

文章编号: 1001- 2486(2009) 01- 0104- 05

## 鳐鱼胸鳍模式的运动学建模与仿真\*

杨少波, 韩小云, 邱 静

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 由于流场环境中的鱼类动力学建模困难, 目前胸鳍模式研究进展受到制约。随着计算机的高速发展和数值计算的进步, 将有限元建模应用于水动力学研究, 近年来也成为热点。而利用有限元建模, 必须进行对象的运动学建模。本文提出了鱼类胸鳍模式的运动学模型, 通过物理特征和运动参数探讨了运动波形, 简化了鳐鱼胸鳍模式的运动方程, 利用运动方程作为模型的运动边界条件, 对牛鼻鲛的有限元模型进行仿真, 探讨了牛鼻鲛的运动规律, 验证了运动学模型的有效性。

**关键词:** 胸鳍模式; 运动学; 仿真; 有限元

**中图分类号:** TP391. 9      **文献标识码:** A

## Kinematics Modeling and Simulation of Pectoral Locomotion in Batoid Fish

YANG Shao-bo, HAN Xiao-yun, QIU Jing

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

**Abstract:** Due to the difficulty of dynamics modeling in fish surrounding by the fluid, little progress has been made in the design of the current pectoral locomotion. With the rapid development of the high performance computers and numerical methods, finite element modeling applied to explore the hydrodynamics of the fish has become a hot topic recently. The kinematics modeling is usually the first step in solving the problem. Therefore, the kinematics modeling of pectoral locomotion in fish is proposed. The pectoral locomotion is simulated with the physical character and kinematic parameter, and the kinematic formula of the pectoral locomotion in batoid fish is simplified. Along with the boundary condition of the above kinematic formula, the finite element modeling in Cownose Ray is finally simulated in order to study the kinematics. The simulation modeling, compared with the observation results, is proved to be valid.

**Key words:** pectoral locomotion; kinematics; simulation; finite element

胸鳍模式, 属于 MPF (Median and/or Paired Fin) 模式中的一种, 指的是鱼类依靠胸鳍的摆动、波动或者两者的复合运动来完成自身的推进或者机动动作。根据 Webb<sup>[1]</sup> 1984 年提出的鱼类泳动模式的分类, 依靠胸鳍模式泳动的鱼类兼具优良的机动性能。由于胸鳍的运动方式的多样性和运动的复杂性, 关于胸鳍模式泳动性能和仿生水下推进器的研究, 直到近年来才逐步受到国内外学者的重视。这些学者在实验测量、理论模型和模型设计方面做了不少有益的工作<sup>[2-8]</sup>, 极大地推动了胸鳍模式泳动机理的研究。

目前关于胸鳍模式的泳动机理研究, 最棘手的问题是动力学建模。正是由于鱼体的柔性, 多样的运动方式和行为以及复杂的流固耦合作用, 才使得动力学建模不得不进行一些必要的简化, 但这些简化模型得出的结果不能反映鱼类身体周围的流动细节。本文考虑到直接建立动力学模型的困难, 拟通过给定模型的运动边界条件, 对考虑了柔性和流固耦合作用的牛鼻鲛有限元模型进行仿真, 探讨鳐鱼胸鳍模式的运动规律。由于水动力学研究不是本文的重点, 所以不赘述。

\* 收稿日期: 2008- 06- 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50405006); 国防科技大学博士研究生创新资助项目 (B060302)

作者简介: 杨少波 (1975-), 男, 博士生。

## 1 运动学理论模型

胸鳍作为鱼类推进机动或者辅助推进机动的器官,外形都是扁平的,因而我们可将胸鳍的变形部分近似为柔性变形薄板<sup>[9]</sup>。现选取体坐标系  $Oxyz$ , 令胸鳍的基线与前缘的交点为原点  $O$ ,  $y=0$  平面为胸鳍展平时在  $XY$  面上的投影面, 胸鳍基线为  $x$  轴, 整个坐标轴系符合右手法则(图 1)。若不考虑游鱼的侧滑、偏航和滚转的机动运动, 由此可以假定单个胸鳍的运动方程为

$$z = h(x, y, t) \quad (x, y) \in F_s \quad x > 0, y > 0$$

其中  $F_s$  为胸鳍在  $XY$  面上的投影区域,  $x_L(y)$ ,  $x_T(y)$  分别为胸鳍的前缘和后缘曲线。

鳐鱼游动时, 胸鳍上展示了沿前后推进的行波, 这种行波类似为简谐波, 由于更一般的周期波动可以利用傅氏分析方法来处理, 所以鳐鱼的胸鳍运动可以表示为具有任意幅值的一系列行波:

$$h(x, y, t) = \text{Re}[H(x, y) \exp(i(\omega t - kx))]$$

其中,  $\text{Re}$  代表取实部, 复函数  $H(x, y)$  为波幅,  $\omega$  为圆频率,  $k = 2\pi/\lambda$  是波数( $\lambda$  是波长)。

