

# 燃料电池城市客车动力系统匹配与仿真研究

李惠林，周凯，何锋，颜廷坤

(贵州大学机械工程学院，贵州贵阳550025)

摘要：以某款城市客车为参考，开发燃料电池城市客车，依据整车性能设计指标，对燃料电池城市客车驱动电机、燃料电池系统及蓄电池组进行选择、计算与匹配。利用ADVI<sub>s</sub>OR搭建燃料电池城市客车模型、建立中国典型城市道路循环工况，对整车动力性、纯电动驱动模式下经济性和动力系统各部件性能进行仿真，结果表明，所选动力系统各部件能够满足整车功率需求，整车动力性能良好，蓄电池组soc在理想区间变化，纯电动模式下的续驶里程满足设计要求。

## 0引言

燃料电池汽车已被世界汽车业看作是未来新能源汽车发展的重要方向之一[1]。文献[2]通过制定适用于燃料电池汽车建模与动态控制设计流程，开发一种随机动态规划算法，将其应用于燃料电池汽车的能量管理，从而实现经济优化，同时保持了良好的驾驶性能。文献[3]利用MATLAB / simulink建立了燃料电池混合动力系统仿真车辆模型，并与使用混合控制单元实现逻辑阈值方法的功率控制策略并行，其具有在较低燃料消耗水平的同时实现所请求驱动功率的能力。文献[4]对燃料电池轿车动力系统匹配方法进行研究，提出选择能量源的方法；文献[5]针对纯电动汽车续驶里程短的问题，结合燃料电池与蓄电池的优点，对燃料电池+蓄电池增程式动力系统结构进行分析，提出根据能量管理策略和续驶里程要求确定燃料电池功率，再根据行驶习惯进行修正的动力系统匹配方法。

本文燃料电池城市客车采用燃料电池系统为主动动力源，蓄电池组为辅助动力源的混合动力系统结构形式。依据燃料电池城市客车整车性能设计指标，分别对驱动电机、燃料电池、蓄电池组各部件进行了参数计算、匹配，利用ADVI<sub>s</sub>OR搭建燃料电池城市客车模型，对所建立的中国典型城市道路循环工况、整车动力性能、纯电动驱动模式下的续驶里程进行仿真，验证所设计燃料电池城市客车动力性、纯电动驱动模式下经济性以及动力系统部件合理性。

