

一种基于可变等效因子的燃料电池汽车等效燃料消耗最小策略

甘秀芹¹, 张浩彬², 张 宁²

(1. 南京交通职业技术学院 汽车工程学院, 南京 211188; 2. 东南大学 机械工程学院, 南京 211189)

摘要: 为了改进燃料电池汽车的燃料经济性与环境适应性, 基于等效燃料消耗最小策略, 开展了燃料电池汽车能量管理与优化算法的研究。首先, 基于车辆动力学模型求解得出的输出功率或制动回收功率, 计算系统的等效燃料消耗, 并将其作为优化目标, 以期实现经济性最优的功率分配; 其次, 为了适应不同的环境工况, 基于等效因子的实际物理意义, 提出了随蓄电池荷电状态变化的可变等效因子, 使燃料电池汽车能在更好地维持荷电状态的同时, 可更充分地利用蓄电池空余能量。WLTC(worldwide harmonized light vehicles test cycle)和CATC(China automobile test cycle)等标准行驶工况下的仿真结果表明, 所提出的基于可变等效因子的等效燃料消耗最小策略, 可以满足燃料电池汽车降低氢耗、保持蓄电池荷电状态的功能, 实现了能量管理与优化, 具有较好的工况适应能力。

关键词: 燃料电池汽车; 能量管理策略; 燃料经济性; 等效燃料消耗最小策略; 可变等效因子

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

An Equivalent Fuel Consumption Minimization Strategy for Fuel Cell Vehicles Based on Variable Equivalent Coefficient

GAN Xiuqin¹, ZHANG Haobin², ZHANG Ning²

(1. School of Automotive Engineering, Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to improve the fuel economy and environmental adaptability of fuel cell vehicles, the energy management and optimization algorithm of fuel cell vehicle is studied based on the equivalent fuel consumption minimization strategy. First, the output

power or braking recovery power is obtained by solving the vehicle dynamics model, and the equivalent fuel consumption of the system is calculated and taken as the optimization objective to achieve the most economic power distribution. In order to improve the adaptability to different working conditions, considering the physical meaning of equivalent coefficient, a variable equivalent coefficient concerning the state of charge of battery is formulated for the first time, so that the fuel cell vehicle can better maintain the state of charge and make full use of the spare energy of the battery. The simulation results under WLTC (worldwide harmonized light vehicles test cycle) and CATC (China automobile test cycle) standard conditions show that the proposed equivalent consumption minimization strategy based on the variable equivalent factor can meet the function of reducing fuel consumption and maintaining battery state of charge, which realizes the energy management and optimization of fuel cell vehicle and verifies good adaptability to working conditions.

Key words: fuel cell vehicle; energy management strategy; fuel economy; equivalent fuel consumption minimization strategy; variable equivalent coefficient

燃料电池汽车(FCV)一般是指利用氢能的新能源汽车。氢燃料电池系统可以保证更高的效率、更低的噪声, 以及几乎为零的污染物排放, 目前已受到了各国的广泛关注^[1]。常用的氢燃料电池有质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)、磷酸燃料电池和固态氧化物燃料电池。PEMFC具有工作温度低、启动速度快、效率高等优点, 目前已在汽车上得到了较好的应用^[2]。但由于

收稿日期: 2021-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52072072)

第一作者: 甘秀芹(1981—), 女, 副教授, 工学硕士, 主要研究方向为新能源汽车、智能网联汽车。E-mail: gxq9851@163.com

通信作者: 张宁(1985—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为运载系统动力学及其智能化。E-mail: nzhang_cn@seu.edu.cn

燃料电池动态响应较慢,当燃料电池在车辆启停或急加速工况下工作时,会导致燃料电池内部反应不完全,从而影响电池的寿命和稳定性^[3]。为了保证汽车行驶的稳定性,需要添加具有高功率密度与高能量密度的辅助动力源^[4]。考虑到汽车结构相对紧凑,布置空间有限,对辅助动力源的稳定性与成本有着一定的要求,因此常使用磷酸铁锂电池等蓄电池作为辅助动力源。

FCV 的整车能量管理策略与混合动力汽车类似,可分为基于规则的策略和基于优化的策略这两类。基于规则的能量管理策略又可以分为基于确定规则的策略和基于模糊规则的策略,其基本思路为:对车辆在行驶过程中的状态,如车辆速度、加速度、蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)、需求功率等设置逻辑阈值(对不同工况适应性较差);基于模糊规则的能量管理策略在一定程度上改善了对工况的适应性^[5-6]。

