

# 基于 120 kW 燃料电池空气系统试验的流量和压力协调控制

张白桃, 宫大鹏, 刘 泽, 许思传

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 大功率质子交换膜燃料电池的空气子系统通过控制空压机转速和背压阀开度来调整进气流量和压力。由于该多变量系统具有非线性与耦合性特性, 因此导致参数控制困难。研究采用前馈控制与双回路 PI 控制相结合的策略来调节该系统的进气流量和压力, 该控制方法涉及的参数少。在采用该控制方法的试验过程中, 根据电堆操作条件对空气子系统流量和压力的需求在线标定控制参数, 得到前馈表和 PI 参数。试验结果表明: 采用前馈控制与双回路 PI 控制相结合的控制策略, 可使空气子系统实际流量与设定流量误差控制在 1.5 g/s 以内, 实际压力与设定压力误差控制在 0.25 kPa 以内。该控制策略和控制参数确定方法可以实现大功率质子交换膜燃料电池空气子系统流量和压力的解耦控制, 可满足燃料电池系统空气供气要求。

**关键词:** 质子交换膜燃料电池; 空气子系统; 协调控制; 双回路 PI 控制

中图分类号: U473.4; TM911

文献标志码: A

## Coordinated Control of Flow Rate and Pressure Based on an Experiment in a 120 kW Fuel Cell Air System

**Abstract:** The flow rate and back-pressure of the air supply system in the high-power proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) are regulated by adjusting the speed of the air compressor and the angle of the solenoid valve, respectively. Due to the nonlinearity and coupling of the multivariable system, the control method and control parameters of the fuel cell system are complicated. For this reason, a strategy combining feedforward and double loop PI is designed to control the flow rate and back-pressure. The speed of the compressor and the angle of the back-pressure valve are matched by calibrating the feedforward table and PI parameters. The

results show that the flow rate and back-pressure follow the set value, the flow error is within 1.5 g/s, and the pressure error is within 0.25 kPa. The proposed strategy can coordinately control the airflow rate and back-pressure, and meets the requirements of PEMFC.

**Key words:** proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); air supply system; coordinated control; double loop PI control

目前, 大功率燃料电池系统阴阳极普遍采用高压气体进行供气。其中, 阳极所需氢气是通过高压储氢瓶提供, 瓶中高压氢气经过减压阀后由比例阀控制提供给电堆的压力, 而阴极流量和压力则是通过调节空压机转速和背压阀开度来控制。高压供气可以提高燃料电池的输出性能和缩小系统尺寸, 但会增加空压机系统额外耗功, 且阴阳极压差控制不当还可能会造成电堆膜电极的损坏, 损伤电堆性能<sup>[1]</sup>。燃料电池空气系统压力控制方法有前馈控制、反馈控制、线性二次最优控制(LQR)、神经网络及预测控制等<sup>[2-4]</sup>。但是, 多变量耦合的大功率质子交换膜燃料电池空气子系统的数学模型难以精确建立, 且基于理想模型得到的控制策略往往比较复杂, 精度难以保证, 控制效果甚至可能更坏<sup>[5]</sup>。基于 Lancaster 结构的二阶系统解耦变换的求解和分析主流算法是采用保结构同谱流, 但是在实际工程应用中难以实现。系统的模型参数或结构在受到干扰影响时, 可能会存在严重的不确定性, 参数变化过大时, 导致控制效果变差, 系统的性能甚至无法满足要求<sup>[6]</sup>。Al-Durra 等人为验证空气流量和压力的协调控制技术, 采用了基于多变量线性二次调节器的仿真研究方法<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2021-10-10

基金项目: 中国国家自然科学基金(21776221)

第一作者: 张白桃(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为车用燃料电池空气供给控制系统。E-mail: zhangbaitao1710@163.com

通信作者: 许思传(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为车用燃料电池发动机系统集成与控制。E-mail: scxu@tongji.edu.cn

