

# 系泊参数对漂浮式风力机平台的影响研究

汤金桦<sup>1</sup>, 李春<sup>1,2</sup>, 叶舟<sup>1,2</sup>, 阳君<sup>1,2</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

**摘要:** 海上漂浮式风力机的研究已成为风电领域的重点与热点, 而系泊对漂浮式风力机平台的安全有极其重要的影响, 因此本文选取基于 Barge 平台的 NREL 5MW 漂浮式风力机作为研究对象, 研究系泊参数对漂浮式风力机动态响应及系泊缆张力的影响。结果表明: 系泊直径和系泊长度的变化对漂浮式风力机纵摇及系泊缆顶端张力影响较大, 对垂荡和纵摇影响较小; 当系泊直径为 0.3m 时, 纵荡位移偏移量达到最大, 系泊缆顶端张力达到最小; 随着系泊长度的增长, 纵荡位移不断增大, 系泊缆顶端张力不断减小。

**关键词:** 漂浮式风力机; Barge 平台; 系泊参数; 动态响应

**中图分类号:** TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2016)01-0180-06

## Influence of mooring parameters on floating platform of wind turbine

TANG Jinhua<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1,2</sup>, YE Zhou<sup>1,2</sup>, YANG Jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The study of floating offshore wind turbine has become a focus of wind turbine field, and moorings has important impact on the safety of floating wind turbine. The paper selected NREL 5MW floating wind turbine as object based on the Barge platform to study the influence of mooring parameters on the dynamic response of floating wind turbine and mooring stress. The result showed that the change of mooring diameter and length has greater influence on longitudinal shake and tension of mooring floating wind turbine, and has less influence on vertical swing and longitudinal shake; when mooring diameter is 0.3 m, the displacement offset volume of longitudinal swing reaches the maximum, the tension of mooring line top reaches the minimum; with the increase of mooring length, longitudinal swing displacement constantly increases, the tension of mooring line top constantly reduces.

**Key words:** floating wind turbine; Barge platform; mooring parameters; dynamic response

人类社会的不断发展, 导致化石能源的长期匮乏和资源危机的日益严峻, 许多国家将目光聚焦新能源, 尤其是清洁的风能资源<sup>[1]</sup>。全球风能理事会 (Global Wind Energy Council, GWEC) 2015 年 2 月发布的《2014 年全球风电统计数据》报告显示, 2014 年全球风电累计装机容量新增 51 477 MW, 同比增长 16%<sup>[2]</sup>。与陆上风能相比, 海上风能具有安全、无污染、可再生、储量大、分布广和不占用陆地资源等优点<sup>[3-4]</sup>。未来风电场建设的必然趋势是“由陆向海、由浅向深、由固定基础向漂浮式平台”<sup>[5]</sup>。

近年来, 国内外学者对漂浮式风力机做了初步

研究。文献[6]通过有限元法并运用辐射/绕射理论对漂浮式风力机 Spar 平台在不同水深条件下的进行计算与对比, 得到 F-K 力和辐射阻尼力随频率的变化受水深影响较小, 而绕射力和附加质量力在垂荡自由度上的峰值随水深增加而减小。文献[7]采用有限元方法并结合多体动力学方法, 研究了 3 种平台结构在风、浪、流载荷作用下的时域和频域动态响应, 结果表明运动幅值和平台所受波浪力均在低频波浪作用下出现较大响应。文献[8]对漂浮式风力机在恶劣环境下的动力学响应进行分析, 对比了风力机在小于切出风速运行时和恶劣环境停

收稿日期: 2015-07-29; 修回日期: 2015-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (E51176129); 上海市教育委员会科研创新 (重点) 项目 (13ZZ120、13YZ066); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (博导) 项目 (20123120110008); 上海市科委项目资助 (13DZ2260900)

