

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.01170

基于最小势能原理的延绳钓渔具作业状态数值模拟

宋利明¹, 张智¹, 袁军亭², 李玉伟¹

1. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306

2. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306

摘要: 基于有限元理论及最小势能原理, 以 2008 年 9 月到 2009 年 1 月海上实测的 188 枚钓钩的深度、24 个站点不同深度的三维海流数据、渔具参数和作业参数为基础, 建立并验证了延绳钓三维最小势能模型。结果表明: (1) 建立的延绳钓最小势能模型可以计算得出任何三维分层海流作用下延绳钓的三维形状和钓钩的深度, 大部分钓钩的实测深度与数学模型数值深度之间的差别不大, 其平均差值为 12.03 m, 差值范围为 0.02 ~ 40.36 m (方差 $S^2=100.30$, 标准差 $S=10.01$, $n=188$), 通过成对双样本均值分析, 实测深度与数值深度无显著性差异 ($P>0.05$); (2) 延绳钓渔具的干线在海水中稳定后并不是呈平滑的悬链线, 而是波浪形的曲线; (3) 圆柱体轴线与流向垂直时的阻力系数 (C_{N90}) 取值对于数值模拟的结果有一定的影响, C_{N90} 值的选取与研究对象的雷诺数有关。延绳钓最小势能数值模型能够有效模拟并预测延绳钓在不同深度的三维海流作用下的形状、钓钩深度并达到可视化。

关键词: 延绳钓; 数值模拟; 有限元分析; 最小势能原理

中图分类号: S973

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)05-1170-09

延绳钓渔具周围的流态及水动力会影响其形状和钓钩深度。延绳钓渔具的作业深度决定了渔具对目标鱼种的捕捞效率和选择性。因此, 了解延绳钓的形状与海洋环境因素和作业参数之间的相互关系、掌握延绳钓渔具的作业深度十分重要。为了掌握延绳钓作业时的形状及钓钩所达到的深度, 许多学者进行了相关研究^[1-4], 主要集中于渔具形状、钓钩深度与海洋环境的关系。随着数值计算和计算机技术的发展, 数值模拟已应用到渔具研究中^[5-13], 这些研究应用有限元分析和 MATLAB 数值模拟分析, 对渔具的形状与海洋环境的关系进行数值模拟和可视化, 但部分研究中所用的海流为均匀定常流, 仅对延绳钓的干线进行模拟, 模型的计算速度有待进一步提高^[12]。本研究应用有限元分析^[14]及最小势能原理^[15]对延绳钓渔具的浮子绳、干线和支线建立最小势能模

型, 并将海上实测的数据(包括不同深度的三维海流数据、作业参数和渔具参数)输入到模型中, 利用 MATLAB 进行数值模拟计算^[16], 验证最小势能模型的有效性, 以便利用数值模拟来掌握延绳钓的形状和钓钩深度, 提高目标鱼种的渔获率, 减少对其他鱼种的兼捕。

1 材料和方法

1.1 数据来源

调查时间为 2008 年 9 月至 2009 年 1 月; 调查渔船为超低温金枪鱼延绳钓渔船“新世纪 86 号”, 总长 56.4 m, 总吨位 497.00 t, 主机功率 882.00 kW; 调查海域为印度洋中部(10°S–1°N, 60°E–69°E), 共 24 个站点, 具体如图 1 所示; 调查仪器为微型温度深度计 TDR-2050(测定钓钩的实际深度, 共 188 枚)和挪威 NORTECK 公司的 2 000

收稿日期: 2010-08-25; 修订日期: 2010-12-16.

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA092202); 上海海洋大学博士科研启动基金项目(B-8202-08-290); 农业部远洋渔业探捕项目(D-8006-08-0058); 上海市重点学科建设项目(S30702).

作者简介: 宋利明(1968–), 教授, 博导, 主要从事金枪鱼渔业、深海底层延绳钓渔业和网箱养殖工程的研究. Tel: 021-61900311; E-mail: lmsong@shou.edu.cn

m 深度量程的 Aquadopp2000 型三维海流计(测定不同水层的三维海流数据, 每 50 m 为 1 层, 共 7 层, 0~350 m)。调查渔具结构: 浮子直径为 360 mm; 浮子绳直径为 5.5 mm, 长 40 m; 干线为 8 股编织的尼龙复丝, 其直径为 5.4 mm, 长度取决于每天作业的实际情况, $1.0 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^5$ m 不等; 支线总长 52 m, 第 1 段为直径 4 mm 的硬质聚丙烯, 长 2 m(加上夹子)左右; 第 2 段为直径 2.5 mm 的单丝, 长 23 m; 第 3 段为直径 2.2 mm 的单丝, 长 15 m; 第 4 段为包芯线, 长 5 m; 第 5 段为直径 1.3 mm 的单丝, 长 7 m, 下接钩高、钩宽分别为 63 mm、36 mm 的环形钩。本次调查以大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)为目标鱼种, 兼捕渔获物包括黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)、箭鱼(*Xiphias gladius*)、长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)和枪鱼类(*Istiophoridae*)。

