



基于 EIS 的燃料电池故障在线诊断研究进展

王 宁¹, 杨萧潇¹, 孟海军², 郭建伟³, 谢 峰⁴, 叶东浩⁵, 朱荣杰⁶, 邵志刚⁴, 丁 飞¹
(¹河北工业大学电气工程学院, 智能配用电装备与系统全国重点实验室, 天津 300130; ²军事科学院某所, 北京 100141; ³清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; ⁴中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023; ⁵武汉船用电力推进装置研究所, 湖北 武汉 430064; ⁶航天氢能(上海)科技有限公司, 上海 200245)

摘 要: 燃料电池(fuel cell, FC)作为清洁高效的电化学能量转换装置,在交通运输、分布式发电等领域具备广阔应用前景,但运行过程中材料劣化、工况波动易引发各类故障,影响其可靠性与耐久性。电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)凭借非损伤扰动信号、多频率表征电池内部过程的独特优势,可精准解析电池内部欧姆损耗、电荷转移、传质过程等状态变化,成为FC故障诊断的核心技术。针对在线实时诊断的工程化需求,本文从在线诊断的全流程视角,系统梳理了基于EIS的FC故障诊断技术研究进展。在测量系统优化方面,从硬件集成、激励信号设计和输出信号处理三个维度总结了现有EIS测量技术的优化路径;在特征提取方面,归纳了等效电路模型拟合、弛豫时间分布解析以及卷积神经网络端到端学习等方法的适用场景与性能特点;在在线诊断策略方面,将现有方法划分为基于模型、数据驱动及融合方法三大类,结合诊断精度、响应时间与适用故障类型进行了综合对比。在此基础上,本文构建了涵盖材料型故障与工况诱导型故障的EIS特征信号归纳框架,以奈奎斯特图的图形变化模式为统一描述载体,凝练了各类故障在阻抗复平面上的共性特征,为不同诊断方法提供了参照体系。最后,展望了在线诊断技术在故障退化轨迹、极端工况适应性等方面的应用前景,为突破基于EIS的FC故障诊断技术的在线应用提供科学指导。

关键词: 燃料电池; 电化学阻抗谱; 特征提取; 在线故障诊断

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0333

中图分类号: TM 911.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3803-21

Review of on-line fuel cell fault diagnosis based on EIS

WANG Ning¹, YANG Xiaoxiao¹, MENG Haijun², GUO Jianwei³, XIE Feng⁴, YE Donghao⁵, ZHU Rongjie⁶, SHAO Zhigang⁴, DING Fei¹

(¹State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and Systems, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; ²A certain institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China; ³Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ⁴Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China; ⁵Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion, Wuhan 430064, Hubei, China; ⁶Aerospace Hydrogen Energy (Shanghai) Technology Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: As clean and efficient electrochemical energy conversion devices, fuel cells (FCs)

收稿日期: 2026-04-17; 修改稿日期: 2026-06-14。

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2024123)。

第一作者: 王宁(1990—),男,博士,副教授,主要研究方向为电池储能技术,包括基于电化学阻抗谱的燃料电池、锂离子电池状态监测与故障诊断研究, E-mail: ningwang@hebut.edu.cn; 通信作者: 邵志刚,博士,研究员,研究方向为车用质子交换膜燃料电池工程技术开发, E-mail: zhgshao@dicp.ac.cn; 丁飞,博士,教授,主要研究方向为电化学储能技术, E-mail: hillingfei@163.com。

引用本文: 王宁, 杨萧潇, 孟海军, 等. 基于 EIS 的燃料电池故障在线诊断研究进展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3803-3823.

Citation: WANG Ning, YANG Xiaoxiao, MENG Haijun, et al. Review of on-line fuel cell fault diagnosis based on EIS[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3803-3823.

hold broad prospects in various fields, including transportation and distributed power generation. However, material degradation and operational fluctuations induce various faults, thereby compromising FC reliability and durability. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS), leveraging its unique advantages of noninvasive perturbation signals and multifrequency characterization of internal processes, accurately resolves state changes in ohmic losses, charge transfer, and mass transport within FCs, making it a core technology for fault diagnosis. To satisfy the engineering requirements for online real-time diagnosis, this study systematically reviews the research progress on EIS-based FC-fault-diagnosis technologies from a full-process perspective of online diagnosis. Regarding measurement system optimization, existing EIS techniques are summarized from three dimensions: hardware integration, excitation-signal design, and output-signal processing. For feature extraction, the applicable scenarios and performance characteristics of methods including equivalent-circuit model fitting, distribution of relaxation times analysis, and convolutional neural network-based end-to-end learning are reviewed. For online diagnostic strategies, existing approaches are categorized into model-based, data-driven, and hybrid methods, and are comprehensively compared in terms of their diagnostic accuracy, response time, and applicable fault types. On this basis, an EIS characteristic-signal-induction framework spanning both material-induced and operating-condition-induced faults is constructed. Using Nyquist plot morphological evolution as a unified descriptive carrier, common fault characteristics on the complex impedance plane are condensed into a baseline reference for different diagnostic methods. Finally, the practical research and application outcomes of various diagnostic strategies across different FC types are summarized alongside material-induced and operating-condition-induced fault classifications. The application prospects of online diagnostic technologies for fault-degradation-trajectory modeling and extreme-condition adaptability are discussed, offering scientific guidance for overcoming the barriers to online EIS-based FC-fault diagnosis.

Keywords: fuel cell; electrochemical impedance spectroscopy; feature extraction; on-line fault diagnosis

氢气凭借清洁高效的能源载体属性,在全球能源转型中发挥着关键作用。而将氢能转化为电能的氢燃料电池(fuel cell, FC),以高效、零排放、高能量密度等优势,在交通、便携设备及备用电源等诸多领域展现出广阔的应用前景。现阶段的FC主要面临材料型和工况诱导型故障,从而降低电池的可靠性、耐久性,已成为制约其规模化应用的瓶颈。一方面,在FC的全寿命周期内,持续的电化学和机械过程损伤不可避免;另一方面,人工错误操作或设备异常引发的偶发故障会加速性能下降^[1]。以上挑战与严苛的商业化耐久性目标形成鲜明对比——美国能源部明确要求,车用FC电堆耐久性需达到5000小时^[2];我国国标同步规定,商用车用

FC电堆耐久性达到5000 h,乘用车用电堆达到3000 h^[3]。因此,为了保证FC长期稳定运行,可靠、高效的故障在线诊断技术成为重要的研究方向。

传统的燃料电池故障诊断,主要通过监测电压^[4]、温度^[5]、压力^[6]等信号,这类方法只能感知性能下降的结果,无法揭示故障发生的内在机理,难以满足复杂工况下精准、实时、鲁棒的诊断需求。电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)作为非破坏性的电化学分析技术^[7],其电学快速识别技术,能够有效表征电池内部多种电化学和物理过程,可以得到欧姆电阻、电荷转移电阻、扩散阻力以及电容等,是提前预警

故障的核心表征手段, 从而成为FC故障在线诊断的前沿解决方案。

EIS与不同诊断方法的结合, 能够催生出满足车载实时性、鲁棒性与可解释性的在线故障诊断方案。正是基于这一认识, 研究者围绕基于EIS的故障在线诊断应用展开了大量探索, 逐步形成了基于模型、数据驱动以及融合方法三类技术路径。然而, 现有综述多局限于单一研究视角, 未结合FC类型差异与在线实时诊断需求, 难以支撑在线故障诊断技术的落地优化。系统梳理基于EIS的FC故

障在线诊断研究, 厘清技术发展脉络与短板, 可为突破FC故障诊断技术瓶颈、指导工程化实际应用, 提供重要理论参考与实践指引。本文拟首先阐述基于EIS的FC故障在线诊断研究背景与意义; 其次, 详解EIS在线检测技术的研究进展; 再次, 分类梳理不同类型FC下基于EIS的故障诊断技术成果, 重点剖析在线实时诊断面临的难题; 最后, 立足基于EIS的FC在线故障诊断的全流程优化与关键技术攻坚视角, 展望在线诊断技术的落地发展路径。图1为基于EIS的FC故障在线诊断研究示意图。

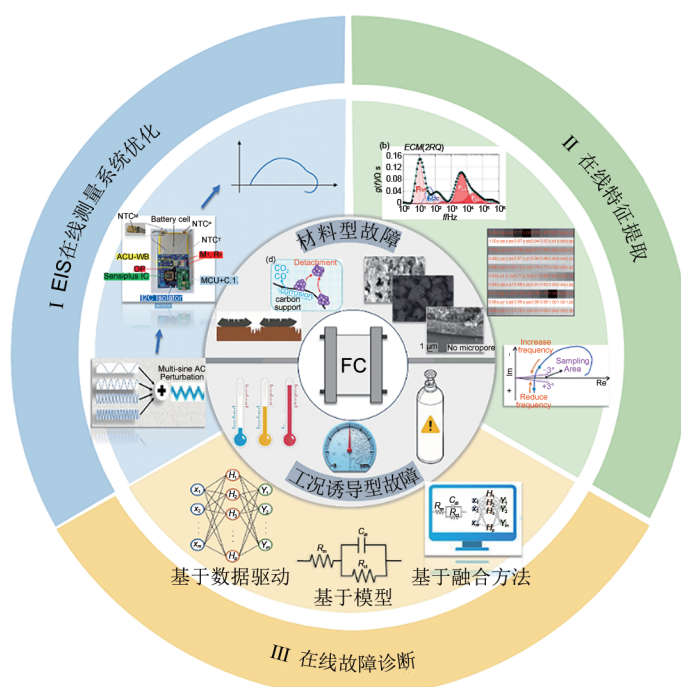


图1 基于EIS的燃料电池故障在线诊断示意图

Fig. 1 Schematic diagram of on-line fault diagnosis for fuel cells based on EIS

1 EIS基本概念及物理意义

FC系统是复杂的电化学反应系统, 因此很难获得可视化的电池内部运行状态。而EIS具有高界面敏感性, 可快速检测电化学反应与状态变化, 进而判断物质传输过程。目前, FC中各种元件的介电特性和电气特性已可确定, 通过电池在不同频率下阻抗响应的测量, 可以获得活化极化、欧姆极化和浓差极化等多种内部过程的信息。

EIS技术的基本原理如图2所示。通过控制FC的DC-DC电路使电池维持稳态输出电流与电压, 叠加与测量频率相关的小幅正弦电流(或电压)激

励信号, 电池将产生对应的电压(或电流)响应信号。从而可以得到不同频率下电池的阻抗值, 获得EIS。当采用激励电流为输入信号时, 阻抗值可由下式求得:

$$I(t) = I_m \sin(2\pi f_0 t + \theta) \quad (1)$$

$$U(t) = U_m \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (2)$$

$$|Z(j\omega)| = U_m / I_m \quad (3)$$

$$Z(j\omega) = |Z(j\omega)| e^{j(\varphi - \theta)} \quad (4)$$

$$e^{j(\varphi - \theta)} = \cos(\varphi - \theta) + jI_m \sin(\varphi - \theta) \quad (5)$$

其中, 式(1)(2)为EIS激励电流、响应电压信号在时域的方程。式(3)(4)为EIS激励电流、响应电压在频域的阻抗方程。式(5)为欧拉方程, j 为虚

单位, I_m 和 U_m 分别为激励电流信号和响应电压信号的幅值, θ 和 φ 分别为激励电流信号和响应电压信号的相角, f_0 为激励电流信号和响应电压信号的频率, $|Z(j\omega)|$ 为 f_0 频率下 FC 阻抗的幅值。

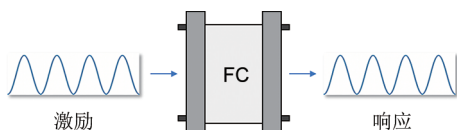


图2 EIS基本原理(基于文献[7]的经典理论框架绘制)

Fig. 2 The basic principles of EIS (Drawn based on the classic theoretical framework of references[7])

以 PEMFC 为例, 工作原理如图 3(a) 所示。PEMFC 通常包含七个关键组成部分, 包括催化层、气体扩散层、阳极和阴极侧的气体通道, 以及夹在它们之间的质子交换膜^[9]。在阳极侧, 氢气通过气体扩散层被输送到阳极催化层, 并在催化剂的作用下分解成质子和电子。在阴极侧, 氧气在到达阴极催化层后, 在催化剂的作用下, 与阳极产生并经质子交换膜迁移至阴极的质子、以及经外电路传输而来的电子结合生成水。图 3(b) 为测量所得到的典型 EIS 奈奎斯特图: 高频段阻抗弧与实轴的截距反映电池内部总欧姆损失, 且膜电阻占主导; 中频段存在两个阻抗弧, 分别对应阳极和阴极的活化过程, 阴极因氧还原反应 (oxygen reduction reaction, ORR) 动力学更慢, 其电荷转移阻抗 R_{ct} 更大; 低频段表示传质阻抗^[9]。此外, 低频除传质阻抗外存在电感回路, 对于这一现象的主流解释: ① 电化学反应中吸附中间物的缓慢弛豫过程, 该中间物主要包括 PtO 或部分毒化物; ② 由于阴极扩散层加湿不足, 存在的动态水传递。对高、中、低频的精准测量, 是进一步分析电池状态的前提。