作者简介: 汤金桦 (1991-), 男, 山东威海人, 硕士研究生, 研究方向: 风力发电。

机时的动力学响应。文献[9]分别计算两种不同结构形式的深水驳船平台水动力特性,特别是在极端海况作用下的水动力特性,以及考虑了变桨控制技术对水动力特性的影响。

由此可见,国内外学者对漂浮式风力机的研究主要侧重于在环境载荷作用下平台的动态响应及稳定性分析,对其系泊系统的研究较少。针对浮式平台系泊系统的研究主要集中在深海浮式石油平台领域<sup>[10-11]</sup>,但漂浮式风力机与浮式石油平台相比,所受到的载荷并不完全相同。因此,对漂浮式风力机系泊系统的研究尤为重要。

本文选取漂浮式风力机 Barge 平台系泊系统作为研究对象,研究系泊系统参数对系统动态响应及系泊缆张力的影响,以期为漂浮式风力机系泊系统的设计和分析提供参考。

## 1 漂浮式风力机模型

本文选取基于 ITI Energy Barge 平台的 NREL 5MW 漂浮式风力机为研究对象,漂浮式风力机模型如图 1 所示。

漂浮式风力机在外界载荷作用下可视为具有六

个自由度的刚体,六自由度上的运动包括沿  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的平动及绕各轴的转动。平动包括纵荡 (Surge)、横荡 (Sway) 和垂荡 (Heave),其大小由长度单位表示;转动包括横摇 (Roll)、纵摇 (Pitch) 和首摇 (Yaw),其强弱由角度单位表示。Barge 平台在六自由度上的运动如图 1 所示。

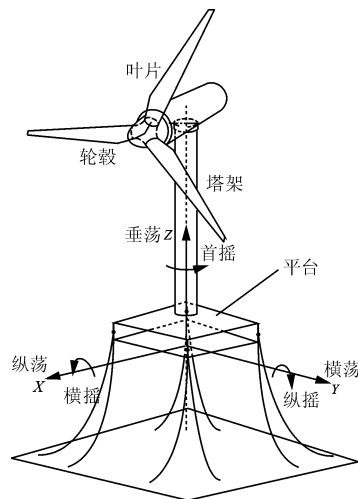


图 1 Barge 平台风力机模型及平台自由度示意图

ITI Energy Barge 平台<sup>[12]</sup>主要参数见表 1, NREL 5MW 风力机<sup>[13]</sup>要参数见表 2。

表 1 ITI Energy Barge 平台参数

| 长 × 宽/<br>m | 吃水/<br>m | 排水量/<br>m <sup>3</sup> | 平台总<br>质量/kg            | 质心/<br>m | 横摇惯量/<br>(kg · m <sup>-2</sup> ) | 纵摇惯量/<br>(kg · m <sup>-2</sup> ) | 首摇惯量/<br>(kg · m <sup>-2</sup> ) | 系泊缆<br>数目 | 缆索<br>长度/m | 缆索<br>直径/m | 缆索质量/<br>(kg · m <sup>-3</sup> ) | 缆索拉伸刚<br>度/(N · m <sup>-1</sup> ) |
|-------------|----------|------------------------|-------------------------|----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|------------|------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 40 × 40     | 4        | 6 × 10 <sup>3</sup>    | 5.452 × 10 <sup>6</sup> | 0.2818   | 7.269 × 10 <sup>8</sup>          | 7.269 × 10 <sup>8</sup>          | 1.454 × 10 <sup>9</sup>          | 8         | 473.3      | 0.0809     | 130.4                            | 5.89 × 10 <sup>8</sup>            |

表 2 5MW NREL 风力机参数

| 功率/<br>MW | 切出风速/<br>(m · s <sup>-1</sup> ) | 叶片数 | 额定风速/<br>(m · s <sup>-1</sup> ) | 风轮直<br>径/m | 平台质<br>量/kg           | 轮毂直<br>径/m | 风轮质<br>量/kg           | 轮毂高<br>度/m | 机舱质<br>量/kg           | 切入风速/<br>(m · s <sup>-1</sup> ) | 塔架质<br>量/kg            |
|-----------|---------------------------------|-----|---------------------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
| 5.0       | 25                              | 3   | 11.4                            | 126        | 7.0 × 10 <sup>5</sup> | 3.0        | 1.1 × 10 <sup>4</sup> | 90         | 2.4 × 10 <sup>5</sup> | 3                               | 3.47 × 10 <sup>5</sup> |

