

DOI: 10.12264/JFSC2021-0076

基于龙格库塔法的漂流延绳钓沉降过程数值模拟

宋利明^{1,2}, 李轶婷¹

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306

摘要:掌握延绳钓渔具的沉降过程对于提高目标鱼种的渔获率、减少其他物种的兼捕具有重要意义。本研究基于有限元理论, 采用集中质量法建立延绳钓三维动力学沉降模型, 把 2016 年 3 月至 2016 年 7 月海上实测的 12 个站点的风速和风向、不同深度的三维海流数据、渔具参数以及作业参数输入模型, 应用七级六阶龙格库塔法求解模型, 得出与 12 个实测站点对应的 80 枚钓钩的深度和沉降时长, 3 个代表性站点代表性节点的模拟沉降速度和渔具空间形状, 并与海上实测数据进行对比分析。结果表明: (1)建立的延绳钓三维沉降模型可计算得出 X 、 Y 和 Z 方向流速分别在 $-0.05\sim 0.80$ m/s、 $-0.30\sim 0.28$ m/s 和 $-0.12\sim 0.10$ m/s 范围内的钓钩深度、沉降时长、沉降速度和渔具空间形状; (2)延绳钓三维沉降模型得出的钓钩深度、沉降时长、沉降速度与实测钓钩深度、沉降时长、沉降速度无显著性差异 ($P>0.05$); (3)模拟得出的渔具空间形状与实测的空间形状基本一致。本研究建立的延绳钓三维动力学沉降模型能预测三维海流作用下的钓钩深度、沉降时长、沉降速度、空间形状并达到三维动态可视化。

关键词: 漂流延绳钓; 数值模拟; 沉降过程; 龙格库塔法

中图分类号: S973

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)01-0157-13

掌握延绳钓渔具的沉降过程对于将钓钩投放至适当深度、提高目标鱼种的渔获率、减少其他物种的兼捕具有重要意义^[1-9]。研究三维海流与延绳钓渔具作业深度之间的关系尤为重要^[10-13]。为获得延绳钓钓钩深度, 许多学者对延绳钓渔具空间形状、钓钩深度进行了研究。Wan 等^[14-15]和 Lee 等^[16-17]对延绳钓进行数值模拟, 模拟时将海流设置为均匀流, 模拟得出渔具的空间形状和钓钩深度, 模拟的空间形状和钓钩深度与实际存在一定的误差。周际^[18]和宋利明等^[19-20]建立延绳钓三维静力学模型可获得钓钩深度与渔具形状, 但不能展示渔具在不同时刻的动态变化过程, 数值模拟运算的速度和精度有待提高。曹道梅^[21]根据有限元方法建立了动力学模型, 分析了延绳钓渔具各节点的运动, 通过隐式欧拉法, 利用 R 语言对模型进行求解, 但未考虑浮子与浮子绳和干线之间的相互作用, 与实际情况存在偏差。Song 等^[2]采

用集中质量法建立了动力学模型, 但模型中的集中质量法受库朗条件(courant condition)的限制, 节点太多会导致计算出现发散。Song 等^[22]运用集中质量法建立了延绳钓渔具的动力学模型, 并采用欧拉-梯形法求解延绳钓渔具起绳过程中的空间位置、张力和形状, 但模型求解的速度有待进一步提高。关于延绳钓数值模拟的研究还存在一定的局限性, 主要包括部分模拟出现发散、计算精度和速度不高、未考虑渔具与风力之间的相互作用^[10]等。

本研究应用集中质量法与有限元分析对延绳钓浮子、浮子绳、干线和支线建立动力学模型, 并考虑渔具与海流、风力之间的相互作用, 运用显式七级六阶龙格库塔法求解, 采用 MATLAB 并行计算, 以提高计算精度和速度, 为今后利用显式七级六阶龙格库塔法求解延绳钓动力学模型、延绳钓渔具的设计改进和合理投放提供参考。

收稿日期: 2021-02-21; **修订日期:** 2021-04-22.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0901205); 2016 年农业农村部海洋渔业资源调查与探捕项目(D-8006-16-8045).

作者简介: 宋利明(1968-), 博士, 教授, 研究方向为捕捞学. E-mail: lmsong@shou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 海上调查

1.1.1 调查船、地点和时间 调查船为以长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)为目标鱼种的延绳钓渔船“丰汇 18”, 渔船参数如下: 总长 42.3 m, 型宽 5.7 m, 型深 2.6 m, 最大功率 400 kW, 投绳速度 8.7~9.2 kn。调查时间为 2016 年 1 月 28 日至 2016 年 8 月 8 日。调查区域为波利尼西亚以北的公海海域($4^{\circ}30'S \sim 10^{\circ}30'S$ 、 $151^{\circ}30'W \sim 143^{\circ}30'W$)(图 1)。

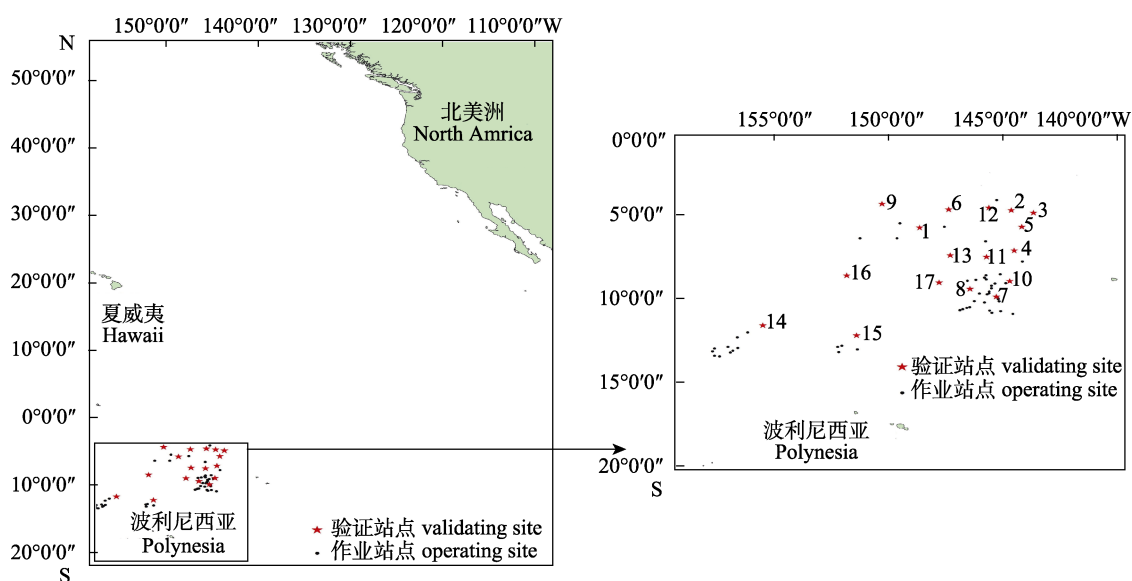


图 1 延绳钓作业站点和验证站点分布图

1-12 表示验证站点编号。

Fig. 1 The distribution of longline fishing operating sites and validating sites
1-12 means the number of validating site.

