

## 旁通阀结构对燃料电池系统阴极压力控制效果的分析

周雅夫<sup>1,2</sup>, 吕浩然<sup>1,2</sup>, 胡宾飞<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学 汽车工程学院, 辽宁, 大连 116024;  
2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁, 大连 116024)

**摘要:** 为减小压力波动对燃料电池寿命的不利影响, 通过仿真及对比试验, 探究增加旁通阀对阴极供给系统压力波动的改善效果。根据对燃料电池输出特性与各组件工作原理的分析, 建立机理与控制模型; 采用基于自抗扰的反向解耦方法实现流量与压力的解耦控制; 运用模糊PI方法实现压力波动控制。通过Matlab/Simulink仿真验证了解耦方法在该系统结构下的控制效果, 在对比试验中, 压力波动峰值分别为无旁通阀 1.82 kPa 与有旁通阀 1.09 kPa, 旁通阀的增加减小了压力波动, 使阴极流道压力的稳定性得到了更有效的控制, 对提升燃料电池寿命有重要意义。

**关键词:** 旁通阀; 燃料电池; 流量压力解耦控制; 压力波动控制

中图分类号: U469.72; TK91 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.04.09

## Analysis of the Effect of Bypass Valve Structure on Cathode Pressure Control in Fuel Cell Systems

ZHOU Yafu<sup>1,2</sup>, LYU Haoran<sup>1,2</sup>, HU Binfei<sup>1,2</sup>

(1. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;  
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to reduce the adverse effects of pressure fluctuations on the service life of fuel cells, the effectiveness of adding a bypass valve to control pressure fluctuations was investigated through simulation and comparative experiments. Based on the analysis of the fuel cell output characteristics and operating principles of each component, the mechanism and control model were established. An inverted decoupling method based on active disturbance rejection was used to achieve decoupling control of flow and pressure. Pressure fluctuation control was implemented using a fuzzy PI control. The effect of decoupling control within this system structure was verified using the Matlab/Simulink platform. The peak pressure fluctuation in the comparative experiments is 1.09 kPa with the bypass valve and 1.82 kPa without the bypass valve respectively. The addition of a bypass valve can reduce pressure fluctuations, thereby increasing the service life of the fuel cell.

**Keywords:** bypass valve; fuel cell; flow and pressure decoupling control; cathode air pressure fluctuation control

收稿日期: 2023-02-15 改稿日期: 2023-03-31 网络首发日期: 2024-03-28

基金项目: 辽宁省科学技术计划揭榜挂帅项目(2021JH1/10400076)

参考文献引用格式:

周雅夫, 吕浩然, 胡宾飞. 旁通阀结构对燃料电池系统阴极压力控制效果的分析[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(4): 653-660.

ZHOU Yafu, LYU Haoran, HU Binfei. Analysis of the Effect of Bypass Valve Structure on Cathode Pressure Control in Fuel Cell Systems[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(4): 653-660. (in Chinese)



能源是人类社会赖以生存与发展的基石<sup>[1]</sup>，然而化石燃料的不可再生性，以及因广泛使用化石燃料导致的碳排放问题，使各国专家学者与科研人员认识到发展替代能源的重要性<sup>[2]</sup>。氢能因其环保无污染、能量转化效率高等特点成为近年来的研究热点，燃料电池是氢能的一种重要应用形式，然而，高昂的成本与较短的使用寿命制约了其大规模商业化推广的进程<sup>[3]</sup>。

燃料电池空气供给系统的气体流量与压力控制效果是影响燃料电池寿命的两个重要因素。截至目前，国内外科研人员针对不同类型的空气压缩机提出了不同的气体流量控制方法。YANG Duo等<sup>[4]</sup>建立了基于供气系统的七阶非线性模型，该模型具有多状态变量和变量间强耦合的特点，因此又通过模型线性化进行了简化；周苏等<sup>[5]</sup>在前馈补偿解耦闭环控制的基础上增加了自适应查表算法，用于提高空气压缩机转速的调节能力；连静等<sup>[6]</sup>为缓解空气压缩机响应滞后的问题，将模型预测引入对过氧比的控制中。与此同时，国内外科研人员基于传统的阴极空气供给系统结构提出了多种压力控制方法。常九健等<sup>[7]</sup>通过阴阳极压力差联合控制空气压缩机、节气门、喷氢阀等流量元件，稳定了负载大幅突变工况下的氧气供给；YUAN Hao等<sup>[8]</sup>基于模糊扩展状态观测器，设计了车用燃料电池气体供给串联解耦控制器，对阴极气体流量与压力实现解耦控制。

