

文章编号: 1000-8241(2018)09-1048-08

# 晃动条件下孔槽式液体分布器的结构优化

唐建峰<sup>1</sup> 周军逸<sup>1</sup> 张豪杰<sup>1</sup> 杨文刚<sup>2</sup> 张伟明<sup>1</sup> 青霞<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院; 2. 中海石油气电集团技术研发中心; 3. 四川省特种设备检验研究院

**摘要:** 二级孔槽式液体分布器具有分布质量高、操作弹性大等特点,但对水平度的要求极高,为提高其在海上晃动工况下的适应性,需要对传统结构进行优化。基于各种晃动形式对孔槽式液体分布器的液体分布性能影响的相关研究,采用 Fluent 模拟软件对受晃动影响更为严重的二级槽进行流体力学数值模拟,找出晃动条件下二级槽的液体分布质量下降的原因,提出相应的结构优化措施并模拟验证。结果表明:增大二级槽入口两侧孔口的直径和增加竖直隔板,可以有效提高孔槽式液体分布器在静止和晃动条件下的液体分布质量;增加缓冲挡板,可以提高静止条件下的液体分布质量,但会进一步恶化晃动条件下二级槽的流量均布。优化后的孔槽式液体分布器能够更好地适用于海上晃动平台或浮式生产储油卸油装置的生产需求。(图 13,表 3,参 26)

**关键词:** 孔槽式液体分布器; 晃动; Fluent; 数值模拟; 结构优化

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.09.015

## Structure optimization of trough liquid distributor in the sloshing condition

TANG Jianfeng<sup>1</sup>, ZHOU Junyi<sup>1</sup>, ZHANG Haojie<sup>1</sup>, YANG Wengang<sup>2</sup>, ZHANG Weiming<sup>1</sup>, QING Xia<sup>3</sup>

1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China);

2. Technology R &amp; D Center, CNOOC Gas &amp; Power Group; 3. Sichuan Special Equipment Inspection Institute

**Abstract:** The two-trough liquid distributor is advantageous with high-quality distribution performance and big operational flexibility, but its requirement on levelness is extremely strict. In order to increase the adaptability of trough liquid distributor to offshore sloshing conditions, therefore, its traditional structures shall be optimized. In this paper, the studies on the effects of various sloshing forms on the liquid distribution performance of trough liquid distributor were reviewed. Then, Fluent software was adopted to carry out fluid dynamics numerical simulation on the secondary trough which is more affected by the sloshing. Accordingly, the reasons for the liquid distribution quality deterioration of secondary trough in the sloshing condition were figured out, and the corresponding structure optimization measures were proposed and verified by means of simulation method. It is indicated that the liquid distribution quality of trough liquid distributor in the conditions of stillness and sloshing can be improved effectively by increasing the diameter of the orifices on both sides of the inlet of secondary trough or adding vertical baffles. If buffer baffles are added, the liquid distribution quality in the stillness condition can be improved, but the flow uniformity of secondary trough in the sloshing condition will be deteriorated further. The optimized trough liquid distributor is better adaptive to offshore sloshing platforms or floating production, storage and offloading devices. (13 Figures, 3 Tables, 26 References)

**Key words:** trough liquid distributor, sloshing, Fluent, numerical simulation, structure optimization

海上晃动工况对吸收塔及其内件性能提出更高的要求<sup>[1]</sup>。液体分布器作为最重要的塔内件之一,其分布性能直接影响预处理过程中气液的传质交换作用<sup>[2-4]</sup>。优良的液体分布器能够形成高质量的液体初始分布,

更加有利于填料性能的发挥,使整个塔器内的气液传质过程更加充分<sup>[5-11]</sup>。二级孔槽式液体分布器具有分布均匀、操作稳定等优点,被广泛应用于陆上工厂<sup>[12-15]</sup>。但传统的孔槽式液体分布器在安装时对水平度十分敏

感,要求孔槽两端避免形成过大的液面落差<sup>[16-17]</sup>。

海上晃动形式包括横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡 6 个自由度<sup>[13]</sup>。唐建峰等<sup>[18]</sup>研究了晃动对排管式液体分布器均布效果的影响,认为横摇、纵摇对其孔口流量分布影响较大;少数研究者<sup>[19-20]</sup>利用模拟与实验相结合的方法对晃动条件下孔槽式液体分布器的性能展开研究,发现纵摇影响一级槽的流量均布,横摇影响二级槽的流量均布,且横摇对分布器整体的影响程度大于纵摇的影响程度。基于此,针对二级槽在横摇条件下的分布效果进行模拟,提出结构优化措施,模拟验证其优化效果和适用程度,为制造适用于海上晃动工况的大型孔槽式液体分布器提供参考。

## 1 模型建立

### 1.1 物理模型

建立直径 1.2 m 孔槽式液体分布器模型(图 1),进料经过一级槽的初步分离,按各二级槽需求的流量流到二级槽内,最后从二级槽的出流孔流出,完成最终的液体分布工作。为确保液面稳定,一级槽横截面积与 6 个二级槽横截面积之和基本相等,且由一级槽流入二级槽孔的面积与对应二级槽流出孔面积之和相等。

