

氢能轨道交通的研究现状与发展趋势

陈维荣¹, 王颖民¹, 李秉训¹, 孟翔¹, 张世聪², 李奇¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756;

2. 中国铁道科学研究院 机车车辆研究所, 北京 100081)

摘要: 在“双碳”目标提出后, 氢燃料电池因其清洁、环保、高效的技术特点而备受关注, 以氢能作为轨道交通车辆的动力已成为铁路领域低碳化转型及绿色发展的有效途径之一。文章首先介绍了氢能在轨道交通领域的国内外发展现状; 其次对各项核心技术进行整理阐述, 包括氢燃料电池系统集成与控制技术、混合动力能量管理技术、燃料电池故障诊断与寿命预测技术等, 并重点介绍各技术优缺点及适用范围; 之后结合实际情况, 分析技术现存的问题与挑战, 并提出发展方向; 最后, 从不同角度对氢能轨道交通的发展趋势进行展望, 为进一步研发与应用提供参考。

关键词: 氢能; 轨道交通; 混合动力系统; 燃料电池; 故障诊断

中图分类号: U267.9; TK91

文献标识码: A

Overview on current research status and development trends of hydrogen-powered rail transit

CHEN Weirong¹, WANG Yingmin¹, LI Bingxun¹, MENG Xiang¹, ZHANG Shicong², LI Qi¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China;

2. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Hydrogen fuel cells, boasting their technical features of cleanliness, environmental and high efficiency, have been gaining significant attention in response to the "carbon peaking and carbon neutrality" goals. In recent years, hydrogen-powered rail vehicles have achieved fruitful results as one of the effective approaches towards the low-carbon transformation and sustainable development in the rail sector. This paper began with an introduction to the current development status of hydrogen-powered rail transit at home and abroad. Then, the core technologies involved were expounded, including the integration and control of hydrogen fuel cell systems, energy management for hybrid power, and fault diagnosis and service life prediction of fuel cells, with a focus on their technical pros and cons and scopes of application. In addition, the existing issues and challenges were analyzed and the development orientations were raised according to the practical considerations. Finally, the development trends of hydrogen-powered rail transit were prospected from different perspectives to provide a reference for further development and application.

Keywords: hydrogen-powered; rail transit; hybrid power system; fuel cell; fault diagnosis

0 引言

2020年9月, 我国提出“双碳”目标, 这为能源

行业的发展指明方向^[1-2]。氢能作为一种可再生、高效率、零污染的清洁能源, 正逐步成为能源转型的重要载体。燃料电池作为一种将燃料中化学能转换为电能的发电装置, 燃料电池技术被认为是实现氢能高效利

基金项目: 国家自然科学基金项目(52077180); 中国国家铁路集团有限公司科研开发计划重点课题(N2021J030)

第一作者: 陈维荣(1965—), 男, 教授, 博导, 俄罗斯工程院外籍院士, 主要从事氢能与燃料电池技术、牵引供电自动化等领域研究。

通信作者: 李奇(1984—), 男, 教授、博导, 入选国家级青年人才计划, 主要从事氢燃料电池系统控制及混合动力系统能量管理等领域研究; E-mail: liqi0800@163.com

引用格式: 陈维荣, 王颖民, 李秉训, 等. 氢能轨道交通的研究现状与发展趋势[J]. 机车电传动, 2023(3): 1-11.

Citation: CHEN Weirong, WANG Yingmin, LI Bingxun, et al. Overview on current research status and development trends of hydrogen-powered rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(3): 1-11.

用的最佳技术。燃料电池按电解质材料可分为质子交换膜型、固体氧化物型、磷酸型、熔融碳酸盐型、碱性型5种类型。其中,质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)具有使用寿命长、功率密度高、启动迅速、环境友好、能量转换效率高等优点,在诸多领域实现广泛应用^[3-4]。目前,氢质子交换膜燃料电池是氢燃料电池的主流技术方向。

使用氢燃料电池是实现轨道交通低碳化、绿色化发展的有效途径之一^[5-9]。单个燃料电池电堆的功率等级较小,一般不能满足轨道交通实际运行需求,因此,通常会多个燃料电池电堆以一定结构组合形成多堆燃料电池系统,以此作为主动力源,同时与储能系统配合组成多堆燃料电池混合动力系统。

氢燃料电池混合动力系统的可靠高效运行是氢能在轨道交通领域应用的关键。当前,在系统能量管理、故障诊断与寿命预测等方面均已开展了较为深入的研究,但在不同技术方法对不同应用场景适应性方面和相关技术在实际复杂现场的工程化方面还存在不足,需要进一步开展深入研究,以满足应用需求和行业发展的需要。

本文首先对国内外氢能轨道车辆的发展历史与现状进行介绍,总结国内氢燃料电池轨道车辆技术的优势与不足;其次,对氢燃料电池混合动力系统的关键技术进行梳理,对比分析技术的优劣与差异,阐明各项技术的实际应用场景;然后,结合实际研究经验,对现存的一些问题和挑战进行分析整理;最后,对未来轨道交通领域氢能的研究发展方向和目标进行展望,为后续研究者提供思路与参考。

1 研究现状

1.1 国外研究现状

目前,国外已有许多国家成功研制了氢燃料电池混合动力轨道车辆。

2002年,美国车辆工程公司(Vehicle Projects LLC)联合燃料电池动力研究所(Fuel Cell Propulsion Institute)共同研制了世界上第1辆以氢燃料电池为动力的机车^[10]。该机车被用作矿用机车,最大功率为17.5 kW,整备质量为36 t,与之前通过蓄电池驱动的矿车相比,减重约30%。2007年,美国的伯灵顿北方圣菲铁路公司(BNSF)提出了大功率燃料电池调车研制计划^[11]。该调车机车的自重为127 t,采用混合动力系统,配备了240 kW的氢燃料电池和最大输出功率超过1 MW的蓄电池,车载氢气质量达70 kg。

2006年,东日本铁路公司(JR East)发布了世界首款氢燃料电池轻轨列车,该车的动力系统由2台65 kW的氢燃料电池和340 kW的蓄电池组成,最高速度可达100 km/h,1次加氢即可行驶50~100 km,比内燃

机车节能约50%。日本铁道综合技术研究所(RTRI)于2003年开展了氢燃料电池客运列车研制^[12],并于2010年将该列车投入正式示范运行,该列车配备6台18.5 kW的氢燃料电池和1组360 kW的蓄电池,续航里程约为300 km,最高速度为110 km/h。2019年,东日本铁路公司与日立公司、丰田公司联合启动了氢燃料电池混合动力列车的研发,目前该工作正在有序进行。

