

串联型脉冲喷嘴的实验研究

唐川林, 吴霞, 胡东

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 根据水声学原理和瞬变流理论, 在自激振荡脉冲射流喷嘴的基础上, 设计了一种新型的串联型脉冲喷嘴, 它由 Helmholtz 谐振腔和风琴管谐振腔串联组成。实验选用 3 种不同形状碰撞壁风琴管, 采用 SD150 测试系统, 分析了串联型脉冲射流动态特性和形状变化对脉冲射流特性的影响规律, 以及泵压和风琴管振荡腔长对射流冲蚀效果的影响。实验结果显示: 如果两振荡腔结构参数选择合理, 使其固有频率耦合, 射流将能激励出更大的流体振荡, 射流的瞬时能量将得到更大提高; 3 种碰撞壁中, 冲蚀效果最佳的是球面形碰撞壁风琴管串联型脉冲喷嘴。

关键词: Helmholtz 谐振腔; 风琴管谐振腔; 自激振荡; 压力脉动; 喷嘴

中图分类号: O358

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)04-0060-05

The Experimental Study on the Series Pulsed Nozzle

Tang Chuanlin, Wu Xia, Hu Dong

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract A new series pulsed nozzle, which is composed of the Helmholtz and organ pipe oscillation cavity, is designed on the basis of self-oscillating pulsed nozzle according to hydro-acoustics and fluid dynamics. The impinging wall of three typical shapes are chosen in the experiment. The SD150 test system is used for analyzing the effects of parameters on the jet oscillating trait, analyzing the effect of the change in impinging wall shape on pulsed jetting characteristics and the effects of the pump pressure and the length of the organ pipe oscillation cavity on the jet impact pressure. Experimental results show that the jet will inspire a stronger oscillating fluid and the instantaneous energy of the jet will be enhanced more largely if the parameters of the two oscillating cavities are well designed and their inherent frequencies of the two oscillating cavities are mutually coupled. The experiment also shows that the series pulsed nozzle of spherical impinging wall has the strongest erosion ability among the three tested impinging wall.

Key words: Helmholtz oscillation cavity; organ pipe oscillation cavity; self-excited oscillation; impact pulsed; nozzle

0 引言

国内外学者们从不同的角度用不同的理论来阐述、分析自激振荡脉冲射流产生机理^[1-5]。Rockwell 和 Naudascher^[2]将流体诱发自激振动的原因分为流体动力学激励、流体共振激励和流体弹性激励; 西南石油学院的廖荣庆和蒋海军^[3]等人应用流体网络理论简化自激振荡脉冲射流的物理模型, 建立了其数学模型; 重

庆大学廖振方教授^[1]等人将自激振荡脉冲射流应用于石油钻井, 研制出了用于石油钻井钻头的自激振荡脉冲喷嘴, 大大提高了钻头的破岩能力和钻井速度。

国内外文献主要集中在单腔室下射流动态特性的研究, 对于多个腔室串联情况下射流特性的研究甚少。为获得更为有效的自激振荡脉冲射流喷嘴, 提高射流冲击压力和破岩效率, 本文从提高脉冲射流瞬时峰值出发, 设计出一种新型的串联型脉冲喷嘴, 并进

收稿日期: 2007-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374087), 湖南省教育厅基金资助重点项目(04A067)

作者简介: 唐川林(1963-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事高效射流理论及应用研究。

行了实验研究。

1 自激振荡机理与串联型脉冲射流喷嘴的设计

1.1 自激振荡机理

如图1所示, Helmholtz 谐振腔脉冲喷嘴中, 当一股来流进入振荡腔室时, 射流中一定频率范围内的涡量扰动得到放大, 在剪切层中形成一连串离散涡环, 当其到达碰撞壁并与之相互作用时, 在碰撞区产生压力振荡波, 该波以声速向上游传播, 若此时压力波相位与射流初始振荡相位一样, 整个流体的振荡被迭加、放大。该过程不断重复, 形成强烈的自激振荡脉冲射流。

