

## “尼罗河魔鬼”柔性长鳍运动曲面建模与仿真\*

谢海斌, 沈林成, 胡天江

(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”柔性长背鳍的波动运动为研究对象,综合考虑影响柔性长鳍运动建模的诸因素,建立了描述柔性长鳍波动运动时动态曲面的数学模型,并根据试验观测获得的仿生对象相关数据及对运动学模型中相关要素的简化假设,对仿生对象鱼体及柔性长鳍动态曲面进行仿真计算,通过与试验观测获得的照片进行对比,表明建立的柔性长鳍运动曲面模型通过合理设置各种参数,能够较好地描述柔性长鳍的波动运动,具有较强的适应性和通用性。柔性长鳍运动学模型的建立为其动力学研究及其基于有限元方法的仿真计算奠定了数学基础。

**关键词:**尼罗河魔鬼;柔性长鳍;运动曲面;建模;仿真

**中图分类号:**TP391.9 **文献标识码:**A

## The Modeling and Simulation of the Movement Curved Surface of the Long Flexible Fin of *Gymnarchus Niloticus*

XIE Hai-bin, SHEN Lin-cheng, HU Tian-jiang

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

**Abstract:** This paper establishes a uniform kinematics model to describe the undulation surfaces by the long flexible fin of *Gymnarchus niloticus*, with various factors comprehensively considered. Simulation is carried out using the morphological measured data and some simplified hypotheses to related factors. Compared with the filmed views, the simulation results show that the kinematics model can effectively depict the movement curved faces of the long flexible fin, and has better adaptability as well as versatility. Meaningfully, the establishment of the kinematics model for the long flexible fin has made a good preparation for further finite - element-based dynamic analysis.

**Key words:** *Gymnarchus niloticus*; long flexible fin; movement curved surface; modeling; simulation

水生动物的推进模式具有高效、高速、高机动性、高稳定性和低噪声等特点,因此近年来国内外掀起了研究鱼类推进机理和仿生机器鱼的热潮。目前国际上关于鱼类推进模式较为权威的分类是根据鱼类推进所使用的部位不同分为身体/尾鳍推进模式(body and/or caudal fin)和奇鳍/对鳍推进模式(median and/or pair fin)两大类<sup>[1,2]</sup>。仿生对象“尼罗河魔鬼(*Gymnarchus niloticus*)”的推进方式属于奇鳍/对鳍推进模式中典型的弓鳍目模式(Amiiform)<sup>[2]</sup>,这种鱼躯体较长,游动时身体近乎不发生

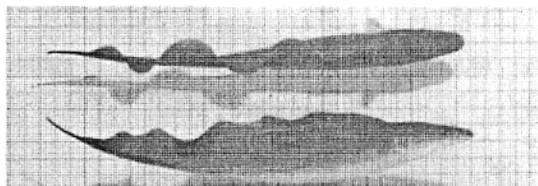


图 1 仿生对象“尼罗河魔鬼”

Fig.1 Bionic object *Gymnarchus niloticus*

形变,而依靠波动轻质柔软的长背鳍产生推力,速度快且攻击性强。由于受生物实验技术和非定常流体动力学理论的制约,对弓鳍目模式没能展开深入的研究。研究“尼罗河魔鬼”柔性长鳍的波动推进机理,需要进行流体动力学分析和基于有限元方法的计算流体力学(CFD)仿真,而无论是理论分析中的流场计算,还是仿真中的动态网格建立等,都必须以柔性长鳍的运动学模型为基础。

\* 收稿日期:2005-05-08

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 “尼罗河魔鬼”柔性长鳍结构及其波动运动描述

通过仿生试验观察,“尼罗河魔鬼”的柔性长鳍(鳍面)几乎等于身体长度,由200多根鳍条(硬体细圆柱形结构)和蹼(Membrane)(柔性结构)组成。鳍条间靠蹼连接,每根鳍条由一组肌肉驱动,可实现二自由度定点摆动运动<sup>[3]</sup>。为了便于描述,定义如下名词:

(1) 鳍条基点: 鳍条摆动过程中的固定点,也是鳍条与鱼体的连接点。(2) 基点邻域点: 假定鳍条上与基点距离小于 $\delta$ 的点在鳍面运动过程中弯曲形变可以忽略,则定义鳍条上与基点相距 $\delta$ 的点为基点邻域点。(3) 鳍面基线: 所有鳍条基点的连线。柔性长鳍的这种结构及相关名词定义如图2所示。

