

基于整车动力需求的氢燃料电池跟随型 能量控制策略研究与优化

杨 琨, 郭凤刚

(北汽福田汽车股份有限公司, 北京 102206)

摘要:在基于动力电池 SOC 规则型能量控制策略基础上,提出基于整车动力需求的氢燃料电池跟随型策略,并进行 MATLAB/Simulink 仿真分析。结果表明,跟随型策略可有效稳定动力电池 SOC 区间,降低电池吞吐量,并使燃料电池摆脱长期处于低功率区间运行的状态。氢燃料电池和动力电池寿命可得到大幅提升。

关键词:整车动力需求;氢燃料电池;能量控制策略;跟随型;Simulink

中图分类号:U469.7;U461.2

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2022)06-0001-05

Study and Optimization on Follow-up Power Control Strategy of Hydrogen Fuel Cell Based on Vehicle Power Requirement

YANG Kun, GUO Fenggang

(Beiqi Foton Motor Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: On the basis of the regular power control strategy based on SOC of power battery, the authors propose the following-up strategy of hydrogen fuel cell based on vehicle power requirement, and carry out simulation analysis with MATLAB/Simulink. The results show that the follow-up strategy can effectively stabilize the SOC range of the power battery, reduce the battery throughput, and get the fuel cell out of the long-term low-power range operation. Therefore, the life of hydrogen fuel cell and power battery can be greatly improved.

Key words: vehicle power requirement; hydrogen fuel cell; power management strategy; follow-up type; Simulink

目前,氢燃料电池(HFC)受催化反应速率和辅助零部件响应的影响,其功率输出偏“软”^[1],需要配合动力电池“削峰减谷”,以满足整车即时功率需求。作为其核心管理的能量控制策略(PMS),对燃料电池和动力电池的寿命均存在重大影响^[2-3]。

本文将已交付运营的 10.5 m 氢燃料电池客车作为研究对象,开发基于整车动力需求规则的跟随型 PMS。通过 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,验证模型准确性,并完成策略效果预测。

1 整车及氢燃料电池电电混合动力系统

1.1 基本情况

采用本文控制策略的整车,最大允许总质量 17 t,整备质量 14 t,最高设计车速 69 km/h;搭载驱动电机额定功率、额定转速、额定转矩分别为 110 kW、900 r/min、1 100 N·m,峰值参数分别为 220 kW、2 700 r/min、2 400 N·m。配备额定功率 94 kW、峰值功率 115 kW 的氢燃料电池和 51 kW·h 的磷酸铁锂功率型(放电倍率 2 C)动力电池。整车高压平台 470~700

收稿日期:2022-07-16。

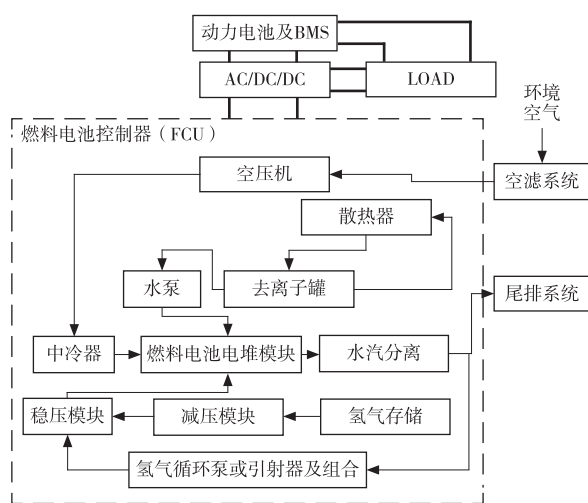
第一作者:杨 琨(1982—),男,博士;高级工程师;主要从事新能源汽车及相关技术开发与研究工作。E-mail:yangkun20@foton.com.cn。

V, 低电压平台 9~16 V。车辆行驶工况为城市公交工况, 单程 43.5 km, 共包含 14 站, 平均单趟运行 1~1.5 h, 每日运营时长约 10 h, 总运营里程超过 300 km。

