

彭晓莉, 何锋, 范灿明, 等. 燃料电池城市客车动力系统设计与管理研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(7): 74-82.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.250711

燃料电池城市客车动力系统设计与管理研究

彭晓莉¹, 何 锋¹, 范灿明¹, 余必云², 刘定一²

(1 贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550025; 2 奇瑞万达贵州客车股份有限公司, 贵阳 550014)

摘 要: 针对燃料电池城市客车动力系统设计研究尚不成熟, 燃料电池频繁变载及工作效率较低的问题, 以动力性为指标, 结合实际工况特性和效率特性, 对动力系统进行参数匹配与选型, 并提出一种基于功率差值的双模糊控制能量管理方法, 以降低燃料电池变载率、扩充其运行范围。在不同工况下, 通过 AVL-Cruise/Matlab/Simulink 环境搭建的整车模型和控制策略进行联合仿真, 并与两种能量管理策略进行了比较。仿真结果表明: 燃料电池城市客车动力系统参数匹配合理, 动力性满足要求; 基于功率差值的双模糊控制策略在不同工况下都具有较好的适应性和燃料经济性, 降低燃料电池变载率更利于提升其寿命, 动力电池荷电状态(SOC)变化稳定在合理范围内。

关键词: 燃料电池城市客车; 动力系统设计; 能量管理; 双模糊控制

中图分类号: U469.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)07-0074-09

Research on power system design and energy management of fuel cell city buses

PENG Xiaoli¹, HE Feng¹, FAN Canming¹, YU Biyun², LIU Dingyi²

(1 School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2 Chery Wanda Guizhou Bus Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract: Aiming at the problems of immature research on fuel cell city bus power system design, frequent fuel cell loading and low efficiency, the power system parameters are matched and selected based on the dynamics as the index, and the actual working condition characteristics and efficiency characteristics are synthesized, and a double-fuzzy control energy management method based on the power difference is proposed in order to reduce the loading rate of the fuel cell and expand its operating range. The vehicle model and control strategy built in AVL-Cruise/Matlab/Simulink environment are jointly simulated under different operating conditions and compared with two energy management strategies. The simulation results show that: the power system parameters of the fuel cell city bus are reasonably matched, and the power meets the requirements; the double-fuzzy control strategy based on the power difference has better adaptability and fuel economy under different working conditions, and the reduction of the fuel cell variable load rate is more conducive to the enhancement of its lifespan, and the change of the state of charge (SOC) of the power cell is stabilized within a reasonable range.

Key words: fuel cell city bus; power system design; energy management; double fuzzy control

0 引 言

在众多清洁能源中, 氢能应用领域十分丰富, 在应用过程中零排放、无污染, 可持续再生, 是 21 世纪全球能源战略的主要发展方向^[1-4]。燃料电池作为新能源汽车最理想的电源, 在公共汽车、重型卡车等领域的应用取得了重大进展^[5-7]。纯燃料电池汽车无法持续响应高负荷需求功率、能量利用率不高; 纯

电动汽车续驶里程有限, 峰值功率难以满足车辆动力需求^[8-9]。针对上述问题, 以燃料电池提供主要动力, 动力电池作为辅助动力源的混合动力系统成为弥补上述缺陷最有效的途径之一, 在满足整车峰值功率需求的同时, 可对多余能量进行再生制动, 从而提供 stronger 的动力性和续航能力, 但动力系统关键部件参数的准确匹配及动力源间能量的合理分配也更加复杂^[10]。

基金项目: 贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2023]一般 400)。

作者简介: 彭晓莉(1997—), 女, 硕士, 主要研究方向: 燃料电池客车混合动力系统参数匹配与能量管理。

通信作者: 何 锋(1963—), 男, 学士, 教授, 主要研究方向: 新能源汽车。Email: fenghe 01@vip. Sina. com。

收稿日期: 2023-11-30

文献[11]对燃料电池/超级电容的混合驱动模式进行探索,并在此基础上研究了整车参数的匹配问题;文献[12]基于可用外接电源技术,从工况跟随、燃料电池输出功率等进行仿真研究,验证了混合驱动系统设计的合理性;文献[13]提出了一种状态机控制策略,在多动力源的模型上建立状态机控制策略,用来确定各能量源输出参考功率值;文献[14]针对燃料电池/超级电容汽车能量管理进行研究,提出了改进的功率跟随能量管理策略,实现了能量分配的最优化。但以上几种匹配方案及确定规则对汽车行驶工况的动态变化考虑不够充分,难以使车辆整体性能最佳。

文献[15]提出了一种基于两种类型的模糊规则逻辑的混合动力汽车能量管理策略,证明提出的控制策略适用于混动汽车;文献[16]在原模糊控制策略的基础上,对燃料电池输出功率变化率进行约束,控制效果优于有限状态机控制策略。基于优化的能量管理策略克服了研究者的主观“经验论”,通过建立价值函数最小的优化目标,并借助优化算法寻找最佳的控制方法,实现系统两个动力源的能量分配。文献[17]提出一种基于动态规划的全局优化能量管理策略,保证了能量分配全局最优性,但此类策略计算复杂度,无法对系统进行在线控制。文献[18]在模型预测控制算法框架下,提出基于长短期记忆的行驶周期预测的瞬时优化能量管理策略,延长了燃料电池寿命,显著降低了能耗,但也易出现局部最优的状况。随着研究的深入,基于学习的策略逐步成为能量管理领域的热点。文献[19]为提高燃料电池汽车经济性 & 维持动力电池能量平衡,提出了基于等效因子的 Q-learning 算法能量管理策略,其控制效果接近于动态规则控制策略,但该算法需要依赖大量的训练数据,计算复杂,难以在实车上应用。

