

# 减摇水舱性能晃荡平台试验研究

裴 斐, 林 焰\*

(大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 某型钻井船用减摇水舱尺寸受到严格限制, 为了给船用减摇水舱的设计提供参考, 开展了减摇水舱性能晃荡平台试验研究. 使用减摇水舱试验台架和缩尺比例模型, 对 U 型舱和槽型舱进行了 1°、2°、4° 激励幅值和 55%、70%、85%、100% 通透率的扫频晃荡试验研究; 对槽型舱进行了 65、105、145 mm 液位的试验研究. 对水舱内液体产生的力矩幅值和相位进行记录分析, 总结出合理的水舱结构参数以保证减摇性能. 结果表明, 水舱在大激励幅值下有更大的减摇力矩和更好的相位性能. 对两种水舱增加阻尼板减小通透率可以扩展减摇力矩相位的有效范围. 液位变化对槽型舱减摇力矩的幅值和相位都有明显作用. 由此得出结论: 两种水舱在大激励幅值下性能更加优秀; 70%~85% 的通透率能够同时兼顾减摇力矩幅值和相位性能; 在 145 mm 液位下两种水舱都有最佳性能. 对槽型舱而言, 改变液位能够极大地改变水舱的峰值频率适应不同工作情况, 但是过低的液位会导致水舱过度阻尼从而对性能产生不利影响.

**关键词:** 减摇水舱; 摇摆台; 相位控制; 参数设计

**中图分类号:** U664.73

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb202204003

## 0 引 言

深海钻井船因为要携带大量设备, 船上可以用来安装减摇水舱的空间十分有限, 需要对这一尺寸受到严格限制的水舱进行试验测试. 水舱试验常见方式为台架试验, 赖志昌等<sup>[1-4]</sup>建立了摇摆试验台, 能够模拟减摇水舱对船舶的减摇作用, 并开展试验验证晃荡平台方法可行性的研究. 曲家文等<sup>[5-6]</sup>在摇摆试验台上开展了 U 型减摇水舱参数变化的研究, 指出水舱相对横摇中心的位置对横摇效果有明显影响, 而液位影响很小. 吴建林等<sup>[7]</sup>对减摇水舱开展了自由衰减试验和强迫振动试验, 通过这两种试验能够快速获得减摇水舱的基本性能. 肖丽娜等<sup>[8-10]</sup>对槽型减摇水舱进行了研究, 指出槽型舱格栅对于水舱性能有着明显影响, 可以通过调整格栅改善频率响应性能, 而且液位能够有效调节槽型舱的性能以适应不同工况. Gawad 等<sup>[11]</sup>指出, 在减摇水舱设计时不仅要考虑减摇的阻尼作用, 还要考虑水舱参数对舱内液体产生力矩相

位的调整, 通过对水舱设计参数的调整可以得到合理的相位性能. Alujević 等<sup>[12]</sup>研究了 U 型减摇水舱对船舶横摇的影响, 分析了水舱与横摇运动对波浪激励的吸收与耗散. Subramanian 等<sup>[13]</sup>使用遗传算法对水舱进行优化, 研究若干主要参数对水舱性能的影响. Bernal-Colio 等<sup>[14]</sup>开展了基于摇摆台的水舱试验, 记录了不同水舱内部结构对水舱性能的影响, 并在此基础上开展了数值计算研究, 检验了若干计算模型的精度.

在已有研究的基础上, 本文针对性地研究水舱内液体运动所产生的力矩, 考量在各种水舱样式和激励情形下水舱内液体产生的力矩, 进而评估减摇效果.

本研究应用六自由度晃荡平台, 该平台可以提供变幅值、变频率的稳定横摇激励, 并在多个晃荡研究中得到应用<sup>[15-17]</sup>. 本研究分别对 U 型减摇水舱和槽型减摇水舱开展研究, 对液位、通透率和激励幅值 3 个参数开展试验. 通过分析减摇力矩幅值和相位信息, 总结合理的设计参数, 同时兼顾

收稿日期: 2021-09-05; 修回日期: 2022-05-11.

基金项目: 国家重点实验室专项经费资助项目(S18315).

作者简介: 裴 斐(1989-), 男, 博士生, E-mail: peifei@mail.dlut.edu.cn; 林 焰\*(1963-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: lyliny@dlut.edu.cn.

