

## 柔性长鳍波动推进试验及分析\*

王光明, 沈林成, 胡天江, 李非

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** :以依靠长背鳍推进的“尼罗河魔鬼”为研究对象,对柔性长鳍波动推进模式的运动学进行了研究。介绍了“尼罗河魔鬼”巡航游动试验的实验原理及方法,通过试验揭示了波动柔性长背鳍的形态学特征、运动特性及运动参数间的相关性,定性描述了“尼罗河魔鬼”正、逆向行进时背鳍产生波形的差异,在此基础上建立了柔性长鳍波动的运动学简化模型,利用细长体理论估算样本巡航游动时的水动力学效率大于 83.12%。

**关键词** :尼罗河魔鬼;长背鳍;波动;运动学模型

中图分类号 :TP24 文献标识码 :A

## Examination and Analysis of Undulatory Dorsal Fin Propulsion of *Gymnarchus Niloticus*

WANG Guang-ming, SHEN Lin-cheng, HU Tian-jiang, LI Fei

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

**Abstract** :This paper introduces the experimental principle and method on undulatory dorsal fin propulsion of *Gymnarchus niloticus*, a large aggressive fish whose swimming mode is referred to as amiiform mode. The fish is propelled by undulations of a long-based dorsal fin while the body axis is in many cases held straight in swimming. In order to investigate the undulatory dorsal fin propulsion and its potential for providing alternative approaches for future underwater vehicle design, the kinematics of steady forward swimming of *Gymnarchus niloticus* was described and the geometric features of the body and locomotive characteristic and parameters of the flexible dorsal fin were discussed. Furthermore, a simplified kinematic model on locomotion of the undulatory long dorsal fin propulsion was established according to the observation and experimental data. By applying the large-amplitude elongated-body theory, the estimation shows that the hydromechanical efficiency of the undulatory long dorsal fin system is more than 83.12%. It is suggested that the undulatory long dorsal fin propulsion is an adaptation to swimming with high hydromechanical efficiency.

**Key words** :*Gymnarchus niloticus*; long-based dorsal fin; undulation; kinematic model

鱼类经过数百万年的进化,其推进机构尽管未必是最优的,但在推进效率、机动性和稳定性等方面是现有人工机械推进装置所无法比拟的,它们无噪声推进和很少显著尾迹的优点对于军事应用尤为重要。它们非凡的能力可以启发人们创新设计,以提高人工推进系统的操纵和其与水环境的交互性能。因此,鱼类推进机理和仿鱼推进技术在近半个世纪以来,日趋成为水下推进器领域研究的热门方向。

鱼类科目中大约 15% 的鱼类利用奇鳍和对鳍(Median and/or Paired Fin——MPF)进行推进<sup>[1]</sup>。MPF 推进模式中诸如刀鱼、蝴蝶鱼等鱼类采用的柔性长鳍波动推进游动模式集较高的推进效率、优良的机动性、稳定性于一体,不仅适用于远洋航行,还具有低速下灵活机动、抗扰动能力强的特点<sup>[2-4]</sup>,适应于近海等复杂环境。因此,研究鱼类柔性长鳍波动推进机理对于研制集自主水下航行器(AUV)性能和遥控操纵航行器(ROV)性能于一体的未来新型水下航行器来说,具有重要的理论指导意义。

“尼罗河魔鬼”是一种极为稀少的淡水鱼,生活于热带非洲河流湖泊中,以小鱼为食,在寻找猎物时能够经济地巡航游动。其躯体细长,游动时许多情况身体轴保持直线,游动靠轻质柔软的长背鳍波动实现,速度快且攻击性强,属于 MPF 推进模式中典型的弓鳍目模式(Amiiform)。文章以“尼罗河魔鬼”为研

\* 收稿日期 :2005 - 08 - 30  
基金项目 :国家部委创新基金资助项目  
作者简介 :王光明(1974—)男,讲师,在职博士生。

研究对象,对弓鳍目模式推进进行了研究,通过“尼罗河魔鬼”巡航游动试验,揭示柔性长背鳍波动运动参数间的相关性及变化规律,为建立“尼罗河魔鬼”长背鳍波动推进的运动学模型提供可靠依据。

