

# 燃料电池汽车动力系统匹配及混合度研究

## A Study on the Matching and Hybrid Degree of Powertrains for the FCV

韩恺 李小龙 宋昱

(北京理工大学 机械与车辆学院)

**摘要:**本文对燃料电池汽车动力系统进行匹配计算,运用 GT-SUITE 软件搭建了燃料电池汽车动力系统模型及整车后向仿真模型,并在此基础上开展燃料电池动力系统混合度对整车经济性及加速性能的影响规律研究。研究结果表明,随着混合度的增加,车辆加速性能下降;经济性提高,在 US06 驾驶循环中最高混合度氢耗较最低混合度的氢耗低 11.04%。

**关键词:**燃料电池汽车;混合度;加速性;经济性;GT-SUITE

**Abstract:** The fuel cell vehicle powertrains were matched and established as a model with the vehicle backward simulation model by using GT-SUITE software. On this basis, the influence rules of the hybrid degree of fuel cell power system on the economic and acceleration performance of the vehicle were studied. The research results show that with the increase of the degree of hybridization, the vehicle's acceleration performance is reduced, but the economy is improved. In the US06 driving cycle, the hydrogen consumption of the highest degree of hybridization is 11.04% lower than the lowest.

**Key words:** FCV; DOH; acceleration performance; economic performance; GT-SUITE

## 0 前言

燃料电池汽车以其零排放、高效率 and 低噪声等优点受到世界众多国家、企业以及研究机构的青睐<sup>[1]</sup>。在燃料电池汽车的开发过程中,为了解决燃料电池无法冷启动、不能吸收制动回馈能量、动态响应性能较弱以及其工况不能剧烈变化等问题,通常选用动态响应性能良好、能吸收制动回馈能量的蓄电池或超级电容作为辅助能源,与燃料电池共同组成双能源动力系统<sup>[2]</sup>。

双能源动力系统有效改善了燃料电池汽车的经济性和动力性,但由于燃料电池与蓄电池在功率密度、能量密度以及动态响应性能等方面的差异,燃料电池汽车动力系统设计时更加复杂,其中动力系统混合度(燃料电池系统功率占动力源总功率的比例)直接影响了燃料电池汽车的成本、经济性以及加速性能<sup>[3]</sup>。王勇等<sup>[4]</sup>在 HWFET、UDDS 与 C45 三种不同驾驶循环下以最佳燃油经济性为目标进行混合度优化,最终得到合适混合度区间为 0.3~0.4。问朋朋、黄明宇等<sup>[5-6]</sup>设计了多种动力源匹配方案,在满足动力性和经济性的前提下选择了合适的功率匹配方案。赵治国等<sup>[7]</sup>对某燃料电池轿车的能源进行混合度仿真优化,研究发现优化后混合度对应的燃油经济性提高、加速性能下降。上述研究主要集中在对燃料电池汽车混合度的优化设计,而在混合度对燃料电池汽车经济性、加速性能内在影响和规律分析方面鲜有研究。

因此,为了进一步探索混合度对燃料电池汽车经济性以及加速性能的影响规律,本文运用 GT-SUITE 软件搭建了燃料电池汽车动力系统模型与整车后向仿真模型,开展了不同混合度对燃料电池汽车整车经济性与加速性能的影响规律研究,为燃料电池汽车动力系统设计提供依据。

## 1 燃料电池汽车参数

### 1.1 燃料电池汽车构型

燃料电池汽车动力系统由燃料电池与动态响应性能良好的蓄电池或超级电容共同组成，根据其组合可分为“燃料电池+蓄电池”、“燃料电池+超级电容”以及“燃料电池+蓄电池+超级电容”三种构型。其中，“燃料电池+蓄电池”构型的动力系统具备系统简单、质量轻与体积小等优点，被广大汽车公司所采用<sup>[8]</sup>，因此，本文选取该构型搭建动力源。其构型如图 1 所示，燃料电池发动机通过直流/直流变换器（DC/DC）与蓄电池并联，将输出电压调节到与蓄电池组输出电压一致，再通过公共总线向电机驱动系统供电来驱动车辆<sup>[9]</sup>。

