

串联型滑模结构的燃料电池供气系统控制研究^{*}马钊铎¹ 李惠林¹ 龚成平² 边东生³ 何 锋¹

(1. 贵州大学机械工程学院 贵阳 550025; 2. 贵州经贸职业技术学院 贵阳 550025;

3. 奇瑞万达贵州客车股份有限公司 贵阳 550025)

摘 要: 针对燃料电池空气供给系统动态性能易受负载变化和外界环境因素影响的问题,设计了一种由超螺旋滑模控制与终端滑模控制相结合的串联型控制策略。建立了面向控制的五阶动态模型,提出了在负载变化时供气系统跟踪最佳过氧比、最大净输出功率和阴极压力测量的控制问题;提取最佳期望值并设计控制器,利用 Lyapunov 方法进行闭环稳定性验证。仿真分析可知,所搭建的观测器扰动估计值与理论实际值误差在 0.01% 以内,且本文方法与 PID 控制相比过氧比跟踪最佳期望值响应时间提高了 6.9%,最大净功率输出值提高 0.2%,阴极压力响应时间相比提高了 60%。由结果可得,本文策略在负载变化时可以有效的控制供气系统过氧比跟踪最佳期望值并输出最大净功率,能够准确、迅速的估计阴极压力,能够较好的估计扰动,具有较强的抗干扰能力。

关键词: 燃料电池供气系统;串联型滑模控制;过氧比;抗干扰

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.2010

Research on the control of fuel cell gas supply system with tandem sliding mode structure

Ma Xingcong¹ Li Huilin¹ Gong Chengping² Bian Dongsheng³ He Feng¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Vocational and Technical College of Economics and Trade, Guiyang 550025, China;

3. Chery Wanda Guizhou Bus Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: Aiming at the problem that the dynamic performance of the fuel cell air supply system is susceptible to load changes and external environmental factors, a tandem-type control strategy combining super-helical sliding mode control and terminal sliding mode control is designed. A control-oriented fifth-order dynamic model is established, and the control problem of tracking the optimal oxygen excess ratio, maximum net output power and cathode pressure measurement of the air supply system during load change is proposed; the optimal expectation value is extracted and the controller is designed, and the closed-loop stability is verified using the Lyapunov method. Simulation analysis shows that the constructed observer perturbation estimate is within 0.01% error from the theoretical actual value. Compared with PID control, the response time of tracking the optimal expected value of the oxygen excess ratio is improved by 6.9%, the maximum net power output is increased by 0.2%, and the response time of cathode pressure is improved by 60%. From the results, it can be concluded that the strategy of this paper can effectively control the oxygen excess ratio of the gas supply system to track the optimal desired value and output the maximum net power when the load changes, can accurately and rapidly estimate the cathode pressure, can better estimate the perturbation, and has a strong anti-disturbance ability.

Keywords: fuel cell air supply system; tandem sliding mode control; stoichiometry ratio; anti-interference

0 引 言

随着科学技术的发展,传统的化石能源消耗持续增加,

能源储备急剧减少,极大的破坏了自然生态环境和影响人类的可持续发展^[1]。寻找可持续发展的新能源备受瞩目,其中质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel

cell, PEMFC) 的能量来自于氢能, 不产生污染物且氢能可持续发展, 这些优势使得燃料电池成为未来汽车行业和发电领域发展的趋势^[2]。目前制约燃料电池汽车技术发展的主要因素是: 电堆材料研发、整车动力系统集成研究。其中针对材料的问题, 国内外许多的学者^[3]已经对电堆的膜电极、催化剂等进行了深入研究。在动力系统集成方面, PEMFC 的运行条件、启动方式和发电系统的动态响应等都将直接影响 PEMFC 的使用性能^[4-5], 但相较于空气供给系统对 PEMFC 动态性能的影响已经得到了很大改善。空气供给系统存在空压机、供给管路、中冷器、加湿器这些部件^[6], 在系统工作状况发生突变时可能存在滞后而无法及时满足系统的供给需求。同时由于燃料电池是一个多输入多输出、强耦合的非线性复杂系统^[7], 如果不能准确地控制供气压力与流量, 会使得燃料电池工作效率降低。影响压力与流量主要因素是进气量, 当增大供氧量, 可以缓解供氧不足的现象但是也会增大空压机寄生功率; 若减小供氧量造成气体压强较小则会导致空压机工作不稳定, 引起喘振现象^[8], 因此 PEMFC 的动态输出性能在很大程度上受空气供给回路控制性能的影响。为了提高燃料电池在负载突变和受到外界干扰时的工作性能, 需要供气系统进气压力与流量快速响应和稳定, 使燃料电池系统输出最佳净功率, 所以对于供气系统过氧比(oxygen excess ratio, OER)的跟踪控制极为重要, 近年来国内外学者对 PEMFC 供气系统过氧比控制展开了大量研究。

