DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.03.004　　文章编号：1000-128X(2023)03-0032-08

氢能源轨道车辆及动力系统发展与创新

李　明，高利华，李泽宇
（北京市地铁运营有限公司，北京　100044）

摘　要：发展氢能是实现“双碳”目标的重要措施。文章基于轨道交通的运营特征，梳理了国内外氢能源轨道车辆及其关键技术应用现状，总结了氢能源轨道车辆及动力系统的技术难点。针对空间与重量、能量与效率、运维与成本的限制，提出了低成本高质量设计、高能效设计、高安全可靠设计、标准体系建设等应用研究的创新方向，可为氢能源在轨道车辆上的应用提供技术借鉴。

关键词：轨道车辆；绿色低碳；氢能源；新技术；氢燃料电池；城市轨道交通
中图分类号：U267.9；TK91　　**文献标识码：**A

Review on development and innovation of hydrogen-powered rail vehicles and power systems

LI Ming, GAO Lihua, LI Zeyu

(Beijing Mass Transit Railway Operation Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Developing hydrogen energy is a crucial step towards achieving the "carbon peaking and carbon neutrality" goals. This paper presented a systematic review on the current application status of hydrogen-powered rail vehicles and the key technologies at home and abroad, and summarized the technical difficulties associated with hydrogen-powered rail vehicles and their power systems, based on the operational characteristics of rail transit. To address the constraints arising due to conflicting factors such as space and weight, energy and efficiency, and operation/maintenance and cost, some innovative approaches in application research were proposed, such as the low cost and high quality design, high energy efficiency design, high safety and reliability design, and standard system promotion. The research presented in this paper can serve as a technical reference for the application of hydrogen energy in rail vehicles.

Keywords: rail vehicle; green and low-carbon; hydrogen energy; new technology; hydrogen fuel cell; urban rail transit

0　引言

根据国内外统计数据可知，全球二氧化碳排放主要来源于能源发电与供热、交通运输、制造业与建筑业等领域[1]。为实现“双碳”目标，我国出台了一系列政策文件，国务院于2021年印发《2030年前碳达峰行动方案》和《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》，为能源、交通运输绿色低碳转型指明方向[2-3]。中国城市轨道交通协会于2022年发布《中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案》，提出一系列指导城市轨道交通行业绿色转型的行动举措，其中氢能源应用是绿色能源转型的重点之一[4]。

随着氢燃料电池技术及氢能基础设施的不断完善，氢能产业已逐步成为应对气候变化、实现绿色可持续发展的有效途径。氢气作为可持续利用的绿色能源载体，与氧气在氢燃料电池电堆内部通过电化学反应产生水，可实现“零”碳排放的动力输出。氢燃料电池系统的能源利用效率可达50%~60%，远高于内燃机，且冬季低温特性、续航里程优于锂电池，因此已成为能源转型升级的关键。

目前我国已形成庞大的氢能源产业链。在氢燃料

通信作者：李　明（1983—），男，博士，正高级工程师，主要从事轨道车辆绿色低碳与智能运维方面的研究；E-mail: limit_sina@163.com
引用格式：李明, 高利华, 李泽宇. 氢能源轨道车辆及动力系统发展与创新[J]. 机车电传动, 2023(3): 32-39.
Citation: LI Ming, GAO Lihua, LI Zeyu. Review on development and innovation of hydrogen-powered rail vehicles and power systems[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(3): 32-39.

电池汽车方面，国家发改委、能源局于2022年印发《氢能产业发展中长期规划（2021—2035年）》。截至2022年底，我国已经批准京津冀城市群、上海城市群、广东城市群、河南城市群和河北城市群5个示范城市群。这些地区具有氢燃料电池产业发展基础，通过政策支持可带动新能源汽车产品快速商业化。在轨道交通方面，我国近些年先后开发了氢燃料电池调车机车、有轨电车、市域列车等多种车型，自西南交通大学于2013年开发了我国首辆氢燃料电池调车机车起，中车唐山公司、中车四方公司分别于2016年和2019年先后开发出氢燃料电池混合动力有轨电车，中车浦镇公司于2021年研制出氢燃料电池数轨列车，中车戚墅堰公司、中车大同公司于2021年分别研制了氢燃料电池混合动力调车机车，这些车型都已投入到示范运营中。中车四方公司、中车浦镇公司先后获得了氢燃料电池有轨电车、数轨列车的订单，也已正式开展载客示范运营。

