

文章编号: 1006-4710(2015)01-0067-05

# 水翼的空化噪声数值预报研究

阮辉, 廖伟丽, 黄永, 赵亚萍, 赵夏青

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 以 NACA0015 水翼为研究对象, 采用 Schnerr-Sauer 空化模型和 Ffowcs-Wiliams & Hawkings 声学模型, 计算了二维水翼的空化噪声, 并对水翼的空化过程和水翼空化的噪声性能进行了分析。研究表明, 水翼空化呈现出明显的脉动性和周期性, 空化空泡云脱落的周期为 0.170 4 s, 由漩涡引起的水翼壁面附近的反向射流是诱发空化空泡形成和脱落的主要成因。通过分析各个监测点的声压脉动特性可知, 噪声在水翼头部区域的传播与主流方向一致, 没有逆向传播。在空化发展过程中, 空化区域的噪声信号有向下游叠加的趋势, 但是传播到水翼尾部流动区域时, 已经逐渐衰减完毕。

**关键词:** 水翼; 空化; 噪声; 数值模拟

**中图分类号:** TV734.1      **文献标志码:** A

## Research on cavitation noise numerical prediction of hydrofoil

RUAN Hui, LIAO Weili, HUANG Yong, ZHAO Yaping, ZHAO Xiaqing

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** With NACA0015 hydrofoil as the research objective, Schnerr-Sauer hydrofoil model and Ffowcs-Wiliams & Hawkings acoustic models are adopted to calculate the two-dimensional hydrofoil cavitation noises and to analyze the performances of hydrofoil cavitation process and hydrofoil cavitation noises. The research results indicate that hydrofoil cavitation process appears to have obvious pulsation and periodicity, and that the period of cavitation cloud falling off is 0.170 4 s. The reverse jet induced by the vortex near the wall of hydrofoil is the major cause of cavitation inception and falling off. The transmission direction of noise in the head of hydrofoil is the same with the main flow direction, and backward transmission does not happen. In the process of cavitation development, the noise signal of cavitation region has the tendency of adding to downstream, but when the noise signal spreads to the hydrofoil tail for region, it has gradually attenuated.

**Key words:** hydrofoil; cavitation; noise; numerical simulation

随着国民经济的快速发展和科学技术的迅速革新, 涉及到空化现象的学科领域越来越广, 如水轮机、水泵、高速鱼雷体、水面舰艇、潜艇、水利工程泄水建筑物乃至生物学和医学等<sup>[1]</sup>。一直以来, 由空化引起的危害阻碍了许多工程项目的发展, 特别是在水力机械领域, 空化引起的不稳定和压力脉动不但使得水力系统流量控制困难, 而且导致周围结构的振动, 更有甚者, 空化产生的宽波段的激波具有与其他部件发生共振的风险; 空泡溃灭, 内爆发射的冲

击波具有高分贝的噪声, 在许多空化实验<sup>[2-4]</sup>中, 空化发生时首先侦测到声音, 而不是观察到水泡, 这种高分贝的噪声严重影响机组的安全稳定运行。

为了消除空化引起的负面影响, 近年来, 如何准确地模拟出空化现象成为研究的热点, 而模拟的关键在于采用的空化模型和噪声模型。南京理工大学的张木等<sup>[5]</sup>比较了 Kunz 空化模型和 Sauer 空化模型模拟 NACA0015 水翼的空泡形态, 分析了初始涡、回射涡、空泡分离及空泡再生的周期性脱落过

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179152)。

作者简介: 阮辉, 女, 博士生, 研究方向为水力机械。E-mail: rh2009@163.com。

通讯作者: 廖伟丽, 女, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水力机械。E-mail: liaoweili2004@163.com。

程;江苏大学的杨敏官等<sup>[6]</sup>基于 Reynolds 平均法,采用 RNG  $k-\epsilon$  模型及 Mixture 两相流模型对超空化翼型 YS930 的各个超空化阶段在变攻角及变雷诺数工况下进行了数值模拟研究。戚定满等<sup>[7]</sup>选取不同噪声溃灭的数值模型,对单空泡溃灭的辐射噪声谱作了比较细致的分析,得到了不同模型所对应的噪声谱。蒲中奇等<sup>[8]</sup>利用 Lighthill 方程发展了双空泡溃灭的流场声辐射模型,并忽略了流动介质的压缩性,进行了数值模拟计算,得出空泡之间是相互干涉的,空泡溃灭的过程变慢且辐射噪声增强。由此可知,国内水翼空化的数值研究主要集中在非定常空化现象的模拟,水翼空化引起的噪声的数值研究还未见报道。因此本文从空化和噪声的基础理论出发,以 NACA0015 水翼为研究对象,采用 Schnerr-Sauer 空化模型和 Ffowcs-Wiliams & Hawkings 声学模型,数值计算了二维水翼的空化噪声,并对水翼的空化过程和水翼空化的噪声性能进行了分析。

