

文章编号: 1001- 2486(2006) 03- 0099- 05

柔性长鳍仿生装置波动控制技术*

谢海斌, 张代兵, 沈林成

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:以“尼罗河魔鬼”柔性长鳍的波动运动为背景, 主要研究了柔性长鳍仿生装置的波动控制技术。首先研究了柔性长鳍推进波产生原理及其技术实现方案; 其次, 针对仿生装置的实际系统建立了鳍面运动学模型, 从中提取了能够实现柔性长鳍多种波动模式的波动控制参数, 并对柔性长鳍几种特定波动模式的实现方法进行了仿真研究; 进一步, 根据仿生装置的物理约束条件提出了控制参数的合法性判据; 最后, 研究了柔性长鳍仿生装置的波动控制策略及其控制流程。研究结果表明柔性长鳍仿生装置通过合理设置控制参数能够模拟仿生对象的多种波动运动模式, 并实现推进波的多参数控制, 能够满足柔性长鳍多种波动参数下的非定常流体动力学测试的需要。

关键词:尼罗河魔鬼; 柔性长鳍; 仿生装置; 波动控制; 波动模式

中图分类号: TP391 文献标识码: A

Undulation Control on the Bionic Device of Long Flexible Fin

XIE Hai-bin, ZHANG Dai-bing, SHEN Lin-cheng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper studies the undulation control on the bionic device of long flexible fin based on undulation movement generated by the long flexible fin of *Gymnarchus niloticus*. Firstly, the principle of forming propulsion wave and the realization scheme of long flexible fin were studied. Secondly, a kinematics model was established to describe the undulation surfaces of the bionic device, the undulation control parameters which can be used in realizing multiple undulation modes of bionic object were distilled, and the methods of realizing some given undulation modes of long flexible fin were studied by simulations. According to the physical constraints of the bionic device, the criteria to judge the validity of these parameters were also presented. Finally, the paper studies undulation control strategy and control-flow of the bionic device of long flexible fin. The research result indicates that the bionic device of long flexible fin can imitate multiple undulation modes of bionic object via setting control parameters properly, and can realize multi-parameter control of propulsion wave. So, it can satisfy the unsteady hydrodynamic measurement demands of the bionic device with multiple undulation parameters.

Key words: *gymnarchus niloticus*; long flexible fin; bionic device; undulation control; undulation mode

“尼罗河魔鬼(*gymnarchus Niloticus*)”(如图 1 所示)的推进方式是利用其柔性长背鳍产生推进波, 并与流体作用获得推力, 通过改变推进波波形、波频、波长和波传播方向等要素可以控制推力的大小和方向^[1-2]。由于这种推进方式具有流体扰动小并可产生矢量推力等优点, 正在成为水下仿生推进技术方面一个新兴的研究方向。研制能够模仿“尼罗河魔鬼”柔性长背鳍结构与功能的仿生装置, 结合各种测试手段, 获取给定推进波模式下各种波动参数对应的流体动力学参数及流场结构数据, 成为辅助柔性长鳍波动推进技术研究的有效手段。

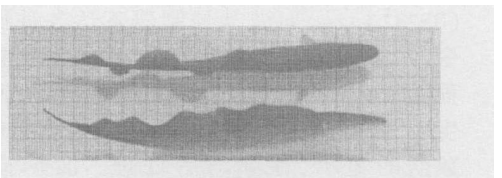


图 1 仿生对象“尼罗河魔鬼”
Fig. 1 The bionic object—*gymnarchus Niloticus*

* 收稿日期: 2005- 11- 29

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 谢海斌(1977-), 男, 博士生。

1 柔性长鳍推进波产生原理及其仿生装置实现方案

“尼罗河魔鬼”的柔性长背鳍几乎等于身体长度,由200多根骨质弹性鳍条以及连接鳍条的膜质柔性蹼组成,每根鳍条由一组肌肉驱动,可实现二自由度定点摆动运动。鳍面通过鳍条运动带动柔性蹼产生形变,并控制所有鳍条的摆动规律和相互间的相位关系,形成能够产生推力的推进波^[3]。