本文从轨道交通行业应用现状和关键技术研究现状进行总结，分析了存在的问题，指出了后续技术创新的方向，为行业应用提供参考。

1　行业应用现状

国内外多个国家针对氢燃料电池系统在轨道交通上的应用开展了大量研究，推动了氢燃料电池轨道车辆的快速发展。本文就不同车型的国内外研究与应用情况进行总结。

1.1　有轨电车

氢燃料电池有轨电车运行无须架设接触网，可降低整体建设成本、提升城市的美观度。国内外氢能有轨电车/轻轨列车典型应用案例如表1所示。

表1　氢能有轨电车/轻轨列车典型应用案例

Table 1　Typical application cases of hydrogen-powered tram/light rail train

年份	国家	编组	氢燃料电池功率/ kW	最高运行速度/(km·h^{-1})	动力模式
2007	日本	单辆车	100	100	氢燃料电池+锂电池
2011	西班牙	单辆车	24	20	氢燃料电池+锂电池
2016	中国（中车唐山）	三编组	300	70	氢燃料电池+锂电池+超级电容
2019	中国（中车四方）	三编组	300	70	氢燃料电池+锂电池
2022	日本	两编组	240	100	氢燃料电池+锂电池
2023	中国（京投装备）	两编组	200	80	氢燃料电池+锂电池

在国外，西班牙城轨运营商FEVE于2011年推出了1款由2套氢燃料电池系统驱动的有轨电车；东日本铁路公司JR于2020年研发了FV-E991氢燃料电池列车，该车运行速度可达100 km/h，续航里程可达140 km；2022年，东日本铁路公司又联合日立公司和丰田公司，研制氢燃料电池混合动力列车HYBARI，并计划于2030年开始商业服务。

在国内，“十二五”期间，中车唐山公司与西南交大依托科技部国家科技支撑计划项目，于2016年开发了世界首列商用型氢燃料电池混合动力有轨电车（图1），随后将该电车在唐山投入示范运营，项目在燃料电池/超级电容混合动力牵引与能量管理、大功率燃料电池系统集成和效率优化控制等关键技术方面取得了成果。2023年，北京轨道交通技术装备集团有限公司自主研发出国内首列氢燃料电池混合动力铰接轻轨车（图2），该车以氢燃料电池系统和动力电池系统为动力源，具备灵活编组和全自动驾驶功能。

氢燃料电池有轨电车一般采用2~5节车的编组结构，燃料电池及车载供氢系统集成安装在车辆顶部，储能系统放置于车底。氢燃料电池及车载供氢系统集成安装在车辆顶部，储能系统放置于车底。氢燃料电池系统输出功率一般为200~300 kW，车辆储氢量为30~40 kg，整车续航里程为100~150 km。在氢燃料电池有轨电车的应用方面，国内总体比国外领先。但是，由于有轨电车占用地面路权，不适合在社会车流较大的区域运用，因此目前国内大多线路都设置在新区、



图1　氢燃料电池混合动力有轨电车

Fig. 1　Hydrogen fuel cell hybrid tram

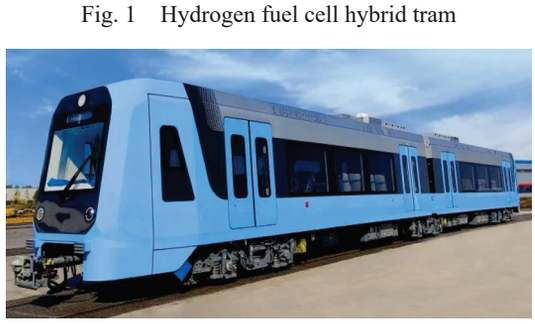


图2　氢燃料电池混合动力铰接轻轨车

Fig. 2　Hydrogen fuel cell hybrid articulated light rail vehicle

近郊区等，这对氢燃料电池有轨电车的发展带来限制。如进一步提高车辆运用的安全性并降低成本，将有助于氢燃料电池有轨电车的推广。

1.2 市域列车

随着世界各国城市集群的不断涌现，中心城市与周边卫星城市的交通网络愈发受到重视。氢燃料电池市域列车的典型应用案例如表2所示，其编组结构多采用2~5节车编组，氢燃料电池及供氢系统一般集成安装在车辆顶部，氢燃料电池系统功率多为400~600 kW，车辆储氢量为120~200 kg，整车续航里程为600~1 000 km。

