

新型垂荡结构对钻井平台的性能优化研究

陈博, 喻志勇

(兰州理工大学机电学院, 甘肃 730050)

摘要: 设计、研究一种新型结构的双浮体四立柱半潜式钻井平台, 论证新型垂荡结构是否能够有效减小平台的垂荡响应。通过 workbench 建立双浮体四立柱原平台三维湿表面模型和新型结构的平台模型, 通过数值模拟仿真分析, 得到需要的数据进行综合评价。分析数据得出, 增加新型垂荡结构的平台垂荡附加质量约增加一倍, 平台在浪向角为 0° 、 45° 、 90° 时垂荡响应的最小值、最大值、均值都有所减小, 且垂荡响应最大值减小的较为明显。最后得出, 所设计的新型结构半潜式钻井平台能有效的降低平台的垂荡运动, 在设计时可以应用参考。

关键词: 垂荡结构; 钻井平台; 性能优化; 附加质量; 垂荡响应

Performance optimization research of new heave structure for drilling platform

Chen Bo, Yu Zhi Yong

(School of mechanical and electrical engineering, Lanzhou University of Technology, Gan Su 730050)

Abstract: To design and study a new type of semi-submersible drilling platform of double floating body four column, to demonstrate the new heave structure whether can reduce the heave response of the platform effectively. To create 3D Wet surface model of semi-submersible drilling platform of double floating body four column and new structure 3D wet surface model by workbench, through simulation analysis, to obtain the required data to comprehensive evaluation. Analysis of data obtained, heave added mass approximately double increase of adding a new type of heave structure of platform, the minimum value, maximum value and mean value of the heave response are all reduced, when the angle of wave is 0° , 45° and 90° degrees, while reduce more obvious of heave maximum response. Conclusion that, the design of the new structure of semi-submersible drilling platform can effectively reduce platform heave motion, it can be applied in the design of reference.

Key words: Damping; structural analysis; flow fields; spectrum analysis; structural dynamics; structural optimization

钻井平台是海洋油气开发的重要装备, 钻井平台在空间中存在六个自由度, 平台易受到风浪作用而运动, 在平台的六个运动响应中其中垂荡运动对平台的拖航、作业、风暴自存工况都有较大的影响。半潜式钻井平台具有诸多优点^[1], 使其成为现今海洋采掘的主要装备, 半潜式钻井平台根据其立柱数不同, 浮体个数及形状的差异又存在诸多构型的半潜式钻井平台。通过大量的数值仿真、模拟证实了四立柱、双浮体构型的半潜式钻井平台的综合性能较为优异, 但是平台垂荡响应在受到有义波高较大的波浪作用时其垂荡响应仍然较大。针对平台的垂荡响应问题提出了垂荡板结构, 来减小平台的垂荡响应, 通过分析得到了垂荡板可以对平台的垂荡运动有着一定的抑制作用。常规海况在 30 米以下水深, 平台结构几乎不会受到波浪的影响, 仅存在洋流作用。Thiagarajan K P 通过数值模拟和模型试验分析了垂荡板对平台垂荡响应的影响, 各种直径和厚度的垂荡板对平台垂荡响应的作用, 实验与数值模拟结果比较提出了垂荡板的性能与的几何形状、直径、厚度有关, 给出了最佳的垂荡板几何形状^[2]。Zhang F 研究了垂荡板的各种参数对单柱式 (Spar) 平台水动力性能影响, 实验和数值模拟单柱式平台在加装垂荡板的情况下, 垂荡板对波浪载荷作用的响应, 以及对附加质量、阻尼系数影响^[3]。Shen W 研究了垂荡板不同形状对 Spar 平台水动力特性的影响, 模拟计算了垂荡板对平台附加质量系数和阻尼系数的影响, 结果表明: 在一定范围内, 锥形垂荡板的水动力性能较好^[4]。Bull D 发明了带有垂荡版的单立柱平台, 实现了垂荡板能有效的增加

