

单点系泊潜标系统动力学建模与姿态分析

齐占峰, 秦玉峰, 史 健, 贾立双

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘 要: 通过对单点系泊潜标进行动力学分析, 利用集中质量法建立系统的动力学模型, 编制 Matlab 仿真程序, 通过数值模拟获取不同海流条件下, 分析潜标系统的姿态。文中将一个典型潜标系统的浮球、锚链、重力锚等部件, 利用集中质量法简化为节点, 通过模拟真实环境中的海流流速在垂直方向的分布, 设计 1~5 m/s 的流速剖面分布。将节点的物理参数和海流参数代入仿真程序中, 得到各节点的姿态、节点间张力以及重力锚与海底摩擦力等数据。分析仿真结果, 海流流速与节点的偏降、节点间的张力以及重力锚与海底的摩擦力成正比, 仿真结果与实际情况相符。文中设计的建模方法和仿真程序可以为单点系泊潜标的总体设计、姿态估算、锚系配置提供工程参考。

关键词: 潜标; 集中质量法; 动力学模型; 姿态分析

中图分类号: P715.5; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1003-2029(2019)01-0018-07

海洋潜标系统是对海洋水下环境进行长期、定点、多参数剖面观测的仪器设备系统, 是海洋环境立体监测系统的重要组成部分。海洋潜标系统具有观测时间长、隐蔽、测量不易受海面气象条件影响, 可以在极端海况下完成观测任务, 在国外, 20 世纪 70 年代以来就得到了广泛的应用。20 世纪 90 年代以来, 随着我国海洋科学研究、海洋综合利用和国防事业发展的需要, 我国对海洋环境监测的力度不断加强, 对海洋水下环境监测仪器设备的需求日益增加, 海洋潜标系统在我国也逐渐得到了较广泛的应用。

潜标系统的设计是必须考虑布放环境条件、所选仪器性能、连接结构和布放回收方法的系统工程, 主要包括系统配置设计、姿态和系统受力分析和结构连接及其可靠性设计。

1 潜标系统坐标系

潜标系统的构成复杂, 部件和绳索的种类很多, 如图 1 所示为典型潜标系统组成示意图。本文利用集中质量法对潜标系统进行简化, 将主要的部件如 CTD、海流计、声学释放器等简化为一个单独

的质点, 这样在原理上保证重要部件的计算参数准确度。同时将不同的绳缆简化成质点和无质量弹簧的形式, 弹簧和质点之间通过铰接的型式连接。

将潜标系统简化成为集中质量弹簧系统, 并建立如图 2 所示的笛卡尔全局坐标系 $O-XYZ$, 定义该坐标系的 X 、 Y 、 Z 轴的方向。将 Z 轴定义为水的深

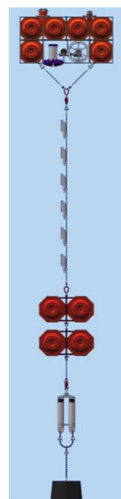


图 1 潜标系统示意图

Fig.1 submersible buoy system schematic diagram

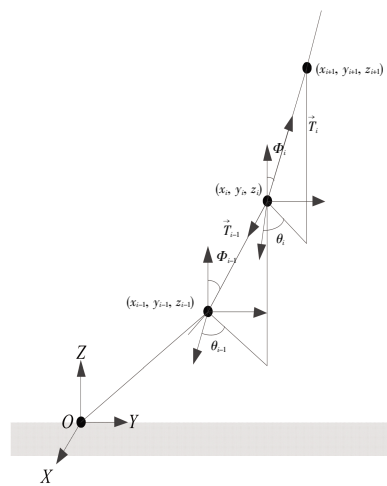


图 2 节点 i 的坐标

Fig.2 the coordinates of node i

收稿日期: 2018-04-11

基金项目: 海洋公益性行业专项资助项目 (201405006-2)

作者简介: 齐占峰 (1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为海洋移动观测技术。E-mail: 596365272@qq.com

度方向即竖直向上,将 X 轴 Y 轴定义为海平面的方向,将 O 点定义在潜标重力锚的质心上。为了描述潜标系统各个节点在 O - XYZ 坐标系下的姿态,引入了方向角 θ 和俯仰角 Φ 。结合节点的位置信息、方向角和俯仰角建立了节点 i 的坐标示意图,如图 2 所示。

