

掠翼型振荡水翼的水动力特性分析

陈卓¹, 焦波¹, 孙光², 林海花¹

1. 山东交通学院 船舶与港口工程学院, 山东 威海 264209

2. 山东交通学院 航运学院, 山东 威海 264209

摘要 : 在振荡水翼研究领域, 目前对于水翼的选择仍以传统的 NACA 类翼型为主。为探索其他翼型结构水动力相关特性以进一步提高水翼的适用范围。通过仿生学的方法以鱼尾鳍的后掠结构为基础, 建立了前缘后掠型、后缘前掠型以及后掠翼和前掠翼的振荡水翼的运动模型, 并描述了相关的数学表达式和参数定义。通过数值模拟方法, 分析了掠角对于掠翼型振荡水翼水动力性能的影响。结果显示, 掠角主要影响水翼的升阻力系数和力矩系数, 且其影响随角度变化并不呈完全相关关系。

关键词 : 振荡水翼; 掠翼; 水动力; 平均功率系数

Analysis Of Hydrodynamic Characteristics Of Swept Wing Oscillating Hydrofoil

Chen Zhuo¹, Jiao Bo¹, Sun Guang², Lin Haihua¹

1. Naval Architecture And Port Engineering College, Shandong Jiaotong University, Weihai, Shandong 26420

2. School of Navigation and Shipping, Shandong Jiaotong University, Weihai, Shandong 264209

Abstract : In the field of oscillating hydrofoil research, traditional NACA type airfoils are still the main choice for hydrofoils. To explore the hydrodynamic characteristics of other wing structures and further improve the applicability of hydrofoils. Based on the swept structure of the fish tail fin using biomimetic methods, motion models of oscillating hydrofoils with swept leading edge, swept trailing edge, swept back wing, and swept forward wing were established, and relevant mathematical expressions and parameter definitions were described. The influence of sweep angle on the hydrodynamic performance of swept wing oscillating hydrofoils was analyzed through numerical simulation methods. The results show that the sweep angle mainly affects the lift drag coefficient and moment coefficient of the hydrofoil, and its influence is not completely correlated with the change of angle.

Keywords : oscillating hydrofoil; swept wings; hydrodynamic; average power coefficient

引言

海洋能作为可再生能源之一, 自20世纪70年代开始, 受到各沿海国家尤其是发达国家的高度重视^[1] 开发和利用海洋可再生能源对于我国海洋战略新兴产业的培育和发展及缓解世界能源短缺问题均有重要意义。

潮流能是所有海洋能的重要分支之一。与其它形式能源相比, 潮流能具有许多优越性: 与太阳能, 风能相比, 潮流能能量更集中, 密度比太阳能大30倍左右, 比风能大4倍左右, 可预测性强, 依据地球、月亮、太阳与引潮力之间的相对运动, 能较精确地预测出所测定海域内的潮流能量; 能量较稳定, 波动性大约是波浪能的0.2%左右。据统计, 全球潮汐能和海流能技术可利用总量分别为 1×10^8 kW 和 3×10^8 kW, 年发电量可达2000万亿度。因此潮流能成为重点研发对象, 受到我国大力支持^[2] 振荡水翼发电装置是近年来新兴的潮流能转换装置。由于水翼展长限制小, 可部署在浅海、浅滩等地区。故相比传统旋转类水轮机, 其设备维护方便, 一次性投资小, 加之其运动速度缓慢, 对当地海洋生态系统较为友好^[3-6]。随着1981年McKinney^[7]等首次提出并用风洞实验验证了振荡翼捕能的可行性, 人们对于振荡水翼的研

究广泛开展。Pizial^[8] 对不同攻角下的翼型进行实验, 得到了其在空气条件下的瞬时压力数据, 并考察了三维翼型在旋转失速情况下的平均升力系数, 拖曳力系数以及俯仰力矩系数等运动特性。Li^[9] 等对剪切流中做俯仰运动的翼型的水动力学特征进行了数值模拟分析, 并研究频率对振荡翼推力的机理的影响, 并得出振动频率在0.7附近其推进效率最高。

