DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.03.007　　文章编号：1000-128X(2023)03-0057-08

数字轨道胶轮电车氢燃料电池混合动力系统设计与运用

綦　芳，崔周森，张　弛，杨　丽
（中车南京浦镇车辆有限公司，江苏 南京　210031）

摘　要：为响应双碳目标和市场需求，中车浦镇公司自主研发了氢能数字轨道胶轮电车（简称数轨车辆）平台，并首次将氢燃料电池混合动力系统应用于数轨车辆。氢燃料电池混合动力系统是关键核心新技术之一，文章基于数轨车辆的牵引性能、续航里程及平均功率等关键指标，提出了氢动力系统和储能系统的选型原则，确定了满足实际运行需求的系统参数匹配与选型方案，并优化了基于主动跟随的改进型功率跟随算法，确保车辆在运行过程中，氢燃料电池系统处于高效率区间运行。试验结果表明，按照文中所提能量管理方法，数轨车辆的平均氢耗量约为 20 kg/10^2 km，每车每年减少碳排放约 125 600 kg，充分证明了氢燃料电池混合动力系统在数轨车辆领域应用的可行性，为其他制式车辆的应用提供指导。

关键词：城市轨道交通；氢燃料电池；氢动力系统；储能系统
中图分类号：U482.2；TK91　　**文献标识码：**A

Design and application of hydrogen fuel cell hybrid system for digital rail vehicle

QI Fang, CUI Zhousen, ZHANG Chi, YANG Li

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: In order to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals and to meet the market demand, CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd. developed a hydrogen energy digital rail vehicle platform, and applied the hydrogen fuel cell hybrid system to digital rail vehicle for the first time. The hydrogen fuel cell hybrid system is one of the key technologies of digital rail vehicle. For the purpose of this paper, the principle of model selection for hydrogen power and energy storage systems were summarized based on the key indicators, such as traction performance, endurance mileage and average power of digital rail vehicle, the scheme of system parameter matching and model selection that meets the actual operational requirements was determined, and an improved power following algorithm based on active following was proposed to keep the fuel cell system operates under high-efficient range during the operation of the vehicle. The test results show that when the energy management method proposed in this paper is adopted, the average hydrogen consumption of digital rail vehicle is about 20 kg per 100 km, and the total carbon emission of each vehicle is reduced by 125 600 kg per year, which fully proves the feasibility of applying the hydrogen fuel cell hybrid power system to digital rail vehicle, and lays the foundation for its extension to other vehicle systems.

Keywords: urban rail transit; hydrogen fuel cells; hydrogen power system; energy storage system

0　引言

在碳达峰、碳中和的大背景下，氢能因其零排放的特点成为战略新兴产业和未来产业的重点发展方向之一，氢燃料电池采用纯净无污染的氢气，反应全过程的产物只有水，实现环保零排放；且发电转换效率在40%~60%，转换效率高。氢能产业发展中长期规划

通信作者：綦　芳（1982—），女，正高级工程师，从事氢动力系统、储能系统和牵引辅助系统的设计研发工作；E-mail: qifang11155@163.com
引用格式：綦芳, 崔周森, 张弛, 等. 数字轨道胶轮电车氢燃料电池混合动力系统设计与运用[J]. 机车电传动, 2023(3): 57-64.
Citation: QI Fang, CUI Zhousen, ZHANG Chi, et al. Design and application of hydrogen fuel cell hybrid system for digital rail vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(3): 57-64.

（2021—2035）文件指出氢能是未来国家能源体系的重要组成部分，是用能终端实现绿色低碳转型的重要载体，是战略新兴产业和未来产业重点发展方向，并要求有序推进氢能在交通领域的示范应用[1]。氢燃料电池混合动力供电的列车与全线由接触网供电的列车相比，取消了牵引供电系统；与储能装置供电的列车相比延长了续航里程，在轨道交通领域发展潜力巨大[2]。

国际上，法国阿尔斯通[3-5]、德国西门子[6]等公司已研发了氢燃料电池混合动力列车；英国、德国等欧洲国家，计划2035年将既有内燃机车全部替换为氢能机车；而国内多家轨道交通车辆制造商也已开展氢燃料电池混合动力系统供电车辆的研制工作[7]。从国内外的氢能源列车来看，氢能在轨道交通领域主要集中在机车、市域列车和以低地板为代表的新型中小运量轨道交通车辆，在双碳的背景下将迎来广阔应用。

为解决轨道“最后一公里”的关键性问题，中小运量的轨道交通制式存在非常大的发展空间。其中电子导向胶轮电车作为一种新兴的轨道交通制式，因其造价成本低、建设周期短、收益快等突出优势，得到了广泛关注。为实现低碳出行，中车浦镇公司着手研发氢燃料电池混合动力的数字轨道胶轮电车（数轨车辆）。

文献[8-9]以氢燃料电池混合动力有轨电车为研究对象，对其系统拓扑以及动力系统参数匹配进行了研究，但对于混合动力系统的能量管理方法并未开展深入的研究。文献[10]和文献[11]分别介绍了氢燃料电池冷却系统与车载氢系统的设计，但未总结出通用的原则。本文将论述氢燃料电池混合动力系统中氢动力系统和储能系统功率及能量的匹配原则，并以氢能数轨车辆为例进行选型研究，确定系统方案并验证其可行性。文中所提匹配原则可为同类车辆动力系统的配置提供参考。

