

质子交换膜燃料电池水淹和膜干故障诊断研究综述

西安交通大学电气工程学院 张雪霞

质子交换膜燃料电池以其高能量转换率、无污染、启动速度快、运行温度低等优势，在新能源机车、有轨电车、汽车、便携式电源及分布式发电等领域受到广泛的青睐。西南交通大学研发的首辆PEMFC机车“蓝天号”及联合中车唐山机车车辆有限公司研制的世界首列燃料电池/超级电容混合动力100%低地板有轨电车展示了PEMFC在机车领域的发展趋势。然而，目前PEMFC制造成本高、寿命较短、稳定性较差等不足，阻碍了PEMFC大规模的商业推广与应用。

PEMFC是一种多物理场耦合的非线性复杂系统，许多因素影响其水管理故障，尤其随PEMFC功率增大，水淹和膜干故障更易发生，导致系统的耐久性降低，工作性能受影响，甚至剩余寿命缩短。

准确揭示PEMFC水淹和膜干故障产生机理、有效诊断水淹和膜干故障状态以及探寻水淹和膜干故障发生后的解决措施，已逐渐成为研究焦点。

1 PEMFC水淹和膜干故障

1.1 PEMFC内部水传递机理

PEMFC电堆在运行过程中，电堆内部的水主要源于阴/阳极气体增湿水及阴极侧电化学反应生成的水。电堆内部水的排出方式主要是阴极侧反应剩余气体排气、阴极侧脉冲排气和阳极侧脉冲排气三种方式。水在电堆内部的传输包括“电拖曳作用”和“反渗透作用”等。在反应过程中，质子交换膜需充分湿润，这是因为在阳极催化剂层产生的质子是水合质子(H₃O⁺)的形式进行传输，因此，质子会将部分阳极侧的水带到阴极侧，该过程称为“电拖曳作用”。由于氢质子和电子到达阴极侧催化剂层与氧气发生反应生成水，而阳极侧没有水的产生，故膜两侧的水存在浓度差，阴极侧的水会通过膜扩散到阳极侧，该过程称为“反渗透作用”。PEMFC电堆内部水迁移如图1所示。

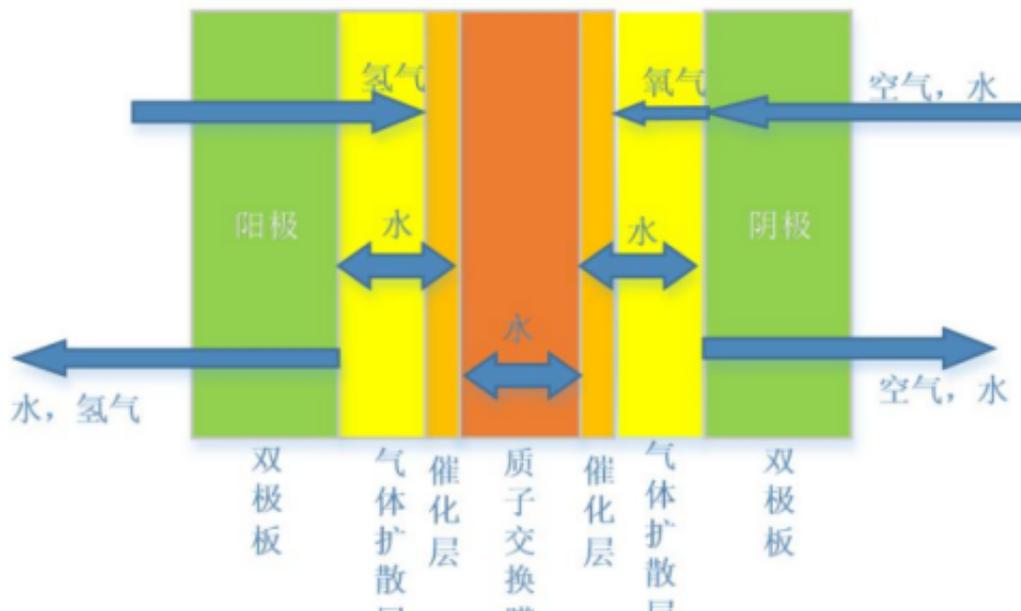


图1 PEMFC内部水迁移示意

1.2 水淹和膜干故障的产生机理

在PEMFC的运行过程中，质子传导率与膜水含量密切相关，因此，良好的输出性能对应充分湿润的质子交换膜。然而电池内部水含量过高会产生水淹故障，而水含量不足则会导致膜干故障。气体扩散层和流道的水淹使得气体反应物到达反应位点的传输受阻，催化剂的活性面积因水的覆盖而降低，PEMFC的活化损耗和浓差损耗显著增加。膜干故障会引起电阻率上升，使得PEMFC在运行过程中产热增加，进一步导致能量转化效率降低及更为严重的膜干故障

