

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.05.007

# 基于自抗扰控制的燃料电池供气系统协同控制研究\*

付佩<sup>1</sup>, 张化喜<sup>1</sup>, 蔡旭<sup>2</sup>, 兰子剑<sup>1</sup>, 刘青山<sup>1</sup>, 陈轶嵩<sup>1</sup>

(1. 长安大学汽车学院, 西安 710064; 2. 岚图汽车科技有限公司, 武汉 430056)

**[摘要]** 发展氢燃料电池汽车是我国推进“双碳”战略目标的关键举措之一。质子交换膜燃料电池(PEMFC)发动机系统,作为燃料电池汽车的核心动力源,展现出非线性、强耦合性和时滞性等复杂特性。这些特性使得PEMFC系统在应对汽车加速、爬坡等多变工况下的复杂功率需求时面临诸多挑战,特别是在系统气体供给的精准控制和系统响应的动态调节方面。气体供给的流量和压力对PEMFC的输出性能具有决定性影响,不当的气体供给不仅会降低电堆效率,甚至可能导致电堆损坏或失效,从而严重影响系统的整体性能和使用寿命。因此,优化气体供给系统,实现精准控制,是提升PEMFC系统性能和延长其使用寿命的关键所在。本文从建立PEMFC供气系统模型出发,深入分析氧气过量比、气体压力和气体压差等关键运行参数对于系统输出性能的影响;针对PEMFC系统氧气过量比、阴极压力以及两级气体压差采用非线性自抗扰控制算法(ADRC)进行三者协同控制研究,并将其与比例-积分-微分(PID)控制器进行对比。在PID控制下氧气过量比超调量最大可达1,而在ADRC控制下,氧气过量比超调量仅为0.2左右,达到稳态时间大约在0.1s, PID控制下则在1s左右;PID控制算法下的阴极气体压力在负载电流突变后,超调量在0.08 bar左右且波动较大,在2s内达到稳定值,而在ADRC控制算法下,阴极气体压力能够在0.8s内达到稳定值,且超调量远小于PID控制算法;在PID控制下两级气体压差超调量最大可达到0.15 bar且波动幅度较大,达到稳定时间较长,但在ADRC控制器下能够快速且稳定地达到设定值0.2 bar且波动幅度较小。结果表明,在负载电流和排氢动作等扰动因素下,ADRC控制器具有更好的解耦性、鲁棒性和稳定性。

**关键词:** 燃料电池; 供气系统; PID; 自抗扰控制; 协同控制

## Research on Collaborative Control of Fuel Cell Gas Supply System Based on Auto-disturbance Rejection Control

Fu Pei<sup>1</sup>, Zhang Huaxi<sup>1</sup>, Cai Xu<sup>2</sup>, Lan Zijian<sup>1</sup>, Liu Qingshan<sup>1</sup> & Chen Yisong<sup>1</sup>

1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064; 2. LanTu Automobile Technology Co., Ltd., Wuhan 430056

**[Abstract]** The development of hydrogen fuel cell vehicle is one of the important measures to realize the “Double carbon” strategic goal in our country. As the main power source of fuel cell vehicle, proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system has nonlinear, strong coupling and time-delay characteristics. Those characteristics make PEMFC system have many difficulties when it is faced with complex power demand under various conditions like vehicle acceleration and climbing, especially in terms of precise control of gas supply and dynamic regulation of system response. The flow rate and pressure of gas supply play a decisive role in the output performance of PEMFC. Improper gas supply can lead to low efficiency of the stack and even damage or failure of the stack, and then affect the overall performance and service life of the system. Therefore, accurate gas supply system by optimizing the gas supply system is the key to improve the performance and extend the service life of PEMFC. Based on the establishment of a gas supply system model for PEMFC, in this paper the influence of key operating parameters such as oxygen excess ratio, gas pressure and gas pressure difference on the output performance of the system is ana-

\* 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2021YFE0192900)、国家自然科学基金青年科学基金(52302427, 52306068)和陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0464)资助。

原稿收到日期为2024年09月10日,修改稿收到日期为2024年11月06日。

通信作者:陈轶嵩,教授,博士,E-mail:chenyisong\_1988@163.com。

lyzed. The synergetic control of oxygen excess ratio, cathode pressure and bipolar gas pressure difference in PEMFC system using nonlinear active disturbance rejection control (ADRC) algorithm is researched, which is then compared with those under the proportional integral derivative (PID) controller. Under PID control, the maximum overshoot of the oxygen excess ratio can reach 1, while under ADRC control, the overshoot only around 0.2, and the time to reach steady state is approximately 0.1 seconds, compared to around 1 seconds under PID control. After a sudden change in load current, the overshoot of the cathode gas pressure under the PID control algorithm is around 0.08 with large fluctuations, reaching a stable value within 2 seconds. Under the ADRC control algorithm, the cathode gas pressure can reach stable value within 0.8 seconds, with an overshoot much smaller than the PID control algorithm. Under PID control, the overshoot of the two-stage gas difference can reach up to 0.15 with large fluctuations and longer time to reach stability, but under the ADRC controller, it can quickly and stably reach the set value of 0.2 bar with smaller fluctuations. The results show that the ADRC controller has better decoupling, robustness and stability under the disturbance factors of load current and hydrogen displacement action.

**Keywords: fuel cell; gas supply system; PID; auto-disturbance rejection control; cooperative control**

## 前言

发展氢燃料电池汽车是我国实现“双碳”战略目标的重要路径之一,作为燃料电池汽车的主要动力来源,质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)发动机系统是一个非线性、强耦合、时滞性的复杂系统,这些特性使得PEMFC系统在面临汽车加速、爬坡等多变工况下的复杂功率需求时,存在诸多难点。系统的气体供给流量及压力对于PEMFC的输出性能起着决定性作用,不当的气体供给会导致电堆效率低下,甚至造成电堆损坏或失效,进而影响系统的整体性能和使用寿命。因此,建立能够精确描述PEMFC系统的模型,并设计能够快速响应负载电流变化的控制器是提升PEMFC系统输出性能以及延长使用寿命的关键点。

空气供给系统在车用燃料电池发动机系统中负责提供进行电化学反应所需的氧气,发挥着极其重要的作用。不同功率需求下的氧气供给量以及阴极压力也各不相同,需要对氧气过量比以及阴极气体压力进行有效的控制,从而保障车用燃料电池发动机系统能够安全高效的运行。近年来,国内外学者对于空气质量流量的控制算法进行了诸多研究。Zhang等<sup>[1]</sup>设计了基于二型模糊逻辑的自适应控制器。刘秋秀<sup>[2]</sup>辨识出空气系统的2阶传递函数,并针对该传递函数设计了PI控制器和1阶ADRC控制器用于控制过氧比。徐梓淦<sup>[3]</sup>设计了4阶空气供给系统的MPC控制器。Liu等<sup>[4]</sup>设计了复合前馈PID控

制器。Matraji等<sup>[5]</sup>设计了非线性2阶SMC控制器。Deng等<sup>[6]</sup>基于6阶非线性PEMFC系统,设计了级联自适应SMC控制器。Han等<sup>[7]</sup>设计了一种模型参考自适应控制器。Kim等<sup>[8]</sup>考虑了过氧比控制过程中的约束问题,设计了一种自适应控制器,并采用神经网络逼近器和自适应参数来补偿系统不确定性。Yang等<sup>[9]</sup>设计了基于模糊预测控制器。周苏等<sup>[10]</sup>使用自适应查表算法优化了前馈补偿解耦控制器。

在车用燃料电池发动机系统运行过程中,阴极气体压力同样也影响着燃料电池系统的输出性能以及使用寿命。因此还需要对阴极气体压力进行控制,实现空气流量压力协调控制。Danzer等<sup>[11]</sup>设计了微分平滑控制器,实现了阴极压力和氧气过剩率的多变量控制。Li等<sup>[12]</sup>设计了基于反馈线性化的ADRC控制器。杨朵<sup>[13]</sup>设计了SMC控制器,实现了空气流量和压力的协同控制。王昭懿<sup>[14]</sup>设计了2阶ADRC解耦控制器并采用遗传算法进一步对ADRC控制器参数进行了优化。曾繁勇<sup>[15]</sup>针对多输入多输出的PEMFC空气回路系统,设计了基于扰动观测器的MPC控制器。

车用燃料电池氢气供给系统负责提供燃料电池进行电化学反应的氢气,对于燃料电池系统的输出性能起着至关重要的作用。目前国内外学者针对3种氢气供给形式的系统控制进行了以下研究。Kurnia等<sup>[16]</sup>重点讨论了阳极供气结构对于控制策略的影响。Fan等<sup>[17]</sup>针对PEMFC阳极死端结构系统,设计了基于状态查询的阳极压力控制策略。洪凌<sup>[18]</sup>针对PEMFC氢气回路系统,设计了非线性多输入多输出反馈控制器,以对供气管道压力和阳极含氢

量进行控制。Zhang 等<sup>[19]</sup>针对带有氢气循环泵的阳极死端系统,设计了一种前馈和 PI 的阳极压力控制器。吴智才<sup>[20]</sup>针对 PEMFC 氢气循环系统设计了模糊 PI 控制器。Wang 等<sup>[21]</sup>采用神经网络控制以及预设性能控制分别控制阴极以及过氧比。

由于 PEMFC 系统在运行过程中,电堆阴阳极之间的物质传输在不断发生,导致阴阳极中的物质成分以及压力不断地发生变化,影响着燃料电池电堆的输出性能以及使用寿命,因此须对阴阳气体压差进行控制。目前国内外学者围绕阴阳极气体压力平衡展开了如下研究工作。Bao 等<sup>[22]</sup>针对进气量、阴极气体压力以及阴阳极气体压差等控制目标,设计了基于观测器反馈的线性二次型高斯控制器以及在线的自适应模型预测控制器<sup>[23]</sup>。朱云<sup>[24]</sup>针对存在系统不确定性以及外部扰动的 PEMFC 系统提出了一种多变量自适应最优控制器。周炳杰<sup>[25]</sup>针对阴阳极压力平衡问题,设计了控制效果更好的漏斗控制器。

综上所述,目前国内外学者对于 PEMFC 氢气供给系统控制研究工作大多是对氢气计量比以及阳极气体压力的单独控制研究,对于空气供给系统中的空气流量压力以及两极压力平衡三者协同控制问题研究较少。

因此本文围绕车用燃料电池发动机供气系统建模仿真及控制展开研究,主要内容总结如下:

(1)基于质量守恒定律、能量守恒定律以及理想气体方程等,分析 PEMFC 系统的工作原理,搭建了 PEMFC 气体供给系统模型。

(2)基于所建立的 PEMFC 系统模型,通过 PEMFC 试验测试平台分别对不同气体压力和运行温度条件下的燃料电池极化特性以及功率密度进行了试验验证。

(3)基于仿真分析所得的最佳氧气过量比结果,针对空气供给系统流量控制问题,设计了 PID 控制器,采用了粒子群寻优算法对空气供给系统 PID 控制进行了优化。

(4)基于仿真分析所得的 PEMFC 系统的最佳氧气过量比、阴极气体压力以及阴阳极气体压差结果,针对 PEMFC 气体供给系统设计三者协同控制器。

## 1 燃料电池电堆及供气系统模型

燃料电池气体供给系统由氢气供给系统和空气供给系统两部分组成,氢气供给系统模型主要包括氢气流量比例阀、氢气供给管道以及氢气排气阀等模型,空气供给系统模型主要包括空气压缩机模型、空气供给管道以及空气回流管道。本章主要采用半经验模型的方法,并依据燃料电池发动机系统各部分的结构参数及工作特性,搭建相应的模型,如图 1 所示。