节点 i 的坐标写成矩阵形式则 i 的坐标表示为:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \end{pmatrix} + L_{i-1} \cdot \begin{pmatrix} \sin\beta_{i-1} \cdot \cos\alpha_{i-1} \\ \sin\beta_{i-1} \cdot \sin\alpha_{i-1} \\ \cos\beta_{i-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: L_{i-1} 为节点之间的空间距离, $L_{i-1} = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}$ 。

由节点 $i-1$ 和节点 i 的瞬时坐标值可以得到方向角和俯仰角的瞬时值,方向角 α 和俯仰角 β 利用坐标值表示的表达式为:

$$\alpha_{i-1} = \arctan\left(\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right) \quad (2)$$

$$\beta_{i-1} = \arccos\left(\frac{z_i - z_{i-1}}{L_{i-1}}\right) \quad (3)$$

2 潜标系统数学建模

根据图 3 所示,可以得到节点 i 的运动学方程为:

$$m_i \cdot \ddot{\mathbf{a}}_i = \vec{B}_i + \vec{G}_i + \vec{F}_{d_i} + \vec{F}_{l_i} + \vec{T}_i + \vec{T}_{i-1} + \vec{f}_i \quad (4)$$

式中:

m_i 为节点 i 的质量; $\ddot{\mathbf{a}}_i$ 为节点 i 的加速度矢量; $\vec{B}_i$ 为节点 i 受到的浮力, $B_i = \rho \cdot g \cdot V_i$; $\vec{G}_i$ 为节点 i 受到的重力, $G_i = m_i \cdot g$; $\vec{F}_{d_i}$ 为在水流 U_i 下节点 i 受到的水阻力矢量; $\vec{F}_{l_i}$ 为节点 i 受到的惯性力矢量; $\vec{T}_i, \vec{T}_{i-1}$ 为节点 i 受到的绳的张力矢量; $\vec{f}_i$ 为节点 i 受到的海底作用力矢量。

节点 i 受到张紧力 $\vec{T}_i$ 和 $\vec{T}_{i-1}$ 的作用,根据上节建立的坐标系在 x, y, z 方向进行分解,得到张紧力在 3 个方向上的解析方程:

$$\begin{cases} \vec{T}_i + \vec{T}_{i-1} = T_i \sin\beta_i \cos\alpha_i - T_{i-1} \sin\beta_{i-1} \cos\alpha_{i-1} \\ \vec{T}_i + \vec{T}_{i-1} = T_i \sin\beta_i \sin\alpha_i - T_{i-1} \sin\beta_{i-1} \sin\alpha_{i-1} \\ \vec{T}_i + \vec{T}_{i-1} = T_i \cos\beta_i - T_{i-1} \cos\beta_{i-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中:由于潜标系统在主浮体和重力锚节点与中间节点受力型式有区别,为了能够统一解析方程的表达,设置 $\vec{T}_0 = 0, \vec{T}_n = 0$ 。

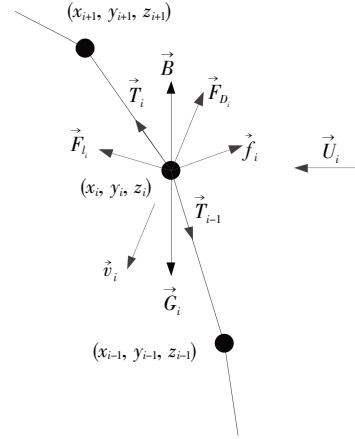


图 3 节点 i 受力分析简图

Fig.3 static analysis of node i

潜标在布放过程中受到复杂的环境载荷,为方便研究系统的运动过程简化环境载荷,只考虑海流对潜标系统各个部件的水阻力的影响。水阻力是部件在水中运动过程中水流流速 $\vec{U}$ 和部件的运动速度 $\vec{v}$ 耦合作用。按照 Blow 和 Huang 等^[14-15]关于将节点的流体水阻力的计算公式,得到部件 i 的流体水阻力的表达式:

$$\vec{F}_{d_i} = \frac{1}{2} \rho C_{d_i} A_i \left| \vec{U}_i - \vec{v}_i \right| (\vec{U}_i - \vec{v}_i) \quad (6)$$

