

# 燃料电池系统空气供应内模解耦控制器设计

陈凤祥<sup>1,2</sup>, 陈 兴<sup>1</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:** 针对高压质子交换膜燃料电池空气供应系统的空气流量和进气压力具有较强的耦合性这个特性, 将内模控制原理与多变量解耦控制理论相结合, 提出了空气流量和进气压力的鲁棒解耦控制策略. 仿真结果表明, 采用内模解耦控制不仅能实现被控量的解耦, 而且在系统模型失配的情况下可以获得比传统 PID(比例-积分-微分)解耦控制器更好的鲁棒性; 同时控制器参数少, 整定简单.

**关键词:** 质子交换膜燃料电池(PEMFC); 空气供应系统; 内模解耦控制; 高压

**中图分类号:** TM911.4

**文献标志码:** A

## Internal Model Decoupling Controller Design for High Pressure PEMFC Air Supply System

CHEN Fengxiang<sup>1,2</sup>, CHEN Xing<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In view of the strong coupling between air mass flow and back pressure in the air supply system of high pressure proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), a robust decoupling controller that combined the principal of internal model control (IMC) with multiple variable decouple control theory is proposed. The simulation results show that the internal model-decoupling controller can not only provide a nice decoupling, but also get a much better robust performance compared with the traditional proportion-integral-derivative (PID) decoupling controller when the real system does not match well with the nominal model; moreover, the proposed controller is also featured with less controller parameters and easy to be tuned.

**Key words:** proton exchange membrane fuel cell(PEMFC); air supply system; internal model decoupling control; high pressure

燃料电池汽车具有安静、高效、零排放(绿色环保)等传统汽车所不具备的优点, 因而相关的研究、开发已受到世界诸多国家及车企的重视. 相比低压燃料电池系统, 高压质子交换膜燃料电池(简称高压燃料电池)系统不但可以进一步提升系统效率, 还可以增大系统功率密度、减小系统尺寸和改善水平衡等优势, 这在有限的车载空间内具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>. 众多文献<sup>[1-2]</sup>表明, 高压燃料电池系统是目前也是未来车用燃料电池发展的趋势. 如丰田(TOYOTA)、本田(HONDA)和巴拉德(BALLARD)等公司都采用高压燃料电池作为车用燃料电池系统<sup>[3-4]</sup>. 高压燃料电池系统的空气供应区别于低压系统鼓风机空气供应的最重要和明显的一点是: 该系统是一个多输入-多输出耦合系统<sup>[5]</sup>, 而且还具有较强的非线性、不确定性等特点. 作为一个多变量控制系统, 高压燃料电池系统的空气供应的压力和流量需要被优化协调控制, 从而使系统整体获得良好的动静态特性.

目前, 国内外对于高压燃料电池系统的空气流量和进气压力的协同调节鲁棒控制器设计研究还鲜见报道. 全书海等<sup>[6]</sup>采用了单输入-单输出比例-积分-微分(PID)控制对风机管道压力进行调节, 从而实现了对电堆内氧气量的控制. Talj 等<sup>[7]</sup>将背压阀设定为恒定开度, 通过自适应滑模控制方法对空压机的供气量进行控制, 实现了过氧比的恒定控制. 实际中为了提高系统效率, 高压燃料电池系统中的空气供应流量和压力一般都需要协同调节. 为此, 张立炎等<sup>[5]</sup>提出了对高压燃料电池系统进行解耦控制, 以此实现空气流量和进气压力的相对独立控制. Ahmed Al-Durra 等<sup>[8]</sup>考虑到基于多变量线性二次调节器(LQR)理论研究了空气流量和进气压力的协调控制技术, 并通过仿真方法验证了其有效性. 许思传等<sup>[9]</sup>直接通过 PID 实现了对流量和压力的控制,

但由于系统的耦合性使得系统压力波动较大. 陈凤祥等<sup>[10]</sup>直接从多变量控制理论入手,采用了前馈补偿的解耦方式结合比例-积分控制实现了对空气流量和进气压力的解耦控制,并在实际系统中获得了良好的控制效果. 然而,当系统在大范围内工作时,或者环境温度和压力(如高原环境下)发生较大变化时,系统模型就会和原模型发生较大失配,此时系统的控制性能也会发生不同程度的下降,这些问题是上述控制器设计中所没有考虑的. 为此,本文针对高压燃料电池的空气供应系统,应用内模解耦控制策略进行控制器的设计、仿真和性能分析研究.

