

绕栅中水翼空化流动的数值和实验研究¹⁾

时素果²⁾ 王国玉 黄 彪

(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘要 采用数值计算和实验研究的方法研究了绕水翼和栅中水翼的非定常空化流动. 实验采用高速录像技术分别观察了绕水翼和栅中水翼云状空化形态随时间的变化, 测量了升阻力, 并对测量数据进行了频率分析. 计算时空化模型选用了能比较准确描述旋涡空化非定常特性的 Kubota 模型, 湍流模型采用能准确捕捉流场非定常特性的 FBM 模型. 计算模型的可靠性用实验结果进行验证. 结果表明, 计算与实验的结果基本一致, 相比绕单个水翼的空化流动, 绕栅中水翼的空穴厚度比较薄, 翼型近壁处的逆压梯度较小, 反向射流的速度较小, 且水汽混合区速度梯度较小, 空穴的脱落周期变长, 平均升阻力系数较小.

关键词 栅中水翼, 空穴形态, 反向射流, 脱落周期

中图分类号: TV131.32 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)03-0625-05

引 言

空化是因液体中局部压力低于该温度下的汽化压强时产生气泡的一种流体动力学现象. 水力机械中的空化会带来严重后果. 空化会导致流动的不稳定, 引起强烈的噪声、振动和空蚀, 造成水力机械效率的降低, 引起水力机械载荷的非定常变化, 造成叶片的疲劳破坏, 降低使用寿命. 空化一直是水力机械研究中面临的一个重大课题^[1].

研究水翼的空化特性对于理解水力机械内部的复杂空化流动现象具有重要的意义. 在实验研究方面, Franc 等^[2]用荧光素钠作染色剂, 观察了绕水翼不同头形体的附着型空化. Wang 等^[3]采用高速录像观测了绕水翼不同空化阶段的空泡形态, 利用 LDV 测量了空穴内平均速度和湍流脉动. 李向宾等^[4]利用 PIV 观测了绕水翼超空化的形态和速度分布, 并详细分析了其形成机理. 张博等^[5]研究了绕水翼云状空化产生的机理, 得到了反向射流是导致云状空泡团脱落的主要原因. Kjeldsen 等^[6]对 NACA-0015 翼型进行了实验研究, 对实验结果进行了频谱分析, 提出了在小空化数的情况下, 功率谱在较低频率处出现强峰, 且不随着空化数和攻角变化. 在数值方法方面, Kubota 等^[7]在 Rayleigh-Plesset 方程基础上建立水蒸气体积份数与混合介质

密度之间的关系, 提出了基于空泡动力学的两相流模型. Senocak 等^[8]采用汽相质量传输方程求解汽液两相之间的能量传输. 季斌等^[9]基于状态方程的空化模型模拟了水翼尾部空泡脱落特性.

上述的研究工作基本上针对单水翼的绕流进行的, 而水力机械内部的流动是发生在叶片流道中的, 单一的水翼研究不能反映叶片间的相互作用对空化流动特性的影响, 需要进行叶栅空化动力特性的研究. Coutier-Delgosh 等^[10]数值模拟了叶栅中空化非定常流场.

1 数值模型与方法

1.1 滤波器湍流模型 (FBM)

由 Johansen 等提出的滤波器湍流模型中^[11], k 方程和 ε 方程采用与标准 $k-\varepsilon$ 模型相同的形式, 而湍流黏度为

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho_m k^2}{\varepsilon} F \quad (1)$$

式中, ρ_m 为混合介质的密度, C_μ 为 $k-\varepsilon$ 模型常数, F 为滤波函数, 由滤波器尺寸 λ 和湍流长度尺度的比值大小决定, 定义为

$$F = \min \left[1, C_3 \frac{\lambda \varepsilon}{k^{3/2}} \right], \quad C_3 = 1.0 \quad (2)$$

对尺度小于滤波器尺寸的湍流, 采用标准 $k-\varepsilon$

2010-06-24 收到第 1 稿, 2010-10-02 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (50979004) 和高校博士学科专项科研基金 (200800070027) 资助项目.