基于优化的能量管理策略分为基于全局优化和基于瞬时优化两类。全局优化中常用的方法包括动态规划方法和庞特里亚金最值原理。丁阿鑫等^[7]根据动态规划方法,对行驶工况进行离线全局优化,有效地提升了整车燃油经济性,延长了燃料电池系统使用寿命。潘越等^[8]基于庞特里亚金极小值原理,考虑 SOC、燃料电池功率变化率,建立了对燃料电池余热进行利用的能量管理策略。基于全局优化的能量管理策略可以达到在整个测试循环中的燃料消耗最小,但需要事先得知循环中的工况信息,且计算量大,在实际场景中难以运用。

基于瞬时优化的能量管理策略中,常用的方法包括模型预测、等效燃料消耗最小策略(equivalent fuel consumption minimization strategy, ECMS)。赵治国等^[9]提出了利用多模式模型预测方法的策略,根据行驶工况自适应调整,降低了燃料消耗。Paganelli 等^[10]很早提出了在混合动力汽车上的等效燃油消耗最小策略,将主动力源与蓄电池之间的能量流动用等效计算的方式结合起来,实时地计算出等效总消耗最低的工作点。胡建军等^[11]在 ECMS 的基础上,采用 PI 控制算法实时更新等效因子,提出了一种可实时控制的自适应等效油耗最低能量管理策略。李跃娟等^[12]将等效因子作为全局优化中的优化变量,通过离散优化,获得不同工况下的最佳等效因子。目前关于 ECMS 的研究大多考虑混合动力汽车,对如何应用 ECMS 减小 FCV 燃料消耗,提升工况适应性研究较少。

本文基于 PEMFC 的燃料电池车辆采用了 ECMS 策略,针对固定等效因子对环境工况变化适应性差的问题进行优化,首次提出随蓄电池荷电状态变化的可变等效因子,提升了车辆对不同环境工况的适应性。本文参考丰田 Mirai 车型的技术参数建立了燃料电池车辆系统模型,基于该模型求解得到的输出功率或制动回收功率,计算等效燃料消耗,并将其作为优化目标,计算经济性最优的功率分配。通过分析等效因子在不同工况下对 ECMS 优化效果的影响,提出随蓄电池荷电状态变化的可变等效因子,以提升对工况的适应能力。最后,通过 WLTC (worldwide harmonized light vehicles test cycle)、CATC (China automotive test cycle) 等标准工况下的仿真进行验证,结果显示:本文提出的基于可变等效因子的 ECMS 能够降低燃料电池系统功率变化频率,从而延长燃料电池寿命,并能满足降低氢耗、保持蓄电池 SOC 的要求,具有较好的工况适应能力。

1 PEMFC 车辆系统建模

1.1 PEMFC 系统建模

在燃料电池中,反应中释放的化学能可以用吉布斯自由能的变化 Δg_f 计算得到,即反应生成物与反应物吉布斯自由能之差^[12]。该能量会转化为电能,即驱动电子运动所作的功,由此可以计算燃料电池的可逆开路电压为:

$$\Delta g_f = W_E = q \cdot E = -2FE \quad (1)$$

式中: W_E 为驱动电子所做的功; q 为电子所带的电荷量; E 为燃料电池电路的可逆开路电压; F 为法拉第常数,代表 1 摩尔电子所带的电荷大小。考虑到电池的实际工作损耗,得出单片燃料电池的输出电压曲线如图 1 所示。

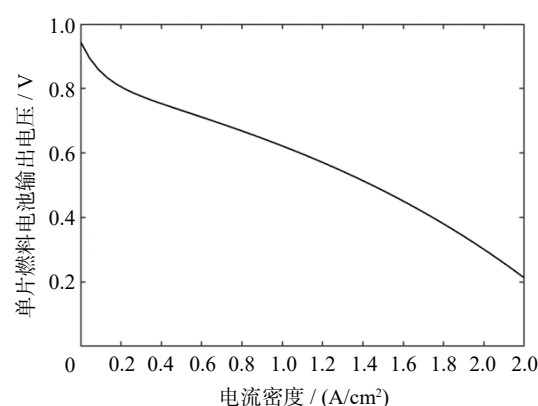


图 1 单片燃料电池的输出电压

Fig.1 Output voltage of single fuel cell

1.2 车辆动力学建模

车辆在行驶过程中,需克服滚动阻力 F_f 、空气阻力 F_w 、坡度阻力 F_i 及加速阻力 F_j ,所需驱动力 F_t 为:

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j = (F_0 + F_1 v + F_2 v^2) + \frac{1}{2} C_D A \rho v_r^2 + G \sin(\alpha) + \delta m \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

