排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 11 月 Nov. 2017 | 第 35 卷 第 11 期 Vol. 35 No. 11

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0157

非定常空化流致噪声的数值模拟

朱明明，黄彪，王国玉，王宁
（北京理工大学机械与车辆学院，北京 100081）


朱明明

摘要：采用计算流体力学与声学边界元法相结合对绕水翼非定常空化流动的负载噪声进行计算，同时基于球空泡理论的脉动体积法预测了空泡噪声.研究结果表明：无空化发生时，负载噪声以低频线谱特性为主，声波基频与尾涡脱落频率基本一致，线谱峰值发生于低阶谐频处；空化发生时，相比于负载噪声的线谱成分，连续谱增强较为显著，且负载噪声的总声压级相比无空化时有所增大，并且空泡噪声成为最主要噪声源，辐射噪声频谱呈宽谱特性；空泡噪声功率谱密度的第一和第二个峰值频率分别与空化脱落频率和尾涡脱落频率相对应，而空泡噪声的声能量密度集中在相对较高的频带范围内，这可能是由于云状空化阶段空穴尾部伴随着多尺度的空化泡生长脱落行为所致.

关键词：水翼；非定常空化流动；空泡噪声；负载噪声；数值模拟
中图分类号：S277.9；TV734.1　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2017)11-0933-08

朱明明，黄彪，王国玉，等. 非定常空化流致噪声的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(11)：933-940.

ZHU Mingming，HUANG Biao，WANG Guoyu，et al. Numerical investigation on noise induced by unsteady cavitating flow over hydrofoil[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2017，35(11)：933-940.(in Chinese)

Numerical investigation on noise induced by unsteady cavitating flow over hydrofoil

ZHU Mingming，*HUANG Biao*，*WANG Guoyu*，*WANG Ning*
(School of Mechanical Engineering，Beijing Institute of Technology，Beijing 100081，China)

Abstract：The loading noise of unsteady cavitating flow around a hydrofoil is calculated by combining CFD and acoustic boundary element method，meanwhile，the corresponding cavitation noise is predicted by bubble volume pulse method in spherical cavitation bubble theory. The results indicate that non-cavitation loading noise is mainly subject to a linear spectrum at low frequency. Moreover，the acoustic fundamental frequency is basically the same as the vortex shedding frequency，and the spectrum peaks are at its low-order harmonics. However，when cavitation occurs，the continuous spectrum is significantly enhanced compared with the linear composition，and the overall acoustic pressure level of loading noise is increased compared with that of non-cavitation. In addition，the bubble noise becomes the main noise source with a broad spectrum. The first and second peak frequencies of the acoustic power spectrum density are consistent with the cloud cavitation and the trailing vortex shedding frequencies，respectively. Nevertheless，the acoustic power density of bubble noise is concentrated in the higher frequency bands，which may be resulted from the growth and shedding behavior of multi-scale bubbles behind the tail of cavity.

Key words：hydrofoil；unsteady cavitating flow；bubble noise；loading noise；numerical simulation

收稿日期：2016-07-04；**修回日期**：2016-09-06；**网络出版时间**：2017-10-31
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20171031.2350.008.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51306020)
作者简介：朱明明(1986—)，男，安徽淮北人，硕士研究生(zhumingming6@163.com)，主要从事流体机械空化噪声研究.
黄彪(1985—)，男，湖北武汉人，副教授，博士(huangbiao@bit.edu.cn)，主要从事水力机械内部空化流动研究.

空化是在液体内部或液固交面上发生的液体与其蒸汽的相变过程,在船舶工程、水中兵器、水利工程、水力机械等领域,非定常空化现象及其诱导的流致噪声受到人们越来越多的重视和关注[1]. 通常,低速无空化流场的流致噪声以负载噪声为主. 但空化发生时,流致噪声除了包含负载噪声外,空泡的发展和溃灭过程产生噪声成为主要的噪声源. 空化噪声会降低水下目标的隐身性能,是水下目标的重要噪声源[2],也是识别水下目标的重要判据. 因此,研究非定常空化流致噪声具有重要意义.

流致发声主要由流场中的非定常性引起,这种非定常性包括各种尺度的旋涡及湍流引发的脉动. 目前工程应用中的辐射声场计算较为广泛的方法多采用基于 Fowcs Williams – Hawkings(FWH)方程的声类比方法(包括 porous FWH 和 Kirchhoff – FWH 方程). 数值预测绕流体负载噪声,首先通过数值计算获得绕流体的流场特性,然后将得到的物体表面脉动压力分布作为声源项,利用声类比方法计算其辐射声场. 国内外很多学者开展了相关方面的数值研究,SEOL 等[3-4]应用面元法和 FWH 方法对非均匀流场中螺旋桨的无空化噪声和空化噪声进行了数值研究. 孙红星等[5]结合非定常升力面理论和 FWH 方程方法计算了螺旋桨的低频离散谱噪声. 值得注意的是,升力面理论和面元法都是建立在势流理论的基础之上. 近年来,随着 CFD 技术的不断发展,基于黏性流理论求解 N – S 方程组的方法已经被广泛应用,使得对一些复杂流动预测精度得到提高. 高霄鹏等[6]采用 SST $k-\omega$ 湍流模型并以 Lighthill 声类比理论为基础,研究了水面舰艇绕流场的流噪声辐射特性. 张漫[7]采用 Reliable $k-\varepsilon$ 湍流模型计算了螺旋桨水动力性能,并采用声类比方法对无空泡低频离散谱噪声进行了数值预测.

