

长背鳍波动推进游动研究*

王光明 胡天江 李 非 沈林成

(国防科技大学机电工程与自动化学院 长沙 410073)

摘要：以依靠长背鳍推进的“尼罗河魔鬼”为研究对象，对弓鳍目模式推进进行了研究。在“尼罗河魔鬼”巡航游动试验的基础上，通过对鱼体几何形态和柔性长背鳍波动的运动学分析，建立了“尼罗河魔鬼”长背鳍波动推进的简化运动学模型，并利用大摆幅伸长体理论分析了长背鳍波动推进的水动力学特性。计算表明：“尼罗河魔鬼”在 0.728 ~ 0.985 身长/s 的速度范围内，长背鳍波动推进的水动力学效率介于 81.664% ~ 86.420% 之间，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。

关键词：长背鳍 波动推进 运动学模型 水动力学效率

中图分类号：TP24

0 前言

受自然界鱼类卓越的水中游动和姿态控制能力的启发，仿鱼推进器研究已成为水下推进技术研究的热点。关于鱼类推进模式和推进机理的研究是新型仿鱼水下推进器的研究基础，早在 1926 年 BREDER 就对鱼类的推进模式进行了研究，WEBB^[1] 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/尾鳍推进模式和奇鳍/对鳍推进模式。参考文献[2]中根据鱼类产生推力的身体机构和运动类型，将身体与尾鳍波动模式又分为鳗鲡模式、亚鲛科模式、鲛科模式、鲟科模式/鲛科加月牙尾推进模式和箱鲀科模式，将奇鳍/对鳍推进模式又分为鳃科模式、弓鳍目模式、裸背鳗属鱼模式、鳞鲀科模式、隆头鱼科模式和鲀科模式，并对每一种模式作了详细描述。在鱼类推进机理与仿鱼推进器研究方面，目前，生物流体力学领域和仿生机器人领域中研究和仿生的对象多为身体/尾鳍推进模式鱼类，诸如金枪鱼、海豚、七鳃鳗等；由于受生物试验技术和非定常流体动力学理论的制约，关于奇鳍/对鳍推进模式鱼类的研究主要限于依靠胸鳍摆动推进的隆头鱼科模式，对依靠轻质柔软长鳍波动产生推进的弓鳍目模式(依靠长背鳍)和裸背鳗属鱼模式(依靠长臀鳍)的机理及应用研究尚未深入展开。

以依靠长背鳍推进的“尼罗河魔鬼”为研究对象，对弓鳍目模式推进进行了研究，在“尼罗河魔鬼”巡航游动试验的基础上，通过对鱼体几何形态和柔性长背鳍波动的运动学分析，建立了“尼罗河魔鬼”长背鳍波动推进的简化运动学模型，进而分

析了长背鳍波动推进的水动力学特性，结果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。

1 试验设备与方法

一条长为 27 cm(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(1.5 m × 0.5 m × 0.5 m)中进行拍摄，鱼缸中水温保持在 25℃，鱼缸底部铺上 1.0 cm × 1.0 cm 的透光坐标方格。与水平成 45° 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。

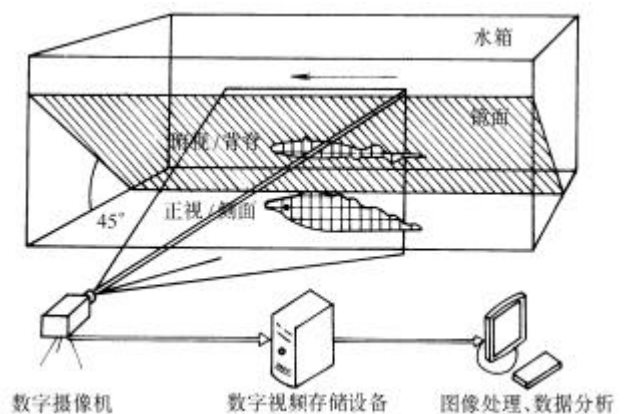


图 1 试验装置示意图

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 1 000 W 的高亮度石英灯。数字摄像机(Sony DCR - TRV30)的分辨率为 320 × 240，以每秒 30 帧的速率拍摄，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。图 2 为一组样