其他国家也同时开展了氢能在轨道交通领域应用的相关研究^[13],其中德国于2005年成功研发第1台氢燃料电池机车;丹麦于2010年研发了第1台氢燃料电池机车,并进行了示范性运行试验;西班牙铁路公司在2011年推出新一代氢燃料电池有轨电车;法国阿尔斯通公司于2016年推出Coradia iLint氢燃料电池列车,并于2017年在德国萨克森州投入商业运营;英国于2019年推出首列氢能源列车,该车既可以由氢燃料电池供电,又可以由接触网供电;此外,韩国、加拿大等国家也制定了氢燃料电池混合动力机车的研发计划^[14]。

1.2 国内研究现状

国内对氢燃料电池混合动力轨道车辆的研究较晚,但成果丰硕。2008年,西南交通大学率先开展研究,并于2013年成功研制出我国首台以氢燃料电池为动力的机车“蓝天号”^[15]。该车的动力系统是由150 kW的燃料电池组成,车载9个氢气罐,续航时间可达24 h以上,最高速度为65 km/h,最大牵引力满足牵引最大质量200 t的要求。

2016年,在“蓝天号”的基础上,西南交通大学和中国中车联合研制了世界上第1辆商用氢燃料电池/超级电容混合动力有轨电车^[16]。该车配备了2个150 kW的氢燃料电池电堆,多个超级电容和动力电池模块,1个35 MPa的高压储氢罐,最大运行速度为70 km/h,可载客336人,续航里程超过40 km。

此外,2016年,清华大学与中国中车联合开发了一种氢燃料电池有轨电车,该车采用三编组设计,搭载200 kW燃料电池作为牵引动力源,采用钛酸锂电池作为储能系统,其电池容量约为88 kW·h,运行速度为70 km/h,单次加氢可持续行驶100 km^[17]。2019年,该车在广东佛山正式投入商业运营,这是世界上第1辆正式投入运营的氢能有轨电车。

2022年12月28日,由中车长客与成都轨道集团共同研发的全球首列氢能市域列车在成都下线。该车最高速度可达160 km/h,续航里程可达600 km,中途行驶无须添加燃料。

2023年3月2日,北京轨道交通技术装备集团有限公司研发的国内首列氢燃料混合动力铰接式轻轨列车在北京下线。该车搭载了氢燃料电池混合动力系统,运行1年可减少约40 t碳排放,其续航里程在100 km

以上。

2 关键技术

2.1 氢燃料电池系统集成与控制技术

氢燃料电池电堆是由多个单片氢燃料电池单体堆叠而成的发电装置。为保证电池系统的安全可靠运行,通常会配备辅机系统,主要包括氢气供应系统、空气供应系统、冷却系统和控制系统^[18]。其中,氢气供应系统通过减压阀、过滤器和比例阀等实现稳定的氢气供应;空气供应系统通过空气过滤器、空压机、中冷器和加湿器等部件,向电堆提供具有一定压力的、清洁湿润的氧气,确保电堆电化学反应的正常进行;冷却系统用于确保系统工作的正常环境温度;控制系统基于传感器实时采集的系统压力、温度等状态参数,根据相应的控制策略调节氢气比例阀开度、空压机转速、背压阀开度等参数,保证燃料电池稳定运行,提升电堆工作效率和净输出功率。

氢燃料电池电堆的性能与海拔、温度、湿度等工作环境条件有关,良好的控制方法可以显著提升电堆运行效率、改善电堆动态响应并增强系统鲁棒性。近年来,国内外学者针对氢燃料电池发电系统的运行区域和动态响应优化开展了大量研究。

①运行区域优化:一般通过对大量离线试验数据的分析来获得系统运行特性,进而指导系统的在线控制。随着燃料电池技术的不断发展,常规环境下的运行控制已较为完善,高海拔条件下的应用成为研究焦点。文献[19]针对小型无人机应用,提出一种基于前馈型模糊PID的电堆温度控制方法和基于安时积分门限法的膜水含量调节方法,兼顾了热管理和水管理,提高了氢燃料电池发电系统的效率;文献[20]分析了海拔变化对压力、流量的影响,进而提出一种通过分数+阶PI^λD^μ控制方法实现无人机跨高度运行条件下的过氧比快速调节。

②动态响应优化:即通过控制方法的优化,提高系统响应速度和鲁棒性。文献[21]提出一种新型的自适应高阶滑模控制方法,利用自适应模糊逻辑系统,在线逼近系统中未建模动态,从而提高了过氧比调节速度及系统稳定性;文献[22]提出一种氢燃料电池发电系统的一阶自抗扰控制方法,通过数据驱动反馈将系统线性化,进而在改善动态响应的同时提高系统效率;文献[23]运用基于神经网络模型的实时线性化氢燃料电池发电系统模型,提出一种近似的预测控制方法来控制其输出电压,从而提高了响应速度。

2.2 混合动力技术

氢燃料电池混合动力系统是列车正常运行时的主要动力源,为列车正常运行提供所需的大部分电能。

储能设备(锂电池或超级电容器)为辅助动力源,在列车启动、加速和爬升等特殊条件下提供所需的电能;同时也用于制动阶段的能量回收,以提高整车的能量利用率,延长氢燃料电池使用寿命^[24]。

氢燃料电池混合动力系统根据其所集成的储能设备数量及类别,可分为两混型和三混型^[25]。两混型主要包括氢燃料电池/锂电池和氢燃料电池/超级电容2种类型;三混型则是氢燃料电池-锂电池-超级电容型。目前,轨道车辆应用通常采用控制策略和管理方法较为简单的两混型氢燃料电池混合动力系统,其中,以锂电池为储能设备的混合动力系统有较高的能量密度,因此车辆的运行里程更长,但其加减速性能受制于有限的功率密度;而氢燃料电池/超级电容混合动力系统具有更高的功率密度,因此车辆有着更好的加减速性能,但超级电容能量密度更低,难以保证运行里程。两混型动力系统主要拓扑结构如图1所示。

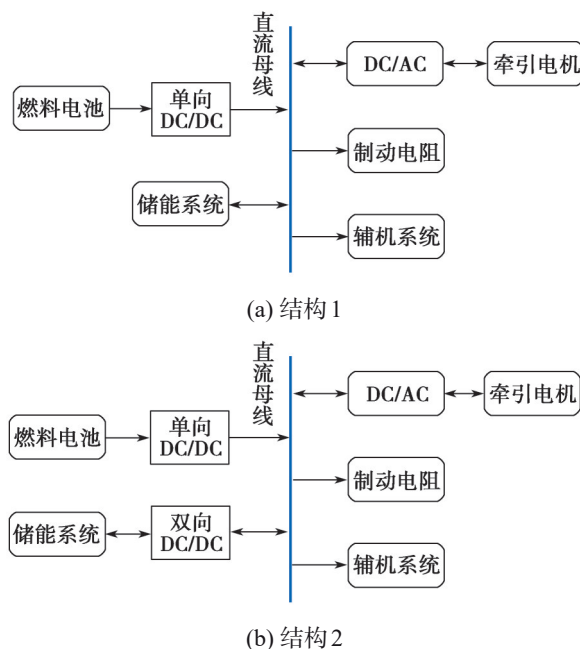


图1 两混型氢燃料电池混合动力系统主要拓扑结构

Fig. 1 Topology of two-hybrid hydrogen fuel cell hybrid power system

结构1中的储能系统直接连接至直流母线,拓扑结构简单易控,应用广泛,但其母线电压受储能系统的荷电状态(SOC)影响较大,可能会限制SOC变化范围,从而影响整个系统的能量管理;结构2的储能系统通过双向DC/DC连接至直流母线,使得母线电压更加稳定,同时储能系统SOC可在更大的范围内变化,其容量可得到充分利用,但该拓扑的控制难度更高。

