

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.013

大型浮体水动力响应特性数值模拟及减摇措施

何良德¹, 黄挺¹, 李俊龙², 罗成未¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430015)

摘要: 为研究马尔代夫海域大型浮体水动力响应特性及减摇措施, 基于三维势流理论和刚体运动方程建立了浮箱水动力响应数值模型, 分析了不同纵横比浮箱的水动力响应特性, 讨论了减摇板布置方式及形式对浮箱减摇效果的影响, 并在此基础上给出了较优的减摇板布设方案。结果表明: 纵横比为2:1的矩形浮箱在各个浪向下的运动响应相对平稳; 减摇板宽度对浮箱横摇的控制作用较明显; 浮箱迎、背浪面同时安装减摇板时减摇效果受安装高度影响显著; 对于迎浪侧的双层开孔减摇板, 上层减摇板开度40%时对浮箱横摇控制较好, 浮箱横摇有义值极限海况下可降低16.9%, 建议优先选用上层带开度的单侧双层减摇板布设形式。安装减摇板对波浪作用下浮体结构强度影响较小, 应着重关注减摇板与外壳的连接强度。

关键词: 大型浮体; 减摇板; 水动力响应; 势流理论; 数值模拟; 马尔代夫海域

中图分类号: P75

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)04-0097-11

Numerical simulation of hydrodynamic response and anti-rocking measures of the large floating structure

HE Liangde¹, HUANG Ting¹, LI Junlong², LUO Chengwei¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changjiang Survey Planning Design Research Co., Ltd., Wuhan 430015, China)

Abstract: In order to study the hydrodynamic response characteristics and anti-rocking measures of large floating bodies in the waters of Maldives, a numerical model of hydrodynamic response of floating tanks is established based on the three-dimensional potential flow theory and the rigid-body motion equation, the hydrodynamic response characteristics of floating tanks with different aspect ratios are analyzed, the influence of anti-shake plate layout and type on the anti-rocking effect of floating tanks is discussed, and a better layout scheme of anti-shake plates is given on this basis. The results show that the rectangular floating box with an aspect ratio of 2:1 has a relatively stable motion response in each wave. The width of the anti-shake plate has an obvious control effect on the floating box, and when the anti-shake plate is installed at the same time on the floating box and the back wave surface, the anti-rocking effect is significantly affected by the installation height. For the double-layer open-hole anti-rocking plate on the facing side, when the opening of the upper anti-shake plate is 40%, the control over the rocking of the floating box is better, and the rollover of the floating box can be reduced by 16.9% under the limit sea state. This study recommends the single-sided double-layer anti-rocking plate layout form with the opening of the upper layer. The installation of the anti-shake plate has little effect on the strength of the floating structure under the action of waves, and attention should be paid to the connection strength of the anti-shake plate and the shell.

Key words: large floating structure; anti-shake plate; hydrodynamic response; potential flow theory; numerical simulation; the waters of Maldives

随着全球人口数量膨胀和陆地资源紧张,海洋空间的开发利用成为一个必然趋势。近年来,以大型浮体为组建单元的漂浮城市、浮式人工岛等概念被相继提出,成为研究热点^[1-3]。通常,大型浮体既可以作为独立的海洋平台使用,也可以作为单元模块拼接组成超大型浮体^[4-5]。大型浮体在波浪下会产生明显的摇荡运动^[6-8],严重时不仅会影响浮体上设备、人员的正常工作,甚至还会发生倾覆事故。因此,关注大型浮体的水

基金项目: 中国交通建设集团项目(2018-ZJKJ-01);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200202066)

作者简介: 何良德(1964—),男,副教授,硕士,主要从事港航结构工程及基础工程研究。E-mail: hldhsy@163.com

通信作者: 黄挺(1983—),男,副研究员,博士,主要从事地基基础研究。E-mail: huangting@hhu.edu.cn

引用本文: 何良德,黄挺,李俊龙,等.大型浮体水动力响应特性数值模拟及减摇措施[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):97-107.

HE Liangde, HUANG Ting, LI Junlong, et al. Numerical simulation of hydrodynamic response and anti-rocking measures of the large floating structure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 97-107.

动力响应具有重要意义。

目前,大型浮体主要有半潜式和浮箱式 2 种^[9],李良碧等^[10]采用 Sesam 软件对半潜式大型浮体进行水动力分析,结果表明横向浮筒半潜式大型浮体纵荡幅值比纵向浮筒型小很多;袁杨^[11]对半潜式大型浮体五浮筒型以及三浮筒型 2 种方案进行了频域下的水动力性能分析,发现五浮筒方案水动力性能更优;王亚香等^[12]基于物理模型试验,研究了浮箱式浮体在波浪场中的动力响应,发现浮体纵荡和纵摇均随相对波高增大而增大,随相对板长的增大而减小;舒志等^[13]应用三维水弹性理论和刚体的三维势流理论,对比研究了浮箱式超大型浮式结构物在波浪中无系泊时的运动响应,发现浮体前三阶垂向弯曲传递函数的响应幅值与结构的升沉运动幅值相当。已有工程经验表明,浮箱式浮体构造简单,拼接容易,是近海海洋载体的优选形式,但因水线面面积大,波浪作用下运动响应问题十分突出^[14-15],有必要开展浮箱式大型浮体水动力响应的控制研究。

本文以马尔代夫海域作为潜在的工程应用背景,研究大型浮体的选型、水动力响应及减摇问题。考虑到现有施工技术条件下单个大型浮体尺寸有限,结构的水弹性变形不显著^[16],故本文简化认为浮体为刚体,其响应采用刚体运动方程进行计算。在此基础上,采用三维势流理论考虑水动力荷载作用,研究浮箱式浮体波浪响应特性以及减摇板布置方式和形式对水动力响应的控制效果。

1 大型浮体工程简况

大型浮体工程拟选址于马尔代夫首都马累附近的芭环礁内。该海域平均水深 50 m,流速、风速较小,因此浮体水动力响应主要受波浪的影响。根据观测数据,芭环礁外海波浪常浪向为 SSW,2 年一遇有义波高为 3.3 m,谱峰周期为 8.3 s,100 年一遇有义波高为 4.6 m,谱峰周期为 10.2 s。主风向为 W,平均风速为 4.7 m/s。由于芭环礁海域海况相对平静,水深较浅,大型浮箱式浮体是合理的选择。

2 浮体运动计算理论

本文采用数值模拟软件 AQWA 进行建模并开展水动力响应计算。

2.1 势流理论

势流理论假定流体为无黏、无旋、不可压缩的理想流体,即存在速度势函数 $\varphi(x,y,z,t)$ 。制约流体的基本方程为拉普拉斯方程(式(1))和拉格朗日方程(式(2))。

$$\nabla^2 \varphi(x,y,z,t) = 0$$

(1)

$$\frac{p}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = C(t)$$

(2)

式中: p 为压力; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; v 为流速; $C(t)$ 为待定时间 t 的函数,需根据问题给出的条件决定。

拉普拉斯方程决定流场中的速度分布,拉格朗日方程决定流场中的压力分布,从而确定浮体所受到的流体作用力。对于有大尺度浮体(浮体特征长度大于 1/6 波浪波长)干扰的简谐传播波浪场,根据 Haskind 的理论,速度势函数为

$$\varphi(x,y,z,t) = \varphi_{\omega} + \varphi_d + \varphi_r$$

(3)