NACA类翼型由于数据获取具有开放性, 本身又是低阻翼型, 故广泛被用于机翼及水翼的理论研究。随着振荡水翼的研究不断深入, 已有学者致力于改进传统翼型从而提高获能效率。Sun^[10] 等在NACA0018水翼基础上加装了可移动的尾缘格尼襟翼并考虑了在雷诺数不变的情况下格尼襟翼在不同长度和不同运动周期下对水翼能量捕获效率的影响, 以及与传统水翼和加装固定式格尼襟翼的各项水动力系数进行对比。数据表明, 尾缘格尼襟翼与振荡水翼的运动相结合有助于提高捕能效率。Fish团队^[11-16] 对座头鲸的水下运动做出研究, 发现座头鲸鳍肢前缘特殊的结节凸起产生的涡流有助于延迟失速, 增加升力, 减少阻力。并设计了具有类似突起的NACA 634-021翼型进行了风洞实验。结果表明, 具有突起的翼状结构可以将最大升力提高超过6%, 将极限失速角增加40%, 并将阻力降低多达32%。该项研究也直接证明通

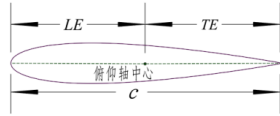
过仿生学内容对水翼翼型改良的可行性。

本文受 Fish 团队启发, 通过仿生学方法以鱼尾鳍的后掠结构为基础并进一步分析多种掠翼结构的水动力性能。

一、水翼模型的建立

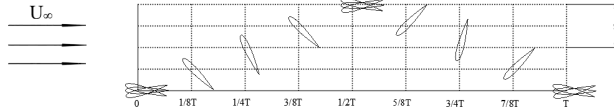
(一) 二维振荡水翼运动模型

图1为振荡水翼的参数图。定义 LE 为水翼俯仰轴中心与翼前缘的距离, TE 为俯仰轴中心与翼后缘距离, c 为水翼弦长, 俯仰轴中心位于水翼弦长上。



> 图1 二维振荡水翼几何模型

常规二维振荡水翼目前普遍采用的运动形式为: 在迎流作用下, 以正弦谐波围绕俯仰轴中心进行俯仰运动和沿 Y 轴垂降的升降运动的叠加。如图2所示。



> 图2 二维振荡水翼运动模型

常规振荡水翼正弦运动方程为:

$$y(t) = -y_p \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

$$\theta(t) = -\theta_p \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

式中, f 为振荡频率, t 为当前时刻, φ 为升降俯仰相位角(本研究中定为 90°)。

为消除由来流流场非定常性和非均匀性导致流速变化和水翼几何参数差异而造分析困难, 引入了2个重要无量纲参数, 雷诺数 Re_c 和折算频率 f^* , 式中 U_∞ 为来流速度, ν 为流体运动粘度:

$$Re_c = U_\infty c / \nu \quad (3)$$

$$f^* = fc / U_\infty \quad (4)$$

在研究中, 由于来流是水翼捕获能量的唯一来源, 故忽略水翼系统本身受力而仅考虑来流作用的影响。当水流过水翼时, 将产生随水翼运动状态变化且垂直于水翼方向的合力 $F(t)$, 该合力分解为垂直于来流方向的升力 $L(t)$ 和平行于来流方向的阻力 $D(t)$ 。同时, 合力 $F(t)$ 在水翼的旋转轴位置产生力矩 $M(t)$ 。定义无因次化后的水翼升力系数 C_L , 阻力系数 C_D , 力矩系数 C_M :

$$C_{L(t)} = L(t) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S \quad (5)$$

$$C_{D(t)} = D(t) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S \quad (6)$$

$$C_{M(t)} = M(t) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S c \quad (7)$$

式中, ρ 为流体密度, U_∞ 为来流速度, S 为水翼迎流面积。水翼的捕获能量瞬时功率 P 为升力做功与俯仰力矩做功之和:

$$P = L \cdot v + M \cdot \omega \quad (8)$$

故一个周期内水翼平均功率 \bar{P} 为

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt \quad (9)$$

瞬时功率系数 C_p 为

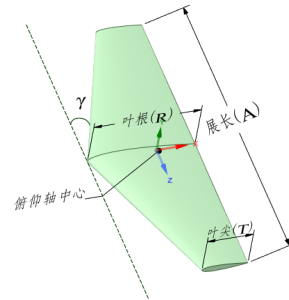
$$C_p = C_{PL} + C_{PM} = \frac{1}{U_\infty} [C_L v + C_M c \omega] \quad (10)$$