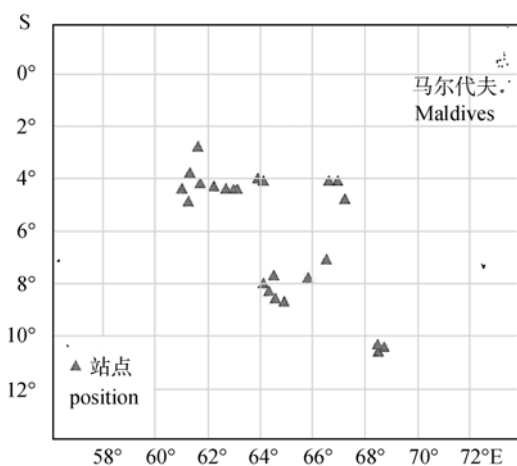


图 1 本研究调查站点

Fig.1 The survey positions in the study

1.2 最小势能模型的建立

1.2.1 有限元基本假设 考虑到浮子的受力分析比较复杂, 因此假设 2 个浮子是固定的。实际浮子绳、干线和支线为延绳钓的 3 个主要受力部件。因此把延绳钓渔具视为一个系统, 建立模型。因为延绳钓渔具由柔性绳索构成, 柔性绳索在外力作用下形状会发生变化, 而形状的变化又会影响力的分布, 因此与刚体相比, 柔性绳索的形状和作用力之间相互影响很大, 只有经过一定的时间,

各种作用力达到平衡时, 柔性绳索才可能处于相对稳定的状态, 保持一定的空间形状。本研究有限元模型的基本假设为:

(1) 延绳钓放入海水中达到稳定状态后, 整个延绳钓渔具所受的海流作用相同; 延绳钓每 2 个浮子之间渔具的受力状态相同, 可用其中的 2 个浮子之间的渔具代表;

(2) 2 个浮子始终漂浮于水面;

(3) 将每一水层测得的经向、纬向和垂向海流的平均值作为该水层的三维海流, 把在 1 个站位测到的各个水层的三维海流作为该次作业的数据;

(4) 每次作业中投绳机出绳速度 V_1 , 船速 V_2 保持稳定(以算术平均值计算);

(5) 在某一时段中, 各水层海流的速度大小与方向不变, 渔具经过一系列的位置变化, 最终干线达到稳定的平衡状态。此时可将各柔性杆单元刚化为刚性杆单元;

(6) 浮子绳、干线和支线绝对柔软, 只能承受拉力(张力), 不能承受压力、扭矩和弯矩。杆单元属二维轴向拉杆, 且内力只有轴向拉力;

(7) 杆单元是圆柱形, 其水阻力系数随着海流与构件的相对方向的变化而变化。杆单元之间的节点集中了杆单元的全部质量, 不考虑其水阻力因素。

1.2.2 坐标系统的建立 本研究以 2 个浮子间的延绳钓渔具(共 16 枚支线, 图 2)作为研究对象(下同)。在海平面上, 以 2 个浮子的连线为 X 轴, 其中点为 X 坐标轴的原点, 以垂直于两浮子连线的一方为 Y 轴的正方向, 以垂直于海平面竖直向下为 Z 轴的正方向, 建立坐标系(图 2)。由于建立的坐标系与大地坐标系不同, 有一定的夹角, 而三维海流计测定的数据是以大地坐标系为基准的, 因此需计算得出海流作用力在 X 、 Y 和 Z 坐标轴上的分量, 进而得出各个节点的位置坐标 X_i 、 Y_i 和 Z_i ($i=1 \sim 16$, 表示干线杆单元的编号)。

1.2.3 延绳钓渔具各参数初始值的确定 为了简化计算, 本研究将浮子看作为固定的点, 两浮子间的距离由式(1)计算得出。假设延绳钓系统各部件处于自然下垂状态, 计算出各节点的位置坐标

