DOI: 10.3901/JME.2020.12.207

自振射流装置结构及频率特性*

潘 岩 蔡腾飞 马 飞 邱林宾 高路路
(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

摘要: 自振射流频率特性包括低频脉动与高频振荡, 其发生机理与应用条件均存在较大差异, 而现有研究较少。基于流体网络理论建立数学模型, 分别计算流体管网与喷嘴的声谐固有频率; 基于信号分析方法, 获取自振射流的全频谱结构, 进而探讨射流装置结构与射流频率特性的关系。试验结果表明, 一个完整的自振射流频谱由低频脉动和高频振荡两部分组成, 但两者相差近两个数量级; 自振射流的低频脉动通常由管网内流体扰动引发, 当扰动频率与管网固有频率相接近时, 低频振荡增强; 其高频振荡由喷嘴出口处流体涡激振动引发, 当涡振频率与喷嘴声谐固有频率相接近时, 射流产生强烈的高频振荡; 低频脉动射流不受喷嘴出口形状和外部环境参数影响, 可应用于非淹没或低围压环境下, 而高频振荡射流受喷嘴出口形状和外部环境参数影响大, 可应用于围压条件下。研究成果揭示了射流装置结构与射流频率特性的关系, 为自振射流装置结构设计及深海资源开采提供了技术支撑。

关键词: 自振射流; 装置结构; 频率特性; 低频脉动; 高频振荡

中图分类号: TG156

Device Configuration and Frequency Characteristics of Self-resonating Water Jet

PAN Yan CAI Tengfei MA Fei QIU Linbin GAO Lulu

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: The frequency characteristics of self-resonating water jet include low-frequency pulsation and high-frequency oscillation, the occurrence mechanism and application conditions of which are quite different, while it is less reported. The device producing the jet is regarded as a whole, based on the fluid network theory, the mathematical model of the device is established to obtain the acoustic natural frequencies of the fluid network and the nozzle. Based on the signal analysis method, the whole frequency spectrum of the self-resonating jet is obtained, then the relationship between the device configuration and the frequency characteristics of the jet is discussed. The experimental results show that a complete spectrum of the self-resonating water jet consists of two parts, namely the low frequency pulsation frequencies and the high frequency oscillation frequencies, but the difference between these two frequency ranges is nearly two orders of magnitude. The low frequency pulsation of the self-resonating water jet is usually caused by the fluid disturbance inside the pipe network, when the disturbance frequency is close to the acoustic natural frequency of the pipe network, the low-frequency oscillation is enhanced. While the high-frequency oscillation is caused by the vortex-induced vibration at the nozzle exit. When the vortex shedding frequency is close to the acoustic natural frequency of the nozzle, the acoustic resonance occurs and the high frequency oscillation is generated. The low frequency pulsating jet is not affected by the shape of the nozzle outlet and external environmental parameters, so it can be applied to non-submerged or low confining pressure environments, while the high frequency oscillating jet is strongly affected by the above factors, so it can be applied under confining pressure conditions. The research results reveal the relationship between the device configuration of the self-resonating water jet and the frequency characteristics of the jet, which provides a theoretical basis for the structural design of the jet device and the application of the water jet in deep-sea area.

Key words: self-resonating water jet; device configuration; frequency property; low-frequency pulsation; high-frequency oscillation

0 前言

自振射流是一种新型高效射流, 无需外加激励

即可产生强烈的压力振荡, 从而显著提高射流的打击冲蚀效果, 其在页岩气、深海资源开采等领域具有广阔应用前景。自振射流的压力振荡特征包括低频脉动与高频振荡, 前者脉动频率较低, 为几赫兹, 后者频率却高达几万赫兹, 为了提高自振射流的振荡特性及其应用效果, 国内外学者进行了大量研究,

