

# 大功率 PEMFC 氢气系统建模与仿真

陈家城

(福州职业技术学院交通工程系, 福州 365108)

【欢迎引用】陈家城. 大功率 PEMFC 氢气系统建模与仿真[J]. 汽车文摘, 2024(2): 56-62.

【Cite this paper】CHEN J C. Hydrogen System Modeling and Simulation of High-Power PEMFC[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(2): 56-62.

**【摘要】**针对大功率车用燃料电池发动机的氢气系统进行建模,基于 MATLAB/Simulink 平台搭建氢气系统核心部件模型及其控制模型,并集成氢气系统整体模型,基于该模型进行 2 种常见汽车行驶工况—CLTCP 和 NEDC 工况的动态仿真,结果表明,所建控制模型能较好保证阳极入口压力满足工作压力需求,并将阴极和阳极的压差维持在 0.02 MPa,2 种工况的氢气利用率分别为 99.67%和 99.76%,表明该模型可以用于大功率车用 PEMFC 系统开发。

**关键词:**质子交换膜燃料电池 (PEMFC); 氢气供给系统; 引射器; 氢气循环泵; 氢气利用率

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230053

## Hydrogen System Modeling and Simulation of High-Power PEMFC

Chen Jiacheng

(Department of Traffic Engineering, Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 365108)

**【Abstract】**The model of hydrogen system of high-power fuel cell engine is designed, the core components and control system of hydrogen system are modeled and simulated in MATLAB/Simulink platform. Based on the hydrogen system model, the CLTCP and NEDC common driving conditions are simulated on dynamic. The results showed that the anode working pressure requirements could be guaranteed by the inlet pressure, and the pressure difference between cathode and anode was maintained in 0.02 MPa. The hydrogen utilization rate of the two conditions were 99.67 % and 99.76 % respectively. That means the model can be used in the development of high-power vehicle PEMFC system.

**Key words:** Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), Hydrogen supply system, Ejector, Hydrogen circulation pump, Hydrogen utilization

## 0 引言

质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 具有良好的低温启动性能、高功率密度、零污染且能源来源广泛等诸多优势,是未来新能源汽车发展的重要方向之一<sup>[1]</sup>。PEMFC 系统一般包括电堆、氢气供给系统、空气供给系统和热管理系统。氢气供给系统是为电堆提供适应工作要求的一定压力和流量的氢气燃料,保障电堆持续稳定运行。氢气供给模式一般有流通模式、再循环模式和死端阳极模式 (Dead-Ended Anode, DEA)。电堆阳极产生的废气中含有反应生成的水和未反应的氢气,氢气再循环系统可实现对阳极残余氢气的循环利用,对燃料电池的输出功率和能源效率有很大影响。

关于燃料电池氢气系统的研究主要有 2 个方面: (1) 针对核心部件结构设计及选型研究; (2) 针对氢气系统匹配及控制策略研究。优化阳极氢气供给控制策略无需对质子交换膜燃料电池原有结构进行额外更改,即可提高燃料电池系统的性能,因此氢气供给控制策略的研究备受研究者的关注。

氢气循环系统的核心部件有氢气循环泵和引射器。相较于氢气循环泵,引射器因无移动部件、结构简单、运行可靠、无寄生功率等优点,被视为实现燃料电池氢气循环利用的理想装置<sup>[2-3]</sup>。因此越来越多的研究人员利用试验和数值分析方法,对引射器结构参数的影响规律开展研究,发现工作流体压力、工作流体流量、喷嘴喉部直径等对引射器性能有直接影响<sup>[4-6]</sup>。

当前氢气供给系统的控制策略通常采用比例、积分、微分(Proportional, Integral, Differential, PID)控制和模型预测控制。常见的PID算法对比例阀的控制效果在稳定工况下较好,但无法对电堆工况动态变化做出快速响应。为了更快速有效地对阳极氢气流量和压力进行控制,带有前馈的PID控制策略<sup>[7]</sup>、带有前馈的PI控制氢气供应系统控制策略<sup>[8-9]</sup>、PID与模糊双模控制等多种形式控制策略被不断提出。随着燃料电池功率等级的不断发展,双路径供氢(Dual Path Hydrogen Supply, DPHS)策略能有效提高燃料电池系统的性能<sup>[10-11]</sup>。

虽然燃料电池氢气系统在引射器等核心部件的优化设计、系统的控制策略上都有较多研究,也取得了一定的成就,但基于车用燃料电池系统面临的功率需求大,工况复杂多变的动态过程研究仍然较少。

