

流花 4-1 油田海域近海面风场特性分析

杜宇¹, 武文华^{*1}, 岳前进¹, 李锋², 谢日彬², 李平²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 中海油深圳分公司, 广东 深圳 518067)

摘要: 为了解决海洋强风场特性研究中实测数据不足的问题, 在我国南海流花 4-1 油田一座半潜式平台上, 开展了近海面风场特性的实测研究工作. 对 2011-09-22 实测数据开展了分析, 获得了南海近海面风场的湍流强度、阵风因子和湍流积分尺度等强风特性参数; 同时开展了脉动风功率谱的拟合研究工作, 将实测谱与 Davenport 谱、von Karman 谱和 Kaimal 谱进行比较, 证明了 von Karman 谱在近海面强风环境中拟合结果较优.

关键词: 脉动风; 风场特性; 原型测量; 脉动风谱

中图分类号: P229

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201506002

0 引言

风荷载是海洋结构主要设计荷载之一, 在海洋结构抗风设计中认为风荷载由静力项和脉动项组成. 在近海固定式平台的设计中, 由于平台结构刚度相对较大, 在设计中通常只考虑静风荷载的影响, 而忽略脉动项. 随着海洋资源开发逐渐向深远海发展, 大型浮式海洋结构得到广泛应用, 风荷载中脉动项对浮式结构的定位能力, 以及对平台管道、拉索和薄壁等附属结构产生的颤振、抖振和涡激振动等问题愈发显著, 使得海洋结构中脉动风特性的研究受到了广泛的重视.

目前国内外针对各类结构已经开展了大量风场特性实测研究, 包括对超高层结构脉动风场特性研究^[1-3], 近地面脉动风场特性研究^[4-6], 大跨桥梁脉动风场特性研究^[7-8]等. 然而针对海洋结构近海面风场特性研究开展的工作相对较少. Ahmad 等对张力腿平台的脉动风特性开展了研究, 对海洋平台结构在动风荷载激励下 6 个自由度响应特征进行了分析^[9]; Morandi 等在北海 Hutton TLP 平台上开展了台风实测研究, 捕获了强台风 Lili

过境时的风场信息, 以此对该海域强风天气下的风场特性开展了研究^[10]; Korpås 等利用北海一处油田实测获得的 1 年期风要素信息, 对此油田的风分布特点和脉动特性进行分析, 以此作为发展风力驱动平台的可行性分析基础^[11]. 欧进萍等对我国渤海海域 1965~1986 年间 12 个气象站的监测数据进行统计, 给出了渤海海域的风场特性统计^[12]; 肖仪清等基于近海面实测数据的分析, 对台风黑格比脉动风特性进行了分析, 对台风过境过程进行了研究^[13]; Hu 等在南海奋进号 FPSO 上进行了现场监测工作, 获得了长期的风参数信息^[14].

上述工作大都只是针对海岸和浅海位置的风特性研究, 在南海开展的工作也没有考虑到脉动风对海洋结构物产生的影响. 近年来我国对于南海海洋资源开发需求日趋迫切, 为保证大型海洋资源开发装备的安全, 在我国南海深远海开展实测脉动风特性的研究, 进而促进南海海洋结构抗风性能的研究是十分必要的.

本文基于在我国南海流花 4-1 油田海域进行

收稿日期: 2014-11-09; 修回日期: 2015-07-20.

基金项目: 国家科技重大专项课题资助项目(2011ZX05026-02-02); “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB013705, 2014CB046803); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT13ZD208); 创新研究群体科学基金资助项目(51221961).

作者简介: 杜宇(1987-), 男, 博士生, E-mail: duyuy0501@163.com; 武文华*(1973-), 男, 博士, 副教授, E-mail: lxyuhua@dlut.edu.cn.

的现场原型监测工作,通过对风要素样本进行选择与分析,由典型原型实测数据获得流花 4-1 海域脉动风速、湍流强度和湍流积分尺度等风特性信息,并对各类风特性随平均风速变化的分布特点和相互之间的相关性进行讨论.最后对分析样本中 1 h 的风数据进行风谱拟合,并与 NPD 和 API 规范中给出的风谱以及 Davenport 谱、Kaimal 谱及 von Karman 谱进行比较.基于实测数据的脉动风特性分析,不但可以为新海洋结构抗风设计提供依据,也可以作为对在役海洋结构抗风行为预测的参考.

