

基于 NEDC 的氢-锂电池混合动力系统 性能仿真

魏宁¹, 黄凤云¹, 杜树村¹, 陈浩¹, 王连修², 李新海^{1*}

1. 山东建筑大学机电工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省标准化研究院, 山东 济南 250014

摘要:设计氢燃料电池-锂电池混合动力系统,利用 AVL-CRUISE 软件构建整车动力系统模型,基于新欧洲行驶测试循环(new European driving cycle,NEDC)对氢燃料电池各主要部件功耗、氢燃料电池性能、锂电池性能、氢燃料电池进气流量进行仿真验证系统的经济性和合理性。结果表明:NEDC 全工况下,各部件中空压机的功耗最大,且与车速正相关;全工况耗氢量为 0.089 kg,总行驶里程为 10.926 km,耗氢量较低,经济性较好;氢燃料电池堆内工作温度为 66~77 ℃,符合 60~80 ℃ 的温度要求;锂电池在城市工况输出功率占比大于郊区工况输出功率占比;氢气过量系数为 1.1~1.5,满足动力系统不同功率输出要求;实际空气流量与设定目标接近,控制效果较好。

关键词:混合动力系统;氢燃料电池;锂电池;空压机

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)05-0020-07

引用格式:魏宁,黄凤云,杜树村,等.基于 NEDC 的氢-锂电池混合动力系统性能仿真[J].内燃机与动力装置,2023,40(5):20-26.

WEI Ning, HUANG Fengyun, DU Shucun, et al. Performance simulation of a hydrogen-lithium battery hybrid power system based on NEDC[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(5):20-26.

0 引言

随着能源消耗、碳排放及全球环境污染问题日益凸显,新能源汽车成为汽车行业发展的热点^[1-4]。纯电动汽车具有零排放、能源利用效率高、加速响应快、静音、舒适等优点,是新能源汽车的主流^[5]。充电基础设施不完善、充电时间长、续航里程短和火力发电碳排放多等问题限制了纯电动汽车发展^[6],目前混合动力汽车是很好的解决方案。氢能质量能量密度大,能量转化效率高,被誉为 21 世纪的理想能源^[7]。与锂电池相比,氢燃料电池的反应产物为水,同样绿色清洁;储氢罐加氢时间可缩短至 5 min 以内,极大减少了用户等待时间,克服了纯电动汽车充电时间长、续航里程短的缺陷。氢燃料电池与锂电池相结合可以实现动力系统的快速响应及多能源互补^[8]。

为提高测试和开发的效率,降低开发成本和风险,通常采用软件建模仿真对汽车整车及燃料电池动力系统进行分析研究。郭晓凯等^[9]基于 Simulink 软件建立控制器的仿真模型,得出氢燃料电池混合动力系统能量最优控制参数;时佳威等^[10]利用 AVL-CRUISE、Simulink 软件联合仿真,对车用燃料电池耐久性控制策略进行研究;郭朋彦等^[11]利用 Simulink 建立了能量管理系统模型,提高了燃料电池混合动力车的经济性和安全性;杨彩虹等^[12]通过 ADAMS 虚拟仿真软件对某混合动力汽车发动机与电动机进行动力学

收稿日期:2023-08-15

基金项目:山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QE065);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2041,2023TSGC0855);济南市“新高校 20 条”资助项目(2021GXRC075),山东节能协会会校融合发展项目(SDJN2306);山东省大学生创新训练项目(S202210430024)

第一作者简介:魏宁(2002—),女,济南人,主要研究方向为氢能及燃料电池关键技术,E-mail:V00_OK@163.com。

***通信作者简介:**李新海(1989—),男,济南人,工学博士,副研究员,主要研究方向为内燃机工作过程及排放控制、CFD 数值解析及工程应用、氢燃料电池系统集成及关键技术,E-mail:xinhailove9@126.com。

仿真分析;康健健等^[13]分析燃料电池动力系统,确定相关参数使动力系统达到最佳状态;洪晏忠等^[14]抽取在售的氢燃料电池汽车,进行不同使用工况下的行驶里程和氢气消耗量测试,为动力系统经济性的研究提供了一定参考依据,但测试过程复杂,成本高,并且没有得到较好的控制策略。

