

# 燃料电池汽车改进型状态机能量管理策略研究

丁阿鑫,张晨阳,沈英

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350108)

**摘要:** 车用燃料电池“电-电”混合动力能量管理系统优化可有效提升整车燃油经济性,并可增加燃料电池系统使用寿命。针对“燃料电池+蓄电池”混合动力系统,利用动态规划原理得出其在 JN1015 和 MANHATTAN 两种循环工况下的离线优化结果。分析并提取优化结果中分配给燃料电池的功率与需求功率之间的线性关系,建立一种改进型状态机能量管理策略。在 NEDC 和 UDDS 两种循环工况下,对提出的策略在 MATLAB/Simulink 环境中进行仿真验证,结果表明改进后的策略可达到与动态规划接近的最优效果,且其控制效果与离线最优的功率分配结果的相似度可达到 96.83% 和 98.88%。

**关键词:** 燃料电池汽车;动态规划;有限状态机;能量管理策略

**中图分类号:** TP202+.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2021)02-0181-04

## Study on Improved State Machine Energy Management Strategy for Fuel Cell Vehicles

DING Axin, ZHANG Chenyang, SHEN Ying

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, 350108, China)

**Abstract:** Automotive fuel cell hybrid power system has the promise of high fuel economy of fuel cell vehicles and can prolong the span of life of fuel cell systems. In this paper, the off-line optimization results under JN1015 and MANHATTAN driving cycles are obtained by using the dynamic programming for fuel cell/battery hybrid power systems. The linear relationship between the power of fuel cell and the required power is extracted in the optimization results, and an improved state machine energy management strategy is developed. The proposed EMS is verified by NEDC and UDDS driving cycles in MATLAB/Simulink. The results show that the proposed strategy can achieve optimal control effects approximate DP-based EMS, and the similarity between its control effect and offline optimal power distribution results can reach 96.83% and 98.88% respectively.

**Keywords:** fuel cell vehicles; finite state machine; dynamic programming; energy management strategy

## 0 引言

以燃料电池系统(fuel cell system, FCS)作为主要供能装置的电动汽车,因其具有零排放的特点<sup>[1]</sup>,被认为是未来发展方向之一。然而,实际驾驶过程中车辆的动态条件复杂,为了满足动态条件下的性能要求,燃料电池汽车的驱动系统通常至少包括两个供能装置:FCS 和辅助储能系统<sup>[2]</sup>。

在燃料电池汽车中,设计合理的能量管理策略可提高汽车的燃油经济性,并延长动力系统各部件的使用寿命。

基于规则的能量管理策略是一种基于工程经验的控制策略。文献[3]综合考虑车辆的功率需求和蓄电池组的荷电状态(state of charge, SOC)提出一种基于规则的能量分配策略。在 UDDS 和 FUDS 循环工况下,该策略与不受功率限制的能量管理策略相比,可节省 8.35% 和 6.81% 的氢气消耗。文献[4]研究了基于双模糊逻辑控制的多目标优化能量管理策略,与基本的模糊逻辑控制相比,可减少 14.6% 的油耗和 40% 的电池退化成本。

基于优化的能量管理策略是基于对成本函数最小化有显著影响的分析和数值计算,常用动态规划(dynamic programming, DP)和庞特里亚金最小值原理(pontryagin's minimum principle, PMP)。文献[5]比较了基于 PMP 和基于 DP 的能量管理策略,在 FTP72、NEDC 2000 和 JN1015 循环工况中,DP 和 PMP 的氢气消耗差异在 0.5% 以内。文献[6]提出一种基于 PMP 的能量管理策略,该策略通过引入成本函数来考虑燃料电池的寿命,可有效地延长 FCS 的使用寿命。

基于规则的能量管理策略虽然相对简单,但无法得到最佳的经济性。基于优化的能量管理策略在驱动周期信息已知的前提下可实现最优,但因受到诸多因素限制,不能用于实时控制。

本研究利用基于 DP 的能量管理策略求解出离线最优分配结果。根据燃料电池系统的参考功率轨迹,提取相应的规则,综合考虑系统的功率需求和蓄电池的 SOC 限制,建立一种改进型状态机的能量管理策略。仿真结果表明,所提出的控制策略能够达到接近 DP 的最优结果,并能有效地降低燃料电池汽车总的等效氢气消耗且可实现

