

文章编号: 1000-8241(2020)05-0582-05

# 基于 AQWA 与 OrcaFlex 的海上漂浮软管输油系统仿真

赵小兵<sup>1</sup> 康正凌<sup>1</sup> 祝文倩<sup>2</sup> 李江江<sup>1</sup> 虞鹏程<sup>1</sup>

1. 92228 部队; 2. 广州船舶及海洋工程设计研究院

**摘要:** 风浪流联合作用下漂浮软管的运动状态与受力情况非常复杂,为此采用 AQWA 与 OrcaFlex 联合仿真的方法对海上漂浮软管输油系统进行动态仿真分析。通过建立数值模型,利用 AQWA 软件对油船进行频域分析,再利用 OrcaFlex 软件对漂浮软管、油船、浮筒、系泊缆之间的耦合运动进行时域分析。结果表明:风浪流对漂浮软管所受张力影响呈非线性增长,漂浮软管输油系统张力最大点在软管两端位置,通过设置沿线系固锚可以明显降低软管所受张力,减少漂移量。采用该方法和模型对输送距离为 1 100 m 的海上漂浮软管输油系统进行分析,得出最优软管长度为 1 300 m,无沿线系固时软管漂移量约为 300 m,可以满足 4 级海况下的安全要求。研究成果对于此类海上漂浮软管输油系统的动态仿真分析具有借鉴意义。(图 4,表 6,参 20)

**关键词:** 漂浮软管; 海况; 动态仿真; 频域分析; 时域分析

中图分类号: TE835

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.05.015

## Simulation of offshore floating hose oil transportation system based on AQWA and OrcaFlex

ZHAO Xiaobing<sup>1</sup>, KANG Zhengling<sup>1</sup>, ZHU Wenqian<sup>2</sup>, LI Jiangjiang<sup>1</sup>, YU Pengcheng<sup>1</sup>

1. Unit 92228 of PLA; 2. Guangzhou Marine Engineering Corporation

**Abstract:** Considering that the motion state and the stress of floating hose are complex under the combined action of winds, waves and currents, the dynamic simulation analysis of offshore floating hose oil transportation system was thereby carried out through the method of joint simulation based on AQWA and OrcaFlex. The numerical model was established to analyze the frequency domain of oil tanker by AQWA, and to perform the time domain analysis on the coupling motion between floating hose, oil tanker, buoy and mooring line by OrcaFlex. The results show that the influence of wind, waves and currents on the floating hose tension increases nonlinearly. The maximum tension points of the floating hose oil transportation system are at both ends of the hose. The tension acting on the hose can be obviously reduced and the drift distance can be shortened by setting securing anchors along the line. Through the analysis on the offshore floating hose oil transportation system with the transportation distance of 1 100 m, based on this method and model, it can be concluded that the optimal hose length is 1 300 m, the hose drift distance is about 300 m when no securing anchor is set along the line, and the safety requirements can be met under 4-level sea state. The research results can provide certain reference for the dynamic simulation analysis of such offshore floating hose oil transportation system. (4 Figures, 6 Tables, 20 References)

**Key words:** floating hose, sea state, dynamic simulation, frequency domain analysis, time domain analysis

海上漂浮输油软管是一种以尼龙纤维为骨架,内外涂有聚氨酯材料的高强度输油软管,具有质量轻、抗拉强度高、抗弯刚度小、易盘卷等特点,被广泛应用于快速装卸油的作业场合,如在无码头条件下进行油船到岸滩区域的油料输送<sup>[1-4]</sup>或将失事油船上的油料卸载到油船或岸滩上。采用漂浮软管装卸油料的方法具

有输送快捷、管道铺设简单、作业配套资源需求少、适用性广泛、通用性强等特点。漂浮软管自身质量轻、浮力大,漂浮于海面之上,很容易受到风浪流的作用,受力分析属于几何非线性范围。对于海上漂浮输油系统,由于漂浮软管、油船、浮筒、系泊缆之间的耦合作用,漂浮软管的动态受力分析十分复杂。

国外针对海上漂浮软管的研究并不多见,主要集中在对海洋工程柔性立管的研究<sup>[5-13]</sup>。中国对海上漂浮软管的研究起步较晚,相关研究成果较少<sup>[14]</sup>,主要集中在两个方面:①采用静态分析方法对漂浮软管受力进行近似分析研究<sup>[15-18]</sup>;②采用动态分析的方法,利用有限元软件分析漂浮软管在风浪流载荷下的受力变化,或者在模拟波浪下分析软管所受的外载荷作用力<sup>[19-20]</sup>。为全面了解海上漂浮输油系统中漂浮软管的形态与张力变化,有必要建立全系统仿真模型,分析漂浮软管、油船、浮筒、系泊缆之间的耦合运动,以获得风浪流环境载荷下漂浮软管的实时运动和张力变化。

