



豚尾的摆动推进

程健宇 庄礼贤 童秉纲

(中国科技大学近代力学系, 合肥 230026)

收稿日期 1990 年 10 月 4 日

关键词 动物运动, 生物力学, 非定常运动

提要 采用非定常势流理论, 对高游速海洋动物所具有的新月形尾推进进行了分析, 着重考虑了推进力能量的频率特性, 并理论估算了一种海豚的实际游动状况。

一些位于食物链顶端的高速游动海洋动物,象金枪鱼、鲨鱼和鲸等,在鳗科推进模式的基础上,尾鳍演变成大展弦比的新月形,摆动段在整个体长中所占比例很小,尾部成为专门的推进器官。一般认为,经历不同进化途径的水生动物所呈现出的尾部形态趋同现象,主要是由外部流体的运动特性造成的^[3],这方面的研究还可参看文献[4,5]。本文将在对鳗鲡推进模式^[1]与?科推进模式^[2]研究的基础上,再对新月形尾推进作一专门分析,着重考察尾部的波状摆动频率和波长对推进性能的影响。作为例证,本文对一种海豚的实际游动状况进行了理论估算,得出了与测量值很接近的估算值。旨在对水生动物的尾形演化给出一种适当的物理解释;也在于探求高游速海洋生物游动的力学机理,以丰富人们对运动力学的认识。

1 理论分析

设鱼体以常速度 U 前进,采用摆幅作线性变化的波动柔板来模拟尾鳍的运动。在体轴系中^[1],波动板的运动方程可以写成:

$$h(x, t) = (A_1 + A_2 x e^{i\psi}) e^{i(\omega t - kx)} \quad (1)$$

其中, A_1, A_2, ψ 为线性波幅函数中的实常数; ω 为约化频率; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数(λ 为波长)。采用 $U \cdot L$ (L 为尾长) 和 U/L 为特征量将各物理量无量纲化,可用非定常涡环法来解绕波动板的势流速度场,进而可以算出波动板游动推进的各力能量,例如,维持波板运动所需的输入功率,摆动产生的推力等。它们的时间平均值分别记为 $C_E, G = C_{Ts} + C_{Tp}$, 这里, C_{Ts} 代表前缘吸力系数, C_{Tp} 为压差推力系数。定义吸力比:

$$\gamma_s = C_{Ts}/C_T \quad (2)$$

不难理解,过高的 γ_s 将促成前缘分离,从而导致游动性能变坏,因而不可能是实际采用的游动状态。

定义游动推进的流体力学推进效率为:

$$\eta = C_T/C_E \quad (3)$$

追求高效率是动物进化的目标之一。因此,我们在理论上也可以提出一个反问题:何种运动方式将使能耗率为最小?在(1)式限定的运动方式下,就是要找出波幅系数 A_1, A_2 和波相 ψ 的一个最佳组合,使得在推力给定的条件下(即 $C_T = C_{T0} = \text{常数}$),效率 η 达到最高。所得的最佳参数组合记作 $(0, 1)_{op}$ (0 次与 1 次幂的最佳组合)。分析表明,该最佳参数组合实际和 C_{T0} 无关,因此, C_T 值也可看作最佳运动方式下的推力,此时耗能最少。

2 月牙尾推进的频率特性

用图1所示的物形来代表月牙尾,计算它在最佳运动状态下的力能特性随频率的变化关系。

图2 分别给出了刚性平板($k=0$)与板长为 $1/4$ 波长的波动板($k = \pi/2$)的计算结果,这里选取了3种有代表性的平面形状(图2),由 γ_s 曲线可以看出,当 $k=0$ 时,在 ω 大于2以后,即有 $\gamma_s > 1$ 。这时,板的推力完全来自前缘吸力,作用在板面上压差却导致负推力(阻力)。由此可见,当 k 值接近于零,即波动特征不明显,尾面大体作平移和旋转摆动时,摆动频率不可过高(小于