## 2 平台及系泊系统动力学模型

### 2.1 漂浮式风力机平台动力学模型

漂浮式风力机平台的运动可以由波频运动和低频运动叠加<sup>[14]</sup>而成。因此,时域运动方程的求解过程可分为求解波频运动和低频运动的过程。方程(1)为漂浮式风力机平台在海风、波浪和海流等外力作用下的耦合运动方程:

$$[M_s + M_d] \ddot{x}(t) = F_{sw}(t) + F_c(t) + F_w(t) + F_h(t) + F_d(t) + F_{wf}(t) \quad (1)$$

式中:  $\ddot{x}$  为加速度, m/s<sup>2</sup>;  $M_s$  为结构质量;  $M_d$  为漂移频率下的附加质量;  $F_{sw}$  为波浪慢漂力, N;  $F_c$  为流

力, N;  $F_w$  为风力, N;  $F_h$  为静水力, N;  $F_d$  为阻尼力, N;  $F_{wf}(t)$  为平台的一阶波频力, 在仅计算平台的低频慢漂运动时此项可以忽略。

漂浮式风力机平台系泊系统由于其质量、柔度较大, 一阶波浪谱能量非常低, 结构物在水平面内不会发生波浪激励运动。对于漂浮式风力机平台, 慢漂共振出现在纵荡、横摇和首摇运动中。但漂浮式风力机平台垂荡、横摇及纵摇运动的固有周期处于波浪激励范围内, 因此必须考虑一阶波浪载荷。基于这种变化情况, 一阶波浪力应当进行修正。

总波频力(绕射力和 Froude - Krylov 力)可由下式计算:

$$F_{wf}(t) = \text{Re} \left[ \sum_{i=1}^N a_j (f_j + (M_d - M_j) \ddot{x}_j + (C_d - C_j) \dot{x}_j) e^{i(-\omega_j t + kx_p + \varepsilon_j)} \right] \quad (2)$$

式中:  $\ddot{x}_j = -\omega_j^2 x_j, \text{m/s}^2$ ;  $\dot{x}_j = -i\omega_j x_j, \text{m/s}$ ;  $M_d$  为结构的慢漂附加质量;  $M_j$  为频率  $\omega_j$  处的附加质量;  $C_d$  为漂移频率阻尼;  $C_j$  为频率  $\omega_j$  时的阻尼;  $a_j$  为规则波波幅,  $\text{m}$ ;  $x_p$  为波浪原点与波浪之间的垂直距离,  $\text{m}$ 。

## 2.2 系泊系统悬链线模型

Barge 平台漂浮式风力机系泊系统采用悬链线系泊系统,系泊缆绳产生的恢复力作用在导缆孔处,系泊系统缆绳模型如图 2 所示。

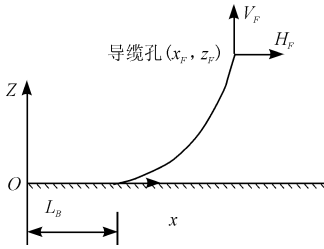


图2 悬链线示意图

当缆绳与海底接触时,其方程<sup>[15]</sup>为:

$$x_F = L_B + \frac{H_F}{w} \ln \left[ \frac{V_F}{H_F} + \sqrt{1 + \left( \frac{V_F}{H_F} \right)^2} \right] + \frac{H_F L}{EA} + \frac{C_B w}{2EA} \left[ -L_B^2 + \left( L_B - \frac{H_F}{C_B w} \right) \cdot \max \left( L_B - \frac{H_F}{C_B w}, 0 \right) \right] \quad (3)$$

$$z_F = \frac{H_F}{w} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{H_F}{V_F} \right)^2} - 1 \right] + \frac{V_F^2}{2EAw} \quad (4)$$