本文中设计氢-锂电池混合动力系统,基于AVL-CRUISE M平台搭建整车仿真模型,设计氢能和电能的控制策略,通过对新欧洲行驶测试循环(new European driving cycle, NEDC)工况下混合动力系统性能的仿真分析,得出氢-锂电池混合动力汽车的耗氢量、锂电池和燃料电池及相关部件的参数变化,提高了氢-锂电池混合动力系统的经济性和动力性。

1 整车动力系统参数设计

1.1 整车及传动系统参数

氢-锂电池混合全功率汽车整车及传动系统参数如表1所示。

表1 整车及传动系统参数

整车整备质量/t	轴距/m	轮胎半径/m	整车总功率/kW	迎风面积 A/m^2
1.5	2.35	0.302	45	2.031
氢燃料电池功率/kW	空气阻力因数 C_d	汽车旋转质量换算因数	滚动阻力因数 f	
30	0.32	1.02	0.02	
最大爬坡度/%	传动机构减速比 i	30 min 最高车速/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	0~100 km/h 加速时间/s	
≥ 30	6	120	11	

1.2 动力系统参数匹配结果

设计传动系统驱动电机参数、动力电池参数和燃料电池参数,并进行参数匹配优化。氢-锂电池混合动力汽车驱动电机、动力电池和燃料电池参数如表2所示。

表2 氢-锂电池混合动力汽车燃料电池、动力电池和驱动电机参数匹配结果

零部件	类型	参数匹配结果
燃料电池系统	质子交换膜燃料电池	30 min 最高可持续功率大于等于 30 kW
		额定功率大于等于 30 kW
		峰值功率大于等于 30 kW
动力电池系统	三元锂电池	电池容量为 5.5 kW·h
		瞬时最大放电倍率小于等于 20
		电压为 325~450 V
驱动电机	永磁同步电机	峰值扭矩为 256 N·m
		额定转矩为 128 N·m
		额定转速为 3 357 r/min
		峰值功率为 67 kW
		额定功率为 45 kW

1.3 理论公式

本文中采用某质子交换膜燃料电池。燃料电池系统的欧姆电压损失

$$U_d = I_{\text{stack}} R = J_0 R A_{\text{area}},$$

式中: J_0 为电堆电流密度, A/m^2 ; I_{stack} 为堆栈电流, 为电网所需电流与燃料电池的交叉电流的和, A ; A_{area}

为燃料电池活化面积, m^2 ; R 为燃料电池的多相电阻, Ω 。

阴极电压损失

$$U_0 = U_{\text{act}} + U_{\text{CCL}} + U_{\text{GDL}},$$

式中: U_{act} 为活化损耗引起的压降, U_{CCL} 为燃料电池阴极催化层中氧气传输损失引起的压降, U_{GDL} 为燃料电池气体扩散层中氧气传输损耗引起的压降。

燃料电池电化学模型电压

$$U_{\text{cell}} = U_{\text{OC}} - U_0 - U_{\text{d}},$$

式中 U_{OC} 为理想开路电压。

堆栈电压

$$U_{\text{stack}} = U_{\text{cell}} n_{\text{cells}},$$

式中 n_{cells} 为堆栈中的单元数。

2 整车动力学模型

2.1 拓扑结构

燃料电池自身存在动态响应慢、工作电压不稳定、输出峰值功率受限等缺点,难以满足车辆在多变负载下的动态快速响应要求。实际应用中,燃料电池车辆通常搭配辅助电源装置,减弱负载突变对燃料电池寿命的不利影响。根据直流/直流(direct current/direct current, DC/DC)变换器数量和位置,燃料电池和锂电池复合的拓扑结构可分为多种。本文中的燃料电池和锂电池复合的拓扑结构如图 1 所示,并基于该结构设计氢能和控制策略。图 1 中, I_{bat} 、 I_{dc1} 、 I_{bus} 、 I_{FC} 、 I_{dc2} 分别为锂电池、第 1 台 DC/DC 变换器、整车、燃料电池、第 2 台 DC/DC 变换器的输出电流, U_{bat} 、 U_{FC} 、 U_{dc} 、 U_{bus} 分别为锂电池、燃料电池、DC/DC 变换器、整车的电压。