2 基于 EIS 的故障诊断技术

2.1 EIS 测量系统技术优化

EIS 作为 FC 故障诊断中兼具非侵入性与机理解析能力的核心技术, 在离线场景中积累了丰富的应用。其测量主要依托电化学工作站、组件拆解测试或与循环伏安法等技术联合应用, 精准捕捉各类故障的阻抗特征, 为故障诊断研究奠定了坚实基础。然而, 传统 EIS 技术需要扫描多个频率点, 耗时较长, 难以捕捉车载快速启停、负载突变等动态工况下的动态故障。并且, 专用阻抗分析仪体积大、成

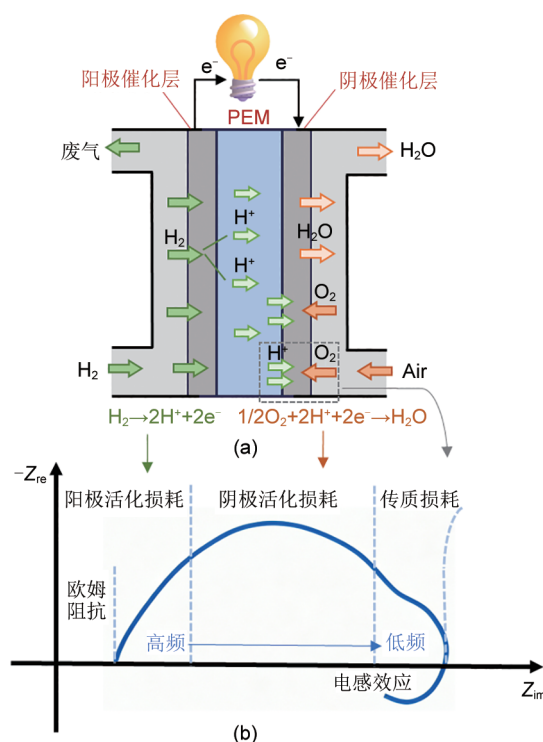


图3 (a) 典型的 PEMFC 工作原理; (b) 典型 EIS 奈奎斯特图

Fig. 3 (a) Typical working principle of PEMFC; (b) Typical EIS Nyquist plots

本高昂且需专业操作, 通常追求极致的精度而非紧凑性和集成度, 难以在车载等工况下直接应用。为了克服传统 EIS 技术测量时间长、体积大的局限性, 在线 EIS 技术应运而生, 其通过优化快速扫描方法、与 FC 系统原部件集成等方法, 适用于工程应用场景下的故障在线监测。

2.1.1 硬件优化

传统 EIS 测量装置能提供高度精确的读数, 但体积大、成本高, 限制了其在车载场景中的应用。因此, 研究者开发了嵌入式 EIS 硬件系统, 在成本、体积与测量能力间取得平衡, 从而实现车载 EIS 的准确测量^[10]。

Ria 等^[11]提出基于专用集成电路的紧凑型 EIS 硬件方案, 其硬件结构如图 4(a) 所示, 突破传统分立元件的架构限制, 将 EIS 测量全流程功能集成于单颗芯片, 无需额外信号调理模块, 装置体积大幅缩小。Ma 等^[9]开发了一种多通道在线燃料电池 EIS 测量装置, 利用多相交错升压拓扑和平均电流控制技术设计了一种可输出 1~500 Hz、10 A 正弦激励电流的电流源, 采用正交矢量数字锁相放大器算法

设计阻抗测量模块, 测试平台的实验结果证明阻抗模数值的误差小于3.5%, 相位角的误差小于1.5°, 装置成本大大减小。Li等^[12]设计并制造了一种紧凑性较高的嵌入式系统用于故障诊断, 如图4(b)所示, 相比传统分立元件结合通用处理器的方案, 体

积缩小40%以上, 计算延迟降低至毫秒级, 成功在线诊断4类故障。Zhang等^[13]提出了一种新的DC-DC变换器拓扑, 并提出了一种优化的扰动电流产生算法, 该算法可以满足大功率电池堆的要求, 实现车载在线EIS测量。

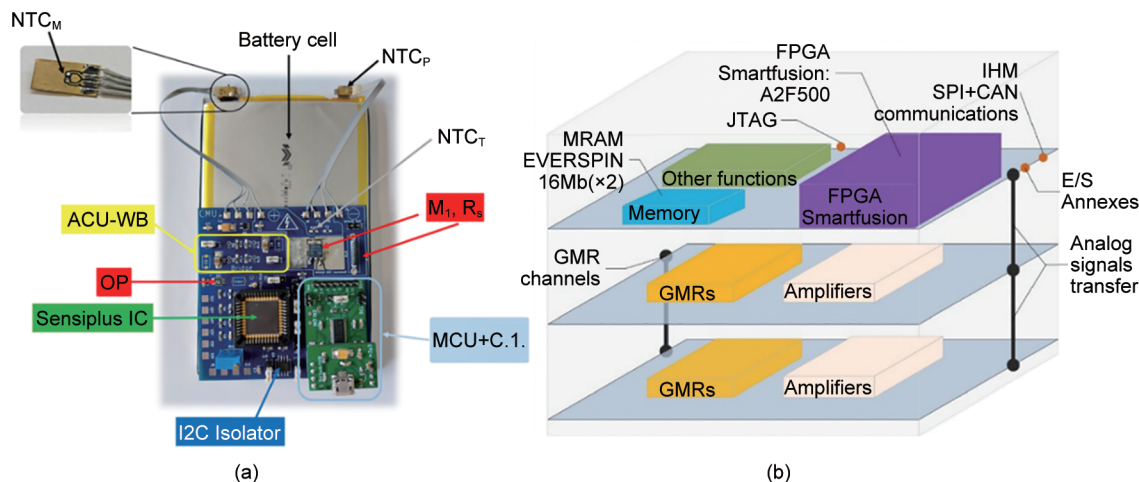


图4 (a) Ria等^[11]设计紧凑型EIS硬件; (b) Li等^[12]设计嵌入式系统

Fig. 4 (a) A compact EIS hardware system designed by Ria et al^[11]; (b) Embedded system designed by Li et al^[12]

2.1.2 输入信号优化

为了解决EIS扫频时间长的局限, 并提高电化学过程状态信息获取的效率, 研究人员聚焦输入激励信号优化, 其核心思路是通过复合信号设计减少频率遍历耗时。多正弦(multi-sine)激发方法^[14]作为该方向的典型代表, 其原理如图5所示, 通过一次性注入包含多个频率成分的复合信号, 大幅缩短全频谱测量时间^[15]。为充分发挥多正弦激发信号的诊断效能, 必须对频率成分优化。具体来说, 在尽量减少冗余频率成分的同时, 最大化提取与FC内部电化学过程相关的信息, 并通过傅里叶变换实现快速分析, 以适应快速在线故障诊断的场景。

Abuker等人^[15]利用弛豫时间分布DRT分析选择关键特征频率, 组合优化多正弦激励信号, 并结合TimesNet深度学习模型提出了新的故障诊断框架, 最终诊断准确率高达99.4%。Liu等^[16]提出了一种新型多级多正弦(multi-stage multi-sine, MSS)注入方法以优化宽频扫频过程, 如图6(a)所示, 实现了在0.1 Hz~1k Hz频段内, 阻抗幅值误差不超过3.2%的同时将EIS测量速度提升约6倍。Jiang等^[17]提出通过M序列激励与Morlet小波变换实现0.5~500 Hz频段的快速扫频, 完成5秒内在线测量, 实现超过96.7%监测精度。Debenjak等^[18]提出一种基于伪随

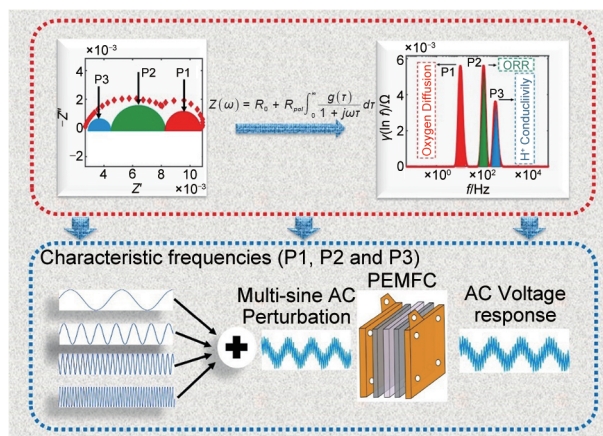


图5 频率选择方法的多正弦激发信号^[15]

Fig. 5 Schematic diagram of multi-sine EIS technique^[15]

机二进制序列(pseudo-random binary sequence, PRBS)作为扰动信号, 基于连续小波变换结合的PEMFC阻抗快速测量方法, 在0.1~500 Hz频段仅需60秒即可完成阻抗测量, 且测量精度与传统方法相当, 如图6(b)所示。Sheng等^[19]提出一种基于自适应分段离散区间二进制序列(discrete-interval binary sequence, DIBS)信号的快速EIS测量技术, 如图6(c)所示, 通过128阶自回归模型对电池电化学噪声进行功率谱估计形成激励信号, 将激励幅值

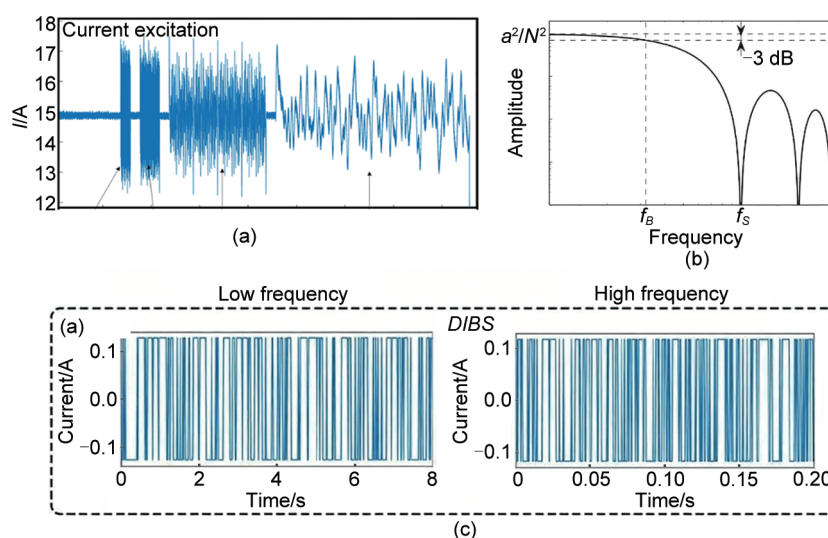


图6 EIS输入信号优化: (a) MSS^[16]; (b) PRBS^[18]; (c) 自适应分段DIBS^[19]

Fig. 6 EIS input signal optimization: (a) MSS^[16]; (b) PRBS^[18]; (c) Adaptive segmented DIBS^[19]

控制于工作电流2%以内;配合DRT辅助的ECM拟合数据处理,单次测量仅需16~18 s。

2.1.3 输出信号优化

经硬件系统与激励信号优化后,EIS测量终端输出的原始阻抗谱信号,仍难以完全规避环境干扰、硬件残余误差、信号漂移畸变等问题。相较于侧重硬件支撑的系统优化以及侧重前端调控的激励优化,EIS输出信号优化聚焦测量终端的信号后处理与精准校正环节,是进一步提升阻抗谱质量的关键举措。本节围绕EIS原始输出信号的质量提升需求,系统梳理输出信号优化核心技术,剖析其作用机理与应用效果,为故障诊断的精准数据获取提供理论与技术参考。

Du等^[20]提出基于标准方波激励与Morlet小波变换的EIS输出信号优化方法,如图7(a)所示,利用Morlet小波的时频局部化特性,创新性地仅在方波跳变时刻开展卷积运算,实验验证表明,经该方法优化后的EIS输出信号,实部相对误差全频段控制在5%以内,虚部在关键频段的误差小于10%。Dong等^[21]进一步修正Morlet小波函数,引入明确的频率参数替代尺度因子,并简化电流与电压信号的公共系数,剔除阻抗计算中冗余的系数项,形成适配车载场景下阻抗求解的简化小波形式。

高斯过程(Gaussian processes, GP)作为一种概率机器学习模型,也被引入EIS数据处理领域。Py等^[22]展示了GP不仅能够对噪声数据进行平滑滤波,还能提供预测的不确定性量化,这对于评

估后续诊断结果的置信度至关重要,如图7(b)所示。该方法通过构建阻抗实部与虚部的联合概率分布,实现了对噪声谱的稳健回归,为后续的物理参数提取奠定了可靠基础。Kasper等^[23]提出了一套先进的EIS校准工作流程,通过对已知阻抗的标准虚拟电池进行测量,精确标定并修正了由测量系统引入的系统性误差,在50 mHz~10 kHz的宽频范围内使低微欧姆阻抗的测量精度得到提升。

