

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210742

PEMFC 全功率变流量喷射器流场特性研究*

伊安宁, 王辰, 王雷

(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

摘要:针对质子交换膜燃料电池全功率氢循环对喷射器变流量的需求,提出并设计了不同嵌套方式的四喷嘴喷射器,以实现不同工况下变流量性能。为研究不同嵌套方式喷射器的流场特性及其循环性能,采用计算流体力学方法对喷射器进行建模和分析。结果表明,部分嵌套喷射器的内部流场比全嵌套喷射器的内部流场稳定;当二次流压力和背压不变时,一次流压力从6 bar(1 bar=100 kPa)增加到10 bar,部分嵌套喷射器引射比先上升后下降,在压力为7 bar时存在最大值;而全嵌套喷射器引射比是下降的趋势,通过与实验数据的比较,部分嵌套喷射器具有更优的性能;最后通过多喷嘴 PWM 逻辑控制,实现了170 kW 燃料电池全功率变流量拟线性调控性能,满足燃料电池在变功率运行下的氢循环需求。

关键词: 燃料电池;喷射器;四喷嘴;计算流体力学;引射比;逻辑控制

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

Study on flow field characteristics of PEMFC full power variable flow ejector

Yi Anning, Wang Chen, Wang Lei

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: This article proposes and designs a four-nozzle ejector with different nesting methods to meet the variable flow requirements of proton exchange membrane fuel cell full power hydrogen recirculation under different working conditions. The computational fluid dynamics method is used to study the internal flow field of the different nesting type four-nozzle ejectors and recycling performance. The results show that the internal flow field of partially nested ejector is more stable than that of the fully nested ejector. When the secondary flow pressure and back pressure remain constant, the entrainment ratio (ER) of partial nested ejector firstly rises and then decreases with the condition of the primary flow pressure increasing from 6 bar(1 bar=100 kPa) to 10 bar where the maximum ER is obtained at the primary flow of 7 bar. Through the comparison with the experimental data, the partial nested ejector has better performance than the fully nested ejector whose performance of ER declines gradually in the whole process. Finally, the full power variable flow linear regulation performance is realized through the multi-nozzle logic control to meet the requirements of fuel cell variable power operation for the hydrogen cycle ejector.

Keywords: fuel cell; ejector; four-nozzle; computation fluid dynamic; recirculation ratio; logical control

0 引 言

目前,化石燃料的大量应用带来了环境污染、温室效应、能源危机等日益严重的问题,促使研究者将目光转向新型绿色能源^[1-4]。燃料电池不受热机效率的限制,将燃料的化学能直接转换成电能,其中质子交换膜燃料电池(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)具有效

率高、无污染、运行温度低、功率密度高、长寿命等优点,是应用前景广阔的绿色能源转换装置。

氢循环系统是 PEMFC 系统的重要组成部分。在 PEMFC 运行时,通常会通入过量的氢气将阳极通道中的水携带出去,而阳极出口会含有一部分未反应的氢气,需要进行循环利用,提高燃料电池系统的性能和效率^[5-8]。喷射器由于体积小、无功率消耗、成本低等优点,使其成为燃料电池阳极氢循环的最优选择^[9-11]。

收稿日期:2022-11-19 Received Date: 2022-11-19

* 基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1504700)项目资助

喷射器已广泛应用于制冷系统、海水淡化等多个领域。近年来,喷射器不断改进发展,很多学者逐渐将喷射器引入到燃料电池系统。随着计算机的发展,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)逐渐被应用于喷射器的流场分析上^[12-15]。宋亚杰等^[16]利用 CFD 技术对低温制冷系统中喷射器进行了研究。Yan 等^[17]通过 CFD 仿真技术和实验研究了喷射器喷嘴出口位置(nozzle exit position, NXP)和面积比(area ratio, Ar)对喷射器的性能影响。Merritt 等^[18]证实了喷射器可循环 PEMFC 系统中未消耗的氢气。Kim 等^[19]提出了一种新的满足燃料电池要求的喷射器设计方法,并通过实验验证了设计的有效性。Dadvar 等^[20]用一种新的理论模型研究了电堆参数与喷射器之间的相关性,提出了两种无因次参数(尺寸比、直径比)辅助喷射器设计。Maghsoodi 等^[21]提出喷射器 4 个重要的几何参数,即混合室长度、NXP、扩散室长度和扩散室角度对喷射器性能的影响。Yang 等^[22]不仅研究上述 4 个几何参数对喷射器性能的影响,还研究了混合室直径和喷嘴出口直径对喷射器性能的影响。Pei 等^[23]重点介绍了面积比(混合室直径与喷嘴直径的比)和 NXP 对喷射器性能的影响。Wang 等^[2]采用二维模型数值研究了喷射器扩散室角对氢气再循环性能的影响。张心悦等^[15]在燃料电池变工况的条件下,研究了喷射器结构参数与燃料电池的系统的耦合关系。

对于宽功率燃料电池,定结构喷射器已不再适用,不能满足变流量的要求。为满足变工况的燃料电池,一些学者对喷射器结构进行了改进。Brunner 等^[24]设计了可变几何喷射器,在燃料电池系统工作在 7~17 kW 输出功率范围内,该喷射器具有良好的循环性能。Du 等^[25]设计了一种共轴双喷嘴引射器,该喷射器满足了燃料电池在 17.9~84 kW 范围内的氢循环要求。

