

## “尼罗河魔鬼”长背鳍波动包络线的提取算法\*

胡天江 李 非 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：“尼罗河魔鬼”采用长背鳍波动推进方式，属于典型的奇鳍/对鳍推进鱼类。在已有的理论模型中，细长体理论(Elongated-body theory)较为适合于分析该类游动方式的推进性能。长背鳍的波动包络线方程是细长体理论的必要参数。拍摄实验样本(MPC-1)的自由游动视频，从中选取多组平稳运动图像序列，经旋转变校正、零点配准、尺度归一、小波去噪等预处理后，提取了柔性长背鳍波动推进时的顶端边缘轮廓样本曲线簇，进而给出了波动包络曲线的多项式拟合方程。实验结果表明长背鳍波动包络线提取算法是有效的，根据算法所提取的长背鳍波动包络线方程为后续的推进力及推进效率的分析奠定了基础。

关键词：尼罗河魔鬼；柔性长背鳍；波动包络线；多项式拟合方程；奇鳍/对鳍推进；水下仿生推进  
中图分类号：TP391 文献标识码：A

## A Contour-detecting Algorithm for Undulation by the Long-based Dorsal Fin of *Gymnarchus Niloticus*

HU Tian-jiang, LI Fei, SHEN Lin-cheng

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

**Abstract** *Gymnarchus niloticus*, propelled by undulations of a long-based dorsal fin, is a typical representative of median and/or paired fin (MPF) fishes. Elongated-body theory (EBT) is one of the most effective theoretical models which can be applied to analyze the swimming performance of MPF fishes. This paper proposes an algorithm to detect the contour curve of undulations by the long-based dorsal fin, and furthermore the contour function is indeed a key factor in EBT. In this study, some videos are recorded when the specimen (which we name MPC-1) is freely swimming. We preprocess each frame of several selected video segments with a series of operations including rotation-calibrating, origin-matching, scale-regularizing as well as noise-reducing. Finally, the contour curve is fitted with a polynomial expression which is determined by a cluster of preprocessed undulation curve samples. The experimental results show that this algorithm is effective, and moreover the detected contour function is a good preparation for further analyses on the dorsal fin propulsion thrust and efficiency.

**Key words**: *Gymnarchus niloticus*; the long-based flexible dorsal fin; undulation contour; polynomial-fitting function; MPF; aquatic bio-propulsion

鱼类推进模式和推进机理的研究是新型仿鱼水下推进器研究的基础，早在 1926 年 Breder<sup>[1]</sup>就对鱼类的推进模式进行了研究，Webb 于 1984 年根据鱼类推进所使用的身体部位不同，将其分为两大类：身体/尾鳍推进模式 (BCF: Body and/or caudal fin) 和奇鳍/对鳍推进模式 (MPF: Median and/or paired fin)<sup>[2,3]</sup>。“尼罗河魔鬼”是热带非洲刚果河的一种弓鳍目电鳗，其游动主要由长背鳍的波状摆动来推进，巡航游动时身体保持刚性，近乎不发生形变。显然，“尼罗河魔鬼”属于典型的 MPF 推进模式。20 世纪 80 年代，Blake 和 Lighthill 等学者研究发现，MPF 模式具有机动性能好、游动噪声低、推进效率高等推进优势<sup>[4]</sup>。在比较了吸盘理论、抗力理论和反作用理论等分析方法之后，Blake 发现反作用理论中的细长体理论 (EBT) 模型是最有效的分析模型之一<sup>[5]</sup>。而长背鳍的波动包络方程则又是细长体理论模型<sup>[6-8]</sup>的必要参数。

\* 收稿日期：2005-05-18  
基金项目：国家部委创新基金资助项目  
作者简介：胡天江(1979-)男，博士生。

### 1 序列图像采集

体长(定义为鱼体自由伸展时从嘴部到尾部末端的长度)为 24.5cm 的“尼罗河魔鬼”样本 MPC-1 置于长方体玻璃鱼缸(150cm × 50cm × 60cm)中进行拍摄。拍摄时水温保持在 26℃,与水平成 45°角的平面镜放置鱼缸中,用于同步观察样本游动时背面和侧面视图<sup>[9]</sup>。鱼缸底部平铺标准坐标网格纸,用于测量结果的尺度标定及变形校正等。