力矩幅值和相位的性能,为实船水舱设计提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试验系统介绍

减摇水舱试验台架由控制系统、六自由度运动平台、水舱台架、水舱模型和数据采集系统组成,如图 1 所示.在控制系统输入运动参数,六自由度运动平台即可以按照要求做出指定的运动.水舱台架固定于六自由度运动平台之上,通过高度调整装置,可以调节水舱台架在六自由度运动平台上的摇摆半径.水舱模型固定于篮筐之中,篮筐通过缆索与水舱台架相连.如图 2 所示, $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  为拉力传感器,测量所在缆索的拉力, $F_r$  所在的缆索提供向下的拉力,以使水舱模型受力平衡. $L_1$  和  $L_2$  分别为  $F_1$  和  $F_2$  所测拉力对  $O$  点的力臂, $L_3$  为  $F_3$  和  $F_4$  所测拉力对  $O$  点的力臂.数据采集系统在同一时间刻度下记录拉力传感器和运动姿态.



图 1 减摇水舱试验台架

Fig. 1 Anti-roll tank test platform

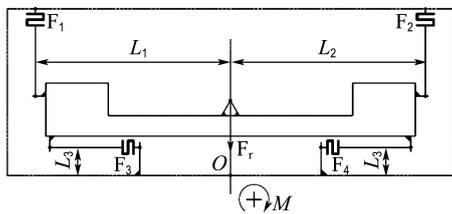


图 2 试验测力原理图

Fig. 2 Load measurement schematic drawing

### 1.2 液体力矩的测出

整个测力系统对旋转中心  $O$  点求力矩:

$$M_O = F_1 L_1 + F_3 L_3 - F_2 L_2 - F_4 L_3 \quad (1)$$

其中  $F_1 \sim F_4$  为  $F_1 \sim F_4$  传感器测得的拉力, $L_1 =$

$961 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 961 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 200 \text{ mm}$ .

由于篮筐和减摇水舱模型随着舱内液体一起运动,因此  $M_O$  由固体运动产生的力矩和液体运动产生的力矩两部分组成,即  $M_O = M_s + M_l$ ,其中  $M_s$  为固体运动产生的力矩, $M_l$  为液体运动产生的力矩.

为了得到液体运动产生的力矩,首先在空舱时测出固体运动产生的  $M_s$ ,然后在同样的运动过程中测量装有液体的力矩  $M_O$ .在时历曲线上完成二者的相减:

$$M_l(t) = M_O(t) - M_s(t) \quad (2)$$

根据力学相似原理,模型换算应符合集合相似、运动相似和动力相似,得到台架模型与实船的换算关系<sup>[18]</sup>.其中实船与台架模型的比例系数  $\lambda = 20$ ,各个尺度的换算关系详见表 1.

表 1 台架模型与实船的换算关系

Tab. 1 Conversion relation between platform model and actual ship

项目	比例系数	项目	比例系数
线尺度	$\lambda$	周期	$\lambda^{1/2}$
频率	$\lambda^{-1/2}$	角度	1
角速度	$\lambda^{-1/2}$	质量	$\lambda^3$
力矩	$\lambda^4$		

### 1.3 相位对减摇效果的影响

图 3 描述了波浪激励力矩与船舶运动以及减摇力矩之间相位  $p$  和幅值  $A$  的关系.船舶运动的相位落后波浪激励力矩  $1/4$  周期,当减摇力矩落后船舶运动  $1/4$  周期时,与波浪激励力矩相差  $1/2$  周期,作用方向与波浪激励力矩时刻相反,减摇效

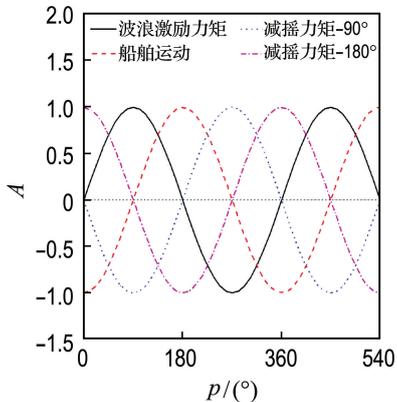


图 3 减摇力矩与船舶运动的相角差

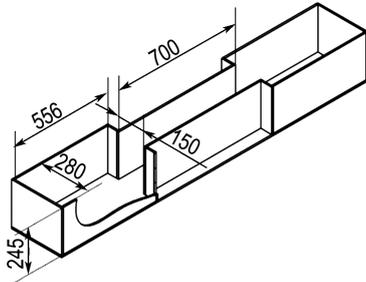
Fig. 3 Phase difference between anti-roll moment and ship motion

