

# 基于模型的质子交换膜燃料电池系统 阳极气体浓度估计技术综述

池训逞<sup>1</sup>, 侯中军<sup>2</sup>, 魏 伟<sup>3,4</sup>, 夏增刚<sup>2</sup>, 庄琳琳<sup>2</sup>, 郭 荣<sup>1</sup>

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上海捷氢科技股份有限公司 系统开发部, 上海 201800; 3. 中科军联(张家港)新能源科技有限公司 技术中心, 江苏 张家港 215600; 4. 上海醇加能源科技有限公司 技术中心, 上海 201600)

**摘 要:** 为了对质子交换膜燃料电池(PEMFC)系统进行管理以延长其寿命, 需要设计基于模型的状态观测器对内部状态进行实时监测, 并通过反馈控制将其控制在预期水平。由于 PEMFC 阳极氢气浓度直接决定了系统的输出性能, 并且不断循环的氢气以及氮气因跨膜扩散在阳极不断累积, 导致阳极气体浓度估计困难。因此, 本文着重介绍了 PEMFC 阳极气体浓度估计的前沿技术, 并对现有研究存在的问题和未来发展趋势进行了阐述, 以期对 PEMFC 气、水、热管理的研究做出贡献。

**关键词:** 车辆工程; 质子交换膜燃料电池; 内部状态; 基于模型的观测器

**中图分类号:** TM911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2022)09-1957-14

**DOI:** 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb20220261

## Review of model-based anode gas concentration estimation techniques of proton exchange membrane fuel cell system

CHI Xun-cheng<sup>1</sup>, HOU Zhong-jun<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>3,4</sup>, XIA Zeng-gang<sup>2</sup>, ZHUANG Lin-lin<sup>2</sup>, GUO Rong<sup>1</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of System Development, Shanghai Hydrogen Propulsion Technology Co., Ltd., Shanghai 201800, China; 3. CAS&M (Zhangjiagang) New Energy Technology Co., Ltd., Zhangjiagang 215600, China; 4. Shanghai Alclplus Energy Technology Co., Ltd., Shanghai 201600, China)

**Abstract:** In order to prolong proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) lifespan, it is necessary to design a state observer to monitor the internal states, and control the internal states at the expected level through feedback control. Since the anode hydrogen concentration directly determines the output performance of PEMFC, and circulation of anode hydrogen as well as nitrogen accumulation caused by diffusion across membrane leads to the difficulty of anode gas concentration estimation. Therefore, this paper focuses on the cutting-edge technology of PEMFC anode gas concentration estimation, and the existing problems as well as the future development trend of existing research are also described, hoping to

收稿日期: 2022-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A20166).

作者简介: 池训逞(1995-), 男, 博士研究生. 研究方向: 燃料电池系统建模与状态估计. E-mail: chixuncheng@tongji.edu.cn

通信作者: 郭荣(1979-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 电动汽车控制技术. E-mail: guorong@tongji.edu.cn

make contributions to the research of gas, water and heat management for PEMFC.

**Key words:** vehicle engineering; proton exchange membrane fuel cell(PEMFC); internal states; model-based observer

## 0 引言

质子交换膜燃料电池(Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC),下文简称燃料电池,是一种能够通过氢气和氧气的化学反应产生电能的电化学装置<sup>[1]</sup>。由于燃料电池具有较低的工作温度及快速启动的优点<sup>[2]</sup>,被认为是汽车新能源化过程中潜在的替代电源,近几年受到了广泛的关注和研究。随着生产氢气成本的不断下降,燃料电池有望在能源和电力方面引领世界走向独立于化石燃料的氢经济。当前制约燃料电池汽车发展的主要因素是能源转化效率低、耐久性 & 寿命有待提高。为了解决这些问题,一方面需要从材料设计方面进行考虑,设计高效率的催化剂、高性能的质子交换膜以及双极板;另一方面,更重要的还应该考虑各子系统(空气供应子系统、氢气供应子系统、水/热管理系统)的管理策略。为了优化各子系统的管理策略,需要实时监测系统内部变量,如阴、阳极气体浓度以及质子交换膜的含水量。

相比于燃料电池电堆(下文简称电堆)阴极,阳极氢气供应系统循环的氢气以及氮气、水蒸气因跨膜扩散作用在阳极不断累积,导致电堆阳极气体浓度的变化具有非线性、时滞性及参数不确定性。另外,氮气和水蒸气的累积会导致氢浓度下降,直接影响燃料电池系统的输出性能<sup>[3]</sup>。因此,阳极气体浓度的实时获取更加重要。传统的方法,如利用传感器测量气体压力,由于其价格昂贵、不易安装的劣势,并不适用于车用燃料电池系统<sup>[4]</sup>。另外,采用质谱仪对气体浓度进行分析不具备实时性。近年来,学者们致力于研究基于模型的燃料电池系统内部变量观测器(Observer)。该方法通过建立观测器模型,根据可测量的信号(燃料电池输出电压、冷却液出口温度、阳极流道进/出口总气体压力),设计了误差收敛算法以确保气体浓度的估计值趋近于其真实值,实现了气体浓度的实时估计。

基于此,本文针对电堆阳极,综述了阳极内部气体浓度估计的研究现状。首先,介绍了燃料电池系统的组成及各子系统的工作原理。然后,全

面剖析了阳极气体动态特性,分类阐述了现阶段用于阳极气体浓度估计的技术。最后,对全文内容进行总结,并讨论了阳极气体浓度观测器技术的发展方向。

## 1 燃料电池系统工作原理及各子系统组成、原理

燃料电池是一种能够将燃料的电化学能转化为电能的能量转换装置,其典型结构如图1所示,包括双极板、气体扩散层、催化层及质子交换膜<sup>[5]</sup>。阳极采用氢气作为燃料,阴极采用空气中的氧气作为氧化剂。氢气经过阳极的气体扩散层,在催化剂的作用下转化成质子和电子,分别通过质子交换膜和外电路传递至阴极。阴极内空气中的氮气及水蒸气随着气体扩散层传递至催化层,氧气在催化剂的作用下,结合从外电路传递来的电子形成氧离子,氧离子再与通过质子交换膜传递来的质子结合生成水。其中,部分水通过渗透作用扩散至阳极,剩余的水被排出电堆。整个过程的总体反应如下所示:

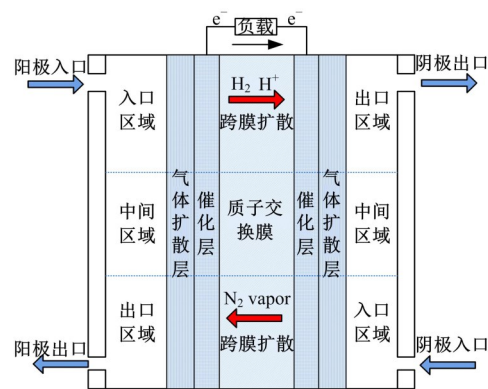
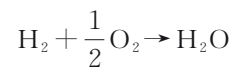


图1 燃料电池单体工作原理

Fig. 1 Working principle of PEMFC

由于单片燃料电池电压通常小于1V,为了满足实际负载的工作需求,需要将若干个燃料电池单体串联起来组成电堆,并配置相应的辅助设备(Balance of plant, BOP),组成燃料电池系统,其典型结构如图2所示,包括:空气供应子系统、氢气供应子系统及水/热管理系统。

