

1-2-2019

Research and Implementation of 3D Emergency Drilling System of Oil Spill at Sea

Changjun Zou

Key Lab of Marine Simulation & Control Lab, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China;

Yin Yong

Key Lab of Marine Simulation & Control Lab, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China;

Xiuwen Liu

Key Lab of Marine Simulation & Control Lab, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China;

Haijiang Li

Key Lab of Marine Simulation & Control Lab, Dalian Maritime University, Dalian 116021, 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.

Research and Implementation of 3D Emergency Drilling System of Oil Spill at Sea

Abstract

Abstract: In view of the high cost, constraint to time and space, harmfulness to the environmental as well as insufficient training in extreme weather condition in current oil spill emergency drilling system, a 3D emergency drilling system of oil spill based on virtual reality is presented and implemented. The classical oil spill model is adopted to establish an oil boom driven model based on mass-spring system. Interactive operation between oil boom and oil film based on polygon clipping is realized. The system runs stably and smoothly in the system test, which fully proves the correctness and reliability of the system architecture and the related key technologies.

Keywords

virtual reality, oil spill at sea, oil spill interaction, emergency drilling system

Recommended Citation

Zou Changjun, Yin Yong, Liu Xiuwen, Li Haijiang. Research and Implementation of 3D Emergency Drilling System of Oil Spill at Sea[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 906-913.

海上溢油应急三维演练系统的研究与实现

邹长军, 尹勇, 刘秀文, 李海江

(大连海事大学航海动态仿真和控制实验室, 大连 116021)

摘要: 针对当前溢油应急演练成本高昂, 受到时空和天气环境等的限制, 且对环境具有危害性, 实际参与人员无法在各种极端天气环境中得到足够充分训练等因素的影响, 提出并实现了一种基于虚拟现实技术的溢油应急演练系统。采用经典的溢油模型, 建立了基于质点弹簧模型的围油栏运动模型, 实现了基于多边形裁剪的溢油与围油栏运动交互。经过系统测试, 运行稳定流畅, 表明论文设计的系统架构和相关关键技术正确性和可靠性。

关键词: 虚拟现实; 海上溢油; 溢油交互; 应急演练系统

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)03-0906-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803017

Research and Implementation of 3D Emergency Drilling System of Oil Spill at Sea

Zou Changjun, Yin Yong, Liu Xiuwen, Li Haijiang

(Key Lab of Marine Simulation & Control Lab, Dalian Maritime University, Dalian 116021, China)

Abstract: In view of the high cost, constraint to time and space, harmfulness to the environment as well as insufficient training in extreme weather condition in current oil spill emergency drilling system, a 3D emergency drilling system of oil spill based on virtual reality is presented and implemented. The classical oil spill model is adopted to establish an oil boom driven model based on mass-spring system. Interactive operation between oil boom and oil film based on polygon clipping is realized. The system runs stably and smoothly in the system test, which fully proves the correctness and reliability of the system architecture and the related key technologies.

Keywords: virtual reality; oil spill at sea; oil spill interaction; emergency drilling system

引言

随着中国海上石油开发、储存和运输量的日益增长, 重大海上溢油风险不断提高, 事故应急面临严峻形势, 亟需加强海上溢油应急能力建设。而在海上溢油应急能力建设中, 加强应急人员培训和演练尤为重要。一方面, 通过应急演练的开展可以对

演练中暴露出的问题和不足进行总结, 对应急预案进行修改和完善。另一方面, 应急演练能够提高应急指挥人员的指挥协调能力, 提高操作人员的应变和快速反应能力, 最大程度减轻海上溢油事故造成的危害。然而, 采用真实设备的传统应急演练方式一方面需要进行较大规模的组织, 要耗费大量的人力物力。另一方面这种事故演习的内容具有一定的局限性。无法随心所欲地模拟种种事故情况, 模拟的溢油事故场景比较单一^[1]。近年来, 随着虚拟现实技术的日益成熟, 虚拟现实技术越来越多的被应用到应急演练中, 较好地解决了传统应急演练手段的诸多问题: 1) 三维演练系统能够使参演人员具有



收稿日期: 2016-03-18 修回日期: 2016-07-03;
基金项目: 国家 863 计划(2015AA016404), 海洋公益性行业科研专项(201505017-4), 云南内河航运“船舶操纵模拟实训系统”(云交科 2013(A)01);
作者简介: 邹长军(1987-), 男, 江西九江, 博士生, 研究方向为航海动态仿真、交通系统虚拟现实技术等。

