文章编号: 1000−8152(2009)01−0001−07

仿生波动长鳍运动学建模及算法研究

胡天江[1], 沈林成[1], 李 非[2], 王光明[1], 韩小云[1]

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 长鳍波动推进鱼类在稳定性、机动性、低速下状态保持等方面较其它鱼类有着显著优势. 本文将鱼类波动长鳍抽象为零厚度理想波动面, 引入直纹面建立曲线坐标意义下波动长鳍的运动学模型, 描述了长鳍波动推进时的非等幅波动、非对称波形等运动特征. 面向理论分析和数值模拟, 进一步扩充直纹面模型, 使之满足弯曲基线、非零厚度等长鳍形态及运动特征, 进而建立笛卡尔坐标系下的长鳍波动描述方程, 相应地, 设计了鱼类长鳍波动推进的运动描述算法. 根据给定形体和运动参数, 对零厚度理想波动板和弓鳍目"尼罗河魔鬼"鱼进行运动学仿真, 验证了运动学模型及运动描述算法的有效性.

关键词: 波动长鳍; 直纹面; 运动学模型; 波动描述算法; "尼罗河魔鬼"

中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Kinematic modeling and motion algorithm for long undulatory fins

HU Tian-jiang[1], SHEN Lin-cheng[1], LI Fei[2], WANG Guang-ming[1], HAN Xiao-yun[1]

(1. College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;
2. College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Studies have shown that undulatory propulsion with long fins has advantages in stability, maneuverability, and low-speed retaining. By using the differential geometry, we develop a rules-surface-based kinematic model for a zero-depth fin. This model characterizes the undulatory properties, including the non-uniform height and the non-uniform amplitude. It has also been studied in-depth in Cartesian coordinates to reflect the curve-based and non-zero-depth properties. The corresponding undulation algorithm is proposed and implemented in the dynamic mesh analysis of computational fluid dynamics (CFD). To validate the effectiveness and feasibility of the proposed undulatory model and algorithm, simulations of an ideal zero-depth waving plate and the Gymnarchus niloticus (a freshwater fish which is pushed forward by undulations caused by a long dorsal fin) are given respectively, with specified morphological and undulatory parameters. This study may serve as a good platform for dynamic analysis of undulations.

Key words: the long undulatory fins; ruled surface; kinematics; the undulation algorithm; Gymnarchus niloticus

1 引言(Introduction)

近20多年来, 受自然界鱼类游动的快速性和高效性启发, 仿鱼推进技术已成为水下机器人领域的研究热点之一[1~3]. 通过深入研究鱼类的推进机理, 揭示鱼类高效游动的奥秘, 为研制高效率、低噪音、高机动性、高稳定性和易隐蔽的仿生航行体提供新的思路. 可见, 鱼类游动机理分析和仿鱼推进装置研制是仿鱼推进技术研究的重要内容. 运动学建模是衔接机理分析和装置研制的有机体, 它既对游动特征和仿生启示进行形式化表达, 也为仿鱼推进装置研制提供设计依据.

弓鳍目(Amiiform)、裸背鳗(Gymnotiform)等鱼类游动时主要依靠长背鳍或长臀鳍波动产生推力, 它们集较高的推进效率、优良的机动性、稳定性于一体, 不仅适合于远洋航行, 还具有低速下灵活机动、抗扰动能力强的特点, 适应于近海等复杂环境[2]. 通过鱼类游动观测实验, 分析了长鳍不仅具有波频、波长、波幅等要素可调的运动特征, 而且具有非等高鳍条、弯曲基线、鳍条与基线呈非垂直关系的形态特征[4,5]. 仿生波动长鳍研究起步较晚, 现有运动学模型大都借鉴Lighthill的尾摆鱼类二维波动方程. 比如, MacIver[6]对尾摆方程进行适当扩充, 提出了基于俯视面正弦曲线簇的运动学模型. Xie[7]提出了多坐标系转换的运动学模型, 仅能对理想的仿鱼波动面进行运动描述. 总的说来, 鱼类波动长鳍运动描述模型数目有限, 很难综合描述生物观测实验

收稿日期: 2007−09−23; 收修改稿日期: 2008−03−27.
基金项目: 国防基础科研项目; 国家自然科学基金资助项目(50405006).

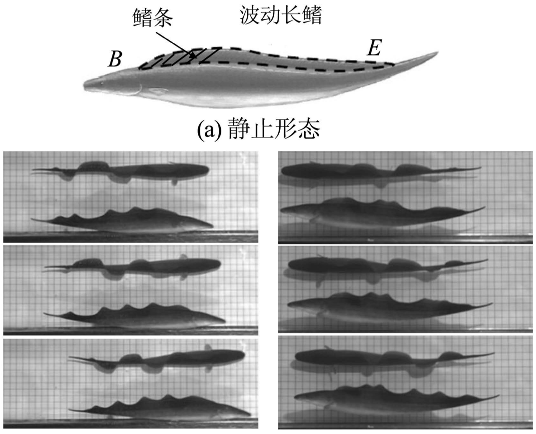
获取的形态及运动特征.