随着 PEMFC 技术的发展,特别是大功率车用燃料电池的迅速推广应用,要求喷射器在全功率范围内具有良好的变流量性能。虽然目前对变流量喷射器已有很多研究和探索,但是尚无法满足 PEMFC 在全功率下对变流量的要求。针对以上问题,本文以 170 kW 大功率燃料电池系统为研究对象,设计四喷嘴变流量喷射器,以满足 PEMFC 在全功率下对变流量循环的需求。

1 四喷嘴喷射器模型的建立

1.1 燃料电池系统中喷射器的工作原理

传统喷射器驱动的 PEMFC 氢气再循环系统如图 1 所示,喷射器由喷嘴、吸入室、混合室和扩散室组成。氢气再循环系统的工作流程如下:从储氢罐流出的高压一次流氢气通过喷嘴加速成为超音速,在喷嘴出口形成负

压区,抽吸阳极未反应的二次流气体,在混合室进行能量交换,最后混合气体通过扩散室升压,流入燃料电池阳极。在循环过程中,喷射器不仅实现燃料的循环利用,而且同时将燃料电池中的液态水排出,防止水淹停机。

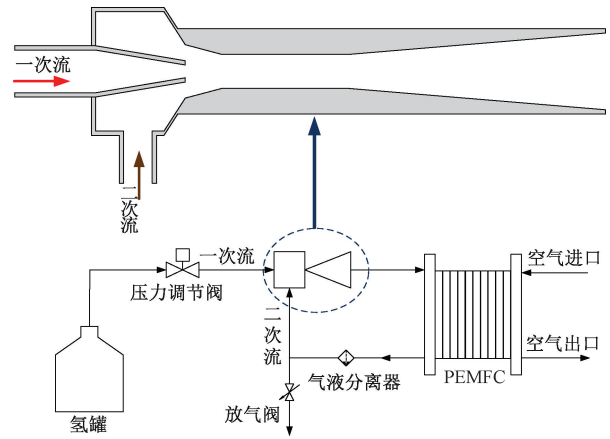


图 1 喷射器驱动 PEMFC 阳极氢循环系统

Fig. 1 Anodic hydrogen recirculation system with a conventional ejector

1.2 四喷嘴喷射器的设计

在喷射器结构中,喷嘴是重要的结构之一,喷嘴的数量影响着喷射器的性能。根据前期研究^[26],若将喷嘴数量设计成 5 个或以上的数量,会使单个喷嘴孔径过小单独工作时会产生回流现象导致喷射器失效;若喷射数量设计成 2 或 3 个时,不能满足喷射器在燃料电池全功率下工作。本文针对以上的问题,提出一种新型四喷嘴喷射器。4 个喷嘴有多种嵌套方式,但主要分为部分嵌套和全嵌套两类,本文选择引射性能较好的两种典型四喷嘴分布结构进行研究如图 2 所示,其他喷嘴分布形式不做赘述。对于部分嵌套喷射器图 2(a),只有最小的喷嘴被最大的喷嘴所包围,大喷嘴的直径为 1.4 mm。对于两个倾斜喷嘴大小相等,倾斜角是在研究性能及尺寸后选取的最佳倾斜角,具体数值如表 1 所示。若将倾斜角度变大,会增大吸入室和混合室直径,导致喷射器回流;若倾斜角度变小,会造成多股流体碰撞损失更多动能。而全嵌套喷射器(图 2(b))中,3 个小喷嘴都放置在大喷嘴中,由于组合方式的不同,大喷嘴直径也会有所不同,图 2(b)中大喷嘴直径为 3.8 mm。由于一次流在喷嘴出口达到极高的速度,与此速度相比,二次流初始速度可忽略不计,可以将二次流的侧向入口简化为圆环形的轴向入口^[27](喷嘴外围)。而 3 个小喷嘴的直径计算如下:

$$A_{m1} = \frac{m_{in} v_{cr}}{k p_{cr} p_p} \quad (1)$$

$$p_{cr} = \frac{p^*}{p_p} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

$$v_{cr} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \sqrt{RT_{p^*}}} \quad (3)$$

$$A_{ni} = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (4)$$

式中: m_{in} 为一次流量(从已知实验数据获得); p_p 为一次流压力; k 为一次流气体的气体比热比; v_{cr} 为临界速度; p_{cr} 为喉部相对压力; p^* 和 T_{p^*} 为气体的临界速度和临界压力; R 为气体通用常数; D 指喷嘴直径。

