doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2021.05.009

仿海蛇柔性桨状蛇尾推进水动力学研究①

刘春红②* ** *** 张国伟③** *** 刘 铜** *** 李 斌** *** 慕 丽*

(*沈阳理工大学机械工程学院 沈阳 110159)

(**中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(***中国科学院机器人与智能制造创新研究院 沈阳 110169)

摘 要 海蛇躯体不同的推进段对推力的贡献不同,侧面压扁成桨状尾部是海蛇自适应进化最典型的特征,显著增强了其运动速度、机动性和效率。本文以柔性蛇尾为研究对象,建立蛇尾摆动流固耦合水动力分析模型,采用求解 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)方程方法,研究蛇尾尺度参数-运动学参数-推进力之间的动力学关系。以 NACA006 翼型为基础,分析了不同蛇尾运动频率、幅值以及几何参数对推进力的影响。结果表明,摆动频率和摆动幅值对推进力的影响非独立的,本文中模型在摆动频率大于 0.7 Hz、摆动幅值小于 45°时,推进力随摆动频率、摆动幅值增大而增大;在改变蛇尾外形参数优化时,推进力随蛇尾侧面积增加而增加,通过改变弦长增大侧面积的方式有利于增加推进力。

关键词 仿生机器海蛇;柔性蛇尾;流固耦合;仿真实验

0 引 言

仿海蛇机器人具有细长的身体结构、良好的机动能力和姿态调整能力,与传统水下机器人不同,海蛇机器人有超冗余自由度,使其更容易在复杂的障碍中接近目标位置,更加胜任受限空间、狭小空间环境作业任务[1]。鉴于海蛇机器人突出的机动性能和作业能力,文献[2]模拟生物蛇"波动"方式运动,研制了国际上首台水下蛇形机器人,通过蛇体关节翼板实现其水中游动。文献[3]开展了水下蛇形机器人推进方式研究,仿真结果证明了刚性蛇尾对推进效率的积极作用。文献[4]结合蛇形驱动和传统推进器推进方式联合研制了用于水下检修的 EELUME 系列蛇形机械臂。文献[5]使用三维运动测量系统和脊椎的 3D 仿真模型来测试海蛇的运动,采用椭圆形截面躯体和软材料蛇尾研制了首台海蛇机器人样机。文献[6]研制了水陆两栖蛇形机器人,并借鉴水下滑翔机的滑翔运动特征,开展了混合驱动滑翔蛇形机器人研究[7],阐明海蛇灵活的身体与水流的相互作用,是提高海蛇机器人游动效率的关键。

生物学研究表明,被侧面压扁成桨状结构的海蛇尾是海蛇自适应创新进化最典型的特征。文献[8]利用谱系分子系统学和内部骨结构的计算机断层扫描重建了胎生海蛇尾桨的进化,研究表明,桨的大小和形状增强了海蛇在水中的机动性、加速性,尤其在躲避危险时,迅速俯冲、游动等加速运动作用表现更为明显。文献[9]将人工桨附在幼虎的尾巴上,评估了尾巴形状对运动性能的影响,即尾桨提高了游泳速度,但降低了陆地上的爬行速度。文献[4]仅是定性地给出蛇尾对运动的促进作用。文献[10]探究带有被动尾鳍的仿生水下蛇机器人路径跟踪问

① 国家重点研发计划项目(2017YFB1200103)资助。

② 女,1992 年生,硕士生;研究方向:水下蛇形机器人水动力研究;E-mail: lch_111503@126.com

③ 通讯作者,E-mail: zhgw@sia.cn

(收稿日期:2020-05-15)