1.1 推进波产生原理

根据动量定理,柔性鳍面只有产生行波,才能将流体沿波动传播的方向推出,从而获得反方向的推力。按照行波的产生原理,柔性鳍面产生的推进行波必须能够传播鳍条的周期性运动,因此鳍面波动过程中所有鳍条具有相同的运动规律和频率,且相邻鳍条存在一定规律的相位滞后或超前。通过改变鳍条内间距和刚度等物理因素或改变鳍条摆动频率、摆幅和鳍条间的相位关系等行为因素就可以实现推进波波形、波幅、波长、波频及行波传播方向等要素的控制,从而适应不同速度和加速度的推进要求^[3]。必须指出,本文论述的鳍面推进行波与弹性介质传播的行波存在着本质差别,前者是介质通过主动变形从而产生运动状态的传递,而后者是由于介质存在弹性而产生的振源能量的传递,因此将这两种行波模式分别称为主动行波模式和被动行波模式。

1.2 柔性长鳍仿生装置实现方案

柔性长鳍仿生装置的鳍面结构及波动致动机构分别按照结构仿生与功能仿生的原则进行设计。

(1) 鳍面结构。柔性鳍面设计为“鳍条/柔性蹼”结构,鳍条采用刚性或弹性材料,柔性蹼选用弹性较好的橡胶材料,鳍条与柔性蹼的连接设计为内嵌式。兼顾到鳍面柔韧性和抗拉性等要求,鳍面几何形状按照各种动态参数下平均内应力最小化准则进行设计。鳍条长度根据仿生对象的观测数据进行设计。

(2) 波动致动机构。柔性鳍面的各种推进波模式是通过所有鳍条协调摆动进行波形拟合来实现的,因此要求每根鳍条均可独立控制。采用 Futaba S5301 大扭矩舵机作为鳍条致动器,并将实现鳍条摆动的单节模块设计为“舵机驱动—齿轮传动”结构。为使仿生装置能够拟合1~4个波长的标准正弦行波,根据香农采样定理,整套装置由17套单节模块构成,并按照双并列线性结构排布,通过实时控制每个舵机角度,按照期望的运动规律和相位关系依次摆动来模拟“尼罗河魔鬼”长背鳍的部分推进波模式。

(3) 波动控制系统结构。仿生装置的波动控制系统由测控计算机、波动控制器和舵机控制器三部分构成。测控计算机的主要功能是:①通过人机交互界面对柔性鳍面的波动参数进行输入、修改、编辑等;②通过无线串口(RS232标准)向波动控制器下达各种操作指令,并与其进行数据交换,实现仿生装置的远程控制;③接收外测设备的测量数据,监测仿生装置的运行状态,并利用虚拟仪表实现测量数据的显示、存储与后处理。波动控制器

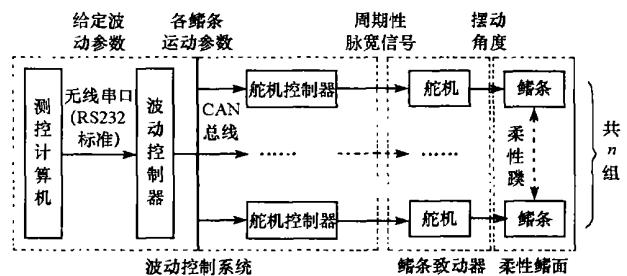


图2 波动控制系统体系结构

Fig. 2 The architecture of undulation control system

(PC104)是整个控制体系结构的核心,其功能是:①接收测控计算机上传的数据并执行各种操作指令;②向测控计算机上传系统运行状态数据和出错信息;③对接收的波动参数进行合法性判断;④根据合法波动参数和适当的控制策略实时解算每根鳍条的角位置参数,并通过CAN总线下传给所有舵机控制器。舵机控制器(单片机,共17个)将接收的角位置参数转化为控制舵机所需的PWM信号,控制舵机实现期望的运动规律。柔性长鳍仿生装置波动控制系统体系结构如图2所示。

2 柔性长鳍仿生装置鳍面运动学模型

下面参照文献[4-5]关于柔性长鳍的运动学建模方法和相关名词及坐标系统的定义,建立柔性长鳍仿生装置鳍面运动学模型。受工程实现手段的限制,仿生柔性长鳍被安装在刚性载体上,鳍条数远少

于仿生对象且只能实现有限的平面运动规律,因此柔性长鳍仿生装置只能实现仿生对象的部分波动运动模式。此时,鳍面基线为一条时不变的固定直线,且沿鳍面基线的自然参数(弧长) s 取值为离散的,因此柔性长鳍仿生装置的鳍面运动学模型将大为简化。

