

刚性胸鳍运动参数的优化

徐义刚, 万德成

(海洋工程国家重点实验室, 船舶海洋与建筑工程学院, 上海交通大学 上海 200240)

摘要: 刚性胸鳍的运动函数中包含有多个参数, 各个参数对胸鳍水动力的产生有很大的影响。本文结合不可压、非定常 N-S 方程求解器和 Hooks-Jeeves 优化方法, 研究静水情况下和有来流情况下, 基于升力推进模式的胸鳍运动方式的参数优化, 使胸鳍的运动能够产生最大平均推力及较小的平均升力, 结果表明 Hooks-Jeeves 方法能够有效处理胸鳍运动参数优化问题, 并给出了优化后的运动参数及对应的平均推力系数和平均升力系数。

关键词: 胸鳍; CFD; 优化; 基于升力推进模式

中图分类号: O352; TV131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0053(2012)02-210-11

The Optimization of Motion Parameters of Rigid Pectoral Fin

XU Yi-gang, WAN De-cheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There are several parameters in the kinematic model of rigid pectoral fin, and every parameter has great effect on the hydrodynamic forces generated by pectoral fin. Combining the incompressible, unsteady N-S equations solver and the Hooks-Jeeves optimization method, the parameters of the kinematic model for the lift-based swimming mode is optimized so that the motion of the pectoral fin generates the maximum average thrust and the minimum average lift force in the case of still water and uniform flow, respectively. The results show the Hooks-Jeeves optimization method can effectively deal with the parameters optimization of the pectoral fin motion, and the optimized motion parameters, the corresponding average thrust and average lift force are given.

Key words: pectoral fins; computational fluid mechanics; optimization; lift-based swimming mode

水下潜器有着非常广泛的应用, 包括海底油气勘探、深海科学考察等^[1~2]。但是, 由螺旋桨提供推力的水下潜器进行悬停运动和快速转弯是十分困难的, 并且也难以精确控制潜器的位置和姿态^[3]。然而许多鱼类的游动具有很高的机动性和高效性, 因此研究鱼类运动及其水动力学性能有助于仿生推进器的开发^[4~5]。这些仿生推进器可以用于水下潜器, 并且可以作为鱼类游动水动力学和鱼类运动控制研究的实验工具。

目前, 关于水下仿生潜器的研究主要集中在鱼类尾鳍的水动力学性能上, 然而关于鱼类胸鳍的运动方式及其水动力学性能方面的研究还比较少。Blake 采用了考虑非定常现象的叶元体理论计算了胸鳍的平均推力和推进效率^[6]。Lauder 等实验测量了胸鳍的运动方式, 并采用 DPIV 技术观察了翻车鱼和海鲫利用胸鳍前进的过程和胸鳍的尾流场, 分析了低速鱼和高速鱼尾流场的差别, 并通过观察胸鳍周围的流场分析了翻车鱼的受力情况, 说明了翻车鱼采用胸鳍转向的机理^[7~9]。Ramamurti 开发了不可压 N-S 方程求解

收稿日期: 2011-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(11072154; 50739004); 上海东方学者人才计划基金(2008007)

作者简介: 徐义刚(1987-), 男, 河南省平顶山人, 硕士研究生, 研究方向: 船舶与海洋工程计算流体力学。

通讯作者: 万德成, Email: dewan@sjtu.edu.cn

器,并结合非结构网格和网格自适应技术研究了尖嘴鱼胸鳍拍动的水动力学性能^[10]。Suzuki 结合重叠网格方法和非定常 N-S 方程求解器研究了机械胸鳍周围的不稳定流动^[11]。Kato and Liu 开发了安装有机械胸鳍的水下潜器,并采用实验和数值计算研究了机械胸鳍在水中、流中及波浪中两自由度运动和三自由度运动时的水动力学性能^[12~13]。日本东海大学研制出了安装有一对胸鳍的潜器,进行了胸鳍游动和姿态控制的实验研究。北京航空航天大学研制出仿蝠鲼胸鳍,并进行了静水推力测试试验,结果显示该仿生胸鳍能够通过正弦摆动运动产生推进力,且随着仿生胸鳍摆动频率和摆动幅度的增大,推进力明显增加^[14]。国防科技大学的杨少波等研制了仿牛鼻鲼胸鳍模式机器鱼,讨论了胸鳍摆动参数对机器鱼推进和机动的影晌作用,并且定量比较研究了胸鳍的时间非对称摆动及其对运动的影响规律^[15]。哈尔滨工程大学的王兆立、苏玉民等针对刚性胸鳍建立了二自由度、三自由度运动模型,采用实验和数值计算分析了刚性胸鳍在不同运动参数下的水动力学性能^[16]。

不考虑胸鳍的柔性变形,刚性胸鳍的运动包含三种基本的运动:前后方向划动,上下方向拍动和转动。刚性胸鳍的任何运动方式都可以由这三种基本运动构成。本文采用不可压、非定常 N-S 方程求解器计算胸鳍在不同运动方式下,胸鳍各个方向上产生的水动力,然后结合 Hooks-Jeeves 优化方法对胸鳍运动参数进行优化,使胸鳍能够产生最大平均推力及较小平均升力。Hooks-Jeeves 优化方法也称步长加速法或模式搜索法,它是最优化方法中处理不可微函数时常用的一种方法^[17]。本文基于升力推进模式,分别得到了刚性胸鳍在静水情况下和有来流情况下,产生最大推力及较小升力的运动参数,为后续研究中胸鳍运动参数的选定提供参考。

1 理论和方法

1.1 胸鳍模型和运动方式

箱鲀(Boxfish)主要依靠身体上的各种鳍在水中游动,其外形及其胸鳍的形状如图 1 所示。本文基于箱鲀胸鳍的实际形状建立了胸鳍模型,并且根据仿生推进器的实际需要,对胸鳍模型的尺寸按照一定的比例进行放大,放大后胸鳍模型的跨长和弦长分别为 100mm 和 97mm,并且其厚度近似为沿着跨长方向胸鳍模型的横截面为椭圆。胸鳍模型最终的形状和尺寸如图 2 所示。