对于空化声学特性的研究,最初大多是基于单个理想球形空泡进行的. 黄景泉[8]在基本声学假设下,对孤立空气 – 水蒸汽空泡从起始到溃灭阶段的噪声进行了分析,结果表明空泡声辐射能量集中在溃灭阶段,空泡群的声功率等于单空泡辐射能量的平均值与每秒溃灭空泡数的乘积. 空泡的大小对应着不同的噪声频率,较大空泡其噪声频率较低. 戚定满等[9]利用边界元法计算了单空泡演变并分析了噪声谱特性. 蒲中奇等[10]对双空泡溃灭及其声辐射规律进行了研究. 然而实际空泡的溃灭是复杂的多空泡及空泡云综合作用的随机过程. 对于群空泡的噪声问题,时域数值预测主要有 3 种方法:基于声类比拟理论的 FWH 方程方法、基于单气泡理论的声压叠加法和基于球空泡理论的脉动体积法. 胡建[11]采用低阶面元法预测了螺旋桨的空泡性能并结合 FWH 方程方法预测了螺旋空泡噪声. 王国栋[12]采用空化黏流理论结合 FWH 方程方法计算了螺旋桨的辐射噪声. 朱志峰[13]采用基于单气泡理论的声压叠加法计算并分析了螺旋桨的空泡噪声特性,该方法通过各空泡体积脉动引起的远场声压进行叠加来预测远场噪声. 杨琼方等[14]采用空化黏性 CFD 瞬态模拟和脉冲球形气泡声理论相结合的方法预测了非均匀伴流场中螺旋桨的空泡噪声,其空泡体积脉动规律采用经验公式得到. 况贶等[15]采用面元法结合球空泡理论的脉动体积法计算了螺旋桨空泡噪声,并与另外 2 种方法进行对比,验证了球空泡体积法的可信性. 目前对空化噪声辐射特性的研究,可参阅的文献大多集中在螺旋桨空化噪声方面,公开发表的基于水翼模型的空化噪声研究相对较少. 阮辉等[16]采用 Schneer – Sauer 空化模型和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对 NACA0015 水翼空化进行了数值研究,并采用 FWH 方程方法预测了空化噪声.

文中旨在对非定常空化流致噪声进行数值模拟研究,采用大涡模拟与 Kubota 空化模型相结合的方法对绕水翼非定常空化流动进行数值计算,并与试验结果进行对比验证,在此基础上分别进行负载噪声和空泡噪声预测. 对于负载噪声的计算采用计算流体力学与声学边界元法相结合,而空泡噪声计算则是采用基于球形气泡辐射声理论的脉动体积法.

1 计算模型及边界条件

以 Clark – Y 型水翼为研究对象,翼型弦长 c = 70 mm,厚度比为 11.7%,图 1 给出了计算区域及边界条件.

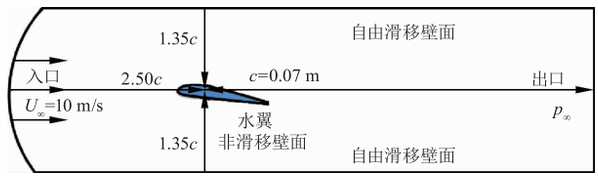


图 1 计算模型及边界条件

Fig. 1 Computational model and boundary conditions

计算域整体沿展向拉伸 1 mm 并在前、后面采用对称面边界条件以模拟无界流场的自由流. 入口端距离前缘为 2.50c,出口距离尾缘为 5.00c,上下

自由滑移壁面距翼型中心均为 1.35c. 整体计算域采用分块结构化网格划分,翼型前端采用 c 型网格并对翼型前缘迎流面及近壁区域进行网格加密,全域网格数约为 4.8×10^5. 时间差分格式选择二阶向后欧拉格式,空间差分格式选择二阶迎风格式,计算 Y^+ 取值约为 1,并保证平均 CFL 数小于 5. 计算采用速度入口与压力出口边界条件,大小与试验值保持一致,即入口速度 $U_\infty=10$ m/s,入流攻角 $\alpha=8°$,雷诺数 $Re=7.0\times10^5$. 通过改变不同出口压力来实现预定工况. 非稳态计算的时间步长取为 1.0×10^{-4} s,其对应声学响应的最大计算频率为 5 kHz. 声监测点位于距离翼型前缘点 1.4 m(20.00c)处.

