

燃料电池汽车混合度与能量管理策略研究

宋昱, 韩恺, 李小龙, 王东洋

(北京理工大学, 北京100081)

摘要：针对目标车辆，以满足车辆动力性为前提，进行燃料电池动力系统静态匹配，并基于GT-Suite平台建立燃料电池动力系统模型及整车模型。以NEDC循环（新欧洲行驶工况）为研究工况开展在不同混合度下，不同能量管理策略对整车经济性的影响规律及影响机理研究，为确定燃料电池轿车最优能源配置提供依据。结果表明，燃料电池动力系统混合度及能量管理策略差异会导致燃料电池、动力电池功率分配以及运行时间不同，进而影响动力系统效率进而影响整车经济性；功率跟随模式在中混合度情况下整车经济性最优，开关控制模式在低混合度情况下整车经济性最优。

在世界能源危机日益严重、环境污染恶化的大背景下^[1]，氢燃料电池汽车对稳定能源供给、改善能源结构、提升国际竞争力和科技创新实力具有显著的意义，成为新能源汽车发展的重要技术方向[2]。

在燃料电池车辆混合动力系统中，目前主要有纯燃料电池、燃料电池加动力电池、燃料电池加超级电容等6种配置方案，其中

燃料电池加动力电池的动力配置方案具有加速性好，可靠性高，经济性好的优点，被广为应用^[3]

。在燃料电池加动力电池的动力系统配置中存在两种动力源功率组合以及分配问题^[4]，混合动力汽车不同动力源的功率组合称为混合度^[5]，混合度对燃料电池与动力电池工作效率有较大影响，影响了整车经济性^[6]

。而整车能量管理策略基于事件与时间，合理分配主、辅电源输出功率分配，保证整车性能要求以及各部件合理的工作状态^[7]，对经济性有着显著的影响^[8-10]

。混合度与能量管理策略对整车经济性与动力性有着复杂关系，因此如何针对不同混合度的混合动力系统科学选取合适的控制策略成为亟待解决的问题之一^[11]

。现阶段针对该方面内容，国内的研究主要是基于整车指标和行驶循环，研究不同混合度对燃料电池燃料经济性的影响

。张

涛研究了

在不同循环工况下

，混合度对整车动力系统经济性的影响，并考虑到了购置成本随混合度变化情况^[11]

。赵治国通过制定自

适应能量管理策略，研究了NEDC工况下

不同混合度下整车经济性和动力性^[12]

。王勇等人研究了不同工况下，混合度对燃油经济性的影响，但未考虑到能量管理策略对经济性的影响^[13]。

本文将针对目标车辆进行动力系统匹配，基于GT-Suite平台建立整车动力系统模型，研究不同能量管理策略与混合度，两者对电-电混合燃料汽车燃油经济性的影响规律。

1 动力系统选取与参数设计

1.1 整车参数及动力性要求分析

原型车基本参数如表1所示。

表 1 整车基本参数

| 参数名称 | 参数值 |
|---------------------|--------|
| 整车质量/kg | 1 580 |
| 迎风面积/m ² | 2 29 |
| 车轮半径/m | 0. 307 |
| 传递效率 | 0. 9 |
| 滚阻系数 | 0. 014 |
| 风阻系数 | 0. 318 |
| 旋转质量换算系数 | 1. 05 |

整车动力性指标如表2所示。

表 2 整车动力性指标

| 指标名称 | 指标值 |
|-------------|-----|
| 最高车速/(km/h) | 120 |
| 最大爬坡度/% | 20 |
| 百公里加速时间/s | 15 |

根据车辆动力学理论可知整车需求功率 P 为：

$$P = \frac{v}{3\ 600\eta_t} \left(mg\sin\alpha + mgf\cos\alpha + \frac{C_D A}{21.15} v^2 + \frac{\delta m dv}{dt} \right). \quad (1)$$

式中： v 为车速； m 为整车质量； α 为坡度角； C_D 为空

气阻力系数； A 为迎风面积； δ 为旋转质量换算系数； η_t 为传递系统效率。

1) 当车辆达到最高车速要求时, 功率为 P_1 :

$$P_1 \geq \frac{V_{\max}}{3600\eta_m\eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A V_{\max}^2}{21.15} \right), \quad (2)$$

将相关参数代入式 (2), 可以得到 $P_1 \geq 33.55 \text{ kW}$ 。

2) 当车辆处于最大爬坡状态, 以 20 km/h 行驶时, 有整车需求功率 P_2 :

$$P_2 \geq \frac{V_i}{3600\eta_m\eta_t} \left(mgf \cos \alpha_{\max} + mg \sin \alpha_{\max} + \frac{C_D A V_i^2}{21.15} \right), \quad (3)$$

将相关参数代入式 (3), 可以得到 $P_2 \geq 43.26 \text{ kW}$ 。

3) 为了满足加速性需求, 车辆加速运动所需功率为 P_3 :

$$P_3 \geq \frac{1}{3600\eta_m\eta_t} \left(mgf V_m + \delta m \frac{du}{dt} + \frac{C_D A V_m^3}{21.15} \right), \quad (4)$$

将相关参数代入式 (3), 可以得到 $P_3 \geq 49.43 \text{ kW}$ 。

式中: t_m 为最大加速时间, V_m 为最大速度。

1.2 电机参数

驱动电机需要确保其最大功率大于所有工况最大需求量, $P_{\max} \geq \max(P_1, P_2, P_3)$, 取整得到最大功率 $P_{\max} = 50 \text{ kW}$ 。电机最高转速为电机恒功率区可以达到的最高转速, 应满足汽车最高车速行驶要求。由车速与转速对应关系可以得到:

$$V = \frac{\omega r}{i_o} = \frac{2\pi n r}{60 i_o} \times 3.6 = \frac{0.377 n r}{i_o}, \quad (5)$$

带入 $V_{\max} = 120 \text{ km/h}$; $i_o = 9.11$; $r = 0.307 \text{ m}$ 。

式中, 得到 $n_{\max} = 9\,446 \text{ rpm}$;

电机基速通过百公里加速时间确定。当汽车以最大速度进行百公里加速时, 电机先以恒转矩进行工作, 达到基速以恒功率工作, 直至达到目标速度。根据加速过程小于 15 s , 可以求得 $n_e = 4\,723 \text{ rpm}$ 。

$$T_e = 9\,550 \frac{P_e}{n_e} = 51 \text{ Nm}, \quad (6)$$

峰值扭矩为

$$T_{\max} = 9\,550 \frac{P_{\max}}{n_e} = 101 \text{ Nm}. \quad (7)$$

获得电机参数如表 3 所示。

表 3 电机参数表

| 参数名称 | 参数值 |
|----------|-------|
| 额定功率/kW | 25 |
| 最大功率/kW | 50 |
| 额定转矩/Nm | 51 |
| 最大转矩/Nm | 101 |
| 额定转速/rpm | 4 723 |
| 最大转速/rpm | 9 446 |