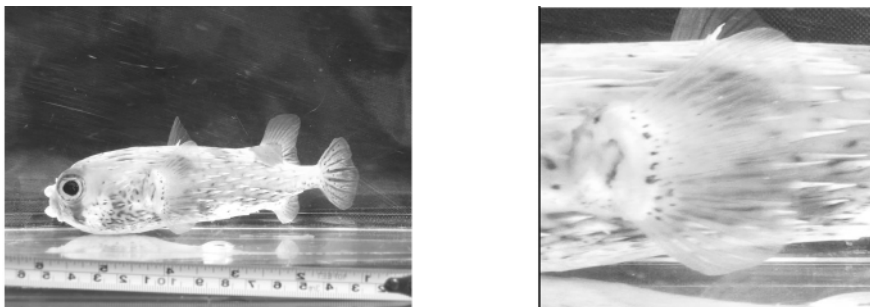


图 1 箱鲀(Boxfish)外形及其胸鳍形状

Fig. 1 Boxfish and its pectoral fin

刚性胸鳍的三种基本运动如图 3 所示。为了方便描述胸鳍运动,本文建立了固定在鱼体上的坐标系,其原点 O 在胸鳍的根部, X 轴由鱼尾指向鱼头, Z 轴由鱼背部指向腹部, Y 轴垂直于 $X-Z$ 平面。在鱼体坐标系下,胸鳍划动角 ϕ_R ,拍动角 ϕ_{FL} 和转动角 ϕ_{FE} 的定义如图 4 所示,其随时间的运动规律由正弦函数表示

$$\begin{aligned} \phi_R &= \phi_{R0} - \phi_{RA} \cos(\omega_{fin} \cdot t) \\ \phi_{FE} &= \phi_{FE0} - \phi_{FEA} \cos(\omega_{fin} \cdot t + \Delta\phi_{FE}) \\ \phi_{FL} &= -\phi_{FLA} \cos(\omega_{fin} \cdot t + \Delta\phi_{FL}) \end{aligned} \quad (1)$$

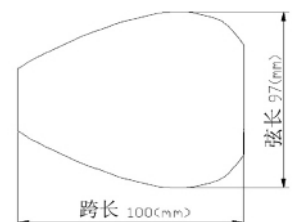


图 2 胸鳍模型的形状和尺寸
Fig. 2 The shape and size of pectoral fin

式(1)中, ω_{fin} 和 t 分别表示胸鳍运动的角速度和时间; ϕ_{R0} 和 ϕ_{FE0} 分别表示胸鳍划动角和转动角的平均值, 也表示这两种基本运动的平均位置; ϕ_{RA} 、 ϕ_{FEA} 和 ϕ_{FLA} 分别表示胸鳍划动角、转动角和拍动角的幅值, 各个角的幅值的绝对值越大, 说明其对应的运动越重要; $\Delta\phi_{FE}$ 和 $\Delta\phi_{FL}$ 分别表示胸鳍转动角和拍动角的相位。

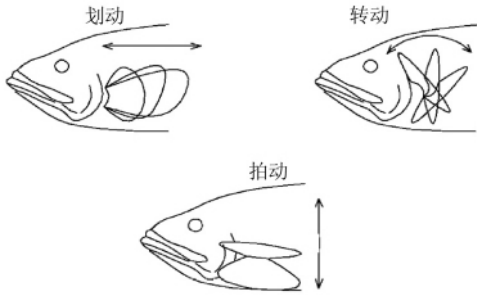


图 3 胸鳍的三种基本运动示意图

Fig. 3 Three basic motions of pectoral fin

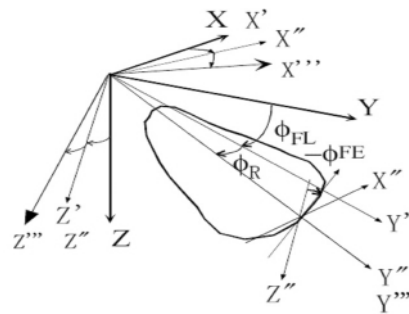


图 4 鱼体坐标系下胸鳍运动角的定义

Fig. 4 Three angles in body-fixed coordinate system

胸鳍摆动推进方式的运动模式主要分为两类: 基于阻力推进模式和基于升力推进模式。基于阻力推进模式下, 胸鳍通过前后划动产生推力。基于升力推进模式下, 胸鳍在几乎垂直于鱼体轴线的平面内上下拍动产生推力, 如图 5 所示。基于升力推进模式下, 胸鳍的运动主要包括拍动和划动, 因此胸鳍运动函数(公式(1))中的拍动角幅值 ϕ_{FLA} 和转动角幅值 ϕ_{FEA} 的绝对值明显大于划动角幅值 ϕ_{RA} 的绝对值。

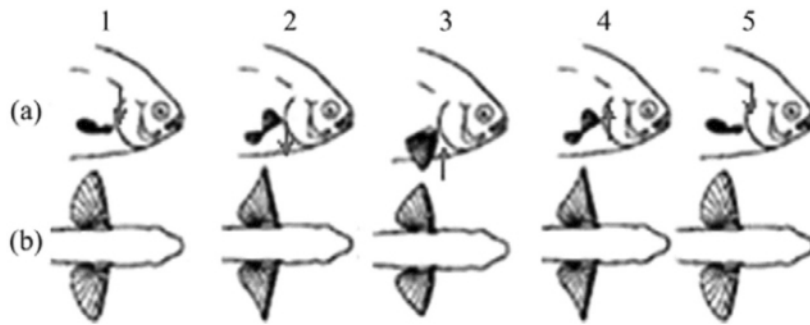


图 5 升力推进模式下胸鳍的运动

Fig. 5 The pectoral fin motion under lift-based swimming mode

1.2 网格生成

本文只研究单个胸鳍的运动, 在胸鳍周围生成了单块的结构化 O-O 型网格, 如图 6 所示。

由于胸鳍随时间运动, 所有网格点的位置也要随着时间更新, 其顺序如下所示^[11]