## 1 内模解耦控制器设计

### 1.1 空气供应系统模型介绍

一般高压燃料电池系统的空气供应系统主要由空气压缩机、中冷器、气/气加湿器、电堆、背压阀及连接管路组成,其拓扑结构如图 1 所示. 文献[10]通过双通道延时 M 序列的方式对一款高压燃料电池

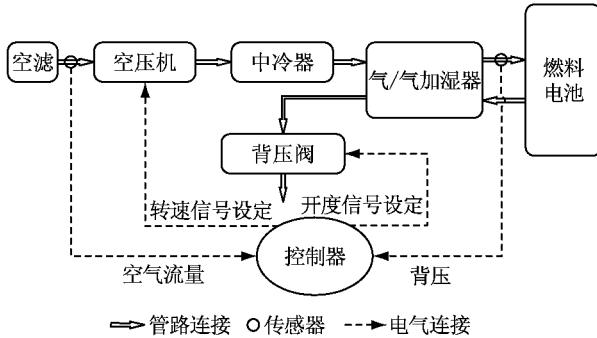


图 1 高压燃料电池空气供应系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of air supply subsystem of a high pressure PEMFC

空气供应子系统的动态特性进行了辨识,在其典型工况点的辨识所得的传递函数如式(1)所示.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{1+T_{11}s} & \frac{k_{12}}{1+T_{12}s} \\ \frac{k_{21}}{1+T_{21}s} & \frac{k_{22}}{1+T_{22}s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.0094}{1+0.869s} & \frac{0.578}{1+0.638s} \\ \frac{0.00035}{1+1.033s} & \frac{-0.12}{1+0.813s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $s$  为拉普拉斯变元; $y_1$  为空气流量, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $y_2$  为进气压力, $10^2 \text{ kPa}$ ;  $u_1$  为空压机转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $u_2$  为背压阀开度; $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$  分别为相应通道的增益系数; $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$  分别相应通道的时间常

数. 鉴于该模型不但简洁,同时又能反应系统实际工况点附近的动态,为此以该模型为基础,通过引入内模原理解决 PID 解耦控制中模型失配的问题,从而提高系统鲁棒性,同时还简化控制器的参数整定.

### 1.2 内模解耦原理及控制器设计

解耦控制可消除系统中各控制回路间的相互耦合关系,使每一个输入只控制相应的一个输出,每一个输出又只受到一个控制的作用. 矩阵求逆解耦是一种常用的解耦方法,但往往鲁棒性欠佳<sup>[11]</sup>. 为了克服实际系统中模型失配、系统扰动等问题,引入内模控制原理,其基本思想是将模型与实际对象并联(如图 2 所示),用模型动态逆设计控制器<sup>[12]</sup>,同时通过引入滤波器,来实现对鲁棒性和快速性的折中.

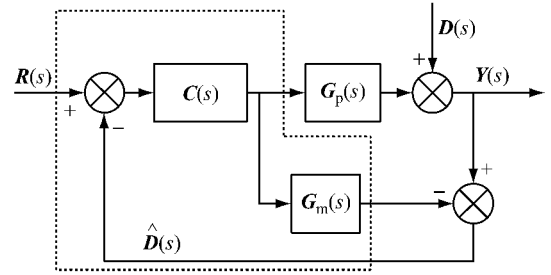


图 2 内模解耦控制系统结构

Fig. 2 Diagram of IMC and decoupling control system

内模控制方法由 Garcia 和 Morari 于 1982 年首先正式提出. 它允许系统过程和标称模型存在较大的偏差,属于鲁棒控制范畴. 内模解耦控制将内模控制与多变量解耦控制结合<sup>[12]</sup>,使控制器既能解决系统的耦合问题,又能增强系统的鲁棒性. 内模解耦控制系统的基本结构如图 2.  $G_p(s)$  为过程传递函数矩阵,  $G_m(s)$  为内部模型传递函数矩阵,  $C(s)$  为内模解耦控制器传递函数矩阵,  $R(s)$  为输入向量,  $Y(s)$  为输出向量,  $D(s)$  为外部扰动,  $\hat{D}(s)$  为反馈信号.

