水下仿生扑翼推进性能分析

丁　浩，宋保维，田文龙

（西北工业大学 航海学院，陕西 西安　710072）

摘　要： 为了探索水下仿生扑翼的推进机理，研究水下扑翼推力及推进效率的特性，建立了二自由度水下扑翼运动模型及水下扑翼推进效率估算方法。采用计算流体力学的方法，利用动网格技术处理运动边界问题，基于 Realizable k-ω 湍流模型对水下扑翼运动的非定常水动力性能进行了数值计算。通过对多种运动工况下水下扑翼推进性能数值计算的结果分析，阐述了水下扑翼推力产生的机理，得到了扑动频率、上下拍动幅度、翻转幅度等扑翼运动参数对扑翼推力的影响关系，给出了水下扑翼推进效率随运动参数的变化曲线及最佳推进效率点，为水下扑翼推进技术的研究和发展提供了重要参考。

关　键　词： 扑翼推进，动网格，推力，推进效率

中图分类号： TP242.3　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-2758(2013)01-0150-07

目前，水下仿生推进技术成为国内外研究的热点，水生动物经过上亿年的演变和进化将非定常水动力学中的物理原理应用得非常成功，达到了很高的机动性能和效率，其中鱼类和企鹅类等哺乳动物的扑翼游动方式具有高速、高效、灵活、低噪等特点[1]。通过研究、学习、模仿等手段来复制和再造这些扑翼游动生物的运动特性和功能，将其运用到水下航行器中，将极大提高水下航行器的运动能力，具有很强的实用价值。

国内外对仿生扑翼推进技术及机理开展了很多研究工作，取得了许多定性和定量的成果，为仿生扑翼推进技术在水下航行器的应用提供了有力的技术支撑。其中，麻省理工学院的 Traintafyllou 教授开展了关于水翼摆动的实验，得到了斯特劳哈尔数与水翼推进性能的关系[2]；Jones K. D 等人通过数值仿真及实验在扑翼运动机理方面做了一系列研究[3]；梁建宏，王田苗等实验研究了机器鱼在不同频率下游动速度、阻力与消耗功率的关系[4]；苏玉民等利用三维面元法计算分析了金枪鱼刚性和柔性尾鳍的非定常水动力特性[5]；宋笔锋等进行了微扑翼飞行器的低速风动实验，研究了空中扑翼展弦比、刚度和弯度对扑翼推力特性的影响[6]。

然而上述文献对水下仿生扑翼推进尚缺乏系统全面的研究，且未给出水下扑翼推进效率的衡量公式。为了探索水下仿生扑翼的推进机理，研究水下扑翼推力及推进效率的特性，本文采用计算流体力学(CFD)的方法，对扑翼二自由度运动模型进行了非结构化网格划分，并利用动网格技术对水下扑翼运动的非定常水动力性能进行了数值计算，得到了扑动频率、上下拍动幅度、翻转幅度等扑翼运动参数对扑翼推力的影响关系，在建立水下扑翼推进效率仿真计算方法的基础上，给出了水下扑翼推进效率随运动参数的变化曲线及最佳推进效率点，为水下扑翼航行器的推进器设计提供了一定的参考。

1　数学模型

1.1　控制方程

考虑不可压缩流动湍流问题，其运动控制方程为[7]

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\gamma + \gamma_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]$$

收稿日期： 2012-05-03　　**基金项目：** 高等学校博士学科点专项基金(20116102110009)资助

作者简介： 丁浩(1983—)，西北工业大学博士研究生，主要从事水下航行器总体设计研究。

式中，$u_i(i=1,2)$ 为流体运动速度，$x_i(i=1,2)$ 为空间坐标，p 为流体压强，t 为时间，γ 为运动黏性系数，$\gamma_t = c_\mu k^2 \varepsilon$ 为湍流黏性系数，k 为湍流动能，ε 为湍动能耗散率，c_μ 为常数。