由于PID控制的明显优势,常规工业控制过程大多采用PID控制回路,但是对于复杂的、非线性的和时滞的系统,简单PID控制效果不好,因此需要结合其它算法来进行控制。将内模解耦方法应用在高压燃料电池系统中,对空气供应系统的动态特性进行了辨识,能够在系统模型失配的情况下仍保持较好的鲁棒性<sup>[8]</sup>。采用开环和闭环控制试验对高压大功率燃料电池系统进气压力进行了研究,单入单出PID算法控制压力效果不理想,提出采用两种方式结合或者更加优化的方法来控制供气系统,使得在不同工况下能够提高控制精度<sup>[9]</sup>。

前馈控制使被控量能够快速到达设定值附近,PI控制可以消除稳态误差,本文采用前馈控制与双回路PI控制相结合的策略来调节燃料电池空气子系统进气的流量和压力。具体是在试验过程中,首先针对本120 kW燃料电池系统台架使用的空压机和背压阀找出它们的工作性能特性。根据采购的已知电堆不同工况下最佳工作条件对阴极供气流量和压力的要求,标定此条件下对应的空压机转速和背压阀开度的前馈表,得到控制空气子系统两个执行器所需的前馈表参数。然后分别标定流量回路和压力回路的PI参数以得到空气子系统所有控制参数,该控制方法涉及的参数少。试验结果表明,采用前馈与双回路PI协调控制策略和试验法确定控制参数可以实现空气子系统流量压力协调控制,满足燃料电池空气供气要求。

## 1 试验台架

实验室搭建了120 kW燃料电池空气供气系统,用于研究所选用空压机和背压阀组成的空气子系统的供气特性。空气子系统零部件按照空气的流向依次是空气滤清器,空压机,中冷器,模拟电堆,背压阀,以及连接这些部件的管路,还包括测量气体参数的温度压力流量传感器和控制器,给空压机电机和空气冷却所使用的冷却管路,水泵,散热风扇等。试验台架为单独的空气子系统测试台架,采用了一个与电堆阴极空腔体积相同的模拟罐替代电堆,在模拟罐侧面有排气口,装有流量控制器,模拟电堆用以单独调试供气子系统时模拟空气流经阴极的气体流动特性和气体消耗量。燃料电池空气子系统原理图如图1所示。

同时,实验室还进行了120 kW燃料电池系统的集成设计,其中空气子系统采用的是前述空气系统

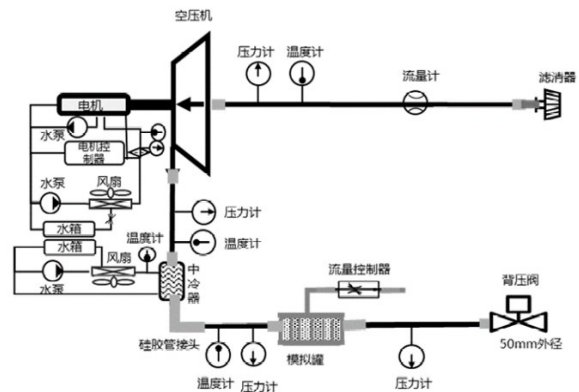


图1 120 kW燃料电池空气子系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of air supply subsystem of 120 kW fuel cell system

台架上的供气零部件,电堆模拟罐替换为真实的电堆。系统其余部分还包括氢气子系统,冷却子系统,测试电堆,电气电控子系统。氢气子系统从15 MPa的氢罐处获得高压氢气,经过安全阀,过滤器减到合适的压力12 bar后,再通过比例阀进行调节以达到电堆反应所需的阳极压力。由于电堆冷却温度和辅助系统部件冷却温度不一致,冷却子系统分为主冷却系统和辅助冷却系统,主冷却系统流经电堆和中冷器,为空气和电堆进行冷却,辅助冷却系统流经DC控制器,空压机电机和控制器,为辅助部件进行冷却。电堆采用的是360片组成的120 kW电堆。燃料电池系统原理图如图2所示。

