

基于FLUENT的原油储罐浮球式自动切水器数值模拟

姜东方

中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊
Email: cppejdf185@sina.com

收稿日期: 2021年3月26日; 录用日期: 2021年6月8日; 发布日期: 2021年6月15日

摘要

储罐原油切水是原油罐区的重要作业。原油储罐的切水设备在运行过程中应满足节能和环保的要求。本文以原油储罐自动切水器为研究对象, 利用FLUENT软件建立了水力数学模型, 对流经原油储罐和自动切水器的含水原油进行了流动状态的数值模拟, 验证了自动切水器的设计参数, 并确定自动切水器的安装数据, 为原油储罐自动切水器的安装调试提供了经验。

关键词

原油储罐, 自动切水器, 数值模拟, 原油, 水

Numerical Simulation of Crude Oil Storage Tank Ball Float Type Automatic Dehydration Facility Based on FLUENT

Dongfang Jiang

China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang Hebei
Email: cppejdf185@sina.com

Received: Mar. 26th, 2021; accepted: Jun. 8th, 2021; published: Jun. 15th, 2021

Abstract

The dehydration of crude oil is the important operation in the crude oil storage tank area. The dehydration facility during operation should try to meet the requirements of energy conservation and environmental protection. The automatic dehydration facility of crude oil storage tank is the object of study in this article. The hydraulic mathematical model is established by using FLUENT software. The flow state of water bearing crude oil passing through the crude oil storage tank and the automatic water cutter is numerically simulated. The design parameters of the automatic water cutter are verified, and the installation data of the automatic water cutter are determined, which provides experience for the installation and debugging of the automatic water cutter of crude oil storage tank.

Keywords

Crude Oil Storage Tank, Automatic Dehydration Facility, Numerical Simulation, Crude Oil, Water

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石油是现代工业的血液，为保障国家能源安全，保证原油供给充足应加快原油储备能力建设，增强我国在国际原油贸易中的话语权，为此我国多地兴建大批的原油战略储库和商业储库[1]。

原油在存储、运输、加工等过程其所含水分会对相应设施造成极大影响[2]，因此，在原油储存过程中切水作业占有重要地位[3]。长期以来，储罐原油切水作业主要由人工进行，效率低，风险大，易发跑油、冲塔，甚至爆炸等安全事故，对人身健康及自然环境构成重大威胁，浮球式自动切水器可实现连续脱水，节能环保，克服了人工操作的诸多弊端，可极大提高原油储罐切水作业的效率[4]。

目前，对自动切水器的使用研究仅限于工程经验和生产作业过程中的数据积累分析，缺乏仿真数值模拟研究。通过对自动切水器进行仿真数值模拟，可为使用单位提供工程仿真模拟分析数据，有利于提高原油储罐自动脱水器的选型、安装、调试的准确性，有助于提高运维管理的效率[5]。

2. 数值模拟原理及主要参数

2.1. 数值模拟原理

原油与水在密度、颜色、粘度、电导率、微波吸收、导光性和超声波回波等方面存在特性差异[6] [7], 利用原油与水存在密度和粘度特性差异[8], 对原油储罐浮球式自动切水器进行数值模拟, 进而对自动切水器的整个工作过程进行数值模拟分析。

2.2. 主要参数

以中-俄原油管道俄罗斯来油为参考[9], 对原油的含水率进行了实测得到其含水率为 0.057%, 并对某储库罐容为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的原油储罐进行了实测, 得到罐底水层高度为 0.86 m, 自动切水器设计流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$, 原油物性参数见表 1。

Table 1. Main physical parameters of Russian crude oil

表 1. 俄罗斯原油的主要物性参数表

序号	项目	单位	数值
1	密度(20℃)	g/cm^3	0.84
2	凝点	℃	<-25
3	倾点	℃	<-28
4	析蜡点	℃	13
5	初馏点	℃	40
6	水分	%	0.057
7	开口闪点	℃	<4
8	酸值	mgKOH/g	0.05
9	运动粘度(20℃)	mm^2/s	7.29
10	密度(20℃)	g/cm^3	0.84
11	凝点	℃	<-25

