

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210525

燃料电池观光车系统建模与能量管理的研究*

裴一啸¹ 尹必峰¹ 孙 闯¹ 高海宇²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013; 2. 德燃动力科技有限公司氢燃料电池汽车技术研究中心 嘉兴 314000)

摘要: 为了解决燃料电池观光车能量管理的问题,建立了燃料电池观光车整车及零部件模型,设计开发了车载恒温器控制策略,并通过整车及零部件台架试验验证了模型的准确性;为了提升整车经济性及耐久性,提出了一种新的基于二次型效用函数的改进策略,并通过 KKT 条件获得了实时最大收益,最后开发了一种多目标闪电搜索算法,并通过该算法求解了策略的最佳参数。仿真结果表明,与恒温器控制策略相比,所提出的改进策略可以提升 1.7% 的续航里程,耐久性提高 11.2%;并且该策略兼顾了 SOC 状态,结合了整车及零部件的历史输出功率信息,工况适应性强。

关键词: 燃料电池;能量管理;KKT 条件;闪电搜索算法

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research on system modeling and energy management of fuel cell sightseeing vehicle

Pei Yixiao¹ Yin Bifeng¹ Sun Yan¹ Gao Haiyu²

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Fuel Cell Vehicle Technology Research Center, D. R. Power Technology Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract: In order to solve the energy management problem of fuel cell sightseeing vehicle, the model of fuel cell sightseeing vehicle and its components are established, and the thermostat control strategy is designed. The accuracy of the model is verified by the bench test. In order to improve the economy and durability of the vehicle, a novel strategy based on quadratic utility function is proposed, and the real-time maximum benefit is obtained by KKT condition. Finally, a multi-objective lightning search algorithm is designed, and the optimal parameters of the novel strategy are solved by the algorithm. Simulation results show that compared with thermostat control, the proposed strategy can improve the driving range by 1.7% and durability by 11.2%. In addition, the strategy takes into account the SOC and combines the historical output power information of the vehicle and its components. The novel strategy also has a strong adaptability to working conditions.

Keywords: fuel cell;energy management strategy;KKT conditions;lightning search algorithm

0 引 言

随着汽车工业的进一步发展,传统内燃机车辆消耗了大量化石燃料,排放有害废气,导致空气污染、温室效应、酸雨等^[1]。能源危机与气候变暖已成为当下急需解决的全球性问题^[2]。纯电动汽车(battery electric vehicle, BEV)因其无污染物排放、可采用可再生能源充电的优点被开发出来,但 BEV 也存在电池充电时间长,一次充电续航里程有限,储电成本高等缺点。为了克服 BEV 的相关问题,混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)和插电式混合动力汽车(plug in hybrid electric vehicle, PHEV)被开发出来,但

HEV 和 PHEV 并未能从根本上解决污染物排放的问题^[3-4]。将氢燃料电池作为电动汽车的储能解决方案是另一种减少充电时间和增加汽车行驶里程的方法。此外,氢气被视为一种清洁燃料,其来源较为广泛如:电解水、生物质能制氢、工业副产氢等,然而低耐久性和高成本是阻碍燃料电池商用化的两个主要障碍。

燃料电池因其无法回收制动能量、使用寿命短、动态输出特性较差等缺点无法单独给车辆供电,因此燃料电池通常与超级电容、电池等一起配合使用,多电源能量管理(energy management strategy, EMS)成为影响车辆动力性、经济性、耐久性的关键因素^[5]。Yue 等^[6]指出 EMS 主

收稿日期:2022-06-30

* 基金项目:江苏省重点研发计划(BE2019006-3)项目资助

要分为两大类:基于规则的策略和基于优化的策略。基于规则的 EMS 是根据个人的经验开发的,通常以确定的规则来控制车辆的供电,并使燃料电池在高效点工作。但是,基于规则的策略并不能保证 EMS 是最优的。Wang 等^[7]考虑了电池充放电极限、剩余容量等约束条件,设计了一种基于规则的能量管理策略来分配燃料电池/电池/超级电容混合动力汽车的功率,并使用贝叶斯蒙特卡罗方法来估算能量存储系统的功率和剩余容量。研究表明,与简单 EMS 相比,具有上述约束条件的 EMS 在燃油经济性和动态响应方面更合理。