在车载等高功率应用场景中,EIS扰动激励信号通常需借助DC/DC变换器注入,而变换器的非线性开关行为可能导致激励电流波形失真,进而影响阻抗测量结果。Shen等^[24]深入分析了这种由在线EIS引入的直流母线振荡问题,并指出信号畸变会直接影响阻抗谱的低频段质量。并针对这一问题,采用分布参数模型或非线性系统辨识方法对测量链路进行预先表征,可在数据后处理阶段对测得的阻抗进行逆向补偿。上述后处理技术共同保障了EIS数据的可靠性,为基于EIS的FC故障在线诊断提供了高质量的数据基础。

对EIS数据的正确分析,需满足因果性、线性、稳定性与有限性四项基本条件,若其中任一条件不满足都会导致分析结果偏差甚至错误结论,因此EIS数据有效性验证是分析前的核心前提^[25]。EIS数据有效性判定核心依赖Kramers-Kronig(K-K)关系,通过校验阻抗实部与虚部的内在物理约束关系,实现输出信号一致性与系统耦合特性的自校验,即便在车载场景DC-DC激励受限、易受耦

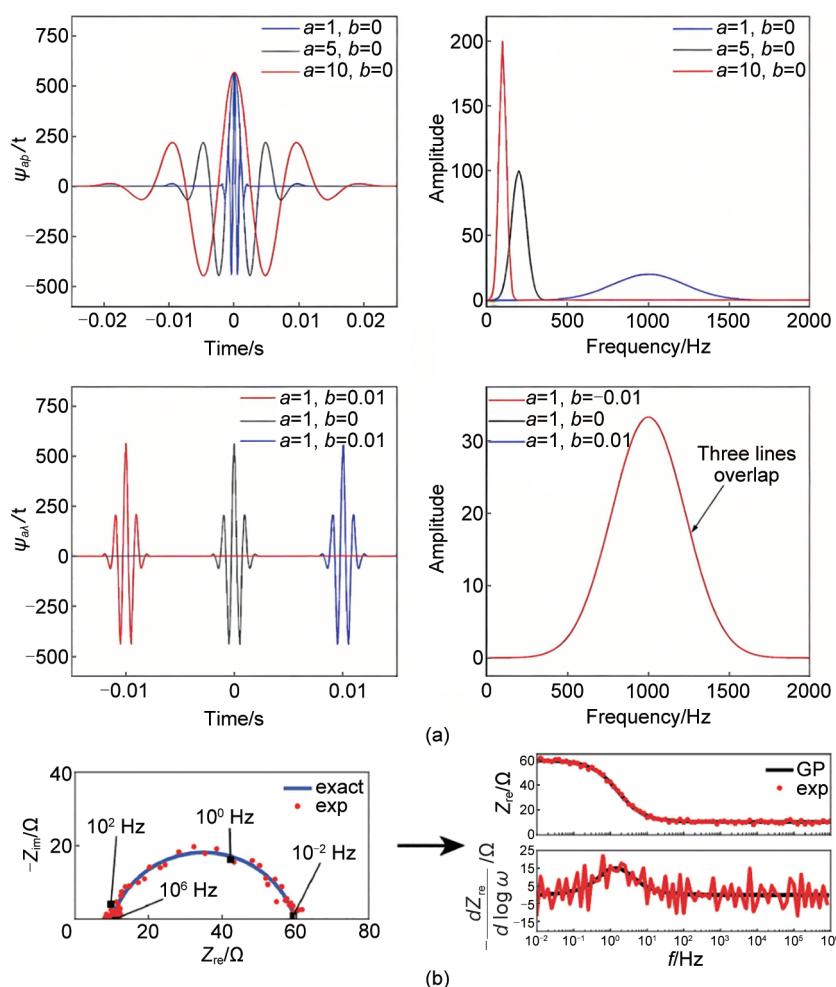


图7 输出信号优化: (a) 小波变换^[20]; (b) 高斯去噪^[22]

Fig. 7 Output-signal optimization: (a) Wavelet transform^[20]; (b) Gaussian denoising^[22]

合干扰等非理想条件下, EIS数据仍可为后续数据处理提供可靠支撑。

EIS测量系统优化主要沿硬件集成化、激励信号复合化和输出信号精准化三方面展开研究。硬件集成方案体积小成本低, 但频率范围和电流幅值受限, 难以同时覆盖高频欧姆与低频传质响应; 复合激励信号有效压缩测量时间, 但高频信噪比不足与低频能量衰减的矛盾尚未解决; 输出信号后处理可改善数据质量, 但无法根除硬件非线性引入的系统性误差。目前三条路径协同优化研究尚属空白, 特别是激励信号与硬件滤波的匹配设计、后处理误差对前端激励参数的自适应反馈机制, 均有待深入研究。

2.2 特征提取

经2.1节测量系统硬件集成、激励信号与输出信号优化得到的原始EIS数据, 仍需完成标准化预

处理才能用于特征提取: 主要包括剔除电磁干扰、负载突变导致的离群异常值^[26], 对不同工况下的阻抗数据进行归一化以消除量纲差异, 以及通过主成分分析、线性判别分析等方法去除全频谱数据中的冗余信息^[27], 这是保障后续特征有效性和诊断模型鲁棒性的关键前置环节。EIS提供了FC在宽频范围内的动态响应信息, 然而直接通过EIS全谱数据诊断故障可能面临不够直观且效率低下的问题。特征提取旨在从EIS数据中提取出能够表征FC内部状态变化的关键信息。这些特征可以是具有明确物理意义的模型参数, 也可以是便于机器学习的统计特征。

EIS可以用典型的等效电路模型 (equivalent circuit model, ECM) 来表示, 表1列出了常见的ECM元件。

最经典的等效电路模型为Randle模型[图8(a)],

表1 电路元件与模型
Table 1 Circuit components and models

示意图	元件类型	关键特性	表达式
	电阻(R)	相位角 0°, 无频率依赖	$Z = R$
	电容(C)	相位角 90°	$Z = (j\omega C)^{-1}$
	Warburg 阻抗(W)	相位角 0°~90°, 与扩散过程相关	$Z = Y_0^{-1}(j\omega)^{-1/2}$
	恒相位元件(Q)	相位角 (-90n)° (0<n<1), 适用于非理想界面	$Z = 1/Y_0(j\omega)^n$

由两个电阻, 一个电容组成, 其总阻抗为:

$$Z = R_m + \frac{1}{\frac{1}{R_{ct}} + j\omega C_{dl}} \quad (6)$$

其中, R_m 为代表欧姆损耗, R_{ct} 代表电荷转移损耗, ω 为角频率, j 为虚部单位, C_{dl} 表征双层电荷积累现。为实现对不同实际场景的精准描述, 多种 Randle 的扩展模型相继被提出。Fouquet 模型 [图 8(b)] 是经典改进模型, 其总阻抗为:

$$Z = R_m + \frac{1}{\frac{1}{R_{ct} + Z_w} + Y_0(j\omega)^n} \quad (7)$$

其中, Y_0 为 CPE 的导纳参数, n 为 CPE 的相位角因子 ($0 < n < 1$, $n=1$ 时退化为理想电容)。其在 Randle 模型基础上用恒相位元件 (constant phase element, CPE) 代替表征双层 (C_{dl}), 同时增加了用于再现传质效果的非线性 Warburg 阻抗 (Z_w), 法拉第阻抗与 C_{dl} 电荷积累现象的电容并联。在不同研究中, 由于与电极过程相关的假设、边界和阻抗在不同频率下占主导地位的界定存在差异, 元件之间的选择和连接大不相同, 从而产生不同的 ECM。

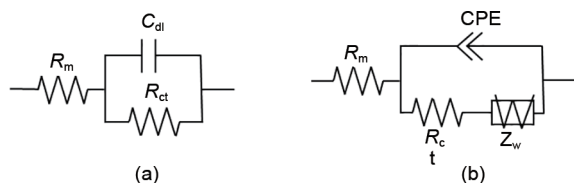


图8 ECM: (a) Randle 模型; (b) Fouquet 模型
Fig. 8 ECM: (a) Randle model; (b) Fouquet model

Le Canut 等^[28]利用 R(RC)(RC) 对 PEMFC 在膜干条件下的现象进行了解释, 该团队在文献[29]中展示了 R(RC)(RC) 的多种参数组合情况的 EIS, 并强调低频段奈奎斯特图的变化。Heidari 等^[30]搭建了

瞬态一维两相传质模型并通过 MATLAB 求解 0.1 Hz ~ 100 kHz 的 EIS, 缩短测量范围, 避开耗时长的高低频测量。此外, DRT 作为一种无模型解析方法, 可将阻抗弧解耦为不同时间常数的弛豫过程集合, 从而直接关联到具体的电化学反应、欧姆过程、以及传质过程, 实现在不同电池电位下故障机理的可视化、可比例化分析, 明确各过程对应的弛豫特征与等效电路元件的关联, 提升 ECM 的物理可解释性与建模可靠性^[31]。Dierickx 等^[31]利用 DRT 验证了不同等效电路模型的阻抗响应, 并通过对比 DRT 指导模型选择, 如图 9(a) 所示。Xiao 等^[32]选择了 R(RC)(RC)(RC) 的 ECM 来提高拟合精度, 如图 9(b) 所示, 将 1~1000 Hz 频段科学划分为干扰、混合、特征三类频段, EIS 测量时间从 51 s 缩短至 30.1 s。

部分研究从 EIS 原始数据中逐层挖掘故障相关特征, 既保留数据的原始性, 又实现有效特征的精准提取。Ren 等^[33]提出了一种基于阻抗的零相欧姆电阻测量方法, 以零相欧姆电阻和固定低频阻抗作为水故障的指标, 将阻抗点限制在 $\pm 3^\circ$ 的采样限制区域内, 精度足以反映微小的含水量差异。Li 等^[34]仅选取高、低两个特征频率点 (1 kHz、0.4 Hz), 通过其阻抗谱的高低频交点横坐标, 提取故障特征, 诊断时长约 4 s, 表明了该方法的快速性。Jiang 等^[17]从阻抗谱中自适应提取两个特征频率, 对于 3 kW 的 PEMFC 整体分类准确率为 96.9%。Najafi 等^[35]考虑到不同频率范围内 EIS 测试所需时间的显著差异, 将 EIS 频率划分为 4 个聚类, 针对每个电流密度确定可以实现最高精度的频段。

卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 摒弃了传统下诊断流程, 其结构示意图如图 10(a) 所示, 从原始输入中逐层挖掘故障相关特征,

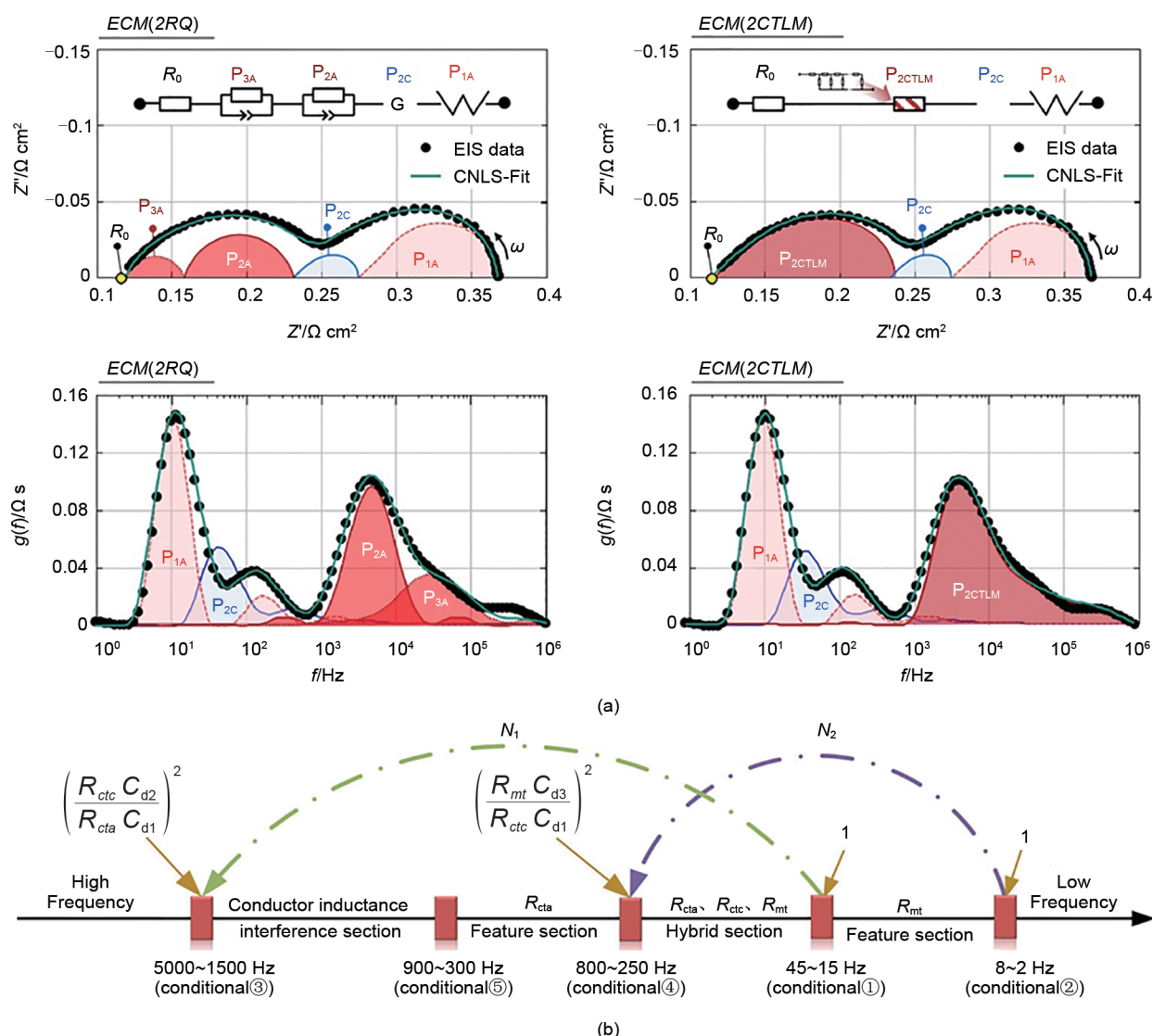


图9 (a) 基于不同ECM、测量和模拟阳极支持SOFC的阻抗谱和DRT^[31]; (b) EIS频率分段示意图^[32]
Fig. 9 (a) Impedance spectra and DRT of anode-supported SOFC measured and simulated based on different equivalent circuit models^[31]; (b) Schematic diagram of EIS frequency segmentation after fuzzy inference^[32]