1.2　Realizable k-ε 湍流模型

鸟类和昆虫的翅膀扑动时，翅上存在着涡的生成和脱离并对其飞行能力产生了巨大的影响。而扑翼在水中运动的运动原理与鸟类的飞行原理相似，因此推断扑翼在水中运动时，可能亦存在着涡的生成和脱落。为更好地捕捉这一特征，湍流模型选择 Realizable k-ε 模型。相应方程如下[7]：

湍流动能 k 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k + \rho\varepsilon$$

耗散率 k-ε 方程

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho c_1 S\varepsilon - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + c_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} c_{3\varepsilon} G_b$$

2　数值计算

2.1　扑翼运动模型

本文将扑翼运动模型考虑为无界流中的刚性翼，定义二自由度扑翼的上下拍打运动和翻转运动均按简谐运动规律扑动，其运动的角位移表达式

$$\begin{cases} y(t) = y_0 \sin(2\pi f t + \psi_1) + y_{\text{bias}} \\ \theta(t) = \theta_0 \sin(2\pi f t + \psi_2) + \theta_{\text{bias}} \end{cases}$$

式中 y_0 是扑翼上下拍水的幅值，θ_0 是扑翼自身的翻转幅值，f 为频率（翼的翻转频率和拍水频率相同），ψ_1、ψ_2 为初始相位角，y_{bias} 用来改变扑翼拍水的平衡位置，θ_{bias} 用来改变扑翼翻转的平衡位置，y_{bias}、θ_{bias} 可改变航行器的运动状态。

对上求导可得拍水运动线速度 v 和翻转运动角速度 ω，其表达式

$$\begin{cases} v(t) = 2\pi f y_0 \cos(2\pi f t + \psi_1) \\ \omega(t) = 2\pi f \theta_0 \cos(2\pi f t + \psi_2) \end{cases}$$

扑翼二自由度运动模型运动过程如图 1 所示。

2.2　扑翼推进效率

扑翼运动所需的功率主要由 3 部分组成[9]：①运动过程中克服翼自身的重力、惯性所做的功和翼的弹性变形所贮存的机械能；②驱动机构传动过程中克服摩擦等损失的机械能；③为产生游动所需动力而对水做的功。对扑翼水下航行器而言，第 3 项功率是我们最关心且占主导作用的部分。本文所用扑翼模型为刚性翼模型，忽略其重力及传动环节影响，主要用第 3 部分水动功率作为输入功率来衡量扑翼推进效率。

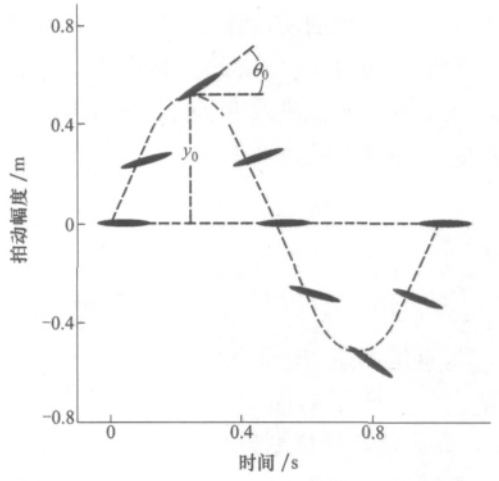


图 1　扑翼二自由度运动模型示意图

为了便于研究，将扑翼运动产生的推力、升力及力矩进行无量纲化处理，推力系数

$$C_T = \frac{2F_x}{\rho_\infty \cdot V_\infty \cdot S}$$

升力系数

$$C_L = \frac{2F_y}{\rho_\infty \cdot V_\infty \cdot S}$$

力矩系数

$$C_m = \frac{2M}{\rho_\infty \cdot V_\infty \cdot S \cdot L}$$

式中 F_x 扑翼运动瞬时推力，F_y 为扑翼运动瞬时升力，M 为扑翼运动瞬时力矩，ρ_∞ 为无穷远处流体密度，V_∞ 为无穷远处来流速度，S 为翼表面积，L 为翼特征长度，设为常数。

