

燃料电池汽车动力系统功率平衡控制策略*

孙泽昌 魏学哲 钟再敏

(同济大学汽车学院 上海 200092)

摘要：燃料电池汽车动力总成控制的主要目的是平衡各个动力总成部件如燃料电池发动机、动力蓄电池和电动机之间的功率流向和能量平衡，使车辆保持较好的动力性和经济性。依据燃料电池汽车动力系统基本拓扑结构，提出了基于 DC/DC 变换器电流控制方式和基于模糊决策的蓄电池恒荷电状态控制的动力系统功率平衡控制算法，在 MATLAB 环境中进行了离线仿真，并用快速控制原型方法进行了实车试验验证。

关键词：燃料电池汽车 动力系统控制 模糊决策

中图分类号：U46

0 前言

燃料电池汽车是以燃料电池发动机(Fuel cell engine, FCE)为主要动力源的电动车辆，因目前燃料电池发动机尚存在输出功率较低(尤其在国内)、特性较软及响应较慢等不足，故目前国内外各大汽车公司和研究机构研制的燃料电池汽车大都配备高功率动力蓄电池组作为辅助动力源^[1]。这主要是出于两方面的考虑：从动力性角度看，由于仅配置燃料电池功率不足，导致整车的动力性较差；从经济性的角度看，由于燃料电池汽车采用电动机作为机电能量转换装置，当电动机回馈制动时，燃料电池不能被反充电，为了利用该部分能量，必须配置能量回收的存储装置。

1 系统结构及恒流控制方式

对整个动力系统的合理控制需要在满足动力性的条件下尽可能提高其经济性。从能量供给角度考虑，满足动力性要求就必须及时提供电动机所需的功率。当汽车突然加速时，由于燃料电池发动机响应较慢，动力蓄电池组应提供瞬时的峰值放电功率；满足经济性要求则应能充分吸收电动机回馈制动时的功率，由于汽车的紧急制动过程在几秒之内，因此动力蓄电池组应有吸收瞬时峰值充电功率的能力。该系统简化的拓扑结构如图 1 所示。该燃料电池汽车动力系统由燃料电池发动机、DC/DC 变换器、动力蓄电池、电动机及驱动器等主要动力装置

组成。在控制上采用两级控制，即车辆控制和功率平衡控制。车辆控制器和能量控制器完成各自的控制任务，其中车辆控制器解释驾驶操作命令，根据驾驶员的意图及车辆动力学特性计算出车辆对功率的需求，而能量控制则根据当前动力源(燃料电池发动机和动力蓄电池组)的状况并考虑两者响应速度的不同决定如何满足车辆控制器提出的功率需求，能量流向和控制信号流向如图 2 所示。

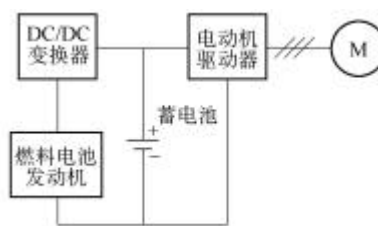


图 1 燃料电池汽车动力系统拓扑结构

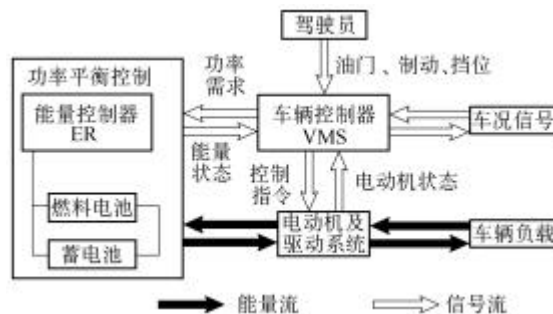


图 2 动力总成系统结构

在该系统中，DC/DC 变换器是控制燃料电池输出功率的关键部件，由于燃料电池发动机通过 DC/DC 变换器与电动机和蓄电池组相连。根据对 DC/DC 控制方式的不同，动力系统方案可分为电压源控制模式和电流源控制模式两种。本系统采用了电流源控制模式，如图 3 所示。