* 国家创新基金资助项目。20050102 收到初稿，20050925 收到修改稿

本匀速游动时等时间间隔图像序列图，试验测量结果见表。

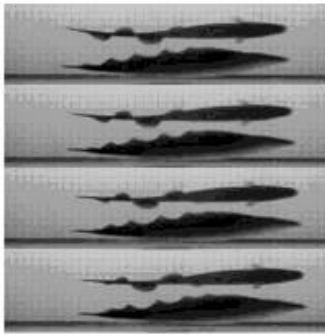


图2 匀速游动时等时间间隔图像序列图

2 简化的运动学模型

“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，属于典型的弓鳍目推进模式。此鱼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

表 样本游动长背鳍运动参数测量值及其推力、功率、效率估算值

样本游动速度 $u/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	特征流速 $v/(L \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 $Re/10^4$	特征波速 $c/(L \cdot \text{s}^{-1})$	量纲一的特 征波长 l	量纲一的特 征波幅 $A/10^{-2}$	平均推力 $\bar{F}/\mu\text{N}$	平均功率 $\bar{P}/\mu\text{W}$	水动力学效率 $\eta/\%$
9.66	0.728	0.983	1.051	0.278	5.552	9.63	2.318	81.664
21.23	0.786	1.061	1.117	0.309	5.674	9.99	2.540	83.498
21.63	0.801	1.081	1.139	0.330	5.685	9.18	2.341	84.823
22.26	0.824	1.113	1.186	0.341	5.946	9.42	2.915	79.287
23.80	0.882	1.190	1.202	0.361	6.851	11.69	2.380	86.420
26.59	0.985	1.329	1.202	0.359	6.961	9.39	3.030	82.409

(多达 200 多条)通过薄膜连接而成，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。

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，把鱼体简化为由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 3 所示，鱼体长为 L_b ，柔性长鳍长为 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断面圆锥顶角为 $2j$ 。

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(Oxy 平面内) $b(x)$ 为

$$b(x) = 2(L - x)\sin j \quad 0 \leq x \leq L \quad (1)$$

静止鳍面鳍条不与鱼脊柱垂直，而向鱼尾倾斜

与脊柱成 q 角(小于 90°)，鳍条长为 L_f ，则静止鳍面深度 $b_f = L_f \sin q$ 。

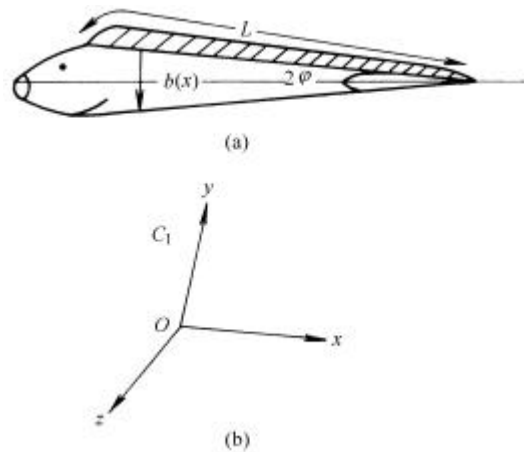


图3 “尼罗河魔鬼”结构简化模型示意图

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，波形关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 l ，则柔性长鳍在 z 方向上运动的侧向位移 $H(x, y, t)$ 为

$$H(x, y, t) = \frac{x \sin \mathbf{q} + y \cos \mathbf{q}}{b_0} h_0 \cos[k(x \cos \mathbf{q} - y \sin \mathbf{q}) - \omega t] \quad (2)$$

