

氢能源在轨道交通领域的应用现状分析及展望^{*}董侃^{1,2,3} 刘伟志^{1,2,3} 刘冰^{1,2,3} 马颖涛^{1,2,3} 杨宁^{1,2,3} 陈嘉楠^{1,2,3}(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所, 100081, 北京; 2. 北京纵横机电科技有限公司, 100094, 北京;
3. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 100081, 北京)

摘要 [目的] 氢能源因其储量丰富、生态友好、转化高效等特点, 已成为轨道交通能源转型的解决方案之一。在氢能源轨道交通车辆应用初期, 需对既有研究现状进行分析, 并提出应用建议。[方法] 阐述了氢能源的应用背景、能源特点, 介绍了国内外氢能源轨道交通车辆的应用现状。在此基础上, 提炼了氢能源在轨道交通领域应用的关键技术问题, 并对这些关键技术的研究现状进行了分析。针对关键技术的应用和研究现状, 总结了氢能源在轨道交通领域应用中亟待解决和突破的问题, 并提出了相关建议。[结果及结论] 在应用推广和技术创新的双重驱动下, 氢能源在轨道交通领域具有广阔的应用前景。应从产业政策、标准体系和应用技术等方面持续推进, 以进一步推动氢能源在轨道交通领域的应用, 助力轨道交通能源转型。

关键词 轨道交通; 氢能源; 动力系统; 燃料电池

中图分类号 TK91: U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.09.002

Analysis and Prospect of Hydrogen Energy Application in the Field of Rail Transit

DONG Kan^{1,2,3}, LIU Weizhi^{1,2,3}, LIU Bing^{1,2,3}, MA Yingtao^{1,2,3}, YANG Ning^{1,2,3}, CHEN Jianan^{1,2,3}

(1. Locomotive and Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., 100081, Beijing, China; 2. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., 100094, Beijing, China; 3. State Key Laboratory of Traction and Control for EMU and Locomotives, 100081, Beijing, China)

Abstract [Objective] Hydrogen energy becomes one of the solutions for energy transition in rail transit due to its characteristics such as abundant reserves, ecological friendliness, and efficient transition. At the initial stage of hydrogen energy application in rail transit vehicles, it is necessary to analyze the existing research status and put forward application suggestion. [Method] The application background and characteristics of hydrogen energy are described, and the application status of hydrogen energy in rail transit vehicles at home and abroad is

introduced. On this basis, the key technical challenges of hydrogen energy application in the field of rail transit are extracted, and their research status is analyzed. Then, according to the application and research status, the urgent problems to be solved and overcome in the application of hydrogen energy in the field of rail transit are summarized, and relevant suggestions are put forward. [Result & Conclusion] Driven by both the application promotion and the technological innovation, hydrogen energy has a broad application prospect in the field of rail transit. The industrial policy, standard system and application technology should be continuously promoted for the further application of hydrogen energy in rail transit field, helping energy transition in rail transit.

Key words rail transit; hydrogen; power system; fuel cell

氢能源是一种储量丰富、清洁低碳、应用广泛的二次能源。氢能源的研发与应用, 对推动能源体系向绿色低碳转型具有重要意义, 目前已成为各国未来能源战略的重要组成部分。为推动氢能源在各领域的应用, 德国、日本、美国等国出台了相应的政策措施^[1]。我国政府印发了《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》, 首次将氢能源上升到国家能源战略的高度, 并强调通过氢能源的应用推广, 推动交通、工业等用能终端, 以及高耗能、高排放行业向绿色低碳转型。

据《中国国家铁路集团有限公司 2022 年统计公报》报道: “截至 2022 年底, 我国铁路运营里程达 15.5 万公里, 国家铁路能源消耗折算标准煤 1 512.58 万吨。”轨道交通行业作为高能耗用能终端, 低碳化能源转型意义重大。为促进氢能源在轨道交通领域健康、快速发展, 轨道交通行业也出台了相关政策措施, 其中: 《“十四五”铁路科技创新规划》指出, 要深化对储能设备、燃料电池等创新型牵引供电技术的研究; 《中国城市轨道交通绿色城轨

