

1-4-2019

Aerodynamic Noise Generating Mechanism of Corbula Type Throttle Valves

Yueqin Li

1. Southwest petroleum university institute of electrical and mechanical engineering, Chengdu 610500, China;;

Xiao Fei

1. Southwest petroleum university institute of electrical and mechanical engineering, Chengdu 610500, China;;

Fan Ming

2. Southwest Oil and Gas Branch of PCL, Chengdu 610051, China;

Xiaodong Xu

1. Southwest petroleum university institute of electrical and mechanical engineering, Chengdu 610500, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Aerodynamic Noise Generating Mechanism of Corbula Type Throttle Valves

Abstract

Abstract: The throttle mechanism of pneumatic noise and the noise spectrum characteristics of corbula type throttle valve are studied by targeting on aerodynamic noise problems caused by gas when flowing through the corbula type throttle valve, *the method of CFD software with acoustic software simulation is used as well*. The studies have showed that when the flow of fluid flows through shrink section, it can be effected by throttling effect, *the speed of gas on the hole exit increases rapidly to form under-expanded supersonic jet*, causing strong turbulence and *shock wave* noise. The conclusion is that the construction of throttling gas by small holes is the root cause for fluid noise in the valve. The flow noise within valve is characterized by spectrum of wideband; the aerodynamic noise with low frequency possesses higher energy; the noise amplitude of high frequency drops quickly along the flowing direction of working medium; and the main noise band moves to the low frequency band.

Keywords

joint simulation, throttle valve, aerodynamic noise, shock wave

Recommended Citation

Li Yueqin, Xiao Fei, Fan Ming, Xu Xiaodong. Aerodynamic Noise Generating Mechanism of Corbula Type Throttle Valves[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1615-1621.

笼套式节流阀气动噪声机理研究

李悦钦¹, 肖飞¹, 范铭², 徐小东¹

(1. 西南石油大学 机电工程学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油西南油气气分公司, 四川 成都 610051)

摘要: 针对气体流经笼套式节流阀所引起的气动噪声问题, 采用 CFD 软件与声学软件联合仿真的方法, 研究了笼套式节流阀气动噪声的产生机理和噪声频谱特性。研究表明: 流经节流阀的气体遭遇小孔缩流断面的节流作用, 在小孔出口处速度剧烈增加形成超音速欠膨胀射流, 引发剧烈的速度、压力脉动, 形成了强烈的湍流噪声和激波噪声, 小孔节流结构是阀门流噪声产生的根本原因; 阀门内部流噪声的频谱呈现宽频带特性, 且气动噪声低频部分能量较大, 沿工作介质流动方向高频噪声幅值迅速下降, 主要噪声的频带向低频带移动。

关键词: 联合仿真; 节流阀; 气动噪声; 激波

中图分类号: TP214

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1615-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804050

Aerodynamic Noise Generating Mechanism of Corbula Type Throttle Valves

Li Yueqin¹, Xiao Fei¹, Fan Ming², Xu Xiaodong¹

(1. Southwest petroleum university institute of electrical and mechanical engineering, Chengdu 610500, China;

2. Southwest Oil and Gas Branch of PCL, Chengdu 610051, China)

Abstract: The throttle mechanism of pneumatic noise and the noise spectrum characteristics of corbula type throttle valve are studied by targeting on aerodynamic noise problems caused by gas when flowing through the corbula type throttle valve, the method of CFD software with acoustic software simulation is used as well. The studies have showed that when the flow of fluid flows through shrink section, it can be effected by throttling effect, the speed of gas on the hole exit increases rapidly to form under-expanded supersonic jet, causing strong turbulence and shock wave noise. The conclusion is that the construction of throttling gas by small holes is the root cause for fluid noise in the valve. The flow noise within valve is characterized by spectrum of wideband; the aerodynamic noise with low frequency possesses higher energy; the noise amplitude of high frequency drops quickly along the flowing direction of working medium; and the main noise band moves to the low frequency band.

