

宏压电纤维致动的水下推进器性能及机理^{*}

林煌旭¹, 任泉荣¹, 娄军强^{1,2}, 贾振¹

(1. 宁波大学机械工程与力学学院 宁波, 315211)

(2. 浙江大学浙江省先进制造技术重点实验室 杭州, 310027)

摘要 提出了一种宏压电纤维复合材料(macro fiber composite, 简称 MFC)致动的仿鲹科身体/尾鳍(body or caudal fin, 简称 BCF)水下推进器。利用搭建的实验平台测试了不同驱动电压条件下推进器的摆动性能, 推进器在峰峰值为 1 000 V, 频率为 17.7 和 3 Hz 的激励电压下分别取得空气中最大摆幅峰峰值为 45 mm, 水下最大摆幅峰峰值 13 mm。借助计算流体力学(computational fluid dynamics, 简称 CFD)研究了仿生推进器在稳定摆动过程中流场特性和尾迹旋涡的分布情况, 从推进器端部观察到的“反卡门涡街”结构揭示了仿生推进器的流体动力学机制和摆动式推进机理。推进器端部在 x 方向上的平均推进力可达 1.5 mN。研究成果对压电纤维致动器在仿生推进器的优化设计和提高其推进效率提供技术支持。

关键词 仿生水下推进器; 宏压电纤维复合材料; 身体/尾鳍谐振式推进; 计算流体力学分析; 反卡门涡街

中图分类号 TP24; TH113

引 言

随着陆地资源的日益枯竭, 蕴藏着丰富矿产资源的海洋是维持人类可持续发展的重要空间。模拟海洋生物的仿生水下推进器拥有出色的流体动力学性能, 具有推进效率高, 机动性强且隐蔽性好的优点, 在海洋环境监测、生物观察及资源勘探领域具有广阔的应用前景^[1]。以鱼类为代表的海洋生物进化出了卓越的水下运动能力。近 85% 的鱼类都采用了身体/尾鳍推进方式^[2]。BCF 模式的鲹科鱼类推进效率可超过 90%, 是迄今为止鱼类演化出的效率最高、速度最快的推进模式, 被认为是未来水下推进装置的最终设计目标^[3]。

早期的仿生水下推进器多采用电机、气/液压等常规驱动元件, 配合铰链、连杆机械传动机构来模仿鱼的躯干及尾部的摆动。但是复杂庞大的传动机构导致推进器动作生硬、柔度不高, 推进效率难以媲美模仿的鱼类。智能材料发展为水下驱动技术提供了新的途径^[4]。智能材料可与基体结构直接集成, 实现“近零驱动”。采用智能材料驱动的仿生推进器打破了传统驱动方式的限制, 表现出较大的柔性, 从而

较好地模拟鱼类复杂的运动。研究者将压电材料^[5]、形状记忆合金^[6]以及离子导电聚合物材料^[7]等智能材料成功地用于新型水下仿生机器鱼的驱动和推进, 证实了智能材料在水下推进领域的巨大优势。近年来, 美国国家航空航天局率先研制出了宏压电纤维复合材料, MFC 展示出了柔性好、变形大且驱动力强等优点, 在水下仿生推进系统中具有广阔应用前景^[8]。但是由于智能材料驱动的水下推进系统研究尚处于起步阶段, 目前研究大都止于可行性验证阶段, 研究重点在于驱动方法可行性和方案可实现性, 对整个仿生推进系统的驱动特性和推进机理缺乏深入研究^[9]。

文中在描述 MFC 结构的基础上, 根据鲹科鱼类的游动方式和特点, 提出了一种宏压电纤维致动的仿鲹科水下推进器。搭建了推进器性能测试平台, 分别对推进器在空气中和水下的摆动性能进行了实际测试。基于实验测试结果, 采用计算流体力学研究了推进器摆动过程中的流场特性和尾迹旋涡的分布情况, 得到了推进器在不同摆动时刻瞬态流场的涡量云图以及速度矢量的变化情况, 揭示了提出的仿生推进器的流体动力学机制和推进机理。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51505238, 51805276, 61703217); 浙江省自然科学基金资助项目(LY20E050007); 宁波市自然科学基金资助项目(2019A610112)