如图 1,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 像素,以每秒 30 帧的速率拍摄,拍摄的视频数据导入计算机,从中选取多组巡航游动段的图像序列,通过一系列处理获取相关参数。

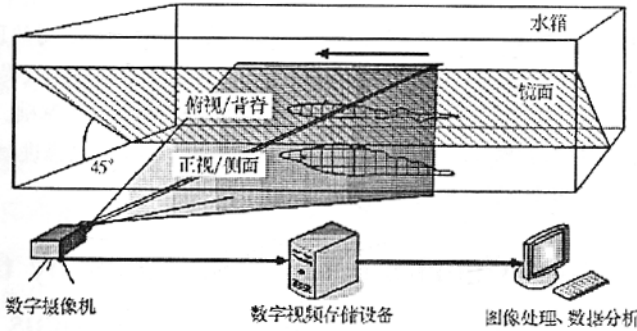


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipments

实验从拍摄视频中选取多组巡航段样本图像序列,每个序列分别由 5 ~ 10 帧图像组成。当仿生对象从右侧向左侧游动时约定为正向游动,否则为反向游动。例如,图 2 给出了两组序列图像样本,其中(a)是正向游动,而(b)则是反向游动。

### 2 提取算法

在提取长背鳍波动包络曲线时需要处理实验对象巡航游动下的多组图像序列,考虑到每组图像序列中样本游动方向、鱼体图像尺寸、测量误差等不尽相同,有必要对所选的每帧图像进行预处理,以使得波形轮廓样本曲线能够满足以下条件(1)实验样本游动方向一致(统一取为正向)(2)中心轴线与水平方向一致(3)不同帧图像中的鱼体长度一致(统一取为鱼体实际长度)(4)不同轮廓曲线的对应参数具有统一坐标系意义(5)尽量消除测量引入的误差。

针对上述条件,分别采用对称翻转、旋转校正、尺度归一、零点配准、小波去噪等方法进行预处理。

为便于算法描述,分别定义长背鳍的起点为  $S=(x_s, y_s)$  终点为  $T=(x_t, y_t)$ ,旋转校正后分别对应  $S'=(x'_s, y'_s), T'=(x'_t, y'_t)$ ,零点配准后为  $S''=(x''_s, y''_s)=(0, 0)=O'', T''=(x''_t, y''_t)$ ;长背鳍曲线采样点数为  $N$ ,长背鳍鳍基长度(定义为长背鳍起始点  $S$  到终点  $T$  之间的实际尺寸)记为  $L_f$ ,中心轴线与水平方向的夹角为  $\theta$  ( $x_i^{(k)}, y_i^{(k)}$ )表示预处理过程中第  $k$  组序列中第  $i$  个采样点坐标,且令( $x_1^{(0)}, y_1^{(0)}$ )

$$=(x_s, y_s) \quad (x_N^{(0)}, y_N^{(0)})=(x_t, y_t); \text{矩阵 } CP^{(k)} = \begin{bmatrix} x_1^{(k)} & y_1^{(k)} \\ \vdots & \vdots \\ x_i^{(k)} & y_i^{(k)} \\ \vdots & \vdots \\ x_N^{(k)} & y_N^{(k)} \end{bmatrix} \text{表示坐标序列,设 } CP^{(0)}, CP^{(1)}, CP^{(2)},$$