本文基于MATLAB/Simulink平台搭建匹配70 kW大功率车用PEMFC系统,且引射器与氢气循环泵并联的氢气循环供给系统模型。并基于该氢气系统模型对常见的CLTCP和NEDC汽车行驶工况进行动态仿真研究,模拟燃料电池系统仿真过程中的供氢、氢气再循环及排氢等动态过程,探索氢气系统的进气和循环控制策略,为燃料电池系统性能优化研究提供参考。

## 1 氢气循环系统架构

氢气供给系统主要包括供氢、排氢和氢气再循环3个部分。对于大功率燃料电池系统,氢气流量的需求较大,采用传统单个引射器或者氢气循环泵已无法满足电堆对循环流量的需求<sup>[12]</sup>,因此采用引射器和氢气循环泵组合的形式对尾气中的氢气进行循环利用。氢气循环系统架构示意如图1所示。

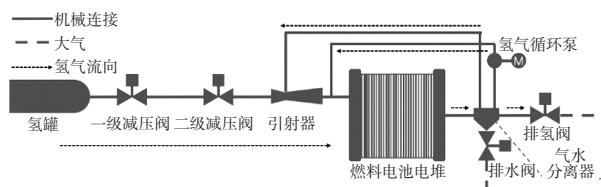


图1 氢气循环系统架构示意

氢气由氢罐流出经2级减压阀减压后,在引射器和氢气循环泵的作用下,与尾气中循环回阳极入口的氢气混合后进入燃料电池电堆阳极。入堆后的氢气在催化剂作用下,形成的氢质子穿过质子交换膜与阴极空气发生电化学反应产生水。未参与反应的气体与水分子经气水分离器将水气分离后,水由排水阀排

出,部分氢气由氢气循环泵和引射器的作用返回阳极入口,其余剩余气体经排氢阀排出。

## 2 氢气供给系统数学模型

根据氢气供给系统架构的主要组成部件,搭建氢气系统动态模型,主要包括减压阀模型、氢气喷嘴和引射器模型、氢气循环泵模型、水气分离器模型、排氢阀模型和电堆阳极流道模型。

### 2.1 减压阀模型

减压阀的作用是将气源的压力调节稳定到一定值,使得调节阀能够获得稳定的气源动力用于调节控制。在入口压力一定的情况下,减压阀出口气体压力与流经减压阀的气体流量在一定工作区间内存在线性关系。

根据主流气体减压阀产品参数得到流经减压阀的氢气摩尔流量和出口处氢气压力 $P_{out}$ 的数据(表1),拟合得到出口氢气压力与流经减压阀的氢气摩尔流量的经验公式。考虑到减压阀是机械运动,气体流量变化不能立即改变其出口压力,因此采用一阶传递函数描述该过程,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{0.1s + 1} \quad (1)$$

式中, $s$ 为传递函数的自变量,称为复频率。

表1 流经减压阀的氢气摩尔流量与出口处氢气压力

氢气摩尔流量 /mol·s <sup>-1</sup>	$P_{out}$ /MPa	氢气摩尔流量 /mol·s <sup>-1</sup>	$P_{out}$ /MPa
0.1	0.225 3	0.6	0.217 3
0.2	0.224 8	0.7	0.216 5
0.3	0.222 4	0.8	0.214 6
0.4	0.221 1	0.9	0.213 4
0.5	0.219 7	1.0	0.212 1

### 2.2 引射器模型

引射器的作用是对氢气进行降压增速,形成压差将引射气体吸入,经过混合段混合后再将气体由扩压段减速增压流出。

基于引射器的工作过程,搭建引射器模型<sup>[13-14]</sup>。入口处氢气质量流量 $q_m$ 和喷嘴处马赫数 $M_a$ 分别为:

$$q_m = \begin{cases} \frac{C_D A P_p}{\sqrt{R_{H_2} T}} \left( \frac{P_p}{P_s} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_s}{P_p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \frac{P_{out}}{P_{in}} \geq 0.528 \\ \frac{C_D A P_p}{\sqrt{R_{H_2} T}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \frac{P_{out}}{P_{in}} < 0.528 \end{cases} \quad (2)$$

$$M_{a_i} = \sqrt{\frac{2\left[1 - (P_s/P_p)^{(1/\gamma)}\right]}{\gamma - 1}} \quad (3)$$

式中,  $R_{H_2}$  为氢气气体常数,  $T$  为氢气喷嘴温度,  $A$  为喷嘴开口面积,  $P_p$  和  $P_s$  分别为工作气体压力和引射气体压力,  $\gamma$  为氢气比热比, 在理想气体条件下比热比等于绝热指数。

