

拉法尔喷管流态分析与数值模拟

姜鹏,王中医,李勇,郭喜龙

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:拉法尔喷管结构设计的合理性直接影响真空发生器的工作效率。使用 FLUENT 模拟软件对拉法尔喷管结构和使用工况两个方面进行模拟分析,寻求内外部因素对喷管出口速度变化的影响关系。由仿真结果可知,喷管出口背压与进气压力的比值决定喷管内部的流动状态,拉法尔喷管的收缩角与扩张角的改变对喷管出口流速影响较小,而改变喷管出口截面与喷管喉部截面的面积比,喷管出口速度发生显著改变。

关键词:拉法尔喷管;真空发生器;液态分析;FLUENT;喷嘴

中图分类号:TB756 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0099-04

Flow Pattern Analysis and Numerical Simulation of Lafort Nozzle

JIANG Peng, WANG Zhongyi, LI Yong, GUO Xilong

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The rationality of Lafort nozzle structure design directly affects the working efficiency of vacuum generator. FLUENT simulation software is used to simulate and analyze Lafort nozzle structure and operating conditions to explore the influence relationship between internal and external factors on nozzle outlet velocity changes. The simulation results show that the ratio of nozzle outlet back pressure and inlet pressure determines the flow state inside the nozzle. The change of Lafort nozzle contraction angle and expansion angle has little influence on nozzle outlet velocity, while the changes of section area ratios of nozzle outlet and throat significantly change the nozzle outlet velocity.

Keywords: Lafort nozzle; vacuum generator; flow analysis; FLUENT; nozzle

0 引言

拉法尔喷管是一个压缩-扩张性喷管,由收缩段、喉部和扩张段 3 部分组成^[1],它可以使具有一定压力及较低速度的气体产生超音速流从喷嘴射出,流动效率高^[2]。拉法尔喷管现已广泛用于石油、化工、冶金、电力等行业大管径流体的流量控制与计量。此外拉法尔喷管作为真空发生器的核心部件,在气力输送过程中起着至关重要的作用。

德国人在 19 世纪末率先利用空气动力学对蒸汽喷射器进行理论研究,奠定了喷射器的理论基础^[3]。大量研究已证明结构尺寸对喷射器的性能存在影响。KROLL A E^[4]讨论了扩压器混合段、扩压段的长度对喷射器性能的影响。CROFT D R 和 LILLEY D G^[5]研究了喷嘴喉部直径和扩散段角度对性能的影响。RIFFAR S B 和 OMER S A^[6]以及 SUN D 和 EAMES I W^[7]研究了在定压混合理论和定常面积混合理论中,喷嘴位置对喷射器性能的影响,并提出当流体完全混合时,喷嘴位置对喷射器性能影响显著。

南京工业大学桑芝富的团队中,徐海涛^[8]比较了经典空气动力学、热力学法和数值模拟三种方法,并采用数值模拟研究分析了大压缩比、中膨胀比和大压缩比、大膨

胀比喷射器在变工况下的性能。大连理工大学的沈胜强等^[9]以一维理论为基础,建立了一套分析喷射器性能与设计喷射器结构的软件,研究了激波的强度、位置和产生流体堵塞的原因。李素芬等^[10]分析了喷嘴内激波产生的原因,建立了喷射器内超音速流动的计算方法和数学模型。中山大学的郭金基^[11]在实验的基础上,提出喷射器速度分布模型、混合室压力和自由流束长度的计算方法。王权等^[12]以索科洛夫的《喷射器》为基础,编写了喷射器的设计程序,并提出引射系数的一种简化计算方法。

本文对拉法尔喷管的尺寸和结构进行数值模拟和优化,将影响拉法尔喷管性能的参数量化分析。本研究运用数值模拟方法^[13],将定性和定量地表达拉法尔喷管中喷嘴出口速度流场分布情况,从而为类似工况拉法尔喷管的设计提供指导。

1 拉法尔喷管工作原理

由拉法尔喷管的加速原理图(图 1)可知,工作流体先进入拉法尔喷管的收缩段,遵循“流体在管道流动时截面小处流速大,截面大处流速小”的原理,工作气体不断加速,至喉口处被加速至音速或者超音速。通过喉口处流体速度超过音速之后将不再遵循“流体在管道流动时截面小处流速大,截面大处流速小”的原理,而是恰恰

