

文章编号: 1674-5566(2013)06-0855-07

## 鲤鱼三维建模及流场受力数值计算

周澍欣, 胡庆松

(上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 将鱼体和鱼鳍整体作为研究对象进行流场中受力分析对于研究鱼类本身游动效率机理和仿生应用具有重要意义。以鲤鱼为研究对象, 通过对鱼体的形体模型数学化, 将特征数据导入 FLUENT 三维软件, 结合鲤鱼的运动与形体特征进行建模, 并将其模型置于来流方向平行于鱼体的流场中进行力学有限元数值计算。计算中物理场采用中心差分插值方法, 流动模型采用标准两方程模型, 结合具体参数进行了推导计算。通过计算发现 X 方向上所受阻力贡献度排名前三分别为鱼头部分的 45%、鱼主体部分的 29% 以及鱼胸鳍部分的 14%; 鱼体部分在 Y 方向上所受阻力贡献度排名前三分别为鱼胸鳍部分的 47%、鱼主体部分的 29% 以及头部的 14%; 总合力为  $(-7.88 \times 10^{-3}, 2.00 \times 10^{-3}, -5.87 \times 10^{-5})$  N。计算结果表明在设计中考虑升力时应主要着重于鱼的前鳍以及鱼体部分的设计, 考虑运行阻力时应着重于鱼头以及鱼体部分的设计。数值计算结果为仿生机器鱼的结构设计提供了一个良好的力学基础, 对于提高仿生机器鱼的运动控制水平具有较好的指导价值。

**研究亮点:** 选取所需鱼体特征进行采集并建模, 对所使用模型的数学表达式进行理论阐述。利用 FLUENT 流场分析软件对定常正向来流情况下鲤鱼鱼体受力进行了数值计算, 并对结果进行了分析, 对比不同部分对总合力的贡献度, 得出了在鲤鱼形机器鱼外形设计上考虑升力以及运行阻力时应着重考虑鱼头部分以及前鳍的设计。

**关键词:** 鲤鱼; 鱼鳍; 三维建模; 流场; 有限元

**中图分类号:** TP 242

**文献标志码:** A

仿鱼鳍驱动机器鱼相对于传统螺旋桨式推进器来说具有效率高、转弯半径小、运动控制灵活及运行噪音低等优点<sup>[1]</sup>, 20 世纪 90 年代以来逐渐成为国内外仿生学领域研究热点之一。目前美国、日本、英国和中国等多个研究机构已经研发成功仿生不同鱼种特征的机器鱼, 并已在水下考古、水环境监测等领域获得实际应用<sup>[2]</sup>。由于雷诺数的影响, 研制高效率的大型水下仿生机器鱼十分困难, 因此, 当前主要以与自然鱼类尺度相对应的小型仿生鱼研究为主。除了仿生机器鱼的本体开发、试验和应用外, 为加深对鱼体运动高效率的深层次理解, 提高仿生机器鱼的控制水平, 其运动控制理论方面国内外也已经获得了较多成果。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

析鳍科鱼类推进模式的“细长体理论”<sup>[3]</sup>, 进一步, LIGHTHILL 提出了“大摆幅细长体理论”<sup>[4]</sup>。为推进“大摆幅细长体理论”的细化应用, 提高与试验效果的匹配水平, CHOPRA 和 KAMBE 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”<sup>[5]</sup>。考虑到鱼类游动的生物力学特性和结构动态特点, VIDELER 和 HESS 针对侧向振幅与身体长度相比很小的鱼类提出了“薄体理论”<sup>[6]</sup>。CHANG 和 BLICKHAN 提出了“波动平板理论”<sup>[7]</sup>。近年来, 麻省理工学院的 TRIANTAFYLLOU 等人研究发现, 在自行驱动鱼类身体后部有射流形成, 这些喷射的涡流在产生推力方面起着非常重要的作用<sup>[8-9]</sup>。这些经典研究成果对当今的仿生机器鱼研究具有重要作用。

收稿日期: 2013-06-30 修回日期: 2013-09-10

基金项目: 上海市自然科学基金(11ZR1415600); 上海市教育委员会创新基金(12YZ133); 国家自然科学基金青年基金(51309150)