2.3 混合动力能量管理技术

对于混合动力系统,如何分配主电源和辅助电源的输出功率是问题的关键。考虑经济性,氢燃料电池应尽可能工作在高效率区间;考虑耐久性,氢燃料电

池应尽可能在运行过程中保持平稳输出。因此,在进行能量分配时,需在经济性与耐久性之间寻求平衡。目前,混合动力系统的能量管理方法得到国内外学者的广泛研究,其能量管理策略主要分为2类:基于规则的能量管理策略与基于优化的能量管理策略,如图2所示。

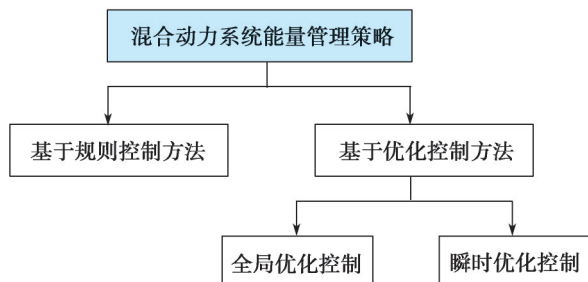


图2 氢燃料电池混合动力系统能量管理策略划分
Fig. 2 Classification of energy management strategies for hydrogen fuel cell hybrid power systems

2.3.1 基于规则的能量管理策略

基于规则的能量管理策略主要包含功率跟随、状态机以及模糊控制等方法。这类方法具有算法设计简单、运算速度快、可靠性高等特点。文献[26]利用神经网络和多岛遗传算法找到了最佳的控制参数集,从而对确定性规则的能量管理方法进行校准,以解决混合动力汽车的排放和经济性冲突问题。文献[27]将神经网络应用于模糊控制,通过神经网络学习模糊逻辑控制器的从属函数,以确保经济性,加快收敛速度。基于规则的能量管理策略有较强的鲁棒性和适应性,更适用于复杂工况,但其依然需要实际经验来提升控制效果,且不能保证最优控制。因此,为实现全局最优的控制效果,更多学者开始探索基于优化的能量管理策略。

2.3.2 基于优化的能量管理策略

基于优化的能量管理策略分为全局优化和瞬时优化。全局优化策略包括动态规划、随机动态规划以及遗传算法等,该策略从全局最优的角度出发求解,一般可得到整个运行工况下的最优解。文献[28]针对燃料电池客车提出了一种基于随机动态规划算法的混合动力系统能量管理策略,其运行条件被建模为离散的随机动态过程,基于此通过策略迭代算法对能量分配进行优化。文献[29]使用动态规划来测试电池重量和存储容量对运行成本的影响,以选择合适的电池容量来降低系统成本。文献[30]开发了基于动态规划的控制器,可将相关成本限制在最小值,同时为电池的SOC引入1个惩罚因子,如果SOC超过了限制幅度,惩罚因子会立即增加。由于基于全局优化的方法需要提前预知未来工况,因此常将其用于固定的驾驶路线,且该方法计算量庞大,不能满足实时能量管理的需要,难以在实际车辆上实现。

瞬时优化策略包括等效氢耗最小方法、庞特里亚

金极小值原理相关方法,通过实时收集车辆数据,建立当前工况下的目标函数,求解实时最优值。虽然瞬时优化策略只能实时计算,无法保证在整个运行工况下目标最优,但其计算量远小于全局优化策略。文献[31]基于等效氢耗理论建立了包括燃料电池瞬时氢耗和蓄电池瞬时氢耗在内的总氢耗模型,并将其应用于城市公交进行测试,结果表明,系统百公里氢耗为9.3 kg,比基于规则的能量管理算法降低了2.1%。文献[32]提出基于庞特里亚金极小值原理的控制策略来维持电池SOC值并减少系统的氢气消耗,该方法通过在混合比例缩小的平台上使用验证了其有效性。此外,瞬时优化策略与智能算法(神经网络、模糊控制)相结合,可获得更加优秀的控制性能。文献[33]提出一种基于在线辨识极小值原理的能量管理方法(A-PMP),将传统极小值原理与基于遗忘因子递推最小二乘算法的在线辨识方法相结合,在减少氢耗的同时优化了燃料电池的性能、维持了辅助动力源的SOC。结合试验测试数据,该方法与等效氢耗最小(ECMS)、最小值原理(PMP)这2种方法的氢耗对比如图3所示。

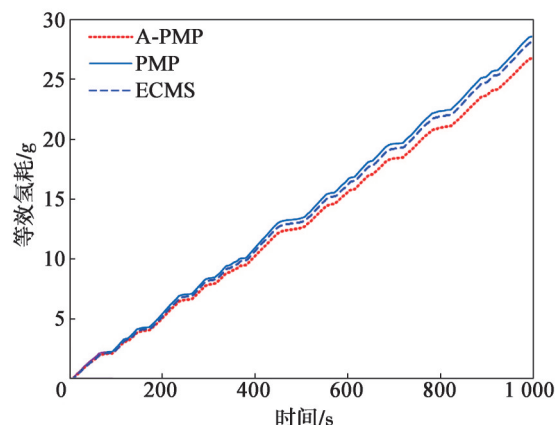


图3 氢燃料电池混合动力系统等效氢耗对比

Fig. 3 Comparison of equivalent hydrogen consumption of hydrogen fuel cell hybrid systems

各种混合动力能量管理方法的优劣对比如表1所示。

表1 混合动力能量管理方法对比

Table 1 Comparison of energy management methods among hybrid power systems

能量管理策略	优点	缺点
基于规则	算法设计简单、运算速度快、可靠性高	依赖于专家经验,不能保证最优控制
基于全局优化	能得到整车运行最优解	计算量大,求解时间长,难以实际应用
基于瞬时优化	计算量小,可实时计算	无法保证整个运行工况内目标最优

目前,混合动力能量管理研究逐渐开始围绕制动能量回收、电池耐久度、舒适度等方面开展;同时,现阶段的管理策略大都基于已知工况,为更好地应用于实际,还需结合实时路况信息,面向更加复杂的

