

文章编号: 1001-4888(2013)01-0027-09

柔性双尾鳍效率的测量和优化*

金通, 刘泰然, 秦丰华, 杨基明

(中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027)

摘要: 建立了仿生拍动推进推力和效率的测量平台, 通过电机的转动扭矩、转动角速度及推进力计算得到仿生推进系统的推进效率。对本课题组研制的组合仿生无人水下航行器中柔性双尾鳍模型进行了测量与分析, 结果表明柔性尾鳍推进时小摆幅摆动运动效率要高于大摆幅运动; 双尾鳍推进方式在小摆幅模式下无论在推进力还是在效率方面都要优于单尾鳍。最后根据模型实验数据, 优化了双尾鳍推进的运动参数, 并用于优化 UUV 性能。

关键词: 无人水下航行器; 组合仿生; 双尾鳍; 推进效率

中图分类号: Q692 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-060

0 引言

近年来, 无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)作为一种新型的航行器在水下监视、水下救援、学术研究和军事等方面的使用越来越多^[1]。传统 UUV 是由已经发展成熟的螺旋桨推进, 但存在着推进效率低和机动性能不够等缺点, 与水生动物优良的游动能力相比更是相形见绌。经过漫长岁月的自然选择, 水生动物进化出各种不同的高效推进方式。它们通过身体的变形或者其附属物(如鱼类的胸鳍等)的摆动来加速周围的水流以产生推进力, 同时还依靠流线型的身体以及合适的运动方式达到减小阻力的目的^[2]。近年来, 仿生推进技术因其在 UUV 设计上的巨大潜力, 引起了研究学者的广泛关注^[3-12]。

本实验室以“源于自然”的仿生思想为基础, 以“超越自然”为目标, 集游动动物的高推进能力和飞行动物的高机动能力之所长, 研制了一种新型的组合仿生 UUV(图 1), 将昆虫的扑翼推进方式和鱼类的摆尾游动方式结合在一起, 兼具高效能推进和机动灵活; 并使用了并排排列的双尾鳍设计, 使 UUV 巡游更加稳定。在试航中也已经验证了其机动性和稳定性方面的优势^[13]。

UUV 在实际使用中, 除了机动性和稳定性之外, 续航时间也是一个极为重要的性能指标。在电池等能源供给一定的情况下, 提高效率显然是增强续航能力的直接途径, 因此对效率进行测量、分析, 寻找提高效率的方法和方式是 UUV 走向实用的重要环节。人们对此也开展了一些工作, 其中颇具代表性的如 Anderson 等在 1998 年对做升沉和俯仰运动的翼型进行了效率的实验测量, 证明其推进效率比传统推进方式更高^[14]。北京航空航天大学的文力博士也对机器鱼的输入功率进行过测量, 发现 St 数和攻角均会影响机器鱼的推进效率^[15]。基于细长体理论进行估算, 生物推进的效率可以高达 90%^[16], 提高仿生推进效率还大有可为。UUV 绝大部分时间都将处于巡游状态, 提高巡游状态下的推进效率就显得尤为重要。在我们的组合仿生 UUV 中, 巡游推进主要由尾鳍实现, 因此, 本文着重考察尾鳍的推进效率, 设计了一种较高效率的柔性双尾鳍, 并进行了初步的优化。

* 收稿日期: 2012-04-18; 修订日期: 2012-07-19

基金项目: 中国舰船研究设计中心 B 类研发基金(YFB11-04-35)及中科院创新方向性项目(KJCX-YW-L05)资助

通讯作者: 秦丰华(1975-), 男, 博士, 副教授。主要从事仿生学、微流体物理学等领域工作。E-mail: qfh@ustc.edu.cn

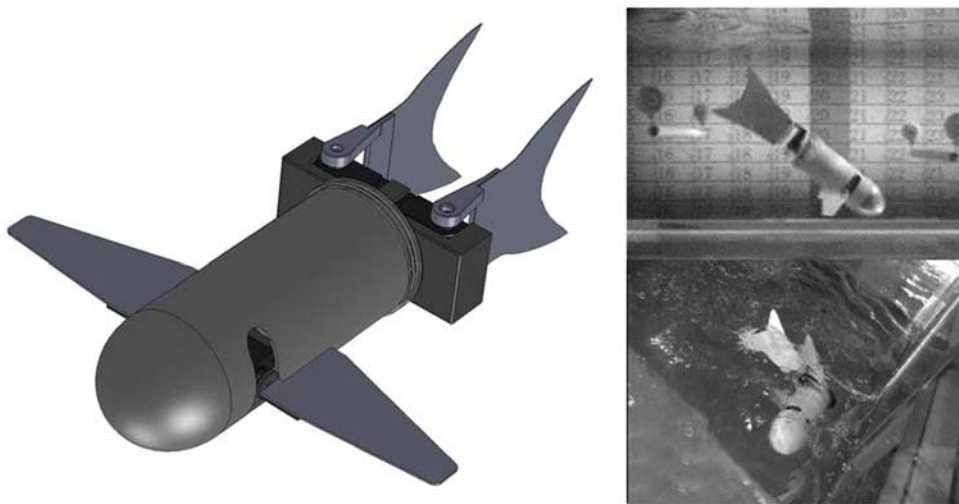


图1 双尾鳍翼鳍组合仿生UUV

Fig. 1 Hybrid bionic UUV with two tails and flapping fins

1 实验设计

1.1 尾鳍设计

高速巡游的鱼类如金枪鱼和海洋哺乳动物如海豚等的尾鳍为拥有俯仰(Pitch)和升沉(Heave)两个自由度的尾鳍,而 Anderson 等人的研究也证实了这种推进方式的推进效率很高,所以在一定程度上模仿这种运动方式可能可以达到高效率的效果。