果最好<sup>[1]</sup>。当减摇力矩与波浪激励力矩无相位差或者相位落后 1/4 周期时,对抵消波浪激励不做贡献。如果减摇力矩的相位落后船舶运动超过 1/2 周期,将会产生增摇作用。

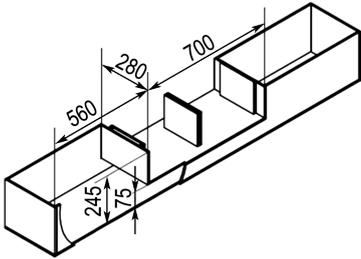
因此,减摇水舱如果想要取得好的效果,减摇力矩与船舶运动的相位应当尽可能接近 1/4 周期。

### 1.4 试验工况的设置

试验对象有 U 型舱和槽型舱,模型尺寸如图 4 所示。



(a) U 型舱模型内壁尺寸



(b) 槽型舱模型内壁尺寸

图 4 减摇水舱模型尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Dimensions of anti-roll tank model (unit: mm)

每种水舱对应 3 个试验参数,分别为激励幅值、通透率和液位。

试验采用正弦激励,同一正弦幅值对应若干分布在频域范围内的频率。本试验采用挡板作为阻尼结构,3 块宽度相同的挡板安装于水舱内的插槽,对水流形成阻碍,剩余的通过宽度与最大的通过宽度的比值为通透率。液位是指水舱处于水平静止状态时自由液面到舱底的距离。

U 型舱和槽型舱对应的工况设置分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 U 型舱工况设置

Tab. 2 Test cases of U-shape tank

激励幅值/(°)	通透率/%	液位/mm
1,2,4	55,70,85,100	145

表 3 槽型舱工况设置

Tab. 3 Test cases of flume tank

激励幅值/(°)	通透率/%	液位/mm
1,2,4	55,70,85,100	65,105,145

## 2 自由衰减试验与结果

自由衰减试验旨在测出无激励情况下,试验舱内液体自由振荡的周期。

试验分为两步:(1)对试验舱进行激励,使舱内液体充分运动起来;(2)中断激励,让液体自由振荡,直至停止。

对激励过程进行分析,计算出衰减过程中液体振荡的平均周期。

由表 4 可知,U 型舱在相同液位下,随着通透率逐渐增大,模型对应的振荡周期逐渐减小。

表 4 U 型舱自由衰减试验结果

Tab. 4 U-shape tank free decay test results

通透率/%	液位/mm	模型周期/s	实船周期/s
55	145	4.08	18.26
70	145	4.01	17.92
85	145	3.90	17.46
100	145	3.88	17.35

由表 5 可知,槽型舱在同一液位下,不同通透率对模型对应的振荡周期影响不大。但是相同通透率下,振荡周期对液位很敏感,其随着液位增大而明显变短。

表 5 槽型舱自由衰减试验结果

Tab. 5 Flume tank free decay test results

通透率/%	液位/mm	模型周期/s	实船周期/s
55	65	6.04	27.03
55	105	4.66	20.86
55	145	3.98	17.79
70	65	5.92	26.48
70	105	4.54	20.31
70	145	3.91	17.50
85	65	5.87	26.25
85	105	4.56	20.41
85	145	3.85	17.23
100	65	5.73	25.64
100	105	4.57	20.42
100	145	3.86	17.28

由此可知,槽型舱的自由振荡周期对液位更加敏感,通透率影响较小.

### 3 减摇水舱试验结果

根据表 2、3 所制定的工况,对 U 型舱和槽型舱进行试验.

正弦运动激励产生液体力矩,力矩图像为三角函数曲线,力矩图像相位滞后于激励运动.三角函数曲线的幅值对应力矩结果,滞后的相位对应相位结果.

#### 3.1 U 型舱试验结果

在相同通透率下,模型减摇力矩  $M$  峰值所对应的激励频率  $f$  随着激励幅值的增大而减小.从

图 5(a)、(b)、(c) 可以发现,随着激励幅值增大,尖峰向左移动.

随着激励幅值的增大,舱内液体在同样的时间内运动的距离增大,阻尼因素的影响增大.随着阻尼增大,减摇力矩的峰值左移,对应的频率下降.

在图 5(d)、(e)、(f) 中,激励幅值不变,液位 145 mm,不同的通透率对于峰值频率的影响十分明显.高通透率对应高的峰值频率.高的通透率也使得力矩的幅值显著增大.

