

文章编号:1000-582X(2004)10-0029-04

# 燃料电池/蓄电池双能源电动汽车动力系统仿真\*

冉振亚<sup>1</sup>, 曹文明<sup>2</sup>, 杨超<sup>2</sup>, 赵树恩<sup>1</sup>, 庞迪<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400030; 2. 国家客车质量监督检验中心, 重庆 400030)

**摘要:**采用燃料电池/蓄电池作为电动汽车动力系统的开发与研究是国外电动汽车动力系统研究的新方向。结合对电动汽车动力系统研究进行的一些探讨,对燃料电池/蓄电池双能源电动汽车动力系统进行了建模。并采用与focus汽车同样的底盘和车身,用30 kW质子交换膜燃料电池为主动动力源,以铅酸蓄电池为辅助动力源。在Advisor平台上实现了对该虚拟样车的仿真,而且以欧洲NEDC循环工况进行了仿真实验,结果表明该虚拟样车完全满足设计和性能要求。

**关键词:**双能源;动力系统;电动汽车;仿真

**中图分类号:**U469.72

**文献标识码:**A

由于蓄电池体积大、能量密度低、充电时间长等缺点制约了电动汽车的发展<sup>[1]</sup>。近年来快速发展的质子交换膜燃料电池由于其能量转化效率高、能量密度大、无须充电、零排放等优点广泛被采用在电动汽车上。由于燃料电池价格昂贵、冷启动性能差、后备功率不足等缺点影响了燃料电池汽车的广泛推广,现通过采用质子交换膜燃料电池(PEMFC)加上铅酸蓄电池双能源的电动汽车可以解决行驶里程短和充电时间长的问题。随着燃料电池技术的日趋成熟,这种新一代的电动汽车正逐渐成为世界各汽车公司研究开发的热点<sup>[2]</sup>。

## 1 双能源电动汽车动力驱动系统的建模

双能源电动汽车动力系统工作过程简述如下:当汽车起步时,蓄电池大电流放电,起动汽车。当汽车以巡航速度行驶时,主控制单元根据具体工况确定电源系统的工作状况,在保证汽车正常行驶的条件下优先让燃料电池单独工作,能量富余时可向蓄电池组充电;当燃料电池的电能不足以维持给定车速时,主控制单元控制蓄电池组放电予以补充。当汽车加速行驶或上坡时,燃料电池和蓄电池同时工作,输出大电流满足电动机高功率需要;同时主控制单元准确地调节燃料电池和蓄电池输出电流的比例,限制燃料电池、蓄电池电流的输出,以维持它们的寿命。当汽车制动减速或下

长坡时,主控制单元控制燃料电池停止供电,电动机再生电流经PWM、双向DC/DC高频升(降)压变换器降压之后向蓄电池充电。

### 1.1 质子交换膜燃料电池

质子交换膜燃料电池工作原理和反应过程见图1<sup>[3]</sup>,由图中可看出,燃料(H<sub>2</sub>)供给阳极,氧化剂(O<sub>2</sub>)进入阴极催化剂(Pt)使氢在阳极分解成自由电子和质子,自由电子通过外电路形成电流,而质子通过电解质移至阴极,催化剂促使它们与阴极的氧结合生成水,并产生热量。在这个过程中,燃料的化学能被分离出来直接转换为电能,通常约有75%~90%的燃料可以转化为电能。整个电化学反应为:燃料+氧化剂=H<sub>2</sub>O+其它物质+电。单元电池输出能量值非常小,通常将其串联成电池组(由150~160个单电池组成)以满足汽车动力性要求。

质子交换膜燃料电池单电池的输出电压数学模型可以通过基本的电化学热力学推导出来,表达式如下所示:

$$V_0 = E - \eta_{act} - \eta_{conc} - \eta_{ohmic}$$
$$E = E_{std} + (T - T_0) \frac{\Delta S}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{0.5})$$
$$\eta_{act} = \frac{RT}{anF} \ln \frac{i}{i_0}$$

