

# 高压燃料电池系统空气供应解耦控制器设计

陈凤祥<sup>1,2</sup>, 陈俊坚<sup>1</sup>, 许思传<sup>1,2</sup>, 章 桐<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

**摘要:** 利用高压空压机测试平台, 通过相关技术辨识了高压燃料电池空气供应子系统的传递函数矩阵. 基于前馈补偿解耦技术实现了空气流量和背压的相对独立控制. 实验和仿真结果表明, 该策略在较大范围内具有较好的鲁棒性.

**关键词:** 高压; 质子交换膜燃料电池; 解耦控制; 空气流量; 背压

**中图分类号:** TM911

**文献标志码:** A

## Decoupling Controller Design for Air Supply Subsystem of High Pressure PEMFC System

CHEN Fengxiang<sup>1, 2</sup>, CHEN Junjian<sup>1</sup>, XU Sichuan<sup>1, 2</sup>, ZHANG Tong<sup>1, 2</sup>

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on a platform of a high pressure air compressor, the transfer function matrix of the air supply subsystem for high pressure proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is identified and then the air flow and back pressure is decoupled via feed-forward compensation decoupling control technique. Both the results of experiment and simulation show that the proposed controller can really achieve the decoupling control of air flow and back pressure, and it also has good robust performance in a large range of working condition.

**Key words:** high pressure; proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); decoupling control; air flow; back pressure

质子交换膜燃料电池(燃料电池)在车载电源中备受青睐. 全世界各大汽车厂商竞相研发具备零排放、效率高、燃料来源多元化、能源可再生的燃料电池汽车. 高压燃料电池系统, 不但可以提升系统效

率, 还可以增大系统能量密度, 减小系统尺寸, 改善水平衡等, 对于有限的车载空间具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>. Tatyana V Reshetenko 等<sup>[2]</sup>研究表明, 提高背压可以减少活化和质量传递的损失, 从而较大提升燃料电池堆内各物理参量的空间分布均匀性. Jin-Cherng Shyu 等<sup>[3]</sup>认为提高背压可以降低电堆膜电阻, 同时提高催化剂活性, 从而大大提升系统性能, 而且对燃料电池系统性能的提高远优于增湿对于膜电阻减少而带来系统性能的提升. 然而, 相比低压系统, 高压系统的空压机需要消耗非常可观的寄生功率, 因此, 如何有效控制系统的压力、流量是提升高压燃料电池系统效率和可靠性的关键. 空压机控制不够理想则会造成喘振, 使供气系统不能正常工作, 甚至可致电堆失效. 高压系统的空气是一个多输入多输出耦合系统<sup>[4]</sup>, 而且还具较强的非线性、不确定性等特点.

目前国内外对于高压系统的背压和空气流量协同调节的控制器设计研究还鲜见报道, 文献[5-6]针对高压系统排气管面积一定的情况下, 分别采用线性二次型调节器及滑模理论进行了最优过氧比控制器设计, 显然背压是不可控的, 它完全由流量、管阻及电堆电流特性决定. 张立炎等<sup>[4]</sup>在理论上分析了高压系统的空气流量和背压的耦合性, 并建议采用解耦控制进行空气流量和背压的相对独立控制. Hengbing Zhao 等<sup>[7]</sup>通过仿真分析认为可变背压可提升系统的整体效率. 针对实际高压系统, 孙业祺等基于线性系统的单输入单输出 PID 方法对背压控制做了一些试探性的研究, 结果表明, 受耦合性、非线性等多种因素影响, 其闭环控制效果仍有待改善. 为此, 本文直接从多变量控制理论入手, 通过选择合适的操纵变量, 采用前馈补偿的解耦方式研究空气流量和背压的相对独立控制.