定义各个曲线的峰值点对应的频率为峰值频率,各个工况对应的峰值频率和力矩大小如表 6 所示.

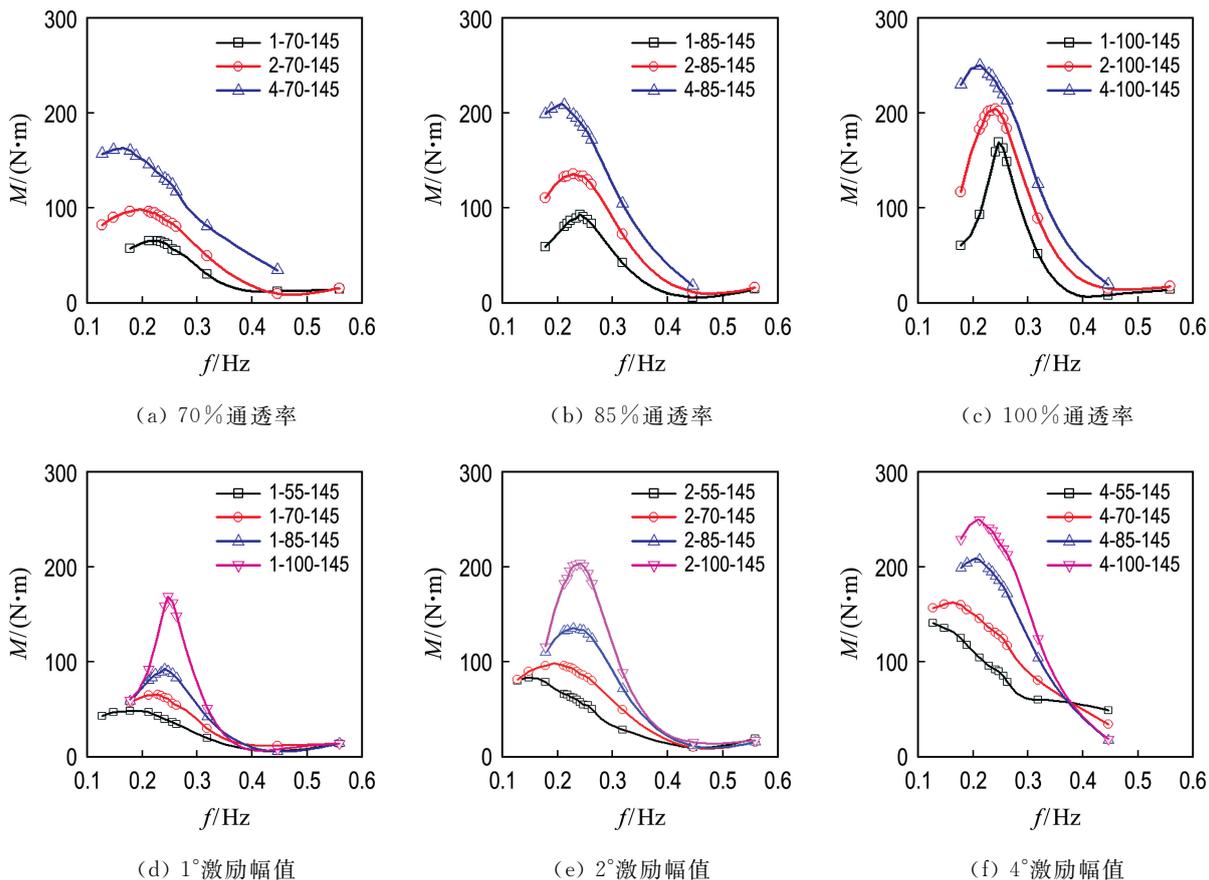


图 5 U 型舱单一变量的幅值结果

Fig. 5 U-shape tank amplitude results with single variable

图 6 为 U 型舱在不同激励幅值下的相位  $p$  结果.由图 6 可以观察到,通透率对于相位结果的影响非常大,能够显著改变相位在整个频域范围内的大小.100%通透率在相位上相较其他 3 种工

况有明显的劣势.首先是在高效相位区间( $45^\circ \sim 135^\circ$ )频率范围小.其次是在  $1^\circ$  和  $2^\circ$  激励幅值的情况下会在 0.4 Hz 以上的区间产生增摇作用.通过增加阻尼板可以明显改善这一情况,有效缩小

表 6 U 型舱试验的峰值频率和对应力矩

Tab. 6 Peak frequency and corresponding moment of U-shape tank test

激励幅值/ (°)	通透率/ %	峰值频率/ Hz	横摇力矩/ (N·m)
1	55	0.196	48.3
1	70	0.223	65.5
1	85	0.242	92.4
1	100	0.250	169.2
2	55	0.154	83.3
2	70	0.200	98.2
2	85	0.229	135.2
2	100	0.241	203.6
4	55	0.128	140.4
4	70	0.165	162.3
4	85	0.207	208.7
4	100	0.210	249.9

增摇区间. 减摇水舱在大激励幅值 4° 工况下会有更大的有效工作区间, 但在高频处依然会有增摇现象.