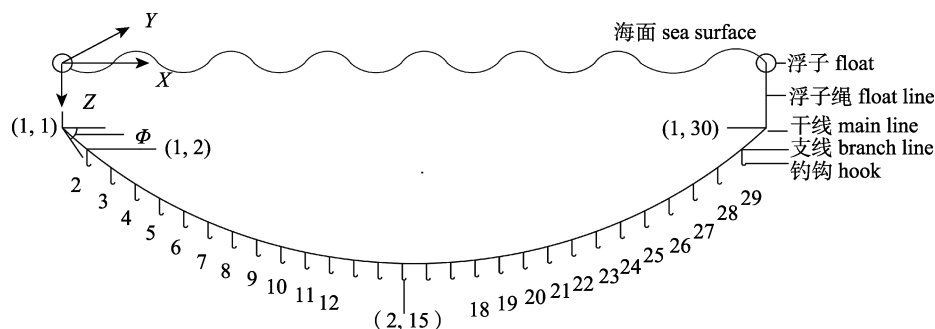


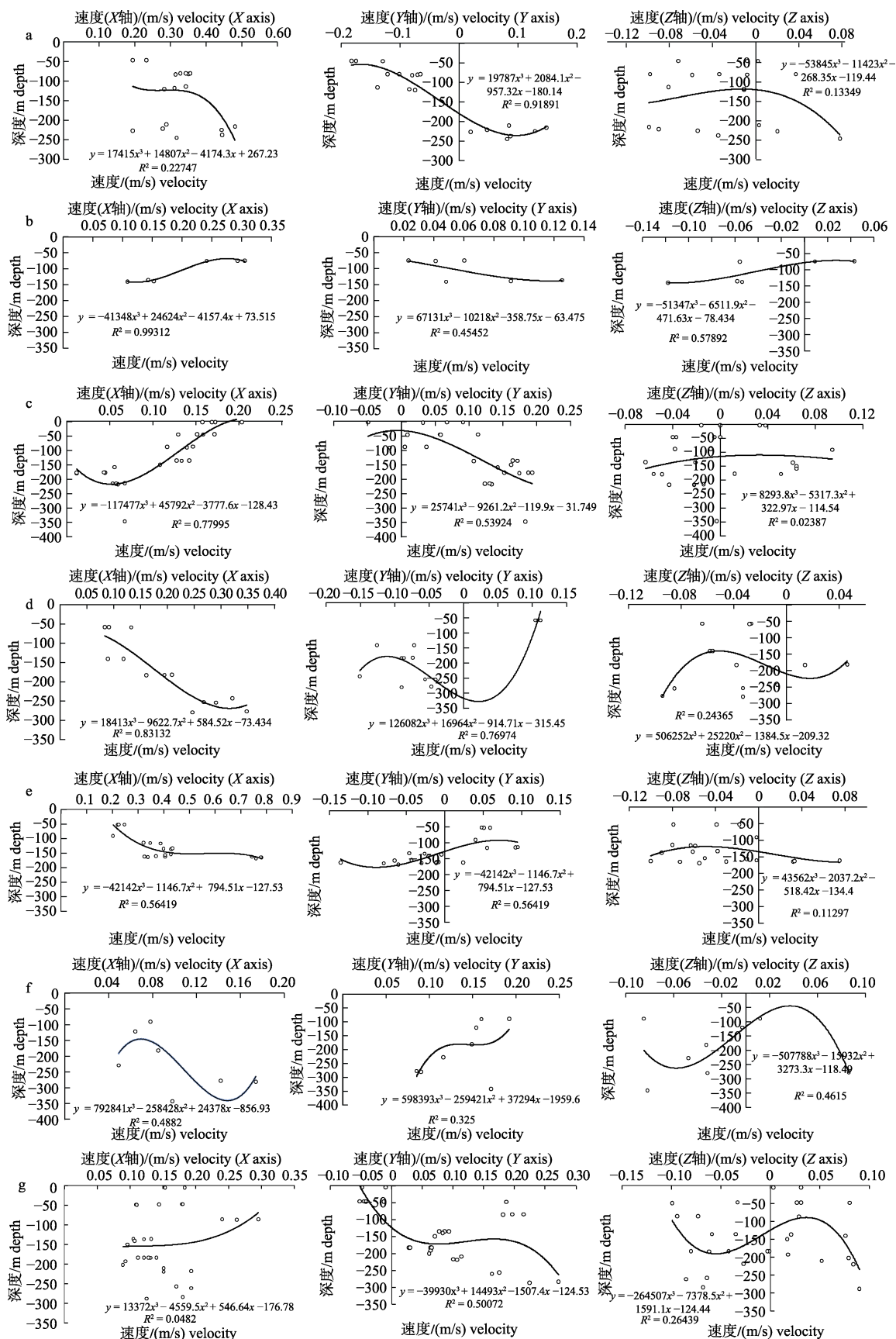
图 2 延绳钓渔具展开示意图

Fig. 2 The sketch of longline

1.1.3 三维海流数据 用挪威诺泰克公司生产的单点式多普勒三维海流计(型号 ADCP2000, NORTEK Co, Norway, 精度 0.001 m/s)测定 0~350 m 每沉降 50 m 左右处的三维海流。按照三维海流大小、钓

1.1.2 调查渔具 延绳钓渔具: 直径为 360 mm 的塑料浮子, 浮子绳为直径 3.5 mm 的聚丙烯捻线, 长 28 m; 干线为直径 4 mm 的单丝, 两浮子间的长度为 1047~1182 m; 支线全长 20.5 m, 由 3 段组成, 第一段为长 1.5 m、直径 3.5 mm 的聚丙烯捻线, 第二段为长 17 m、直径 1.8 mm 的尼龙单丝, 第三段为长 2 m、直径 1.5 mm 的尼龙单丝。两浮子之间的钓钩数为 28 枚, 其展开示意图见图 2, 图 中所标钩号和节点编号将用于后续数值模拟研究。

钩深度分布和实测数据的覆盖情况, 筛选出 12 个具有代表性的站点作为模型验证站点。12 个验证站点根据不同水层的实测三维海流数据采用多项式回归的方法得出 X 、 Y 和 Z 方向的海流分布(图 3)。



(待续 to be continued)

(续图 3 Fig.3 continued)