## 1 高压燃料电池系统介绍

高压燃料电池系统的空气供应子系统主要由空气压缩机、中冷器、增湿器、电堆、冷凝器、背压阀及连接管路组成(如图 1 所示). 考虑到实际条件的限

制,将图中虚线框部分用管路代替,这虽会影响系统流阻的真实特性,但考虑到电堆和管路及电流等因素引起的流阻总和小于背压阀的可调流阻,整个系统的动静态特性主要是由空压机和背压阀共同决定,因此,简化后的系统的控制器设计过程仍对真实燃料电池控制器设计具有较强的借鉴意义.

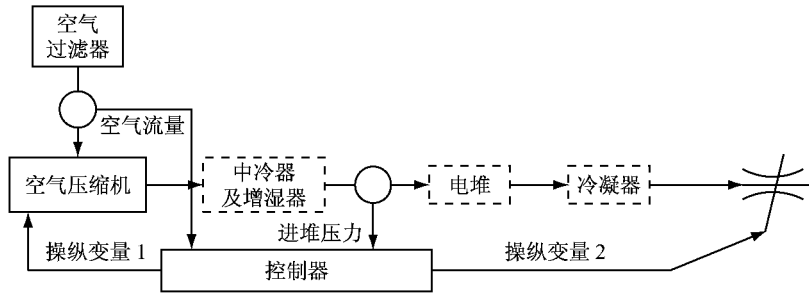


图 1 高压燃料电池空气供应子系统

Fig.1 Air supply subsystem of high pressure PEMFC

针对上述高压系统,空气流量和背压控制存在两种可供选择的方案. 方案一:以空机电压  $u_{AC}$  和背压阀电压  $u_{ET}$  为操纵变量控制系统的空气流量和背压,如图 2 所示. 方案二:分别对空压机电机构建转速环,对背压阀电机构建开度环,选空压机转速  $n$  和背压阀开度  $\theta$  为操纵变量控制系统的空气流量和背压,如图 2 所示.

空压机转速环的引入不仅可以很快抑制电机转速环内的干扰,而且还可以提升系统线性化程度. 背压阀在本系统中采用了电子节气门,具有较强的非线性,为此引入开度环可将局部非线性子系统线性化,从而使得整体系统更接近线性. 考虑上述几点,本文采用在方案二的基础上进行解耦控制器设计. 对于转速环和开度环分别采用 PID 控制器. 为不引起混淆,对背压阀的开度引入一个量纲为一开度值  $\theta$ ,定义如下:

$$\theta = 100\alpha / (\alpha_{\max} - \alpha_0) \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为当前位置开度角; $\alpha_{\max} = 90^\circ$  为最大开度角; $\alpha_0 = 12^\circ$  为自由状态开度角.

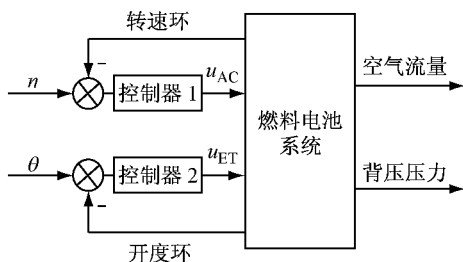


图 2 操纵变量选择原理图

Fig.2 Diagram of manipulation variables

## 2 系统辨识

系统辨识问题确切地说就是从特定的一类模型中选出一个与被控对象输入、输出实测数据拟合得最好的模型. 本文采用多通道延时 M 序列的辨识方法,该方法不但可以消除噪声干扰,还可对二通道传递函数同时辨识,从而减少各种低频噪声引入的误差及辨识时间<sup>[8-9]</sup>.

### 2.1 开环测试

通过开环测试粗略估计系统带宽和调整时间. 如果采用频域法进行带宽测量较为麻烦,一方面需要扫频仪;另一方面测试时间过长. 考虑到系统响应基本符合一阶惯性环节,这里直接将带宽估计转换成对阶跃响应的上升时间估计. 开环阶跃测试得到信息如下<sup>[9]</sup>:上升时间约为 1.2 s,调整时间约为 4.0 s,系统带宽约为  $f_M \approx 0.3$  Hz.