Keywords: joint simulation; throttle valve; aerodynamic noise; shock wave

引言

节流阀作为高压气井采气必要的控制设备, 主



收稿日期: 2016-05-10 修回日期: 2016-07-01;
作者简介: 李悦钦(1956-), 男, 四川成都, 硕士, 副教授, 研究方向为流体机械、空气动力性噪声; 肖飞(1992-), 男, 四川资阳, 硕士生, 研究方向为流体机械; 范铭(1986-), 男, 四川遂宁, 本科, 高工, 研究方向为井下工具。

要起调节流体流量、压力及流动方向的作用, 以确保系统安全、稳定工作。高压气体流经节流阀时流动状态复杂, 湍流和振动严重, 所产生的强烈流噪声及其辐射噪声问题不容忽视^[1]。据现场测量, 工作时节流阀周围的噪音高达 105 dB, 远远超过了行业标准 90 dB。高噪声不仅会严重影响周围工作人员的身心健康, 同时还会降低设备精度, 引起机

<http://www.china-simulation.com>

• 1615 •

械零部件的严重损坏,研究表明大约 110 dB(A)噪声会导致阀门零件以及与之相连管道的机械性破坏^[2]。阀门零部件的振动噪声和流体在阀内产生的气动噪声是构成节流阀噪声的两大因素,机械振动噪声是由湍流、压力振荡或由于速度和(或)大的流量所产生的不稳定的流动力量所引起的。其噪声级比较低,很少超过 90 dB(A),频率在 50 ~1 500 Hz 范围之内。通过改变阀体厚度等办法,机械振动噪声往往是可以降低的^[3]。气动噪声由直接作用于流体的振动力、流体本身剧烈运动等产生,其幅值远大于结构振动噪声的幅值,是阀门噪声的主要构成部分^[4]。研究节流阀气动噪声的产生机理、特性,可以有助于控制它的产生和传播,减少井场噪音污染。

国内外对阀门的气动噪声做了一定研究,王诩^[5]通过对某型号蒸汽管路阀门流体动力特性及噪声源特性进行了研究,为阀门的降噪及低噪声阀门的设计提供依据;刘翠伟^[6]等通过数值仿真分析了气体流经球阀气动噪声的产生机理;徐峥^[7]通过对主蒸汽隔离阀的声腔结构进行声学模态分析,找出了蒸汽湍流与结构本身的声振耦合关系;Jewook Ryu^[8]等使用频域声学类比法计算了快开节流阀的内部气动噪声,发现大尺度的湍流是不规则偶极子噪声产生的主要原因。但是这些研究多数局限于亚音速湍流噪声,本文通过 CFD 软件与声学软件联合仿真的方法分析了具有超音速流动的笼套式节流阀气动噪声产生机理以及结构优化。

1 气动噪声的数值计算

1.1 数值计算方法

目前,气体动力性噪声的数值模拟方法有三种:计算气动声学方法(Computational Aero-Acoustic,简称 CAA)、莱特希尔声类比方法(Lighthill's Acoustic Analogy)以及混合计算方法(Hybrid Method)^[9]。其中计算气动声学方法的计算量极大,声类比方法一般只用于计算远场辐射,

进场计算误差较大,不能考虑结构和声学装置的影响^[10]。混合计算方法就是利用计算流体动力学(CFD)软件和声学软件对工程中的气动噪声进行联合仿真计算其本质还是莱特希尔声类比方法。由于引入了专业的声学计算软件,因此能够对工程中气动噪声做出更全面的预测^[11]。本文采用 CFD 软件 Fluent 与声学软件 Virtual Lab 联合仿真对笼套式节流阀气动噪声进行研究分析。流场仿真中先使用 $k-\varepsilon$ 模型计算出稳态结果,然后以稳态结果为作为初始条件选择湍流模型 LES 进行瞬态仿真,得到涡量、速度等流场参数的时域精确解;再将流场瞬态仿真的结果导入专业声学软件 Virtual Lab11.0,采用边界元法计算出流体流经节流阀引起的声场分布。