基于优化的控制策略包括全局优化和实时优化。全局优化算法包括:如动态规划^[8]、庞特里亚金最小原理^[9]、粒子群优化^[10]等。全局最优 EMS 能够在已知行驶信息的情况下,获得行驶工况的全时域最优解。但同时计算时间也较长,难以在实车上应用。

近年来人工智能技术愈发成熟,一些学者开始将智能控制算法与 EMS 结合起来。席利贺等^[11]利用 BP 神经网络算法对增程器开启时刻与输出功率进行离线训练,建立了增程器输出功率与车辆行驶状态参数间的非线性映射关系,得到了具有实时控制能力的神经网络控制模型。Lian 等^[12]利用深度确定性策略梯度对基于深度强化学习的 EMS 进行优化,加速了学习过程。Qi 等^[13]采用基于深度强化学习的 EMS 来降低油耗。

目前能量管理控制策略均存在一些问题,传统基于规则的控制策略难以保证系统的经济性,基于优化的控制策略需要通过离线仿真优化控制参数,而基于人工智能的控制策略需要大量的学习样本。本文主要以燃料电池观光车为研究对象,重点解决燃料电池在使用过程中启停频繁、整车能量利用率低的问题,同时为了延长燃料电池和电池的使用寿命、提升能源利用效率,提出了一种能够主动均衡能源部件使用寿命和能源利用效率的实时能量管理策略,该策略可以根据电池剩余电量主动调节燃料电池和电池的输出功率,并通过多目标优化算法对调节因子进行离线优化,有效提升了燃料电池使用寿命,本文提出的控制策略可以提高系统能量利用率、提升部件耐久性,同时无需大量学习样本,可以在实车中应用。

1 动力系统建模与试验

为了使模型接近实物,本文动力系统模型采用了效率传递模型,电机、燃料电池效率数据均来自于真实的台架试验。

1.1 整车模型

所设计的燃料电池观光车采用电池作为主要能源,燃料电池作为增程器,燃料电池与 DC/DC 串联后与电池并联接入能量管理控制器(power distribution unit, PDU), PDU 内部集成有 EMS, EMS 根据车辆的功率需求,实时分配燃料电池与电池的输出功率,并控制燃料电池的开启或

关闭。由于在校园内部行驶,最高车速限制 40 km/h。

为了匹配合适的电源部件以及驱动电机,建立了整车需求功率模型如式(1)所示。

$$P_{req} = 0.5C_d \cdot A \cdot \rho \cdot V^3 + m \cdot g \cdot V \{C_r \cos(\theta) + \sin(\theta)\} + \delta m \frac{dV}{dt} \cdot V \quad (1)$$

式中: C_d 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度; V 为车辆速度。 m 为车辆总质量; C_r 为滚动阻力系数; θ 为坡度; δ 为车辆旋转质量换算系数。

1.2 燃料电池模型

本文搭建了一个稳态燃料电池试验台架,燃料电池的环境温度、湿度和气压均处于稳定状态。电堆的输出功率一方面满足负载需求,另一方面还要满足辅件系统的功率需求,导致系统功率降低。根据台架试验的结果,获得的电堆及系统效率如图 1 所示。

$$\begin{cases} M_{H_2} = \frac{1}{LHV} \int_0^t \frac{P_{fc}(t)}{\eta_{fc}(t)} dt \\ \eta_{fc} = \frac{P_{fc}}{m_{H_2} \cdot LHV} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{fc} 为燃料电池系统净功率, M_{H_2} 为系统氢气消耗质量, LHV 为氢气低热值, η_{fc} 为燃料电池系统效率, m_{H_2} 为单位时间内的氢气消耗质量。

