文章编号：1008－8857(2015)03－0168－06 DOI：10.13259/j.cnki.eri.2015.03.009

两种常用漂浮式风力机平台动态特性分析

成 欣，叶 舟，高月文，李 春
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘 要：分别针对MIT/NREL TLP和Umaine-Hywind Spar两种海上风力机浮式平台主体的水动力特性进行研究，旨在分析两者的系泊稳定性.基于海洋水动力学和结构动力学理论，建立了平台/缆索系统耦合模型，在水深和外界载荷激励相同的情况下，利用有限元分析ANSYS软件中的水动力学计算模块进行时域、频域响应分析，研究了两种平台在海风、海流和随机波联合作用下的动态响应，并分析了两种平台随波浪频率的响应变化.结果表明：MIT/NREL TLP平台的动态响应较大，而Umaine-Hywind Spar平台动态响应较小；两平台均在低频波浪作用下产生响应峰值.

关键词：海上风力机；漂浮式平台；时域；频域；动态特性

中图分类号：TK 83 **文献标志码**：A

Analysis on the dynamic performance of two floating platforms for offshore wind turbine

CHENG Xin, YE Zhou, GAO Yuewen, LI Chun
(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The studies on hydrodynamic characteristics of MIT/NREL TLP and Umaine-Hywind Spar for offshore wind turbines are done to analyze the two floating platforms. Based on marine hydrodynamics and structural dynamics theories, a coupled model of platform/cable is constructed to carry out time domain and frequency domain analysis with the same sea depth and external excitations using hydrodynamic calculation module of ANSYS, so as to study the dynamic responses of the two platforms under the combined effects of wind, current and irregular waves. Analyses about the response variations of the platforms with the wave frequency changes are also engaged. The results show that Umaine-Hywind Spar has weaker responses than MIT/NREL TLP. Besides, both of two platforms arrive at the maximum responses when the wave frequency is low.

Keywords: offshore wind turbine; floating platform; time domain; frequency domain; dynamic performance

海上有丰富的风能资源和广阔平坦的区域，使得近海风力发电技术成为近年来研究和应用的热点.我国已建成了东海大桥海上风电场，计划建设的近海浅水区域风电场有10多个[1].除渤海外，我

收稿日期：2013－10－10
基金项目：上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL1302)；上海市教育委员会科研创新资助项目(13YZ066)；国家自然科学基金资助项目(51176129)
第一作者：成 欣(1990—)，男，硕士研究生. 研究方向：漂浮式风力机. E-mail：cxdr320@163.com

国黄海、东海和南海平均水深均在 40 m 以上，浅水区域有限，非常适合漂浮式风力机系统的开发. 海上漂浮式风力机的最大特点是克服了在海床底部安装基础结构时受水深影响的缺点，使海上风电场的建设可向深水区发展[2]. 在海上风力机平台和开发深海油气的平台中，张力腿平台(TLP)和浮柱式平台(Spar)是公认的优秀平台形式[3]. TLP 是一种典型的深水平台，以其半固定、半顺应的运动特征在深水海洋工程中广为应用，其最重要的特点是平台的竖向运动很小[4-5]. Spar 平台属于顺应式平台的范畴，凭借其优良的性能和相对较低的造价，成为世界深海风力机和油气开采的主力平台类型之一[6]. 近年来，我国风电产业发展迅猛，海上石油开发业从近海走向深海[7]，为适应深海平台开发的需要，有关深海平台的相关理论和技术的研究得到了蓬勃发展.

浮式平台的动态特性能够反映平台在外界载荷作用下的响应特性和稳定性，对整个漂浮式风力机系统的稳定性和安全性有重大影响. 本文分别选取设计水深相同的 MIT/NREL TLP 平台和 Umaine-Hywind Spar 平台，借助有限元分析 ANSYS 软件中的水动力计算模块进行时域、频域响应分析计算，分析两种平台在相同风、浪、流作用下的位移动态响应以及平台响应随波浪频率的变化.