式中: F_0 、 F_1 、 F_2 为通过实验拟合得到的滚阻参数^[13]; v 为车速; C_D 、 ρ 、 A 、 v_r 分别为空气阻力系数、空气密度、车辆迎风面积和相对风速; G 、 α 分别为车辆所受重力和坡道仰角; m 、 δ 分别为车辆质量和旋转质量转换系数。车辆减速时制动力的计算相同。进而可以计算车轮转速 ω_w 与车轮转矩 τ_w 如下:

$$\omega_w = \frac{v}{r_w} \quad (3)$$

$$\tau_w = F_t \cdot r_w \quad (4)$$

FCV系统中配备一台电机,可用作电动机或发电机。本文针对永磁同步电机进行建模,电机所需的驱动功率 P_{demand} 为:

$$P_{\text{demand}} = \frac{\tau_m n_m}{9.55} \cdot \frac{1}{\eta(\tau_m, n_m)} \quad (5)$$

式中: τ_m 为电机转矩, n_m 为电机转速,它们均可通过车辆传动比 i 推得:

$$\tau_m = \frac{\tau_w}{i} \quad (6)$$

$$n_m = i \omega_m \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (7)$$

当 P_{demand} 为正数时,电机用作电动机;当 P_{demand} 为负数时,电机用作发电机。当电机用作发电机时,可以对制动力进行回收,并向蓄电池充电。考虑到实际情况中大部分的制动力由机械制动装置提供,为了简化模型,假定所有的制动转矩均由电机提供,并利用其发电产生能量的20%向蓄电池充电。

在计算驱动电机效率时,由于电机的电动效率与发电效率变化趋势类似,因此在搭建模型时认为发电效率与电动效率相同。采用的永磁同步电机效率图如图2所示^[14]。

1.3 蓄电池建模

本文采用的蓄电池模型为等效电路模型。考虑到精确性与模型的复杂度,所以采用二阶RC模型(见图3)。在复频域中蓄电池的输出电压可表示为:

$$U_L(s) = \text{OCV}(s) - I_{\text{bat}}(s) \left[R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s} + \frac{R_2}{1 + R_2 C_2 s} \right] \quad (8)$$

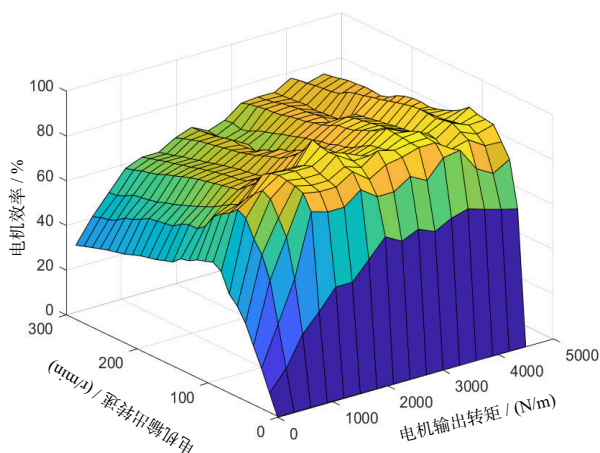


图2 驱动电机电动效率图

Fig.2 Efficiency diagram of driving motor

式中: U_L 为负载电压;OCV为蓄电池开路电压; I_{bat} 为蓄电池充放电电流; R_0 、 R_1 、 R_2 、 C_1 、 C_2 分别为等效电路中的电阻和电容,其数值依据文献[15]中的蓄电池SOC确定。