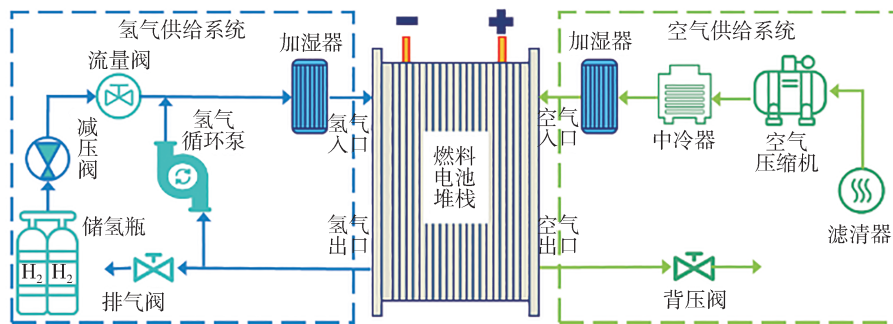


图1 PEMFC 供气系统结构图

### 1.1 燃料电池电堆模型

#### 1.1.1 输出电压模型

燃料电池电堆输出电压主要包括能斯特电动势(即电化学理论开路电压)和活化极化损失、欧姆极化损失以及浓差极化损失等电压损失。燃料电池电堆输出电压如下:

$$U_{\text{out}} = (E_{\text{Nernst}} - U_{\text{act}} - U_{\text{ohmic}} - U_{\text{con}}) \times N_{\text{cell}} \quad (1)$$

式中:  $U_{\text{out}}$  表示电堆实际输出电压(V);  $E_{\text{Nernst}}$  表示能

斯特电动势(V);  $U_{\text{act}}$  表示活化极化电压损失(V);  $U_{\text{ohmic}}$  表示欧姆极化损失(V);  $U_{\text{con}}$  表示浓差极化损失(V);  $N_{\text{cell}}$  表示组成电堆的单体电池片数。

$$E_{\text{Nernst}} = -\frac{\Delta g^0 + \Delta S(T_{\text{fc}} - T_0)}{2F} + \frac{RT_{\text{fc}}}{2F} \left( \frac{\ln p_{\text{O}_2}}{2} + \ln p_{\text{H}_2} \right) \quad (2)$$

式中:  $\Delta g^0$  表示标准条件下的吉布斯自由能变化量(J/mol);  $\Delta S$  表示反应物熵的变化量(J/(mol·K)),由

于反应过程中会保持燃料电池电堆的温度处于期望温度,故熵变可以近似为常数; $T_{fc}$ 表示工作温度(K); $T_0$ 表示标准状态下的温度(K); $F$ 表示法拉第常数(C/mol); $R$ 表示通用气体常数(J/(mol·K)); $p_{O_2}$ 和 $p_{H_2}$ 分别表示参与电化学反应气体中的氧气和氢气分压力(bar)。

Tafel由下式计算<sup>[26]</sup>:

$$U_{act} = U_0 + U_a(1 - e^{-c_0 i}) \quad (3)$$

式中: $U_0$ 表示燃料电池电流密度为0时的压降(V); $U_a$ 为常数(V); $c_0$ 为常数,取10。

$$U_0 = 0.279 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{fc} - T_0) + 4.308 \times 10^{-5} \times T_{fc} \left[ \ln\left(\frac{P_{ca} - P_{sat}}{1.01325}\right) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{0.1173(p_{ca} - p_{sat})}{1.01325}\right) \right] \quad (4)$$

$$U_a = 0.5736 - 5.8 \times 10^{-4} T_{fc} + (1.8 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.166) \times \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}\right) + (1.618 \times 10^{-2} - 1.618 \times 10^{-4} T_{fc}) \times \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}\right)^2 \quad (5)$$

$$\lg p_{sat} = 5.07406 - \left(\frac{1657.46}{T_{fc} - 273.15 + 227.02}\right) \quad (6)$$

在燃料电池中,欧姆极化损失主要包括两种:一种是质子以水合氢离子的形式穿过流道时形成的电压损失,另一种是电子穿过流道时形成的电压损失。由欧姆定律可得欧姆极化损失如下:

$$U_{ohmic} = R_{ohmic} \cdot I = (R_M + R_C) \cdot I \quad (7)$$

式中: $R_{ohmic}$ 表示燃料电池单体的欧姆电阻( $\Omega$ ); $R_M$ 和 $R_C$ 分别表示质子交换膜的等效膜阻抗( $\Omega$ )和电子转移过程中的电阻( $\Omega$ ); $I$ 表示燃料电池电堆负载电流(A)。

质子交换膜等效膜阻抗和质子交换膜电阻率可由下式计算:

$$\begin{cases} R_M = \frac{\rho_m t_m}{A} \\ \rho_m = \frac{181.6 \times [1 + 0.03 \cdot \frac{I}{A} + 0.062 \cdot (\frac{T_{fc}}{303})^2 \cdot (\frac{I}{A})^{2.5}]}{(\lambda_m - 0.634 - 3 \cdot \frac{I}{A}) \exp(4.18 \cdot \frac{T - 303}{T})} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\rho_m$ 表示质子交换膜的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ ); $t_m$ 表示质子交换膜的厚度(cm); $A$ 表示质子交换膜的有效面积( $\text{cm}^2$ ); $\lambda_m$ 表示质子交换膜含水量,是阴极含水量和阳极含水量的平均值。

浓差极化电压损失可由下式计算:

$$U_{con} = \frac{RT_{st}}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_{max}}\right) \quad (9)$$

式中 $i_{max}$ 表示电堆的最大电流密度(A/ $\text{cm}^2$ )。

### 1.1.2 阴极流道模型

阴极流道中主要包含了氮气、水和氧气3种成分,质量状态变化关系可由下式表示:

$$\begin{cases} \frac{dm_{O_2,ca}}{dt} = W_{O_2,ca,in} - W_{O_2,ca,rec} - W_{O_2,ca,out} \\ \frac{dm_{N_2,ca}}{dt} = W_{N_2,ca,in} - W_{N_2,ca,out} \\ \frac{dm_{w,ca}}{dt} = W_{w,ca,in} + W_{w,ca,gen} + W_{w,mb} - W_{w,ca,out} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $m_{O_2,ca}$ 、 $m_{N_2,ca}$ 和 $m_{w,ca}$ 分别表示阴极流道中的氧气、氮气和水的质量(kg); $W_{O_2,ca,in}$ 、 $W_{N_2,ca,in}$ 和 $W_{w,ca,in}$ 分别表示进入阴极流道的氧气、氮气和水的质量流量(kg/s); $W_{O_2,ca,out}$ 、 $W_{N_2,ca,out}$ 和 $W_{w,ca,out}$ 分别表示排出阴极流道的氧气、氮气和水的质量流量(kg/s); $W_{O_2,ca,rec}$ 表示电化学反应中氧气的消耗速率(kg/s); $W_{w,ca,gen}$ 表示电化学反应中水的生成速率; $W_{w,mb}$ 表示质子交换膜中的水传递速率(kg/s)。

$$\begin{cases} W_{O_2,ca,in} = x_{O_2,in} W_{ca,in} \\ W_{N_2,ca,in} = x_{N_2,in} W_{ca,in} \\ W_{w,ca,in} = x_{w,in} W_{ca,in} \\ \phi = \frac{p_w}{p_{sat}(T_{fc})} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $W_{ca,in}$ 表示进入阴极流道的气体的质量流量(kg/s); $M_{O_2}$ 、 $M_{N_2}$ 、 $M_w$ 和 $M_{air}$ 分别表示氧气、氮气、水和干燥空气的摩尔质量(kg/mol); $\phi$ 表示气体的相对湿度。

根据理想气体定律,可以得到阴极流道中氧气的分压力 $p_{O_2}$ 、氮气的分压力 $p_{N_2}$ 以及水蒸气的分压力 $p_{w,ca}$ ,阴极流道内的气体总压力 $p_{ca}$ 为各个气体分压力之和:

$$\begin{cases} p_{O_2} = \frac{m_{O_2} RT_{fc}}{M_{O_2} U_{ca}} \\ p_{N_2} = \frac{m_{N_2} RT_{fc}}{M_{N_2} U_{ca}} \\ p_{w,ca} = \frac{m_{w,ca} RT_{fc}}{M_w U_{ca}} \\ p_{ca} = p_{O_2} + p_{N_2} + p_{w,ca} \end{cases} \quad (12)$$

根据电化学反应方程式,可以得到阴极流道中氧气的消耗速率 $W_{O_2,ca,rec}$ 和水的生成速率 $W_{w,ca,gen}$ :

$$W_{O_2,ca,rec} = N_{cell} \frac{M_{O_2} I}{4F} \quad (13)$$

$$W_{w,ca,gen} = N_{cell} \frac{M_w I}{2F} \quad (14)$$

由于阴极流道出口处的压力与回流管路中的压力较为接近,故可以将压强与质量流量的关系近似为线性关系,排出阴极流道的气体质量流量可由下式计算:

$$W_{ca,out} = k_{ca,out} (p_{ca} - p_{rm}) \quad (15)$$

排出阴极流道中的氧气、氮气和水的质量流量可由下式计算:

$$\begin{cases} W_{O_2,ca,out} = x_{O_2,out} W_{ca,out} = \frac{m_{O_2}}{m_{N_2} + m_{N_2} + m_{w,ca}} W_{ca,out} \\ W_{N_2,ca,out} = x_{N_2,out} W_{ca,out} = \frac{m_{N_2}}{m_{N_2} + m_{N_2} + m_{w,ca}} W_{ca,out} \\ W_{w,ca,out} = x_{w,out} W_{ca,out} = \frac{m_{w,ca}}{m_{N_2} + m_{N_2} + m_{w,ca}} W_{ca,out} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $k_{ca,out}$ 表示阴极流道出口的孔口系数( $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{Pa})$ ); $p_{rm}$ 表示阴极回流管道气压(Pa)。

### 1.1.3 阳极流道模型

阳极流道中主要包含了氢气和两种物质。根据质量守恒定律可建立阳极流道中的氢气和水蒸气质量的变化过程:

$$\begin{cases} \frac{dm_{H_2,an}}{dt} = W_{H_2,an,in} - W_{H_2,ca,rec} - W_{H_2,an,out} \\ \frac{dm_{w,an}}{dt} = W_{w,an,in} - W_{w,mb} - W_{w,an,out} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $m_{H_2,an}$ 和 $m_{w,an}$ 分别表示阳极流道中氢气和水的质量; $W_{H_2,an,in}$ 和 $W_{w,an,in}$ 分别表示进入阳极流道的氢气和水的质量流量; $W_{H_2,an,out}$ 和 $W_{w,an,out}$ 分别表示排出阳极流道的氢气和水的质量流量; $W_{H_2,ca,rec}$ 表示电化学反应中氢气的消耗速率。

进入阳极流道的氢气和水可由下式计算:

$$\begin{cases} W_{H_2,an,in} = \frac{W_{an,in}}{1 + \phi_{an}} \\ W_{w,an,in} = \frac{\phi_{an} W_{an,in}}{1 + \phi_{an}} \end{cases} \quad (18)$$

