

多堆共轨燃料电池脉冲阀引射器仿真分析

张蒙蒙 陈海娥 邓阳庆

(佛山仙湖实验室, 佛山 528200)

【摘要】基于某峰值功率为200 kW的大功率三堆共轨质子交换膜氢燃料电池(PEMFC),使用Fluent软件对脉冲阀引射器单体和供氢系统的多缸共轨脉冲阀引射器进行稳态计算流体力学(CFD)迭代计算,确定引射器方案,利用引射器台架试验验证了设计方案和仿真模型的可靠性,对脉冲阀引射器引射系数的影响因素进行仿真分析,可知同等压力变化条件下,二次流喷射压力对引射系数的影响最大,入堆压力次之,喷射压力影响最小,同时,氮气含量对引射系数影响较大,最后进行脉冲阀引射器瞬态仿真分析,结果表明:同稳态结果相比较,瞬态条件下计算的引射系数有很大的裕度,因此在电堆实际工作时可以进一步覆盖低功率工况;保持脉冲阀占空比不变,提高喷射频率,有利于引射系数的提高。

关键词:氢燃料电池 多堆共轨 脉冲阀引射器 均匀性 计算流体力学分析

中图分类号:TK91

文献标志码:A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230058

The Simulation Analysis of Pulse Valve Ejector for Multi-Stack Common-Rail Fuel Cell

Zhang Mengmeng, Chen Haie, Deng Yangqing

(Foshan Xianhu Laboratory, Foshan 528200)

【Abstract】Based on a 200 kW peak power three-stack common-rail Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), the steady Computational Fluid Dynamics (CFD) iterative calculation between the single pulse valve ejector and the multi-stack common-rail pulse valve ejector under and hydrogen supply system was carried out by Fluent software, and the ejector scheme was determined. Then the reliability of the design and simulation was verified by the ejector bench test. The influence factors of pulse valve ejector were simulated and analyzed, from which we can know that with the same pressure variation, the injection pressure of secondary flow has the greatest influence on the ejection coefficient, followed by the inlet pressure, and the injection pressure has the least influence. Meanwhile, nitrogen content has great influence on the ejection coefficient. Finally, the transient simulation analysis of the pulse valve ejector was carried out. The results show that, compared with the steady state results, the ejection coefficient calculated under transient state has a large margin, so it can further cover the low power condition. Keeping the duty cycle unchanged and increasing injection frequency are beneficial to the improvement of ejection coefficient.

Key words: Hydrogen fuel cell, Multi-stack, Pulse valve ejector, Uniformity, CFD simulation

【引用格式】张蒙蒙,陈海娥,邓阳庆.多堆共轨燃料电池脉冲阀引射器仿真分析[J].汽车工程师,2023(10):11-16.

ZHANG M M, CHEN H E, DENG Y Q. The Simulation Analysis of Pulse Valve Ejector for Multi-Stack Common-Rail Fuel Cell[J]. Automotive Engineer, 2023(10): 11-16.

1 前言

氢燃料电池重型载货汽车具有零排放、效率高、燃料加注时间短、续航里程长、极寒环境下可正

常运行等特性和优势,具有良好的发展前景^[1-2]。大功率、多堆组共轨燃料电池系统是现阶段燃料电池技术的重要发展趋势,多堆共轨氢喷射和氢循环引射技术可提高电堆应用的灵活性和适应性。

氢循环引射技术的关键部件是引射器,引射器利用储氢装置和燃料电池之间的压差回收氢气,从而避免寄生功率的产生,同时具有结构简单、噪声小、易维护(无运动部件)等优点^[3-4]。经过研究人员的不断探索,质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)系统氢循环引射器在理论和设计方面取得了大量研究成果。Jung等设计了由引射器和比例阀组成的喷射泵系统以替代传统的引射器-鼓风机氢循环系统,采用脉冲式燃料供给方案克服了引射器在低功率条件下性能差的缺陷^[5]。尹燕等建立了用于PEMFC阳极再循环系统的引射器三维数值模型,并总结了引射器的几何参数优化设计方案^[6]。相关研究大多针对单个电堆中的单体引射器,研究结果不能完全适用于大功率、多堆共轨燃料电池系统引射器,故需开发一款新的脉冲阀引射器,在利用前端氢罐的高压力进行氢气喷射的同时,提高控制精准性。