1 数轨车辆设计

1.1 车辆关键技术与顶层设计

数轨车辆是适用于公路路面行驶的电子导向胶轮电车，其车辆尺寸和轴重等参数依据公共交通车辆标准设计，同时保留了传统轨道交通车辆灵活编组、大运量、低地板、电力驱动、高舒适性的优势，是一种全新适用于公路行驶的轨道交通车型制式。数轨车辆采用了光电磁综合数字轨道导向技术、氢燃料电池混合动力技术、全轮转向控制技术和转向架铰接技术等，具备虚拟导向、长距离续航、轴重轻、曲线通过能力强等技术优势，且沿线无需供电、土建等施工，造价低，建设周期短，适用于既有城市道路运营。本文中，氢燃料电池混合动力系统在设计的过程中需满足车辆的顶层需求，主要包括车辆续驶里程需求、动力系统质量与体积要求和牵引系统功率与能量需求。

1.2 车辆结构及拓扑

根据轨道交通车辆的运量目标，数轨车辆设置为3辆编组形式，如图1所示。两头为带司机室的动车（Mc），中间为拖车（T），每节车之间采用铰接装置相连，整列车共设置2个双轴带动力转向架和2个铰接拖车转向架。

数轨车辆采用无接触网供电模式，由氢燃料电池混合动力系统给牵引系统、辅助系统等负载供电，主电路如图2所示。车辆设置混动模式和纯电动模式，正常情况下工作在混动模式，氢燃料电池故障时采用纯电动模式。同时车辆设置加氢口，当氢气不足时，可在线路终点附近的加氢站进行加氢。

1.3 氢燃料电池混合动力系统架构

相比仅采用超级电容供电的纯电数轨车辆，运用氢燃料混合动力系统供电的氢能数轨车辆在续驶里程方面具有显著的优势。但考虑到氢燃料电池的峰值功率输出能力以及动态响应性能等欠佳，无法回收车辆减速和刹车产生的再生制动能量，因此需结合其他动力装置在功率输出能力等方面进行补充和改善，构成氢燃料电池混合动力系统[13]。

氢燃料电池混合动力系统包括氢动力系统和储能系统。氢动力系统则包含了车载氢系统和燃料电池发电系统，其中车载氢系统由加注子系统、储存子系统、

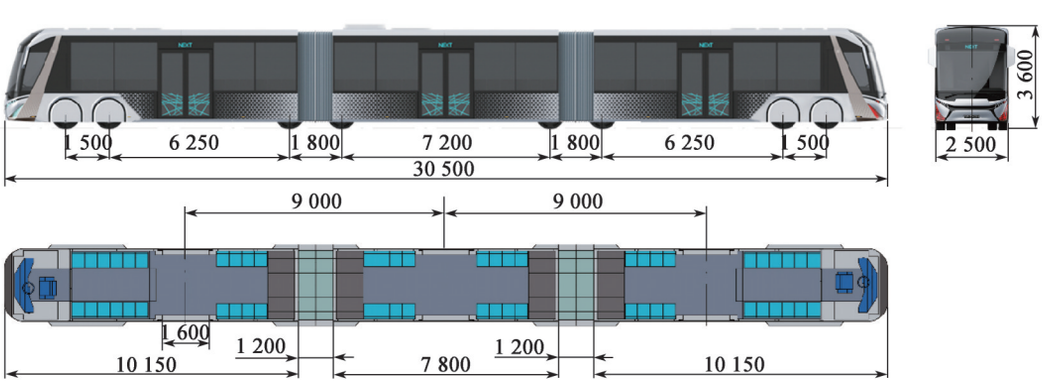


图1 数轨车辆编组

Fig. 1 Formations of digital rail vehicles

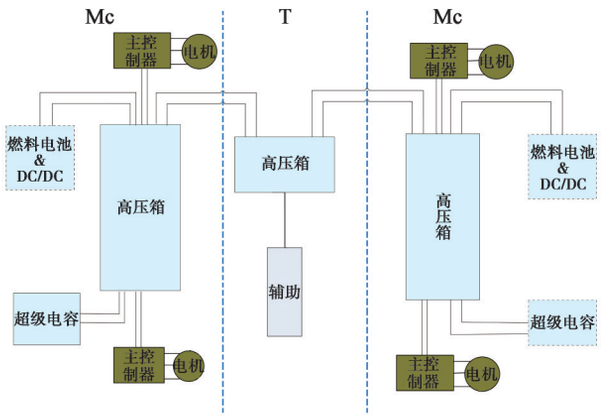


图 2　车辆主电路拓扑

Fig. 2　Topology of vehicle's main circuit

供给子系统和预警子系统构成；燃料电池发电系统由氢燃料电池模块、空气供给系统、氢气供给系统、冷却系统和电气系统构成，各系统的关系如图 3 所示。氢燃料电池混合动力系统拓扑如图 4 所示。