最终可构建出的蓄电池模型如图4所示。本文采用的FCV系统模型的主要参数参考了丰田Mirai车型,如表1所示。

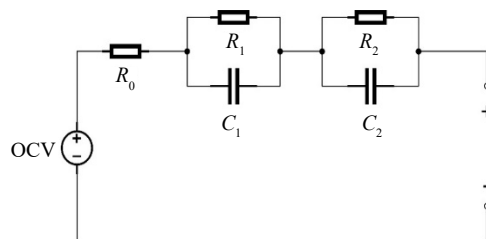


图3 二阶RC模型

Fig.3 Second order RC model

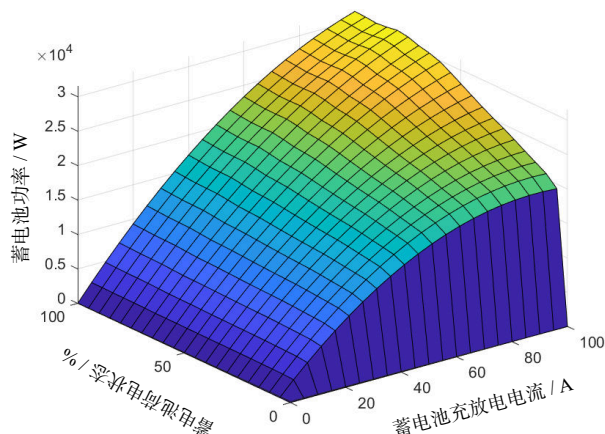


图4 蓄电池在不同充放电电流、SOC下的功率

Fig.4 Charge or discharge power of battery at different currents and SOC values

表1 FCV系统模型中的主要参数

Tab.1 Main parameters in FCV system model

主要参数	物理意义	数值	单位
C_D	空气阻力系数	0.31	/
A	车辆迎风面积	2.89	m^2
ρ	空气密度	1.2258	kg/m^3
m	整车质量	2100	kg
δ	汽车旋转质量转换系数	1.2	/
i	减速器传动比	13.6	/
η_i	减速器效率	0.90	/
r_w	车轮半径	0.37	m
F_0	滚动阻力系数	194.93	/
F_1	滚动阻力系数	0.9947	/
F_2	滚动阻力系数	0.0545	/
Q_{bat}	蓄电池容量	16.8	Ah
U_{bat}	蓄电池额定电压	300	V

2 可变等效因子ECMS能量管理策略

2.1 系统等效燃料消耗与目标优化函数

用燃料电池的电流除以每摩尔氢气能在反应中释放的电子电量,可以得到燃料电池系统瞬时燃料消耗 C_{st} 如下^[16]:

$$C_{st} = n \cdot M_{H_2} \cdot \frac{I_{st}}{2F} = 1.03 \times 10^{-8} n \cdot I_{st} \quad (9)$$

式中: I_{st} 为燃料电池电堆电流; n 为电堆中串联的燃料电池数量。为了使燃料电池与蓄电池的能量消耗具有可比性,将蓄电池的电能耗等效为燃料消耗。蓄电池充放电时的损耗是由内阻导致的,其能量效率和内阻与蓄电池 SOC 相关。本文主要关注车辆在长时间测试循环中的经济性,故不考虑蓄电池的内阻及其带来的能量损耗,蓄电池充放电时的等效燃料消耗 C_{bat} 为:

$$C_{bat} = \frac{C_{st, avg}}{P_{st, avg}} \cdot P_{bat} \quad (10)$$

式中: $C_{st, avg}$ 为燃料电池的平均燃料消耗率; $P_{st, avg}$ 为燃料电池的平均输出功率; P_{bat} 为蓄电池的瞬时功率。系统的等效燃料消耗函数为:

$$C_{sys} = C_{st} + \gamma(SOC) C_{bat} \quad (11)$$

式中的 γ 为 SOC 补偿系数,用以保证蓄电池的 SOC 在较小的范围内,其值为:

$$\gamma(SOC) = 1 - \beta \times \left[\frac{SOC - \frac{SOC_H + SOC_L}{2}}{\frac{SOC_H - SOC_L}{2}} \right] \quad (12)$$

式中: SOC_H 为 SOC 的给定最高限值; SOC_L 为 SOC 的给定最低限值; β 为等效因子 ($0 < \beta < 1$)。将系统等效燃料消耗 J_{min} 作为优化目标:

$$J_{min} = \min(C_{sys}) = \min(C_{st} + \gamma(SOC) \cdot C_{bat}) \quad (13)$$

根据实际系统的性能,设置优化问题的限制条件如下:① 燃料电池系统输出功率与蓄电池输出功率之和等于功率需求;② 蓄电池的输出功率在其当前 SOC 决定的输出范围之内;③ 燃料电池系统的输出功率在其允许范围之内;④ 燃料电池系统的输出变化率小于 20 kW/s;⑤ 为避免燃料电池系统频繁启停,设置其最小输出功率为 3 kW。

2.2 等效因子的物理意义

在 ECMS 中,等效因子的作用为调节蓄电池 SOC 调整到设定值的快慢。从式(12)可以看出,若 β 增大,当 $SOC > \frac{SOC_H + SOC_L}{2}$ 时, $\gamma(SOC)$ 减小,此时蓄电池一般为放电,等效燃料消耗就更小,此时使用蓄电池能量的倾向很大;当 $SOC < \frac{SOC_H + SOC_L}{2}$ 时, $\gamma(SOC)$ 则会很大,此时蓄电池一般为充电,等效得到的等效燃料补偿很大,因此此时向蓄电池充电的倾向很大。因此, β 越大时,越能快速地调整蓄电池 SOC 至设定值,但充电时消耗的氢燃料也更多。