胸鳍上的推进波既有弦向的波动, 也有展向上的大范围变形, 则行波包络面为一曲面。假设鳐鱼胸鳍任一弦向位置具有相同比例的展向变形, 波幅函数可以对  $x, y$  进行解耦, 则鳐鱼胸鳍运动方程可写为

$$h(x, y, t) = \text{Re}[A_m(x) e^{i\Psi_m} A_n(y) e^{i\Psi_n} e^{i(\omega t - kx)}]$$

其中,  $A_m(x) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m x^{m-1}$ ,  $A_n(y) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n y^{n-1}$ ,  $\Psi_m, \Psi_n, a_m, a_n$  为实数。

## 2 仿真分析

胸鳍的物理特征和运动参数决定了胸鳍运动时产生的水动力分量, 从而可以影响游鱼的推进和机动<sup>[10]</sup>。其中, 物理特征包括鳍条的间距、鳍条的长度和鳍条的柔性; 而运动参数主要包括推进波的幅值、推进波的波动频率、推进波的波长和鳍条间的相位。

### 2.1 鳍的形状

同属于鳐形总目, 鱼的胸鳍形状为半圆形或半椭圆形, 而牛鼻鲛的胸鳍形状为类三角形。胸鳍的形状不同必定是和它们的生存环境所要求的运动方式相适应。鱼属于底栖动物, 它的圆形胸鳍的波动所具有的极强机动性就能很好地适应海底的复杂环境; 牛鼻鲛属于浮游动物, 它的三角胸鳍的摆动能提供足够的升力和推力完成巡游和捕食。图 2 仿真结果表明, 不同的胸鳍形状在同一运动参数情况下具有不同的推进波形, 随着胸鳍前沿后掠角的增大, 波形逐渐变得不明显。需要说明的是, 矩形的胸鳍很少见, 而矩形的背鳍和臀鳍居多, 此处引入主要是为了进行对比和直观表现。

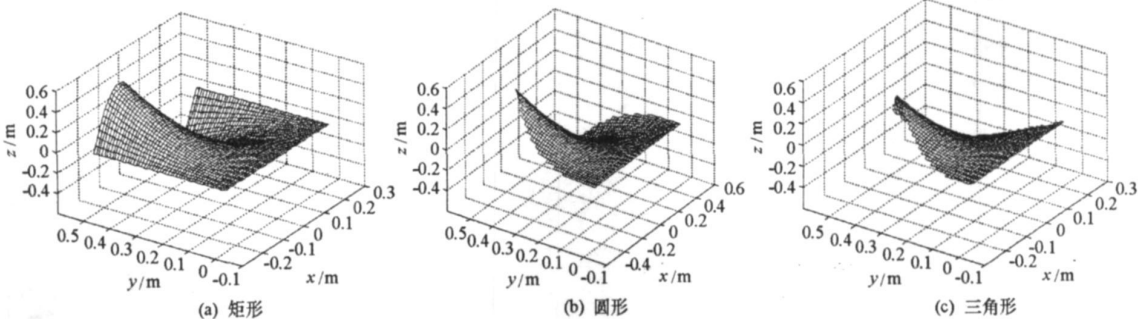


图 2 胸鳍波形

Fig. 2 Propulsive wave in pectoral fin

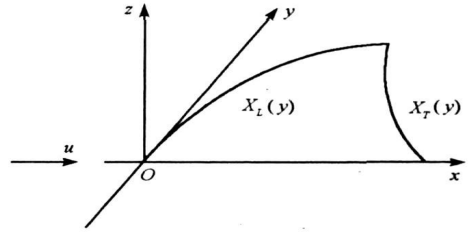


图 1 鱼类胸鳍模式的运动学模型

Fig. 1 Kinematics modeling of pectoral locomotion in fish

## 2.2 弦向波幅

不同鱼类的胸鳍运动时,推进波在弦向有不同的变化趋势。假定  $h_0$  为胸鳍变形时的最大  $z$  向幅值,  $L$  为弦长,则胸鳍等幅变化、幅值先线性增大后线性减小和幅值逐渐线性增大三种变化的数学表达分别为