无需依赖先验机理知识, 适配复杂工况下的故障场景, 最终以端到端方式生成诊断结果。Liu等^[36]整合振幅注意力和时间差分注意力, 并通过MSA模块完成多尺度跨时空特征融合, 有效提取故障特征。并通过置换特征重要性评估特征贡献, 以识别关键特征。实验结果证明, 所提方法能够实现高精度故障识别, 精度范围为97%~100%, 平均稳定性为98.3%。Yu等^[37]提出了一种基于EIS和CNN的策略, 如图10(b)所示, 将阻抗映射到二维矩阵作为卷积神经网络的输入, 并在卷积神经网络的全连接层中添加电流作为附加特征来工作, 实现了诊断精度高于96%。Shin等^[38]则通过CNN处理膜电

极光学显微镜图像, 如图10(c)所示, 同时融合欧姆电阻和电荷转移电阻作为特征, 最终预测模型的均方根误差仅为4.62。

多尺度卷积神经网络(multi-scale convolutional neural network, MCNN)通过多尺度卷积核并行结构, 能够同时捕捉不同尺度的特征, 如图11所示。MCNN在传统CNN框架基础上支持多源数据并行输入, 通过构建多个具有不同核大小和步幅的并行卷积路径, 捕捉不同尺度的特征信息。这些并行通路可以提取输入数据的多尺度特征并融合, 能够全面且准确地提取特征^[39]。Xu等^[26]引入了MCNN用于故障诊断, 解决传统CNN对故障严重程度差

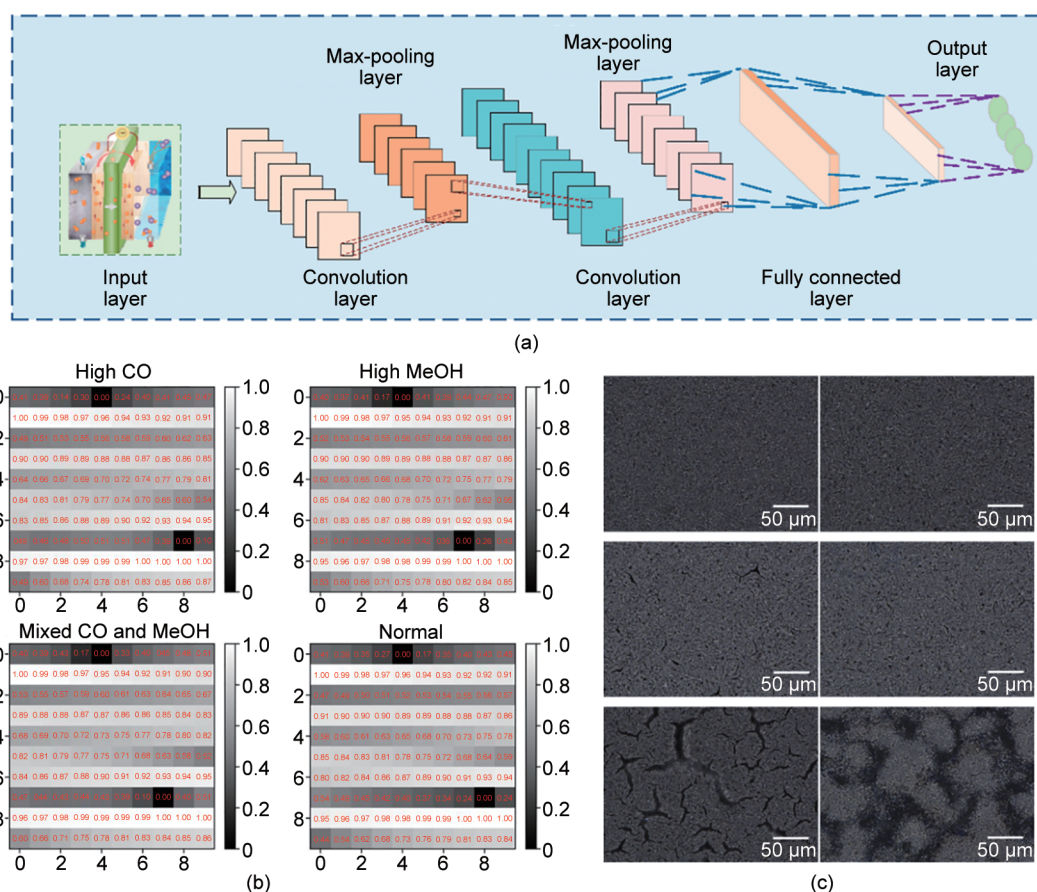


图10 CNN: (a) 结构示意图^[36]; (b) 阻抗归一化后映射为二维矩阵^[37]; (c) 结合CL光学图像分类^[38]
 Fig. 10 CNN: (a) Schematic diagram of structure^[36]; (b) Normalized impedances mapped into a 2D matrix^[37]; (c) Classification combined with optical images of the CL^[38]

异化诊断的不足,丰富了应用场景的维度,实现了超过97%的故障诊断准确率。Jiang等^[39]将MCNN用于提取数据特征,应用多头注意力(multi-head self-attention, MSA)机制,为特征分配适当的权重。随后MCNN-MSA组件作为基础学习器,其预测数据被输入元学习器,最终诊断准确率达到98.67%。

基于EIS的特征提取方法,已在特征维度压缩与诊断精度提升方面取得初步进展。然而,ECM方法物理意义明确但拟合耗时长,深度学习方法精度高但可解释性不足。此外,如何将DRT解析的电化学时间常数与物理边界嵌入深度学习模型训练过程,实现深度融合,仍有待深入研究。

2.3 在线故障诊断技术

在完成EIS特征提取的基础上,故障诊断方法的选择直接决定诊断精确度与工程适用性。目前,基于EIS的故障诊断技术已形成较为成熟的体系,诊断能力逐步得到提升。根据诊断原理,现有在线

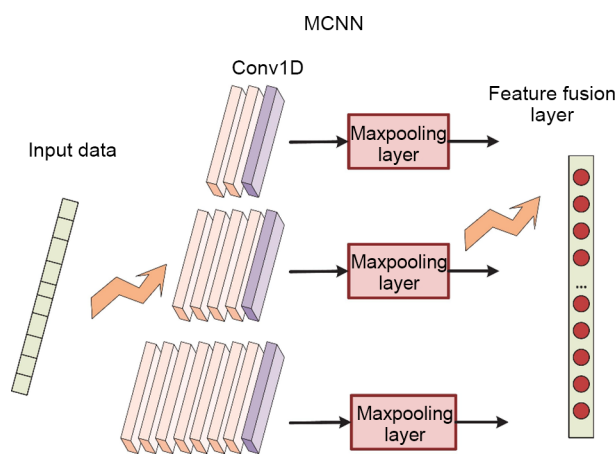


图11 MCNN结构图^[39]
 Fig. 11 Structure of multi-scale convolutional neural networks^[39]

故障诊断方法可分为基于模型的方法、基于数据驱动的方法以及融合方法三大类。

基于模型的方法中,故障诊断主要通过阻抗相关参数的残差进行评估,然后进行残差推理以检测

可能发生的故障^[40]。Schopen等^[41]通过LR(RQ)(RQ)W模型拟合EIS数据,如图12(a)所示,提取出欧姆电阻、电荷转移电阻等关键参数,发现进气湿度从30%提升至85%时膜电阻降低超39%、阴极电荷转移电阻降低约23%,并指出该方法拓展至在线应用开发健康监测系统是可行的。刘相万等^[42]基于二阶RQ-RLC等效电路模型,如图12(b)所示,

结合EIS数据辨识模型参数,测试集准确率达97.44%。Xiao等^[43]提出了一种RL(RQ-RC)等效电路模型,如图12(c)所示,在高频、中频和低频区域有良好的拟合效果。鲜亮等^[44]采用R(RQ)(RQ)(RQ)形式的ECM,如图12(d)所示,对阻抗谱进行拟合,根据高频45°直线分支畸变和低频半圆弧,诊断出阴极水淹程度。

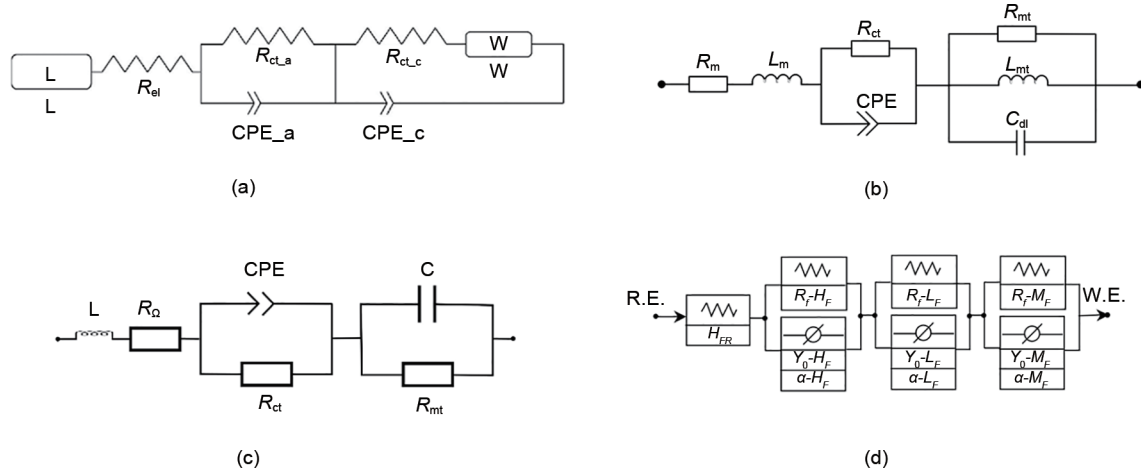


图12 基于等效电路模型的故障诊断: (a) LR(RQ)(RQ)W模型^[41]; (b) 二阶RQ-RLC模型^[42]; (c) RL(RQ-RC)^[43]; (d) R(RQ)(RQ)(RQ)^[44]

Fig. 12 Fault diagnosis based on ECM: (a) LR(RQ)(RQ)W model^[41]; (b) Second-order RQ-RLC model^[42]; (c) RL(RQ-RC) model^[43]; (d) R(RQ)(RQ)(RQ) model^[44]

基于数据驱动的诊断方法不需要复杂的理化机理,通过直接从EIS测量数据中提取特征,并利用机器学习算法建立从特征空间到故障类型空间的映射,更适应复杂和在线应用场景,其典型工作流程如图13所示。该流程整体分为离线训练与在线诊断两大阶段:离线阶段首先基于历史数据完成阻抗谱数据的测试与采集,通过特征提取与选择挖掘阻抗谱中的关键故障敏感信息;随后依托机器学习算法进行模型的训练与优化,最终完成诊断模型的构建与验证。在线阶段则针对实时运行数据进行阻抗在线测试,经特征处理后输入至已训练完成的模型,由模型输出对应的故障类型与故障程度评估结果,实现对运行状态的实时监控与故障智能判定。郭泽林^[45]建立以CNN、随机森林、K最近邻算法、极端梯度提升树(extreme gradient boosting, XGBoost)为基分类器,XGBoost为元分类器的Stacking集成学习框架,实现了对PEMFC系统正常、水淹、膜干和氢气泄漏四种运行状态的诊断。同时,在满足相同损失函数的前提下,使CNN的

运算时间减少28 s。Nie等^[46]提出了一种基于邻域成分分析和k近邻的故障诊断方法,测试准确率为97.67%,诊断时间为0.0009885 s。此外,神经网络也展现了强大的能力,包括储存计算^[47-48]、极端学习机^[49]和长短期记忆网络^[50]。