场景。

2.4 氢燃料电池故障诊断与寿命预测技术

由于氢燃料电池的成本较高,其使用寿命制约着其在轨道车辆上的应用。如果电池发生故障(如催化剂中毒、电极水淹),则可能对系统造成不可逆的损坏。因此,故障诊断和寿命预测是氢燃料电池稳定运行的关键^[34-37],该技术可通过基于模型、基于数据驱动和基于试验的方法来实现。

2.4.1 基于模型的故障诊断与寿命预测方法

该方法利用系统的材料特性、老化机制、加载条件等建立模型,收集实际输出数据,进行残差分析并做出决策^[38-40]。

故障诊断模型包括解析模型和黑盒模型。基于解析模型的故障诊断方法需要建立准确的数学模型。文献[41-42]基于自适应聚焦粒子群优化算法提出了氢燃料电池机理模型(模型涉及了流体动力学、热力学、电化学、膜阻抗、传质和膜含水量等方面的关键参数),通过测试平台收集了100组电池电流密度和电压数据,可提高氢燃料电池的输出性能;文献[43]提出一种燃料电池发电系统的鲁棒故障重建方法,利用硬件测试平台重建缺氧工况并预测系统状态,从而验证了该方法的有效性和可行性;文献[44]提出一种基于解析冗余数学模型的PEMFC故障诊断策略,将模型线性化为8个状态方程,基于该模型监测瞬态现象,得出数值模拟结果,检测并隔离水淹、膜干燥和空气压缩机过电压故障。

黑盒模型的输入和输出需基于试验数据的结果推测得出。文献[45]提出一种基于拉格朗日乘数法和反向传播神经网络的集成算法,并通过了训练与测试,试验结果表明该算法的识别精度达到93.24%;文献[46]提出一种适用于在线故障诊断的T-S模糊模型,通过粒子群优化算法和蚁群算法优化模型参数,实现对水淹和膜干燥故障的在线检测,并通过试验验证了方法的准确性;文献[47]提出一种基于支持向量回归的机车模型,PEMFC非线性多变量模型采用有效信息自适应粒子群优化法来调整超参数,与试验数据的比较表明,该方法可显著提高模型的识别能力。

基于模型的寿命预测方法包括卡尔曼滤波器、粒子滤波器、降解机制模型等。文献[48]提出一种基于无迹卡尔曼滤波器的氢燃料电池损伤跟踪与寿命预测策略,试验结果表明该方法可成功追踪损伤参数,预测剩余寿命;文献[49]提出一种融合粒子滤波框架的氢燃料电池预测算法,验证了对数线性模型、指数模型和线性模型3种类型的经验电压降级模型,试验结果表明对数线性模型可预测PEMFC运行500 h后的寿命,预测精度达95%;文献[50]提出用于汽车的PEMFC经验寿命预测模型,将激活损失、欧姆损失和浓度损失添

加到退化项和负载曲线项中,对拟合的协变量进行模拟,并利用历史试验数据验证了模型有效性。

基于模型的诊断预测方法可准确区分故障类别,但在实际应用中,以频率扫描的方式测量阻抗的方法耗时较长,难以实现在线故障诊断。同时,目前该方法主要针对小功率、单片电池进行研究,由于大功率电堆及多堆运行系统的强耦合性、滞后性、不确定性,因此该方法仍需进一步研究。

2.4.2 基于数据驱动故障诊断与寿命预测方法

由于氢燃料电池混动系统是高度不确定的复杂系统,难以通过精确的公式或模型表征系统老化,因此通常可利用氢燃料电池实际运行的样本数据进行诊断与预测^[51-52]。

基于数据驱动的故障诊断方法包括人工智能法和信号处理法。人工智能法是根据系统状态在特征超空间中找到描述特定模式的相关特征,通常需采用经验分类器将实时数据分为各种不同的故障状态以及正常状态,并通过诊断决策来完成故障检测和隔离。文献[53]以EIS作为基本工具,通过融合双重模糊诊断策略来在线监测PEMFC的水管理状态,试验结果表明所提策略可以诊断3种健康状态(正常、氧饥饿和氧饱和),但无法确定电池故障的具体位置。文献[54]提出基于概率神经网络和线性判别分析的PEMFC水管理故障诊断方法,对17 086组相关故障数据的研究表明,该方法可检测3种故障状态(正常、水淹和膜干燥),其训练和测试样本的识别精度分别达到99.80%和93.48%。

信号处理法是以数字运算方法实现信号变换、滤波、检测和估值,因此可观察到在时域中无法表示的内容。文献[55]提出一种基于模式识别和小波变换模极大值的故障诊断策略,试验结果表明,该方法可识别出气压压力过低、阴极流量过高、一氧化碳中毒和冷却回路短路等故障,其精确度高达100%;文献[56]提出一种考虑经验模式分解的水管理子系统故障诊断策略,该策略将输出电压划分为14个本征模式函数,并对每个本征模式函数贡献的能量进行估计,试验结果表明该方法的故障识别精度超过98%。

基于数据驱动的寿命预测方法有回声状态网络、自适应神经模糊推理系统、长短期记忆递归神经网络等。文献[57]提出一种考虑回声状态网络的氢燃料电池退化预测方法,从现有的氢燃料电池压降数据中学习网络参数,并通过迭代结构预测其功率和电堆电压,计算剩余寿命;文献[58]提出一种基于自适应神经模糊推理系统的氢燃料电池老化预测策略,结果表明,该方法特别适合于预测由PEMFC发电系统特性退化引起的特性损失;文献[59]提出基于LSTM RNN循环神经网络的PEMFC剩余寿命预测方法,该方法采用等间隔采样和局部加权回归离散平滑方法对数据进行重建和平滑,大大降低了数据计算成本,通过对PEMFC

的 1 154 h 老化试验结果分析表明,其预测精度达 99.23%。

基于数据驱动的诊断预测方法不依赖于对象的具体模型,而是利用大量历史数据进行分析,采用不同数学算法进行数据处理,进而开展诊断与预测。该方法在在线诊断时有较大优势,但在所需时间和识别准确率方面仍需进一步提升性能。

2.4.3 基于试验的故障诊断与寿命预测方法

该方法的研究内容较少,但具有独特优势,具体包括磁场法和故障运行法。

利用氢燃料电池周围环绕的磁场识别故障可以不影响电池的正常使用,且可以重复进行。文献[60]为监测氢燃料电池电流周围的磁场,开发了三维偏微分方程模拟平台,构建了电池故障和特定磁场属性之间的对应关系,该方法可估计氢燃料电池的感应磁场并区分故障单体电池。

故障运行法是指在各种运行模式下进行故障测试,以收集实际数据,并找到动力系统的最佳运行系数。文献[61]在各种运行模式下进行了淹没故障试验,根据水淹故障发生阶段氢燃料电池中阳极气体的压降呈阶梯式变化的特点,将故障过程分为 4 个阶段(湿润期、无水期、水淹期和过渡期),并根据预警限值提出基于微湿控制区和区间划分标准的故障诊断策略,使电池能够在无膜干故障和水淹故障 2 种模式下运行。