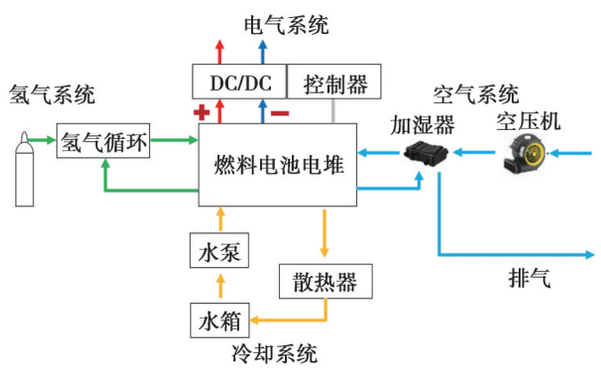


图 3　燃料电池发电系统框图

Fig. 3　Block diagram of fuel cell power system

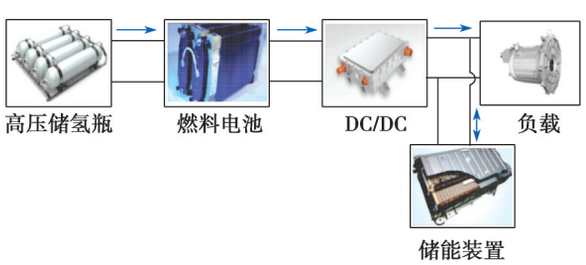


图 4　氢燃料电池混合动力系统拓扑

Fig. 4　Topology of hydrogen fuel cell hybrid system

根据氢燃料电池是否与电机驱动系统直接相连可以分为直接驱动混合动力系统和间接驱动混合动力系统。一般情况下，以燃料电池为主的混合动力系统采用直接驱动方式，氢燃料电池的输出功率基于负载需求而变化，属于被动调节；而以储能装置为主的混合动力系统采用间接驱动方式，可通过 DC/DC 变换器主动调节氢燃料电池的功率输出。本文采用了间接驱动方式，氢燃料电池通过 DC/DC 变换器升压后与车辆负载（电机控制器、辅助变流器）相连，储能装置与直流母线相连，通过调整 DC/DC 变换器的输出电流可控制燃料电池的输出功率和储能装置的荷电状态，系统拓扑如图 4 所示。

1.4　车辆牵引性能

车辆牵引性能是数轨车辆的重要性能，其动力系统配置需要满足车辆的性能指标要求。数轨车辆在干燥、清洁的路面上行驶，其车辆牵引性能参数如表 1 所示。

表 1　车辆牵引性能参数

Table 1　Parameters of vehicle's traction system

关键指标参数	参数值
车辆在 0~40 km/h 加速过程中的平均加速度/(m·s^{-2})	≥1.0
车辆在 0~70 km/h 加速过程中的平均加速度/(m·s^{-2})	≥0.7
车辆在 70 km/h~0 减速过程中的平均常用减速度/(m·s^{-2})	≥1.1

根据车辆牵引性能的关键指标参数，在额定载荷（AW2）下，可计算得到车辆所需的牵引特性曲线，如图 5 所示，确定了氢燃料电池混合动力系统的功率和能量需求。

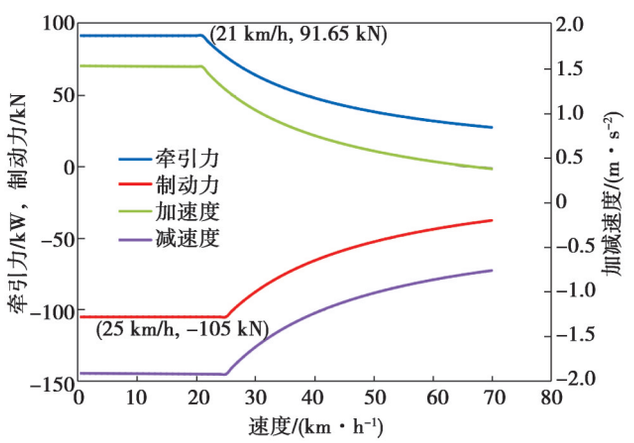


图 5　AW2 载荷牵引制动特性曲线

Fig. 5　Characteristic curve of traction and braking of AW2 load

2　氢燃料电池混合动力系统参数匹配

目前氢燃料电池在数轨车辆的应用尚无先例，而数轨车辆在设计过程中需要根据氢燃料电池、超级电容以及氢系统的参数，综合考虑车辆属性、牵引系统功率与能量需求以及实际运营要求等诸多要素确定氢燃料电池混合动力系统的配置，相比于传统车辆更为复杂。因此，开展数轨车辆的参数匹配与选型的相关研究，是解决氢燃料电池混合动力系统应用落地的关键环节。通过合理地配置系统参数，有利于提升车辆整体的性能。

2.1　动力系统参数匹配策略

氢燃料电池混合动力系统需要确定氢燃料电池的功率、储氢量、储能装置的功率和能量等关键系统参数，文献[12]中对动力电池和超级电容确定的约束条件策略如表 2 所示。

表 2　氢燃料电池混合动力系统选型原则

Table 2　Principle of model selection for hydrogen fuel cell hybrid power system

约束条件	氢动力系统	超级电容储能装置
功率约束	满足平均功率； 确定燃料电池的总数量	满足车辆牵引和电制动性能对应的峰值功率，包括牵引峰值功率和电制动功率； 根据功率和串联数量确定储能器件单体的并联数量
能量约束	由目标续航里程、车辆能耗水平和燃料电池发电系统的效率决定储氢量	车辆以目标牵引性能加速到最大速度所需的总能量和纯电动续航里程所需要的能量，二者取大值
电压约束	氢燃料电池的输出电压与DC/DC输入电压相匹配，确定氢燃料电池的串联数量	根据车辆平台电压决定储能装置的总电压，由储能器件单体的电压确定储能器件单体的串联数量

