

混合动力及氢能应用

氢燃料电池增程式混合动力机车 动力系统设计

王旭海, 齐红瑞, 孙凤霞, 赵志芳

(中车大同电力机车有限公司, 山西 大同 037038)

摘要: 随着新能源在轨道交通领域应用的不断发展, 新能源混合动力机车在节能减排等方面的优势愈加明显, 而以氢燃料电池和锂电池为动力的混合动力机车也具有越来越广阔的前景。通过对调车机车作业工况的分析, 提出了适用于调车机车工况的氢燃料电池“增程式”混合动力机车动力系统, 并分析了该系统的特点和优势。结合中车大同电力机车有限公司研制的700 kW氢燃料电池混合动力机车, 对动力系统的结构参数、组成部分和控制方式等进行了介绍, 重点对动力系统的匹配性设计和能量管理进行了分析研究。通过对动力系统的研究, 结合机车实际运行的数据, 证实了该“增程式”混合动力机车动力系统的可行性, 并提出了后续研究的方向。

关键词: 氢燃料电池; 混合动力; 动力系统; 增程式; 调车机车; 能量管理

中图分类号: U260.9⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2022)03-0110-06

Powertrain system design of hydrogen fuel cell range-extended hybrid electric locomotive

WANG Xuhai, QI Hongrui, SUN Fengxia, ZHAO Zhifang

(CRRC Datong Co., Ltd., Datong, Shanxi 037038, China)

Abstract: With the continuous development of the application of new energy in the field of rail transit, the advantages of new energy hybrid locomotives in energy saving and emission reduction are more obvious, and the hybrid locomotive powered by hydrogen fuel cells and lithium batteries also has more and more extensive prospect. Based on the analysis of the operating conditions of the shunting locomotive, a hydrogen fuel cell range-extended hybrid locomotive powertrain system suitable for the operating conditions of the shunting locomotive was proposed, and the characteristics and advantages of the system were analyzed. Combined with the 700 kW hydrogen fuel cell hybrid locomotive developed by CRRC Datong Co., Ltd., the structural parameters, components and control methods of the powertrain system were introduced, focusing on the research and analysis of the matching design and energy management of the powertrain system. Through the research on the powertrain system, combined with the actual operation data of the locomotive, the feasibility of the range-extended hybrid locomotive power system was confirmed, and the follow-up research direction was proposed.

Keywords: hydrogen fuel cell; hybrid power; powertrain system; range-extended; shunting locomotive; energy management

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2022-03-28

基金项目: 山西省重大科技专项 (20201101016)

通信作者: 王旭海 (1985—), 男, 高级工程师, 主要从事电力机车电气系统及新能源动力系统方面的研究;

E-mail: wangxh0513@163.com

0 引言

近年来,“绿色、低碳、节能”成为轨道交通装备发展的重要方向,新能源混合动力机车已成为国内外研究的焦点^[1]。相比于传统单一能源的动力机车,新能源混合动力机车具有节能减排、充放电灵活、供电互补、可根据列车工况选择最佳运行模式、环境友好性更好等诸多优点^[2-3]。相比于传统的内燃机车和“内-电”混合动力调车机车,以氢燃料电池和锂离子蓄电池为动力的“氢-电”混合动力调车机车,效率更高,并能大幅降低二氧化碳排放量,能更好地满足干支线作业和调车场作业的节能减排需求。

本文结合调车机车的运用特点,提出了氢燃料电池“增程式”混合动力系统的设计方案。该动力系统是基于中车大同电力机车有限公司研制的700 kW氢燃料电池混合动力机车,并在机车研制成功后,对动力系统进行了试验验证,证实了该动力系统方案在中小功率调车机车上的适应性和优越性。

