• 西华大学燃料电池关键技术与测评方法专题 •

质子交换膜燃料电池阴极供气系统建模与控制综述*

吴树鹏[1] 吕皇君[1] 曾昭炜[2] 武小花[1]

（1.西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室，成都 610039；2.成都工贸职业技术学院，成都 611731）

【摘要】介绍了质子交换膜燃料电池（PEMFC）阴极供气系统的组成和工作原理，以及燃料电池对离心式空气压缩机的特殊要求和防喘振策略，并对阴极供气系统建模和控制的研究现状进行了分析，最后，结合相关研究成果总结了空气压缩机在燃料电池中使用必须实现的关键技术和空气压缩机防喘振的研究方向，以及质子交换膜燃料电池阴极供气系统建模与控制的研究方向和发展前景。

关键词：质子交换膜燃料电池 阴极供气系统 离心式空气压缩机 防喘振

中图分类号：TM911.4 **文献标志码：**A **DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250256

Review on Modeling and Control of Cathode Gas Supply System for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Wu Shupeng[1], Lü Huangjun[1], Zeng Zhaowei[2], Wu Xiaohua[1]

(1. Key Laboratory of Automotive Measurement, Control and Safety of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039;
2. Chengdu Industry and Trade College, Chengdu 611731)

【Abstract】Firstly, the paper introduces the composition and working principle of the cathode air supply system for Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC), special requirements of fuel cells for centrifugal air compressors and the anti-surge strategies. Secondly, the current research status of modeling and control of the cathode air supply system is analyzed. Finally, based on the relevant research results, the paper summaries the key technologies that must be achieved for the use of air compressors in fuel cells, the research direction of anti-surge of air compressors, as well as the research direction and development prospects of modeling and control of the cathode air supply system for PEMFC.

Key words: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), Cathode gas supply system, Centrifugal air compressor, Anti-surge

【引用格式】 吴树鹏, 吕皇君, 曾昭炜, 等. 质子交换膜燃料电池阴极供气系统建模与控制综述[J]. 汽车工程师, 2026(4): 10-18.

WU S P, LÜ H J, ZENG Z W, et al. Review on Modeling and Control of Cathode Gas Supply System for Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Automotive Engineer, 2026(4): 10-18.

1 前言

阴极供气系统作为质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell，PEMFC）的关键子系统，对其输出功率和使用寿命具有关键性作用[1]。通过适当提高空气和氢气的压力，能够促进电化学反应的进行并加快阴极水分排出，改善燃料电池的性能[2]。

空气压缩机作为燃料电池阴极供气系统的核心部件，其主要功能是为燃料电池系统提供适宜流量的压缩空气[3]。燃料电池系统中常用的空气压缩机主要有两种类型，即螺旋式空气压缩机和离心式空气压缩机[4]。离心式空气压缩机因其结构简单、紧凑、效率更高和成本更低而更具吸引力[5]。喘振是离心式空气压缩机的固有特性，喘振严重时，轴承和叶轮可能损坏，造成严重事故[6]，而通过建立合理的控制策略能够有效避免喘振发生。因此，建立能够表征燃料电池阴极供气系统静态、动态特性的

*基金项目：四川省科技计划项目（2024YFHZ0314）。

模型和有效的控制策略对燃料电池应用和空气压缩机保护具有十分重要的意义。

2 质子交换膜燃料电池供气系统

2.1 供气系统的组成

质子交换膜燃料电池供气系统的组成如图1所示,系统的基本工作原理为:外界空气经过空气过滤器,由空气压缩机加压后进入供应管道,再由中冷器冷却,经加湿器湿化的反应空气进入燃料电池阴极;氢气由氢气罐经调压阀进入阳极;在催化剂的作用下,储存在氢气与氧气中的化学能转化成电能[7]。氢气通常由高压氢气瓶提供,对其进行适当减压即可实现燃料电池阳极侧反应气体供应。而对于进入燃料电池阴极侧的空气相比于传统内燃机具有更高的要求,主要体现在空气的洁净度、压力、温度和湿度方面,因此需要为燃料电池配置各种辅助部件,主要包括空气过滤器、空气压缩机、中冷器、加湿器、背压阀和消音器等。其中,燃料电池阴极侧各辅助部件及其作用如表1所示。