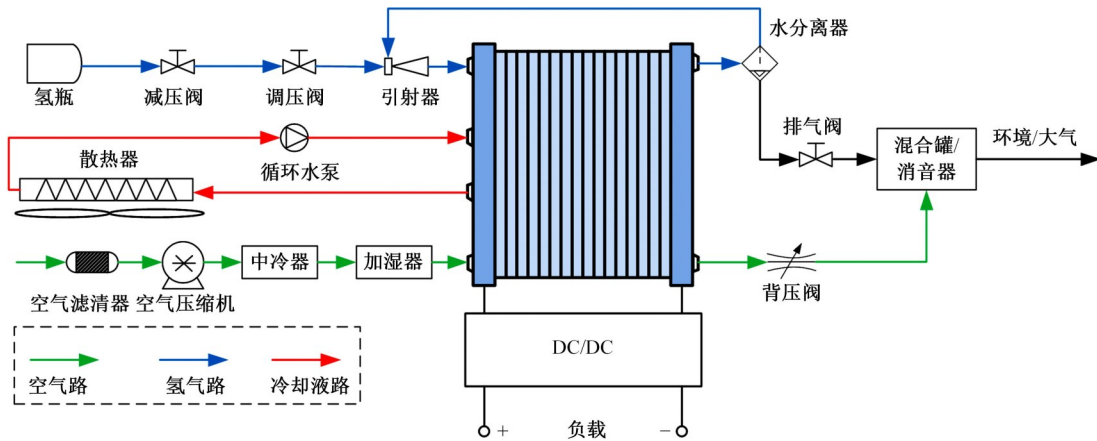


图2 燃料电池系统典型结构

Fig. 2 Typical structure of PEMFC system

### 1.1 空气供应子系统

空气供应子系统由空气滤清器、空气压缩机、中冷器、加湿器等装置组成<sup>[6]</sup>。空气滤清器主要功能是将空气中的液态水、液态油滴分离出来,并滤去空气中的灰尘和固体杂质,从而防止这些颗粒和化学物质对电堆催化剂(催化剂中毒)和电解质膜(膜穿孔、破裂)造成危害。空气压缩机是燃料电池空气供应子系统最为重要的部件,其功能是为燃料电池系统电堆在不同工况工作时,提供满足电堆良好运行要求的流量、压力、温度和湿度的空气<sup>[7]</sup>。燃料电池运行时,为保证质子交换膜含有所需水分(降低电阻、传递质子),需要通过加湿器对反应气体进行增湿,以确保质子交换膜保持良好的水合状态和较好的电导率,使燃料电池始终高效地工作<sup>[8]</sup>。安装在电堆空气出口的背压阀用于调整空气入堆的压力。

空气压缩机一方面能够增加空气的压力,从而提高氧气分压以增大反应物体积浓度,进而提高电堆的功率密度;另一方面,空气经过加压后温度会上升,若空气的压缩比过高,则会导致空气压缩机的出口温度超过质子交换膜的玻璃态转变温度<sup>[9]</sup>。因此,系统会在空气压缩机后增加中冷器以降低空气温度。

### 1.2 氢气供应子系统

典型的氢气供应子系统由氢气源、减压阀、调压阀、引射器组成<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.1 氢气源

车载燃料电池多采用高压气态储氢的方式,即高压气态储氢瓶(后简称为氢瓶)。按照氢瓶材料可将其划分为I型、II型、III型、IV型,如表1所示。

表1 氢瓶分类

Table 1 Classification of hydrogen tank

类型	材料	最大储氢压力/MPa
I型	全金属材料	20
II型	金属材料衬里,纤维-树脂复合材料包裹(包裹材料用箍圈式)。	30
III型	金属材料衬里,纤维-树脂复合材料包裹(采用两极+螺旋铺设)。	70
IV型	高分子材料衬里,纤维-树脂复合材料包裹(采用两极+螺旋铺设)。	70

氢瓶内为纯氢气,其动态过程可表示为:

$$\frac{dm^{\text{htank}}}{dt} = \dot{m}^{\text{htank}_i} - \dot{m}^{\text{htank}_e} \quad (1)$$

式中: $m^{\text{htank}}$ 为氢瓶内氢气的质量; $\dot{m}^{\text{htank}_i}$ 、 $\dot{m}^{\text{htank}_e}$ 分别为流入、流出氢瓶氢气的质量流量。

在实际应用中,氢瓶只流出氢气,与温度、压力有关,可表示为:

$$\frac{dm^{\text{htank}}}{dt} = -\dot{m}^{\text{htank}_e} = \frac{V^{\text{htank}} \cdot M_{\text{H}_2}}{R} \cdot \frac{d}{dt} \left[ \frac{p^{\text{htank}}}{T^{\text{htank}} \cdot Z(p^{\text{htank}}, T^{\text{htank}})} \right] \quad (2)$$

式中: $V^{\text{htank}}$ 为氢瓶的体积; $M_{\text{H}_2}$ 为氢气的摩尔质量; $R$ 为通用气体常数; $p^{\text{htank}}$ 为氢瓶的压力; $T^{\text{htank}}$ 为氢瓶的温度; $Z$ 为压缩因子,与 $p^{\text{htank}}$ 和 $T^{\text{htank}}$ 有关。

#### 1.2.2 减压阀

减压阀位于氢瓶与调压阀之间,用于降低并稳定氢气压力,其原理如图3所示。

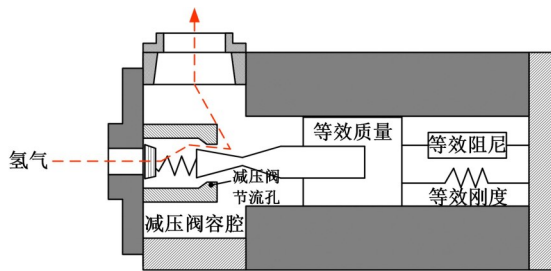


图3 减压阀原理图

Fig. 3 Schematic diagram of pressure reducing valve

高压氢气经过减压阀节流孔后,流入减压阀容腔。当设定压力等于减压阀容腔压力时,阀芯受到的压力与弹簧力平衡,压力不变;当设定压力小于容腔压力时,节流孔面积减小,使得流入减压阀容腔的氢气流量下降;当设定压力大于容腔压力时,节流孔面积增大,使得流入减压阀容腔的氢气流量上升。因此,减压阀能够根据设定压力实现氢气压力的调节。

### 1.2.3 调压阀

调压阀位于减压阀与引射器之间,能够控制流入电堆的氢气流量,进而调节电堆阳极的压力。调压阀的驱动由脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)信号实现,其流量系数 $kv^{brv}$ 由PWM信号的占空比 $\alpha^{brv}$ 所决定。调压阀可视为可变面积的喷管,其输出气体的质量流量由流量系数、进出口气体压力、入口温度决定。

### 1.2.4 引射器

高压氢气经调压阀进入氢气供应子系统引射器的前端,电堆反应后的氢气、水混合物从阳极氢气流道出口流出,经过水分离器去除氢气中90%以上液态水后,大部分未反应的氢气被引射器卷吸后返回电堆阳极流道入口。引射器的结构如图4所示。

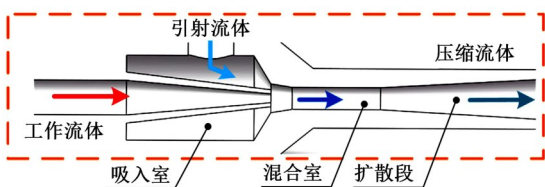


图4 引射器结构图

Fig. 4 Structure diagram of ejector

喷管出口沿径向形成速度梯度,在吸入室中的高速工作流体在剪切力的作用下带动低速引射流体。同时,由于吸入室内气体压力小于引射流体压力,使得引射流体在压差作用下流入吸入室。于是,工作流体与引射流体在混合室混合,经扩散

段后减速增压,形成压缩流体进入电堆阳极供氢。

压缩流体中的混合气体成分为氢气、氮气、水蒸气,其组分计算可表示为:

$$y_X^{hej.out} = \frac{\dot{n}_X^{hej.dr} + \dot{n}_X^{hej.suc}}{\sum (\dot{n}_X^{hej.dr} + \dot{n}_X^{hej.suc})} \quad (3)$$

式中: $y$ 为气体体积分数; $X$ 为混合气体的成分; $\dot{n}_X^{hej.dr}$ 为工作流体的摩尔流量; $\dot{n}_X^{hej.suc}$ 为引射流体的摩尔流量。

对于阳极出口气体,除了采用引射器进行氢气循环以外,还可以采取的处理模式为:死端阳极模式和氢气循环泵循环模式<sup>[11]</sup>。

死端阳极模式通过对阳极出口进行封堵以提高电堆的运行压力,从而提高氢气的利用率<sup>[12]</sup>。然而,在电堆长期正常运行的过程中,由于阳极出口处于封闭状态,化学反应生成的水易导致阳极侧发生“水淹”现象。同时,未发生反应的气体等杂质在阳极侧聚集,影响了氢气的利用率,进而影响系统的发电效率。因此,对于死端阳极模式,常见的处理方式是在阳极出口增加一个排气电磁阀<sup>[13]</sup>,将电堆的电压或阳极内部气体的浓度作为参考值,周期性地打开排气电磁阀将废气排出,以保证燃料电池系统处于较高的发电效率水平。然而,该方法会导致部分氢气的浪费。