1 南海流花 4-1 油田海域风要素测量

流花 4-1 油田位于香港以东 215 km,如图 1 所示,作业水深 300 m,是我国南海重要的深水油田.该海域地处亚洲季风区,夏季受台风影响,冬季受长期的冬季季风影响.2006 年流花 4-1 油田海域遭受超强台风作用,导致一艘 FPSO 系泊失效,因此对该海域风特性的研究是十分必要的.

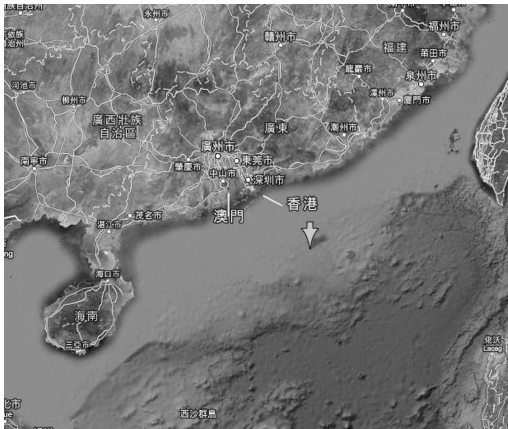


图 1 南海流花 4-1 油田位置

Fig.1 Location of LH4-1 oil field in South China Sea

本文在流花 4-1 油田半潜平台上建立了风荷载测量系统.风速测量采用的是英国 Gill 公司的 WindMaster Pro 超声风速仪,它可以测量定点三维风速风向信息,灵敏度为 0.01 m/s,测量精度优于 0.1 m/s,以北向为 0°方向.布置位置为平台船艏吊机灯台上(如图 2 所示),是平台除火炬塔外的高点,通过 GPS 测量该位置的平均海拔高度为 39 m.实测风数据通过自主研发的自适应采集

器进行采集和存储.



图 2 平台上的超声风速仪

Fig.2 Ultrasonic anemometer on platform

2 实测数据风特性分析

分析样本取自监测周期内风速较大、风向稳定并来自船艏的 2011-09-22 全天 24 h 的数据,以 10 min 为基本时距做平均的样本风速和风向曲线如图 3 所示.所取样本测得最大瞬时风速 20.03 m/s,以 10 min 为基本时距测得最大平均风速 16.73 m/s,10 min 平均风速基本稳定在 10~15 m/s,属于强风天气.样本风向变化较小,稳定在 148°左右,与船艏方向一致,认为风数据没有受到火炬塔影响.

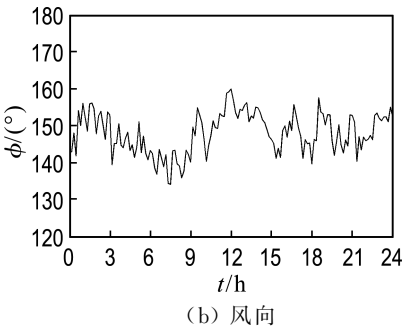
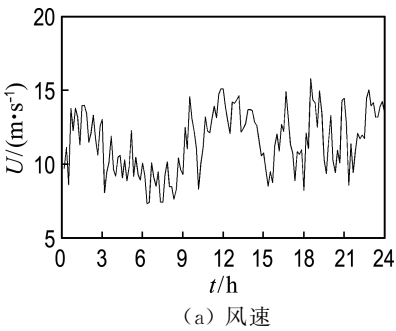


图 3 2011-09-22 的 10 min 平均风速风向曲线
Fig.3 Mean wind speed and direction per 10 min recorded in 2011-09-22