根据理想气体定律,可以得到阳极流道中氢气的分压力 $p_{H_2}$ 以及水蒸气的分压力 $p_{w,an}$ ,阳极流道内的总气体压力 $p_{an}$ 为各气体分压之和,关系式如下:

$$\begin{cases} p_{H_2} = \frac{m_{H_2} RT_{fc}}{M_{H_2} U_{an}} \\ p_{w,an} = \frac{m_{w,an} RT_{fc}}{M_w U_{an}} \\ p_{an} = p_{H_2} + p_{w,an} \end{cases} \quad (19)$$

由于水蒸气分压达到饱和蒸气压后,气态的水

便会形成液态的水,故水蒸气的质量可由下式计算:

$$m_{w,an} = \min(m_{w,an}, \frac{M_w P_{sat} U_{an}}{RT_{fc}}) \quad (20)$$

根据电化学反应方程式,可以得到阳极流道中氢气的消耗速率 $W_{H_2,an,rec}$ :

$$W_{H_2,an,rec} = N_{cell} \frac{M_{H_2} I}{2F} \quad (21)$$

排出阳极流道的气体质量流量由线性喷嘴方程计算得到:

$$W_{an,out} = k_{an,out} (p_{an} - p_{rm}) \quad (22)$$

式中: $V_{an}$ 表示阳极流道体积( $\text{m}^3$ ); $k_{an,out}$ 表示阳极流道出口的孔口系数( $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{Pa})$ )。

## 1.2 空气供给系统模型

### 1.2.1 空气压缩机模型

本文的空气压缩机模型主要依据转速动态模型和空气压缩机 Map 图进行建模,其中转速动态模型主要通过电机相关参数以及机理公式来描述空气压缩机的转速以及功率的动态特性,如图2所示。空气压缩机的动态转速方程如下:

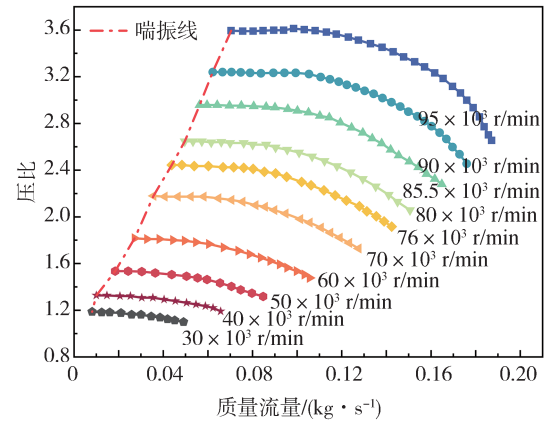


图2 空气压缩机压比-流量-转速 Map 图

$$\frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{\tau_{cm} - \tau_{cp}}{J_{cp}} \quad (23)$$

式中: $\omega_{cp}$ 表示空气压缩机的转动速率( $\text{rad}/\text{s}$ ); $\tau_{cm}$ 和 $\tau_{cp}$ 分别表示空气压缩机的输出转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ )和负载转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ ); $J_{cp}$ 表示空气压缩机的转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )。

空气压缩机的输出转矩和负载转矩可由下式计算:

$$\tau_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (u_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (24)$$

$$\tau_{cp} = \frac{C_p T_{atm}}{\omega_{cp} \eta_{cp}} \left[ \left( \frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (25)$$

式中: $\eta_{cm}$ 表示空气压缩机的电机效率; $k_t$ 和 $k_v$ 分别表示空气压缩机的电机转矩灵敏度常数( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$ )

和电机反电动势常数 ( $V/(\text{rad}\cdot\text{s})$ );  $R_{\text{cm}}$  表示电机电枢电阻 ( $\Omega$ );  $u_{\text{cm}}$  表示空气压缩机的输入电压 ( $V$ );  $C_p$  表示空气的比热容常压系数 ( $\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$ );  $T_{\text{atm}}$  和  $p_{\text{atm}}$  分别表示环境的温度 ( $K$ ) 和压力 ( $\text{bar}$ );  $\eta_{\text{cp}}$  表示空气压缩机的效率;  $p_{\text{sm}}$  表示空气压缩机输出端口的压力 ( $\text{bar}$ );  $\gamma$  表示空气的比热容比;  $W_{\text{cp}}$  表示空气压缩机的输出流量 ( $\text{kg/s}$ )。

采用二次多项式对空气压缩机 Map 图数据进行拟合,以简化模型并加快计算速度,将空气压缩机转速和空气供给管道气体压力  $p_{\text{sm}}$  作为输入量,空气压缩机质量流量  $W_{\text{cp}}$  作为输出量进行拟合,得到三者之间函数关系式如下:

$$W_{\text{cp}}(\omega_{\text{cp}}, p_{\text{sm}}) = l_{00} + l_{10}\omega_{\text{cp}} + l_{01}p_{\text{sm}} + l_{11}\omega_{\text{cp}}p_{\text{sm}} + l_{20}\omega_{\text{cp}}^2 + l_{02}p_{\text{sm}}^2 \quad (26)$$

式中  $l_{mn}$  均为拟合参数,具体参数值见表 1。

表 1 空气压缩机拟合多项式参数表

参数	数值
$l_{00}$	1.606
$l_{10}$	$2.212 \times 10^{-4}$
$l_{01}$	-5.992
$l_{11}$	$2.201 \times 10^{-3}$
$l_{20}$	$3.521 \times 10^{-8}$
$l_{02}$	-88.53

空气压缩机 Map 图拟合数据的  $R^2$  为 0.987 0, 均方根值误差 (RMSE) 为 0.005 3, 拟合效果良好, 可以准确反映空气压缩机正常工作情况。

### 1.2.2 空气供给管道模型

空气供给管道中的气体质量变化过程的方程如下:

$$\frac{dm_{\text{sm}}}{dt} = W_{\text{cp}} - W_{\text{sm},\text{out}} \quad (27)$$

根据理想气体定律,可以计算得到空气供给管道中压力:

$$\frac{dp_{\text{sm}}}{dt} = \frac{R}{U_{\text{sm}} M_{\text{air}}} (W_{\text{cp}} T_{\text{cp},\text{out}} - W_{\text{sm},\text{out}} T_{\text{sm}}) \quad (28)$$

由于供给管道和阴极流道压力较为接近,故可以将压强与质量流量的关系近似为线性关系,排出供给管道的气体质量流量可由下式计算:

$$W_{\text{sm},\text{out}} = k_{\text{sm},\text{out}} (p_{\text{sm}} - p_{\text{ca}}) \quad (29)$$

式中:  $m_{\text{sm}}$  表示空气供给管道气体质量 ( $\text{kg}$ );  $W_{\text{sm},\text{out}}$  表示流出管道的气体流量 ( $\text{kg/s}$ );  $p_{\text{sm}}$ 、 $T_{\text{sm}}$  和  $V_{\text{sm}}$  分别表示空气供给管道中的压强 ( $\text{Pa}$ )、温度 ( $\text{K}$ ) 和体积 ( $\text{m}^3$ );  $k_{\text{sm},\text{out}}$  表示空气供给管道出口的孔口系数 ( $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{Pa})$ )。

## 1.3 氢气供给系统模型

### 1.3.1 氢气流量比例阀模型

比例阀的输出流量与其进出口压力有关,可由下式表示:

$$Q_s = \begin{cases} \frac{257p_{\text{in}}}{\sqrt{T_0\rho_0}} k_{\text{val}}, & p_{\text{out}} \leq 0.5p_{\text{in}} \\ \frac{514\sqrt{p_{\text{out}}(p_{\text{in}} - p_{\text{out}})}}{\sqrt{T_0\rho_0}} k_{\text{val}}, & p_{\text{out}} > 0.5p_{\text{in}} \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $p_{\text{in}}$  和  $p_{\text{out}}$  分别代表了比例阀进出口的压力,文中认为储氢瓶中的高压氢气经过减压阀后压力为 10 bar;  $\rho_0$  表示标准状态下气体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $k_{\text{val}}$  表示比例阀流量系数,与比例阀全开状态下的流量系数 (取 0.45) 和开度  $\alpha_{\text{val}}$  ( $\alpha_{\text{val}} \in [0, 1]$ ) 有关,可由式 (31) 计算:

$$k_{\text{val}} = \alpha_{\text{val}} K_{\text{val}} \quad (31)$$

### 1.3.2 氢气供给管道模型

氢气供给管道中的气体的质量变化可由下式描述:

$$\frac{dm_{\text{sp}}}{dt} = W_{\text{val}} - W_{\text{sp},\text{out}} \quad (32)$$

式中:  $m_{\text{sp}}$  表示氢气供给管道中的气体质量 ( $\text{kg}$ );  $W_{\text{val}}$  和  $W_{\text{sp},\text{out}}$  分别表示比例阀的输出流量 ( $\text{kg/s}$ ) 和流出氢气供给管道的流量 ( $\text{kg/s}$ )。

由理想气体定律,可以计算氢气供给管道中的压力变换:

$$\frac{dp_{\text{sp}}}{dt} = \frac{RT_{\text{sp}}}{V_{\text{sp}} M_{\text{mix}}} (W_{\text{val}} - W_{\text{sp},\text{out}}) \quad (33)$$

由于供给管道和阳极流道压力较为接近,故可以将压强与质量流量的关系近似为线性关系,排出氢气供给管道的气体质量流量可由下式计算:

$$W_{\text{sp},\text{out}} = k_{\text{sp},\text{out}} (p_{\text{sp}} - p_{\text{an}}) \quad (34)$$

式中:  $p_{\text{sp}}$ 、 $T_{\text{sp}}$  和  $V_{\text{sp}}$  分别表示氢气供给管道中的压强 ( $\text{Pa}$ )、温度 ( $\text{K}$ ) 和体积 ( $\text{m}^3$ ),  $V_{\text{sp}}$  取  $0.0084 \text{ m}^3$ ;  $M_{\text{mix}}$  表示混合气体的摩尔质量 ( $\text{kg}/\text{mol}$ );  $k_{\text{sp},\text{out}}$  表示氢气供给管道出口的孔口系数,取  $0.3018 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{Pa})$ 。

### 1.3.3 氢气排气阀模型

由下式可以计算得排气阀流量  $Q_e$ :

$$Q_e = \begin{cases} \frac{257p_{\text{in}}}{\sqrt{T_0\rho_0}} k_{\text{val}}, & p_{\text{out}} \leq 0.5p_{\text{in}} \\ \frac{514\sqrt{p_{\text{out}}(p_{\text{in}} - p_{\text{out}})}}{\sqrt{T_0\rho_0}} k_{\text{val}}, & p_{\text{out}} > 0.5p_{\text{in}} \end{cases} \quad (35)$$

式中:  $p_{in}$  和  $p_{out}$  分别代表了排气阀进出口的压力 (Pa);  $k_{val}$  表示排气阀的流量系数。

## 2 燃料电池系统模型验证及仿真分析

本文采用 100 kW 燃料电池系统作为研究对象, 基于已建立的车用燃料电池发动机系统数学模型, 使用 MATLAB/Simulink 搭建如图 3 所示的仿真模型, 通过 PEMFC 试验测试平台, 将试验和仿真运行参数设置为相同的数值, 对燃料电池电堆输出电压模型进行试验验证。基于已验证的仿真模型, 对不同关键运行参数条件下的 PEMFC 系统进行静态、动态仿