氢气循环泵循环模式通过氢气循环泵将阳极出口未反应的氢气吸入阳极入口与氢源提供的氢气一同再次为电堆提供燃料,进一步提升了氢气的利用率,从而提高了燃料经济性<sup>[14]</sup>。同时,采用氢气循环模式可使氢气及水分均匀地分布在电堆内部,有利于优化阳极侧的水管理,延长了电堆的使用寿命,使燃料电池系统处于稳定的气、水平衡状态<sup>[15]</sup>。采取循环泵进行氢气循环可以控制循环流量,但需要消耗额外的能量。

## 1.3 水/热管理子系统

水/热管理子系统包括电堆冷却系统、空气冷却系统和增湿系统,主要由加湿器、散热器和循环水泵等组成。电堆在反应过程中会生成液态水,为了获得较高的电池性能,通常在运行过程中又需要对反应气体进行加湿,以保证质子交换膜得到合理的润湿,减少质子传导阻力,降低内阻<sup>[16]</sup>。若反应气体加湿不足,引起膜脱水电堆性能变差;若反应气体加湿度过高,则会析出液态水,并增加电堆排水负担。电堆运行过程中,会产生水,并随尾气排出。若水不能及时排出,在电堆内不断地

累积将会产生“水淹”现象,堵塞流道,影响气体分配;堵塞气体扩散层,影响气体传输;覆盖在催化层反应区域,限制了反应气体与催化层的接触反应<sup>[17]</sup>。这些将会导致反应气体在电堆中不同区域分配得不均匀,使电堆每个单体性能参差不齐,严重影响了整个电堆的性能。“水淹”严重甚至会引起反极,产生不可逆损害,大大缩短了电池的寿命。从本质上看,燃料电池的水管理问题就是如何优化和平衡其反应过程生成的水含量、为了加湿气体通入电堆内部的水含量,从而使电堆内部加湿均匀的同时不产生局部水淹的现象。

电堆在运行过程中会释放热量,在中、低电流区域,电堆的发热量低于燃料电池的发电量;在高电流区域,电堆的发热量会高于其发电量。这表明,当电堆工作在较高电流工况时,为了保持一定的工作温度,其散热需求会远高于低电流工作时的散热需求。如果电堆工作时的热量不能及时地排出,其工作温度将会持续上升,而电堆的内部温度并不是由里到外均匀分布的,也就不可避免地会出现局部单节电池或者电池内部局部区域超温的现象。当温度升到一定程度时,质子交换膜会脱水导致电导率降低,进而影响发电性能。更为严重的是,质子交换膜在高温环境的局部热点会导致膜穿孔,最终影响质子交换膜电堆运行的安全性<sup>[18]</sup>。冷却系统的作用是将电化学反应产生的热量从电堆内部带走,保持电堆在适宜的温度范围内工作。

## 2 燃料电池阳极气体动态过程及其特性分析

为了通过设计观测器以实现燃料电池阳极气体浓度的估计,需要对阳极气体动态过程及其特性进行分析,并根据分析结果针对性地选择对应的观测器设计方法。

电堆内部的化学反应与跨膜扩散现象同时发生,二者相互作用使电堆内部不同区域的气体压力、温度、湿度分布不均匀,最终导致燃料电池阳极各区域的气体组分浓度出现明显差异。因此,将电堆划分为3个区域,即入口区域、中间区域和出口区域,如图1所示,并对燃料电池气体的动态过程进行深入探究。阳极入口区域气体动态特性主要与阳极供气、氢气循环有关,同时受到气体化学反应和跨膜扩散的影响;阳极中间区域气体动

态特性主要与气体化学反应、跨膜扩散有关;阳极出口区域气体动态特性主要与阳极排气有关,同时存在气体化学反应和跨膜扩散。

### 2.1 阳极入口区域

阳极入口区域各组分气体主要受到阳极供气和循环气体的影响,其中氢浓度受到的影响较大,具体受调压阀和引射器控制。调压阀开度直接决定了进入阳极的气体流量和压强;引射器的结构则影响引射比,进而影响供应的纯氢气与电堆出口循环气体的混合比例<sup>[19]</sup>。以上因素导致该区域混合气中氢气浓度最多,且沿阳极流道逐渐减少,氮气浓度和水蒸气最少,且沿阳极流道逐渐增多。

氢气循环时,引射器的工作流量和引射比的计算<sup>[20]</sup>引入了阳极模型的非线性。同时,氢气的循环受到流速的影响,气体浓度的传输存在一定的延时,并且由于循环速度的变化导致这种延时存在不确定性。另外,氢气从氢气瓶流入电堆内部需要经过减压阀和调压阀,而阀门的流量系数与阀门的流量之间的关系为非线性<sup>[21]</sup>。

### 2.2 阳极中间区域

阳极中间区域各组分气体状态主要受到气体化学反应和跨膜渗透的影响。氢气在阳极催化层发生反应而消耗,并在阴极生成大量的水,且蒸发量相对于阴极入口区域少。受到两侧浓差的影响,阴极的氮分子、氧分子、水分子向阳极跨膜渗透,进而影响了阳极该区域混合气的浓度。以上因素导致该区域混合气中水蒸气的含量最多,并且沿阳极流道先增后降,氮气浓度沿流道因累积而逐渐增大,氢气浓度沿流道因反应消耗而逐渐减小。

阳极中间区域主要受到化学反应和气体扩散的影响,而气体跨膜渗透导致阳极气体浓度发生变化。其中,跨膜渗透的气体流量由渗透跨膜系数、膜两侧浓度差、膜厚度所决定<sup>[22]</sup>,而跨膜系数和膜厚度的计算过程引入了阳极模型的非线性。

### 2.3 阳极出口区域

阳极出口区域气体主要受到阳极排气的影 响。排气阀关闭时受到气体跨膜扩散的影响,氮气在出口区域逐渐积累,当排气阀开启含有氮气的混合气排出电堆,使得电堆阳极氮气浓度下降。与此同时,排气阀开启也会造成电堆阳极压力的波动和部分氢气的损失。当排气阀关闭时,由于

氮气的跨膜扩散导致氮气在阳极积累,并且沿流道越来越多,在该区域氮气的含量最多。由于电堆阴极入口与阳极出口相连,并且阴极入口空气中的水含量最少,导致质子交换膜靠阴极入口侧较干,进而导致沿该区域的水蒸气含量逐渐减少。该区域内氮气含量最多、氢气含量最少,氮气、氢气、水蒸气含量沿阳极流道逐渐减少。

综上所述,燃料电池阳极气体变化具有非线性、时滞性和参数不确定性。

### 3 燃料电池阳极气体浓度估计技术

燃料电池阳极气体浓度估计的基本原理如图 5 所示<sup>[23]</sup>,其中,  $x$  为气体浓度;  $\hat{x}$  为气体浓度的估计值;  $y$  为系统输出;  $\hat{y}$  为系统输出的估计值;  $d$  为干扰;  $u$  为控制器输出;  $p_{N_2}$ 、 $p_{H_2}$ 、 $p_{vap}$  分别为阳极氮气分压力、阳极氢气分压力、阳极水蒸气分压力;  $c_{N_2}$ 、 $c_{H_2}$ 、 $c_{vap}$  分别为氮气、氢气、水蒸气的浓度。通过设计浓度观测器将不可测量或不易测量的燃料电池阳极气体浓度  $x$  以可测量的物理量(如燃料电池电压、冷却液出口温度等)表征,得到气体浓度估计值  $\hat{x}$ 。将气体浓度估计值代入观测器模型,计算燃料电池系统输出  $y$  的估计值  $\hat{y}$ 。通过设计观测器误差收敛算法,不断修正燃料电池输出的估计值,使得估计值与实际值的误差  $e$  趋于零,实现燃料电池阳极气体浓度的实时估计。燃料电池阳极被估计气体如表 2 所示。