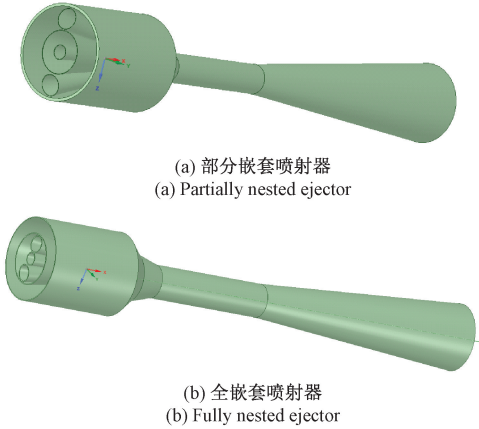


图2 四喷嘴喷射器的两种典型布设方式
Fig. 2 Two forms of the four nozzles ejector

喷射器其他结构参数,例如混合室直径、混合室长度、扩散室长度等均保持一致,如表1所示。

表1 其他结构参数
Table 1 Other structural parameters

参数	数值
喷嘴1直径/mm	0.6
喷嘴2直径/mm	0.8
喷嘴3直径/mm	0.8
喷嘴2、3倾斜角度/(°)	9
喷嘴长度/mm	40
喷嘴出口位置/mm	10
混合室直径/mm	8
混合室长度/mm	40
扩散室长度/mm	80

1.3 计算域网格划分

采用 ANSYS 软件建立三维计算模型,作为网格生成器对模型进行非结构网格划分。为了提高计算域网格质量,对三维模型进行区域加密处理,流动简单的区域密度低一些,流动复杂的区域密度高一些。如图3所示。

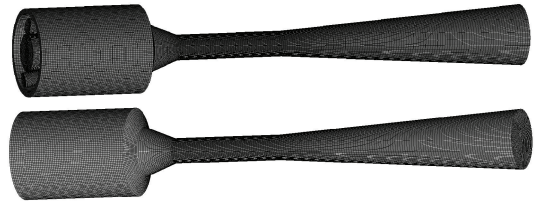


图3 四喷嘴喷射器模型的网格
Fig. 3 The grids of the four-nozzle ejector model

1.4 控制方程

由于燃料电池在稳定条件下运行,氢气被假设是理想气体,在喷射器内部稳定流动。墙壁表面被认为是绝热的,喷射器内的流体被视为单相流。根据以上假设,喷射器内部的控制守恒方程如下。

连续方程:

$$\nabla \times (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

动量方程:

$$\nabla \times (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \times \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (6)$$

能量方程:

$$\nabla \times [\vec{v}(\rho E + P)] = \nabla \times [\lambda \nabla T - \sum_q h_q \vec{J}_q + \vec{\tau} \vec{v}] \quad (7)$$

物种运输方程与理想气体:

$$\nabla \times (\rho \vec{v} Y_q) = -\nabla \times \vec{J}_q \quad (8)$$

$$\rho = P/R_g T \quad (9)$$

式中: ρ 为密度; \vec{v} 为速度; P 为压力; $\vec{\tau}$ 为应力张量; \vec{g} 为重力加速度; E 为总能量; λ 为化学计量比; T 为温度; h_q 为焓; \vec{J}_q 为扩散通量; Y_q 为质量分数; R_g 为气体常数。

1.5 边界条件设定

利用流体力学软件 ANSYS Fluent 16.0 对模型进行数值仿真。采用基于压力的求解方法对控制方程求解,用标准壁面方程对壁面的流动进行处理,采用 SIMPLEC 算法对压力场进行求解,对压力、温度等物理量的离散求解采用二阶迎风法。喷射器的一次流、二次流进口设置为压力进口,出口为压力出口,一次流温度为 293 K,二次流温度为燃料电池工作温度 338 K。为确保计算收敛,所有的计算变量的残差均小于 10^{-6} 。

1.6 网格无关性检验

为了确保结果的可靠性和准确性,建立3组不同网格数量的部分嵌套四喷嘴喷射器模型进行仿真验证,3组模型的网格数分别是 785 242、1 245 316、1 613 454。采用干氢气作为工作流体,喷射器4个入口的一次流压力均为 7 bar (1 bar = 100 kPa),二次流压力为 1.9 bar,出口压力为 2.1 bar。得到的轴向静压如图4所示,网格数量为 1 245 316 和 1 613 454 的结果较为接近,为了保证