为了避免多关节尾鳍在机构和控制上的复杂性,增强系统稳定性,本文用单关节尾鳍实现类似的运动方式,设计了一种一半为刚性一半为柔性的尾鳍,如图 2(a)所示,其中靠近转轴的部分为 1.5mm 厚度的刚性碳纤维平板,末端为柔性 0.3mm 厚度的碳纤维平板,柔性平板的抗弯刚度约为 $1 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。尾鳍摆动过程中,由于流体的作用,尾鳍柔性部分变形从而形成和刚性部分不一样的攻角,当尾鳍逆时针转动时,尾鳍柔性部分会形成如图 2(b)所示的攻角,从而模仿双关节尾鳍摆动时的攻角,以期提高其效率。

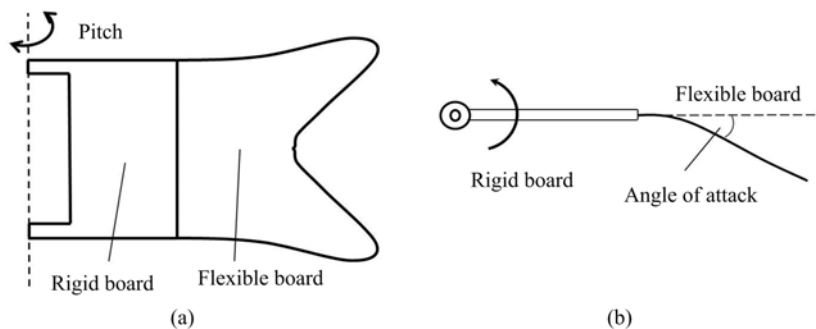


图2 柔性尾鳍示意图

Fig. 2 Flexible tail

1.2 效率定义

为测量尾鳍推进效率,首先需要建立一个实验平台来模拟推进器的推进。为模拟巡游状态,使用了中国科学技术大学流体力学实验室的循环式水洞,将尾鳍模型固定在循环水洞中,用来流速度模拟巡航速度。这样的近似方法 Lighthill 在 1969 年曾经使用过,并提出过一个效率的定义^[17]:

$$\eta = \frac{UF}{P_m}$$

其中 U 为来流速度; F 为整周期内的平均推力; P_m 为整周期内摆动尾鳍所需要消耗的平均功率。由于

实验仅对尾鳍进行,并没有 UUV 主体。假想存在一个主体,在来流速度 U 时受到的平均阻力正好为 F ,则 UUV 受力平衡而处于巡游状态。换言之,输入功率 P_{in} 使尾鳍得以维持一定的运动方式,产生平均推力 F 并输出平均功率 UF ,所以也可以认为是尾鳍的效率。

输入功率可使用电机的输出扭矩 M 和角速度 ω 的乘积来计算,周期平均输入功率则定义为:

$$P_{in} = \frac{1}{T} \int_0^T \omega M dt$$

由于尾鳍与电机转轴刚性连接,电机转动角速度与尾鳍转动角速度相同,故可通过测量尾鳍角速度得到。电机输出扭矩则与固定电机所需要的扭矩相等,可应用测力天平进行测量。

综上所述,为得到尾鳍效率需要测量的量有:

- (1) 尾鳍的转动角度 α ,对时间求导可以得到角速度 ω ;
- (2) 电机上受到的扭矩 M_0 ,或者固定电机所需要的扭矩 $M = -M_0$;
- (3) 推进力 F ;
- (4) 水流速度 U 。

1.3 实验平台

为了实现前述目的,建立了相应的实验平台,如图 3 所示,其中模型动力由 MKS 公司生产的防水处理过的 DS1210 舵机提供。舵机控制系统由 NI 公司的采集卡 USB-6212 实现,其计数器端口发出不同占空比的 PWM 波,控制舵机运动到不同的角度,控制程序使用 NI 公司的软件 LabVIEW 编写。舵机运动的运动曲线则选择了正弦曲线:

$$\theta = A \sin(2\pi ft)$$

其中 A 为摆幅; f 为摆动频率。因为舵机性能的局限性,不能完全按照设定的曲线进行运动,其实际运动曲线由安装在尾鳍关节上的电位器测量得到,电位器线性精度为 0.1%。

扭矩和推进力通过一台具有五个分量的测力传感器测量得到,可以测量如图 2 所示的 Y 和 Z 方向的力和 X 、 Y 、 Z 方向的扭矩,精度为 0.1%,传感器信号经过信号放大器低通滤波和放大,由 NI 公司的 USB-6212 采集卡采集得到。为保证实验的准确性,采集系统包括计算机等所有设备都使用电池供电,与交流电隔离,以避免循环式水洞使用的变频器及电机对信号产生的干扰。即便如此,采集得到的信号仍然存在一定的噪声,需要使用数字滤波。数字滤波使用 FFT 低通滤波,其频率选定为摆动频率的 10 倍。