* 国家自然科学基金(51774019)和国家重点研发计划(2016YFC0802900)资助项目。20191102 收到初稿, 20200229 收到修改稿

取得了显著成果。

在自振射流低频脉动特性及应用研究中, 主要基于流体网络理论, 对射流系统频率特性及射流打击力展开研究。李晓红等^[1]利用集中参数法建立了射流系统的等效网络模型, 并通过数值计算发现系统具有低通滤波和谐振等特性; 杨林^[2]继而研究了系统结构及工作压力等参数对射流频率特性的影响; 李江云等^[3]采用数值仿真对流体压力场进行分析, 发现射流的脉冲效果与喷嘴腔内周期性变化的空化气囊有关; 王健等^[4]通过试验研究射流打击力与工作压力、喷嘴结构之间的关系, 得到了低压射流打击力的经验公式; 裴江红等^[5]建立双腔室自激振荡喷嘴的相似网络模型, 并对其频率特性进行了理论研究; 汪朝晖等^[6]研究了喷嘴谐振腔结构参数对射流振荡特性的影响, 从而得到改善射流空化状态的相关参数。

而对于自振射流高频振荡特性的研究, 主要基于波涡共振理论, 探讨喷嘴声谐固有频率与射流自激频率的匹配问题。ROCKWELL^[7]提出流体诱导自激振动的原因是腔内剪切层不稳定性及反馈过程中不稳定扰动的放大; CHAHINE 等^[8-9]采用流体阻抗法计算得到风琴管喷嘴的声谐固有频率, 并提出产生强烈振荡的谐振腔结构设计模式; JOHNSON 等^[10]研究发现喷嘴结构参数对射流的自激频率特性具有重要影响; 廖振方等^[11]总结了扰动波在腔内剪切层的传播过程, 并研究了不同碰撞壁形状对射流振荡特性的影响; 李根生等^[12]对风琴管喷嘴与赫姆霍兹喷嘴的调制机理进行分析, 将自振射流应用于石油钻井, 提高了射流的工作效率; 王萍辉等^[13]通过比较喷嘴及靶盘的振动, 研究了自振射流的振荡特性及频率特性; 易灿等^[14]对比风琴管喷嘴与锥形喷嘴的空化起始能力, 发现风琴管喷嘴比普通锥形喷嘴具有更大的起始空化数; 李登等^[15]探究了风琴管喷嘴内表面粗糙度对射流压力脉动特性的影响, 并得到射流压力振荡峰值的初步数学模型; 唐川林等^[16]对圆形喷嘴和方形喷嘴进行打击试验, 研究表明不同喷嘴结构对射流频率特性具有重要影响; 潘岩等^[17]对围压下风琴管射流的自激频率展开研究, 得到特定喷嘴结构下射流高频自激频率随空化数的变化规律。

综上所述, 国内外学者对自振射流的频率特性及其影响因素开展了广泛研究, 为自振射流技术的推广应用奠定了良好的基础。然而在现有研究中, 由于对自振射流的完整频谱结构的不清晰, 通常将自振射流的低频特性和高频特性割裂开来, 进行单一研究, 导致其频率影响因素的分析缺乏针对性; 自

振射流显现出来的振荡特性与流体扰动密切相关, 而引发射流低频和高频振荡的流体扰动不同, 诱发机理不同, 因此其应用环境也不同, 但在实际应用中, 二者经常混淆, 造成了自振射流的工作效能的低下。

本文将采用风琴管喷嘴, 基于流体网络理论建立自振射流装置系统的数学模型, 分析系统的固有频率特性; 采用信号分析方法获取自振射流的完整频谱结构, 通过试验深入探讨射流振荡的诱发机理, 揭示射流频率特性与射流装置结构的关系。

1 射流装置及其频率

自振射流装置主要由喷嘴结构及来流管路组成, 为保证流体进入喷嘴时流速稳定, 在其上游设计容积元件, 因此高压流体经来流管路、容积元件进入喷嘴谐振腔, 由孔口喷出, 其装置示意图如图 1 所示。

图 1 射流装置示意图

p_0 ——始端压力 u_0 ——始端流速 l_N ——来流管路长度 d_N ——来流管路直径 l_s ——容积元件腔长 D_s ——容积元件直径 L ——谐振腔腔长 D ——谐振腔直径 d ——孔口直径 p ——终端压力 u ——终端流速

射流装置的固有频率主要包括管网的固有频率与喷嘴的声谐共振频率, 流体在管网内传输将产生宽频压力扰动, 当流体扰动频率与射流装置的固有频率相接近时, 将引起流体共振, 增强射流的振荡效果。由于喷嘴孔口处流体扰动频率较高, 本节将基于流体网络理论中的分布参数法建立射流装置的数学模型, 即采用传递矩阵法计算管网的固有频率, 采用流体阻抗法计算喷嘴的声谐固有频率, 分析系统的固有频率特性。

