

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210743

无人机燃料电池氢循环引射器设计及流动性能研究*

徐好进, 王辰, 王雷

(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

摘要:氢燃料电池无人机发展迅速,但无人机结构紧凑气源容量有限,如何提高氢气利用率,进一步增强续航能力是一个亟待解决的问题。针对该问题,本文设计了引射循环系统,将排空的氢气进行回收利用,以提高氢气利用率。以典型的1.7 kW 无人机燃料电池为例,采用计算流体力学方法设计了氢循环引射器,并进行性能分析,揭示了不同工况下内部流场特性。结果表明在二次流压力与出口压力压差为10 kPa时,一次流压力在300~700 kPa的范围内具有良好的引射性能。同时研究了关键结构参数喉嘴面积比(AR)和不同工况对引射性能的影响,研究表明,最佳AR随一次流压力变化而变化,统筹考虑本文选择AR=16,满足了不同工况下的全局最优引射性能,氢气利用率最高提升了30.3%,进一步延长了无人机的续航能力。

关键词:氢燃料电池;引射器;计算流体力学;流场分析;结构优化

中图分类号: TH36 TB61⁺⁷ **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

Design and flow performance of ejector in PEMFC hydrogen cycle for UAV

Xu Haojin, Wang Chen, Wang Lei

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The PEMFC driven unmanned aerial vehicle (UAV) is developing rapidly. However, the UAV has a compact structure and limited air source capacity. It is an urgent problem to improve the utilization rate of hydrogen that will further enhance the UAV endurance. In this paper, a hydrogen recirculation system based on the ejector is designed to recycle the drained hydrogen to improve the utilization rate of fuel. For the 1.7 kW fuel cell used in UAV, a hydrogen cycle ejector is designed by using the computational fluid dynamics method, and the performance analysis is implemented to reveal the internal flow field characteristics under different working conditions. The results show that the primary flow pressure has a good ejecting performance in the range of 300~700 kPa when the pressure difference between the secondary flow pressure and the back pressure is 10 kPa. Then, the influence of key structural parameters of area ratio (AR) and different working conditions on the ejecting performance is studied. The research shows that the optimal AR varies with the change of primary flow pressure, and the AR is selected as 16 in this paper to meet the global optimal ejecting performance under different working conditions. The maximum hydrogen utilization rate of the proposed system is increased by 30.3% outperforming that of the traditional UAV's system.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; ejector; computational fluid dynamics; fluid analysis; structure optimization

0 引言

随着工业上无人机的广泛应用,续航时间越来越成为桎梏无人机行业发展的关键问题^[1],相较于当前作为主流无人机电源的锂电池来说,质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)因其长续

航时间、高能量密度、高能量转换效率、低工作温度和无污染等优点引起人们的广泛关注^[2-4]。

由于无人机紧凑结构导致气源容量有限,且目前使用的燃料电池^[5-6]大多将未反应的氢气直接排放到大气中,造成燃料浪费,因此,为进一步提高燃料利用率,增强续航能力,在氢燃料电池的阳极回路加入氢气循环系统。氢循环主要有机械循环泵和引射器两种方式,而引射器

又因其结构简单、耐用、无寄生功率损耗、无振动等优点,引发学者们的广泛研究^[7-8]。

引射器作为一个定结构装备,通过对其结构参数和几何形状的优化,可以显著提高其引射性能。Wang 等^[9]研究了引射器主喷管的几何形状和表面粗糙度对引射器性能的影响,结果表明,在设计引射器时喷嘴的喉部、发散段的长度和表面粗糙度对引射器的引射性能影响较大;Genc 等^[10]研究了固体氧化物燃料电池系统中引射器在不同喷嘴喉部直径、喷嘴出口角度和出口位置下的性能,结果表明,喷嘴出口位置 (nozzle exit position, NXP) 和喷嘴出口角度对汽碳比 (steam to carbon ratio, STCR) 和引射比都有显著影响,当 NXP 增大、喷嘴出口角度减小时,引射比增大,STCR 增大;Wang 等^[11]研究了引射器的混合室直径和扩散室角度对引射性能的影响,结果表明,混合室直径对引射器的引射比和氢气再循环比有显著影响,扩散室角度在 11° 和 13° 时,引射器性能最佳。

引射器优点众多,但在应用中也存在较大局限,即引射器的工作范围有限^[12]。为了解决引射器宽工况工作这一问题,学者们提出了多种方案,最常见的是多引射器并联、变几何结构引射器和单引射器加空气压缩机并联这 3 种方案。Hosseinzadeh 等^[13]的研究结果表明,优化几何形状的单引射器无法覆盖整个燃料电池电流范围内所需的再循环。因此提出了一种替代方案,对于不同的电流范围使用了两个引射器,该系统可以更好地利用引射器的优点进行再循环;Wang 等^[14]设计了一种面积比 (area ratio, AR) 自动调谐 AR 引射器和喷嘴出口位置自动调谐 NXP 引射器,仿真结果表明,与固定结构的引射器相比,自调谐引射器具有较强的引射性能改善能力;Liu 等^[15]提出了压缩-引射组合系统的控制导向模型,通过分析空气压缩机与引射器之间的内在关系,基于热力学原理和集总参数法建立了一种混合模型,He 等^[16]利用该方案来循环未反应的氢气,在中高输出功率范围内使用压缩机进行再循环,结果表明该组合有效拓宽了燃料电池氢循环系统的工作范围。