$$Y(s) = \frac{G_p(s)C(s)}{1 + (G_p(s) - G_m(s))C(s)} R(s) + \frac{1 - G_p(s)C(s)}{1 + (G_p(s) - G_m(s))C(s)} D(s) \quad (2)$$

$$\hat{D}(s) = (G_p(s) - G_m(s))R(s) + D(s) \quad (3)$$

根据式(1)可知,  $G_p(s) =$

$$\begin{bmatrix} \frac{0.0094}{1+0.869s} & \frac{0.578}{1+0.638s} \\ \frac{0.00035}{1+1.033s} & \frac{-0.12}{1+0.813s} \end{bmatrix}, Y(s) \text{ 为 } \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \text{ 的拉普拉斯}$$

变换. 若内部模型能够精确描述受控过程(即模型匹配),则有  $G_p(s) = G_m(s)$ ; 若内部模型不能精确描述受控过程或过程模型存在不确定性(即模型失配),则有  $G_p(s) \neq G_m(s)$ . 根据模型是否匹配、是否存在扰

动可以分以下情况讨论.

情况 1:  $G_p(s) = G_m(s)$  且  $D(s) = 0$ , 即模型匹配且没有扰动, 则

$$Y(s) = G_p(s)C(s)R(s) = G_m(s)C(s)R(s) \quad (4)$$

显然此时  $\hat{D}(s) = 0$ , 内模控制为开环结构. 若取  $C(s) = 1/G_m(s)$ , 则  $Y(s) = R(s)$ , 表明前馈控制器  $C(s)$  是理想跟踪控制器.

情况 2:  $G_p(s) = G_m(s)$  且  $D(s) \neq 0$ , 即模型匹配且存在扰动, 则

$$Y(s) = G_p(s)C(s)R(s) + (1 - G_p(s)C(s))D(s) \quad (5)$$

反馈信号  $\hat{D}(s) = D(s)$ , 内模控制起到克服扰动的作用. 若此时  $C(s) = 1/G_m(s)$ , 则不管  $D(s)$  如何变化, 其对  $Y(s)$  的贡献为零.

情况 3:  $G_p(s) \neq G_m(s)$  且  $D(s) = 0$ , 即模型失配且没有扰动, 则

$$Y(s) = \frac{G_p(s)C(s)}{1 + (G_p(s) - G_m(s))C(s)}R(s) \quad (6)$$

$$\hat{D}(s) = (G_p(s) - G_m(s))R(s) \quad (7)$$

此时内模控制起到克服过程不确定性的作用.

情况 4:  $G_p(s) \neq G_m(s)$  且  $D(s) \neq 0$ , 即模型失配且存在扰动, 输出信号满足式(2), 反馈信号满足式(7). 此时内模控制既要克服扰动, 又要克服过程模型的不确定性. 这种情况是实际中最常见的.

由于所研究的系统为双输入-双输出系统, 因此不妨设

$$\begin{cases} Y(s) = \begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} \\ R(s) = \begin{bmatrix} R_1(s) \\ R_2(s) \end{bmatrix} \\ G_m(s) = \begin{bmatrix} G_{m11}(s) & G_{m12}(s) \\ G_{m21}(s) & G_{m22}(s) \end{bmatrix} \\ C(s) = \begin{bmatrix} C_{11}(s) & C_{12}(s) \\ C_{21}(s) & C_{22}(s) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $G_{m11}(s), G_{m12}(s), G_{m21}(s), G_{m22}(s)$  表示系统各通道的传递函数;  $C_{11}(s), C_{12}(s), C_{21}(s), C_{22}(s)$  分别表示对应通道的控制器传递函数.

由上式可得

$$C(s) = \begin{bmatrix} \frac{90.205(0.869s+1)}{(0.11s+1)^2} & \frac{434.488(0.869s+1)(0.813s+1)}{(0.638s+1)(0.18s+1)^2} \\ \frac{0.2631(0.869s+1)(0.813s+1)}{(1.033s+1)(0.11s+1)^2} & \frac{-7.066(0.813s+1)}{(0.18s+1)^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{m11}(s) & G_{m12}(s) \\ G_{m21}(s) & G_{m22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11}(s) & C_{12}(s) \\ C_{21}(s) & C_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(s) \\ R_2(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

为了实现输入-输出解耦,  $G_m(s)C(s)$  须为对角阵, 即满足式(10).