2 实验结果

2.1 单尾鳍测试

大多数鱼类仅具单一尾鳍,仿生推进技术中也经常采用单尾鳍,对单尾鳍推进性能的测试是仿生研究的基础。本文对柔性单尾鳍进行了测试,摆动频率 f 从 0.5 Hz 到 2.5 Hz 间隔取值,幅度 A 选取了 10° 、 15° 和 20° 三种情况,来流速度固定为 0.3 m/s。

柔性单尾鳍推进测试结果如图 4 所示,在测量的范围内,推力随频率的增加呈单调增变化,高频率可以获得高推力,这与 Anderson 得到的结果类似^[14],同时,相同频率下摆幅增大也能产生更大的推力(如图 4(a)所示);同时在高频率大摆幅可以获得高推力的同时,输入功率也会随之增长(如图 4(b)所示),所以效率在衡量推进性能方面变得尤为重要,图 4(c)为不同运动参数下的效率曲线,随着频率的增加,效率并不单调增大,而是呈先增加再减小的趋势,并在一定运动参数下得到最大值,这也和

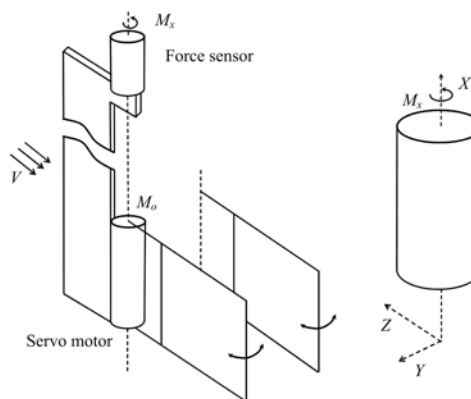


图 3 实验平台示意图

Fig. 3 Apparatus used for measuring thrust force and efficiency

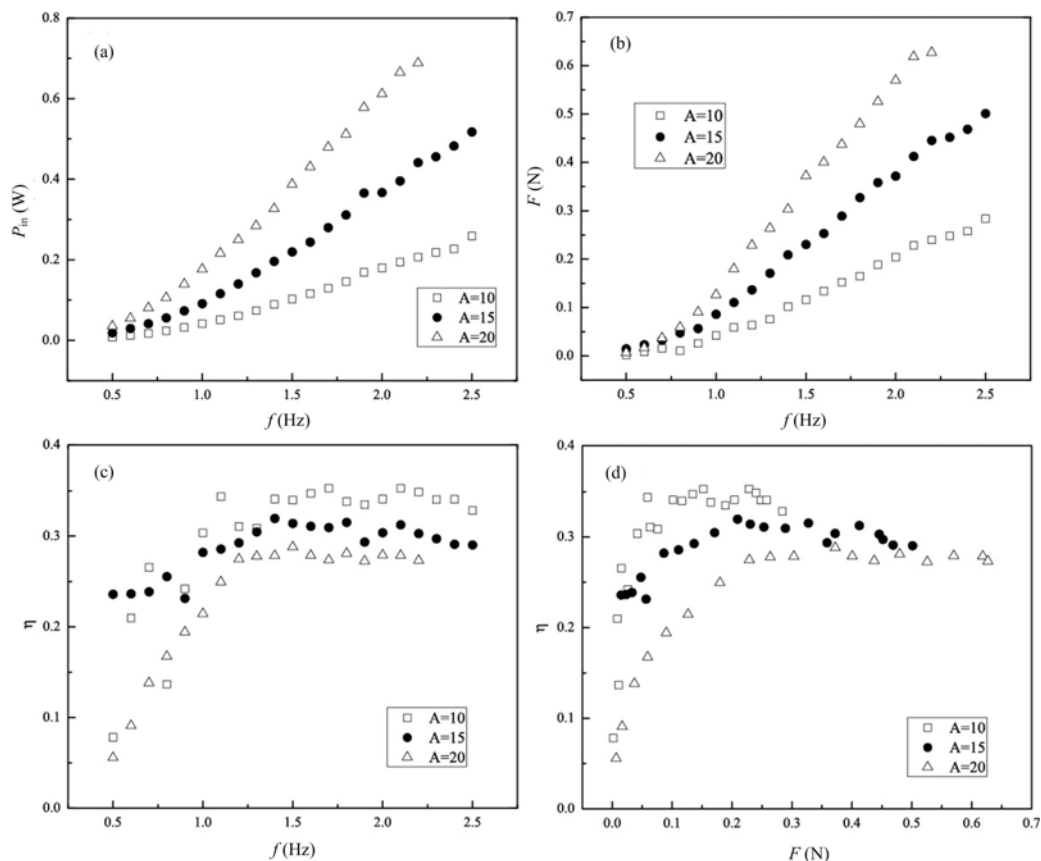


图4 柔性单尾鳍不同摆动幅度下平均输入功率(a)、平均推力(b)、平均效率(c)随频率的变化以及推力—效率曲线(d)

