

8-13-2020

Modeling and Simulation of Offshore Support Vessel Anchoring Operation

Hongbo Sun

1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;;2. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;;

Chaojian Shi

1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;;

Wenjin Lin

3. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Offshore Support Vessel Anchoring Operation

Abstract

Abstract: In order to understand the configurations of mooring line and working wire, tension variation at release point of working wire and the influence of the offshore support vessel during anchoring operation, a mathematical models of OSV anchoring operation was established. *According to the MMG (Ship Manoeuvring Mathematical Model Group) ship motion mathematical modeling theory, a 6dof ship motion mathematical model was built. And a 6dof cable motion mathematical model was established with finite difference method. A coupling ship-cable-anchor-cable system model was established.* The system motion simulations were carried out, and the results indicate that the model can be used to determine the control strategy of the systems during operation, and provide theory support for offshore oil ship simulator development.

Keywords

offshore support vessel, mooring line, working wire, ship motion mathematical model, finite difference method

Recommended Citation

Sun Hongbo, Shi Chaojian, Lin Wenjin. Modeling and Simulation of Offshore Support Vessel Anchoring Operation[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 3041-3047.

海洋石油支持船抛锚作业建模与仿真

孙洪波^{1,2}, 施朝健¹, 林文锦³

(1. 上海海事大学商船学院, 上海 200135; 2. 集美大学航海学院, 厦门 361021; 3. 中海油服, 天津 300450)

摘要: 为了解海洋石油支持船(Offshore Support Vessel-OSV)抛锚作业过程中, 系泊缆和工作缆的缆型、张力变化以及抛锚作业对锚作船的影响, 提出了一种 OSV 抛锚作业的建模方法。采用 MMG(Ship Manoeuvring Mathematical Model Group)建模思想, 建立了六自由度拖船运动数学模型, 通过水下缆索任一微元段的受力平衡条件导出各微元段的动力学微分方程, 建立了拖缆模型。在此基础上考虑耦合边界条件, 建立了船-缆-锚-缆系统的运动数学模型, 并采用龙格库塔方法对船舶运动积分求解, 采用差分法对拖缆运动进行求解。仿真结果表明该模型可为制定抛锚控制策略提供参考依据, 并对 OSV 模拟器开发提供理论基础。

关键词: 海洋石油支持船; 系泊缆; 工作缆; 船舶运动数学模型; 有限差分

中图分类号: U661.33 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 12-3041-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201612023

Modeling and Simulation of Offshore Support Vessel Anchoring Operation

Sun Hongbo^{1,2}, Shi Chaojian¹, Lin Wenjin³

(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China; 2. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 3. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450, China)

Abstract: In order to understand the configurations of mooring line and working wire, tension variation at release point of working wire and the influence of the offshore support vessel during anchoring operation, a mathematical models of OSV anchoring operation was established. According to the MMG (Ship Manoeuvring Mathematical Model Group) ship motion mathematical modeling theory, a 6dof ship motion mathematical model was built. And a 6dof cable motion mathematical model was established with finite difference method. A coupling ship-cable-anchor-cable system model was established. The system motion simulations were carried out, and the results indicate that the model can be used to determine the control strategy of the systems during operation, and provide theory support for offshore oil ship simulator development.

Keywords: offshore support vessel; mooring line; working wire; ship motion mathematical model; finite difference method

引言

在海洋资源勘探和开发活动中, 海洋石油支持

船协助作业是不可避免的环节。海洋石油支持船按作业范围分为: 三用工作船、供应船、守护船、倒班船等。本文研究的是锚作船 AHV(Anchor Handling Vessel)采用提锚圈方式进行深水抛锚过程的建模与仿真^[1]。抛锚作业建模与仿真, 不仅要考虑水下柔索运动数学模型建模, 还要考虑工作缆的收放问题、工作缆锚作船端的边界处理问题以及工作缆、锚和系泊缆三者之间的耦合问题。因此, 该模型是一个