**基金项目:** 福建省科技厅引导性项目(2017N0013)

**第一作者简介:** 丁阿鑫(1993—),男,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向为车辆新能源及节能环保技术。

实时控制。

## 1 燃料电池汽车模型

燃料电池/蓄电池动力系统拓扑结构和能量流如图 1 所示。FCS 的输出通过 DC/DC 变换器与蓄电池的输出并行地提供给负载。FCS 的功率可通过 DC/DC 变换器进行调节,继而实现能量管理。

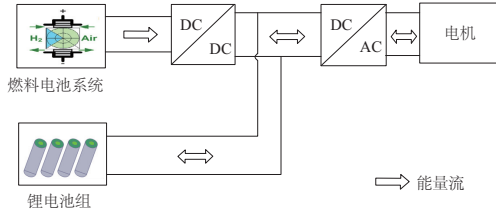


图 1 燃料电池混合动力系统的拓扑结构和功率流

### 1.1 车辆动力学模型

车辆在运行中所需要的需求功率  $P_{DM}$  可用下式表示:

$$P_{DM} = \left( vGf\cos\alpha + \frac{C_D A v^3}{21.15} + vG\sin\alpha + v\delta m \frac{dv}{dt} \right) / \eta_r \quad (1)$$

式中各参数具体意义见文献[7]。

### 1.2 电机模型

燃料电池汽车中使用的电机有两种工作模式:驱动电机模式和发电机模式。当处于驱动电机工作模式时,其功率可由下式计算:

$$P_m = \frac{T_m \cdot \omega_m}{\eta_m} \quad (2)$$

当处于发电机工作模式时,其功率如下:

$$P_m = T_m \cdot \omega_m \cdot \eta_m \quad (3)$$

式(2)和式(3)中: $P_m$ 代表电机的功率; $\omega_m$ 是电机的转速; $T_m$ 表示电机的转矩; $\eta_m$ 是电机的效率。

### 1.3 燃料电池系统模型

燃料电池单体电压的数学表达式如下<sup>[8]</sup>:

$$v_{FC} = E_{\text{nernst}} - V_{\text{Ohm}} - V_{\text{act}} - V_{\text{conc}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{nernst}}$ 是能斯特电压; $V_{\text{Ohm}}$ 、 $V_{\text{act}}$ 和  $V_{\text{conc}}$  分别为欧姆过电压、活化电压和浓差过电压。

燃料电池电堆功率可由下式计算:

$$P_{\text{stack}} = n \cdot v_{FC} \cdot I_{\text{stack}} \quad (5)$$

式中: $n$ 代表燃料电池单体的数量; $I_{\text{stack}}$ 表示燃料电池电堆电流。

在 FCS 中,氢气的消耗量和电堆电流之间的关系可用式(6)表示:

$$\varphi_{H_2, FCS} = \int_0^t f_{H_2} dt = \int_0^t \frac{60nI_{\text{stack}}AV_0}{2N_A Q} dt \quad (6)$$

式中: $f_{H_2}$ 表示燃料电池系统的氢气流量; $V_0$ 表示气体的标准摩尔体积; $A$ 是燃料电池的单片活化面积; $Q$ 是一个电子的电量; $N_A$ 代表阿伏伽德罗常数。

## 1.4 蓄电池模型

蓄电池采用  $R_{int}$  等效电路模型<sup>[9]</sup>。图 2 为蓄电池的开路电压(open circuit voltage, OCV)与 SOC 的关系曲线。根据电池内阻模型,电池输出功率  $P_{BAT}$ 、开路电压  $V$ 、电流  $I_{BAT}$  和内阻  $R$  的关系如下式:

$$I_{BAT} = \frac{V - \sqrt{V^2 - 4R \cdot P_{BAT}}}{2R} \quad (7)$$

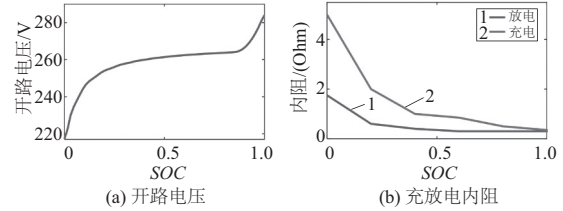


图 2 蓄电池开路电压和充放电内阻

蓄电池 SOC 可以利用式(8)计算出:

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{\int_0^t I_{BAT}(t) dt}{Q_{BAT}} \quad (8)$$

式中  $Q_{BAT}$  表示蓄电池的额定容量。

表 1 列出了燃料电池动力系统各部件参数。

表 1 混合动力系统选型参数

子系统名称	参数	数值
电机	额定功率/kW	45
	最大功率/kW	65
	额定转速/(r/min)	2 400
	最高转速/(r/min)	4 500
燃料电池系统	额定功率/kW	40
	最大功率/kW	55
蓄电池	工作电压/V	250
	额定容量/Ah	6.0
DC/DC 变换器	效率/%	95

## 2 基于改进型状态机的能量管理策略

本研究利用基于 DP 的能量管理策略求解出燃料电池/蓄电池混合系统离线最优的功率分配结果,然后根据 FCS 的参考功率轨迹,提取相应的规则,建立一种改进型状态机的能量管理策略。所提出的能量管理策略的设计方案如图 3 所示。

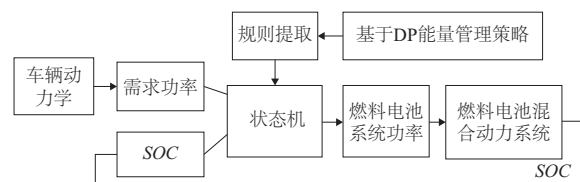


图 3 改进型状态机能量管理策略的设计方案

## 2.1 基于动态规划的能量管理策略

本研究以蓄电池的  $SOC$  作为系统的状态变量, FCS 的输出功率  $P_{FCS}$  作为系统的控制变量, 混合系统总的氢气消耗量作为系统的性能指标函数, 构建基于 DP 的最优控制问题。

系统的状态方程可用式(9)描述:

$$SOC(t) = F[SOC(t), P_{FCS}(t)] \quad (9)$$

式(10)为优化问题的性能指标函数  $J$ 。

$$J = \varphi_{H_2, FCS} = \int_{t_0}^{t_f} f_{H_2} dt \quad (10)$$

另外, 优化问题还受到约束条件式(11)的限制。

$$\begin{cases} I_{BAT, min} \leq I_{BAT} \leq I_{BAT, max} \\ P_{PCS, min} \leq P_{PCS} \leq P_{PCS, max} \\ P_{BAT, min} \leq P_{BAT} \leq P_{BAT, max} \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \\ SOC_{init} = SOC_{end} \\ 4R(SCO(t))P_{BAT}(t) \leq V^2(SOC(t)) \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $I_{BAT, max}$  和  $I_{BAT, min}$  分别为蓄电池的工作电流上、下限;  $P_{FCS, min}$  和  $P_{FCS, max}$  分别代表 FCS 的最小输出功率和最大输出功率;  $P_{BAT, min}$  和  $P_{BAT, max}$  分别是蓄电池的最小充电功率和最大放电功率;  $SOC_{min}$  和  $SOC_{max}$  分别为蓄电池  $SOC$  的下限和上限;  $SOC_{init}$  为  $SOC$  的初值,  $SOC_{end}$  为  $SOC$  的终值。

在利用 DP 算法求解时, 需要离散各阶段的状态变量和控制变量, 离散形式的状态方程如下:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= x(k) + F(u, x) \cdot \Delta t \\ k &= 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (12)$$

其中:  $x(k)$  为状态变量, 表示蓄电池的  $SOC$ ;  $u$  为控制变量, 表示 FCS 的功率;  $F$  是式(9)中的函数。

离散形式的性能指标函数为:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} f_{H_2}(k) \quad (13)$$