Fig. 4 Single-flexible-tail test: (a) Mean input power, (b) Mean thrust force,

(c) Mean efficiency as a function of frequency, (d) Mean efficiency as a function of thrust force

Anderson的结果相似。但在实际应用中,仅仅比较不同运动参数下的效率曲线并不能完全说明问题,工程师更关注在获得同样推力的时候如何选用合适的参数获得更高的效率。图4(d)所示的效率—推力曲线正好为此提供指导,从图中可以看出,在实验测量范围之内,摆动幅度越小,其效率越高。换言之,小摆幅高频率要优于大摆幅低频率摆动运动方式。

为了考察柔性的影响,将尾鳍中柔性部分替换为相同尺寸的刚性板,进行了对照实验,测试结果如图5所示,其随运动参数的变化规律和柔性单尾鳍类似,但相同条件下无论效率还是推力均低于柔性尾鳍。

摆动推进的缺陷之一是在产生推力的同时也会产生明显的侧向力,导致UUV在前进的同时艇艏会左右晃动。这种晃动不仅会造成UUV的航行稳定性降低,实现机动的难度增加,而且还会造成推力方向晃动进而降低推进效率。为了定量描述侧向力的影响,这里定义侧向力绝对值的平均值和推进力平均值的比值 $R = \overline{|F_s|} / \overline{F_T}$, 该值越大则表示侧向力对推进的影响越大。从图6中可以看出,随着频率的增加, R 会逐渐减小直至趋近一个固定值,而同频率下,小幅度的 R 值会比大幅度的摆动大。较高频率下,不同摆幅时 R 都会趋近于一个在0.4~0.5之间的值,这表明单尾鳍推进无法通过参数的优化完全消除侧向力。

2.2 双尾鳍实验结果

如上文所述,单尾鳍推进时一定会产生侧向力,其方向由摆动运动确定。由对称性显见并行排列但反相运动的一对尾鳍恰好可以产生一对大小相等、方向相反的侧向力,从而使得整体侧向力为零。关于双尾鳍设计,在上世纪90年代美国麻省理工学院就曾经研制过双尾鳍仿生推进船;国内哈尔滨工程大学也将双尾鳍推进应用在船的设计中,并对双尾鳍推进进行了测试,通过调整双尾鳍频率来优化其性

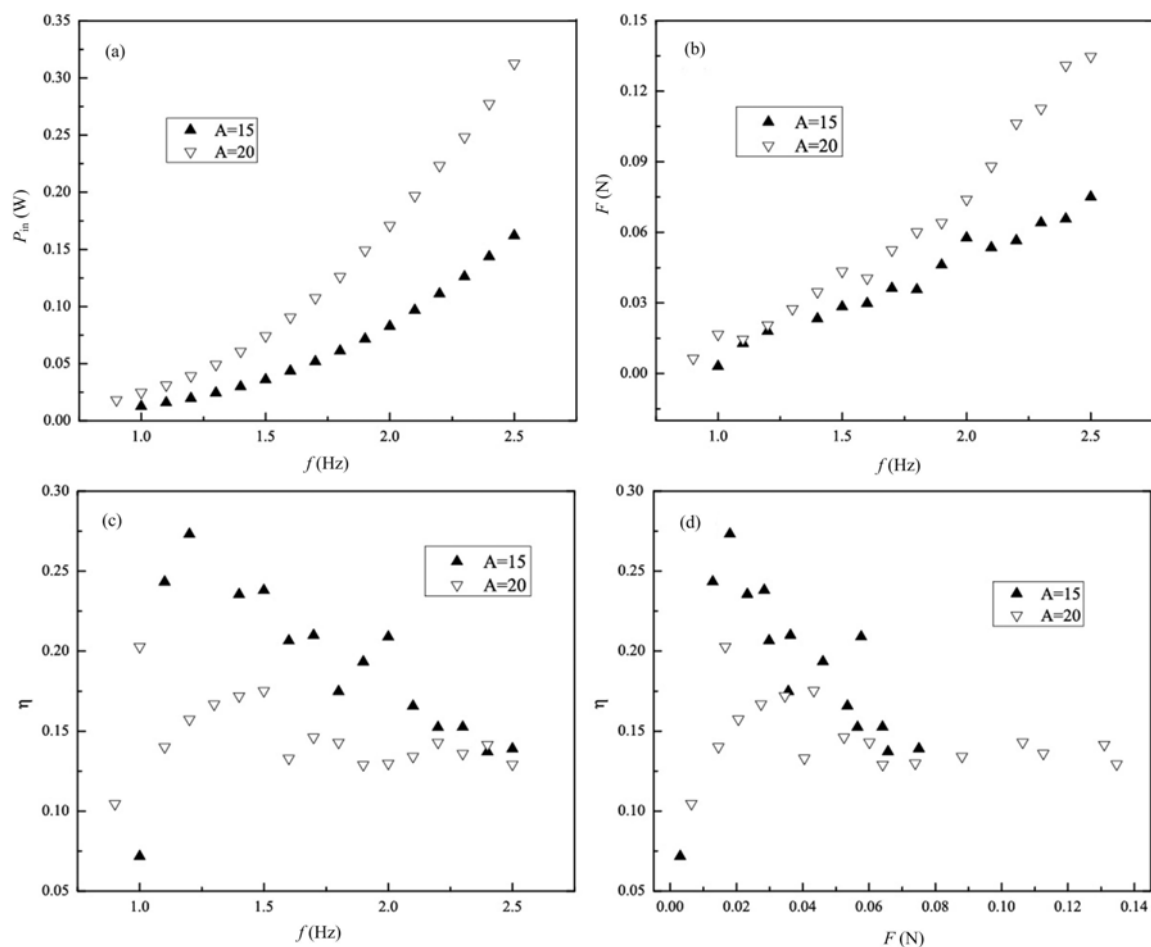


图 5 刚性单尾鳍不同摆动幅度下平均输入功率(a)、平均推力(b)、平均效率(c)随频率的变化及推力—效率曲线(d)

