

# 基于阴极再循环的燃料电池系统建模 与动态性能分析

刘 泽, 许思传

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 阴极再循环通过调节电堆进气中的氧分压和水蒸气分压特别适合解决车用燃料电池系统在低怠速工况下的缺水和高电势问题。建立了一个带阴极再循环功能的燃料电池非线性系统控制模型, 使用阴极再循环泵将阴极出口的气体引回到空压机出口实现了进气加湿和氧分压调节。该模型可捕捉由阴极再循环带来的一系列动态响应。结果表明, 阴极再循环可以极大地改善小电流密度下的进气湿度, 随着阴极再循环比的增加, 加湿动态响应加快; 氧分压调节的动态响应较慢, 但通过合理的阴极再循环策略仍能将在小电流密度下的高电势限制在 0.8 V 以下。通过抑制小电流密度下的电压, 实现了 50% 的怠速功率降幅。

**关键词:** 车用燃料电池系统; 阴极再循环; 面向控制建模; 动态性能

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

## Modeling and Dynamic Performance Analysis of Vehicle Fuel Cell System with Cathode Recirculation

LIU Ze, XU Sichuan

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Cathode recirculation is particularly suitable for solving the problems of water shortage and high potential of vehicle fuel cell systems under low load or idle conditions by adjusting the oxygen partial pressure and relative humidity of the stack intake. In this paper, a control-oriented nonlinear model of fuel cell system with cathode recirculation function is established. The exhaust gas circulation pump is used to introduce the cathode exhaust gas back to the outlet of the air compressor to realize intake air humidification and oxygen partial pressure regulation. The model can capture a series of

dynamic responses brought about by cathode recirculation. The results show that the cathode recirculation can greatly improve the intake air humidity at a low current density. With the increase of the exhaust gas circulation ratio, the humidification dynamic response is faster. The dynamic response of the oxygen partial pressure regulation is slow, but the high potential at small electric densities can still be limited to less than 0.8 V by a reasonable cathode recirculation strategy. A 50% idle power reduction is achieved by suppressing the voltage at small densities.

**Keywords:** vehicle fuel cell system; cathode recirculation; control-oriented modeling; dynamic performance

聚合物电解质膜燃料电池由于其高效、清洁的优势, 在碳中和的全球背景下逐渐成为车载动力系统的主要研究方向<sup>[1]</sup>。虽然在过去的 20 年间质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 商业化应用得到了巨大的发展, 但在交通运输领域, 由于运行工况和环境因素的复杂多变, 耐久性问题仍然是一个极大的挑战<sup>[2]</sup>。

质子膜湿度过低导致质子传导率大大降低, 内阻增大, 极大地降低了输出性能。同时, 膜湿度过低可能会导致膜干燥或膜撕裂, 严重降低使用寿命<sup>[3]</sup>。目前车载燃料电池系统中最常用的增湿方法是使用外部加湿器对空气进行加湿。但笨重的加湿器对于狭小的汽车安装空间来说极为不友好, 因此自增湿燃料电池系统应运而生。然而, 自增湿系统在小电流密度工况下的低产水量仍然不足以润湿膜, 进一步改善自增湿系统十分必要。阴极再循环可以在小电流密度工况下改善燃料电池的自增湿能力, 它通

收稿日期: 2022-05-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0102802)

第一作者: 刘 泽, 工学博士, 主要研究方向为车用燃料电池系统控制及耐久性。E-mail: mrliuze@163.com

通信作者: 许思传, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为燃料电池发动机。E-mail: xusc@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

过将高湿度的阴极废气引至阴极进气口加湿干燥的进气,从而改善膜水合条件<sup>[4]</sup>。Kim等<sup>[5]</sup>探究了阴极再循环的加湿效果,发现阴极再循环系统虽然比使用膜加湿器的系统性能(极化曲线和功率)有所下降,但下降幅度不大,但与去掉加湿器所带来的优势相比,还是非常有意义的。Xu等<sup>[6]</sup>通过建立一个带阴极再循环非线性系统模型探究了自加湿性能,通过一个调节阀将废气引入到空压机的前侧实现了加湿的效果。Rodosik等<sup>[7]</sup>通过一个稳态的理论分析模型探究了阴极再循环的加湿效果并进行了实验验证,在电堆阴极入口处可实现25%到85%较大的相对湿度范围。

高电位持续或循环被认为是损害耐久性的致命威胁<sup>[8]</sup>。长期的高电势保持运行会引起膜电极中碳载体的腐蚀<sup>[9]</sup>,铂催化剂的团聚和脱落,极大地减少电化学活性表面积(ECSA),从而降低燃料电池的耐久性和性能<sup>[10]</sup>。因此,降低燃料电池在运行过程中的高电势持续时间是提高耐久性的有效方法。阴极再循环在降低高电势上也具有独特的贡献。阴极再循环通过将部分阴极废气引入进气口,降低电堆进气中的氧分压,从而抑制高电势来改善耐久性。Zhang等<sup>[11-12]</sup>分析了30 kW燃料电池系统中阴极再循环对高电压的限制作用,通过减少新鲜气流和增加废气再循环量实现了小电流下电压限制在0.8 V的目标。Zhao等<sup>[13]</sup>实验探究了阴极再循环的电压抑制效果,实验结果表明,通过调节循环气体流量和降低新鲜空气量,可以在低电流密度下降低电池电压,同时阴极气体通道入口和出口处的氧体积分数差异变小。