1.3 燃料电池混合度边界选取原则

考虑到DCDC效率以及沿程损耗，取转换效率90%^[5]

，取总功率需求为55kW，由于混合度改变，燃料电池与动力电池功率占比不同，燃料电池最小功率选取应当考虑到燃料电池单独工作时，保证车辆以80km/h持续行驶。由式（2）—式（4）可以得到燃料电池最小功率为11kW。动力电池应满足峰值功率需求，以及回收制动能量需求。

燃料电池与动力电池两种能量总功率为55kW，当燃料电池功率最小为11kW时，混合度约为0.2。动力电池在工况中起到削峰填谷的作用，并且回收制动能量，动力电池最小峰值功率为20kW，此时混合度约为0.6。混合度为0.1为最小间隔，可以得到表4所示功率混合度配比表。

表 4 混合度功率表

| 混合度 | 燃料电池功率/kW | 动力电池功率/kW |
|-----|-----------|-----------|
| 0.2 | 11 | 44 |
| 0.3 | 16.5 | 38.5 |
| 0.4 | 22 | 33 |
| 0.5 | 27.5 | 27.5 |
| 0.6 | 33 | 22 |

1.4 动力电池参数选型

本文选用某公司生产的磷酸铁锂电池^[15]，其基本参数如下表5所示。

表 5 磷酸铁锂电池参数

| 项目 | 磷酸铁锂电池 |
|----------|--------|
| 容量/A * h | 11 |
| 电压/V | 3.2 |
| 最大充电电压/V | 3.65 |
| 最小放电电压/V | 2 |
| 最大充电电流 | 3C |
| 最大放电电流 | 10C |
| 质量/g | 50 |

考虑到动力电池需要满足1.3中不同混合度的功率需求，得到不同混合度的动力电池模块，如表6所示。

表 6 不同混合度的动力电池参数

| 混合度 | 容量/Ah | 电压/V | 额定功率/kW | 包数量 |
|-----|-------|------|---------|---------|
| 0.2 | 33 | 320 | 66 | 100 * 3 |
| 0.3 | 33 | 320 | 66 | 100 * 3 |
| 0.4 | 33 | 320 | 66 | 100 * 3 |
| 0.5 | 22 | 320 | 44 | 100 * 2 |
| 0.6 | 22 | 320 | 44 | 100 * 2 |

1.5评价指标

本文选用等效百公里氢耗量作为经济性指标，百公里氢耗量将动力电池中初末差值电量等效转换为氢气体量。

等效百公里耗氢量计算式为：

$$M = \frac{m_{fc, H_2} + m_{b, H_2}}{S} \times 100, \quad (8)$$

其中：

$$m_{b, H_2} = \frac{E \times 3.6 \times 10^6}{120 \times 10^3 \times 1000 \eta_{fc}}. \quad (9)$$

式中： M 为百公里耗氢量，kg/(100 km)； m_{b, H_2} 为动力电池等效耗氢量，kg； m_{fc, H_2} 为燃料电池耗氢量，kg； S 为续航里程，km。

2 能量管理策略

目前，能量管理策略主要分为规则式能量管理策略与基于优化的能量管理策略^[13]。针对燃料电池动力系统，被普遍使用的能量管理策略为开关控制策略与功率跟随控制策略^[4]。本文主要研究这两种策略在不同混合度下对经济性造成的影响。

2.1 开关控制策略

开关控制策略根据动力电池SOC (State of Charge) 荷电状态来启动关闭燃料电池。燃料电池在恒定点工作，其控制效果图如图1所示。开关模式的基本思路为：燃料电池在定点工作，动力电池作为功率平衡装置来满足具体的汽车行驶要求^[3]。

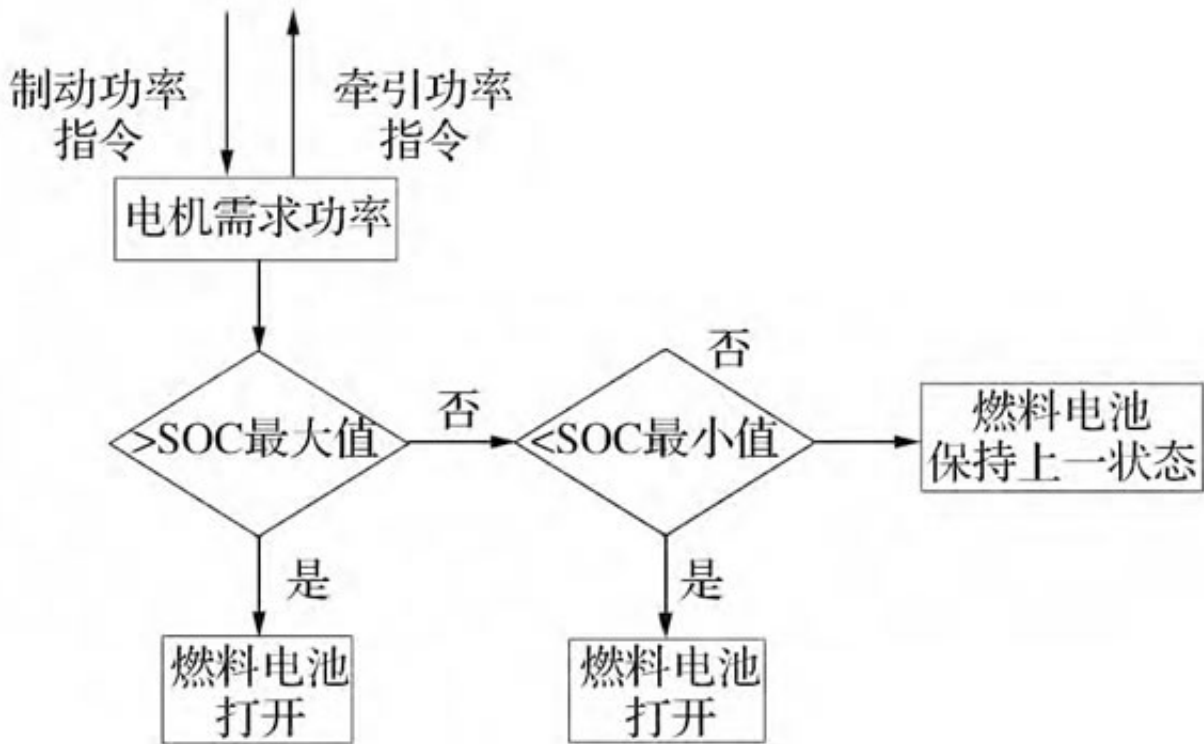


图 1 燃料电池开关控制工作模式流程图

当动力电池SOC低于设定值最低限度时，燃料电池以额定功率工作；当动力电池SOC高于设定最高额度时，燃料电池关闭；当动力电池在高低设定值之间，维持上一时刻状态，减少燃料电池开启次数。根据资料，对于电动车PEMFC发动机，一般选定单池电压为0.6~0.65V^[16]，本文中选定单片电压为0.65V，进而根据电池组片数确定总功率。