本文基于某峰值功率为200 kW的大功率三堆PEMFC开发脉冲阀引射器,在考虑单堆引射器设计要求的同时,兼顾三堆串联带来的一致性问题的,使用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对单体引射器和供氢系统下多堆引射器进行多轮计算后确定引射器方案,结合试验台架进行验证,最后采用瞬态CFD分析进一步了解脉冲阀引射器的性能,同时就喷射频率对脉冲阀引射器引射系数的影响因素进行研究。

2 计算分析

2.1 单体引射器 CFD 仿真分析

2.1.1 引射器计算模型

大部分引射器的设计以燃料电池电堆额定工况点为基准条件^[7],为了尽量覆盖低功率工况点,本文以常用电流密度工况点600 mA/cm²为设计基准。图1所示为单体引射器的几何模型。



图1 引射器几何模型

本文使用Fluent软件对引射器单体进行稳态CFD计算,电流密度为600 mA/cm²、过量系数为1.6、介质为氢气。表1所示为引射器的计算边界条件与初始条件,计算模型的相关设置如表2所示,计算网格数量为110×10⁴个。

表1 单体引射器仿真边界条件与初始条件

参数	取值	参数	取值
喷射流量/g·s ⁻¹	0.41	引射温度/°C	73
喷射压力/kPa	500	入堆压力/kPa	200
喷射温度/°C	25	入堆温度/°C	70
引射压力/kPa	194.5		

表2 单体引射器仿真模型设置

参数	设置
粘性模型	$k-\epsilon$ 模型(Realizable),强壁面函数,粘滞加热
物料属性	理想气体
混合物属性	比热:混合律 热导率:理想气体混合律 粘度:理想气体混合律

2.1.2 计算结果分析

通常使用引射系数 k 评价引射器的性能,引射系数可直观地反映一次流对二次流的引射能力^[7-8]:

$$k = G_s / G_f \quad (1)$$

式中, G_f 、 G_s 分别为一次流、二次流流量。

对计算结果进行统计,得到单体引射器的引射系数为1.17。图2、图3所示分别为引射器速度场分布和压力场分布情况,可以看出,流体在喷嘴喉口处速度达到最大值,压力势能转化为流体动能后经喷嘴出口超声速喷出形成马赫环,二次流被吸入混合室与一次流相互混合,二者在混合室和喉口段混合均匀,进入电堆,为电堆提供所需流体。

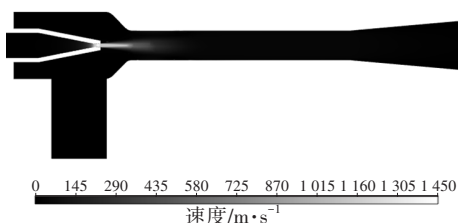


图2 引射器速度场分布

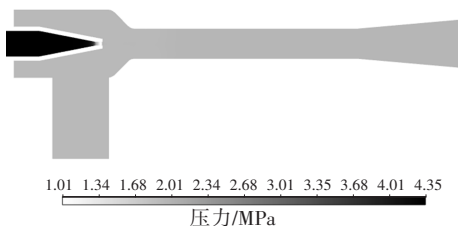


图3 引射器压力场分布

2.2 多堆共轨引射器 CFD 仿真分析

得到单体引射系数后,需要在供氢系统中评价单体引射器是否合适,使用Fluent软件对引射器系统进行稳态CFD计算。引射器需要满足:供氢系统共轨的三堆引射器的引射系数与单体引射器的引射系数接近;共轨的三堆引射器引射系数一致性需

在 $\pm 5\%$ 范围内;二次流总轨的压力与单体引射器的二次流压力接近。获得符合需求的引射器方案需要经过数次迭代。

2.2.1 共轨引射器计算模型

图4所示为供氢系统多堆共轨引射器模型:流体从电堆流出后经氢水分离器进入引射器,即引射器二次流;二次流被吸入引射器与一次流混合形成均匀混合气进入电堆。

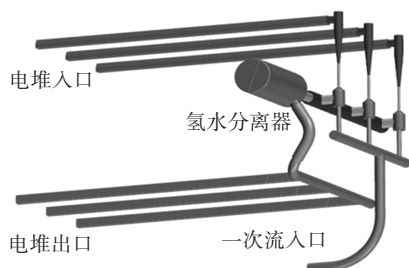


图4 供氢系统共轨引射器

使用Fluent软件对供氢系统的共轨引射器进行稳态CFD计算,供氢系统引射器的计算工况与单体引射器工况一致:电流密度为 600 mA/cm^2 ,过量系数为1.6。多堆共轨引射器仿真计算边界条件与初始条件如表3所示,介质为氢气,计算网格数量为 $1\,200 \times 10^4$ 个,计算模型参照表2设置。