定义空化数 σ 为

$$\sigma=\frac{p_\infty-p_v}{0.5\rho U_\infty^2},\tag{1}$$

式中:p_∞ 为远场参考压力;p_v 为 25 ℃时水的饱和蒸气压,取值为 3 169 Pa;ρ 为水的密度,取 998 kg/m^3.

2　计算方法及数学模型

流致噪声产生于流动中的扰动传播,无论扰动是由于物体本身还是流动造成的,均会产生压力波动,并作为声源向外传播. 声源类型主要包括单极子声源、偶极子声源以及四极子声源. 非定常空化流致噪声分量包括:水翼附面层和旋涡脱落辐射出高频噪声,等价于四极子源;翼型周围非均匀流场诱导的翼型表面非定常脉动作用力,辐射出低频线谱噪声,由脉动湍流场诱导的翼型表面非定常脉动作用力,辐射出低频连续谱噪声,二者共同构成了负载噪声,可等价于偶极子源;由空泡发展溃灭引起的噪声,等价于单极子源. 翼型排开一定体积的水引起的厚度噪声,可等价于单极子源. 其中,负载噪声与空泡噪声是流致噪声的主要部分.

利用 FWH 声类比方法求解负载噪声的关键在于准确获得绕流体表面非定常压力分布. 对于单极子的空泡噪声预测,关键在于空化体积脉动的准确模拟. 二者均建立在非定常流场的准确模拟基础之上,在本研究中,应用大涡模拟与 Kubota 空化模型相结合的方法进行非定常空化流动计算,详细的计算方法和数值模型见文献[17].

2.1　负载噪声计算方法

以 FWH 声类比拟方程为基础的流致噪声预测方法,可以表达声场中单极子、偶极子和四极子等基本解的分布. 方程形式由连续性方程与 N－S 方程联合导出,即

$$\frac{\partial^2p'}{\partial t^2}-c^2\frac{\partial^2p'}{\partial x_i^2}=\frac{\partial^2T_{ij}}{\partial x_i\partial x_j}-\frac{\partial}{\partial x_i}\left[P_{ij}\delta(f)\frac{\partial f}{\partial x_j}\right]+\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho_0u_i\delta(f)\frac{\partial f}{\partial x_j}\right],\tag{2}$$

式中:p'为声压,$p'=p-p_0$;$\delta(f)$ 为 Dirac－δ 函数;T_{ij} 为 Lighthill 应力张量,$T_{ij}=\rho u_iu_j+P_{ij}-c^2\rho\delta_{ij}$,$P_{ij}=p\delta_{ij}-\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right)$.

式(2)右侧 3 项分别表示四极子声源项、偶极子声源项、单极子声源项. 研究中,假定翼型为薄翼刚性壁面,且无体积脉动,故单极子声源项只有空泡体积脉动. LIGHTHILL[18] 指出:流场中四极子声源与偶极子声源强度之比正比于马赫数的平方,而相比于水中声速,水翼绕流为相对低速流动,其四极子声源强度远小于偶极子声源. 因此在本研究中,忽略了四极子声源.

获得翼型表面压力脉动解后,将此脉动压力导入声学软件 Virtual. Lab Acoustics,应用式(3)在声学网格上转换成声辐射压力,即声载荷,并利用快速傅里叶变换(FFT)将流场中时域脉动信号变换成频域信号后,从而获得流致噪声辐射场中的偶极子声源边界条件.

$$p_{\text{in}}=\int_S p(y)\frac{\partial G(x,y)}{\partial n_y}\mathrm{d}S_y,\tag{3}$$

式中:p_{in}为辐射声压;$p(y)$为边界上的流体脉动压力;$G(x,y)$为拉普拉斯方程的格林函数,表示在流场中固体表面 S 上 y 处的点声源于 τ 时刻发出的声音在 t 时刻传至 x 处的声压;S_y 为固体表面积分区域;n_y 表示在固体表面 S 上 y 处的外法线向量.

计算中,待非定常流场计算进入动稳定后,连续采集 1 000 个时间步的壁面压力脉动作为负载声源项,并进行远场声辐射特性分析. 采用的声学边界元网格如图 2 所示,参考声压为 1.0×10^{-6} Pa,水中声速为 1 497 m/s. 从声源网格节点向声网格节点之间的数据传递使用“多对一”的守恒型插值方式完成,从而在节省计算资源的同时提高声场计算精度.



图 2　声学边界元网格

Fig. 2　Grid for acoustic boundary element method

2.2 空泡噪声计算方法

空泡噪声的低频成分主要由空化体积脉动产生,属于单极子源,而高频成分源于空泡的溃灭及其产生的冲击波. 由于实际空泡溃灭过程的模拟非常困难,目前仍很难对高频成分进行数值预测,且其声压级相比低频成分较低[3],因此本研究主要考虑空化噪声的低频成分.