燃料电池空气系统设定流量值是根据电堆规格书中不同工况所需电流和过氧比进行计算得到,计算公式如下:

$$W_{\text{air}} = \frac{360 \times I \times \lambda_{\text{O}_2}}{4 \times 96485} \times 4.76 \times 29 \quad (1)$$

式中:  $W_{\text{air}}$  是计算得到的空气流量设定值, g/s;  $I$  是电堆不同工况下电流值, A。

## 2 试验台架控制策略及程序实现

搭建的燃料电池试验平台采用Motohawk控制器。该控制器具有快速开发优点,系统所选的各零部件信号类型基于控制器引脚资源类型进行匹配。由于控制器开发模块基于Simulink工具,因此试验台架控制策略采用Matlab软件编程及代码生成。

### 2.1 空气系统控制逻辑

大功率质子交换膜燃料电池空气子系统通过空压机和背压阀来调整进气流量和压力。本文采用前

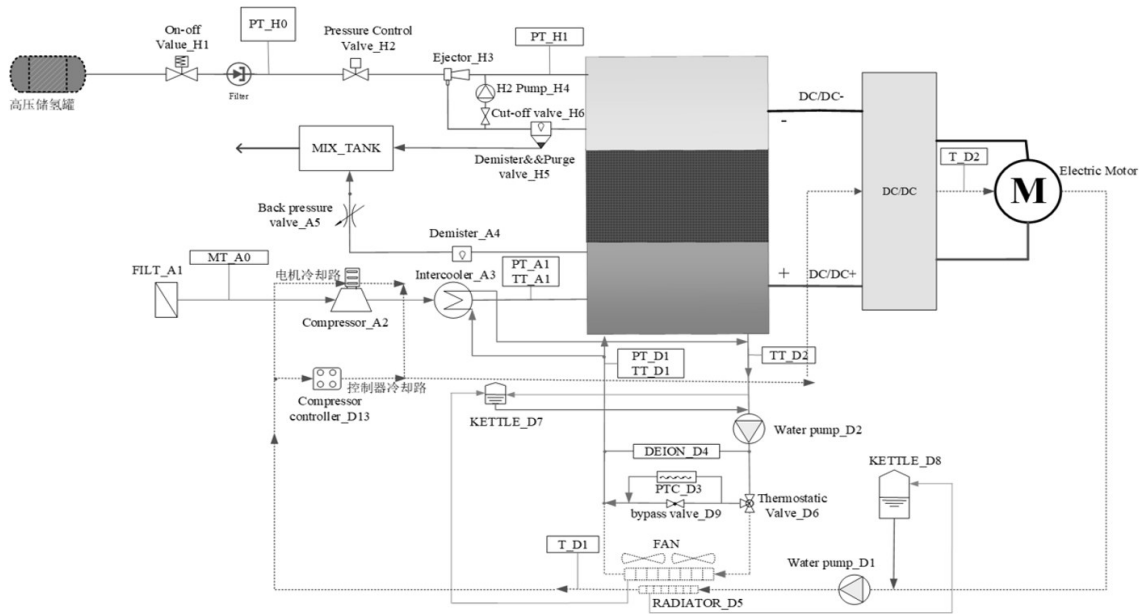


图2 120 kW燃料电池系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of 120 kW fuel cell system

馈控制与双回路PI控制相结合的策略来调节燃料电池空气子系统的进气流量和压力。空气子系统的前馈表是电堆电流—空压机转速表、电堆电流—背压阀开度表,即根据电堆的电流查空压机对应转速和背压阀对应开度,DC采集自身输入电流值并反馈给控制器,得到电堆电流值。PI控制部分则根据不