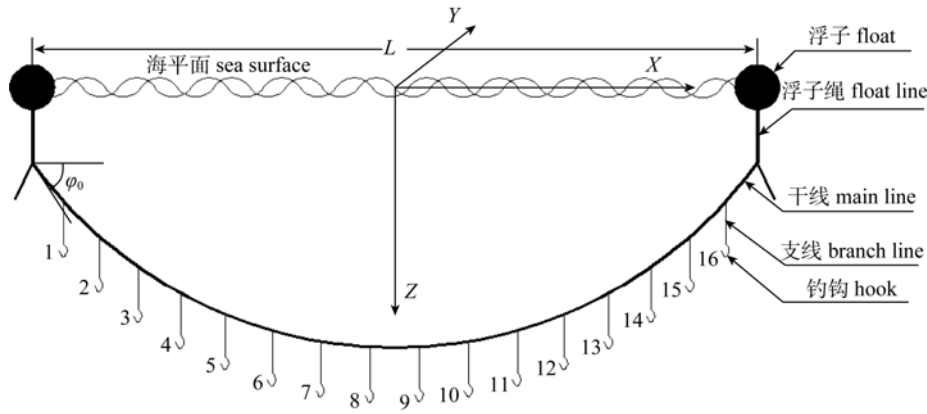


图 2 延绳钓数值计算坐标系示意图

Fig.2 The sketch of coordinates system for numerical calculation of longline

(其中干线采用悬链线方程计算各节点的起始位置, 干线初始时在 XZ 平面内, Z 轴为深度方向)。将浮子绳看成干线的一部分, 又因为浮子绳及支线较短, 所以将其各看成 1 个杆单元, 并且初始时, 延绳钓各部件都在同一平面内。支线与 TDR 水中重合计约为 5.88 N。

延绳钓干线的初始深度按照日本吉原有吉的钓钩深度计算公式^[17]进行计算, 即根据杆单元的水平方向坐标, 按照悬链线公式计算得出该干线杆单元的初始深度。

$$X_i = -\left[\frac{L}{2} - \frac{L}{n} \times (i-1)\right] \quad (1)$$

$$Y_i = 0 \quad (2)$$

$$Z_i = h_b + l_h \left[\sqrt{1 + \cot^2 \varphi_0} - \sqrt{\left(1 - \frac{2i}{n}\right)^2 + \cot^2 \varphi_0} \right] \quad (3)$$

对于支线的初始坐标, 应用下面的公式计算:

$$X_j = -\left[\frac{L}{2} - \frac{L}{m} \times (j-1)\right] \quad (4)$$

$$Y_j = 0 \quad (5)$$

$$Z_j = l_h \left[\sqrt{1 + \cot^2 \varphi_0} - \sqrt{\left(1 - \frac{2j}{m}\right)^2 + \cot^2 \varphi_0} \right] + h_a + h_b \quad (6)$$

其中:

$$L = V_2 \times m \times t \quad (7)$$

$$l_h = V_1 \times m \times \frac{t}{2} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{L}{2l_h} = \frac{V_2}{V_1} = \cot \varphi_0 \sinh^{-1}(\tan \varphi_0) \quad (9)$$

式 1-9 中: X_i 、 Y_i 和 Z_i 为干线杆单元的初始位置坐标; X_j 、 Y_j 和 Z_j 为支线杆单元的初始位置坐标; h_a 为支线长; h_b 为浮子绳长; l_h 为干线弧长的一半; φ_0 为干线支承点上切线与水平面的交角(图 2), 与 μ 有关, 作业中很难实测 φ_0 , 因此采用短缩率 μ 来推出 φ_0 ; n 为两浮子之间干线杆单元的总数; m 为两浮子间干线的分段数, 即支线数加 1; i 为两浮子之间自左侧计的干线杆单元的序数(1 ~ n); j 为两浮子之间自一侧计的钓钩编号序数, 即钩号[1 ~ ($m-1$)]; L 为两浮子之间的海面上的距离; t 为投放前后两枚钓钩间的时间间隔(以下简称为时间间隔)。

1.2.4 最小势能模型建立 对于弹性问题, 系统总势能是一种泛函, 在所有边界条件的可能位移中, 满足平衡方程的真实位移使物体势能泛函取驻值, 即势能的变分为零^[15]:

$$\delta \Pi = \delta U - \delta W = 0 \quad (10)$$

对于线性的弹性体, 势能取最小值, 即

$$\delta \Pi^2 = \delta U^2 - \delta W^2 \geq 0 \quad (11)$$

其物理意义为, 在平衡状态下系统势能总是趋于最小化^[15]。

(1) 每个杆单元所受的作用力分析

假设 a、b 分别为杆单元的两端, 则其所受到的外力有: 重力和浮力(水中重 G_s)、水动力(包括水阻力 R_D 和升力 R_L)(图 3), 其计算方法如下:

$$G_s = (\rho - \rho_w)g \frac{\pi d^2}{4} l_{ab} \quad (12)$$

$$R_D = \frac{1}{2} \rho_w d l_{ab} v^2 C_D \quad (13)$$

$$C_D = \sin^3 \alpha C_{N90} + \pi C_f \quad (14)$$

$$R_L = \frac{1}{2} \rho_w d l_{ab} v^2 C_L \quad (15)$$

$$C_L = \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \cdot C_{N90} \quad (16)$$

内力主要为杆单元在外力作用下产生的拉力 T_{ab} (图 3), 其计算方法为:

$$T_{ab} = E \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \frac{\Delta l_{ab}}{l_{ab}} \quad (17)$$