2.1 脉动风速分析

对风特性的分析采用矢量分解法,以 10 min 为基本时距确定主风向,再通过矢量分解法获得脉动风速. 设水平平均风速和风向角分别为 U 和 ϕ , $u_x(t)$ 和 $u_y(t)$ 分别为测量获得的水平风速分量,则根据矢量分解法有

$$U = \sqrt{\overline{u_x(t)^2} + \overline{u_y(t)^2}} \tag{1}$$

$$\cos \phi = \frac{\overline{u_x(t)}}{U} \tag{2}$$

式中: $\overline{u_x(t)}$ 、 $\overline{u_y(t)}$ 分别是水平风速分量在基本时距内的均值. 由此给出基本时距内横风和纵风的脉动风速 $u(t)$ 和 $v(t)$ 的计算公式:

$$u(t) = u_x(t) \cos \phi + u_y(t) \sin \phi - U \tag{3}$$

$$v(t) = -u_x(t) \sin \phi + u_y(t) \cos \phi \tag{4}$$

同时给出垂向风的脉动风速计算公式, W 为基本时距内垂向风平均风速, $u_w(t)$ 为测得垂向风风速,则垂向脉动风速

$$w(t) = u_w(t) - W \tag{5}$$

通过式(1)~(5)可以确定选取的测量样本 3 个方向的脉动风速,得到的脉动风速曲线如图4~6 所示.

2.2 湍流强度与阵风因子

湍流强度定义为风的脉动分量平均变化幅值(即脉动风标准差)与标准时距平均风速的比值. 计算方法如下:

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U}; i = u, v, w \tag{6}$$

其中 I_u 、 I_v 和 I_w 分别为 3 个方向脉动风的湍流强度, σ_u 、 σ_v 和 σ_w 分别为 3 个方向脉动风的标准差. 图 7 为湍流强度随平均风速的变化关系,纵向和

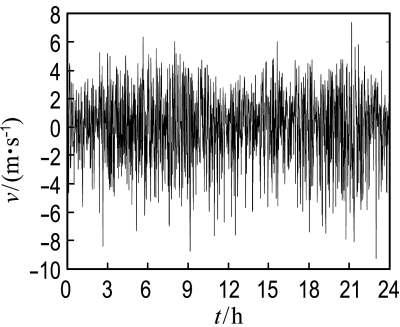


图 4 纵向脉动风速

Fig. 4 Longitudinal fluctuating wind speed

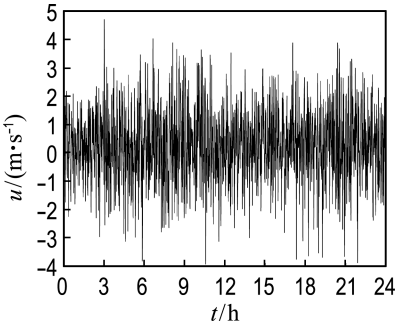


图 5 横向脉动风速

Fig. 5 Lateral fluctuating wind speed

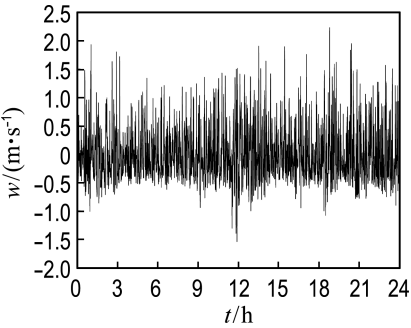


图 6 垂向脉动风速

Fig. 6 Vertical fluctuating wind speed

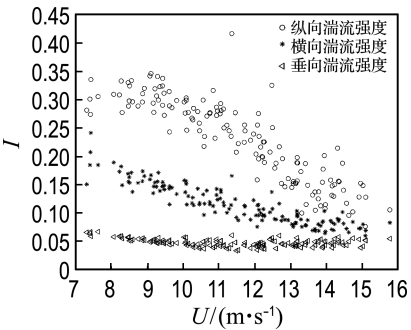


图 7 平均风速与湍流强度关系曲线

Fig. 7 Relation curve between turbulence intensity and mean wind speed

横向湍流强度随平均风速增大而明显减小,垂向湍流强度基本维持在 0.05 左右. 在风速增大超过 15 m/s 时,纵向和横向湍流强度逼近垂向湍流强度. 3 个方向平均湍流强度如表 1 所示.