整数个周期 T 内扑翼产生的平均推力为

$$\bar{F}_x = \frac{1}{T}\int_0^T F_x(t)\,\mathrm{d}t$$

扑翼推进效率按常规计算方法可定义为

$$\eta = \frac{\bar{F}_x \cdot V}{\bar{P}}$$

式中 η 为推进效率，$\bar{F}_x$ 为对应平均推力，$\bar{P}$ 为平均输入功率，V 为游动速度。式中 $\bar{F}_x$、$\bar{P}$ 可以通过数值计

算得到，而 V 在真实情况下应该是扑翼扑动产生的推力克服阻力达到的实际游动速度，在这里等于我们设定的来流速度 V_∞，由此计算出来的推进效率并不是通常意义的推进效率，因此，本文从能量转换的角度定义扑翼的推进效率为

$$\eta = \frac{\bar{F}_x}{\bar{P}}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{T}\left(-\int_0^T M(t)\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t + \int_0^T F_y \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t\right)$$

式中 η 为有量纲量，单位 N/W，物理意义即单位输入功率产生的推力大小。

2.3　计算区域与网格划分

计算域尺寸为：1 500 mm × 1 500 mm；入口边界（Inlet）设置：velocity inlet；出口边界（Outlet）设置：outflow；其余壁面（Wall）设置：wall。

基于对动网格的认识，采用非结构化的三角形网格来作计算域的网格，为提高计算精度，对扑翼的近壁面网格做细化，为提高动网格的更新质量，设置交界面以区分不同流场域。边界条件设置及网格如图 2 所示。

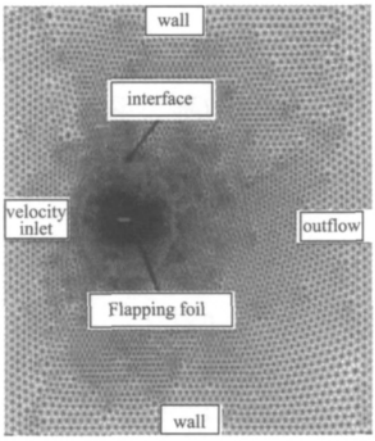


图 2　边界条件设置

2.4　算例验证

为了验证本文计算方法的可行性，采用与 MIT 相同的试验工况[8] 来进行计算，即采用 NACA0012 翼型，来流速度 0.4 m/s，翻转幅度 30°，分别计算 St 为 0.1，0.2，0.3，0.4 下的平均推力系数。St 定义为

$$St = \frac{2y_0 f}{U}$$

式中，U 为来流速度，y_0 为翼上下振荡幅度，f 为扑动频率。

如图 3 所示，通过计算所得到的平均推力系数和 MIT 的试验数据能够较好吻合，且具有相同的变化趋势。

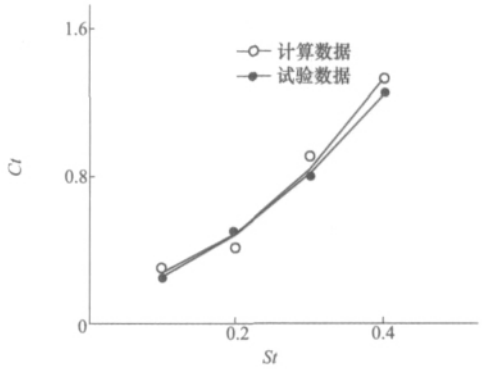


图 3　计算结果与试验数据对比

3　计算结果与分析

为了研究扑翼推力产生机理及各运动参数对推力及效率的影响关系，本文选用二维 NACA0010 翼型的刚性扑翼作为运动模型，翼型弦长为 c = 100 mm。

3.1　对扑翼推力产生机理的解释

为了探索扑翼推力产生的机理，对上面的扑翼模型在来流速度 U = 0.1 m/s，上下拍动幅度 y_0 = 0.03 m，翻转幅度 θ_0 = 30°，频率 f = 2 Hz 工况下的扑翼运动进行了数值仿真，得到了推力系数 C_t 随时间的变化曲线以及扑翼在整个周期运动中流场速度矢量图。