式中: C_{d_i} 为节点 i 的流体阻力系数; A_i 为节点 i 在水流方向上的迎流面积; $\vec{U}_i$ 为节点 i 所在深度的流速矢量; $\vec{v}_i$ 为节点 i 的运动速度矢量。

将 $\vec{F}_{d_i}$ 的矢量公式在坐标系中 x, y, z 方向进行分解,得到 3 个方向的标量方程:

$$\begin{cases} \vec{F}_{d_{ix}} = \frac{1}{2} \rho C_{d_i} A_i \left| \vec{U}_i - \vec{v}_i \right| (\vec{U}_{ix} - \vec{v}_{ix}) \\ \vec{F}_{d_{iy}} = \frac{1}{2} \rho C_{d_i} A_i \left| \vec{U}_i - \vec{v}_i \right| (\vec{U}_{iy} - \vec{v}_{iy}) \\ \vec{F}_{d_{iz}} = \frac{1}{2} \rho C_{d_i} A_i \left| \vec{U}_i - \vec{v}_i \right| (\vec{U}_{iz} - \vec{v}_{iz}) \end{cases} \quad (7)$$

当节点在流体中做加速运动时,节点要引起周围流体进行加速运动。由于流体的惯性将引起节点运动的驱动力大于节点本身质量所产生的惯性力。因此节点的惯性力主要由节点的附加质量和节点排开水体积引起的惯性力组成。参考流体力学与海

洋工程结构力学中的相关知识,惯性力的表达式:

$$\text{附加质量的惯性力: } \vec{F}_{lim} = m_{a_i} \left(\frac{d\vec{U}_i}{dt} - \frac{d\vec{v}_i}{dt} \right);$$

$$\text{流体排开体积的惯性力: } \vec{F}_{liv} = \rho V_i \left(\frac{d\vec{U}_i}{dt} \right);$$

节点 i 的惯性力 $\vec{F}_i$ 的数学表达式:

$$\vec{F}_i = m_{a_i} \left(\frac{d\vec{U}_i}{dt} - \frac{d\vec{v}_i}{dt} \right) + \rho V_i \frac{d\vec{U}_i}{dt} = m_{v_i} \frac{d\vec{U}_i}{dt} - m_{a_i} \frac{d\vec{v}_i}{dt} \quad (8)$$

式中: C_m 为附加质量系数, $m_{a_i} = C_m \rho V_i$; m_{v_i} 为总体附加质量, $m_{v_i} = (1 + C_m) \rho V_i$;

将 $\vec{F}_i$ 的矢量公式在坐标系中 x, y, z 方向进行分解, 得到 3 个方向的标量方程:

$$\begin{cases} \vec{F}_{li_x} = m_{v_i} \frac{dU_{i_x}}{dt} - m_{a_i} \frac{dv_{i_x}}{dt} \\ \vec{F}_{li_y} = m_{v_i} \frac{dU_{i_y}}{dt} - m_{a_i} \frac{dv_{i_y}}{dt} \\ \vec{F}_{li_z} = m_{v_i} \frac{dU_{i_z}}{dt} - m_{a_i} \frac{dv_{i_z}}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} m_i + m_{a_i} & 0 & 0 \\ 0 & m_i + m_{a_i} & 0 \\ 0 & 0 & m_i + m_{a_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dv_{i_x}}{dt} \\ \frac{dv_{i_y}}{dt} \\ \frac{dv_{i_z}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \rho C_d A_i |U_i - v_i| (U_i - v_i) + m_{v_i} \frac{dU_{i_x}}{dt} + T_i \sin \beta_i \cos \alpha_i - T_{i-1} \sin \beta_{i-1} \cos \alpha_{i-1} + f_{ci_x} \operatorname{sgn}(v_{i_x}) \\ \frac{1}{2} \rho C_d A_i |U_i - v_i| (U_i - v_i) + m_{v_i} \frac{dU_{i_y}}{dt} + T_i \sin \beta_i \cos \alpha_i - T_{i-1} \sin \beta_{i-1} \sin \alpha_{i-1} + f_{ci_y} \operatorname{sgn}(v_{i_y}) \\ \frac{1}{2} \rho C_d A_i |U_i - v_i| (U_i - v_i) + m_{v_i} \frac{dU_{i_z}}{dt} + T_i \cos \beta_i - T_{i-1} \cos \beta_{i-1} + k(h + z_i) + c \dot{v}_{i_z} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: 当 $i=1$ 和 $i=n$ 的表达式略有不同, 假定 $\vec{T}_0 = 0, \vec{T}_n = 0$, 将系统的动力学方程组简化为一种形式便于系统动力学仿真。