传统的阴极空气供给系统结构与上述方法在气体流量与平均压力的控制方面有良好的效果，但在试验中仍能观察到某些工况下存在较大的瞬时压力波动，而频繁且较大的应力变载将降低质子交换膜的使用寿命。为了进一步提升压力控制的精度，减小压力波动，本文在传统的燃料电池空气供给系统结构中新增了旁通阀，并基于该结构展开了压力控制方法研究。

## 1 燃料电池供给系统结构

图1为新增了旁通阀的燃料电池供给系统整体结构，本文针对阴极空气供给侧展开研究。阴极供给系统负责为燃料电池提供合适流量与压力的空

气。空气经空气压缩机压缩后进入阴极供给管路，此时气体处于高温高压且干燥的状态，无法满足燃料电池工作所需；因此，使用中冷器对空气压缩机送入管路的气体进行冷却，并由加湿器对气体进行加湿后再送入电堆阴极；反应剩余气体经背压系统排到大气。通过阴极入口前新增的旁通阀与其余附件的协同工作，实现对气体压力更加精准的控制。

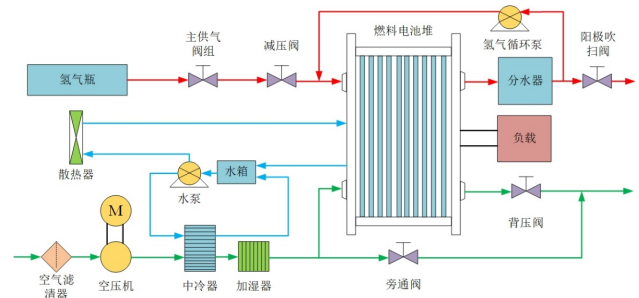


图1 燃料电池供给系统结构

## 2 燃料电池空气供给系统建模

### 2.1 燃料电池建模

燃料电池单体的理论输出电压可由Nernst<sup>[9]</sup>方程表示为：

$$V_{\text{ideal}} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{\text{stack}} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{\text{stack}} [\ln(p_{\text{O}_2}) + \ln(p_{\text{H}_2})] \quad (1)$$

式中： $T_{\text{stack}}$ 为电堆工作温度，一般取353 K； $P_{\text{O}_2}$ 为阴极氧气分压， $P_{\text{H}_2}$ 为阳极氢气分压，均可近似取202.65 kPa。

燃料电池工作过程中，会由于各种损耗产生不可逆的电压降，从而使其输出电压低于理论值。电压损失主要可以归结为以下3部分<sup>[10]</sup>。

1) 活化极化电压损耗 $V_{\text{act}}$ ，即由于在阳极经化学键断裂生成的电子运动到阴极与离子结合形成新化学键的过程中，所需能量造成的损耗。该电压损耗主要来自于阴极侧，可表示为：

$$V_{\text{act}} = \frac{RT_{\text{stack}}}{2\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2)$$

式中： $R$ 为统一气体常数，为8.314 J/(mol·K<sup>-1</sup>)； $\alpha$ 为传输系数，一般取0.5； $F$ 为法拉第常数，为96 485 C/mol； $i$ 为电池单体电流密度； $i_0$ 为交换电流密度，一般取0.1 mA/cm<sup>2</sup>。

2) 欧姆电压损耗 $V_{\text{ohm}}$ ，即由于电子流经导体、

质子在交换膜中运动受到阻力而产生的损耗，表示为：

$$V_{ohm} = i \times R_{ohm} = i \times \int_0^{\delta_{member}} \frac{dz}{\sigma(\lambda(z))} \quad (3)$$

$$\sigma = \begin{cases} (5.139\lambda - 3.26) \times 10^{-3} \times e^{[1268(1/303 - 1/T_{stack})]}, & \lambda > 1 \\ 1.879 \times 10^{-3} \times e^{[1268(1/303 - 1/T_{stack})]}, & \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\delta_{member}$ 为交换膜的厚度； $R_{ohm}$ 为单体的膜电阻，与膜厚度有关<sup>[11]</sup>； $\lambda$ 为膜含水量； $\sigma$ 为膜导电率，与含水量有关<sup>[11]</sup>。

3) 浓差极化电压损耗 $V_{con}$ ，即由于气体反应的不均匀性使电极附近产生反应物浓度梯度进而导致的电压损失，一般出现在高电流密度区，表示为：

$$V_{con} = i \times (c_2 \frac{i}{i_{max}})^{c_3} \quad (5)$$

式中： $c_2$ 与电堆温度及氧气分压均有关<sup>[11]</sup>； $c_3$ 一般取2； $i_{max}$ 一般取2.2。

结合式(1)~(5)，经整理可得到燃料电池单体实际输出电压的表达式。

## 2.2 空气供给系统建模

### 2.2.1 空气压缩机模型

空气压缩机内电机的转动特性可以通过静态电机模型<sup>[12]</sup>描述，如式(6)所示。

$$J_{compressor} \times \frac{d\omega_{compressor}}{dt} = \tau_{comp\_drive} - \tau_{comp\_load} \quad (6)$$

