

燃料电池系统故障诊断识别策略发展

刘 斌

(武汉船用电力推进装置研究所, 武汉 430064)

摘 要: 燃料电池系统是一个具有多输入输出变量的非线性系统, 为了及时、准确地诊断出燃料电池系统中的故障, 保证燃料电池系统的正常工作和安全运行, 本文阐述了燃料电池系统的故障类型及影响, 主要从电池系统故障诊断识别方法进行简要论述, 为故障诊断识别策略的开发提供了方向。

关键词: 燃料电池 故障类型 故障诊断

中图分类号: TM911.4 文献标识码: A 文章编号: 1003-4862 (2023) 04-0001-04

Development of fault diagnosis and recognition strategies for fuel cell systems

Liu Bin

(Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion, Wuhan 430064, China)

Abstract: Fuel cell system is a nonlinear system with multiple input and output variables. In order to diagnose the faults in the fuel cell system timely and accurately, and ensure the normal and safe operation of the fuel cell system, this paper describes the fault types and effects of the fuel cell system, and briefly discusses the battery system fault diagnosis and recognition methods. It provides the direction for the development of fault diagnosis and recognition strategy.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; fault type; fault diagnosis

0 引言

质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 是一种高效、环境友好、能将氢气和氧气的化学能转化成电能的发电装置, 因其具有电流密度高、工作温度低、启动速度快和结构紧凑等优点, 在未来车用动力系统领域具有广泛应用前景^[1]。

然而, 随着 PEMFC 电源技术的进一步发展和大规模推广, 其成本、燃料来源、配套设施和耐久性依然是制约其商业化发展的四个关键障碍, 特别耐久性问题, 由于 PEMFC 制作工艺和组成结构复杂, 内部反应过程涉及多物理场, 是一种复杂的非线性系统, 当故障发生时, 电池内部参数变化难以直接观测, 故障发展机理无法准

确描述, 导致输出电压下降, 严重影响系统安全稳定运行, 甚至造成电池寿命衰减, 阻碍了其商业化应用进程^[2-3]。因此, 通过可靠的故障诊断策略实时辨识出燃料电池发生的各类故障, 这样不仅阻止故障蔓延, 缓解故障影响, 保证燃料电池系统在使用期间能够安全、可靠、高效的运作, 同时也保证了人身安全, 减少经济损失, 在安全性和经济性上都具有十分重要的意义。

本文总结了燃料电池系统的故障类型及影响, 梳理了电池系统故障诊断识别方法的研究思路, 为故障诊断识别策略的开发提供了方向。

1 燃料电池系统故障类型及影响

1.1 燃料电池系统的概述

燃料电池系统是燃料电池汽车的核心部件, 其系统主要包括: 氢气供给子系统、空气供给子系统、加湿子系统、氮气吹扫子系统、温度控制子系统、电子负载子系统和电堆^[4]。其系统结构

收稿日期: 2023-01-05

作者简介: 刘斌 (1979-), 男, 高级工程师。研究方向: 检测技术及电力系统。E-mail: lbin_nb@163.com

如图 1 所示。

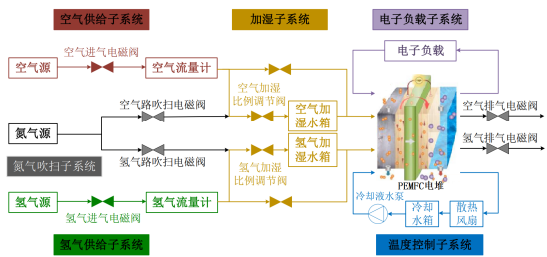


图 1 燃料电池系统结构图

其中，氢气和空气供给子系统向整个系统提供反应所需的燃料和氧化剂；加湿子系统为电堆反应提供合适的反应物湿度，一方面使膜充分湿润，避免膜的过干影响质子的传导，造成电化学反应效率下降，另一方面及时排除产生的水，避免膜的过湿，使气体流动阻塞，造成“水淹”故障；温度控制子系统用于调控电堆合适的温度；电子负载子系统通过电子负载进行放电并采集各种电参数，可以根据电堆的不同规格及运行情况设定相应的负载大小；电堆是整个 PEMFC 系统最核心的组件，为燃料和氧化剂的反应提供场所；氮气吹扫子系统向电堆吹扫氮气有效降低反应后残余在电堆内部燃料和氧化剂浓度，有助于减缓燃料电池残余反应物致使的膜电极衰减，保障电池性能^[5-6]。

