

梢涡空化起始预报及噪声特性研究

彭晓星^{*1}, 徐良浩¹, 宋明太¹, 张凌新², 王本龙³

曹彦涛¹, 刘玉文¹, 洪方文¹, 颜开¹

1 中国船舶科学研究中心 船舶振动噪声重点实验室, 无锡, 214082,

2 浙江大学 力学系, 杭州, 301127

3 上海交通大学 工程力学系, 上海, 200240

* Email: henrypxx@163.com

摘要: 梢涡空化是船舶推进器常见而复杂的空化现象, 其形成和演化特性研究具有重要的工程意义。本研究以 NACA66₂-415 椭圆水翼为研究对象, 首先对水翼梢涡全湿流场和梢涡空化流场开展了精细测量和高分辨率数值模拟, 获得了涡流的速度分布、涡核半径、最低压强、雷诺应力等流场特征。然后采用来流气核控制技术, 对不同来流气核情况下的梢涡空化初生开展了试验研究, 获得了不同攻角、不同水速、不同含气量的梢涡空化初生试验数据, 同时对涡流场中单气核及多气核迁移和生长过程开展了数值模拟研究, 提出了在梢涡空化初生研究中定量表征气核谱的方法, 综合分析了升力系数、雷诺数、含气量和气核谱分布对梢涡空化初生的影响, 结合理想涡理论模型以及气泡动力学理论, 建立了考虑尺度效应和水质影响的梢涡空化初生预报模型。最后采用噪声与高速摄像同步测量技术, 在国内实验室首次发现并可重现梢涡空化中的“涡唱”现象, 并通过理论分析阐明了涡唱发生的机理。

关键词: 梢涡; 空化; 流场测量; 噪声; 预报

1 引言

旋涡流动是自然界普遍存在的流动现象, 是流体力学中重要的研究课题。梢涡空化作为一种重要的空化类型, 是水动力学特有的研究领域, 由于旋涡涡心低压的存在, 梢涡常常成为流场中最先发生空化的区域, 而且由于旋涡流动的特点, 使得水中自由气核和溶解气体对梢涡空化的形成和演化较之其他类型的空化有更大的影响, 形成旋涡空化中水-汽-气并存的复杂结构。尽管对梢涡空化研究的历史很长, 但目前对梢涡空化机理的认识尚缺

乏系统性,人们已经认识到水质对旋涡空化有重要的影响,但还缺乏定量研究。这在很大程度上限制了对梢涡空化起始预报的精度和对梢涡空化危害性的抑制。

梢涡空化起始机理研究主要集中在螺旋桨梢涡空化研究领域^[1],其核心是解决梢涡空化起始预报的尺度效应问题。旋涡空化起始主要与涡流中心的最低压力有关,涡流中心处的最低压力通常可由 Rankine 和 Burgers 等建立的线涡模型来描述,取决于速度环量(旋涡强度)和涡核半径。为了分析宏观流动参数对梢涡涡流的影响,Fruman 等^[2]以及 Boulon 等^[3]测量了不同流动条件下的水翼梢涡流场分布,发现梢涡强度与水翼的载荷系数密切相关。但有关水翼或推进器叶片上的涡系耦合作用的研究还很少。

除了涡心内部的平均压力,涡流内部湍流脉动引起的压力脉动对旋涡空化也有重要起始影响。Arndt & Keller^[4]采用 LDV 和全息照相技术,测量了椭圆翼梢涡内部压力的脉动,表明低压区的压力脉动水平非常显著,可直接影响梢涡空化起始。Ran & Katz^[5]以及 Gopalan 等^[6]在剪切湍流的相干结构中发现小尺度涡的瞬间压力要远远低于平均压力。由于相关实验结果较少,对非定常脉动效应的影响尚未有定性和量化的认识。目前已认识到湍流脉动对旋涡空化起始的重要影响,但是如何模化旋涡流脉动压力依然是空化起始研究中悬而未决的问题。

气核大小和分布是影响旋涡空化起始的另一重要因素。气核是水中存在的微小气泡,尽管气核存在的机理尚存在争议,但气核在水中大量存在却是不争的事实,气核被涡流捕捉的时间与气核的浓度、尺度分布密切相关。由于水体中气核分布的差异,常导致实际起始空化数与理论值出现偏差。Briancon-Marjollet & Merle^[7]研究了气核浓度和气核大小对空化起始的影响,发现不同气核分布下的起始空化数差别很大。为了准确预报梢涡空化的起始空化数,Arndt & Maines^[8]建议在强水(含气量少,气核尺寸小)中使用消失空化数来判断空化起始,以代替弱水(含气充足,气核尺寸大)中的起始空化数。

