DOI: 10.3901/JME.2018.02.209

文丘里管不同空化阶段空化不稳定性特性的试验研究*

龙新平^{1,2} 王炯^{1,2} 左丹^{1,2} 章君强^{1,2} 季斌^{1,2}

(1. 水射流理论与新技术湖北省重点实验室 武汉 430072;

2. 武汉大学动力与机械学院 武汉 430072)

摘要: 采用高速摄像技术研究文丘里管在空化数分别为 0.76、0.51、0.26 的三种不同状态下的空化流动现象, 比较不同工况下空化云脱落的具体方式, 利用图像处理工具分析空化云面积的变化规律, 研究空化云脱落和各测压点压力变化之间的关联关系。结果表明, 空化云从文丘里管喉管起始段近壁面处生成以后, 逐渐向下游发展, 在不同空化阶段呈周期性的以不同的方式脱落。随着空化数的减小, 空化云脱落方式由单一的上下同时脱落向单边脱落转变, 而单边脱落又以下边脱落为主。当空化非常剧烈时, 在扩散管内出现多段不连续的团状空化云。另外, 空化云脱落与扩散管内 3 个不同位置的脉动压力有很强的关联性, 而与喉管内脉动压力关联不大。空化云脱落的主频与扩散管内脉动主频几乎完全对应, 且随着空化程度的加剧而递减, 对应主频分别为 275.9 Hz、176.8 Hz、12 Hz。

关键词: 文丘里管; 高速摄像技术; 空化云; 脉动压力; 脱落

中图分类号:

Experimental Investigation of the Instability of Cavitation in Venturi Tube under Different Cavitation Stage

LONG Xinping^{1,2} WANG Jiong^{1,2} ZUO Dan^{1,2} ZHANG Junqiang^{1,2} JI Bin^{1,2}

(1. Key Lab. of Jet Theory and New Technology of Hubei Province, Wuhan 430072;

2. Wuhan University, School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan 430072)

Abstract: A high-speed camera is used to observe the cavitation flow under different stages corresponding to the cavitation number of 0.76, 0.51 and 0.26. The shedding ways of cavity cloud under different conditions are compared. The area variations of cavity cloud are analysed by image processing tools. The relations between shedding laws of cavity cloud and change laws of pressure in different position are studied. The experimental results are conducted. Cavity cloud produced from internal face in throat of venturi tube develops downstream, and periodically sheds in different ways under different cavitation stages. As cavitation number reduces orderly, the shedding ways of cavity cloud convert to unilateral shedding from bilateral shedding. Particularly, unilateral shedding mostly consist of nether shedding. When cavitation is very severe, multistage discontinuous cavity cloud appear in the diffuser. Additionally, the shedding of cavity cloud has a strong association with the pressure fluctuation in three different position in diffuser, but it has little association with the pressure fluctuation in throat. The dominant shedding frequency nearly corresponds to the dominant frequency of pressure fluctuation. And both of the dominant frequency orderly decrease as cavitation get violent, respectively corresponding to 275.9 Hz, 176.8 Hz, 12 Hz.

Key words: Venturi tube; high-speed camera technology; cavity cloud; pressure fluctuation; shedding

0 前言

空化是流体机械设备中经常出现的一种流动现

象, 空化的不稳定性是空化流动的一个重要特性, 也一直是空化研究的重点。

早期, 学者们对空化不稳定性的原因进行了许多研究, 尤其是对水翼的研究。1975 年, FURNESS 等^[1]提出近壁反向流动的存在是导致空穴尾部不稳定的原因, 其后 KUBOTA 等^[2]采用高速摄像技术观察到了这种现象, 而 GOPALAN 等^[3]采用高速摄影

* 国家自然科学基金资助项目(11472197, 51679169, 51576143)。20161211 收到初稿, 20170720 收到修改稿

技术和 PIV 测量的方法进一步分析了这种不稳定现象。之后, ARNDT 等^[4]发现水翼空化不稳定性的两种机制, 即当 $\sigma/2\alpha < 4$ (σ 是空化数, α 是攻角) 时, 表面波的传播是引起空化不稳定性的主导因素; 当 $\sigma/2\alpha > 4$ 时, 则是回射流占主要作用。2010 年, 张博等^[5]在试验中也发现了类似的规律。其后, 水翼局部空化的周期规律、不同阶段特性得到了研究。2007 年, 张敏弟等^[6-7]通过试验发现绕翼型空化云的运动是一个准周期的过程。并发现绕超空化水翼和 Clark-Y 型水翼的空化云的运动都存在明显的脱落周期和脱落轨迹, 由于翼型尾部的反向射流, 使得空化云旋涡脱落。2014 年, 时素果等^[8]研究了不同温度下绕水翼的空化云形态。数值模拟也是研究空化不稳定性的的重要手段, 季斌等^[9]基于 LES 选用均匀空化流模型, 对 NACA66 型水翼的不稳定空化进行了数值模拟, 发现空腔体积脉动是空化水翼附近压力波动的根本原因。

