

8-7-2020

Modeling and Simulation of Mooring System in Anchor Handling Simulator

Zhongxian Zhu

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Yin Yong

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Helong Shen

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, 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 Mooring System in Anchor Handling Simulator

Abstract

Abstract: Dynamics modeling and simulation of the mooring system are the key technologies in Anchor Handling Simulator (AHS), the model's quality and the visualization have great impact on the real-time, fidelity and immersed feeling in the scene simulation, and hence affect the quality of training on the anchor handling operation by using AHS. *Based on the Lumped Mass Method the dynamics model of the mooring line was built up, and 4-order Runge-Kutta method was used to solve the model, and the computing speed could meet the demand on real-time; A model for the mooring line embedded in seabed soil was established, the modeling of line-seabed interaction was realized, and the results can reflect the line's motion in seabed soil; By applying a series of visualization technologies, the dynamic simulation of the anchor handling operation in offshore engineering was realized.*

Keywords

anchor handling simulator, mooring system, lumped mass method, dynamics model

Recommended Citation

Zhu Zhongxian, Yin Yong, Shen Helong. Modeling and Simulation of Mooring System in Anchor Handling Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2285-2290.

锚操作模拟器中锚泊系统的建模与仿真

朱忠显, 尹勇, 神和龙

(大连海事大学航海学院, 大连 116026)

摘要: 锚泊系统的建模与仿真是锚操作模拟器中的关键技术之一, 模型的质量和可视化效果将会影响到场景仿真的实时性、逼真度和沉浸感, 从而影响到利用模拟器进行抛起锚培训的效果。基于集中质量法建立了锚泊系统的动力学模型, 采用四阶龙格-库塔法进行了数值解算, 模型解算的速度能够满足仿真的实时性要求; 建立了非线性海床土中锚泊线的受力模型, 实现了锚泊线与海床土的交互建模, 能够反映嵌入海床土中锚泊线的运动情况; 采用了一系列可视化技术, 实现了海洋工程中锚操作过程的动态仿真及可视化。

关键词: 锚操作模拟器; 锚泊系统; 集中质量法; 动力学模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 10-2285-06

Modeling and Simulation of Mooring System in Anchor Handling Simulator

Zhu Zhongxian, Yin Yong, Shen Helong

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Dynamics modeling and simulation of the mooring system are the key technologies in Anchor Handling Simulator (AHS), the model's quality and the visualization have great impact on the real-time, fidelity and immersed feeling in the scene simulation, and hence affect the quality of training on the anchor handling operation by using AHS. Based on the Lumped Mass Method the dynamics model of the mooring line was built up, and 4-order Runge-Kutta method was used to solve the model, and the computing speed could meet the demand on real-time; A model for the mooring line embedded in seabed soil was established, the modeling of line-seabed interaction was realized, and the results can reflect the line's motion in seabed soil; By applying a series of visualization technologies, the dynamic simulation of the anchor handling operation in offshore engineering was realized.

Keywords: anchor handling simulator; mooring system; lumped mass method; dynamics model

引言

随着各式海洋浮式结构物的使用越来越多并逐渐向深水延伸, 结构物的定位问题越来越受到重视。当前船舶与海洋工程中主要采用两种定位系

统: 锚泊定位系统和动力定位系统。由于锚泊定位系统具有投资少、可靠度高、使用和维护方便等优点, 因而锚泊系统被广泛应用于海洋工程中, 是目前主要采用的定位系统。

随着海洋工程不断向深海延伸, 抛起锚船为浮式结构物安放锚泊系统的操作难度也越来越大, 危险性越来越高, 对锚操作人员的专业素质也提出了越来越高的要求。因此, 如何对锚操作相关人员进行高效和有效地专业培训, 是目前一个迫切需要解决的问题。传统的锚操作培训采用实船操作方式进行, 培训周期较长、效率较低, 且存在较大安全隐