$$(1) A_m(x) = h_0$$

$$(2) A_m(x) = h_0(1 - |2x/L|)$$

$$(3) A_m(x) = h_0(1/2 + x/L)$$

图3为展向波幅不变、矩形胸鳍波形随弦向波幅的变化规律。弦向波幅的变化对波形各点的幅值有直接的影响。

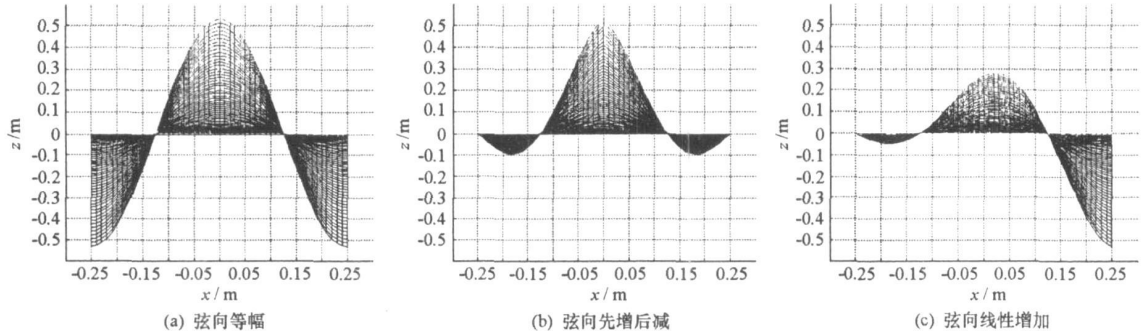


图3 弦向波形

Fig. 3 Propulsive wave in chord direction

## 2.3 展向波幅

鲹鱼胸鳍模式游动时,胸鳍的展向变形都比较大。通过线性变化和二次曲线变化来考察波形的影响,数学表达分别为

$$(1) A_n(y) = c_1 y$$

$$(2) A_n(y) = c_1 y + c_2 y^2$$

图4为弦向波幅不变、矩形胸鳍波形随展向波幅的变化规律。展向波幅的变化同样也会影响到波形的幅值。

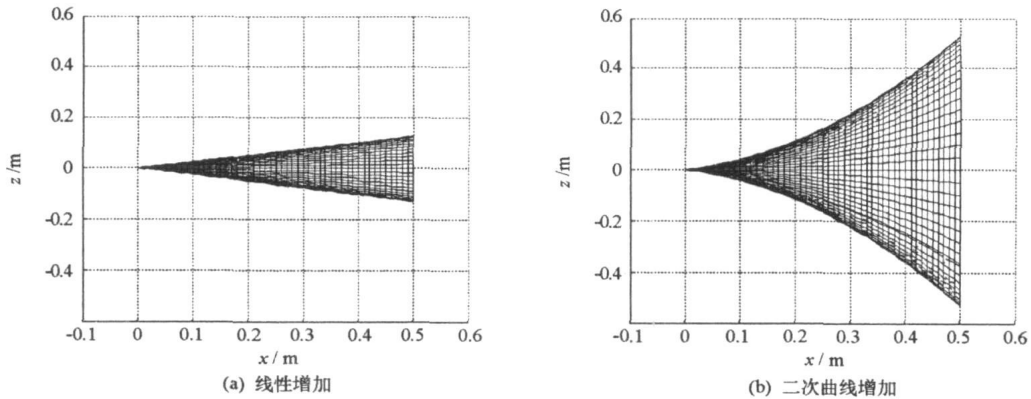


图4 展向波形

Fig. 4 Propulsive wave in pectoral span direction

## 2.4 推进波波长

推进波的数量  $N$  与推进波的波长  $\lambda$  存在关系,即  $N = L/\lambda$  其中  $L$  为胸鳍基线弦向长度。Rosenberger<sup>[11]</sup>通过观测8种典型的鲹鱼游动,总结出推进波数量是区分胸鳍波动模式、摆动模式和混合

