

近海油料输转系统管线排空模型及数值模拟

陈 畅^a, 张 帆^b, 张世富^c, 张起欣^d

(后勤工程学院 a. 军事油料应用与管理工程系; b. 机械电气工程系;
c. 国家救灾应急装备工程技术研究中心; d. 军事供油工程系, 重庆 401311)

摘要:针对近海油料输转系统管线排空作业,建立了管线排空数学模型,运用 MATLAB 软件,计算了在不同工作压力情况下,管线总的排空时间;分析了在不同时间间隔下,管线受到的摩擦阻力和速度分布情况;运用 ANSYS 软件,构建了管线排空数值模型,分析了管线压力分布、速度分布以及流体轨迹分布规律,对掌握管线排空作业过程中的力学规律具有指导意义。

关键词:近海油料输转系统;管线排空;数值模拟;ANSYS;MATLAB

本文引用格式:陈畅,张帆,张世富,等.近海油料输转系统管线排空模型及数值模拟[J].兵器装备工程学报,2017(6):76-79.

Citation format:CHEN Chang, ZHANG Fan, ZHANG Shi-fu, et al. Model and Numerical Simulation for Pipeline Evacuation of Offshore Oil Transportation System[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(6): 76-79.

中图分类号:TE97

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)06-0076-04

Model and Numerical Simulation for Pipeline Evacuation of Offshore Oil Transportation System

CHEN Chang^a, ZHANG Fan^b, ZHANG Shi-fu^c, ZHANG Qi-xin^d

(a. Department of Military Oil Application and Management Engineering; b. Department of Mechanic and Electric Engineering; c. National Engineering Research Center for Disaster and Emergency Relief Equipment; d. Department of Petroleum Supply Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China)

Abstract: This paper focuses on the pipeline evacuation of offshore oil transportation system. The mathematical model for pipeline evacuation was established, and the total emptying time under different working pressure was calculated by using MATLAB software. Frictional resistance and velocity distribution of the pipe under different time intervals was analyzed. The numerical simulation for the pipeline evacuation was carried out by using ANSYS software. The pressure distribution, velocity distribution and distribution law of the fluid trajectory are analyzed, which will make contribution to the analysis and control of the variation of the pipeline during the evacuation operation.

Key words: offshore oil transportation system; pipeline evacuation; numerical simulation; ANSYS; MATLAB

软质管线因其较大的抗拉强度和较小的抗弯刚度,具有储存空间小和便于收展的特点,广泛应用于近海油料输转和其他海洋工程领域。在近海进行油料输转作业后,为了实现

管线快速撤收,必须先对管线实施排空作业。有关学者对管线排空进行了相关研究。甘文潇等^[1]对目前采用的自流排空、水顶法排空、气顶法排空等工艺技术特点,进行了分析比

收稿日期:2017-01-25;修回日期:2017-02-26

基金项目:军需能源专业科研项目(YX213Z044)

作者简介:陈畅(1990—),男,博士研究生,主要从事油气加注技术与装备、油料勤务研究。

较。吴秀全等^[2]针对注汽锅炉冬季点停炉排空管线冻堵问题,提出了解决对策并进行了改进。刘忠辉等^[3]对聚酯装置浆料配制罐排空管线的堵塞原因进行了分析。姜俊泽等^[4]根据钢质机动管线的结构特点,设计制作了双丝电容探针持液率检测装置,并用该装置对排空过程中管内的持液率进行了实测。程雪^[6]针对油库及管线系统油污水具有不连续性、油水密度差较大、含油污水中含油量较低、悬浮物较少的情况,研制了采用聚结分离技术的污水处理装置。李正阳等^[7]通过对机动管线水顶油排空作业终端混油切割流程、设备操作的分析,测量了三通球阀的流动特性,论证了三通球阀作为机动管线混油切割阀的可行性。从目前文献检索的情况看,对管线排空方面的研究较少,尤其是对管线排空的模型化分析和数值分析还未见报道。本文从工艺的角度出发,结合作业实际,构建了海上软质管线排空模型,并进行了数值分析,对于分析管线排空过程规律有一定的意义。

1 管线排空工艺流程

在完成近海油料输转后,对管线进行快速撤收前,必须对海上软质管线排空,由于所有都依托船载设备,必须在作业船设置排空单元,以实现排空作业。排空单元可由空压机、高压储气罐、收发球装置、高压弹簧气卷盘等组成,主要完成管线压力试验、气顶排空和收发清管球作业。排空工艺流程如图1所示。