平台的附加质量和减小平台的升沉运动^[5]。Moreno J 采用 1:20 比例模型，得到了垂荡板在强迫振动中平台的固有频率，对比了两模型尺度下平台的附加质量和阻尼，并全面讨论垂荡板对平台性能的影响^[6]。Bozonnet P 对垂荡板研究，提供了垂荡板的设计、选型的数据库^[7]。Garrido-Mendoza C A 研究垂荡板，得出了垂荡板能有效增加平台的附加质量和阻尼等参数^[8]。Park S 对各种型号的阻尼板的水动力运动响应进行了研究，基于势流理论对阻尼片的大小进行分析，确定了最佳阻尼板的选型，提出了在平台风暴自存状态下，建议通过数值模拟进行评价^[9]。钻井平台的起伏运动是至关重要的，垂荡响应可以通过安装垂荡板来抑制，然而，相关的流体动力效应，其中粘性阻尼和附加质量，是非常复杂的。Li B, Huang Z 通过实验研究，时域和频频相比分析的方法，总结了垂荡板对平台升沉和垂荡运动的影响^[10]。综上可知对单立柱型钻井平台的垂荡结构研究的较多，但是对半潜式钻井平台的垂荡结构研究的确很少，且增加垂荡结构主要是从附加质量和垂荡响应上加以分析。

文章以设计一种新型的半潜式钻井平台为出发点，首先用软件建立所研究平台的三维湿表面模型，然后数值模拟仿真得到平台在垂荡方向的附加质量、垂荡响应，然后综合分析、处理数据，最后得出新型结构的半潜式钻井平台能够很好的起到降低平台垂荡响应及增加平台垂荡附加质量的作用，在设计选型时可以作为参考选型。

1 理论基础及数值计算方法

1.1 理论基础

三维势流理论是研究平台在波浪载荷与运动，及进行水动力的重要基础理论，主要应用于分析平台上大结构物，对于小结构物采用莫里森理论分析，莫里森理论为半理论半经验的公式只进行辅助计算。海浪对产生平台的作用力与力矩，进而平台对波浪产生的反作用力与力矩，这种形式的力和力矩称为附加质量，数学模型为质量 m 平台要获得加速度为 a ，施加在平台上的波浪力 F 将要大于 ma ，可写成： $F = (m + \lambda)a \Rightarrow F - \lambda a = ma$ ，在平台受到海浪作用而加速运动时它起到阻力作用^[11]，所有适当的附加质量增加对平台降低运动响应有一定的益处^[12]。

1.2 平台附加质量计算

$$\text{流体两时刻速度势差可表示为: } \delta\Phi = \sum_{i=1}^6 \delta u_i \delta\Phi_i \quad (1)$$

$$\text{平台六个自由度上的受力分量: } F_i = - \int_{S_b} p n_i d_A \quad (2)$$

$$\text{由 } \frac{\partial\Phi}{\partial t} - \frac{p - p_a}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = 0 \text{ 带入得: } F_i = \iint_{S_b} \left(\rho \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \rho \frac{U^2}{2} + \rho gz - p_a \right) n_i d_A \quad (3)$$

$$\text{式(3)两边同乘 } \delta t \text{ 有: } \delta t \cdot F_i = \delta t \cdot \iint_{S_b} \rho \frac{\partial\Phi}{\partial t} n_i d_A + \delta t \cdot \iint_{S_b} \left(\rho \frac{U^2}{2} + \rho gz - p_a \right) n_i d_A \quad (4)$$

$$\text{取 } \delta t \rightarrow 0 \text{ 有: } \lim_{\delta t \rightarrow 0} \delta t \cdot \iint_{S_b} \rho \frac{\partial\Phi}{\partial t} n_i d_A = \iint_{S_b} \rho \delta\Phi n_i d_A \Rightarrow \delta t \cdot F_i = \iint_{S_b} \rho \delta\Phi n_i d_A \quad (5)$$