作者简介: 周澍欣(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械设计及理论。E-mail: 46590594@qq.com

通信作者: 胡庆松, E-mail: qshu@shou.edu.cn

随着计算机、相关 CFD (Computational Fluid Dynamics) 数值计算及试验能力的发展,仿生机器鱼理论研究的重点转移到鱼体周边流场的水动力分析和构造,向所仿生的目标鱼种产生的流场和动力性能靠拢。LIU 和 KAWACHI<sup>[10]</sup>采用三维不可压层流 Navier-Stokes 方程求解了大幅摆动翼的非定常水动力特性,并用该方法建立了蝌蚪的流场模型。SANDBERG 和 RAMAMURTI<sup>[11]</sup>用基于非结构化网格的有限元解法计算了金枪鱼尾鳍及摆动翼的非定常水动力性能。苏玉民和黄胜<sup>[12]</sup>用三维面元法计算分析了仿生金枪鱼刚性及柔性尾鳍的非定常水动力性能。杨亮<sup>[13]</sup>利用 FLUENT 软件的二次开发,采用动网格技术详细计算了具有金枪鱼尾鳍运动规律的机翼在粘性流场中的水动力性能,计算分析了三维尾鳍的非定常水动力性能。ZHANG<sup>[14]</sup>通过人工压缩法采用非结构化网格对 Navier-Stokes 方程进行求解,获得了三维水流下的仿生鱼尾摆动涡街仿真计算结果。BI 等<sup>[15]</sup>研究了仿生机器鱼胸鳍的强度对驱动力和驱动效率的影响,一定程度的翼展方向的灵活度将有助于提高驱动力,另外,雷诺数对驱动效率影响非常显著。将仿生机器鱼鳍的水动力性能向自然鱼种逼近有助于提升仿生水平,其不足在于单个(尾)鳍的周边流场和水动力性能的分析还不足以为具有多个鳍的仿生机器鱼的研究提供足够支撑,探索多个鱼鳍摆动下的受力计算方法具有重要意义。

鲤鱼具有典型的多鳍结构,其体形特点适合传感器等的布放。本文以鲤鱼鱼体特征为对象进行分析,将其体形特征进行数学化描述,将其用于机器鱼体的三维建模和网格化并将各个鱼鳍部分模型进行网格细化,最终在 ANSYS (Fluent 模块) 中进行来流为定常流时鱼体在给定流场下所呈现的力学特征计算,根据结果分析鱼体各部分对鱼体所提供的力的作用功能,并得出该鱼体在各条件下所受到的各方向上力的合力,为仿生机器鱼的优化设计提供支撑。

## 1 鲤鱼外形特征数值化

鱼类的外形虽多种多样,但一般可以分为头部、躯干和尾部 3 个部分,并因本研究主要涉及鱼体在流场中的力学特征,因此鱼鳍的特征需要重点描述<sup>[16]</sup>。鱼类种类繁多,鲤鱼鱼体的长宽

比、躯干厚度、尾部厚度等具有较好的比例,适宜进行内部结构设计以布放控制单元、驱动单元和传感器等功能部分,故以其为对象进行分析研究,并根据影响鱼体在流场中的力学特性的主要参数来选取采集鲤鱼形态特征并进行建模仿真。根据实际采集了鲤鱼的体长、体宽、体高、背鳍特征、尾鳍特征、臀鳍特征、胸鳍特征等,对鱼体的主体进行建模,并对鱼体鱼鳍的外形特征进行了详实的描述。选取这些特征是因为其对鱼体在流场中所呈现的力学分布影响比较大,而鱼鳍虽属体积较小,但因其鱼类游动中起着关键作用,因此也进行了重点描述。鱼体建模采集为直线型处在自然状态下的鲤鱼鱼体,鱼体部分特征如表 1 所示。

鱼鳍特征使用相应的比例长度对其各个特征参数进行采集,力求达到对特征形态建模的较高准确度。鳍外形以鱼鳍的基本形态与机械构造实现相结合进行建模,并对部分关键建模部分添加关节部分,以便相关的仿生分析工作,一个游动姿态下建模结果如图 1 所示。