工作流体至混合段入口处时的流动状态变化为:

$$T_p/T_{p,2} = 1 + (k-1)M_{a_{p,2}}^2/2 \quad (4)$$

$$V_{p,2} = M_{a_{p,2}} \sqrt{KR_{H_2}T_{p,2}} \quad (5)$$

式中,  $M_{a_{p,2}}$  和  $T_{p,2}$  分别为工作流体在混合段入口处的马赫数和温度,  $k$  为氢气绝热指数。

混合段入口处流体流速沿入口截面径向方向从内到外是变化的, 其变化与流动区域半径大小及引射器结构尺寸、气体压力相关参数  $n_v$  有关<sup>[7]</sup>。

$$n_v = 1.393 \times 10^{-4} e^{\beta_p/0.05} + 0.456\beta_D + 0.1668 \quad (6)$$

式中,  $\beta_p = P_s^{0.8}/P_p^{1.1}$ ;  $\beta_D = D_m/D_t$ ,  $D_m$  和  $D_t$  分别为混合段和喷嘴的直径。

对流速和平均密度积分即可得到引射流体流量, 通过计算工作流体和引射流体在混合段入口处各自的流速, 结合动量定理, 可得混合至均匀时的总体流速。

随后, 混合气体均匀流动, 经扩压段流出, 流量各处相同, 等于混合段出口流速与截面积乘积。

### 2.3 氢气循环泵模型

氢气循环泵安装在氢气回流管道中, 和引射器共同将未反应的氢气从出口循环至阳极入口。

氢气循环泵循环摩尔流量为:

$$n = \frac{u_{bl} \cdot w_{bl,max}}{M_{rec}} \quad (7)$$

式中,  $n$  为氢气循环泵循环摩尔流量,  $u_{bl}$  为氢气循环泵的开启信号,  $w_{bl,max}$  为标准条件下氢气循环泵的角速度,  $M_{rec}$  为反应物的摩尔质量。

### 2.4 排氢阀模型

排氢阀功能是将阳极侧未反应的氢气和阴极侧渗透过来的氮气排到大气中, 既要保障电堆反应的氢气浓度, 又要保持足够的工作压力, 保障电堆效率。

可根据式(8)伯努利方程计算气体通过排氢阀的流速。

$$P_1 + 0.5\rho v_1^2 = P_2 + 0.5\rho v_2^2 \quad (8)$$

式中,  $P_1$  是阳极空间中气体压力,  $P_2$  是大气环境压力,  $\rho$  是阳极空间中气体密度,  $v_1$  和  $v_2$  分别为排氢阀关闭和打开时的气体流速。

假设排氢阀关闭时气体流速为0, 可计算得到排氢阀打开时气体流速, 再根据阀门直径可求得其横截面积。利用理想气体方程将体积流量转换成物质的量流量。根据排氢阀控制信号确定当前时刻排氢阀开闭状态, 计算氢气和氮气流量, 返回至阳极流道计算新的氢气和氮气含量。排氢频率过高会影响氢气利用率, 也可能造成潜在危险; 排氢频率过低则易造成杂质气体累积, 影响电堆性能。

### 2.5 水气分离器模型

燃料电池运行过程中会产生大量的水, 混合气体出电堆后, 因温度降低, 在阳极的循环气中容易产生大量液体水, 如不能及时进行水气分离, 把液态水由排水阀排出, 液体水将在阳极循环中不断累积流入电堆内, 极易造成阳极水淹故障。水气分离器是利用流体转向过程中水气的密度差异, 实现液体下沉与气体分离。

模型中水气分离器尺寸参数参考离心式水气分离器, 进出口管路直径为20 mm, 最大储水容积200 mL, 使用压力为0.1~0.25 MPa。为简化模型, 将水气分离器的分离效率设为常数95%。

水气分离器的流动阻力, 气体通过水气分离器产生的压降  $\Delta p$  与入口氢气的体积流量  $W_{H_2}$  关系由产品数据拟合得到, 见式(9)。

$$\Delta p = 0.0083W_{H_2}^2 - 0.2892W_{H_2} \quad (9)$$

### 2.6 阳极流道模型

阳极入口气体流量  $\dot{n}_{ai}(t)$  等于氢罐供给的氢气流量  $\dot{n}_{hi}(t)$  和氢气循环泵输送的含氢混合流量  $\dot{n}_{ai}(t)$  之和, 见式(10)。

$$\dot{n}_{ai}(t) = \dot{n}_{hi}(t) + \dot{n}_{ai}(t) \quad (10)$$

阳极出口气体流量为阳极入口气体流量  $\dot{n}_{an,in}$  加上跨膜运输的氮气流量  $\dot{n}_{cr,N_2}$  和水跨膜运输量  $\dot{n}_{cr,H_2O}$ , 减去反应的气体流量  $\dot{n}_{react,H_2}$ , 再减去跨膜运输的氢气流量  $\dot{n}_{cr,H_2}$ , 见式(11)。

$$\dot{n}_{an,out} = \dot{n}_{an,in} - \dot{n}_{cr,H_2} - \dot{n}_{react,H_2} + \dot{n}_{cr,N_2} + \dot{n}_{cr,H_2O} \quad (11)$$