收稿日期: 2015-06-09 修回日期: 2015-07-24;
基金项目: 863 课题(2015AA016404); 交通部应用基础研究项目(2014329225370); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(313204330);
作者简介: 朱忠显(1986-), 男, 山东单县, 博士生, 研究方向为航海动态仿真; 尹勇(通讯作者, 1969-), 男, 湖北郧县, 教授, 博导, 研究方向为航海动态仿真, 虚拟现实技术等。

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

• 2285 •

患和风险,因而迫切需要一种安全、快速和高效的培训方式。基于这种强烈的需求,应用多种先进的高科技产品和计算机软硬件技术的锚操作模拟器应运而生。

国外一些知名的公司已经展开锚操作模拟器的研发并逐渐投入使用,如挪威的 Kongsberg、英国的 Transas 和荷兰的 MPRI 等。STCW 公约马尼拉修正案中在第 B-V/e 节中增加了“关于近海供应船上负责值班的船长和高级船员的培训和资格指导”,对海洋工程船船员的培训与发证逐渐得到重视,并明确了应用模拟器进行培训的法律效力。DNV 船级社也对欲开展锚操作作业培训的模拟器制定了详细的认证标准,这对锚操作模拟器的发展与技术进步产生了极大的促进。在国内,锚操作模拟器的研发还处于研究阶段。

锚泊系统的建模与仿真是锚操作模拟器中的关键技术之一,其动力学模型的质量将会影响到计算结果精确性、实时性和实用性;其可视化效果将会影响到锚操作模拟器中场景仿真的逼真度和沉浸感,从而影响到利用锚操作模拟器对抛起锚相关操作人员进行培训的效果。

本文将基于集中质量法建立锚泊系统的动力学模型,充分考虑各种环境作用力对锚泊系统的影响^[1-4];建立合适的海洋土模型,并处理锚泊线与

海床土体之间的交互;应用四阶龙格-库塔法进行模型解算,并采用一系列可视化方法实现锚操作过程的动态仿真。

1 锚泊系统的动力学模型

锚泊系统的动力学模型应该建立在合适的坐标系下,本文根据需要建立了惯性坐标系 $o-xyz$ 和局部坐标系 $i-btn$,如图 1 所示。惯性坐标系是空间固定的坐标系,其原点位于锚泊系统末端与锚的连接处,锚泊线的长度记为 $s=0$ 。锚泊系统的动力学模型建立在惯性坐标系中,所有的计算均应转换到该坐标系下进行。局部坐标系附在锚泊线上, t 轴为锚泊线切线方向,指锚泊线长度 s 的增加方向, n 和 b 分别为锚泊线微元的法向和副法向;欧拉角 (ϕ, θ) 为锚泊线微元段的姿态角。两个坐标系均为右手坐标系,通过姿态角 (ϕ, θ) 进行关联。局部坐标系到惯性坐标系的转换矩阵为:

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

即: $[x, y, z]^T = [A][b, t, n]^T$ 。矩阵 $[A]$ 为单位正交矩阵,其逆矩阵为其转置矩阵。

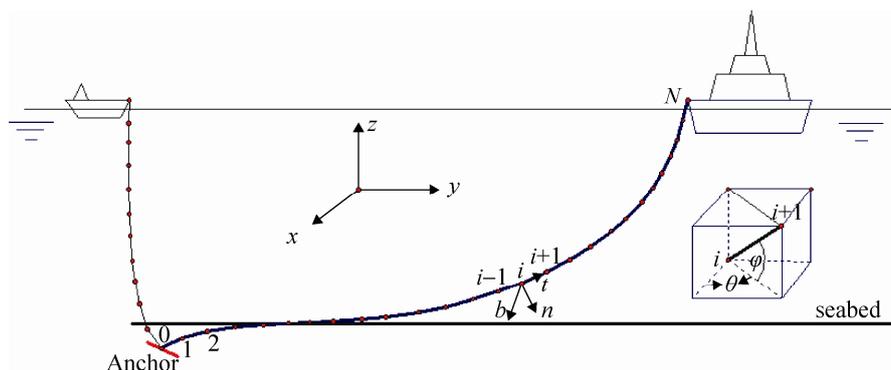


图 1 锚泊系统坐标系

本文基于集中质量法建立锚泊系统的动力学模型,将锚泊线在空间上离散为一系列节点,末端 $s=0$ 为第 $i=0$ 个节点,上端点处 $s=S$, 为第 $i=N$