自动切水器设备结构见图 1。

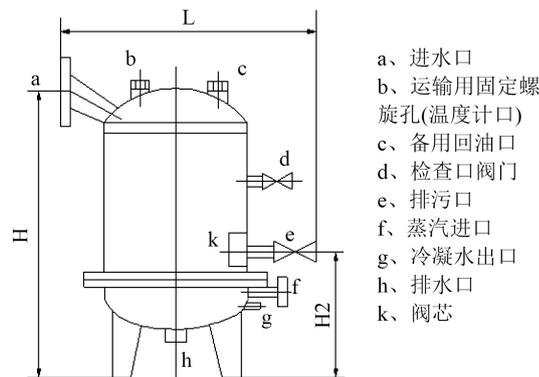


Figure 1. Structure diagram of automatically dehydrating facility

图 1. 自动切水器结构示意图

设备参数见表 2。

Table 2. Main parameters of automatically dehydration facility**表 2.** 自动切水器主要参数

序号	项目	单位	数值
1	高度	mm	790
2	直径	mm	Φ500
3	有效容积	m ³	0.14
3	进口管径	mm	Φ80
4	回油管径	mm	Φ25
5	排水管径	mm	Φ50
6	浮球半径	mm	100
7	浮球密度	g/cm ³	7.85

3. 流体动力学数值模拟

3.1. 数值模拟的前提条件

影响切水器内液体流动场的因素包括：原油的密度和粘度；空心浮球的体积、密度和壁厚；自动切水器进口管径和安装高度，排水口管径；自动切水器回油管管径、长度和安装高度；回油摩阻等[10][11]。由此设定以下数值模拟条件：

- 1) 自动切水器内部的液体流动是一个随时间变化的瞬态过程；
- 2) 自动切水器使用蒸汽伴热，内部液体温度与储罐内液体温度相同，因此不用考虑温度场变化；
- 3) 空心浮球在体积、密度一定的前提下，FLUENT 模拟时将其认为是均匀球体，可计算出当量密度，该密度应介于原油密度和水密度之间。

3.2. 预估算设备安装参数

根据工程实际，为了确定安装数据，数值模拟前应预估算以下参数：

- 1) 经计算自动切水器进口流速为 0.4 m/s；
- 2) 回油过程中，估算回油管长度为 2.5 m；
- 3) 暂定进水管安装高度高于罐底环梁 0.15 m；
- 4) 经摩阻计算，暂定回油管的安装高度高于罐底环梁 1 m。

在各项参数给出的前提下，分别以自动切水器中浮球上浮、浮球下沉和回油过程为例，建立二维动网格模型进行数值模拟。

3.3. 数学模型的建立

本文中对自动切水器的 FLUENT 仿真模拟，采用的是多相流 VOF、湍流 $k-\varepsilon$ 模型和二维动网格模型[12]。

3.3.1. 多相流 VOF 模型

VOF 是跟踪流场内流体流动的方法[13]，数值模拟考虑流场的变化使用 VOF 的容积比率方程、密度属性方程和动量方程。

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{a_q}}{\rho_q} \quad (1)$$

$$\rho = a_2 \rho_2 + (1 - a_2) \rho_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

α : 容积比率; t : 时间; ρ : 密度; μ : 运动粘度; v : 体积; g : 重力加速度; P : 压力; S : 源项; F 外作用力。

3.3.2. 湍流标准 k-ε 模型

湍流标准 k-ε 模型具有适用范围广及精度高等优点, 因此在工程流场的模拟计算中应用广泛。在湍流均匀连续性方程和雷诺方程的基础上, 建立湍流动能 k 的输送方程, 并在 k 方程的基础上引入耗散率 ε 方程, 形成了标准 k-ε 模型[14]。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho C_D \frac{k^{3/2}}{l} \quad (4)$$

k : 湍流动能; ε : 耗散率; μ : 运动粘度; u : 流速; σ : 层流边层厚度; C : 钢管粗糙度。

3.3.3. 动网格模型

FLUENT 动网格模型用于计算运动边界问题, 可模拟流域形状随时间变化的情况, 在计算之前要先定义体网格的初始状态[15]。本文中对自动切水器的回油过程和浮球的起降过程就是利用该模型实现的。