当前阳极氢气的引射循环系统多用于车载或船载的大功率燃料电池系统,而对无人机小功率燃料电池应用的研究较少,因此本文对无人机燃料电池阳极氢气引射循环系统进行了研究。因为无人机系统的紧凑结构,需要在保证系统性能的前提下,尽可能减小氢循环系统的复杂度,因此单引射器方案在系统复杂性、耐用性和效率方面提供了潜在的最佳解决方案。本文以无人机用 1.7 kW 燃料电池为例,采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法对引射器进行结构设计、数值计算和性能分析,揭示其内部流场分布及其变化,通过对引射器几何结构的优化,获取更宽的工作

范围和更优的引射性能,提高燃料利用率,从而提高氢燃料电池无人机的续航能力。

1 氢循环引射器模型建立

1.1 基于引射器的 PEMFC 阳极氢循环系统

氢燃料电池的引射循环系统如图 1 所示,由氢罐、减压阀、引射器、电堆、气液分离器及排气阀共同构成,来自氢罐的高压氢气被视为一次流,由未消耗的氢和电堆反应生成的水蒸汽组成的阳极出口混合气体被视为二次流。来自氢罐的高压氢气经减压阀减压后通入引射器,二次流被一次流吸入引射器内与一次流混合,然后通入燃料电池阳极入口,与阴极通入的氧气于电堆内完成反应,实现氢气再循环。

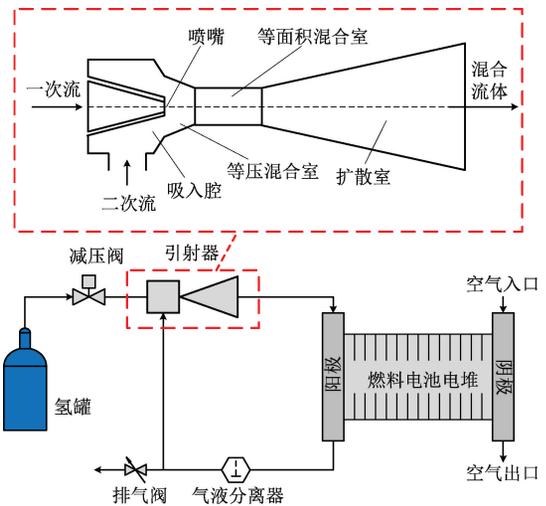


图 1 基于引射器的 PEMFC 阳极氢循环系统示意图
Fig. 1 Diagram of the PEMFC anode hydrogen circulation system based on the ejector

引射器作为氢循环的关键部件,是一种利用高速流体引射低速流体的装置。引射器一次流入口与氢罐相连,二次流入口与引射器出口分别与电堆阳极出口和阳极入口相连接。高压一次流通入引射器后,经收敛喷嘴后进行能量转化,将势能转化为动能,此时引射器不与外界进行热交换,根据能量守恒定律,一次流加速到超音速,压力降低,于吸入腔内形成负压区域,引射来自阳极出口的低速二次流。一次流与二次流在混合室充分混合,于扩散室实现对混合流体的增压,使其满足阳极入口压力需求。

1.2 引射器控制方程

本文采用 CFD 方法对引射器进行了数值仿真研究,以揭示流动特性并评估其性能,为建立 PEMFC 中引射器

的数值模型,进行以下假设^[17]:

- 1) 引射器内的工作流体为稳定可压缩流体;
- 2) 工作流体满足理想气体方程;
- 3) 引射器壁的内表面视为绝热。

基于以上假设,其仿真模型满足以下方程:

- 1) 连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

- 2) 动量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}_i \cdot \vec{v}_j) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

- 3) 能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v} (\rho E + P)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum h_j \vec{J}_j + \vec{v} \vec{\tau}) \quad (4)$$

式中: ρ 是密度, \vec{v} 是速度, $\vec{\tau}$ 是应力张量, E 是总能量, k_{eff} 是有效的导热系数, h_j 是物料的焓值。

1.3 引射器设计参数

氢燃料电池系统需要过量的氢化学计量比 λ_{H_2} , 以增强电化学反应并排出反应生成的水。忽略通过质子交换膜扩散到阴极的内部氢损失, λ_{H_2} 定义为:

$$\lambda_{H_2} = \frac{m_{rec} + m_{con}}{m_{con}} = 1 + \frac{m_{rec}}{m_{con}} \quad (5)$$