题,被动尾鳍可以使机器人的前进速度几乎翻倍。但是上述研究尚未定量给出蛇尾尺度参数-运动学参数-推进力之间的内在关系。

目前,关于生物尾部推进作用机理的研究多集中于鱼的尾鳍,文献[11]在对鱼尾鳍推进研究中,以空气动力学的二维机翼理论为基础,提出了“大幅摆细长体理论”(LAEBT)。文献[12]提出“二维波动板理论”,将鱼类身体简化为弹性薄板,进行柔性波动板的二维推进特性研究。文献[13]运用三维时域面元法分别分析了刚性尾鳍和柔性尾鳍的水动力性能,并提出大摆幅摆动尾鳍的计算方法。文献[14]针对鱼鳍推进性能等问题,针对鱼鳍材料刚度对推进性能的影响进行研究,发现刚性鱼鳍与柔性鱼鳍的流场结构明显不同。随着柔性材料的发展,仿生柔性尾鳍对于水下生物推进机理的模仿更为接近。文献[15]以金枪鱼为研究对象,针对柔性尾鳍进行研究,通过求解 RANS 方程和非定常势流面元法的计算,研究弦向变形相位角对柔性摆动尾鳍水动力性能影响,结果表明在不同的前进速度中合理的弦向变形相位角使得柔性尾鳍的输入功率大于刚性尾鳍,且推进效率更大。文献[16]采用基于雷诺平均 RANS 方程的数值方法和有限体积法计算,探讨了摆动尾鳍的各个运动参数及不同尾鳍形状对仿鱼尾鳍的性能之影响。

然而,蛇尾形状的差异对于水动力机制有所不同,对于蛇尾水动力分析并不能完全适用于海蛇机器人,因此本文针对海蛇柔性桨状蛇尾建立三维模型并针对其运动参数进行流固耦合水动力分析,采用求解 RANS 方程的累积分布函数(cumulative function distribution, CFD)方法计算了三维柔性摆动蛇尾模型的水动力性能。讨论了仿生海蛇桨状蛇尾运动频率、幅值参数以及不同展弦比的蛇尾对推进力的影响,为机器海蛇后续研究提供基础。

1 蛇尾运动力学分析

海蛇蛇尾形状类似桨型如图 1 所示,侧面压扁使得蛇尾划水能力更强,海蛇在水下游动时扁平的蛇尾摆动过程中会因为受到水压力而产生一定程度的被动柔性变形,这种柔性变形有益于提高游动效率、俘获流场能量等。

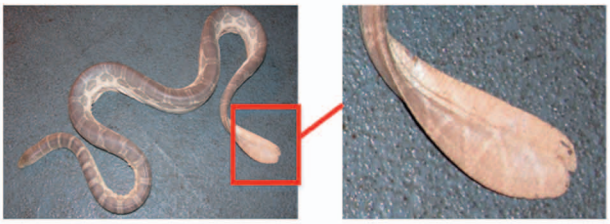


图 1 海蛇桨状蛇尾

1.1 蛇尾运动模型

本文将蛇尾的运动简化为绕 Z 轴进行往复摆动运动,蛇尾模型的前缘施加一个摆动方程 $\theta(t)=\theta_0\sin(2\pi ft)$,式中 θ_0 表示蛇尾摆动的最大摆角,f 为蛇尾摆动频率,柔性蛇尾模型在前缘的驱动力、自身弹性力和周围流体力的共同作用下产生变形。图 2 所示为攻角为零时蛇尾的一个周期内柔性变形,由于摆动过程中蛇尾模型根部向后部分因柔性变形产生位移滞后,故摆角 θ 为蛇尾中心线(虚线)在根部的切线与 X 轴方向的夹角。

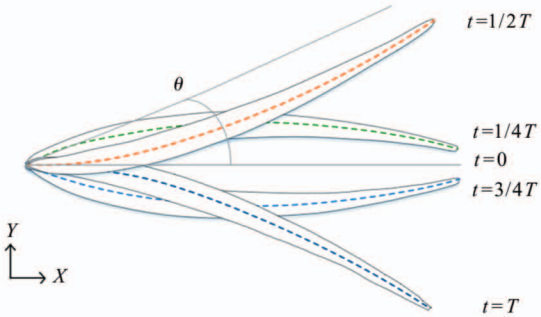


图 2 柔性蛇尾在一个周期内柔性变形示意图

1.2 流固耦合水动力分析

柔性蛇尾在水中摆动时受到水动力的影响产生运动以及弹性变形,而柔性蛇尾的运动以及变形同时也影响流体载荷的分布和大小,故本文采用流固耦合方法对柔性蛇尾进行水动力分析。