本算例步长设为 0.005 s，计算了 800 步，共 4 s 时间，扑翼运动从起动到结束共经历了 8 个完整的周期，在扑翼开始运动 2 个周期后流场达到稳定状态，因此我们选取第 4 个周期（2 ~ 2.5 s）推力系数随时间的变化作为研究对象来对扑翼运动的推力特性进行分析。

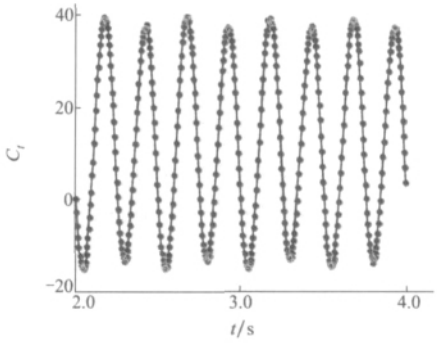


图 4　推力系数随时间变化曲线

从图 4 中可以看出:

1) 扑翼运动产生的推力随时间的变化是周期性变化的,且变化频率是扑翼运动频率的 2 倍;

2) 在扑翼运动 1 个周期内,产生了 2 个峰值推力和 2 个峰值阻力(推力系数为负);

3) 1 个周期内平均推力系数为正,意味着扑翼运动产生了推力。

为了解释扑翼运动推力系数随运动时间的变化,我们将扑翼运动的 1 个完整周期划分为 4 个阶段:

1) 时间 2 ~ 2.125 s,从平衡位置到扑翼上拍最高点为上挥 1 阶段,此过程 $C_t < 0$,从图 5a) 可以看到,扑翼前缘形成了逆时针的涡,后缘形成了顺时针的涡;

2) 时间 2.125 ~ 2.25 s,从上拍最高点回到平衡位置的过程为下拍 1 阶段,此过程 $C_t > 0$,从图 5b) 可以看到,扑翼前缘形成顺时针的涡,后缘形成逆时针的涡;

3) 时间 2.25 ~ 2.375 s,从平衡位置到下拍最低点为下拍 2 阶段,此过程 $C_t < 0$,从图 5c) 可以看到,扑翼前缘形成顺时针的涡,后缘形成逆时针的涡;

4) 时间 2.375 ~ 2.5 s,从下拍最低点回到平衡位置的过程为上挥 2 阶段,此时 $C_t > 0$,从图 5d) 可以看到,扑翼前缘形成逆时针的涡,后缘形成顺时针的涡。

扑翼运动过程中受到的力是由于扑翼运动时和流场中的流体相互作用造成的。从扑翼受力的角度来讲,这种作用力可以分为 2 部分: ①扑翼本身阻碍流体流动,而流体施加到扑翼上的阻力; ②外力驱动扑翼运动时,使流场流动发生变化,将能量传递到流体,流体以涡的形式将能量重新传递给扑翼而使其受力,这种力可以是阻力,也可以是推力。