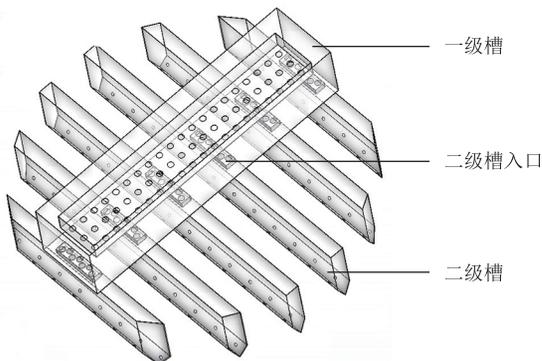


图 1 孔槽式液体分布器物理模型图

### 1.2 边界条件及参数设置

利用 Fluent 软件,对二级槽采用压力求解器进行瞬态模拟,湍流模型选取标准的  $k-\epsilon$  模型,近壁处采用标准的壁面函数,多相流模型选用捕捉气液界面效果较好的 VOF 模型。设置进口为速度进口,给定进口速度;所有出口设为压力出口,表压为 0。通过导入 UDF 实现二级槽从平衡位置开始做余弦运动,压力速度耦合采用 Simple 算法,初始时刻设置槽内液面为稳定工作时的液面高度<sup>[21-23]</sup>。

### 1.3 性能评价指标

为衡量液体是否分布均匀,选取分布不均匀系数  $M_f$  作为评价指标,  $M_f$  越大,液体分布质量越高。  $M_f$  的计算公式为:

$$M_f = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q_{oi} - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

式中:  $N$  为计算所需的孔槽式液体分布器出口总个数,此处取 12;  $Q_{oi}$  为  $i$  孔口的出口实验流量, kg/s;  $\bar{Q}_o$  为各孔口的平均出口流量, kg/s。

### 1.4 模型准确性验证

#### 1.4.1 网格独立性验证

为平衡计算成本与计算精度之间的关系,需要对网格进行独立性验证<sup>[24]</sup>。以孔槽式液体分布器的出口流量不均匀度为指标,分别对网格数为 80 000~1 000 000 之间的数值模型进行检验(图 2)。结果表明:随着液体分布器计算模型网格数的递增,各出口流量的不均匀度逐渐趋于稳定,可见计算结果不随网格数的变化而改变。同时,随着网格数增加,数值计算过程中所占计算机资源增加,计算成本增大。因此,综合考虑计算成本,模拟孔槽式液体分布器宜采用网格数为 800 000 的模型。

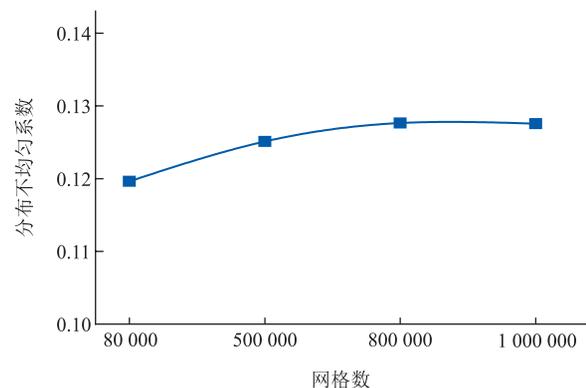


图 2 孔槽式液体分布器出口流量不均匀度随网格数的变化曲线

#### 1.4.2 准确性验证

为了验证上述模型的准确性,开展了孔槽式液体分布器实验研究<sup>[25-26]</sup>。实验装置(图 3)主体包括孔槽式液体分布器、晃动平台、泵、收集与计量装置、流量计、截止阀、水槽等。实验流程如下:将水槽注满水,开启泵使液体在整个系统内循环,通过回流管路阀门和流量计下方的阀门调节流量,采用流量计测量实验流量,采用液体收集与计量装置计量二级槽出口流量。

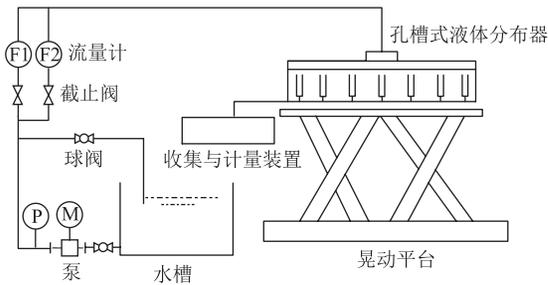


图3 孔槽式液体分布器实验装置示意图

实验介质为水,实验所得流量是累积流量,模拟所得流量为瞬时流量。以晃动周期 10 s 为例,实验取的是前 2.5 s 的累积流量;模拟取初始时刻(0 s)、1/8 周期(1.25 s)、1/4 周期(2.5 s)的瞬时流量。为了将模拟值与实验值进行对比,将模拟值作如下处理:①将 0 s 与 1.25 s、1.25 s 与 2.5 s 的流量平均值分别作为 0~1.25 s、1.25~2.5 s 时间段的流量平均值;②利用所得各时间段的流量平均值计算前 2.5 s 的累积流量。

孔槽式液体分布器的一级槽与二级槽结构一致,但二级槽受晃动影响更为严重,因此取最长二级槽进行研究。考虑到二级槽下方存在两排流动状态相似的孔口,为了方便研究,对二级槽各孔口进行编号(图 4)。