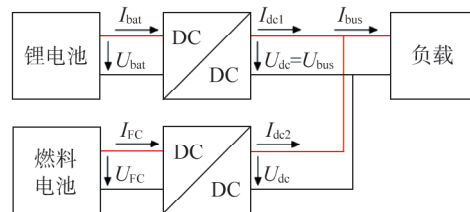


图 1 燃料电池和锂电池复合拓扑结构

该拓扑结构可通过控制 2 台 DC/DC 变换器的占空比,灵活调节 2 个动力源的输出功率,操作简单,稳定性好,可满足动力系统对负载总线电压高稳定性需求。

2.2 整车动力学模型

通过 AVL-CRUISE M 平台搭建整车动力系统模型,如图 2 所示。

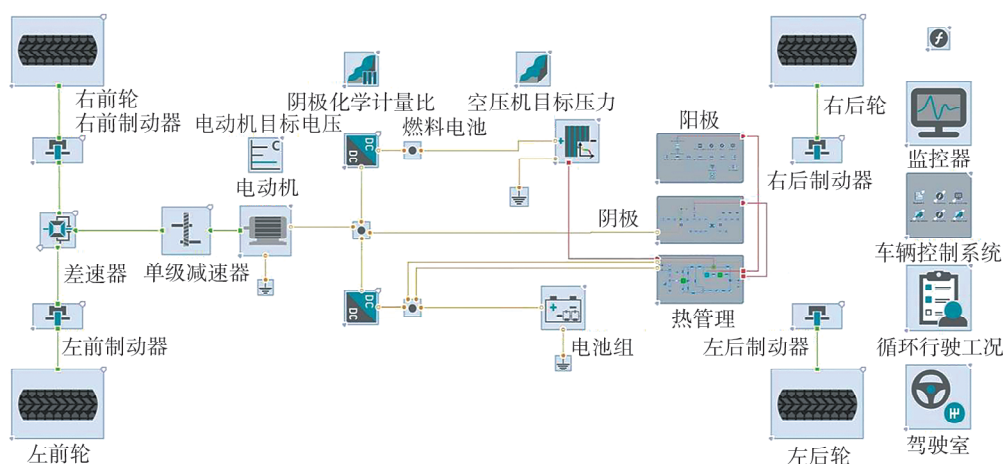


图 2 整车动力系统模型图

该模型主要包括燃料电池、锂电池、DC/DC 变换器和车辆负载等,车辆负载模型由车辆、制动装置、

差速器、单级主减速器、驱动电机和汽车整体组成。

3 仿真结果分析

基于动力系统模型进行NEDC工况仿真,主要对城市和郊区2种工况进行分析。设置总循环时长为1 180 s,前780 s为重复4次的城市循环工况,其余时间为郊区循环工况。

3.1 氢燃料电池各部件功耗分析

空压机位于阴极子系统,是氢燃料电池的关键部件,为电堆提供具有一定压力的空气,满足电堆功率的持续输出。空压机的功耗直接影响电堆系统的比功率。车速与空压机功耗随时间变化曲线如图3所示。由图3可知:1)城市工况下,平均车速为18.466 km/h,空压机平均功耗为0.118 kW,当车速达到最高,即为50 km/h时,空压机功耗为1.225 kW;2)郊区工况下,平均车速为62.151 km/h,空压机平均功耗为0.629 kW,当车速达到最高,即为120 km/h时,空压机功耗为3.414 kW;3)空压机的功耗随着车速的增大而增大,原因为随着车速升高,车辆需要更多的氧气满足氢燃料电池的需求,因此空压机需要提供更多压缩空气,导致空压机功耗增加。

