

文章编号: 1002-0446(2002)02-0107-04

水下仿生机器鱼的研究进展 I——鱼类推进机理*

梁建宏 王田苗 魏洪兴

(北京航空航天大学 机器人研究所 北京 100083)

摘要: 仿生机器鱼技术是近年来水下机器人领域研究的热点之一,它为研制高效、高机动性和低噪声的水下运载器提供了新的思路. 本文以鱼的脊椎曲线为研究对象,提出了一种新的鱼类推进机理——波动推进,分析了波动推进过程中的运动阻力. 通过鱼类游动观测实验和仿生机器鳗鱼的研制,验证了该理论的有效性.

关键词: 仿生机器鱼; 脊椎曲线; 波动推进

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF UNDERWATER ROBOFISH I- DEVELOPMENT OF A SMALL EXPERIMENTAL ROBOFISH

LIANG Jian-hong WANG Tian-miao WEI Hong-xing

(Robotic Institute of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing, 100083)

Abstract: The Bionic Robofish Technology is one of the hotspots in the underwater robotics research field in recent years. It provides a new train of thinking for people to develop the underwater vehicles with high efficiency, high maneuverability, and low noise. This article makes some research on the fish vertebral curve, brings forward a fish propulsion theory—undulate propulsion. And the drag during the fish's undulate propulsion is also analyzed. Through the observing experiments on real fish swimming and bionic robot eel developing, we prove the efficiency of this theory.

Keywords: robofish; vertebral curve; undulate propulsion

1 引言(Introduction)

高效、高机动性水下运载器是目前水下运载器设计领域的研究热点,它基于鱼在水中的游动特性及其身体结构分析. 由于鱼类的推进模式不同于常规的螺旋桨推进,所以近年来关于鱼类推进机理的研究引起了越来越多研究者的兴趣. 1970年 Lighthill 将空气动力学的二维机翼理论运用于尾鳍推进的研究,提出了用于分析鳐科推进模式的“细长体理论”^[1,2]. 1977年, M. G. Chopra 和 T. Kambe 又提出了一种可用于大摆幅、月牙形尾鳍推进的“二维抗力理论”,该理论是 1953年 Hancock 提出的“大摆幅抗力理论”与 1971年 Lighthill 提出的“大摆幅细长体理论”的补充^[3]. 考虑到鱼类游动的生物力学特

性和结构的动态特点,1984年 Hess 和 Videler 针对与身体长度相比其侧向振幅很小的鱼类提出了“薄体理论”^[4];假定鱼沿纵向弯曲刚度为常量. 1994年 Cheng 和 Blickhan 提出了“波动平板理论”^[5]. 1998年 Cheng 提出了“动态梁理论”. 近年来,麻省理工学院的 Triantfyllou 等人研究发现,在自行驱动鱼类体后部有射流形成,这些喷射的涡流在产生推力方面起着非常重要的作用^[6,7]. 根据“射流推进理论”,他们研制了“仿生金枪鱼”和“仿生梭鱼”.

鱼类行为学家的研究表明,大多数鱼类把身体当作推进器,身体左右摆动击水,利用其产生的反作用力使鱼体向前推进. 金枪鱼、旗鱼、鲨鱼游泳时身体摆动实际上只限于尾部;而鳗鲡、泥鳅、鳊鱼等,

* 基金项目:中国科学院机器人学开放研究实验室基金资助项目(项目编号:RL200011);国防基础科研项目(项目编号:J1300C1004).

收稿日期:2001-09-04

它们的尾鳍退化,其前进完全依赖身体的摆动.基于这种推进原理,我们提出了“波动推进理论”,试图从波动学的角度阐释鱼类的游动机理.我们把鱼体的脊椎抽象为几何曲线,称之为脊椎曲线,鱼体通过改变脊椎曲线直接控制身体周围的水流来产生推力.本文首先通过物理建模的方法得到了波动推进的速度算式,分析了波动推进过程中的运动阻力,然后基于泥鳅在水中的游动形态的观测实验,对其脊椎曲线进行了定量分析,最后根据“波动推进理论”,研制了一条仿生“机器鳗鱼”,得到了较好的效果.

2 波动推进理论 (Undulate propulsion theory)

波动推进理论主要以鱼的脊椎曲线为研究对象.鱼体之所以能够前进,是由于脊椎曲线带动它所包络的流体向后喷出,产生推力.我们认为鱼体在水中作波动运动,其游动形态类似一系列正弦波.