式中 $0 \leq x \leq L$

$0 \leq y \leq b_f$

$k = 2\pi / \lambda$

h_0 —— 波幅系数

ω —— 波的角频率

b_0 —— 鱼体的最大深度

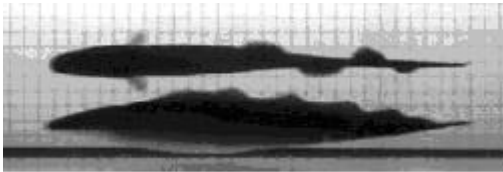


图 4 样本游动姿态与波形图

根据此模型，可以估计背鳍相对于坐标系的侧向运动速度和相对于流体的侧向运动速度，进一步通过水动力学分析，可以获得“尼罗河魔鬼”波动鳍推进产生的推力及推进效率。

3 波动鳍的水动力学分析

当前关于水生生物波动推进的水动力学模型有三种基本的建模方法，分别应用激盘/促动盘理论、抗力理论和反作用理论。促动盘理论是动量原理在流体动力学中的特殊应用，此方法的基本原理是把作用于流体上的推进机构简化为理想的装置(促动盘)，当流体流经它时压强会增加，通过对整个促动盘面积上压强增量的积分可获得流体对其产生的推力。此方法的主要优点在于推进机构(这里指长背鳍)被视为黑盒子，因此其详细的运动学特性不需要获得。若推进机构运动中能量损耗相对于尾迹的动能是重要的量时，则这种黑盒子的方法存在大的缺陷。

所谓抗力理论，它假设在不可压缩的牛顿流体中，任一小段机体与周围液体间的相互作用可分为抗力和粘性阻力，二者均和该段机体相对于液体的瞬时速度成正比。通过分析流体—机体相互作用的静力学平衡，加以考虑热力学和运动学的约束来分析推进机构的动力学。由于其忽略了流体运动的惯性力，因此仅适用于水生生物游动雷诺数很低(小于1)的游动。而采用波动鳍推进的游动，其雷诺数一般在相对高的数值 ($10^3 \sim 10^5$)，不适合应用此理论

进行水动力学分析。关于抗力理论的进一步讨论见参考文献[3]。

反作用理论强调水生生物在无粘流体游动中产生的惯性力，认为生物游动的推力主要产生于流体介质的反作用力。这种反作用力的大小取决于：机体相对于介质运动速度(加速度)的变化率。与机体表面发生相互作用介质质量——虚质量的变化率。在近半个世纪里，关于水生生物波动推进的反作用理论有了巨大发展，其中比较完善并应用于实践计算的理论主要有 Lighthill 的伸长体理论^[3-6]和吴耀祖等的波板理论^[7-10]。反作用理论主要应用于高雷诺数的生物游动分析。

“尼罗河魔鬼”长背鳍的细长比(鳍深/鳍长) $d < 0.05$ ，巡航游动时雷诺数 Re 介于 $10^3 \sim 5 \times 10^4$ 之间，鳍条的摆动波幅相对于鳍长是个小量(波幅/鳍长 = 1)，而相对鳍深则为同一量级的量，因此大摆幅伸长体理论是比较适合于分析“尼罗河魔鬼”长背鳍波动的水动力学理论。参考文献[11-12]也指出关于水生生物长鳍波动推进分析可以应用伸长体理论，吴耀祖于参考文献[13]中就应用伸长体理论分析长鳍波动推进的动力学问题作了概括性讨论。

采用大摆幅伸长体理论分析“尼罗河魔鬼”匀速游动的长鳍波动推进，作以下几个基本假设：流体(水)作为非粘性不可压缩的牛顿流体，流体运动服从连续方程。流体脱落于鳍面形成的尾迹中涡做无旋运动。鳍的长度为常量。垂直于脊椎方向鳍的任一薄片运动主要受相邻部分鳍面运动的影响。鳍面流体脱落仅发生于鳍条的最大摆速时刻。