## 1燃料电池城市客车整车结构及参数

燃料电池+蓄电池混合动力系统结构如图1。

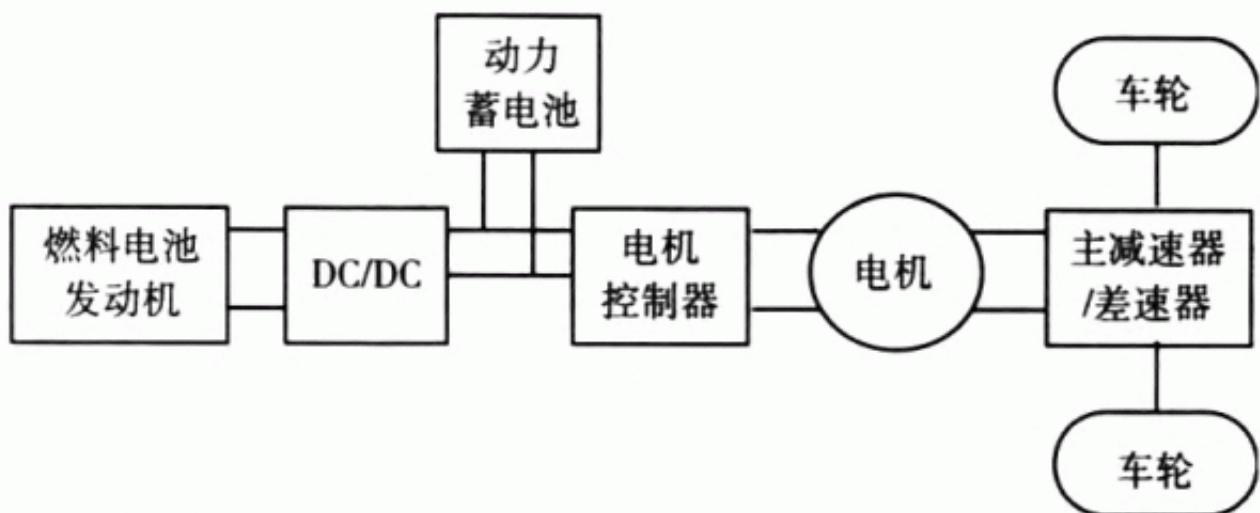


图 1 燃料电池 + 蓄电池混合动力系统结构

通常由燃料电池系统提供车辆行驶所需动力，燃料电池系统和蓄电池组则在车辆爬坡、急加速等工况时共同提供所需动力，另外根据车辆行驶工况需求，有时车辆仅在纯电动模式下行驶，可以有效避免单一燃料电池作为车辆动力系

统能量源时所造成的车辆性能不足，从而提升车辆经济性。针对动力系统各部件相关参数计算，合理地匹配出燃料电池输出功率与蓄电池组输出功率，满足车辆行驶需要的功率稳态分量（匀速行驶状态）和动态分量（如起步、加速状态），保证车辆的动力性[6]。

燃料电池城市客车结构参数如表1，其整车性能设计指标如表2。

**表 1 燃料电池城市客车结构参数**

参 数	数 值
整备质量 $m_0/\text{kg}$	12850
迎风面积 $A/\text{m}^2$	8.830
空气阻力系数 $C_D$	0.7
轮胎滚动半径 $r/\text{m}$	0.51
滚动阻力系数 $f$	0.015
满载质量 $m/\text{kg}$	18000
前轴载荷质量/ $\text{kg}$	6000
整车尺寸(长 × 宽 × 高)/ $\text{mm}^3$	11400 × 2530 × 3530
轴距/ $\text{mm}$	5600
主减速比 $i_0$	6.167

**表 2 燃料电池城市客车性能设计指标**

性能设计指标	数 值
爬坡能力/ $\%$	$\geq 20$ (车速 15km/h)
0 ~ 50km/h 加速时间/s	$\leq 25$
最高车速 $u_{\max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	69
纯电动续驶里程/ $\text{km}$	100(蓄电池 80% 放电, 车速 40 km/h)

2动力系统各部件参数确定

## 2.1 驱动电机参数计算

需要计算驱动电机额定功率  $P_e$  与峰值功率  $P_m$ ；额定转速  $N_e$  与峰值转速  $N_m$ ；额定转矩  $T_e$  与峰值转矩  $T_m$ 。

### 2.1.1 驱动电机功率计算

1) 燃料电池城市客车最高车速时所需功率

$$P_{m-u_{\max}} = \frac{1}{\eta_i \eta_{\text{mot}}} \left( \frac{mgf}{3600} u_{a_{\max}} + \frac{C_D A}{76140} u_{a_{\max}}^3 \right) \quad (1)$$

式中： $g$  为重力常数，通常取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ； $\eta_i$  为传动系机械效率，取  $0.92$ ； $\eta_{\text{mot}}$  为电机效率，取  $0.96$ 。

2) 燃料电池城市客车以恒定车速，爬上一定坡度所需功率

$$P_{m-a_{\max}} = \frac{1}{\eta_i \eta_{\text{mot}}} \left( \frac{mgf}{3600} u_a \cdot \cos \alpha_{\max} + \frac{mg}{3600} u_a \cdot \sin \alpha_{\max} + \frac{C_D A}{76140} u_a^3 \right) \quad (2)$$

式中： $\alpha_{\max} = \arctan(i_{\max})$ 。

3) 燃料电池城市客车由静止加速到  $50 \text{ km/h}$  所需功率

$$P_{m-a_{\max}} = \frac{1}{\eta_i \eta_{\text{mot}}} \left( \frac{mgf}{3600} u_a + \frac{C_D A}{76140} u_a^3 + \frac{\delta m}{3600} \cdot \frac{du}{dt} u_a \right) \quad (3)$$