1 氢燃料电池混合动力调车机车

1.1 调车机车工作特性

对于在铁路站场以及在工矿企业内部承担调车兼小运转任务的内燃调车机车,其特殊的工作特点是:①机车启动、加速、换向、制动频繁,导致机车柴油机负荷变化频率高;②柴油机满负荷工作时间平均只有10%左右,约50%的工作时间处于空载运行状态;③柴油机平均使用功率只有额定功率的30%~50%^[4]。图1为美国环境保护署公布的调车机车负荷谱调研数据^[5],通过调研数据可以看出,当内燃机车进行调车作业时,仅有很短的时间会用到柴油机的最大功率,而大多数时间处于空转或待机状态,这就造成了整车效率低下,同时也增加了废气排放量。

同时,通过对国内主要机务段和相关工矿企业使用机车的调研,在一般工矿企业或者机务段段内调车作业时,机车一般牵引重量较小,机车大部分时间处于停车或轻载状态。部分机务段段内调车作业的功率发挥情况^[6]如表1所示。

从表1可以看出,国内用于段内作业的调车机车,

其牵引质量一般在1 000 t以内,机车轮周功率一般在1 000 kW以下。在实际运行中,段内调车的大部分作业功率在300 kW以下,考虑机车在作业时的轨面情况,可将机车轮周功率设计为700 kW,即可满足大部分段内调车作业的需求。

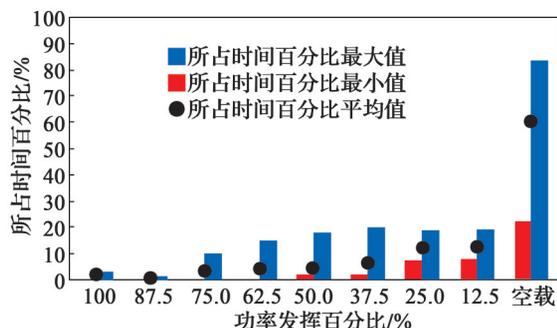


图1 调车机车不同负载工况下的作业时间

Fig. 1 Operating time of shunting locomotive under different load conditions

1.2 “增程式”动力系统优势

针对上述段内调车机车的作业特点,宜采用“增程式”氢燃料电池混合动力系统,即采用输出功率较小的氢燃料电池和输出功率较大的动力蓄电池组成机车的动力系统。采用该模式动力系统的机车具有以下优势:

1) 综合效率较高

当机车在短时大功率输出时,由动力蓄电池作为主要的功率输出单元,满足机车的牵引需求;当机车在停车或空载运行时,由氢燃料电池为动力蓄电池充电,同时提供机车的辅助能量损耗;当机车制动时,动力蓄电池能够回收制动能量,从而达到节能目的。由于氢燃料电池系统的工作效率一般可达50%^[6],远高于内燃机的效率,因此在机车整个运行过程中,机车综合效率要高于内燃机车或“内-电”混动车。

2) 简化能量管理策略

“增程式”混合动力系统中的氢燃料电池,其输出功率与机车运行工况无关,只与动力蓄电池的荷电状态(SOC)有关。当动力蓄电池SOC值较低时,氢燃料电池可满功率输出;当动力蓄电池SOC值较高时,氢燃料电池可降功率运行或停机^[7]。因此,可通过动力蓄电池SOC值来控制燃料电池的启/停和输出功率,从而简化了混合动力系统的能量管理策略。

表1 段内调车作业功率发挥统计

Table 1 Statistics on the performance of the shunting operation power in the section

%

柴油机功率/kW	编组及牵出作业时柴油机作业时间占比			推峰作业时柴油机作业时间占比	
	苏家屯站 (DF ₇ B)	新丰镇站 (DF ₇ B)	武汉北车站 (DF ₇ C)	武汉北车站 (DF ₇ C)	新丰镇站 (DF ₇ B)
[0, 200)	83.60	81.70	93.70	75	94.70
[200, 300)		3.00		20	3.90
[300, 500)	8.33	2.62	0.32	5	1.40