真分析。

### 2.1 燃料电池电堆模型测试验证

将阴阳极气体压力固定为 1.0 bar, 运行温度分别设置为 50 和 60 °C, 得到不同温度下 PEMFC 的极化特性曲线以及功率密度曲线, 如图 4 所示。在 50 和 60 °C 的条件下, 仿真输出电压与实测数据的平均误差分别约为 0.006 5 和 0.005 8 V, 平均相对误差分别约为 0.89% 和 1.11%, 仿真功率密度与实测数据的平均误差分别为 0.001 6 和 0.002 3 W/cm<sup>2</sup>。所建模型的仿真结果与实测数据基本保持一致, 故所建燃料电池电堆输出电压模型在不同的温度条件下的准确性较好。

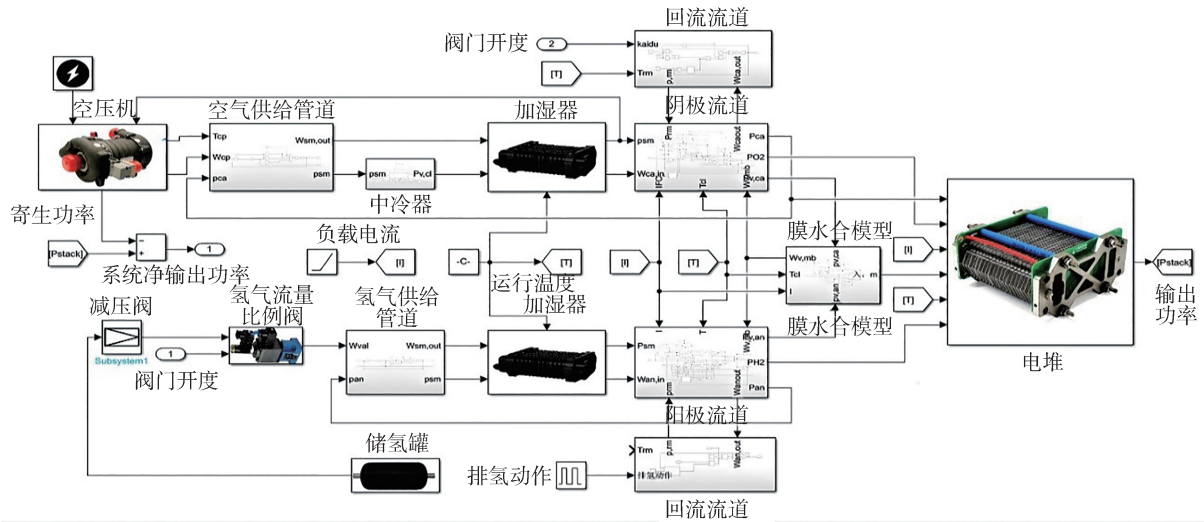


图 3 燃料电池发动机系统 Matlab/Simulink 仿真模型

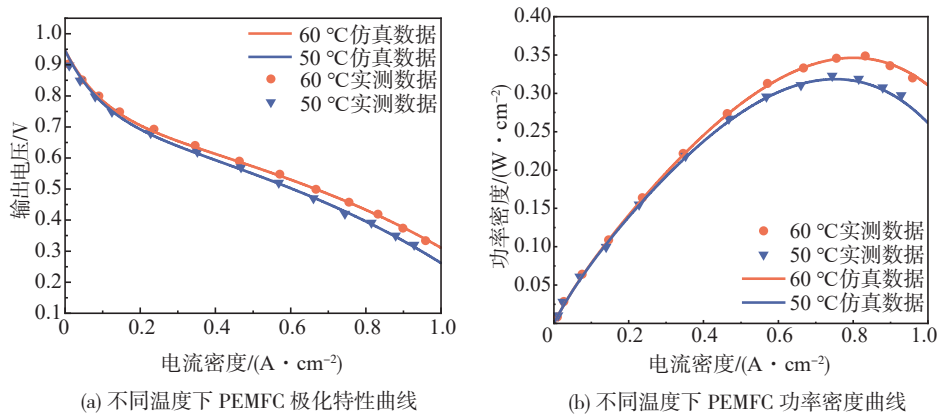
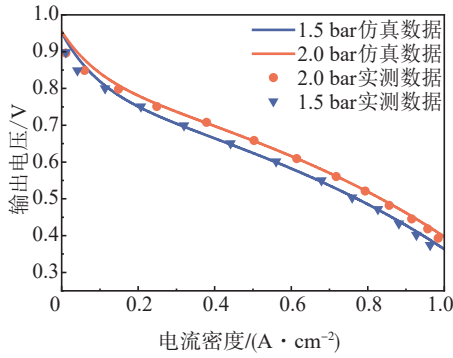


图 4 不同温度下 PEMFC 特性曲线

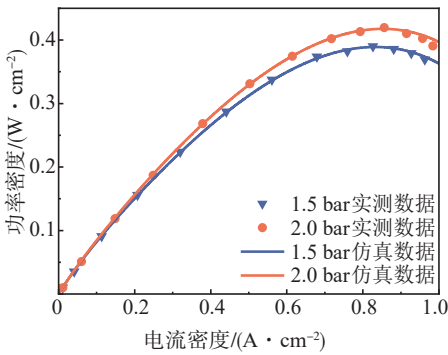
将运行温度恒定保持在 60 °C, 气体压力分别设置为 1.5 和 2 bar, 得到不同气体压力下 PEMFC 极化特性曲线以及功率密度曲线, 如图 5 所示。分析可知, 在 1.5 和 2 bar 的条件下, 仿真输出电压与实测数

据的平均误差分别约为 0.026 4 和 0.009 8 V, 平均相对误差分别约为 0.32% 和 1.25%, 在 1.5 和 2 bar 的条件下, 仿真功率密度与实测数据的平均误差分别约为 0.041 7 和 0.014 9 W/cm<sup>2</sup>。模型仿真结果与

实测数据基本保持一致,故燃料电池输出电压模型在不同气体压力条件下也具有较好的准确性。



(a) 不同气体压力下 PEMFC 极化特性曲线



(b) 不同气体压力下 PEMFC 功率密度曲线

图5 不同气体压力下 PEMFC 特性曲线

### 2.2 空气供给系统关键参数仿真分析

#### 2.2.1 不同氧气过量比下系统输出性能仿真分析

设置运行温度为 60 °C, 阴阳极压差为 0.2 bar, 背压阀开度为 0.8, 负载电流分别为 100、150、200、250、300 和 350 A, 对不同氧气过量比下的系统净输出功率、空气压缩机消耗功率以及电堆输出功率进行仿真分析, 如图 6 所示。

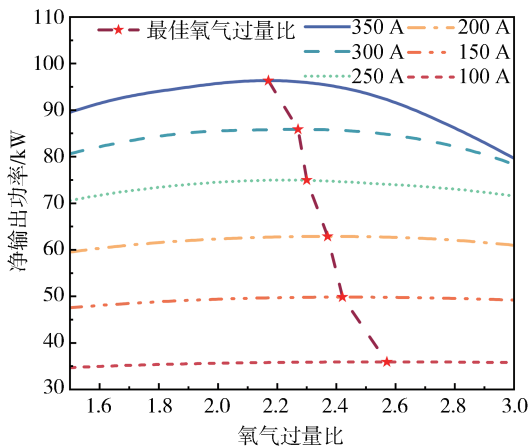


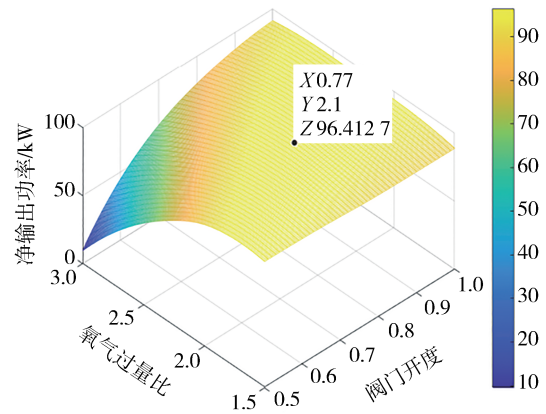
图6 不同氧气过量比下的净输出功率

由图可知,在不同的负载电流下,燃料电池系统净输出功率随着氧气过量比的增大,呈现出先增大后减小的趋势。电流为 100、150、200、250、300 和 350 A 时,对应的最大净输出功率分别约为 35.95、49.86、62.90、75.01 和 96.37 kW,最佳氧气过量比分别约为 2.57、2.42、2.37、2.30、2.27 和 2.17,将最佳氧气过量比视为与负载电流相关的函数,利用三次多项式拟合二者之间的函数关系式:

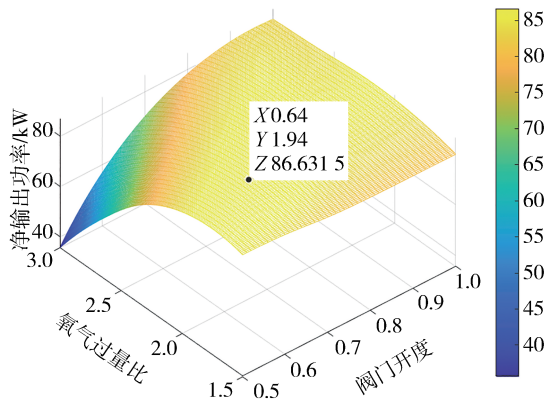
$$\lambda_{O_2}^* = -4.963 \times 10^{-8} I^3 + 3.586 \times 10^{-5} I^2 - 0.009412I + 3.2 \quad (36)$$

#### 2.2.2 不同氧气过量比与背压阀阀门开度下系统输出性能仿真分析

设置运行温度为 60 °C, 负载电流分别为 350 和 300 A, 气体压差为 0.2 bar, 对不同氧气过量比和背压阀阀门开度下的燃料电池系统净输出功率进行仿真分析, 如图 7 所示。燃料电池发动机的最大净输出功率约为 96.41 kW, 此时的背压阀阀门开度和氧气过量比分别约为 0.77 和 2.1。燃料电池



(a) 燃料电池系统净输出功率(I=350 A)



(b) 燃料电池系统净输出功率(I=300 A)

图7 不同氧气过量比背压阀阀门开度下的净输出功率

发动机系统的最大净输出功率约为 86.63 kW, 此时的背压阀阀门开度和氧气过量比分别约为 0.64 和 1.94。

为探究不同负载电流下燃料电池系统的最佳背压阀开度以及氧气过量比, 将背压阀阀门开度设置为 0.5~1, 步长为 0.01, 氧气过量比设置为 1.5~3, 步长为 0.01, 负载电流设置为 150~350 A, 步长为 10 A, 遍历计算出在不同负载电流下, 燃料电池发动机系统所输出的最大净功率, 并找出其所对应的阀门开度、氧气过量比、供给管道压力以及阴极流道压力, 结果见表 2。

表 2 不同负载电流下最优工作条件

电流/A	过量比 $\lambda_{O_2}$	阀门 开度 $\theta$	供给管道 压力/bar	阴极流道 压力/bar
150	2.26	0.50	2.43	2.38
160	2.18	0.50	2.49	2.44
170	2.11	0.50	2.54	2.49
180	2.05	0.50	2.55	2.60
190	2.00	0.50	2.67	2.51
200	1.99	0.52	2.69	2.61
210	1.98	0.54	2.71	2.65
220	1.95	0.55	2.74	2.67
230	1.95	0.57	2.76	2.70
240	1.93	0.58	2.80	2.73
250	1.95	0.60	2.82	2.74
260	1.92	0.60	2.73	2.66
270	1.92	0.61	2.72	2.65
280	1.92	0.62	2.77	2.69
290	1.95	0.64	2.79	2.71
300	1.94	0.64	2.80	2.72
310	1.98	0.67	2.82	2.74
320	2.03	0.70	2.87	2.78
330	2.02	0.71	2.87	2.80
340	2.08	0.75	3.02	2.91
350	2.10	0.77	3.08	2.99

