

# 具有辅助动力源的燃料电池 汽车功率平衡控制算法\*

钟再敏 贡海涛 孙泽昌

(同济大学)

**【摘要】**建立了包括燃料电池发动机、电机及其控制器、动力蓄电池组在内的燃料电池汽车动力系统的动态数学模型。通过设计线性二次型调节器得到最优控制律;通过构造状态观测器解决状态变量蓄电池开路电压不可测量的问题,从而建立了基于全状态反馈的燃料电池汽车动力控制算法。离线仿真和实车转鼓试验证明,所建立的动力控制算法达到了既定的控制目标,并且充分考虑了动力系统主要部件的动力性和经济性。

**关键词:**燃料电池汽车 动力系统 数学模型 线性二次型调节器 控制

**中图分类号:**U469.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3703(2006)07-0009-04

## Power Balance Control Algorithm of Fuel Cell Vehicle Fitted with Auxiliary Powertrain

Zhong Zaimin, Yun Haitao, Sun Zechang

(Tongji University)

**【Abstract】** Construct dynamic mathematic model of the fuel cell vehicle powertrain which is composed of fuel cell engine, DC motor and its controller, as well as the power battery. The optimum control rule is obtained by design of Linear Quadratic Regulator, and the unmeasurable question of open circuit voltage of status variable battery is solved by constructing a status observer to set up a power control algorithm of a fuel cell vehicle based on a full status feedback. Off line simulation and rotating drum test for a vehicle approved that the power control algorithm set up can realize the given control target with a full consideration of power ability and economy of main components in power system.

**Key words:** Fuel cell vehicle, Powertrain, Mathematic model, Linear Quadratic Regulator, Control

### 1 前言

能源短缺和环保问题促使人们开发低污染的替代能源汽车,燃料电池汽车作为一种可行方案已成为目前汽车领域的研究热点之一。从能量转换方式和系统结构来看,燃料电池汽车动力系统同传统内燃机汽车有着本质的区别,因此其动力控制算法也有着完全不同的研究内容,这也是燃料电池轿车开发过程中的重点和难点之一。运用现代控制理论的基本思想,首先通过理论分析和试验参数辨识建立动力系统的状态空间数学模型,然后根据该数学模型通过设计线性二次型调节器建立了基于全状态反馈的燃料电池汽车动力控制算法。离线仿真和实车转鼓试验对所设计的动力控制算法验证表明,文中采用的功率平衡算法可行并且具有本质上的优越性。

### 2 动力系统动态建模

#### 2.1 动力系统等效物理模型

所研究的燃料电池轿车动力系统具有如图1所示的物理结构。永磁同步电机经减速/差速机构驱动车轮,电机控制器采用变频矢量控制,可以实现电机的四象限运行<sup>[1]</sup>。在燃料电池和电机控制器之间增加直流/直流变换器(DC/DC)的作用是对系统进行阻抗匹配,以解决燃料电池输出特性偏软的问题<sup>[2]</sup>。动力蓄电池作为辅助动力源并联在直流母线上,其作用是吸收回馈能量、提供峰值功率和响应负载功率的快变成分<sup>[3]</sup>。

图1中单向DC/DC采用恒流控制;电机采用转矩闭环控制,可以将其视作一恒流控制的负载;动力蓄电池作为直流母线上唯一的电压源决定了母线的瞬时电压。另外,燃料电池采用所谓的功率跟随控

\* 基金项目:国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2003AA501011)。

·设计·计算·研究·

制,首先根据功率需求对燃料电池给出预测控制指令,然后根据其最佳工作点调节 DC/DC 的电流设定。

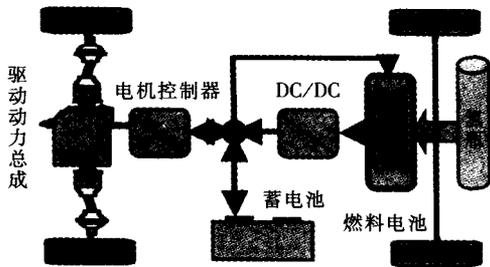


图1 燃料电池轿车动力系统结构

由以上分析可以建立如图2所示的等效电路模型,其中蓄电池采用 RC 等效电路模型。由文献[4]可知,10倍率放电实验时采用 RC 等效电路模型的电池电压瞬时最大误差为 2 V。采用更高阶的等效电路模型虽然可以减小误差,但会给后续的分析和计算带来困难,因此蓄电池采用一阶的 RC 模型,对于控制算法的设计是可取的。