式中:  $x_F, z_F$  为导缆孔坐标;  $H_F, V_F$  为缆绳在导缆孔出的水平和竖直恢复力,  $\text{N}$ ;  $C_B$  为缆绳与海底的摩擦系数;  $EA$  为缆绳抗拉刚度,  $\text{N/m}$ ;  $w$  为单位长度缆绳在水中所受的重力,  $\text{N}$ ;  $L$  为缆绳未拉伸时的长度,  $\text{m}$ ;  $L_B$  为与海底接触缆绳的长度,  $\text{m}$ ,  $L_B = L - V_F/w$ 。

当缆绳被完全提起即没有缆绳与海底接触时,悬链线方程为:

$$x_F = \frac{H_F L}{EA} + \frac{H_F}{w} \left\{ \ln \left[ \frac{V_F}{H_F} + \sqrt{1 + \left( \frac{V_F}{H_F} \right)^2} \right] - \ln \left[ \frac{V_F - wL}{H_F} + \sqrt{1 + \left( \frac{V_F - wL}{H_F} \right)^2} \right] \right\} \quad (5)$$

$$z_F = \frac{H_F}{w} + \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{H_F}{V_F} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{V_F - wL}{H_F} \right)^2} \right] + \frac{1}{EA} \left( V_F L - \frac{wL^2}{2} \right) \quad (6)$$

当已知系泊缆参数和导缆孔的位置坐标时,通过悬链线方程可以得到系泊缆在导缆孔处的水平和竖直恢复力,并通过计算得到缆绳恢复力矩。Jason J M 的实验验证了此模型的准确性<sup>[16]</sup>。

## 3 环境参数设定

我国沿海海域频繁出现的海况为三级浪,有义波高  $H_s$  为 0.5 ~ 1.25 m,波浪周期为 5 s;极端海况为有义波高  $H_s$  为 7.5 m,波浪周期为 8 ~ 9 s。西太平洋海域频繁出现的海况为四级浪,有义波高  $H_s$  为 1.25 ~ 2.5 m,波浪周期 7 s;极端海况  $H_s$  为 9 m,波浪周期为 10 s。西太平洋最恶劣区域 NW15 海区频繁出现的海况为五级浪,有义波高  $H_s$  为 2.5 ~ 4.0 m,波浪周期为 8 s;极端海况  $H_s$  为 11 m,波浪周期为 11 s<sup>[17]</sup>。

因此,考虑到漂浮式风力机实际部署海域的风况与海况,本文环境条件设定如下:风速为 11.4 m/s;波浪谱为 P-M 谱,有义波高为 7.5 m,谱峰周期为 8 s;海流速度为 1 m/s。为简化计算,假定风浪流方向均为垂直入射风力机风轮迎风面的方向,即沿 x 轴正方向,故只需考虑风力机平台纵荡、垂荡和纵摇方向的动态响应。

## 4 结果与分析

漂浮式风力机 Barge 平台所采用的悬链线式系泊系统主要由缆绳自重提供恢复力。当漂浮式风力机处于平衡位置时,部分缆绳与海底接触;当漂浮式风力机产生位移时,与海底接触部分的缆绳长度发生变化,从而改变恢复力。悬链线系泊主要有 3 个参数:系泊直径、系泊长度和导缆孔位置。通过改变系泊相关参数,分别研究各参数对平台动态响应的影响。

### 4.1 系泊直径的影响

仅考虑系泊直径对平台及系泊缆顶端张力的影响时,系泊长度和导缆孔位置均不改变。系泊直径对平台动态响应及系泊缆顶端张力的影响如图 3 所示。

随着系泊直径的增加,由图 3(a) 所示,纵荡位移偏移量先增加再减小,当系泊直径为 0.3 m 时,纵荡位移偏移量最大,达到 58.68 m,偏移量的标准差亦达到最大,纵荡动态响应程度先增大后减小;由图 3(b) 及 3(c) 所示,取最大工况和最小工况下的系泊直径对垂荡和纵摇几乎没有影响;由图 3(d) 所示,系泊缆顶端张力最大值先减小后增加,当系泊直径为 0.3 m 时,系泊缆顶端张力取得最小值 127.2 kN,动态响应标准差先减小后增大,张力动态响应程度先减小后增大。

