

质子交换膜燃料电池故障诊断方法综述及展望

陈维荣, 刘嘉蔚, 李奇, 郭爱, 戴朝华

(西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Review and Prospect of Fault Diagnosis Methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

CHEN Weirong, LIU Jiawei, LI Qi, GUO Ai, DAI Chaohua

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has the advantages of high energy efficiency, none polluting emissions, low working temperature and fast startup. But there are many problems, such as high cost, poor reliability and short service life, restricting its large-scale commercial applications. The state art of fault diagnosis techniques of PEMFC is summarized in the paper. The classification of fault diagnosis methods of PEMFC is discussed, in terms of model, data driven and experimental test. Meanwhile, on the basis of the merits and demerits of the existing diagnostic methods, the key contents for further research are proposed to offer references for readers. This paper will contribute to developments of both fault prediction and health management for PEMFC.

KEY WORDS: proton exchange membrane fuel cell; fault diagnosis; model; data driven; artificial intelligence

摘要: 质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有能量转化率高、环境友好、工作温度低和启动速度快等特点,但存在成本高、可靠性差和寿命短等问题,制约其大规模商业化应用。总结了国内外 PEMFC 故障诊断技术的现状,从模型、数据驱动和实验测试三个方面,归纳 PEMFC 故障诊断方法的分类;在现有诊断方法优缺点的基础上,提出可进一步研究的重点内容,对 PEMFC 故障预测与健康管理的具有一定参考价值。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 故障诊断; 模型; 数据驱动; 人工智能

0 引言

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是最有前景的能源,由

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473238, 51407146); 四川省杰出青年基金项目(2015JQ0016)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (61473238, 51407146); Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of Sichuan Province of China (2015JQ0016)。

于其效率高、功率密度大、零排放、运行温度低和负载响应快等特点,在汽车、机车和有轨电车等领域展现出巨大优势^[1-3]。本课题组研发出世界首列 PEMFC/超级电容混合动力有轨电车,装配两套 150kW 的 PEMFC 系统作为主动力源,具有加气快、运行周期长等优点,已经得到示范性应用^[4],然而在实际运行中可能出现故障^[5]。PEMFC 故障能够引起系统性能衰减甚至缩短电堆使用寿命,为了检测和隔离故障,对 PEMFC 的监控和故障诊断成为亟待解决的问题。

PEMFC 系统由电堆模组和辅机构成,其中辅机包括氢气供给系统、空气供给系统、水热管理系统、数据采集和控制系统。电堆模组故障分为致命性故障和可恢复性故障,致命性故障包括质子交换膜破损、电极穿孔和双极板损坏,可恢复性故障包括电堆短路、电极水淹、膜干、电堆过载、催化剂中毒和氢氧混合。氢气供给系统故障有氢气瓶内氢气压力过低、氢气泄漏、高压氢气阀故障、氢气管堵塞、氢气循环泵和尾气阀故障。空气供给系统故障主要有空压机喘振、空气管道泄漏、空气过滤器堵塞和风机故障。水热管理系统故障有水泵压力过低或损坏、水管阻塞、循环水导电率过高、水量不足、冷却风扇损坏和散热器故障。数据采集和控制系统故障分为最小系统(供电电路、晶振电路和微控制单元)、通讯、软件和输出电路故障^[6-8]。

目前,已有文献综述 PEMFC 故障诊断技术。A. Benmouna 等^[9-11]总结基于模型和非模型的 PEMFC 故障诊断方法。Reem I. Salim 等^[12]分析影响 PEMFC 系统的故障(辅机故障、电堆永久和瞬时故障)及其对应的诊断技术。Pei Pucheng 等^[13]介绍基于压降的 PEMFC 水故障诊断方法。然而,为了

进一步保障 PEMFC 系统安全、可靠和经济地运行, 结合 PEMFC 电堆的实际情况, 一些新的 PEMFC 故障诊断技术还有待进一步探讨和研究。

本文对 PEMFC 故障诊断方法的研究进行综述, 分别从模型、数据驱动和实验测试三个方面, 对现有 PEMFC 故障诊断技术进行总结, 分析和比较各种诊断方法的优缺点和发展前景, 为后续开展更为深入的研究提供借鉴与参考。

1 基于模型的诊断方法

通过对实际系统与模型输出产生的残差进行分析、处理和决策的方法, 称为基于模型的诊断方法^[14], 如图 1 所示, 可分为解析模型和黑盒模型。

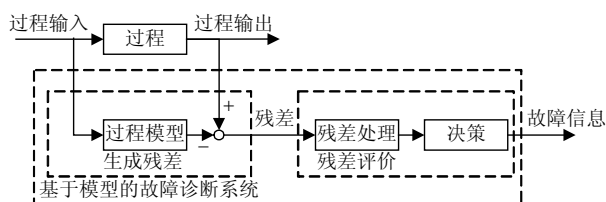


图 1 基于模型的故障诊断方案原理图

Fig. 1 Schematic diagram of model-based fault diagnosis scheme

1.1 解析模型

解析模型主要基于产生的输入输出或状态空间模型^[14]。根据残差产生机理, 分为参数辨识模型、基于观测器的模型和等价空间法。

1.1.1 参数辨识模型

模型中一些参数的值与 PEMFC 系统运行的行为有关, 当这些值的变化超过一定限度时, 通过故障决策检测和隔离故障, 如图 2 所示。

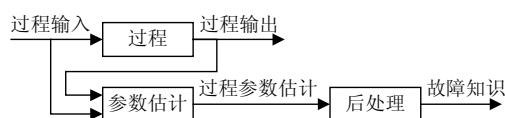
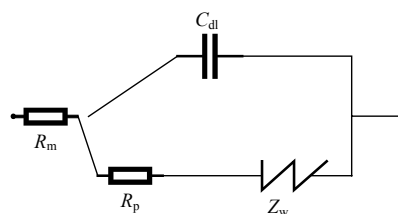


图 2 参数辨识方案原理图

Fig. 2 Schematic diagram of parameter identification scheme

Andres Hernandez 等^[15]利用 PEMFC 系统等效电路模型进行 PEMFC 建模和诊断。凭借递推最小二乘法辨识部件参数, 特定电阻的阻值变化量作为故障指示器。水淹、膜干和膜退化三种故障与等效电路中的流阻有关, 通过流阻的值能够检测电堆中发生的故障。基于自适应聚焦粒子群优化(adaptive focusing particle swarm optimization, AFPSO)算法, 李奇等^[16-17]对 PEMFC 机理模型中涉及流体动力

