

# 台风浪下海上机场 VLFS 动态响应与能量转换机理\*

李文杰<sup>1,2</sup>, 柯世堂<sup>1,2</sup>, 陈静<sup>1,2</sup>, 朱庭瑞<sup>1,2</sup>, 任贺贺<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学土木与机场工程系 南京, 211106)

(2. 江苏省机场基础设施安全工程研究中心 南京, 211106)

**摘要** 超大浮式结构(very large floating structure, 简称 VLFS)是集空港和海港为一体的大型海上多功能浮式结构, 现有研究大多关注规则波下刚性模块柔性连接模型的动力响应, 忽略了台风浪极端环境下海上机场自身柔性引起的非线性振动特性。针对此问题, 提出了一种新型多柔-刚性混合模块建模方法, 采用 Jonswap 谱特征参数对台风“鲇鱼”过境实测海浪谱开展了精细化仿真模拟, 分析了台风浪下海上机场 VLFS 整体和局部非线性动态响应特性, 揭示了海上机场与环境荷载之间的能量转换机理。结果表明: 海上机场多柔-刚性混合模块模型可以较好地反映此类 VLFS 结构动力响应特性; 海上机场超长柔性及台风浪场不均匀性使其结构呈现显著非线性, 位移、转角和水弹性变形分别以沿波向、绕展向和沿垂向为主, 极值应力主要分布于撑杆附近; 环境荷载能量和结构重力势能在初始阶段主要转换为系泊势能, 稳定阶段则主要转换为结构动能和弹性势能。

**关键词** 台风浪; 海上机场; 超大浮式结构; 动态响应; 能量转换机理

**中图分类号** P75; U66

## 引言

海上机场 VLFS<sup>[1]</sup>是建立在海上可供飞机起降、检修及加油等功能一体化的超大型漂浮式基础设施, 其作为“移动的海岛”, 具有受地震影响小、灵活度高和部署快捷等优势, 必将成为新时代国家建设海洋强国战略<sup>[2]</sup>的重要工程。区别于传统百米级船舶和海洋平台, 海上机场浮式平台尺寸长达数公里, 水平尺度远大于垂直尺度, 在面临台风巨浪等极端海洋环境时结构柔性及台风浪环境不均匀性使其动态响应呈现显著非线性, 其弹性变形和流固耦合不容忽视<sup>[3-4]</sup>。尤其是台风、海啸等极端环境下海上机场 VLFS 非线性动态响应已超出现有规范和技术范畴, 因此开展台风浪环境下海上机场 VLFS 非线性动态响应特性研究具有重要的理论意义和工程价值。

针对 VLFS 的动态响应特性, 现有研究大多集中于规则波工况。Watanabe 等<sup>[5]</sup>采用 Mindlin 板理论计算了规则波下浮体结构形变和应力分布。Cheng 等<sup>[6-7]</sup>采用线性波浪和经典薄板理论开展规则波下 VLFS 的简化水弹性分析, 并通过试验证实了该方法的可行性。多数研究一般假定海浪是均匀规则的, 这种边界条件与实际海洋环境不符, 海上机场

常常会面临复杂极端气候, 而国内外针对海上机场在非规则波下的响应较少。Ding 等<sup>[8]</sup>建立了非规则波下 VLFS 各模块水弹性响应的简化计算方法和相应计算软件, 并通过水池试验结果验证了简化计算方法的准确性。孙泽等<sup>[9]</sup>开展了非规则波浪环境下 VLFS 的模块运动和连接器载荷研究。现有关于 VLFS 的研究多采用刚性模块-柔性连接(rigid module flexible connection, 简称 RMFC)方法<sup>[10-12]</sup>研究规则波下浮式结构动态响应, 并未考虑多模块浮体纵摇与我国机场道面的坡度规范之间的关系, 且海上机场单模块跨长约为 300 m, 台风巨浪环境下单模块水弹性响应非常显著, 从而影响整个浮式平台的动态响应, 这与 RMFC 建模方式中刚性模块的假设不符, 单模块的水弹性响应不容忽视。

鉴于此, 考虑机场跑道平整度要求建立了一种新型海上机场 VLFS 多柔-刚性混合模块模型并开展动力特性分析。根据台风“鲇鱼”过境实测海浪谱结合 Jonswap 谱特征参数开展了台风驱动下海浪谱精细化模拟, 并验证了海浪谱的有效性。基于水弹性理论分析台风浪下海上机场 VLFS 运动响应、水弹性响应和 Von Mises 应力分布规律, 揭示了海上机场与环境荷载之间的能量转换机理, 为海上机场

\* 国家自然科学基金资助项目(52078251); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20210309, BK20211518); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX21\_0234); 南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划资助项目(xcxjh20210719)