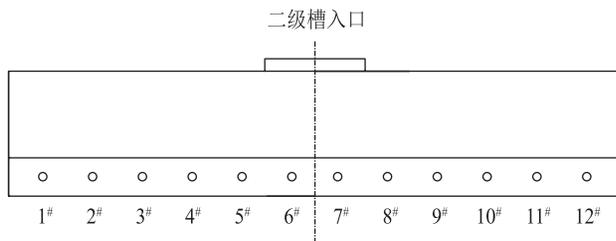


图4 孔槽式液体分布器二级槽孔口编号示意图

取进液量 30 m<sup>3</sup>/h、周期 10 s、横摇 5° 工况下孔槽式液体分布器二级槽各孔口的实验值与模拟值进行对比(表 1, 相对误差 =  $\frac{\text{模拟值} - \text{实验值}}{\text{实验值}} \times 100\%$ )。结果表明:模拟值与实验值变化趋势基本一致,二者相对误差均小于 10%,吻合度较高。因此,建立的模型及模拟方法是可靠的,可以用于孔槽式液体分布器在晃动条件下的性能研究。

## 2 优化方法

将受横摇晃动影响更为剧烈的孔槽式液体分布器的最长二级槽作为优化对象,依据分布不均匀系数  $M_f$ ,检测二级槽改造前后的分布质量变化。

表1 孔槽式液体分布器二级槽各孔口模拟流量值与实验流量值对比

孔口号	流量/(kg·s <sup>-1</sup> )		相对误差/%
	实验	模拟	
1 <sup>#</sup>	0.340	0.345	1.33
2 <sup>#</sup>	0.340	0.326	4.05
3 <sup>#</sup>	0.327	0.298	8.82
4 <sup>#</sup>	0.272	0.287	5.61
5 <sup>#</sup>	0.197	0.196	0.30
6 <sup>#</sup>	0.295	0.269	8.65
7 <sup>#</sup>	0.293	0.277	5.69
8 <sup>#</sup>	0.202	0.222	9.86
9 <sup>#</sup>	0.290	0.281	3.22
10 <sup>#</sup>	0.297	0.282	5.06
11 <sup>#</sup>	0.280	0.293	4.56
12 <sup>#</sup>	0.275	0.292	6.30

### 2.1 增大孔口直径

传统的孔槽式液体分布器在设计时对所有的孔口采用相同的孔径,但由于其上加载的液体横向速度较大,位于二级槽入口两侧的孔口流量较其他位置偏小,为了提高入口两侧孔口流量,可增大孔径。其优化原则为:假设各孔口平均穿孔流速不变,利用各孔口流量与平均流量的差别、孔口流量与孔径的关系来确定增大后的孔口直径,计算公式为:

$$d' = d_0 \sqrt{\frac{Q'}{Q_0}} \quad (2)$$

式中:  $d_0$ 、 $d'$  分别为增大前、后的孔径, mm;  $Q'$  为各孔口的平均流量, kg/s;  $Q_0$  为增大前孔口的流量, kg/s。

在优化前,二级槽上孔口直径均为 11 mm,其中二级槽入口两侧的 5<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 孔口流量降低程度最为严重,孔口流量为 0.1 kg/s,所有孔口平均流量为 0.128 kg/s。根据式(2),可以得出 5<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 孔口增大后的直径为 12.4 mm。对增大孔径后的二级槽进行数值模拟,分别得到静止和横摇 5° 工况下二级槽各孔口流量(图 5)。可见,在静止工况下,增大孔径后的二级槽上 5<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 孔口流量增加,6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup> 孔口流量下降,使得入口附近的孔口流量更加平稳,2<sup>#</sup>、11<sup>#</sup> 孔口流量下降幅度较大;在横摇 5° 工况下,增大孔径后的二级槽各出口流量波动较优化前的流量波动小。

对孔径增大前后的分布不均匀系数  $M_f$ (表 2)进行计算:在静止和横摇 5° 工况下,增大孔径的二级槽均比未增大孔径的二级槽分布性能好。其中,横摇工况下分布性能提升效果十分明显,  $M_f$  降低幅度为 28.75%。因此,增大二级槽入口两侧的孔径可以有效提高分布器的分布质量。