若 β 减小,当 $SOC > \frac{SOC_H + SOC_L}{2}$ 时, $\gamma(SOC)$ 增大,此时蓄电池一般为放电,等效得到的等效燃料消耗就更大,此时使用蓄电池能量的倾向较小;当 $SOC < \frac{SOC_H + SOC_L}{2}$ 时, $\gamma(SOC)$ 则会较小,此时蓄电池一般为充电,等效得到的等效燃料补偿较小,此时向蓄电池充电的倾向较小。因此, β 越小时,维持蓄电池 SOC 在设定值越慢,但充电时消耗的氢燃料更少。

如果等效因子选取过大,会导致蓄电池 SOC 较高时过量用电,当 SOC 很快降低后,则会为了充电使氢耗大为增加,最终增大了氢燃料消耗。如果等效因子选取过小,当 SOC 降低后充电过慢,可能导致 SOC 过低,影响蓄电池的输出效率和使用寿命。因此,等效因子的制定与蓄电池 SOC 有很大的关系。

2.3 最优等效因子的选取

由以上分析可知,等效因子的制定应考虑蓄电池 SOC,当 SOC 很高时,增大等效因子以利用蓄电池的空余能量;当 SOC 很低时,也要增大等效因子以快速维持蓄电池 SOC;当 SOC 处于合理范围内时,则应该降低等效因子,既可以更好地维持 SOC,也可以降低氢耗。基于以上考虑,本文设置最优等效因子为:

$$\beta = \left(\text{SOC} - \frac{\text{SOC}_H + \text{SOC}_L}{2} \right)^2 / \left(\frac{\text{SOC}_H - \text{SOC}_L}{2} \right)^2 \quad (14)$$

当 SOC_H 与 SOC_L 分别取为0.8、0.2时,最优等效因子随SOC变化如图5所示。可以看出,当蓄电池SOC接近 SOC_H 或 SOC_L ,最优等效因子 β 接近1;当蓄电池SOC接近 $\frac{\text{SOC}_H + \text{SOC}_L}{2}$ 时,最优等效因子 β 趋近于0,与以上分析中的理想最优等效因子具有相同的特性。

3 仿真结果分析

为充分接近实际驾驶情况与公路条件,本文在WLTC与CATC两种标准行驶工况下对燃料电池车辆性能进行测试。CATC中针对不同车型有8种

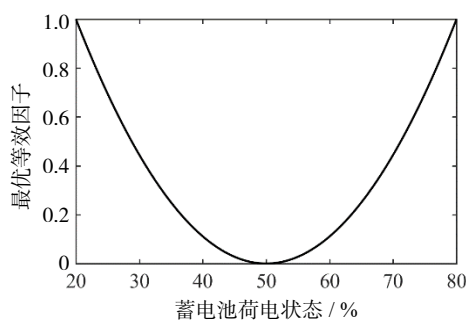
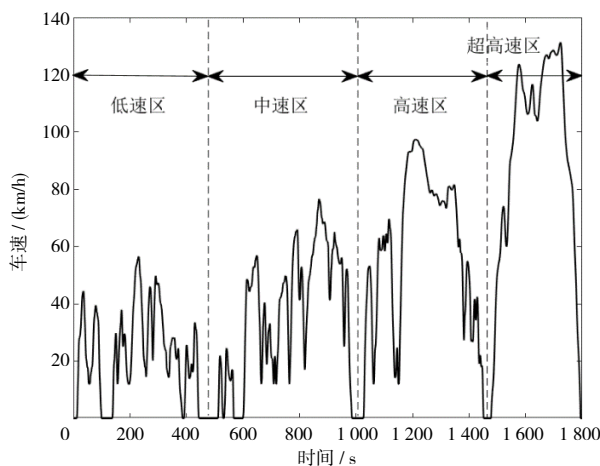