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-08-25

的设计和优化提供工程参考依据。

# 1 多尺度台风浪场

## 1.1 实测台风海浪谱

我国南海位于全球台风高发的西北太平洋海域边缘,据中国台风网统计,近 10 年年均超过 20 个台风影响中国海域,高频台风驱动的巨浪会对海洋基础设施造成重大破坏,尤其是海上机场 VLFS 等巨型柔性结构。结合投放于我国南海 115°E, 22°N 的波浪骑士数据,以 2010 年超强台风“鲑鱼”为研究对象,研究台风过境时海浪的时间空间分布规律。台风“鲑鱼”自 10 月 13—23 日历时 10 天,其中 21—22 日对我国南海影响最大。结合中小多尺度台风浪场环境和南海海域地貌条件,选取南海北部波浪骑士投放位置作为海上机场小尺度部署地,以模拟实测环境下海上机场的非线性动态响应,台风中尺度路径走向及波浪骑士小尺度测点方位布置见图 1。

频率为 0.085 Hz,波浪谱谱峰最大为 28 m<sup>2</sup>/Hz。随着台风浪场影响程度加剧,谱峰频率缓慢减小。当台风影响减弱后,波浪谱谱峰显著减小。

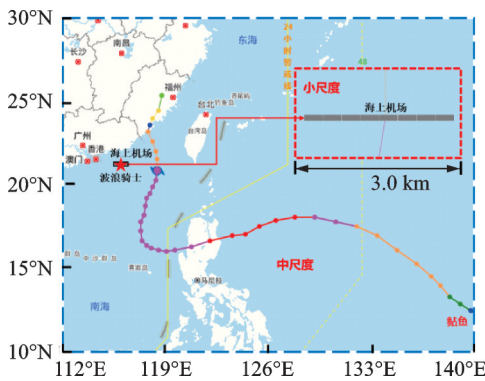


图 1 台风路径及测点方位布置

Fig.1 Location of typhoon path and measuring points

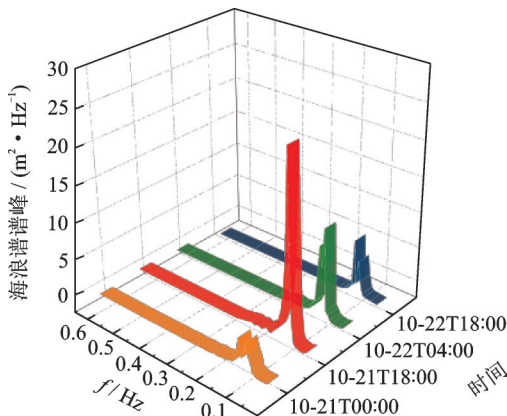


图 2 台风“鲑鱼”下的实测海浪谱

Fig.2 The measured wave spectrum of typhoon Megi

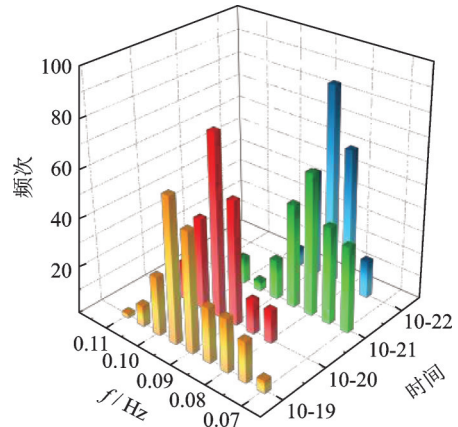


图 3 台风“鲑鱼”谱峰频率分布

Fig.3 Peak frequency of typhoon Megi

## 1.2 海浪场特征参数

国际上常采用海浪谱描述波浪能、波浪频率和波浪方向等其他变量间的分布规律,目前采用较多是 Jonswap 谱<sup>[13]</sup>,其表达式为

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^4\right] \gamma \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma^2 \omega_0^2}\right] \quad (1)$$

其中: $g$ 为重力加速度; $\omega_0$ 为谱峰频率,取 0.085; $\gamma$ 为峰值提升因子,其观测值范围介于 1.5~6.0; $\alpha$ 为波浪能量尺度参数,是无因次风区 $\bar{x}$ 的函数。

$$\alpha = 0.076 \bar{x}^{-0.22} \quad (2)$$

$$\bar{x} = gx/U \quad (3)$$

其中: $x$ 为风区; $U$ 为海面 10 m 高度处的风速,海上机场部署点为 52 m/s。

$\sigma$ 为谱型参数

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 & (\omega \leq \omega_0) \\ \sigma_a = 0.09 & (\omega > \omega_0) \end{cases} \quad (4)$$

将海浪谱参数无因次化,得到无因次峰频为

$$\bar{\omega} = \omega_0 U/g \quad (5)$$

为了采用峰值提升因子 $\gamma$ 实现台风作用下海浪谱的预报,Naess<sup>[14]</sup>引入了海浪谱宽度 $B$

$$B = m_0/\omega_0 S(\omega_0) \quad (6)$$

其中: $S(\omega_0)$ 为海浪谱峰频处对应的谱值; $m_0$ 为海浪谱的零阶矩。

将海浪谱宽度引入到 Jonswap 谱中并进行无因次化处理,得到海浪谱宽度与峰值提升因子之间的函数为

$$B = \int_0^\infty \bar{\omega}^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(\bar{\omega}^{-4} - 1)\right] \gamma \exp\left[-\frac{(\bar{\omega} - 1)^2}{2\sigma^2}\right]^{-1} d\bar{\omega} \quad (7)$$