### 2.2 辨识序列设计

根据开环测试信息可知码元最小保持时间  $\Delta \leq 1/(3f_M) = 1.1$  s, 故取  $\Delta = 1.0$  s. M 序列长度  $N_p > T_s/\Delta + 1$ ,  $T_s$  为采样时间,考虑到在排除系统漂移的情况下,测试时间越长,模型准确度越好,同时  $N_p$  只可能为  $2^n - 1$ <sup>[9]</sup>, 为此取  $N_p = 63$ . 最后,根据多通道延时 M 序列辨识原理,设计如下测试序列:转速幅值为  $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,开度幅值为 2,辨识序列信号如图 3 所示.

选定系统平衡点  $(n_0, \theta_0)$  为  $(6\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}, 9)$ , 此时流量和背压分别为  $48.8 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ , 88 kPa. 在

测试过程中,叠加上述序列,最终辨识所得传递函数矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.0094}{1+0.869s} & \frac{0.578}{1+0.638s} \\ \frac{0.035}{1+1.033s} & \frac{-12}{1+0.813s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $s$  为拉普拉斯变元; $y_1$  为空气流量,  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $y_2$  为背压,  $\text{kPa}$ ;  $u_1$  为转速,  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $u_2$  为开度. 流量通道和背压通道的曲线拟合分别如图 4 和图 5 所示. 显然,模型较为准确. 计算系统的相对增益矩阵<sup>[10]</sup>为  $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.848 & 0.152 \\ 0.152 & 0.848 \end{bmatrix}$ , 一般而言当  $\lambda_{11} \in [0.3, 0.7]$  时,系统具有很强的耦合性,  $\lambda_{11}$  越接近 1,耦合性越弱,为了达到较好的控制效果,这里采用解耦控制.