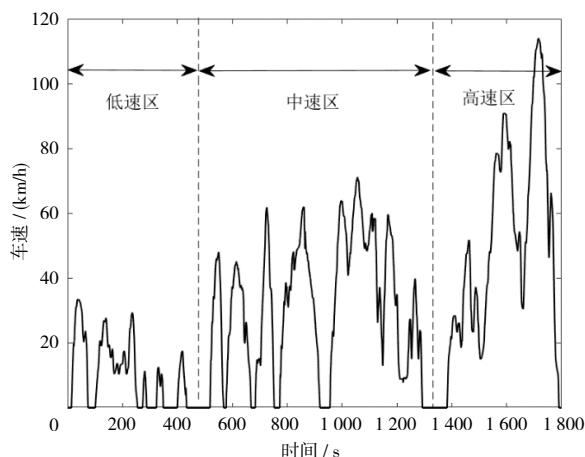
图5 最优等效因子-蓄电池SOC图

Fig.5 Optimal equivalent coefficient-battery SOC plot

驾驶工况。本文选用的工况为CLTC-P(China light-duty vehicle test cycle-passenger)。WLTC、CLTC-P工况下的速度-时间如图6所示。基于固定等效因子、可变等效因子ECMS的仿真结果结果如图7和图8所示。



a WLTC行驶工况



b CLTC-P行驶工况

图6 WLTC、CLTC-P行驶工况下速度-时间关系

Fig.6 Velocity-time plot under WLTC and CLTC-P conditions

可变等效因子的ECMS中燃料电池功率变化与蓄电池SOC变化与使用固定等效因子时类似。在行驶工况的低速部分,燃料电池系统的输出功率非常平稳,峰值功率均由蓄电池提供;在中速部分,燃料电池系统功率大体平稳,在峰值功率处有增长,但仍满足变化率小于20 kW/s的限制;在高速部分,由于蓄电池SOC降低,在ECMS的作用下,燃料电池系统输出功率增加,且在需求功率不高时向蓄电池充电,因此在高速部分燃料电池功率大大增加。通过对比可发现,使用可变等效因子ECMS时,燃料电池系统功率变化频率降低,因此在满足动力性需求的同时也能延长燃料电池寿命,仿真结果见表2。

可以发现,在CLTC-P行驶工况中,使用可变等效因子时,氢燃料消耗比任何固定等效因子时都低,同时也能很好地保持蓄电池SOC;在WLTC行驶工况中,使用可变等效因子能保持氢耗在较低水平,同时也能保持蓄电池SOC在合理范围内。若使用固定的等效因子,在CLTC-P中取得最低氢耗,在WLTC中就不能很好地保持蓄电池SOC;在WLTC中保持蓄电池SOC,则在CLTC-P中不能取得最低的氢耗。因此验证基于可变等效因子的ECMS能满足燃料电池系统、蓄电池的工作性能、降低氢耗、保持蓄电池SOC,同时具有一定的工况适应能力,有更好的实际应用价值。