文丘里管也是空化研究的一个重要对象, 借鉴水翼空化的不稳定性研究, 学者们也对文丘里管空化不稳定性进行了诸多分析。2003 年, SATO 等^[10]利用高速摄像技术观测了文丘里管内空泡产生、发展至溃灭的全过程, 并在较小空化数下观察了扩散段内出现的不稳定片状空化云。STUTZ 等^[11]利用 X 射线装置和双光探测器对文丘里管的不稳定片状空化云进行了观测, 发现空化云体积随时间的变化表征了空化云脱落周期规律, 指出出口速度对空化流以及空化云脱落频率有重要影响作用。COUTIER-DELGOSHA 等^[12-13]对矩形文丘里管不稳定空化流进行了数值模拟, 获得的结果与 STUTZ 等^[11]的试验结果非常吻合。2007 年, YAZICI 等^[14]研究了二维轴对称文丘里管中的空化流动, 发现空化流动的振动频率范围很广, 并监测到高动量的空泡最后会在扩散管中溃灭成低动量的小空泡, 振动随之变小。2010 年, SAYYAADI 等^[15]采用高速摄像观察到了文丘里管空化流的波动过程, 发现相较于工作压力, 空化数对空化云长度的脉动频率、本征频率无量纲参数 St 影响更为显著, 且认为回射流是空化云脱落的主要因素。2014 年, 严海军等^[16]通过试验发现文丘里管扩散段后半段出现明显回流从而导致空化云周期性脱落。2015 年, CHEN 等^[17]研究了文丘里管空化状态下的准周期压力脉动, 并认为云空化中准周期压力脉动与空化云随时间演化行为有着很强的联系。

对文丘里管空化的不稳定, 学者们主要对空化云体积或空化云长度的周期性变化以及空化云脱落的原因进行了较为细致的研究。但文丘里管不同空

化阶段空化云脱落的具体表现形式并没有得到详细研究, 压力脉动与空化云脱落的关联关系也未详细研究。空化云的运动是一种复杂的准周期性运动, 空化云的周期性脱落总是伴随着流动失稳、漩涡和湍流脉动等复杂流动现象, 进而引起结构振动和噪声, 降低设备性能、影响设备运行。因此, 对空化云脱落的具体表现的研究以及空化云脱落规律和压力变化规律的研究对文丘里管的实际应用具有重要的工程意义。为此, 本文采用高速摄影技术观测了三种不同空化状态下空化云运动, 分析空化云脱落现象的具体表现, 分析空化云脱落规律和压力变化规律的关联关系。

1 试验设置

1.1 试验对象

试验采用的文丘里管结构参数及测压孔位置如图 1 和表 1 所示。

图 1 文丘里管结构示意图

1.收缩管 2.喉管 3.扩散管

表 1 文丘里管结构参数

进口直径	出口直径	喉管直径	喉管长度	收敛角	扩散角
D_{in}/mm	D_{out}/mm	D_{th}/mm	W/mm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$
50	50	10	10	45	12

为便于观察, 文丘里管采用有机玻璃加工而成, 其外截面采用方形结构, 以减小光线折射引起的误差。文丘里管喉部与扩散管依次布置了 4 个测压孔来采集壁面压力, 其位置与喉管进口截面 $t-t$ 距离见表 2。

表 2 测压孔位置分布

mm				
测压孔位置	x_1	x_2	x_3	x_4
与截面 $t-t$ 距离	5	50	90	130

1.2 试验装置

试验装置如图 2 所示。利用离心泵 1 为文丘里管提供高压工作流体, 阀门 3 和 9 用于调节文丘里管进出口压力, 变频器 2 用于调节离心泵转速, 水箱 10 连接进出口管路使其形成循环水路, 并通过外水箱 11 营造水浴环境使水温保持恒定。各仪器及其技术参数见表 3。