1　基本环境载荷

环境载荷指直接或间接由环境作用引起的载荷，包括由环境载荷引起的所有外力，如系泊力、运动惯性力、液舱晃荡力等. 漂浮式风力机所受到的环境载荷主要来自风、浪、流，还有内波、地震和海冰(大块浮冰或冰山). 本文仅考虑前三种载荷.

1.1　风载荷

海风对海洋结构物的工作影响很大，通常作用在结构上的风载荷是动态的，但一些结构对风载荷的反应几乎为静态形式. 在实际工程中常用设计风速法得到结构所受到的海风载荷. 根据我国海上移动平台入级规范可计算作用于构件上的风力 F，并应确定合力作用点的垂直高度[8]，即

$$F = C_h C_s S P \tag{1}$$

$$P = 0.613 \times 10^{-3} V^2 \tag{2}$$

式中：S 为平台在正浮或倾斜状态时受风构件的正投影面积；C_h、C_s 分别为受风构件的高度系数和形状系数；P 为风压；V 为设计风速.

1.2　波浪载荷

波浪载荷是漂浮式风力机平台所受到的主要环境载荷，且较风载荷更为复杂，这也是与陆上风力机最大不同之处. 作用在漂浮式平台上的水动力包括波浪激振力、由结构运动产生的辐射力和考虑波浪高阶效应的漂移力. 其中：波浪激振力包括由入射波形成的不稳定压力所引起的 F－K 力(佛汝德－克雷洛夫力)和由于结构存在影响波浪密度分布产生压差而引起的绕射力；辐射力包括附加质量力和辐射阻尼力. 对于大尺度结构，一般采用绕射理论对作用于物体表面上的整个水动压力进行积分计算波浪载荷. 在绕射理论中，流场用速度势函数描述，该速度势在流体各处应满足拉普拉斯方程，并满足物体表面、自由表面、海底及无穷远处的边界条件. 通常总速度势由入射势、绕射势(假定物体固定)和运动着的物体在静水中产生的辐射势组成，从而得到结构物的运动与作用力. 描述波浪运动的理论有许多，根据不同要素可分为线性和非线性、有旋和无旋、规则和不规则、单向和多向、浅水和深水等. 漂浮式风力机平台一般远离海岸，局部水深几乎不变；与波长相比，水深相对较大. 通常用无旋模型描述一个波浪在其生成区域外的传播或在水池内造波机产生的波浪传播. 理想流体和无旋流动的假设可使问题大大简化，其方法是引入速度势函数 $\Phi(x, y, z, t)$，利用速度势给出速度场 $V(x, y, z, t) = \nabla\Phi(x, y, z, t)$，于是流动的无旋性自动得到保证. 在流域内质量守恒(对于不可压缩流体，$\mathrm{div}V = 0$)可表示为速度势函数的拉普拉斯方程[9]，即

$$\Delta\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0 \tag{3}$$

通过伯努利-拉格朗日关系式可得到流域内的压力

$$p = p_0 - \rho_w g z - \rho_w \frac{\partial\Phi}{\partial t} - \frac{1}{2}\rho_w (\nabla\Phi)^2 \tag{4}$$

式中：p_0 为参考压力，即大气压力；ρ_w 为海水密度；g 为重力加速度.

波浪理论的分类与 3 个几何参数(波高 H、波长 L、水深 h)有关. 浅水理论与深水(或中等水深)理论之间的区别取决于厄塞尔参数 U_r，有

$$U_r = \frac{kA}{(kh)^3} = \frac{HL^3}{8\pi^2 h^3} = \frac{\varepsilon}{\mu^2} \quad (5)$$

式中：A 为波幅；$k = 2\pi/L$；非线性参数 $\varepsilon = A/h$；色散参数 $\mu = kh$.

