

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.009

大型箱体浮式结构拖带动力响应物理模型试验研究

冯曦^{1,2}, 高子骋¹, 徐嘉言¹, 顾浩洋¹, 豆斐¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 江苏省近海智能探测装备与技术创新平台, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究大型箱体浮式结构在海上运输过程中的作业安全问题, 开展了正常作业条件下浮式结构拖带时的水动力响应物理模型试验, 以不规则波浪荷载作用下浮式结构的六自由度运动量为主要研究对象, 从各运动量谱的演变规律出发, 探讨了在不同有效波高、平均波周期和拖带速度情况下浮式结构的运动响应。结果表明: 迎浪拖带时, 纵摇与垂荡两自由度对不规则波浪荷载响应较为稳定, 且对平均波周期和拖带速度较为敏感; 随着平均波周期增大, 两者的运动量谱从多峰谱过渡为单峰谱, 谱形逐渐规则且束窄, 谱峰频率与波浪谱峰频率接近, 相对谱峰频率在1左右且随着平均波周期增大而增大; 随着拖带速度增大, 垂荡运动量谱的谱形逐渐尖陡, 谱峰密度、相对谱峰密度均增大, 水动力响应加剧; 垂荡最大可能距离和最大可能纵摇角度均随有效波高增大而增大, 最大可能纵摇角度随拖带速度增大而减小。

关键词: 大型箱体浮式结构; 拖带物理模型试验; 不规则波; 水动力响应

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)05-0067-09

Physical model test on dynamic response of large box floating structure under towing

FENG Xi^{1,2}, GAO Zicheng¹, XU Jiayan¹, GU Haoyang¹, DOU Fei¹

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

2. Jiangsu Province Offshore Intelligent Detection Equipment and Technology Innovation Platform, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the operational safety of large box floating structures during sea transportation, a physical experiment of hydrodynamic response of floating structures during reverse towing under normal operating conditions was carried out. From perspective of the evolution law of motion spectrum, the six-degree-of-freedom movement of floating structures under irregular wave action was regarded as the studying object. The motion response of the floating structure under the change of significant wave height, mean wave period and towing speed was discussed. The results show that pitch and heave yield a stationary response to the irregular wave load, and are sensitive to average wave period and towing speed. With the increase of the mean wave period, the motion spectra of the pitch and heave transition from multi-peak spectrum to single-peak spectrum, with the shape of the spectrum turning regular and narrowing gradually. In addition, the peak frequency is close to that of the wave spectrum, and the relative peak frequency is close to 1 and increases with the increased mean wave period. With the increase of towing speed, the shape of heave motion spectrum is gradually sharp and steep, and the relative spectral peak as well as the spectrum peak density grows, indicating intensified hydrodynamic response. Last, the maximum possible heave distance and the maximum possible pitch angle increase with the enhanced wave height, and the maximum possible pitch angle decreases with raised towing speed.

Key words: large box floating structure; towing laboratory experiment; irregular wave; hydrodynamic response

大型浮式结构(large floating structure, LFS)具有移动性强、抗震性好、对自然环境污染小的优点, 可用于构建新型漂浮城市、海洋牧场、海上石油平台、海上军事基地等, 有助于节能减排和海洋环境保护, 也便于合理利用海洋空间、节省陆域资源, 已成为近些年的研究热点^[1-5]。LFS一般在陆上预制成型后运输到外海施

基金项目: 国家重点研发计划2022年度“智能机器人”重点专项(2022YFB4703401); 装备预研教育部联合基金项目(8091B0221231); 江苏省近海智能探测装备与技术创新平台开放课题项目(202202)

作者简介: 冯曦(1987—), 女, 教授, 博士, 主要从事近海水动力模拟研究。E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

引用本文: 冯曦, 高子骋, 徐嘉言, 等. 大型箱体浮式结构拖带动力响应物理模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 67-75.

FENG Xi, GAO Zicheng, XU Jiayan, et al. Physical model test on dynamic response of large box floating structure under towing[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 67-75.

工地点,由于 LFS 尺寸大、惯性力强,在复杂海洋环境中其往往对风浪的运动响应较常规浮体更为剧烈,因而航行和作业的危险系数更大、难度更高^[6]。因此,有必要针对 LFS 在拖带过程中的运动特性与动力响应开展相应研究,为保障其运输和安装过程中的作业安全提供理论支撑。

我国海上 LFS 的研究工作始于 20 世纪 80 年代,吴有生院士率先提出了三维水弹性力学理论,为 LFS 与波浪作用研究提供了重要的理论基础^[7]。近年来研究者们从数值模拟、物理模型试验等方面开展了研究,并取得了一定的成果。

数值模拟方面,不少学者通过构建精细化的流固耦合模式,开展了波浪荷载下浮体结构的受力响应研究。何良德等^[8]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,分析了浮箱的纵横比和减摇板布置方式对 LFS 水动力响应特性的影响。He 等^[9]通过搭建二维大跨度浮桥数值模型,发现了防浪板的数量和长度与横摇及其共振和垂荡的关系。Tang 等^[10]也对浅水重力波作用下浮动弹性板式 LFS 的弯曲变形进行了研究。陈善群等^[11]采用 SPH 方法结合 MoorDyn 动态系泊缆索模型,对波浪驱动下系泊箱式浮体的运动响应及系泊力进行了研究。陈德春等^[12]推导了系泊浮体受到碰撞而产生的冲击力数学物理方程。

物理模型试验方面,Dobrochinski 等^[13]针对一艘受管制的巴拿马型集装箱船开展了 1:100 的物理模型试验,测量了模型在规则、不规则长波浪和不规则短波浪作用下的受力情况,分析并验证了数值工具在确定停泊系统波浪力问题上的适用性。Xiang 等^[14]以水浮桥的浮动基础为例,通过在波浪水槽内搭建物理模型的方式,研究了可有效抑制浮体在波浪荷载下发生共振反应的系泊方式。李德江等^[15]基于 ADAMS 平台建立了描述双船联合举升过程中运动特征的虚拟样机,据此对双船联合举升多体协同作业系统的横摇稳定性进行了研究,通过物理模型试验和虚拟样机交叉驱动方式高效准确得到了上部组块横摇运动的时域响应规律,并验证了举升系统中主动补偿装置简化的合理性。