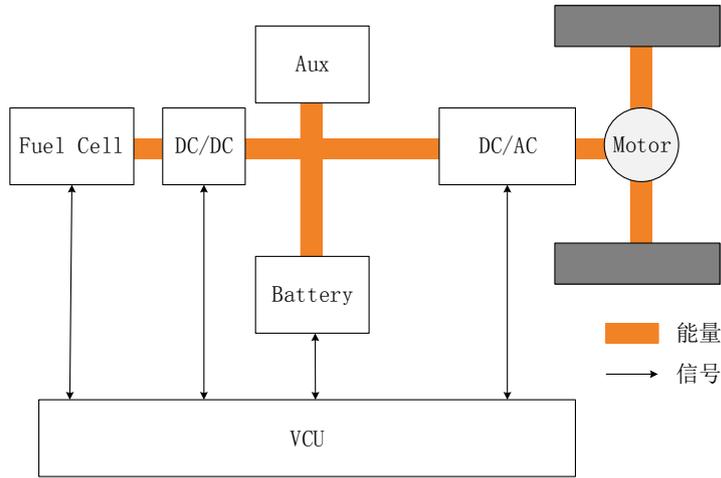


图 1 “燃料电池+蓄电池” 动力系统结构图

### 1.2 燃料电池汽车整车参数

本文选取某国产电动汽车作为研究对象，其整车参数及设计目标性能参数如表 1 所示：

表 1 燃料电池汽车整车参数及性能指标

整车参数				性能指标	
整车整备质量 $m(\text{kg})$	1600	轮胎滚动半径 $r(\text{m})$	0.307	综合续航里程 $S(\text{km})$	$\geq 400$
旋转质量转换系数 $\delta$	1.05	滚阻系数 $f$	0.014	最高车速 $v_{max}(\text{km/h})$	$\geq 160$
迎风面积 $A(\text{m}^2)$	2.29	传动效率 $\eta_t$	0.90	百公里加速时间 $t(\text{s})$	$\leq 13$
风阻系数 $C_D$	0.318	传动比 $i_g$	9.1	最大爬坡度 $i(\%)$	$\geq 30$

### 1.3 电机参数

(1) 为达到最高车速，电机最高转速  $n_{max}$  应满足：

$$n_{max} \geq \frac{v_{max} \times i_g}{0.377r} \quad (1)$$

(2) 为满足车辆以最低稳定速度 ( $v_s=16\text{km/h}$ ) 进行最大坡度爬坡，电机峰值扭矩  $T_{max}$  需要满足：

$$T_{max} \geq \frac{(mgf \cos \theta_{max} + mg \sin \theta_{max} + \frac{C_D A v_s^2}{21.15}) \times r}{i_g \times \eta_t} \quad (2)$$

(3) 由电机工作特性可知, 燃料电池汽车百公里加速分为恒扭矩加速与恒功率加速, 其总时间应满足:

$$\int_0^{v_e} \frac{\delta m}{3.6 \left( \frac{T_{max} \times \eta_t \times i_g}{r} - mgf - \frac{C_D A v^2}{21.15} \right)} dv + \int_{v_e}^{100} \frac{\delta m}{3.6 \left( \frac{T_{max} \times v_e \times \eta_t \times i_g}{v \times r} - mgf - \frac{C_D A v^2}{21.15} \right)} dv \leq t \quad (3)$$

(4) 电机持续功率  $P_e$  由最高车速决定:

$$P_e \geq \frac{v_{max}}{3600 \eta_t} \left( mgf + \frac{C_D A v_{max}^2}{21.15} \right) \quad (4)$$

保留一定余量, 计算得电机相关参数如表 2 所示:

表 2 驱动电机参数

参数名称	数值	参数名称	数值
峰值转速 (r/min)	12600	电机基速 (r/min)	4600
峰值扭矩 (N·m)	180	持续扭矩 (N·m)	114
峰值功率 (kW)	87	持续功率 (kW)	55

#### 1.4 动力源参数

在燃料电池汽车动力系统中, 燃料电池与蓄电池为系统的动力源, 共同为车辆提供电力。其中, 蓄电池是由单个的电池包或模块串并联而成; 燃料电池以燃料电池系统的形式存在, 包括燃料电池堆 (由单片燃料电池堆叠而成) 与辅助系统 (空气压缩机、加湿器、散热器以及氢气循环泵等耗电组件), 由于辅助系统是跟 DC/DC 的输出端连接, 本文以下提及的燃料电池系统包含 DC/DC。

在车辆行驶过程中, 动力源最大输出功率应满足电机最大需求功率与车载电器设备的功率之和:

$$P_{FCS} + P_B \geq \frac{P_{max}}{\eta_{MC}} + P_A \quad (5)$$

式中:  $P_{FCS}$  为燃料电池系统最大功率,  $P_B$  为蓄电池最大功率,  $P_A$  为车载电器峰值功率,  $P_{max}$  为电机峰值功率,  $\eta_{MC}$  为电机驱动系统效率。

在车辆起动后低速 ( $v \leq 30 \text{ km/h}$ ) 行驶阶段, 由于燃料电池系统无法瞬间起动, 整车需求功率由蓄电池单独提供; 此外, 当车辆处于再生制动时, 蓄电池需要足够的充电功率来吸收制动回馈能量。综合考虑, 蓄电池峰值功率最小取 20kW。