3) 氢燃料电池寿命提高

氢燃料电池由于其自身特性限制, 加减载速率较慢, 并且功率频繁变化对其性能和寿命有较大影响^[8], 因此氢燃料电池的最佳工作状态是在额定功率下持续运行。由于“增程式”混合动力系统中的氢燃料电池输出功率只与动力蓄电池的 SOC 值有关, 因此通过能量管理策略, 可使氢燃料电池长时间运行在额定功率, 从而提高了其使用寿命。

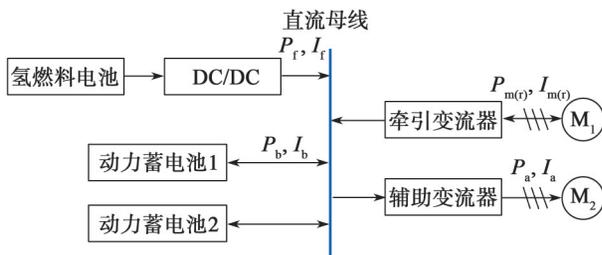
4) 机车可运行于纯电动模式

由于动力蓄电池功率较大, 可在短时间内完全满足机车牵引功率需求, 因此机车可在氢气耗尽或燃料电池故障等情况下, 通过预留的充电插座为动力蓄电池充电, 使机车运行在纯电动工作模式下, 从而提高机车的可用性。

2 动力系统结构和组成

2.1 动力系统结构

动力系统设计为氢燃料电池间接连接结构, 即氢燃料电池系统通过 DC/DC 变换器与机车母线连接, 而动力蓄电池则直接连接到母线上, 直流母线的电压等于动力蓄电池的输出电压^[9]。同时, 为了保证动力蓄电池的输出功率满足要求, 也为了增加其运行可靠性, 将动力蓄电池设计为 2 组完全一致且相互独立的电池单元, 如图 2 所示。



DC/DC—直流/直流变换器; P_a —辅助功率; I_a —辅助电流; P_b —动力蓄电池输出(或输入)功率; I_b —动力蓄电池输出(或输入)电流; P_r —氢燃料电池输出功率; I_r —氢燃料电池输出电流; $P_{m(r)}$ —牵引(电制动)功率; $I_{m(r)}$ —牵引(电制动)电流; M_1 —牵引负载(主要指牵引电机); M_2 —辅助负载(包括风机、水泵、压缩机等所有的辅助负载)。

图2 混合动力系统结构拓扑图

Fig. 2 Structure topology diagram of hybrid powertrain system

氢燃料电池通过 DC/DC 模块连接到机车高压母线上, 可以保持燃料电池输出状态稳定, 避免功率频繁剧烈变化, 进而可以降低极化效应增强速度, 有助于延长燃料电池的使用寿命。同时, 该系统结构简单、控制方便, 总线电压为电池电压(电压稳定), 电池直接连接负载, 供电可靠性较高; 而通过变流器的调节和限制, 可以实现制动能量的回馈吸收^[10]。

2.2 动力系统功率

通过分析上述调车机车运行工况和“增程式”动力系统的结构, 在理想状态下, 如不考虑制动回馈能量和通过地面电源对动力蓄电池充电, 机车在一个运行周期(即包括牵引、空载、怠速及停车等各种工况的完整运行周期)内, 动力蓄电池的 SOC 应保持不变, 即机车输出的能量全部来自氢燃料电池所转化的氢气的能量, 动力蓄电池只用于对机车功率的补充。机车的运行功率和能量状况为:

$$P_f T = \left(\sum_{i=1}^m P_i t_i \right) / \eta_1 + P_a T / \eta_2 \quad (1)$$

$$T = t_1 + t_2 + \dots + t_m \quad (2)$$

$$Q_b \geq P_{\max} t_{\max} / \eta_1 + P_a t_{\max} / \eta_2 \quad (3)$$

式中: P_i 为机车在不同运行工况下的轮周功率; T 为机车 1 个运行周期的总运行时间; t_i 为机车在不同工况下的运行时间; η_1 为机车牵引系统综合效率(包括电机、传动系统和逆变器的总效率); η_2 为机车辅助系统综合效率; Q_b 为动力蓄电池最大可用电量; P_{\max} 为机车最大功率; t_{\max} 为机车最大功率持续运行时间。