本文引入微分几何中的直纹面, 建立了鱼类波动长鳍的运动学模型, 以参数化方式描述了其游动特征和仿生启示. 结合实验观测数据, 采用基线切向局部坐标系方法, 对直纹面模型进行适当扩充, 使之能够描述弯曲基线和非零厚度的长鳍特征. 在离散网格意义下, 设计并实现了长鳍波动推进的运动描述算法. 仿真实例表明: 运动学模型和算法不仅能够有效地描述非等高鳍条、弯曲基线、非零厚度等形态特征, 而且可以表征波动周期性、波幅单峰性和正逆向波形异构性等运动特征, 为后续动力学分析及仿真奠定基础.

2 波动长鳍运动学模型(Kinematic model for the long undulatory fins)

2.1 长鳍波动推进特征(Propulsive features of undualtions)

以弓鳍目鱼为研究对象, 开展生物观测实验, 分析长鳍波动推进的形态学及运动学特征(具体实验观测方法和结论见文[4, 5]). 图1(a)为弓鳍目样本的静止形态, 长背鳍由200多根密致鳍条连接柔性鳍面构成(图中描绘了代表性鳍条), 长鳍沿体关于中心脊面对称分布, B为起点, E为终点; (b)为正向游动序列, 长鳍推进波向后传播; (c)为逆向游动序列, 推进波向前传播.



(a) 静止形态

(b) 正向游动 (c) 逆向游动

图 1 长鳍波动推进鱼类的静止形态及游动序列

Fig. 1 Morphology and swimming sequence of undulatory propulsion of the fish with a long dorsal fins

借助图像处理等手段分析发现, 长鳍波动推进模式中推进波形具有以下3个关键特征:

1) 波动周期性: 鳍条在平衡位置附近作周期性摆动, 相邻鳍条以一定相位差相继摆动, 鳍面顶缘的轮廓线类似于正弦波, 随时间变化且周期性重复;

2) 波幅单峰性: 波幅的最大值沿背鳍从前端到后端符合单峰变化规律, 约在中部达到最大;

3) 非对称性: 波动面轮廓线形成的波形, 其波峰偏离中心位置, 偏移的方向与游动方向相反, 和波传播方向一致, 使得沿波传播方向的上升段较为平缓, 下降段较为陡峭[5].

2.2 基于直纹面的波动描述方程(Ruled surface based descriptive formula for undulations)

定义 1 对于给定的单参数直线族$\{\vec{\alpha}(u), \vec{\delta}(u)\}$, 参数曲面

$$X(u,v) = \vec{\alpha}(u) + v \cdot \vec{\delta}(u)$$

称为由族$\{\vec{\alpha}(u), \vec{\delta}(u)\}$生成的直纹面. 通过$\vec{\alpha}(u)$平行于$\vec{\delta}(u)$的直线$L_t$称为母线, 曲线$\{\vec{\alpha}(u), u \in I\}$称为曲面$X$的准线[8].

若忽略波动长鳍的厚度影响, 将波动长鳍抽象为零厚度波动面, 如图2, 以基线为波动面的准线, 以鳍条为母线, 则根据上述直纹面定义, 可建立长鳍波动面描述方程如下[9]:

$$\begin{aligned} &\vec{p}(r,s,t) = \vec{b}(s,t) + r \cdot d(s) \cdot \vec{c}(s,t), \\ &0 \leqslant s \leqslant L, 0 \leqslant r \leqslant 1. \end{aligned} \tag{1}$$

式中: L为长鳍基线的长度, $d(s)$为鳍条长度, $\vec{b}(s,t)$表示长鳍基线, 描述鳍条起端沿鳍长方向变化的轨迹; $\vec{c}(s,t)$表示波形变化, 描述鳍条沿起端周期摆动的变化规律. 参数r可以理解为波动点沿$\vec{c}(s,t)$矢径方向上与鳍条起端的距离对鳍高作归一化处理的结果, 即比例$|PP_s|/|P_eP_s|$(如图2), 取值范围为$[0,1]$. 当$r=0$时, $\vec{p}(r,s,t)$即为基线$\vec{b}(s,t)$, 在随体坐标系下不随时间变化; 当$r=1$时, $\vec{p}(r,s,t_0)$表示t_0时刻鳍条末端沿基线运动时扫过的轨迹, 即波动面的顶缘线:

$$\vec{a}(s,t_0) = \vec{b}(s,t_0) + d(s) \cdot \vec{c}(s,t_0),\ 0 \leqslant s \leqslant L. \tag{2}$$