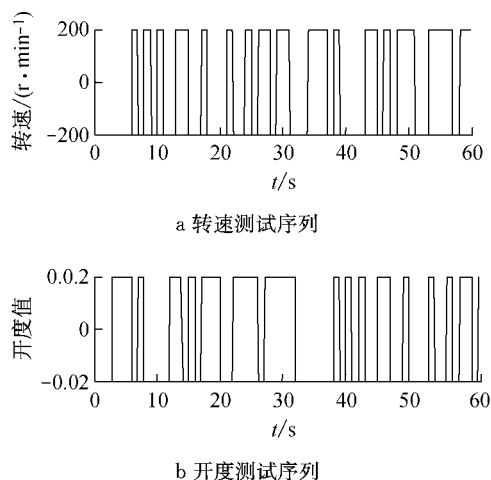


图 3 转速及开度测试序列

Fig. 3 Test sequence of rotation speed and opening angular

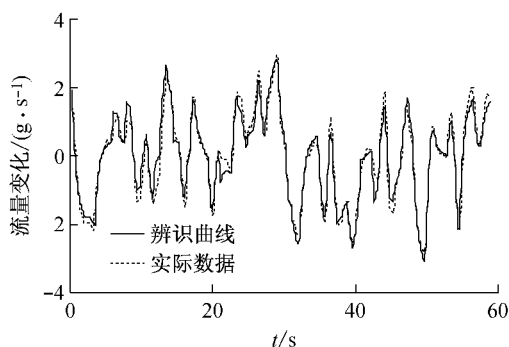


图 4 流量通道辨识结果

Fig. 4 Identification results of air flow

### 3 解耦控制器设计

前馈补偿作为自动控制中最早出现的一种克服

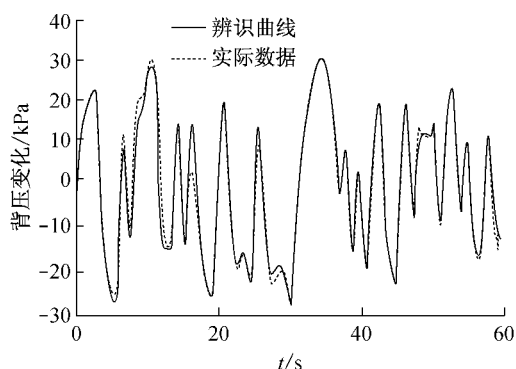


图 5 背压通道辨识结果

Fig. 5 Identification results of back pressure

干扰的方法,同样适用于解耦控制系统,本文采用前馈补偿解耦方法进行解耦控制器设计,结构原理如图 6 所示<sup>[10]</sup>. 根据不变性原理得

$$N_{21}(s) = -G_{21}(s)/G_{22}(s)$$

$$N_{12}(s) = -G_{12}(s)/G_{11}(s) \quad (3)$$

式中:  $G_{11} = \frac{0.0094}{1+0.869s}$ ,  $G_{12} = \frac{0.578}{1+0.638s}$ ,  $G_{21} = \frac{0.035}{1+1.033s}$ ,  $G_{22} = \frac{-12}{1+0.813s}$ . 考虑到  $N_{21}$  和  $N_{12}$  各自零极点十分接近,形成了偶极子,可采取零极点对消来简化  $N_{21}$  和  $N_{12}$ ,这里采用静态前馈补偿的方式,取  $N_{21}=0.003$ ,  $N_{12}=-61.5$ . 解耦后,本文选择了两路 PI 控制器分别调节流量和背压. 背压回路的 PI 参数:比例系数 -8.83,积分系数 -16.1. 流量回路的 PI 参数:比例系数 232,积分系数 253. 控制周期均为 0.1 s.

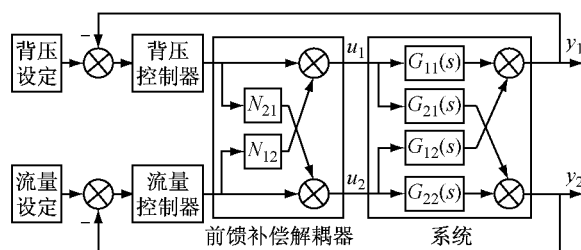


图 6 前馈解耦补偿结构图

Fig. 6 Diagram of feed-forward decoupling compensation

## 4 实验/仿真分析

### 4.1 仿真实验

本文分别验证了解耦的 PID 控制和未解耦的 PID 控制. 如图 7 所示,当期望流量发生突变,但期望背压不发生变化时,两种控制器的流量跟随几乎一致. 但对于背压波动而言,采用解耦的 PID 控制的

背压几乎保持不变(只产生了约 2 kPa 的波动),采用未解耦的 PID 控制则产生了近 40 kPa 的波动,是前者的 20 倍,这种变化幅度对燃料电池膜有较大的危害.调节背压对流量的影响如图 8 所示,两控制器几乎有相同的背压响应过程,但是未解耦的 PID 控制对流量的波动达到了近  $1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而解耦的 PID 控制对流量的波动不到  $0.1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ .从图 7 和图 8 可知,采用解耦可以有效抑制流量和背压的相互耦合,使它们的相对独立控制成为可能.需要说明的是,这里负流量及背压,并不是实际流量,而是离开平衡点( $48.8 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $88 \text{ kPa}$ )的流量和背压的偏差值.

