

燃料电池客车动力系统建模与能量管理策略研究

王哲^{1,2}, 谢怡^{1,2}, 孙维³, 臧鹏飞^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804;
3. 上海汽车集团股份有限公司 前瞻技术研究部, 上海 201804)

摘要: 基于 ADVISOR 进行二次开发, 建立了燃料电池客车整车前向仿真模型. 基于模糊控制方法制定了能量管理策略; 为提升燃料电池耐久性, 对模糊控制进行改进, 提出改进后的模糊控制能量管理策略. 中国典型城市工况下的仿真结果表明, 改进后的模糊控制能量管理策略在车辆经济性和燃料电池耐久性方面均优于功率跟随式能量管理策略.

关键词: 燃料电池客车; 燃料电池耐久性; 模糊控制; 能量管理策略

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

Modeling and Energy Management Strategy Research of Fuel Cell Bus

WANG Zhe^{1,2}, XIE Yi^{1,2}, SUN Wei³, ZANG Pengfei^{1,2}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Research & Advanced Technology Department, SAIC Motor, Shanghai 201804, China)

Abstract: A forward simulation model of a fuel cell bus was established based on ADVISOR. A fuzzy energy management strategy was also formulated. In order to improve the fuel cell durability, an improved fuzzy control energy management strategy was proposed. The simulation results under the typical urban operating conditions in China show that the proposed energy management strategy is better than the traditional power-following energy management strategy in terms of vehicle economy and fuel cell durability.

Key words: fuel cell bus; durability of fuel cell; fuzzy control; energy management strategy

燃料电池作为新能源汽车的一种能量源, 通过氢气和氧气在催化剂的作用下发生化学反应产生电能, 以此驱动电机, 由电机带动整车运行. 其反应产

物只有水, 真正实现了零排放, 且拥有能量转化率高, 运行平稳等优点, 被认为是极具潜力的新能源汽车技术方案. 但是燃料电池实现产业化当下仍面临诸多障碍, 耐久性问题是阻碍燃料电池汽车商业化的重要原因之一^[1]. 燃料电池在静载工况下寿命较高, 但在复杂的车载工况下, 燃料电池的寿命急剧衰减. 因此对于燃料电池客车动力系统, 制定合理有效的控制策略具有重要意义. 合理的动力系统控制策略不仅能提高动力系统的工作效率, 提升车辆经济性, 还能有效管理燃料电池的工作条件, 避开不利工况或减少不利工况的存在时间, 提升车用燃料电池使用寿命.

目前, 燃料电池汽车动力系统研究主要包括动力系统建模与能量管理策略两方面. 对于动力系统建模, 大多研究基于 ADVISOR 后向仿真模型进行开发, 以车辆运行工况作为输入, 沿动力传递路线反向计算动力需求, 向电机、电池等动力系统提出需求. 前向仿真模型不同于后向仿真模型, 前向仿真模型以驾驶员的动力需求作为输入, 向电机、电池等动力系统提出需求, 沿动力系统传递路线计算车轮的实际车速, 因此前向仿真模型更接近于实际车辆驾驶习惯, 便于应用于整车控制器的开发和测试^[2]. 对于能量管理策略的研究, 多以优化经济性为研究目标^[3], 少有结合燃料电池耐久性进行研究的能量管理策略.

本文对燃料电池客车动力系统进行研究. 首先基于 ADVISOR 进行二次开发, 建立了燃料电池客车整车前向仿真模型, 包括燃料电池模型、动力电池模型等. 其次, 分析了对燃料电池寿命不利的四种车载工况, 采用模糊控制方法, 以保证车辆的动力性、维持电池合理的荷电状态、提高车辆的经济性和燃料电池的耐久性为研究目标, 对燃料电池动力系统

的能量管理策略进行研究. 并在 Matlab/Simulink 软件环境下进行仿真测试, 对能量管理策略进行验证.

1 燃料电池客车动力系统建模与仿真

燃料电池客车为电-电混合客车, 关键零部件包括燃料电池、动力电池、电机及其控制器、主减速器等, 其动力系统结构如图 1 所示.