Pukrushpan 等^[9]基于对供气系统的各个零部件及供气管路进行工作特性分析建立了九阶模型和相应的机理研究。文献[10]作者采用基于自适应滑模观测器在动态工况下对 PEMFC 近优过氧比 OER 进行跟踪控制。文献[11]研究了负载变化引起的阴极、阳极压力平衡变化对整个 PEMFC 系统输出特性的影响, 优化了吹扫时间和间隔, 提高系统的响应速度和输出功率。文献[12]为了解决供气系统过氧比的控制问题, 作者设计了一种智能 PID 控制方法提高了控制效能和对各种工况的适应能力。文献[13]建立了面向控制的阴极和阳极控制器设计模型及扩展状态观测器, 通过实验验证了所提出的控制方法在不同工况下的有效性。文献[14]作者设计了一种自适应滑模控制, 有效抑制传统滑模控制的抖振现象。文献[15]中提出了混合自适应控制策略对供气系统的压力进行控制, 在不同负荷变化情况下, 该控制系统能比传统控制方法更有效地减小压力差。文献[16]作者则是对 PEMFC 系统的阴极湿度进行研究, 并采用自抗扰控制策略设计控制器, 有效缩短响应时间、减小超调量、提高能效。上述研究的控制策略大多是前馈加反馈的控制方法, 主要是对供气系统的动态响应及跟踪固定过氧比进行研究, 但却缺乏考虑在不同负载下系统输出最佳净功率值对应不同的最佳过氧比的控制研究, 缺少对传感器不能直接测量的阴极压力的控制, 难以实现对压力与流量的协调控制及相关的解耦研究。滑模变结构控

制(sliding mode control, SMC)简称为滑模控制, 是一种常用的非线性控制方法, 因其具有很强的鲁棒性和响应速度快、对应参数变化及外部扰动不灵敏^[17]被广泛运用于非线性系统控制, 基于观测器的滑模控制器设计能更好的适应因外界干扰而产生的扰动, 增强系统的鲁棒性和反应能力。

本文中提出一种将超螺旋滑模控制方法与终端滑模控制相结合的串联型控制策略, 使供气系统过氧比能够迅速地跟踪最佳过氧比并输出最大净功率, 同时估计系统受到的总扰动和阴极压力。其中超螺旋滑模控制得出系统的参考阴极压力, 而终端滑模控制则通过观测器估计出系统的阴极压力, 借鉴反馈通道通过等速滑模控律得到系统的输入电压。通过 Lyapunov 方法验证控制方法的稳定性, 最后在 MATLAB/Simulink 上进行仿真实验分析。

1 供气系统模型

车用 PEMFC 系统的总体配置图如图 1 所示, 主要由空气供给系统、供氢系统、水处理系统、热处理系统和排气系统组成, 为了方便研究供气系统, 对系统进行简化处理, 建立包含空压机、供应管道、电堆和回流管的供气系统模型。

现进行以下假设: 1) 所有气体都遵循理想气体定律; 2) 氢气的供应能够及时跟随氧气的反应; 3) PEMFC 阳极压力能够及时遵循阴极压力变化; 4) 进入电堆的气体温度已控制在理想值且被充分加湿。

1.1 空压机模型

空压机的转速动态特性可以通过下式描述:

$$\frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{\eta_{cm} k_t}{R_{cm} J_{cp}} (\omega_{cm} - k_v \omega_{cp}) - \frac{C_p T_{atm}}{\omega_{cp} \eta_{cp} J_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (1)$$

式中: k_t 、 k_v 、 R_{cm} 和 η_{cm} 为空压机的系统参数, C_p 为空气比热容、 T_{atm} 为环境温度、 η_{cp} 为空压机效率、 J_{cp} 为空压机与电机的联合惯量、 p_{sm} 为供应管道的压力、 p_{atm} 为环境压力、 γ 为空气比热比、 W_{cp} 空压机空气流量。

1.2 供气管道模型

根据理想气体状态方程, 供气管道压力可以被式(2)描述:

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{R_a \gamma}{V_{sm}} (W_{cp} T_{cpout} - W_{smout} T_{sm}) \quad (2)$$

式中: R_a 为理想气体常数, V_{sm} 为空气供给管道体积, T_{sm} 为供气管道温度与进入阴极的气体温度相同, T_{cpout} 为离开空压机的气体温度, W_{smout} 为从供应管道出去进入电堆阴极的流量。