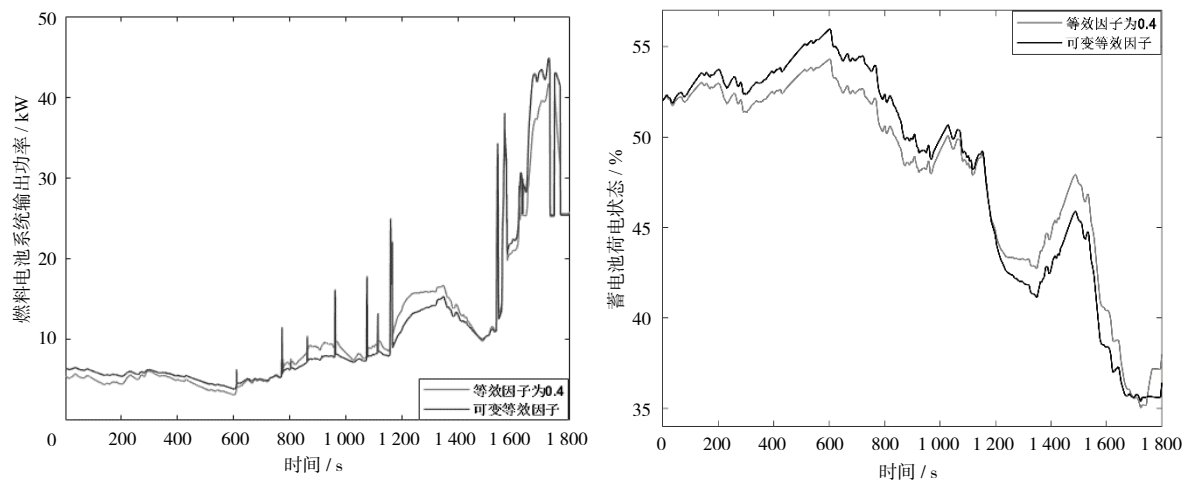


图7 WLTC工况下仿真结果

Fig.7 Simulation results under WLTC condition

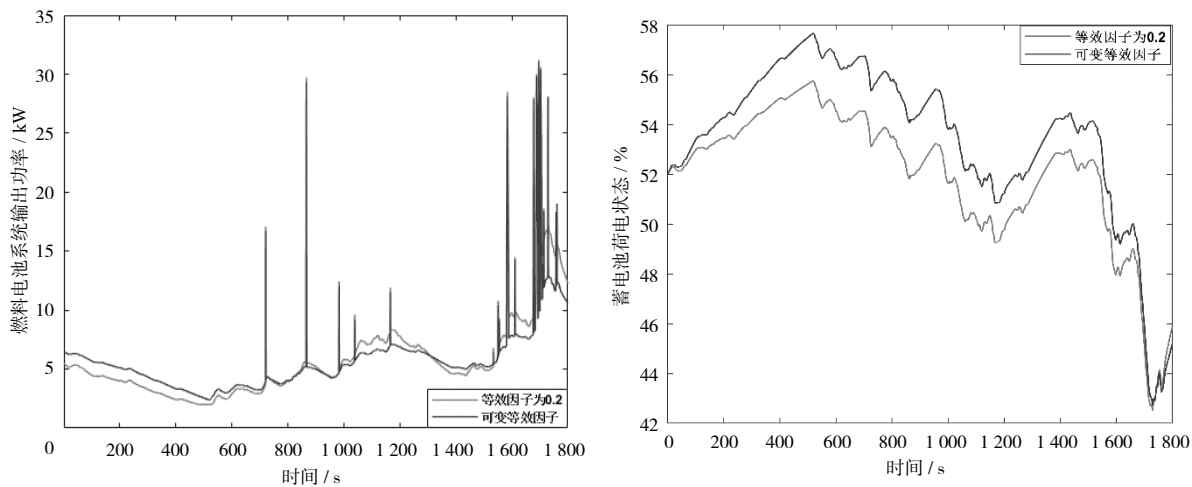


图8 CATC-P工况下仿真结果

Fig.8 Simulation results under CATC-P condition

表2 燃料消耗与蓄电池最终SOC仿真结果

Tab.2 Simulation results of fuel consumption and final SOC of battery

行驶工况	等效因子	氢燃料消耗总量/kg	蓄电池最终SOC/%	平均百公里氢耗/(kg/100 km)
WLTC	0.2	0.4198	26.58	1.9320
	0.4	0.4771	38.00	2.1144
	0.6	0.5033	42.52	2.2017
	0.8	0.5177	44.71	2.2513
	可变	0.4846	36.43	2.1553
CLTC-P	0.2	0.2373	45.08	1.6828
	0.4	0.2388	45.88	1.6860
	0.6	0.2453	47.13	1.7197
	0.8	0.2660	45.90	1.8737
	可变	0.2371	45.18	1.6806

4 结论

本文针对质子交换膜氢燃料电池汽车,基于等效燃料消耗最小的能量管理策略,进一步关注提升

车辆对不同环境工况的适应性。本文参考丰田Mirai车型的技术参数建立了燃料电池车辆系统模型,基于等效因子的实际物理意义设置了考虑蓄电池SOC的最优等效因子,通过在WLTC、CATC-P

标准工况下的仿真分析验证了本文提出方法:

(1) 本文搭建燃料电池系统模型中主要关注了燃料电池系统的输出伏安特性;在车辆动力学模型中根据行驶工况当前车速计算得到车轮转速与车轮转矩,根据电机模型计算得到电机的输入功率或制动回收功率;在蓄电池模型中,建立了二阶RC等效电路模型,对电路元件进行了参数拟合,得到了蓄电池在不同充放电电流、电池SOC下的输出功率。

(2) 根据等效燃料消耗最小的能量管理策略,计算了系统总等效燃料消耗,并将其表达为优化变量为燃料电池功率的优化问题,并根据动力源的工作特性与限制制定了优化问题的限制条件。基于等效因子对维持蓄电池SOC的影响,设置了考虑蓄电池SOC的最优等效因子。

(3) 在WLTC和CATC-P标准工况下对本文提出的能量管理策略进行验证,结果表明可变的等效因子既能满足降低氢耗、保持蓄电池SOC的要求,同时具有较好的工况适应能力。

参考文献:

- [1] ABDELKAREEM M A, ELSAID K, WILBERFORCE T, *et al.* Environmental aspects of fuel cells: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752:141803.
- [2] 卢璐, 吴磊, 史继诚, 等. PEMFC用抗潮水性功能化Pt/C催化剂的制备及表征[J]. *材料工程*, 2019, 47(6):63.
LU Lu, WU Lei, SHI Jicheng, *et al.* Preparation and characterization of anti-flooding functional Pt/C catalyst for PEMFC [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(6):63.
- [3] BARBIR F, YAZICI S. Status and development of PEM fuel cell technology [J]. *International Journal of Energy Research*, 2008, 32 (5): 369.
- [4] MINH V T, PUMWA J. Simulation and control of hybrid electric vehicles [J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2012, 10 (2): 308.
- [5] 路鑫阳, 武志斐. 减少燃料电池功率振荡的FCV混合能量管理策略[J]. *现代制造工程*, 2021(3): 35.
LU Xinyang, WU Zhifei. FCV hybrid energy management strategy to reduce fuel cell power oscillation [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2021(3): 35.
- [6] 翁泽斌, 朱文超, 杨扬, 等. 加速工况下燃料电池混合动力系统建模及能量管理策略研究[C]// 2020中国自动化大会. 上海: 中国自动化学会, 2020: 519.
WENG Zebin, ZHU Wenchao, YANG Yang, *et al.* Modeling and energy management strategy of fuel cell hybrid power system [C]// China Automation Conference 2020. Shanghai: Chinese Association of Automation, 2020: 519.
- [7] 丁阿鑫, 张晨阳, 沈英. 燃料电池汽车改进型状态机能量管理策略研究[J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(2): 181.
DING Axing, ZHANG Chenyang, SHEN Yang. Study on improved state machine energy management strategy for fuel cell vehicles [J]. *Journal of Mechanical Manufacturing and Automation*, 2021, 50(2): 181.
- [8] 潘越, 明平文, 杨代军, 等. 基于余热利用的燃料电池汽车能量管理策略[J]. *汽车技术*, 2020(4): 9.
PAN Yue, MING Pingwen, YANG Daijun, *et al.* Fuel cell vehicle energy management strategies based on waste heat utilization[J]. *Automobile Technology*, 2020(4): 9.
- [9] 赵治国, 沈沛鸿, 郑怡颖, 等. 燃料电池轿车模型预测实时优化控制[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 648.
ZHAO Zhiguo, SHEN Peihong, JIA Yiyang, *et al.* Model predictive real-time optimal control of fuel cell vehicle [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46 (5): 648.
- [10] PAGANELLI G, DELPRAT S, GUERRA T M, *et al.* Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains [C]// IEEE 55th Vehicular Technology Conference. Birmingham: IEEE, 2002: 2076.
- [11] 胡建军, 杨颖, 邹玲波, 等. 混合动力汽车自适应等效油耗最低能量管理策略[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(12): 80.
HU Jianjun, YANG Ying, ZOU Lingbo, *et al.* Adaptive equivalent consumption minimization strategy for plug-in hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44 (12): 80.
- [12] 李跃娟, 齐巍, 王成, 等. 并联混合动力汽车ECMS的时变等效因子提取算法的研究[J]. *汽车工程*, 2021, 43(2):181.
LI Yuejuan, QI Wei, WANG Cheng, *et al.* Study on extraction algorithm for time-varying equivalent factor of ECMS for parallel hybrid electric vehicle [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(2):181.
- [13] 何卫, 覃兰珺, 林欢. 整车滑行阻力理论计算方法[J]. *汽车实用技术*, 2021, 46(1): 185.
HE Wei, QIN Lanjun, LIN Huan. A theoretical calculation method of vehicle sliding resistance [J]. *Automotive Applied Technology*, 2021, 46(1): 185.
- [14] 殷国栋, 李广民, 朱侗, 等. 四轮驱动电动汽车多Agent能量管理体系研究[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(15): 1765.
YIN Guodong, LI Guangmin, ZHU Tong, *et al.* Study on Multi-Agent system of energy managements for 4WD electric vehicles [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29 (15): 1765.
- [15] 洪宇童, 洪汉池, 林一航. 车用锂离子电池荷电状态参数辨识的建模仿真[J]. *厦门理工学院学报*, 2020, 28(3): 9.
HONG Yutong, HONG Hanchi, LIN Yihang, *et al.* Modeling and simulation of lithium-ion battery state of charge [J]. *Journal of Xiamen University of Technology*, 2020, 28(3): 9.
- [16] 徐梁飞, 华剑锋, 包磊, 等. 燃料电池混合动力客车等效氢耗优化策略[J]. *中国公路学报*, 2009, 22(1): 104.
XU Liangfei, HUA Jianfeng, BAO Lei, *et al.* Optimized strategy on equivalent hydrogen consumption for fuel cell hybrid electric bus [J]. *Chin Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(1): 104.