水泵和散热风扇是汽车热管理系统中重要的组件,用于控制和调节燃料电池系统的温度,保证其正常运行。水泵、散热风扇及空压机功耗随时间变化曲线如图4所示。由图4可知:在全工况运行下,空压机的功耗最大,风扇功耗最小,可忽略不计。

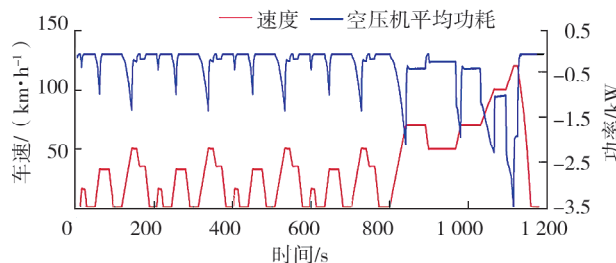


图3 车速与空压机功耗随时间变化曲线

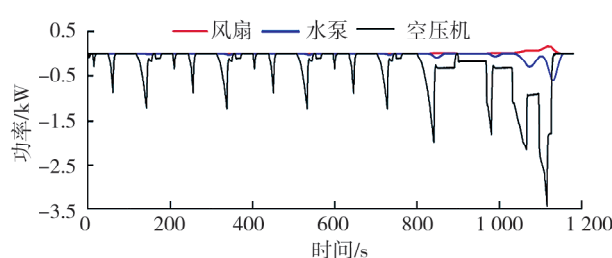


图4 水泵、散热风扇、空压机功耗对比

3.2 氢燃料电池性能分析

3.2.1 耗氢率

完整循环工况下,氢燃料电池的耗氢率与车速随时间变化曲线如图5所示,耗氢率随车速变化曲线如图6所示。

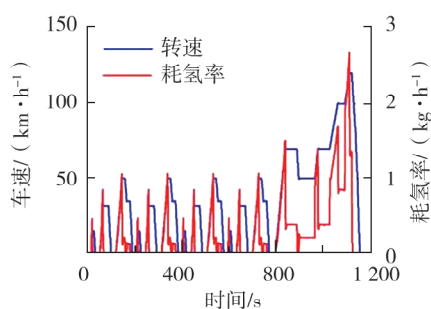


图5 车速与耗氢率随时间变化曲线

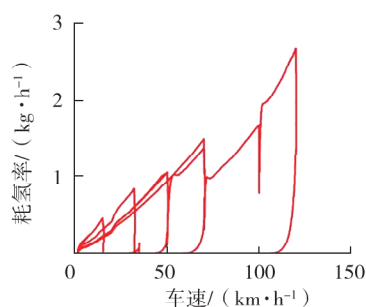


图6 耗氢率随车速变化曲线

由图5可知:1)当达到城市循环工况的最高速度时,耗氢率为0.690 kg/h,通过积分计算,每个城市循环工况的耗氢量为6.7 g,行程为1.003 km;2)当达到郊区工况的最高速度时,耗氢率为2.047 kg/h,郊区工况整体的耗氢量为62.5 g,行程为6.914 km;3)完整NEDC工况的总行驶里程约为10.926 km,耗氢量约为89.3 g,耗氢量较低。由图6可知:车速越高,耗氢率越大,且随车速的提高,耗氢率增幅减小。