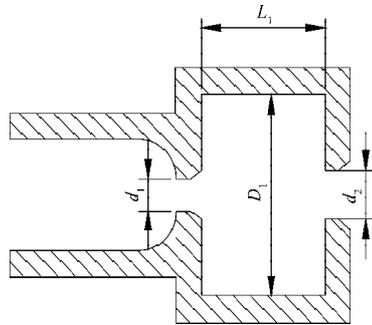
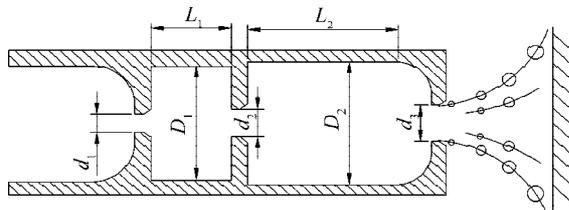


图1 Helmholtz 谐振腔脉冲喷嘴示意图

Fig. 1 Sketch of Helmholtz oscillating pulsed nozzle

1.2 串联脉冲射流喷嘴的设计

风琴管和 Helmholtz 谐振腔是 2 种典型的自激振荡腔室结构。本文根据瞬态流理论和水声学原理, 设计了一种串联型脉冲喷嘴, 它由圆柱形 Helmholtz 振荡腔与风琴管谐振腔串联构成, 如图2所示。



d_1 - 上喷嘴直径; d_2 - 中喷嘴直径; d_3 - 下喷嘴直径; D_1 - 自振腔直径; L_1 - 自振腔长度; D_2 - 风琴管振荡腔直径; L_2 - 风琴管振荡腔长度

图2 串联型风琴管脉冲喷嘴示意图

Fig. 2 Sketch of series organ pipe pulsed nozzle

当来流进入 Helmholtz 谐振腔时, 产生自激压力初始振荡, 此压力振荡反馈回谐振腔并得到放大, 形成反馈压力振荡, 当振荡射流进入风琴管谐振腔再次经过放大后就得到了脉冲峰值更强的振荡射流。要使射流经过二次放大, 需适当设计风琴管谐振腔尺寸和控制流体马赫数、Strouhal^[4]数, 使反馈压力振荡的频率与风琴管谐振腔的固有频率相匹配, 从而在谐振腔内

产生声谐共振, 形成驻波, 射流剪切层内涡流变成大结构分离环状涡流, 此大结构的涡流环可以增强射流的脉冲效果。

根据水声学原理, 射流产生共振时驻波的频率与脉冲射流装置固有频率相近, 且由 Strouhal 数确定。Helmholtz 谐振腔的固有频率^[5]为:

$$f_1 = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1}{V_1 L_1}} \quad (1)$$

式中: f_1 为谐振腔固有频率;
 a 为当地声速;
 A_1 为谐振腔入口面积;
 V_1 为腔室容积;
 L_1 为腔长轴向长度。

应用传递矩阵法计算风琴管谐振腔的固有频率。在流体管路中管内, 不定常的基本微分方程, 连续性方程和运动方程^[6-8]为:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{gA\partial H}{a_2 \partial t} = 0, \\ \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ^n}{2gDA^n} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

令风琴管中矩形体积元件的体积为 V_2 , 则体积元件的转移矩阵 P 为:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jV_2 g \omega / a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

忽略变截面管道中非线性摩擦项来计算变截面管道的场矩阵, 求解得:

$$F = \begin{bmatrix} 1 - b_1 b_2 \omega^2 & -j(b_3 b_9 \omega - b_7 \omega^3) \\ -j(b_9 b_3 \omega - b_8 \omega^3) & 1 - b_1 b_6 \omega^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由系统传递矩阵 $U = F_n P_n \cdots F_2 P_2 F_1$ 得:

$$U = FP =$$

$$\begin{bmatrix} 1 - b_1 b_2 \omega^2 & -j(b_3 b_9 \omega - b_7 \omega^3) \\ -j(b_9 b_3 \omega - b_8 \omega^3) & 1 - b_1 b_6 \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jVg\omega / a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设上游压力脉动很小, 可忽略不计, 则 $h_{in}=0$; 在下游, 压力水经喷嘴射入大气, 令 $h_{out}=0$, 结合上式计算可得风琴管谐振腔固有频率为:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{b_3 b_4}{b_7}} \quad (6)$$