### 4.2 系泊长度的影响

仅考虑系泊长度对平台的影响及系泊缆顶端张力时,系泊直径和导缆孔位置均不改变。系泊长度对平台动态响应及系泊缆顶端张力的影响如图 4 所示。随着系泊长度的增长,由图 4(a)所示,纵荡位

移偏移量不断增加,偏移量的标准差增大,纵荡动态响应程度亦是增大;由图 4(b)及图 4(c)所示,取最大工况和最小工况下的系泊长度对垂荡和纵摇几乎没有影响;由图 4(d)所示,系泊缆顶端张力最大值不断减小,动态响应标准差减小,张力动态响应程度

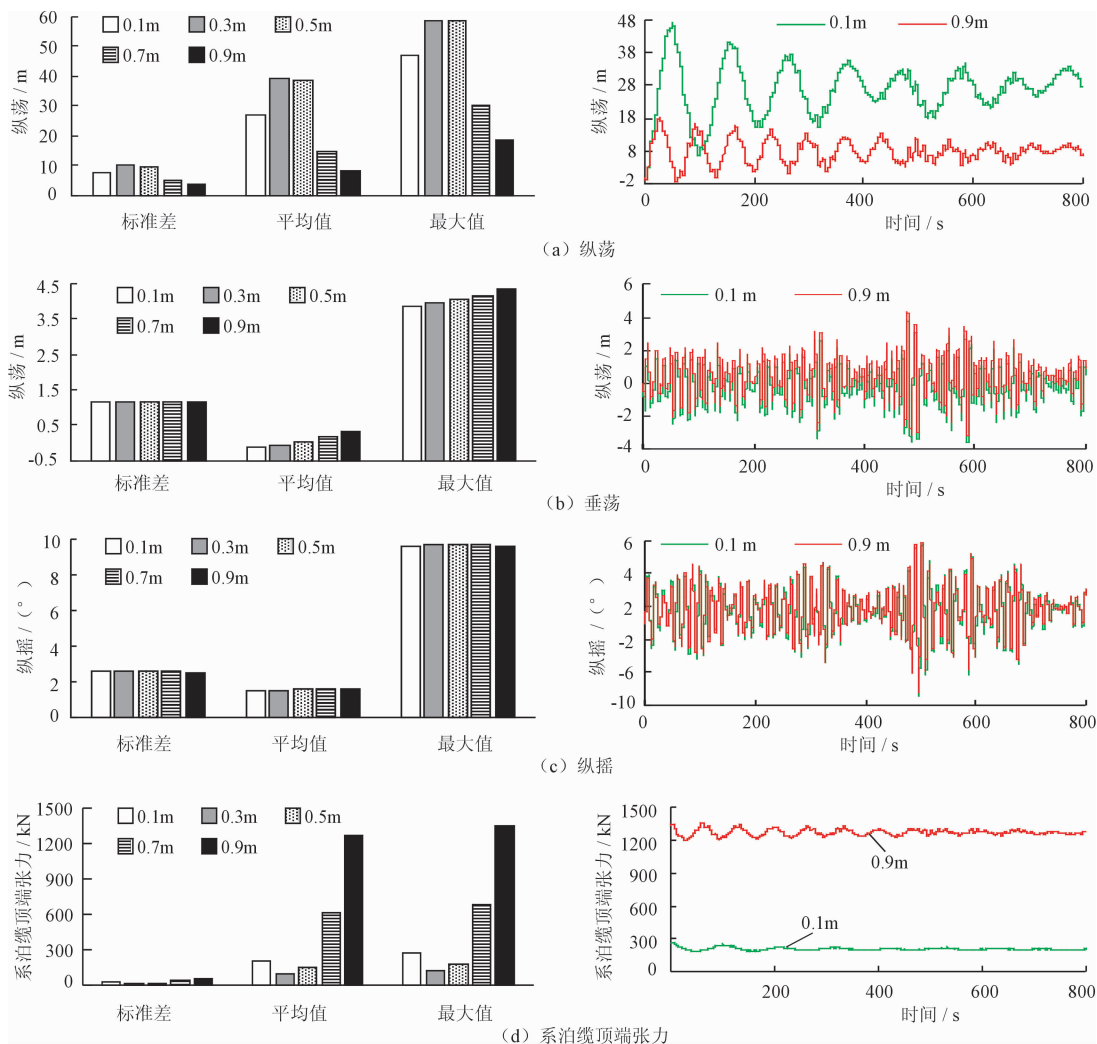
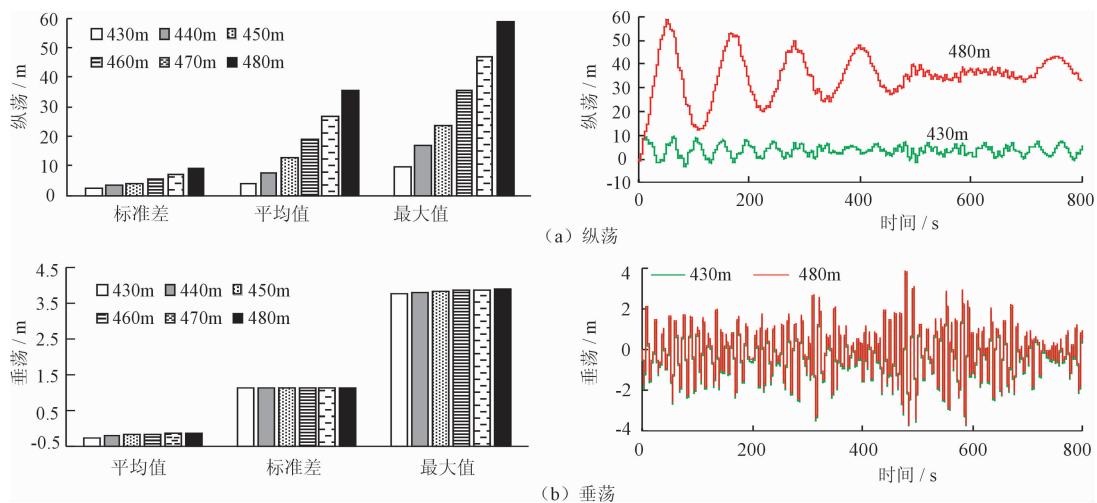


