

# 燃料电池氢气流量控制系统变负载匹配设计与仿真

李 晶<sup>1</sup>, 张 力<sup>1</sup>, 邹姜昆<sup>1</sup>, 明平文<sup>2,3</sup>

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 3. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

**摘要:** 针对车载质子交换膜燃料电池供氢系统负载工况多变时的氢气流量控制问题, 提出一种基于比例减压阀与流量控制阀的氢气流量负载匹配控制系统架构与方法。建立了从高压储氢瓶至燃料电池堆的供氢系统整体模型, 基于该模型设计了比例减压阀、流量控制阀与氢气循环泵的控制策略, 并就某一型号电堆的变负载工况对系统模型与控制策略进行仿真验证。结果表明: 电堆阳极压力可快速跟踪给定压力, 响应时间约 2~3s; 氢气流量可适应负载变化需求, 其瞬时超调量与压力响应速度成正相关; 稳态时氢气利用率维持在 95% 以上, 供氢过量比维持在 1.27 以上, 供气氮含量维持在 5% 以下, 满足电堆性能需求。

**关键词:** 质子交换膜燃料电池; 供氢系统; 变负载工况; 负载匹配; 控制策略

中图分类号: TM911.42; TK91

文献标志码: A

## Variable Load Matching Design and Simulation of Hydrogen Flow Control System for Fuel Cell

LI Jing<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, ZOU Jiangkun<sup>1</sup>, MING Pingwen<sup>2,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Addressing the challenge of hydrogen flow control in the on-board proton exchange membrane fuel cell system under variable loads, a control system architecture and method for hydrogen flow load matching based on proportional pressure reducing valve and flow control valve were proposed. The comprehensive model from the hydrogen tank to the fuel cell stack was established. Control strategies for the proportional pressure reducing valve, flow control valve, and hydrogen circulation pump were designed and validated through simulations. The results show that the anode pressure of the stack can promptly track the set

pressure with a response time of approximately 2~3 s. The hydrogen flow can adjust to load variations, with the transient overshoot correlating positively with the pressure response speed. In a stable state, the hydrogen utilization rate remains above 95%, the hydrogen excess ratio exceeds 1.27, and the nitrogen content in the supplied gas is below 5%, meeting the stack performance criteria.

**Keywords:** Proton exchange membrane fuel cell; Hydrogen supply system; Variable load; Load matching; Control strategy

质子交换膜燃料电池汽车(PEMFC Vehicles)是传统燃油汽车最具潜力的替代品之一。供氢系统是燃料电池汽车的重要组成部分, 为满足负载多变时电堆对氢气不同程度的需求, 需要对氢气流量与压力、氮气浓度等进行合理控制。

现有 70MPa 车载高压储氢瓶供氢系统多采用两级减压方案, 二级减压阀为定值减压阀, 阎耀保等<sup>[1]</sup>分析了车载两级气动减压阀的工作机理, 建立了阀的数学模型, 从功耗的角度分析了燃料电池供氢系统前端输氢管路特性与负载需求的关系。电堆氢耗和性能受负载端氢气传输方式的影响, PEMFC 供氢系统以循环模式为主<sup>[2-3]</sup>。Jenssen<sup>[4]</sup>等通过实验发现被动回氢方式难以全面满足车载燃料电池功率、寿命等方面的需求。除了氢气供给流量, 电堆压力与膜电极两端压差变化对电堆性能也有显著影响<sup>[5]</sup>。Hong<sup>[6]</sup>、Chen<sup>[7]</sup>等建立了以电堆阳极回路为主面向压力控制的供氢系统模型, 但未考虑储氢瓶至减压阀的输氢管路特性; Yuan 等<sup>[8]</sup>研究了阳极压力模糊 PID 控制策略, 忽略了气体流量的超调。张家明等<sup>[9]</sup>为大功率电堆供氢系统设计了阳极压力控制策略, 调节特定负载下的循环流量以满足电堆要求的供氢过量比, 但未考虑阳极回路的水蒸气和氮气; 何丽等<sup>[10]</sup>研

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(52276210)

第一作者: 李晶, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为流体传动控制基础理论及应用。

E-mail: cynthia\_li@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

究了氢氧过量比对燃料电池性能的影响,指出氢气过量比在1.1以上对电堆的影响很小;同时黄俭标等<sup>[1]</sup>的研究表明当氢气过量比低于1.05时系统响应迟缓,性能下降。燃料电池堆供氢过量比很大程度上受到杂质气体分数的影响,因此以纯氢气为介质进行研究有一定的局限性。

本文提出一种以比例减压阀与可调流量阀为核心的变负载工况下氢气流量控制系统架构与控制方法,建立包含储氢瓶输氢管路氢气传输与循环、燃料电池堆氢气流量—电流特性以及氮气渗透的供氢系统整体模型,设计系统氢气流量控制策略,通过仿真验证方案的合理性。