$CP^{(3)}, CP^{(4)}$ 分别表示初始的、旋转校正后的、零点配准后的、尺度归一后的 Dmey 小波去噪后的长背鳍

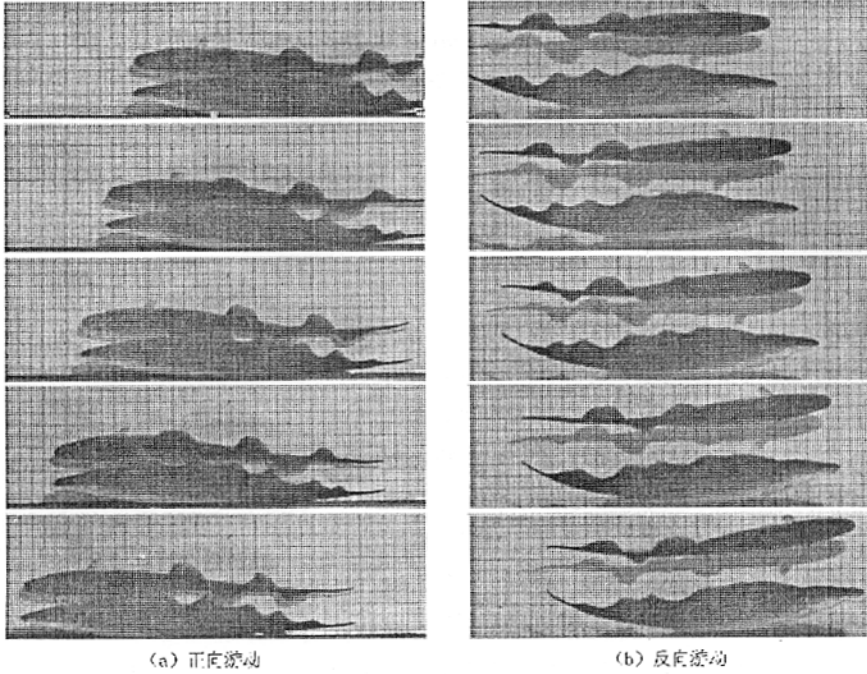


图2 实验拍摄样本图像序列

Fig.2 Cruising image sequences selected from recorded videos :

(a) directional swimming (b) counter-directional swimming

采样点坐标序列, 定义  $T_{22} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$  为旋转矩阵,  $B_{NN} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ & & \ddots & \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  为零点配准矩阵,  $r =$

$\frac{L_f}{x_t' - x_s'}$  为尺度归一的伸缩比例因子,  $Demy[2](\cdot)$  为两层 Dmey 小波去噪算子。

## 2.1 预处理算法

(1) 读入初始序列图像  $I$ ;

(2) 交互提取长背鳍初始波形轮廓线  $ST$ ;

(3) 若样本图像为正向游动, 则转入步骤(4); 若为反向游动, 则先将所取波形轮廓线以  $Y$  轴为对称轴进行翻转(即将游动方向统一为正向), 然后转入步骤(4);

(4) 计算夹角

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_t - y_s}{x_t - x_s}\right) \quad (1)$$

(5) 对波形轮廓线  $ST$  进行旋转校正得到轮廓曲线  $S'T'$ , 以使得轮廓线的中心轴线与水平方向一致(即  $\theta = 0$ )。旋转校正算法为

$$CP^{(1)} = CP^{(0)} \times T_{22} \quad (2)$$

(6) 对波形轮廓线  $S'T'$  作零点配准得到  $S''T''$ 。即将旋转波形图进行平移, 使得轮廓曲线  $S''T''$  的起始点与坐标原点重合。零点配准算法为

$$CP^{(2)} = B_{NN} \times CP^{(1)} \quad (3)$$

(7) 将波形轮廓线  $S''T''$  进行伸缩变换, 使得波形轮廓线与实际物理尺寸统一。尺度归一算法为

$$CP^{(3)} = r \times CP^{(2)} \quad (4)$$

(8) 滤除测量引入的部分误差。采用两层 Dmey 小波<sup>[11]</sup>分解,保留其低频成分,抑制其高频成分,以消除测量所引入的部分误差。Dmey 小波去噪算法为

$$CP^{(4)} = Dmey[2 \downarrow CP^{(3)}] \tag{5}$$

(9) 输出预处理后的波形轮廓序列点。处理完毕后输出的坐标序列与初始坐标序列之间的关系为

$$CP^{(4)} = Dmey[2 \downarrow r \times B_{NN} \times CP^{(0)} \times T_{22}] \tag{6}$$

2.2 包络线提取算法

(1) 选取  $n$  组巡航段图像序列  $\{CG_1, \dots, CG_n\}$ 。设第  $i$  组共有  $m_i$  张单帧图像,则  $CG_i = \{CI_{i1}, \dots, CI_{ij}, \dots, CI_{im_i}\}, i = 1, \dots, n$ ;

(2) 令  $i = 1, j = 1$ ;

