DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.03.009
文章编号：1000-128X(2023)03-0073-11

氢能源接触网检修车燃料电池动力系统设计

刘　畅[1]，黄永聪[2]，殷　枢[1]，陶诗涌[1]，杨春华[1]
（1.四川荣创新能动力系统有限公司，四川 成都　610095；
2.国能新朔铁路有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯　017010）

摘　要：针对国家能源集团新朔铁路公司下辖铁路沿线接触网及基础设施的触网检修车需求，文章研发一款基于质子交换膜燃料电池（PEMFC）的100 kW氢能源接触网检修车动力系统。该系统旨在优化系统供电电压制式和自身供电模式，提高系统对环境温度的适应性和能量转换效率，降低系统噪声，同时实现燃料电池系统、动力分配控制器与整车之间的通信与控制。依据国家标准，在第三方检测机构对产品的性能与设计指标进行验证，并进行实际装车应用，对燃料电池系统与整车匹配性进行验证。结果表明，该系统满足整车700 V供电需求，所有辅助部件(BOP)均由系统自给供能，无需外部电源。系统具备在−30~45 ℃环境温度下的运行能力，噪声小于70 dB@0.3 m，直流电压制式转换器（DC/DC）后端额定效率可达40%。在实际应用中，燃料电池动力系统可配合整车完成运行、制动、充电等操作，整车匹配性良好。设计的燃料电池动力系统符合氢能源接触网检修车需求，为燃料电池动力系统在轨道交通的应用提供了有效的设计参考价值和工程应用经验。

关键词：燃料电池动力系统；氢能源接触网检修车；质子交换膜燃料电池；系统设计；系统测试；装车运行

中图分类号：TK91；U273　　**文献标识码：**A

Design of fuel cell power system for hydrogen-powered inspection train used for overhead contact line equipment

LIU Chang[1], HUANG Yongcong[2], YIN Shu[1], TAO Shiyong[1], YANG Chunhua[1]

(1. Sichuan Rongchuang New Energy Power System Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610095, China;
2. CHN ENERGY Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017010, China)

Abstract: A 100 kW hydrogen energy power system based on proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) was developed to meet the inspection trains for overhead contact line equipment along the railway lines under the jurisdiction of Xinshuo Railway Company, a subsidiary of CHN ENERGY Group. The system was designed to optimize the power supply voltage format and self-powering mode, enhance the system's adaptability to environmental temperatures, reduce system noise level, improve energy conversion efficiency, and enable communication and control between the fuel cell system, power distribution controller, and the train. The resulting product underwent verification on the performance and design indexes by a third-party testing organization according to national standards. Additionally, it was put into application on board to validate its compatibility with the train. The results show that the system fulfills the 700 V power supply requirements of the train, while the balance of plant (BOP) is self-powered without relying on external sources. The system can operate within a temperature range of −30 ℃ to 45 ℃, with noise emissions below 70 dB@0.3 m and a DC/DC converter efficiency rating of 40%. In practical applications, the fuel cell power system effectively helped the train in operations such as running, braking, and

通信作者：陶诗涌(1980—)，男，博士，高级工程师，主要从事氢燃料电池及发电技术方面的研究；E-mail: taosy@rong-chuang.com
引用格式：刘畅, 黄永聪, 殷枢, 等. 氢能源接触网检修车燃料电池动力系统设计[J]. 机车电传动, 2023(3): 73-83.
Citation: LIU Chang, HUANG Yongcong, YIN Shu, et al. Design of fuel cell power system for hydrogen-powered inspection train used for overhead contact line equipment[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(3): 73-83.

charging, demonstrating good compatibility with the train. The designed fuel cell power system successfully meets the requirements of the hydrogen-powered inspection train for overhead contact line equipment, providing a valuable design reference and practical engineering experience for the application of fuel cell power systems in railway transportation.

Keywords: fuel cell power system; hydrogen-powered inspection train for overhead contact line equipment; proton exchange membrane fuel cells; system design; system test; on-board operation

0 引言

能源在人类文明的进步与发展中起到不可或缺的作用，纵观能源的发展迭代，可以分为薪柴、煤炭、化石能源和可再生能源4个阶段，能源发展的本质是能源结构中碳氢比不断降低的过程，实现从高碳排放到低碳排放再到无碳排放的发展历程[1]。全球工业化进程的加快导致经济发展与环境保护之间的矛盾愈发不可调和，迫切需要寻求一种可以替代传统化石燃料的清洁能源[2]。氢能源相较于传统化石能源，具有绿色无污染、可再生、安全高效等优势；相较于风光水力等新能源，氢能源具有稳定性高、可长期大量存储等优势。因此，氢能源可作为传统能源的替代清洁能源。同时，氢能源以其可与热能、冷能、燃料等多种能源高度耦合的特性，可在交通、建筑和工业等领域发挥重要作用。

相关科研院所在新能源方面的研究推动了节能环保动力与替代能源车型的发展[3]。作为燃料电池电动汽车的主动力能源，质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一种将氢和氧的化学能通过电极反应直接转化成电能的装置，在轨道交通领域同样具备广阔的应用前景。针对轨道交通用燃料电池的设计，文献[4]列举了氢技术在铁路车辆设计和应用中可能遇到的问题以及解决方案，提出未来氢燃料电池混合动力轨道车辆能源系统可能会基于固体氧化物燃料电池(SOFC)或PEMFC的观点。文献[5]针对氢能有轨电车动力性进行分析，提出以氢燃料电池为主、蓄电池为辅的混合动力系统更适宜有轨电车动力模式。文献[6]对有轨电车动力系统建模分析，为氢燃料电池混合动力有轨电车运行提供理论支撑。氢燃料电池列车的成功试车以及氢燃料电池混合动力机车完成牵引则表明了氢燃料电池的可应用性[7-8]。

综上所述，对燃料电池动力性能方面的研究众多，但是对于大功率轨道燃料电池发动机设计、各子系统主要参数及关键零部件选型的研究却少有论述。本文依据氢能源接触网检修车需求指标，设计一套大功率燃料电池动力系统。该系统以PEMFC电堆为核心，根据氢能源接触网检修车需求，设计单套额定功率为100 kW的燃料电池动力系统，并对该系统进行需求指标检验测试和装车应用试验，完成设计验证。