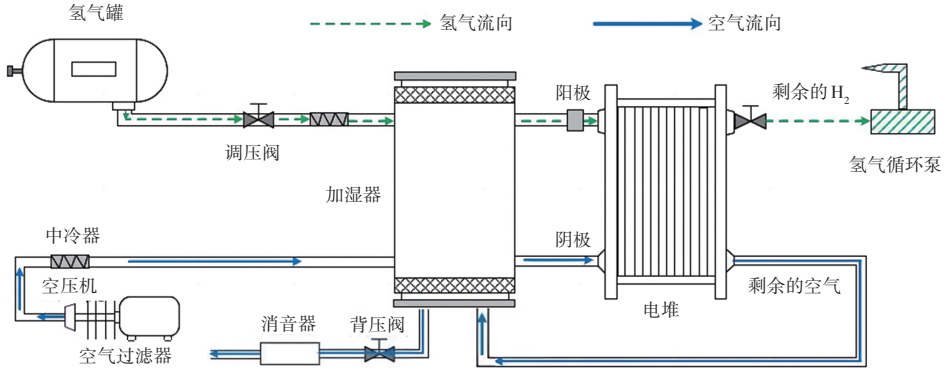


图1 供气系统结构

表1 燃料电池阴极侧部件

部件名称	样图	作用	关注点
空气滤清器		物理过滤:粉尘颗粒 化学过滤:有毒气体	容尘量 活性炭
空气压缩机		提供高压高流量空气	流量 压比 寄生功率
中冷器		提供温度适宜的空气	换热能力 气密性
加湿器		提供湿度适宜的空气	加湿性能 流阻
背压阀		提供空气背压,调节压力	通径开度 流阻
消音器		降低空气出口噪声	降噪性能 体积

2.2 空气压缩机要求及关键技术

空气压缩机的种类繁多,根据压缩原理可以将其分为容积式和速度式。容积式又分为活塞式、螺杆式、滑片式3种;速度式分为离心式和轴流式2种[3]。鉴于离心式空气压缩机与燃料电池具有更高的适配性[8],本文主要介绍离心式空气压缩机,其工作原理为:通过控制驱动电机的电压调节电机转速,电机转子带动同轴上的叶轮转动,叶轮旋转将空气压缩并经供气管路传输至燃料电池阴极[9]。燃料电池空气压缩机在工作时不仅要求节能并有效地压缩空气,还应具备以下特性[10]:

a. 无油:因为润滑油会影响质子传导和降低催化剂活性。

b. 高效率:空气压缩机的功耗约占燃料电池输出功率的20%,提高效率可改善燃料电池功率输出。

c. 小型化:以实现更高的空间利用率。

d. 材料性能高:开发耐磨、可靠的空气压缩机部件可延长空气压缩机的寿命。

e. 低成本:是加速燃料电池汽车产业化的必然要求。

f. 低噪声:以有效改善车载环境。

g. 动态响应快:负载需求功率变化时,需要无延迟调节空气流量和压力。

2.3 空气压缩机防喘振策略

喘振是离心式空气压缩机的固有现象,其机理是:进入空气压缩机的气体流量不足以使空气压缩机内部压力提高至需要的压力,导致空气压缩机入口压力小于管道压力,进而引起气流剧烈波动,产生振动和噪声。图2所示为用于某燃料电池系统的离心式空气压缩机MAP图。目前,空气压缩机的防喘振思路主要有固定极限流量法和可变极限流量法,即强制空气压缩机工作点流量不低于最低极限

流量,其中可变极限流量法是一种设置极限流量随转速变化的方法。由喘振机理可知,提高空气压缩机入口流量、降低空气压缩机出口压力是防止喘振发生的基本原理[11]。Zhou等[6]提出了一种基于小波变换的喘振故障诊断准则,通过对空气压缩机的流量进行实时诊断,在其出现喘振趋势时,根据实时诊断结果采取相应的措施。李俊[12]提出了恒压逼近喘振控制线的控制策略,在喘振阀的开度控制方面使用了模糊PID控制器,模糊控制器的输出量作为PID控制器的参数,进而快速准确地控制喘振阀的开闭,从而保障空气压缩机的稳定运行。Tomi等[13]通过对燃料电池空气压缩机的MAP图进行分析,建立了路径控制和速率控制方法,路径控制方法通过改变MAP图上工况路径的方向避开喘振区,速率控制方法通过改变空气压缩机的转速避开喘振线对应的喘振流量。郭昂等[14]设计了模糊控制防喘振方案,基于可变极限流量法控制旁通阀,并通过设计工况对防喘振效果进行仿真分析,验证了控制策略的有效性。Peng等[15]提出了一种基于模糊反喘振补偿的反馈线性化滑模解耦与模糊抗喘振补偿的协调控制策略,首先依据PEMFC系统净输出功率分析,确定了不同负载下过氧比(Oxygen Excess Ratio,OER)和阴极气压的最优参考值,针对空气压缩机的运行轨迹及其喘振线特性构建了模糊逻辑防喘振补偿器,实现了气流与压力的协同补偿,从而可靠地避免空气压缩机喘振现象的发生。Liu等[16]提出了一种在线自适应反浪涌控制(Online Adaptive Anti-Surge Control,OAASC)策略,该策略融合多时域滑动窗口技术和基于能量的特征校正方法,能够提前检测并自适应抑制浪涌,防止其恶化,并通过两阶段参数识别过程构建了具备喘振预测功能的燃料电池供气系统动力学模型。