基于试验的诊断预测方法能够在不影响氢燃料电池正常使用的情况下进行检测,但其成像设备较贵,目前仅适用于实验室研究。

各诊断预测方法优劣如表 2 所示

表 2 故障诊断与预测方式对比

Table 2 Comparison of fault diagnosis and prediction methods

方法类型	优点	缺点
基于模型的方法	可精准识别故障	难以实现在线检测,对大功率多堆燃料电池研究较少
基于数据驱动的方法	不依赖于模型,基于历史数据,易实现在线检测	检测时间与准确率需进一步提升
基于试验的方法	不影响燃料电池正常使用	成本过高,难以实现商业化应用

2.5 车载储氢技术

由于氢气的分子质量小、性质活跃,并且热值较高,出于安全性考虑,装载氢燃料电池混合动力系统的氢能轨道车辆还需要解决车载储氢的难题^[62]。目前,车载储氢技术按照存储原理可分为物理储氢和化学储氢 2 类。物理储氢主要包括高压气态储存、低温液态储存;化学储氢主要包括金属氢化物储氢、有机液体储氢。

高压气态储氢是指利用高压,将氢气压缩至气瓶的储氢方式。该方法成本低、技术成熟,是目前应用最广泛的储氢方式,但仍存在容易泄漏、储氢密度不高的问题,因此,需要提升其安全性和质量,向高压化、轻量化、低成本的方向进一步发展。

低温液态储氢是将氢气压缩冷却至-252 ℃以下,使其液化并储存于绝热真空储存器中。该方法的储氢纯度和密度大幅提高,但存在氢气液化能耗较高和氢气容易因储氢材料隔热性能不足而蒸发损失的难点,需要向低挥发、高质量、低成本方向发展。

有机液体储氢是利用不饱和有机物液体的加氢、脱氢反应实现储氢。该技术储氢密度高,极具应用前景,安全性好,但有机物会影响氢气纯度和其使用效率,需要进一步提升储氢介质的脱氢效率与催化剂性能,降低脱氢成本。

金属氢化物储氢是以金属氢化物的形式吸附氢,并通过加热氢化物释放氢气。该方法有着氢气释放纯度高、储氢压力平稳、安全性好等优点,后续应用需在提高材料储氢量、降低成本、优化反应温度、优化储氢罐结构等方面进行研究强化。

各种储氢方式的优劣如表 3 所示。

表 3 储氢方式对比

Table 3 Comparison of hydrogen storage methods

储氢方式	优点	缺点
高压气态储氢	成本低,技术成熟,充放氢气快,工作条件宽	容易泄漏,储氢密度低
低温液态储氢	纯度高,储氢密度高	易挥发,液化过程能耗较大
有机液体储氢	储氢密度高,安全性高	有机物会影响氢气纯度,导致其效率降低
金属氢化物储氢	氢气释放纯度高,储氢压力平稳,安全性好	反应温度条件要求较高

3 存在的挑战

3.1 技术挑战

氢燃料电池商业化应用目前还存在不少技术上的挑战。由于材料方面的限制,当前氢燃料电池对氢气浓度和运行环境的要求较高。当氢气浓度不足、运行条件恶劣或者功率波动较大时,电池的耐久性将大幅下降、服役寿命大大缩短,极大影响氢燃料电池在轨道交通行业的应用。目前用于移动式发电的燃料电池系统的寿命一般仅为 20 000~25 000 h 左右,无法满足轨道交通车辆 20~30 年设计寿命需求,因此在车辆的设计寿命内,需多次更换燃料电池系统。同时,由于机车车辆运行的功率需求较大,而当前单套氢燃料电池系统可输出的最高功率仅为 100~150 kW,因此需配备多堆氢燃料电池作为主动力源。但多堆氢燃料电池结

构相对复杂,具有多物理场、多能量流及多时间尺度特征,协调控制难度较高。

除此之外,氢气储存问题仍需进一步解决。当前,车载储氢方式仍以高压气态储氢为主,为满足机车车辆的功率需求,在保证安全性的基础上,需进一步提升车载储氢瓶的储氢质量,而其影响因素主要包括储氢的压力和温度。目前,主流储氢瓶的最大工作压力一般为35 MPa和70 MPa^[63],考虑轨道车辆的续航里程需求,70 MPa及以上的储氢瓶是未来的发展趋势。同时,温度对储氢瓶储氢能力的影响较大,储氢瓶的温度会随环境温度与工作状态的变化而变化,导致瓶内压力也随之变化,从而影响储氢瓶的储氢质量。以容积为160 L、压力为70 MPa的储氢瓶为例,假设环境温度大致分为春夏季温度(20~60 ℃)和秋冬季温度(-40~20 ℃),那么当春夏季最大储氢质量计算约为5.8 kg时,秋冬季可达到6.4 kg^[64],这将导致氢燃料电池轨道车辆的续航里程受温度影响较大,也制约其商业化进程。

3.2 安全要求

氢安全控制是制约氢能轨道车辆商业化的难点。目前,氢安全控制策略已形成完善的框架,主要分为加氢安全策略、储氢安全策略、氢泄漏及排氢安全策略和整车紧急状态安全策略^[65]。

①加氢安全策略主要针对高压氢气加注时氢气快速升温可能引发的安全隐患。目前常用的储氢形式为高压气态储氢,为实现氢气安全、快速地加注,通常采用氢气预冷、温升控制和分级加注结合的方法,降低加氢时氢气温度,提高加氢效率。

②储氢安全策略主要是利用温度、压力、氢浓度传感器等对储氢瓶实时监测,通过控制器读取传感器信号并采用相应的策略计算参数、对参数进行判断和故障处理,提醒驾驶人员采取安全措施。

③氢燃料电池工作时会产生水,因此在排出积水时不可避免会有少量氢气排出。氢泄漏及排氢安全策略主要是保证排氢浓度低于可燃值。当排氢浓度高于预设值时,一般可以通过减少排氢时间、增加空气排放量的方法来降低氢气浓度,从而确保车辆与乘客的安全。

④当燃料电池出现故障、车辆出现碰撞或急停的紧急情况时,为避免因氢气引发事故,整车紧急状态安全策略必不可少。当车辆异常行驶时,供氢系统将进入安全应急状态,停止供氢并立即报警提示,保证车辆及人员安全。

目前,氢能轨道车辆产业规模进一步扩大,其安全控制已成为研究重点。随着仿真技术的进步、测试数据的积累和传感器技术的提升,安全控制技术将得到迅速发展。

3.3 成本要求

氢燃料电池轨道车辆的成本也需要考虑,虽然氢燃料轨道车辆可以摆脱接触网系统,节约建设成本,但是氢燃料电池较短的服役时间导致其需要多次更换,整体运行成本高于接触网和储能式车辆^[66-69]。因此,减少燃料电池更换次数能更好地降低运行成本。目前的研究主要是针对多堆燃料电池的一致性、燃料电池的故障诊断,只有减少燃料电池的更换次数,才能更好地将该技术应用于我国轨道交通之中。