3 潜标系统姿态数值模拟

由于真实海洋环境中不同深度的海流差异巨大, 且流速在 X, Y, Z 方向均有速度分量, 使得仿真难度较大。由于本文是将潜标的姿态分析简化到 $O-YZ$ 平面, 因此假设不同深度流速为沿 OY 方向, 考虑到近海底的海流流速较小, 因此假设海底流速为 0 m/s 。仿真的流速数据如表 1 所示, 流速数据通过线性插值获取 $0 \sim 200 \text{ m}$ 之间的流速剖面, 流速剖面如图 4 所示。

当潜标系统节点着地时, 节点受到海底在 z 方向的支持力和在 x 和 y 方向的摩擦力, 可以将海底等效成非线性弹性阻尼来考虑。为了简化系统分析模型, 采用常洪波和 Gobat 有关海底摩擦力的方法^[10-16], 将海底等效成线性弹性阻尼模型来考虑。将海底在 x 和 y 方向上的摩擦力用库伦摩擦力的相关理论来计算。由此可以得到节点 (包括重力锚) 在着地时的受力情况, 并得到着地节点的 f_i 的方程, 并将 $\vec{f}_i$ 的表达式在 x, y, z 方向进行分解, 得到方程组为:

$$\begin{cases} f_i = f_{ci_x} + f_{ci_y} + f_{ci_z} \\ f_{ci_x} = -\mu f_{ci_z} \operatorname{sgn}(v_{i_x}) \\ f_{ci_y} = -\mu f_{ci_z} \operatorname{sgn}(v_{i_y}) \\ f_{ci_z} = k(-z_i - h) - c v_{i_z} \end{cases} \quad z_i \leq -h \quad (10)$$

式中: f_i 为节点 i 的库伦摩擦力; μ 为库伦摩擦系数, 用于表示节点与海底的摩擦; k 为海底等效弹性刚度系数; c 为等效阻尼系数; $\operatorname{sgn}(v_{i_x})$ 为符号函数, 用于表示摩擦力方向与运动速度相反。

根据前文潜标系统部件的受力分析, 得到 $\vec{F}_d, \vec{F}_l, \vec{T}_i, \vec{f}_i$ 的数学表达式, 将其表达式代入到方程 (2) 中, 得到潜标系统动力学方程的矩阵型式:

表 1 流速剖面数据

Tab.1 current profile data

		深度/m								
		0	20	40	60	70	80	100	160	200
流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1	0.6	0.3	0.15	0.1	0.075	0.05	0.03	0	0
	2	1.2	0.6	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0	0
	3	1.8	0.9	0.45	0.3	0.225	0.15	0.09	0	0
	4	2.4	1.2	0.6	0.4	0.3	0.2	0.12	0	0
	5	3	1.5	0.75	0.5	0.375	0.25	0.15	0	0

仿真计算流程如图 5 所示, 首先初始化各节点参数; 然后判断总浮力和总重力, 若总浮力大于总重力则说明潜标配置错误, 结束仿真; 然后计算各节点的水阻力、节点间张力以及张力角度等参数; 利用张力和张力角度, 计算节点间的弹性伸长量, 进而计算各节点的实际位置; 判断当前锚是否到