假设蛇尾体坐标系原点在其质心处,X 轴沿着水平方向,指向蛇尾后缘方向为正。Z 轴垂直于纸面,向外为正,采用右手坐标系。如图 3 所示,蛇尾摆动过程中会因为受到流场压力 P、粘性阻力 F_μ 及体积力 f_v 作用,蛇尾受到外力的合力可分解为沿 X 轴的水流阻力 F_x(当 $F_x<0$ 时,蛇尾受到的为前进

的推力)和沿 Y 轴的侧向力 F_y。

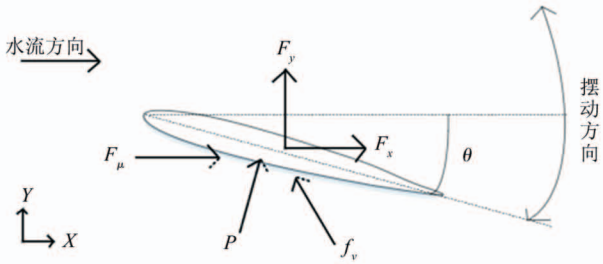


图 3　摆动蛇尾受力分析示意图

根据 Navier-Stokes 方程及质量守恒列出关于流体和固体的平衡方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v}^f = 0 \tag{1}$$

$$\rho^f(\partial \boldsymbol{v}^f/\partial t + \boldsymbol{v}^f \cdot \boldsymbol{v}^f) = \nabla \boldsymbol{\sigma}^f \tag{2}$$

$$\rho^s \partial^2 u^s/\partial t^2 = \nabla(J\boldsymbol{\sigma}^s F^{-T}) + f_v \tag{3}$$

式中，ρ^f 为流体的密度，单位 kg/m^3；ρ^s 为蛇尾的密度，单位 kg/m^3。

假设流体是线性粘性的，蛇尾表面附近的流体总应力 $\boldsymbol{\sigma}^f$ 由水压力、粘性应力以及体积力组成。

$$\boldsymbol{\sigma}^f = -\nabla PI + \rho^f \mu \quad (\nabla \boldsymbol{v}^f + \nabla \boldsymbol{v}^{fT}) \tag{4}$$

式中，μ 为流体动力粘度，单位 Pa · s；P 为流体压力，单位 Pa；$\boldsymbol{v}^f$ 为流体速度，单位 m/s；蛇尾具有弹性和可压缩性，其中 $\boldsymbol{F}$ 是变形梯度张量，矩阵形式表示为 $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{I} + \nabla u^s$，$u^s$ 为结构的位移，则结构速度 $\boldsymbol{v}^s = \partial u^s/\partial t$，固体参考应力为

$$\boldsymbol{\sigma}^s = 1/\boldsymbol{JF}(\lambda^s(trE)\boldsymbol{I} + 2\mu^s E)\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

式中，E 为材料杨氏模量，单位 Pa。

在柔性蛇尾与流体接触的表面应满足流固耦合边界条件，蛇尾模型表面两侧的应力平衡且速度相容，即 $\boldsymbol{\sigma}^f \boldsymbol{n} = \boldsymbol{\sigma}^s \boldsymbol{n}$，$\boldsymbol{v}^f = \boldsymbol{v}^s$，$\boldsymbol{n}$ 为接触面的单位法向量。则蛇尾受到的推进力 F_x 与侧向力 F_y 分别表示为

$$F_x = \int_s \boldsymbol{\sigma}^f \boldsymbol{n}_x \mathrm{d}S \qquad F_y = \int_s \boldsymbol{\sigma}^f \boldsymbol{n}_y \mathrm{d}S \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{n}_x$、$\boldsymbol{n}_y$ 分别为接触面沿 x、y 方向的单位法向量。

2　柔性蛇尾三维模型

本文采用具有多物理场建模解决方案的 COMSOL Multiphysics 软件求解柔性蛇尾在流体域中摆动的流固耦合问题，在该软件中动网格技术及自动重新划分网格技术能够解决短时间间隔的流固耦合问题。

2.1　几何模型

根据澳大利亚海蛇的尺寸，其身体平均长度为 83 ~ 191.4 cm，蛇尾长度为蛇体总长度的 10% ~ 13%，即 10 ~ 25 cm[17]。海蛇的桨状尾巴在形态上非常简单，薄而扁平，可以将蛇尾模型简化为薄板模型。为减少水流阻力，仿海蛇柔性蛇尾截面选用弦长为200 mm 的 NACA0006 翼型，展长尺寸为 120 mm，根据海蛇蛇尾柔性特点，选用橡胶材料特性赋予柔性蛇尾模型，如图 4 所示。

