

负压输送中真空发生器真空度特性分析

王中医,姜鹏,李忠毅,李勇,郭喜龙
(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:真空发生器在气动行业应用于真空输送过程中,可以快速地产生负压,实现短距离负压输送。结合真空发生器在现代工业上的应用,通过数值模拟的方法,探讨真空度特性与进气压力的关系、出口背压对最大真空度的影响、进气压力对抽气速率的影响及出口背压对抽气速率的影响以及对真空度产生的影响。在一定范围内,真空度随着进气压力的增大而增大;随着背压的增大而下降;随着抽气速率的降低而增加。

关键词:真空发生器;进气压力;出口背压;进气压力;真空度

中图分类号: TB756 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2021)05-0200-03

Analysis of Vacuum Characteristics of Vacuum Generator in Negative Pressure Transportation

WANG Zhongyi, JIANG Peng, LI Zhongyi, LI Yong, GUO Xilong
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Vacuum generator applied in pneumatic industry in vacuum conveying process can quickly generate negative pressure and realize short-distance negative pressure conveying. By combing its application in modern industry, the relationship between the vacuum characteristics and inlet pressure, and the impact of outlet back pressure on the maximum vacuum, the influence of the inlet pressure on the pumping rate, and the influence of the outlet back pressure on the pumping rate, and their influences on vacuum are discussed through numerical simulation. Within specific limits, vacuum increases with the increase of intake pressure, decreases with the increase of back pressure and increases with the decline of pumping rate.

Keywords: vacuum generator; intake pressure; outlet back pressure; intake pressure; vacuum

0 引言

在管道输送系统中,真空度是衡量一个真空发生器工作能力的重要指标。同一工况下,真空发生器所能达到的真空度越大,其输送能力就越强。徐文灿教授率先对真空发生器进行了全面的理论研究和分析,通过关闭和打开引射流体入口面,探讨不同情况下内部流体的流动参数随工作流体压力变化情况^[1]。2002年姚朝辉建立了真空发生器响应时间和真空度时间变化的数学计算模型^[2]。2016年南京理工大学李昊军教授采用定量的方法描述了多级真空发生器的抽气特性,得出了多级真空发生器在腔体有流动阻力与无流动阻力两种情况下,真空度随时间的变化曲线^[3]。

在本文中工况是进气压力为 450 kPa,真空口引射压力为标准大气压,出口背压为 30 kPa,工作流体和引射流体为空气,温度为 25 °C, $T_p = T_H = 298$ K,通过计算得出喷管喉径为 10.03 mm,出口直径 14.23 mm,混合室直径 33.24 mm,喉管嘴径 10.12 mm,建立三维模型,通过 Fluent 仿真软件仿真。由于考虑到引射流体速度相对于工作流体而言相差较大,基本上可以忽略,因此为了方便研究并

且减少计算量,在单独观察真空度和抽气速率的问题时将真空发生器简化为二维对称模型^[4],如图 1 所示。

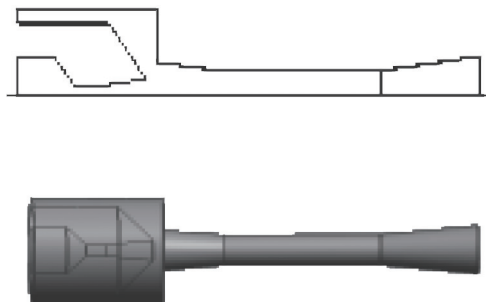


图 1 真空发生器对称模型

1 进气压力对真空度的影响

为探讨真空度特性与进气压力的关系,在保证其他条件不变的情况下,在进气压力 0.15 MPa~0.75 MPa 之间,每间隔 0.1 MPa 进行一次模拟仿真。本次仿真真空发生器真空口采用壁面边界,出口背压为一个大气压。试验和