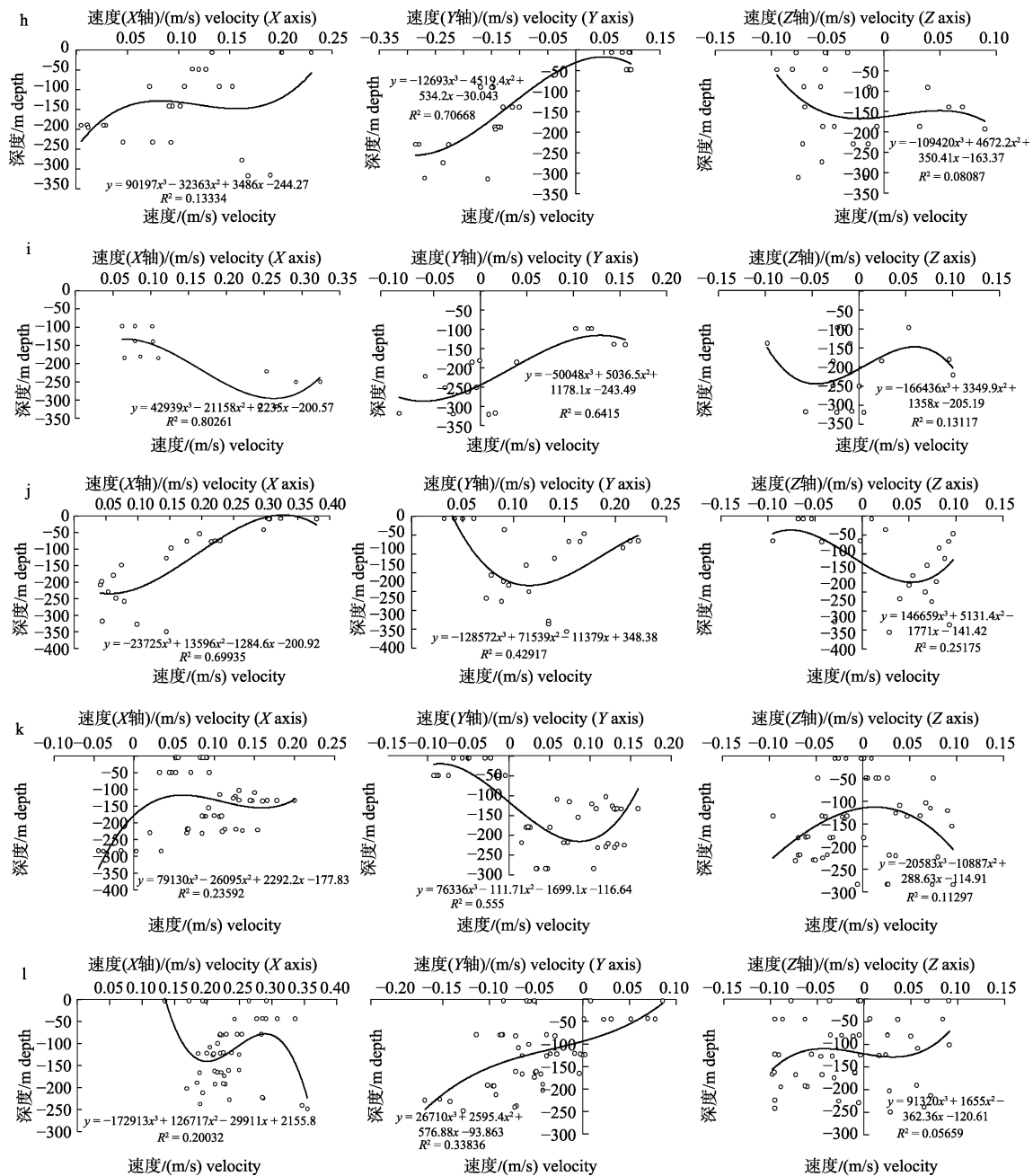


图 3 12 个代表站点的海流拟合曲线

a. 站点 1 (3 月 24 日); b. 站点 2 (3 月 27 日); c. 站点 3 (3 月 28 日); d. 站点 4 (3 月 29 日); e. 站点 5 (3 月 30 日);
f. 站点 6 (4 月 2 日); g. 站点 7 (4 月 3 日); h. 站点 8 (5 月 26 日); i. 站点 9 (6 月 5 日); j. 站点 10 (6 月 7 日);
k. 站点 11 (6 月 11 日); l. 站点 12 (6 月 12 日).

Fig. 3 Current fitting curve of 12 representative sites

a. Site 1 (24 Mar); b. Site 2 (27 Mar); c. Site 3 (28 Mar); d. Site 4 (29 Mar); e. Site 5 (30 Mar); f. Site 6 (2 Apr);
g. Site 7 (3 Apr); h. Site 8 (26 May); i. Site 9 (5 Jun); j. Site 10 (7 Jun); k. Site 11 (11 Jun); l. Site 12 (12 Jun).

1.1.4 沉降深度、沉降时长和沉降速度 用加拿大 RBR 公司生产的微型温度深度计(TDR-2050 RBR Co, Canada; 量程为 10~750 m; 精度为 0.1 m; 误

差为 $\pm 0.05\%$ 以内)测定不同钩号的钓钩随时间变化的深度变化、最终沉降稳定时在一定范围内波动的深度和最深钩号钓钩首次达到稳定所花的沉

降时长(该时长作为该站点渔具的沉降时长)。将不同钩号的钩钩在一定深度范围内波动的深度平均值作为该钩号的沉降深度。根据不同钩号的钩钩沉降至各个目标水层[(50.0±5.0) m、(100.0±5.0) m、(150.0±5.0) m、(200.0±5.0) m]的时间差计算出各个目标水层的沉降速度。

1.2 数值模型和解模方法

浮子、浮子绳、干线、支线、钩钩为主要的受力部件, 本研究采用集中质量法建立延绳钩沉降过程动力学模型, 假设延绳钩由许多集中质量点和无质量的弹簧单元组成, 集中质量点被称为节点。模型中将延绳钩分为有限个杆单元, 杆单元受到的力集中分配到节点, 节点除了受到重力和水动力外, 还受到张力作用, 节点之间的张力把不同受力质量节点结合成延绳钩整体, 建立模型^[19]。

1.2.1 基本假设

(1)浮子始终漂浮于水面, 浮子提供浮力与整个渔具所受重力及垂直方向水动力动态平衡。

(2)延绳钩每两个浮子间的渔具受力状态相同, 用其中两个浮子间的渔具状态代表。

(3)将每个站点不同水层(0 m、50 m、100 m、150 m、200 m、250 m、300 m 和 350 m)的三维海流(图 3 海流拟合曲线中各深度对应的三维海流)分别代入模型中, 作为对应水层渔具节点所受到的三维海流。如果拟合的三维海流曲线中无法查得 0 m、50 m、100 m 对应的流速, 或对应的深度出现 2 个流速, 则根据海上实测的海流确定流速。

(4)数值模拟过程中在浮子绳、干线与支线中不产生弯矩、扭矩和压力, 浮子绳、干线与支线内部张力只有轴向张力^[22]。

1.2.2 建立坐标系 本研究的研究对象是两个浮子间的延绳钩渔具。海平面上相邻两浮子之间的连线为 X 轴, 左侧一端点为原点, 垂直于海平面竖直向下为 Z 轴方向, 垂直于 XOZ 平面的一方为 Y 轴正方向, 建立坐标系, 如图 2。建立的坐标系为直角坐标系, 与实际的大地坐标系不同, 二者之间存在一定的夹角, 三维海流计以大地坐标系进行测量, 本研究将三维海流转化为直角坐标系中的三维海流。

1.2.3 模型的建立 根据实际作业情况, 渔具在 XOZ 平面内将从左到右进行投放。浮子、浮子绳、支线分别看作是单独的一部分, 浮子作为一个节点, 又因支线和浮子绳较短, 将其看成一个杆单元, 把支线钩钩处作为一个节点, 浮子绳与干线连接处作为一个节点, 把支线与干线的连接点作为一个节点, 两连接点之间的干线作为一个杆单元。每一部分的受力情况如下:

(1)浮子相当于一个质量点, 其所受到的外力有重力、浮力、风力^[22]。计算方法如下:

$$G = \frac{\pi d_0^2}{4} \rho g h_1 \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{\pi d_0^2}{4} \rho_1 g h_2 \quad (2)$$

$$R_x = \frac{1}{2} \rho C_x S_0 v^2 \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{S_1}{2} \rho_2 Q^2 \quad (4)$$

$$C_x = \sin^3 \alpha C_{N90} + \pi C_f \quad (5)$$

式(1)~(5)中, G 为浮子的重量; F_1 为浮子所受浮力; R_x 为浮子的水阻力; F_2 为风作用在浮子上的力; d_0 为浮子直径; ρ 为浮子密度; ρ_1 为海水密度; ρ_2 为空气密度; h_1 为浮子高; h_2 为浮子水下高度; C_x 为水阻力系数; S_0 为浮子垂直来流的投影面积; S_1 为浮子在风速垂直方向上的投影面积; v 为海流速度; Q 为风速; α 为冲角; C_{N90} 为垂直阻力系数, 为 1.12^[21]; C_f 为海水摩擦系数。