1.2 理论分析

气动噪声由直接作用于流体的振动力、流体本身剧烈运动等产生,即流噪声;由流体力学基本方程组可知,用于可压缩粘性流体的运动方程纳维-斯托克斯方程(N-S 方程):

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \nabla p + \mu \Delta v + \frac{\mu}{3} \nabla(\nabla \cdot v) \quad (1)$$

式 1 中, μ 为动力黏度系数, v 为速度矢量;

在 N-S 方程的基础上,得到 Lighthill 波动方程为:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \alpha_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2)$$

其中

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + [(p - p_0) - c_0^2(\rho - \rho_0)] \delta_{ij} \quad (3)$$

式(2)中, ρ 、 ρ_0 分别为气体和自由流体密度, kg/m^3 ; v 为气体流速, m/s ; t 为时间, s ; F 为作用于流体的体积力, N/kg ; p 为气体压力, Pa ; μ 为气体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; α_0 、 c_0 为远场声速, m/s ; x_i 、 x_j 为坐标值; T_{ij} 为 Lighthill 应力张量; u_i 、 u_j 为速度分量, m/s ; P_0 为流场静压, Pa ; δ_{ij} 为罗内克符号。该波动方程反映了流体中声波运动与流场参数的关系。运动物体在流体中的发声问题用 FW-H^[12-13] 方程表示为:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 \rho' = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [(p' \delta_{ij}) \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f)] + \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (4)$$

式(3)中, ρ' 为气体密度变化, kg/m^3 ; f 是用来定义表面 S 的一个函数, 如果 $f < 0$, 则在区域 1 中, 如果 $f > 0$ 则在区域 2 中; $\delta(f)$ 为狄拉克函数; p' 为气体压力变化, Pa 。等号右边的三项作为声源项, 分别为由表面加速度引起的声源、由表面脉动压力引起的声源、流体紊流所产生的四极子声源。

2 流场仿真

2.1 流场仿真模型

图 1 为笼套式节流阀的结构图, 其中 1 为活塞杆, 2 为压帽, 3 为外压盖, 4 为内压盖, 5 为阀体, 6 为隔套, 7 为活塞头压环, 8 为柱塞, 9 为笼套, 10 为底座。图 2 是其节流工作原理图。笼套式节流阀的工作原理是通过阀杆控制柱塞 8 与笼套 9 的配合长度决定节流过流面积, 进而直接影响对流体的流通能力, 达到节流效果。

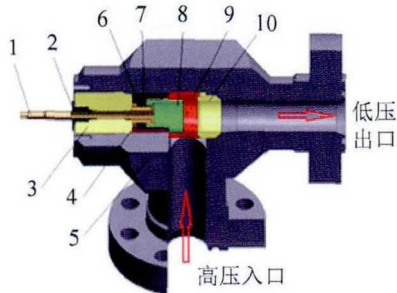


图 1 笼套节流阀结构图

Fig. 1 Structure of Corbula Type Throttle Valve

根据节流阀内腔结构及阀内流体流动特性, 建立节流阀内部流场模型(图 3), 出、入口直径均为 64 mm, 为使湍流充分发展, 取入口段长度为 500 mm。流体介质为 ideal gas, 采用压力入口压力出口的边界形式, 入口压力 40 Mpa, 出口压力 8 Mpa, 入口温度为 324 k, 出口温度为 299 k (现场实际工况)。对于有限元仿真计算, 网格质量的好坏直接影响计算的收敛性和结果数据的精确性。

该计算采用 hypermesh 软件对流体域进行离散划分, 均使用六面体网格, 网格数量约为 200 万, 其质量均在 0.75 以上。根据奈奎斯特采样定理:

$$t = \frac{1}{2f} \quad (5)$$

由式(5)可知, 要分析 5 000 Hz 的频率, 则设置分析时间步长 $t=0.0001$ s。对阀门不同节流开度气动噪声研究结果表明, 不同开度下阀门流场及速度场数值不同, 但偶极子和四极子分布结果一致, 仅存在声源大小差异。实际工况中阀门的常用开度开度为 50%, 因此取开度为 50%进行详细阐述。