定义鳍面坐标系 $Ox_q y_q z_q$ (以鳍面尾端处鳍条基点为坐标原点,鳍面基线为 Ox_q 轴,指向载体头部,以坐标原点处鳍条摆动对称轴为 Oz_q 轴,指向背离载体的方向, Oy_q 轴与 Ox_q 轴和 Oz_q 轴构成右手系)以描述柔性长鳍的波动运动及其产生的推力与操控力矩。建模过程如下:

(1) 由于鳍条间距设计为等间距的(设为 d),因此 s 取值为: $s = kd (k = 0, 1, \dots, n-1), (n-1)d = L, n$ 为仿生装置设计的鳍条数, L 为鳍面基线长度。

(2) 定义鳍条对称轴,使得鳍条的最大、最小摆角关于该轴对称,根据行波拟合条件所得的结论,鳍条摆角运动函数 $\theta_i(k, t)$ 可表示为 $\theta_i(k, t) = A(k)f(k, t)$ 。其中, k 为鳍条序号; t 为时间; $A(k) > 0$ 为鳍条的摆动幅值; $f(\cdot)$ 为任何以 2π 为周期且值域为 $[-1, 1]$ 的周期性泛函,即 $f[\varepsilon(t)] = f[\varepsilon(t) \pm 2\pi]$; 将 $\varepsilon(t)$ 取为关于时间 t 的线性函数,即 $\varepsilon(t) = \omega t + \varepsilon_0(k)$, $\varepsilon_0(k)$ 为鳍条运动的初始相位,用 ω 描述鳍条摆动角频率; 鳍条对称轴偏离 $Ox_q y_q z_q$ 平面的程度和分布状况用鳍条对称轴偏角函数 $\theta_q(k)$ 描述。根据上述控制参数 $f(\cdot)$ 、 $A(k)$ 、 $\theta_q(k)$ 、 $\varepsilon_0(k)$ 和 ω , 可得第 k 根鳍条 t 时刻的舵机角位置参数为:

$$\theta(k, t) = \theta_i(k, t) + \theta_q(k) = A(k)f[\omega t + \varepsilon_0(k)] + \theta_q(k) \quad (1)$$

(3) 鳍条长度分布函数为 $L_q(k)$, 沿鳍条轴线的弧长参数为 l , 则 $l \in [0, L_q(k)]$, 由于鳍面基线为鳍面坐标系 $Ox_q y_q z_q$ 的 Ox_q 轴, 且将鳍条按刚性处理(鳍条采用刚性材料制作), 由此可得定义在 $Ox_q y_q z_q$ 中的柔性长鳍仿生装置鳍面运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} x_r(k, l, t) \\ y_r(k, l, t) \\ z_r(k, l, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kd \\ l \sin[\theta(k, t)] \\ l \cos[\theta(k, t)] \end{bmatrix}, \quad l \in [0, L_q(k)] (k = 0, 1, \dots, n-1) \quad (2)$$

3 控制参数描述及其合法性判据

3.1 波动控制参数

根据式(1)和(2)可知,当鳍条数 n 、鳍条间距 d 和鳍条长度分布函数 $L_q(k)$ 设计定后,仿生装置的波动模式完全由鳍条摆角运动函数 $\theta(k, t)$ 决定。下面分析 $f(\cdot)$ 、 $A(k)$ 、 $\theta_q(k)$ 、 $\varepsilon_0(k)$ 和 ω 五个控制参数与柔性长鳍的各种波动模式之间的定性关系。

(1) 鳍条运动规律控制: 鳍条的周期性运动规律由 $f(\cdot)$ 描述,因此可以将 $f(\cdot)$ 设置为不同的函数形式(以 2π 为周期且值域为 $[-1, 1]$ 的周期性函数),来实现鳍条的各种周期性摆动运动规律。

(2) 变幅波动模式控制: $A(k)$ 为鳍条摆动幅值函数,决定了波动曲面的包络形状,是描述推进波波形的一个重要参数。因此,在 $L_q(k)$ 设计定后,可以通过设置 $A(k)$ 控制波动曲面包络线形状来实现发散型、收敛型以及梭型等变幅波动模式。