综上所述, 70%~85% 通透率可以兼顾减摇的力矩和相位, 同时有效缩小增摇区间. 而且减摇水舱在大幅度的激励下会有更大的有效工作范围.

### 3.2 槽型舱试验结果

如图 7(a) 所示, 不同通透率对槽型舱力矩幅值的影响包括幅值大小和峰值频率两部分. 通透率会显著影响槽型舱减摇力矩的幅值, 随着通透率下降, 力矩的幅值也减小, 这一点与 U 型舱相似. 但对峰值频率的影响较小, 各个工况对应的峰值频率并不会像图 5 中发生显著的变化.

图 7(b) 中展示了激励幅值对于减摇力矩幅值大小和峰值频率的影响, 减摇力矩的峰值随着激励幅值的增大而增大, 峰值频率随着减摇水舱

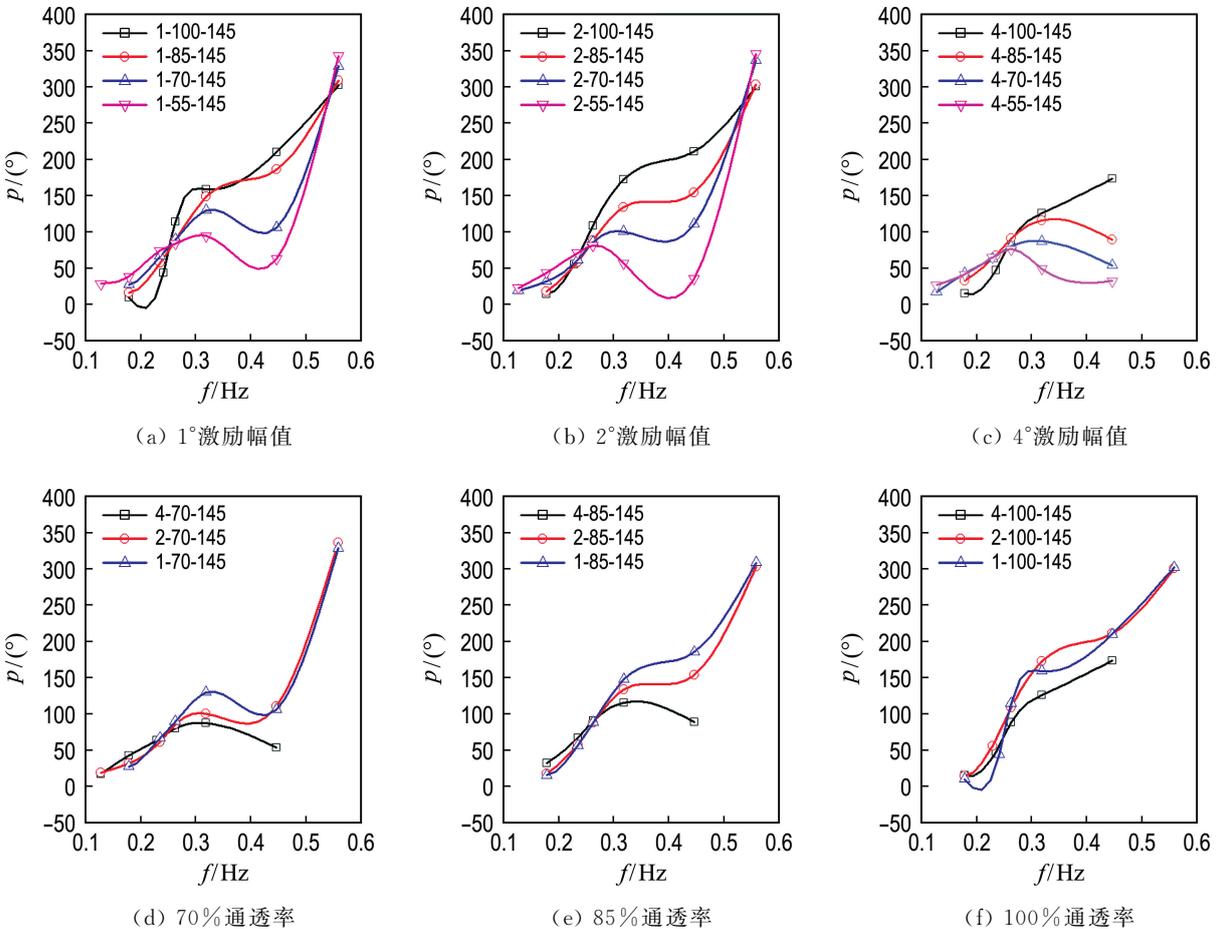


图 6 U 型舱单一变量的相位结果

Fig. 6 U-shape tank phase results with single variable

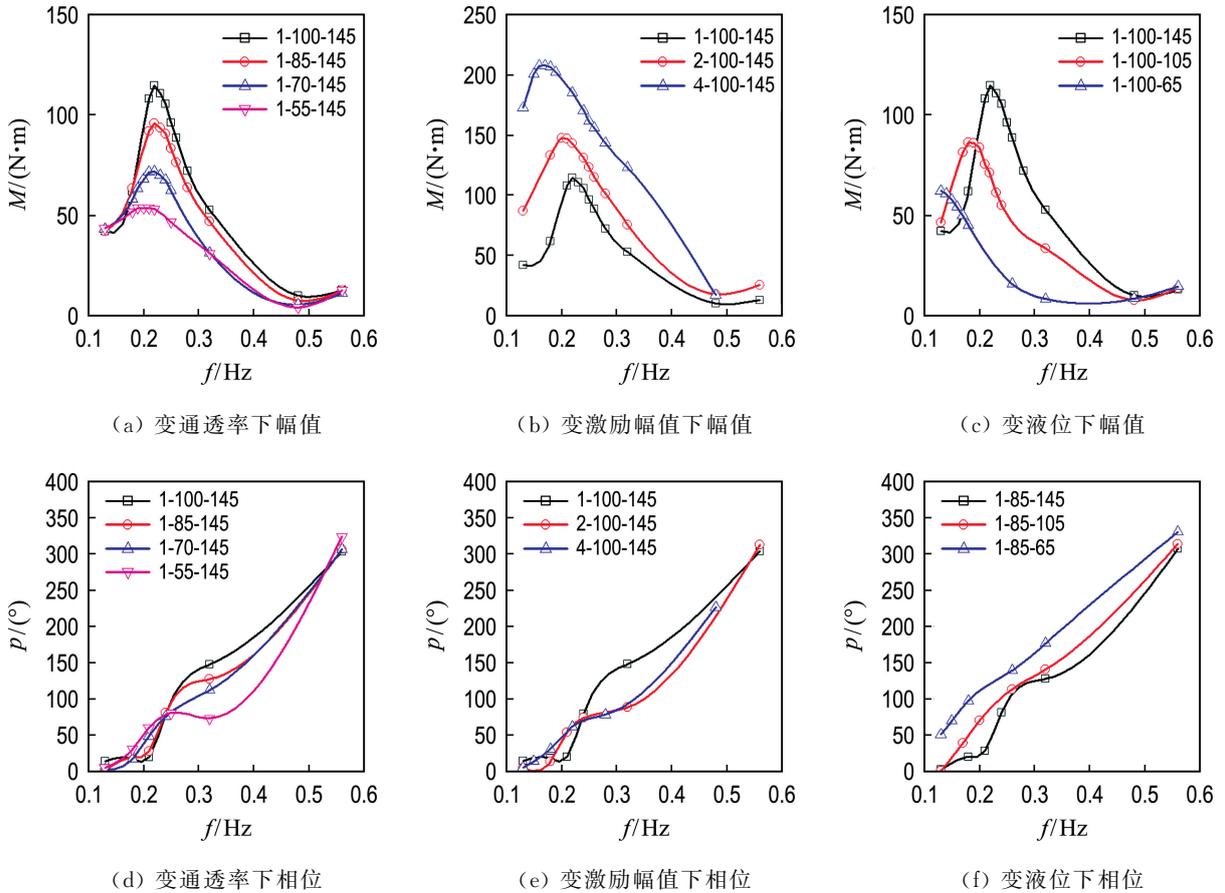


图 7 槽型舱单一变量结果

Fig. 7 Flume tank single variable results

激励幅值增大而减小. 这一现象可以看作是阻尼作用在大幅运动中影响增大.

