

‘8’字涡在摆动中作用之 探讨及实验研究

北京航空航天大学 吴靖** 高歌

【摘要】 通过对鱼类摆动推进的观测研究, 提出了摆动推进的波涡原理, 理论分析认为“8”字涡的存在与相互作用是提供推力的原因。通过对刚性摆动翼的有关实验, 得到启发性的有力证据。并发现“8”字涡具有储能特性。这一新型原理对分析鱼类游泳及设计高效推进器具有重大意义。

关键词: 摆动推进 波涡原理 分析与实验研究

1 前言

摆动推进是水生动物经过漫长的进化选择所形成的主要推进方式, 其低能耗高速度的机理至今对人类还是一个谜, 被称为 Cray 疑难。鱼类游泳的机动性和低噪声, 也是人们的研究目标, 并期望在舰船设计中有所借鉴。高速鱼类最主要的形体特征是: 体型呈比较宽厚的纺锤型, 尾部相对体长很小, 尾柄收缩, 尾鳍呈大展弦比新月型^[1]。由于高速鱼类主要通过摆动尾鳍获得推力, 故而尾鳍摆动过程的流体力学细节是揭开鱼类游泳奥秘的关键。

目前关于水生动物游动的主要理论简述如下。(1) 抗力理论: Taylor(1952) 对微生物和蠕虫作细长体流动分析, 认为其推进机理主要是靠粘性力作用^[2]。该理论适用于小雷诺数条件下整体身体作波状摆动的方式。(2) 细长体理论: Lighthill 采用空气动力学中的细长体理论对鳗模式进行了系统的研究^[3]。Lighthill 认为, 尾鳍往复打水, 产生与卡门涡街的涡量方向和排列位置相反的尾涡, 故而不是阻力, 恰是推力^[4]。Lighthill 在分析鱼尾摆动必然产生涡的基础上, 认为推力的产生来源于尾部涡环的脱落, 而新月形尾鳍特别容易使圆形涡环从后缘脱落, 从而将能量损失降到最小, 故推进效率最高^[3]。但实际上鱼尾摆动时所形成的新月形拱面与沙丘一样有着很强的驻涡能力^[5], 随着鱼的游走将涡环留在原地。(3) 二维波动板理论: Wu 于 70 年代首次提出, 并讨论了鱼类的最佳运动方式, 认为鱼体获得的推力即是由一系列小涡搓出来的^[6]。童秉纲教授等在此基础上发展了三维波板理论并进行了大量数值研究, 取得了很好的结果^[7, 8]。

随着对非定常运动、非线性问题研究的深入, 人们认识到鱼尾摆动实际上是充分利用非定常涡流的一种方式, 并进行了实验探讨^[9]。由于鱼尾的摆动轨迹近似于波动, 因而目前的研究都是以正弦波或变幅正弦波来模拟的, 也因此没有反映出鱼尾摆的非线性。

我们的工作试图从非线性波涡相互关系的角度出发, 提出对摆动推进流体力学机理的新认识, 并设计一种仿鱼尾型的刚性摆动翼, 其流动近似符合本文所提出的观点, 以期得到可为

理论所依据的数据,为揭开鱼类摆动之秘提供一点线索。

2 摆动推进的波涡原理

波涡相互作用是当代非定常、非线性流体力学的一个重要领域。波中可以有涡,涡中也可

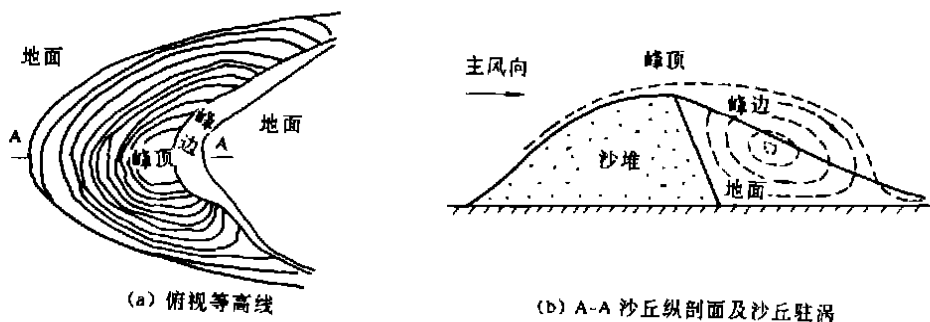


图 1 某新月型沙丘流动示意图

以有波^[10]。新月形拱面(如新月形沙丘、新月形尾鳍等),遵从最小功原理(变分原理),流体流经时耗功小、驻涡稳定性高、涡流阻力小并沿峰边形成一拱形驻涡涡管,且沙丘与驻涡合成一孤立波包^[11](如图 1)。孤立波是一种非线性波,一种稳定的储能结构。本文只给出孤立波与新月形沙丘外流动的形状相似性,至于它们的内在联系还需深入研究。