转动

$$x_{ijk}^n = x_{pivot} + \cos(\phi_{FE}^n)(x_{ijk}^0 - x_{pivot}) + \sin(\phi_{FE}^n)(z_{ijk}^0 - z_{pivot})$$

$$y_{ijk}^n = y_{ijk}^0$$

$$z_{ijk}^n = z_{pivot} - \sin(\phi_{FE}^n)(x_{ijk}^0 - x_{pivot}) + \cos(\phi_{FE}^n)(z_{ijk}^0 - z_{pivot})$$

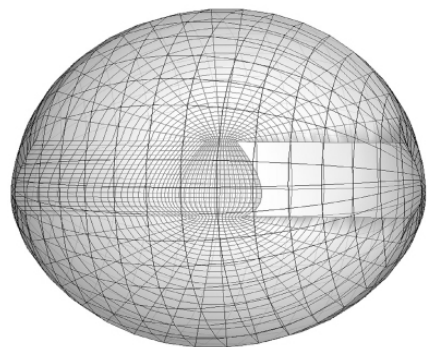


图 6 胸鳍周围的 O-O 型网格

Fig. 6 The O-O type of grid around pectoral fin

拍动

$$\begin{aligned}
 x_{ijk}^{n2} &= x_{ijk}^{n1} \\
 y_{ijk}^{n2} &= y_{pivot} + \cos(\phi_{FL}^n)(y_{ijk}^{n1} - y_{pivot}) - \sin(\phi_{FL}^n)(z_{ijk}^{n1} - z_{pivot}) \\
 z_{ijk}^{n2} &= z_{pivot} + \sin(\phi_{FL}^n)(y_{ijk}^{n1} - y_{pivot}) + \cos(\phi_{FL}^n)(z_{ijk}^{n1} - z_{pivot})
 \end{aligned}$$

划动

$$\begin{aligned}
 x_{ijk}^{n3} &= x_{pivot} + \cos(\phi_R^n)(x_{ijk}^{n2} - x_{pivot}) - \sin(\phi_R^n)(y_{ijk}^{n2} - y_{pivot}) \\
 y_{ijk}^{n3} &= y_{pivot} + \sin(\phi_R^n)(x_{ijk}^{n2} - x_{pivot}) + \cos(\phi_R^n)(y_{ijk}^{n2} - y_{pivot}) \\
 z_{ijk}^{n3} &= z_{ijk}^{n2}
 \end{aligned}$$

这里上标 0 和 n 表示第 0 和第 n 时间步,上标 1、2 和 3 分别表示转动,拍动和划动的先后顺序。下标 $i、j$ 和 k 表示结构化网格中各个网格点,下标 $pivot$ 表示运动的基点,即鱼体坐标系下的原点。

1.3 N-S 方程求解

控制方程是不可压、非定常 N-S 方程,本文假设流动为层流,不考虑湍流,其质量和动量的强守恒形式如下^[18~19]

$$\int_{V(t)} \left(\frac{\partial q}{\partial \tau} \right) dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_{V(t)} Q dV + \oint_{S(t)} (f - Qu_g) \cdot n dS = 0 \tag{2}$$

最后一项 $f = (F + F_v, G + G_v, H + H_v)$ 表示流过体单元表面的净通量。

$$\begin{aligned}
 q &= \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} u^2 + p \\ uv \\ uw \\ \beta u \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} vu \\ v^2 + p \\ vw \\ \beta v \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} wu \\ wv \\ w^2 + p \\ \beta w \end{bmatrix} \\
 F_v &= -\frac{1}{Re} \begin{bmatrix} 2u_x \\ u_y + v_x \\ u_z + w_x \\ 0 \end{bmatrix}, \quad G_v = -\frac{1}{Re} \begin{bmatrix} v_x + u_y \\ 2v_y \\ v_z + w_y \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H_v = -\frac{1}{Re} \begin{bmatrix} w_x + u_z \\ w_y + v_z \\ 2w_z \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

β 是人工可压缩因子, p 为压力, $u、v$ 和 w 为速度的三个分量。 $V(t)$ 为单元体积, $S(t)$ 为单元表面积, u_g 为网格的速度。 t 表示物理时间, τ 表示虚拟时间, Re 是雷诺数。 q 项和虚拟时间是为了在每一个时间步长内进行内部迭代,当速度散度为 0 而满足连续性方程时, q 项就会消失。所有的流体变量根据胸鳍弦长 L , 特征速度 U 和运动粘性系数 ν 进行无量纲化。无量纲参数雷诺数定义如下

$$Re = \frac{LU}{\nu}$$

基于通量分裂法,对流项采用三阶精度的 MUSCL 差分格式进行离散。基于有限体积法中的高斯积分,粘性项采用二阶中心差分格式离散。时间积分采用了基于欧拉隐式格式的近似因式分解法进行离散。

流域的外边界包含来流边界和出流边界,来流边界上的边界条件中速度分量 $(u, v, w) = (u_{bound}, v_{bound}, w_{bound})$, 压力为 0。出流边界上,速度和压力梯度都为 0,即 $\partial(u, v, w, p) / \partial n = 0$ 。在胸鳍表面,速度分量采用无滑移边界,即 $(u, v, w) = (u_{body}, v_{body}, w_{body})$, 为了包含胸鳍运动的加速度引起的动态效果,由动量方程得到物体表面的压力梯度, $\partial p / \partial n = -a_0 \cdot n$, a_0 为胸鳍表面的加速度。