“尼罗河魔鬼”游动过程中,鳍面通过鳍条运动带动柔性蹼形成推进波与流体作用获得推力。鳍面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和摆幅等行为因素调整推进波的波形、波幅、波长、波频及行波传播方向等要素,从而适应不同速度和加速度的推进要求。驱动鳍条的肌肉组织能够使鳍条完成纵向和侧向微移来适应不同绕流场变化,以达到推进效能最大化,同时在转弯机动过程中被用于补偿身体的非灵活性。此外,鳍面能够通过仅通过改变推进波的传播方向产生逆向推力,且逆向推进效率与正向推进效率相当<sup>[4]</sup>。

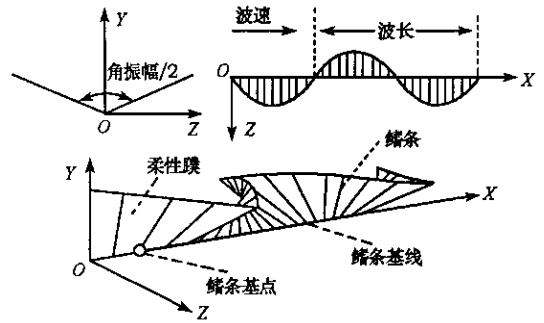


图2 柔性长鳍结构示意图

Fig.2 The structure schematic of the long flexible fin

## 2 柔性长鳍波动运动的要素分析

### 2.1 影响柔性长鳍波动运动曲面建模的因素分析

柔性长鳍波动运动曲面建模需要综合考虑如下因素:(1) 鳍面基线的形状: 受鱼体的运动约束。(2) 静态鳍面的形状: 决定于鳍条的长度分布。(3) 鳍条相对于鱼体纵对称面的角度偏移。(4) 鳍条运动的空间维度(平面或三维运动)和定点摆动的运动规律。(5) 鳍面波形参数: 决定于鳍面波形的包络线。(6) 鳍波动模式: 行波波动模式或驻波波动模式。(7) 鳍条材料力学特性: 刚性鳍条或弹性鳍条。(8) 鳍面波动参数: 频率、波长、波幅、相位、波传播方向等。

### 2.2 关于鱼体及鳍面运动的基本假设

(1) 鱼体中心轴线是一条长度不变的动态曲线,用于描述鱼体的形态和运动规律,其长度 $L_0$ (常量)由鱼的生理结构决定,中心轴线上任一点处的法平面与鱼体轮廓曲面的交线都为椭圆曲线,法平面的主法线与副法线为椭圆曲线的两条对称轴;

(2) 中心轴线的所有法平面与鱼体轮廓曲面所交的椭圆曲线上长半轴端点连线为鳍面基线,其长度随鱼体的运动而发生变化;

(3) 所有鳍条的运动都是绕各自的鳍条基点作周期性定点摆动,且运动规律符合同一函数形式,只是参数取值不同;

(4) 通过试验观测,发现柔性长鳍波动过程中鳍条形变微小,因此将鳍条按刚性处理。

### 2.3 坐标系定义

(1) 鱼体中心轴线坐标系族 $Ox_h Y_h Z_h(s)$ 和鳍面基线坐标系族 $Ox_q Y_q Z_q(s)$ : 分别以鱼体中心轴线和鳍面基线的弗朗内特(Frenet)活动框架<sup>[5]</sup>为其对应的坐标系(曲线上 $s$ 点处的局部坐标系 $X$ 轴、 $Z$ 轴和 $Y$ 轴分别为该点的切矢、副法矢、主法矢),用于分别描述鱼体和鳍面的形态。

(2) 鱼体坐标系 $Ox_b Y_b Z_b$ : 在鱼体中心轴线坐标系族中,取最前端点的局部坐标系为鱼体坐标系,该坐标系在惯性坐标系中的位置(原点坐标)与姿态(欧拉角)表征鱼体的位置与姿态。