计算中,利用 Lighthill 方程可推导出小脉动单极子声源辐射声压的一般表达式,即式(2)中仅存在单极子源项时的解为

$$p'(r,t)=\frac{\rho}{4\pi r}\frac{\mathrm{d}^2V}{\mathrm{d}t^2}, \tag{4}$$

式中:p 为声源密度;r 为监测点到声源中心距离;V 为声源体积.

若将所有翼型周围空化范围等价于等体积的体积源,将声源中心固定在翼型中心,则通过非定常空穴体积脉动规律代入式(4)可得空化状态下任意测点的声压.

将空化区域转化为等体积的球形空泡,将空泡的真实表面转化为球形空泡的虚拟表面,运用理想空泡的噪声计算模型预测远场空泡辐射的噪声[11]. 本研究提取空化体积脉动信息的具体方法为:假设一个单元控制体的空泡体积分数为 a_i,其单元控制体的体积为 V_i,则在此单元控制体中的空泡体积为 V_ia_i,整个空化范围的空泡体积则为 $\sum V_ia_i$,其中 $\sum$ 表示在选定的区域内对总网格单元求和.

3 结果与讨论

3.1 无空化流致噪声分析

图3和图4分别给出了空化数 $\sigma=2.0$ 时,数值计算得到的瞬态时均速度场和时均涡量场,可以看出:在水翼尾缘处,存在周期性的涡结构产生、发展、生长和脱落过程,并因此导致壁面压力的周期性脉动,从而使得翼型的升力系数、阻力系数发生周期性变化.

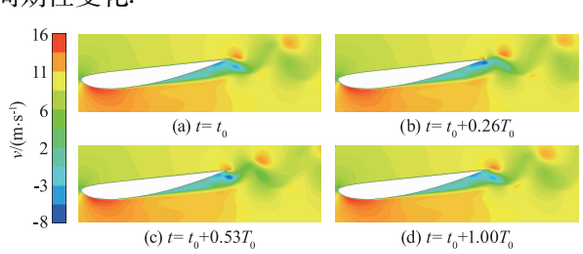


图3 瞬态时均速度分布

Fig. 3 Unsteady velocity distribution

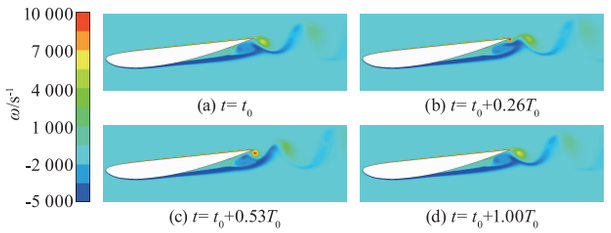


图4 瞬态时均涡量分布

Fig. 4 Unsteady vorticity distribution

图5a为水翼的升力和阻力系数变化曲线,可以看出:时均升力系数 C_L 和时均阻力系数 C_D 分别为0.915和0.071,时均升力系数与文献[19]的计算结果基本一致. 图5b通过对升力系数曲线进行频谱特性分析,其中纵坐标轴 *PSD* 表示功率谱密度,可以看出,其主导频率与尾涡脱落频率一致,约为292.9 Hz,进而可知尾涡脱落周期约为34 ms.

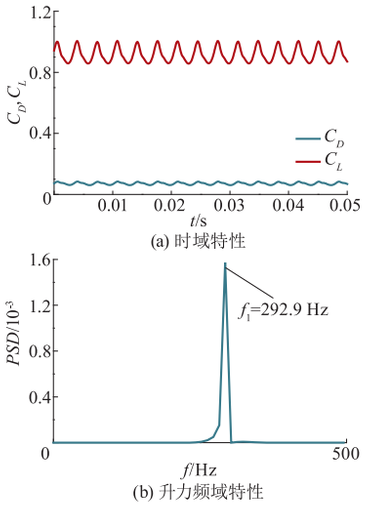


图5 无空化翼型水动力特性

Fig. 5 Unsteady lift and drag of hydrofoil in non-cavitation state

无空化条件($\sigma=2.0$)下,翼型周围负载噪声的声压 L_p 幅值分布如图6所示,可以看出:受来流攻角的影响,声指向性相对于翼型中心弦线呈“8”字型对称,在整个计算频率范围内都表现出明显的整体偶极子特性.

图7为无空化条件($\sigma=2.0$)下,在监测点处,由负载声源引起的声压级频谱响应计算结果,可以看出:负载声源辐射的噪声具有明显的低频线谱特性,声波基频约为290 Hz,与尾涡脱落频率基本一致;线谱峰值位于谐波处,这与 GERRARD[20] 关于圆柱绕流气动噪声试验所得结论一致,表明了文中计算方法的正确性.