$$\begin{bmatrix} G_{m11}(s) & G_{m12}(s) \\ G_{m21}(s) & G_{m22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11}(s) & C_{12}(s) \\ C_{21}(s) & C_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(s) & 0 \\ 0 & f_2(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $f_1(s), f_2(s)$  为滤波器传递函数, 其形式如下:

$$f_i(s) = \frac{1}{(T_i s + 1)^n} \quad (11)$$

式中:  $T_i$  为滤波器时间常数,  $i=1, 2; n$  为自然数, 它的选取应当使控制器可物理实现(即控制器的分子多项式的阶小于等于分母多项式的阶). 通过调节滤波器时间常数  $T_i$  可以实现闭环系统的快速性和鲁棒性的均衡. 由式(10)可求得  $C(s)$  如下:

$$C(s) = \begin{bmatrix} G_{m11}(s) & G_{m12}(s) \\ G_{m21}(s) & G_{m22}(s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1(s) & 0 \\ 0 & f_2(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

为了使系统的稳态误差为零, 应满足  $G_m(0) \cdot C(0) = I, C(0) = G_m^{-1}(0)$ , 即

$$\begin{bmatrix} C_{11}(0) & C_{12}(0) \\ C_{21}(0) & C_{22}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{m11}(0) & G_{m12}(0) \\ G_{m21}(0) & G_{m22}(0) \end{bmatrix}^{-1} \quad (13)$$

由于本系统中  $G_m(s)$  不存在非最小相位零点和时滞环节, 因此控制器不会出现超前环节和不稳定的情况, 其物理实现得到保证. 若定义

$$\begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{m11}(s) & G_{m12}(s) \\ G_{m21}(s) & G_{m22}(s) \end{bmatrix}^{-1} \quad (14)$$

则内模解耦控制器的结构如图 3.

## 2 仿真分析

针对上述设计, 取  $T_1 = 0.11, T_2 = 0.18, n = 2$ , 由式(12)可求得控制律并简化整理如下:

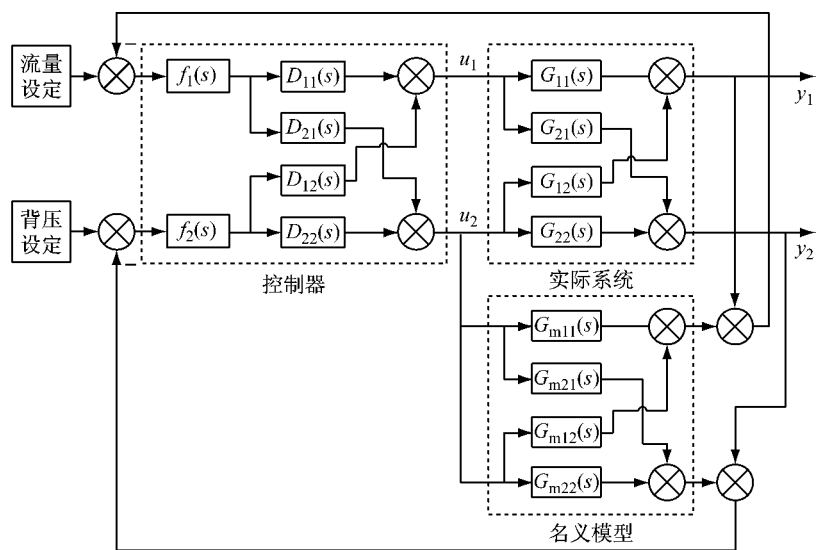


图 3 内模解耦控制器结构

Fig.3 Diagram of an internal model and decoupling controller

基于该控制器(IMC)和软件 Matlab/Simulink 建立空气供应系统模型,并针对模型匹配和失配的不同情况分别进行仿真分析,并将其控制效果与 PID 解耦控制<sup>[10]</sup>进行比较.另外,还针对 IMC 中滤波器中的参数( $T_1, T_2$ )整定进行仿真分析.

### 2.1 模型匹配情形

当模型匹配时(即  $G_p(s) = G_m(s)$ ,如式(16)所

示),系统响应曲线如图 4 所示,图中 Ref 表示设定值.

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.0094}{1+0.869s} & \frac{0.578}{1+0.638s} \\ \frac{0.00035}{1+1.033s} & \frac{-0.12}{1+0.813s} \end{bmatrix} \quad (16)$$

