

# 船舶装货过程中加注管背压波动耦合效应

袁世杰, 卢金树, 邓佳佳, 吴文锋, 张建伟

(浙江海洋大学, 浙江 舟山 316022, Email:YyuanSJ@163.com)

**摘要:** 船舶海上装货是船舶运营过程中的一个重要环节, 装货引起的油品晃荡效应直接影响加注管的背压变化, 影响船舶装货的安全以及效率。同时由于船舶易受到海上风浪的影响, 加重舱内油品的晃荡效应。本文以 VLCC 型油船液舱为原型, 针对不良海况下船舶装货过程, 利用两相流模型研究船舶液舱加注管背压波动。通过监测加注管背压以及舱内油品速度变化特征, 分析油船装货过程中舱内油品晃荡效应, 探究船舶装货过程中油品装货与油品晃荡的耦合效应。研究发现: 随着油品装货速率的增大, 加注管背压增加明显, 舱内油品速度却会出现下降的情况, 同时随着舱内油品含量的增加, 油品晃荡效应逐渐减弱。

**关键词:** 晃荡效应, 油舱, 装货速率, 背压, 耦合效应

## 1 引言

海上运输船舶具有宽度大、装载深度高的特点, 在一定的频率范围内波浪力作用下船体运动会导致液舱剧烈的运动<sup>1</sup>, 而晃荡载荷对船体结构和运动都产生重大影响, 降低运营效率和安全性。舱内油品的晃荡主要取决于液舱运动的性质、振幅、频率、油品性质以及油品含量<sup>[3-4]</sup>。在船舶装货作业过程中, 油品受到加注泵的排出压力通过加注管从供油船输送到受油船, 受油船液舱内油品自由面不断变化, 液舱内加注管受加注泵的排出压力和液舱运动产生的脉冲压力、非冲击压力联合作用影响, 液舱加注管成为应力集中的危险部位。当油船在大风浪环境中进行装货作业时, 受油船液舱不稳定因子的提升, 外部激励提供能量维持油品晃荡, 造成舱内油品自由液面剧烈运动。油品晃荡受装货作业影响的同时又受到船舶运动的影响, 两者产生的油品晃荡效应将会叠加, 加剧液舱加注管背压波动, 严重影响油品装货速率。

采用 CFD 模拟风浪环境下受油船液舱装货过程, 基 VOF (volume-of-fluid) 法展开数值模拟。针对船舶装货作业中受油船液舱加注管背压变化, 研究油品晃荡对加注管背压变化的影响, 结合装速率, 研究船舶装货过程中油品装货与加注管背压的耦合效应。

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY18E090008); 国家自然科学基金项目 (51079129)

作者简介: 袁世杰 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶安全与防污染

## 2 模型建立

### 2.1 受油船加注油品动力学分析

实际油品装货过程中, 油品受到加注泵的排出压力通过加注管从供油船输送到受油船, 如图 1 所示。在装货过程中, 不考虑温度变化等引起的能量损耗问题, 根据伯努利方程:

$$U_1 + Z_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + \frac{P_1}{\rho_1} = U_2 + Z_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \frac{P_2}{\rho_2} \quad (1)$$

式中:  $U_1$  表示加注泵排出油品的内能;  $U_2$  表示液舱加注管出口处油品的内能;  $Z_1$  表示加注泵排出油品与舱底的距离;  $Z_2$  表示液舱加注管出口处油品与舱底的距离;  $u_1$  表示加注泵排出油品的速度;  $u_2$  表示液舱加注管出口处油品的速度;  $P_1$  表示加注泵排出油品的压强;  $P_2$  表示液舱加注管出口处油品的压强;  $\rho_1$  表示加注泵排出油品的密度;  $\rho_2$  表示液舱加注管出口处油品的密度。

受油船装货过程中, 流体密度以及管中流体距离舱底的高度不变, 假定加注泵的排出压力在装货过程中保持一定。当装货速度改变时, 即导致加注管背压发生变化, 同时当舱内油品晃荡压力发生变化时, 影响加注管出口背压波动, 间接影响油品装货速率。