通过对现有机车的运行工况统计或通过对不同工况进行牵引计算仿真, 可获取机车的轮周功率和运行时间, 并根据式(1)和式(2)计算出氢燃料电池的输出功率。动力蓄电池的输出功率和可用电量应满足机车的最大功率需求和最大功率下持续运行所需的能量需求[(满足式(3)的要求)]。

如考虑机车在运行过程中的制动回馈能量, 则式(1)可转换为

$$P_f T + P_r T_r \eta_3 = \left(\sum_{i=1}^m P_i t_i \right) / \eta_1 + P_a T / \eta_2 \quad (4)$$

式中: P_r 为机车电制动功率; T_r 为 1 个运行周期内电制动时间, 可根据实际运行情况确定, 一般调车机车牵引工况和制动工况运行时长可按 3:1 估算; η_3 为电制动综合效率, 一般取 0.5~0.7。

2.3 动力蓄电池

根据调车机车作业工况和使用环境特点, 机车动力蓄电池应具备良好的环境适应性, 能够在高温和极寒天气下正常启动运行; 同时, 要具有比功率大的特点, 能够大倍率充放电, 并具有“快充快放、随充随放”特性。鉴于上述原因, 本系统选用钛酸锂蓄电池作为动力电池^[11-12], 为机车大功率输出提供能量。

该动力系统采用 2 个独立的动力蓄电池柜, 每个电池柜采用 40 个电池模组串联组成, 每个模组由 5 并 8 串的单体钛酸锂电池构成, 每个单体电池的容量为 40 A·h。整个电池柜共由 320 串 5 并单体电池组成, 其输出额定电压为 DC 736 V, 工作电压范围为 DC 640 V 到 DC 832 V, 保护电压上下限值为 DC 576 V 和 DC 838 V,

额定电量为 147.2 kW·h。2 个电池柜并联, 额定电量为 294.4 kW·h, 质量约为 6 200 kg, 最大放电功率可达 850 kW, 能够满足机车的短时满功率输出需求。

2.4 氢燃料电池

在动力系统中, 氢燃料电池的作用主要是将储氢系统存储的高压氢气化学能转化为机车运行所需的电能, 从而提高机车的续航能力。相比于其他类型的氢燃料电池, 质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 具有运行温度低、启动快、比功率和比能量高、结构简单和稳定性好等诸多特点^[13], 已成为目前在交通行业应用最为广泛的燃料电池。本动力系统选择的也是以 PEMFC 电堆为核心的氢燃料电池系统, 系统包括燃料电池电堆、空气模组、氢气模组、热管理模组、高压电气系统、低压控制系统等。燃料电池通过直流双向 DC/DC 模组与机车母线连接, DC/DC 既能调节燃料电池的输出电压使其与母线电压相匹配, 又能将母线电压降压变换, 在系统启动时为燃料电池系统内的辅助机组供电。

该动力系统包括 1 套 PEMFC 系统和 1 套双向 DC/DC 模组, 系统 (包括 DC/DC 模组) 的额定净输出功率为 60 kW, 额定输出电压为 DC 750 V, 额定输出电流为 80 A, 电压范围为 DC 600~850 V, 输出电流范围为 0~90 A, 系统峰值效率不低于 50%。

3 动力系统控制

3.1 动力系统启停控制

当机车正常启动运行时, 动力蓄电池必须启动, 以使机车辅助系统正常运行, 同时动力蓄电池通过中间直流母线为氢燃料电池启动提供动力, 用以启动空气压缩机等辅助部件。氢燃料电池可根据需求, 确定是否启动。当氢燃料电池系统启动后, 与动力蓄电池一起为机车输出能量。动力系统的启停示意如图 3 所示。