收稿日期: 2018-08-20; 修回日期: 2018-10-25

1 MFC 致动的水下推进器结构描述

1.1 MFC 的基本构成

宏压电纤维复合材料是由美国 Langley 研究中心研发的新型压电纤维复合材料^[10]。MFC 按照一定的比例成分和空间排布形式将矩形横截面的粗压电纤维和树脂基体胶合在一起,同时采用特殊工艺将指交叉电极蚀刻在包铜聚酰亚胺薄膜上,其结构示意图见图 1。树脂基体增强了 MFC 结构的强度和韧性;指交叉电极排列方式增加了压电陶瓷与电极之间的接触面积,大幅度提高了 MFC 的变形和驱动能力;最外层的聚酰亚胺薄膜能保证其密封性和防水性。与传统的压电陶瓷相比,MFC 具有柔性更好、驱动变形量大且能量转换效率高等一系列优点,因此特别适合作为水下推进器的驱动元件。

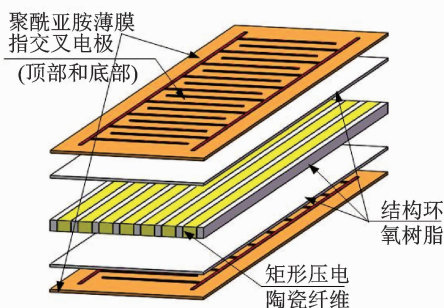


图 1 MFC 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of MFC actuator

1.2 仿鳐科谐振式水下推进器结构

鳐科鱼类自主游动过程中,头部和胸部的横向位移几乎可以忽略,可将其身体大约 2/3 部分视为刚体,其巨大的推进力主要是尾部摆动产生。鳐科鱼类 BCF 谐振式推进模式中,其柔性尾部协调身体摆动产生推进力前进,且摆动幅度从身体后部到尾鳍逐渐增大,其尾部摆动产生的推进力占整个身体前进所需推进力的 90% 以上,其摆动推进过程如图 2 所示^[11]。

由于鳐科鱼类在推进过程中头部和胸部基本不动,主要靠尾部带动尾鳍摆动产生推进作用,许多研究者都采用经典的悬臂式 Euler-Bernoulli 梁模型来模拟鳐科鱼类 BCF 摆动推进模式,文中建立 MFC 致动的推进器结构如图 3 所示^[12]。

如果对 MFC 施加一定的交变电压,MFC 将沿着基体横向方向产生伸缩变形,带动基体材料不断地产生弯曲变形,其中粘贴有 MFC 的基体部分在

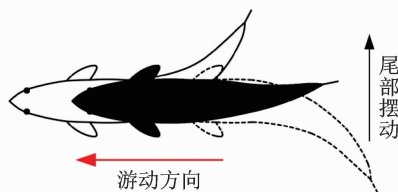
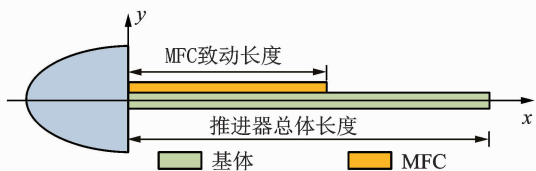


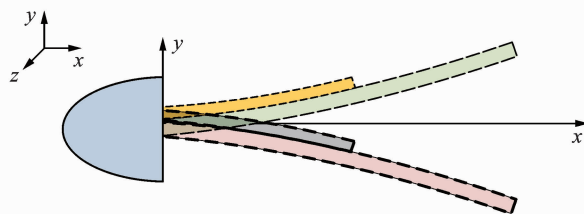
图 2 鳐科鱼类 BCF 谐振式推进过程示意图

Fig. 2 BCF oscillatory propulsion process for carangiform fish



(a) 静止状态

(a) Stationary state



(b) 摆动状态

(b) Oscillating state

图 3 MFC 致动的水下推进器结构示意图

Fig. 3 Structure of the underwater propeller actuated by MFC

MFC 带动下主动变形,而没有粘贴 MFC 的基体部分在主动变形部分的带动下也会发生变形,从而产生类似于鳐科鱼类尾部的摆动运动,进而模拟鳐科鱼类的摆动式推进模式,其结构尺寸参数见表 1。