实际台风浪场预报中,有效波高是海浪谱的重

要参数,有效波高可由海浪谱的零阶矩表示

$$H_{1/3} = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (8)$$

结合 Yang 等<sup>[15]</sup>得到的台风海浪谱规律,利用最小二乘法拟合得到无因次峰频、海浪谱宽度与无因次风区的解析函数,其表达式为

$$\begin{cases} \bar{\omega} = 1.369 \times 10 \bar{x}^{-0.3009} \\ B = 3.782 \times 10^{-2} \bar{x}^{0.1598} \end{cases} \quad (9)$$

根据台风“鲑鱼”作用下的实测海浪谱数据,通过引入海浪谱宽度确定 Jonswap 谱特征参数,结合上述海浪谱宽度与峰值提升因子之间的关系,得到 Jonswap 谱中峰值提升因子为 5.6,有效波高为 5.2 m。将表征台风“鲑鱼”下海浪谱的 Jonswap 谱特征参数作为后续小尺度数值水池试验中的入口边界条件,实现中小尺度耦合台风浪场高精度仿真,并解决风场和结构的高精度传递、多时间尺度控制和跨尺度突变等问题。

## 2 海上机场建模

### 2.1 多柔-刚性混合模块模型

目前,国内外学者多采用 RMFC 方法建立海上机场 VLFS 几何模型,多模块浮式结构整体纵摇值较大。文献[16-17]开展的水池试验中浮体的最大纵摇分别为 1.82° 和 2.04°,我国相关机场标准<sup>[18]</sup>规定跑道单向纵坡应不大于 0.58°,现有 VLFS 采用的 RMFC 模型纵摇值均不符合我国机场道面坡度规范要求。此外,RMFC 模型将 VLFS 单模块假定为刚体,未考虑单模块的弹性变形,然而超高长宽比的单模块在风浪环境下的水弹性响应不容忽视。

鉴于此,提出了一种柔性模块-刚性连接(flexible module rigid connection,简称 FMRC)新型建模方法。不同于常规的 RMFC 模型,FMRC 模型相邻模块间通过固定铰耦合方式横向刚性连接,模型底部下浮板与海底之间采用钢缆悬链线进行锚固。海上机场总长约为 2.5 km,由 8 个模块采用刚性连接器首尾依次相连组成,每个单模块由 1 块上浮板、5 块下浮板、10 根立柱和 8 根撑杆构成。表 1 给出了单模块主要设计参数。海上机场运动规则采用自由运动方式,图 4 为海上机场 FMRC 模型示意图。

### 2.2 动力特性分析

结构动力特性是决定其受力分布和动态变形的关键因素,结构模型在真空环境中的动力特性是浮体水弹性分析的基础。根据结构主要设计参数建立海上机场超大浮体有限元模型,不考虑海水的影响,

表 1 单模块主要设计参数

Tab.1 Main design parameters of single module

主要参数	数值	主要参数	数值
浮体总长/m	300	排水量/t	852 136
浮体总宽/m	100	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 850
浮体总高/m	27	弹性模量/Pa	2.10×10 <sup>11</sup>
浮体吃水/m	14	泊松系数	0.30
立柱高度/m	16	横摇惯性矩	2.11×10 <sup>12</sup>
立柱直径/m	18	纵摇惯性矩	1.73×10 <sup>13</sup>
排水体积/m <sup>3</sup>	854 219	艏摇惯性矩	1.90×10 <sup>13</sup>

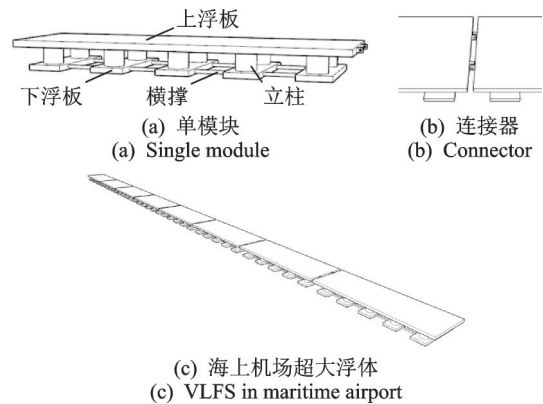


图 4 海上机场 FMRC 模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of maritime airport FMRC model

对海上机场 VLFS 的 FMRC 模型与 RMFC 模型在真空环境中进行结构模型动力特性分析。海上机场结构模型频率对比如图 5 所示,可知 2 种模型基频均较小,自第 7 阶至第 15 阶频率非常接近,前 15 阶内频率均小于 0.5 Hz,表明 FMRC 模型亦可较好地反映海上机场的结构动力响应特性。

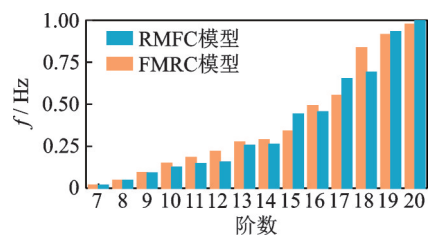


图 5 海上机场结构模型频率对比








Fig.5 Frequency comparison of maritime airport models

海上机场频率与典型模态如表 2 所示。由表 2 可知:海上机场的 2 点和 3 点垂直弯曲模态分别第 7 和第 8 阶,频率分别为 0.017 和 0.046 Hz;第 11 阶出现第 1 个水平弯曲模态,频率为 0.182 Hz;第 1 和第 2 个扭转弯曲模态出现在第 13 和 17 阶,频率分别为 0.275 和 0.551 Hz;第 16 阶呈现为扭转弯曲和垂向弯曲叠加模态,频率为 0.491 Hz。