* 国家 863 计划资助项目(2003AA501011)。20050131 收到初稿，20050705 收到修改稿

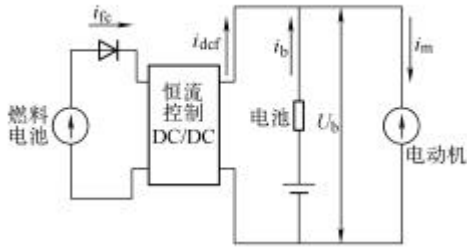


图 3 电流控制方案

选择该方案主要考虑到以下几点。

(1) 如前所述，FCE 的动态响应较慢，而限制 FCE 输出功率的主要因素是空压机转速和 FCE 冷却水的温度，而冷却水的温度又同 FCE 输出能力有关系。若水温没有调节到适当的数值，此时强行加大电堆输出功率将导致其电压过低而发生故障，DC/DC 变换器采用电流控制方式更易于根据 FCE 当前的能力控制其输出功率。

(2) 若 DC/DC 采用恒流源方式控制，则动力系统除蓄电池外都是可控的，而蓄电池组可以根据电动机的能量需求通过 DC/DC 进行间接控制，也就是说流经蓄电池的荷电状态是间接可控的。

(3) 动力总线电压唯一的由动力蓄电池确定，而蓄电池的端电压和其荷电状态(State of charge, SOC)密切相关，所以只要控制 SOC 保持基本恒定就可以保证动力总线电压处于合适的范围之内。

2 恒 SOC 控制及模糊决策算法

从上面的分析也可以看出对动力蓄电池组的控制是整个燃料电池汽车动力系统控制的一个重要方面，而动力蓄电池组的充放电能力与其 SOC 有直接关系。根据 SOC 值(S_c)还可以确定蓄电池的最大允

许充放电电流，从而确定电池组的功率能力。所以整个动力系统的控制策略必须将 S_c 控制在合理的范围内，从而使动力蓄电池组工作在最佳状态下^[2]。

此外，锂离子动力电池的性能的衰减直接体现在其直流内阻的增加，而其直流内阻的增加速度与其 SOC 值的变化范围(S_c)有很大关系，当 S_c 较小时，其直流内阻增长较慢，而当 S_c 较大时，其直流内阻增长较快，为了保持锂离子动力电池的使用寿命，应将其 S_c 控制在较小的范围内。

这里使用锂离子动力蓄电池组，试验表明当其 SOC 值在 0.5 附近时，充放电能力都较大，电池充放电效率较高，且能满足电压波动要求，于是控制目标就是将 S_c 限定在 0.5 附近一个合理的范围内。

为了实现上述的控制目标，需要一定程度上干预蓄电池的充放电电流，当电动机要求的功率较小而蓄电池的 S_c 较低时，应主动的增加燃料电池发动机输出的功率为蓄电池充电；当蓄电池 S_c 较高时，主动减小燃料电池发动机的输出功率使蓄电池放电。

蓄电池管理系统将流过电池的电流 I_b 积分从而计算出目前情况下 SOC 的增量 ΔS_c ，并与 SOC 初始值 S_{c_init} 相加可以得到当前 S_c ，通过提出的模糊决策算法得出电流控制系数 C_{Ib} ，然后在一定的电流输出限制函数(这主要由电池和燃料电池的自身特性决定)下转化为动力蓄电池电流输出期望值 I_{b_exp} ，该期望值和电动机电流的前馈计算值共同决定燃料电池输出功率(即 DC/DC 变换器输出电流值 I_{dcf})，从而使电池电流 I_b 的稳态值跟随 I_{b_exp} 变化。蓄电池管理系统可以根据电池电流计算 S_c 。模糊控制算法采用 PD 算法，由于 S_c 在某种程度上也间接反映了动力总线电压值，而 S_c 的变化率表征了流过蓄电池组电流的趋势，所以根据 S_c 及其变化率，可对动力蓄电池充放电电流的限制进行模糊控制。该模糊控制系统结构如图 4 所示，图 4 中 h 为常数。