式中： $\frac{du}{dt}$  为汽车加速度 ( $\text{m/s}^2$ )； $\delta$  为汽车旋转质量换算系数，取  $1.02$ 。

将整车参数分别代入式(1)(2)(3) 可得：

$$P_{m-u_{\max}} = 87.61 \text{ kW}, P_{m-i_{\max}} = 175.76 \text{ kW}, P_{m-a_{\max}} = 90.08 \text{ kW}。$$

综上，驱动电机峰值功率应同时满足燃料电池城市客车最高车速、最大爬坡度、加速度的要求<sup>[7]</sup>。所以，驱动电机峰值功率：

$$P_m \geq \max \{ P_{m-u_{\max}}, P_{m-i_{\max}}, P_{m-a_{\max}} \} = 175.76 \text{ kW} \quad (4)$$

考虑功率损耗等，驱动电机峰值功率圆整取  $P_m = 180 \text{ kW}$ ，则驱动电机额定功率：

$$P_e = \frac{P_m}{\lambda} \quad (5)$$

式中： $\lambda$  为驱动电机过载系数，取  $1.8$ <sup>[8]</sup>，可得其额定

功率  $P_e = 100 \text{ kW}$ 。

### 2.1.2 驱动电机转速计算

驱动电机峰值转速  $N_m$  应满足燃料电池城市客车最高车速需求, 即:

$$N_m \geq \frac{u_{a\max}}{0.377 \cdot r} \cdot i_0 \quad (6)$$

计算得:  $N_m \geq 2213 \text{ r/min}$ 。

驱动电机峰值转速圆整取  $N_m \geq 2500 \text{ r/min}$ 。考虑燃料电池城市客车在市区行驶时通常处于低速工况, 并且常伴有红、绿灯, 进出站的启停状态, 因此驱动电机基速比的选取应保证其有较好能量转换效率, 选择驱动电机基速比  $\beta = 2.5$ , 则驱动电机额定转速为:

$$N_e = \frac{N_m}{\beta} \quad (7)$$

计算得:  $N_e = 1000 \text{ r/min}$

### 2.1.3 驱动电机转矩计算

依据公式(2) 可得驱动电机峰值转矩为:

$$T_m = \frac{mg\sin\alpha_{\max} + mgf\cos\alpha_{\max} + C_D A u_a^2 / 21.15}{i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t \cdot \eta_{mot}} \cdot r \quad (8)$$

式中:  $i_g$  为变速器传动比, 取 1。

计算得:  $T_m = 3488.41 \text{ Nm}$ 。

考虑燃料电池城市客车极端工况下的功率损耗, 选取驱动电机峰值转矩为  $T_m = 3600 \text{ Nm}$ , 则驱动电机额定转矩:

$$T_e = \frac{9550P_e}{N_e} \quad (9)$$

式中:  $P_e$  为驱动电机额定功率;  $N_e$  为驱动电机额定转速。

计算得:  $T_e = 955 \text{ Nm}$ 。

根据理论计算结果, 综合对比各类电机性能参数及特点, 选定永磁同步电机作为驱动电机。

## 2.2 燃料电池参数计算

燃料电池城市客车驱动电机所需功率为燃料电池与蓄电池组功率之和,即:

$$P_m = P_{fc} + P_b \quad (10)$$

式中: $P_m$  为驱动电机需求功率; $P_{fc}$  为燃料电池输出功率; $P_b$  为蓄电池组输出功率。

通过前述对比计算可知,最高车速计算出的驱动电动机功率取最大值,此时驱动电机功率即为燃料电池系统输出功率,燃料电池城市客车有最大后备功率,其加速、爬坡性能最优,根据(1)式可知: $P_{fc} = 87.61 \text{ kW}$ 。

燃料电池最大净输出功率圆整取  $P_{fc\max} = 100 \text{ kW}$ ,选取能量转换率高、可靠性高的质子交换膜燃料电池系统作为燃料电池城市客车主动力源。