综上所述,目前鲜有从燃料电池城市客车动力系统驱动模式、工作效率高低、燃料电池输出功率变化率大小等方面综合考虑整车的动力系统参数匹配和能量管理策略问题的研究。因此,在深入研究目前动力系统相关部件的性能和成本的基础上,对动力系统部件进行参数确定和选型。为综合考量能量管理系统的整体效率及燃料电池频繁启停、功率波动大,结合在线规则优化策略的优势,提出一种基于功率差值的双模糊控制的能量管理策略,以改善燃料电池城市客车的动态特性、延长电池使用寿命及降低等效氢耗。

1 燃料电池城市客车整车建模

1.1 整车动力系统构型方案

燃料电池城市客车动力系统结构如图 1 所示,由燃料电池和动力电池组成电-电混合动力系统,整车基本参数见表 1。动力系统主要包含燃料电池系统、功率变换器、动力源系统、驱动电机等。针对多动力源系统,主要部件参数的合理匹配是满足整车动力性的关键。

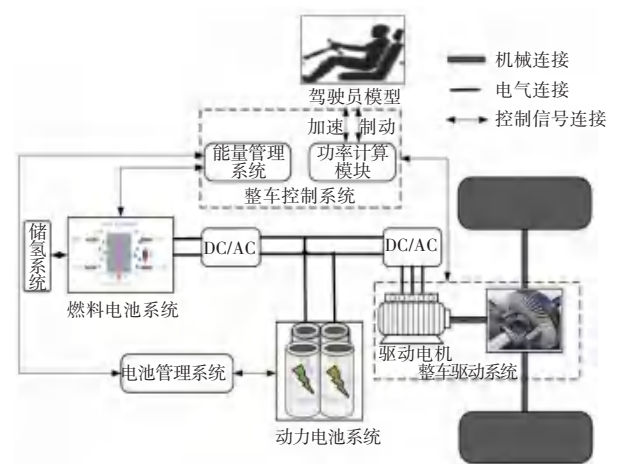


图 1 整车动力系统结构

Fig. 1 Vehicle power system structure

表 1 整车基本参数

Table 1 Basic parameters of the vehicle

结构参数	数值
整车整备质量 m /kg	11 000
车轮滚动半径 r /m	0.478
车轮滚动阻力系数 f	0.018
迎风面积 A /m ²	9.600
风阻系数 C	0.650
主减速比 i_0	6.140
转动惯量系数 δ	1.100

由《GB/T 39132-2020 燃料电池客车技术规范》和《GB/T28382-2012 纯电动乘用车技术条件》可知,其性能设计指标见表 2。

表 2 设计指标

Table 2 Design index

指标描述	参数要求
最高车速/(km·h ⁻¹)	≤69
最大爬坡度/%	≥12
0~50 km 加速时间/s	≤15

1.1.1 驱动电机选型与参数匹配

对比现有驱动电机不同特性,选用永磁同步电机作为燃料电池城市客车动力系统关键部件之一。驱动电机功率参数匹配通常依据整车最高车速、最大爬坡度及加速性能需求^[20]。燃料电池城市客车驱动电机的峰值功率必须满足 $P_{\max} \geq \max\{P_e, P_c, P_a\}$, 由下式联立可得峰值功率 $P_{\max}$ 和额定功率 P_e 。

$$P_e = \frac{1}{3\,600\eta_m} \left(mgfu_{\max} + \frac{CAu_{\max}^3}{21.15} \right) \tag{1}$$

$$P_c \geq \frac{u}{\eta_m} \left(\frac{mgf\cos\alpha}{3\,600} + \frac{CA}{76\,140}u^2 + \frac{mg\sin\alpha}{3\,600} \right) \tag{2}$$

$$P_a \geq \frac{\delta mu_m}{3\,600\eta_m} \left(\frac{du_m}{dt} - u_m \left(\left(1 - \frac{dt}{t_m} \right) \right)^x \right) + \frac{mgfu_m}{3\,600\eta_m} + \frac{CAu_m^3}{76\,140\eta_m} \tag{3}$$

$$P_e = \frac{P_{\max}}{\lambda} \tag{4}$$

式中: P_c 为整车满足最大爬坡度时所需功率, P_a 为整车满足加速性能时所需功率, x 为拟合系数, 一般取 0.5^[21], η_m 为整车传动系统效率, g 为汽车重力, u 为车速, α 为坡度角, u_m 为末速度, t_m 为城市客车加速的持续时间。

根据城市客车最大爬坡度和 0~50 km 加速时间, 可以由下式确定驱动电机的峰值扭矩 $T_{\max}$ 及额定转矩 T_e 。

$$\frac{T_m i_0 \eta_m}{r} = mgf\cos\alpha + \frac{CAu^2}{21.15} + mgsin\alpha + \delta m \frac{du}{dt} \tag{5}$$

$$T_e = \frac{T_{\max}}{\lambda} \tag{6}$$

依据汽车最高车速 $u_{\max} = 69\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及式(7)~(9) 可以确定驱动电机最大转速 $n_{\max}$ 。当扩大恒功率系数 $\beta = 2.5$ 时, 可求得额定转速 n_e 。

$$n_{\max} = \frac{i_0}{0.377r} u_{\max} \tag{7}$$

$$n_e = \beta n_{\max} \tag{8}$$

$$t = \int_0^{50} \frac{du}{a} = \frac{1}{3.6} \int_0^{50} \left[\delta m du \cdot \left(\frac{T_{\max} i_0 \eta_m}{r} - mgf - \frac{CAu^2}{21.15} \right)^{-1} \right] \tag{9}$$

驱动电机最终数值见表 3。

表 3 驱动电机参数

Table 3 Drive motor parameters	
参数	数值
额定电压/V	419
额定/最高转速 (r · min ⁻¹)	1 000/2 500
额定/峰值功 (kW)	100/150
额定/峰值转矩 (N · m)	955/2 500