模拟曲线图如图 2 所示。

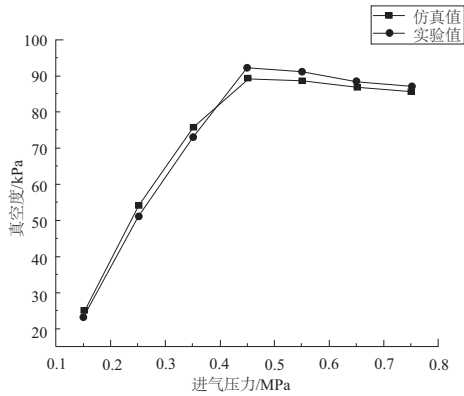


图 2 真空度随进气压力变化曲线

由图 2 知,在进气压力为 0.15 MPa ~ 0.45 MPa 之间时,真空度随着进气压力的增大而增大,且增长速率接近线性增长,在 0.45 MPa ~ 0.55 MPa 之间真空度有轻微降低,在进气压力超过 0.55 MPa 后,真空度下降较明显。故观察 0.35 MPa、0.45 MPa、0.55 MPa 3 种工况下压力(图 3)和速度(图 4)模拟云图,寻找真空度下降的原因。

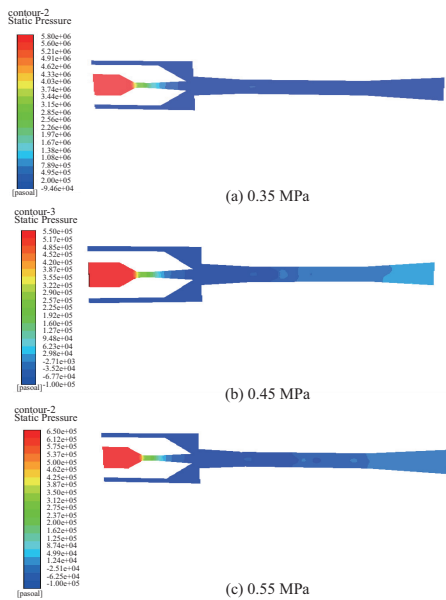


图 3 不同进气压力下真空管静压力分布

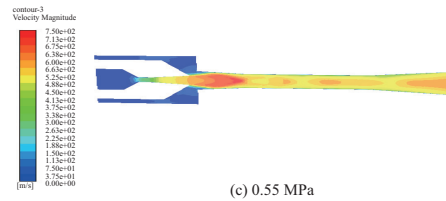
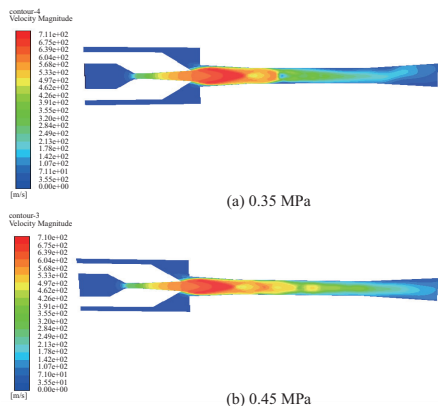


图 4 不同进气压力下真空管流体速度

从图 4 可以看出,压力的改变对混合室的收缩段流场影响较大,在进气压力为 0.35 MPa 时,流体的马赫数小于极限值,在混合室的收缩段气体没有完全膨胀,真空度亦没有达到临界值。在进气压力为 0.45 MPa 时,混合室流体速度达到临界值,气体也充分膨胀,此时真空度达到该条件下的最大值。随着进气压力继续增大,喷管出口气体流速也不再增加,因此拉法尔喷管上下游压力比亦保持不变,所以当进气压力为 0.55 MPa 时,出口压力必然升高,从而对从喷管喷出的气体产生阻碍作用^[5],真空度下降。