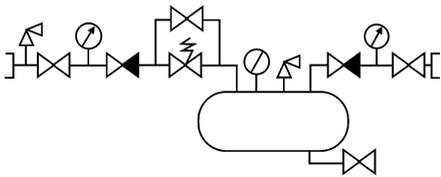


图1 排空工艺流程

2 管线排空模型

根据管线排空的实际情况,建立管道排空模型^[5],排空模型示意图如图2。

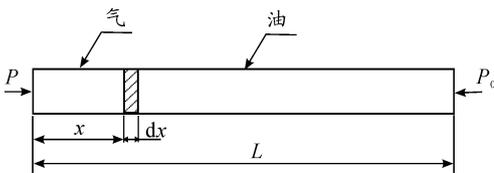


图2 排空模型示意图

在 t 时刻气液混合面到达图2中所示的位置,即混合面距离进口距离为 x ,经过 dt 时刻向出口方向移动了 dx 的距离。

由普朗特公式结合雷诺数公式,可得

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\lg(Re\sqrt{\lambda}) - 0.8 \\ Re = \frac{vD}{\nu} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 λ 为 t 时刻液体段的摩擦因数, Re 为 t 时刻液体段的雷诺数, ν 为 t 时刻液体段的运动黏度, v 为输送液体的运动黏度。

以 t 时刻管道剩余的液体为对象,分析该段液体的受力情况:该段液体受到气液混合面向出口方向的压力 P ,受到管道出口处的压力 P_0 ,同时受到摩擦阻力 f ,由牛顿定律可得:

$$\begin{cases} PS - P_0S - f_t = m_t a_t \\ m_t = \gamma S(L - X) \\ v = \frac{dx}{dt} \\ a = \frac{dv}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 S 为管道断面面积, f_t 为 t 时刻液体段受到的摩擦力, m_t 为 t 时刻液体段的质量, a_t 为 t 时刻液体段的运动加速度, γ 为输送液体的重度。

由沿程摩擦损失公式得:

$$h_f = \lambda \frac{L - X}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

根据牛顿内摩擦定律得:

$$\begin{cases} \tau = \mu \frac{du}{dy} = \frac{D\gamma i}{4} \\ f_t = \tau \pi D(L - X) \\ i = \frac{h_w}{L - X} \\ h_w = h_f + h_j \approx Kh_f \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 τ 为管道界面上的平均切应力, i 为管道的能坡度, h_w 为总水头损失, h_f 为沿程摩擦损失, h_j 为局部摩擦损失, K 为比例系数。

将式(1)至式(4)联立可得:

$$\begin{cases} \frac{P - P_0}{\gamma(L - X)} - \frac{\lambda K}{2Dg} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = \frac{d^2x}{dt^2} \\ \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\lg\left(\frac{\sqrt{\lambda}d}{v} \frac{dx}{dt}\right) - 0.8 \end{cases} \quad (5)$$

3 管线排空数值模拟

1) 几何模型建立。根据气顶排空的作业方式,系统为装备补给完油料之后,在空压机的作用下,将空气注入管道内部,推动清管器向前运动,清管器推动管道内的余油排出管道。考虑到该模型是气液混合模型,因此采用二维平面气液混合VOF模型,即输油管道轴向断面,如图3所示。

2) 网格划分。由于采用二维平面模型,且模型为矩形,因此本文采用平面扫略(sweep)矩形网格划分的方式,设置左端为模型出口(outlet),右端为模型入口(inlet),网格数量为30354,节点数为4560个,如图4所示。

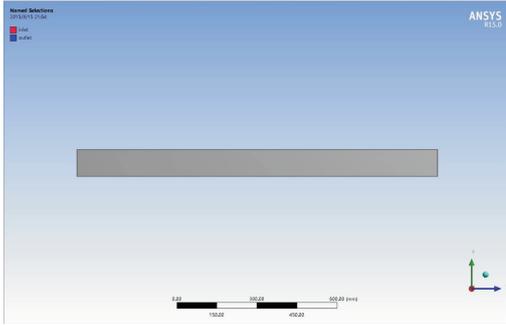


图3 管道排空模型

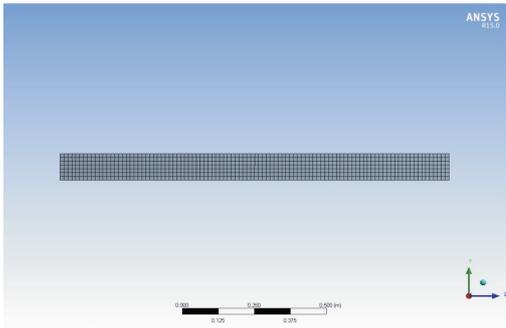


图4 管道排空模型网格划分

3) 控制方程。其方程如下:

① 连续方程

用积分形式表示系统的质量,可得:

$$m = \iiint_{V(t)} \rho dV \quad (6)$$

按照质量守恒定理,用数学方法表示,即

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{V(t)} \rho dV = 0 \quad (7)$$

式(7)为连续方程的拉格朗日积分形式,结合运输方程和高斯公式,可以得到欧拉形式的连续方程,即

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (8)$$

式(8)中 $\frac{d}{dt}$ 表示物质导数, $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla$, 对于不可压缩流体,其密度为常数,其连续方程可以写成

$$\nabla \cdot u = 0 \text{ 或 } \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0 \quad (9)$$

② 动量方程

运动的流体微元的动量可以表示为

$$u dm = \rho u dV \quad (10)$$

动量守恒原理是流体系统的动量变化率等于系统受外力之和,即

$$\iiint_{V(t)} \rho dV = \sum F \quad (11)$$

式(11)中外力 F 主要包括体积力(质量力)和面积力,结合应力的张量形式、雷诺第二运输方程、高斯公式等,简化后的动量方程为

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho f + \nabla \cdot \sigma \quad (12)$$

③ 能量方程

单位质量流体所具有的内能用 e 表示,因此单位体积流体所具有的内能为 ρe , $\frac{1}{2} \rho u \cdot u$ 表示单位体积流体的动能,因此单位体积流体包含的总能量 $E = \rho e + \frac{1}{2} \rho u \cdot u$, 能量守恒原理可以表示为

$$\frac{d}{dt} \iiint_{V(t)} \rho (e + \frac{1}{2} u \cdot u) dV = \sum W + \sum Q \quad (13)$$

式中 $\sum W$ 为单位时间内外力对系统做功之和, $\sum Q$ 为单位时间传入系统的全部热量。

4) 求解器与参数设置。选择二维单精度基于压力的瞬态 VOF (Volume of Fluid) 模型,粘度方程选择 $k-\varepsilon$ 求解器方程;近壁面采用标准壁面函数的处理方法,选择空气 (air) 和柴油 (diesel-liquid) 作为研究的介质;选择阶段 1 为空气,阶段 2 为柴油;在边界条件的设置中,选择压力入口 (Pressure Inlet), 压力出口 (Pressure Outlet); 在求解方法的设置中,选择 SIMPLEC 的压强速度关联形式,设置适当的松弛因子以及计算精度,选择恰当的时间步长、反馈时间和迭代次数,进行迭代计算。

4 结果与分析

4.1 管线排空模型计算

式(5)可以整理成关于 dx 和 dt 的微分方程,按总长度 $L = 1350$ m, 管径内径 $d = 98$ mm, 利用 Matlab 软件进行计算机编程,计算压缩机工作压力分别为:3.0 MPa、1.0 MPa、0.7 MPa 情况下的排空总时间 T , 求解结果如表 1 所示。