2) E-mail: shisuguo@bit.edu.cn

模型模拟;对尺度大于滤波器尺寸的湍流,则采用直接计算方法求解.值得注意的是,为保证滤波过程的实现,所选取的滤波器尺寸应不小于滤波计算区域的网格大小,即 $\lambda > \Delta_{\text{grid}}$,这里网格大小取为 $\Delta_{\text{grid}} = \sqrt{\Delta x \cdot \Delta y}$, Δx 和 Δy 分别为网格在 X 和 Y 两个坐标方向的长度.

1.2 空化模型

忽略热传输和非平衡相变效应,空化流动液相体积含量的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho_L \alpha_L)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_L \alpha_L \mathbf{u}) = \dot{m} \quad (3)$$

其中, α_L 为液相体积含量, ρ_L 为液相密度,汽相密度为 ρ_V ,则混合介质密度表示为 $\rho_m = \rho_L \alpha_L + \rho_V(1 - \alpha_L)$, $\dot{m}$ 为考虑蒸发和凝结的质量传输源项.根据 Rayleigh-Plesset 方程,同时考虑汽核数密度随汽相体积含量增加而相应减小作出修正,源项可用以下公式计算

$$\dot{m} = f \frac{3\alpha_{\text{nuc}} \alpha_L \rho_V}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_V - p|}{\rho_L}} \text{sgn}(p - p_V) \quad (4)$$

其中, f 为随蒸发和凝结程度不同而变化的经验系数, α_{nuc} 为汽核数密度, R_B 为汽核直径, p_V 为汽化压强.

许多实验表明湍动能对空化产生重要的影响,本文采用文献 [8] 中提出的方法来计算湍动能 k 对当地汽化压强的影响,具体修正公式见文献 [8].

1.3 计算网格和方法验证

如图 1 所示,模型安放位置为与水洞实验一致,水洞尺寸见文献 [4-5],网格数及其验证见文献 [12].计算采用 Clark-y 型翼型和 Clark-y 型翼型叶栅,水翼和栅中水翼的弦长均为 42.7 mm.

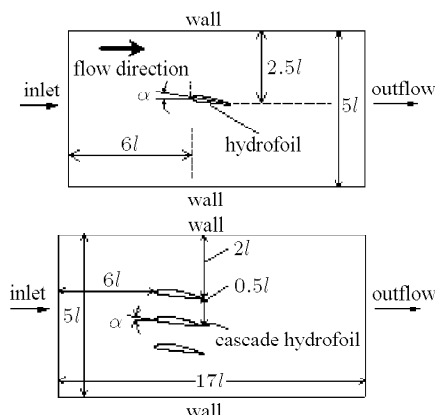


图 1 水翼和栅中水翼安放位置翼型示意图

Fig.1 Schematic diagram of hydrofoil and cascade hydrofoils

2 结果分析

2.1 空穴形态的对比分析

图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了实验得到的当 $\sigma = 0.8$ 时水翼和栅中水翼空穴的发展过程,图 3(a) 和图 3(b) 分别给出了相同条件下计算得到的水翼和栅中水翼空穴的发展过程.由图 2 和图 3 可以看出,实验和计算的结果基本一致.对比图 2 和图 3 发现,水翼和栅中水翼的发展规律是相似的,首先在水翼头部低压区产生厚度很小的微空泡与液滴组成的空穴,此时空穴附着在水翼表面上;随着时间的推移,空穴向水翼尾端发展时,空穴长度和厚度不断增加,空穴较稳定,除空穴尾端存在白色的水气混合区,

