

# 质子交换膜燃料电池最优过氧比多内模控制

陈凤祥<sup>1,2</sup>, 俞林炯<sup>1,2</sup>, 翟双<sup>3</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; 3. 上海汽车集团股份有限公司, 上海 201804)

**摘要:** 基于多模型的内模控制及前馈控制研究了质子交换膜燃料电池的最优过氧比控制策略。在该策略中, 通过选择不同典型工况点进行模型线性化以获取系统内模; 结合隶属函数和前馈设计方法实现了最优过氧比的多内模控制策略。仿真结果表明, 该控制策略比常规单内模控制器以及 PID 控制在大范围内具有更好的控制品质。

**关键词:** 质子交换膜燃料电池; 最优过氧比; 多模型; 内模控制; 隶属函数

中图分类号: TM911

文献标志码: A

## Multiple Internal Model Control for Optimal Oxygen Excess Ratio of PEMFC

CHEN Fengxiang<sup>1,2</sup>, YU Linjiong<sup>1,2</sup>, ZHAI Shuang<sup>3</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; 3. SAIC Motor Co. Ltd., Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A strategy for optimal oxygen excess ratio of PEMFC is proposed based on a multiple internal model principal and feed-forward. Internal models, are first derived by linearizing the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system at different operating conditions; then the strategy is achieved by the combination of membership function and feed forward design method. Simulation results show that the proposed strategy performs than the conventional single internal model controller and PID controller.

**Key words:** proton exchange membrane fuel cell; optimal oxygen excess ratio; multiple model; internal model control; membership function

化学能通过电化学反应转化为电能<sup>[1]</sup>。在燃料电池系统中, 由于空压机及其供气管路的动态响应滞后于加载到电堆的电流信号, 这会引发燃料电池系统氧气供应不足, 出现“缺氧”状态, 也称作“氧饥饿”, 即反应气供应不能维持所需要的输出电流, 从而造成电压瞬间过低, 甚至缩短燃料电池的寿命<sup>[2-3]</sup>。然而, 为电堆供应过多的空气, 虽会增加总发电量, 但也会增加空压机的耗能, 从而针对某一电流存在合适的空气供应量使得系统的发电效率最高。因此, 空气供应量进行最优控制具有较强的工程意义。

近年来, 不少学者对过氧比控制(在燃料电池研究领域用过氧比来衡量这种空气供应多寡程度)提出了不少控制策略。如 R. J. Talj 等<sup>[4-6]</sup>通过自适应滑模控制方法对空压机进行控制, 实现了过氧比的恒定控制。A. Arce 等<sup>[7]</sup>采用一种显式模型预测控制的方法以减少在线计算负荷, 并采用带有约束的模型预测控制方法来调节过氧比, 同时通过选择不同电流下的最优过氧比来实现系统效率的最优。上述控制方法, 计算时间复杂度较高, 因而很难在车载系统中得以应用。Pukrushpan 等<sup>[8]</sup>提出了前馈加 PID(比例积分微分)控制及系统线性化后的状态反馈控制方法, 虽然这两种方法在局部范围内较为有效, 但是在全局范围内表现不佳。经仿真表明, 当系统电流大于 250 A 后, 控制品质相对变差。这是因为质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)系统是一个非线性系统, 基于局部模型的控制技术很难兼顾到全局的控制品质。最近, Imad Matraji 等<sup>[9]</sup>基于文献[8]的燃料电池模型采用了双环串接控制技术将过氧比控制在两处, 其中外环为过氧比调节环, 内环为空气流量调节环, 内外环均采用 2 阶滑模控制的超螺旋算法。S. Saqib H. Rizvi 等<sup>[10]</sup>基于平滑滑模控制和双环控制结构研究了燃料电池电堆电压的恒压调节问题, 其中内

质子交换膜燃料电池是一种将化学能转化为电能能量装置, 它将燃料(氢气)和氧化剂(氧气)的

收稿日期: 2012-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61104077); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20090072120025); 高等学校创新引智计划(B08019)

第一作者: 陈凤祥(1978—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为燃料电池控制。E-mail: fxchen\_qjy@hotmail.com