式中  $f_{H_2}(k)$  为每个阶段的瞬时氢气消耗量。

在求解过程中, 各阶段最优性能指标的测度可以表示为:

$$\begin{aligned} J_{N-k, N}^*[x(N-k)] &= \\ \min_{u(N-k)} (\Delta t \cdot m_{H_2} \{ [x(N-k), u(N-k)] \}) &+ \\ J_{N-(k-1), N}^*[x(N-(k-1))] & \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} x[N-(k-1)] &= \\ x[N-k] + \Delta t \cdot F[u(N-k), x(N-k)] & \\ k &= 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (15)$$

式(14)、式(15)中各参数具体意义见文献[8]。

## 2.2 基于动态规划的优化结果分析

采用图4所示的 JN1015 和 MANHATTAN 循环工况对基于 DP 能量管理策略进行仿真。  $SOC_{max}$  和  $SOC_{min}$  分别设置为 0.7 和 0.4, 初始  $SOC$  和终端  $SOC$  均设置为 0.55。离线最优控制下 FCS 的功率轨迹如图5所示(本刊黑白印刷, 相关疑问请咨询作者)。

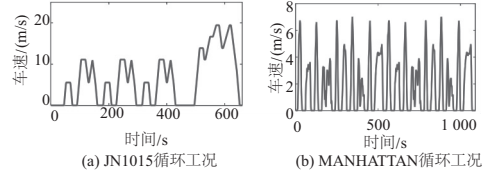


图4 JN1015 和 MANHATTAN 循环工况

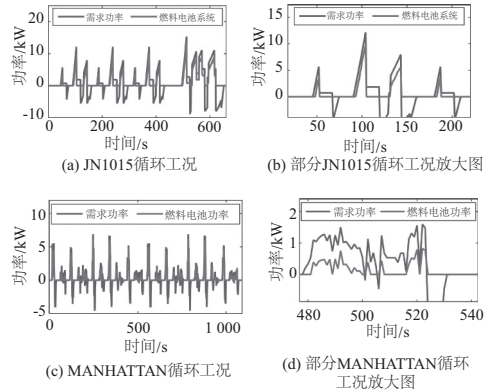


图5 JN1015 和 MANHATTAN 循环工况下功率分配

## 2.3 基于改进型状态机能量管理策略

a) 定义系统总的等效氢气消耗

将 FCS 的氢气消耗和蓄电池的等效氢气用量之和定义为燃料电池汽车的等效氢气消耗, 用来评价改进后的控制效果。若改进后的管理策略下系统总的等效氢气消耗与基于 DP 的能量管理策略的结果偏差在 5% 之内, 则说明改进后的控制策略结果接近最优。否则, 需要对建立的规则进行改进。总的等效氢气消耗计算公式如下:

$$\varphi_{Tot} = \varphi_{H_2, FCS} - \frac{\Delta SOC \cdot Q_{max} \cdot V_{BAT, avg} \cdot 3600}{\lambda \cdot \eta_{FCS} \cdot \eta_{DC}} \cdot \eta_{charge} \quad (16)$$

$$\varphi_{Tot} = \varphi_{H_2, FCS} - \frac{\Delta SOC \cdot Q_{max} \cdot V_{BAT, avg} \cdot 3600}{\lambda \cdot \eta_{FCS} \cdot \eta_{DC}} \cdot \frac{1}{\eta_{discharge}} \quad (17)$$

式(16)和式(17)中:  $\Delta SOC$  是循环工况下蓄电池  $SOC$  的变化量;  $Q_{max}$  是蓄电池的最大容量;  $V_{BAT, avg}$  表示蓄电池组的平均电压;  $\lambda$  是氢的低热值;  $\eta_{FCS}$  和  $\eta_{DC}$  是 FCS 和 DC/DC 转换器的效率;  $\eta_{charge}$  和  $\eta_{discharge}$  分别表示蓄电池的充、放电效率。

b) 改进型状态机能量管理策略的设计

改进型状态机控制是利用从离线优化结果中提取的控制规则, 根据需求的功率和蓄电池  $SOC$ , 将燃料电池汽车的运行状态划分为如下 4 种模式:

1) 启动模式: 车辆启动时, 蓄电池  $SOC$  在  $>40\%$  且需求功率在  $5 \text{ kW}$  内, 负载需求功率由燃料电池和蓄电池共同供电。

2) 巡航模式: 车辆需求功率在  $5 \sim 40 \text{ kW}$  内, 蓄电池  $70\% > SOC > 40\%$ , 可进一步划分为低速、中速和高速巡航状态。

3) 制动模式:需求功率 $<0$ ,且此时当  $SOC < 70\%$  时,即车辆处于制动状态。

4) 停车模式:负载需求功率为  $0$  且车速为  $0$  时,燃料电池、蓄电池和电机均处于关闭状态。

表 2 列出了改进型状态机控制规则。状态机原理如图 6 所示,其中 A 为启动模式, B 为巡航模式(其中  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  分别为低速、中速和高速巡航模式), C 为制动模式, D 为停车模式。 $S_i(i=0,1,\dots,7)$  为切换标志,切换条件分别为: $S_1:(5 < P_{DM} \leq 40) \parallel (40\% < SOC < 70\%)$ ;  $S_2:(5 < P_{DM} \leq 8) \parallel (40\% < SOC < 70\%)$ ;  $S_3:(8 < P_{DM} \leq 12) \parallel (40\% < SOC < 70\%)$ ;  $S_4:(12 < P_{DM} \leq 40) \parallel (40\% < SOC < 70\%)$ ;  $S_5:(P_{DM} < 0) \parallel (SOC < 70\%)$ ;  $S_6:(0 < P_{DM} \leq 5) \parallel (40\% < SOC < 70\%)$ ;  $S_7:(P_{DM} = 0) \parallel (40\% < SOC)$ 。

表 2 改进型状态机控制规则表

运行模式	需求功率 $P_{DM}/kW$	$SOC/\%$	燃料电池参考输出功率 $P_{FCS}/kW$
启动	$0 < P_{DM} \leq 1.5$	40~70	$P_{FCS} = P_{DM} - 1.25$
	$1.5 < P_{DM} \leq 2$		$P_{FCS} = 0.5 \cdot P_{DM} + 0.5$
	$2 < P_{DM} \leq 5$		$P_{FCS} = P_{DM} - 1$
巡航	$5 < P_{DM} \leq 8$	40~70	$P_{FCS} = 0.9 \cdot P_{DM}$
	$8 < P_{DM} \leq 12$		$P_{FCS} = 0.8 \cdot P_{DM} + 1$
	$12 < P_{DM} \leq 40$		$P_{FCS} = P_{DM} - 2.5$
制动	$P_{DM} < 0$	$< 70$	$P_{FCS} = 0$
停车	$P_{DM} = 0$	$> 40$	$P_{FCS} = 0$

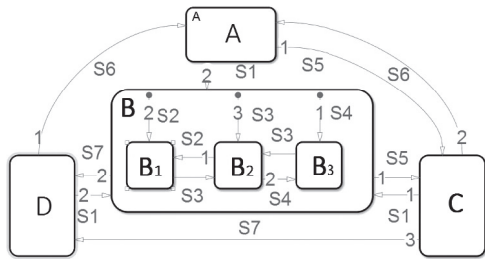


图 6 状态机原理示意图

### 3 能量管理策略的仿真分析

本研究利用 NEDC 和 UDSS 循环工况对提出的改进型状态机能量管理策略进行仿真验证分析。

#### 3.1 NEDC 和 UDSS 循环工况下的验证分析

图 7 和图 8 分别为燃料电池混合动力系统在 NEDC 和 UDSS 循环工况下的仿真结果。在图 7(a) 中,燃料电池功率轨迹与基于 DP 控制下的参考功率轨迹接近重合。其中,在 289~297 s、358~374 s、748~764 s 等时间段,需求功率在  $0 \sim 5 kW$  内,汽车工作在启动模式。此时燃料电池的功率与参考值的差异较大,这是因为负载需求功率处于低功率段,最优控制下燃料电池功率轨迹与需求功率轨迹之间线性关系不强,规则提取时不够准确导致的误差。同样,在图 8(a) 中也有类似的结论。