表3 供氢系统共轨引射器仿真边界条件

参数	取值	参数	取值
喷射流量/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	1.23	出堆温度/ $^{\circ}\text{C}$	73
喷射压力/kPa	500	入堆压力/kPa	200
喷射温度/ $^{\circ}\text{C}$	25	入堆温度/ $^{\circ}\text{C}$	70
出堆压力/kPa	195.5		

2.2.2 计算结果分析

表4所示为供氢系统多堆共轨引射器的引射系数,从表4中可以看出:3个引射器的引射系数等效于单体引射器的引射系数1.10,与单体引射器的仿真计算结果1.17接近;3个引射器之间引射系数的偏差在 $\pm 5\%$ 范围内,引射器一致性好。图5、图6所示分别为供氢系统共轨引射器和进堆前气体的速度分布情况,由图5、图6可知,三堆共轨引射器速度分布均匀,一致性好,同时,从3个引射器流出的氢气流动性好,混合均匀,可以为电堆持续提供稳定的氢气。

表4 供氢系统共轨引射器仿真结果

引射器	引射系数	偏差/%
引射器1	1.079	-2.09
引射器2	1.106	0.36
引射器3	1.120	1.63

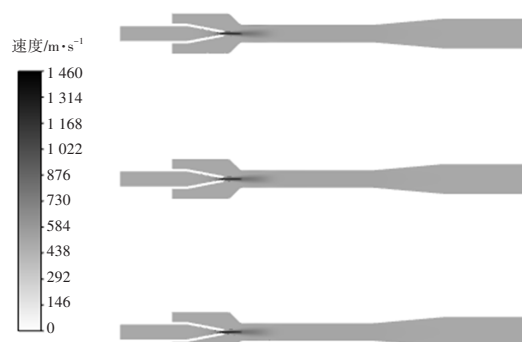


图5 供氢系统共轨引射器速度场分布

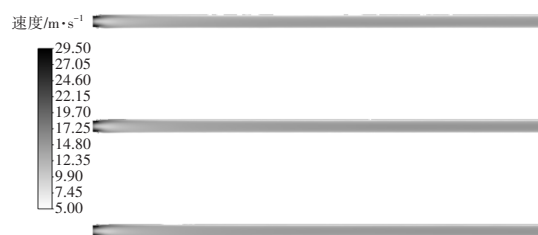


图6 进堆气体速度场分布

3 引射器台架试验

为了验证引射器的设计与仿真模型的可靠性,需要进行引射器台架试验。将试制好的脉冲阀引射器安装在台架上,如图7所示,试验气体为氢气,引射器台架试验分为2个部分,首先验证脉冲阀喷嘴是否满足压力和流量需求,然后进行整体的脉冲阀引射器试验。

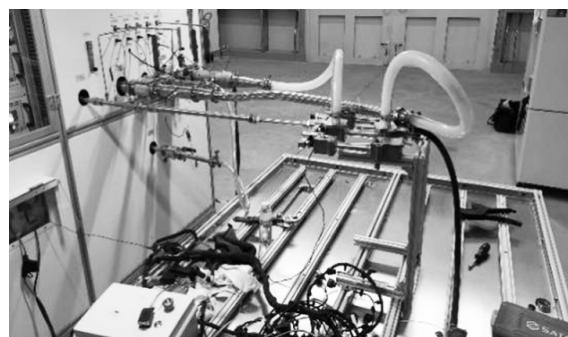


图7 引射器试验台架

3.1 脉冲阀喷嘴试验

喷嘴由脉冲阀和拉法尔喷嘴集成获得,如图8所示,试验时仅开启一次流供气管路,通过控制程序调节不同的占空比,记录3个喷嘴在不同占空比下的喷射流量,试验证明,脉冲阀集成拉法尔喷嘴能够精准控制喷射流量,喷嘴试验结果如图9所示,3个喷嘴在不同占空比下的喷氢量满足设计流量需求,同时3个喷嘴的流量一致性偏差在 $\pm 5\%$ 范围内,验证了喷嘴加工工艺的可靠性。