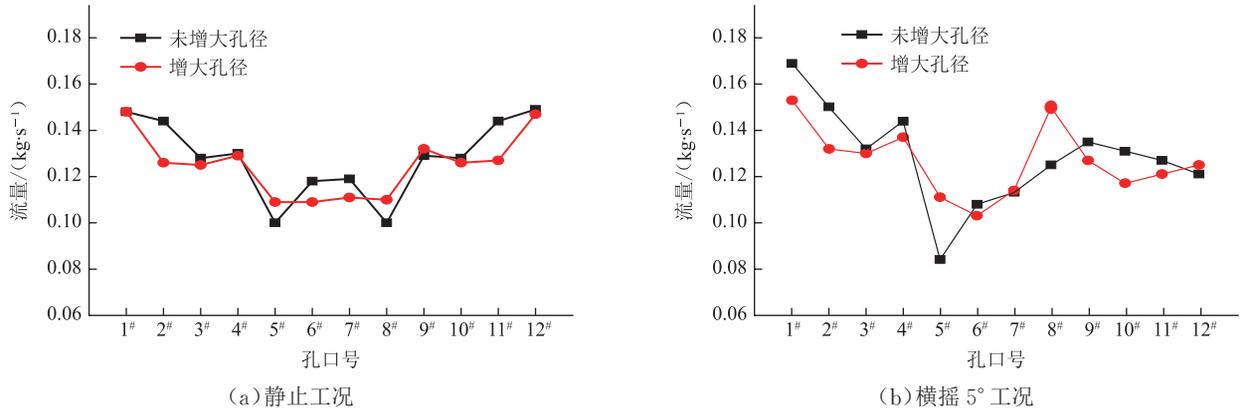


图5 增加孔径前后二级槽上各孔口流量变化曲线

表2 增大孔径前后二级槽上各孔口流量分布不均匀系数对比

孔径是否增大	分布不均匀系数	
	静止工况	横摇 5° 工况
未增大	0.127	0.160
增大	0.104	0.114

2.2 增加缓冲挡板

根据图4, 二级槽入口下方遭受进液冲击作用区域的液面波动较为明显。为减缓进料的冲击作用, 在二级槽中间区域设置缓冲挡板(图6), 缓冲板距离槽底  $L_1=60\text{ mm}$  处。正常工作时缓冲挡板位于液面以下, 其作用是减小二级槽进液的冲击效果且不造成液体飞溅, 使得槽内液面波动减轻, 从而提高二级槽整体分布均匀程度。

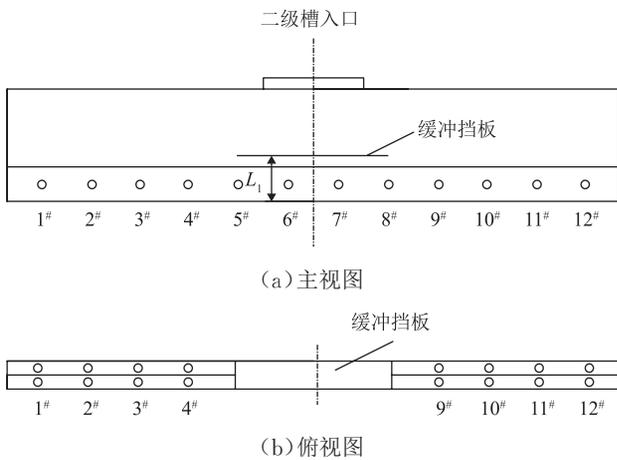
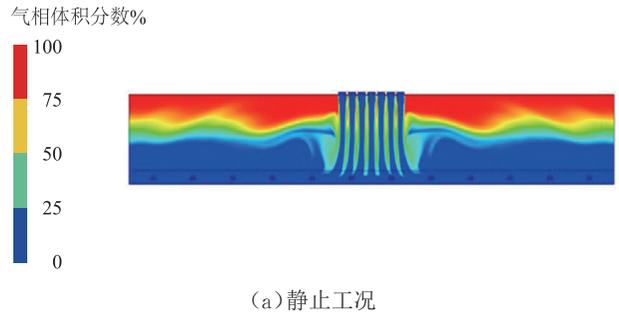
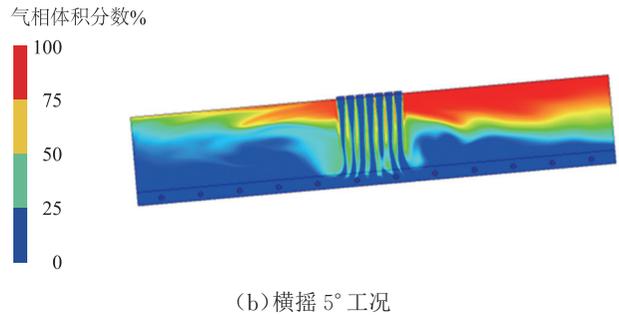


图6 添加缓冲挡板的二级槽结构示意图

对添加缓冲挡板的二级槽开展进液量为  $40\text{ m}^3/\text{h}$  的静止和横摇  $5^\circ$  工况的数值模拟, 与优化前的二级槽内液面进行对比(图7、图8)。在静止工况下, 增加缓冲挡板的二级槽对进液有明显缓冲作用, 入口下方的  $5^\circ\sim 8^\circ$  孔口液面更加稳定, 但挡板上液体有轻微溅起现象, 形成碎浪; 在横摇  $5^\circ$  工况下, 增加缓冲挡板的二

