

# 基于 LMS AMESim 的车用燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统能量管理仿真

纪常伟<sup>1,2</sup>, 李响<sup>1</sup>, 梁晨<sup>3</sup>, 汪硕峰<sup>1</sup>, 牛会鹏<sup>1</sup>, 史凡锐<sup>4</sup>

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100124;  
3. 北京汽车研究总院有限公司, 北京 101300; 4. 北京新能源汽车股份有限公司, 北京 102606)

**摘要:** 基于 20 kW 燃料电池电堆及燃料电池测试系统, 获得燃料电池极化曲线及氢气消耗量曲线; 基于锂离子动力电池充放电系统, 获得锂离子动力电池输出电压曲线. 将试验所得数据导入到 LMS AMESim 软件中, 分别构建燃料电池及锂离子动力电池模块, 同时, 构建仿真平台其他所需模块并搭建 DC/DC 变换器模型, 建立燃料电池-锂离子动力电池混合的动力系统仿真平台. 依据不同动力源的各自特点, 引入能量控制策略, 对该混合动力系统进行模拟仿真. 在所选定新欧洲驾驶循环 (new European driving cycle, NEDC) 工况下仿真结果表明, 该混合动力系统可以满足车辆在所选定工况下的动力需求. DC/DC 变换器可提升并稳定燃料电池输出电压跟随母线电压, 并通过对电流的分配进行功率在不同动力源之间的分配; 燃料电池输出功率在合理范围之内, 并取消燃料电池在低功率下的工况, 从而保护燃料电池, 延长其使用寿命; 锂离子动力电池荷电状态 (state of charge, SOC) 始终保持在合理范围内, 未出现过充或过放情况. 研究结果可为搭建混合动力试验平台及整车搭载匹配提供理论依据及参考.

**关键词:** 燃料电池; 锂离子动力电池; 混合动力系统; 能量管理; 仿真平台; LMS AMESim

中图分类号: TK 91

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2020)01-0058-10

doi: 10.11936/bjtxb2018060011

## Simulation of Energy Management for Hybrid Power System of Vehicle Fuel Cell and Lithium Ion Power Battery Based on LMS AMESim

Ji Changwei<sup>1,2</sup>, Li Xiang<sup>1</sup>, Liang Chen<sup>3</sup>, Wang Shuofeng<sup>1</sup>, Niuhui Peng<sup>1</sup>, Shi Fanrui<sup>4</sup>

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. Collaborate Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100124, China; 3. Beijing Automotive Technology Center, Beijing 101300, China; 4. Beijing Electric Vehicle Co., Ltd., Beijing 102606, China)

**Abstract:** Based on 20 kW fuel cell stack and fuel cell test system, the fuel cell performance curve was obtained. The output voltage performance curve of Li-ion battery was obtained based on the charging and discharging system of Li-ion power battery. The experimental data were imported into the LMS AMESim software, and the simulation platform of the hybrid power system of fuel cell and Li-ion power battery was established. At the same time, the energy control strategy was introduced to carry out the joint simulation of the hybrid power system. The simulation results under selected working conditions show that the hybrid power system can satisfy the dynamic performance of the vehicle under the selected working conditions and distribute the power among different power sources by allocating the current. The output power of the fuel cell is within a reasonable range and the SOC of the Li-ion power battery remains within a reasonable

收稿日期: 2018-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476002); 北京市教育委员会科技计划资助项目(KM201510005011); 北京市教育委员会科技计划重点资助项目(KZ201610005005)

作者简介: 纪常伟(1965—), 男, 教授, 主要从事内燃机燃烧、节能与排气净化方面的研究, E-mail: chwji@bjut.edu.cn

range without overcharge or overdischarge. The results can provide a theoretical basis and reference for building a hybrid power experimental platform and matching the whole vehicle.

**Key words:** fuel cell; Li-ion power battery; hybrid power system; energy management; simulation platform; LMS AMESim

燃料电池作为一种发电装置,可将蕴含在燃料中的化学能直接转化为电能.与传统蓄电池不同,其反应物是由外部供应而不是储存在电池内部.因此,燃料电池无须充电,可长时间输出电能<sup>[1]</sup>.相较于其他种类的燃料电池,质子膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)以其比能量高、工作温度低等优点,被广泛应用于电动汽车等领域<sup>[2-3]</sup>.但由于PEMFC动态响应较慢且无法回收制动能量,使其在实际应用中受到限制<sup>[4-5]</sup>.锂离子动力电池因具有动态响应快、可快速充放电等优点也被应用在汽车等领域,但由于充电时间较长、续航里程有限等缺点,其应用也受到限制<sup>[6]</sup>.因此,将两者并联组成混合动力系统作为汽车的动力源,可有效结合燃料电池与锂离子动力电池的优势,弥补不足.

谢星等<sup>[7]</sup>基于Cruise和Simulink软件分别搭建燃料电池及整车模型进行联合仿真研究,研究结果表明动力系统可满足动力性需求且锂离子动力电池荷电状态(state of charge, SOC)保持在合理范围内. Mokrani等<sup>[8]</sup>基于Simulink软件提出电力系统的拓扑结构及其各子系统的识别方法,实现了车辆的无中断供电.李奇等<sup>[9]</sup>应用ADVISOR仿真软件建立了燃料电池与蓄电池混合动力系统模型,提出并验证了基于模糊逻辑控制的能量管理策略的可行性.曹楠等<sup>[10]</sup>搭建了燃料电池-锂离子动力电池缩比实验台,验证了动态负荷下系统的响应及跟随情况.

本文利用LMS AMESim软件基于20 kW车用燃料电池和8 A·h锂离子动力电池搭建了燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统仿真模型.其中,燃料电池的性能曲线和锂离子动力电池输出电压曲线分别通过燃料电池实验平台和锂离子动力电池充放电测试设备获取.随后,在选定工况下对系统进行联合仿真,确定满足车辆动力需求的动力匹配及控制策略,并为燃料电池-锂离子动力电池混合动力试验研究及整车测试提供参考和依据.