(3) 惯性坐标系 $Ox_e Y_e Z_e$ : 采用东北上( $XYZ$ )固定坐标系,原点与鱼体坐标系的初始原点重合。

(4) 随体惯性坐标系 $Ox_f Y_f Z_f$ : 坐标原点始终与鱼体系重合,坐标轴始终与惯性系平行,即相对于惯

性系为一平移坐标系,用于计算鱼体与鳍面的三维网格。

(5) 鳍条坐标系族  $OX_i Y_i Z_i(s)$  鳍条运动满足 2.2 中的基本假设 (3), 为了获得鳍条基点运动函数的最简表达形式, 定义鳍条坐标系, 使得  $s$  点处的鳍条基点邻域点的运动轨迹在鳍条坐标系中  $OX_i Y_i(s)$  平面上的正交投影曲线通过或包围原点, 且关于  $OX_i(s)$  轴对称, 鳍条坐标系相对于对应点处鳍面基线坐标系的关系用欧拉角  $\varphi_q(s), \theta_q(s), \gamma_q(s)$  表示<sup>[6]</sup>, 定义如图 3 所示。

以上坐标系定义如图 4 所示。

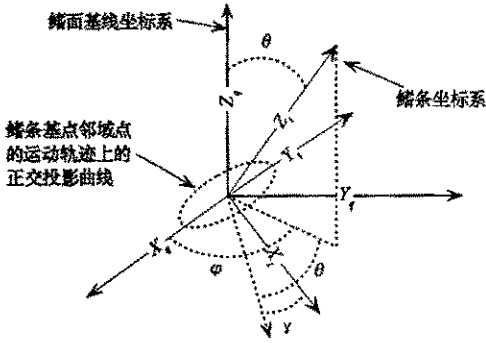


图 3 欧拉角定义示意图

Fig. 3 Definition of Eulerian angles

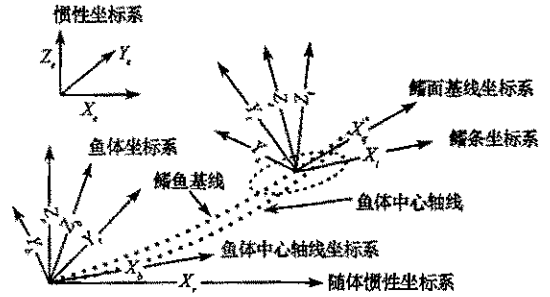


图 4 坐标系统定义示意图

Fig. 4 Definition of reference frames

### 3 鱼体及柔性长鳍运动曲面建模

#### 3.1 鱼体轮廓动态曲面建模

(1) 确定鱼体中心轴线的动态曲线函数。在随体惯性坐标系中, 用自然参数方程<sup>[5]</sup>描述为:  $P(s, t) = [x(s, t), y(s, t), z(s, t)]^T$  其中  $t$  为时间,  $s \in [0, L_b]$  为沿中心轴线的弧长(自然参数), 根据 2.2 中基本假设 (1), 鱼体中心轴线曲线函数满足公式:

$$s = \int_0^s \sqrt{(x'_s)^2 + (y'_s)^2 + (z'_s)^2} ds \tag{1}$$

(2) 求解鱼体中心轴线坐标系族。鱼体中心轴线上任一点  $s$  处的局部坐标系  $X$  轴、 $Z$  轴和  $Y$  轴的基

矢量分别为单位切矢  $\tau(s, t) = \frac{\dot{P}}{|\dot{P}|}$ 、副法矢  $b(s, t) = \frac{\dot{P} \times \ddot{P}}{|\dot{P} \times \ddot{P}|}$  和主法矢  $n(s, t) = b \times \tau =$

$\frac{(\dot{P} \times \ddot{P}) \times \dot{P}}{|\dot{P} \times \ddot{P}| \times |\dot{P}|}$ 。可得中心轴线坐标系族向随体惯性系的变换矩阵为  $C_b^i(s, t) = [\tau, n, b]^T$ <sup>[5]</sup>。鱼体

系  $OX_b Y_b Z_b$  为  $s=0$  处的局部坐标系。

(3) 根据试验观测获得的鱼体侧视与俯视轮廓线  $f(s)$  和  $g(s)$  求解  $s$  处法平面上的椭圆曲线:

$$\begin{cases} x_h(s, u) = 0 \\ y_h(s, u) = g(s) \sin u \\ z_h(s, u) = f(s) \cos u \end{cases} \quad u \in [0, 2\pi] \tag{2}$$