结果的准确性以及较高的计算效率,采用网格数量为 1 245 316 的喷射器模型进行仿真实验。

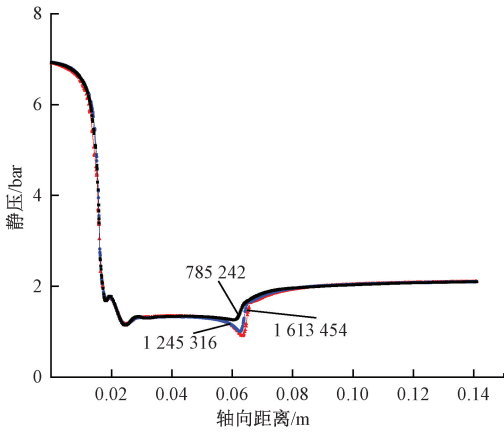


图 4 不同网格数的轴向压力

Fig. 4 Axial pressure of different grid number

2 性能分析

采用三维数值模拟的方法研究四喷嘴喷射器的流场特性和以及边界条件对喷射器再循环性能的影响。

2.1 四喷嘴喷射器流场特性

喷射器内部流体的流动、混合、扩散等机理较为复杂,研究内部流场的变化对揭示喷射器的性能起着重要的作用。四喷嘴喷射器速度流场如图 5 所示。边界条件设置为一次流压力 7 bar,二次流压力 1.9 bar,出口压力 2.1 bar。图 5(a)可以看出,气体通过喷嘴后会逐渐收敛聚集。由于两个喷嘴与主轴线是倾斜的状态,在喷嘴出口处会出现激波现象,同时也会造成一定的能量损失。而在扩散室中,有一定的回流现象产生,与多个喷嘴同时开启有一定关系,但不影响喷射器的引射功能。图 5(b)可以看出,一次流和二次流的混合流体充满了整个混合室。在流体进入混合室和离开混合室两个位置,都会产生激波现象。同样在扩散室的后半端,也会出现回流现象。两种喷射器只开启中心轴线上两个喷嘴时,如图 5(c)和(d)所示,流体沿中心轴线流出在扩散室内无回流现象。与图 5(a)和(b)相比,图 5(c)和(d)只开启中心轴线上的喷嘴,没有开启倾斜的喷嘴。可得,扩散室中产生回流现象是由于来自不同方向的流体互相撞击造成一定能量损失所造成的。从喷射器流场图看出,部分嵌套喷射器流体混合更充分、流动更稳定性,性能更好。

2.2 两种喷射器的引射性能

在喷射器研究中,引射比是评估喷射器性能的重要的指标,其直接反映工作流体抽吸引射流体的能力。对

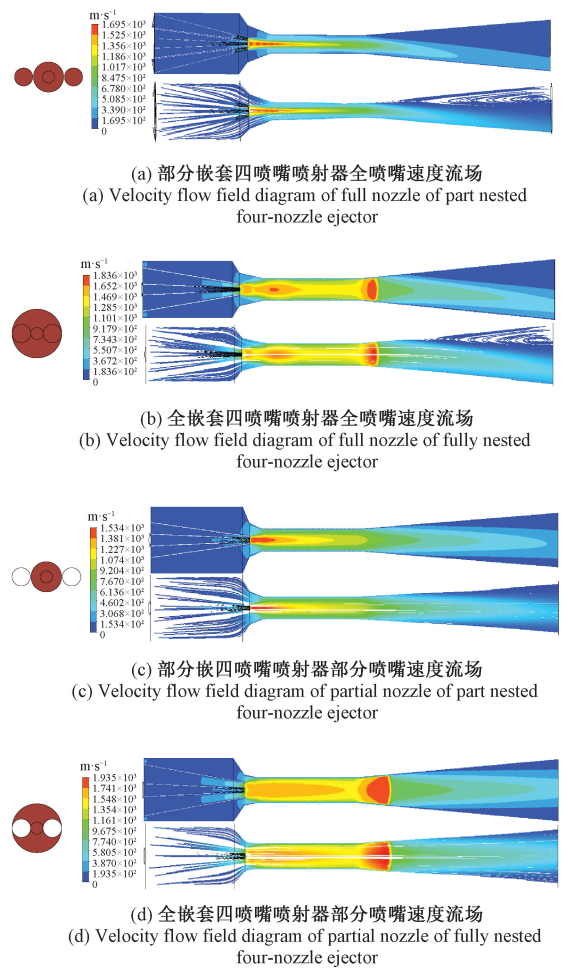


图 5 不同喷射器速度流场

Fig. 5 Velocity flow field diagram of different ejectors

于四喷嘴喷射器,引射比 ω 为:

$$\omega = \frac{m_s}{m_f} = \frac{m_s}{m_{f1} + m_{f2} + m_{f3} + m_{f4}} \quad (10)$$

式中: m_f 一次流质量流量,即 4 个喷嘴的总质量流量; m_{f1} 为喷嘴 1 的流量; m_{f2} 为喷嘴 2 的流量; m_{f3} 为喷嘴 3 的流量; m_{f4} 为大喷嘴的流量; m_s 为二次流质量流量。

将一次流压力从 6 bar 增加到 10 bar,二次流压力和出口压力保持不变,研究在一次流压力不同的情况下两种喷射器的引射性能。图 6 所示为两种喷射器质量流量变化的情况,两种喷射器一次流质量流量都随压力的增加而增加,而全嵌套四喷嘴喷射器的一次流质量流量远远大于部分嵌套四喷嘴喷射器的一次流质量流量,是因为全嵌套四喷嘴喷射器中最大的喷嘴直径要大于部分嵌套四喷嘴喷射器中的最大喷嘴直径。而部分嵌套四喷嘴喷射器的二次流质量流量是递增的状态,全嵌套四喷嘴喷射器中的二次流质量流量是递减的现象。当一次流压力大于 8.5 bar 时,部分嵌套四喷嘴喷射器的二次流质量流量将超过全嵌套四喷嘴喷射器的二次流质量流量。