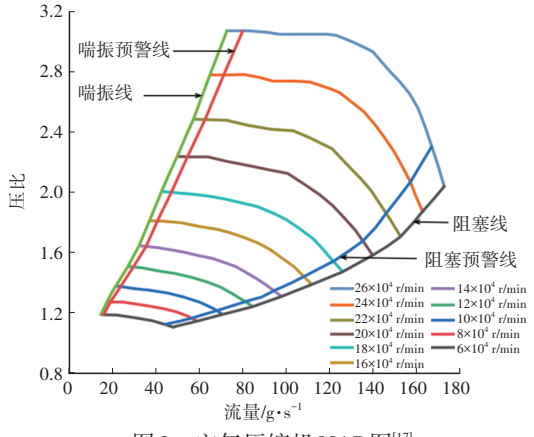


图2 空气压缩机MAP图[17]

3 质子交换膜燃料电池阴极供气系统建模

建立一个能够表征燃料电池阴极供气系统的静态、动态特性的仿真模型是后续控制策略开发的基础。针对不同的研究意图应当选取不同的建模方法,目前质子交换膜燃料电池阴极供气系统的模型主要包括机理模型、数据模型和混合模型3种。

3.1 机理模型

燃料电池阴极供气系统的机理模型是根据其内部反应机制、物质与能量的传递机制建立的数学模型。随着对系统快速反应和适应不同工作状态的能力要求的提高,实时控制兼容性的要求逐步提高,研究人员通过模型结构、观测器工具组合、模型参数调整来促进控制导向机理模型的发展,减少模型计算量,提升负载突然变化时的动态性能。Li等[18]将质子交换膜燃料电池空气供给系统的原始模型建立为高阶全驱动形式,使用固定时间扩张状态观测器测量阴极压力,为气体流量与压力动态关系的可靠描述提供了理论依据,可以支持后续的扰动补偿及非线性问题解决。Deng等[19]在原模型的基础上引入长短期记忆(Long Short-Term Memory,LSTM)网络在线学习性能导向,超参数由麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm,SSA)进行优化,以增强非线性负载的预测准确性,避免氧饥饿现象,并保留了机理框架。Klütsch等[20]进一步研究阴极化学比和压力对系统性能的影响,扩展了优化方法,给出了压缩机最优运行策略,该模型强调了如何使用一定参数进一步提升系统的净功率和效率。Peng等[21]针对空气压缩机喘振安全边界问题研究了系统模糊抗喘振补偿机理模型,通过协调气流和压力,提高了模型对喘振边界的适用性,优化了系统的净输出功率。Wei等[22]考虑可变环境,建立了包含环境压力变化的阴极动态机理模型,提高了模型的鲁棒性和预测精度。Ou等[23]建立了能量回路重构机理模型,考虑了管道压力分布和喘振约束,提升了模型对非定常流场的描述精度。Meng等[24]基于气流和压力协同优化,建立了耦合阴极流场机理模型,实现了OER和压力的调控,提高了模型在多变量耦合条件下的适用性。

3.2 数据模型

燃料电池阴极供气系统的数据模型是在大量科学可靠的试验数据基础上运用人工智能的方法建模获得的,避免了繁琐的机理分析过程,对大量

的数据进行训练和验证，即可得到系统输入与输出的关系。Cheng等[25]采用神经网络和状态方程建立PEMFC阴极供气系统的数据模型，利用径向基函数（Radial Basis Function，RBF）神经网络大幅提高了空气压缩机建模的精度，其拟合误差小于4%。卫国爱[26]根据Elman动态神经网络的特点建立了PEMFC空气流量、压力给定值预测模型，并通过仿真测试验证了该模型的预测效果。Deng等[27]采用循环神经网络方法对空气压缩机进行了非线性建模，由于模型参数在解决非线性问题时具有很大的优势，空气流量和压力比的误差近似为零，为阴极供气系统的实时控制奠定了基础。Deng等[28]为提升PEMFC空气供应系统的控制性能，特别是在应对氧气饥饿等非线性问题方面，提出了一种结合LSTM与模型预测控制（Model Predictive Control，MPC）的方法，利用LSTM对实测数据进行在线建模，并引入SSA优化模型超参数，从而提高预测精度。

3.3 混合模型

燃料电池阴极供气系统的混合模型结合了机理模型和数据模型的优点，在保证模型精度的同时降低了建模工作的难度。张天贺[29]采用机理建模法建立了气体流量模型、供给管道模型、返回管道模型，以便综合考虑燃料电池阴极流道的长度、深度等因素，并对燃料电池的性能和结构进行优化，并采用BP神经网络曲面拟合建立了空气压缩机模型，该模型能够以任意精度逼近供给管道压力、空气压缩机空气流量、转速之间的函数关系。张可健等[30]采用机理建模和辨识建模相结合的方式对模型进行推算，该模型可准确反映燃料电池工作压力、工作温度和OER等参数的静态和动态响应过程，同时基于该模型探究了上述参数对燃料电池性能的影响。张冲[31]为了实现对阴极压力与进气歧管压力的精确控制，在机理与数据混合的框架下建立了面向控制的阴极供气系统四阶模型，包括输出电压模块、燃料电池内部各气体成分动态模型以及膜含水量模型。