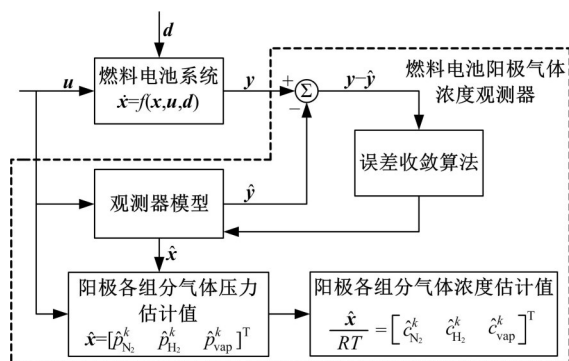


图 5 基于观测器的燃料电池控制系统

Fig. 5 PEMFC control system based on observer

为了设计燃料电池阳极气体浓度观测器,首先需要建立燃料电池气、水动态模型。关于燃料电池气、水动态模型的研究主要分为两类:①燃料电池集总参数模型<sup>[24]</sup>;②表征燃料电池气体各组元宏观分布的燃料电池分布参数模型<sup>[25]</sup>。

针对集总参数模型(通常也认为是零维模

表 2 燃料电池阳极被估计气体

名称	描述
阳极氮气分压力 $p_{N_2}$	阳极氮气由阴极气体跨膜渗透而来,过多的氮气会降低氢气浓度,从而降低系统输出性能。
阳极氢气分压力 $p_{H_2}$	氢气的分压力决定了系统输出性能。
阳极水蒸气分压力 $p_{vap}$	水蒸气的分压力决定了燃料电池内部的相对湿度,进而影响了质子交换膜的含水量。

型),以质量守恒和能量守恒为前提,将燃料电池系统分成几个子系统分别进行研究,将各子系统的空间分布处理为平均值,并且将传统数值模型中的复杂偏微分方程改写为常微分方程,大大减少了模型的计算负担<sup>[26]</sup>。虽然目前集总参数模型应用广泛,但是由于燃料电池各子系统的耦合程度高、模型阶数高、状态变量多等原因,难以实现状态的实时估计,需要进一步对模型进行降阶和简化。

针对分布参数模型,为了表征燃料电池中气、水的动态传递过程,需要建立一系列连续性方程、纳维-斯托克斯方程等偏微分方程<sup>[27]</sup>。同时,还需要建立燃料电池的质量、电荷以及能量守恒方程,用于燃料电池的动态过程和内部状态分布分析。通过建立具有复杂几何形状的多维两相(气相、液相)燃料电池模型,获得燃料电池内部各状态更全面、更详细的空间分布<sup>[28]</sup>。然而,基于多维分布参数模型设计的观测器计算成本较高,不适合长时间尺度仿真和燃料电池控制器的实时处理。在实际应用中,常见的处理方式是将分布参数模型离散化,将空间分布按照一定的划分方式离散化为若干个空间,每个空间内的气体视为均匀分布,即将分布参数模型划分为若干个集总参数模型,从而进行观测器设计。

总的来说,分布参数模型能够获得燃料电池系统详细而全面的空间分布,但观测器设计方法难度极大、计算成本较高,不适合实时状态观测;集总参数模型虽然计算成本较低,但是考虑到集总参数模型所得到的状态均为平均值,可能会隐藏内部的关键信息。

因此,针对不同的气体浓度观测需求,需要选择对应的燃料电池系统建模方式。下文将分别阐述基于集总参数模型和分布参数模型的燃料电池阳极气体浓度估计技术。

### 3.1 基于集总参数模型的观测器设计

对于基于集总参数模型的观测器设计,现有的燃料电池阳极气体浓度观测器主要分为:龙伯格观测器、卡尔曼滤波观测器、自适应观测器以及滑模观测器。

#### 3.1.1 龙伯格观测器

龙伯格(Luenberger)观测器比较了系统的可测量和状态估计量,通过反馈增益配置,实现了状态变量估计值的收敛。龙伯格观测器的基本结构如图6所示<sup>[29]</sup>,图中,下角标 $k$ 表示第 $k$ 时刻;0表示初始时刻。

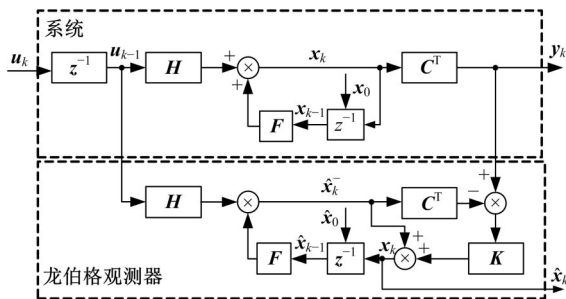


图6 龙伯格观测器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of Luenberger observer

图6中, $K$ 为反馈增益矩阵,为定值; $H$ 为控制矩阵; $F$ 为状态转移矩阵; $z^{-1}$ 表示离散化。根据第 $k$ 时刻的先验估计值,并结合误差校正项 $K(y_k - C^T \hat{x}_k)$ 可以得到第 $k$ 时刻的最优估计值。

基于反馈控制原理,通过反馈增益矩阵将系统测量值 $y$ 与模型输出值 $\hat{y}$ 之间的误差引入状态方程,使得观测值 $\hat{x}$ 能够快速逼近系统状态,最终得到期望的收敛值。

Hong等<sup>[30]</sup>提出了一种多输入、多输出的非线性状态反馈控制器,以保证足够的氢气供应和适当的氢气浓度。同时,利用龙伯格观测器来观测阳极气体分压力以优化控制器。仿真结果显示,在不同电流条件下,阳极气体分压力估计误差能在几秒时间内追踪至实际值。然而,该研究虽考虑了阴极氮气的跨膜扩散,但未考虑阴极水的扩散,因此在建模过程中忽略了阳极水蒸气的存在。Liu等<sup>[31]</sup>为实现阳极气体吹扫策略设计,利用龙伯格观测器估计了阳极氮气的浓度,确定了吹扫间隔和吹扫时间。实验结果表明,在实时估计阳极氮气浓度的基础上,提出的阳极吹扫策略提升了燃料电池的氢气利用率,并大大延长了吹扫间隔。为了保护燃料电池且保证其性能,该研究将工作温度和供气湿度设置为定值,因此跨膜渗透

系数仅由电流密度决定。若实际中工作温度和供气湿度发生变化,则会导致跨膜渗透系数计算出现误差,进而导致阳极气体浓度计算出现偏差。同时,该研究未考虑阳极水蒸气的存在。Lira等<sup>[32]</sup>以非线性燃料电池系统模型为基础,结合热力学平衡关系,采用雅可比线性化建立了线性变参数模型,并利用龙伯格观测器估计了内部参数,如空气压缩机电压、氢气浓度等,从而进行燃料电池系统的故障诊断<sup>[33,34]</sup>。

上述龙伯格观测器采用静态反馈增益,因此增益通常是恒定的。虽然极点配置的静态反馈增益系数在观测系统的大多数条件下都能满足收敛要求,但是由于燃料电池系统在实际工作过程中,负载是动态变化的,因此在处理动态条件时,有些数据点可能不满足收敛要求,从而导致算法无法收敛。此外,燃料电池阳极气体变化具有非线性的特点,因此在设计龙伯格观测器前需要对非线性系统进行线性化,从而得到系统矩阵,这将导致某些非线性信息丢失,影响气体浓度的估计精度。同时,在状态重构过程中没有考虑噪声的影响,所以在应用龙伯格观测器进行状态估计之前,需要先滤除实测数据的噪声。

#### 3.1.2 卡尔曼滤波观测器

卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)是一种递归滤波算法,能够根据离散系统的实时噪声和测量数据,在保证最小均方误差的前提下估计出动态系统的未知参数。卡尔曼滤波过程的总体流程图如图7所示。在一个滤波周期中,卡尔曼滤波具有两种不同的信息更新过程:时间更新过程和测量更新过程。时间更新过程是利用前一时刻状态的估计值来预测当前时刻的状态;测量更新过程是利用测量值与状态之间的关系,以及实时测量值来校正时间更新过程所预测的向量。如果系统满足可控、可观测的条件,在经过若干次预测-校正-预测-校正后,卡尔曼滤波观测器所得到的状态估计值最终趋近于状态真实值。