,甚至膜撕裂,严重影响输出性能和剩余寿命。

在水淹和膜干故障的众多机理研究中,ZHAN等对PEMFC的水传递机理进行了数值模拟研究,发现大孔隙率的气体扩散层、气体扩散层和催化剂层间微孔层的存在能通过直径更大的水滴,防止水滴堵塞孔隙,能够更加有效的避免水淹故障的产生。CAI等对PEMFC的流道接触角和流道材料通过数值模拟进行了分析,发现流道接触角为 90° 时,流道壁会形成一层水膜,水膜进一步分裂后形成的大水滴会阻碍流道的水传递,引起水淹故障的发生。JING和ZHANG等的实验研究中,大电流密度时,电拖曳作用过强导致阳极侧出现缺水或膜干故障、欧姆阻抗增加;大电流密度和高相对湿度条件下,电池中过量的水因堵塞流道和扩散层孔隙而无法及时排出,导致电池出现水淹故障。ZHAO利用水入侵-蒸发实验模拟干湿循环对PEMFC内部结构的影响,研究结果表明,水淹-膜干循环会造成催化剂凝聚颗粒急剧增大,并伴随着针孔和催化剂撕裂等不可逆的损伤,导致PEMFC长期的性能衰退。

上述的机理研究表明,水淹和膜干故障对电池性能和内部结构具有严重的不可逆损害,但可从材料、内部结构以及操作条件避免或缓解PEMFC的水淹和膜干故障。

1.3水淹和膜干故障的影响因素

在PEMFC运行时,外部条件会影响内部水含量和水的传输方向,进而影响电堆性能。常见的影响因素包括电堆电流、电堆温度、电堆阴阳极进气压力、流量、湿度等。

当PEMFC需要大功率出力时,电流会随之增大,此时电堆内部电迁移增加,阴极侧水量积聚。张金辉提出在大电流密度下反应生成的水更多,阴极侧的水为电拖曳作用携带的水与阴极生成的水之和,故大量的水积聚在阴极。此时,如不能及时将水排出,就可能引起水淹故障的发生。

PEMFC电堆温度会影响水蒸气析出的液态水量。当电堆电流较小而电堆温度较高时,会出现膜脱水,甚至膜干现象。Br è queF等提出燃料电池操作条件不当会打破电堆水平衡,从而导致水淹和膜干故障的发生,并通过实验测试得到不同操作条件对电池内部湿度影响的占比,实验结果表明,在湿度的影响因子中,电堆温度相较阴极气体化学计量比更为显著。

氢气和氧气进入电堆需要一定的压力以保持气体的流动,膜两侧的压力差对水具有压力迁移作用,推动水在膜中的传递。戴朝华等人提出湿度过高、气体流速过低以及电堆内部压力过大都可能引起反应物分布不均,导致流道内阻力变化,造成气体扩散电极的腐蚀以及流道阻塞,最终引发水淹故障。

上述研究分析表明,电堆中的水含量和水迁移主要受电流、温度、气体压力及压力差等因素影响。在运行时因参数设置不当导致热管理和水管理出现失衡时,电堆内部会出现液态水堆积无法排出或者质子交换膜含水过少而影响质子的传导,由此PEMFC进入水淹和膜干的不健康运行状态。

1.4水淹和膜干故障的诊断指标

现有的PEMFC故障诊断中,水淹和膜干的定义和诊断指标尚未拥有统一的标准。常见的诊断指标有电压、压力降、电化学阻抗谱等。

1.4.1电压指标

在PEMFC运行过程中,当发生水淹时,输出电压出现大幅下降并伴随着剧烈波动。然而,电压指标很难准确诊断膜干,这是由于膜干发生时,输出电压仅出现因膜电阻增大而引起的下降,未伴随剧烈波动,与操作条件不当导致的电压下降难以区分。

1.4.2压力降指标

针对压力降指标,主要分为基于直接压力降、压力降偏差、压力降频率和两相流乘数等指标。

(1)直接压降

直接压降指气体进口处与出口处的压力差,主要用于PEMFC水淹的趋势分析,可分为阳极压力降和阴极压力降。当发生水淹时,阴极压力降逐渐增加直到平衡,此时由于浓度梯度的影响,阴极侧的水反渗透到阳极使阳极侧水含量增

加,进一步导致阳极压力降增加。当发生膜干时,此时膜内水含量极低,压力降几乎不变,故膜干不能由直接压力降单一表征。但膜干时电池的输出电压因膜电阻的增加而减小,故可结合直接压力降和电压这两个指标诊断膜干故障。