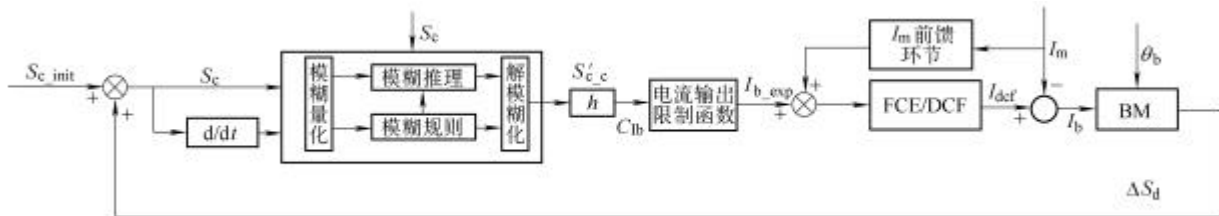


图 4 基于模糊决策推理算法的能量控制器结构图

模糊控制器的设计主要是设定其输入与输出变量模糊子集的隶属函数、模糊变量的量化论域、模糊控制规则、输入输出变量的比例变换因子等参数，参见下表。由图 4 可知，该模糊控制器的输入为 S_c 和 SOC 的变化率 $\Delta \dot{S}_c$ ，输出为蓄电池组电流期望系

数 C_{Ib} ； S'_c 、 $\Delta \dot{S}'_c$ 和 $S'_{c,c}$ 分别为 S_c 、 $\Delta \dot{S}_c$ 和 C_{Ib} 的模糊语言变量。输入变量 S'_c 划分为 $S'_{c_biglean}$ 、 $S'_{c_smalllean}$ 、 S'_{c_normal} 、 $S'_{c_smallrich}$ 、 $S'_{c_bigrich}$ 5 个模糊状态，其论域是 $[0.4, 0.6]$ ，采用三角形隶属函数形式，

如图 5 所示。输入变量 $\Delta S'_c$ 被划分成负、0、正 3 个模糊状态，其论域定义为 $[-1, 1]$ ，采用三角形隶属函数形式，如图 6 所示。

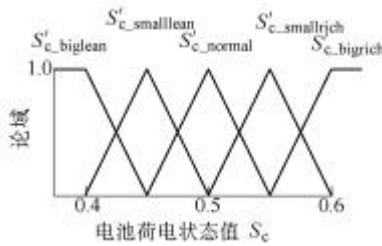


图 5 SOC 的隶属函数

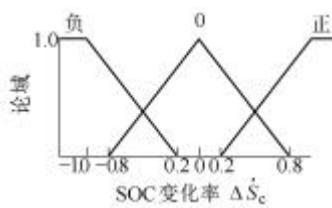


图 6 SOC 变化率的隶属函数

输出变量 S'_{c-c} 被分成 $S'_{c-c_bigcharge}$ 、 $S'_{c-c_smallcharge}$ 、0、 $S'_{c-c_smalldischarge}$ 、 $S'_{c-c_bigdischarge}$ 5 个模糊状态，其论

域定义为 $[-1, 1]$ ，也采用三角形隶属函数形式，如图 7 所示。

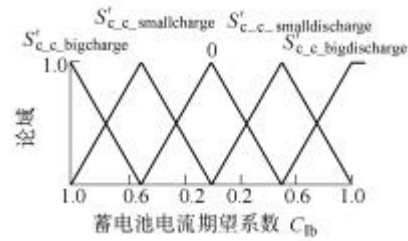


图 7 S'_{c-c} 的隶属函数

在充分考虑到控制系统的非线性、大时滞等情况下，根据试验总结出的操作经验，得出了如表所示的控制规律。

根据 Mamdani 推理规则，此控制规则可用模糊关系表达式表示为

$$R = S'_{ci} \Delta S'_{ci} S'_{c-cij}$$

若某时刻的 S_c 为 S'_c ， S_c 的变化率 $\Delta S'_c$ ，则得到相应的控制量为

$$S'_{c-c} = S'_c \Delta S'_c R$$

在解模糊判决中，采用了重心法。

表 模糊控制规则表

		S'_c				
		$S'_{c_biglean}$	$S'_{c_smalllean}$	S'_{c_normal}	$S'_{c_smallrich}$	$S'_{c_bigrich}$
$\Delta S'_c$	负	$S'_{c-c_bigcharge}$	$S'_{c-c_smallcharge}$	0	0	$S'_{c-c_smalldischarge}$
	0	$S'_{c-c_bigcharge}$	$S'_{c-c_smallcharge}$	0	$S'_{c-c_smalldischarge}$	$S'_{c-c_bigdischarge}$
	正	$S'_{c-c_smallcharge}$	0	0	$S'_{c-c_smalldischarge}$	$S'_{c-c_bigdischarge}$