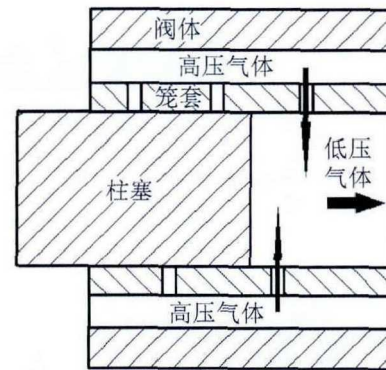


图 2 笼套式节流阀工作原理图

Fig. 2 Working principle of Corbula Type Throttle Valve



图 3 节流阀流体域

Fig. 3 Fluid field of throttling valve

2.2 流场仿真结果分析

从图 4 和图 5 可以看出, 在节流阀入口段压力稳定且处于一个较高的水平, 虽处于湍流状态, 但该区域速度低、压力脉动小, 属于声学平稳区; 高压气体进入阀腔后, 被笼套阻挡, 气体围绕笼套充满阀腔, 该区域气体受反作用力和摩擦力的影响, 流速有所降低, 同时在小孔边缘的气体又以较高的速度进入节流小孔, 使得气体在这个区域速度梯度

较大, 由于流体间的剪切作用, 将在该区域形成漩涡和回流; 节流小孔到笼套后的扩压区域为阀门的节流区, 从图4中可以看出, 在节流区存在明显的压力降, 压力能转化为动能, 气体被压入节流小孔并在小孔末端超音速喷射出去。

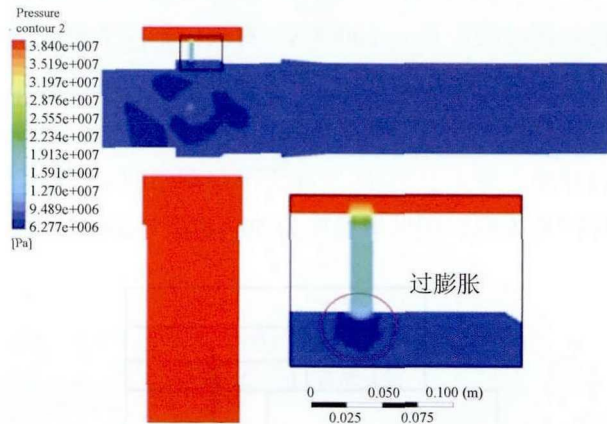


图4 Z=0处压力分布云图
Fig. 4 Pressure contour at Z=0

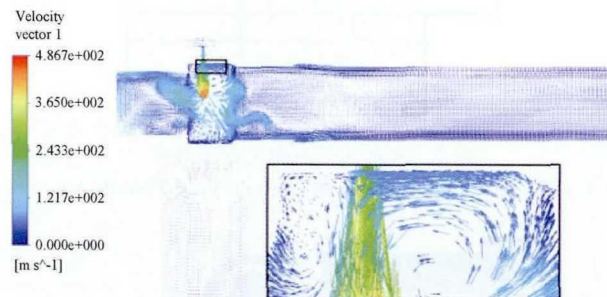


图5 Z=0速度矢量图
Fig. 5 Velocity vector at Z=0

图6为湍动能云图, 湍动能是速率的变化而引起的, 其大小可以反应该处流体的混乱程度, 从该图中可以看出, 湍动能最大的地方出现在笼套中心, 这是由于在笼套内超音速射流与周围亚音速流动的气体产生强烈的剪切作用产生涡流, 同时射流在笼套内部环形空间内相遇碰撞, 使得该区域内流动极其不稳定, 引发剧烈的速度、压力脉动, 从而在该区域将形成强烈的湍流噪声。