同工况使用分段控制。根据电堆电流— $K_p$ 表、电堆电流— $K_i$ 表进行控制参数的设定,控制策略框图如图3所示。根据系统运行时电堆操作条件对空气子系统流量和压力的需求在线标定控制参数后,得到空压机转速和背压阀开度的前馈表和PI控制参数。图3中电流指电堆电流值,转速是指空压机转速。

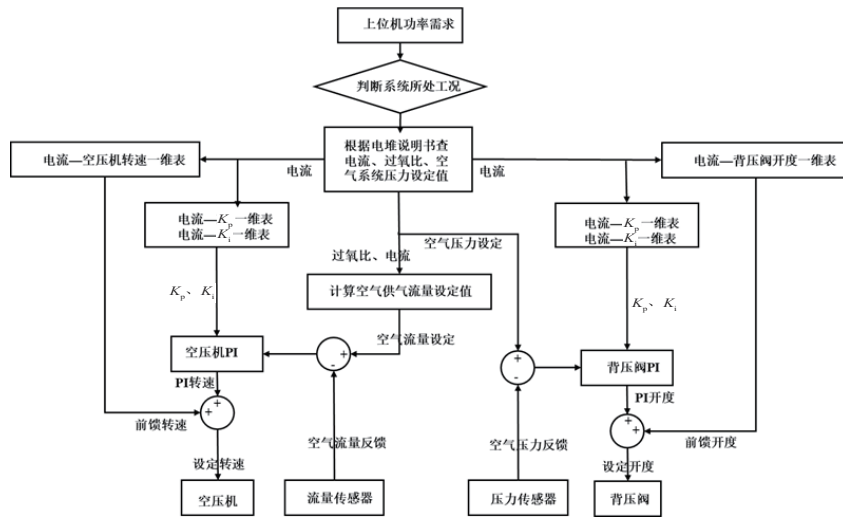


图3 120 kW燃料电池空气子系统控制策略框图

Fig.3 Control strategy diagram of air supply subsystem of 120 kW fuel cell system

### 2.2 软件程序实现

由于单独开发的空气子系统程序在空气子系统试验台架上运行后会移植到燃料电池系统整体程序中,因此把系统整体的运行工况以及工况切换等也在编写空气子系统程序的时候一并考虑。具体做法

是在程序模块在加入空气参数设定量切换的状态机模块,再结合上述的空气系统控制策略,在开发平台上进行编写程序。部分程序代码如图4所示,其中虚线圈出的部分是需要进行标定的控制参数,详见表1。



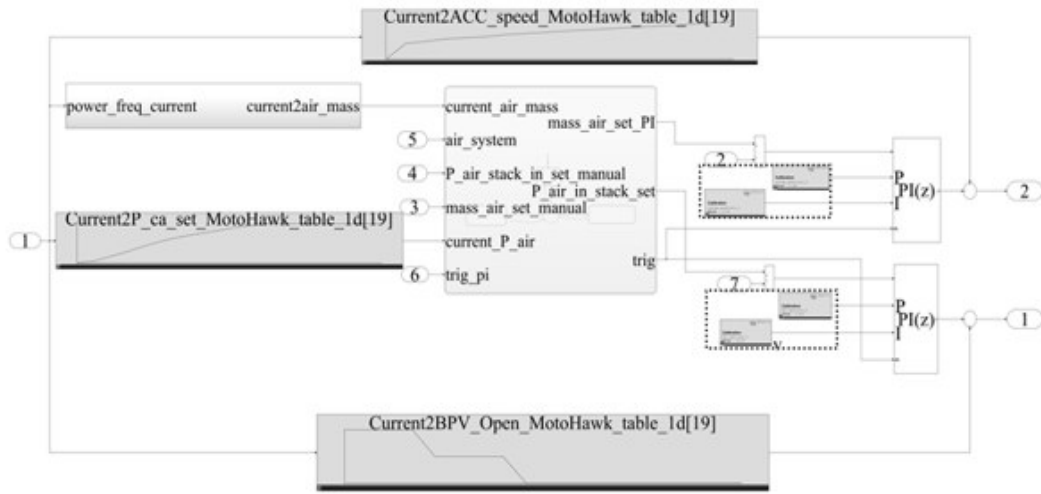


图4 120 kW燃料电池空气子系统部分控制程序

Fig.4 Partial control program code of air supply subsystem of 120 kW fuel cell system