为了防止怠速工况下高电势带来的不可逆衰减,车用燃料电池系统的怠速电流一般设定为单体电压为0.8 V时所对应的电流。但是,这种怠速条件会造成极大的功率浪费。以车用120 kW系统为例,由于辅助部件(BOP)的寄生功耗在怠速电流下仅为3~4 kW左右,而电堆的功率输出约为17 kW左右,考虑到后续的能量管理和能量储存压力,如此巨大的电能供耗差距是需要避免的。一个理想的电能供耗关系是电堆供给功率与寄生功耗基本持平,这样就需要降低怠速电流,然而这样做的后果就是使电堆工作在高电位条件下,从而加速了耐久性衰减。鉴于此,利用阴极再循环的方式可降低小怠速电流条件下的高电位问题,既缓解了由高电位碳载体腐蚀引起的耐久性衰减又降低了怠速功率。

然而,目前基于阴极再循环在燃料电池系统上

的应用研究大部分都基于开环的稳态分析,同时在阴极再循环的组织方式上将废气引回到空压机前侧,从而使空压机处在高湿度的恶劣工作条件下。为此,本文建立了一个详细的配备阴极再循环的燃料电池系统模型。模型中使用循环泵将废气引入到空压机出口处进行建模;利用所开发的系统模型探究了增加阴极再循环泵后所带来的供气变化;考虑到车辆运行的动态性,重点关注了阴极再循环对进气加湿和高电势抑制的动态响应;分析了阴极再循环对4种电位(能斯特、活化、欧姆、浓差)的影响程度并评价了阴极再循环的利用对降低怠速功率的效果。

## 1 非线性系统建模

本文中带阴极再循环的燃料电池系统重点关注的是整个阴极侧的供气排气过程以及电化学反应过程,因此,对于系统中的其他过程作了相应的简化,这也有利于模型在控制算法设计过程保持高速的计算性能。模型在开发过程中的假设如下:

(1)所有气体被认定为理想气体,遵从理想气体状态方程。

(2)忽略了气体压力、温度、浓度在空间内的分布差异,模型被集总化。

(3)考虑到氢气管路较低的压差和较小的体积,供氢路和阳极腔的体积被集总在一起进行建模。

(4)电堆温度设定为恒定。

(5)中冷器是一个等压降温的理想过程。

本文所提出的带阴极再循环的燃料电池系统如图1所示。阴极再循环的实现方式为通过废气循环泵将阴极气水分离器出口的废气引入到空压机的出口处,混合之后进入电堆。动态模型模拟了组件、管路、容腔的一系列瞬态行为。

### 1.1 阴极侧建模

#### 1.1.1 空压机模型

空压机模型采用半经验半机理模型,采用惯性动力学和压缩机特性图的非线性曲线拟合方法对压缩机进行建模并模拟空压机的瞬态行为。空压机模型的控制方程如式(1)~(6)所示<sup>[14-15]</sup>。

$$J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = \tau_{cm} - \tau_{cp} \quad (1)$$

$$\tau_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (2)$$

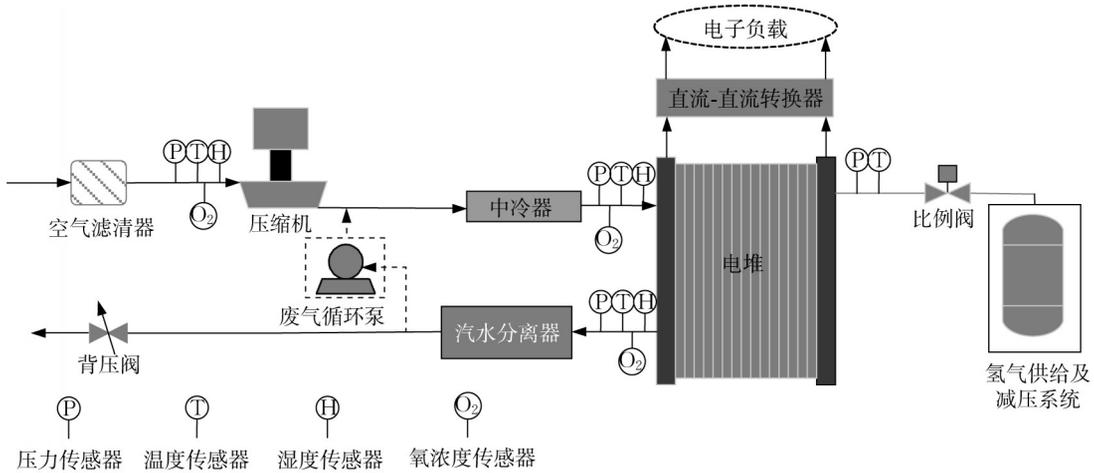


图1 带阴极再循环的自增湿燃料电池系统

Fig. 1 Self-humidifying fuel cell system with cathode recirculation

$$\tau_{cp} = \frac{c_p}{\omega_{cp}} \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[ \left( \frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (3)$$

$$W_{cp} = \Phi \rho_a \frac{\pi}{4} d_c^2 U_{cp} \quad (4)$$

$$U_{cp} = \frac{\pi}{60} d_c N_{cp} \quad (5)$$

$$T_{cp, out} = T_{atm} + \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[ \left( \frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (6)$$

式(1)~(3)建立了驱动力矩和阻力矩的压缩机动态方程,公式(4)~(6)确定了空压机出口流量以及空压机出口温度。 $J_{cp}$ 为电机和压缩机之间的组合转动惯量; $\omega_{cp}$ 为压缩机角速度; $\tau_{cm}$ 为电机的扭矩输入; $v_{cm}$ 为压缩机电压; $\tau_{cp}$ 为驱动压缩机的所需力矩, $k_t$ 、 $k_v$ 、 $R_{cm}$ 为电机常数; $\eta_{cm}$ 和 $\eta_{cp}$ 分别为电机和压缩机的机械效率; $\gamma$ 为绝热指数; $c_p$ 为空气的比定压热容; $p_{atm}$ 和 $p_{sm}$ 分别为环境压力和空压机出口压力; $T_{atm}$ 和 $T_{cp, out}$ 分别为空压机进出口温度; $U_{cp}$ 为压缩机叶尖转速; $d_c$ 为压缩机直径; $N_{cp}$ 为压缩机转速; $W_{cp}$ 为压缩机流量。