\* 收稿日期:2004-06-10

作者简介:冉振亚(1949-),男,万州市人,重庆大学副教授,主要从事汽车摩托的开发研究。

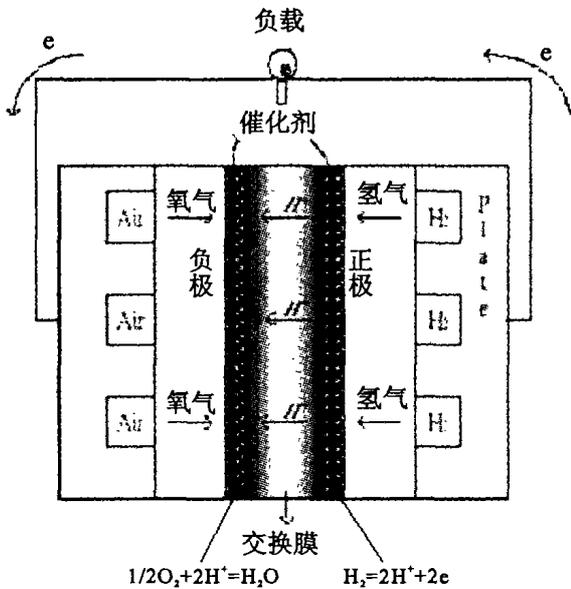


图1 燃料电池工作原理

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \left( 1 - \frac{i}{i_{lim}} \right)$$

$$\eta_{ohmic} = i \cdot (R_{electrode} + R_{membrane} + R_{plate})$$

式中为可逆电动势,  $\eta_{act}$  为活化过电位,  $\eta_{conc}$  为浓差过电位,  $\eta_{ohmic}$  为欧姆过电位,  $E_{std}$  为标准电极电势,  $F$  为法拉第常数,  $\Delta S$  为标准摩尔熵,  $T$  为工作温度。  $T_0 = 298.15 \text{ K}$ ,  $P_{H_2}$ 、 $P_{O_2}$  分别为反应界面  $H_2$ 、 $O_2$  的分压,  $i$  为电流密度,  $i_0$  为交换电流密度,  $i_{lim}$  为极限电流密度。

在 Matlab/Simulink 平台上建立的燃料电池控制框图如图 2 所示。

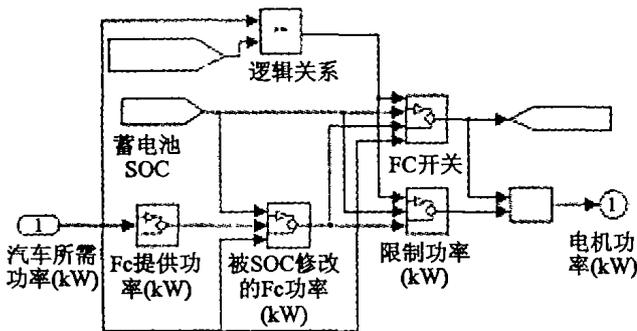


图2 燃料电池控制框图

### 1.2 无刷直流电动机

无刷直流电动机的转矩和电动势可用下列各式表述<sup>[4]</sup>:

$$T_m = C_m \times \Phi \times I_a$$

$$E = C_e \times \Phi \times n$$

$$C_m = \frac{p \times N}{2\pi \times b}$$

$$C_e = \frac{2\pi}{60} \times C_m = \frac{p \times N}{60b}$$

式中,  $T_m$  为电机转矩,  $N \cdot m$ ;  $C_m$  为转矩常数,  $Nm/$

( $Wb \cdot A$ );  $p$  为磁极对数;  $N$  为有效导体总数;  $b$  为并联支路对数;  $\Phi$  为磁通,  $Wb$ ;  $I_a$  为电枢电流,  $A$ ;  $E$  为电枢绕组的反电动势,  $V$ ;  $C_e$  为电势常数,  $V \cdot \text{min}/(r \cdot Wb)$ ;  $n$  为电机转速,  $r/\text{min}$ ;