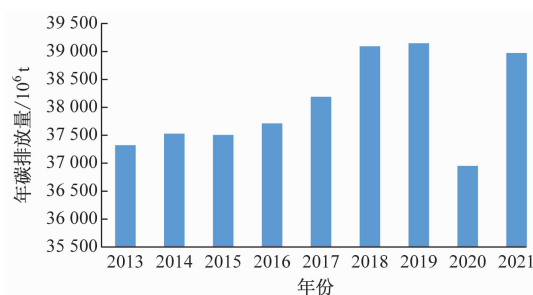
^{*} 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2022J016-C)

发展行动方案》提出,要推广氢能源运营车辆、工程车辆、维护作业车在城市轨道交通运输领域的应用。在行业需求和政策推动下,氢能源作为一种绿色清洁的新兴能源,开始在轨道交通领域得以示范应用。

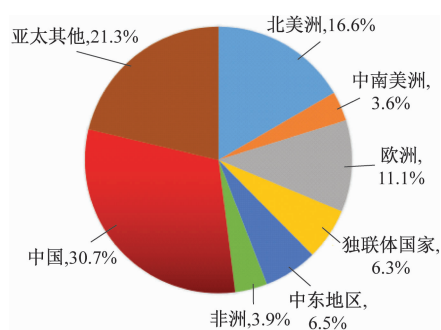
本文针对氢能源在轨道交通领域的应用展开分析。首先介绍氢能源应用背景及在轨道交通的应用现状。在此基础上,提炼出氢能源在轨道交通应用的关键技术问题,并对研究现状进行分析,针对应用和研究现状,对氢能源在轨道交通应用中亟待解决和突破的问题进行分析。最后提出氢能源应用的推广建议。

1 氢能源概述

《世界能源统计年鉴 2022》对 2021 年全球能源数据进行了收集和分析^[2]。从整体看,2021 年全球能源需求和碳排放扭转了 2020 年因新冠肺炎疫情而暂时降低的局面,已基本恢复至疫情前的水平。图 1 为 2013—2021 年全球碳排放量统计数据。由图 1 可知,我国 2021 年的碳排放量约占全球碳排放量的 30%,这一数据既表明了中国经济复苏的强劲势头,也体现了中国能源脱碳的迫切需求。



a) 2013—2021 年全球碳排放量统计数据



b) 2021 年全球主要国家和地区的碳排放量占比

图 1 全球碳排放量统计数据(2013—2021 年)

Fig. 1 Statistics of global carbon emissions from 2013 to 2021

氢能源之所以在全球应对气候变化和碳减排中被寄予厚望,主要得益于以下几大特性^[3]:

1) 生态友好。与传统的化石燃料不同,氢在转化为电和热时的副产物只有水,无温室气体排放,这与全球低碳目标最为契合。

2) 发电效率高。氢燃料电池将化学能直接转换为电能,没有热能和机械能的中间过程,其发电效率可以达到 50% 以上。

3) 储运方式多样^[4]。氢储能可利用绿电电解水制氢,再以气态、液态或固态形式储存,并可成为电网调峰的有效手段。

4) 应用广泛。氢能源既可利用燃料电池发电,应用于公路交通、轨道交通、航空和船舶等领域,也可作为化工原料参与生产,还可应用于建筑供暖等方面。

随着轨道交通行业绿色低碳理念的不断深入及氢能源应用技术的持续发展,国内外已有多个氢能源轨道交通车辆的应用案例。

2 氢能源在轨道交通领域的应用现状

2.1 国外氢能源轨道交通车辆应用

国外氢能源轨道交通车辆研发起步较早:

1) 2006 年, JR(日本铁路)公司开发了世界上首列燃料电池混合动力列车,其车辆配置了 2 台 65 kW 燃料电池和 19 kWh 锂离子电池,最高运行速度为 100 km/h^[5]。