其中, T_{ab} : 杆单元的张力; R_D : 杆单元 ab 的水阻力; R_L : 杆单元 ab 的升力; G_s : 杆单元的水中重; E : 尼龙 1010 的弹性模量, 取 $2.83 \times 10^8 \text{ Pa}^{[18]}$; d : 杆单元直径(支线的直径, 以支线中最长的第 2 段单丝的直径进行计算, 为 2.5 mm); Δl_{ab} : 杆单元的伸长量; l_{ab} : 杆单元的长度; α : 圆柱体的轴线与来流的夹角; ρ_w : 海水的密度; v : 各层海流速度(将海平面下 $0 \sim 350 \text{ m}$ 深度海流分为 7 层, 每层 50 m , 各层海流均不相同); C_D : 水阻力系数; C_f : 黏滞力引起的阻力系数, 取 $\pi C_f = 0.02^{[18]}$; C_L : 升力系数; C_{N90} : 圆柱体轴线与流向垂直时的阻力系数, 本研究中雷诺数 Re 为 $0 \sim 4.37 \times 10^3$, 因此, 可不考虑振动, 也不会产生卡门涡列, 本研究取值为 $1.2^{[12,19]}$; ρ : 网线的密度。

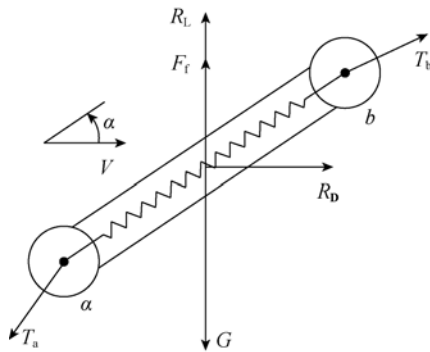


图 3 杆单元的受力分析

Fig.3 The mechanical acting on the element

(2) 杆单元的虚位移

杆单元位移及拉伸示意图如图 4 所示。

1) 外力作用下的虚位移 外力作用下的虚位移(D_a)主要是由杆单元受到的重力、浮力及水动力综合作用而产生的, 对于虚位移(D_a)的计算, 将其分为 X 、 Y 和 Z 三方向的位移, 其示意图如图

4 所示, 计算公式为^[6-8]:

$$\begin{aligned} X(u) &= (X_b - X_a) + (u_b - u_a) \\ Y(v) &= (Y_b - Y_a) + (v_b - v_a) \\ Z(w) &= (Z_b - Z_a) + (w_b - w_a) \end{aligned} \quad (18)$$

其中:

X 轴正向为放钩航方向, Z 轴正向向下, Y 轴垂直于 X 和 Z 轴;

$X(u)$ 、 $Y(v)$ 和 $Z(w)$ 分别为杆单元在外力作用下产生的 X 、 Y 和 Z 三方向的虚位移;

X_a 、 Y_a 、 Z_a 、 X_b 、 Y_b 和 Z_b 分别为杆单元 a 、 b 两端的 X 、 Y 和 Z 三方向绝对坐标;

u_a 、 v_a 、 w_a 、 u_b 、 v_b 和 w_b 分别为杆单元 a 、 b 两端节点在 X 、 Y 和 Z 三方向的位移。

2) 内力作用下的虚位移 杆单元受到外力作用后会产生伸长量, 这一伸长量即为杆单元在内部拉力作用下产生的虚位移 $L_i(D_a) - L_{i0}$, 其计算方法为^[6-8]:

$$L_i(D_a) - L_{i0} = \sqrt{X(u)^2 + Y(v)^2 + Z(w)^2} - \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2} \quad (19)$$

$$X_0 = X_b - X_a \quad (20)$$

$$Y_0 = Y_b - Y_a \quad (21)$$

$$Z_0 = Z_b - Z_a \quad (22)$$

其中: $L_i(D_a) - L_{i0}$ 项表示由于节点的大位移及单元张力的原因而产生的第 i 个单元的变形伸长。

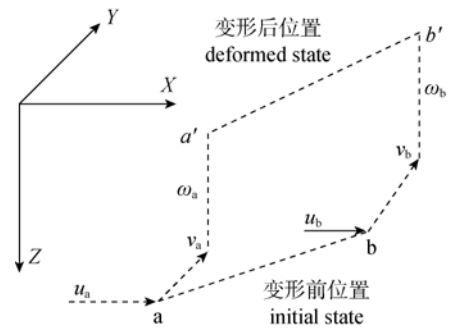


图 4 杆单元位移及拉伸示意图

Fig.4 Diagram of the displacement and tensile of rod element

(3) 杆单元的弹性势能

杆单元在外力与内力的相互作用下, 因为伸长会产生相应的弹性势能(U)^[6-8]:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{L_{i0}}{2EA_i} T_i^2 \quad (23)$$

其中: L_{i0} 为第 i 个杆单元的初始长度; A_i 为第 i 个杆单元的横截面面积; E 为材料的弹性模量; n 为杆单元数; T_i 为作用于第 i 个杆单元上的张力。