3.4. 物理模型的建立和网格划分

物理模型见图 2。

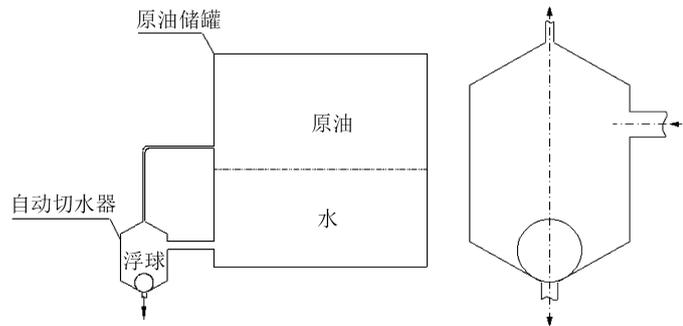


Figure 2. Physical model of automatically dehydration facility
图 2. 自动切水器物理模型

自动切水器数值模拟网格划分见图 3。

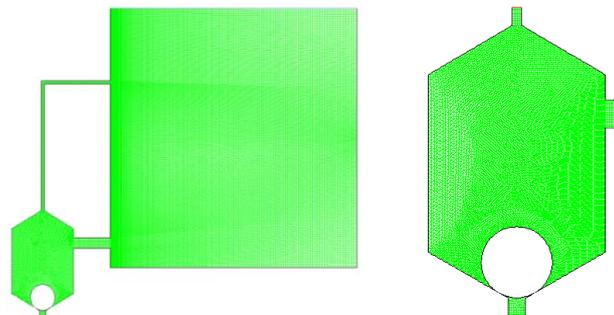


Figure 3. Mesh generation of automatically dehydration facility
图 3. 自动切水器网格划分

3.5. 液体速度场数值模拟及结果分析

3.5.1. 浮球上浮模拟结果及分析

随着原油和水持续进入自动切水器，由于密度差异，原油连续向切水器上部运动，水不断在切水器底部汇集，当浮球重量小于液体浮力时，浮球上浮，下方的排水口开始排水，FLUENT 模拟得到了此过程中某时刻流体的体积、压力和速度分布云图，见图 4。

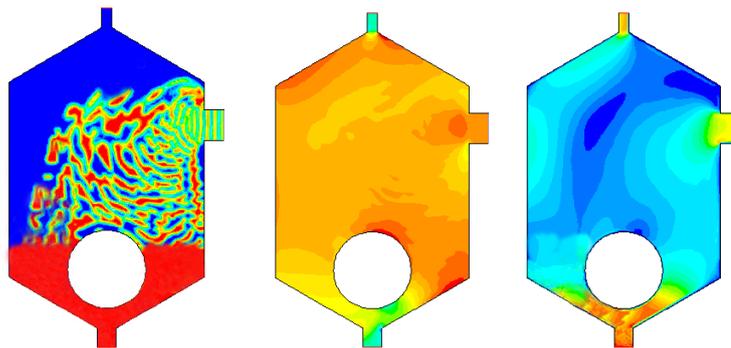


Figure 4. Fluid volume, pressure and velocity distribution cloud map
图 4. 流体体积、压力和速度分布云图

浮球上浮时排水口被打开水从下方排出，从以上图中可以清晰地看到自动切水器内部油水分层情况、压力分布情况和速度分布情况，可知回油管和排水管内的压力较小，排水口液体流速较大。

3.5.2. 浮球下沉模拟结果及分析

随着水不断被排出，液体浮力持续减小，当浮球重量大于液体浮力时，浮球下沉到切水器底部封闭排水口，经模拟得到此过程中某时刻流体的体积、压力和速度分布云图，见图 5。

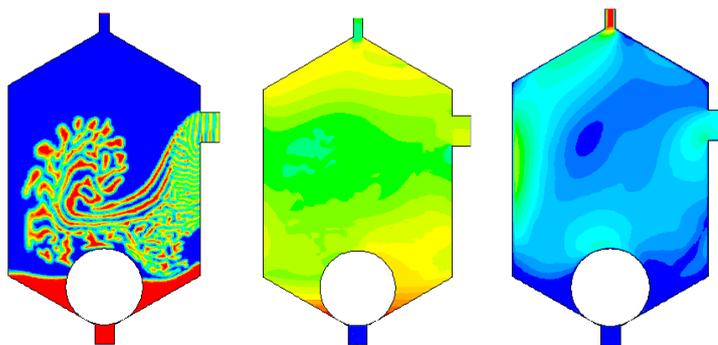


Figure 5. Fluid volume, pressure and velocity distribution cloud map
图 5. 流体体积、压力和速度分布云图