## 2.3 蓄电池参数确定

根据功率分配原则,由式(10)可得:

$$P_{bmax} \geq P_{mmax} - P_{fmax} \quad (11)$$

式中: $P_{bmax}$  为燃料电池最大输出功率。

计算可得: $P_{bmax} = 80 \text{ kW}$ 。

根据整车性能设计指标,燃料电池城市客车以  $u_{ele}$  匀速行驶时蓄电池组负载功率:

$$P_{ele} = \frac{u_{ele}}{\eta_t \eta_{mot} \eta_{bat}} \left( \frac{mgf}{3600} + \frac{C_D A u_{ele}^2}{76140} \right) \quad (12)$$

式中: $P_{ele}$  为蓄电池组负载功率; $\eta_{bat}$  为蓄电池组放电效率,取 0.95。

等速  $u_{ele}$  条件下,燃料电池城市客车行驶距离  $S$  所需能量:

$$W_{road} = P_{ele} \cdot t = \frac{P_{ele} \cdot S}{u_{ele}} \quad (13)$$

式中: $W_{road}$  燃料电池城市客车行驶所需能量。

蓄电池组在一定放电深度下释放能量:

$$W_{ele} = \frac{U_0 \cdot C \cdot \zeta_{SOC}}{1000} \quad (14)$$

式中: $U_0$  为蓄电池组电压; $W_{ele}$  为蓄电池组释放能量; $C$  为蓄电池组容量; $\zeta_{SOC}$  为蓄电池组有效放电容量(15% ~ 95%)。

由式(12)、(13)、(14)可得蓄电池组容量:

$$C = \frac{1000 P_{ele} \cdot S}{U_0 \cdot \zeta_{SOC} \cdot u_{ele}} \quad (15)$$

计算得: $C = 335.5 \text{ A} \cdot \text{h}$



考虑燃料电池城市客车实际运行时，电器附件耗电量约占整车耗电量15%左右以及蓄电池内阻损耗，最终确定蓄电池组容量 $C=360\text{ A}\cdot\text{h}$ 。

通过对比各种蓄电池性能参数，可知磷酸铁锂电池工作温度范围广、充放电电荷大，较适合用作燃料电池城市客车动力电池组，其主要性能参数如表3。

**表 3 动力电池组主要参数**

参数	数值	参数	数值
单体额定电压/V	3.2	总电压/V	384
单体额定容量/A·h	60	总容量/A·h	360
最大放电电流/A	2C	单体个数	720

### 3基于ADVISOR仿真结果

ADVISOR是美国可再生能源实验室NREL在MATLAB和sIMuLINK软件环境下开发的高级车辆仿真软件，可以通过参数输入实现燃料电池城市客车仿真测试[9-10]。

ADVISOR仿真后的主要输出结果包括各部件变量输出结果、整车燃油消耗结果、整车排放性能结果及加速与爬坡试验结果等。

#### 3.1车速跟随结果

图2所示为车速跟随结果曲线，曲线cyc\_kph\_r和曲线kpha分别代表燃料电池城市客车在中国典型城市道路循环工况下的需求车速和实际车速，由图2可知，实际车速与循环工况需求车速相等。