根据表 2 对氢燃料电池的额定功率、储能器件单体的个数以及氢气瓶个数进行了具体的参数设计，并在参数匹配过程中考虑了车辆的体积以及重量限制。

氢燃料电池系统满足最高速运行时的功率需求为

$$N_{\mathrm{FC}}p_{\mathrm{FC}}\eta_{\mathrm{DC_uni}}\geqslant\frac{P_{\mathrm{t}}\left(v=v_{\max}\right)}{\eta_{\mathrm{INV}}\eta_{\mathrm{m}}\eta_{\mathrm{t}}}\tag{1}$$

式中：N_{FC}为氢燃料电池单体数量；p_{FC}为氢燃料电池单体可提供功率；$\eta_{\mathrm{DC_uni}}$为变换器的效率；η_{INV}和η_{m}分别为电机控制器以及电机的平均效率；η_{t}为传动系统的效率；P_{t}为车辆的功率；$v_{\max}$为最高运行速度。

车载氢系统满足续航要求以及有效储氢量要求为：

$$\left.\begin{aligned}&N_{\mathrm{H_2}}m_{\mathrm{H_2}}\geqslant m_{\mathrm{D}}\\&N_{\mathrm{H_2}}e_{\mathrm{H_2}}\geqslant E\left(v=v_{\max},s\geqslant s_{\mathrm{D}}\right)\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中：$N_{\mathrm{H_2}}$为气瓶数量；$m_{\mathrm{H_2}}$为单个氢气瓶的氢气有效储氢量；m_{D}为要求的整车有效储氢量；$e_{\mathrm{H_2}}$为单个氢气瓶的储氢等效电量；s_{D}为续航里程；E表示最大速度下，当车辆达最大续驶里程时，所需的电量。

混合动力系统提供加速到转折速度的功率和能量需求为：

$$\left.\begin{aligned}&N_{\mathrm{SC_power}}p_{\mathrm{SC}}+N_{\mathrm{FC}}p_{\mathrm{FC}}\eta_{\mathrm{DC_uni}}\geqslant\frac{P_{\mathrm{t}}\left(v=v_z,a=a_{\max}\right)}{\eta_{\mathrm{INV}}\eta_{\mathrm{m}}\eta_{\mathrm{t}}}\\&N_{\mathrm{SC}}=\max\left(N_{\mathrm{SC_energy}},N_{\mathrm{SC_power}}\right)\\&e_{\mathrm{SC}}N_{\mathrm{SC_energy}}\geqslant\int_0^{T_{\mathrm{vz}}}\frac{P_{\mathrm{t}}\left(v=a_{\max}t\right)-N_{\mathrm{FC}}\Delta p_{\mathrm{FC}}t\eta_{\mathrm{DC_uni}}}{\eta_{\mathrm{INV}}\eta_{\mathrm{m}}\eta_{\mathrm{t}}}\mathrm{d}t\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

式中：e_{SC}和p_{SC}为超级电容单体可提供的有效能量和功率；Δp_{FC}为氢燃料电池系统的最大功率加载；$a_{\max}$为最高加速度；v_z为转折速度；T_{vz}为加速到转折速度需要的时间；$N_{\mathrm{SC_energy}}$和$N_{\mathrm{SC_power}}$分别为从加速到转折速度的能量和功率需求的超级电容数量，根据最大化原则，超级电容的数量N_{SC}应取二者中的最大值。

混合动力系统提供整个加速过程中的能量需求为

$$N_{\mathrm{SC}}e_{\mathrm{SC}}\geqslant\int_0^{T_{\mathrm{vz}}}\frac{P_{\mathrm{t}}\left(v=a_{\max}t\right)}{\eta_{\mathrm{INV}}\eta_{\mathrm{m}}\eta_{\mathrm{t}}}\mathrm{d}t+\int_{T_{\mathrm{vz}}}^{T_{\mathrm{v\,max}}}\frac{P_{\mathrm{t}}\left(v=v_z+at\right)}{\eta_{\mathrm{INV}}\eta_{\mathrm{m}}\eta_{\mathrm{t}}}\mathrm{d}t\tag{4}$$

车辆的加速过程可以分为两部分：以最大加速度加速到转折速度v_z，以及以不断减小的加速度加速到最高运行速度$v_{\max}$。

对于车辆的最大爬坡需求，其功率应满足下式：

$$N_{\mathrm{SC}}p_{\mathrm{SC}}+N_{\mathrm{FC}}p_{\mathrm{FC}}\geqslant\frac{P_{\mathrm{t}}\left(v=v_z,\beta=\beta_{\max}\right)}{\eta_{\mathrm{INV}}\eta_{\mathrm{m}}\eta_{\mathrm{t}}}\tag{5}$$