(4) 最小势能模型方程组的建立

由于延绳钓渔具由柔性绳索构成, 根据有限元理论, 将柔性绳索离散为多个杆单元, 若受到外力作用, 则各杆单元将离开其初始位置, 发生大位移运动而变形。根据最小势能原理, 则整个延绳钓系统的总势能(Π)可以表示为^[6-8]:

$$\Pi = \sum_{a=1}^f F_a D_a + \sum_{i=1}^n T_i [L_i(D_a) - L_{i0}] - \sum_{i=1}^n \frac{L_{i0}}{2EA_i} T_i^2 \quad (24)$$

式中: F_a 表示作用于第 a 个节点上的等效节点力; D_a 表示第 a 个节点位移; T_i 作用于第 i 个杆单元上的张力; L_i 为第 i 个杆单元变形后的长度; A_i 为第 i 个杆单元的横截面面积; f 为节点的总自由度数; n 为杆单元数。

等式右侧中的 $[L_i(D_a) - L_{i0}]$ 项表示由于节点的大位移及单元张力的原因而产生的第 i 个单元的变形伸长, 并且根据最小势能原理, 当整个离散体处于平衡状态时, 系统的总势能取最小值, 即 $\partial \Pi / \partial D_a = 0$ 和 $\partial \Pi / \partial T_i = 0$ 。从而可以得到求解问题的基本方程式^[6-8]:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial D_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial L_n}{\partial D_1} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \frac{\partial L_1}{\partial D_f} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial L_n}{\partial D_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ F_f \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$[L_i(D_a) - L_{i0}] - \frac{L_{i0}}{EA_i} T_i = 0, i = 1, 2, \dots, n$$

式 25 构成了关于单元节点位移(D_a)和内部拉力(T_i)的($f+n$)个自由度的基本联立方程式。通过 MATLAB 编程求解上述非线性方程组^[16], 即可获得在不同的三维海流作用下浮子绳、干线及支线上各个节点的空间位置, 由此得到延绳钓的三维空间形状和钓钩的数值模拟深度。

1.3 数值模拟深度与实测深度的比较验证

把调查站点的三维海流数据、渔具参数和作

业参数输入到模型中, 计算得出各节点的坐标值, 包括钓钩的三维坐标值(Z 轴的值数值模拟深度), TDR 实测深度为钓钩的 Z 轴的值, 将数值模拟结果, 即各节点的坐标值和 TDR 实测深度导入 MATLAB 软件(由于 TDR 实测深度只有 Z 坐标, 其 X 和 Y 坐标直接引用数值模拟得出的结果), 得出最小势能模型数值模拟深度与 TDR 实测深度的三维比较图, 定性分析其差异状况; 应用 t -检验^[19]分析 TDR 实测深度(188 枚)与最小势能模型数值模拟深度的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 数值模拟深度与实测深度的定性比较结果

对在 24 个站点作业的延绳钓的水下形状进行模拟, 得出其数值模拟图(图 5)。其中 X 、 Y 和 Z 轴值为延绳钓渔具在作业状态下的三维空间位置坐标。当不同深度的三维海流较大时, 钓钩的深度较浅(最深的钓钩达 250 m 左右, 图 5a), 当不同深度的三维海流较小时, 钓钩的深度较深(最深的钓钩达 300 m 左右, 图 5b)。

2.2 数值模拟深度与实测深度的定量比较结果

大部分钓钩的实测深度与数学模型数值深度之间的差别不大, 其平均差值为 12.03 m, 差值范围为 0.02 ~ 40.36 m(方差 $S^2=100.30$, 标准差 $S=10.01$, $n=188$)。 t -检验^[20]结果表明, 实测深度与数值深度(188 枚钩)无显著性差异($P>0.05$)(表 1)。

3 讨论

(1) C_{N90} 的取值对于数值模拟的结果有一定的影响。在袁军亭^[10]的研究中 C_{N90} 取 1.12, 主要是根据雷诺数 Re 在 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ 时, 不考虑振动获得的经验值, 并且其研究对象为网片。Wan 等^[6]的研究中 C_{N90} 取 1.30, 主要是根据雷诺数 Re 为 $6 \times 10^2 \sim 2 \times 10^3$ 。本研究选用 Fridman^[19]和宋利明^[12]中的 C_{N90} 值, 其原因为 Fridman^[19]认为当圆柱体的长度与直径之比为无穷大时, C_{N90} 值为 1.20, 宋利明^[12]的研究对象亦为延绳钓。本研究认为 C_{N90} 值的选取与研究对象的雷诺数 Re 有关, 本研究中雷诺数 Re 较小($0 \sim 4.37 \times 10^3$), 而 Hu^[21]和 Yamamoto