图 3 系泊直径的影响



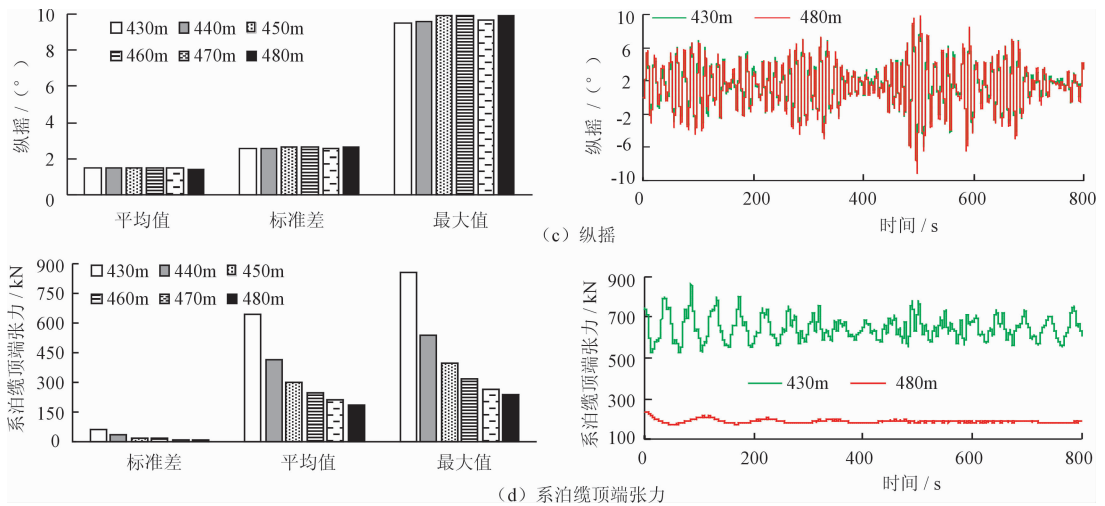


图4 系泊长度的影响

减小。系泊长度为480 m时,因系泊处于较为舒张的状态,对平台的拉紧作用不够明显,导致平台在纵荡方向位移发生剧烈变化,所以系泊顶端张力相较于430 m系泊更小。

### 4.3 导缆孔位置的影响

仅考虑导缆孔位置对平台的影响及系泊顶端

张力时,系泊直径和系泊长度均不改变。导缆孔位置对平台动态响应及系泊顶端张力的影响如图5所示。

由图5可知,仅考虑导缆孔位置变化因素时,由柱形图和散点图可以看出,导缆孔位置的变化对平台的动态响应和系泊顶端张力的影响很小。

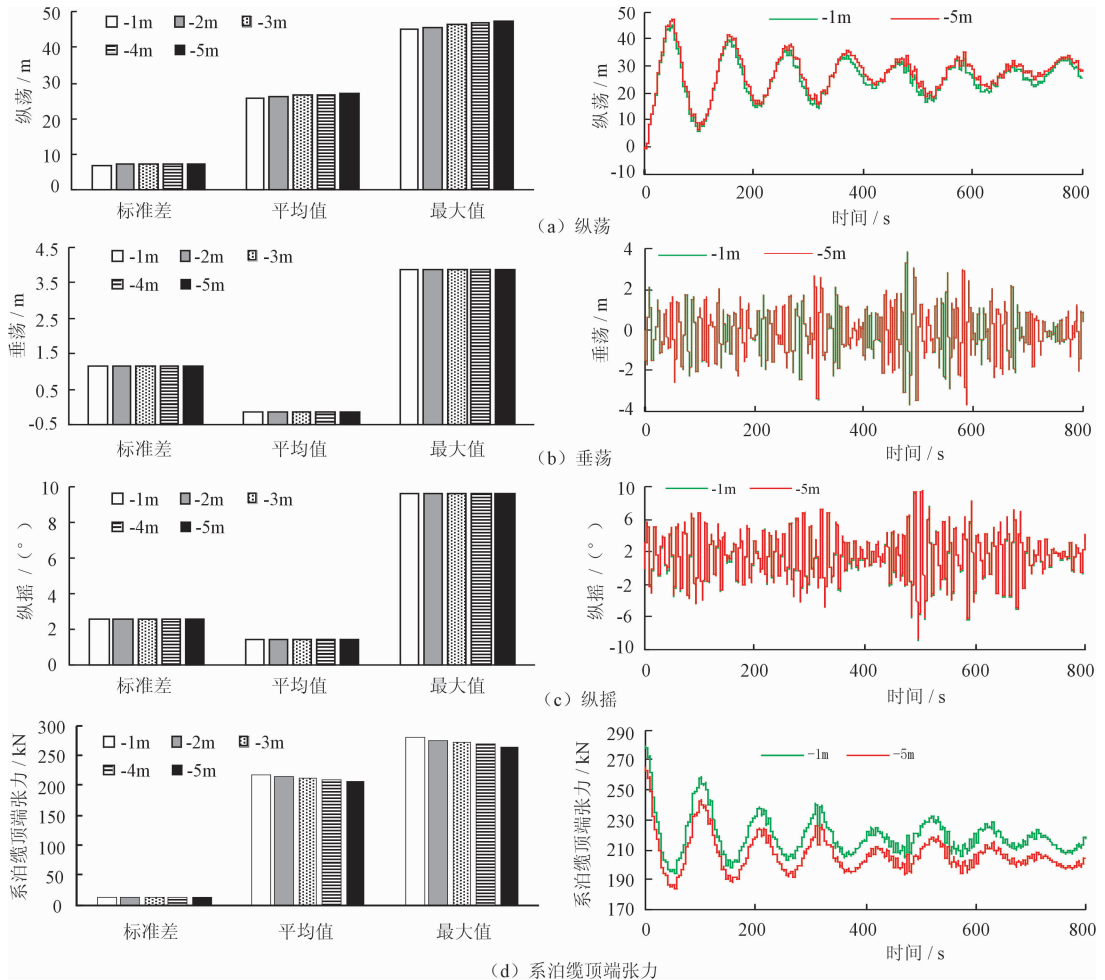


图5 导缆孔位置的影响

## 5 结 论

本文以 ITI Energy Barge 平台的 NREL 5MW 漂浮式风力机为研究对象,考虑了规则波浪谱与海流耦合作用,分别研究了系泊直径、系泊长度和导缆孔位置等系泊参数对平台的动态响应及系泊缆顶端张力的影响,得到以下结论:

(1) 系泊直径变化对漂浮式风力机纵荡及系泊缆顶端张力影响较大,对垂荡和纵摇影响影响较小。当系泊直径为 0.3 m 时,纵荡位移偏移量达到最大,系泊缆顶端张力达到最小值。

(2) 系泊长度变化对漂浮式风力机纵荡及系泊缆顶端张力影响较大,对垂荡和纵摇影响影响较小。随着系泊长度的增加,纵荡最大值不断增加,系泊缆顶端张力不断减小。

(3) 导缆孔位置变化对平台的动态响应和系泊缆顶端张力几乎没有影响。

### 参考文献:

- [1] 郑崇伟,胡秋良,苏勤,等. 国内外海上风能资源研究进展[J]. 海洋开发与管理,2014(6):25-32.
- [2] Lauha F. Global wind statistics 2014[R]. Global Wind Energy Council, 2015.
- [3] Junginger M, Turkenburg W C, Faaij A. Cost reduction prospects for offshore wind farms[J]. Wind Engineering, 2004,28(1):97-118.
- [4] U. S. Department of Energy (U. S. DOE). 20% wind energy by 2030: increasing wind energy's contribution to U. S. electricity supply [R]. DOE/GO-102008-2567. Washington, DC; U. S. DOE. 2008.
- [5] 李春,叶舟,高伟,等. 现代陆海风力机计算与仿真[M]. 上海:上海科学技术出版社,2012.
- [6] 成欣,叶舟,周国龙,等. 漂浮式风力机平台在不同水深下的响应特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25