## 1 混合动力系统仿真平台建立

### 1.1 混合动力系统拓扑结构

燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统所选用的拓扑结构如图1所示.基于燃料电池高电流低

电压的特性,在燃料电池与电机及其控制器单元中间增加DC/DC变换器,用以提升燃料电池电压并与母线电压相匹配.由于DC/DC变换器输出端与输入端功率不变(不考虑损耗),且电流与电压呈反比关系,因此在DC/DC变换器输出端提升了输出电压并降低输出电流.由于燃料电池电压得到提升并且维持稳定状态,进而可由DC/DC变换器通过控制输出电流来控制燃料电池的输出功率,实现功率分配.该混合动力系统采用燃料电池为主,锂离子动力电池为辅的方式运行.车辆大部分工况由燃料电池单独供电,但当车辆所需功率大于燃料电池最大输出功率时,锂离子动力电池作为补充动力提供额外功率输出;当车辆所需功率小于燃料电池最大输出功率时,燃料电池可根据锂离子动力电池的SOC状态为锂离子动力电池充电;当车辆所需功率小于燃料电池最小输出功率时,为保护燃料电池,此时由锂离子动力电池提供全部输出功率.此外,锂离子动力电池可回收车辆制动过程中产生的制动能量.

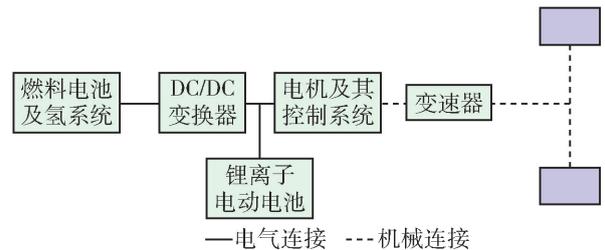


图1 混合动力系统拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid power system topology structure

### 1.2 仿真软件介绍

LMS AMESim软件为多学科领域复杂系统建模仿真平台.通过此平台可建立较为复杂的包含多个学科、领域的系统模型,并进行仿真计算分析,同时可研究模型的稳态及瞬态特性.利用该软件可以完成机电一体复杂系统的分析.由于该平台具有非常实用的物理模型模块,应用该软件可以避免数值分析与编程等烦琐步骤<sup>[11]</sup>.因此,利用该软件,基于试验平台数据,建立混合动力仿真模型,可以更有效地反应车辆真实行驶状况,为日后混合动力实验平台搭建及试验提供理论参考依据.

本文所使用的 LMS AMESim 软件模块主要包括:燃料电池、动力电池、控制单元、电机、整车及驾驶员等模块. DC/DC 变换器模型需要单独搭建.

### 1.3 驾驶员模型建模

驾驶员模型是通过当前车速与下一时刻目标车速进行比对,判断下一时刻输出加速(0:无加速;1:最大加速度)或制动(0:无制动;1:最大制动加速度)信号,将信号输送给整车控制器,从而控制车辆行驶速度.

模型中,对于加速的 PID 控制见公式

$$\text{err} = V_{\text{cont}} - V_{\text{veh}} \quad (1)$$

$$\text{acc} = \text{GPacc} \cdot \text{err} + \text{GIacc} \int \text{err} dt + \text{GAacc} \cdot dV_{\text{contAnt}} \quad (2)$$

$$dV_{\text{contAnt}} = (V_{\text{contAnt}} - V_{\text{cont}}) / \text{ad}V_{\text{Ant}} \quad (3)$$

$$\text{lacc} = \text{GIacc} \cdot \int \text{err} \cdot dt \quad (4)$$

式中:err 为目标车速与当前车速的误差; $V_{\text{cont}}$ 、 $V_{\text{veh}}$ 、 $V_{\text{contAnt}}$  分别为目标车速、当前实际车速以及预期控制车速;acc 为加速控制参数,其值范围为 0~1;GPacc 为加速度控制回路的比例增益;GIacc 为加速度控制积分增益;GAacc 为加速度控制预期增益;ad $V_{\text{Ant}}$  为提前控制时间;lacc 为加速过程中的积分部分.

对于制动的控制见公式(1)及式

$$\text{brak} = \text{GPbr} \cdot \text{err} - \text{GIbr} \cdot \int \text{err} \cdot dt - \text{GAb}r \cdot dV_{\text{contAnt}} \quad (5)$$

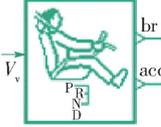
$$\text{lbr} = -\text{GIbr} \cdot \int \text{err} \cdot dt \quad (6)$$

式中:brak 为制动控制参数,范围为 0~1;GPbr 制动控制比例增益;GIbr 制动控制积分增益;GAb r 为制动控制预期增益;lbr 为制动过程中积分部分.

驾驶员模型参数如表 1 所示.

表 1 驾驶员模型参数

Table 1 Parameters of driver model

模型符号	参数名称	参数值
	反应时间/s	2
	加速控制增量/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	0.251
	减速控制增量/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	0.051
	开始至制动踏板抬起时间/s	0.5

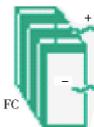
### 1.4 燃料电池模型建模

本文采用燃料电池在大部分工况下作为混合动力系统中动力的主要来源.所使用的燃料电池为质

子交换膜燃料电池,其基本性能参数如表 2 所示,燃料电池试验平台如图 2 所示.为确保燃料电池在运行过程中处于安全、可靠、高效的工作状态,需要对燃料电池进行性能试验.利用试验获得的燃料电池性能试验最优结果,完成 LMS AMESim 软件中燃料电池模型的建模.