1.3 回流管道模型

设定回流管道内空气温度不变化, 则根据理想气体状态方程有:

$$\frac{dp_{rm}}{dt} = \frac{R_a T_{rm}}{V_{rm}} (W_{caout} - W_{rmout}) \quad (3)$$

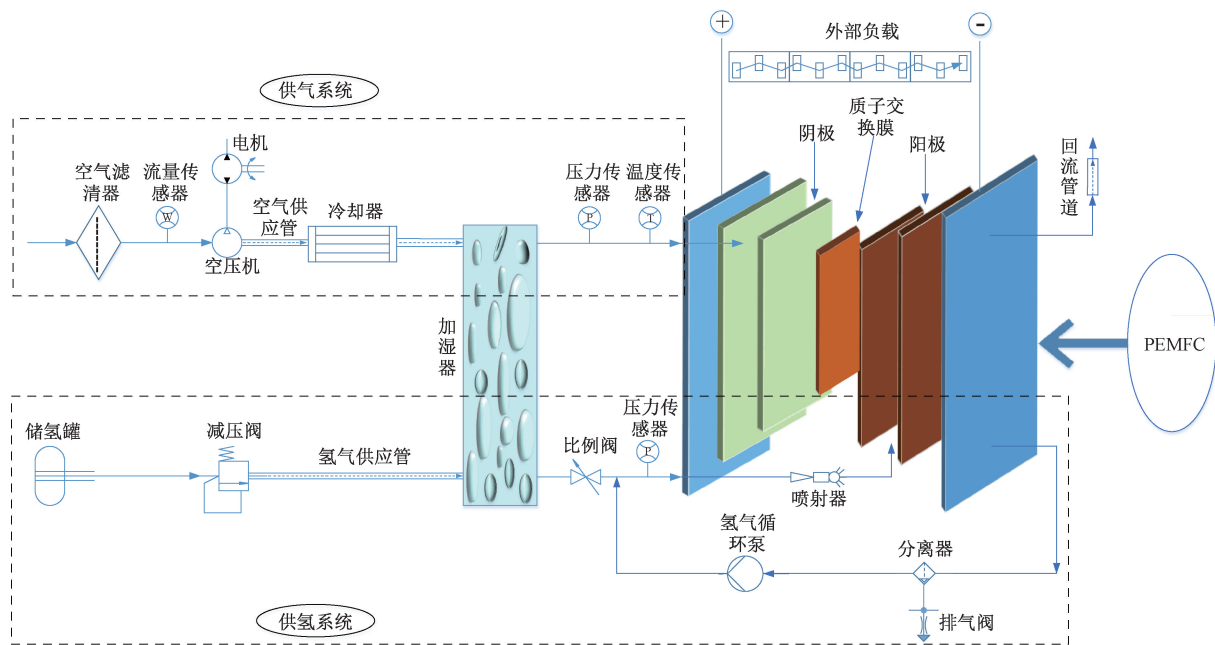


图 1 PEMFC 系统的总体配置图

Fig. 1 The overall configuration of the PEMFC system

式中: T_{rm} 为回流管道温度与电堆工作温度相同, V_{rm} 为空气回流管道体积, W_{rmout} 为回流管道流量。

1.4 电堆模型

1) 阴极气体动态模型

阴极气体主要有氧气、氮气和水蒸气组成, 氮气不参与反应, 在理想条件下进入电堆内的气体完全被加湿, 水蒸气分压不变。所以只有氧气量变化, 根据质量守恒定律有:

$$p_{o_2ca} = \int \frac{R_{o_2} T_{st}}{V_{ca}} (W_{o_2inca} - W_{o_2outca} - W_{o_2reacted}) \quad (4)$$

$$p_{N_2ca} = \int \frac{R_{N_2} T_{st}}{V_{ca}} (W_{N_2inca} - W_{N_2outca}) \quad (5)$$

式中: T_{st} 为燃料电池工作温度, R_{o_2} 、 R_{N_2} 分别为氧气和氮气的气体常数, W_{o_2inca} 、 W_{o_2outca} 、 $W_{o_2reacted}$ 分别代表氧气进入、离开和在阴极反应的流量, W_{N_2inca} 、 W_{N_2outca} 分别代表氮气进入和离开阴极的流量。

参与反应的氧气根据电化学原理可有:

$$W_{o_2reacted} = M_{o_2} \frac{nI_{st}}{4F} \quad (6)$$

n 为单体电池的数量取 316, F 为法拉第常数 96 485 C/mol。

2) 输出电压模型

根据电化学原理可有, 能斯特电压:

$$E_{NERST} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T_{st} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{st} \times [\ln(p_{H_2an}) + 1/2 \ln(p_{o_2ca})] \quad (7)$$