收稿日期: 2015-04-02 修回日期: 2015-07-11;
基金项目: 国家自然科学基金(51109090);
作者简介: 孙洪波(1977-), 男, 黑龙江, 博士, 讲师, 研究方向为海上交通模拟和环境评价; 施朝健(1957-), 男, 福建, 博导, 教授, 研究方向为海上交通模拟和环境评价。

<http://www.china-simulation.com>

• 3041 •

复杂的动态响应系统模型，对这个动态系统模型的研究，不仅可以更好的对抛锚过程进行控制，对保证抛锚系统设备的可靠性安全性具有理论上的指导作用和重要的工程应用价值，而且还可应用于该类模拟器的研制，并进行船员的训练与培训。

国内外已有很多学者分别针对拖船和拖缆的运动建模与仿真预报进行了大量的理论研究。对于水面船体的研究，从上世纪 60 年代以 Abkowitz^[2]为代表的整体建模理论的提出，以及上世纪 70 年代以小川阳弘等^[3]为代表的 MMG 模型的提出，发展到现阶段，船舶运动模型虽然在某些方面的模型精度还有提高的空间，但已能满足工程及船员培训的需要，并得到广泛的应用。水下拖缆自身运动的基础研究，早在上世纪 60 年代就已广泛地展开。拖缆水动力模型建模方法主要包括：集中质量法、有限元法、有限差分法和直接积分法等。例如：Walton and Polchaton^[4]首先采用集中质量法研究了海军武器试验中水下锚链的二维运动响应，并给出详细的求解算法和公式。中岛俊夫等^[5]建立了船舶系留锚链的三维集中质量法模型，并给出了详细的算例。Ablow 等^[6]在建立拖缆运动控制微分方程的基础上，采用有限差分法求解其的三维动态运动，与集中质量法相比空间与时间步长的选择具有更大的灵活性。有限元法和直接积分法更适用于拖缆静力分析，而不适合描述非定常状态下拖缆水动力性能^[7]。国内的王飞、陈英龙^[8-9]等在拖缆的建模与仿真方面，对集中质量法进行了详细的总结和研究；苑志江^[10]等采用变步长有限差分数值算法对水下拖曳系统进行数值计算与仿真，并给出了步长变化的设定原则与算法；文献[11-12]采用了考虑拖缆弯矩和扭矩的有限差分法，可以对拖缆在低应力情况下进行计算。

通常，抛锚系统主要由水面锚作船、工作缆、锚、系泊缆和海上平台组成，建模过程中必需考虑船缆之间的相互影响、缆和锚之间的耦合以及锚触底后的动态响应才能准确预报系泊缆和工作缆在抛锚过程中的缆型以及沿缆长的张力分布。但现有的众多相关研究，考虑到拖缆于拖船质量比较小而忽

略了船缆之间的相互作用，这必定会对整个系统的预报精度产生影响。文献[13]采用数值模拟手段，对水下拖缆的运动进行了仿真，但没有考虑船缆间的相互影响；文献[8]采用集中质量法，仅对三自由度船舶与拖缆完全耦合的运动响应做了详细分析。目前，对海洋石油支持船抛锚过程的研究多采用悬链模型进行静态的研究与分析^[14]，不能模拟和体现抛锚过程的动态响应。本文的研究方法为，首先采用 MMG 建模思想建立六自由度船舶运动模型，采用有限差分法建立拖缆模型，然后建立船缆相互作用，并考虑船-缆-锚耦合和缆长变化的系统模型，最后，利用该系统模型对静水中 500 m 水深，采用提锚圈抛锚方式的抛锚过程进行动态仿真分析。