其中, m_{rec} 和 m_{con} 分别表示实际功率输出下的被引射器引射的和电堆反应消耗的氢气质量流量。

典型的引射器结构包括一次流入口、收敛喷嘴、二次流入口、吸入腔、等压混合室、等面积混合室和扩散室等。其中一次流喷嘴的喉部直径 D_{nt} 是引射器最重要的结构参数:

$$D_{nt} = \sqrt{\frac{4m_p C_{cr}}{\pi \kappa V_{cr} P_p}} \quad (6)$$

其中, C_{cr} 是气体的临界速度, κ 是气体比热比, m_p 是引射器入口的供氢压力, P_p 为燃料电池工作的最大压力, V_{cr} 是临界压力比。 C_{cr} 和 V_{cr} 可由式(7)、(8) 计算得出:

$$C_{cr} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} R_g T_p} \quad (7)$$

$$V_{cr} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (8)$$

式(6)中的 m_p 可由式(9) 计算得出:

$$m_p = m_{con} = N_{cell} \frac{I M_{H_2}}{2F} = \frac{P_{st} M_{H_2}}{2V_c F} \quad (9)$$

其中, N_{cell} 是燃料电池电堆的电池数, I 是电堆的工作电流, F 是法拉第常数, P_{st} 是电堆的输出功率, M_{H_2} 是氢气的摩尔质量, V_c 是电堆中单个电池的电压。

为保证单引射器在宽工况下良好的性能,等面积混合室的直径为4倍的喉部直径,因为相对较小的值可以在较低的一次流量下提高引射性能;等面积混合室长度为8倍的混合室直径,较大的混合室长度可确保混合流体进入扩散室前的充分混合;喷嘴到出口的位置 NXP 设置为0.9倍的混合室直径,以避免喷嘴和内壁之间的间隙过小,从而限制二次流并降低引射器性能;扩散室的长度为4.9倍的混合室长度,扩散角为 11° ,为确保出口直径为10 mm。引射器的结构参数如表1所示。

表1 引射器主要结构参数

Table 1 Key structure parameters of the ejector

结构	参数
一次流入口直径/mm	4
喷嘴喉部直径/mm	0.32
NXP /mm	1.15
等面积混合室直径/mm	1.28
等面积混合室长度/mm	10.24
扩散室长度/mm	49.84
扩散室扩散角/($^\circ$)	11

影响引射器性能的结构参数有很多,如喷嘴收敛角度、 AR 、 NXP 、混合室长度和扩散室长度等。 AR 是对引射器性能影响最大的结构参数之一,定义为引射器等面积混合室出口的截面积与喷嘴喉部的截面积之比,如式(10)所示。

$$AR = \frac{A_{nt}}{A_{mix}} \quad (10)$$

其中, A_{nt} 为喷嘴喉部截面积, A_{mix} 为等面积混合室出口截面积。

引射比 ω 定义为再循环的氢气与消耗的氢气的质量流量的比值,是评价引射器性能的主要参数。根据质量守恒定律,在燃料电池氢循环系统的稳定工作点下,电堆反应消耗的氢气质量流量 m_{con} 等于引射器一次流入口的质量流量 m_p ,再循环的氢气质量流量等于引射器二次流入口的质量流量 m_s ,即引射比可表示为:

$$\omega = \frac{m_{rec}}{m_{con}} = \lambda_{H_2} - 1 = \frac{m_s}{m_p} \quad (11)$$

为了将氢燃料电池电堆中反应生成的水排出,需要通入过量的氢气的化学计量比,一般要大于1.5,因此氢循环系统的引射比最小为0.5^[18],反之,PEMFC 将处于回流状态,无法正常工作。

氢气利用率 μ_{H_2} 就是将供给的氢气总量转化为电能和热能的百分比,这是衡量引射循环系统性能的一个重

要参数^[19], 100%的燃料利用率意味着理论上供给阳极的氢气量与电化学反应所需的氢气量相同。其定义式为:

$$\mu_{H_2} = \frac{m_{con}}{m_{total}} \quad (12)$$

1.4 CFD 模型

采用 Gambit2.4.6 和 fluent16.0 软件作为网格生成器和控制方程求解器进行仿真分析。建立的四边形网格如图 2 所示。利用如下参数评价网格质量:最小正交质量为 0.76、最大正交歪斜率为 0.23 和最大长宽比为 1.37, 网格质量满足仿真要求;在 CFD 商用软件包 Fluent16.0 中对建立的模型采用 RNG 湍流模型进行求解^[20-23], 流体近壁面处理方式选择“强化壁面处理”, 选择湍流强度和水利直径作为充分发展流体的湍流边界条件。此外,采用 SIMPLEC 算法计算压力-速度耦合场,采用一阶迎风格式对动量、湍流动能、耗散率及能量方程进行离散化。对模型的质量、动量以及能量控制方程进行迭代求解时,直到所有方程的残差小于 10^{-6} 时,认为该解是收敛的。在仿真过程中,将引射器一次流和二次流入口设为“压力入口”,出口设为“压力出口”,室温 293 K 作为一次流温度设定值,燃料电池的工作温度 343 K 用作二次流温度输入值。此外,引射器的壁面参数设置为绝热,粗糙度 0.5。