当 $U_r < 1$，意味着色散效应较非线性效应占优势，用参数 $kA \equiv \varepsilon$ 对势函数 Φ 进行展开，可实现对问题的求解，即

$$\Phi = \varepsilon\phi^{(1)} + \varepsilon^2\phi^{(2)} + \varepsilon^3\phi^{(3)} + \cdots + \varepsilon^i\phi^{(i)} \quad (6)$$

式中，$\phi^{(i)}$ 为势函数的 i 阶导数.

这就是所谓的斯托克斯方法，由此可得到斯托克斯规则波模型. 相反，当 $U_r > 1$，h/L 为小参数，从而得到椭圆余弦波模型和孤立波模型. 在大部分海洋工程模型中，水深足够大，故可应用斯托克斯模型[10].

小尺度海洋结构上的波浪力 F_w 通常采用 Morison 方程计算，由拖曳力和惯性力组成，即

$$F_w = \frac{1}{2}C_D\rho_w D\left(u - \frac{\partial y}{\partial t}\right)\left|\left(u - \frac{\partial y}{\partial t}\right)\right| + C_M\rho_w\frac{\pi D^2}{4}\left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right) \quad (7)$$

式中：C_D、C_M 分别为曳力系数和惯性力系数；u 为垂直于构件轴线水质点的速度分量；D 为直立圆柱的直径.

1.3 海流载荷

海流载荷是由海流作用在海洋工程结构物上所产生的载荷. 海流力是作用在海洋结构物上的一种流动阻力. 根据水下结构物上的阻力是流体动能函数的原理，可按照稳定流动条件下阻力的数学表达式得到海流力，其计算需合理确定海平面以下某深度的海流速度、阻力系数和惯性力系数. 其中，海流设计流速应取为在平台作业海区范围内可能出现的最大流速值，包括潮流流速、风暴涌流速和风成流流速，还应考虑作业海区流速的垂向分布. 当波浪存在时，还应对无波浪时的流速垂向分布进行修正，以使瞬时波面处的流速保持不变.

当只考虑海流作用时，作用在平台水下部分构件的海流载荷为

$$F_c = \frac{1}{2}C_D\rho_w V_w^2 S \quad (8)$$

式中，V_w 为设计海流流速.

应注意海流与波浪的相互作用. 当采取 Morison 公式计算波浪载荷时，应将波浪水质点速度与海流速度矢量相加；当采用绕射理论计算波浪载荷时，海流载荷应按式(8)计算，并与波浪载荷矢量相加.

2 平台建模与计算

2.1 平台模型建立

本文研究对象为 MIT/NREL TLP 和 Umaine-Hywind Spar 平台. TLP 平台由麻省理工学院设计的张力腿平台改进得到，以混凝土为压舱物，8 根缆索分成 4 组构成 4 根筋腱，分别连接 4 根从底部水平延伸而出的辐条和位于海底的桩基，缆索由于预张力作用始终处于完全张紧状态；Spar 平台是缅因大学根据国际能源署(IEA)研发的 OC3-Hywind Spar 改变水深以便于试验比较而得来，主体为一深吃水的细长浮筒，周身附连 3 根悬链线缆索并通过三脚架连接，以增加平台系泊的抗偏刚度，相邻缆索夹角为 120°，且在一定预张力作用下处于半张紧半松弛状态[11].

本文采用 ANSYS 软件中水动力计算模块进行模型导入和表面网格划分，分析中对系泊系统进行了适当简化，忽略了系泊系统的阻力. 对 Umaine-Hywind Spar 作了去除三角形连接、缆索直接连在浮筒上的简化，这在静态分析中是合适的，但不适用于所有的动态条件[12]. 计算中没有对缆索进行线性简化. 两平台参数如表 1 所示. 图 1 分别为 MIT/NREL TLP 和 Umaine-Hywind Spar 平台几何模型.