## 3 氢气供给系统 Simulink 仿真模型

在 Matlab/Simulink 中, 基于数学模型分别建立减压阀模型、氢气喷嘴和引射器模型、氢气循环泵模型、水气分离器模型、排氢阀模型和电堆阳极流道模型, 得到氢气供给系统 Simulink 模型。

氢气供给系统一般采用高纯度的氢气供气, 供给氢气的同时需要兼顾氢气纯度、利用率和安全排放等

问题。因此需要同时搭建氢气供给系统的控制器模型,通过一定的控制逻辑调节氢气喷嘴和氢气循环泵转速,控制阳极入口期望氢气流量和压力输入;同时通过调节排氢阀开关频率,控制电堆定期排气,保障电堆效率。氢气供给系统的喷嘴控制器模型、排氢阀控制模型和氢气循环泵控制模型。

模型的综合控制效果应该保证阳极入口实际压力能够满足工作压力需求,且阴极和阳极压差维持在一定范围内,同时具有一定的氢气过量系数,又有较好的氢气利用率。

## 4 仿真验证

### 4.1 模型假设

为简化系统动态模型,根据流体力学等知识对仿真模型进行以下假设:氢罐供气纯净且压力稳定,沿管道没有压降;气体为理想气体;管壁和电堆为绝热系统;阳极流道气体均匀分布;阳极流道入口湿度可以维持在设定值,燃料电池质子交换膜始终保持良好的加湿状态。

### 4.2 模型验证

采用文献[15]相同的条件进行仿真验证实验,设定工作温度为80℃,加载工况电流如图2所示。仿真结果表明阴极和阳极压力差能控制到0.012 MPa,且电流发生突变时,阳极压力也能跟随发生变化,满足系统的压力要求,与文献[15]结果相似,误差在20%内,表明所建模型可靠(见图3)。

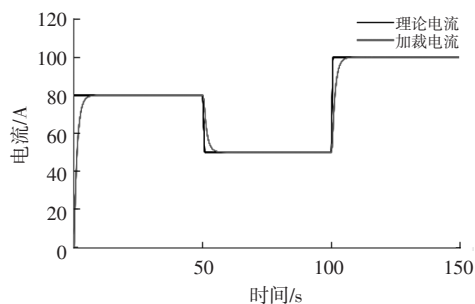


图2 模型验证工况加载电流

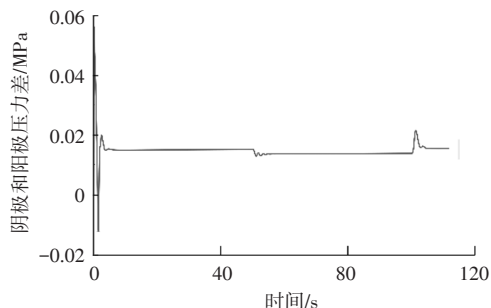


图3 模型验证阴极和阳极压力差

### 4.3 仿真模型参数

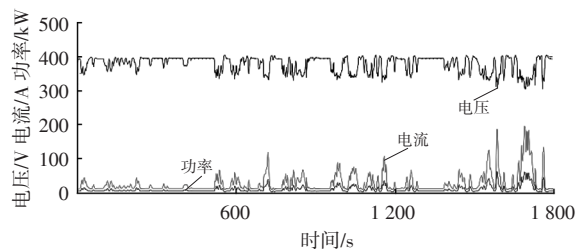
本文所建氢气供给系统模型为70 kW 质子交换膜燃料电池系统提供反应气体,燃料电池系统及氢气供给系统主要参数如表2所示。