从上述研究可以看出,目前已有研究多专注于浮体在系泊状态下的运动响应,而对在海上航行过程中或拖带状态下的浮式结构运动响应的研究较少。此外,上述研究中 LFS 的结构多为梁式或扁平式、薄板式,针对高度不容忽视的 LFS,如沉箱式预制结构,关注较少。

本文以大型箱体浮式结构在波浪荷载下的动力响应为主要目标,开展了不规则波浪作用下大型箱体浮式结构拖带物理模型试验,分析了多种波况和航运速度组合下该浮式结构的水动力响应,可为未来超大型海上预制装备或平台的拖带航行提供参考。

1 试验方法

1.1 试验布置

试验在河海大学水灾害防御全国重点实验室波浪港池中进行,大型箱体浮式结构模型(以下简称“模型”)的试验装置及场地布置如图 1 所示。港池长 60 m、宽 40 m、深 1.2 m,静水水深 0.4 m。港池四周设置了消浪缓坡及消浪网,港池内布设有一台可移动造波机,可通过计算机控制产生试验所需的波浪。拖带系统由固定式轨道与运动小车构成(图 1(a)),模型的拖带方式如图 1(b)所示(图中 α 为造波机前沿面与牵引缆绳的夹角,本文仅研究迎浪反拖情况, $\alpha=60^\circ$)。试验中波高由电阻式波高仪进行测量,共布置 8 根波高仪,并通过计算机控制数据采集和分析测量结果。

1.2 结构模型

本文所研究的 LFS 原型为一大型箱体浮式结构,大小为 60 m×20 m×12 m,其长度 60 m 相当于常规预制沉箱的 3 倍,对预制化浮式箱体而言属于大型结构。按照 JTS/T 231—2021《水运工程模拟技术规范》及试验条件,试验采用重力相似准则,试验比尺为 1:100。模型采用有机玻璃制作,为中空矩形模块,用砝码配重,如图 2(a)(b)所示。模型质量为 10.3 kg,吃水深度为 8.3 cm,重心位置相对 x 、 y 、 z 轴的质量惯性矩分别为 0.062、0.360、0.370 kg·m²,横摇和纵摇自振周期分别为 0.85、0.88 s。试验前,首先对模型在浮运时的质量及质量分布进行了砝码压载配重率定,保证模型和原型的质量和惯性矩均满足相似性要求。考虑在有轨拖带时,模型迎浪前进,运动量可参照船舶六自由度进行定义(图 2(a)),可分为纵荡(Δx)、横荡(Δy)、垂荡(Δz)、横摇(θ_x)、纵摇(θ_y)和艏摇(θ_z)。

试验拖带装置为自主研发。试验开始前,模型放置于起始端的固定泊位处。拖带系统上的拖带小车由安装在轨道一端的直流电机通过钢缆进行拖带,按照工况设置的速度前进。小车下部焊接一根竖杆,竖杆后