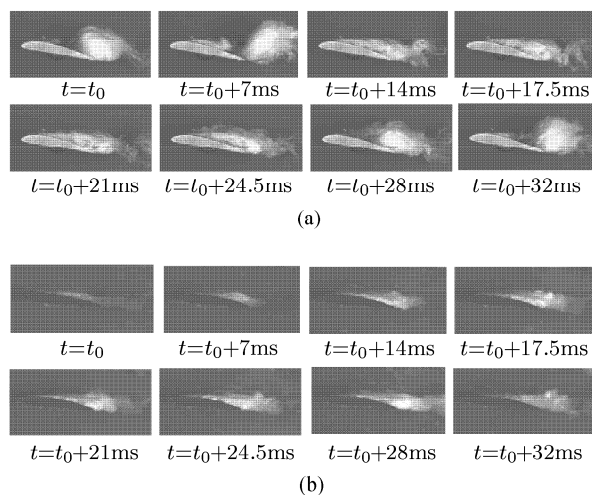


图 2 实验得到空穴形态随时间变化图 ($\sigma = 0.8$)

Fig.2 The cavity shape around the hydrofoil and cascade hydrofoil in the experiment ($\sigma = 0.8$)

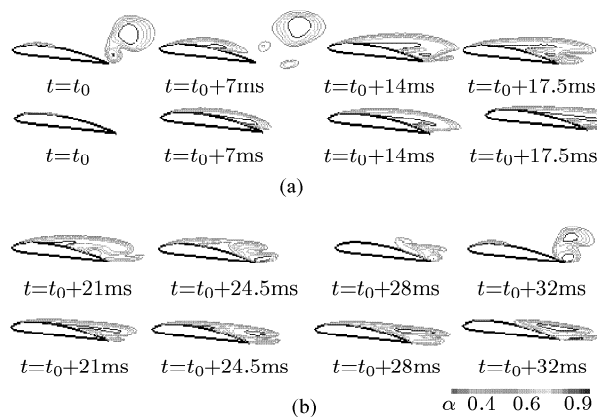


图 3 计算得到水翼和栅中水翼的空穴等值线对比图 ($\sigma = 0.8$)

Fig.3 The cavity shape around the hydrofoil and cascade hydrofoil in the numerical calculation ($\sigma = 0.8$)

空穴的大部分呈透明状, 尤其是空穴发展到水翼尾端时, 水翼吸力面被很薄的一层水蒸气所覆盖. 在空穴脱落阶段, 水翼吸力面上空穴断裂成两个部分, 附着在水翼表面的空穴逐渐向水翼前端回缩, 空穴长度减小, 而尾部的空泡脱落, 并向下游运动最后溃灭. 实验与计算结果也清楚地表明两者空穴结构的差异, 相对水翼, 附着在栅中水翼表面的空穴厚度较小, 水气界面较清晰, 汽液界面上水气变化梯度较大, 空穴发展到翼型尾部后, 栅中水翼形成的空穴长度随时间变化较慢, 即栅中水翼附着段空泡脱落的周期相对较长, 从图中可知, 水翼的周期大约为 28ms, 栅中水翼的周期大约为 32ms. 同时还发现, 栅中水翼空穴断裂点位置后移, 靠近翼型尾部.

2.2 压力和速度流场的对比分析

为了研究水翼和栅中水翼空穴形态和周期差别的原因, 图 4 给出了空穴脱落阶段两个典型时刻单水翼和栅中水翼壁面压力系数沿弦长的变化. 在 $t = t_0 + 24.5\text{ms}$ 时刻, 单水翼吸力面压力系数曲线出现了波动, 压力系数峰值位于 $0.3C$ 处, 且峰值较大, 这导致水翼尾部的逆压梯度较大, 对应的空穴回缩较明显. 而栅中水翼周围吸力面压力系数峰值位于 $0.6C$ 处, 峰值较小, 空穴尾部的逆压梯度较小, 空穴开始回缩, 此时峰值较低, 且峰值位置向翼型头部移动速度较慢. 对于压力面, 相对水翼, 栅中水翼压力系数仍然较小. 随着时间的推移, 其峰值位置和峰值大小都发生了很大的变化, 相对水翼, 栅中水翼变化幅度较小. $t = t_0 + 28\text{ms}$ 时刻, 水翼的空穴回缩到翼型头部, 此时吸力面低压区只有翼型头部部分区域, 在水翼约 $0.25C$ 处压强升高导致了空穴的断裂, 此时栅中水翼由于叶栅中水翼之间的相互作用, 却还有大片的低压附着区, 相对高压区压力系数峰值在翼型的 $0.55C$ 处. 此时, 对于压力面, 相对水翼, 栅中水翼的压力系数仍较低, 但两者差值略有增加.