表1 分段PI控制参数

Tab.1 Piecewise PI control parameters

电堆电流/ A	空压机 $K_p$	空压机 $K_i$	背压阀 $K_p$	背压阀 $K_i$
0	4.00	4.0	3.00	15.0
60	4.00	4.0	3.00	15.0
120	3.50	2.5	1.00	15.0
180	1.50	2.5	0.60	15.0
240	1.40	2.0	0.60	10.0
300	1.20	2.0	0.50	10.0
360	1.10	2.0	0.50	13.5
420	0.27	2.0	0.55	11.0
480	0.27	2.0	0.50	9.0
540	0.27	2.0	0.65	10.0
570	0.27	2.0	0.70	12.0

### 3 试验研究

在搭建完成的燃料电池空气子系统上所采用的空压机和背压阀的特性进行试验,以得到空气供应子系统的供气特性。试验过程中单独调节背压阀的开度和空压机的转速,得到燃料电池空气子系统供气参数与空压机和背压阀的对应特性。然后,针对120 kW燃料电池系统所采用的电堆空气子系统操作条件,在120 kW燃料电池系统台架上对空气子系统进行供气控制参数的标定,涉及的试验包括空气供气流量闭环控制试验、压力闭环控制试验和流量压力双回路控制试验。120 kW空气子系统台架和120 kW燃料电池系统台架如图5所示。

#### 3.1 空压机MAP与背压阀开度标定试验

在搭建完成的燃料电池空气子系统上,结合120 kW电堆空气子系统操作条件,进行空压机

MAP和背压阀开度的控制试验。具体是直接对空压机输入设定转速命令和对背压阀输入设定开度(占空比)命令,记录传感器返回的空气子系统压力和流量值,以及此时对应的空压机转速和背压阀开度值。改变空压机转速和背压阀开度,使得传感器返回的流量和压力值接近120 kW电堆空气子系统操作条件,依次记录下每一次标定好的流量、压力、空压机转速和背压阀开度。因为电堆的操作条件中可以通过电流查对应的空气子系统的流量和压力,这样就得到了根据电流查空压机转速和背压阀开度的空气子系统的两个控制前馈表,即电堆电流—空压机转速表、电堆电流—背压阀开度表(见表2)。

#### 3.2 单独流量闭环和压力闭环控制试验

为使空气子系统提供的空气流量和压力能够满足燃料电池系统稳定、长时间的工作,需要对供气的流量和压力进行及时的控制调节。空气子系统的流量和压力具有相互耦合影响特性,空压机具有非线性特点。为避免模型的不准确性带来的控制模型上的误差,直接从试验的角度进行流量和压力回路的单独控制。即利用在120 kW空气子系统台架上试验得到的前馈控制表,即开环的流量和压力控制,再结合根据电流进行分段的PI控制策略,构成两个单独的流量和压力闭环控制回路。两个回路的 $K_p$ 和 $K_i$ 值在单回路试验时进行标定,结果如表1所示。