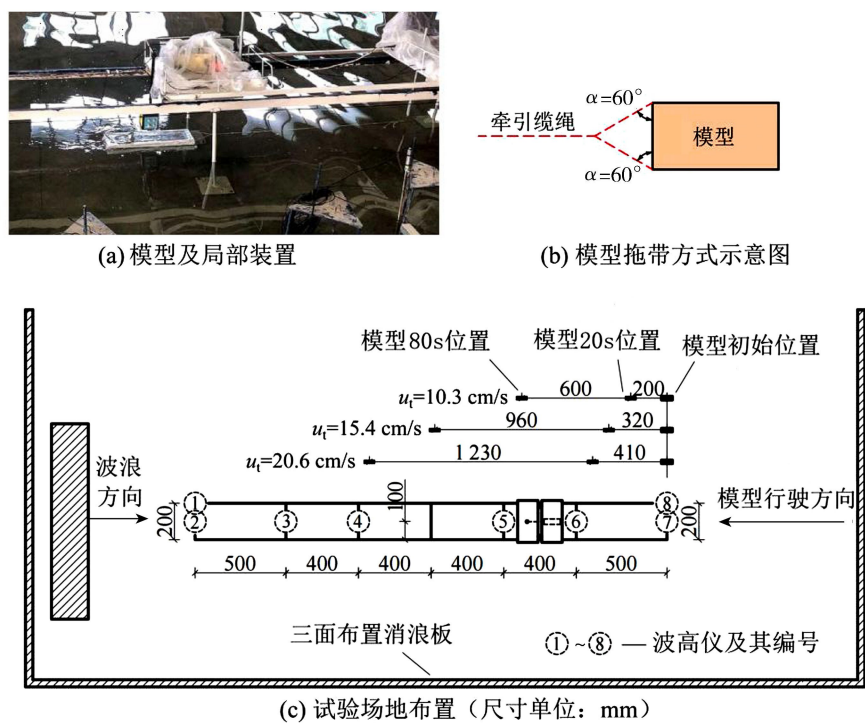


图 1 试验装置及场地布置

Fig. 1 Experimental device and site layout

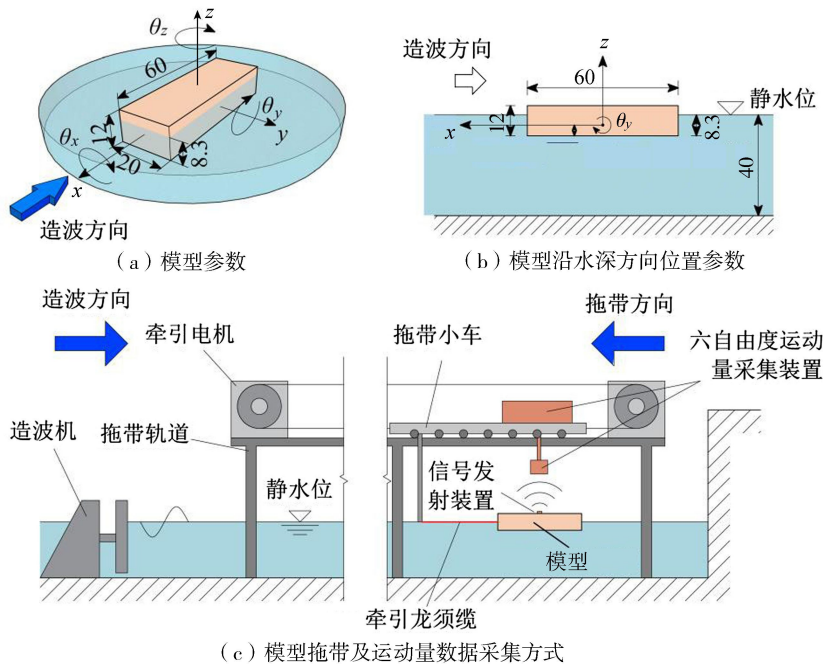


图 2 模型及拖带装置示意图(单位:cm)

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental model and towing device (unit: cm)

绑接牵引龙须缆,龙须缆连接模型,连接方式如图 1(b)所示。

小车上部搭载六自由度运动量采集装置,该装置由南京水利科学研究院研制。模型上部安装有配套的信号发射装置,拖带过程中,信号发射装置持续发射信号,因而信号接收装置能够持续且同步地获取模型在拖带过程中的姿态数据,并传输到终端计算机进行处理,如图 2(c)所示。

造波机开始造浪后,通过全局摄像头和浪高仪监测港池内波浪,待波浪稳定地传播至整个观测区时,启动拖带小车,将其运动速度平缓调节到设计速度进行拖带试验。待模型的航行速度相对稳定后,六自由度运动量采集装置开始采集模型运动响应数据。小车运行速度通过改变输入直流电电压进行控制,通过改变直

流电机接线正反实现轨道上小车运行方向的改变。

1.3 试验工况

针对迎浪拖带情况,根据平均波周期(T_m)和有效波高(H_s)分别设计了6组不规则波浪工况,结合3组拖带速度(u_t),共进行了15组试验,每组进行2次或3次重复试验,相关工况见表1。考虑到预制浮体结构通常在天气状况良好时运输,设计波况依据我国华南海域特点及海上运输极端海况(最大承受海况)3级海况设定。拖带速度采用正常海运拖带速度(原型为2~4 kn)。经过试验比尺换算, H_s 在1.00~1.25 cm之间, T_m 在0.6~0.8 s之间。在试验港池内静水深(h)为0.4 m时,经计算该水深条件属于有限水深至深水范围,符合正常天气情况下浮体结构拖带的水动力环境。

表1 正向入射波作用下物理模型试验工况

Table 1 Experimental setup under the action of forward incident wave

工况	有效波高/cm	波陡	平均波周期/s	相对水深	平均波速/(cm/s)	拖带速度/(cm/s)
1	1.00	0.040	0.7	0.52	108.99	10.3,15.4,20.6
2	1.25	0.068	0.6	0.71	93.65	10.3,15.4,20.6
3	1.25	0.050	0.7	0.52	108.99	10.3,15.4,20.6
4	1.25	0.038	0.8	0.40	123.38	10.3,15.4,20.6
5	1.50	0.060	0.7	0.52	108.99	10.3,15.4,20.6

注:本文试验波况属有限水深至深水二阶非线性波范畴。

造波机采用 JONSWAP 谱进行不规则波的构造,为消除波浪多次反射的影响,采用间歇式生波模式。针对不规则波每组试验造波持续约为3 min,波数约为200个,停机后待水面平静再进行下一组试验。每组工况重复2次或3次试验以保证数据的可靠度要求,试验采样时间间隔为0.01 s。

1.4 数据处理

试验前先对造波机参数进行了率定,通过波高仪采集波面过程测算、反馈造波机输入参数,重复迭代使波高和波周期贴近设计值。根据率定的波浪参数采集波面数据进行波浪谱分析,过程如下:①对于某一通道采集到的波面数据,利用快速傅里叶变换生成粗谱,并对粗谱进行平滑处理;②针对2次或3次重复性试验,对每个通道平滑后的波浪谱进行平均;③针对某一波浪工况,对观测区波浪谱进行空间平均,利用8个通道处的波浪谱生成平均波浪谱,并据此确定观测区谱峰频率。

针对模型的水动力响应,选取平稳段六自由度运动量开展频域分析。平稳时间段为造波机启动后20~80 s之间。数据处理流程如下:①对试验原始数据进行降噪处理;②由于试验港池内存在液面晃荡、增水等无法完全消除的高频随机扰动现象,可通过带通滤波消除,指定阻带高、低频率分别为0.25 Hz和50 Hz;③对滤波后的数据采用快速傅里叶变换进行频谱分析;④在3组重复试验数据基础上,进行平滑并取值得到最终的运动量谱。

2 拖带过程中大型箱体浮式结构的运动量谱演变特征

首先对各组试验的波浪谱和运动量谱进行对比分析。试验结果表明,各工况中,模型在纵摇与垂荡两自由度方向上对波浪荷载具有较为稳定且显著的响应。图3对比了六自由度在 $H_s=1.0$ cm、 $T_m=0.7$ s、 $u_t=15.4$ cm/s工况下的运动量谱和波浪谱(图中 S_{LFS} 、 S_w 分别为运动量谱密度(蓝线)和波浪谱密度(红线), $f_{p,LFS}$ 、 $f_{p,w}$ 分别为运动量谱峰频率和波浪谱峰频率,即峰值频率)。由图3可见,该波况下,浪能集中在0.8~3 Hz区间,谱峰频率为1.128 Hz,谱峰密度为0.13 cm²/s,呈现出典型的单峰窄谱特征。各自由度能量在频域范围内分布较为分散,除在波浪谱峰频率左右也出现最大峰值外,在高频区间(3~6 Hz)出现多个峰值,且基本位于3.9 Hz附近。此外,运动频率还出现向低频区间频移的趋势,能量在0.5 Hz处也有聚集。试验数据显示,当波况发生改变时,运动量谱特征存在差异,表现为大多数自由度在第一峰值处的谱峰密度存在较大起伏,谱形差异大,除垂荡和纵摇以外,多峰值谱在频域内的分布没有明显规律。纵摇和垂荡在各组试验中对波浪谱均有较显著响应,其第一峰值或第二峰值总位于 $f_{p,w}$ 或 $3f_{p,w}$ 处。下文将对垂荡与纵摇这两个自由度开展敏感度分析。