### 2.2.3 不同气体压差下电堆输出性能仿真分析

保持阳极气体压力适当高于阴极气体压力可以提高氢气的利用率<sup>[12]</sup>, 设置仿真模型的运行温度为 60 °C, 气体压力为 2 bar, 两极气体压差分别为 0.0.1 和 0.2 bar, 得到图 8 所示不同气体压差下单体燃料电池输出性能仿真结果。可知随着气体压差的增大燃料电池电堆的输出性能也在提高。

## 2.3 氢气供给系统关键参数仿真分析

### 2.3.1 不同负载电流下阳极气体压力仿真分析

设置运行温度为 60 °C, 阳极气体压力为 2.4 bar,

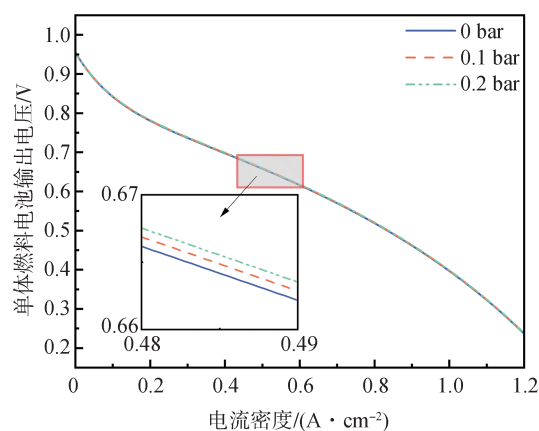


图 8 不同气体压差下单体燃料电池输出性能

暂不考虑排氢动作, 将排氢阀开度设置为 0, 负载电流设置为如图 9 所示的阶跃信号, 对不同负载电流下的阳极气体压力进行仿真分析, 仿真结果如图 10 所示。可知当负载电流发生阶跃时, 阳极气体压力也会随之改变。

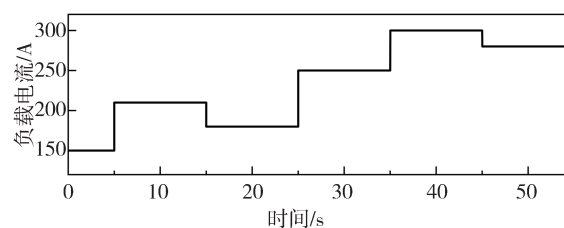


图 9 负载电流变化情况

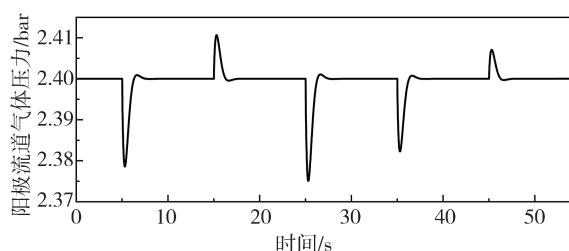


图 10 阳极气体压力变化曲线

### 2.3.2 排氢扰动下阳极气体压力仿真分析

设置运行温度为 60 °C, 阳极气体压力为 2.4 bar, 负载电流为 200 A, 设置排氢动作排气间隔为 2 s, 周期性信号持续时间为 0.5 s, 如图 11 所示。

由图 12 可知, 燃料电池电堆运行过程中, 排气阀的开闭影响着阳极流道中的气体质量: 当排气阀开启时, 将阳极流道中的一部分废气排出, 流道中的气体质量快速下降, 气体压力也会随之下降至 2.368 bar, 通过比例阀加大氢气的供给量, 阳极流道

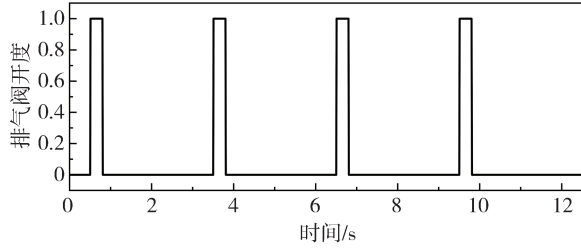


图11 PEMFC 发动机系统排气信号

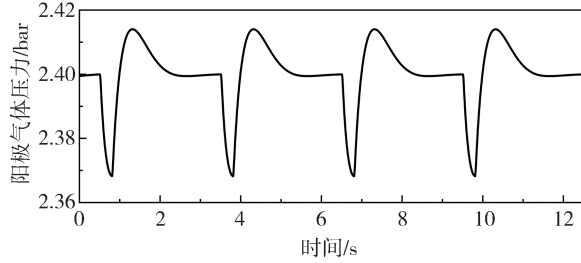


图12 排气动作电堆阳极通道气体压力变化曲线

内的气体压力开始逐渐回升;当排气阀关闭时,由于系统响应滞后,导致阳极通道中的气体压力相较于设定值有一定的上升,上升至约 2.414 bar,再通过比例阀减小阳极通道中的氢气供给量,从而气体压力可恢复至设定值。

### 3 燃料电池空气供给系统氧气过量比控制研究

#### 3.1 燃料电池空气供给系统控制模型

本节假设运行温度为 60 °C,气体湿度为 100%,且中冷器和加湿器能够将入堆气体的温度以及湿度保持恒定值,不考虑其产生的损耗;假设阳极通道中氢气供给量充足,且温度、湿度以及阴阳极气体压差能够恒定保持在期望值。基于上述假设,燃料电池空气供给系统控制模型可以表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\omega_{cp}}{dt} &= -\frac{1}{J_{cp}} \times \frac{\eta_{cm} k_t k_v}{R_{cm}} \omega_{cp} - \frac{1}{J_{cp}} \times \frac{C_p T_{atm}}{\eta_{cp}} \times \\ &\quad \frac{1}{\omega_{cp}} \left[ \left( \frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \left( \omega_{cp}, \frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right) + \\ &\quad \frac{\eta_{cm} k_t}{J_{cp} R_{cm}} u_{cm} \\ \frac{dp_{sm}}{dt} &= \frac{RT_{sm}}{U_{sm} M_{air}} W_{cp} \left( \omega_{cp}, \frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right) - \frac{RT_{sm}}{U_{sm} M_{air}} \times \\ &\quad k_{sm, out} (p_{sm} - p_{ca}) \end{aligned} \right. \quad (37)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dm_{O_2, ca}}{dt} &= x_{O_2, in} k_{sm, out} (p_{sm} - p_{ca}) - x_{O_2, out} \times \\ &\quad k_{ca, out} (p_{ca} - p_{rm}) - N_{cell} \frac{M_{O_2}}{4F} I \\ \frac{dm_{N_2, ca}}{dt} &= x_{N_2, in} k_{sm, out} (p_{sm} - p_{ca}) - x_{N_2, out} \times \\ &\quad k_{ca, out} (p_{ca} - p_{rm}) \end{aligned} \right. \quad (38)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_{ca}}{dt} &= \frac{m_{O_2, ca} RT_{fc}}{M_{O_2} U_{ca}} + \frac{m_{N_2, ca} RT_{fc}}{M_{N_2} U_{ca}} + \frac{m_{w, ca} RT_{fc}}{M_w U_{ca}} \\ \frac{dp_{rm}}{dt} &= \frac{RT_{rm}}{U_{rm} M_{air}} [k_{rm, out} (p_{ca} - p_{rm}) - W_{rm, out} (p_{rm}, \theta)] \end{aligned} \right. \quad (39)$$

空气供给系统的状态空间方程可以由下式描述:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{p}(\mathbf{x})\mathbf{d} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d}) \end{aligned} \right. \quad (40)$$

式中: $\mathbf{u}$ 表示系统输入向量, $\mathbf{u}=[u_{cm} \theta]^T$ ; $\mathbf{x}$ 为系统状态向量, $\mathbf{x}=[\omega_{cp}, p_{sm}, m_{O_2, ca}, m_{N_2, ca}, m_{rm}, p_{rm}]^T$ ,分别表示空气压缩机的背压阀阀门开度以及输入电压; $\mathbf{d}$ 表示系统干扰向量, $\mathbf{d}=I$ ,表示电堆负载电流; $\mathbf{y}$ 表示系统输出向量, $\mathbf{y}=[\lambda_{O_2}, p_{sm}, W_{cp}, p_{ca}]^T$ 。

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -a_1 x_1 - a_2 \frac{1}{x_1} \left[ \left( \frac{x_2}{a_3} \right)^{a_4} - 1 \right] W_{cp} \left( x_1, \frac{x_2}{a_3} \right) + a_5 u_1 \\ \dot{x}_2 &= a_6 \left[ W_{cp} \left( x_1, \frac{x_2}{a_3} \right) - a_7 (x_2 - p_{ca}) \right] \\ \dot{x}_3 &= a_8 (x_2 - p_{ca}) - a_9 \frac{x_3}{x_3 + x_4 + a_{10}} (p_{ca} - x_6) - a_{11} d \\ \dot{x}_4 &= a_{12} (x_2 - p_{ca}) - a_9 \frac{x_4}{x_3 + x_4 + a_{10}} (p_{ca} - x_6) \\ \dot{x}_5 &= a_9 (p_{ca} - x_6) - W_{rm, out} (x_6, u_2) \\ \dot{x}_6 &= a_{13} x_5 \end{aligned} \right. \quad (41)$$

$$\left\{ \begin{aligned} y_1 &= x_2 \\ y_2 &= W_{cp} \left( x_1, \frac{x_2}{a_3} \right) \\ y_3 &= a_{14} x_3 + a_{15} x_4 + a_{16} \\ y_4 &= \frac{a_8 (x_2 - p_{ca})}{a_{11} d} \end{aligned} \right. \quad (42)$$

式中 $a_i (i=1, 2, \dots, 16)$ 为常数,具体表达式见表3。

#### 3.2 基于PID的最佳氧气过量比控制算法研究

##### 3.2.1 PID 控制器设计

选取最佳氧气过量比仿真中的结果作为不同负载电流下的期望值,将氧气过量比的期望值与空气供给系统中实际氧气过量比的差值作为PID控制器的反馈误差,经过比例、积分以及微分3个环节之后

表 3 状态空间方程参数表

参数	表达式	参数	表达式	参数	表达式	参数	表达式
$a_1$	$\frac{\eta_{cm} k_i k_v}{J_{cp} R_{cm}}$	$a_2$	$\frac{C_p T_{atm}}{J_{cp} \eta_{cp}}$	$a_3$	$p_{atm}$	$a_4$	$\frac{\gamma - 1}{\gamma}$
$a_5$	$\frac{\eta_{cm} k_1}{J_{cp} R_{cm}}$	$a_6$	$\frac{RT_{sm}}{U_{sm} M_{air}}$	$a_7$	$k_{sm, out}$	$a_8$	$x_{O_2, in} k_{sm, out}$
$a_9$	$k_{ca, out}$	$a_{10}$	$m_{w, ca}$	$a_{11}$	$N_{cell} \frac{M_{O_2}}{4F}$	$a_{12}$	$x_{N_2, in} k_{sm, out}$
$a_{13}$	$\frac{RT_{rm}}{U_{rm} M_{air}}$	$a_{14}$	$\frac{RT_{fc}}{M_{O_2} U_{ca}}$	$a_{15}$	$\frac{RT_{fc}}{M_{N_2} U_{ca}}$	$a_{16}$	$\frac{m_{w, ca} RT_{fc}}{M_w U_{ca}}$