燃料电池系统峰值功率应满足车辆高速 ( $v \geq 120 \text{ km/h}$ ) 巡航时的整车功率需求:

$$P_{FCS,min} \geq \frac{v}{3600 \eta_t \eta_{MC}} \left( mgf + \frac{C_D A v^2}{21.15} \right) + P_A \quad (6)$$

则燃料电池系统与蓄电池的功率组合应满足:

$$\begin{cases} P_{FCS,min} \geq 34\text{kW} \\ P_{B,min} \geq 20\text{kW} \\ P_{FCS} + P_B = 105\text{kW} \end{cases} \quad (7)$$

根据动力系统混合度的定义:

$$\text{DOH} = \frac{P_{FCS}}{P_{FCS} + P_B} \quad (8)$$

可得动力系统 DOH 的变化范围为 0.32~0.81。

## 2 燃料电池汽车模型

### 2.1 燃料电池系统模型

燃料电池系统包含 DC/DC 以及与其输出端相连的辅助系统, 燃料电池堆与其系统间的功率、效率关系如式(9)。燃料电池堆由单片燃料电池堆叠而成, 每片燃料电池实际输出电压均存在由渗透损失、活化损失、浓差损失以及欧姆损失组成的不可逆损失, 其实际输出电压如式(10)。忽略单片燃料电池之间的不均匀性, 燃料电池堆功率如式(11)表示。

$$\begin{cases} P_{FCS} = P_{Stack} \times \eta_{DC} \times (1 - \gamma) \\ \eta_{FCS} = \eta_{Stack} \times \eta_{DC} \times (1 - \gamma) \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{cell} = 1.229 - \frac{R_{gas} T}{2\alpha F} \ln\left(\frac{j + j_{loss}}{j_0}\right) - C \ln\left(\frac{j}{j_{lim} - j}\right) - j \times A \times R \quad (10)$$

$$P_{Stack} = n V_{cell} \times j \times A \quad (11)$$

式中:  $P_{Stack}$  为电堆功率,  $\eta_{DC}$  为 DC/DC 的效率,  $\gamma$  为辅助系统消耗功率占 DC/DC 输出端功率的比值,  $\eta_{FCS}$  为燃料电池系统效率,  $\eta_{Stack}$  为电堆效率,  $V_{cell}$  为燃料电池单片输出电压,  $j$  为电流密度,  $R_{gas}$  为气体常数,  $T$  为热力学温度,  $\alpha$  为电荷转移常数,  $F$  为法拉第常数,  $j_0$ 、 $j_{lim}$  与  $j_{loss}$  分别为燃料电池交换电流密度、极限电流密度与漏电流密度,  $C$  为质量传输损失系数,  $A$  为活化面积,  $R$  为燃料电池欧姆电阻,  $n$  为燃料电池单体数。

燃料电池系统由于其多辅助系统的耦合, 整个系统在动态响应上远不如蓄电池, 可近似当作一阶系统处理<sup>[10]</sup>, 其实际输出功率  $P_{act}$  为:

$$P_{act} = (P_{re} - P_{past}) \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + P_{past} \quad (12)$$

式中:  $\tau$  为系统的时间常数, 与燃料电池系统的功率成正比<sup>[11]</sup>。  $P_{re}$  为需求功率,  $P_{past}$  为前一时间功率。

### 2.2 蓄电池模型

蓄电池模型中, 等效电路模型由于其模型简单且能较好地模拟电池的工作特性的优点, 被广泛应用于整车动力匹配以及能量管理算法中<sup>[12]</sup>。常见的等效电路模型包括 Rint 模型、RC 模型以及 Thevenin 模型等, 其中又以 Rint 模型最为简单有效, 其模型可用式(12)~(14)表示。在该模型中蓄电池开路电压、充放电内阻等参数受温度以及荷电状态影响, 本文仅考虑荷电状态的影响, 某 6.5Ah

磷酸铁锂电池开路电压及内阻见图 2。

$$I = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4CRP_{re}}}{2R} \quad (13)$$

$$V = V_{oc} - IR \quad (14)$$

$$SOC = \frac{SOC_0 \times Q_{max} - \int Idt}{Q_{max}} \quad (15)$$

式中： $I$ 为电池组工作电流，正值为放电，负值为充电， $V_{oc}$ 表示电池组开路电压， $C$ 表示库伦效率， $R$ 表示充放电内阻， $P_{re}$ 表示向蓄电池组的请求功率， $SOC$ 表示当前荷电状态， $SOC_0$ 表示初始荷电状态， $Q_{max}$ 表示电池最大电荷容量。