对工程应用而言,旋涡空化起始机理的研究目的是为了构建普适的旋涡空化起始预报方法。目前的旋涡空化起始预报方法,以涡流最低平均压力为核心建立起始空化数与无量纲流动参数间的关系,并通过系数修正提高预报的普适性,但仍存在严重的“尺度效应”问题。这主要是因为尽管人们已经知道涡流结构、水质气核条件对旋涡空化起始有重要影响,但对影响规律缺乏系统、精确、定量的研究成果,难以将其考虑在减小尺度效应的预报方法中。

旋涡空化的演化过程包括空泡在旋涡流场中的发展、变形和溃灭,其流动结构的不稳定是产生噪声和振动的主要因素。由于在旋涡流中存在很大的压力梯度与速度梯度,在此作用下空泡会产生很强的变形与脉动,从而引起显著的压力脉动与噪声辐射。Briancon-Marjollet & Merle^[7]在实验中发现了梢涡空泡中的异常噪声,该噪声的发生使得整体环境噪声提高了 25 分贝以上。Maines & Arndt^[9]将这种噪声命名为唱音,他们发现唱音发生时柱状梢涡空泡呈现两种模态,一种是正常的涡流旋转,一种是空泡表面的逆向旋转,并且这种逆向旋转呈螺旋形向上游发展。

本研究在前人研究工作的基础上,重点研究梢涡流场的形成及流场结构对梢涡空化起

始的影响，特别是包括含气量和气核的影响，同时对梢涡演化发展观察中的噪声特性开展研究和分析。

2 梢涡形成及流动结构与梢涡空化起始的关系

梢涡流场和分析采用试验测量和数值模拟相结合的方法。试验测量在的中国船舶科学研究中心空化机理水洞中进行。试验模型采用 NACA66₂-415 椭圆水翼（图 1）。梢涡流场测量分别采用 LDV 和 SPIV 两种方法，测量布置和测量坐标如图 2 所示。针对绕水翼流场采用高精度 DES 方法和局部网格加密方法，获得了与测量较为吻合的数值模拟结果。图 3 是 LDV 测量结果与数值模拟结果的比较。

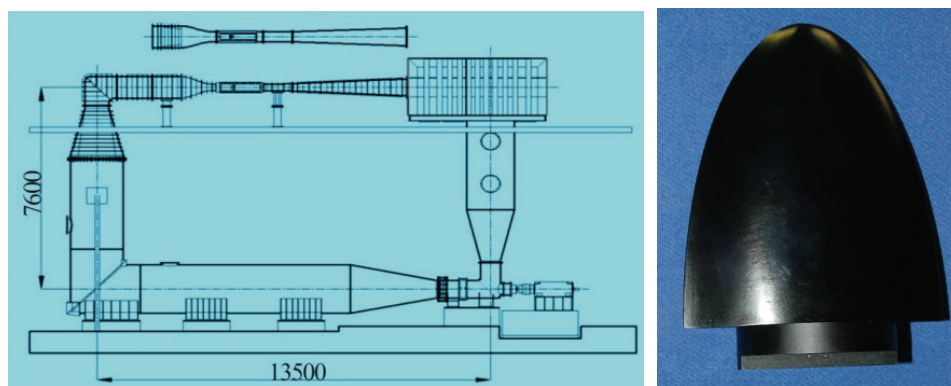


图 1 试验水筒和试验模型

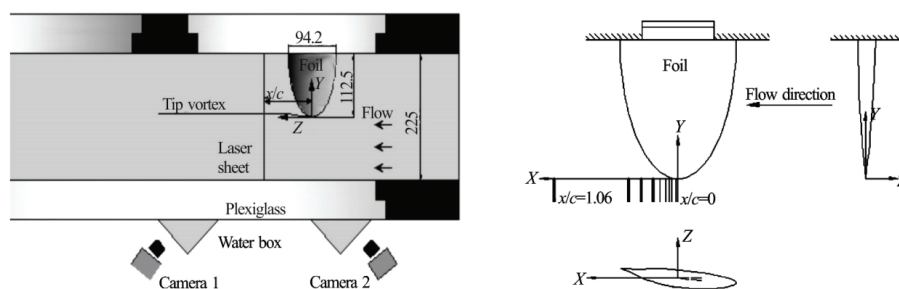


图 2 SPIV 布置与测量坐标示意

SPIV 和数值模拟获得了梢涡形成和演化过程中不同截面速度和涡量场，以及由绕涡核的速度和涡核尺度决定的涡心平均压力的变化（图 4）。研究表明，梢涡形成过程的梢涡从