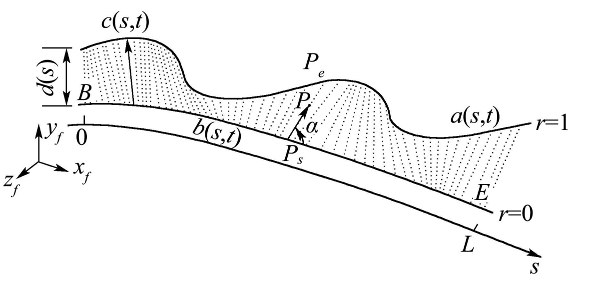


图 2 波动长鳍的直纹面描述模型

Fig. 2 Ruled surface based kinematic model for the undulatory fins

若记V为波传播速度, 则$\vec{c}(s,t)$的形式应满足波

动方程:

$$\frac{\partial^2 \vec{c}(s,t)}{\partial s^2} - \frac{1}{V^2}\frac{\partial^2 \vec{c}(s,t)}{\partial t^2} = 0. \tag{3}$$

通过建立长鳍游动波形的参数描述, 可以将长鳍波动推进的特征予以形式化. 以少量参数表达丰富的波形特征(周期性、单峰性、非对称性), 利于后续分析处理.

当鳍条在平衡位置附近作周期摆动时, 将其侧向摆动角度θ作为表征量, 结合相邻鳍条之间关系, 可定义

$$\theta(s,t) = a(s)\cdot f(s+Vt), \tag{4}$$

其中: $\dfrac{\delta\theta}{\delta t} = V\dfrac{\delta\theta}{\delta s}$, $a(s)$为关于位置s的函数, $f(s+Vt)$为关于位置s和时间t的周期函数, 例如典型的正弦变化规律可表示为

$$\theta(s,t) = \theta_{\max}(s)\cdot\sin(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{\lambda}s + \phi), \tag{5}$$

式中: λ为推进波长, T为波动周期, ϕ为初始相位角, $\theta_{\max}(s)$表示鳍条侧向最大摆角, 很难直接测量, 可通过间接测量长鳍波动包络$e(s)$来获取, 如公式(6):

$$\theta_{\max}(s) = \sin^{-1}\left(\frac{e(s)}{d(s)}\right), 0 \leqslant s \leqslant L. \tag{6}$$

设笛卡尔坐标系$o_f - x_f y_f z_f$(图2)的原点o_f与长鳍起点B重合, $o_f x_f$轴与直线BE重合, 基线位于平面$o_f x_f y_f$之上. 正向与逆向行进的波形非对称规律(图3)可以通过沿波传播方向叠加一个周期运动实现, 此周期运动的变化规律应与波幅变化规律相似, 形式化表述如下:

$$\begin{cases} c_{x_f}(s,t) = s + k_x\cdot f(s+Vt), \\ c_{z_f}(s,t) = k_z\cdot f(s+Vt), \end{cases} \tag{7}$$

其中k_x和k_z是长鳍波动推进过程中波形非对称性的表征系数, 若$k_x = 0$且$k_z = 1$, 则式(7)退化为规则的对称波形, 即Lighthill二维波动方程或其演化形式[6,7]. 实验观测和分析表明, 长鳍波形的非对称性实质上是受鳍条倾角(如图2)的影响, 数学形式上可描述为典型正弦波形沿$o_f x_f$ 轴方向的一定变形, 引入角度变量φ表征其变形程度, 将k_x和k_z定义为:

$$k_x \triangleq \sin\varphi, k_z \triangleq \cos\varphi. \tag{8}$$

将式(8)代入式(7), 易得:

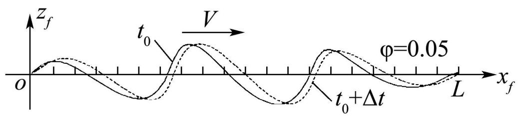
$$\begin{cases} c_{x_f}(s,t) = s + \sin\varphi\cdot f(s+Vt), \\ c_{z_f}(s,t) = \cos\varphi\cdot f(s+Vt). \end{cases} \tag{9}$$

参数φ取值在$[-0.1, 0.1]$之间. 当$\varphi = 0$时, $k_x = 0$且$k_z = 1$, 式(9)表示规则的对称波形; 当$\varphi > 0$时, 式(9)生成如图3(a)所示的后向传播的非对称推进波形; 当$\varphi < 0$时(9)对应图3(b)中前向传播的非对称推进波形. 设定前向传播时波速V为正(如图3(b)), 为体现波峰偏向和波动传播方向一致, 式中φ的取值应与V 符号相反.

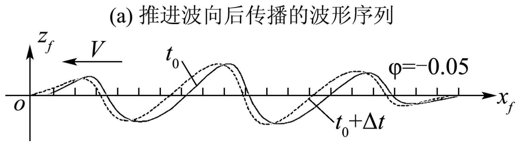
采用正弦变化规律, 长鳍游动波形的参数描述可表示为:

$$\begin{cases} c_{x_f}(s,t) = s + d(s)\cdot\sin(\theta(s,t))\cdot\sin\varphi, \\ c_{z_f}(s,t) = d(s)\cdot\sin(\theta(s,t))\cdot\cos\varphi, \end{cases} \tag{10}$$

其中$\theta(s,t)$满足公式(5). 图3为典型参数下的不同传播方向(对应V的符号)的波形俯视图(在$x_f o_f z_f$面上的投影), 其中实线为t_0 时刻的波形, 虚线为$t_0+\Delta t$时刻的波形. 注意到φ的取值应与V符号相反.