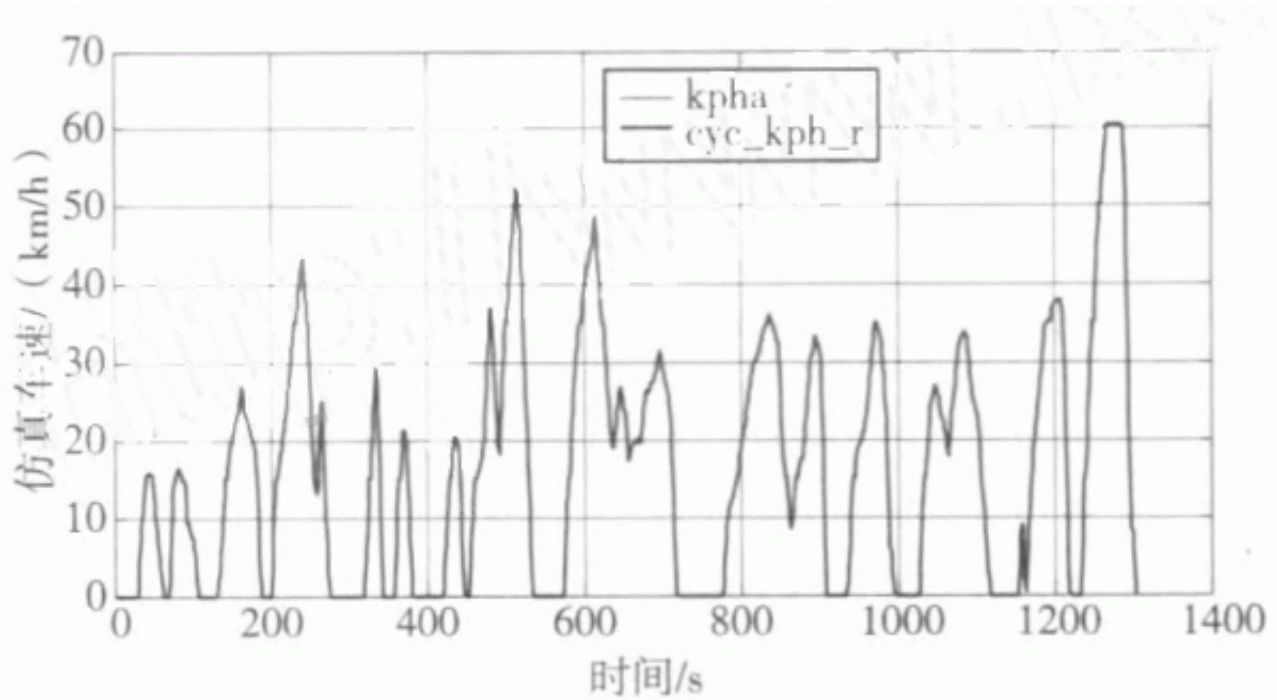


图2 车速跟随结果曲线

### 3.2 蓄电池SOC结果

蓄电池组SOC状态如图3所示。蓄电池组初始SOC=0.7，蓄电池组SOC上限值cs\_lo\_soc=0.8及下限值cs\_hi\_soc=0.4。

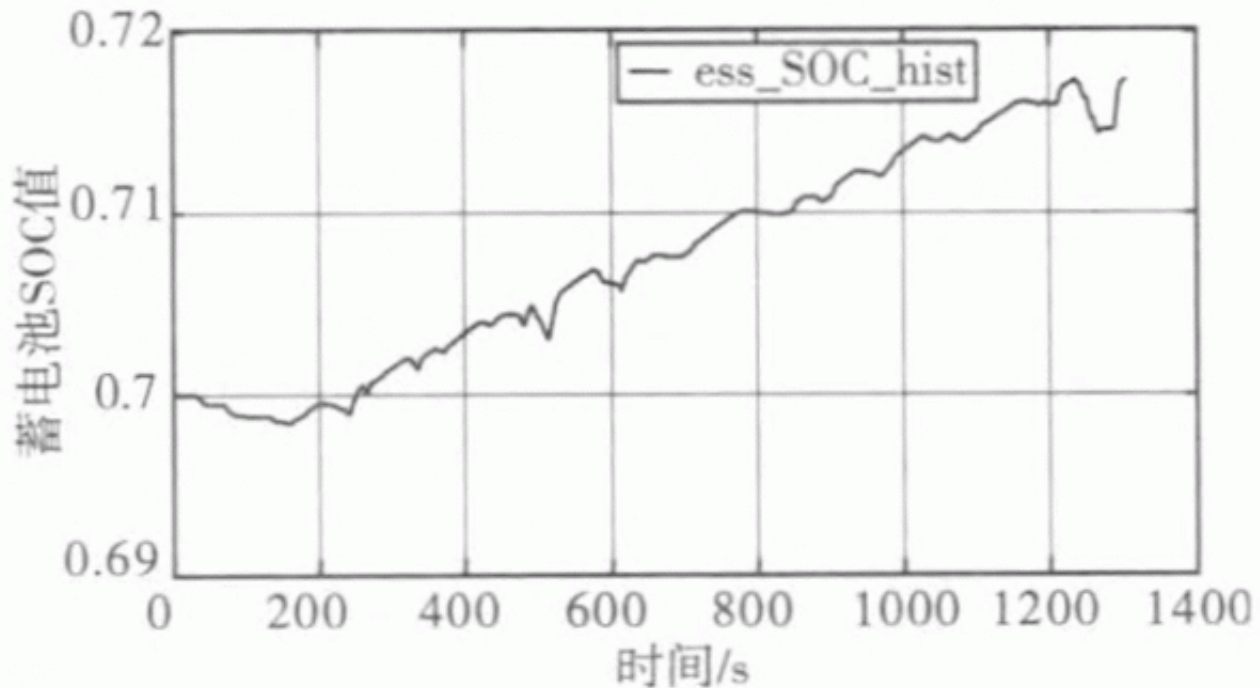