模式的主要特征参数。图 5 为弦向和展向波幅不变, 矩形胸鳍波形随推进波的数量变化规律。

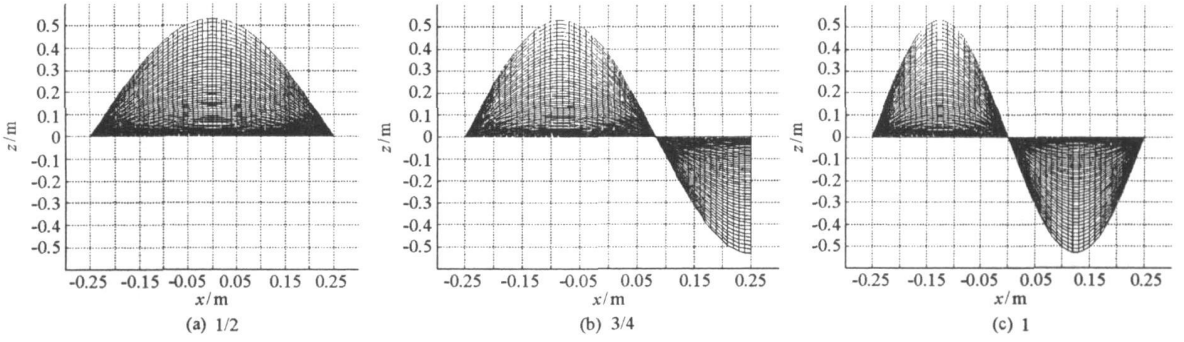


图 5 推进波数量

Fig. 5 Propulsive wave number

### 3 鳐鱼胸鳍的运动学

#### 3.1 胸鳍运动学方程

综合以上分析, 我们可以对鳐鱼胸鳍的运动波形进行简化。由于胸鳍展向波幅包络线表现为二次曲线(图 6<sup>[12]</sup>), 并假定弦向波幅为等幅变化, 则鳐鱼的胸鳍运动学方程可以表示为

$$h(x, y, t) = (c_1 y + c_2 y^2) \sin(\omega t - kx)$$

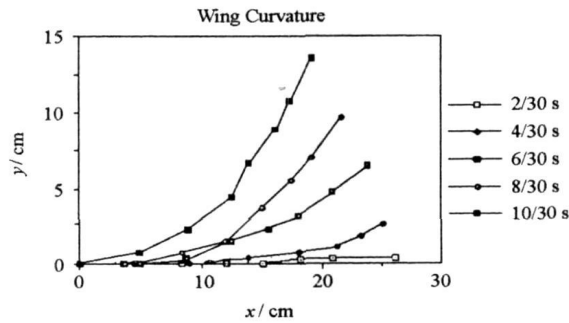


图 6 胸鳍展向位移时间历程(1/4 周期)

Fig. 6 Displacement in pectoral fin span direction dependent time (one quarter of a period)

其中,  $c_1, c_2$  为包络线系数, 其数值与胸鳍扇动方式等因素有关。通过控制参数  $c_1$  和  $c_2$  的大小, 可以控制展向波幅分布。鳐科和魟科的胸鳍运动波形见图 7。

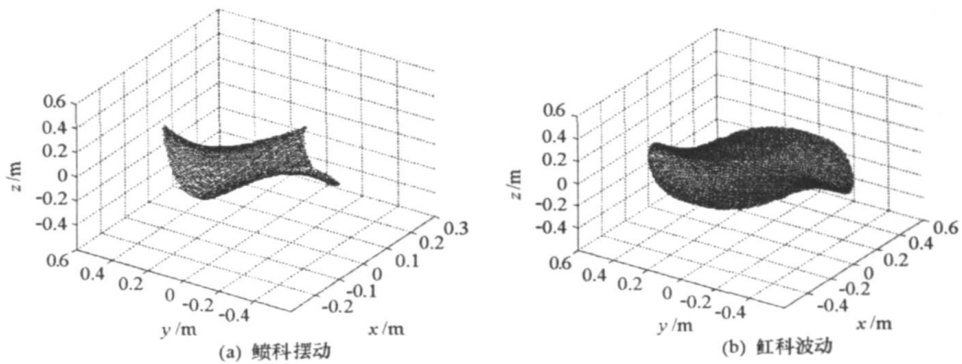


图 7 运动波形

Fig. 7 Propulsive wave

### 3.2 有限元仿真

上述的模型没有考虑流体环境,反映的仅仅只是胸鳍的运动。实际上,鱼类在水中游动时,一方面受到水动力的作用而发生运动和变形,另一方面鱼体的变形改变了流体的物面边界条件,使得水动力发生变化。这种相互作用是周而复始的。如果要详细了解鱼类游动的细节,必须要考虑这种复杂的流固耦合作用。本文针对牛鼻鲛的有限元模型进行时空域上的离散,并在每个时间步上对拉格朗日域和欧拉域进行解耦,轮流进行求解。