平均功率系数 \bar{C}_p 为:

$$\bar{C}_p = \bar{C}_{PL} + \bar{C}_{PM} = \frac{1}{T} [\int_0^T C_{PL} dt + \int_0^T C_{PM} dt] \quad (11)$$

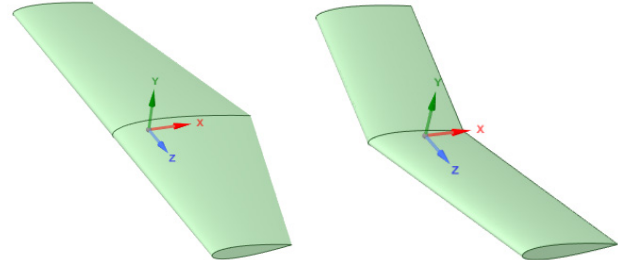
(二) 掠翼型振荡水翼模型

本文所采用掠翼型振荡水翼以 NACA0015 翼型为基础, 定义展长为 A , 叶根长 R , 叶尖长 T 。保持常规水翼翼尾缘部分结构不变, 在维持平均启动弦长恒定的条件下改变水翼翼尖与叶根部分弦长的比值即可得到前缘后掠水翼如图3。



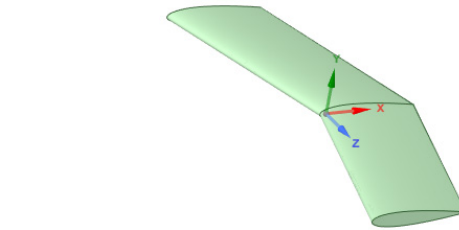
> 图3 前缘后掠型振荡水翼

同理, 保持前缘不变, 针对尾缘部分变化叶尖与叶根的比值得图4(a)所示后缘前掠水翼。



(a) 后缘前掠

(b) 后掠翼



(c) 前掠翼

> 图4 后缘前掠型振荡水翼

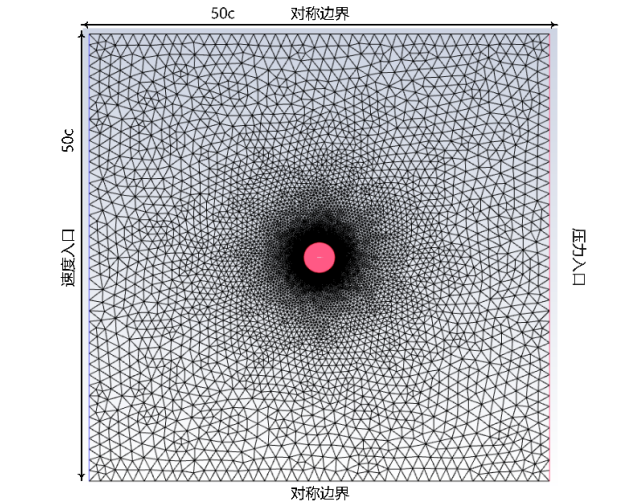
而在保持水翼整体弦长不变的情况下仿照机翼形式, 将水翼两侧分别向后和向前产生一定掠角即得到整体型掠翼如后掠翼和前掠翼如图4(b)和4(c)。

二、数值模拟方法与无关性验证

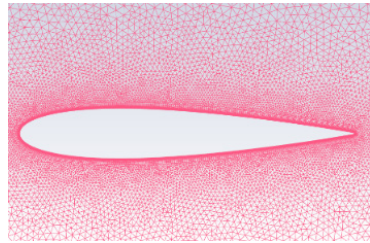
(一) 模拟方法验证

在 Fluent 模型基础上, 使用动网格与滑移网格模型相结合,

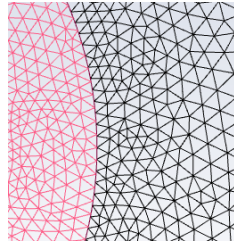
通过用户自定义函数 (UDF) 方法使全主动水翼进行正弦运动。图5为滑移网格模型, 其中正方形外流场区域宽度为 $50c$, 圆形流域直径 $3c$ 翼型采用 NACA0015, 雷诺数工况为 5×10^5 , 折算频率 0.14 俯仰角度为 75° 升沉幅值为1倍弦长 $0.25m$, 来流速度为 $2m/s$ 俯仰轴中心位于水翼弦长靠近前缘的三分之一处。其中网格节点总数为 3×10^4 , 水翼网格节点为 500 。



