

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

王田苗, 杨兴帮, 梁建宏

(北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100191)

摘要: 中央鳍/对鳍 (MPF) 推进模式和身体/尾鳍 (BCF) 推进模式是仿生自主水下机器人 (AUV) 最常见的两种推进模式, 其中 MPF 推进模式具有 BCF 推进模式无法比拟的一些运动优势. 本文首先在推进方式、运动速度、推进效率、机动性和游动稳定性等方面对这两种推进模式进行了分析比较, 将 MPF 模式推进的仿生 AUV 分为多鳍拍动式、胸鳍扑翼滑翔式和长鳍波动式 3 种, 并分别详细综述了这 3 种 MPF 模式推进的仿生 AUV 的国内外研究现状, 最后对其游动性能、驱动方式选择、驱动器数量、推进鳍和本体外形设计等问题进行了分析和讨论, 对 MPF 模式推进的仿生 AUV 研制所存在的问题进行了归纳总结, 并对今后可进行的研究内容作了展望.

关键词: MPF 游动; 仿生; AUV

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-03-0352-11

A Survey on Bionic Autonomous Underwater Vehicles Propelled by Median and/or Paired Fin Mode

WANG Tianmiao, YANG Xingbang, LIANG Jianhong

(Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The median and/or paired fin (MPF) mode and the body and/or caudal fin (BCF) mode are the two commonly used propulsion modes of the bionic autonomous underwater vehicles (AUVs). Thereinto, the bionic AUVs with the MPF mode have some advantages over those with the BCF mode. Firstly, this paper contrasts the two propulsion modes in the aspects of propulsion mechanism, swimming speed, propulsion efficiency, maneuverability and swimming stability. Then the bionic AUVs with the MPF mode are divided into three categories, i.e., multi-fin oscillating, pectoral-fin flapping or/and gliding, and long-fin undulating. Subsequently, the three categories are surveyed in detail respectively, including the current status at home and abroad. Then the swimming performance, the drive types, the number of drives, and the design of the propulsion fins and the body housing are analyzed and discussed. Finally, the existing problems of the AUVs with the MPF mode are described and summarized, and the key emphasis of the future work for the AUVs is prospected.

Keywords: MPF (median and/or paired fin) swimming; bionic; AUV (autonomous underwater vehicle)

1 引言 (Introduction)

近年来, 随着深海电缆的搭建和海底输油管道的铺设以及海洋油气开采等海洋工程技术的发展, 工程技术人员研制了各种适合海洋作业的水下机器人. 由于深海作业环境对人类的生命安全构成潜在威胁, 而且载人水下航行器系统复杂, 成本高, 所以其在海洋工程中的应用受到一定限制. 目前, 无人水下机器人 (UUV) 得到了比较广泛的应用, 而作为无人水下机器人的一个分支, 自主水下机器人 (AUV) 发展迅速.

AUV 是一种不需要接收实时操纵指令和提供外部能源的可独立作业的水下机器人, 与一般的

UUV 相比, 在作业环境和操纵范围方面具有明显优势. 在海洋工业中, AUV 可完成海床地形测量、海底管道和线缆勘察、海洋化学污染物采样等任务^[1]. 除了商用和民用领域, AUV 在军事和海洋环境科学领域也有广泛的应用, 包括军事侦察、水下排雷、港口巡逻、海底地震预测、海洋温度监控、极地海冰勘察等^[2-3]. 正是由于 AUV 具有广泛的应用前景和潜在的应用价值, 科研工作者们开发出了形态、功能、尺度各异的 AUV 平台. 现阶段开发的 AUV 主要包括传统水下作业机器人和仿生水下机器人两大类, 随着仿生学原理和仿生学设计研究的深入开展, 仿生水下机器人已成为近年来的研究热点^[4].

仿生水下机器人是模仿自然界中水生生物的运动模式和推进方式设计而成的可在水体环境下作业的机器人, 充裕的水生生物资源为水下仿生机器人的运动模式、操作策略、抗压和减阻设计以及水下导航等提供了丰富的启示, 这些都是仿生 AUV 适应水体环境、提高生存能力所必备的. 海洋生物具有游动效率高、机动性好、潜深大、运动阻力小等适合水下生存的特性^[5], 仿生学家及研发工程师们借鉴水生生物的这些生存优势, 开发了一系列以仿生方式推进的水下机器人, 与传统的水下机器人相比, 此类机器人在适应水下生存方面具有明显优势.

身体/尾鳍推进模式 (BCF) 和中央鳍/对鳍推进模式 (MPF)^[6-7] 是水生生物常用的两种推进模式, 水下仿生机器人也广泛采用这两种模式进行推进. 根据文献记载, BCF 游动模式推进的仿生 AUV 最早问世^[8], 迄今为止, 科研工作者对这种推进模式的仿生推进机理已经进行了大量的研究并研制出了具有多种运动特性的样机平台^[9-10]. 但是, MPF 游动具有高机动性和高效性以及良好的稳定性和可控性, 使其具有更广泛的实际应用前景, 因此 MPF 推进模式的仿生 AUV 越来越受到人们的关注.

本文首先介绍 MPF 推进模式的基本概念及与 BCF 模式的对比结果, 并对 MPF 推进模式的仿生 AUV 进行了分类, 然后对国内外 MPF 模式的仿生

AUV 的研究现状进行了简单介绍, 根据国内外的研究情况对 MPF 推进模式的仿生 AUV 进行了总结, 最后对这种仿生 AUV 的研究所存在的问题进行了分析, 并对今后的研究重点进行预测展望.

2 MPF 推进模式的基本概念、与 BCF 推进模式的对比分析及 MPF 模式推进的仿生 AUV 的分类 (Basic concept of the MPF mode, the contrast with the BCF mode, and the classification of the bionic AUVs with MPF mode)

MPF 模式与 BCF 模式的显著差别是^[6], BCF 游动主要通过身体和尾鳍的拍动产生向前的推进力, 而 MPF 游动借助除身体和尾鳍以外的鳍的拍动或波动产生推进力. MPF 游动的推进鳍包括成对的胸鳍、背鳍或臀鳍, 也可以是成对背鳍和臀鳍的配合, 通过这些鳍在拍动或波动过程中与水的相互作用, 产生推进自身游动的动力, 驱动整个身体产生相应运动, 同时产生各自由度方向上的机动性. 典型的 MPF 游动模式具有 6 个自由度方向上的精确机动性, 其中水中原地悬停和原地换向是 MPF 模式最大的优势. 表 1 给出了 BCF 模式和 MPF 模式的仿生 AUV 在推进机理、运动速度、推进效率、机动性和游动稳定性方面的比较结果.

表 1 BCF 模式和 MPF 模式仿生 AUV 比较

Tab.1 The contrast of the bionic AUVs between BCF mode and MPF mode

比较内容	BCF 模式	MPF 模式
推进机理	由尾鳍和身体的波动或摆动产生平移波形成前进的推力	由成对的胸鳍、背鳍、臀鳍, 或者背鳍和臀鳍混合拍动或波动产生推进力
运动速度	适合大航程高速巡游, 加速性能好	适合小航程低速游动
推进效率	高速巡游时效率较高, 但低速和转弯时效率较低	低速游动时具有较高的推进效率
机动性	机动性较差, 转弯半径较大, 完全由横向摆动的单自由度尾鳍推进的 BCF 模式 AUV 不能实现俯仰和滚转运动	机动性优良, 具有 6 个自由度的机动性, 可原地悬停和转弯
稳定性	游动状态易受水体环境影响	游动稳定性好, 抗干扰能力强

按照推进方式的不同, 可将 MPF 模式的仿生 AUV 分为多鳍拍动式、胸鳍扑翼滑翔式和长鳍波动式三种. 多鳍拍动式 MPF 模式的仿生 AUV 采用 2 个或者 2 个以上的鳍的协调拍动产生动力, 满足机动性要求, 其主要仿生原型为水生生物海龟和黑鲈; 胸鳍扑翼滑翔式 MPF 模式的仿生 AUV 采用类似鸟类翅膀的胸鳍结构, 通过扑动产生推进动力, 而且在速度达到一定值时, 还可以在水中滑翔前进,