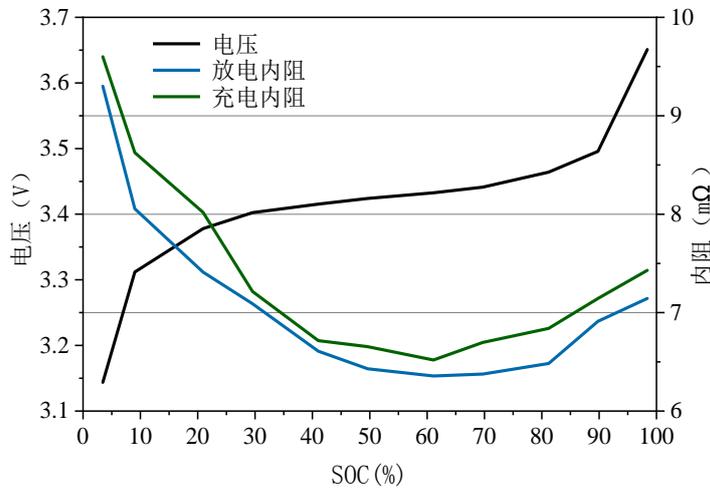


图 2 某 6.5Ah 磷酸铁锂电池特性

### 2.3 能量管理策略模型及评价指标

燃料电池汽车的能量管理策略需要考虑的因素较多，除保证车辆的动力性、经济性之外，还要重点考虑燃料电池系统的耐久性以及蓄电池组的循环寿命<sup>[1]</sup>。本文采用基于规则的恒 SOC 负载均衡控制策略，将蓄电池 SOC 维持在一个最适的区间 (0.55-0.6)，既能以最大功率充放电，同时效率较高；此外，制动回馈以最大制动能量回收为目标。其策略逻辑图如下图 3 所示。其中， $P_{dem}$ 为当前车辆需求功率； $P_{FC,act}$ 为燃料电池当前输出功率； $P_{past}$ 为燃料电池系统前一时刻输出功率； $P_B$ 为蓄电池当前功率，正值为放电，负值为充电； $P_{char,max}$ 为蓄电池当前最大允许充电功率； $SOC$ 为蓄电池当前荷电状态； $P_{ava}$ 为通过移动平均法计算得到的燃料电池当前时刻请求功率。