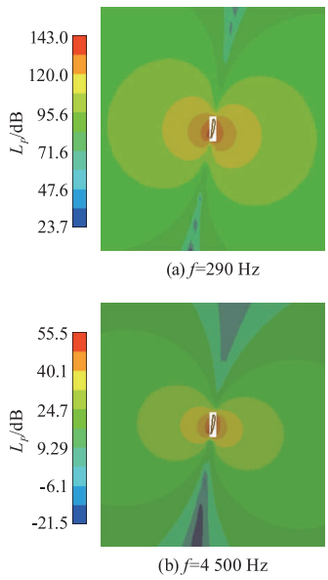


图 6　无空化负载噪声声压幅值频谱分布

Fig. 6　Pressure amplitude distribution of loading noise in non-cavitation state

根据总声压级计算公式,

$$L_{poverall}=10\log\left(\sum 10^{0.1L_p(i)}\right), \tag{5}$$

其中 $L_p(i)$ 为频率为 i 处的声压级,计算可得 3 kHz 内该工况下的总声压级为 53.41 dB.

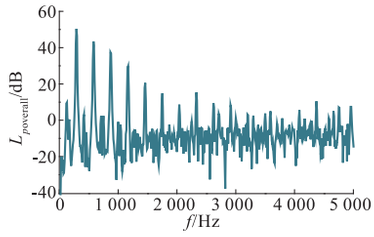


图 7　无空化负载噪声辐射频谱图

Fig. 7　Frequency spectrograms of loading noise in non-cavitation state

3.2　非定常空化流致噪声分析

根据空化形态,空化可分为 4 类,即随着空化数的降低,依次出现初生空化、片状空化、云状空化和超空化[21]. 云状空化阶段具有强烈的非定常性,伴随着大量的不同尺度空泡构成的空泡群的脱落和破灭,引起强烈的噪声、振动[22],因此文中仅针对云状空化阶段开展非定常空化流致噪声分析.

图 8 为数值计算得到的云状空化($\sigma=0.8$)流场结构准周期性演变过程,并与试验结果进行对比,图中各小图从左至右分别为试验空穴状态、数值空穴状态、涡量分布. 试验在北京理工大学循环水洞中进行,水洞简图见文献[23],其基本结构包括收缩段、试验段、扩散段,弯管段,回水管和进水管. 水洞试验段呈长方体型,尺寸为 700 mm × 70 mm × 190 mm,水洞收缩段长度为 1 513 mm,扩张段长度为 1 043 mm. 试验中,通过一台交流变频器调节水流速度,控制精度为 0.01 Hz,并通过一台真空泵控制系统中的压力,可调范围:0 ~ 0.095 MPa,控制精度为 0.005 MPa. 试验段最大流速为 20.00 m/s,稳定速度为 4.68 ~ 12.78 m/s,最小空化数为 0.3.

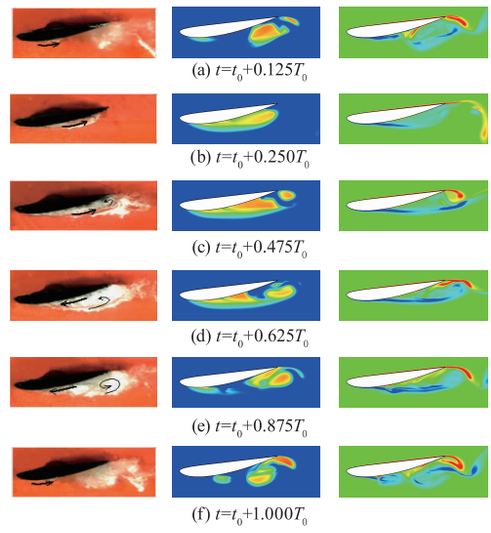


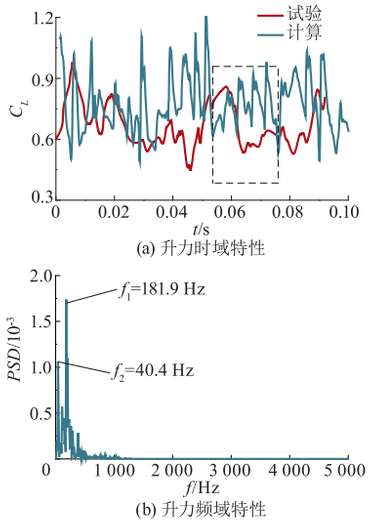
图 8　云状空化流场结构

Fig. 8　Flow structure in cloud cavitation condition

由图 8 可以看出:数值计算和试验结果所表现出的非定常空化发展过程基本一致;在 $t=t_0+0.125T_0$(T_0为云空化生长脱落周期)时刻,翼型前缘形成透明状附着型空化,并随时间推移不断向尾缘生长,空泡厚度和长度不断增大;在 $t=t_0+0.475T_0$时刻,附着型空穴在吸力面上达到最大长度和最大厚度,并开始在空穴尾部产生逆时针的空化旋涡;在 $t=t_0+0.625T_0$至 $t_0+0.875T_0$阶段,在紧贴壁面的区域内诱导了一股持续向上运动的反向射流,水翼尾部的水汽混相区域逐渐形成并扩大,而透明状的汽相空穴区域则逐渐缩小;在空穴前缘附近,反向射流与主流相遇,随即产生了空穴的断裂和大尺度空泡的旋涡脱落.