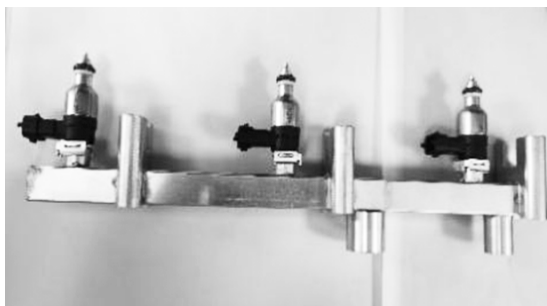


图8 脉冲阀喷嘴

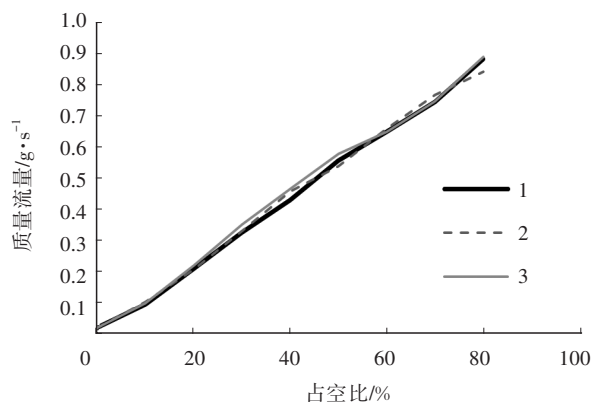


图9 脉冲阀喷嘴试验结果

3.2 脉冲阀引射器试验

引射器台架试验需要同时打开一次流供气管路和二次流供气管路,将脉冲阀占空比调节到最大,然后控制一次流喷射压力进行试验,此时类似比例阀模式。

分别取电流密度为 600 mA/cm^2 、 800 mA/cm^2 和 1200 mA/cm^2 进行台架试验,记录一次流和二次流流量,得到3个工况点的引射器引射系数,取与试验同样的边界条件进行CFD仿真计算,根据计算获得的一次流和二次流流量得到引射系数的仿真结果,并与试验数据进行对比,结果如图10所示。由图10可知,试验结果与仿真结果趋势一致,误差在允许范围5%内,证明建立的仿真模型的准确性满足要求,可以进行后续仿真计算。

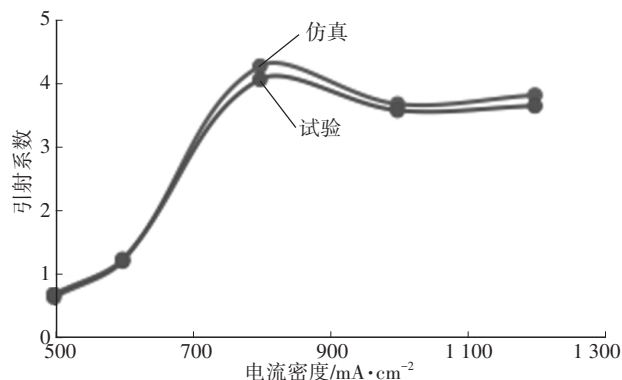


图10 引射系数仿真与试验结果对比

4 引射器影响因素分析

本文利用仿真分析研究一次流喷射压力 P_1 、入堆压力 P_d 、二次流引射压力 P_s 和氮气含量对引射系数的影响。

首先研究不同边界条件对引射器的影响。在相同电流密度 600 mA/cm^2 条件下,以表1所示参数为基础,分别改变一次流压力 P_1 、二次流压力 P_s 和入堆压力 P_d ,计算分析结果如图11~图13所示:同等压力变化条件下, P_s 对引射系数的影响最大, P_d 次之, P_1 影响最小。