表2 仿真模型参数

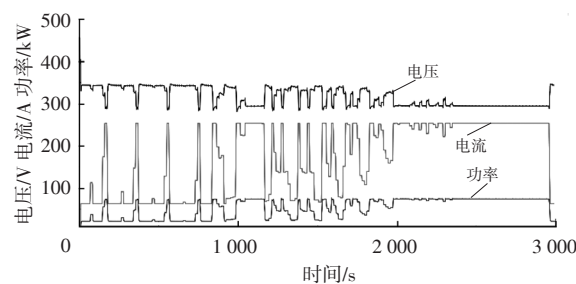
燃料电池系统		氢气供给系统	
参数	数值	参数	数值
质子交换膜厚度/cm	0.012	氢气比热比	1.4
有效活化面积/cm <sup>2</sup>	280	阳极流道体积/m <sup>3</sup>	0.005
电池片数/片	440	阳极压降系数	0.004
干燥膜密度/kg·cm <sup>-3</sup>	0.002	阳极气体相对湿度/%	70
干燥膜摩尔质量/kg·mol <sup>-1</sup>	1.1	喷嘴直径/m	0.006
工作温度/℃	80	排氢阀阀口直径/m	0.003
电堆质量/kg	100	氢气循环泵转子直径/m	0.4

### 4.4 动态仿真

分别选取CLTCP和NEDC汽车行驶工况,对燃料电池氢气供给系统进行动态仿真,分析阳极压力、氢气流量随工况变化情况,以及阳极和阴极压力差控制情况。2种工况加载电流、电压和功率如图4所示。



(a) CLTCP 工况



(b) NEDC 工况

图4 2种工况加载电流、电压和功率

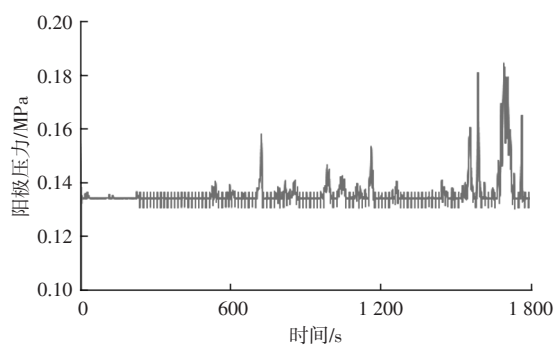
## 5 仿真结果与分析

### 5.1 阳极压力动态响应

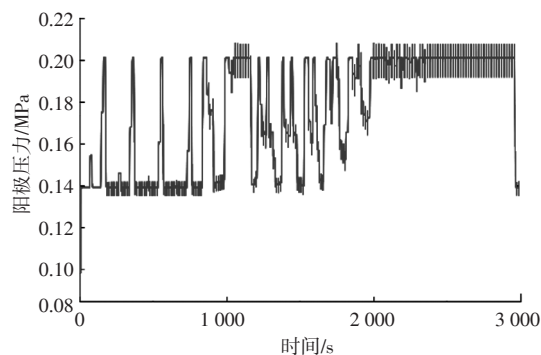
对所建PEMFC系统仿真模型分别在CLTCP和NEDC行驶工况下进行动态仿真,阳极压力动态响应

结果如图5所示。阳极入口压力通过PID控制器调节。2种工况下,阳极压力在需求电流增大时,都能积极正向响应,随之增大,从而保证输出需求。CLTCP工况电流大部分时间保持在13.8 A,其阳极压力可稳定在约0.134 MPa;而NEDC工况在运行2 000 s后电流保持在约250 A,阳极压力稳定在约0.2 MPa,说明在需求电流相对稳定时能保持在一定的压力水平上,且该压力水平与工作需求电流存在正相关关系。因为阳极压力的增加使氢气浓度增大,从而加快燃料电池反应。

CLTCP工况下阳极压力波动水平明显小于NEDC工况,可见工作电流越大,对燃料电池的输出特性越不利,其结果与燃料电池极化曲线特性相一致。



(a)CLTCP 工况



(b)NEDC 工况

图5 电堆阳极入堆压力

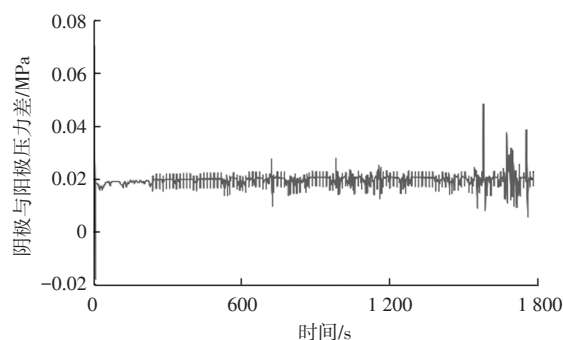
### 5.2 阴极与阳极压力差控制

CLTCP和NEDC行驶工况下阴极与阳极的压差控制情况如图6所示。2种工况下压差都能较好保持在0.02 MPa附近,表明所建控制模型控制效果较好。NEDC工况下阴极和阳极的压差波动较大,是因为阳极和阴极压力随工况电流变化的幅度较大。