### 1.1.2 进气混合腔模型

进气混合腔模型模拟了空压机出口流量和废气循环泵流量混合后的气体组分以及温度的动态变化过程。采用能量守恒定律确定混合气体的温度,由于混合腔位于空压机和废气循环泵出口处,两者都具有较高的温度,模型因此假设了此处没有液态水产生。混合气体温度控制方程组如方程组(7)所示。

$$\begin{cases} H_{mix} = H_{cp} + H_{arp} \\ H_{cp} = 1.006 W_{dryair, cp} T_{cp, out} + \\ \quad W_{v, cp} (2501 + 1.86 T_{cp, out}) \\ H_{arp} = 1.006 W_{dryair, arp} T_{arp, out} + \\ \quad W_{v, arp} (2501 + 1.86 T_{arp, out}) \\ H_{mix} = 1.006 W_{dryair, mix} T_{mix} + \\ \quad W_{v, mix} (2501 + 1.86 T_{mix}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $H_{mix}$ 为混合气体焓值; $H_{cp}$ 为压缩机出口处气体焓值; $H_{arp}$ 为循环泵出口处气体焓值; $W_{dryair, cp}$ 和 $W_{v, cp}$ 分别为空压机出口气体中干空气流量和水蒸气流量; $W_{dryair, arp}$ 和 $W_{v, arp}$ 分别为废气循环泵出口气体中干废气流量和水蒸气流量; $W_{dryair, mix}$ 和 $W_{v, mix}$ 分别为混合气中的干空气流量和水蒸气流量; $T_{arp, out}$ 和 $T_{mix}$ 分别为废气循环泵出口的温度和混合气体的温度。

由于混合后各气体组分发生了较大的变化,因此方程(8)用来计算混合气体的气体常数 $R_{mix}$ 。

$$R_{mix} = \frac{R}{M_{mix}},$$

$$M_{mix} = \frac{n_{O_2, mix}}{n_{mix}} M_{O_2} + \frac{n_{N_2, mix}}{n_{mix}} M_{N_2} + \frac{n_{H_2O, mix}}{n_{mix}} M_{H_2O} \quad (8)$$

式中: $R$ 为理想气体常数; $M_{mix}$ 为混合气体摩尔质量; $M_{O_2}$ 、 $M_{N_2}$ 、 $M_{H_2O}$ 分别为氧气、氮气、水的摩尔质量; $n_{O_2, mix}$ 、 $n_{N_2, mix}$ 、 $n_{H_2O, mix}$ 分别为氧气、氮气和水蒸气的摩尔数; $n_{mix}$ 为混合气体的摩尔数。

### 1.1.3 供气歧管模型

根据质量连续性方程建立进气歧管的集总填充动力学模型。主要表征了进气歧管内的质量流量,压力和温度的动态特性。控制方程如式(9)~(12)

所示。

$$\frac{dm_{sm}}{dt} = W_{mix} - W_{sm, out} \quad (9)$$

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{\gamma R_{mix}}{V_{sm}} (W_{mix} T_{mix, out} - W_{sm, out} T_{sm}) \quad (10)$$

$$W_{mix} = W_{cp} + W_{arp} \quad (11)$$

$$W_{sm, out} = k_{sm, out} (p_{sm} - p_{ca}) \quad (12)$$

式(9)~(12)中: $m_{sm}$ 和 $p_{sm}$ 分别为供气气管内气体质量和压力; $W_{mix}$ 为进气歧管入口质量流量,它包括了空压机出口流量 $W_{cp}$ 和阴极再循环泵流量 $W_{arp}$ ;  $p_{ca}$ 为燃料电池阴极腔压力; $W_{sm, out}$ 为进气歧管出口流量; $k_{sm, out}$ 为出口的流量系数; $R_{mix}$ 和 $T_{mix, out}$ 分别为混合气体的气体常数和温度; $V_{sm}$ 为进气歧管的体积; $T_{sm}$ 为管道内的温度,可由理想气体状态方程得到。

#### 1.1.4 中冷器模型

中冷器的作用是将进入到电堆的气体降低到合理温度以保证电堆的高性能运行,本文的中冷器模型采用了理想的等压降温过程,模拟了进气湿度的动态变化。控制方程如式(13)所示<sup>[14]</sup>。

$$p_{v, cl} = R_{mix} p_{sat}(T_{mix}) \quad (13)$$

式中: $p_{v, cl}$ 为相对湿度进入中冷器的水蒸气分压力; $R_{mix}$ 为混合气体相对湿度; $p_{sat}(T_{mix})$ 为温度为 $T_{mix}$ 时的饱和水蒸气压力; $T_{mix}$ 为混合气体温度。

#### 1.1.5 回流歧管模型

排气歧管模型基于质量连续性的集总填充动力学模型,动态模拟排气压力的变化。模型假设了排气温度等于电堆温度。排气歧管模型可由方程组(14)表示<sup>[16]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{dp_{rm}}{dt} = \frac{R_a T_{rm}}{V_{rm}} (W_{ca, out} - W_{rm, out}) \\ W_{ca, out} = k_{ca, out} (p_{ca} - p_{rm}) \\ W_{rm, out} = W_{bpv} + W_{arp} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $p_{rm}$ 、 $T_{rm}$ 、 $V_{rm}$ 分别为排气歧管的压力、温度和体积; $W_{ca, out}$ 、 $k_{ca, out}$ 、 $p_{ca}$ 分别为电堆阴极出口的流量、流量系数和压力; $W_{rm, out}$ 为排气歧管出口的流量,由背压阀流量和废气循环泵流量组成; $W_{bpv}$ 为背压阀流量; $W_{arp}$ 为循环泵流量。