2.1 几何模型

如图1所示,假设脊椎曲线占一个波长 λ ,鱼体是面积为 $\lambda \times b$ 的带状物,其质量为 M .鱼体做正弦运动,其俯视图恰为一个波长的波形,且波速为 V ,频率为 f ,波幅为 A .

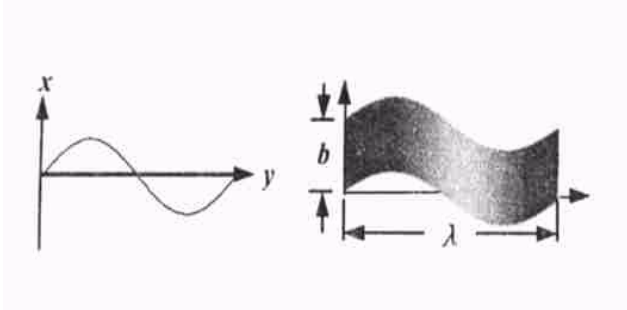


图1 鱼体脊椎曲线的几何模型

Fig. 1 Geometrical model for vertebral curve of fish body

2.2 波动推进速度算式的推导

以图1所示坐标系为参考系,则脊椎曲线包络的工作质质量为

$$\begin{aligned} M_1 &= 2\rho \int_0^{\lambda/2} A \sin(2\pi x/\lambda) dx \\ &= 2\rho \int_0^{\pi} A (\lambda/2\pi) \sin\theta d\theta \\ &= 2A b \lambda \rho / \pi \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ρ 为工作质密度.

工作质相对脊椎曲线的速度即波速 V .在启动瞬间,工作质将被脊椎曲线挤压推动而相对鱼体达到

波速 V ,以地为参考系,设躯体对地速度为 V_B ,工作质对地速度为 V_W ,由于鱼体在水中的阻力与速度呈递增关系,故在启动瞬间,鱼体受到的阻力可以忽略不计,因此应用动量守恒有

$$M_1 \times V_W = M_0 \times V_B \quad (2)$$

因为 $V_B + V_W = V$

则

$$V_B = M_1 V / (M_0 + M) \quad (3)$$

又有

$$V = f \lambda \quad (4)$$

将(1)、(4)式代入(3),得

$$V_B = \frac{f \lambda \times 2bA \lambda \rho}{M_0 \pi + 2bA \lambda \rho} \quad (5)$$

令 $Y = 2bA \lambda \rho / (M_0 \pi + 2bA \lambda \rho)$,则式(5)变为

$$V_B = Y f \lambda \quad (6)$$

Y 是一个小于1的系数,它表征了鱼类的几何特征、体重对速度的影响,我们称之为动力特征系数.

增大波长 λ 可获得较大的 Y 值.但是 λ 的增大将使脊椎曲线变得平缓,由于流体的粘滞作用,其中包络的流体将达不到波速.因此波动推进的几何假设,以及将液体当作固体处理的方法,使得它只适用于具有较大扭动幅度的鳗鱼类,并且这种鱼类身体的扭动将占到一个波长左右.波动推进假设是建立在对脊椎曲线包络的水的质量积分和动量定理之上,其积分的分离面取在 x 轴上.泥鳅游动时确实是使流体产生了分离,并且以漩涡的方式抛出尾部.漩涡的抛出速度和摆动频率一致,在一个周期内,尾部产生一对旋向相反的漩涡.

3 推进阻力分析 (Drag analysis)

如图2所示,鱼把躯体曲线内所包含的水向后推,以获取向前的动力.由于波形运动在产生向后的推动力的同时,还产生侧向的推动力.所以在波动中的躯体上的每一点处,推动力的合力总是指向鱼躯体的后方,并与前进的轴线方向成一定角度.

在理想状态下,我们把向前的推进力与向后的推动力看作是一对大小相等、方向相反的作用力与反作用力矢量.因此,推进力也可被分解为指向前进轴线方向的推进力(正推力)和与正推力成90度角的侧向力(侧推力).其中,侧推力作用在进行侧向位移的鱼体上,并通过脊椎把力矩传导到鱼的头部,产生使头部偏离航向的力.这个力被鱼大而坚硬的头部所产生的惯性阻力,及鱼有规律地缩放头部与身体主干联接处的筋腱的动作所抵消.另一方面,鱼躯

体上每一点处(除波峰处以外)所产生的正推力合成为一个向前的力. 它使鱼克服了身体所受的阻力, 向前游动.