(a) 滑移网格



(b) 边界层部分



(c) 网格交界面

> 图7 滑移网格模型

Kinsey^[1] 等通过实验与数值模拟相结合的方法研究了振荡水翼在不同折算频率下的获能效率特性。本文为验证数值模拟方法及运动模型的正确性, 在该网格参数及工况条件下选取较为稳定的第三个周期与其研究进行对比验证, 结果如表2。其中 C_{Lmax} 为升力系数最大值, \bar{C}_D 为阻力系数平均值, C_{Mmax} 为俯仰力矩系数最大值, \bar{C}_P 为平均功率系数。经对比可知, 本文所采用的数值模拟方法合理。

表2 本模型与 Kinsey 研究模型计算结果比较

模型	C_{Lmax}	\bar{C}_D	C_{Mmax}	\bar{C}_P
Kinsey	2.819	1.757	0.565	0.986
本文	2.742	1.773	0.574	0.973

(二) 时间步长及网格无关性验证

为避免网格疏密和时间步长对计算结果的影响, 对本研究的三维掠翼型振荡水翼模型进行了网格和时间步长无关性验证。经对水翼结构及流场取四种不同数量网格后进行比较结果如表3

表3 网格数量无关性结果验证

网格数 / 百万	C_{Lmax}	\bar{C}_D	C_{Mmax}	\bar{C}_P
1.07	3.652	1.675	1.276	0.188

网格数 / 百万	C_{Lmax}	\bar{C}_D	C_{Mmax}	\bar{C}_P
1.25	3.682	1.668	1.279	0.198
1.44	3.685	1.669	1.279	0.198
1.72	3.629	1.661	1.247	0.197

可见, 在网格数量取 $1.25 \times 10^6 \sim 1.72 \times 10^6$ 时, 网格各项数值趋于稳定, 而 1.07×10^6 附近时平均功率系数与稳定区域仍有5.05%的差距。故选择 1.44×10^6 网格数量的划分方式作为水翼的网格模型。

表4为在保证库朗数小于1的情况下, 分别取时间步长为 $1.67 \times 10^{-3}s$, $1 \times 10^{-3}s$, $7.14 \times 10^{-4}s$, $5 \times 10^{-4}s$ 四种时间步长计算结果。

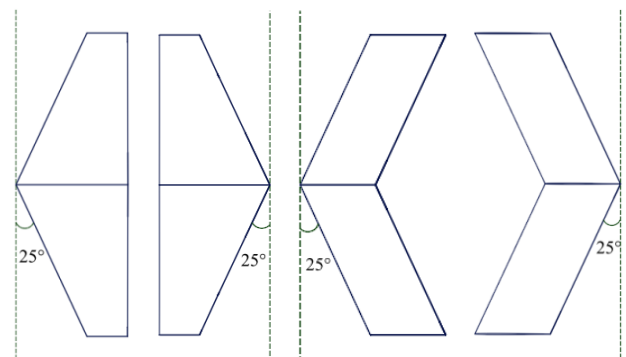
表4 时间步长无关性验证

$\Delta t/s$	C_{Lmax}	\bar{C}_D	C_{Mmax}	\bar{C}_P
1.67×10^{-3}	3.725	1.666	1.290	0.194
1×10^{-3}	3.685	1.670	1.279	0.198
7.14×10^{-4}	3.727	1.671	1.298	0.198
5×10^{-4}	3.725	1.675	1.300	0.199