学、热力学以及电化学、膜阻抗、膜含水量和质量传递量等 8 个关键参数进行寻优, 使用 Scribner Associates 公司的 PEMFC 测试系统(890CL)采集 100 组电池输出电压和电流密度。仿真结果与实验数据吻合很好, 表明该算法对于改善 PEMFC 输出性能和优化模型参数设置将起到重要作用。电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)是监测 PEMFC 系统的有力工具。不同频率的小幅正弦波电压(或电流)信号微扰 PEMFC 系统以激励阻抗响应, 得到频响函数值^[18], 通过阻抗谱中阴极欧姆电阻模值的变化反映 PEMFC 电堆的性能减退情况。王珂等^[19]利用简化的 Randles 等效电路(参见图 3)推导电路断开时的 PEMFC 电压响应, 通过和实测曲线拟合得到阻抗参数, 绘制了 PEMFC 阻抗谱。基于 EIS 综合干扰测试系统, 鲜亮等^[20]观察到高频 45° 直线分支畸变和描述阴极水淹程度的低频半圆弧现象, 采用 R(RQ)(RQ)(RQ)形式的等效电路模型(equivalent circuit model, ECM)拟合了电化学阻抗谱。Kim 等^[21]研究了低频纹波电流对 PEMFC 阴极水淹和膜干的影响, 在可变频率下用电化学工作站测量 12 个单电池, 由阻抗曲线获得辨识模型参数的平均值, 发现低频纹波电流(100Hz)使 PEMFC 阻抗模值增加, 并加快 PEMFC 水故障退化。



R_p —电荷转移电阻; Z_w —电极扩散阻抗; C_{dl} —双电荷层电容;

R_m —膜阻抗。

图 3 Randles 等效电路

Fig. 3 Randles equivalent circuit

1.1.2 基于观测器的模型

在基于观测器的框架中, 使用设计的观测器产生残差, 如图 4 所示。

通过线性变参数(linear parameter varying, LPV)方法, S. de Lira 等^[23]建立考虑模型参数随工作点变化的 PEMFC 系统模型, 设计线性变参数观测器预测 PEMFC 系统状态, 仿真结果表明该模型能够检测空压机喘振、电堆电压降低和进气管道氢气(或氧气)泄漏故障。基于自适应二阶滑模(second-order

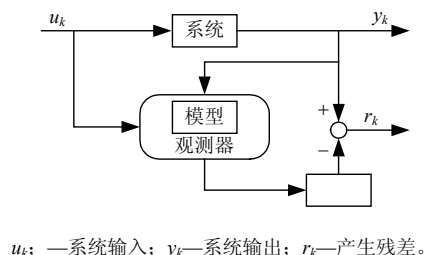


图 4 基于观测器的残差产生器设计

Fig. 4 Observer based residual generator design

sliding mode, SOSM)观测器和李普希茨非线性, Salah Laghrouche 等^[24]提出 PEMFC 系统鲁棒故障重构方法, 自适应更新律用于辨识不确定的参数, 估计的参数注入到自适应二阶滑膜观测器中, 通过硬件在环(hardware-in-loop, HIL)测试平台成功预测了系统状态和重构氧饥饿故障, 并证明了该方法应用于空气供应系统的可行性和有效性。Damiano Rotondo 等^[25]引入 Takagi-Sugeno(T-S)区间观测器解决 PEMFC 鲁棒故障诊断问题, 通过检查测量值和 Takagi-Sugeno 区间观测器输出之间的一致性完成故障检测。当检测到故障时, 触发故障隔离过程, 使用理论故障特征矩阵(fault signature matrix, FSM)隔离空气供给管道和阳极压力传感器故障。

1.1.3 等价空间法

基于状态空间模型, 等价空间法采用等价关系产生残差。

Michael Buchholz 等^[26]使用线性规范变量分析(canonical variate analysis, CVA)对非线性 PEMFC 电堆进行建模。线性状态空间模型能够很好地表征电堆的输入-输出行为, 模型中引入卡尔曼滤波器和逆模型(参见图 5), 线性规范变量分析状态空间模型对于氧饥饿和氧饱和故障展现出很好的诊断效果。Yang Quan 等^[27]提出基于解析冗余数学模型的 PEMFC 故障诊断方法, 数学模型线性化为 8 个状态方程, 模型中采集到的瞬态现象包括空压机动力学、流动特性、流体力学、质量和能量守恒, 产生解析冗余关系(analytical redundancy relations, ARR), 并给出数值仿真结果, 能够检测并隔离水淹、膜干和空压机过电压故障。

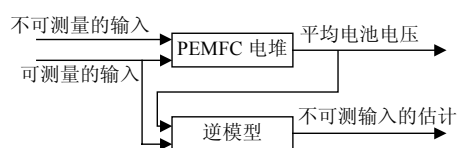


图 5 逆模型

Fig. 5 The inverse model

1.2 黑盒模型 监督学习方法

黑盒模型基于统计理论, 系统输入和输出之间的关系不依赖于物理方程, 而是通过实验数据推理得到^[9]。人工智能(artificial intelligence, AI)模型可以模拟 PEMFC 系统, 主要包括人工神经网络(artificial neural network, ANN)、模糊逻辑(fuzzy logic, FL)、自适应神经模糊推理系统(adaptive neuro fuzzy inference systems, ANFIS)和支持向量机(support vector machine, SVM)。

1.2.1 神经网络

基于输入输出数据, 人工神经网络能够学习和构建复杂系统的非线性映射和多变量之间的关系。讨论几种典型神经网络模型在 PEMFC 故障诊断中的运用, 包括反向传播神经网络(back propagating neural network, BP-ANN)、径向基函数神经网络(radial basis function neural network, RBF-ANN)、可拓神经网络(extension neural network, ENN)和前馈神经网络(feedforward neural network, FNN)。