2.1 入射波平均波周期的影响

图4和图5分别为有效波高 $H_s=1.25$ cm时,不同平均波周期 T_m 和不同拖带速度 u_t 情况下的垂荡和纵

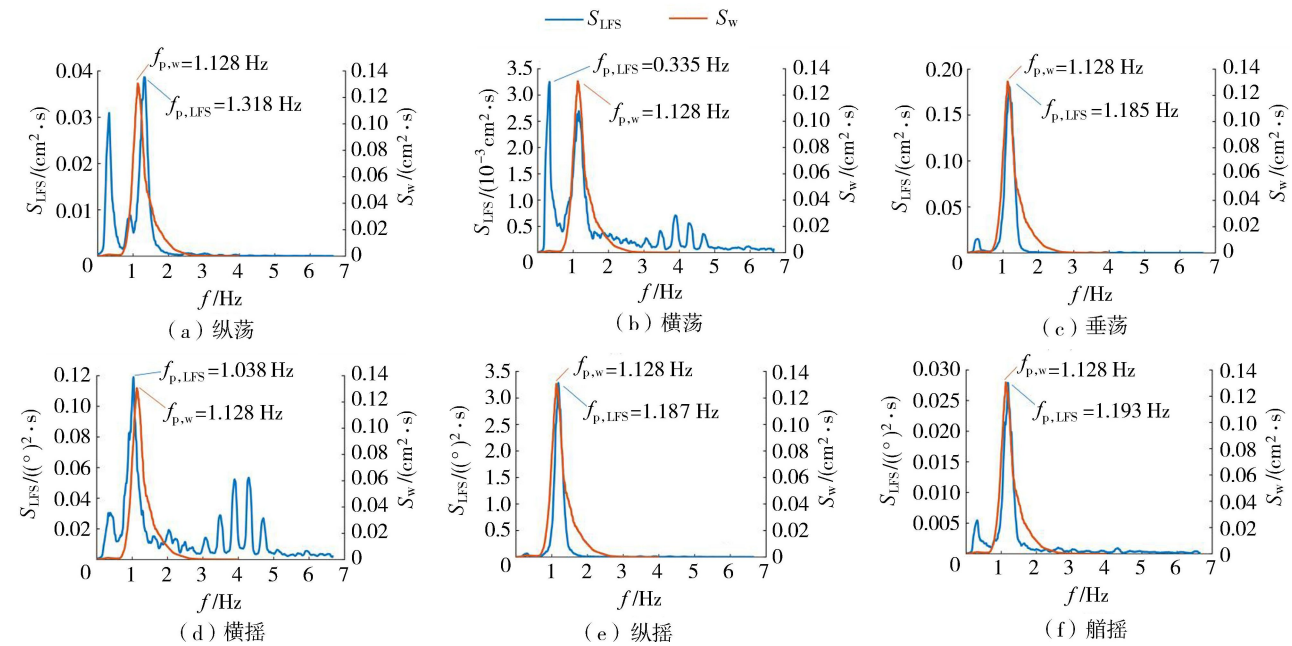


图 3 六自由度运动量谱与波浪谱对比

Fig. 3 Comparison between six-DOF spectra and wave spectra

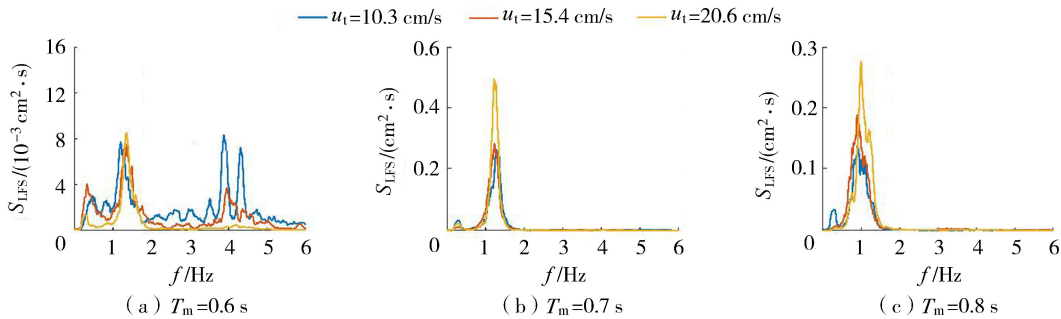


图 4 垂荡运动量谱密度随平均波周期和拖带速度的变化 ($H_s=1.25\text{ cm}$)

Fig. 4 Variation of heave motion spectrum density with mean wave period and towing speed ($H_s=1.25\text{ cm}$)

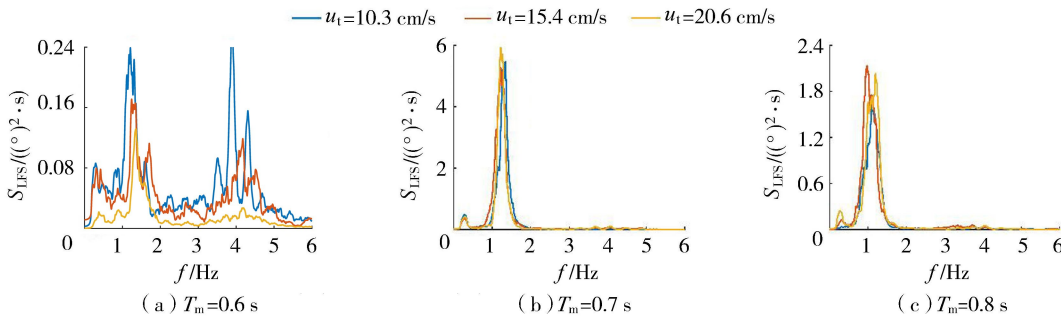


图 5 纵摇运动量谱密度随平均波周期和拖带速度的变化 ($H_s=1.25\text{ cm}$)