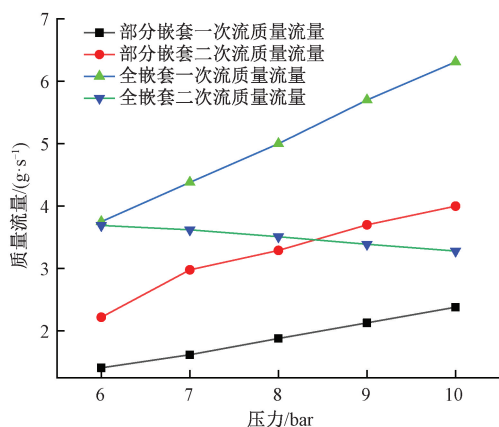


图6 两种喷射器的质量流量变化

Fig. 6 Flow rate variation of two ejectors

图7所示为两种喷射器的引射比随压力的变化情况。部分嵌套四喷嘴喷射器的引射比会随压力的升高先增加后减小,当压力达到7 bar时,引射比有最大值为1.84;而全嵌套四喷嘴喷射器的引射比随压力的升高持续下降,当压力为6 bar时,引射性能最好,引射比最大值为0.98。部分嵌套四喷嘴喷射器的引射比要远远大于全嵌套四喷嘴喷射器的引射比,是因为在部分嵌套四喷嘴喷射器中流体在喷嘴出口速度要大于全嵌套四喷嘴喷射器中喷嘴出口处的流体速度,部分嵌套四喷嘴喷射器引射的质量流量会逐渐超过全嵌套四喷嘴喷射器引射的质量流量。从上述内容可知,一次流压力对喷射器性能有着重要的影响。

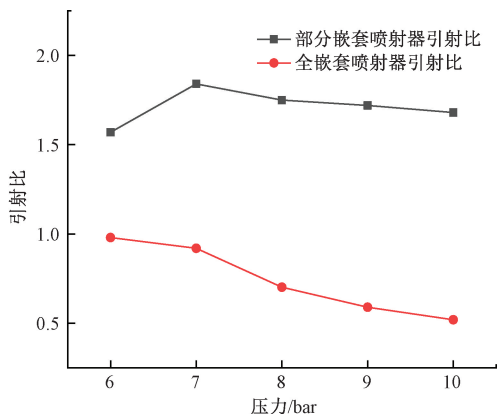


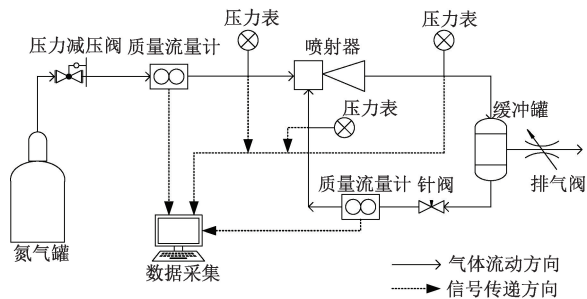
图7 两种喷射器引射比的变化

Fig. 7 Change of ejector ratio of two kinds of ejectors

2.3 实验装置

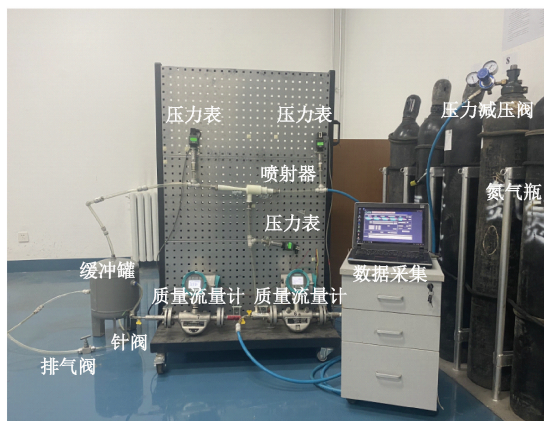
为了验证所建数学模型的准确性,搭建实验台与仿真模拟实验进行对比。图8(a)和(b)所示分别是实验装置的系统图和实验装置的实物。该实验台包括喷射器,缓冲罐,压力传感器,流量计,减压阀,针阀,排气阀,数据采

集装置。在实验测试中,考虑到实验安全用氮气来替代氢气作为气体动力源,减压阀用来降低从气罐中流出的气体压力,以满足实验所需的气体压力。流量计用来测量进入喷射器一次流和二次流质量流量,压力传感器用来测量喷射器入口和出口的压力值,缓冲罐、针阀和排气阀用来模拟燃料电池电堆中压降。另外,实验环境温度为293 K,所有的压力和流量数据都被及时的收集和保存在电脑中。



(a) 实验装置系统

(a) Experimental device system diagram



(b) 实验装置实物

(b) Experimental device physical diagram

图8 实验装置

Fig. 8 Experimental device

在相同的工况条件下进行比较分析,一次流压力在6~10 bar,二次流压力和出口压力保持在1.9和2.1 bar。图9所示为实验得到的引射比和仿真得到的引射比之间的比较。

通过结果分析得出,数值模型计算值和实验结果较好的吻合,相对误差在8%内。误差主要由加工误差和实验误差引起。因此,所建立的数值模型能够较准确地反应喷射器的性能。

2.4 仿真结果与实验的对比

在一定的工况条件下,电堆实验所测得的引射比保持不变。两种喷射器仿真的引射比与部分电堆实验的引射比的比较如图10所示。实验要求的引射比数值为1.5,根据以上的分析,全嵌套喷射器的引射比最大值才