为了提高 PEMFC 系统的稳定性和可靠性, Shao Meng 等^[28]提出反向传播神经网络集成方法。通过 PEMFC 系统动态模型和实验分析散热系统、氢氧混合和气体供给系统故障的机理和影响。基于反向传播神经网络和拉格朗日乘数法, 设计及模拟神经网络集成方法, 利用实验数据训练和测试模型。测试结果表明, 该方法可将诊断准确率从只采用反向传播神经网络时的 85.62%提高到 93.24%。当静态神经网络模型用于系统故障检测, 且将模型预测误差作为残差时, 如果神经网络工作在相关模式, 则残差对故障不敏感^[29]。M. M. Kamal 等^[29]在独立模式下采用径向基函数神经网络作为故障检测的系统模型, 发现了残差对故障较敏感。为了提高检测的信噪比, 用递归正交最小二乘法(recursive orthogonal least square method, ROLS)训练网络权值, 另一个径向基函数神经网络利用残差信号中的信息隔离故障。该方法应用到密歇根大学开发的基准模型中^[30], 模拟了部件、执行器和传感器故障, 仿真结果表明, 所开发的方法能够检测和隔离标称值 $\pm 10\%$ 大小的故障。N. Yousfi Steiner 等^[31]提出了基于可拓神经网络建模的 PEMFC 水故障诊断。可拓神经网络的输入是电流、空气流速、电堆和气体入口温度, 输出是电压和压降。模型计算正常条件下的电堆电压和压降, 比较模型输出与实际运行过程的测量值以产生残差, 并对 PEMFC 健康状态(水

淹、膜干或正常)进行分类。Wang Menghui 等^[32]开发了 PEMFC 故障诊断系统,使用 ZigBee 无线传感器实现了 PEMFC 状态监控,传感器模块用于构建 PEMFC 电压、电流、温度和供气压力等数据,利用可拓神经网络方法建立了故障诊断数学平台,能够检测氧饥饿、系统工作温度下降、氧气孔堵塞、散热系统、氢气供给系统和通信系统故障。基于单电池温度和电流密度, Ali. Mohammadi 等^[33]实现了水淹和膜干故障的定位,使用 3D 故障 - 敏感模型估计了局部参数(单电池温度、电流和电压分布),并模拟了水故障,双层前馈神经网络能够将故障定位在单电池的 9 个分段内,但该方法只能用于诊断单体电池。

与分析模型相比,神经网络具有优良的非线性近似能力和更少的模型构建假设。此外,它对噪声的敏感度较低而且可以基于不完整的数据库。然而,神经网络属于监督学习技术,需要大量正常和不同故障条件下的数据分类故障,故障运行实验不但耗时较长,还可能对系统造成不可逆的损坏。随着测试变量和故障种类的增加,神经网络将变得愈加复杂,如何降低神经网络的训练时间并保证分类精度是一个重要课题。当使用多层感知器神经网络(multi-layer perceptron neural network, MLPANN)时,确定隐层和每层神经元数目也是关键性问题。

1.2.2 模糊逻辑

模糊逻辑在处理不确定性、模糊性和非线性系统方面具有很大优势,结合 If-Then 规则、隶属度函数和逻辑运算符,通过模仿人类推理,建立输入与输出之间的关系,数值型数据转换为语言变量,隶属度函数定义变量属于输出(即在 0 和 1 之间)的程度。模糊逻辑的诊断方法通常与进化算法融合,设定输出阈值判别和分类故障。

郭家兴等^[34-35]提出了适用于在线故障诊断的 Takagi-Sugeno 模糊模型,并用蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)和粒子群优化算法(particle swarm optimization algorithm, PSO)对模型参数进行调整和优化。模型输入是电堆总电压、最低单片电压、电流、出口温度和空气入口压力。通过模型输出大小(即 PN)和变化率(即 ΔPN)两个阈值实现了在线诊断膜干和水淹故障。在 $PN \geq 0.9$ 时,如果 $\Delta PN \leq 0.1$,则故障为水淹,否则为膜干,如图 6 所示^[34]。

与需要在各种故障中精确学习的神经网络相比,模糊逻辑模型中的规则和隶属度函数是基于运

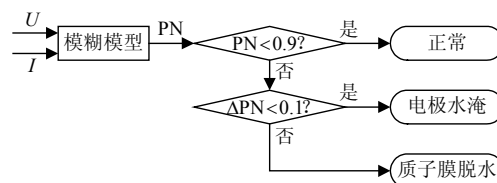


图 6 模糊逻辑故障诊断流程图

Fig. 6 Fuzzy logic fault diagnosis flow chart

行经验或专家知识,仅需考虑选择的特征、最佳聚类数和目标函数,具有简单和易实现的优点,但是不能在线调整,当需要考虑新的故障时,无法自动在线更新规则和隶属度函数。

1.2.3 自适应神经模糊推理系统

自适应神经模糊推理系统结合神经网络的自适应能力和模糊逻辑的定性方法,当前研究主要是建立基于自适应神经模糊推理系统的模型预测 PEMFC 系统输出电压。

Yasemin Vural 等^[36]使用训练与测试的自适应神经模糊推理系统模型预测了 PEMFC 的极化曲线,模型输入是电池温度、阴阳极加湿度和压力等变量,结果表明模型输出和实验数据之间具有较好的一致性。在 PEMFC 正常工作条件下, Silva 等^[37]预测了由系统老化引起的输出电压衰减,提出了基于时间序列的自适应神经模糊推理系统预测方法,将电压信号分解为正常运行和外部扰动两部分,使用 PEMFC 在长期运行试验(1000h)中的数据进行验证,结果表明该方法适合于预测 PEMFC 系统老化。

自适应神经模糊推理系统通过神经网络设计,并调整模糊推理系统的参数,不需要任何先验知识。然而,该方法目前仅适用于基于单片电池的离线应用,缺乏大功率等级的实时应用,因此发展大功率 PEMFC 电堆实时诊断技术十分必要。

1.2.4 支持向量机

支持向量机建立在统计学理论和结构风险最小化(structural risk minimization, SRM)原则基础上,具有学习速度快、预测精度高和适合于小样本数据等特点,拥有强大的非线性系统建模能力。

Li Xi 等^[38]提出了基于最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)模型的非线性预测控制算法,结合径向基核建立了 PEMFC 电堆非线性离线模型,在 PEMFC 运行时离线模型在每个采样时刻进行线性化,通过广义预测控制(generalized predictive control, GPC)算法实现了 PEMFC 预测。实验结果证明该方法能够控制运