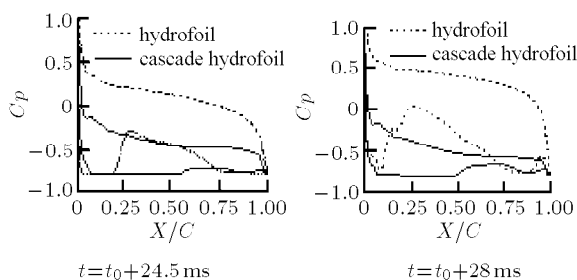


图 4 压力系数对比图 ($\sigma = 0.8$)

Fig.4 The pressure coefficient ($\sigma = 0.8$)

为了进一步研究水翼和栅中水翼空穴结构差别的原因, 图 5 对比了空穴脱落阶段两个时刻水翼和栅中水翼的速度矢量和空穴形态并分析了在翼型上 4 个位置水平方向上的速度分布. 从图 5 可知, 空穴结构与流场内速度分布有密切的关系, 空穴区内速度梯度较小, 在水气交界面处存在非常大的速度梯度, 对比水翼和栅中水翼的水气混合区内的速度梯度, 水翼的速度梯度较大. 从速度的空间分布上看, 在翼型中后部, 水翼和栅中水翼的速度分布差别比较明显, 而在翼型头部即 $23\%C$ 和 $46\%C$ 处, 不同时刻对应的速度分布差别较小, 在相同 y 值上, 水翼对应的速度较小. 在 $69\%C$ 处, 栅中水翼速度分布与 $46\%C$ 上的结果相一致, 而水翼对应的速度分布变化较大, 靠近翼型壁面的速度远小于栅中水翼的速度, 在 $92\%C$ 处, 这种差异更加显著. 从速度随时间变化上看, 在 $t = t_0 + 24.5\text{ms}$ 时刻, 水翼对应的反向射流头部已到达翼型约 $0.3C$ 处, 最大反向射流速度约为 9.1m/s , 对于栅中水翼反向射流头部只到达翼型的 $0.6C$ 处, 速度也较小, 约为 6m/s . 随着时间的推移, 反向射流不断向翼型头部推进, 其强度不断增加. 到 $t = t_0 + 28\text{ms}$ 时刻, 反向射流头部到翼型的 $0.25C$ 处, 最大速度约为 9.8m/s , 而栅中水翼此时只到 $0.55C$ 处, 最大反向射流速度为 6.5m/s , 反向射流强度均略有增加.

结合压力系数和速度图可得, 反向射流头部位置和压力峰值位置一致, 说明翼型出现的局部高压是反向射流造成的, 这与张博等^[5]得到的结论一致, 由此可得正是由于反向射流速度不同, 造成到达翼型头部位置不同和速度流场的差别.

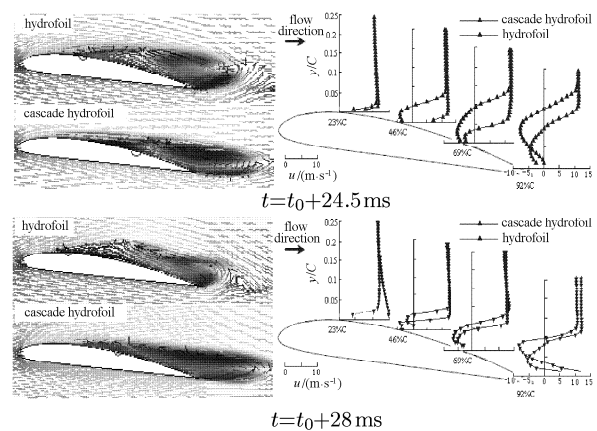


图 5 两个时刻 u 方向上的速度分布和空穴形态图 ($\sigma = 0.8$)

Fig.5 Instantaneous velocity distribution and cavity shape ($\sigma = 0.8$)

2.3 动力特性分析

为了对比分析水翼和栅中水翼动力特性的区别, 图 6 给出了水翼和栅中水翼的升阻力系数随时间的变化, 并在表 1 中给出了实验和计算得到的升阻力系数的平均值.