1.1 管网固有频率

采用传递矩阵法计算管网的固有频率, 即通过脉动压力与脉动速度衡量管网内部流体状态, 根据管网始端与终端边界条件以及沿管路每一元件的转移矩阵, 建立频率方程, 从而得到管网固有频率^[18]。

根据图 1 所示射流装置结构, 建立管网传递函数为

$$\begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix} = \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 \begin{pmatrix} p_0 \\ u_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, 管路边界条件 $\mathbf{M}_1$ 为来流管路转移矩阵; $\mathbf{M}_2$ 为容积元件转移矩阵; $\mathbf{M}_3$ 为谐振腔转移矩阵。其表达式分别如下

$$M_1 = \begin{pmatrix} \cos \frac{2\pi f_N l_N}{c} & -\rho c \sin \frac{2\pi f_N l_N}{c} \\ \frac{1}{\rho c} \sin \frac{2\pi f_N l_N}{c} & \cos \frac{2\pi f_N l_N}{c} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2\pi f_N V_s}{\rho c^2 A} & \frac{A_N}{c} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} \cos \frac{2\pi f_N L}{c} & -\rho c \sin \frac{2\pi f_N L}{c} \\ \frac{1}{\rho c} \sin \frac{2\pi f_N L}{c} & \cos \frac{2\pi f_N L}{c} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, ρ 为流体密度(kg/m^3); c 为波速(m/s); f_N 为管网固有频率(Hz); A_N 为来流管路横截面面积(m^2); A 为谐振腔面积(m^2); V_s 为容积元件体积(m^3)。

根据式(1)~(4), 得到管网频率方程为

$$\left(\cos \frac{2\pi f_N L}{c} - \rho c \sin \frac{2\pi f_N L}{c} \cdot \frac{2\pi f_N V_s}{\rho c^2 A} \right) \times \left(\cos \frac{2\pi f_N l_N}{c} - \rho c \sin \frac{2\pi f_N l_N}{c} \right) - \rho c \sin \frac{2\pi f_N L}{c} \cdot \frac{A_N}{A} \cdot \left(\frac{1}{\rho c} \sin \frac{2\pi f_N l_N}{c} + \cos \frac{2\pi f_N l_N}{c} \right) = 0 \quad (5)$$

根据式(5)可计算得到管网固有频率 f_N , 当管路中流体扰动频率与管网固有频率相接近时, 自振射流低频脉动增强。

1.2 喷嘴声谐固有频率

风琴管喷嘴结构由入口收缩断面(D_s/D)、出口收缩断面(D/d)及谐振腔组成, 如图2所示。高速流体经孔口喷出并产生自激, 在孔口处形成流体扰动。

图2 风琴管喷嘴结构及自激机理示意图

基于流体阻抗法^[19], 喷嘴的声谐固有频率可表示为

$$f = \frac{(2n-1)c}{4L} \quad (6)$$

式中, n 为振荡模数, $n=1, 2, 3 \dots$ 。

根据涡激振动理论, 射流自激频率 f^* 可表示为

$$f^* = \frac{Srv}{d} \quad (7)$$

式中, Sr 为斯特劳哈尔数; v 为射流出口流速, m/s ;

d 为孔口直径, m 。

当孔口处射流的自激频率与喷嘴的声谐固有频率相匹配时, 在谐振腔内将产生声谐共振, 此时射流高频振荡增强。

2 试验

2.1 管网结构

试验系统主要由水箱、水泵、流量计、压力表、压力传感器、容积元件及喷嘴结构等部件组成, 其管网结构示意图如图3所示。管路直径 $d_N=10 \text{ mm}$, 管路总长度 $l_N=10 \text{ m}$, 容积元件直径 $D_s=24 \text{ mm}$, 长度 $L_s=100 \text{ mm}$, 喷嘴谐振腔直径 $D=14 \text{ mm}$, 腔长 $L=24 \text{ mm}$ 。