本文中采用 Pukrushpan 的修正 Tafel 公式有活化电压:

$$U_{act} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T_{st} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{st} \times \left[\ln\left(\frac{p_{ca} - p_{sat}(T_{st})}{1.01}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{0.1173(p_{ca} - p_{sat}(T_{st}))}{1.01}\right) + \{0.5736 - 5.8 \times 10^{-4} + (1.8 \times 10^{-4} T_{st} - 0.166) \times \left[\frac{p_{o_2ca}}{0.1173} + p_{sat}(T_{st}) \right] + (1.618 \times 10^{-2} - 1.618 \times 10^{-5}) \times \left[\frac{p_{o_2ca}}{0.1173} + p_{sat}(T_{st}) \right]^2 \} \times (1 - e^{-10i}) \right] \quad (8)$$

欧姆电压:

$$U_{ohm} = I \times R_{ohm} \quad (9)$$

浓差电压:

$$U_{con} = i \left(C \frac{i}{i_{max}} \right)^2 \quad (10)$$

式中: i 为电堆电流密度 $\frac{I_{st}}{A_{fc}}$, C 经验常数。则燃料电池输出

电压为:

$$V = n \times (E_{NERST} - U_{act} - U_{ohm} - U_{con}) \quad (11)$$

2 控制目标及期望值

本文中设计的串联型控制策略, 要通过状态观测器估计不能被传感器直接测量的阴极压力和总扰动, 还要控制阴极压力变化跟随参考阴极压力, 以及使供气系统在受到外界干扰和内部扰动的情况下过氧比能够迅速准确的跟踪最佳过氧比并输出最大净功率。其中燃料电池过氧比定义为电堆进入的氧气量与消耗的氧气量的比值, 表示为:

$$\lambda_{o_2} = \frac{W_{o_2in}}{W_{o_2reacted}} = \frac{4FW_{o_2in}}{M_{o_2} n I_{st}} \quad (12)$$

过氧比控制在最优状态是为了减小空压机功率损耗从而保证电堆的净功率输出,所以过氧比的期望值需要根据电堆的净输出功率来进行确定。

$$p_{net} = p_g - p_{cp} \quad (13)$$

式中: p_{net} 为输出净功率, p_g 为总产生功率等于 $V \times I_{st}$ 。
 p_{cp} 为空压机的耗损功率,其值等于:

$$p_{cp} = \frac{C_p T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (14)$$

在不同负载电流下,仿真得到电堆输出净功率随过氧比变化的关系如图 2 所示,提取出不同负载电流下最大输出净功率对应的过氧比值,使用拟合工具箱 (curve fitting tool) 的多项式拟合出最佳过氧比与负载电流之间的关系如下,图中拟合线为最佳过氧比曲线。

$$\lambda_{o_2}^{ref} = 3 \times 10^{-4} I_{st}^2 - 6.63 \times 10^{-2} I_{st} + 7.719 \quad (15)$$

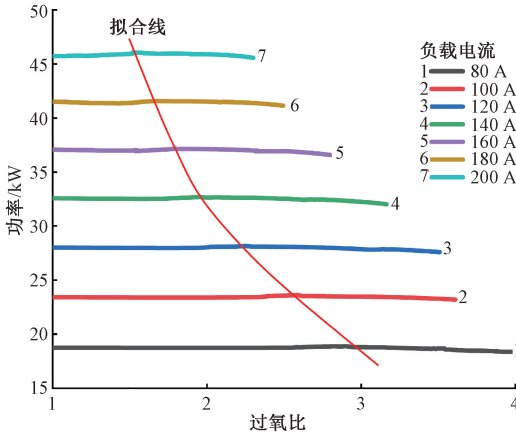


图 2 净输出功率与过氧比的关系图

Fig. 2 Net output power vs. peroxide ratio

3 控制器设计

为了方便控制器的设计,本文中在上述供气系统的模型基础上建立面向控制的五阶动态模型,其状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = g_1 u - g_2 x_1 - g_3 \left[\left(\frac{x_2}{g_4} \right)^{g_5} - 1 \right] \frac{W_{cp}}{x_1} \\ \dot{x}_2 = g_6 \left[W_{cp} \left\{ g_7 + g_8 \left[\left(\frac{x_2}{g_4} \right)^{g_5} - 1 \right] \right\} - g_9 (x_2 - \Theta) \right] \\ \dot{x}_3 = g_{10} (\Theta - x_3) - g_{11} \xi \\ \dot{x}_4 = g_{12} (x_2 - \Theta) - g_{13} (\Theta - x_3) - g_{14} d \\ \dot{x}_5 = g_{15} (x_2 - \Theta) - g_{16} (\Theta - x_3) \\ x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = [w_{cp}, p_{sm}, p_{rm}, p_{o_2}, p_{N_2}] \end{cases} \quad (16)$$