1.4 水动力系数

根据上述的 N-S 方程、边界条件和离散格式,数值求解胸鳍的运动在各个方向上产生的水动力,水动

力系数 C_x 、 C_y 和 C_z 定义如下

$$\begin{aligned} C_x &= F_x / (0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S) \\ C_y &= F_y / (0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S) \\ C_z &= F_z / (0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S) \end{aligned} \quad (3)$$

F_x 、 F_y 和 F_z 分别表示胸鳍运动在 X 、 Y 和 Z 方向上产生的水动力。 U 是参考速度, S 为胸鳍的表面积。其中, C_x 为推力系数, C_y 为侧向力系数, C_z 为升力系数。

平均水动力系数为水动力系数在时间上的平均, 定义如下

$$\begin{aligned} C_x^* &= \frac{1}{T} \int_0^T C_x dt \\ C_y^* &= \frac{1}{T} \int_0^T C_y dt \\ C_z^* &= \frac{1}{T} \int_0^T C_z dt \end{aligned} \quad (4)$$

T 表示胸鳍运动的一个周期。

1.5 优化方法

如上所述, 胸鳍的运动包含几个参数, 分别是 ϕ_{R0} 、 ϕ_{RA} 、 ϕ_{FE0} 、 ϕ_{FEA} 、 $\Delta\phi_{FE}$ 、 ϕ_{FLA} 、 $\Delta\phi_{FL}$ 。优化的目标是得到胸鳍运动的最优参数, 使得胸鳍运动能够产生最大的平均推力和较小的平均升力。本文采用了 Hooke-Jeeves 方法, 它是一种非线性的优化方法, 非常适合处理不可微的优化问题。Hooke-Jeeves 方法主要由交替进行的“探测搜索”和“模式移动”组成。探测搜索的出发点称为“参考点”, 探测搜索的目的是在参考点的周围寻找比它更好的点, 这样的点称为“基点”。从基点出发, 沿参考点到基点的方向, 可能是寻找到更优的点的方向, 这样的方向称为“模式”。下一步就进行模式移动, 模式移动的起点是基点, 它的终点是新的参考点。于是探测搜索与模式移动就可以交替进行下去。如果在当前步长下已经不能找到更优的点, 就减小步长, 继续进行探测搜索和模式移动, 一直到步长减小到某个预定值, 就可以判断为结果收敛。Hooke-Jeeves 方法结合 N-S 方程求解器, 胸鳍运动参数的整个优化过程如下

1. 初始时刻, 假定一组胸鳍运动参数, 记为多维坐标点的形式, 即 $p^{init} = (\phi_{R0}, \phi_{RA}, \phi_{FE0}, \phi_{FEA}, \Delta\phi_{FE}, \phi_{FLA}, \Delta\phi_{FL})$ 。初始参考点 P^{ref} 等于 P^{init} , 表示为 $P^{ref} = P^{init}$ 。

2. 采用 N-S 方程求解器, 得到参考点对应的胸鳍运动参数下, 胸鳍运动产生的平均推力系数 C_x^{*ref} , 可以表示为 $C_x^{*ref} = Solver(P^{ref})$ 。

3. 首先把 P^{ref} 和 C_x^{*ref} 分别赋给试探点 P^{temp} 和试探点对应的平均推力 C_x^{*temp} , 表示为 $P^{temp} = P^{ref}$, $C_x^{*temp} = C_x^{*ref}$ 。

4. 然后试探点对应的第一个运动参数 ϕ_{R0} 增加一个大小为 $Step$ 的量, 表示为 $P^{temp} + (Step, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。由 N-S 方程求解器, 得到当前的胸鳍运动参数下胸鳍运动产生的平均推力系数 C_x^* , 可以表示为 $C_x^* = Solver(P^{temp} + (Step, 0, 0, 0, 0, 0, 0))$, 如果 $C_x^* > C_x^{*temp}$, 那么更新试探点及试探点对应的平均推力, 表示为 $P^{temp} = P^{temp} + (Step, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $C_x^{*temp} = C_x^*$, 然后进行第 5 步。否则, 试探点对应的第一个运动参数 ϕ_{R0} 减小一个大小为 $Step$ 的量, 表示为 $P^{temp} - (Step, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。由 N-S 方程求解器得到当前的胸鳍运动参数下胸鳍运动产生的平均推力系数 C_x^* , 可以表示为 $C_x^* = Solver(P^{temp} - (Step, 0, 0, 0, 0, 0, 0))$, 如果 $C_x^* > C_x^{*temp}$, 那么更新试探点及试探点对应的平均推力, 表示为 $P^{temp} = P^{temp} - (Step, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $C_x^{*temp} = C_x^*$, 否则, 试探点及试探点对应的平均推力保持不变。

5. 和第 4 步的过程类似, 可以依次增加和减少试探点对应的第 2 至第 7 个参数, 得到最后更新过的 P^{temp} 和 C_x^{*temp} 。然后基点 P^{base} 和基点对应的平均推力系数 C_x^{*base} 分别由最后更新的试探点及对应的推力系数赋值得到, 表示为 $P^{base} = P^{temp}$, $C_x^{*base} = C_x^{*temp}$ 。

6. 如果 $C_x^{*base} > C_x^{*ref}$, 那么新的参考点 P^{ref} 就等于基点加上由参考点到基点的方向, 表示为 $P^{ref} = 2 \times P^{base} - P^{ref}$, 步长 $Step$ 保持不变。否则, P^{ref} 保持不变, 步长更新为 $Step = de \times Step$, 其中 de 为缩放

因子,且 $0 < de < 1$ 。

7. 如果步长 $Step$ 大于某个值,即 $Step > Step_conver$, 返回到第 2 步, 否则表示优化过程已收敛, 输出基点对应的运动参数及平均推力系数, 优化过程结束。