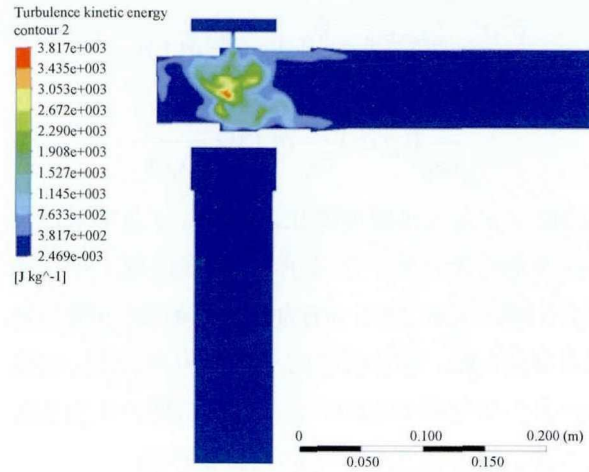


图6 Z=0湍动能分布云图
Fig. 6 Contour of turbulent kinetic energy at Z=0

图7为涡量等值线, 可以看出笼套式节流阀涡流主要出现下游区, 涡量和涡流强度在射流区到达最大值, 并沿流体流动方向逐渐降低。从图8中明显可以看到大量漩涡, 这是由于分子间粘性摩擦力的作用, 笼套内超音速射流与周围亚音速流动的气体产生强烈的剪切作用形成大量漩涡; 较大尺度的涡不停地从主流中得到能量, 通过涡流与涡流的相互作用, 能量转移到小尺度涡, 而小尺度涡受粘性力的阻碍作用而破裂形成更小尺度的涡旋, 同时伴随着湍流能量的耗散, 所以涡旋随着下游管道长度的增加而减少。而阀体壁面的粘滞效应、笼套处的绕流运动、小孔出口处的超音速射流, 使涡旋又不停的产生。阀体内涡旋的产生和破裂导致湍流运动中物理量的脉动从而形成了气动噪声。