图3 管网结构示意图

忽略各测量元件接头处的压力损失, 由式(5)计算得到管网固有频率 f_N , 如表1所示。

表1 射流装置各固有频率

波速 $c/(\text{m/s})$	管网 f_N/Hz	喷嘴声谐 f/kHz
1 450	72.4	15.1

2.2 喷嘴结构

试验所采用的风琴管喷嘴包括无扩口喷嘴与扩口喷嘴两种结构, 如图4所示。为使喷嘴的声谐固有频率相同, 其谐振腔尺寸均保持一致, 由式(6)计算得到喷嘴声谐固有频率 f , 如表1所示。

两种喷嘴孔口结构不同, 无扩口喷嘴孔口为圆柱形流道, 而扩口喷嘴孔口由圆柱形流道与倾斜锥面组成。其中流道直径均为 d , 无扩口喷嘴流道长度为 L_1 , 扩口喷嘴圆柱形流道长度为 L_2 , 扩口角度为 θ , 扩口角长度为 L_3 , 其参数如表2所示。

图4 喷嘴结构示意图

表 2 喷嘴出口结构参数

孔口直径 d/mm	流道长度 L_1/mm	流道长度 L_2/mm	扩口角度 $\theta/^\circ$	扩口角长度 L_3/mm
2	3.7	0.7	21	3.0

2.3 试验参数

为保证射流始终工作在淹没条件下, 容积元件及喷嘴结构均置于高压罐中。试验过程中, 保持射流工作压力即喷嘴出口流速不变, 稳定流速下, 电动机转速为 621 r/min, 齿轮箱减速比为 4.45, 据此可得到三柱塞高压泵引起的压力脉动基频 f_p 为 6.98 Hz。在相同工作压力条件下, 改变围压, 采用不同喷嘴结构进行试验研究, 试验参数见表 3。

表 3 试验参数

组次	工作压力 $\Delta P/\text{MPa}$	围压 P_c/MPa
1	16	1.6
2	16	1.0, 1.2, 1.6, 1.8

3 试验结果分析

3.1 射流低频与高频特征

选用不同喷嘴结构, 按表 3 第 1 组参数进行试验, 试验过程中保持工作压力与围压不变, 获取流体压力脉动信号, 并得到自振射流的全频谱结构。为探究射流低频特征, 对其低频部分进行放大, 如图 5 所示。

图 5 射流低频特征

对比图 5a、5b 可以看出, 不同喷嘴结构下, 射流低频部分频谱结构较为一致, 其低频能量主要集中在 7 Hz 及其倍频、以及 58 Hz 等频段处。前者频率与该试验工况下高压泵的脉动基频基本一致,

因此该部分能量与泵的扰动有关。而对比表 1 中理论计算结果可知, 58 Hz 频率成分约为管网固有频率, 由于计算过程中将管路部分弹性管视为刚性管以及忽略压力损失、流体黏性等因素, 实际管网频率小于其理论计算结果, 但两者量级一致, 均为低频脉动。由此可知, 流体扰动频率与管网固有频率相接近时, 射流低频脉动增强。

两种喷嘴结构下射流的高频特征如图 6 所示, 对比图 6a、6b 可以看出, 无扩口喷嘴产生的射流未发生明显的高频振荡, 而扩口喷嘴产生射流的高频振荡显著增强, 其能量主要集中在 6.6 kHz、13.2 kHz、19.8 kHz 三个频段。根据课题组前期基于射流高频自激频率的研究^[17], 射流发生自激振荡时, 其高频特征频率包含自激频率基频及其谐波。因此可以认定, 13.2 kHz 为射流自激频率基频, 6.6 kHz 及 19.8 kHz 为其谐波, 对比表 1 可知, 该工况下射流自激频率与喷嘴的声谐固有频率相接近, 高频振荡显著增强。

图 6 射流高频特征

综合图 5、6 可以看出, 自振射流频谱同时包含低频脉动频率与高频振荡频率, 其中低频脉动频率小于 100 Hz, 而高频振荡频率则高达 10 kHz 以上, 两者相差约为两个数量级, 与理论计算相吻合。

此外, 两种喷嘴结构下射流低频特征基本一致, 而高频特征具有较大差异, 表明自振射流两种振荡特性的产生机理不同。射流低频脉动由管内流体扰动引发, 不受喷嘴出口形状的影响; 而高频振荡由喷嘴出口处流体扰动引发, 其产生与否与喷嘴出口形状直接相关。