## 1 海上漂浮软管输油系统

某 5 000 吨级油船锚泊在距离海岸线 1 200 m 的位置,在油船与岸滩之间铺设了一条漂浮软管,将油料输送到岸上,海上浮筒距离油船、岸滩分别为 100 m, 1 100 m;浮筒与油船之间的漂浮软管长 120 m,其余软管每根长 100 m,软管间采用接头连接(图 1)。油船总长 100.5 m,型宽 18 m,型深 9.5 m,通过 4 根系泊缆系泊;油船系泊水域水深 10 m,海底平均坡度小于 15°;漂浮软管额定工作压力 1.6 MPa,壁厚 3.5~4.5 mm,

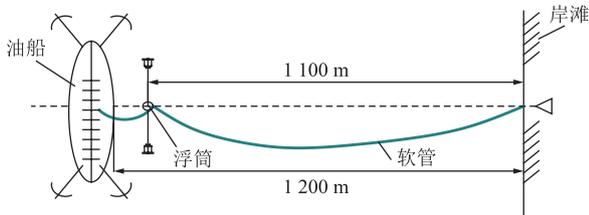


图 1 海上漂浮软管输油系统组成示意图

单位质量 2.5 kg/m,抗拉弹性模量 7 GPa,轴向抗拉强度 150 kN,抗弯刚度 1 000 N/m。作业适应海况:展收海况不大于 2 级,作业海况不大于 3 级,生存海况不大于 4 级,适应海流不大于 1.02 m/s。

## 2 分析与计算工况

### 2.1 分析方法

AQWA 是用于分析船舶与海洋工程结构物水动力性能的专业软件,在国际上享有较高知名度。OrcaFlex 是业内先进的海洋工程柔性立管和系泊分析软件,可以对锚泊系统、海洋工程立管系统、水下软管等进行分析。采用 AQWA 和 OrcaFlex 联合仿真方法对海上漂浮软管输油系统进行频域和时域的数值仿真分析,步骤如下:

(1) 建立油船数值模型后,将模型数据导入 AQWA 软件的输入数据文件,利用 AQWA-LINE 模块进行频域分析,计算规则波下油船的波浪载荷和响应。

(2) 利用 OrcaFlex 软件中已有的软管模块建立漂浮软管的数值模型。

(3) 基于 AQWA 软件的计算结果,利用 OrcaFlex 软件对漂浮软管、船体、浮筒、系泊缆之间的耦合运动进行时域分析,仿真风浪流环境影响下漂浮软管的实时运动,得到时域下软管张力随时间的变化曲线。

### 2.2 计算工况

表 1 给出了某海上漂浮软管输油系统仿真计算工况,主要包括海况级别、风速、风向、浪向等。

表 1 某海上漂浮软管输油系统仿真计算工况表

海况级别	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	有义波高/m	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	风向/(°)	浪向/(°)	流向/(°)	备注
2 级	7.90	0.50	1.028	90	90	90	软管通气
3 级	10.70	1.25	1.028	90	90	90	软管通油
4 级	13.80	2.50	1.500	90	90	90	软管通油

注:风向、浪向、流向的方向角定义为传播方向与坐标系  $x$  轴的夹角,俯视时顺时针为正。

风选用 NPD 谱,海浪选用 JONSWAP 谱,该谱由“北海海浪联合计划”测量分析得到,波浪谱公式为:

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^{\exp \left[ -\frac{\omega - \omega_p}{2(\sigma \omega_p)^2} \right]} \quad (1)$$

$$\alpha = 0.0076 (gx/v^2)^{-0.22} \quad (2)$$

$$\omega_p = 22 (g/v) (gx/v^2)^{-0.33} \quad (3)$$

式中: $S_{\zeta}(\omega)$ 为波浪谱密度。 $\alpha$ 为无因次常数。 $x$ 为风区长度, m。 $v$ 为平均风速, m/s。 $\omega_p$ 为谱峰频率。 $\gamma$ 为谱峰提升因子,平均值为 3.3。 $\sigma$ 为峰形参数,当  $\omega \leq \omega_p$  时,  $\sigma=0.07$ ; 当  $\omega > \omega_p$  时,  $\sigma=0.09$ 。 $\omega$ 为波浪频率。

