

文章编号: 1007-7294(2024)02-0250-11

# 海上旅游平台大跨度网壳结构强度分析

方 春, 岳亚霖, 韦朋余, 张亦龙, 戴泽宇, 杨伟楠, 张欣玉  
(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

**摘要:**海上旅游平台大跨度网壳结构作为新型结构,目前还没有成熟的设计和强度分析方法。本文以网壳结构立柱间的相对位移为波浪载荷控制参数,基于设计波法和三维水弹性理论计算波浪载荷;以百年一遇的风速作为风载工况,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟风场计算风载荷,利用面元积分法计算网壳结构等效节点载荷,建立大跨度网壳结构外载荷计算方法。在此基础上,以“海洋之心”旅游平台为算例,开展了网壳结构响应分析,获得了风载荷、波浪载荷及风浪联合作用下的网壳结构响应,对比分析了风载荷和波浪载荷对网壳结构响应的影响。

**关键词:** 海上旅游平台; 大跨度网壳结构; 风载荷; 波浪载荷; 结构强度

中图分类号: U661.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.02.008

## Strength analysis method of large-span reticulated shell structures for offshore tourism platforms

FANG Chun, YUE Ya-lin, WEI Peng-yu, ZHANG Yi-long,  
DAI Ze-yu, YANG Wei-nan, ZHANG Xin-yu  
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

**Abstract:** As a new type of structure, there is no mature design and strength analysis method for large-span reticulated shell structures of offshore tourism platforms. In this paper, the relative vertical displacement of the reticulated shell structure column was taken as the wave load control condition, and the wave load was calculated based on the design wave method and the three-dimensional hydroelastic theory. With the once-in-a-century wind speed taken as the wind load working condition, the turbulence model of  $k-\varepsilon$  was adopted to simulate the wind field for calculation of the wind load, the panel integration method was used to calculate the equivalent node load of the reticulated shell structure, and the calculation method of the external load for large-span shell structures was thus established. On this basis, taking the “Heart of the Sea” tourism platform as an example, the response analysis of the reticulated shell structure was carried out, and the responses of the reticulated shell structure under the action of wind load, wave load and combined loads of both were obtained. The effects of wind load and wave load on the response of the reticulated shell structure were compared and analyzed.

**Key words:** offshore tourism platform; large-span reticulated shell structure; wind load; wave load; structural strength

## 0 引 言

海上旅游平台是一种新型海洋平台,部署在岛礁附近。为满足观光、游乐、会议和剧院等需求,上

收稿日期: 2023-08-04

作者简介: 方 春(1997-),男,硕士研究生,通讯作者,E-mail: fc1002@mail.ustc.edu.cn;

岳亚霖(1964-),男,研究员,博士生导师。

部为网壳、下部为箱型浮体的大跨度无支柱新型舱段结构型式应运而生,这种结构上部有陆地大跨度网壳结构型式的外形,下部为海工浮力平台。对于这种结构,目前还没有建立规范计算方法,因此,针对这种结构开展强度分析研究具有现实意义。

陆上网壳结构承受的外载荷主要有风载荷、地震载荷以及雪载荷等。在风载荷方面,获取的方法有现场实测法、风洞试验法和数值模拟法,其中数值模拟法是风载荷分析中常用的研究方法,成本较低,应用广泛。Holmes等<sup>[1]</sup>基于Reynolds时均方程,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对不同弧形屋面进行数值模拟,分析了平均风压和影响平均风压的因素;Murakami<sup>[2]</sup>分别采用了LES、ASM和 $k-\varepsilon$ 三种湍流模型进行数值模拟,并将三种数值模拟结果与实验数据进行了对比;楼文娟<sup>[3]</sup>等采用了Realizable  $k-\varepsilon$ 模型对强台风地区大跨度屋盖进行数值模拟,分析了屋盖悬挑部分的风压和升力特性。在地震载荷方面,大跨度网壳结构的承载力和变形分析采用的方法主要有反应谱法、弹性时程分析法和弹塑性时程分析法。谢鑫<sup>[4]</sup>以单层球面网壳为研究对象,用弹塑性时程分析方法研究了在地震作用下网壳结构的动力响应。在雪载荷方面,刘玉轩<sup>[5]</sup>利用MATLAB软件实现了施威德勒型单层球面网壳结构表面雪荷载的不均匀分布计算。

与陆上网壳结构相比,海上旅游平台上的网壳结构所受外载荷存在较大差异:一是旅游平台所受风载荷为海洋风载荷,其设计考虑的工况最大值远大于陆地风载荷;二是下部基础载荷不同,旅游平台所受基础载荷为波浪载荷,且网壳结构下部节点随下浮体甲板结构变形而一起变形。

本文以旅游平台下浮体模块上表面中心点及其与网壳结构中轴线上两个立柱交点间的相对垂向位移为波浪载荷控制参数,基于设计波法和三维水弹性理论计算波浪载荷;以百年一遇的风速作为风载工况,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟风场计算风载荷,利用面元积分法计算网壳结构等效节点载荷。在此基础上,以“海洋之心”旅游平台为算例,开展风载荷、波浪载荷及风浪联合作用下的网壳结构响应分析,探讨风载荷和波浪载荷对网壳结构响应的影响规律。

## 1 载荷计算方法

影响旅游平台大跨度网壳结构的环境载荷主要来自波浪载荷与风载荷。通过对旅游平台下浮体进行水动力学响应计算,完成风暴自存工况下设计波的选取,进而获得下浮体传递给网壳结构的波浪载荷;通过对网壳结构蒙皮表面风载荷的计算,完成面元风载荷转换为节点风载荷,获得网壳结构承受的风载荷。