式中: φ_{ω} 为未经浮体扰动的入射波势; φ_d 为固定浮体对入射波流场的干扰,称为绕射波势; φ_r 为浮体强迫振动对静水流场的干扰,称为辐射波势。速度势函数除需满足式(1)以外,还需满足相关边界条件,包括物面条件、自由表面条件、海底条件、无穷远处条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = v_{bn} & S = S_b \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 & z = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 & z = -h \\ \nabla \varphi = 0 & R \rightarrow \infty \end{cases}$$

(4)

式中: ν_{bn} 为浮体湿表面的法向速度; S 为水线面面积; S_b 为浮体湿表面面积; R 为流场半径; h 为水平面到海底的距离。

当浮体特征长度大于 $1/6$ 波浪波长时,根据速度势,通过拉格朗日积分可以求得整个流场的压力分布。流体施加在单模块上的作用力也可以进一步被求出:

$$p(x,y,z,t)=-\rho\frac{\partial\varphi}{\partial t}-\rho gz\tag{5}$$

2.2 莫里森方程

波浪对小尺度结构物的作用主要为黏滞效应和附加质量效应,小尺度结构物的波浪力 F_w 可以采用莫里森方程^[17]计算:

$$dF_w=d\left[\frac{1}{2}\rho DC_d(u_f-u_s)|u_f-u_s|+\rho AC_mu_f-\rho A(C_m-1)u_s\right]\tag{6}$$

式中: D 为杆件的特征直径; C_d 为阻力系数; u_f 为垂直杆件方向的流体质点速度; u_s 为垂直杆件方向结构自身的运动速度; A 为杆件截面面积; C_m 为惯性力系数。

2.3 浮体运动方程

由式(5)可求得整个模块波浪压力分布,压力沿浮体湿表面积分即可得到浮体受到的环境外力。当浮体投影横截面尺度小于 $1/5$ 波浪波长时,浮体环境外力可根据莫里森方程(式(6))计算。进一步地,可以建立运动方程:

$$M\ddot{X}+A\ddot{X}+B\dot{X}+KX=F_D\tag{7}$$

式中: X 为浮体各自由度运动响应; M 为浮体质量矩阵; A 为附加质量矩阵; B 为辐射阻尼矩阵; K 为静水刚度矩阵; F_D 为浮体环境外力,由风、浪、流荷载组成,本研究仅考虑由式(5)或式(6)计算得到的波浪荷载。采用数值方法对式(7)进行求解即可得到浮体在波浪场中的运动响应。

3 浮体选型及水动力响应特性

3.1 浮箱式浮体关键设计参数及数值模型

浮箱式浮体结构设计主要涉及的尺寸参数有长、宽、型深和干舷高度,如图 1 所示。参考现有工程施工能力,浮箱面积拟定为 7000 m^2 。根据工程设计要求,浮箱上部荷载为 14.7 kPa (包括建筑自重和活荷载,吃水约 1.5 m),经过试算满载吃水拟定为 3 m (自重吃水约 1 m),结构型深为 6 m 。满载吃水线与上层甲板的距离为 3 m ,符合《国际载重线公约》(ILLC)和《船舶与海上设施法定检验规则》关于干舷高度的要求。

浮箱长、宽尺寸选择涉及不同的纵横比,合理的纵横比选择应使浮箱具有较小的运动响应。由式(4)(7)可知,浮体在波浪场的运动响应与浮体湿表面形状有关。建立了 4 种水动力面元模型(图 2),纵横比分别为 $1:1$ (长 85 m 、宽 85 m)、 $2:1$ (长 120 m 、宽 60 m)、 $3:1$ (长 147 m 、宽 49 m)以及 $4:1$ (长 172 m 、宽 43 m)。模型网格基本尺寸为 1 m ,满足单波长能覆盖 7 个以上单元的要求。根据浮箱上部设计荷载以及工程应用背景,数值模拟中浮箱总重心高度设定在坐标 $(0,0,0)$ 。

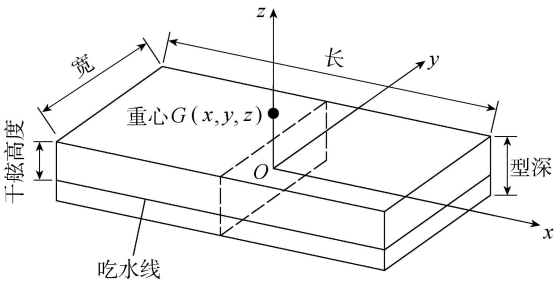


图 1 浮体主要尺度参数示意图
Fig.1 Schematic diagram of main dimensions of floating structure

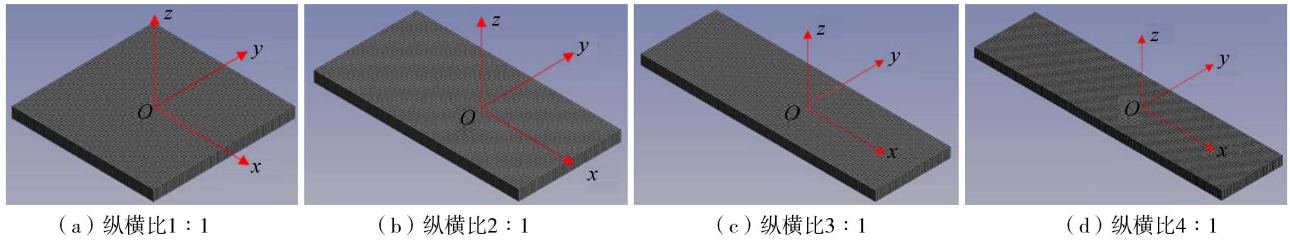


图 2 浮箱面元模型
Fig.2 Surface-element model of floating tanks

6)处,吃水线位于 $z=0\text{ m}$ 处。

实际海域中波浪是不规则的^[18],由波浪引起的浮体响应是一个随机过程。通常认为不规则波由许多不同频率、波幅和相位的规则波组成,计算规则波作用下的浮箱响应是研究其复杂海况下水动力响应的基础。现采用响应幅值算子 RAO(浮体响应幅值与规则波波幅的比)体现线性波浪作用下浮体的运动响应特性。不同形状浮体在 0° (x 轴向)和 90° (y 轴向)浪向下的 RAO 如图 3 所示。显然浮箱纵横比对其水动力响应影响明显,基于所依托工程浪向较为集中以及短轴向耐波性考虑,推荐采用纵横比 2 : 1 的布置方案。