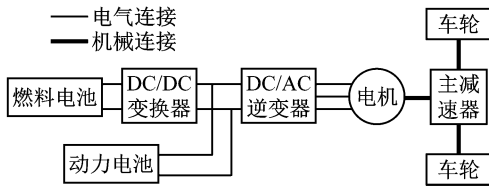


图 1 燃料电池客车动力系统结构

Fig.1 Powertrain system structure of fuel cell bus

1.1 整车前向仿真模型

本文基于 ADVISOR 的燃料电池动力系统模型, 进行了二次开发, 获得整车正向仿真模型. ADVISOR(advanced vehicle simulator)是由美国可再生能源实验室 NREL (National Renewable Energy Laboratory) 在 Matlab/Simulink 软件环境下开发的高级车辆仿真软件. 本文的整车仿真模型主要包括驾驶员模块、踏板解析模块、电机及其控制器、电气负载、主减速器模块、轮轴模块、车辆模块、电源总线、能量管理模块、燃料电池模块、动力电池模块.

1.1.1 燃料电池模型

燃料电池模型的输入为负载电流 I_{fc} , 模型输出为燃料电池实际输出功率 P_{fc} , 燃料电池效率 η_{fc} .

燃料电池输出电压由理想电动势和极化过电势决定, 主要包括: 活化过电势、欧姆过电势、浓差过电势^[4]. 故燃料电池单体输出电压 V_{cell} 表示为

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (1)$$

式中: E_{Nernst} 为理想电动势; V_{act} 为活化过电势; V_{ohm} 为欧姆过电势; V_{con} 为浓差过电势.

结合 Ballard 某款燃料电池极化特性曲线, 对本文建立的燃料电池单体电压模型进行验证, 如图 2 所示, 仿真结果与实际曲线拟合效果较好, 说明模型的有效性.

PEMFC 中存在双层电荷层现象, 当负载电流发生改变时, 在电子聚集的电极表面与氢离子聚集的电解质表面之间会产生一个缓慢变化的电压. 通常用图 3 所示的等效电路来描述此动态特性^[5]. 图中:

R_a 为活化过电势和浓差过电势的等效电阻, 称为极化电阻; R_{ohm} 为欧姆过电势的等效电阻, 称为欧姆电阻; C 为并联在 R_a 上的等效电容.

燃料电池的动态特性微分方程为

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{I_{fc}}{C} - \frac{V_d}{\tau} \quad (2)$$

式中: V_d 为 R_a 两端电压, 亦称为极化过电势.

τ 为时间常数, 可表示为

$$\tau = CR_a \quad (3)$$

燃料电池实际单体输出电压表示为

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{ohm} - V_d \quad (4)$$

燃料电池堆输出总电压及输出功率为

$$V_{stack} = nV_{cell} \quad (5)$$

$$P_{fc} = I_{fc}V_{stack} \quad (6)$$

式中, n 为燃料电池堆所含单体数量.

图 4 为 Ballard 某款燃料电池功率-效率曲线. 由图可知, 燃料电池输出功率为 10~30 kW 时, 燃料

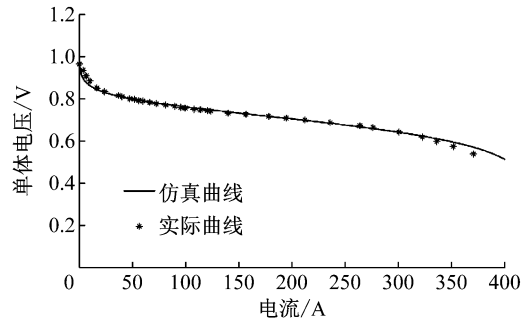


图 2 燃料电池极化特性曲线

Fig.2 Polarization curve of fuel cell

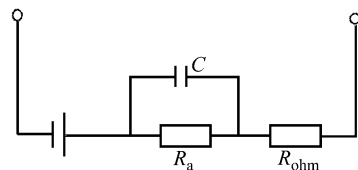


图 3 PEMFC 等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of PEMFC

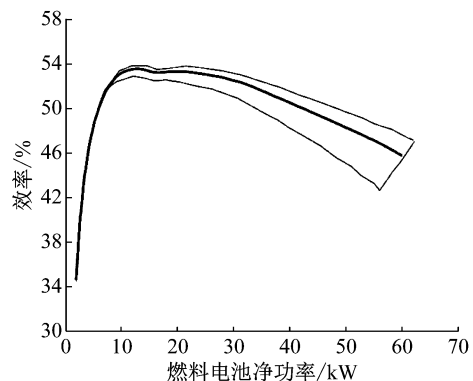


图 4 燃料电池功率-效率曲线

Fig.4 Power-efficiency curves of fuel cell

电池工作效率较高,因此能量管理策略应尽量使燃料电池工作在该区间.