表 2 燃料电池基本性能参数

Table 2 Basic performance parameters of the fuel cell

模型符号	参数名称	参数值
	额定功率/kW	20
	峰值功率/kW	23.09
	电池节数	110
	电流范围/A	0~320
	电压范围/V	60~110
	额定电流/A	280

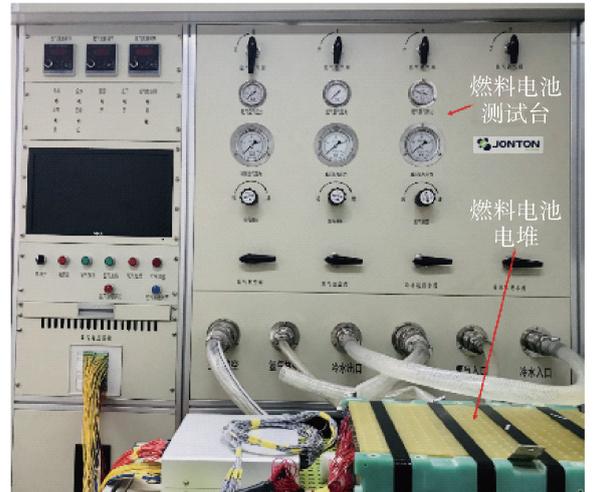


图 2 燃料电池测试平台

Fig. 2 Testing platform of fuel cell

通过控制能斯特方程及燃料电池阴阳极气体消耗量与电堆电流关系式<sup>[12-13]</sup>中所涉及的变量,式(7)~(9)给出了能斯特方程及 PEMFC 中阴阳极气体消耗量与电堆电流的关系式,改变相关变量对 PEMFC 进行测试.最优性能曲线如图 3 所示.图 4 为氢气消耗量随电流的变化曲线.

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 + 8.5 \times 10^{-4} (T_{\text{fc}} - T_{\text{ref}}) + 4.308 \times 10^{-5} T_{\text{fc}} \left[ \ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2}) \right] \quad (7)$$

$$F_{\text{O}_2, \text{reacted}} = M_{\text{O}_2} \frac{NI_{\text{st}}}{4F} \lambda_1 \quad (8)$$

$$F_{\text{H}_2, \text{reacted}} = M_{\text{H}_2} \frac{NI_{\text{st}}}{2F} \lambda_2 \quad (9)$$

式中: $E_{\text{Nernst}}$ 为热力学电动势; $T_{\text{fc}}$ 为燃料电池温度; $T_{\text{ref}}$ 为参考温度; $P_{\text{H}_2}$ 为氢气分压值; $P_{\text{O}_2}$ 为空气分压值; $F_{\text{O}_2,\text{reacted}}$ 为氧气消耗质量流量; $M_{\text{O}_2}$ 为氧气摩尔质量; $N$ 为电堆中单体个数; $I_{\text{st}}$ 为燃料电池电堆电流; $F$ 为法拉第常数; $\lambda_1$ 为过量空气系数; $F_{\text{H}_2,\text{reacted}}$ 为氢气质量流量; $M_{\text{H}_2}$ 为氢气摩尔质量; $\lambda_2$ 为过量氢气系数。

PEMFC 燃料电池的运行温度为  $60 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。本研究中,通过控制循环水温度来控制 PEMFC 电堆温度,循环水温度控制为  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,且进出口温差小于等于  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,因此 PEMFC 电堆温度控制在  $65 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

气体压力值根据文献[14]及燃料电池本身特性进行确定。根据电堆使用说明书,氢气与空气压差不宜过大且气体压力小于  $0.2 \text{ MPa}$ 。因此,氢气与空气采取相同压力  $0.18 \text{ MPa}$ ,防止质子交换膜发生形变而造成损坏。

过量空气系数的确定根据文献[15],并经过试验测定,系数为  $2.5$ 。但在电流密度较低时,空气需及时带走阴极产生的水,防止水淹,因此需加倍。

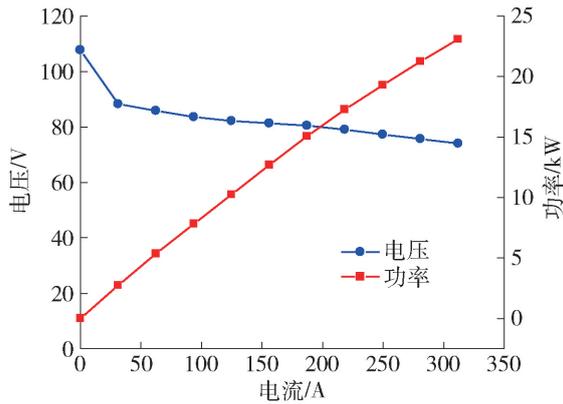


图3 燃料电池最优性能曲线

Fig. 3 Curve of fuel cell optimal performance

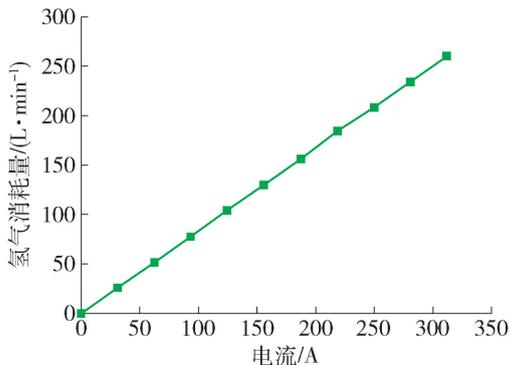


图4 燃料电池氢气消耗量曲线

Fig. 4 Curve of fuel cell hydrogen consumption

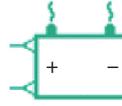
## 1.5 锂离子动力电池模型建模

锂离子动力电池作为混合动力系统的辅助动力源,其电压的变化决定了系统母线的瞬时电压。本研究中采用磷酸铁锂动力电池,其主要性能参数如表3所示。

表3 锂离子动力电池参数

Table 3 Parameters of lithium-ion power battery

模型符号	参数名称	参数值
	总能量/(kW·h)	2.8
	电池组额定容量/(A·h)	8
	标称总压/V	356.4
	单体电芯/V	3.3
	组合方式	1并108串
	最高放电倍率	10C
	最高充电电压/V	388.8
	最低放电电压/V	270
	最大连续充电电流/A	200
	最大连续放电电流/A	250
	最大脉冲充电电流/A	300
	最大脉冲放电电流/A	450