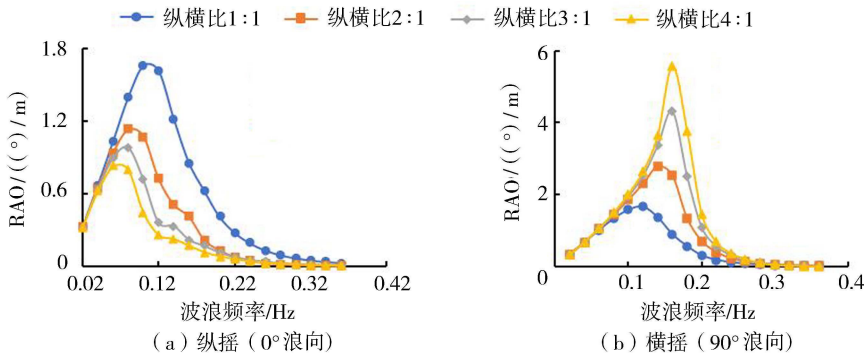


图 3 纵横比对浮箱运动响应的影响

Fig. 3 Effect of aspect ratio on the motion response of floating tanks

3.2 浮箱水动力响应计算结果

图 4 给出了纵横比 2 : 1 浮箱 6 个方向自由度随波浪入射方向的变化情况。浮箱的纵荡和横荡运动呈现低频特性,在 $0 \sim 0.16\text{ Hz}$ 的频率区间内,运动响应随频率增大而显著减少,直至趋近于 0。垂荡运动表现出类似的变化特征。低频波浪下水质点往复移动范围较大,带动浮箱产生显著的 3 个方向的位移。各浪向下垂荡 RAO 差异主要出现在 $0.02 \sim 0.3\text{ Hz}$ 区间,随波浪入射角转向垂直于纵轴,浮箱底部同时承受同相位波浪作用的面积增大,放大了垂荡 RAO 响应。横摇和纵摇 RAO 在计算频率范围内均是先增大后减小,与浮箱自身频率(0.1 Hz)相关。相比较而言,横摇响应整体较纵摇明显,在工程应用中应加以注意。艏摇响应在 45° 时最显著,随波浪频率呈下降趋势。图 4 表明,不同迎浪面时浮箱主导运动响应不同,对于浪向集中的海域应注意合理选择布置方向。

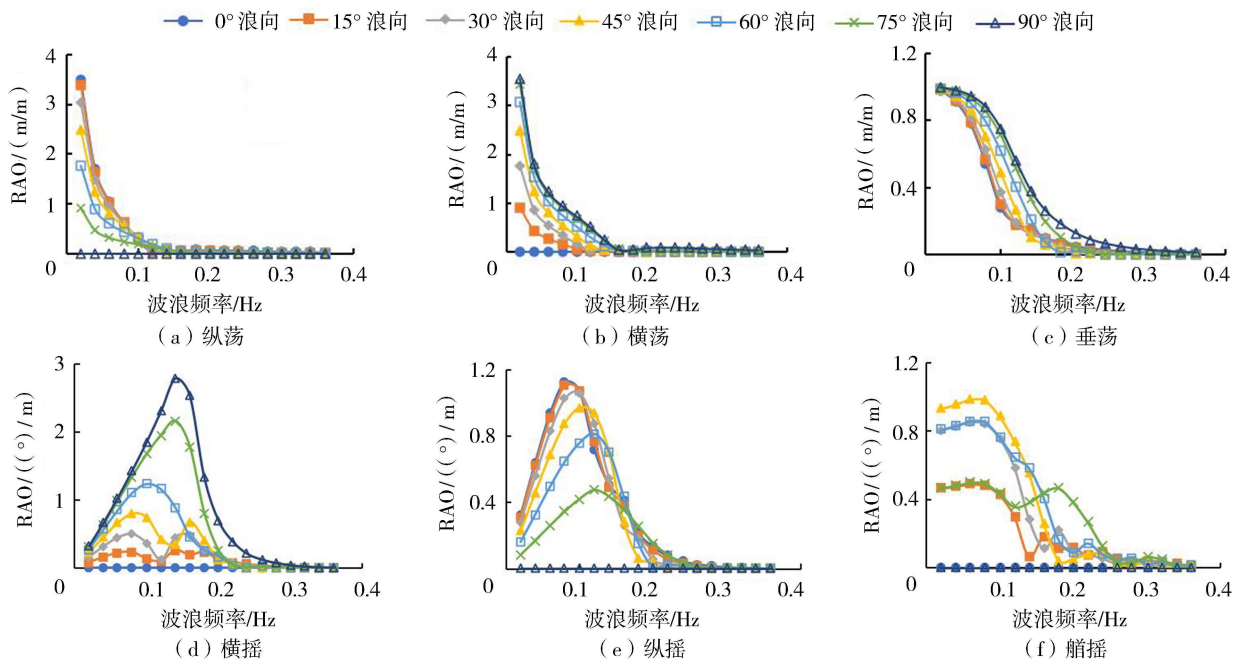


图 4 波浪入射角对浮箱运动响应的影响

Fig. 4 Effect of wave incidence angle on the motion response of floating tanks

4 浮箱水动力响应控制及优化

4.1 减摇板-浮箱水动力模型

控制大型浮体在波浪作用下的水动力响应,提高其耐波性,对保证浮体上部设施正常使用以及工程安全具有重要意义。已有研究显示,在浮箱中部、首尾加舦龙骨可有效抑制浮箱横摇响应^[19],安装减摇鳍、隔板也可减少浮箱的纵摇、垂荡等响应^[20-22]。结合浮箱的形状特点,本文拟在浮箱周边安装附体装置“减摇板”以减小浮箱运动响应,并在分析减摇板布置位置及形式对浮箱运动响应影响的基础上得出较优的浮箱减摇板布设方案。

拟在纵横比 2 : 1 的浮箱迎浪侧添加减摇板,如图 5 所示。由于浮箱的主要运动响应与波浪方向相关,不同迎浪面上的减摇板所抑制的运动响应类型也不同,本文以长边迎浪面设减摇板的浮箱分析减摇板对浮箱垂荡、横摇响应的控制效果,以短边迎浪面设减摇板的浮箱分析减摇板对浮箱纵摇响应的控制效果。

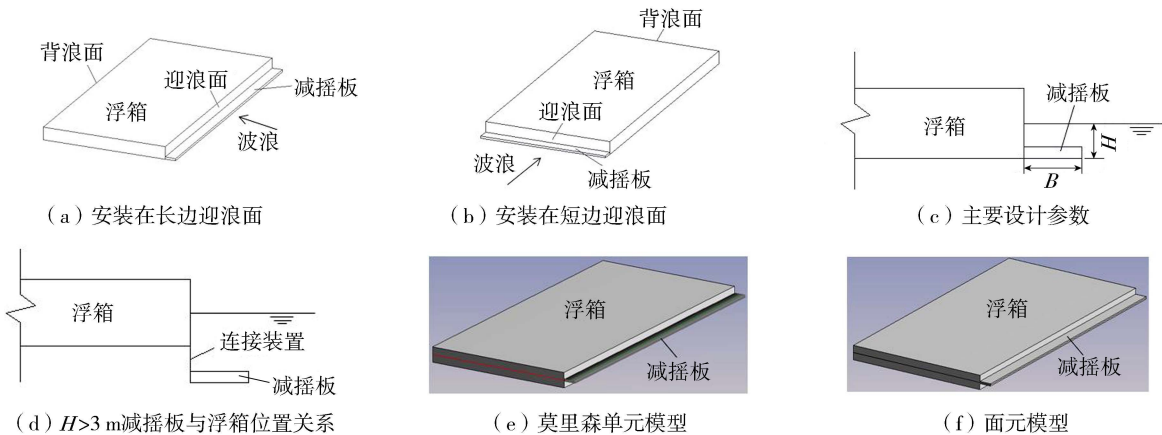


图 5 带减摇板浮箱
Fig. 5 Floating tanks with anti-shake plate

基于简化考虑,本研究中减摇板厚度为 1 m,减摇板长度与浮箱迎浪面对应边长相同,主要研究参数有安装高度 H (减摇板底面与水面线的距离),减摇板宽度 B 。当 $H=0.5\text{ m}$,水线与板中心重合,当 $H=3\text{ m}$,浮箱底面与板底面重合,当 $H>3\text{ m}$ 时,减摇板与浮箱相对位置如图 5(d) 所示,实际情况减摇板与浮箱间有桁架式连接装置连接,考虑到连接装置对浮箱运动影响较小,为简化模型,在 AQWA 水动力计算中不建立连接装置,视为同一个刚体,减摇板与浮箱无相对运动。