图2 试验装置示意图

- 1.离心泵 2.变频器 3.9.阀门 4.电磁流量计 5,6.压力传感器
7.高频压力传感器 8.文丘里管 10.内水箱 11.外冷却水箱

表3 各仪器及其技术参数

名称	型号	技术参数
离心泵	CKX32-16	转速: 2 900 r/min; 扬程: 33 m; 流量: 9 m ³ /h
电磁流量计	IFS400	精度: ≤0.3% FS 量程: 0~5 L/s
压力传感器	CY3011BCP70N	精度: ≤0.5 %FS 量程: 0~700 kPa
高频压力传感器	HELM91	非线性误差: ≤0.25% FS 采样频率: 100 kHz

本次试验中高速摄像机型号为 Phantom Ultrahigh-Speed Cameras v2512, 拍摄帧率为 10 000 fps, 图片分辨率为 1 024 像素×400 像素。图 3 为高速摄像机布置位置示意图, 摄像机与文丘里管轴线平行布置。其中拍摄区域长度 $W_s=188$ mm, 相机距离 $D_s=600$ mm。

图3 高速摄像机布置位置示意图

1.3 试验步骤

在试验开始时, 调节离心泵出口阀门使文丘里管进口压力(绝对压力)稳定在 400 kPa, 再通过调节图 2 中文丘里管出口阀门 9 的开度改变出口压力, 分别使文丘里管内部出现小、中、大三种范围的空化现象, 此时文丘里管出口压力(绝对压力)分别为

279 kPa、188 kPa、99 kPa, 其空化云溃灭的位置主要分布在扩散管前段、中段和后段。待每个工况稳定后, 采集各测量点的数据, 并同时利用高速摄像机连续拍摄一定时间内的照片, 直至三个工况全部测完。

2 结果与分析

本节将利用 Matlab 图像处理工具对前述拍摄图片做出相应的后处理, 观察空化云演变规律与脱落现象, 同时结合文丘里管内的压力测量值进行频谱分析。

2.1 空化云脱落

以量纲一参数空化数 σ 表征空化云发展的剧烈程度, σ 计算公式为

$$\sigma = \frac{(p_{\text{out}} - p_v)}{\rho v_{\text{th}}^2 / 2} \quad (1)$$

式中, p_{out} 表示文丘里管出口压力, p_v 为试验环境条件下水的饱和蒸汽压力, ρ 表示水的密度, v_{th} 表示喉管处的平均流速。

在本试验的三种工况下, 随着出口压力依次减小, 空化程度逐渐加剧, 空化数逐渐减小, 分别为 0.76、0.51、0.26。

2.1.1 量纲一参数空化数 $\sigma=0.76$

当 $\sigma=0.76(p_{\text{out}}=279$ kPa) 时, 空化云溃灭位置主要位于文丘里管扩散管前端, 空化程度较弱。此时空化云从文丘里管喉管边壁上下两侧初生, 并向下游呈对称发展, 互不接触, 空化云脱落后, 团状空化云继续增大并相互接触, 随后溃灭。此时空化云脱落形式为单一的上下同时脱落。如图 4 所示。

图4 上下同时脱落($p_{\text{out}}=279$ kPa, $\sigma=0.76$)

2.1.2 量纲一参数空化数 $\sigma=0.51$

减小出口压力至 $p_{\text{out}}=188$ kPa, 空化数减小至 $\sigma=0.51$, 空化程度加剧, 空化云溃灭位置主要位于

文丘里管扩散管中端。此时空化云脱落形式有所改变,如图 5 所示,出现了单边脱落尤以下边脱落为主的脱落形式,但仍以上下同时脱落形式为主,如图 6 所示。其中,上下同时脱落形式与 $\sigma=0.76$ 的工况下极为相似,但 $\sigma=0.51$ 的工况下空化云脱落过程时间较长。如图 6 所示,以某一时刻空化云处于发展阶段为起始时刻,经过 0.6 ms 在扩散管前端近壁面出现空化云脱落现象,随后脱落的空化云向下游继续发展直至完全溃灭。与此同时,喉管处贴壁形成初生空化云并向下游发展,主流空化云与脱落空化云之间保留有较大的间隙,脱落现象明显易见。另一方面,如图 5 所示,在单边脱落过程中,由于扩散管近壁旋涡运动与逆压梯度耦合作用诱导产生回射流,近壁回流运动使上游壁面附近来流空化云速度减小,局部压力增大,而下侧空化云受到的影响大于上侧,在较强的回射流作用下发生了脱落,脱落后的下侧空化云向中心运动,挤压主流,迫使主流向上侧运动并挤压上侧空化云,使上侧空化云也出现了脱落,脱落后的空化云以顺时针方向旋转向下游运动直至溃灭,从而出现了以下边脱落为主