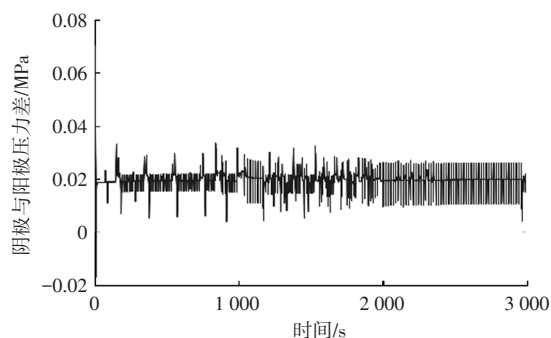
### 5.3 氢气流量动态响应

喷嘴控制器根据循环泵的回氢量和电堆反应所需的氢气,计算出喷嘴应提供的氢气量,从而控制喷嘴的开度和开启时间。CLTCP和NEDC行驶工况下,

喷嘴控制信号如图7所示。得到喷嘴出口的氢气摩尔流量结果如图8所示。喷嘴控制信号和喷嘴出口流量随工况变化趋势都与阳极压力随工况变化趋势一致。其原因是喷嘴控制信号越大,意味着喷嘴开度越大,则喷嘴出口流量越大。而喷嘴喷出的流量一部分用于电化学反应,另一部分则是用于维持阳极入口压力,使阳极入口实际压力与需要压力相等,故此与随工况变化趋势与阳极压力相似。



(a)CLTCP 工况

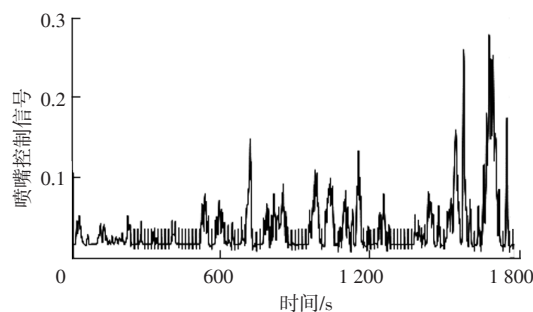


(b)NEDC 工况

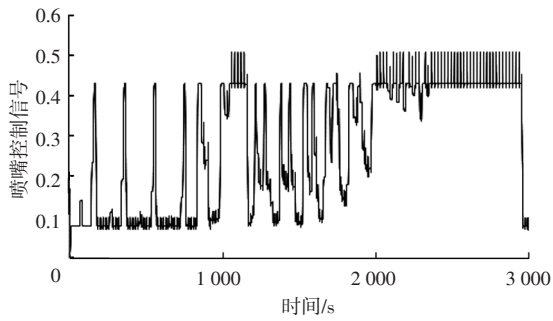
图6 阴极与阳极压力差

### 5.4 氢气循环与排氢控制

氢气循环泵可将阳极空间中未反应的氢气循环至阳极入口重新和引射器出口的氢气混合。排氢阀则是定期将阳极流道中的废气排出,保证阳极流道中的氢气浓度,使氮气和它其它惰性气体含量低于一定值,从而保障燃料电池的效率。