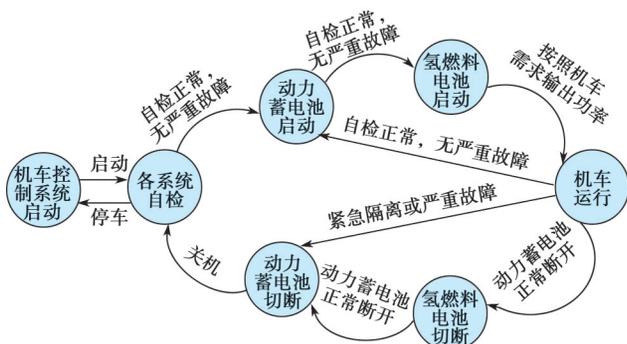


图3 氢燃料电池混合动力系统启停示意图

Fig. 3 Schematic diagram of start-stop of hydrogen fuel cell hybrid powertrain system

考虑氢燃料电池正常停机需要进行一定时间的吹扫, 以保证电池寿命和下次启动的稳定性, 因此, 当动力系统停机时, 应先对氢燃料电池系统进行停机操作, 当氢燃料电池系统停机后, 再断开动力蓄电池。在特殊紧急情况 (如紧急制动) 下如需切除机车动力, 则可直接断开动力蓄电池, 则此时氢燃料电池也随之停机, 但此操作会影响氢燃料电池的性能和寿命。

3.2 动力系统功率控制

在机车运行时, 主要依靠牵引变流器进行功率调节。牵引变流器根据机车的牵引功率需求, 并结合氢燃料电池系统的输出功率和动力蓄电池的充放电功率, 确定机车的输出能力, 确保机车在运行过程中各系统能够正常运行。

当机车处于牵引工况时, 整车功率由氢燃料电池系统和动力电池共同提供, 此时须满足下式:

$$\frac{p_m}{\eta_1} \leq (p_f + p_b) - \frac{p_a}{\eta_2} \quad (I_m > 0, I_f > 0, I_b > 0, I_a > 0) \quad (5)$$

当机车处于制动工况时, 由制动回馈能量和氢燃料电池系统共同为动力蓄电池充电, 此时须满足下式:

$$p_r \eta_3 + p_f \leq p_b + \frac{p_a}{\eta_2} \quad (I_m < 0, I_f > 0, I_b < 0, I_a > 0) \quad (6)$$

当机车处于停车或惰行工况时, 由氢燃料电池系统为动力蓄电池充电, 并提供辅助能耗, 此时须满足下式:

$$p_f = p_b + \frac{p_a}{\eta_2} \quad (I_m = 0, I_f > 0, I_b < 0, I_a > 0) \quad (7)$$

3.3 动力系统能量管理

能量管理策略是混合动力机车技术的核心。能量是否按预期分配, 动力系统各部件能否安全正常运行, 机车是否运行在合理和经济的模式下, 都需要能量管理来完成。对于“增程式”混合动力系统, 其能量管理策略是基于开关模式的策略, 由动力蓄电池当前的 SOC 值确定燃料电池开关的工作状态: 当 SOC 值小于规定的最小值时, 燃料电池处于工作状态并稳定运行在额定值; 当 SOC 大于规定的最大值时, 燃料电池功率线性下降, 直至关闭状态^[14-15]。

根据机车运营工况的不同, 可设定氢燃料电池运行时动力蓄电池的 SOC 值, 以使动力蓄电池 SOC 值处于便于工作的最佳状态, 也使氢燃料电池最长时间工作在其额定状态, 以延长其寿命。暂定该动力系统的能量管理按表 2 所示的策略执行。

执行表 2 的策略, 可使动力蓄电池保持在较高的 SOC 值, 能保证在一定时间内机车牵引作业比较集中的工况。如机车牵引作业任务较少, 可将动力蓄电池 SOC 值降低, 以使氢燃料电池运行在功率较低而效率处于更高的状态。