在优化过程中, 如果胸鳍运动参数或平均升力系数超出了设定的范围, 则此运动参数对应的平均推力设为一个负数, 以排除此运动参数, 这样可以满足限制条件。

2 计算结果

2.1 网格收敛性验证

为了验证网格的收敛性, 本文采用了四套不同数目的网格分别计算了胸鳍的推力系数。四套网格均为 O-O 型结构化网格, 网格数依次为 $35 \times 17 \times 15$, $35 \times 17 \times 20$, $35 \times 17 \times 24$, $35 \times 17 \times 35$, 可以看出四套网格的网格数在 I, J 方向上相同, 在 K 方向逐渐增大。胸鳍运动频率 ω_{fin} 为 12 (周期 $T = \pi/6$), 雷诺数 Re 设为 2.63×10^4 , 计算时间步长 Δt 为 0.004s (每个周期大约有 131 时间步)。胸鳍运动参数如下

$$\begin{aligned} \phi_{R0} &= 0.0^\circ, \phi_{RA} = 5.0^\circ \\ \phi_{FE0} &= 90^\circ, \phi_{FEA} = 20^\circ, \Delta\phi_{FE} = 0^\circ \\ \phi_{FLA} &= -25^\circ, \Delta\phi_{FL} = 90^\circ \end{aligned} \quad (5)$$

计算结果如图 7 所示, 可以看出网格 3 和网格 4 计算结果基本相同, 表明网格 3 已经满足网格收敛性, 因此选用网格 3 进行胸鳍运动参数优化计算。

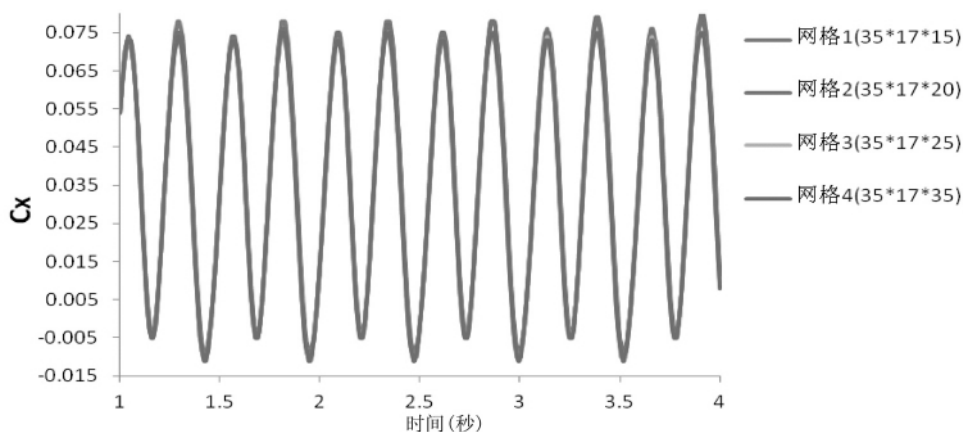


图 7 静水情况下平均推力系数的收敛过程

Fig. 7 Time variation of hydrodynamic force under 4 different grids

2.2 运动参数优化

本文计算了有来流和静水中两种情况下, 基于升力推进模式的胸鳍运动方式的运动参数优化, 有来流的情况下, 胸鳍运动的频率 ω_{fin} 和来流速度分别设为 12 (周期 $T = \pi/6$) 和 0.2m/s。静水情况下, 胸鳍运动的频率 ω_{fin} 也为 12 (周期 $T = \pi/6$)。雷诺数 Re 设为 2.63×10^4 , 计算时间步长 Δt 为 0.004s (每个周期大约有 131 时间步)。胸鳍的初始运动参数如下

$$\begin{aligned} \phi_{R0} &= 0.0^\circ, \phi_{RA} = 5.0^\circ \\ \phi_{FE0} &= 90^\circ, \phi_{FEA} = 20^\circ, \Delta\phi_{FE} = 0^\circ \\ \phi_{FLA} &= -25^\circ, \Delta\phi_{FL} = 90^\circ \end{aligned} \quad (6)$$

本文采用的优化方法只有局部收敛性, 为了保证优化过程朝着基于升力推进模式进行, 初始运动参数要反映出升力推进模式的基本特征。升力推进模式主要包括上下拍动和转动, 因此初始运动参数中的拍动角幅值 ϕ_{FLA} 和转动角幅值 ϕ_{FEA} 的绝对值应该设为明显大于划动角幅值 ϕ_{RA} 的绝对值; 胸鳍的转动角相

位和拍动角相位分别设为 $\Delta\phi_{FE}=0^\circ$ 和 $\Delta\phi_{FL}=90^\circ$ 保证了胸鳍拍动角和转动角有一定的相位差,符合刚性胸鳍产生推力的条件。这样的初始参数既保证优化过程的方向性,并且也能加快优化过程的收敛速度。

在实际情况下,由于安装、制造等方面的原因,仿生推进器上刚性胸鳍的各个角的幅值和位置都会有一定的限制。并且为了保证胸鳍在产生最大平均推力的情况下,不会产生较大的平均升力。本文在优化过程中,对各运动参数和平均升力系数设定了如下的限制条件

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \phi_{R0} \leq 40^\circ, \quad \phi_{R0} + \phi_{RA} \leq 60^\circ, \quad \phi_{R0} - \phi_{RA} \geq -60^\circ, \quad -50^\circ \leq \phi_{FLA} \leq 0^\circ \\ -0.005 < C_z^* < 0.005 \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)表示,胸鳍的划动角幅值限制在 40° 以内,并且划动角的位置限制在 -60° 到 60° 之间,拍动角的幅值限制在 40° 以内,平均升力的绝对值要小于 0.005。

对于每组运动参数,计算的时间为胸鳍运动的 5 个周期,并且使用第 3 周期到第 5 周期的水动力数据来计算各个方向上的平均水动力系数。

在静水情况下,运动参数优化过程中平均推力系数和平均升力系数随迭代次数的变化如图 8(a)和图 8(b)所示,随着迭代次数的增加,平均推力系数 C_x^* 收敛到了 0.156,而平均升力系数 C_z^* 收敛到 -0.003 ,表 1 给出了优化后的运动参数。