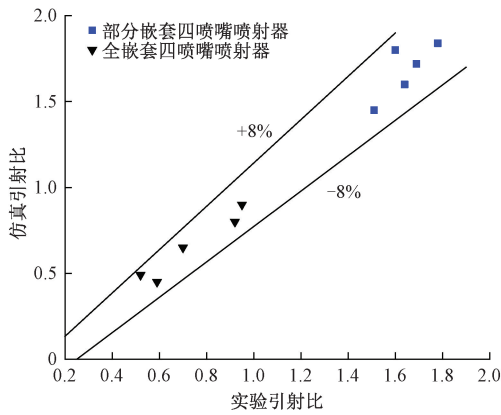


图 9 实验引射比与仿真引射比的比较

Fig. 9 Comparison between experimental and simulate recirculation ratios

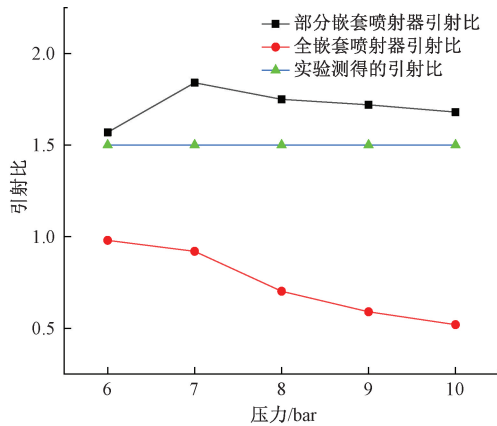


图 10 仿真与实验引射比的比较

Fig. 10 Comparison of simulation and experimental recirculation ratio

0.98, 显然不符合实验要求; 而部分嵌套喷射器的引射比明显要高于实验测得的数值。而当一次流压力为 6 bar 时, 引射比为 1.57, 最接近实验要求。通过两种喷射器引射比和实验所需引射比的比较, 部分嵌套喷射器更能满足实验需求。

2.5 全功率变流量性能研究

1) 变流量情况下的喷嘴切换

结合前文的分析, 部分嵌套四喷嘴喷射器可以满足实验的要求, 但是有个缺陷是能满足燃料电池部分工况下的情况, 不能满足全功率下流量变化的需求。在面对 170 kW 大功率燃料电池全功率变流量的情况, 需要对部分嵌套四喷嘴喷射器的喷嘴直径进行改进。将 4 个喷嘴运行的功率设置成总功率的 10% (第 1 喷嘴)、20% (第 2 喷嘴)、20% (第 3 喷嘴)、50% (第 4 喷嘴), 结构如图 11 所示。

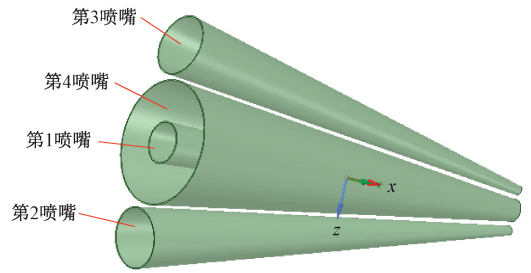


图 11 4 个喷嘴结构示意图

Fig. 11 Structural diagram of four-nozzle

改进后的喷嘴直径以及数值仿真后得到的各个喷嘴的流量如表 2 所示。

表 2 喷嘴直径及喷嘴流量

Table 2 Nozzle diameter and nozzle flow

喷嘴	直径/mm	流量/(g·s ⁻¹)
第 1 喷嘴	1.0	0.31
第 2 喷嘴	1.2	0.62
第 3 喷嘴	1.2	0.62
第 4 喷嘴	2.4	1.41

根据 170 kW (Pe) 燃料电池测得的实际电流值和流量值 (电流值和流量值是一一对应关系) 来判断喷嘴投入运行的个数及大小, 判断标准如表 3 所示 (表 3 中, 将喷嘴简述为 1、2、3、4)。

表 3 喷嘴运行的参考依据

Table 3 Reference basis for nozzle operation

功率	电流/A	流量/(g·s ⁻¹)	运行喷嘴
10% Pe	0~50	0~0.29	1
20% Pe	51~100	0.30~0.58	2(3)
30% Pe	101~150	0.59~0.87	1+2(3)
40% Pe	151~210	0.88~1.18	2+3
50% Pe	211~250	1.19~1.45	1+2+3(或 4)
60% Pe	251~310	1.46~1.71	1+4
70% Pe	311~360	1.72~2.03	2(3)+4
80% Pe	361~412	2.04~2.32	1+2(3)+4
90% Pe	413~445	2.33~2.61	2+3+4
100% Pe	446~495	2.62~2.91	全开

2) 四喷嘴控制方法

当燃料电池功率变化时,相应的流量也会发生变化,导致需要喷嘴的数量和大小也会发生变化。如果变工况时,对相应喷嘴进行立即关闭和开启,则会出现阶跃跳动,会出现燃料短缺、供应不足的现象,导致运行时间增长,对燃料电池产生一定的冲击,减少燃料电池的寿命。为了解决上述问题,现采用多喷嘴 PWM 逻辑控制方法,通过 PWM 调制控制比例电磁阀开度,从而满足流量的需求。