在水中, 鱼体受到三种阻力的作用. 一种是鱼体表面与水之间的摩擦阻力. 它受鱼体表面光滑程度的影响, 对于不同的速度而言, 它一般是恒定的. 第二种是由鱼的体积和形状决定的惯性阻力. 它的产生是由于鱼体波动过程中改变了身体周围的水的压力. 第三种是旋涡的诱导阻力. 因此, 我们不难推测: 若鱼体太瘦, 则摩擦阻力大, 因为体表面积相对于肌肉质量来说显得太大; 而若鱼体太肥厚, 则会因波动过程中需要推移大量的水而产生很大的惯性阻力. 此外, 动物学的研究也已表明, 游动速度最快的水生脊椎动物都具有共同的体型特征: 身体的最大宽度为其体长的四分之一, 因为这种体形能最大限度地降低惯性阻力. 这个结论被我们确定为机械鱼外形设计的基本原则.

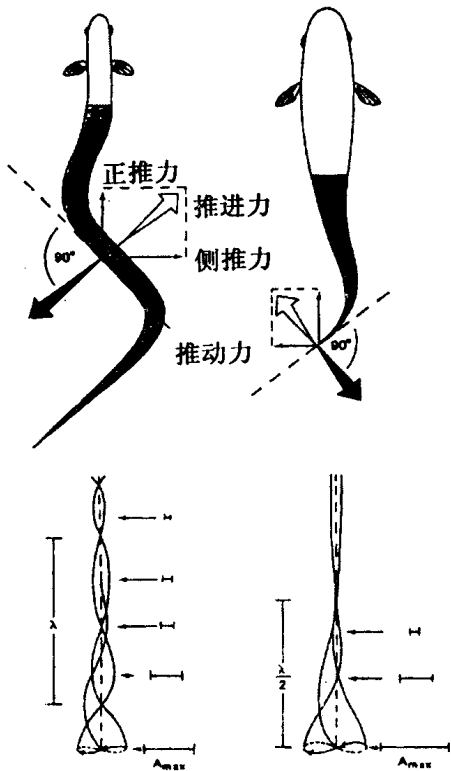


图 2 鱼体推进阻力分析

Fig. 2 Drag analysis of fish body

通过观察我们还注意到, 对于像泥鳅那样具有柔长体形的水生动物来说, 躯体所作的波形运动的波速是均匀一致, 而且往往快于游动的速度. 因为 $M_1 \times V_w = M_0 \times V_B$, 而鱼体的密度较大, 所以 M_1 往往小于 M_0 , 而 V_w 则大于 V_B . 波幅由于前文所述的阻力

的作用, 而从头到尾逐渐增大, 呈有阻尼的正弦波的形状(见图 2).

4 鱼类游动观测实验 (Observations of living fish)

4.1 实验装置

实验是在一个可控制水流速度与方向的玻璃水槽(6× 6cm)中进行的. 水槽上方安装的照明灯光、摄像机与水面成适当的角度. 水槽底部贴上了染色的坐标纸, 以便随后在计算机上进行脊椎曲线的视频采样和定量分析计算.

试验中, 泥鳅被置于 4cm 深的水中. 水流被控制在使游动的泥鳅相对于地面静止的流速上(大约 0.20m/s). 这时, 流动的水面会随泥鳅躯体的扭摆而产生扰动, 从而破坏了光线原来在水面的反射角度和强度, 产生了光影. 这一系列的变化被摄像机实时地拍摄下来, 并被输入计算机视频采样系统进行分析.

4.2 实验结果分析

泥鳅游动形态的视频采样照片如图 3 所示. 通过记录并分析图像中泥鳅的游动形态, 我们可以捕捉到波动推进的各项细节数据. 分析方法如下.