## 1 供氢系统分析与建模

### 1.1 系统分析与模型假设

为保持电堆大负载时有一定的压力储备向电堆

输送足够的氢气流量,二级减压阀出口压力设定值较高,在负载发生变化尤其是负载突然减小时,作为精调元件的流量控制阀前后压差过大,发热加剧,不仅导致控制精度下降,而且对负载端的水热管理系统亦造成冲击。对此,本文提出一种出口压力动态可调的比例减压阀控制方案。

根据现有车载供氢系统结构<sup>[1]</sup>,结合本文提出的控制方案,建立结构如图1所示的车载燃料电池供氢系统模型。高压氢气瓶压缩氢气初始压力为70MPa,经瓶口包含高压减压阀的阀组减压至0.5~10MPa,再经比例减压阀降低至燃料电池工作所需压力;流量控制阀根据负载需求动态调节氢气流量。氢气进入阳极后在膜电极上与来自阴极的氧气发生电化学反应,电堆末端未完全反应的氢气由循环泵输送至电堆阳极进口以实现循环利用。泄漏/排气阀可将电堆内的少量气体排出,防止阳极杂质气体体积分数过大。

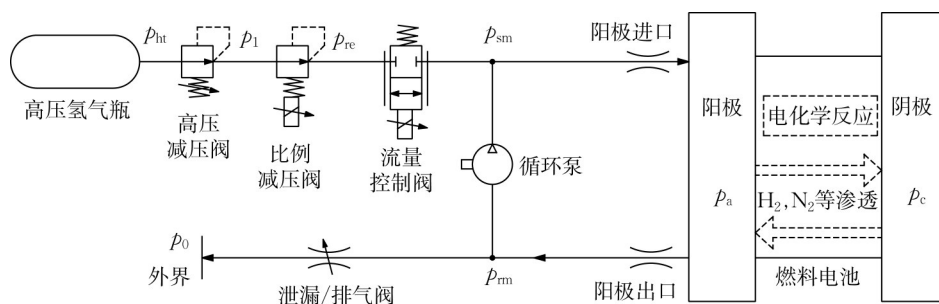


图1 车载供氢系统架构

Fig.1 On-board hydrogen supply system architecture

为对系统模型进行合理简化,提出以下假设:

- (1)经高压减压阀减压后的气体为理想气体;
- (2)水/热管理系统处于理想工作状态,气体管道与电堆流道的温度与湿度保持恒定;
- (3)气体的流动为一维稳定流动;
- (4)阴极空气供应充足且阴极压力处于标称压力。

### 1.2 输氢管路模型

#### 1.2.1 高压储氢瓶

储氢瓶内氢气质量与流量满足质量守恒。由于储氢瓶内压力较高,不宜用理想气体状态方程描述,这里采用适用于高压气体的范德瓦尔斯方程<sup>[12]</sup>,将气瓶内压力与流量的关系表示为

$$\frac{dp_{ht}}{dt} = - \left[ \frac{V_{ht} T_{ht} R}{\left( V_{ht} - \frac{bm}{M_{H_2}} \right)^2} - \frac{2a}{V_{ht}^2} \frac{m_{ht}}{M_{H_2}} \right] \dot{n}_{ht} \quad (1)$$

式中: $\dot{n}_{ht}$ 为储氢瓶输出的氢气摩尔流量; $p_{ht}$ 为瓶内压力; $V_{ht}$ 为储氢瓶容积; $T_{ht}$ 为瓶内温度; $m_{ht}$ 为氢瓶氢气质量; $M_{H_2}$ 为氢气的摩尔质量; $R$ 为通用气体常数; $a$ 和 $b$ 为气体的比例常数。对氢气, $a=0.025 \text{ m}^6 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{-2}$ ;  $b=0.027 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

#### 1.2.2 高压减压阀

车载供氢系统的高压减压阀一般包含在储氢瓶瓶口的组合阀模块中,这里采用如图2所示的直动式锥形定压减压阀的数学模型<sup>[1]</sup>。

阀芯运动时的力平衡方程为

$$p_1 A_f - F_k - F_n + F_{b1} + F_{b2} = m \ddot{x} \quad (2)$$

式中: $A_f$ 为压力对阀芯作用的有效面积; $m$ 为阀芯质量; $\ddot{x}$ 为阀芯加速度; $F_k$ 为阀芯所受弹簧力; $F_n$ 为阀芯所受的气体粘性阻力; $F_{b1}$ 与 $F_{b2}$ 分别为稳态气流反力和瞬态气流反力。