浮球下沉关闭排水口，从以上图中可以看出排水口处压力最小，为一个大气压；排水口处液体的流速为零，表明浮球沉到切水罐底部时排水口没有液体流出，浮球对排水口的密封性能较好。

3.5.3. 回油过程模拟及结果分析

经过一段时间运行，自动切水器内近乎充满原油，当原油储罐沉降水再次进入自动切水器时，由油水密度不同而产生的压力差使得自动切水器中的原油回流进入大罐，经模拟得到流体的体积、压力和速度分布云图，见图 6。

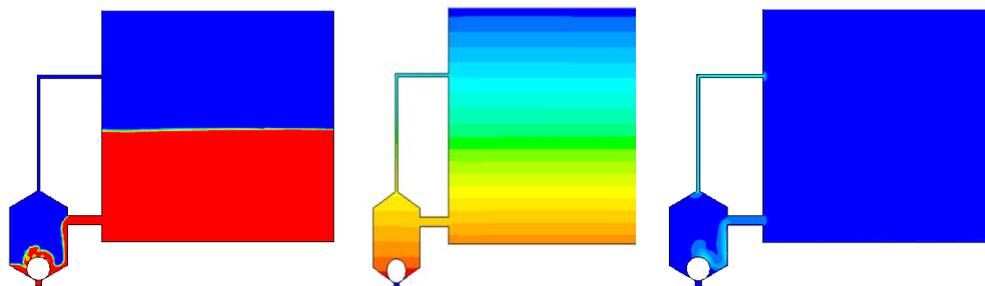


Figure 6. Fluid volume, pressure and velocity distribution cloud map

图 6. 流体体积、压力和速度分布云图

回油过程中原油经回油管回流储罐，从以上图中可看到随着密度和液位高度的不同，压力逐渐变化，回油管中的压力小于储罐底部压力，因此原油才能回流到储罐中。回油管中液体流速较大，排水口被浮球封闭，流速为零。

4. 结论

通过对自动切水器进行数值模拟，验证了该设备设计参数的合理性，明确了进水管安装高度及回油管的安装高度的正确性，验证了排水口和浮球的接触面密封性能良好，表明使用自动切水器进行原油储罐切水作业是切实可行的，为今后原油储罐自动脱水设备的选型、安装和调试提供了经验借鉴。

参考文献

- [1] 梅冠群. 我国“十四五”石油储备建设思路研究[J]. 当代石油石化, 2020, 28(1): 9-17.
- [2] 张帆. 原油含水对管道运行的影响[J]. 油气储运, 1998, 17(8): 4-6, 3.
- [3] 李国珍, 肖华, 董守平, 等. 油水分离技术及其进展[J]. 油气田地面工程, 2001, 20(2): 7-9.
- [4] 胡华贵. 自动切水器在油罐区的设计与应用分析[J]. 化工能源, 2017, 43(9): 169-171.
- [5] 潘武汉. 储罐自动脱水器在原油脱水中的应用[J]. 油气储运, 2008, 27(1): 58-59.
- [6] 蔡星. 油田开发后期的原油脱水技术[J]. 油气田地面工程, 2003, 22(4): 32, 35.
- [7] 陈建树. 孤东油田原油脱水工艺[J]. 油气田地面工程, 2004, 23(11): 59.
- [8] Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wisely, Reading.
- [9] 李荣光, 杜鹃, 张巍, 等. 俄罗斯原油在水中的质量分数变化及扩散规律[J]. 油气储运, 2014, 33(7): 744-747.
- [10] 李明海, 奚亮, 高振辉. 关于乌石化油品罐区自动脱水设施的选用[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(1): 23-25.
- [11] 俞临春. 大型储罐密闭脱水设施的应用[J]. 设备管理, 2016(24): 162.
- [12] 温正, 石良辰, 任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 143-155.
- [13] 基于 VOF 模型与动网格技术的油气悬架气液两相流数值模拟[J]. 中国机械工程, 2016, 27(15): 2091-2099.
- [14] 韩占忠, 王敬, 兰小平, 等. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 92-124.
- [15] 陈志杰, 张磊, 顾浩杰. FLUENT 动网格技术在核级定压差止回阀上的应用[J]. 流体机械, 2019, 47(7): 34-38.