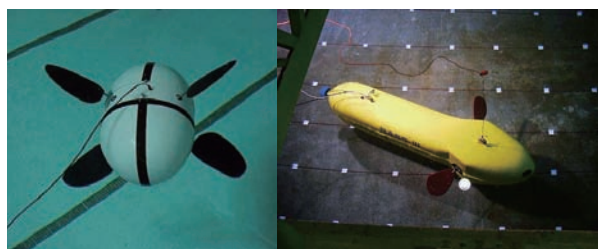
其仿生原型主要为水生生物蝠鲼; 长鳍波动式仿生 AUV 通过自身波动鳍产生的推进波推动躯体前进, 其仿生原型为自然界中的刀鱼和黄貂鱼等以波动鳍方式游动的水生生物. 与长鳍波动推进方式相比, 多鳍拍动推进的仿生 AUV 结构简单, 游动速度相对较快, 同时易于实现俯仰、滚转、偏航、换向等控制. 因而, 多鳍拍动推进的仿生 AUV 更易于与实际应用相结合, 而波动鳍推进的仿生 AUV 的研究对探

索其仿生原型的推进机理具有重要的意义。

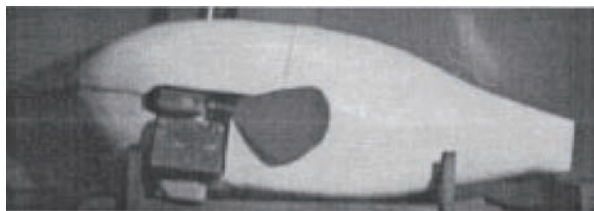
3 研究现状 (Current situation)

3.1 多鳍拍动式 MPF 模式的仿生 AUV 研究现状

自然界中 MPF 游动模式的水生生物具有优异的机动性和良好的原地悬停能力, 大部分 MPF 推进模式的仿生 AUV 正是模仿生物的这种优势研发出来的。1999 年, 美国 Nekton Research 公司研制了一款四鳍驱动的仿生 AUV 样机 PilotFish^[11-12], 如图 1(a) 所示。PilotFish 的 4 个柔性鳍以 X 型平均分布在身体周围, 利用柔性鳍拍动的方式产生推进力, 每个鳍由一个 2.5 kW 的直流伺服电机驱动, 水池测试实验表明其最大游速可达 0.6 m/s。2000 年, 日本东海大学的 Kato 等人研发了一条仿生机器黑鲈 BASS-II^[13]。选择黑鲈作为仿生对象, 是因为它们能够以胸鳍驱动躯体低速前进, 同时还可通过胸鳍的拍动实现水中稳定悬停。如图 1(c) 所示, 该机器鱼使用 2 个直流伺服电机驱动一对胸鳍, 通过胸鳍与水的相互作用来调节鱼体的航向和俯仰, 可以产生 6 个自由度方向的操纵力。实验结果表明, 在一定水流的冲击下, 该机器黑鲈能以 0.05 m/s 的游动速度与水下监听站实现精确对接。随后, 在 BASS-II 的基础上, 他们又研发了一款同样以胸鳍拍动驱动的仿生机器鱼 BASS-III^[12], 如图 1(b) 所示。



(a) Nekton Research 公司研制的 PilotFish 仿生 AUV (b) 日本东海大学研制的 BASS-III 仿生 AUV



(c) 日本东海大学研制的 BASS-II 仿生 AUV

图 1 美国 Nekton Research 公司和日本东海大学研制的 MPF 模式的仿生 AUV

Fig.1 The bionic AUVs with MPF mode developed by Nekton Research (USA) and Tokai University (Japan)

2004 年, 加拿大麦吉尔大学开发出六鳍驱动的水下仿生机器人 AQUA^[14], 其游动步态为铗鲑型游动 (ostraciform swimming)。如图 2 所示, AQUA 的每个鳍相对于躯体只有一个转动自由度, 身体外形

是依据 RHex 陆地机器人设计的^[15], 旨在通过改进使其发展成为一个自主的两栖 AUV 平台。AQUA 的成功研制表明, 通过使用多个单自由度摆动的驱动鳍, 可以实现仿生 AUV 的上浮、加速、下潜、偏航、滚转等功能。

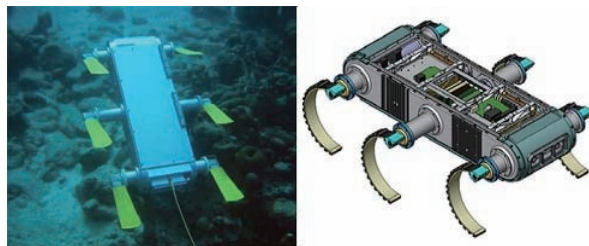
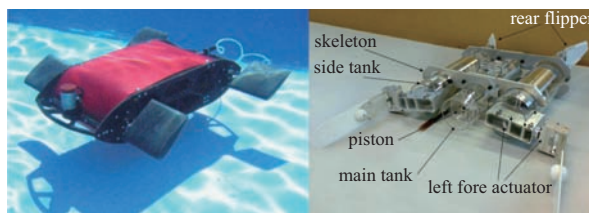


图 2 加拿大麦吉尔大学研发的 AQUA 仿生 AUV

Fig.2 The bionic AUV AQUA developed by McGill University (Canada)



(a) 美国瓦萨学院研制的 Madeleine

(b) 新加坡南洋理工大学研制的 robotic turtle

图 3 美国瓦萨学院和新加坡南洋理工大学研发的四鳍仿生 AUV 样机

Fig.3 The bionic UAVs with four oscillating fins developed by Vassar College (USA) and NTU (Singapore)

2006 年, 美国瓦萨学院研发了 Madeleine 四鳍驱动仿生 AUV, 以此进行实验来探索四鳍游动与两鳍游动相比在控制步态方面的特定优势^[16], 如图 3(a) 所示。使用 Madeleine 进行四鳍和两鳍驱动的对比较实验表明, 四鳍拍动推进具有更好的加速稳定性, 速度波动更小, 但当达到相同的峰值速度时, 四鳍运动消耗的能量是两鳍运动的 2 倍多。

2007 年, 新加坡南洋理工大学研发了一款基于模块化设计的四鳍推进的仿生 AUV 样机^[17], 如图 3(b) 所示。该 AUV 模仿自然界中的海龟进行设计, 能够实现水下潜航和陆地行走, 考虑到便于按照不同的任务需求进行结构改装和重构, 整个系统采用的是模块化的架构, 前后鳍的驱动都是独立的。水下推进实验表明, 此仿生 AUV 的四鳍拍动模式具有高效率、高机动性的特点。

2008 年, 美国 MIT 的研究人员也研发了一款名为 RoboTurtle 的多鳍驱动的仿生 AUV^[18], 如图 4(a) 所示, 它是一个四鳍驱动的隆头型游动 (labriform-type swimmer) 的仿生 AUV, 采用四鳍驱动是因为在拍动过程中四鳍分布的对称性可使平台保持稳定,

更易于控制. 为便于系统升级和扩展, RoboTurtle 的鳍被设计成独立的模块^[19], 各模块包括一个提供滚转驱动的 190 W 直流无刷电机、一个提供俯仰驱动的 15 W 直流无刷电机、相应电机的驱动电路以及相应的电路连接. 其控制力调节是通过改变振动波的相位和幅值来实现的. 美国 iRobot 公司开发的 Transphibian 商业化两栖仿生 AUV, 也采用了与 RoboTurtle 相似的模块化设计思路^[20], 将拍动鳍作为支撑腿来使用时, Transphibian 也能实现部分陆地运动, 如图 4(b) 所示. 2011 年, 美国海军研究实验室推出了一款四鳍拍动推进仿生 AUV 概念模型^[21], 如图 4(c) 所示, 该模型的壳体外形和前后拍动鳍的位置分布是利用 CFD (computational fluid dynamics) 技术进行优化设计的, 这样的设计使游动过程中整个系统所受流体阻力最小, 他们将经实验验证过的双鳍拍动仿生 AUV 控制方法应用于该模型样机, 通过建模仿真计算, 得到该模型样机的最大游速为 0.42 m/s.