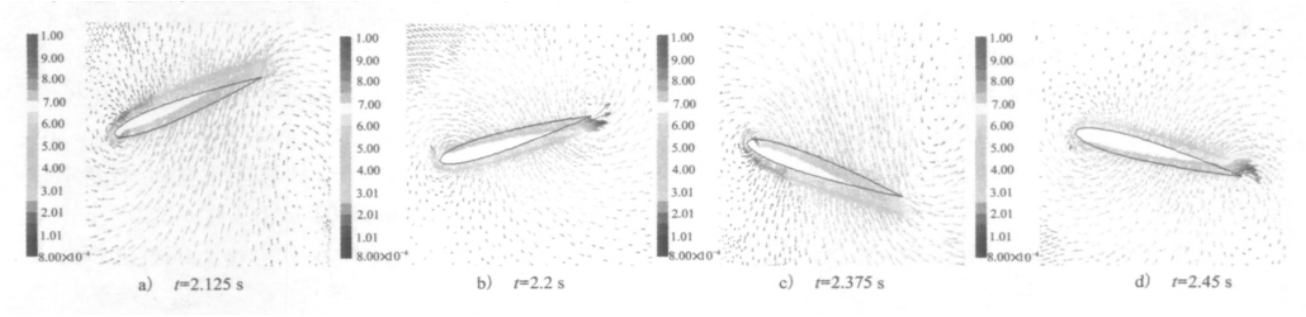


图 5　1 个周期内不同时刻扑翼运动流场速度矢量变化图

结合扑翼推力系数变化规律以及上述对扑翼运动过程中涡的变化可以对扑翼推力的产生做如下分析:

1) 前缘涡和尾涡的产生对扑翼推力的产生有重要影响[10]。扑翼在上挥和下拍过程中,前缘涡和尾涡的旋向虽然相反,但从它们的排列上看,在脱离扑翼后都将形成逆卡门涡街[3],从而对扑翼产生推力作用;

2) 在扑翼上挥 1 阶段,扑翼运动速度从零按余弦规律增大到最大值,而翻转角度从零变化到翻转最大幅值,初始阶段,由于扑翼运动速度为零,前缘涡及尾涡尚未形成,此时,扑翼对流体的阻碍起主导作用,扑翼产生的力表现为阻力,且随着翻转幅度的增加这种阻力明显增大; 随着扑翼运动速度的不断增加,前缘涡及尾涡的脱离形成的逆卡门涡街将产生推力而抵消部分阻力,阻力在达到一个峰值的极限位置时开始减小。

3) 在扑翼下拍 1 阶段的初始位置,新的尾涡尚未形成,上挥 1 阶段形成的尾涡仍存在于流场中,它增大了扑翼与流体的相对速度,使得扑翼产生的推力继续增大,这与“尾流捕获”机理[10]相符合。随着扑翼翻转角度的减小,扑翼对流体的阻碍作用也开始减小,此时新的前缘涡及尾涡亦形成,所以此时的推力增加幅度剧烈,然而随着扑翼运动速度的逐渐减小,形成的逆卡门涡街强度随之减弱,推力开始减小,从整个变化情况看,推力在到达一个推力峰值后开始下降。

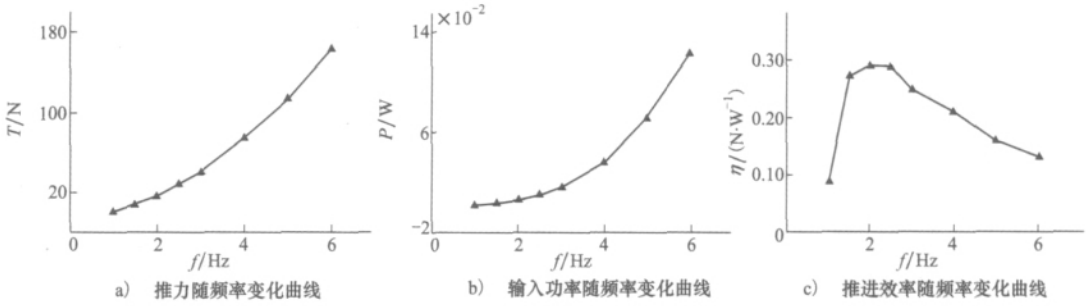
4) 扑翼下拍 2 过程与上挥 1 过程推力的变化相似,上挥 2 过程与下拍 1 过程相似,出现峰值推力和峰值阻力是上文提到的 2 部分力相互作用的结果。

经过以上分析,我们不难看出,由于 2 种力的交

互作用，扑翼推力的变化频率确实是扑翼扑动频率的 2 倍，且产生了 2 个推力峰值和 2 个阻力峰值，由于推力峰值大于阻力峰值，扑翼运动的 1 个周期的平均推力系数为正，产生了推力。