(2)压力降偏差

压力降偏差指PEMFC实际运行过程中的压力降与理论计算的压力降之间的差值,可用于表征PEMFC的水淹、正常和膜干状态。文献利用阳极压力降偏差验证了水淹形成过程中水在流道和气体扩散层的四种存在形式。文献将3- σ 原理应用于该指标,准确区分了PEMFC的工作状态。此外,研究人员结合压力降偏差与人工神经网络(ANN)算法,对水淹和膜干进行了诊断。

(3)压力降频率压力降频率指有源PEMFC的数据采集系统以不同频率运行,进而获取不同频率下的压力降。基于压力降频率,可通过Fourier变换、小波变换等方法提取特征频率获取PEMFC内部水含量的动态变化。

(4)两相流乘数两相流乘数指液态水在两相流中的影响,可由单相流压力降和两相流压力降推导得出。基于两相流乘数的指标,低温时的高乘数可用于表征水淹,高温时的低乘数则可反映膜干。在上述压力降指标中,直接压力降一般用于单相流诊断应用,而压力降偏差广泛地应用于单相流、两相流的故障诊断。

1.4.3阻抗谱

PEMFC的阻抗谱一般可由EIS测量仪器获得,其中高频电阻和低频阻抗可分别作为膜干和水淹故障的诊断指标。这是由于膜电阻可近似由阻抗谱的高频电阻进行描述,高频电阻越大,表明膜的质子传导率越低,膜水含量越低。在阻抗谱中,低频阻抗可描述电池的质量传输电阻,根据PEMFC水传输机理可知,水淹会堵塞气体扩散层和流道,导致气体的质量传输电阻增大。

1.4.4诊断指标小结

除上述常见的指标外,全睿将膜的相对湿度80%作为水淹的诊断指标,相对湿度40%作为膜干的诊断指标。B.M.Boskoska等通过数据采集、信号处理、统计分析和信息聚集等手段获取了一个能够良好地表征水淹、膜干以及其故障严重性的判断指标,该指标能适用于水淹和膜干的在线诊断。

上述电压、压力降和阻抗谱三个指标中,电压和压力降可用于在线诊断与故障预测。压力降能够准确的判断水淹和膜干,但对电堆中的故障片难以有效诊断。此时可通过电化学阻抗谱或电压监测法进行故障电池的准确定位。电化学阻抗谱中阻抗指标能精准描述水管理故障的特征及定位故障单片,但需要大量时间获取阻抗信息,在商业应用和实时控制领域,基于电化学阻抗谱的在线诊断需要进一步研究。

1.5水淹和膜干故障的危害

随着液态水的不断堆积,最终覆盖气体扩散层和催化剂层表面,降低催化层活性、加快材料的腐蚀和催化剂的流失、减少活性面积,甚至出现液态水在气体流道内集聚,导致气体流通不畅,严重影响PEMFC的运行、性能和剩余寿命。YANG等观察到电堆经常会出现阳极水淹,阻碍氢气的流动和扩散,引起局部氢饥饿,从而导致催化层的碳腐蚀。OwejanJP等发现水淹还会导致输出电压不稳定。华周发的研究得出,水淹会增大反应物通过扩散层到达催化层的传质阻力,降低电池输出功率,甚至使膜的局部发生溶胀,对膜造成损伤,严重时导致反极现象。St-PierreJ等发现水淹不仅会瞬间降低电堆性能,还会减少电堆的剩余寿命。

膜干是水管理和热管理不当引起的水分蒸发或流失太快而导致的质子交换膜含水量过低。在PEMFC中质子交换膜用于传导质子,而质子的传导过程需要水分子作为载体,故膜干发生时质子传导率会大幅下降,影响电池正常运行;同时,膜电阻增大,电流通过膜时的产热增加,严重时会导致局部过热而灼烧质子交换膜。若长期处于膜干状态,干燥区域不断扩大,最终导致整个膜干化破裂,造成不可逆的损害。张洪霞等将电堆在膜干状态下长期运行,发现电堆性能变差,利用光学显微镜观察膜的内部构造,如图2所示,观察到膜的物理降解速度加快,进而发生膜穿孔,甚至裂纹。