表 1 MFC 致动的水下推进器结构尺寸表

Tab. 1 Structural parameters of the underwater propeller

结构参数	数值	
	致动器	基体
材料或型号	MFC 8514-P1	3240 环氧树脂
总体长度×宽度×厚度/mm	145×22×0.55	
致动长度×宽度×厚度/mm	85×14×0.3	
密度/(kg·m ⁻³)	5 440	2 130
弹性模量 E ₁ /GPa	30.336	24

1.3 仿鳐科水下推进器摆动机理

图 3(b)中,推进器在 $x-z$ 平面内的摆动状态是

细长体结构特征,理论上常用欧拉-伯努利梁模型来表示推进器模型的弯曲变形^[13]。

其运动方程描述为

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} = F(x, t) \quad (1)$$

其中: ρ 为推进器材料的等效密度; $A(x)$ 为等效横截面积; $EI(x)$ 为弯曲刚度; $F(x, t)$ 为 MFC 驱动力和流体的合力。

由于推进器前身基本不动,近似可认为其满足一端固定,一端自由的悬臂梁边界条件为

$$\begin{cases} z(0) = 0 \\ \frac{dz(0)}{dx} = 0 \\ \frac{d^2 z(L)}{dx^2} = 0 \\ \frac{d^3 z(L)}{dx^3} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

利用假设模态法和悬臂梁边界条件确定推进器各阶主振型函数为

$$z_r(x) = \text{ch}\beta_r x - \cos\beta_r x + \xi_r(\text{sh}\beta_r x - \sin\beta_r x) \quad (3)$$

其中: $\xi_r = -(\text{ch}\beta_r L + \cos\beta_r L)/(\text{sh}\beta_r L + \sin\beta_r L)$;
 $z_r(x)$ 为推进器在第 r 阶振型时的横向位移。

2 推进器性能测试系统搭建

仿生推进器的摆动行为直接决定了推进器的推进性能,为了测试 MFC 致动器的致动效果,搭建了推进器性能测试系统如图 4 所示。实验中压电纤维采用美国 Smart Material Corp. 生产的 d_{33} 模式 MFC,型号为 MFC 8514-P1,并用环氧树脂胶水 DP-460 将 MFC 与梁基体进行粘贴。

推进器性能测试过程中,控制平台发出控制信号到嵌入式机箱 CompactDAQ (NI, cDAQ-9178),通过电压输出模块(NI, AO9263)输出并经高压功率放大器(Trek,PZD700A,放大增益 200)放大,最后施加到 MFC 上,从而驱动 MFC 按照设定的控制规律实现推进器的摆动运动;同时利用布置在推进器末端的激光位移传感器 (Micro-EPSILON, ILD1402-50)实时检测推进器末端的纵向摆动位移,其摆动位移信号通过调理电路转换为 1~5 V 的电压信号,经电压输入模块(NI, AI9205)采集到 cDAQ 机箱,最后输送到计算机中。整个测控系统基于 NI-LABVIEW 平台完成,系统实物装置见图 5。