当需求功率在  $5 \sim 40 kW$  内,汽车处于巡航模式时,燃

料电池功率轨迹与基于 DP 控制下的参考功率几乎重合,如 331~338 s、831~890 s 等时间段。当需求功率 $<0$  时,汽车处于制动模式,如 85~95 s、280~290 s 等时间段。

图 7(b) 与图 8(b) 展示了蓄电池  $SOC$  与参考  $SOC$  轨迹的对比。可见其轨迹趋势与参考轨迹是一致的,差异为终端的  $SOC$  值。图 7(b) 终端的  $SOC$  值高于初始值 0.55, 电池最终处于充电状态。由于电池充电时存在效率问题,会损失一些能量,这增加了系统的消耗。所以在图 7(d) 中,系统总的等效氢气消耗与参考值差别较大。而图 8(b) 中,蓄电池  $SOC$  的终端值低于初始值 0.55, 蓄电池最终处于放电状态。降低了充电时的能量损耗,使系统总的氢气消耗更少,结果更接近最优。在图 8(d) 中两条氢气消耗曲线更加接近,也可得出相同的结论。

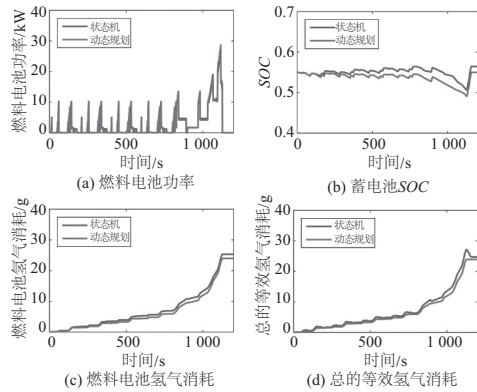


图 7 NEDC 循环工况下仿真结果

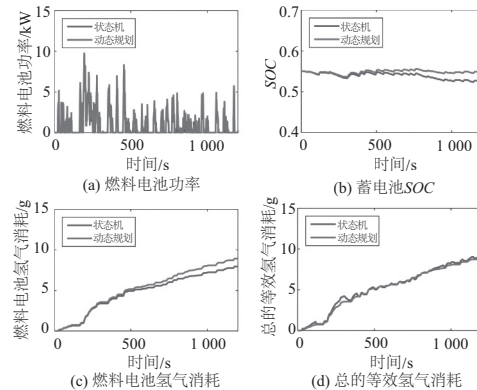


图 8 UDSS 循环工况下仿真结果

图 7(d) 与图 8(d) 是两种工况下系统总的等效氢气消耗对比,具体燃料消耗见表 3。可见,在 NEDC 和 UDSS 循环工况中,改进型状态机的功率分配策略下系统总的等效氢气消耗与基于 DP 的差异仅为 3.17% 和 1.12%,这说明本研究提出的基于改进型状态机 EMS 可以达到接近 DP 的最优控制效果。

表 3 燃料消耗比较

循环工况	氢气消耗/g		与 DP 的差异/%
	动态规划	改进型状态机	
NEDC	23.956	24.715	3.17
UDSS	9.667	9.775	1.12

(下转第 204 页)

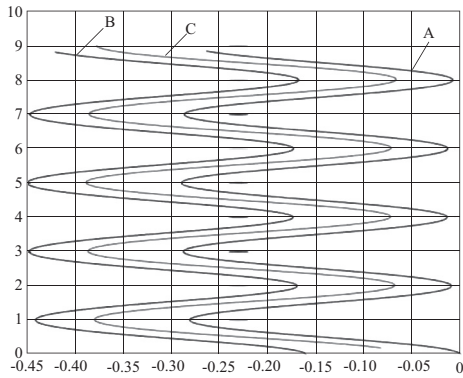


图9 MATLAB仿真小车三个轮的轨迹图

动轨迹是关键,其轨迹主要依靠转向机构来实现。通过先对总传动比的确定,从而确定后轮直径、一对齿轮、曲柄摇杆机构的曲柄、摇杆、连杆等的尺寸。利用 SolidWorks 绘制出了小车的三维模型,对小车整体结构进行分析。再对小车建立数学模型,采用 MATLAB 对轨迹进行优化处理,从而得出小车的合理设计数据。但小车本身存在不可避免的制造误差、安装误差和装配误差等,小车的运行轨迹必然会受到影响。