基于模型的方法往往需要高精度的模型来进行更可靠的故障诊断,然而在实际应用中,FC系统的复杂性导致了建模困难。相比之下,基于数据驱动的方法避免了建立复杂模型的过程,但同时这也导致了可能缺乏对应的机理解释。因此,有些研究者将基于模型和基于数据驱动的诊断方法融合来充分发挥两者优势,依托模型参数提供故障的机理背景,再结合数据驱动技术对系统复杂性的处理能力,实现在线诊断的可解释性和鲁棒性的协同提升。王筱彤等^[51]提出R(RQ)(RQ)(RQ)三阶等效电路模型,并采用Nelder-Mead参数辨识方法,得到总体误差较小的EIS拟合曲线。Yu等^[52]对不同故障条件下采集的EIS进行ECM参数辨识,结合支持向量机(support vector machine, SVM)方法对高

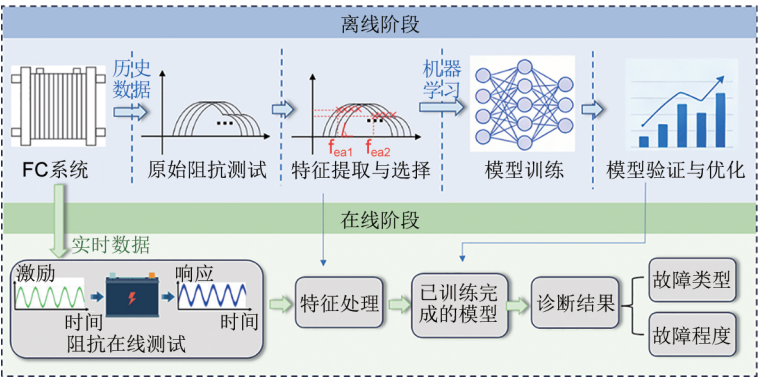


图 13 基于机器学习的诊断技术应用于FC系统的流程图

Fig. 13 Flowchart of the application of machine learning-based diagnostic technology in FC systems

温 PEMFC 系统故障在线监测。黄赵军等^[53]提出一种基于模糊 C 值聚类 and 概率神经网络的故障诊断方法，选取 0.1~5000 Hz 下的特征，并作为模糊 C 值聚类-概率神经网络故障诊断模型的故障特征输入。Shi 等^[54]提出了一种具有在线学习故障特征能力的基于 ECM 和在线序列极限学习机（online sequential extreme learning machine, OS-ELM）框架故障诊断模型，利用 OS-ELM 从等效电路元件数据集中学习数据特征，采用优化的模糊 C 均值对样本数据进行聚类 and 划分，以在线更新 OS-ELM

模型。

表 2 对上述三种在线故障诊断方法的性能进行了对比。现有在线故障诊断研究已形成较为完整的方法体系，在诊断精度方面取得了显著进展。然而，现有研究多在固定工况下验证，跨工况与跨老化阶段的泛化能力尚不明确；此外，诊断模型多为离线训练后静态部署，缺乏面向长期运行的在线增量学习能力。未来需要进一步加强电化学机理与数据驱动方法的深度融合研究，推动在线诊断从实验室验证走向工程化应用。

表 2 在线故障诊断方法性能对比

Table 2 Performance comparison of online fault diagnosis methods

方法类别	具体方法	诊断精度	诊断时间	适用故障类型	文献
基于模型	ECM+残差诊断	97.44%	—	水淹/膜干	[42]
数据驱动	TimesNet+DRT	99.4%	90.7 ms	水管理故障	[15]
数据驱动	CNN	>96%	—	水淹/膜干/H ₂ 泄漏	[37]
数据驱动	MCNN-MSA	98.67%	—	多类可恢复/致命故障	[39]
数据驱动	NCA-KNN	97.67%	1 ms	水淹/膜干	[46]
融合方法	ECM+PSO-SVM	97.14%	—	水淹/膜干/H ₂ 泄漏	[51]
融合方法	ECM+SVM	99.62%	—	水淹/膜干/饥饿	[52]
融合方法	模糊 C 均值+PNN	>98%	—	水淹/膜干	[53]
融合方法	ECM+OS-ELM	>99%	在线更新	水淹/膜干	[54]

3 在线故障诊断技术在FC中的应用

FC 可以根据电解质类型进行分类，分为聚合物膜燃料电池、固体氧化物燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、碱性水溶液燃料电池等。其故障类型复杂多样，不同故障的诱发机理、演化路径及对系统性能的影响存在显著差异。为系统厘清各类故障的核心特性与 EIS 响应规律，本节构建表 3，从故障分类、故障机理、EIS 特征型号三个维度进行整

合，揭示典型故障的内在成因，明确各类故障对应的 EIS 特征差异。

3.1 材料型故障

材料型故障与 FC 所用材料本身的固有性质和其在特定操作环境下的劣化行为直接相关，长期的故障工况运行或者动态负载变化都会导致电极的劣化。Schulze 等^[50]通过表面分析研究了催化剂与聚四氟乙烯 PTFE 的降解过程，利用 EIS 量化了降解对性能的影响。结果表明运行过程中电池的电化学

表 3 FC 故障机理及 EIS 特征信号

Table 3 FC-failure mechanism and EIS characteristic signal

分类	故障类型	故障机理	EIS 的 Nyquist 图特征信号
材料型故障	电极降解	催化剂降解	DMFC ^[55] PEMFC ^[56-57] PEFC ^[58] PEMFC ^[60-61] PEFC ^[62] AEMFC ^[63-64] SOFC ^[65] 高频阻抗基本不变，中低频电阻的增加 ^[57, 59]
		电极载体与结构劣化	PEMFC ^[60-61] PEFC ^[62] AEMFC ^[63-64] SOFC ^[65] 高频阻抗基本稳定，中频 R_{ct} 显著增大 ^[58, 64, 66]
		电解质降解	PEMFC ^[67-68] PEFC ^[49, 69-70] DMFC ^[55] 高频欧姆阻抗增大，整体向实轴正方向偏移 ^[71] ，低频段亦受影响 ^[72]
		多孔传输结构降解	PEFC ^[73] PEMFC ^[74] SOFC ^[75] 高频阻抗增大，中频小幅增大，低频增大 ^[73] SOFC 中气相扩散电阻逐渐增大 ^[76]
		水故障	PEFC ^[77-78] SOFC ^[79] 干燥时低频段圆弧显著增大 ^[78] ；水淹时高频右移，中低频段圆弧显著增大 ^[80] ；SOFC 中频电荷转移电阻增加 ^[80]
	工况诱导型故障	反应物饥饿	PEMFC ^[81-82] HT-PEMFC ^[83] SOFC ^[84] 低频区半圆的增大或变形 ^[85] ，SOFC 面积比电阻增大 ^[86]
		中毒	MCFC ^[87] PEMFC ^[88] SOFC ^[89-90] 电荷转移极化阻抗增大；H ₂ S 中毒的影响延伸至 10 Hz 以下的低频区域，而 CO 中毒仅影响高频（>100 Hz） ^[91] ；SOFC 气体转换过程和 O ²⁻ 表面交换过程主导电阻增加 ^[92]

性能会下降，这种降解可以分为可逆和不可逆部分，不可逆的降解很可能归因于催化层结构的变化。

催化层作为 FC 电化学反应的核心区域，如图 14(a)所示，是由催化剂、碳载体、离聚物、孔隙共同构成的多孔复合材料。催化剂降解，如图 14(b)所示，是由于含水量过高或催化剂层本身的物理损坏，使得表面活性位点发生溶解、沉淀以及催化表面的氧化和重建等化学损伤^[93-94]。催化层的碳载体在高温、高含水量、高电位条件下，易降解，一般称为碳氧化或碳腐蚀^[60]。碳腐蚀是一种重要的降解机制，一方面，它通过破坏催化剂的连通性、破坏电极的孔隙结构、失去疏水性、增大催化剂的粒径等方式破坏 PEMFC 的性能；另一方面，碳腐蚀导致的碳骨架断裂、表面氧化及阻抗上升。

催化层降解的核心特征，可通过 SEM、XPS 及 EIS 等手段直接观测，反映催化层的失效程度。Saleh 等人^[95]利用 EIS 与标准电位循环协议结合使用，在极短时间内评估两种不同碳催化材料和结构的降解能力。Hu 等^[96]利用 1200 h 加速应力测试与 EIS 结合 DRT 技术，提出碳腐蚀引起的非线性性能下降的降解机制：EIS 表现为高频欧姆电阻逐步上升、中频电荷转移电阻扩大、低频扩散阻抗显著扩

张；通过 DRT 特征峰的强度变化定位腐蚀阶段，且通过电化学表面积和活化电阻之间的衰减率差异实现燃料电池故障的早期预警。Castanheira 等^[97]通过 1.4 V 高电位保持试验模拟车载启停工况下的碳载体腐蚀，结合 CV 测试表征电化学活性面积的演化规律，如图 14(c)所示，并提出了以电化学活性面积与活化阻抗的衰减速率差作为非线性加速退化的早期预警信号。Zhu 等^[98]进一步研究了不同高电位水平对阴极 CL 碳腐蚀的影响规律，通过电池整体与 CL 局部的 EIS 测试，如图 14(d)所示，明确了 1.2 V 以上电位区间碳腐蚀速率的突变阈值。Liu 等^[99]在模拟启停循环工况下结合 CO 吸附分离技术，采用 EIS 研究提出碳腐蚀三阶段：碳内表面活性位点暴露阶段、碳结构坍塌与界面重构阶段、活性碳流失与导电网络破坏阶段，如图 14(e)所示。通过 EIS 量化了碳腐蚀引发的欧姆损耗、反应动力学损耗及传质损耗，为不同工况下碳腐蚀的定量诊断提供了关键证据。Carrabba 等^[100]对比了长侧链与短侧链离聚物对碳腐蚀抗性的影响，发现短侧链离聚物虽然碳氧化标记更明显，但其质子传导率更优，高电流密度下的性能衰减反而更小，如图 14(f)所示。

由此可知，材料型故障的本质是材料固有缺陷

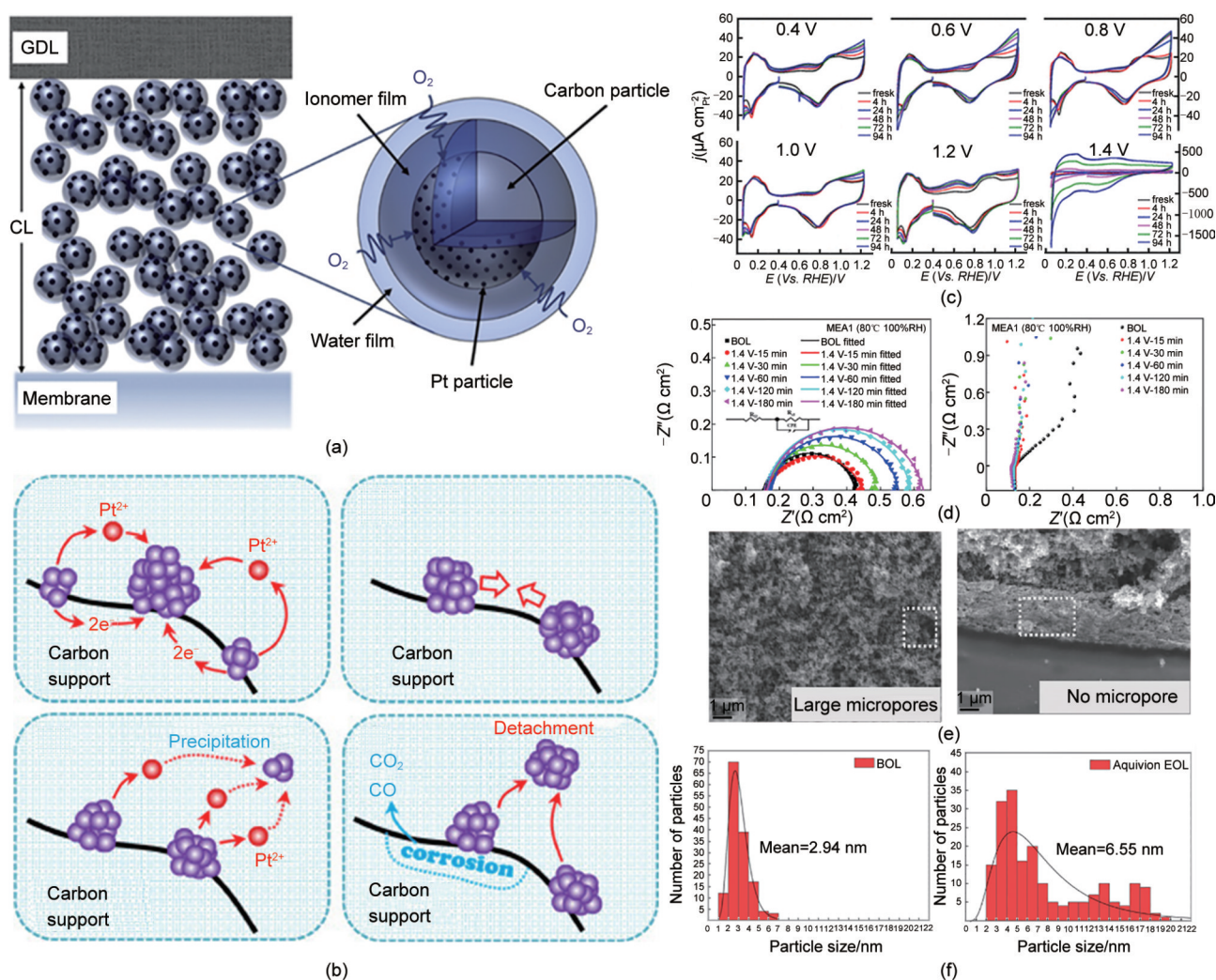


图 14 催化层衰退: (a) 催化层示意图^[94]; (b) 降解机制^[67]; (c) CV测试^[97]; (d) 电池及催化层的EIS测试^[98]; (e) SEM^[99]; (f) 催化剂的粒子尺寸分布^[100]