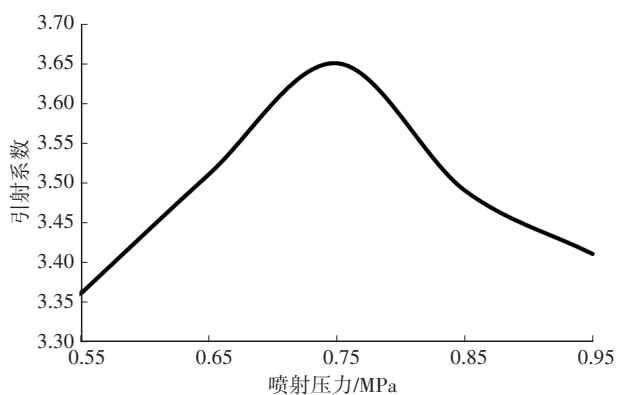


图11 不同一次流喷射压力下的引射系数

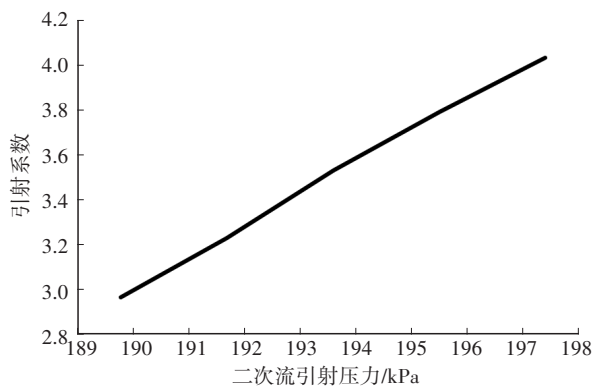


图12 不同二次流引射压力下的引射系数

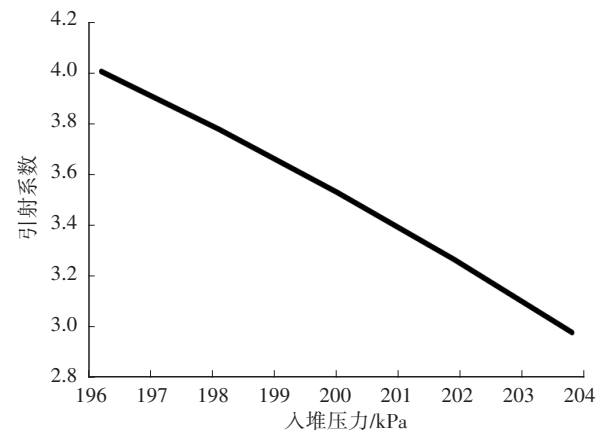


图13 不同入堆压力下的引射系数

引射器实际工作时,工作气体不是纯氢气,其中存在部分氮气。氮气含量对引射系数也存在影响,取氮气体积分数分别为0%、5%、10%、15%和20%进行计算分析,分析结果如图14所示。由图14可知,氮气含量对引射系数影响较大,氮气体积分数每增加5%,对应的引射系数减小约16%,氮气体积分数为15%时的引射系数约为纯氢气条件下引射系数的一半。

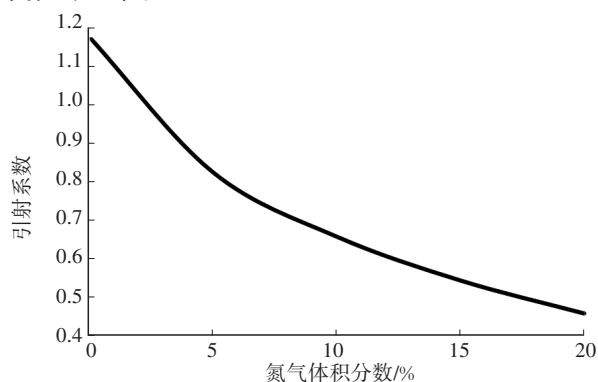


图14 不同氮气含量下的引射系数

5 单体引射器瞬态CFD仿真分析

为更深入地了解脉冲阀引射器的性能及其影响因素,需要对脉冲阀引射器进行瞬态仿真。

5.1 引射器瞬态计算模型

本文使用Fluent软件对引射器单体进行瞬态仿真分析,设电流密度为 600 mA/cm^2 、过量系数为1.6、介质为纯氢气,网格数量为 110×10^4 个。瞬态计算一次流质量流量边界采用脉冲(开/关)模式,如图15所示,此时一次流喷射频率为20 Hz,取5个周期进行计算,其余边界条件与稳态计算保持一致,参照表1,计算模型设置参照表2。