个节点。锚泊线总长度为 S 。任取一微元段 ds 进行受力分析,其运动将会受到重力与浮力、流体阻力和锚泊线张力等的影响。对微元段应用牛顿第二

定律, 得到锚泊线第 i 个节点的控制方程:

$$M_i \ddot{x}_i = \Delta T_i + B_i + G_i + F_{Di} + F_{pui} \quad (1)$$

其中, \ddot{x}_i 为第 i 个节点位置对时间的二阶导数, 即加速度; ΔT_i 为节点受到的张力, 张力-应变关系按线性化处理, 其本构关系采用虎克定律描述; B_i 和 G_i 分别为第 i 个微元段的浮力和重力; F_{Di} 为微元段所受流体阻力, 按 Ablow^[5] 和 Huang^[6] 等人的方法计算; M_i 为锚泊线微元的质量矩阵, 包括微元段的惯性质量 m_i 和其在水中的附加质量 M_{ai} , 均取节点两侧质量和附加质量的一半之和, 按王飞^[4] 的方法计算; F_{pui} 为锚泊线与海床土体的相互作用力。

1.1 与海床土体之间的交互

卧底链通常为刚质锚链, 自重较大, 而海床表面土体的承载能力通常较小, 锚链将会嵌入到海床土中。本文从土力学的角度出发, 建立缆索-海床土接触问题的动力学模型, 实现缆索-海床接触的动力学仿真^[7-9], 锚泊线在土体中运动时的受力分析如图 2 所示。其中, V 为该位置处的运动速度; F_t 和 F_n 分别为锚泊线受到的土体摩擦力和土抗力, 分别作用在锚泊线切向和法向, 与局部坐标系下的速度方向相反。

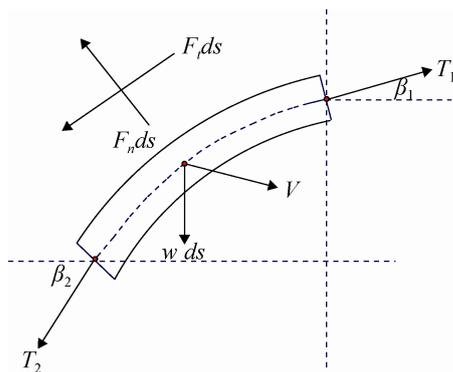


图 2 土体中锚泊线受力分析

对于处于饱和粘土中的缆索单元, 法向土抗力 q 参照承载力公式计算:

$$q = N_c s_u b_b \quad (2)$$

其中: N_c 为承载力系数; s_u 为不排水抗剪强度; $b_b = d_e \sim 3d$ 为有效承载宽度; d_e 为与嵌入缆具有相同重量的等效圆柱体的直径; d 为嵌入缆直径。

切向土压力 f 为:

$$f = b_s \alpha_s s_u \quad (3)$$

其中: α_s 为折减系数, 在饱和软粘土中取 1.0; b_s 为有效剪切宽度, 锚链 $b_s = 5.2d \sim 10.3d$ 。

海床面以下土体采用线性化模型, 土体不排水抗剪强度 $s_u = s_{u0} + k \cdot z$, 其中 $s_{u0} = 0.0 \text{ kPa}$, $k = 1.57 \text{ kPa/m}$, 土体灵敏度 $s_t = 3$ 。