流量控制回路试验:试验时将背压阀开度固定在68%,将电堆电流值和对应的过氧比代入式(1),计算得到设定的流量值分别为26.2 g/s, 39.5 g/s,

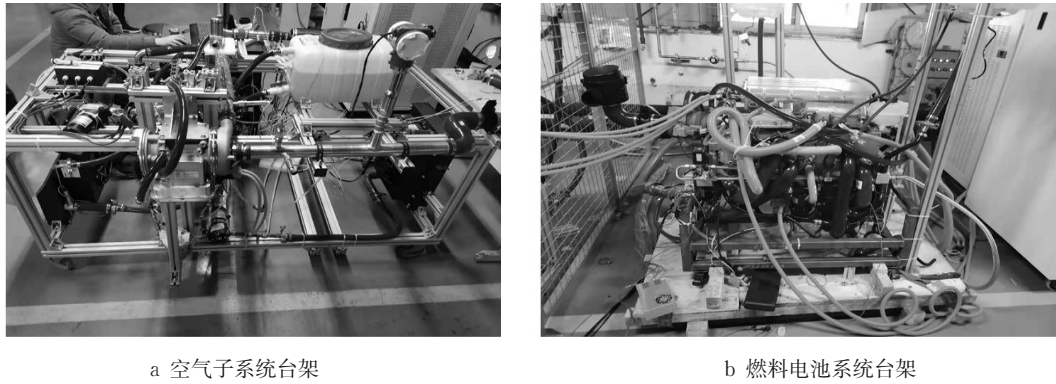


图5 120 kW 空气子系统试验台架和 120 kW 燃料电池系统试验台架

Fig.5 Air supply subsystem bench and fuel cell system bench for 120 kW fuel cell system

表2 电堆电流对应空压机转速和背压阀开度的前馈表  
Tab.2 Feedforward table for speed of air compressor and opening of back pressure valve

电堆电流/A	空压机转速/(kr/min)	背压阀开度/%
0	0	30
60	45.0	30
120	61.5	34
180	69.0	35
240	73.0	40
300	75.0	45
360	79.0	45
420	82.0	50
480	85.5	57
540	88.0	65
570	90.0	65

61.3 g/s。实验结果如图 6 所示,从图中可以看出,压力随着流量的变化值比较大,压力与流量耦合度高,但是流量跟随设定流量值变化,流量误差控制在 1.5 g/s 以内。

压力控制回路试验:试验时将空压机转速固定在 69 kr/min。压力设定值是根据电堆规格书电流查表,压力设定值分别为 189.1 kPa, 191.3 kPa, 192.8 kPa。试验结果如图 7 所示,从图中可以看出,流量随着压力的变化值比较大,压力与流量耦合度高,但是压力跟随设定压力值变化,压力误差控制在 0.25 kPa 以内。

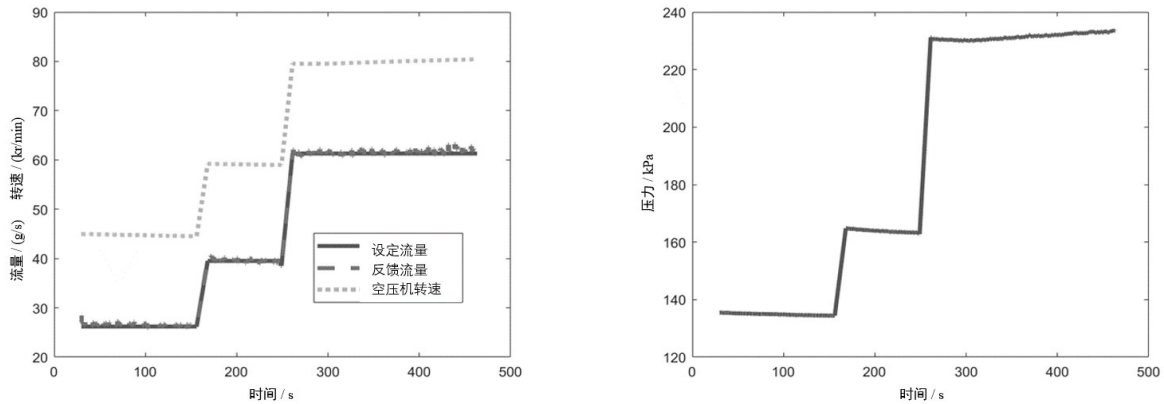


图6 空气子系统流量单独控制时流量和压力实验结果

Fig.6 Experimental results of flow and pressure when the flow of air supply subsystem is controlled separately