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

• 906 •

较好的沉浸感, 能够使参演人员获得更加真实的体验。2) 开展演练成本较低, 更加安全环保。3) 系统能够对全程进行监控和回放, 能够将演练中间结果进行打印输出。因此, 基于虚拟现实技术的三维应急演练系统具有较好的推广前景。

目前围绕着虚拟现实及海上溢油模拟技术, 学者进行了广泛深入的研究。这其中如 Xiaobo Chao^[2]建立了二维和三维海上溢油数学模型, 并对新加坡海峡海上溢油事故进行了数值模拟及实验观测, 两者结果吻合良好。Liu Yancheng^[3]建立了用于应急演练的二维溢油应急演练系统。系统根据海区各时段的风速、潮汐、潮流等环境数据分布情况及实时环境数据保存到数据库中, 供随时查询和调用。Yu Feng^[4-5]通过数值计算方法得到区域的潮流场, 并采用经典溢油数学模型对溢油运动进行模拟, 同时采用 Rendering to Texture (RTT) 方法实现海上溢油可视化。Ren Hongxiang^[6]对短时间尺度内的连续溢油进行研究, 提出了利用平面折射技术实现海面油膜的绘制。Wang Xiaofeng^[7]利用 POM 流场模型结合 Oilmap 系统, 设计了一个旨在对未来可能发生的各种溢油灾害进行模拟和预测, 为防范溢油灾害和应急决策提供模拟预测系统。M. De Dominicis 等^[8]建立了考虑海上溢油扩散、漂移、蒸发和乳化过程的拉格朗日海上溢油运动数学模型, 并进行了海上围油栏及收油机布放的模拟^[9]。Chen Xuan^[10]等通过采用纹理映射技术实现海面溢油的可视化, 溢油模型采用 Fay 的经典三阶段经验模型, 流场采用均匀流场方法建立了一个溢油应急演练系统。

通过梳理前人研究成果可以发现, 前人研究主要还是针对海上溢油数学模型或者潮流场数值计算单个方面进行研究, 但将二者结合进行研究并应用于溢油场景真实感绘制的研究较少。本文基于海上溢油应急数学模型和潮流场数值计算, 提出采用虚拟现实技术的海上溢油应急三维演练系统的系统架构, 并进行编程实现。

1 海上溢油应急三维演练系统总体功能设计

结合前人的研究成果, 考虑到该系统自身的特点, 分析了系统功能需求, 根据需求分析设计了系统架构设计。

作为一个应急培训系统, 其首要功能在于对操作人员的培训, 并能根据需要对培训过程进行记录和回放。采用基于虚拟现实技术的溢油应急培训系统应该具备基本的人员应急效果仿真, 能够实现海上溢油应急设备的收放及交互, 包含演习海域三维模型, 海域环境数学模型等。同时为了便于在培训中发现参演人员所采取应急措施的不足, 应该具备演练回放和事故重演功能, 能够为使用人员提供电子海图的基本操作功能。

(1) 人员应急仿真培训

系统可以设置不同港口、不同气象条件、不同时段下溢油事故情景, 逼真显示海上溢油事故场景, 操作人员的应急处理也能实时反映在系统场景中, 实现良好交互过程。根据设置的不同的情景, 可以对参加溢油应急处理相关人员(应急中心指挥者、现场指挥者、现场各类操作者等)进行仿真培训。

(2) 溢油应急设备的操作仿真

能够模拟不同海况下海上溢油应急设备, 如围油栏、收油机、吸油毡等的布放与回收; 海事搜救直升机、溢油喷洒装置等的操作。能够实现溢油操作设备之间交互, 如围油栏与海面溢油、收油机与海面溢油的交互等。能够方便用户根据自己的需求增减溢油应急设备。

(3) 基于 S57 的电子海图基本信息显示与操作

系统可以在发生海上溢油事故时, 首先收集溢油的物理、化学性质资料, 并了解该海域的环境敏感区分布状况, 收集实时和历史的气象海况水文资料, 并将这些资料输入到该系统中, 并能够显示相应的环境信息, 如风、流等, 方便操作人员读取。系统配备电子海图, 显示相关海域的电子海图信息, 操作人员可浏览、查询信息、放大、缩小海图

等,并且能够根据操作人员的需求显示感兴趣的内容,减少多余信息干扰。在应急演练过程中,可以根据参演人员需要进行标记,如应急力量部署、人员动态、溢油回收进展。还能够根据溢油回收进展情况计算预计所需的时间及所需的回收设备,给参演人员提供方便。