(3) 变波长波动模式控制: 鳍条运动的初始相位 $\varepsilon_0(k)$ 可用于描述鳍条间的固定相位关系, $\varepsilon_0(k)/\omega$ 也反映了鳍条运动过程中固定时间延迟关系,因此, $\varepsilon_0(k)$ 是描述柔性鳍面推进波波长特征和初始相位(用 $\varepsilon_0(1)$ 描述)的唯一参数。将 $\varepsilon_0(k)$ 设定为沿波长方向线性函数,即 $\varepsilon_0(k) = (2\pi d/\lambda)k + \varepsilon_0(1)$, 可实现波长为 λ 的等波长波动模式,若将 $\varepsilon_0(k)$ 设定为其它函数形式,则可以实现变波长推进波模式。

(4) 波动频率控制: 根据 $f(\cdot)$ 的周期性,可知波动频率 f 与 ω 的关系为 $f = 1/T = |\omega|/2\pi$ 。因此, ω 的大小决定了推进波的波动频率,此外, ω 取值的正负还确定了推进行波的传播方向。

(5) 鳍面侧向偏转控制: “尼罗河魔鬼”的柔性长鳍波动过程中可以偏离鱼体纵对称面来适应不同绕流场变化,以达到推进效能最大化。由于鳍条对称轴偏角函数 $\theta_q(k)$ 就是度量各鳍条对称轴偏离 $Ox_q y_q z_q$ 平面的程度和分布的函数,因此仿生装置可以通过改变 $\theta_q(k)$ 来实现仿生对象的这种波动模式。

下面通过仿真手段对上述结论进行验证。根据柔性长鳍仿生装置技术实现方案,鳍条数设计为 17 根且间距相等,鳍条采用刚性材料。假定 $L_q(k)$ 为常数,即鳍条等长,且取为单位长度 1,将 $f(\cdot)$ 取为正

弦函数(即 $\sin(\cdot)$), 根据(1)式可得各鳍条 t 时刻的舵角位置参数为: $\theta(k, t) = A(k) \sin[\omega t + \varepsilon_0(k)] + \theta_q(k)$ 。通过改变 $A(k)$ 、 $\theta_q(k)$ 、 $\varepsilon_0(k)$ 和 ω 实现柔性长鳍的各种推进波波动模式的仿真结果如图 3 所示。图 3(a), (b), (c) 为柔性长鳍曲面在 Ox_qy_q 的投影, 其中横坐标为鳍条序号 k 。图 3(d) 为定义在 $Ox_qy_qz_q$ 中的柔性长鳍 3 维曲面, 其中, x 坐标为鳍条序号 k , y 与 z 坐标为无量纲数。