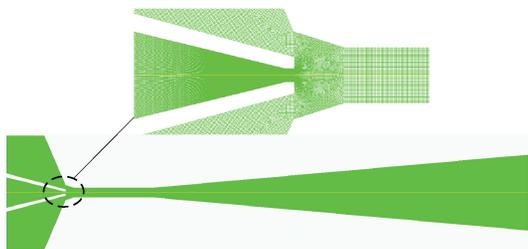


图 2 引射器计算域与网格结构

Fig. 2 Calculation domain and the grids of the ejector

2 模型验证

2.1 网格无关性验证

为了保证实验结果的准确性,确保 CFD 模型划分的网格数量不会对实验结果分析产生影响,进行网格无关性验证^[24],利用 Gambit 将二维轴对称模型从疏到密分别划分为 59 616、77 053、106 240、153 455 和 237 420 个网格,并在一次流压力为 700 kPa,二次流压力和引射器出口压力分别为 150 和 160 kPa 的工况下对模型进行仿真来验证网格数量对引射器的影响。不同网格数量下模型的轴向压力分布如图 3 所示,5 组不同数量的模型中

106 240、153 455 和 237 420 个网格数量模型的轴向压力分布近乎重合,因此选择 106 240 个网格,既能满足精度要求,又能节省计算时间。

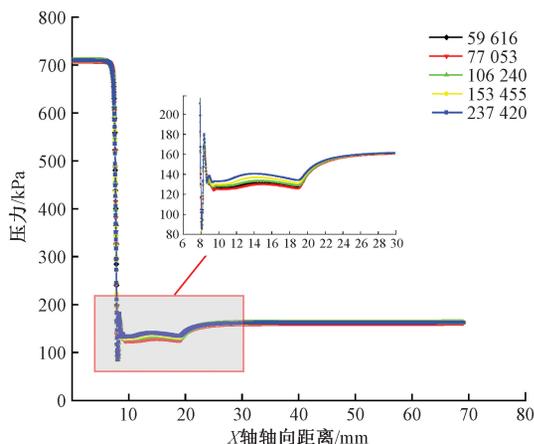
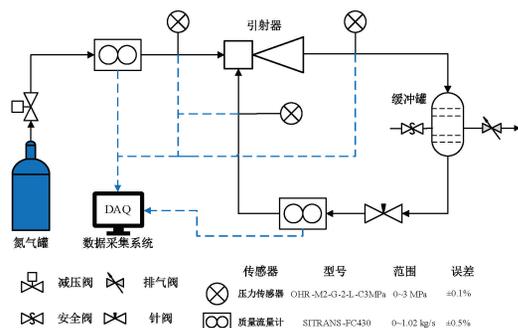


图 3 不同网格数模型下按 X 轴轴向分布的压力分布图

Fig. 3 Axial pressure distribution in X-axis under different grid number models

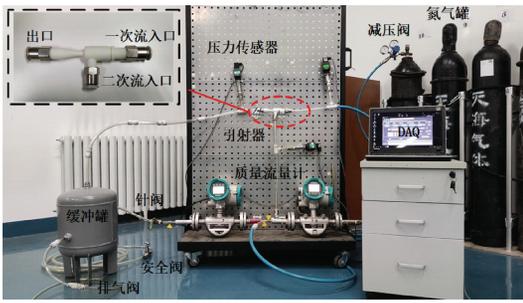
2.2 模型验证

为了验证所设计的引射器结构,建立了图 4 所示的引射器实验平台。实验平台配有氮气瓶、减压阀、引射器、缓冲罐、针阀、排气阀、安全阀以及 2 个质量流量计和 3 个压力传感器。实验测试所用的引射器为 3D 打印组件,为了保证安全性,实验装置简化为在不发生反应的条件工作,采用氮气作为替代物来提供气体势能。其中缓冲罐、针阀和排气阀用来模拟氢燃料电池电堆工作时的压降和气体消耗;安全阀用来防止系统压力超出安全阈值;质量流量计(型号: SITRANS FC430,精度: $\pm 0.5\%$)和压力传感器(型号: OHR-M2-G-2-L-C3MPa,精度: $\pm 0.1\%$)用来测量流体的质量流量和引射器三端口的压力;此外,环境温度为 293 K,所有的运行数据皆由数据采集系统(data acquisition, DAQ)实时采集并储存在计算机中。



(a) 引射器实验平台示意图

(a) Diagram of the ejector experimental platform



(b) 引射器及实验平台实物图
(b) The photograph of the test platform and manufactured ejector

图 4 引射器实验平台

Fig. 4 The ejector experimental platform

在实验过程中, 利用排气阀和针阀将二次流压力和出口压力分别控制在 150 和 160 kPa, 通过调节减压阀, 使一次流压力在 300~700 kPa 之间变化, 利用质量流量计采集的数据计算得到引射比, 每 50 kPa 记录一次实验数据。在相同条件下, 将仿真结果与实验数据进行比较, 如图 5 所示, 结果表明, 实验数据与数值仿真结果吻合较好, 相对误差在 7% 之内, 平均相对误差为 4.2%。因此, 所建立的数值模型能够较准确地描述引射器的工作性能。