1.1.2 动力电池模型

动力电池模型采用实验建模的方法,根据选用的电池实验参数对模型的参数进行调整.模型参数包括:电池充放电内阻、电池开路电压、电池容量、电池最低工作电压和电池最高工作电压.

本文采用 Rint 等效电路模型,如图 5 所示.

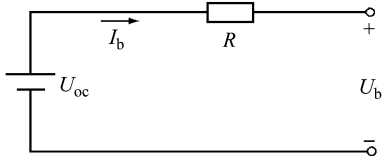


图 5 Rint 等效电路模型示意图

Fig.5 Rint equivalent circuit model

由图 5 的等效电路计算电池的输出功率 P_b 与电流 I_b 的关系为

$$P_b = U_{oc}I_b - RI_b^2 \quad (7)$$

式中: U_{oc} 为动力电池开路电压(V); R 为电池内阻(Ω); I_b 为电池输出电流(A); P_b 为电池输出功率(W).

电池的母线电压 U_b 的计算如下:

$$U_b = U_{oc} - RI_b \quad (8)$$

电池荷电状态(State of Charge, SOC)作为电池的重要参数,每一时刻下的 SOC 值 $x_{soc}(t)$ 计算如下:

$$x_{soc}(t) = x_{soc}(0) - \frac{\int_0^t I_b dt}{3\ 600Q} \quad (9)$$

式中: t 表示充放电时间(s); $x_{soc}(t)$ 表示 t 时刻的电池 SOC 值; $x_{soc}(0)$ 表示初始时刻的电池 SOC 值; Q 表示电池容量(Ah).

动力电池的效率 η_b 分别为充电效率和放电效率,计算如下:

$$\eta_b = \begin{cases} \frac{P_b}{P_b + I_b^2 R} & I_b \geq 0 \\ \frac{P_b - I_b^2 R}{P_b} & I_b < 0 \end{cases} \quad (10)$$

本文采用实验建模法,电池内阻 R 和电池开路电压值 U_{oc} 由当前电池 SOC 确定,电池开路电压和充放电内阻随电池 SOC 的变化如图 6 所示.

由图 6 知,当动力电池 SOC 处于 0.2~0.8 区间时,电池充放电内阻小,工作效率高,因此能量管理策略应尽量保证动力电池 SOC 维持在 0.2~0.8.

1.1.3 氢耗模型计算

由燃料电池的化学反应机理可得,燃料电池单

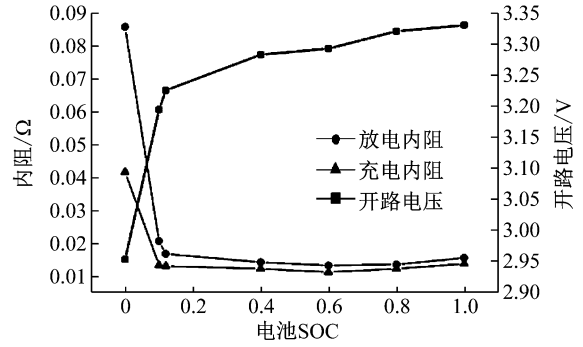


图 6 电池单体相关参数

Fig.6 Parameters of battery cell

位时间的耗氢量与燃料电池的输出电流唯一相关,计算如下:

$$f_{H_2} = \frac{S_{H_2} M_{H_2} N_{fc} I_{fc}}{2\ 000F} \quad (11)$$

式中: f_{H_2} 为单位时间的耗氢量($kg \cdot s^{-1}$); S_{H_2} 为燃料电池的氢气过量系数,取 $S_{H_2} = 1.2$; M_{H_2} 为氢气的摩尔质量, $2\ g \cdot mol^{-1}$; N_{fc} 为燃料电池的单体数量; F 为法拉第常数, $96\ 485\ C \cdot mol^{-1}$.