1.1.2 燃料电池选型与参数匹配

选用质子交换膜燃料电池作为整车动力源之一。燃料电池应在大部分工况下单独驱动整车行驶, 并且能在整车需求功率较小时为动力电池充电。燃料电池的功率应满足下式:

$$P_{Fc} \eta_{DC} \geq \frac{1}{3\,600\eta_{mot}\eta_m} (mgfu + \frac{CAu^3}{21.15}) + P_A \tag{10}$$

式中: η_{DC} 为 DC/DC 工作效率, P_A 为辅助设备功率, η_{mot} 为电动机及其逆变器效率, P_{Fc} 为燃料电池输出功率。

在燃料电池发电过程中, 通过化学反应将化学能转换成电能, 根据氢燃料消耗量与电耗量之间的等效算法^[17], 将储能元件提供给驱动电机的能量带入进行换算, 可将燃料电池城市客车在循环工况下行驶的电耗值转换为等效氢耗值:

$$C_v = \int f_{H_2} dt + \frac{\int_0^t I_b U_B dt}{1.2 \times 10^8 \times \eta_{Fc}} \tag{11}$$

式中: f_{H_2} 为单位时间内的氢耗量, η_{Fc} 为燃料电池平均输出效率。

考虑到动力电池的辅助作用和燃料电池的能量转换效率, 最终确定燃料电池的峰值功率 $P_{Fc_{\max}}$ 为 75 kW, 其功率-效率关系曲线如图 2 所示。当燃料电池堆输出功率在 20 kW 附近时, 其工作效率最高, 故将此功率点暂定为本研究对象的最优功率 $P_{Fc_{\text{best}}}$ 。

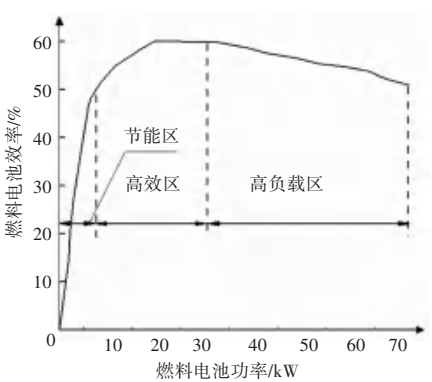


图 2 燃料电池特性

Fig. 2 Fuel cell characteristics

1.1.3 动力电池选型与参数匹配

选择磷酸铁锂电池作为辅助动力源,动力电池采用 R_{int} 等效电路模型,其输出功率 P_{Bat} 满足如下公式:

$$P_{Bat} = U_{oc} \cdot I_{Bat} - R \cdot I_{Bat}^2 \tag{12}$$

式中: U_{oc} 为动力电池开路电压, R 为动力电池内阻, I_{Bat} 为动力电池输出电流。

动力电池主要用于解决汽车起步阶段,补偿整车需求功率差值,由下式可得动力电池峰值功率 P_{Bat_max} 。

$$P_{Bat_max} = \frac{P_{max} - \eta_{DC} P_{Fc_max}}{\eta_{Bat_dis}} \tag{13}$$

当燃料电池城市客车由动力电池组单独供电,在常用车速 $u_c = 30 \text{ km/h}$ 等速行驶 $S = 50 \text{ km}$ 时,动力电池组所需能量和容量应满足下式:

$$W = P_{Bat} \cdot t = \frac{P_{Bat} \cdot S}{u_c} = \frac{U_{oc} \cdot C_{Bat} \cdot \Delta_{soc}}{1\,000} \tag{14}$$

式中: η_{Bat_dis} 为动力电池放电效率, Δ_{soc} 为动力电池有效放电容量, C_{Bat} 为动力电池容量, W 为动力电池能量。动力电池组最终参数见表 4。

表 4 动力电池参数

Table 4 Power battery parameters		
标称电压/标称容量/ (V · A · h ⁻¹)	能量密度/ (W · h · kg ⁻¹)	峰值功率/ kW
521.6/170	160	70

1.2 基于 AVL-Cruise 的整车模型搭建

根据整车动力性能指标,完成了燃料电池城市客车各部件的选型及参数匹配,并基于 AVL-Cruise 平台搭建整车仿真模型如图 3 所示。整车模型主要包括了车辆模块、驱动电机模块、动力电池及燃料电池模块和传动系等。

