

# 浮体间距对半潜式风力机平台水动力性能的影响

张洪达, 王军龙, 鲁效平, 刘祥银

(山东中车风电有限公司风电装备研究所, 济南 250022)

**摘 要:** 由于半潜式海上风力机平台的浮体(立柱和下浮箱)之间的相互影响, 船长与浮体中心线间距的比值  $L/b$  不同时半潜式风力机平台的水动力性能存在显著差异。对 5 种不同  $L/b$  值的半潜式风力机平台的波浪载荷、运动性能进行频域水动力数值预报, 探究半潜式风力机平台水动力性能随  $L/b$  值的变化规律。结果表明, 当  $L/b$  值介于 1.8~2.0 之间, 半潜式海上风力机平台具有最佳的水动力性能, 这也与国内外已经交付的 11 条半潜式平台的主尺度统计资料相吻合。

**关键词:** 海上风力机; 半潜平台; 水动力学; 数值模拟; 结构优化; 波浪载荷; 运动响应

**中图分类号:** TK8

**文献标识码:** A

## 0 引 言

与普通海上浮式结构物不同, 海上浮式风力机处于风、浪、流多种荷载联合作用的复杂海洋环境之中。另外, 浮式风力机系统结构高耸, 风倾力矩对海上风力机浮式平台影响非常明显, 而且还会受到风力机叶片转动时产生的气动载荷<sup>[1]</sup>。

本文对 5 种船长  $L$  与浮体中心线间距  $b$  比值  $L/b$  的半潜式风力机平台进行频域水动力数值预报, 求解风力机平台的波浪载荷、运动性能的幅值响应算子  $RAO$  (response amplitude operator) 和短期响应, 探究半潜式风力机平台的水动力性能随  $L/b$  的变化规律, 确定半潜式风力机平台具有优良水动力性能的  $L/b$  值区间。

## 1 水动力响应

半潜式海上风力机的特殊结构形式决定了结合三维势流理论和 Morison 公式计算波浪载荷比较合适。二者存在一定区别为 Morison 理论忽略频率对水动力系数的影响, 而三维势流理论能考虑立柱和浮箱之间的相互作用, 以及波浪绕射和辐射效应<sup>[2]</sup>。

考虑到风力发电机组和浮体平台在风浪流联

合作用下的运动响应非常困难, 故此处暂只考虑半潜式风力机平台在波浪中的受力和运动<sup>[3]</sup>。如图 1 所示, 在总长、吃水确定的情况下对 5 种不同  $L/b$  值的半潜式风力机平台选取几种主要载荷控制参数进行  $RAO$  和短期预报响应。图中,  $L$  为船长,  $B$  为船宽,  $b$  为浮体中心线间距,  $B_s$  为浮体宽。

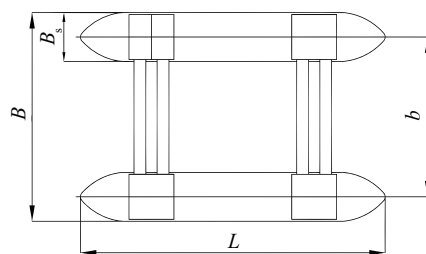


图 1 半潜式风力机平台示意图

Fig. 1 Sketch of semi-submersible wind turbine platform

为模拟目标海上风力机的真实响应, 建立船体湿表面 Panel 模型以模拟绕射力和辐射力, 横撑部分则需要另外建立 Morison 模型以模拟粘性力<sup>[4]</sup>。船体湿表面 Panel 模型和横撑 Morison 模型见图 2。

目标半潜式海上风力机平台的主尺度见表 1。目标半潜风力机平台作业于挪威北海, 波浪谱取 Jonswap 谱, 设计海况取百年一遇波高 17.3 m, 跨零周期 13 s, 谱峰升高因子  $\gamma$  取 2.96。

收稿日期: 2017-09-19

基金项目: 国家电网公司科技项目(NYB17201600300)