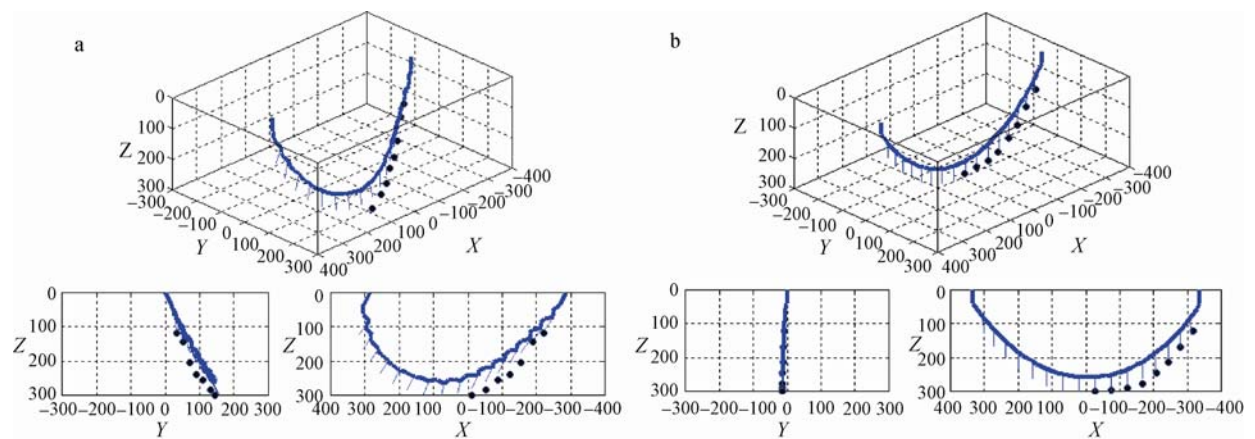


图 5 实测深度与最小势能模型计算深度之间的比较

a: 2008 年 12 月 14 日; b: 2008 年 12 月 28 日. X -两浮子连线方向上的距离(m); Y -海面上垂直于两浮子连线方向上的距离(m); Z -深度(m); ●为实测的钓钩深度; | 为支线, 其下方末端为钓钩所处深度.

Fig.5 Comparison between numerical hook depth of minimum potential energy principle model and the depth measured by TDR in some positions

a. December 14, 2008; b. December 28, 2008. X -distance along the connecting line between two floats (m); Y -distance along the perpendicular to the connecting line between two floats in the plane of sea surface (m); Z -depth (m); ●shows the measured hook depth; | shows the branch lines, whose end shows the numerical hook depth.

表 1 实测深度与数值模拟深度的 t -检验结果(188 枚钩)

Tab.1 Significant difference of t -test results between measured hook depth and numerical hook depths (188 hooks)

统计值 statistic value	实测深度 measured hook depth	能量模型数值模拟深度 numerical hook depth of minimum potential energy principle model
平均/m average	204.35	209.67
方差/ m^2 variance	4758.51	4480.19
自由度 df	374	374
t 统计量 t stat.	-0.76	
$P(T \leq t)$ 单尾 $P(T \leq t)$ one-way	0.22	
$P(T \leq t)$ 双尾 $P(T \leq t)$ two-way	0.44	

等^[22]认为 C_{N90} 值与雷诺数 Re 成负相关关系, 因此, 本研究中 C_{N90} 取值 1.20 较为合理。

(2)本研究对延绳钓的浮子绳、干线以及支线进行了数值模拟, 根据模拟结果得出延绳钓渔具的干线在海水中稳定后并不是呈平滑的悬链线。这与重力和海流等水动力对干线和支线的联合作用有关^[18], 使得负荷不呈沿索长均匀分布。另外, 对于一个杆单元, 由于两支线的作用力, 使得干线上与支线连接的节点位置下沉, 而节点中间部分则受海流作用(尤其是 Z 方向海流)使两节点中间部分的干线发生漂浮, 从而加剧了干线稳定后在水中呈不平滑状。笔者先前的计算中^[12]仅对干线进行了数值模拟, 没有分析计算支线的受力问题, 本研究中所用方法使得延绳钓数值模拟的精

度得到了提高, 并且可以较准确地预测金枪鱼延绳钓作业过程中, 钓钩受到不同三维海流作用下的深度, 和干线在实际中为波浪形的曲线(图 5a)。另外, 本研究可以模拟在任何海流下延绳钓渔具在海水中的形状, 克服了只能模拟海流小于 0.8 m/s 时的延绳钓渔具在海水中的形状^[12]的不足。

(3)数值模拟已广泛应用到渔具研究中, 可提供一种省时、省力的渔具试验和设计方法, 为生产、教学和科研单位服务^[6, 9, 11, 23], 但大部分研究中所用的海流为均匀定常流, 没有考虑垂直方向海流的作用^[5-11, 13], 所用的渔具为按比例缩小的模型。本研究中的海流为实测的三维海流, 所用的渔具为真实的渔具, 反映了海上的实际情况, 并利用实测数据验证了最小势能模型^[6, 8]的有效

性,表明今后可利用该数值模型预测延绳钓作业时的三维形状,掌握钓钩深度和渔具的受力状况,并达到可视化。调整某一参数(渔具、作业或海流参数)后,即可预测延绳钓作业状态的变化,从而更好地为实际生产作业中调整渔具或作业参数提供参考,提高目标鱼种的渔获率^[9]。