表 2 海上机场频率与典型模态

Tab.2 Frequency and typical mode of maritime airport

振型	阶数 $f/\text{Hz}$
	7 0.017
	8 0.046
	10 0.148
	11 0.182
	13 0.275
	16 0.491
	17 0.551

### 3 数值仿真模拟

#### 3.1 运动控制方程

假设海水是不可压缩性的黏性流体,忽略海水表面张力,流体黏性运动需同时满足 Navier-Stokes 方程和连续性方程<sup>[19]</sup>,即

$$\rho \mathbf{u} / \partial t + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \nabla(\mu \nabla \mathbf{u}) - \nabla p + \rho \mathbf{g} \quad (10)$$

$$\partial \rho / \partial t + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (11)$$

其中: $\mathbf{u}$ 为海水运动速度矢量,其运动分量为 $(x, y, z)$ ;  $\mu$ 为海水的动力黏度系数与涡动黏度系数之和;  $P$ 为海水压力;  $\rho$ 为海水密度;  $g$ 为重力加速度。

假定海上机场 FMRC 模型主体框架为各向同性线弹性材料,极端环境下结构同时产生运动响应和水弹性变形,结构广义运动方程<sup>[20]</sup>为

$$\sigma = D \epsilon \quad (12)$$

$$(\mathbf{a} + \mathbf{A}) \ddot{\mathbf{p}} + (\mathbf{b} + \mathbf{B}) \dot{\mathbf{p}} + (\mathbf{c} + \mathbf{C} + \mathbf{C}_m) \mathbf{p} = \mathbf{E} + \mathbf{Q} + \mathbf{R} \quad (13)$$

其中: $\sigma$ 为应力;  $D$ 为材料正切系数;  $\epsilon$ 为应变;  $\mathbf{p}$ 为广义主坐标列阵;  $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 分别为海上机场的广义质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 分别为分别广义附加质量矩阵、附加阻尼矩阵和附加恢复力矩阵;  $\mathbf{C}_m$ 为系泊悬链线刚度矩阵;  $\mathbf{E}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}$ 分别为广义波浪激励力列阵、体积力列阵和静态力列阵。

#### 3.2 数值水池试验

采用数值水池开展台风浪下海上机场海上水弹性模型试验,图 6 给出了数值水池总计算域尺寸,定义海上机场单模块长度  $L=300 \text{ m}$ ,海上机场总长为  $8L$ ,下浮板通过 48 根钢缆悬链线与海底系泊固定,数值水池总计算域沿波向、展向和垂向分别为  $12L$ ,  $2L$  和  $0.4L$ 。总计算域分为造波区和消波区,造波区

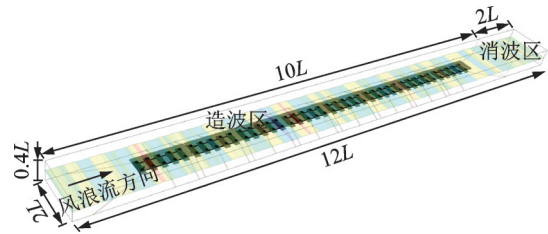


图 6 数值水池总计算域

Fig.6 Total computational domain of numerical tank

采用隐式非定常三维多相流模型,根据台风浪场特征参数生成不规则波浪,为消除波浪反射引起的边界效应,在计算域入口和出口处分别采用动量源阻尼力和阻尼以实现消波。

海上机场超大浮体沿流向的结构柔性远大于展向方向,文献[21-22]研究表明,浮体最不利浪向条件为沿流向方向,浮体沿展向的垂向弹性变形很小,因此笔者主要开展海上机场沿流向条件下的结构动态响应研究。计算域入口边界条件选用速度入口,将海浪谱参数作为小尺度入口边界条件进行物理仿真造波,计算域两侧及底面分别采用对称平面和无滑移壁面,消波区出口采用压力出口边界条件。造波区与消波区之间的接触面作为计算子域分割面,不影响海水和空气的交换。基于雷诺时均法湍黏模型,结合海水流动特点选用 K-Omega 湍流模型精确描绘流场信息。以台风过境时海上机场部署位置 10 m 高度处最大风速 52 m/s 为基本风速,采用幂指数律定义中数值水池风剖面场函数。数值模拟通常忽略同一水平面流速的微小变化<sup>[20]</sup>,假定海水为稳定流速,选用台风下海水平均流速为 2 m/s。

各区域采用动网格技术模拟结构的旋转、平移和变形,计算域采用结构化网格和非结构化网格相结合,以精细化计算结构位移和水弹性变形。计算域网格划分如图 7 所示,海上机场模型采用高质量非结构化网格,水线区域和外围区域均采用结构化网格,其中对水线面进行局部加密。各区域网格由内向外疏密程度合理,分辨率较高且过渡自然,可精