(2)水下部分的渔具所受到的外力基本相同, 有水中重力(G_s)和水动力(包括阻力 R_D 和升力 R_L)^[23-25]。计算方法如下:

$$G_s = (\rho_3 - \rho_1) g C_m \frac{\pi d_1^2}{4} l_{ab} \quad (6)$$

$$R_D = \frac{1}{2} \rho_1 C_D d_1 l_{ab} v^2 \quad (7)$$

$$C_D = \sin^3 \alpha C_{N90} + \pi C_f \quad (8)$$

$$R_L = \frac{1}{2} \rho_1 C_L d_1 l_{ab} v^2 \quad (9)$$

$$C_L = \sin^2 \alpha \cos \alpha C_{N90} \quad (10)$$

式(6)~(10)中, G_s 为杆单元水中重量; R_D 为作用在杆单元上的水阻力; C_D 为水阻力系数; R_L 为作用

在杆单元上的升力; C_L 为升力系数; ρ_3 为杆单元的密度; $C_m=3^{[12]}$, 附加质量系数 C_m 包括了杆单元自身的重量; d_1 为杆单元直径; l_{ab} 为杆单元长度; v 为各层海流速度(将海平面下 0~350 m 海流分为 7 层, 每层 50 m, 各层海流均不相同)。本研究中雷诺数 Re 为 $0\sim4.59\times10^3$, 因此, 可不考虑振动, 也不会产生卡门涡列。

(3) 张力由外力作用产生, 为模型中的主要内力^[24]。计算方法为:

$$T = E \frac{\pi d^2 \Delta l_{ab}}{4 l_{ab}} \quad (11)$$

式中, T 为杆单元的张力; E 为尼龙 1010 的弹性模量, 取 2.83×10^8 Pa; d 为杆单元直径(支线的直径, 以支线中最长的尼龙单丝的直径进行计算, 为 1.8 mm); l_{ab} 为杆单元长度; Δl_{ab} 为杆单元的伸长量。

1.2.4 模型解法 通过以下 $(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}, x_{i4}, y_{i4}, z_{i4})$ 对点 i 进行位置校正。节点空间位移的二阶导数 (x_i'', y_i'', z_i'') 是基于杆单元和节点的张力分析后的 X 、 Y 和 Z 轴方向的加速度。对应的一阶导数 (x_i', y_i', z_i') 是节点的速度^[26]。内部张力在渔具上的作用体现在各节点受到相邻节点张力的影响。

$$x_i'' = u(x_i, y_i, z_i, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}, x_{i4}, y_{i4}, z_{i4}, C_m, C_{N90}) \quad (12)$$

$$y_i'' = w(x_i, y_i, z_i, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}, x_{i4}, y_{i4}, z_{i4}, C_m, C_{N90}) \quad (13)$$

$$z_i'' = j(x_i, y_i, z_i, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}, x_{i4}, y_{i4}, z_{i4}, C_m, C_{N90}) \quad (14)$$

节点在 X 、 Y 和 Z 轴上的运动方程是非线性二阶微分方程。二阶方程通过以下方程可以降阶为一阶方程进行求解^[26-27]。

$$x_i' = u(x_i, y_i, z_i, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}, x_{i4}, y_{i4}, z_{i4}, C_m, C_{N90}) \quad (15)$$

$$y_i' = w(x_i, y_i, z_i, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}, x_{i4}, y_{i4}, z_{i4}, C_m, C_{N90}) \quad (16)$$

$$z_i' = j(x_i, y_i, z_i, x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}, x_{i4}, y_{i4}, z_{i4}, C_m, C_{N90}) \quad (17)$$

本研究通过二阶导数确定节点加速度, 通过

一阶导数确定节点速度, 采用七级六阶龙格库塔法提高求解方程的稳定性和精确度。

$$k_1 = f(n) \quad (18)$$

$$k_2 = f\left[x(n) + \frac{h}{2}, y(n) + \frac{h}{2} \times k_1\right] \quad (19)$$

$$k_3 = f\left[x(n) + \frac{h}{4}, y(n) + \frac{h}{16} \times (3 \times k_1 + k_2)\right] \quad (20)$$

$$k_4 = f\left[x(n) + \frac{h}{2}, y(n) + \frac{h}{2} \times k_3\right] \quad (21)$$

$$k_5 = f\left[x(n) + \frac{3h}{4}, y(n) + \frac{h}{16} \times (-3 \times k_2 + 6 \times k_3 + 9 \times k_4)\right] \quad (22)$$

$$k_6 = f\left[x(n) + h, y(n) + \frac{h}{7} \times (k_1 + 4 \times k_2 + 6 \times k_3 - 12 \times k_4 + 8 \times k_5)\right] \quad (23)$$

$$y(n+1) = y(n) + \frac{h}{90} \times (7 \times k_1 + 32 \times k_3 + 12 \times k_4 + 32 \times k_5 + 7 \times k_6) \quad (24)$$

式(18)~(24)的实现需要前 6 个步骤的系数赋值。阶数越高, 模型的稳定性越好^[10]。通过系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 、 k_6 值对模型中 X 、 Y 、 Z 轴的速度、加速度进行计算, 提高了稳定性和运算精度并减少了发散。

运用 MATLAB 求解上述方程。通过 MATLAB 并用公式(1)~(10)对各节点的受力进行赋值。根据实测数据设定方程的初值和基本参数, 其中基本参数包括: 两个浮子间节点的数量($n+2$)、浮子直径(d_0)、浮子高度(h_1)、杆单元直径(d_1)[分为干线直径(d_g)、支线直径(d_z)和浮子绳的直径(d_s)]、杆单元长度(l_{ab})[分为线长度(l_g)、支线长度(l_z)和浮子绳长度(l_s)]、阻力系数(C_{N90})、弹性模量($E, E=2.83\times10^8$ Pa)、附加质量力系数(C_m)、海水密度($\rho=1.030$ g/cm³)、流速在 X 、 Y 和 Z 方向的分量(v_x 、 v_y 和 v_z)等。

1.2.5 模型验证的方法

(1) 沉降深度、沉降时长和沉降速度 针对 12 个验证站点, 模拟得出与海上实测结果相对应的 80 枚钓钩的深度和沉降时长。按照下列方法确定 12 个验证站点中流速为高、中和低的 3 个代表性站点并模拟得出该 3 个代表性站点的钓钩(节点)沉降至 50.0 m、100.0 m、150.0 m、200.0 m 时的

沉降速度: ①实测钓钩深度与模拟深度无显著性差异; ②根据 X 、 Y 和 Z 方向流速多项式回归公式, 计算 175.0 m 处(150.0~200.0 m 的平均值)的三维合成流速, 按照流速高、中和低, 选定站点 6 (合成流速为 0.22 m/s, 高)、3 (合成流速为 0.16 m/s, 中)和 9 (合成流速为 0.11 m/s, 低)作为代表性站点。应用成对样本 t 检验的方法, 分析 80 枚钓钩实测深度与数值模拟深度之间的差异; 分析 12 个站点实测沉降时长与模拟沉降时长的差异; 分析站点 6、3 和 9 代表性钓钩(节点)沉降至 50.0 m、100.0 m、150.0 m、200.0 m 时的实测沉降速度与模拟沉降速度的差异^[19]。因为模型中节点数量较多, 选择代表性的节点用于研究沉降速度^[12]。代表性的节点为支线节点(2, 2)、(2, 4)、(2, 6)、(2, 8)、(2, 10)、(2, 12)和(2, 14)或支线节点(2, 1)、(2, 3)、(2, 5)、(2, 7)、(2, 9)、(2, 11)和(2, 13), 具体节点位置见图 2。