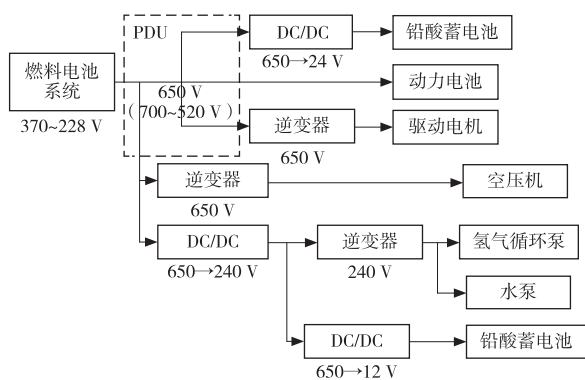
1.2 电-电混合动力系统及 PMS 设计要求

1.2.1 电-电混合动力系统

本文 HFC 客车的“电-电混合动力系统”架构和电气原理如图 1 所示。



(a) 整车电-电混合动力系统架构图



(b) 燃料电池系统电气原理图

图 1 “电-电混合动力系统”架构和电气原理

图 1(b) 中 24 V 铅酸电池用来给整车控制器、主散热系统、DC/DC 控制器、空压机控制器等供电; 12 V 铅酸电池主要是为氢燃料电池 (FCU) 控制系统供电^[4]。

排除产品设计失误, HFC 寿命性能的主要影响因素包括: 启停机绝对次数、输出功率加/降载速率与变载频率、低温冷启动策略及绝对次数、长期服役功

率/电压/电流等^[5-6], 主要是通过影响 HFC 内部核心零部件或材料的耐久性来影响系统整体寿命。动力电池作为辅助动力源, 其寿命的主要影响因素包括: 环境/电池温度、过充/过放、电池充放量 (吞吐量) 等^[7]。所有影响 HFC 和动力电池寿命的参数均可通过混合动力系统的控制算法直接或间接控制, 以保证系统满足整车的动力需求并整体处于比较好的健康状态 (SOH), 同时兼顾整车在全生命周期 PLM 中的能耗优化。

1.2.2 PMS 设计要求

PMS 设计首先应确保动力电池 SOC 在最佳寿命安全窗口, 再保证其区间稳定性以控制动力电池吞吐量。动力电池 SOC 及吞吐量与 FCS 变载频率、升降载速率和启停机次数均有直接关系。因此, FCS 支持变载和启停机工况方面的性能表现直接决定了电-电混合动力系统 PMS 可优化空间及系统耐久性能表现。高变载工况可以支撑超细分的动力电池 SOC 查表策略, 甚至可以设计基于整车功率需求的模糊控制策略, 两者均可表现出优于传统动力电池 SOC 查表 PMS 的鲁棒特性^[8]。

目前, PMS 常用的类型包括基于动力电池 SOC 的规则型策略和基于整车动力需求及车辆驾驶特征的跟随型策略。本文是在规则型 PMS 基础上, 以整车动力需求为索引并进行间歇性迭代计算, 提高燃料电池系统功率输出与车辆需求的吻合程度, 降低动力电池动力输出占比, 降低其吞吐。

2 基于动力电池 SOC 规则型 PMS

2.1 规则型 PMS 设计

规则型 PMS 是指针对不同动力电池 SOC 区间, 由整车控制器 (VCU) 差异化设置燃料电池目标功率, 并保持动力电池 SOC 维持在某区间的能量控制策略。在车辆运行过程中, FCS 始终处于可变功率输出状态。整车控制器 (VCU) 结合 BMS 给出的动力电池可允许充放电功率 (SOP) 和 SOC 状态, 将功率需求 (目标功率) 发送给燃料电池控制器 (FCU), 再由 FCS 完成功率响应。

为保证动力系统寿命, 规则型 PMS 设计时常将动力电池 SOC 安全窗口设定为 40%~80%, 燃料电池

系统变载时间间隔 ≥ 7.25 s, 尽量避免非故障启停机, 同时将氢燃料电池系统输出功率定在 10~80 kW 区间, 因为输出功率越小, 系统效率越高。

本文制定的规则型 PMS 如图 2 所示, FCS 响应功率点定义为 60 kW、35 kW、27 kW、23 kW、18 kW、16 kW、13 kW、10 kW、5 kW, 其中细化功率区间 [10, 35] kW 是根据图 3 中的整车动力需求平均功率来确定的。相应地, 动力电池 SOC 查表索引区间为 [20, 40]、(40, 60]、(60, 65]、(65, 68]、(68, 70]、(70, 75]、(75, 78]、(78, 80]、(80, 100]。若车辆处于制动回收或动力电池处于低温等状态时, 应同步考虑动力电池 SOP。