此外,氢气成本也是需要考虑的问题。目前,氢气成本高于电能的主要原因是氢能产业正处于起步阶段,氢气制造行业还未形成规模。但随着氢能相关产业的发展和光伏制氢技术的成熟,制氢的成本将会大幅降低,并有望低于电能,成为考虑环境保护与经济效益的首选^[70-71]。

3.4 加氢站建设

氢燃料电池轨道车辆加氢是急需解决的问题。2019年,随着世界上第1辆正式投入运营的氢能有轨电车在佛山上线,中国建立了首个氢能有轨电车加氢站。

目前国内加氢站的建设标准大多针对汽车,针对氢能轨道车辆加氢站的规范相对较少。氢燃料电池轨道车辆的功率需求和氢气容量要求远大于氢燃料电池汽车,加氢站的容量增大,建设难度与要求增加;同时,伴随着加氢站规模的增大、加氢时间的增加,其安全设计应更加严格。虽然国内尚无运营加氢站的重大伤亡事故,但随着加氢需求的增加,风险也会随之增大。目前加氢站的风险主要是易燃、高压和泄漏范围大,且这些风险主要在氢气储运、加注和使用3个环节。因此,加氢站需要向高储氢、安全化、规范化的方向发展,同时也需针对轨道交通的独特加氢特性进行研究。

4 发展趋势

4.1 高速化与重载化

尽管氢燃料电池轨道车辆在节能减排上的表现要优于传统列车,但受限于氢燃料电池的输出功率,其行驶速度相对较低。为了更好地满足乘客需求,高速化是氢燃料电池客运轨道车辆的主要发展方向之一。目前,我国时速120~160 km的氢燃料电池城际动车组正处于实施阶段,时速160~200 km的氢燃料电池动车组正处于可行性研究阶段。未来,氢燃料电池轨道车辆将以更高的运行速度服务我国轨道交通的低碳发展。同时,我国目前也正在对氢燃料电池站场调车和重载机车进行深入研究,提升氢燃料电池机车整体性能,支撑轨道交通的绿色转型。

4.2 整车正向设计

现阶段氢燃料电池轨道车辆的应用以既有车型改造和零部件升级替换为主,存在车辆性能与运行要求不匹配的情况。因此,后续氢燃料电池轨道车辆需开展正向设计,以性能设计、结构设计、试验测试不断迭代为过程,以设计技术、设计规范、设计软件、数字孪生设计集成为核心,除了响应运行速度、节能环保等市场需求外,更要面向先进技术参数,即高效率、高可靠性、智能化运维等进行整体规划,与现有的轨道车辆研发与生产融合,打造氢燃料电池轨道车辆设计、制造、运维开发一体化能力。

5 结论

本文对氢能在国内外轨道交通行业的发展现状进行了整理,对核心技术的研究现状进行了梳理和介绍,分析了目前存在的问题和挑战,并对行业趋势进行了展望。

总体而言,氢能应用于轨道交通可以有效降低碳排放和建设成本,但由于部分技术的成熟度、产业链整体的发展情况与行业配套的完善程度等原因,氢能大规模应用于我国轨道交通产业仍任重道远。但氢能有着它独特的优势,随着相关技术、产业的发展更迭,氢能必将在轨道交通领域大放异彩,成为我国新能源产业中不可或缺的部分。

参考文献:

- [1] 曹键. “双碳”目标下“十四五”特高压规划线路对铁路煤炭运输的影响分析研究[J]. 铁道经济研究, 2021(6): 12-15.
CAO Jian. Analysis and research on the impact of planned UHV lines in the 14th Five Year Plan on railway coal transportation under the goal of "carbon peaking and carbon neutrality"[J]. Railway Economics Research, 2021(6): 12-15.
- [2] 张明琦, 郑泽东, 李永东. 公路货运能耗及低碳化发展路径研究[J]. 机车电传动, 2022(3): 10-16.
ZHANG Mingqi, ZHENG Zedong, LI Yongdong. Research on road freight energy consumption and low-carbon development path[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(3): 10-16.
- [3] 储鑫, 周劲松, 刘东华, 等. 国内外氢燃料电池汽车发展状况与未来展望[J]. 汽车实用技术, 2019(4): 8-10.
CHU Xin, ZHOU Jinsong, LIU Donghua, et al. Development and future prospect of the hydrogen fuel cell vehicle at home and abroad[J]. Automobile Applied Technology, 2019(4): 8-10.
- [4] 刘坚, 钟财富. 我国氢能发展现状与前景展望[J]. 中国能源, 2019, 41(2): 32-36.
LIU Jian, ZHONG Caifu. Current status and prospects of hydrogen energy development in China[J]. Energy of China, 2019, 41(2): 32-36.
- [5] 中国城市轨道交通协会. 《城市轨道交通“十四五”人才培养规划》发布: “十三五”回顾与“十四五”发展展望[J]. 城市轨道交通, 2021(11): 14-17.
China Association of Metros. Release of the "14th Five Year Plan for talent cultivation in urban rail transit": review of the 13th Five Year Plan and development prospects for the 14th Five Year Plan[J]. China Metros, 2021(11): 14-17.
- [6] 韩庆军, 姚正斌. 氢燃料电池有轨电车结构设计及控制方法研究[J]. 机车电传动, 2016(2): 48-51.
HAN Qingjun, YAO Zhengbin. Structure design and control method for hydrogen fuel cell tramcar[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(2): 48-51.
- [7] 付稳超, 齐洪峰, 戴朝华, 等. 有轨电车燃料电池混合动力多目标匹配优化[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 604-611.
FU Wenchao, QI Hongfeng, DAI Chaohua, et al. Multi-objective matching optimization for hybrid fuel-cell power system in trams[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 604-611.
- [8] 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.
- [9] 徐磊, 田庆, 李艳昆. 基于DP优化的有轨电车用燃料电池混合电源系统协调控制[J]. 机车电传动, 2021(6): 73-80.
XU Lei, TIAN Qing, LI Yankun. Coordinated control of fuel cell hybrid power system for trams based on DP optimization[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(6): 73-80.
- [10] 王旭海, 齐红瑞, 孙凤霞, 等. 氢燃料电池增程式混合动力机车动力系统设计[J]. 机车电传动, 2022(3): 110-115.
WANG Xuhai, QI Hongrui, SUN Fengxia, et al. Powertrain system design of hydrogen fuel cell range-extended hybrid electric locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(3): 110-115.
- [11] MILLER A R, HESS K S, BARNES D L, et al. System design of a large fuel cell hybrid locomotive[J]. Journal of Power Sources, 2007, 173(2): 935-942.
- [12] LIU Jianxing, LAGHROUCHE S, AHMED F S, et al. PEM fuel cell air-feed system observer design for automotive applications: an adaptive numerical differentiation approach [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(30): 17210-17221.
- [13] KIM N, CHA S, PENG H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(5): 1279-1287.
- [14] FERNANDEZ L M, GARCIA P, GARCIA C A, et al. Com-