(3) 取图像  $CI_{ij}$  作预处理,得到标准轮廓线  $SC_{ij}$ ;

(4) 令  $j = j + 1$ 。若  $j < m_i$ ,则转入(2);若  $j = m_i$ ,转入(5);

(5) 令  $i = i + 1$ 。若  $i < n$ ,则转入(2);若  $i = n$ ,转入(6);

(6) 在同一坐标系中显示所有标准轮廓线  $\{SC_{ij} | j = 1, \dots, m_i; i = 1, \dots, n\}$ ;

(7) 交互给定初始拟合线的关键控制点,上侧初始拟合线控制点集为  $UC = \{UC_1, \dots, UC_p\}$ ,下侧初始拟合线控制点集为  $DC = \{DC_1, \dots, DC_q\}$ ;

(8) 根据给定控制点,进行多项式曲线拟合,上、下初始拟合线分别是  $g_1(x)$  和  $g_2(x)$ ;考虑到平滑度和计算量的折衷,多项式次数一般选为五次或者六次;从原理上讲,离散控制点亦可以拟合为 B 样条曲线,但 B 样条曲线的解析表达式比多项式曲线复杂,不适合于后续长背鳍波动推进的动力学分析,因此本算法选取多项式拟合曲线作为长背鳍波动推进的波形包络线;

(9) 缘于巡航段“尼罗河魔鬼”长背鳍波形的对称性,令

$$f(x) = \left| \frac{g_1(x) - g_2(x)}{2} \right| \tag{7}$$

为长背鳍波形包络线方程。

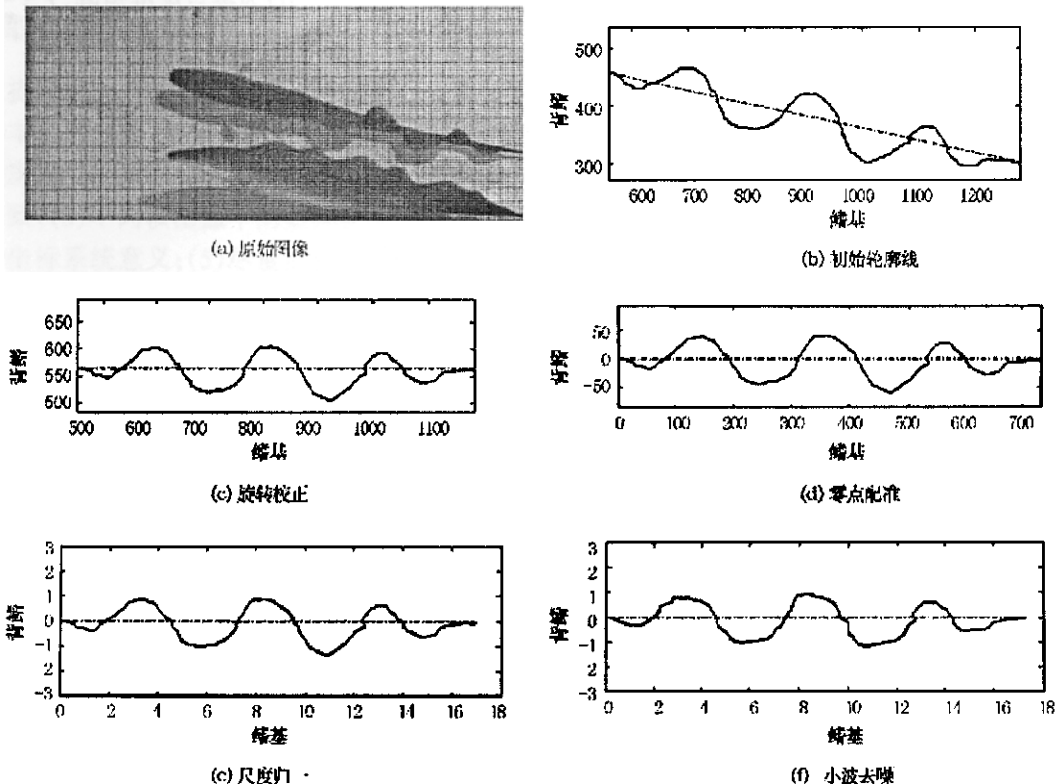


图3 预处理波形轮廓线演变示意图

Fig.3 Diagram for the intermediate results of preprocessing

### 3 结果与分析

从拍摄视频中共选取 5 组巡航段的平稳图像序列,即  $n = 5$ , 每组图像序列的帧数分别为  $m_1 = 8, m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 5$ , 其中第 4 组为反向游动图像序列,其余均为正向游动序列。