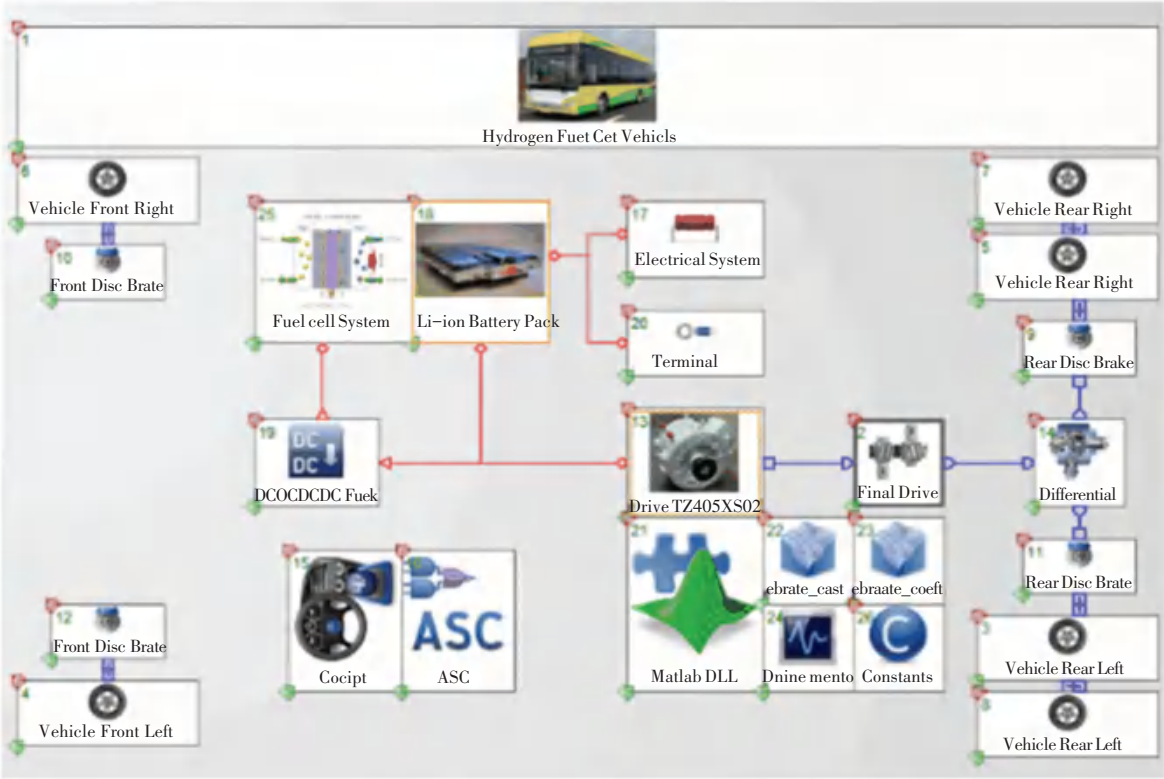


图 3 整车仿真模型

Fig. 3 Vehicle simulation model

2 能量管理策略设计

2.1 功率跟随能量管理策略

在基于确定性规则的能量管理策略中,功率跟随能量管理策略可以弥补开关控制模式能量管理策

略中存在的控制效果不佳,动力电池劳损快的缺陷,主要根据整车 P_{req} 和 SOC 值来决定燃料电池是否工作。当 $SOC \in [0, 0.2]$ 时,燃料电池独立输出,使 SOC 快速上升至规定工作范围内,在保证动力系统正常运行的同时,防止动力电池损坏;当 $SOC \in$

[0.2,0.6] 时,燃料电池输出功率除满足整车需求功率外,还需为动力电池充电,直至 SOC 值位于期望值 0.6 附近;当 $SOC \in [0.6,0.8]$ 时,若整车负荷较大,燃料电池提供主要需求功率,动力电池提供辅助功率;反之,动力电池独自输出,使 SOC 在期望值附近波动。 $SOC \in [0.8,1]$ 时,整车需求功率由动力电池独自提供,直至动力电池 SOC 值降至规定的工作范围。

2.2 传统模糊控制能量管理策略

模糊控制基于模糊集理论和模糊逻辑推理,将相关工程知识和控制经验转换成数学函数。通过综合被控对象各因素,确定其输入输出变量,限定变量工作范围,设定变量的模糊子集,并选择合适的隶属函数以确定控制器结构,进而实现模糊控制器的设计,其工作原理如图 4 所示。

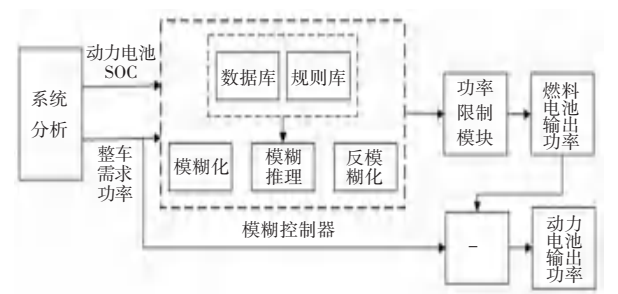


图 4 传统模糊控制器工作原理图
Fig. 4 Working principle diagram of traditional fuzzy controller

考虑到运算精度,结合燃料电池城市客车具体工况, P_{req} 不超过 60 kW, P_{req} 的模糊论域为 $[0,60]$,模糊子集为 {VD, D, M, ZM, G, VG}; SOC 的模糊论域为 $[0,1]$,模糊子集为 {L, Z, H}; P_{fc} 模糊论域为 $[5,60]$,模糊子集 {ND, NS, NM, ZO, PM, PS, PH}。针对燃料电池城市客车工作特性,制定模糊控制规则见表 5,对应模糊规则 map 如图 5 所示。

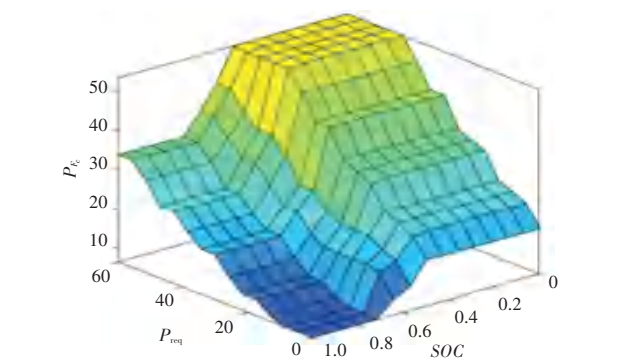


图 5 传统模糊控制器规则 map 图
Fig. 5 Map of traditional fuzzy controller rules

表 5 传统模糊控制规则表
Table 5 Table of traditional fuzzy control rules

SOC	P_{req}					
	VD	D	M	ZM	G	VG
L	NM	ZO	PS	PM	PH	PH
Z	NS	NM	NM	ZO	PS	PM
H	ND	ND	ND	NM	ZO	PS

2.3 改进模糊控制能量管理策略

传统的能量管理中,对于燃料电池城市客车进行多层次、多方面的研究分析较少,且传统的控制策略因其只有一个模糊控制器并执行双输入单输出操作,专家经验也略显缺乏,无法提供足够且有效的数据。针对上述问题,将传统模糊控制策略改为基于功率差值的双模糊控制能量管理策略,扩展燃料电池工作范围,提升整车动力性及经济性。将改进策略应用于城市客车的能量管理中,从燃料电池的启停频率、动力电池输出功率、SOC 变化区间、等效氢耗量及燃料电池效率部分进行仿真验证。