表2 氢能市域列车典型应用案例

Table 2 Typical application cases of hydrogen-powered intracity train

年份	国家	编组	氢燃料电池功率/ kW	最高运行速度/(km·h^{-1})	动力模式
2017	法国	两编组	400	140	氢燃料电池+锂电池
2022	德国	两编组	400	160	氢燃料电池+锂电池
2023	中国（中车长客）	四编组	400	160	氢燃料电池+超级电容

氢燃料电池市域列车的开发进程总体晚于有轨电车，且国外的研究早于中国。阿尔斯通公司（Alstom）于2017年研制出Coradia iLint型市域列车（图3），该车由Coradia Lint 54内燃动车组发展而来。2019年，阿尔斯通和Eversholt Rail公司联合发布Breeze氢能源列车，其最高运行速度为140 km/h，续航里程为1 000 km。



图3 Coradia iLint氢能列车

Fig. 3 Coradia iLint hydrogen-powered train

2022年，西门子公司（Siemens）发布Mireo Plus H氢能列车（图4），该列车最高速度为160 km/h，牵引动力为1.7 MW，续航里程可达600 km，将于2023年在德国巴登–符腾堡州的铁路线路上开始试运行。2022年，Stadler公司在柏林InnoTrans展上推出了其用于美国加利福尼亚州的客运FLIRT H2氢能动车组（图5），车速可达127 km/h。

在国内，中车几家主机厂也开展了氢燃料电池市域列车的研究。2022年12月28日，中车长客股份公司联合成都轨道集团研制的氢能源市域列车（图6）下线。该列车为四编组，最高速度为160 km/h，续航里程可达600 km。



图4 Mireo Plus H氢能列车

Fig. 4 Mireo Plus H hydrogen-powered train



图5 FLIRT H2氢能列车

Fig. 5 FLIRT H2 hydrogen-powered train



图6 氢能源市域列车

Fig. 6 Hydrogen-powered intracity train

1.3 无轨电车

不独占路权的无轨电车近年来成为国内各城市关注的对象，而不带受电弓的氢能源无轨电车则进一步降低了建设成本，保护了城市景观。作为国内特色产品，无轨电车的典型应用案例如表3所示。

表3 氢能无轨电车典型应用案例

Table 3 Typical application cases of hydrogen-powered trolley bus

年份	国家	编组	氢燃料电池功率/ kW	最高运行速度/(km·h^{-1})	动力模式
2022	中国（中车浦镇）	三编组	200	70	氢燃料电池+超级电容
2022	中国（中车唐山）	三编组	240	70	氢燃料电池+锂电池

2022年12月27日，中车浦镇公司研制的全球首辆中运量氢动力数字轨道胶轮电车下线（图7）。该车采用了氢燃料+超级电容的大容量车载储能技术、数字虚拟轨道、自动驾驶等先进技术，同时取消了铁轨、沿

线接触网及变电站，可与社会加氢站共用加氢系统，大幅降低了线路及供电施工成本。



图 7　氢能源无轨电车

Fig. 7　Hydrogen-powered trolley bus

1.4　调车机车

调车机车（含工程车）是指用于车辆段或线路区间作业的机车。以氢能调车机车为例，由于启停频繁，需具备一定的启动牵引力和制动力，故氢燃料电池混合动力系统需配备动力电池，负责功率补充和能量回收，以维持燃料电池系统工作在最佳工况区间。相对于传统的内燃式调车机车，其污染物排放及噪声都大幅降低，应用前景较好。表 4 为典型的调车机车应用案例。

表 4　氢能调车机车典型应用案例

Table 4　Typical application cases of hydrogen powered shunting locomotive

年份	国家	编组	氢燃料电池功率/ kW	最高运行速度/ ($km \cdot h^{-1}$)	动力模式
2009	美国	单辆车	250	70	氢燃料电池+铅酸电池
2013	中国（西南交通大学）	单辆车	150	65	氢燃料电池+锂电池
2021	中国（中车戚墅堰）	单辆车	400	100	氢燃料电池+锂电池
2021	中国（中车大同）	单辆车	60	80	氢燃料电池+锂电池