表 1 某条鲤鱼鱼体部分主要特征描述

Tab. 1 Main features description of one carp body

特征名	特征值
鱼全长	13.12 cm
叉长	10.33 cm
鱼体宽最大处	2.17 cm
鱼尾长	3.30 cm
鱼躯干长	4.51 cm
尾柄高	1.10 cm
鱼体高最大处	3.11 cm
胸鳍水平展角	45 度(建模,非实测)
腹鳍面	水平(建模,非实测)
鱼胸鳍连接鱼体面	此面法向向量为(-1,1,0)

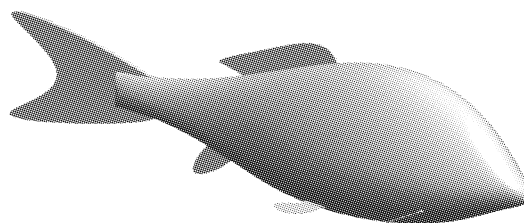


图 1 鱼体建模结果

Fig. 1 The results of fish body modeling

上述建模结果为流场中的鲤鱼鱼体受力分析打下了较好基础。鲤鱼鱼体属于复杂形体对

象,其受力情况采用常规方法难以实现,采用有限元法进行计算是合理选择之一。

## 2 鱼体模型的网格化

为采用有限元法进行受力分析,鲤鱼鱼体的合理网格化非常重要。在本研究中的网格划分采用的方法为有限体积法(Finite Volume Method, FVM),基本思路是:将计算区域划分为网格,使各网格点周围都有一个相互不重复的控制体积区域,并将其待解控制方程对每一个控制体积积分,从而得出一组离散方程。FVM方法中对于三维流体流动问题的控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S \quad (1)$$

式中: $\phi$  为通用变量; $\Gamma$  为广义扩散系数; $S$  为广义源项。对于上式的各物理量进行对有限体积  $\Delta V$  积分并进行中心差分插值,只考虑稳态问题,可得:

$$\sum_{i=1}^3 \left[ (\rho u_i)_e A_{ei} \frac{\phi_p + \phi_e}{2} - (\rho u_i)_w A_{wi} \frac{\phi_w + \phi_p}{2} \right] = \sum_{i=1}^3 \left[ \Gamma_e A_{ei} \left( \frac{\phi_p - \phi_e}{x_i \delta_e} \right) - \Gamma_w A_{wi} \left( \frac{\phi_p - \phi_w}{x_i \delta_w} \right) \right] + S \Delta V \quad (2)$$

式中: $u_i$  代表流速向量  $v$  的各方向的分量,即  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向分速度; $x_i$  代表的分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  3 个方向,即  $x_1$  为  $x$ 、 $x_2$  为  $y$ 、 $x_3$  为  $z$ ;下角标  $p$  代表该数值是节点  $P$  的值,下角标  $e$  代表节  $p$  点下游方向的节点值,下角标  $w$  代表节点上游  $p$  方向的值; $A_{ei}$  为  $p$  节点上游节点体积在  $i$  方向上的投影面积, $A_{wi}$  为  $p$  节点下游节点体积在  $i$  方向上的投影面积,其中  $i=1, 2, 3$  时分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向; $S = S_c + S_p \phi_p$ ,  $S_c$  是常数,  $S_p$  是随时间和物理量  $\phi$  变化的项,  $\phi_p$  为在点  $p$  的物理量  $\phi$  的值。本研究所需研究的问题主要特征为鱼体模型附近流场的速度,因此以  $\phi = u(25, 0, 0)$ ,  $u(50, 0, 0)$ ,  $u(75, 0, 0)$ ,  $u(100, 0, 0)$  cm/s 等系列化流场数据为背景进行了计算和比较分析。

对于需要进行流体力学仿真的主体来说,鱼体以及鱼体所处场的网格化方法以及划分精度对模拟仿真结果的正确性有着重要的影响。通常流体仿真建模的网格划分一般可将体网格分为四面体网格、六面体网格以及这两种网格的混合划分,因四面体网格的划分效率高,方便划分流场以及复杂形体模型等优点而选取使用四面体网格主体的划分方法,如图 2 所示,并保证划