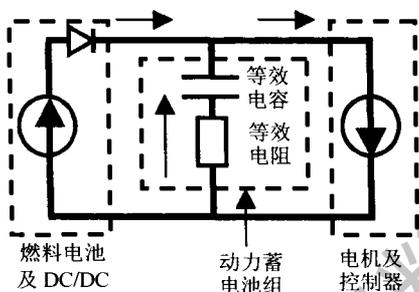


图2 动力系统的简化等效电路模型

2.2 系统动态数学模型

根据系统等效电路模型和整体控制方案,以及主要功率部件的特性,可以得到各功率部件输入和输出的近似动态关系式,从而可以建立系统近似的动态数学模型。

2.2.1 燃料电池

输入功率设定为  $P_{fset}$ , 输出为当前允许输出功率限定  $P_{Lm}$ , 其传递函数用一阶环节近似表示为:

$$G_{K_{fce}}(s) = \frac{P_{Lm}(s)}{P_{fset}(s)} = \frac{K_{fce}}{T_{fce}s + 1} \quad (1)$$

式中,  $K_{fce}$ 、 $T_{fce}$  分别为开环增益和时间常数;  $G_k$  代表开环传递函数表达式。

2.2.2 DC/DC

DC/DC 输入值为电流设定  $I_{defset}$ , 输出为电流  $I_{def}$ , 用一阶环节近似表示为:

$$G_{K_{df}}(s) = \frac{I_{def}(s)}{I_{defset}(s)} = \frac{K_{df}}{T_{df}s + 1} \quad (2)$$

式中,  $K_{df}$ 、 $T_{df}$  为开环增益和时间常数。

2.2.3 电机及其控制器

电机输入为转矩设定  $TQ_{set}$ , 输出为实际转矩  $TQ_b$ , 开环传递函数可近似为:

$$G_{K_{mc}}(s) = \frac{TQ_b(s)}{TQ_{set}(s)} = \frac{K_{mc}}{T_{mc}s + 1} \quad (3)$$

式中,  $K_{mc}$ 、 $T_{mc}$  分别表示开环增益和时间常数。

由于电机电流同电机转速有关, 因此无法建立电机电流和转矩设定之间的线性关系, 为此构造变量电机功率设定  $P_{mset} = Tq_{set}n/9.55$ , 则有:

$$G_{K_m}(s) = \frac{I_m(s)}{P_{mset}(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (4)$$

式中,  $K_m = K_{mc}/U_{bus}$ ,  $U_{bus}$  表示母线电压, 在这里取常数;  $T_m = T_{mc}$ 。

2.2.4 蓄电池

蓄电池采用 RC 等效电路模型, 则有:

$$\frac{1}{C} \int_0^t [-I_b(t)] dt + R[-I_b(t)] = U_{bus}(t) \quad (5)$$

式中,  $I_b$  为蓄电池电流;  $R$  为等效内阻;  $C_0$  为等效电容;  $U_{bus}$  表示母线电压瞬时值; 积分项为蓄电池开路电压  $U_b$ , 则有:

$$G_{K_b} = \frac{U_b(s)}{I_b(s)} = \frac{1}{C_0 s} \quad (6)$$

其中电池电流和电机电流及 DC/DC 电流满足代数关系式:  $I_b(t) = I_m(t) - I_{df}(t)$ 。

联合式(1)、(2)、(4)、(6)即可得到动力系统四阶的 S 域动态数学模型。由上述分析可以看出, 所研究的动力系统是一个非线性、时变、强耦合的多输入多输出系统, 但经过适当的简化和变形, 可以抽象为一个适合于分析设计的线性定常模型, 下面通过试验验证模型的可信性。