在有来流情况下,运动参数优化过程中平均推力系数和平均升力系数随迭代次数的变化如图 9(a)和图 9(b)所示,随着迭代次数的增加,平均推力系数 C_x^* 收敛到了 0.098,而平均升力系数 C_z^* 收敛到 -0.001 ,表 2 给出了有来流情况下优化后的运动参数。

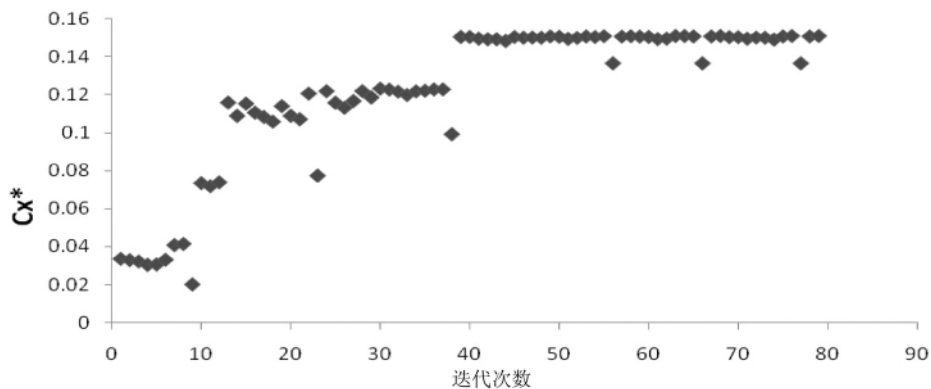


图 8(a) 静水情况下平均推力系数的收敛过程

Fig. 8(a) The convergence process of average thrust in still water

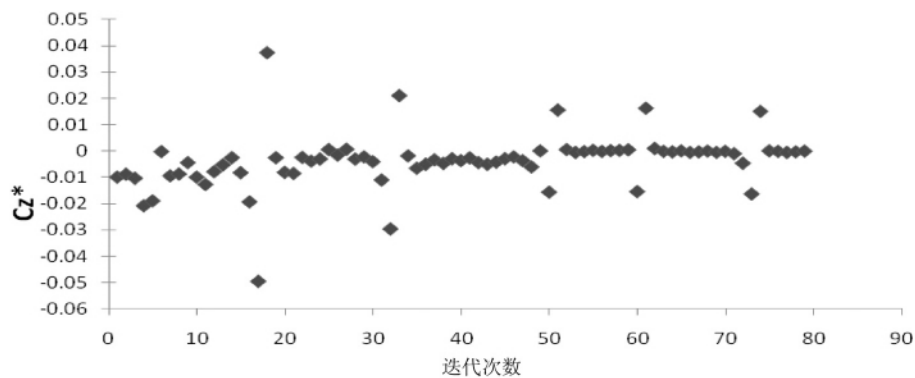


图 8(b) 静水情况下平均升力系数的收敛过程

Fig. 8(b) The convergence process of average lift force in still water

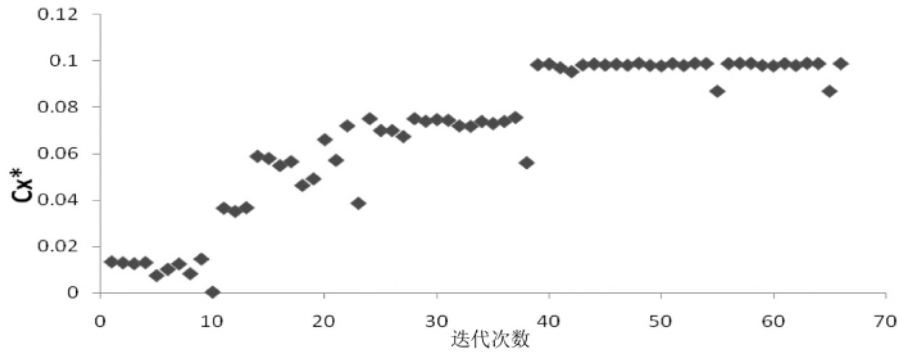


图 9(a) 有来流情况下平均推力系数的收敛过程

Fig. 9(a) The convergence process of average thrust in uniform flow

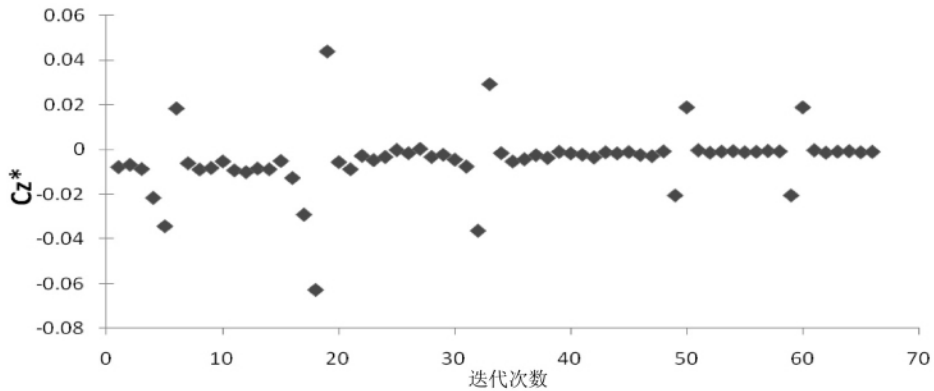


图 9(b) 有来流情况下平均升力系数的收敛过程

Fig. 9(b) The convergence process of average lift force in uniform flow

表 1 静水情况下优化后的运动参数

Tab.1 The result of optimization in still water

ϕ_{R0}	ϕ_{RA}	ϕ_{FE0}	ϕ_{FEA}	$\Delta\phi_{FE}$	ϕ_{FLA}	$\Delta\phi_{FL}$
-4.5°	0.0°	90°	37.5°	5°	-50°	80°