1 船、缆系统运动数学模型

研究船舶和拖缆在水中的运动，一般采用两种坐标系统：惯性坐标系统和附体坐标系统，如图 1。

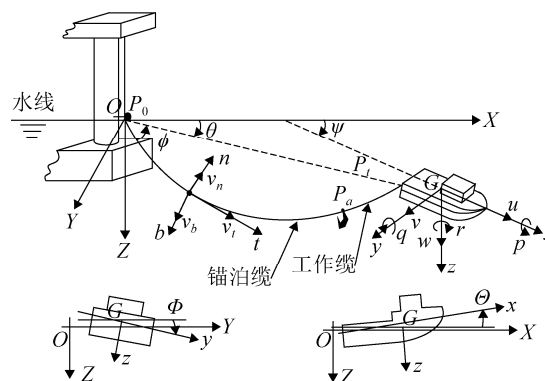


图 1 船缆坐标系统

图 1 中， $OXYZ$ 为固定于地球表面的惯性坐标系统，规定 X 指向正北， Y 指向正东， Z 垂直于地表指向上； $Gxyz$ 是原点位于船舶重心的附体坐标系。规定 x 指向船首， y 指向右舷， z 垂直于龙骨指向下，关于三个坐标轴的线速度分别为 u 、 v 和 w ，角速度为 p 、 q 和 r ； Θ 、 Φ 和 ψ 为船舶在 $OXYZ$ 坐标系下的欧拉角。 Pmb 是原点位于缆索上的附体坐标系，规定 t 为缆索切向， n 和 b 为缆索的两个法向，三个方向上的线速度分别为 v_t 、 v_n 和 v_b ； θ 、 φ 为缆索在 $OXYZ$ 坐标系下的欧拉角。

1.1 船舶运动数学模型

船舶的实际运动是一个具有 6 个自由度的复杂的运动。对于大多数情况下的船舶运动及控制而言, 可以忽略船舶垂荡、横摇和纵摇运动, 为了尽可能准确地反应船舶实际的运动姿态, 本文采用六自由度船舶运动数学模型, 其动力学方程如下:

$$\begin{cases} (m+m_x)(\dot{u}+qw-vr)=X_H+X_P+X_R+X_L \\ (m+m_y)(\dot{v}-pw+ur)=Y_H+Y_P+Y_R+Y_L \\ (m+m_z)(\dot{w}+pv-qu)=Z_H+Z_P+Z_R+Z_L \\ (I_x+J_x)\dot{p}+(I_z-I_y)qr=K_H+K_P+K_R+K_L \\ (I_y+J_y)\dot{q}+(I_x-I_z)pr=M_H+M_P+M_R+M_L \\ (I_z+J_z)\dot{r}+(I_y-I_x)pq=N_H+N_P+N_R+N_L \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中: } A_v = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi - \cos\phi\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 拖揽运动数学模型

设缆索是细长、柔性和圆柱形状。缆索受重力、水动力和惯性力作用, 不考虑缆索所受的扭矩。按照 Ablow 等^[6,16]提出的方法, 可将水下缆索任意一点处的动力学方程写成如下形式:

$$M \frac{\partial Y}{\partial s} = N \frac{\partial Y}{\partial t} + Q \quad (4)$$

式中: $Y = [T \ V_t \ V_n \ V_b \ \theta \ \varphi]^T$,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & V_b \cos\varphi & -V_n \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -V_b \sin\varphi & V_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & V_n \sin\varphi - V_t \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T \end{bmatrix},$$

式中: X 、 Y 、 Z 、 K 、 M 、 N 分别为作用于船体的力和力矩; m 、 m_x 、 m_y 、 m_z 分别为船舶质量和各附体坐标轴方向上的附加质量; I 、 J 结合下角标分别为绕各船舶附体坐标轴的转动惯量和附加转动惯量。下角标 H 表示船体所受的粘性流体力及力矩; 下角标 P 、 R 和 L 分别表示螺旋桨、舵和缆绳力及力矩。公式(1)中各参数及力的详细计算可参考文献^[15]。