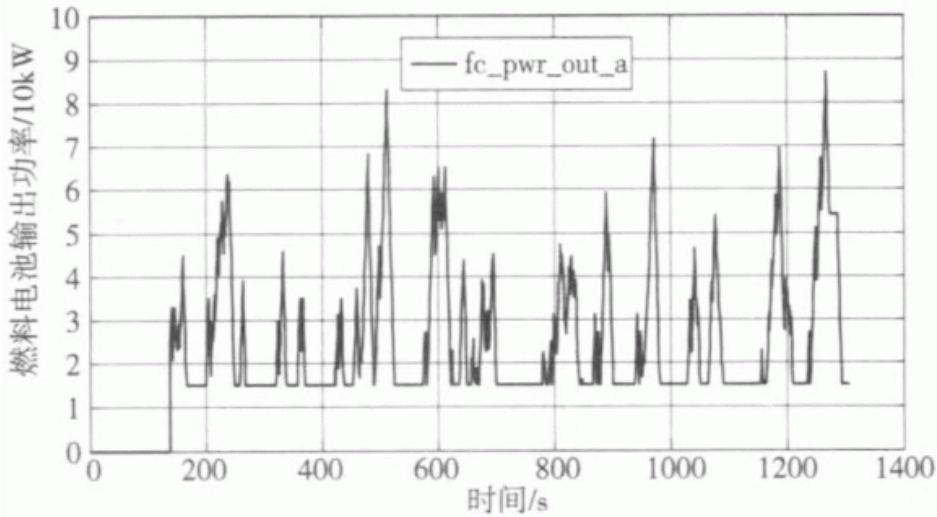


图3 蓄电池组 SOC 状态曲线

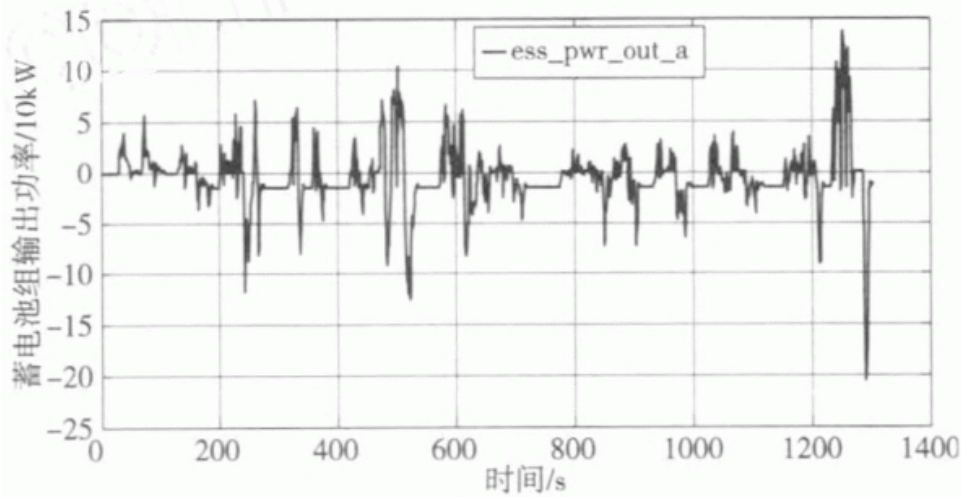
由图3可知，在选择仿真的中国典型城市道路循环工况中，蓄电池组SOC始终保持在0.69~0.72之间。