(2) 渔具在沉降过程中形状的变化 选择 175.0 m 处流速为高、中和低对应的站点 6、3 和 9, 分析其沉降过程, 以第 10 分钟、第 20 分钟和最终沉降稳定时刻画出其展开图, 再把实测钓钩的深度(Z 方向的坐标)叠加到对应的节点位置(由于未测定 X 和 Y 方向的坐标, 把数值模拟得到的 X 和 Y 方向的坐标作为实测钓钩在该 2 个方向的坐标), 用成对样本 t 检验的方法比较钓钩实测深度与数值模拟深度之间的差异, 定性和定量验证模型的可靠性。

2 结果与分析

2.1 沉降深度和时长

12 个站点的 80 枚钓钩(节点)的最终沉降深度(实测值与模拟值)见表 1。通过 t 检验得出钓钩实测深度与模拟深度无显著性差异($P>0.05$), 每一站点的最终沉降时长与模拟沉降时长无显著性差异($P>0.05$)(图 4)。

2.2 沉降速度

175.0 m 处流速为高、中和低的站点分别为 6、3 和 9, 选择该 3 个站点的代表性节点(钓钩)沉降至 50.0 m、100.0 m、150.0 m、200.0 m 时的实测沉降速度与模拟沉降速度进行对比, 对比结果如

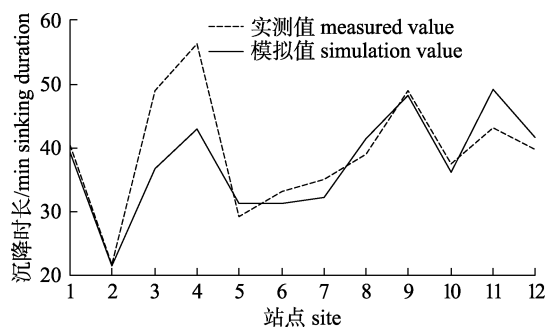


图 4 12 个代表性站点延绳钩沉降时长
模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured sinking duration of pelagic longline at 12 representative sites

图 5~7 所示。结果表明实测沉降速度与模拟沉降速度无显著性差异($P>0.05$)。

站点 6、3、9 的代表性节点沉降速度(实测值与模拟值)保持在 0.017~0.383 m/s。随着沉降, 站点 6 中的节点(2, 2)、(2, 4)、(2, 6)、(2, 8)、(2, 10)和(2, 12)的模拟沉降速度与实测沉降速度无显著性差异($P>0.05$); 站点 3 中的节点(2, 1)、(2, 3)、(2, 5)、(2, 7)、(2, 11)和(2, 13)模拟沉降速度与实测沉降速度无显著性差异($P>0.05$); 站点 9 中的节点(2, 1)、(2, 3)、(2, 5)、(2, 7)、(2, 11)和(2, 13)模拟沉降速度与实测沉降速度无显著性差异($P>0.05$)。

2.3 渔具在沉降过程中形状的变化

站点 6、3、9 渔具沉降至第 10 分钟、第 20 分钟和最终沉降稳定时刻的展开形态见图 8、9、10。站点 6 在 175.0 m 处, 合成流速较大; 沉降至第 10 分钟时, 渔具已完全展开; 在第 31.3 分钟, 达到稳定, 节点(2, 14)模拟深度和实测深度分别为 243.2 m 和 225.8 m。站点 3 在 175.0 m 处, 合成流速中等, 在沉降 10 min 的过程中, 渔具还未完全展开, 沉降至第 20 分钟时, 渔具已基本展开, Z 轴方向的深度继续增加, 但沉降速度变慢, 在 36.7 min 时达到稳定, 节点(2, 13)模拟深度和实测深度分别为 217.7 m 和 218.3 m。站点 9 在 175.0 m 处, 合成流速较小, 沉降至第 10 分钟时, 还未完全展开, 沉降至第 20 分钟时, 渔具已基本展开, 在 48.3 min 时达到稳定, 节点(2, 13)模拟深度和实测深度分别为 192.7 m 和 179.8 m。渔具沉降至最终深度后在海流的作用下保持动态平衡且呈现不平滑的状态。

表 1 延绳钓模拟沉降深度与实测沉降深度对比

Tab. 1 Comparison of simulated depth and measured depth of pelagic longline

节点 node	站点 1 site 1		站点 5 site 5		站点 6 site 6		站点 7 site 7	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
	measured value	simulation value	measured value	simulation value	measured value	simulation value	measured value	simulation value
(2, 2)	67.7	68.0	91.9	95.5	111.6	109.5	86.7	103.7
(2, 4)	88.7	83.3	156.0	117.7	146.8	145.4	118.2	133.7
(2, 6)	99.7	115.6	141.3	136.5	153.9	177.0	164.0	159.6
(2, 8)	120.9	134.0	152.2	151.6	176.8	203.5	182.7	180.8
(2, 10)	138.7	147.7	/	/	228.9	223.8	202.7	196.8
(2, 12)	142.6	152.5	164.0	170.1	226.8	237.3	203.2	207.2
(2, 14)	/	/	176.2	173.3	225.8	243.2	205.0	211.7
P	0.0833		0.3967		0.0908		0.2511	

节点 node	站点 2 site 2		站点 3 site 3		站点 4 site 4		站点 8 site 8	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
	measured value	simulation value	measured value	simulation value	measured value	simulation value	measured value	simulation value
(2, 1)	69.1	70.1	73.6	88.0	99.9	88.8	69.7	65.6
(2, 3)	109.2	107.7	78.3	121.4	207.3	123.9	92.7	114.2
(2, 5)	127.1	141.2	149.3	150.9	208.3	174.9	136.1	139.0
(2, 7)	148.3	190.0	149.8	175.8	216.4	181.3	157.3	159.8
(2, 9)	194.1	213.1	198.9	195.6	/	/	162.9	176.1
(2, 11)	224.2	229.7	215.3	209.7	228.3	217.3	184.0	187.6
(2, 13)	238.1	239.2	218.3	217.7	/	/	192.4	194.0
P	0.0921		0.1659		0.0580		0.1219	

节点 node	站点 9 site 9		站点 10 site 10		站点 11 site 11		站点 12 site 12	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
	measured value	simulation value	measured value	simulation value	measured value	simulation value	measured value	simulation value
(2, 1)	84.1	85.4	63.1	78.5	73.0	87.4	55.1	83.1
(2, 3)	112.0	113.7	94.8	87.6	126.9	119.4	60.9	107.0
(2, 5)	141.3	138.3	114.3	112.1	158.4	147.6	142.2	127.6
(2, 7)	152.1	158.8	140.8	151.9	188.1	171.3	115.0	144.6
(2, 9)	175.9	174.9	158.7	166.7	198.1	190.0	147.4	157.9
(2, 11)	178.8	186.3	160.3	176.3	199.8	203.3	162.8	167.3
(2, 13)	179.8	192.7	175.8	180.8	211.2	210.9	173.4	173.6
P	0.1258		0.0933		0.3873		0.1057	