## 1 实验设备与方法

将一条长为 27cm(从嘴部的顶端到身体尾部末端的长度)的“尼罗河魔鬼”样本置于一个大的玻璃鱼缸(1.5m×0.5m×0.5m)中进行拍摄,鱼缸中水温保持在 25℃,鱼缸底部铺上 1.0cm×1.0cm 的透光坐标方格。与水平成 45°角的平面镜置于鱼缸中,用于同步观察样本游动时背面和侧面视图,如图 1 所示。

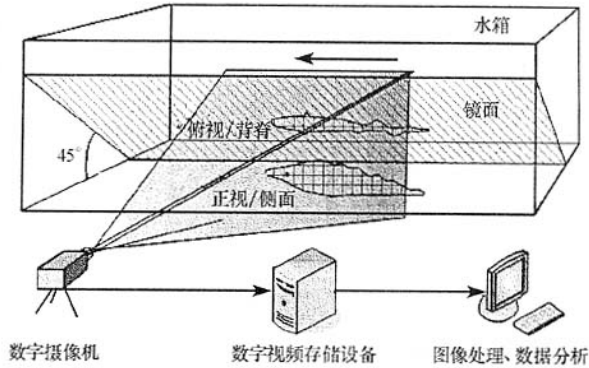


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment

采用数字摄像机对鱼缸中自然巡航游动的样本进行连续拍摄。光源采用两盏 1000W 的高亮度石英灯。数字摄像机(Sony DCR-TRV30)的分辨率为 320×240,以 30 帧/s 的速率拍摄,拍摄的图像数据导入计算机进行数据处理分析,测量匀速直线游动样本的游速与波动鳍的运动参数。

## 2 试验结果及数据分析

### 2.1 形态学测量结果及分析

形态学测量是建立“尼罗河魔鬼”身体结构简化模型的基础,也是仿真研究中建立网格的必要条件,试验对所选仿生对象样本进行了形态学测量。图 2 为所选样本侧视拍摄图和俯视拍摄图采样点的拟合图,图中给出了侧视图中鱼体边缘和长背鳍边缘沿体长(Length)的分布,其中阴影部分为样本的长背鳍。从图中可见俯视图呈现左右对称性,长背鳍的投影就位于对称轴线上,此说明“尼罗河魔鬼”躯体关于长背鳍左右对称,这有利于游动过程中保持身体的平衡和避免偏航。图 3(a)为样本体深(Body depth)、体宽(Body width)、鳍深(Fin depth)沿体长的空间分布图,从中观察可见,长背鳍的起点与体宽的最大值点非常靠近,几乎重合,此身体结构特点有助于鱼体进行姿态、深度和航迹的调整,也可能有利于提高背鳍波动游动的推进效率。图 3(b)为样本长背鳍纵深、身体纵深对整体纵深的比例沿体长的分布图。背鳍纵深相对整体纵深的分布是影响 MPF 推力产生机制的重要因素,参考文献 5~7 对此方面进行了讨论。

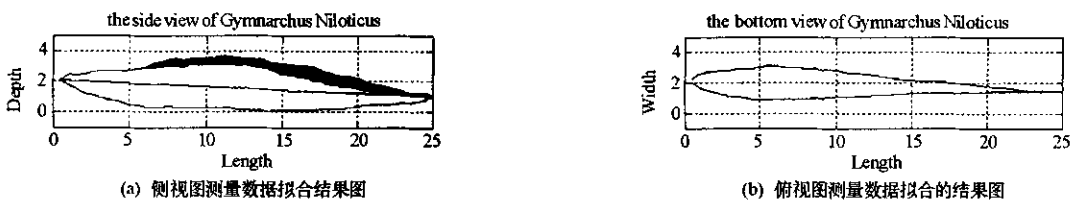
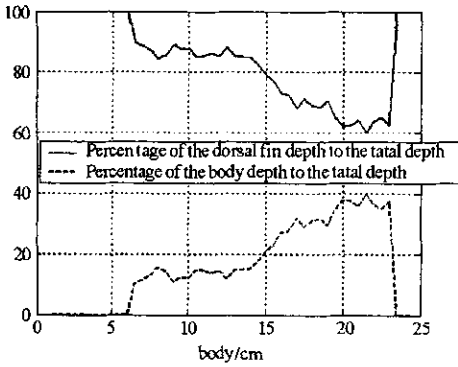
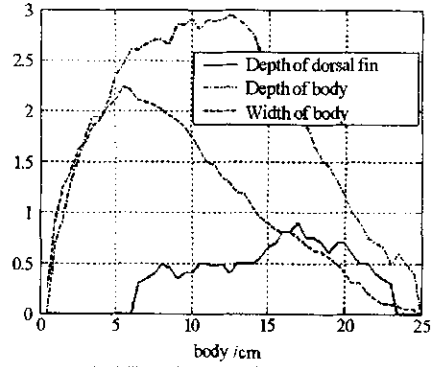