### 1.1 三维水弹性理论

本文采用三维水弹性理论<sup>[6-7]</sup>分析旅游平台的运动和波浪载荷,平台在波浪中运动时的三维线性频域水弹性力学运动方程为

$$[-\omega^2([\mathbf{a}] + [\mathbf{A}]) + i\omega([\mathbf{b}] + [\mathbf{B}]) + ([\mathbf{c}] + [\mathbf{C}])] \{\mathbf{p}_a\} = \{\mathbf{F}\} \quad (1)$$

式中, $[\mathbf{a}]$ 、 $[\mathbf{b}]$ 、 $[\mathbf{c}]$ 分别为结构的广义质量阵、阻尼阵以及刚度阵, $[\mathbf{A}]$ 、 $[\mathbf{B}]$ 、 $[\mathbf{C}]$ 分别为广义流体附加质量阵、辐射阻尼阵以及恢复力系数阵, $\{\mathbf{F}\}$ 为广义波浪激励力, $\omega$ 为遭遇频率, $\{\mathbf{p}_a\}$ 为广义主坐标列阵。

### 1.2 设计波法

本文采用基于海浪谱的随机性设计波法获取等效设计波,波浪载荷的响应谱为

$$S_R(\omega) = [R_{ao}(\omega)]^2 S_w(\omega) \quad (2)$$

式中, $S_R(\omega)$ 为载荷响应谱, $R_{ao}(\omega)$ 为载荷传递函数, $S_w(\omega)$ 为波浪谱。

设计波波幅可由下式计算得到:

$$A_D = (R'_{\max}/R_{aoc}) \cdot L_f \quad (3)$$

式中: $A_D$ 为设计波波幅; $R'_{\max}$ 为最大的载荷响应值; $R_{aoc}$ 为单位波幅最大响应; $L_f$ 为荷载系数,根据中国

船级社《海上移动平台结构状态动态评价及应急响应服务指南》，依据不规则波浪谱对设计作业海域的适应程度， $L_j$ 取值为1.1~1.3，本文取1.2。设计波的频率和浪向角为 $R_{\omega}$ 最大时对应的频率和浪向角。

1.3 风场控制方程

对于风场中的空气流体，不可压缩流体连续性方程与RANS方程的张量形式<sup>[8]</sup>为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \tag{5}$$

式中， $\bar{u}_i$ 是时均速度分量， $u_i'$ 是脉动速度分量，脉动速度相关项 $-\rho \overline{u_i u_j}$ 称为雷诺应力， $\rho$ 和 $\nu$ 为流体的密度和动力粘性系数。

1.4 湍流模型

本文采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟网壳结构的风场。湍流动能 $k$ 和耗散率 $\varepsilon$ 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{7}$$

式中，模型常数分别为 $C_{1\varepsilon}=1.44$ ， $C_{2\varepsilon}=1.92$ ， $C_\mu=0.09$ ， $\sigma_k=1.0$ ， $\sigma_\varepsilon=1.3$ ， $G_b$ 、 $G_k$ 为湍流动能生成项， $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 表示湍流 Prandtl 数， $S_k$ 、 $S_\varepsilon$ 为源项。

1.5 海上旅游平台结构型式

本文以“海洋之心”旅游平台为实例，图1为该旅游平台的总体构型，共分为14个模块，其中M3模块采用了新型大跨度网壳结构型式，主要由网壳结构的上层建筑和箱型结构的下浮体组成，如图2所示。上层建筑的网壳结构参数如下：跨距90 m，高度30 m，其中立柱高3 m，中心星空穹顶直径10 m；设肋杆（径向杆件）48根，环杆（环向杆件）10圈，截面形式均为无缝钢管，截面尺寸为 $\phi 350 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ，如图3所示，网壳结构立柱与下浮体通过焊接的方式组合在一起。

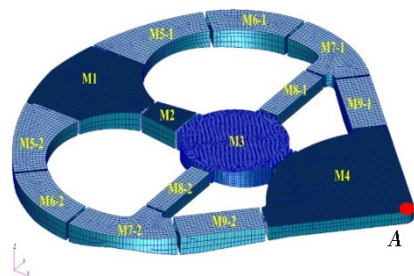


图1 旅游平台总体构型

Fig.1 Overall configuration of tourism platform

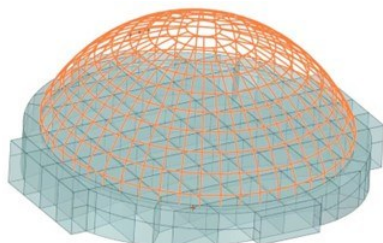


图2 M3模块结构示意图

Fig.2 Structural diagram of M3 module

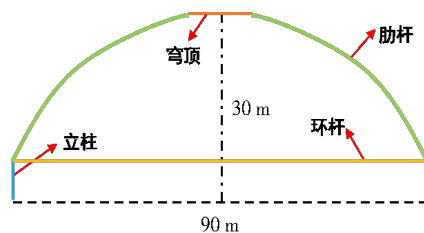


图3 网壳结构侧视图

Fig.3 Side view of reticulated shell structure

1.6 波浪载荷计算

工程试验和实践证明<sup>[9-10]</sup>，采用设计波<sup>[11-12]</sup>直接计算所需的波浪载荷，进而利用有限元法对船舶或平台浮体结构强度进行分析<sup>[13-16]</sup>，是开展平台整体响应和结构应力评估的有效方法。

以旅游平台下浮体结构为研究对象，建立数值分析模型，选取风暴自存工况作为计算工况。在风暴自存时，旅游平台应为单点系泊状态，系泊点为图1中A点，具有风向标效应，因此，本文重点分析研