3.4 小结

对3种模型的特性进行对比分析，如表2所示，机理模型可以较为准确地反映PEMFC的温度、水的跨膜运输、气体的传输等过程中的参数，但是在模型推导时进行了大量假设，且模型的阶数越高，越不利于控制器的开发。数据模型可以避免对燃料电池进行繁琐的机理分析，但是对试验数据的准确性要求很高，同时建立的模型通用性低、可移植性差。混合模型则可以根据研究意图对模型进行调整，对关键参数和部件进行机理建模，以数据模型的方式保留次要因素对燃料电池的影响。

表2 质子交换膜燃料电池阴极供气系统模型的优缺点

方法	优点	缺点
机理模型	提供了对系统内部工作原理的深入理解； 能够模拟系统的动态行为和响应	模型复杂，需要大量的参数和初始条件； 计算成本高； 对模型参数的准确性要求高，参数估计困难
数据模型	相对简单，易于实现和计算； 不需要深入的物理过程知识； 可以处理大量的试验数据	缺乏对系统内部工作原理的描述； 可能无法预测未见过的操作条件或工况； 过度依赖数据质量，对噪声敏感
混合模型	结合机理模型的深入理解和数据模型的简便性； 提高模型的准确性和鲁棒性； 适用于复杂系统，能够处理不同层次的信息	模型构建和维护难度大； 需要同时处理机理和数据驱动的方法； 可能存在模型过拟合的风险

4 质子交换膜燃料电池阴极供气系统控制方法

在燃料电池阴极侧，空气压缩机为燃料电池提供一定压力和流量的空气，往往需要利用合适的控制策略，阴极供气系统的控制策略主要包含单一控制和组合控制等，如图3所示，被控变量包括气体流量、压力、OER、空气压缩机转速等[32]。

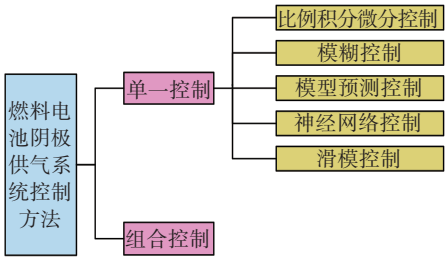


图3 质子交换膜燃料电池阴极供气系统控制方法分类

4.1 单一控制

4.1.1 PID控制

比例积分微分（Proportional Integral Derivative，PID）控制作为最早发展起来的控制策略，因其算法简单和可靠性高，广泛应用于燃料电池供气系统控制。Zhao等[33]基于六阶PEMFC系统模型设计了一种非线性观测器来估计OER和阴极压力，同时采用了一种分数阶PID控制算法，在负载电流变化时将

OER和阴极压力调整到其参考值。Zhao等[34]针对超高速离心式空气压缩机的控制，设计了2个分散的PI控制器来控制空气流量和空气压力，结果显示，压力突变会导致流量突变，证明了流量和压力存在耦合关系。贾玉茹[35]对阴极供气系统采用双闭环PID控制，在其中加入前馈补偿解耦环节后，当分别单独改变流量和压力设定值后，2个控制回路间未相互影响，说明前馈补偿实现了系统的完全解耦。

4.1.2 模糊控制

模糊控制与其他控制算法相比更为简单且计算负担小。Hao等[36]提出双模糊模型控制来调节负载突变情况下的OER，与PID控制器和自适应模糊逻辑控制器相比，模糊双模型控制能够在电流变化时及时调整设定点的OER。Wu等[37]提出一种基于粒子群优化算法的混合模糊控制器，模糊控制器中的比例因子得到了有效优化，该方案由反馈控制子系统、前馈控制子系统和切换子系统构成，通过最优控制器实时切换实现OER最优控制。Wu等[38]以调节阴极侧的供应歧管压力为目标，提出了一种控制方法，主要由两部分组成：一是复位控制方法，用于改善调节供应歧管压力时的瞬态响应；二是模糊部分，用于调整复位控制方法系数。仿真结果表明，该方法在不确定性影响下，系统瞬态响应和稳定性得到改善。Wei等[22]为了解决阴极气体状态不可测的问题，设计了模糊扩张状态观测器来估计阴极压力并重构OER，仿真结果表明，与传统控制方法相比，该策略在瞬态响应和稳态精度方面表现更优，并提高了发电效率，硬件在环试验进一步验证了其在实际应用中的可行性和高精度控制能力。