由于无扩口喷嘴下射流以低频脉动为主要振荡特征, 而扩口喷嘴下射流产生强烈的高频振荡。因

此, 分别采用不同喷嘴结构进行试验, 获取自振射流的频谱结构, 分别探究射流的不同振荡特性。

3.2 无扩口喷嘴及射流频谱特征

采用无扩口喷嘴, 试验参数如表 3 第 2 组, 试验过程中保持工作压力不变, 获取不同围压下射流的压力脉动, 其频谱结构如图 7 所示。

图 7 不同围压下无扩口喷嘴射流频谱结构

由图 7 可以看出, 采用无扩口喷嘴时, 流体压力脉动信号中低频信号能量较强, 该频率成分基本不随围压发生改变, 其幅值约为 0.1 MPa, 波动范围随围压变化较小; 而高频信号幅值较低, 且随围压增大, 该频段能量逐渐衰减直至消失。

由以上分析可知, 喷嘴为无扩口结构时, 射流以低频脉动为主, 其频率成分较为稳定, 且受围压影响较小。由于低频脉动由管网内部流体扰动引发, 不受外部环境参数影响。因此, 低频脉动射流可应

用于非淹没或低围压环境下。

3.3 扩口喷嘴及射流频谱特征

采用扩口喷嘴, 试验参数如表 3 第 2 组, 获取不同围压下射流的压力脉动, 其频谱结构如图 8 所示。

图 8 不同围压下扩口喷嘴射流频谱结构

由图 8 可以看出, 采用扩口喷嘴时, 流体压力脉动信号中低频信号较为稳定, 而高频信号的频率及幅值均发生明显变化。围压由 1.0 MPa 增至 1.8 MPa 时, 射流自激频率基频及其谐波随之整体增大, 基频变化范围为 10.5~13.9 kHz; 基频增至 13.2 kHz 时, 高频振荡幅值达到最高, 其三波能量远超低频脉动强度, 此时射流自激频率基频与喷嘴声谐固有频率相匹配, 发生流体共振, 射流高频振荡达到最强。

由以上分析可知, 喷嘴为扩口结构时, 射流发生高频振荡, 振荡频率及幅值均受围压影响较大。

由于高频振荡由喷嘴孔口处流体涡激振动引发, 受外部流体性质及环境参数影响较大, 因此, 高频振荡射流可应用于淹没条件尤其是高围压环境下, 提高射流在高围压下的打击冲蚀效果。

4 结 论

(1) 自振射流的频谱具有宽带特征, 其频率组成由射流装置结构决定, 低频段频率由管网结构确定, 高频段频率由喷嘴结构确定。

(2) 射流低频脉动由管网内流体扰动引发, 接近管网固有频率, 通常低于 1 kHz; 射流高频振荡由喷嘴出口处流体扰动即涡激振动引发, 接近喷嘴谐振腔声固有频率, 高于 10 kHz, 两者频率范围相差较大。

(3) 低频脉动射流不受喷嘴出口形状和外部环境的影响, 可应用于非淹没或低围压环境下; 高频振荡射流受喷嘴出口形状和外部环境的影响较大, 可应用于淹没围压条件下尤其是高围压环境下, 显著提高射流的打击冲蚀效果。