$$F_i = f_i + f'_i \quad (f_i \text{ 表示附加惯性力, } f'_i \text{ 表示其它成分})$$

$$\delta t \cdot f_i + \delta t \cdot f'_i = \iint_{S_b} \rho \delta\Phi n_i d_A \text{ 取 } \delta t \rightarrow 0: \delta t \cdot f_i = \iint_{S_b} \rho \delta\Phi n_i d_A$$

$$\text{分解速速势 } \phi(x', y', z', t) \text{ 得: } \delta t - f_i = \iint_{S_b} \rho \left(\sum_{j=1}^6 \delta u_j \delta\Phi_j \right) n_i d_A \Rightarrow f_i = \sum_{j=1}^6 \left(\iint_{S_b} \rho \delta\Phi_j n_i d_A \right) \frac{\delta u_j}{\delta t} \quad (6)$$

解得平台各方向的附加质量： $m_{ij} = \iint_{S_b} \rho \delta \Phi_j n_i dA$

$$\text{整理得: } m_{ij} = \iint_{S_b} \rho \delta \Phi(x', y', z', t)_j \frac{\partial(\delta \Phi(x', y', z', t)_i)}{\partial n} dA \quad (7)$$

S_b 表示平台湿表面面积； ρ 海水密度； A 平台积分最小单元； $u_{i,j}$ 表示平台运动的广义方向速度； $n_{i,j}$ 平台面的广义方向数 ($i, j=1,2,3,4,5,6$)； U 平台的瞬时速度； p 压强。

1.3 垂荡结构垂荡响应计算

垂荡结构的流体动力表达式为： $F = f$ ， f 为与流体、垂荡结构运动形式、垂荡结构形式有关的函数。所研究因素较为复杂，对问题适当的简化得 f 为与 v, v', Ω, Ω' 有关的函数， v 为平台的移动速度， v' 为平台的移动加速度， Ω 为平台转动的角速度， Ω' 为平台角加速度。分析可得到垂荡结构在水平面内的运动表达式：

$$X = f_x(v, u, r, v', u', r') ; \quad Y = f_y(v, u, r, v', u', r') ; \quad N = f_N(v, u, r, v', u', r') ;$$

垂荡结构在垂直面内的运动可表示为： $X = f_x(u, w, q, u', w', q') ; Z = f_z(u, w, q, u', w', q') ;$

$M = f_M(u, w, q, u', w', q') ;$ $f(x)$ 的函数泰勒展开有：

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2} f''(x_0)(x - x_0)^2 + \frac{1}{3!} f'''(x_0)(x - x_0)^3 + \dots \quad (8)$$

进一步处理有

$$\begin{aligned} f(x, y, z, \dots) &= f(x_0, y_0, z_0, \dots) + \left(\frac{\alpha}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial}{\partial z} \Delta z + \dots \right) f(x_0, y_0, z_0, \dots)' + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial}{\partial z} \Delta z + \dots \right)^2 \\ &f(x_0, y_0, z_0, \dots)'' + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial}{\partial z} \Delta z + \dots \right)^3 f(x_0, y_0, z_0, \dots)''' + \dots \end{aligned}$$

整理分析得垂荡响应 (Z) 与垂荡板的简化关系：

$$\begin{aligned} Z = f_z(u, w, q, u', w', q') &= Z_0 + Z_u u + Z_w \Delta w + Z_q q + Z_{u'} u' + Z_{w'} \Delta w' + Z_{q'} q' + \\ &\frac{1}{2} (Z_{uu} u^2 + Z_{ww} \Delta w^2 + Z_{qq} q^2 + 2Z_{uw} \Delta w u + 2Z_{qw} \Delta w q + 2Z_{uq} u q) + \frac{1}{6} (Z_{uuu} u^3 + Z_{www} \Delta w^3 + Z_{qqq} q^3 + \dots) \end{aligned} \quad (9)$$