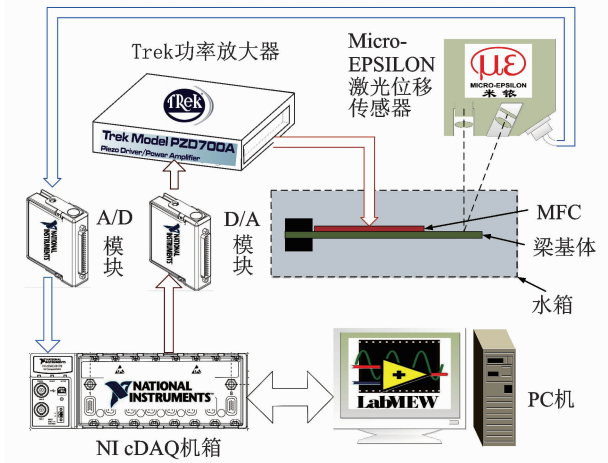


图 4 推进器性能测试系统结构框图

Fig. 4 Block diagram of the underwater propeller system

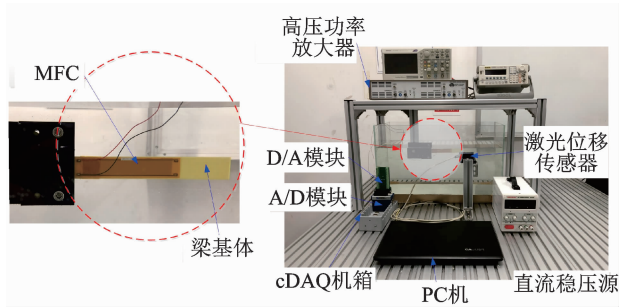


图 5 测试系统实物图

Fig. 5 Experimental setup of the underwater propeller system

3 仿生推进器摆动性能测试

3.1 空气中推进器摆动性能测试

实验中首先通过扫频实验激起推进器的弹性振动以掌握其模态特性。考虑到低阶振动模态在推进器振动特性中的主导地位,采用频率范围 0.1~30 Hz,电压峰峰值为 800 V 的正弦扫频信号施加到 MFC 致动器上,整个扫频过程持续 20 s,采样频率为 500 Hz。从空气中推进器扫频实验测试结果中可以看出:MFC 致动器作用下,推进器产生了明显的弹性振动,其一阶固有频率为 17.7 Hz,摆动幅度峰峰值最大可达 35 mm 以上。

为了进一步测试推进器在空气中的摆动特性,进行了不同幅值和频率的驱动电压下,推进器末端摆动幅值变化的性能测试实验。考虑到压电纤维致动器的驱动电压范围为 -500~1 500 V,实验中施加无偏置、峰峰值分别为 200, 400, 600, 800 V 及 1 000 V,频率范围为 12~22 Hz、间隔为 1 Hz 的电压激励信号到压电纤维致动器上,测得推进器末端

振幅随激励电压的变化情况如图6所示。

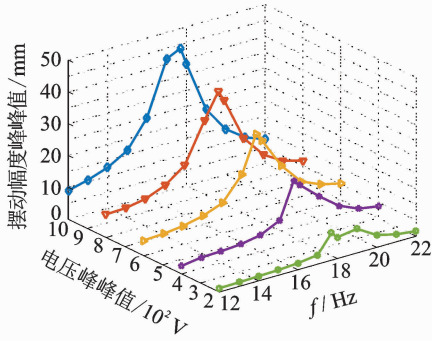


图6 空气中推进器末端振幅随驱动电压变化实验结果
Fig. 6 In air experimental result of the oscillatory amplitude with varied driving voltage

从实验结果中可以看出:相同激励电压幅值下,推进器在固有频率处具有最大的摆幅;在峰峰值1 000 V的激励电压下,其空气中的摆幅峰峰值可达45 mm。初步证实了所提出方案的可行性。

3.2 水下推进器摆动性能测试

在周围流体动力学的影响下,推进器结构的固有频率会显著下降。采用流体动力学函数对推进器空气中的固有频率进行修正,可得其水下固有频率表达式^[13]为

$$f_{\text{fluid}} = f_{\text{air}} \sqrt{\frac{4\rho_c h}{4\rho_c h + \pi\rho_w b \Gamma_r}} \quad (4)$$

其中: ρ_w 为水的密度; ρ_c 为推进器等效密度,由等效体积法确定值为2 689 kg/m³; b 和 h 分别为基体宽度和厚度; Γ_r 为水动力学函数,此处可近似取为1。经计算可得推进器水下固有频率 f_{fluid} 约为4.9 Hz。

为了掌握水下推进器的低阶模态特性,采用频率范围0.1~7 Hz,电压峰峰值为800 V的正弦扫频信号施加到MFC致动器上。从水下推进器扫频实验末端位移频谱图7中可以看出:其水下固有频率约为4.2 Hz,与修正公式计算结果基本一致。与空气中测试实验相似,同样施加5个不同峰峰值,频率范围为2~7 Hz、间隔为0.5 Hz的电压激励信号到压电纤维致动器,测得水下推进器末端振幅随激励电压的变化情况见图8。

显然受周围流体作用力的影响,不仅推进器结构固有频率显著降低,其在相同驱动电压下末端摆动幅度也大幅度下降。在峰峰值1 000 V激励电压致动下,水下推进器最大摆幅的峰峰值仅为13 mm。需要指出的是:实验中水下推进器最大摆幅是在频率为3 Hz的激励电压作用下取得的,明显低于推进