当阀芯处于动态平衡状态时,减压阀出口压力 $p_1$

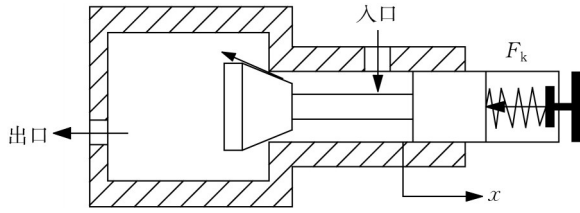


图2 直动式定压减压阀

Fig.2 Direct-acting constant pressure reducing valve

稳定。

### 1.2.3 比例减压阀

比例减压阀前端压力稳定,输出压力与控制电信号成比例关系。根据文献[9]中不同阀开度下比例阀压力输出性能的实测数据,用插值法得到阀开度与输出压力特性,如图3所示。

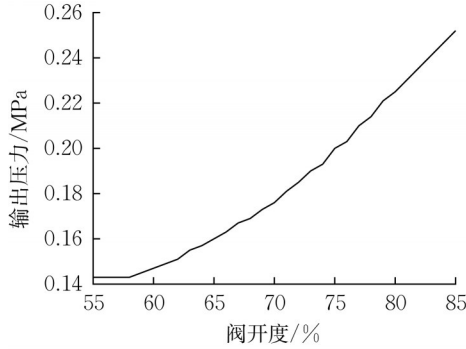


图3 比例减压阀控制电流-压力特性

Fig.3 Control current-pressure characteristics of proportional pressure reducing valve

### 1.2.4 流量控制阀

流量控制阀为开度随控制信号连续可调的节流阀,根据阀口气体质量流量方程<sup>[1,9]</sup>,通过阀口的氢气质量流量 $w_{ht}$ 为

$$w_{ht} = \begin{cases} \frac{C_d p_{re} A}{\sqrt{R_g T}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_{sm}}{p_{re}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{sm}}{p_{re}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & \Pi \leq \frac{p_{sm}}{p_{re}} \leq 1 \\ \frac{C_d p_{re} A}{\sqrt{R_g T}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}, & 0 \leq \frac{p_{sm}}{p_{re}} < \Pi \end{cases} \quad (3)$$

式中: $p_{re}$ 为比例减压阀输出压力; $p_{sm}$ 为进气管道压力; $A$ 为流量控制阀口节流面积,由电信号比例调节; $T$ 为阀口上游温度; $R_g$ 为氢气气体常数; $\Pi$ 为临界压力比,与工质有关,对氢气 $\Pi=0.528$ ;  $k$ 为氢气绝热

系数; $C_d$ 为阀口流量修正系数,本文阀口采用锥阀形式,对锥阀而言 $C_d$ 根据经验值取0.7。

## 1.3 阳极回路模型

### 1.3.1 阳极管道及流道

阳极管道及流道中的气体包括氢气、氮气和在水蒸气,可视为理想气体<sup>[6-8]</sup>,根据质量守恒与理想气体状态方程,得进气管道压力与流量的关系式为

$$\dot{p}_{sm} = (RT_{sm}/V_{sm})(\dot{n}_{ht} + \dot{n}_{cp} - \dot{n}_{ai}) \quad (4)$$

式中: $p_{sm}$ 为进气管道压力; $T_{sm}$ 为进气管道温度; $V_{sm}$ 为进气管道体积; $\dot{n}_{ht}$ 为来自储氢瓶的气体摩尔流量; $\dot{n}_{cp}$ 为来自循环泵的气体摩尔流量; $\dot{n}_{ai}$ 为电堆阳极进口气体摩尔流量。

同理可得阳极流道压力与流量的关系式为

$$\dot{p}_a = (RT_a/V_a)(\dot{n}_{ai} - \dot{n}_{ao} + \dot{n}_{cr,N_2} - \dot{n}_{cr,H_2} - \dot{n}_{re}) \quad (5)$$

式中: $p_a$ 为阳极流道压力; $T_a$ 为阳极流道温度; $V_a$ 为阳极流道体积; $\dot{n}_{ao}$ 为阳极出口气体摩尔流量; $\dot{n}_{cr,N_2}$ 与 $\dot{n}_{cr,H_2}$ 分别是质子交换膜上氮气与氢气的摩尔渗透速率; $\dot{n}_{re}$ 为参与电化学反应的氢气摩尔流量。

同理可得出气管道压力与流量的关系式为

$$\dot{p}_{rm} = (RT_{rm}/V_{rm})(\dot{n}_{ao} - \dot{n}_{cp} - \dot{n}_{ex}) \quad (6)$$

式中: $p_{rm}$ 为出气管道压力; $T_{rm}$ 为出气管道温度; $V_{rm}$ 为出气管道体积; $\dot{n}_{ex}$ 为排气口排出的气体摩尔流量。

燃料电池气体孔口流量可用式(7)~(9)表示<sup>[13]</sup>,阳极进口、阳极出口和排气口的流量分别为

$$\dot{n}_{ai} = \alpha(A_{ai}/M_{ai})(p_{sm} - p_a) \quad (7)$$

$$\dot{n}_{ao} = \alpha(A_{ao}/M_{ao})(p_a - p_{rm}) \quad (8)$$

$$\dot{n}_{ex} = \alpha(A_{ex}/M_{ex})(p_{rm} - p_0) \quad (9)$$

式中: $A_{ai}$ 、 $A_{ao}$ 、 $A_{ex}$ 分别为阳极进口、阳极出口、排气口的孔口面积; $M_{ai}$ 、 $M_{ao}$ 、 $M_{ex}$ 为对应孔口处上游的气体摩尔质量; $\alpha$ 为流量系数; $p_0$ 为大气压。