### 3.3 流量压力双回路控制试验

燃料电池系统在不同工况工作时需要对空气子系统提供的流量和压力进行及时的控制调节,从而满足不同工况下的电堆用气需求,而且及时、稳定的供气有利于延长电堆的使用寿命和稳定发挥系统性能。从单独压力和流量回路的试验中也可以知道:固定开度时空压机转速的改变使得流量和压力朝同

一趋势变化,固定空压机转速时背压阀开度的改变则使压力流量朝相反趋势变化,符合离心式压缩机的工作特性。在 120 kW 空气子系统台架上试验已经得到前馈控制表,即开环的流量和压力控制,以及在 120 kW 燃料电池系统台架上实验已经得到根据电流进行分段的 PI 控制参数,结合二者可以得到采用前馈控制与双回路 PI 控制相结合的流量压力控

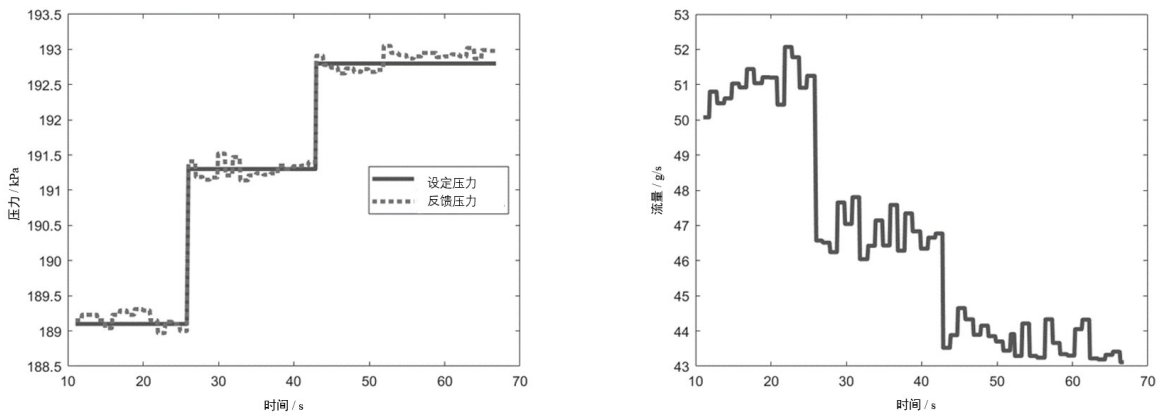


图7 空气子系统压力单独控制时流量和压力实验结果

Fig.7 Experimental results of flow and pressure when the pressure of air supply subsystem is controlled separately

制参数。在 120 kW 燃料电池系统台架上进行实验, 根据电流值和对应的过氧比带入前文提到的流量计算公式中计算得到设定的流量值。当流量设定值分别为 70.8 g/s, 76.5 g/s, 83.6 g/s。设定空气压力值

为 250 kPa 时, 得到的实验结果如图 8 所示。由图 8 可看出, 流量跟随设定流量值变化, 误差在 1.5 g/s 以内, 压力随着设定流量的变化稳定在压力设定值 ( $250 \pm 1$ ) kPa, 压力与流量均能稳定跟随设定值。