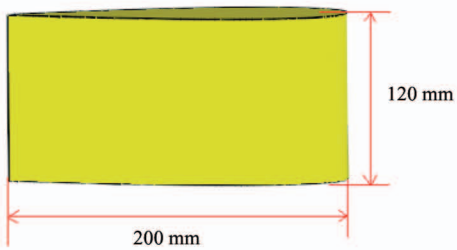


图 4　三维蛇尾几何模型

2.2　流体域设置及网格划分

计算域的设置需根据蛇尾模型尺寸来确定[18]，蛇尾模型的特征长为 L，宽为 H，在流体域几何中心位置垂直放置，模型截面平行于 XOY 平面，尾鳍轴线与 X 轴平行。为避免流域尺寸和边界位置对计算结果产生影响，将流体域的空间尺寸设置为 $10L \times 5H \times 5H$ 的矩形区域，设置流体域入口为速度入口，流体域出口为压力出口，如图 5 所示。

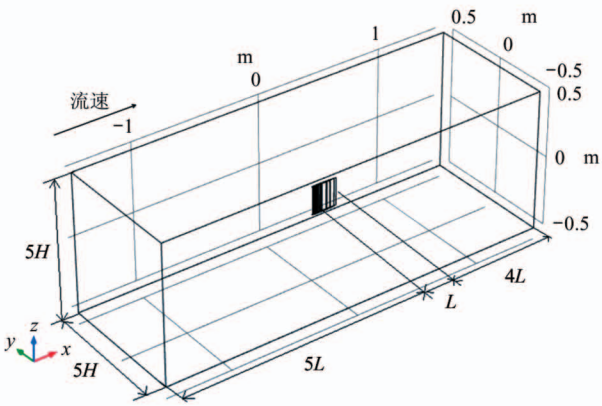


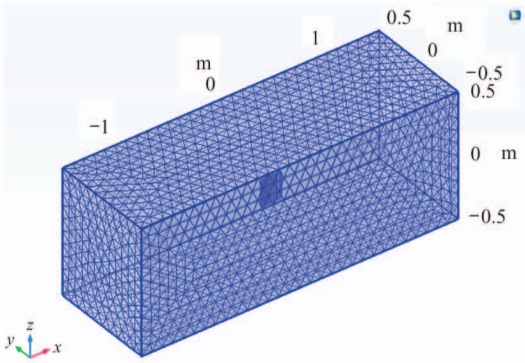
图 5　流体域

蛇尾外表面设置为无滑移壁面。在蛇尾前端设置刚性连接件,使其绕 z 轴以函数 $\theta(t)$ 进行摆动,模型参数及材料参数如表 1 所示。

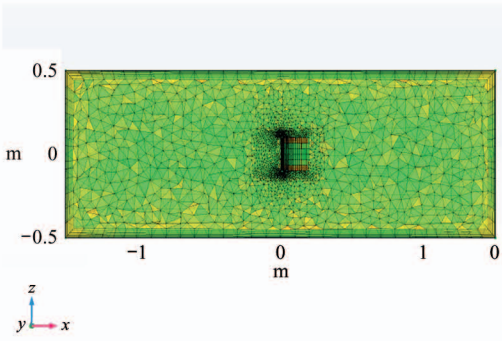
表 1　材料属性及模型参数

参数/单位	值
μ_f/Pa · s	0.001
ρ^f/kg · m^{-3}	1000
ρ^s/ kg · m^{-3}	1000
E/Pa	7.8×10^5
L/m	0.2
H/m	0.12