- parison of control schemes for a fuel cell hybrid tramway integrating two dc/dc converters[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(11): 5731-5744.
- [15] PENG Fei, CHEN Weirong, LIU Zhixiang, et al. System integration of China's first proton exchange membrane fuel cell locomotive[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(25): 13886-13893.
- [16] 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.
- [17] ZHANG Wenbin, LI Jianqiu, XU Liangfei, et al. Comparison study on life-cycle costs of different trams powered by fuel cell systems and others[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(38): 16577-16591.
- [18] 宋昱, 韩恺, 李小龙, 等. 燃料电池汽车混合度与能量管理策略研究[J]. *交通科技与经济*, 2019, 21(2): 40-46.
- SONG Yu, HAN Kai, LI Xiaolong, et al. A study of degree of hybridization and energy management strategies for fuel cell electric vehicle[J]. *Technology & Economy in Areas of Communications*, 2019, 21(2): 40-46.
- [19] 向乾, 张晓辉, 王正平, 等. 适用无人机的小型燃料电池控制方法[J]. *航空学报*, 2021, 42(3): 86-97.
- XIANG Qian, ZHANG Xiaohui, WANG Zhengping, et al. Control method of small fuel cells for UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(3): 86-97.
- [20] 赵冬冬, 赵国胜, 夏磊, 等. 无人机用燃料电池阴极供气系统建模与控制[J]. *航空学报*, 2021, 42(7): 496-512.
- ZHAO Dongdong, ZHAO Guosheng, XIA Lei, et al. Modeling and control of fuel cell cathode gas supply system for UAV[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(7): 496-512.
- [21] 马冰心, 王永富. PEMFC系统过氧比的自适应高阶滑模控制[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(2): 253-264.
- MA Bingxin, WANG Yongfu. Adaptive high-order sliding mode control for oxygen excess ratio of PEMFC system[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(2): 253-264.
- [22] SUN Li, SHEN Jiong, HUA Qingsong, et al. Data-driven oxygen excess ratio control for proton exchange membrane fuel cell[J]. *Applied Energy*, 2018, 231: 866-875.
- [23] SHOKUHI-RAD A, JAMALI A, NAGHASHZADEGAN M, et al. Optimum Pareto design of non-linear predictive control with multi-design variables for PEM fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(15): 11244-11254.
- [24] 陈维荣, 朱亚男, 李奇, 等. 轨道交通用多堆燃料电池发电系统拓扑及系统控制与检测方法综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23): 6967-6980.
- CHEN Weirong, ZHU Yanan, LI Qi, et al. Review and prospect of structures, control and detection schemes of multi-stack fuel cell power generation system used in rail traffic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6967-6980.
- [25] 张国瑞, 李奇, 韩莹, 等. 基于运行模式和动态混合度的燃料电池混合动力有轨电车等效氢耗最小化能量管理方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23): 6905-6914.
- ZHANG Guorui, LI Qi, HAN Ying, et al. Study on equivalent consumption minimization strategy based on operation mode and DDOh for fuel cell hybrid tramway[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6905-6914.
- [26] DUAN B M, WANG Q N, WANG J N, et al. Calibration efficiency improvement of rule-based energy management system for a plug-in hybrid electric vehicle[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2017, 18(2): 335-344.
- [27] 于瑞广, 邹再新, 王亚祥, 等. 混合动力汽车模糊神经参考控制策略优化[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(16): 357-362.
- YU Ruiguang, WU Zaixin, WANG Yaxiang, et al. Optimization of fuzzy neural reference control strategy for hybrid electric vehicle[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(16): 357-362.
- [28] 张炳力, 代康伟, 赵韩, 等. 基于随机动态规划的燃料电池城市客车能量管理策略优化[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(17): 4664-4667.
- ZHANG Bingli, DAI Kangwei, ZHAO Han, et al. Optimized energy management strategy for fuel cell city bus based on stochastic dynamic programming[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(17): 4664-4667.
- [29] RURGLADDAPAN J, UTHAICHANA K, KAEWKHAM-AI B. Li-Ion battery sizing and dynamic programming for optimal power-split control in a hybrid electric vehicle[C]// *IEEE. 2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. Phetchaburi: IEEE, 2012: 1-5.
- [30] XU Liangfei, OUYANG Minggao, LI Jianqiu, et al. Dynamic programming algorithm for minimizing operating cost of a PEM fuel cell vehicle[C]// *IEEE. 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Hangzhou: IEEE, 2012: 1490-1495.
- [31] 徐梁飞, 华剑锋, 包磊, 等. 燃料电池混合动力客车等效氢耗优化策略[J]. *中国公路学报*, 2009, 22(1): 104-108.
- XU Liangfei, HUA Jianfeng, BAO Lei, et al. Optimized strategy on equivalent hydrogen consumption for fuel cell hybrid electric bus[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(1): 104-108.
- [32] 洪志湖, 李奇, 陈维荣. 基于PMP的机车用燃料电池混合动力系统能量管理策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(13): 3867-3878.
- HONG Zhihu, LI Qi, CHEN Weirong. An energy management strategy based on PMP for the fuel cell hybrid system of locomotive[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(13): 3867-3878.