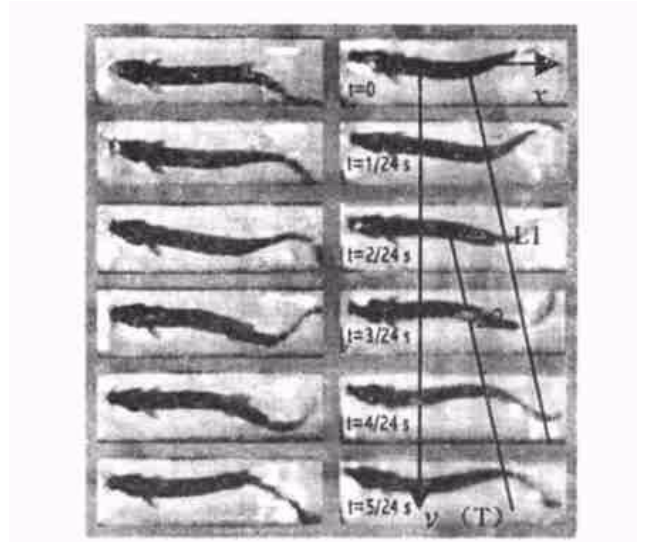


图 3 泥鳅游动的视频采样照片

Fig. 3 Video sampling photograph for loach

(1)坐标系的建立: 如图 3, 在并排的两列图片中, 从左上至右下依次是连续二分之一秒内泥鳅游动的实际情况. 选取泥鳅胸鳍以后基本不动的脊椎部位为坐标原点, 此点以右的脊椎有扭动. 头部不动的脊椎方向既泥鳅的前进速度方向, 取其反方向为“x”轴方向, 它的垂直方向为“y”方向. 从上到下, 它同时是间隔 1/24 秒的时间(T)坐标.

(2) 波速与游动速度的确定: 图3右边的两条直线指出了连续的两个波峰产生和消亡的过程, 在“ $X - T$ ”坐标系内, 它们的斜率就是波速 V_w , 由测量得 $V_w = 0.28(\text{m/s})$. 游动速度由实际观测得 $V = 0.20(\text{m/s})$.

(3) 波长和频率的确定: 图3最下方并排的两张图片中, 脊椎扭动的形态基本相同, 说明泥鳅经过了一个周期的运动, 因此周期是 $1/4\text{s}$, 频率是 4Hz . 相邻两个波峰在“ X ”方向的距离是 3.5cm 左右, 故波长是 7cm .

由测量得到质量、摆幅、鱼体高度, 代入式(5), 得到理论速度为 0.23m/s , 所有数据如表1所示.

表1 泥鳅波动推进的身体参数

Table 1 Body coefficient parameter of undulate propulsion for loach

泥鳅身体参数		各符号的生物意义
$f(\text{Hz})$	4	鱼体扭动频率
$\lambda(\text{m})$	0.07	鱼体游动时的波长
$b(\text{m})$	0.015	鱼体高度
$A(\text{m})$	0.015	摆幅
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	1000	水的密度
$M_0(\text{kg})$	0.015	鱼体质量
$V_B(\text{m/s})$	0.23	理论速度
$V'_B(\text{m/s})$	0.20	实测速度

从实验中观察到, 泥鳅在游动中基本不改变扭动的幅度, 但是在原点附近, 摆幅由零逐渐增大, 这一部分可以看作“起振”. 因此, 必须构造摆幅在 x 方向上的函数 $A(x)$, 它是一个增函数. 从实验中还发现, 泥鳅在游动中使用的波长也是基本不变的. 即 $L = K_L \lambda$, 且 $K_L \approx 0.75$

综合以上两点, 我们可以认为, 鳗鱼类使用波动推进的方式游泳, 它通过脊椎的周期扭动产生推力, 其运动方程描述如下

表3 仿生机器鳗鱼水中实验结果

Table 3 Aquatic experimental result of robot eel

波长(λ)	尾部长度/波长	最大速度	频率对速度的影响
2.4m	1/4	0.1 m/s	最大速度在 0.5Hz 取得, 继续提高频率速度反而降低, 2Hz 时在原地颤动, 完全失去推力.
1.2m	1/2	0.3 m/s	最大速度在 1Hz 取得, 继续提高频率速度无明显变化. 鱼头晃动剧烈.
0.8m	3/4	0.6 m/s	2Hz 时获得最大速度. 速度随频率的提高呈良好的线性关系, 头部前进平稳, 晃动较小.
0.6m	1	0.5 m/s	2Hz 时获得最大速度. 启动较快, 速度随频率提高而提高, 但是提高较慢.

$$Y = A(x) \sin(2\pi t/T + 2\pi x/\lambda) \quad (7)$$

$$x \in (0, k\lambda)$$

5 仿生鳗鱼的实验研究(Experimental research of robo-eel)

5.1 仿生机器鳗鱼结构

基于“波动推进理论”, 我们设计了一种仿生机器鳗鱼. 机器鱼实验装置外形如图4所示, 它有一个宽大的玻璃钢头部, 身体和尾部的蒙皮由防水的喷塑涤纶布料粘合而成. 尾段由6个关节组成, 蒙皮在关节连接处做成皱褶结构, 使弯曲的阻力最小. 每个关节里都有直流伺服电机驱动, 通过计算机编程和无线电遥控, 使得6个关节的运动符合波动规律.