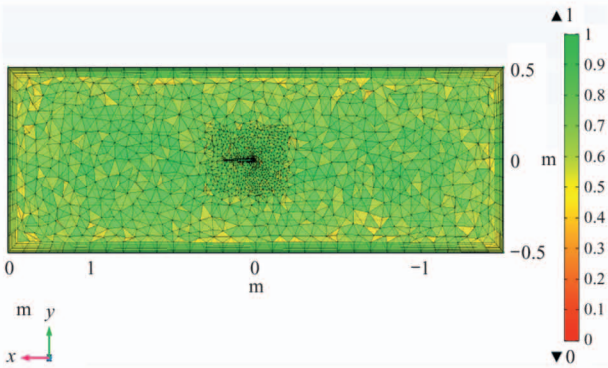
对于网格划分部分,蛇尾沿着展长方向轮廓一致,且横截面由直线和样条曲线定义,所以采用上下两个表面为源面和目标面间映射方式建立网格,减少网格单元数量从而降低求解自由度。为避免由于蛇尾末端厚度较小而产生质量过小或反转单元,利用文献[18]的方法,将网格单元参数设置最大单元大小为 0.422 m、最小单元大小为 0.02 m 及最大单元增长率为 1.15。流体域则采用自由四面体网格建立,在保证计算准确性和减少计算量的前提下,网格大小选用 COMSOL 预置的粗化尺寸,对自由四面体网格单元质量进行基本优化时期最小单元质量在 0.02 以上,并将蛇尾模型附近的网格细分,保证计算结果的准确性,最终划分网格单元总数为88 916,最小单元质量 0.0624,满足网格质量要求。网格划分结果如图 6 所示。



(a) 全局网格划分效果图



(b) 网格划分正视截面



(c) 网格划分俯视截面

图 6　网格划分结果

2.3　仿真验证

为了验证仿真结果的准确性,本文仿真了文献[19]中海蛇机器人仅有柔性尾鳍摆动时的步态。本文选择摆动尾鳍摆动幅值为 45 °,摆动角速度为 3 rad/s 和 4 rad/s 2 组实验进行仿真对比,仿真结果推力 F_x 收敛图如图 7 所示。仿真结果与文献结果对比如表 2 所示,本文的仿真结果与实验中的结果误差小于 5%。

表 2　仿真结果与文献结果对比

ω/rad/s	文献组 F_x/N	仿真组 F_x/N	误差
3	1.31	1.28	1.5%
4	1.28	1.34	4.7%

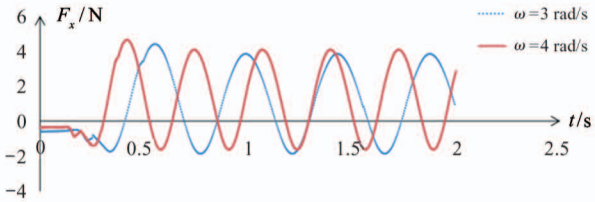


图 7　推进力的仿真结果

3　仿真分析

本节对仿海蛇柔性桨状蛇尾的推力性能进行了

仿真实验研究。实验包括 4 个可控参数，即摆动频率 f、摆动幅值 θ、展长 L_s 和弦长 L_c。

3.1　柔性蛇尾的摆动变形

柔性蛇尾在水中摆动时受到水动力的影响产生运动以及弹性变形，而柔性蛇尾的运动以及变形同时也影响流体载荷的分布和大小，经流固耦合计算后得到柔性蛇尾在水中一个周期内摆动及变形如图 8所示。

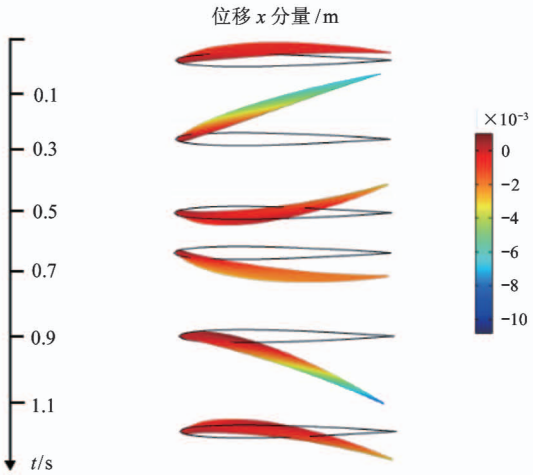


图 8　柔性蛇尾摆动变形

3.2　蛇尾运动参数对推进力的影响

为了分析运动参数与推进力的内在关系，对截面为弦长 200 mm、展长为120 mm的 NACA0006 翼型进行水动力计算。

设置水流速度 $U=0.3$ m/s，考虑两个运动参数的所有范围，共进行了 55 组仿真实验，获得了 10 个摆动周期产生的推力。为了定性说明摆动参数与推进力的关系，本文选取仿真达到稳态后的 5 个周期的平均推力为参考值，不同蛇尾运动频率、幅值以及蛇尾几何参数下的仿真结果如表 3 所示。