在云空化阶段,翼型的升力和阻力取决于尾涡结构以及空化结构的共同作用. 图 9 给出了云状空化状态下水翼的升力系数变化曲线,可以看出,时均升力系数C_L 和时均阻力系数 C_D 分别为 0.769 和 0.114. 通过对计算所得升力系数曲线进行频率分析,表明云空化生长脱落频率为 40.4 Hz,尾缘空化涡旋结构的脱落频率为 181.9 Hz,相应的云空化生

长脱落频率约为24.75 ms,尾缘涡脱落频率为55 ms,详细的分析方法见文献[19].



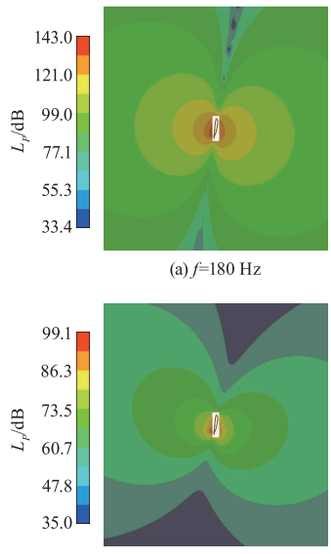
(a) 升力时域特性

(b) 升力频域特性

图9 云状空化时翼型水动力特性

Fig. 9 Unsteady lift of hydrofoil in cloud cavitation condition

云状空化下,翼型周围负载噪声的声压幅值分布如图10所示,可以看出:相比于无空化状态,声指向性在低频段相对于翼型中心弦线仍然具有较强的整体偶极子特性(见图10a),但在相对较高的某些频率下将发生一定的变化(见图10b).



(a) f=180 Hz

(b) f=4 520 Hz

图10 云空化负载噪声声压幅值频谱分布

Fig. 10 Pressure amplitude distribution of loading noise in cloud cavitation

图11为在云状空化阶段,声检测点处由负载声源引起的声压级频谱响应计算结果,可以看出,相比负载噪声的线谱成分,连续谱成分增强较为显著,3 kHz频率范围内的负载噪声总声压级为62.08 dB.通过图8和图4涡量分布对比,研究认为导致负载噪声这种频谱特性变化的主要原因在于:空化的发生,有效地促进了涡旋结构的产生,从而加剧了流场结构的非定常特性[24],使得脉动湍流场对翼型的作用增强,进而导致连续谱成分增强较为显著.

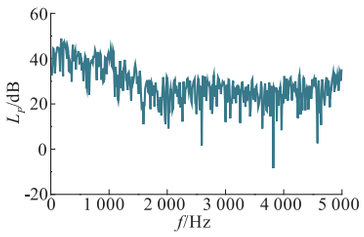
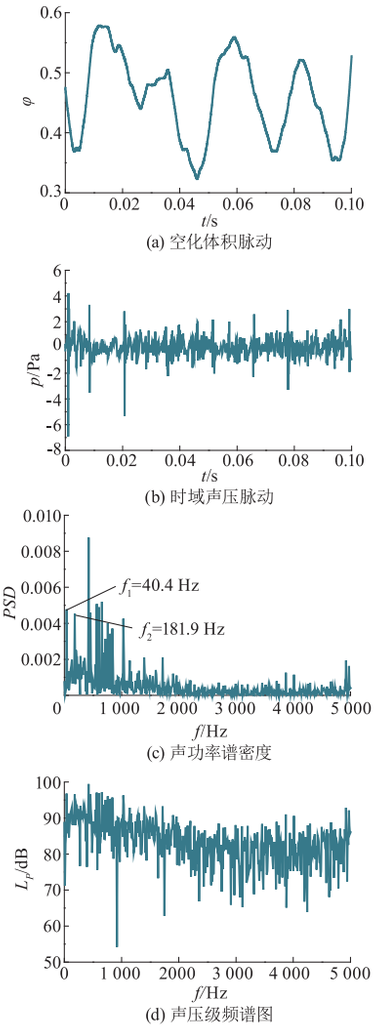


图11 云状空化负载噪声声压级频谱图

Fig. 11 Frequency spectrograms of loading noise in cloud cavitation

图12为σ=0.8时的空化体积脉动引起的单极子源在同一位置处辐射的噪声特性.