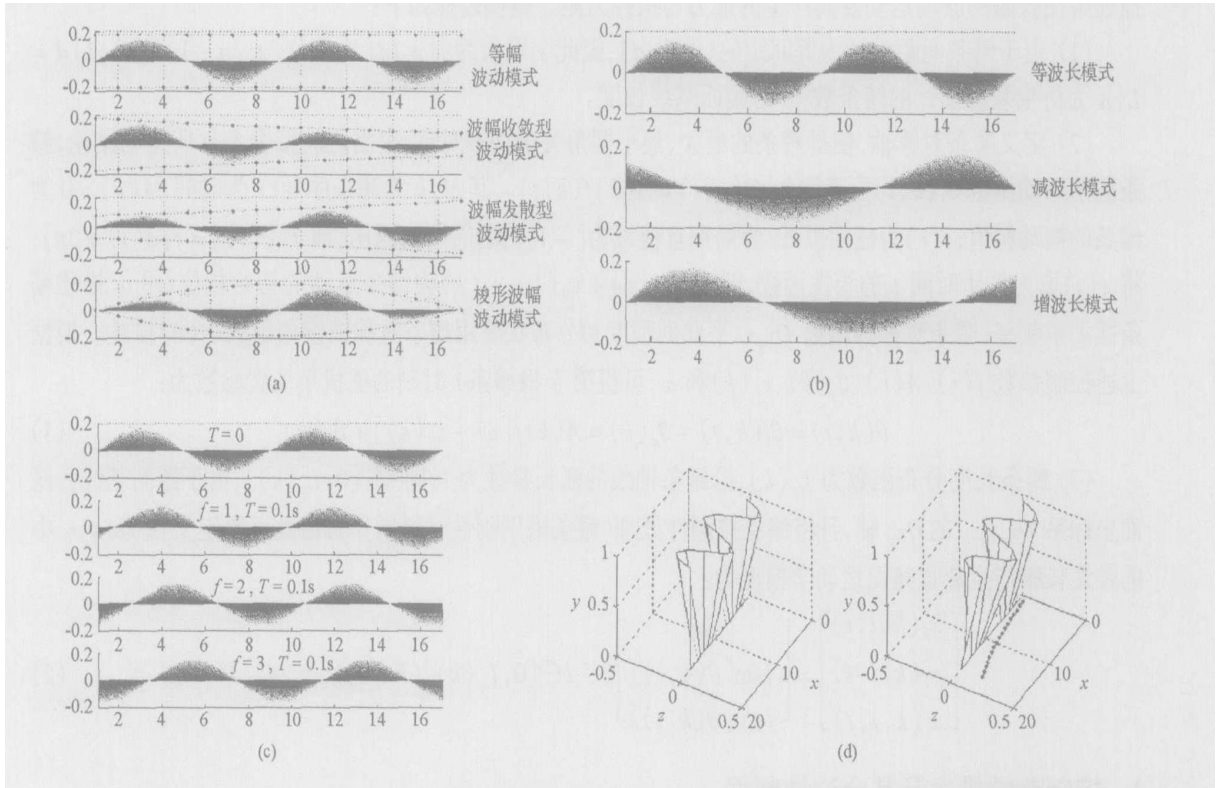


图 3 (a) 通过 $A(k)$ 实现变幅波动模式控制; (b) 通过 $\varepsilon_0(k)$ 实现变波长波动模式控制; (c) 通过 ω 实现波动频率控制; (d) 通过 $\theta_q(k)$ 实现鳍面侧向偏转控制

Fig. 3 (a) Controlling undulatory amplitude through $A(k)$; (b) Controlling undulatory wavelength through $\varepsilon_0(k)$; (c) Controlling undulatory frequency through ω ; (d) Controlling Fin lateral deflection through $\theta_q(k)$

3.2 波动控制参数合法性判据

舵机输出轴的可控转动范围 $[-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$ 和空载转速 v_{\max} 限制了每根鳍条的最大运动范围和每个控制时钟内的角度最大调节量。设控制周期为 T_c , 则时间被离散化为 $t = mT_c (m = 0, 1, 2, \dots)$, 各鳍条 T 时刻的舵角控制量简化表示为 $\Delta\theta(k, T) = \theta(k, T) - \theta(k, T - 1)$ 。因此由控制参数 $f(\cdot)$ 、 $A(k)$ 、 $\theta_q(k)$ 、 $\varepsilon_0(k)$ 和 ω 确定的柔性鳍面波动模式是否可以被仿生装置所实现, 应满足如下判据:

(1) 鳍条最大摆角满足舵机转动范围约束, 即:

$$\max_{k,t} [|\theta(k, t)|] = \max_k [A(k) + |\theta_q(k)|] \leq \theta_{\max} \quad (3)$$

(2) 鳍条摆角在每个控制周期内的调节量都小于舵机最大转速允许的调节上限, 即:

$$\max_{k,t} [\Delta\theta(k, t) / T_c] \leq v_{\max} \quad (4)$$

4 柔性长鳍仿生装置波动控制实现

4.1 推进波模式转换动态控制

仿生装置在运行过程中, 当设定的波动控制参数 $f(\cdot)$ 、 $A(k)$ 、 $\theta_q(k)$ 、 $\varepsilon_0(k)$ 和 ω 任何一个发生改变, 且满足 3.2 节中的合法性判据时, 系统将进行推进波模式转换。推进波模式的转化过程可采用两种控制策略实现, 分别如下:

(1) 即时调整策略: 根据公式 $m = \max_k [\theta_{\text{new}}(k, 0) - \theta_{\text{old}}(k, t)] / (T v_{\max})$ 计算从当前时刻 t 起完成模

式转换所需的控制周期数 m , 然后在随后的 m 个控制周期内按照公式 $[\theta_{new}(k, 0) - \theta_{old}(k, t)]/m$ 所确定的调整量同步完成所有鳍条的角位移调整, 调整完毕后, 按照新的控制参数进行波动控制。该控制策略完成模式转换时间为 mT_c , 但在模式转换过程中, 波形可能会乱, 不一定构成行波。