无刷直流电机的转速  $n$  与电流间的关系式为:

$$n = \frac{U_0 - I_a \times R_a}{C_e \times \Phi}$$

无刷直流电动机的动力方程可以通过  $R-L$  电路的能量平衡推导出来, 方程如下:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + d/dt \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

其中脚标  $a, b, c$  为三相电枢。

在 Matlab/Simulink 平台上建立的电机控制框图如图 3 所示。

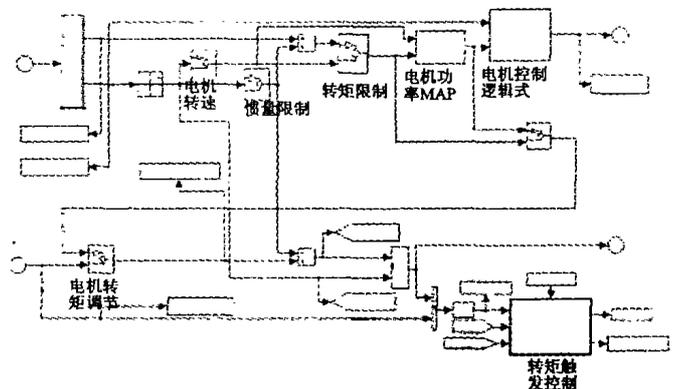


图3 电动机控制框图

### 1.3 蓄电池

铅酸蓄电池容量特性的理论模型有著名的 Peukert 方程式<sup>[5]</sup>:

$$I^n \cdot \tau = \text{Const}$$

式中,  $I$  为恒流放电电流值;  $\tau$  为以  $I$  值恒流持续放电至终止电压的时间;  $n$  为与电池类型有关的常数, 铅酸电池通常取 1.3 左右。

铅酸蓄电池的电压特性表达式为:

$$V = E - (R_0 + R_f) \cdot I$$

式中,  $V$  为电池的工作电压,  $E$  为电池的电动势,  $R_0$  为电池充满电状态下的内阻,  $R_f$  为电池放电过程中的附加内阻,  $I$  为放电电流值。

铅酸蓄电池的瞬时放电电流可以通过它的输出功率计算得到:

$$i = \frac{(v - \sqrt{v^2 - 4RP_{out}})}{2R}$$

铅酸蓄电池的荷电状态 (SOC) 可以通过下式计算<sup>[6]</sup>:

$$SOC = SOC_{init} - \frac{i \cdot t}{C_{max}}$$

在 Matlab/Simulink 平台上建立的铅酸蓄电池控制模型。

### 2 混合能源控制

该电动汽车由两种能源来驱动,即质子交换膜燃料电池和蓄电池。能源控制器的主要功用是合理分配燃料电池和蓄电池之间的功率,以满足汽车的功率要求。目前按它们之间分配的控制策略来分,可分为两种基本的控制策略模式<sup>[7]</sup>:功率跟随式(Power follower)和恒温器式(Thermostat)。功率跟随模式的基本思路为:当电池电量状态(SOC)在[cs\_lo\_, cs\_hi\_] (电池充电量的高低状态设定值)之间时,燃料电池应在某一设定的范围内输出功率,输出功率不仅要满足车辆驱动要求,还要为电池组充电,该功率称为均衡功率(即对电池进行了补充使电池在最佳 SOC 状态)。