由图 2 可知, $P_{Fc_best} = 20$ kW。基于功率差值的双模糊控制策略如图 6 所示,将模糊控制器 1 的输入变量改为需求功率与最优功率的差值 ΔP_1 ,输出变量改为燃料电池实际输出功率与最大功率的比例 m_1 ,且 $m_1 \in [0,1]$ 。同时,增加一个模糊控制器 2,输入变量的论域 $P_{req} \in (-60,60)$ kW,增加制动能量回收的范围,作为对原有模糊控制器细节的一大补充。同样,其输入变量改为需求功率与最优功率的差值 ΔP_2 ,SOC₁、SOC₂ 及 m_2 论域范围均为 $[0,1]$ 。

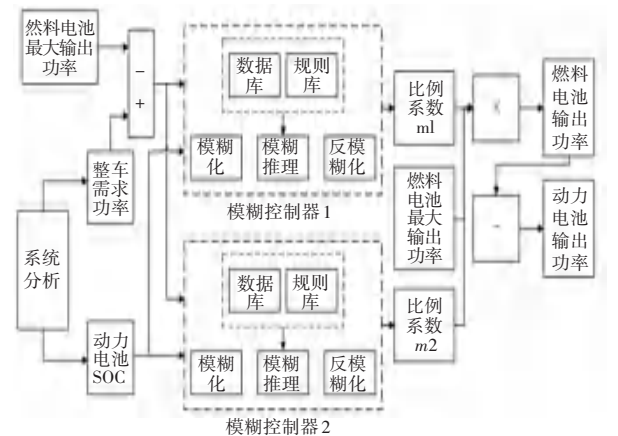


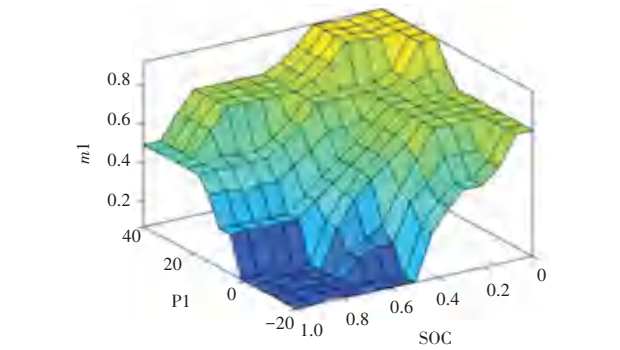
图 6 改进模糊控制策略图
Fig. 6 Improved fuzzy control strategy diagram

根据计算和控制分析,可得到论域 1 即 ΔP_1 为 $[-20,40]$,论域 2 即 ΔP_2 为 $[-80,40]$,对应模糊子集均为 {VD, D, M, ZM, G, VG};输入变量 SOC 对应

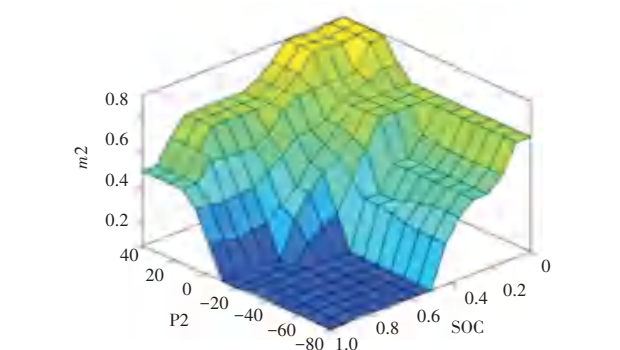
模糊子集均为 {VL, L, Z, H, VH}; 输出变量模糊子集改为 {NS, NM, ZO, PM, PS}。为了综合动力系统关键部件响应速度与范围的优势, 增加其控制的多样性, 模糊控制隶属度函数选用三角函数与梯形函数相结合, 对应双模糊控制器模糊规则不变 (见表 6), 模糊规则 map 如图 7(a)、(b) 所示。

表 6 改进模糊控制规则表

Table 6 Improved fuzzy control rules						
SOC	ΔP					
	VD	D	M	ZM	G	VG
VL	PM	PM	ZO	PM	PS	PS
L	ZO	PM	PM	PM	PM	PS
Z	NS	NM	ZO	ZO	PM	PM
H	NS	NS	NS	NM	ZO	PM
VH	NS	NS	NS	NM	ZO	ZO



(a) ΔP_1 模糊规则 map 图



(b) ΔP_2 模糊规则 map 图

图 7 改进模糊控制器规则 map 图

Fig. 7 Map of improved fuzzy controller rules

3 燃料电池城市客车仿真分析

3.1 整车动力性仿真分析

为验证该燃料电池城市客车是否符合表 2 的设计指标, 在 AVL-Cruise 软件搭建的整车模型的基础上建立稳态行驶工况、加速工况、从静止满负荷加速至最大车速 3 个仿真任务进行验证。

采用简单计算模式对最高车速进行仿真计算, 客车行驶的最高车速可满足最高车速 69 km/h 的技术指标。如图 8 所示, 燃料电池城市客车最大爬坡度为 15.9%, 满足爬坡度不低 12% 的要求, 随着车速逐渐增大, 爬坡性能逐渐减弱。为验证整车加速性能是否满足要求, 对燃料电池城市客车在负载状态下从静止加速至 50 km/h 进行仿真验证, 如图 9 所示, 所需加速时间为 17.5 s, 满足城市客车加速性能需求。