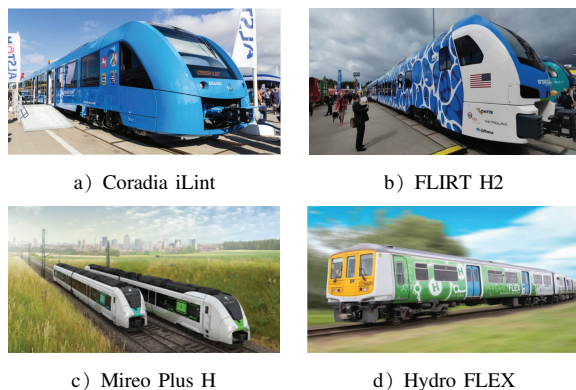
2) 法国阿尔斯通公司研发的 Coradia iLint 列车是世界上首个投入商业运营的氢能源客运列车,该车的动力系统由燃料电池和锂离子电池组成,列车续航里程可达 1 000 km^[6]。

3) 瑞士施泰德公司在 FLIRT 型内燃动车组基础上开发了 FLIRT H2 氢能源动车组,并在柏林 InnoTrans 2022 会议上进行了公开展示,该车计划于 2024 年载客运营。该动车组车辆采用氢燃料电池 + 高倍率钛酸锂电池,整车牵引功率可达 700 kW。

4) 德国西门子公司在 Mireo Plus 动车组平台基础上研发了 Mireo Plus H 氢能源列车,该车已于 2023 年开始试运行,列车的续航里程约为 1 000 km。

5) 英国首列氢能源列车 Hydro FLEX 由伯明翰大学与 Porterbrook 公司共同研发,其最高运行速度为 120 km/h,续航里程约为 800 km^[7]。

部分具有代表性的国外氢能源列车如图 2 所示。



a) Coradia iLint

b) FLIRT H2

c) Mireo Plus H

d) Hydro FLEX

图 2 部分具有代表性的国外氢能源列车

Fig. 2 Representative foreign hydrogen energy trains

2.2 我国氢能源轨道交通车辆应用

我国于 2013 年拉开了氢能源轨道交通车辆应用的序幕:

1) 首列氢能源列车“蓝天号”由西南交通大学于 2013 年研发成功,该车采用 150 kW 燃料电池作为牵引动力,设计速度为 65 km/h。

2) 中车青岛四方机车车辆股份有限公司研发的氢能源有轨电车于 2015 年 3 月下线,并于 2019 年在佛山高明有轨电车线上投入商业运营。该车配备了 200 kW 燃料电池系统,最高运行速度为 70 km/h,续航里程为 80 ~ 100 km。

3) 中车戚墅堰机车有限公司与同济大学于 2021 年联合研发了氢能源调车机车,该车配备了 400 kW 氢燃料电池和两级架构大功率 DC/DC 变换器,整车的牵引功率为 1 400 kW,设计速度为 100 km/h。

4) 中车株洲电力机车有限公司与国家能源集团联合研发的氢能源调车机车于 2021 年下线,该车采用氢燃料电池与锂电池混合动力模式,整车最大功率为 2 400 kW,续航里程约为 600 km,设计速度为 100 km/h。

5) 中车长春轨道客车股份有限公司研发的氢能源市域轨道交通列车于 2022 年 12 月下线,该车采用“复兴号”关键核心技术,最高运行速度为 160 km/h,最大续航里程为 1 000 km。该车的成功研制,实现了氢能源市域轨道交通列车在全球范围内的领跑^[8]。

6) 中车大同电力机车有限公司研发的“宁东号”氢能源机车于 2023 年 6 月下线,其车辆装备了 800 kW 氢燃料电池和 486 kWh 锂电池,并配备了

270 kg 的储氢罐。

我国部分具有代表性的氢能源列车如图 3 所示。



a) 四方股份公司氢能有轨电车

b) 中车株机公司氢能机车

c) 长客股份公司氢能市域列车

d) 中车大同公司“宁东号”氢能机车

图 3 我国部分具有代表性的氢能源列车

Fig. 3 Representative hydrogen energy trains in China

3 氢能源在轨道交通领域应用的关键技术

国内外氢能源列车设计的技术路线中,均涉及了氢燃料电池设计、氢能源混合动力系统设计、氢燃料电池 DC/DC 变换器设计、车辆能量管理等关键技术。

3.1 氢燃料电池设计技术

氢燃料电池是氢能源轨道交通车辆的能量转化场所,是氢能源所蕴含化学能转化成电能的装置^[9]。根据电解质的不同类型,氢燃料电池有多种分类^[10],其中,质子交换膜燃料电池因其环境适应性强、能量利用率高、启动速度快、结构简单、可靠性高等优点成为了氢燃料电池研究和应用的重点^[11]。