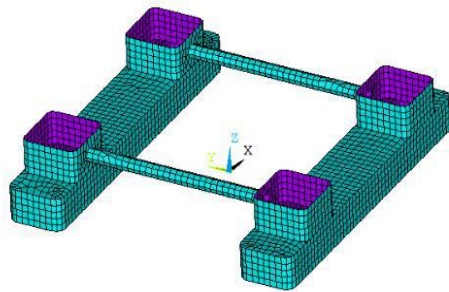
2 模型的建立与仿真

文章选取双浮体四立柱的半潜式钻井平台为原型，在原型的基础上为新增四垂荡圆板为改进型，垂荡圆板分布在平台的四角。所研究平台结构采用相同尺寸参数，平台的尺度如表 1，所研究平台的构型如图 1，采用 workbench^[13-14]得到需要的数据文件。

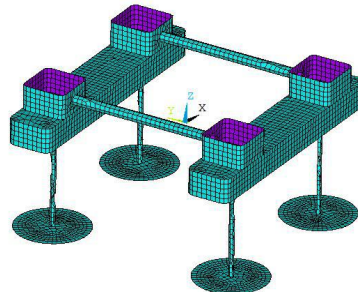
表 1 平台主尺度

名称	参数	尺度/m
浮体	长	101.23
	宽	18.60
	高	10.72
立柱	长	18.51
	宽	18.51
	直径	2.15
横撑	长	60.31
平台	吃水	20.00
垂荡圆板	直径	15.00

连接柱	直径	1.00
连接柱	长度	40.00
垂荡圆板	吃水	60.00



a 原平台



b 改型平台

图1 研究平台三维湿表面模型

为了研究垂荡板对平台运动和相关性能的影响，考虑到分析规模和篇幅，主要从平台垂荡附加质量和在不同浪向角下平台的单位垂荡响应进行分析、研究。通过平台的排水质量确立平台的质量，平台的转动惯量 $I = mk^2$ ，式中 I 为平台转动惯量； m 为平台质量； k 为回转半径，对于文中所研究的规则平台， $k_{xx} = 0.34 \times b$ ， $k_{yy} = 0.25 \times a$ ， $k_{zz} = 0.26 \times a$ ；式中 a 为平台的长； b 为平台的宽；根据上式可求得平台转动惯量。通过数值模拟分析得到原平台的垂荡方向附加质量分量曲线图 2，改进平台垂荡方向附加质量分量曲线图 3。