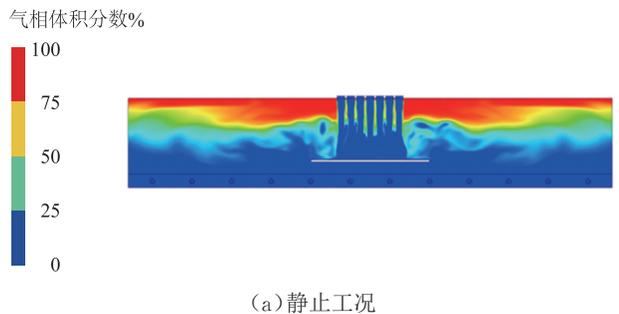


(a) 静止工况

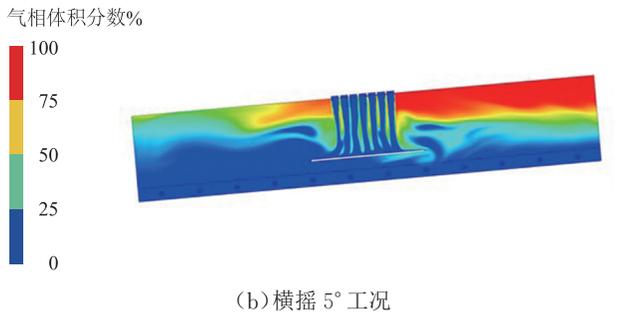


(b) 横摇 5° 工况

图7 优化前二级槽内液面分布情况



(a) 静止工况



(b) 横摇 5° 工况

图8 优化后二级槽内液面分布情况

级槽的入口下方液面更高,且液体破碎情况由于晃动的加入有所缓解,但由于加入缓冲挡板,在晃动过程中,挡板对进液有导向作用,使得二级槽最低端堆积了更多液体,最高端的液面更低,加剧了整个槽内的液面高度差异,增大了其不均匀程度。

根据优化前后二级槽各孔口流量变化曲线(图9)可见:在静止工况下,增加了缓冲挡板的二级槽在位于入口下方的孔口流量明显增大,但缓冲挡板两侧由于液体横向流速较快,该区域的孔口流量减小;在横摇5°工况下,增加缓冲挡板的二级槽内高低端的各孔口流量差异增大,这是由于缓冲隔板在晃动过程中对进液有导向作用,从而增加了槽内的液面高度差异。

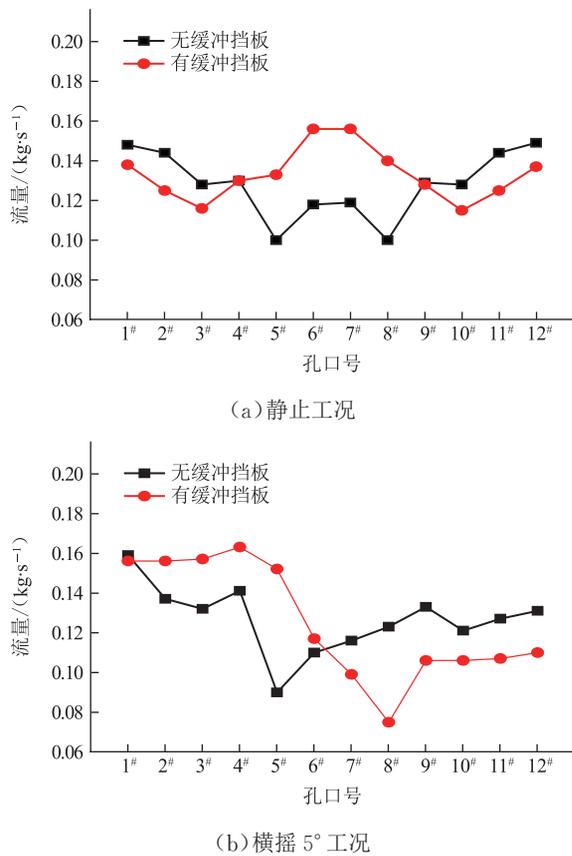


图9 优化前后二级槽各出口流量变化曲线

计算增加缓冲挡板前后的  $M_f$ (表3)可见:在静止工况下,增加缓冲挡板有利于提高二级槽出口流量的均匀程度,  $M_f$ 降低幅度高达24.41%;但在横摇5°工况下,增加缓冲挡板明显降低了二级槽各孔口流量的均匀程度。因此,孔槽式液体分布器在水平度较高的工况下运行时,增加缓冲挡板有利于提高二级槽的分布质量;在海上晃动工况下工作时,增加缓冲挡板会降低二级槽的分布质量。

表3 增加缓冲挡板前后各孔口流量分布不均匀系数对比

是否增加挡板	分布不均匀系数	
	静止工况	横摇5°工况
未增加	0.127	0.160
增加	0.096	0.225

2.3 添加阻晃隔板

孔槽式液体分布器带有自由液面容器的防晃设计,通过改变容器的外部形状或内部结构来实现,即通过设计合理的存液外形来改变晃动参数,或利用增加阻尼装置(防晃装置)来提高晃动阻尼<sup>[24]</sup>。在实际工程中,通常在某些容器内部添加防晃挡板来减小液体晃动,如在航天器推进剂储箱中设计防晃挡板,常用的防晃挡板有对称圆环形挡板、非对称半圆形挡板以及对称纵向条形挡板等。下面对孔槽式液体分布器的二级槽增加不同形式的阻晃隔板,分析不同隔板形式对二级槽的阻晃效果。