#### 3.1 预处理结果列举

图 3(a) 是第 2 组图像序列中的单帧图像,长背鳍的初始轮廓线如图 3(b),总采样点数为  $N = 50$ ,求得中心轴与水平方向夹角  $\theta = -12.2149^\circ$ ,因此旋转矩阵为  $T_{22} = \begin{bmatrix} 0.9774 & 0.2116 \\ -0.2116 & 0.9774 \end{bmatrix}$ ,旋转校正后的波形如图 3(c),图 3(d) 是零点配准后的波形图。文献 [10] 已经测得“尼罗河魔鬼”实验样本 MPC-1 的背鳍长度为  $L_f = 17.0\text{cm}$ ,对长背鳍波形进行尺度归一的比例因子为  $r = 0.0232$ ,尺度标定后如图 3(e)。图 3(f) 则是经两层 Dmey 滤波后的波形图,去噪前轮廓曲线在波峰处存在剧烈变化点,不够光滑,这主要是由测量过程中的误差引起的,而在滤波之后这些剧烈变化得到抑制,曲线光滑性得以改善,也更加接近长背鳍自由波动时所呈现的波形。为了说明小波去噪的效果,图 4 给出了两层 Dmey 小波去噪前后的效果比较图。

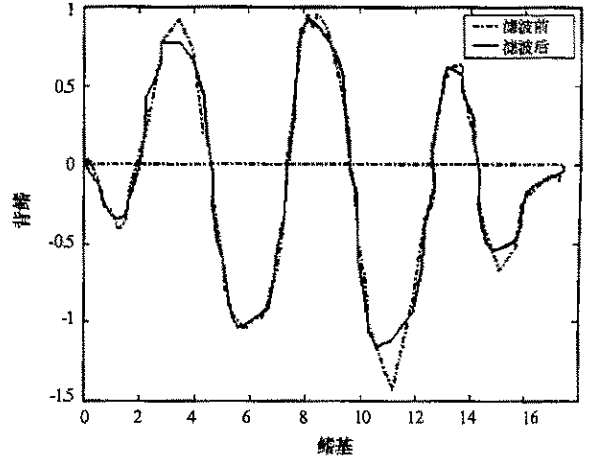


图 4 Dmey 小波去噪前后的波形轮廓线比较图

Fig. 4 Comparison between undulation curves without and with Dmey-denoising

#### 3.2 包络线提取

按包络线提取算法,对 5 组巡航段初始图像序列进行单帧的预处理操作,得到具有统一意义的标准波形曲线,共  $\sum_{i=1}^n m_i = 28$  条。将 28 条标准波形曲线显示到同一坐标系中,根据图 5 所示的波形曲线簇给定关键控制点(如“\*”所示),其中控制点集合  $UC$  和  $DC$  的点数分别为  $p = 14$  和  $q = 11$ 。

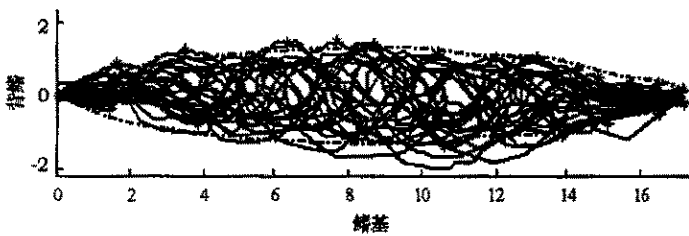


图 5 长背鳍波动包络线提取图

Fig. 5 Diagram for contour-detecting of undulation by the dorsal fin

由控制点集  $UC$  计算初始上侧拟合线  $g_1(x)$ ,由控制点集  $DC$  计算初始下侧拟合线  $g_2(x)$ ,进而根据公式(7)得长背鳍波动的波形包络线为

$$f(x) = \left| \frac{g_1(x) - g_2(x)}{2} \right|$$

$$= -0.55790x^6 + 2.67153x^5 - 4.50146x^4 + 3.50644x^3 - 1.57244x^2 + 0.45867x + 0.00512$$