图 5 单边脱落过程($p_{\text{out}}=188 \text{ kPa}$, $\sigma=0.51$)

图 6 上下同时脱落过程($p_{\text{out}}=188 \text{ kPa}$, $\sigma=0.51$)

的单边脱落现象。由于压力波以及回射流的影响较小,未能传递到上游空化云,因此这种形式的单边脱落主要发生于主流空化云尾部。

2.1.3 量纲一参数空化数 $\sigma=0.26$

当 $\sigma=0.26(p_{\text{out}}=99 \text{ kPa})$ 时,空化云溃灭位置主要位于文丘里管扩散管后端,空化程度很剧烈,其脱落方式与上一工况大致相同。但空化云上下同时脱落出现频率大大降低,而空化云单边脱落出现频率较高。此时,上下两侧生成的空化云沿着流动方向大规模的混合,空化云运动至扩散管中部时开始脱落,随后分离出来呈团状向下游运动逐渐溃灭消失。

在脱落过程中,脱落空化云与上游主流空化云间隔较小,且随着主流运动,主流空化云也运动至扩散管中部并开始脱落,而此前脱落的空化云并未完全溃灭,此时,在扩散管内出现了多段不连续的团状空化云,如图 7 所示。

图 7 扩散管内多段脱落($p_{\text{out}}=99 \text{ kPa}$, $\sigma=0.26$)

2.2 空化云演变与压力脉动的关系

当 $\sigma=0.76$ 时,由于空化的不稳定性,空化云脱落位置总是在细微变动。在扩散管前中部区域设置矩形监察框(大小为 $12 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$),如图 8 所示。

图 8 矩形框设置位置示意图($p_{\text{out}}=279 \text{ kPa}$, $\sigma=0.76$)

空化云随主流向下游发展时,脱落后的空化云会依次出现在矩形框内,上游的主流空化云运动到矩形框前端附近时会产生下一次脱落现象,因此在矩形框内会明显观察到空化云明暗交替变化的现象,矩形框内一个周期内的亮度和变化,反映了一次脱落后的空化云在通过矩形框时的面积变化规律。STUTZ 等^[11]的研究表明,空化云体积随时间的变化表征了空化云脱落周期规律,因此可以通过统计矩形框内亮度和的变化,来反映空化云在此区域

内的含量变化,进而间接表征空化云脱落变化规律。运用 Matlab 图像处理工具,将灰度图像变换为含有各像素点灰度信息的矩阵,而矩形框的设置即为子矩阵选取,通过计算子矩阵中所有像素点的灰度和,即可计算出矩形框内空化云亮度和,再将其进行 FFT 变换,结果表征了脱落后空化云在通过矩形框时面积变化振幅与频率的关系。与此同时,对文丘里管内 4 个测压点压力测量结果做 FFT 变换,可以得到各个位置的脉动特征。将空化云脉动特征与压力脉动特征进行比较分析,结果如图 9 和图 10 所示。

图 9 矩形框内亮度和的 FFT 结果与扩散管 3 个测压点压力值 FFT 结果($p_{\text{out}}=279 \text{ kPa}$, $\sigma=0.76$)

图 10 喉部压力值 FFT 结果($p_{\text{out}}=279 \text{ kPa}$, $\sigma=0.76$)

对比矩形框内空化云亮度和的 FFT 结果与扩散管 3 个测压点压力值 FFT 结果,两者高度吻合,在低频段尤为相似,其振幅最大值对应的频率均为 275.9 Hz,而频率表示单位时间内空化云脱落次数。因此,空化云脱落主频与扩散管压力脉动主频是相同的,空化云脱落规律与扩散管测压孔处压力脉动规律有很强的关联性。另一方面,喉管压力值 FFT

结果与空化云亮度和的 FFT 结果相差很大,表明喉管处压力脉动规律与空化云脱落规律关联不大。同时,扩散管内压力脉动主频对应振幅基本相当,并大于喉管内压力脉动主频对应振幅。

相同的规律也出现在 $\sigma=0.51$ 工况下。如图 11 所示,在扩散管中部区域设置矩形监察框(大小为 $9 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$),按照上述方法,得到了矩形框内空化云亮度和的 FFT 结果与测压点压力值 FFT 结果,如图 12、13 所示。