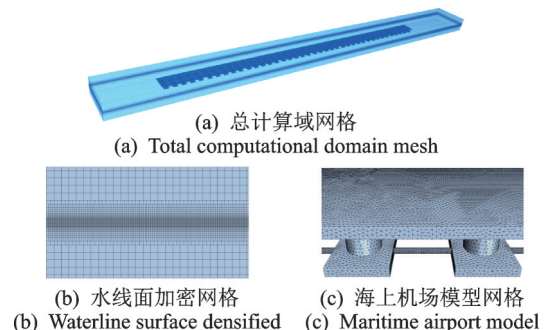


图 7 计算域网格划分

Fig.7 Computing domain meshing

确捕捉海水流动和海上机场变形细节,自适应网格数量和质量均满足计算精度要求。

### 3.3 有效性验证

为验证数值水池试验中台风浪场的有效性,在设置波浪参数时启用理论解比较。图8给出了数值水池内2个不同区域处浪高仪监测的浪波面起伏曲线,其中:数值水池解为通过波浪传输方程计算得到的波高曲线;理论解为通过斯托克斯波浪理论计算得到的波高曲线。由图可知,浪高仪监测值幅值略小于理论解,且在相位上呈现略微差异,但整体上监测值与理论解吻合度较高。浪高仪的有义波高监测值与海浪有义波高近似,2个浪高仪监测值最大误差出现在波浪产生初始时刻,为1.9%,验证了数值水池的计算解精度,证明数值计算解与理论解具有较好的一致性。

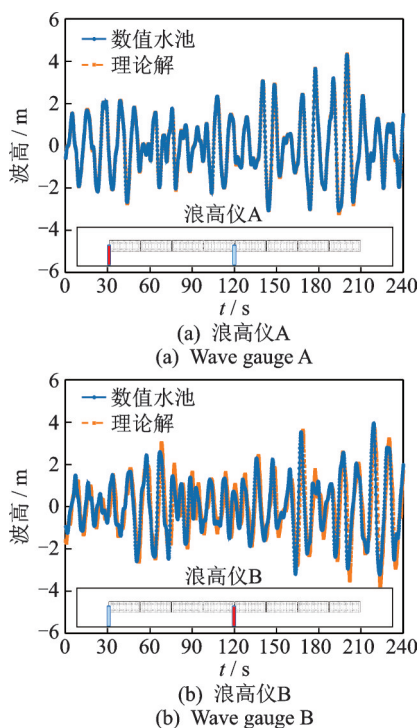


图8 浪高仪监测的海浪波面起伏曲线  
Fig.8 Wave gauge monitors waves fluctuation curves

## 4 动态响应特性

为研究台风浪下海上机场动态响应特性,结合数值水池试验设置的计算域边界条件、约束条件及网格划分方法,其中速度入口采用 Jonswap 谱特征参数表征中尺度台风“鲑鱼”实测海浪谱作为数值水池试验小尺度入口边界条件。在此基础上,基于水弹性理论分析台风驱浪下海上机场超大浮体运动响应、水弹性变形和 Von Mises 应力分布规律。

### 4.1 位移与转角

图9,10给出了台风浪下海上机场位移和转角时程曲线,结构运动响应整体上呈现显著非线性。由图9可知,海上机场总位移以沿流向位移为主导,展向和垂向位移相对较小。台风浪荷载下海上机场沿流向漂行约8 m,而后在系泊悬链线拖曳作用下沿流向达到一个相对稳定的漂动范围,幅值在7~9 m之间,沿展向和垂向位移最终维持在-1.0 m左右。

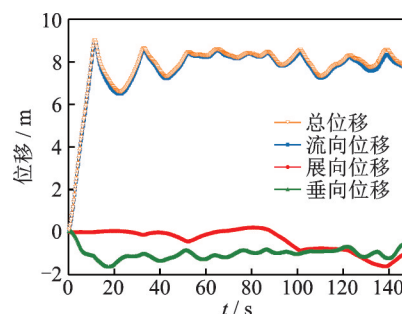


图9 风驱浪下海上机场位移时程曲线  
Fig.9 Time history curves of marine airport displacement under wind drive waves

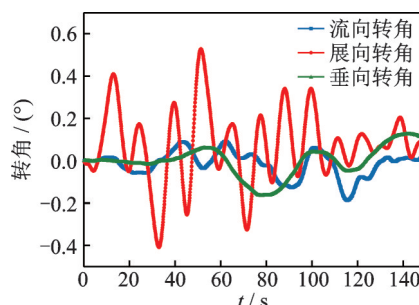


图10 风驱浪下海上机场转角时程曲线  
Fig.10 Time history curves of marine airport angular under wind drive waves

旋转转角表示海上机场围绕基准坐标轴旋转的欧拉角度。分析图10可知:台风浪场中海上机场绕流向和垂向的欧拉转角均较小,最大转角分别为 $-0.19^\circ$ 和 $-0.16^\circ$ ;绕展向的欧拉角最大转角为 $0.53^\circ$ ,符合我国相关机场跑道单向纵坡标准规定。结构绕各个方向产生转角后均可快速恢复稳定,反应了海上机场系泊系统高效的定位恢复性能。