式(4)~(9)中各流量与压力符号关系示意如图4所示。除了储氢瓶输出的氢气流量 $\dot{n}_{ht}$ 、膜电极渗透的氮气与氢气流量 $\dot{n}_{cr,N_2}$ 与 $\dot{n}_{cr,H_2}$ 、电化学反应氢气流量 $\dot{n}_{re}$ ,其余流量都是包含氢气、氮气与水蒸气的混合气体流量,气体压力与体积分数的关系为

$$\dot{n}_{or,x} = (p_{pi,x}/p_{pi})\dot{n}_{or} \quad (10)$$

式中: $\dot{n}_{or,x}$ 为气体 $x$ 流经某一孔口的摩尔流量; $\dot{n}_{or}$ 为流经该孔口的混合气体摩尔流量; $p_{pi,x}$ 为该孔口上游腔室或管道的气体 $x$ 的分压; $p_{pi}$ 为该孔口上游腔室或管道的混合气体压力。

分别以阳极氢气与氮气为对象列出理想气体状态方程,可得系统中氢气与氮气各自的分压关于其



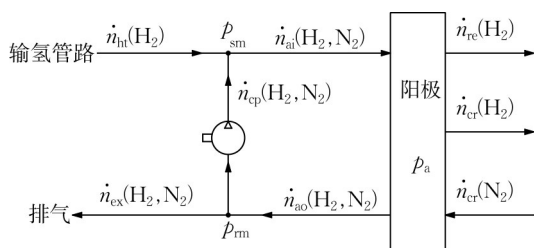


图4 阳极回路各符号之间的关系

Fig.4 Relationship between symbols in the anode circuit

流量的函数,其结构形式与式(4)、式(5)、式(6)相似,限于篇幅,在此不一一列出。

### 1.3.2 膜电极

进入电堆阳极的一部分氢气在膜电极上参与电化学反应。根据法拉第电解定律,电流与气体反应速率的关系可以表示为

$$\dot{n}_{re} = \dot{n}_{re,H_2} = (0.5N/F)I \quad (11)$$

式中:  $I$  为电堆电流;  $N$  为燃料电池片数;  $F$  为法拉第常数。

同时,质子交换膜上存在气体的渗透现象。气体摩尔渗透速率可表示为<sup>[14]</sup>

$$\dot{n}_{cr,x} = Nk_{cr,x}(p_{x,h} - p_{x,l}) \quad (12)$$

式中:  $\dot{n}_{cr,x}$  为气体  $x$  的摩尔渗透速率;  $p_{x,h}$  和  $p_{x,l}$  分别为气体  $x$  在质子交换膜两侧的分压;  $k_{cr,x}$  为气体的渗透系数,与气体性质及质子交换膜结构等有关。

燃料电池工作时,阴极的氮气与氧气会同时向阳极渗透。文献[14]的研究表明,当不考虑膜电极上的电化学反应时,空气中氧气的渗透速率仅为氮气的1/8;而燃料电池实际工作时氧气大部分在电化学反应中被消耗,使得氧气渗透量远小于氮气渗透量,因此本文忽略了氧气的渗透量。

### 1.3.3 循环泵

循环泵模型使用MAP图描述。本文根据系统功率需求,选用Busch公司生产的燃料电池专用爪式氢气循环泵,将其在不同压力与转速下测得的体积流量<sup>[15]</sup>折算为质量流量,用插值法得到其特性,如图5所示。

### 1.3.4 阴极流道

膜电极气体渗透速率计算需同时考虑阴极气体分压与浓度。阴极气体为压缩空气,主要成分为氮气与氧气。由于阴极无循环回路,不存在由阳极渗透而来的氢气累积,所以阴极氢气分数可视为0。

根据1.3.1中的计算方法,同理可得阴极出口的氮气和氧气的流量表达式为

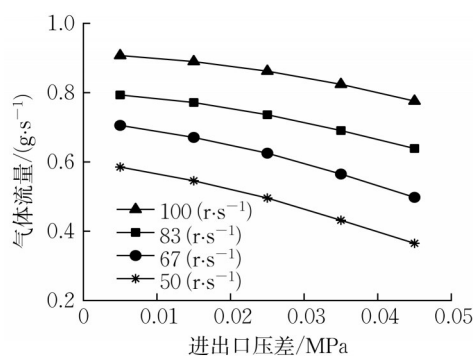


图5 循环泵气体流量特性

Fig.5 Gas flow characteristics of circulating pump

$$\dot{n}_{co,N_2} = x_{N_2,c} \dot{n}_{co} \quad (13)$$

$$\dot{n}_{co,O_2} = x_{O_2,c} \dot{n}_{co} \quad (14)$$

$$\dot{n}_{co} = \alpha(A_{co}/M_c)(p_c - p_0) \quad (15)$$

式中:  $x_{N_2,c}$  和  $x_{O_2,c}$  表示阴极氮气和氧气的体积分数;  $\dot{n}_{co}$  是阴极出口混合气体的摩尔流量;  $A_{co}$  是阴极出口面积;  $M_c$  为阴极混合气体的摩尔质量; 阴极压力  $p_c$  处于标称状态。