1.2 燃料电池系统常见故障类型

表 1 PEMFC 常见故障类型、原因及影响^[7-9]

故障类型	故障原因	影响
氢气供给子系统故障	1、氢气进堆压力过低； 2、氢气泄露。	1、降低电堆输出性能； 2、爆炸隐患。
空气供给与加湿子系统故障	1、空气进堆压力过低； 2、空气进堆湿度过低	1、降低电池输出性能；2、导致质子交换膜缺水而过干，使其质子传导能力减弱，电堆输出性能变差。
温度控制子系统故障	1、冷却水压力过低； 2、冷却水出堆温度过高。	降低电堆的输出性能。
燃料电池电堆故障	1、电极故障； 2、质子交换膜故障； 3、双极板故障； 4、外界因素造成损坏。	1、催化剂中毒、性能衰弱以及电极水淹。 2、压力差过大和温度过高导致膜破裂和膜水淹。 3、气体流动场堵水和导电性变差。 4、长时间严重过载和装配不可靠，会对电堆和单电池造成损坏。

据燃料电池汽车运行的相关故障统计数据表

明，燃料电池汽车发生故障的主要集中在燃料电池系统。燃料电池系统作为气-水-电-热多物理场耦合的复杂动态系统，其工作状态与输出性能受诸多因素影响，在运行过程中可能出现各种故障。常见的故障类型、原因及影响见表 1。

这些故障的频繁发生会降低 PEMFC 的可靠性和耐久性，缩短其使用寿命，严重时会对燃料电池造成致命伤害。因此，通过可靠的故障诊断策略及时准确识别各种故障，对于防止故障蔓延，提高 PEMFC 的性能和寿命具有重要意义。

2 燃料电池系统故障诊断识别方法

故障诊断方法是通过对设备运行信息进行检测、分析和处理，监测设备的工作状态，分析故障成因，预测劣化趋势，从而提高设备效率和运行可靠性^[10]。目前，PEMFC 故障诊断方法分为三类：基于实验测试、模型和数据驱动的方法。

2.1 基于实验测试的 PEMFC 故障诊断方法

基于实验测试的诊断方法是通过实验现象和实验数据探究故障典型模式。测量 PEMFC 在不同故障下运行的电压、膜内阻、电堆温度、气体进出口压差等运行参数，从而获取系统在不同故障下的典型输出模式并建立专家经验库。常用系统运行参数（交流阻抗谱，压力降等）及可视化技术的故障诊断^[11]。

2.1.1 基于系统运行参数的故障诊断

Huaxin Lu^[12]采用电流脉冲注入作为扰动注入法，通过连续小波变换和最大似然估计得到电化学阻抗谱。然后，根据电化学阻抗谱对改进的等效电路模型参数进行识别，实现质子交换膜燃料电池水淹、膜干等故障的准确、快速在线诊断。Li 等人^[13]使用单个电池电压作为诊断变量和支持向量机（SVM）诊断燃料电池堆中的 CO 中毒。由于系统工况复杂，通过实验的方法将所有工况下的典型故障模式模拟出来工作量巨大。同时随着运行时间的累积，PEMFC 性能会出现衰减，系统辅助部件相关参数也具有时变特性。

2.1.2 基于可视化技术的故障诊断

可视化技术可以直观观察到电堆内部水的状态，基于观测结果可以对电堆内的流道等电堆参数进行优化，以提高电堆性能。但由于设备昂贵、技术要求高等因素不适合在线的水淹/膜干诊断，而且大多数可视化技术只能提供定性分析，无法进行定量分析^[14]。

因此,基于实验测试的 PEMFC 故障诊断方法具有一定的局限性。

2.2 基于模型的 PEMFC 故障诊断方法

基于模型的诊断方法是通过对实际系统与解析模型输出产生的残差进行分析、处理和决策的故障诊断^[15]。基于模型的故障诊断如图 2 所示。因此,PEMFC 建模的准确性是保证评估结果可靠性的关键。常采用机理模型和经验模型进行故障诊断。