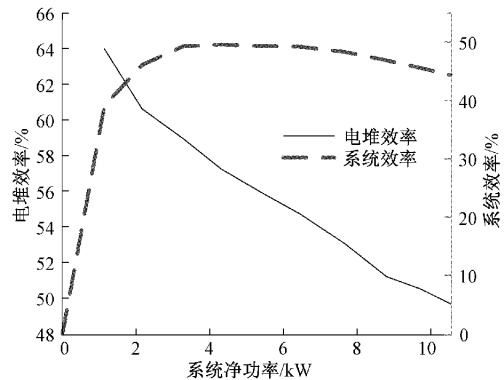


图 1 电堆及系统效率

本文燃料电池一直工作在高效区,不存在怠速以及过载的情况,因此仅考虑由于变载和启停导致的燃料电池性能的衰退,车载燃料电池性能衰退的量化公式^[14]如式(3)所示。

$$D_{fc} = 1.96 \times 10^{-5} \cdot N_{on-off} + 5.93 \times 10^{-7} \cdot N_{change} \quad (3)$$

式中: D_{fc} 为燃料电池总衰退百分比; N_{on-off} , N_{change} 分别为启停次数,变载量。

1.3 电池模型

电池采用了“RINT”内阻模型,电池由电压源与内阻串联组成。电池荷电状态(state of charge, SOC)与输出电流之间的关系如式(4)所示。

$$\begin{cases} V_{bat} = V_{ocv} - I_{bat}R_{bat} \\ I_{bat} = \frac{V_{ocv} - \sqrt{V_{ocv}^2 - 4R_{bat}P_{bat}}}{2R_{bat}} \\ SOC(t) = SOC_{max} - \int_0^t \frac{I_{bat} dt}{Q_{max}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_{bat} 、 V_{ocv} 、 R_{bat} 、 I_{bat} 、 P_{bat} 、 Q_{max} 分别为电池输出电压、开路电压、内阻、电流、输出功率、最大容量; $SOC(t)$ 、 SOC_{max} 分别为电池剩余电量、最大电量。

电池使用寿命主要受输入输出电流和温度影响,频繁的充放电导致其寿命的快速衰退。电池电流和循环使用寿命关系可以表示为^[15]:

$$\begin{cases} D_{bat} = a \cdot (A_h)^b \exp\left(-\frac{E_c + d \cdot C}{R \cdot T_{emp}}\right) \\ A_h = \frac{1}{3600} T_{step} \sum_{n=1}^N |I_{bat}| \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_{bat} 为电池容量衰退百分比, a 为指数前因子, E_c 为活化能, d 为电池充电/放电率的修正系数, C 为充放电倍率, R 为气体常数, T_{emp} 为电池温度, T_{step} 为仿真步长。

2 车载能量管理策略设计与试验

2.1 车载恒温器控制策略设计

车载控制器选用 Freescale 最新一代的 Qorivva

MPC5744 32 位处理器, 受限于控制器芯片计算能力及存储介质大小, 车载能量管理策略采用了基于确定规则的恒温器控制策略, 并根据电池 SOC 状态和氢气余量定义了 5 种运行状态, 具体规则如下:

状态 0: 氢气没有剩余 ($H_{2_remain}=0$) 且 $SOC \leq 10$ 时, 车辆无法启动;

状态 1: 氢气没有剩余且 $SOC > 10$, 由电池单独提供电能, 燃料电池停机;

状态 2: 氢气有剩余 ($H_{2_remain} > 0$) 且 $SOC > 70$ 时, 由电池单独提供电能, 燃料电池停机;

状态 3: 氢气有剩余且 $10 < SOC \leq 70$ 时, 燃料电池以最高效率点的功率 P_{eff} 输出, 电池输出功率为 $P_{bat} = P_{req} - P_{eff}$;

状态 4: 氢气有剩余且 $SOC \leq 10$ 时, 燃料电池以最大功率 P_{fcmax} 输出, 电池输出功率为 $P_{bat} = P_{req} - P_{fcmax}$ 。