Fig. 14 Catalyst layer degradation: (a) Schematic of the catalyst layer^[94]; (b) Degradation mechanisms^[67]; (c) CV test^[97]; (e) EIS test of the cell and catalyst layer^[98]; (e) SEM image^[99]; (f) Particle size distribution of the catalyst^[100]

或不可逆结构损伤,将导致电池性能的永久性下降。EIS的特征参数异常变化是表征材料型故障的关键证据,结合微观结构表征完善故障机制分析,有助于提高后续故障在线诊断研究的可解释性。

FC的长期运行可靠性与效率受到内部材料型故障的显著影响。老化与环境降解作为材料型故障的核心表现,其根本原因在于材料在外部载荷、环境作用或时间累积效应下,微观结构发生不可逆变化,最终导致宏观性能下降或结构断裂,导致输出性能下降^[101]。Onanena等^[102]介绍了一种基于EIS的模式识别方法,从阻抗谱中提取特征来估算燃料电池的工作时间,进而预测其剩余使用寿命。Wang等^[103]利用极化曲线和EIS来确定燃料电池的

老化状况,在各种工作条件下提取偏振曲线和EIS数据,并采用边际距离法根据EIS的几何性质评估老化状态。同样,Li等^[104]通过利用从极化曲线和EIS中提取的与性能衰退相关的特征指标来估算电池状态。Vianna等^[105]利用实阻抗和虚阻抗成分作为特征评估预测了电池老化状态。这些研究展示出EIS在量化和预测FC因老化而引起的材料型故障中的潜力。

催化剂降解、碳腐蚀、电解质衰减等材料型故障的EIS特征研究已较为系统,EIS与DRT、SEM、XPS等微观表征手段的结合,从电化学响应与材料结构两个层面揭示了故障演化规律,为基于阻抗特征的材料失效识别与故障预警提供了理论依据。

3.2 工况诱导型故障

FC测试系统是一个融合工况调控、信号检测、数据处理与反馈控制的复杂集成控制系统,任一部件的异常波动均可能改变运行工况,诱发故障。这类工况诱导型故障往往与外部运行参数偏离燃料电池设计适配范围紧密相关,可直接触发性能异常或可恢复性故障。短时间内待参数恢复至合理范围后,故障可快速缓解或消失,因此需要快速的在线诊断技术。

Huang等^[106]用DRT分析分离EIS过程,通过分析DRT谱的变化,识别阳极和阴极中的水分管理故障类型。Zohra等^[107]通过FFT-PWM技术优化EIS测量,将0.1 Hz~10 kHz频率范围的阻抗数据采集时间缩短至3 min内,随后建立分数阶等效电路模型,更精准拟合水故障下EIS的非理想阻抗响应,将EIS参数作为ANN输入特征,通过训练后的神经网络分类器实现水管理工况诱导故障的高效检测,诊断准确率达92%以上,与传统整数阶模型对比该模型对水故障特征的捕捉更灵敏。Xu等^[26]引入了MCNN用于诊断,实现11类可恢复故障、4类致命故障及多故障的端到端诊断。Li等^[34]提出了一种基于混合频率EIS的水管理故障在线诊断方法,以0.4 Hz、1 kHz为特征频率,结合Salp群算法优化的R(RQ)等效电路模型提取阻抗参数,并构建PSO-BP神经网络分类器,对膜干、水淹故障进行分类,准确率达95.56%。Moussaoui等^[108]开发了优化总谐波失真工具,用于SOFC的快速在线诊断和识别反应物饥饿故障,如图15(a)~(b)所示。Le等^[109]将机器学习方法应用于SOFC系统诊断,通过粗粒度物理模型模拟SOFC堆在燃料分配不均、分层、阴极气体窜入阳极通道三种故障及均匀退化下的EIS数据,构建数据集训练神经网络回归模型和支持向量机分类模型,在固定工况下故障分类准确率超95%、跨工况下分类准确率超90%,如图15(c)所示。Subotić等^[110]通过实验探究了生物质气化系统与SOFC耦合的适用性,在750℃/800℃工况下测试不同气化气成分、气体净化方式及运行参数对工业级SOFC性能的影响,经EIS等短期电化学分析和120 h长期测试,发现750℃干气净化运行是兼顾效率与稳定性的最优方案,同时证实EIS可早期识别碳沉积、Ni再氧化等降解现象,如图15(d)所示。

工况诱导型故障具有可逆性强、响应迅速的特点,现有EIS诊断技术在单一故障识别方面已趋于成熟。然而,工程实际中多故障耦合与材料老化叠加现象普遍,导致阻抗特征交叉重叠,诊断模糊性显著增加。未来应着力开发工况自适应的动态诊断方法,建立故障严重度分级评估体系,提升FC系统动态工况下的运行可靠性。

4 总结与展望

为了提高FC在工程应用场景中的可靠性和耐久性,对电池进行在线故障诊断是完成后续恢复控制的必要先前环节。本文从在线监测的角度综述基于EIS的FC故障在线诊断研究进展,从EIS技术优化、特征提取、决策诊断三个方面分别总结现有方法,并综述在线诊断技术在FC不同故障类型中的应用。虽然各类方法在故障在线诊断方面取得显著进展,但仍有很大提升空间,对于未来的研究工作,本文提出如下建议:

(1) 建立基于长期EIS监测数据的故障退化轨迹模型。当前研究多聚焦于单时间断面的故障分类,对故障演化过程的定量描述不足。未来应利用长期在线EIS数据流,构建涵盖早期微弱退化、中期加速衰减和晚期失效的多阶段退化模型;进一步融合时序预测算法,实现故障早期预警与维护策略的动态优化,以满足FC长寿命运行需求。

(2) 拓展EIS技术在低温启动、高湿度、大电流、长周期运行等极端工况下的应用潜力,完善极端工况故障特征库;针对多故障并发场景,开发多标签分类算法,实现多故障耦合的全面诊断,提高复杂工况下的模型泛化能力。

(3) 推进电化学机理与深度学习模型的深度融合,提升诊断的可解释性与鲁棒性。当前融合方法中,物理信息仅在输入端发挥作用,未参与模型训练过程。未来应探索深层耦合方案,可将电化学控制方程直接融入网络训练,使诊断结果兼具高精度与机理一致性。

(4) 学界和产业界应协同凝练共识,依托本文表3这类规范框架,在统一的故障分类与特征描述语言基础上,建立面向社区共享的公共基准数据集与诊断性能验证基准,加速基于EIS的燃料电池故障在线诊断技术商业化落地。

(5) 加强国产化EIS硬件与软件的自主可控能

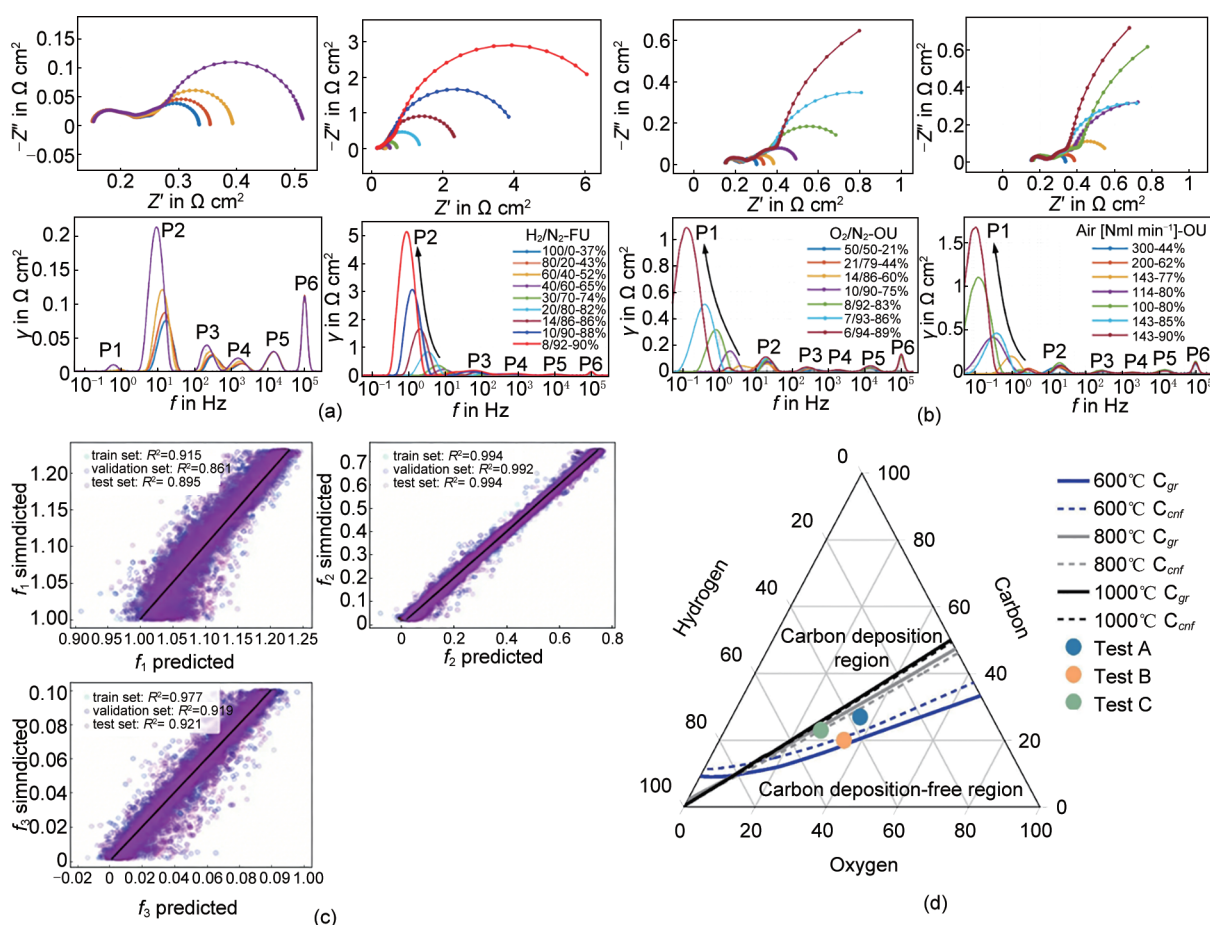


图 15 (a) 燃料饥饿^[108]; (b) 空气饥饿^[108]; (c) 故障等级预测^[109]; (d) C-H-O 积碳边界图^[110]

Fig. 15 (a) Fuel starvation^[108]; (b) Air starvation^[108]; (c) Fault-severity prediction^[109]; (d) C-H-O ternary diagram^[110]

力, 缩小与国际先进水平的差距。当前, 国内在 EIS 硬件自主研发方面仍依赖进口, 核心芯片受制于人, 且在融合电化学机理的智能诊断算法开发方面有待加强。未来需着力攻关面向车载和工业级应用的高精度、低功耗、宽频段集成化 EIS 采集芯片与模块, 同步开发国产化诊断算法库, 推动 EIS 技术在 FC 全生命周期管理中的规模化应用。

参考文献

[1] YU D, LI X J, ZHOU F, et al. Online fault detection and isolation of PEMFC based on EIS and data-driven methods: Feasibility study and prospects[J]. Journal of Power Sources, 2025, 641: 236915. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.236915.
 [2] US Department of Energy. An integrated strategic plan for the research, development, and demonstration of hydrogen and fuel cell technologies[R]. Washington DC: US Department of Energy, 2011: 1-73.
 [3] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 质子交换膜燃料电池 第2部分: 电池堆通用技术条件: GB/T 20042.2—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Proton exchange membrane fuel cells Part 2: General specifications for cell stacks: GB/T 20042.2—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
 [4] PAN W T, ABUKER Y Y A, MAO L. Investigation of feature effectiveness in polymer electrolyte membrane fuel cell fault diagnosis[C]//2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Qingdao). October 25-27, 2019, Qingdao, China. IEEE, 2019: 1-5. DOI: 10.1109/PHM-Qingdao46334.2019.8942975.
 [5] LIM I S, PARK J Y, CHOI E J, et al. Efficient fault diagnosis method of PEMFC thermal management system for various current densities[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(2): 2543-2554. DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.10.085.
 [6] ZHOU S, WANG K Y, ZHOU S W, et al. Features selection and substitution in PEM fuel cell water management failures diagnosis [J]. Fuel Cells, 2021, 21(6): 512-522. DOI: 10.1002/fuce.2021.00045.
 [7] PADHA B, VERMA S, MAHAJAN P, et al. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) performance analysis and challenges in fuel cell applications[J]. Journal of Electrochemical