基于这种观点在 Matlab/Simulink 平台上建立如图 4 所示的控制模型。

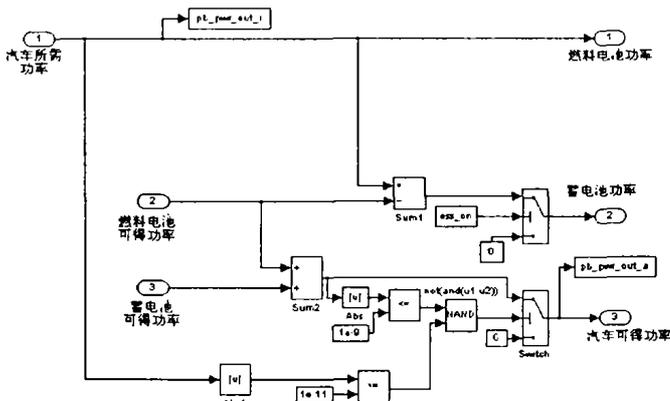


图 4 混合能源控制框图

### 3 Advisor 仿真

Advisor 是一种基于 Matlab 的能量流分配的后向式电动车辆、混合电动车辆和燃料电池车辆仿真软件,通过各种自行设计或标准循环行驶工况仿真整车、动力系统或部件模型的性能,比如整车的动力性、经济性和排放性,控制算法的功率流和效率特性等<sup>[8]</sup>。

基于上面的计算,采用 Advisor2002 仿真该电动汽车的设计性能,为便于比较和分析,该电动汽车采用与 focus 电动汽车同样的底盘和车身,用 30 kW 质子交换膜燃料电池为主动动力源,以 12 块铅酸蓄电池为辅助动力源(原 focus 电动汽车动力源为 28 块铅酸蓄电池),车辆仿真参数如表 1 所示。在 NEDC 工况下的仿真结果如图 5 所示。

表 1 电动汽车参数表

整车参数	整车质量/kg	1304	滚阻系数	0.012 63
	迎风面积/m <sup>2</sup>	2.06	空阻系数	0.312
	轮胎规格	215/45 ZR17	轴距/m	2.62
电机参数	额定功率/kW	150	最高转速/(r·min <sup>-1</sup> )	10 000
	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	6500	平均工作效率	0.91
燃料电池型号/	Markv/Nafion115™		燃料电池组体积/L	48.6
燃料	质子交换膜		燃料电池组总重/kg	136
电池	输出功率/kW	30	电池堆峰值效率	0.6
参数	单电池电压/电流密度	0.7v/0.215A/cm <sup>2</sup>	体积比功率/(w·L <sup>-1</sup> )	617
	质量比功率/(w·kg <sup>-1</sup> )	220		
蓄电	数量(块)	12	重量/kg	234
池组	额定输出电压/v	144	SOC <sub>min</sub>	0.4
参数	额定放电容量/Ah	660	SOC <sub>init</sub>	0.7
传动系	主减速比	3.5	传动系平均效率	0.91
参数	I 档传动比	1.55	II 档传动比	1

图 5(a)为整车车速随时间的变化曲线。由图 5(a)可以看出:按实验要求,循环路程总长 10.94 km,用时 1 184 s。仿真表明该电动汽车完全可以达到实验要求,该电动汽车从 0 ~ 96.6 km/h 的加速时间为 6.7 s,从 64.4 ~ 96.6 km/h 的加速时间为 2.3 s,以 88.5 km/h 的车速、持续 10 s 的爬坡度为 39.5%。而原 focus 电动汽车从 0 ~ 96.6 km/h 的加速时间为 8.8 s,从 64.4 ~ 96.6 km/h 的加速时间为 3.5 s,以 88.5 km/h 的车速、持续 10 秒的爬坡度为 28.6%。由此可说明该电动汽车比原 focus 电动汽车具有更强的动力性。