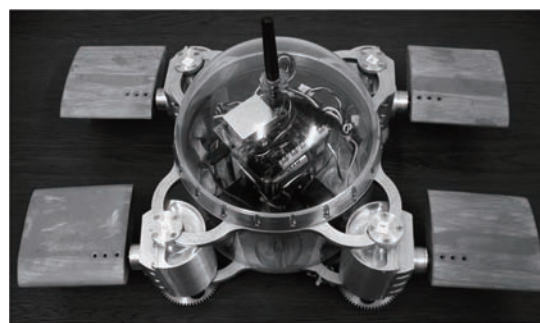
图 4 美国 MIT、iRobot 公司和海军研究实验室研制的 MPF 模式仿生 AUV 样机

Fig.4 The bionic AUVs with MPF mode developed by MIT, iRobot and NRL in the USA

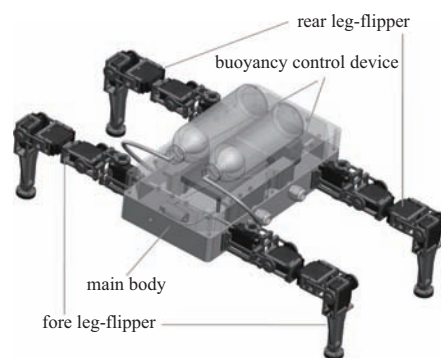
国内部分高校也对多鳍拍动推进的仿生 AUV 进行了研究. 2008 年, 北京大学研制了一个四鳍拍动推进的仿生机器海龟^[22], 如图 5(a) 所示, 该仿生 AUV 的 4 条鳍对称地分布在躯体的周围, 通过 4 条鳍的协调拍动, 可以在任意方向上产生推进力进行机动, 实现复杂的 3 维运动, 包括上升、下潜、滚转和悬停等. 2011 年, 华中科技大学研制了一款名为 MiniTurtle-I 的具有较强环境适应性的仿生两栖 AUV 样机^[23]. 如图 5(b) 所示, MiniTurtle-I 的 4 个拍动鳍采用的也是模块化设计, 而且具有双重功能, 可按水下步态拍动推进身体以游动方式前行, 经过结构变形后, 又可作为支撑腿实现陆地运动.

2012 年, 北京航空航天大学机器人研究所也研发了一款四鳍拍动系列的仿生海龟, 在南极科考中为科考船只探测前方海域环境状况^[24]. 如图 6 所示, 该仿生海龟的外形尺寸为 1400 mm×680 mm×300 mm, 本体质量 20 kg, 可实现空间 5 个自由度的运动, 能够在原地灵活转弯. 其最大前进速度为

1 m/s, 设计作业深度为 30 m, 可连续作业 10 h, 载有高亮 LED 光源、鱼眼镜头和惯性导航模块, 可完成深海探测和侦察等任务.



(a) 北京大学研制的仿生机器海龟



(b) 华中科大研制的 MiniTurtle-I

图 5 北京大学和华中科技大学研制的仿生 AUV 样机
Fig.5 The bionic AUVs developed by Peking University and HUST

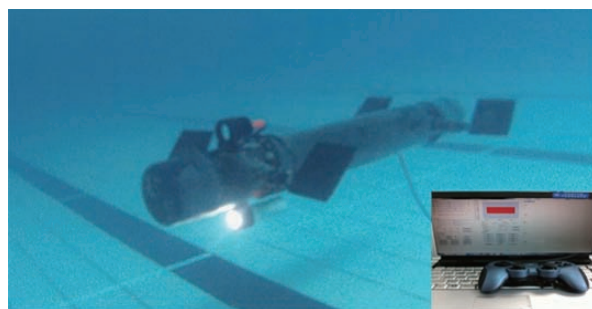


图 6 北京航空航天大学研制的仿生多鳍 AUV 样机

Fig.6 The bionic AUV with multiple oscillating fins developed by Beihang University

3.2 胸鳍扑翼滑翔式 MPF 仿生推进 AUV 研究现状

胸鳍扑翼滑翔式仿生 AUV 的自然原型是蝠鲼, 它们可以依靠胸鳍的上下扑动产生前进动力, 具有高效率的巡游性能和非常好的机动性能, 能在前游时快速原地转弯, 也可骤然悬停.

2006 年, 美国塔夫斯大学研发了一条仿曼塔蝠鲼的水下滑翔仿生机器人^[25], 曼塔蝠鲼被选为仿生对象是因为这种生物体具有较高的游动效率, 同时较大的扑翼鳍表面积可作为水下滑翔设计的参

考. 如图 7(a) 所示, 该仿生蝠鲼长约 50 cm, 翼展 1 m, 通过气动活塞驱动多关节骨骼臂, 骨骼臂带动 PVC (polyvinyl chloride) 翅膀拍动, 从而产生仿蝠鲼的扑翼式运动. 2007 年, 日本冈山大学的研究人员研制了一款同样采用气动方式驱动但外形更接近于生物蝠鲼的仿生 AUV 样机^[26], 他们按照非线性有限元方法对外形进行最优设计, 采用基于 CAD 技术的橡胶模制工艺加工, 最终得到了柔性躯体的仿生曼塔蝠鲼样机. 如图 7(b) 所示, 该仿生 AUV 通体材料都为硅橡胶, 体长 150 mm, 体宽 170 mm, 通过气动阀进行驱动, 游动速度可达 100 mm/s.



(a) 美国塔夫斯大学研制的仿生蝠鲼样机 (b) 日本冈山大学研制的柔性躯体仿生蝠鲼

图 7 美国塔夫斯大学和日本冈山大学设计的仿生扑翼 AUV 样机

Fig.7 The bionic AUVs with flapping wings developed by Tufts University (USA) and Okayama University (Japan)



(a) Festo研发的仿生AUV样机 (b) EvoLogics研发的仿生AUV样机

图 8 德国的 Festo 与 EvoLogics 研发的仿生扑翼 AUV 样机
Fig.8 The bionic AUVs with flapping wings developed by Festo and EvoLogics (Germany)

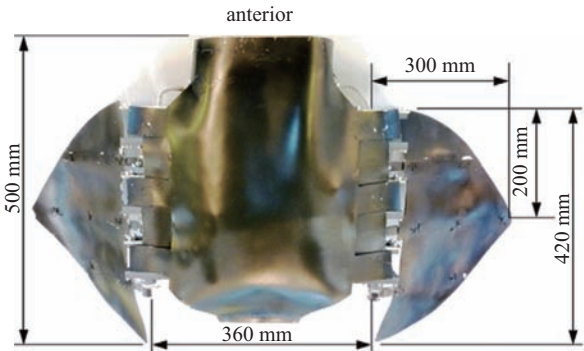
2007 年, 德国的 Festo 和 EvoLogics 两家公司研发出两条相似的仿生蝠鲼 AUV 样机^[27-28], 如图 8 所示, 两个样机都采用了柔性驱动结构. Festo 研发的仿生蝠鲼采用大功率液压系统控制扑翼鳍运动, 其翼展为 96 cm. EvoLogics 研发的是一系列不同尺度的仿生蝠鲼 AUV, 翼展尺寸为 1.5 m ~ 3.5 m, 这些仿生蝠鲼的躯体结构中都包括一个由浮力装置驱动的滑翔机构和一个用来实现精确机动控制的喷射推进系统, 这个推进系统可以使仿生蝠鲼实现类似自然界中蝠鲼的运动模式.