2.2 响应算子与自由度

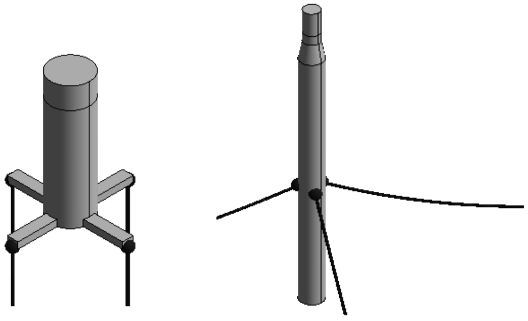
浮体波频运动 6 个自由度响应的稳态幅值称为幅值运动响应算子(response amplitude operator). 该算子是由波浪激励到船体或浮体运动的传递函数，为船体或浮体运动谱与波浪谱的比值，表征单位波幅的特征响应. 对于平动，其幅值响应算子 $Y_{y\zeta}^2(\omega) = S_{y\zeta}(\omega)/S_\zeta(\omega)$；对于转动，其幅值响应算子 $Y_{\theta\zeta}^2(\omega) = S_{\theta\zeta}(\omega)/S_\zeta(\omega)$，其中：$S_{y\zeta}(\omega)$ 和 $S_{\theta\zeta}(\omega)$ 分别为海上结构物的平动和转动运动谱；$S_\zeta(\omega)$ 为波浪谱；ω 为入射波浪的频率.

随机波浪可视为无数个振幅、频率不等，初相位随机并沿与 x 轴成不同角度的方向传播的简单余弦波的叠加. 通常把风浪和由此引起的摇荡运动都看成是具备各态历经性的平稳随机过程，平台对

表 1　MIT/NREL TLP 和 Umaine-Hywind Spar 平台参数

Tab. 1　Parameters of MIT/NREL TLP and Umaine-Hywind Spar

平台参数	数值	
	MIT/NREL TLP	Umaine-Hywind Spar
水深/m	200	200
直径/m	18	6.5～9.4
吃水/m	47.89	120
排水量/m^3	12 180	8 029
平台总质量(含压舱物)/kg	8 600 000	7 466 000
重心水平面下位置/m	40.61	89.92
横摇惯量/($kg \cdot m^3$)	571 600 600	4 229 000 000
纵摇惯量/($kg \cdot m^3$)	571 600 600	4 229 000 000
首摇惯量/($kg \cdot m^3$)	361 400 000	164 200 000
系泊缆数目/根	8	3
导缆孔/锚水下深度/m	47.89/200	70/200
导缆孔/锚至平台中心线间距/m	27/27	5.2/445
未张紧缆索长度/m	151.7	468
缆索直径/m	0.127	0.09
缆索质量/($kg \cdot m^{-1}$)	116	145
缆索拉伸刚度/N	1 500 000 000	384 200 200



(a) MIT/NREL TLP　　(b) Umaine-Hywind Spar

图 1　平台几何模型

Fig. 1　Geometric models of the platforms

任一波浪成分的响应是该成分波波幅的线性函数并与它对其它波浪成分的响应无关.利用平台各自由度的运动幅值响应算子给出在每一个波浪频率下的平台响应并叠加求和,可得到在多个波浪作用下的平台运动方程[13].可用平台位置的幅值响应算子反映在外界环境载荷激励下平台在 6 个自由度上的运动情况,从而体现平台稳定性.6 个自由度上的运动如图 2 所示.由于风、浪、流均为 -180° 入射,因此主要分析沿 x 轴的平动(纵荡)和绕 y 轴的转动(纵摇)位置幅值响应算子.

2.3　计算工况

在外界激励条件相同时对两种平台进行时域响应分析,风速恒定取为 10 $m \cdot s^{-1}$,设定海流速度从海平面至海底由 0.95 $m \cdot s^{-1}$ 线性减小至 0 $m \cdot s^{-1}$,随机波谱选择 P-M 谱,外界海况条件参数如表 2 所示.利用表 2 的数据建立平台与缆索在风、浪、流联合作用下的耦合计算模型,分析时间为 300 s,时间步长为 0.01 s.