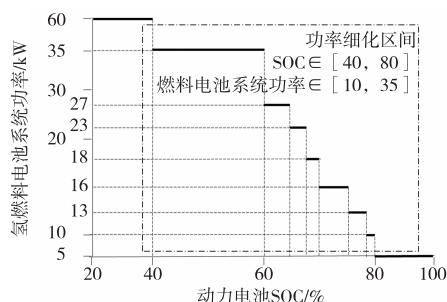


图2 基于动力电池SOC查表规则PMS

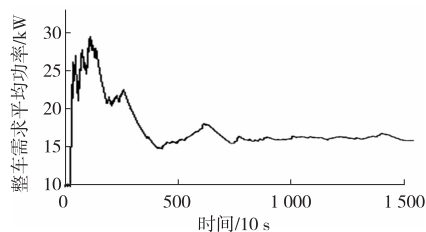


图3 整车平均需求功率曲线

2.2 车辆运营情况及问题

车辆投入运营近半年, 单车行驶最高里程 35 682 km, 全年平均氢耗 5.17 kg/100 km。根据云数据平台数据, 对其中某辆车全天 FCS 和动力电池工作数据进行整理和分析, 如图 4 和图 5 所示。

1) 动力电池。SOC 工作范围为 53%~73%, 满足 40%~80% 的安全窗口。通过对动力电池实际充/放电(即包含驱动放电及制动回收电等)积分计算, 其工作期间吞吐量为 425.3 Ah。

动力电池 SOC 工作范围是指, 最大可用电量减掉其安全区间、过放区间和缓冲区间后剩下的可以允

许长期工作容量范围; 最佳寿命安全容量窗口范围通常为 58%~65%^[9]。保证动力电池在最佳寿命 SOC 范围工作是整个能量控制策略中非常重要的部分。动力电池吞吐量一方面可反映出车辆工况特征, 另一方面也反映出动力电池的充放倍率。随充放倍率提高, 最佳寿命安全窗口也会缩小^[10]。鉴于此, 缩小动力电池 SOC 工作范围, 并降低其吞吐量是保持动力电池寿命性能的重要手段。从实车运营数据可知, 动力电池 SOC 工作范围和吞吐量存在进一步缩窄及降低的空间。

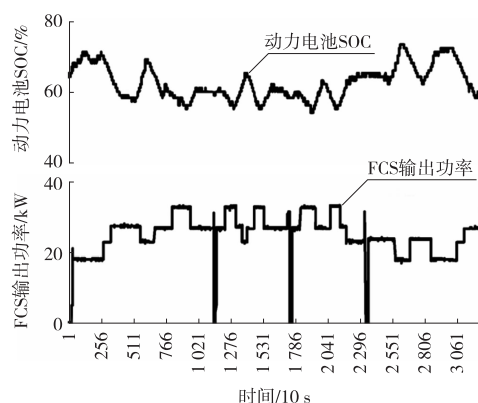


图4 动力电池实际SOC和FCS输出功率曲线

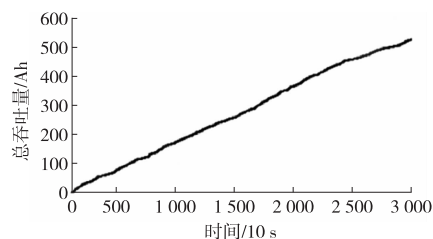


图5 动力电池吞吐量曲线

2) 氢燃料电池系统。全天总变载次数 38 次, 最小变载时间间隔 70 s, 平均变载时间间隔 979 s; 人为切换运营模式导致 3 次系统启停; 20~35 kW 区间内功率运行时间占总运行时间的 89%, 无 ≥ 35 kW 功率点出现。总体来说, 氢燃料电池系统在功率范围和变载频率方面虽然满足设计要求, 但 FCS 长期工作在 35 kW 以下, 可能会造成膜电极长期润湿不足, 从而加速其衰减, 可考虑采用调高输出功率来优化 FCS 的健康状态, 以更好地平衡双电系统寿命性能。