行温度快速到达目标值, 优于传统的模糊和比例-积分-微分(proportional integral derivative, PID)控制器, 避免了内部系统的复杂性, 为 PEMFC 系统的在线控制奠定良好的基础。为了研究不同操作条件(机车 PEMFC 电流、电堆温度、氢气压力和空气流速)对机车 PEMFC 电堆动态行为的影响, Li Qi 等^[39]提出基于支持向量回归(support vector regression, SVR)的机车 PEMFC 系统非线性多变量模型, 利用有效信息策略自适应粒子群优化(effective informed adaptive particle swarm optimization, EIA-PSO)算法对支持向量机回归模型的超参数进行调整, 以提高模型的识别性能, 与实验数据对比表明该模型可以有效地模拟机车 PEMFC 电堆的动态行为, 并预测输出电压和功率。

支持向量机模型具有良好的泛化能力, 该能力与输入数据维数无关。只要设定正常运行条件下的阈值, 将支持向量机模型推广到 PEMFC 系统故障诊断是可行的。与模糊逻辑相比, 它具有很高的精度且无需先验知识; 相比神经网络, 它拥有良好的泛化能力和鲁棒性。然而, 支持向量机因其核函数受 Mercer 条件限制、样本需求量大和算法收敛慢等缺点, 在实际应用中也具有局限性。

解析模型需要建立基于 PEMFC 系统内部运行过程的分析模型, 必须要了解流体力学、电学、机械、热力学和电化学等不同领域的知识, 因此模型通常是复杂的物理多维模型。然而, PEMFC 内部参数、结构和材料很难获得, 空气入口流速、电堆温度和单电池电压需要特殊的监控系统, PEMFC 系统之间的组成和部件参数各不相同, 所以建立通用的解析模型是非常困难的。虽然人工智能模型能够对 PEMFC 系统的复杂过程进行建模, 但是残差产生和评价指标没有分析模型那么完善, 难以解释变量间的因果关系。

2 数据驱动的诊断方法

数据驱动方法利用历史数据信息, 主要分为模式分类方法和信号处理方法。**非监督学习和数据处理方法**

2.1 模式分类方法

基于模式分类的诊断过程如图 7 所示。从先验知识和历史数据中确定经验分类器, 使用分类器将

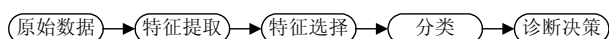


图 7 模式分类的诊断流程图

Fig. 7 The diagnosis flow chart of pattern classification

实时数据分为正常状态和各种故障状态, 执行诊断决策完成故障检测和隔离。

Li Zhongliang 等^[40-43]提出了模式分类的 PEMFC 系统故障诊断策略, 如图 8 所示。Fisher 判别分析(fisher discriminant analysis, FDA)从单电池电压中提取特征, 支持向量机、球形多类支持向量机(spherical-shaped multiple-class support vector machine, SSM-SVM)或有向非循环图支持向量机(directed acyclic graph support vector machine, DAGSVM)将提取的特征分为不同的类, 诊断决策规则检测, 并隔离大电流脉冲、短路、氧饱和、氧饥饿、一氧化碳中毒和散热系统故障, 使用 40 片单电池构成的 3kW 电堆的实验数据验证方法的相关性, 通过增量学习实现在线诊断。以电化学阻抗谱为基本工具, Zheng Zhixue 等^[44]提出了双模糊诊断方法在线监控 PEMFC 电堆水管理状况。双模糊的意义包括形成数据簇的模糊聚类 and 基于聚类结果做出决策的模糊逻辑, 实验证明该方法能在线识别氧饱和、氧饥饿和正常三种健康状态, 但不能定位电堆中发生故障的单电池。

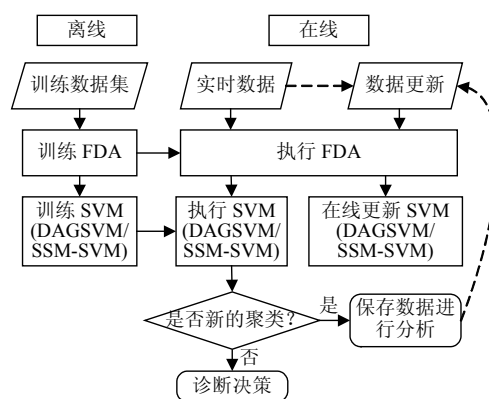


图 8 数据驱动诊断策略流程图

Fig. 8 Flow chart of data driven diagnosis strategy

模式分类的诊断方法种类繁多, 对其进行比较研究以对比各方法的优劣尤为重要。文献[45-46]从诊断精度和计算复杂度的角度比较了各种 PEMFC 模式分类诊断方法, 以便找到 PEMFC 电堆在线诊断工具。从与单电池电压相关的数据中提取特征, 使用分类器区分不同状态的特征(即正常、水淹和膜干), 在考虑了主成分分析(principal components analysis, PCA)、Fisher 判别分析、核主元分析(kernel principal component analysis, KPCA)和内核 Fisher 判别分析(kernel fisher discrimination analysis, KFDA)4 种自动特征提取方法的基础上, 采用了高

斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)、K 最近邻算法(K-nearest neighbor, KNN)和支持向量机 3 种典型分类方法进行诊断对比分析。实验结果表明, 基于 Fisher 判别分析和支持向量机的方法拥有更高的性能和更少的计算量, 错误诊断率(error diagnosis rate, EDR)小于 10%。但该方法目前只能用于诊断 PEMFC 水故障, 将来需要进一步研究通过增加分类数目和训练数据将其扩展到可以诊断更多种类的故障。

2.2 信号处理方法

信号处理方法包括小波变换(wavelet transform, WT)和经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD), 能够提供频域信号的视图, 并观测到时域信号无法显示的信息。

2.2.1 小波变换

小波变换分为连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)和离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)。连续小波变换适用于信号的时频分解, 离散小波变换有更高的计算精度和去噪能力。

Benouioua 等^[47-48]提出了基于小波变换模极大值(wavelet transform modulus maxima, WTMM)和模式识别的 PEMFC 故障诊断方法, 使用连续小波变换和多重分形计算电压信号的奇异性谱, 利用支持向量机和 K 最近邻算法分类频谱, 结果表明该方法可以区分阴极流速、气体压力、冷却回路和一氧化碳中毒等故障, 分类正确率为 100%。Jonghoon Kima 等^[49]通过离散小波分解从输出端电压信号(output terminal voltage signal, OTVS)中提取了 PEMFC 电化学特性信息。Mona Ibrahima 等^[50]使用离散小波变换辨识膜干和水淹故障, 研究表明在 PEMFC 检测和定位故障上, 离散小波变换比连续小波变换更加有效。