梢部开始发展，有多处涡系汇集到梢涡中，到达下游一定位置时，涡流趋于稳定并基本保持不变，涡心压力沿轴向呈现高-低-高的特征，最低压力出现在接近翼梢的下游位置。

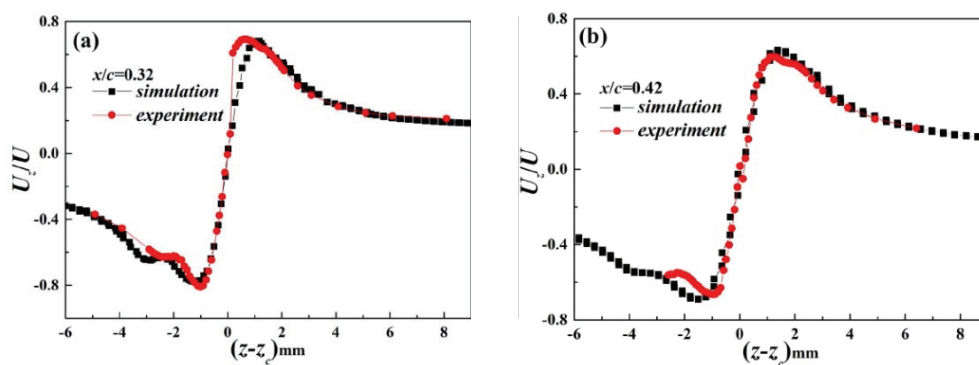
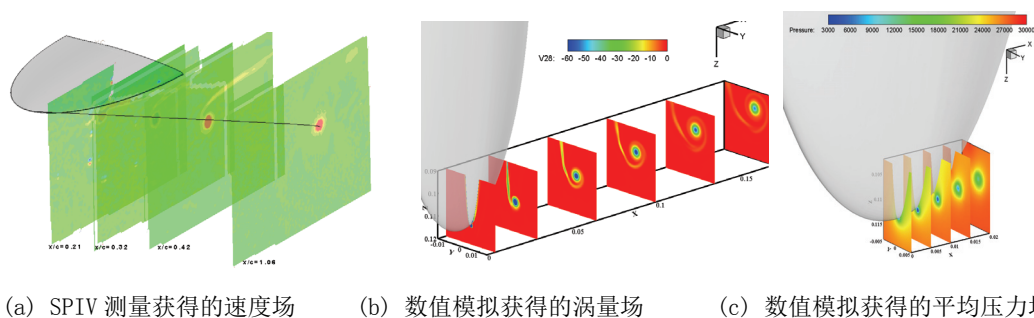


图3 梢涡两个截面 LDV 测量结果及数值模拟结果比较



(a) SPIV 测量获得的速度场 (b) 数值模拟获得的涡量场 (c) 数值模拟获得的平均压力场

图4 梢涡形成及演化过程

影响梢涡空化起始的因素除涡旋中心的平均压力外，涡心脉动压力也是不可忽略的因素。LDV 测量表明，涡核内的湍动能远大于涡核外，且在涡心达到极值（图 5 a）。数值模拟结果也显示涡心脉动压力具有同样的规律，且从梢部开始沿流向呈现高-低-高-低的趋势（图 5）。分析表明，脉动压力在梢部附近的高点与该处有不同的涡系汇入有关，下游的局部高点与水翼尾流的湍流输运有关。

随后开展水洞试验表明梢涡空化起始于梢部附近下游位置（图 6）。与梢涡流场测量和数值模拟获得的全湿梢涡涡核中心平均压力及涡核中心的湍流脉动沿流向的分布比较，说明梢涡空化起始位置与最低涡心平均压力及最强涡核中心的湍流脉动有关。这一结论部分解释了梢涡空化起始点与最小涡心压力点间的偏差，并为建立新的梢涡空化起始模型提供的试验依据。