分中各个网格的连续性,对主要描述部分的网格进行加密。以上工作对仿真结果的准确性提供了一定的保证,图 3 为网格划分结果。

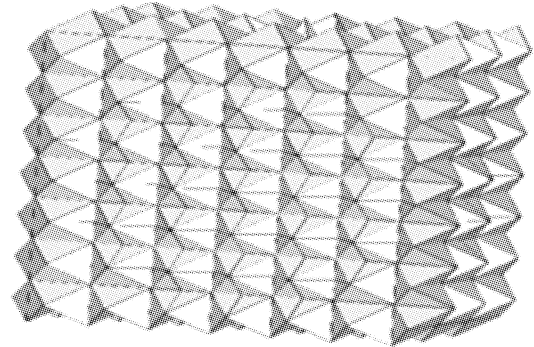


图 2 四面体网格划分六面体结果

Fig. 2 The results of tetrahedral meshing in splitting the hexahedron

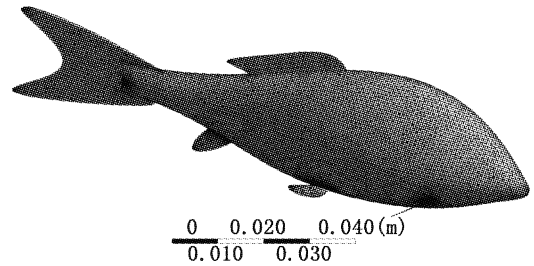


图 3 鱼体建模后的网格划分

Fig. 3 Meshing of fish body after modeling

## 3 鱼体模型在流场中的数值计算

对于鱼体在流场中的受力数值计算来说关键是给予一定初始流场条件,对于描述流场速度来说通常使用的是一个与鱼体长度相关的数值,由此可以非常直观的了解鱼体的长度与其力学特征的关系,类似于马赫数。而在自然条件下鲤鱼的直行游动速度为每秒两个鱼身,在鲤鱼中已属于较快速度,且能体现该鱼体在流场中的特性(相较于静水来说)。

由于鱼类的游动环境为自然状态下的清水中(如湖泊,河流),所以选择模型为不可压流。其模拟条件为三维基于压力的显式定常模拟条件,添加重力作用,求解方程选择标准的粘性  $k-\epsilon$  方程,模型为鱼体的直线型且鱼头朝向  $X$  轴的正方向,鱼背鳍相对于臀鳍处在  $Y$  轴的正方向,并在本问题中忽略热交换。模拟流场内的流体为液态水,因为研究鱼体在流场中的压力为主要

部分,所以在压力精度方面选择二阶迎风格式 (Second order upwind) 以提高求解后压力结果的精度。并在入口处设置垂直于入口平面的,速度为两个鱼身(25 cm/s)的来流。设置收敛标准为  $1 \times 10^{-4}$ , 并进行 500 步的迭代计算,残差收敛均匀趋势明显,约在 220 步时得到收敛,其中 y 轴以及 z 轴速度残差曲线大部分重合(即线 5 和线 6),如图 4 所示。

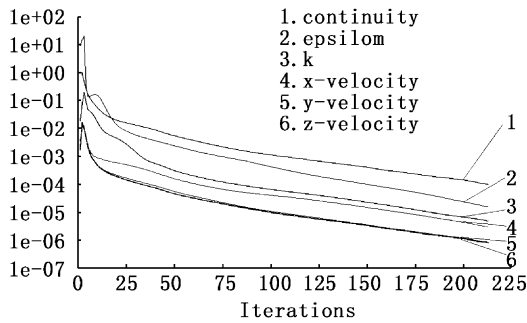


图 4 迭代计算中的各项残差收敛情况

Fig. 4 The convergence residuals of all subjects during the iteration

此处采用的  $k - \varepsilon$  为标准两方程模型(本研究中  $k$  为  $0.025 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,  $\varepsilon$  为  $0.075 \text{ m}^2/\text{s}^3$ ),其中  $k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + z'^2)$ , 为湍动能,其由来流速度各方向的脉动值的平方和组成。 $\varepsilon$  引入使得两方程进行求解更为方便,并有着一定的物理意义,其表达式为式(3),同时湍动粘度  $u_t$  可由  $k$  与  $\varepsilon$  表达出来,其表达式为式(4)即:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