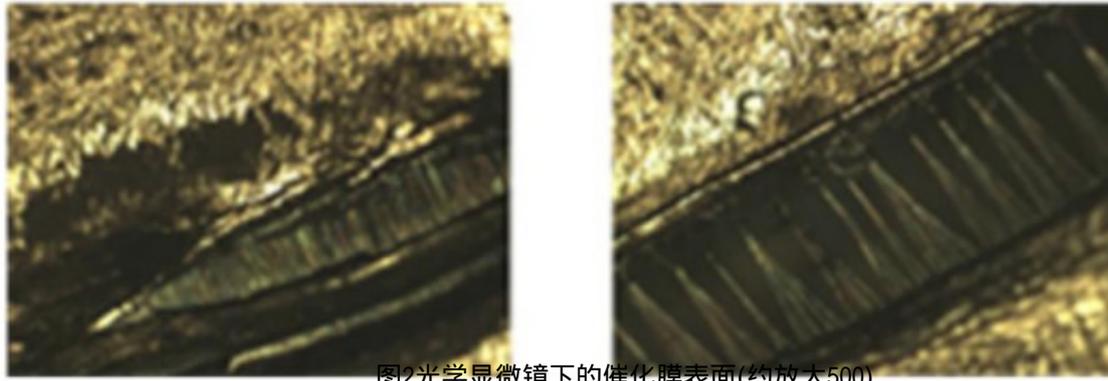


图2光学显微镜下的催化膜表面(约放大500)

2水淹和膜干故障的诊断方法

目前对PEMFC水淹和膜干故障的诊断方法,主要是基于模型、实验和数据驱动这三种诊断方法。

2.1基于模型方法的水淹和膜干故障诊断

基于模型的诊断方法主要是通过数学模型来模拟电池运行状态。郭家兴等采用工业常用的故障诊断方法,即首先建立对象模型,然后根据模型输出,对PEMFC发电系统进行故障诊断。并提出了一种适用于在线诊断的双输入单输出的一维T-S模糊模型,通过输入电压、电流值,基于模糊逻辑对PEMFC进行建模,最终以设定模型输出的阈值和模型输出变化率的阈值诊断水淹和膜干故障。该论文仅对单电池进行实验,而电堆中各单片电池间具有强耦合性、差异性和相关性,且单片电压巡检系统还增加了系统复杂程度和系统故障率。

周苏等在基于COMSOL+Multiphysics3.5平台建立PEMFC二维分布参数模型研究水淹和膜干故障。通过对比故障前后PEMFC内部相应物理量的变化,对故障嵌入可行性进行了验证。该模型验证了不同典型故障下,电压降的程度和类型。间接表明可通过检测单片电池电压变化来判断故障类型。

魏雨辰等通过建立PEMFC半机理半经验的动态模型,对燃料电池水淹和膜干故障进行仿真,对比由该模型的快速EIS方法和实验方法获得的Nyquist图和Bode图,验证了基于模型仿真和快速EIS方法的结果的正确性,初步实现了故障识别和分类,为基于模型的诊断方法提供了借鉴。Gebregergis等通过PEMFC单片电池电压和阻抗响应来识别水淹和膜干,并采用低频阻抗响应来阐明故障原因,同时对C模型(resistivecapacitive, Cmodel)和CPE模型(resistiveconstant-phase-element, CPEmodel)进行了比较,结果表明CPE模型更符合实际情况,但对模型的精确度有很高的要求。

Giurgea等结合基于模型诊断和基于信号诊断方法的优点,提出一种新的故障检测方法:基于单片电池电压和电堆的逆向射流模型统计分析单片电压的方差和相关电压的下降评估水淹的概率,并通过一500W电堆的实验结果验证了该方法的有效性。

上述研究中,T-S模糊模型将PEMFC内部作为黑箱模型,以输入输出的关系来表征水淹和膜干故障,该方法无需精准的PEMFC模型,但存在参数的辨识问题。基于模型的EIS方法具有准确区分故障类别的优点,是水淹和膜干故障研究中常用的工具,但以频率扫描的方式测量阻抗耗时长,针对大功率PEMFC电堆的在线故障诊断需进一步研究。基于三维建模软件对PEMFC的模型研究,其能直观地表征故障和正常时水含量在电池内部的分布,但仅针对单片电池进行了研究。PEMFC大功率电堆及多堆运行系统存在着强耦合性、滞后性、约束性、不确定性和随机干扰等特点,上述方法在实际中的应用及推广,亟待进一步深入研究。

2.2基于实验方法的水淹和膜干故障诊断

基于实验方法对PEMFC的水淹和膜干故障的诊断,主要测量的参数有电压、膜内阻、气体进出口压力降等。

2.2.1基于阳极气体压力降诊断

水淹和膜干故障文献和发现阳极气体压力降可视为水淹的可靠指标,阻抗可作膜干指标,进而可通过监测阳极压力降和阻抗来判断水淹和膜干。通过测量电池的阳极进出口压力差估算气体扩散层中的水饱和度来判断电池内部水的状态。研究发现单片电压巡检系统会增加系统故障,不宜用于故障诊断,故通过阳极压力降进行水淹判断,利用在线测