为实现能量转换,氢燃料电池系统主要包括电堆、氢气系统、空气系统、热管理系统及电气系统等核心部件,其组成框图如图 4 所示。图 4 中:氢气来源于氢气瓶,经多级减压后进入氢燃料电池电堆阳极;空气经压缩机压缩并增湿后,进入氢燃料电池电堆阴极;燃料电池系统的温度由热管理系统调节;燃料电池电气接口与 DC/DC 变换器相连,进而完成对燃料电池系统输出电压及输出功率的控制。

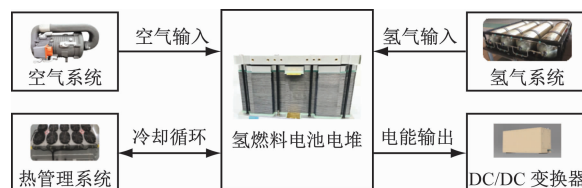


图 4 氢燃料电池系统组成框图

Fig. 4 Composition of hydrogen fuel cell system

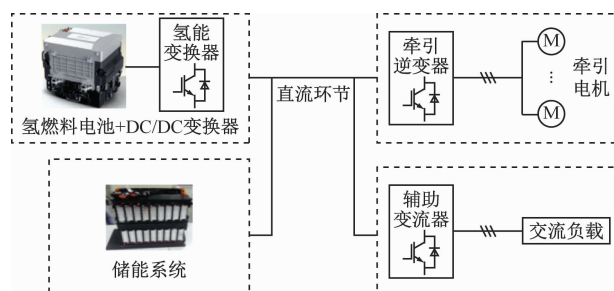
上述部件中,大功率、高效率、长寿命的电堆设计是氢燃料电池技术的重点和难点。为推进氢燃料电池技术的发展,我国多部门发布了支持政策,科技部在《“十四五”国家重点研发计划》中提出:“要研究轨道交通高速列车用大功率、高效率、长寿命、模块化氢动力系统设计与集成技术。”在应用推广和技术创新的双重驱动下,氢能源在轨道交通领域具有广阔的应用前景,氢燃料电池行业有望迎来新的发展机遇。

3.2 氢能源混合动力系统设计

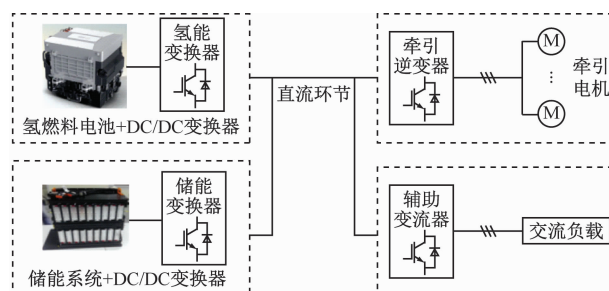
氢能源混合动力系统设计需考虑2个方面因素:

1) 由于电堆的电压较低,电堆需经DC/DC变换器升压后再接入牵引直流环节。

2) 考虑燃料电池系统动态功率响应特性,氢能



a) 储能系统直挂直流母线



b) 储能系统经变换器接入直流母线

图5 氢能源混合动力系统的2种架构方式

Fig. 5 Two architecture modes of hydrogen energy hybrid power system

3.3 氢燃料电池DC/DC变换技术

氢能源混合动力列车牵引中间直流环节的电压通常为750 V或1 500 V。直流环节电压为750 V的车辆,其动力系统架构及燃料电池的配套DC/DC变换器与道路上运行的氢能源机动车辆一致,该DC/DC变换器已有成熟的运用经验,本文不再赘述。