为进一步了解真空度变化原因,绘制不同进气压力下真空管处压强随时间变化关系,如图 5 所示。

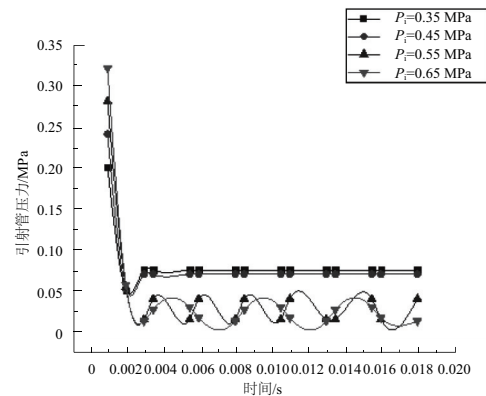


图 5 不同进气压力下真空管处压强随时间变化

设 P_e 为真空管绝对压力值, P_e^* 为绝对压力最小值, P_i 为进气压力, P_i^* 为进气压力临界值。由图 5 可知,真空管处的绝对压强在通入进气压力之后迅速降低,在降低至最小值 P_e^* 后逐渐稳定或呈周期性变化,并且进气压力越大,对应的 P_e^* 的值越小,达到 P_e^* 所用的时间越长。在 $P_i \leq 0.35$ MPa 时, P_e 随时间的推移逐渐趋于稳定。当 $P_i \geq 0.55$ MPa 时, P_e 随时间变化呈现周期性变化,并且随着进气压力的增大,震荡周期越来越长,峰值越来越小^[6],即最大峰值亦远小于大气压。因此即使在振荡周期内,真空发生器引射管真空度依然存在。由此可知:临界值 $0.45 \text{ MPa} \leq P_i^* \leq 0.55 \text{ MPa}$,在 $P_i < P_i^*$ 时, P_e 趋于固定值,在 $P_i > P_i^*$ 时, P_e 呈周期性震荡。

由此可知,激波的产生有一个阈值 P_i^* ,当进气压力 P_i 在达到这个阈值之前,激波并未产生,当进气压力大于这个阈值之后,开始形成激波。由于激波面前后压强不同,激波面前的高压区域将会对激波面前的流体产生一定的阻碍作用,阻碍工作气体及真空口气体的流动,因此拉法尔喷管扩张段气体压强增大,在达到一定值后压迫激波向出口方向移动,直至高压区与真空口处低压区域联通,

一部分工作流体进入到真空管,使真空管内压强增大。进气压力越大,其压迫激波向出口方向移动能力越强,高压区与低压区联通区域越大^[7],从而使得更多的工作流体进入到真空管,真空管内压力增大,真空度降低。

2 出口背压对最大真空度的影响

为了分析观察不同出口背压下真空发生器内部流场变化情况,分别模拟气压 0.55 MPa, 出口背压为 0 kPa、25 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa 5 种工况,其余条件不变,得出如图 6 所示的模拟云图。

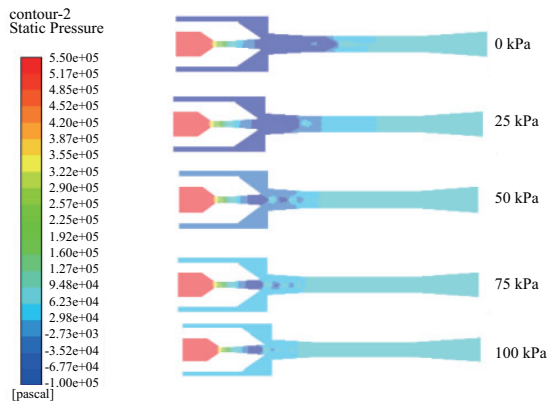


图 6 不同出口背压下真空管处压强随时间变化

从图 6 可以看出,随着出口背压的增大,真空发生器内部流场变化较为明显。在出口背压为 0 kPa 的时候,工作流体经拉法尔喷管喉口加速至音速,并在喷管的扩张段充分膨胀至超音速,在混合室内产生膨胀波,并在通过膨胀波之后进一步加速,从而形成较大的卷吸作用,在真空管内产生较大的真空度,最大真空度达到 80 kPa。当出口背压增加至 50 kPa 时,此时混合室内压力增大,从拉法尔喷管喷出的超音速流体膨胀不充分,喷管出口处的工作流体的速度明显下降,卷吸作用降低,从而使得真空度降低,此时真空度为 58 kPa 左右。随着出口背压的进一步增大,其影响范围进一步向真空室扩散。当出口背压为 75 kPa 时,背压的高压范围已经影响到真空室,从拉法尔喷管喷出的工作流体已经无法正常膨胀加速,真空度下降明显,只有 20 kPa 左右。当出口背压达到 100 kPa 的时候,此时一部分工作流体从真空口发生回流(图 7),真空口内出现正压,真空发生器失效。