(4) 将第 (3) 步求得的椭圆曲线转换到随体惯性坐标系, 从而得到鱼体轮廓的动态曲面数学模型。转换公式为

$$P(s, u, t) = \begin{bmatrix} x_i(s, u, t) \\ y_i(s, u, t) \\ z_i(s, u, t) \end{bmatrix} = C_b^i(s, t) \begin{bmatrix} x_h(s, u) \\ y_h(s, u) \\ z_h(s, u) \end{bmatrix} + P(s, t) \tag{3}$$

#### 3.2 柔性长鳍波动运动曲面建模

(1) 根据鱼体轮廓曲面模型求取鳍面基线函数:  $P_f(s, t) = P_f(s, 0, t)$

(2)求解鳍面基线坐标系:方法同 3.1 中的步骤(2),只是将其中的  $P$  替换为  $P_q$ ,由此得到鳍面基线坐标系向随体惯性坐标系的变换矩阵为  $C_q^r(s,t)=[\tau_q, m_q, b_q]^T$ 。

(3)通过试验观测数据确定鳍面基线坐标系与鳍条坐标系的欧拉角  $\theta_q(s), \varphi_q(s)$  和  $\gamma_q(s)$ :由此可得鳍条坐标系到鳍面基线坐标系的变换阵为  $C_q^r(s,t)=[A_3[\gamma_q(s)]A_1[\theta_q(s)]A_2[\varphi_q(s)]]^T$  [6]。

(4)通过试验观测数据在鳍条坐标系中确定鳍条基点运动函数。鳍条基点运动函数主要是通过分析基点邻域点的运动轨迹在鳍条坐标系中  $Ox_iY_i(s)$  平面上的正交投影曲线,并由其反推其空间曲线函数而得。根据鳍条坐标系的定义,鳍条基点邻域点的运动轨迹在  $Ox_iY_i(s)$  平面上的正交投影曲线关于  $Ox_i(s)$  轴对称,若投影曲线是一条通过原点的直线段,表明鳍条运动是二维的,否则鳍条运动是三维的。投影曲线可用参数方程或极坐标方程(若其为包围原点的封闭曲线)描述为

$$\begin{cases} x(s,t) = x[t, \xi(s)] \\ y(s,t) = y[t, \xi(s)] \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \rho = \rho(\varphi) \\ \varphi(s,t) = \varphi[t, \varphi_0(s)] \end{cases} \quad \varphi \in [0, 2\pi] \quad (4)$$

其中,  $\xi(s,0) = \xi_0(s), \xi = x, y, \varphi$ , 用于描述鳍条运动的初始相位,鳍条间运动的初始相位差蕴含了波长信息  $\lambda(s)$ ,可由鳍面运动动态调整; $\zeta(s,t) = \zeta(s, t \pm T), \zeta = y, \varphi$ , 用于描述鳍条运动的周期性,  $T$  为摆动周期,为可调节参数。

如图 5 所示,根据正交投影的约束条件  $\delta \sin\theta = \rho$ ,可得用直角坐标法或球坐标法描述的鳍条基点运动函数为

$$\begin{cases} x(s,t) = x[t, x_0(s)] \\ y(s,t) = y[t, x_0(s)] \\ z(s,t) = \delta \cos(\theta) = \delta \cos\{\arcsin[\sqrt{x^2 + y^2}/\delta]\} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} r(s,t) = \delta \\ \theta(s,t) = \arcsin\{\rho[\varphi(s,t)]/\delta\} \\ \varphi(s,t) = \varphi[t, \varphi_0(s)] \end{cases} \quad (5)$$

(5)在鳍条坐标系族中确定鳍条曲线函数。设  $L_q(s)$  为鳍条长度的分布函数,  $l$  是由鱼的生理结构决定的时不变函数,为沿鳍条轴线的弧长参数,  $l \in [0, L_q(s)]$ 。根据鳍条按刚性处理的基本假设,可得鳍条曲线函数为

$$\begin{cases} x(s, l, t) = Kx(s, t) \\ y(s, l, t) = Ky(s, t) \\ z(s, l, t) = Kz(s, t) \end{cases} \quad K = \frac{1}{\delta} \quad \text{或} \quad \begin{cases} x(s, l, t) = l \sin[\theta(s, t)] \cos[\varphi(s, t)] \\ y(s, l, t) = l \sin[\theta(s, t)] \sin[\varphi(s, t)] \\ z(s, l, t) = l \cos[\theta(s, t)] \end{cases} \quad (6)$$