表2 混合动力系统能量管理简表

Table 2 Brief table of energy management of hybrid powertrain system

锂电池 SOC	氢燃料电池功率/kW
[0, 0.8]	60
(0.8, 0.9)	在 60~6 kW 线性下降
0.9	6
(0.9, 1.0]	0 (关机)

4 运行状况

目前, 搭载该动力系统的 700 kW 氢燃料电池混合动力调车机车已经在中车大同电力机车有限公司下线, 并已投入试验运行和验证阶段。表3为机车实际作业运行过程中的部分运用数据, 是机车在同一条线路、在不同时间和不同载重时的运行数据。

表3 混合动力机车部分运行数据

Table 3 Part of operating data of hybrid locomotives

行程	载质量/t	里程/km	运行时 长/min	动力电池总耗 电/(kW·h) ^{a)}	耗氢量/ kg ^{b)}
行程1	68+0 (空载)	5.3	11	-1.28	0.58
行程2	68+0 (空载)	5.3	9	8.80	0
行程3	68+947.4	5.3	16	73.08	1.12
行程4	68+737.7	5.3	15	52.35	1.10
行程5	68+947.4	5.3	18	87.78	0
行程6	68+737.7	5.3	17	76.54	0

注: a) 动力电池总耗电为行程结束后总耗电量, 包括制动回馈能量和燃料电池发电量; b) 耗氢量为0时表示氢燃料电池未启动运行。

通过对表3的数据进行分析发现, 机车在相同载重情况下, 氢燃料电池分别处于启动和停止工况时, 动力蓄电池的能耗有明显区别。根据运行时间计算, 氢燃料电池运行时动力蓄电池每小时耗电量下降约 60 kW·h, 与氢燃料电池满功率运行时的功率相匹配; 同时, 根据氢燃料电池的发电量和耗氢量计算, 氢燃料电池的能量转化率约为 13~15 kW·h/kg, 平均效率约为 40%。

截至2021年12月底, 700 kW 氢燃料电池混合动力调车机车已经在段累计运行约 5 个月, 累计运行里程约 5 470 km, 累计耗电量约 33 850 kW·h, 机车运行状态良好。相比于内燃调车机车, 有效降低了排放量, 提高了机车综合效率。

5 结语

通过对 700 kW 氢燃料电池混合动力机车和“增程式”混合动力系统的研制, 验证了氢燃料电池新能源

混合动力系统在调车机车上应用的可行性, 同时也验证了对于段内调车作业等间歇性运行场景, “增程式”混合动力系统具有一定的性能优势。通过在运行中调整能量管理策略, 使机车和动力系统各部分都运行在合适的状态下, 从而提高了整车的运行效率, 进一步降低了排放量。在整车及动力系统设计过程中, 也发现一定的问题, 后续设计应注意以下事宜:

①通过对实际运行情况的分析, 700 kW 氢燃料电池混合动力机车受限于车载氢燃料电池系统的功率, 无法进行长时间大功率牵引作业, 因此在后续设计时应注意根据应用场景的需求, 适当加大增程器, 进一步进行合理的动力系统匹配设计。

②700 kW 氢燃料电池混合动力机车的动力系统功率相对较小, 动力蓄电池为 2 组, 氢燃料电池系统为单电堆、单系统, 因此动力系统控制逻辑较为简单。在后续进行较大功率的调车机车设计时, 可能会涉及到更多组数的动力蓄电池和多电堆、多系统组成的动力系统, 其控制逻辑相对复杂, 需要进行更加深入的研究。

随着锂电池、氢燃料电池等新能源技术的不断发展, 以及相关配套的制氢、储运氢、加氢站等产业链的发展, 具有“绿色、节能和高效”等特点的氢燃料电池混合动力机车, 必将成为未来轨道交通装备的重要组成部分。

参考文献:

- [1] 刘斌, 康明明, 邢涛, 等. 出口德国混合动力调车机车设计[J]. 铁道技术监督, 2019, 47(4): 43-47.
LIU Bin, KANG Mingming, XING Tao, et al. Design of hybrid power shunting locomotives exported to Germany[J]. Railway Quality Control, 2019, 47(4): 43-47.
- [2] 黄露霞. 国内外混合动力机车的新发展[J]. 铁道机车与动车, 2018(6): 1-5.
HUANG Luxia. The new development of hybrid locomotives at home and abroad[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2018(6): 1-5.
- [3] 李廉枫, 朱兵, 任聪. 国内外混合动力机车的开发与应用[J]. 机车电传动, 2020(5): 73-76.
LI Lianfeng, ZHU Bing, REN Cong. Development and application practice of hybrid locomotive at home and abroad[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(5): 73-76.
- [4] 叶顶康, 彭长福, 刘顺国, 等. 混合动力牵引调车机车的研发[J]. 机车电传动, 2012(5): 17-20.
YE Dingkang, PENG Changfu, LIU Shunguo, et al. Development of hybrid power traction shunting locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(5): 17-20.
- [5] KACHE M, 于福鹏. 混合动力机车[J]. 国外铁道机车与动车, 2016(4): 16-19.
KACHE M, YU Fupeng. Hybrid locomotive[J]. Foreign Railway Locomotive and Motor Car, 2016(4): 16-19.

- [6] 何国福, 孟玉发, 叶顶康, 等. 2 000~2 500 kW混合动力机车开发[J]. 机车电传动, 2017(6): 23-27.
HE Guofu, MENG Yufa, YE Dingkang, et al. Development of 2 000 ~ 2 500 kW hybrid diesel locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(6): 23-27.
- [7] 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.
- [8] 梁建英, 刘玉文, 李克雷. 氢能在轨道交通领域的应用及前景[C]//国际清洁能源论坛(澳门). 2017国际清洁能源论坛论文集. 澳门: 国际清洁能源论坛(澳门), 2017: 292-309.
LIANG Jianying, LIU Yuwen, LI Kelei. Application and prospect of hydrogen energy in rail transit[C]// International Forum for Clean Energy (Macao). Proceedings of 2017 International Clean Energy Forum. Macao: International Forum for Clean Energy (Macao), 2017: 292-309.
- [9] 曹楠. 车载燃料电池混合动力系统设计与能量管理[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
CAO Nan. Design and energy management of fuel cell hybrid power system for tram[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [10] 王珂. 燃料电池混合动力系统设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
WANG Ke. Design of the fuel cell hybrid system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [11] 吴健, 张言茹, 郑鑫杰. 钛酸锂电池在城市轨道交通的适用性研究[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 39-46.
WU Jian, ZHANG Yanru, ZHENG Xinjie. Study on the applicability of lithium titanate battery in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(6): 39-46.
- [12] 牟晓莎, 刘玉文, 张文超, 等. 新型能源技术在轨道车辆上的运用研究[J]. 智慧轨道交通, 2021, 58(5): 29-35.
MU Xiaosha, LIU Yuwen, ZHANG Wenchao, et al. Study on application of new energy technology on railway vehicles [J]. Smart Rail Transit, 2021, 58(5): 29-35.
- [13] 刘应都, 郭红霞, 欧阳晓平. 氢燃料电池技术发展现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 162-171.
LIU Yingdou, GUO Hongxia, OUYANG Xiaoping. Development status and future prospects of hydrogen fuel cell technology[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 162-171.
- [14] 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.
- [15] 张利新, 李双龙, 杨杰君. 氢燃料电池电电混合汽车能量管理控制策略研究[J]. 客车技术与研究, 2022, 44(1): 1-3.
ZHANG Lixin, LI Shuanglong, YANG Jiejun. Research on control strategy of energy management for hydrogen fuel cell electric-electricity hybrid vehicles[J]. Bus & Coach Technology and Research, 2022, 44(1): 1-3.