3.2.2 温度和效率

完整循环工况下,氢燃料电池的温度、效率变化曲线如图 7 所示。

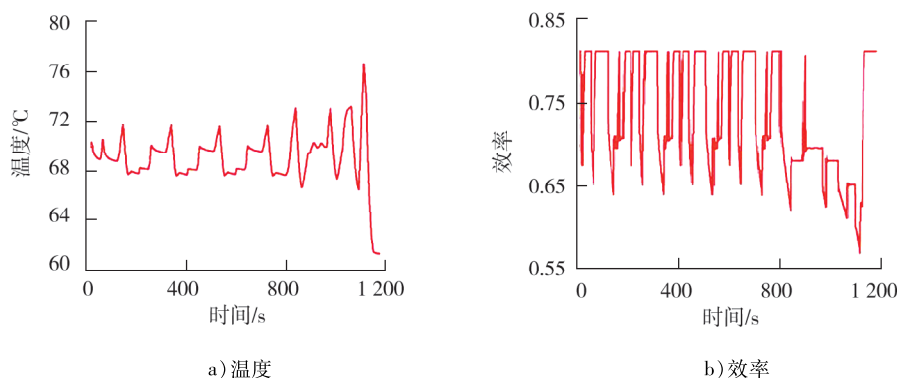


图 7 氢燃料电池的温度、效率变化曲线

由图 7a)可知:1)当达到城市工况最高车速时,燃料电池的温度为 71.72 °C;城市循环工况前 200 s 燃料电池平均温度为 69.12 °C;2)当达到郊区工况最高车速时,燃料电池的温度为 76.60 °C;郊区循环工况前 200 s 的燃料电池的平均温度为 69.08 °C。全工况电池堆内工作温度保持在 66~77 °C,符合 60~80 °C 的温度要求。

由图 7b)可知:1)以城市工况前 200 s 为分析时间段,车速最大时氢燃料电池的效率最低,约为 64%,此时氢燃料电池处于高功率输出状态;每个城市循环的平均效率约为 76.36%,氢燃料电池发电效率较好;2)郊区工况下,车速最大时的效率最低,约为 56.93%,此时燃料电池同样处于高功率输出状态;郊区工况的平均效率约为 69.29%;3)温度与效率负相关,温度越高,效率越低,这是因为热量散失导致了能量损耗。

3.3 燃料电池与锂电池输出特性对比

NEDC 工况下燃料电池和锂电池的功率对比如图 8 所示,图中 θ 为锂电池输出功率与燃料电池和锂电池总功率的比。

由图 8 可知:达到城市循环工况的最大速度时,氢燃料电池输出功率为 14.872 kW;达到郊区循环工况的最大速度时,氢燃料电池输出功率为 39.808 kW。对城市循环工况前 200 s 和郊区循环工况的功率进行积分计算可得:每个城市循环

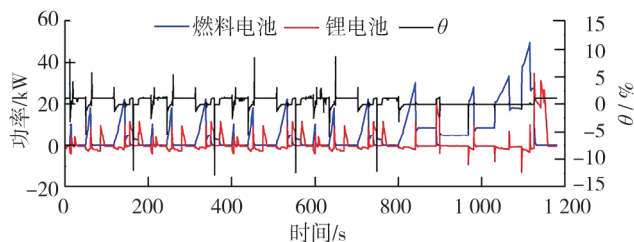


图 8 燃料电池和锂电池的功率对比图

工况的氢燃料电池耗电量为 0.147 kW·h, 车辆行程为 1.003 km;郊区循环工况的氢燃料电池耗电量为 1.304 kW·h, 车辆行程为 6.914 km。

分析城市循环工况的前 200 s,第 0—100 秒时车速变化较为平缓,第 100—200 秒时车速变化迅速。通过对第 0—100 秒、第 100—200 秒 2 个时间段的氢燃料电池耗氢量和输出功率的 4 次积分计算可知,第 100—200 秒的单位功的耗氢量更低,因此氢-锂电池混合动力汽车在市区中行驶时,应该快速达到所允许的最高车速,避免一直低速行驶导致耗氢量升高。

由图 8 还可知:锂电池处于输出电流及充电 2 种工况;当达到城市循环工况、郊区循环工况的最大速度时,锂电池输出功率分别为 10.054、9.989 kW。对城市循环工况前 200 s 和郊区循环工况的功率进行积分计算可得:每个城市循环工况、郊区循环工况的锂电池耗电量分别为 0.014 3、0.148 0 kW·h, 车辆行程分别为 1.003、6.914 km。锂电池耗电量少,经济性较好。