式中: u 代表输入电压, d 代表电堆电流视为外部输入扰动, ξ 表示回流管道输出流量, $\Theta = x_4 + x_5 + c_v$ 表示燃料电池阴极总压力, c_v 表示水蒸气分压, $g_i (i = 1, 2, \dots, 16)$ 是常数系数。

由于阴极气体压力不能直接由传感器直接测量所得,所以设计扩张状态观测器进行估计:

$$\dot{\Theta} = \dot{x}_4 + \dot{x}_5 = c_1 (x_2 - \Theta) - c_2 (\Theta - x_3) - g_{14} d \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} &= c_1 \dot{x}_2 + c_2 \dot{x}_3 - c_3 \dot{y}_1 - g_{14} \dot{d} = c_1 \dot{x}_2 + c_2 \dot{x}_3 - \\ &c_3 \dot{\Theta} - g_{14} \dot{d} - b_0 u + b_0 u \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $g_{12} + g_{15} = c_1$, $g_{13} + g_{16} = c_2$, $g_{12} + g_{13} + g_{15} + g_{16} = c_3$ 。系统总扰动 $f = (g_{12} + g_{15}) \dot{x}_2 + (g_{13} + g_{16}) \dot{x}_3 - g_{14} \dot{d} - b_0 u$, 则有:

$$\dot{\Theta} = -c_3 \dot{\Theta} + b_0 u + f \quad (19)$$

设 $H_1 = \Theta$, $H_2 = \dot{\Theta}$, $H_3 = f$, $\dot{f} = h$, 则非线性系统可以重新写为:

$$\begin{cases} \dot{H}_1 = H_2 \\ \dot{H}_2 = -c_3 H_2 + b_0 u + H_3 \\ \dot{H}_3 = h \\ \Theta = H_1 \end{cases} \quad (20)$$

根据新的状态方程可以构造出非线性扩张状态观测器(NESO)为:

$$\begin{cases} \hat{H}_1 = \hat{H}_2 + \beta_1 (H_1^* - \hat{H}_1) \\ \hat{H}_2 = -c_3 \hat{H}_2 + b_0 u + \hat{H}_3 + \beta_2 (H_1^* - \hat{H}_1) \\ \hat{H}_3 = \beta_3 (H_1^* - \hat{H}_1) \\ \Theta = \hat{H}_1 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\beta_i (i = 1, 2, 3)$ 为观测器设计增益且 $\tilde{H}_i = e_i = H_i - \hat{H}_i$ 根据式(20)和(21)可有观测器误差状态空间方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{H}}_1 \\ \dot{\tilde{H}}_2 \\ \dot{\tilde{H}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & -c_3 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{H}_1 \\ \tilde{H}_2 \\ \tilde{H}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} h \quad (22)$$

为保证系统收敛,则误差状态空间方程的特征值要小于 0, 则有:

$$C_\lambda = \lambda^3 + \lambda^2 (\beta_1 + c_3) + \lambda (\beta_1 c_3 + \beta_2) + \beta_3 \quad (23)$$

设有 3 个根, 则 $C_\lambda = (\lambda + \omega_0)^3$, 并且 $\omega_0 > 0$, 得出: $\beta_1 = 3\omega_0 - c_3$, $\beta_2 = 3\omega_0^2 - 3\omega_0 c_3 + c_3^2$, $\beta_3 = \omega_0^3$ 。同时假设 $\lambda_{o_2}^{ref} - \lambda_{o_2} = e_{\lambda 1}$, 且 $N_d = \lambda_{o_2}^{ref}$, $N_1 = \lambda_{o_2}$ =

$$\frac{4FX_{o_2 mca} k_{smout} (p_{sm} - p_{ca})}{M_{o_2} n I_{st} (1 + \omega_{o_2 mca})} \quad (24)$$

$$\text{令 } f_\lambda = \frac{4FX_{o_2 mca} k_{smout} \ddot{p}_{sm}}{M_{o_2} n I_{st} (1 + \omega_{o_2 mca})}, q = \ddot{p}_{ca}, t =$$

4 仿真研究

基于 MATLAB/Simulink 搭建第一节的 PEMFC 模型,验证本文中设计的控制器效果,系统参数如表 1 所示,通过仿真分析比较 PID 控制、串联型滑模控制在不同负载情况下的最优过氧比追踪情况,给定如图 4 所示负载电流对燃料电池供气系统模型进行仿真验证。