### 3 仿真模型及数值分析

#### 3.1 漂浮软管长度与张力的关系

由赵伟<sup>[20]</sup>的研究可知,软管两端点的距离确定后,软管所受张力与软管长度有关:长度越长,所受张力越小,但漂移量越大;软管长度增加到一定程度后,张力继续变小、速度放缓,但漂移量一直增大。反之,软管所受张力越大,漂移量越小。

当漂浮软管两端点距离确定时,可以通过分析不同长度下软管所受张力与变形情况,根据张力变缓的拐点来确定最优软管长度。该海上漂浮软管输油系统的浮筒与岸上系固点之间的距离为1 100 m,分别对长度为1 200 m、1 300 m、1 400 m的漂浮软管进行4级海况下的动态仿真分析(表2)。可见,海上系固浮筒与岸上系固点间的漂浮软管越长,漂浮软管与浮筒系泊缆张力越小,但漂移量增大;当软管由1 200 m增至1 300 m时,软管与浮筒系泊缆张力减小非常明显(32%和16%);在软管长度大于1 400 m后,软管与浮筒系泊缆张力减小量变缓(6%和3%)。由此,可确定漂浮软管张力变化率拐点发生在软管长度为1 300 m附近。因此,当海上系固浮筒距离岸滩1 100 m时,系固浮筒与岸上系固点之间的输油软管长1 300 m最优。

表2 4级海况下不同长度漂浮软管的仿真计算结果

软管长度/m	最大张力/kN		漂移量/m	软管上岸端与基准线夹角/(°)
	漂浮软管	浮筒系泊缆		
1 200	59.3	44.0	216	40~52
1 300	40.1	37.0	306	51~62
1 400	37.5	35.9	382	58~68

#### 3.2 漂浮软管张力与海况的关系

确定了漂浮软管最优长度为1 300 m后,将油船加注口到海上终端的漂浮软管定义为hose1,其余各段软管编号依次为hose2、hose3、…、hose14;其中hose1长120 m,hose2~hose14长度均为100 m(图2)。对2级、3级、4级海况下的漂浮软管进行动态数值分析(表3)可见,漂浮软管最大张力为40.05 kN,对于轴向抗拉强

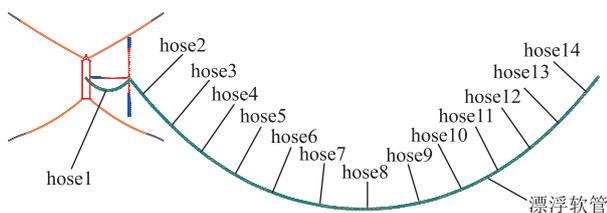


图2 海上漂浮软管张力分析模型图

表3 不同海况下漂浮软管最大张力及安全系数统计

海况级别	最大张力/kN	张力最大位置	安全系数	安全系数要求
2级	14.96	hose2	10.03	>3
3级	24.93	hose2	6.02	>3
4级	40.05	hose2	3.75	>3

度为150 kN的漂浮软管在4级海况下的安全系数为3.75,符合CCS《海上移动平台入级与建造规范》中锚索的要求。因此,在4级海况下海上漂浮软管可以安全使用。

#### 3.3 漂浮软管增加沿线系固时张力与漂移量的变化

利用漂浮软管进行油料输送时,由于作业海域面积受限且长时间作业,为了提高可靠性和减少漂浮软管的漂移量,在漂浮软管沿线每段软管接头处布置了一个100 kg的系固锚进行系固。对该情况进行数值分析,首先在原数值模型基础上增加沿线系固,模型中连接海上系固浮筒与软管的系泊缆为poly1,沿线系泊缆依次为poly2、poly3、…、poly13(图3)。模拟得到沿线系固的海上漂浮软管与沿线系泊缆在2级、3级、4级海况下所受最大张力(表4)及增加沿线系固前后漂浮软管漂移量(表5)。可见,增加沿线系固后,软管张力、偏移量降低幅度均超过70%。