图 2 鱼类摆动推进时的波状尾迹示意图

鱼类往复摆动时将边界层中的涡脱泻出留在原地,形成尾涡(见图 2)。鱼尾在摆动过程中,在尾鳍凹面侧形成一诱导大涡,由于新月形拱面驻涡的强稳定性,此涡贴在尾鳍后缘不脱落;由于它是以相对鱼体的主流为支撑面,此大涡必在前方贴尾鳍处诱导出一小涡(呈拱形布局),如图 3 所示。当鱼尾从中心线向右摆动时(参见图 3(a)),主流及摆动共同诱导的大涡在



图 3 鱼尾摆动过程所形成的诱导涡对

不断增大,此涡诱导的小涡亦随之加强,摆动是产生涡量的原因。当鱼尾摆动到右极限位置时,主流沿孤立波包流过,大涡处于极限状态,其速度等于鱼体的泳速。当鱼尾向中心回摆时,给大涡一个向左向下的力,大涡速度减慢,能量受到消耗;而原来诱导的小涡受到加速转动的力,吸收能量,逐渐变大。由于上述两个原因,再加上流经鱼体左侧的水流的协同作用及前一个脱离涡的吸引,将原大涡渐渐脱离鱼尾。在达到中心线位置时,原小涡 B 直接卷到鱼尾的右侧成为新的初始大涡 A(参见图 3(b))。原大涡 A 完全脱离鱼体成尾迹,并与以前的脱离涡协调相处,

形成反卡门涡街。鱼尾继续向左摆动,翻卷过去的涡随摆动渐渐增大,并又诱导出一个小涡,重复上述过程。

下面简直探讨鱼尾在摆动过程中,对涡的变化对推进的作用。由于对涡呈“8”字形而将其形象地称为“8”字涡。在摆动过程中,从“8”字涡产生到大涡脱落之前,“8”字涡的左、右极限位置示意图如图 4 所示,AB 连线始终指向鱼体前进方向。

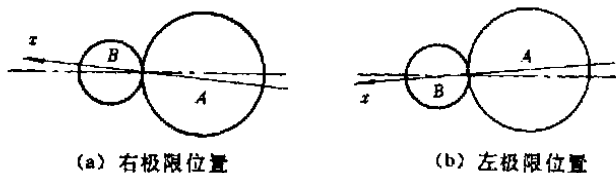


图 4 “8”字涡示意图

由于鱼尾对大涡 A 的作用主要是靠小涡 B 来传递的,因此“8”字涡 A 与 B 之间的相互关系十分重要。“8”字涡的相互作用力始终是沿 AB 直线,既然大涡 A 最终由于受到阻力而如水中 Stokes 波一样打一个转回到原地,因此不妨直观地认为鱼体受到一个向前的作用力。由于 AB 连线与前进方向基本一致,因此可以从中领略到鱼类摆动高效推进的奥秘了。至于推力的大小和效率的高低可能与鱼尾摆动的幅度和频率有主要关系,因为这两个因素直接影响到“8”字涡的大小和变化等情况。摆动是唯一能产生“8”字涡、维持“8”字涡(靠新月形尾鳍更有效)以及利用“8”字涡获得推力的自然界方式。实际中,鱼然只在起动和加速/转弯时大幅度高频率摆尾,以期获得高推力;而回游时小幅度低频率摆尾,以期获得高效率。

由上述观察及以往的研究和下述实验,得到初步结论:推力和效率与“8”字涡的时空变化率有关。大涡脱离与产生新的诱导小涡是同步进行的,且两者都是产生推力的协同因素;涡脱离后形成的波形尾迹亦影响着大涡的发展和结局,共同构成了一个复杂谐调的动力系统。

3 摆动翼实验研究

论证实验的关键是设计能产生并维持“8”字涡的摆动刚性叶片。我们设计一种仿鱼尾翼型进行实验研究,如图 5 所示。翼型为从一椭球壳体中截出的一新月型翼型内部中空。摆动时,以头部为支点,沿图示转动方向摆动一定角度。鱼类在一般情况下摆尾幅度不超过 30° 。翼型的型面为对扣双沙丘形,利用沙丘的新月形拱面与鱼尾在摆动过程中形成凸面的相似性,认为二者的驻涡特性是一样的。这样,翼型在摆动过程中,总有一个拱面起鱼尾面的作用,并且产生大小不同的一对涡(如图 6)。