卡尔曼滤波观测器原理图(见图8)与龙伯格观测器类似,同样是通过反馈增益配置,实现状态变量估计值的收敛。不同点在于,反馈增益系数 $K_k$ 在每次迭代过程中会根据估计误差协方差矩阵 $P$ 进行更新。此外,卡尔曼滤波观测器考虑了系统噪声(包括:过程噪声 $n_k$ 和测量噪声 $w_k$ ),服从高斯分布,即:

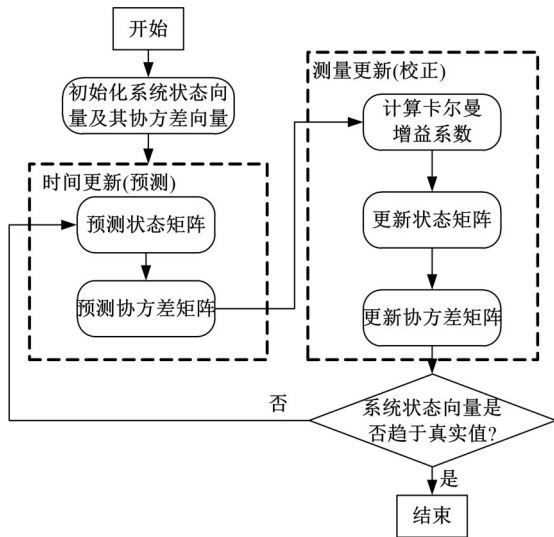


图 7 卡尔曼滤波算法流程图

Fig. 7 Flow chart of Kalman filter algorithm

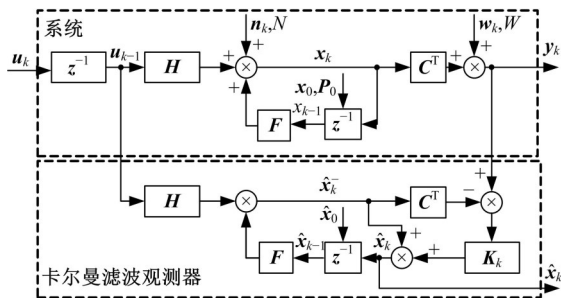


图 8 卡尔曼滤波观测器原理图

Fig. 8 Schematic diagram of Kalman filter observer

$$\begin{cases} n_k \sim N(0, N) \\ w_k \sim N(0, W) \end{cases} \quad (4)$$

针对燃料电池阳极气体浓度观测,由于被估计的气体浓度与燃料电池系统输出存在非线性关系,因此在每一个滤波周期的时间更新过程中,利用上一时刻的状态估计值和协方差对系统进行局部线性化,得到基于扩展卡尔曼滤波(Extend Kalman filter, EKF)的观测器<sup>[35]</sup>。Böhler等<sup>[36]</sup>针对传统EKF估计中被估计值超出物理或模型边界之外的问题,设计了带有约束条件的EKF(Constraint extended Kalman filter, CEKF)观测器来估计燃料电池系统阴、阳极气体组分,为系统混合控制和故障监测提供了参考。实际驾驶循环条件的仿真结果显示,CEKF有较高的估计精度,并且当阴极发生“氧饥饿”时,EKF的气体估计值开始发散,而CEKF仍然能精确地跟随实际气体浓度。

EKF观测器虽然能够较好地处理非线性系统的状态估计问题,但是该方法在每一次滤波周期中需要耗费大量时间计算非线性模型雅可比矩

阵,并且必须满足小扰动假设,同时局部线性化过程中忽略了二阶及以上的高阶项。因此,对于强非线性系统,EKF估计性能极不稳定,甚至发散。利用非线性变换的无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman filter, UKF)<sup>[37]</sup>可以有效解决由系统非线性加剧而引起的滤波发散问题。Xu等<sup>[38]</sup>为了避免阳极侧“水淹”现象,建立了阳极侧内部状态的零维动态模型,并且基于UKF方法设计了阳极内部状态观测器,实时观测阳极内部的水蒸气压力、氮气压力、氢气压力以及平均液态水饱和比。根据所观测的阳极内部状态,可实时控制阳极排气阀,防止阳极侧“水淹”。如前述分析,阴极侧液态水和氮气会发生跨膜运输,渗透至阳极侧,若渗透量过多则会降低系统效率。为了解决这一问题,Piffard等<sup>[39]</sup>研究了一种基于UKF的阳极氮气浓度观测器,为设计阳极排气策略提供了参考浓度。然而,该研究未考虑液态水的蒸发,即未考虑阳极内水蒸气的存在。传统基于卡尔曼滤波方法的观测器设计过程中将过程噪声协方差设为一个定值,并不会随着迭代而更新。为了解决该问题,Vepa<sup>[40]</sup>提出了自适应UKF方法,在每一个滤波周期中对过程噪声协方差进行自适应估计,并将该方法用以估计燃料电池阴、阳极流道中液态水含量、气体扩散层液态水的体积和压力。仿真结果显示,相比于无自适应UKF的浓度估计方法,带有自适应UKF的浓度估计方法在电堆电压和输出功率估计方面有更好的性能特性。

卡尔曼滤波观测器能够解决龙伯格观测器静态反馈增益导致某些动态条件下无法收敛的问题。EKF观测器通过偏导数或连续差分得到的雅可比矩阵对非线性系统进行线性化,但是忽略了系统的高阶项。UKF观测器通过对非线性系统的概率分布进行近似,利用一系列确定的样本来逼近状态的后验概率分布。从本质上来看,无论是EKF还是UKF,它们都是对含噪声的非线性系统进行逼近,不可避免地丢失真实信息。同时,在设计卡尔曼滤波观测器时,认为系统受到的噪声服从高斯分布。对于实际的燃料电池系统,由于气体动态过程具有非线性,同时噪声不一定服从高斯分布。利用自适应噪声算法设计燃料电池的高精度卡尔曼滤波观测器是今后研究的重点。

### 3.1.3 自适应观测器

龙伯格观测器和卡尔曼滤波观测器对模型误差较敏感,非线性系统模型的各种不确定性对自适应观测器的影响可以忽略不计。因此,自适应观测器同样适用于非线性燃料电池系统的状态估计。Arcak等<sup>[41]</sup>根据电堆电压与氢气分压之间的非线性方程,引入自适应观测器来估计阳极入口和出口的氢气分压,并分析了入口压力变化的鲁棒性和模型参数误差的敏感性。然而,该研究将阳极流道的平均氢气压力简单地定义为阳极出、入口气体压力和的一半,认为阴极氧气平均压力是已知的,未考虑阳极氮气和水蒸气的存在。Morales等<sup>[42]</sup>进一步丰富了Arcak等的研究,利用自适应观测器估计了阳极入口和出口的氢气分压,还估计了阳极流道气体的质量流量。

### 3.1.4 滑模观测器

基于滑模变结构控制理论,滑模观测器能够连续、有目的地驱动系统的动态响应遵循预设轨迹函数,收敛至预设的滑模面附近,重构系统状态<sup>[43]</sup>。滑模收敛算法的设计与目标参数和扰动无关,滑模观测器不需要模型的线性度。同时,该方法对模型误差和不确定扰动具有鲁棒性,因此,对于具有不确定性的非线性燃料电池系统,滑模观测器广泛应用于燃料电池阴、阳极的状态估计。滑模观测器原理图如图9所示。

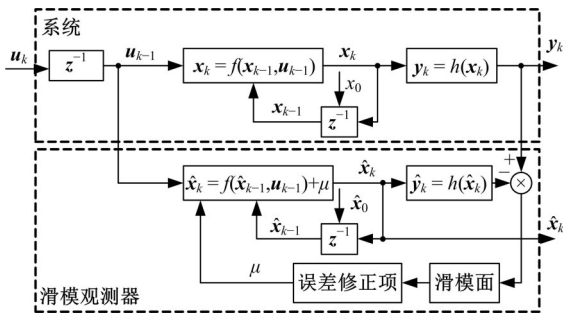


图9 滑模观测器原理图

Fig. 9 Schematic diagram of sliding mode observer

利用滑模观测器进行状态估计不需要对非线性系统进行线性化处理,直接利用非线性函数 $f(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 来表征非线性系统,从而不会丢失系统的非线性信息,提高了观测器的精度。