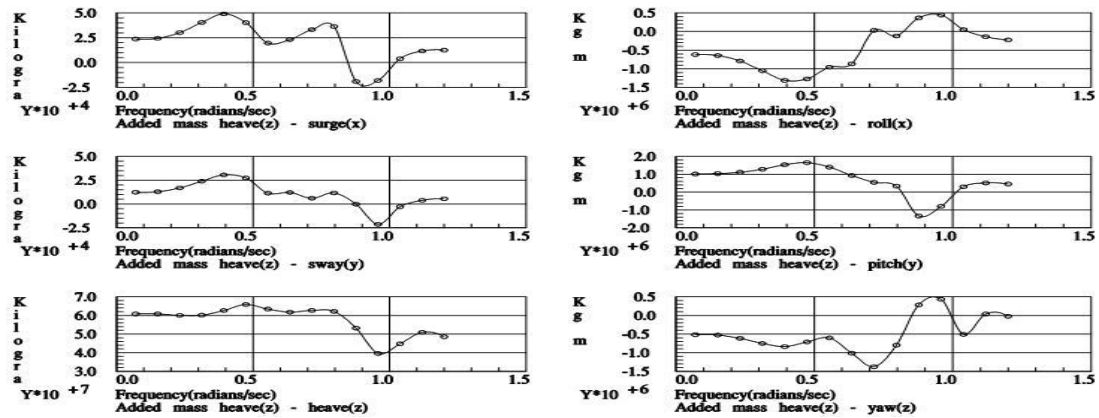


图2 原平台垂荡附加质量

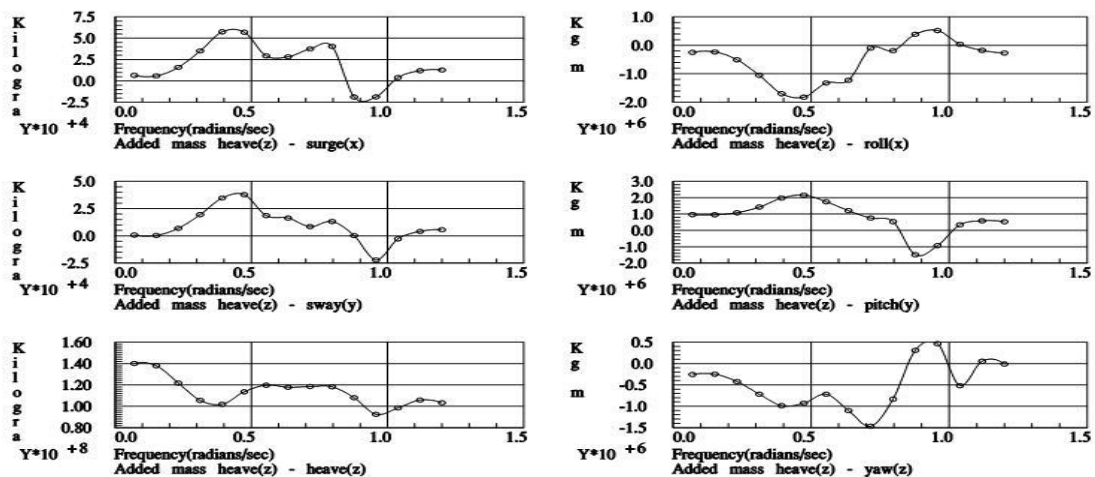
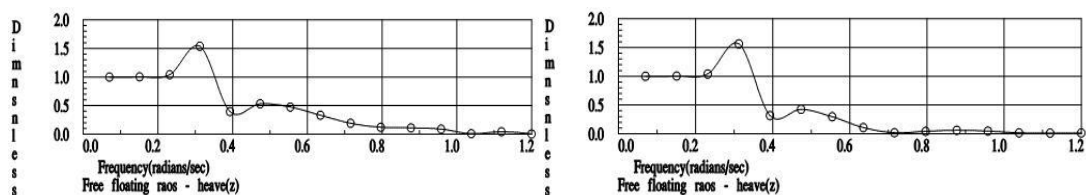


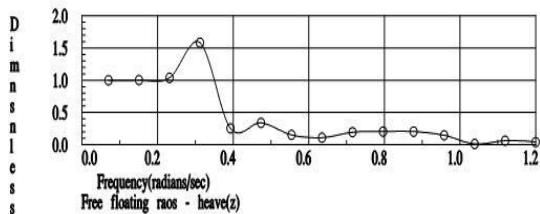
图3 改进平台垂荡附加质量

垂荡响应对平台正常的作业有着重要的影响,为了使钻井工作的正常进行在天车与大钩间要加装减振装置,有些平台还有升沉补偿结构。考虑到较为全面的对比分析改进型平台和原平台的垂荡响应之间的性能差异,从浪向角为 0° 、 45° 、 90° 三个角度进行评价,图5、图6分别给出了在不同浪向角下原平台和改进平台的在单位波高作用下的运动响应曲线图。