图 2 “尼罗河魔鬼”样本拍摄图测量数据拟合结果图

Fig.2 Morphological measured data from silhouette of *G. niloticus*



(a) 体深、体宽、鳍深的空间分布图



(b) 背鳍纵深、躯体纵深对整体纵深的比例图

图3 样本形态学参数的空间分布图

Fig.3 Interspace distributing of morphological parameters( body depth , body width , fin depth ) along body length

### 2.2 运动学测量结果及分析

依靠长背鳍波动推进的“尼罗河魔鬼”游动姿态及背鳍波形如图4所示。匀速游动时，背鳍波动形成类似正弦波，波沿鳍的前缘向尾缘的方向传播，波的传播方向与游动方向相反。其波幅从前缘开始逐渐增大，到背鳍中部达到最大，其后至尾缘部分逐渐减小。

“尼罗河魔鬼”以较快速度匀速游动时，背鳍的波动频率偏高，波幅较大，波数较正常游速下多0.5~1个，反之低速游动时，频率偏低，波幅较小，波数无明显变化。图5为一组样本匀速游动时等时间间隔图像序列。图6为长背鳍的波动参数随速度变化规律，匀速游动时，鳍波动的波速、波长、波幅与游速之间存在明显的相关性，且随游速一致变化而递增或递减。

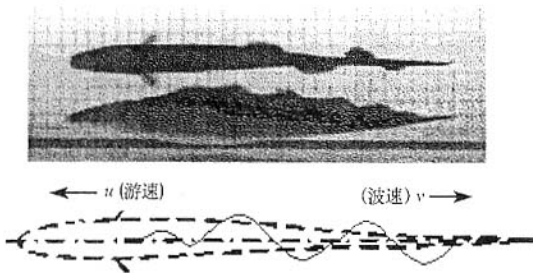


图4 样本游动姿态与波形图

Fig.4 Silhouette and undulatory waves of *G. niloticus* during steadily swimming

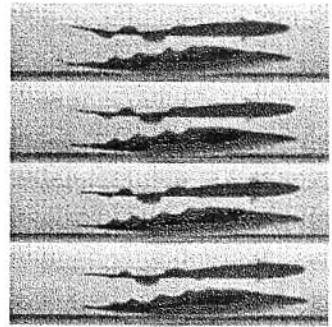


图5 匀速游动时等时间间隔图像序列

Fig.5 Images show body position and dorsal fin's waves at same intervals during steadily swimming

长背鳍通过简单地改变推进波的传播方向产生逆向行进，是“尼罗河魔鬼”波动推进的一个显著特点。逆向行进时，背鳍波动形状与正向行进时的运动有明显差异，波形对比如图7所示。当正向行进时，背鳍波动作为主要推力来源，波形的波峰偏后，沿前缘向尾缘方向的上升段较为平缓；当逆向行进时，背鳍波形的波峰偏前，沿前缘向尾缘方向的下降段较为平缓。同时正向游动时，胸鳍保持相对静止，紧贴身体；逆向行进时，胸鳍摆动明显。

### 3 运动学简化模型

由形态学观测可知：“尼罗河魔鬼”鱼体深度从嘴部顶端平滑增大到头部后端，而后逐渐缓慢减小到鱼尾末端成一圆点，整个身体围绕中心线（鱼嘴顶端与鱼尾末端的连线）成几何对称。柔性长背鳍附连于鱼体脊背，从鱼体头部后端（鱼体最深处）延伸至鱼体尾部，由数根鳍条（多达200多条）通过薄膜（Membrane）连接而成，背鳍深度沿身体纵向只有小量变化，可以近似为常量。巡航游动时身体近乎不发生形变，而依靠轻质柔软的长背鳍围绕脊柱波动产生推力。