表 1 PEMFC 模型数据

Table 1 PEMFC model data

符号	值	符号	值
k_t	0.017 2/NmA^{-1}	γ	1.4
k_v	$0.013 \text{ 2/Vrad}^{-1} \text{ s}$	k_{smout}	$1.652 \times 10^{-6} / \text{kg} \cdot \text{sPa}$
R_{cm}	$1.5 / \Omega$	R_a	$286.9 / \text{Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
J_{cp}	$5 \times 10^{-5} / \text{kgm}^2$	P_{atm}	$1.013 \times 10^5 / \text{Pa}$
T_{atm}	$298.15 / \text{k}$	T_{st}	$333.15 / \text{k}$
η_{cm}	0.96	V_{cm}	$0.04 / \text{m}^3$
η_{cp}	0.85	V_{rm}	$0.005 / \text{m}^3$

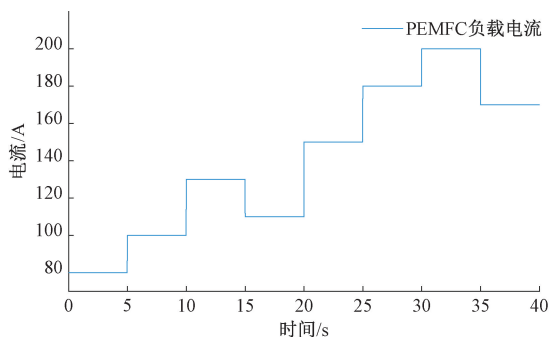


图 4 PEMFC 负载电流

Fig. 4 PEMFC load current

4.1 阴极压力及干扰观测

阴极压力与集总干扰无法通过传感器直接测量,故设计扩张状态观测器进行估计。仿真结果如图 5 所示是 PID 控制、串联型滑模控制、原始系统和 NESO 的系统阴极压力变化对比结果,当输入电流值发生变化时会引起过氧比的变化进而导致进气压力的变化以及阴极压力的变化。其中 PID 控制与串联型滑模控制都能够在较短的时间内将阴极压力迅速的调整到期望的阴极压力,并且两种控制器的调整时间分别为 0.6 s 和 1.5 s,对比未加控制器之前的系统调整时间分别提高了 71.4% 和 28.6%,其中串联型滑模控制控制阴极压力达到理想稳定值的时间相比 PID 控制器的提高了 60%。

在燃料电池受到外界干扰并做出反应时,系统内部也会产生一些较大的反应,为了把影响降到最低本文需要能够及时的了解到系统扰动并做出相应的响应,从图 6 系统干扰观测结果可以看出,在负载突变处串联型滑模控制扰

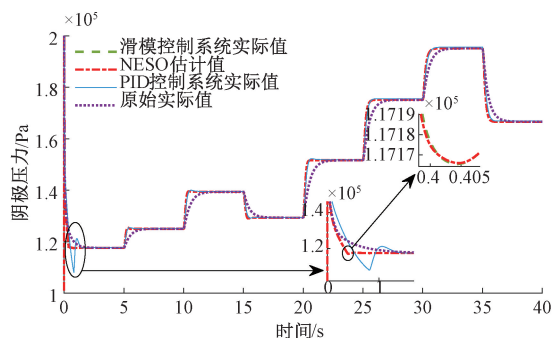


图 5 阴极压力变化

Fig. 5 Cathode pressure variation

动估计值与系统理论的扰动值误差在 6.25% 左右,但在 0.4 s 左右的调整时间后系统估计值与理论实际值高度重合,误差在 0.01% 以内,表明本文中设计的控制器能够较好的估计系统不能测量的扰动。

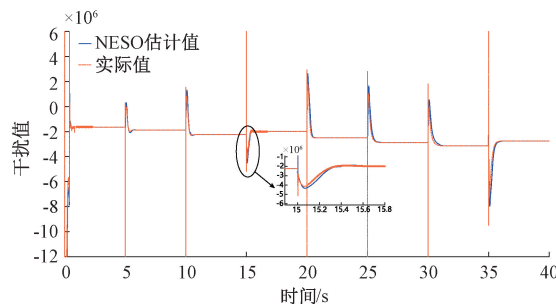


图 6 干扰观测结果

Fig. 6 Interference observations

4.2 过氧比与净输出功率

过氧比跟踪控制是表征 PEMFC 供气系统性能好坏的一大标志,本文中也是重点研究在负载变化情况下,过氧比的期望值提取和跟踪控制性能;如图 7 所示是 PID 控制、串联型滑模控制和未加控制器的原始输入系统过氧比跟踪仿真结果,分析可知 PID 控制、串联型滑模控制都能够在负载变化时迅速的跟踪最佳过氧比,比未加控制器的原始输入系统响应时间分别提高 20% 和 56%;同时串联型滑模控制相比于 PID 控制在负载突变时过氧比虽然超调高 2.98%,但是其到达期望值的响应时间比 PID 提高 6.9%。