Fig. 5 Variation of pitch motion spectrum density with mean wave period and towing speed ($H_s=1.25\text{ cm}$)

摇运动量谱密度演变特征。由此可见,当 $T_m=0.6\text{ s}$ 时,在 u_t 较小时垂荡运动量谱发生较大范围的能量频移;当 T_m 增大时,高频能量迅速减小,能量在波浪谱峰对应的频域区间集中,并呈现出单峰谱的态势。运动量谱密度第一峰值的谱峰频率与 $f_{p,w}$ 相近,且随着 T_m 增大, $f_{p,LFS}$ 单调递减且垂荡的运动幅度先增大后减小。当 $T_m=0.7\text{ s}$ 时(图 4(b)),垂荡的谱峰密度 ($S_{f_{p,LFS}}$) 是 $T_m=0.6\text{ s}$ 波况下的近 20 倍(图 4(a)),当 $T_m=0.8\text{ s}$ 时, $S_{f_{p,LFS}}$ 略有下降(图 4(c))。这可能与 $T_m=0.7\text{ s}$ 波况下 $f_{p,w}$ 与浮式结构的固有频率接近,产生共振相关。

与垂荡运动量谱相似,随着 T_m 由 0.6 s 增大到 0.8 s ,谱型从多峰谱收敛为单峰谱,且纵摇运动量谱密度

第一峰值均呈现先增大后减小的趋势,在 $T_m=0.7\text{ s}$ 时,运动量谱最为尖陡,能量集中在 $f_{p,w}$ 附近,且谱峰能量最大。同时,随着平均波周期增大,纵摇运动量谱密度第一峰值所处谱峰频率($f_{p,LFS}$)递减。

2.2 入射波有效波高的影响

图6和图7分别为 $T_m=0.7\text{ s}$ 时,不同有效波高 H_s 、不同拖带速度 u_t 垂荡和纵摇的运动量谱密度的变化规律。图6显示,在 $T_m=0.7\text{ s}$ 时,除拖带速度较小时低频处偶尔出现较小谱密度第二峰值外,所有谱形均为单峰谱。垂荡最大峰值对应的 $S_{fp,LFS}$ 和 $f_{p,LFS}$ 随 H_s 变化均不显著。 S_{LFS} 整体随着 H_s 增长呈现出略微增长的趋势,当 $H_s=1.25\text{ cm}$ 时 $S_{fp,LFS}$ 达到最大,此后随着 H_s 继续增大反而略有降低。 $f_{p,LFS}$ 随着 H_s 的变化规律与 $S_{fp,LFS}$ 相仿。综合考虑 u_t 与 H_s 的联合影响后,发现大波高叠加较快的拖带速度,使得浮式结构的垂荡幅度明显增大。例如,当 $H_s=1.00\text{ cm}$ 、 $u_t=10.3\text{ cm/s}$ 时, $S_{fp,LFS}$ 仅为 $0.1\text{ cm}^2\cdot\text{s}$,而当 $H_s=1.50\text{ cm}$ 、 $u_t=20.6\text{ cm/s}$ 时, $S_{fp,LFS}$ 能达 $0.3\text{ cm}^2\cdot\text{s}$ 。

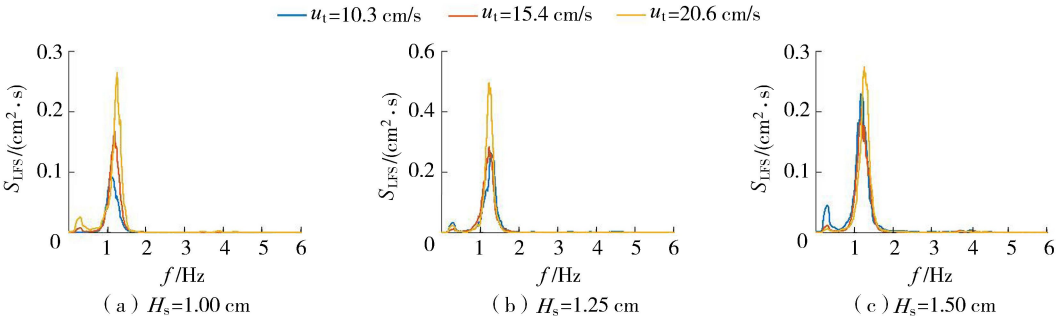


图6 垂荡运动量谱密度随有效波高和拖带速度的变化 ($T_m=0.7\text{ s}$)

Fig.6 Variation of heave motion spectrum density with significant wave height and towing speed ($T_m=0.7\text{ s}$)

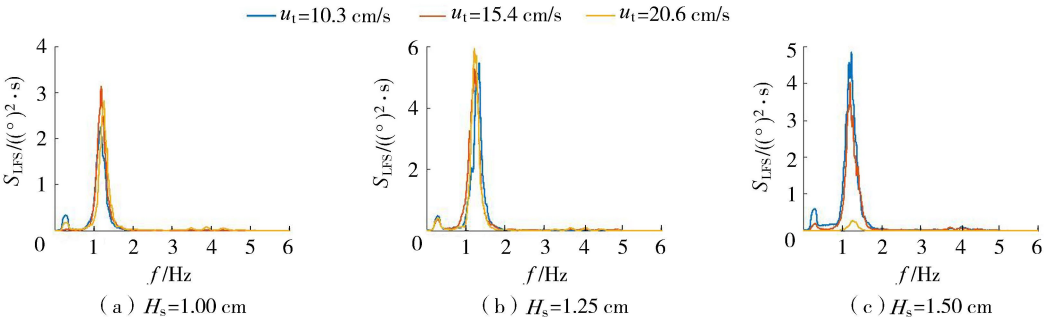


图7 纵摇运动量谱密度随有效波高和拖带速度的变化 ($T_m=0.7\text{ s}$)