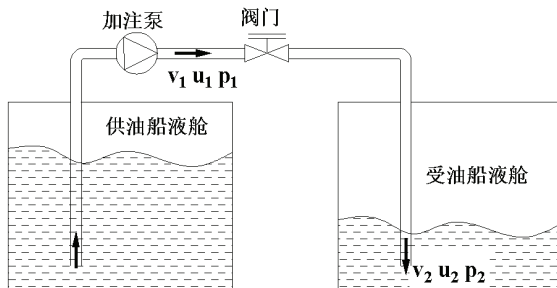


图 1 液舱装货系统图

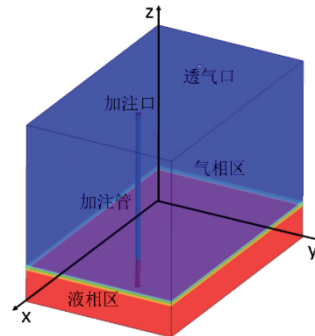


图 2 液货舱物理模型

### 2.2 物理模型

本文以具有代表性的 VLCC (Very Large Crude Carrier) 型液舱为原型, 同时考虑模型试验的验证, 通过几何相似准则建立长方体的模型舱 (图 2)。

液舱物理模型几何参数为  $0.842\text{m} \times 0.737\text{m} \times 0.464\text{m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 加注管直径为  $0.012\text{m}$ , 加注管长  $0.46\text{m}$ , 孔心位置  $(0.55, 0.20, 0.47)$ ; 透气口直径为  $0.016\text{m}$ , 孔心位置  $(0.25, 0.20, 0.47)$ 。

### 2.3 数值模型

#### 2.3.1 网格划分

为了开展装货过程中船舶运动情形下受油船液舱内加注管背压变化特性研究, 基于模型假设, 构建运动受油船液舱模型。采用 CFD 软件对受油船液货舱的物理模型建模并划分网格。划分的网格均为六面体结构性网格, 加注管采用 O-gridBlock 处理以提高网格质量。

采用 ICEM 软件建立液舱的数值模型，经网格无关性验证，网格数量取为 317012，节点数为 332312。

### 2.3.2 数值计算设计

运动 CFD 软件模拟受油船三维液舱装货过程，这一过程可视为受油船液舱内油品的自然对流和强迫对流的混合过程，液舱内油品遵循质量守恒、动量守恒及能量守恒方程。

动网格设置：在定义初始网格、边界运动的方式及运动区域过程中，选择整个网格和边壁作为运动区域，动网格技术适合处理液体晃荡相关问题，针对液舱内油品晃荡展开研究，采用 UDF（用户自定义函数）来定义边界的运动方式。计算方法采用 Simple 算法的改进算法 PISO（Pressure Implicit Split Operator）。

边界条件：数值模型的边界是模型舱的内壁，定义为固壁边界(wall)；采用速度进口，油品占比为 1；透气口处为压力出口，压力为 0.101325MPa；迭代时间步长为 0.005s。

## 3 数值计算与结果讨论

### 3.1 计算工况

在实际的海洋环境中，海上波浪是多种不规则风浪混合浪，而海上波浪有效周期主要集中在 4~10s<sup>[5-6]</sup>。根据船舶安全运营要求以及船舶中船员的操作经验，正常海况下船舶安全运营时的横摇角度一般在 10° 左右，在恶劣条件下船舶的横摇角也不能超过 30°。因此为了能够尽可能地反映实际海况环境，确定试验工况液舱运动周期 T=10s、运动幅值 A=10°。

由于不同的装货速率代表着不同的液面上升速率，因此为了研究不同装货速率对加注管背压的影响，根据舟山海域保税燃油海上装货情况，共设计 4 种装货速率：0.23m/s、0.46m/s、0.69m/s、0.92m/s，考虑到受油船液舱装货过程几乎不出现空舱的情况，其初始装载率为 10%。