图 5 中点划线表示六次多项式拟合时的波形包络线。由于“尼罗河魔鬼”自由游动时,身体中心轴线存在部分弯曲形变,旋转校正并不能完全消除长背鳍波形关于中心轴线的非对称性,因此波形包络线  $f(x)$  及其水平方向镜像  $-f(x)$  有可能与部分波形轮廓线相截交。

#### 3.3 波形重构

在细长体理论中,长背鳍波动时顶端波形函数为

$$h(x, t) = h_1(x) \sin(kx + \omega t) = h_1(x) \sin(2\pi kx + 2\pi ft) \quad (8)$$

其中  $k$  为完整波数,  $f$  为鳍条的摆动频率。若令  $\lambda$  为推进波的波长, 则有  $k = L_f/\lambda$ 。

根据本文的实验结果有  $h_1(x) = f(x)$  成立, 因此波动推进的波形为

$$h(x, t) = f(x) \sin(2\pi kx + 2\pi ft) \quad (9)$$

假定在某一游速下, 长背鳍呈现波完整波个数为  $k = 3.5$ , 鳍条摆动频率为  $f = 1\text{Hz}$ , 当  $t = 0$  时波形曲线如图 6(a) 所示, 其中上侧点划线表示包络线  $f(x)$ , 下侧点划线则表示  $f(x)$  关于水平方向的镜像  $-f(x)$ 。波动推进过程中长背鳍在不同时刻将呈现不同的波形, 图 6(b) 分别给出了在  $t = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8\text{s}$  时的系列波形重构图。由图中可以看出, 不同时刻的波形反映了推进波的传播过程。



图 6 长背鳍波动的波形重构图

Fig.6 Reconstructed undulation curves with the achieved contour function

## 4 结论与展望

截取“尼罗河魔鬼”实验样本 MPC-1 匀速游动时的平稳图像序列, 经预处理消除不同组图像的差异性得到具有统一坐标意义的长背鳍波动轮廓线, 进而提取波动包络线并给出波动包络方程。实验结果表明: 算法所提取的长背鳍波动波形包络线能够保持自由游动时长背鳍波形的基本特征。根据提取包络线进行重构的波形呈现前后对称性, 这与它同时具备前进和后退双向机动能力的特征相吻合, 因此波形包络线提取算法是有效的。更重要的是, 包络方程也是后续推进效能分析中细长体理论模型的必要参数。因此本文的后续工作主要集中在如何将所提取的波动包络方程应用到基于 EBT 的长背鳍波动推进的效能分析中去。

## 参考文献:

- [1] Breder C M. The Locomotion of Fishes[J]. Zoologica, 1926, 4: 159-256.
- [2] Webb P W. Form and Function in Fish Swimming[J]. Sci. Amer., 1984, 251: 58-68.
- [3] 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).
- [4] Lighthill M J, Blake R W. Biofluidynamics of Balistiform and Gymnotiform Locomotion. Part I. Biological background, and analysis by elongated-body theory[J]. Journal of Fluid Mech., 1990, 212: 183-207.
- [5] Blake R W. Swimming in the Electric-eels and Knifefishes[J]. Can. J. Zool., 1983, 61: 1432-1441.
- [6] Lighthill M J. Large amplitude elongated-body theory of fish locomotion[J]. Proc. R. Soc., Ser., B, 1971, 179: 125-138;
- [7] Lighthill M J. Mathematical Theories of Fish Swimming[A]. In Fisheries Mathematics[M], ed. J. H. Steele, London, New York and San Francisco: Academic Press, 1977: 131-144;
- [8] Lighthill M J. Mathematical biofluidynamics[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1975.
- [9] 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], 2004.
- [10] Hu T J, Li F, Wang G M, et al. Morphological Measurement and Analysis of Gymnarchus niloticus[J]. Journal of Bionics Engineering. 2005, 2(1): 25-31.
- [11] Castleman K R. Digital Image Processing[M]. Prentice-Hall International, Inc. 1996.