由图 7(c)可见, 液位对于减摇力矩的影响十分显著. 减摇力矩幅值随着液位升高而增大; 峰值频率随着液位升高而增大, 不同工况之间差异非常明显, 而且 65 mm 液位并未出现对应的峰值频率.

由图 7(d)可见, 通透率对减摇力矩的相位也有明显的影响, 1° 激励幅值下 55% 通透率工况的有效频率范围要大于其余 3 种工况. 在 4° 激励幅值下, 通透率带来的影响更加显著. 55% 和 70% 通透率可以有效消除在高频可能出现的增摇现象.

由图 7(e)可知, 激励幅值也是影响减摇力矩相位的因素之一, 在 2° 和 4° 工况中, 处于有效相位区间的范围明显大于低幅值的情况. 即槽型舱在较大幅值的激励下会有大的减摇频率范围.

由图 7(f)可知, 不同的液位也对减摇力矩的

相位产生影响, 中低液位的 65 mm 工况相位明显滞后于 105 mm 与 145 mm 的, 由此可见较高液位有利于保持减摇力矩处于有效相位区内.

综上所述, 对槽型舱而言, 145 mm 液位、70% 通透率和较大激励幅值有利于减摇水舱发挥减摇效果. 对于小激励幅值的情形可以靠减小通透率和提升液位来增大减摇频率范围.

## 4 结 论

(1) 液位同时也是水舱中液体质量的体现, 适量的液体质量不仅可以增大减摇力矩, 还能增大减摇水舱的有效工作频率范围. 通透率可以从峰值频率和有效工作频率两方面来影响减摇力矩. 可以调节通透率来获得更大的减摇力矩和更大的有效工作频率范围, 在较大激励幅值的情况下, 还可以避免增摇现象的出现. 激励幅值不仅会对减摇力矩的幅值产生影响, 更会在频域中影响峰值频率的位置和相位.

(2)由试验结果分析可以得出,液位、通透率和激励幅值都会对减摇水舱的工作产生明显影响.减摇水舱产生的减摇力矩在频域中的幅值和相位都会受到这3种因素的影响.减摇力矩在频域中的性能会随着激励幅值动态地改变,对减摇水舱性能的评估不能单纯基于固有频率,而要综合多种因素来考虑,开展对应的试验是一种有效且可靠的方法.

(3)对本文中的两种水舱而言,70%~85%通透率和145 mm液位能够保证水舱减摇力矩的幅值和相位都处于较好的工作区间.水舱在较大的激励幅值中性能表现更佳.

(4)本文的试验方法直接测量液体运动产生的力矩以及对应的自由表面图像,可为以后的数值模拟工作打下基础.