相反^[14]。因此在扩张段流速随着截面积的增大而增大,工作流体被进一步加速。由于是等熵流动,因此速度不断增大,压力不断降低。

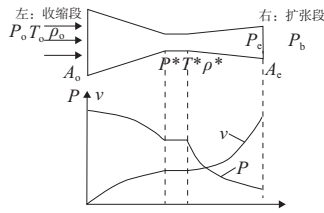


图1 拉法尔喷管增速原理图

2 仿真模型及参数建立

2.1 几何模型及边界条件

首先利用 Solidworks 进行几何结构建模,为了更加方便地观察流体通过拉法尔喷管后的状态,在建模过程中,在喷管出口截面后建立 20 mm×10 mm 的外部自由区域,如图 2 所示。网格划分采用 Workbench,如图 3 所示。网格最大值为 5 mm,网格总节点数 429 753,网格数量 817 324;近壁面采用棱柱型边界层,层数为 5,厚度为默认值。边界条件入口为压力入口边界,出口为压力出口边界,固体壁面为无滑移的绝热边界。为求解温度场和密度场的变化在流体的流动过程中需引入能量方程(energy-equation)。湍流方程采用 k-epsilon 标准形式。

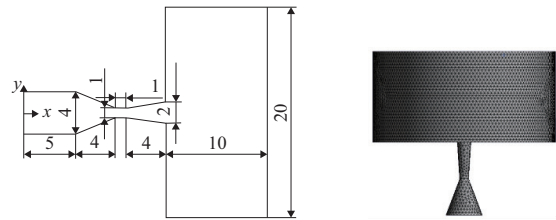


图2 拉法尔喷管模拟几何模型 图3 计算区域网格划分

2.2 喷管速度流场仿真分析

由于目前工业上普遍采用的气源压力为 0.6 MPa 左右,因此本次对于拉法尔喷管模拟的进气压力分别为 0.45 MPa、0.55 MPa、0.65 MPa,并得出了 3 种工况下的速度云图、压力云图以及密度云图,分别如图 4-图 6 所示。通过对比得出以下结论:

1)对比各工况下的速度云图得知,压缩空气在拉法尔喷管的收缩段速度不断增加但始终小于声速,在喉口处达到了当地声速,并在扩张段达到超音速,随着进气压力的增大,工作流体尾迹沿轴向方向越来越长,并且尾迹更加清晰,通过拉法尔喷管后的流体速度更大。