### 3.2 装货速度对加注管背压的影响

#### 3.2.1 油品装货过程中液舱加注管背压变化

为进一步研究装货速度对加注管背压的影响，模拟 5 种装货速度对照试验进行研究。图 3 分别为是不同装货速度下，液舱进行装货时加注管背压时域图。

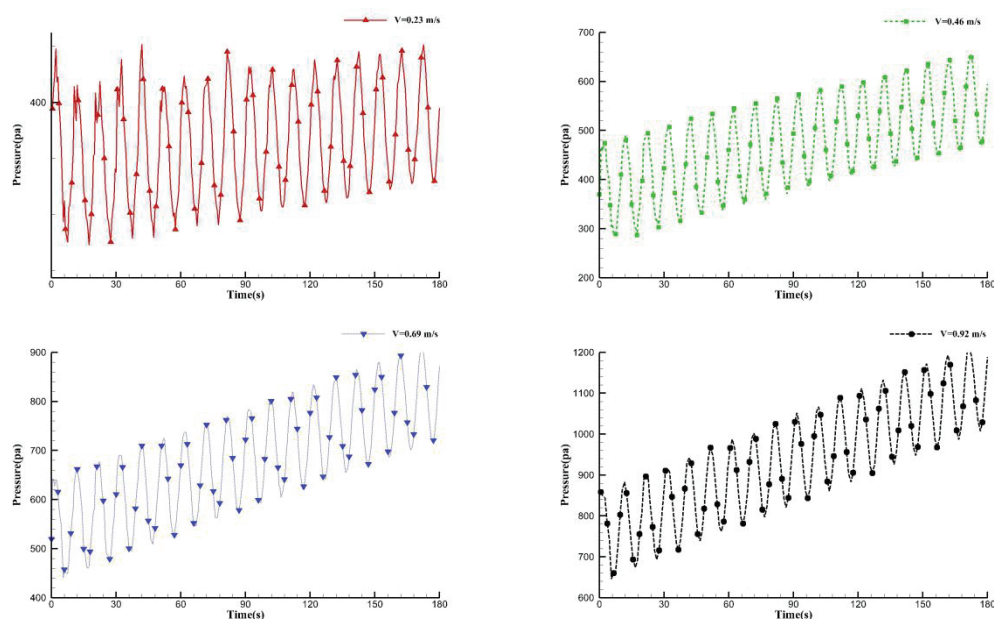


图3 不同装货速度下加注管背压时域

由图3可知,背压曲线每半周期交替增加和减少,同一装货速度下背压波动变化范围基本相同,但不同装货速度时背压曲线差异较大,装货速度越大背压初始值越高,波动越大,变化斜率越大。因为当油品从加注管进入到液舱内时,舱内油品的运动受到加注油品的冲击,造成冲击载荷,产生有压力波动,当加注速度越大时,加注管内油品流量越大,对舱内油品的冲击越大,压力波动越大。

从图3中还可以看出,随着装货的进行,压力变化范围略有减小。因为当舱内油品从一侧舱壁流向另一侧时,内部油品的流动速度比自由液面油品慢一些,同时更加稳定。自由液面在水平方向上的位移最大,同时在撞击舱壁时会发生水跃现象,对舱内油品造成冲击释放能量。因此,与内部油品相比,上部油品变化较大。在油品装货过程中,随着时间的推移,舱内油品不断增加,自由液面上移,油品冲击造成的压力波动对加注管背压的影响逐渐减小。

### 3.2.2 油品装货过程中液舱自由液面和速度场

取一个运动周期内的3个相同时刻的 $X=0.3\text{m}$ 截面上油品速度矢量图, $V$ 表示油品装货速度, $\bar{v}$ 为该截面油品的平均速度(图4)。

如图4所示,当液舱发生运动时,自由液面会形成一系列的波,从而造成油品发生位移,舱内油品运动方向与液舱运动方向相反,并与舱壁发生碰撞,油品在垂直方向产生较大的位移,出现水跃现象,冲击自由液面,由于舱内油品液面的不规则性,造成背压变化不均匀。此外,根据速度矢量图可以发现,舱内油品内部速度远小于自由液面油品速度。同时发现装货速度较大时,舱内自由液面上升幅度较小,这是因为油品的自阻尼特性吸收了液舱运动产生的能量,装货速度越大导致舱内油品含量越多,油品上升幅度越小。

对比不同装货速度下  $t=105s$  时刻油品平均速度可以发现,当装货速度小于  $0.92m/s$  时,随着装货速度的增加,平均速度呈下降现象。这是因为在  $t=105s$  时刻,此时舱内油品相对稳定,舱内油品的横向流动占主导作用,加注管内喷射出的油品干扰舱内油品的横向流动,使横向流动发生弯曲,造成两股油品的合并,同时在有加注泵排出压力的作用下,在加注管附近产生高压区,这个高压区造成舱内油品的部分停滞,抑制了油品的流动。当装货速度增大时,舱内油品横向流动受到的干扰作用越大,油品平均速度越小。当装货速度增加至  $1.15m/s$  时,在较高的装货速度条件下,加注管喷射出的油品占主导位置,增强了舱内油品的流动,造成油品速度增加。