船舶附体坐标系与惯性坐标系内船舶运动学物理量之间的关系分别为公式(2)和(3)。

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = A_v \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} w \sin\varphi + \frac{1}{2}\rho d(1+eT)^{1/2} \pi C_t V_t |V_t| \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2}\rho d(1+eT)^{1/2} C_n V_n (V_n^2 + V_b^2)^{1/2} \\ w \cos\varphi + \frac{1}{2}\rho d(1+eT)^{1/2} C_b V_b (V_n^2 + V_b^2)^{1/2} \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} \frac{-mV_t}{1+eT} & m & 0 & 0 & m_1 V_b \cos\varphi & -m_1 V_n \\ e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+eT \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(1+eT)\cos\varphi & 0 \\ \frac{-em_1 V_b}{1+eT} & 0 & 0 & m_1 & m_1 V_n \sin\varphi - m V_t \cos\varphi & 0 \\ \frac{-em_1 V_n}{1+eT} & 0 & m_1 & 0 & -m_1 V_b \sin\varphi & m V_t \end{bmatrix},$$

式中: ρ 为海水密度; g 为重力加速度; A 为缆横截面积; m 为每米缆的质量; ρA 为每米缆的附加质量, $m_1 = m + \rho A$; $w = (m - \rho A)g$ 为水中每米缆的质量; $d = (1 + eT)^{1/2} d_0$ 为拉伸后, 缆的直径, d_0 为未拉伸缆的直径, T 为缆索张力, $e = 1/EA$, E 为缆的杨氏模量; C_t 、 C_n 和 C_b 为拖揽的水动力系数。

缆索附体坐标系与惯性坐标系内缆索运动学物理量之间的关系由公式(5)确定。

$$\begin{bmatrix} dX/ds \\ dY/ds \\ dZ/ds \end{bmatrix} = (1+Te)\mathbf{B}_V \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{式中: } \mathbf{B}_V = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta & -\sin\varphi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\varphi\sin\theta & -\sin\varphi\sin\theta & \cos\theta \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \end{bmatrix}$$

将长度为 s_m 系泊缆和长度为 s_w 工作缆分成长度为 Δs_j 的微段, 节点数 $j = n_m + 1$ 代表系泊缆, $j = n_w + 1$ 代表工作缆; $\mathbf{Y}_j = [T \ V_t \ V_n \ V_b \ \theta \ \varphi]^T_j$ 表示每个节点, 包含 6 个变量。然后将方程组(4)在空间方向上进行中央差分, 时间方向上作向后差分, 得到 $6(n_m + n_w)$ 个, 含 $6(n_m + n_w + 2)$ 个未知变量的差分方程组, 用 i 表示时间步, 则差分方程组格式如下:

$$\begin{aligned} & \left[\mathbf{M}_j^i + \mathbf{M}_{j-1}^i \right] \frac{\mathbf{Y}_j^i - \mathbf{Y}_{j-1}^i}{\Delta s_j} = \mathbf{N}_j^i \frac{\mathbf{Y}_j^i - \mathbf{Y}_j^{i-1}}{\Delta t_i} + \\ & \mathbf{N}_{j-1}^i \frac{\mathbf{Y}_{j-1}^i - \mathbf{Y}_{j-1}^{i-1}}{\Delta t_i} + \mathbf{Q}_j^i + \mathbf{Q}_{j-1}^i \end{aligned} \quad (6)$$

2 模型的边界条件

为求解抛锚作业过程中船、缆和锚的三维动态运动, 除了要单独建立船和缆的运动模型外, 还要处理工作缆释放端、缆和锚连接点、系泊缆平台端以及锚触底时的边界条件使方程组(6)得到封闭。