锂离子动力电池单体输出电压由其开路电压、内阻及电流决定,而电池组的输出电压由单体输出电压及单体个数决定。锂离子动力电池 SOC 状态由其额定容量、电荷量及时间决定,详见

$$V_{\text{cell}} = V_{0\text{cell}} - R_{\text{cell}} I_{\text{cell}} \quad (10)$$

$$V_{\text{bank}} = V_{\text{cell}} N_{\text{cell}} \quad (11)$$

$$\frac{d\text{SOC}}{dt} = -\frac{dq}{dt} \frac{100}{C_{\text{nom}}} \quad (12)$$

式中: $V_{\text{cell}}$ 为单体输出电压; $V_{0\text{cell}}$ 为单体开路电压; $R_{\text{cell}}$ 为单体内阻; $I_{\text{cell}}$ 为单体电流; $V_{\text{bank}}$ 为电池包输出电压; $N_{\text{cell}}$ 为电池包单体个数; $C_{\text{nom}}$ 为额定容量。

利用充放电系统(如图5所示)将锂离子动力电池充满电后进行放电,测定锂离子动力电池输出电压随 SOC 的变化曲线,如图6所示;而高低温箱设备则提供锂离子动力电池的工作环境,本研究中锂离子动力电池工作环境为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,湿度为  $60\%$ 。由图6可知,锂离子动力电池输出电压随 SOC 的增加而上升,且增幅逐渐减小, SOC 在  $70\% \sim 90\%$  时,电压最为平稳。

## 1.6 DC/DC 变换器建模

从燃料电池特性曲线(见图3)中可以看出,随着电流的升高,电压呈下降趋势。而负载一般都需要稳定的高电压输出,并且燃料电池无法回收制动能量,因此,需要单向 DC/DC 变换器与燃料电池相



图5 充放电机及高低温箱设备

Fig. 5 Charging and discharging device and high and low temperature box

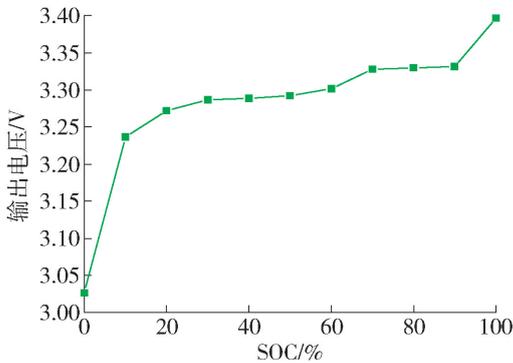


图6 锂离子动力电池输出电压随其SOC的变化曲线

Fig. 6 Curve of lithium-ion battery output voltage with its SOC

连<sup>[16]</sup>. 作为混合动力系统中能量分配的主要部件, DC/DC 变换器主要分为电流型和电压型 2 种<sup>[17]</sup>. 混合动力系统中母线电压由锂离子动力电池决定, 由于燃料电池输出电压通过 DC/DC 变换器计算变比后跟随母线电压, 能量的输出由输出电流决定, 因此本研究采用电流型 DC/DC 变换器. 当需求功率发生突变时, 锂离子动力电池可以快速响应, 使燃料电池电流平稳过度, 保护燃料电池.

锂离子动力电池输出功率、电机需求功率及 DC/DC 变换器输出功率关系为

$$P_{\text{bat}} = P_{\text{motor}} - P_{\text{DC/DC}} \quad (13)$$

式中  $P_{\text{bat}}$ 、 $P_{\text{motor}}$  和  $P_{\text{DC/DC}}$  分别为锂离子动力电池、电机和 DC/DC 转换器输出功率.

DC/DC 变换器参数如表 4 所示.

DC/DC 变换器模型如图 7 所示.

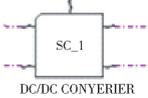
### 1.7 整车及电机模型建模

整车及电机模型基本参数如表 5 所示.

在构建了模型所需的模块后, 将模块组合为燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统仿真平台, 如图 8 所示.

表 4 DC/DC 变换器参数

Table 4 Parameters of DC/DC converter

模型符号	参数名称	参数值
	额定功率/kW	30
	输入电流/A	3 ~ 320
	输入电压/V	0 ~ 420
	输出电流/A	2 ~ 200
	输出电压/V	120 ~ 530

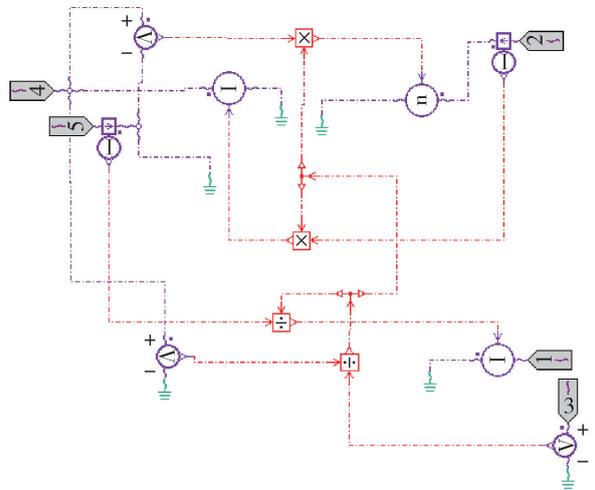
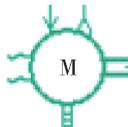


图7 DC/DC 变换器模型图

Fig. 7 Model diagram of DC/DC converter

表 5 整车及电机模型基本参数

Table 5 Basic parameters of vehicle and motor model

名称	模型符号	主要参数	参数值
		整备质量/kg	775
		轴荷比/%	50
		迎风面积/m <sup>2</sup>	2.08
		轮胎尺寸	145/60R13
		额定功率/kW	20
		最大功率/kW	35
		最大扭矩/(N·m)	120