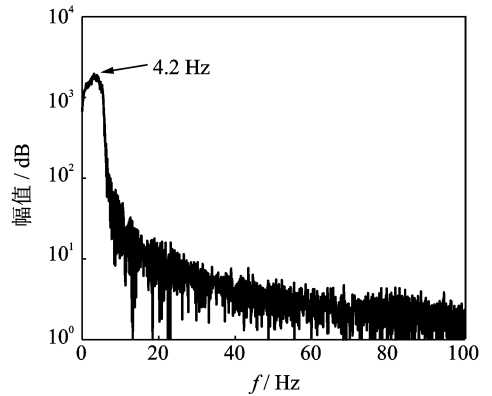


图7 水中推进器扫频实验末端摆位移移频谱图
Fig. 7 Underwater frequency response of the propeller

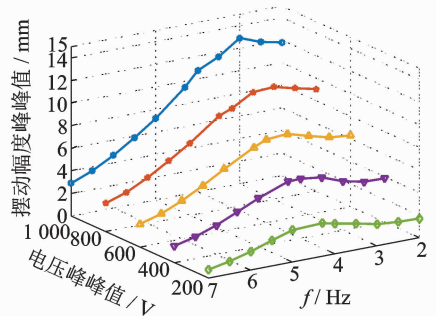


图8 水下推进器末端振幅随驱动电压变化实验结果
Fig. 8 Underwater experimental result of the oscillatory amplitude with varied driving voltage

器结构的水下固有频率;这是由于压电纤维材料本身的机电耦合特性、迟滞非线性以及流体水动力特性相互影响的结果,随着驱动电压的升高,存在着刚度软化现象^[14]。

4 推进器谐振式推进机理分析

仿生推进器通过模拟鱼类BCF摆动方式来实现推进,由于水下推进器的往复摆动属于复杂的流固耦合动力学问题,难以通过理论建模的方法进行分析求解,故此处采用计算流体力学的方法对其摆动式推进机理进行研究。基于ANSYS-FLUENT仿真平台,采用可实现 $k-\epsilon$ 湍流模型,选择弹簧光顺和局部重构方法相结合的动网格技术来刻画流场的动态变化过程,并设置力函数来定义推进器的往复摆动过程。

CFD仿真分析中建立的计算域和网格划分结果如图9所示。长方体流体域的尺寸为545 mm×222 mm×300 mm,3个方向尺寸都远大于推进器尺寸,从而保证推进器周围的流体能充分发展,最后采用四面体非结构网格对流体域进行划分,获得节

点数 187 582 个。

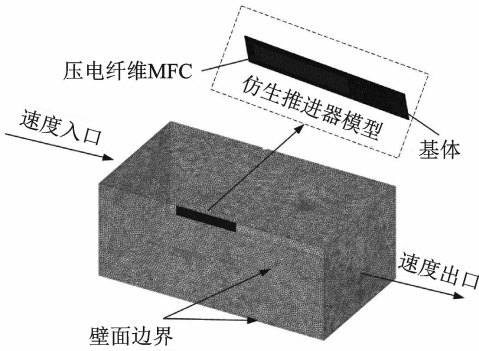


图 9 FLUENT 中计算域和网格划分结果

Fig. 9 Computational domain and grid meshing results in FLUENT

4.1 CFD 仿真结果分析

由图 8 可知推进器在峰峰值 1 000 V, 激励频率 4 Hz 的激励电压下, 摆幅峰峰值达到 10.4 mm。故 CFD 仿真分析中设定推进器的摆动频率为 4 Hz, 单侧摆幅为 5.2 mm; 为了便于分析流场结构的数值计算结果, 定义推进器末端的摆动位置和摆动相位角的关系如图 10 所示。定义推进器摆动到最左端, 速度为零的时刻为 0° 相位; 推进器摆动到中间位置, 向右运动速度最大的时刻为 90° 相位; 同理最右端速度为零时刻为 180° 相位, 向左运动速度最大的中间位置 270° 相位。