为了避免燃料电池在不同的状态之间切换时频繁起停, 车辆短时间制动时燃料电池不停机, 并且定义了状态转移条件, 具体状态转移条件如图 2 所示。

2.2 车载控制策略试验验证

1) 转鼓台架试验

能量管理控制器通过硬件在环测试确定功能完善后接入整车, 最后对整车进行转鼓台架试验, 验证车辆的爬坡能力、续驶里程等, 转鼓台架试验如图 3 所示。

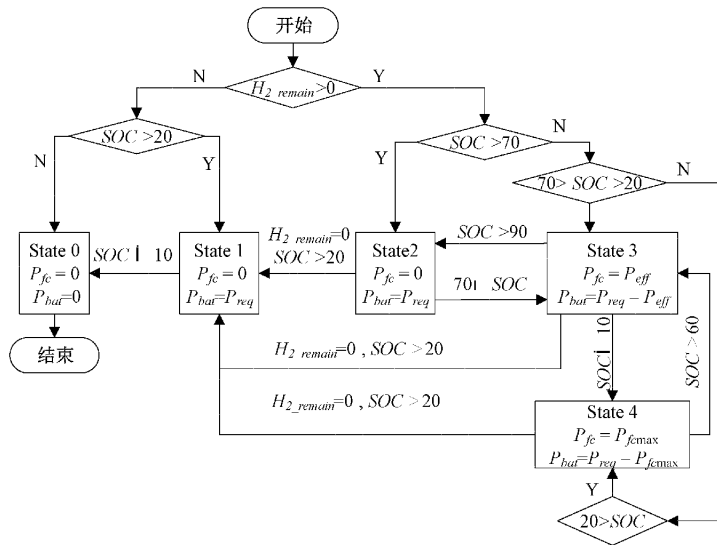


图 2 能量管理控制逻辑

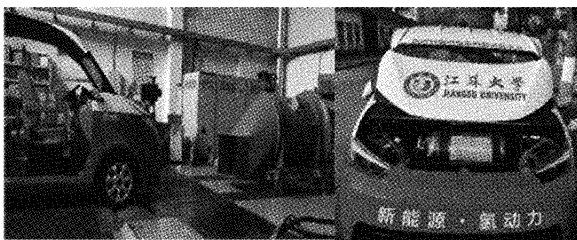


图 3 转鼓台架试验

2) 仿真与试验结果对比

由于该车辆不属于道路车辆, 仅能在校区内部使用, 最高车速也有限制, 且车辆行驶路线固定, 故采用实际测量的校园工况进行仿真, 车速及路线如图 4。本文对燃料电池观光车的纯电(电池单独供电)续驶里程、混动(电池及燃料电池协同供电)续驶里程、20% 爬坡度通过性进行了仿真与试验验证, 结果如表 1, 实车试验与仿真试验的数据误差在可接受范围内, 也验证了仿真模型的准确性。

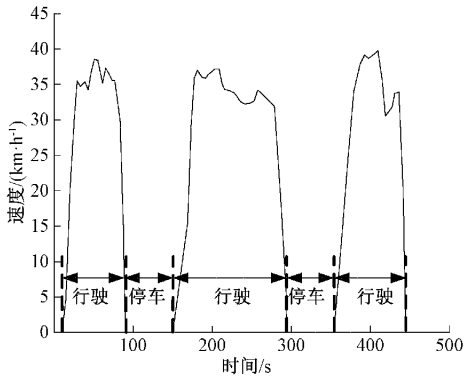


图 4 校园行驶工况

表 1 仿真与试验结果对比

试验项目	仿真结果	试验结果
纯电续航里程/km	108.5	106.9
混动续航里程/km	237.1	235.2
20%爬坡度	通过	通过

3 改进能量管理策略的设计与仿真

3.1 改进策略设计

由于车载控制策略采用了基于规则的恒温器控制策略,如引言所述,该策略下燃料电池和电池的耐久性并不能得到有效的保障,且整车经济性也不是最优的。因此本文提出了一种改进控制策略,该策略采用二次型效用函数来定性表征燃料电池和电池在能量分配中的收益。

对于燃料电池而言,主要考虑提高其耐久性和经济性,燃料电池输出功率变化越小,且维持在最高效率点附近,其在能量分配的过程中收益就越大,即效用函数值越大。对于电池而言,主要考虑提高其使用寿命,当电池输出功率变化值越小,且越接近其历史平均功率时,其效用函数越大。燃料电池和电池的效用函数如下:

$$\begin{cases} U_{fc} = \omega_{eco} \cdot U_{eco} + \omega_{dua} \cdot U_{dua} \\ U_{eco} = 1 - c(P_{fc} - P_{fctop})^2 \\ U_{dua} = 1 - d(P_{fc} - P_{fel})^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} U_{bat} = \omega_{ave} \cdot U_{ave} + \omega_{dif} \cdot U_{dif} \\ U_{ave} = 1 - a(P_{bat} - P_{ave})^2 \\ U_{dif} = 1 - b(P_{bat} - P_{batl})^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_{fc} 为燃料电池总效用函数; U_{eco} 为燃料电池考虑经济性的效用函数; U_{dua} 为燃料电池考虑耐久性的效用函数; ω_{eco} 、 ω_{dua} 为权重系数; P_{fctop} 、 P_{fel} 、 P_{maxdif} 分别为燃料电池最高效率点的输出功率、上一秒的输出功率以及燃料电池功率最大变化率; c 、 d 为系数用于约束 U_{eco} 和 $U_{dua} \leq 0$ 。 U_{bat} 为电池总效用函数; U_{ave} 为电池考虑输出功率偏离平均功率的效用函数; U_{dif} 为电池考虑功率波动的效用函数; ω_{ave} 、 ω_{dif} 为权重系数; P_{ave} 、 P_{batl} 、 P_{batmax} 分别为电池历史平

均输出功率、上一秒的输出功率以及最大可输出功率; a 、 b 为系数用于约束 U_{ave} 和 $U_{dif} \leq 0$ 。

当效用函数最大时,燃料电池以及电池的经济型和耐久性可以得到最大程度保障。燃料电池和电池效用函数最大化形式如下:

$$\begin{cases} \max f(P_{fc}) = \omega_{eco} \cdot U_{eco} + \omega_{dua} \cdot U_{dua} \\ \max f(P_{bat}) = \omega_{ave} \cdot U_{ave} + \omega_{dif} \cdot U_{dif} \end{cases} \quad (8)$$

为了简化控制器运算过程,采用加权和方法将该双目标函数最大化问题转化为单目标函数最小化问题,新目标函数改下为如下:

$$\min f(P_{fc}, P_{bat}) = -\omega_{eco} \cdot U_{eco} - \omega_{dua} \cdot U_{dua} - \omega_{ave} \cdot U_{ave} - \omega_{dif} \cdot U_{dif} \quad (9)$$

燃料电池与电池还需满足权重系数和为 1,燃料电池输出功率与电池输出功率之和等于整车需求功率 P_{req} ,且燃料电池和电池输出功率都在其自身最大范围内:

$$\begin{cases} \omega_{eco} + \omega_{dua} + \omega_{ave} + \omega_{dif} = 1 \\ 1 \geq (\omega_{eco}, \omega_{dua}, \omega_{ave}, \omega_{dif}) \geq 0 \\ P_{fc} \eta_{dc} + P_{bat} = P_{req} \\ P_{fc} \leq P_{fcmax} \\ P_{bat} \geq P_{batmin} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 实时收益最大化问题的求解

为了获得实时的燃料电池与电池在能量管理分配过程中的最大化收益,本文利用 KKT 条件(karush-kuhn-tucker conditions)和拉格朗日乘法将式(10)中的等式约束与式(9)中的目标函数组合成为新函数,最终形式如下:

$$L(P_{fc}, P_{bat}) = -\omega_{eco} \cdot U_{eco} - \omega_{dua} \cdot U_{dua} - \omega_{ave} \cdot U_{ave} - \omega_{dif} \cdot U_{dif} + h(P_{fc} \eta_{dc} + P_{bat} - P_{req}) \quad (11)$$

对式(11)进行偏微分及联立求解可得极值点:

$$P_{fc} = \frac{a \cdot \eta_{dc} \cdot \omega_{ave} (P_{req} - P_{bat}) + b \cdot \eta_{dc} \cdot \omega_{dif} (P_{req} - P_{bat})}{a \cdot \eta_{dc} \cdot \omega_{ave} + b \cdot \eta_{dc} \cdot \omega_{dif} + c \cdot \omega_{eco} + d \cdot \omega_{dua}} - \frac{c \cdot \omega_{eco} P_{fctop} - d \cdot \omega_{dua} P_{fel}}{a \cdot \eta_{dc} \cdot \omega_{ave} + b \cdot \eta_{dc} \cdot \omega_{dif} + c \cdot \omega_{eco} + d \cdot \omega_{dua}} \quad (12)$$

$$P_{bat} = P_{req} - P_{fc} \eta_{dc} \quad (13)$$

式中:除了 ω_{eco} 、 ω_{dua} 、 ω_{ave} 、 ω_{dif} 、 P_{bat} 、 P_{fc} 外其他均可视为常数,只要确定这 4 个权重系数即可确定燃料电池、电池最终目标输出功率。