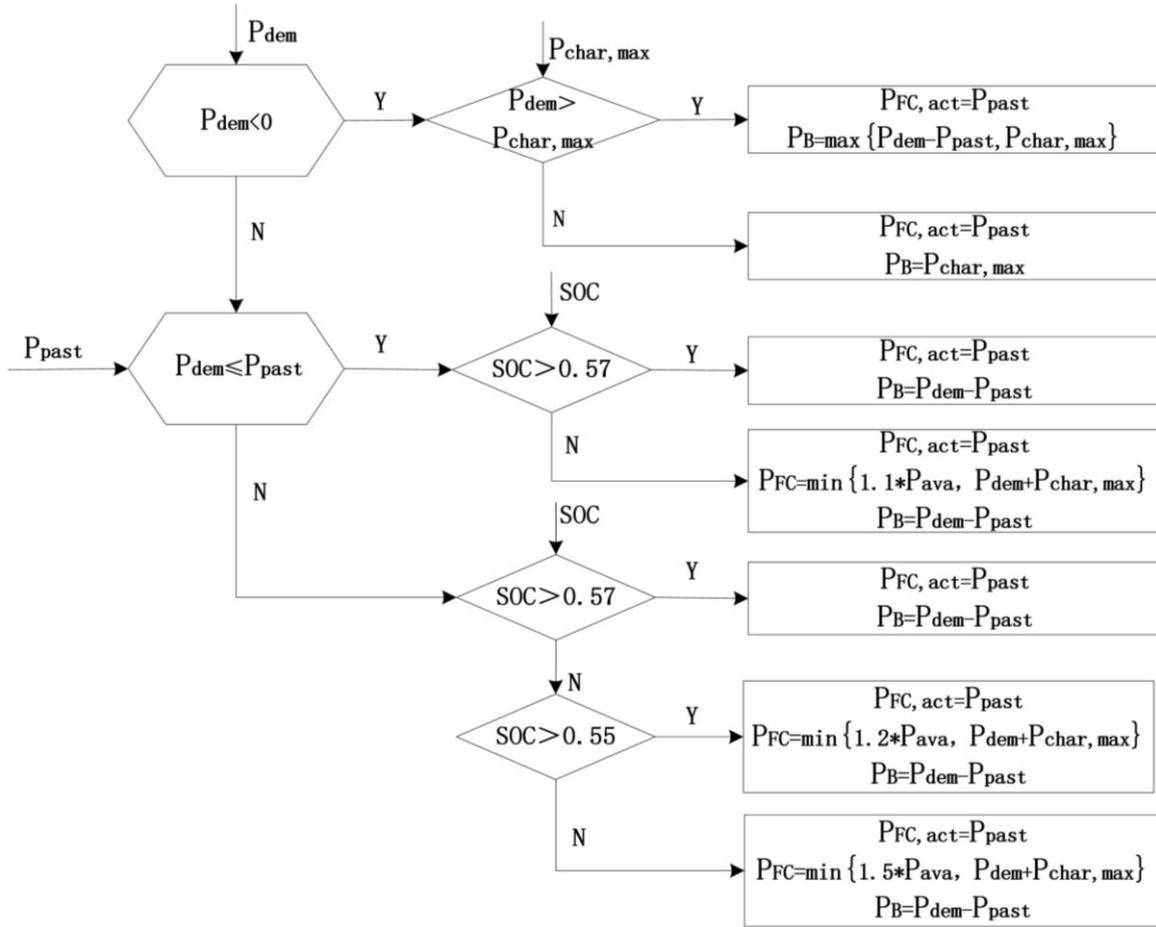


图 3 恒 SOC 负载均衡控制策略逻辑图

为衡量混合度对整车经济性以及加速性能的影响，本文以百公里加速时间作为加速性能指标，以等效百公里氢耗作为经济性的评价指标，其计算方法为：

$$m_{H_2} = \int \frac{nM_{H_2}I_{Stack}}{2F} dt + \frac{\int UI dt}{q_{H_2}\eta_{FCS}\eta_{char}} \quad (16)$$

式中： $M_{H_2}$  为氢气摩尔质量， $I_{Stack}$  为燃料电池堆电流， $n$  为燃料电池单体数， $U$ 、 $I$  为动力电池输出电压、电流， $q_{H_2}$  为氢气高热值， $\eta_{FCS}$  为燃料电池系统平均效率， $\eta_{char}$  为蓄电池组平均充电功率。

## 2.4 燃料电池汽车模型验证

本文最终建立的燃料电池汽车模型如图 4 所示。在此基础上对电机及整车动力学模型进行百公里加速时间校核，其百公里加速时间可由仿真模型得到。如图 5 所示，其百公里加速时间为 12.9s（忽略燃料电池系统的动态特性），小于 13s，满足设计要求。