P_{req} 为燃料电池需求功率， P_{req} 按不同混合度依据表4取值， SOC_{max} ， SOC_{min} 分别为动力电池荷电状态最高限值与最低限值。

2.2功率跟随控制策略

功率跟随管理策略基本思想为依照动力电池SOC与功率需求调整燃料电池输出，使动力电池处于理想电量附近以最佳状态进行浅循环充放电工作。其控制效果图如图2所示，当燃料电池低于 SOC_{min}

或者电

动机需求功率

较高，蓄能器功率不足，燃

料电池需要工作给负载提供动力；当动力电池和电量高

于 SOC_{max}

，且电机需求功率较小，燃料电池处于关闭状态。当燃料电池处于状态跟随状态时，电机需求功率不大，动力电池荷电状态较好，燃料电池跟随上

一时刻状态，减少燃料电池开关次数，延长燃料电池寿命^[15]

。为了更加直观说明该控制原理，功率跟随控制模式如图2所示。

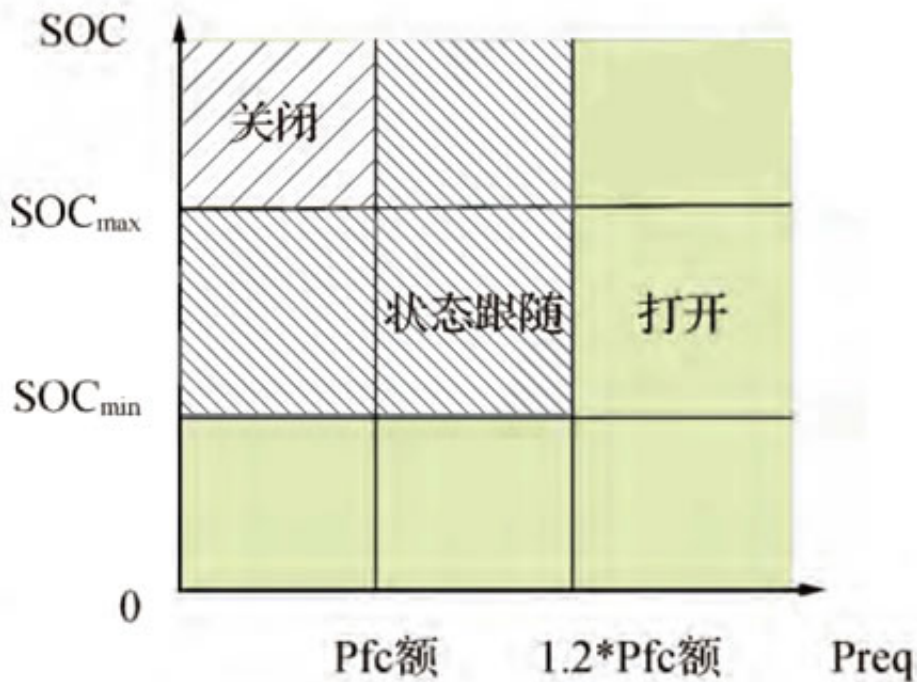


图 2 功率跟随控制模式示意图

燃料电池需求功率计算式如式(10)所示：

$$P_{req} = P_{mc_in} - power_{charge} \times spd_{scale} \times \frac{\left(SOC - \frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2} \right)}{\frac{1}{2} (SOC_{max} - SOC_{min})}. \quad (10)$$

燃料电池工作时的均衡功率，需要同时考虑到电机工作需求与动力电池荷电状态，使动力电池SOC维持在期望值附近。

$power_{charge}$ 为动力电池额定功率， SOC_{max} ， SOC_{min} 分别为动力电池SOC高低设定值，SOC为当前SOC值， spd_{scale} 为传输系数，Pfc为燃料电池额定功率。

3整车动力模型建立

本文根据选取动力系统参数，基于实验数据与汽车动力学理论建模，建立基于GT-Suite的前向仿真模型，该模型可以对基于整车模型的动力系统关键元器件进行仿真。建立模型如图3所示。

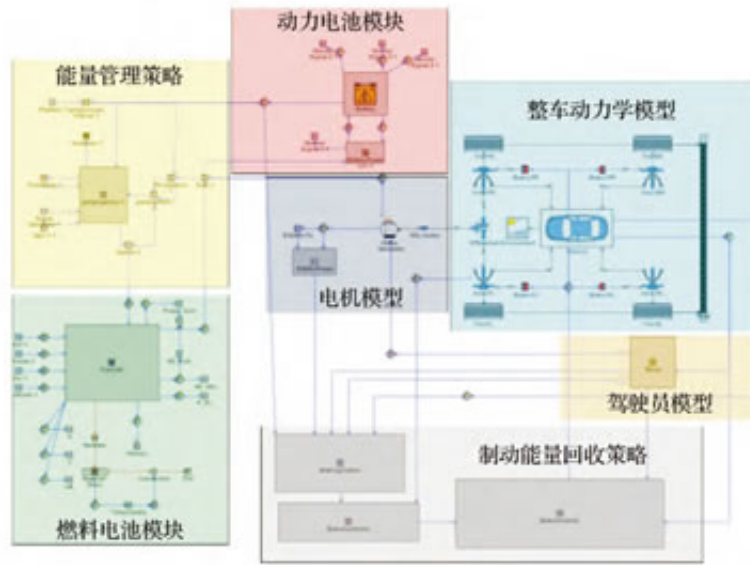


图3 基于整车的燃料电池动力系统模型

3.1 动力电池模型

本文使用简单内阻模型对电池进行仿真。由能量守恒可以得到：

$$IV_{oc} - I^2 R_{int} - CP_{request} = 0, \quad (11)$$

可以得到电流为：

$$I = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4(R_{int})(P_{request}C)}}{2(R_{int})}, \quad (12)$$