## 1 研究对象

选取 NACA0015 水翼为计算模型,该水翼为对称型翼型,弦长  $L=0.05\text{ m}$ ,展向  $s=0.05\text{ m}$ ,攻角为  $8^\circ$ 。二维水翼的计算域及噪声计算点位置分布如图 1 所示,上游来流进口距翼型头部为  $3L$ ,下游去流出口距翼型尾部为  $6L$ ,两侧壁面距翼型中心各为  $2L$ 。为了采集翼型附近的声压脉动,在翼型展向中间位置的截面布置了 7 个监测点,其中  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  为靠近翼型头部壁面附近的监测点,它们的相对位置分别为  $0.1L$ 、 $0.2L$ 、 $0.3L$ 、 $0.45L$ , $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$  为翼型下游距翼型尾部的监测点,它们的相对位置分别为  $1.1L$ 、 $1.3L$ 、 $1.6L$ 。

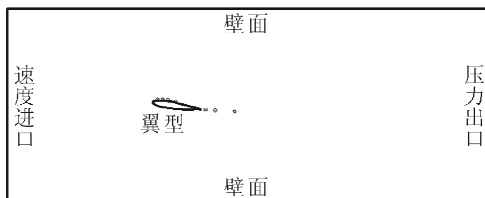


图 1 计算域及噪声计算点位置分布图  
Fig. 1 Calculation region and location of calculating points of noise

计算模型采用结构化网格,由于翼型表面和尾流区域流动形态变化较大,需要特别关注,因此将此区域的网格进行加密处理,以便比较真实地模拟复杂的流动情况,捕捉到重要的流场信息;对于其它地方适当降低网格密度,以控制整个网格数;经过网格无关性的检验,确定网格节点总数为 212 288。计算

域网格划分如图 2 所示。

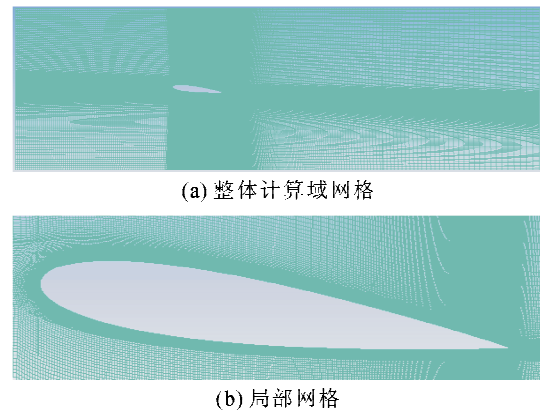


图 2 计算域网格划分

Fig. 2 Mesh distribution of the calculation region

## 2 研究方法及可行性分析

水翼的空化噪声研究是基于 FLUENT 商业软件展开的,首先进行水翼的定常空化模拟;然后在定常空化计算收敛的基础上进行水翼的非定常空化计算,时间步满足 Courant 稳定准则;最后在非定常空化计算的基础上加入噪声模块进行水翼空化噪声的计算。其中采用的湍流模型为 RNG  $k-\epsilon$  模型,空化模型为 Schnerr-Sauer 模型<sup>[9]</sup>。FLUENT 的噪声模块中,对于噪声主要利用 Ffowcs-Wiliams & Hawkings 方程进行处理,其由连续方程和 N-S 方程联合推导得出,具体形式<sup>[10]</sup>如下:

$$\frac{1}{\alpha_0^2} \frac{\partial^2 \dot{p}}{\partial t^2} - \nabla^2 \dot{p} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left\{ T_{ij} H(f) \right\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ [p_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \right\} + \frac{\partial}{\partial t} \left\{ [p_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \right\} \quad (1)$$

式中, $u_i$  表示  $x_i$  方向流体速度的分量; $u_n$  表示垂直于面  $f=0$  方向流体速度的分量; $v_i$  表示  $x_i$  方向面运动速度的分量; $v_n$  表示垂直于面  $f=0$  方向面运动速度的分量; $\delta(f)$  表示 Delta 函数; $H(f)$  表示 Heaviside 函数; $\dot{p}$  代表远场声压 ( $\dot{p} = p - p_0$ ),  $f=0$  指源面,可为物体表面或具有渗透性的非物体表面, $n_i$  为指向外域 ( $f > 0$ ) 的垂直单位矢, $\alpha_0$  代表远场的声速; $T_{ij}$  为张力。