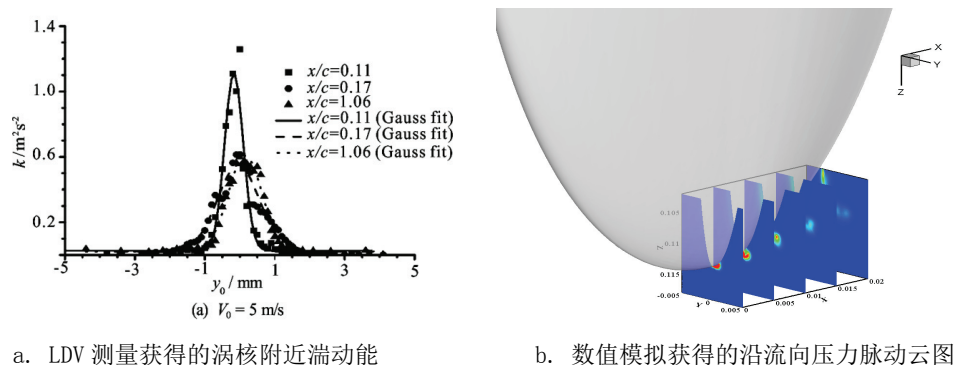


图 5 涡心湍流脉动与压力脉动

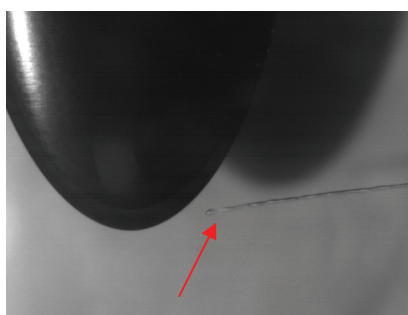


图 6 高速摄像获得的梢涡空化起始位置

3 考虑气核影响的梢涡空化起始预报模型

影响梢涡空化起始的因素包括水翼攻角、雷诺数和水质。以 NACA66₂-415 椭圆水翼为模型, 首先针对不同含气量的水质在不同攻角和不同来流速度下进行了梢涡空化起始试验, 由于理论分析和试验都说明水翼攻角与升力系数成线性关系, 结果分别以升力系数和雷诺数表达, 结果见图 7。从试验结果可以看出, 升力系数对梢涡空化起始的影响大致符合理论分析获得的 2 次方关系, 但不同含气量影响不同, 高含气量更易发生空化; 雷诺数的影响则更为复杂, 对较低的含气量, 雷诺数增加梢涡空化起始略早发生, 但影响有限, 而对高含气量, 低雷诺数时梢涡空化起始显著提前, 并随雷诺数增加起始空化数逐步下降。这一现象可以用气核在梢涡流场中的发育时间解释, 高含气量同时意味着水中含有较多的气核, 较低的来流水速 (试验中较低的雷诺数) 为气核提供了更多的生长时间, 而较大的水翼攻角则提供了较高的漩涡强度 (低压)。所以较大的升力系数、较高的含气量和较低的雷诺数, 更易发生空化。

我们还采用试验段上游播种气核的方法,对相同含气量不同来流速度情况下,不同的气核谱进行了梢涡空化起始试验,图 8 是相关试验结果。从结果可以看到,来流气核对梢涡空化起始有显著影响,来流气核越多、气核尺度越大,梢涡空化越容易发生。