环使用 PID 进行最优过氧比控制(过氧比为 2), 外环使用平滑滑模技术调节电堆输出电压。

针对 PEMFC 空气供应系统非线性特性, 本文将基于多工作点的线性化模型, 和多内模控制技术, 并结合前馈控制手段, 研究了最优过氧比多内模控制。鉴于 Pukrushpan<sup>[8]</sup>文中模型仿真分析得到, 当过氧比处于 2.0~2.4, 系统的净功率输出最大(即效率最优), 但此区间内净功率曲线又十分平坦, 为此本文类同文献[8-10]的提法将最优过氧比定义在两处。显然这是合理的。仿真结果证明, 它比传统 PID 控制超调量小, 调整时间短; 比单内模具有更佳的全局控制品质, 具有较强的工程实践价值。

## 1 问题阐述

R. J. Talj 等<sup>[5]</sup>基于 Pukrushpan<sup>[8]</sup>的工作, 简化了 PEMFC 空气供应系统, 建立了该子系统的三变量模型, 仿真表明新模型和原模型的误差小于 5%, 具体公式如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\left(C_1 + C_3 + \frac{C_3 C_{20}}{k}\right)x_1 + \\ \quad (C_1 + C_3)x_3 + \frac{C_2 C_3 C_{20}}{k} - C_7 i \\ \dot{x}_2 = -C_9 x_2 - \frac{C_{10}}{x_2} \left[\left(\frac{x_3}{C_{11}}\right)^{C_{12}} - 1\right] \cdot \\ \quad h(x_2, x_3) + C_{13} u \\ \dot{x}_3 = C_{14} \left\{1 + C_{15} \left[\left(\frac{x_3}{C_{11}}\right)^{C_{12}} - 1\right]\right\} \cdot \\ \quad [h(x_2, x_3) - C_{16}(-x_1 + x_3)] \\ \gamma = C_{23}(x_3 - x_1)/C_{24} i \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_1 = P_{ca, O_2} + P_{ca, N_2} + 4.24 \times 10^4$ ;  $P_{ca, O_2}$  为阴极侧氧气分压, Pa;  $P_{ca, N_2}$  为阴极侧氮气分压, Pa;  $x_2$  为空压机电机角速度,  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $x_3$  为空气供应管道压力, Pa;  $h(x_2, x_3)$  为空压机出口空气质量流量,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\gamma$  为过氧比;  $i$  为电流, A;  $u$  为空压机电机控制电压, V;  $C_i, k$  均为常数, 具体可参考文献[8]。该模型简洁, 而且又能真实反映系统动静特性, 为此本文采用该模型进行控制器设计和仿真分析。仿真表明<sup>[8]</sup>: 系统的最优工作点在  $\gamma=2$  处。因此, 本文基于多内模原理, 取系统控制输入量为  $u$ , 电流为可测扰动, 将过氧比控制在  $\gamma=2$ 。

## 2 控制器设计

### 2.1 全局多模型表示

虽然三变量模型已经可以写成比较简洁的状态

方程形式(如式(1)), 但是  $h(x_2, x_3)$  是以表格的形式出现。虽然也可以通过曲面拟合将其转换成高阶多项式, 但会导致状态方程的右边十分复杂, 这样也就很难借助于状态空间的设计方法。然而, 多模型方法被广泛应用于过程控制是处理非线性过程较为方便实用的方法, 其建模方法如下<sup>[11]</sup>: ① 选择  $N$  个合适工作点, 并进行线性化; ② 选择合适的隶属函数(加权函数), 将不同工作点的线性化模型线性组合成全局模型。

$N$  的选取须根据实际对象的非线性特性来确定。太多则导致设计复杂, 且过多的切换过程会导致过多的抖动而不利于全局控制品质; 太少则覆盖不了系统全局范围的动态特性。

不妨设  $\hat{G}_{k,p}(s)$  为第  $k$  个工作点线性化后的模型, 其邻域内的模型输出可以表示为

$$Y_k(s) = \hat{G}_{k,p}(s)U(s) \quad (2)$$

其中,  $Y_k(s), U(s)$  分别为系统的输出和输入,  $\lambda_k(i)$  是  $\hat{G}_{k,p}(s)$  模型在全空间范围内适用的隶属度函数, 其中, 电堆电流为它的自变量, 满足如下约束:

$$\sum_{k=1}^N \lambda_k(i) = 1, \lambda_k(i) \in [0, 1] \quad (3)$$

由此, 可得到如下全局多模型:

$$Y(s) = \sum_{k=1}^N \lambda_k(i) Y_k(s) = \sum_{k=1}^N \lambda_k(i) \hat{G}_{k,p}(s) U(s) \quad (4)$$