### 4.2 水弹性变形

图11给出了海上机场不同方向水弹性变形分布云图。由图可知,海上机场水弹性变形以垂向变形为主导,流向和展向变形相对较小。8个模块总水弹性变形与垂向水弹性变形分布规律基本相同,迎浪面第1模块与尾部第8模块的变形差值相差较

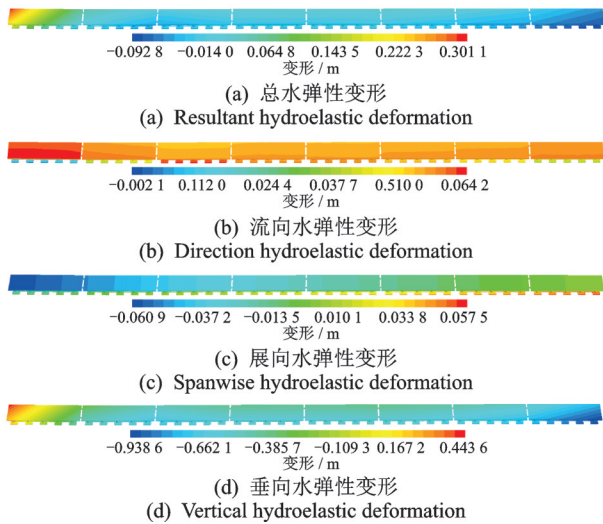


图 11 海上机场不同方向水弹性变形分布云图

Fig.11 Nephogram of hydroelastic response of maritime airport in different directions

大,首尾模块总水弹性变形差值为 0.39 m,而首尾模块垂向水弹性变形则高达 1.38 m。海上机场下浮板、立柱以及横撑的垂向水弹性变形与上浮板变形分布规律基本相同,流向和展向水弹性变形与上浮板变形分布规律存在一定差异,但相差数值较小。

### 4.3 Von Mises 应力

图 12,13 给出了海上机场不同构件 Von Mises 应力时程曲线和单模块 Von Mises 分布云图。由图 12 可知:海上机场上浮板的应力最小;下浮板和

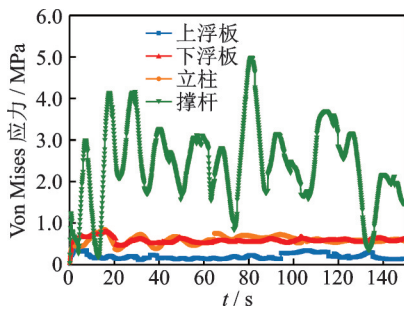


图 12 不同构件 Von Mises 应力时程曲线

Fig.12 Time history curves of Von Mises stress in different components

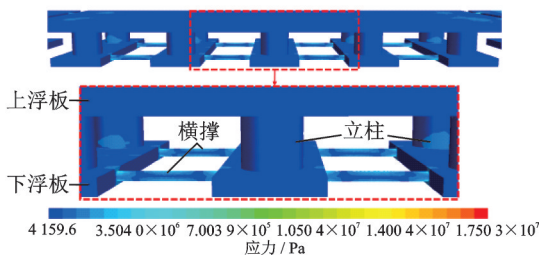


图 13 单模块 Von Mises 应力分布云图

Fig.13 Von Mises stress distribution of single module

立柱处的 Von Mises 应力相对上浮板较大,但仍保持在 0.5 MPa 左右;撑杆处的 Von Mises 应力最大,应力幅值随台风浪荷载波动起伏较大,最大应力幅值达到 5 MPa。由图 13 可知,海上机场 Von Mises 应力极值分布在撑杆及其与下浮板的连接处,其他构件区域的 Von Mises 应力较小。

### 4.4 能量转换机理

海上机场 VLFS 完成部署后在保证自身重力与浮力平衡的同时,主要承受台风浪流极端环境荷载和系泊悬链线拖曳荷载。假定计算域边界摩擦因数恒定,台风浪流储存的能量全部转换为海上机场的动能和势能、系泊悬链线增加的势能以及其他耗散的能量。依据柔性浮式结构工作原理和能量守恒关系,极端环境下海上机场的能量关系可表示为

$$E_w = E_{MK} + E_{MP} + \Delta E_C + E_D \quad (14)$$

其中: $E_w$ 为台风浪流耦合环境荷载储存的能量; $E_{MK}$ 为海上机场产生的动能; $E_{MP}$ 为海上机场增加的势能; $\Delta E_C$ 为系泊悬链线增加的势能; $E_D$ 为波浪与海上机场摩擦或碰撞等耗散的能量。

角动量反映了极端环境下海上机场与初始位置动量与位移的矢量积,角加速度则是描述欧拉角转动的加速度。图 14,15 给出了海上机场的角动量和角加速度时程曲线,由图可知:风驱浪下海上机场角动量和角加速度在加载初始阶段幅值较小,稳定漂泊阶段结构出现强烈非线性特性;海上机场展向和流向的角动量较大,垂向角动量极小;展向角加速度明显大于流向和垂向角加速度,这也解释了展向角度幅值较大的原因。

势能主要包括结构水弹性变形产生的弹性势能、结构垂向位移引起的重力势能变化以及系泊悬链线增加的势能,提取所布测点的监测数据进行分析并处理,得到迎浪面系泊势能变化曲线,如图 16 所示。由图可知:随着海上机场与初始位置发生偏