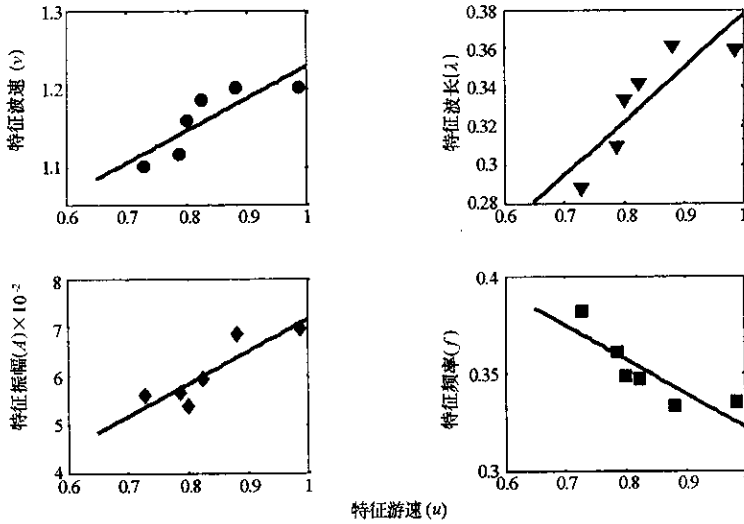


图 6 不同游速下匀速游动时背鳍运动参数变化趋势图  
 (特征游速 = 游速/鳍长 特征波速 = 波速/鳍长 特征波长 = 波长/鳍长 特征波幅 = 波幅/鳍长)

Fig. 6 Kinematics of live steadily swimming *G. niloticus*

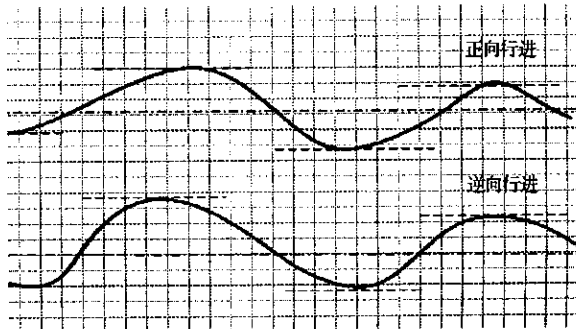


图 7 正、反游动背鳍波形对比图(上为正向游动)

Fig. 7 Undulatory waves forms of *G. niloticus*'s dorsal fin in forward swimming compared with backward swimming

为了便于分析长背鳍波动运动的水动力学主要特性,这里对“尼罗河魔鬼”的几何外形和运动模式进行数学上的简化,把鱼体简化为鱼头和刚性圆锥形身体两部分,柔性长背鳍简化为附属于脊背能灵活摆动的薄体。这种简化既反映了“尼罗河魔鬼”游动时身体保持基本刚性不变形的事实,又反映了柔性长背鳍是由数根鳍条通过薄膜灵活连接构成,附连于鳍条的肌肉纤维可使每根鳍条围绕其底部旋转从而作侧向运动的事实。“尼罗河魔鬼”身体结构简化模型如图 8 所示,鱼体长为  $L_b$ ,柔性长背鳍长为  $L$ ,鱼尾末端与鳍外沿上任一点间的长度为  $L_a = L(a)$  ( $0 \leq a \leq L$ ,鱼尾末端处  $a = 0$ )。过身体中心线与脊背的截面椭圆锥顶角为  $2\varphi_0$ 。

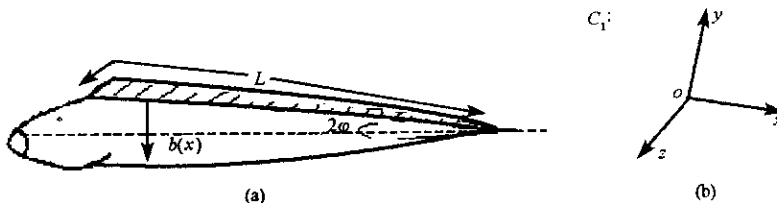


图 8 “尼罗河魔鬼”结构简化模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of a simplified configuration model for *G. niloticus*

取随鱼体运动的笛卡尔坐标系  $C_1: \{x, y, z\}$ ,以背鳍前缘顶点为坐标原点,鱼的脊椎骨为  $x$  轴, $xy$  平面通过静止鳍面,则鱼体侧向深度( $xy$  平面内)  $h(x)$  为

$$h(x) = \alpha(L-x)\sin\varphi \quad 0 \leq x \leq L \quad (1)$$

静止鳍面鳍条不与鱼脊柱垂直,而向鱼尾倾斜与脊柱成 $\theta$ 角( $< 90^\circ$ ),鳍条长为 $L_f$ ,则静止鳍面深度 $b_f = L_f \sin\theta$ 。