其中,  $Y(s)$  为系统的全局输出。显然通过选择合适的工作点和隶属函数, 全局模型的表示可以覆盖系统全局的动态特性。

### 2.2 前馈加多内模控制器结构

前馈加多内模控制的设计思想: 许多实际工业过程存在较大的非线性, 而每个确定的线性模型适用范围相对较小。若把实际工作空间划分为一些不相交的子空间, 对于每个子空间均可通过平衡点线性化得到一个在工作区间内失配较小的线性模型, 而每个内模以及前馈控制器均是针对不同的子空间及相应的线性模型进行独立设计; 然后再通过有机组合成一个有效的总控制器, 即多内模反馈控制器的输出是  $N$  个子空间内模控制器输出的加权线性叠加, 前馈控制器的输出也是  $N$  个子空间的前馈控制器的输出加权线性叠加。前馈加多内模控制(MIMC)框架结构如图 1 所示。若将图 1 中各虚线框用右上角的变量来代替则是前馈加单内模原理

图。图中,  $I_r = \sum_{k=1}^N I_k \lambda_k$  表示全局电流偏移值,  $u_r =$

$\sum_{k=1}^N u_k \lambda_k$  表示全局电压偏移值,其中  $I_k, u_k$  分别为第  $k$  个工作点的电流、电压偏移值;  $G_c = \sum_{k=1}^N G_{k,c} \lambda_k$  为全局前馈控制器,其中  $G_{k,c}$  为第  $k$  个工作点的前馈控

制器;  $\hat{G}_p = \sum_{k=1}^N \hat{G}_{k,p}(s) \lambda_k$  为全局多模型;  $G_{TMC} = \sum_{k=1}^N G_{k,IMC} \lambda_k$  为全局多内模控制器,其中  $G_{k,IMC}$  为第  $k$  个工作点的内模控制器。

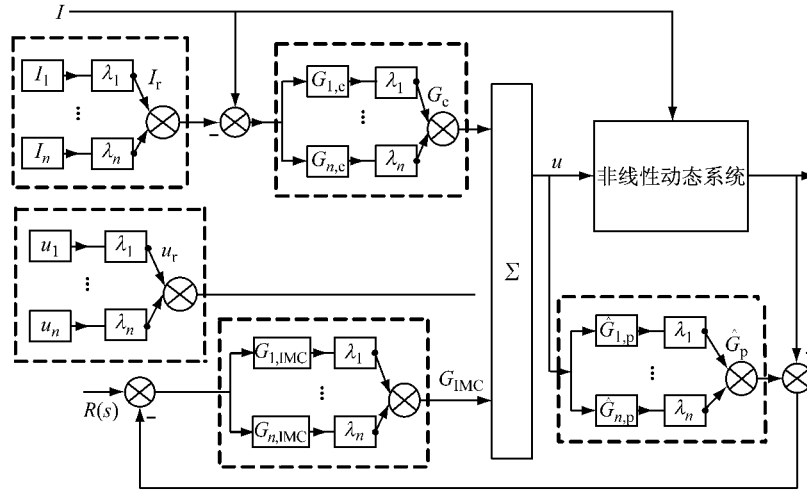


图 1 前馈加多内模控制结构框图

Fig.1 Diagram of feed forward + multiple internal model controller

多内模控制器设计分 4 步:① 选择多个合适工作点对模型进行线性化,并寻求隶属函数,实现全局多模型表示;② 设计一个稳定的理想内模控制器而不考虑系统的鲁棒性;③ 设计合理的滤波器,使得控制器得以物理实现,同时让系统获得鲁棒性和闭环动态特性的折衷;④ 通过将各内模控制器通过隶属函数进行线性组合成多内模控制器。

步骤一 通过仿真寻求多个合适的工作点并对模型线性化,基于隶属函数实现全局多模型表示。

步骤二 因式分解过程模型

$$\hat{G}_{k,p} = \hat{G}_{k,p+} \hat{G}_{k,p-} \quad (5)$$

其中,  $\hat{G}_{k,p+}$  为系统的非最小相位部分(即包含了所有的纯滞后和右半平面的零点),并规定其静态增益为 1;  $\hat{G}_{k,p-}$  为过程系统的最小相位部分。