表 1 3 个方向平均湍流强度

Tab. 1 Mean turbulence intensity of 3 directions

I_u	I_v	I_w
0.230 9	0.115 2	0.047 2

将 3 个方向平均湍流强度换算成为三维湍流强度比为 $I_u : I_v : I_w = 1 : 0.498\ 9 : 0.204\ 4$, 测量结果与陆地建筑规范中规定的 $1 : 0.88 : 0.50$ 比值存在比较大的差别, 因此在海洋结构物抗风设计时需要特别关注与陆地不同的湍流强度比。

为了研究最大阵风对结构的影响, 对用于表述阵风持续期内最大风速与标准时距内平均风速比值的阵风因子 $G_i(t_g)(i = u, v, w)$ 进行实测分析。根据规范要求, t_g 取值 3 s。

$$G_i(t_g) = 1 + \frac{\max [\overline{u_i(t_g)}]}{U}; i = u, v, w \quad (7)$$

图 8~10 分别为 3 个方向上阵风因子与平均风速之间的关系, 由图可以看出, 3 个方向的阵风因子都随着平均风速的增加而略微减小, 同时可以看出, 纵向脉动风的阵风因子在 3 个方向中最大, 说明纵向脉动风波动性最强。

2.3 湍流积分尺度

湍流运动中不同湍流漩涡参与程度不同, 湍流积分尺度是脉动风中湍流漩涡的平均尺寸的度量, 用于反映脉动风速空间相关性的强度。对于空间风场, 可以定义 9 个湍流积分尺度, 以纵向脉动速度相关的纵向湍流积分尺度 L_u^x 为例:

$$L_u^x = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^\infty R_{u_1 u_2}(x) dx \quad (8)$$

其中 $R_{u_1 u_2}(x)$ 表达空间两不同位置纵向脉动风速 $u_1 = u(x_1, y_1, z_1, t)$ 和 $u_2 = u(x_2, y_2, z_2, t)$ 的互协方差函数, t 为时间。由于对空间中不同位置进行风速测量难以实现, 通常都是利用单点测量估计整个风场, 因此对计算湍流积分尺度应用比较广泛的方法是基于 Taylor 假设, 简化为单点测量的分析。假设湍流漩涡以平均风速 U 在风向上进行迁移, 则湍流积分尺度计算简化为

$$L_u^x = \frac{U}{\sigma^2} \int_0^\infty R_u(\tau) d\tau \quad (9)$$

其中 $R_u(\tau)$ 为脉动风速的自相关函数, τ 为积分的时间尺度, 通常积分上限取为 $R_u(\tau)$ 减小到 0.05 处的 τ 值。

利用 Taylor 法对被测样本湍流积分尺度的分析, 得出了纵向、横向和垂向湍流积分尺度平均值分别为 291.9、234.0 和 79.0 m, 最大值分别为 1 185.3、1 130.0 和 760.0 m。由于海面空旷, 通

过平均值和最大值可以发现, 湍流积分尺度在纵向和横向之间区别并不大, 但是明显大于垂向的积分尺度。此外与陆地和近海海面其他监测结果比较^[1, 7, 13], 可以发现在相同计算方法下流花 4-1 油田海域具有相对比较大的湍流积分尺度。

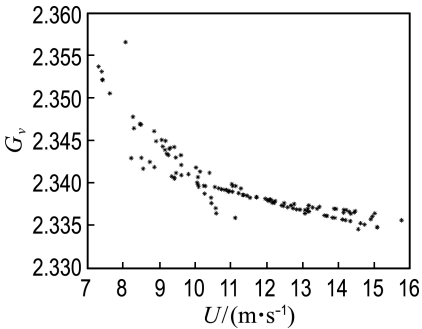


图 8 平均风速与纵向阵风因子关系曲线
Fig. 8 Relation curve between longitudinal gust factor and mean wind speed

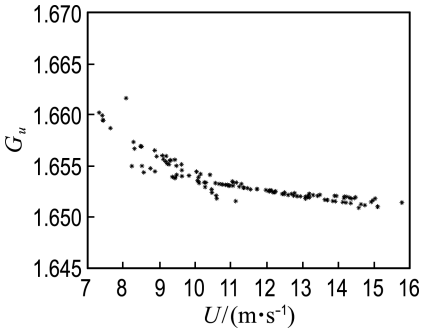


图 9 平均风速与横向阵风因子关系曲线图
Fig. 9 Relation curve between lateral gust factor and mean wind speed