式中： $J_{compressor}$ 为电机的转动惯量，可近似取 $5 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$ ； $\omega_{compressor}$ 为角速度； $\tau_{comp\_drive}$ 为驱动转矩， $\tau_{comp\_load}$ 为负载转矩。

空气压缩机的电机驱动转矩可以表示为：

$$\tau_{comp\_drive} = \eta_{compressor} \times \frac{k_t}{R_{armature}} \times (v_{compressor} - k_v \times \omega_{compressor}) \quad (7)$$

式中： $\eta_{compressor}$ 为电机效率，取95%； $k_t$ 为电机转矩灵敏度，取0.015 Nm/A； $k_v$ 为反电动势常数，取0.015 V/(rad/s)； $R_{armature}$ 为电机电枢电阻，取1.0  $\Omega$ ； $v_{compressor}$ 为电机工作电压。

建模过程中，空气被近似视为理想气体。因此，在大气环境下被绝热压缩的过程中，空气压缩机所做的功为：

$$Q_{air\_comp} = c_{p\_air} \times T_{atm} \times \left[ \left( \frac{P_{sm}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (8)$$

式中： $c_{p\_air}$ 为空气定压比热容，取1.003 kJ/(kg/K<sup>-1</sup>)； $T_{atm}$ 为大气环境温度，为298.15 K； $P_{sm}$ 为空气压缩机出口压力； $P_{atm}$ 为大气环境压力，为101.325 kPa； $\gamma$ 为固定压比下的气体比热系数，为1.4。

空气压缩机的负载主要为气体压缩组件，根据热力学原理，可以得到空气压缩机负载转矩的表达式为：

$$\tau_{comp\_load} = \frac{W_{air} \times Q_{air\_comp}}{\eta_{compressor} \times \omega_{compressor}} = \frac{W_{air} \times c_{p\_air} \times T_{atm} \times \left[ \left( \frac{P_{sm}}{P_{atm}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]}{\eta_{compressor} \times \omega_{compressor}} \quad (9)$$

式中： $W_{air}$ 为空气压缩机出口气体流量。

### 2.2.2 气体管路模型

根据质量守恒定律，进入管路的气体质量流量与离开管路的气体质量流量之间满足如式(10)所示的关系。

$$\frac{dm_{pipeline\_air}}{dt} = W_{pipeline\_in} - W_{pipeline\_out} \quad (10)$$

式中： $m_{pipeline\_air}$ 为管路中的气体质量； $W_{pipeline\_in}$ 为进入管路的流量； $W_{pipeline\_out}$ 为流出管路的流量。

管路内气体压力与温度之间的关系为：

$$\frac{dp_{pipeline\_air}}{dt} = \frac{\gamma \times R_a}{V_{pipeline}} \times (W_{pipeline\_in} \times T_{pipeline\_in} - W_{pipeline\_out} \times T_{atm}) \quad (11)$$

$$T_{pipeline\_in} = T_{atm} + \frac{T_{atm}}{\eta_{compressor}} \left[ \left( \frac{P_{pipeline\_air}}{P_{atm}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (12)$$

式中： $R_a$ 为空气常数，为286.9 J/(kg/K<sup>-1</sup>)； $V_{pipeline}$ 为管路总体积； $T_{pipeline\_in}$ 为气体离开空气压缩机进入管路时的温度。

管路与阴极流道之间的压力差很小，气体始终处于亚临界状态，因此，流量可由喷嘴方程表示为：

$$W_{pipeline\_out} = k_{pipeline\_air} \times (p_{pipeline\_air} - p_{cathod\_in}) \quad (13)$$

式中： $k_{pipeline\_air}$ 为管路传输系数，取 $0.362 \times 10^{-5} \text{ kg/(s/Pa}^{-1})$ 。

### 2.2.3 节气门模型

节气门出口处气体压力为：

$$\frac{dp_{exhaust}}{dt} = \frac{R_a \times T_{atm}}{V_{exhaust}} \times (W_{cathod\_out} - W_{exhaust}) \quad (14)$$

式中： $V_{exhaust}$ 为排气管路体积； $W_{exhaust}$ 为排出系统的气体质量流量。

临界压比定义为:

$$\phi_{\text{edge}} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)} \quad (15)$$