为保证计算精度和收敛速度, 本研究取 $\Delta t = 7.14 \times 10^{-4}s$ 进行数值模拟研究。

三、研究结果与分析

了解掠角及俯仰轴位置对水翼水动力性能的影响, 可以为设计更高效的水翼提供理论依据, 增加设计时的灵活性和选择范围。本文数值模型固定条件为雷诺数 $Re_c = 5 \times 10^5$, 平均气动弦长 $c = 0.25m$, 迎流面积 $S = 0.25m^2$ 展长 $A = 1m$, 折算频率 $f^* = 0.14$, 升沉幅度 $y = c = 0.25m$, 俯仰振幅 $\theta = 70^\circ$ 。在该条件下设计掠翼型水翼包括尾缘不变, 仅通过改变梢根比而改变掠角的前缘后掠翼水翼图5(a)及后缘前掠翼水翼5(b)和以展长方向中心截面为基准, 两翼整体偏移从而产生不同角度的后掠翼和前掠翼。以掠角 25° 为例, 四种基本模型俯视图如图5所示:



(a) 前缘后掠

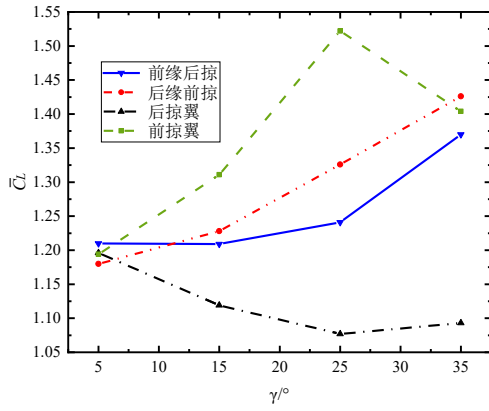
(b) 后缘前掠

(c) 后掠翼

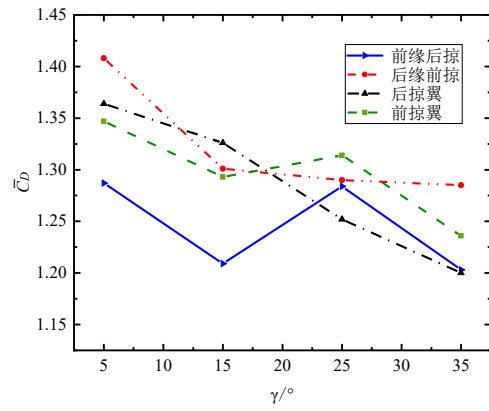
(d) 前掠翼

> 图8 掠翼型振荡水翼

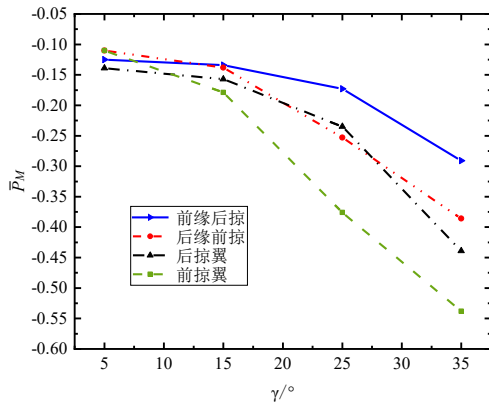
针对四种水翼结构, 研究四种掠角($5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ$)所代表的掠翼程度, 其各项水动力系数如下图:



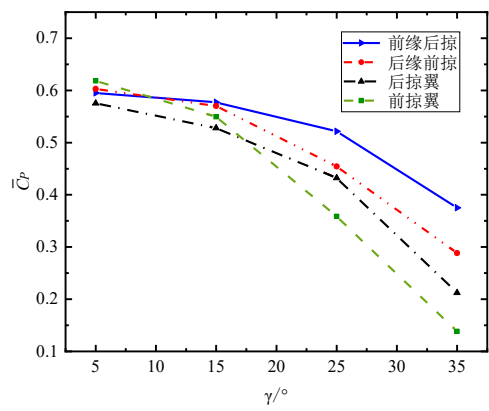
(a) 各模型平均升力系数



(b) 各模型平均阻力系数



(c) 各模型平均力矩功率系数

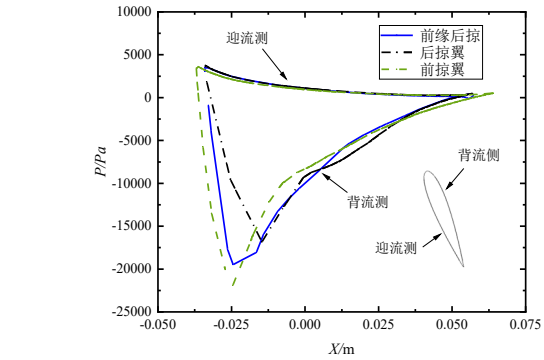


(d) 各模型平均功率系数

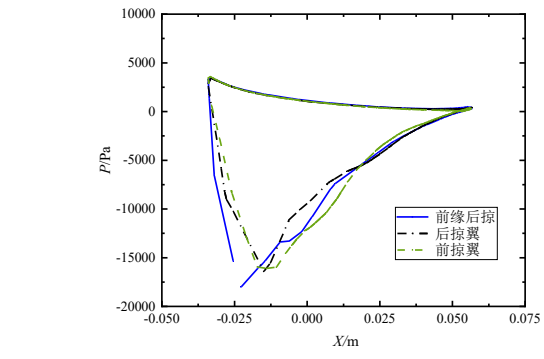
> 图9掠翼型水翼水动力相关系数

对于四种掠翼型水翼，其升力系数及阻力系数随掠角的变化呈不同趋势，前缘后掠型水翼升力系数在后掠角为 25° 之后明显上升，而阻力系数呈波动状态，在 15° 及 35° 时达到最小。后缘前掠型水翼自 15° 开始升力系数上升速度加快， 35° 时为四种结构最高。而阻力系数至 15° 时趋于平缓， 35° 时仍有四种结构中最高阻力系数。后掠翼相较于其他类型水翼升力系数明显较低，至 25° 时达到拐点并小幅上升。阻力系数随掠角增大而持续降低，并于 35° 成为四种结构中阻力系数最低的结构。前掠翼升力系数增长最为明显，在 25° 时达到峰值并出现拐点。其阻力系数变化与前缘后掠类似，值同比有所提高。而平均力矩功率系数仍为影响平均功率系数的主要原因，随着掠角的增大，水翼所作力矩功率增加量逐渐变大，致使水翼平均功率系数减小。

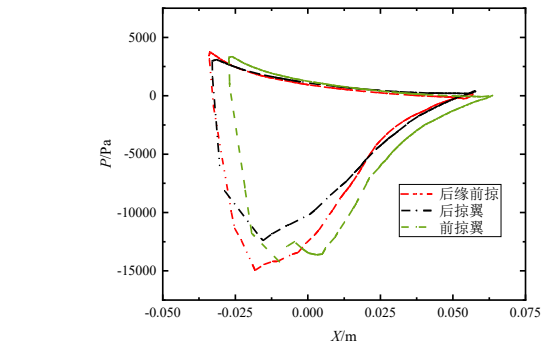
水翼表面压力图是反应水翼运动过程中受力情况的重要参考，图10为在四种不同掠角条件下，水翼平均弦长所在位置的上下表面压力随X方向长度变化的曲线。随着掠角的增大，各种水翼上下表面压差整体呈现减小趋势，在 25° 时达到最小，之后有所增加，可见水翼所受压力与掠角之间变化并非线性。