2002 年，美国能源部牵头研发了世界上首辆氢燃料电池矿用机车，解决了传统柴油机的排放污染和噪声问题。2009 年，美国伯灵顿北方圣达菲（BNSF）铁路公司主导开发了氢燃料电池混合动力调车机车，以柴油/电池混合动力切换器和氢燃料电池公交车为测试平台，研制了 250 kW 功率等级的氢燃料电池调车机车，瞬时功率可超过 1 MW。2013 年，西南交通大学研制了我国首辆氢燃料电池电动机车蓝天号（图 8），该车采用 1 套 HD6 氢燃料电池电堆，储氢系统置于车内。2021 年 6 月 16 日，中国中车戚墅堰机车有限公司研发的国内最大功率的氢燃料混合动力机车下线（图 9），该车功率为 1 400 kW，自主研发的氢燃料电池系统包含 4 个电堆，单个电堆输出功率大于 100 kW，寿命近 20 000 h，最大持续输出功率密度达到 3.2 kW/L，峰值最大电流密度超过 2 A/cm^2。2022 年，中车戚墅堰公司与安托法加斯塔（智利）–玻利维亚铁路公司（FCAB 公司）签署氢能源货运机车出口合同，获得了氢能源机车首个出口订单。中车大同公司研制的氢燃料电池混合动力机车自 2021 年 10 月 29 日投运以来，已安全运行超过 2 万 km，各项性能指标和环境适应性满足运营要求。



图 8　氢燃料电池电动机车（蓝天号）

Fig. 8　Hydrogen fuel cell electric lococomotive (Blue Sky)



图 9　氢燃料电池混合动力机车

Fig. 9　Hydrogen fuel cell hybrid locomotive

2　关键技术研究现状

2.1　氢燃料电池集成技术

氢燃料电池动力系统结构与功能都很复杂，与车辆平台的有效集成是首要问题，主要包括燃料电池系统集成和混合动力系统集成。氢燃料电池各子系统需根据整车运行条件、环境工况，以及电堆参数、运行工况、系统结构等进行匹配计算，得出主要设计参数，为部件选型提供依据。在匹配计算时，首先需要确定电堆的选型和连接方式（串联/并联），然后根据厂商提供的电堆参数，如单体数、电流、电压、空气当量系数、氢气当量系数、阴极压力、阳极压力、冷却液压力等，分别开展各子系统的匹配设计，从而得到空压机、氢气循环泵、减压阀、冷却水泵等的选型参数。混合动力系统在集成设计之前需要先进行匹配设计，即根据车辆的顶层指标（动力性能指标、续航里程、能耗等）确定燃料电池、储能装置、储氢系统的主要参数，然后再结合车辆和线路的具体需求进行集成设计。

轨道交通行业对该技术进行了大量研究，文献[5]

对氢燃料电池混合动力轨道车辆用氢燃料电池系统进行了分析，提出了轨道车辆应用设计的建议方案；文献[6]对氢能有轨电车动力系统进行了分析，认为以氢燃料电池为主、蓄电池为辅的混合动力系统对有轨电车运用场景最为适合；文献[7]将混合动力系统多目标匹配优化策略应用于商用型燃料电池有轨电车；文献[8]针对氢燃料电池有轨电车的冷却装置进行了多方案降噪设计及试验研究；文献[9]基于国内外氢燃料电池单体电压均衡性研究，对其均衡性影响机理进行了归纳总结。

我国进行了相关核心技术的布局，如科技部最近几年设置了多个有关可再生能源与氢能技术的重点专项，针对质子交换膜、气体扩散层、催化剂、空压机、电堆以及氢的“制、运、储、用”等进行自主化攻关。随着国内应用场景的不断完善和研制能力的大幅提升，近两年来，氢能源轨道车全产业链在研发技术、制造能力、综合成本等方面得到大幅提升。

2.2 氢燃料电池控制技术

氢燃料电池系统的控制器主要负责其自身的控制，以及与整个混合动力系统能量控制器或整车控制器的数据交互，实现系统的启动、运行、停机，进行动态能量管理、故障处理以及数据上传。控制系统的具体功能取决于整个系统的拓扑结构。在氢燃料电池系统控制技术方面，过氧比对燃料电池高效可靠运行有重要作用，对过氧比的控制非常重要。文献[10]通过搭建氢燃料电池试验平台，开展氢燃料电池系统控制策略仿真研究，获得了电堆电流密度–过氧比–净功率之间的关系，确定了不同工况下系统的最佳过氧比，并通过增量式 PID 和模糊控制来调节空气进气流量大小，尽可能使电堆运行在高效区。