## 2 燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统能量管理策略

能量管理模块根据车辆的功率需求、锂离子动力电池 SOC 状态、燃料电池状态及驾驶员的驾驶意

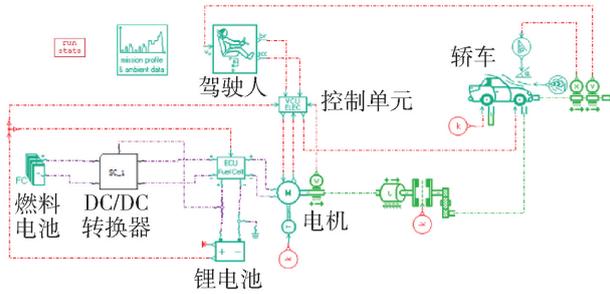


图 8 燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统仿真平台

Fig. 8 Model diagram of DC/DC converter

图,实现燃料电池与锂离子动力电池之间功率的合理分配.

能量管理策略如图 9 所示. 其中,  $P_{FC}$  为燃料电池输出功率,  $P_{bat}$  为锂离子动力电池输出功率,  $P_{FC-eff}$  为燃料电池效率最高点输出功率,  $P_{FCmin}$  为燃料电池最小输出功率,  $P_{FCmax}$  为燃料电池最大输出功率,  $SOC_{min}$  为动力电池 SOC 下限,  $SOC_{max}$  为动力电池 SOC 上限.

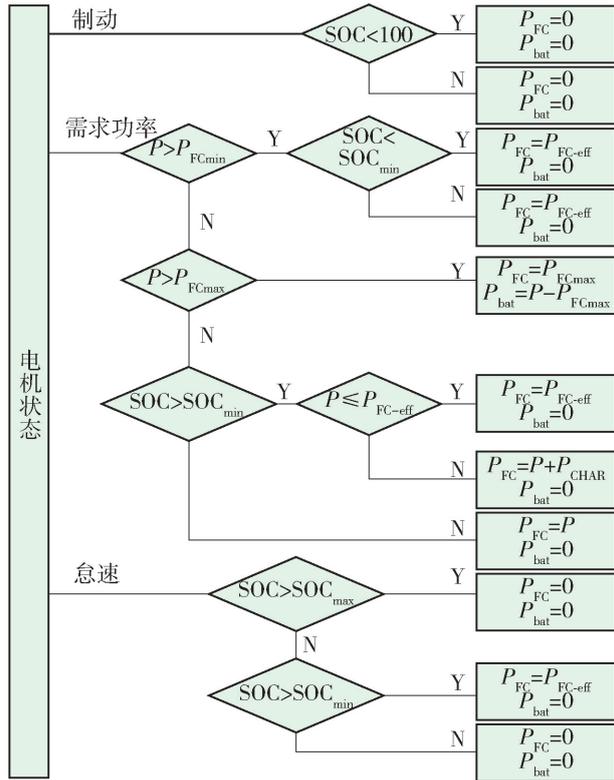


图 9 能量管理策略

Fig. 9 Strategy of energy management

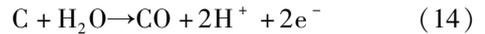
在策略的制定中,始终保持以燃料电池工作在合理范围内为原则,在可满足工况动力性的条件下,使其尽可能工作在效率最佳点. 当需求功率较大时,燃料电池的输出功率将根据需求功率的变化而

变化,而锂离子动力电池则起到快速响应及功率补充的作用.

驾驶员根据当前车速及下一时刻车速进行油门踏板及制动踏板的控制,踏板的控制将提供车辆的需求功率值,控制单元接收到需求功率,根据锂离子动力电池 SOC 状态及燃料电池的输出功率情况,判断功率在 2 种动力源间的合理分配.

1) 当车辆处于制动状态时,燃料电池与锂离子动力电池输出功率均为 0,但锂离子动力电池 SOC 小于 100% 时,此时锂离子动力电池将对制动能量进行回收;反之,则不进行制动能量回收.

2) 当车辆处于需求功率状态时,此时需判断需求功率是否小于燃料电池最小输出功率,如小于且锂离子动力电池无须充电时,为降低燃料电池单电池电压,减少高电压对碳载体的腐蚀,以保护燃料电池电堆,提高燃料电池使用寿命,使燃料电池输出功率为 0,需求功率全部由锂离子动力电池提供. 由于燃料电池碳载体在 65 °C 以上、电势 0.8 V 以上的条件下,碳表面开始被氧化,发生如下化学反应:



从而使纳米级铂颗粒失去载体,导致铂的流失或团聚,降低催化性能,甚至导致催化层结构坍塌<sup>[18-19]</sup>. 通过图 3 可知,当燃料电池输出功率为 2.75 kW 时,此时燃料电池输出电压为 88.26 V,单片平均电压为 0.802 V. 此时燃料电池单片电压过高,因此在不影响动力性的条件下,取消燃料电池在 2.75 kW 以下的工作模式,由锂离子动力电池输出全部需求功率. 同时,由图 2 可知,燃料电池的最大输出功率为 23.09 kW,燃料电池最大输出功率并未达到浓差极化阶段. 因此不会产生较大的电压下降,损害燃料电池<sup>[20]</sup>. 因此,在模型中选取燃料电池最小输出功率为 3 kW,最大输出功率为 23.09 kW.

当需求功率小于燃料电池最小输出功率且锂离子动力电池需要充电时,燃料电池将工作在最佳效率点,所输出的功率提供需求功率,其余部分为锂离子动力电池充电.

当需求功率大于燃料电池最大输出功率时,燃料电池输出最大功率,此时无论锂离子动力电池是否需要充电,都输出需求功率与燃料电池最大输出功率的差值,由于锂离子动力电池后备 SOC 较高,且此时工况持续时间较短,因此锂离子动力电池不会产生过放.