2.1 工作缆释放端边界条件

工作缆释放端 P_t 节点处的边界条件由在惯性坐标系中, 锚作船上释放点处的速度和工作缆的释放速度 V_w 确定。如果 P_t 点在锚作船附体坐标系上的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 则工作缆释放端的边界条件可由下式确定:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ V_n \\ V_b \end{bmatrix}_{P_t} = \mathbf{B}_{V_{P_t}}^{-1} \mathbf{A}_V \begin{bmatrix} u + (qz_p - ry_p) \\ v + (rx_p - pz_p) \\ w + (py_p - qx_p) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于工作缆释放时, 缆长增加, 因此, 必须在仿真计算过程中动态的调整缆索节点数以及缆索运动方程的个数。具体方法是当缆长在 $i+1$ 时刻超过一个预定值后加入一个新的节点 \mathbf{Y}_{j+1}^{i+1} , 其具体表达式如下:

$$\mathbf{Y}_{j+1}^{i+1} = [T \ V_t \ V_n \ V_b \ \theta \ \varphi]^i_j \quad (8)$$

2.2 缆和锚连接点边界条件

从图 2 所示的系泊缆、锚和提锚圈的连接方式中可以看出, 将锚作为一小段与锚等质量等体积的不可拉伸的圆柱体处理进行仿真计算更为方便。 P_{a+1} 和 P_{a-1} 分别为锚与工作缆的连接端和锚与系泊缆的连接端, P_{wa} 和 P_{am} 分别为工作缆与锚的连接端和锚与系泊缆的连接点端。则在锚两端的连接点上存在如下关系:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{P_{wa}}^{-1} \begin{bmatrix} v_t \\ v_n \\ v_b \end{bmatrix}_{P_{wa}} = \mathbf{A}_{P_{a+1}}^{-1} \begin{bmatrix} v_t \\ v_n \\ v_b \end{bmatrix}_{P_{a+1}} \\ \mathbf{A}_{P_{a-1}}^{-1} \begin{bmatrix} v_t \\ v_n \\ v_b \end{bmatrix}_{P_{a-1}} = \mathbf{A}_{P_{am}}^{-1} \begin{bmatrix} v_t \\ v_n \\ v_b \end{bmatrix}_{P_{am}} \\ \mathbf{A}_{P_{wa}}^{-1} \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{P_{wa}} = \mathbf{A}_{P_{a+1}}^{-1} \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{P_{a+1}} \\ \mathbf{A}_{P_{a-1}}^{-1} \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{P_{a-1}} = \mathbf{A}_{P_{am}}^{-1} \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{P_{am}} \end{cases} \quad (9)$$

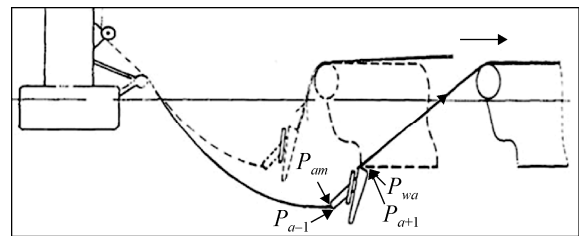


图 2 提锚圈连接方式

2.3 系泊缆平台端及锚触底时的边界条件

通常在锚作船协助抛锚作业时, 系泊平台不发

生位移, 即平台处于静止状态。因此, 系泊缆平台端 P_0 处的边界条件为:

$$\mathbf{B}_{V P_0} \begin{bmatrix} V_t \\ V_n \\ V_b \end{bmatrix}_{P_0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

锚触底时的边界条件与系泊缆平台端的处理方式相同。由于锚触底的前一刻的法向速度与切向速度变化不大, 因此, 本文的处理方式是锚触底后, 速度瞬间变为零。虽然, 抛锚过程中, 系泊缆可能先于锚触底, 但本文的模型没有考虑系泊缆与海底的相互作用, 而仅对锚和工作缆的触底过程进行考虑。此时方程组(6)变为 $6n_w$ 个含 $6(n_w + 1)$ 个未知变量的差分方程组, 其末端的边界条件为:

$$\mathbf{B}_{V P_{wa}} \begin{bmatrix} V_t \\ V_n \\ V_b \end{bmatrix}_{P_{wa}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