(4) 演习训练回放和溢油事故重演

在人员应急仿真培训过程中,系统记录训练过程中的多种数据,输出保存到文件中,训练结束后,教练员可根据需要随时回放该次演习过程,系统运行中的各种动态参数实时计算并显示,方便教练员讲解分析整个训练过程,以达到更好的培训目的。

2 海上溢油应急三维演练系统模块组成

海上溢油应急三维演练系统采用 C/S 架构,主要由两大模块组成:溢油应急演练导演台和溢油应急操作台,系统通过局域网进行通信。导演台主要负责练习的编辑、三维溢油模型解算、流场解算、演练环境控制、演练记录与回放、分析打印等模块。通过局域网一个导演台可以连接多个操作终端,操

作终端主要包括溢油设备操纵模块,三维模型可视化模块、演练记录与回放模块等。系统模块框图如图 1 所示。

2.1 海上溢油数学模型

根据海上溢油扩散理论,海上溢油过程分为 3 个阶段,自身扩展、漂移和风化过程。其中风化过程一般考虑蒸发和乳化两个过程。该溢油应急演练系统考虑了海上溢油的自身扩展、漂移和风化三个主要运动过程,采用是选择四种过程模型进行组合计算,通过扩散模型求解油膜的长轴和短轴长度及与风向夹角,通过漂移模型计算漂移,通过风化模型计算溢油蒸发和乳化。

2.1.1 溢油扩散

溢油泄漏到海面上时,会在表面张力、惯性力、重力和粘性力的作用下向四周散开,其中重力和表面力为驱动力,惯性力和粘性力为阻力。针对溢油扩散模型,相关的学者开展了许多研究,其中有 Fay^[11]提出的三阶段油膜扩展理论。Lehr^[12]对 Fay 理论进行修正,考虑了风场对油膜非对称扩展的影响。

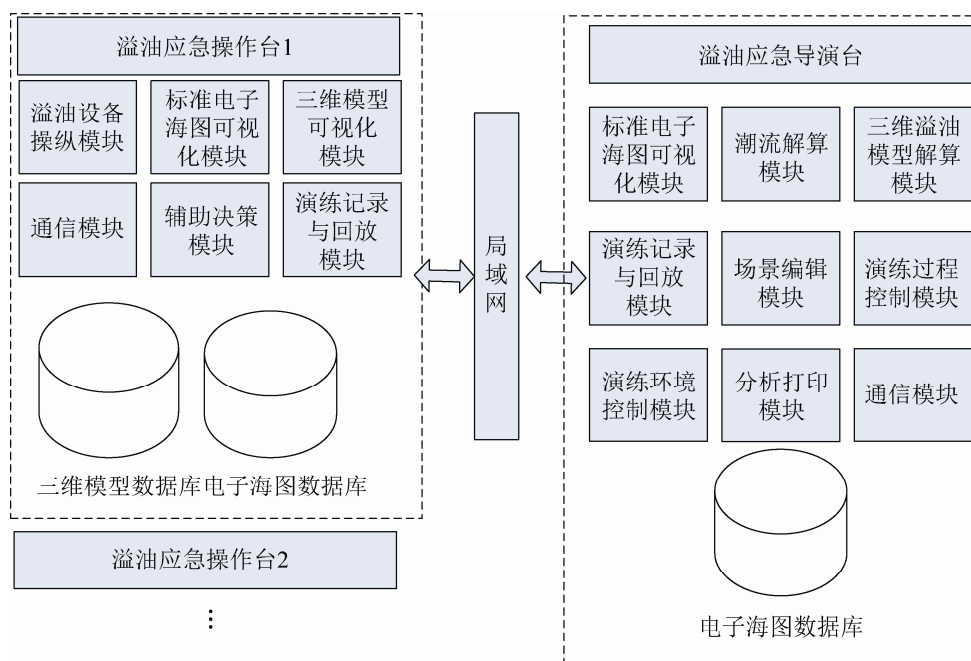


图 1 系统结构图

Fig. 1 System Structure Diagram

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

Lehr 考虑了风速对油膜扩展影响, 对扩散模型进行了改进, 认为油膜成椭圆形扩展, 椭圆长轴在风的合成方向上, 该模式正确反映了油膜在风向上拉长的现象:

$$\left. \begin{aligned} Q &= C_1 [(\rho_w - \rho_o) / \rho_o]^{1/3} V^{1/3} t^{1/4} \\ R &= Q + C_2 W^{4/3} t^{3/4} \\ A &= \pi QR \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: Q 、 R 分别椭圆短轴长度和长轴长度; ρ_w 、 ρ_o 分别为水和油密度; V 为溢油初始体积; W 为风速; A 为油膜面积; C_1 、 C_2 为经验常数, 与油品种类、性质有关, 一般取 $C_1=1.1$, $C_2=0.03$ 。