电-电混合燃料电池客车的经济性需综合考虑燃料电池和动力电池.采用等效百公里氢耗作为经济性评价指标,将动力电池消耗电量等效转换为氢气量^[6]如下:

$$\delta_{H_2} = \frac{\int_0^t I_b U_b dt}{1.2 \times 10^8 \times \eta_{fc}} \quad (12)$$

式中: η_{fc} 为燃料电池平均工作效率; δ_{H_2} 为蓄电池的等效耗氢量(kg); t 表示仿真时间(s)

等效百公里耗氢量的计算如下:

$$C_{H_2} = \int_0^t f_{H_2} dt \quad (13)$$

$$m_{H_2} = \frac{\delta_{H_2} + C_{H_2}}{S} \times 100 \quad (14)$$

m_{H_2} 为等效百公里耗氢量(kg); C_{H_2} 为整个循环工况的氢气消耗量(kg); S 为整个循环工况的行驶距离(km).

1.2 整车及动力系统参数

用于研究的燃料电池客车动力性指标及各零部件参数如表 1 和表 2 所示.

表 1 整车动力性指标

Tab.1 Vehicle dynamic performance index	
参数	数值
最高车速 $v_{max}/\ km \cdot h^{-1}$	85
最大爬坡度 $\alpha/\%$	16
0~50 $km \cdot h^{-1}$ 加速时间 t_a/s	25

ADVISOR(advanced vehicle simulator) 是由

表 2 动力系统参数

Tab.2 Parameters of powertrain system

参数名称	参数	数值
整车参数	外形尺寸 (长×宽×高)/mm	12 000×2 550×3 800
	整备质量 m_0 /kg	14 000
	总质量 m /kg	18 400
	风阻系数 C_D	0.65
	迎风面积 A_f /m ²	7.00
轮胎	车轮半径 r	275/70R22.5(0.478 m)
	滚阻系数 f	0.015
传动系统	主减速器传动比 i_0	7.72
	传动系效率 η	92%
蓄电池	电池容量/Ah	120
	最大充放电倍率/C	3
	电池电压/V	520
燃料电池	峰值输出功率/kW	60
	怠速功率/kW	3.3
	工作电压/V	220~420
	额定输出电流/A	288
驱动电机	额定/峰值功率/kW	110/220
	额定/最高转速/r·min ⁻¹	1 000/3 700
	额定/最大扭矩/N·m	1 050/2 100

美国可再生能源实验室在 Matlab/Simulink 软件环境下开发出来的先进汽车仿真软件. 本文基于 ADVISOR 中的燃料电池汽车进行二次开发, 建立了燃料电池客车前向仿真模型. 图 7 所示为燃料电池客车前向仿真模型计算流程图.

2 能量管理策略

2.1 燃料电池耐久性的影响因素

大量研究表明, 车辆的运行工况对燃料电池使用寿命有重要影响^[7-8]. 影响燃料电池寿命的 4 种工况如下:

(1) 大幅变载工况

大幅变载工况会导致燃料电池单体电位在 0.5~0.9 V 之间频繁变化, 加速内部催化剂和碳载体的衰减, 从而加速燃料电池寿命衰减.