SOC 状态可以表示为：

$$SOC = \frac{\text{Instantaneous} \cdot \text{Capacity}}{\text{Maximum} \cdot \text{Capacity}}, \quad (13)$$

$$\text{Instantaneous} \cdot \text{Capacity} = Q - \int Idt. \quad (14)$$

式中： V_{oc} 为电池开路电压， R_{int} 为电池内阻， V_{oc} 与 R_{int} 为实验数据拟合的 SOC 函数， C 为电池库伦效率。

3.2 燃料电池模型

燃料电池模型为机理模型，根据电流电压曲线与功率密度曲线可以得到极化曲线图，极化曲线可以由下式描述：

$$V = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{conc}, \quad (15)$$

式中： V 为燃料电池开路电压， E 为电池电动势， η_{act} 为活化损失， η_{ohmic} 为欧姆损耗， η_{conc} 为浓差损失。

其中：

$$\eta_{act} = \frac{R_{gas} T}{2\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_o}\right), \quad (16)$$

$$\eta_{conc} = -C \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right), \quad (17)$$

R_{gas} 为气体常数， α 为电荷转移系数， i_o 为交换电流密度， C 为质量转移系数

3.3 电机模型

电机模型数据由实验得来，发电状态与做功状态的效率为电机转速 n 以及扭矩 T 的函数，即：

$$\eta_{m_dis} = f(n, T) T \geq 0, \quad (18)$$

$$\eta_{m_chg} = f(n, T) T \leq 0. \quad (19)$$

3.4 整车动力学模型

本文仅考虑汽车纵向运动特性，即车辆直线行驶过程中，电机需满足加速要求，爬坡性能，克服空气阻力，高速行驶等要求^[7]。车辆主要受牵引力制动力、滚动阻力、空气阻力、坡道阻力、加速阻力。

$$F = mgf \cos \alpha + \frac{C_D}{21.15} A u^2 + \sigma m \frac{du}{dt} + mg \sin \alpha. \quad (20)$$

其中： F 为整车驱动力； m 为整车质量； g 为重力加速度； f 为轮胎滚动阻力系数； α 为爬坡度； C_D 为空气阻力系数； A 为迎风面积； σ 为旋转质量换算系数； u 为汽车行驶速度。

3.5模型校核

在建立基于实验数据以及汽车动力学理论的前向仿真模型后，本文分别就百公里加速以及最高车速进行校核，由于本文以NEDC工况为研究工况，最大爬坡度不做校核。

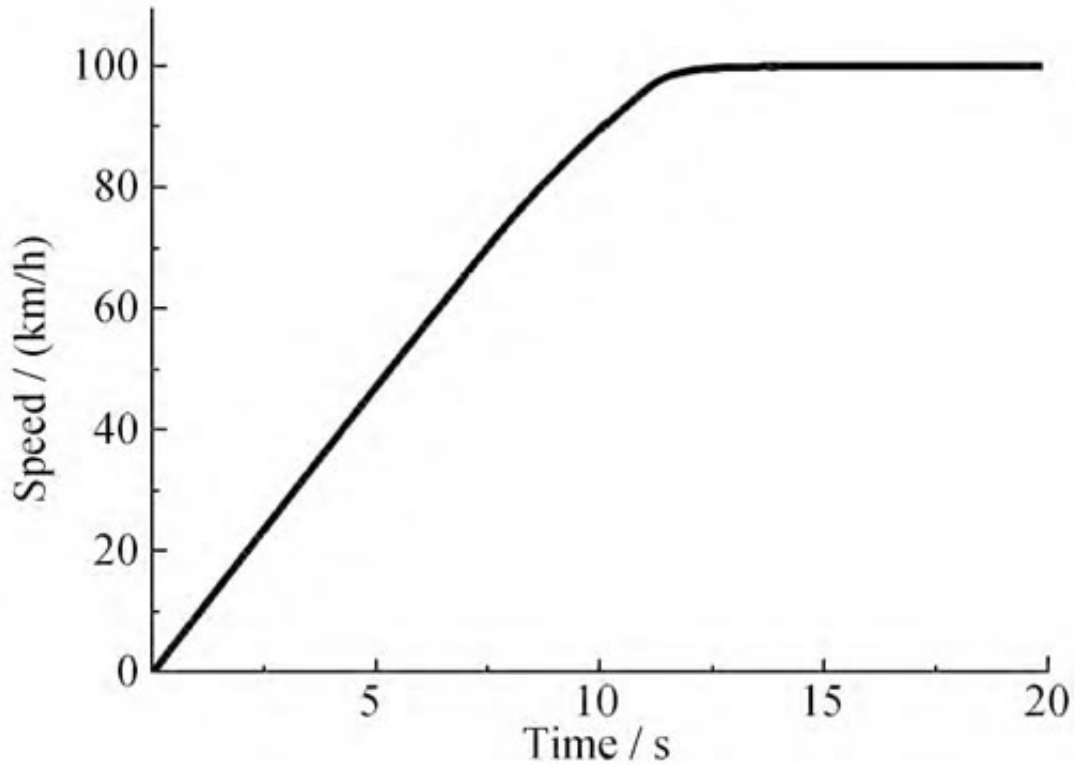


图 4 车辆百 km 加速

由图4可得车辆百公里加速时间在12.27s，不超过15s，满足车辆加速的设计要求。图5为车辆在NEDC工况下车辆行驶速度图，可以从中看出实际行驶速度很好地跟随了设定值，两条曲线重合，最高速度达到120km/h，满足车辆最高行驶速度的设计要求。