为了验证该模型可靠性, 本文研究了 1991-03-31 进行的一次海上投油实验^[13], 该次溢油数量为 400kg, 风速为 6 m/s, 风向 350°, 并将仿真结果进行对比, 如表 1 所示。

表 1 溢油计算结果与实测值
Tab.1 Oil Spill Calculation Results Compared with the Experimental Results

时间/h	类型	长轴/m	短轴/m	面积/m ²
2	实测	217.1	4.2	712.2
	计算	225.65	4.23	748.83
	误差%	3.94	0.60	5.14
3	实测	321.0	4.5	1123.1
	计算	295.39	4.63	1073.40
	误差%	-7.98	2.89	-4.43

从表 1 可以看出, 在溢油发生后第 2 个小时和第 3 个小时, 溢油油膜误差分别为: 长轴误差 3.96% 和 -7.98%, 短轴误差为 0.60% 和 2.89%, 溢油面积误差为 5.14% 和 -4.43%, 可以看出计算结果比较准确, 最大误差只有 7.98%, 验证了文章所用溢油扩散模型的可信度。

2.1.2 溢油漂移模型

Hoult 等^[14]建立了海上溢油漂移模型, 油膜边缘上任意点在不同时间 t , 不同方向上的漂移速度 $\vec{u}_T(t, \theta)u_T$ 为:

$$-\vec{u}_T(t, \theta) = \vec{u}_c + K_2 \vec{u}_{10} \quad (2)$$

式中: \vec{u}_T 是表面海流速度矢量; \vec{u}_{10} 为当地海面上

10 m 处的风速矢量; K_2 是风漂流系数, 黄礼贤等根据实验给出 $K_2 = 0.035$ 。知道了海流的流向、海面上 10m 处的风向之后, 可以用下式来计算油膜漂移方向和海流的流向之间的夹角:

$$\tan \gamma = \frac{KV_w \sin \phi}{V_s + KV_w \cos \phi} \quad (3)$$

式中: γ 是油膜漂移方向和海流的流向之间的夹角; V_w , V_s 分别是海流流速和海面 10 m 处风速; ϕ 是海流流向和海面 10 m 处风向的夹角。因此, 只要用式(2)(3)计算出油膜边缘上任意点的速度, 就可以算出相应点的位移, 从而预报出油膜的漂移运动轨迹。

2.1.3 风化模型

溢油风化过程包含了蒸发、溶解、乳化、分散、吸附沉降、光氧化及生物降解多个过程。在研究已有风化模型的基础上, 文章选取了美国 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)/ HAZMAT (Hazardous Materials Response and Assessments Division)的 ADIOS^[15]风化模型对溢油的风化过程进行分析。ADIOS 是美国 NOAA/HAZMAT 发展的新型风化模型, 涉及到了油品的 3 个性质(密度、粘性和含水量)和 4 个物理过程(扩展、蒸发、水包油分散、油包水乳化)。

模型计算时, 油膜的扩展过程采用前文的 Fay 模型计算, 蒸发过程用 Stiver and Mackay^[16]的公式计算:

$$dF/dt = (K_E/h) \exp[(6.3) - 10.3(C_1 - C_2 F)/T] \quad (4)$$

乳化含水率用 Mackay 首次提出的雾化公式计算, 即:

$$dY/dt = kU^2(1 - Y/Y_f) \quad (5)$$

式中: Y 是水同乳化物体积比; Y_f 是完全乳化之后水同乳化物体积比; 常数 k 在未发生乳化的情况下为 0, 一般情况下, $k = 1.6 \times 10^{-5} \text{ s/m}^2$ 密度的计算是根据 Mackay 等运用的模型中假设密度与蒸发分数及温度的变化成线性关系来计算的:

$$\rho_m = Y\rho_w + (1 - Y)\rho_o[1 - c_1(T_0 - T_1)](1 + c_2 f) \quad (6)$$

式(6)中, ρ_m 为混合物的密度(kg/m³); ρ_o 为参

考密度(kg/m^3); T 为参考温度(K); f 为油蒸发掉的部分; c_1 和 c_2 为在溢油性质基础上的实验参数。

粘度用 Mackay 公式计算:

$$V_m = V_0 \exp\left(\frac{c_3 Y}{1 - c_4 Y}\right) \cdot \exp\left[c_5 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \exp(c_6 f) \quad (7)$$