通信作者: 张洪达(1988—), 男, 硕士、工程师, 主要从事仿真分析与计算机编程方面的研究。zhanghongda.happy@163.com

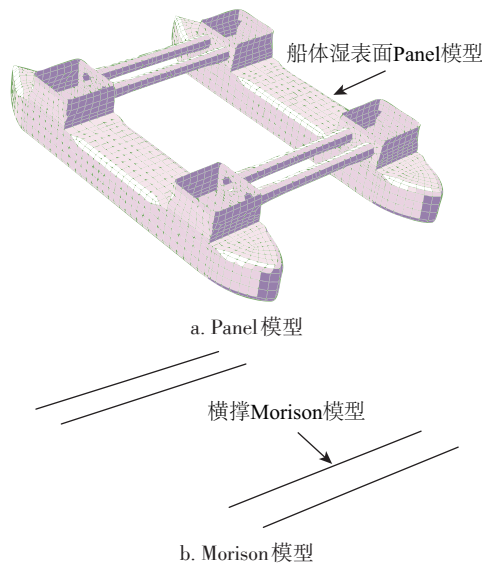


图2 半潜式海上风力机平台的响应模型

Fig. 2 Response model of semi-submersible wind turbine platform

表1 目标半潜式风力机平台主尺度

Table 1 Principal dimension of semi wind turbine platform

总长 $L/m$	型宽 $B/m$	浮体型宽 $B_s/m$	吃水 $d/m$
104.5	71.5	16	19

DNV 规范<sup>[5]</sup>中对半潜式海上平台提出几种对平台结构和总体性能影响较大的载荷控制参数: 浮箱间的横向分离/压缩力  $F_L$ 、浮箱间的横向扭矩  $M_L$ 、浮箱间

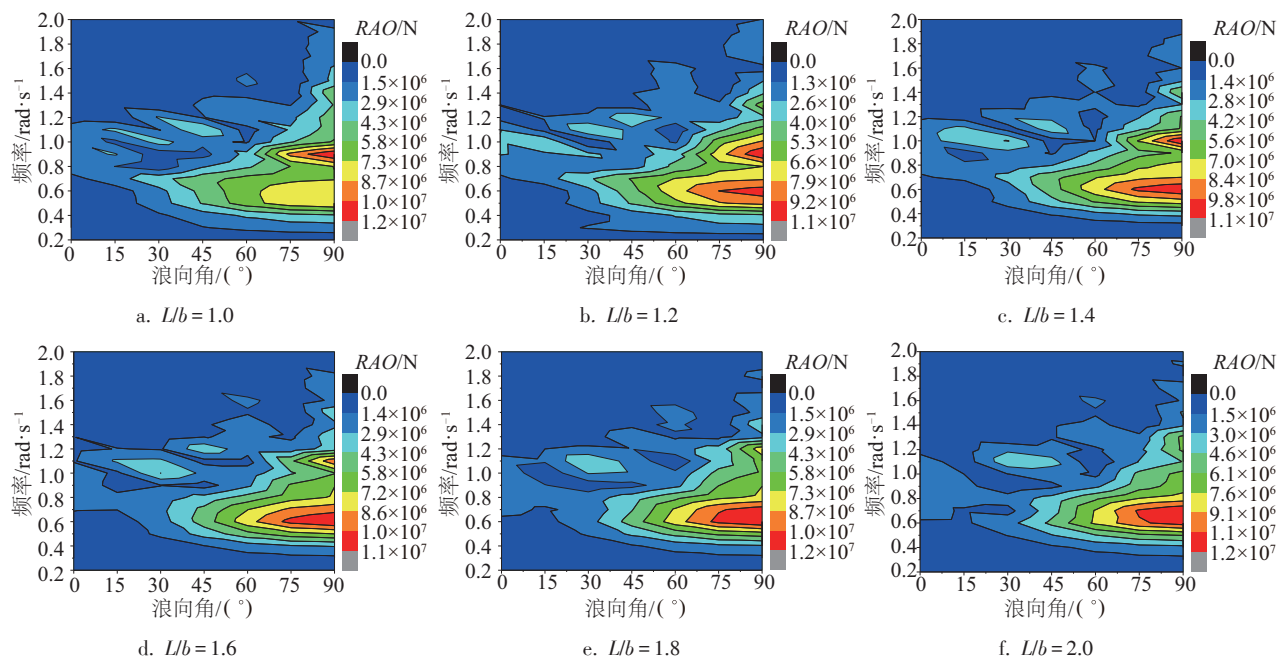
的纵向分离力  $F_L$ 、浮箱的垂向弯矩  $M_V$ 、运动响应。

考虑到典型半潜式海上风力机平台具有双对称结构和对浪向的敏感性, 确定波浪搜索方案: 从  $0^\circ \sim 90^\circ$  每隔  $15^\circ$  取一个浪向, 波浪频率取  $0.2 \sim 2.0 \text{ rad/s}$ , 步长取  $0.1 \text{ rad/s}$ 。

### 1.1 横向分离/压缩力

从图3可看出不论  $L/b$  取何值, 横向分离/压缩力  $RAO$  最大值都是发生在横浪时, 而且浪向角越靠近横浪  $RAO$  越高, 而这种响应特征属于典型半潜式海上风力机平台的共性<sup>[6]</sup>。随着  $L/b$  增大,  $RAO$  达到最大值的波浪频率呈降低趋势, 平台结构对低频波浪敏感程度提高。出现这种现象的原因是因为波长约等于浮箱外侧间宽度的两倍时横向分离/压缩力达到最大值, 随着  $L/b$  值的增大, 浮体之间的间距减小, 规则波的波长  $\lambda = 2\pi g/\omega^2$  ( $g$  为重力加速度,  $\omega$  为波浪频率) 随着频率的降低反而增大; 当浮箱间距减小到一定程度时更易与低频时的波长相等而使横向分离力达到最大值。