对于大尺度浮体,一般采用势流理论(式(1)~(5))计算作用在结构面上的荷载作用,当忽略流体黏性效应时,在 AQWA 中可采用面元模型进行计算;对于小尺度结构物,在 AQWA 中可采用莫里森单元建模以考虑小尺度结构上的波浪力,即采用莫里森公式(式(6))计算波浪力,考虑了黏性效应,忽略绕射作用。本文中减摇板迎浪面尺寸较小,存在阻力作用(需用莫里森单元考虑),同时又具有较大的平面尺寸,存在波浪绕射作用(需用面元考虑),故先评估 2 种建模方式对浮箱响应的影响。

针对减摇板安装高度 $H=0.5\text{ m}$ 、宽度 $B=5\text{ m}$ 的情况,分别采用面元和莫里森单元建模,如图 5(e)(f) 所示,其中,为进一步明确阻力作用的影响,莫里森单元模型设定为只有阻力作用(黏性效应),即式(6)中 C_d 按照 JST 145-2—2013《海港水文规范》取 1.2,不考虑减摇板质量影响(C_m 取 0)。2 种模型计算结果如图 6 所示。图 6 中,考虑阻力作用的莫里森单元模型峰值较无减摇板时浮体横摇响应减小 0.7%,说明对于本浮箱结构,引入莫里森单元考虑减摇板黏性效应的影响较小。采用面元模型计入减摇板上绕射作用力后,横摇峰值较无减摇板浮箱减小 10.8%,表明减摇板产生的绕射作用力对浮箱响应影响比迎浪面阻力更显著。此外,考虑到莫里森单元无法模拟减摇板开度,

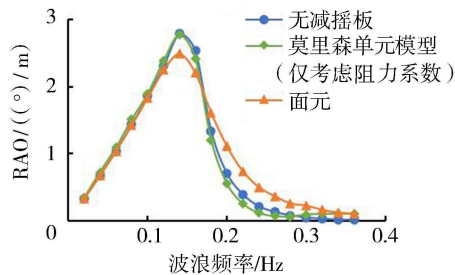


图 6 减摇板建模方式对浮箱横摇响应的影响
Fig. 6 Influence of anti-shake plate modeling method on the horizontal roll response of floating tanks

因此本文选择面元模型建模分析。

4.2 减摇板安装高度的影响

图 7 为浮箱迎浪面减摇板安装宽度 $B=5\text{ m}$ 时减摇板安装高度 H 对浮箱运动响应的影响,其中, H_m 为模块干弦高度(6 m),原型是指浮箱未设置减摇板时的工况。计算结果显示,当减摇板安装高度 $H=0.50H_m$ 时,浮箱垂荡 RAO 在 0.1 Hz 处出现峰值,较原型增大了 35.0%,说明减摇板与浮箱底面齐平后,增加了浮箱结构在竖直方向上获取的波浪能量,从而导致浮箱垂荡响应显著增加。当 $H=0.08H_m$ 、 $0.50H_m$ 时,浮箱横摇 RAO 峰值较原型减小了 11.1%、6.5%,这是因为沿浮箱宽度方向由面元单元计入的波浪绕射荷载空间分布不均匀,并且浮箱长边减摇板水线面面积相对较大,因此安装高度影响较为显著。显然,减摇板安装高度对浮箱纵摇 RAO 影响不显著。

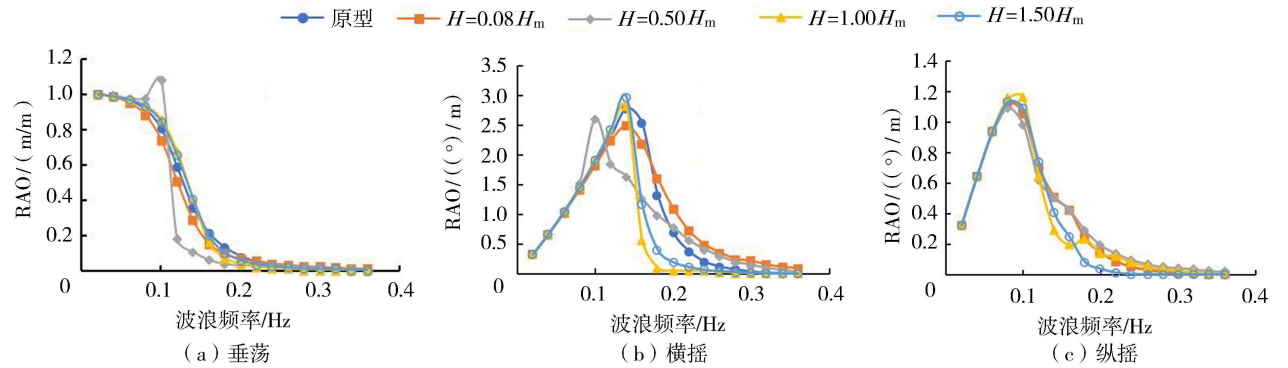


图 7 减摇板安装高度对浮箱运动响应的影响

Fig. 7 Effect of the height of anti-shake plate on the motion response of floating tanks

4.3 减摇板宽度的影响

图 8 为减摇板安装高度 $H=3\text{ m}$ 时减摇板宽度 B 对浮箱运动响应的影响,其中 B_m 为浮箱宽度(60 m),原型是指浮箱未设置减摇板时的工况。随着减摇板宽度的增加,浮箱的垂荡、横摇和纵摇响应均有所减小,其中减摇板对横摇的控制效果较好。当 $B=0.25B_m$ 时,RAO 峰值较原型减小了 26.5%,较 $B=0.08B_m$ 时减摇板横摇控制效果提升了 15.4%。减摇板对纵、横摇控制效果的差异是因为控制纵摇运动需要外界提供较大的回复力矩,因增大浮箱长边减摇板宽度对回复力矩贡献有限,如需有效控制纵摇运动,可在浮箱短边布置减摇板。