随后, Festo 将蝠鲼拍动鳍改进后应用在他们设计的仿生企鹅 AUV 中^[29-30]. AquaPenguin 通过两个胸鳍拍动可按照隆头型游动 (labriform-type) 模式推

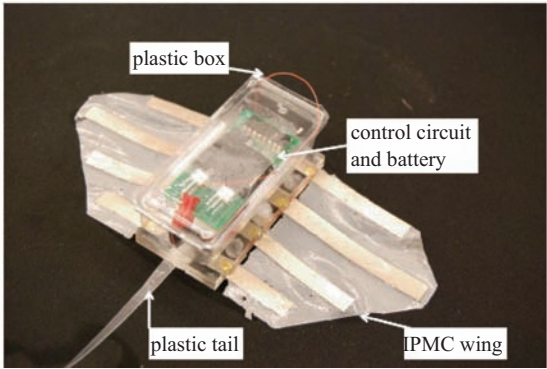
进, 其总体长为 77 cm, 最大游动速度为 2 L/s (L 为样机体长), 如图 9 所示.



图 9 Festo 研发的仿生企鹅 AquaPenguin 样机
Fig.9 The bionic AUV named AquaPenguin developed by Festo



(a) 南洋理工大学研制的RoMan-II



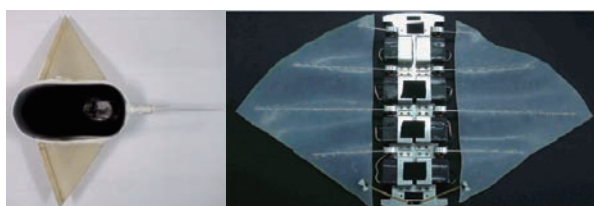
(b) 弗吉尼亚大学研制的IPMC驱动仿生扑翼AUV

图 10 南洋理工大学和弗吉尼亚大学研制的仿生扑翼 AUV
Fig.10 The bionic AUVs with flapping wings developed by NTU (Singapore) and University of Virginia (USA)

2010 年开始, 新加坡南洋理工大学的研究人员也开始对曼塔蝠鲼进行一系列的仿生研究^[31-32]. 图 10(a) 为他们研制的 RoMan-II 仿生蝠鲼试验样机. RoMan-II 身体两侧平均分布有 6 个柔性鳍条, 每个鳍条由相应的直流伺服电机驱动, 通过鳍条的拍动产生推进力, 可实现各个方向的机动性, 该样机可完成原地转弯和直线后退等高难度动作, 稳定巡航时, 速度可达到 1 L/s. 2011 年, 美国弗吉尼亚大学也研制了一个具有相同架构的仿生蝠鲼^[33], 如图 10(b) 所示, 该仿生扑翼 AUV 依靠平均分布在身体两侧的 8 个鳍条的拍动推进躯体运动, 与 RoMan-II 不同的是, 该仿生蝠鲼的鳍条本身就是可产生驱动

力的人工肌肉 (IPMC), 整个 AUV 的质量为 55.3 g, 通过水池游动实验测定其速度可达 0.4 cm/s.

国内也有学者对仿生扑翼方式推进的 AUV 进行了研究, 并取得了一定的成果. 2009 年, 哈尔滨工业大学研制了一条以柔性胸鳍摆动方式推进的形状记忆合金 (SMA) 丝驱动型仿生蝠鲼机器鱼^[34-35]. 如图 11(a) 所示, 该机器鱼外形与双吻前口蝠鲼外形相似, 身体呈现扁平形状, 有一对三角形的柔性仿生胸鳍, 直线游动速度达到 79 mm/s, 最小转弯半径为 118 mm. 国防科技大学也研制了一台与南洋理工大学的 RoMan-II 结构类似的仿生蝠鲼样机^[36-37]. 如图 11(b) 所示, 该仿生蝠鲼由 4 对左右对称的鳍条拍动推进, 每个鳍条通过一个伺服电机驱动, 可实现前行、后退、原地转弯、行进转弯等运动模式. 水池测试实验测定其游动速度可达 0.15 m/s.



(a) 哈尔滨工业大学研制的 SMA 驱动型仿生扑翼 AUV
(b) 国防科技大学研制的仿生蝠鲼样机

图 11 哈尔滨工业大学和国防科技大学研制的仿生扑翼 AUV 样机

Fig.11 The bionic AUVs with flapping wings developed by HIT and NUDT



(a) 气动式仿生蝠鲼 (b) 电动式仿生蝠鲼

图 12 北京航空航天大学研制的仿生扑翼式 AUV 样机

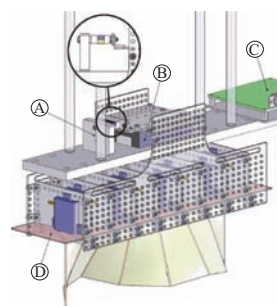
Fig.12 The bionic AUVs with flapping wings developed by Beihang University

2010 年, 北京航空航天大学机器人研究所也开发了一款仿生牛鼻鲼样机^[38], 名为 Robo-Ray II, 如图 12(a) 所示, 该样机主体部分为结构简单的柔性躯干, 由两侧的气动肌肉驱动, 垂直方向舵用来控制转向. 仿生牛鼻鲼的总翼展为 56 cm, 体长为 32 cm, 在拍动频率为 1.2 Hz 时, 最大速度可以达到 0.5 L/s. 2011 年, 北京航空航天大学机器人研究所又研发了一条与 Robo-Ray II 外形相似, 但是采用不同驱动方式的仿生牛鼻鲼样机^[39]. 该样机体长和翼展

分别为 0.46 m 和 0.71 m, 采用鳍条式驱动, 3 对鳍条分别布置在身体两侧, 每个鳍条通过伺服电机驱动. 通过水池游动实验测定该样机的速度可达 0.26 m/s, 约为体长的 0.55 倍.

3.3 长鳍波动式 MPF 模式推进的仿生 AUV 研究现状

长鳍波动式仿生 AUV 以鱼类的具有波动功能的背鳍、腹鳍或臀鳍为仿生推进的模仿对象, 通过鳍条驱动弹性鳍面产生波状运动, 通过波动的鳍面与水作用获得推进力. 波动鳍仿生 AUV 的机构简单, 流体的载荷分布合理, 机动性好, 参数控制灵活, 但是由于目前长鳍波动的推进机理尚不明确, 仿生相似度不够, 已研制出的具有独立航行能力的该种推进模式的仿生 AUV 样机的游动性能还有待提高, 目前大部分的研究处在原理探索和仿生推进装置验证阶段.



(a) 美国西北大学研制的波动鳍仿生测试装置



(b) 南洋理工大学研制的波动鳍仿生实验装置 (c) 代尔夫特理工大学研制的波动鳍仿生实验装置

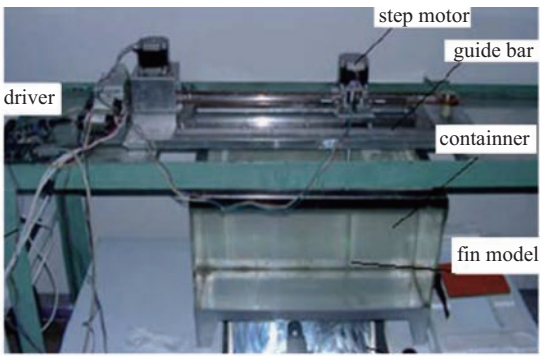
图 13 国外典型带状鳍仿生推进实验装置

Fig.13 The typical experimental devices abroad for testing the propulsion performance of undulatory ribbon fins

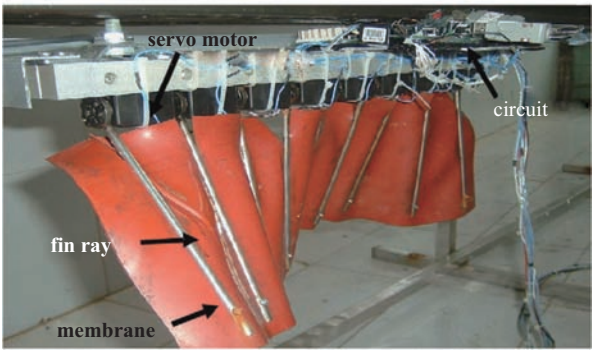
2006 年, 美国西北大学研发了一套模仿黑鬼刀鱼长鳍波动式推进的实验装置^[40], 如图 13(a), 选择刀鱼作为仿生对象是因为它在 6 个自由度的方向上都具有高效的机动能力, 并且具有良好的换向机动性. 通过控制振动波的相位和幅值, 发现推进波能够沿躯体向前或是向后传播, 引入不同的偏移量可以产生符合各种条件的操纵机动性. 2005 年开始, 南洋理工大学也研发了一系列相似的带状鳍仿生推进实验装置^[41-43] (图 13(b)), 他们将这种带状鳍推进器安装在仿生鱼体上, 得到了以刀鱼波动鳍模式

推进的机器刀鱼^[44-45] (图 14(a)、(b)) 和利用鳐科模式双鳍波动推进的机器乌贼^[46-47] (图 14(c)), 它们都是由安装在胸部或身体两侧的带状鳍驱动的. 荷兰代尔夫特理工大学也开发了一台推进方式类似的仿生 AUV^[48], 如图 14(d) 所示, 命名为 Galatea, 它是以鳐科模式游动的盒状 AUV, 图 13(c) 为波动鳍实验装置图.

