]. Fluid Measurement & Control, 2025, 6(2): 36-39.
- [4] 况成忠, 欧世锋. 阀控式密封铅酸蓄电池在线监测与健康评估技术综述[J]. 机电信息, 2024(4): 1-11. DOI:10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2024.04.001.
KUANG C Z, OU S F. Summary of on-line monitoring and health assessment technology for valve-regulated sealed lead-acid batteries[J]. Mechanical and Electrical Information, 2024(4): 1-11. DOI:10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2024.04.001.
- [5] PANG Z Y, YANG K, SONG Z X, et al. Effects of floating charge ageing on electrochemical impedance spectroscopy of lead-acid batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 87: 111322. DOI: 10.1016/j.est.2024.111322.
- [6] 刘润兴, 盖玉成, 杨品哲, 等. 基于交流阻抗谱的铅酸蓄电池健康状态检测[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(11): 3499-3507.
LIU R X, GAI Y C, YANG P Z, et al. Health-status detection of lead-acid battery based on AC impedance spectroscopy[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(11): 3499-3507.
- [7] KEDDAM M, STOYNOV Z, TAKENOUTI H. Impedance measurement on Pb/H₂SO₄ batteries[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1977, 7(6): 539-544. DOI:10.1007/BF00616766.
- [8] WANG W B, YAO W X, CHEN W, et al. Directional DC charge-transfer resistance on an electrode-electrolyte interface in an AC nyquist curve on lead-acid battery[J]. Applied Sciences, 2020, 10(6): 1907. DOI:10.3390/app10061907.
- [9] CAHAN B D, DAROUX M L, YEAGER E B. Effect of physical and geometric factors on the impedance of electrochemical power sources[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1989, 136(6): 1585-1590. DOI:10.1149/1.2096973.
- [10] ZHU Y L, JIANG B, ZHU J G, et al. Adaptive state of health estimation for lithium-ion batteries using impedance-based timescale information and ensemble learning[J]. Energy, 2023, 284: 129283. DOI:10.1016/j.energy.2023.129283.
- [11] 朱一听, 吴昊, 黎莞伟, 等. 基于静态 EIS 模型的锂离子电池 SOC 估计[J]. 电池, 2025, 55(2): 267-272.
ZHU Y X, WU H, LI G W, et al. SOC estimation method of Li-ion battery based on static EIS model[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(2): 267-272.
- [12] BADEDA J, KWIECIEN M, SCHULTE D, et al. Battery state estimation for lead-acid batteries under float charge conditions by impedance: Benchmark of common detection methods[J]. Applied Sciences, 2018, 8(8): 1308. DOI:10.3390/app8081308.
- [13] KWIECIEN M, BADEDA J, HUCK M, et al. Determination of SoH of lead-acid batteries by electrochemical impedance spectroscopy [J]. Applied Sciences, 2018, 8(6): 873. DOI:10.3390/app8060873.
- [14] D'ALKAINE C V, MENGARDA P, IMPINNISI P R. Discharge mechanisms and electrochemical impedance spectroscopy measurements of single negative and positive lead-acid battery plates[J]. Journal of Power Sources, 2009, 191(1): 28-35. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.097.
- [15] CALBOREAN A, BRUJ O, MURARIU T, et al. Resonance frequency analysis of lead-acid cells: An EIS approach to predict the state-of-health[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101143. DOI:10.1016/j.est.2019.101143.
- [16] YANG K, PANG Z Y, SONG Z X, et al. Investigation of distribution of relaxation times responding to valve-regulated lead acid batteries degradation process[J]. Electrochimica Acta, 2025, 514: 145682. DOI:10.1016/j.electacta.2025.145682.
- [17] MOHSIN M, PICOT A, MAUSSION P. A new lead-acid battery state-of-health evaluation method using electrochemical impedance spectroscopy for second life in rural electrification systems[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104647. DOI:

- 10.1016/j.est.2022.104647.
- [18] NGUYEN T T, DOAN V T, LEE G H, et al. Development of an intelligent charger with a battery diagnosis function using online impedance spectroscopy[J]. *Journal of Power Electronics*, 2016, 16(5): 1981-1989. DOI:10.6113/jpe.2016.16.5.1981.
- [19] BRUJ O, CALBOREAN A. Qualitative characterization of lead-acid batteries fabricated using different technological procedures: An EIS approach[J]. *Batteries*, 2023, 9(12): 593. DOI:10.3390/batteries9120593.
- [20] 刘海峰, 万宁坤, 苏琨, 等. 智能变电站蓄电池在线评估方法研究[J]. *制造业自动化*, 2024, 46(6): 191-198, 214. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2024.06.030.
- LIU H F, WAN N K, SU K, et al. Research on on-line evaluation method of battery in intelligent substation[J]. *Manufacturing Automation*, 2024, 46(6): 191-198, 214. DOI:10.3969/j.issn.1009-0134.2024.06.030.
- [21] 孙国良, 李平, 叶伟, 等. 一种变电站蓄电池电化学阻抗谱的实时采集与监控装置: CN120214613A[P]. 2025-06-27.