对于过氧比的跟踪控制性能另一个评判指标就是净输出功率,当负载变化时系统期望的输出功率也会相应改变,如图 8 所示是 PID 控制、串联型滑模控制下的燃料电池净输出功率值与期望的输出功率对比结果,分析可知在二者控制下都能满足系统在负载变化时及时输出达到要求的最佳功率值,并且响应速度更快,其中串联型滑模控制相比于 PID 控制响应时间平均提升了 1.3% 左右,进而使净输出功率提高了 0.2%。

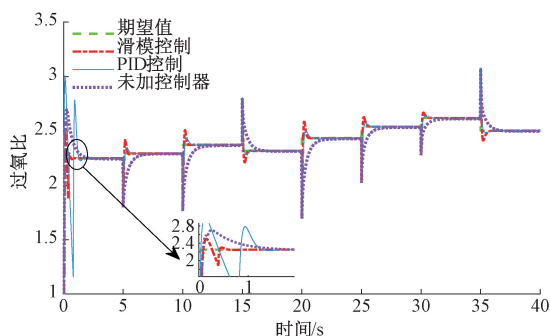


图 7 过氧比控制结果

Fig. 7 Peroxide ratio control results

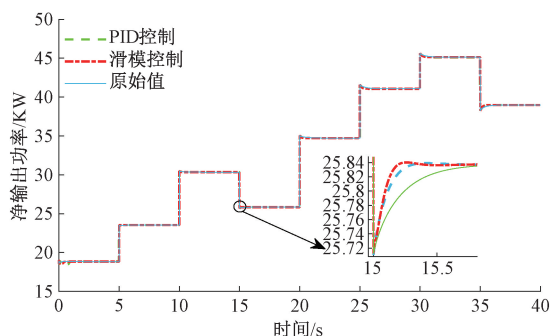


图 8 净输出功率结果

Fig. 8 Net output power results

5 结 论

本文所设计的控制器能够估计传感器所不能测量的阴极压力与集总干扰,并且在负载变化时阴极压力能更快的达到理想压力值,实际的过氧比准确、快速的跟踪最佳过氧比,根据实际变化的情况输出最大净功率;有效的提高了 PEMFC 的工作效率及抗干扰能力,降低了 PEMFC 供气系统对外界干扰及系统精确模型的依赖性。

本文中的控制器设计也为后续进行燃料电池流量与压力解耦提供了参考,也为后续实验验证其实际效果提供了理论依据。

参考文献

- [1] 王贺武,欧阳明高,李建秋,等. 中国氢燃料电池汽车技术路线选择与实践进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2022,13(2):211-224.
WANG H W, OUYANG M G, LI J Q, et al. China's hydrogen fuel cell vehicle technology route selection and practice progress [J]. Journal of Automotive Safety and Energy Conservation, 2022,13(2):211-224.
- [2] 库赛哈桑,伊蒂马德阿扎维,萨米恩. 氢燃料电池汽车: 机遇与挑战[J]. 可持续发展, 2023, 15(15): 11501.
HASSAN Q, AZZAWI I D J, SAMEEN A Z, et al.

Hydrogen fuel cell vehicles: opportunities and challenges[J]. Sustainability, 2023, 15(15): 11501.