当需求功率介于燃料电池最大输出功率和最小效率点功率之间时,锂离子动力电池如需充电,且需求功率小于最佳效率点功率时,燃料电池将输出最佳效率电功率。

当需求功率介于燃料电池最大输出功率和最小效率点功率之间时,锂离子动力电池如需充电,且需求功率大于最佳效率点功率时,燃料电池将输出需求功率与充电功率之和。

当需求功率介于燃料电池最大输出功率和最小效率点功率之间时,锂离子动力电池无须充电,燃料电池将输出全部需求功率。

3) 当车辆处于怠速状态时,此时锂离子动力电池输出功率为0,但需要根据其SOC状态判断是否需要充电。当锂离子动力电池SOC状态大于设定的SOC最小值时,燃料电池不需要对外输出功率为锂离子动力电池充电,输出功率为0;当锂离子动力电池SOC状态小于设定的SOC最小值时,此时燃料电池工作在最佳效率点,对锂离子动力电池进行充电。

对于需求功率的快速响应,锂离子动力电池在功率响应方面优于燃料电池,功率变化迅速,燃料电池无法及时跟随,此时锂离子动力电池则会补充需求功率与燃料电池输出功率之间的差值<sup>[21]</sup>。而当需求功率超过燃料电池需求的最大功率时,二者的差值则由锂离子动力电池进行补充。而由图6可知,锂离子动力电池输出电压随SOC的变化,且当SOC为70%~90%时较为稳定。但为预留制动能量回收的SOC空间,设置 $SOC_{min}$ 为70%, $SOC_{max}$ 为80%,保证锂离子动力电池SOC波动范围较小,从而提高其循环寿命。

### 3 模拟仿真计算及结果分析

在LMS AMESim模拟仿真软件中构建燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统模型并进行仿真,对上文提出的控制策略进行验证及评价,验证其可否满足车辆动力需求,同时,监测二者的工作状态。

本研究采用新欧洲驾驶循环(new European driving cycle, NEDC)为测试工况。NEDC包含4个市区工况(urban driving cycle, UDC)以及1个市郊工况(extra urban driving cycle, EUDC),包括加速、减速、怠速和匀速4种状态,能够真实反映车辆在实际道路中的运行情况,因此采用NEDC工况作为本研究中的测试工况<sup>[22-23]</sup>。图10为车速与时间关系

图,通过观察图10可以看出,依托于PID控制的驾驶员模型以及能量匹配及控制,本研究中的混合动力系统可以满足NEDC循环工况中速度及加速度的要求。

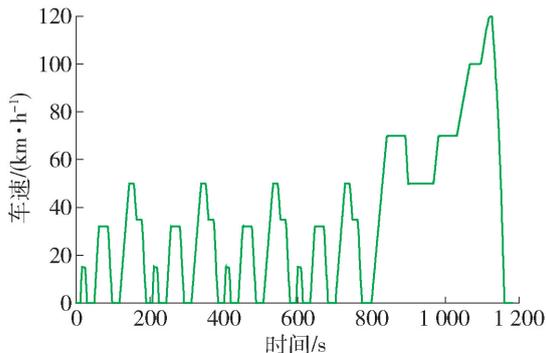


图10 车速与时间关系

Fig. 10 Relationship between speed and time

设定锂离子动力电池初始SOC为75%,燃料电池初始电压为107.77V。

图11为车辆需求功率随时间的变化图,图12为燃料电池与锂离子动力电池的输出功率随时间变化图。通过观察图11、12可以看出,整车在运行过程中,市区工况需求最大功率为9.15kW,市郊工况最大需求功率为32.30kW。燃料电池最大输出功率为23.08kW,小于其最大输出功率23.09kW,同时,取消了其输出功率在2.75kW以下的工况,保证燃料电池输出功率式中大于2.75kW。锂离子动力电池最大输出功率为9.30kW,放电倍率为3.3C,小于锂离子动力电池最大放电倍率,在工作过程中,锂离子动力电池承担的输出功率波动较大并且回收制动能量。