- [33] 李奇, 王晓锋, 孟翔, 等. 基于在线辨识和极小值原理的 PEMFC 混合动力系统综合能量管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6991-7001.
- LI Qi, WANG Xiaofeng, MENG Xiang, et al. Comprehensive energy management method of PEMFC hybrid power system based on online identification and minimal principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6991-7001.
- [34] COSTAMAGNA P, DE GIORGI A, MOSER G, et al. Data-driven techniques for fault diagnosis in power generation plants based on solid oxide fuel cells[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 281-291.
- [35] ARAYA S S, ZHOU Fan, SAHLIN S L, et al. Fault characterization of a proton exchange membrane fuel cell stack[J]. Energies, 2019, 12(1): 152.
- [36] WU Y, MEYER Q, LIU F, et al. Investigation of water generation and accumulation in polymer electrolyte fuel cells using hydro-electrochemical impedance imaging[J]. Journal of Power Sources, 2019, 414: 272-277.
- [37] CHEN Huicui, ZHAO Xin, ZHANG Tong, et al. The reactant starvation of the proton exchange membrane fuel cells for vehicular applications: a review[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 282-298.
- [38] LI Zhongliang, ZHENG Zhixue, OUTBIB R. Adaptive prognostic of fuel cells by implementing ensemble echo state networks in time-varying model space[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 379-389.
- [39] LIU Jie, ZIO E. Prognostics of a multistack PEMFC system with multiagent modeling[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(1): 76-87.
- [40] MAO Lei, JACKSON L, HUANG Weiguo, et al. Polymer electrolyte membrane fuel cell fault diagnosis and sensor abnormality identification using sensor selection method[J]. Journal of Power Sources, 2020, 447: 227394.
- [41] 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.
- [42] LI Qi, CHEN Weirong, WANG Youyi, 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.
- [43] LAGHROUCHE S, LIU Jianxing, 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.
- [44] YANG Quan, AITOUACHE A, BOUAMAMA B O. Fault detection and isolation of PEM fuel cell system by analytical redundancy[C]//IEEE. 18th Mediterranean Conference on Control and Automation. Marrakech: IEEE, 2010: 1371-1376.
- [45] SHAO Meng, ZHU Xinjian, CAO Hongfei, et al. An artificial neural network ensemble method for fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cell system[J]. Energy, 2014, 67: 268-275.
- [46] 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.
- [47] QI Li, CHEN Weirong, LIU Zhixiang, et al. Nonlinear multi-variable modeling of locomotive proton exchange membrane fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25): 13777-13786.
- [48] ZHANG Xian, PISU P. Prognostic-oriented fuel cell catalyst aging modeling and its application to health-monitoring and prognostics of a PEM fuel cell[J]. International Journal of Prognostics and Health Management, 2014, 5(1): 1-16.
- [49] JOUIN M, GOURIVEAU R, HISSEL D, et al. Prognostics of PEM fuel cell in a particle filtering framework[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(1): 481-494.
- [50] ZHANG Xinfeng, YANG Daijun, LUO Minghui, et al. Load profile based empirical model for the lifetime prediction of an automotive PEM fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(16): 11868-11878.
- [51] ZHANG Zehan, LI Shuanghong, XIAO Yawen, et al. Intelligent simultaneous fault diagnosis for solid oxide fuel cell system based on deep learning[J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 930-942.
- [52] 马睿, 任子俊, 谢任友, 等. 基于模型特征分析的质子交换膜燃料电池建模研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7712-7729.
- MA Rui, REN Zijun, XIE Renyou, et al. A comprehensive review for proton exchange membrane fuel cell modeling based on model feature analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7712-7729.
- [53] ZHENG Z, PETRONE R, PÉRA 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.
- [54] 刘嘉蔚, 李奇, 陈维荣, 等. 基于概率神经网络和线性判别分析的 PEMFC 水管理故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3614-3621.
- LIU Jiawei, LI Qi, CHEN Weirong, et al. Research on PEMFC water management fault diagnosis method based on probabilistic neural network and linear discriminant analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3614-3621.

- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] MORANDO S, JEMEI S, HISSEL D, et al. Proton exchange membrane fuel cell ageing forecasting algorithm based on Echo State Network[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(2): 1472-1480.
- [58] SILVA R E, GOURIVEAU R, JEMEÏ 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.
- [59] LIU Jiawei, LI Qi, CHEN Weirong, et al. Remaining useful life prediction of PEMFC based on long short-term memory recurrent neural networks[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(11): 5470-5480.
- [60] HINAJE M, BETHOUX O, KREBS G, et al. Nonintrusive diagnosis of a PEMFC[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(3): 1-4.
- [61] SONG Mancun, PEI Pucheng, ZHA Hongshan, 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.
- [62] 张志芸, 张国强, 刘艳秋, 等. 车载储氢技术研究现状及发展方向[J]. *油气储运*, 2018, 37(11): 1207-1212.
ZHANG Zhiyun, ZHANG Guoqiang, LIU Yanqiu, et al. Research status and development direction of on-board hydrogen storage technologies[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2018, 37(11): 1207-1212.
- [63] 吴文瀚. 上海氢燃料电池汽车产业发展环境分析[J]. *上海汽车*, 2014(9): 29-33.
WU Wenhan. Analysis of the development environment of new energy vehicle in Shanghai[J]. *Shanghai Auto*, 2014(9): 29-33.
- [64] 王亚雄, 钟顺彬, 孙逢春. 车载高质量密度固态储氢材料研究进展[J]. *稀有金属*, 2022, 46(6): 796-812.
WANG Yaxiong, ZHONG Shunbin, SUN Fengchun. Research progress in vehicular high mass density solid hydrogen storage materials[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2022, 46(6): 796-812.
- [65] 宋冠强, 王依芮, 赵贯甲, 等. 70 MPaⅢ型车载储氢气瓶充氢过程的热力学响应特性模拟[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(9): 488-492.
SONG Guanqiang, WANG Yirui, ZHAO Guanjia, et al. Simulation of thermodynamic response characteristics of hydrogen filling process of a 70 MPa type Ⅲ vehicle-mounted hydrogen storage tank[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2022, 43(9): 488-492.
- [66] 滕欣余, 张国华, 胡辰树, 等. 我国典型城市氢能经济性和低成本氢源探索分析[J]. *化工进展*, 2022, 41(12): 6295-6301.
TENG Xinyu, ZHANG Guohua, HU Chenshu, et al. Analysis on hydrogen energy economy and low cost of hydrogen source in typical cities of China[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(12): 6295-6301.
- [67] 孟照鑫, 何青, 胡华为, 等. 我国氢能产业发展现状与思考[J]. *现代化工*, 2022, 42(1): 1-6.
MENG Zhaoxin, HE Qing, HU Huawei, et al. Development situation and consideration of hydrogen energy industry in China[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(1): 1-6.
- [68] 顾维群, 王瞳瞳, 雷国胜. 燃料电池有轨电车运营经济可行性分析[J]. *电源技术*, 2018, 42(10): 1513-1515.
GU Weiqun, WANG Tongtong, LEI Guosheng. Economic feasible analysis of operation of fuel cell trams[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42(10): 1513-1515.
- [69] 李明, 张骄, 崔霆锐, 等. 北京地铁绿色低碳技术创新研究与应用[J]. *机车电传动*, 2022(3): 29-36.
LI Ming, ZHANG Jiao, CUI Tingrui, et al. Research and application of green and low-carbon innovation in Beijing subway[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2022(3): 29-36.
- [70] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(6): 1-12.
XU Shuo, YU Biying. Current development and prospect of hydrogen energy technology in China[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, 23(6): 1-12.
- [71] 张轩, 樊昕晔, 吴振宇, 等. 氢能供应链成本分析及建议[J]. *化工进展*, 2022, 41(5): 2364-2371.
ZHANG Xuan, FAN Xinye, WU Zhenyu, et al. Hydrogen energy supply chain cost analysis and suggestions[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(5): 2364-2371.

收稿日期: 2023-03-20

修回日期: 2023-04-15