- [3] 黄沛兴,郭坤坤,钟尚树. 质子交换膜燃料电池膜电极组装特性模拟与数值研究[J]. 国际氢能杂志, 2022, 47(88): 37577-37586.
HUANG P H, KUO J K, CHUNG S H. Characteristic simulation and numerical investigation of membrane electrode assembly in proton exchange membrane fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(88): 37577-37586.
- [4] 罗月,焦奎. 质子交换膜燃料电池冷启动[J]. 能源与燃烧科学进展, 2018, 64: 29-61.
LUO Y, JIAO K. Cold start of proton exchange membrane fuel cell [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 64: 29-61.
- [5] 周福,辛迪奥,克努森凯尔. 氢气的湿度水平对氢燃料电池质子交换膜电池的电池性能影响[J]. 燃料电池, 2019, 19(1): 2-9.
ZHOU F, SINGDEO D, KAR S K. Investigation of the effect of humidity level of H₂ on cell performance of a HT-PEM fuel cell[J]. Fuel Cells, 2019, 19(1): 2-9.
- [6] 周苏. 燃料电池汽车建模及仿真技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2017, 01.
ZHOU S. Modeling and simulation technology of fuel cell vehicle [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017, 01.
- [7] 约书亚亚德,沃伦瓦兹,乌米特奥科伊. 流场解耦压力和分布对聚合物电解质燃料电池系统性能的影响[J]. 可持续能源技术与评估, 2019, 36: 100551.
HECK J D, VAZ W S, KOYLU U O, et al. Decoupling pressure and distribution effects of flow fields on polymer electrolyte fuel cell system performance[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019, 36: 100551.
- [8] 陈思月,左曙光,吴志鹏. 燃料电池汽车在各种压缩机转速下电动高速离心式压缩机喘振的综合振动声学特性及数学建模[J]. 机械系统与信号处理, 2022, 178: 109311.
CHEN S Y, ZUO S H G, WU Z H P, et al. Comprehensive vibro-acoustic characteristics and mathematical modeling of electric high-speed centrifugal compressor surge for fuel cell vehicles at various compressor speeds[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 178: 109311.
- [9] 杰伊普克鲁斯潘,安娜斯特凡诺普卢,彭惠. 燃料电池动力系统的控制:原理、建模、分析和反馈设计[M]. 柏林:施普林格科学与商业媒体,2024.

- PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G, PENG H. Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2004.
- [10] 朱云,邹建霄,李帅. 一种基于自适应滑模观测器的 PEMFC 动态运行条件下近乎最优 OER 跟踪控制方法[J]. 国际氢能杂志, 2022, 47(2): 1157-1171.
- ZHU Y, ZOU J X, LI SH, et al. An adaptive sliding mode observer based near-optimal OER tracking control approach for PEMFC under dynamic operation condition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(2): 1157-1171.
- [11] 张钦国,佟泽明,佟水光. 氢循环和死端阳极质子交换膜燃料电池系统的建模与动力学性能研究[J]. 能源, 2021, 218: 119476.
- ZHANG Q G, TONG Z M, TONG SH G, et al. Modeling and dynamic performance research on proton exchange membrane fuel cell system with hydrogen cycle and dead-ended anode [J]. Energy, 2021, 218: 119476.
- [12] 伊鹏,陈锦州,何洪文. 基于智能 PID 方法控制 PEMFC 供气系统氧过量比[J]. 可持续发展, 2023, 15(11): 8500.
- YI P, CHEN J ZH, HE H W. Control of oxygen excess ratio for a PEMFC air supply system by intelligent PID methods [J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8500.
- [13] 李成,赵宏辉,刘华阳. 聚合物电解质膜燃料电池的供气控制和实验验证[J]. 机电一体化, 2023, 91: 102958.
- LI CH, ZHAO H H, LIU H Y, et al. Gas supply control and experimental validation for polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Mechatronics, 2023, 91: 102958.
- [14] 秦彪,王新立,王雷,等. 燃料电池供气系统的自适应滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(11): 2049-2058.
- QIN B, WANG X L, WANG L, et al. Adaptive sliding mode control of fuel cell gas supply systems[J]. Control Theory and Applications, 2023, 40(11): 2049-2058.
- [15] 程静,张程辉,李可. PEMFC 气体压力混合自适应控制[J]. 能源, 2020, 13(20): 5334.
- CHENG J, ZHANG CH H, LI K, et al. Hybrid adaptive control for PEMFC gas pressure [J]. Energies, 2020, 13(20): 5334.
- [16] 程曦,徐江海,刘倩. 应用于 PEMFC 系统阴极湿度控制的主动干扰抑制控制策略[J]. 能源转换与管理, 2020, 224: 113389.
- CHENG X, XU J H, LIU Q, et al. Active disturbance rejection control strategy applied to cathode humidity control in PEMFC system [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 224: 113389.
- [17] 李朔. PEMFC 发电系统性能优化与容错控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- LI SH. Research on performance optimization and fault-tolerant control method of PEMFC power generation system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [18] 付光杰,石英辰,张旭东,等. 基于改进型自适应滑模观测器在飞轮储能系统中的控制方法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(16): 105-110.
- FU G J, SHI Y CH, ZHANG X D, et al. Control method based on improved adaptive sliding mode observer in flywheel energy storage system [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(16): 105-110.

作者简介

马钊骢,硕士研究生,主要研究方向为新能源汽车动力系统集成与控制。

E-mail: 2813956792@qq.com

李惠林(通信作者),副教授,主要研究方向为新能源汽车系统动力学与控制、汽车噪声与振动。

E-mail: 1512704170@qq.com