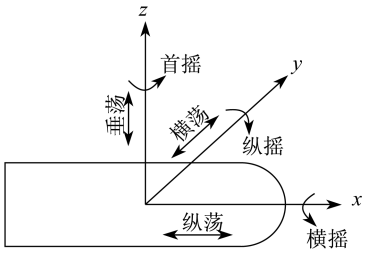


图 2　浮体在 6 个自由度上的运动

Fig. 2　Movements of the floating bodies in six degrees of freedom

表 2　外界海况条件参数

Tab. 2　Parameters of sea state conditions

参数名称	数值
平均风速/($m \cdot s^{-1}$)	10
表面海流速度/($m \cdot s^{-1}$)	0.95
海床海流速度/($m \cdot s^{-1}$)	0
P-M 谱起始频率/($rad \cdot s^{-1}$)	0.1
P-M 谱结束频率/($rad \cdot s^{-1}$)	3.5
谱峰周期/s	11.2
有义波高/m	6

3　结果分析

3.1　MIT/NREL TLP 平台

3.1.1　时域响应分析

图 3(a)、(b)分别为 MIT/NREL TLP 平台纵荡和纵摇时域位移幅值响应算子,其中纵坐标分别表示对应单位波幅的位移和偏转角.从图 3 中可看出,平台在风、浪、流载荷作用下绕起始位置作往复运动,纵荡和纵摇运动均在约 180 s 后开始进入峰值,其中纵荡最大位置幅值响应算子约为 5 $m \cdot m^{-1}$,纵摇最大位置幅值响应算子最大值约为 $17^\circ \cdot m^{-1}$.

3.1.2　频域响应分析

频域响应分析是研究平台随波浪频率变化的运动响应,考虑到载荷的作用方向与平台自身特点,此处分析纵荡、垂荡和纵摇的频域响应.图 4(a)、(b)、(c)分别为 MIT/NREL TLP 平台纵荡、垂荡和纵摇运动的频域响应算子.从图中可看