因本研究的燃料电池属于中低压系统, 节气门出口处压力即为大气压, 因此, 可通过喷嘴方程对节气门开度变化导致流量变化进行描述, 如式(16)所示。

$$W_{\text{exhaust}} = \frac{C_D \times A_{\text{ETC}} \times p_{\text{exhaust}}}{\sqrt{R_a \times T_{\text{atm}}}} \times \left( \frac{p_{\text{atm}}}{p_{\text{exhaust}}} \right)^{1/\gamma} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \times \left[ 1 - \left( \frac{p_{\text{atm}}}{p_{\text{exhaust}}} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (16)$$

式中:  $C_D$  为节气门排气系数, 取 0.013;  $A_{\text{ETC}}$  为节气门开口面积。

节气门开度可以表示为:

$$\theta_{\text{ETC}} = \frac{A_{\text{ETC}}}{\pi \times r_{\text{ETC}}^2} \times 90 \quad (17)$$

式中:  $r_{\text{ETC}}$  为节气门的阀片半径, 经测量为 22.5 mm。

根据上述内容, 在 Matlab/Simulink 中建立如图 2 所示的燃料电池及空气供给系统模型。在对系统模型进行合理简化、聚焦控制系统的输入输出后, 可得到空气供给系统控制模型。

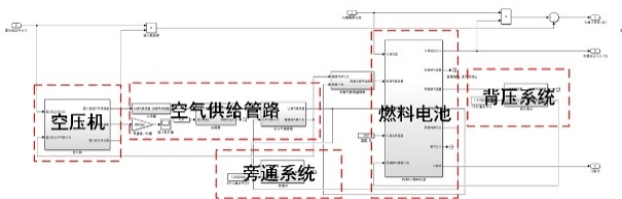


图 2 燃料电池及空气供给系统模型

### 3 阴极压力控制方法

#### 3.1 过氧比控制

本文着重针对燃料电池阴极压力控制进行研究, 然而, 合适的气体流量是电堆进行电化学反应的前提与必要条件, 因此, 需要首先满足电堆的流量条件。过氧比定义为阴极供给的氧气质量流量  $W_{\text{O}_2, \text{in}}$  与反应消耗流量  $W_{\text{O}_2, \text{react}}$  之比, 如式(18)所示。

$$\lambda = \frac{W_{\text{O}_2, \text{in}}}{W_{\text{O}_2, \text{react}}} \quad (18)$$

过氧比反映了燃料电池阴极的氧气流量供给情况, 是衡量系统性能的重要参数之一。当过氧比小于 1 时, 电堆会出现“氧饥饿”现象, 此时电堆输出电压降低, 严重时甚至会烧毁质子交换膜<sup>[13]</sup>; 若过氧比过大, 空气压缩机消耗的功率将会增加, 此时负载功率不变, 将导致系统的净功率减小。试验表明, 不同输出电流条件下, 系统净功率最大时对应的过氧比集中在 2~2.5<sup>[14]</sup>, 本节选定 2.0 为控制目标。

PI 控制是一种基于误差的控制方法, 在 PI 控制器的作用下, 误差经过比例与积分调节, 将这两种调节的和作为控制信号输出到被控对象, 其控制器的数学方程为:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (19)$$

式中:  $K_p$  为可调比例系数;  $T_i$  为可调积分时间常数。

本节所设计的过氧比控制器结构如图 3 所示。该控制器以过氧比期望值与由燃料电池系统反馈的过氧比实际值之间的差值作为输入, 以气体流量期望值作为输出, 传递给由 3.2 节所建立的流量压力解耦控制器, 调节空气压缩机转速, 进而改变阴极的过氧比。

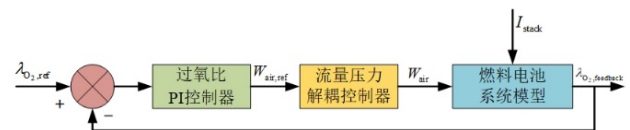


图 3 过氧比 PI 控制器结构

#### 3.2 流量压力联合控制

燃料电池空气供给系统的控制输入是空气压缩机转速与背压阀开度, 控制输出是阴极通道内的气体流量与压力, 该系统是典型的二输入二输出系统, 系统输入、输出与传递函数之间的关系为:

$$Y(s) = G_p(s)U(s) \quad (20)$$

其中, 传递函数  $G_p(s)$  的矩阵表达式为:

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{p11}(s) & G_{p12}(s) \\ G_{p21}(s) & G_{p22}(s) \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(21)中既有代表主回路的传递函数  $G_{p11}(s)$ , 又有代表回路间的传递函数  $G_{p12}(s)$ , 因此, 回路间存在耦合作用。由于该系统为非线性系统, 如果