建立的系统状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (7)$$

式中, 状态矢量  $x = [I_{df} \quad I_m \quad U_b \quad P_{Lm}]^T$ ; 输入矢量  $u = [P_{fset} \quad P_{mset} \quad I_{defset}]^T$ ; 输出矢量  $y = [I_{df} \quad I_m \quad U_{bus} \quad P_{Lm}]^T$ ,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为系统矩阵, 由模型参数  $K_{fce}$ 、 $T_{fce}$ 、 $K_{df}$ 、 $K_m$ 、 $T_m$ 、 $C_0$ 、 $R$  确定。

2.3 模型参数估计

系统模型确定之后, 需要确定其中的未知参数, 即模型参数估计问题, 本文采用最小二乘参数估计法<sup>[5]</sup>进行模型参数估计。

以某型燃料电池轿车样车为试验对象, 采集了其转鼓试验中多次 J1015 循环工况的相关数据作为离线参数估计的样本数据, 分别对各部件进行离线参数估计。为评价参数估计结果的准确性, 定义平均

偏差率  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \frac{Y_{estimation} - Y_{real}}{Y_{real} - Y_{base}} \right| \quad (8)$$

式中,  $k$  为样本数据个数;  $Y_{estimation}$  为各部件输出的估计值;  $Y_{real}$  为实测值;  $Y_{base}$  为初始零输入稳定状态时的输出值。

### 2.3.1 燃料电池模型验证

对于燃料电池模型, 功率上升和下降时 FCE 的动态相应速度差异较大。从功率平衡的角度出发, 更关心的是燃料电池功率上升(即加速)过程中的特性, 因此, 在实际设计中, 可以以上升过程的特性参数为准。用式(8)计算平均偏差率为 11.67%, 而单独采用上升阶段的数据计算的平均偏差率为 3.75%。

### 2.3.2 DC/DC 和电机模型验证

DC/DC 和电机的估计较为准确, 平均偏差率分别为 3.18% 和 2.42%。

### 2.3.3 蓄电池模型验证

对于蓄电池模型, 放电时估计值基本符合实测值, 充电时估计值要大于实测值, 充放电时蓄电池的动态特性差异较大。从功率平衡的角度出发, 更关心的是其蓄电池放电过程中的特性, 因此, 在实际设计中以放电特性参数为准<sup>[3]</sup>, 平均偏差率为 9.01%, 而单独采用放电时的数据计算平均偏差率为 4.34%。

根据上述系统辨识得到的动力系统动态数学模型, 以一次 J1015 循环工况中实测的输入数据和初始状态作为模型的输入和初始条件进行离线仿真, 图 3 是主要部件电流的仿真值同实测值的对比。

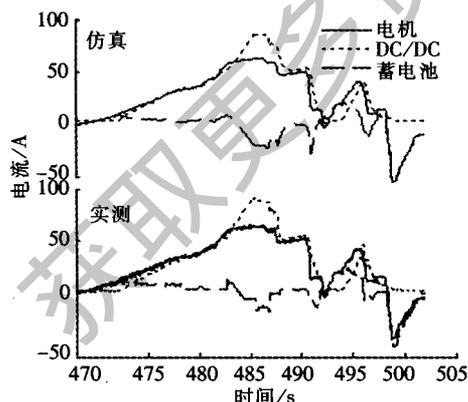


图 3 某时间段电流的仿真结果与实测数据对比

仿真结果同试验数据的对比证明, 所建立的动力系统数学模型可以近似反映实际系统的特性。模型参数验证证明, 尽管忽略了一些高阶动态特性, 但所建立的各部件数学模型和参数估计的结果能够在一定程度上反映实际部件的输入输出特性, 可用于