(4)本研究中的数学计算模型是通过有限元分析及最小势能原理建立的,由此对各节点列平衡方程^[15]。在逐步迭代求解过程中,初值的赋予是影响计算速度的主要因素^[10]。本研究的数值模型计算过程中仍然有部分站点在计算中出现不收敛的情况,其原因可能是使用的海流数据为 0~350 m 共 7 个水层(每 50m 为 1 层)的三维海流数据,特别是加入了垂直方向上的海流,需要通过较为复杂的人工调试才能得出结果,因此需要对 MATLAB 计算程序进一步优化。

(5)延绳钓在实际作业中受力非常复杂,其中有海流对延绳钓的水动力,延绳钓渔具的重力及浮力,还有海浪对浮子的推力等。为了便于进行数值模型的建立与计算,模型中没有考虑海浪对浮子的推力,另外数值计算模型中用到了材料的弹性模量,参考了尼龙 1010 的弹性模量^[18]来进行计算,因此,数值计算的精度有待进一步提高。

(6)数值计算时把所测定的一个站点的三维海流作为该次作业整个延绳钓所处水域的三维海流,并把某一深度的三维海流作为其附近的一个水层的海流来分析海流对钓具深度的影响和产生的水阻力,可能存在一定的误差。今后应测定不同站位、不同深度的三维海流数据,并采用动力学的方法进一步改进数值计算模型,提高数值计算的准确度。

致谢:本研究得到浙江省远洋渔业股份有限公司曾岳祥总经理、徐信海副总经理、王晓晴总工程师和“新世纪 86”号全体船员等的大力支持,谨致谢忱。

参考文献:

[1] Mizuno K, Okazaki M, Nakano H, et al. Estimation of un-

derwater shape of tuna longlines with micro-bathymographs [R]. Int Am Trop Tuna Commun Spec Rep, 1999: 10-35.

[2] 万荣,宋协法,唐衍力,等.渔具模型空间形状的计测方法[J].水产学报,2004,28(4):443-449.

[3] Bigelow K A, Michael K M, Ftanxois P, et al. Pelagic longline gear depth and shoaling [J]. Fish Res, 2006, 77: 173-183.

[4] Yoshinori M, Keiichi U, Reiko O, et al. Three-dimensional underwater shape measurement of tuna longline using ultrasonic positioning system and ORBCOMM buoy [J]. Fish Sci, 2006, 72: 63-68.

[5] Suzuki K. Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets [J]. Fish Sci, 2003, 69: 695-705.

[6] Wan R, Cui J H, Song X F, et al. A numerical model for predicting the fishing operation status of tuna longlines [J]. 水产学报, 2005, 29 (2):238-245.

[7] Wan R, Hu F X, Tokai T, et al. A method for analyzing static response of submerged rope system based on a finite element method [J]. Fish Sci, 2002, 68:65-70.

[8] Wan R, Hu F X, Tokai T. A static analysis of the tension and configuration of submerged plane nets [J]. Fish Sci, 2002, 68: 815-823.

[9] Lee J H, Lee C W, Cha B J. Dynamic simulation of tuna longline gear using numerical methods [J]. Fish Sci, 2005, 71: 1287-1294.

[10] 袁军亭.网片的三维力学模型研究及应用 [D].上海:上海水产大学,2007:1-132.

[11] Lee C W, Kim Y B, Ho G, et al. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves [J]. Ocean Eng, 2008, 35:1521-1532.

[12] 宋利明.印度洋大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)栖息环境综合指数-基于延绳钓渔业调查数据 [D].上海:上海海洋大学,2008:1-209.

[13] Kim Y H, Park M C. The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner [J]. Ocean Eng, 2009, 36: 1080-1088.

[14] Logan D L. 有限元方法基础教程 [M]. 第 3 版.伍义生,吴永礼,译.北京:电子工业出版社,2003:241-257.

[15] Argyris J H. 能量原理与结构分析 [M]. 邵成勋,译.北京:科学出版社,1978:1-311.