(a) 推进波向后传播的波形序列



(b) 推进波向前传播的波形序列

图 3　长鳍波动推进的非对称波形

Fig. 3　Asymmetric wave forms of the undulatory fins

综上所述, 根据以下简化原则, 长鳍波动推进模式的直纹面描述模型可表示为方程(11):

a) 长鳍厚度为零;

b) 长鳍基线为直线;

c) 鳍条运动的平衡位置位于xoy平面, 其运动规律关于xoy平面对称, 各鳍条的运动遵循等周期、等频率的一致波动规律;

d) 从轮廓线的波形来看, 波峰偏离中心位置, 其波峰偏离方向和波动传播方向一致, 使得沿波传播方向的上升段较为平缓, 下降段较为陡峭.

2.3 直纹面模型扩充(Generalization of the ruled surface based model)

波动长鳍运动描述方程能够很好地描述长鳍波动推进时的周期性、单峰性、非对称性等运动特征, 但鱼类真实长鳍很难满足模型(11)中长鳍基线为直线和长鳍厚度为零的假设条件. 因此, 本节将对直纹面模型进行进一步扩充, 以满足实际长鳍的弯曲基线、非零厚度的特征.

$$\begin{cases} p_{x_f}(r,s,t) = s + r\cdot d(s)\cdot \sin(\sin^{-1}(\dfrac{e(s)}{d(s)})\cdot \sin(\dfrac{2\pi}{T}t+\dfrac{2\pi}{\lambda}s+\phi))\cdot \sin\varphi, \\ p_{y_f}(r,s,t) = r\cdot d(s)\cdot \cos(\sin^{-1}(\dfrac{e(s)}{d(s)})\cdot \sin(\dfrac{2\pi}{T}t+\dfrac{2\pi}{\lambda}s+\phi)), \\ p_{z_f}(r,s,t) = r\cdot d(s)\cdot \sin(\sin^{-1}(\dfrac{e(s)}{d(s)})\cdot \sin(\dfrac{2\pi}{T}t+\dfrac{2\pi}{\lambda}s+\phi))\cdot \cos\varphi, \end{cases} \tag{11}$$

首先, 建立全局笛卡尔坐标系o-xyz, 如图4. 长鳍基线b_s可表示为全局坐标系o-xyz中的函数$\{b(x), x_b \leqslant x \leqslant x_e\}$. 不失一般性, 设$b_s$为弯曲基线, 则可对直纹面上每一点$S$分别建立局部坐标系$o'$-$x'y'z'$, 满足:

$$\begin{cases} o' \in b_s, \\ \overrightarrow{o'S} \in x'o'y', \\ \angle So'x' = \alpha, \\ \tan\beta = b'(x_{o'}), \end{cases} \tag{12}$$

其中: β表示$o'x'$轴与ox轴的夹角, 逆时针为正. α表示母线$o'S$与$o'x'$轴正向的夹角, 逆时针为正.

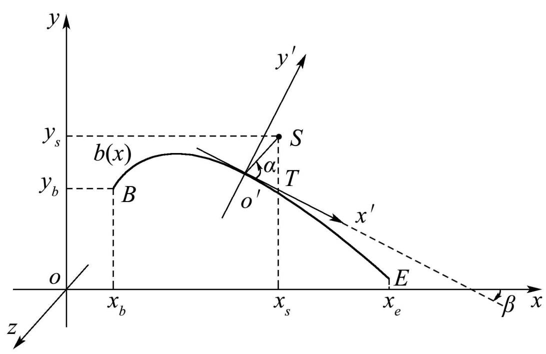


图 4 波动长鳍运动描述的坐标系

Fig. 4 Global and local coordinates for undulatory description of the long fins

设某波动点从波动局部坐标系$[\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}]^\tau$向全局坐标系$[x, y, z]^\tau$的转换方程为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

在局部坐标系下, 长鳍波动可表征为: S绕基点o'作侧向摆动, 直线$o'S$与点o'处切线正向成α角. 实验观测表明, 长鳍在z轴向上具有一定厚度, 关于xoy平面对称, 如图5所示. 因此, N才是真实长鳍鳍面上的波动点, 则S可视为N在对称面xoy上的投影, 长鳍波动过程中厚度保持不变, 即$|SN| = |S_1N_1| = |S_2N_2|$.