式中: $c_3 = 2.5$, $c_4 = 0.65$, $c_5 = 5.0$, c_6 是用一条曲线表示的。

2.1.4 溢油风化实验:

通过对一次溢油风化的实验, 得出了溢油蒸发曲线和剩余曲线, 如图 2 所示。实验参数如下:

API: 26.9

倾点: $-34\text{ }^\circ\text{C}$

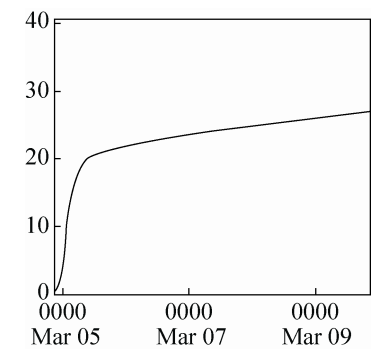
粘度: $36.3\text{ cST at } 0\text{ }^\circ\text{C}$

风速: 2 m/s

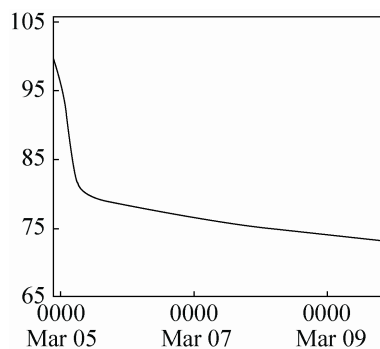
水温: $29\text{ }^\circ\text{C}$

盐度: 32 ppt

溢油数量: 1000 bbl



(a) 蒸发曲线



(b) 溢油剩余曲线

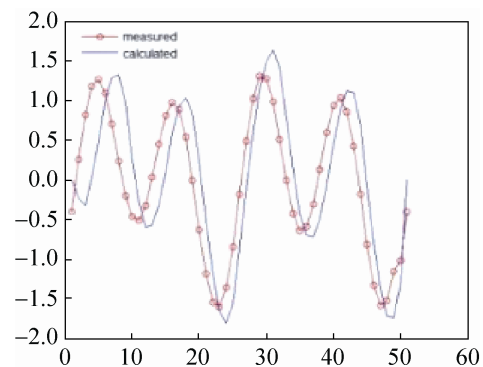
图 2 溢油蒸发曲线和剩余曲线

Fig. 2 Oil Spill Evaporation Curves and Residual Curves

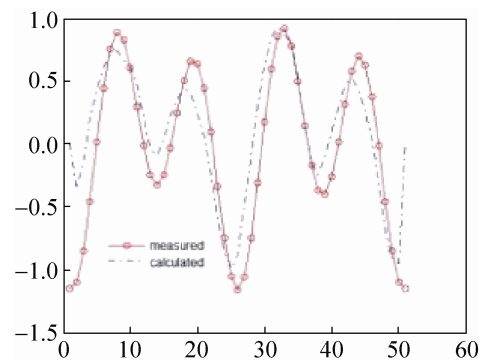
2.2 潮流解算模块

为了得到计算海域的潮流场, 必须采用离散数值方法对流体力学方程组进行离散求解。在已有的相关研究中, 流场的数值计算方法主要有: 有限体积、有限差分、有限元和格子玻尔兹曼等方法。其中有限差分方法发展最成熟, 也是应用最广泛的一种离散方法。

文章采用了 Landset 提出的二维单层流体力学数学模型。该方法就是采用一种有限差分离散计算方法, 即隐式方向交替法(Alternating Direction Implicit Method), 简称 ADI 法, 该方法是 Peaceman, Rachford 等提出的一种有限差分近似算法, 也是目前广泛应用的一种差分近似方法^[5], 图 3(a)(b) 分别为塘沽和埭口的计算水位和实测水位的对比, 图 4 为典型时刻潮流场。