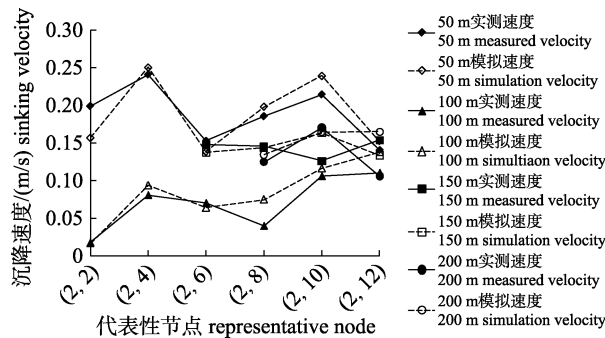


图 5 站点 6 代表性节点的实测沉降速度与模拟沉降速度的对比

Fig. 5 Comparison of measured sinking velocity and simulated sinking velocity of representative nodes at site 6

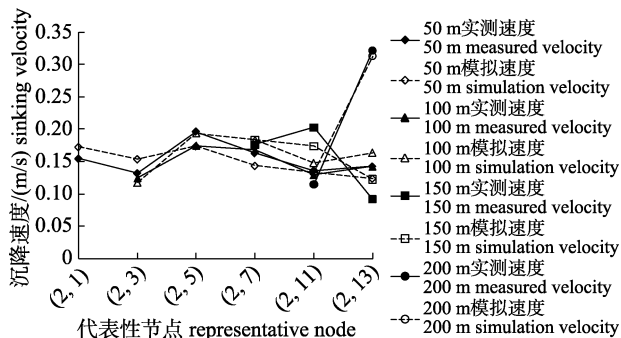


图 6 站点 3 代表性节点的实测沉降速度与模拟沉降速度的对比

Fig. 6 Comparison of measured sinking velocity and simulated sinking velocity of representative nodes at site 3

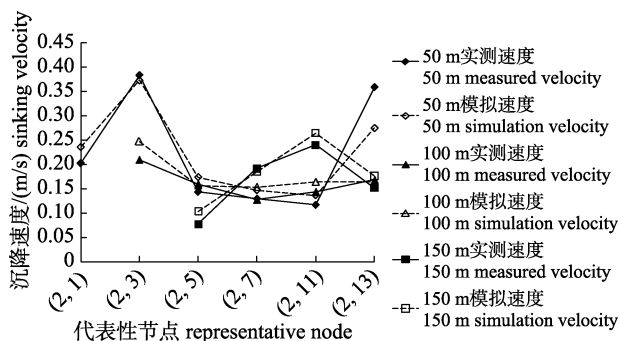


图 7 站点 9 代表性节点的实测沉降速度与模拟沉降速度的对比

Fig. 7 Comparison of measured sinking velocity and simulated sinking velocity of representative nodes at site 9

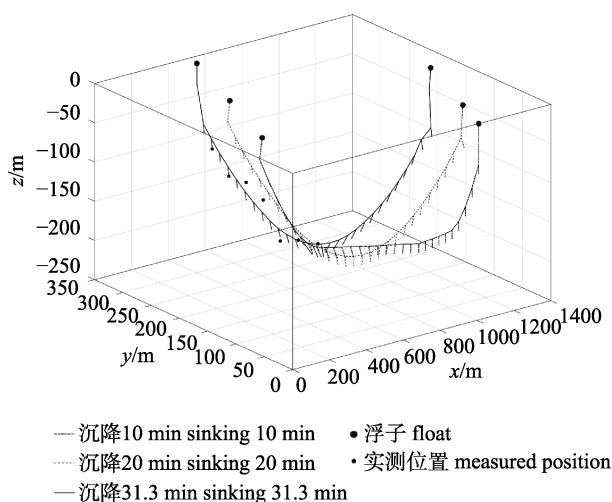


图 8 站点 6 渔具沉降过程中不同时刻的延绳钓三维展开图
Fig. 8 Three dimensional view of pelagic longline at different settlement time in the settlement process at site 6

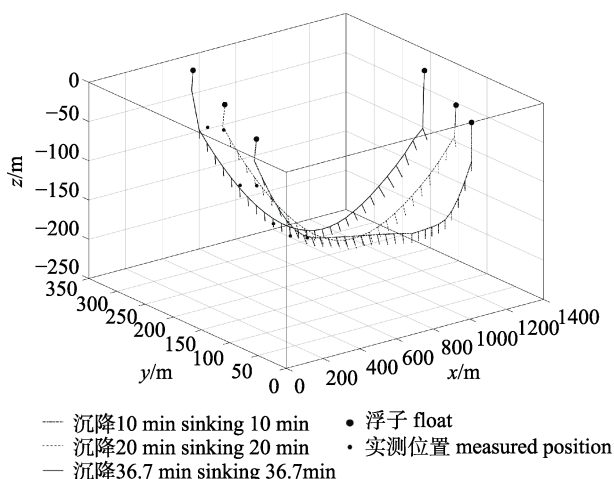


图 9 站点 3 渔具沉降过程中不同时刻的延绳钓三维展开图
Fig. 9 Three dimensional view of pelagic longline at different settlement time in the settlement process at site 3

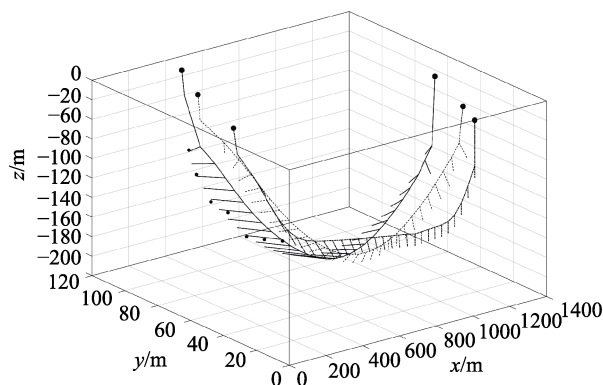


图 10 站点 9 渔具沉降过程中不同时刻的延绳钓三维展开图
Fig. 10 Three dimensional view of pelagic longline at different settlement time in the settlement process at site 9

3 个代表性站点实测钓钩的深度与数值模拟得出的钓钩深度的差值在 0.06~26.46 m 范围内, 成对样本 t 检验的结果表明该 3 个代表性站点的实测钓钩深度与数值模拟得出的钓钩深度无显著性差异 ($P>0.05$), 3 个代表性站点的模拟空间形状与实测的空间形状基本一致。

3 讨论

3.1 显式七级六阶的龙格库塔法的适用性

显式七级六阶龙格库塔法提高了模型求解的速度和精度, 比低阶龙格库塔法更适用, 高阶龙格库塔法可获得高精度的数值解^[27-29]。求解微分方程的数值方法主要有显式法和隐式法, 求解延绳钓模型的复杂数学方程属于非线性高阶刚性微分方程^[15]。前人将渔具定义为一个非线性系统, 常采用隐式方法来计算非线性高阶刚性微分方程, 以提高解的稳定性和准确性^[20]。前人研究也表明显式算法在求解这类刚性微分方程时是不稳定的^[2]。半隐式方法可以给出更稳定的解, 但仍然难以获得平衡状态^[30]。在阶数上, 4、5、6 阶龙格库塔法对非刚性的方程求解十分有效, 通过比较 4、5、6 阶龙格库塔法, 都能求解本研究中的模型, 它们的主要区别是阶数越高, 理论精度越高, 但求解速度变慢^[31-34]。本研究中的阶 ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$) 是影响计算速度的主要因素, 也影响模型求解是否发散。本研究运用相邻节点的速度、加速度、