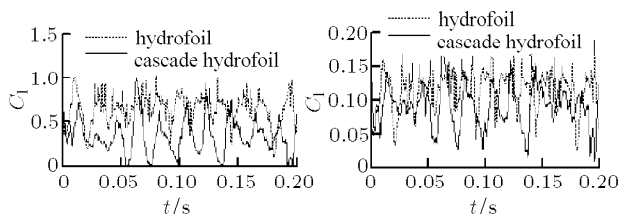


图 6 升阻力系数随时间变化图 ($\sigma = 0.8$)

Fig.6 Time evolution of lift and drag coefficient ($\sigma = 0.8$)

表 1 实验和计算升阻力系数平均值 ($\sigma = 0.8$)

Table 1 The average value of C_l and C_d in the experiment and the calculation ($\sigma = 0.8$)

	Hydrofoil		Cascade hydrofoil	
	C_l	C_d	C_l	C_d
experiment	0.69	0.11	0.42	0.087
numerical results	0.72	0.11	0.38	0.08

从图 6 可以看出, 相比水翼, 栅中水翼受上下翼影响, 其升阻力系数上下波动较大, 且其升阻力系数平均值比较小, 这从表 1 中可以更清楚地看出. 同时, 从图 6 中还可以看出, 栅中水翼升阻力变化周期较长, 与形态图得到结果相一致. 为了更好地研究水翼和栅中水翼脱落频率的区别, 对翼型所受升力进行了 FFT 变换, 得到了水翼和栅中水翼基于升力的频谱图, 具体见图 7, 其中图 7(a) 和 7(b) 分别为数值计算和实验得到结果, 横坐标为基于翼型

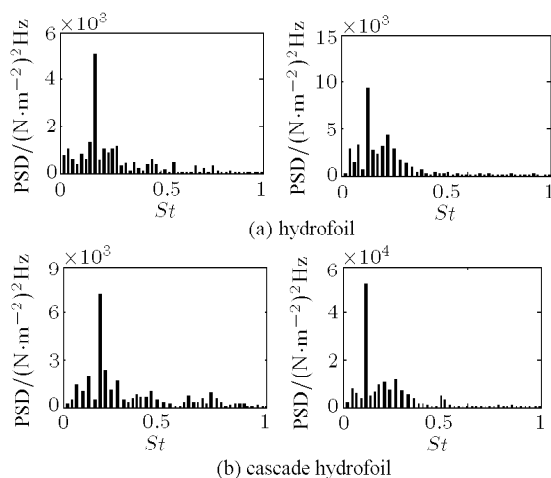


图 7 水翼和栅中水翼的升力的频谱图 ($\sigma = 0.8$)

Fig.7 The spectral analysis of the hydrofoil and the cascade hydrofoil ($\sigma = 0.8$)

弦长的斯特劳哈数, 纵坐标是功率谱密度, 从图上可知, 水翼和栅中水翼数值计算得到的斯特劳哈数和实验得到的基本一致, 对于水翼, 数值计算的斯特劳哈数为 0.16, 而实验结果是 0.17, 而对于栅中水翼来说, 数值计算得到斯特劳哈数为 0.12, 实验结果是 0.10.

3 结 论

(1) 从空穴形态上看, 相对水翼, 附着在栅中水翼表面的空穴厚度较薄, 水气界面较清晰, 汽液界面水气变化梯度较大, 空泡脱落的周期相对较长, 空穴断裂点位置后移.

(2) 从压强和速度分布上看, 相比水翼, 栅中水翼近壁处的逆压梯度变小, 反向射流的速度变小, 水气混合区速度梯度也比较小.

(3) 从动力特性上看, 相比水翼, 栅中水翼升阻力系数上下波动范围较大, 但是其升阻力系数平均值较小, 升阻力变化周期较长.