3 功率平衡能量控制系统

利用上面所述的模糊决策推理算法并结合各个动力总成部件的特性，构造了如图 4 所示的燃料电池汽车动力总成系统能量控制器的控制结构图。

能量控制器通过模糊决策推理算法得到蓄电池输出电流期望系数，并经一定的电流限制函数(这主要根据蓄电池的功率特性和燃料电池发动机的动态特性决定)得到蓄电池输出电流期望值，然后通过模糊控制器构成闭环系统，其中被控对象是燃料电池发动机，电动机电流 I_m 作为扰动量考虑，蓄电池 SOC 控制目标值 S_c^* 作为参数输入模糊决策推理系统中，可根据不同的蓄电池的特性要求进行不同的处理，在文中根据对锂离子电池的功率特性测试结果设定 $S_c^*=0.5$ 。

4 控制算法仿真

针对上面提出的模糊决策推理算法和能量控制器结构，首先用仿真软件 MATLAB 中 Simulink 和 Fuzzy logic toolbox 进行了仿真研究。

通过建立燃料电池汽车的整车和动力系统模型(燃料电池发动机模型、动力蓄电池模型以及驱动系统模型等)以及车辆动力学模型，以 $S_c^*=0.5$ 作为期望中心值，在欧洲 ECE-EUDC 工况下进行了离线仿真。图 8 是蓄电池 S_c 随时间的变化曲线，图 9 是燃料电池发动机、蓄电池和电动机瞬时电流部分展开图。从图 8 可以看出 S_c 稳定在 0.5 附近，满足了控制目标，而且电流的变化也符合设计的期望。