2.2.2 经验模式分解

经验模式分解是分析非平稳信号的有力工具, 它无须预先设定任何基函数的特性使其成为一种自适应信号处理方法^[51]。

Cédric Damour 等^[51]提出了基于经验模式分解的 PEMFC 水故障诊断方法, 如图 9 所示。输出电压分解为 14 个固有模式函数(intrinsic mode functions, IMFs), 计算每个固有模式函数对全部能量的贡献, 实验表明, 通过电压比较第 1 与第 9 个固有模式函数能量的贡献, 能够检测并隔离水故

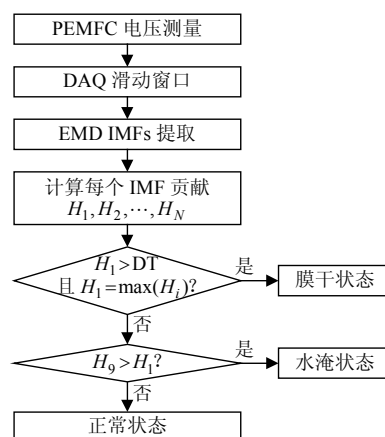


图 9 EMD 诊断策略流程图^[51]

Fig. 9 Flow chart of EMD diagnosis strategy

障, 诊断正确率超过 98%。图中: DT 表示膜干阈值; H_i 表示第 i 个 IMF 的贡献, $i=1,2,\dots,14$ 。

数据驱动的诊断方法使用监测的历史数据学习系统行为, 并执行故障预测, 不需要 PEMFC 模型或系统专业知识, 底层算法实现速度快、计算效率高。然而, 它需要正常和有针对性故障条件下的大量历史数据集, 完全依赖传感器数据和相关信号, 预测的置信水平取决于可用的历史经验数据。

3 基于实验测试的诊断方法 获取额外参数 (数据信息)

基于实验测试的诊断方法分为磁场方法和故障运行方法。

3.1 磁场方法

利用 PEMFC 电堆周围的磁场检测故障的方法具有非侵入式、易重复使用等优点。尽管相关研究较少, 但是已经展示了其潜能。

Melika Hinaje 等^[53]使用 PEMFC 内部电流产生的磁场监测电堆, 设计 3D 偏微分方程模型仿真工具, 建立 PEMFC 故障与特定磁场特征之间的因果关系, 该方法能计算 PEMFC 感应磁场和区分故障单电池。M. Le Ny 等^[52]提出了基于 PEMFC 电堆周围磁场测量的诊断方法, 利用 PEMFC 中电流分布产生的磁场信号估计 2D 电流密度分布, 使用固定在电堆周围的 30 个传感器绘制磁场图(参见图 10)区分健康状态和故障状态的电流密度变化, 通过改变空气过量系数可辨识膜干或电极水淹, 并采用反演算法和优化传感器阵列设计来提高故障分辨率。

3.2 故障运行方法

故障运行方法主要是开展不同工况下的故障运行实验, 得到实际数据, 并找到系统最佳运行状态参数, 使系统稳定和正常运行。

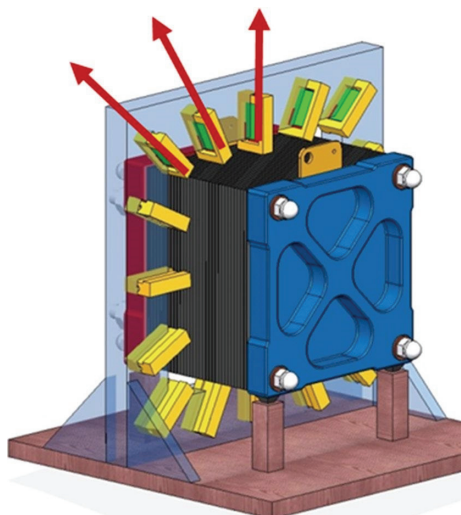


图10 电堆的示意图和单轴磁通传感器方向

Fig. 10 Schematic diagram of the stack and single axis magnetic sensor direction

Song Mancun 等^[54]开展不同条件下的水淹实验,发现 PEMFC 在水淹发生过程中阳极气体压力降呈现“阶跃平台”式变化特征,据此特征将水淹过程分为无水期、湿润期、过渡期和水淹期4个时期,并在给出 PEMFC 水淹报警界限的基础上,提出了基于微湿控制区的水故障诊断方法(参见图11)和区间划分判据,使 PEMFC 运行于无水淹和无膜干状态,实验结果证明了所提出方法的有效性。图

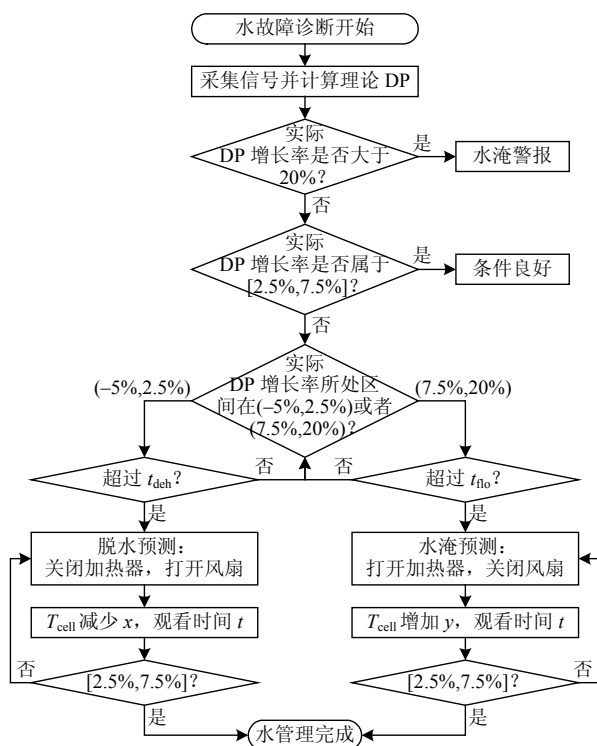


图11 基于阳极气体压力降的水故障诊断方法

Fig. 11 Water management strategy based on hydrogen drop

中: DP 表示氢气压力降; t_{deh} 表示膜干的判断时间; t_{no} 表示水淹的判断时间; T_{cell} 表示电池温度。

虽然磁场方法通过电流产生的磁场可以判别 PEMFC 的故障状态,但存在对车载电机和电路系统造成磁干扰的隐患,会影响设备的正常运行。故障运行方法能够较好地检测单电池的水状态,但是不能准确判定发生水淹或膜干的单电池位置。此外,对于多套 PEMFC 系统,该方法也无法判定发生故障的单个 PEMFC 系统位置。目前,PEMFC 故障诊断系统的验证主要集中于体积庞大的测试平台,尚无实际的工程化应用。现有研究主要集中于中小密度条件下的稳态工况,而针对动态工况下的大功率 PEMFC 系统故障诊断尚需进一步研究。