(a) 空化体积脉动

(b) 时域声压脉动

(c) 声功率谱密度

(d) 声压级频谱图

图12 云状空化空泡噪声辐射特性

Fig. 12 Radiation characteristics of bubble noise in cloud cavitation

由图 12 可以看出:受空化体积准周期性变化(见图 12a)影响,声压变化亦呈准周期性(见图 12b);在图 12c 中,第一个峰值位置频率 f_1 与云空泡生长脱落频率一致,第二个峰值位置频率 f_2 与尾缘涡结构脱落频率一致,然而,声能量密度主要集中在更高的频带(424.4 ~ 838.7 Hz)内,这可能是由于云状空化阶段空穴尾部伴随着多尺度的空化泡生长脱落行为所致;图 12d 与图 11 对比,可明显看出空泡噪声已成为主要噪声源.

4　结　论

采用计算流体动力学与声学仿真相结合的方法对绕水翼非定常空化的负载噪声进行计算,并基于球空泡理论的脉动体积法预测了空泡噪声,得到如下结论:

1) 在无空化阶段,负载噪声以低频线谱成分为主,声波基频与尾涡脱落频率基本一致,线谱峰值位于低阶谐波处,且从低频到高频呈近似线性规律减小.

2) 在云状空化阶段,负载噪声的线谱成分受到抑制,连续谱特性增强,且其声压级相比无空化有所增加,此时,空泡噪声成为主要噪声源,辐射频谱能反映出较多的流场信息,空泡噪声的功率谱密度第一个峰值频率与云空泡生长脱落频率一致,第二个峰值频率与尾缘涡结构脱落频率一致. 然而,声能量密度主要集中在更高的频带范围内,这可能是由于云状空化阶段空穴尾部伴随着多尺度的空化泡生长脱落行为所致.

参考文献(References)

[1] 潘森森, 彭晓星. 空化机理[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.

[2] 刘竹青, 陈奕宏, 熊紫英, 等. 螺旋桨空化噪声时域和频域特征研究[C]//第十四届船舶水下噪声学术讨论会论文集,2013.

[3] SEOL H, SUH J C, LEE S. Development of hybrid method for the prediction of underwater propeller noise [J]. Journal of sound and vibration, 2005, 288(1): 345 - 360.

[4] SEOL H, JUNG B, SUH J C, et al. Prediction of non-cavitating underwater propeller noise [J]. Journal of sound and vibration, 2002, 257(1): 131 - 156.

[5] 孙红星, 朱锡清. 螺旋桨离散谱噪声计算研究[J]. 船舶力学, 2003(4):105 - 109.
SUN Hongxing, ZHU Xiqing. Study on discrete noise induced by marine propeller[J]. Journal of ship mechanics, 2003(4):105 - 109. (in Chinese)

[6] 高霄鹏, 杨国桢. 水面舰船流噪声基本声场的数值研究[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(1): 74 - 78.
GAO Xiaopeng, YANG Guozhen. Numerical research on fluid noise of surface ship[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013,25(1):74 - 78. (in Chinese)

[7] 张漫. 螺旋桨无空泡噪声的数值预报研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.

[8] 黄景泉. 空泡起始和溃灭阶段的噪声[J]. 应用数学和力学, 1990(8):725 - 730.
HUANG Jingquan. Noise at inception and collapse of a cavity[J]. Applied mathematics and mechanics, 1990(8): 725 - 730. (in Chinese)

[9] 戚定满, 鲁传敬. 单空泡演化及辐射噪声[J]. 上海交通大学学报, 1998,32 (12):50 - 54.
QI Dingman, LU Chuanjing. Growth and collapse of single bubble and its noise[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998,32 (12):50 - 54. (in Chinese)

[10] 蒲中奇, 张伟, 施克仁, 等. 双空泡溃灭及空化噪声的建模[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(11): 1450 - 1452.
PU Zhongqi, ZHANG Wei, SHI Keren, et al. Noise generation during the simultaneous collapse of two bubbles[J]. Journal of Tsinghua University (science & technology), 2005, 45(11): 1450 - 1452. (in Chinese)

[11] 胡健. 螺旋桨空泡性能及低噪声螺旋桨设计研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.

[12] 王国栋. 螺旋桨水动力、空泡和噪声性能预报方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.

[13] 朱志峰. 基于 N - S 方程的舰船螺旋桨空泡噪声特征研究[D]. 南京:东南大学, 2011.