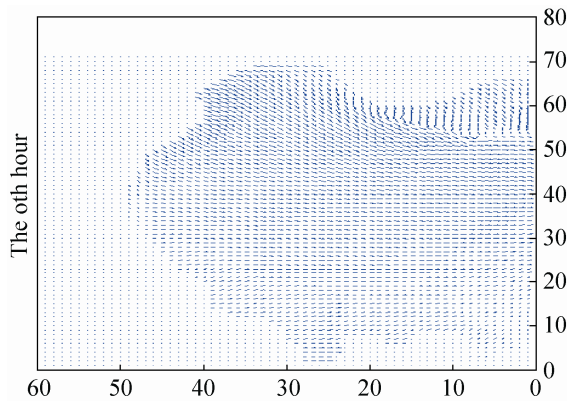
(a) 塘沽水位对比



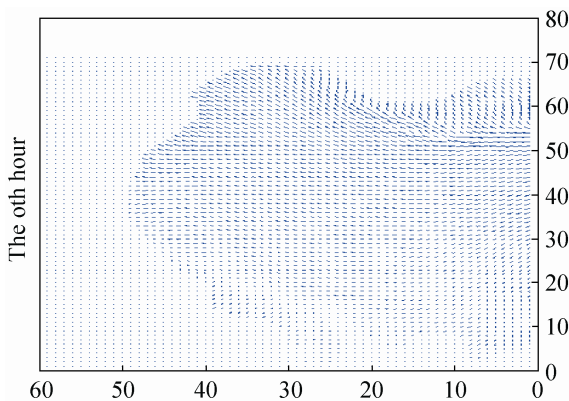
(b) 埭口水位对比

图 3 计算水位和实测水位对比

Fig. 3 Comparison of Calculated Water Level and the Measured Water Level



(a) 渤海湾典型时刻潮流场(1)



(b) 渤海湾典型时刻潮流场(2)

图4 渤海湾典型时刻潮流场

Fig. 4 Bohai Bay Tide Current Field

2.3 基于质点弹簧模型围油栏模块

文章提出了基于物理模型的海上围油栏的实时运动建模仿真。采用 Provot^[17]提出的经典质点-弹簧模型,认为围油栏的密度和厚度是均匀的,将围油栏离散成的质点,每个质点的质量和物理机械性能均相同。在质点-弹簧模型中,每一个粒子质点与两端粒子质点通过弹簧相连^[18],质点弹簧模型保证了仿真效果真实性。

如图5所示,该组图显示了围油栏在不同时刻的形状变化对比,围油栏通过相邻节点将拉力传递至相邻节点。每个质点粒子在横向通过结构弹簧相连,在受到拉力时,围油栏通过弹簧传递拉力和压力。同时为了降低弹簧由于受到拉力发生震荡,为此增加了阻尼,可以通过调节阻尼系数控制震荡现象的发生。

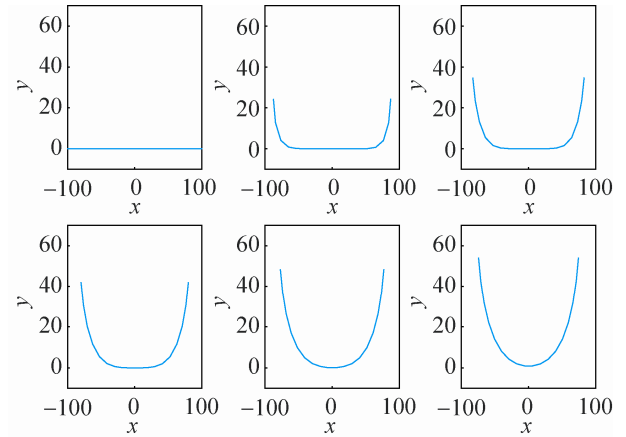


图5 围油栏不同时刻形状

Fig. 5 Oil Boom Shapes at Different at Times

如图6(b)所示为围油栏拖带时仿真效果,与图6(a)真实围油栏相比可以看出,仿真结果具有较高逼真程度。



(a) 真实围油栏效果

(b) 模拟围油栏效果

图6 真实围油栏与模拟效果对比

Fig. 6 Real Oil Boom and Simulation Results contrast

除此之外,还建立了海上围油栏与海上溢油交互模块,通过采用多边形裁剪算法^[19],实现了围油栏围油操作效果,围油栏与溢油交互效果见图7,首先根据围油栏当前的位置建立裁剪多边形,然后根据当前的裁剪多边形对溢油对边进行裁剪,得到交互后的溢油油膜形状。