阻晃隔板的形式有水平、竖直两种,现对二级槽结构进行优化,分别增加水平阻晃隔板(图10)和竖直阻晃隔板(图11)。在二级槽晃动到最大幅度过程中,

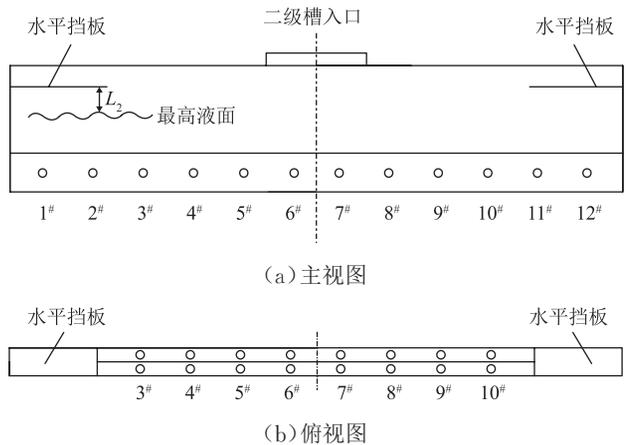


图10 二级槽添加水平隔板后的结构示意图

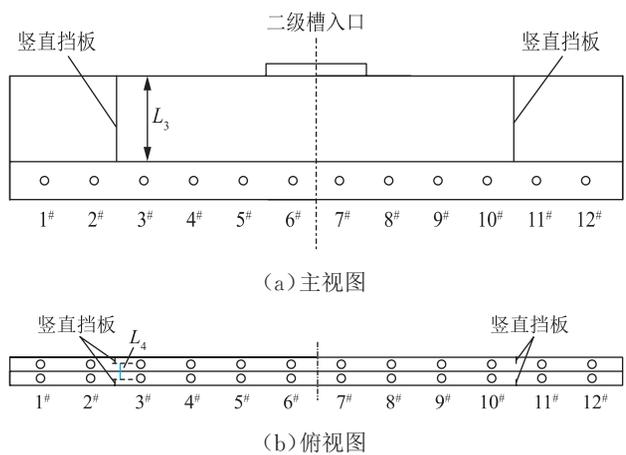


图11 二级槽增加竖直隔板后的结构示意图

液体向两侧堆积,二级槽的1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、11<sup>#</sup>、12<sup>#</sup>孔口上方液面波动最为剧烈,因此将水平挡板安装在这4个孔口上方,即位于二级槽最高液面上方 $L_2=10\text{ mm}$ 。将竖直挡板分别安装在2<sup>#</sup>与3<sup>#</sup>孔口之间、10<sup>#</sup>与11<sup>#</sup>孔口之间,插入深度 $L_3=170\text{ mm}$ ,竖直隔板中间的间距为 $L_4=30\text{ mm}$ ,作为液体横向流动通道。

对增加阻晃隔板前后的二级槽进行进液量为 $40\text{ m}^3/\text{h}$ 的横摇 $5^\circ$ 工况的数值模拟,得出二级槽在最大晃动角度处的液面分布情况(图12)。与未优化的结构相比,增加水平阻晃隔板的二级槽晃动到最大角度时,其最低端的液面被隔板阻挡,液面波动情况明显好转,但液面在4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>孔附近出现较大不连续性;增加竖直隔板的二级槽内由于横向流通面积减小,槽内液体向最低端的堆积速度减慢,形成的漩涡减小,从而缓解了液面波动情况。