为了便于直观分析推进力在不同参数下变化趋势，将表 3 数据绘制成折线图，如图 9 所示。

由图 9 可以看出：

（1）随着摆动频率增大，推进力增大。

（2）在摆动频率小于 0.7 Hz 时，不同的摆动幅值下的推进力均小于 0，且随摆动幅值越大，阻力越大。

（3）当摆动频率 0.7 Hz $<f<$ 1.8 Hz 时，摆动幅值小于 45 °推进力增量缓慢或降低。

（4）以摆动幅值从 45 °增加到 55 °为例，摆动频率至少达到 1.83 Hz 以上时，摆动幅值的增量才会对推进力有积极的影响。

表 3　各摆动参数下水动力仿真结果

F_x/N \ θ ; f/Hz	15 °	25 °	35 °	45 °	55 °
0.2	−0.12	−0.28	−0.52	−0.81	−1.15
0.5	−0.09	−0.23	−0.35	−0.54	−0.95
0.7	−0.07	−0.02	−0.06	−0.05	−0.65
0.8	−0.07	0.03	0.10	0.26	−0.52
1	−0.06	0.23	0.35	0.75	−0.20
1.5	0.27	0.92	1.51	2.19	2.17
1.8	0.68	1.26	2.22	3.32	3.18
1.83	0.68	1.32	2.32	3.35	3.35
1.85	0.69	1.38	2.36	3.40	3.51
1.9	0.70	1.50	2.50	3.62	3.85
2	0.70	1.71	2.77	3.93	4.55

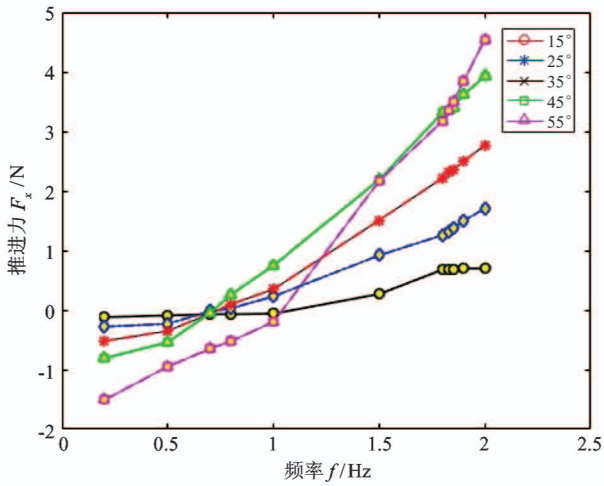


图 9　各摆动参数下推进力

3.3　蛇尾外形参数对推进力的影响

为了分析外形参数对推进力的影响，本文通过改变弦长和展长两种方式调整柔性蛇尾模型，并对不同模型进行水动力仿真分析，根据实际生物海蛇蛇尾与身长比例，将本文蛇尾模型尺寸参数设置如表 4。A、B、C 3 组模型中，蛇尾模型的弦长 L_c 均为 200 mm，展长 L_s 依次增加 20 mm；C、D、E 3 组中，蛇尾模型的展长 L_s 均为 120 mm，弦长 L_c 依次增加