图5(a)和(b)分别描述了长鳍截面GFH在$So'z'$平面上的波动序列, 其中实线为t_0时刻, (a)中虚线为t_1时刻, (b)中虚线为t_2时刻. S的波动方程由直纹面模型描述, N的波动可基于S作适当调整. 设$\zeta = |SN|$, $[\tilde{x}_N, \tilde{y}_N, \tilde{z}_N]^\tau$和$[\tilde{x}_S, \tilde{y}_S, \tilde{z}_S]^\tau$ 分别表示N和S的局部坐标值, θ_i $(i = 0, 1, 2)$表示t_i时刻侧向摆角, 其中$\theta_0 = 0$, 则

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_N \\ \tilde{y}_N \\ \tilde{z}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_S \\ \tilde{y}_S \\ \tilde{z}_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\zeta\sin(\theta_i)\cos\alpha \\ -\zeta\sin(\theta_i)\sin\alpha \\ \zeta\cos(\theta_i) \end{bmatrix}. \tag{14}$$

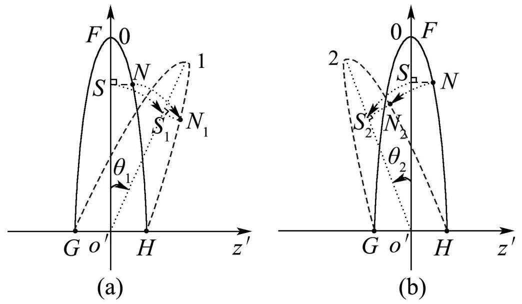


图 5 波动长鳍运动描述的厚度修正

Fig. 5 Non-zero depth complementarity for kinematic description of the undulatory fins

3 波动长鳍运动学算法及实例(Kinematical algorithm and examples)

现有的鱼类游动理论模型均基于势流、线性化边界条件或假定尾迹形状的条件, 无法解决非线性游动的相互影响问题, 也无法兼容尾迹的动态变化过程. 自1990年以来, 计算流体动力学(CFD)逐渐成为了鱼类推进机理的主要研究方法[10,11], 此时, 设计并实现基于离散网格的波动长鳍运动描述算法尤为重要.

波动长鳍运动学算法是指: 面向动力学分析及仿真等实际应用, 实现上述波动长鳍运动模型, 给出全局坐标系o-xyz中波动长鳍的推进波形序列, 即所有波动点随时间的变化序列. 算法分为以下两个阶段:

a) 预处理: 在全局坐标系下, 求得长鳍鳍面上每点N的波动不变量, 表示为五元组

$$< x_{o'},\ \rho,\ \beta,\ \alpha,\ \zeta >,$$

其中, $x_{o'}$, β和φ的含义如图4, $\rho = |o'S|$, $\zeta = |SN|$(图5).

b) 波形序列生成: 根据给定输入和上述波动不变量, 给出直纹面模型意义下的波动推进波形序列.

引入符号: $N_n^{(j)}$—t_n时刻长鳍鳍面上第j个波动点, 全局坐标系下记为$[x_N^{(j,\,n)}, y_N^{(j,\,n)}, z_N^{(j,\,n)}]^\tau$, 局部坐标系下表示为$[\widetilde{x}_N^{(j,\,n)}, \widetilde{y}_N^{(j,\,n)}, \widetilde{z}_N^{(j,\,n)}]^\tau$; $S_n^{(j)}$—$N_n^{(j)}$在平面xoy上的投影点, 全局坐标系下记为$[x_S^{(j,\,n)}, y_S^{(j,\,n)}, z_S^{(j,\,n)}]^\tau$, 局部坐标系下表示为$[\widetilde{x}_S^{(j,\,n)}, \widetilde{y}_S^{(j,\,n)}, \widetilde{z}_S^{(j,\,n)}]^\tau$; $\theta_n^{(j)}$—$S_n^{(j)}$点在t_n时刻的侧向摆动角.

3.1 波动描述算法(The undulation algorithm)

输入: 长背鳍形态参数$d(s)$, 推进波长λ, 波动周期T, 初始相位角ϕ, 长鳍顶缘包络方程$e(s)$, 长鳍基线方程$b(x)$, 非对称波形参数φ.

输出: 长鳍波动推进的波形序列$\{W(k), k = 1, 2, \cdots, K\}$.

a) 预处理:

1) 遍历长鳍上离散网格点, 记录各点在全局坐标系下的坐标值$\{[x_N^{(i,0)}, y_N^{(i,0)}, z_N^{(i,0)}]^\tau, i = 1, 2, \cdots, m\}$;

2) 提取当前波动点的标号j;

3) 令$\zeta^{(j)} = z_N^{(j,0)}$计算投影点$S_0^{(j)}$:

$$x_S^{(j,0)} = x_N^{(j,0)}, y_S^{(j,0)} = y_N^{(j,0)}, z_S^{(j,0)} = 0;$$

4) 根据定义(12), 可列出以下方程组, 其中$\alpha^{(j)}$为已知观测值:

$$\begin{cases} y_{o'}^{(j)} = b(x_{o'}^{(j)}), \\ z_{o'}^{(j)} = 0, \\ \beta^{(j)} = \tan^{-1}(b(x_{o'}^{(j)})), \\ \tan(\alpha^{(j)} + \beta^{(j)}) = \dfrac{y_S^{(j,0)} - y_{o'}^{(j)}}{x_S^{(j,0)} - x_{o'}^{(j)}}, \end{cases}$$