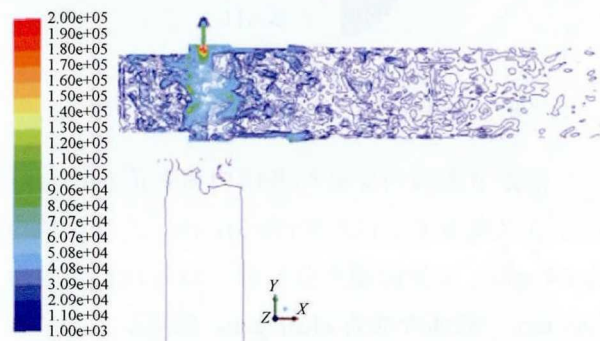


图7 Z=0处涡量等值线
Fig. 7 Vortex contour at Z=0

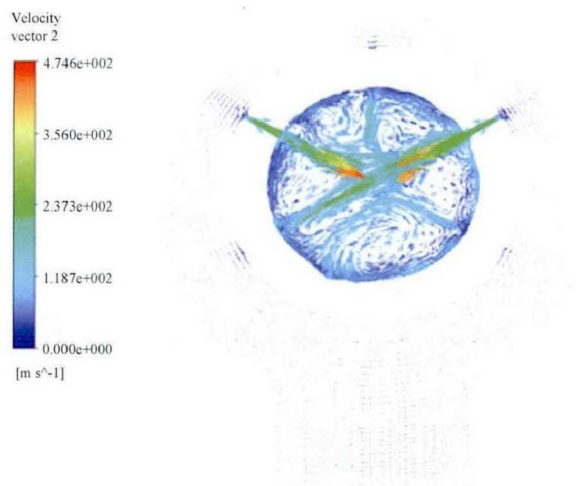


图8 X=0处速度矢量图
Fig. 8 Velocity vector at X=0

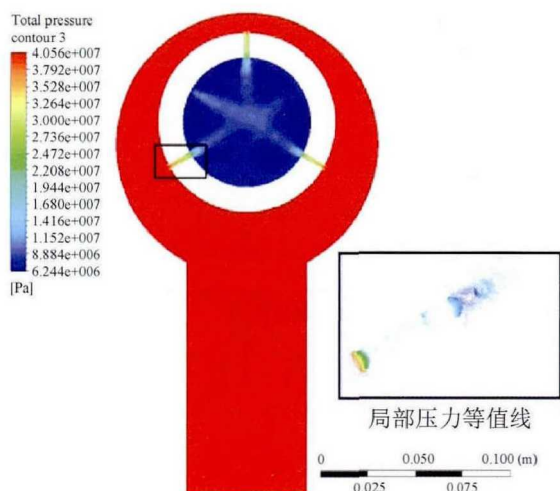


图9 X=0处压力分布云图
Fig. 9 Pressure contour at X=0

由速度矢量图和压力云图可知,该射流出口处静压大于周围压力,速度为 1.44 Ma,在小孔出口处产生膨胀扇区,使得射流静压逐渐降低到笼套内环境压力;从图 9 的压力等值线中可以清楚的看到激波的存在,这是由于气流膨胀一方面使得气体沿着流向方向加速;另一方面气流过膨胀将使射流压力低于笼套内环境压力,相当于给超音速射流一个正的压强扰动,超音速气流在该正压扰动作用下迅速收缩,形成了图 9 中的激波。激波扫过未经扰动的气体后,不仅会使气流的状态参数在这个区域内发生急剧的变化^[14]。激波带来的逆压力梯度还会使主流与阀座边界层的流动分离产生反方向回流,从而引起局部与主流相反的涡对流流动,如图 6

所示。同时激波和超音速射流相互作用使射流的扩张速率迅速增加,会在流场中形成复杂的激波结构和不同尺度的湍流结构。在大尺度湍流结构的作用下,主流区域将产生强烈的马赫波辐射^[15],引起激波啸叫和宽频激波噪声,这也是阀门气动噪声的主要声源。综上可知节流小孔处的结构突变的影响,不仅会生成强烈的湍流噪声,还会形成激波噪声,是笼套式节流阀产生强烈气动噪声的根源。

3 声学仿真

3.1 气动噪声模型

Virtual Lab11 中新添加了可压缩气体模块和喷注噪声模块,可以全面的分析阀门气动噪声。声学网格和流场仿真网格有本质区别,采用直接边界元法时,只需将声学空间离散为声学边界元网格。为确保计算精度,通常假定在最小波长内有 6 个单元。本文分析频率为 5 000 Hz,声传播速度 340 m/s,因此最大单元尺寸长度 L 应满足:

$$L \leq \frac{c}{6f_{\max}} = \frac{340}{6 \times 5000} = 0.0113 \quad (6)$$

最终取 L 为 10 mm 建立声学网格模型,如图 10 所示。

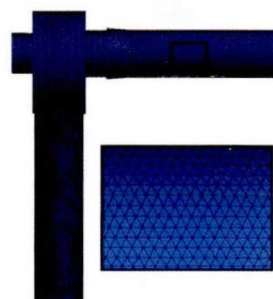


图10 声学计算网格模型
Fig. 10 Acoustic computing mesh model

流体动力声源可分为三类:单极子、偶极子和四极子声源。单极子声源一般在气体流速较低的湍流中产生,且声功率较低,通常忽略其声学贡献;物体表面压力脉动,将产生偶极子声源噪声;喷流、尾迹和严重的分离流,将引起四极子声源噪声^[16]。四极子声源强度与偶极子声源强度之比正比于马

赫数的平方, 笼套式节流阀中最大流速为 1.44 Ma, 偶极子声源强度和四极子声源强度在同一数量级, 因此必须同时考虑偶极子声源和四极子声源的影响。

图 11 为 400 Hz 时气动噪声的声压分布云图, 从图中可以看出入口段节流区的声压级最低, 阀腔节流区声压级最高。气流进入阀门后受到笼套的阻挡作用, 漩涡脱落形成的压力脉动作用于阀体壁面, 以及超音速射流形成的剧烈压力脉动作用于笼套表面都将形成偶极子声源; 同时气体流经小孔后, 产生小孔节流效应, 超音速射流与周围相对静止的气体强烈的剪切作用形成四极子声源。在偶极子声源和四极子声源共同的作用下使得该区域的声压级达到最大。