图 11 矩形框设置位置示意图($p_{\text{out}}=188 \text{ kPa}$, $\sigma=0.51$)

图 12 矩形框内亮度和的 FFT 结果扩散管 3 个测压点压力值 FFT 结果($p_{\text{out}}=188 \text{ kPa}$, $\sigma=0.51$)

图 13 喉部压力值 FFT 结果($p_{\text{out}}=188 \text{ kPa}$, $\sigma=0.51$)

在此工况下,振幅最大值对应的频率均为 176.8

Hz, 表明空化云脱落主频与扩散管压力脉动主频相同。而在主频左侧的低频部分, 也出现了类似的对应情况。此低频部分正好对应着该工况下出现的较低频率的以下边脱落为主的单边脱落形式。同时, 扩散管测压孔 x_3 、 x_4 处压力脉动主频对应振幅相当, 并小于测压孔 x_2 处压力脉动主频对应振幅。而喉管处无主频, 其平均压力值在饱和蒸汽压附近。在此工况下, 空化云溃灭位置在测压孔 x_2 附近, 溃灭后引起该处局部压力增大, 并向周围传播, 在向上传播时由于主流空化云的作用而逐渐消减, 同时 x_1 处始终有初生空化云覆盖, 故而喉管处压力脉动很小。而向下游传播时无空化云阻隔, 下游压力也会出现周期性脉动, 但其脉动振幅减小。

当 $\sigma=0.26$ 时, 空化云溃灭位置主要位于文丘里管扩散管后端($p_{\text{out}}=99 \text{ kPa}$), 由于空化云发展过于充分, 从一个小区域截取矩形监察框获得的空化云亮度变化数据难以表征其脉动特征, 因此在扩散管中后端设置长条形矩形框(大小为 $88 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$)以准确反映空化云变化特征, 如图 14 所示。

图 14 矩形框设置位置示意图($p_{\text{out}}=99 \text{ kPa}$, $\sigma=0.26$)

如图 15 和 16 所示, 比较矩形框内亮度和的 FFT

图 15 矩形框内亮度和 FFT 结果与扩散管 3 个测压点压力值 FFT 结果($p_{\text{out}}=99 \text{ kPa}$, $\sigma=0.26$)

结果与文丘里管内各测压孔压力值 FFT 结果可知, 扩散管内各测压点压力脉动主频与空化云脱落主频非常吻合, 其主频接近 12 Hz , 相较于空化较弱工况下的主频非常小。而喉管处测压点压力脉动幅值很小, 相对于扩散管压力脉动幅值可以忽略。同时, 扩散管 x_4 处压力脉动幅值略小于 x_3 处, 而大于 x_2 处压力脉动幅值。喉管处压力脉动幅值很小而可以忽略, 其平均压力值在饱和蒸汽压附近。在此工况下, 空化云溃灭位置在测压孔 x_3 处下游附近, 因而 x_3 、 x_4 处压力脉动幅值较大, 由于压力波的传播受到消减, 传至上游 x_2 处压力脉动幅值减小。而 x_1 处于空化云初生位置, 总是被初生空化云覆盖, 其压力脉动幅值极小。

图 16 喉部压力值 FFT 结果($p_{\text{out}}=99 \text{ kPa}$, $\sigma=0.26$)

另外, 综合以上三个工况下的空化云脱落主频及其对应的空化数可以发现, 随着空化数减小, 空化区域增大, 空化程度逐渐加剧, 空化云脱落主频是逐渐减小的。

3 结论

本文采用高速摄像技术观测了文丘里管在空化数分别为 0.76 、 0.51 、 0.26 的三种不同状态下的空化流动现象, 分析了空化的不稳定特性。比较不同工况下空化云脱落的具体方式; 利用图像处理软件分析空化云面积变化规律; 研究空化云脱落规律和各测压点压力变化规律的关联性, 给出了空化云脱落规律与壁面压力脉动的关系, 主要结论如下:

(1) 空化云从文丘里管喉管起始段近壁面生成以后, 逐渐向下游发展, 在不同空化阶段呈周期性地以不同的方式脱落, 随着空化数的降低, 空化云脱落方式由单一的上下同时脱落向单边脱落发生转变, 而单边脱落以下边脱落为主。当空化程度非常剧烈时, 在扩散管内出现多段不连续的团状空化云。