图 10 是一种典型的车载氢燃料电池系统控制方案。图 10 中，$p_{ca,in}$是阴极入口压力；W_{H2}是氢气流量；T_{purge}是氢气排气周期；W_{air}是空气流量；W_c是冷却液流量；$p_{c,in}$是电堆冷却液入口压力。在空气供应系统中，根据阴极入口压力确定最佳过氧比，控制压缩机的空气流量，使电堆模组净功率最大。在氢气供应系统中，根据阴极入口压力确定电堆阳极入口压力参考值，通过调节氢气流量确保氢气压力高于空气压力 0.05 bar（5 kPa）。在热管理系统中，根据电堆电流确定电堆温度差参考值，通过控制冷却液流量来满足温差要求和电堆入口处冷却液压力不大于空气压力的要求；电堆的入口温度设定为 60 ℃，通过对散热器的空气流量进行调节实现温度控制。

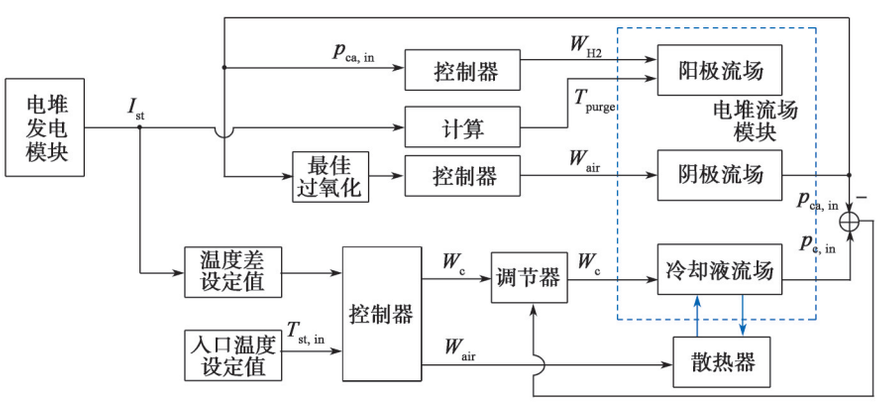


图 10　车载氢燃料电池控制系统控制方案示意图

Fig. 10　Schematic diagram of on-board hydrogen fuel cell control system

混合动力系统能量控制的基本思想是基于整车功率需求进行各能量源功率分配，稳定供电电压并提升系统工作效率，很多专家对此进行了研究。文献[11]针对现代轨道交通车辆整体性能要求，梳理分析了国内外多堆燃料电池发电系统技术的研究进展，总结了拓扑结构和控制、检测方法对整车性能的影响。文献[12]提出基于庞特里亚金极小值原理（PMP）的能量管理策略，在硬件试验平台上进行验证，并与能量管理系统进行对比，验证了 PMP 在维持蓄电池的 SOC、提升效率及燃料经济性上具有更好的性能。

2.3 氢内燃机

国内研究较多的另一种氢能源供电技术是氢内燃机技术。氢内燃机自 20 世纪 70 年代开始逐步在宝马、大众汽车公司得到应用。随着高压储氢技术的成熟应用，目前氢燃料内燃机有望达到 45% 的有效热效率。2022 年，吉利公司研发的氢内燃机的有效热效率实测达到 44%。一汽解放汽车公司研发的国内首款重型商用车缸内直喷氢气发动机，运转功率超 350 kW，指示热效率超过 55%。中国重汽与潍柴动力联合研发的氢内燃机重卡，实现了有效热效率 41.8%。

目前氢能在轨道车辆上的应用主要是基于质子交换膜燃料电池（PEMFC），依靠电堆中氢气与氧气的电化学反应产生电能，因此采用氢燃料电池需要更新整套驱动系统，同时还需要贵金属催化剂。如果采用氢内燃机，则底盘布局与传统燃油车更为接近，只需对发动机与燃料喷射系统相关部件进行改造，把燃油变