数值求解过程中,采用有限体积法离散控制方程,采用 SIMPLEC 算法解决动量方程中速度和压力耦合求解问题。对流项离散格式中一阶迎风格式容易产生假扩散,模拟过程中采用二阶迎风格式;选用 QUICK 格式对水蒸汽相进行离散;选用二阶迎风格式对湍流输运方程进行离散。进、出口均设置

为远场边界。进流面设置为速度进口,大小为 6 m/s,方向垂直于进流面,此时雷诺数为  $3 \times 10^5$ ,流动属于湍流流动;出流面设置为压力出口,面平均压力为环境压力,用来控制空化数,本文空化数为 1.0。设置翼型物面和流场边界壁面为无滑移固体壁面。为了分析数值模拟结果的精度,将数值计算的翼型物面压力系数与 Youshihisa & Takekoshi<sup>[11]</sup> 和 Kubota<sup>[12]</sup> 等人的实验数据进行了对比,图 3 为翼型物面压力系数曲线对比图,其中压力系数计算公式为:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2} \quad (2)$$

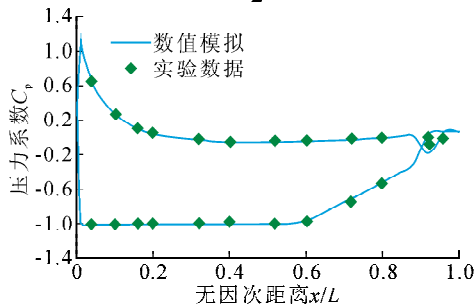


图 3 数值模拟的水翼表面压力系数与实验数据对比  
Fig. 3 Comparison between the hydrofoil surface pressure coefficient of numerical simulation and experiment data

式中,  $p$  为压力,  $p_\infty$  为远场参考压力,  $\rho$  为流体密度,  $v_\infty$  为远场参考速度。

由图 3 可知,数值模拟的水翼表面压力系数整体与实验数据比较吻合,最大误差在 0.92L 位置,该位置压力面的压力系数比实验值小 0.174,吸力面的压力系数比实验值大 0.119,在允许误差范围内,因此本文采用的数值模拟方法是可行且有效的。

### 3 结果分析

本研究首先分别对  $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $8^\circ$  及  $12^\circ$  攻角的二维水翼进行了定常空化模拟,模拟结果显示攻角为  $0^\circ$  时,水流受翼型扰动较小,没有发生空化;攻角为  $2^\circ$  时,在距翼型头部  $L/4$  位置发生轻微的空化;攻角为  $4^\circ$  时,空化程度加深,并且空化起始点向翼型头部移动;随着攻角的增大,翼型空化区域变长、变厚。从空化发展完整性考虑,选取  $8^\circ$  攻角的水翼进行非定常空化及噪声研究。

经过对二维水翼进行非定常的空化模拟后,得出了二维水翼在一个周期内空泡的初生、发展、断裂、脱落、破灭过程,如图 4 所示,其中蓝色部分为液态水,其他颜色代表不同的空泡体积分数。