直流环节电压为1 500 V的车辆通常需要配备两级DC/DC变换器。第一级变换器与750 V车辆的配置一致。第二级变换器则需要具备电气隔离和双向变换功能,其中,电气隔离的需求是由于氢燃料电池系统电堆及辅助设备(以下简称“辅机”)的绝缘等级较低,需要与1 500 V母线电气隔离;双向变换的需求则是在氢燃料电池供电时,将第一级DC/DC变换器变换后的电压进一步升压到牵引直流环节的电压等级,为牵引系统提供电源,并在燃料电池启动阶段将储能系统电压降至可供燃料电

源车辆通常采用氢燃料电池+储能系统的混合动力架构,其中:氢燃料电池用于提供持续的功率输出;储能系统可采用锂离子动力电池或超级电容,在列车的动态加速过程中提供瞬时功率,并在制动过程中回收制动能量。

综合考虑车辆需求及上述2个方面因素,可行的氢能源混合动力系统架构有2种方式,分别如图5 a)、图5 b)所示。其中:图5 a)为氢燃料电池经DC/DC变换器接入直流环节,储能系统直挂直流母线,该架构结构简单、可靠性高,但直流环节电压的波动范围较大;图5 b)为氢燃料电池和储能系统均通过DC/DC变换器接入直流环节,该架构较图5 a)略复杂,但可充分发挥储能系统的能力,并可保证牵引直流环节电压稳定。目前这2种架构均已在多个氢能源混合动力车辆中有所应用。

池系统辅机启动的范围。针对第二级DC/DC变换器,满足功能需求的主流方案包括双有源桥式变换器、LLC(电感-电感-电容)型谐振变换器、升降压+LLC型谐振变换器,这3种DC/DC变换器的拓扑方案如图6所示。

为了给设计提供依据,进一步对这3种DC/DC变换器拓扑方案从软开关性能、电压调节能力、变换效率、偏磁抑制性能等方面展开对比,分析结果如表1所示。

从表1可知:从软开关能力、变换效率、偏磁抑制性能等方面看,LLC型谐振变换器具有天然优势,但不足之处在于其电压调节能力较弱,而氢能源车辆燃料电池系统和储能系统的输出电压变化范围均较大。为了保留LLC谐振变换器的上述优势,同时使其具备较强的电压调节能力和良好的输入滤波能力,升降压+LLC型谐振变换器的电路拓扑是更好的技术选择。此外,升降压电路还可采用