3.2 气动噪声的频谱特性

根据流场分析可知, 笼套式节流阀内部湍流最剧烈的部位在超音速射流对流区。本文设定沿出口

管道中心线向下 0 m、0.1 m、0.2 m、0.3 m 四个噪声接收点, 分别提取了声压频谱曲线。

从图 12 中可看出笼套式节流阀内部的脉动声压频谱呈现宽频带特性。在低频时声压级幅值较大, 随频率的升高, 幅值持续下降。靠近笼套中心噪声声压较高, 远离射流中心, 噪声声压级幅值下降, 且高频变化最为明显, 主要噪声频带向低频带移动。



图 11 声压分布云图(410 Hz)

Fig. 11 Contour of sound pressure (410 Hz)

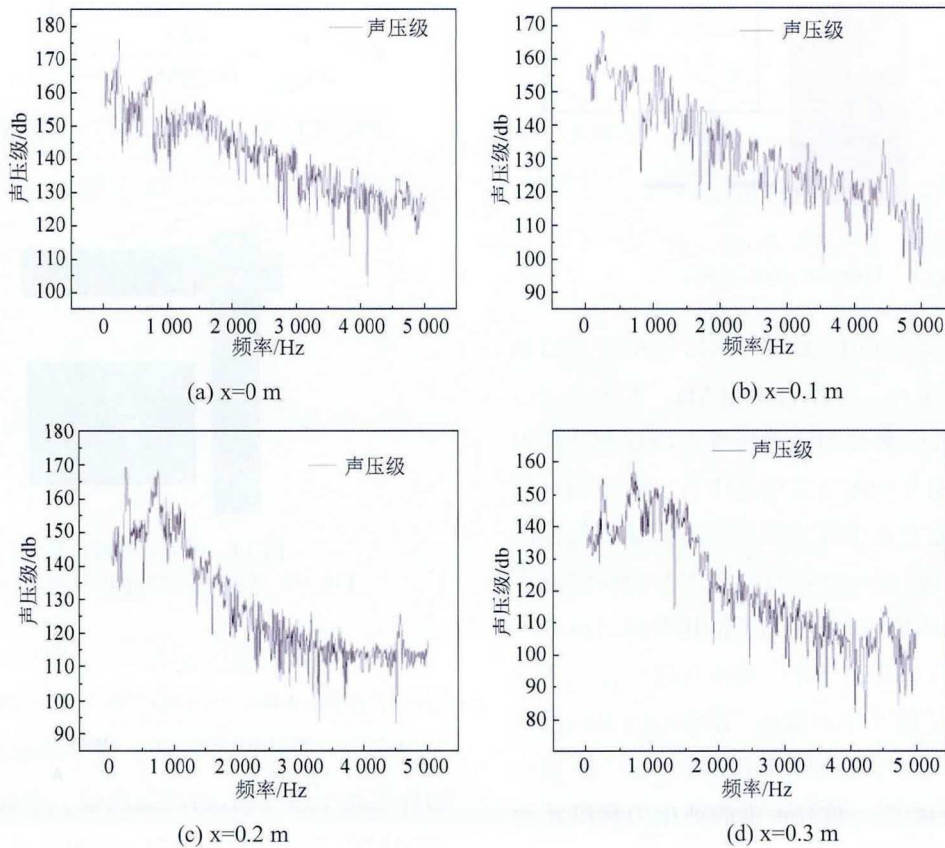


图 12 声压频谱图

Fig. 12 Spectrum of sound pressure

<http://www.china-simulation.com>

4 结论

本文采用 CFD 软件与声学软件联合仿真的方法研究了气体流经节流阀时的空气动力学噪声问题, 得出了以下结论:

1、气体流经小孔后形成超音速射流, 引发了下游强烈的速度、压力脉动, 产生湍流噪声; 形成的超音速射流将生成激波, 将引起激波啸叫和宽频激波噪声。

2、笼套式节流阀气动噪声是偶极子声源和四极子声源共同作用的结果; 其内部的脉动声压频谱呈现宽频带特性, 且噪声低频部分能量较大, 高频部分能量较小。远离射流中心, 噪声声压级幅值下降, 且高频变化最为明显, 主要噪声频带向低频带移动。