式中: $b_3 = \frac{L_3}{4g}$;

$$b_4 = \frac{1}{A_{31}} + \frac{1}{A_{32}} + \frac{1}{A_{33}};$$

$$b_7 = \frac{A_{32}L_3^3}{64gA_{31}A_{33}a^2};$$

A_{31} , A_{32} , A_{33} , A_{34} 分别为风琴管变截面 4 等分截面的面积;

L_3 为风琴管变截面段的长度;

a 为波在管内液体中的传播速度;

A 为谐振腔入口面积;

V_2 为风琴管矩形腔室容积。

因此, 串联型风琴管脉冲喷嘴的设计, 首先必须分别计算出两谐振腔的固有频率, 然后根据自激压力振荡发生的激励频率 (即射流临界自激结构耦合频率) 设计出合适的两谐振腔尺寸。

2 实验装置和方法

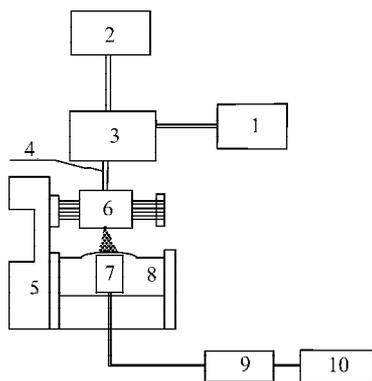
2.1 实验装置

实验主要设备与测试仪器见表 1, 实验系统见图 3 布置。

表 1 实验主要设备与测试仪器

Table 1 The experimental equipment and testing instrument

设备名称	设备型号	有关参数
三相异步电动机	Y280S-4	转速: 1 480 r/min
活塞泵	GA-3.6/50YA	测量范围为 0~50 MPa
压力传感器	AK-4 型	
动态式信号采集及分析系统	SD150	



1- 蓄水池; 2- 电动机; 3- 三柱塞往复泵; 4- 高压软管;
5- 实验架; 6- 喷嘴装置; 7- 压力传感器; 8- 测试靶盘;
9- 信号采集及分析系统; 10- 计算机

图 3 实验装置及测试系统简图

Fig. 3 Sketch of experimental equipment and testing system

2.2 实验方法

稳定流体经三缸柱塞泵加压后直接由管线引入串联型脉冲喷嘴, 由喷嘴射出的高速射流冲击底部的靶盘装置, 测试底盘上开有直径很小的测压孔 (0.3 mm), 射流动态特性通过测压孔传到装于靶盘

的压力传感器上, 再通过 SD150 测试系统采集射流动态信号。喷嘴安装在实验架上, 实验架是由水切割操作台改装的, 测试靶盘安装在实验架底部, 实验架带动喷嘴可以上下左右移动, 从而可调节喷距 (喷嘴至传感器压力端距离), 并可进行轴向射流动态特性测试。

实验中, 串联型脉冲喷嘴的第一级圆柱型 Helmholtz 自激振荡腔和二级风琴管谐振腔的设计尺寸如表 2 所示。

表 2 几种串联型风琴管脉冲喷嘴

Table 2 The symbol of organ pipe pulsed nozzle

喷嘴 编号	结构尺寸/mm						结构关系					
	d_1	d_2	d_3	L_1	L_2	L_3	D_1	D_2	d_2/d_1	d_3/d_1	L_1/d_1	D_1/d_1
NO.1	2.0	2.4	2.88	5	10	7	40	56				
NO.2	2.0	2.4	2.88	5	10	7	40	56	1.2	1.44	2.5	20
NO.3	2.0	2.4	2.88	5	10	7	40	56				

其中, 第 1 号喷嘴风琴管的碰撞壁形状为球面体; 第 2 号喷嘴风琴管的碰撞壁形状为 120° 锥面; 第 3 号喷嘴风琴管的碰撞壁形状为平面。

3 实验结果与分析

3.1 不同串联脉冲喷嘴冲击压力脉动特性

图 4 为表 2 中 1~3 号串联型脉冲喷嘴轴心压力脉动峰值 P_{\max} 随风琴管谐振腔腔长 L_c 的变化规律, 实验选取泵压为 10 MPa。由图可知, 第 2 号喷嘴射流冲击压力脉动峰值最高, 其射流压力峰峰值也最大, 由此可见, 第 2 号喷嘴产生的脉冲效果最佳。