$L/b$  等于 1.0 时, 横向分离/压缩力  $RAO$  在波浪频率  $\omega$  为  $0.9 \text{ rad/s}$  附近达到最大值。  $L/b$  值处于 1.2~1.4 之间时,  $\omega$  等于  $0.6$ 、 $0.9 \text{ rad/s}$  时  $RAO$  出现双峰值, 出现很明显的过渡趋势。当  $L/b$  大于 1.6,  $\omega = 0.9 \text{ rad/s}$  的  $RAO$  峰值又逐渐减小, 最终平台结构只对  $\omega = 0.6 \text{ rad/s}$  波频敏感。

图3 不同  $L/b$  值的横向分离/压缩力  $RAO$ Fig. 3 Split force  $RAO$  between pontoons for different  $L/b$

由表 2 知,横向分离/压缩力短期响应最大响应值随  $L/b$  先增大后减小,  $L/b=1.2$  时达到最大。

表 2 横向分离/压缩力响应结果

Table 2 Split force response value between pontoons

$L/b$	浪向角/ ( $^{\circ}$ )	频率/ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$RAO/N$	最大 响应值/ $N$
1.0	90	0.9	$1.159 \times 10^7$	$9.779 \times 10^7$
1.2	90	0.9	$1.052 \times 10^7$	$9.833 \times 10^7$
1.4	90	1.0	$1.116 \times 10^7$	$9.786 \times 10^7$
1.6	90	0.6	$1.149 \times 10^7$	$9.729 \times 10^7$
1.8	90	0.6	$1.157 \times 10^7$	$9.696 \times 10^7$
2.0	90	0.7	$1.211 \times 10^7$	$9.659 \times 10^7$

工程实践中,横向分离/压缩力较易造成海上风力机平台的横向构件发生拉压失效,故当  $L/b$  值在约 1.2 附近时更易发生这种破坏。此外,横向分离/压缩力  $RAO$  达到峰值的波浪频率与  $L/b$  值成反

比,说明浮体间距越小时平台结构对低频率波浪更敏感。当  $L/b$  值处于 1.2~1.4 区间时,平台横向分离/压缩力  $RAO$  值在多个波浪频率下都达到峰值,导致平台结构尤其是横向构件在实际海况中会有更大概率处于高应力水平,从而发生结构破坏。

## 1.2 横向扭矩

当斜浪位于浮体对角线上,且斜浪波长等于斜对角线长时,横向扭矩达到最大。横向扭转状态下,半潜风力机平台除扭转状态外,还存在横向分离力,这 2 种载荷都对横向构件有拉压效果<sup>[7]</sup>。

由图 4 可知,横向扭转  $RAO$  达到  $10^8$  量级的波浪频率基本维持在 0.8  $\text{rad/s}$  附近,并未随  $L/b$  值变化,这说明  $L/b$  值不会对横向扭转  $RAO$  峰值出现的波浪频率产生明显影响。随着  $L/b$  值增大,  $RAO$  达到  $10^8$  量级的浪向数量逐渐减少,即横向扭矩  $RAO$  响应浪向范围整体趋于缩小,且  $RAO$  能量级下降也更快。