此后, 沿锚至工作缆释放端方向逐一判断工作缆节点是否触底, 触底的节点速度变为零, 同时方程组(6)减少 6 个方程。

2.4 船-缆耦合条件

在抛锚作业过程中, 锚作船与工作缆是相互作用、相互影响的。因此, 必须将船和缆视为一个相互影响的整体进行考虑。船-缆耦合的主要方法有两种, 一种是将拖船的运动方程离散成拖缆的方程形式, 然后联立成方程组一并求解。该方法虽然能够保证船和缆间的相互影响在时间步长上的同步性, 但使整个系统的运动方程复杂化, 并降低了解算效率。

本文采用将船和缆两个部分分别求解的方法。锚作船部分采用龙格库塔法, 而工作缆部分采用有限差分法。这种处理方法思路清楚, 物理意义明确, 求解算法简单明了。虽然在解算过程中, 是将工作缆前一时刻的张力作为作用船上的影响力, 但对于锚作船-缆这种低频运动系统, 在较小的时间步长下仍能保证足够的精度。

具体的方法是根据式(6)~(11), 在给定了初始

释放点速度的条件下采用 Newton 迭代法解算, 求得缆的形态及张力。在释放点 $P_t(x_P, y_P, z_P)$ 已知的情况下, 将求得的释放点张力 T_L 经惯性坐标和船体坐标变换后, 得到各船体坐标轴上的力和力矩, 如式(12)。

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \\ K_L \\ M_L \\ N_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_L (\cos \varphi \cos \theta \cos \psi + \\ \cos \varphi \sin \theta \sin \psi) - \\ T_L (\cos \varphi \cos \theta \sin \psi - \\ \cos \varphi \sin \theta \cos \psi) - \\ T_L \sin \varphi - \\ Y_L z_P + Z_L y_P - \\ X_L z_P + Z_L x_P - \\ X_L y_P + Y_L x_P \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)的计算结果代入到式(1)中, 用龙格库塔法解算式(1)的非线性微分方程组, 从而得到下一时刻释放点的速度。

3 仿真计算

拖缆运动的计算涉及解算大型差分方程组, 利用 MATLAB 软件在数值计算上的优势, 对抛锚系统模型进行求解仿真。本文以“海洋石油 681 号”为例, 采用 PCP 方式进行静水中, 500 m 水深抛锚作业仿真。锚重为 10 T, 锚作船、缆和锚的主尺度如表 1 和表 2^[1]。

表 1 锚作船主尺度

主要参数	数值	主要参数	数值
总长 L_{oa}/m	93.4	型深 D/m	9.5
两柱间长 L_{bp}/m	82.0	平均吃水 d_m/m	6.5
船宽 B/m	22.0	排水量 Δ/m^3	8 173

表 2 缆主尺度

主要参数	系泊缆数值	工作缆数值
总长 L_c/m	1 500	1 500
直径 d_c/m	0.084	0.077
弹性模量 E/m	196×10^9	196×10^9
质量 $m/(kg \cdot m^{-1})$	126	24.7
切向阻力系数 C_t	0.02	0.02
法向阻力系数 C_b, C_n	2.0	2.0