4 下一步研究方向

目前,PEMFC 故障诊断技术已经取得了一定研究进展,但是相对于 PEMFC 技术的其它领域研究与应用,其故障诊断技术的发展仍相对落后。随着物理、化学、材料等学科与信息技术的迅速发展,笔者认为以下几个方面尚需开展进一步的研究工作:

1) PEMFC 故障模型的理论研究。

PEMFC 的内部机理非常复杂,而到目前为止,还没有一个适用于故障诊断、实用性强的 PEMFC 系统模型,这直接制约着 PEMFC 系统诊断方法的研究。PEMFC 系统故障中潜在的物理过程还没有得到充分地发展,即基于失效机理的综合故障模型。因此,开发每种失效机理的 PEMFC 系统故障模型,并将其集成到可以预测大部分故障的综合故障模型中是将来的一个研究方向。

2) 多套大功率 PEMFC 系统的故障诊断方法研究。

近些年,PEMFC 技术在轨道交通领域的应用取得了飞速发展,但一套 PEMFC 系统无法满足轨道车辆功率的需求,需要采用多套 PEMFC 系统。既有 PEMFC 故障诊断方法仅限于单个中小功率电堆或单片电池,无法实现多套 PEMFC 系统的故障诊断。因此,大幅变载下多套 PEMFC 系统的故障诊断方法研究也是未来 PEMFC 故障诊断技术的发展方向。

3) 复杂环境下的 PEMFC 系统多重故障诊断。

现有故障诊断方法大多是在实验室条件下完成的,且主要针对单一故障诊断问题。实际车载

PEMFC 系统工作环境恶劣, 温度变化、机械振动、外界磁场和负载扰动等都会对故障信息造成影响。当 PEMFC 系统存在多重故障时, 故障特征信息可能会相互影响, 从而增加故障诊断的复杂性。因此, 复杂环境下的 PEMFC 系统多重故障诊断也是一个值得研究的问题。

4) 考虑 PEMFC 系统老化的故障诊断策略研究。

PEMFC 系统系统老化会引起其性能的下降, 目前已有文献的故障诊断方法大多未开展计及 PEMFC 系统老化的故障诊断策略研究, 未考虑如何准确区分 PEMFC 系统故障和由老化造成的 PEMFC 系统性能下降这两种故障问题。因此, 研究基于 PEMFC 系统老化程度的在线自适应调节故障诊断策略, 也是需要开展的研究工作。

5) PEMFC 系统在线故障诊断方法研究。

现有文献报道的故障诊断方法仍然停留在离线验证阶段, 在线故障诊断方法的实现还鲜有实质性突破。随着 PEMFC 系统越来越多地应用在汽车和轨道机车等中大功率领域, 保证系统安全、可靠、稳定运行是一个关键问题。因此, PEMFC 系统的在线故障诊断方法研究是非常重要的研究方向。

5 结论

本文从模型、数据驱动和实验测试三个方面对国内外 PEMFC 故障诊断技术研究现状进行归纳和总结, 并在对现有故障诊断方法优缺点分析的基础上, 提出了需要进一步深入开展研究的重点及建议, 对 PEMFC 故障预测与健康管理技术的研究工作具有一定指导意义。

参考文献

- [1] Petrone R, Zheng Z, Hissel D, et al. A review on model-based diagnosis methodologies for PEMFCs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(17): 7077-7091.
- [2] Raga C, Barrado A, Lazaro A, et al. Black-box model identification technique and frequency analysis for PEM fuel cell with overshooted transient response[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5334-5346.
- [3] 陈维荣, 钱清泉, 李奇. 燃料电池混合动力列车的研究现状与发展趋势[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(1): 1-6.
Chen Weirong, Qian Qingquan, Li Qi. Investigation status and development trend of hybrid power train based on fuel cell[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(1): 1-6(in Chinese).
- [4] 陈维荣, 卜庆元, 刘志祥, 等. 燃料电池混合动力有轨电车动力系统设计[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3): 430-436.
Chen Weirong, Bu Qingyuan, Liu Zhixiang, et al. Power system design for a fuel cell hybrid power tram[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(3): 430-436(in Chinese).
- [5] Chen H, Pei P, Song M. Lifetime prediction and the economic lifetime of proton exchange membrane fuel cells[J]. Applied Energy, 2015, 142: 154-163.
- [6] Liu J, Luo W, Yang X, et al. Robust model-based fault diagnosis for PEM fuel cell air-feed system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3261-3270.
- [7] Hua Jianfeng, Lu Languang, Ouyang Minggao, et al. Proton exchange membrane fuel cell system diagnosis based on the signed directed graph method[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196: 5881-5888.
- [8] 全睿, 全书海, 谢长君, 等. 燃料电池发动机故障诊断专家系统设计与研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2011, 35(2): 280-284.
Quan Rui, Quan Shuhai, Xie Changjun, et al. Study and design of fault and diagnosis expert system for fuel cell engine[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2011, 35(2): 280-284(in Chinese).
- [9] 周苏, 韩秋玲, 胡哲, 等. 质子交换膜燃料电池故障诊断的模式识别方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2017, 45(3): 408-412.
Zhou Su, Han Qiuling, Hu Zhe, et al. Pattern recognition method for proton exchange membrane fuel cell fault diagnosis[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2017, 45(3): 408-412(in Chinese).
- [10] Zheng Z, Petrone R, Pera M C, et al. A review on non-model based diagnosis methodologies for PEM fuel cell stacks and systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(21): 8914-8926.
- [11] Benmouna A, Becherif M, Depernet D, et al. Fault diagnosis methods for proton exchange membrane fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(2): 1534-1543.
- [12] Salim Reem I, Noura Hassan, Fardoun Abbas. A review on fault diagnosis tools of the proton exchange membrane fuel cell[C]//2nd International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems. Nice, France, 2013: 686-693.
- [13] Pei P, Li Y, Xu H, et al. A review on water fault diagnosis of PEMFC associated with the pressure drop[J]. Applied