浪状况下旅游平台的运动响应。选用 Jonswap 谱为计算海浪谱,具体波浪参数如表 1 所示。采用 THAFTS 软件进行三维水弹性力学计算以获取波浪载荷<sup>[7]</sup>。

表 1 波浪载荷参数

Tab.1 Wave load parameters

海浪谱	JONSWAP 谱
谱峰提升因子 $\gamma$	3.3
谱峰周期 $T_p$	10 s
有义波高 $H_s$	5 m
浪向	顶浪

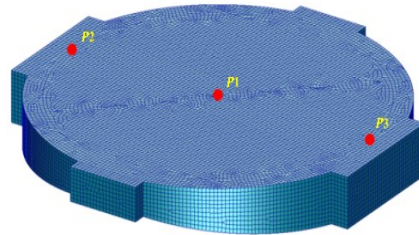


图 4 M3 模块变形特征点

Fig.4 Deformation feature points of M3 module

根据旅游平台上部网壳结构布置和型式特点,选取“下浮体模块 M3 的上表面中心点  $P1$  及其与上部网壳结构在中轴线上两个立柱的交点  $P2$  和  $P3$  间的相对垂向位移”,作为控制网壳结构所受波浪载荷强度的特征工况,特征点  $P1$ 、 $P2$ 、和  $P3$  的具体位置如图 4 所示;经水动力分析获得特征工况下的特征响应  $R_{ao}$ ,以  $R_{ao}$  极值对应的波浪参数作为网壳结构强度分析的设计波。表 2 给出了根据具体的特征响应  $R_{ao}$  得到的三个特征点之间相对垂向位移的设计波参数。从中选取短期极值最大的工况,即  $P2$  对  $P3$  的垂向相对位移,获得等效设计波参数为周期 11.74 s,波高 5.46 m。

表 2 等效设计波要素

Tab.2 Equivalent design wave elements

工况	位置	设计波周期/s	$R_{ao}$	短期极值	设计波波高/m
上甲板相对垂向位移/m	$P2$ 对 $P1$	9.74	0.04	0.06	3.08
		15.14	0.04	0.06	3.24
	$P3$ 对 $P1$	11.74	0.10	0.22	4.72
		20.27	0.09	0.22	5.12
	$P3$ 对 $P2$	9.74	0.11	0.24	4.46
		11.74	0.09	0.24	5.46
		19.95	0.08	0.24	6.18

为方便起见,建立以 M3 模块上甲板中心为原点的平面直角坐标系  $OXY$ , $X$  轴正向指向 A 点,右旋垂直  $X$  轴方向为  $Y$  轴正向;对网壳结构的 48 根立柱进行编号,取 1#立柱位于  $X$  轴正向,逆时针方向逐渐增加编号,直至 48#立柱。坐标系与立柱编号如图 5 所示。

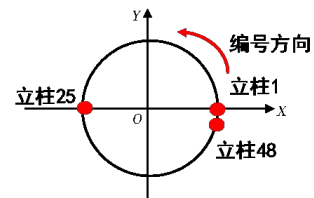


图 5 坐标系与立柱编号

Fig.5 Coordinate system and column numbers

为分析波浪载荷作用下平台上部网壳结构响应,需要获取网壳结构立柱与下浮体 M3 模块交点的节点位移,为此,本文将波浪载荷一个周期(从 0 s 至 11.74 s)分为 30 个时刻,分别对每个时刻进行响应分析,获得了 48 根立柱在 30 个不同时刻的底端位移。图 6 给出了 1#立柱在一个设计波周期内的垂向位移值。

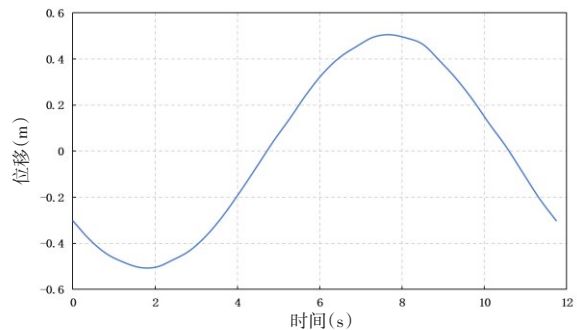


图 6 立柱 1 垂向位移变化图

Fig.6 Vertical displacement change diagram

计算结果中  $P3$  点的  $X$  向加速度为  $0.001 \text{ m/s}^2$ ,  $Y$  向加速度为  $1\text{E}-06 \text{ m/s}^2$ ,  $Z$  向加速度为  $0.02 \text{ m/s}^2$ ,三向加速度均远小于重力加速度( $g$ )。因此,惯性力对旅游平台的影响较小,在后续研究中可忽略惯性力的影响。

### 1.7 风载荷计算

风载荷的获得通常有现场实测、风洞试验和数值分析三种方法<sup>[18-19]</sup>。工程应用证明,通过数值模拟结构周围风场并求解结构表面风载荷的分析方法,是一种便捷有效的风载荷计算方法,因此本文选用该方法进行风载荷分析。

以旅游平台上部大跨度网壳结构为研究对象建立数值分析模型,取南海海域百年一遇风速即16级风,56 m/s风速作为风暴自存工况计算风速;利用Fluent软件计算壳体结构在定常风<sup>[20]</sup>作用下的表面风载荷,图7给出计算域结构化网格划分。本文假设网壳结构中线上的点和坐标原点(坐标系同1.6节,下同)的连线与X轴的夹角为 $\alpha$ ,沿表面法向指向网壳内部的压力值为正压,反之背离网壳的压力值为负压。经分析计算获得的网壳表面压力云图如图8、图9所示,中轴线上网壳表面压力与 $\alpha$ 角的变化关系如图10所示。