通过对比分析氢燃料电池和锂电池功率输出曲线可得氢-锂电池混合动力汽车工作时的供能变化规律。汽车启动时,燃料电池动态响应慢,锂电池对外输出,燃料电池成功启动后,动力源逐渐替换;行驶过

程中,当车速过高、燃料电池无法满足需求功率时,锂电池再次提供能量;制动或减速过程中进行能量回收,部分车辆动能转化为电能存储在锂电池中,此时对应图8中锂电池功率为负的情况;汽车在郊区行驶时,通常以长时间的稳定巡航和高速行驶为主,无频繁的起、停和加速过程,此时氢燃料电池可以持续提供动力,锂电池为辅助能源,因此, θ 较小。

3.4 氢燃料电池进气流量控制分析

NEDC工况下氢燃料电池阴、阳极边界条件控制如图9所示。由图9a)可知:模型运行时,氢气采取变过量系数供气,过量系数为1.1~1.5,这是因为系统模型采用NEDC工况,负载不断变化,变过量系数供气可满足不同功率输出;通过比例积分微分(proportion integral differential, PID)算法调节电磁阀等,控制氢气质量流量,可使实际氢气质量流量接近目标氢气质量流量。由图9b)可知:通过PID控制背压阀和空压机等,可以使空气质量流量迅速到达设定目标,两者相差很小,控制精度较高。

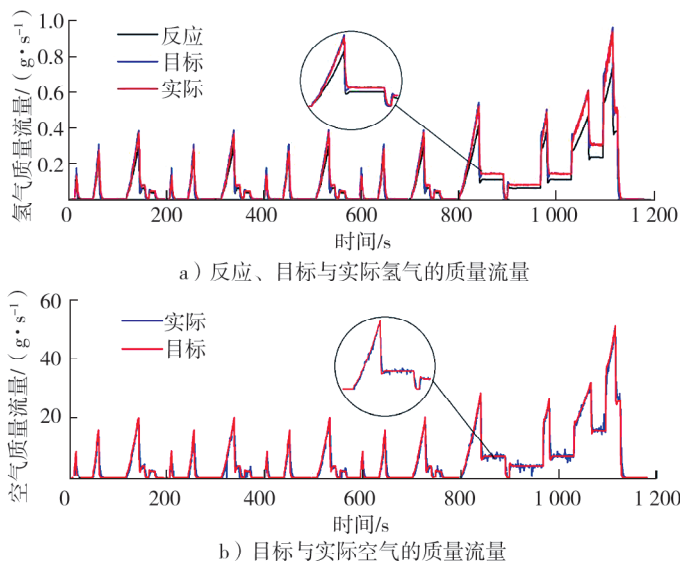


图9 氢燃料电池阴、阳极边界条件

4 结论

通过 AVL-CRUISE M 平台搭建氢-锂电池混合动力汽车模型,基于 NEDC 工况,对氢燃料电池各主要部件功耗、氢燃料电池性能、锂电池性能、氢燃料电池进气流量进行仿真分析,得到以下结论。

1) 氢燃料电池各部件中空压机的功耗最大,且与车速正相关,城市工况、郊区工况空压机平均功耗分别为 0.118、0.629 kW。

2) NEDC 全工况的氢燃料电池耗氢量为 0.089 kg,总行驶里程为 10.925 km,系统具有良好的经济性;电池温度保持在 66~77℃,平均温度为 69℃,符合 60~80℃ 的温度要求。

3) NEDC 全工况的氢燃料电池耗电量为 1.892 kW·h,锂电池耗电量为 0.205 kW·h,耗电量较少,经济性较好。锂电池在城市工况的输出功率占比大于在郊区工况的输出功率占比。

4) 氢-锂电池混合动力系统氢气的过量系数为 1.1~1.5,通过 PID 调节电磁阀和空压机,使实际氢气流量接近目标氢气流量;实际空气流量与设定目标接近,控制效果较好。

参考文献:

- [1] 马玓,谢建文,王艳霞. 生态环境保护背景下的新能源开发[J]. 能源与节能,2023(4):61-63.
- [2] 黎新月. 新能源汽车的发展对能源和环境的影响[J]. 资源节约与环保,2023(4):129-132.
- [3] 曹雅丽. 生态环境部:推广应用新能源汽车助力大气污染防治[N]. 中国工业报,2023-03-31(4).
- [4] 李永康,吴喜庆. 国内混合动力汽车发展与政策建议研究[J]. 内燃机与配件,2022(23):115-117.
- [5] 高乔. 中国新能源发展开足马力[N]. 人民日报海外版,2022-11-07(10).
- [6] 袁宇航. 新能源汽车的故障问题与维修技术探讨[J]. 时代汽车,2023(10):173-175.
- [7] 张春晖,肖楠,苏佩东,等. 氢能、碳减排与可持续发展[J]. 能源与环保,2023,45(7):1-9.
- [8] 张颖. 氢能发展迎来机遇燃料电池核心技术仍待突破[J]. 汽车与配件,2023(14):4.
- [9] 郭晓凯,闫献国,陈峙,等. 氢燃料电池混合动力能量多参数控制方法仿真[J]. 计算机仿真,2022,39(6):146-150.
- [10] 时佳威,谢金法,赵勇. 车用燃料电池耐久性控制策略研究[J]. 现代制造工程,2021(8):56-63.
- [11] 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.

- [12] 杨彩虹,海有科,穆华辉,等.混合动力汽车动力系统匹配研究[J].专用汽车,2023(5):18-19.
- [13] 康健健,崔迎涛.燃料电池汽车混合动力系统设计研究[J].汽车与新动力,2022,5(2):25-27.
- [14] 洪晏忠,崔焱鹏.使用工况对氢燃料电池汽车百公里氢气消耗量影响研究[J].时代汽车,2023(16):108-110.

Performance simulation of a hydrogen-lithium battery hybrid power system based on NEDC

WEI Ning¹, HUANG Fengyun¹, DU Shucun¹, CHEN Hao¹,
WANG Lianxiu², LI Xinhai^{1,*}

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Shandong Institute of Standardization, Jinan 250014, China

Abstract: This study is focused on the design of a hybrid power system integrating hydrogen fuel cells and lithium batteries, with a primary objective of verifying its economic viability and practicality through simulation. The complete vehicle power system model is developed using AVL-CRUISE software. Simulation and analysis are conducted based on the new European driving cycle (NEDC) to assess the power consumption of major components within the hydrogen fuel cell system, hydrogen fuel cell performance, lithium battery performance, and hydrogen fuel cell intake airflow. The results indicate that the power consumption of the compressor in the accessory subsystem reaches its maximum during the NEDC cycle and shows a positive correlation with vehicle speed. The hydrogen consumption is 0.089 kg over the complete cycle, covering a total distance of 10.926 km. The hybrid system has low hydrogen consumption and good economy. The fuel cell temperature is maintained within the range of 66 °C to 77 °C. Furthermore, the lithium battery exhibits a higher power output ratio during urban driving conditions compared to suburban scenarios. The hydrogen excess ratio ranging from 1.1 to 1.5, which meets the different power output requirements of the power system. The actual airflow closely matches the preset target, indicating a precise control.

Keywords: hybrid powertrain system; hydrogen fuel cell; lithium battery; compressor

(责任编辑:郎伟锋)

+++++

(上接第 19 页)

proposed. The results show that using the proportional integral differential (PID) control strategy, the bias of the solenoid valve duty cycle between 2.5% and 5.0% has a significant impact on the results of the boost control. The deviation coefficient of the integral time constant of the turbocharging system is greater than 0, and there is a tendency for the turbocharging pressure to be under regulated. The integral time constant of the boost system is less than 0, and the boost pressure tends to overshoot. The closing margin of the exhaust bypass valve is -0.05 ~ 0.20 mm, which is a relatively suitable. The torque slope method is effective and could quickly evaluate the transient response performance of turbochargers on an engine bench.

Key words: turbocharger; transient response; PID pre-control; closing margin; torque slope

(责任编辑:胡晓燕)