量欧姆阻抗诊断膜干。通过测量电堆正常运行时的阳极气体压力降和水淹状态下的压力降进行对比发现: 正常运行时的阳极压力降与电流密度成正比; 而水淹时的输出电压下降, 阳极压力降明显升高。

宋满存通过实验验证了采用阳极压力降进行水淹诊断的可行性。通过测量实际阳极气体压力降和理论比较, 发现二者的差值随着电堆水淹程度的加深而增大。该方法可用于判断发生水淹的趋势及程度, 但对水淹故障的界限难以有效判断。针对这一问题, 通过实验分析了阳极气压力降在电池水淹过程中的“阶跃平台”的变化特征, 结合电压及阳极流道内水的形态, 将水淹过程划分为无水期、湿润期、过渡期和水淹期四个阶段, 并进行了验证。在后续的研究中, 基于“3-sigma法”的阳极压力降偏差将PEMFC的运行状态分为膜干、正常和水淹态, 在水淹故障发生时, 通过提升运行温度和加快排气频率将PEMFC恢复到正常工作区域。

2.2.2 基于交流阻抗谱和膜内阻诊断水淹和膜干故障

PEMFC中的水含量会影响膜阻抗的大小和交流阻抗谱形状, 但交流阻抗谱和膜内阻不易直接测量。罗良庆讨论了常见的测量质子交换膜内阻或交流阻抗谱的方法: 中断电流法简单常用, 但不适于在线测量; 交流阻抗法的测量精度取决于测试条件下负载的精确幅/相特征, 然而大多负载的精确特征难以获取, 故限制了该方法的推广应用; 高频阻抗法总体较为复杂; EIS测量得到的数据可对PEMFC模型进行曲线拟合和参数估算, 进一步获取如欧姆阻抗、极化阻抗、双层电容效应以及扩散阻抗等重要参数, 利用上述数据可全面准确地分析电池的运行性能以实现电池的健康状态监测和水管理诊断。

LeCanut等研究发现, 在恒电流工况下实验, 水淹和膜干均会使得输出电压和膜阻抗随时间变化, 当仅依据输出电压变化难以分辨故障类型时, 阻抗变化便可作为辅助的诊断依据。该论文认为膜干会导致所有频率下的阻抗幅值和相位角增大; 而在低频($<10\text{Hz}$)时水淹会引起阻抗幅值增大, 同时在 100Hz 以下时相位角减小; 因此可通过阻抗谱的变化来判断电堆的水淹或膜干状态。谭保华和舒芝锋根据膜内阻和膜湿度的高度相关性, 基于内阻和湿度的经验公式建立膜湿度的软测量方法, 进而通过膜湿度来预测燃料电池内部水的状态。Legros等通过EIS和声发射技术检测(Acoustic-Emission, EA)建立电堆阻抗模型, 并通过实验发现水淹主要影响传递阻抗和阴极Warburg阻抗。鲜亮等人基于交流阻抗谱法验证R(RQ)(RQ)结构的等效电路模型(equivalent circuit model, ECM)参数, 由实验结果观察到低频半圆弧可用于描述阴极水淹程度。Fouquet等利用常相位元件代替电双层电容改进传统的Randles等效电路模型, 基于该模型, 通过测量膜极化电阻和扩散电阻定义了与正常、水淹和膜干条件相关的三个子空间。Kurz等使用EIS方法来诊断水淹和膜干现象。实验结果显示 0.5Hz 处阻抗虚部的测量值和 1kHz 处阻抗实部的测量值可用于区分水淹和膜干。Roy等的研究表明水淹可通过测量阻抗的标准差进行预测, 发生水淹时的电池阻抗和阻抗的标准差具有显著的增加。

LEE等设计了一种新型内嵌的特殊微型传感器, 可沿气体流道和横穿气体流道来检测膜电阻的局部变化, 随后以电阻数据来判断电堆所处的工作状态。但该传感器设计难度大、造价高, 很难推广到实际应用。Debenjak等对一个含80片电池的电堆, 基于EIS测量频率范围从 30Hz 到 300Hz 组成的电堆阻抗谱, 并结合电堆输出电压判断水淹和膜干状态。Roy等测量单电池阻抗来研究水淹过程, 发现水淹是一个渐进的过程, 流道和气体扩散层的几何设计对水淹故障的缓解有较大的影响。Yousfi-Steiner等指出EIS常用于检测燃料电池水淹和膜干, 但检测过程耗时长、设备成本高等缺点使其很难应用于在线诊断。