Fig. 5 Single-rigid-tail test: (a)Mean input power, (b)Mean thrust force,

(c)Mean efficiency as a function of frequency, (d)Mean efficiency as a function of thrust force

能^[18]。但双尾鳍的相互作用是增强还是削弱推进力,以及双尾鳍推进效率受哪些因素影响,本文将通过实验来回答。实验中,将两尾鳍间距离固定为 80mm,运动参数则与单尾鳍实验一致。因为对称性,仅需要测量其中一个尾鳍的数据,所以测量设备仅安装在其中一个尾鳍上。

与单尾鳍类似,当双尾鳍摆动频率增高或摆动幅度变大时,均需要更大的输入功率,如图 7(a)所示。同时,我们也可以发现维持相同的摆动运动时,双尾鳍并不需要比单尾鳍更高的输入功率。双尾鳍平均推力、效率的变化规律也与单尾鳍类似,如图 7(b),(c)所示,但摆幅为 20°的效率相较于小摆幅的下降要更为明显。图 7(d)为其推力效率曲线,可以看到趋势仍然是幅度越小其效率值越高。在较小推力约为 0.2N 的时候可以获得很高的效率,其值接近 0.4。

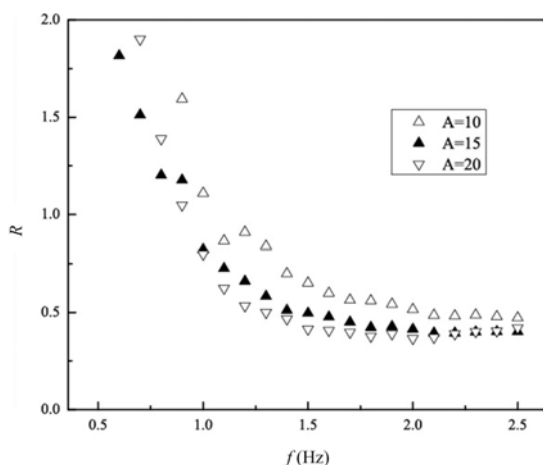


图 6 柔性单尾鳍的 R 值随频率变化曲线

Fig. 6 Ratio of mean absolute landscape force and mean thrust force as a function of frequency