式中：$\beta_{\max}$为最大爬坡度。

此外，混合动力系统的重量和体积应满足最大可允许范围的限制；

$$\left.\begin{aligned}&N_{\mathrm{FC}}m_{\mathrm{FC}}k_{\mathrm{FC_}m}+N_{\mathrm{SC}}m_{\mathrm{SC}}k_{\mathrm{SC_}m}\leqslant M_{\mathrm{limit}}\\&N_{\mathrm{FC}}v_{\mathrm{FC}}k_{\mathrm{FC_}v}+N_{\mathrm{SC}}v_{\mathrm{SC}}k_{\mathrm{SC_}v}\leqslant V_{\mathrm{limit}}\end{aligned}\right\}\tag{6}$$

式中：m_{FC}、m_{SC}分别为氢燃料电池和超级电容模块的质量；v_{FC}、v_{SC}则分别为二者的体积；实际使用中，燃料电堆配备了辅机系统，超级电容模块需进行集成，混合动力系统的附属质量和体积均会增加，因此引入了质量增加系数以及体积增加系数，分别为$k_{\mathrm{FC_}m}$、$k_{\mathrm{SC_}m}$、$k_{\mathrm{FC_}v}$、$k_{\mathrm{SC_}v}$，可根据工程经验确定其值；M_{limit}和V_{limit}则为质量限制值和体积限制值。

2.2　参数匹配结果

根据上述参数匹配策略，本节通过MATLAB软件仿真计算，给出具体的参数匹配结果。对于车载氢系统，基于仿真数据，每公里能耗按照5 kW·h计算，以续航里程100 km为目标，式(2)中能量需求E为500 kW·h，通过计算求得所需氢气的质量为31.25 kg。结合车辆设备布置，选择165 L的氢瓶，5个氢瓶为一组，整车配置两组。车载氢系统参数的选型如表3所示。

表 3　车载氢系统参数

Table 3　Parameters of on-board hydrogen supply system

参数名称	参数值
工作压力/MPa	35
储氢量/kg	38
储存能量/(kW·h)	608
储氢系统使用寿命	10年或11 000次
氢气加注接口	TN5
氢气泄漏报警系统	氢浓度传感器

氢燃料电池的选型需在式(1)的基础上进一步考虑车辆的平均功率，经过计算得到氢燃料电池系统的额定功率不应低于160 kW。基于现有氢燃料电池模组的具体参数，并留出功率裕量，选用了两套100 kW的电堆。燃料电池发电系统的参数如表4所示。

表 4　燃料电池发电系统参数

Table 4　Parameters of fuel cell system

参数名称	参数值或说明
额定功率/kW	100
输出直流电压范围/V	500 ~ 720
寿命/年	5
防护等级	IP65
冷启动温度/℃	−25
燃料电池冷却介质	50/50 水−乙二醇混合物

为满足数轨车辆氢燃料电池混合动力系统供电的需求，车辆储能装置需具备以下特点[14]：①高安全性和高可靠性；② 具有高功率密度，大功率、快速充放电能力；③较高的能量密度；④长使用寿命。结合上述特点，选择能量型超级电容作为本车的储能系统。此外，考虑到车辆在纯电模式下的续航里程需求，以 10 km 为续驶里程下限，且超级电容的荷电状态（State of charge，SOC）按照80%计算，则超级电容的能量需求不应低于62.5 kW·h。文中采用上海奥威科技有限公司的超级电容作为匹配对象，其单体数据如表5所示，超级电容系统参数如表6。

表 5　超级电容单体参数

Table 5　Parameters of SC unit

参数	数值
工作电压/V	2.8 ~ 4.0
标称容量/F	27 000
直流内阻/mΩ	0.6
储存能量/(W·h)	45
标准充/放电电流/A	75
最大充/放电电流(<20 s)/A	200
循环寿命/次	50 000
质量/g	445
外形尺寸(L×W×H)	304 mm×109 mm×9.8 mm
工作温度/℃	−25 ~ 55
储存温度/℃	−30 ~ 60

表 6　超级电容系统参数

Table 6　Parameters of SC system

参数名称	参数值
工作电压区间/V	504~720
标称容量/F	1 763
有效储存能量/(kW·h)	64.8
标准充放电电流/A	≤600
最大充放电电流(20 s)/A	1 000
电源系统成组寿命/年	10

通过联立式(3)~式(6)，得出超级电容的单体数不应低于1 390，考虑氢燃料电池混合动力系统设备在车辆的布置，整车配置了2套超级电容，其性能参数如表6所示。

3　混合动力系统的能量管理

氢燃料电池混合动力系统能量管理的效果决定了燃料电池的工作效率，进而决定了车辆的氢耗量及续航里程。为了提升氢燃料电池的效率，减少氢耗量，延长续航里程，对混合动力系统的能量管理进行了相应研究。