1 氢能源接触网检修车工况概述与设计目标

氢能源接触网检修车主要服务于国家能源集团新朔铁路公司与国家能源集团鄂尔多斯煤制氢基地区间铁路，以及新朔铁路公司下辖大准铁路、准池铁路和新准铁路沿线接触网及基础设施的检修。其工作特性为单个天窗点作业时间4 h，作业范围35 km，存在大量隧道作业工况；在行驶时，启动牵引力需求为64 kN，最高运行速度需满足120 km/h。基于上述工作特性需求，氢能源接触网检修车采用氢燃料电池与锂电池混合供电模式提供车辆动力，其中燃料电池功率为200 kW，而隧道作业对噪声控制要求较高，需要满足整车噪声小于75 dB@1 m。其作业场地冬季环境温度可低达−30 ℃，在特殊作业区间环境温度可能高于40 ℃。针对该作业环境，整车需具备−30 ℃低温适应性以及45 ℃高温适应性。整车供电需求为DC 700 V，因此燃料电池输出电压需稳定在DC 700 V。同时由于车辆氢气载量固定，为满足一次加氢后氢气量可以满足一次作业时间，燃料电池系统额定工况点效率需不低于40%（含DC/DC）。

基于项目要求，本文设计的燃料电池动力系统将被应用于氢能源接触网检修车，设计需求指标如表1所示。

2 燃料电池动力系统总体设计

本文研发的氢能源接触网检修车燃料电池动力系统单套系统总体设计如图1所示，主要由电堆子系统、氢气供应子系统、空气供应子系统、热管理子系统、电气子系统和控制子系统构成。

依据表1所述需求，设计燃料电池动力系统，单套额定发电功率满足100 kW，为满足系统输出电压、工作温度与噪声等指标，在标准燃料电池动力系统设计基础上，应增加额定电压供给、低温工作、降噪等针对性设计，以满足氢能源接触网检修车应用需求。

燃料电池动力系统各子系统的工作原理为：氢气与氧气分别由氢气供应子系统和空气供应子系统供应；电堆子系统为氢气与氧气发生化学反应的主要场所；热管理子系统主要用于电堆散热控温和辅助部件

表 1　氢能源接触网检修车燃料电池动力系统主要设计指标

Table 1　Main design indexes of fuel cell power system of hydrogen-powered inspection train for overhead contact line equipment

指标	参数	设计依据	判定执行标准
额定发电功率/kW	200	整车动力系统设计需求	GB/T 24554—2009
燃料电池动力系统套数/套	2	整车结构设计需求	
单套输出直流电压范围/V	650~900	整车供电设计需求	GB/T 24554—2009
单套额定输出直流电压/V	700	整车供电设计需求	GB/T 24554—2009
工作温度/℃	−30~45	整车工作环境设计需求	GB/T 25319—2010 GB/T 33979—2017 GB/T 24554—2009
单套噪声/dB	< 75@1 m	整车噪声设计需求	GB/T 25122.1—2018
单套额定点效率（含 DC/DC）	≥40%	整车储氢设计需求	GB/T 24554—2009

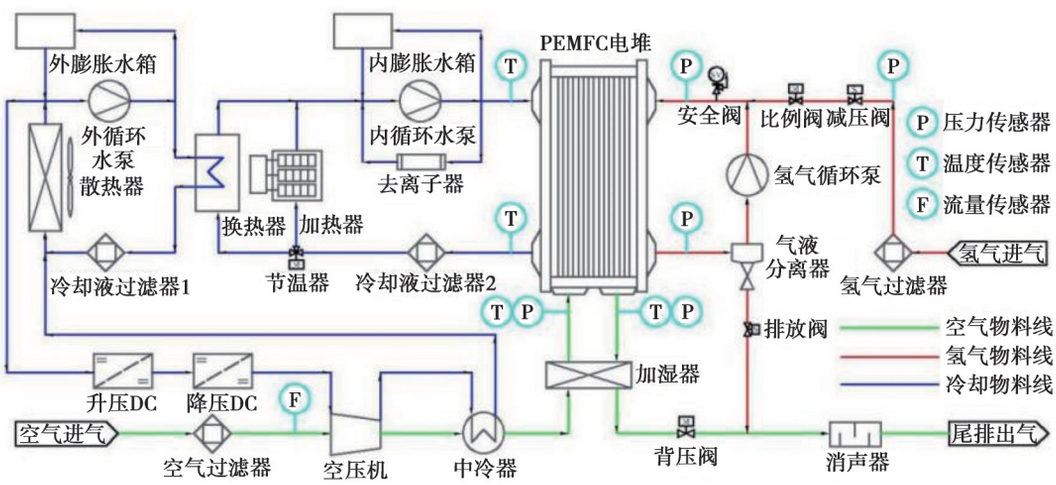


图 1　燃料电池动力系统总体设计图

Fig. 1　Design diagram of fuel cell power system

（BOP）的散热冷却；电气子系统主要用于系统的电气控制和电能输出；控制子系统主要用于燃料电池动力系统的控制与整车控制器的通信。

2.1　电堆子系统

电堆子系统作为氢气与氧气发生化学反应的主要场所，主要依据燃料电池动力系统功率需求和内部损耗需求设计。燃料电池动力系统功率需求为 100 kW。本系统选用单片电压 E_{cell}=0.65 V@300 A 的单片作为电堆子系统组成部件，单片功率最高可达 195 W。

设计 BOP 损耗占电堆总输出的 20%，则电堆输出需满足 125 kW 方可实现燃料电池动力系统 100 kW 的输出需求，因此设计采用 N=125×1000/195≈641 节单片。本系统合计采用 642 片燃料电池单片，以 107 片单片串联，组成单电堆模块，再将 6 套电堆模块串联，构成电堆子系统。

2.2　空气供应子系统

空气供应子系统主要用于空气的输送和尾气的排出，外部空气经空气供应子系统进入 PEMFC 电堆阴极，与氢气发生电化学反应，反应后生成水与剩余的气体由阴极出口处排出到环境中。空气供应子系统设计图如图 2 所示。

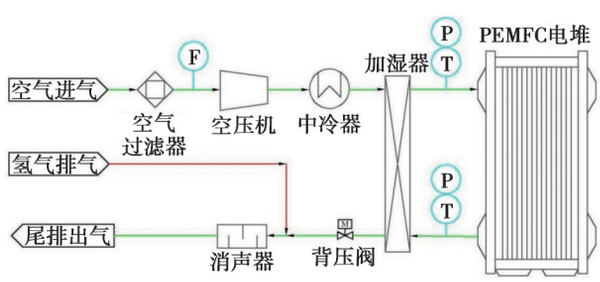


图 2　空气供应子系统设计图

Fig. 2　Design diagram of air supply sub-system

本燃料电池动力系统中的电堆子系统由多单片串联而成，在燃料电池发电过程中，需要使适当过量的空气进入电堆，可有效提高燃料电池电堆发电效率。该实际空气流量与理论空气流量的比值称为空气化学计量比 S_{AIR}。实际在本系统中，空气需求量可由式(1)进行计算。

$$F_{AIR}=\frac{I\times 22.4\times 60\times 0.207}{n_{AIR}\times F}\times N\times S_{AIR} \tag{1}$$