为氢气。对轨道车辆应用而言，由于与传统车辆有较高的零部件通用性，氢内燃机应用的技术难度和成本比氢燃料电池更有优势，在后期维修保养方面也有更成熟的服务体系，未来发展取决于2种不同技术路线相关的产业链发展和关键技术攻关情况。

3　存在的问题

3.1　空间与重量的限制

氢燃料电池系统应用于轨道车辆最直接的问题是空间与重量限制。受限于车辆限界和轴重，氢燃料电池系统的尺寸和轮廓需按照列车的统一要求确定，而燃料电池系统部件繁多，如何进行合理集成、实现部件的小型化/轻量化是急需解决的问题。

3.2　能量与效率的限制

氢燃料电池电堆效率曲线呈“两头低、中间高”的特点，低功率应用时存在能效不高的问题，需要结合储能系统进行高效控制，实现能量输出与工作效率综合最优。因此，氢燃料电池电堆的优良设计和能量控制系统开发成为性能提升的关键手段。氢燃料电池箱、动力电池箱之间的均衡控制，面向具体运行工况和线路条件的能量控制策略均非常重要，需要针对性地进行设计。

3.3　运维与成本的限制

虽然近年来氢燃料电池技术进步较为明显，但系统相关的采购成本和运维成本仍是用户最为关注的项点，系统的高可靠运行、低运维工作量应成为技术设计的重要需求。以阿尔斯通公司的Coradia iLint市域列车为例，2022年12月，由于车辆运行故障、加氢存在困难、阿尔斯通公司并未按时交付列车等问题，原计划在运营商RMV的网络中运行的6列氢能列车，实际仅有2列在正常使用，导致运营商不得不穿插使用内燃机车和巴士接送乘客。因此，需要从全生命周期的可靠性、可维护性、易用性、综合运用成本等方面考虑，进行车辆设计。

4　技术创新方向

4.1　低成本高质量设计

近几年，氢燃料电池技术发展迅速，特别是在膜电极、气体扩散层、催化剂、双极板和电堆整体集成技术等方面有了很大进步，其系统性能和成本仍是大规模推广应用的关键点[13]。因为轨道车辆和重卡对燃料电池电堆的功率需求，目前国内主流氢燃料电池系统产品基本都实现了单堆额定功率大于100 kW。

后续应从以下4个方面实现低成本高质量应用：

①工作寿命：在2015年左右，主流电堆的工作寿命多为10 000~15 000 h，而目前国内普遍以30 000 h或百万公里寿命为目标，因此需要在催化剂及其载体、膜电极、电堆和系统控制等诸多方面实现提升。

② 输出功率：目前石墨极板电堆的功率密度可达到4 kW/L，金属双极板电堆的功率密度可达到5 kW/L，但金属双极板存在金属腐蚀问题，是需要攻克的关键技术，此外，电堆内部流场和热管理系统的设计也需要提升。

③系统效率：目前氢燃料电池混合动力系统效率一般为40%~60%，辅机效率提升和功耗优化管理方面还有很多工作要开展。

④综合成本：建议针对制造和使用2方面降低成本。制造成本包括材料成本（如催化剂、双极板）、工艺成本（如膜电极涂布、双极板生产、电堆组装等），可以从材料选型、结构优化方面降本。使用成本包括氢燃料电池用氢、氢气制储运输、加氢站建设运营等成本，常用的制氢方法主要有电解水制氢、工业副产品制氢、化工原料制氢等，未来清洁能源电解水制氢技术将会成为主流技术之一。目前国内主要采用35 MPa储氢瓶，后续可从70 MPa高压储氢、液态储氢和氢气输送管道建设等方面入手，进一步提高储运效率、降低长距离储运成本。

4.2　高能效设计

氢燃料电池系统在低功率运行时效率不高，需通过有效的控制方法保证电堆运行在合理的工况，发挥最佳能效。

质子交换膜燃料电池在启动和停机过程中所形成的氢气/空气界面是造成性能衰减和耐久性恶化的重要因素。碳材料易在高电位、高温、高氧浓度环境下发生氧化腐蚀[14]，由于电堆的正常运行温度为50~70 ℃，碳载体被氧化的速率很低。PEMFC催化剂载体在启停过程中存在反向电流腐蚀，即在电池启动和停机过程中，其阳极会出现氢气/空气界面[15]。此时，燃料电池的阳极会有氧化反应发生，同时在阴极催化层表面形成高电位而发生氧化反应，使得催化剂颗粒脱落，造成PEMFC的性能衰减[16-17]。产生的H^+通过质子交换膜到达阳极，就会产生反向电流，因此，应合理制定燃料电池的启动控制策略、运行控制策略和正常停机、紧急停机策略。其中，文献[18] 提出了一种多堆燃料电池系统优化控制方法，以氢耗量和耐久性为优化目标，精准优化每个单堆燃料电池系统输出功率，进而实现整车氢耗量最低。后续，应不断优化控制策略，开展高能效设计，降低氢耗量。