样本巡航前行时基本保持水平直线游动,游动姿态与波形如图4所示,背鳍围绕脊柱侧向摆动形成类似正弦波形的波沿脊柱向鱼尾传播,波形相对于脊柱基本保持对称,波幅从鱼头到鱼尾只有轻微变化。为反映这一游动特性和便于数学处理,对鳍的运动模式进行数学上简化处理:设鱼游动时深度不变,背鳍摆动形成正弦波,波长为 $\lambda$ ,则柔性长鳍在 $z$ 方向上运动的侧向位移 $H(x, y, t)$ 为

$$H(x, y, t) = \frac{x \sin\theta + y \cos\theta}{b_0} h_0 \cos[k(x \cos\theta - y \sin\theta) \pm \omega t] \quad \begin{matrix} 0 \leq x \leq L \\ 0 \leq y \leq b_f \end{matrix} \quad (2)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ ;  $h_0$ ——波幅系数;  $\omega$ ——波的角频率;  $b_0$ ——鱼体的最大深度。

式(2)中“ $\pm$ ”符号取决于推进波传递方向,正向行进时取“-”,表示推进波向长鳍尾端传播。逆向行进时取“+”,表示推进波向长鳍前端传播。

基于上述运动学模型,根据细长体理论<sup>[3]</sup>推导推进效率 $\eta$ 的公式为

$$\eta = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{v}{u} \right) \cdot \left[ 1 + \frac{1}{8} \cdot \frac{u-v}{u+v} \cdot \left( \frac{h_0}{b_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

依据上述简化模型和式(3)结合试验测试数据估算样本巡航游动时其水动力学效率大于83.12%,此结果与文献8基本一致。

## 4 结语

依据实验数据,计算样本在特征游速(游速/鳍长)为0.728~0.985 $l \cdot s^{-1}$ (鳍长/秒)时,特征波长(背鳍的平均波长/鳍长)从0.278 $l$ 随速度增大到0.359 $l$ ,特征波速(波速/鳍长)从1.051 $l \cdot s^{-1}$ 随速度增大到1.202 $l \cdot s^{-1}$ ,特征波幅(波幅/鳍长)随速度只有小量变化,水动力学推进效率介于83.12%~90.95%,且随速度增大而增大。实验和计算数据表明,长背鳍波动推进游动是一种适应水中环境的高效游动模式。

由于实验获得样本的游速范围比较窄,还不能全面描述长背鳍波动参数随游速变化,需要大量实验以获得较完整数据。在实验观测数据方面,本试验方法尚存在由于三维真实场景向二维图像退化所引入的系统误差,观测数据处理系统未能实现全程自动化,尚存在人工交互节点,观测数据处理系统亟需改进,以适应复杂模型下大规模数据的处理分析。

## 参考文献:

- [1] Sfakiotakis M, Lane D M, Davies J B C. Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion [J]. IEEE J. Oceanic Engineering, 1999, 24 (2): 237-252.
- [2] Webb P W. The Biology of Fish Swimming [A]. In: Maddock L, Bone Q, and Rayner JMV. (eds.), Mechanics and physiology of animal swimming [C]. Cambridge University Press, 1994: 45-62.
- [3] Webb P W, Weihs D. Fish Biomechanics [M]. Praeger, New York, 1983.
- [4] 沈林成,王光明. 仿鱼长鳍波动推进器研究的进展与分析 [J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(4): 96-100.
- [5] Lighthill M J. Biofluidynamics of Balistiform and Gymnotiform Locomotion. Part 2. The Pressure Distribution Arising in Two-dimensional Irrotational Flow from a General Symmetrical Motion of a Flexible Flat Plate Normal to Itself [J]. J. Fluid. Mech. 1990, 213: 1-10.
- [6] Lighthill M J. Biofluidynamics of Balistiform and Gymnotiform Locomotion. Part 3. Momentum Enhancement in the Presence of a Body of Elliptic Cross-section [J]. J. Fluid. Mech. 1990, 213: 11-20.
- [7] 李非,王光明,胡天江,等. “尼罗河魔鬼”长背鳍波动推进实验研究 [A]. 国防科技大学第四届研究生学术活动节论文集 [C]. 长沙: 国防科技大学, 2004: 119-124.
- [8] Blake R W. Swimming in the Electric Eels and Knifefishes [J]. Can. J. Zool. 1983, 61: 1432-1441.