式中：n_{AIR}为 1 mol 空气反应得到的电子数；F为法拉第常数；F_{AIR}为燃料电池单片空气需求量，sL/min；I为单

片电流，A；N为燃料电池单片数；S_{AIR}为常数，常取值1.5~2.0。

利用式(1)，可对空压机与背压阀进行选型设计。本系统所用的空气由无刷永磁电机驱动空压机提供，由电控背压阀调节系统压力，空压机的转速、功率和扭矩等信息由空压机控制系统进行采集与监控。在空气供应子系统安装流量传感器和压力传感器，监控入口空气是否符合电堆需求，并在满足系统功能时保证空气供应的快速反应。在启动阶段，空压机由燃料电池动力系统外部供电，启动完成且PEMFC电堆电压达到要求后，空气压缩机切换至由燃料电池动力系统直接供电。

PEMFC反应温度通常在60~100 ℃，由于空气经过空气压缩机压缩后温度较高(通常会高于100 ℃)，会引起电堆反应温度偏高。因此需配置中冷器，将空气温度冷却至合理范围内，并在空气供应子系统安装温度传感器，监控入口空气温度是否符合电堆需求。

PEMFC电堆中发生电化学反应时，需要以水充当载体在质子交换膜中将阳极质子转移至阴极，因此空气湿度过低会导致空气进口处质子交换膜水分含量降低（膜干），引起电化学反应速度下降，降低燃料电池动力系统性能。入口空气相对湿度大于95%可有效避免膜干现象，因此需配置加湿器，燃料电池反应会生成大量水随反应剩余气体排出，利用电堆出口含大量水的尾气对入口空气进行加湿，使入口空气湿度符合电堆需求。

由于HS、SO_X、CO、NO_X等物质会引发电堆子系统催化剂中毒，从而降低燃料电池输出性能，因此需在空气供应子系统入口安装空气过滤器，对空气进行过滤[9-10]。同时，为满足接触网检修车噪声指标，在尾排处安装消音器以降低噪声。

2.3 氢气供应子系统

氢气供应子系统主要用于氢气的输送和反应剩余气体的排出，氢气通过氢气供应子系统进入PEMFC电堆的阳极，与空气发生电化学反应后，剩余的氢气从阳极出口排出。氢气供应子系统设计如图3所示。

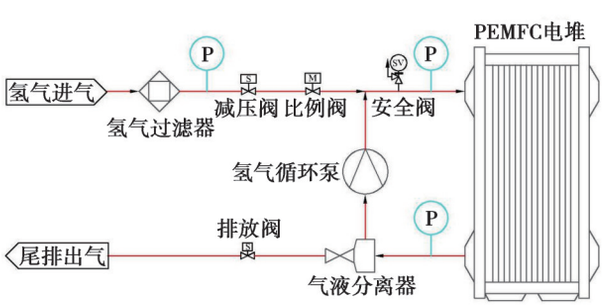


图3 氢气供应子系统设计图

Fig. 3 Design diagram of hydrogen supply sub-system

在本系统中，氢气需求量可由式(2)进行计算。

$$F_{H_2}=\frac{I\times 22.4\times 60}{n_{H_2}\times F}\times N \tag{2}$$

式中：n_{H2}为1 mol氢气反应失电子数；F_{H2}为单片理论氢气需求量，sL/min。

在燃料电池发电过程中，需要适当过量的氢气进入电堆以提高燃料电池电堆发电效率，该实际氢气流量与理论氢气流量的比值称为化学计量比。其中理论氢气流量为持续外部供应，过量氢气由氢气循环泵将未反应氢气直接循环回阳极入口。通常氢气的化学计量比S_{H2}取值与空气化学计量比相同，且该值常取1.5~2.0。循环氢气流量为

$$F_{H_2,\mathrm{cycle}}=F_{H_2}\times S_{H_2} \tag{3}$$

式中：$F_{H_2,\mathrm{cycle}}$为单片系统循环氢气量，sL/min。

根据式(2)选型比例阀调节流量，利用比例阀精确调整氢气压力，通过在氢气供应子系统安装压力传感器，监控入口氢气是否符合电堆需求。氢气供应子系统由内部控制器根据电堆进气压力检测器对驱动电机和氢气比例阀进行控制，使其满足电堆内部电化学反应要求。

通过式(3)选型氢气循环泵，氢气循环泵能够将其转速、功率和扭矩等信息量进行监控与采集。在启动阶段，氢气循环泵由系统外部供电，启动完成且PEMFC电堆电压达到要求后，氢气循环泵切换至由PEMFC电堆直接供电。该集成方案可实现氢气的循环使用，有效提高系统效率。

由于HS、SO_X、CO、NO_X等物质会引发电堆子系统催化剂中毒并导致电堆寿命缩短，因此需在氢气供应子系统入口提供氢气过滤器，对氢气进行过滤[9-10]。

常规氢气储罐存储压力为35 MPa或者70 MPa，而氢气储罐经过一级减压后，压力通常为8 MPa。为满足电堆子系统对氢气供应的需求，本系统所用的氢气由减压阀进行初步减压。当系统氢气压力存在异常时，启动安全阀进行泄气，防止系统受损。

在化学反应过程中，受水在质子交换膜迁移影响，不断有阴极产生水通过质子交换膜渗透到阳极侧，过量的水渗透至阳极会导致阳极水淹，物料无法和催化剂接触，降低反应活性并影响电堆性能，且质子交换膜的浓度渗透效应会导致阴极中微量氮气渗透过质子交换膜至阳极，降低氢气纯度。因此需要在氢气供应子系统安装气液分离器，对液态水进行分离，同时排放阀进行周期脉冲式排放，用于排出电堆阳极侧的液态水和杂质气体[11]。

通过氢气循环、气液分离器、排放阀的设计，可有效提高整套系统的效率，满足接触网检修车效率指标要求。

2.4　热管理子系统

PEMFC电堆在发电的同时会释放热量，电堆需要工作在一定的温度范围内，温度过高和过低都会影响电堆的效率，甚至会导致电堆的永久损坏[12]。因此，需要通过热管理子系统将电堆产生的热量散发到大气中，保证电堆工作在恒定的温度。同时，系统BOP部件在工作时会产生热量，也需要配置热管理子系统使BOP部件可以在正常温度下工作。热管理子系统设计如图4所示。