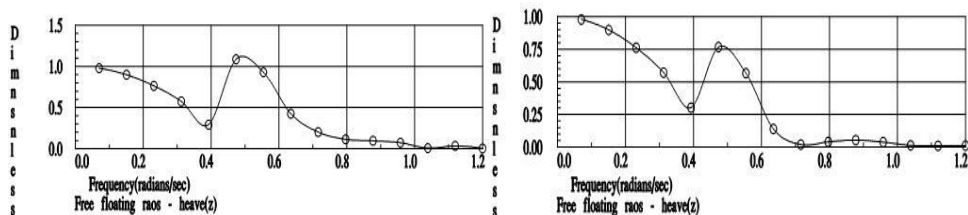
c 0 度浪向角

d 45 度浪向角



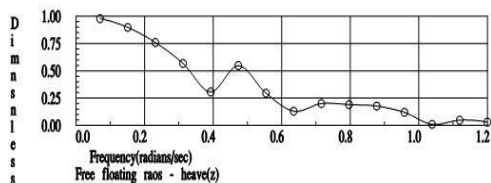
e 90 度浪向角

图4 不同浪向角下原平台单位波浪垂荡响应



f 0 度浪向角

g 45 度浪向角



h 90 度浪向角

图 5 不同浪向角下改进平台单位波浪垂荡响应

3 数据处理与分析

在数值模拟的处理文件中得到目标平台的垂荡附加质量分量数值，表中 Surge (x)、Sway (y)、Heave(z)、Roll(x)、Pitch(y)、Yaw(z)分别表示平台纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、首摇方向^[15]。原平台和改进型平台在六个分量中都给出了统计的最小值、最大值、均值，并取小数点后三位有效数字如表 2、3 所示，值得说明的是附加质量的正负与所选的边界条件有关，并不是代表负的质量存在，仅是代表数学含义。

表 2 原平台垂荡附加质量分量

名称	Min (kg)	Max (kg)	Mean (kg)
Surge (x)	-1.899×10^4	4.900×10^4	2.078×10^4
Sway (y)	-2.140×10^4	3.065×10^4	1.004×10^4
Heave(z)	3.956×10^7	6.585×10^7	5.716×10^7
Roll(x)	-1.309×10^6	4.446×10^5	-4.723×10^5
Pitch(y)	-1.339×10^6	1.654×10^6	6.656×10^5
Yaw(z)	-1.376×10^6	4.322×10^5	-5.020×10^5

表 3 改进平台垂荡附加质量分量

名称	Min (kg)	Max (kg)	Mean (kg)
Surge (x)	-1.875×10^4	5.747×10^4	2.033×10^4
Sway (y)	-2.207×10^4	2.380×10^4	9.460×10^3
Heave(z)	9.236×10^7	1.400×10^8	1.335×10^8
Roll(x)	-1.817×10^6	5.198×10^5	-5.254×10^5
Pitch(y)	-1.488×10^6	2.160×10^6	7.909×10^5
Yaw(z)	-2.557×10^5	4.631×10^5	-4.916×10^5

从表 2、3 统计数据可知，从垂荡附加质量分量最小值上看，改进型平台对纵荡、横荡、横摇、纵摇上的附加质量分量没有影响，而垂荡方向上的附加质量分量约减小了 $\frac{1}{2}$ ，首摇

方向的附加分量质量则减小为原来的 $\frac{1}{5}$ ；从最大值上看，改进型平台对纵荡、横荡、横摇、

纵摇、首摇方向上的垂荡附加质量分量几乎没有影响，垂荡方向的垂荡附加质量则增加了 1 倍；从均值上，改进型平台对纵荡、横荡、横摇、纵摇、首摇方向上的垂荡附加质量分量影响不大，垂荡方向的附加质量分量增加了约 1 倍；增加此构型的垂荡板后平台的垂荡附加质量约增加了 1 倍， $F = (m + \lambda)a \Rightarrow F - \lambda a = ma$ 角度分析对降低平台的垂荡运动响应有较为明显的效果。

表 4 原平台单位波浪垂荡响应

名称	Min(m)	Max(m)	Mean(m)
浪向角 0 度	4.582×10^{-3}	1.580	0.4600
浪向角 45 度	-1.392×10^{-2}	1.564	0.3987
浪向角 90 度	1.298×10^{-2}	1.582	0.4237