4.1.3 模型预测控制

MPC算法用于在满足一组约束的同时控制响应过程，适用于燃料电池阴极供气系统控制，以满足对空气流量和压力的控制约束。曾繁勇[39]针对阴极供气系统具有多输入多输出、强耦合性和强非线性的特性，提出基于模型预测自抗扰的控制方法进行解耦控制，且通过设计扰动观测器实现对系统的未知扰动进行估计并反馈给模型预测控制器，以实现对控制目标的快速、稳定跟踪。Chen等[40]考虑到燃料电池供气系统的强非线性耦合和干扰，提出一种反馈线性化MPC的级联驱动抗扰控制方案，在提出的级联控制中，外环为抗扰控制，用于实现OER跟踪，内环MPC调节空气压缩机流量。仿真结果表明，所提出的级联控制策略可以在空气压缩机运行高效率区调节OER。李鹏程[41]以不同电流下空气压缩机产生最佳净输出功率时的OER作为控制目标，采用MPC方法控制供气量，使其保持在不同电流下的最佳OER。仿真结果表明，在电流变化条件下，空气压缩机供气量可跟随最佳OER变化，在保证供气量的同时降低空气压缩机功耗，提高了系统的净功率输出。

4.1.4 神经网络控制

神经网络控制策略的设计无需依靠精确的系统模型，具有结构简单、易于实时计算等优点。张春雷等[42]设计了一种自适应神经网络滑模控制器，用于将PEMFC阴极供气系统OER调节至其最优参考值，以维持系统最大净输出功率并避免氧饥饿。Sanchez[43]考虑到系统的非线性，选择B样条神经网络（B-Spline Neural Network，B-SNN）对系统进行控制，并在燃料电池dSPACE仿真平台上对其进行了测试，结果表明，该控制策略具有较高的鲁棒性和自适应性。Wang等[44]提出一种基于高增益观测器的鲁棒复合自适应神经网络控制器，以阴极入口氧气流量为控制变量，实现PEMFC阴极供气系统的OER控制。

4.1.5 滑模控制

滑模控制（Sliding Mode Control，SMC）是一种结构简单且性能优越的控制方法，具有响应速度快、对扰动不敏感等优点。Zhao等[45]采用滑模变结构方法控制空气压缩机的输出流量，使其在动态负载情况下满足燃料电池对阴极供气的要求，并采用二阶滑模算法控制空气压缩机的驱动转矩，实现对输出流量的动态调节。Wang等[46]对PEMFC空气供给系统在负载突变和故障情况下易发生氧气饥饿的问题，提出了一种级联有限时间滑模容错控制策略，该方法通过内环自适应滑模控制器重构故障信号并跟踪输出轨迹，外环采用有限时间观测器生成期望轨迹，实现了对氧气过量比的快速容错控制。Matraji等[47]研究了“扭转算法”的二阶滑模多输入多输出控制器，实现对PEMFC阳极和阴极的压力调节。杨文钰[48]提出了基于最大净功率的滑模变结构控制策略，利用最大净功率调节器进行系统温度寻优，快速寻找最大净功率点，从而缩短了传统控制器单独作用下燃料电池系统的动态响应时间。最大净功率调节器的公式为：

$$P=-0.975\,1I_{\mathrm{stack}}^{2}+0.048\,14T_{\mathrm{ref}}^{2}+0.451\,7I_{\mathrm{stack}}T_{\mathrm{ref}} \quad (1)$$

式中：I_{stack}为系统负载输出电流，T_{ref}为电堆最大净功

率点对应的最优温度。

4.2 组合控制

组合控制是至少包含了以上2种控制算法的新策略，也是当前多数学者研究的重点。Liu等[49]结合前馈解耦法，为PEMFC阴极供气系统设计了一种模糊PID控制器，实现了对流量和压力的独立控制，并提高了系统的动态响应性能和稳定性，从而降低氧匮乏的可能性。Tian等[50]针对给定设定点下OER的调整，提出了MPC与PID的混合控制方案，该方案采用MPC实现空气压缩机与背压阀的协同控制，引入PID以消除MPC方法控制过程中控制模型与受控系统不匹配引起的稳态误差。此外，文献[25]基于神经网络和状态方程建立数据模型，设计了4种控制方案，仿真结果表明，在PID、模糊PID、前馈PID和模糊前馈加模糊PID中，模糊前馈加模糊PID控制效果最好，OER响应时间仅为1 s。Xiong等[51]针对PEMFC空气供给系统中存在的强非线性与时间延迟问题，提出了一种结合改进型扩张状态观测器（Extended State Observer，ESO）与模糊自适应滑模控制的新型控制策略，通过引入扰动估计误差反馈和模糊逻辑优化提升了阴极压力估计的准确性，同时，融合终端滑模与分数阶PID设计了模糊加权控制结构，实现了对氧气过量比的快速跟踪。仿真结果显示，该方法在空气流量控制性能方面优于传统PID、自抗扰控制（Active Disturbance Rejection Control，ADRC）和滑模自抗扰控制（Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control，SMADRC）策略，具有更高的控制精度和鲁棒性。