表1 利用 Matlab 编程得到排空时间结果

压缩机工作压力 P/MPa	3.0	1.0	0.7
排空总时间 T/s	194.58	361.14	448.65

运用 Matlab 编程,计算在不同时间间隔下,管道受到的摩擦阻力和速度分布情况,如图 5、图 6 所示。

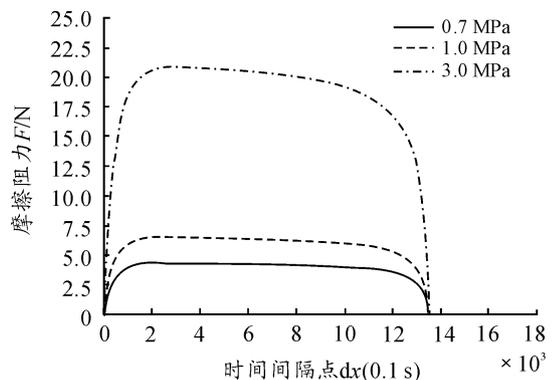


图5 摩擦阻力随排空时间变化情况

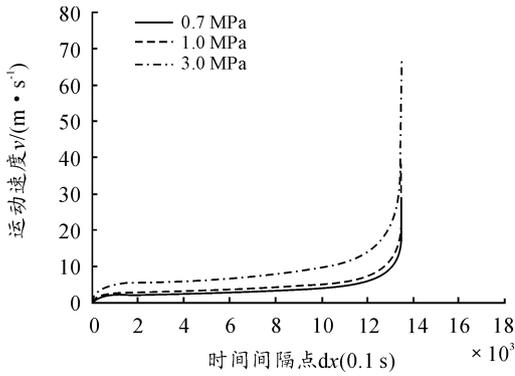


图6 速度大小随排空时间变化情况

从图5、图6可知:摩擦阻力随着排空时间,开始急速增大到某个值,随后以十分缓慢的速度减小,到了某个时间点急速降低至基本为零;排空速度的大小从零开始随时间增大而逐渐增大,当接近排空末端时,速度急剧增大。这主要是由于排空刚开始阶段管道内充满液体,其摩擦阻力较大,排空速度较慢,随着排空任务的进行,气体段体积逐渐增大,液体段体积逐渐减小,摩擦阻力不断减小,排空速度逐渐增大,当液体段全部排空时,管道内充满了气体,阻力基本为零,排空速度达到最大值。

4.2 数值模拟结果分析

1) 压力分布规律。由迭代计算可以得到,管道排空时的压力变化云图,如图7。

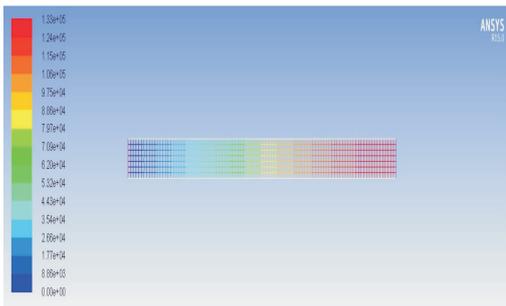


图7 管道排空压力云图

从图7可知:在进行排空任务时,与空压机高压储气罐出口相连接处的压力较高,沿着排空方向静压力不断减小,在出口处静压力最小;这是由于随着排空的进行,空气段摩擦阻力较小,柴油段摩擦阻力较大。在考虑管道的承压能力以及承压安全时,主要对排气入口端的关键点进行排查。

2) 速度分布规律。通过迭代计算,得到排空管线速度分布矢量图,如图8。从图8可知:沿着管道排空方向,内部流体的运动速度逐渐加大;从径向进行比较,排气入口处存在最小值,出口处存在最大值;这是由于空气段的摩擦阻力较小,柴油段的摩擦阻力较大,随着时间的推移,整段管道的摩擦阻力不断减小,因此排空速度沿着排空方向不断增大;同时由于管道近壁面处存在边界层,因此靠近管道壁面的速度小,管道内部的速度大。

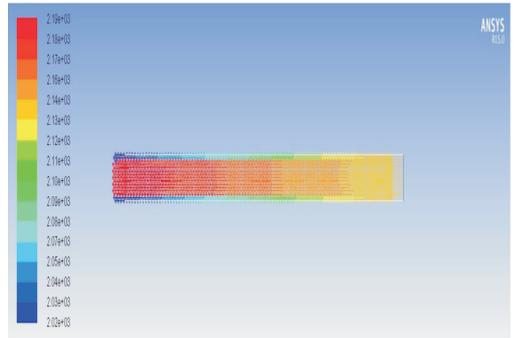


图8 速度分布矢量图

③ 流体粒子轨迹分布规律

通过迭代计算,得到内部流体的轨迹分布图,如图9所示。

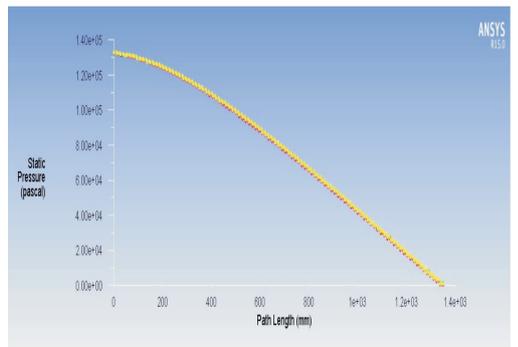


图9 流体轨迹与静压力的关系

从图9可知,在排空过程中,内部流体主要包括空气和柴油以及二者气液混合体,在进口段其压力为最大值,即为压缩机所能提供的最大压力,随着运动的进行,其静压力不断减小,最终在出口处达到最小值。