参考文献:

- [1] Lin Wei, Ming Zhang, Zhi-jiang Jin. Numerical Analysis of Aerodynamic Noise in a High Parameter Pressure Reducing Valve [J]. Applied Mechanics and Materials Vols(S1662-7482), 2013, 12(9): 397-400.
- [2] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
Ma Datai. Noise and vibration control engineering manual[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.
- [3] 王佳典, 唐浩. 基于 CFD 方法的调节阀流动噪声预测[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(5): 104-109.
Wang Jiadian, Tang Hao. Prediction of Flow Noise in a Controlling-valve Using CFD method[J]. noise and vibration control, 2014, 34(5): 104-109.
- [4] 孙晓峰, 周盛. 气动声学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 577-584.
Sun Xiaofeng, Zhou Sheng. Aero acoustics[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 1994: 577-584.
- [5] 王翔. 蒸汽管路阀门流动与噪声源特性研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.
Wang Xu. Research for Flow Field and Noise Source Charaacteristicsof Valvein Steam Pipe[D]. Harbin Institute of Technology, 2011.
- [6] 刘翠伟, 李玉星, 王武昌, 等. 输气管道气体流经阀门气动噪声产生机理分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 152-157.
LIU Cui-wei, LI Yu-xing, WANG Wu-chang. Analysis on the mechanism of aero-acoustic noise generated by gas flow through valves of natural gas pipelines [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 152-157.
- [7] 徐峥. 核电站主蒸汽隔离阀气流诱发振动与噪声问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
Xu Zheng. Research for Vibration and Noise due to Airflow of Main Steam Isolation Valve in Nuclear Power Station[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [8] Jewook Ryu, Cheolung Cheong, Sungtae Kim, et al. Computation of internal aerodynamic noise from a quick-opening throttle valveusing frequency-domain acoustic analogy[J]. Applied Acoustics (S0003-682X), 2005, 66(11): 1278-1308.
- [9] 唐浩. LMS Virtual. Lab 流体声学解决方案[R]. LMS International, 2010.
Tang Hao. LMS Virtual. LabFluid acoustics solution[R]. LMS International, 2010.
- [10] 孟令雅, 刘翠伟, 李玉星, 等. 输气管道气动噪声产生机制及其分析方法[J]. 中国石油大学学报, 2012, 36(6): 128-137.
Liu Cuiwei, Li Yuxing, Wang Changwu, et al. Aero-acoustics generation mechanism and analysis methods for natural pipelines[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(6): 128-137.
- [11] 徐俊伟, 吴亚锋, 陈耿, 等. 气动噪声数值计算方法的比较与应用[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(4): 6-10.
Xu Junwei, Wu Yafeng, Chen Geng, et al. Comparison and Application on the Aero-acoustics Numerical Computing Methods[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(4): 6-10.
- [12] Lighthill M J. On sound generated aerodynamically I.general theory [J](S1364-5021). Proc. R. Soc. Lond. A, 1952, 211(1107): 564-587.
- [13] Ffowcs Williams J E, Hawkings D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. (S1364-503X). Proc. Roy. Soc. Lond. A, 1969, 264(1151): 321-342.
- [14] 韩标, 许宏庆. 超声速射流离散频率噪声的屏蔽抑制及对流动的影响[J]. 空气动力学学报, 2004, 22(2): 141-146.
Han Biao, Xu Hongqing. Supersonic jet screech suppression by a shield and it's effects on the flow[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2004, 22(2): 141-146.
- [15] 刘昕, 姜宗林, 王春, 等. 欠膨胀超声速射流不稳定机理的数值研究[J]. 力学学报, 2008, 25(5): 1-5.
Liu Xin, Jiang Zonlin, Wang Chun, et al. Numerical study of expanded supersonic jet instability mechanism[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 25(5): 1-5.
- [16] Farassat F. Introduction to generalized functions with applications in aerodynamics and aero acoustics[R]. NASA Technical Paper 3428, 1996.