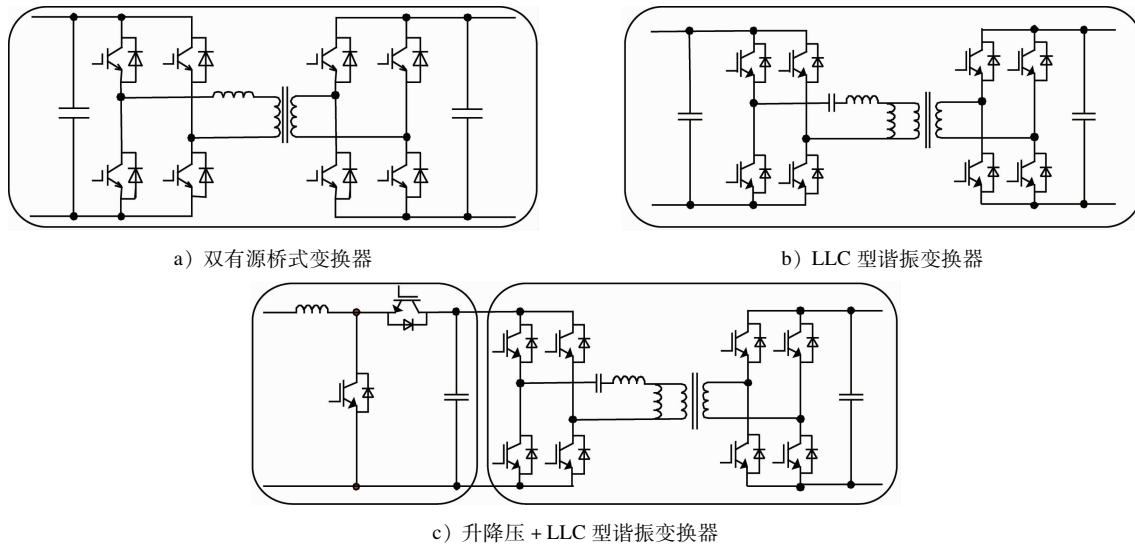


图6 3种DC/DC变换器的拓扑方案

Fig. 6 Topology schemes of 3 DC/DC converters

表1 3种DC/DC变换器拓扑方案的性能对比

Tab.1 Performance comparison of three topology schemes for DC/DC converters

性能	双有源桥式变换器	LLC 型谐振变换器	升降压 + LLC 型谐振变换器
软开关性能	零电压开通,硬关断	原边:零电压开通,低电流关断;副边:零电流关断	前级:硬开关;后级:性能同 LLC 型谐振变换器
电压调节能力	较强	较弱	较强
变换效率	较低	较高	介于双有源桥式变换器,LLC 型谐振变换器之间
偏磁抑制性能	需进行偏磁控制	具有偏磁自校正功能	具有偏磁自校正功能

多重化技术提高等效纹波频率,以获得更好的电路控制效果。

3.4 车辆能量管理策略

氢能源混合动力列车通常包括2种及以上动力源,应建立车辆能量管理策略,使列车在满足不同运用工况动力需求的基础上,进一步提高列车的能源利用率和混合动力系统的工作效率。

根据氢燃料电池系统和储能系统的不同特点,车辆能量管理策略应在满足车辆动力需求的前提下,实现以下2个目标^[12]:①优化氢燃料电池的工作区间,减少氢燃料电池的动态负荷,保证氢燃料电池系统工作在高效的运行区间内;②将储能系统的荷电状态维持在合理区间范围内,保证车辆牵引、制动的动态能量需求,最大限度提高储能系统的使用寿命。为实现上述目标,车辆能量管理策略可分为三类^[13]:

1) 基于规则的控制策略^[14]。该策略依据工程经验或已确定模型建立能量调度规则,能量调度规则主要包括开关控制、状态机控制、功率跟随控制等确定规则,以及常规模糊控制、自适应控制、预测

控制等模糊规则。由于该策略具有简单易实现、实时性好、可靠性高等优点,目前已成为氢能源混合动力车辆研究初期广泛应用的能量调度方法。然而,该策略需要依赖既有经验或固定模型,这使得该策略无法根据实际工况进行实时调整,对规则以外的工况适应性较差,且无法进行最优求解。

2) 基于优化的控制策略^[15-16]。该策略结合能耗、成本等经济性指标及车辆动力性指标构建目标函数,并根据车辆需求制定约束条件,运用数学方法进行可行域内的目标函数寻优,以期在满足转矩和功率需求的基础上获得优化的能源分配方案。根据优化目标的不同,该策略又可分为全局优化策略、瞬时优化策略2种。其中:全局优化策略根据运用工况,从全局最优角度求解目标函数,优化效果较好,但全局寻优需要的计算量较大,如何提高算法的实时性,是全局优化策略需要解决的主要问题;瞬时优化策略根据实时数据寻找当前工况的优化求解,该类策略无法实现全局最优,但可提高算法的计算速度和实时性,目前已在工程中获得了较好的应用效果^[17]。

3) 基于新兴算法的能量管理策略。该策略主要包括基于神经网络的能量管理策略和基于频率解耦的能量管理策略。以基于频率解耦的能量管理策略为例^[18],该策略考虑了氢燃料电池及储能系统各自的功率输出特性,利用信号处理技术将功率需求中不同频段的信号分离出来,将低频段信号分配给燃料电池系统,将中高频段信号分配给储能系统。该策略充分考虑了不同能源系统的特性,且实现过程较为简单,目前已获得了越来越多的关注。

4 氢能源在轨道交通领域的应用瓶颈

在行业需求和政策推动下,氢能源在轨道交通领域已获得示范性应用,然而在基础设施配套、应用技术、运用维护成本及运用安全等方面仍存在亟待解决和优化的问题。

1) 基础设施配套。制氢、运氢、加氢等设施的完善,是氢能源在轨道交通大规模商业应用的基础^[10]。制氢方面,我国煤制氢的比例高达60%以上,而电解水制氢的比例不足3%,且制氢与用氢存在严重的空间不匹配问题;运氢方面,目前以长管拖车的气态运输为主,该方式适合距离短、运量小的运输场景,运氢系统尚不成熟,不利于氢能源大规模商业应用;加氢方面,目前我国加氢站数量不足,而加氢站网络化分布是氢能源大规模商业应用的保障。