5 结论

本文对软质管线排空作业进行分析,建立了管线排空数学模型,结合实际情况计算出压缩机工作压力在3.0 MPa情况下,总的排空时间为194.58 s,分析了不同时间间隔下,管道受到的摩擦阻力和速度分布情况。运用ANSYS软件,构建了软管模型,分析了压力分布、速度分布以及流体粒子轨迹分布规律,对检测管道的承压能力以及承压安全具有指导意义。

参考文献:

- [1] 甘文潇,江崇林,刘佩,等.长江中上游浮动码头液态危化品管线排空工艺技术探讨[J].中国储运,2014(3):135-136.
- [2] 吴秀全,申长云,郑强,等.注汽锅炉冬季点停炉排空管线冻堵问题探讨[J].新疆石油科技,2015(1):73-74.

(下转第120页)

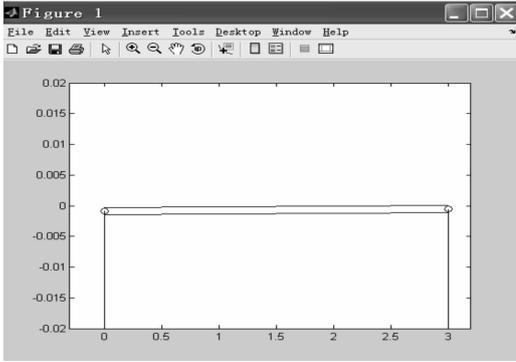


图 10 (c)

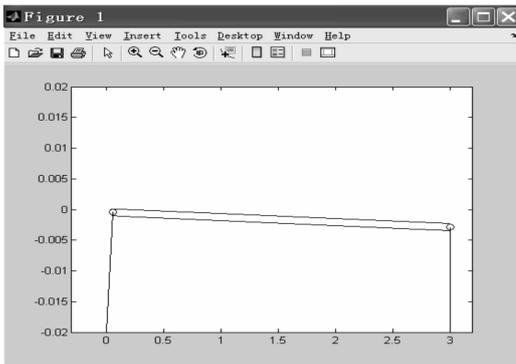


图 11 (d)

易于控制的二自由度耦合振动台。该振动台具有结构简单和易于控制等优点,并且造价和使用费都较低,模拟实现的自由度数目少,可靠性较强;对其结构进行了初步分析,为进一步研究奠定了基础。通过基于 AMESim 和 Matlab/Simulink 软件的联合仿真结果表明,该结构适用于公路运输等振幅较小的振动模拟系统。

参考文献:

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2007:202-211.
- [2] 杨云. 电液道路模拟振动台及功率谱再现控制的研究[D]. 西安:西安交通大学,2003:3-12.
- [3] 李盛海. 液压机构及其组合[M]. 北京:清华大学出版社,1992:8-12.
- [4] 安子军. 机械原理教程[M]. 北京:机械工业出版社,2004:10-14.
- [5] 张静,许忠华,臧文福. 确定平面低副四杆机构死点位置的新方法[J]. 森林工程,2007,23(4):28-29.
- [6] 秦家升,游善兰. AMESim 软件的特征及其应用[J]. 工程机械,2004(12):6-8.
- [7] 段云龙,韩保红,马英忱,等. 一种二自由度并联电液振动台的机构和运动学研究[J]. 机械传动,2011,35(6):34-36.

4 结论

提出了一种适用于电液伺服道路模拟系统结构简单和

(责任编辑 唐定国)

(上接第 79 页)

- [3] 刘忠辉,张国跃,闵宇. 聚酯装置浆料配制罐排空管线堵塞原因分析[J]. 设备管理与维修,2013(3):64.
- [4] 姜俊泽,张伟明,雍歧卫,等. 机动管线气顶排空过程持液率特性的实验研究[J]. 实验流体力学,2016(4):48-55.
- [5] 姜俊泽,张伟明,段纪森,等. 野战输油管线排空过程的气体与液体两相流瞬态模型[J]. 兵工学报,2016(8):

1536-1542.

- [6] 程雪. 长输管线试压及排空污水的除油原理与处理装置研究[D]. 北京:北京化工大学,2013.
- [7] 李正阳,张伟明,贾邓乐,等. 机动管线水顶油排空油水混合物切割工艺研究[J]. 后勤工程学院学报,2013(6):30-35.

(责任编辑 唐定国)