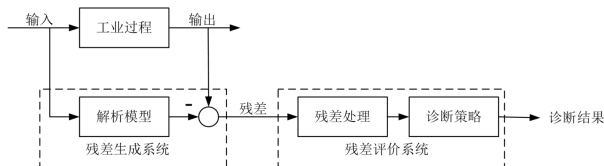


图 2 基于模型的 PEMFC 故障诊断

2.2.1 基于机理模型的故障诊断

机理模型是根据 PEMFC 系统内部机理,基于质量平衡方程、能量平衡方程、化学反应原理及电路原理等获得的数学模型。Yang Quan 等^[16]采用了基于解析冗余的燃料电池发动机系统故障诊断方法,首先用状态方程表示燃料电池发动机的数学模型,然后生成解析冗余关系,最后得到数值仿真的结果,实现对膜过干、水淹等故障诊断。机理模型的优点是基于模型参数观测到 PEMFC 老化过程中内部状态和关键参数的变化,对系统描述高准确性和通用性;其缺点在于建立模型需要了解电机、机械、流体学、热力学以及电化学等多个领域的知识,精确建模困难,计算量较大,难以适用于实时系统。

2.2.2 基于经验模型的故障诊断

Moeinjahromi 等^[17]提出了考虑温度、相对湿度、压力和循环电压影响的 ECSA 衰减经验模型,用于预估循环负载条件下 PEMFC 的 ECSA 衰减,并利用 26 篇不同文献中的 ECSA 衰减实验数据验证了该模型的准确性和通用性。经验模型具有实现简单、计算复杂度低和易于在线使用的优点。但与机理模型相比,经验模型也存在精度低、通用性差、需要更多的实验数据来辨识模型参数。

2.3 基于数据驱动的 PEMFC 故障诊断方法

基于数据驱动的故障诊断方法通过对燃料电池历史运行过程中的各个参数进行数据采集、特征提取、数据分类和诊断决策,结合人工智能等技术挖掘故障特征信息,无需建立故障模型,实现系统故障的精确诊断。常用基于模式识别、信

号处理、人工智能的故障诊断

2.3.1 基于模式识别的故障诊断

基于模式识别的故障诊断包括支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、ANN、决策树等模式识别算法。其故障诊断如图 3 所示。

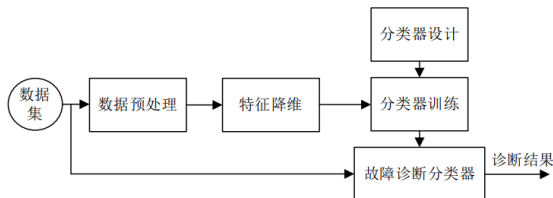


图 3 基于模式识别的 PEMFC 故障诊断

田颖等^[18]提出一种基于改进的人工蜂群(IABC)优化支持向量机(SVM)的故障诊断方法,通过非线性燃料电池系统模型做了算法的验证,结果表明该算法的准确率达到 96.12%,有较好的诊断效果。

2.3.2 基于信号处理的故障诊断

基于信号处理的诊断方法是通常利用小波变换、经验模式分解、主元分析等方法对信号进行诊断处理,直接对可以测量的信号进行分析,获取所需的特征值,实现故障诊断,不需要构建数学模型。Lei Mao^[19]在聚合物电解质膜燃料电池故障诊断中对不同尺寸的传感器组的性能进行了有效性对比,利用小波包变换和核主成分分析对数据集进行降维,提取特征进行状态分类,实现了 PEMFC 水故障的识别。

2.3.3 基于人工智能的故障诊断

Liu Zhongyong^[20]开发了一种 Inc-DenseNet 的新型密集连接神经网络用于 PEMFC 故障诊断,实现高精度的故障诊断,其 PEMFC 四种健康状态(正常、水淹、脱水、缺氧)的诊断准确率可达 95.3%。马睿等^[21]利用卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)技术识别 PEMFC 故障特征,通过 100kW 蒸汽型燃料电池数据验证诊断方法性能,结果表明所提方法能够 100%识别出膜干故障、氢气泄漏故障、正常状态以及未知状态 4 种运行状态。