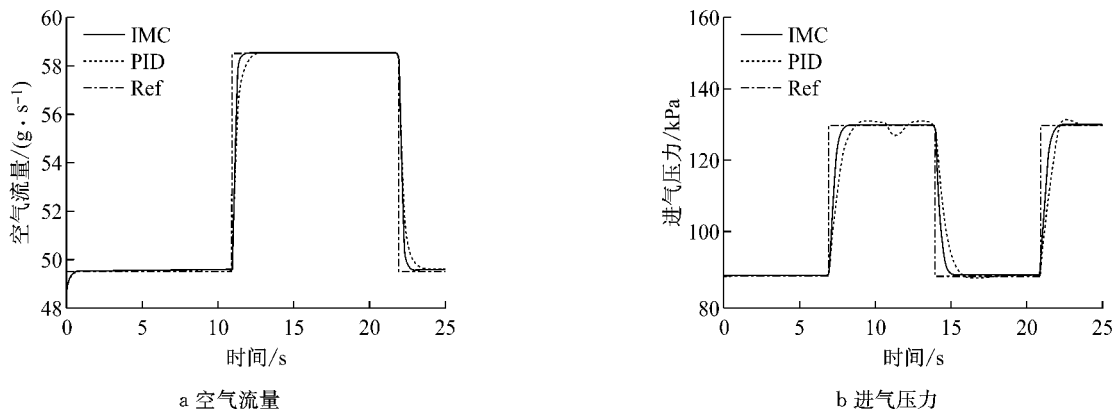


图 4 模型匹配时流量与进气压力响应曲线

Fig.4 Response curves of air mass flow rate and pressure for accurate model

比较 IMC 与 PID 的控制性能指标,如表 1.

表 1 2 种控制方法的控制性能指标

Tab.1 Control performance indexes of the two control systems

控制方法	流量通道稳态误差	压力通道稳态误差	流量通道上升时间/s	压力通道上升时间/s	流量通道超调量	压力通道超调量
IMC 解耦	0	0	0.50	1	0	0
PID 解耦	0	0	0.95	2	0	1.5%

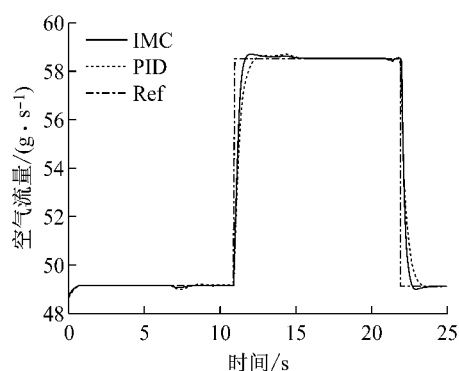
$t=11\text{ s}$  时,当设定空气流量的阶跃量为  $9.4\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$  时,IMC 控制的进气压力不变,而 PID 控制的进气压力因流量改变产生了约  $3.2\text{ kPa}$  的波动; $t=14\text{ s}$  时,当设定进气压力下降  $60\text{ kPa}$  时,IMC 控制的空气流量几乎没有波动,而 PID 控制的流量波动量为  $0.1\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ . 由以上分析可知,不管是流量通道还是压力通道,IMC 控制的上升时间和超调均比 PID 控制要小,且 IMC 解耦控制效果更好.

## 2.2 模型失配情形

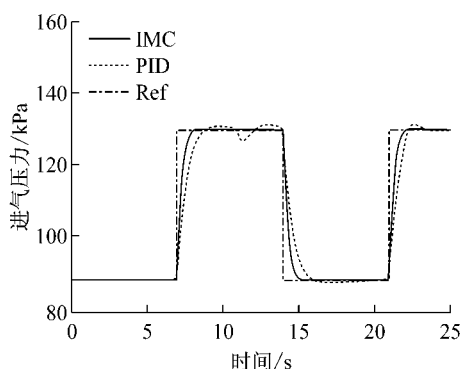
模型失配(即  $G_p(s) \neq G_m(s)$ )的情况较为复杂,主要考虑以下 3 种参数摄动的情况。

(1)  $T_{11}$  增加 20% 且其他参数不变时,传递函数矩阵如式(17)所示,系统响应如图 5 所示。

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.0094}{1.0428s+1} & \frac{0.578}{0.638s+1} \\ \frac{0.00035}{1.033s+1} & \frac{-0.12}{0.813s+1} \end{bmatrix} \quad (17)$$



a 空气流量



b 进气压力

图 5  $T_{11}$  增加 20% 时流量与进气压力响应曲线

Fig. 5 Response curves of air mass flow rate and pressure for inaccurate model with  $T_{11}$  increased by 20%