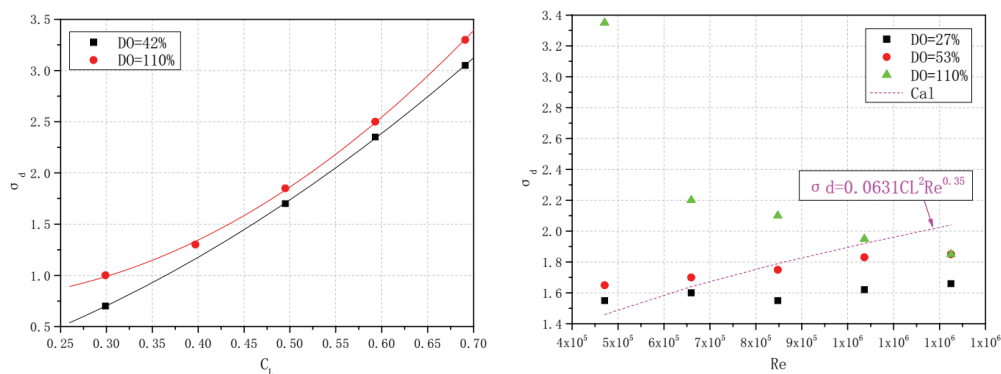


图 7 不同含气量下雷诺数和升力系数对梢涡空化起始试验结果

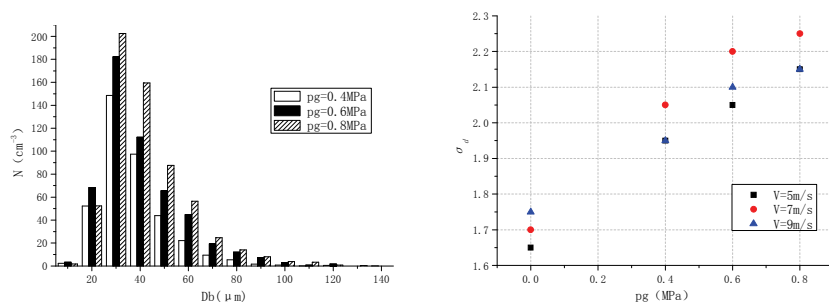


图 8 来流气核与初生空化数的关系

为了理解并定量刻画水质对梢涡空化初生的影响,开展了涡流场中单气核、多气核运动的研究。流场采用欧拉描述,气核运动采用拉格朗日描述,气核受力中主要考虑了 Stokes 力和压差力。图 9 是单气核在二维涡流场中移动轨迹,单气核研究表明,气核在涡流中的轨迹呈现螺旋线型,周向运动由流体速度驱动,径向运动由压差驱动。涡流参数、气核初始位置以及气核尺寸均对气核轨迹具有显著影响,气核尺寸越大,卷入涡心的时间就越短,结果定性解释了梢涡空化初生过程中的经典疑问,即弱水中空化初生位置位于上游,强水中空化初生位置位于下游。多气核在三维流场中的模拟结果如图 10 所示,研究发现,当给定气核谱分布,最早发生爆发性生长的气核既不是尺寸最大的气核,也不是数目最多的气核,而是数目中等、尺寸中等的气核。

传统梢涡空化初生预报模型无法考虑气核分布的影响,这也是梢涡空化尺度效应的主要来源。在试验和数值模拟的基础上,通过解析方法建立了快速筛选涡流中临界气核 R 的

准则，以临界气核抗拉强度作为水质的理论表征，建立了包含气核谱分布的梢涡空化初生预报模型：

$$\sigma_i = KC_L^2 Re^m - \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U^2} \frac{4S}{3R\sqrt{3[\frac{p_\infty - p_v}{2S/R}] + 1}}$$

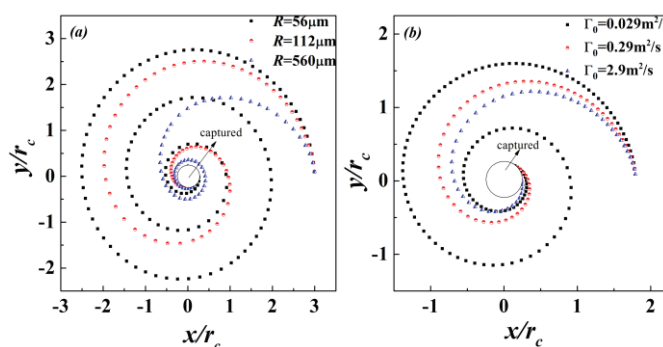


图 9 (a) 环量为定值时不同半径气核的轨迹，(b) 同一气核在不同环量下的轨迹

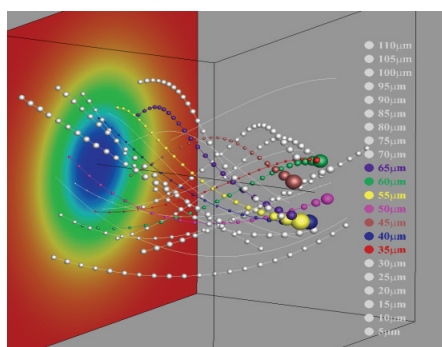


图 10 不同半径气核的在旋涡流场中的运动轨迹

4 空化涡唱现象的实验室生成和机理分析

“涡唱”是漩涡空化演化过程中的独特现象，发生涡唱时在某个特殊频率下噪声会提高 20dB 以上，国外在 20 世纪末曾有报道，但在其他实验室难以重现，对其发生条件和内在机理尚不清楚。我们在试验室发现了梢涡演化过程中的涡唱现象，并对发生“涡唱”的梢涡空化形态特性和发生机制进行了分析研究。