2) 燃料电池技术。催化剂材料方面,目前燃料电池系统主要以铂基催化剂为主,但铂资源稀少,铂基催化剂材料稀缺已成为燃料电池大规模应用的瓶颈之一^[11],亟须开发无铂或少铂的催化技术;燃料电池系统功率方面,目前燃料电池以道路机动车辆应用为主,电堆和燃料电池系统的功率均较低,而轨道交通车辆所需功率较大,迫切需要开展大功率电堆设计、燃料电池多堆并联等核心技术攻关;体积和质量方面,燃料电池系统附件种类多且散热系统庞大,难以应用于限界和轴重上有严格要求的轨道交通场景中,亟须进行燃料电池的小型化和轻量化攻关。

3) 系统设计和验证技术。系统设计方面,目前氢能源在轨道交通领域的示范应用以动力集中车辆为主,而对动车组、市域/城际列车和城市轨道交通列车等动力分散车辆,能源系统是否需要整列并联,以及能源系统整列并联带来的多燃料电池系统、多储能系统功率均衡及稳定性问题,均需要进

一步研究;系统验证方面,受涉氢组合试验安全问题限制,目前氢能源轨道交通车辆的系统试验均在车上进行,缺乏地面组合试验验证手段。

4) 运用维护成本。氢元素丰富,但氢能源的获取需要消耗大量能源,成本高昂。此外,运氢、加氢等环节配套设施不完善,也将用氢成本进一步推高,限制了其在轨道交通领域的发展及应用。

5) 运用安全性。氢作为可燃气体,涉氢相关的设计、施工、生产、储存、应用等环节均应满足相关标准及规定的要求。此外,对轨道交通而言,车辆氢动力系统的安全性设计及站场、车库的安全性改造,也是氢能源在轨道交通大规模商业应用所面临的主要问题。

5 应用推广建议

针对上文所述关键技术及应用瓶颈,本文提出氢能源在轨道交通领域的应用推广建议:

1) 产业政策方面。一方面,加大氢能源上游产业链和基础设施建设方面的政策扶持力度,降低终端运用维护成本;另一方面,规划研究氢能源轨道交通车辆的商业推广应用场景,补贴支持客运、货运和工程机械领域的示范应用,积累氢能源轨道交通车辆的设计和运维经验。

2) 标准体系方面。鼓励相关企业、高校和科研院所积极参与氢能源产业国际标准的制定工作,加快完善我国氢能源产业的国家标准体系,积极推进氢能源在轨道交通行业的标准布局及体系建设。

3) 应用技术方面。推进大功率、高效率、长寿命、模块化氢燃料电池系统的技术攻关,推进高续航需求下的车载储氢系统高效存储、安全供氢和快速加氢等技术攻关;推进氢能源轨道交通车辆动力系统与牵引系统匹配设计、车辆能量智能管理等技术攻关。

6 结语

本文针对氢能源在轨道交通领域的应用现状展开分析,首先介绍了氢能源的应用背景、能源特点及在轨道交通的应用现状。在此基础上,提炼出氢能源在轨道交通领域应用的关键技术问题,并对相应研究现状进行了分析。随后针对应用和研究现状,对氢能源在轨道交通领域应用中亟待解决的问题进行阐述,并从产业政策、标准体系和应用技术等方面提出了相应的建议。