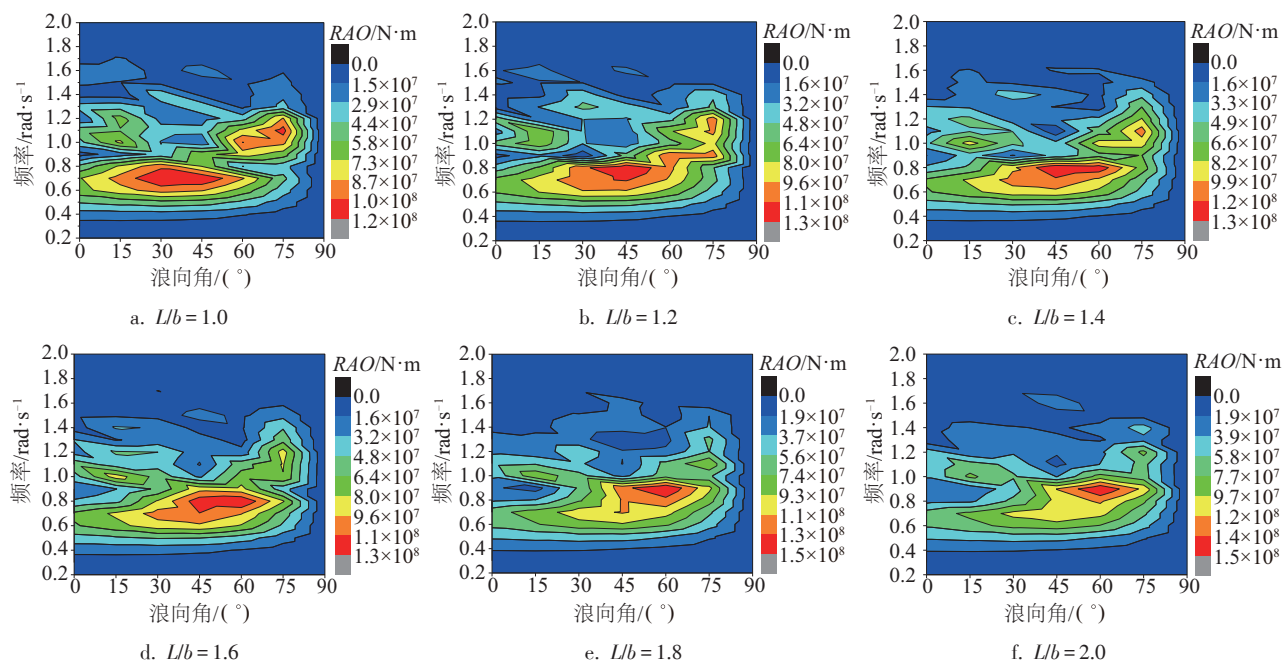


图 4 不同  $L/b$  值的横向扭矩  $RAO$

Fig. 4 Torsion moment  $RAO$  for different  $L/b$

从表 3 可知,随着  $L/b$  增大,横向扭矩  $RAO$  达到最大值时的波浪频率逐渐增大,这是因为随着  $L/b$  值增大,浮体之间斜对角线长度变短,即响应规则波波长  $\lambda = 2\pi g/\omega^2$  减小,对应的响应波频率增大。

横向扭矩  $RAO$  达到最大值时的浪向角越来越

越大,表明能引起纤细船体横向扭转的浪向角比肥胖船体更大。船长  $L$  不变,随着  $L/b$  值增大,浮体间距  $b$  减小幅度的越来越小,造成  $RAO$  达到最大值时的浪向逐渐趋于平稳。横向扭转短期预报最大响应值总体上处于减小趋势,并在  $L/b$  值为 1.2 时达到最大值,对横向构件的威胁也最大。

表3 横向扭矩响应结果

Table 3 Torsion moment response value

$L/b$	浪向角/ ( $^{\circ}$ )	频率/ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$RAO /$ $\text{N}\cdot\text{m}$	最大响 应值/ $\text{N}\cdot\text{m}$
1.0	30	0.7	$1.163\times 10^8$	$8.073\times 10^8$
1.2	45	0.8	$1.278\times 10^8$	$8.161\times 10^8$
1.4	45	0.8	$1.312\times 10^8$	$8.132\times 10^8$
1.6	60	0.8	$1.283\times 10^8$	$7.314\times 10^8$
1.8	60	0.9	$1.484\times 10^8$	$7.460\times 10^8$
2.0	60	0.9	$1.545\times 10^8$	$7.378\times 10^8$