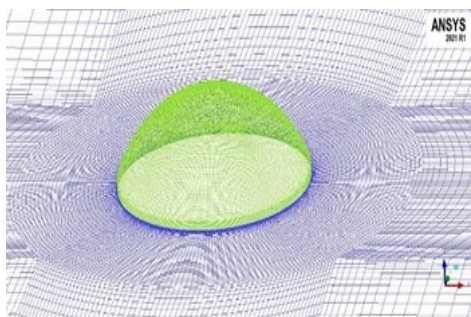


图7 计算域结构化网格划分

Fig.7 Structured grid division of computing domain

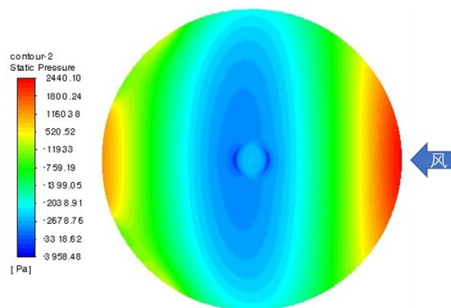


图8 壳体表面压力云图(俯视图)

Fig.8 Cloud chart of shell surface pressure (top view)

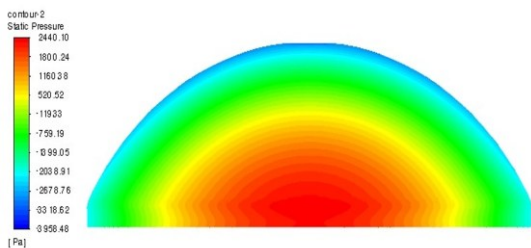


图9 网壳表面压力云图(迎风面正视图)

Fig.9 Cloud chart of shell surface pressure (front view of windward side)

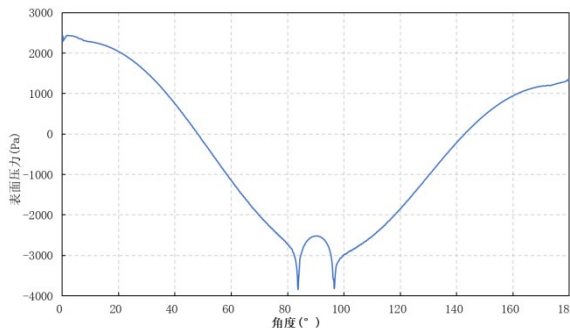


图10 网壳中轴线表面压力变化曲线

Fig.10 Variation curve of surface pressure on the axis of reticulated shell

从计算结果可以看出:网壳结构外表面的最大正压出现在迎风面前沿,在后缘出现了小部分正压区。最大负压在顶部,并向两侧逐渐减小;顺风向风载荷( $F_x$ )总值为1361.5 kN,垂向总风载(即顶吸力 $F_z$ )为8971.1 kN,垂向总风载远大于顺风向总风载。因此,顶吸力为网壳结构在风载荷作用下的主要载荷。

大跨度网壳结构中直接承受风载荷的是网壳结构表面覆盖的蒙皮结构,但蒙皮结构通常不参与结构强度计算,因此在结构强度计算时,蒙皮面单元分布风载荷需要转换为网壳结构环杆和肋杆节点的等效载荷。

本文以网壳结构环杆与肋杆的交点为积

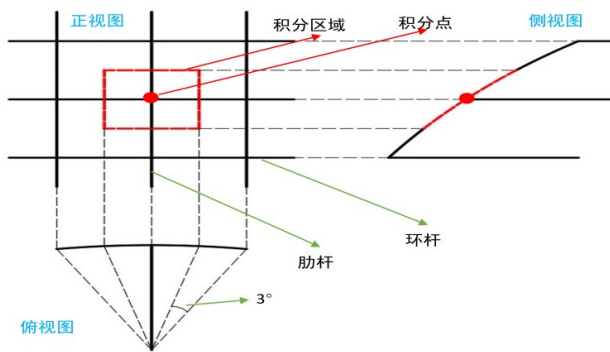


图11 节点载荷积分方式

Fig.11 Node load integration mode

分点,将积分区域内CFD计算得到的面元载荷施加到节点上,得到节点载荷(包括三个方向的分力 $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ ),如图11所示。通过节点位置坐标定位的方式,将节点载荷映射到网壳结构计算模型中环杆与肋杆的交点上。

## 2 网壳结构响应分析

根据《空间网格结构技术规程》<sup>[21]</sup>,单层网壳结构可以采用空间梁系有限元法分析结构响应,单层网壳的节点均可假设为刚节点。本文采用ANSYS软件,参考上文分析得到的等效波浪载荷和等效风载荷,对平台上层建筑的大跨度网壳结构进行风载荷、波浪载荷及风浪联合作用下的网壳结构响应分析。

### 2.1 风载荷作用下的网壳结构响应

为研究风载荷单独作用下网壳结构的结构响应,在网壳结构的相应节点上施加计算得到的56 m/s风速下的等效节点载荷,作为等效风载荷开展结构响应分析,获得了风载荷单独作用下的网壳结构垂向位移云图、位移云图和Von-Mises应力云图如图12~14所示。网壳结构的顶部区域应力较大,底部区域应力值较小;最大Von-Mises应力位于顶部环杆与肋杆接头处(图14中红色标记处),其值为224.2 MPa。由此可见,风载荷主要影响网壳结构的顶部区域。