单独使用反向解耦器<sup>[15]</sup>对空气供给系统进行解耦，则传递函数存在的误差对解耦效果有较大的影响。为了抑制干扰、补偿误差，本节采用基于线性自抗扰的反向解耦控制方法。

反向解耦器矩阵为：

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{P12}(s)}{G_{P11}(s)} \\ -\frac{G_{P21}(s)}{G_{P22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

空气供给系统的控制变量矩阵可以表示为：

$$u(s) = [\omega_{compressor}, \theta_{BPV}]^T \quad (23)$$

式中： $\omega_{compressor}$ 为空气压缩机转速； $\theta_{BPV}$ 为背压阀开度。

可以将空气供给控制系统表示为如下形式：

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = b_1 u_1 + f_1, \\ \dot{y}_2 = b_2 u_2 + f_2. \end{cases} \quad (24)$$

式中： $u_1$ 、 $u_2$ 为控制变量矩阵； $f_1$ 、 $f_2$ 为系统内部与外部的总扰动； $y_1$ 、 $y_2$ 为系统的状态变量。

建立可用于观测式(24)系统所受内部扰动与外部扰动的线性扩张状态观测器LESO，如式(25)所示。

$$\begin{cases} \dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times z + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} \times u + \\ \begin{bmatrix} 3\omega_o \\ 3\omega_o^2 \\ \omega_o^3 \end{bmatrix} (y - [1 \ 0 \ 0]z), \\ \hat{y} = [1 \ 0 \ 0]z. \end{cases} \quad (25)$$

式中： $z$ 为系统状态的观测量； $\omega_o$ 为观测器带宽，取120。

按照“基于误差消除误差”的原则，建立可用于式(24)系统误差控制的线性状态误差反馈控制率LSEF，如式(26)所示。

$$u_0 = \omega_c^2 \times (y_{ref} - z_1) - 2\omega_c \times z_2 \quad (26)$$

式中： $y_{ref}$ 为被控量期望值； $\omega_c$ 为控制器带宽，取30。

此时再使用式(22)所表示的反向解耦器即可使系统的传递函数变为：

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{p11}(s) & 0 \\ 0 & G_{p22}(s) \end{bmatrix} \quad (27)$$

于是供给系统的气体流量与压力仅分别受到空

气压缩机转速与背压阀开度的控制，本节所设计的流量压力解耦控制器结构如图4所示。

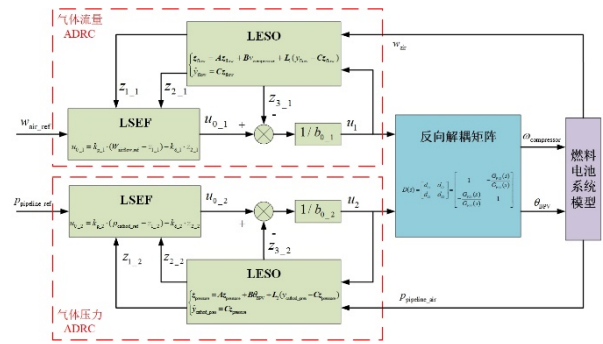


图4 流量压力联合控制器结构

### 3.3 压力波动控制

通过3.2节设计的控制器，空气供给系统初步实现了解耦控制，且在系统实际运行过程中，供给管路内的平均压力基本可以维持稳定。但在某些工况下，仍能观察到较大的瞬时压力波动现象，主要由叶轮与扩压器叶片的相互作用使离心式空气压缩机内的气体压缩过程不连续所致<sup>[16]</sup>。本节在图1所示的系统结构中，运用模糊PI方法对旁通阀进行闭环控制，以减小管路内压力的瞬时波动，为电堆提供一个更加稳定的工作环境。

模糊控制是一种以模糊集理论、模糊语言变量与模糊逻辑推理为基础的智能控制方法。管路内实时气体压力与目标压力之间的偏差 $E$ 与偏差变化率 $E_c$ 作为模糊PI控制器的输入，考虑到仿真步长及后续台架试验所用单片机的运算能力后，将 $E$ 的量化域设置为 $[-3, 3]$ ，同时将该量化域划分为3个量化等级，即 $E = \{\text{负}, \text{零}, \text{正}\} = \{N, Z, P\}$ ；由于偏差变化率的绝对值较小，所以将 $E_c$ 的量化域设置为 $[-1, 1]$ ，同时为了便于计算，也划分为3个量化等级，即 $E_c = \{\text{负}, \text{零}, \text{正}\} = \{N, Z, P\}$ ；为了提高模糊集的灵敏度， $E$ 与 $E_c$ 均采用三角形隶属度函数。PI参数中的 $\Delta k_p$ 与 $\Delta k_i$ 的量化域均设置为 $[-3, 3]$ ，在各自的量化域中，也划分出3个量化等级，同样采用三角形隶属函数。