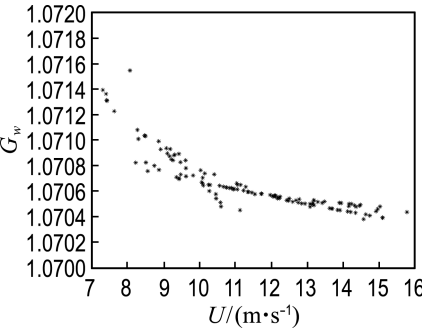


图 10 平均风速与垂向阵风因子关系曲线
Fig. 10 Relation curve between vertical gust factor and mean wind speed

为了详细分析湍流积分尺度变化特点, 绘制了时间尺度下的纵向和横向湍流积分尺度曲线,

如图 11、12 所示,纵向、横向湍流积分尺度发生最大位置在 9 h 左右,其后风速变化剧烈,引起比较强的湍流积分尺度变化,此时并不是风速最大位置,类似的发生在 18 h 和 21 h 左右,因此可以发现湍流积分尺度并不与风速呈现简单的线性关系.

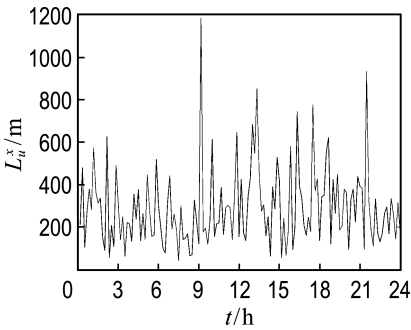


图 11 纵向湍流积分尺度随时间变化

Fig. 11 Time domain of longitudinal integral scale of turbulence

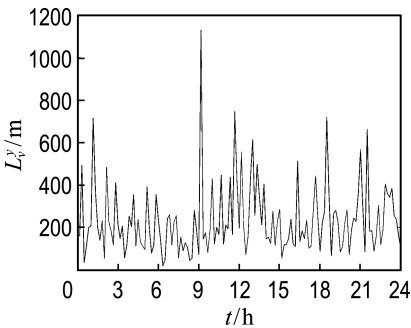


图 12 横向湍流积分尺度随时间变化

Fig. 12 Time domain of lateral integral scale of turbulence

图 13 为平均风速与湍流积分尺度关系,可以印证之前的结论,整体上湍流积分尺度随着平均风速的增加而呈增加趋势,但是体现出了一定的离散性,最大值也并不发生在风速最大处.随着风速的增加,离散性愈发强烈,没有固定的规律.因此在海洋结构抗风性能设计时,应当根据不同海域的实测结果作为参考.

2.4 脉动风功率谱密度

脉动风功率谱是海洋结构抗风设计的重要参量,表征了不同频率湍流漩涡的贡献.目前大量的风谱形式被广泛应用,比较普遍的有 von Karman 谱、Kaimal 谱和 Davenport 谱等.选择合适的风

谱对结构抗风性能的设计具有重要的意义.

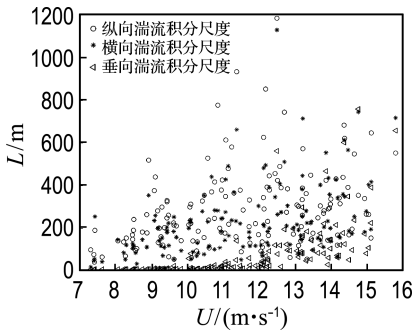


图 13 平均风速与湍流积分尺度关系

Fig. 13 Integral scale of turbulence versus mean wind speed

根据文献[9]的建议,脉动风功率谱可以表达为量纲一的形式:

nS_a / u_*^2 = a f_z / (1 + b f_z^{1/m})^{5m/3} (10)

式中: $a=u,v,w$; n 为脉动风频率; S_a 为脉动风功率谱密度函数; u_* 为摩阻速度; $f_z = nz/U$, 为莫宁坐标. 分析中, u_* 可由下式得出:

u_* = Uk / ln(z/z_0) (11)

式中: k 为冯卡门常数, 取为 0.4; z 为测点高度, 39 m; z_0 为粗糙度长度, 按照 I 类粗糙度类别取 0.001 m.