$$u_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中:  $u'_i$  为某一方向速度的脉动值,  $x_k$  代表与  $u'_i$  对应方向的轴,  $C_u$  为经验常数。与以上  $u_t$ ,  $k$  和  $\varepsilon$  相对应的运输方程便可以列出如下形式:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} - \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中:  $G_k$  是由于平均速度梯度引起的湍动  $k$  的产生项,  $G_b$  是由于浮力引起的湍动能  $k$  的产生项,  $Y_M$  代表可压湍流中脉动扩张的贡献,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  和  $C_{3\varepsilon}$  为经验常数,  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别是  $k$  和  $\varepsilon$  的耗散率,  $S_k$  和  $S_\varepsilon$  为用户定义源项。

在本仿真计算中所主要关注的问题为仿生机器鱼体在来流中所呈现的压力分布情况。而从直观的鱼体压力云图中可以看出: 当来流为平行于直线鱼体的细长体且为两倍体长每秒时,其头部所受压力最大,体宽最大处呈现负压,鱼前侧鳍展开时其所提供的负压在全模型中最为明显,并且前鳍所提供负压的强度要比鱼体最宽部分提供的负压强度大得多,而尾鳍部分受到的却是来自两侧的正压(图 5、图 6)。

鱼体的不同部分在给定流场的情况下所起到的作用以及功能是不同的,对于鱼类直行游动时候前鳍的状态为收拢,而鱼类在上浮和下潜状态时,鱼的前鳍作用以及变化明显,可视作为前鳍是提供上浮与下潜功能的主要载体,因此从鱼体功能来说在实现仿生机器鱼上浮以及下潜的设计应主要考虑鱼体的前鳍,而在减小某部分运行阻力的设计时,毫无疑问地必须结合鱼体的曲面设计与鱼鳍的形态以及其展角进行考虑。因此,获得鱼体各部分所受力对合力的贡献度成为了设计鱼体的重中之重。

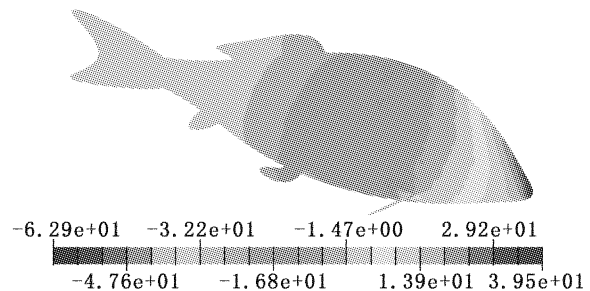


图 5 鱼体在所设流场中呈现的力学特征  
Fig. 5 Mechanical characteristics of fish in the flow field

仿真模拟时设定流场中来流速度两倍体长(25 cm/s)并且方向水平于鱼体(与尾鳍平行),加入受到重力影响,并设湍动能以及湍动耗散能分别为 0.025 以及 0.075,在此前提条件模拟下,截取其各个部分受力情况并对其贡献度进行计算,结果如表 2 所示。由于实际应用中需要考虑的环境流速会大于上述条件,因此改变来流速度