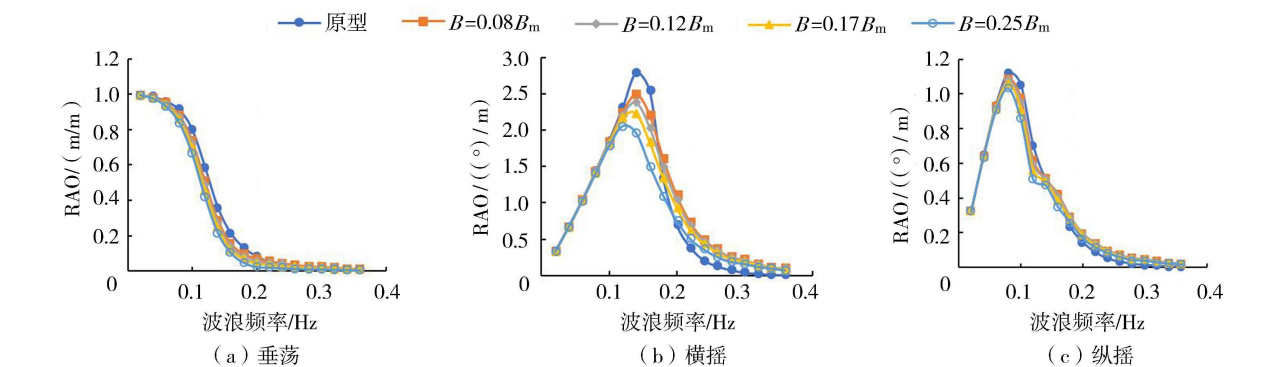


图 8 减摇板宽度对浮箱运动响应的影响

Fig. 8 Effect of the width of anti-shake plate on the motion response of floating tanks

4.4 减摇板形式的影响

在单侧安装单层减摇板的基础上,分析双侧安装单层减摇板、单侧安装双层开孔减摇板对浮箱减摇效果的影响。

在浮箱的迎浪面和背浪面均安装 $B=5\text{ m}$ ($B=0.08B_m$) 的减摇板,即双侧减摇板,如图 9 所示。图 10 给出了双侧减摇板不同安装高度下浮箱横摇 RAO,可以看出 $H=0.08H_m$ 时横摇 RAO 较原型减小了 32.9%,比仅在迎浪面单侧有板时控制效果提高了 21.8%,而其他安装高度下浮箱 RAO 峰值已超过原型,减摇效果较差。

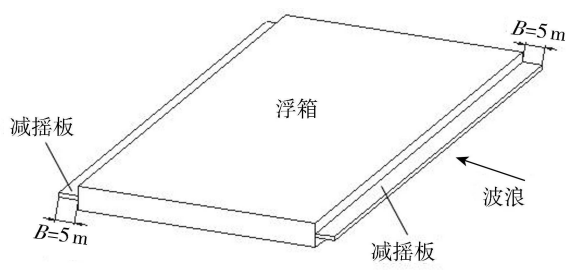


图 9 双边设置减摇板
Fig. 9 Double-side anti-shake plate

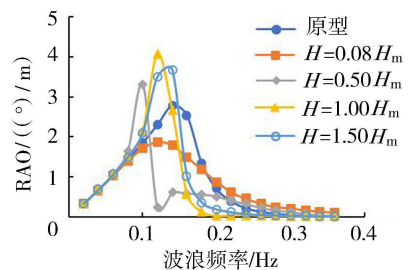


图 10 双侧减摇板安装高度对浮箱横摇响应的影响
Fig. 10 Effect of the height of double-side anti-shake plate on the horizontal roll response of floating tanks

已有计算结果显示 $H=0.08H_m$ 和 $H=0.5H_m$ 这 2 种安装高度下的减摇板对横摇运动均有一定控制效果,在此基础上,设计了上板安装高度 $H_1=0.08H_m$ 、下板安装高度 $H_2=0.5H_m$ 的单侧双层减摇板布置方案,上板宽 B_1 、下板宽 B_2 均为 5 m, $B=0.08B_m$,并在其中一个减摇板上开孔,如图 11 所示,减摇板的开度 η_i (上减摇板为 η_1 ,下减摇板为 η_2) 定义见式(8)。

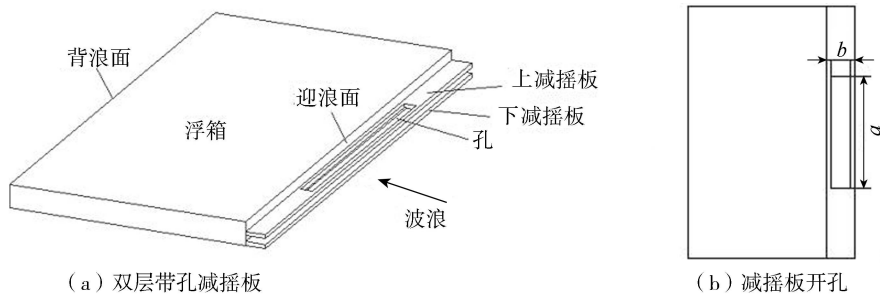


图 11 双层带孔减摇板示意图

Fig. 11 Schematic diagram of double-side anti-shake plate with opening

$$\eta_i = S_{ai}/S_i = ab/BL \tag{8}$$

式中: S_{ai} 为带孔减摇板中孔的面积; S_i 为减摇板未开孔面积; L 为减摇板长度,与浮箱迎浪面边长相等。

图 12 为不同开度单侧双层减摇板作用下浮箱的横摇运动 RAO 曲线,其中上减摇板 $H=0.5\text{ m}$,下减摇板 $H=3\text{ m}$ 。从图 12 可以看出,当开度为 0 时,双层减摇板的 RAO 峰值较原型降低了 12.5%。当上板开度 η_1 增大,RAO 曲线逐渐靠近只设置下层无开度减摇板时的 RAO 曲线;类似的变化规律同样可从下板开度 η_2 变化中观测到。这说明双层减摇板可以近似看作上下 2 块单层减摇板作用效果的叠加,当双层减摇板其中之一的开度增大,该板的抑制效果也随之减小,减摇效果逐渐趋近于单层减摇板的情况。另外,对比图12(a)(b)可以发现双层减摇板时的 RAO 响应介于 2 种减摇板单独布置的情况,改变双层减摇板的开度,可以实现调整 2 层减摇板各自发挥比例,进而取得更优控制效果的作用。其中,下减摇板开孔的影响相对较小,当 $\eta_1=40\%$ 时,双层减摇板控制效果最好。

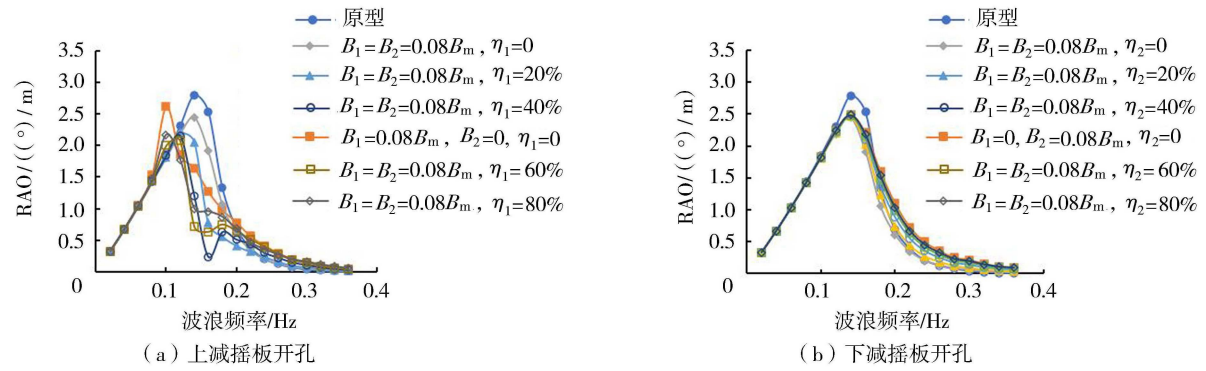


图 12 双层减摇板开度对浮箱横摇响应的影响

Fig. 12 Effect of the opening ratio of double-side anti-shake plate on the horizontal roll response of floating tanks