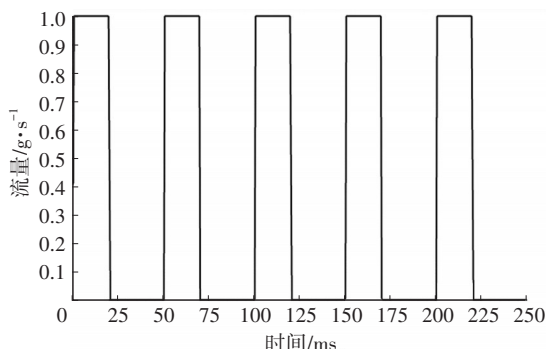


图15 单体引射器瞬态CFD仿真一次流流量边界

5.2 计算结果分析

二次流引射流量如图16所示。由图16可知,二次流量主要分为阀门开启进气阶段、阀门关闭惯性进气阶段和回流阶段的流量。喷射频率为20 Hz

时脉冲阀引射器的引射系数为1.49,大于稳态计算获得的引射系数1.17,由此可知脉冲阀引射器可以覆盖更多的低功率工况点,再匹配合适的控制策略即可尽量满足低负荷工况点的需求。

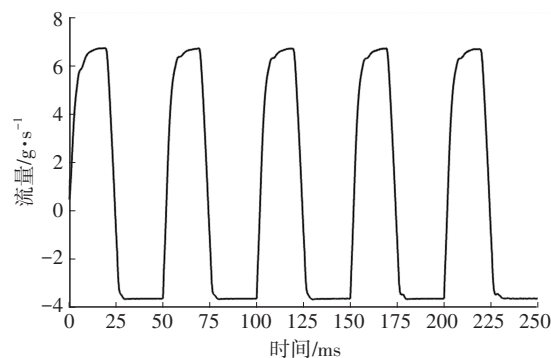


图16 喷射频率为20 Hz时单体引射器二次流引射流量

一次流喷射压力如图17所示。由图17可知,脉冲阀全开时所需喷射压力约为1.2 MPa,考虑脉冲阀自身流阻约为0.2~0.3 MPa,1.5 MPa的喷射压力满足脉冲阀开启条件。实际上脉冲阀最大开启压力一般为1.5~2.0 MPa,本文脉冲阀引射器的喷射压力仍有裕度,后续可进一步优化。

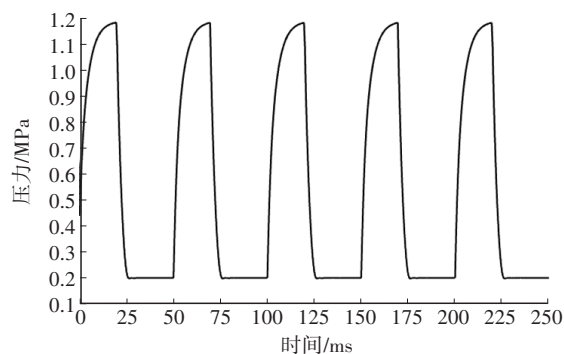


图17 一次流喷射压力

5.3 喷射频率对引射系数的影响

为了研究不同脉冲阀喷射频率对脉冲阀引射器引射系数的影响,在占空比不变的条件下,分别在10 Hz、20 Hz和40 Hz喷射频率条件下进行对比计算。

表5所示为不同喷射频率下脉冲阀引射器的引射系数和二次流流量。由表5可知,随着喷射频率的提高,引射系数增大,不同喷射频率下的引射系数近似线性关系,由此可以拟合出不同喷射频率下的引射系数。

表5 不同喷射频率下引射系数和二次流流量计算结果

喷射频率/Hz	二次流流量/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	k
10	0.566	1.38
20	0.612	1.49
40	0.721	1.75

图 18、图 19 所示分别为喷射频率为 10 Hz、40 Hz 时的二次流引射流量,对比图 16、图 18 和图 19 可知,当占空比保持不变时,提高脉冲阀喷射频率,脉冲阀关闭时二次流的回流流量减少,二次流总流量增大,进而提高了引射系数。