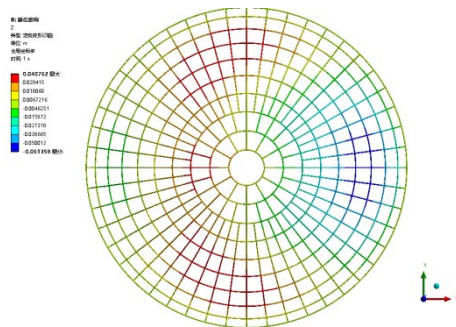


图12 网壳结构垂向位移云图

Fig.12 Vertical displacement cloud diagram of reticulated shell structure

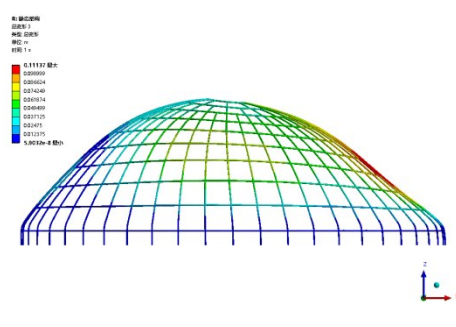


图13 网壳结构位移云图(侧视图)

Fig.13 Deformation cloud diagram of reticulated shell structure (side view)

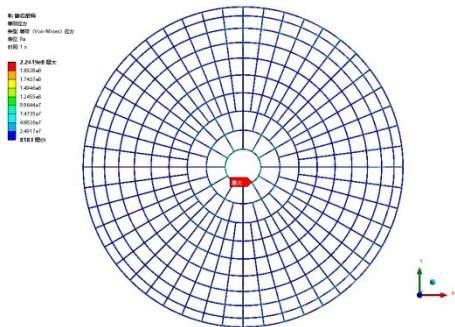


图14 网壳结构 Von-Mises 应力云图

Fig.14 Von-Mises stress cloud diagram of reticulated shell structure

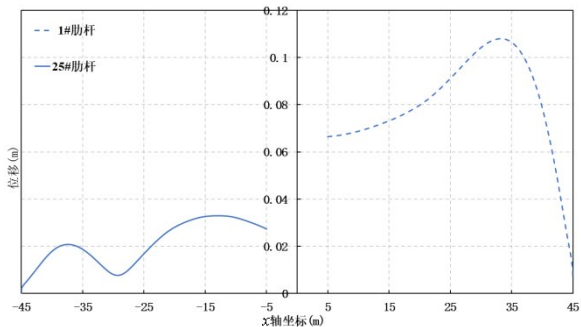


图15 风载荷作用下网壳中轴线的位移曲线

Fig.15 Displacement curves of the central axis of the reticulated shell under wind load

网壳中轴线上1#和25#肋杆的位移变化曲线如图15所示,结合响应结果可以看出,在风载荷单独作用下,网壳结构迎风面受风载荷直接作用而产生较大凹陷变形,最大凹陷位移值为0.11 m;背风面处则由于风载荷在网壳结构底部区域产生了漩涡,同样受到正压作用而产生了凹陷变形,但其值明显较迎风面小,最大凹陷位移值仅为0.02 m;网壳结构的两侧受到负压的拉力作用而产生了向外的突出变形。整个网壳结构模型的变形表现为前后受压凹陷同时两侧受拉突起的形态。风载荷引起的网壳

表面位移在空间分布上变化较大。

### 2.2 波浪载荷作用下的网壳结构响应

总体而言,旅游平台上层网壳结构为轻型结构,与其连接的平台下浮体结构在重量和刚度等方面相差巨大,在尺度方面也存在较大差别,在风暴自存工况下,合理设计的平台结构其总体变形应为线弹性变形(即属于小变形范围)。因此在研究由平台受环境载荷引起的甲板变形时,可忽略网壳结构变形对下浮体结构变形产生的耦合影响。由此本文假定:与平台下浮体交叉连接点的网壳结构立柱位移是由平台受环境载荷作用引起的甲板变形所决定,与网壳结构受载变形无关。

基于上述假定,在求解波浪载荷作用下网壳结构响应时,可将网壳结构与平台下浮体结构分开考虑,分为两个步骤:首先,忽略网壳结构影响,进行平台下浮体在波浪载荷下的结构响应分析,以获取平台下浮体(甲板)与网壳结构(立柱)交叉连接点的位移;其次,将该交叉连接点位移作为网壳结构立柱强制位移约束开展网壳结构响应分析。

作为算例,本文针对“海洋之心”旅游平台开展了波浪载荷作用下网壳结构响应分析,分析时将波浪载荷一个周期(从 0 s 至 11.74 s)分为 30 个时刻,得到一个波浪周期内网壳结构响应结果,如图 16~20 所示。

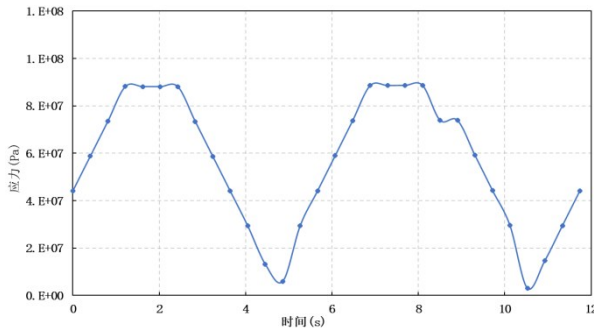


图 16 最大 Von-Mises 应力随时间变化曲线

Fig.16 Variation of max. Von-Mises stress with time

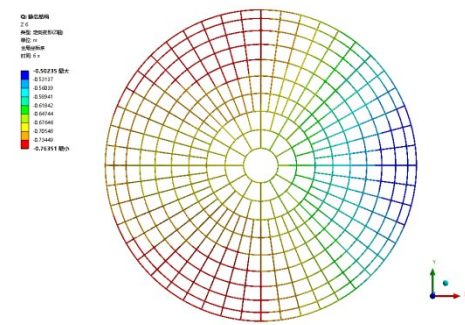


图 17 网壳结构垂向位移云图

Fig.17 Vertical displacement cloud diagram of reticulated shell structure

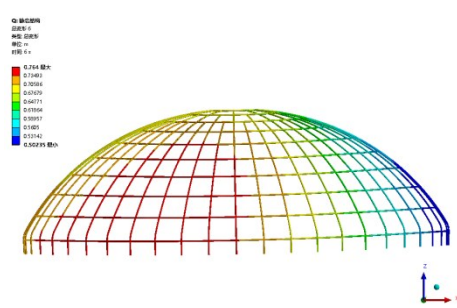


图 18 网壳结构总位移云图(侧视图)