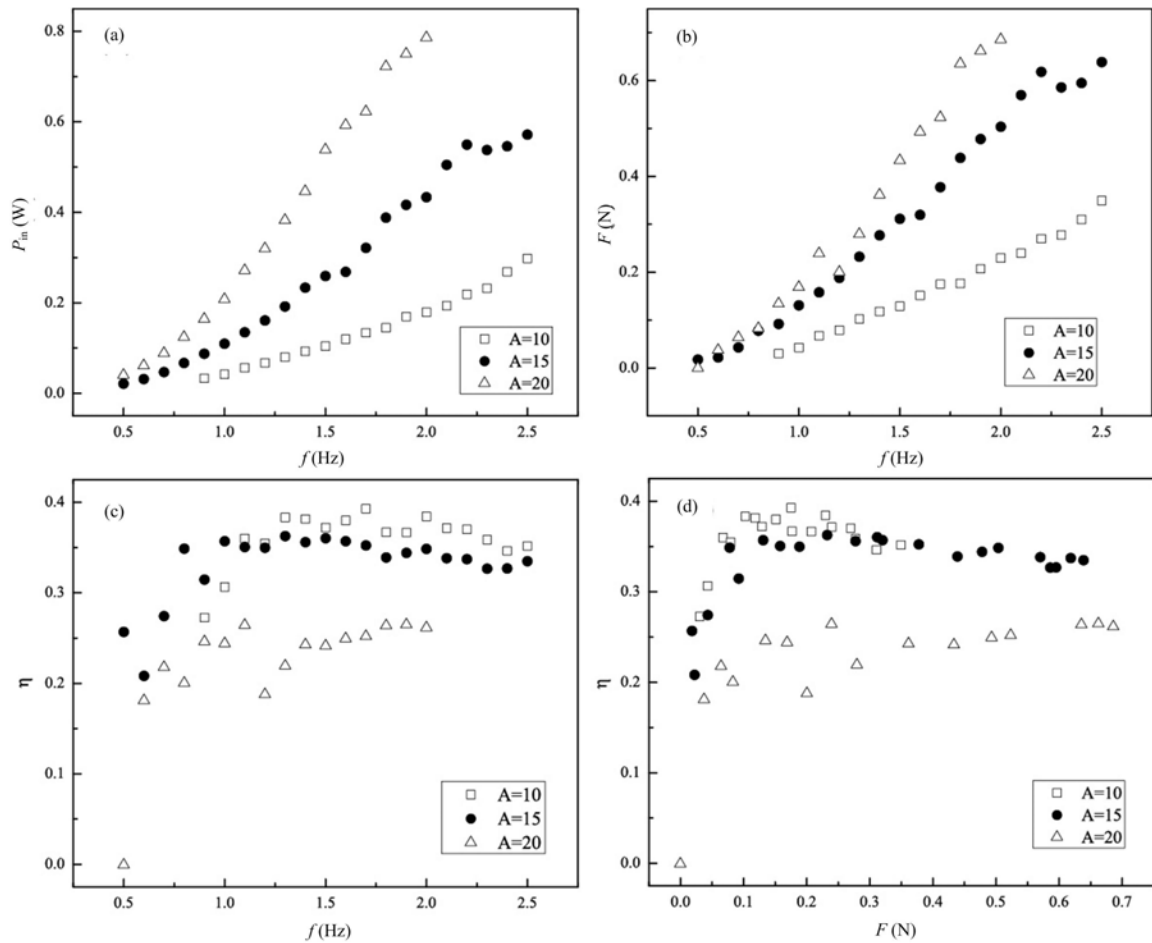


图7 柔性双尾鳍不同摆动幅度下平均输入功率(a)、平均推力(b)、平均效率(c)随频率的变化以及推力-效率曲线(d)

Fig. 7 Double-flexible-tail test: (a) Mean input power, (b) Mean thrust force, (c) Mean efficiency as a function of Frequency, (d) Mean efficiency as a function of thrust force

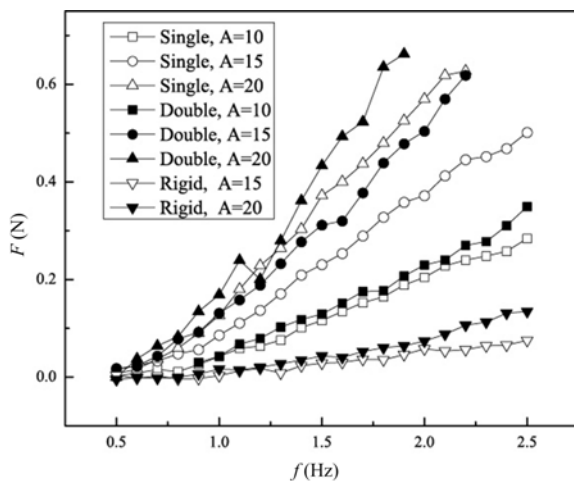


图8 柔性单尾鳍和双尾鳍以及刚性单尾鳍推力比较
 Fig. 8 Comparison of mean thrust force between flexible single-tail, double-tail and rigid single-tail

2.3 单尾鳍和双尾鳍推进性能对比

为了更清楚的分析各种尾鳍的推进性能,将各尾鳍的推力随运动参数的变化同在图8中反映出来。从图中可以清楚地看到,尽管尾鳍尺寸、运动参数完全相同,刚性尾鳍的推力要明显小于柔性尾鳍;不论尾鳍如何摆动,并排双尾鳍的推力也要大于两个独立单尾鳍的推力之和,换言之,双尾鳍利用了尾鳍之间的相互作用,实现了“一加一大于二”的推进性能增强的效果。

从推进效率来看,如图9所示,在摆幅为 10° 和 15° 时,所有摆动频率下双尾鳍效率均优于单尾鳍,但摆幅为 20° 时低频摆动的双尾鳍效率更高而高频摆动是单尾鳍效率更优。即使在提供相同推力的条件下,如图10所示,

仍然可以发现摆幅不很大时双尾鳍的推进效率更高;如果要求更大的推力而选择了更大摆幅、更高频率

的推进方式,则双尾鳍的效率将会下降,甚至不如单尾鳍。

综上所述,并排双尾鳍在合适的运动参数下,既可以提供更大的推力,同时还有更高的效率。导致这种效果的原因显然是因为双尾鳍之间的相互作用在这里得到了正面的应用。以摆动频率 $f=1.9\text{Hz}$ 为例,如图 11 所示,当两尾鳍相对远离时,出现一个推力峰值,摆动相对增大时,这个峰值得到进一步加强;同时,可以表征输入功率的扭矩仅数值变大,曲线形状没有明显变化,这导致在获得较大推力的同时效率并没有下降。注意到本实验中双尾鳍之间的距离固定不变,所以当摆幅进一步变大时,尾鳍间距则相对变小,在两尾鳍靠近时,流体空间演化受到限制,导致更强的流体反作用使得需要更大的扭矩才能维持其摆动,在扭矩曲线中出现了个高水平的平台,这最终导致了效率的下降。因此,双尾鳍间距与摆动幅度之间存在一个最佳平衡点,在该点附近能同时获得大推力与高效率。