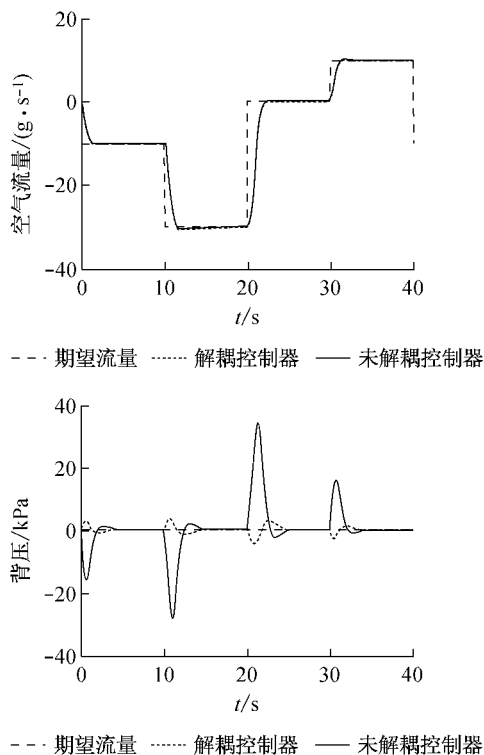


图 7 流量变化对背压的影响

Fig.7 The impact of back pressure by the variation of air flow

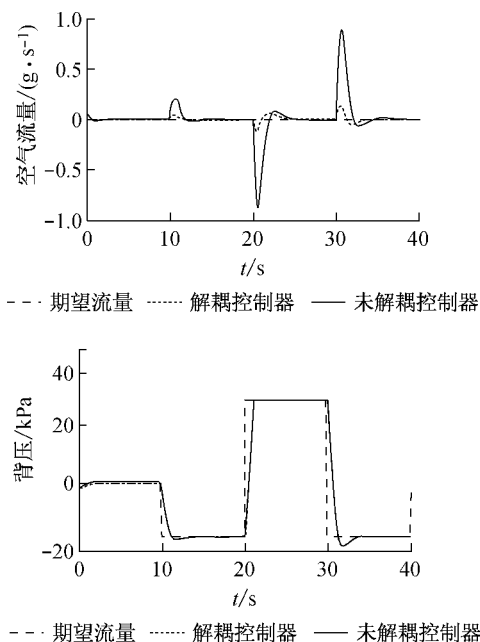


图 8 背压变化对流量的影响

Fig.8 The impact of air flow by the variation of back pressure

## 4.2 实验验证

将上述控制器作用于实际系统,并独立调节空气流量和背压,实验结果如图 9 所示.从图 9 可见,空气流量在  $40 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  的峰峰值为  $0.6 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,即流量控制精度约 0.75%.流量基本按照设定的  $1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  的速率进行升降,没有超调.背压的调节具有一定超调(这和仿真结果相一致),在表压为 100 kPa 处峰峰值为 8 kPa,即相对背压控制精度约 4%.背压控制精度相对较差的原因:背压阀工作区间太窄,导致开度控制精度不高;采用简单的 PID 进行背压阀控制,扰动抑制性不够好,在开环时其开度的波动量的峰峰值就达到 0.7.另外,当流量从  $31 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  上升到  $46 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,或从  $46 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  下降到  $36 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  时,从图 9 可知,背压均无明显变化.当设定流量不变,设定背压从 60 kPa 阶跃上升到  $80 \text{ kPa} \rightarrow 100$

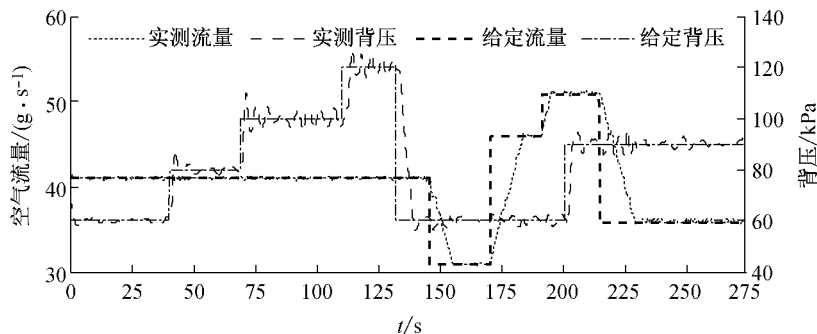


图 9 空气流量和背压相对独立控制效果图

Fig.9 The controller effect by the decoupling control of air flow and back pressure

kPa $\rightarrow$ 120 kPa 时,背压的变化并没有对流量产生明显的扰动.可见本文设计的解耦控制器起到了流量和背压的相对独立控制的效果.图 10 为操纵变量的

实测输出结果,从图 10 中可见,转速和背压开度均相对平稳,这对执行机构是有利的.