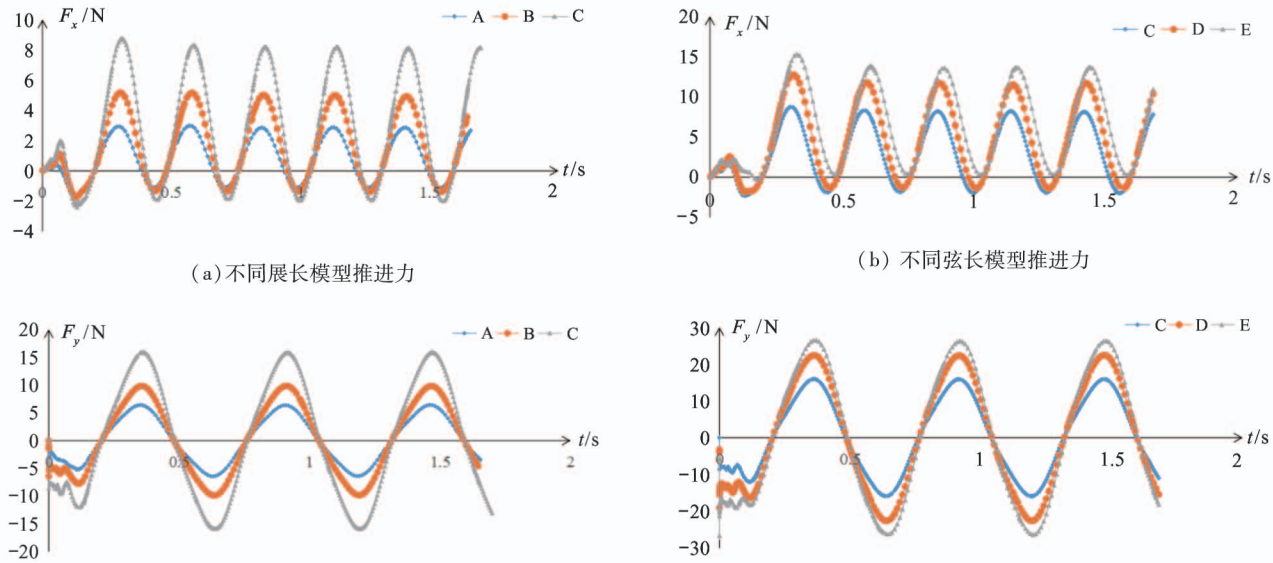
50 mm。模型材料不变,运动参数选择 $f=1.8$ Hz, $\theta_0=45°$,水流速度设置为 $U=0.3$ m/s。

表 4　蛇尾外形参数对比仿真实验设置

模型序号	弦长 L_c/mm	展长 L_s/mm
A	200	80
B	200	100
C	200	120
D	250	120
E	300	120

最后得出各组仿真实验的推进力和侧向力,如图 10 所示。

从图 10(a)可以看出,A、B、C 3 组结果对比,蛇尾模型推进力波动幅值随展长增大而增大;从图 10(b)可以看出,C、D、E 3 组结果对比,推进力波动幅值随弦长增大而增大且曲线向上平移,此外序号为 E 的模型在摆动平稳后推进力均为正值;从图 10(a)、(b)对比可知,通过增大弦长来增大表面积的方式更有利于增加蛇尾模型本身的推进力。从



(a)不同展长模型推进力　(b) 不同弦长模型推进力

(c) 不同展长模型侧向力　(d) 不同弦长模型侧向力

图 10　不同蛇尾模型仿真结果

图 10(c)、(d)可以看出,无论增大展长或弦长,侧向力波动的幅值都会增加。

4　结　论

本文以柔性仿蛇尾为研究对象,针对海蛇蛇尾进化特征进行分析,创建仿海蛇柔性蛇尾的几何模型,建立蛇尾摆动流固耦合水动力分析模型,研究蛇尾尺寸参数-运动学参数-推进力之间的内在关系,分析不同蛇尾运动频率、幅值,以及蛇尾模型的形状参数对推进力的影响,得到的主要结论如下。

(1)仿海蛇柔性蛇尾做周期性摆动时摆动频率、摆动幅值对推进力有一定影响,在一定的范围内推进力随摆动频率和摆动幅值的增大而增大,但两个摆动参数对推进力的影响不是独立的,在较小摆动频率时,摆动幅值的增加使得推进力减小。

(2)蛇尾模型展长或弦长的增大都会使其整体表面积增加使其推进力增加,展长增加使得推进力波动幅值增大,而弦长增加使推进力波动幅值增大同时波动曲线向上平移,所以通过改变弦长增大侧面积的方式更有利于增加推进力。

由于项目进度计划实验部分将在后期进行,所以本文的实验验证部分会在后期的工作中完成。作者将通过实验验证运动参数及几何参数对柔性蛇尾水动力性能的影响,并且在以后的研究中会结合仿生海蛇机器人本体来进行海蛇机器人整体的水动力特性研究。

参考文献

[1] Eleni K, Pettersen K Y, Gravdahl J T, et al. Modeling, control and energy efficiency of underwater snake robots [J]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015, 10: 716-719