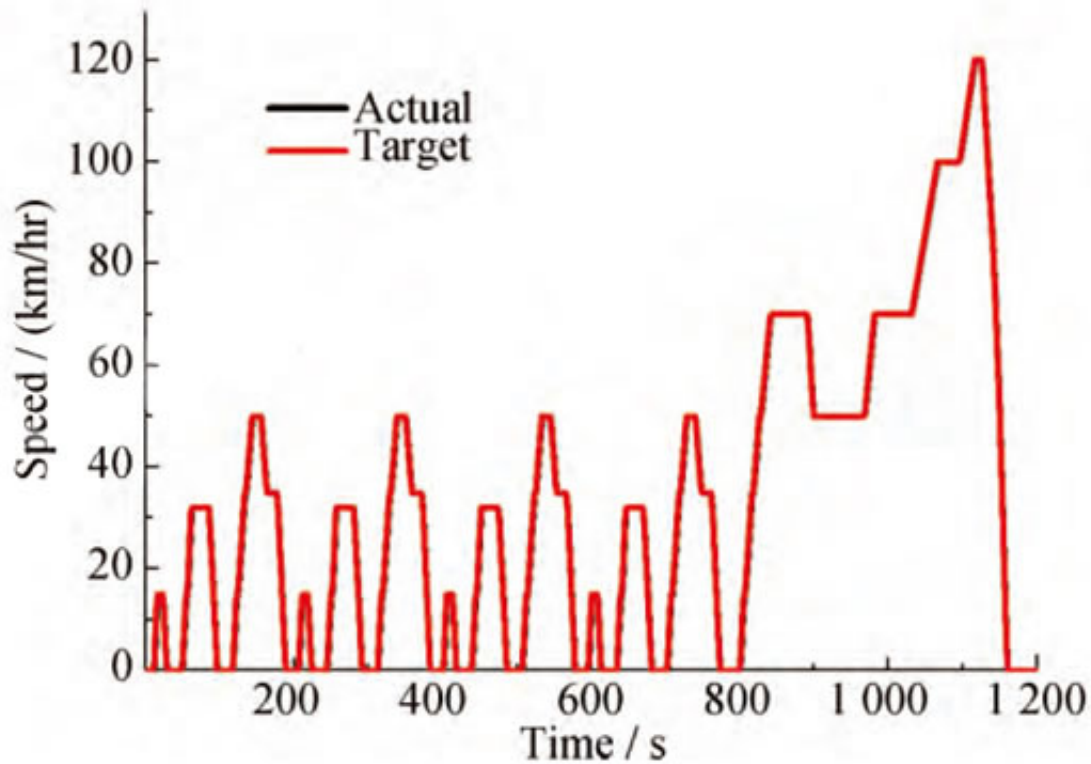


图 5 车辆 NEDC 工况

4仿真结果分析

在进行参数设计以及能量管理策略制定之后，本文基于GT-Suite平台搭建了整车及动力系统模型，在NEDC工况下对混合度与能量管理策略对动力系统经济性进行研究，得到以下结果。

4.1不同混合度下燃料电池状态变化

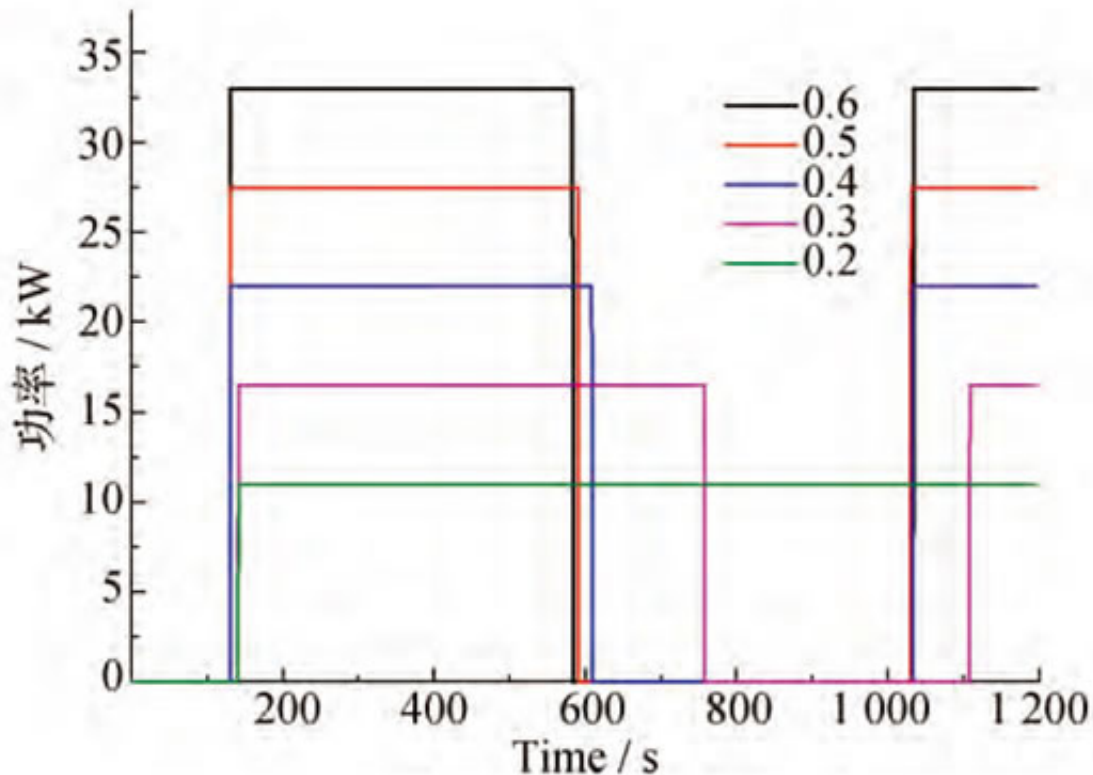


图 6 不同混合度下开关控制模式燃料电池输出

图6为开关控制策略下不同混合度条件下燃料电池输出变化情况，由图6可知，在开关控制策略模式下，燃料电池始终工作在额定工作点，随着混合度的增大，燃料电池输出功率增大，充电能力增强，工作时间减小。

图7为功率跟随控制策略下不同混合度条件下燃料电池输出功率的变化情况，由图可知，在功率跟随控制策略模式下，随着动力电池荷电状态（SOC）不断改变，需求功率不断发生变化，燃料电池的输出功率随之改变，不再工作于额定状态。图8展示了燃料电池不同混合度下，功率跟随模式燃料电池开关次数与开启时刻变化，可以看出随着动力系统混合度的增大，燃料电池最大输出功率增大，仅在大功率需求阶段工作，所以开关次数随混合度增大而减少，起始工作点后移。