### 1.3 纵向分离力

半潜式风力机平台受到波长约等于斜对角线

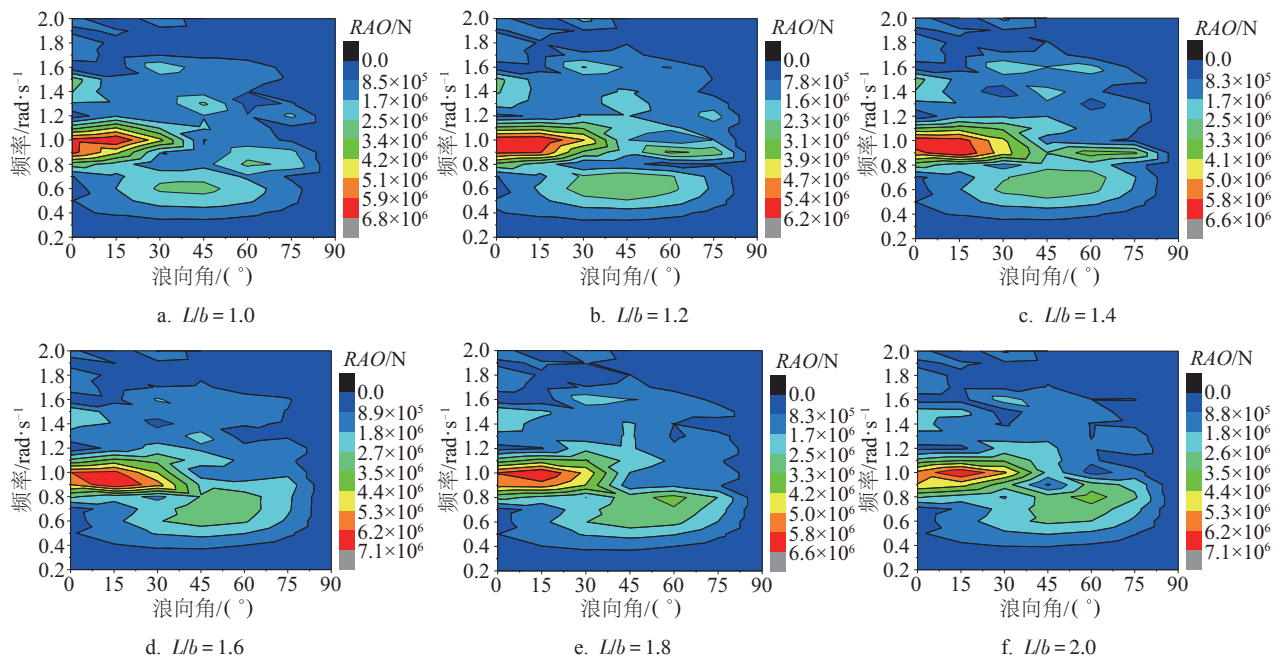


图5 不同  $L/b$  值的平台纵向分离力  $RAO$

Fig. 5 Longitudinal shear force  $RAO$  for different  $L/b$

从表 4 看出纵向分离力  $RAO$  值在  $L/b$  为 1.6、2.0 时均出现较大的峰值。通过总结发现在这 2 种  $L/b$  值下,风力机平台斜对角线长度都大约是船长的 1.118 倍,而这是其他  $L/b$  值时并不具备的,这也为我们在初步设计阶段制定船体主尺度时提供了一定的工程借鉴意义。

不论  $L/b$  值如何变化,纵向分离力短期响应最大值达到峰值时的浪向和波浪频率几乎未发生变化,这说明  $L/b$  值对平台纵向分离力短期响应最大值影响有限。 $L/b$  值在 1.0~1.6 区间时,平台纵向分离力的

长的 1.5 倍的斜浪时,纵向分离力达到最大。纵向分离状态下平台还存在横向分离力,且 2 种分离载荷都对横向构件有拉压效果<sup>[8]</sup>。

从图 5 可看出无论  $L/b$  取何值,纵向分离力  $RAO$  达到峰值的浪向基本维持在  $15^{\circ}$ ,波浪频率处于  $1.0 \text{ rad/s}$  附近。这表明不同浮体间距的平台纵向分离力  $RAO$  达到峰值时的浪向、波浪频率都不会变化。对于任一种  $L/b$  值的半潜式海上风力机,随浪时平台的纵向分离力较大,这是由于随浪时水线下的平台表面承受的波浪压力在纵向方向上的合力也较大。当  $L/b$  值增大时,横撑长度逐渐减小,水线下平台表面在纵向方向上的投影面积也逐渐减小。所以随着  $L/b$  值增大,随浪对平台纵向分离力的影响也逐渐减小。

短期响应最大值并未明显变化;当  $L/b$  处于 1.6~2.0 之间时,纵向分离力的最大短期响应值略微下降。造成这种现象的原因是,波浪能量与波高的平方、波浪周期成正比,随着  $L/b$  值逐渐增大,斜对角线长度越来越小,达到纵向分离力极值时的波长越来越小,波浪周期也随之减小,则波浪能量也降低。

### 1.4 垂向弯矩

当遭遇迎浪或随浪且波长约等于浮箱长时,下浮体就会发生类似于船体经常出现的中拱中垂变



表 4 纵向分离力响应结果

Table 4 Longitudinal shear force response value				
$L/b$	浪向角/(°)	频率/ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$RAO/\text{N}$	最大响应值/ $\text{N}$
1.0	15	1.0	$6.761\times10^6$	$2.435\times10^7$
1.2	15	1.0	$6.181\times10^6$	$2.422\times10^7$
1.4	15	0.9	$6.615\times10^6$	$2.448\times10^7$
1.6	15	0.9	$7.085\times10^6$	$2.432\times10^7$
1.8	15	1.0	$6.639\times10^6$	$2.289\times10^7$
2.0	15	1.0	$7.052\times10^6$	$2.212\times10^7$

形状态<sup>[9]</sup>。从表 5 看出垂向弯矩  $RAO$  达到最大值时的浪向与频率并不随着  $L/b$  值而变化,这点和纵向分离力非常相似。随着  $L/b$  值增大,垂向弯矩  $RAO$  和短期响应最大值总体上处于一直降低的趋势,这是由于随着  $L/b$  值增大,横撑不断缩短,船体湿表面在垂向方向的投影面积逐渐减少,导致平台