## 参考文献:

- [1] 赖志昌. U型减摇水舱及试验摇摆台实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.  
LAI Zhichang. Research on U-tube anti-rolling tank and test rolling table experimentation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001. (in Chinese)
- [2] 曲家文. 船舶减摇水舱试验装置理论及试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.  
QU Jiawen. The theory and experiment researching of examination equipment for tank stabilizer [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003. (in Chinese)
- [3] 张虹. 可控被动式减摇水舱仿真及试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.  
ZHANG Hong. Research on simulation and experiment of passively controlled anti-rolling tank [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2004. (in Chinese)
- [4] 孙伟. 船舶U型减摇水舱控制系统设计及实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.  
SUN Wei. Designing of ship U-tube anti-rolling tank control system and experimental investigation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)
- [5] 曲家文, 张虹, 于立君, 等. 减摇水舱相关参数变化对减摇影响的研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(1): 58-61.  
QU Jiawen, ZHANG Hong, YU Lijun, *et al.* The effects of the changes of relevant variables of anti-rolling tank on anti-rolling performance [J]. **Journal of Harbin Engineering University**, 2004, 25(1): 58-61. (in Chinese)
- [6] 郭黎滨, 赖志昌, 金鸿章, 等. 减摇水舱在船上的布置问题研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(5): 1-6.  
GUO Libin, LAI Zhichang, JIN Hongzhang, *et al.* Vertical location of tank within ship [J]. **Journal of Harbin Engineering University**, 2002, 23(5): 1-6. (in Chinese)
- [7] 吴建林, 邵昱, 刘少卿, 等. U型减摇水舱模型试验与数值仿真 [J]. 船舶工程, 2016, 38(6): 42-44, 54.  
WU Jianlin, SHAO Yu, LIU Shaoqing, *et al.* Model test and fluid simulation of U type anti-rolling tank [J]. **Ship Engineering**, 2016, 38(6): 42-44, 54. (in Chinese)
- [8] 肖丽娜. 平面被动槽型减摇水舱的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.  
XIAO Lina. Study of the passive anti-roll flume tank [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [9] 张培信, 李榛, 翁徽贛. 平面纯被动减摇水舱设计研究 [J]. 船舶与海洋工程, 2012(3): 40-47.  
ZHANG Peixin, LI Zhen, WENG Huigan. Study on design of pure passive anti-roll tank [J]. **Naval Architecture and Ocean Engineering**, 2012(3): 40-47. (in Chinese)
- [10] 陈军, 邹康, 徐志海. 平面被动减摇水舱阻尼格栅优化研究 [J]. 船舶设计通讯, 2016(S1): 7-10.  
CHEN Jun, ZOU Kang, XU Zhihai. Optimization of damping baffles for free-surface passive anti-rolling tank [J]. **Journal of Ship Design**, 2016(S1): 7-10. (in Chinese)
- [11] GAWAD A F A, RAGAB S A, NAYFEH A H, *et al.* Roll stabilization by anti-roll passive tanks [J]. **Ocean Engineering**, 2001, 28(5): 457-469.
- [12] ALUJEVIĆ N, ĆATIPOVIĆ I, MALENICA Š, *et al.* Ship roll control and power absorption using a U-tube anti-roll tank [J]. **Ocean Engineering**, 2019, 172: 857-870.
- [13] SUBRAMANIAN R, JYOTHISH P V, SUBRAMANIAN V A. Genetic algorithm based design optimization of a passive anti-roll tank in a sea going vessel [J]. **Ocean Engineering**, 2020, 203: 107216.

- [14] BERNAL-COLIO V R, GÓMEZ-GÓNI J, CERCOS-PITA J L. CFD computation of the hydrodynamic torque due to free-surface antiroll tanks with 3D dynamics [J]. **Ships and Offshore Structures**, 2020(2020): 1-13.
- [15] LIU Ge, LIN Yan, GUAN Guan, *et al.* Numerical research on the anti-sloshing effect of a ring baffle in an independent type C LNG tank [J]. **Journal of Zhejiang University-Science A**, 2018, **19**(10): 758-773.
- [16] LIU Ge, LIN Yan, GUAN Guan, *et al.* A numerical technique for sloshing in an independent type C LNG tank with experimental investigation and validation [J]. **International Shipbuilding Progress**, 2017, **64**(1/2): 79-100.
- [17] LIU Ge, LIN Yan, GUAN Guan, *et al.* Experimental study on frequency domain resonant characteristic of sloshing in LNG independent type C tank [J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2017, **51**(12): 2392-2398.
- [18] 杨建民, 肖龙飞, 盛振邦. 海洋工程水动力学试验研究 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- YANG Jianmin, XIAO Longfei, SHENG Zhenbang. **Experimental Study on Ocean Engineering Hydrodynamic** [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2008. (in Chinese)

## Experimental study of anti-roll tank performance conducted on rolling platform

PEI Fei, LIN Yan\*

( School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** The dimension of the anti-roll tank installed on a certain drill ship is strictly restricted. An experimental study based on rolling platform is conducted to test the performance of anti-roll tank in order to provide reference for anti-roll tank design on ship. By employing anti-roll tank test platform and small-scale model, experiments of U-shape tank and flume tank are carried out.  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  exciting amplitude and 55%, 70%, 85%, 100% passing ratio cases are tested in frequency domain. Flume tank is tested under different liquid levels of 65, 105 and 145 mm. By recording and analyzing amplitude and phase of liquid induced moment, sound tank structure parameters are obtained to provide good anti-roll performance. According to the experiment result, tanks provide larger anti-roll moment and better phase under large exciting amplitude. Application of damping pad for reducing passing ratio expands effective band of anti-roll moment phase for both tanks. Change of liquid level affects both amplitude and phase of anti-roll moment significantly in case of flume tank. Both tanks gain better performance under large exciting amplitude, 70%-85% passing ratio can meet both amplitude and phase demand of anti-roll moment and 145 mm liquid level is best choice for both tanks. But it must be noted that, for flume tank, change of liquid level can adjust peak frequency of tank for different situations, a level too low will lead to unnecessary damping resulting in negative influence.

**Key words:** anti-roll tank; rolling platform; phase control; parameter design