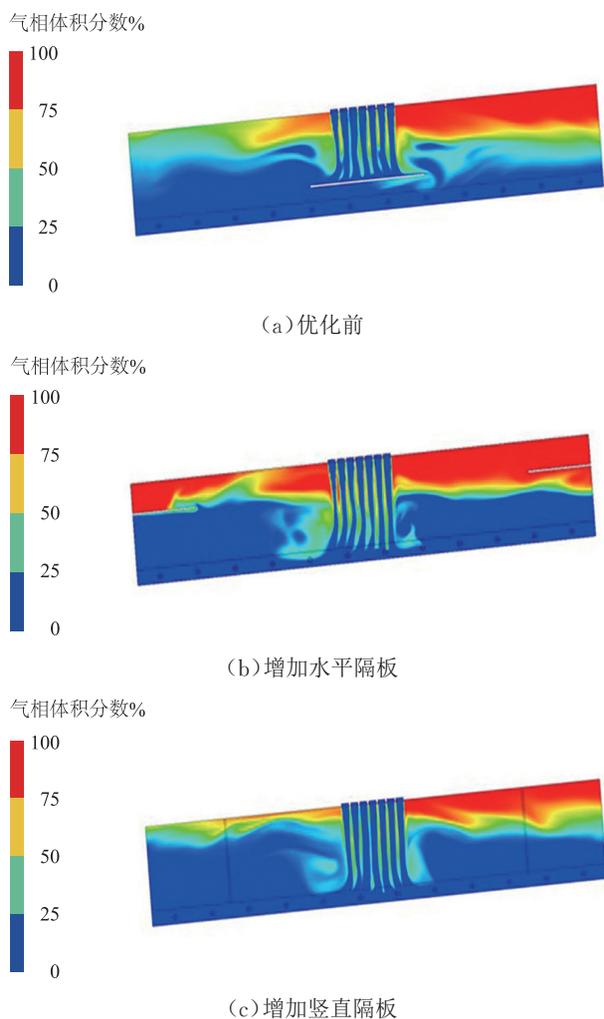


图12 添加阻晃隔板前后二级槽液面分布情况

根据优化前后二级槽各孔口流量曲线(图13),并结合图12液面波动情况可见:增加水平隔板的二级槽

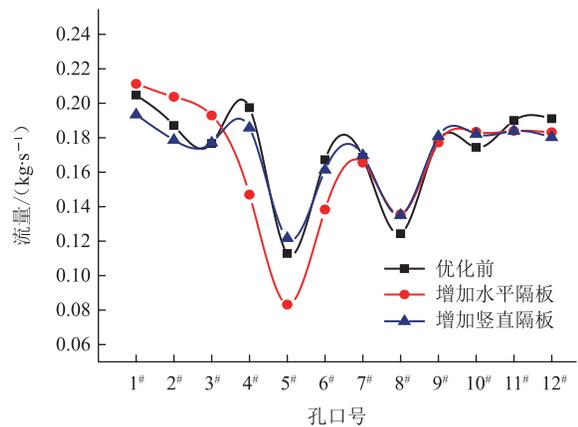


图13 增加阻晃隔板前后二级槽各孔口流量曲线

液面波动情况得到明显好转,但在较低端的孔口流量变化剧烈,1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>孔口上方液体的增高趋势被水平隔板抑制,从而在这部分孔口上方形成额外的液体压头,造成1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>孔口流量增大,且增加隔板后减小了液体流动的空间,液体流动更加剧烈,使得4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>孔口上方液体断裂,造成该区域孔口流量减小;增加竖直隔板的二级槽,虽然液面波动的减缓程度不及增加水平隔板的情况,但增加隔板后未带来额外液体压头,整体流量的波动情况有所减缓。

计算得到增加水平、竖直阻晃隔板后的 $M_f$ 分别为0.205、0.121,将其与未优化前的 $M_f$ (0.154)进行对比可见:增加水平隔板的二级槽由于额外压头和减小了液体流动空间,因此整体分布质量下降,而增加竖直隔板的二级槽分布质量有所提高。因此,对于在封闭型液仓阻晃中适用的水平隔板,不适用于带有进出液口的长形窄槽的阻晃优化,而增加竖直隔板的二级槽结构起到一定的阻晃效果。

### 3 结论

对于直径 $1.2\text{ m}$ 的孔槽式液体分布器,为提高其液体分布质量,采用3种优化方法。

(1)增大二级槽入口两侧孔口的孔径可以有效减小小入口附近孔口流量的波动程度,提高二级槽在静止和横摇时的分布质量。

(2)增加缓冲挡板,在静止工况下,可以减小二级槽的液面波动,使入口附近孔口的流量提升,整体流量的均匀程度提高;在横摇工况下,会对进液有导向作用,加剧液面的高低差异,增大各孔口流量的不均匀程度。

(3)在二级槽增加竖直隔板的阻晃效果比增加水平隔板的阻晃效果好。

### 参考文献:

- [1] 唐建峰, 崔健, 修云飞, 等. 海上天然气脱酸塔内排管式液体分布器各喷淋密度下的孔径研究[J]. 化工进展, 2017, 36(4): 1192-1201.  
TANG J F, CUI J, XIU Y F, et al. Research on orifices diameter of calandria liquid distributor used in offshore deacidification tower with different spray densities[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(4): 1192-1201.
- [2] 王翊红, 黄维秋, 王文捷, 等. 喷淋密度对吸收塔液体分布器分布性能的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 35(15): 218-222.  
WANG Y H, HUANG W Q, WANG W J, et al. Experimental researching of the influence of sprinkle density to the liquid distribution performance of the liquid distributor in the absorption tower[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 35(15): 218-222.
- [3] 李春利, 闫磊, 董立会, 等. 一种耦合 CTST 的新型槽盘式液体分布器性能研究[J]. 现代化工, 2017, 37(7): 163-167.  
LI C L, YAN L, DONG L H, et al. Performance of a new groove-tray liquid distribution coupling CTST[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(7): 163-167.
- [4] 孙磊, 王兵, 白冰冰, 等. 液体分布器布液均匀性影响因素综合分析[J]. 山东化工, 2016, 45(10): 76-82.  
SUN L, WANG B, BAI B B, et al. The comprehensive analysis of liquid distributor liquid distribution uniformity factors[J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(10): 76-82.
- [5] 董谊仁. 填料塔液体分布器的设计[J]. 化工生产与技术, 1998(1): 1-10.  
DONG Y R. The designing of liquid distributor in packed columns[J]. Chemical Production and Technology, 1998(1): 1-10.
- [6] 李学斌, 李放, 陈新, 等. 填料塔中的液体分布器[J]. 氯碱工业, 2006(3): 44-45.  
LI X B, LI F, CHEN X, et al. The liquid distributor in the packed column[J]. Chlor-Alkali Industry, 2006(3): 44-45.
- [7] 徐世民, 张艳华, 任艳军. 塔填料及液体分布器[J]. 化学工业与工程, 2006, 23(1): 75-80.  
XU S M, ZHANG Y H, REN Y J. Packings and liquid distributor in packed column[J]. Chemical Industry and Engineering, 2006, 23(1): 75-80.
- [8] 陈桂珍. 填料层内液体的分布及液体分布器的选型[J]. 深冷技术, 2001(1): 10-13.  
CHEN G Z. Liquid distribution in the packing layers and type selection of liquid distributors[J]. Cryogenic Technology, 2001(1): 10-13.
- [9] 安海静. 大型填料塔槽式液体分布器的实验研究与流体力学模拟计算[D]. 天津: 天津大学, 2003: 1-5.  
AN H J. Experimental study and CFD simulation on liquid distributor in large-scale packed column[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003: 1-5.
- [10] 宋娜. 槽式液体分布器改进研究[J]. 科技创新与应用, 2013(32): 21.  
SONG N. Research on improvement of trough liquid distributor[J]. Technology Innovation and Application, 2013(32): 21.
- [11] 孙希瑾, 陈建娟, 秦岭. 大型填料塔液体分布器的设计应用[J]. 石油化工设计, 2002, 19(1): 10-15.  
SUN X J, CHEN J J, QIN L. Design and application of liquid distributor in large-sized packing tower[J]. Petrochemical Design, 2002, 19(1): 10-15.
- [12] 王志祥, 于颖, 关琦. 槽式液体分布器的设计及应用[J]. 化工机械, 1999, 26(2): 92-94.  
WANG Z X, YU Y, GUAN Q. Design and application of the trough liquid distributors[J]. Chemical Engineering & Machinery, 1999, 26(2): 92-94.
- [13] 王一军, 张斌, 于清, 等. 新型槽式液体分布器的设计与分析[J]. 新疆石油天然气, 2006, 2(3): 93-97.  
WANG Y J, ZHANG B, YU Q, et al. Design and analysis of a new type of channel liquid distributors[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2006, 2(3): 93-97.
- [14] 林秀锋, 陈桂珍. 液体分布器分布质量评价体系综述[J]. 化学工程, 2008, 36(12): 74-78.  
LIN X F, CHEN G Z. Overview on evaluation system of liquid distributor quality[J]. Chemical Engineering (China), 2008, 36(12): 74-78.
- [15] LOTHAR S. A new method to assess liquid distributor quality[J]. Chemical Engineering and Processing, 2006, 45: 1011-1017.
- [16] 王丽华, 张吕鸿, 周海鹰, 等. 槽式液体分布器进液情况的 CFD