- Science and Technology, 2022, 13(2): 167-176. DOI: 10.33961/jecst.2021.01263.
- [8] MIN T, ZHANG R Y, CHEN L, et al. Reactive transport processes in proton exchange membrane fuel cells[J]. Encyclopedia, 2023, 3 (2): 746-758. DOI:10.3390/encyclopedia3020054.
- [9] MA Y Y, WANG X Y, YUAN H, et al. Review of electrochemical impedance spectroscopy in fault diagnosis for proton exchange membrane fuel cells[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 211: 115226. DOI:10.1016/j.rser.2024.115226.
- [10] BECHARA C, FRIEDRICH G, FORGEZ C, et al. Embedded spectroscopy: Potentialities and constraints for onboard battery diagnostics[J]. Power Electronic Devices and Components, 2025, 12: 100118. DOI:10.1016/j.pedc.2025.100118.
- [11] RIA A, MANFREDINI G, GAGLIARDI F, et al. Online high-resolution EIS of lithium-ion batteries by means of compact and low power ASIC[J]. Batteries, 2023, 9(5): 239. DOI: 10.3390/batteries9050239.
- [12] LI Z L, OUTBIB R, GIURGEA S, et al. Online implementation of SVM based fault diagnosis strategy for PEMFC systems[J]. Applied Energy, 2016, 164: 284-293. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.060.
- [13] ZHANG X J, ZHANG T, CHEN H C. Implementation and optimization of perturbation currents for vehicular proton exchange membrane fuel cells online electrochemical impedance spectroscopy measurements[J]. Fuel Cells, 2024, 24(1): 17-31. DOI:10.1002/fuce.202300114.
- [14] FORTIN P, GERHARDT M R, ULLEBERG Ø, et al. Multi-sine EIS for early detection of PEMFC failure modes[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 855985. DOI: 10.3389/fenrg.2022.855985.
- [15] ABUKER Y Y A, LIU Z Y, SHOUKAT A, et al. Efficient diagnosis of water management faults in polymer electrolyte membrane fuel cells using optimized multi-sine excitation signal and TimesNet[J]. Journal of Power Sources, 2025, 635: 236559. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.236559.
- [16] LIU Z M, WANG X Y, CHANG G F, et al. Online monitoring of fuel cell electrochemical impedance spectrum with multi-stages multi-sine signals based on DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12): 16826-16838. DOI: 10.1109/TPEL.2024.3448530.
- [17] JIANG P K, CHEN J, JIN L, et al. Adaptive condition monitoring for fuel cells based on fast EIS and two-frequency impedance measurements[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 8517-8525. DOI:10.1109/TIE.2022.3220843.
- [18] DEBENJAK A, BOŠKOSKI P, MUSIZZA B, et al. Fast measurement of proton exchange membrane fuel cell impedance based on pseudo-random binary sequence perturbation signals and continuous wavelet transform[J]. Journal of Power Sources, 2014, 254: 112-118. DOI:10.1016/j.jpowsour.2013.12.094.
- [19] SHENG C, LEI J Z, ZENG L H, et al. Online impedance spectrum measurement of fuel cells with discrete-interval binary sequence signals[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73 (5): 7949-7959. DOI:10.1109/TIE.2025.3645396.
- [20] DU R B, WANG X Y, DAI H F, et al. Online impedance spectrum measurement of fuel cells based on Morlet wavelet transform[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(47): 24339-24352. DOI:10.1016/j.ijhydene.2021.05.012.
- [21] DONG Q C, ZHOU Y F, LIAN J, et al. A fast fuel cell EIS measurement method based on square wave excitation and modified wavelets[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2023, 170(4): 044502. DOI:10.1149/1945-7111/accab2.
- [22] PY B, MARADESA A, CIUCCI F. Gaussian processes for the analysis of electrochemical impedance spectroscopy data: Prediction, filtering, and active learning[J]. Electrochimica Acta, 2023, 439: 141688. DOI:10.1016/j.electacta.2022.141688.
- [23] KASPER M, LEIKE A, THIELMANN J, et al. Electrochemical impedance spectroscopy error analysis and round robin on dummy cells and lithium-ion-batteries[J]. Journal of Power Sources, 2022, 536: 231407. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.231407.
- [24] SHEN J B, WANG J C. Analysis of DC link oscillations in a hybrid fuel cell powertrain brought by *in situ* converter based electrochemical impedance spectroscopy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(55): 31080-31090. DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.08.146.
- [25] GINER-SANZ J J, ORTEGA E M, PÉREZ-HERRANZ V. Montecarlo based quantitative Kramers-Kronig test for PEMFC impedance spectrum validation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(34): 11279-11293. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.135.
- [26] XU J H, ZHANG B X, ZHU K Q, et al. Fault diagnosis of PEMFC based on fatal and recoverable failures using multi-scale convolutional neural networks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 80: 916-925. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.190.
- [27] TEO D K X, MAUL T, TAN M T T. Method—An investigation into post-hoc analysis methods for electrochemical biosensor data[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2024, 171(2): 027525. DOI:10.1149/1945-7111/ad2313.
- [28] LE CANUT J M, LATHAM R, MÉRIDA W, et al. Impedance study of membrane dehydration and compression in proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2009, 192(2): 457-466. DOI:10.1016/j.jpowsour.2009.03.027.
- [29] REZAEI NIYA S M, HOORFAR M. Study of proton exchange membrane fuel cells using electrochemical impedance spectroscopy technique-A review[J]. Journal of Power Sources, 2013, 240: 281-293. DOI:10.1016/j.jpowsour.2013.04.011.
- [30] HEIDARI H, ESMAILI Q, RANJBAR A A. Model-based diagnosis of proton-exchange membrane fuel cell cathode catalyst layer microstructure degradation[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(15): 24408-24423. DOI:10.1002/er.8755.
- [31] DIERICKX S, WEBER A, IVERS-TIFFÉE E. How the distribution of relaxation times enhances complex equivalent circuit models for fuel cells[J]. Electrochimica Acta, 2020, 355: 136764. DOI:

- 10.1016/j.electacta.2020.136764.
- [32] XIAO F, CHEN T, PENG Y L, et al. Fault diagnosis method for proton exchange membrane fuel cells based on EIS measurement optimization[J]. Fuel Cells, 2022, 22(4): 140-152. DOI:10.1002/fuce.202200083.
- [33] REN P, PEI P C, LI Y H, et al. Diagnosis of water failures in proton exchange membrane fuel cell with zero-phase ohmic resistance and fixed-low-frequency impedance[J]. Applied Energy, 2019, 239: 785-792. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2019. 01.235.
- [34] LI Q, WANG H L, WANG T H, et al. Online diagnosis method of water management faults based on hybrid-frequency electrochemical impedance spectroscopy for PEMFC[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 2707-2716. DOI:10.1109/TTE.2024.3427401.
- [35] NAJAFI B, BONOMI P, CASALEGNO A, et al. Rapid fault diagnosis of PEM fuel cells through optimal electrochemical impedance spectroscopy tests[J]. Energies, 2020, 13(14): 3643. DOI:10.3390/en13143643.
- [36] LIU J, XIE W Q, XIAO X L, et al. Temporal-spatial waveform fault attention design for PEMFC fault diagnosis via permutation feature importance in smart terminal[J]. Processes, 2026, 14(1): 18. DOI:10.3390/pr14010018.
- [37] YU D, LI X J, ARAYA S S, et al. A novel method of EIS application in online fault diagnosis of high-temperature PEMFC with CNN[J]. Journal of Power Sources, 2025, 639: 236663. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.236663.
- [38] SHIN S, KIM J, LEE S, et al. Multimodal data-driven prediction of PEMFC performance and process conditions using deep learning [J]. IEEE Access, 2024, 12: 168030-168042. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3472849.
- [39] JIANG Z, YANG B, ZHENG R Y, et al. Fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cell using multiple convolutional neural networks with multi-scale attention mechanism[J]. Information Sciences, 2025, 720: 122524. DOI:10.1016/j.ins.2025.122524.
- [40] ISERMANN R. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods—An introduction[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(5): 639-652. DOI:10.1016/S0967-0661(97)00046-4.
- [41] SCHOPEN O, NARAYAN S, BECKMANN M, et al. An EIS approach to quantify the effects of inlet air relative humidity on the performance of proton exchange membrane fuel cells: A pathway to developing a novel fault diagnostic method[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 58: 1302-1315. DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.01.218.
- [42] 刘相万, 杨扬, 朱文超, 等. 基于二阶 RQ-RLC 模型的质子交换膜燃料电池水管理故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7893-7904.
- LIU X W, YANG Y, ZHU W C, et al. Second-order RQ-RLC model-based fault diagnosis for water management in proton exchange membrane fuel cells[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2022, 42(21): 7893-7904.
- [43] XIAO F, CHEN T, GAN Z Y, et al. The influence of external operating conditions on membrane drying faults of proton-exchange membrane fuel cells[J]. Energy, 2023, 285: 128787. DOI:10.1016/j.energy.2023.128787.
- [44] 鲜亮, 肖建, 贾俊波. 质子交换膜燃料电池交流阻抗谱实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 101-106.
- XIAN L, XIAO J, JIA J B. An experimental study on AC impedance spectroscopy of proton exchange membrane fuel cell [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(35): 101-106.
- [45] 郭泽林. 质子交换膜燃料电池的故障诊断与容错控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- GUO Z L. Fault diagnosis and fault-tolerant control of proton exchange membrane fuel cell[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [46] NIE Z H, WANG L, LIU Z Y, et al. Data-driven fault diagnosis method for PEMFC based on NCA-KNN[C]//2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). August 5-8, 2024. Kristiansand, Norway. IEEE, 2024: 1-6.. DOI: 10.1109/iciea61579.2024.10664835.
- [47] ZHENG Z X, MORANDO S, PERA M C, et al. Brain-inspired computational paradigm dedicated to fault diagnosis of PEM fuel cell stack[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (8): 5410-5425. DOI:10.1016/j.ijhydene.2016.11.043.
- [48] MORANDO S, PERA M C, STEINER N Y, et al. Fuel cells fault diagnosis under dynamic load profile using reservoir computing [C]//2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). October 17-20, 2016, Hangzhou. IEEE, 2016: 1-6. DOI: 10.1109/VPPC.2016.7791693.
- [49] SORRENTINO A, SUNDMACHER K, VIDAKOVIC-KOCH T. Polymer electrolyte fuel cell degradation mechanisms and their diagnosis by frequency response analysis methods: A review[J]. Energies, 2020, 13(21): 5825. DOI:10.3390/en13215825.
- [50] SCHULZE M, WAGNER N, KAZ T, et al. Combined electrochemical and surface analysis investigation of degradation processes in polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(6): 2328-2336. DOI:10.1016/j.electacta.2006.05.063.
- [51] 王筱彤, 李奇, 王天宏, 等. 基于离散区间二进制序列激励信号的燃料电池 EIS 测量及故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (14): 4526-4537. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.191043.
- WANG X T, LI Q, WANG T H, et al. EIS measurement based on DIBS excitation signal and fault diagnosis method of fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4526-4537. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191043.
- [52] YU D, LI X J, ARAYA S S, et al. Online data-driven fault detection for the HTPM fuel cells based on EIS: Equivalent electrical circuit model analysis[C]//2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). May 17-20, 2024, Chengdu, China. IEEE, 2024: 78-83. DOI:10.1109/IPEMC-ECCEAsia60879.2024.10567661.
- [53] 黄赵军, 苏建徽, 解宝, 等. 基于模糊 C 均值聚类和概率神经网络的 PEMFC 故障诊断方法研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 475-483.
- HUANG Z J, SU J H, XIE B, et al. Research on pemfc fault diagnosis method based on fuzzy c means clustering and