进入阴极的空气中一部分氧气在质子交换膜发生反应的摩尔流量  $\dot{n}_{re,O_2} = NI/4F$ , 另一部分随尾气一起排出, 氮气本身不参与反应。设空压机吸入标准大气压常温下的空气, 其中氮气与氧气的体积分数比为0.78:0.21, 故有

$$(\dot{n}_{co,N_2} + \dot{n}_{cr,N_2})/(\dot{n}_{co,O_2} + \dot{n}_{re,O_2}) = 0.78/0.21 \quad (16)$$

联立式(13)~(16)得到阴极氮气体积分数随负载电流需求变化的关系, 如图6所示。

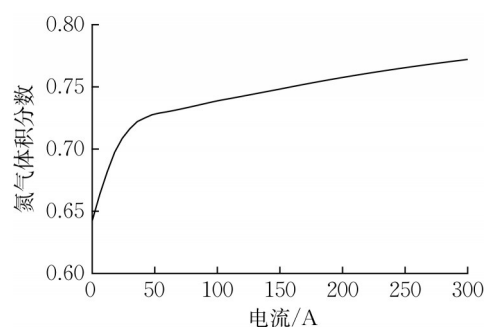


图6 阴极氮气体积分数与电堆电流对应关系

Fig.6 Relationship between nitrogen volume concentration of cathode and stack current

## 1.4 模型验证

本文所研究的燃料电池参数来自Ballard公司的9SSL型电堆。为验证所建立模型的准确性, 将电堆在不同负载电流下测定的标称阳极压力<sup>[16]</sup>与模型在无控制策略时计算出的稳态阳极压力进行对比, 如

图7所示。结果表明仿真值与标称值吻合较好,最大相对误差不超过5%。

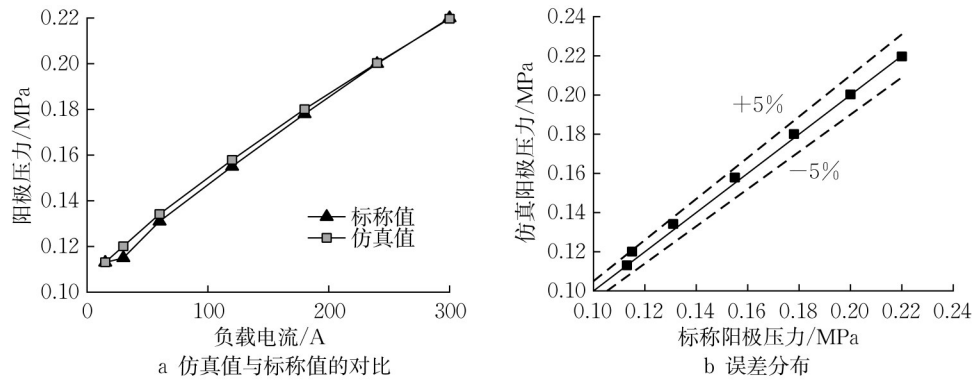


图7 模型准确性验证

Fig.7 Accuracy verification of the model

## 2 控制策略设计

### 2.1 控制系统整体架构

基于前述供氢系统数学模型,提出一种车载供氢系统氢气流量变负载匹配控制方法,控制系统整体架构如图8所示。设有三个控制器 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ ,分别控制流量控制阀的开度、比例减压阀输出压力与循

环泵转速。同时设置带有前馈补偿器的PID控制器,根据负载电流计算需求的给定流量信号。前馈补偿器输出的补偿流量信号根据不同负载电流下所需的对应流量查表插值获得;PID控制器则是根据不同负载电流下电堆阳极的期望压力与实际压力的误差,进一步快速调节瞬时流量,以达到在输氢流量适应负载需求的同时快速调节电堆阳极压力的目的。