综上,双侧单层减摇板($H=0.08H_m, B=B_m$)布置方案、上板开度 $\eta_1=40\%$ 的单侧双层减摇板($H_1=0.08H_m, H_2=0.5H_m, B_1=B_2=0.08B_m$)布置方案的控制效果较好。基于减摇板材料用量相近考虑,进一步将上述两者与 $H=0.08H_m, B=2B_1=0.16B_m$ 的单侧单层减摇板横摇 RAO 响应进行对比,如图 13 所示。双侧减摇板和单侧双层减摇板的横摇 RAO 在计算频率范围内整体小于 2 倍板宽的单侧单层减摇板,其中双侧减摇板 RAO 峰值最小。当波浪频率大于 0.14 Hz 时双侧减摇板布置的浮箱响应超过单侧双层减摇板的情况。基于此,本文浮箱式结构的减摇板形式优先为 $\eta_1=40\%$ 的单侧双层减摇板和双侧减摇板。表 1 为 2 种形式减摇板在极限海况下对浮箱的横摇控制效果。结果显示双侧减摇板对横摇有义值的控制效果达到 18.9%, $\eta_1=40\%$ 的单侧双层减摇板达到 16.9%,两者差距并不显著。从工程材料经济性角度,建议优先选用上层带开度的单侧双层减摇板布置形式。

5 减摇板对浮体结构强度的影响

为研究波浪作用下典型减摇板设置对浮箱结构强度的影响,建立了浮体结构有限元数值分析模型,如图 14 所示。其中,浮体材料采用高强度钢,浮体内部结构考虑为由纵横舱壁和纵横骨架构成的纵横板式,如图 15 所示。浮体的内外壳、舱壁、框架和减摇板均采用壳单元模拟,骨架采用 T 形截面的梁单元模拟。

施加在浮体上的荷载包括浮体自重、压舱水重、上部(甲板)荷载、静水荷载(吃水3 m)和动水荷载(波浪荷载)。考虑到实际海况的随机性和复杂性,工程中常用等效设计波方法^[23]进行浮体波浪荷载的计算,采用的设计波参数见表 2。

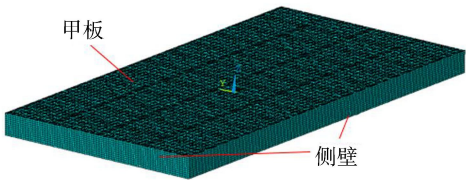
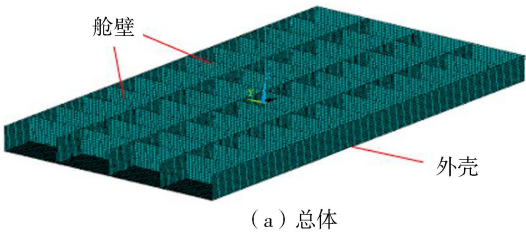


图 15 纵横板式浮箱内部布置

Fig. 15 Internal layout of floating tanks with vertical and horizontal plates

沿浮体纵向、横向提取各设计波下外壳底板不同路径上的节点应力,如图 16 所示。由图 17~19 可以看出,在 3 种设计波下,有无减摇板对浮体内部结构应力影响较小,应力分布基本一致,应力峰值最大差异为 23.17%。但由于减摇板的存在,原本作用在外壳侧壁的水压力作用在减摇板上,侧壁与底板或甲板相交处的应力集中有所减小,减摇板与外壳连接处出现新的应力集中位置。如图 20 所示,减摇板最大应力均出现在与外壳的连接位置,设计波 3 下的应力最大(151 MPa)。除连接位置外,减摇板自身应力较小,均在允许应力范围内。综上所述,增加减摇板对浮体浮

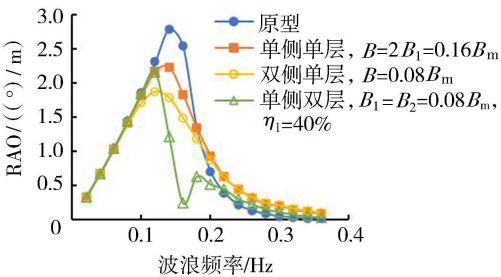


图 13 减摇板形式对浮箱横摇响应的影响

Fig. 13 Effect of the form of anti-shake plate on the horizontal roll response of floating tanks

表 1 极限海况下减摇板对浮箱横摇控制效果

Table 1 Control effect of anti-shake plate on the horizontal roll response of floating tanks under limit sea condition

减摇板形式	横摇有义值/(°)	控制效果/%
原型	4.38	
双侧单层减摇板	3.55	18.9
$\eta_1=40\%$ 单侧双层减摇板	3.64	16.9

图 14 浮箱结构有限元数值分析模型

Fig. 14 Finite element analysis model of floating tank structure

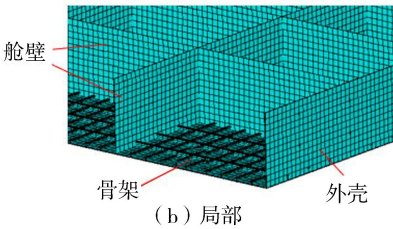


表 2 设计波参数

Table 2 Parameters of design wave

设计波编号	浪向/(°)	频率/Hz	相位/(°)	波高/m	控制荷载
1	0	0.10	-13	7.20	垂向弯矩/剪力
2	0	0.10	167	7.20	垂向弯矩/剪力
3	60	0.14	-64	7.28	扭矩

力。除连接位置外,减摇板自身应力较小,均在允许应力范围内。综上所述,增加减摇板对浮体浮

箱主体的应力影响较小,工程应用时主要应关注减摇板自身的强度及其与外壳连接处的强度。

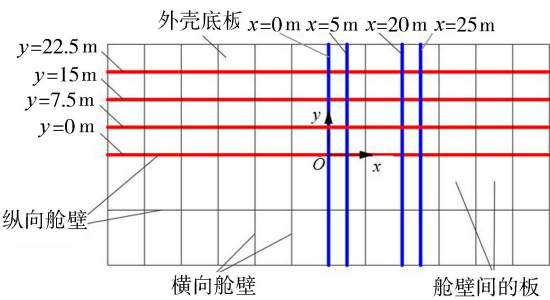


图 16 外壳底板应力路径示意图

Fig. 16 Schematic diagram of stress paths on shell bottom

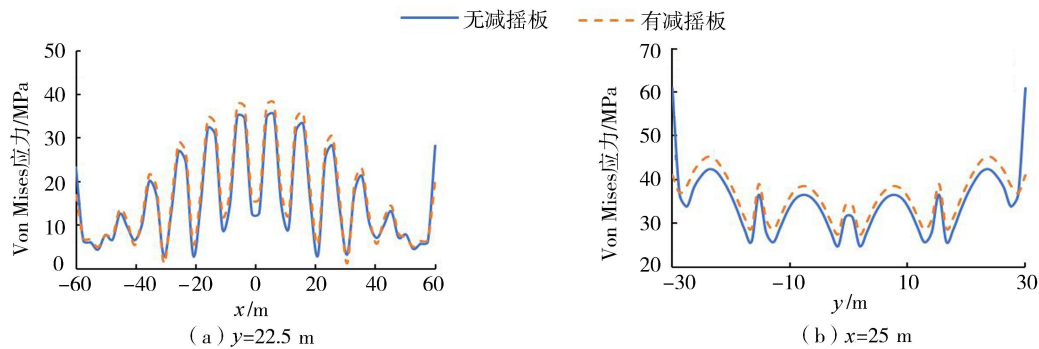


图 17 设计波 1 下浮体有无减摇板 Von Mises 应力对比

Fig. 17 Comparison of Von Mises stress of floating body with or without anti-shake plate under design wave 1