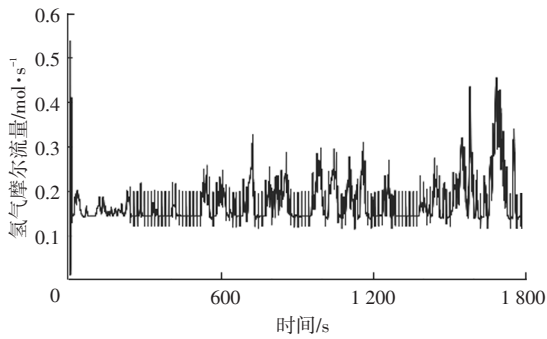


(a)CLTCP 工况

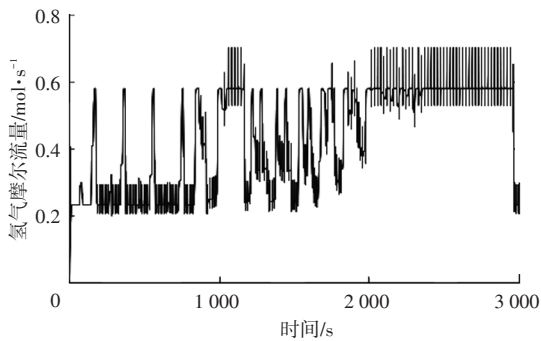


(b)NEDC工况

图7 喷嘴控制信号



(a)CLTCP工况

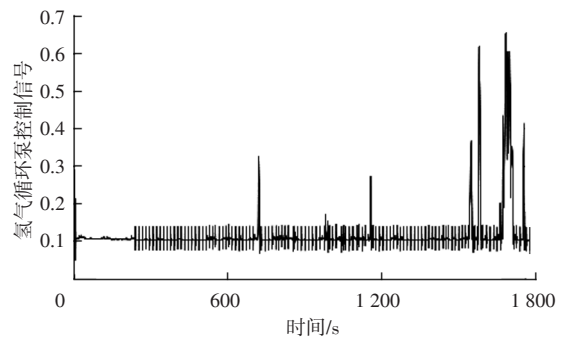


(b)NEDC工况

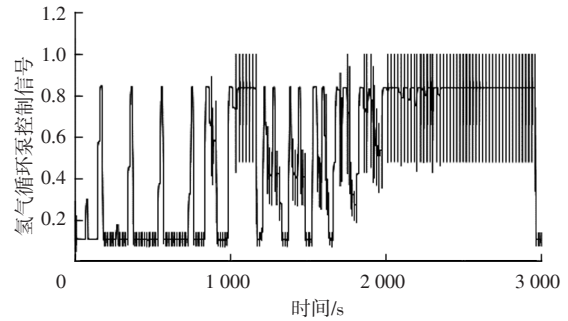
图8 喷嘴出口的氢气摩尔流量

氢气循环泵转速控制采用查表法,根据电堆电流大小直接得到需要的氢气循环泵转速。2种工况下的氢气循环泵控制信号如图9所示,与图4工况拉载电流对照,可看出循环泵控制信号能较好响应负载电流的变化,同时结合图5中阳极压力特性曲线与加载工况具有较好的变化趋势,可表明所建模型循环泵的控制能较好地响应工况所需电流。

排氢阀的控制主要采用基于规则的控制方法。本文排氢阀的控制方法是当氮气浓度超过1%时打开排氢阀,当氮气浓度低于1%时关闭排氢阀。2种工况下,排氢阀的控制信号如图10所示。2种工况下排氢阀打开时,排出的氢气摩尔流量结果如图11所示。

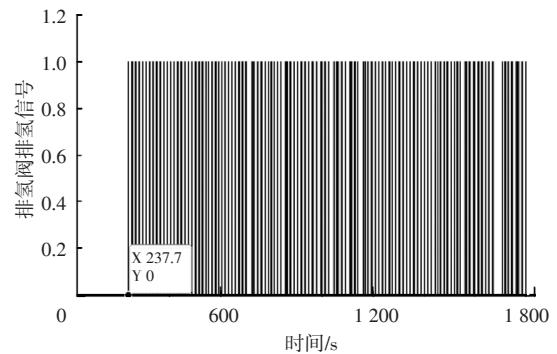


(a)CLTCP工况

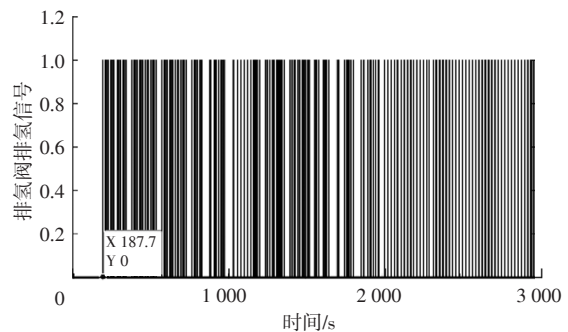


(b)NEDC工况

图9 氢气循环泵控制信号



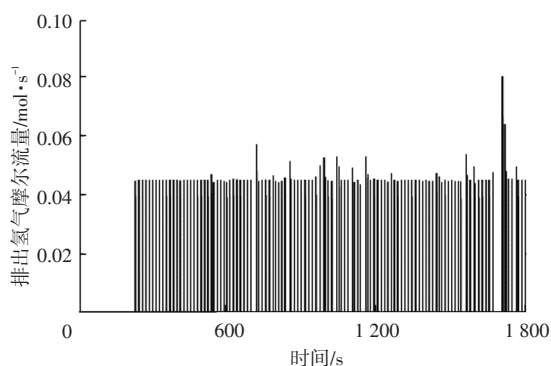
(a)CLTCP工况



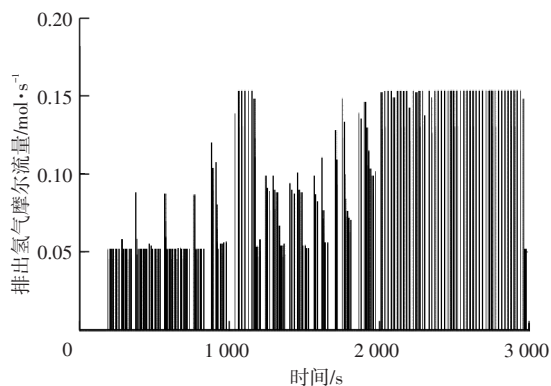
(b)NEDC工况

图10 排氢阀排氢频率

CLTCP工况下排氢阀首次开启时间为燃料电池系统运行后237.7s,而NEDC工况是187.2s。说明电流越大,阳极入口压力越大,氮气浓度越容易得到排氢阀开启的浓度值。