2.2.3 基于可视化技术研究水淹和膜干故障的动态过程

可视化和图形成像技术用于监测PEMFC内部水分布和水的动态变化, 其主要包括: 中子成像, 直接成像, 核磁共振成像和X射线扫描成像四种技术方法。

Bellows等于1999年首次将中子成像法应用于PEMFC来观察水的分布, 随后其他机构将该技术作为对PEMFC进行无损分析的工具。Gebel等通过小角度中子散射实验观察了透明燃料电池中的水的动态变化情况。Bazylak等通过荧光显微镜和压力传感器研究了水淹中液态水的生成过程及水在气体扩散层和流道的动态过程。Afra等采用透明的气体扩散层对水传输过程进行了可视化研究。利用实验研究了无MPL的GDL, 带 1cmMPL 的GDL和带 2cmMPL 的GDL, 结果表明, 微孔层能够明显改善电池的水淹故障, 提升电池的性能。Garcia-Salaberri等采用了中子成像的液态水分布研究了膜水合和脱水过程, 结果表明, 水合脱水循环是阳极进室中水的周期性冷凝及水滴流入阳极流场引起的。Akitomo等利用X射线成像和极化电压分析了高温高压对PEMFC的影响, 结果表明, 高温时的水蒸气分压过高导致氧分压下降, 且易造成膜干的发生, 从而影响电池性能。张新丰等对核磁共振法、中子成像法、X射线扫描成像、电子扫描成像、光学成像法、共焦显微成像和荧光显微成像法等可视化技术用于研究电堆内水含量及其分布的特征进行了概述。

可视化技术能直观地观察电堆内部水的状态, 该技术可用于优化电堆内的流道等参数以提高电堆性能。但受限于昂贵的设备、技术要求高等, 不适于在线水淹和膜干故障诊断, 且多数可视化技术仅提供定性分析而非定量分析。

2.2.4小结

上述3种主要方法中,基于阳极压力降能够实时在线地反映PEMFC的水淹和膜干故障,并能指导操作条件使PEMFC恢复到正常态,但该方法对电堆中故障片的准确定位较难。针对故障定位问题,基于交流阻抗谱和膜阻抗的方法可依据单片电池的阻抗特征进行准确的故障定位,且能描述整个电堆的阻抗特征。但是,通过频率扫描测试阻抗谱,多次测量取平均值获取单个频率点的阻抗,这些过程具有耗时长缺点,阻碍了其在线诊断应用。当扫描单个频率点来表征阻抗时,用于反映水淹和膜干的阻抗指标,其对应频率点的选取较难,尤其是表征水淹故障的低频阻抗点。可视化技术能直接观察水在电池内部的分布及气液两相的动态变化,有助于PEMFC内部水的机理研究,但成像设备昂贵、需要透明电池、仅适用于实验室研究等不足限制了商业化应用及在线应用。

2.3基于数据驱动方法的水淹和膜干故障诊断

基于数据驱动方法的诊断技术主要基于大量的历史数据分析,且不依赖诊断对象的具体模型。

在文献的研究过程中,首先对PEMFC施加伪随机二进制序列信号(PRBS)激励信号获取大量阻抗数据信息,并将其视为独立的复杂随机变量,随后进行连续小波变换(CWT)、连接函数进行数据融合,再将处理后的数据信息进行统计分析,以连接函数的输出对PEMFC的水淹和膜干及其故障严重性进行诊断,并通过实验数据验证了该诊断方法的有效性。

周苏等基于小波分析方法对电堆电压信号进行处理,根据得到的小波分析图谱的差异来识别故障类型,从而初步实现诊断目的。全睿针对故障的复杂性和识别的不确定性问题,提出了基于信息融合技术的支持向量机(supportvectormachine,SVM)和D-S证据理论(dempster-shaferttheory,DST)的信息融合技术的PEMFC故障诊断方法。

有研究提出不应将电堆作为一个整体进行水淹实验而应考虑单电池间的差异性,并对一个20片电池组成的电堆进行水淹实验,以每片电池的电压作为输入数据,采用Fisher线性判别(Fisherlineardiscrimination,FDA)提取特征,利用高斯混合模型(Gaussianmixturemodel,GMM)进行故障检测并分类,将数据分成不同的健康等级,进而诊断电堆所处状态。对离线的历史数据进行训练,又提出将Fisher线性判别(Fisherlineardiscrimination,FDA)和有向非循环图支持向量机(directedacyclicgraphsupportvectormachine,DAGSVM)相结合,得到用于特征提取的FDA模型和故障分类的DAGSVM模型,基于上述模型进行在线处理实时数据,实现在线诊断。有研究提出使用非模型诊断的方法,首次将RC(reservoircompu ting)方法应用于PEMFC故障诊断,将诊断结果和现有方法进行对比发现RC方法在诊断时长和准确度上均有很大进步。使用LDA-PNN方法对PEMFC的17806组水管理故障样本进行诊断,发现此方法在诊断精度和诊断时间方面均有很大提升,并认为该方法适用于水淹和膜干故障诊断。有研究应用ANN估计了PEMFC的理论压力降来研究基于压力降指标的水淹和膜干故障诊断。