表 2 有来流情况下优化后的运动参数

Tab.2 The result of optimization in uniform inflow

ϕ_{R0}	ϕ_{RA}	ϕ_{FE0}	ϕ_{FEA}	$\Delta\phi_{FE}$	ϕ_{FLA}	$\Delta\phi_{FL}$
0.0°	0.0°	90°	32°	5°	-50°	80°

由表 1 和表 2 可以看出,静水情况下和有来流情况下,优化后的运动参数基本相同,但是静水条件下胸鳍产生的平均推力要大于有来流情况下胸鳍产生的平均推力。

2.3 优化结果验证

本文对静水情况下的优化结果进行了验证。与初始运动参数相比,优化后的运动参数中胸鳍的拍动角相位 $\Delta\phi_{FL}$ 、转动角幅值 ϕ_{FEA} 和拍动角幅值 ϕ_{FLA} 有明显的变化,因此本文针对这三个参数分别设置算例,通过数值计算验证优化结果。

除胸鳍运动参数外,其它计算条件与 2.2 节中的静水情况下的计算条件相同。首先,只改变拍动角相位 $\Delta\phi_{FL}$,其它运动参数与静水情况下的最优运动参数(表 1)相同,共计算了 13 个算例。由于最优运动参数中的拍动角相位为 80° ,因此设置各个算例对应的拍动角相位分布在 80° 周围,如表 3 所示。

表 3 各个算例对应的拍动角相位

Tab. 3 The phase of flapping angle for each case

算例 1	算例 2	算例 3	算例 4	算例 5	算例 6	算例 7	算例 8	算例 9	算例 10	算例 11	算例 12	算例 13	
$\Delta\phi_{FL}$	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°

计算结果如图 10 所示,可以看出,平均升力 C_z^* 在限制范围内,平均推力 C_x^* 在拍动角相位 $\Delta\phi_{FL} = 80^\circ$ 时达到了最大值, $\Delta\phi_{FL}$ 大于或小于 80° , 平均推力都会减小。从这个方面看,优化后的运动参数能够产生最大的推力。

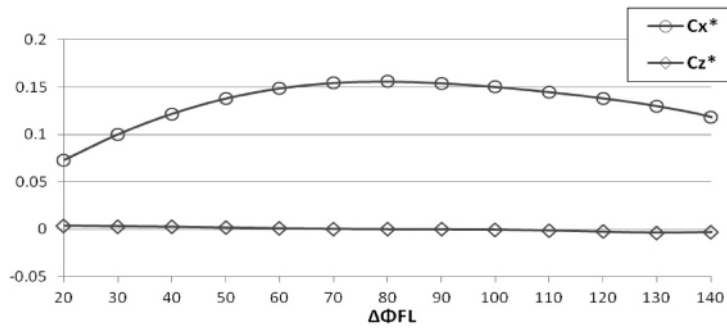


图 10 不同的拍动角相位对应的平均推力和平均升力

Fig. 10 The average thrust and lift force versus variable amplitudes of feathering angle

然后,只改变转动角幅值 ϕ_{FEA} ,其它运动参数与静水情况下的最优运动参数(表 1)相同,也计算了 13 个算例。由于最优运动参数中的转动角幅值为 37.5° ,因此设置各个算例对应的转动角幅值分布在 37.5° 周围,如表 4 所示。

表 4 各个算例对应的转动角幅值

Tab. 4 The amplitude of feathering angle for each case

算例 1	算例 2	算例 3	算例 4	算例 5	算例 6	算例 7	算例 8	算例 9	算例 10	算例 11	算例 12	算例 13	
ϕ_{FEA}	0°	6.25°	12.5°	18.75°	25°	31.25°	37.5°	43.75°	50°	56.25°	62.5°	68.75°	75°

计算结果如图 11 所示,可以看出,平均升力 C_z^* 在限制范围内,平均推力 C_x^* 在 $\phi_{FEA} = 37.5^\circ$ 时达到了最大值, ϕ_{FEA} 大于或小于 37.5° , 平均推力都会减小。从这个方面看,优化后的运动参数也是可靠的。

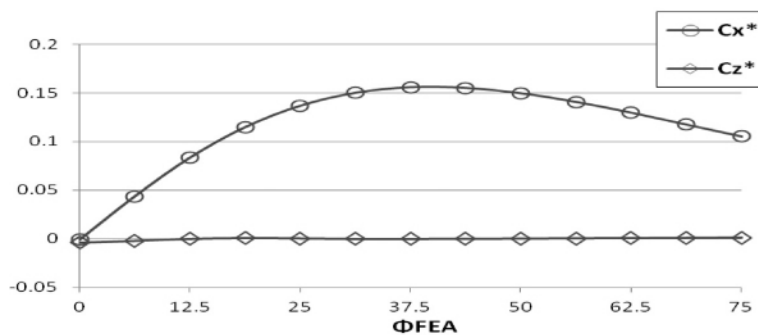


图 11 不同的转动角幅值对应的平均推力和平均升力

Fig. 11 The average thrust and lift force versus variable amplitudes of feathering angle

最后,只改变拍动角幅值 ϕ_{FLA} ,其它运动参数与静水情况下的最优运动参数(表 1)相同。根据式(7)中对胸鳍的拍动角幅值的限制,在 0° 到 -50° 之间设置了 5 个算例,如表 5 所示。

表 5 各个算例对应的拍动角幅值
Tab.5 The amplitude of flapping angle for each case

	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4	算例 5
ϕ_{FLA}	-10°	-20°	-30°	-40°	-50°

计算结果如图 12 所示,可以看出,平均升力 C_z^* 在限制范围内,平均推力 C_x^* 在 $\phi_{FLA} = -50^\circ$ 时达到了最大值。由此也可以看出优化后的运动参数也是可靠的。