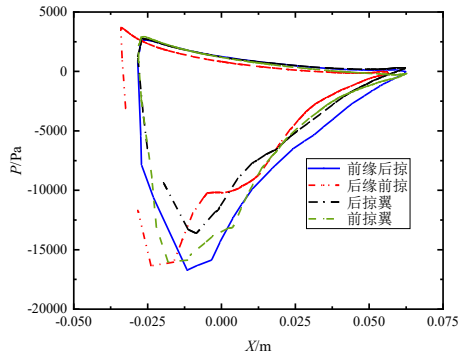
5° 掠角



15° 掠角

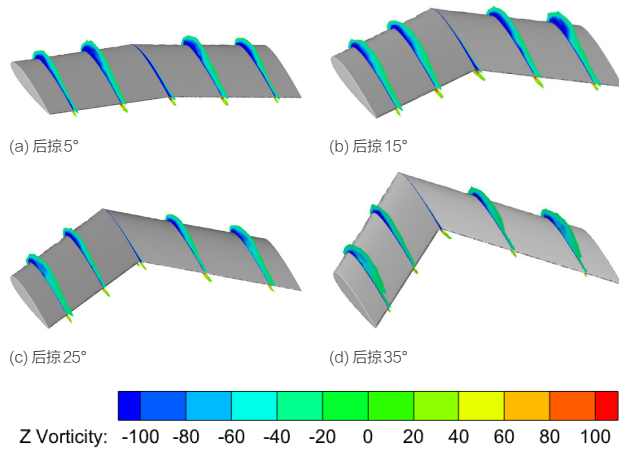


25° 掠角



35° 掠角

> 图 10 不同掠角各翼型表面压力图



> 图 11 不同后掠角水翼涡量图

结合图 11, 后掠翼涡量云图随着后掠角的增加而逐渐向叶尖扩散并减小。至 35° 时中心涡强度减小, 而边缘处产生轻微涡脱落现象。也是水翼在后掠角为 35° 条件下所受压力略大于 25° 的原因。

四、结论

本研究为掠翼型振荡水翼的设计提供了理论依据, 未来的研究可以针对推进方面的应用或进一步探索前掠型水翼及梯形翼等不同结构类型的水翼水动力性能, 以及对不同频率或俯仰角度等运动形式进行分析。具体结论如下:

(1) 随着后掠角的增加, 水翼整体表现为升力系数增加而阻力系数降低的特性, 该特点保证了水翼工作时的稳定性, 对于船舶推进性能有所改善。

(2) 在进行增加水翼弦向长度的研究时, 应留意力矩做功的增加, 且由于升力系数增加的缘故, 力矩功率所作负功对于水翼的影响逐渐提高。

(3) 致使不同结构水翼受力变化与掠角不成相关关系的原因在于各种结构水翼边缘产生的涡脱落状况不同, 应具体针对特定结构的水翼制定合理的设计方案。

参考文献

[1]Armaroli N, Balzani V. Towards an electricity-powered world [J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(9): 3193-222.

[2]Schiermeier Q, Tollefson J, Scully T, et al. Electricity without carbon [J]. Nature, 2008, 454(7206): 816-23.

[3]YOUNG J, LAI J C S, PLATZER M F. A review of progress and challenges in flapping foil power generation (vol 67, pg 2, 2014) [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 67(2014): 1-28.

[4]ZHU Q. Energy harvesting by a purely passive flapping foil from shear flows [J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 34(2012): 157-169.

[5]LIU Z Q, WANG Y Z, HUA X G. Numerical studies and proposal of design equations on cylindrical oscillating wave surge converters under regular waves using SPH [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 112242.

[6]ZHANG D, MA X, SI Y, et al. Effect of doubly fed induction Generator/Tidal current turbines on stability of a distribution grid under unbalanced voltage conditions [J]. Energies, 2017, 10(2): 212.

[7]KINSEY T, DUMAS G. Computational Fluid Dynamics Analysis of a Hydrokinetic Turbine Based on Oscillating Hydrofoils [J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(2): 021104.

[8]PIZIALI R. 2-D and 3-D oscillating wing aerodynamics for a range of angles of attack including stall [R], 1994.

[9]LI D Y, LIU N S, LU X Y, et al. Force characteristics and vortex shedding of a pitching foil in shear flows [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 17(1): 27-33.

[10]SUN G, WANG Y, XIE Y D, et al. Research on the effect of a movable gurney flap on energy extraction of oscillating hydrofoil [J]. Energy, 2021, 225: 120206.

[11]FRIEDLAENDER A S, HAZEN E L, NOWACEK D P, et al. Diel changes in humpback whale Megaptera novaeangliae feeding behavior in response to sand lance Ammodytes spp. behavior and distribution [J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 395: 91-100.

[12]HAZEN E L, FRIEDLAENDER A S, THOMPSON M A, et al. Fine-scale prey aggregations and foraging ecology of humpback whales Megaptera novaeangliae [J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 395: 75-89.

[13]FISH F E, WEBER P W, MURRAY M M, et al. The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology [Z]. Oxford University Press, 2011

[14]EDEL R, WINN H. Observations on underwater locomotion and flipper movement of the humpback whale Megaptera novaeangliae [J]. Marine Biology, 1978, 48: 279-287.

[15]FISH F E. The myth and reality of Gray's paradox: implication of dolphin drag reduction for technology [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2006, 1(2): R17.

[16]FISH F E, BATTLE J M. Hydrodynamic design of the humpback whale flipper [J]. Journal of Morphology, 1995, 225(1): 51-60.