参 考 文 献

- [1] 李晓红, 杨林, 王建生, 等. 自激振荡脉冲射流装置的固有频率特性[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 641-644.
LI Xiaohong, YANG Lin, WANG Jiansheng, et al. The natural frequency characteristic of the self-excited oscillation pulsed water jet device[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 641-644.
- [2] 杨林. 自激振荡脉冲磨料射流的动态特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
YANG Lin. Study on dynamic characteristics of self-excited oscillation pulsed abrasive water jet[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [3] 李江云, 王乐勤, 徐如良, 等. 低压大直径喷嘴自激脉冲射流空化模型[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 438-440.
LI Jiangyun, WANG Leqin, XU Ruliang, et al. Cavitation model for the low-pressure large-diameter self-excited pulse nozzle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(3): 438-440.
- [4] 王健, 李江云, 关凯. 自激脉冲喷嘴装置试验研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 678-681.
WANG Jian, LI Jiangyun, GUAN Kai, et al. Experimental study of self-excited pulse jet[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(4): 678-681.
- [5] 裴江红, 唐川林, 胡东. 双腔室自激振荡喷嘴频率特性研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 29-32.
PEI Jianghong, TANG Chuanlin, HU Dong, et al. Self-excited oscillation frequency feature of a pulsed water jet nozzle with double-chamber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4): 29-32.
- [6] 汪朝晖, 胡亚男, 廖振方, 等. 基于自激振荡脉冲效应的雾化喷嘴出口流道空化特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 204-212.
WANG Zhaohui, HU Yanan, LIAO Zhenfang, et al. Cavitation characteristic study on the outlet channel of atomization nozzle based on the self-excited oscillating pulse effects[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 204-212.
- [7] ROCKWELL D. Oscillations of impinging shear layers[J]. AIAA Journal, 1983, 21(5): 645-664.
- [8] CHAHINE G L, GENOUX P F, JOHNSON V E. Analytical and experimental study of the acoustics and the flow field characteristics of cavitating self-resonating water jets[M]. Albuquerque, NM: Sandia National Labs, 1984.
- [9] CHAHINE G L, JOHNSON V E, LINDENMUTH W T, et al. The use of self-resonating cavitating water jets for underwater sound generation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 77(1): 113-126.
- [10] JOHNSON V E, CHAHINE G L, LINDENMUTH W T, et al. The development of structured cavitating jet for deep hole bits[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, September, 26-29, 1982.
- [11] 廖振方, 唐川林. 自激振荡脉冲射流喷嘴的理论分析[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(2): 24-27.
LIAO Zhenfang, TANG Chuanlin. Theory of the self-excited oscillation pulsed jet nozzle[J]. Journal of Chongqing University, 2002, 25(2): 24-27.
- [12] 李根生, 沈忠厚. 自振空化射流理论与应用[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2008.
LI Gensheng, SHEN Zhonghou. Theory and application of self-resonating cavitating waterjet[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008.
- [13] 王萍辉, 马飞. 自激振动空化射流振动分析试验[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 89-95.
WANG Pinghui, MA Fei. Vibration analysis experiment of self-resonating cavitating waterjet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 89-95.

- [14] 易灿, 李根生, 张定国. 围压下自振喷嘴空化起始能力试验及应用研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 218-223.
YI Can, LI Gensheng, ZHANG Dingguo. Laboratory and field study of enhancing cavitation effect with self-resonating nozzle under ambient pressure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 218-223.
- [15] 李登, 李晓红, 康勇, 等. 风琴管喷嘴内表面粗糙度对高压射流特性的影响试验研究[J]. 机械工程学报. 2015, 51(17): 169-176.
LI Deng, LI Xiaohong, KANG Yong, et al. Experimental investigation on the influence of internal surface roughness of organ pipe nozzle on the characteristics of high pressure jet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 169-176.
- [16] 唐川林, 王晓明, 胡东, 等. 自振脉冲喷嘴中异形结构对射流振荡频率的影响[J]. 矿山机械, 2015, 43(1): 15-20.
TANG Chuanlin, WANG Xiaoming, HU Dong, et al. Influence of special-outlet self-exciting oscillation pulsed nozzle on oscillation frequency[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(1): 15-20.
- [17] 潘岩, 蔡腾飞, 马飞, 等. 围压条件下风琴管射流自激频率的估算模型[J]. 机械工程学报, 2018, 54(18): 220-225.
PAN Yan, CAI Tengfei, MA Fei, et al. Self-excited frequency estimation model of organ-pipe water jet under confining pressure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18): 220-225.
- [18] 罗志昌. 流体网络理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
LUO Zhichang. Fluid network theory[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [19] JOHNSON V E, LINDENMUTH W T, Conn A F, et al. Feasibility study of tuned-resonator, pulsating cavitating water jet for deep-hole drilling[M]. Albuquerque, NM: Sandia National Labs, 1981.
-
- 作者简介: 潘岩, 女, 1993年出生, 博士研究生。主要研究方向为自激振荡射流理论与应用。
E-mail: 18810636420@163.com
蔡腾飞, 男, 1992年出生, 博士研究生。主要研究方向为自激振荡射流技术与应用。
E-mail: caitengfei92@163.com
马飞(通信作者), 男, 1968年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为振动噪声分析与控制、自振空化射流技术。
E-mail: yeke@ustb.edu.cn