3.1　基于改进型功率跟随的能量管理方法

为更合理地配置混合动力系统的实时输出功率，拟采用功率跟随策略实现车辆控制。传统的功率跟随策略是基于储能系统的SOC状态，通过DC/DC变换器调整储能系统的输出功率，氢燃料电池的输出属于“被动控制”，如式(7)所示。

$$\left.\begin{aligned} P_{\mathrm{SC}} &= P_{\mathrm{SC,N}}\frac{2A_{\mathrm{SOC}}-\left(A_{\mathrm{SOC\,h}}+A_{\mathrm{SOC\,min}}\right)}{A_{\mathrm{SOC\,h}}-A_{\mathrm{SOC\,min}}} \\ P_{\mathrm{FC}} &= P_{\mathrm{req}}-P_{\mathrm{SC}} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中：P_{SC}和P_{FC}分别为超级电容与氢燃料电池的实时输出功率；$P_{\mathrm{SC,\,N}}$为超级电容系统的标定功率，可由运行工况推算得出；A_{SOC}为超级电容系统的实时荷电状态；$A_{\mathrm{SOC\,min}}$和$A_{\mathrm{SOC\,h}}$分别表示超级电容的最小和最高的SOC值。

在传统功率跟随算法中，燃料电池的输出功率由负载功率决定，处于“被动控制”，此时无法确定氢燃料电池的输出是否位于高效率区间。而数轨车辆采用了储能直供拓扑结构，与应用传统功率跟随策略的车辆有所区别，因此对现有策略进行了优化改进，使氢燃料电池的输出功率跟随超级电容的SOC波动实时变化，实现氢燃料电池系统的“主动控制”。

在改进型功率跟随算法中，车辆在运行过程时超级电容的SOC需长时间处于60%以上，因此考虑将氢燃料电池的高效率区间与超级电容60%~80%的SOC区间相覆盖。而对于SOC低于60%的情况，此时车辆需求功率较大，需要增大氢燃料电池的输出功率。综上所述，氢燃料电池主动跟随的经验功率点分布及其拟合曲线如图6所示。

车辆实际控制中，采用三次函数进行拟合并用以实际控制，如下所示：

$$P_{\mathrm{FC}}=aA_{\mathrm{SOC}}^{3}+bA_{\mathrm{SOC}}^{2}+cA_{\mathrm{SOC}}+d \tag{8}$$

式中：a, b, c, d都为拟合系数，a = −0.001 927，b= 0.294 6, c=−16.87, d= 451.8。

为防止氢燃料电池因变载幅度过大而损坏系统耐久性，将其功率设置为阶梯型。

根据车辆功率需求和超级电容的SOC水平，数轨车辆控制单元调整氢燃料电池的工作状态和功率输出，文中所提能量管理方法对应的工作流程如图7所示。

由图7可知，氢燃料电池控制单元将氢燃料电池系

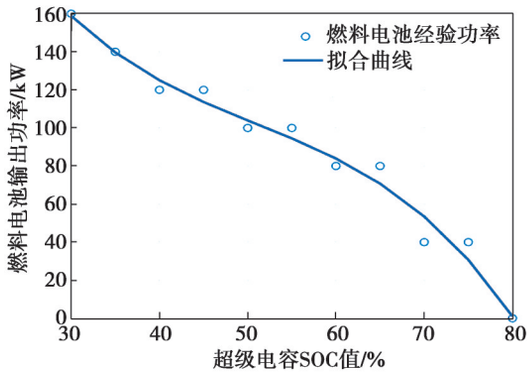


图 6　氢燃料电池主动跟随经验功率设定值及其拟合曲线

Fig. 6　Setting values of active following empirical power of hydrogen fuel cell and the fitting curve

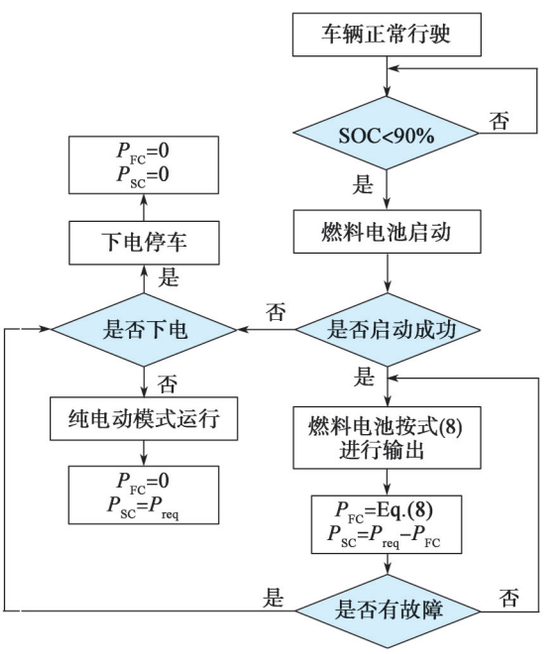


图 7　氢燃料电池工作流程

Fig. 7　Flowchart for hydrogen fuel cell

统的工作状态作为在线控制的核心。若氢燃料电池正常启动且工作状态正常，则执行改进主动功率跟随算法；若氢燃料电池无法成功启动或处于故障状态，则根据超级电容的剩余电量进一步判断车辆工作模式，若SOC处于较高区间，切换至纯电动模式运行，反之则切换至停车模式。

3.2　试验验证

目前，中车浦镇公司研制的氢能数轨车辆已通过试验验证，并在上海临港新区投入了运营。数轨车辆的整车外观如图8所示。基于参数匹配与选型结果，氢燃料电池混合动力系统在车顶的安装效果如图9所示。