令:

$$\begin{cases} \frac{\omega_{eco} + \omega_{dua}}{\omega_{ave} + \omega_{dif}} = \frac{k_1}{1 - k_1} \\ \frac{\omega_{ave}}{\omega_{ave} + \omega_{dif}} = k_2 \\ \frac{\omega_{eco}}{\omega_{eco} + \omega_{dua}} = k_3 \\ 1 \geq (k_1, k_2, k_3) \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

当电池 SOC>60 时,燃料电池不工作,车辆处于纯电模式;电池 SOC=60 时,燃料电池输出功率较小, $k_1=0$;当电池 SOC=10 时,燃料电池输出功率较大, $k_1=1$ 。为了简

化计算,本文通过线性方程表征 k_1 :

$$k_1 = \frac{60 - SOC}{60 - 10} \quad (15)$$

对于未知量 k_2, k_3 ,本文采用了一种离线仿真迭代寻优的方法确定,主要方法如下:

构造多目标优化函数如下:

$$\min g(k) = \{-s, D_{fc}, D_{bat}\} \quad (16)$$

式中: s 为一次补充能源车辆最远行驶距离。

将闪电搜索算法(lightning search algorithm)与 Pareto 解集相结合,利用闪电搜索算法的单目标快速寻优的特点结合 Pareto 多目标的支配关系,创新性地设计了一种多目标闪电搜索算法,并通过迭代仿真获得 k_2, k_3 的最优解,具体流程如下:

步骤 1) 初始化算法参数如:优化对象 k_2, k_3 , 迭代次数,数量等。

步骤 2) 将 k_2, k_3 代入仿真模型,计算适应度值: $-s, D_{fc}, D_{bat}$,并保存记录。

步骤 3) 与历史适应度记录相对比,根据 Pareto 解集原理判断适应度是否存在支配情况,若是,用新适应度取代被支配的适应度后进入步骤 4);若否,直接进入步骤 4)。

步骤 4) 根据闪电搜索算法的梯级先导传播机制更新 k_2, k_3 。

步骤 5) 判断是否满足终止条件,若是则算法结束;若否,返回步骤 2)。

所提出的控制策略原理如图 5 所示。

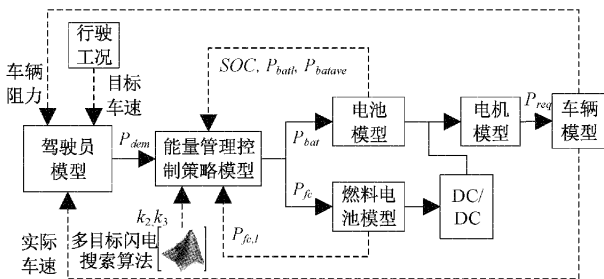


图 5 控制策略原理图

4 结果与讨论

为了验证改进策略的优越性及适用性,本文基于图 4 的校园工况对改进策略的参数进行了优化与确定,部分优化结果如表 2。从保护燃料电池寿命的角度出发,选择燃料电池寿命衰退百分比最小值对应的参数 $k_2 = 0.28, k_3 = 0.19$ 。

图 6 为基于恒温器控制策略与改进策略下燃料电池输出功率的对比。恒温器控制策略控制燃料电池一直工作在最高效率点,燃料电池输出功率保持恒定。而改进策略的燃料电池输出功率受到需求功率、电池平均功率、历史电池功率、燃料电池最高效率点功率及历史燃料电池功率的综合影响。改进策略根据电池 SOC 合理调控各个功

表 2 部分优化结果

k_2	k_3	燃料电池	电池衰退	里程/ km
		衰退百分比/ ($\times 10^{-3}\%$)	百分比/ ($\times 10^{-3}\%$)	
0.06	0.12	6.966	5.56	242.16
0.19	0.13	6.964	5.65	242.11
0.27	0.16	6.963	5.72	242.09
0.28	0.19	6.962	5.75	241.08
...