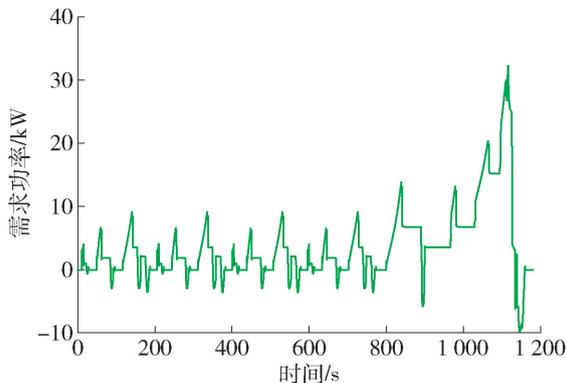


图11 车辆需求功率

Fig. 11 Vehicle demand power

通过观察图13、14可以看出,燃料电池输出电压在74.1~85.6V,电压波动范围较大,无法满足电机及母线电压的需求,且不利于能量的分配。在经

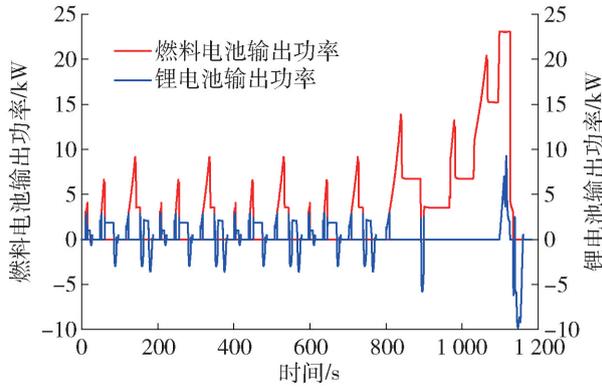


图12 燃料电池与锂离子动力电池的输出功率

Fig. 12 Output power of fuel cell and lithium-ion power battery

过DC/DC转换器转换后,电压稳定在359.4V左右。同时,DC/DC转换器输出电压可以跟随母线电压在允许范围之内变化。

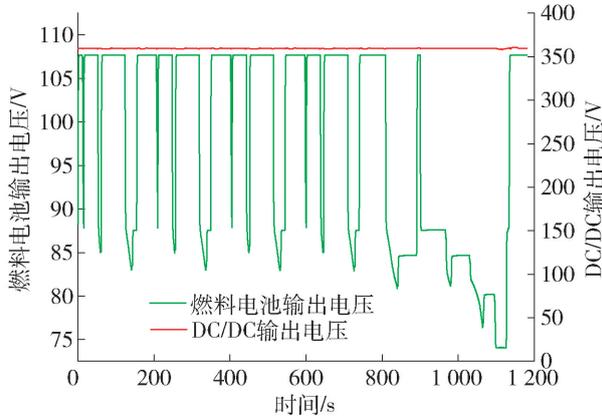


图13 燃料电池输出电压与DC/DC转换器输出电压

Fig. 13 Output voltage of fuel cell and DC/DC converter

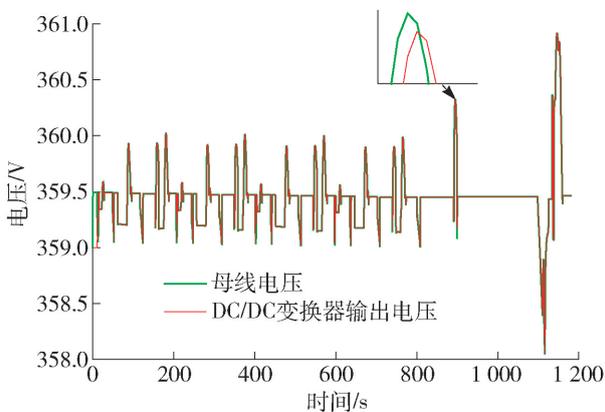


图14 DC/DC转换器输出电压与母线电压对比

Fig. 14 Comparison of output voltage between bus and DC/DC converter

对比图12、15可以看出,燃料电池与锂离子动力电池的输出电流均与各自输出功率变化趋势一致,实现通过DC/DC转换器稳定燃料电池输出电压并通过控制燃料电池输出电流实现功率分配。

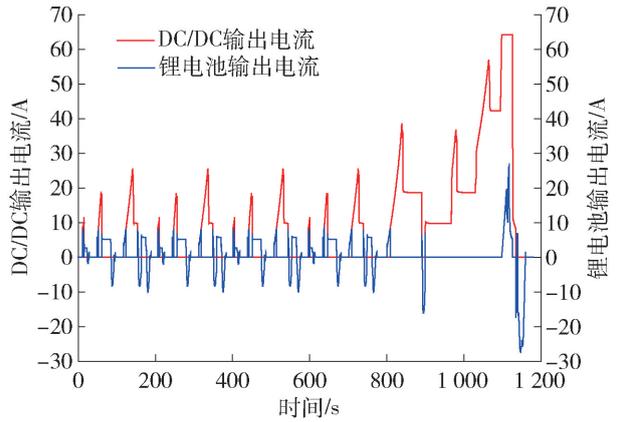


图15 DC/DC转换器输出电流与锂离子动力电池输出电流

Fig. 15 Output current of DC/DC converter and lithium-ion power battery

通过观察图16可以看出,锂离子动力电池SOC状态在市区工况由75%降至73%,NEDC完整工况SOC波动范围为75.0%~73.6%,波动范围不大,有助于保护锂离子动力电池,延长使用寿命。

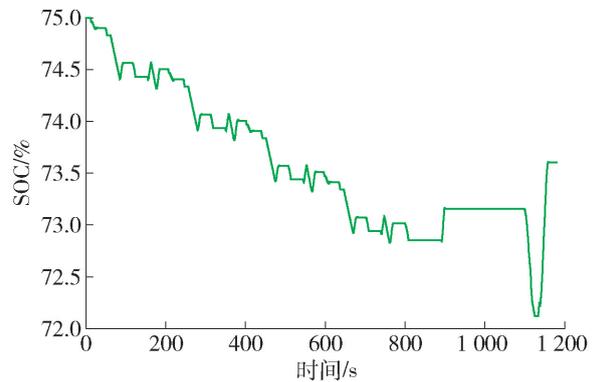


图16 锂离子动力电池SOC状态

Fig. 16 SOC state of lithium-ion powered battery

## 4 结论

本研究基于LMS AMESim模拟仿真软件构建了燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统的联合仿真平台,利用试验台架对燃料电池及锂离子动力电池进行的性能测试结果,进行混合动力仿真。在仿真平台中对此能量管理策略进行验证与分析,从仿真结果可知:

1) 在整车运行过程中,该能量管理策略及动力匹配方案可满足 NEDC 工况所需的加速、减速、怠速和匀速的速度要求。

2) 燃料电池取消了高电压工作区间,既降低了功率波动的区间,又保护了催化剂载体,有利于其寿命的延长。此外,使用该策略燃料电池始终在活化极化与欧姆极化区域工作,未进入浓差极化区域,从而保护电堆。在需求功率较大时,燃料电池可跟随需求功率。