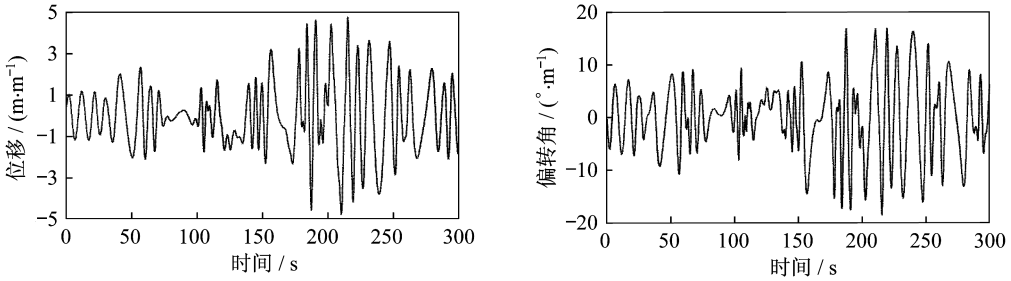


图 3 MIT/NREL TLP 时域幅值响应算子

Fig. 3 Time domain response amplitude operators of MIT/NREL TLP

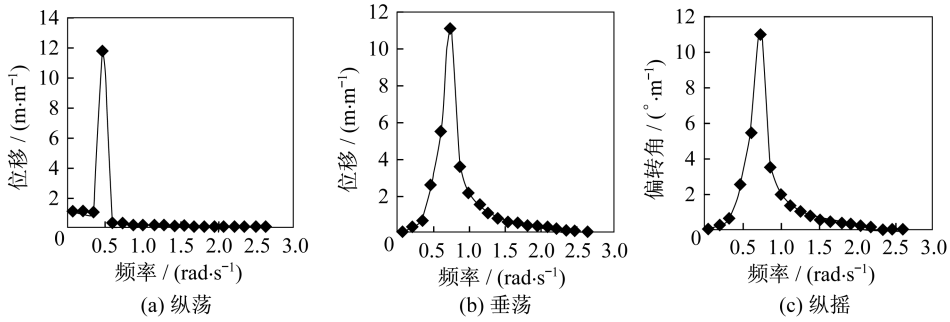


图 4 MIT/NREL TLP 频域响应算子

Fig. 4 Frequency domain response amplitude operators of MIT/NREL TLP

出,平台纵荡运动在0.07 rad·s^{-1}左右的波浪频率下产生响应峰值,之后随着波浪频率增大响应急剧降低,约在 0.4 ~0.7 rad·s^{-1}之间上升,随后便呈下降趋势;垂荡运动约在波浪频率 0.5 rad·s^{-1}时出现响应峰值,该值前后均为急升急降趋势;而纵摇运动的响应峰值出现在波浪频率0.8 rad·s^{-1}左右;此外,TLP 平台的垂荡和纵摇频域响应的峰值接近.

3.2 Umaine-Hywind Spar 平台

3.2.1 时域响应分析

图 5 为 Umaine-Hywind Spar 平台在相同载荷作用下的纵荡和纵摇位置幅值响应算子,其中纵坐标分别表示对应单位波幅的位移和偏转角.从图中可看出,平台在风、浪、流载荷的作用下绕起始位置作往复运动,且比 MIT/NREL TLP 的运动更为规律.相比于 TLP 平台,其纵荡位移响应算子均为 cm 级,平动位移变化很小;由于平台自身结构特性,纵摇位置响应亦很小,最大值不到 3°·m^{-1}.

3.2.2 频域响应分析

图 6 为 Umaine-Hywind Spar 平台的纵荡、垂荡和纵摇运动的频域响应算子.由图 6 可知,Spar 平台纵荡运动在0.07 rad·s^{-1}的波浪频率下