垂向弯矩作用面积的缩小。总结得知,增大浮体间距有助于降低垂向弯矩载荷,这样能有效提高平台结构的总纵强度。

表 5 垂向弯矩响应结果

Table 5 Vertical bending moment response value				
$L/b$	浪向角/(°)	频率/ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$RAO/\text{N}\cdot\text{m}$	最大响应值/ $\text{N}\cdot\text{m}$
1.0	0	0.7	$1.265\times10^8$	$8.986\times10^8$
1.2	0	0.7	$1.186\times10^8$	$8.808\times10^8$
1.4	0	0.7	$1.123\times10^8$	$8.631\times10^8$
1.6	0	0.7	$1.077\times10^8$	$8.457\times10^8$
1.8	0	0.7	$1.043\times10^8$	$8.339\times10^8$
2.0	0	0.7	$1.019\times10^8$	$8.273\times10^8$

从图 6 得出,  $L/b$  值越低,垂向弯矩  $RAO$  达到高能量级的浪向、波浪频率范围越来越小,也就是说垂向弯矩  $RAO$  能量越来越集中。

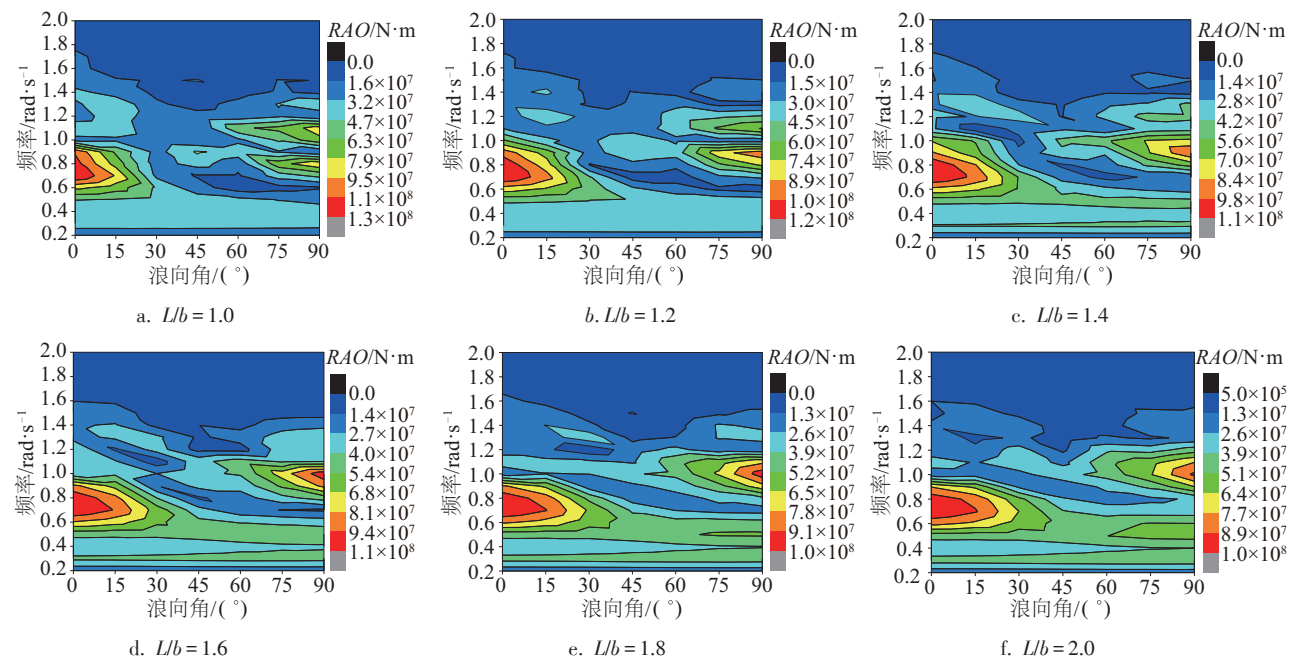


图 6 不同  $L/b$  值的垂向弯矩  $RAO$   
Fig. 6 Vertical bending moment  $RAO$  for difficult  $L/b$

1.5 运动响应

这里结合表 6 和图 7 对六自由度运动响应进行分析。其中,纵荡、横摇、横荡和垂荡的自由度运动幅值的短期响应曲线呈较明显的简谐波形式。

1)纵荡:横浪时纵荡运动短期响应值为零;迎浪或随浪时平台纵荡运动幅值短期响应值达到最

大。纵荡运动幅值短期响应最大值基本不随  $L/b$  值变化而变化,说明  $L/b$  值不会对半潜式海上风力机平台的纵荡运动产生明显影响。

2)横荡:与纵荡运动正好相反,横浪时,平台横荡运动幅值短期响应值达到最大;迎浪或随浪时,平台横荡运动幅值短期响应值为零。但与纵荡类似的是横荡运动短期响应最大值也基本不随  $L/b$  值