首先联合高速摄像观察与噪声测量，获得了可靠再现梢涡空化涡唱的临界参数和实验

条件,为研究涡唱特征和形成机制提供了实验条件。图 11 是来流 7m/s,空化数 1.2 时发生“涡唱”时的梢涡空化形态及噪声谱。试验观察发现,涡唱发生在梢涡空化形态转换的工况,空化数较小时梢涡空化强烈,空化形态呈螺旋状,而空化数较大时梢涡空化形态呈细线状。当水翼梢部存在少量附着透明空泡时,当附着透明空泡边界出现有规律的脉动,原来的螺旋状空化形态也开始不稳定,空泡表面出现类似波动的情况,同时出现涡唱现象。不同试验条件下涡唱试验表明,水翼攻角、来流速度和水中含气量对“涡唱”的噪声频率和幅值有重要影响。

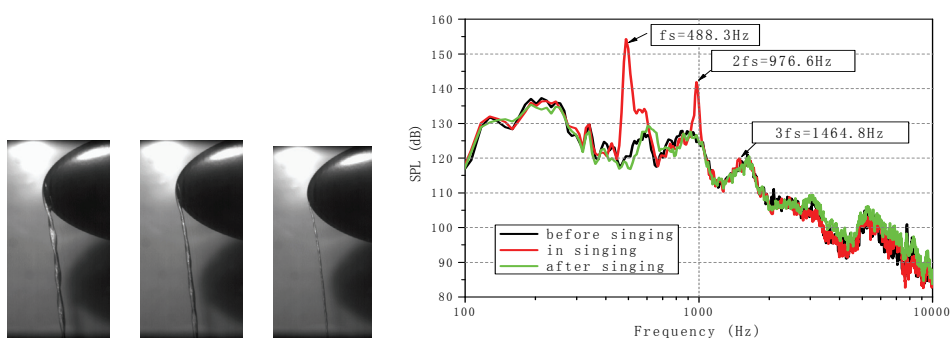


图 11 发生涡唱前、中、后梢涡空化形态和噪声谱

根据高速摄像实验结果,对涡唱发生时梢涡空化直径随时间变化进行分析(图 12),说明涡唱时空化界面存在周期振动,且频率与涡唱主频相同,通过柱状汽泡动力学分析确认涡唱主频为受控边界柱状空泡的本征频率,说明涡唱是一种外界激励诱导的共振现象,其周期可表达为:

$$T_N = \frac{4\pi^2 r_b^2}{\Gamma} \sqrt{\ln\left(\frac{r_D}{r_b}\right)}$$

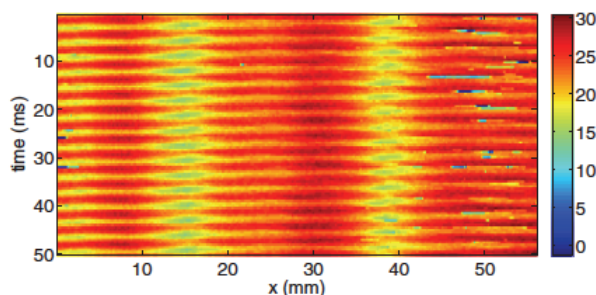


图 12 涡唱发生前后梢涡空化直径随时间变化

关于涡唱发生的激励机制，国外学者曾对柱状空泡的震荡模态进行分析，发现其一阶模态和二阶模态频率均与涡唱频率不符，我们采用表面波传播理论中的色散关系，发现一阶模态和二阶模态叠加波的差频可能是涡唱的激励源，如图 13 所示，详细推导和分析可参见文献[30]。