步骤三 设计内模控制器如下:

$$G_{k,IMC}(s) = f(s) / \hat{G}_{k,p-}(s) \quad (6)$$

式中:  $f(s)$  为内模控制器的滤波器,对于阶跃输入而言,取  $f(s) = 1 / (Ts + 1)^r$ ,  $r$  的选取以保证内模控制器为真;  $T$  为滤波器时间常数,  $T$  越大则系统的鲁棒性越好,但牺牲了动态品质。对于一个给定的系统,  $T, r$  为仅有的控制器设计参数,其物理意义明确。

步骤四 全局多内模控制器

$$G_{TMC} = \sum_{k=1}^N G_{k,IMC} \lambda_k \quad (7)$$

前馈控制器设计步骤雷同,这里不予详细描述。

### 2.3 多内模设计

对多内模(MIMC)控制器设计如下:选取  $N = 2$ ,并在工作点  $i_1 = 180 \text{ A}, \gamma_1 = 2$  和  $i_2 = 260 \text{ A}, \gamma_2 = 2$  处进行线性化,本文采用 Matlab 线性化工具箱进行求解,求解结果如下所述。

针对系统(1),在输入电流  $i_1 = 180 \text{ A}$ ,过氧比  $\gamma_1 = 2$  处进行系统线性化,得系统的平衡态变量值为:  $u_1 = 143.3, x_{1,1} = 167\ 318.4, x_{2,1} = 183\ 006.2, x_{3,1} = 7\ 327.6$ ,系统的输出可以表示为

$$Y_1(s) = G_{1,i}(s) I_1(s) + \hat{G}_{1,p}(s) U_1(s) \quad (8)$$

其中,  $Y_1(s), I_1(s), U_1(s)$  分别为  $\gamma - \gamma_1, i - i_1, u - u_1$  的拉普拉斯变换

$$G_{1,i}(s) = \frac{-0.011\ 11s^3 - 0.762s^2 - 10.55s - 26.55}{s^3 + 71.9s^2 + 1\ 007s + 2\ 532}$$

$$\hat{G}_{1,p}(s) = \frac{13.41s + 47.74}{s^3 + 71.9s^2 + 1\ 007s + 2\ 532}$$

由此,该工作点的前馈  $G_{1,c}(s)$  以及内模控制器  $G_{1,IMC}(s)$  分别为

$$G_{1,c}(s) = -\frac{G_{1,i}}{\hat{G}_{1,p}} =$$

$$\frac{0.011\ 11s^3 + 0.762s^2 + 10.55s + 26.55}{13.41s + 47.74} =$$

$$as^2 + bs + \tilde{G}_{1,c}(s) \quad (9)$$

其中,  $\tilde{G}_{1,c}(s) = (7.98s + 26.5) / (13.41s + 47.74)$ 。为

了使得前馈控制器物理可实现,取  $G_{1,c}(s) \approx \tilde{G}_{1,c}(s)$ . 根据内模原理,其内模控制器为

$$G_{1,IMC}(s) = \frac{s^3 + 71.9s^2 + 1\,007s + 2\,532}{(13.41s + 47.74)(Ts + 1)^r} \quad (10)$$

要使  $G_{1,IMC}(s)$  为真,取  $r=2, T=0.01$ , 则

$$G_{1,IMC}(s) = \frac{s^3 + 71.9s^2 + 1\,007s + 2\,532}{0.001\,3s^3 + 0.273s^2 + 14.36s + 47.74} \quad (11)$$

在输入电流  $i_2=260$  A, 过氧比  $\gamma_2=2$  处进行系统线性化,得到系统的平衡态各变量值为:  $u_2=200.4, x_{1,2}=222\,837.6, x_{2,2}=245\,497.8, x_{3,2}=9\,571.8$ . 系统的输出可以表示为

$$Y_2(s) = G_{2,i}(s)I_2(s) + \hat{G}_{2,p}(s)U_2(s) \quad (12)$$

其中,  $Y_2(s), I_2(s), U_2(s)$  分别为  $\gamma-\gamma_2, i-i_2, u-u_2$  的拉普拉斯变换

$$G_{2,i}(s) = \frac{-0.007\,692s^3 - 0.467\,1s^2 - 3.522s - 6.328}{s^3 + 64.05s^2 + 481.9s + 856.2}$$

$$\hat{G}_{2,p}(s) = \frac{2.384s + 8.485}{s^3 + 64.05s^2 + 481.9s + 856.2}$$

同理得,该工作点的前馈  $G_{2,c}(s)$  以及内模控制器  $G_{2,IMC}(s)$  分别为

$$G_{2,c}(s) = \frac{1.96s + 6.33}{2.38s + 8.49},$$

$$G_{2,IMC}(s) = \frac{s^3 + 64.05s + 481.9s + 856.2}{0.000\,2s^3 + 0.049s^2 + 2.55s + 8.49} \quad (13)$$

算法采用如下隶属函数:

$$\lambda_1(i) = \begin{cases} 1, & i \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq i \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq i \leq b \\ 0, & i \geq b \end{cases}, \lambda_2(i) = 1 - \lambda_1(i) \quad (14)$$

其中,  $a=240, b=250$ .