- Energy, 2016, 173: 366-385.
- [14] Ding Steven X. Model-based fault diagnosis techniques[M]. London: Springer, 2013.
- [15] Andres Hernandez, Hissel D. Modeling and fault Diagnosis of a polymer electrolyte fuel cell using electrical equivalent analysis[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(1): 148-160.
- [16] 李奇, 陈维荣, 刘述奎, 等. 基于自适应聚焦粒子群算法的质子交换膜燃料电池机理建模[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 119-124.
- Li Qi, Chen Weirong, Liu Shukui, et al. Mechanism modeling of proton exchange membrane fuel cell based on adaptive focusing particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(20): 119-124(in Chinese).
- [17] Li Q, Chen W, Wang Y, et al. Parameter identification for PEM fuel-cell mechanism model based on effective informed adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2410-2419.
- [18] 蔡光旭, 郭建伟, 王佳. 交流阻抗技术在质子交换膜燃料电池上的研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(1): 56-63.
- Cai Guangxu, Guo Jianwei, Wang Jia. Application of electrochemical impedance spectroscopy to study of proton exchange membrane fuel cell[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(1): 56-63(in Chinese).
- [19] 王珂, 陈维荣, 韩明, 等. 基于电流断路法的空冷型燃料电池阻抗谱实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(29): 87-93.
- Wang Ke, Chen Weirong, Han Ming, et al. Experimental diagnosis of air breath proton exchange membrane fuel cell through current interrupt[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(29): 87-93(in Chinese).
- [20] 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 Liang, Xiao Jian, Jia Junbo. An experimental study on AC impedance spectroscopy of proton exchange membrane fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(35): 101-106(in Chinese).
- [21] Kim J, Lee I, Tak Y, et al. Impedance-based diagnosis of polymer electrolyte membrane fuel cell failures associated with a low frequency ripple current[J]. Renewable Energy, 2013, 51: 302-309.
- [22] Yuan X, Sun J C, Wang H, et al. AC impedance diagnosis of a 500W PEM fuel cell stack[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(2): 929-937.
- [23] de Lira S, Puig V, Quevedo J, et al. LPV observer design for PEM fuel cell system: Application to fault detection[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(9): 4298-4305.
- [24] Laghrouche S, Liu J, Ahmed F S, et al. Adaptive second-order sliding mode observer-based fault reconstruction for PEM fuel cell air-feed system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(3): 1098-1109.
- [25] Damiano Rotondo, Rosa M F, Sebastian Tornil-Sin, et al. Robust fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cells using a Takagi-Sugeno interval observer approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(4): 2875-2886.
- [26] Buchholz M, Eswein M, Krebs V. Modelling PEM fuel cell stacks for FDI using linear subspace identification[C]//IEEE International Conference on Control Applications, San Antonio, America, 2008: 341-346.
- [27] Yang Q, Aitouche A, Bouamama B O. Fault detection and isolation of PEM fuel cell system by analytical redundancy[C]//18th Annual International Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Marrakech, Morocco, 2010: 1371-1376.
- [28] Shao M, Zhu X, Cao H, et al. An artificial neural network ensemble method for fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cell system[J]. Energy, 2014, 67: 268-275.
- [29] Kamal M M, Yu D W, Yu D L. Fault detection and isolation for PEM fuel cell stack with independent RBF model[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 28: 52-63.
- [30] Pukrushpan J T. Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2003.
- [31] Yousfi Steiner N, Hissel D, Mocoteguy P, et al. Diagnosis of polymer electrolyte fuel cells failure modes (flooding & drying out) by neural networks modeling[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(4): 3067-3075.
- [32] Wang Menghui, Chen Mujia. Design of a fault diagnosis system for PEM fuel cells[C]//International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2012: 460-463.
- [33] Mohammadi A, Djerdir A, Yousfi Steiner N, et al. Advanced diagnosis based on temperature and current density distributions in a single PEMFC[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(45): 15845-15855.
- [34] 郭家兴, 朱新坚, 曹广益. 质子交换膜燃料电池故障诊断[J]. 电源技术, 2008, 32(8): 528-531.
- Guo Jiaxing, Zhu Xinjian, Cao Guangyi. Fault diagnosis of PEMFC[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2008, 32(8): 528-531(in Chinese).
- [35] Quan R, Quan S, Huang L. T-S fuzzy model-based fault diagnosis of PEM fuel cell engine[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 34-35: 92-97.

- [36] Vural Y, Ingham D B, Pourkashanian M. Performance prediction of a proton exchange membrane fuel cell using the ANFIS model[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(22): 9181-9187.
- [37] Silva R E, Gouriveau R, Jemei S, et al. Proton exchange membrane fuel cell degradation prediction based on adaptive neuro-fuzzy inference systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(21): 11128-11144.
- [38] Li X, Cao G, Zhu X. Modeling and control of PEMFC based on least squares support vector machines[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(7-8): 1032-1050.
- [39] Li Q, Chen W, Liu Z, et al. Nonlinear multivariable modeling of locomotive proton exchange membrane fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25): 13777-13786.
- [40] Li Z, Outbib R, Giurgea S, et al. Diagnosis for PEMFC systems: a data-driven approach with the capabilities of online adaptation and novel fault detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 5164-5174.
- [41] Li Zhongliang, Giurgea S, Outbib R, et al. Fault diagnosis and novel fault type detection for PEMFC system based on spherical-shaped multiple-class support vector machine[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2014: 1628-1633.
- [42] Li Z, Outbib R, Giurgea S, et al. Fault detection and isolation for polymer electrolyte membrane fuel cell systems by analyzing cell voltage generated space[J]. Applied Energy, 2015, 148: 260-272.
- [43] Li Z, Outbib R, Giurgea S, et al. Online implementation of SVM based fault diagnosis strategy for PEMFC systems[J]. Applied Energy, 2016, 164: 284-293.
- [44] Zheng Z, Péra M, Hissel D, et al. A double-fuzzy diagnostic methodology dedicated to online fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cell stacks[J]. Journal of Power Sources, 2014, 271: 570-581.
- [45] Li Z, Outbib R, Hissel D, et al. Data-driven diagnosis of PEM fuel cell: a comparative study[J]. Control Engineering Practice, 2014, 28: 1-12.
- [46] Li Z. Data-driven fault diagnosis for PEMFC systems[D]. Aix-en-Provence, France: Aix-Marseille University, 2014.
- [47] Benouioua D, Candusso D, Harel F, et al. PEMFC stack voltage singularity measurement and fault classification[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(36): 21631-21637.
- [48] Benouioua D, Candusso D, Harel F, et al. Fuel cell diagnosis method based on multifractal analysis of stack voltage signal[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(5): 2236-2245.
- [49] Kim J, Tak Y. Implementation of discrete wavelet transform-based discrimination and state-of-health diagnosis for a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(20): 10664-10682.
- [50] Ibrahim M, Antoni U, Steiner N Y, et al. Signal-based diagnostics by wavelet transform for proton exchange membrane fuel cell[J]. Energy Procedia, 2015, 74: 1508-1516.
- [51] Damour C, Benne M, Grondin Perez B, et al. Polymer electrolyte membrane fuel cell fault diagnosis based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Power Sources, 2015, 299: 596-603.
- [52] Le Ny M, Chadebec O, Cauffet G, et al. PEMFC stack diagnosis based on external magnetic field measurements[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2015, 45(7): 667-677.
- [53] Hinaje M, Bethoux O, Krebs G, et al. Nonintrusive diagnosis of a PEMFC[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 1-4.
- [54] Song M, Pei P, Zha H, et al. Water management of proton exchange membrane fuel cell based on control of hydrogen pressure drop[J]. Journal of Power Sources, 2014, 267: 655-663.