(2) 启停工况

燃料电池启动或停机瞬间, 在电堆内部阳极侧

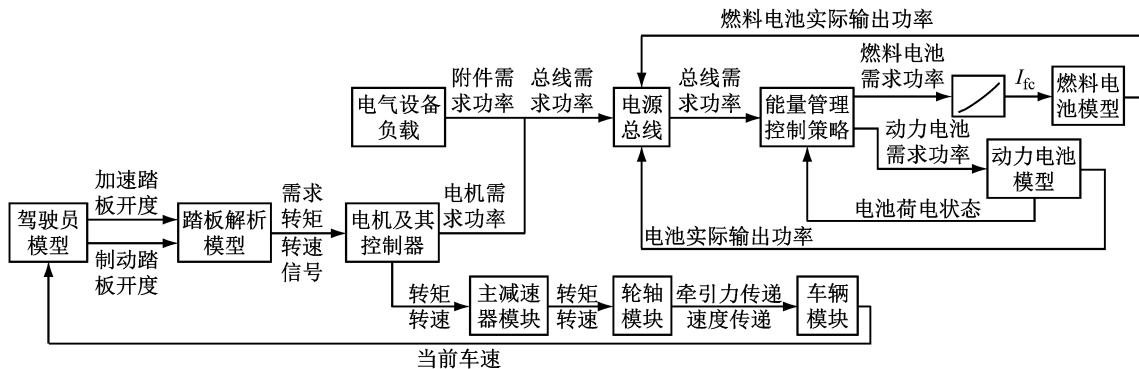


图 7 燃料电池客车前向仿真计算流程

Fig.7 Fuel cell bus forward simulation model

容易形成氢空界面, 导致阴极产生局部高电位, 引起碳载体的氧化, 从而加速燃料电池寿命衰减.

(3) 怠速工况

怠速工况下, 反应生成的水较少, 反应气体分压较大, 使燃料电池的膜电极难以保持良好的湿度, 加速质子交换膜的腐蚀.

(4) 过载工况

燃料电池过载运行时, 燃料电池以大电流, 低电压输出. 反应生成的水量加大, 水管理不当易造成燃料电池水淹, 引起碳载体的腐蚀.

综上所述, 在能量管理控制策略的制定过程中, 要尽量减少大幅变载、怠速、过载、启停工况的时间或次数.

2.2 能量管理控制策略的制定原则

在制定能量管理控制策略时, 燃料电池与动力

电池的能量分配需满足以下 4 点要求:

(1) 满足驾驶员的动力性需求.

(2) 维持动力电池的 SOC 在合理的范围内波动.

(3) 降低等效百公里氢耗, 提升动力系统的经济性.

(4) 减少对燃料电池使用寿命不利的工况, 提升燃料电池的耐久性.

2.3 基于模糊控制的能量管理控制策略

2.3.1 模糊控制基本理论

模糊控制实际上是输入输出变量与语言控制规则的定量关系算法结构. 其控制过程分为模糊化、模糊逻辑判断、解模糊化, 如图 8 所示^[9].

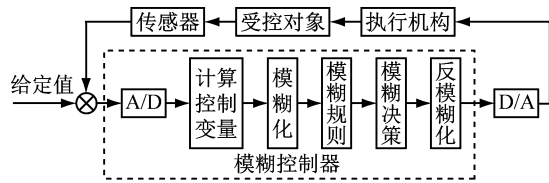


图 8 模糊控制基本原理

Fig.8 Basic principles of fuzzy control

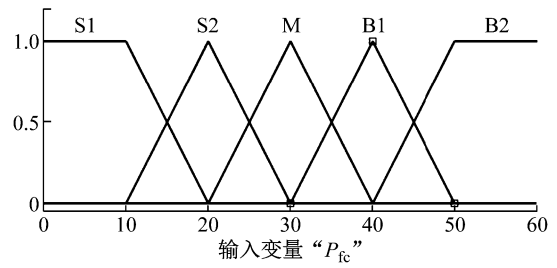


图 11 Pfc 的模糊分布

Fig.11 Fuzzy distribution of Pfc

2.3.2 模糊控制设计

(1) 输入输出变量设计

本控制器选取动力系统需求功率 P_r 和电池 SOC 作为模糊控制器的输入,根据计算和控制需求分析,动力系统需求功率 P_r 的论域定为 $[0, 260]$. 电池 SOC 的论域定为 $[0, 1]$.

模糊控制器的输出为燃料电池需求功率 P_{fc} ,根据燃料电池的选型和仿真分析, P_{fc} 的论域定为 $[0, 60]$. 动力电池负责削峰填谷,其输出功率 P_b 由 P_r 与 P_{fc} 计算如下:

$$P_b = P_r - P_{fc} \quad (15)$$

(2) 输入输出变量的模糊分布

首先,需确定输入输出变量的模糊子集,确定动力系统需求功率 P_r 的模糊子集为 $\{S1, S2, S3, S4, M1, M2, B1, B2, B3, B4, BM\}$, 电池 SOC 的模糊子集为 $\{S3, S4, M, B3, B4\}$, 燃料电池需求功率 P_{fc} 的模糊子集为 $\{S1, S2, M, B1, B2\}$, 采用 trimf 函数与 trapmf 函数相结合的方法设置变量的隶属函数,输入输出变量的模糊分布如图 9~图 11 所示.