(2) 空化云脱落规律与扩散管内 3 个不同位置的壁面压力脉动有很强的关联性, 而与喉部压力脉动关联不大。空化云脱落主频与扩散管压力脉动主频几乎完全对应, 且随着空化程度的加剧递减, 对应主频分别为 275.9 Hz 、 176.8 Hz 、 12 Hz 。

参 考 文 献

- [1] FURNESS R A, HUTTON S P. Experimental and theoretical studies of two-dimensional fixed-type cavities[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1975, 97(4): 515-521.
- [2] KUBOTA A, KATO H, YAMAGUCHI H, et al. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling tech[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1989, 111(2): 204-210.
- [3] GOPALAN S, KATZ J. Flow structure and modeling issues in the closure region of attached cavitation[J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(4): 895-911.
- [4] ARNDT R E A, SONG C C S, KJELDSEN M, et al. Instability of partial cavitation: A numerical/experimental approach[C/CD]//Symposium on Naval Hydrodynamics. 2000.
- [5] 张博, 王国玉, 黄彪, 等. 绕水翼空化非定常的动力特性[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(6): 164-169.
ZHANG Bo, WANG Guoyu, HUANG Biao, et al. Unsteady dynamics of cavitating flows around a hydrofoil[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(6): 164-169.
- [6] 张敏弟, 王国玉, 张建波, 等. 绕 Hydronautics 水翼空化云流动的试验研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(3): 424-426.
ZHANG Mindi, WANG Guoyu, ZHANG Jianbo, et al. Experimental study of cloudy cavitating flows around a hydronautics foil[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(3): 424-426.
- [7] 张敏弟, 王国玉, 董子桥, 等. 绕水翼云状空化流动特性的研究[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(1): 71-74.
ZHANG Mindi, WANG Guoyu, DONG Ziqiao, et al. Experimental study of cloudy cavitating flows around hydrofoils[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(1): 71-74.
- [8] 时素果, 王国玉, 胡常莉, 等. 不同温度水体空化水动力脉动特性的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(8): 174-181.
SHI Suguo, WANG Guoyu, HU Changli, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of cavitating flows around hydrofoil under different water temperatures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(8): 174-181.
- [9] JI Bin, LUO Xianwu, ARNDT R E A, et al. Large eddy simulation and theoretical investigations of the transient cavitating vortical flow structure around a NACA66 hydrofoil[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 68: 121-134.
- [10] SATO K, HACHINO K, SAITO Y. Inception and dynamics of traveling-bubble-type cavitation in a venturi[J]. *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu B Hen/transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part B*, 2003, 70(689): 69-76.
- [11] STUTZ B, LEGOUPIL S. X-ray measurements within unsteady cavitation[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 35: 130-138.
- [12] COUTIER-DELGOSHA O, REBOUD J L, DELANNOY Y. Numerical simulation of the unsteady behaviour of cavitating flows[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2003, 42(5): 527-548.
- [13] COUTIER-DELGOSHA O, FORTES-PATELLA R, REBOUD J L. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 125(1): 38-45.
- [14] YAZICI B, TUNCER I H, AK M A. Numerical & experimental investigation of flow through a cavitating venturi[C]//Recent Advances in Space Technologies, 2007. RAST '07. 3rd International Conference on, 2007: 236-241.
- [15] SAYYAADI H. Instability of the cavitating flow in a venturi reactor[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2010, 42(5): 3066-3076.
- [16] 严海军, 王子君, 陈燕. 文丘里施肥器空化过程高速摄像分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(10): 901-905.
YAN Haijun, WANG Zijun, CHEN Yan. High-speed photography analysis on cavitation of Venturi injector[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(10): 901-905.
- [17] CHEN G, WANG G, HU C, et al. Combined experimental and computational investigation of cavitation evolution and excited pressure fluctuation in a convergent-divergent channel[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 72: 133-140.

作者简介: 龙新平(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为喷射技术的理论及应用/流体机械及装置。

E-mail: xplong@whu.edu.cn

王炯, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为喷射技术的理论及应用。

E-mail: wangjiong@whu.edu.cn

左丹, 女, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为喷射技术的理论及应用。

E-mail: zuodanwhu@163.com

章君强, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为喷射技术的理论及应用。

E-mail: zhangjunqiang@whu.edu.cn

季斌, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向是推进器空化水动力学、喷射技术的理论及应用、空化流动。

E-mail: jibin@whu.edu.cn