在系统运行时，未转化为电能的能量将以热能形式输出，电堆产热计算公式为

$$Q=(E-E_{\text{cell}})\times N\times I \tag{4}$$

式中：E为理论电势，理论电势值E的具体值取决于产物水的状态；E_{cell}为实际电势；Q为PEMFC电堆产热量，kW。

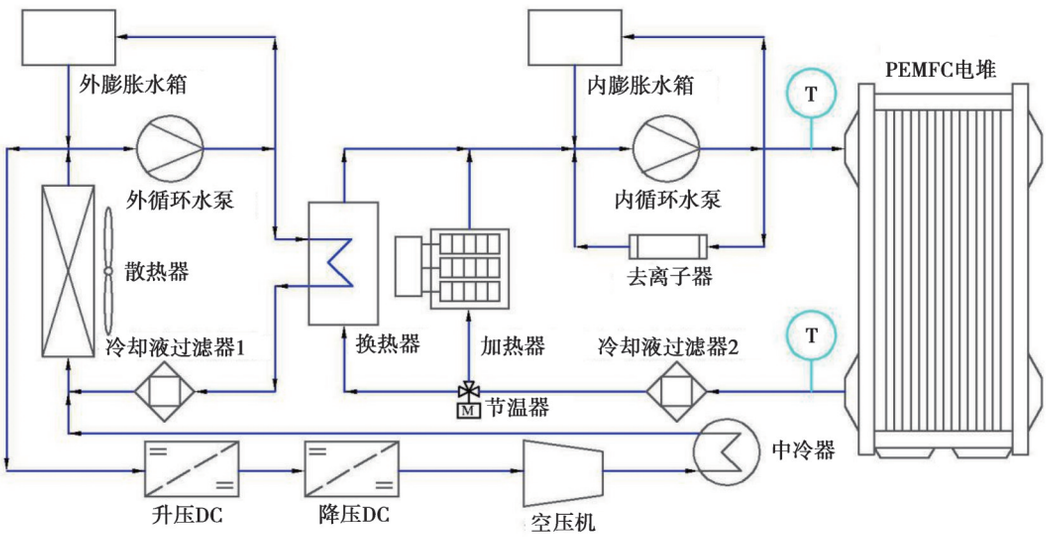


图4　热管理子系统设计图

Fig. 4　Design diagram of thermal management sub-system

由于PEMFC电堆需要稳定的反应温度，以保证催化剂作用在其最佳反应活性温度下，因此PEMFC电堆进口温度T_{in}和出口温度T_{out}在反应进行时都需要维持在稳定的状态。由式(5)可计算出燃料电池动力系统所需冷却液流量。

$$F_{\text{cool}}=\frac{Q\times 1000}{(T_{\text{out}}-T_{\text{in}})\times c_{\text{p}}} \tag{5}$$

式中：F_{cool}为经过PEMFC电堆的冷却液流量，L/min；c_{p}为冷却液定压比热容，J/(g·K)。

依据式(4)~式(5)选型水泵，保证冷却液流量和电堆出入口温度均达到指标要求。电堆冷却水泵能够对自身转速、功率等信息进行采集与监控。在热管理子系统安装温度传感器，可监控电堆出入口温度是否符合需求。在启动阶段，电堆冷却水泵由系统外部供电，启动完成且PEMFC电堆电压达到要求后，电堆冷却水泵切换至由燃料电池动力系统直接供电。

PEMFC电堆离子率要求小于5 μS/cm，当冷却剂导电率大于额定值时，运行燃料电池动力系统可导致高电压隔离失效[13]。为避免冷却液的电导率超标，必须对冷却液进行钝化处理，并且在热管理子系统中增加去离子器，冷却液采用50%乙二醇溶液作为冷却介质；同时利用可隔绝离子的换热器，将容易影响冷却液离子率的部件（包含散热器和BOP部件）与PEMFC电堆隔离。

在本系统中，BOP部件和PEMFC电堆热量均由散热器散发至空气中，热管理子系统内部控制器根据PEMFC电堆冷却液入口、出口温度检测器对电堆冷却水泵进行控制，使水流量满足PEMFC电堆内部电化学反应要求，同时对散热器风机转速进行控制，从而使PEMFC电堆出入口温差满足内部电化学反应要求。

为满足接触网检修车低温适应性指标，在系统中额外配置节温器与加热器，用于低温环境下冷启动加热系统，在启动阶段，启动节温器使冷却液经过加热器，加热器由系统外部供电，系统达到启动温度后自动关闭。

2.5　电气子系统

电气子系统分高压电气与低压电气两部分。在低压电气系统中，24 V电源主要用于系统所有信号采集和通信控制供电。在高压电气系统中，由于PEMFC电堆的极化特性，对于大功率PEMFC电堆来说，必须维持输出母线上的电压相对恒定。本系统中PEMFC电堆输出电压为300~670 V，因此需增加单向DC/DC升压斩波器来维持输出电压的稳定。为满足接触网检修车电压指标，燃料电池动力系统选用的单向DC/DC升压斩波器输入电压范围为300~670 V，最大输出电流为300 A，输出电压范围为650~900 V，额定输出功率为120 kW。由于系统配置有电压范围为200~450 V的BOP部件，因此在DC/DC升压斩波器后配置DC/DC

降压斩波器，为BOP部件供电。所选用的 DC/DC 降压斩波器输入电压范围为600~900 V，输出电压波动范围200~450 V。该子系统可满足系统供电输出以及系统内部控制和辅助系统的供电。

2.6 控制子系统

控制子系统主要负责燃料电池动力系统的自身控制与整车通信，主要由燃料电池系统控制器(FCU)负责。FCU 通过对内部控制器与执行器的通信与控制，以及与外部整车控制器、动力分配系统(RDU)通信交互，实现燃料电池动力系统启动、运行、停机等功能，并在过程中进行动态能量管理、故障处理以及数据上传。FCU 控制器与整车控制器(VCU)之间存在控制器局域网络(CAN) 总线通信接口和多个硬线信号接口。燃料电池系统内部和外部的CAN网络拓扑结构如图 5 所示。内部CAN 网络节点包括空压机节点、冷却水泵节点、氢气循环泵节点和DC/DC 节点；CAN网络外部有一条通信链路接口，与整车控制器和动力分配控制器进行信息交互。内部和外部CAN节点通信标准均为扩展帧、250 kbps波特率。

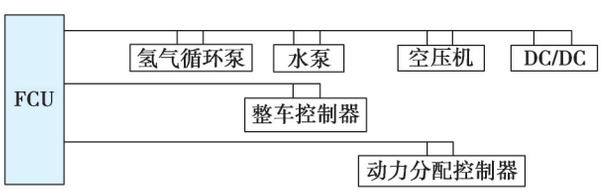


图5 控制子系统网络拓扑图

Fig. 5 Network topology of control sub-system

研制的氢能源接触网检修车燃料电池动力系统实物如图 6 所示。系统所有接口位于同侧，便于整车集成，侧盖和顶盖可拆卸以便于维修，底部设置4个固定底座，用于被固定在接触网作业车上。