底,若没到底修正各节点的位置,并重复计算所有节点的数据。若锚到达海底,结束仿真计算,输出仿真结果。

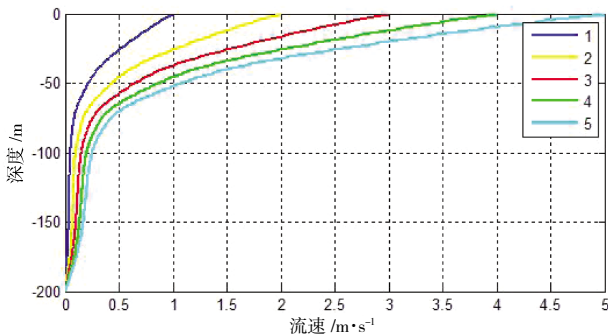


图 4 1~5 m/s 流速分布曲线
Fig.4 current profile of 1~5 m/s

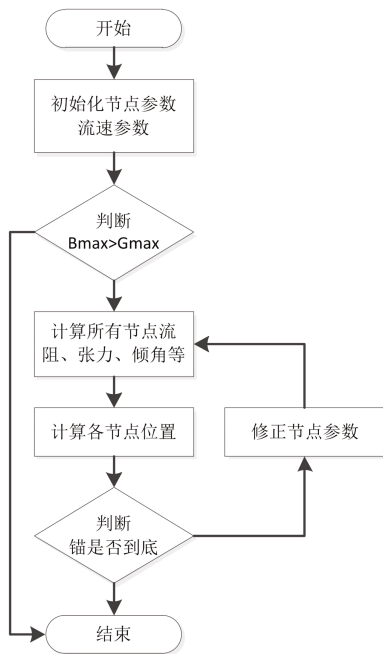


图 5 仿真计算流程图
Fig.5 simulation flowchart

以图 6 所示的潜标系统为例,对单点系泊潜标在流场环境下的姿态进行分析。该潜标系统主要包括:浮球、重力锚、锚链以及卸扣。根据集中质量法,将不同结构部件单独考虑,浮球、重力锚和卸扣不考虑它们的长度,将其质量集中成为一个节点。将一个锚链分为两个等长段,每段的质量集中为一个节点,并设置节点的长度属性为锚链长度的一半。简化后的节点参数如表 2 所示。潜标节点外形复杂,浮球、浮球以及不同锚链的水动力系数获取困难,因此本文中各节点的水阻力系数参考 RK Dewey^[9]的试验数据,应用在本文的仿真程序中。

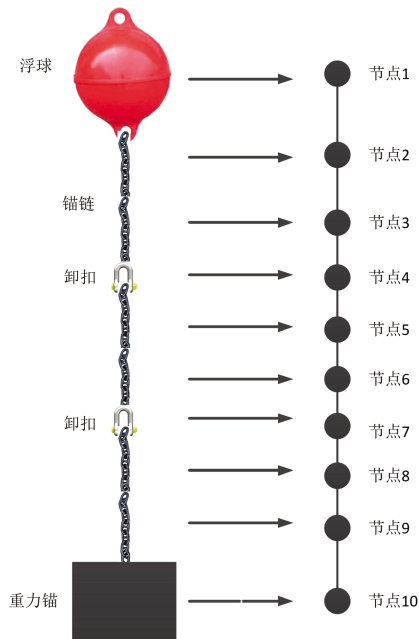


图 6 单点系泊潜标系统及集中质量模型
Fig.6 submersible buoy system and simplified model

表 2 节点物理参数
Tab.2 the physical parameters of nodes

节点	参数					
	长度 /m	弹性 模量/Pa	横截 面积/m ²	重力 /kg	浮力 /N	迎流 面积 /m ²
浮球	6.75	2.00E+11	1.00E-04	2000	37000	0.57
锚链 11	13.5	2.00E+11	1.00E-04	135	174.6	0.27
锚链 12	6.75	2.00E+11	1.00E-04	135	174.6	0.27
卸扣	6.75	2.00E+11	1.00E-04	1	1	0.01
锚链 21	13.5	2.00E+11	1.00E-04	135	174.6	0.27
锚链 22	6.75	2.00E+11	1.00E-04	135	174.6	0.27
卸扣	6.75	2.00E+11	1.00E-04	1	1.3	0.01
锚链 31	6.75	2.00E+11	1.00E-04	135	174.6	0.27
锚链 32	13.5	2.00E+11	1.00E-04	135	174.6	0.27
重力锚	0	0.00E+00	0.00E+00	15000	13000	0.4

表 3 系统物理参数
Tab.3 the physical parameters of the system

名称	摩擦系数	密度/kg·m ³	水深/m
参数	0.5	1 030	100

本文以利用 MATLAB 软件实现潜标的姿态仿真研究,将上述参数代入到仿真程序中,得到不同流速下的姿态如图 7 所示,随流速的增大,潜标姿态变化明显。表层流速 1 m/s 时,节点 1 水平偏移 1.89 m,表层流速 5 m/s 时,节点 1 的水平偏移量为 30.6 m。