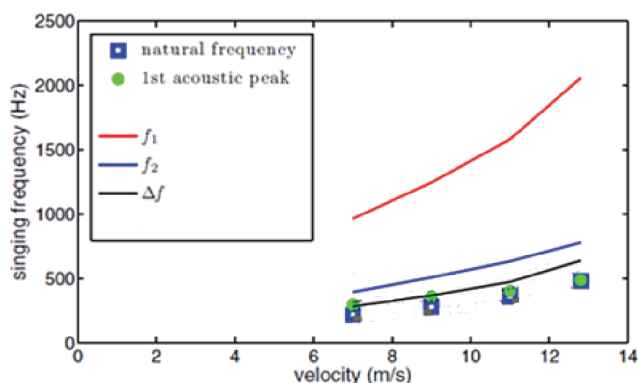


图 13 涡唱发生预报公式与试验比较

4 结论

本研究以 NACA66₂-415 椭圆水翼为模型，采用试验观察测量、数值计算和理论分析方法对梢涡流场的形成和特征进行了系统研究，全面分析了影响梢涡空化起始的涡心平均压力，湍流脉动，及包括含气量和气核的水质等因素，建立考虑气核影响的梢涡空化起始预报模型。同时对梢涡空化演化过程中的涡唱现象开展了研究，掌握实验室产生空化涡唱条件，并通过梢涡空化界面波动的试验测量和理论分析，分析提出空化涡唱的本质和发生机理。

致谢

本文工作获得国家自然科学基金重点项目（11332009）资助。

参考文献

- 1 Arndt R, Cavitation in vertical flows, Annu. Rev. Fluid Mech., 2002, 34:143–175.
- 2 Fruman DH, Dugue C, Pauchet A et al., Tip vortex roll-up and cavitation, 19th Symposium on naval hydrodynamic, 1992.
- 3 Boulon O, Franc JP, Michel JM, Tip vortex cavitation on an oscillating hydrofoil, J. Fluids Eng., 1997,

- 119:752–758.
- 4 Arndt R, Keller AP, Water quality effects on cavitation inception in a trailing vortex, J. Fluids Eng., 1992, 114:430-438.
 - 5 Ran B, Katz J, Pressure fluctuations and their effect on cavitation inception within water jets, J. Fluid Mech., 1994, 262:223–263.
 - 6 Gopalan S, Katz J, Knio O, The flow structure in the near field of jets and its effect on cavitation inception, J. Fluid Mech., 1999, 398:1–43.
 - 7 Briancon-Marjollet L, Merle L, Inception development and noise of a tip vortex cavitation, 21th Symposium on naval hydrodynamic, 1996, 851-864.
 - 8 Arndt R, Maines BH, Viscous effects in tip vortex cavitation and nucleation, 20th Symposium on naval hydrodynamic, 1994.
 - 9 Maines BH, Arndt R, Tip vortex formation and cavitation, J. Fluids Eng., 1997, 119:413-419.
 - 10 Peng X.X., Wang B.L., Li H.Y., Xu L.H., and Song M.T., Generation of abnormal acoustic noise: singing of a cavitating tip vortex, PHYSICAL REVIEW FLUIDS, 2017, 2, 053602.

Study on the prediction of tip vortex cavitation inception and the vortex cavitation noise

PENG Xiao-xing¹, XU Liang-hao¹, SONG Ming-tai¹, ZHANG ling-xin², WANG Ben-long³

CAO Yan-tao¹, LIU Yu-wen¹, HONG Fang-wen¹, YAN Kai¹

(1 National Key Laboratory on Ship Vibration and Noise, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082

2 Department of Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027

3 Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240

(Email: henrypxx@163.com)

Abstract : Tip vortex cavitation (TVC) is an common and complex cavitation phenomenon in marine propeller. In present paper the elliptic hydrofoil with section NACA 662-415 is chosen as a model, tip vortex flow field was studied first by experimental measurements and numerical simulation. Velocity distributions, vortex core size, average pressure and turbulence fluctuation in the vortex were obtained to analyze the relation with TVC inception. In addition, the effect of water quality including air content and nuclei distributions on TVC inception was explored by test and numerical modeling. Combining with lift coefficient, Reynolds number and nuclei, a new prediction formula of tip vortex cavitation inception is proposed. Finally the vortex singing was studied, which is a special noise phenomenon in the development tip vortex cavitation. The way to repeatable generate the phenomenon at various Reynolds number and cavitation number was found in our laboratory. The mechanism of the vortex singing in cavitating tip vortex is presented.

Key words: Tip vortex; cavitation, flow field, noise, prediction