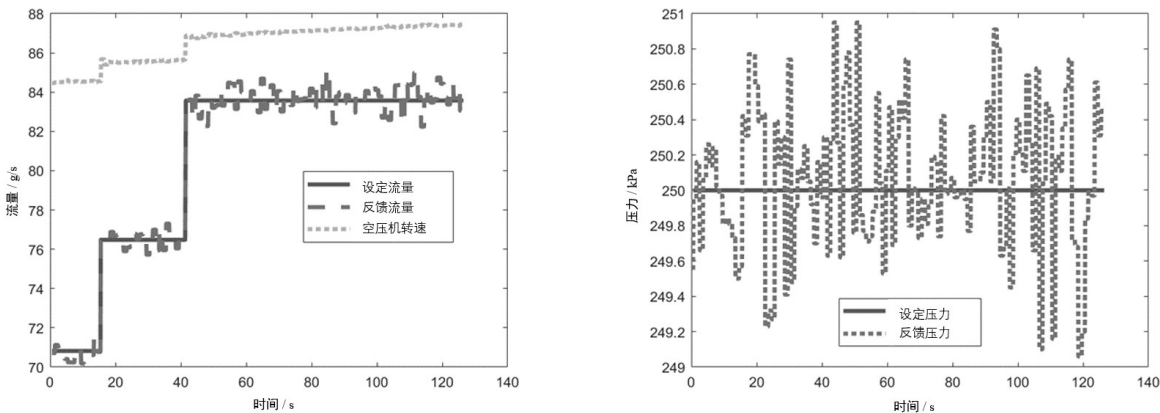


图8 空气子系统流量压力双回路控制时流量和压力实验结果

Fig.8 Experimental results of flow and pressure when double loop PI is adopted to control the flow rate and back-pressure

### 4 结语

本文采用前馈控制与双回路PI控制相结合的策略来调节燃料电池空气系统进气的流量和压力。该控制方法涉及的参数少, 在试验过程中, 根据 120 kW 电堆操作条件对空气子系统流量和压力的需求在线标定控制参数, 得到空压机转速和背压阀开度的前馈表和PI参数。采用前馈与双回路PI协调控制策略, 空气子系统实际流量与设定流量误差在 1.5 g/s 以内, 实际压力与设定压力误差在 0.25 kPa 以内, 压力与流量均能跟随设定值稳定变化。该协调控制策略和控制参数确定方法可以实现空气子系

统流量压力解耦控制, 满足燃料电池空气供气要求。

### 参考文献:

- [1] MA T, LIN W, YANG Y, *et al.* Study on air pressure-flow decoupling control in fuel cell system based on feedforward algorithm[C]// New Energy & Intelligent Connected Vehicle Technology Conference. 2019. DOI:10.4271/2019-01-5042.
- [2] ALMEIDA P, SIMOES M. Neural optimal control of PEM fuel cells with parametric CMAC networks[J]. Industry Applications, 2005, 41(1): 237. DOI: 10.1109/TIA.2004.836135.
- [3] MATRAJI I, LAGHROUCHE S, WACK M. Pressure control in a PEM fuel cell via second order sliding mode[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37: 16104.

- DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.007.
- [4] NA W K, BEI G. Feedback-linearization-based nonlinear control for PEM fuel cells[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23: 179. DOI: 10.1109/TEC.2007.914160.
- [5] 徐芳芳. 基于粒子群的预测函数解耦控制方法的研究及应用[D]. 沈阳:东北大学, 2009.
- XU Fangfang. The research and practice upon predictive function decoupling control based on the particle swarm optimization. [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [6] 沈继红, 匡林林, 王淑娟. 基于谱信息的二阶系统解耦研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 587.
- SHEN Jihong, KUANG Linlin, WANG Shujuan. Research on decoupled of quadratic systems based on eigenvalues data [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences), 2011, 27(4): 587.
- [7] AL-DURRA A, YURKOVICH S, GUEZENNEC Y. Study of nonlinear control schemes for an automotive traction PEM fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(20):11291.
- [8] 陈凤祥, 陈兴. 燃料电池系统空气供应内模解耦控制器设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 1924.
- CHEN Fengxiang, CHEN Xing. Internal model decoupling controller design for high pressure PEMFC air supply system [J]. Journal of Tongji University (Natural Sciences), 2016, 44(12): 1924.
- [9] 孙业祺, 许思传, 倪淮生, 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 study on intake pressure control of high pressure fuel cell engine [J]. Vehicle Enging, 2008(5): 22.