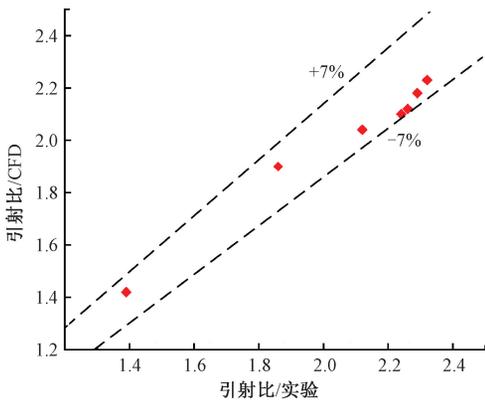


图 5 模型验证

Fig. 5 Model evaluation

3 结果分析

3.1 引射器性能分析

在对引射器进行性能分析时, 重点关注引射比这一关键指标, 它直接反映了引射器对二次流的引射能力, 通过对引射比变化的分析来确定引射器的最佳性能, 其定义式如式(11)所示。

在一次流压力范围为 300~700 kPa, 出口压力为 160 kPa 的条件下进行实验, 得到引射器在不同二次流压

力作用下一次流压力与引射比的关系, 如图 6 所示, 在二次流压力不变的情况下, 改变一次流压力, 随着一次流压力的不断增加, 引射比呈现出先增加后减小的趋势, 其最优工况下的引射比最高可达 2.86; 在固定一次流压力和出口压力的条件下, 引射比会随着二次流压力的增大而增大, 且在不同的二次流压力下, 其最优工况点也有所不同; 不同二次流压力对引射器性能的影响等价于电堆阳极入口到二次流入口的压降大小对引射器性能的影响, 二次流压力越小, 压降越大, 二次流到出口的升压比(引射器二次流压力与出口压力的比值)就越大, 对引射器性能影响就越大。

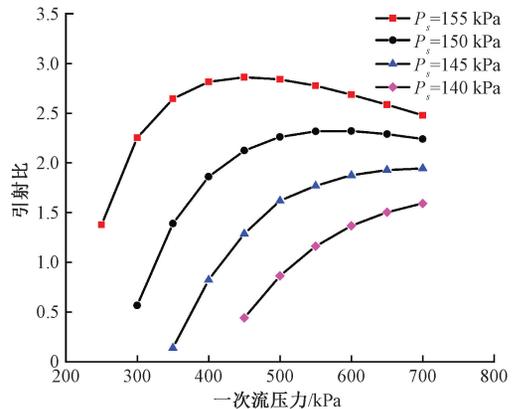


图 6 不同二次流压力下一次流与引射比的关系

Fig. 6 The relationship between primary flow and entrainment ratio under different secondary flow pressures

3.2 引射器内部流场分析

在一次流压力为 700 kPa, 二次流压力和出口压力分别为 140、160 kPa 的工况下引射器内部流场的速度云图及轴向速度分布如图 7 所示, 一次流经过喷嘴时, 速度急剧增加, 在喷嘴出口处达到超音速, 因为喷嘴喉部激波的存在, 此时引射器不与外界环境进行热交换, 根据能量守恒定律, 动能增加的同时, 势能会相应的减小, 因为多个激波的存在, 导致喷嘴与混合室之间的流体速度存在两个峰值, 此时喷嘴出口的高速一次流通过剪切力作用引射二次流进入混合室, 二者在混合室内形成混合流体, 混合过程中一次流速度不断减小, 二次流速度持续增加, 直到二者达到相同的速度, 充分混合。混合流体进入扩散室后, 因为扩散室有一定的升压效果, 所以部分动能会转化为势能, 速度会持续减小直至引射器出口端。

相同工况下压力云图和局部放大图如图 8 所示, 氢罐供给的高压一次流在经过喷嘴时压力急剧降低, 根据能量守恒, 势能转化为动能, 高压一次流转变为超音速一次流, 并在吸入腔内形成压力低于二次流入口的低压区域, 将二次流吸卷入引射器, 于混合室混合后进入扩散室, 在扩散室内对混合后的流体进行压力的小幅抬升, 使

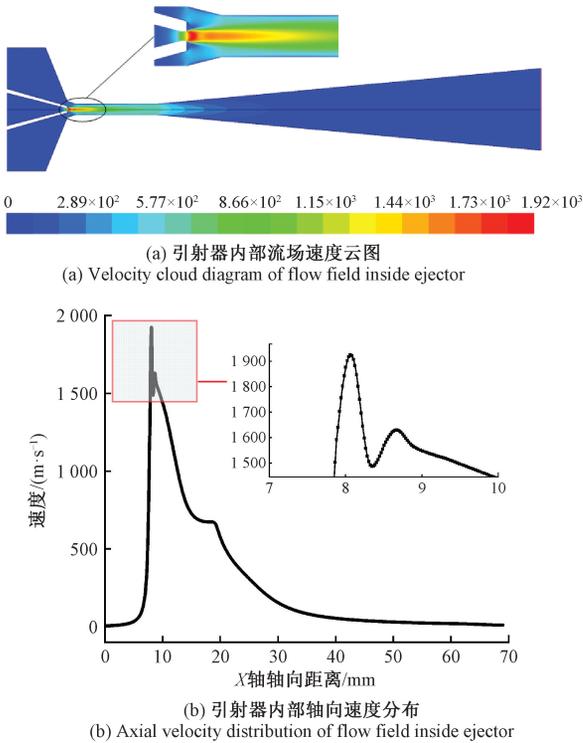


图7 引射器内部流场速度云图及轴向速度分布

Fig. 7 Velocity cloud image and axial velocity distribution of the flow field inside ejector