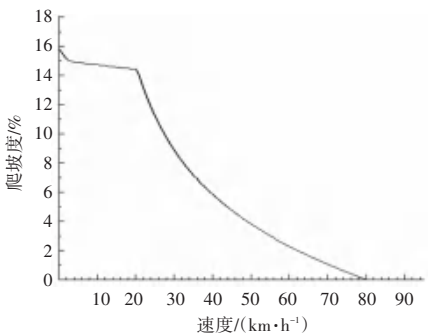


图 8 速度-爬坡度关系曲线

Fig. 8 Relation curve of velocity and gradient

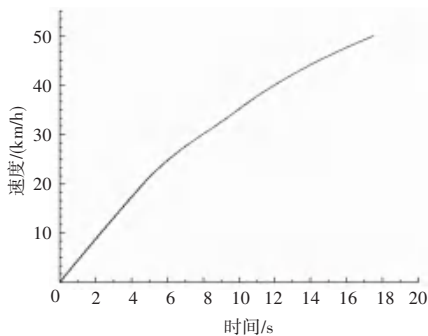


图 9 时间-速度关系曲线

Fig. 9 Time-velocity relationship curve

3.2 能量管理策略仿真分析

选用两种能量策略与改进后的控制策略进行对比, 设置仿真任务在每种工况下循环两次, SOC 初始值为 0.6。分别从 3 种能量管理策略下, 对工况跟随、燃料电池输出功率、动力电池输出功率、SOC、燃料电池效率和整车氢耗量的变化情况展开分析, 验证控制策略的有效性。

结合燃料电池城市客车实际运行情况, 选择中国典型城市客车工况 (CCBC) 及美国曼哈顿工况 (Manhattan Bus) 建立仿真任务, 基于 AVL-Cruise/Simulink 进行联合仿真分析。如图 10(a)、(b) 所示, 在 3 种能量管理策略下, 实际车速与期望车速间的误差在允许范围内, 工况跟随情况良好, 表明整车动力性满足路况需求, 能量管理策略有效。

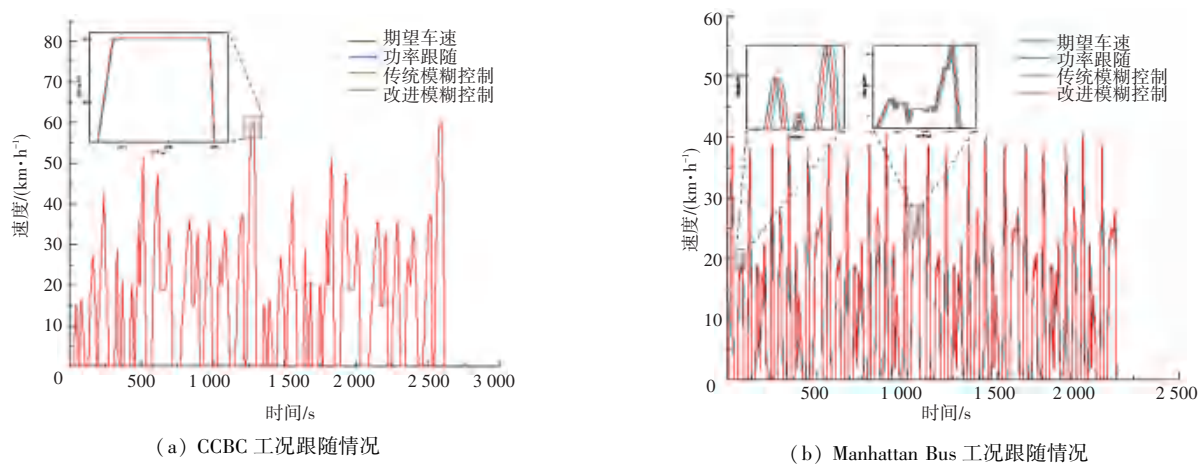


图 10 整车在不同工况下的速度跟随情况

Fig. 10 Speed tracking of the entire vehicle under different operating conditions

图 11 是两种工况在不同控制策略下燃料电池及动力电池输出功率曲线。由图 11(a) ~ (d) 可知, 在相同工况下, 基于功率跟随的控制策略输出功率波动范围最小, 传统模糊控制下输出功率波动范围最大。改进控制策略的输出功率适中, 但其能够更

合理地对动力源进行合理分配, 虽平均输出功率较高, 但多余功率被转化成动力电池电量储存起来, 表现为动力电池 SOC 上升, 并使燃料电池输出功率维持在高效率区域。