目前,基于数据驱动方法对PEMFC水淹和膜干进行诊断受到广泛关注。该方法能直接利用PEMFC运行时的数据作为训练数据进行测试,通过不同数学算法对数据进行处理来获取水淹、膜干和正常态的特征,再根据特征来判断其余数据下电池的工作状态。基于数据驱动的故障诊断方法可应用于在线诊断、大功率PEMFC电堆及多堆的水淹和膜干故障诊断,针对电堆中故障单片的定位具有较大优势。但算法所需时间、特征分类及故障识别准确率等需进一步改进提升。

3水淹和膜干故障的缓解方法

水热管理不当可能会导致电堆出现水淹、膜干等故障现象,常见的缓解措施有改变脉冲排气,改变运行温度、加湿方式和流道设计结构等。

为改善水传递,CAI等人发现流道采用疏水性的底壁有助于形成脉冲效应,使水更快速的排出,避免流道内水堆积而产生水淹故障。

HAO等对脉冲排气进行了研究,提出在水淹状态下,一段短时间的脉冲排气可让电堆在相对长的时间内保持干燥。张金辉等对阳极压力降设置阈值,达到阈值时通过脉冲排气的手段来缓解水淹;同时对膜阻抗也设置一个阈值,当膜阻抗超过阈值时,增加空气进气湿度来缓解膜干。宋满存等人指出常见的脉冲排气法从实验结果表明仅能缓和一段时间的水淹而未从根本上解决故障;故脉冲排气只能作为严重水淹时的辅助策略。良好地控制水、热管理才能从源头解决水淹和膜干故障。

李桦等提出了一种主副流道分流式的阴极进气加湿方式,并应用基于不同水传输机理的数学模型研究了该新型进气

方式的加湿效果,并用于同时解决膜干和水淹两种故障。仿真结果表明:该阴极进气方式可在节约50%进气加湿用水的同时保证电池性能。遗憾的是该文仅为数值模拟研究,实际应用中的效果有待解决。

Bunmark等提出修改流道的几何设计,如图3所示,并基于实验对比分析了阴、阳极流道向上或向下倾斜20度及方形流道设计时电堆内部的湿度,结果表明:在阴极向下倾斜20度可使电堆性能最佳,并在高湿度时也有较好性能。这是由于该设计可以加强水从阴极到阳极的反渗作用,有助于膜水合作用来提高电导率。

YAN等设计了两种3维流场通道几何结构,并通过实验对数值模型的分析进行验证。其中一种结构为促进氧气对流的波浪形通道,该设计可增强氧气的供应并产生涡流,随后涡流通过惯性将积聚在GDL的水排出;另一种结构为具有梯度深度的波浪形通道,该流道设计能让流体沿流道提升流速,克服了下流区域严重的氧饥饿和水淹情况,使电流分布更加均匀。实验结果表明,这两种流道均能提升电池性能,尤其在大电流密度下。

Afra等通过添加微孔层来减少气体回流、层与层之间的水饱和度等级,以及减小GDL内部非湿润液体的膨胀面积,进而改善电池性能。Akitomo等提到,高温时可通过气体进气压力改善输出性能,该论文还提到在未来的高温高压大功率的发展中,微孔层的孔隙结构和湿润情况的研究及其重要。