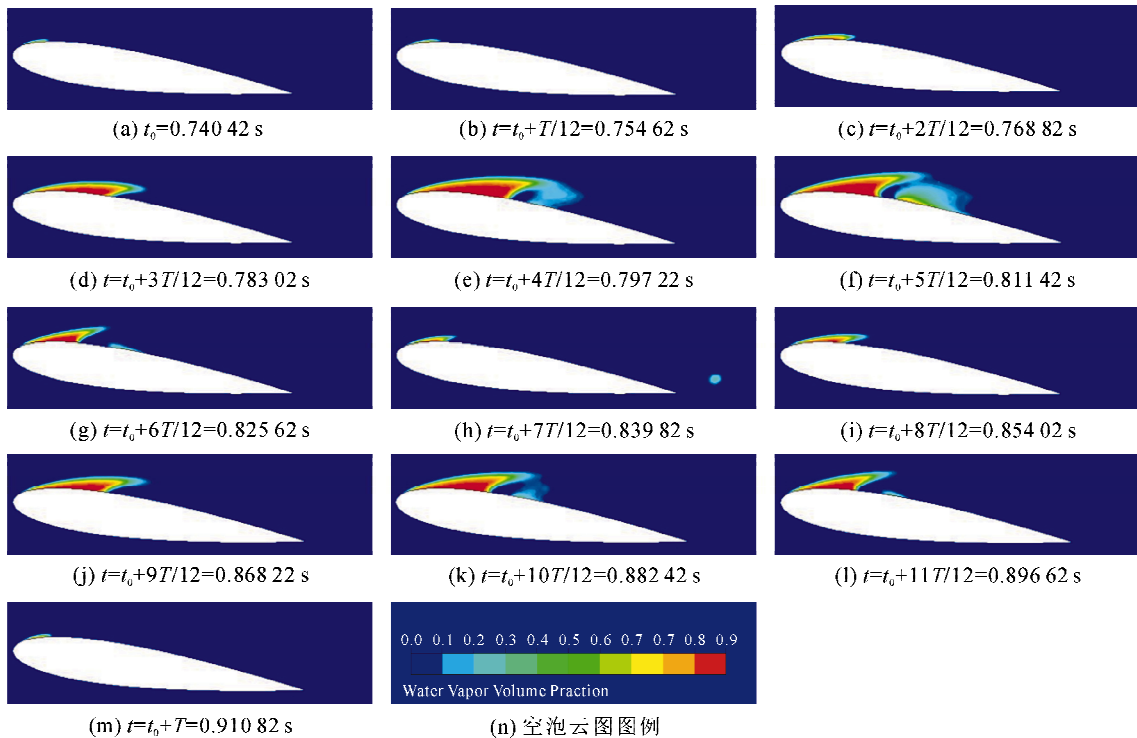


图 4 一个周期内空泡形态变化图  
Fig. 4 Cavity configuration in one period

由图 4 可知,当  $t=0.74042$  s 时,在水翼头部开始出现较小面积的附着型片状空泡;随着流动的发展,片状空泡的厚度和长度都逐渐增加,当空泡长度小于翼型弦长的 40% 时,空泡的形状相对比较稳定,

如图 4(d) 所示;随着空化发展,空泡长度超过弦长 40% 时,空泡尾部区域开始出现波动,表现出非定常特性,而且空泡长度越长,空泡尾部波动的幅度越大,如图 4(e) 所示;空化继续发展,空泡尾部区域开始出

现断裂并分成两个部分,如图 4(f)、4(g)所示,分别称为空泡主体和空泡附体,空泡主体继续残留在水翼头部表面并逐渐减小,脱落的空泡附体在主流作用下向水翼尾部游动并逐渐减小,如图 4(h)所示;随着时间的推移,空泡附体开始脱离水翼表面向水翼尾部区域移动,在水翼尾部高压区破灭;最后,水翼头部的附着空泡又出现逐渐增大、减小的非定常过程,如图 4(i)、4(j)、4(k)、4(l)所示。当  $t=0.918\ 02\ \text{s}$  时,新的空化空泡生长周期又开始了,如图 4(m)所示。可以得出水翼空化空泡云脱落的周期  $T$  为  $0.170\ 4\ \text{s}$ 。

为了详细分析空化形成的原因和机理,对不同时刻的流动结构进行了研究,图 5 给出了一个空化周期内 5 个关键时刻的翼型表面速度矢量分布。在  $t_0$  时刻(图 5(a)所示),由于翼型尾部的漩涡,导致水翼壁面附近的流速与主流速度方向相反,并且主流

速度明显大于水翼壁面附近流速,这一现象被称为反向射流,此时翼型头部开始发生空化;当空泡长度接近弦长 40%时( $t=0.783\ 02\ \text{s}$ ),水翼表面产生一个新的低强度、小尺寸顺时针漩涡,气核在漩涡中心的低压区作较长时间的停留,从而促进空化继续发展,如图 5(b)所示;当空泡长度超过弦长 40%时( $t=0.797\ 22\ \text{s}$ ),空泡尾部区域开始出现波动,表现出非定常特性,在来流的推动下,小漩涡向下游移动并扩大,片状空化空泡逐渐长大,如图 5(c)所示;漩涡扩大到整个水翼尾部时( $t=0.839\ 82\ \text{s}$ ),开始分裂为两个小的漩涡(图 5(d)所示),此时空泡发生断裂和脱落;空泡脱落后,水翼壁面附近又产生新的顺时针漩涡,继续促进空化发展,如图 5(e)所示。由此可见,由漩涡引起的水翼壁面附近的反向射流是诱发空化空泡形成和脱落的主要成因。