本文采用的比例电磁阀流量特性曲线如图 12 所示。比例电磁阀存在死区和饱和区,在控制过程中充分考虑了该问题。

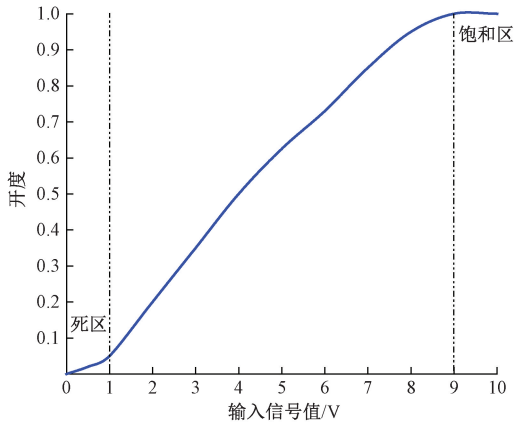


图 12 比例电磁阀特性曲线

Fig. 12 Characteristic curve of proportional solenoid valve

通过 PWM 调制控制比例电磁阀实现流量的拟线性调节,例如燃料电池从 10% 功率模式下切换到 20% 功率模式下,如图 13 所示,供氢压力保持不变,通过 PWM 调制控制比例电磁阀逐渐减小第 1 喷嘴的流量,与此同时增大第 2 喷嘴(第 3 喷嘴)的流量,两个喷嘴流量相互叠加,总流量呈拟线性趋势上升。如图 14 所示,通过对 4 个喷嘴之间的逻辑控制,得到了 170 kW 全功率范围内的拟线性变化的性能曲线。

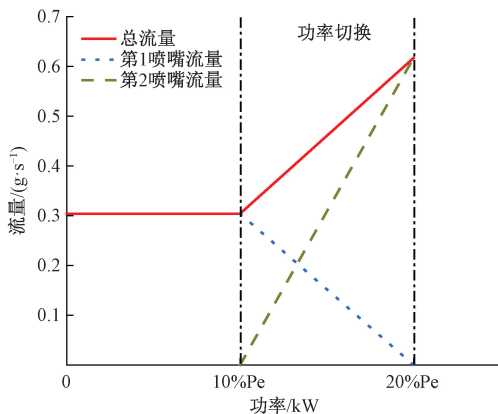


图 13 功率切换流量变化示意图

Fig. 13 Diagram of power switching flow change

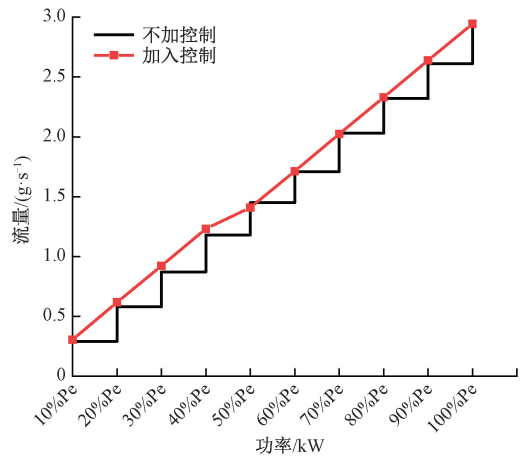


图 14 拟线性变化性能曲线

Fig. 14 Linear variation performance curve

3 结 论

本文针对燃料电池全功率氢循环对喷射器变流量的需求,设计了两种不同嵌套方式的四喷嘴喷射器,详细分析了两种喷射器的内部流场;同时探讨不同的一次流压力下,喷射器引射性能的变化。最后结合实验测得的数据,对喷射器施加多喷嘴 PWM 逻辑控制方法,实现 170 kW 全功率变流量的需求。

1) 在两种喷射器的流场分析中,全嵌套喷射器内部流场机理较为复杂,而部分嵌套喷射器内部流体较为稳定,混合的更为均匀、流动更稳定,性能更好。

2) 当一次流压力从 6 bar 增加到 10 bar 时,部分嵌套喷射器的引射比会先增大后减小,且当一次流压力为 7 bar 时,引射比有最大值,其数值为 1.84;而全嵌套喷射器的引射比一直下降,而最大值仅为 0.98。与实验测得的部分引射比相比较,部分嵌套喷射器更能满足氢循环的要求。

3) 对部分嵌套四喷嘴喷射器的喷嘴直径进行改进,满足了 170 kW 燃料电池在全功率范围内变流量的需求,通过多喷嘴 PWM 逻辑控制,实现全功率变流量拟线性调控性能。

参考文献

- [1] RODOSIK S, PTOIROT-CROUVEZIER JP, BULTELY Y. Simplified anode architecture for PEMFC system based on alternative fuel feeding: Experimental characterization and optimization for automotive application[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45:19720-19732.
- [2] WANG X H, XU S C, XING C M. Numerical and experimental investigation on and ejector designed for an 80 kW polymer electrolyte membrane fuel cell stack[J].