参考文献

- [1] 符冠云, 熊华文. 日本、德国、美国氢能源发展模式及其启示[J]. 宏观经济管理, 2020(6): 84.
FU Guanyun, XIONG Huawen. The models of hydrogen energy development in Japan, Germany and the United States and enlightenments[J]. Macroeconomic Management, 2020(6): 84.
- [2] 李洪言, 张景谦, 陈健斌, 等. 2021 年全球能源转型面临挑战: 基于《bp 世界能源统计年鉴(2022)》[J]. 天然气与石油, 2022, 40(6): 129.
LI Hongyan, ZHANG Jingqian, CHEN Jianbin, et al. Global energy transition faces challenges in 2021—Based on the bp Statistical Review of World Energy (2022) [J]. Natural Gas and Oil, 2022, 40(6): 129.
- [3] 韩笑, 张兴华, 闫华光, 等. 全球氢能源产业政策现状与前景展望[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12): 27.
HAN Xiao, ZHANG Xinghua, YAN Huaguang, et al. Current situation and prospect of global hydrogen energy industry policy [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12): 27.
- [4] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 氢能源储运技术现状及其在电力系统中的典型应用[J]. 现代电力, 2021, 38(5): 535.
LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, et al. An overview on hydrogen energy storage and transportation technology and its typical application in power system [J]. Modern Electric Power, 2021, 38(5): 535.
- [5] 汪培桢, 杨升. 氢能源有轨电车应用综述[J]. 装备制造技术, 2020(2): 196.
WANG Peizhen, YANG Sheng. Overview of hydrogen power tram applications [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(2): 196.
- [6] 苏靖棋. 使用氢燃料电池的动车组 Coradia iLint[J]. 现代城市轨道交通, 2019(4): 84.
SU Jingqi. Coradia iLint-EMU using hydrogen fuel cell [J]. Modern Urban Transit, 2019(4): 84.
- [7] 张静. 具有市场前景的氢能源列车[J]. 国外铁道机车与动车, 2021(6): 1.
ZHANG Jing. The market prospect of hydrogen trains [J]. Foreign Railway Locomotive and Motor Car, 2021(6): 1.
- [8] 沙森. 氢能源市域列车书写绿色低碳轨道交通新篇章[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(4): 10.
SHA Miao. Hydrogen-energy urban train [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(4): 10.
- [9] 陈瞳, 周宇昊, 张海珍, 等. 氢燃料电池发展现状和趋势[J]. 节能, 2019, 38(6): 158.
CHEN Tong, ZHOU Yuhao, ZHANG Haizhen, et al. Development present status and tendency of hydrogen fuel cell [J]. Energy Conservation, 2019, 38(6): 158.
- [10] 程一步. 氢燃料电池技术应用现状及发展趋势分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2018, 3(2): 5.
CHENG Yibu. Application status and development trend analysis of hydrogen fuel cell technology [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2018, 3(2): 5.
- [11] 高助威, 李小高, 刘钟馨, 等. 氢燃料电池汽车的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2022, 36(14): 74.
GAO Zhuwei, LI Xiaogao, LIU Zhongxin, et al. Development trend and research status of the hydrogen fuel cell vehicle [J]. Materials Reports, 2022, 36(14): 74.
- [12] 康劲松, 李鸿哲, 马源, 等. 氢燃料电池列车能量管理策略研究综述[J]. 铁道车辆, 2023, 61(2): 1.
KANG Jinsong, LI Hongzhe, MA Yuan, et al. Review on energy management strategy of hydrogen fuel cell trains [J]. Rolling Stock, 2023, 61(2): 1.
- [13] 樊运新, 龙源, 江大发, 等. 新能源混合动力机车发展现状及关键技术综述[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(1): 1.
FAN Yunxin, LONG Yuan, JIANG Dafa, et al. Overview of development status and key technologies of new energy hybrid electric locomotive [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2023, 46(1): 1.
- [14] KANG J, GUO Y, LIU J. Rule-based energy management strategies for a fuel cell-battery hybrid locomotive [C] // 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan, China. New York: IEEE, 2020: 45.
- [15] 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.
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.
- [16] WU C, LU S, XUE F, et al. Optimal sizing of onboard energy storage devices for electrified railway systems [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 1301.
- [17] 林庚毅. 混合动力机车牵引系统建模与能量管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LIN Gengyi. Modeling and energy management of traction system for hybrid locomotive [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [18] 丁晨光. 氢燃料电池混合动力系统能量管理策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
DING Chenguang. Research on energy management strategy of hydrogen fuel cell hybrid power system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

· 收稿日期:2023-09-12 修回日期:2023-11-17 出版日期:2024-09-10
Received:2023-09-12 Revised:2023-11-17 Published:2024-09-10
· 通信作者:董侃,高级工程师,dkan2019@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license