3.2　扑翼运动推力及效率随频率的变化

设定来流速度 $U = 0.2$ m/s，上下拍动幅度 $y_0 = 0.03$ m，翻转幅度 $\theta_0 = 30°$，计算了频率 f 分别为 1 Hz、1.5 Hz、2 Hz、2.5 Hz、3 Hz、4 Hz、5 Hz、6 Hz 下的推进特性。



a)　推力随频率变化曲线　　b)　输入功率随频率变化曲线　　c)　推进效率随频率变化曲线

图 6　推进特性随拍动频率变化曲线

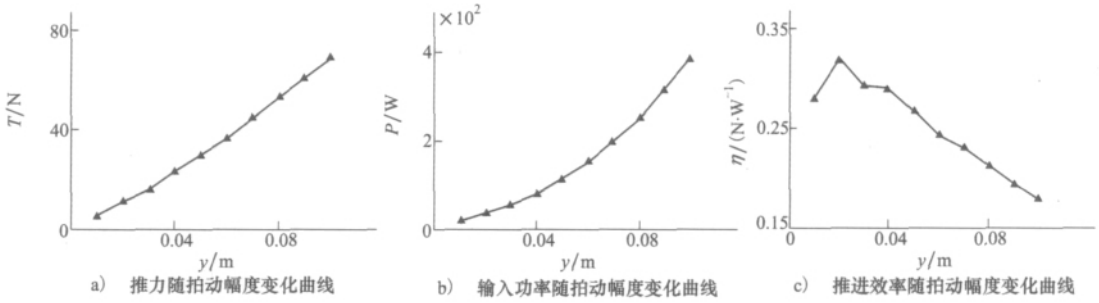
1) 在其它运动参数确定的情况下，扑翼运动的频率越高，其单位时间内对流体做的功越大，其产生的平均推力也越大，如图 6a) 所示，产生的平均推力近似的与扑翼运动频率平方成正比，即 $T \propto f^2$。

2) 随扑翼运动频率的增加，所需要的输入功率随之显著增加，在 $f < 3$ Hz 区域，增加幅度较为缓慢，在 3 Hz $< f <$ 6 Hz 区间，平均输入功率急剧增加。如图 6b) 所示。

3) 推进效率随频率的增加整体呈先增加后降低的趋势，也就是说推进效率随频率变化有个最佳值点，所得这一变化趋势与 MIT 试验结果相符[8]。如图 6c) 所示，效率最佳值点所对应的频率为 1.5 ~2.5Hz。

3.3　扑翼运动推力及效率随拍动幅度的变化

设定来流速度 $U = 0.2$ m/s，翻转幅度 $\theta_0 = 30°$，拍动频率 $f = 2$ Hz，计算了扑翼上下拍动幅度 y_0 分别为 0.01 m、0.02 m、0.03 m、0.04 m、0.05 m、0.06 m、0.07 m、0.08 m、0.09 m、0.1 m 下的推进特性。



a)　推力随拍动幅度变化曲线　　b)　输入功率随拍动幅度变化曲线　　c)　推进效率随拍动幅度变化曲线

图 7　推进特性随上下拍动幅度变化曲线

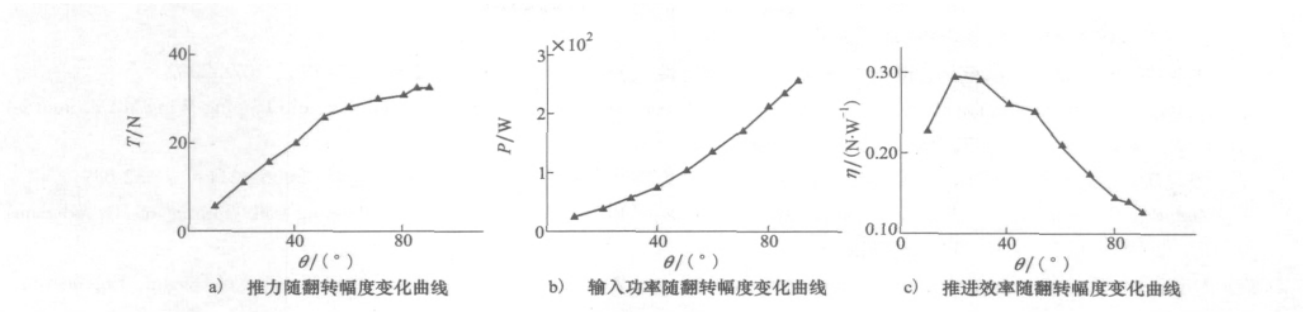
1) 拍动幅度的增大，使得扑翼上下扑动的线速度显著增大，既增大了动压，同时增大了扑翼对流体的做功距离，因此，推力随拍动幅度的增加而呈近似线性增加。