4.3 小结

结合阴极供气系统强非线性、变量耦合和动态负载需求，由控制策略可知，单一控制算法结构简单、计算量小，但存在以下缺陷：PID受参数整定影响而存在超调，响应慢；模糊控制依靠专家经验，精度有限，MPC计算量大且对模型精度敏感；神经网络、SMC鲁棒性强，但存在难以实现、易产生抖振等问题。组合控制可以通过算法互补弥补单一控制的缺陷，提高响应速度、稳态精度、抗干扰能力和整体优化性能。近年来，控制目标也由早期单变量优化转变为多变量协同调控，可以有效减少负载快速变化条件下变量耦合、氧饥饿风险及寄生功率损失，研究表明，反馈线性化、级联结构、主动扰动抑制及智能观测器补偿等能够显著降低耦合影响和改善瞬态响应。

5 结束语

本文通过对相关文献的分析，总结和展望如下：

a. 分析了PEMFC对离心式空气压缩机的要求，无油轴承、高转速、无传感器控制、高频控制等方向将会是未来研究的重点。

b. 对PEMFC阴极供气系统不同建模方法进行了详细说明，不同建模方式各有特点，后续建模工作中不仅应加强对燃料电池内部规律和外界环境（如工作温度、水传输机制和应用场景等）的分析，还应考虑燃料电池自身零部件性能衰退对系统工作特性的影响，从而建立更加精确合理的模型，同时也利于后续控制器的开发。

c. 对PEMFC阴极供气系统不同的控制方法进行了详细介绍，可知OER控制是目前研究的热点，对此应开发更精确的观测器对OER信息进行采集分析。此外，空气流量和压力存在耦合现象，解耦控制亦是当前和未来的研究热点。后续控制策略开发应更多关注其动态响应速度，以无延时响应负载需求变化，同时具有更好的抗干扰能力。

d. 未来研究可以开展离心式空气压缩机喘振形成原因的在线实时预测与可变几何补偿的智能防喘振控制机制的研发，以提升系统运行安全、动态稳定性能，并发展膨胀机深耦合实现有效能量回收和降低耗能，提高机器在高原、极端温度等宽工况下的适应性和工作效率，改善建模中的环境因素和部件老化问题，提升控制策略在OER优化和流量-压力解耦中的观测精度和反应速度，最后结合车辆能量和热管理实现多变量优化，提高效率、延长寿命、节省成本，实现PEMFC的大规模商业应用。

参 考 文 献

[1] 徐德鸿，李海津，李霄，等. 燃料电池发电系统研究综述[J]. 电源学报，2012(6)：1-8.
XU D P, LI H J, LI X, et al. Review on the Fuel Cell Power System[J]. Journal of Power Supply, 2012(6): 1-8.

[2] 纪少波，马荣泽，赵同军，等. 质子交换膜燃料电池运行参数影响规律研究[J]. 汽车安全与节能学报，2021，12(2)：251-256.
JI S B, MA R Z, ZHAO T J, et al. Study on the Influence of Operation Parameters on the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell System[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(2): 251-256.

[3] 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 Y, ZHOU L B, BAI W T, et al. Research Status of Air Compressors in Fuel Cells[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(12): 1513-1519.

[4] LIU Z X, 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] ZHAO D D, DOU M F, BLUNIER B, et al. Control of an Ultra High Speed Centrifugal Compressor for the Air Management of Fuel Cell Systems[C]// 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2012: 1-8.

[6] ZHOU S, JIN J, WEI Y H. Research on Online Diagnosis Method of Fuel Cell Centrifugal Air Compressor Surge Fault [J]. Energies, 2021, 14(11).

[7] 张庚, 刘国金. 质子交换膜燃料电池输出电压稳定控制技术[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 134-140.
ZHANG G, LIU G J. Output Voltage Stability Control Technology for Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 134-140.

[8] HE Y N, XING L F, ZHANG Y Q, et al. Development and Experimental Investigation of an Oil-Free Twin-Screw Air Compressor for Fuel Cell Systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 145: 755-762.

[9] 王恺. 车载质子交换膜燃料电池建模与进气系统控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WANG K. Research on Modeling of Vehicle Proton Exchange Membrane Fuel Cell and Control of Intake System [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[10] ZHANG H J, YU W F, HUA W, et al. Design and Key Technology of Oil-Free Centrifugal Air Compressor for Hydrogen Fuel Cell[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2022, 6(1): 11-19.

[11] ANTONOVA M, VASILIEVA E. Concept of Anti-Surge Protection[C]// IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems. Kremenchuk, Ukraine: IEEE, 2019: 82-85.

[12] 李俊. 空压机防喘振系统控制方法的研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
LI J. Research on Control Method of Anti-Surge System of Air Compressor[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019.

[13] TOMI N, HASEGAWA S, FARNSWORTH J, et al. Development of Air Supply Controller for FCV Based on Model-Based Development Approach[J]. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 2021, 3(5): 2245-2256.