为便于分析计算，取随鱼体运动的笛卡尔坐标系 $C_2 : \{x, y, t\}$ ，鱼体中心线为 x 轴， y 轴通过长鳍前缘顶端， xy 平面通过静止鳍面。在坐标系 C_2 中，则鱼体深度为 $b(x)$ ，鳍面深度为 $b_f(x)$ ，鳍面在 z 方向上的侧向位移为 $h(x, y, t)$ ，设鱼沿身体中心线以速度 u 向 x 轴负方向匀速游动，背鳍任一断面相对于坐标系的侧向运动速度为 $v(x, y, t)$ 相对于流体的侧向运动速度为 $w(x, y, t)$ ，则

$$v(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial t} h(x, y, t) \quad (3)$$

$$w(x, y, t) = Dh(x, y, t) \quad (4)$$

式中 D —— 微分算子，表示物质导数

$$D = \partial_t + u \cdot \nabla$$

$$\nabla = (\partial_x, \partial_y, 0)$$

(1) 匀速游动中任一单位长度鳍面传递给流体

的动量

$$M_a(x, y, t) = m(x, y) \cdot w(x, y, t) \quad (5)$$

式中 $m(x, y)$ ——单位长度鳍侧向游动的有效虚质量

$$m(x, y) = r\pi b \left[\frac{2y + b(x)}{4} \right]^2 \quad (6)$$

式中 r ——流体密度

b ——虚质量系数

b 是个量纲一参数，取决于鱼体断面形状及鳍深—波长比(H/l)，参考文献[5]详细讨论了 **b** 值的变化，对于具有单鳍的鱼其 **b** 值在0.8~1.2之间。

为了便于讨论，此处 **b** 值取1。

(2) 单位长度鳍面受到的瞬时侧向力

$$L_a(x, y, t) = -DM_a(x, y, t)$$

$$W : 0 \quad x \quad L \cos j \quad b(x) \quad y \quad L_f(x) \quad (7)$$

(3) 单位长度鳍面在单位周期 T 内运动，前进方向(速度 u 的方向)所受的平均推力

$$F_a(x, y, t) = \frac{1}{T} \int_0^T L_a(x, y, t) \frac{\partial}{\partial x} h(x, y, t) dt \quad (8)$$

(4) 尼罗河魔鬼在前进方向(速度 u 的方向)上受到的平均推力

$$\bar{F} = \iint_W \overline{F_a(x, y, t)} dx dy$$

$$W : 0 \quad x \quad L \cos j \quad b(x) \quad y \quad L_f(x) \quad (9)$$

(5) 柔性长背鳍侧向波动所作的平均功率(单位周期 T 内平均)

$$\bar{P}_T = - \iint_W \overline{L_a(x, y, t) \frac{\partial}{\partial t} h(x, y, t)} dx dy$$

$$W : 0 \quad x \quad L \cos j \quad b(x) \quad y \quad L_f(x) \quad (10)$$

式中 $\overline{L_a(x, y, t) \frac{\partial}{\partial t} h(x, y, t)}$ ——时间平均

(6) 波动鳍推进的水动力学效率

$$h = \frac{\bar{F}u}{\bar{P}_T} \quad (11)$$

4 结论

长背鳍的运动参数、根据大摆幅伸长体理论计算的鳍波动所产生的推力、所作的功及推进效率值如表所示。特征游速(游速/鳍长)在0.728~0.985L/s时，特征波长(背鳍的平均波长/鳍长)从0.278L随速度增大到0.359L，特征波速(波速/鳍长)从1.051L/s随速度增大到1.202L/s，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81.664%~86.420%之间，且随速度增大而增大。试