2)对比各工况下的压力云图得知,由于出口设置为自由边界,从喷管喷出的高压气体迅速与外部气体混合,因此进气压力的改变对拉法尔喷管出口压力影响较小。

3)对比各工况下密度云图可知,符合气体压力越高密度越大的一般规律,随着压力的增大,从喷管出口流出的高密度工作气体区域越来越大。

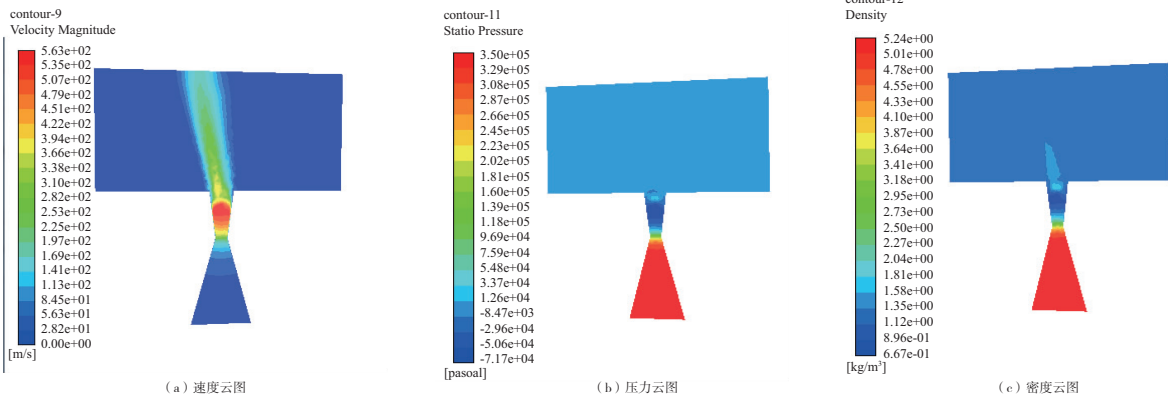


图4 进气压力为 0.45 MPa 云图模型

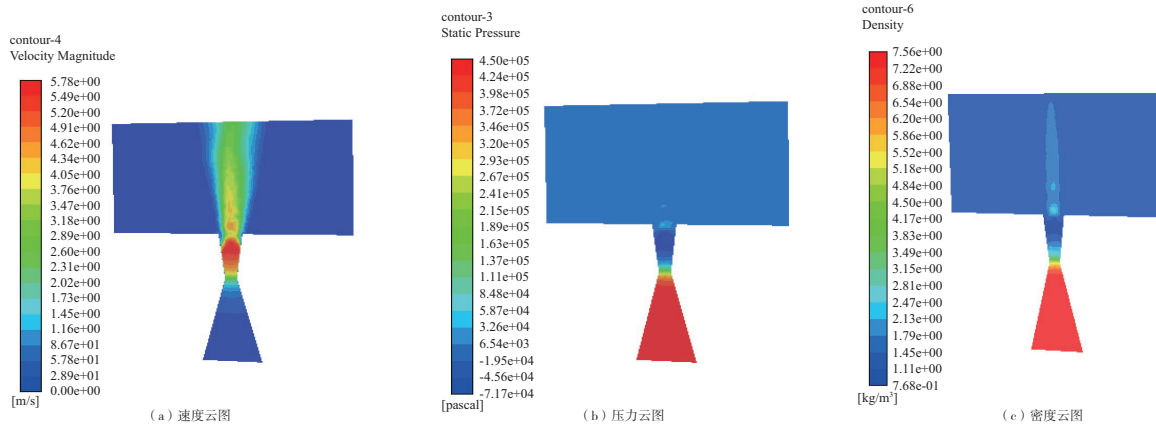


图5 进气压力为 0.55 MPa 云图模型

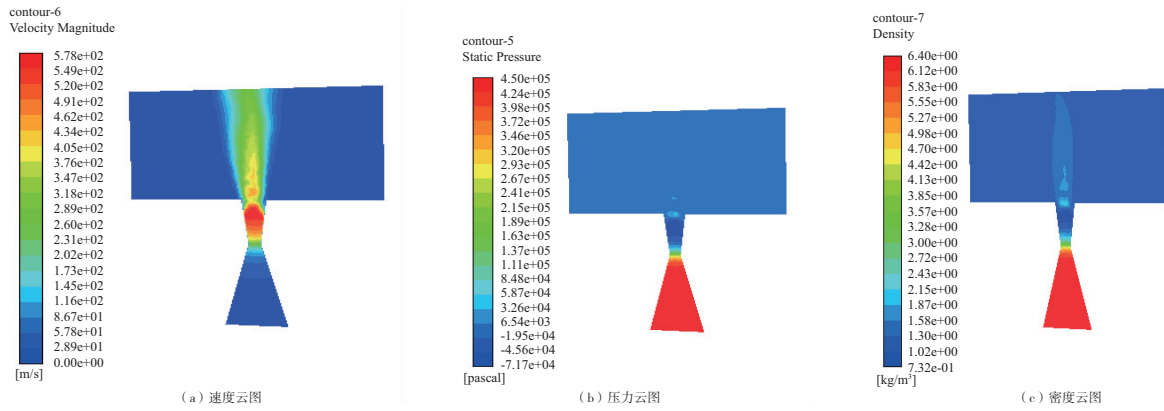


图6 进气压力为0.65 MPa云图模型

3 模拟结果分析

1) 不同进气压力对喷管出口速度的影响

图7为喷管速度与进气压力的变化关系曲线,从图中可以看出,随着进气压力的增加,气体速度不断增大,但最终受制于面积比的约束,速度逐渐保持不变。从图4(a)可知,当进气压力为0.45 MPa时,工作气体没有得到充分的膨胀,通过喉口后加速至超音速的气体无法贯穿整个扩张段,系统处在一个过膨胀的状态,并且由于激波导致的压差使得出口截面处的流体速度较小。当进气压力达到0.65 MPa时,收缩段气体流速同样为亚声速,但通过喉口后的气体在扩张段得到充分的膨胀,系统处于一个欠膨胀状态,通过喷管后的气体要继续膨胀加速,因此出口速度较大。