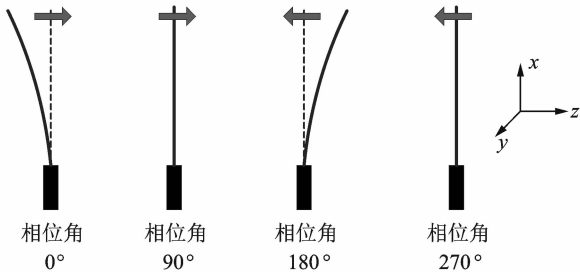


图 10 推进器摆动位置和和相位角关系图

Fig. 10 Definition of the phase angle of the oscillating propeller

由于推进器在启动初始阶段与周围流体的耦合效应较为复杂, 且处于不稳定阶段, 故此处选取推进器摆动 35 个周期以后的流场稳定变化情况分析其摆动过程的流场特性。图 11 给出了静水条件下瞬态流场的涡量云图以及速度矢量图在一个完整摆动周期内的稳定变化情况, 其中从相位角 0° 开始, 以 45° 为间隔, 共 8 个典型相位。

从摆动的推进器端部涡流发展变化的 8 幅时间序列图 11(a)~(h)中可以看出: 推进器端部从左向

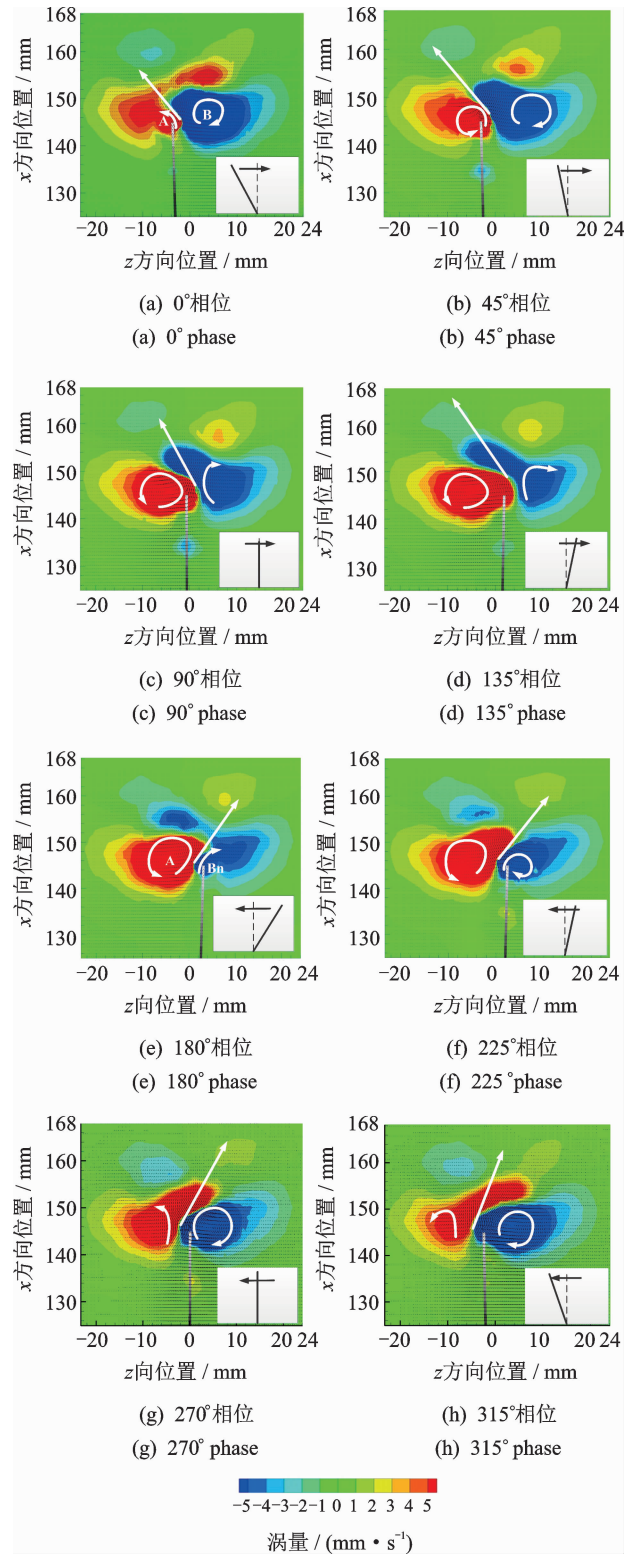


图 11 瞬态流场涡量云图以及速度矢量变化图

Fig. 11 Computed instantaneous velocity fields and vorticity distribution

右的摆动过程中(0→180°), 在 0→45° 相位, 推进器端部左侧萌发出一个新的逆时针旋涡 A, 见图 11 (a)。随着推进器加速向右摆动, 旋涡的强度和范围