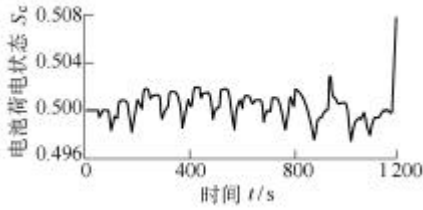


图 8 离线仿真中蓄电池 S_c 随时间变化历程

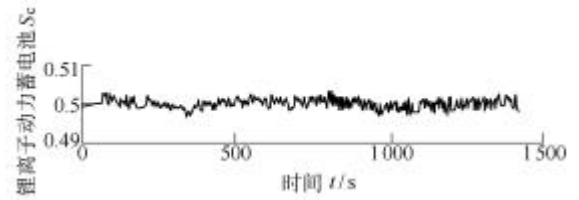


图 11 转鼓试验中 S_c 随时间变化历程

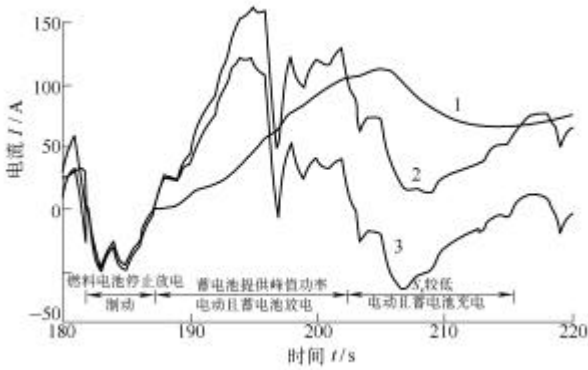


图 9 离线仿真中瞬时电流部分展开图

1.DC/DC 输出电流 2.电动机电流 3.电池电流

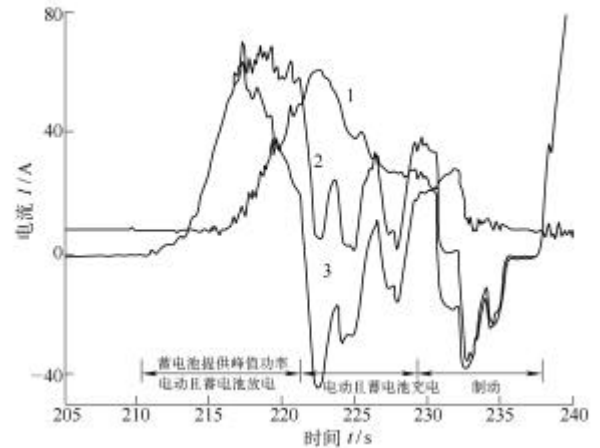


图 12 转鼓试验中瞬时电流部分展开图

1.DC/DC 输出电流 2.电动机电流 3.电池电流

5 快速控制原型转鼓试验

在上述离线仿真的基础上，采用快速控制原型技术，以 dSpace 公司 MicroAutobox 作为能量控制器，将上述控制算法在该控制器上实现，MicroAutobox 是一套基于 MATLAB/Simulink/RTW 的控制系统开发及半实物仿真的软硬件工作平台，它具有高速计算能力的硬件系统，包括处理器、I/O 等，还拥有方便易用的实现代码自动生成/下载/试验和调试的软件环境。

将上述控制算法和 MicroAutobox 应用在同济大学汽车学院开发的燃料电池轿车“超越一号”上，并施加 SANTANA2000 的典型行驶阻力，在转鼓试验台上得到图 10、图 11 和图 12 所示的试验结果。其中图 10、图 11 是实际车速和 SOC 随时间的变化历程，图 12 是燃料电池发动机、蓄电池和电动机瞬时电流部分展开图。

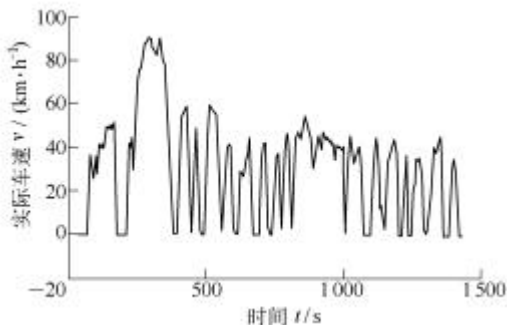


图 10 转鼓试验中车速时间历程

6 结论

从离线仿真和半实物仿真试验结果中，可以看出动力电池的 S_c 基本上稳定在期望中心值 0.5 左右，保证了电池在其效率和寿命最优范围内工作。另外，从图 10 的车速变化历程中也可看出，车辆的动力性能也是满足要求的。通过分析图 9 和图 12 可知，电动机的功率需求中变化较快的部分基本上由动力电池提供，功率需求中变化较慢的部分基本上由燃料电池发动机提供；而且比较这两幅图可看出其变化在数值上也是基本相等的，这说明提出的燃料电池汽车动力系统拓扑结构是合理的，控制策略及方法达到了控制目标。仿真结果和实际试验结果的对比也说明了燃料电池发动机、动力电池和电动机的模型建立的是较准确的，为动力系统电控单元开发的后续环节提供了很好的基础。

参 考 文 献

- 1 Chan C C. The present status and future trends of electric vehicles . In : First Circular of China-Japan Electric Vehicle Joint Conference . Beijing : Beijing Institute of Technology Press , 2001 : 100 ~ 107
- 2 Jung J H, Lee Y K, Choe S Y . Power control strategy based on SOC for series hybrid electric vehicle system . In : First Circular of China-Japan Electric Vehicle Joint Conference.

- Beijing :Beijing Institute of Technology Press ,2001 :156 ~ 163
- 3 Timothy J R. Fuzzy Logic with Engineering Applications. Beijing : Publishing House of Electronics Industry , 2001
- 4 Ogata K. 现代控制工程(第三版). 卢伯英等译. 北京 : 电子工业出版社 , 2000

POWER BALANCE STRATEGY OF POWERTRAIN IN FUEL CELL VEHICLE

Sun Zechang Wei Xuezhe Zhong Zaimin
(School of Automotive, Tongji University,
Shanghai 200092)

Abstract : The object of fuel cell vehicle power train control is to balance the energy and power between fuel cell engine, power batteries and electric motor to achieve better dynamic performance and fuel economy. According to fuel cell vehicle basic topological architecture, a DC/DC converter current controlled mode is presented and an algorithm based on fuzzy logic to balance battery state of charge is introduced, then the control mode and algorithm are verified in matlab by off-line simulation, then tested by rapid control prototyping method on a real fuel cell vehicle.

Key words : Fuel cell vehicle Powertrain control
Fuzzy decision

作者简介：孙泽昌，男，1953 年出生，教授，博士生导师。

E-mail : sunzechang@fcv-sh.com