假定有限元模型扑动周期为 0.2s,通过施加给左右胸鳍对称结点的强迫运动,使得两鳍的扑动对称,得出的模型仿真结果如图 8。将其与牛鼻鲛实测图形(图 9)比较可以看出,在一个周期中,鱼鳍的扑动规律基本上是一致的,即不仅胸鳍能够自由上下扑动,鱼鳍波还沿弦向有明显的相位延滞,可见仿真结果有效。

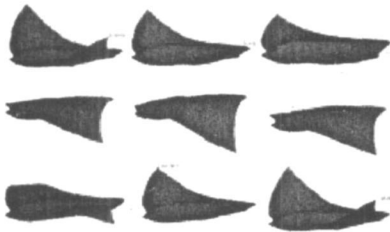


图 8 牛鼻鲛周期扑动仿真结果

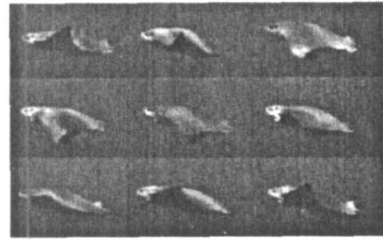


图 9 牛鼻鲛周期扑动实验结果

Fig. 8 Pectoral flapping simulation of a period in Cownose Ray

Fig. 9 Pectoral flapping of a period in Cownose Ray

## 4 结论

- (1) 探讨了物理参数(胸鳍形状)和运动参数(弦向波幅、展向波幅和波长)对推进波波形的影响。
- (2) 通过实际验证两种典型鲛鱼胸鳍模式的运动学参数,简化并统一了鲛鱼的胸鳍模式运动学模型。
- (3) 利用牛鼻鲛的有限元模型,通过给定的运动方程,分析了胸鳍的运动规律,验证了鲛鱼胸鳍运动规律的有效性。

## 参考文献:

- [1] Webb P W. Form and Function in Fish Swimming[J]. Scientific American, 1984, 251(1): 72.
- [2] Michael, David M L, Davies J B C. Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999, 24: 237- 252.
- [3] Wilga P W, Lauder G V. Locomotion in Sturgeon: Function of the Pectoral Fins[J]. J. Exp. Biol, 1999, 202: 2413- 2432.
- [4] Wilga P W, Lauder G V. Three-dimensional Kinematics and Wake Structure of the Pectoral Fins During Locomotion in Leopard Sharks *Triakis Semisciata*[J]. J. Exp. Biol., 2000, 203:2261- 2278.
- [5] Wilga P W, Lauder G V. Functional Morphology of the Pectoral Fins in Bamboo Sharks, *Chiloscyllium Plagiosum*: Benthic Versus Pelagic Station Holding[J]. J. Morphol., 2001, 249:195- 209.
- [6] Wilga P W, Lauder G V. Function of the Heterocercal Tail in Sharks: Quantitative Wake Dynamics During Steady Horizontal Swimming and Vertical Maneuvering[J]. J. Exp. Biol., 2002, 205: 2365- 2374.
- [7] Eliot G D, Lauder G V. Experimental Hydrodynamics of Fish Locomotion: Functional Insights from Wake Visualization[C]// Integ. & Comp. Biol., 2002, 42: 243- 257.
- [8] Clark R P, Smits A J. Thrust Production and Wake Structure of a Batoid-inspired Oscillating Fin[J]. J. Fluid Mech., 2006, 562: 415- 429.
- [9] 程健宇. 水生动物游动的流体动力学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1988.
- [10] Breder C M, Edgerton H E. An Analysis of the Locomotion of the Sea-horse, *Hippocampus Hudsonius*, by Means of High-speed Cinematography [C]// Ann. NY Acad. Sci., 1942, 43: 145- 172.
- [11] Rosenberger L J. Pectoral Fin Locomotion in Batoid Fishes: Undulation Versus Oscillation[J]. The Journal of Experimental Biology, 2001, 204: 379- 394.
- [12] Heine C E. Mechanics of Flapping Fin Locomotion in the Cownose Ray, *Rhinoptera Bonasus* (Elasmobranchii: Myliobatidae) [D]. USA: Duke University, 1992.