[14] 杨琼方, 王永生, 张明敏. 不均匀伴流场中螺旋桨空化的黏性流数值模拟和低频噪声预测[J]. 声学学报, 2012,37 (6):583 - 594.
YANG Qiongfang, WANG Yongsheng, ZHANG Mingmin. Propeller cavitation viscous simulation and low-frequency noise prediction with non-uniform inflow[J]. Acta acustica, 2012,37(6):583 - 594. (in Chinese)

[15] 况贶, 张永坤. 时域螺旋桨空泡噪声的球空泡脉动体积方法[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(2):22 - 29.
KUANG Kuang, ZHANG Yongkun. Prediction of propeller cavitation noise using bubble volume pulse method in time domain[J]. Ship science and technology, 2012, 34(2):22 - 29. (in Chinese)

[16] 阮辉，廖伟丽，黄永，等. 水翼的空化噪声数值预报研究[J]. 西安理工大学学报，2015,31(1):67－71.
RUAN Hui, LIAO Weili, HUANG Yong, et al. Research on cavitation noise numerical prediction of hydrofoil[J]. Journal of Xi′an University of Technology, 2015,31(1):67－71. (in Chinese)

[17] HUANG B, ZHAO Y, WANG G. Large eddy simulation of turbulent vortex-cavitation interactions in transient sheet/cloud cavitating flows[J]. Computers & fluids, 2014, 92: 113－124.

[18] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically [J]. Proc Roy Soc(ser A), 1952, 211: 564－587.

[19] 赵宇，王国玉，黄彪，等. 非定常空化流动涡旋运动及其流体动力特性[J]. 力学学报，2014，46(2)：191－200.
ZHAO Yu, WANG Guoyu, HUANG Biao, et al. Study of turbulent vortex and hydraulic dynamics in transient sheet/cloud cavitating flows[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2014, 46(2): 191－200. (in Chinese)

[20] GERRARD J H. Measurements of the sound from circular cylinders in an air stream[J]. Proceedings of the Physical Society(section B), 1995, 68(7): 453.

[21] WANG G Y, SENOCAK I, SHYY W. Dynamics of attached turbulent cavitating flows[J]. Progress in aerospace sciences, 2001, 37(6): 551－581.

[22] BAKIR F, REY R, GERBER A G, et al. Numerical and experimental investigations of the cavitating behavior of an inducer[J]. International journal of rotating machinery, 2004,10(1):15－25.

[23] 黄彪. 非定常空化流动机理及数值计算模型研究[D]. 北京:北京理工大学，2013.

[24] BIN J I, LUO X, PENG X, et al. Three-dimensional large eddy simulation and vorticity analysis of unsteady cavitating flow around a twisted hydrofoil[J]. Journal of hydrodynamics(ser B), 2013, 25(4): 510－519.

(责任编辑　陈建华)

(上接第926页)

[9] NUMACHI F, OBA R, CHIDA I. Effect of surface roughness on cavitation performance of hydrofoils－report 1[J]. Journal of basic engineering, 1965, 87(2): 495－502.

[10] COUTIER－DELGOSHA O, DEVILLERS J F, LERICHE M, et al. Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation[J]. Journal of fluids engineering, 2005, 127(4): 726－733.

[11] KROGSTAD P A, ANTONIA R A, Browne L W B. Comparison between rough-and smooth-wall turbulent boundary layers[J]. Journal of fluid mechanics, 1992, 245: 599－617.

[12] KROGSTAD P A, ANTONIA R A. Structure of turbulent boundary layers on smooth and rough walls[J]. Journal of fluid mechanics, 1994, 277: 1－21.

[13] SHARP K V, ADRIAN R J. Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes[J]. Experiments in fluids, 2004, 36(5): 741－747.

[14] FARHAT M, GENNOUN F, AVELLAN F. The leading edge cavitation dynamics[C]//Proceedings of ASME 2002 Joint US－European Fluids Engineering Division Conference. Montreal, Quebec, Canada, 2002: 337－342.

[15] AUSONI P, ZOBEIRI A, AVELLAN F, et al. The effects of a tripped turbulent boundary layer on vortex shedding from a blunt trailing edge hydrofoil[J]. Journal of fluids engineering, 2012, 134(5): 1618－1619.

[16] DRYDEN H L. Review of published data on the effect of roughness on transition from laminar to turbulent flow [J]. Journal of the aeronautical sciences, 1953, 20(7): 477－482.

[17] VAN RIJSBERGEN M, SLOT J. Bubble-induced sheet cavitation inception on an isolated roughness element [J]. Journal of physics, 2015, 656(1): 012172.

[18] DE CHIZELLE Y K, CECCIO S L, BRENNEN C E. Observations and scaling of travelling bubble cavitation [J]. Journal of fluid mechanics, 1995, 293: 99－126.

[19] HUANG B, YOUNG Y L, WANG G, et al. Combined experimental and computational investigation of unsteady structure of sheet/cloud cavitation[J]. Journal of fluids engineering, 2013, 135(7): 071301.

[20] BRENNEN C. Cloud cavitation[J]. Journal of the acoustical society of America, 2007,121(5):3032－3036.

(特约编辑　赵凤朝　责任编辑　盛杰)