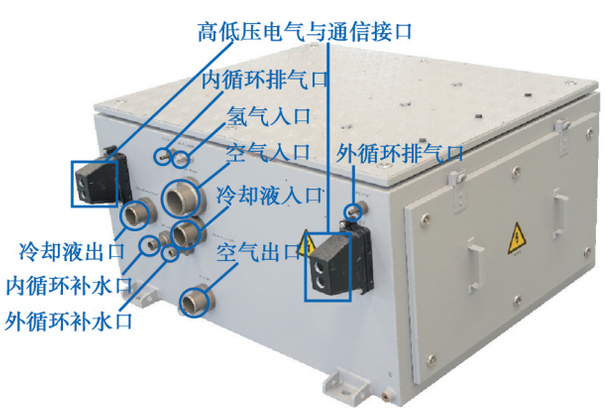


图 6 氢能源接触网检修车燃料电池动力系统实物图

Fig. 6 Photo of fuel cell power system of hydrogen-powered inspection train for overhead contact line equipment

3 燃料电池动力系统测试

针对接触网检修车需求，在中国汽车工程研究院对燃料电池动力系统进行系统测试。

3.1 性能测试

根据氢能源接触网检修车燃料电池动力系统设计指标，需要对燃料电池动力系统功率、电压、效率等性能指标进行验证，确定是否达到指标需求。依据标准 GB/T 24554—2009《燃料电池发动机性能试验方法》，利用燃料电池动力系统测试台架，针对燃料电池动力系统进行了多项性能测试，测试结果如图 7~图 8 和表 2 所示。

3.1.1 额定功率测试

燃料电池动力系统额定功率运行测试结果如图 7 所示。额定功率测试检验燃料电池动力系统是否可在额定功率下持续输出，以及输出的稳定性与波动性。由图 7 (a) 可知，PEMFC 电堆输出电压为 435 V，电堆电流为 280 A，电堆输出功率可达 121.8 kW。由图 7(b) 可知，电气子系统 DC/DC 升压斩波器将 435 V 电压升压至 700 V 并持续输出 60 min。由图 7(c)可知，燃料电池动力系统以 100 kW 功率持续输出，BOP 功率消耗为 17.9%，满足电堆子系统设计要求。由图 7(d) 可知，氢气消耗流量稳定，功率波动不超过±1%。输出功率、输出电压满足接触网检修车设计指标要求。

3.1.2 稳态特性测试

稳态特性测试检验燃料电池动力系统不同运行工况下的效率，选择 10%P_E、20%P_E、30%P_E、40%P_E、50%P_E、60%P_E、70%P_E、80%P_E、90%P_E、P_E共计 10 个工况点，按照规定加载到每个工况点，每个工况点至少运行3 min。系统效率利用式(6)进行计算。

$$\eta = \frac{1000 \times P}{m_{H_2} \times A_{LHV\ H_2}} \times 100\% \tag{6}$$

式中：η 为燃料电池动力系统效率，%；P 为燃料电池动力系统输出功率，kW；m_{H_2} 为氢气质量流量，g/s；$A_{LHV\ H_2}$ 为氢气低热值 1.2×10^5 kJ/kg。

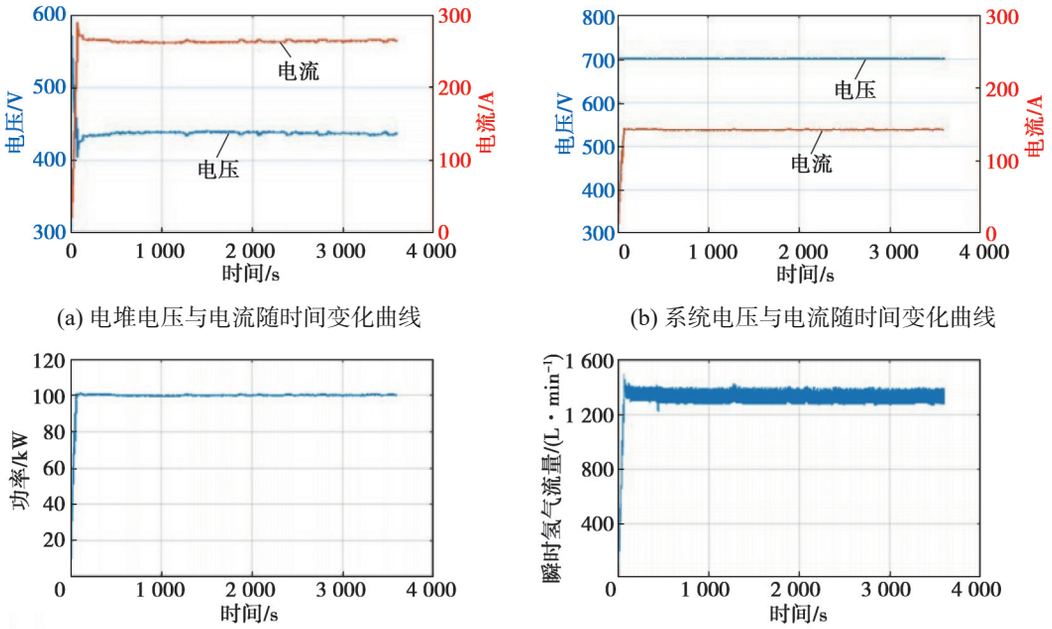
燃料电池动力系统稳态特性测试结果如图 8 所示。由图 8(a) 可知，通过电气子系统 DC/DC 升压斩波器，系统输出电压在任何工况下均可稳定在 700 V。由图 8 (b) 可知，燃料电池动力系统在额定工况点(100 kW)效率为 41.98%，最大效率为 55.99%。输出功率与系统效率满足接触网检修车设计指标要求。