模糊整定规则见表1。若 $E$ 为 $N$ 时，代表发生了超调，此时 $\Delta k_p$ 取 $N$ ；当 $E$ 为 $Z$ 时，若 $E_c$ 为 $N$ ，为了减小超调， $\Delta k_p$ 取 $N$ ；若 $E_c$ 为 $Z$ ，为了减小误差， $\Delta k_p$ 取 $P$ ；若 $E_c$ 为 $P$ ，为了快速减小正向误差， $\Delta k_p$ 取 $P$ 。

表 1 模糊规则表

$\Delta k_p / \Delta k_i$	$E_C$		
	N	Z	P
N	NZ	NZ	NZ
Z	NP	PP	PP
P	PZ	PZ	PZ

完成上述模糊推理后，采用Centroid法进行解模糊，代入式(28)完成PI参数的自整定，驱动节气门电机改变旁通阀开度，从而对阴极气体压力波动进行调节。

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p, \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i. \end{cases} \quad (28)$$

#### 4 仿真及试验结果分析

##### 4.1 仿真结果分析

将表2参数应用于图2所建立的机理模型，将模型输出与图5所示的合作方燃料电池实际输出进行对比，结果如图6所示。模型效果与实际的电堆输出基本吻合。

表 2 某 60 kW 燃料电池参数

参数	值
额定功率/kW	60
有效活化面积/cm <sup>2</sup>	280
电流范围/A	0~250
电压范围/V	200~300

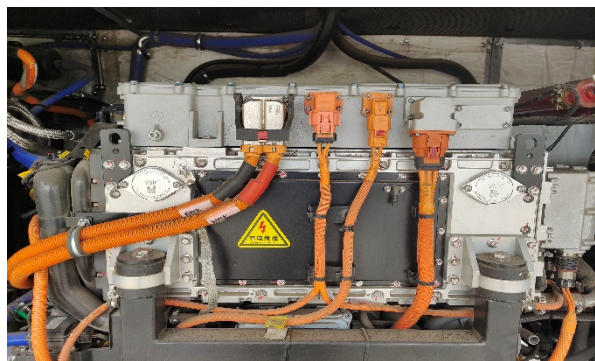


图 5 某 60 kW 燃料电池总成

由于难以模拟系统实际运行过程中的气体压力波动，所以首先通过仿真验证在该系统结构下解耦控制的效果。仿真阶段负载电流如图7所示，模拟了燃料电池从中等负荷阶跃加载至最大功率的工

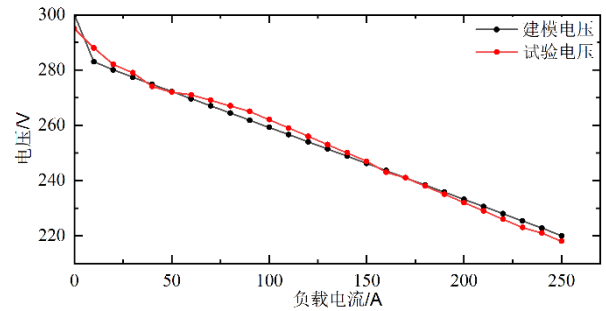


图 6 建模与试验结果对比

况，对控制方法的实时性要求较高。在第11s处因存在剧烈的负载电流阶跃突变，使气体流量出现了3 g/s的控制超调，在2.6 s后达到了平衡。可以看到，气体流量整体可以跟随负载电流的变化做到快速响应。

图8显示了阴极压力的变化曲线。经测量，阴极压力变化的滞后时间小于0.49 s，稳态精度小于0.88 kPa。根据仿真数据，气体流量与压力分别得到了控制，验证了本文提出的控制方法可以在所研究的结构上实现解耦控制。