在$[x_b,\, x_e]$范围中搜索可得$x_{o'}^{(j)}$值;

5) 根据下式, 分别计算当前点的波动半径$\rho^{(j)}$和横轴倾角$\beta^{(j)}$:

$$\rho^{(j)} = \sqrt{(x_S^{(j,0)} - x_{o'}^{(j)})^2 + (y_S^{(j,0)} - y_{o'}^{(j)})^2},$$
$$\beta^{(j)} = \tan^{-1}(b(x_{o'}^{(j)}));$$

6) 向波动不变量元组表中添加参数项

$$< x_{o'}^{(j)},\ \rho^{(j)},\ \beta^{(j)},\ \alpha^{(j)},\ \zeta^{(j)} >;$$

7) 设定$j = j + 1$, 如果$j \leqslant m$, 转2); 否则, 转8);

8) 输出所有波动点的波动不变量元组表.

b) 波动序列生成:

1) 读取当前时刻t_n;

2) 提取当前波动点的标号j;

3) 查询元组表$< x_{o'}, \rho, \beta, \alpha, \zeta >$, 可得$N_n^{(j)}$的波动不变量$x_{o'}^{(j)}$, $\rho^{(j)}$, $\beta^{(j)}$, $\alpha^{(j)}$和$\zeta^{(j)}$;

4) 将$s = \int_{x_b}^{x_{o'}^{(j)}} \sqrt{1 + [b'(x)]^2} \mathrm{d}x$, $t = t_n$代入公式(5)和(6), 得

$$\theta_n^{(j)} = \tan^{-1}\left(\frac{e(s)}{d(s)}\right) \cdot \sin(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{\lambda}s + \phi);$$

5) 令$\rho^{(j)} = r \cdot d(s)$, 结合直纹面波动方程(11), 可得点$S_n^{(j)}$在局部坐标系中的坐标值为:

$$\widetilde{x}_S^{(j,\,n)} = \rho^{(j)} \sin\theta_n^{(j)} \cos\varphi,$$
$$\widetilde{y}_S^{(j,\,n)} = \rho^{(j)} \cos\theta_n^{(j)},$$
$$\widetilde{z}_S^{(j,\,n)} = \rho^{(j)} \sin\theta_n^{(j)} \sin\varphi;$$

6) 根据公式(14)修正非零厚度的影响, 可得波动点$N_n^{(j)}$为:

$$\widetilde{x}_N^{(j,\,n)} = \rho^{(j)} \sin\theta_n^{(j)} \cos\varphi - \zeta^{(j)} \sin\theta_n^{(j)} \cos\alpha^{(j)},$$
$$\widetilde{y}_N^{(j,\,n)} = \rho^{(j)} \cos\theta_n^{(j)} - \zeta^{(j)} \sin\theta_n^{(j)} \sin\alpha^{(j)},$$
$$\widetilde{z}_N^{(j,\,n)} = \rho^{(j)} \sin\theta_n^{(j)} \sin\varphi + \zeta^{(j)} \cos\theta_n^{(j)};$$

7) 根据坐标变换公式(13), 将$N_n^{(j)}$的局部坐标值转换为全局坐标值;

8) 令$j = j + 1$, 如果$j \leqslant m$, 转2); 否则, 转9);

9) 输出当前时刻的波形$W(n)$为:

$$W(n) = \{[x_N^{(i,\,n)}, y_N^{(i,\,n)}, z_N^{(i,\,n)}]^\tau, i = 1, 2, \cdots, m\};$$

10) 令$n = n+1$, 如果$n \leqslant K$, 转1); 否则, 转11);

11) 输出长鳍波动推进的波形序列$\{W(k), k = 1, 2, \cdots, K\}$.

评述 实际应用中, 同一波动描述对象, 预处理算法仅需执行一次, 波动不变量元组表可记录到指定参数文件. 生成波动序列时, 直接从参数文件中提取相关波动参数, 而不必再次执行预处理算法.

3.2 仿真实例(Simulation)

3.2.1 零厚度理想波动板(Ideal zero-depth undulatory plate)

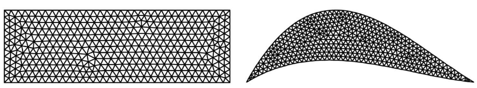
以零厚度理想波动板为例, 采用CFD动网格方法, 分析波动描述模型参数对推进波形的影响. 两组对比实验的参数取值如表1, 第1组是直基线规则矩形板, 第2组是弯曲基线非等高波动板.