### 3 数值仿真

为验证方法的有效性,仿真中将多内模(MIMC)、单内模(IMC)及PID控制器进行对比.在IMC方案中取在输入电流  $i_1=180$  A, 过氧比  $\gamma_1=2$  处线性化的结果. PID控制器的参数由Simulink中PID模块自行优化整定,整定后参数如下:比例系数71.38,积分系数842.15,微分系数-1.13,滤波系数18.8.在仿真中PID算法和IMC算法均采用了相同

的前馈补偿,其前馈控制器采用系统在  $i_1=180$  A,  $\gamma_1=2$  下的线性化后的前馈控制器设计结果

$$\tilde{G}_c(s) = (7.98s + 26.5)/(13.41s + 47.74) \quad (15)$$

即和MIMC中的  $G_{1,c}(s)$  相一致.

系统所施加扰动电流从80 A阶梯上升到320 A,然后阶梯下降到220 A,其曲线如图2所示.

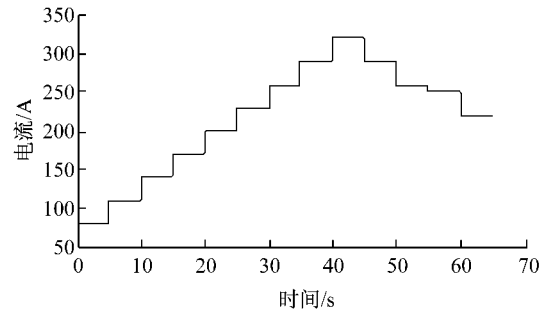


图2 燃料电池电堆实际输出电流  
Fig.2 Output current of the PEMFC

经过上述3种不同控制算法的控制后,系统的闭环响应如图3所示,其局部放大如图4所示.由图4a可知,当电流小于230 A时,MIMC控制器和MIC控制器的控制曲线几乎重合,PID控制效果相对前二者较差(较大的超调量和调整时间),其原因是电流0~240 A工作区间中,实际上MIMC和MIC的控制输出是一致的.当电流从230 A上升到260 A时,MIMC没有超调,调整时间和MIC差不多,但MIC有超调(如图4b所示),这是切换引起的结果.当电流大于250 A时,MIMC控制器性能大大优于MIC以及PID控制器(如图4c和4e所示).当电流达到320 A时,PID控制器失稳定,系统存在较大稳态误差,但MIMC和IMC控制器依然能够保持良好的控制品质(如图4d所示).尽管在大电流区

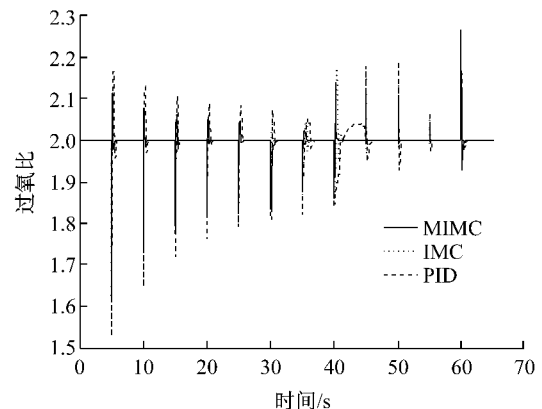


图3 最优过氧比控制效果图  
Fig.3 Optimal oxygen excess ratio control effect

( $i \geq 250$  A)MIMC 控制器优于 MIC,小电流区( $i \leq 240$  A)MIMC 和 MIC 控制效果相同,但是在切换区  $240 \text{ A} < i < 250 \text{ A}$ ,MIMC 存在抖动(如图 4f 所示).抖动是任何切换控制器都不可避免的问题,但是从全局范围内来看,MIMC 控制器的性能还是优于 MIC 控制器,PID 最差.