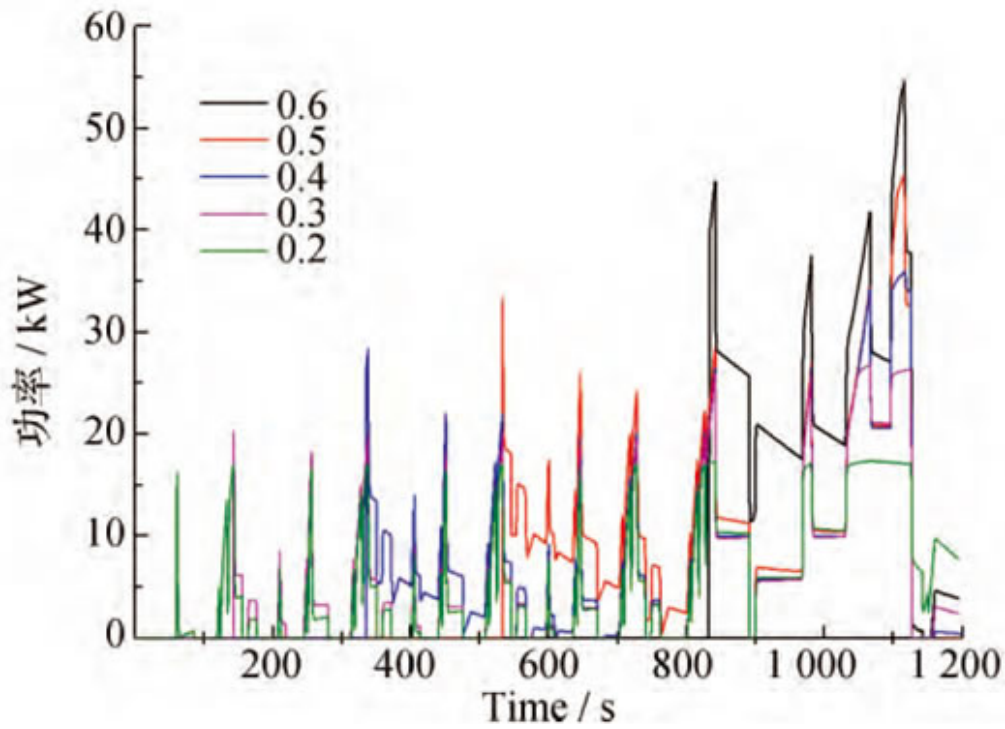


图 7 不同混合度下功率跟随模式燃料电池输出

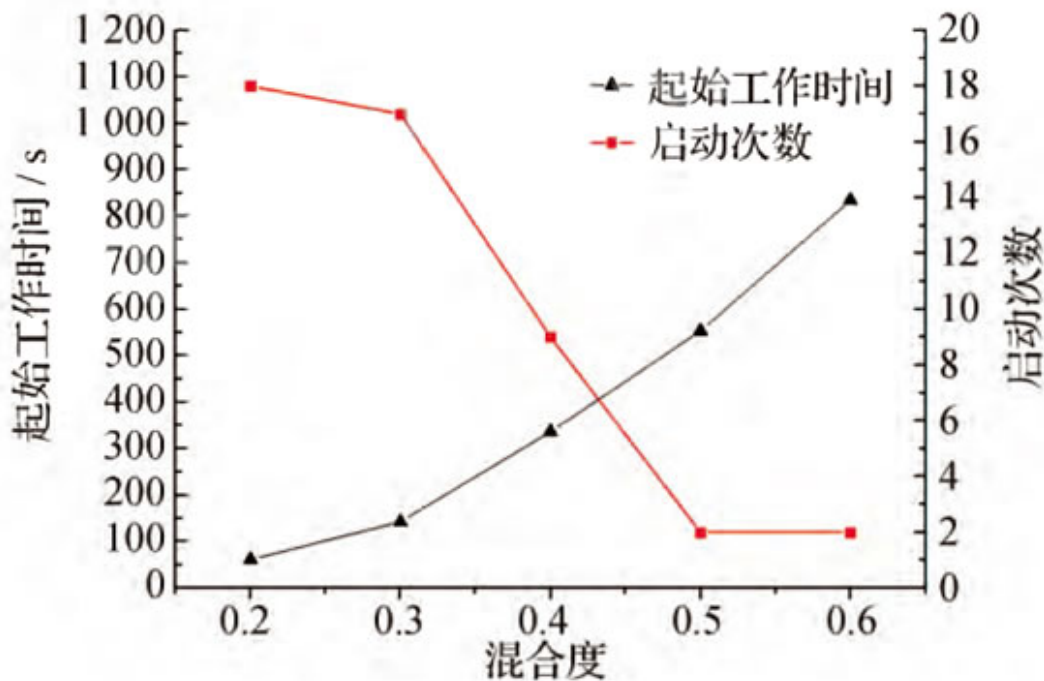


图 8 不同混合度下功率跟随模式燃料电池
开关次数与开启时刻

突然变载、启停次数增加会导致电池性能衰减与寿命缩短[17]。在相同混合度下，相对于开关控制模式，功率跟随模式燃料电池工作状态不断变化，启停次数增加，导致燃料电池的使用寿命受到影响，开关模式燃料电池在不同混合度情况下寿命长于工作在功率跟随模式下。随着混合度的增大，开关控制模式下燃料电池工作时间减少，电池工作寿命增长。功率跟随模式下，随混合度增加，燃料电池只在大功率需求阶段工作，开关次数减少，工作频率降低，燃料电池寿命增加。