1.5 为宜)。观测表明, 实际的月牙尾推进多属于这种情况。一旦行波特征加强, 波动板的 γ_s 就可远小于刚板, 这是由于波板前缘有弯曲, 可使前缘处局部来流大体顺着当地物面的切线方向, 从而有效地抑制了前缘奇性造成的分离, 成为一种可取的游动姿态。

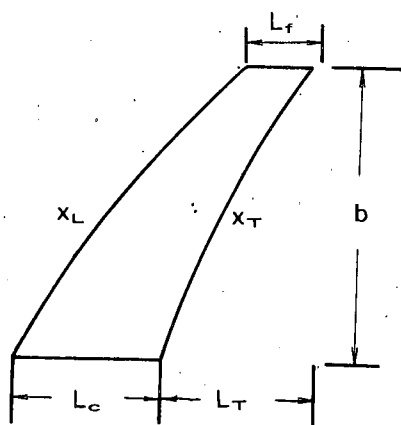


图1 半月月牙尾的平面形状
Fig.1 The semi-planar-form of lunate tail

据, 利用二维刚板的最佳运动理论, 讨论了豚尾的运动。Chopra 和Kambe^[7]也曾利用三维沉浮和俯仰刚板的计算结果讨论过海豚的阻力特性。下面, 将利用本文的理论分析方法对这种海豚的游动特性作一简单的估算。

据Wu^[4]的说明, 豚尾的形状接近三角形, 也具有一定的月牙尾特征。计算中要用到的原始观测数据以及相应的无量纲参数见表1^[4,7,8], 其中符号的意义可参看文献[2]。据判断, 海豚总推力的绝大部分将由尾部运动提供, 因而可以利用月牙尾最佳运动的分析方法对海豚的游动特性作近似估算。Chopra 和Kambe^[7]曾指出, 线性理论可以应用到摆幅比 $\varepsilon=h_m/L_c$ 不大于2的情况; 此处 $\varepsilon=1.25$, 故线性理论仍旧是适用的。

我们采用图3所示的物形, 即具有前凸曲前缘的新月形, 来代表豚尾的形状。取 $L_f=0.5$, $L_T=1$ ($\alpha=1.5$), $b=2$, 这时展弦比 $AR=4.8$, 比表中所列实际展弦比($AR=5.4$)要略低一些。

当 $\omega=0.68$ 时, 采用刚板沉浮与俯仰组合振动模型(即取 $k=0$), 并用本文最佳运动理论算出各力能量与运动参量(见图2), 结果列于表2。再采用波动板模型结合最佳运动分析, 作相应的理论计算, 将得出的力能量和运动参量对波速 $V_w=\omega/k$ 的依赖关系拟合合成如下的近似公式:

$$\begin{aligned}\eta &= (1 - 0.91)V_w^{-1} + 0.91 \\ C_T &= 0.1(1 - V_w^{-1}) \\ \gamma_s &= 0.42(1 - V_w^{-1})^2 \\ \frac{A_2}{A_1} &= 0.67(1 - V_w^{-2}) \\ \psi &= 55^\circ(V_w^{-2} - 1) + 270^\circ\end{aligned}\quad (4)$$

当鱼作常速运动时, 阻力系数由下式确定^[2]:

刚板与波动板的 C_T 与 η 曲线都表明, 推力随着频率增加而增加, 但效率却相反。与矩形板摆动的特点相似^[1], 对任意给定的频率, 波板的推进效率总高于刚板, 推力系数则相反。从图2 可看出, 两种展宽的频率特性相同, 并且幅值差别也很小。计算结果还表明, 随着频率增加, 物面形状的影响将加大, 同时 A_2/A_1 , 随 ω 非线性增加, ψ 非线性减少, 即摆幅沿尾长方向的变化加剧。