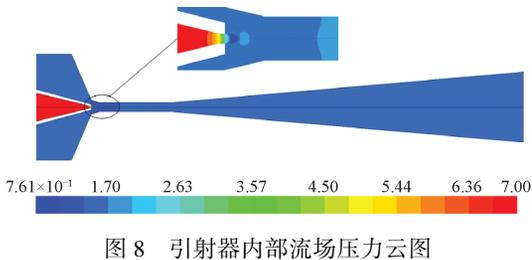


Fig. 8 Pressure cloud diagram of the flow field inside ejector

其满足电堆阳极入口的压力要求,避免影响电堆的使用寿命。温度云图和局部放大图如图9所示,流体温度在引射器内部变化明显,当一次流体以293 K的温度进入喷嘴时,喷嘴出口位置的流体温度急剧下降至 -100°C 左右,一次流在与被引射流体的混合过程中,温度逐渐升高。在混合过程中,由于能量守恒定律,温度场中温度较高的位置,在压力场中的压力较小。纵观压力场和温度场可以看出,流体在等面积混合室内实现了充分混合。

通过对引射器内部流场的分析和可视化,了解其内部流体的演变过程和混合机理,研究混合层生长、剪切力作用的动量交换规律,总结引射器工况、结构参数影响流体混合的规律,为引射器几何结构的设计提供有力支持。比如根据燃料电池的运行工况,分析流体的引射过程,可

以指导引射器喷嘴参数的设计,研究混合室的混合过程,观察不同流体是否充分混合,从而指导等面积混合室的设计和优化。

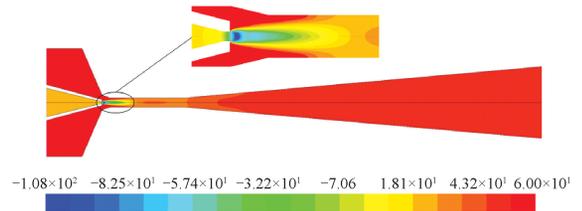


Fig. 9 Temperature cloud diagram of the flow field inside ejector

3.3 结构参数优化

在引射器结构参数中,喉嘴面积比 AR 是主要因素,如式(10)所示, AR 包含两个变量,因此采用控制变量法,分析引射器内部流体演化过程和能量损失等流动特性,研究 AR 对引射器性能的影响。

针对1.7 kW 燃料电池工况所设计的引射器, A_m 是定值,此时主要影响 AR 值的结构参数就是等面积混合室出口截面积 A_{mix} 。为研究 AR 对引射器性能的影响,设计了不同喉嘴面积比的引射器,并在固定二次流压力与背压的条件下分别对其引射性能进行了数值仿真,仿真结果如图10所示。从图中可以看出当一次流压力为700 kPa时,随着 AR 的增大,引射器的引射比先增大后减小,并在 $AR=32$ 时,达到最优值。

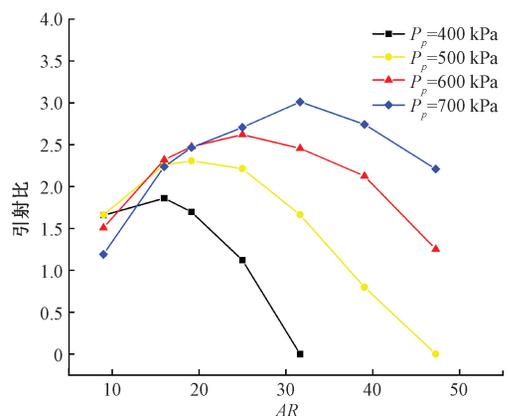


Fig. 10 The relationship between entrainment ratio and AR in different primary flow

在一次流压力为700 kPa的条件下,该引射器在其混合室出口与喷嘴出口面积之比 AR 达到32时,获得了最大引射比,是该工况下的最优设计参数。然而,相对于其他工况,这并不是最有效的设计,如在一次流压力为