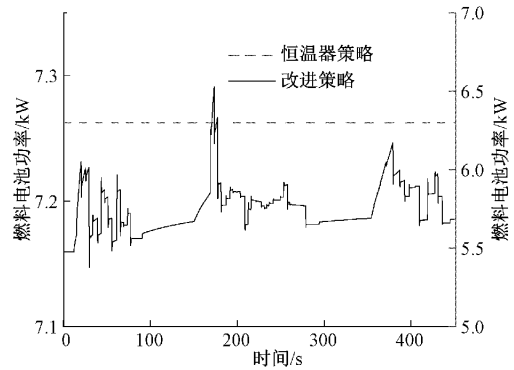


图 6 不同策略下燃料电池输出功率的对比

率之间的比重,并通过多目标优化算法求解得到最佳比重,因此改进策略下的燃料电池输出功率存在一定的波动。

由于基于恒温器控制策略的燃料电池一直工作在最高效率点,燃料电池系统效率较高。基于改进策略的燃料电池的输出功率存在波动因此其系统效率不能一直维持在最高效率点,但其系统效率与基于恒温其控制策略的效率差距不大。由于图 6 中改进策略的燃料电池输出功率大于恒温器控制策略因此其 SOC 上升较快,该现象可以从图 7 中看出。

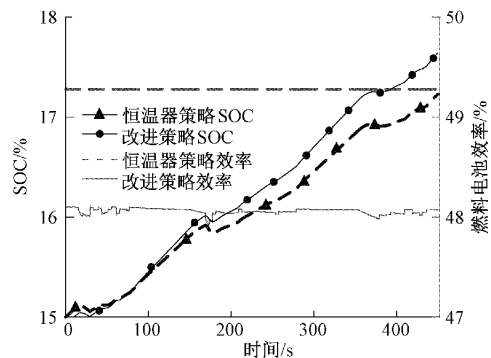


图 7 不同策略下燃料电池输出功率及电池 SOC 的对比

图 8 为不同策略下电池输出功率的对比,由于基于恒温器控制策略的燃料电池输出功率低于基于改进策略的燃料电池的输功率,因此在制动阶段恒温器控制策略电池

的输入功率小于改进策略电池的输入功率。在驱动阶段恒温器控制策略电池的输出功率则大于改进策略电池的输出功率。

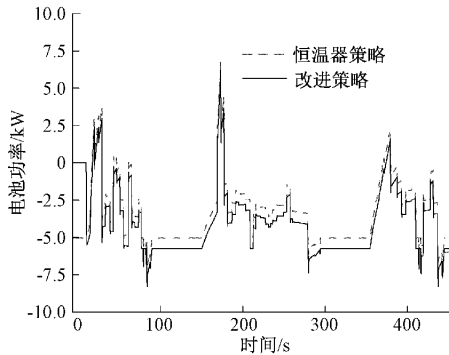


图 8 不同策略下电池输出功率的对比

本文同时也将基于全局优化的策略-动态规划算法、基于规则的策略-模糊控制与所开发的两种控制策略进行了仿真对比。车辆一次补充能源并行驶到能源全部消耗完，四种策略的对比数据如表 3。由于动态规划算法以最远续航里程做优化目标所以在 4 种控制策略中其续航里程最远经济性最好，但燃料电池寿命衰退较为严重。模糊控制的控制规则基于个人经验，且无优化目标，在 4 种控制策略中燃料电池与电池的寿命衰退程度最大，且续航里程也较差。恒温器控制策略控制燃料电池以恒定功率输出，虽然燃料电池不存在由于变载导致的寿命衰退情况，但是由于设置的燃料电池开启关闭区间较小，导致燃料电池启停次数增多，燃料电池寿命衰退程度高于改进策略。本文提出的改进策略综合考虑了燃料电池、电池耐久性以及经济性，虽然续航里程不及动态规划，但燃料电池寿命衰退最小，且电池寿命衰退也较小。对比 4 种策略，所提出的改进策略综合控制效果优于其他 3 种控制策略，尤其在保护燃料电池使用寿命方面该策略表现最佳。