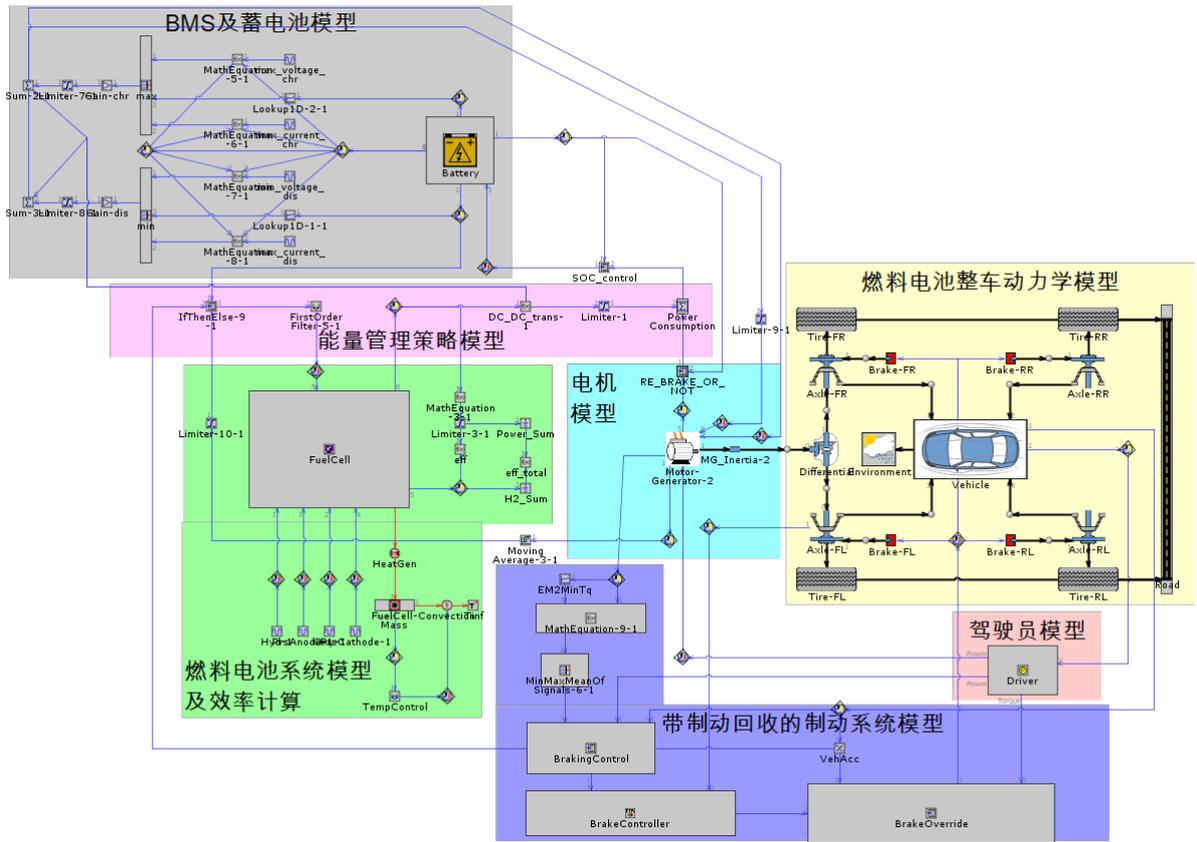


图 4 燃料电池汽车动力系统及整车仿真模型

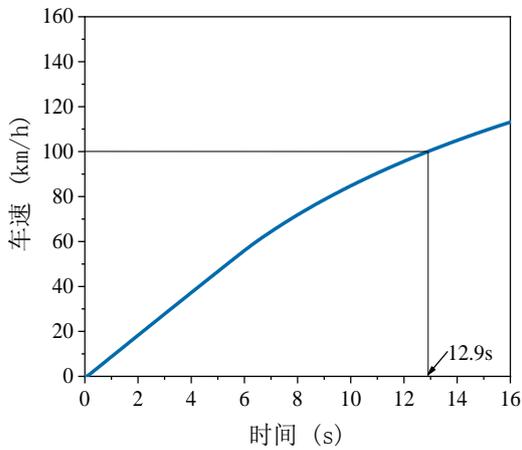


图 5 燃料电池汽车百公里加速曲线

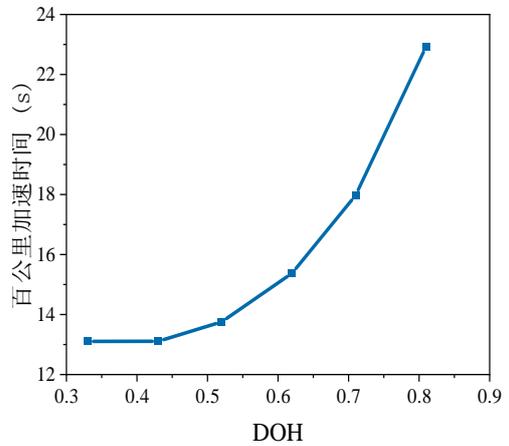


图 6 燃料电池汽车百公里加速时间与混合度的关系

### 3 仿真结果与分析

保持动力源总功率为 105kW 不变，以 10kW 为等差值，燃料电池系统功率从 35kW 逐步增加到 85kW，蓄电池功率相应降低，得到 6 个功率组合，其对应的功率组合以及蓄电池容量如表 3 所示。

表 3 各 DOH 对应动力源参数及整车质量

序号	DOH	燃料电池系统功率/kW	蓄电池组功率/kW	蓄电池组容量/Ah
1	0.33	35	70	52
2	0.43	45	60	46
3	0.52	55	50	39
4	0.62	65	40	33
5	0.71	75	30	27
6	0.81	85	20	20

### 3.1 加速性能分析

车辆的加速性以百公里加速时间来衡量，运行仿真得到各个混合度下车辆的百公里加速时间，如图 6 所示。由图可知，随混合度的增大，车辆的百公里加速时间呈上升趋势：当混合度较小时，加速时间增长较为缓慢；当混合度较大时，车辆的加速时间急剧上升，这是由于动力源输出功率不能满足电机的功率需求所致。图 7 表示在加速情况下各个混合度动力源输出功率与电机需求功率随时间变化的关系，显然，随着混合度的增大，在同一时刻，较低混合度的动力源能输出的功率大于较高混合度的动力源；当  $DOH < 0.43$  时，动力源的输出功率能够一直覆盖电机需求功率，车辆的加速性能得以保证；当  $DOH > 0.43$  并逐渐增大时，动力源的输出功率不能完全覆盖电机需求功率，导致车辆的百公里加速时间变长。