400 kPa 时,若同样选择 $AR=32$,引射器运行时将处于回流状态,无法正常工作。此外,可以观察到,每个一次流压力取值都存在一个最优 AR 值,随着一次流压力的增加,其最优 AR 取值相对延迟。利用二次函数拟合引射器最优 AR 值与一次流压力的关系,由此可以得出在该设计工况范围内,引射器最优 AR 值与一次流压力之间的关系式为:

$$AR^* = 1.096e^{-4}P_p^2 - 0.067P_p + 25.196 \quad (13)$$

其中, AR^* 为最优 AR 值, P_p 为引射器一次流压力。

然而,引射器在较低功率下较难达到所需的引射比,易导致回流现象发生,影响燃料电池的使用,且不同工况下的最优 AR 也各不相同。因此,为了能够满足低功率条件下的引射需求,也为了引射器能在更宽的功率范围工作且有良好的引射性能,选择了 $AR=16$ 作为所设计引射器的喉嘴面积比,此时,在给定一次流压力范围内,引射比均大于 1.5,引射性能良好。应该提到的是,最佳喉嘴面积比在很大程度上取决于工作流体和操作条件,这是因为对于不同的流体,其性质也有所不同。

3.4 氢气利用率分析

本文设计了基于引射器的氢气循环系统,将排空的氢气进行循环再利用,以提高氢气利用率,延长无人机续航时间,氢气利用率定义如式(12)所示。不同工况条件下的氢气利用率变化情况如图 11 所示,引射循环系统能够有效的提高燃料电池的氢气利用率,随着一次流压力的增加,氢气利用率呈现先增加后减小的趋势,在不同二次流压力下,二次流压力越接近出口压力,氢气利用率越高;图 11 中虚线代表典型直排式燃料电池的最低氢气利用率 65%,加入引射循环系统后其最低氢气利用率相比提升了 7.5%,达到 72.5%;氢气利用率的最大值为 95.3%,相比提升了 30.3%。

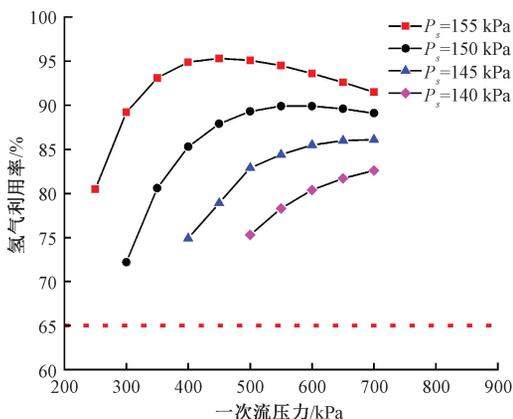


图 11 不同二次流压力下一次流与氢气利用率的关系

Fig. 11 The relationship between primary flow and utilization ratio of hydrogen under different secondary flow pressures

4 结 论

针对现有无人机燃料电池系统氢气利用率低的问题,提出了阳极氢气单引射器的引射循环方案,设计并研制了适用于 1.7 kW 燃料电池的引射器,对其内部流场和性能参数进行了系统地分析,得出以下结论:

1) 研究了一次流、二次流压力对引射性能的影响,研究表明,在二次流压力不变的情况下,随着一次流压力的增加,引射比呈现出先增加后减小的趋势,其最优工况下的引射比最高可达 2.86。

2) 对引射器工作时内部速度、压力和温度分布进行可视化,了解其内部流体的演变过程和混合机理,并据此对引射器结构进行优化,提高引射器性能。

3) 在变工况下研究了 AR 对引射性能的影响,研究表明, AR 对引射器性能影响明显,并且其最优喉嘴面积比 AR 随工况的变化而变化,在喉嘴面积比 $AR=16$ 时引射器在宽功率范围内有良好的引射性能。

4) 在变工况下研究了二次流压力对氢气利用率的影响,研究表明,引射循环系统能够有效的提高燃料电池的氢气利用率,最低氢气利用率相比典型燃料电池系统提高了 7.5%,达到了 72.5%,其氢气利用率最大值为 95.3%,相比提升了 30.3%。

参考文献

- [1] WANG B, ZHAO D, LI W X, et al. Current technologies and challenges of applying fuel cell hybrid propulsion systems in unmanned aerial vehicles [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 116: 0376-0421.
- [2] 张心悦,张海伦,王雷. 燃料电池氢循环引射器性能分析与结构优化[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 152-160.
ZHANG X Y, ZHANG H L, WANG L. Performance analysis and structure optimization of ejector in PEMFC hydrogen cycle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 152-160.
- [3] 高大威,金振华,卢青春. 基于 Matlab 的燃料电池汽车动力系统仿真[J]. 系统仿真学报, 2005(8): 1899-1901.
GAO D W, JIN ZH H, LU Q CH. Simulation of fuel cell vehicle power train based on Matlab [J]. Journal of System Simulation, 2005(8): 1899-1901.
- [4] PAN Z F, AN L, WEN C Y. Recent advances in fuel

- cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles[J]. *Applied Energy*, 2019, 240: 473-485.
- [5] APELAND J, PAVLOU D, HEMMINGSEN T. State-of-technology and barriers for adoption of fuel cell powered multirotor drones[J]. *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2020: 1359-1367.
- [6] GONG A, PALMER J, BRIAN G, et al. Performance of a hybrid, fuel-cell-based power system during simulated small unmanned aircraft missions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41 (26): 11418-11426.
- [7] 薛浩渊,王雷,贾磊. MED-TVC 两级真空喷射泵模型分析及设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40 (7): 114-120.
- XUE H Y, WANG L, JIA L. Model analysis and design of the two-stage vacuum ejector used in MED-TVC system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 41(7): 114-120.
- [8] YIN Y, FAN M ZH, JIAO K, et al. Numerical investigation of an ejector for anode recirculation in proton exchange membrane fuel cell system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126: 1106-1117.
- [9] WANG L, YAN J, WANG C, et al. Numerical study on optimization of ejector primary nozzle geometries [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 76: 219-229.
- [10] GENÇ O, TOROS S, TIMURKUTLUK B. Geometric optimization of an ejector for a 4 kW SOFC system with anode off-gas recycle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(19): 9413-9422.
- [11] WANG X H, XUA S CH, XING CH M. Numerical and experimental investigation on an ejector designed for an 80 kW polymer electrolyte membrane fuel cell stack[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 415: 25-32.
- [12] ZHU Y, LI Y. New theoretical model for convergent nozzle ejector in the proton exchange membrane fuel cell system [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 191: 510-519.
- [13] HOSSEINZADEH E, ROKNI M, JABBARI M, et al. Numerical analysis of transport phenomena for designing of ejector in PEM forklift system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39: 6664-6674.
- [14] WANG L, LIU J P, ZOU T, et al. Auto-tuning ejector for refrigeration system [J]. *Energy*, 2018, 161: 536-543.
- [15] LIU J P, WANG L, JIA L, et al. A control oriented model for combined compression-ejector refrigeration system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 138: 538-546.
- [16] HE J L, CHOE S Y, HONG C O. Analysis and control of a hybrid fuel delivery system for a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 185: 973-984.
- [17] HUANG B J, CHANG J M, WANG C P, et al. 1-D analysis of ejector performance[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22: 354-364.
- [18] MAZZELLI F, LITTLE A B, GARIMELLA S, et al. Computational and experimental analysis of supersonic air ejector: Turbulence modeling and assessment of 3D effects[J]. *International Journal of Heat Fluid Flow*, 2015; 56: 305-316.
- [19] NIKIFOROW K, KOSKI P, KARIMÄKI H, et al. Designing a hydrogen gas ejector for 5 kW stationary PEMFC system-CFD-modeling and experimental validation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(33): 14952-14970.
- [20] SONG Y J, WANG X L, WANG L, et al. A twin-nozzle ejector for hydrogen recirculation in wide power operation of polymer electrolyte membrane fuel cell system [J]. *Applied Energy*, 2021, 300: 117-442.
- [21] CROQUER S, PONCET S, AIDOUN Z. Turbulence modeling of a single-phase R134a supersonic ejector. Part 1: Numerical benchmark [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 61: 140-152.
- [22] JENSSEN D, BERGER O, KREWER U. Improved PEM fuel cell system operation with cascaded stack and ejector-based recirculation [J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 324-333.
- [23] 任建波,苗超,李强,等. 基于数值仿真的 MED-TVC 喷射泵参数优化与性能研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(10): 82-88.
- REN J B, MIAO CH, LI Q, et al. Parameter optimization and performance analysis of the ejector used

in MED-TVC system based on numerical simulation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 82-88.

- [24] DU Z Q, LIU Q, WANG X L, et al. Performance investigation on a coaxial-nozzle ejector for PEMFC hydrogen recirculation system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(76): 38026-38039.

作者简介



徐好进, 2020年于济南大学获得学士学位, 现为山东大学控制科学与工程学院研究生, 主要研究方向为燃料电池与喷射理论。

E-mail: 2446612062@qq.com

Xu Haojin received his B. Sc. degree from University of Jinan in 2020. He is currently a master student in the School of Control Science and Engineering at Shandong University. His main research interests include fuel cells and jet theory.



王辰, 2014年于山东大学获得学士学位, 2017年于山东大学获得硕士学位, 2022年于英国曼彻斯特大学获得博士学位, 现为山东大学控制科学与工程学院博士后, 主要研究方向为燃料电池、引射器、流体控制等。

E-mail: sduchenwang@163.com

Wang Chen received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Shandong University in 2014 and in 2017, and received his Ph. D. degree from University of Manchester, UK in 2022. He is currently a post doctor in the School of Control Science and Engineering at Shandong University. His main research interests include fuel cells, ejector and fluid control etc.



王雷(通信作者), 1993年于山东工业大学获得学士学位, 2000年于山东大学获得硕士学位, 2004年于浙江大学获得博士学位, 现为山东大学教授, 主要研究方向为现代检测技术、燃料电池、海水淡化、多相流检测和低品位能源利用中的控制问题。

E-mail: leiwang@sdu.edu.cn

Wang Lei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong Polytechnic University in 1993, received his M. Sc. degree from Shandong University in 2000, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2004. He is currently a professor at Shandong University. His main research interests include modern detection technology, fuel cells, desalination, multiphase flow detection and the control problems in low-grade energy resource utilization.