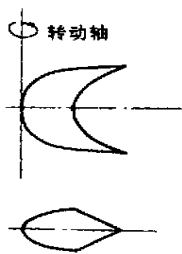


图 5 仿鱼尾翼型

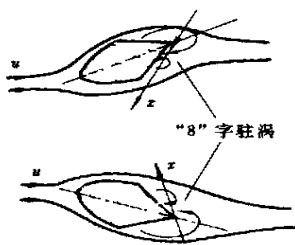


图 6 仿鱼尾型摆动过程中驻涡形态

实验中, 使叶片在流动的水中摆动, 并测出其产生推力的数值, 根据其消耗的功率, 近似评估其推进性能。摆动过程中可变频调幅。移动滑动车可测摆角为 10° 、 20° 、 30° 时的力能特性。测量结果见图 7~9。采用皮托管测量回流区位置, 见图 10。

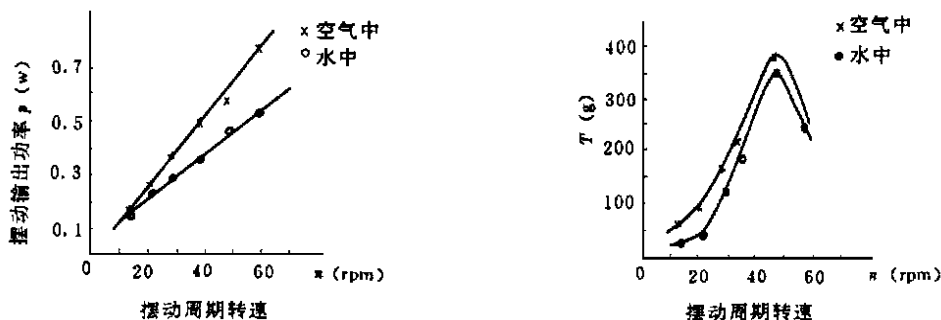


图 7 低速流($u = 0.05 \text{ m/s}$)时的力能特性

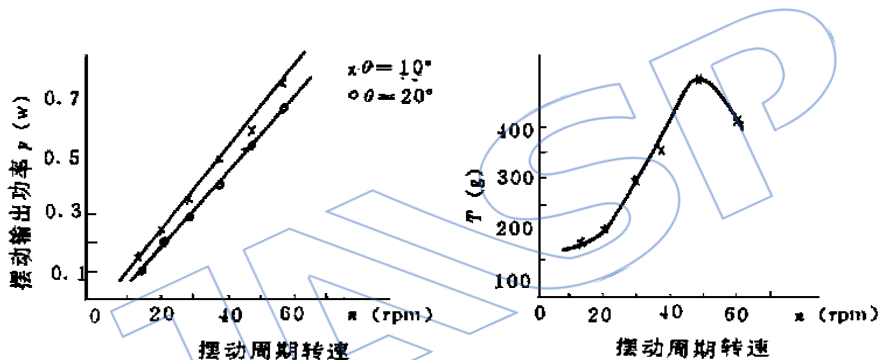


图 8 中速流($u = 0.24 \text{ m/s}$)时的力能特性

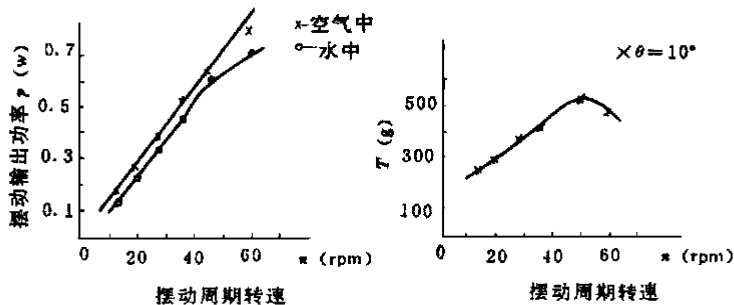


图 9 高速流($u = 0.4 \text{ m/s}$)时的力能特性

实验结论是: (1) 由于摆动过程中, 大涡与小涡涡心连线如图 6 是沿摆动中心线略偏向前方向, 故而能产生一定推力, 并在向中心线回摆过程中小涡吸收大涡能量, 对叶片及周围流体产生一 x 向力, 故而系统在水中耗能很低。(2) 由于摆动过程中能量在“8”字涡中转化并存储起来, 同时“8”字涡相互吸引、维持, 故而具有储能特性。(3) 在摆动频率低、摆角小时, 沿轴向分

力小,故而推力小。摆角大、频率大时,“8”字涡对时空的变化率大,推力亦大。(4)本实验的推力结果很小,不具实用价值,但可初步验证“8”字涡的动力特性。(5)与鱼类不同的是,本实验叶片型面能始终维持不脱落的“8”字涡,而非在脱离一个涡的同时产生另一个涡来得保证“8”字涡的不间断性。

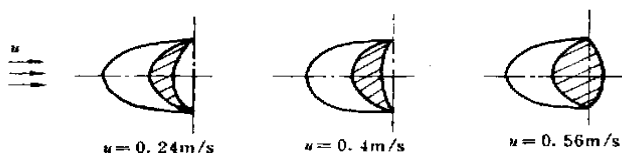


图 10 不同流速下回流区位置(阴影部分)

本实验系在清华大学水力学实验室完成,其间得到李永祥教师的大力协助。在理论研究过程中,得到宁晃教授的指导帮助。孙伟同学毕设期间协助实验。特此致谢!