滑模观测器可分为一阶滑模观测器和高阶滑模观测器。

一阶滑模观测器的滑模面 $\epsilon$ 定义为:

$$\epsilon = y - \hat{y} \quad (5)$$

式中: $y$ 为可测变量; $\hat{y}$ 为其估计值。

一阶滑模观测器的误差修正项 $\mu_0$ 为:

$$\mu_0 = \sigma \text{sign}(\epsilon) \quad (6)$$

式中: $\sigma$ 为观测器的设计参数; $\text{sign}(\cdot)$ 为切换函数,

$$\text{sign}(\epsilon) = \begin{cases} 1, & \epsilon > 0 \\ 0, & \epsilon = 0 \\ -1, & \epsilon < 0 \end{cases}.$$

文献[44]提出了一阶滑模观测器,同时估计了阴极和阳极内的气体压力,并通过李雅普诺夫稳定性理论分析证实了多状态观测器的有效性,但本文并未通过仿真和实验验证该观测器的性能。Piffard等<sup>[45]</sup>改进了之前的研究,利用一阶滑模观测器来估计阳极内部的氮气渗透量和相对湿度,并利用全球协调轻型车辆测试周期工况进行了仿真验证。与先前基于UKF的观测方法相比,滑模观测器具有更好的收敛效果。

在一阶滑模观测器中,由于切换函数 $\text{sign}(\cdot)$ 的不连续性,导致一阶滑模观测器输出存在抖振现象。与一阶滑模观测器相比,由于二阶滑模观测器能够有效缓解一阶滑模输出的抖振效应,同时观测器的设计比高阶(三阶及以上)滑模观测器简单,因而在燃料电池状态估计方面应用广泛。

二阶滑模观测器的滑模面的定义与一阶滑模面相同,不同点在于误差收敛算法的设计,定义为:

$$\begin{cases} \mu = \mu_1 + \mu_2 \\ \dot{\mu}_1 = -\alpha \text{sign}(\epsilon) \\ \mu_2 = \begin{cases} -\lambda |\epsilon_0|^\xi \text{sign}(\epsilon), & |\epsilon| > |\epsilon_0| \\ -\lambda |\epsilon|^\xi \text{sign}(\epsilon), & |\epsilon| \leq |\epsilon_0| \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mu$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 均为误差校正项; $\lambda$ 、 $\alpha$ 、 $\epsilon_0$ 、 $\xi$ 为观测器的设计参数。

误差修正项 $\mu$ 中的积分作用保证了输出信号的连续性,缓解了输出的抖振现象。

Liu等<sup>[46]</sup>设计了二阶滑模观测器来估计阳极流道中的氢气分压,该观测器的测量值为电堆电压、电堆电流和阳极入口总压力。将电堆电压测量值与观测器模型输出值的差值作为状态重构注入项,通过李雅普诺夫分析确定了观测器参数,保证了观测器在有限时间内收敛。仿真结果验证了该观测器在负载变化下的有效性、鲁棒性和可行性。然而,该研究未考虑阳极内氮气的存在,且假设阴极流道中的氧气分压是可知的,因此需要再设计一个观测器对阴极状态进行估计。Sankar

等<sup>[47]</sup>提出了一个相对完整的燃料电池系统模型,该模型结合了压缩机和中冷器、供、回流管以及用于氢再循环的喷射器。为了使温度保持在最佳工作范围内,建立了一个简单的热管理子系统模型,估计了包含阳极和阴极流道内温度和气体分压的 12 种状态。为了提高 PEMFC 系统的寿命,引入滑模控制器和滑模观测器进行闭环仿真。结果表明,基于观测器的控制器在设定值跟踪方面优于传统的 PID 控制器,并且对负载电流的扰动具有更好的鲁棒性。

### 3.2 基于分布参数模型的观测器设计

在目前的研究中,绝大部分的燃料电池内部状态观测器都是基于集总参数模型而设计的。在集总模型中,燃料电池内部气体压力、温度和浓度均视为均匀分布,所得到的状态观测值均为平均值。但是,燃料电池在运行的过程中,流道内和气体扩散层的状态并非呈均匀分布,在高电流密度条件下这种不均匀性更加剧烈。然而,由于反应物化学反应的消耗,参与反应的气体在下游区域的浓度明显低于上游区域的浓度<sup>[48]</sup>,因此基于集总参数模型的观测器无法监测流道内局部气体饥饿和传质不良引起的电流密度下降。基于此,许多学者将燃料电池分布参数模型进行离散化,将空间分布按照一定的划分方式离散化为若干个空间,每个空间内的气体视为均匀分布,即把分布参数模型离散化为若干个集总参数模型,并进行阳极气体浓度观测器的设计研究。

Luna 等基于文献[49]的分析,进行了一系列针对阴、阳极气体浓度分布估计的研究。首先,在文献[50]中提出了燃料电池阳极气体流道离散化的广义模型,如图 10 所示。

前述集总参数模型中,实现气体浓度观测的方法主要是设计误差收敛策略,使观测器模型输出收敛于燃料电池实际输出的测量值,即间接观测气体浓度。Luna 等进行的研究中,出口区域的气体浓度可通过传感器直接计算求得,并设计误差收敛策略,使第  $n$  个区域(即出口区域)气体浓度的估计值收敛于第  $n$  个区域的测量值,进一步反推第  $n-1$ 、 $n-2$ 、 $\dots$ 、 $1$  个区域气体浓度的估计值,进而得到整个流道气体浓度的分布,即直接观测气体浓度分布。

在文献[50]中,Luna 等设计了基于滑模控制的超螺旋算法的误差收敛算法,并仿真验证了该

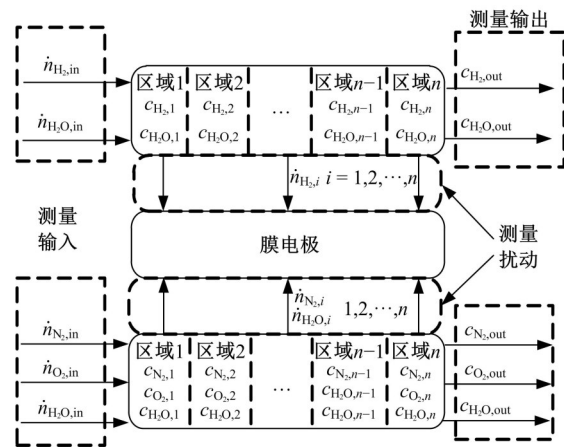


图 10 燃料电池气体流道广义离散模型

Fig. 10 Generalized model of the discretized PEMFC gas channel

策略在不同气体输出流量下气体浓度估计的性能,同时也验证了所设计的观测器在模型不确定、时间滞后性下具有良好的估计精度。

在文献[51]中,Luna 等进一步完善了观测器策略,设计了高阶滑模观测器来估计外界扰动项,并在 NEDC 工况下进行了仿真分析。仿真结果显示,与一般的非线性扰动观测器相比,高阶滑模观测器具有更高的观测精度。

在文献[52]中,Luna 等提出了非线性模型预测控制策略来调节阳极气体流道内不同气体的浓度,并且对阳极分布参数模型进行了前向和后向的离散化,设计了阳极浓度观测器以实现被控对象的输出反馈控制。

进一步地,在文献[53]中,结合非线性模型预测控制策略和高阶滑模观测器,完成了燃料电池内部分布参数的反馈控制。在给定的 NEDC 仿真场景下,适当的控制动作可以使燃料电池在较低过氧比下工作,并提高了效率,同时防止了燃料电池局部气体“饥饿”和“水淹”故障。

Chen 等<sup>[54]</sup>首先将阳极流道分成 3 个区域,以减少每个区域气体压力之间的建模误差、压力空间分布、电化学和气体渗透的影响,建立了阳极供气、反应及循环模型。基于该模型提出了一种全状态反馈控制器来保证充足的氢气供应。同时,设计了高阶滑模观测器来估计每个区域内气体的浓度。仿真结果表明所提出控制方法和估计方法的有效性。