变化而变化,说明  $L/b$  值也几乎不会对半潜式风力机平台的横荡运动产生明显影响。

表6 六自由度运动响应短期预报最大值

Table 6 Max. short term motion response value of SDOF

$L/b$	纵荡/ m	横荡/ m	垂荡/ m	横摇/ (°)	纵摇/ (°)	首摇/ (°)
1.0	0.986	0.934	1.145	1.036	0.646	0.515
1.2	0.976	0.933	1.181	0.851	0.629	0.505
1.4	0.968	0.930	1.205	0.810	0.615	0.436
1.6	0.963	0.924	1.233	0.792	0.605	0.389
1.8	0.958	0.940	1.260	0.761	0.597	0.361
2.0	0.955	0.934	1.282	0.727	0.591	0.340

3)垂荡:垂荡短期响应最大值随着  $L/b$  值增大而增大,这也说明型宽与垂荡运动幅值呈反比关系,增大型宽有助于降低半潜式风力机平台垂荡运动响应幅值。 $L/b$  值处于 1.0~1.4 区间时,垂荡运动短期响应曲线逐渐趋于平稳,对浪向敏感度逐渐降低;当  $L/b$  值继续增大时,垂荡运动短期响应曲线对浪向敏感度又逐渐提高。 $L/b$  值处于 1.4 附近时,平台的

垂荡运动幅值短期响应值处于最小值范围。

4)横摇:横摇运动短期响应值随浪向而变化的趋势与横荡运动保持一致。 $L/b$  值低于 1.4 时,横摇运动的短期响应最大值迅速降低  $L/b$  超过 1.4 后,平台横摇运动的短期响应值趋于平稳。

5)纵摇:纵摇运动的短期响应值随浪向的变化趋势与纵荡运动保持一致。随着  $L/b$  值增大,纵摇运动短期响应曲线越来越规则,当  $L/b$  值大于 1.8 时,短期响应曲线基本呈余弦形式,说明纤细船体在波浪中的纵摇运动受相邻浪向的干扰更小。

6)首摇:浪向角为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  时,首摇短期响应值均为零,因为在这 4 个浪向角下波浪都平行于半潜平台对称面,对称面两侧平台表面受到的水动力大小一样,不会产生绕垂向轴的扭矩。 $L/b$  值小于 1.6 时,首摇运动的短期响应最大值下降明显;当  $L/b$  值超过 1.6,首摇运动的短期响应最大值变化微弱。这说明首摇运动与型宽存在一定正比关系,但当型宽减小到一定程度,降低型宽对首摇运动的改善并不明显。