不断发展壮大,在 45° 相位已经有了明显的圆环形状见图11(b),且旋涡的面积和能量密度逐渐增大($45^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 135^\circ$),直到推进器摆动到右极限位置相位 180° ,左侧逆时针旋涡A与推进器末端完全脱离,见图11(e)。而同时,在推进器末端右侧又酝酿出一个新生的顺时针旋涡Bn(图11e),在推进器末端从右向左的摆动过程中($180^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 0^\circ + T$),顺时针旋涡Bn不断形成、壮大、直至最后脱落。在顺时针旋涡Bn发展的同时,逆时针旋涡A完全脱离推进器末端向右后传播,且能量强度逐渐减小(图11(a),(f)~(h))。

从图11涡流云图的变化过程中可以看出:由于上一个周期内产生旋涡的存在,在一个摆动周期内的任意相位,推进器端部一对交替出现、旋向相反的旋涡始终清晰可见,并且两个旋向相反的旋涡相遇并卷到一起,形成一对近似对称的涡环结构;在下一个周期里,推进器摆动引起的流场特征和上一个周期相似,从而周而复始产生新的涡流,涡流又周期性地脱落,进而产生“反卡门涡街”流场结构,此种结构在水中生物游动过程中被观察到,并用来解释鱼类生物的游动推进机理^[15-16]。

由于反卡门涡街结构的存在,两个旋向相反的旋涡交汇在一起,产生一股向斜后方运动的射流,如图11(a)~(h)中的白色直线所示。推进器结构在射流反作用力的作用下向前推进。这就是推进器模拟鱼类游动的摆动式推进机理。

4.2 CFD 推进力计算

图12给出了推进器端部沿 x 方向上的推进力随时间变化曲线。由图可知,由于推进器端部刚开始启动阶段加速度比较大,推进力明显增大;在周围流体阻力作用下,波动曲线幅值开始衰减,在2s之后趋于稳定。由于推进力的波动曲线不是关于 x 轴对称的,因此推进力一个周期内的平均值不等于零,故能给推进器提供动力。仿真结果表明,在摆动频率为4Hz,单侧摆幅达到5.2mm条件下,推进器端部在 x 方向上的平均推进力可达到1.5mN。

5 结束语

借鉴鲹科鱼类的推进方式和游动特点,笔者提出了一种宏压电纤维致动的仿鲹科谐振式水下推进器。仿生推进器性能测试实验结果表明:空气中仿生推进器在固有频率处具有最佳摆动效果,摆幅最大;而在周围流体作用下,仿生推进器在水下的固有