#### 1.1.6 背压阀模型

背压阀模型采用喷嘴方程建立,通过开口面积及流量确定进出口压差并通过调节开口面积 $A_T$ 改

变阴极侧的压力。控制方程如式(15)所示<sup>[15]</sup>。

$$\begin{cases} W_{bpv} = \frac{C_D A_T p_{rm}}{\sqrt{R T_{rm}}} \left( \frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ 1 - \frac{p_{atm}}{p_{rm}} \frac{\gamma-1}{\gamma} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \frac{p_{atm}}{p_{rm}} > \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ W_{bpv} = \frac{C_D A_T p_{rm}}{\sqrt{R T_{rm}}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \\ \frac{p_{atm}}{p_{rm}} \leq \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $W_{bpv}$ 为流经背压阀的流量; $C_D$ 为流量系数; $A_T$ 为垂直于流动方向的有效流动截面面积; $R$ 为理想气体常数。

#### 1.1.7 阴极循环泵模型

本模型中废气循环泵的建模方式与空压机模型一致,通过一系列类似于公式(1)~(7)的方程捕获废气循环泵的流量 $W_{arp}$ 与出口温度 $T_{arp, out}$ ,如方程组(16)所示。

$$\begin{cases} W_{arp} = f(\omega_{arp}, \frac{p_{sm}}{p_{rm}}) \\ T_{arp, out} = T_{fc} + \frac{T_{fc}}{\eta_{arp}} \left[ \left( \frac{p_{sm}}{p_{rm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\omega_{arp}$ 为废气泵的角速度; $\frac{p_{sm}}{p_{rm}}$ 为废气循环泵进出口压比; $T_{fc}$ 为电池温度; $\eta_{arp}$ 为循环泵效率。

## 1.2 电堆建模

### 1.2.1 电压模型

燃料电池电压 $v_{fc}$ 是基于能斯特开路电压 $E_{nemst}$ 、活化损耗 $v_{act}$ 、欧姆损耗 $v_{ohm}$ 和浓差损耗 $v_{conc}$ 得到,如式(17)所示。

$$v_{fc} = E_{nemst} - v_{act} - v_{ohm} - v_{conc} \quad (17)$$

根据氢氧燃料电池的热力学理论电压以及运行条件, $E_{nemst}$ 可由式(18)进一步获得。

$$E_{nemst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[ \ln p_{H_2} + \frac{1}{2} \ln p_{O_2} \right] \quad (18)$$

式中: $T_{fc}$ 为电池温度; $p_{H_2}$ 、 $p_{O_2}$ 分别为氢气和氧气分压力。

一般来说,燃料电池的阳极和阴极都存在激活

过电压。然而,阳极的氢氧化反应非常快,因此,由激活损失引起的电压降主要取决于阴极反应条件。活化过电压可由经验公式(19)表示。

$$v_{act} = k_1 + k_2 T_{fc} + k_2 \ln C_{O_2}^* + k_4 T_{fc} \ln I \quad (19)$$

式中: $k_1 \sim k_4$ 为经验参数,可通过实际电池试验辨识; $C_{O_2}^*$ 为燃料电池阴极氧体积分数; $I$ 为电流。

欧姆过电压主要由燃料电池的等效阻抗以及电流密度确定,如式(20)所示。

$$v_{ohm} = i R_{ohm}(\lambda_m) \quad (20)$$

式中: $R_{ohm}$ 为等效阻抗,是膜含水量 $\lambda_m$ 的函数; $i$ 为电流密度。

浓差过电压是由反应物在反应中消耗导致浓度变化引起的。计算公式如式(21)。

$$v_{conc} = c \ln \left( \frac{i_{max}}{i_{max} - i} \right) \quad (21)$$

式中: $c$ 为待估参数; $i_{max}$ 为极限电流密度。

通过式(17)~(21),电压模型确定为是电流、温度、阴极压力、氧分压、氢分压和膜含水量的函数。

### 1.2.2 阴极流动模型

阴极流动模型主要描述了燃料电堆阴极内部各状态量的流动行为,可由公式组(22)计算得到。

$$\begin{cases} \frac{dp_{O_2,ca}}{dt} = \frac{R_{O_2} T_{fc}}{V_{ca}} ((W_{O_2,ca,in} - W_{O_2,ca,out} - W_{O_2,reacted})) \\ \frac{dp_{N_2,ca}}{dt} = \frac{R_{N_2} T_{fc}}{V_{ca}} (W_{N_2,ca,in} - W_{N_2,ca,out}) \\ \frac{dp_{v,ca}}{dt} = \frac{R_v T_{fc}}{V_{ca}} (W_{v,ca,in} - W_{N_2,ca,out} + W_{v,ca,gen} + W_{v,mem}) \quad (0 \leq p_{v,ca} \leq p_{sat}(T_{fc})) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $p_{O_2,ca}$ 、 $p_{N_2,ca}$ 、 $p_{v,ca}$ 分别为阴极腔内的氧气、氮气、水蒸气分压力; $R_{O_2}$ 、 $R_{N_2}$ 、 $R_v$ 分别为氧气、氮气和水蒸气的气体常数; $V_{ca}$ 为阴极体积; $W_{O_2,ca,in}$ 、 $W_{N_2,ca,in}$ 、 $W_{v,ca,in}$ 分别为阴极进口处氧气、氮气和水蒸气的流量; $W_{O_2,ca,out}$ 、 $W_{N_2,ca,out}$ 、 $W_{v,ca,out}$ 分别为阴极出口处氧气、氮气和水蒸气的流量; $W_{O_2,reacted}$ 为参与反应的氧气流量; $W_{v,mem}$ 为膜扩散水蒸气流量; $p_{sat}(T_{fc})$ 为温度为 $T_{fc}$ 时的饱和水蒸气压力。