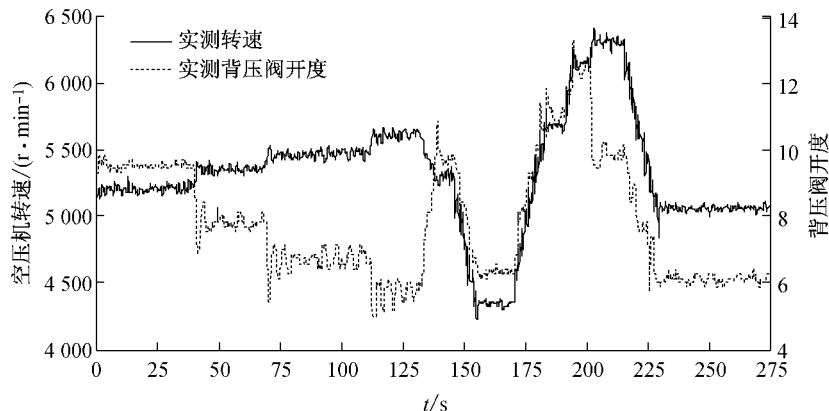


图 10 操纵变量实际输出结果

Fig.10 The output of manipulation variables

## 5 结论

针对高压燃料电池系统,以空压机转速和背压阀开度为操纵变量,通过局部反馈(转速环和开度环)和静态前馈补偿解耦器实现了空气供应子系统的解耦控制,最后采用单回路 PID 控制的方法实现了系统的空气流量和背压的相对独立控制.模型辨识结果表明,采用多通道延时 M 序列辨识的方法可以获得较高精度的系统传递函数矩阵.

## 参考文献:

- [1] 孙业祺,许思传,倪怀生,等.高压燃料电池发动机进气压力控制试验研究[J]. 车用发动机,2008(5):22.  
SUN Yeqi, XU Sichuan, NI Huaisheng. Experimental research on intake pressure control of high pressure fuel cell engine [J]. Vehicle Engine, 2008(5):22.
- [2] Reshetenko V T, Bender G, Bethune K, et al. Systematic study of back pressure and anode stoichiometry effects on spatial PEMFC performance distribution [J]. *Electrochimica Acta*, 2011,56: 8700.
- [3] Shyu J C, Hsueh K L, Tsau F. Performance of proton exchange membrane fuel cells at elevated temperature [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52: 3415.

- [4] 张立炎,全书海.燃料电池系统建模与优化控制[M]. 北京:电子工业出版社,2011.  
ZHANG Liyan, QUAN Shuhai. Modeling and optimization control of fuel cell system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [5] Pukrushpan T J, Stefanopoulou G A, Peng Huei. Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design [M]. London: Springer,2004.
- [6] Talj J R, Hissel D, Ortega R, et al. Experimental validation of a PEM fuel-cell reduced-order model and a moto-compressor higher order sliding-mode control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(6): 1906.
- [7] Zhao Hengbing, Burke F A. Optimization of fuel cell system operating conditions for fuel cell vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2009,186: 408.
- [8] 徐宁寿.系统辨识技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1986.  
XU Ningshou. Technique and application of system identification [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [9] 朱豫才.过程控制的多变量系统辨识[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2005.  
ZHU Yucui. Multivariable system identification of process control [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2005.
- [10] 邵惠鹤.工业过程高级控制[M]. 上海:上海交通大学出版社,1997.  
SHAO Huihe. Advanced control in industrial process [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1997.