Fig.18 Total displacement cloud diagram of reticulated shell structure (side view)

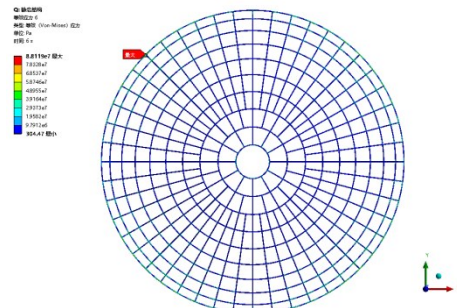


图 19 网壳结构 Von-Mises 应力云图

Fig.19 Von-Mises stress cloud diagram of reticulated shell structure

图 16 给出了最大 Von-Mises 应力随时间变化关系曲线,从中可以看出,在 2.025 s 时刻网壳结构应力达到峰值,但应注意,图中应力峰值在不同时刻出现在不同位置。图 17、图 18 和图 19 分别给出了 2.025 s 时刻网壳结构的垂向位移、总位移和 Von-Mises 应力云图,从中可以看出,网壳结构最大 Von-Mises 应力为 88.12 MPa,位于底部肋杆、环杆与立柱接头处(图 19 中红色标记处),且网壳结构应力较大区域位于底部区域,顶部区域应力值较小。因此,波浪载荷主要影响网壳结构的底部区域。

图 20 给出了 2.025 s 时刻网壳中轴线上 1#和 25#肋杆的变形曲线,从中可以看出,在波浪载荷单独作用下,1#肋杆底部位移较小,顶部位移较大,最大值为 0.16 m;25#肋杆位移均大于 1#肋杆最大位移

值,且底部位移大于顶部,最大值为0.22 m。

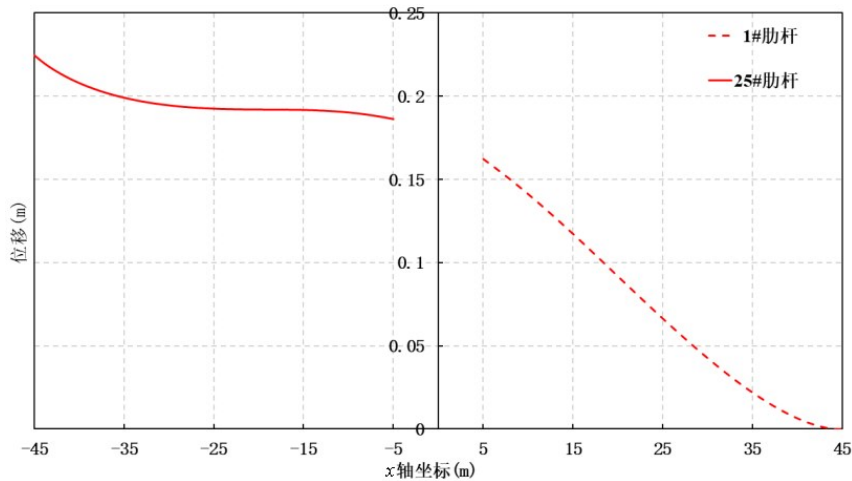


图 20 2.025 s时刻网壳中轴线上位移曲线

Fig.20 Displacement curve of central axis of reticulated shell at 2.025 s

### 2.3 风浪联合作用下的网壳结构响应

为研究风浪联合作用下网壳结构响应,本文以下浮体与网壳立柱底端交叉处的位移作为网壳结构计算模型的位移约束,在网壳结构的节点上施加 56 m/s 风速下的等效节点载荷,作为等效风载荷。考虑网壳结构的重力作用,开展网壳结构在风浪联合作用下的结构响应分析。

分析时将波浪载荷一个周期(从 0 s 至 11.74 s)分为 30 个时刻,分别计算 30 个时刻网壳结构在风浪联合加载作用下的结构响应,汇总 30 个时刻的计算结果得到一个周期内网壳结构最大 Von-Mises 应力随时间变化曲线,如图 21 所示。从图中可以看出,网壳结构的最大应力发生在 2.025 s 时刻,网壳结构的最小应力发生在 7.29 s 时刻。值得注意的是,图中应力最大值在不同时刻出现在不同位置。因此可以认为,2.025 s 时刻为该网壳结构在风暴自存状态下最危险的工况。