1.2 锚泊线收放

锚泊线收放速度设为 v_{dr} , 是关于时间的函数, $v_{dr} > 0$ 时放链, $v_{dr} < 0$ 时收链。锚泊线的收放必然引起节点数目的增减。设锚泊线新增减长度 Δl 为:

$$\Delta l = \int_0^t v_{dr} d\tau \quad (4)$$

放链时 $\Delta l > 0$, 最后两个节点之间的长度为 $l_{N-1/2} + \Delta l$ 。当 $|\Delta l| \geq l_{N-1/2}$ 时增加一个节点, 新增节点的位置和速度为增加前两节点的位置和速度之和的一半, $\Delta l = \Delta l - l_{N-1/2}$; 收链时 $\Delta l < 0$, 最后两个节点之间的长度为 $2l_{N-1/2} + \Delta l$, 当 $|\Delta l| \geq l_{N-1/2}$ 时减少一个节点, $\Delta l = \Delta l + l_{N-1/2}$ 。最后两节点间的长度介于 $l_{N-1/2} \sim 2l_{N-1/2}$ 之间。

2 动力学模型数值解算

若锚泊线与工作缆分离, 由于锚的运动量很小, 设置锚泊系统的锚端边界条件为固定端; 若锚泊线与工作缆未分离, 则将锚泊线和工作绳作为一个整体, 工作绳上端与锚作船的运动保持一致; 设置锚泊线顶端的位置和速度与平台的运动保持一致。初始条件包括锚泊系统和工作绳在初始时刻所有节点的位置坐标和速度, 可通过静态求解方法得到。

联立控制方程(1)和边界条件, 再加上给定的锚泊系统初始条件, 并由 $v = dx/dt$, 得到完整的偏微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = M_{ai}^{-1} \cdot F_i & (i=1, 2, \dots, N-1) \\ \frac{dx_N}{dt} = x_i \end{cases} \quad (5)$$

对此方程组采用显式四阶龙格-库塔法进行积

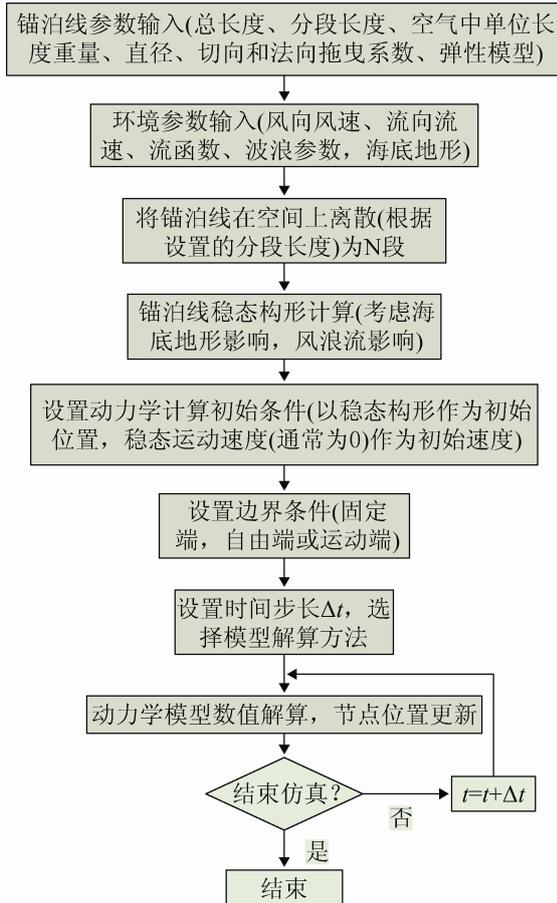


图 3 锚泊线解算流程

分求解, 由各节点时间 t_n 时刻锚泊线的运动状态即可得到 $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ 时刻的运动状态。锚泊线解算流程与图 3 所示, 动力学模型解算流程如图 4 所示。