2) 平均输入功率随拍动幅度的增加而增加，从整体变化趋势看，平均输入功率近似与拍动幅度平方成正比，即 $P \propto y_0^2$，如图 7b) 所示。

3) 如图 7c) 所示，从整体变化趋势看，推进效率随拍动幅度增加呈先增加后减小的趋势，仍然存在一个最佳推进效率点，在本例中最佳推进效率点所对应的拍动幅度 $y_0 = 0.02$ mm。

3.4　扑翼运动推力及效率随翻转幅度的变化

设定来流速度 $U = 0.2$ m/s，上下拍动幅度 $y_0 = 0.03$ m，频率 $f = 2$ Hz，分别计算了翻转幅度 θ_0 为 10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°、85°、90° 下的推进特性。



a) 推力随翻转幅度变化曲线　b) 输入功率随翻转幅度变化曲线　c) 推进效率随翻转幅度变化曲线

图 8　推进特性随上下翻转幅度变化曲线

1) 翻转幅度的增加同时增加了扑翼运动对流体做功的距离,产生的推力随之增加,但在翻转幅度超过 50°时,推力的增加幅值有所减缓,在超过 85°时,推力幅值基本不再增加,如图 8a) 所示。主要原因是翻动幅度的增加,使得扑翼对来流的阻碍作用明显变大,产生的推力将有部分用于抵消由此产生的阻力。

2) 从图 8b) 可以看出,平均输入功率随翻转幅值增加,从整体变化趋势看,平均输入功率近似与拍动幅度平方成正比,即 $P \propto \theta_0^2$。

3) 推进效率随翻转幅度增加呈先增加后减小的趋势,如图 8c) 所示,最佳推进效率点所对应的拍动幅度 $\theta_0 = 20° \sim 30°$,小于 20°时,效率呈增加趋势,大于 30°时则开始下降。

4　结　论

建立了二自由度扑翼运动模型,并给出了数值计算扑翼推进效率的方法,利用 Fluent 动网格技术,采用 Realizable k-ε 湍流模型,通过求解非惯性坐标系下不可压缩 N-S 方程,对水下扑翼运动的非定常水动力性能进行了数值计算。计算结果表明:

1) 前缘涡和尾涡对扑翼推力的产生有重要作用,它们脱离扑翼后形成的逆卡门涡街是产生推力的重要因素,与扑翼本身阻碍流体流动而反作用于扑翼的阻力相互作用,使扑翼推力的变化产生了 2 个峰值推力和 2 个峰值阻力;

2) 推力随扑翼拍动频率的增加呈平方倍的增加,但推进效率存在一个最佳值点,在设计水下扑翼航行器时,在推力不足的情况下,可以增大拍动频率,在航行器保持匀速航行的情况下,为了节省电源,应尽量将频率保持在最佳值点附近;

3) 推力随上下拍动幅度的增加近似呈线性增加,而推进效率呈先增加后降低的趋势;

4) 推力随翻转幅度的增加而增加,但随着翻转幅度的增加,推力的增加幅度变小,且有下降的趋势,而对应的推进效率呈先增加后减小的趋势。

参考文献:

[1] 高　俊, 毕树声, 李　吉等. 胸鳍扑翼式机器鱼的设计及水动力实验. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(3): 344-350
Gao J, Bi S S, Li J, et al. Design and Hydrodynamic Experiments on Robotic Fish with Oscillation Pectoral Fins. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(3): 344-350 (in Chinese)