[16] Reacktenwald G. 数值方法和 MATLAB 实现与应用 [M]. 伍卫国,万群,张辉,等,译.北京:机械工业出版社,

- 2004: 1-550.
- [17] 齐藤 昭二. マグロの遊泳層と延縄漁法[M]. 東京: 成山堂書屋, 1992: 9-10.
- [18] 周应祺, 许柳雄, 何其渝. 渔具力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 1-161.
- [19] Fridman A L. Calculations for fishing gear designs [M]. Oxford(UK): Fishing News Books Ltd., 1986: 1-241.
- [20] 梅长林, 范金城. 数据分析方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1-284.
- [21] Hu F X. Studies on the hydrodynamic characteristics and position control of fishing gears [J]. Fish Eng, 2005, 32: 331-347.
- [22] Yamamoto K, Mukaida Y, Puspito G, et al. A scale effect evaluated by drag measurement comparison between prototype plane nets and one-fifth model based on Tauti's law[J]. Fish Sci, 1996, 62: 561-565.
- [23] Niedzwiedz G. Computer-aided simulation of shape and strength of trawls after changes in design and operational conditions [C]//Paschen M, Köpnick W, Niedzwiedz G, et al. Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. Rostock(Germany):Neuer Hoochschulschriftenverlag Dr. Ingo Koch & Co. KG, 2000: 119-135.
- ~~~~~

欢迎订阅 2012 年《农产品质量与安全》

主管 中华人民共和国农业部 主办 中国农业科学院
支持单位 农业部农产品质量安全监管局
协办单位 农业部农产品质量安全中心 中国绿色食品发展中心
承办单位 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所

主要栏目: 本刊特稿、本刊专稿、政策法规、质量安全监管、无公害农产品、绿色食品、有机农产品、农产品地理标志、农业标准化、检验检测、学科建设与发展、研究与探讨、海外博览、农业标准公告、市场信息与动态等。

读者对象: 与农产品质量安全、农业质量标准和检验检测有关的各级行政管理、科研教学、检验检测、技术推广、生产企业等部门的相关人员。

本刊为双月刊, 逢双月 10 日出版。大 16 开本, 彩色四封, 64 页。全国各地邮局(所)均可订阅, 也可直接到本刊编辑部办理订阅手续。邮发代号: 82-223。每册定价: 10.00 元, 全年共 60.00 元。

通讯地址: 北京市中关村南大街 12 号中国农科院质标所《农产品质量与安全》编辑部, 邮政编码: 100081。

联系电话/传真: (010)82106522、82106521 E-mail: aqs@caas.net.cn

欢迎各界朋友订阅、赐稿和刊登广告

Numeric modeling of a pelagic longline based on minimum potential energy principle

SONG Liming¹, ZHANG Zhi¹, YUAN Junting², LI Yuwei¹

1. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Fishing parameters (such as the shooting speed of mainline, vessel speed, time interval between two hooks, numbers of hooks between two floats) can be adjusted to deploy the hooks to water layers that are preferred by target species, such as tuna. As a result, the catch rate of the target species can be increased and the catch of bycatch species (e.g., loggerhead turtles, *Caretta caretta*; blue sharks, *Prionace glauca*; silky sharks, *Carcharhinus falciformis*) can be reduced. Together, these actions improve fishing efficiency and help maintain biological diversity. To better understand the relationship between these factors and the fishing depth of longline gear, we developed a numeric model of the behavior of a pelagic longline. We conducted surveys on board Chinese large scale tuna longliners in the Indian Ocean between September 2008 and January 2009. During the surveys, the vessels targeted bigeye tuna (*Thunnus obesus*) but also caught yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), swordfish (*Xiphias gladius*), albacore (*Thunnus alalunga*) and billfishes (Istiophoridae). The hook depths (188 hooks) were measured using temperature depth recorders (TDRs) and the three dimensional current was measured at a range of depths at 24 sites using an acoustic doppler current profiler (ADCP). We developed a three-dimensional numerical longline model (3DNLM) using finite element analysis and the minimum potential energy principle method. We used Matrix Laboratory (MATLAB) software to program and conduct the numerical calculations. The three dimensional current data were assigned to seven, 50 m depth intervals (e.g., 0–50, 50–100, or 300–350 m). The coordinates of all the nodes of the longline (including the float lines, mainline, and branch lines) were calculated by inputting three-dimensional current profile data, fishing gear parameters (the diameter of the mainline and branch line, the total weight of the branch line and the bait in the water, the density of the mainline and branch line, the elastic modulus of the mainline, the length of the branch line, and the length of the float rope), operating parameters (vessel speed, line shooter speed, and the time interval between two hooks) into the numerical model. The model then outputs the shape of the longline under water and the depth of each hook. We verified the model output using experimental data. The model was able to accurately depict the three-dimensional shape and hook depths of the pelagic longline. There was no significant difference between the hook depth measured by TDR and the model estimate of hook depth ($P=0.22>0.05$). The average difference between two methods was 12.03 m (range: 0.02–40.36 m, $S^2=100.30$, $S=10.01$, $n=188$). The underwater shape of the main line was represented by a wave-shaped curve. The shape was related to the force of the branch line. This load was concentrated at the respective node of the main line and made the depth of this node deeper. The main line between two nodes may have floated somewhat because of lift generated by sea currents, especially upwelling currents. The model estimates of the three-dimensional shape and the hook depths were influenced by the value of the drag coefficient (C_{N90}). C_{N90} was defined as the drag coefficient associated with water flow plumb to the cylinder. The value of the drag coefficient (C_{N90}) was determined based on the Reynolds number (Re) of the study object.

Key words: longline; numerical modeling; finite element analysis; minimum potential energy principle