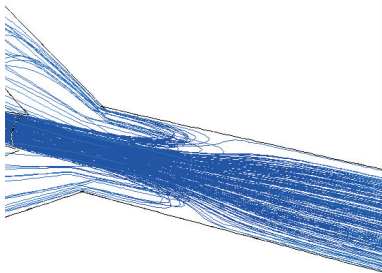


图 7 出口背压为 100 kPa 时混合室入口流体迹线图

3 进气压力对抽气速率的影响

抽气速率反映真空发生器性能的另一个重要指标。根据等压混合假设理论,在选取多组恒定真空度的情况下,通过改变进气压力 P_i , 观察进气压力的改变对抽气速率的影响。

图 8 为多组恒定真空管压力下真空发生器抽气速率随进气压力的变化关系。从图中可以看出,在 y 轴的零线以下,表示该情况下抽气速率为负值,即真空口发生了气体回流,真空发生器失效。而在零线以上的部分表示真空发生器可以正常工作。各组恒定压力下均存在一个进气压力的最优值 P_i^* , 在这个最优值之前,抽气速率随着进气压力的增大迅速增大,在达到最优值 P_i^* 后,抽气速率逐渐不变,甚至有轻微下降。这是因为进气压力的持续增大,激波面后的能量不断增大,其对引射流体的壅塞作用不断增强,使得抽气速率有了缓慢的下降趋势^[8]。

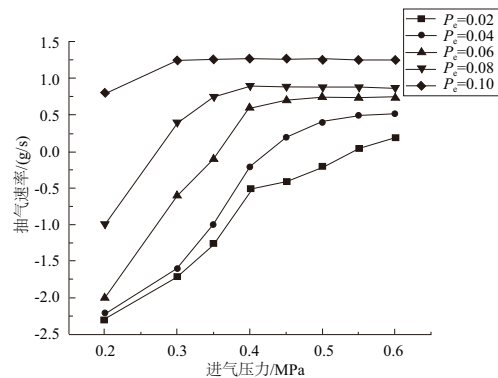


图 8 多组恒定真空度下抽气速率随进气压力的变化

图 9 为进气压力为 0.5 MPa 时抽气速率与真空度变化关系。可以看出抽气速率随着真空度的增大而减小,所以在模拟求取最大真空度的时候,真空口边界条件设置为封闭入口壁面条件,即真空口通气量为 0 的时候即为真空发生器所能达到最大真空度^[9]。

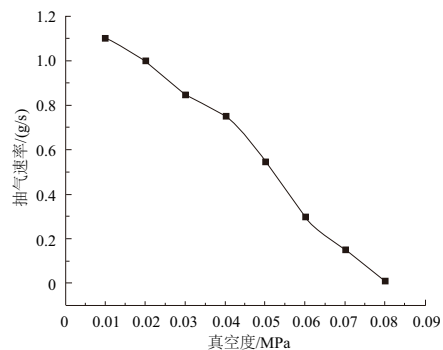


图 9 进气压 0.5 MPa 时抽气速率与真空度变化关系

4 出口背压对抽气速率的影响

取真空度为 0.06 MPa, 出口背压为 0 kPa、20 kPa、
(下转第 214 页)

产品感受良好,对功能给予了肯定;有 85%左右的视力障碍人士接受产品定价并有意愿购买此产品。

5 结语

针对盲人出行障碍物感知难、安全系数低、无法识别目的地路径等问题,设计了基于 STM32 单片机的智能导盲拐杖。所设计的拐杖采用 HC-SR04 超声波模块探测障碍物,使盲人无触感知障碍物位置。通过 MPU-6050 陀螺仪进行姿态解算进而判断盲人是否跌倒。当盲人长时间处于跌倒状态时,拐杖能够自主向路人呼救,并通过 GPS 和 SIM800 将位置发送给家人。拐杖可以通过蓝牙与手机 APP 通信,进行常去地导航;夜晚时能够打开闪灯提示路人及车辆注意。所设计的导盲拐杖得到了视觉障碍人士的肯定评价。

参考文献:

[1] 刘火良,杨森. STM32 库开发实战指南:基于 STM32F4[M].

北京:机械工业出版社,2017.