表 4 PID 控制参数表

参数	$K_p$	$K_i$	$K_d$
A组	20	300	20
B组	30	400	50
C组	50	600	40

输出空气压缩机的电压,氢燃料电池空气供给系统的PID控制器结构形式如图13所示。

### 3.2.2 PID 控制器仿真结果分析

将氢燃料电池发动机系统运行温度设置为60℃,阴阳极压差设置为0.2 bar,背压阀开度设置为0.8,负载电流变化设置为图9所示的周期性阶跃信号,从150逐步增加至280 A,仿真时长设置为65 s。采用试凑法对PID控制器的3个控制参数进行整定,选取表4中的3组参数进行仿真分析,结果如图14所示。

由图可见,负载电流增大时,在3组PID参数的

控制下,氧气过量比迅速上升至峰值,且均超过了期望氧气过量比值。在超调量方面,C组最大,约为0.040,其次是B组,约为0.039,A组最小,约为0.036;在上升时间方面,C组最快,约为1 s,其次是B组,约为1.28 s,A组最慢,约为1.54 s;在稳定时间方面,C组最快,B组其次,A组最慢。因此在3组参数中C的性能较为优秀。

### 3.2.3 PSO-PID 控制器仿真结果分析

用粒子群算法对PID控制器的3个关键参数进行整定,负载电流由150阶跃至180 A的工作条件下的寻优迭代过程如图15所示。随着迭代次数的增加,粒子群的适应度值在不断减小,并在第15次迭代之后收敛到稳定值,同时,PID控制器的3个参数随着不断地迭代计算,也逐渐收敛至一点,此时的PID参数分别为: $K_p=113.0997, K_i=200, K_d=245.2246$ 。

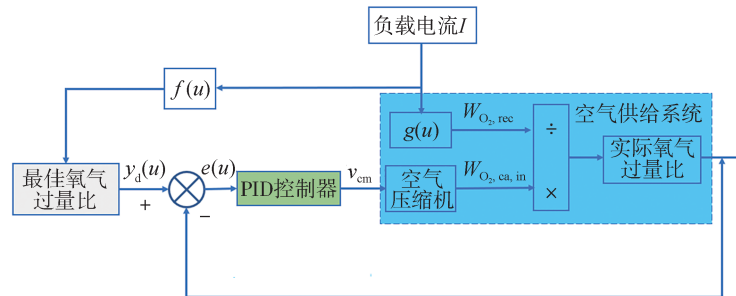


图 13 空气供给系统 PID 控制器结构形式

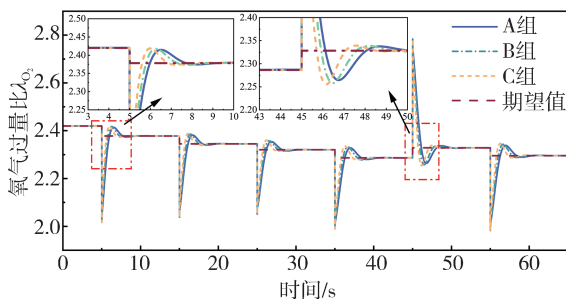


图 14 不同 PID 控制参数下氧气过量比控制曲线

将寻优所得的3个参数值设置为PID控制器参数,负载电流、温度及阀门开度按照前文进行设置,经过仿真计算可以得到PSO-PID控制器的氧气过量比变化曲线,如图16所示。

由图16可知,在两种控制算法下,氧气过量比均能到达期望值,且动态时间均在2.5 s左右,与C组参数下的PID控制效果不同的是,PSO-PID控制下的氧气过量比在负载电流以及期望值改变时,能够较为平滑地过渡到期望值,超调量约为0.4,远小于C组PID控制的超调量,且不存在振荡。因此,PSO-PID控制下的控制效果优于C组参数。

## 4 燃料电池发动机系统气体流量压力协同控制研究

### 4.1 空气流量压力协同控制算法研究

#### 4.1.1 ADRC 控制器设计

将空气压缩机的控制电压以及背压阀开度作为

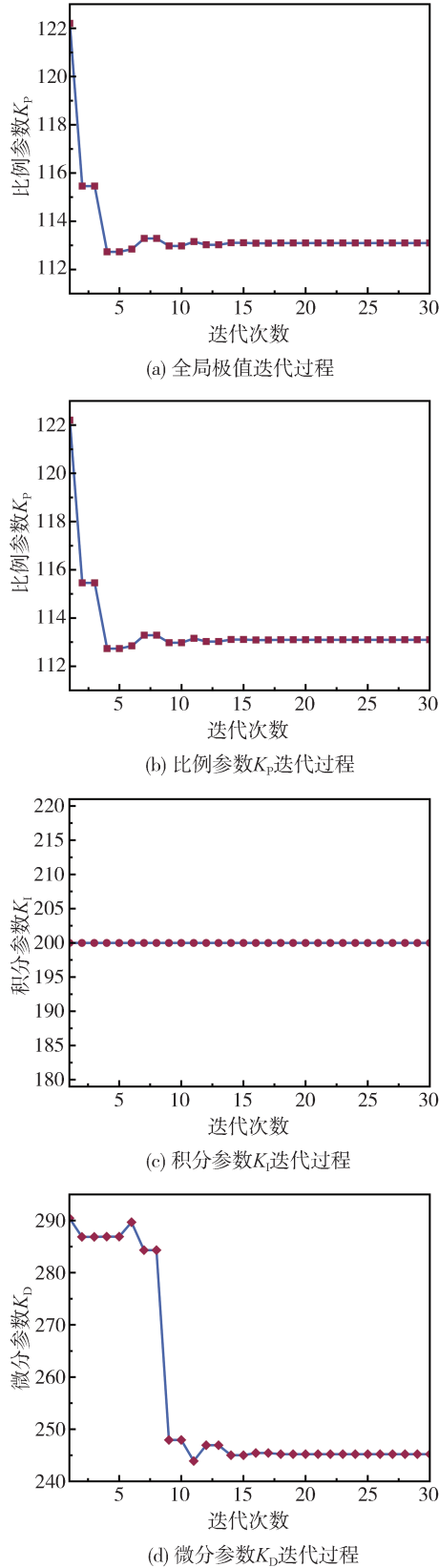


图15 粒子群算法寻优迭代收敛过程

输入量控制车用燃料电池发动机空气供给量以及阴极流道中的气体压力。针对其具有强耦合关系的两

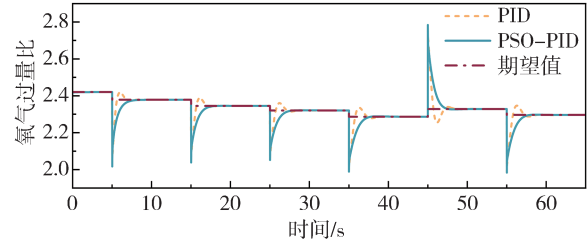


图16 PSO-PID控制下氧气过量比变化曲线

输入两输出系统,采用ADRC控制算法将其分解为两个单输入单输出系统控制回路1,输入量空气压缩机输入电压 $v_{cm}$ 对应输出量氧气过量比 $\lambda_{o_2}$ ;控制回路2,输入量背压阀阀门开度 $\theta$ 对应输出量阴极气体压力 $p_{ca}$ 。并对两个回路分别设计了控制器。在ADRC算法下,通过扩张状态观测器(ESO)实时观测两个回路之间的耦合作用以及外部干扰,并将其作为“总扰动”实时补偿给反馈控制律,从而实现解耦。

基于3.1节中的燃料电池空气供给系统控制模型设计2阶ADRC控制器,系统的输入量分别为 $u_1=v_{cm}$ , $u_2=\theta$ ,系统的输出量为 $y_1=\lambda_{o_2}$ , $y_2=p_{ca}$ ,则空气供给系统模型可以转化为

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 = f_1(x(t), \dots, w, t) + b_1 u_1 \\ \ddot{y}_2 = f_2(x(t), \dots, w, t) + b_2 u_2 \end{cases} \quad (43)$$

将控制回路1的跟踪微分器 $TD_1$ 设计为

$$\begin{cases} u_{1,1}(k+1) = u_{1,1}(k) + h_1 u_{1,2}(k) \\ u_{1,2}(k+1) = u_{1,2}(k) + h_1 \times \\ \quad \text{fhan}(u_{1,1} - \lambda_{o_2}^*, u_{1,2}, r_1, h_1) \end{cases} \quad (44)$$

式中 $\text{fhan}(x_1, x_2, r, h_0)$ 为速度控制综合函数,具体形式如下:

$$\begin{cases} d = rh_0 \\ d_0 = h_0 d = rh_0^2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2}, & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h_0}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ \text{fhan} = \begin{cases} -r \cdot \text{sign}(a), & |a| > d \\ -r \cdot \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (45)$$

将控制回路2的跟踪微分器 $TD_2$ 设计为

$$\begin{cases} u_{2,1}(k+1) = u_{2,1}(k) + h_2 u_{2,2}(k) \\ u_{2,2}(k+1) = u_{2,2}(k) + h_2 \times \\ \quad \text{fhan}(u_{2,1} - p_{ca}^*, u_{2,2}, r_2, h_2) \end{cases} \quad (46)$$

将氢燃料电池系统的氧气过量比 $\lambda_{o_2}$ 的扩张状

态观测器 ESO<sub>1</sub> 设计为

$$\begin{cases} err_1 = z_{1,1} - y_1 \\ \dot{z}_{1,1} = z_{1,2} - \beta_{1,1}err_1 \\ \dot{z}_{1,2} = z_{1,3} - \beta_{1,2}fal(err_1, 0.5, \delta_1) + b_1u_1 \\ \dot{z}_{1,3} = -\beta_{1,3}fal(err_1, 0.25, \delta_1) \end{cases} \quad (47)$$

式中  $fal(e, \alpha, \delta)$  为非线性函数, 具体形式如下:

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \\ |e|sign(e), & |e| > \delta \end{cases} \quad (48)$$

式中:  $\alpha$  为可调参数;  $\delta$  为线性阶段与非线性阶段的分界点。

将氢燃料电池系统的阴极气体压力  $p_{ca}$  的扩张状态观测器 ESO2 设计为

$$\begin{cases} err_2 = z_{2,1} - y_2 \\ \dot{z}_{2,1} = z_{2,2} - \beta_{2,1}err_2 \\ \dot{z}_{2,2} = z_{2,3} - \beta_{2,2}fal(err_2, 0.5, \delta_2) + b_2u_2 \\ \dot{z}_{2,3} = -\beta_{2,3}fal(err_2, 0.25, \delta_2) \end{cases} \quad (49)$$

将两个控制回路的状态误差反馈控制律 NLSEF<sub>1</sub> 和 NLSEF<sub>2</sub> 设计为

$$\begin{cases} u_{0,1} = -fhan(e_{1,1}, c_1e_{1,2}, r_3, h_3) \\ u_{0,2} = -fhan(e_{2,1}, c_2e_{2,2}, r_4, h_4) \end{cases} \quad (50)$$