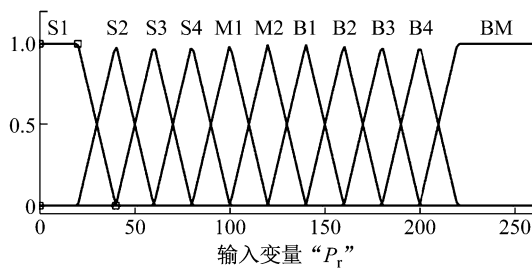


图 9 Pr 的模糊分布

Fig.9 Fuzzy distribution of Pr

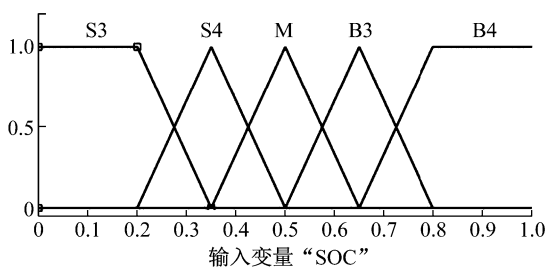


图 10 电池 SOC 的模糊分布

Fig.10 Fuzzy distribution of SOC

(3) 模糊规则的制定

模糊规则的制定按照以下原则进行设计:①动力电池 SOC 过低时,燃料电池保持高功率输出,满足电机功率需求的同时给蓄电池充电,使电池 SOC 迅速上升至合理范围.②动力电池 SOC 过高时,在保证动力性的前提下,燃料电池低功率输出,此时以动力电池放电为主,使电池 SOC 迅速下降至合理范围.③动力电池 SOC 处于中等状态,且需求功率中等时,燃料电池需达到一定程度的功率跟随,尽量使电池 SOC 在合理范围内波动.④需求功率较小或中等时,且动力电池 SOC 较高时,燃料电池以小功率输出,防止电池过充.⑤需求功率 P_r 过大时,燃料电池以最大功率 60 kW 输出.

基于以上控制原则,制定模糊规则,动力系统需求功率 P_r 包含 11 个模糊子集,电池 SOC 包含 5 个模糊子集,因此模糊规则库包含 55 条控制规则.

基于以上模糊推理方法,得到模糊控制器的功率分布如图 12 所示.

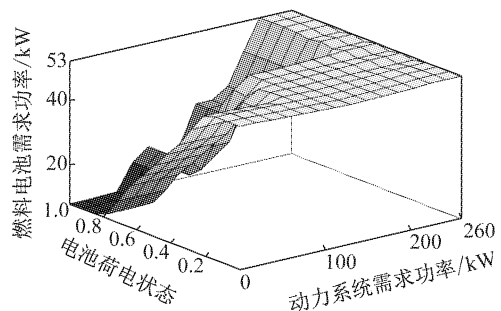


图 12 模糊控制器的功率分布

Fig.12 Power distribution of fuzzy control

2.3.3 能量管理策略的改进

由于模糊控制的控制细节不可控,并且为了提升燃料电池的耐久性.本文的能量管理策略对模糊控制能量管理策略进行改进,根据控制需求进行补充:

(1) 大幅变载工况不利于燃料电池的使用寿命,因此对模糊控制的输出即燃料电池需求功率的

变化率进行限制,避免燃料电池输出功率的大幅变化.控制思路如图 13 所示.

K 为设定的最大功率变化率($\text{kW} \cdot \text{s}^{-1}$).当模糊控制器输出的燃料电池需求功率变化率大于设定值 K 时,燃料电池输出功率以速率 K 增长至设定的需求功率.

(2) 当电池 SOC 过高且需求功率很低时,模糊控制器输出的燃料电池需求功率值很低.为防止燃料电池工作在怠速工况,空调及附件需求功率全部由燃料电池提供.