(上接第 184 页)

## 4 结语

本文对基于状态机的能量管理策略进行了改进。首先,分析了不同复杂循环工况下基于 DP 控制的结果,得出燃料电池系统的最优工作区域;然后,根据典型驾驶循环的特征和离线优化的结果,提取相应的规则用于改进型有限状态机的设计;最后,定义混合系统的总等效氢气消耗来评价仿真结果。利用 NEDC 和 UDDS 两种循环工况对所提出的改进型状态机能量管理策略进行验证,仿真结果表明,其控制效果与离线最优结果的相似度可达到 96.83% 和 98.88%。继而说明在不同的复杂驱动工况下,所提出的有限状态机能量管理策略可以达到与 DP 相似的最优控制效果。本研究可使混合动力系统总等效氢气消耗近似最优,且具有普遍适用性。

### 参考文献:

- [1] 王新光. 燃料电池混合能源优化管理与控制算法研究[D]. 太原:太原科技大学,2016.
- [2] 元勇伟,许思传,王玉. 燃料电池汽车动力总成方案分析[J].

### 参考文献:

- [1] 王斌,王衍,李润莲,等. “无碳小车”的创新性设计[J]. 山西大同大学学报(自然科学版),2012,28(1):59-62,96.
- [2] 李林松,伍文广. 基于 Matlab 的无碳小车转向机构优化设计[J]. 机械传动,2019,43(2):59-63.
- [3] 同济大学数学系. 高等数学[M]. 北京:高等教育出版社,2014.
- [4] 钱瑞明,金京,杨铁牛,等. 机械设计[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [5] 孙桓,陈作模,葛文杰,等. 机械原理[M]. 8 版. 北京:高等教育出版社,2013.
- [6] 刘文清,娄锐,贺鹏程,等. 无碳小车的优化设计[J]. 机械制造,2017,55(12):32-35.
- [7] 贾先,王晗,王笃,等. 基于不完全齿轮与曲柄摇杆机构进行转向控制的无碳小车[J]. 机械制造,2017,55(12):36-38.
- [8] 李夫忠,杜红梅,宋冬利,等. 复杂机械系统可靠度分配方法研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(3):29-32.
- [9] 张天宇,马帅,李恩智,等. 基于 ADAMS 的无碳小车运动学仿真分析[J]. 机械研究与应用,2018,31(3):9-11.

收稿日期:2019-12-10

电源技术,2017,41(1):165-168.

- [3] WANG Y J, SUN Z D, CHEN Z H. Development of energy management system based on a rule-based power distribution strategy for hybrid power sources[J]. Energy, 2019, 175: 1055-1066.
- [4] YANG J B, XU X H, PENG Y Q, et al. Modeling and optimal energy management strategy for a catenary-battery-ultracapacitor based hybrid tramway[J]. Energy, 2019, 183: 1123-1135.
- [5] ZHENG C H, XU G Q, PARK Y I, et al. Comparison of PMP and DP in fuel cell hybrid vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(1): 117-123.
- [6] ZHENG C H, XU G Q, PARK Y I, et al. Prolonging fuel cell stack lifetime based on Pontryagin's Minimum Principle in fuel cell hybrid vehicles and its economic influence evaluation[J]. Journal of Power Sources, 2014, 248: 533-544.
- [7] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2009.
- [8] 林雨珊,沈元兴,沈英. 车用燃料电池混合动力系统自适应控制研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):168-172,200.
- [9] 夏超英,杜智明. 混合动力汽车实时优化控制策略仿真分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2016,46(4):1276-1286.

收稿日期:2020-02-26