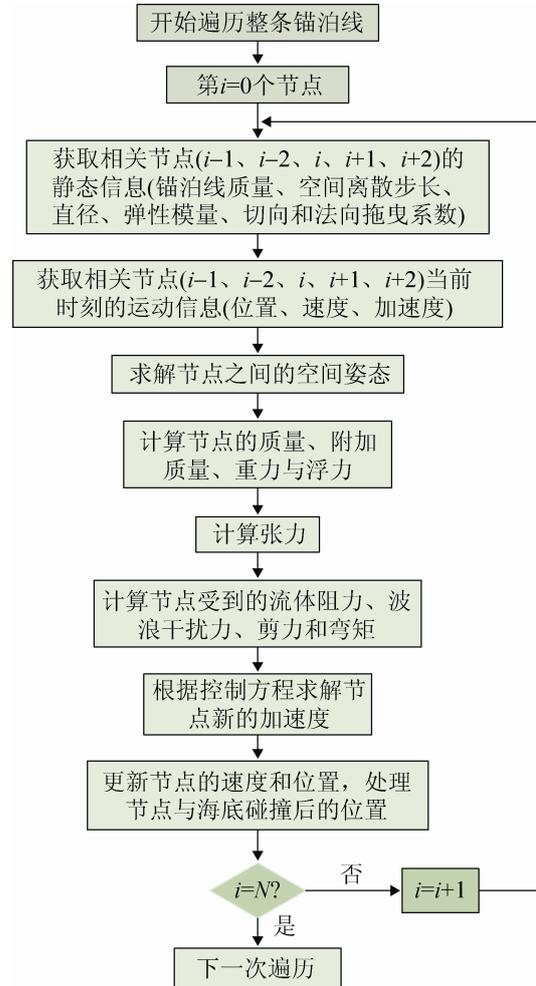


图 4 动力学模型解算流程

3 锚操作过程仿真

海洋平台的定位锚泊抛锚距离较长、水深较深, 锚的形式也多种多样, 需要专用的抛起锚辅助船(Anchor Handling Vessel, AHV)完成抛锚作业。抛起锚船配备有专用的起抛锚设备, 包括拖缆机、鲨鱼钳、导销和艏滚筒等, 并有开敞的艏甲板。抛起锚作业是一项单调乏味、专业要求较高, 费力、费时又极其危险的工作。对抛起锚操作过程的仿真有利用帮助受训人员对作业过程的认识、了解作业

风险, 对改善工作环境、提高工作效率, 控制和降低作业风险有十分积极的意义。根据不同的锚型、作业水域和锚泊系统特点, 抛锚作业过程也略有差异, 但大致过程基本一致。

本文对抛起锚船对平台实施布锚作业的过程进行了动态仿真。仿真任务是将锚布放在距平台 2 200 m、水深为 700 m 的海底平面上, 锚操作过程参考文献[10]中的步骤。图 5 所示为锚操作过程的示意图。锚泊线和工作缆的参数如表 1 所示, 并将

锚设定为重量为 18 000 kg 的集中载荷^[10]。

首先, 抛起锚船靠近平台并将船艏对准平台, 平台将锚、浮标传递到船上。抛起锚船将锚和浮标固定于艏甲板上之后, 平台以 1.0 m/s 的速度放出锚链, 抛起锚船按给定的航向、以 0.5 m/s 速度航行。锚泊线的形状如图 6 所示, 其中每两条曲线之间的时间间隔为 2 分钟。抛起锚船所受锚泊线拉力曲线如图 9 的第 0~23 min 所示。

在距平台 750 m 处, 平台放链长度略大于两倍水深, 达 1 450 m。此后平台放链速度控制在 0.4 m/s, 抛起锚船以略大于放链速度的航速沿给定航线向前行驶, 船速为 0.5 m/s。在距平台 1 550 m 处, 当放链长度达 2 100 m 时, 平台暂停放链。该过程中锚泊线的形状如图 7 所示。锚泊线对船的拉力大小如图 9 第 24~48 min 所示。