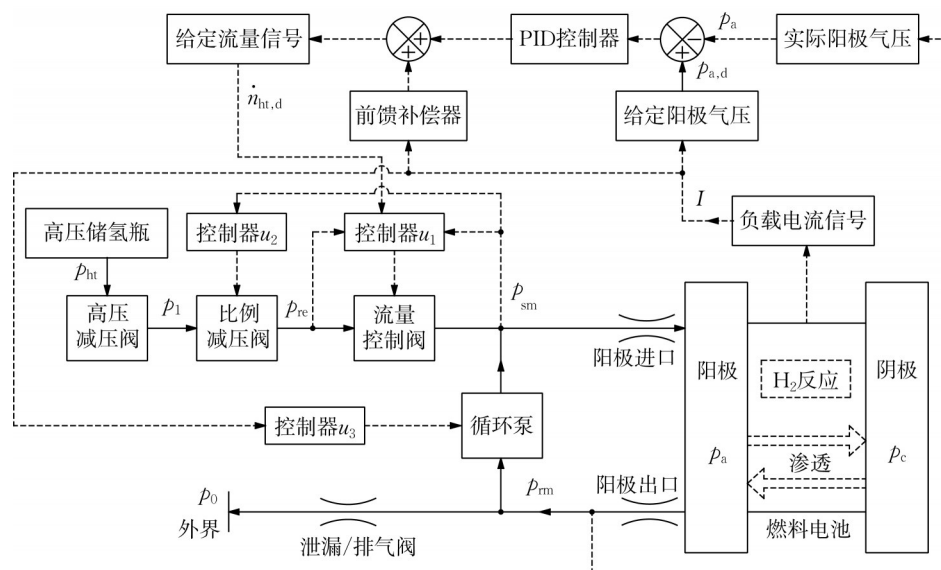


图8 氢气流量控制系统架构

Fig.8 Hydrogen flow control system architecture

对于排气方案,本文考虑到电堆内部压力与流量的稳定,将排气阀设置为一个开度极小的常开节流口,部分尾气通过该节流口持续排出。

### 2.2 进气流量阀控制

流量控制阀的作用是精调一次流纯氢气流量,计算式为

其阀口节流面积由控制器 $u_1$ 比例调节。控制器 $u_1$ 接收流量控制阀前后的压力信号 $p_{re}$ 、 $p_{sm}$ 以及PID控制器输出的给定氢气摩尔流量信号 $\dot{n}_{ht,d}$ ,据此计算流量控制阀所需开度。根据式(3)<sup>[1,9]</sup>,得到开度信号 $u_s$ 的计算式为

$$u_x = \frac{\dot{n}_{\text{ht,d}}}{p_{\text{re}} y_{\text{fcn}}} \cdot \frac{1}{A_{\text{max}}} \quad (17)$$

其中

$$y_{\text{fcn}} = \begin{cases} \frac{C_d}{\sqrt{R_g T}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_{\text{sm}}}{p_{\text{re}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{\text{sm}}}{p_{\text{re}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \frac{1000}{M_{\text{H}_2}}, & \Pi \leq \frac{p_{\text{sm}}}{p_{\text{re}}} \leq 1 \\ \frac{C_d}{\sqrt{R_g T}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} \frac{1000}{M_{\text{H}_2}}, & 0 \leq \frac{p_{\text{sm}}}{p_{\text{re}}} < \Pi \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $C_d$  为阀口流量系数;  $T$  为阀口上游温度;  $A_{\text{max}}$  为阀口面积最大值。

该控制方法的优点在于:即使比例减压阀出口压力出现降低或波动,从而导致流量阀入口压力与前后压比不稳定,系统也可以实时将其反馈至控制器,计算出相应压力下对应的流量阀开度,使得流量阀的输出不受压力波动影响。

### 2.3 比例减压阀控制

比例减压阀的作用是在不同负载电流下动态调节流量控制阀入口压力  $p_{\text{re}}$ , 使其与进气管道压力  $p_{\text{sm}}$  匹配, 保证氢气传输时具有足够的压力能, 同时减少流量控制阀压差过大而造成的调节精度下降、节流损失与发热加剧等问题。根据传感器测得的进气管道压力  $p_{\text{sm}}$ , 控制器  $u_2$  向比例减压阀输出压力控制信号, 使流量控制阀前后压力满足式(19), 其中  $K_{\text{re}}$  为大于0且小于1的比例常数。

$$p_{\text{re}} = p_{\text{sm}} / K_{\text{re}} \quad (19)$$

### 2.4 循环泵控制

循环泵将未完全反应的氢气(二次流)输送至电堆入口重复利用, 保持一定的供氢过量比。循环泵流量过小将不满足电堆对氢气过量比的需求; 由于二次流中含有氮气, 循环流量过大则会导致供气氮含量超标。因此循环泵转速设定依据为: ①进气管道氮含量不超过上限值(5%); ②长时间运行阳极供氢过量比不小于期望值(约1.2)<sup>[10-11]</sup>。

循环泵流量由其转速决定, 并受进出口压差影响。储氢瓶输出的一次流氢气流量近似为电化学反应消耗的氢气流量, 即与电堆电流近似成比例关系, 因此为保持供氢过量比稳定, 控制器  $u_3$  根据负载电流信号  $I$  计算循环泵转速  $\omega_{\text{cp}}$ , 其控制律为

$$\omega_{\text{cp}} = K_{\text{cp}} I + \omega_{\text{min}} \quad (20)$$

式中:  $K_{\text{cp}}$  为比例系数;  $\omega_{\text{min}}$  为循环泵允许的最小转速。  $\omega_{\text{cp}}$  不超过循环泵电机允许的最大转速。

系统通过流量控制阀精确控制一次流流量, 同时比例减压阀的动态调压作用可避免流量控制阀前后压差过大导致的控制精度变差。通过合理设置循环泵转速以控制二次流流量, 在一次流流量跟随反应需求量的同时, 保持阳极进气量维持一定的过量比, 并约束阳极进气管道的氮含量。因此, 仿真分析从以下三个方面展开: ①压力响应; ②流量响应, 包括氢气利用率与供氢过量比; ③氮含量(体积分数)变化。

## 3 仿真分析

仿真系统参数如表1所示。给定如图9所示的负载电流需求, 根据负载电流需求可用查表插值的方法得到阴极和阳极的标称压力。经仿真得到的供氢系统阳极压力响应曲线、流量响应曲线、供氢过量比曲线、氢气利用率曲线、氮含量变化曲线分别如图10~13所示。