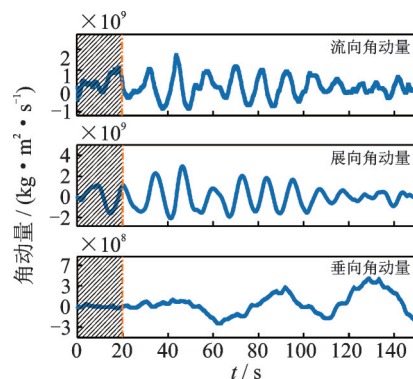


图 14 海上机场角动量时程曲线

Fig.14 Marine airport angular momentum curves



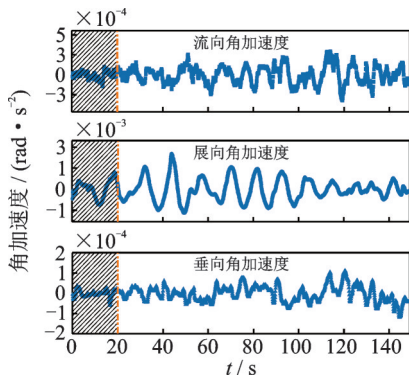


图 15 海上机场角加速度时程曲线

Fig.15 Marine airport angular acceleration curves

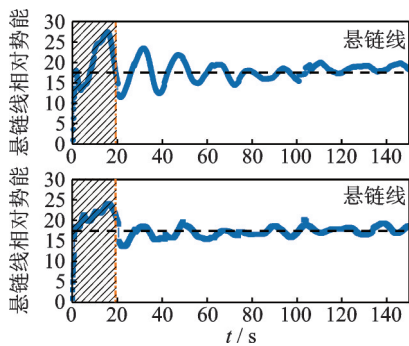


图 16 迎浪面系泊势能变化曲线

Fig.16 Catenary potential energy curves on wave facing surface

移,系泊悬链线赋予结构拖曳力,系泊悬链线势能也随之增大;加载初始 20 s 内系泊悬链线势能随波浪能推力呈阶梯增长趋势,最大相对势能为初始势能的 28 倍,而后逐渐稳定在初始势能 18 倍左右的范围内。

图 17 给出了海上机场重力势能与第 1 模块弹性势能及重力势能变化曲线,分析发现:初始加载阶段结构弹性势能和重力势能分别呈现跳跃式增大和减小;当系泊悬链线势能稳定后,弹性势能和重力势能开始呈现周期性变化并稳定在一定范围内。

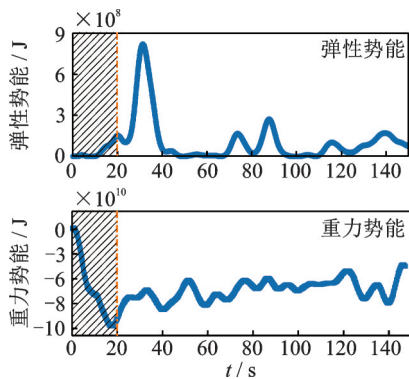


图 17 弹性势能与重力势能变化曲线

Fig.17 Elastic potential energy and gravitational potential energy curves

海上机场与环境荷载之间的能量交换呈现显著非线性特性,由于耗散能在能量转换中占比很少,忽略波浪与海上机场摩擦或碰撞耗散的能量。加载初始阶段,环境荷载携带的能量主要转换为系泊悬链线增加的势能,海上机场的动能和弹性势能随之逐渐增加,结构重力势能随之逐渐减小;结构稳定漂浮阶段,环境荷载携带的能量主要转换为结构动能和弹性势能。分析发现,式(14)中定义的结构重力势能增加项实际上是作为能量减少项,与环境荷载能量转换为动能和弹性势能,故修正式(14)为

$$E_w + \Delta E_C = E_{MK} + E_{MP} \quad (15)$$

根据海上机场与环境荷载之间的能量交换规律,提出极端台风浪流环境中海上机场的非线性能量转换机理:初始阶段,极端环境荷载储存的能量和结构重力势能主要转换为系泊悬链线的势能,部分转换为海上机场的动能和弹性势能;稳定阶段,极端环境荷载储存的能量和结构重力势能主要转换为海上机场的动能和弹性势能,部分转换为系泊悬链线的势能。

## 5 结 论

1) 采用 Jonswap 谱特征参数模拟的海浪场可以有效反映台风“鲑鱼”过境实测海况,提出的海上机场 FMRC 模型可以较好地反映此类海上机场结构动力响应特性。

2) 台风浪场下海上机场动态响应呈现显著非线性,结构位移、转角和水弹性变形分别以沿波向位移、绕展向转角和垂向变形为主,绕展向最大转角符合我国相关机场跑道单向纵坡规定, Von Mises 应力极值主要分布于浮体撑杆附近。

3) 环境荷载能量和海上机场重力势能储存的能量,初始阶段主要转换为系泊势能,部分转换为结构动能和弹性势能;稳定阶段主要转换为结构动能和弹性势能,部分转换为系泊势能。