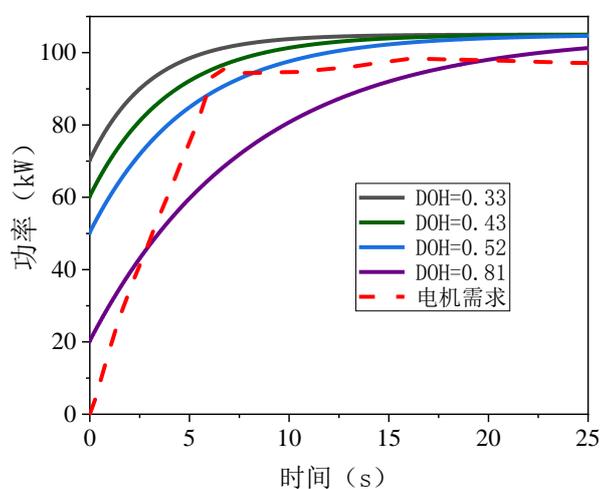


图 7 各混合度动力源输出功率与电机需求功率

### 3.2 经济性分析

本文选择 NEDC,US06 以及 HYEFT 三种工况，开展混合度对整车经济性的影响规律研究。在每种工况下分别对各个混合度进行仿真，经过计算后得到其对应的等效百公里氢耗，其变化趋势如图 8 所示。

由图 8 可知，在三种循环工况中，随着混合度的增大，车辆的等效百公里氢耗总体呈现下降趋势，在 US06 循环中氢耗下降最为明显。此外，在 HYEFT 循环中，当  $DOH=0.81$  时，其氢耗较  $DOH=0.72$

时略微增加。为分析以上现象的内在原因，计算各个工况对应混合度下燃料电池系统的平均效率。如图 9，在三种工况循环中，燃料电池系统的平均效率均随混合度的增加而增加，与等效百公里氢耗有很强的相关性，可以认为是燃料电池系统平均效率的增加导致等效百公里氢耗的下降，故提高燃料电池系统的平均工作效率是提高车辆经济性的重要手段之一。

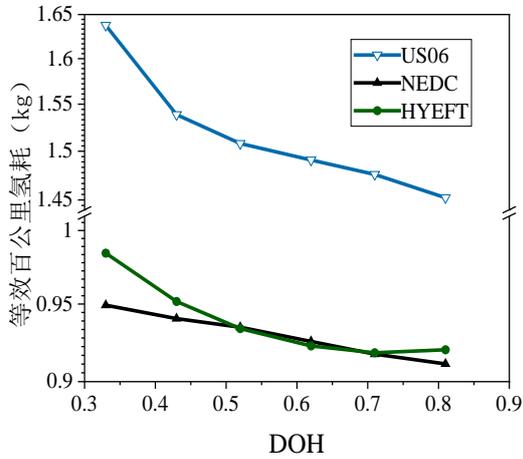


图 8 等效百公里氢耗与混合度的关系

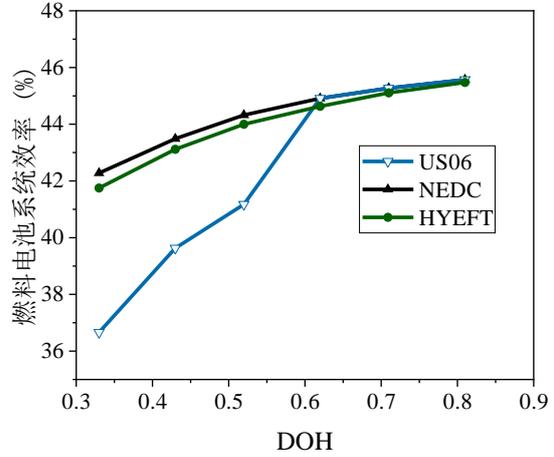


图 9 各工况、混合度对应燃料电池系统平均效率

在 US06 循环中，燃料电池系统平均效率的最大差值达到 9%，统计两个混合度下燃料电池系统各个功率段的输出功占比。如图 10，发现两者的功率段均集中在 20~30kW，低混合度燃料电池系统在该功率段效率相对较低，导致其系统平均效率相对较低。而高混合度燃料电池系统一直维持高效率，充分发挥了燃料电池中低负荷高效率的优势。

在 HYEFT 驾驶循环中，燃料电池系统的平均效率随混合度单调增加，而其等效百公里氢耗却在混合度为 0.81 时出现增加的现象，比前一个混合度增加 2g 的等效百公里氢耗，违背两者间的相关性。经研究发现，当混合度为 0.81 时，由于蓄电池最大充电功率的限制，导致车辆不能以纯再生制动方式制动，需要机械制动介入，从而致使其等效百公里氢耗增加。图 11 为 5 个 HYEFT 循环下两个混合度的电机制动功率随时间的变化关系，积分后得到两个混合度对应的电机制动回馈能量分别为 0.389kWh 与 0.167kWh，其差值等效氢量为 12.4g，远大于增加的氢耗。