在仿生原理样机的研制方面, 日本大阪大学自 2002 年开始对由 2 个侧向柔性长鳍推进的仿生 AUV 进行了一系列的研究, 先后研制了 3 套样机装置, 图 14(e) 为 2006 年研制的第 3 代样机^[49], 其 2 个波动鳍由 17 个伺服电机单元驱动产生运动, 能够在水下灵活地转向、俯仰、盘旋、上浮、下潜等, 可完成空间 6 自由度的自主运动, 航行试验显示, 当推进鳍波数为 1、波动频率为 2Hz 时样机航速可达 0.4 m/s. 随后, 他们将新型智能材料 IPMC 用于仿生带状鳍的驱动中, 研发了一条类似的仿生 AUV 样机^[50], 如图 14(f) 所示, 该样机身体两侧平均分布着 8 对驱动鳍条, 鳍条材料为可实现智能驱动的 IPMC 人工肌肉, 经水池实验测定其最大推进速度为 18.1 mm/s.



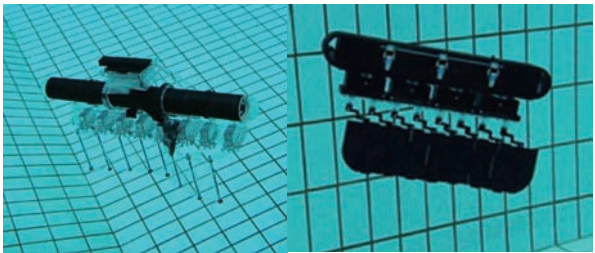
(a) 中国科技大学长鳍波动式仿生推进实验装置



(b) 国防科技大学波动长鳍测试装置

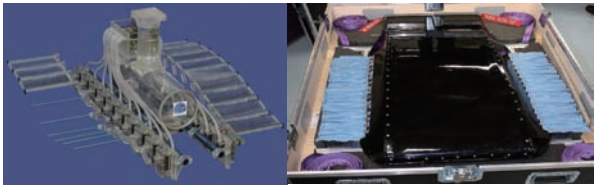
图 15 国内波动鳍仿生推进实验装置

Fig.15 The bionic propulsion devices with undulatory fins in China



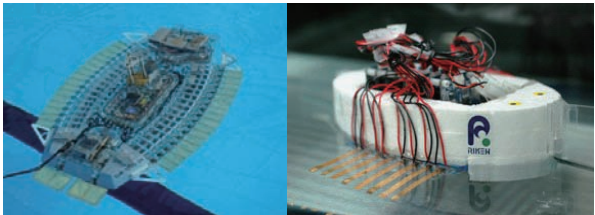
(a) 南洋理工大学研制的 NKF-I 波动鳍仿生 AUV

(b) 南洋理工大学研制的 NKF-II 波动鳍仿生 AUV



(c) 南洋理工大学研制的双鳍波动推进仿生 AUV

(d) 代尔夫特理工大学研制的 Galatea



(e) 大阪大学研制的电机驱动的波动鳍仿生 AUV

(f) 大阪大学研制的 IPMC 驱动的波动鳍仿生 AUV

图 14 国外典型长鳍波动式仿生 AUV

Fig.14 The bionic AUVs abroad propelled by long undulatory fins

根据文献调研结果, 国内从事长鳍波动式仿生推进研究的单位有 4 家, 分别为国防科技大学、中国科技大学、哈尔滨工业大学和中国科学院自动化研究所. 图 15 分别为中国科技大学和国防科技大学研制的仿生波动鳍实验装置^[51-52]. 中国科技大学在长鳍波动推进方面侧重于通过 CFD 仿真和实验手段研究波动机理以及形状记忆合金 (SMA) 驱动仿生鳍条实现波动推进的相关理论和技术^[51,53-58], 而国防科技大学在以实验手段研究波动理论的同时^[52,59-62], 研制出两台波动鳍推进的仿生 AUV 试验样机, 其中图 16(a) 为单鳍波动推进样机^[63], 图 16(b) 为多鳍波动推进样机^[64], 这 2 个 AUV 样机的鳍条都采用刚性材料, 柔性鳍面选用弹性较好的橡胶材料. 通过多鳍波动推进的水池测试实验得到, 增加波动鳍的波动速度和波动鳍的数目、增大鳍面展弦比都可以提高鱼体的稳态推进速度. 2009 年, 中国科学院自动化所也研发了一条双鳍驱动的仿生 AUV 样机^[65], 如图 16(c) 所示, 每个波动长鳍由一张柔性弹性膜和 10 根鳍条组成, 每个鳍条由一个直流伺服电机控制其上下拍动, 通过 20 个电机的协调运动产生推进波推动躯体前进. 该样机可产生前行、后退、自转和侧向游动等 4 种运动模式, 通过水池实验测得其平均前行速度和最大前行速度

分别为 232 mm/s 和 370 mm/s, 平均侧向游动速度和最大侧向游动速度分别为 146 mm/s 和 214 mm/s. 哈尔滨工业大学也研制了一台类似结构的波动鳍仿生 AUV 样机^[66-67], 见图 16(d), 该样机采用左右对称的 5 对鳍条驱动, 与中国科学院研制的仿生 AUV 不同的是, 鳍条的驱动采用的不是电机而是 SMA 材料, 水池测试实验表明, 该样机的最大直线游动速度为 40 mm/s, 最大转向速度为 22°/s.

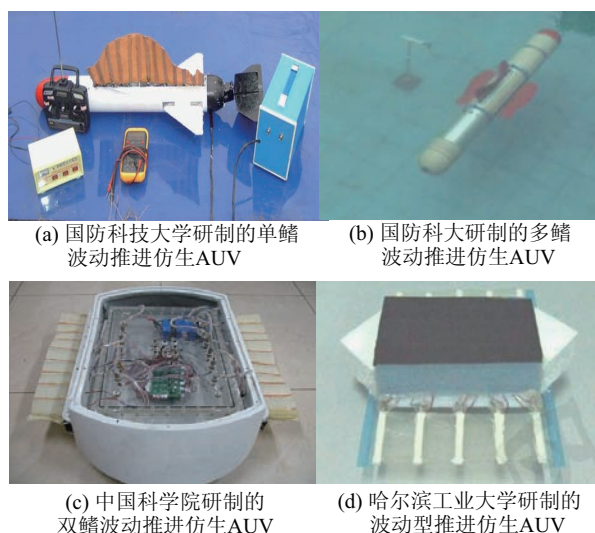


图 16 国内研制的波动鳍推进的 MPF 模式的仿生 AUV 样机

Fig.16 The AUVs with MPF mode propelled by undulatory fins in China

4 MPF 推进模式仿生 AUV 研究现状分析 (State of the art of AUVs with MPF mode)

1) 游动性能分析

对于仿生 AUV 来说, 游动性能的优劣可通过游动速度和机动性来评定. 从以上的发展历程来看, MPF 仿生推进 AUV 的游动速度和游动机动性远远没有达到预期的要求. 驱动功率不足^[33,50]、外形减阻设计未达到要求^[17,23,25]、驱动效率过低^[34,67]等是影响 MPF 推进模式仿生 AUV 速度的主要因素. 其中游动效率是影响速度的一个关键因素, 其对动力学参数的变化很敏感^[5]. 由于获得较高的推进效率是研制仿生推进 AUV 的主要动机之一, 所以在未来的研发中, 应该尽可能保证系统在良好的运动学条件下工作, 把提高效率放在首要的位置. 仿生推进鳍的仿生相似度不够(多鳍和波动鳍的非柔性仿生)、协调性不好(多鳍和波动鳍摆动或波动的协调性不好)以及运动学控制方程的过度简化是影响游动机动性的主要因素. 流体力学模型的复杂性增加了以精确模型进行系统控制的难度, 目前的运

动学控制水平决定了当前的运动学参数优化方法. 为了保证获得较好的运动学参数, 可对流体动力学模型进行离线优化, 将 CFD 仿真^[20-21]和 DPIV 技术及分析方法^[68-72]应用于拍动鳍和波动鳍推进模式的计算中, 可为研究人员提供一定的研究方法和参数分析的优化手段.