- 模拟及试验[J]. 石油化工设备, 2005, 34(5): 12-15.
- WANG L H, ZHANG L H, ZHOU H Y, et al. Test and CFD simulation of liquid dispersion in slotted liquid distributor[J]. Petro-Chemical Equipment, 2005, 34(5): 12-15.
- [17] 李焱, 喻西崇, 王春升, 等. 浮式液化天然气船 FLNG 工艺系统关键设备海上适应性分析[J]. 中国造船, 2016(增刊 1): 154-161.
- LI Y, YU X C, WANG C S, et al. Analysis on the marine adaptability of key equipment of FLNG process system for floating liquefied natural gas vessel[J]. Shipbuilding of China, 2016(S1): 154-161.
- [18] 唐建峰, 杨帆, 崔健, 等. 晃动对 FLNG 排管式液体分布器性能的影响[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 123-128.
- TANG J F, YANG F, CUI J, et al. Effects of sloshing on the performance of FLNG calandria liquid distributors[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 123-128.
- [19] 胡晓明, 李万莉, 赵志国, 等. 液罐车罐体内液体横向晃动研究[J]. 应用力学学报, 2013, 30(5): 641-646.
- HU X M, LI W L, ZHAO Z G, et al. Horizontal fluid sloshing analysis in the body of tank truck[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(5): 641-646.
- [20] 王庄, 李遇春, 王立时. 不同截面水槽流体参数晃动的 SPH 模拟[J]. 计算物理, 2013, 30(5): 642-648.
- WANG Z, LI Y C, WANG L S. SPH simulations of parametric sloshing in various shape aqueducts[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2013, 30(5): 642-648.
- [21] 段文广. 基于 FLUENT 的液体分布器内部流场分析[J]. 现代制造技术与装备, 2009(2): 17-18.
- DUAN W G. Analysis of liquid distributor internal flow based on FLUENT[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2009(2): 17-18.
- [22] ZHANG L H, GAO G H, SUI H, et al. CFD simulation and experimental validation of fluid flow in pre-distributor[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, 19(5): 815-820.
- [23] 徐兴平, 黄东升, 方华灿. 充液结构内液体晃动及阻晃机理试验研究[J]. 中国海洋平台, 1994(增刊 1): 165-168.
- XU X P, HUANG D S, FANG H C. Experimental study on liquid and retarding mechanism in liquid filled structures in shaking condition[J]. China Offshore Platform, 1994(S1): 165-168.
- [24] 靳玉林. 具有新型防晃结构贮箱的液体晃动动力学分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1-3.
- JIN Y L. The new anti-sloshing structure in the tank and analysis of liquid sloshing dynamics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1-3.
- [25] 唐建峰, 金新明, 周军逸, 等. FLNG 填料塔内气体分布器适应性试验[J]. 油气储运, 2018, 37(7): 822-830.
- TANG J F, JIN X M, ZHOU J Y, et al. Compatibility test of gas distributor in the FLNG packed tower[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(7): 822-830.
- [26] 包春风, 许保云, 艾波, 等. 结构型槽盘式液体分布器性能研究[J]. 化学工程, 2016, 44(4): 54-58.
- BAO C F, XU B Y, AI B, et al. Performance of structural trough-pan liquid distributor[J]. Chemical Engineering (China), 2016, 44(4): 54-58.
- (收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2018-06-29; 编辑: 李在蓉)
- 
- 基金项目:** 中华人民共和国工业和信息化部项目“天然气预处理用大型塔器研制”, [2014]495。
- 作者简介:** 唐建峰, 男, 1973 年生, 教授, 2011 年博士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事气田集输、天然气预处理、FLNG 关键设备相关研究。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, 266580。电话: 0532-86983173, Email: tangpaper@126.com