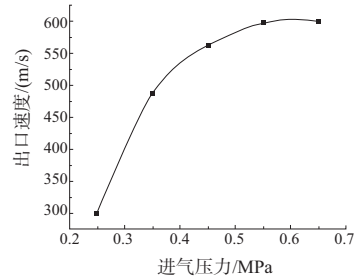


图7 不同进气压力下出口速度

2) 不同面积比对喷管出口速度的影响

取进气压力为0.55 MPa,喷管喉口直径为10 mm,喷管出口直径14 mm,17 mm,20 mm 3组。通过对3组不同面积比的拉法尔喷管进行模拟分析。速度云图如图8所示。

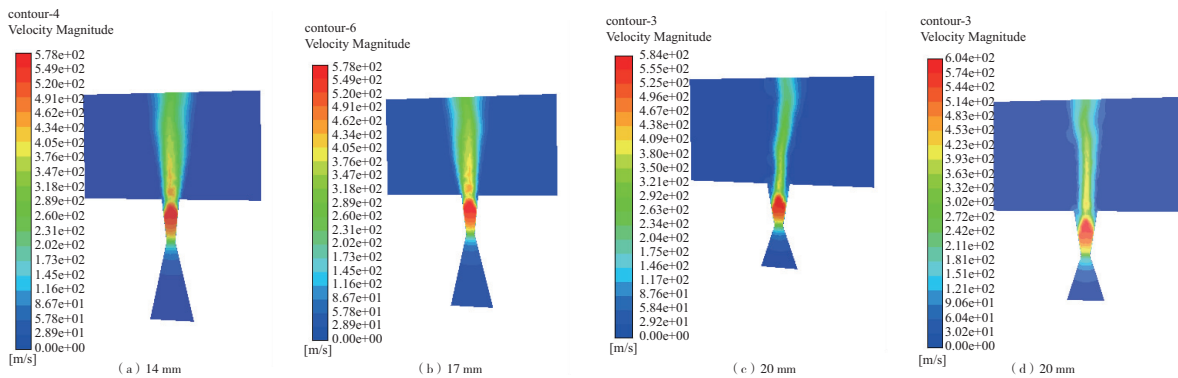


图8 不同结构下出口速度云图

从图8可知,当进气压力为0.55 MPa时,出口速度随着喷管出口直径的增大而增大。在喷管出口直径为20 mm的时候,喷管流速不再增大。从图8(c)可以明显看出通过喉口后的超音速流体只占据了拉法尔喷管扩张段的一部分,系统处于一个过膨胀的状态,因此出口速度较小。在喷管喉径一定的情况下,增大出口截面的面积可以获得较大的出口速度,但同时所需的上下游压差也越大,即所需临界状态下的工作压力更大或者出口背压更小。因此增加模拟实验,图8(d)为喷管出口直径同样为20 mm的情况下,增大入口进气压力至0.75 MPa,此时,通过喉口处的超音速流体逐渐占据了整个拉法尔喷管的扩张段,出口流速进一步增大。而工业生产中真空发生器的供给压

力一般在0.25 MPa~0.65 MPa之间,因此要根据实际生产中供给压力与外部背压的综合情况而定,并非越大越好。

3) 不同扩张角度对出口速度的影响

扩张角度即扩张管扩张的角度大小。在出口截面和喉口截面面积比一定的情况下,为探究扩张角的大小对喷管出口速度的影响,分别选取扩张角为8°、10°、12°的3种拉法尔喷管进行数值模拟,得出出口速度分布图(图9)和不同扩张角下对应的出口速度(表1)。

表1 不同扩张角下对应出口速度

扩张角/(°)	8	10	12
出口速度/(m/s)	600.152	602.342	604.258

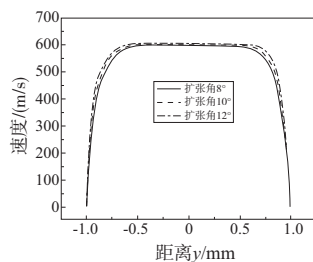


图9 不同扩张角下出口速度沿轴向方向分布图

由图9与表1知:在面积比确定的情况下,改变扩张角的大小对截面出口速度影响较小。因此在合理范围内扩张角的选择有较大的灵活性。同时在实际工业生产中为达到较大气体流速,首先应参考目前能提供的气源压力与出口背压之间的比例大小,然后根据压力关系选择面积比合适的拉法尔喷管,不可盲目选择大面积比的拉法尔喷管。