2) 驱动方式选择

驱动方式的选择也是研发仿生 AUV 需要考虑的一个关键问题, 从文献调研结果来看, 多鳍拍动式仿生 AUV 都是使用电机驱动的, 而胸鳍扑翼滑翔式和长鳍波动式的仿生 AUV 除了使用电机驱动外, 还有的 AUV 采用气动、液压或是人工智能材料进行驱动.

无刷直流伺服电机驱动是比较常用的驱动方式^[12-13,27,44,46,48], 较高的转矩密度和良好的可控性使其成为驱动器的首选, 但是这种高性能的直流伺服电机的价格很昂贵. 为了降低研制成本, 也有部分仿生 AUV 采用普通的直流电机或是大功率的马达作为驱动源^[16,18], 配合传动装置和可产生仿生拍动或振动的机械结构, 如曲柄移动导杆机构等, 来实现对 AUV 的仿生驱动. 在控制系统合理布局和可控性良好的条件下, 气动或液压驱动系统可以提供更高的功率密度, 所以也有部分仿生 AUV 样机采用气动或液压驱动方式^[25-26,38]. 由于输送驱动液体或气体的软管不存在复杂的密封问题, 而且驱动活塞和波纹管驱动器可以产生类似于生物肌肉的线性驱动特性, 这些优势使这两种驱动方式在仿生 AUV 研制中受到欢迎. 但是这样的驱动方式需要更复杂更庞大的系统, 而庞大的液压或气动系统如果集成在仿生 AUV 平台上, 可能会导致比较轻便的电机驱动更低的游动速度. 所以, 可根据具体的应用需求, 如研制成本、游动速度、系统复杂度、可控性等方面来选择合适的驱动方式.

从现阶段发展状况来看, 人工智能材料将在仿生工程设计中起到越来越重要的作用, 这种材料集驱动和感知于一身, 应用在仿生 AUV 上可提高其仿生相似度, 降低系统复杂性, 增强其可控性^[33-34,50,66]. 但这些智能材料驱动器也有一些缺点, 如 SMA 依靠电流产生焦耳热使材料发生相变和变形来实现驱动, 这就使能源利用率下降、驱动效率降低; 而现阶段对于 IPMC 和压电驱动器的驱动机理研究还不够充分, 应用还不够完善, 这种材料还不适合在大尺度高功率的仿生 AUV 系统中应用. 因此, 研发具有高驱动功率、快速响应、高效率的仿生致动材料是提高仿生 AUV 性能的一个关键手段.

3) 驱动器数量

除了驱动方式选择之外, 仿生 AUV 实现自主游动功能所需的驱动器数量也是一个值得关注的问题. 多鳍拍动推进的仿生 AUV 驱动器数量由拍动鳍的数量和每个鳍实现的拍动自由度决定, 由于四鳍拍动的对称性和良好的可控性, 目前多鳍拍动推进式仿生 AUV 大部分都采用四鳍拍动^[16-24], 驱动方式多采用电机驱动, 根据拍动鳍相对于身体的自由度确定驱动器数量一般为 4 个或 8 个, 而且为保证系统可靠性和便于系统升级, 每个驱动器采用模块化结构独立工作. 胸鳍扑翼滑翔式和长鳍波动式仿生 AUV 驱动器数量由扑动或波动的翼面数量和翼面上鳍条的数量决定, 鳍条相对躯体一般只有一个摆动自由度, 摆动动作由控制其摆动的电机、气动装置或人工智能材料驱动完成^[25,33-34,38]. 对于多鳍拍动推进的仿生 AUV 而言, 由于模块化设计的需求, 无法减少驱动器的数量, 但是可通过选择更好的驱动方式和更优的外形设计达到最优的控制效果, 而对于采用非智能材料驱动的胸鳍扑翼滑翔式和长鳍波动式仿生 AUV 来说, 可通过设计合理的传动机构来减少驱动器的数量, 达到简化系统、降低自重和提高载重量的目的.

4) 推进鳍和本体外形设计

从仿生发展历程来看, MPF 模式推进的仿生 AUV 在柔性推进鳍和仿生外形设计方面得到了一定的发展. 目前, 多鳍拍动式仿生 AUV 多采用刚性较大的拍动鳍^[16-18,22,24], 而胸鳍扑翼滑翔式和长鳍波动式仿生 AUV 多采用刚性骨架(翼骨或鳍条)配合柔性鳍面产生扑动或波动来推进躯体前进^[38-39,44-47,64]. 柔性鳍的使用在一定程度上提高了 AUV 的仿生相似度, 但是推进效果与生物原型相比还存在很大差距, 主要原因是对生物柔性鳍推进的水动力学研究尚有欠缺, 因此, 需要在充分了解生物推进鳍原理的基础上进一步提高仿生柔性鳍的推进性能. 为了研究水生生物身体外形对游动性能的影响, 研究人员也研发了一系列能够维持仿生对象特定身体外形的柔性外部支撑结构^[26-28,31-32,38-39], 但是这样的结构能否抵抗深水操作的高压作用还有待进一步进行实验观察. 这些柔性躯体 AUV 的研发和广泛应用使柔性本体的设计更趋于普遍化. 日本冈山大学的蝠鲼样机^[26]和北京航空航天大学 Robo-Ray 系列^[38-39]的躯体保形结构都是通过铸造的方法成型的, 实验结果表明, 这种方法可行并具有一定的应用价值, 得到的身体保形结构可以保持良好的抗压性. 但对于长时间水下作业的仿生 AUV

来说, 驱动器的冷却是这种设计需要考虑的一个问题, 因为这样的设计不允许内部热对流; 而且, 这种构建躯体的方法可能不适合尺寸较大的仿生 AUV. 因而, 在身体外形仿生方面, 选择具有较强抗压性能的材料和适当的成型加工方法, 为整个仿生 AUV 系统选择良好的散热机制, 是应该考虑的因素.

5 结论和展望 (Conclusions and prospects)

本文回顾并分析了 MPF 仿生推进系统的发展历程, 从近年来的研究和应用情况推测, 这种推进方式的仿生 AUV 仍然具有一定的潜在研究价值, 需要在其仿生原型的生物运动机理方面进行进一步的探索和挖掘.

水生生物的身体形态不仅仅由符合水动力学的优化条件决定, 也有一部分由生物实现运动功能所需的能量对自身骨骼和肌肉的需求决定. 智能材料和新型驱动方式的应用是当前研究的热点, 这些材料和驱动器在输出力和功率密度方面与生物肌肉骨骼相比还有一定差距, 为了在仿生 AUV 技术中充分利用新型材料和新型驱动器, 更充分地了解与水动力学相关的形态学特征是重中之重, 这些形态学特征可在具体的工程应用中进一步优化以适应特定的工程要求. 同时, 研制具有更高性能的智能仿生材料也是提高仿生 AUV 性能的一个关键因素.