为验证该模型的可行性与精确性, 以 1 500 m 长的系泊缆为例进行不同拖力下的计算仿真, 并与

实验结果^[1]进行比对。结果如图 3。

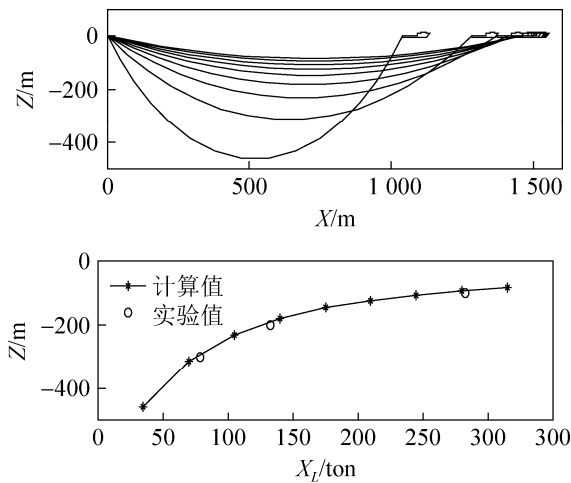


图 3 不同拖力下的拖缆构型

通过与实验数据的比较,说明本模型算法不仅是可行的,而且在精度上完全满足实际工程计算要求。

为了解海洋石油支持船抛锚作业中,系泊缆和工作缆在抛锚过程中的缆型,工作缆释放端的张力变化以及对锚作船的影响,以 500 m 水深抛锚为例进行仿真计算。在提锚圈布锚作业中,最具代表性的关键步骤之一是锚作船到达目标位置后,平台刹住锚链,锚作船降低推进功率,同时开始放锚^[1]。本文的仿真计算就是针对该过程进行的。仿真结果如图 4~6 所示。

图 4 为 500 m 抛锚作业仿真过程中,系泊缆、锚、工作缆以及锚作船的运动过程。仿真过程开始于,平台已经放出 1 500 m 系泊锚链并刹住锚链,锚作船航行到距平台 1 050 m 的位置。此时,锚作船以 1 节左右的速度低速前行,并以 0.5 m/s 的速度放锚直到锚触底。从图 4 中可以看出部分系泊缆位于水深线以下,原因是本模型没有对系泊缆触底进行考虑,而仅考虑了锚和工作缆触底后的情况。同时还可以看出,当锚触底后,工作缆而呈现松弛状态,参考图 5 可知,其原因是锚触底后工作缆受力瞬间减小所致。