## 参 考 文 献

[1] ANDO S, OKAWA Y, UENO I. Feasibility study of floating offshore airport [J]. Papers of Ship Research Institute, 1983(4):1-134.  
 [2] 刘笑阳. 海洋强国战略研究[D]. 北京: 中共中央党校, 2016.  
 [3] LIN Q, LU D Q, YEUNG R W. Hydroelastic response of a circular plate in waves on a two-layer fluid of finite depth [J]. China Ocean Engineering, 2014, 28(5): 671-686.  
 [4] 徐道临, 戴超, 张海成. 多模块浮体 ADAMS 动力学

- 仿真及连接器对响应特性的影响[J]. 振动工程学报, 2018, 31(3): 456-467.
- XU Daolin, DAI Chao, ZHANG Haicheng. Dynamic simulation and connector's effect on the response characteristics of multi-modular floating structure using ADAMS [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(3): 456-467. (in Chinese)
- [5] WATANABE E, UTSUNOMIYA T, WANG C, et al. Benchmark hydroelastic responses of a circular VLFS under wave action [J]. Engineering Structures, 2006, 28(3): 423-430.
- [6] CHENG Y, JI C, ZHAI G J, et al. Fully nonlinear numerical investigation on hydroelastic responses of floating elastic plate over variable depth sea-bottom[J]. Marine Structures, 2017, 55:37-61.
- [7] CHENG Y, ZHAI G, OU J. Time-domain numerical and experimental analysis of hydroelastic response of a very large floating structure edged with a pair of submerged horizontal plates[J]. Marine Structures, 2014, 39:198-224.
- [8] DING J, TIAN C, WU Y, et al. A simplified method to estimate the hydroelastic responses of VLFS in the inhomogeneous waves [J]. Ocean Engineering, 2019, 172:434-445.
- [9] 孙泽, 田超, 丁军, 等. 风浪环境下的岛礁超大浮体水弹性响应分析[J]. 船舶力学, 2020, 24(8): 1024-1035.
- SUN Ze, TIAN Chao, DING Jun, et al. Hydroelastic analysis of VLFS near islands in typhoon wave environment [J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(8): 1024-1035. (in Chinese)
- [10] KARMAKAR D, BHATTACHARJEE J, SAHOO T. Wave interaction with multiple articulated floating elastic plates [J]. Journal of Fluids and Structures, 2009, 25(6):1065-1078.
- [11] GAO R, TAY Z, WANG C, et al. Hydroelastic response of very large floating structure with a flexible line connection [J]. Ocean Engineering, 2011, 38: 1957-1966.
- [12] MICHAILIDES C, LOUKOGEORGAKI E, ANGELIDES D. Response analysis and optimum configuration of a modular floating structure with flexible connectors[J]. Applied Ocean Research, 2013, 43: 112-130.
- [13] HASSELMANN D, DUNCKEL M, EWING J. Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973 [J]. Journal of Physical Oceanography, 1980, 10(8): 1264-1280.
- [14] NAESS A. On the distribution of crest to trough wave heights[J]. Ocean Engineering, 1985, 12(3): 221-234.
- [15] YANG S, HOU Y, LIU Y. Observed typhoon wave spectrum in northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(5): 1286-1294.
- [16] DING J, TIAN C, WU Y, et al. Hydroelastic analysis and model tests of a single module VLFS deployed near islands and reefs [J]. Ocean Engineering, 2017, 144: 224-234.
- [17] WU Y, DING J, TIAN C, et al. Numerical analysis and model tests of a three-module VLFS deployed near islands and reefs [J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2018, 4:111-122.
- [18] 中国民用航空局机场司. MH 5001—2021 民用机场飞行区技术标准[S]. 北京: 中国民航出版社, 2021.
- [19] GATICA G, OYARZÚA R, SAYAS F. A twofold saddle point approach for the coupling of fluid flow with nonlinear porous media flow [J]. Journal of Numerical Analysis, 2012, 32(3):845-887.
- [20] KHALAK A, WILLIAMSON C. Dynamics of a hydroelastic cylinder with very low mass and damping [J]. Journal of Fluids and Structures, 1996, 10(5): 455-472.
- [21] 孙永岗, 孙建群, 郭飞, 等. 超大浮体的多段梁模型特性分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(5): 456-464.
- SUN Yonggang, SUN Jianqun, GUO Fei, et al. Characteristics of multi-segment beam model of very large floating structure [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 16(5):456-464. (in Chinese)
- [22] 黄从亮, 董晴, 吕海宁, 等. 近距离靠泊条件下钻井支持平台与生产平台相对运动研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(3): 42-51.
- HUANG Congliang, DONG Qing, LÜ Haining, et al. Studies on the relative motions of the tender support drilling unit and production platform coupled system with a small separation distance [J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(3): 42-51. (in Chinese)



**第一作者简介:**李文杰,男,1995年12月生,博士研究生。主要研究方向为风浪环境与结构工程。曾发表《Wind-induced collapse mechanism and failure criteria of super-large cooling tower based on layered shell element model》(《Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics》2022, Vol.221)等论文。  
E-mail: liwenjienuaa@163.com

**通信作者简介:**柯世堂,男,1982年11月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为风工程与结构工程。  
E-mail:keshitang@163.com