- probabilistic neural network[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2024, 45(1): 475-483.
- [54] SHI Y, HE W, XIE B, et al. PEMFC fault diagnosis based on an equivalent circuit and OS-ELM framework[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(1): 1277-1287. DOI: 10.1109/TIA.2023.3313134.
- [55] JEON M K, WON J Y, OH K S, et al. Performance degradation study of a direct methanol fuel cell by electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 53(2): 447-452. DOI: 10.1016/j.electacta.2007.06.063.
- [56] GERLING C, HANAUER M, BERNER U, et al. PEM single cells under differential conditions: Full factorial parameterization of the ORR and HOR kinetics and loss analysis[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2022, 169(1): 014503. DOI: 10.1149/1945-7111/ac44ba.
- [57] BEVILACQUA N, ASSET T, SCHMID M A, et al. Impact of catalyst layer morphology on the operation of high temperature PEM fuel cells[J]. *Journal of Power Sources Advances*, 2021, 7: 100042. DOI:10.1016/j.powera.2020.100042.
- [58] ZHANG W Q, MARUTA T, SHIRONITA S, et al. Anode and cathode degradation in a PEFC single cell investigated by electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 131: 245-249. DOI:10.1016/j.electacta.2014.02.054.
- [59] YILMAZ A, PASAOGULLARI U. Contamination of Pt catalyst with carbon monoxide during hydrogen evolution[J]. *ECS Transactions*, 2019, 92(8): 411-418. DOI:10.1149/09208.0411ecst.
- [60] XU K, ZHAO X Y, HU X, et al. The review of the degradation mechanism of the catalyst layer of membrane electrode assembly in the proton exchange membrane fuel cell[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 558 (5): 052041. DOI:10.1088/1755-1315/558/5/052041.
- [61] PROKOP M, DRAKSELOVA M, BOUZEK K. Review of the experimental study and prediction of Pt-based catalyst degradation during PEM fuel cell operation[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020, 20: 20-27. DOI: 10.1016/j.coelec. 2020. 01.016.
- [62] GRANDI M, GATALO M, KAMŠEK A R, et al. Mechanistic study of fast performance decay of PtCu alloy-based catalyst layers for polymer electrolyte fuel cells through electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Materials*, 2023, 16(9): 3544. DOI: 10.3390/ma16093544.
- [63] MAURYA S, LEE A S, LI D G, et al. On the origin of permanent performance loss of anion exchange membrane fuel cells: Electrochemical oxidation of phenyl group[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 436: 226866. DOI: 10.1016/j.jpowsour. 2019. 226866.
- [64] LI Q H, HU M X, GE C X, et al. Ionomer degradation in catalyst layers of anion exchange membrane fuel cells[J]. *Chemical Science*, 2023, 14(38): 10429-10434. DOI:10.1039/d3sc03649a.
- [65] ZHOU Z P, NADIMPALLI V K, PEDERSEN D B, et al. Degradation mechanisms of metal-supported solid oxide cells and countermeasures: A review[J]. *Materials*, 2021, 14(11): 3139. DOI:10.3390/ma14113139.
- [66] CHANG J S, JIAO M H, ZHANG P P, et al. Analyzing the degradation mechanism of solid oxide fuel cell during different time periods[J]. *Electrochimica Acta*, 2024, 498: 144615. DOI: 10.1016/j.electacta.2024.144615.
- [67] REN P, PEI P C, LI Y H, et al. Degradation mechanisms of proton exchange membrane fuel cell under typical automotive operating conditions[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020, 80: 100859. DOI:10.1016/j.pecs.2020.100859.
- [68] LIM C, GHASSEMZADEH L, VAN HOVE F, et al. Membrane degradation during combined chemical and mechanical accelerated stress testing of polymer electrolyte fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 257: 102-110. DOI:10.1016/j.jpowsour.2014.01.106.
- [69] KHAN S S, SHAREEF H, IBRAHIM A A. Improved semi-empirical model of proton exchange membrane fuel cell incorporating fault diagnostic feature[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1566-1573. DOI: 10.35833/MPCE. 2019.000179.
- [70] KUSOGLU A, TANG Y L, SANTARE M H, et al. Stress-strain behavior of perfluorosulfonic acid membranes at various temperatures and humidities: Experiments and phenomenological modeling[J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2009, 6: 011012. DOI:10.1115/1.2971069.
- [71] CHEN S Y, HAO M S, HU Y B, et al. Insight into the evolution of membrane chemical degradation in proton exchange membrane fuel cells: From theoretical analysis to model developing[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 599: 234238. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.234238.
- [72] ALIAS M S, KAMARUDIN S K, ZAINOODIN A M, et al. Structural mechanism investigation on methanol crossover and stability of a passive direct methanol fuel cell performance *via* modified microporous layer[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(9): 12928-12943. DOI:10.1002/er.6624.
- [73] CHUN H, CHANG J H, KIM J W, et al. Durability analysis of polymer electrolyte membrane fuel cell's gas diffusion layer based on distribution relaxation time analysis: Influence of the presence or absence of a micro-porous layer[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 71: 831-844. DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.05.154.
- [74] JUNG S Y, MORTAZAVI M. Transient characteristics of in-plane water transport in gas diffusion layers of PEM fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 51: 1584-1593. DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.10.055.
- [75] YURKIV V. Reformate-operated SOFC anode performance and degradation considering solid carbon formation: A modeling and simulation study[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 143: 114-128. DOI:10.1016/j.electacta.2014.07.136.
- [76] DU K, SONG C, YUAN B, et al. Degradation analysis of plasma sprayed metal-supported solid oxide fuel cell: The evolution of electrode processes under polarization[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 621: 235298. DOI: 10.1016/j.jpowsour. 2024.

- 235298.
- [77] JI M B, WEI Z D. A review of water management in polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *Energies*, 2009, 2(4): 1057-1106. DOI:10.3390/en20401057.
- [78] FREIRE T J P, GONZALEZ E R. Effect of membrane characteristics and humidification conditions on the impedance response of polymer electrolyte fuel cells[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2001, 503(1/2): 57-68. DOI:10.1016/S0022-0728(01)00364-3.
- [79] HUANG Y L, PELLEGRINELLI C, WACHSMAN E D. Fundamental impact of humidity on SOFC cathode ORR[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(3): F171-F182. DOI:10.1149/2.0221603jes.
- [80] LEE H, KIM J, BAEK J, et al. Effects of water on the degradations in the Ni-YSZ anode of the direct ammonia solid oxide fuel cells[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154764. DOI:10.1016/j.cej.2024.154764.
- [81] MENG K, CHEN B, ZHOU H R, et al. Experimental investigation on voltage response characteristics of hydrogen-oxygen proton exchange membrane fuel cells under gas starvation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 268: 115973. DOI:10.1016/j.enconman.2022.115973.
- [82] XIA Z F, CHEN H C, LI W H, et al. Characterization and analysis of current distribution for oxygen starvation diagnosis: A research based on segmented PEMFC technology[J]. *Renewable Energy*, 2024, 237: 121757. DOI:10.1016/j.renene.2024.121757.
- [83] YU D, LI X J, ARAYA S S, et al. Data-driven diagnosis of high temperature PEM fuel cells based on the electrochemical impedance spectroscopy: Robustness improvement and evaluation[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 96: 544-558. DOI:10.1016/j.jechem.2024.05.014.
- [84] ZHANG J H, GUO H D, LEI L B, et al. Experimental investigation of fuel starvation on industrial-sized solid oxide fuel cells using segmented cathodes and area specific resistances[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 562: 232725. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.232725.
- [85] XIA Z F, CHEN H C, SHAN W C, et al. Behavior of current distribution evolution under reactant starvation conditions based on a single polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) with triple-serpentine flow field: An experimental study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(36): 13650-13668. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.187.
- [86] NUSEV G, MOREL B, MOUGIN J, et al. Condition monitoring of solid oxide fuel cells by fast electrochemical impedance spectroscopy: A case example of detecting deficiencies in fuel supply[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 489: 229491. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229491.
- [87] DEVIANTO H, SIMONETTI E, MCPHAIL S J, et al. Electrochemical impedance study of the poisoning behaviour of Ni-based anodes at low concentrations of H₂S in an MCFC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(24): 19312-19318. DOI:10.1016/j.ijhydene.2012.03.110.
- [88] ANDREASEN S J, MOSBÆK R, VANG J R, et al. EIS characterization of the poisoning effects of CO and CO₂ on a PBI based HT-PEM fuel cell[C]// ASME 2010 8th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, June 14-16, 2010, Brooklyn, New York, USA. 2010: 27-36. DOI: 10.1115/FuelCell2010-33054.
- [89] YAN H Z, ZHANG B X, CHEN Z L, et al. Deep learning-based fault diagnosis of solid oxide fuel cells fueled by the syngas containing carbon monoxide and hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2026, 198: 152572. DOI:10.1016/j.ijhydene.2025.152572.
- [90] LI M, WANG X, et al. Chromium-induced interfacial deactivation in SOFCs under practical conditions: Mechanistic insights into chromium sources and current load effects[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(34): 49029-49037. DOI:10.1021/acsami.5c12498.
- [91] SIMON ARAYA S, ZHOU F, LENNART SAHLIN S, et al. Fault characterization of a proton exchange membrane fuel cell stack [J]. *Energies*, 2019, 12(1): 152. DOI:10.3390/en12010152.
- [92] YU H Y, FRANTZ C, SAVIOZ L, et al. Poisoning and recovery behavior of Ni-GDC based electrolyte-supported solid oxide fuel cell exposed to common sulfur compounds under processed biogas environment[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 642: 236901. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.236901.
- [93] SALIM R I, NOURA H, FARDOUN A. A review on fault diagnosis tools of the proton exchange membrane fuel cell[C]//2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol). October 9-11, 2013, Nice, France. IEEE, 2014: 686-693. DOI: 10.1109/SysTol.2013.6693877.
- [94] GWAK G, LEE J, GHASEMI M, et al. Analyzing oxygen transport resistance and Pt particle growth effect in the cathode catalyst layer of polymer electrolyte fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(24): 13414-13427. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.080.
- [95] SALEH F S, EASTON E B. Diagnosing degradation within PEM fuel cell catalyst layers using electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2012, 159(5): B546-B553. DOI:10.1149/2.098205jes.
- [96] HU Z Y, XU L F, GAN Q Q, et al. Carbon corrosion induced fuel cell accelerated degradation warning: From mechanism to diagnosis[J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 389: 138627. DOI: 10.1016/j.electacta.2021.138627.
- [97] CASTANHEIRA L, DUBAU L, MERMOUX M, et al. Carbon corrosion in proton-exchange membrane fuel cells: From model experiments to real-life operation in membrane electrode assemblies[J]. *ACS Catalysis*, 2014, 4(7): 2258-2267. DOI: 10.1021/cs500449q.
- [98] ZHU C Y, XING Y J. Effect of high potential on carbon corrosion of cathode catalyst layer in proton exchange membrane fuel cells [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2025, 172(3): 034511. DOI:10.1149/1945-7111/adbec2.
- [99] LIU F F, GAO Z L, SU J Z, et al. Understanding the process of

- carbon corrosion and its impact on performance degradation during simulated start-stop operations for the proton exchange membrane fuel cell[J]. *Electrochimica Acta*, 2023, 468: 143193. DOI:10.1016/j.electacta.2023.143193.
- [100] CARRABBA G M, SARTORETTI E, PARISI E, et al. Carbon corrosion resistance in PEM fuel cells: Comparative study of short and long side chain perfluorosulfonic acid ionomers[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 133: 546-559. DOI:10.1016/j.ijhydene.2025.04.262.
- [101] 宋明, 夏凡辰, 王炳英, 等. 梯度孔隙阳极对固体氧化物燃料电池蠕变损伤影响[J]. *硅酸盐学报*, 2025, 53(8): 2219-2228.
- SONG M, XIA F C, WANG B Y, et al. Effect of gradient porosity in anodes on creep damage in solid oxide fuel cells[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 53(8): 2219-2228.
- [102] ONANENA R, OUKHELLOU L, CANDUSSO D, et al. Estimation of fuel cell operating time for predictive maintenance strategies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(15): 8022-8029. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.039.
- [103] WANG Y J, LIU H M, LU C, et al. PEM fuel cell health state assessment using a geometrical approach and mahalanobis distance[C]//2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). June 12-15, 2016, Guilin, China. IEEE, 2016: 1312-1316. DOI:10.1109/WCICA.2016.7578457.
- [104] LI Q, GAO Z B. A similarity-based prognostics approach for full cells state of health[C]//2014 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2014 Hunan). August 24-27, 2014. Zhangjiajie City, China. IEEE, 2014: 279-283.. DOI: 10.1109/phm.2014.6988179.
- [105] VIANNA W O L, DE MEDEIROS I P, SANTOS AFLALO B, et al. Proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) impedance estimation using regression analysis[C]//2014 International Conference on Prognostics and Health Management. June 22-25, 2014. Cheney, WA, USA. IEEE, 2014: 1-8.. DOI: 10.1109/icphm.2014.7036404.
- [106] HUANG H D, ZHANG Z J, XIAO C L, et al. Water management fault diagnosis by operando distribution of relaxation times analysis for anion exchange membrane fuel cells[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(28): 2505304. DOI: 10.1002/adv. 2025 05304.
- [107] ZOHRA ARAMA F, LARIBI S, MAMMAR K, et al. Efficient water-related failure detection in PEM fuel cells: Combining a PEMFCs fractional order impedance model with FFT-PWM techniques and artificial neural network classification[J]. *Heliyon*, 2024, 10(7): e29084. DOI: 10.1016/j. heliyon. 2024. e29084.
- [108] MOUSSAOUI H, HAMMERSCHMID G, VAN HERLE J, et al. Fast online diagnosis for solid oxide fuel cells: Optimisation of total harmonic distortion tool for real-system application and reactants starvation identification[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 556: 232352. DOI:10.1016/j.jpowsour.2022.232352.
- [109] LE G T, MASTROPASQUA L, ADLER S B, et al. Operando diagnostics of solid oxide fuel cell stack via electrochemical impedance spectroscopy simulation-informed machine learning [J]. *ECS Transactions*, 2021, 103(1): 1201-1211. DOI:10.1149/10301.1201ecst.
- [110] SUBOTIĆ V, BALDINELLI A, BARELLI L, et al. Applicability of the SOFC technology for coupling with biomass-gasifier systems: Short- and long-term experimental study on SOFC performance and degradation behaviour[J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113904. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113904.