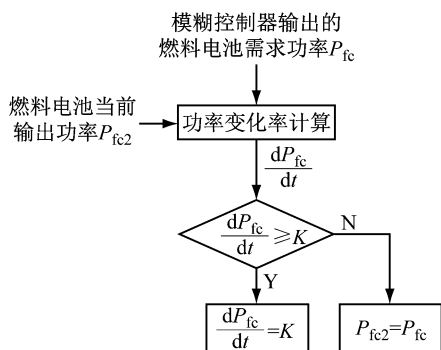


图 13 燃料电池功率变化率限制

Fig.13 Limit of fuel cell power changing rate

3 仿真分析

以中国典型城市工况作为测试工况,基于 Matlab/Simulink 进行仿真分析,分析能量管理控制策略在经济性和耐久性上的优劣.

3.1 燃料电池耐久性的定量分析

前文对影响燃料电池耐久性的 4 种典型工况进行了分析.为统计在一个中国典型城市工况下 4 种工况的出现频次,对 4 种工况进行定量分析:

(1) 当燃料电池输出功率随时间的变化率大于 $5 \text{ kW} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,定义为大幅变载工况.

(2) 当燃料电池输出功率大于 60 kW 时,定义为过载工况.

(3) 由于本文采用的燃料电池怠速功率为 3.3 kW ,因此定义燃料电池输出功率小于 5 kW 时为怠速工况.

(4) 当燃料电池输出功率从 0 变化到有输出功率为一个启停工况.

3.2 改进前后能量管理策略对比

3.2.1 中国典型城市工况测试

图 14 所示为中国典型城市工况下,两种能量管理策略下的工况跟随曲线,曲线说明两种能量管理策略下均能实现工况跟随.

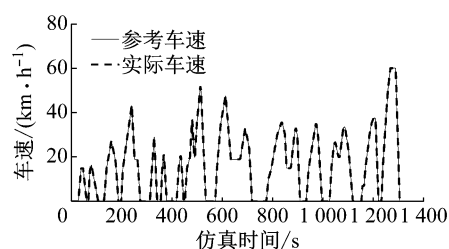


图 14 工况跟随曲线

Fig.14 Speed curves with operation condition

3.2.2 耐久性与经济性对比

图 15 所示两种能量管理策略下,电池 SOC 变化曲线.

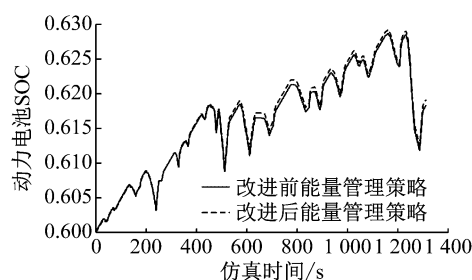


图 15 电池 SOC 变化曲线

Fig.15 Battery SOC curves

由图 15 可知,一个中国典型城市工况下,动力电池 SOC 变化率在 3% 以内,动力电池始终工作在高效区.

图 16 所示两种能量管理策略下,燃料电池输出功率曲线.由图可知,改进前能量管理策略下的燃料电池输出功率在 500 s 、 600 s 和 1250 s 左右出现了大幅变化,不利于燃料电池耐久性.

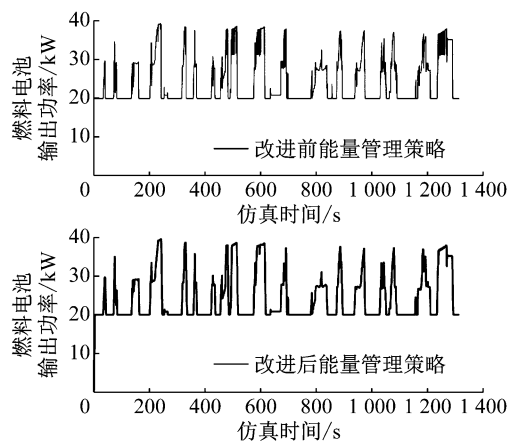


图 16 燃料电池输出功率

Fig.16 Fuel cell output power

表 3 为两种策略的仿真对比结果,改进后的模糊控制能量管理策略虽然经济性略微下降,但能有效提升耐久性.