Fig.7 Variation of pitch motion spectrum density with significant wave height and towing speed ($T_m=0.7\text{ s}$)

与垂荡相仿,纵摇在上述工况下也表现出单峰窄谱的特性(图7)。但从有效波高 H_s 的影响来看,单峰谱的 $S_{fp,LFS}$ 和 $f_{p,LFS}$ 随着 H_s 增大呈现出先增大后减小的趋势,但整体变化规律不显著。其中 $S_{fp,LFS}$ 变幅在 $2\sim6\text{ (}^\circ\text{)}^2\cdot\text{s}$,平均值在 $3\text{ (}^\circ\text{)}^2\cdot\text{s}$ 左右。不同于垂荡,综合考虑 u_t 与 H_s 的联合影响后,纵摇的振幅并无显著变化。

2.3 拖带速度的影响

从上述分析可见,拖带速度 u_t 对于模型在波浪荷载作用下的水动力响应有着显著影响。在平均波周期较大时($T_m=0.7\sim0.8\text{ s}$),垂荡的谱密度 S_{LFS} 随着 u_t 增大而增大。本文试验中,当 u_t 从 10.3 cm/s 增大至 20.6 cm/s 时, S_{LFS} 增长率为 $33\%\sim48\%$ 。在平均波周期较小时($T_m=0.6\text{ s}$),垂荡的 S_{LFS} 在 $f_{p,w}$ 处变化不显著;而高频部分的能量则随着 u_t 增大急剧衰减,至 $u_t=20.6\text{ cm/s}$ 时,高频峰值极小。与之相反,随着 u_t 的增大,垂荡的谱峰频率 $f_{p,LFS}$ 逐渐递增。

与垂荡相仿的是,在平均波周期较小时($T_m=0.6\text{ s}$),纵摇的高频部分能量随着拖带速度的增大也急剧衰减。而随着拖带速度的增大, $f_{p,LFS}$ 在逐渐递增。与垂荡不同的是, S_{LFS} 随着 u_t 增大呈现出减小趋势。在 $T_m=0.7\text{ s}$ 、 $H_s=1.25\text{ cm}$ 波况下,当 u_t 从 10.3 cm/s 增大至 20.6 cm/s 时, S_{LFS} 最大减小了 33% 。

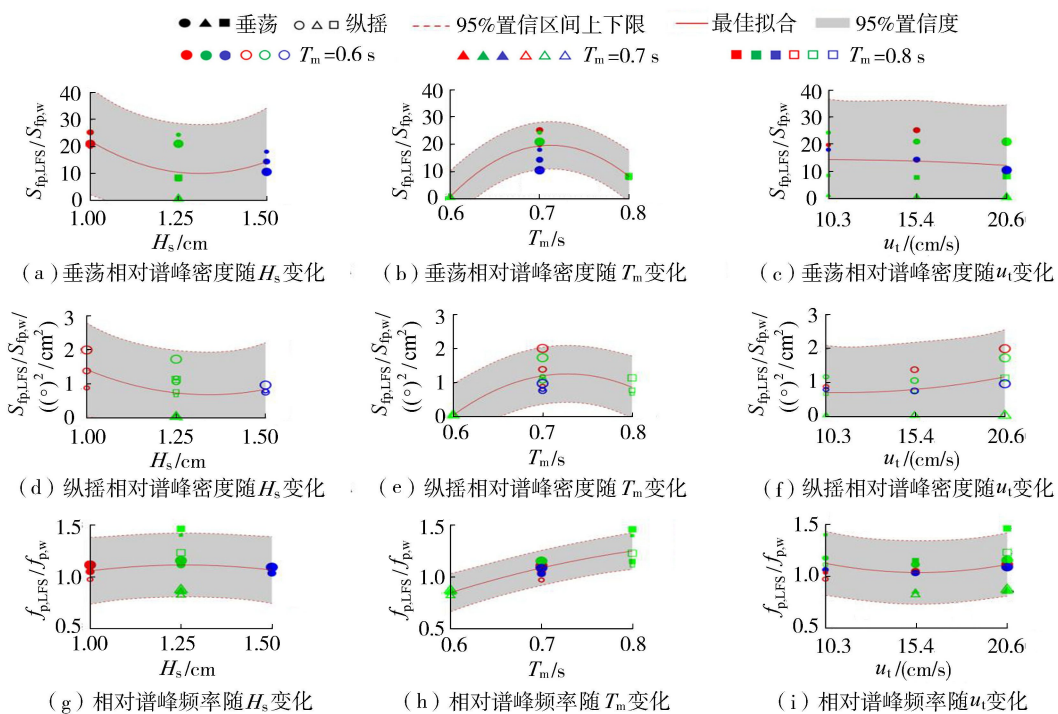
如图6和图7所示,有效波高和平均波周期一定时($H_s=1.25\text{ cm}$, $T_m=0.6\text{ s}$),运动量谱在浮体结构较低

速运行时表现出双峰谱特征,在较高速运行时表现出单峰谱特征。此外,当浮体结构以 10.3 cm/s 速度运行时,纵摇和垂荡的最大峰值出现在 3.9 Hz、即 $3f_{p,w}$ 处,第二峰值出现在 $f_{p,w}$ 处,略低于最大峰值。随着拖带速度的增大,各峰值均降低,其中高频处的峰值迅速衰减,使得第一和第二峰值的相对高度发生置换,第一峰值出现在 $f_{p,w}$ 处,且随着航速增大,优势凸显。值得一提的是,低频处(约 $0.5f_{p,w}$)也存在能量汇集区,相较第一和第二峰值,低频部分的能量随航速增大而衰减得较慢。