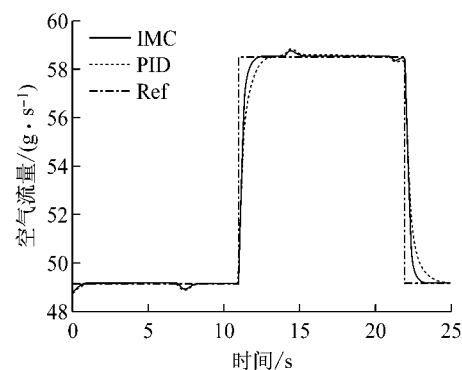
(2)  $k_{11}$  减小 30% 且其他参数不变时,传递函数矩阵如式(18)所示,系统响应如图 6 所示。

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.00658}{1+0.869s} & \frac{0.578}{1+0.638s} \\ \frac{0.00035}{1+1.033s} & \frac{-0.12}{1+0.813s} \end{bmatrix} \quad (18)$$

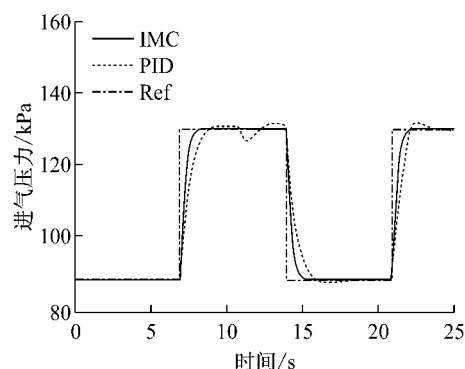
(3)  $k_{11}$  减小 30%,  $k_{22}$  增加 30%,  $T_{11}$  减少 20% 且其他参数不变时,传递函数矩阵为如式(19)所示,系统响应如图 7 所示。

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.00658}{1+0.6952s} & \frac{0.578}{1+0.638s} \\ \frac{0.00035}{1+1.033s} & \frac{-0.156}{1+0.813s} \end{bmatrix} \quad (19)$$

由图 5、图 6、图 7 可知,在上述 3 种模型失配的情况下,IMC 响应曲线的上升时间及超调均比相应 PID 的小,即使在模型失配较严重时(如图 7 所示),当  $t=11$  s 时流量发生改变,进气压力也存在扰动,但 IMC 进气压力的扰动量也明显比 PID 的小。



a 空气流量



b 进气压力

图 6  $k_{11}$  减小 30% 时流量与进气压力响应曲线

Fig. 6 Response curves of air mass flow rate and pressure for inaccurate model with  $k_{11}$  decreased by 30%

由以上仿真分析知,内模解耦控制器可以实现良好的流量跟随和进气压力跟随,在失配不严重时,IMC 的进气压力扰动几乎不受流量的改变而产生扰动,且上升时间和调整时间均没有明显的改变。即使在模型失配严重时,其流量的响应时间可以减少 50%,压力摄动可以减少 45%,因此该控制器依然能够取得比传统 PID 更满意的控制效果(如图 7 所示)。

## 2.3 滤波器参数对系统鲁棒性的影响分析

选取不同的滤波器时间常数  $T_1$  和  $T_2$  进行仿真,并分析其变化对系统快速性和鲁棒性的影响。以模型失配最为严重的第 3 种情况为例(即系统传递函数为式(19)),同时注入流量通道的白噪声功率为 0.01,进气压力通道的白噪声功率为 0.000 05。

保持  $T_2=0.18$  不变,分别取  $T_1$  为 0.05, 0.15,

0.40, 得到仿真曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 时间常数  $T_1$  越小, 空气流量通道的响应速度越快, 但系统对外界扰动越敏感, 即抑制外界扰动的能力越差, 鲁棒性越差。保持  $T_1 = 0.11$  不变, 分别取  $T_2$  为

0.05, 0.15, 0.40。得到仿真曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 时间常数  $T_2$  越小, 进气压力通道的快速性越好, 系统鲁棒性也越差。