图6(a)描述了两种波动板的零时刻初始形态, 根据CFD动网格模拟要求, 两组实验均采用三角形划分网格, 数目分别是584和673. 图6(b)和(c)分别列举了两种波动板的推进波形周期序列. 图中, λ的取值决定长鳍呈现完整波形的个数n, 满足$n = L/|\lambda|$, 第1组实验的完整波形数为1, 第2组则为2; λ符号可调节行波传递方向, 第1组取正值, 推进波沿X轴正向传递, 第2组取负值, 推进波沿X轴反向传递; φ表征波形的非对称程度, 其绝对值越大, 非对称性越明显. ϕ是初始相位角, 对波形特征没有影响. $\theta_{\max}$越大, 波动波幅越大, 第2组波幅明显高于第1组. 可见, 波动描述模型的参数具有明确物理意义, 且易于调节.

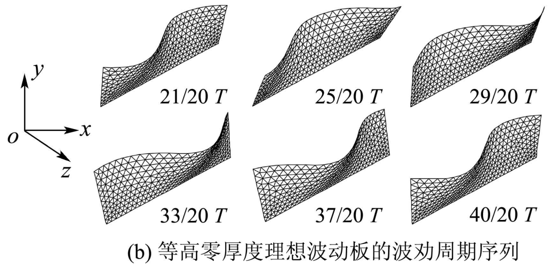
表 1 零厚度理想波板的实验参数

Table 1 Parameters for the zero-width undulatory plate

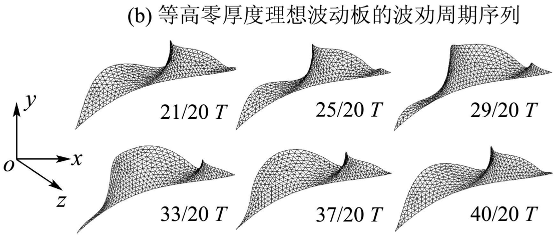
参数	第1组	第2组
L/ cm	100.0	100.0
λ/ cm	100.0	–50.0
T/ s	1.00	0.50
φ	–0.1	0.05
ϕ/ rad	$\pi/3$	0
$\theta_{\max}(s)$/ rad	$\pi/9$	$2\pi/9$
$d(s)$	0.32	$1.20s(1-s)(1.5-s)$
$b(x)$	0	$0.50x(1-x)(1.2-x)$



(a) 零厚度理想波动板的零时刻形态



(b) 等高零厚度理想波动板的波劝周期序列



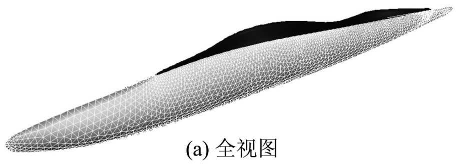
(c) 非等高零厚度理想波动板的波动周期序列

图 6 零厚度理想波动板仿真实例

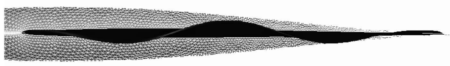
Fig. 6 Simulation of the zero-width ideal undulatory plate

3.2.2 弓鳍目鱼“尼罗河魔鬼”(Gymnarchus niloticus)

以弓鳍目鱼类“尼罗河魔鬼”为例, 模型参数取值如下: $L = 17.0$ cm, $\lambda = 8.5$ cm, $T = 0.2$ s, $\varphi = -0.05$, $\phi = 0$, $b(x) = \gamma^{\tau} \cdot X$ (其中$\gamma = [-4472.1, -773.87, -25.742, -14.586, 0.0025]^{\tau}/100$, $X = [x^4, x^3, x^2, x, 1]^{\tau}$), $d(s)$和$e(s)$参考文献[4, 5]. 结合鱼体的形态参数, 重构“尼罗河魔鬼”的三维形体, 如图7所示, 长鳍基线具有显著的弯曲特征, 长鳍具有一定厚度, 鳍条高度和波动幅值都呈现“前后小、中间大”的单峰性.



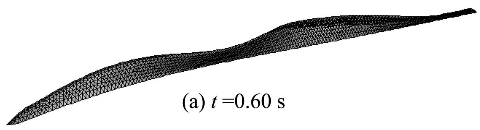
(a) 全视图



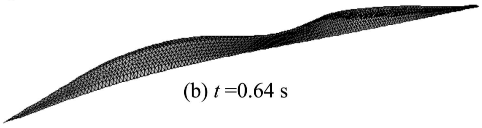
(b) 俯视图

图 7 弓鳍目鱼体及长背鳍的三维形体

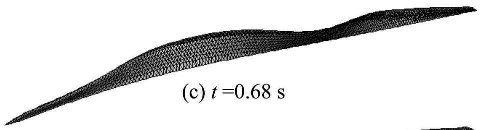
Fig. 7 The three-dimensional reconstructed shape of the Amiiform fish and its undulatory dorsal fins