3 讨 论

3.1 运动量谱与波浪谱特征参数的相关关系

图 8 从运动量谱与波浪谱特征参数角度体现了模型对不规则波浪荷载的响应。本文采用运动量谱峰密度与波浪谱峰密度的比值(相对谱峰密度 $S_{fp,LFS}/S_{fp,w}$)作为特征参数来衡量外部环境要素变化情况下浮式结构水动力响应的剧烈程度,采用单峰运动量谱峰频率与波浪谱峰频率的比值(相对谱峰频率 $f_{p,LFS}/f_{p,w}$)来比较在不同波况和拖带速度情况下的变化特征。



注:实心图标表示垂荡,空心图标表示纵摇;红色、绿色、蓝色分别表示 $H_s = 1.00, 1.25, 1.50$ cm;
图标大小(小、中、大)分别表示 $u_t = 10.3, 15.4, 20.6$ cm/s。

图 8 运动量谱与波浪谱特征参数相关关系

Fig. 8 Correlation between the kinematic volume spectrum and the characteristic parameters of the wave spectrum

由垂荡的相对谱峰密度(图 8(a)(b)(c))可见, $S_{fp,LFS}/S_{fp,w}$ 随着 H_s 增大而减小,随着 T_m 增大时先增大后减小,随着 u_t 增大而增大,但变化趋势存在较大的不确定性。此外,除 $T_m = 0.6$ s 波况外, $S_{fp,LFS}/S_{fp,w}$ 在 0.5 ~ 1 之间,在 $T_m = 0.7$ s 波况下,普遍大于 1。

由纵摇的相对谱峰密度(图 8(d)(e)(f))可见,在 H_s 、 T_m 影响下, $S_{fp,LFS}/S_{fp,w}$ 表现出与垂荡的相对谱峰密度类似的规律,但其随 u_t 的变化规律与垂荡相反,即随 u_t 增大呈下降趋势。

不同于谱峰密度表现出的较大的不确定性, $f_{p,LFS}/f_{p,w}$ 较稳定,在 0.75 ~ 1.5 区间内浮动,再次证明垂荡和纵摇两自由度对不规则波浪具有稳定的响应和同频共振的特点。随着 T_m 的增大(图 8(h)), $f_{p,LFS}/f_{p,w}$ 线性递增。 $f_{p,LFS}/f_{p,w}$ 随着 H_s 、 T_m 变化并无明显变化趋势(图 8(g)(i))。

3.2 最大可能运动量

为了进一步分析大型箱体浮式结构在拖带过程中的安全性和稳定性,本文比较了波况和拖带速度对模型最大可能垂荡距离和最大可能纵摇角度的影响(图 9)。对于不规则波浪影响下可能出现的最大自由度可

基于运动量谱进行推求:

$$\zeta_{\max} = \sqrt{2\sigma_{\zeta}^2 \ln\left(\frac{t_s}{T_m}\right)}$$

(1)

其中

$$\sigma_{\zeta}^2 = \sum_{i=1}^N S(f_i) \Delta f$$

式中: $\zeta_{\max}$ 为最大可能自由度,本文指垂荡距离(Δz)或最大可能纵摇角度(θ_y); t_s 为运动响应持续时长,本文取平稳观测段; $S(f_i)$ 为自由度谱密度; Δf 为频率间隔; f_i 为某段频率的中位数; N 为频谱频率分段总数。

图9为 Δz 对波参数和拖带速度的响应,可见 Δz 随着 T_m 或 H_s 增大,均呈现逐渐增大后收敛的趋势。在小波高、短周期不规则波作用下, Δz 变幅相对较小,不超过0.5 cm,当 $T_m=0.7$ s、 $H_s=1.25$ cm时, $\Delta z \approx H_s$ 。 Δz 对拖带速度的敏感度不高,在拖带速度较小时, Δz 分布较分散,最大差异超0.5 cm。

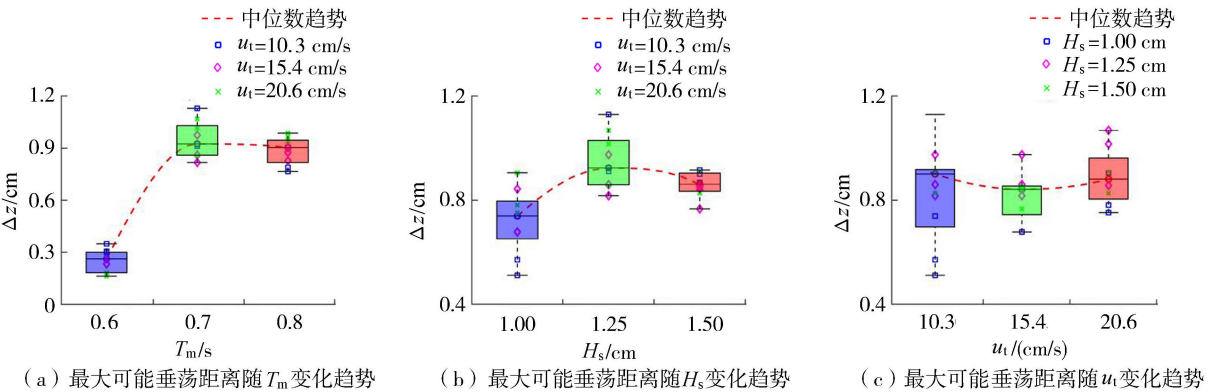


图9 最大可能垂荡距离与 T_m 、 H_s 和 u_t 的关系

Fig. 9 Relationship between maximum possible heave distance and T_m , H_s and u_t

图10为 θ_y 对波参数和拖带速度的响应,可见 θ_y 随着 H_s 增大而增大,随 u_t 加快而减小,随着 T_m 变化先增大后减小。整体而言,针对本文试验采用的模型, θ_y 跨度在 $2^\circ \sim 4^\circ$ 之间;在小波高、低航速下, θ_y 的变幅较大;在 $T_m=0.7$ s时 θ_y 最大可超 4° 。