依据上述设定, 则空气供给系统控制回路 1 中的空气压缩机控制电压  $v_{cm}$  以及控制回路 2 中的背压阀阀门开度  $\theta$  分别为

$$\begin{cases} u_1 = u_{cm} = u_{0,1} - z_{1,3}/b_1 \\ u_2 = \theta = u_{0,2} - z_{2,3}/b_2 \end{cases} \quad (51)$$

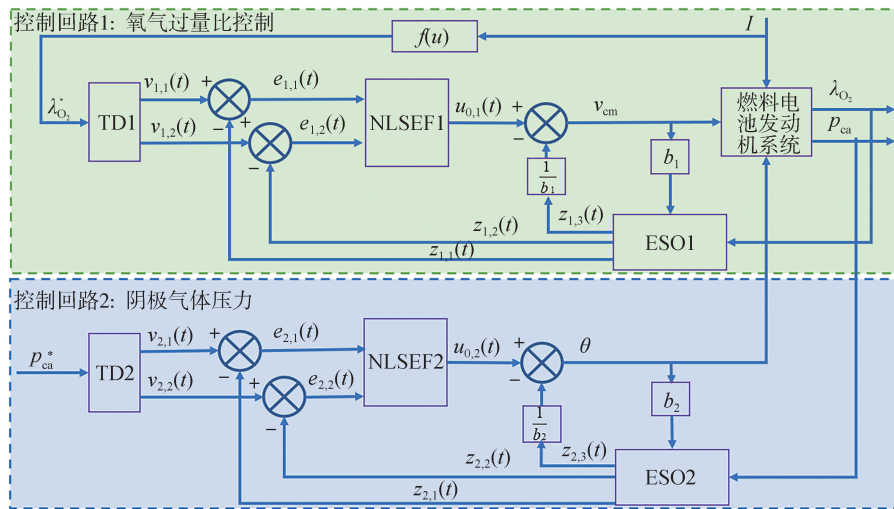


图 17 空气供给系统 ADRC 控制器结构形式

#### 4.1.2 ADRC 控制器仿真结果分析

设置氢燃料电池发动机系统运行温度为 60 °C, 阴阳极压差为 0.2 bar, 负载电流变化为图 18 所示的周期性阶跃信号, 控制回路 1 中期望氧气过量比以及控制回路 2 中期望阴极压力根据表 5 设置, 仿真时长设置为 55 s。

仿真后得到氢燃料电池发动机系统中氧气过量

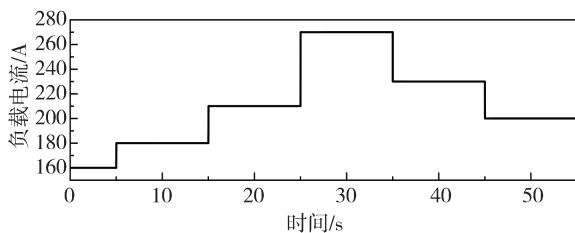


图 18 负载电流变化情况

表 5 氢气供给系统控制器参数

参数	PID 控制器参数			ADRC 控制器参数				
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$r_1$	$h_1$	$c_1$	$r_3$	$h_3$
回路 1	113	200	245	30	0.1	1	50	0.02
				$\delta_1$	$\beta_{1,1}$	$\beta_{1,2}$	$\beta_{1,3}$	$b_1$
				0.01	400	800	1 500	0.25
回路 2	-1	-30	0	100	0.1	0.1	300	0.05
				$\delta_2$	$\beta_{2,1}$	$\beta_{2,2}$	$\beta_{2,3}$	$b_2$
				0.01	400	800	1 500	300
回路 3	5	10	24	100	0.1	0.03	1	0.01
				$\delta_3$	$\beta_{3,1}$	$\beta_{3,2}$	$\beta_{3,3}$	$b_3$
				0.01	400	800	1 500	30

比、空气压缩机输入电压、阴极气体压力以及背压阀阀门开度的变化曲线, 如图 19~图 22 所示。

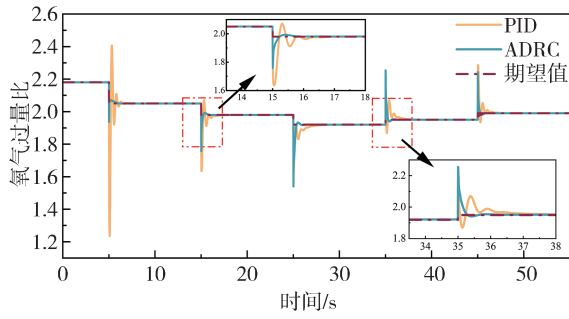


图19 PID和ADRC控制下的氧气过量比变化曲线

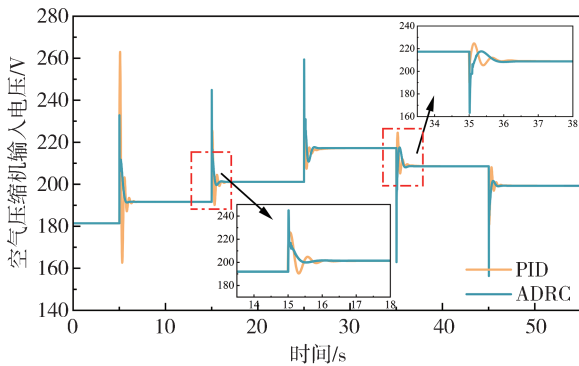


图20 PID和ADRC控制下空气压缩机输入电压变化曲线

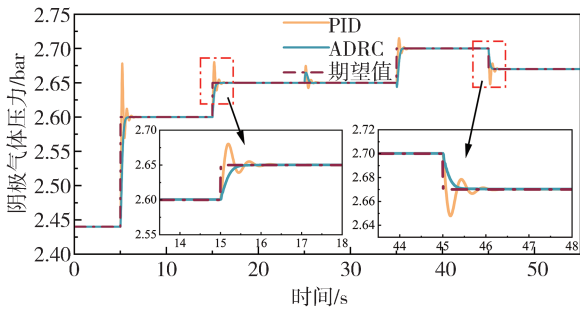


图21 PID和ADRC控制下阴极气体压力变化曲线

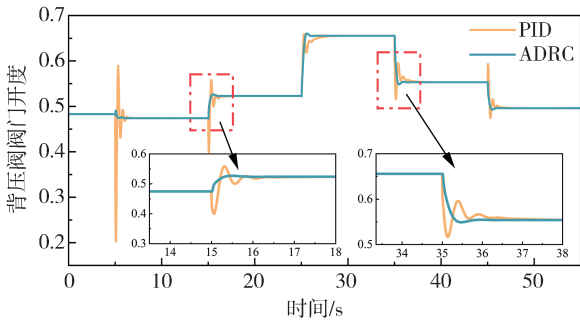


图22 PID和ADRC控制下的背压阀开度变化曲线

由图19可知,当时间为5s时,PID控制下氧气过量比超调量最大可达到1,而在ADRC控制下,氧

气过量比超调量仅为0.1左右,且在ADRC控制下,达到稳态时间大约在0.1s,PID控制下则在1s左右。ADRC控制下的氧气过量比在负载电流突变后,氧气过量比也会存在一定的突变,但其在短时间内可以达到期望值,且超调量极小。

由图20可知,在PID控制下,在10s时输出电压超调量最高可达70V,而相同条件下ADRC超调量仅为40V,且波动量以及达到稳定时间要明显小于PID控制器,可以减小寄生功率以及电压波动对于空气压缩机的损害。

由图21可知,PID控制算法下的阴极气体压力在负载电流突变后,超调量在0.08bar左右且波动较大,在2s内达到稳定值。而在ADRC控制算法下,阴极气体压力能够在0.8s内达到稳定值,且超调量远小于PID控制算法。

由图22可知,PID控制下超调量最大可达到0.28且波动量较大,但在ADRC控制下的背压阀阀门开度能够快速准确地达到稳定值,且超调量以及波动量远小于PID控制算法,可以使得背压阀阀门开度能够平滑而稳定过渡到稳态。

### 4.2 阴阳极气体压差平衡控制研究

#### 4.2.1 氢气供给系统ADRC控制器设计

将氢气流量比例阀的阀门开度 $\alpha_{val}$ 作为输入量控制燃料电池发动机系统阳极气体压力。在4.1.1节中的两个控制回路的基础上设置控制回路3:输入量比例阀阀门开度 $\alpha_{val}$ 对应输出量阳极气体压力 $p_{an}$ 。针对控制回路3设计相应的ADRC控制器,如图23所示,将阴极气体压力增大0.2bar作为期望值,通过ESO实时观测负载电流和排氢扰动等扰动作用,并实时补偿给反馈控制律,实现阳极气体压力的控制。

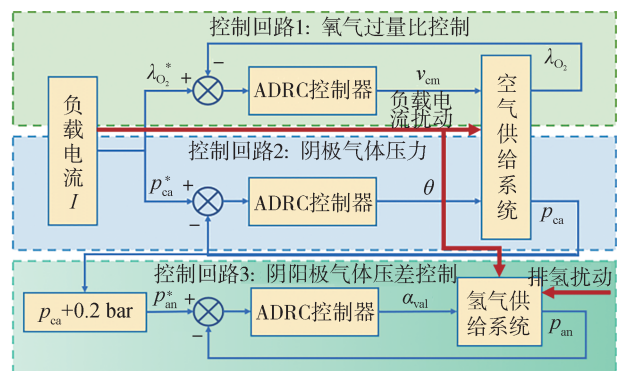


图23 氢气供给系统ADRC控制器结构形式

基于燃料电池氢气供给系统模型设计2阶ADRC控制器,系统的输入量为 $u_3=\alpha_{\text{val}}$ ,输出量 $y_3=p_{\text{an}}$ ,则氢气供给系统模型可以写为以下形式:

$$\ddot{y}_3 = f_3(x(t), \dots, w, t) + b_3 u_3 \quad (52)$$

将控制回路3的跟踪微分器 $\text{TD}_3$ 设计为

$$\begin{cases} u_{3,1}(k+1) = u_{3,1}(k) + h_5 u_{3,2}(k) \\ u_{3,2}(k+1) = u_{3,2}(k) + h_5 \cdot \text{fhan} \times \\ (u_{3,1} - p_{\text{an}}, u_{3,2}, r_5, h_5) \end{cases} \quad (53)$$

将氢燃料电池发动机系统的阳极气体压力 $p_{\text{an}}$ 的扩张状态观测器 $\text{ESO}_3$ 设计为

$$\begin{cases} \text{err}_3 = z_{3,1} - y_3 \\ \dot{z}_{3,1} = z_{3,2} - \beta_{3,1} \text{err}_3 \\ \dot{z}_{3,2} = z_{3,3} - \beta_{3,2} \text{fal}(\text{err}_3, 0.5, \delta) + b_3 u_3 \\ \dot{z}_{3,3} = -\beta_{3,3} \text{fal}(\text{err}_3, 0.25, \delta) \end{cases} \quad (54)$$

将控制回路3的状态误差反馈控制律 $\text{NLSEF}_3$ 设计为

$$u_{0,3} = -\text{fhan}(e_{3,1}, c_3 e_{3,2}, r_6, h_6) \quad (55)$$

依据上述设定,则控制回路3中的比例阀阀门开度 $\alpha_{\text{val}}$ 为

$$u_3 = \alpha_{\text{val}} = u_{0,3} - \frac{z_{3,3}}{b_3} \quad (56)$$

#### 4.2.2 ADRC控制器仿真结果分析

将氢燃料电池发动机系统运行温度设置为 $60^\circ\text{C}$ ,阴阳极压差设置为 $0.2\text{ bar}$ ,负载电流变化设置为图18所示的周期性阶跃信号,排气动作设为排气间隔为 $10\text{ s}$ 、持续时间为 $0.5\text{ s}$ 的周期性信号,控制回路3中期望阳极气体压力设置为高于阴极气体压力 $0.2\text{ bar}$ ,仿真时长设置为 $55\text{ s}$ ,氢气供给系统参数见表5,仿真结果如图24~图27所示。