3 豚尾的力能特性

Lang 和Daybell^[6]将一种受过训练的海豚(Pacific Whitesided Dolphin 或*Leg-enorhynchus obliquidens*)放入水池, 并作了仔细的实验观测。后来, Wu^[4]根据这些观测数

$$C_D = \epsilon^2 \frac{S_T}{S_B} C_T \quad (5)$$

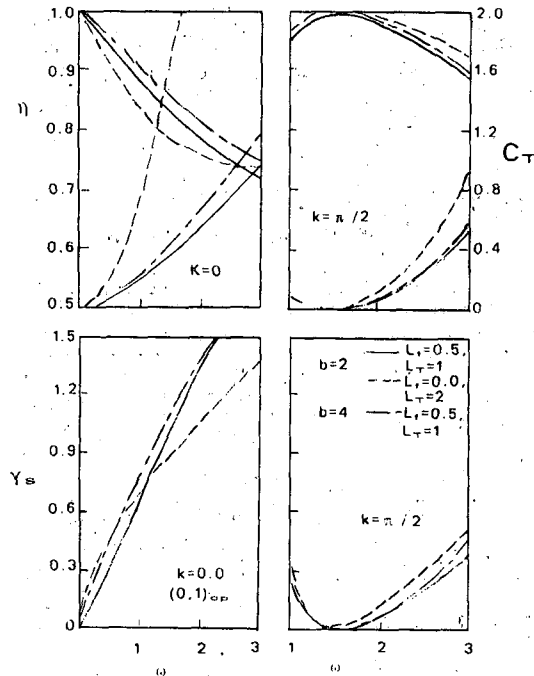


图2 最佳运动状态下3种尾形力能特性随频率的变化关系

Fig. 2 Optimum dynamic and energetic performances VS. frequencies for the three kinds of lunate tails

其中, S_T 与 S_B 分别为豚尾投影面积与鱼体总表面积。我们将 $V_w^{-1}=0$ 和 0.5 时的 C_D 值也列于表2中。Lang 和 Daybell 对减速滑行海豚的阻力进行了测量, 实测值约为 $C_D=0.0027$ 。由模型化理论可以估算 C_T , 再由(5)式可以推算出阻力系数 C_D 。由表2结果可见, Chopra 和 Kambe 的理论值比观测值高一个量级, 而根据本文最佳运动分析得到的阻力系数却与观测值量级一致。特别是 $V_w^{-1}=0.5$ 时的波动板理论值, 几乎与观测值达到相吻合的程度。当然, 由于实际的新月尾与鱼体连接处不存在前缘吸力, C_T 的理论估值会略偏高; 计算中取的展弦比 AR 又比实际观测值小, 使 C_T 估值略偏低。此外, 除了尾鳍, 鱼体其它部位也会提供少量推力。综合评判各种可能的误差, 估计理论估算的推力会有 $10 \sim 20\%$ 的误差。即使如此, 本文的理论估算值仍不失为一个可靠的近似结果。

将最佳运动参数 A_2/A_1 与 ψ 代入物面运动方程(1), 得到:

$$h/l_c = 1.25 \cos \left[0.68 \left(t - \frac{x}{V_w} \right) \right] - 0.84 \left(1 - \frac{1}{V_w^2} \right) x \cos \left[0.68 \left(t - \frac{x}{V_w} \right) + 90^\circ + 55^\circ \left(\frac{1}{V_w^2} - 1 \right) \right],$$

$$0 \leq x \leq 1, 0 \leq V_w^{-1} \leq 1 \quad (6)$$

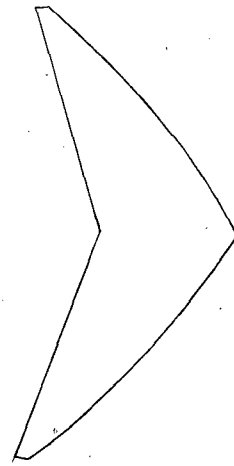


图3 豚尾的计算模型——具有前凸曲前缘和直后缘的半月尾叉

Fig.3 Computational model of the dolphin tail: semi-lunate tail with a curved convex leading-edge and a straight trailing-edge

Lighthill 等人^[3,7] 也曾用刚性板沉浮和俯仰振动模型研究过尾鳍的运动, 并讨论了最佳游动问题, 尾鳍运动表示为:

$$h = h_1 \cos \sigma t - \alpha(x - x_a) \cos(\sigma t + \alpha_{ph}) \quad (7)$$