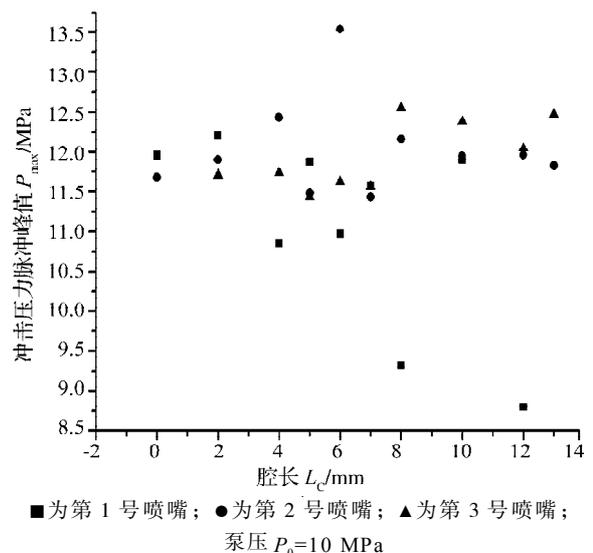


图 4 3 种喷嘴射流压力脉动峰值随腔长变化规律

Fig. 4 Variations of pulsed peak value versus the length of cavity for the three nozzle

3.2 不同泵压下压力脉动特性

图 5 是第 1 号喷嘴在泵压分别为 7.5 MPa、10 MPa

和 12 MPa 条件下, 射流压力脉动峰值 P_{max} 随腔长 L_c 的变化规律。

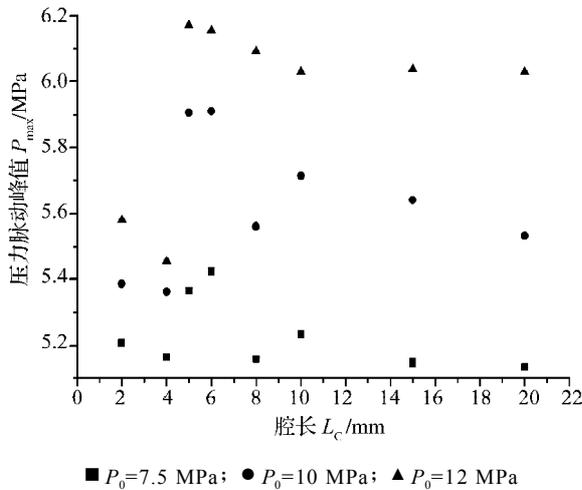


图5 第1号喷嘴压力脉动峰值随腔长的变化规律

Fig. 5 Variations of pulsed peak value versus length of cavity for NO.1 nozzle

图6是第2号喷嘴在泵压为5 MPa、10 MPa和15 MPa条件下, 射流压力脉动峰值 P_{max} 随腔长 L_c 的变化规律。

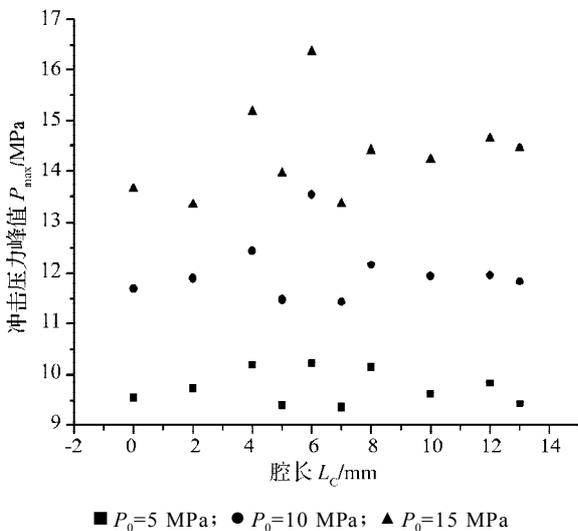


图6 第2号喷嘴压力脉动峰值随腔长的变化规律

Fig. 6 Variations of pulsed peak value versus length of cavity for NO.2 nozzle

图7是第3号喷嘴在泵压为5 MPa、10 MPa和15 MPa条件下, 射流压力脉动峰值 P_{max} 随腔长 L_c 的变化规律。

由图4~7可以看出, 在泵压和喷距一定条件下, 射流压力脉动峰值和压力峰峰值在某一合适腔长范围内达到最大, 超出这个范围, 其值变小, 这说明存在最佳腔长与之对应。这是由于在腔长较大时, 射流沿程压力损失严重, 因而峰值被严重削弱; 而在腔长较短时, 射流直接穿过了腔长, 旋涡运动得不到有效放大,