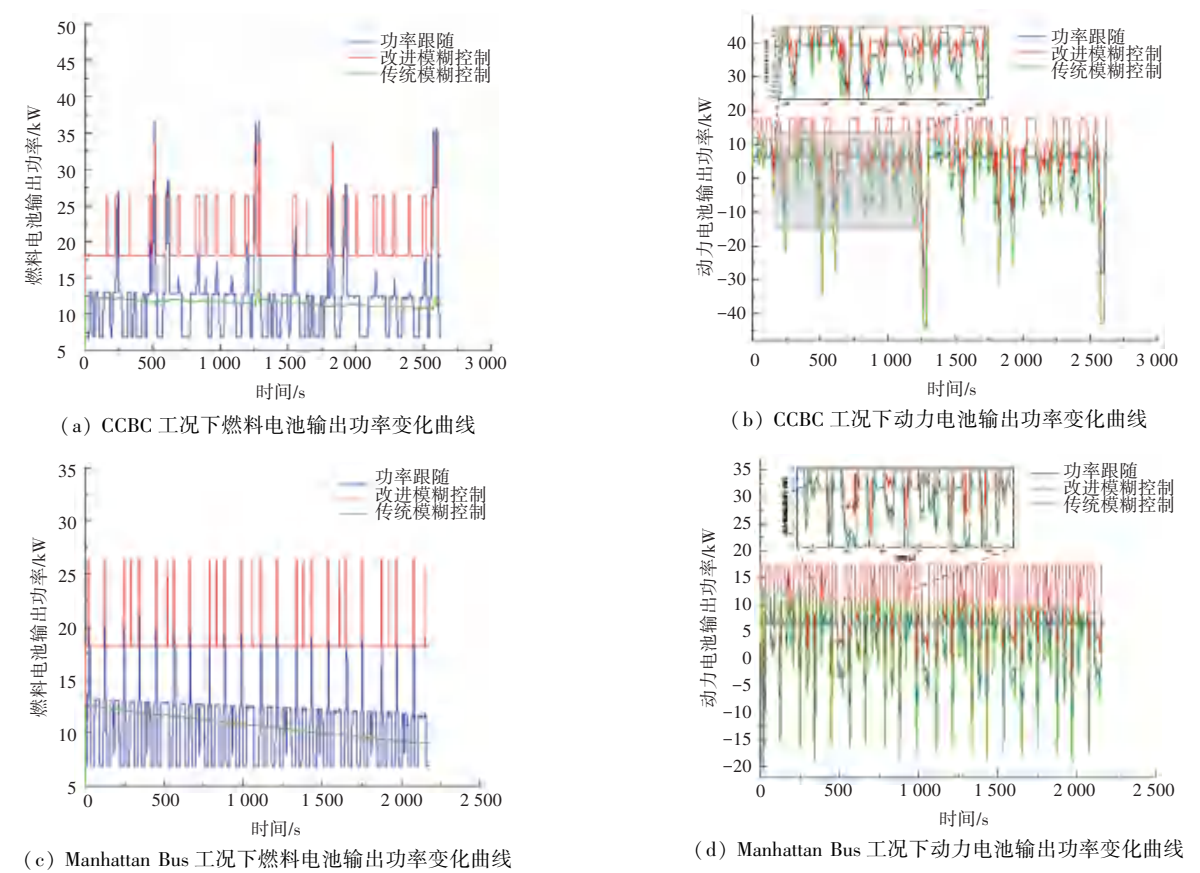


图 11 燃料电池和动力电池功率变化曲线

Fig. 11 Power change curve of fuel cell and power battery

表 7 给出了不同控制策略百公里等效耗氢量对比结果。其中, CCBC、Manhattan Bus 下基于功率差

值的双模糊控制策略的等效耗氢量均低于其他两种策略。与功率跟随策略相比, 两种工况的耗氢量分

别减少了 14.70% 和 17.57%, 同时能够实现比传统模糊控制策略降低了 17.45% 和 14.28%, 说明基于功率差值的双模糊控制策略具有较好的经济性。

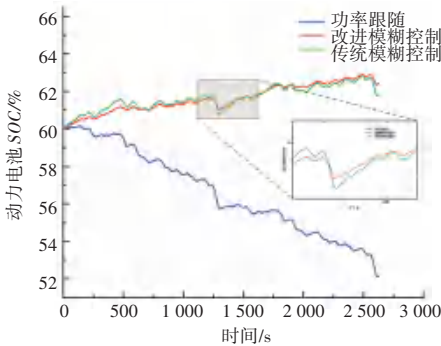
表 7 两种工况下的等效氢耗量

Table 7 Equivalent hydrogen consumption under two working conditions

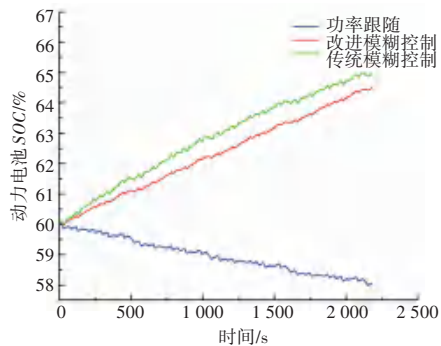
循环工况	功率跟随	模糊控制	改进控制
CCBC	3.719	3.589	3.069
Manhattan Bus	4.706	4.894	4.034

注: 等效氢耗量单位为 kg/100 km

图 12 为在不同工况中不同策略下 SOC 变化曲线。如图 12(a) 所示, 在 CCBC 工况下, 改进控制策略下 SOC 变化都相对平缓, 传统模糊控制策略与其接近, 在期望值附近来回波动。但功率跟随控制策略中 SOC 变化幅度较大, 不利于提升动力电池寿命。图 12(b) 为 Manhattan Bus 工况下 SOC 变化结果, 改进控制策略与传统模糊控制策略 SOC 变化均呈上升的趋势, 前者变化范围更小, 随着仿真的运行, 功率跟随策略随时间的累计呈缓慢下降的趋势。



(a) CCBC 工况下动力电池 SOC 变化曲线



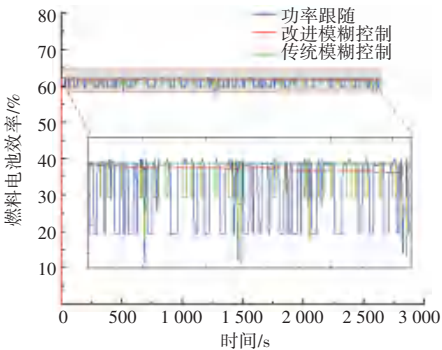
(b) Manhattan Bus 工况下动力电池 SOC 变化曲线

图 12 动力电池 SOC 变化曲线

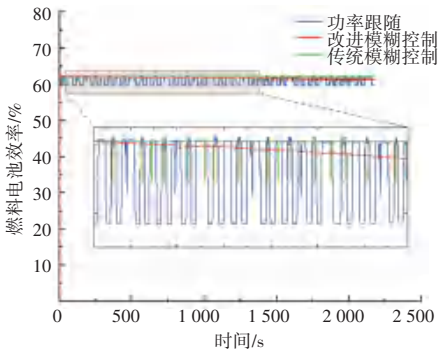
Fig. 12 SOC change curve of power battery