[2] Schouveiler L, Hover F S, Triantafyllou M S. Performance of Flapping Foil Propulsion. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20: 949-959

[3] Jones K D, Castro B M, Mahmoud O, et al. A Numerical and Experimental Investigation of Flapping-Wing Propulsion in Ground Effect. AIAA 40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2002

[4] 梁建宏, 王田苗, 魏洪兴等. 水下仿生机器鱼的研究进展Ⅲ-水动力学实验研究. 机器人, 2002, 24(4): 304-308
Liang J H, Wang T M, Wei H X, et al. Research and Development of Underwater Robofish Ⅲ-Hydrodynamics Experiments of Robofish. Robot, 2002, 24(4): 304-308 (in Chinese)

[5] 苏玉民, 黄　胜, 庞永杰. 仿鱼尾潜器推进系统的水动力分析. 海洋工程, 2002, 20(2): 54-59
Su Y M, Huang S, Pang Y J. Hydrodynamic Analysis of Submersible Propulsion System Imitating Tuna-Tail. The Ocean Engi-

neering, 2002, 20(2): 54-59 (in Chinese)

[6] 张亚峰, 宋笔锋, 袁昌盛等. 微型扑翼飞行器推力特性试验. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2078-2082
Zhang Y F, Song B F, Yuan C S, et al. Experimental Investigation of Propulsion Characteristic of Flapping-Wing MAV. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2078-2082 (in Chinese)

[7] 张晓庆, 王志东, 张振山. 二维摆动翼仿生推进水动力性能研究. 水动力学研究与进展, 2006, 21(5): 632-639
Zhang X Q, Wang Z D, Zhang Z S. Hydrodynamic Study of Bionic Propulsion for 2-D Flapping Foil. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21(5): 632-639 (in Chinese)

[8] Michael S T, Alexandra H T, et al. Review of Experimental Work in Biomimetic Foils. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 43(3): 558-594

[9] 曾 锐, 昂海松, 刘国涛等. 柔性扑翼的模型建立及其功率研究. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(3): 28-31
Zeng R, Ang H S, Liu G T, et al. The Model and Power of Flexible Flapping-Wing. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(3): 28-31 (in Chinese)

[10] Dickinson M H. The Wake Dynamics and Flight Forces of the Fruit Fly Drosoph Ilamelano Gaster. The Journal of Experimental Biology, 1996, 199: 2085-2104

Exploring Propulsion Performance Analysis of Bionic Flapping Hydrofoil

Ding Hao, Song Baowei, Tian Wenlong

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Bionic flapping hydrofoil underwater vehicles show obvious advantages over traditional underwater vehicles. One of the key problems in the bionic flapping hydrofoil research is the propulsion performance. Sections 1, 2 and 3 of the full paper explain the exploration mentioned in the title. Their core consists of: "The mechanism, the thrust property and propulsive efficiency of the bionic flapping hydrofoil propulsion is investigated by solving numerically the incompressible Navier-Stokes equations in a non-inertial reference frame moving with the rigid foil. First, a 2-DOF motion model of the rigid flapping foil is developed. Then the computational domain was discretized into unstructed grid within the ANSYS ICEM software. Finally, numerical computations of the flapping foil movement under various propulsion conditions were carried out by means of code Fluent.". The computational results, given in Figs. 4 through 8, and their analysis demonstrate preliminarily the mechanism of flapping foil, and show preliminarily and quantitatively the relationship between the propulsion performance and the motion parameters, including inflow velocity, flapping frequency, pitch amplitude and heaving amplitude; all these can be used as useful reference in the further research of flapping foil propulsion technology. Section 4 gives some useful conclusions of the full paper.

Key words: calculations, computer software, degrees of freedom (mechanics), efficiency, hydrofoil propulsion, mathematical models, Navier Stokes equations; DOF, dynamic mesh, flapping hydrofoil propulsion, propulsive efficiency, thrust