4.2经济性随混合度变化趋势分析

在NEDC工况下，不同混合度下开关、功率跟随控制策略其百公里耗氢量变化趋势如图9所示。

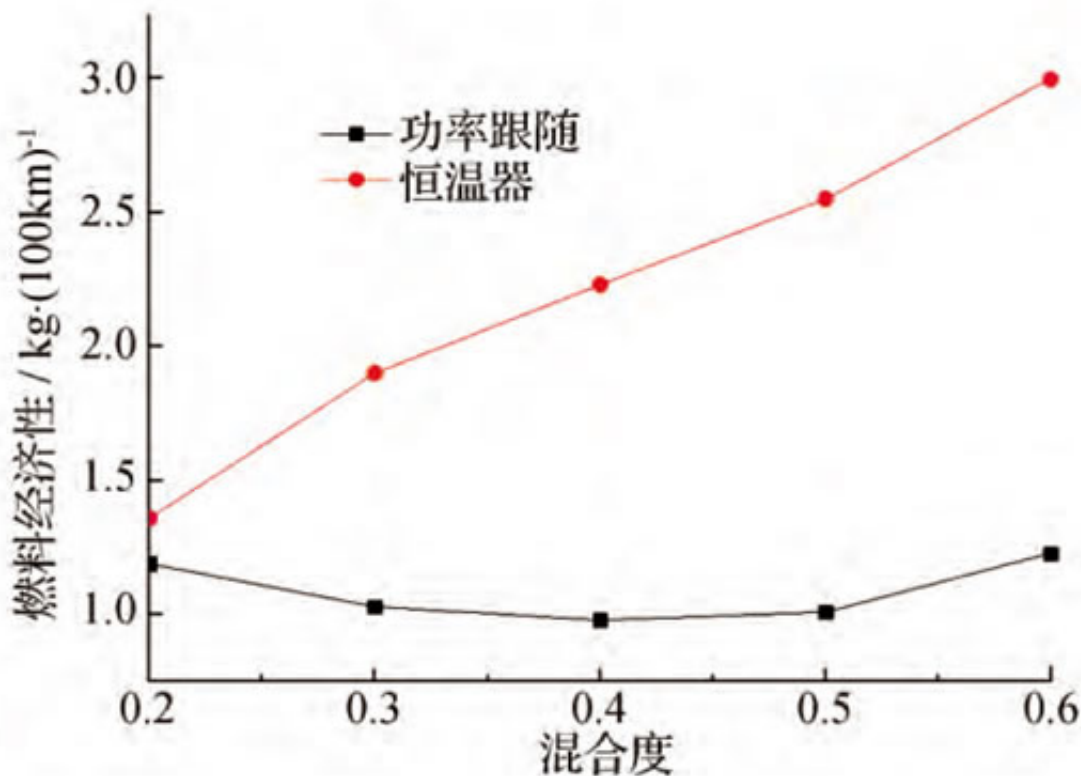


图9 不同混合度下开关、功率跟随模式经济性对比

图9不同混合度下开关、功率跟随模式经济性对比由图9可知，在NEDC工况下，功率跟随能量管理策略经济性在不同混合度下优于开关控制模式。开关控制策略百公里耗氢量呈现单调上升趋势，功率跟随控制模式百公里耗氢量呈现先下降再上升的趋势，在混合度0.4~0.5之间达到经济性最优。

由图9—图11可以分析出两种能量管理策略在混合度不同情况下经济性变化趋势不同的原因。

开关控制模式下，燃料电池动力系统经济性随混合度增加而变差。由图1所示开关控制模式原理可知，在开关工作模式下，当动力电池低于一定SOC，燃料电池启动以额定功率启动工作，当动力电池高于设定SOC时，燃料电池关闭，如图6所示。

开关工作模式下，燃料电池输出功率随着混合度增大而增大，工作时间随混合度增加而减少。当燃料电池额定功率超出动力电池最大充电功率时，动力电池以最大功率进行充电，造成充电效率下降，经济性降低。

功率跟随模式下，动力系统耗氢量随混合度增长呈先降低后升高的趋势，在中混合度0.5左右达到最优。

从图7中可以发现在功率跟随模式下，随着混合度的增大，燃料电池输出功率逐渐增大，工作时间逐渐减少且只工

作在高功率需求阶段。由式(8)功率跟随模式燃料电池功率需求功率以及图2所示功率跟随控制模式可知，在混合度较低情况下，由于燃料电池需要维持动力电池SOC保持在一定水平，动力电池需求充电功率较大，燃料电池位于打开状态，无法满足动力电池高功率需求，以最大功率工作在低效率区(如图10所示)，耗氢量增加，整车经济性变差。随着混合度的增大，燃料电池逐渐工作在高效率区。

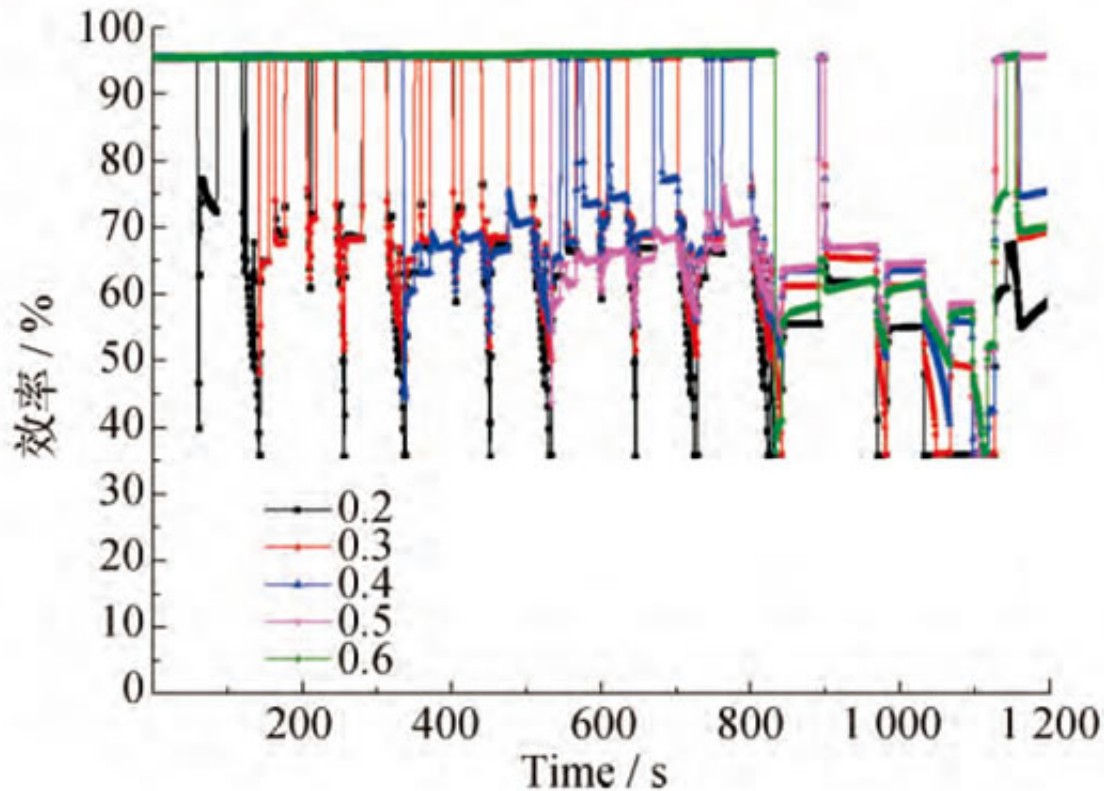


图 10 不同混合度下燃料电池输出效率

图11为燃料电池系统平均效率以及动力电池热损图，从图11中可以得到燃料电池在中混合度下平均效率较高，在混合度为0.6的条件下，由于功率跟随策略造成燃料电池动态特性较差，加剧了燃料消耗。燃料电池随着混合度的增大充电能力增强，动力电池充放电深度增大，热损增大，经济性降低。这造成了在功率跟随控制策略下，整车动力系统耗氢量增加，经济性变差。