其中, h_1 为沉浮幅值, α 为俯仰角幅值, X_a 为俯仰轴位置, α_{ph} 为两种振型的相位差。我们将 $k=0$ 时的最佳运动参数, 变换成(7)式的表达方式, 各参数的值也在表2中列出。

表1 原始观测数据及无量纲参数

Tab.1 Primitive surveying data and nondimensional parameter

观测值	无量纲参数
$U=5.18 \text{ m/s}$	$R_c=UI_B/\gamma = 1.04 \times 10^7$
$I_B=2.0 \text{ m}$	$R_c=UI_c/\gamma = 1.04 \times 10^6$
$I_c=0.2 \text{ m}$	$\epsilon = h_m/I_c=1.25$
$h_m=0.25 \text{ m}$	$\omega=\sigma I_c/U=0.68$
$b=0.26 \text{ m}$	
$S_T=0.049 \text{ m}^2$	$b/I_c=1.3$
$S_B=1.56 \text{ m}^2$	$AR=(2b)^2/S_T=5.5$
$f=2.8 \text{ Hz}$	$(\vartheta=U\alpha/\sigma h_m=0.78)$
$(a=0.66)$	
$(\alpha_{ph}=90^\circ)$	$[AR=4.8]$
$(X_a/I_c=1)$	$[I_T=I_c=1]$
	$[I_f/I_c=0.5]$
	$C_D=0.0027$

注: () 与 [] 分别为 Yates 与本文的假定值。

表2 各力能量与运动参量

Tab.2 Each energy and movement parameter

Chopra 和 Kambe 值	$C_T=0.23, \eta=0.92$
	$C_D=0.011$
本文值	$C_T=0.10, \eta=0.91, \gamma_s=0.42,$ $A_2/A_1=0.67, \varphi_2-\varphi_1=215^\circ$
$1/V_w=0$	$C_D=0.049, \alpha=0.84$ $X_a/I_c=1.22, \alpha_{ph}=35^\circ$ $\theta=0.98$
$1/V_w=0.5$	$C_T=0.05, \eta=0.96$ $\gamma_s=0.11, A_2/A_1=0.50$ $\varphi_2-\varphi_1=229^\circ, C_D=0.0025$

* 录自文献[8]。

参考文献

- [1] 程健宇, 庄礼贤, 童秉纲, 1988. 鱼类鳃模式推进的游动性能分析, 水动力学研究与进展 3 (3): 87 ~ 91.
- [2] 程健宇, 庄礼贤, 童秉纲, 1991. 鱼类推进性能的数值计算, 空气动力学学报 9 (1): 94 ~ 103.
- [3] Lighthill, M.J., 1969. Hydromechanics of aquatic animal propulsion—a survey, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1: 413-446.
- [4] Wu T. Y., 1971. Hydromechanics of swimming propulsion, part 1-3, *J. Fluid Mech.* 46: 337-568.
- [5] Ahmadi A.R. & Widnall, S. E., 1986. Energetics and optimum motion of oscillating lifting surfaces of finite span, *J. Fluid Mech.* 162: 261-282.
- [6] Lang T. G. & Daybell, D. A., 1963. Porpoise performance tests in a sea-water tank, NAVWEPS Rept. 8060, Notes TP 3 063.
- [7] Chopra M. G. & Kambe, T., 1977. Hydromechanics of lunatetail swimming propulsion Part 2. *J. Fluid Mech.* 79: 49-60.
- [8] Yates G. T., 1983. Hydrodynamics of body and caudal fin propulsion, in *Fish Biomechanics*, Webb, P. W. & Weihs, D., eds., Praeger Publishers, New York, 177-213.

UNDULATORY PROPULSION OF PORPOISE TAIL

Cheng Jianyu, Zhuang Lixian and Tong Binggang

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026*)

Key Word: Swimming, Biomechanics, Animal locomotion, Unsteady flow

Received: 4, Oct., 1990

Abstract

Based on the unsteady potential flow theory, the lunate-tail swimming propulsion of fast ocean animals is analysed in this paper. The dependence of propulsive energetic quantities upon undulation frequency is particularly considered, and performance estimation of a porpoise is given.