陈维荣

收稿日期: 2016-11-03。

作者简介:

陈维荣(1965), 男, 博士, 教授, 博士生导师, IET Fellow, IEEE Senior Member, 主要从事电力系统及其自动化、新能源并网发电技术、燃料电池技术与应用等方面的研究工作, wrchen@swjtu.edu.cn;

刘嘉蔚(1993), 男, 博士研究生, 主要从事燃料电池健康诊断与控制技术等方面的研究工作, daben@my.swjtu.edu.cn;

李奇(1984), 男, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE Senior Member, 主要从事燃料电池系统优化与控制、新能源并网发电技术、微电网运行与控制技术等方面的研究工作, 本文通讯作者, liqi0800@163.com。

(责任编辑 李婧妍)

Review and Prospect of Fault Diagnosis Methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

CHEN Weirong, LIU Jiawei, LI Qi, GUO Ai, DAI Chaohua
(Southwest Jiaotong University)

KEY WORDS: proton exchange membrane fuel cell; fault diagnosis; model; data driven; artificial intelligence

Proton exchange membrane fuel cell(PEMFC) is the most promising energy with characteristics of high efficiency, large power density, zero emissions, low operating temperature and fast load response. PEMFC has shown great advantages in the automobiles, locomotives and tramways. However, PEMFC may fail in actual operation, which can cause system performance

degradation and even shorten the service life of the stack. In order to detect and isolate the fault, fuel cell monitoring and diagnosis becomes an urgent problem to be solved. There are three approaches of fuel cell fault diagnostics as illustrated in Fig.1: the model based method, the data-driven method and the experimental test method.

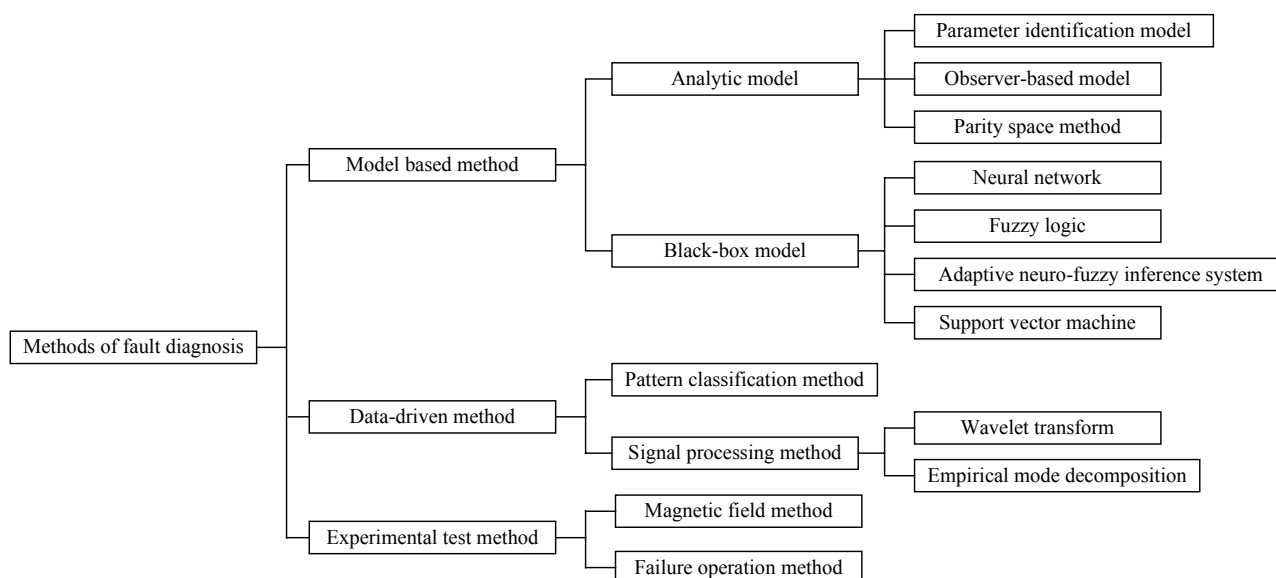


Fig. 1 Different fault diagnosis methods for PEMFC

With the development of the fault diagnosis techniques, the factors considered in the diagnosis are more comprehensive. But it should be recognized that the internal mechanism of PEMFC is still not being clearly understood, and the currently used approaches still have some problems. Therefore, under different operation conditions, we need to select the appropriate methods to get as effective results as possible.

This paper summarizes the research status of fuel cell fault diagnosis in current use, including the merits and demerits of the existing diagnostic methods. In

addition, the future directions for fault diagnosis of PEMFC are predicted and relative suggestions are given as follows:

- 1) Theoretical research on PEMFC fault model;
- 2) Experimental research on fault diagnosis for several sets of large power PEMFC;
- 3) Diagnoses of multiple faults for PEMFC in complex environment;
- 4) Research on fault diagnosis strategy considering aging of the PEMFC system;
- 5) Online implementation of the fault diagnosis strategy for the PEMFC systems.