[14] 郭昂, 王福, 邓召文. 离心式空压机燃料电池系统防喘振仿真[J]. 拖拉机与农用运输车, 2022, 49(5): 43-46.
GUO A, WANG F, DENG Z W. An Anti-Surge Simulation on Fuel Cell System Based on Centrifugal Compressor[J]. Tractor & Farm Transporter, 2022, 49(5): 43-46.

[15] PENG C, XIE C, ZOU J X, et al. A Feedback Linearization Sliding Mode Decoupling and Fuzzy Anti-Surge Compensation Based Coordinated Control Approach for PEMFC Air Supply System[J]. Renewable Energy, 2024, 237.

[16] LIU Z M, CHANG G F, JIANG S F, et al. Adaptive Anti-Surge Control Strategy for PEM Fuel Cell Vehicle with Online Surge Detection[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 844-858.

[17] 刘志祥, 李伦, 丁一, 等. 包含离心式空压机的大功率PEMFC空气系统喘振研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 233-239.
LIU Z X, LI L, DING Y, et al. The Surge Research of Heavy Duty PEMFC Air System with A Centrifugal Compressor[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(1): 233-239.

[18] LI C, ZHAO Y, LIU Z, et al. Prescribed Performance Control for PEM Fuel Cell Air Supply System Based on Fully Actuated Approach with Fixed Regulation Time[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2024, 53(8): 4657-4672.

[19] DENG Z H, CHEN M, WANG H J, et al. Performance-Oriented Model Learning and Model Predictive Control for PEMFC Air Supply System[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 64: 339-348.

[20] KLÜTSCH J, PISCHINGER S. Systematic Design of Cathode Air Supply Systems for PEM Fuel Cells[J]. Energies, 2024, 17(14): 3534-3534.

[21] PENG C, XIE C, ZOU J X, et al. A Feedback Linearization Sliding Mode Decoupling and Fuzzy Anti-Surge Compensation Based Coordinated Control Approach for PEMFC Air Supply System[J]. Renewable Energy, 2024, 237.

[22] WEI H, DU C Q, KE F Y, et al. Research on Air Supply Management for a 100-kW Vehicle Fuel Cell System with Fuzzy Self-Adaptive Anti-Disturbance Controller[J]. Fuel, 2025, 400.

[23] OU K, YE W, ZHANG X, et al. An Energy-Circuit-Based Fuel Cell Air Compressor System Model Reconstruction and Predictive Control Approach[J]. Renewable Energy, 2025, 254.

[24] MENG L, HAI Y, TIANWEI D W, et al. Air Flow Rate and

Pressure Control Approach for the Air Supply Subsystems in PEMFCs[J]. ISA transactions, 2021, 128: 624-634.

[25] CHENG J, ZHANG B T, MAO H Y, et al. Modeling and Fuzzy Feedforward Control of Fuel Cell Air Supply System [J]. World Electric Vehicle Journal, 2021, 12(4).

[26] 卫国爱. 车用PEMFC空气供给系统建模及控制策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
WEI A G. Study on Model and Control Strategy in Air Supply System of PEMFC in Vehicles[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.

[27] DENG Z H, CHEN Q H, ZHANG L Y, et al. Data Driven NARMAX Modeling for PEMFC Air Compressor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(39): 20321-20328.

[28] DENG Z H, CHEN M, WANG H J, et al. Performance-Oriented Model Learning and Model Predictive Control for PEMFC Air Supply System[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 64: 339-348.

[29] 张天贺. 燃料电池发动机空气供给系统建模与控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
ZHANG T H. Research on Modeling and Control of Fuel Cell Engine Air Supply System[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.

[30] 张可健, 曲大为, 兰洪星, 等. 基于MATLAB/Simulink的氢燃料电池系统建模与仿真[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5380-5386.
ZHANG K J, QU D W, LAN H X, et al. Hydrogen Fuel Cell System Modeling and Simulation Based on MATLAB/Simulink[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5380-5386.

[31] 张冲. 燃料电池空气供给系统非线性动态输出反馈控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
ZHANG C. Research on Nonlinear Dynamic Output Feedback Control Method of Fuel Cell Air Supply System [D]. Changchun: Jilin University, 2021.

[32] HOU J B, YANG M, KE C C, et al. Control Logics and Strategies for Air Supply in PEM Fuel Cell Engines[J]. Applied Energy, 2020, 269.

[33] ZHAO D D, LI F, MA R, et al. An Unknown Input Nonlinear Observer Based Fractional Order PID Control of Fuel Cell Air Supply System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5523-5532.

[34] ZHAO D D. Control of an Ultra-High Speed Centrifugal Compressor for the Air Management of Fuel Cell Systems [J]. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2012, 50(3): 2225-2234.