(6)在随体惯性坐标系中建立柔性长鳍波动曲面的运动学模型。将鳍条曲线函数变换到随体惯性坐标系,得到柔性长鳍波动曲面的运动学模型如下:

$$\begin{bmatrix} x(s, l, t) \\ y(s, l, t) \\ z(s, l, t) \end{bmatrix} = C_q^r(s, t) C_q^r(s, t) \begin{bmatrix} x(s, l, t) \\ y(s, l, t) \\ z(s, l, t) \end{bmatrix} + P_q(s, t), l \in (0, L_q(s)), s \in [0, L] \quad (7)$$

## 4 仿真计算

### 4.1 仿生试验观测数据

鱼体侧视轮廓线  $f(s)$ 、俯视轮廓线  $g(s)$  和鳍条长度的分布函数  $L_q(s)$  由鱼的生理结构决定,可通过试验观测获得。“尼罗河魔鬼”的侧视图与俯视图如图 6 所示 [7,8]。

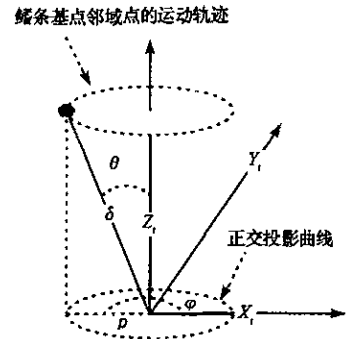


图 5 鳍条基点运动示意图  
Fig.5 Movement of the Fin ray base

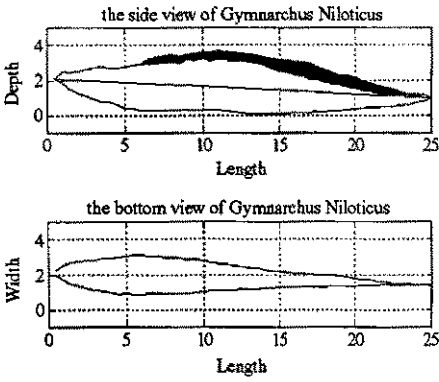


图6 “尼罗河魔鬼”侧视图与俯视图

Fig.6 Side view and top view of Gymnarchus niloticus

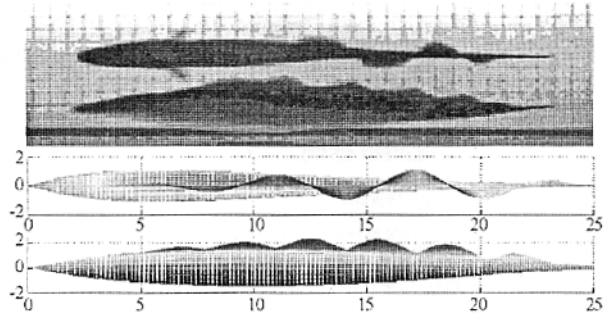


图7 鱼体观察试验照片与理论模型网格比较

Fig.7 Comparison between geometry reconstructed with theoretical model and one recorded with a camera of Gymnarchus niloticus

4.2 鱼体中心轴线为直线时的鱼体与柔性长鳍运动曲面仿真计算

- (1)取鱼体中心轴线曲线函数为  $P(s, t) = [s \ 0 \ 0]^T, s \in [0, L_b], L_b$  为测得的鱼体长度。
- (2)取中心轴线坐标系与随体惯性系坐标轴平行,由此可得  $C_q(s, t) = E$  (单位矩阵)。
- (3)根据鱼体侧视轮廓线  $f(s)$  和俯视轮廓线  $g(s)$  求得鱼体轮廓曲面  $P_q(s, u, t)$ 。
- (4)求取鳍面基线函数  $P_q(s, t) = P_q(s, 0, t)$ 。
- (5)求解鳍面基线坐标系随随体惯性坐标系的变换矩阵  $C_q(s, t) = [\tau_q \ n_q \ b_q]^T$ 。
- (6)取鳍面基线坐标系与鳍条坐标系的欧拉角  $\theta_q(s) = \varphi_q(s) = \gamma_q(s) = 0$ , 由此可得  $C_q(s, t) = E$ 。
- (7)假定鳍条基点运动函数为