提高拍动和波动运动的驱动效率是今后发展仿生 AUV 需要解决的关键问题之一, 因为获得高效率是最初发展仿生推进 AUV 的主要原因之一. 而到现在为止, 这个问题还没有得到很好的解决. 我们在仿生工程科学中模仿的很多水生生物, 它们的运动特性和游动机理还没有被完全探索清楚, 例如水动力学不稳定性对游动效率的影响、水生生物自身的减阻功能等, 目前还没有一种可以把所有的对仿生 AUV 系统的影响因素都考虑进来的仿生 AUV 的设计方法, 所以大部分仿生 AUV 系统与其原型相比在运动性能上有很大差距. 因此, 探索仿生原型的运动特性和游动机理并应用于仿生系统, 探索游动过程的流体动力学影响因素, 提高仿生相似度是实现 MPF 模式 AUV 高效游动需解决的关键问题.

仿生 AUV 领域的主要进展是由计算模型的发展推动的, 当今计算机计算能力的提高和并行处理算法的日趋完善, 使越来越复杂的数学模型得到实用的解, 这样就可以利用仿真手段更有效地进行低成本的形态学和运动学实验. 计算机仿真技术与相应的实验测试手段相结合, 可以以较低成本和更高的效率实现 MPF 仿生 AUV 的设计和优化工

作 [51-58].

最后, 为了突出仿生水下推进系统所具备的优势, 需要在工作性能方面开展更直接的比较工作, 验证仿生推进系统与传统推进系统(螺旋桨推进)相比所具有的独特优势.

参考文献 (References)

- [1] Danson E F S. Technology and applications of autonomous underwater vehicles[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2003.
- [2] Tripp S T. Autonomous underwater vehicles (AUVs): A look at coast guard needs to close performance gaps and enhance current mission performance[R]. Groton, USA: Coast Guard Research and Development Center, 2006.
- [3] Dowdeswell J A, Evans J, Mugford R, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs) and investigations of the ice-ocean interface: Deploying the Autosub AUV in Antarctic and Arctic waters[J]. Journal of Glaciology, 2008, 54(187): 661-672.
- [4] Bandyopadhyay P R. Trends in biorobotic autonomous undersea vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 109-139.
- [5] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An efficient swimming machine[J]. Scientific American, 1995, 272(3): 40-48.
- [6] 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.
- [7] Webb P W. Form and function in fish swimming[J]. Scientific American, 1984, 251(1): 58-68.
- [8] Barrett D S. The design of a flexible hull undersea vehicle propelled by an oscillating foil[D]. Boston, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [9] 喻俊志, 陈尔奎, 王硕, 等. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(4): 485-491.
Yu J Z, Chen E K, Wang S, et al. Research evolution and analysis of biomimetic robot fish[J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(4): 485-491.
- [10] 1 & 1 INTERNET AG. Robotic-fish[EB/OL]. [2012-08-05]. <http://www.robotic-fish.net/index.php?lang=en&id=robots>.
- [11] Kemp M, Hobson B, Janet J, et al. Assessing the performance of oscillating fin thruster vehicles[C]//International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST). Lee, New Hampshire, USA: Autonomous Undersea Systems Institute, 2001: 1-9.
- [12] Fish F E, Lauder G V, Mittal R, et al. Conceptual design for the construction of a biorobotic AUV based on biological hydrodynamics[C]//International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. Durham, New Hampshire, USA: University of New Hampshire-Marine Systems Press, 2003: 1-8.
- [13] Kato N. Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 121-129.
- [14] Georgiades C, German A, Hogue A, et al. AQUA: An aquatic walking robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 3525-3531.
- [15] Altendorfer R, Moore N, Komsuoglu H, et al. RHex: A biologically inspired hexapod runner[J]. Autonomous Robots, 2001, 11(3): 207-213.
- [16] Long Jr J H, Schumacher J, Livingston N, et al. Four flippers or two? Tetrapodal swimming with an aquatic robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2006, 1(1): 20-29.
- [17] Low K H, Zhou C L, Ong T W, et al. Modular design and initial gait study of an amphibian robotic turtle[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 535-540.
- [18] Licht S C. Biomimetic oscillating foil propulsion to enhance underwater vehicle agility and maneuverability[D]. Boston, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [19] 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(3): 786-794.
- [20] iRobot. Advanced platforms[EB/OL]. [2012-08-05]. http://www.irobot.com/us/cool_stuff/Research/Advanced_Platforms.aspx.
- [21] Geder J D, Ramamurti R, Palmisano J. Four-fin bio-inspired UUV: Modeling and control solutions[C]//ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. New York, USA: ASME, 2011: 1-10.
- [22] Zhao W, Hu Y H, Wang L. Construction and central pattern generator-based control of a flipper-actuated turtle-like underwater robot[J]. Advanced Robotics, 2009, 23(1/2): 19-43.
- [23] Han B, Luo X, Wang X J, et al. Mechanism design and gait experiment of an amphibian robotic turtle[J]. Advanced Robotics, 2011, 25(16): 2083-2097.
- [24] 田伟程. 多鳍水下仿生机器人的结构设计与运动控制 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
Tian W C. Structural design and motion control of multi-fin underwater bionic robot[D]. Beijing: Beihang University, 2012.
- [25] Brower T P L. Design of a manta ray inspired underwater propulsive mechanism for long range, low power operation[D]. Medford, Massachusetts, USA: Tufts University, 2006.
- [26] Suzumori K, Endo S, Kanda T, et al. Bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied Manta swimming robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 4975-4980.
- [27] Drives & Control. Artificial rays take to the water[EB/OL]. [2012-08-06]. <http://www.drives.co.uk/fullstory.asp?id=1963>.
- [28] EvoLogics. Subsea glider with fin ray effect[EB/OL]. [2012-08-06]. <http://www.evologics.de/en/products glider/index.html>.
- [29] Festo. AquaPenguin[EB/OL]. [2012-08-06]. http://www.festo.com/cms/en-us_us/10290_10344.htm.
- [30] Festo. A biomechatronic overall concept[EB/OL]. [2012-08-06]. http://www.festo.com/net/SupportPortal/Downloads/42074/AquaPenguin_en.pdf.
- [31] Zhou C L, Low K H. Better endurance and load capacity: An improved design of manta ray robot (RoMan-II)[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(suppl): 137-144.
- [32] Zhou C L, Low K H. Design and locomotion control of a biomimetic underwater vehicle with fin propulsion[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(1): 25-35.
- [33] Chen Z, Um T I, Bart-Smith H. Ionic polymer-metal composite enabled robotic manta ray[C]//Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Bellingham, USA: SPIE, 2011: 1-12.