[35] 贾玉茹. 氢燃料电池发动机进气系统建模与控制策略研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
JIA Y R. Research on Modeling and Control of Hydrogen Fuel Cell Engine Intake System[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

[36] HAO X H, ZHANG H C, AN A M, et al. Fuzzy Double Model Control for Air Supply on a PEM Fuel Cell System [J]. Communications in Computer & Information Science (CCIS), 2012, 355: 392-400.

[37] WU K, ZHU J, JIANG B. Hybrid Fuzzy Controller Design on Oxygen Excess Ratio Control of PEMFC Air Feed System by Using PSO Algorithm[C]// 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Kunming, China: Northeastern University, 2021: 1313-1318.

[38] WU L L, MEHRDAD F. A Novel Fuzzy Reset Method for Pressure Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell in the Presence of Uncertainty[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 46(2): 1951-1961.

[39] 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. Research on Air Supply Circuit Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell System[D]. Changchun: Jilin University, 2022.

[40] CHEN J Z, LI J W, XU Z Z, et al. Anti-Disturbance Control of Oxygen Feeding for Vehicular Fuel Cell Driven by Feedback Linearization Model Predictive Control-Based Cascade Scheme[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(58): 33925-33938.

[41] 李鹏程. 质子交换膜燃料电池系统仿真与控制[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
LI P C. Simulation and Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell System[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.

[42] 张春雷, 李鹤, 董茂林, 等. 燃料电池空气供应系统自适应神经网络滑模控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(9): 1270-1276.
ZHANG C L, LI H, DONG M L, et al. Adaptive Neural Network Sliding Mode Control for the Fuel Cell Air Supply System[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(9): 1270-1276.

[43] SANCHEZ V M, BARBOSA R, ARRIAGA L G, et al. Real Time Control of Air Feed System in a PEM Fuel Cell by Means of an Adaptive Neural-Network[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(29): 16750-16762.

[44] WANG Y L, WANG Y F, CHEN G. Robust Composite Adaptive Neural Network Control for Air Management System of PEM Fuel Cell Based on High-Gain Observer[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(14): 10229-

10243.

[45] ZHAO D D, GAO F, DAVID B, et al. Sliding-Mode Control of an Ultrahigh-Speed Centrifugal Compressor for the Air Management of Fuel-Cell Systems for Automotive Applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(1): 51-61.

[46] WANG Z X, GUO X Y, DONG Z, et al. Finite-Time Sliding Mode Fault-Tolerant Control of PEM Fuel Cell Air Supply System[J]. Asian Journal of Control, 2024, 26(6): 3014-3026.

[47] MATRAJI I, LAGHROUCHE S, WACK M. Pressure Control in a PEM Fuel Cell via Second Order Sliding Mode [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(21): 16104-16116.

[48] 杨文钰. 基于滑模控制策略的PEMFC发电系统输出性能控制优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
YANG W Y. Output Optimization Control of PEMFC Based on Sliding Mode Control[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[49] LIU Z, CHEN H C, PENG L, et al. Feedforward-Decoupled Closed-Loop Fuzzy Proportion-Integral-Derivative Control of Air Supply System of Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Energy, 2022, 240.

[50] TIAN Y, ZOU Q, LIU J Q, et al. Novel Hybrid Control Scheme of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Supply System[J]. Energy Technology, 2021, 10(2).

[51] XIONG W L, ZENG X G, ZENG X, et al. A Fuzzy Adaptive Sliding-Mode Control Method with Improved ESO for a PEMFC Air Supply System[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 128: 395-405.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2025年12月29日。

《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》于1986年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车材料与制造技术类月刊，目前已入选《中文核心期刊要目总览》（第二版）、RCCSE中国准核心学术期刊（B+）、中国核心期刊（遴选）数据库、中国学术期刊综合评价数据库、欧洲学术出版中心数据库（EuroPub）、哥白尼精选期刊数据库（ICI Journals Master List）、EBSCO International数据库、J-Gate数据库。

《汽车工艺与材料》以“为中国报道汽车制造，为汽车引领工艺材料”为办刊宗旨，致力于报道以汽车轻量化技术和智能制造技术为核心的先进制造技术与材料应用技术，重点关注电动汽车蓄电池、电机、电控关键材料技术，燃料电池材料技术，高强度钢、铝镁合金、非金属材料及其成形技术，连接技术，智能装备与绿色制造等，以期通过高质量学术内容的出版和传播助推行业创新技术的交流与发展。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商，及时报道汽车行业最新的产品设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目：

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求：

（1）来稿须具有独创性并与实践相结合，文章字数最好控制在5 000～8 000字。

（2）来稿不能在国内、外公开杂志上发表过，请勿一稿多投。

（3）来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。

（4）来稿须包括以下项目：题名、作者姓名、作者单位、摘要（200字左右）、参考文献等。来稿采用word文档的格式。

（5）来稿文章格式应符合一般科技论文格式，或参考近期本刊所刊登文章格式。

（6）文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处。

（7）本刊使用网站投稿，投稿网址：http://qcgyycl.cbpt.cnki.net，咨询电话：0431-82026054。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。