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = y_{\max}(s) \cos[\omega t + \epsilon_0(s)] \\ z = \delta \cos(\theta) = \delta \cos\{\arcsin[\sqrt{y^2}/\delta]\} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $y_{\max}(s)$  为最大位移,在此取为常数,且  $\delta > y_{\max} > 0$ ;  $\omega$  为摆动角频率,行波正向传播时取正,否则取负,摆动周期为  $T = 12\pi/\omega$ ;  $\epsilon_0(s)$  为初始相位,在此将初始相位设定为沿波长方向的等速变化函数,设波长为  $\lambda$ , 则  $\epsilon_0(s) = \epsilon_{01} - 2\pi s/\lambda$ ,  $\epsilon_{01}$  为波动曲面的初始相位。

(8)根据以上假设和分析求解鱼体轮廓曲面及柔性长鳍波动运动曲面。

试验获取的“尼罗河魔鬼”照片与根据理论模型求得的鱼体轮廓曲面及柔性长鳍波动运动曲面网格比较如图7所示。

5 结 论

以“尼罗河魔鬼”柔性长背鳍的波动运动为研究对象,综合考虑影响柔性长鳍运动建模的多种因素,建立了描述柔性长鳍波动运动时动态曲面的数学模型,并根据试验观测获得的仿生对象相关数据及对运动学模型中相关要素的简化假设,对仿生对象鱼体及柔性长鳍动态曲面进行仿真计算,通过与试验观测获得的照片进行对比,表明论文建立的柔性长鳍运动曲面模型通过合理设置各种影响因素的参数,能够较好地描述柔性长鳍的波动运动,具有较强的适应性和通用性。柔性长鳍运动学模型的建立为其进一步的动力学研究和基于有限元方法的计算流体力学仿真的动态网格建立提供了分析手段,并奠定了数学基础。

参 考 文 献 :

[1] Webb P.W. Form and Function in Fish Swimming[J]. Scientific American, 1984, 251(1): 58-68.

## 4 结 论

求解了液体火箭尾焰辐射在吸收、散射及自身辐射性介质中传输的简化微积分方程,主要考虑高温气体分子的红外辐射,略去散射在所研究方向引起的辐射增量,计算结果与实测值的比较说明方法是可行的。

## 参 考 文 献:

- [1] Ludwig C B. Handbook of infrared radiation from combustion gases[R]. NASA SP-3080,1973.
- [2] Ludwig C B, Malkmus W, Walker J, et al. A Theoretical model for absorbing, emitting, and scattering plume radiation. Hortn T H(Ed). Spacecraft Radiative Transfer and Temperature Control[C]. New York: AIAA Progress Series in Astronautics and Aeronautics, 1982. 83:111-127.
- [3] 徐南荣. 喷气流红外辐射场的数值计算[J]. 航空动力学报, 1995, 16(6):647-653.
- [4] 聂万胜, 杨军辉, 何浩波, 庄逢辰. 液体火箭发动机尾焰流场及其燃烧组分的谱带模型参数计算[A]. 装备指挥技术学院学术交流会论文集[C]. 北京: 军事科学出版社, 2005.

(上接第 29 页)

## 参 考 文 献:

- [1] 李枝清, 梁阿磊, 彭路. 高速路由器设计方案研究[J]. 计算机工程, 2001, 27(8):94-96.
- [2] 林闯, 周文江, 李寅, 等. 基于 Intel 网络处理器的路由器队列管理: 设计、实现与分析[J]. 计算机学报, 2003, 26(9):1069-1077.
- [3] Villamizar C, Song C. High Performance TCP in ANSNET[J]. ACM Computer Communications Review, 1994, 24(5):45-60.
- [4] Appenzeller G, Keslassy I. Sizing Router Buffers[A]. SIGCOMM '04[C], 2004.
- [5] 胡晓峰, 孙志刚, 苏金树, 等. 高速路由器并行交换技术研究[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(1):60-64.

(上接第 66 页)

- [2] Sfakiotakis M, Lane D M, Davies J B C. Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion[J]. IEEE J 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, 2005(10).
- [4] Consi T R, Seifert P A, Triantafyllou M S, et al. The Dorsal Fin Engine of the seahorse( Hippocampus sp. )[J]. Journal of Morphology, 2001, 248:80-97.
- [5] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条(CAGD&NURBS) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994:22-25.
- [6] 孙世贤, 黄圳圭, 等. 理论力学教程 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997:99-102.
- [7] 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.
- [8] 胡天江, 李非, 沈林成. “尼罗河魔鬼”长背鳍波动包络线的提取算法[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(6).