3 基于整车动力需求的跟随型 PMS

将整车实时功率需求作为燃料电池系统目标输

出功率的能量控制策略称为跟随型 PMS。采用跟随型 PMS 可对 FCS 输出功率进行更加准确的预测及纠偏^[11],从而解决上述规则型 PMS 存在的问题。

3.1 跟随型 PMS 设计

将动力电池 SOC/SOP 状态、整车动力需求作为 FCS 输出功率的联合判据,以 10 s 为时间间隔,对 FCS 需求功率进行计算后绘制出如图 6 所示的跟随型 PMS 示意图。其中整车需求功率 P 根据车辆实际运行数据计算获得:

$$P = \sum_{t_s}^{t_e} U \times I / (t_e - t_s)$$

式中: t_s 为开始时间; t_e 为结束时间; U 为母线电压; I 为母线电流。

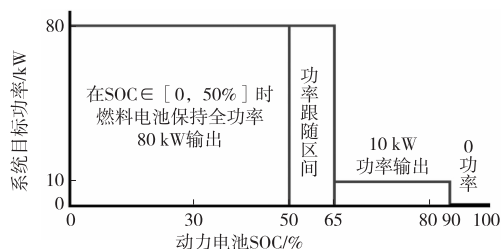


图 6 跟随型 PMS 示意图

在该控制策略中,FCS 在动力电池 SOC 低于 50% 时以 80 kW 全功率输出,待动力电池 SOC 回升至 65% 后,由 VCU 恢复对 FCS 输出功率的跟随控制。具体要求是:当动力电池 SOC 高于 90% 时,FCS 怠速(零功率)输出;当 $80\% \leq \text{动力电池 SOC} \leq 90\%$ 时,FCS 以最小输出功率 10 kW 输出;当动力电池 SOC 降到 65% 时,恢复系统的跟随控制,直到 SOC 值为 50% 为止。

3.2 策略仿真与分析

对 FCS 需求功率及变载需求、动力电池 SOC 和吞吐总量变化情况进行对比,分析两种能量控制策略各自的优劣势。

3.2.1 PMS 仿真模型搭建

利用 MATLAB R2018a 软件对电-电混合动力系统进行能量流仿真模型搭建^[12],在基于动力电池 SOC 查表规则的 PMS 模型基础上,增加 FCS 需求功率跟随控制模块并完成相关仿真模拟计算。在 MATLAB/Simulink 中以能量流形式建立其仿真模型,实现

对策略快速验证和迭代。规则型和跟随型控制策略在控制策略上有明显差异:前者首先通过 BMS 将动力电池的 SOP/SOC 作为判断依据输入给 VCU,由 VCU 决定 FCS 输出功率;后者首先通过 VCU 将整车功率需求反馈给 FCU,再由 BMS 结合 FCS 输出功率进行功率的削峰填谷,具体如图 7 所示,其中①~③表示控制时序。

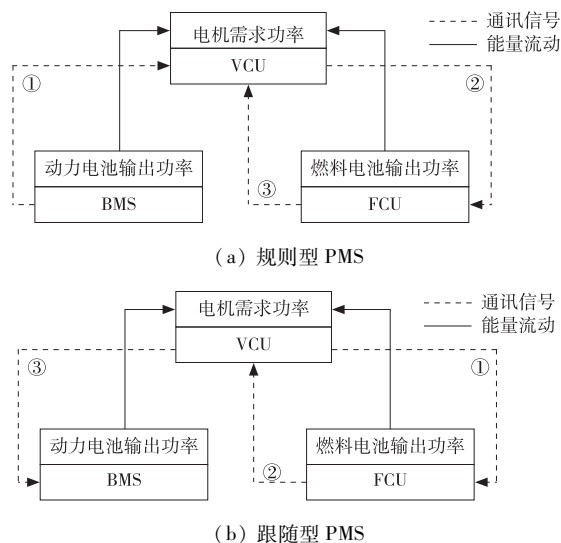


图 7 规则型和跟随型 PMS 控制信号及能量流示意框图

在 MATLAB/Simulink 中建立的仿真模型通过动力电池初始状态模块、整车动力需求模块、氢燃料电池系统需求功率即时判定模块、动力电池吞吐量计算模块组成,以数据总线的形式获取各个子模块的输入量、输出量及系统状态变量,用于各功能模块的计算。