此外，还进行了启动特性、动态响应、峰值功率、紧急停机、气密性、绝缘电阻、质量测试等。测试结果如表 2 所示。所有性能参数均可满足设计指标和安全要求。

3.2 环境温度适应性与噪声测试

3.2.1 环境温度适应性测试

根据氢能源接触网检修车燃料电池动力系统设计指标，需要对燃料电池动力环境温度适应性指标进行

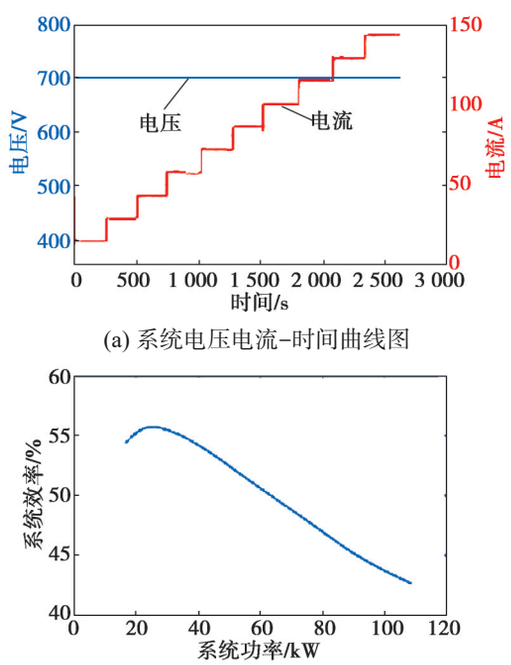


(a) 电堆电压与电流随时间变化曲线　(b) 系统电压与电流随时间变化曲线

(c) 系统功率曲线　(d) 氢气瞬时流量曲线

图 7　燃料电池动力系统额定功率运行测试结果

Fig. 7　Test resules of fuel cell power system in operation at rated power



(a) 系统电压电流-时间曲线图

(b) 系统效率-功率曲线图

图 8　燃料电池动力系统稳态特性测试结果

Fig. 8　Steady-state characteristics test results of fuel cell power system

验证，确认是否达到指标需求。依据 GB/T 33979—2017《质子交换膜燃料电池发电系统低温特性测试方法》，对低温环境适应性进行验证[14]；依据 GB/T 24554—2009《燃料电池发动机性能试验方法》，对常温环境适应性进行验证；依据 GB/T 25319—2010《汽车用燃料电池发电系统 技术条件》，对高温环境适应性进行验证[15]。利用燃料电池动力系统测试台架与环境仓，针对燃料电池动力系统进行了多种环境温度性能测试。

表 2　燃料电池动力系统性能测试结果

Table 2　Performance test results of fuel cell power system

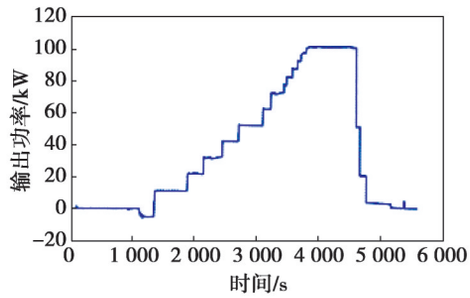
序号	测试项目	测试结果
1	启动特性测试	13.13 s(冷启动)
		10.94 s(热启动)
2	峰值功率测试	110 kW 稳定运行 10 min
3	动态响应测试	7.78 s(加载)
		6.81 s(卸载)
4	紧急停机测试	紧急停机 5 min 后，燃料电池动力系统可正常启动
5	气密性测试	50.00 kPa→21.41 kPa(氢腔)
		90.00 kPa→41.99 kPa(氢腔与空腔)
6	绝缘电阻测试	1 200 Ω/V(正极)
		1 200 Ω/V(负极)
7	质量测试	480 kg

1)低温环境适应性测试

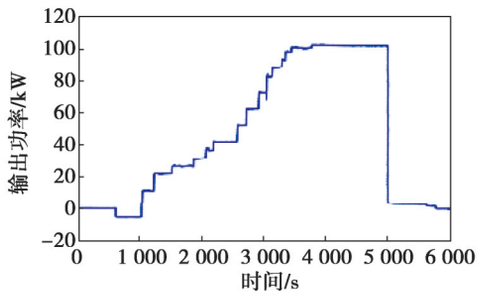
燃料电池动力系统低温启动及运行测试结果如图 9 所示。通过将燃料电池动力系统置于-10 ℃、-20 ℃和-30 ℃环境温度下浸机 12 h，发出启动命令后，测试系统启动响应能力及低温环境运行适应性。完成 10 min 运行后，再次浸机 12 h 并重复该操作。燃料电池动力系统利用热管理子系统的加热器与节温器设计，在低温环境下对燃料电池动力系统进行加热。由图 9 可知，燃料电池动力系统在-10 ℃、-20 ℃和-30 ℃环境温度下均顺利启动并正常拉载与卸载，在额定功率下可正常运行。启动完毕再次浸机 12 h 后，启动系统亦可正常运行。

2) 高温环境适应性测试

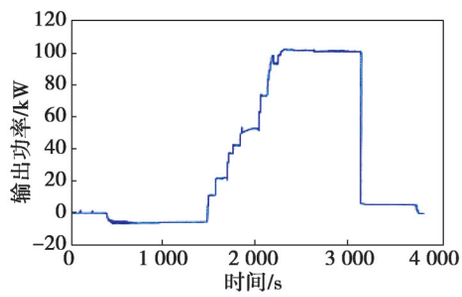
通过将燃料电池动力系统置于 45 ℃环境温度下运



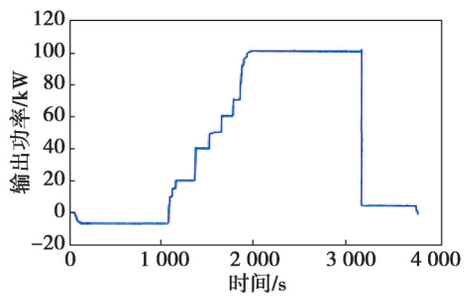
(a) −10 ℃系统第一次运行功率曲线图



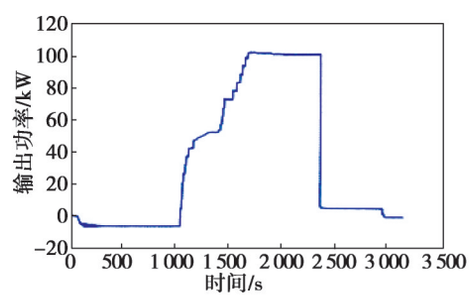
(b) −10 ℃系统第二次运行功率曲线图



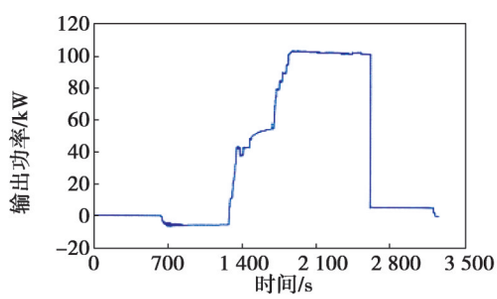
(c) −20 ℃系统第一次运行功率曲线图



(d) −20 ℃系统第二次运行功率曲线图



(e) −30 ℃系统第一次运行功率曲线图



(f) −30 ℃系统第二次运行功率曲线图

图 9　燃料电池动力系统低温启动及运行测试

Fig. 9　Low temperature start-up and operation test of fuel cell power system

行测试其高温适应性。燃料电池动力系统高温适应性测试结果如图 10 所示。由图 10 可知，燃料电池动力系统在 45 ℃环境温度下可正常拉载卸载，并在额定功率下运行 60 min 无异常。