表 5 改进平台单位波浪垂荡响应

名称	Min(m)	Max(m)	Mean(m)
浪向角 0 度	3.363×10^{-3}	1.087	0.4323
浪向角 45 度	-1.079×10^{-2}	0.9785	0.3452
浪向角 90 度	1.015×10^{-2}	0.9875	0.3509

通过数据处理得到表 4、表 5，分别给出了浪向角为 0°、45°、90° 时原平台与改进平台在单位波高作用下垂荡响应的最小值、最大值和均值。进一步分析可知，增加垂荡结构后平台在浪向角为 0°、45°、90° 时垂荡响应的最小值、最大值、均值都有所减小，且最大值减小的较为明显，取得了较好的减小垂荡响应效果。为了直观反映数值大小，图 6 给出了研究平台单位波浪作用垂荡响应直方图。

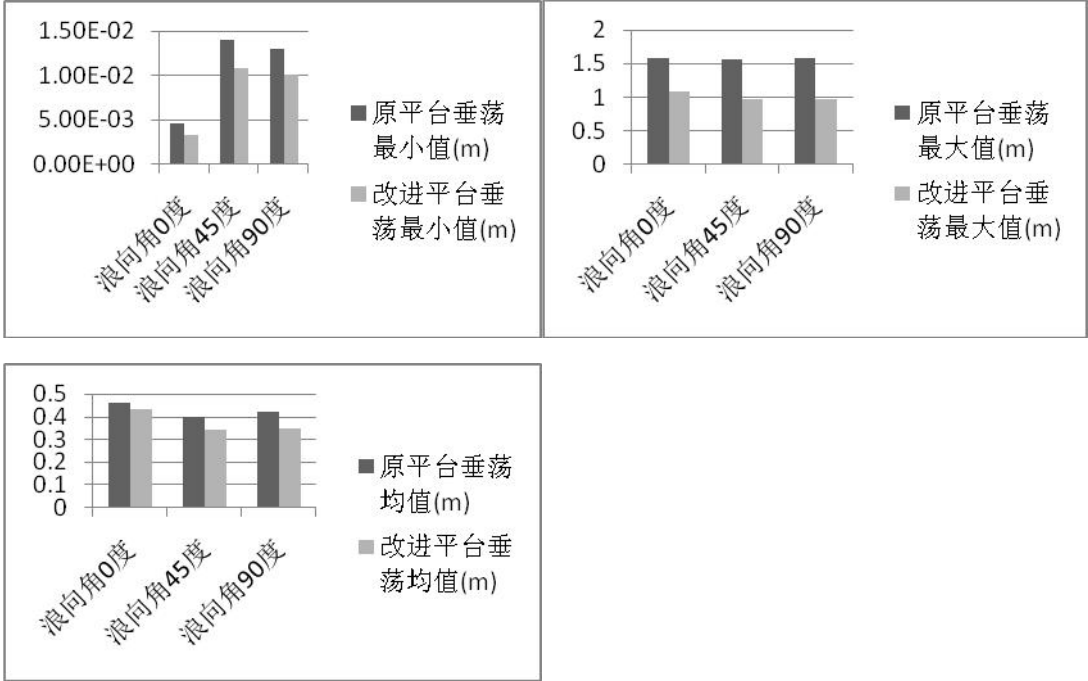


图 6 所研究平台单位波浪响应直方图

4 结论

根据对双浮体四立柱型半潜式钻井平台与增加垂荡板的双浮体四立柱半潜式钻井平台在垂荡附加质量，及平台在单位波高下的垂荡响应分析，得到以下结论：

- 1) 双浮体四立柱的半潜式钻井平台，增加新型垂荡结构后其垂荡附加质量分量中纵荡、横荡、横摇、纵摇分量几乎不受影响；
- 2) 双浮体四立柱的半潜式钻井平台，增加新型垂荡结构后其垂荡附加质量约增加一倍，能抵御一定的海浪冲击作用，进而减小平台垂荡的运动响应；
- 3) 平台在受到迎浪和横浪作用平台的垂荡响应要大于平台受到 45 度斜浪的响应，当增加新型的垂荡结构后，迎浪、45 度斜浪、横浪对平台的垂荡响应都有所降低，其中横浪引起的垂荡响应减小的较为明显；
- 4) 新型垂荡结构能很好的降低平台的垂荡响应以及提高平台的垂荡附加质量，能在一定程度上降低平台整体的运动响，在平台选型设计的初期可以采用该结构。

参考文献：

- [1]Olsen R M, Li G. Dry Tree Semi-Submersible With Reduced-Height Drilling Floor: US , US20130284447[P]. 2013.
- [2]Thiagarajan K P, Datta I, Ran A Z, et al. Influence of heave plate geometry on the heave response of classic spars[C]//ASME 2002 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2002: 621-627.
- [3]Zhang F, Yang J, Li R, et al. Effects of heave plate on the hydrodynamic behaviors of cell spar platform[C]//25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2006: 203-209.

- [4]Shen W, Tang Y, Liu L. Research on the hydrodynamic characteristics of heave plate structure with different form edges of a spar platform[J]. China Ocean Engineering, 2012, 26: 177-184.
- [5]Bull D, Gerber J, Powers W. Heave plate with improved characteristics: US, US 7878734 B2[P]. 2011.
- [6]Moreno J, Cameron M, Thiagarajan K P, et al. Hydrodynamic Performance of Heave Plates on Floating Offshore Wind Turbine Platforms[C]//The Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2015: 3-6.
- [7]Bozonnet P, Emery A. CFD Simulations for the Design of Offshore Floating Wind Platforms Encompassing Heave Plates[C]//The Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2015: 11-20.