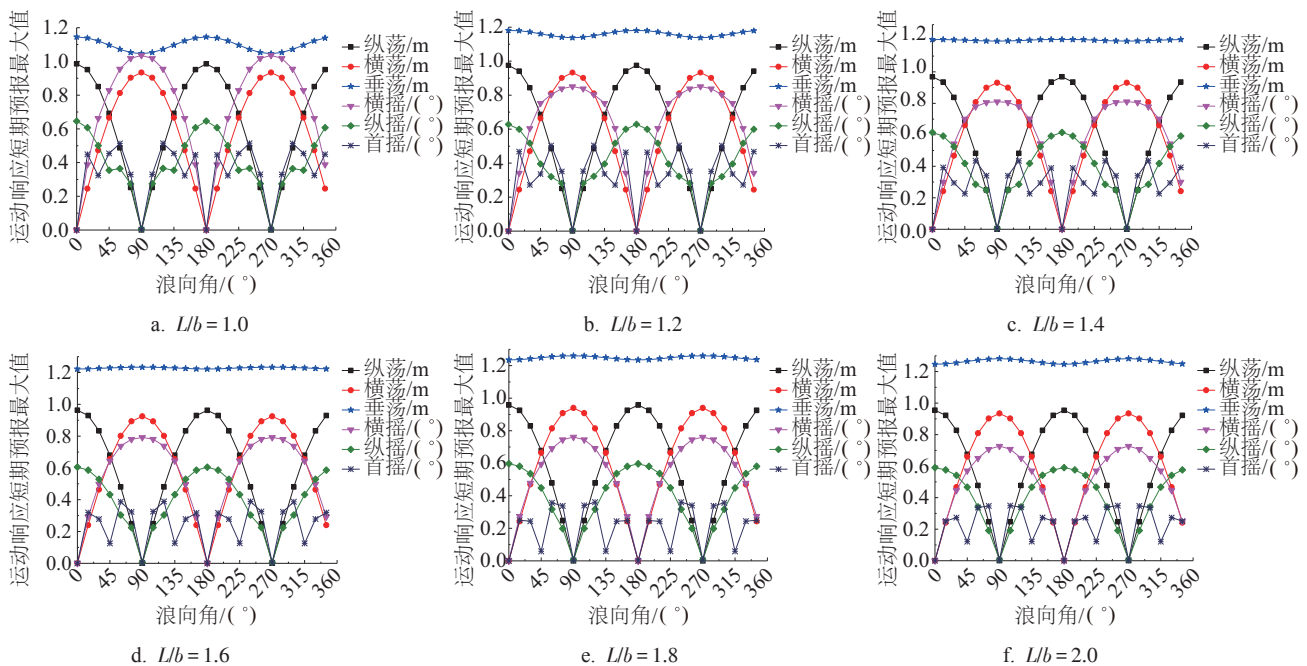


图7 不同  $L/b$  值的运动响应短期预报最大值

Fig. 7 Max. short term motion response value for different  $L/b$

## 2 结 论

$L/b$  值为 1.2 附近时,横向构件承受的横向分离/压缩力、横向扭矩最大,最易造成横向构件失效

破坏。 $L/b$  值处于 1.8~2.0 之间,既保证半潜风力机平台具有较好的六自由度运动性能,横向分离/压缩力、横向扭矩、纵向分离力、垂向弯矩载荷这几种控制参数的短期预报值都处于较低水平,对于平台结

构尤其是横向构件的安全性都很有利。

笔者对 11 条由国内外知名设计公司设计、已经建造并交付的半潜式平台的实船主尺度资料进行统计,  $L/b$  值也均介于 1.8~2.0 之间,这也和本文的研究结果相吻合。

### [参考文献]

- [1] 唐友刚, 桂 龙, 曹 茜, 等. 海上风机半潜式基础概念设计与水动力性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(11): 1314—1319.
- [1] Tang Yougang, Gui Long, Cao Han, et al. Conceptual design and hydrodynamic performance of the semi-submersible floating foundation for wind turbines [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35 (11): 1314—1319.
- [2] 唐 耀. Spar 型浮式风机平台动力响应分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [2] Tang Yao. Dynamic response analysis of a spar type floating wind turbine platform [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [3] Roddier D, Peiffer A, Aubault A, et al. A generic 5 MW wind float for numerical tool validation and comparison against a generic spar [A]. Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on

Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rotterdam [C], Holand, 2011: 2011-50278.

- [4] DNV · GL. SESAM user's manual/wadam [M]. Oslo, Norway: Det Norske Veritas, 2016.
- [5] DNV-RP-C103. Column-stabilised units [M]. Oslo, Norway: DET Norske Veritas AS, 2015.
- [6] Lefebvre S, Collu M. Preliminary design of a floating support structure for a 5 MW offshore wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2012, 40: 15—26.
- [7] Philippe M, Babarit A, Feerant P. Comparison of time and frequency domain simulations of an offshore floating wind turbine [A]. ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2011 [C], Rotterdam, Netherlands, 2011: 589—598.
- [8] 徐志亮. 半潜式海洋平台的结构剩余强度研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [8] Xu Zhiliang. Researches on redundancy strength of semi-submersible Platform [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [9] Koo B J, Goupee A J, Kimball R W, et al. Model tests for a floating wind turbine on three different floaters [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136 (2- Special Section Articles) : 020907—020917

## EFFECT OF FLOATING BODY SPACING ON HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF SEMI-SUBMERSIBLE WIND TURBINE PLATFORM

Zhang Hongda, Wang Junlong, Lu Xiaoping, Liu Xiangyin

(Wind Power Equipment Research Institute, CRRC Wind Power(Shan Dong) Co., Ltd., Ji'nan 250022, China)

**Abstract:** Because of the interaction among floating bodies (include columns and pontoons), the hydrodynamic performance of semi-submersible offshore wind turbine platform will have quite different when the ratio of length overall to spacing between floating bodies' centerlines ( $L/b$ ) is different. This paper introduced the change law of hydrodynamic performance of semi-submersible offshore wind turbine with the ratio of  $L/D$  through the frequency domain hydrodynamic numerical prediction methods for wave loads and motion response of five platforms whose  $L/b$  is different. It is shown that the platform has superior hydrodynamic performance when  $L/b$  is between 1.8 and 2.0, and this is also consistent with principal dimension statistics of 11 semi-submersible platforms that have been delivered both at home and abroad.

**Keywords:** offshore wind turbine; semi-submersible platform; hydrodynamics; numerical simulation; structural optimization; wave load; motion response