后续控制算法的设计中。

## 3 基于全状态反馈的动力控制算法

容易验证式(7)表述的系统开环不稳定, 因此必须首先解决系统的镇定问题, 这在实际中表现为所谓的系统功率平衡问题。

解决电混合燃料电池汽车功率平衡问题, 文献(6)中介绍了包括模糊算法和神经网络在内的非线性算法, 其优点是鲁棒性和适应性好, 能很好跟随当前系统状态和负载变化, 但存在运算量大、参数整定较困难等问题, 而且难以做到最优。

文献(7)中提出将电机电流作为干扰处理, 干扰前馈加蓄电池电流和 SOC 值双闭环反馈的功率平衡控制结构, 物理意义明确, 结合非线性的闭环控制参数可以取得较好的控制效果。但存在的问题主要有两个: 首先是仅实现了部分状态反馈, 所以控制效果有进一步改进的空间; 其次, 单纯依赖试验标定的方法确定闭环控制参数复杂且无法做到最优。

本文在前人工作的基础上, 通过设计线性二次型调节器求得最优控制律, 通过设计状态观测器解决部分状态变量不可测量的问题, 从而建立了基于全状态反馈的功率平衡算法, 采用全状态反馈更容易获得优异的控制性能<sup>[8]</sup>; 而通过线性二次型调节器的设计, 可以保证闭环系统稳定性和一定性能泛函下的最优, 因而具有本质上的优越性。

### 3.1 状态观测器设计

容易验证, 给定线性定常系统  $\Sigma_0(A, B, C)$  完全可控且完全能观。

对于系统  $\Sigma_0$ , 状态矢量中的蓄电池开路电压  $U_b$  是不能直接测量的, 为此基于系统  $\Sigma_0(A, B, C)$  构造渐进状态观测器  $\hat{\Sigma}_0$ , 其状态方程为:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G(y - \hat{y}) \quad (9)$$

式中,  $\hat{x}$  和  $\hat{y}$  分别为状态  $x$  和输出  $y$  的观测值;  $G$  为反馈增益阵。

通过配置状态观测器的闭环极点位置得到反馈增益阵  $G$ , 可以调整状态观测值对实际状态的渐进速度, 从而得到期望的闭环特性。图 4 是采用设计的状态观测器进行离线仿真得到的蓄电池开路电压观测值和母线电压测量值及通过电流积分得到的开路电压值之间的对比。状态观测器优于电流积分方法在于: 前者不受初始条件的影响, 而积分需要准确的初始条件, 这在实际控制中是很难做到; 二是后者容易受到积分累计误差的影响。

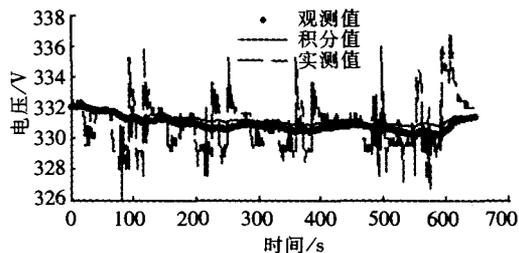


图4 开路电压观测值与实测值、积分值的对比

对蓄电池开路电压反馈的目的是控制蓄电池剩余电量(或荷电状态)保持在最佳范围,这也是系统的控制目标之一。常规的做法是利用蓄电池管理系统上传的SOC估计值进行控制,而车用蓄电池SOC值的估计目前存在易产生误差的问题<sup>[4]</sup>,因此依赖SOC估计值有时控制偏差较大,从而影响系统动态品质。通过构造开路电压的状态观测器,可以较好的解决这个问题。

### 3.2 线性二次型调节器的设计

建立由系统变量和控制变量二次型函数积分表示的二次型性能泛函如下:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [a(I_{dc} - I_m)^2 + b(I_{dc} - P_{Lm}/U_{bus})^2 + cU_b^2 + dP_{Set}^2 + eP_{mSet}^2 + fI_{dcSet}^2] dt = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (10)$$