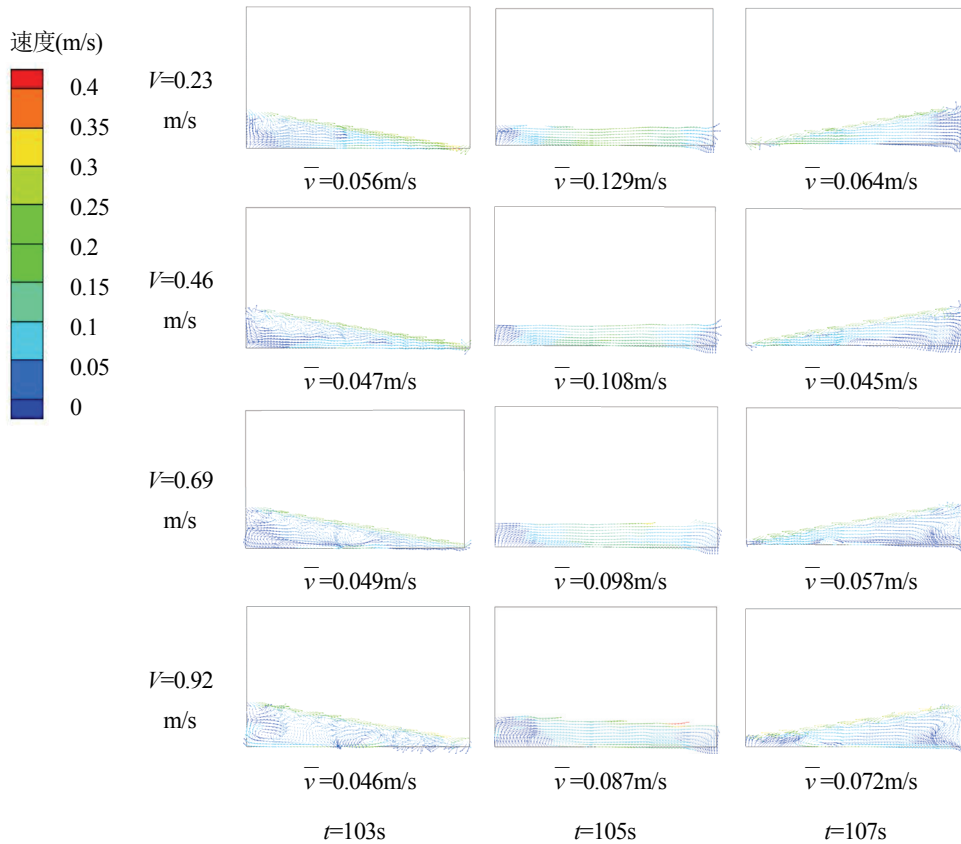


图4 速度矢量变化

## 4 结论

本研究应用 VOF 法开展一系列模拟试验,针对装货过程中舱内油品流场,分析大风浪下受油船运动对加注管背压波动的耦合效应,主要结论总结如下。

- (1) 加注管在油品自由表面附近相对于较深的位置背压有更明显的波动。
- (2) 有油品的自阻尼特性, 在一定的外部激励频率下, 装货速度越大, 舱内油品最大自由液面位移越小, 同理随着装货的进行, 舱内油品最大自由液面位移越来越小。
- (3) 在一定装货速度范围内, 油品的装货可以减小油品的运动速度, 抑制油品的晃荡效应。

## 参 考 文 献

1. 蔡忠华. 液货船液舱晃荡问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
2. 朱仁庆, 吴有生. 液舱内流体晃荡特性数值研究[J]. 中国造船, 2002, 43(2):15-31.
3. Akyildiz H, N. Erdem ün al. Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: Numerical simulation and experimental validation[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(16):2135-2149.
4. Zhao W H, Hu Z Q, Yang J M, et al. Investigation on sloshing effects of tank liquid on the FLNG vessel responses in frequency domain[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011.
5. 李瑞丽. 海浪周期若干问题研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
6. 江克平. 海浪周期的统计分布[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 1964(1):51-60.

## Coupling effect of back pressure fluctuation of oil filling pipe during tanker loading operation

YUAN Shi-jie, LU Jin-shu, DENG Jia-jia, WU Wen-feng, ZHANG Jian-wei  
(Zhejiang Ocean University, Zhejiang, Zhoushan, 316022, China. Email:YyuanSJ@163.com)

**Abstract:** Tanker offshore loading is an important link in the process of ship operation. The oil sloshing effect caused by tanker loading has an important impact on the safety and efficiency of tanker refueling. At the same time, the sloshing effect of oil in the tanker is aggravated due to the vulnerability of ships to sea waves. Based on the VLCC tanker, the paper focuses on the loading process of oil tanker under heavy sea conditions, and the two-phase flow model was used to study the back pressure fluctuation of ship tank filling pipe. Combined with the back pressure of the filling pipe and the variation characteristics of the oil velocity in the oil tank, the paper analyzes the coupling effect of oil loading and back pressure of filling pipe during the loading process of the tanker, and explores the causes and laws of the sloshing pressure of the oil. The research shows that as the loading speed increases, the back pressure of the filling pipe increases obviously, but the speed of the oil in the tanker may decrease. At the same time, as the oil content in the tank increases, the sloshing effect of the oil gradually decreases.

**Key words:** sloshing effect; oil tank; loading speed; back pressure; coupling effect