图 13 为不同能量管理策略下燃料电池效率变化曲线。从图 13(a) 可知, 在 CCBC 工况下, 功率跟随控制策略中燃料电池效率为 60.33%, 变化幅度为 3.60%; 传统模糊控制策略中燃料电池效率为

60.82%, 变化幅度为 2.79%; 基于功率差值的双模糊控制策略下燃料电池效率为 61.99%, 变化幅度为 0.18%。从图 13(b) 可知, 在 Manhattan Bus 工况下, 功率跟随控制策略中燃料电池效率及变化幅度与 CCBC 工况相同; 传统模糊控制策略中燃料电池效率为 60.72%, 变化幅度为 2.83%; 基于功率差值的双模糊控制策略下燃料电池效率 62% 附近小范围波动。



(a) CCBC 工况下燃料电池效率变化曲线



(b) Manhattan Bus 工况下燃料电池效率变化曲线

图 13 燃料电池效率变化曲线

Fig. 13 Change curve of fuel cell efficiency

综上, 改进后的模糊控制能量管理策略下, 燃料电池工作效率更高, 提升整车经济性的同时更有利于延长燃料电池使用寿命。

4 结束语

本文以某燃料电池城市客车为研究对象, 为满足其在频繁启停、加速和爬坡等运行工况对整车动力性的需求, 对动力系统进行了构型改进及匹配计算, 引入燃料电池最佳输出功率的概念, 设计了不同工况下基于功率差的复合模糊控制能量管理策略, 合理分配了复合动力源间的输出功率, 提升了燃料电池工作效率。

开展关于整车动力系统的设计及能量管理策略的研究, 可有效提升其动力性, 降低整车等效氢耗量, 但整车仿真模型与实车模型仍存在一定偏差, 在

实验条件允许情况下,可将动力系统优化设计及能量管理策略方案应用至实车中或加入硬件在环实验,验证设计方案的可行性。

参考文献

[1] HAN J, WANG J, HE Z, et al. Hydrogenpowered smart grid resilience[J]. *Energy Conversion and Economics*, 2023, 4(2): 89104.

[2] 刘畅,林汉辰,史陈芳达,等. 中国氢燃料电池汽车市场发展现状 & 展望[J]. *南方能源建设*,2024,11(2):162-171.

[3] KÖK C, MERT S O. Energetic and exergetic performance investigation of different topologies for hybrid fuel cell vehicles [J]. *International Journal of Energy Research*, 2023 (1): 7165382.

[4] AHUJA A, WAGHOLE D R, RAMDASI S S. Optimal control strategy for PEM electric vehicle using Matlab Simulink [J]. *Journal of Electrical Electronics Engineering*, 2023, 69(3): 101-105.

[5] 刘勇刚,陈峥,张元建. 新能源汽车能量管理与优化控制[M]. 重庆:重庆大学出版社,2021.

[6] 李国伟. 氢燃料电池跨座式单轨车辆动力传动系统优化匹配研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2023.

[7] 彭晓莉. 燃料电池城市客车动力系统优化设计与能量管理研究[D]. 贵阳:贵州大学,2025.

[8] GAO D, JIN Z, LU Q. Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus [J]. *Journal of Power Sources*, 2008,185(1): 311-317.

[9] 王庆年,曾小华,初亮,等. 新能源汽车关键技术[M]. 北京:化学工业出版社,2017:12-37.

[10] HEMI H, GHOUILI J, CHERITI A. A real time fuzzy logic

power management strategy for a fuel cell vehicle [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 80(4):63-70.

[11] 仇斌,陈全世,黄勇. 采用超级电容的燃料电池城市客车参数匹配和性能仿真[J]. *汽车工程*,2007,29(1):41-45.

[12] 陈树勇,仇斌,陈全世,等. 电-电混合燃料电池城市客车动力系统建模与仿真[J]. *系统仿真学报*,2008,20(14):6.

[13] LI Q, YANG H, HAN Y, et al. A state machine strategy based on droop control for an energy management system of PEMFC-battery-supercapacitor hybrid tramSway [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(36): 16148-16159.

[14] 孙闫,夏长高,尹必峰,等. 燃料电池电动汽车的能量管理[J]. *吉林大学学报(工学版)*,2022,52(9):2130-2138.

[15] SOLANO M J, MULOT J, HAREL F, et al. Experimental validation of a type - 2 fuzzy logic controller for energy management in hybrid electrical vehicles [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(7): 1772-1779.

[16] 赵国强,田韶鹏,肖哲,等. 基于模糊控制的燃料电池电动轻卡能量管理策略研究[J]. *汽车工程学报*,2024,14(4):723-732.

[17] 王志福,徐崧,罗崴. 基于动态规划的燃料电池车能量管理策略研究[J]. *太阳能学报*,2023,44(10):550-556.

[18] CHEN H, XIONG R, LIN C, et al. Model predictive control based real-time energy management for hybrid energy storage system [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 7(4): 862-874.

[19] 尹燕莉,张鑫新,潘小亮,等. 基于等效因子的 Q 学习燃料电池汽车能量管理策略[J]. *汽车安全与节能学报*,2022,13(4): 785-795.

[20] 余志生. 汽车理论[M]. 第 6 版. 北京:机械工业出版社,2018.

[21] 张方强. 增程式电动汽车动力系统参数匹配与仿真优化研究 [D]. 杭州:浙江大学,2017.