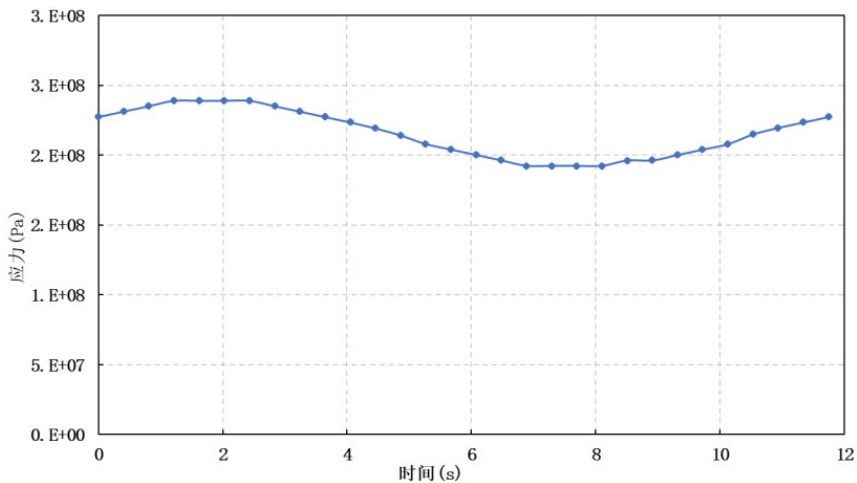


图 21 最大 Von-Mises 应力随时间变化曲线

Fig.21 Variation of max. Von-Mises stress with time

网壳结构在 2.025 s 时刻呈现为中垂状态,图 22 给出了垂向位移云图,图 23 给出了 Von-Mises 应力云图,从中可以看出,最大 Von-Mises 应力值为 239.10 MPa,位于顶部环杆与肋杆接头处(图中红色标记处)。网壳结构的另一典型特征时刻为 7.29 s 时刻,此时网壳结构呈现为中拱状态,垂向位移和 Von-Mises 应力分别如图 24、图 25 所示,最大 Von-Mises 应力值为 192.38 MPa,同样位于顶部环杆与肋杆接头处(图 25 中红色标记处)。

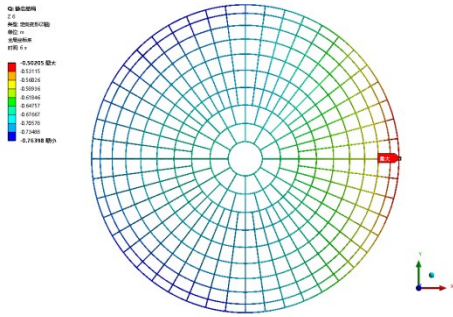


图22 网壳结构垂向位移云图

Fig.22 Vertical displacement cloud diagram of reticulated shell structure at 2.025 s

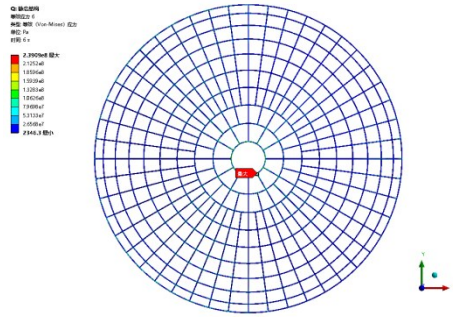


图23 网壳结构 Von-Mises 应力云图

Fig.23 Von-Mises stress cloud diagram of reticulated shell structure (side view) at 2.025 s

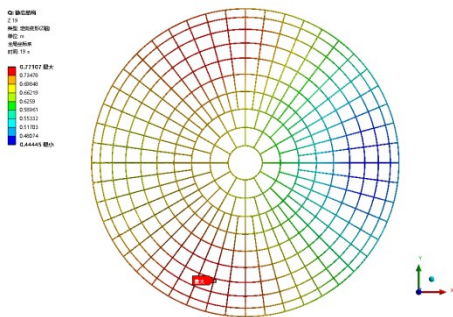


图24 网壳结构垂向位移云图

Fig.24 Vertical displacement cloud diagram of reticulated shell structure at 7.29 s

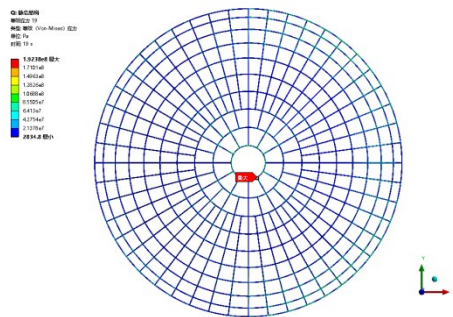


图25 网壳结构 Von-Mises 应力云图

Fig.25 Von-Mises stress cloud diagram of reticulated shell structure (side view) at 7.29 s

图26中的绿色曲线给出了2.025 s时刻网壳中轴线上1#和25#肋杆的位移变化,从中可以看出在风浪联合作用下,网壳结构变形从背风面到迎风面逐渐减小。波浪载荷使网壳结构整体产生了较大的位移,其幅值变化较为平缓。风载荷使网壳结构整体产生的位移明显比波浪载荷时小,但风载荷位移幅值变化较为剧烈;叠加波浪载荷的作用,容易诱导产生局部区域的失稳变形。

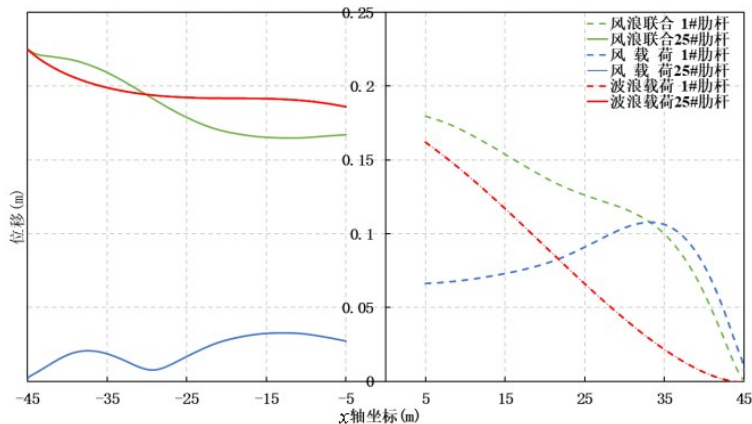


图26 网壳中轴线的位移曲线

Fig.26 Displacement curve of central axis of reticulated shell

### 3 结 论

本文以海上旅游平台大跨度网壳结构为研究对象,选择下浮体模块上表面中心点及其与网壳结构中轴线上两个立柱交点间的相对垂向位移为波浪载荷控制参数,基于设计波法和三维水弹性理论