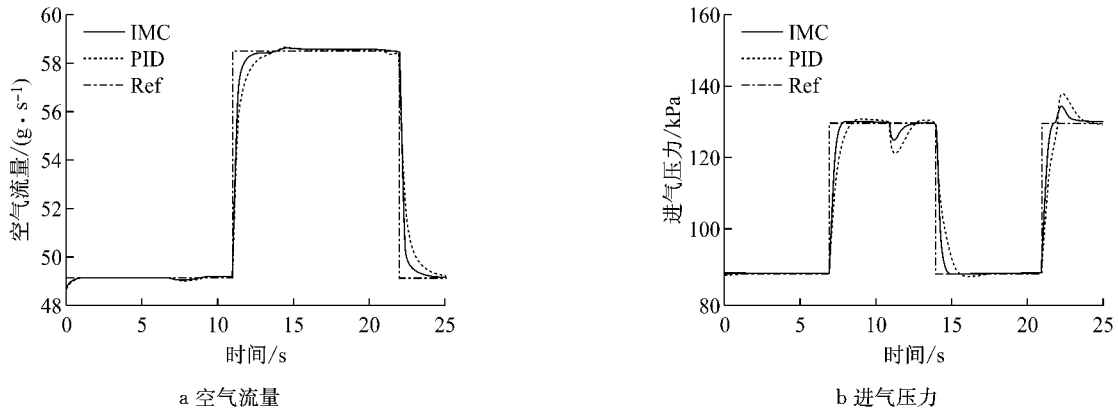


图 7 失配较严重时流量与进气压力响应曲线

Fig.7 Response curves of air mass flow rate and pressure for highly inaccurate model

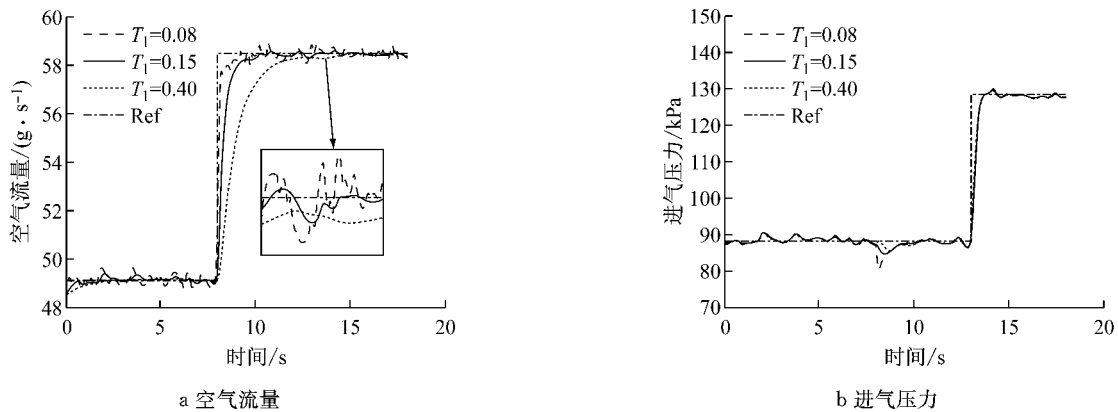


图 8 模型失配时不同  $T_1$  的仿真曲线

Fig.8 Response curves of air mass flow rate and pressure for different values of  $T_1$

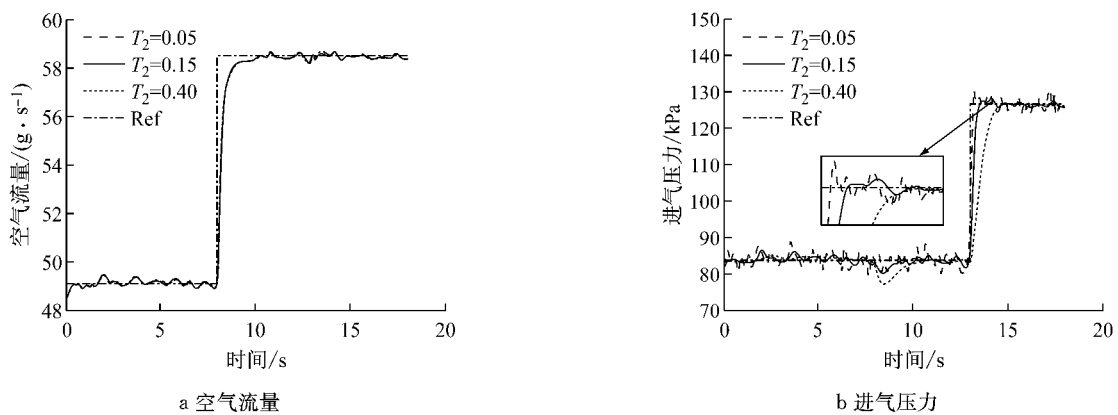


图 9 模型失配时不同  $T_2$  的仿真曲线

Fig.9 Response curves of air mass flow rate and pressure for different values of  $T_2$