仿生机器鳗鱼的基本技术参数如表2所示.

表2 仿生机器鳗鱼技术参数

Table 2 Technical parameter of robot eel

重 量	0.8 kg
几何参数	$0.8 \times 0.15 \times 0.05\text{m}^3$
尾部长度	0.6m
最大频率	2Hz(水中)
关 节 数	6
最大弯矩	$2.3\text{kg} \times \text{cm}$
工作电压	4.8V
驱动方式	直流电磁马达
控制方式	调频数字比例遥控

5.2 实验研究

机器鳗鱼游动实验的目的在于进一步验证波动推进原理的有效性, 测试不同摆幅、波长情况下的游动效果. 实验是在开阔水域进行的, 机器鳗鱼通过无线电遥控的方式完全自由地前进. 由于机电系统消耗的功率和扭动的频率成正比, 并且能够提供的最大功率是一定的, 因此游动的效果由以下参数评估: 最大速度, 效率, 频率和速度的线性关系.

6 结论(Conclusion)

本文研究了鱼类的运动机理,提出了一种新的“波动推进理论”,分析了波动推进的运动阻力,并从活鱼游动实验观测到了波动推进方式的客观存在.依据这些理论假设和数学模型,研制了一条仿生机器鳗鱼.实验表明,在一定的波长范围内,速度随频率的提高呈良好的线性关系.

参考文献 (References)

- 1 Lighthill M J. Aquatic Animal Propulsion of High Hydrodynamic Efficiency. *Journal of Fluids Mechanics*. 1970. *Mech*. 44: 265- 301
- 2 Lighthill M J. Large-amplitude Elongated-body Theory of Fish Locomotion. *Proc R Soc London* 1971. Ser A453:1763- 1770
- 3 M G Chopra, T Kambe. Hydromechanics of Lunate-Tail Swimming Propulsion, Part2. *Journal of Fluids Mechanics*. 1977, **79**

(1): 49- 69

- 4 J J Videler, F Hess. Fast Continuous Swimming of Two Pelagic Predators, Saith (*Piichius Virens*) and Macheral (*Scomber Scombrus*): Kinematic Analysis. *J Exp Biol*, 1984, **109**: 209- 228
- 5 J Y Cheng, R Blickhan. Note on the Calculation of Propeller Efficiency Using Elongated Body Theory. *J Exp Biol*, 1994, **192**: 169- 177
- 6 Triantafyllou M S, Barrett D S, Yue D K P. A New Paradigm of Propulsion and Maneuvering for Marine Vehicles. *Trans Soc Naval Architects Marine Eng*. 1996, **104**: 81- 100
- 7 Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An Efficient Swimming Machine. *Sci Am* 1995, **272**: 64- 70

作者简介:

梁建宏 (1977-), 男, 广西柳州人, 博士研究生. 研究领域: 微小型仿生机电系统.

(上接第 106 页)

7 功能测试(Performance test)

在完成整个系统的软硬件配置后,我们以运动实例检验了系统的性能和各项预期功能.首先我们针对直线和圆弧运动考察了机器人的运动性能和轨迹跟踪性能.从驱动轴码盘的读数看,实际码数对给定码数的跟踪是比较理想的,但由于制造和装配误差、车轮的滑动等造成的随机误差,所以不能让车体严格跟踪实际期望轨迹.

由于本系统是根据用户需要建成的,并没有克服上述缺点.实际上我们已经研制出一套视觉全局定位系统,用于机器人的全局位置跟踪,这样就把可以位置闭环从伺服层提高到决策层,很好地补偿了各种随机误差.另外,我们也研究并实验成功了用加速度传感器实现加速度闭环反馈控制,克服了车体由于受外界扰动产生的轻微抖动现象.

参考文献 (References)

- 1 韩建达, 宋亦旭等. 三自由度全方位移动机器人样机及其控制系统体系结构. *机器人*, 2000, 青岛
- 2 蒋新松等. *机器人学导论*. 辽宁科学技术出版社, 1993
- 3 付京逊等. *机器人学*. 中国科学技术出版社, 1989
- 4 徐国华, 蔡涛等. 自主式水下机械手关节速度伺服控制研究. *机器人*, 1999, **21**(1)
- 5 赵忆文. 移动机器人体系结构及多机器人协调规划. 博士毕业论文, 2000 年

作者简介:

田宇 (1977-), 男, 硕士研究生. 研究领域: 机器人学, 机器人控制.

吴镇炜 (1962-), 男, 副研究员. 研究领域: 机器人控制, 机器人离线编程技术.