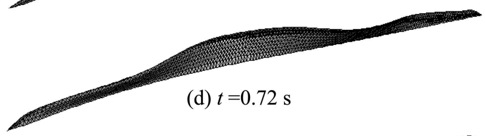
(a) t =0.60 s



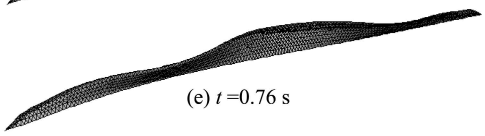
(b) t =0.64 s



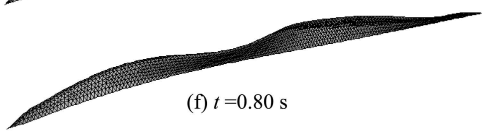
(c) t =0.68 s



(d) t =0.72 s



(e) t =0.76 s



(f) t =0.80 s

图 8 弓鳍目鱼长鳍波动推进的波形序列

Fig. 8 Propulsive wave sequence for periodic undulations by the dorsal fins of the Amiiform fish

通过图7与图2的比较, 可以验证长鳍运动学模型能够较好地保持长鳍波动推进特征. 实验详细记录了$0\sim1$ s内波动长背鳍的推进波形, 图8列举了$0.60\sim0.80$ s的波形序列, 从中可观察到推进行波由前至后的传递过程, (a)和(f)两者波形一致, 分别对应T和$2T$时刻, 验证了长鳍波动的周期性(根据(11)易证波动周期为T).

综上所述, 长鳍运动学模型和算法能够较好地保持长鳍波动推进时的形态及运动特征.

4 结论(Concluding remarks)

将弓鳍目鱼类波动长鳍类比于直纹面, 以基线为准线, 以鳍条为母线, 采用微分几何方法建立了长鳍直纹面运动学模型, 设计并实现了面向CFD分析的运动描述算法. 模型和算法具有以下优点:

1) 以较少的参数表达丰富的长鳍推进波形特征, 包括波动周期性、波幅单峰性和非对称波形等重要特征;

2) 参数物理意义明确, 可通过实验观测来获取;

3) 描述算法简捷, 易于调节和实现长鳍的推进波形序列;

4) 算法精度较高, 每个时间步均以波动不变量为参考值, 无误差积累.

本文算法既可生成弓鳍目、裸背鳗等长鳍鱼类的波动推进波形序列, 也可描述仿鱼长鳍装置的波动推进过程. 算法实例表明基于直纹面的波动描述模型能够较好地吻合实验观测现象, 是对波动长鳍形态及运动特征的抽象和形式化表达. 但是, 直纹面模型忽略了鳍条柔性, 未能考虑长鳍波动推进过程中沿鳍条方向的可能形变, 如何表征长鳍鱼类鳍条的柔性特征将是仿生长鳍运动学模型需要进一步解决的新问题.

参考文献(References):

[1] YU J Z, TAN M, WANG S, et al. Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics (Part B: Cybernetics)*, 2004, 34(4): 1798 – 1810.

[2] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J, et al. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 237 – 252.

[3] 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 Junzhi, CHEN Erkui, WANG Shuo, et al. Research evolution and analysis of biomimetic robot fish[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(4): 485 – 491.)

[4] HU T J, LI F, WANG G M, et al. Morpholocial measurement and analyses of Gymnarchus niloticus[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2005, 2(1): 25 – 31.

[5] LI F, HU T J, WANG G M, et al. Locomotion of Gymnarchus niloticus: experiment and kinematics[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2005, 2(3): 115 – 121.

[6] MACIVER M A, FONTAINE E, BURDICK J W. Designing future underwater vehicles: principles and mechanisms of the weakly electric fish[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 39(3): 651 – 659.

[7] 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: 38 – 47.
(XIE Haibin. *Design, modeling, and control of bionic underwater vehicle propelled by multiple undulatory fins*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 38 – 47.)

[8] 杜卡莫. 曲线与曲面的微分几何[M]. 田畴, 忻元龙, 姜国英, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 137 – 144.

[9] 李非. 背鳍/背臀鳍波动推进机理实验研究与仿真[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
(LI Fei. *Experimental and numerical researches on undulatory dorsal/median fin propulsion modes*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.

[10] LIU H. Simulation-based biological fluid dynamics in animal locomotion[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2005, 58(4): 269 – 282.

[11] KATO N. Median and paired fin controllers for biomimetic marine vehicles[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2005, 58(4): 238 – 252.

作者简介:

胡天江 (1979—), 男, 博士研究生, 2007年9月至2008年9月获"国家建设高水平大学公派研究生项目"资助在新加坡南洋理工大学联合培养, 研究方向为迭代学习控制、仿生机器人、生物计算流体动力学, E-mail: t.j.hu@nudt.edu.cn;

沈林成 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为任务规划、智能控制、图像处理、模式识别、仿生机器人, E-mail: lcshen@nudt.edu.cn;

李 非 (1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为图像处理、运动建模、生物信息学, E-mail: thales@ynet.com;

王光明 (1974—), 男, 讲师, 研究方向为仿生机器人、测试技术, E-mail: gmwang@nudt.edu.cn;

韩小云 (1971—), 男, 副教授, 研究方向为智能故障检测、仿生隐身技术, E-mail: hxy801@21cn.com.