不能形成有效反馈, 射流压力峰值降低。分析图4和图5可得, 第1号喷嘴泵压在7.5 MPa、10 MPa和12 MPa下, 喷嘴的最佳腔室范围均在5~6 mm之间。分析图7可得, 第3号喷嘴泵压在5 MPa、10 MPa和15 MPa下, 喷嘴的最佳腔室范围都在7~9 mm之间。实验选取泵压为5 MPa, 喷距设定在4 mm, 以满足势流核条件。现用无因次腔长(即腔长与腔室出口直径的比值)来描述压力脉动峰值与压力峰峰值的变化规律。上喷嘴、中喷嘴和下喷嘴直径见表2, 由此可得第1~3号串联型风琴管脉冲喷嘴的无因次最优腔长范围分别为1.5~2 mm、1.7~2.3 mm和2.3~3 mm。

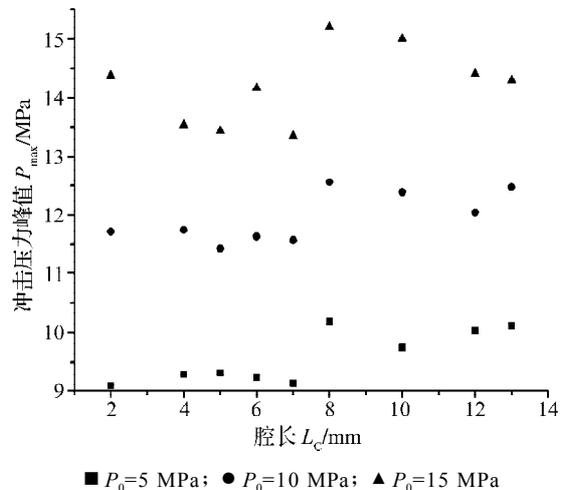


图7 第1号喷嘴压力脉动幅度随腔长的变化规律

Fig. 7 Variations of pulsed range versus length of cavity for NO.1 nozzle

3.3 不同喷嘴冲击压力脉动特性比较

图8是串联型脉冲喷嘴和Helmholtz振荡腔喷嘴的射流压力脉动峰值 P_{max} 随泵压的变化关系曲线。

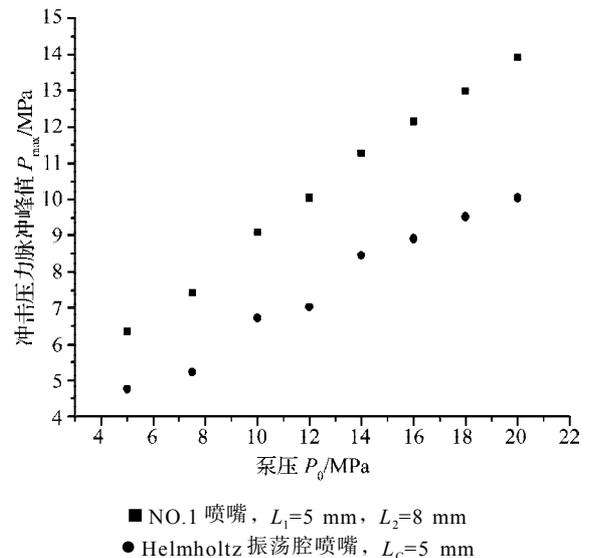


图8 不同喷嘴冲击压力脉动特性比较

Fig. 8 Comparing of impact pulsed trait for different nozzle

由图可得,在泵压相同的条件下,串联型脉冲喷嘴压力脉动峰值高于 Helmholtz 振荡腔喷嘴。也就是说,串联型脉冲喷嘴较单腔 Helmholtz 振荡腔喷嘴的冲刷效果大,脉冲效果好。