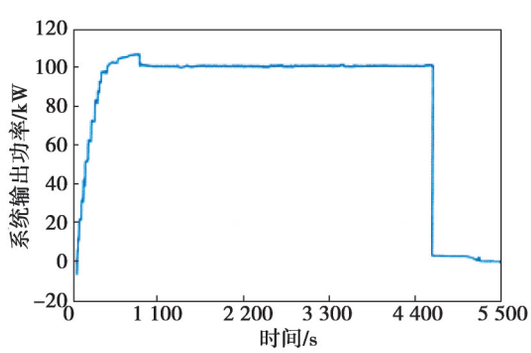


图 10　燃料电池动力系统高温适应性系统时间−功率曲线图

Fig. 10　Time-power curve from high temperature adaptability system of fuel cell power system

第三方执行不同温度测试内容与测试依据如表 3 所示，燃料电池动力系统均可正常实现启动、拉载、运行、降载等工况，无异常无故障报出，验证了本燃料电池动力系统可满足接触网检修车工作温度设计指标要求。

表 3　燃料电池动力系统运行环境温度表

Table 3　Operating environment temperatures of fuel cell power system

测试环境温度/°C	测试项目
−30	GB /T 33979—2017，低温启动与运行测试
−20	
−10	
常温（15~25）	GB/T 24554—2009，性能测试
45	GB/T 25319—2010，高温适应性测试

3.2.2　噪声测试

根据氢能源接触网检修车燃料电池动力系统设计指标，需要对燃料电池动力系统噪声指标进行验证。依据 GB/T 25122.1—2018《轨道交通机车车辆用电力变流器　第 1 部分：特性和试验方法》[16]，对燃料电池动力系统进行运行噪声测试。

以燃料电池动力系统上表面为基准面，在该基准面水平距离 0.3 m 处均匀布置 8 个测试位点，噪声测点示意图如图 11 所示，测试结果如表 4 所示。

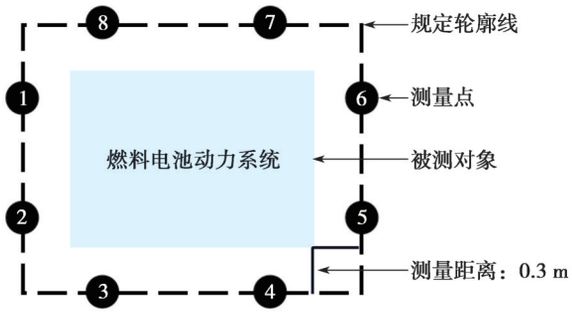


图 11　燃料电池动力系统噪声测点示意图

Fig. 11　Schematic diagram of noise measurement point of fuel cell power system

测得额定工况下 A 计权声压级与环境 A 计权声压级，根据式(7)修正得出噪声测试结果。

$$L_{\mathrm{PA}}=10\times\lg\left(10^{0.1\bar{L}_{\mathrm{PA}}}-10^{0.1\bar{L}_{\mathrm{bgA}}}\right)-K \tag{7}$$

式中：L_{PA}为修正后平均 A 计权声压级，dB；$\bar{L}_{\mathrm{PA}}$为额定工况下平均 A 计权声压级，$\bar{L}_{\mathrm{bgA}}$为背景平均 A 计权声压级；K为环境修正值。

利用式(8)计算平均 A 计权声压级，利用式(9)计算环境修正值。

$$\bar{L}_{\mathrm{A}}=10\times\lg\left(\frac{1}{N}\sum_{N=1}^{N}\lg 10^{0.1L_{\mathrm{A}}}\right) \tag{8}$$

$$K=10\times\lg\left(1+\frac{4}{\alpha\times S_{\mathrm{V}}\Big/1.25\times h\times l_{\mathrm{m}}}\right) \tag{9}$$

式中：$\bar{L}_{\mathrm{A}}$为平均 A 计权声压级，dB；L_{A}为测量 A 计权声压级；N为测量点数；α为平均吸声系数，依据 GB/T 1094.10—2016《电力变压器　第 10 部分　声级测定》确定，S_{V}为环境仓的总表面积，m^2；h为测量点高度，m；l_{m}为测量点轮廓线周长，m。

燃料电池动力系统利用空气供应子系统消音器的设计，可针对噪声源最大位置进行有效降噪。根据表 4 可知，额定功率下修正后平均 A 计权声压级为 69.7 dB@0.3 m，满足接触网检修车噪声设计指标。

表 4　燃料电池动力系统噪声测试数据与结果

Table 4　Noise test data and results of the fuel cell power system　　dB

项目	测试点 N							
	1	2	3	4	5	6	7	8
背景 A 计权声压级 L_{bgAi}	64.0	64.6	63.7	63.1	62.9	63.3	63.8	64.1
额定工况 A 计权声压级 L_{PAi}	71.5	71.8	72.7	72.3	71.2	72.7	73.5	72.9
修正后平均 A 计权声压级 L_{PA}	69.7							

4　燃料电池动力系统装车应用

燃料电池动力系统在实际应用时，需靠配置相应部件方可实现燃料电池动力系统稳定工作。在氢能源接触网检修车上，需配置燃料电池发电系统安装空间；配置供氢系统，可持续为燃料电池提供氢气作为反应物；配置散热系统，保证燃料电池运行在稳定的温度范围内。

2 套 100 kW 燃料电池动力系统安装在驾驶室后方的电气间，同时设置空气滤清器、膨胀水箱安装位置。电气间燃料电池动力系统安装实物图如图 12 所示。

散热系统采用风冷散热方式，配置翅片散热器。单台燃料电池发电系统配置 1 台 8 风机风冷散热器，翅片面积依据燃料电池散热量与工作温度进行选型。燃料电池通过系统内部水泵将冷却液直接泵送至散热器，经过散热器冷却后，冷却液循环回燃料电池为燃料电池持续散热。散热器安装在车底转向架后方（机车前进方向两侧各 1 个）。