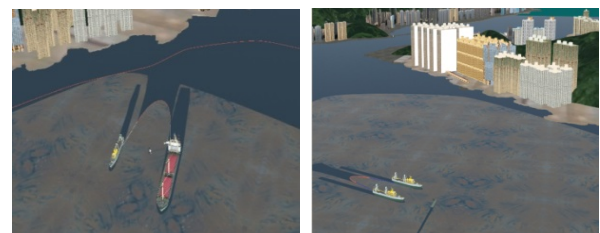


图7 系统运行效果图

Fig. 7 Renderings of the Running System

2.4 三维模型可视化模块

系统能够显示港口及近海建筑、根据数字高程模型生成的地貌地形、叠加遥感影像、显示各种3维船舶模型、三维溢油设备、相关海域三维海面等。该模块能更加真实地反应海上真实海况，能够根据天气生成不同海况海面、产生更加逼真的效果。系统还采用了作者提出的基于纹理投影方法的海上溢油可视化新方法^[20]进行海面溢油的可视化，如图7所示：在溢油发生时，该方法能逼真地显示海上溢油的动态三维效果，同时由于纹理投影变换和渲染的计算都是在 shader 中实现，充分利用 GPU 的并行计算性能，系统测试运行帧率达到48fps以上。

2.5 溢油设备操纵模块

在溢油应急演练中，溢油设备操纵模块的主要功能是人机交互，如围油栏、收油机、收油船等。同时能够在各个指挥操作台之间协同配合，同时参与溢油的应急演练。溢油设备的操控是基于二维显示平台，系统实现了二三维联动，参演人员在二维平台发出相应的命令，三维显示系统能够同时响应该命令，做出响应的动作，达到演练的目的。

2.6 导演台相关控制模块

导演台控制模块包括场景编辑模块、演练过程控制模块和演练环境控制模块。场景编辑模块可以制作溢油演练场景，设置溢油数量，设置初始演练环境等。演练过程控制模块能够在溢油演练过程中对演练过程进行控制，可以提前进行预演，查看溢油模拟效果，并能够对客户端的演练进行控制。演练环境控制模块在演练进行时能够设定和改变相关海域的海况、风级，天气参演人员编排等信息。

3 系统运行测试

系统运行时，首先根据导演台发送的练习进行操作终端初始化配置和三维模型加载，启动溢油解算模块，根据风流等信息进行溢油解算，判断溢油应急设配与海面溢油的交互。在仿真时，需要提前

解算好海区的潮流场，并输出到文件中，供溢油模型进行读取，系统运行流程图如图8所示。

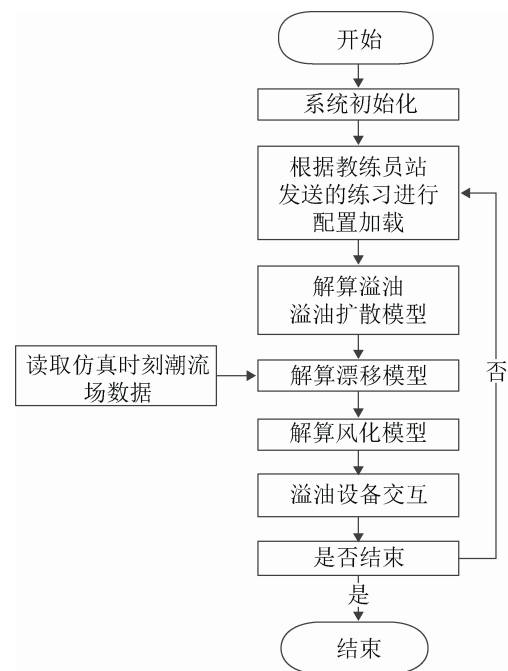


图8 系统运行流程图

Fig. 8 Flow Chart of the System

系统硬件配置如下：硬件平台：Intel Core2 处理器，英伟达 GT430 显卡，DDR3 内存 2G。操作系统：Windows 7 操作系统 32 位。场景三维模型大小：464 M。三维渲染采用 OSG(Open Scene Graph)渲染引擎。系统运行后的仿真效果如图7所示：该测试模拟了两条船舶拖带围油栏进行围油作业效果图。系统运行流畅，运行帧率为48帧以上，满足溢油应急三维演练系统的实时性要求。

4 结论

文章针对海上溢油应急系统进行了相关的研究，通过分析已有应急系统的研究成果，提出了基于虚拟现实技术和 C/S 架构的海上溢油三维应急演练系统。采用教练员站和操作终端的形式，实现教练员站对学员操作终端的有效控制和监督。需要指出的是，三维模拟演练不能完全取代传统实战演练，其可以作为传统实战演练的有效补充，实现优势互补。

后续研究将海上溢油模型与三维潮流场的数值计算结合起来、增加更多溢油应急设备和交互、完善溢油数学模型。为海上溢油研究提供更多的成果。

参考文献:

- [1] 梅玉龙. 应急演练计算机三维模拟系统研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(4): 92-97.
Mei Y. Study on The Computer Three-dimension Simulation System of Emergency Exercise[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(4): 92-97.
- [2] CHAO Xiao-bo, SHANKAR N J, CHEONG H F. Two-and Three-dimensional Oil Spill Model for Coastal Waters[J]. Ocean Engineering(S0029-8018), 2001, 28(12): 1557-1573.
- [3] LIU Yan-cheng, GUANG R, YIN Pei-hai. The Research and Development of the Simulation Training System of Marine Oil Spill Crisis Response[J]. Journal of System Simulation(S1004-731X), 2004, 16(11): 2445-2450.
- [4] YU Feng, YIN Yong. A Method of Oil Spill 3D-Visualization in Jiaozhou Bay[C]//Proceedings of the International Symposium on Intelligent Information Technology Application. 2008: 498-502.
- [5] FENG Yu, YONG Yin. Simulation and 3D visualization of Oil Spill on The Sea[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Virtual Reality Innovation 2011. Singapore, Singapore, 2011: 213-216.
- [6] REN Hong-xiang, ZHANG Xin-yu, YIN Yong. 3D Real-Time Rendering of Continuous Oil Spill on Simulated Ocean[J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(19): 5117-5120.
- [7] WANG Xiao-feng, YE Xian-jin. A Study on Ships Oil Spill Simulates and Forecast for Yangshan Port Sea Area[C]//Proceedings of the International Conference on Remote Sensing, Environment & Transportation Engineering. Nangjin/China, 2011: 4733-4737.
- [8] M D E DOMINICIS N Z, LARDNER R. MEDSLIK-II, A Lagrangian Marine Surface Oil Spill Model for Short-term Forecasting-Part 1: Theory[J]. Geoscientific Model Development(S1991-9603), 2013, 6(6): 1851-1869.
- [9] HOSPITAL A, STRONACH J A, MCCARTHY M W, et al. Spill Response Evaluation Using an Oil Spill Model[C]//Proceedings of the International Oil Spill Response Technical Seminar, 2015.
- [10] XUAN Chen, FENG Yu, CHANG Jun-zou, et al. Research of 3D Oil Spill Response Drill System[J]. Aquatic Procedia(S2214-241X), 2015, 3(2): 15-20.
- [11] FAY J A. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface[C]//Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, 1971: 463-467.
- [12] LEHR W J, SIMECEK-BEATTY D. The Relation of Longmuir Circulation Processes to the Standard Oil Spill Spreading, Dispersion, and Transport Algorithms[J]. Spill Science and Technology Bulletin(S1879-3371), 2000: 6(3/4): 247-253.
- [13] 娄安刚, 奚盘根, 黄祖珂. 海面溢油轨迹的分析与预报[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24(4): 477-484.
LOU A G, XI P G, HUANG Z K. Prediction of Oil Spill Tracks and Study on its Dispersion over the Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1994, 24(4): 477-484.
- [14] HOULT D P. Oil Spreading on the Sea[C]//Proceedings of the Annual Review of Fluid Mechanics, 1972: 341-368.
- [15] LEHR W, JONES R, EVANS M, et al. Revisions of the ADIOS Oil Spill Model[J]. Environmental Modelling & Software(S1364-8152), 2002, 17(2): 189-197.
- [16] MACKAY D. A Mathematical Model of Oil Spill Behaviour[J]. Environment Canada(S2292-1249), 1980, 5(3): 26-53.
- [17] PROVOT X. Deformation Constraints in a Mass- spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior[C] // Proceedings of the Canadian Information Processing Society. Canada, 1995: 147.
- [18] YUAN Bin, DU Hong-wang, WANG Hai-tao, et al. The Simulation of Cable Harness Based on Mass-spring Model[C]//Proceedings of the Web of Conferences MATEC 31, 2015: 1-5.
- [19] DIMRI S C. A Simple and Efficient Algorithm for Line and Polygon Clipping in 2-D Computer Graphics[J]. International Journal of Computer Applications (S0975-8887), 2015, 127(3): 31-35.
- [20] 邹长军, 尹勇, 刘秀文, 等. 海上溢油可视化新方法的研究与实现[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 103-108.
Zou C J, Yin Y, Liu X W, et al. Research and Implementation on New Method of Oil Spill Visualization at Sea Surface[J]. Journal of Chongqing Jiao Tong University (Natural Science), 2017, 36(6): 103-108.