- [2] 吴小芳. 物联网与大数据的新思考[J]. 通信世界,2017(1): 1-2.
- [3] 生利英. 超声波检测技术[M]. 北京:化学工业出版社,2014.
- [4] 吴学伟,伊晓东. GPS 定位技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [5] 陈志旺. 四旋翼飞行器快速上手[M]. 北京:电子工业出版社,2017.
- [6] 王星星,丛思安. 室内定位研究方法综述[J]. 软件导刊,2019,18(9):9-12.
- [7] 史云飞,郝永生,刘德亮,等. 室内无线定位算法研究现状与发展趋势[J]. 电讯技术,2018,58(10):1230-1236.
- [8] 高玥. 浅析现代无线通信技术及未来发展[J]. 中国新通信,2018,20(23):15.
- [9] 郑航. 探讨现代无线通信技术的现状分析及其发展前景[J]. 中国新通信,2018,20(7):17.

收稿日期:2020-10-16

(上接第 202 页)

40 kPa、60 kPa,得到真空口在不同出口背压下抽气速率与进气压力的变化曲线(图 10)。从图中可以看出出口背压对抽气速率影响较小,差值基本集中在低进气压力时出现,由于在低进气压力时较大的出口背压影响会被放大,因此在进气压力持续增大的过程中,出口背压的影响逐渐降低。

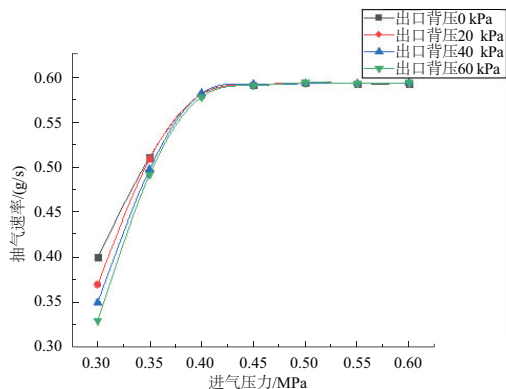


图 10 不同出口背压下抽气速率与进气压力变化曲线

5 结语

本文利用 Fluent 软件对真空发生器整体进行内部流场分析,通过对外部因素:进气压力、出口背压等的综合探讨,对真空发生器的真空度以及抽气速率得出以下结论:

1) 在一定范围内,真空度随着进气压力的增大而增大,但超过这一范围后,通过喷管的超音速流体已经充分膨胀加速,因此继续增大进气压力使得拉法尔喷管下游压力增大,会对引射流体产生一定的阻碍作用,使得真空度略微降低。

2) 出口背压的改变对混合室内压力影响较为明显,背压增大阻碍工作流体的膨胀加速过程,从拉法尔喷管流出的工作流体速度降低,从而使得真空度下降。继续增大背压将导致工作气体在混合室入口处发生回流,从真空管处流出,使真空管出现正压,真空发生器失效。

3) 真空度随着抽气速率的降低而增加,在抽气速率为 0 时,达到最大真空度。出口背压对抽气速率影响较小,差值基本集中在低进气压力时出现。

参考文献:

- [1] 徐文灿. 真空发生器内的流态及其性能分析[J]. 液压与气动,1995(5):8-12.
- [2] 姚朝晖,何枫,陈远. 真空发生器系统吸附响应时间的确定[J]. 真空科学与技术,2002(3):198-201.
- [3] 李昊军. 真空系统节能关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [4] 魏晋,唐黎明,亓海明等. 混合室直径对带喷射器的跨临界 CO₂ 热泵性能影响[J]. 化工学报,2016,67(5):1719-1724.
- [5] 叶辉,张钰,陈志敏,等. 引射混合器数值模拟及性能预测方法研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(2):365-368.
- [6] 刘宝,韩威震,张业明,等. 进气压力对真空发生器性能的影响[J]. 真空科学与技术学报,2019,39(4):304-309.
- [7] APHORN RATANA S, EAMES I W. A small capacity steam-ejector refrigerator: experimental investigation of a system using ejector with movable primary nozzle[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20(5):352-358.
- [8] 陈伟雄,陈会强,石朝胤,等. 喉嘴距对喷射器性能影响的实验研究[J]. 中国科学院大学学报,2016,33(2):253-257.
- [9] 邢鹏成,丁武学,楼晓华,等. 蒸发器除霜喷嘴的高压射流特性分析与结构优化[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):15-18.
- [10] 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.

收稿日期:2020-09-10