(a) CLTCP 工况



(b) NEDC 工况

图 11 排出氢气摩尔流量

根据燃料电池运行期间喷嘴出口氢气总量与排气阀排出的氢气总量之差,可计算 CLTCP 和 NEDC 工况运行时的综合氢气利用率分别为 99.67% 和 99.76%。

## 6 结束语

本文针对车用 PEMFC 氢气供给系统进行建模仿真研究,结果表明所建控制模型能较好保证阳极入口压力满足工作压力需求,同时将阴极和阳极的压差维持在约 0.02 MPa 的合理范围内。通过 CLTCP 和 NEDC 这 2 种工况动态仿真对比,可知 NEDC 工况因频繁的大电流变化,阴极和阳极的压差波动较大。2 种工况的综合氢气利用率都超过 99.6%,说明模型控制效果较好,可以用于大功率车用 PEMFC 系统性能优化仿真。

### 参 考 文 献

- [1] XUE H Y, WANG L, ZHANG H L, et al. Design and investigation of multi-nozzle ejector for PEMFC hydrogen recirculation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(28): 14500–14516.
- [2] 周苏, 胡哲, 王凯凯, 等. 质子交换膜燃料电池系统喷射器的氢气循环特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 1115–1121+1130.

- [3] ZHAO Y Y, LIU Y X, LIU G B, et al. Air and hydrogen supply systems and equipment for PEM fuel cells: a review[J]. International Journal of Green Energy, 2022, 19(4): 331–348.
- [4] NIKIFOROW K, KOSKI P, KARIMAKI H, et al. Designing a hydrogen gas ejector for 5 kW stationary PEMFC system—CFD—modeling and experimental validation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(33):14952–14970.
- [5] 杨秋香, 叶立, 殷园, 等. PEMFC 系统喷射器设计及仿真研究[J]. 能源研究与信息, 2018, 34(3): 176–181.
- [6] 赵海贺, 陈泽宇, 覃承富, 等. 车用燃料电池氢气循环系统喷射特性研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1):173–179.
- [7] 张家明, 马天才, 丛铭, 等. 大功率燃料电池氢气系统建模与控制[J]. 汽车技术, 2021(2): 23–27.
- [8] CHEN F X, YU Y, LIU Y, et al. Control system design for proton exchange membrane fuel cell based on a common rail (I): Control strategy and performance analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(7): 4285–4293.
- [9] YUAN H, DAI H F, WU W, et al. A fuzzy logic PI control with feedforward compensation for hydrogen pressure in vehicular fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(7): 5714–5728.
- [10] BAI X Y, LUO L Z, HUANG B, et al. Performance improvement of proton exchange membrane fuel cell stack by dual-path hydrogen supply[J]. Energy, 2022, 246: 123297.
- [11] HE J L, CHOE S Y, HONG C O. Analysis and Control of a Hybrid Fuel Delivery System for a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell[J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(2): 973–984.
- [12] CHEN L, XU K D, YANG Z Y, et al. Optimal design and operation of dual-ejector PEMFC hydrogen supply and circulation system[J]. Energies, 2022, 15(15): 5427.
- [13] DADVAR M, AFSHARI E. Analysis of Design Parameters in Anodic Recirculation System Based on Ejector Technology for PEM Fuel Cells: A New Approach in Designing[J]. Hydrogen Energy, 2014, 39(23): 12061–12073.
- [14] ZHU Y, LI Y. New Theoretical Model for Convergent Nozzle Ejector in the Proton Exchange Membrane Fuel Cell System [J]. Journal of Power Sources, 2009, 191(2): 510–519.
- [15] 宋鹏, 徐国凯, 刘长宏, 等. PEMFC 及其空气/氢气供给系统控制研究[J]. 电源技术, 2010, 34(4): 334–337.

(责任编辑 明慧)

### 【作者简介】

陈家城(1986—),男,福州职业技术学院,讲师,研究方向为车载燃料电池系统建模仿真及控制。

E-mail:jiachengfzu@hotmail.com