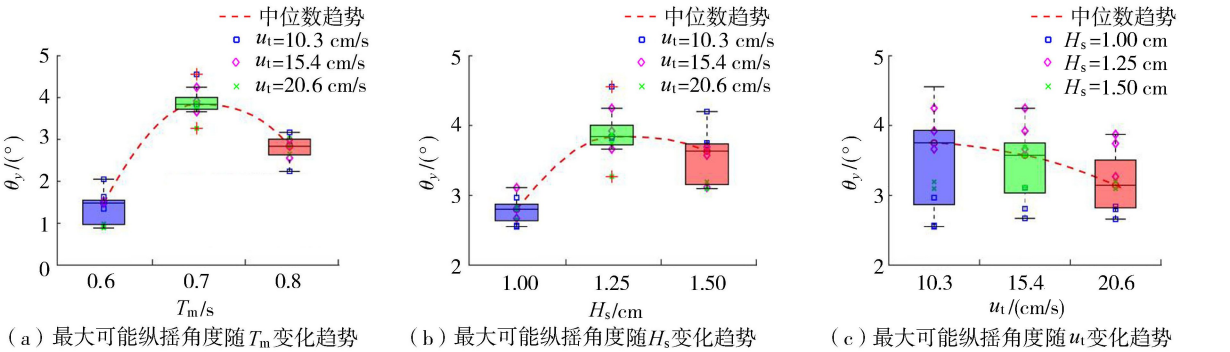


图10 最大可能纵摇角度与 T_m 、 H_s 和 u_t 的关系

Fig. 10 Relationship between maximum possible pitch angle and T_m , H_s and u_t

4 结 论

a. 在六自由度中,纵摇与垂荡两自由度对不规则波浪荷载响应较为稳定;相较于其他四自由度,纵摇与垂荡的运动量谱存在明显的峰值,且相应的运动量谱峰频率与波浪谱峰频率非常接近,二者与波浪荷载发生共振现象。

b. 随着平均波周期增大,纵摇与垂荡两自由度的谱形逐渐稳定且束窄,从多峰谱过渡为单峰谱;运动量谱的谱峰频率也随之减小,而相对谱峰频率增大,且左右摆动幅度减小,趋于固定;最大可能垂荡距离有所增大。

c. 随着有效波高的增大,从运动量谱的相对谱峰密度来看,垂荡和纵摇响应反而降低;入射波有效波高

对纵摇和垂荡的谱峰频率基本无影响,相对谱峰频率始终保持在 1 左右;最大可能垂荡距离和最大可能纵摇角度均增大。

d. 随着拖带速度增大,垂荡运动量谱的谱形逐渐尖陡,谱峰密度、相对谱峰密度均增大,水动力响应加剧;与之相反,拖带速度对运动量谱峰频率无显著影响,且纵摇的水动力响应在减弱,最大可能纵摇角度随拖带速度增大而下降。

参考文献:

[1] 杨红生,章守宇,张秀梅,等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报,2019,43(4):1255-1262. (YANG Hongsheng,ZHANG Shouyu,ZHANG Xiumei,et al. Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China [J]. Journal of Fisheries of China,2019,43(4):1255-1262. (in Chinese))

[2] 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))

[3] MCALLISTER K R . Mobile offshore bases:an overview of recent research[J]. Journal of Marine Science and Technology,1997,2(3):173-181.

[4] WANG S Z. Analytical solutions for the dynamic analysis of a modular floating structure for urban expansion[J]. Ocean Engineering,2022,266:112878.

[5] RIJNSDROP D P, WOLGAMOT H, ZIJLEMA M. Non-hydrostatic modelling of the wave-induced response of moored floating structures in coastal waters[J]. Coastal Engineering,2022,177:104195.

[6] WANG G,DRIMER N,GOLDFELD Y. Modular floating structures (MFS) for offshore dwelling a hydrodynamic analysis in the frequency domain[J]. Ocean Engineering,2020,216:107996.

[7] WU Y. Hydroelasticity of floating bodies[D]. London:University of Brunel,1984.

[8] 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. (in Chinese))

[9] HE Y K,JI W Y,JIA Y,et al. Hydrodynamic performance of a continuous floating bridge with heave plates[J]. Applied Ocean Research,2022,108:102442.

[10] TANG Shanran,XIONG Yingfen,ZHU Liangsheng. Boussinesq-type equations of hydroelastic waves in shallow water[J]. Journal of Fluid Mechanics,2024;985:A45.

[11] 陈善群,汪冰,田菁艾,等. 波浪驱动下系泊箱式浮体运动响应及系泊力的影响因素分析[J]. 船舶力学,2023,27(5):669-682. (CHEN Shanqun,WANG Bing,TIAN Jing' ai,et al. Numerical study on the motion responses and mooring forces of moored floating boxes under waves[J]. Journal of Ship Mechanics,2023,27(5):669-682. (in Chinese))

[12] 陈德春,范自明. 系泊浮体受碰撞时系泊链的冲击力计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(3):80-83. (CHEN Dechun,FAN Ziming. Impact forces calculation for mooring chains as mooring floats in collision[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29 (3): 80-83. (in Chinese))

[13] DOBROCHINSKI J P H, DEYZEN A V, ZIJLEMA M, et al. Combining numerical tools to determine wave forces on moored ships [J]. Coastal Engineering,2023,179:104224.

[14] XIANG S,CHENG B,ZHANG F Y,et al. An improved time domain approach for analysis of floating bridges based on dynamic finite element method and state-space model[J]. China Ocean Engineering,2022,36(5):682-696.

[15] 李德江,邓兴旗,赵树杰,等. 双船联合举升多体协同作业系统横摇稳性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):115-122. (LI Dejiang,DENG Xingqi,ZHAO Shujie,et al. Rolling stability evaluation of multi-body collaborative operation system for the twinship joint lifting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51 (4): 115-122. (in Chinese))

(收稿日期:2023 - 11 - 23 编辑:熊水斌)