(4):97-103.

- [7] 丁勤卫,李春,杨阳,等. 极限海况下三种漂浮式风力机平台的动态响应对比[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):159-165.
- [8] Karimirad M, Moan T. Extreme dynamic structural response analysis of catenary moored spar wind turbine in harsh environmental conditions [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2011, 133(4):1072-1088.
- [9] Jonkman J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine [R]. Dissertations & Theses - Gradworks, 2007.
- [10] 李亚男,唐文献,张建,等. 基于锚泊系统的半潜式海洋平台系泊缆长度优化方法研究[J]. 船舶工程,2014,36(3):115-118.
- [11] 乔东生,欧进萍. 半潜式平台两种锚泊系统的疲劳损伤比较计算[J]. 振动与冲击,2014,33(13):1-5+25.
- [12] Roberston 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.
- [13] Jonkman J M, Matha D. A quantitative comparison of the responses of three floating platforms [C]//. European Offshore Wind 2009 Conference and Exhibition, Stockholm, 2009.
- [14] 叶小嵘. 海上浮式风力机系统环境载荷及耦合运动性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [15] Jonkman J M, Buhl M L Jr. Development and verification of a fully coupled simulator for offshore wind turbines [C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV,2007:28-53.
- [16] Jonkman J M. Dynamics of offshore floating wind turbines - model development and verification [J]. Wind Energy, 2009,12(5):459-492.
- [17] 戴仰山,沈进威,宋竞正. 船舶波浪载荷[M]. 北京:国防工业出版社,2007.