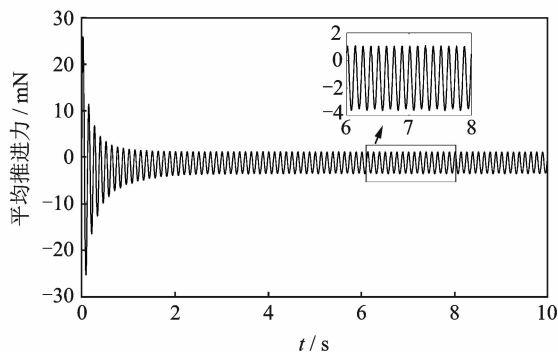


图12 推进器端部 x 方向上的推进力时变曲线
Fig. 12 Variation of the thrust at the x direction

频率和最大摆幅都远小于空气中的情况,且其最大摆幅在略微小于水下固有频率处取得,随着驱动电压幅值的升高,存在着刚度软化现象。

采用CFD分析了仿生推进器在稳定摆动过程中不同相位的流场特性和尾迹旋涡的分布情况。从推进器瞬态流场的涡量云图中观察到了“反卡门涡街”结构,且在两个旋涡的交汇地带产生了一股向斜后运动的水流,推进器在向后喷射水流的反作用力下向前推进。故揭示了仿生推进器的流体动力学机制和推进机理。数值计算结果表明,推进器端部在 x 方向上的平均推进力可达到1.5mN。笔者的研究结果对智能材料驱动的水下推进器的设计和推进机理研究具有一定的参考和借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 王国彪,陈殿生,陈科位,等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 27-44. WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 27-44. (in Chinese)
- [2] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999, 24(2): 237-252.
- [3] 王田苗,杨兴帮,梁建宏. 中央鳍/对鳍推进模式的仿生自主水下机器人发展现状综述[J]. 机器人, 2013, 35(3):352-362. WANG Tianmiao, YANG Xingbang, LIANG Jianhong, et al. A survey on bionic autonomous underwater vehicles propelled by median and/or paired fin mode[J]. Robot, 2013, 35(3):352-362. (in Chinese)
- [4] CHU W S, LEE K T, SONG S H, et al. Review of

- biomimetic underwater robots using smart actuators [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2012, 13(7):1281-1292.
- [5] 王安忆,刘贵杰,王新宝,等. 身体/尾鳍推进模式仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(17): 137-146.
WANG Anyi, LIU Guijie, WANG Xinbao, et al. Development and analysis of body and/or caudal fin biomimetic robot fish [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(17): 137-146. (in Chinese)
- [6] GAO F, WANG Z L, WANG Y K, et al. A prototype of a biomimetic mantle jet propeller inspired by cuttlefish actuated by sma wires and a theoretical model for its jet thrust[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, 11(3): 412-422.
- [7] HUBBARD J J, FLEMING M, PALMRE V, et al. Monolithic IPMC fins for propulsion and maneuvering in bioinspired underwater robotics[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(3): 540-551.
- [8] 官源林,李华峰,杨熙鑫,等. 弹性模量对柔性仿生鱼尾振动行为的影响[J]. *振动、测试与诊断*, 2015 (1): 12-16.
GUAN Yuanlin, LI Huafeng, YANG Xixin, et al. Research of elastic modulus for vibration behavior of flexible bionic fish tail [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015(1): 12-16. (in Chinese)
- [9] EASTMAN A, KIEER J, KIMBER M. Thrust measurements and flow field analysis of a piezoelectrically actuated oscillating cantilever [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 53(5):1533-1543.
- [10] 侯志伟,陈仁文,徐志伟,等. 压电纤维复合材料在结构减振中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30 (1): 51-54.
HOU Zhiwei, CHEN Renwen, XU Zhiwei, et al. Application of macro-fiber composite to structural vibration suppression [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(1): 51-54. (in Chinese)
- [11] 崔祚,姜洪洲,何景峰,等. BCF 仿生鱼游动机理的研究进展及关键技术分析[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(16): 177-184.
CUI Zuo, JIANG Hongzhou, HE Jingfeng, et al. Research development and key techniques of BCF robotic fish in locomotion mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(16): 177-184. (in Chinese)
- [12] PETER D Y, ALEXANDER A. Biomimetic flexible plate actuators are faster and more efficient with a passive attachment [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2016, 32(6): 1001-1011.
- [13] AGARWAL A, NOLAN K P, STAFFORD J, et al. Visualization of three-dimensional structures shed by an oscillating beam [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2017, 70: 450-463.
- [14] TAN D, YAVAROW P, ERTURK A. Resonant nonlinearities of piezoelectric macro-fiber composite cantilevers with interdigitated electrodes in energy harvesting [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2018(2):1-11.
- [15] CHEN Z, SHATARA S, TAN X. Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer - metal composite caudal fin[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(3):448-459.
- [16] CHOI M, CIERPKA C, KIM Y H. Vortex formation by a vibrating cantilever [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2012, 31(5):67-78.



第一作者简介:林煌旭,男,1993年8月生,硕士生。主要研究方向为水下仿生推进器。

E-mail: nbumechanical114@163.com

通信作者简介:娄军强,男,1986年7月生,博士、副教授。主要研究方向为振动主动控制、伺服驱动控制等。

E-mail: loujunqiang@nbu.edu.cn