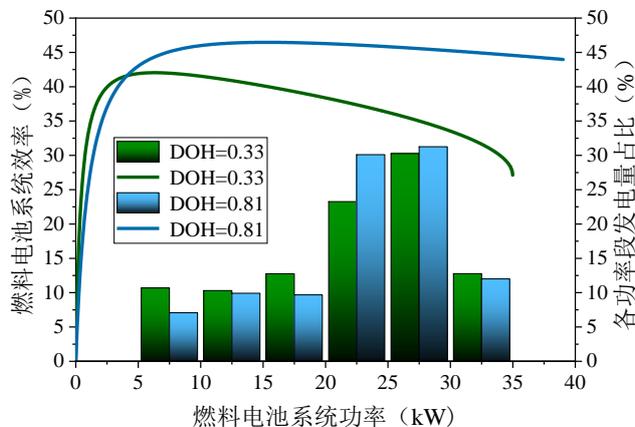


图 10 不同燃料电池系统各功率段发电占比及系统效率对比

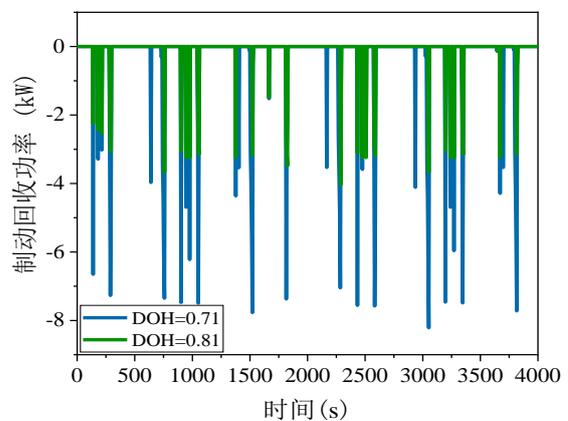


图 11 5 个 HYEFT 循环下两个混合度的电机制动功率

## 4 结论

本文在进行了燃料电池汽车动力系统匹配的基础上,开展了混合度对整车加速性及经济性影响规律的研究,得到如下结论:

(1) 随着混合度的增加,响应性能较弱的燃料电池功率占比增大,导致动力源响应性降低,最终使燃料电池车辆的加速性随之下降,在高混合度时,该现象最为明显。为满足车辆对加速性能的要求,在当前的动力源匹配设计中应采用中小混合度。随着燃料电池系统动态响应性能的提升,在保证加速性的前提下应当充分利用燃料电池高效工作区间广的优势,逐步提高动力源的混合度。

(2) 随着混合度的增加,燃料电池系统平均效率增加,致使整车经济性在三种工况中均呈现上升的趋势。在 US06 工况中,混合度为 0.81 对应的氢耗比 0.33 对应的氢耗降低了 11.32%。此外,在进行动力系统设计时,蓄电池功率不宜过小,应保证有足够的充电功率吸收制动回馈能量,以此进一步提高车辆经济性。

## 5 参考文献

- [1] 曹桂军, 燃料电池混合动力客车整车控制策略[J]. 机械工程学报, 2008,44(06):114-119.
- [2] 钟再敏,魏学哲,孙泽昌, 燃料电池汽车动力总成控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004,32(06): 758-761.
- [3] 负海涛,万钢,孙泽昌, 燃料电池汽车动力总成结构配置及参数优化匹配[J]. 汽车工程, 2006,28(08): 729-733.
- [4] 王勇,王仲范, 燃料电池电动车的混合度分析[J]. 汽车科技, 2004(02): 14-16.
- [5] 问朋朋,黄锋,何彦虎, 氢电混合动力车功率匹配对比研究[J]. 电源技术, 2016,40(9):1854-1856+1864.
- [6] 黄明宇, 冯小保等, 基于先进车辆模拟器的小功率氢电混合动力车混合度的仿真研究[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2013,12(04):29-33
- [7] 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, 2014,36(02): 168-173+180.
- [8] 周苏, 燃料电池汽车建模及仿真技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- [9] 徐梁飞,卢兰光,李建秋, 欧阳明高, 燃料电池混合动力系统建模及能量管理算法仿真[J]. 机械工程学报, 2009,45(01):141-148.
- [10] 冉莉莉,刘志祥, 一种可反映延时特性的 PEMFC 系统动态模型[J]. 电源技术, 2016,40(11):2152-2154+2259.
- [11] Y. Hou, et al., A dynamic model for hydrogen consumption of fuel cell stacks considering the effects of hydrogen purge operation[J]. Renewable Energy, 2014,62(07): 672-678.
- [12] 虞铭, 燃料电池汽车动力系统参数匹配及控制策略初步研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.