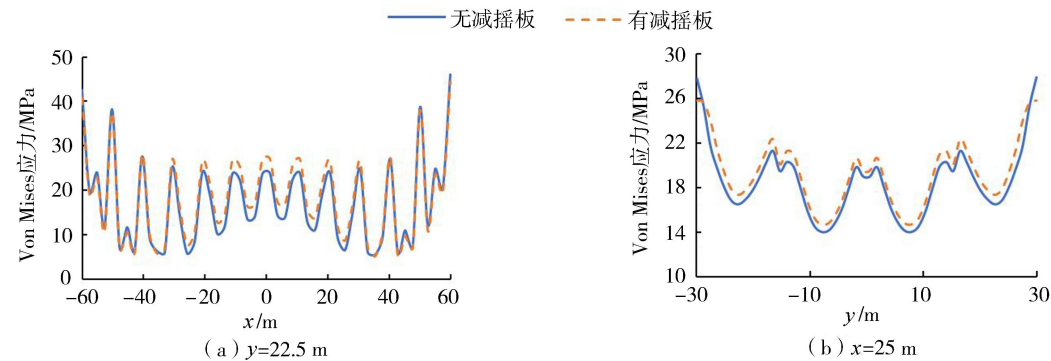


图 18 设计波 2 下浮体有无减摇板 Von Mises 应力对比

Fig. 18 Comparison of Von Mises stress of floating body with or without anti-shake plate under design wave 2

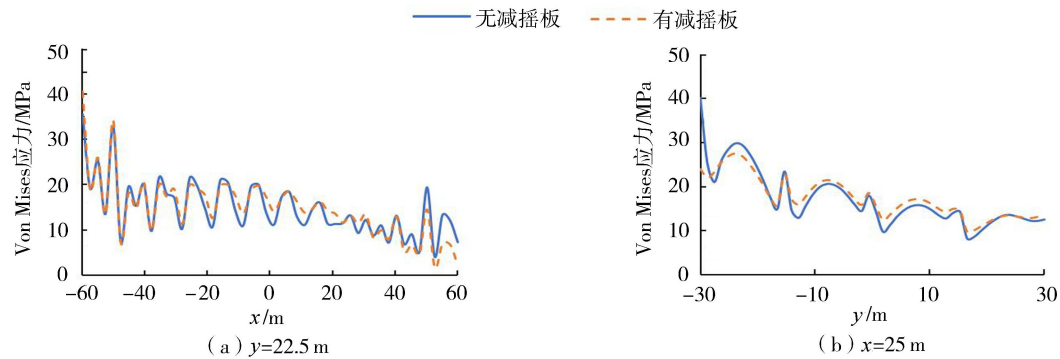


图 19 设计波 3 下浮体有无减摇板 Von Mises 应力对比

Fig. 19 Comparison of Von Mises stress of floating body with or without anti-shake plate under design wave 3

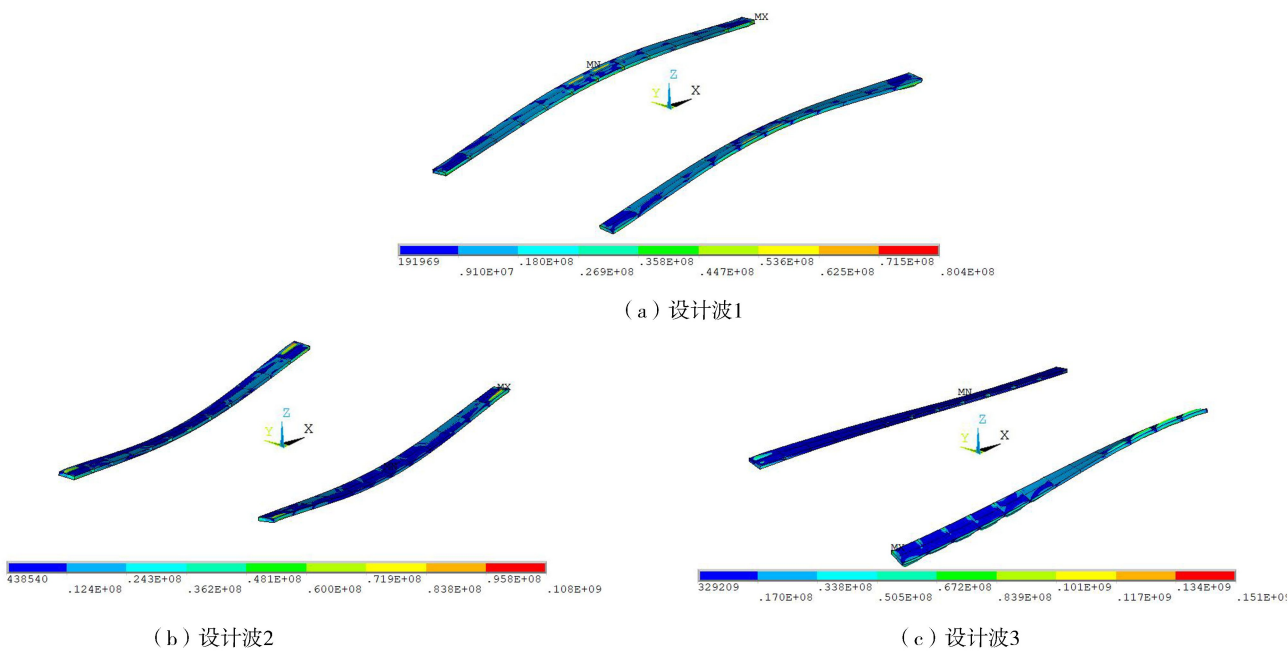


图 20 不同设计波下减摇板应力云图(单位:Pa)

Fig. 20 Stress nephogram of anti-shake plate under different design waves (unit: Pa)

6 结 论

- a. 根据马尔代夫芭环礁海域工程水文特点,提出了大型浮体基本形式及规模尺寸,基于波浪作用下浮箱纵摇以及横摇 RAO 响应特性分析,明确了工程海域的优选纵横比为 2 : 1。不同浪向下水动力计算结果显示,横摇 RAO 整体较纵摇明显,在工程应用中应注意减少浮箱横摇响应;艏摇响应在 45°时最显著,随波浪频率呈下降趋势。
- b. 浮箱侧面布置减摇板对其波浪作用下的水动力响应影响明显。浮箱吃水深度内布置减摇板有助于减少浮箱横摇响应,而减摇板沿浮箱底面齐平布置时引起的垂荡 RAO 响应增加了 35%。随减摇板宽度的增加,浮箱的垂荡、横摇和纵摇波浪响应均有所减小,其中横摇对减摇板宽度的变化尤为敏感。
- c. 在迎浪面和背浪面同时安装减摇板仅在特定安装高度时产生有效的减摇抑制效果,其他安装高度下浮箱 RAO 峰值可能超过原型。研究提出了单侧双层减摇板开孔布置方案,计算结果表明减摇板开度影响减摇效果,其中,上层减摇板开度 40% 时对浮箱横摇控制较好,极限海况下浮箱横摇有义值可降低 16.9%。
- d. 有无减摇板对典型波浪荷载作用下浮箱结构应力的影响较小,减摇板最大应力均出现在与外壳的连接位置处,工程应用时应关注减摇板自身及其与外壳的连接强度。

参考文献:

[1] XIE Zhuoyu, GU Xuekang, DING Jun, et al. Review on conceptual designs and key technologies of very large floating structures [J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(6) : 825-838.