分别为 50 cm/s, 100 cm/s 进行计算, 计算结果如 表 3、4 所示。

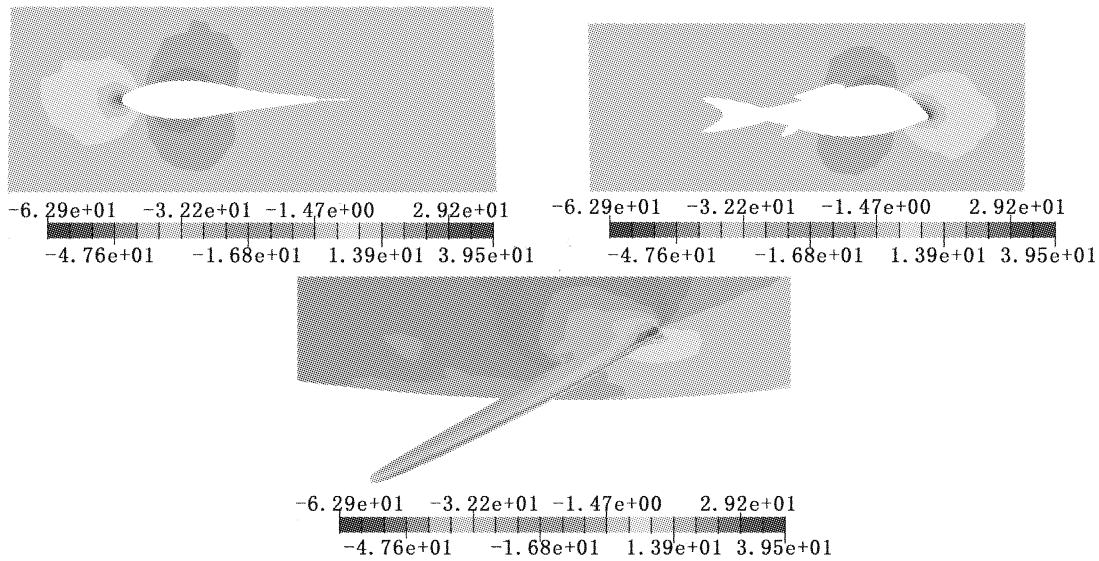


图 6 鱼体细节与特征面所呈现的力学特征

Fig. 6 Details of the fish body and mechanical-characteristics of special plane in flow field

表 2 鱼体在流场流速设为 25 cm/s 时各部分所受力的情况以及其部位作用力贡献度

Tab. 2 Force and contribution of each parts in the provided flow field at 25 cm/s

特征部分编号	特征部分名称	所得鱼体部分受到作用力(N)及其作用贡献度(%)		
		X 方向(1,0,0)	Y 方向(0,1,0)	作用力贡献度(x/y)
1	鱼主体部分	$-2.43 \times 10^{-3}$	$8.37 \times 10^{-4}$	29/29
2	鱼臀鳍部分	$-5.70 \times 10^{-5}$	$1.36 \times 10^{-5}$	1/0.5
3	鱼背鳍部分	$-1.37 \times 10^{-4}$	$-1.25 \times 10^{-5}$	2/0.5
4	鱼侧鳍部分	$-3.47 \times 10^{-4}$	$2.38 \times 10^{-4}$	4/8
5	鱼胸鳍部分	$-1.10 \times 10^{-3}$	$1.37 \times 10^{-3}$	14/47
6	鱼尾鳍部分	$-3.59 \times 10^{-4}$	$-3.87 \times 10^{-5}$	5/1
7	头部	$-3.54 \times 10^{-3}$	$-4.07 \times 10^{-4}$	45/14

表 3 鱼体在流场流速设为 50 cm/s 时各部分所受力的情况以及其部位作用力贡献度

Tab. 3 Force and contribution of each parts in the provided flow field of 50 cm/s

特征部分编号	特征部分名称	所得鱼体部分受到作用力(N)及其作用贡献度(%)		
		X 方向(1,0,0)	Y 方向(0,1,0)	作用力贡献度(x/y)
1	鱼主体部分	$-4.93 \times 10^{-3}$	$3.31 \times 10^{-3}$	21.6/28.1
2	鱼臀鳍部分	$-1.80 \times 10^{-4}$	$4.99 \times 10^{-5}$	0.8/0.6
3	鱼背鳍部分	$-4.38 \times 10^{-4}$	$-4.68 \times 10^{-5}$	1.9/0.6
4	鱼侧鳍部分	$-9.91 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-3}$	4.3/11.2
5	鱼胸鳍部分	$-4.30 \times 10^{-3}$	$5.57 \times 10^{-3}$	18.8/47.1
6	鱼尾鳍部分	$-1.11 \times 10^{-3}$	$-1.40 \times 10^{-4}$	4.9/1.3
7	头部	$-1.09 \times 10^{-2}$	$-1.37 \times 10^{-3}$	47.7/11.1