- [8]Garrido-Mendoza C A, Thiagarajan K P, Souto-Iglesias A, et al. Computation of flow features and hydrodynamic coefficients around heave plates oscillating near a seabed[J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 59: 406-431.
- [9]Park S, Kim K H, Kim J S, et al. A Parametric Study on Motion Reduction Device for Floating Hybrid Power Generation Platform[C]//The Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2015: 8-10.
- [10]Li B, Huang Z, Ying M L, et al. Experimental and numerical study of the effects of heave plate on the motion of a new deep draft multi-spar platform[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2013, 18(2):229-246.
- [11] 夏国泽. 船舶流体力学[M]. 华中科技大学出版社, 2008: 117-118.
Xia Guo Ze. Ship fluid mechanics[M]. Hua Zhong University of Science and Technology Press, 2008: 117-118 (in Chinese).
- [12] 朱仁传, 郭海强, 缪国平,等. 一种基于 CFD 理论船舶附加质量与阻尼的计算方法[J]. 上海交通大学学报, 2009(2):198-203.
Zhu Ren Chuan, Guo Hai Qiang, Mou Guo Ping, et al. A method for calculating the additional mass and damping of ships based on CFD theory[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009(2): 198-203 (in Chinese).
- [13] 韩力. Electronics workbench 应用教程[M]. 电子工业出版社, 2001: 53-100.
Han Li. Workbench [M] Application Tutorial Electronics[M]. Publishing House of electronics industry, 2001: 53-100 (in Chinese).
- [14] 宋志安. 机械结构有限元分析: ANSYS 与 ANSYS Workbench 工程应用[M]. 国防工业出版社, 2010: 22-67.
Song Zhi An. Finite element analysis of mechanical structure: ANSYS and Workbench ANSYS engineering application [M]. National Defence Industry Press, 2010: 22-67 (in Chinese).
- [15] Zheng Z, Zhang X, Zhang J, et al. A Stable Platform to Compensate Motion of Ship Based on Stewart Mechanism[C]//International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Springer International Publishing, 2015: 156-164.