### 3.3动力系统部件输出功率结果

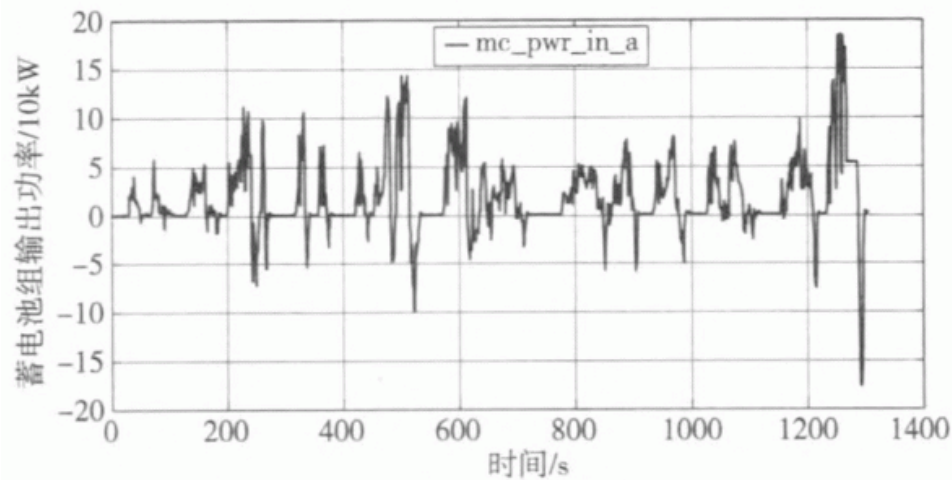
图4所示为燃料电池城市客车行驶过程中，燃料电池实际输出功率、蓄电池组实际输出功率以及驱动电机实际输入功率变化曲线。燃料电池城市客车刚起步时，完全由蓄电池组输出功率；随着车速的提高，燃料电池城市客车正常行驶所需功率由燃料电池系统提供；当燃料电池城市客车处于爬坡或急加速工况时，燃料电池系统无法提供驱动电机所需峰值功率，蓄电池组作为辅助动力源和燃料电池系统一起提供驱动电机所需功率。