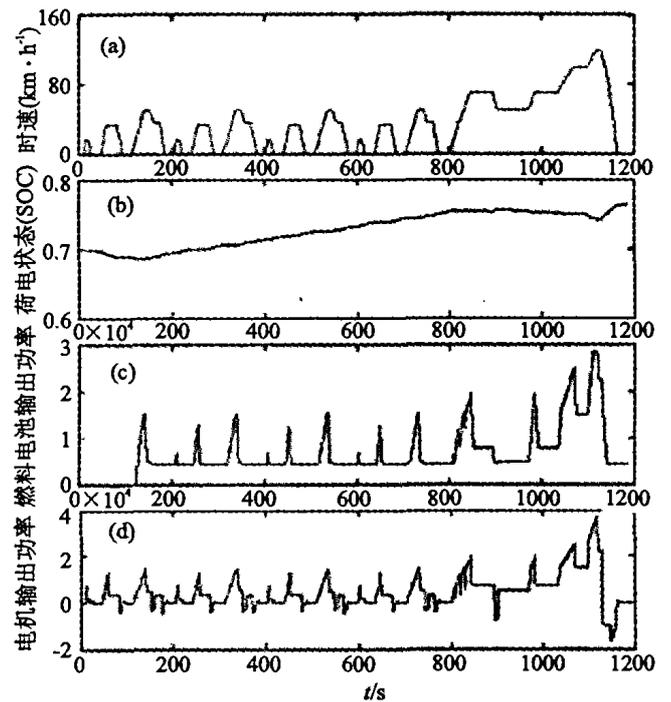


图 5 双能源电动汽车在 NEDC 工况下的仿真曲线

图 5(b)为蓄电池的荷电状态随时间的变化曲线,图 5(c)为燃料电池的输出功率随时间的变化曲线。由图中可以看出,蓄电池的初始荷电状态为 0.7,在汽

车启动时刻,荷电状态降低,以提供汽车启动和燃料电池启动所需的功率。随后按照功率跟随模式的控制策略,燃料电池的剩余功率给蓄电池充电,保持蓄电池荷电状态在初始状态,以延长蓄电池的使用寿命。

#### 4 结 论

通过对燃料电池/蓄电池双能源电动汽车动力系统的研究,建立其数学模型,并以该数学模型在 Matlab6.5 环境下建立了燃料电池/蓄电池双能源电动汽车动力系统的仿真模型。通过研究表明该数学模型是正确的,可用于燃料电池/蓄电池双能源电动汽车研究的仿真、参数选择等方面的研究。通过所开发研究的双能源电动汽车与原 focus 电动汽车动力性的对比实验,充分说明采用了燃料电池/蓄电池双能源的电动汽车比采用单蓄电池的原 focus 电动汽车具有更好的动力性和续驶里程。

#### 参考文献:

- [1] CHAN C C, CHAU K T. Modern electric vehicle technology[M]. New York: Oxford University Press Inc, 2001: 165 - 168.
- [2] NADAL M, BARBIR F. Development of a hybrid fuel cell / battery powered electric vehicle, Int [J]. Hydrogen Energy, 1996, 21 (6): 497 - 505.
- [3] APPLEBY A J, FOULKES F R. Fuel Cell Handbook [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [4] 宋银宾. 电机拖动基础[M]. 北京:冶金工业出版社, 1984.
- [5] 陈全世, 林拥军, 张东民. 电动汽车用铅酸电池放电特性的研究[J]. 汽车技术, 1996, (8): 7 - 11.
- [6] SZUMANOWSKI A. The Model and Simulation for Determination of Minimal Energetic Parameters of Two Source Propulsion System [M]. EVS 10-Hong Kong, 1990.
- [7] 曾小华. 军用混合动力轻型越野汽车动力总成匹配控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2002.
- [8] 汪新云. 串联式混合动力电动客车动力系统建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学汽车工程学院, 2003.

## Simulation for the Power System of Fuel Cell/battery Electric Vehicle

RAN Zhen-ya<sup>1</sup>, CAO Wen-ming<sup>2</sup>, YANG Chao<sup>2</sup>, ZHAO Shu-en<sup>1</sup>, PANG Di<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. National Coach Quality Supervision & Inspection Centre, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The development and research of taking fuel cell /battery as electric vehicle power is a new direction in a broad. A real-time simulation model for power driving system of a fuel cellbattery powered electric virtual vehicle is established. This electric vehicle powered primarily by 30 kw proton exchange membrane (PEM) fuel cells, with Lead-acid battery as assistant power, and with focus classis as virtual vehicle classis. The electric vehicle is simulated on the advisor platform, and the NEDC driving pattern simulation results show that the electric vehicle can satisfy the need of performance.

**Key words:** two source; power system; electric vehicle; simulation

(编辑 成孝义)