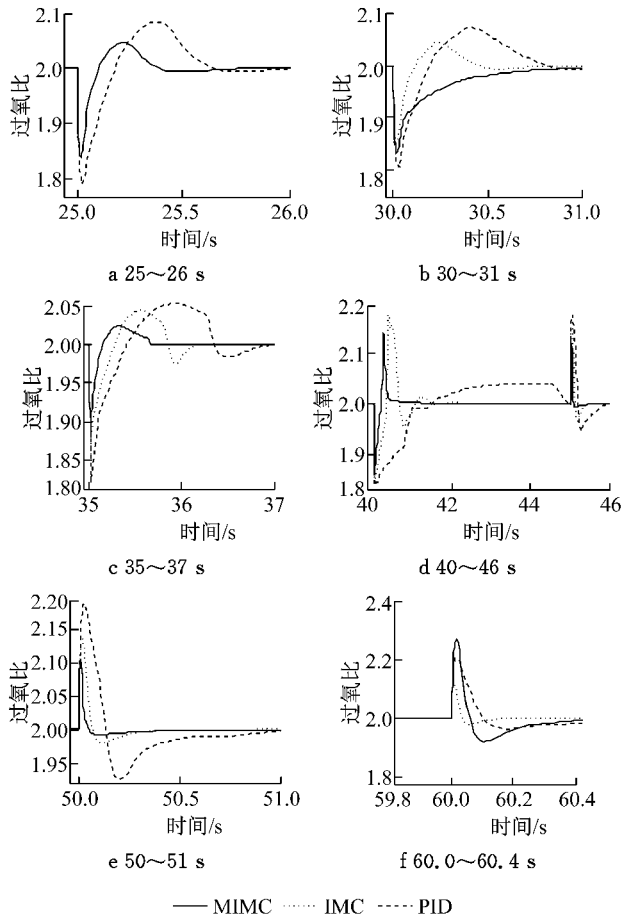


图4 最优过氧比控制局部放大图

Fig.4 Local magnify diagram of optimal oxygen excess ratio control

## 4 结论

本文基于已有文献的 PEMFC 三变量模型,利用前馈加多内模控制的控制方案,实现了对空气供应系统的最优过氧比控制.仿真结果表明,该控制器不仅能有效将系统最优过氧比稳定在给定值,而且在全局动态性能指标上优于单内模控制和 Matlab/

Simulink 工具箱所提供的自调整 PID 控制,即具有较小调整时间和较小的超调量.另外,仿真也揭示了传统 PID 控制在电流 320 A 时,系统已经失稳定,而多内模控制器依然保持较好的控制品质.

## 参考文献:

- [1] CHEN Jixin, ZHOU Biao. Diagnosis of PEM fuel cell stack dynamic behaviors[J]. Journal of Power Sources, 2008, 177: 83.
- [2] Danzer A M, Wittmann J S, Hofer P E. Prevention of fuel cell starvation by model predictive control of pressure, excess ratio, and current[J]. Journal of Power Sources, 2009, 190: 86.
- [3] Rgab O, Yu D L, Gomm B J, Polymer electrolyte membrane fuel cell control with feed-forward and feedback strategy [J]. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, 2(10): 56.
- [4] Talj R J, Ortega R, Hilairet M. A controller tuning methodology for the air supply system of a PEM fuel-cell system with guaranteed stability properties [J]. International Journal of Control, 2009, 82(9): 1706.
- [5] 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.
- [6] Talja R, Ortega R, Astolfic A. Passivity and robust PI control of the air supply system of a PEM fuel cell model [J]. Automatica, 2011, 47(12): 2554.
- [7] Arce A, Ramirez K D, del Real J A, et al. Constrained explicit predictive control strategies for PEM fuel cell systems [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans; IEEE, 2007; 6088-6093.
- [8] Pukrushpan T J, Stefanopoulou G A, Peng Huei. Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design [M]. London: Springer, 2004.
- [9] Matraji I, Laghrouche S, Wack M. Cascade control of the moto-compressor of a PEM fuel cell via second order sliding mode [C]// 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC). Orlando; IEEE, 2011; 634-638.
- [10] Rizvi S S H, Bhatti A I, Khan Q, et al. Smooth sliding mode control for PEM fuel cell system [C]// 24th Chinese Control and Decision Conference. Taiyuan; IEEE, 2012; 3557-3562.
- [11] 张智焕,王树青. 非线性系统的多内模控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2003, 37(1): 56.  
ZHANG Zhihuan, WANG Shuqing. Multiple internal model control design for nonlinear system [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2003, 37(1): 56.