表 2 至表 4 中的各部分贡献度以  $C_i$  表示,  $i$  为特征部分编号, 分别代表鱼体建模的各个部分, 使其便于数据的处理。  $C_i$  分为  $x$  与  $y$  两个方向上的贡献度, 并以“ $x/y$ ”的形式列于表中。贡献度计算遵循以下公式(式 7):

$$C_i = \frac{|F_i|}{\sum_{i=1}^n |F_i|} \times 100\% \quad (7)$$

其中: 贡献度分为  $x$ 、 $y$  方向贡献度;  $i$  为鱼体部分的编号;  $F_i$  为第  $i$  部分所受到力的值(分为  $x$ 、 $y$  方向上的受力);  $n$  为鱼体所分成部分的总数。

表 4 鱼体在流场流速设为 100 cm/s 时各部分所受力的情况以及其部位作用力贡献度

Tab. 5 Force and contribution of each parts in the provided flow field of 100 cm/s

特征部分编号	特征部分名称	所得鱼体部分受到作用力(N) 以及其作用贡献度(%)		
		X 方向(1,0,0)	Y 方向(0,1,0)	作用力贡献度(x/y)
1	鱼主体部分	$-8.05 \times 10^{-3}$	$1.28 \times 10^{-2}$	11.7/27.5
2	鱼臀鳍部分	$-5.71 \times 10^{-4}$	$2.05 \times 10^{-4}$	0.8/0.4
3	鱼背鳍部分	$-1.28 \times 10^{-3}$	$-1.39 \times 10^{-4}$	1.9/0.3
4	鱼侧鳍部分	$-2.84 \times 10^{-3}$	$6.64 \times 10^{-3}$	4.1/14.2
5	鱼胸鳍部分	$-1.66 \times 10^{-2}$	$2.19 \times 10^{-2}$	24.2/46.7
6	鱼尾鳍部分	$-3.68 \times 10^{-3}$	$-4.89 \times 10^{-4}$	5.4/1.0
7	头部	$-3.56 \times 10^{-2}$	$-4.65 \times 10^{-3}$	51.9/9.9

由于本模型建立时将其侧鳍连接面定位面法向向量为 $(-1, 1, 0)$ 的面并给予了前鳍 45 度相对于侧鳍连接面定位面的夹角,因此本鱼体模型在所设流场中获得一定的升力。鱼体在给定流场中受到来流作用于鱼身整体所带来的合力为 $(-7.88 \times 10^{-3}, 2.00 \times 10^{-3}, 5.87 \times 10^{-5})$  N, 其方向为 $(-5, 1, 0)$ 。同时可从表中得出:鱼体部分在 X 方向上所受阻力(x 轴负方向)贡献度排名前三分别为鱼头部分的 45%、鱼主体的 29% 以及鱼胸鳍部分的 14%;鱼体部分在 Y 方向上所受阻力(y 轴正方向)贡献度排名前三分别为鱼胸鳍部分的 47%、鱼主体部分的 29% 以及头部的 14%。

对以上(约两倍体长来流流速, 25 cm/s) 条件研究的同时,研究改变来流流速为 50 cm/s, 100 cm/s 情况下的受力情况及其贡献度。可以直观看到:即使速度增大,其各部分的受力贡献度的改变较小。

可见鱼体在直线型、来流平行于鱼体的情况下,受到来流所提供的 X 方向的阻力主要由鱼头部分提供, Y 方向的升力主要由鱼胸鳍提供,鱼主体的流线型对鱼体在该情况下所受的阻力以及升力有着重要的影响,鱼体胸鳍部分体积较小但提供了大部分的升力,在设计仿真鱼体时对胸鳍的设计应重视,在减小运行阻力方面的设计应主要集中在鱼头部分以及鱼体部分进行。

#### 4 结论

本文通过采集鱼体特征参数,规范鱼体特征采集数据,对具体问题所需研究鱼体特征进行建模,并对鱼体以及细节部分进行细节刻画并网格加密,随之在所仿真结果中采集鱼体以及特征流场的力学特性,并得出本模型在特定流场下所受