从图 6 中可以看出,锚作船在抛锚过程中,受

工作缆的影响,其纵摇角和垂荡值变化不大,但当锚触底瞬间纵摇角和垂荡值突然减小。这一变化也符合实际,同时也是操船人员判断锚触底的依据。

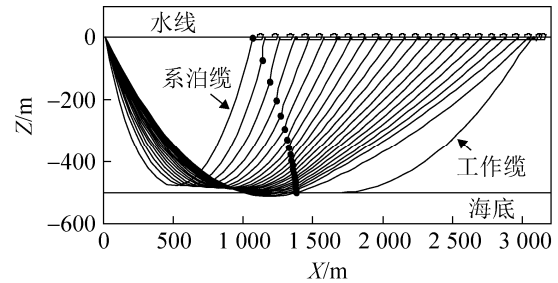


图 4 缆和锚及锚作船的运动过程

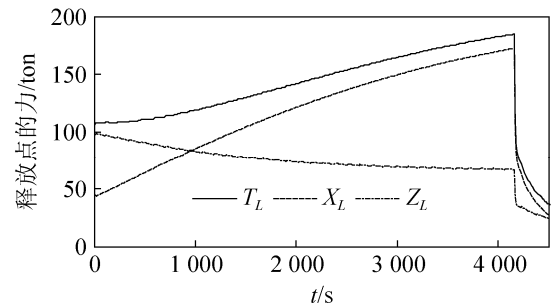


图 5 释放点受力变化

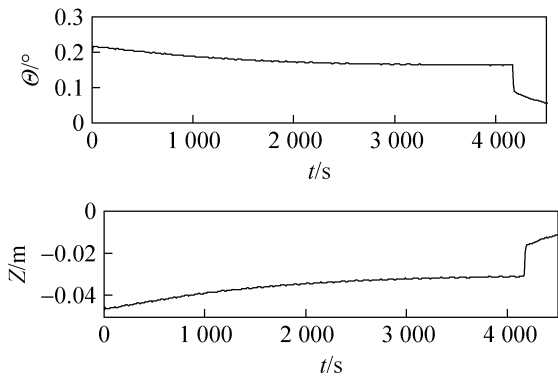


图 6 锚作船纵摇与垂荡变化

4 结论

本文为解海洋石油支持船抛锚作业中,系泊缆和工作缆在抛锚过程中的缆型,工作缆释放端的张力变化以及对锚作船的影响,建立了锚作船放锚过程的系统模型并进行了计算仿真。计算仿真结果表明,本文建立的模型能够实时计算出锚作船放锚过程中,释放端的张力变化以及其对锚作船的运动影

响, 对抛锚过程进行控制, 对保证抛锚系统设备的可靠性安全性具有理论上的指导作用和重要的工程应用价值, 为后续考虑风、流和浪影响下的抛锚作业研究提供理论基础。同时, 本模型能够体现出锚作船在放锚过程中关键操作步骤的动态响应, 因此, 该模型也可以应用于该类模拟器的研制, 并进行船员的训练与培训。

参考文献:

- [1] 林文锦, 邵哲平. 海洋石油支持船抛起锚作业技术及应用指导书 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 217-220.
- [2] Abkowitz M A. Lectures on Ship Hydrodynamics Steering and Manoeuvability [R]// Hydro-and Aerodynamics Laboratory Report No. Hy-5, Lyngby, Denmark, 1964.
- [3] 小川陽弘, 小山健夫, 貴島勝郎. MMG 報告-I 操縦運動の数学モデルについて [J]. 日本造船學會志 (S0386-1597), 1977, 14 (575): 192-198.
- [4] Walton T S, Polachech H. Calculation of Transient Motion of Submerged Cables [J]. Mathematics of Computation (S0025-5718), 1960, 14 (69): 27-46.
- [5] 中嶋俊夫, 元良誠三, 藤野正隆. 質点系モデルによる係留ラインの 3 次元動的解析法 [J]. 日本造船学会論文集 (S0514-8499), 1983, 538 (154): 192-202.
- [6] Ablow C M, Schechter S. Numerical Simulation of Undersea Cable Dynamics [J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 1983, 10(6): 443-457.
- [7] 苑志江, 金良安, 田恒斗, 等. 海洋拖曳系统的水动力理论与控制技术综述 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(2): 408-420.
- [8] 王飞, 黄国樑, 伍生春. 水下拖曳系统缆-船耦合运动模拟 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(4): 571-575.
- [9] 陈英龙, 赵勇刚, 周华, 等. 大型中层拖网网具系统的仿真研究 [J]. 浙江大学学报, 2014, 48(4): 625-632.
- [10] 苑志江, 金良安, 田恒斗, 等. 海洋拖曳系统运动方程的变步长有限差分数值仿真 [J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(1): 95-101.
- [11] Liu Tao, Zhang Weijing, Ma Jie, et al. Transient Dynamic Analysis of Towed Low-tension Cable with Experimental Verification [J]. Journal of Ship Mechanics (S1007-7294), 2013, 17(3): 197-213.
- [12] 沈晓玲, 连琏, 徐雪松. 拖缆动力学离散化计算的后处理方法研究 [J]. 海洋工程, 2011, 29(2): 111-121.
- [13] 张峰, 朱克强, 蒋凯东. 拖船操纵运动中水下拖缆的数值模拟分析 [J]. 港工技术, 2009, 46(6): 39-42.
- [14] L A Lien Wennersberg. Modeling and Simulation of Anchor Handling Vessels [D]. Norwegian University of Science and Technology, 2009.
- [15] 张秀凤. 航海模拟器中六自由度船舶运动数学模型的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [16] V K Srivastava, YVSS Sanyasiraju, Mohammad Tamsir. Dynamic Behavior of Underwater Towed-cable in Linear Profile [J]. International Journal of Scientific & Engineering Research (S2229-5518), 2011, 2(7): 1-10.