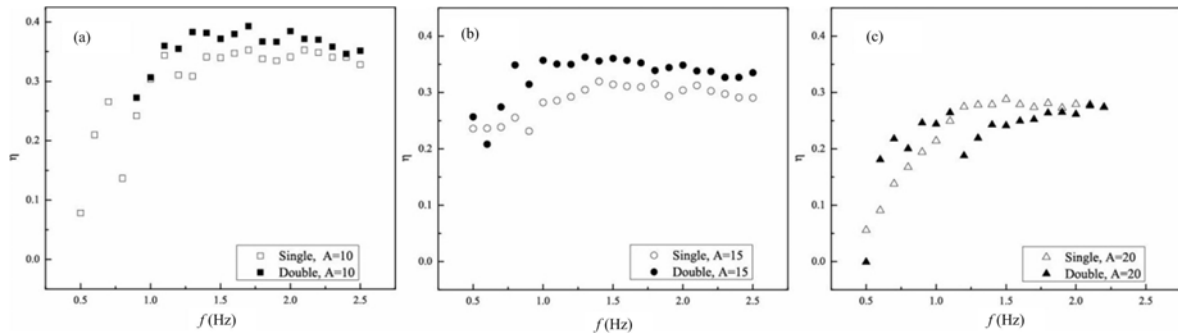


图 9 摆幅分别为 10°(a)、15°(b)和 20°(c)时柔性尾鳍平均效率随频率的变化曲线

Fig. 9 Variations of mean efficiency with the frequency for flexible tails while the amplitude is 10°(a), 15°(b) and 20°(c)

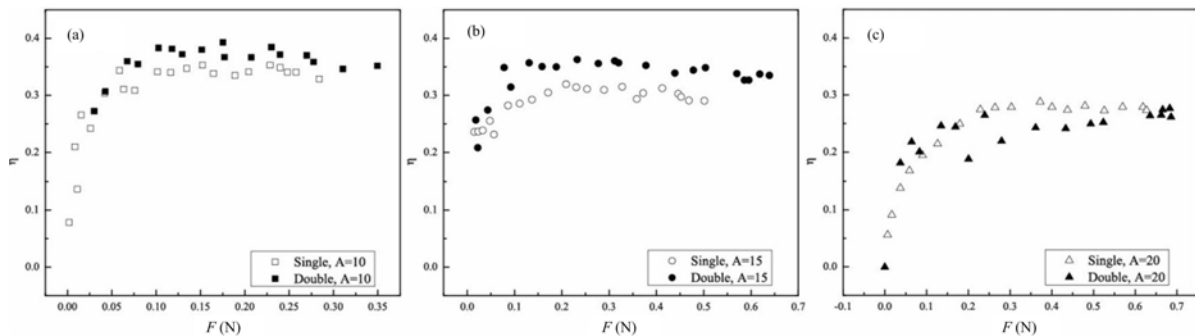


图 10 摆幅分别为 10°(a)、15°(b)和 20°(c)时柔性尾鳍平均推力—效率曲线

Fig. 10 Mean efficiency as a function of thrust force for flexible tails while the amplitude is 10°(a), 15°(b) and 20°(c)

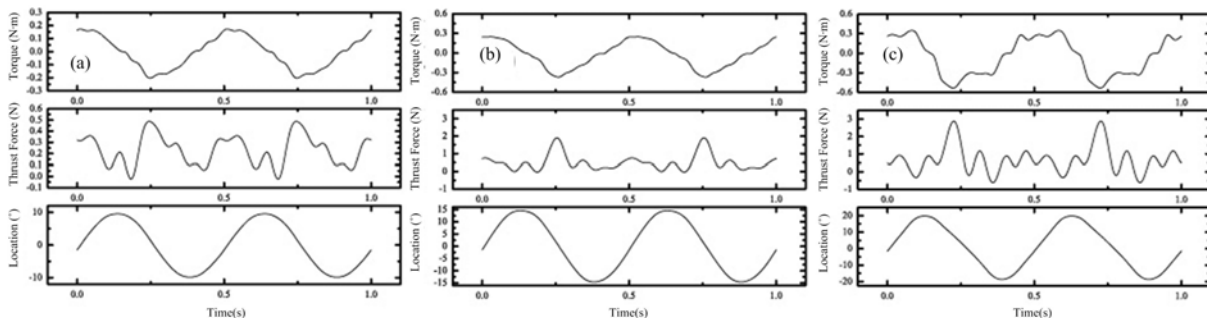


图 11 摆动频率 1.9 Hz 时双尾鳍电机转动扭矩(上)、推进力(中)和尾鳍转角(下)随时间的变化曲线,摆幅分别为 10°(a)、15°(b)、20°(c)。运动曲线中正值为尾鳍闭合,负值为向外张开的状态

Fig. 11 Torque, thrust force and location of the double tails. The frequency is 1.9 Hz and the amplitude is 10°(a), 15°(b) and 20°(c)

3 结 论

本文设计了一种单关节的柔性尾鳍,用于组合仿生 UUV 的双尾鳍推进。为分析其推进性能,建立了一套测量仿生推进器推力和效率的实验平台,对刚/柔性单/双尾鳍进行了测试、分析。结果表明在实验测量的范围内:

- 1) 随着摆动幅度和摆动频率的增加,所有尾鳍的推力都增大;
- 2) 在刚性尾鳍末端增加柔性部分能显著提高尾鳍推进力和推进效率;
- 3) 柔性尾鳍小幅高频摆动与大幅低频摆动可以产生相同的推力,但前者的效率高于后者。故设计 UUV 时,在确定的推力需求下,应优先选择小幅度、高频率的推进方式;
- 4) 当双尾鳍间距固定时,恰当的摆动幅度(本文中表现为双尾鳍靠近时不会相碰的最大值)能有效利用双尾鳍间的相互作用增大推力、提高效率。最优摆幅与双尾鳍间距等因素的关系尚需进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] TANGORRA J L, DAVIDSON S N, HUNTER I W, et al. The development of a biologically inspired propulsor for unmanned underwater vehicles[J]. *Ieee Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32: 533—550.
- [2] FISH F E, LAUDER G V. Passive and active flow control by swimming fishes and mammals[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, 38: 193—224.
- [3] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G S. An Efficient Swimming Machine[J]. *Scientific American*, 1995, 272: 64—70.
- [4] BARRETT D S, TRIANTAFYLLOU M S, YUE D K P, et al. Drag reduction in fish-like locomotion[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 392:183—212.
- [5] ANDERSON J M, CHHABRA N K. Maneuvering and stability performance of a robotic tuna[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42:118—126.
- [6] 梁建宏, 王田苗, 魏宏兴. 水下仿生机器鱼的研究进展—鱼类推进机理[J]. *机器人*, 2002, 24:107—111 (LIANG Jianhong, WANG Tianmiao, WEI Hongxing. Research and development of underwater robofish I—Development of a small experimental robofish[J]. *Robot*, 2002, 24:107—111(in Chinese))
- [7] LICHT S, POLIDORO V, FLORES M, et al. Design and projected performance of a flapping foil AUV[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29:786—794.
- [8] MACIVER M A, FONTAINE E, BURDICK J W. Designing future underwater vehicles: Principles and mechanisms of the weakly electric fish[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29: 651—659.
- [9] 王松, 王田苗, 梁建宏 等. 机器鱼辅助水下考古实验研究[J]. *机器人*, 2005, 27:147—152 (WANG Song, WANG Tianmiao, LIANG Jianhong, et al. Experiment on robofish aided underwater archaeology[J]. *Robot*, 2005, 27:147—152(in Chinese))
- [10] MITTAL R, DONG H B, BOZKURTAS M, et al. Locomotion with flexible propulsors: II. Computational modeling of pectoral fin swimming in sunfish[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2006, 1:S35—S41.
- [11] LAUDER G V, MADDEN P G A, MITTAL R, et al. Locomotion with flexible propulsors: I. Experimental analysis of pectoral fin swimming in sunfish[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2006, 1:S25—S34.
- [12] CURET O M, PATANKAR N A, LAUDER G V, et al. Mechanical properties of a bio-inspired robotic knifefish with an undulatory propulsor[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6:026004.
- [13] 任铮, 金通, 魏榛 等. 双尾鳍组合仿生 UUV 的研制及其特性研究[J]. *船舶科学技术*, 2009, 31:37—42 (REN Zheng, JIN Tong, WEI Zhen, et al. Design and study on the multiple-bionic UUV with double tail fins[J]. *Ship Science and Technology*, 2009, 31:37—42(in Chinese))
- [14] ANDERSON J M, STREITLIEN K, BARRETT D S, et al. Oscillating foils of high propulsive efficiency[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 360: 41—72.
- [15] WEN L, WANG T, WU G, et al. Novel method for the modeling and control investigation of efficient swimming for robotic fish[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59: 3176—3188.
- [16] STREFLING P C, HELLMUM A M, MUKHERJEE R. Modeling, Simulation, and Performance of a

- Synergistically Propelled Ichthyoid[J]. *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics*, 2012, 17: 36–45.
- [17] LIGHTHILL M J. Hydromechanics of Aquatic Animal Propulsion[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1969, 1:413–446.
- [18] 于凯, 黄胜, 胡健 等. 仿鱼推进的实验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35:117–120 (YU Kai, HUANG Sheng, HU Jian, et al. Experimental research of fish-imitating propulsion[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2007, 35:117–120 (in Chinese))

Measurement and Optimization of Flexible Double-Tail Fin for UUV

JIN Tong, LIU Tai-ran, QIN Feng-hua, YANG Ji-ming

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Thrust efficiency of biomimetic propulsion actuator affects significantly the performance of bionic unmanned underwater vehicle (UUV). Several kinds of caudal-fin-type actuator for a hybrid bionic UUV were designed. In order to test these actuators, based on a water channel, a platform was built for measuring thrust force, motor's rotational speed and torque. Then, thrust efficiency suggested by Lighthill can be calculated. A series of experimental measurements were conducted and some results were obtained. Comparing with rigid-tail fin actuator, the flexible-tail fin actuator has better performance in both thrust force and thrust efficiency. For flexible-tail actuator, flapping with small amplitude and high frequency provides same thrust force as the flapping with large amplitude and low frequency. But the former efficiency is higher than the latter. In small flapping amplitude mode, the thrust force and thrust efficiency of double parallel tail fins are better than that with single tail fin. Finally, the movement parameters of actuator with double tail fins were optimized based on experimental results, which were adopted in performance optimization of UUV.

Keywords: unmanned underwater vehicle (UUV); hybrid biomimetics; double tail fin; thrust efficiency