3) DC/DC 变换器成功使燃料电池输出电压跟随母线电压,并通过分配电流的方式进行功率分配,降低能量控制的难度。

4) 利用该能源管理策略后,锂离子动力电池 SOC 波动较小,同时没有出现过充及过放现象,有利于延长锂离子动力电池寿命。

## 参考文献:

- [1] 陈维荣,李奇. 质子交换膜燃料电池系统发电技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-2.
- [2] 周苏,纪光霁,马天才,等. 车用质子交换膜燃料电池系统技术现状[J]. 汽车工程, 2009, 31(6): 1. ZHOU S, JI G J, MA T C, et al. The state of the art of PEMFC for automotive application [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(6): 1. (in Chinese)
- [3] 侯明,衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012, 18(1): 1-13. HOU M, YI B L. Progress and perspective of fuel cell technology [J]. Journal of Electrochemistry, 2012, 18(1): 1-13. (in Chinese)
- [4] KIM M, SOHN Y J, LEE W Y, et al. Fuzzy control based engine sizing optimization for a fuel cell/battery hybrid mini-bus[J]. Journal of Power Sources, 2008, 178(2): 706-710.
- [5] 田维民,陈维荣,彭飞,等. 燃料电池/锂离子动力电池混合动力控制系统设计[J]. 电源技术, 2013, 37(8): 1357-1360. TIAN W M, CHEN W R, PENG F, et al. Design of hybrid control system for fuel cell/lithium battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(8): 1357-1360. (in Chinese)
- [6] 夏发银. 车用燃料电池及其混合电源系统的研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2016. XIA F Y, Research on fuel cell and its hybrid power system Used on vehicles [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2016. (in Chinese)
- [7] 谢星,周苏,王廷宏,等. 基于 Cruise/Simulink 的车用燃料电池/蓄电池混合动力的能量管理策略仿真[J]. 汽车工程, 2010, 32(5): 373-378. XIE X, ZHOU S, WANG T H, et al. A simulation on energy management strategy for the power system of a fuel cell/battery HEV based on cruise/simulink [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(5): 373-378. (in Chinese)
- [8] MOKRANI Z, REKIOUA D, MEBARKI N, et al. Proposed energy management strategy in electric vehicle for recovering power excess produced by fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(30): 19556-19575.
- [9] 李奇,陈维荣,刘述奎,等. 燃料电池混合动力车辆多能源管理策略[J]. 电工技术学报, 2011(增刊1): 303-308. LI Q, CHEN W R, LIU S K, et al. Energy management strategy for hybrid vehicle based on fuel cell [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011 (Suppl 1): 303-308. (in Chinese)
- [10] 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 N. Design and energy management of fuel cell hybrid power system for tram [D]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [11] 陈昶阳. 基于 AMESim 与 ADAMS 机械手设计和仿真[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017. CHEN C Y. Design and simulation based on ADAMS and AMESim manipulator [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] MANN R F, AMPHLETT J C, HOOPER M A I, et al. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1/2): 173-180.
- [13] LARMINIE J, DICKS A L. Fuel cell systems explained [M]. [s.l.]: [s.n.], 2003.
- [14] 孙红,吴玉厚. 反应气体流量和背压对 PEM 燃料电池性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006(6): 1034-1037. SUN H, WU Y H. Effects of reactant flow rate and backpressure on the performance of PEM fuel cells [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2006(6): 1034-1037. (in Chinese)
- [15] 秦敬玉,毛宗强,徐景明,等. 过量空气系数对燃料电池发动机输出特性的影响[J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 379-381. QIN J Y, MAO Z Q, XU J M et al. A study on the characteristics of a fuel cell engine with different excess air ratio [J]. Automotive Engineering, 2004, 26(4): 379-381. (in Chinese)

- [16] HONG Z, LI Q, HAN Y, et al. An energy management strategy based on dynamic power factor for fuel cell/battery hybrid locomotive [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(6): 3261-3272.
- [17] PEREZ-PINAL F J, NUNEZ C, ALVAREZ R, et al. Power management strategies for a fuel cell/supercapacitor electric vehicle [C] // *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007. Piscataway: IEEE, 2008: 605-609.
- [18] ROEN L M, PAIK C H, JARVI T D. Electrocatalytic corrosion of carbon support in PEMFC cathodes [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2004, 7(1): A19-A22.
- [19] KIM M, JUNG N, EOM K S, et al. Effects of anode flooding on the performance degradation of polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 266(1): 332-340.
- [20] 衣宝廉. 燃料电池: 原理·技术·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [21] NASIRI A, RIMMALAPUDI V S, EMADI A, et al. Active control of a hybrid fuel cell-battery system [C] // *Power Electronics and Motion Control Conference*, 2004. Piscataway: IEEE, 2005: 491-496.
- [22] DUAN X, FU J, ZHANG Z, et al. Experimental study on the energy flow of a gasoline-powered vehicle under the NEDC of cold starting [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 1173-1186.
- [23] ZHU G, LIU J, FU J, et al. Experimental study on combustion and emission characteristics of turbocharged gasoline direct injection (GDI) engine under cold start new European driving cycle (NEDC) [J]. *Fuel*, 2018, 215: 2.

### 本刊相关文献链接:

- [1] 冯能莲, 陈龙科, 邹广才. 电动汽车用锂离子电池热特性试验研究 [J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(11): 1737-1742.  
FENG N L, CHEN L K, ZOU G C. Experimental study of thermal characteristics of li-ion battery in electric vehicles [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(11): 1737-1742. (in Chinese)
- [2] 叶欣, 赵耀华, 全贞花. 电动汽车锂离子电池散热加热设计 [J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(8): 1263-1267.  
YE X, ZHAO Y H, QUAN Z H. Design of cooling and heating of lithium-ion battery used in electric vehicle [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(8): 1263-1267. (in Chinese)
- [3] 纪常伟, 孙洁洁, 汪硕峰, 等. 32650 单体电芯和模组热安全性的实验研究 [J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(8): 780-786.  
JI C W, SUN J J, WANG S F, et al. Experimental study on thermal safety of 32650 cell and battery module [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2019, 45(8): 780-786. (in Chinese)
- [4] 徐军, 王禹, 贾志超, 等. 电动公交车锂电池远程监测系统设计与实现 [J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(9): 1327-1333.  
XU J, WANG Y, JIA Z C, et al. Design and implementation of remote monitoring system for electric bus lithium battery [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(9): 1327-1333.

(责任编辑 张 蕾)