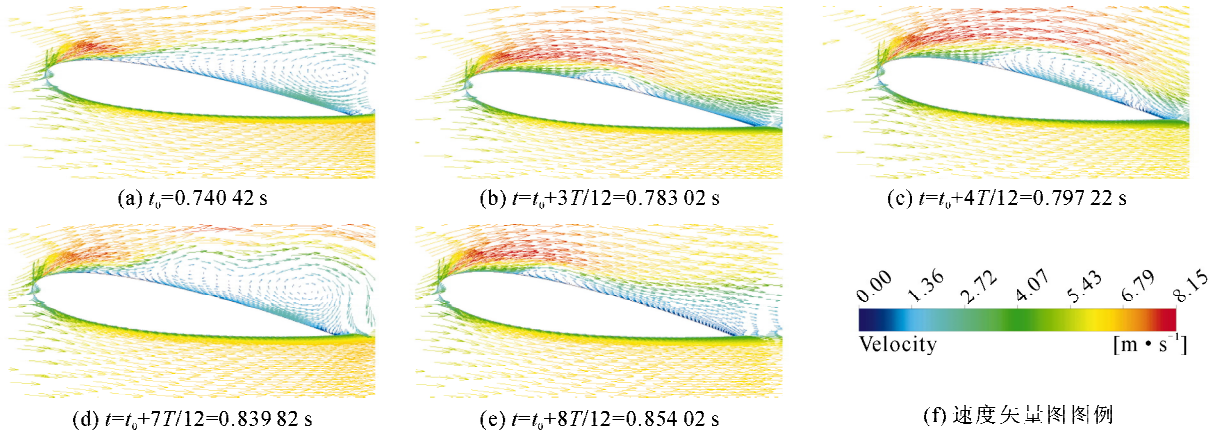
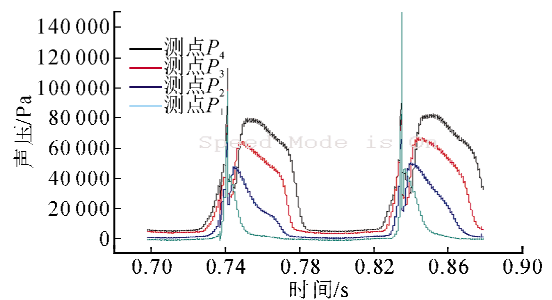


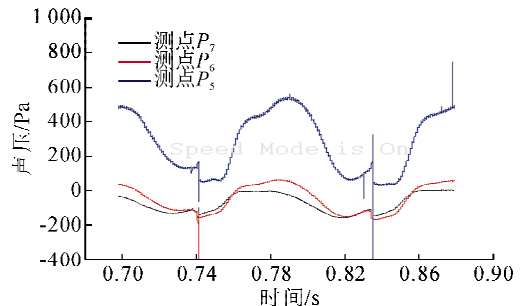
图 5 空化周期内不同时刻翼型表面速度矢量分布

Fig. 5 The velocity vector distribution of hydrofoil's surface at different time in one cavitating period

在二维水翼空化的发展过程的基础上,加入噪声模块,模拟出了水翼发生空化时产生的噪声信号。图 6 给出了各个监测点(即声信号接收点)在一个空化空泡生长周期时间内的声压脉动图,可以看出计算的收敛性比较好,声压随着空化空泡的初生、发展、断裂、脱落、破灭,呈周期性脉动。由图 6(a)可知,空化初生时( $t=0.740\ 42\ \text{s}$ ),靠近翼型头部壁面附近监测点( $P_1、P_2、P_3、P_4$ )的声压开始增大,随着空化的发展,监测点的声压逐渐增大到最大值,但是到达最大值的时刻不一致,越往下游的监测点,出现最大值的时间越靠后,当  $P_4$  测点的声压达到最大值时, $P_1、P_2、P_3$  的声压已经衰减,说明噪声的传播方向与主流方向一致,没有逆向传播。而且, $P_1、P_2、P_3、P_4$  测点的声压幅值呈现递增的趋势,这说明空化发展过程中,空化区域的噪声信号有向下游叠加的趋势。当空泡脱落后,靠近翼型头部壁面附近的监测点的声压都已经衰减到初始值。 $t=0.839\ 82\ \text{s}$  时,