3.4 不同腔长串联型脉冲喷嘴的脉冲压力与泵压的变化规律

图 9 表示不同腔长条件下第 2 号串联型脉冲喷嘴的压力脉动峰值随泵压的变化规律。

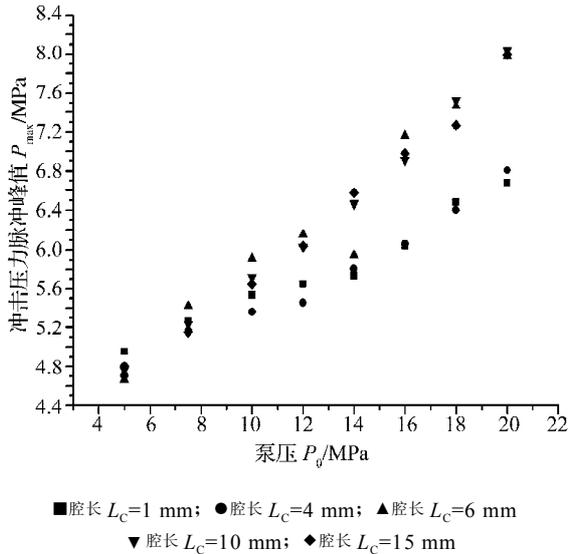


图 9 不同腔长 NO.2 喷嘴压力脉动峰值随泵压变化规律
Fig. 9 Variations of pulsed range versus length of cavity for NO.2 nozzle

由图 9 中可以看出,第 2 号喷嘴压力的脉动峰值随着泵压的增加而增大。由图 9 还可发现,当泵压增加到一定值时,射流峰值增加幅度减缓。这是由于实验中喷嘴结构保持不变,因而泵压的大小就决定了自激振动腔内的射流速度。在腔室结构一定的情况下,泵压的增加改变了流体特性,影响了压力波在液体中的传播速度,从而改变了边界层涡环放大倍数,直接影响射流速度,从而改变了射流压力峰值。实际

中,泵压一般不能选择太大,这是由于泵压的加大会大大增加管道阻力损失,影响装置寿命。

4 结论

1) 本文设计的串联型脉冲喷嘴脉冲效果显著,符合预期设想;

2) 串联型脉冲射流与连续射流和 Helmholtz 振荡脉冲射流相比,其沿程能量损失稍有增加,但在两振荡腔室合理设计配合下,能激励出更大的流体谐振,瞬时能量得到提高,极大提高了射流的冲击和破碎能力。另外,存在产生最大谐振峰值的最佳腔长,实验最优腔长值范围为 6~8 mm。

3) 本文为进一步研究多腔室脉冲喷嘴的动态特性提供了实验基础。

参考文献:

- [1] 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:自然科学版,2002,25(2):24-27.
- [2] ROCKWELL D, NAUDASCHERE. Review: Self-sustaining Oscillations of Flow Past Cavities[J]. ASME, Journal of Fluids Engineering, 1978, 100: 152-165.
- [3] 杨林,李晓红,王建生,等.结构参数对自激振荡脉冲射流固有频率特性的影响[J].流体机械,2001,10(6):26-28.
- [4] 田春,张强.流动诱导空腔振荡预测方法的改进[J].南京航空航天大学学报,1999,34(2):173-177.
- [5] 蒋世全,廖荣庆.串联型自激振荡脉冲射流喷嘴的实验研究[J].天然气工业,1995,16(6):51-53.
- [6] 汪志明,沈忠厚.自激振荡气蚀射流喷管内水声学理论及其应用[J].水动力学研究与进展,1994,9(3):318-324.
- [7] Morel T. Experimental Study of a Jet-Driven Helmholtz Oscillator[J]. Fluids Engineering, 1979, 101(3):383-390.
- [8] 怀特 E B, 斯特里特 V L. 瞬变流理论[M].北京:水利水电出版社,1983:158-177.