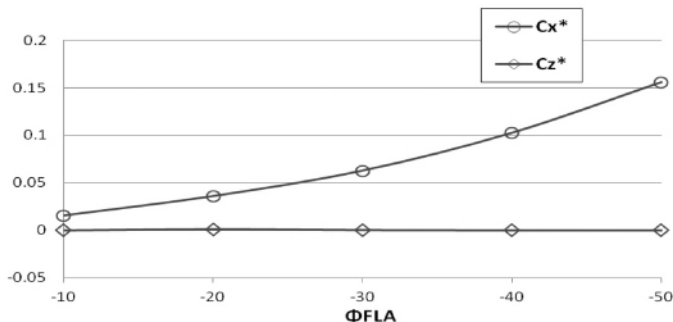


图 12 不同的拍动角幅值对应的平均推力和平均升力

Fig. 12 The average thrust and lift force versus variable amplitudes of flapping angle

3 结论

用 Hooks-Jeeves 方法可以有效处理不可微的优化问题,如本文中胸鳍参数优化问题。针对升力模式推进方式,在静水情况下和有来流情况下,本文利用 Hooks-Jeeves 优化方法分别得到了能够产生最大平均推力系数,同时产生较小的平均升力系数的胸鳍最优运动参数。两种情况下,优化后的运动参数基本相同,但是静水条件下胸鳍产生的平均推力要大于有来流情况下胸鳍产生的平均推力。与初始运动参数相比,优化后的运动参数中胸鳍的拍动角相位 $\Delta\phi_{FL}$ 、转动角幅值 ϕ_{FEA} 和拍动角幅值 ϕ_{FLA} 有明显的变化,最后针对这三个参数分别设置算例,通过数值计算验证了本文得到的胸鳍最优运动参数是可靠的。

4 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(Grant No. 11072154, 50739004),海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金(Grant No. GKZD010053-11),上海东方学者人才计划基金(No. 2008007)和英国劳氏船级社教育基金(LRET)的资助。本文工作还得到日本千叶大学刘浩教授的大力帮助,在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

[1] Muljowidodo, Jenie S D, Budiyo A, Nugroho S A. Recent progress on design, development and testing of underwater vehicles at ITB [C]. Workshop on Underwater System Technology, Putrajaya, Malaysia, 2007.

[2] Muljowidodo, Jenie S D, Budiyo A, Nugroho S A. Design, development and testing of underwater vehicles: ITB experience[C]. The International Conference on Underwater System Technology: Theory and Application, Penang, Malaysia, 2006.

[3] Kato N, Lane D M. Coordinated control of multiple manipulators in underwater robots[C]. Proc 1996 IEEE Int Conf Robotics and Automation, Minneapolis, MN, 1996; 2505-2510.

[4] Anderson J M, Chhabra N K. Maneuvering and stability performance of a robotic tuna[J]. Integ And Comp Biology, 2002, 42(1): 118-126.

[5] Tangorra J L, Davidson S N, Madden P G, Lauder G V, Hunter I W. A biorobotic pectoral fin for autonomous undersea vehicles[C]. IEEE Eng Medicine and Biology Society (EMBS), New York City, 2006, 2726-2729.

[6] Walker J A, Westmeat M W. Mechanical performance of aquatic rowing and flying[J]. Proc R Soc Lond B, 2000, 267: 1875-1881.

- [7] Gibb A C, Jayne B C, Lauder G V. Kinematics of pectoral fin locomotion in the bluegill sunfish *Lepomis macrochirus*[J]. *Exp Biol*, 1994, 189(1): 133—161.
- [8] Drucker E G, Lauder G V. Locomotor forces on swimming fish: three-dimensional vortex wake dynamics quantified using digital particle image velocimetry[J]. *Exp Biol*, 1999, 202(18): 2393—2412.
- [9] Drucker E G, Lauder G V. Wake dynamics and fluid forces of turning maneuvers in sunfish[J]. *Exp Biol*, 2001, 204: 431—442.
- [10] Ramamurti R, Sandberg W C, Löhner R, et al. Fluid dynamics of flapping aquatic flight in the bird wrasse ; three-dimensional unsteady computations with fin deformation[J]. *Exp Biol*, 2002, 205(19): 2997—3008.
- [11] Suzuki H, Kato N. A numerical study on unsteady flow around a mechanical pectoral fin[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2005, 15(3): 161—167.
- [12] Kato N, Liu H. Optimization of Motion of a Mechanical Pectoral Fin[J]. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 2003, 46(4): 1356—1362.
- [13] Kato N, Liu H, Morikawa H. Biology-inspired precision maneuvering of underwater vehicles[C]. *Proc 12th Int Offshore and Polar Eng Conf, Kitakyushu, Japan, ISOPE*, 2002, 2: 269—276.
- [14] YANG S B, QIU J, HAN X Y. Kinematics modeling and experiments of pectoral oscillating propulsion robotics fish[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2009, 6(2): 174—179.
- [15] XU Y C, ZONG G H, BI S S, et al. Initial development of a flapping propelled unmanned underwater vehicle (UUV)[C]. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Dec. 15—18, Crowne Plaza Sanya, Sanya, China. New York: IEEE, 2007: 524—529.
- [16] WANG Z L, SU Y M, YU X Z, WANG X F. Experimental and numerical study on pectoral-Fin propulsive system[J]. *China Ocean Engineering*, 2010, 24(3): 513—522.
- [17] Hadley G. *Nonlinear and Dynamic Programming*[M]. Addison: Wesley, 1964.
- [18] Katumata Y, Uuml, et al. Computation of self-propelled swimming in larva fishes[J]. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 2009, 4(1): 54—66.
- [19] 徐晓锋, 万德成. 金枪鱼自主波动游动的数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2011, 26(2): 228—238.