供氢系统采用高压储氢方式将氢气进行存储，配置 35 MPa 高压储氢罐。单台燃料电池发电系统配置 8 个高压储氢罐，储氢罐数量依据线路里程、运行速度、燃料电池动力系统发电效率进行确定。氢气经过 2 级减压阀，将压降由 35 MPa 降低至燃料电池发电系统的使用压力，直接供给至燃料电池发电系统。储氢罐安装于车体顶部，外部安装有防尘罩。整车中散热系统与供氢系统布置图如图 13 所示。



图 12　燃料电池动力系统装车现场图

Fig. 12　On-site photo of on-board fuel cell power system

为检验燃料电池动力系统与氢能源接触网检修车的匹配性，将装载燃料电池动力系统的氢能源接触网

检修车于“海勒斯壕南—四道柳”区间往返运行，检验燃料电池动力系统工作状况。运行编组氢能源作业车作为本务机，附挂2台JW-4型接触网作业车（总质量74 t），运行总里程约60 km。整车运行现场图如图14所示。



图 13 供氢系统与散热系统布置图

Fig. 13 Location diagram of hydrogen supply system and heat dissipation system





图 14 氢能源接触网检修车运行现场图

Fig. 14 On-site photo of hydrogen-powered inspection train for overhead contact line equipment in operation

作业车于15:00向四道柳方向运行，采用“氢燃料电池+动力电池”混合动力，区间车辆最高运行速度79 km/h，在最高速度点进行了常用全制动试验；16:17抵达四道柳站；16:40，区间返回海勒斯壕南方向，车辆采用“氢燃料电池+动力电池混合”动力，运行约10 km后转至动力电池模式运行，其间以最高运行速度70 km/h（动力电池模式）运行；17:50到达海勒斯壕南；到站后进行了换端重启操作，启动燃料电池向动力电池充电，动力电池电量由20%充至83%，总耗时约35 min。区间运行共计耗氢约10 kg。燃料电池动力系统可配合氢能源接触网检修车执行运行、制动、充电等操作。本次实况运行检验了燃料电池动力系统在氢能源接触网检修车上的基本性能及与整车的匹配性，测试期间可稳定运行，与整车匹配性良好，验证了燃料电池在整车上应用的稳定性。

5 结语

本研究针对氢能源接触网检修车需求指标，研发了以PEMFC电堆为核心的燃料电池动力系统。通过系统设计以及系统测试，说明优化空气供应子系统，可明显降低系统噪声，使系统额定功率噪声低于70 dB@0.3 m；改良热管理子系统，可增强系统的环境适应性，使系统具备环境温度−30~45 ℃的运行能力；提高氢气供应子系统的氢气利用率，可提高系统能量利用率，使系统额定功率效率大于40%（含DC/DC）。通过装车应用，说明燃料电池动力系统可完全适用于接触网作业车，可解决燃料电池动力系统在接触网作业车上的应用问题。该系统为燃料电池动力系统在轨道交通的应用提供了有效的设计参考价值和工程应用经验。

参考文献：

[1] 杨驿昉. 能源转型大时代中的分布式能源——迈入“提质增效”新阶段[J]. 能源, 2017(12): 39-40.
YANG Yifang. Distributed energy in the era of energy transformation: entering a new stage of "improving quality and efficiency"[J]. Energy, 2017(12): 39-40.

[2] 应天杏, 程伟, 孔凡敏, 等. 基于多指标的燃料电池汽车动力系统参数匹配研究[J]. 现代制造工程, 2019(1): 1-7.
YING Tianxing, CHENG Wei, KONG Fanmin, et al. A parameter matching study for fuel cell electric vehicles based on multi-index[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(1): 1-7.

[3] 孙绪旗. 氢燃料电池汽车动力系统设计及建模仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
SUN Xuqi. Design and simulation of the powertrain of hydrogen fuel cell vehicle[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 黄文强 . 氢燃料电池混合动力有轨电车运行能效提升方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
HUANG Wenqiang. Study on energy efficiency improvement method of hydrogen fuel cell hybrid tram operation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[7] 王波 . 阿尔斯通的氢燃料电池火车完成测试[J]. 能源研究与信息, 2020, 36(4): 193.
WANG Bo. Alstom's hydrogen fuel cell train completes testing[J]. Energy Research and Information, 2020, 36(4): 193.

[8] 康劲松 . 中国中车与同济大学联合研制的国内最大功率氢燃料电池混合动力机车完成牵引等系列性能试验[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 114.
KANG Jinsong. The largest hydrogen fuel cell hybrid locomotive jointly developed by CRRC and Tongji University has completed a series of performance tests including traction[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 114.

[9] 汪虹敏, 魏子栋 . 质子交换膜燃料电池催化剂稳定化方法研究进展[J]. 化学通报, 2014, 77(1): 3-11.
WANG Hongmin, WEI Zidong. Development on stability of catalysts for proton exchange membrane fuel cell[J]. Chemistry, 2014, 77(1): 3-11.

[10] 张扬 . 质子交换膜燃料电池复合催化剂制备及其抗硫性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
ZHANG Yang. Study on preparation of proton exchange membrane fuel cell composite catalyst and its resistance to sulfur[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.

[11] SAKAI T, TAKENAKA H, TORIKAI E. Gas diffusion in the dried and hydrated nafions[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1986, 133(1): 88.

[12] YAN Qiangu, TOGHIANI H, CAUSEY H. Steady state and dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under various operating conditions and load changes[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(1): 492-502.

[13] WILKINSON D P, ST-PIERRE J. In-plane gradients in fuel cell structure and conditions for higher performance[J]. Journal of Power Sources, 2003, 113(1): 101-108.

[14] 全国燃料电池标准化技术委员会(SAC/TC 342). 汽车用燃料电池发电系统 技术条件: GB/T 25319—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
National Fuel Cell Standardization Technical Committee (SAC/TC 342). Fuel cell power system used for motor vehicles—Technical specification: GB/T 25319—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[15] 周斌, 姚元英, 李刘红 . 质子交换膜燃料电池电堆与发电系统低温特性试验方法国家标准解析[J]. 中国标准化, 2019(增刊 1): 212-217.
ZHOU Bin, YAO Yuanying, LI Liuhong. Analysis and comparison of national standards of test method for PEMFC stack and power system at subzero environment[J]. China Standardization, 2019(Suppl 1): 212-217.

[16] 程浩, 周小玲, 王益民 . GB/T 25122. 1—2018 轨道交通机车车辆用电力变流器标准解析[J]. 中国检验检测, 2020, 28(6): 109-112.
CHENG Hao, ZHOU Xiaoling, WANG Yimin. Standard analysis of GB/T 25122.1—2018 railway applications-power converters installed on board rolling stock[J]. China Inspection Body & Laboratory, 2020, 28(6): 109-112.

收稿日期：2022-12-15
修回日期：2023-02-05