表 3 改进前后能量管理策略仿真对比

Tab. 3 Simulation comparison between the improved strategy and the original strategy

统计结果	改进前 能量管理	改进后 能量管理
大幅变载时间/s	48.78	9.07
过载时间/s	0	0
怠速时间/s	0.9	0.9
启停次数	1	1
等效百公里氢耗/ kg · 100 km ⁻¹	6.81	6.83

3.3 能量管理策略与功率跟随式能量管理策略对比

将改进后的模糊控制能量管理策略与功率跟随式能量管理策略进行仿真对比,图 17 所示为两种能量管理策略下,燃料电池输出功率曲线。

由图 17 可知,功率跟随式能量管理策略下燃料电池输出功率出现大幅变动,且出现怠速工况,不利于燃料电池的耐久性。而改进后的模糊控制能量管理策略能使燃料电池保持工作在高效区,既有利于燃料经济性,又减少了怠速工况。

图 18 所示两种能量管理策略下,燃料电池工作效率。由图可知,在改进后的模糊控制能量管理策略下,燃料电池工作效率维持在 0.53 左右,而功率跟随式能量管理策略下燃料电池工作效率波动大,且相对偏低。

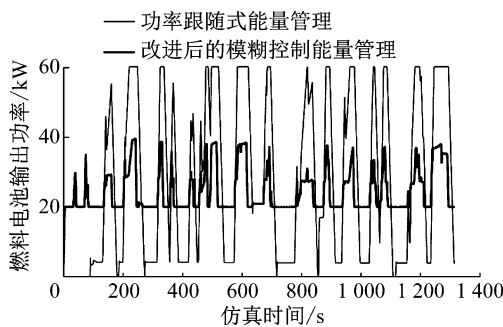


图 17 燃料电池输出功率曲线

Fig.17 Fuel cell output power curves

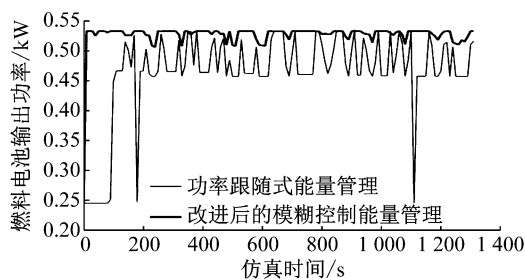


图 18 燃料电池工作效率

Fig.18 Fuel cell operating efficiency

表 4 所示为两种能量管理策略在一个中国典型城市工况下,耐久性与经济性结果对比。

表 4 两种能量管理策略仿真结果对比

Tab. 4 Simulation comparison between the improved strategy and the power-following strategy

统计结果	功率跟随式 能量管理	改进后的模糊 控制能量管理
大幅变载时间/s	121.43	9.07
过载时间/s	0	0
怠速时间/s	424.95	0.9
启停次数	1	1
等效百公里氢耗/ kg · 100 km ⁻¹	7.28	6.83
燃料电池平均工作效率	0.465 8	0.528 7
动力电池平均工作效率	0.987 8	0.981 7

由表 4 可知,改进后的模糊控制能量管理策略相较于功率跟随式能量管理策略,在一个中国典型城市工况下,大幅变载时间减少 92.5%;怠速时间减少 99.8%;等效百公里氢耗降低 6.2%;燃料电池平均工作效率提高 11.9%。验证了本文设计的能量管理策略能有效减少对燃料电池使用寿命不利的工况,提高动力系统工作效率,提升车辆经济性。

4 结论

本文以燃料电池客车为研究对象,搭建了燃料电池客车整车前向仿真模型,并对模型进行了仿真测试,主要结论如下:

(1) 建立了整车前向仿真模型,用于对能量管理策略进行验证。

(2) 定量分析了对燃料电池寿命不利的 4 种工况。基于模糊控制方法制定了能量管理策略;为提升燃料电池耐久性,对模糊控制进行改进,提出改进后的模糊控制能量管理策略。

(3) 在中国典型城市工况下,对改进前后的模糊控制能量管理策略进行仿真对比,仿真结果表明,改进后的模糊控制能量管理策略虽然经济性略微下降,但能有效提升耐久性。

(4) 在中国典型城市工况下,相对于传统功率跟随式能量管理策略,改进后的模糊控制能量管理策略能有效提升车辆经济性和燃料电池耐久性。其中,大幅变载时间减少 92.5%;怠速时间减少 99.8%;等效百公里氢耗降低 6.2%。

(下转第 123 页)