表1 系统仿真参数

Tab.1 System simulation parameters

参数	参数值	参数	参数值
$A_{\text{ai}}/\text{m}^2$	$8.05 \times 10^{-5}$	$V_{\text{a}}/\text{m}^3$	0.002
$A_{\text{ex}}/\text{m}^2$	$1.14 \times 10^{-7}$	$V_{\text{m}}/\text{m}^3$	0.004
$A_{\text{ao}}/\text{m}^2$	$1.40 \times 10^{-4}$	$N/\text{片}$	440
$A_{\text{co}}/\text{m}^2$	$1.13 \times 10^{-4}$	$k_{\text{cr,N}_2}/(\text{mol} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$7.46 \times 10^{-12}$
$T_{\text{a}}/\text{K}$	333	$V_{\text{ht}}/\text{m}^3$	0.16
$T_{\text{sm}}/\text{K}$	298	$T_{\text{ht}}/\text{K}$	298
$T_{\text{m}}/\text{K}$	333	$\alpha/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.01
$V_{\text{sm}}/\text{m}^3$	0.004		

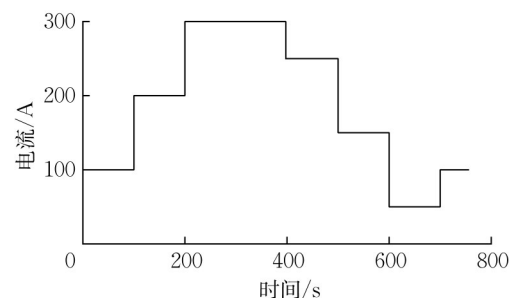


图9 负载电流需求

Fig.9 Load current demand

图10为压力响应曲线, 随着负载电流需求变化, 电堆阳极压力能够较好地跟踪给定的期望压力, 阶

跃瞬时无超调,平均响应时间2~3 s,稳态误差保持在0.3%以下。

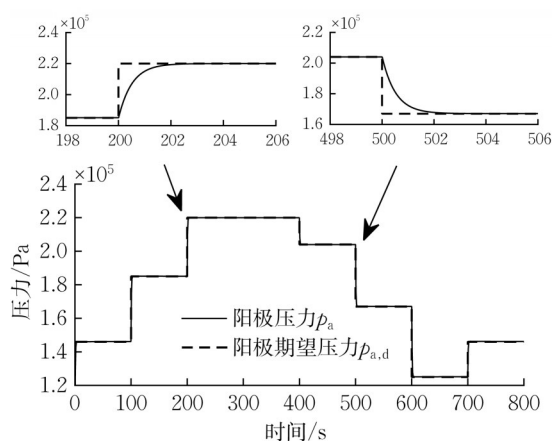


图10 压力响应曲线

Fig.10 Pressure response curve

图11为系统气体摩尔流量响应曲线。系统变负载时高压氢罐输氢流量与阳极进气流量瞬时有一定的超调,这部分超调流量用于调节阳极压力快速响应,故超调时间与压力响应时间相对应。阳极进气流量的瞬时超调也导致供氢过量比与氢气利用率会在负载需求变化瞬时有一定幅度的波动,如图12所示。稳态时供氢过量比维持在1.27以上,而氢气利用率则保持在95%以上。

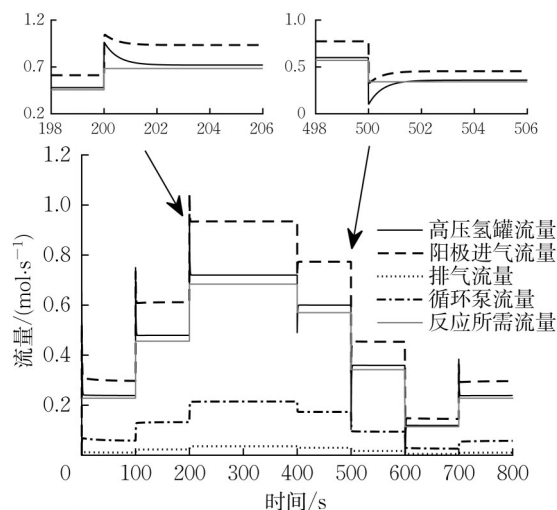


图11 流量响应曲线

Fig.11 Flow response curves

图13为阳极氮含量变化,阳极进气管道的氮含量全程约束在1%以下,而由于进入阳极的气体中氢气参与电化学反应有所消耗,故阳极流道与出气管道的氮含量高于进气管道。由于循环泵有最低转速限制,在循环泵工作时二次流流量最小值不会为0,