参 考 文 献

- 1 Yamamoto K. Instability in a cavitating centrifugal pump. *JSME Int J Ser II*, 1991, 34(2): 9-17
- 2 Franc JP, Michel JM. Attached cavitation and the boundary layer: experimental investigation and numerical treatment. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985, 154(1): 63-90
- 3 Wang GY, Senocak I, Shyy W. Dynamics of attached turbulent cavitating flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37(6): 551-581
- 4 李向宾, 王国玉, 张敏弟等. 绕水翼超空化流动形态与速度分布. *力学学报*, 2008, 40(3): 315-322 (Li Xiangbin, Wang Guoyu, Zhang Mindi, et al. Characteristics of supercavitating flows around a hydrofoil. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 40(3): 315-322 (in Chinese))
- 5 张博, 王国玉, 黄彪等. 云状空化非定常脱落机理的数值与实验研究. *力学学报*, 2009, 41(5): 652-658 (Zhang Bo, Wang Guoyu, Huang Biao, et al. Numerical and experimental studies on unsteady shedding mechanisms of cloud cavitations. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, 41(5): 652-658 (in Chinese))
- 6 Kjeldsen M, Arndt REA, Effertz M. Spectral characteristics of sheet/cloud cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, 2000, 122(3): 481-487
- 7 Kubota A, Kato H, Yamauchi H, et al. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique. *Journal of Fluids Engineering*, 1989, 111(2): 204-210

- 8 Senocak I, Shyy W. A pressure-based method for turbulent cavitating flow computations. *Journal of Computational Physics*, 2002, 176(2): 363-385
- 9 季斌, 洪方文, 彭晓星. 二维水翼局部空泡脱落特性数值分析. 水动力学研究与进展 A 辑. 2008, 23(4): 42-43 (Ji Bin, Hong Fangwen, Peng Xiaoxing. The numerical analysis of shedding characteristics on partial cavitation over 2D hydrofoils. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2008, 23(4): 42-43 (in Chinese))
- 10 Coutier-Delgosha O, Perrin J, Fortes-Patella R, et al. A numerical model to predict unsteady cavitating flow behaviour in inducer blade cascades. Fifth Int Symp. Osaka, Japan. 2003
- 11 Johansen S, Wu J, Shyy W. Filter-based unsteady RANS computations. *Int J Heat and Fluid Flow*, 2004, 25(1): 10-21
- 12 时素果, 余志毅, 俞启东等. 栅中水翼的空化流体动力特性. 北京理工大学学报, 2010, 9(30): 1042-1046 (Shi Suguo, Yu Zhiyi, Yu Qidong, et al. Dynamical characteristics of cavitating flow around a cascade hydrofoil. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 9(30): 1042-1046 (in Chinese))

(责任编辑: 刘俊丽)

THE STRUCTURE ANALYSIS ABOUT THE CAVITATION FLOW AROUND THE CASCADE HYDROFOIL BY NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY¹⁾

Shi Suguo²⁾ Wang Guoyu Huang Biao

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The unsteady dynamics of cavitating flows around a hydrofoil and in a cascade hydrofoil are investigated by numerical and experimental methods. Experiments around a hydrofoil and on a cascade hydrofoil are carried out in a rectangular test section of a cavitation tunnel, and the lift and drag force are conducted and the frequency characteristics of lift signals are analyzed. The cavitation model in calculation is Kubota model which can describe the unsteady vortex cavitation accurately; the filter-based turbulence model can capture the unsteady characteristics in the flow more exactly; the reliability of the numerical model is validated by the experiment of the cavitation tunnel. The results show that a good agreement is obtained between the experimental data and the numerical simulation results. Compared the results around a hydrofoil, the cavitation thickness about the cascade hydrofoil is thinner; the adverse pressure gradient near the wall of the cascade hydrofoil is smaller; the intensity of the re-entrant jet and the velocity gradient in the mixing field are smaller and the shedding time is longer.

Key words the cascade hydrofoil, cavity shape, re-entrant jet, shedding period

Received 24 June 2010, revised 2 October 2010.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50979004) and the Doctor Reserch Fund of Univercity (20080070027).

2) E-mail: shisuguo@bit.edu.cn