由上述分析可知, 滤波器时间常数的选取应当兼顾 2 个通道的快速性和鲁棒性。在不超出实际控制系统物理约束的前提下, 调节滤波器时间常数可

以方便直观地均衡控制系统的快速性和鲁棒性。

## 2.4 流量与压力同时改变时的仿真分析

在燃料电池系统的实际工作过程中, 其空气流

量与进气压力往往需要同时进行调节,为此对流量与压力同时改变的情况进行仿真,得到响应曲线如图 10 所示,IMC 解耦的控制流量调节方面和 PID 相当,但在背压调节性能方面具有更快的响应时间和更小的超调量。

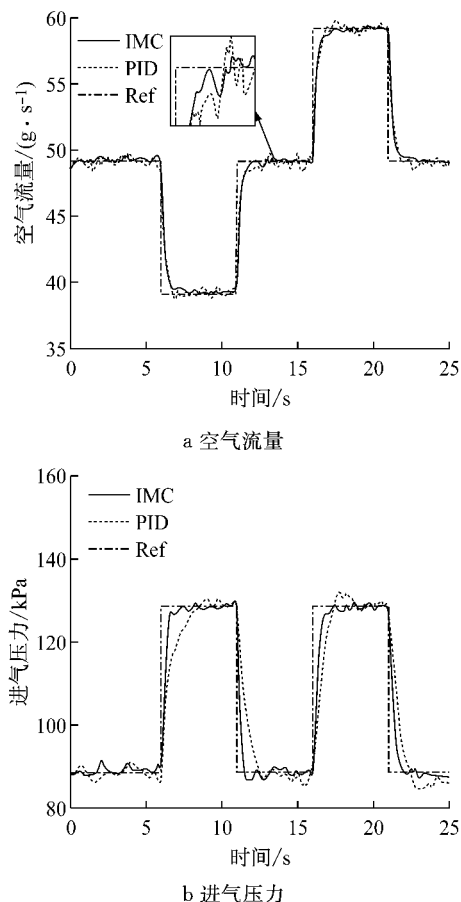


图 10 流量与压力同时改变时的仿真曲线

Fig. 10 Response curves for air mass flow rate and pressure references change simultaneously

### 3 结论

针对质子交换膜燃料电池的空气供应系统中空气流量和进气压力控制存在的耦合性问题,应用内模解耦控制策略进行控制器设计,并与 PID 解耦进行比较。仿真结果表明:该控制器能够很好地实现流量和进气压力的解耦,而且在系统模型失配的情况下可以获得比传统 PID 解耦控制器更好的鲁棒性。此外,通过适当调节滤波器参数可以方便直观地均衡控制系统的动态性能和鲁棒性以满足实际需要。

### 参考文献:

- [1] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong. Fuel cells modeling, control and applications[M]. Florida: CRC Press, 2009.
- [2] BAO Cheng, OUYANG Minggao, YI Baolian. Modeling and control of air stream and hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system-I. Control-oriented modeling [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(13): 1897.
- [3] Asai Y. Control System for sensing the differential pressure between air and hydrogen in a PEFC[C]// SAE 2012 World Congress and Exhibition. [S. l.]: SAE International, 2012: 10.4271/2012-01-1228.
- [4] Vasu G, Tangirala A K. Control-orientated thermal model for proton-exchange membrane fuel cell systems [J]. Journal of Power Sources, 2008, 183(1):98.
- [5] 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.
- [6] 全书海, 张天贺, 张立炎. PEMFC 空气供应系统的建模、仿真与控制[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(10):61.  
QUAN Shuhai, ZHANG Tianhe, ZHANG Liyan. Modeling, simulation and control of air supply system in PEMFC [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(10): 61.
- [7] Talj R J, 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.
- [8] Ahmed Al-Durra, Stephen Yurkovich, Yann Guezennec. Study of nonlinear control schemes for an automotive traction PEM fuel cell system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(20):11291.
- [9] 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, et al. Experimental research on intake pressure control of high pressure fuel cell engine [J]. Vehicle Engine, 2008(5):22.
- [10] 陈凤祥, 陈俊坚, 许思传, 等. 高压燃料电池系统空气供应解耦控制器设计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(7): 1096.  
CHEN Fengxiang, CHEN Junjian, XU Sichuan, et al. Decoupling controller design for air supply subsystem of high pressure PEMFC system [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(7):1096.
- [11] 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.
- [12] 靳其兵, 孙晓天, 张瑶, 等. 多变量解耦内模控制器的设计[J]. 控制工程, 2010, 17(5):572.  
JIN Qibing, SUN Xiaotian, ZHANG Yao, et al. Design of internal model decoupling control for multi-variable system [J]. Control Engineering of China, 2010, 17(5):572.