参 考 文 献

- 1 孟庆闻等. 鱼类比较解剖学. 科学出版社, 1987
- 2 Taylor G I. Analysis of the Swimming of Long and Narrow Animals. Proc. Roy. Soc. (London) A214, 1952
- 3 Lighthill J. Hydromechanics of Aquatic Animal Propulsion—a Survey. Ann. Rev. Fluid Mechanics. 1, 1969
- 4 Lighthill J. Mathematical Biofluidynamics. SIAA, Philadelphia, 1975
- 5 高歌. 紊流旋涡稳定性的理论、计算、实验及应用研究: [博士论文]. 北京航空航天大学, 1985
- 6 Wu T Y. Hydromechanics of Swimming Propulsion. J. Fluid Mech. 46, 1971
- 7 童秉纲, 庄礼贤, 程健宇. 鱼类波状摆动推进的流体力学研究. 力学与实践, 1991, 13(3)
- 8 程健宇, 庄礼贤, 童秉纲. 新月形尾鳍推进的流体力学分析. 力学学报, 1992, 24(4)
- 9 张循如. 机械鱼试验. 国际航空, 1989, (3)
- 10 吴介之. 波涡相互作用研究的某些进展. 力学进展, 1991, 21(4)
- 11 高歌. 沙丘驻涡火焰稳定性的理论与实验研究: [硕士论文]. 北京航空航天大学, 1981
- 12 H. 兰姆. 理论流体动力学. 科学出版社, 1990

(责任编辑 魏星禄)

RESEARCH ON FUNCTION OF 8-SHAPED VORTEX IN OSCILLATORY PROPULSION

Wu Jing and Gao Ge

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A wave-vortex principle of oscillating propulsion is presented, which is based upon the observation and experimental study of fish's oscillating propulsion. The theoretical analysis shows, that the occurrence and interaction of 8-shaped vortex is the reason for creation of thrust. The experiments accomplished with oscillating stiff blades give a strong heuristic evidence. It is that the discovered 8-shaped vortex possesses behaviour of energy storage. This new principle is of great significance for analysing fish's swimming and designing high efficiency propeller.

PREDICTION OF PROPELLER PRESSURE DISTRIBUTION AND PERFORMANCE BY LIFTING SURFACE THEORY

Chen Zemin and Pan Jieyan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A numerical method is presented for prediction of propeller performance and pressure distribution on blade surface according to lifting surface theory. The lifting surface model consists of two layers of constant strength quadrilateral vortex - ring elements covering both surfaces of the blades. The velocity jump across vortex sheet is included in the computation of the pressure distribution. The effect of blade drag has been included in the calculation of propeller performance. Numerical results agree well with experimental data for the considered two propellers.

A TURBULENCE MODEL FOR FILM COOLING RECOVERY REGION

Jiang Tao, Liu Songling, Zhu Huiren

(Northwestern Polytechnical University)

ABSTRACT

It is observed that the normal $k-\epsilon$ turbulence model, which is very popular in computational fluid dynamics, is inapplicable to predicting the film cooling recovery region flow successfully. The reason might be the fact that the profiles of flow parameters are significantly different from those in normal boundary layer due to the blowing and the distance needed for flow returning to the normal boundary layer is too large. A new turbulence model based on Lam-Bremhorst low Reynolds number $k-\epsilon$ turbulence model has been proposed for prediction of the film cooling recovery region. It was found that the constant c_μ and c_1 in the original model should be modified to be functions of coordinates x and y , and the low Reynolds number functions f_μ , f_1 and f_2 should be varied with x and y too. The modified expressions feature that they should be approaching to nonblowing boundary layer when the distance from initial section becomes large enough. Three numerical examples demonstrate the advantages of this new model over the original one for the blowing ratio ranging from 0.4 to 1.0.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AN END-MODIFIED COMPRESSOR CASCADE

Wu Gouhua, Peng Zeyan, Yan Ming, Ren Liyin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A compressor end-modified cascade and its original cascade are compared experimentally to study the three-dimensional flow characteristics at the exit plane of