表 3 不同策略下的燃料电池寿命衰退百分比

策略	启停次数	燃料电池 衰退百分比/ ($\times 10^{-3}\%$)	电池寿命 衰退百分比/ ($\times 10^{-3}\%$)	续驶 里程/ km
动态规划	6	13.24	6.43	245.3 ↑
模糊控制	11	25.32	7.51	239.6
恒温器策略	4	7.84	5.22 ↑	237.1
改进策略	2 ↑	6.96 ↑	5.75	241.1

5 结 论

所提出的改进策略相比于恒温器策略而言，虽然燃料电池的经济性略差，但是整车经济性较高，续航里程提高了 1.7%。该策略也可以有效提高燃料电池寿命，耐久性提高 11.2%。

所提出的改进策略可以根据 SOC 状态自主调节燃料电池的输出功率，SOC 较高时燃料电池输出功率较低，可以延缓燃料电池关闭时刻，降低燃料电池启停次数。SOC 较低时燃料电池输出功率较高，快速给电池补充电量提升 SOC。

所提出的改进策略是一种实时在线控制策略，燃料电池与电池在能量分配的过程中可以获得实时最大收益，同时本文又采用了全局优化算法对控制策略进行了优化，优化过程可以离线完成，不影响车辆的实时控制。最后控制策略结合了整车及零部件的历史输出功率信息，兼顾了部件的耐久性及其经济性。

参考文献

- [1] 刘静,孙闫,夏长高.考虑部件使用寿命的 FCEV 能量管理策略[J].电子测量技术,2022,45(9):1-7.
- [2] CHEN Y Y, YAO Z Y, ZHONG K. Do environmental regulations of carbon emissions and air pollution foster green technology innovation: Evidence from China's prefecture-level cities [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,350: 131537.
- [3] 王永宽,钱立军,牛礼民.插电式混合动力汽车双模糊控制策略及其优化[J].电子测量与仪器学报,2016,30(2): 209-217.
- [4] ZHAO J, LI X. A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: Degradation modes and experimental techniques[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 112022.
- [5] 吴珊.燃料电池电动汽车能量管理系统最优控制策略研究[J].国外电子测量技术,2020,39(4):101-105.
- [6] YUE M, JEMEI S, ZERHOUNI N. Health-conscious energy management for fuel cell hybrid electric vehicles based on prognostics-enabled decision-making [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 11483-11491.
- [7] WANG Y, SUN Z, CHEN Z. Development of energy management system based on a rule-based power distribution strategy for hybrid power sources [J]. Energy, 2019, 175: 1055-1066.
- [8] LEE H, SONG C, KIM N, et al. Comparative analysis of energy management strategies for HEV: Dynamic programming and reinforcement learning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 67112-67123.
- [9] XIE S, HU X, XIN Z, et al. Pontryagin's minimum principle based model predictive control of energy management for a plug-in hybrid electric bus [J]. Applied Energy, 2019, 236: 893-905.
- [10] 闫德超,马超,杨坤,等.基于工况与粒子群优化的增程汽车能量管理策略开发[J].科学技术与工程,2021,21(26):11396-11404.

- [11] 席利贺,张欣,吴建政,等. 基于动态规划与神经网络的增程式电动汽车能量管理策略研究[J]. 公路交通科技,2018,35(9):128-136.
- [12] LIAN R, PENG J, WU Y, et al. Rule-interposing deep reinforcement learning based energy management strategy for power-split hybrid electric vehicle [J]. Energy, 2020, 197: 117297.
- [13] QI X, LUO Y, WU G, et al. Deep reinforcement learning enabled self-learning control for energy efficient driving[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 99: 67-81.
- [14] SONG K, CHEN H. A comprehensive evaluation framework to evaluate energy management strategies of fuel cell electric vehicles[J]. Electrochimica Acta, 2018, 292: 960-973.
- [15] WANG J, LIU P. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.

作者简介

裴一啸,硕士,主要研究方向为氢燃料电池汽车能量管理。

E-mail:2222004096@stmail. ujs. edu. cn

尹必峰(通信作者),博士,博士生导师,教授,主要研究方向为汽车新能源,燃料电池能量管理研究。

E-mail:ybf@ujs. edu. cn