张力计算各节点对应的六阶龙格库塔系数,再由六阶龙格库塔系数建立各节点的平衡方程,最后使用七级六阶龙格库塔法进行求解^[35]。本研究所采用的龙格库塔法为显式龙格库塔法,对步长很敏感,必须采用较小步长才能保证计算的精确性和稳定性,求解过程中步长变小运算速度相对变慢^[32,36]。本研究通过 MATLAB 并行计算,将步长设定为万分之一,改善了前人研究中计算精度与运行速度不能同时兼顾的情况^[22,35-38]以及显式算法常发散的情况,提高了求解速度和精度。

3.2 模型的改进

本研究将风力对浮子的作用力加入模型,使模型与实际作业情况更加接近^[19]。由于浮子受到海面风力的影响,所以本研究运用集中质量法,将所有节点按照实际分为浮子节点、浮子绳节点、干线节点、支线节点分别进行受力分析,更好地模拟了浮子等的水动力性能。前人的研究仅限于将浮子受力设置为固定值,假设浮子在垂直方向上保持不变,仅在渔具其他部分的作用下在海面运动。本研究中假设在沉降过程中,浮子受到风的影响,并与整个渔具形成整体,浮子作为渔具的一部分在沉降过程中达到动态平衡,在海表存在有限的位移,两浮子间的水平间距始终保持在 757~795 m 的范围内,还原了实际作业情况,提高了模型的精度。

3.3 渔具沉降深度、沉降时长、沉降速度和空间形状的变化

渔具数值模拟为渔具投放之前准确预测钓钩最终沉降的深度、沉降时长、沉降速度和空间形状提供了经济、有效的方法。海面风力和风向、各水层的三维海流都会影响渔具沉降的最终深度、沉降时长、沉降速度和空间形状。按照目前的技术,渔具模型试验很难同时有效模拟海面风力和风向、各水层的三维海流等环境因子,因此,通过渔具模型试验的方法准确掌握钓钩最终沉降的深度、沉降时长、沉降速度和空间形状难度很高;海上实测钓钩最终沉降的深度、沉降时长、沉降速度和空间形状需配备相应的仪器设备,并且只能在作业结束后才能得到这些数据,对于指导渔民准确投放钓具、确定渔具投放参数的作用

甚微。本研究方法可为渔民在渔具投放之前准确确定渔具投放参数提供指导。

不同水层的三维海流不同,导致干线载荷分布不均匀,使干线在稳定后呈现出非平滑的曲线。由于海流流速变化,在沉降过程中节点的运动速度在一定范围内波动。由于沉降由左向右进行,张力首先作用于先投放的节点,使相应的渔具产生弹性变形;弹性变形产生张力进而影响到相邻侧节点^[20]。理论上干线形状应以中间节点(2, 14)或(2, 15)为中心,左右对称,但实际中左右形状不对称,主要是由于左侧干线张力先产生并作用于整个干线。

3.4 展望

随着计算机技术的发展,数值模拟在渔具研究中的应用越加广泛与深入^[10-38]。精细化的数值模拟能较好地模拟出实际的作业状态,数值模型可还原渔具实际作业过程中的情况,减小误差^[38-44]。在今后的研究中,可测量动态流速、动态风速、测定渔获物重量和钓获的钩号(节点),在建立模型时,增加这些因素对渔具水动力性能的影响,使模型与实际更加接近,提高数值模拟精度。

参考文献:

- [1] Liu L L, Zhou C, Yu C D, et al. Identifying the catch characteristics of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) longline associated with the depth and soaking time of hooks in the high seas of eastern Pacific Ocean[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(1): 40-48. [刘莉莉, 周成, 虞聪达, 等. 钓钩深度和浸泡时间对东太平洋公海长鳍金枪鱼延绳钓渔获性能的影响研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 40-48.]
- [2] Song L M, Li J, Xu W Y, et al. The dynamic simulation of the pelagic longline deployment[J]. Fisheries Research, 2015, 167: 280-292.
- [3] Dang Y C, Dai X J, Wu F. Effects of vertical distribution and soaking time of tuna longline fishing hooks on catches in North Pacific[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(3): 86-93. [党莹超, 戴小杰, 吴峰. 北太平洋金枪鱼延绳钓钓钩垂直分布及浸泡时间对渔获物的影响[J]. 南方水产科学, 2020, 16(3): 86-93.]
- [4] Boggs C H. Depth, capture time, and hooked longevity of longline caught pelagic fish: Timing bites of fish with chips[J]. Fishery Bulletin, 1992, 90(4): 642-658.

- [5] Bigelow K A, Hampton J, Miyabe N. Application of a habitat-based model to estimate effective longline fishing effort and relative abundance of Pacific bigeye tuna (*Thunnus obesus*)[J]. Fisheries Oceanography, 2002, 11(3): 143-155.
- [6] Li J, Yan L, Yang B Z, et al. Estimation on hook and capture depth of tuna longline conducted by falling-net fishing vessel[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(6): 660-669. [李杰, 晏磊, 杨炳忠, 等. 罩网兼作金枪鱼延绳钓的钓钩深度与渔获水层分析[J]. 海洋渔业, 2018, 40(6): 660-669.]
- [7] Song L M. Integrated habitat index of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean based on longline fishery survey data[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2008: 1-209. [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.]
- [8] Tomczak M, Stuart Godfrey J. Regional Oceanography: An Introduction[M]. London: Butler & Tanner Ltd, 2001: 112-113.
- [9] Mizuno K, Okazaki M, Nakano H, et al. Estimation of underwater shape of tuna longline by using micro-BTs[J]. Bulletin of National Research Institute of Far Seas Fisheries, 1997, 34(1): 1-24.
- [10] Song L M, Li Y T. Research progress of mechanical property of tuna longline gear[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(2): 121-127. [宋利明, 李轶婷. 金枪鱼延绳钓力学性能研究进展[J]. 南方水产科学, 2020, 16(2): 121-127.]
- [11] Bach P, Gaertner D, Menkes C, et al. Effects of the gear deployment strategy and current shear on pelagic longline shoaling[J]. Fisheries Research, 2009, 95(1): 55-64.
- [12] Cao D M, Song L M, Li J, et al. Determining the drag coefficient of a cylinder perpendicular to water flow by numerical simulation and field measurement[J]. Ocean Engineering, 2014, 85: 93-99.
- [13] Song L M, Gao P F. Captured depth, water-temperature and salinity of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) longlining in Maldives waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(3): 335-340. [宋利明, 高攀峰. 马尔代夫海域延绳钓渔场大眼金枪鱼的钓获水层、水温 and 盐度[J]. 水产学报, 2006, 30(3): 335-340.]
- [14] Wan R, Hu F X, Tokai T, et al. A method for analyzing the static response of submerged rope systems based on a finite element method[J]. Fisheries Science, 2002, 68(1): 65-70.
- [15] Wan R, Cui J H, Song X F, et al. A numerical model for predicting the fishing operation status of tuna longlines[J]. Journal of Fisheries of China, 2005, 29(2): 238-245.
- [16] Lee J H, Lee C W, Cha B J. Dynamic simulation of tuna longline gear using numerical methods[J]. Fisheries Science, 2005, 71(6): 1287-1294.
- [17] Lee C W, Lee J H, Cha B J, et al. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(3-4): 331-347.
- [18] Zhou J. Hook depth model of tuna longline in Indian Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2008: 1-93. [周际. 印度洋金枪鱼延绳钓钩钩深度模型[D]. 上海: 上海海洋大学, 2008: 1-93.]
- [19] Song L M, Zhang Z, Yuan J T, et al. Numeric modeling of a pelagic longline based on minimum potential energy principle[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(5): 1170-1178. [宋利明, 张智, 袁军亭, 等. 基于最小势能原理的延绳钓渔具作业状态数值模拟[J]. 中国水产科学, 2011, 18(5): 1170-1178.]
- [20] Song L M, Zhang Z, Yuan J T, et al. Numeric modeling of the pelagic longline based on the finite element analysis[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(2): 256-261. [宋利明, 张智, 袁军亭, 等. 基于有限元分析的漂流延绳钓渔具作业状态数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(2): 256-261.]
- [21] Cao D M. The dynamic simulation of tuna longline[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011: 16-28. [曹道梅. 金枪鱼延绳钓渔具动力学模拟[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011: 16-28.]
- [22] Song L M, Qi Y K, Li J, et al. Dynamic simulation of pelagic longline retrieval[J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(2): 455-466.
- [23] Su Z P, Xu L X, Zhu G P, et al. Effects of towing speed and warp length on the net position of Antarctic krill mid-trawl[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(4): 884-892. [苏志鹏, 许柳雄, 朱国平, 等. 拖速和曳纲长度对南极磷虾中层拖网网位的影响[J]. 中国水产科学, 2017, 24(4): 884-892.]
- [24] Yuan J T. Development and application of the 3D unmerical model 3DNNM[D]. Shanghai: Shanghai Fisheries University, 2007: 1-132. [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.]
- [25] Zhou C K, Wang W. Twin-truss system design for Antarctic krill trawl processing ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(3): 91-97. [周春凯, 王威. 南极磷虾拖网加工船双桁架系统设计[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(3): 91-97.]
- [26] Balyakin A A, Ryskin N M, Khavroshin O S. Nonlinear dynamics of modulation instability in distributed resonators under external harmonic driving[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 2007, 50(9): 726-744.
- [27] Bu S, Jung W K, Kim P. An error embedded Runge-Kutta