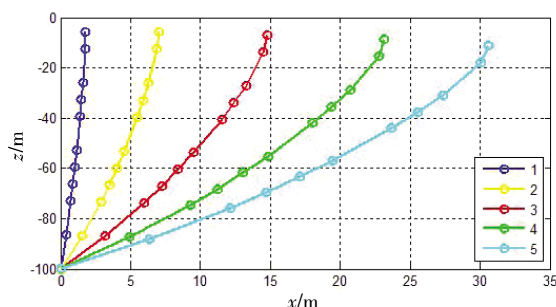


图 7 1~5 m/s 流速下系统的姿态曲线

Fig.7 attitudes of the system at 1~5 m/s

潜标系统在不同流速下对应各节点之间的张力曲线如图 8 所示,可以得知在流速增大的过程中越接近海面节点张力值变化越明显,这是由于节点 1 在静力平衡状态下节点间张力仅需平衡自身浮力,在重力锚节点节点间张力需要平衡整个锚系结构的浮力。

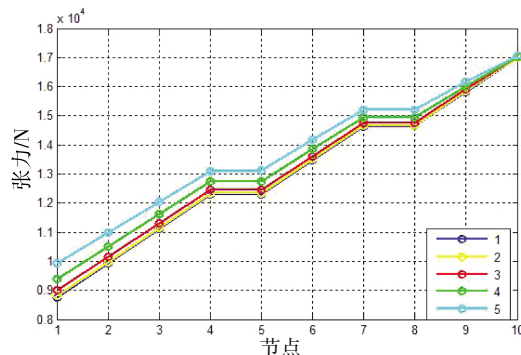


图 8 节点间张力曲线

Fig.8 inter-node tension curve

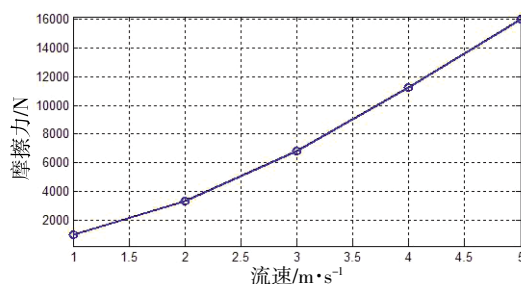


图 9 重力锚海底摩擦力曲线

Fig.9 seafloor friction curve of the anchor

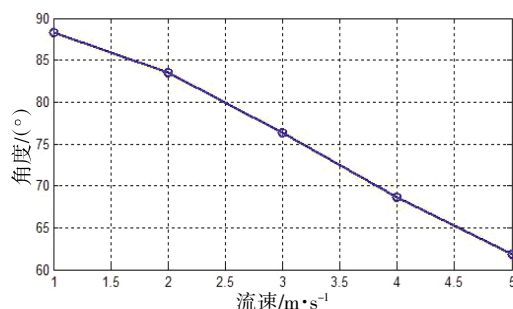


图 10 节点 10 张力角度

Fig.10 Node 10 Tension angle

随着流速的不断增大,重力锚与锚链之间的张力逐渐增大,在没有走锚的情况下,重力锚与海底之间的摩擦力与流速之间基本呈线性关系,如图 9 所示。重力锚与锚链之间的角度随流速的增大而减小,由 88.34° 减小为 61.8° ,角度随流速的变化曲线如图 10 所示。

4 结论

本文在笛卡尔坐标系下给出节点的坐标,利用集中质量法简化潜标系统并进行动力学分析,给出各节点的水阻力、惯性力、重力浮力以及摩擦力等,代入到系统的运动学方程中获得系统的动力学方程。编写 MATLAB 仿真程序,研究在流速剖面作用下典型潜标系统的姿态和节点间张力分布情况和变化规律。随着流速的增加,节点间的张力呈现线性增长,重力锚与海底之间摩擦力也基本呈线性增长,仿真结果与实际情况较为相符。

本文设计的建模方法和仿真程序为单点系泊潜标系统的总体设计和锚系设计提供理论参考。本文研究潜标在静力平衡下的姿态分析和仿真,为下一步潜标系统布放过程的动态仿真分析打下理论基础。

参考文献:

- [1] Mavrakos S A, Chatjigeorgiou J. Dynamic behaviour of deep water mooring lines with submerged buoys [J]. Computers & Structures, 1997, 64(1):819-835.
- [2] Sarkar A, Taylor R E. Dynamics of mooring Cables in Random seas[J]. Journal of Fluids & Structures, 2002, 16(2):193-212.
- [3] Kamman J W, Huston R L. Multibody dynamics modeling of variable length cable systems [J]. Multibody System Dynamics, 2001, 5(3): 211-221.