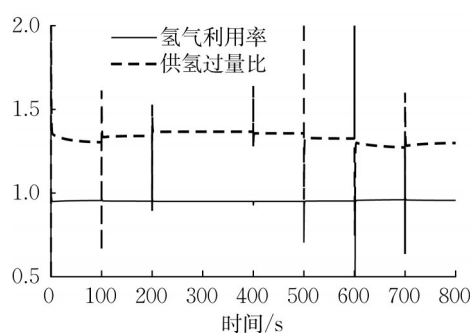


图12 供氢过量比与氢气利用率曲线

Fig.12 Hydrogen stoichiometry and hydrogen utilization curves

因此在负载电流需求较低时,阳极氮含量也更高。

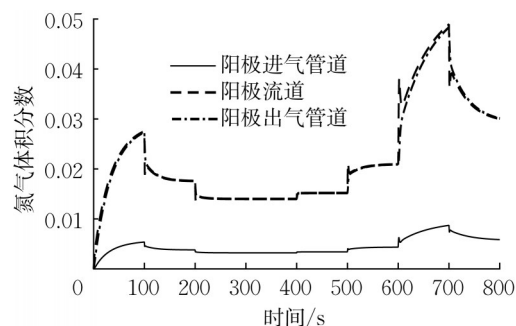


图13 阳极氮含量变化曲线

Fig.13 Anode nitrogen concentration change curves

## 4 结语

本文建立了包括输氢管路与PEMFC电堆阳极循环系统的车载供氢系统集总参数模型,基于该模型提出了一种以比例减压阀与可调流量阀为核心的变负载工况下氢气流量匹配控制系统架构与控制策略,设计了流量阀、比例减压阀和循环泵的控制算法,针对某型号的PEMFC电堆系统进行了仿真。结果表明:电堆阳极压力可快速准确地跟踪给定期望压力;系统供氢流量可快速稳定适应负载的变化需求,并能保持足够的供氢过量比与氢气利用率。阳极进气管道氮含量维持在1%以下,且阳极流道与出气管道的氮含量均维持在5%以下,满足电堆动态性能需求。

## 作者贡献声明:

李 晶:论文构思及系统设计,写作及修改指导;  
张 力:论文写作,理论分析,建模仿真计算;  
邹姜昆:模型验证;  
明平文:实验及工程指导。



## 参考文献:

- [1] 阎耀保, 陈洁萍, 罗九阳, 等. 氢能源汽车车载超高压气动减压阀的机理与特性分析[J]. 中国工程机械学报, 2008(3): 310.  
YIN Yaobao, CHEN Jieping, LUO Jiuyang, *et al.* Mechanism and property analysis on ultra-high pressure pneumatic decompressing valve for hydrogen vehicles[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008(3): 310.
- [2] HWANG J J. Effect of hydrogen delivery schemes on fuel cell efficiency[J]. Journal of Power Sources, 2013, 239(10): 54.
- [3] TOGHYANI S, AFSHARI E, BANIASADI E. A parametric comparison of three fuel recirculation system in the closed loop fuel supply system of PEM fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(14): 7518.
- [4] JENSSEN D, BERGER O, KREWER U. Anode flooding characteristics as design boundary for a hydrogen supply system for automotive polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2015, 298(12): 249.
- [5] MORÁN D A, MARTÍNEZ S A RODRÍGUEZ J J P, *et al.* PEM fuel cell voltage neural control based on hydrogen pressure regulation[J]. Processes, 2019, 7(7): 434.
- [6] 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.
- [7] CHEN Jian, WU Zhongle, WU Chengshuai, *et al.* Observer based fuel delivery control for PEM fuel cells with a segmented anode model[J]. Asian Journal of Control, 2019, 21(4): 1781.
- [8] YUAN Hao, DAI Haifeng, WU Wei, *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.
- [9] 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.  
ZHANG Jiaming, MA Tiancai, CONG Ming, *et al.* Hydrogen system modelling & control for high-power fuel cell system[J]. Automobile Technology, 2021(2): 23.
- [10] 何丽, 刘优贤, 冯坤, 等. 阴阳极饥饿对PEMFC单电池动态性能影响[J]. 太阳能学报, 2019, 40(8): 2383.  
HE Li, LIU Youxian, FENG Kun, *et al.* Effects of cathode and anode starvation on performance of single PEMFC [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2019, 40(8): 2383.
- [11] 黄俭标, 杨代军, 常丰瑞, 等. 低氢气计量比下车载工况燃料电池电堆耐久性研究[J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(6): 1364.  
HUANG Jianbiao, YANG Daijun, CHANG Fengrui, *et al.* Durability of a fuel cell stack with low hydrogen stoichiometry under driving cycle conditions [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2015, 29(6): 1364.
- [12] 魏兆琼. 物理化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.  
WEI Zhaoqiong. Physical chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987.
- [13] O'HAYRE R, CHA S W, COLLELA W G, *et al.* Fuel cell fundamentals third edition [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2016.
- [14] KOCHA S S, YANG D L, YI J S. Characterization of gas crossover and its implications in PEM fuel cells [J]. AICHE Journal, 2006, 52(5): 1917.
- [15] BUSCH. Product leaflet & instruction-manual mink MH 0018 A [EB/OL]. (2021-8-9)[2023-3-14]. <https://www.buschvacuum.com/cn/zh/products/mink-mh-0018-a.html>.
- [16] BALLARD. FCvelocity® -9SSL V4 product manual and integration guide [M]. Burnaby: Ballard Power System Inc., 2011.