(a) 燃料电池输出功率变化曲线



(b) 蓄电池组输出功率变化曲线



(c) 驱动电机输入功率变化曲线

图 4

### 3.4动力性能仿真结果

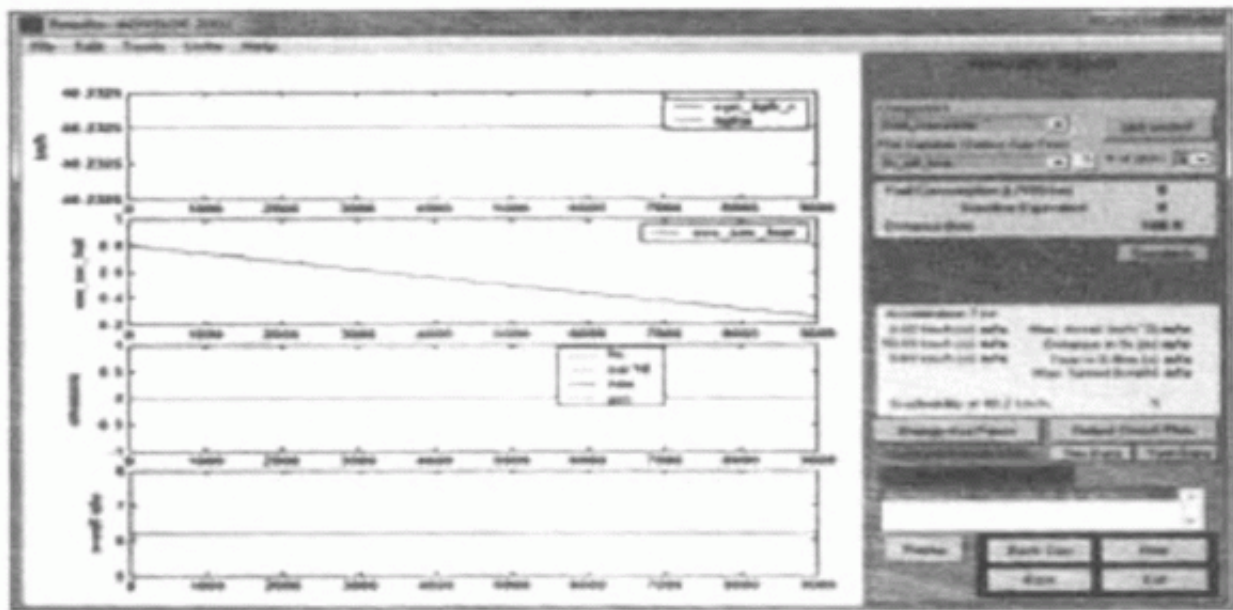
动力性能仿真结果如表4。

**表 4 车辆动力性能仿真结果**

动力性能设计指标	设计指标数值	仿真数值
0 ~ 50km/h 加速时间/s	25	12.9
最高车速/(km/h)	69	74.2
最大加速度/(m/s <sup>2</sup> )	—	2.9
最大爬坡度/%	20	20.8

### 3.5纯电动模式续驶里程仿真结果

图5所示为燃料电池城市客车纯电动续驶里程仿真结果，在纯电动驱使模式下，蓄电池组初始SOC为0.8，燃料电池客车以40 km / h速度行驶100.6km时，蓄电池组SOC变为0.22。



**图 5 纯电动续驶里程仿真结果**

### 4结论

对燃料电池城市客车动力系统结构选型及各部件参数计算、匹配，运用ADVI5OR搭建整车模型，建立中国典型城市道路循环工况进行仿真，结果表明车速跟随效果良好；蓄电池组SOC在有效范围内变化；动力系统各部件均工作在较高效率区间并且能够满足车辆行驶工况的功率需求。

对整车动力性能和纯电动驱动模式下的经济性能进行仿真，结果表明最高车速、最大爬坡度、0~50km / h加速时间均能满足性能设计指标。纯电动驱动模式下的续驶里程满足性能设计指标。

## 参考文献

- [1] 陈全世,仇斌,谢起成. 燃料电池电动汽车[M]. 北京:清华大学出版社,2005:23 - 25.
- [2] YAZDANI A, SHAMEKHI A H, HOSSEINI S M. Modeling, performance simulation and controller design for a hybrid fuel cell electric vehicle[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2015, 37 (1):375 - 396.
- [3] NING Q, XUAN D, KIM Y. Modeling and control strategy development for fuel cell hybrid vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11 (2): 229 - 238.
- [4] 郑怡颖,赵治国. 燃料电池轿车动力系统匹配研究[J]. 机械与电子,2012(7):6 - 9.
- [5] 周苏,江苗,牛继高,等. 燃料电池增程式电动汽车动力匹配与仿真研究[C]//2011 中国汽车工程学会年会论文集,2011.
- [6] 孙绪旗. 氢燃料电池汽车动力系统设计及建模仿真[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
- [7] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [8] 吴海波. 纯电动城市客车驱动系统仿真研究[D]. 贵阳:贵州大学,2015.
- [9] Turkmen A C, Solmaz S, Celik C. Analysis of fuel cell vehicles with advisor software[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 70:1066 - 1071.
- [10] 曾小华,宫维钧. ADVISOR 2002 电动汽车仿真与再开发应用[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/165286.html>