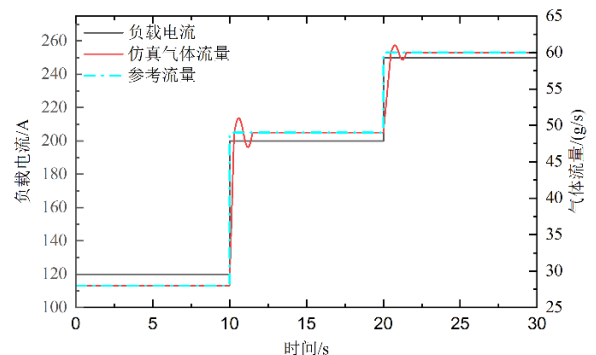


图 7 仿真阶段负载电流及气体流量变化曲线

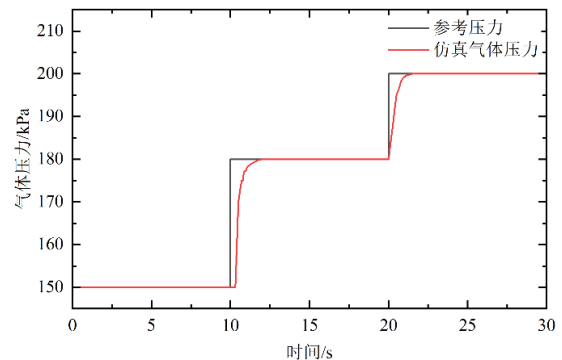


图 8 仿真阶段阴极气体压力变化曲线

##### 4.2 试验结果分析

搭建空气供给系统试验台架，如图9所示，受

限于试验条件，台架中暂用手工风阀模拟燃料电池内部的气阻。在4.1节仿真结果的基础上，将第3章所提出的控制方法经过适当简化与离散化后，应用于该台架，进行有无旁通阀对压力波动控制效果的对比试验。

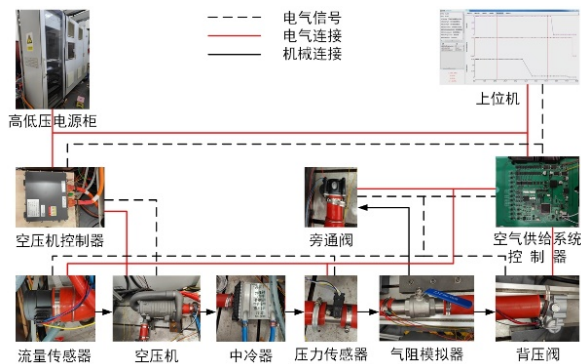


图9 空气供给系统试验台架

试验结果如图10所示，工况为空气压缩机从最低稳定运行转速阶跃上升至燃料电池最大功率所需转速，该工况下压力变化显著，对控制方法的实时性与准确性要求较高。经过测量，无旁通阀结构的系统压力上升共用时5.14 s，有旁通阀结构的系统压力上升共用时5.97 s，这是由于为了避免完全关闭的旁通阀在系统工作过程中突然开启，从而导致管路内压力突变，因此，旁通阀保持有一定的基础开度，该开度可经台架标定得到。经过对系统到达稳态时的数据分析，无旁通阀结构的系统压力波动范围为-1.82~1.76 kPa，有旁通阀结构的系统压力波动范围为-0.91~1.09 kPa。结果显示，旁通阀的增加显著减小了压力波动。

## 5 结论

本文针对旁通阀结构对燃料电池阴极压力控制

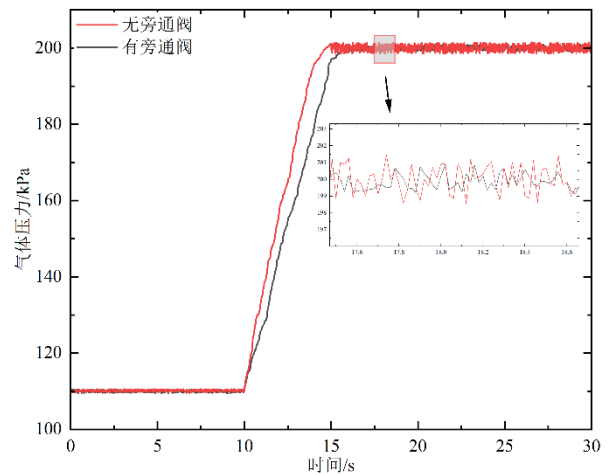


图10 台架试验中无旁通阀压力变化曲线

效果展开了分析。首先从工作原理出发，建立了燃料电池及空气供给系统各组件的机理模型；随后将流量压力联合控制方法应用于该模型，并提出了以旁通阀结构为执行器的压力波动闭环控制方法；最后通过仿真与试验对控制方法在增加了旁通阀的系统结构上的效果进行了验证，结论如下。

1) 基于自抗扰的反向解耦方法应用于增加了旁通阀的空气供给系统中，可分别控制空气压缩机转速与背压阀开度，从而实现流量与压力的解耦控制。

2) 无论空气供给系统中有无旁通阀，管路内气体压力波动均会因电堆负载电流增加带来的进气流量增大而增大。在没有旁通阀结构的系统中，在试验工况下，管路内气体压力波动峰值达1.82 kPa；在增加了旁通阀结构的系统中，相同工况下管路内气体压力波动峰值为1.09 kPa，减小了大约30%。旁通阀的增加使阴极流道压力的稳定性得到了更有效的控制，有助于提高燃料电池的使用寿命。