- method for initial value problems[J]. Kyungpook Mathematical Journal, 2016, 56(2): 311-327.
- [28] Zhang J F, Deng Z C, Zhang K. An improved precise Runge-Kutta method for structural dynamic equations[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 36(4): 378-385. [张继锋, 邓子辰, 张凯. 结构动力方程求解的改进精细 Runge-Kutta 方法[J]. 应用数学和力学, 2015, 36(4): 378-385.]
- [29] Yang Y. Numerical solution of fuzzy differential equations by Runge-Kutta method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 1-36. [杨阳. 龙格库塔法求模糊微分方程的数值解[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 1-36.]
- [30] Zhang X F, Wang M F, Xu L X. Modeling and visualization of part behavior of purse seine using R language[C]//Proceedings of the 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2011: 2080-2083.
- [31] Okbami Michael G D. A comparison of explicit Runge-Kutta methods for nonstiff IVPs and their adaptation for solving nonstiff DDES[D]. Changsha: Central South University, 2012: 1-60. [Okbami Michael G D. 显式 Runge-Kutta 方法求解非刚性单一常时滞微分方程中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 1-60.]
- [32] Hu J C, Luo M. Runge-Kutta approximations for stochastic ordinary differential equations[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2012, 49(4): 747-752. [胡建成, 罗敏. 随机常微分方程的龙格库塔解法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 49(4): 747-752.]
- [33] Huang X H, Hu Z H. Analysis of Runge-Kutta method[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(23): 28. [黄晓红, 胡振华. 浅析龙格-库塔方法[J]. 黑龙江科技信息, 2012(23): 28.]
- [34] Triantafyllou M S, Howell C T. Dynamic response of cables under negative tension: An ill-posed problem[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 173(4): 433-447.
- [35] Zhang X F, Cao D M, Song L M, et al. Application of whole-implicit algorithm and virtual neural lattice in pelagic longline modeling[C]//Proceedings of the 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2012: 2603-2606.
- [36] Zhang X F, Hu F X, Xu L X, et al. Development of numerical computer simulation on fishing nets[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(3): 277-287. [张新峰, 胡夫祥, 许柳雄, 等. 网渔具计算机数值模拟的研究进展[J]. 海洋渔业, 2015, 37(3): 277-287.]
- [37] Fu M H, Liang H L. An improved precise Runge-Kutta integration[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(5): 1-5. [富明慧, 梁华力. 一种改进的精细-龙格库塔法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(5): 1-5.]
- [38] Song L M, Li J, Gao P F, et al. Modeling the hook depth distribution of pelagic longlining in the equatorial area of Indian Ocean[J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(4): 547-556.
- [39] Ni Z Y, Zhang X F, Jin Y F, et al. Hydrodynamic performance analysis of canvas stow net based on numerical simulation[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018, 33(3): 402-407. [倪震宇, 张新峰, 金宇峰, 等. 基于数值模拟的单锚张网张网水动力性能研究[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(3): 402-407.]
- [40] Lee C W, Kim Y B, Lee G H, et al. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(14-15): 1521-1532.
- [41] Suzuki K, Takagi T, Shimizu T, et al. Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets[J]. Fisheries Science, 2003, 69(4): 695-705.
- [42] Wan R, Hu F X, Tokai T. A static analysis of the tension and configuration of submerged plane nets[J]. Fisheries Science, 2002, 68(4): 815-823.
- [43] 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 Engineering, 2009, 36(14): 1080-1088.
- [44] Wu Y W, Wu Y S. The application of catenary and Parabola theories in tuna longline fishery[J]. Marine Fisheries, 2005, 27(1): 1-9. [吴因文, 吴殷书. 悬链线和抛物线理论在金枪鱼延绳钓渔业中的应用[J]. 海洋渔业, 2005, 27(1): 1-9.]

Dynamic numerical simulation of the pelagic longline settlement process based on the Runge-Kutta method

SONG Liming^{1,2}, LI Yiting¹

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China

Abstract: Understanding the settlement process of longline gear is of considerable significance for increasing the catch rate of target species and reducing the bycatch of other species. In this study, based on the finite element theory, a three-dimensional dynamic settlement process model of longline settlement was constructed using the lumped-mass method. The wind speed and direction, three-dimensional current data, fishing gear parameters, and operational parameters of 12 sites measured at sea from March 2016 to July 2016 were used as inputs, and the seven level and six order Runge-Kutta method was used to solve the model. The depth and sinking duration of 80 hooks corresponding to the measured sites were calculated and the simulated sinking speed and gear spatial shape were obtained. These data were then compared with the measured data at sea. The results showed that: (1) the established three-dimensional settlement model of longline settlement could be used to calculate the hook depth, sinking duration, sinking speed, and gear spatial shape at the flow velocity in the X , Y , and Z directions of $-0.05\text{--}0.80\text{ m/s}$, $-0.30\text{--}0.28\text{ m/s}$, and $-0.12\text{--}0.10\text{ m/s}$, respectively; (2) there were no significant differences among the hook depth, sinking duration, and sinking speed obtained using the three-dimensional settlement model and conventionally measured ($P>0.05$); (3) the simulated gear space shapes were similar to those of the measured space shapes. The numerical simulation model developed in this study can predict the hook depth, sinking duration, sinking speed, and spatial shape under the interaction of three-dimensional ocean currents and achieve dynamic three-dimensional visualization.

Key words: pelagic longline; numerical simulation; settlement process; Runge-Kutta method

Corresponding author: SONG Liming. E-mail: lmsong@shou.edu.cn