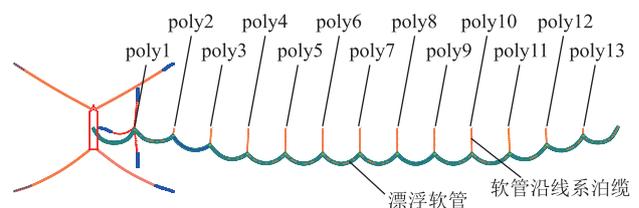


图3 沿线系固下海上漂浮软管和沿线系泊缆张力分析模型图

表4 不同海况下沿线系固的海上漂浮软管和沿线系泊缆最大张力统计结果

海况级别	最大张力/kN		张力最大位置	
	漂浮软管	沿线系泊缆	漂浮软管	沿线系泊缆
2级	3.65	3.13	hose2	poly6
3级	6.78	4.97	hose2	poly6
4级	8.31	11.53	hose2	poly6

表5 增加沿线系固后海上漂浮软管漂移量变化统计结果

海况级别	漂移量/m		漂移量下降幅度
	有沿线系固	无沿线系固	
4级	85	306	72%

### 3.4 漂浮软管沿线系固某点失效时的变化

根据表 4 统计结果,沿线系泊缆索中 poly6 张力最大,若 poly6 由于走锚或系缆断裂等原因发生失效,则海上漂浮软管存在风险,对该工况进行分析(图 4),得到此工况下漂浮软管和沿线系泊缆最大张力(表 6)。可见,在 4 级海况下,当 poly6 失效时, hose2 仍然为张力最大软管,为 8.79 kN;沿线系泊缆中, poly10 张力最大,为 11.59 kN。

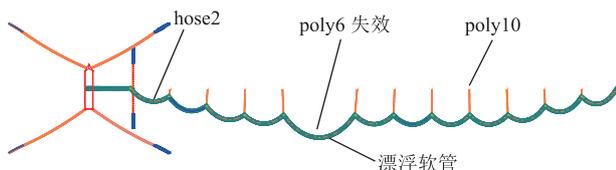


图 4 poly 6 系泊缆失效时漂浮软管和沿线系泊缆张力分析模型图

表 6 poly 6 系泊缆失效时漂浮软管和沿线系泊缆最大张力统计结果

海况级别	最大张力/kN		张力最大位置	
	漂浮软管	沿线系泊缆	漂浮软管	沿线系泊缆
4 级	8.79	11.59	hose2	poly10

2016 年在广州某海域 3~4 级海况下通过海上漂浮软管输油系统对 5 000 吨级油船实施海到岸油料输送试验,试验数据与该模型分析结果基本一致,验证了仿真分析方法和模型的正确性。

## 4 结论

采用 AQWA 与 Orcaflex 软件模拟了海上漂浮软管输油系统,研究了漂浮软管在风浪流环境影响下的最优长度、形态及张力变化,得出以下结论:

(1) 海况对漂浮软管所受张力的影响很大,呈非线性增长,软管张力最大点为其与海上、岸滩连接端点位置。

(2) 增加软管沿线系固装置可以明显降低软管所受张力,减少漂移量。

(3) 当软管沿线系固装置某一个点发生失效时,软管和系泊缆张力会少量增加,可合理设置沿线系泊缆的安全裕量。

(4) 当输送距离为 1 100 m 时,综合考虑系统受力与漂移量,软管长度为 1 300 m 较好;无沿线系固时的漂移量约为 300 m,漂浮软管最大张力为 40.05 kN;对于抗拉强度为 150 kN 的漂浮软管,在 4 级海况下的安全系数为 3.75,可以安全使用。