## 参考文献 (References)

- [1] USMAN M, BALSALOBRE-LORENTE D, JAHANGER A, et al. Pollution Concern During Globalization Mode in Financially Resource-Rich Countries: Do Financial Development, Natural Resources, and Renewable Energy Consumption Matter? [J]. *Renewable Energy*, 2022, 183: 90-102.
- [2] HONG Ling, CHEN Jian, LIU Zhiyang, et al. A Nonlinear Control Strategy for Fuel Delivery in PEM Fuel Cells Considering Nitrogen Permeation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(2): 1565-1576.
- [3] LI Qi, YANG Wenyu, YIN Liangzhen, et al. Real-Time Implementation of Maximum Net Power Strategy Based on Sliding Mode Variable Structure Control for Proton-Exchange Membrane Fuel Cell System [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2020, 6(1): 288-297.

- [4] YANG Duo, PAN Rui, WANG Yujie, et al. Modeling and Control of PEMFC Air Supply System Based on T-S Fuzzy Theory and Predictive Control [J]. Energy, 2019, 188: 116078.
- [5] 周苏, 胡哲, 谢非. 车用质子交换膜燃料电池空气供应系统自适应解耦控制方法研究 [J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 172-177.  
ZHOU Su, HU Zhe, XIE Fei. Study on Adaptive Decoupling Control Method for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Supply System for Base Vehicle [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2): 172-177. (in Chinese)
- [6] 连静, 方思雨, 周雅夫. 基于状态量估计的燃料电池阴极系统控制 [J]. 计算机仿真, 2020, 37(7): 119-122.  
LIAN Jing, FANG Siyu, ZHOU Yafu. Control of Fuel Cell Cathode System Based on State Quantity Estimation [J]. Computer Simulation, 2020, 37(7): 119-122. (in Chinese)
- [7] 常九健, 王晓林, 方建平, 等. 质子交换膜燃料电池阴阳极压力控制策略研究 [J]. 汽车工程, 2021, 43(10): 1466-1471.  
CHANG Jiujian, WANG Xiaolin, FANG Jianping, et al. Study on Control Strategy for Anode and Cathode Pressures in Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(10): 1466-1471. (in Chinese)
- [8] YUAN Hao, DAI Haifeng, MING Pingwen, et al. A Fuzzy Extend State Observer-Based Cascade Decoupling Controller of Air Supply for Vehicular Fuel Cell System [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114080.
- [9] LEE J H, LALK T R, APPLEBY A J. Modeling Electrochemical Performance in Large Scale Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks [J]. Journal of Power Sources, 1998, 70(2): 258-268.
- [10] AMPHLETT J C, BAUMERT R M, MANN R F, et al. Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell [J]. Journal of The Electrochemical Society, 1995, 142(1): 1-8.
- [11] PUKRUSHPAN J T. Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis, and Feedback Design [M]. Cham: Springer, 2004.
- [12] 李奇. 质子交换膜燃料电池系统建模及其控制方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
LI Qi, Research on Modeling and Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [13] LI Qi, CHEN Weirong, LIU Zhixiang, et al. Net Power Control Based on Linear Matrix Inequality for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 1-8.
- [14] 李奇, 杨文钰, 尹良震, 等. 基于最大净功率的 PEMFC 系统过氧比分层控制 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2791-2802.  
LI Qi, YANG Wenyu, YIN Liangzhen, et al. Oxygen Excess Ratio Hierarchical Control of Maximum Net Power of PEMFC System [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2791-2802. (in Chinese)
- [15] GARRIDO J, VÁZQUEZ F, MORILLA F. Inverted Decoupling Internal Model Control for Square Stable Multivariable Time Delay Systems [J]. Journal of Process Control, 2014, 24(11): 1710-1719.
- [16] 李勇, 杨策, 陈山, 等. 离心压气机叶排间涡脱落及气流脉动行为研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(9): 1473-1476.  
LI Yong, YANG Ce, CHEN Shan, et al. Investigation of the Wake Vortex Shedding and the Pulsant Flow Between Rows of a Centrifugal Compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(9): 1473-1476 (in Chinese).

## 作者简介



周雅夫 (1962-), 男, 辽宁大连人, 硕士, 教授, 主要研究方向为新能源整车控制及电机控制。

Tel: 13332231368

E-mail: dlzyf@dlut.edu.cn

## 通信作者



吕浩然 (1995-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为氢燃料电池汽车。

Tel: 15968833451

E-mail: lvhaoran@mail.dlut.edu.cn