根据理想气体道尔顿分压定律,阴极腔内的总压力 $p_{ca}$ 由式(23)求得。

$$p_{ca} = p_{O_2,ca} + p_{N_2,ca} + p_{v,ca} \quad (23)$$

通过上述所描述的方程组,在MATLAB/Simulink中建立了相应的动态模型,并模拟了燃料

电池系统一系列的瞬态行为。相关的建模参数见表1。

表1 燃料电池系统模型的参数系数

Tab.1 Parametric coefficients of PEMFC system model

参数	数值
转动惯量 $J_{cp}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$1 \times 10^{-5}$
电机常数 $k_e/(\text{V}\cdot(\text{ras}\cdot\text{s}^{-1})^{-1})$	0.015 3
电机常数 $k_t/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1})$	0.022 5
电机常数 $R_{em}/\Omega$	1.2
空气比定压热容 $c_p/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$	1.004
供应歧管体积 $V_{sm}/\text{m}^3$	0.02
回流歧管体积 $V_{rm}/\text{m}^3$	0.005
阴极体积 $V_{ca}/\text{m}^3$	0.01
阴极入口流动系数 $k_{sm,out}/(\text{kg}\cdot(\text{s}\cdot\text{Pa})^{-1})$	$2.2 \times 10^{-4}$
阴极出口流动系数 $k_{ca,out}/(\text{kg}\cdot(\text{s}\cdot\text{Pa})^{-1})$	$3.6 \times 10^{-4}$
极限电流密度 $i_{max}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	2.2
大气压力 $p_{atm}/\text{MPa}$	1.013
喷嘴系数 $C_D$	0.012
参数系数 $c$	0.05
辨识参数 $k_1$	0.140 6
辨识参数 $k_2$	$-8.4 \times 10^{-3}$
辨识参数 $k_3$	$-5.01 \times 10^{-4}$
辨识参数 $k_4$	$4.31 \times 10^{-5}$

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 阴极再循环对进气加湿的动态响应

图2显示阴极再循环比例 $R_{egr}$ 为50%时不同电流下阴极废气再循环对阴极进气口湿度的动态影响。图2a显示,系统在15 s时打开,阴极循环泵在极短的时间内响应并达到稳定输出的状态。图2b显示,随着电流的增加,循环泵转速相应增加,这是由于大电流下的排气量增加,导致循环泵的输出流量增加。图2c、2d分别显示了电堆进气口水蒸气分压和相对湿度的动态响应,可以发现,加湿是具有一定的响应时间的,随着电流密度的增加,湿度响应越来越快,加湿的程度也越来越高。这是由于电流的增加使得电化学反应产水量增加,相同的再循环比例下废气的带水量也增加,从而加快了加湿的动态响应。

图3为随着阴极再循环比例的增加,电堆进气口相对湿度的动态变化。可以看出,系统在第4秒打开废气循环泵后,相对湿度迅速上升。随着 $R_{egr}$ 的增加,相对湿度达到稳态的时间逐渐缩短,并且波动幅度也越来越小。同时,在 $R_{egr}=75\%$ 时相对湿度接近1。这一结果为后续的加湿控制提供了理论基础。

图4显示了不同电流密度下电堆进气口相对湿度随 $R_{egr}$ 的变化。在特定的电流下,随着 $R_{egr}$ 的增加,相对湿度呈现逐渐增加的趋势。这是因为阴极再循

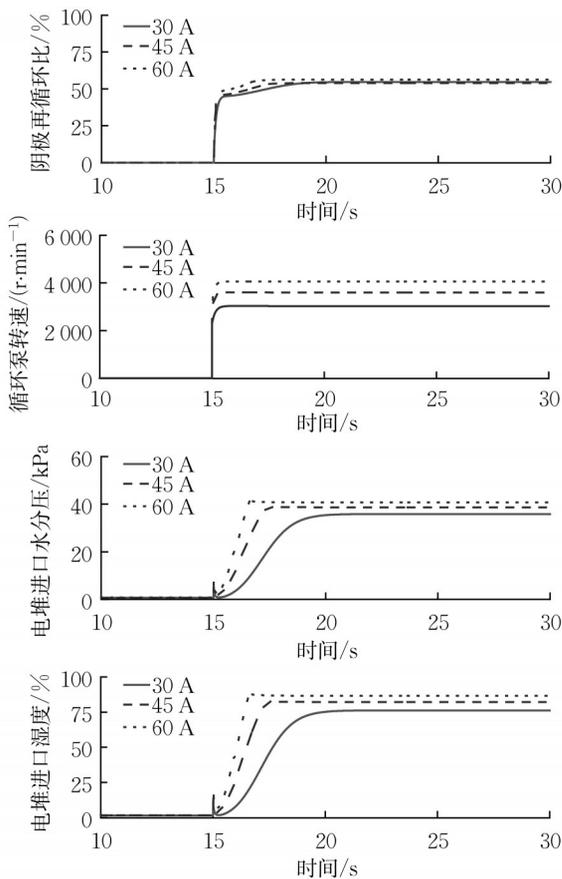


图2 阴极再循环比为50%时对无加湿器PEMFC的加湿动态响应

Fig.2 Dynamic response of humidification to PEMFC without humidifier at a cathode recirculation ratio of 50%