4.3　高安全高可靠设计

氢燃料电池系统的构造比锂电池系统更为复杂，其中，燃料电池电堆由膜电极、双极板构成的电池单元以及集流板、端板、密封圈、水热管理系统等组成，

而质子交换膜、催化剂、气体扩散层是构成膜电极的关键材料，其耐久性决定了电堆的使用寿命和工况适应性。在设计氢燃料电池混合动力系统时，既需要考虑电气系统的安全、可靠，又需要考虑高压氢气泄漏的安全预测与防控。针对氢泄漏涉及的释压、扩散和事故后果3个阶段分别采取相应技术措施，并考虑关联性影响要素，进行综合设计，如图11所示。基于此，文献[19]开展了不同场景下氢燃料电池有轨电车氢泄漏分析并总结了列车运行速度对可燃区域影响的规律，文献[20]针对加氢站内4种典型氢气事故后果（物理爆炸、闪火、射流火焰和气云爆炸）进行了定量研究。随着氢燃料电池轨道车辆的广泛应用，相应的风险研究和技术措施需继续加强。

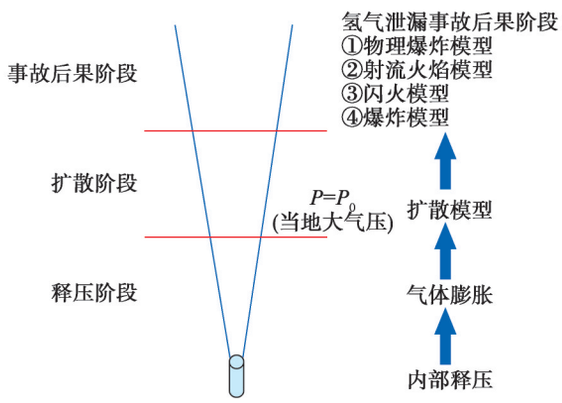


图11 氢气泄漏及其事故后果分析示意图

Fig. 11 Schematic diagram of hydrogen leakage and its consequences analysis

4.4 标准体系建设

基于氢能应用的快速发展，国家标准委员会于2017年发布了《质子交换膜燃料电池发电系统低温特性测试方法》（GB/T 33979—2017）、《加氢站安全技术规范》（GB/T 34584—2017）、《氢系统安全的基本要求》（GB/T 29729—2013）等多项氢能国标，初步形成了我国氢能源标准体系。但氢能在轨道交通方面的应用的国家标准至今仍是空白。

近几年，国内在轨道交通氢燃料电池供电技术企业标准和行业标准方面做了不少努力。基于前期研究与应用基础，联合其他国家开展了氢燃料电池在轨道交通应用的IEC国际标准的编制工作，其中中车唐山公司牵头编制了轨道车辆用燃料电池性能测试方法方面的国际标准，并与阿尔斯通公司联合编制了轨道车辆用燃料电池系统设计方面的国际标准。后续应从氢燃料电池电堆及关键辅机开发、系统集成、控制策略、试验测试、装车应用和运用维护等全面开展标准布局和体系建设，支撑燃料电池产品和技术的快速发展。

5 结语

氢能是轨道交通绿色低碳发展的战略选择。本文总结了氢燃料电池在轨道车辆上的应用情况，分析并提出了氢能源轨道车辆及动力系统关键技术研究方向。后续，针对高安全、高可靠、低成本、高能效等需求，面向设计、制造、运营等环节，持续开展新能源、新材料、新技术、新工艺在车辆上的适用性研究和工程化应用，研究面向不同线路条件和运营需求的氢能源轨道车辆，为轨道交通行业提供基于清洁能源、完全零排放的解决方案，为实现我国“双碳”目标和高质量发展提供技术支撑。

参考文献：

[1] 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.