- [22] PANG Z Y, YANG K, FENG Z Y, et al. Investigation of distribution of relaxation times (DRT) feature attribution in lead-acid battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 652: 237622. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.237622.
- [23] WU P C, HSU W C, CHEN J F. Detection on SOC of VRLA battery with EIS[C]//2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). November 3-6, 2013, Tainan, Taiwan, China. IEEE, 2013: 897-902. DOI: 10.1109/IFEEC.2013.6687629.
- [24] DENSMORE A, HANIF M. Determining battery SoC using electrochemical impedance spectroscopy and the extreme learning machine[C]//2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). November 1-4, 2015, Taipei, China. IEEE, 2015: 1-7. DOI:10.1109/IFEEC.2015.7361603.
- [25] YANG H, CHEN S H, GONG L Q, et al. Online electrochemical behavior analysis on the negative plate of lead-acid batteries during the high-rate partial-state-of-charge cycle[J]. *Electrochimica Acta*, 2020, 354: 136776. DOI:10.1016/j.electacta.2020.136776.
- [26] NELATURY S R, SINGH P. Extracting equivalent circuit parameters of lead-acid cells from sparse impedance measurements [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 112(2): 621-625. DOI:10.1016/S0378-7753(02)00443-3.
- [27] CIUCCI F, CHEN C. Analysis of electrochemical impedance spectroscopy data using the distribution of relaxation times: A Bayesian and hierarchical Bayesian approach[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 167: 439-454. DOI:10.1016/j.electacta.2015.03.123.
- [28] ZHUANG Z X, LI J, LUAN W L, et al. Distribution of relaxation times-based analysis of aging mechanisms and prediction of heating domain for alternating current pulse self-heating lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 623: 235442. DOI:10.1016/j.jpowsour.2024.235442.
- [29] LU Y, ZHAO C Z, HUANG J Q, et al. The timescale identification decoupling complicated kinetic processes in lithium batteries[J]. *Joule*, 2022, 6(6): 1172-1198. DOI:10.1016/j.joule.2022.05.005.
- [30] SCHÖNLEBER M, IVERS-TIFFÉE E. The distribution function of differential capacity as a new tool for analyzing the capacitive properties of lithium-ion batteries[J]. *Electrochemistry Communications*, 2015, 61: 45-48. DOI:10.1016/j.elecom.2015.09.024.
- [31] DANZER M A. Generalized distribution of relaxation times analysis for the characterization of impedance spectra[J]. *Batteries*, 2019, 5(3): 53. DOI:10.3390/batteries5030053.
- [32] AKRAM A S, SOHAIB M, CHOI W. SOH estimation of lithium-ion batteries using distribution of relaxation times parameters and long short-term memory model[J]. *Batteries*, 2025, 11(5): 183. DOI:10.3390/batteries11050183.
- [33] SONI R, ROBINSON J B, SHEARING P R, et al. Lithium-sulfur battery diagnostics through distribution of relaxation times analysis[J]. *Energy Storage Materials*, 2022, 51: 97-107. DOI: 10.1016/j.ensm.2022.06.016.
- [34] MACDONALD D D. Why electrochemical impedance spectroscopy is the ultimate tool in mechanistic analysis[J]. *ECS Transactions*, 2009, 19(20): 55-79. DOI:10.1149/1.3247566.
- [35] SCHICHLIN H, MÜLLER A C, VOIGTS M, et al. Deconvolution of electrochemical impedance spectra for the identification of electrode reaction mechanisms in solid oxide fuel cells[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2002, 32(8): 875-882. DOI: 10.1023/A: 1020599525160.
- [36] 张子恒, 耿萌萌, 范茂松, 等. 基于弛豫时间分布法的退役动力电池健康状态评估[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(2): 770-778.
- ZHANG Z H, GENG M M, FAN M S, et al. SOH estimation based on distribution of relaxation times for the retired power lithium-ion battery[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(2): 770-778.
- [37] 王春林, 朱广焱, 张鹏博, 等. 弛豫时间分布函数应用于电化学阻抗谱分析[J]. *电源技术*, 2021, 45(12): 1569-1572, 1593. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2021.12.013.
- WANG C L, ZHU G Y, ZHANG P B, et al. Application of distribution function of relaxation time in analyzing electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(12): 1569-1572, 1593. DOI:10.3969/j.issn.1002-087X.2021.12.013.
- [38] 王佳, 黄秋安, 李伟恒, 等. 电化学阻抗谱弛豫时间分布基础[J]. *电化学*, 2020, 26(5): 607-627. DOI:10.13208/j.electrochem.200641.
- WANG J, HUANG Q A, LI W H, et al. Fundamentals of distribution of relaxation times for electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2020, 26(5): 607-627. DOI:10.13208/j.electrochem.200641.
- [39] WAN T H, SACCOCCIO M, CHEN C, et al. Influence of the discretization methods on the distribution of relaxation times deconvolution: Implementing radial basis functions with DRTtools [J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 184: 483-499. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.09.097.