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。

由于试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，需要大量试验以获得较完整数据。关于长背鳍波动推进产生推力及推进效率的估算，由于大摆幅伸长体理论主要分析非稳态游动的线性效果，而长背鳍波动具有明显的非线性，因此，需要进一步改进大摆幅伸长体理论，研究三维的、大摆幅、灵活推力面理论，充分考虑非线性效果，以分析高雷诺数下水生生物游动，进而为新型水下仿生推进器的研究提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] WEBB P W. Form and function in fish swimming[J]. Scientific American, 1984, 251(1): 58-68.
- [2] 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.
- [3] LIGHTHILL M J. Mathematical biofluidynamics[M]. Philadelphia: SIAM, 1975.
- [4] LIGHTHILL M J. Note on the swimming of slender fish[J]. J. Fluid Mech., 1960, 9: 305-317.
- [5] LIGHTHILL M J. Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency[J]. J. Fluid Mech., 1970, 44: 265-301.
- [6] LIGHTHILL M J. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion[C]// Proceedings of Royal Society of London, 1971, B179: 125-138.
- [7] WU T Y. Swimming of a waving plate[J]. J. Fluid Mech., 1961, 10: 321-344.
- [8] WU T Y. Hydromechanics of swimming propulsion. Part 1. swimming of a two-dimensional flexible plate at variable forward speeds in an inviscid fluid[J]. J. Fluid Mech., 1971, 46: 337-355.
- [9] WU T Y. Hydromechanics of swimming propulsion. Part 3. swimming and optimum movements of slender fish with side fins[J]. J. Fluid Mech., 1971, 46: 545-568.
- [10] NEWMAN J N, WU T Y. A generalized slender-body theory for fish-like forms[J]. J. Fluid Mech., 1973, 57: 673-693.
- [11] BLAKE R W. Swimming in the electric eels and knifefishes[J]. Can. J. Zool., 1983, 61: 1432-1441.
- [12] LIGHTHILL M J, BLAKE R W. Biofluidynamics of balistiform and gymnotiform locomotion. Part 1. biological background and analysis by elongated body

theory[J]. J. Fluid. Mech. 1990, 212 : 183-207.

- [13] WU T Y. On theoretical modeling of aquatic and aerial animal locomotion[J]. Adv. Appl. Mech., 2001, 38 : 291-353.

RESEARCH ON SWIMMING BY UNDULATORY LONG DORSAL FIN PROPULSION

WANG Guangming HU Tianjiang

LI Fei SHEN Lincheng

(College of Mechatronics Engineering and
Automation, National University of Defense
Technology, Changsha 410073)

Abstract : The kinematics of steady forward swimming of *Gymnarchus niloticus* are described. The geometric features of the body and locomotive characteristic and parameters of the

flexible dorsal fin are discussed. A simplified kinematic model on locomotion of the undulatory long dorsal fin propulsion is based on the observation and experimental data. The hydromechanical performances of the undulatory long dorsal fin propeller of *Gymnarchus niloticus* are estimated applying the large-amplitude elongated-body theory. The hydromechanical efficiency of the undulatory long dorsal fin system ranged from 82.284% to 87.455% over a speed range of 0.728~0.985 lengths · s⁻¹. It is suggested that the undulatory long dorsal fin propulsion is an adaptation to swimming with high hydromechanical efficiency.

Key words : Dorsal fin Undulation

Kinematic model

Hydromechanical efficiency

作者简介:王光明,男,1974年出生,讲师,博士研究生。主要研究方向为仿生机器鱼研究。

E-mail : wangguangming@sina.com

(上接第 87 页)

Abstract : In order to improve high temperature heat pumps (HTHP), firstly it is presented that incomplete condensation of non-azeotropic working fluids is possible in condenser of HTHP, after theoretical analysis is carried out about heat transfer of non-azeotropic working fluids in condenser. Secondly, a experimental plan is designed to study the phenomenon, and many working conditions experiments (flow rate, temperature and frequency are changed) are done on a water-water heat pump unit. Finally, the incomplete condensation is found and

some relationships are presented between the phenomenon and parameters, those are helpful to improve control strategy of HTHP.

Key words : High temperature heat pump

Non-azeotropic working fluids

Incomplete condensation

Experimental research

作者简介:高攀,男,1981年出生,硕士研究生。主要从事制冷工质、系统及其智能调控方面的研究。

E-mail : sijieiren@163.com