[2] 国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-26) [2023-02-15]. https://www. gov. cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
The State Council. Notice of the State Council on issuing the action plan for carbon peak before 2030[EB/OL]. (2021-10-26) [2023-02-15]. https://www. gov. cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.

[3] 中华人民共和国交通运输部. 国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知[EB/OL]. (2022-01-19) [2023-02-15]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220119_3637245.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Notice of the State Council on issuing the development plan for the modern comprehensive transportation system during the 14th Five Year Plan period[EB/OL]. (2022-01-19) [2023-02-15]. https://xxgk. mot. gov. cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220119_3637245.html.

[4] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案 [EB/OL]. (2022-08-01) [2023-02-15]. https://www.doc88.com/p-90287814850111.html.
China Association of Metros. China urban rail transit green urban rail development action plan[EB/OL]. (2022-08-01) [2023-02-15]. https://www. doc88. com/p-90287814850111. html.

[5] SUN Yan, ANWAR M, HASSAN N M S, et al. A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations[J]. Railway Engineering Science, 2021, 29(3): 212-232.

[6] 汪培桢, 杨升. 氢能有轨电车应用综述[J]. 装备制造技术, 2020(2): 196-199.
WANG Peizhen, YANG Sheng. Overview of hydrogen power tram applications[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(2): 196-199.

[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] 李明, 刘楠, 韩铁礼. 燃料电池有轨电车冷却装置降噪设计及试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 97-104.
LI Ming, LIU Nan, HAN Tieli. Noise reduction design and experimental research of cooling system of fuel cell tram[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 97-104.

[9] 戴朝华, 史青, 陈维荣, 等. 质子交换膜燃料电池单体电压均衡性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1289-1302.
DAI Chaohua, SHI Qing, CHEN Weirong, et al. A review of the single cell voltage uniformity in proton exchange membrane fuel cells[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1289-1302.

[10] 兰洪星. 氢燃料电池系统建模与控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LAN Hongxing. Research on modeling and control strategy of hydrogen fuel cell system[D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[11] 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.

[12] 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.

[13] KANGASNIEMI K H, CONDIT D A, JARVI T D. Characterization of Vulcan electrochemically oxidized under simulated PEM fuel cell conditions[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2004, 151(4): E125-E132.

[14] KIM J, LEE J, TAK Y. Relationship between carbon corrosion and positive electrode potential in a proton-exchange membrane fuel cell during start/stop operation[J]. Journal of Power Sources, 2009, 192(2): 674-678.

[15] 余意, 王谌, 詹志刚, 等. 质子交换膜燃料电池启停衰减的研究进展[J]. 电池工业, 2010, 15(2): 120-123.
YU Yi, WANG Chen, ZHAN Zhigang, et al. Research progress on the startup-shutdown attenuation of PEMFC[J]. Chinese Battery Industry, 2010, 15(2): 120-123.

[16] 王诚, 黄俊, 王树博, 等. 车用燃料电池启停工况性能衰减[J]. 化学通报, 2016, 79(11): 1001-1011.
WANG Cheng, HUANG Jun, WANG Shubo, et al. The performance degradation study of vehicle fuel cell under start-stop operating mode[J]. Chemistry, 2016, 79(11): 1001-1011.

[17] 李岩. 水冷型质子交换膜燃料电池限制高电位策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
LI Yan. Study on limiting high voltage of water cooled proton exchange membrane fuel cell[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[18] 蔡良东, 李奇, 刘强, 等. 考虑系统氢耗和耐久性的多堆燃料电池优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (10): 3670-3679.
CAI Liangdong, LI Qi, LIU Qiang, et al. Optimal control method for multi-stack fuel cells considering system hydrogen consumption and durability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3670-3679.

[19] LIU B, PEI C X, HUANG T, et al. Modeling of unintended hydrogen releases from a fuel cell tram[C]//IA HySafe. International Conference on Hydrogen Safety. Edinburg: IA HySafe, 2021.

[20] 李志勇, 潘相敏, 马建新. 加氢站氢气事故后果量化评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 286-291.
LI Zhiyong, PAN Xiangmin, MA Jianxin. Quantitative assessment on hydrogen releases of hydrogen refueling station by consequence modeling[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(2): 286-291.

收稿日期：2023-03-13
修回日期：2023-04-16