(2) 延时调整策略: 在接收到新的合法控制参数后, 各鳍条首先按原控制参数运行 $[\varepsilon_0(k)/\omega]/T_c$ 个控制周期, 然后在随后的 $m - [\varepsilon_0(k)/\omega]/T_c$ (m 根据公式(5)定义) 个控制周期内按照公式 $[\theta_{new}(k, mT_c) - \theta_{old}(k, t + \varepsilon_0(k)/\omega)] / \{m - [\varepsilon_0(k)/\omega]/T_c\}$ 所确定的调整量完成其角位移调整, 调整完毕后, 按照新的控制参数进行波动控制。该控制策略完成模式转换时间要长于即时调整策略, 但该策略在实现模式跳转时波动始终为行波, 因此, 该策略对于实现鳍面波形的动态调节更加优越。

$$m = \max_k \{ [\varepsilon_0(k)/\omega]/T_c \} + \max_{k, \Delta t} \{ [\theta_{new}(k, t + \Delta t) - \theta_{old}(k, t)] / (T_{\mathcal{V}_{max}}) \} \quad (5)$$

4.2 仿生装置控制流程

- (1) 系统上电后给所有舵机发送复位指令, 使舵机输出轴指向零位;
- (2) 通过无线串口以中断方式接收测控计算机下达的各种指令;
- (3) 对有效指令进行解析, 并判断当前系统状态;
- (4) 系统当前状态为停止状态, 若为停机指令, 系统不做任何动作; 若为复位指令, 转入(1); 若为启动指令, 转入(6);
- (5) 系统当前状态为运行状态, 若为停机指令, 则记录所有舵机当前状态, 并将其保持在当前状态; 若为复位指令, 先执行停机指令, 再转入(1); 若为启动指令, 转入(6);
- (6) 对指令中包含的控制参数进行合法性判断, 若为非法参数, 系统保持为当前状态(停止状态或按照原控制参数进行波动控制), 并向测控计算机上传出错信息; 若为合法参数, 按照延时控制策略进行控制;
- (7) 根据控制策略和控制参数解算下一控制周期的各舵角调节量;
- (8) 通过 CAN 总线将各舵角调节量下传给所有舵机控制器, 并由其转化为控制舵机所需 PWM 信号, 最后经由舵机信号接口控制舵机实现期望的运动规律。

控制流程框图如图 4 所示。

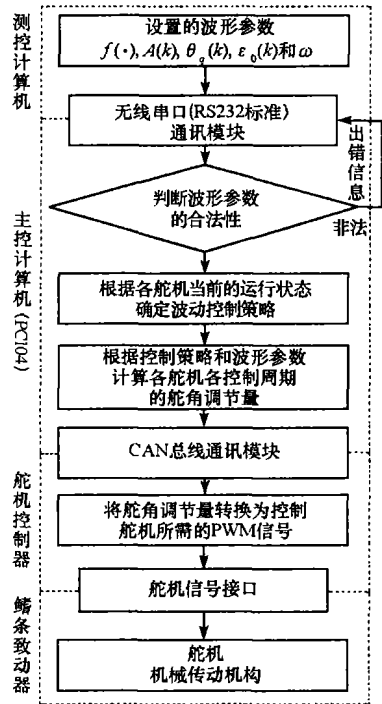


图 4 控制流程框图

Fig. 4 The block diagram of control flow

5 结论

本文提出的柔性长鳍仿生装置的技术实现方案合理可行, 仿生装置通过合理设置控制参数能够模拟仿生对象的多种波动运动模式, 并实现推进波的多参数控制, 能够满足给定推进波模式下各种波动参数对应的非定常流体动力学测试需要, 因此, 柔性长鳍仿生装置将是辅助柔性长鳍波动推进技术研究的重要试验系统。

参考文献:

[1] Webb P W. Form and Function in Fish Swimming[J]. Scientific American, 1984, 251(1): 58- 68.
 [2] Sfakiotakis M, Lane D M, Davies J B C. Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion[J]. IEEE Jr. of Oceanic Engineering, 1999, 24(2): 237- 252.
 [3] 王光明, 胡天江, 等. 长背鳍波动推进游动研究[J]. 机械工程学报, 2006(3).
 [4] Epstein M, Colgate J E, et al. A Biologically Inspired Robotic Ribbon Fin[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C], Workshop on Morphology, Control, and Passive Dynamics, August 1, 2005, Edmonton Alberta Canada.
 [5] 谢海斌, 沈林成, 胡天江. “尼罗河魔鬼”柔性长鳍运动曲面建模与仿真[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(5): 62- 66.