3.2.2 仿真结果及分析

将整车动力需求代入两仿真模型,分别得到基于规则型和跟随型的 PMS 仿真数据。由于实车只搭载规则型 PMS,所以将基于规则型 PMS 的实际运行数据只用于与其仿真数据的对比。分析如下:

1) 动力电池 SOC 分析。由图 8 可知,按规则型策略仿真的动力电池 SOC 变化区间为 52%~74%,与实际运行变化范围 54%~74% 基本一致,满足动力电池系统 40%~80% 的 SOC 范围要求。从仿真结果可知,相比规则型控制策略,跟随型可以实现更稳定的动力电池 SOC 控制(64.8%~65.3%)。由图 9 可知,动力电池实际运行吞吐量为 425.3 Ah,对比仿真规则型策略,动力电池的吞吐量为 410.5 Ah,偏差仅为

3.61%, 证明仿真模型可较为准确地反映电池实际吞吐情况。将相同工况带入跟随型策略仿真模型, 计算出动力电池的总吞吐量为 118.4 Ah, 降低幅度较大, 说明采用跟随型 PMS 可有效提升动力电池寿命。

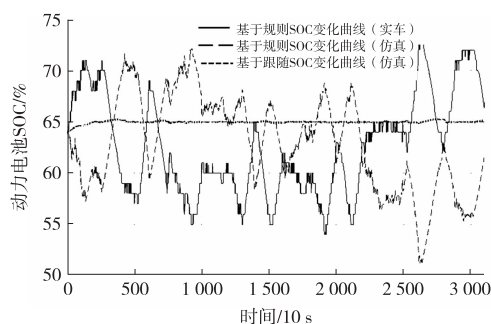


图8 动力电池 SOC 数据

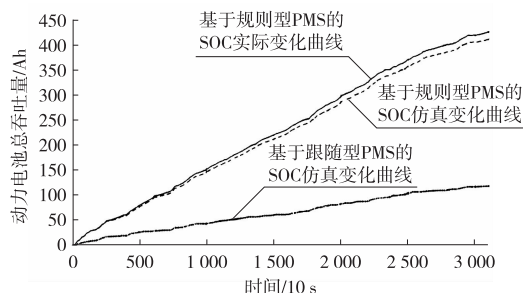


图9 动力电池吞吐量曲线

2) FCS 输出功率分析。跟随型策略中由于 FCS 输出功率与整车功率需求更加接近, 其输出功率区间向高功率范围移动, 因此功率上限的设定是策略中需要重点设计的内容(主要考虑动力电池 SOP、整车动力需求及 FCS 变载限制等)。

将实车运行、规则型和跟随型 PMS 下的 FCS 输出功率数据列入图 10, 可见基于规则型 PMS(含实车运行和仿真)控制下, FCS 输出功率集中在 23 kW、27 kW 和 35 kW 等几个主要功率点, 与实际运营情况接近, 而跟随型 PMS 使 FCS 呈现频繁变载状态且输出功率在 10~80 kW 变化。同时, 对跟随型 FCS 输出功率数据分布进行分析, 发现 30 kW 以下功率占比降至 53.26%, 而 30~80 kW 占比达到了 46.74%。输出功率高于 30 kW 可有效降低因氢燃料电池系统长时间工作在低功率区间而导致的长期膜干现象^[13]。同时, FCS 平均变载时间间隔为 16.5 s, 最短变载时间间隔为 10 s, 相比规则型 PMS 的最小变载时间间隔

70 s 和平均变载时间间隔 979 s, 跟随型策略大幅提高了 FCS 变载频率, 但均小于氢燃料电池系统允许的最小变载时间周期 7.25 s, 满足使用要求。