选取样本数据中 1 h 的数据进行实测脉动风功率谱的拟合, 选取数据为 11:30~12:30 响应比较强烈的样本数据, 平均风速 14 m/s, 平均风向 156.34°, $u_* = 0.3255$. 图 14 和 15 分别为纵向脉动风功率谱密度和横向脉动风功率谱密度以及与

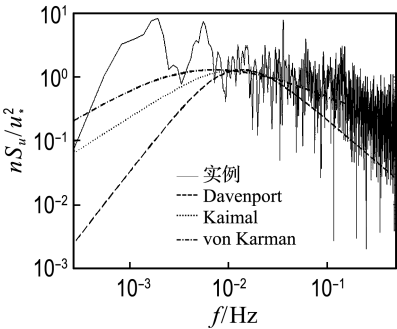


图 14 纵向脉动风功率谱密度

Fig. 14 Longitudinal fluctuating wind power spectral density

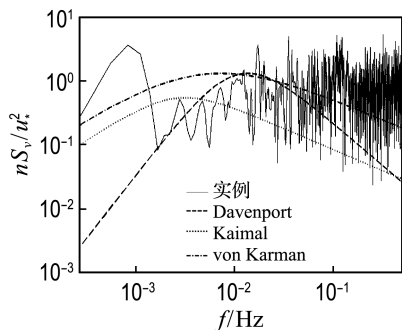


图 15 横向脉动风功率谱密度

Fig. 15 Lateral fluctuating wind power spectral density

其他风谱的比较。从比较中可以发现, Davenport 谱对实测谱能量存在明显的低估; Kaimal 谱对纵向脉动风功率谱拟合比较好, 但是对横向脉动风功率谱拟合则存在能量低估的问题; Kaimal 谱虽然整体拟合较好, 但是对横向脉动风功率谱拟合依然存在高频能量低估问题。由此可见, 对南海流花 4-1 油田附近海域, 在抗风设计中可以考虑使用 von Karman 谱, 但是使用基于实测数据拟合脉动风功率谱进行结构抗风设计更为准确。

3 结 论

(1) 实测湍流强度和阵风因子随平均风速增加而下降。3 个方向湍流强度在风速大于 14 m/s 时逐渐趋于一致。

(2) 实测湍流强度比值为 $I_u : I_v : I_w = 1 : 0.4989 : 0.2044$, 与陆地和近海实测结构有比较大的区别, 在海洋结构抗风设计中应予以特殊考虑。

(3) 实测纵向、横向和垂向湍流积分尺度平均值为 291.9、234.0 和 79.0 m, 大于一般陆地测量值, 纵向和横向积分尺度差别不大。积分尺度随平均风速增加呈增加趋势。

(4) 比较了拟合实测脉动风功率谱和各类型风谱, 其中 von Karman 谱拟合最好, 其他谱均存在能量低估问题; 在实际抗风设计中, 需要对被测海域长期测量数据进行分析, 获得该海域实测脉动风功率谱。

参考文献:

[1] 顾 明, 匡 军, 全 涌, 等. 上海环球金融中心大

楼顶部风速实测数据分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12):114-118, 122, 206.

GU Ming, KUANG Jun, QUAN Yong, *et al.* Analysis of measured wind speed data on top of SWFC [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(12):114-118,122,206. (in Chinese)

[2] 安 毅, 全 涌, 顾 明. 上海陆家嘴地区近 500 m 高空台风“梅花”脉动风幅值特性研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7):21-27.

AN Yi, QUAN Yong, GU Ming. Turbulence characteristics analysis of typhoon 'Muifa' near 500 m above ground in Lujiazui district of Shanghai [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(7):21-27. (in Chinese)

[3] Li Q S, Xiao Y Q, Wong C K. Full-scale monitoring of typhoon effects on super tall buildings [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 20(5):697-717.