### 参考文献:

- [1] HENRY C, MAYO. Eight-inch floating-hoseline system for ship-to-shore fuel delivery: AD7081989[R]. Fort Belvoir: U S Army Mobility Equipment Research and Development Center, 1971: 1-47.
- [2] BAYLES J, CLARKE N, HOFFMAN C, THAYER J. Capability of existing 6-inch bulk fuel delivery system to transfer fuel from tankers 10 000-ft offshore: ADA092946[R]. Port Hueneme: Naval Facilities Engineering Command, 1980: 1-27.
- [3] 张健,林路,何建设,许俊霞. 美军油料保障勤务研究[M]. 北京:海潮出版社,2013: 141-149.  
ZHANG J, LIN L, HE J S, XU J X. U S oil service support[M]. Beijing: Haichao Press, 2013: 141-149.
- [4] 王艳芳. 美军两栖作战与联合越岸后勤[M]. 北京:海潮出版社,2013: 69-72.  
WANG Y F. U S amphibious operations and logistics over-the-shore[M]. Beijing: Haichao Press, 2013: 69-72.
- [5] DE ZOYSA A. Steady-state analysis of undersea cables[J]. Ocean Engineering, 1978, 5(3): 209-223.
- [6] PEYROT A H, GOULOIS A M. Analysis of cable structures[J]. Computers & Structures, 1979, 10: 805-813.
- [7] KIRK C L, ETOK E U. Wave induced random oscillations of pipelines during laying[J]. Applied Ocean Research, 1979, 1(3): 125-135.
- [8] SAYED F B, PATEL M H. Mathematics of flexible risers including pressure and interual flow effects[J]. Marine Structures, 1992(5): 121-150.
- [9] GONZALEZ G. Behavior of offloading marine hose submitted to bending[J]. Research Gate, 2014(4): 86-95.
- [10] 徐慧,张彩莹,罗延生,徐业峻,朱永凯. 海上漂浮输油软管拉伸与弯曲力学特性[J]. 油气储运, 2012, 31(4): 279-282, 288.  
XU H, ZHANG C Y, LUO Y S, XU Y J, ZHU Y K. Analysis of tensile and bending mechanical properties of offshore floating oil hose[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(4): 279-282, 288.
- [11] BROWN M J. Mathematical model of a marine hose-string at a buoy: Part 1-static problem[J]. Offshore and Coastal Modelling, 1985, 12: 251-277.
- [12] BROWN M J, ELLIOTT L. Two-dimensional dynamic analysis of a floating hose string[J]. Applied Ocean Research, 1998, 10(1): 20-23.
- [13] 赵东伟,吴世德,胡栋,段梦兰. 基于输油系统的海上漂浮软管

- 静力学特性研究[J]. 石油机械, 2017, 45(11): 31-36.
- ZHAO D W, WU S D, HU D, DUAN M L. Study on the static characteristics of offshore floating hose based on integral oil transmission system[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(11): 31-36.
- [14] 张帆, 张世富, 陈畅. 海上漂浮输油软管力学分析研究现状[J]. 自动化与仪器仪表, 2015, 193(11): 15-17.
- ZHANG F, ZHANG S F, CHEN C. Research on the mechanical analysis of the offshore floating oil hose[J]. Automation & Instrumentation, 2015, 193(11): 15-17.
- [15] 宇可, 黄荣华, 赵伟. 海上浮式输油软管的优化设计[J]. 机电设备, 2001(1): 39-43.
- YU K, HUANG R H, ZHAO W. Optimal design of floating fuel hose at sea[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2001(1): 39-43.
- [16] 赵伟, 吕英民. 海上浮动输油软管的强度计算[C]. 北京: 第八届全国工程设计年会, 2002: 424-426.
- ZHAO W, LYU Y M. Strength design of floating fuel hose at sea[C]. Beijing: The Eighth Annual Meeting of National Engineering Design, 2002: 424-426.
- [17] 孟浩龙, 吕洪庆, 李著信, 苏毅, 张海明. 海上浮动软管的三维静态分析[J]. 海洋工程, 2003, 21(1): 109-112.
- MENG H L, LYU H Q, LI Z X, SU Y, ZHANG H M. Three-dimension static analysis of the floating hose-string system on sea[J]. The Ocean Engineering, 2003, 21(1): 109-112.
- [18] 孟浩龙, 吕洪庆, 李著信, 龙军, 朱瑞国. 海上浮动软管的静态数学模型[J]. 油气储运, 2002, 21(3): 10-12.
- MENG H L, LYU H Q, LI Z X, LONG J, ZHU R G. The loading calculation on sea floating hose-string system with static mathematic model[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2002, 21(3): 10-12.
- [19] 陈畅, 张世富, 张启欣, 仵路. 基于改进 Morision 公式的海上漂浮软管波浪载荷计算[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(2): 40-44.
- CHEN C, ZHANG S F, ZHANG Q X, WU L. Wave load computation of offshore floating hose based on improved morision equation[J]. Journal Logistical Engineering University, 2015, 31(2): 40-44.
- [20] 赵伟. 海上漂浮输油软管非线性静态反应分析研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2004: 13-26.
- ZHAO W. Nonlinear static and dynamic response analysis of floating fuel hose at sea[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2004: 13-26.
- (收稿日期: 2017-11-10; 修回日期: 2020-03-03; 编辑: 杜娟)

**作者简介:** 赵小兵, 男, 1978年生, 高级工程师, 2001年毕业于解放军后勤工程学院油气储运工程专业, 现主要从事海上油料补给技术的研究工作。地址: 北京市房山区长阳镇稻田南里7号, 100072。电话: 13681470288。Email: zhaoxb116@163.com