表 1 锚泊线与工作缆参数

缆索类型	总长度 /m	重量 /kg·m ⁻¹	水中重量 /kg·m ⁻¹	直径 /mm	横截面积 /m ²	杨氏模量 E(Pa)	法向 阻力系数	切向 阻力系数
工作缆绳	1 200	24.7	20.83	77.0	0.004 7	1.96E+11	1.8	0.004 9
系泊链	2 450	92.0	80.0	84.0	0.011 1	1.96E+11	1.5	0.004 9

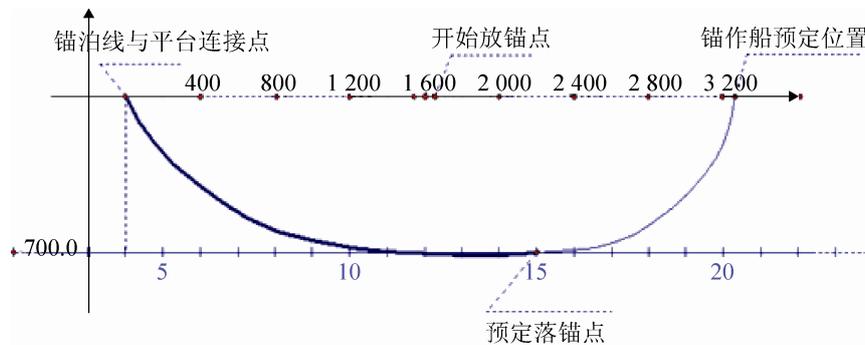


图 5 锚操作过程中示意图

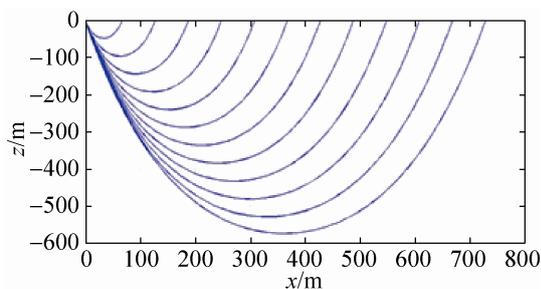


图 6 平台放锚链过程中锚泊线形状

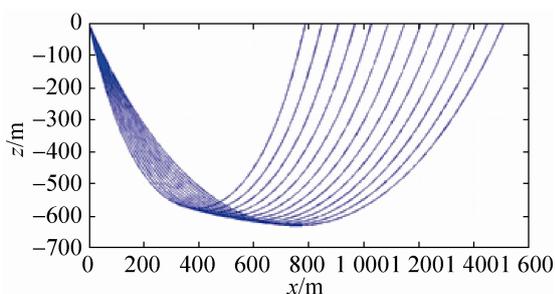


图 7 拖锚向预定地点航行过程中锚泊线形状

抛起锚船继续以 0.5 m/s 行驶, 并在距平台 1 650 m 处开始通过工作缆绳放锚, 船速根据需要控制在 0.5 m/s~0.8 m/s。抛起锚船放工作缆的速度为 0.5 m/s。并根据锚泊线形状和锚的位置适当调整平台放链和抛起锚船放缆的速度。

当抛起锚船的位置距平台 3 250 m 时, 控制抛起锚船的速度为 0, 平台放出锚链总长度为 2 450 m, 抛起锚船放出工作缆绳长度为 1 200 m。图 8 为放锚过程中锚泊线的形状, 其中黑色点状曲线为锚的位置。由于操作过程比较复杂, 锚的位置变化取决于平台放链、工作绳的释放速度和船的位置等。图 9 第 49~102 min 为该过程中锚泊线对船的拉力变化曲线, 在第 94 min 左右, 锚泊线开始与海底发生交互, 锚泊线张力迅速下降, 并在锚落地后降至较低水平。