[2] Yamada H, Chigisaki S, Mori M, et al. Development of amphibious snake-like robot ACM-R5[C]//The 36th International Symposium on Robotics, Tokyo, Japan, 2005: 55-59

[3] Kelasidi E, Pettersen K Y, Gravdahl J T, et al. Modeling and propulsion methods of underwater snake robots[C]// IEEE Conference on Control Technology and Applications, Hawaii, USA, 2017: 316-319

[4] Liljeback P, Mills R. Eelume: a flexible and subsea resident IMR vehicle [C] // OCEANS 2017, Aberdeen, USA, 2017: 22-29

[5] Watson A. Studying sea snakes for underwater robot design [EB/OL]. https://www.adelaide.edu.au/news/news68042.html: The University of Adelaide, 2014

[6] Zuo Z J, Wang Z F, Li B, et al. Serpentine locomotion of a snake-like robot in water environment[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shanghai, China, 2009: 25-30

[7] 唐敬阁, 李斌, 常健, 等. 水下滑翔蛇形机器人结构设计与动力学建模[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 89-94

[8] Sanders K L, Rasmussen A R, Elmberg J. Independent innovation in the evolution of paddle-shaped tails in viviparous sea snakes (Elapidae: Hydrophiinae)[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2012, 52(2): 311-320

[9] Shine F A. The origin of evolutionary innovations: locomotor consequences of tail shape in aquatic snakes[J]. *Functional Ecology*, 2008, 22(2): 317-322

[10] Kelasidi E, Pettersen K Y, Kohl A M, et al. An experimental investigation of path following for an underwater snake robot with a caudal fin[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2017, 50 (1): 11182-11190

[11] Lighthill M J. Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency[J]. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1970, 44(2): 265-301

[12] Wu T Y. Hydrodynamics of swimming propulsion, swimming of a two dimension flexible plate at variable forward speeds in an inviscid fluid[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, 46(2): 337-355

[13] Liu P F. A time-Domain Panel Method for Oscillating Propulsors with both Chordwise and Spanwise Flexibility [D]. St. Johns, Canada: Memorial University of Newfoungland, 1997: 2311-2314

[14] 刘波. 主被动变形鱼鳍推进机理与实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学机械工程学院, 2015: 79-82

[15] 张曦. 仿鱼类摆动尾鳍推进系统的水动力研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2012: 76-79

[16] 苏玉民, 杨亮, 赵士奇, 等. 仿鱼尾鳍推进系统的水动力性能试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 82-85

[17] Graham J B, Lowell W R. Surface and subsurface swimming of the sea snake Pelamis platurus[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1987, 127: 27-22

[18] 胡志强. 海洋机器人水动力数值计算方法及其应用研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2013: 85-91

[19] Huang Z, Kong D, Ren C, et al. Performance study of an underwater snake-like robot with a flexible caudal fin [C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, China, 2019: 2518-2522

Hydrodynamic of propulsion with a flexible paddle-shape tail of sea snake robot

Liu Chunhong[*,**,***], Zhang Guowei[**,***], Liu Tong[**,***], Li Bin[**,***], Mu Li[*]

([*] School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159)

([**] State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

([***] Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169)

Abstract

Different segments of the sea snake contribute to the thrust differently, the lateral flattening into an oar tail is the most typical feature of the sea snake's adaptive evolution, which significantly enhances its movement speed, mobility and efficiency. This paper takes flexible snake tail as the research object and builds a hydrodynamic analysis model of fluid-structure interaction. It uses the method of solving Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations to study the dynamic relationship between kinematics parameters, a serpent scale parameters and propulsion. And it uses NACA006 airfoils as the basis to analyze the influence of movement frequency, geometric parameters and amplitude on propulsion. This experimental results show that the effects of oscillation frequency and amplitude on the propulsion are non-independent. When the oscillation frequency of the model is greater than 0.7 Hz and oscillation amplitude less than 45°, the propulsion increases with the increase of oscillation frequency and oscillation amplitude. When changing the shape parameter optimization of the snake tail, the propulsion increases with the increase of the snake tail area. It is conducive to increase propulsion by changing the chord length and expanding the side area.

Key words: bionic robot sea snake, flexible tail, fluid structure interaction, simulation experiment