- [4] Migliore H J, Meggitt D J. Numerical sensitivity study of ocean cable systems [J]. Journal of the Waterway Port Coastal & Ocean Division, 1978,104(3):263-274.
- [5] 陈小红, 黄祥鹿. 单点系泊海洋资料浮标的动力分析[J]. 中国造船, 1995(3):1-8.
Chen Xiaohong, HUANG Xianglu. Dynamic analysis of a single moored sea data buoy[J]. Shipbuilding OF China, 1995(3):1-8.
- [6] 张志平, 顾秋青, 李超. Hypack 软件在布放深水潜标中的应用[J]. 世界海运, 2011, 34(8):13-15.
ZHANG Zhiping, GU Qiuqing, LI Chao. Application of deploying submersible buoy by Hypack [J]. Marine Technology, 2011, 34(8): 13-15.
- [7] 王磊. 单点系泊系统的动力学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Wang Lei. Study on dynamics of single-point mooring systems[D]. Ocean University OF China, 2012.
- [8] R E Baddour, W Raman-Nair. Marine tether dynamics: retrieval and deployment from a heaving platform[J]. Ocean Engineering, 2002, 29: 1633-1661.
- [9] Dewey, R. K. Mooring design & dynamics – a Matlab package for designing and analyzing oceanographic moorings [J]. Marine Models, 1999(1):103-157.
- [10] J I Gobat, M A Grosenbaugh. Time-domain numerical simulation of ocean cable structures [J]. Ocean Engineering, 2006, 33: 1373-1400.
- [11] A. Umar, T K Datta, Nonlinear response of a moored buoy[J]. Ocean Engineering, 2003,30:1625-1646.
- [12] 季春群. 各种参数对单点系泊运动及载荷的影响[J]. 中国海洋平台, 2000, 15(1):19-23.
Ji Chunqun. The influences of various parameters on the movement and load of single point mooring system [J]. China Offshore Platform, 2000, 15(1):19-23.
- [13] 肖越, 王言英. 三维锚泊系统时域计算分析[J]. 船舶力学, 2005, 9(5):8-16.
XIAO Yue, WANG Yan-ying. Time-domain analysis for 3-D mooring system[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(5):8-16.
- [14] Ablow C M, Schechter S. Numerical simulation of undersea cable dynamics[J]. Ocean Engineering, 1983, 10(6):443-457.
- [15] Huang S. Dynamic analysis of three-dimensional marine cables[J]. Ocean Engineering, 1994, 21(6):587-605.
- [16] 常洪波, 李红霞, 黄一, 等. 海底倾斜及摩擦对系泊缆绳张力的影响[C]// 船舶水动力学学术会议, 2013.
Chang Hongbo, Li Hongxia, Huang Yi. Effect of seabed inclination and friction on dynamic tension of mooring cables [C]// Academic Conference on Ship Hydrodynamics, 2013.

Research on the Dynamic Modeling and Attitude Analysis of the Single-Point Submersible Buoy System

QI Zhan-feng, QIN Yu-feng, SHI Jian, JIA Li-shuang

National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

Abstract: By analyzing the dynamics of single-point submersible buoy system, the dynamic model of the system was established by the lumped mass method, and the Matlab simulation program was programmed. By numerical simulation the attitude of submersible buoy system under different sea current conditions was obtained. By analyzing the distribution of the currents in the vertical direction, a current profile of 1–5 m/s was design in this paper. Using the lumped-mass method, the components of submersible buoy system were simplified to nodes. The physical parameters of the nodes and current parameter ware brought into the simulation program, and the attitude, the tension between the node, and the seafloor friction data were obtained. The simulation results that the attitude, the tension and the friction were proportional to the current velocity are in accordance with the actual situation. The modeling method and simulation program designed in this paper can provide engineering reference for the overall design, attitude estimation and mooring configuration of submersible buoy systems.

Key words: submersible buoy system, lumped-mass method, dynamic modeling, attitude analysis.