为验证本文所提出控制算法在实际系统中的控制效果，基于实际运行数据，将具体阐述数轨车辆在不同工况下能量管理方法的实际控制效果。图10为车辆运营期间的实际运行速度曲线。在对应工况下，车辆母线的需求功率如图11所示。



图 8　氢燃料电池混合动力数轨车辆

Fig. 8　Digital rail vehicle with hydrogen fuel cell hybrid system



图 9　氢燃料电池混合动力系统安装效果

Fig. 9　Installation effect of hydrogen fuel cell hybrid system

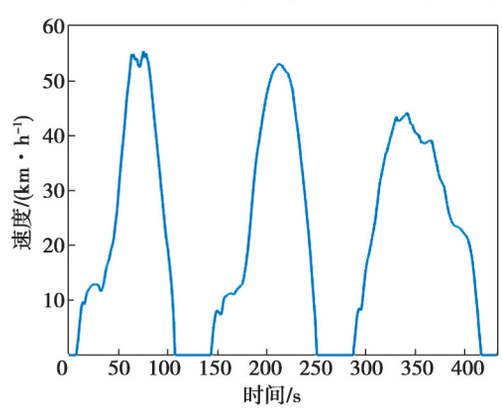


图 10　车辆运营期间实际运行速度曲线

Fig. 10　Actual running speed curve of vehicle in operation

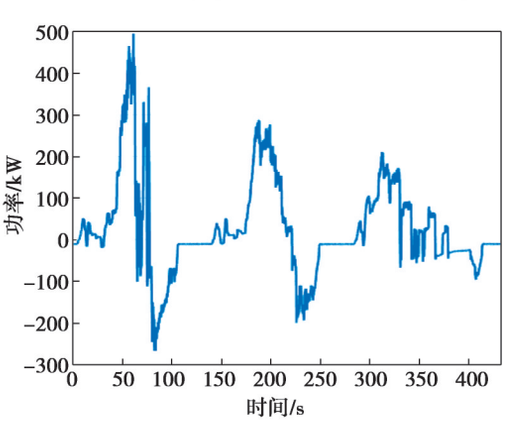


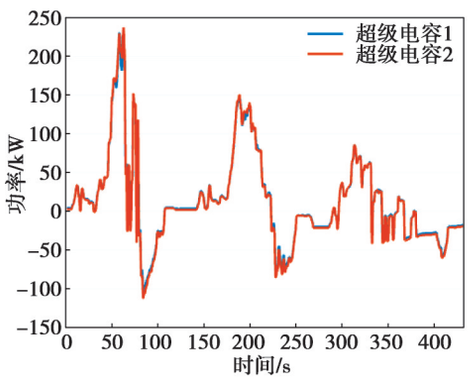
图 11　车辆运营期间母线需求功率实测数据

Fig. 11　Measured power demand of busbar of vehicle in operation

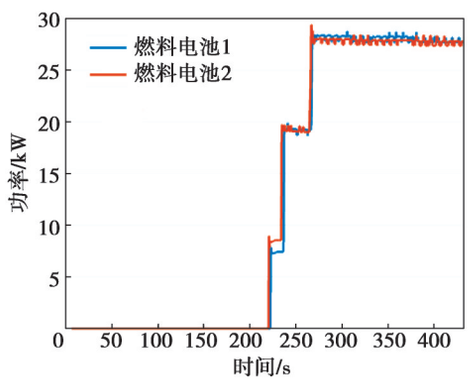
图10共展示了3个运行区间，分别位于12~108 s、

141~250 s和287~426 s时间段内，每个区间包含了车辆加速、变加速、中高速运行和常用制动等多种运行工况。

根据图11所示的功率需求，基于本文提出的能量管理方法，氢燃料电池混合动力系统的实际功率分配结果如图12所示。



(a) 超级电容功率曲线



(b) 燃料电池功率曲线

图 12　超级电容和氢燃料电池功率曲线

Fig. 12　Power curves of SC and hydrogen fuel cell

由图12可知，两套燃料电池和超级电容系统实现了较好的功率均衡效果，达到各动力系统的一致性控制。其中，超级电容承担了大比例的输出功率，燃料电池的输出功率维持在较为稳定的区间。

燃料电池发电系统在不同输出功率下的效率分布情况如图13所示。由图13可知，电堆效率在54%以上，系统的整体效率在45%以上。根据图12显示氢燃料电池大部分时间输出功率为28 kW，在该功率下电堆效率为58%以上，系统的整体效率在54%左右，处于高效输出范围。

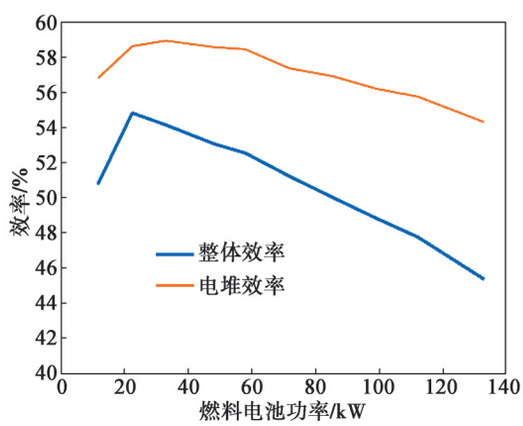


图 13　氢燃料电池系统及电堆效率

Fig. 13　Hydrogen fuel cell hybrid system and stack efficiency

截至2023年2月初，氢耗量统计数据如表7所示，车辆的百公里平均氢耗量为20.16 kg，整车储氢量为38 kg，按实际可用储氢量85%进行计算，车辆的续航里程达到150 km，满足预期。