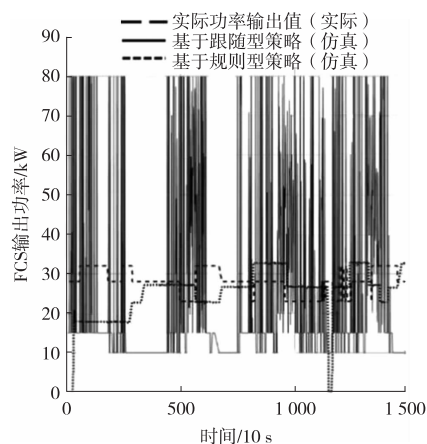


图10 FCS 输出功率曲线

4 结束语

本文以交付运营的氢燃料电池客车作为研究对象, 对其能量控制策略展开研究, 提出基于整车动力需求(跟随型)能量控制策略。根据仿真结果, 跟随型能量控制策略可保持动力电池 SOC 高稳定性, 总吞吐量大幅降低, 可有效提升动力电池寿命。同时, FCS 的输出功率也从中低区间向高区间转移, 有效减弱了 FCS 长时间低功率输出导致的膜干对 FCS 寿命的影响。因此, 基于整车动力需求的跟随型能量控制策略相比传统能量控制策略, 可明显提高电-电混合动力系统寿命性能。

参考文献:

- [1] 杨琨, 董德宝, 彭程, 等. 氢燃料电池电电混合城市客车示范运营整车能量控制策略[J]. 客车技术与研究, 2021, 43(3): 1-4.
- [2] 魏振兴, 周恩序, 张财志, 等. 车用燃料电池动力系统综述[J]. 电源技术, 2019, 43(7): 1237-1240.
- [3] DAVIS K, HAYES G J. Fuel cell vehicle energy management strategy based on the cost of ownership[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2019, 9(4): 226-236.
- [4] 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.

(下转第 37 页)

架质量由 388 kg 减小至 382 kg,白车身弯曲刚度由 $1.38 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 提升到 $1.66 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,扭转刚度由 $1.09 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$ 提升到 $1.25 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$ 。在不增加骨架重量的前提下,白车身刚度得到有效提高,达到设计要求。

4 结束语

将拓扑优化设计应用于白车身刚度优化中,能够克服传统设计中的盲目性,提出合理的结构改进方案及思路以指导设计工作,有效地改善白车身刚度性能。

参考文献:

[1] 杨庆华,连志斌. OptiStruct 在白车身刚度优化中的应用

[C]//第一届结构及多学科优化工程应用与理论研讨会论文集. 2009:1-3.

[2] 张继伟,胡花. 基于 HyperWorks 的某轿车白车身刚度分析及优化[J]. 科技信息,2011(8):3-4.

[3] 于国飞. 基于有限元的全承载式客车车身强度刚度分析[J]. 客车技术与研究,2010,32(4):14-16.

[4] 崔朝军. 拓扑优化及配套技术在转向系统固有频率调整中的应用[J]. 客车技术与研究,2018,40(4):14-17.

[5] 刘庆,侯献军. 基于 HyperMesh/OptiStruct 的汽车零部件结构拓扑优化设计[J]. 装备制造技术,2008(10):42-44.

[6] 洪清泉,赵康,张攀. OptiStrucs & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2013:25.

[7] 孙斌,吴长风,于国飞,等. 纯电动客车底架的拓扑优化设计[J]. 客车技术与研究,2019(5):27-30.

(上接第5页)

[5] 杨琨,徐彬,董德宝,等. 氢燃料电池电电混合动力客车能量控制策略仿真研究[J]. 客车技术与研究,2021,43(1):1-3.

[6] 刘世闯,孙恒五,王瑞鑫,等. 大功率型氢燃料电池重卡动力系统匹配设计[J]. 汽车工程,2021,43(2):196-203.

[7] 李广地,吕浩华,袁军,等. 动力锂电池的寿命研究综述[J]. 电源技术,2016,40(6):1312-1314.

[8] 周苏,王克勇,文泽军,等. 车用多堆燃料电池系统能量管理与控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版),2021,49(1):107-115.

[9] 卢兰光,李建秋,华剑锋,等. 电动汽车锂离子电池管理系

统的关键技术[J]. 科技导报,2016,34(6):39-51.

[10] 马臻,吕迎春,李泓. 锂离子电池基础科学问题(VII)——正极材料[J]. 储能科学与技术,2014,3(1):53-65.

[11] 刘新天,李强,郑昕昕,等. 基于多目标优化的燃料电池汽车能量管理策略[J]. 电子测量技术,2021,44(6):81-89.

[12] 郭朋彦,宗贺辉,王一博,等. 氢燃料电池混合动力汽车能量管理系统建模与仿真分析[J]. 汽车电器,2020(1):13-16.

[13] 王诚,王树博,张剑波,等. 车用燃料电池耐久性研究[J]. 化学进展,2015,27(4):424-435.