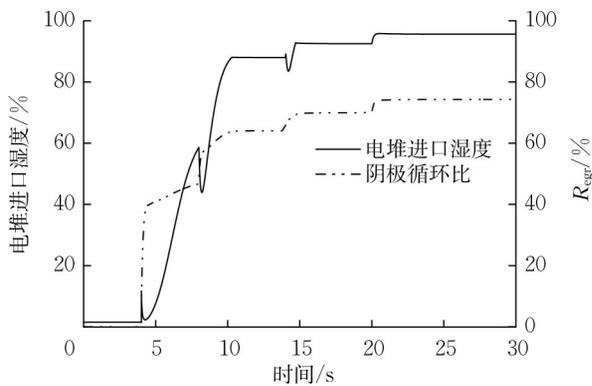


图3 30 A时入口相对湿度随 $R_{egr}$ 的动态变化

Fig.3 Dynamic variation of inlet relative humidity with exhaust gas recirculation ratio for system operation at 30 A

环量的增加使得带回的废气中水蒸气流量增加,从而增加了混合进气中的水蒸气分压,在中冷器固定的冷却温度下,饱和水蒸气分压不变,从而使得进气口混合气体的相对湿度增加。在特定的 $R_{egr}$ 下,电流

密度的增加也使得进口湿度增加,这是由于大电流下化学反应产水量以及质子拖拽水量都增加从而增加了阴极废气中水蒸气的含量,相应地,混合物气体中的水蒸气的含量也增加。同时,可以发现,在达到相同湿度前提下,小电流下废气循环比更大。

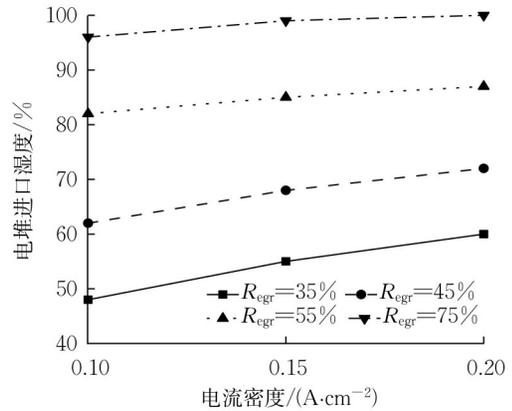


图4 不同电流密度下电堆进口湿度随 $R_{egr}$ 的变化  
Fig.4 Variation of inlet humidity with  $R_{egr}$  at different current densities

## 2.2 阴极再循环对电堆进口氧气的动态响应

图5显示在30 A时,打开阴极循环泵之后系统流量的动态变化。当系统运行到第15秒时循环泵收到输出指令并迅速到达 $R_{egr}=60\%$ 的目标比例。此时,由于循环泵流量的动态上升,导致空压机在短时间内出现了流量下降的现象。这是由于循环泵流量使得进气压力突然增加,从而增大了空压机进出口的压差,在保证背压阀不变的动作下,空压机流量迅速下冲。经过5 s左右,空压机恢复了稳定输出,但是由于压比的增加使得稳定后的输出流量降低。图6进一步的显示了废气循环泵开启带来的阴极进气氧分压的动态变化过程,可以看出,系统大约在8 s内达到稳定,阴极再循环量的增加明显降低了氧分压和氧占总进气量的比例。这个动态响应过程将会为后续电堆阴极内部氧分压状态变量的变化提供理论依据。

图7显示了不同电流密度下,不同的阴极再循环比对进气氧分压的影响。在相同的电流密度下,阴极再循环比例的增加可以显著地降低电堆进气中的氧分压,这是由于随着阴极再循环比例的增加,使得低氧体积分数的废气占总进气量的比例增大,总进气量中的氧占比被稀释。当 $R_{egr}$ 从0增加到75%,电流密度分别为0.10、0.15、0.20  $A\cdot cm^{-2}$ 时,电堆进口氧分压分别大幅下降了79%、74%、72%,有利于降低小电流密度下电池阴极内部的氧分压从而降低高电势。同时,如果要保证相同的氧分压,小电流密

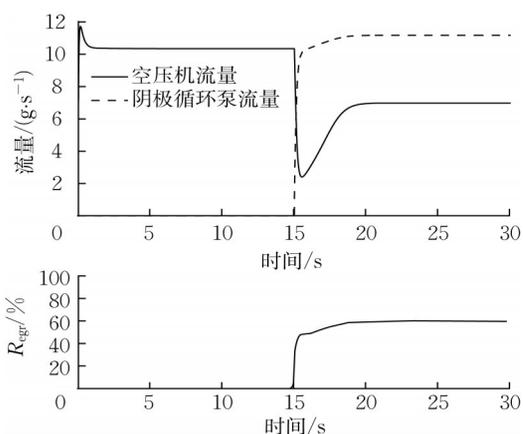


图5 阴极再循环比为60%时进口流量的动态响应

Fig. 5 Dynamic response of stack inlet flow at a  $R_{egr}$  of 60%

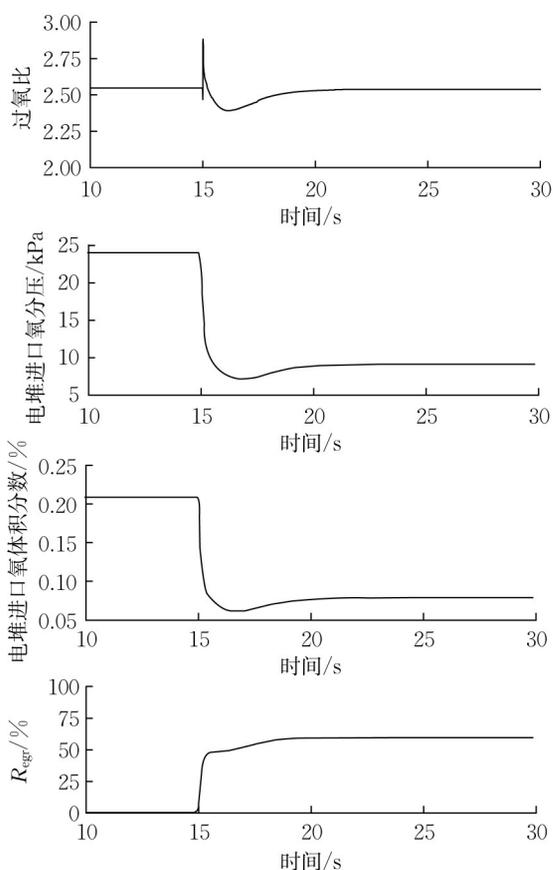


图6 30 A, 60% 废气率时入口氧分压的动态响应

Fig. 6 Dynamic response of inlet oxygen partial pressure at a current of 30 A and a  $R_{egr}$  of 60%