- Journal of Power Sources, 2019, 415:25-32.
- [3] LIU Z Y, CHEN J, LIU H, et al. Anode purge management for hydrogen utilization and stack durability improvement of PEM fuel cell systems[J]. Appl Energy, 2020,275:115110.
- [4] ZHU Y L, YOUSEFI N. Optimal parameter identification of PEMFC stacks using adaptive sparrow search algorithm[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021,46:9541-9552.
- [5] BRUNNER D A, MARCKS S, BAIJPAI M, et al. Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37: 4457-4466.
- [6] HWANG J J. Passive hydrogen recovery schemes using a vacuum ejector in a proton exchange membrane fuel cell system [J]. Journal of Power Sources, 2014; 247: 256-260.
- [7] TOGHYANI S, AFSHARI E, BANIASADI E. A parametric comparison of three fuel recirculation system in the closed loop fuel supply system of PEM fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44: 7518-7530.
- [8] LI F Q, DU J Y, ZHANG L H, et al. Experimental determination of the water vapor effect on subsonic ejector for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017; 42: 29966-29970.
- [9] LIU Y, TU Z K, CHAN S H. Applications of ejectors in proton exchange membrane fuel cells: A review[J]. Fuel Processing Technology, 2021, 214: 106683.
- [10] LIU Y, LUO X B, TU Z K, et al. Droplet dynamics in a proton exchange membrane fuel cell with ejector-based recirculation[J]. Energy Fuel, 2021, 35: 11533-11544.
- [11] LIU Z R, LIU Z, JIAO K, et al. Numerical investigation of ejector transient characteristics for a 130 kW PEMFC system [J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44: 3697-3710.
- [12] 陈佳, 袁朝辉, 郭强, 等. 射流管伺服阀前置级的动态流场分析 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (7): 1731-1737.
- CHEN J, YUAN ZH H, GUO Q, et al. Dynamic flow field analysis of the prestage of jet pipe servo valve[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1731-1737.
- [13] 彭育辉, 吴智洲, 陈祥榛, 等. 天然气喷射阀动态流量的实时精确计量 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 11-17.
- PENG Y H, WU ZH ZH, CHEN X ZH, et al. Real-time metering method for dynamic flow of natural gas injector[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 11-17.
- [14] 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 ejector used in MED-TVC system based on numerical simulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 82-88.
- [15] 张心悦, 张海伦, 王雷. 燃料电池氢循环喷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.
- [16] 宋亚杰, 王新立, 王雷. 低温制冷系统两级喷射器设计与性能分析 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 34-43.
- SONG Y J, WANG X L, WANG L. Design and performance analysis of two-stage ejector for the subzero refrigeration system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 34-43.
- [17] YAN J, CAI W J, LI Y Z. Geometry parameters effect for air-cooled ejector cooling systems with R134a refrigerant[J]. Renewable Energy, 2012, 46: 155-163.
- [18] MERRITT R D, GORBELL B N. Electrochemical fuel cell system with a regulated vacuum ejector for recirculation of the fluid fuel stream: 1995US5441821[P]. [2000-07-20].
- [19] KIM M, SOHN Y J, CHO C W, et al. Customized design for the ejector to recirculate a humidified hydrogen fuel in a submarine PEMFC [J]. Journal of Power Sources, 2008, 176: 529-533.
- [20] DADVAR M, AFSHARI E. Analysis of design

parameters in anodic recirculation system based on ejector technology for PEM fuel cells: A new approach in designing[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39:12061-12073.

- [21] MAGHSOODI A, AFSHARI E, AHMADIKIA H. Optimization of geometric parameters for design a high-performance ejector in the proton exchange membrane fuel cell system using artificial neural network and genetic algorithm [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(1):410-418.
- [22] YANG Y, DU M, MA T, et al. Numerical studies on ejector structure optimization and performance prediction based on a novel pressure drop model for proton exchange membrane fuel cell anode [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(43):23343-23352.
- [23] PEI P, REN P, LI Y, et al. Numerical studies on wide-operating-range ejector based on anodic pressure drop characteristics in proton exchange membrane fuel cell system [J]. *Appl Energy*, 2019, 235:729-738.
- [24] BRUNNER D A, MARCJS S, BAJPAI M, et al. Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37:4457-4466.
- [25] 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, 46:38026-38039.
- [26] XUE H Y, WANG L, ZHANG H L, et al. Design and investigation of multi-nozzle ejector for PEMFC hydrogen recirculation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45:14500-14516.
- [27] 于耀. 蒸汽喷射器的结构优化及多喷嘴结构的数值模拟[D]. 济南:山东大学, 2021.
- YU Y. Numerical simulation of structural optimization and multi-nozzle structure of steam ejector [D]. Ji'nan: Shandong University, 2021.

作者简介



伊安宁, 2021年于武汉理工大学获得学士学位, 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: 981282100@qq.com

Yi Anning received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2021. He is currently a master student in the School of Control Science and Engineering at Shandong University. His research direction is fuel cell 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, 现为山东大学博士后, 主要研究方向为燃料电池和流体控制。

E-mail: chenwangdsu@gmail.com

Wang Chen received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Shandong University in 2014 and 2017, and received his Ph. D. degree from University of Manchester in 2022. He is currently a postdoctoral scholar at Shandong University. His main research interest are fuel cell and fluid control.



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、多相流检测、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, M. Sc. degree from Shandong University in 2000, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2004. He is currently a professor at Shandong University. His main research interests include modern detection technology, multiphase flow detection and the control problems in low-grade energy resource utilization.