计算了波浪载荷;以百年一遇的风速作为风载工况,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟风场计算了风载荷,利用面元积分法计算了网壳结构等效节点载荷,建立了大跨度网壳结构外载荷计算方法。在此基础上,以“海洋之心”旅游平台为算例,开展了网壳结构响应分析,得到以下结论:

(1) 风载荷作用下网壳结构的整体变形表现为迎风面和背风面受压凹陷而网壳两侧受拉突起,风载荷引起的网壳表面位移在空间分布上变化较大。风载荷引起的结构最大应力位于网壳顶部区域。

(2) 波浪载荷作用下网壳结构整体变形从背风面到迎风面逐渐减小,幅值变化较为平缓,最大变形量较大;波浪载荷引起的结构最大应力位于网壳底部区域。

(3) 在风浪联合作用下,波浪载荷使网壳结构整体产生较大位移,其幅值变化较为平缓。风载荷使网壳结构整体产生的位移明显比波浪载荷小,但风载荷位移幅值变化较为剧烈;叠加波浪载荷的作用,容易诱导产生局部区域的失稳变形。风浪联合作用引起的结构最大应力位于网壳顶部区域。

### 参 考 文 献:

- [1] Holmes J D, Paterson D A. Mean wind pressure on arched-roof buildings by computation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 50: 235-242.
- [2] Murakami S, Mochida A. Three dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1987, 25: 291-305.
- [3] 楼文娟, 孙 斌, 卢 旦, 等. 复杂型体悬挑屋盖风荷载风洞试验与数值模拟[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(1): 107-112.  
Lou Wenjuan, Sun Bin, Lu Dan, et al. Wind tunnel test and numerical simulation of wind loads on complex cantilevered roofs [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(1): 107-112. (in Chinese)
- [4] 谢 鑫. 单层球面网壳地震失效荷载快速计算方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.  
Xie Xin. Fast calculation method for the seismic failure peak ground acceleration of single-layer reticulated domes[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [5] 刘玉轩. 风雪载荷作用下单层球面网壳的稳定性分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.  
Liu Yuxuan. Single large spherical reticulated shell under wind and snow load stability analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [6] Wu Yousheng. Hydroelasticity of floating bodies[D]. London: Brunel University, 1984.
- [7] 苗玉基, 陈徐均, 沈海鹏, 等. 基于三维水弹性理论的箱桁组合式浮式栈桥运动响应研究[J]. *船舶力学*, 2022, 26(5): 714-726.  
Miao Yuji, Chen Xujun, Shen Haipeng, et al. Hydroelastic response of box-truss composite floating trestle bridge based on 3-D hydroelastic theory[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(5): 714-726. (in Chinese)
- [8] 陈 默, 张 楠, 郑文涛, 等. 三维可变形翼展向变形气动力特性数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2022, 26(10): 1420-1432.  
Chen Mo, Zhang Nan, Zheng Wentao, et al. Numerical study on aerodynamic characteristics of 3D spanwise deformable airfoil[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(10): 1420-1432. (in Chinese)
- [9] ABS. Rules for building and classing mobile offshore drilling unit[S]. 2008.
- [10] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.  
China Classification Society. Rules for the classification of offshore mobile platforms[S]. Beijing: People Communications Press, 2018.
- [11] Jim S H, Kim Y P, Sim I H, et al. Global strength evaluation for a medium-sized semi-submersible drilling rig[C]/ISOPE-2001: Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001.
- [12] 梁双令. 基于设计波法的船体波浪载荷计算[J]. *船舶科学技术*, 2018, 40(4): 39-42.  
Liang Shuangling. Wave loads of ships calculating based on design wave methods[J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(4): 39-42. (in Chinese)

- [13] 吴波. 大型海上旅游浮式平台的水动力关键技术[J]. 中国造船, 2021, 63(3): 250–256.  
Wu Bo. Key hydrodynamic techniques of large floating platform for offshore tourism[J]. Shipbuilding of China, 2021, 63(3): 250–256. (in Chinese)
- [14] 姜惠. 大型演出平台双体趸船结构强度直接计算研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.  
Jiang Hui. Research on direct strength assessment of large performance platform catamaran pontoon[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] 李志乐. 超大型浮体水弹性响应分析与结构强度评估[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
Li Zhile. Hydroelastic response analysis and structural strength assessment of very large floating structure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [16] 崔维成, 吴有生, 李润培. 超大型海洋浮式结构物动力特性研究综述[J]. 船舶力学, 2001, 5(1): 73–81.  
Cui Weicheng, Wu Yousheng, Li Runpei. Recent researches on dynamic performances of very large floating structures[J]. Journal of Ship Mechanics, 2001, 5(1): 73–81. (in Chinese)
- [17] 王琦彬. 旅游平台剖面载荷计算方法研究[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2022.  
Wang Qibin. Research on the calculation method of section load for tourism platform[R]. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2022. (in Chinese)
- [18] 冯励睿. 大跨度球面网壳风荷载模拟及风振响应特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.  
Feng Lirui. Wind load simulation and wind vibration response characteristics of large span spherical reticulated shell[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022. (in Chinese)
- [19] 张长虹. 大跨柱面网壳结构风荷载以及荷载响应特性试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.  
Zhang Changhong. Experimental study on wind load and load response characteristics of long-span cylindrical reticulated shell structures[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)
- [20] GB50009–2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
GB50009–2012, Load code for building structures[S]. Beijing: China Architecture Press, 2012.
- [21] JGJ 7–2010, 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
JGJ 7–2010, Technical specification for space grid structures[S]. Beijing: China Architecture Press, 2010.