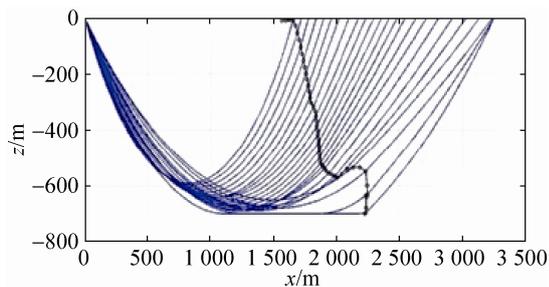


图 8 放锚及锚落地过程中锚泊线形状

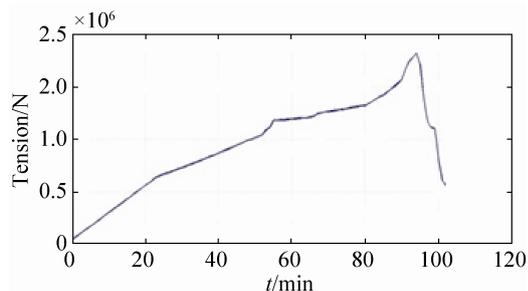


图 9 锚操作过程中锚泊线对船的拉力

4 可视化方法和仿真结果

本文以 Microsoft Visual Studio 2008 为平台，应用 Open Scene Graph(OSG)的函数库，采用一系列可视化技术对锚泊系统进行可视化，并实现了对抛起锚船锚操作过程的动态仿真。在绘制锚链和工作绳时采用轴向布告板技术，图 10 为锚链和工作绳的可视化效果。图 11 是仿真的整体效果图。



图 10 锚链和工作绳的可视化效果



图 11 抛起锚船锚操作仿真效果图

5 结论

锚操作模拟器能够为预研人员和受训的锚操作人员提供一个良好的可视化平台，对于改善工作环境、提高工作效率，有非常重要的意义。基于集中质量法建立了锚泊线的动力学模型，并采用四阶龙格-库塔法进行了数值解算；充分考虑了各外力对锚泊线的作用，建立了锚泊线与海床土体的相互作用模型，并实现了锚泊线收放的模拟；最后通过采用一系列可视化技术和手段，实现了对锚操作过程的动态仿真。本研究所做的工作为锚操作模拟器的研发打下了一定的基础。

参考文献:

- [1] Bingka Yang, Keqiang Zhu, Yanjie Zhu, *et al.* Dynamic response of towed line array [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2013, 25(4): 616-619.
- [2] 朱艳杰, 朱克强, 杨冰卡, 等. 基于凝集质量法的海洋缆索动力学建模与仿真技术 [J]. *海洋工程*, 2014, 32(1): 112-116.
- [3] 王飞, 黄国樑. 导流缆拖曳系统准动态运动建模及仿真 [J]. *上海交通大学学报 (自然版)*, 2012, 46(10): 1658-1664.
- [4] 王飞. 海洋勘探拖曳系统运动仿真与控制技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [5] CM Ablow, S Schechter. Numerical simulation of undersea cable dynamics [J]. *Ocean engineering (S0029-8018)*, 1983, 10(6): 443-457.
- [6] Shan Huang. Dynamic analysis of three-dimensional marine cables [J]. *Ocean engineering(0029-8018)*, 1994, 21(6): 587-605.
- [7] 国振. 吸力锚锚泊系统安装与服役性状研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [8] 斯丽莎. 法向承力锚拖曳安装过程积体模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [9] 王立忠, 斯丽莎, 国振, 等. 法向承力锚拖曳安装过程的整体模拟 [J]. *海洋工程*, 2012, 30(3): 18-28.
- [10] Lars Andreas Lien Wennersberg. Modeling and simulation of anchor handling vessels [D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2009.