[2] SUZUKI H. Overview of Mega-float; concept, design criteria, analysis, and design [J]. Marine Structures, 2005, 18(2) : 111-132.

[3] WAALS O J, BUNNIK T H J, OTTO W J. Model tests and numerical analysis for a floating Mega Island [C] //International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Madrid: American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51203: V001T01A016.

[4] 吴有生, 顾学康, 柳淑学, 等. 海洋超大型浮体重大科学问题的基础研究进展 [J]. 中国基础科学, 2017, 19(4) : 28-44. (WU Yousheng, GU Xuekang, LIU Shuxue, et al. Advances of basic research on the responses and safety of very large floating structures in complicated environment [J]. China Basic Science, 2017, 19(4) : 28-44. (in Chinese))

[5] 杨鹏, 顾学康. 超大型浮体模块水弹性响应和结构强度分析 [J]. 船舶力学, 2015, 19(5) : 553-565. (YANG Peng, GU Xuekang. Analysis on the hydroelastic responses and structural strength of VLFS module [J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19

- (5):553-565. (in Chinese))
- [6] 梁双令,郭欣杰. 浅水中海洋核动力平台低频响应分析[J]. 舰船科学技术,2019,41(10):124-128. (LIANG Shuangling, GUO Xinjie. Analysis on low frequency response of marine nuclear power platform in shallow water[J]. Ship Science and Technology,2019,41(10):124-128. (in Chinese))
- [7] 王言英. 深水浮式海洋平台水动力性能计算研究[J]. 大连理工大学学报,2011(6):837-845. (WANG Yanying. Research on computation of hydrodynamic performance for oceanic floating platform in deep water[J]. Journal of Dalian University of Technology,2011(6):837-845. (in Chinese))
- [8] 蔡新,张洪建. 基于 TMD 控制的浮式风力机稳定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):70-76. (CAI Xin, ZHANG Hongjian. Stability study of floating wind turbine based on TMD control[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):70-76. (in Chinese))
- [9] MIGUEL L P,GREGORIO I,LUIS C. A review of Very Large Floating Structures (VLFS) for coastal and offshore uses[J]. Ocean Engineering,2015,109:677-690.
- [10] 李良碧,张静怡,李嘉宾,等. 不同构型的超大型浮体物水动力分析和波浪载荷预报[J]. 海洋技术学报,2018,37(3):86-92. (LI Liangbi,ZHANG Jingyi,LI Jiabin,et al. Hydrodynamic analysis and wave load forecast of different types of very large floating structures[J]. Journal of Ocean Technology,2018,37(3):86-92. (in Chinese))
- [11] 袁杨. 超大型浮体水动力性能及系泊系统动力特性研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [12] 王亚香,张宁川. 刚性薄板在波浪场中的动力响应[J]. 中国水运,2018(10):234-236. (WANG Yaxiang, ZHANG Ningchuan. Dynamic response of rigid thin plate in wave filed[J]. China Water Transport,2018(10):234-236. (in Chinese))
- [13] 舒志,李润培,王志军. 箱式超大型浮体物在波浪中的运动响应研究[J]. 中国海洋平台,2002,17(3):1-5. (SHU Zhi,LI Runpei,WANG Zhijun. A study on the motion of very large floating structure in waves[J]. China Offshore Platform,2002,17(3):1-5. (in Chinese))
- [14] 罗若,刘祚秋,彭泽宇. 系泊浮箱运动稳定性影响因素分析[J]. 水运工程,2018(9):42-48. (LUO Ruo,LIU Zuoqi,PENG Zeyu. Impact factor analysis of motion stability of buoyancy tank mooring system[J]. Port & Waterway Engineering,2018(9):42-48. (in Chinese))
- [15] 陈剑文,王志东,付佳,等. 浅水中浮式栈桥单浮箱系泊系统及运动响应特性[J]. 舰船科学技术,2015,37(5):42-46. (CHEN Jianwen,WANG Zhidong,FU Jia,et al. Research on mooring system and motion response character of pontoon in floating pier system in shallow water[J]. Ship Science and Technology,2015,37(5):42-46. (in Chinese))
- [16] 徐剑峰,徐胜文,汪学锋,等. 超大型浮体单模块在浅水斜底系泊下的动态响应[J]. 舰船科学技术,2018,40(1):75-80. (XU Jianfeng,XU Shengwen,WANG Xuefeng,et al. Dynamic response of a moored VLFS's single module in shallow water and sloped seabed[J]. Ship Science and Technology,2018,40(1):75-80. (in Chinese))
- [17] MORISON J R,JOHNSON J W,SCHAAF S A. The force exerted by surface waves on piles[J]. Journal of Petroleum Technology,1950,2(5):149-154.
- [18] 沈晖华,时健,徐佳丽,等. 基于 Stacking 集成机器学习的波浪预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):354-358. (SHEN Huihua,SHI Jian,XU Jiali,et al. Wave forecasting algorithm with stacking ensemble machine learning method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(4):354-358. (in Chinese))
- [19] 凌杰,刘源,侯明君,等. 新型连岸浮式栈桥的运动响应对比分析[J]. 机械工程师,2017(8):29-30. (LING Jie,LIU Yuan,HOU Mingjun,et al. Comparative analysis of new-type motion response for shore floating pier[J]. Mechanical Engineer,2017(8):29-30. (in Chinese))
- [20] 薛米安,彭天成,朱爱蒙,等. 垂直隔板开孔率对液体晃荡影响的试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):23-30. (XUE Mi'an,PENG Tiancheng,ZHU Aimeng,et al. Experimental study on the effect of perforation rate of vertical baffle on liquid sloshing[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):23-30. (in Chinese))
- [21] CHAPMAN D A. The adjustment of fin size to minimise the ship induced pitching motion of a towed fish[J]. Ocean Engineering,1984,11(1):23-64.
- [22] 杜君峰,常安腾,王树青等. 半潜式平台垂荡响应抑制措施研究[J]. 海洋工程,2016,34(4):23-29. (DU Junfeng,CHANG Anteng,WANG Shuqing,et al. Measures to reduce the heave response of semi-submersible platforms[J]. The Ocean Engineering,2016,34(4):23-29. (in Chinese))
- [23] 中国船级社. 钢质海船入级规范[S]. 北京:人民交通出版社,2018.