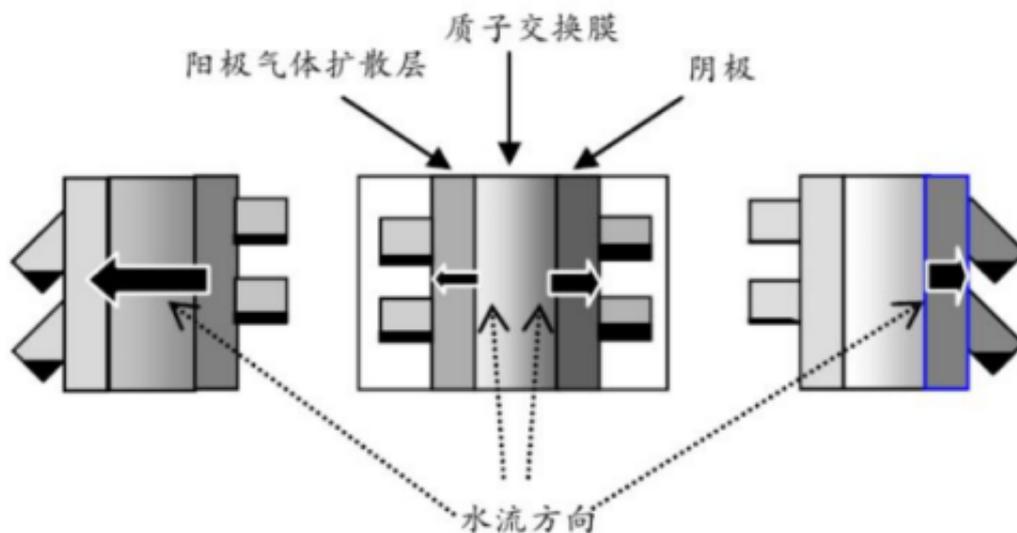


图3三种流道结构-阳极向下倾斜、方形通道、阴极向下倾斜

4结论

4.1总结

PEMFC已有许多成功的商业应用,但易发生水淹和膜干故障引起材料脱落、活化面积减少、膜损坏等不可逆损失,进而导致PEMFC性能、稳定性与耐久性下降甚至寿命衰减,此类问题仍限制着PEMFC的发展。水淹和膜干故障能够发生在PEMFC的不同位置,故完全避免故障的发生十分困难。但历经数十年研究,PEMFC水淹和膜干故障发生的机理逐渐清晰,故障诊断的方法日益丰富,可视化技术的日趋成熟,为改善水管理故障、提高电池性能提供了充分的条件。可视化技术在PEMFC中的应用为研究水传输机理提供了准确有效的途径,为水管理提供相应的改善方法,可惜的是该技术不适用于在线故障诊断。基于数据驱动类型的故障诊断方法,随着算法的改进和分类准确性的提升能准确快速地诊断故障类型,并可用于轨道交通机车等大功率PEMFC应用的在线诊断。因此,以数据驱动为主的水淹和膜干故障诊断方法以其快速、准确、有效的优点,逐渐成为主要的在线诊断方法。然而,故障发生后的缓解措施与实时控制仍需进一步研究,以确保PEMFC能以较高输出性能长期稳定的运行。

4.2展望

PEMFC水淹和膜干是常见的运行状态,严重时会影响电堆性能和寿命。因此对PEMFC进行水淹和膜干故障诊断尤为重要,本文对该领域的进一步研究有如下展望:

1)PEMFC水淹和膜干故障在线诊断方法研究

随着PEMFC的商业化进程，基于数据驱动的在线诊断方法有助于工程应用的实时控制使PEMFC高效稳定运行，尤其是大功率和多堆系统的应用。

2) PEMFC水淹和膜干故障建模

目前的PEMFC模型大多为单片电池正常态或故障态的模型，不能很好地拟合电堆实际运行的状态和参数变化，尤其是正常向故障转换的动态过程。因此，建立适用于故障诊断的PEMFC模型对水淹和膜干故障诊断至关重要。

3) 大功率PEMFC水淹和膜干故障诊断研究

目前针对PEMFC水淹和膜干的诊断主要集中在小功率及单片PEMFC。而作为轨道交通领域的新兴动力源，PEMFC在大功率下的水淹和膜干故障诊断技术尚不成熟，且大电流、高温等复杂环境、更易导致水淹或膜干等状态。为确保轨道交通列车的安全可靠持久运行，关于大规模PEMFC的水淹和膜干故障诊断亟待研究解决。

4) 多堆PEMFC水淹和膜干膜干影响规律研究

目前PEMFC水淹和膜干的研究主要为对单堆或单片电池进行故障诊断，但工程应用通常为多堆组成的系统，当单个电堆发生水淹或膜干故障时，多堆间的耦合性会使得其他电堆所承受的负荷波动，进而导致多个电堆间性能恶化。探究多堆间PEMFC水淹和膜干故障影响规律研究以及定位故障电堆，提出相应的缓解措施以提高多电堆系统的整体寿命，有待深入研究。

5) 水淹和膜干故障评价指标的探讨

在现有研究中，PEMFC水淹和膜干的诊断指标多样，无统一标准，且大部分指标仅适用于单片电池。因此，基于PEMFC的结构参数，以电压和压力降作为主要指标建立较完善、能精确诊断电堆内部故障单片和电堆系统中故障电堆的诊断指标，对大功率PEMFC的商业化应用具有重要的研究价值。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/149241.html>