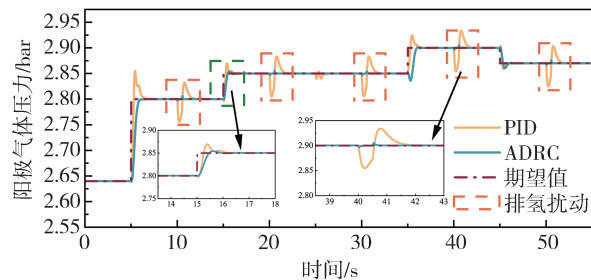


图24 PID和ADRC控制下的阳极压力变化曲线

由图24可知,在PID控制下,当时间为 $5\text{ s}$ 时阳极气体压力超调量为 $0.05\text{ bar}$ 且波动较大,稳定时间较长,但在ADRC控制器下,阳极气体压力的超调量以及稳定时间均优于PID控制器。当进行排气动作时,阳极气体压力会有一定波动,但在ADRC控制

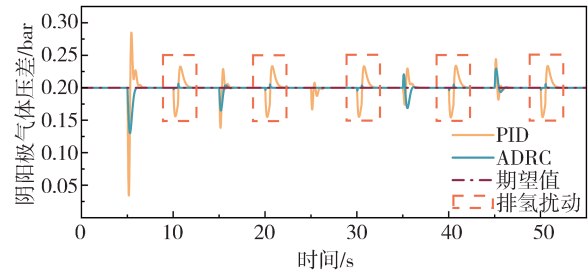


图25 PID和ADRC控制下两极气体压差变化曲线

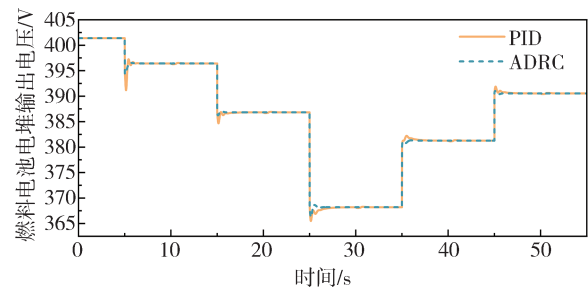


图26 PID和ADRC控制下输出电压变化曲线

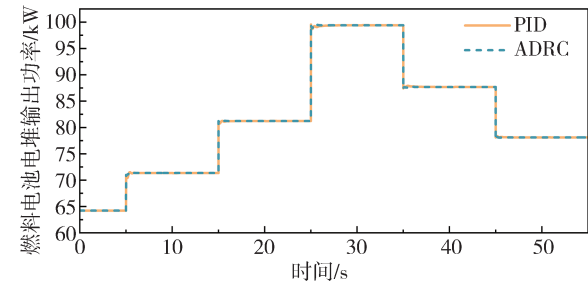


图27 PID和ADRC控制下输出功率变化曲线

器下的阳极气体压力波动量以及重新回到稳定状态的时间明显低于PID控制器,具有良好的鲁棒性。

由图25可知,在进行排气动作时,在PID控制下阳极气体压力超调量最大可达到 $0.15\text{ bar}$ 且波动幅度较大,达到稳定时间较长,但在ADRC控制器下阴阳极气体压差能够快速且稳定地达到设定值 $0.2\text{ bar}$ 且波动幅度较小,有利于提高燃料电池的安全性以及稳定性。由此可以得出,ADRC在抗干扰以及快速响应方面更具优势。

由图26和图27可知:在PID控制器下,电堆输出电压的波动量比较大,稳定时间较长,而ADRC控制器下,电堆输出电压能够在较小的波动量以及较短的时间内达到稳定值;在燃料电池电堆输出功率响应方面,二者的控制响应效果几乎一致,差别较小。综上所述,在燃料电池发动机系统阴阳极气体

压差平衡控制问题中,ADRC具有良好的鲁棒性和稳定性。

## 5 结论

本文基于仿真分析所得的PEMFC系统的最佳氧气过量比、阴极气体压力以及阴阳极气体压差结果,针对PEMFC气体供给系统设计了三者协同控制器。首先针对空气系统流量压力协同控制问题,使用ADRC控制算法对空气供给系统进行了解耦,将其分为流量控制回路和压力控制回路,分别对空气压缩机输入电压以及背压阀阀门开度进行控制,使得氧气过量比和阴极气体压力达到目标值,并与无解耦的PID控制器进行了对比分析,结果表明,ADRC控制器的超调量、调节时间以及抖动等方面的控制性能均优于PID控制器。在空气供给系统控制回路的基础上,新增阳极气体压力控制回路,并设计了ADRC控制器,使得阴阳极气体压差达到目标值,结果表明,在负载电流和排氢动作等扰动因素下,ADRC控制器相较于PID控制器具有更好的抗干扰性能,且阴阳极压差的波动远小于PID控制器,更有利于PEMFC系统高效安全地运行。

### 参考文献

- [1] ZHANG H, WANG Y, WANG D, et al. Adaptive robust control of oxygen excess ratio for PEMFC system based on type-2 fuzzy logic system[J]. *Information Sciences*, 2020, 511: 1-17.
- [2] 刘秋秀. 燃料电池空气供给系统的调控策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
LIU Q X. Study on control strategy of fuel cell air supply system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [3] 徐梓滢. 质子交换膜燃料电池系统建模与气体控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.  
XU Z G. Modeling of proton exchange membrane fuel cell systems and gas control studies[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [4] LIU Z, LI L, DING Y, et al. Modeling and control of an air supply system for a heavy duty PEMFC engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(36): 16230-16239.
- [5] MATRAJI I, LAGHROUCHE S, JEMEI S, et al. Robust control of the PEM fuel cell air-feed system via sub-optimal second order sliding mode[J]. *Applied Energy*, 2013, 104: 945-957.
- [6] DENG H, LI Q, CUI Y, et al. Nonlinear controller design based on cascade adaptive sliding mode control for PEM fuel cell air supply systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(35): 19357-19369.
- [7] HAN J, YU S, YI S. Oxygen excess ratio control for proton exchange membrane fuel cell using model reference adaptive control [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(33): 18425-18437.
- [8] KIM B M, CHOI Y H, YOO S J. Adaptive control of proton exchange membrane fuel cell air supply systems with asymmetric oxygen excess ratio constraints [J]. *IEEE Access*, 2019, 8: 5537-5549.
- [9] YANG D, PAN R, WANG Y, et al. Modeling and control of PEMFC air supply system based on TS fuzzy theory and predictive control [J]. *Energy*, 2019, 188: 116078.
- [10] 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 S, HU Z, XIE F. Study on adaptive decoupling control method for vehicle proton exchange membrane fuel cell air supply system [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(2): 172-177.
- [11] DANZER M A, WILHELM J, ASCHEMANN H, et al. Model-based control of cathode pressure and oxygen excess ratio of a PEM fuel cell system [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 176(2): 515-522.
- [12] LI M, YIN H, DING T, et al. Air flow rate and pressure control approach for the air supply subsystems in PEMFCs [J]. *ISA Transactions*, 2022, 128: 624-634.
- [13] 杨朵. 燃料电池空气供给系统控制与故障诊断策略研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.  
YANG D. Research on control and fault diagnosis strategy of fuel cell air supply system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [14] 王昭懿. 车用质子交换膜燃料电池空气供给系统建模及控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
WANG Z Y. Study on modeling and control strategy of air supply system for vehicle proton exchange membrane fuel cell [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [15] 曾繁勇. 质子交换膜燃料电池系统空气供给回路控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
ZENG F Y. Study on air supply loop control of proton exchange membrane fuel cell system [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [16] KURNIA J C, SASMITO A P, SHAMIM T. Advances in proton exchange membrane fuel cell with dead-end anode operation: a review [J]. *Applied Energy*, 2019, 252: 113416.
- [17] FAN L, XING L, TU Z, et al. A breakthrough hydrogen and oxygen utilization in a H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> PEMFC stack with dead-ended anode and cathode [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 243: 114404.
- [18] 洪凌. 车用燃料电池发电系统氢气回路控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
HONG L. Hydrogen loop control of vehicle fuel cell power generation system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

(下转第887页)

- based on EKF estimation with closed loop optimized parameters [J]. *ISA Transactions*, 2013, 52(6): 835-843.
- [19] APTE A, JOSHI V A, MEHTA H, et al. Disturbance-observer-based sensorless control of PMSM using integral state feedback controller [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(6): 6082-6090.
- [20] QU L, QIAO W, QU L. An extended-state-observer-based sliding-mode speed control for permanent-magnet synchronous motors [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(2): 1605-1613.
- [21] LIN X, XU R, YAO W, et al. Observer-based prescribed performance speed control for PMSMs: a data-driven RBF neural network approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(5): 7502-7512.
- [22] ZHANG X, YANG T, BOZHKO S. Speed/torque ripple reduction of high-speed permanent magnet starters/generators with low inductance for more electric aircraft applications [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, 8(4): 4431-4443.
- [23] WANG C, YAN J, LI W, et al. Disturbances rejection optimization based on improved two-degree-of-freedom LADRC for permanent magnet synchronous motor systems [J]. *Defence Technology*, 2024, 33: 518-531.
- [24] ZHANG G, YAN Y, WANG Q, et al. Adaptive step-size predictive PLL based rotor position estimation method for sensorless IPMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(5): 6136-6147.
- [25] 孙佃升, 章跃进. 自抗扰控制和高频信号注入的内嵌式永磁同步电机无位置传感器控制 [J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(4): 508-514.
- SUN D S, ZHANG Y J. Sensorless control for interior permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection control and high frequency signal injection technique [J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(4): 508-514.
- [26] XU X, HUANG X, HU Q, et al. An improved rotor position estimation method for SPMSM with misaligned hall-effect sensor [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(1): 735-743.
- [27] DU J, HE Y, YANG H. Sensor-less control based on SM-ADRC of PMLSM [C]. *Proceedings of the 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*, 2021.

(上接第874页)

- [19] ZHANG Q, TONG Z, TONG S, 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.
- [20] 吴智才. 燃料电池发动机的氢气循环及排放策略研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- WU Z C. Study on hydrogen cycle and emission strategy of fuel cell engine [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [21] WANG Y, WANG Y. Pressure and oxygen excess ratio control of PEMFC air management system based on neural network and prescribed performance [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 121: 105850.
- [22] BAO C, OUYANG M G, YI B. 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): 1879-1896.
- [23] BAO C, OUYANG M G, YI B. Modeling and control of air stream and hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system—II. linear and adaptive nonlinear control [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(13): 1897-1913.
- [24] 朱云. 质子交换膜燃料电池阴阳极供气系统优化控制研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- ZHU Y. Study on optimal control of proton exchange membrane fuel cell gas supply system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [25] 周炳杰. 燃料电池动力系统阴阳极压力平衡控制策略研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- ZHOU B J. Study on control strategy of cathode-anode pressure balance in fuel cell power system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [26] PUKRUSHPAN J T. Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors [D]. University of Michigan, 2003.