3 结论与展望

目前,为保障 PEMFC 系统安全稳定运行,应该建立有效的故障识别策略,对实际运行中的多类故障进行快速且准确地识别,并及时隔离故障。还需在以下方面进行深入研究:

1) 针对不同 PEMFC 系统的运行故障, 数据驱动方法可以开发出具有针对性的诊断策略, 具有较好的可移植性, 能够用于在线诊断, 但难以实现复杂度与精度的兼顾;

2) 进一步研究多堆燃料电池系统的故障特征以及适用于多堆系统的故障诊断技术。

参考文献:

- [1] 张杜娟, 杨雪嘉, 刘倩倩, 丁刚强, 黄瀚文, 阮润李. 质子交换膜燃料电池铂基催化剂技术发展[J]. 船电技术, 2021, 41(11): 27-30.
- [2] Pahon E, Hissel D, Jemei S, et al. Signal-based diagnostic approach to enhance fuel cell durability[J]. Journal of Power Sources, 2021, 506(6318):230223.
- [3] 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012, 18(1):13.
- [4] Lu J, Gao Y, Zhang L, et al. PEMFC water management fault diagnosis method based on principal component analysis and support vector data description[C]. IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2021:1-8.
- [5] 谷靖, 卢兰光, 欧阳明高. 燃料电池系统热管理子系统建模与温度控制[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(11): 4.
- [6] Nci M. Interline fuel cell (I-FC) system with dual-functional control capability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(1).
- [7] 熊秋芬. 燃料电池发动机信号检测及故障诊断系统研究与实现[D]. 武汉理工大学, 2018.
- [8] 杨朵. 燃料电池空气供给系统控制与故障诊断策略研究[D]. 中国科学技术大学, 2021.
- [9] 全睿. 车用燃料电池系统故障诊断与维护若干关键问题研究[D]. 武汉理工大学, 2011.
- [10] Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, F. Gustin, H.S. Ramadan, S. Fukuhara. Fault diagnosis methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 42(2).
- [11] Hao Yuan, Haifeng Dai, Xuezhe Wei, Pingwen Ming. Model-based observers for internal states estimation and control of proton exchange membrane fuel cell system: A review[J]. Journal of Power Sources, 2020, 468(C).
- [12] Huaxin Lu, Jian Chen, Chizhou Yan, Hao Liu. On-line fault diagnosis for proton exchange membrane fuel cells based on a fast electrochemical impedance spectroscopy measurement[J]. Journal of Power Sources, 2019, 430.
- [13] Zhongliang Li, Rachid Outbib, Stefan Giurgea, Daniel Hissel, Samir Jemei, Alain Giraud, Sebastien Rosini. Online implementation of SVM based fault diagnosis strategy for PEMFC systems[J]. Applied Energy, 2016, 164.
- [14] 张雪霞, 蒋宇, 孙腾飞, 陈维荣. 质子交换膜燃料电池水淹和膜干故障诊断研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(04): 828-838+864.
- [15] Hwanyong Oh, Won-Yong Lee, Jinyeon Won, Minjin Kim, Yoon-Young Choi, Soo-Bin Han. Residual-based fault diagnosis for thermal management systems of proton exchange membrane fuel cells[J]. Applied Energy, 2020, 277.
- [16] Yang Q, Aitouche A, Bouamama B O. Fault Detection and Isolation of PEM Fuel Cell System by Analytical Redundancy[C]. Control & Automation. IEEE, 2010:685-688.
- [17] M. Moein-Jahromi, M.J. Kermani, S. Movahed. Degradation forecast for PEMFC cathode-catalysts under cyclic loads[J]. Journal of Power Sources, 2017, 359.
- [18] 田颖, 韩峰, 李贺, 张龙海. 聚合物电解质膜燃料电池空气供应系统故障诊断[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(04): 116-123.
- [19] Lei Mao, Lisa Jackson. Effect of Sensor Set Size on Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Fault Diagnosis[J]. Sensors, 2018, 18(9).
- [20] Liu Zhongyong, Mao Lei, Hu Zhiyong. A novel densely connected neural network for proton exchange membrane fuel cell fault diagnosis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(94).
- [21] 党翰斌, 马睿, 周俊杰, 皇甫宜耿. 基于 CNN 的质子交换膜燃料电池故障诊断[J]. 电力电子技术, 2020, 54(12): 52-55.