- [34] Wang Z L, Wang Y W, Li J, et al. A micro biomimetic manta ray robot fish actuated by SMA[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1809-1813.
- [35] 王扬威, 王振龙, 李健, 等. 形状记忆合金驱动仿生蝠鲼机器鱼的设计[J]. 机器人, 2010, 32(2): 256-261.
- Wang Y W, Wang Z L, Li J, et al. Development of a biomimetic manta ray robot fish actuated by shape memory alloy[J]. Robot, 2010, 32(2): 256-261.
- [36] Yang S B, Qiu J, Han X Y. Kinematics modeling and experiments of pectoral oscillation propulsion robotic fish[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(2): 174-179.
- [37] 杨少波. 牛鼻鳞泳动动力学分析与仿生机器鱼研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- Yang S B. Hydrodynamic analysis of cownose ray's swimming and research of bionic robotic fish[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [38] Cai Y R, Bi S S, Zheng L C. Design and experiments of a robotic fish imitating cow-nosed ray[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(2): 120-126.
- [39] Cai Y R, Bi S S, Zheng L C. Design optimization of a bionic fish with multi-joint fin rays[J]. Advanced Robotics, 2012, 26(1-2): 177-196.
- [40] Epstein, M, Colgate J, MacIver M. Generating thrust with a biologically inspired robotic ribbon fin[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 2412-2417.
- [41] Low K H, Willy A. Development and initial investigation of NTU robotic fish with modular flexible fins[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 958-963.
- [42] Low K H, Willy A. Biomimetic motion planning of an undulating robotic fish fin[J]. Journal of Vibration and Control, 2006, 12(12): 1337-1359.
- [43] Zhou C L, Low K H. Kinematic modeling framework for biomimetic undulatory fin motion based on coupled nonlinear oscillators[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 934-939.
- [44] Low K H. Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(3): 615-632.
- [45] Low K H, Zhou C L, Zhong Y. Gait planning for steady swimming control of biomimetic fish robots[J]. Advanced Robotics, 2009, 23(7/8): 805-829.
- [46] Willy A, Low K H. Initial experimental investigation of undulating fin[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 2059-2064.
- [47] Willy A, Low K H. Development and initial experiment of modular undulating fin for untethered biorobotic AUVs[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 45-50.
- [48] Simons D G, Bergers M M C, Henrion S, et al. A highly versatile autonomous underwater vehicle with biomechanical propulsion[C]//Proceedings of OCEANS 2009 IEEE Bremen: Balancing Technology with Future Needs. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [49] Rahman M M, Toda Y, Miki H. Computational study on a squid-like underwater robot with two undulating side fins[J]. Journal of Bionic Engineering, 2011, 8(1): 25-32.
- [50] Takagi, K, Yamamura M, Luo Z W, et al. Development of a rajiform swimming robot using ionic polymer artificial muscles[J]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1861-1866.
- [51] Zhang Y H, Song Y, Yang J, et al. Numerical and experimental research on modular oscillating fin[J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(1): 13-23.
- [52] Zhang D B, Hu D, Shen L C, et al. Design of an artificial bionic neural network to control fish-robot's locomotion[J]. Neurocomputing, 2008, 71(4-6): 648-654.
- [53] Zhang Y H, He J H, Yang J, et al. A computational fluid dynamics (CFD) analysis of an undulatory mechanical fin driven by shape memory alloy[J]. International Journal of Automation and Computing, 2006, 3(4): 374-381.
- [54] Zhang Y H, Jia L B, Yang J, et al. A numerical analysis of an undulatory mechanical fin driven by shape memory alloy[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 73-78.
- [55] Zhang Y H, Jia L B, Zhang S W, et al. Computational research on modular undulating fin for biorobotic underwater propulsor[J]. Journal of Bionic Engineering, 2007, 4(1): 25-32.
- [56] 章永华, 何建慧, 张世武, 等. NiTi 形状记忆合金驱动的仿生鱼鳍的研究[J]. 机器人, 2007, 29(3): 207-213.
- Zhang Y H, He J H, Zhang S W, et al. Research on biomimetic fish fin driven by NiTi shape memory alloy[J]. Robot, 2007, 29(3): 207-213.
- [57] 章永华. 柔性仿生波动鳍推进理论与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- Zhang Y H. Theoretic and experimental research on propulsion flexible biomimetic undulatory robotic fin[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [58] 宋艳. 基于形状记忆合金的仿生鳍条结构设计及实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- Song Y. The design of structure and experiment on flexible biomimetic fish fin based on shape memory alloy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [59] 王光明, 胡天江, 李非, 等. 长背鳍波动推进游动研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 88-92.
- Wang G M, Hu T J, Li F, et al. Research on swimming by undulatory long dorsal fin propulsion[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 88-92.
- [60] 林龙信, 陈璟, 沈林成, 等. 柔性长鳍波动仿生推进器的波动控制研究[J]. 信息与控制, 2007, 36(5): 628-633.
- Lin L X, Chen J, Shen L C, et al. On undulatory control of flexible fin in undulatory biomimetic propulsor[J]. Information and Control, 2007, 36(5): 628-633.
- [61] 张代兵. 波动鳍仿生水下推进器及其控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- Zhang D B. Research on the underwater bionic undulatory-fin propulsor and its control method[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [62] 王光明. 仿鱼柔性长鳍波动推进理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- Wang G M. Theoretic and experimental research on propulsion by bionic undulatory fin[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.

- State Oceanic Administration, People's Republic of China. Bulletin of marine environmental status of China[EB/OL]. [2012-12-25]. <http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/>.
- [4] Westwood J. The AUV market place[EB/OL]. [2013-04-26]. <http://www.douglas-westwood.com/files/files/532-100310%20OI%20London%20JW.pdf>.
- [5] Yoshida H, Hyakudome T, Ishibashi S, et al. A compact high efficiency PEFC system for underwater platforms[J]. ECS Transactions, 2010, 26(1): 67-76.
- [6] Hobson B W, Bellingham J G, Kieft B, et al. Tethys-class long range AUVs – Extending the endurance of propeller-driven cruising AUVs from days to weeks[C]/IEEE/OES AUV'2012. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [7] McPhail S. Autosub6000: A deep diving long range AUV[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(1): 55-62.
- [8] Bowen A D, Yoerger D R, Taylor C, et al. The Nereus hybrid underwater robotic vehicle for global ocean science operations to 11,000m depth[C]/IEEE/MTS OCEANS 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-10.
- [9] Eriksen C C, Osse T J, Light R D, et al. Seaglider: A long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 424-436.
- [10] Sherman J, Davis R E, Owens W B, et al. The autonomous underwater glider "Spray"[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 437-446.
- [11] Webb D C, Simonetti P J, Jones C P. SLOCUM: An underwater glider propelled by environmental energy[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 447-452.
- [12] Monterey Bay Aquarium Research Institute. Autonomous ocean sampling network II (AOSN II)[EB/OL]. [2012-12-25]. <http://www.mbari.org/aosn/>.
- [13] Derek A P. Cooperative control of collective motion for ocean sampling with autonomous vehicles[D]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2009: 194-200.

作者简介:

朱心科 (1980-), 男, 博士. 研究领域: 海洋探测技术.

金翔龙 (1934-), 男, 中国工程院院士. 研究领域: 海底勘查.

陶春辉 (1968-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 海底热液硫化物资源调查, 海洋勘探技术, 海底声学, 海洋地球物理.

(上接第 362 页)

- [63] 谢海斌, 张代兵, 沈林成. 基于柔性长鳍波动推进的仿生水下机器人设计与实现 [J]. 机器人, 2006, 28(5): 525-535.
- Xie H B, Zhang D B, Shen L C. Design and realization of a bionic underwater vehicle propelled by undulation of a long flexible fin[J]. Robot, 2006, 28(5): 525-535.
- [64] 谢海斌. 基于多波动鳍推进的仿生水下机器人设计、建模与控制 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- Xie H B. Design, modeling, and control of bionic underwater vehicle propelled by multiple undulatory fins[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [65] Shang L J, Wang S, Tan M, et al. Motion control for an underwater robotic fish with two undulating long-fins[C]/IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 6478-6483.
- [66] Wang Z L, Hang G R, Wang Y W, et al. Embedded SMA wire actuated biomimetic fin: A module for biomimetic underwater propulsion[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(2): 1-12.
- [67] 杭观荣. 基于肌肉性静水骨骼原理的机器乌贼原型关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- Hang G R. Key technologies of robot squid prototype based on the principle of muscular hydrostat[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [68] Drucker E G, Lauder G V. Locomotor forces on a swimming fish: Three-dimensional vortex wake dynamics quantified using digital particle image velocimetry[J]. The Journal of Experimental Biology, 1999, 202: 2393-2412.
- [69] Chen G, Le J, Xu L F, et al. A review on PIV with image measuring techniques[C]/2001 XXIX International Association of Hydraulic Engineering and Research Congress. Beijing, China: IAHR, 2001: 946-954.
- [70] Nauen J C, Lauder G V. Quantification of the wake of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* using three-dimensional stereoscopic digital particle image velocimetry[J]. The Journal of Experimental Biology, 2002, 205: 3271-3279.
- [71] Tytell E D, Lauder G V. The hydrodynamics of eel swimming I – Wake structure[J]. The Journal of Experimental Biology, 2004, 207: 1825-1841.
- [72] Tytell E D. The hydrodynamics of eel swimming II – Effect of swimming speed[J]. The Journal of Experimental Biology, 2004, 207: 3265-3279.

作者简介:

王田苗 (1960-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 微小型机器人, 医疗机器人, 嵌入式机电控制.

杨兴帮 (1987-), 男, 博士生. 研究领域: 微小型机器人, 仿生机器人.

梁建宏 (1977-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 微小型仿生机电系统.