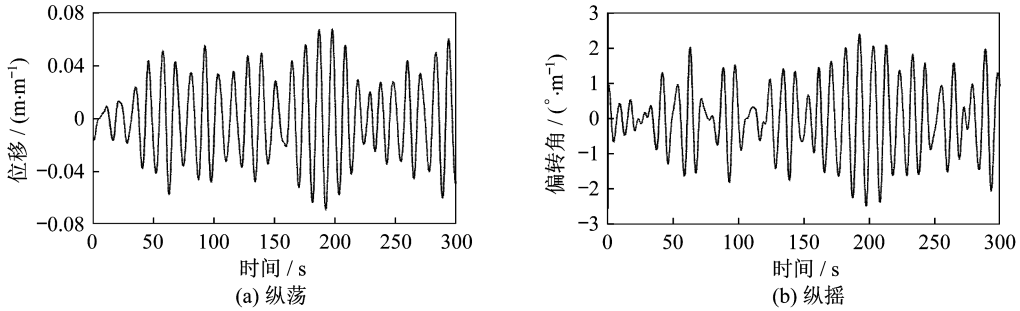


图 5 Umaine-Hywind Spar 时域幅值响应算子

Fig. 5 Time domain response amplitude operators of Umaine-Hywind Spar

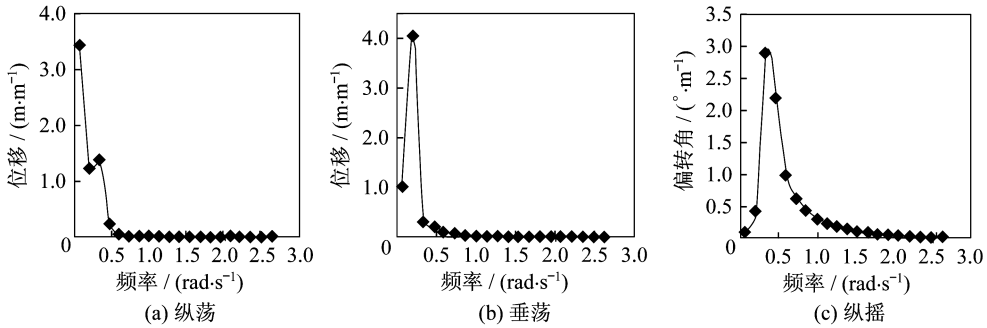


图 6　Umaine-Hywind Spar 频域响应算子

Fig. 6　Frequency domain response amplitude operators of Umaine-Hywind Spar

即出现响应峰值，且除0.20～0.34 rad·s^{-1}之间有小幅升高外，响应幅值呈下降趋势，且峰值略小于 TLP 平台的峰值；垂荡运动的响应峰值出现在频率小于0.5 rad·s^{-1}处，峰值较 TLP 平台的小；纵摇运动的响应峰值出现在频率 0.4～0.5 rad·s^{-1}之间，且与 TLP 平台相比峰值较小；Spar 平台的垂荡响应峰值大于纵荡和纵摇的响应峰值.

以上分析说明，在外界风、浪、流载荷作用下：

（1）MIT/NREL TLP 平台产生较大动态位移，并引发较大幅度的往复运动和摇摆运动；

（2）Umaine-Hywind Spar 平台动态位移较小，考虑其重心远远低于浮心，稳定性较好；

（3）两平台的纵荡、垂荡和纵摇运动响应对频率变化均较敏感，并在低频率时出现响应峰值.

4　结　语

本文在给定海况条件下，考虑风、浪、流联合作用，借助有限元分析 ANSYS 软件中的水动力模块计算分析了两种经典风力机平台的时域和频域响应. 当然，由于在计算过程中尚未考虑平台主体与风力机正常运行下的耦合作用，因此实际耦合情况下的稳定性情况尚有待继续分析. 若能在后续研究工作中加以解决，并能同时考虑平台与波浪之间的共振效应，则可对这两种经典平台的性能和实用性作出更具现实意义的对比，以期得到在不同海况条件下的最佳平台选择，或者通过对平台的改进以降低危险和建造成本. 这将具有更大的实用价值，且将为我国深海漂浮式风力机的发展提供更多有益的参考.

参考文献：

[1] 黄维平，刘建军，赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程，2009，**27**(2)：130－134.

[2] 高伟，李春，刘全. 深海漂浮式风力机的概念设计与气动-水动力耦合特性评述[J]. 能源研究与信息，2011，**27**(3)：168－173.

[3] 唐友刚，张素侠，张若瑜，等. 深海系泊系统动力特性研究进展[J]. 海洋工程，2008，**26**(1)：120－126.

[4] 胡志敏，董艳秋，张建民. 张力腿平台波浪载荷计算[J]. 中国海洋平台，2002，**17**(3)：6－11.

[5] 董艳秋，胡志敏，张翼. 张力腿平台及基础设计[J]. 海洋工程，2000，**18**(4)：63－68.

[6] 王兴刚，孙昭晨，梁书秀，等. 水深和螺旋板对 Classic Spar 水动力特性的影响[J]. 中国海洋平台，2011，**26**(1)：23－30.

[7] 曾晓辉，沈晓鹏，吴应湘，等. 深海平台分析和设计中的关键力学问题[J]. 船舶工程，2005，**27**(5)：18－21.

[8] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[M]. 北京：人民交通出版社，2012.

[9] 唐友刚. 海洋工程结构动力学[M]. 天津：天津大学出版社，2008.

[10] MORLIN B. 海洋工程水动力学[M]. 刘水庚，译. 北京：国防工业出版社，2010.

[11] ROBERTSON A N，JONKMAN J M. Loads analysis of several offshore floating wind turbine concepts[C]// International Society of Offshore and Polar Engineers 2011 Conference，Hawaii，2011.

[12] JONKMAN J. Definition of the floating system for phase IV of OC3[R]. NREL/TP－500－47535，2010.

[13] 吴秀恒. 船舶操纵性与耐波性[M]. 2 版. 北京：人民交通出版社，1999.