表 7　车辆氢耗量统计

Table 7　Statistics of hydrogen consumption of vehicle

车号	里程数/km	电堆	电堆运行时间/h	整车总氢耗/kg	整车百公里氢耗量/(kg·(100 km)$^{-1}$)
12	28 555	电堆1	1 916	2 963	21.04
		电堆2	2 029	3 045	
13	30 709	电堆1	2 333	3 106	20.18
		电堆2	2 364	3 089	
14	29 351	电堆1	2 160	3 116	20.58
		电堆2	2 175	2 925	
15	29 893	电堆1	2 366	2 861	19.09
		电堆2	2 375	2 847	
16	31 187	电堆1	2 364	3 106	19.92
		电堆2	2 364	3 106	

4　结语

本文针对应用于数轨车辆的氢燃料电池混合动力系统，从功率、能量和续驶里程3个维度确定了氢动力系统和储能系统的参数选型。同时提出一种基于氢燃料电池高效率区间的改进型功率跟随算法，解决了氢燃料电池混合动力系统的能量管理问题，实现了对车辆在不同工况下的实时在线控制。通过实际测试，装载氢燃料电池混合动力系统的数轨车辆可适应运营过程中面临的多类型工况，并能在运行过程中保持较高的系统效率，验证了本文所提出的参数匹配与能量管理方法的有效性。

参考文献：

[1]　中华人民共和国国家发展和改革委员会. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)[EB/OL]. (2022-03-23) [2022-12-06]. https://www. ndrc. gov. cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html.
National Development and Reform Commission. Medium and long term plan for the development of hydrogen energy industry (2021—2035) [EB/OL]. (2022-03-23) [2022-12-06]. https://www. ndrc. gov. cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html.

[2]　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.

[3] Alstom. Alstom Coradia iLint – the world's 1st hydrogen powered train[EB/OL]. [2022-12-25]. https://www. alstom. com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st- hydrogen-powered-train.

[4] STEINDORFF K, DON R. 阿尔斯通新一代CORADIATM Lint动车组及其内燃牵引系统[J]. 国外铁道机车与动车, 2013(6): 1-4.
STEINDORFF K, DON R. Alstom's new generation CORADIATM Lint multiple unit and its diesel traction system[J]. Foreign Railway Locomotive and Motor Car, 2013 (6): 1-4.

[5] 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): 84-86.
SU Jingqi. Coradia iLint-EMU using hydrogen fuel cell[J]. Modern Urban Transit, 2019(4): 84-86.

[6] Siemens. H2goesRail – a joint project with DB[EB/OL]. [2022-12-25]. https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/references/h2goesrail.html.

[7] 张军龙. 氢能源在城市轨道交通行业的应用及发展[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018(1): 162-164.
ZHANG Junlong. Application and development of hydrogen energy in the urban rail transit industry[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2018(1): 162-164.

[8] 陈维荣, 张国瑞, 孟翔, 等. 燃料电池混合动力有轨电车动力性分析与设计[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 1-8.
CHEN Weirong, ZHANG Guorui, MENG Xiang, et al. Dynamic performance analysis and design of fuel cell hybrid locomotive[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 1-8.

[9] 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.

[10] 付稳朝. 燃料电池高效冷却系统设计与测试[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(10): 30-35.
FU Wenchao. Design and testing of high efficient fuel cell cooling system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(10): 30-35.

[11] 石俊杰, 于淼, 刘楠. 燃料电池有轨电车车载氢系统设计[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(5): 110-114.
SHI Junjie, YU Miao, LIU Nan. Design of vehicle hydrogen storage system for fuel cell tram[J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(5): 110-114.

[12] 李明, 付稳超, 黄烈威, 等. 100％低地板轻轨车混合动力性能匹配计算[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(2): 55-60.
LI Ming, FU Wenchao, HUANG Liewei, et al. Hybrid performance matching calculation of 100% low-floor LRV[J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33(2): 55-60.

[13] 秦孔建, 高大威, 卢青春, 等. 燃料电池汽车混合动力系统构型研究[J]. 汽车技术, 2005(4): 24-27.
QIN Kongjian, GAO Dawei, LU Qingchun, et al. Study on configuration of the hybrid power system of fuel cell electric vehicles[J]. Automobile Technology, 2005(4): 24-27.

[14] 綦芳. 间歇式供电有轨电车储能装置选型研究[J]. 机车电传动, 2019(6): 118-121.
QI Fang. Selection research of energy storage device for tramcar with intermittent power supply[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(6): 118-121.

[15] PALADINI V, DONATEO T, DE RISI A, et al. Supercapacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(11): 3001-3008.

[16] 刘楠, 于博轩, 郭爱, 等. 燃料电池混合动力的功率跟随管理策略分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1147-1154.
LIU Nan, YU Boxuan, GUO Ai, et al. Analysis of power tracking management strategy for fuel cell hybrid system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1147-1154.

收稿日期：2023-03-06
修回日期：2023-04-12