[4] 徐 安, 傅继阳, 赵若红, 等. 土木工程相关的台风近地风场实测研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(1):23-31.

XU An, FU Ji-yang, ZHAO Ruo-hong, *et al.* Field measurements of typhoons according to civil engineering research [J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2010, 28(1):23-31. (in Chinese)

[5] Cao S, Tamura Y, Kikuchi N, *et al.* Wind characteristics of a strong typhoon [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(1):11-21.

[6] 李宏海, 欧进萍. 基于实测数据的台风风场特性分析[C]// 第二届结构工程新进展国际论坛论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:299-307.

LI Hong-hai, OU Jin-ping. Analysis for the characteristics of typhoon field based on measured data [C] // *Proceedings of the Second International Forum on Advances in Structural Engineering*. Beijing: China Building Industry Press, 2008:299-307. (in Chinese)

[7] 李杏平, 李爱群, 王 浩, 等. 基于长期监测数据的苏通大桥桥址区风特性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10):82-85, 251.

LI Xing-ping, LI Ai-qun, WANG Hao, *et al.* Wind

- characteristics of Sutong bridge based on long-term monitored data [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2010, **29**(10):82-85,251. (in Chinese)
- [8] Miyata T, Yamada H, Katsuchi H, *et al.* Full-scale measurement of Akashi - Kaikyo Bridge during typhoon [J]. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2002, **90** (12-15): 1517-1527.
- [9] Ahmad S, Islam N, Ali A. Wind-induced response of a tension leg platform [J]. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 1997, **72**(1-3):225-240.
- [10] Morandi A, Mercier J A, Bea R G. Performance of deepwater floating production facilities during hurricane Lili [J]. **Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference**, 2004, **3**: 2069-2078.
- [11] Korpås M, Warland L, He W, *et al.* A case-study on offshore wind power supply to oil and gas rigs [J]. **Energy Procedia**, 2012, **24**:18-26.
- [12] 欧进萍,段忠东,陆钦年,等. 渤海海域的风特性统计分析[J]. 海洋通报, 1997, **16**(1):20-28.
- OU Jin-ping, DUAN Zhong-dong, LU Qin-nian, *et al.* Statistical analysis of wind properties in the Bohai Sea [J]. **Marine Science Bulletin**, 1997, **16**(1):20-28. (in Chinese)
- [13] 肖仪清,李利孝,宋丽莉,等. 基于近海海面观测的台风黑格比风特性研究[J]. 空气动力学学报, 2012, **30**(3):380-387, 399.
- XIAO Yi-qing, LI Li-xiao, SONG Li-li, *et al.* Study on wind characteristics of typhoon Hagupit based on offshore sea surface measurements [J]. **Acta Aerodynamica Sinica**, 2012, **30**(3):380-387, 399. (in Chinese)
- [14] HU Zhi-qiang, YANG Jian-min, ZHAO Ying-nian, *et al.* Full scale measurement for FPSO on motions in six-degrees of freedom and environmental loads and deduction of mooring system loads [J]. **Science China: Physics, Mechanics and Astronomy**, 2011, **54**(1):26-34.

Analysis of wind characteristics near sea surface in LH4-1 oil field

DU Yu¹, WU Wen-hua^{*1}, YUE Qian-jin¹, LI Feng², XIE Ri-bin², LI Ping²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. CNOOC Ltd. Shenzhen Branch, Shenzhen 518067, China)

Abstract: To solve the problem of lacking prototype data in study of strong sea wind characteristics, a prototype measurement work for wind characteristics near sea surface is carried out on a semi-submersible platform in LH4-1 oil field in South China Sea. The data collected in the day, 22 September 2011, is analyzed to obtain wind characteristic parameters near sea surface, such as turbulence intensity, gust factor and integral scales of wind turbulence, etc.. Fluctuating wind power spectrum is also calculated by prototype data. The measured spectrum is compared with Davenport spectrum, von Karman spectrum and Kaimal spectrum. The comparative results show that for the strong wind near sea surface von Karman spectrum fits the measured spectrum best.

Key words: fluctuating wind; wind characteristics; prototype measurement; fluctuating wind spectrum