(a) 翼型附近的测点



(b) 翼型尾部的测点

图 6 各个监测点的声压脉动图

Fig. 6 Acoustic pressure pulse at each receiver point

靠近翼型头部壁面附近的监测点的声压又突然增大,重复前一个变化过程,这是由翼型头部的附着空泡的生长引起的。图 6(b)给出了翼型尾部的监测点( $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ )的声压脉动图,可以看出声压的变化规律完全相同,并且随着离声源距离的增加,声压幅值呈单调性的减小,没有表现出水翼头部测点的规律,而且声压值与水翼头部测点的声压值相比,差了两个数量级,这说明噪声信号传播到水翼尾部流动区域时,已经逐渐衰减完毕。

#### 4 结 论

1) 二维水翼模拟结果表明,水翼空化的非定常过程包括空化初生、发展、断裂、脱落、破灭,呈现出明显的脉动性和周期性,空化空泡云脱落的周期为 0.170 44 s;

2) 通过分析不同空化时刻的流动结构可知,由漩涡引起的水翼壁面附近的反向射流是诱发空化空泡形成和脱落的主要成因;

3) 噪声在水翼头部区域的传播与主流方向一致,没有逆向传播。在空化发展过程中,空化区域的噪声信号有向下游叠加的趋势,但是传播到水翼尾部流动区域时,已经逐渐衰减完毕。

#### 参考文献:

- [1] 武新华,王晓伟. 离心泵气蚀故障声发射监测试验研究[J]. 振动工程学报,2004,17(S1):484-486.  
Wu Xinhua, Wang Xiaowei. Experimental research on diagnosis method in the cavitating centrifugal pump by acoustic emission[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004,17(S1):484-486.
- [2] 王勇,刘厚林,袁寿其,等. 离心泵非设计工况空化振动噪声的试验测试[J]. 农业工程学报,2012,28(2):35-38.  
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. Experimental testing on cavitation vibration and noise of centrifugal pumps under off-design conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(2):35-38.
- [3] 赵越,刘智良,郭全宝. 确定模型水泵水轮机水泵工况叶片初生空化的声学方法研究[J]. 大电机技术,2011,(1):39-45.  
Zhao Yue, Liu Zhiliang, Guo Quanbao. A acoustics method of judging inception cavitation on runner blade of model pump turbine at pump condition[J]. Large Elec-

tric Machine and Hydraulic Turbine, 2011,(1):39-45.

- [4] 牛争鸣,李建中. 渥奇段的空化噪声与空化特性[J]. 西安理工大学学报,1997,13(2):140-145.  
Niu Zhengming, Li Jianzhong. The cavitation noise and characteristics in the paraboloid of spillway tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1997,13(2):140-145.
- [5] 张木,谭俊杰,易文俊,等. 绕水翼非定常云空化流动的大涡模拟[J]. 南京理工大学学报,2012,36(2):314-319.  
Zhang Mu, Tan Junjie, Yi Wenjun, et al. Large eddy simulation of unsteady cloud cavitation flow around underwater hydrofoil[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012,36(2):314-319.
- [6] 杨敏官,尹必行,康灿. 绕水翼超空化流场的数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2012,33(1):39-43.  
Yang Minguan, Yin Bixing, Kang Can. Numerical simulation of supercavitating flow around hydrofoil[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2012,33(1):39-43.
- [7] 戚定满,鲁传敬,何友声. 空化噪声谱特性研究[J]. 振动与冲击,1999,18(3):32-36.  
Qi Dingman, Lu Chuanjing, He Yousheng. An investigation on the spectra of bubble noise[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999,18(3):32-36.
- [8] 蒲中奇,张伟. 双空泡溃灭及空化噪声的建模[J]. 清华大学学报,2005,45(11):1450-1452.  
Pu Zhongqi, Zhang Wei. Noise generation during the simultaneous collapse of two bubbles[J]. Journal of Tsinghua University, 2005,45(11):1450-1452.
- [9] Sauer J, Schnerr G H. Development of a new cavitation model based on bubble dynamics[J]. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2001,81:561-562.
- [10] Singhal A K, Athavale M, Li H Y, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002,124(3):617-624.
- [11] Youshihisa Takekoshi, Takafumi Kawamura. Comparison of cavitation models for simulation of cavitating flow over a hydrofoil [C] //Netherlands; Sixth international symposium on cavitation, 2006:154-161.
- [12] Kubota A, Kato H, Yamaguchi H. A new modeling of cavitating flows: a numerical study of cavitation on a hydrofoil section [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992,240:59-96.

(责任编辑 王卫勋)