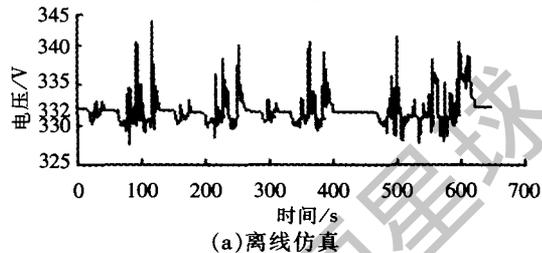
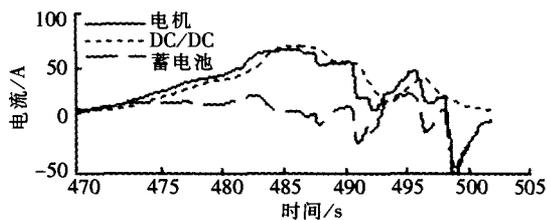
式中: $x(t)$ 为状态矢量; $u(t)$ 为控制矢量; $a, b, c, d, e, f$ 分别为各状态变量和控制变量的权重系数; $Q$ 为半正定的状态加权矩阵,由 $a, b, c$ 决定; $R$ 为正定的控制加权矩阵,由 $d, e, f$ 决定。

性能泛函具有明显的物理意义,式(10)中各项分别代表对控制偏差和控制能量大小的期望。采用最小值原理<sup>[8]</sup>可以求解上述问题,从而得到稳态最优控制律,即状态反馈矩阵 $K$ 。权重系数的确定需要考虑优化设计目标,还受到物理约束的限制,文献[9]给出的权重系数的确定原则具有一定的指导意义。

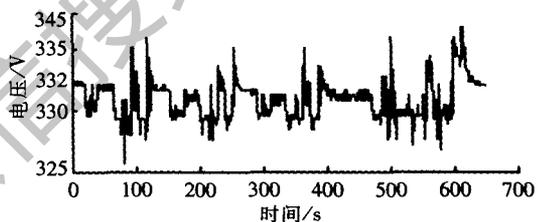
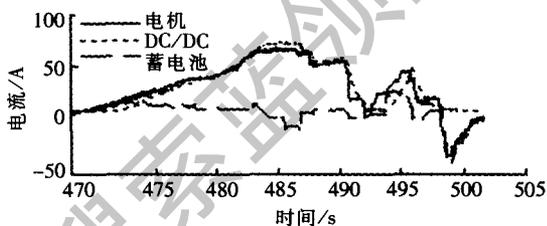
以通过设计线性二次型调节器得到的最优控制律 $K$ 作为状态反馈阵,从而建立了基于全状态反馈的动力控制算法,并以此为基础开发了动力系统控制策略。

## 4 动力控制算法试验验证

将所建立的动力控制算法应用于某型燃料电池轿车样车上,在转鼓试验台上进行一次J1015循环工况测试,图5a、图5b分别是离线仿真和转鼓试验得到的相关数据,上图为某时间段各部件电流曲线的展开图,下图为母线电压的变化历程。



(a) 离线仿真



(b) 转鼓试验

图5 一次J1015循环工况的各部件电流和母线电压变化历程

从离线仿真和转鼓试验结果可以看出:

a. 离线仿真和转鼓试验的相关数据基本对应,说明所建立的系统动态数学模型可以在一定程度上反映系统特性,可以用于控制算法的设计;

b. 离线仿真时直流母线电压的峰、谷值与转鼓试验的数据基本对应,但峰值大于转鼓试验的对应值,说明蓄电池充放电时内阻特性表现出较大不同;

c. DC/DC输出电流的动态跟随速度在不同条件时表现出不一致性,原因是燃料电池冷热态时特性不同;

d. 主要部件电流满足DC/DC跟随电机电流慢变成分,蓄电池跟随电机电流快变成分且吸收电机回馈能量的关系;试验前后稳态母线电压值不变,说明蓄电池试验前后的总能量基本保持不变,证明所设计的动力控制算法满足既定的控制目标;所提出的闭环算法中并没有使用SOC估计值,因而对SOC估计误差不敏感,实现了解析冗余。