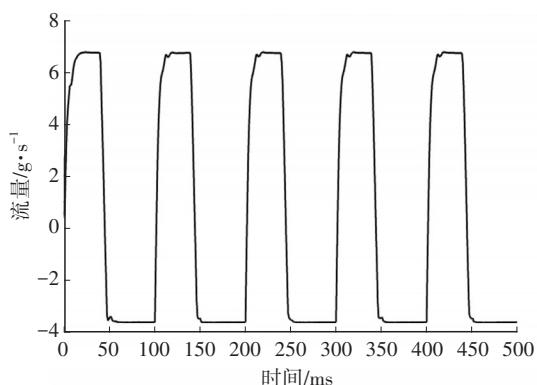


图 18 喷射频率为 10 Hz 时单体引射器二次流引射流量

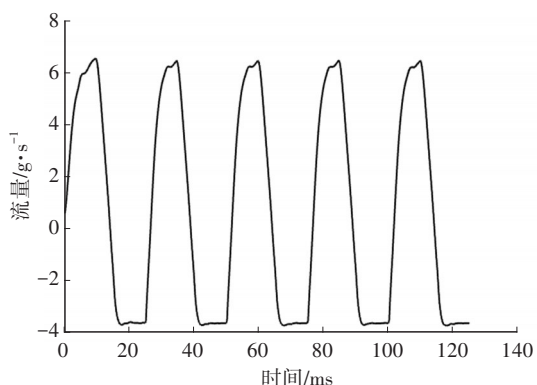


图 19 喷射频率为 40 Hz 时单体引射器二次流引射流量

6 结束语

本文主要研究适用于多堆共轨燃料电池的脉冲阀引射器,分别进行了单体引射器仿真分析、供氢系统多堆共轨引射器仿真分析、引射器台架试验和引射器瞬态分析,可以得到以下结论:

a. 供氢系统三堆共轨引射器的平均引射系数 1.10 与单体引射器的引射系数 1.17 接近;供氢系统三堆共轨的二次流流量一致性在 $\pm 5\%$ 范围内;二次流总轨压力与单体引射器的二次流压力接近。

b. 喷射频率 20 Hz 条件下脉冲阀引射器瞬态计算获得的引射系数为 1.49,同稳态计算结果相比较仍有裕度,故在电堆实际工作时可进一步覆盖低功率工况。保持占空比 40% 不变,提高喷射频率,有利于引射系数的提高。

c. 同等压力变化条件下,二次流喷射压力对引射系数的影响最大,入堆压力次之,一次流喷射压力影响最小;氮气含量对引射系数影响较大。

参考文献

- [1] 陆化普,冯海霞. 交通领域实现碳中和的分析与思考[J]. 可持续发展经济导刊, 2022(增刊1): 63-67.
LU H P, FENG H X. Analysis and Consideration of Carbon Neutrality in Transportation[J]. Economic Guide for Sustainable Development, 2022(Sup1): 63-67.
- [2] 张颖. 双碳目标引领下,氢燃料电池重卡的崛起与挑战[J]. 汽车与配件, 2022(4): 34-37.
ZHANG Y. The Rise and Challenge of Hydrogen Fuel Cell Heavy Trucks under the Guidance of Dual-Carbon Goal[J]. Automotive & Parts, 2022(4): 34-37.
- [3] 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(12): 6664-6674.
- [4] 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(23): 12061-12073.
- [5] JUNG S K, NOH Y G, JEON U S. A Development of the Fuel Cell System That the Jet-Pump is Applied[C]// ASME 2013 11th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. Minneapolis, Minnesota, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [6] 尹燕,范明哲,焦魁,等. 质子交换膜燃料电池系统引射器的数值分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(7): 763-769.
YIN Y, FAN M Z, JIAO K, et al. Numerical Analysis of Ejector for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology), 2016, 49(7): 763-769.
- [7] 乔时和,林柏泉,段永生,等. 基于 CFD 的气液两相射流引射器设计模拟研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(6): 115-117.
QIAO S H, LIN B Q, DUAN Y S, et al. Design Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Jet Ejector Based on CFD[J]. Coal Engineering, 2014, 46(6): 115-117.
- [8] 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: 256-263.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为 2023 年 4 月 24 日。