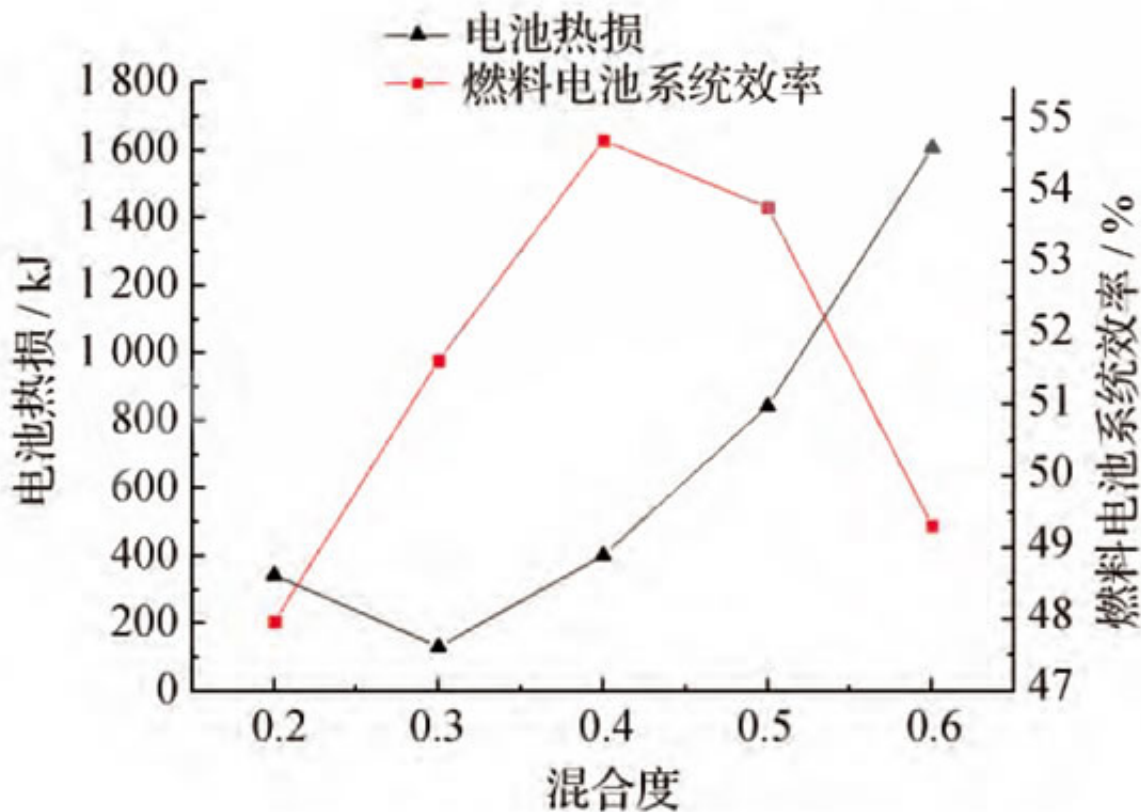


图 11 燃料电池系统平均效率及动力电池热损

在进行燃料电池动力系统功率跟随控制策略制定时，首先应考虑到在混合度选择上使燃料电池额定功率与动力电池额定充电功率相匹配，使燃料电池与动力电池工作在高效率区间，以获得较好的整车经济性。

5结论

本文基于GT-Suite平台，建立燃料电池整车动力系统模型，以NEDC循环为研究工况开展了在不同混合度情况下，依据不同能量管理策略对整车经济性的影响规律及影响机理研究，得到以下结论：

- 1) 整车动力系统匹配中，混合度与能量管理策略相关联，不同混合度限制了燃料电池与动力电池的工作区间，不同能量管理策略决定了燃料电池与动力电池的功率分配。不同能量管理策略适用混合度区间不同，混合度与能量管理策略的匹配对整车经济性有着重要影响。
- 2) 不同混合度下，开关模式由于燃料电池输出只与动力电池SOC有关，在大混合度下，造成充电效率降低，经济性下降。开关能量管理策略制定应综合考虑在不同混合度下，燃料电池额定功率是否与动力电池充电能力相匹配。在现有混合动力系统，燃料电池模块功率较小，混合度较低的情况下，应优先考虑开关能量管理策略。
- 3) 不同混合度下，基于功率跟随模式的能量管理策略，整车经济性随混合度先减小后上升，在中等混合度下，经济性最优，其原因是因为在中等混合度下，燃料电池工作在高效率区，在小功率需求时，燃料电池处于关闭模式，动力电池充放电效率较高。当燃料电池功率不断突破现有功率成本限制时，混合度不断增大，可根据经济性考虑功率跟随能量管理策略获得更好的经济性。

参考文献：

- [1] 王云龙,张洪田,孙远涛. 混合动力汽车动力系统匹配优化仿真实验研究[J]. 交通科技与经济,2018,20(1): 50-53.
- [2] 氢燃料电池汽车技术路线图[J]. 汽车工艺师,2017(11):18-19,58.
- [3] 元勇伟,许思传,万玉. 燃料电池汽车动力总成方案分析[J]. 电源技术,2017(1):165-168.
- [4] 蒋永琛. 增程式电动客车能量管理控制策略研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
- [5] 谢长君. 基于多模型控制的燃料电池汽车混合动力系统优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [6] 曹楠. 车载燃料电池混合动力系统设计与管理[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [7] 王旭峰. 燃料电池混合动力机车建模及能量管理策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [8] 张来云. 增程式燃料电池汽车动力系统匹配及能量管理策略研究[D]. 上海:华东理工大学,2016.
- [9] 王云龙,张洪田,孙远涛. 基于车辆工况试验的混合动力系统动力分配[J]. 交通科技与经济,2018,20(4): 40-45.
- [10] 王云龙,张洪田,孙远涛,等. 基于逆向模式的混合动力系统控制策略研究[J]. 黑龙江工程学院学报,2017(5):1-5.
- [11] 张涛,宋珂,章桐. 基于经济性的燃料电池汽车混合度对比研究[J]. 机电一体化,2015(7):11-16.

- [12] 赵治国,张赛. 燃料电池轿车能量源混合度仿真优化[J]. 汽车工程,2014(2):168-173,180.
- [13] 王勇,王仲范. 燃料电池电动车的混合度分析[J]. 汽车科技,2004(2):14-16,1.
- [14] 万永凯. 混合动力电动汽车锂离子电池 SOC 估算方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013
- [15] 吴澈. 燃料电池汽车动力系统匹配及控制策略研究[D]. 太原:中北大学,2016.
- [16] 衣宝廉. 燃料电池-原理、技术、应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [17] SCHOLTA J, BERG N, WILDE P, et al. Development and Performance of a 10 kW PEMFC Stack[J]. Journal of Power Sources, 2004, 127(1-2): 206-212.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/163204.html>