# 发动机结构噪声的计算机仿真分析

曾金玲<sup>1</sup> 宋春丽<sup>2</sup> 雷雨成<sup>1</sup> 李康<sup>2</sup>

(1.同济大学;2.第一汽车集团公司技术中心)

**【摘要】**以一台四缸发动机为例,应用计算机仿真技术分析了发动机的结构振动噪声。首先建立发动机总成有限元模型,通过模态分析,为发动机的结构修改提供依据。根据车用发动机的实际使用工况,在不同转速及爆发压力下对其进行动力学计算,得到发动机的表面振动速度级。通过改进发动机结构,使发动机的表面振动速度级降低了5.6 dB(A)。

**关键词:**发动机 振动噪声 仿真

**中图分类号:**U467.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3703(2006)07-0013-04

## The Computer Simulation Analysis of Engine Structure Noise

Zeng Jinling<sup>1</sup>, Song Chunli<sup>2</sup>, Lei Yucheng<sup>1</sup>, Li Kang<sup>2</sup>

(1.Tongji University; 2.China FAW Group Corporation R&D Center)

**【Abstract】** Take an engine with four cylinders as an example, and apply computer simulation technology to analyze engine structure vibration and noise. First establish finite element model of engine assembly, and provide evidence for the structure modification of engine through mode analysis. According to the actual operational condition of engine, calculate dynamics with different rotational speed and breakout pressure, and get the surface vibration speed stage of engine. Through improving the structure of engine, the surface vibration speed stage of engine is reduced 5.6 dB(A).

**Key words:** Engine, Vibration noise, Simulation

## 1 前言

随着世界汽车工业的发展,人们对汽车的性能

和质量要求越来越高。汽车的噪声已成为衡量汽车性能的重要因素和依据,噪声问题已成为汽车制造者关注的重要课题<sup>[1]</sup>。对于任何一个机械噪声问题,

## 5 结束语

a. 基于所建立的动态模型,通过求解线性二次型问题建立了基于全状态反馈的动力控制算法,离线仿真和实车转鼓试验的结果证明,所设计的燃料电池轿车动力控制算法满足既定的控制目标。

b. 通过设计线性二次型调节器求解最优控制律,保证了闭环系统的稳定性和性能泛函意义下的最优。所构造的性能泛函具有明确的物理意义,使控制性能指标的提出从频域转到时域,从而使控制律的设计更具指导性。

c. 通过构造状态观测器,既解决了状态变量蓄电池开路电压不可测量的问题,同时又克服了功率平衡控制算法对蓄电池SOC估计值的依赖,实现了解析冗余,提高了系统控制的可靠性。

d. 燃料电池、蓄电池的模型参数均存在不同程度的时变性,今后的工作可以考虑采用在线参数辨识和自适应控制的方法以获得系统实时的最佳动态品质。

## 参 考 文 献

- 1 Rahman Z, et al. An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EV and HEV Propulsion Systems. SAE, 2000, 01-3062.
- 2 Gao Y, et al. Systematic Design of Fuel Cell Powered Hybrid Vehicle Drive Train. IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat.No.01EX485), 2001, 604-611.
- 3 Jaegul Lee, et al. Dynamic State Battery Modeling of Energy and Power as the State Variable for EV Application. SAE 1997, 01-1976.
- 4 魏学哲. 燃料电池轿车锂离子动力蓄电池管理系统研究: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2005.
- 5 杨承志等. 系统辨识与自适应控制. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- 6 陈全世等. 燃料电池电动汽车. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 7 孙泽昌等. 燃料电池汽车动力系统功率平衡控制策略研究. 电气自动化, 2004(3).
- 8 刘豹. 现代控制理论. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 9 何衍庆. 控制系统分析、设计和应用. 北京: 化学工业出版社, 2003.

(责任编辑 辛 民)

修改稿收到日期为2006年4月9日。