表 3 总结了目前用于估计燃料电池阳极气体浓度所设计的观测器类型,并对每种观测器与系统模型给出对应的评价。

表3 燃料电池阳极气体浓度观测器总结  
Table 3 Summary of anode gas observer for PEMFC

模型类型	文献	观测器类型	估计参数	评价
集总参数模型	[30]		阳极气体分压力	未考虑阴极水的扩散;观测器的收敛特性易受噪声和误差的影响。
	[31]	龙伯格观测器	阳极氮气分压力	未考虑阳极水蒸气的存在;跨膜系数仅由电流密度确定;观测器的收敛特性易受噪声和误差的影响。
	[33]		阳极氢气分压力	线性变参数燃料电池模型;观测器的收敛特性易受噪声和误差的影响。
	[34]			
	[36]	EKF观测器	阴、阳极气体分压力	观测器的收敛特性易受噪声的影响。
	[38]		阳极格气体分压力、平均液态水饱和比	观测器的收敛特性易受噪声的影响。
	[39]	UKF观测器	阳极氮气分压力	未考虑阳极水蒸气存在;观测器的收敛特性易受噪声的影响。
	[40]	自适应UKF观测器	流道液态水含量、气体扩散层水的体积和压力	对噪声进行自适应估计;观测器的收敛特性易受噪声的影响。
	[41]	自适应观测器	阳极出入口氢气分压力	未考虑阳极氮气与水蒸气存在;缺乏对燃料电池电
	[42]		阳极出入口氢气分压力、阳极流道流量	压测量噪声和系统参数等不可测量值的鲁棒性。
	[44]	一阶滑模观测器	阴、阳极气体分压力	观测器输出存在抖振现象。
	[45]		阳极氮气渗透量、相对湿度	
	[46]	二阶滑模观测器	阳极流道氢气分压力	未考虑阳极氮气存在;输出抖振现象缓解;需要再设计一个氧气分压力观测器。
	[47]		包括阴、阳极流道内温度和气体分压力的12种状态	鲁棒性好;输出抖振现象缓解。
分布参数模型	[51]			
	[52]	高阶滑模观测器	阳极流道气体分压力	离散模型;在扰动条件下鲁棒性好;计算量由数学复杂度决定。
	[53]			
	[54]			

## 4 未来发展趋势

目前,燃料电池阳极气体浓度观测器的设计仍然存在挑战,未来需要在以下方面进行更深层次的探究:

(1)观测器由系统模型、实际测量信号及观测器输出的误差修正项组成。因此,需要建立一个准确的动态模型来描述实际应用中影响观测器性能的因素。另外,温度通常比压力、流量动态响应速度慢,导致燃料电池系统模型通常假设为等温、单相的,这也是目前研究中较少关注于温度、水蒸气及液态饱和度估计的原因。

(2)一般情况下,大部分非线性观测器是基于集总参数模型所设计,而集总参数模型无法实现局部气体的估计。小部分非线性观测器虽然基于分布参数模型所设计,但是其本质是将空间分布按照一定的划分方式离散化为若干个空间,每个空间内的气体视为均匀分布,即将分布参数模型离散化为若干个集总参数模型。此外,

目前的分布状态估计仅停留在气体通道和催化剂层内的反应物估计水平,液态水的分布状态估计尚未解决。因此,未来需要利用嵌入两相的数值模型,将气体扩散层合理地离散成不同的部分,以较小的计算成本实现对燃料电池内部水分布的描述。

(3)由于燃料电池系统是一个具有不确定性、时滞性的非线性耦合系统。同时,在车辆环境中,各种各样的噪声和电磁干扰会对被测信号产生深刻的影响,观测器的收敛算法对复杂扰动条件应具有良好的鲁棒性。此外,需要对不同类型的观测器进行系统比较,分析其收敛速度、估计精度和计算时间等特点。因此,还需要探索更高鲁棒性、更容易实现的观测器。

(4)对于观测器性能的验证应基于实际试验数据,而不是离线仿真数据。此外,为了进一步验证观测器的性能,应利用实时程序进行更长时间尺度和更真实的驾驶条件模拟和试验。

## 5 结 论

燃料电池内部状态控制不当导致的性能和耐久性退化,限制了其大规模的商业化应用。为此,必须设计观测器对燃料电池内部状态变量进行观测。相比于燃料电池阴极的开放式气体流动,燃料电池阳极气体的循环特性导致其气体流动是封闭的,一旦观测器的精度不高,则会导致观测误差的累加。同时,燃料电池阳极内存在气体跨膜扩散,导致阳极侧氮气和水蒸气的累积。氮气的累积会导致氢气浓度下降,进而影响燃料电池系统的输出;水蒸气的累积会导致质子交换膜水含量的上升。因此,对燃料电池阳极的气体浓度进行估计尤为重要。本文对燃料电池阳极气体浓度观测器设计的研究现状及其应用进行了详细的综述,强调了燃料电池气体浓度观测器在燃料电池子系统中的必要性,阐述了燃料电池不同建模方法、燃料电池阳极气体动态特性及各观测器之间的联系。分别介绍了通过龙伯格观测器、卡尔曼滤波观测器、自适应观测器及滑模观测器来估计燃料电池阳极气体浓度的方法。其中,滑模观测器由于对测量噪声和模型不确定性具有良好的鲁棒性而被广泛认可。另外,为了实现燃料电池分布状态的估计,介绍了基于分布参数的离散模型观测器。

### 参考文献:

- [1] 周雅夫,邵芳雪,黄立建,等. 燃料电池车用新型低纹波 DC/DC 变换器设计[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(4): 1201-1208.  
Zhou Ya-fu, Shao Fang-xue, Huang Li-jian, et al. Design of a new low ripple DC/DC converter for fuel cell vehicles[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 50(4): 1201-1208.
- [2] 张少哲,戴海峰,袁浩,等. 质子交换膜燃料电池电化学阻抗谱敏感性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 40-51.  
Zhang Shao-zhe, Dai Hai-feng, Yuan Hao, et al. Sensibility study on electrochemical impedance of proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 40-51.
- [3] 吴中乐. 基于观测器的燃料电池氢气供给控制[D]. 杭州: 浙江大学控制科学与工程学院, 2018.  
Wu Zhong-le. Observer based fuel delivery control for PEMFC fuel cells[D]. Hangzhou: College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, 2018.
- [4] Jiao J R, Chen F X. Humidity estimation of vehicle proton exchange membrane fuel cell undervariable operating temperature based on adaptive sliding mode observation[J]. Applied Energy, 2022, 313: No. 118779.
- [5] 周伟,朱鑫宁,连云崧,等. 质子交换膜燃料电池的三维流场技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 2-12.  
Zhou Wei, Zhu Xin-ning, Lian Yun-song, et al. Research progress on three-dimensional flow field technology of proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 2-12.
- [6] 周苏,胡哲,谢非. 车用质子交换膜燃料电池空气供应系统自适应解耦控制方法研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 172-177.  
Zhou Su, Hu Zhe, Xie Fei. Study on adaptive decoupling control algorithm for air supply system of vehicle proton exchange membrane fuel cell[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2): 172-177.
- [7] 严彦,周利彪,白文涛,等. 燃料电池用空气压缩机的研究现状[J]. 机电工程, 2021, 38(12): 1513-1519.  
Yan Yan, Zhou Li-biao, Bai Wen-tao, et al. Research status of air compressors in fuel cells[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(12): 1513-1519.
- [8] 霍海波,杨海东,周帅福,等. PEMFC 系统故障诊断的研究[J]. 电池, 2020, 50(3): 289-292.  
Huo Hai-bo, Yang Hai-dong, Zhou Shuai-fu, et al. Research status quo of fault diagnosis for a PEMFC system[J]. Battery Bimonthly, 2020, 50(3): 289-292.
- [9] 方川. 基于降维模型的燃料电池发动机控制方法研究[D]. 北京: 清华大学车辆与运载学院, 2017.  
Fang Chuan. Fuel cell engine control based on reduced dimension model[D]. Beijing: School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, 2017.
- [10] 韩济泉,孔祥程,冯健美,等. 大功率燃料电池汽车氢循环系统性能分析[J]. 汽车工程, 2022, 44(1): 1-7, 35.  
Han Ji-quan, Kong Xiang-cheng, Feng Jian-mei, et al. Performance analysis of hydrogen recirculation system of high power fuel cell vehicles[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 1-7, 35.
- [11] 刘子伟. 燃料电池供氢系统建模与控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学机械与电子控制工程学