度下需要更大的再循环比。

### 2.3 阴极再循环率对燃料电池电压的动态影响

图8显示在30 A时,阴极内部的氧分压、氮气分压、水蒸气分压3个状态变量随 $R_{egr}$ 的动态变化。系统在第4秒的时候打开废气再循环泵,废气循环泵

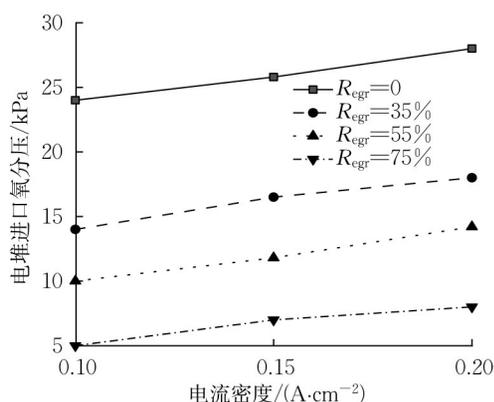


图7 不同电流密度下电堆入口氧分压随 $R_{egr}$ 的变化

Fig.7 Variation of stack inlet oxygen partial pressure with  $R_{egr}$  at different current densities

的惯性作用使得第4秒到第6秒期间的氮气分压出现了突增然后平稳,氧分压展示了相反的趋势,先降低到谷值然后平稳。随着废气循环率的阶跃升高,内部氧分压持续下降,氮分压持续上升,水蒸气分压基本不变。这说明废气再循环的方式本质上是通过增加了进气中氮气比例并且降低氧气比例来实现氧分压的控制。

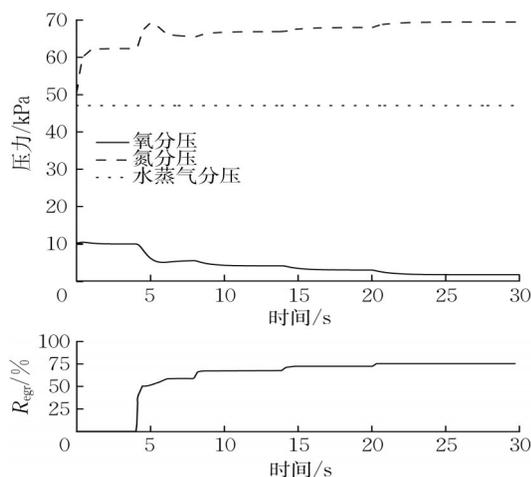


图8 阴极内部状态变量随 $R_{egr}$ 的动态变化

Fig.8 Dynamic changes of cathode internal state variables with  $R_{egr}$

图9显示了3个小电流密度工况下,阴极废气再循环的电压抑制动态效果。系统仍然是在第4秒打开废气循环泵,可以看出,阴极再循环所带来的电压抑制效果很明显但动态响应时间很慢。这是受制于阴极腔内氧分压的动态变化过程,而阴极氧分压的动态变化受制于电池的电化学反应耗氧过程和进气的氧分压变化过程,因此,这也说明了可以通过控制阴极循环泵的响应速度和精度来快速准确地控制电

压,这为后续基于氧分压的电压抑制控制策略提供了基础。从图9中还可以发现,随着 $R_{egr}$ 从0增加到75%,0.10、0.15、0.20  $A \cdot cm^{-2}$ 所对应的电压下降幅度分别为0.030、0.025和0.023 V。不同的电流密度下,电压下降幅度是不同的,可以动态调整电压下降目标值来开发后续的控制策略。