4 结语

拉法尔喷管出口速度的影响因素主要分为外部因素和内部因素,外部因素即工作压力,内部因素即拉法尔喷管的几何结构变化,其中主要包括拉法尔喷管喉口直径、出口截面直径、扩张段扩张角。因此,综合模拟得知:

1) 喷管出口背压与进气压力的比值决定了喷管内部的流动状态,随着进气压力与出口背压压差的增大,喷管出口气体流速逐渐变大,在达到一定值后出口流速的增速逐渐变小,直至稳定。其后增大进气压力或减小出口背压,出口流速始终不变。

2) 大的喉口面积比可以增大喷管出口气体速度,但同时所需的进气压力也相应增大。

3) 拉法尔喷管的收缩角与扩张角的改变对喷管出口流速影响较小,在 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 的变化范围内出口流速的变化幅度在0.6%左右。而改变喷管出口截面与喷管喉部截面的面积比时,喷管出口速度发生显著改变。

参考文献:

- [1] 李军英. 浅议拉瓦尔喷头[J]. 宽厚板, 2002, 8(2): 25-26, 48.
- [2] 肖安红. 气力压运系统中的拉伐尔喷管[J]. 武汉工业学院学报, 2002, 21(4): 31-32, 35.
- [3] EL-DESSOUKY H, ETTOUNEY H, ALATIQUI I, et al. Evaluation of steam jet ejectors[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2002, 41(6): 551-561.
- [4] KROLL A E. The design of jet pumps[J]. Chemical Engineering Process, 1947, 43(1): B21-B24.
- [5] CROFT D R, LILLEY D G. Jet pump design and performance analysis[C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Sciences Meeting. 14th, Washington, D. C.: 1976.
- [6] RIFFAR S B, OMER S A. CFD modelling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid[J]. International Journal of Energy Research, 2001, 25(2): 115-128.
- [7] SUN D, EAMES I W. Recent developments in the design theories and application of ejectors: review[J]. Journal of the Institute of Energy, 1995, 68(475): 65-79.
- [8] 徐海涛. 蒸汽喷射器的理论及数值研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
- [9] 张博, 沈胜强, 李海军, 等. 二维流动模型的喷射器性能分析研究[J]. 热科学与技术, 2003, 2(2): 149-153.
- [10] 李素芬, 沈胜强, 刘岚, 等. 蒸汽喷射器超音速喷射流场的数值分析[J]. 中国造纸, 2001, 20(6): 33-36.
- [11] 郭金基. 亚音速气体喷射器的性能分析及其计算方法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1981, 20(1): 20-31.
- [12] 王权, 向雄彪. 蒸汽喷射压缩机喷射系数计算方法研究[J]. 太阳能学报, 1997, 18(3): 314-321.
- [13] 叶卫东, 张岩, 候宇, 等. 基于FLUENT的变径防气抽油泵性能数值模拟及研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(4): 133-135, 144.
- [14] 郭喜龙. 负压输送中真空发生器研究及数值模拟[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.

收稿日期: 2020-09-09

(上接第94页)

参考文献:

- [1] 柯鹏, 杨春信, 杨雪松, 等. 重型货物空投系统过程仿真及特性分析[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 856-860.
- [2] 李奇, 范常红. 一种脱离锁: 中国, 106343663A[P]. 2017-01-25.
- [3] 邹长庚, 郭海军, 聂德新. 一种着陆脱离锁: 中国, 211543892U[P]. 2020-09-22.
- [4] 鲁霄光. 燃气解脱式闭锁机构动力学分析与优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 1-2.
- [5] 于思淼. 某火箭炮闭锁机构力学特性实验与仿真分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 1-2.
- [6] 王乃光. 火箭武器燃气闭锁解脱机构动力学分析[D]. 北京:

北京工业大学, 2016: 1-2.

- [7] CLOTH H. Pressure dependent release device for a parachute: US, 4858856[P]. 1989-08-22.
- [8] GIONFRIDDO M. A survey of the us army rld programs in airdrop [C]//Aerodynamic Deceleration Systems Conference. USA. Reston, Virginia: AIAA, 1966: 1525.
- [9] 王亚伟, 杨春信, 柯鹏, 等. 货物空投系统自动脱离锁成功脱离概率分析[J]. 航空学报, 2010, 31(2): 265-270.
- [10] 展亚南, 丁阳春, 蒋伟, 等. 货物空投系统脱离锁空中解脱特性仿真研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(7): 49-53.

收稿日期: 2020-09-18