- 院, 2021.
- Liu Zi-wei. Research on modeling and control strategy of fuel cell hydrogen supply system[D]. Beijing: School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, 2021.
- [12] Huang Z, Jian Q, Zhao J. Experimental study on improving the dynamic characteristics of open-cathode PEMFC stack with dead-end anode by condensation and circulation of hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(38): 19858-19868.
- [13] Hu Z, Yu Y, Wang G J, et al. Anode purge strategy optimization of the polymer electrode membrane fuel cell system under the dead-end anode operation[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 320: 68-77.
- [14] Wang B, Deng H, Jiao K. Purge strategy optimization of proton exchange membrane fuel cell with anode recirculation[J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 1-13.
- [15] Shen K Y, Park S, Kim Y-B. Hydrogen utilization enhancement of proton exchange membrane fuel cell with anode recirculation system through a purge strategy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(33): 16773-16786.
- [16] Cheng Z Y, Luo L Z, Huang B, et al. Effect of humidification on distribution and uniformity of reactants and water content in PEMFC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(52): 26560-26574.
- [17] Fan L H, Zhang G B, Jiao K. Characteristics of PEMFC operating at high current density with low external humidification[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 763-774.
- [18] Hu D H, Wang Y T, Li J W, et al. Investigation of optimal operating temperature for the PEMFC and its tracking control for energy saving in vehicle applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 249: No. 114842.
- [19] Liu Y, Tu Z, Chan S H. Performance enhancement in a H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> PEMFC with dual-ejector recirculation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(25): 12698-12710.
- [20] Xue H, Wang L, Zhang H, et al. Design and investigation of multi-nozzle ejector for PEMFC hydrogen recirculation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(28): 14500-14516.
- [21] Zhao D D, Xia L, Dang H B, et al. Design and control of air supply system for PEMFC UAV based on dynamic decoupling strategy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 253: No. 115159.
- [22] Baik K D, Kim M S. Characterization of nitrogen gas crossover through the membrane in proton-exchange membrane fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(1): 732-739.
- [23] Xu L F, Hu J, Cheng S L, et al. Nonlinear observation of internal states of fuel cell cathode utilizing a high-order sliding-mode algorithm[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 356: 56-71.
- [24] Jiao K, Alaefour I E, Li X G, et al. Simultaneous measurement of current and temperature distributions in a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Electrochimica Acta*, 2011, 56(8): 2967-2982.
- [25] Hu J M, Xu L F, Li J Q, et al. Model-based estimation of liquid saturation in cathode gas diffusion layer and current density difference under proton exchange membrane fuel cell flooding[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(41): 14187-14201.
- [26] Verma A, Pitchumani R. Influence of membrane properties on the transient behavior of polymer electrolyte fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 268: 733-743.
- [27] Siege C. Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells[J]. *Energy*, 2008, 33(9): 1331-1352.
- [28] Ziogou C, Voutetakis S, Papadopoulou S, et al. Modeling, simulation and experimental validation of a PEM fuel cell system[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2011, 35(9): 1886-1900.
- [29] 洪凌. 车用燃料电池发电系统氢气回路控制[D]. 杭州: 浙江大学控制科学与工程学院, 2017.
- Hong Ling. Fuel delivery control for vehicular fuel cell power systems[D]. Hangzhou: College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, 2017.
- [30] Hong L, Chen J, Liu Z Y, et al. A nonlinear control strategy for fuel delivery in PEM fuel cells considering nitrogen permeation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(2): 1565-1576.
- [31] Liu Z, Chen J, Liu H, et al. Anode purge management for hydrogen utilization and stack durability improvement of PEM fuel cell systems[J]. *Applied Energy*, 2020, 275: No. 115110.
- [32] Lira S, Puig V, Quevedo J, et al. LPV observer design for PEM fuel cell system: application to fault detection[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(9): 4298-4305.
- [33] Lira S, Puig V, Quevedo J, et al. LPV model-based

- fault diagnosis using relative fault sensitivity signature approach in a PEM fuel cell[C]//18th Mediterranean Conference on Control and Automation, Marrakech, Morocco, 2010: 1284-1289.
- [34] Lira S, Puig V, Quevedo J. Robust LPV model-based sensor fault diagnosis and estimation for a PEM fuel cell system[C]//2010 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, Nice, France, 2010: 819-824.
- [35] Hua Z G, Zheng Z X, Pahon E, et al. A review on lifetime prediction of proton exchange membrane fuel cells system[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 529: No. 231256.
- [36] Böhler L, Ritzberger D, Hametner C, et al. Constrained extended Kalman filter design and application for on-line state estimation of high-order polymer electrolyte membrane fuel cell systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(35): 18604-18614.
- [37] Chen K, Laghrouche S, Djerdir A. Performance analysis of PEM fuel cell in mobile application under real traffic and environmental conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 227: No. 113602.
- [38] Xu L F, Hu Z Y, Fang C, et al. Anode state observation of polymer electrolyte membrane fuel cell based on unscented Kalman filter and relative humidity sensor before flooding[J]. *Renewable Energy*, 2021, 168: 1294-1307.
- [39] Piffard M, Gerard M, Bideaux E, et al. Control by state observer of PEMFC anodic purges in dead-end operating mode[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(15): 237-243.
- [40] Vepa R. Adaptive state estimation of a PEM fuel cell [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, 27(2): 457-467.
- [41] Arcak M, Görgün H, Pedersen L M, et al. A nonlinear observer design for fuel cell hydrogen estimation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(1): 101-110.
- [42] Morales J, Astorga C, Reyes J, et al. Application of a nonlinear observer for estimation of variables in a PEM fuel cell system[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017, 39: 1323-1332.
- [43] Matraji I, Ahmed F S, Laghrouche S, et al. Comparison of robust and adaptive second order sliding mode control in PEMFC air-feed systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(30): 9491-9504.
- [44] Kim E-S, Kim C-J, Eom K-S. Nonlinear observer design for PEM fuel cell systems[C]//2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Seoul, Korea, 2007: 1835-1839.
- [45] Piffard M, Gerard M, Fonseca R D. Sliding mode observer for proton exchange membrane fuel cell: automotive application[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 388: 71-77.
- [46] Liu J X, Lin W Y, Alsaadi F, et al. Nonlinear observer design for PEM fuel cell power systems via second order sliding mode technique[J]. *Neurocomputing*, 2015, 168: 145-151.
- [47] Sankar K, Jana A K. Nonlinear multivariable sliding mode control of a reversible PEM fuel cell integrated system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 541-565.
- [48] Chen H C, Zhao X, Qu B W, et al. An evaluation method of gas distribution quality in dynamic process of proton exchange membrane fuel cell[J]. *Applied Energy*, 232, 2018: 26-35.
- [49] Mangold M, Bück A, Hanke-Rauschenbach R. Passivity based control of a distributed PEM fuel cell model[J]. *Journal of Process Control*, 2010, 20(3): 292-313.
- [50] Luna J, Husar A, Serra M. Nonlinear distributed parameter observer design for fuel cell systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(34): 11322-11332.
- [51] Luna J, Usai E, Husar A, et al. Nonlinear observation in fuel cell systems: a comparison between disturbance estimation and high-order sliding-mode techniques[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(43): 19737-19748.
- [52] Luna J, Ocampo-Martinez C, Serra M. Nonlinear predictive control for the concentrations profile regulation under unknown reaction disturbances in a fuel cell anode gas channel[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 282: 129-139.
- [53] Luna J, Jemei S, Yousfi-Steiner N, et al. Nonlinear predictive control for durability enhancement and efficiency improvement in a fuel cell power system[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 328: 250-261.
- [54] Chen J, Wu Z L, Wu C S, et al. Observer based fuel delivery control for PEM fuel cells with a segmented anode model[J]. *Asian Journal of Control*, 2019, 21(4): 1781-1795.