的合力以及各部分的受力特征(向量形式)。本研究的建模过程不仅采集数据具有很强的鱼类形体代表性而且二次使用价值高,建模及网格化过程操作方便且满足要求,计算结果符合实际情况,以上工作为未来建模多样化、动态仿真、多鱼仿真、不同流场的仿真以及流场条件细化等工作提供了一个良好的基础,为相关流体力学仿真工作提供了一定的借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 张虹. 仿生机器鱼航行控制技术[D]. 上海:上海交通大学,2006.
- [2] 张志刚. 仿生机器鱼设计、控制与自主避障研[D]. 北京:中国科学院自动化研究所,2004.
- [3] LIGHTHILL M J. Aquatic Animal Propulsion of High Hydrodynamic Efficiency[J]. Journal of Fluids Mechanics, 1970, 44:265-301.
- [4] LIGHTHILL M J. Large Amplitude Elongated-body Theory of Fish Locomotion[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1971, 179:125-138.
- [5] CHOPRA M G, KAMBE T. Hydromechanics of Lunate-tail Swimming Propulsion[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1977, 79(1):49-69.
- [6] VIDELER J J, HESS F. Fast Continuous Swimming of Two Pelagic Predators, Saithe (Pollachius Virens) and Mackerel (Scomber Scombrus): A Kinematic Analysis[J]. Journal of Experimental Biology, 1984, 109:209-228.
- [7] CHANG J, BLICKHAN R. Note on the Calculation of Propeller Efficiency Using Elongated Body Theory [J]. Journal of Experimental Biology, 1994, 192:169-177.
- [8] TRIANTAFYLLOU M S, BARRETT D S, YUE D K P. A New Paradigm of Propulsion and Maneuvering for Marine Vehicles[J]. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1996, 104:81-100.
- [9] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G S. An efficient swimming machine[J]. Scientific American, 1995, 272(3): 64-70.
- [10] LIU H, KAWACHI K A. Numerical Study of Undulatory

- Swimming[J]. Journal of Computational Physics,1999,155: 223 - 247.
- [11] SANDBERG W, RAMAMURTI R. Unsteady Flow Computations for Oscillating Fins: a Status Report[J]. International Symposium on UUS technology,1999:182 - 194.
- [12] 苏玉民,黄胜. 仿鱼尾潜器推进系统的水动力分析[J]. 海洋工程,2002,20(2):54 - 59.
- [13] 杨亮. 粘性流场中摆动尾鳍的水动力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2005.
- [14] ZHANG Z, HASSAN O, MORGAN K. The simulation of 3D unsteady incompressible flows with moving boundaries on unstructured meshes[J]. Computers and Fluids,2008,37: 620 - 631.
- [15] BI S S, CAI Y R, ZHENG L C. Effect of Spanwise Flexibility on Propulsion Performance of a Flapping Hydrofoil at Low Reynolds Number[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2012,25(1):12 - 19.
- [16] 郭春钊. 基于鱼体肌肉模型的虚拟仿鱼机器人优化设计与仿真研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.

## Carp 3D-modeling and stress calculation in flow field

ZHOU Shu-xin, HU Qing-song

(College of Engineering Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** It is critical to take the fish body and fins as an integrated object to analyze the stress in the flow field which will be beneficial to conduct the research of its highly efficient swimming mechanism and bionic application. Taking carp as research objective, by the mathematical description of its body and importing the data to Fluent software to set up the model, the mechanics of the fish stressed by the flow field is conducted by the finite-element method. Physical field in the calculation adopts the central difference interpolation method. Flow equation chooses standard  $k-\varepsilon$  model, then integrated with the detail parameters, the calculation is conducted. The results of the simulation indicated that the top three parts of resistance devoted in the direction of the negative x-axis is the 45% of head part, 29% of the fish body and 14% of pectoral fins; and also top three parts of resistance devoted in the direction of the positive y-axis is the 47% of pectoral fins, 29% of fish body and 14% of head part. Total force vector is  $(-7.88 \times 10^{-3}, 2.00 \times 10^{-3}, -5.87 \times 10^{-5})$  N. The data above show that focus should concentrated on the fish-body and pectoral fins when designing the model mainly considering the lift force. The designing of fish body and head-part should be focused on when mainly consider the resistance force. The simulation result provides a sound mechanics foundation for the future research of controlling of the bionic robot fish.

**Key words:** carp; fins; 3D-modeling; flow field; finite-element method