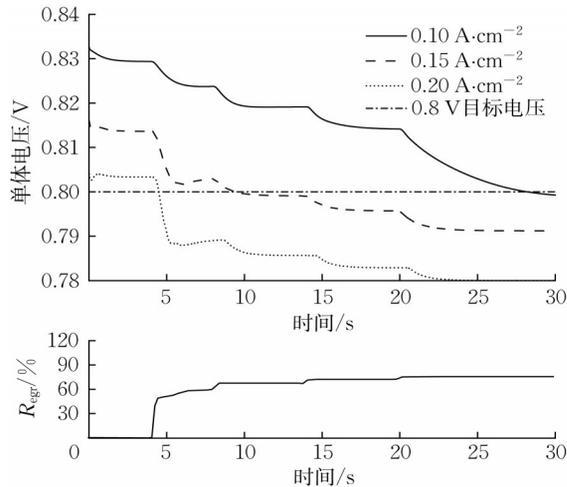


图9 不同电流密度下电压随废气比例的变化

Fig.9 Variation of cell voltage with  $R_{egr}$  at different current densities

表2显示在45 A,废气再循环比例为75%时的各电压损失在总电压下降中的贡献度。在这个运行条件下,单片电池初始电压从0.815 V下降到0.790 V,总的电压下降幅度为0.025 V。其中,由于氧分压的降低能斯特开路电压下降了0.004 V,活化过电压由于氧分压的降低升高了0.020 V。能斯特电压和活化损耗在输出电压下降中的贡献分别占16%和80%,这说明小电流密度工况下这两个电压对氧分压更敏感。浓差损耗和欧姆损耗在小电流密度下对氧分压的影响不敏感从而几乎不变。为了避免持续高电势的运行,目前的燃料电池系统普遍将怠速功率设定为0.8 V,造成了不必要的怠速功率的浪费。由表3可知基于氧分压降低带来的电压抑制效果可以成功降低怠速功率。电堆由360片单体组成,峰值功率为120 kW。电堆工作在60 A时,此时电压为0.8 V,怠速功率高达17.25 kW。废气再循环比例为75%时,可以将系统工作在30 A时的电压从0.83 V降低到0.80 V,也就是说怠速电流可以从60 A降低到30 A并且避免高电势运行。此时的怠速功率从17.25 kW降到了8.60 kW,下降幅度接近50%。同理,相同的控制逻辑可以将怠速电流从60 A下降到45 A,怠速功率下降幅度接近25%。总体

来说,基于氧分压调节机制的电压抑制极大地节约了怠速功率并减轻了后续车端的能量管理负担。

表2 各电压在总电压下降量中的贡献度

Tab.2 Contribution of each loss voltage in total voltage drop

参数	数值/V	贡献度/%
能斯特电压下降量	0.004	16
活化损失增加量	0.02	80
欧姆损失增加量	0.000 25	1
浓差损失增加量	0.000 75	3
总电压下降合计	0.025	100

表3 阴极再循环比例对怠速功率降低幅度的影响

Tab.3 Effect of reduction of idle power by cathode recirculation

电流/A	$R_{egr}=0$		$R_{egr}=75\%$	
	单体电压/V	电堆功率/kW	单体电压/V	电堆功率/kW
30	0.830	8.90	0.800	8.60
45	0.815	13.20	0.795	12.88
60	0.800	17.25	0.780	16.80

### 3 结论

本研究提出了一种基于阴极再循环的燃料电池系统,用于解决小电流密度工况下的加湿和高电势问题,以提高车用燃料电池系统的耐久性。主要结论如下:

(1)阴极再循环可以显著提高进气相对湿度,随着阴极再循环比例的增加,加湿的响应时间和波动逐渐缩小。在相同加湿目标的前提下,电流密度越小所需的阴极再循环比例越大。

(2)阴极再循环量的增加显著降低了电池阴极内部的氧分压。当阴极再循环比从0增加到75%时,在0.10、0.15和0.20  $A \cdot cm^{-2}$  3个电流密度下的氧分压分别下降了79%、74%和72%,效果显著。

(3)当加入阴极再循环之后,能斯特电压下降和活化损失增加是抑制高电势的主要贡献因素,分别占16%和80%,说明这两部分电压对氧分压的降低更加敏感;相反,欧姆损失和浓差损失过电位对氧分压的降低并不敏感。

(4)通过阴极再循环的氧分压调节机制,可以实现怠速功率50%的下降幅度,减少怠速功率的浪费并缓解车端的能量管理压力。

#### 作者贡献声明:

刘泽:负责论文中模型的建立和调试,数据处理,以及论文的撰写和修改。

许思传:负责论文整体思路和研究方向的指导,进行论文的审核。

### 参考文献:

- [1] CANO Z P, BANHAM D, YE S, *et al.* Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets [J]. *Nature Energy*, 2018, 3(4):279.
- [2] DUBAU L, CASTANHEIRA L, MAILLARD F, *et al.* A review of PEM fuel cell durability: materials degradation, local heterogeneities of aging and possible mitigation strategies [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Energy and Environment*, 2014, 3(6):540.
- [3] SCHMITTINGER W, VAHIDI A. A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 180(1):1.
- [4] SHAO Y, XU L, ZHAO X, *et al.* Comparison of self-humidification effect on polymer electrolyte membrane fuel cell with anodic and cathodic exhaust gas recirculation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(4):3108.
- [5] KIM B J, KIM M S. Studies on the cathode humidification by exhaust gas recirculation for PEM fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(5):4290.
- [6] XU L, FANG C, HU J, *et al.* Self-humidification of a polymer electrolyte membrane fuel cell system with cathodic exhaust gas recirculation [J]. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 2018, 15(2):021003.
- [7] RODOSIK S, POIROT-CROUVEZIER J P, BULTEL Y. Impact of humidification by cathode exhaust gases recirculation on a PEMFC system for automotive applications [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44 (25) : 12802.
- [8] LIN R, XIA S, ZHANG Q, *et al.* Comparison between the constant dummy load and step load shut-down strategy for PEMFCs [J]. *Fuel Cells*, 2017, 8:306.
- [9] SHEN Q, HOU M, LIANG D, *et al.* Study on the processes of start-up and shutdown in proton exchange membrane fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 189(2):1114.
- [10] LIN R, YU H, ZHONG D, *et al.* Investigation of real-time changes and recovery of proton exchange membrane fuel cell in voltage reversal [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 236:114037.
- [11] ZHANG Q, TONG Z, TONG S. Effect of cathode recirculation on high potential limitation and self-humidification of hydrogen fuel cell system [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 468:228388.
- [12] ZHANG Q, TONG Z, TONG S, *et al.* Self-humidifying effect of air self-circulation system for proton exchange membrane fuel cell engines [J]. *Renewable Energy*, 2021, 164:1143.
- [13] ZHAO X, XU L, FANG C, *et al.* Study on voltage clamping and self-humidification effects of PEM fuel cell system with dual recirculation based on orthogonal test method [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43 (33) : 16268.
- [14] PUKRUSHPAN J T, PENG H, STEFANOPOULOU A G. Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME*, 2004, 126(1):14.
- [15] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G, PENG H. Control of fuel cell breathing [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2004, 24(2):30.
- [16] BAO C, OUYANG M, 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.