DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.01.003

杜齐鲁, 黄海龙, 周益人, 等. 海洋工程试验中 API 谱特性的风模拟[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 17-22. (DU Qi-lu, HUANG Hai-long, ZHOU Yi-ren, et al. API simulation spectrum in ocean engineering based on physical model tests[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 17-22.)

海洋工程试验中 API 谱特性的风模拟

杜齐鲁, 黄海龙, 周益人, 左其华

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:海洋环境中风荷载是船、采油平台、海上结构等所受主要荷载之一。自然界中的风不均匀且具有较强的脉动性。因此,研究随机脉动风场具有实际意义。采用伺服驱动有效控制风机的响应时间,基于脉动风谱特性进行了随机脉动风的模拟试验,并与同类试验相比,谱形波动较小,因此具有更好的稳定性。同时还研究了各种不同控制因子对谱模拟的影响,给出了稳定脉动风场所需信号时间间隔、试验时长等参数的选取区间。

关键词:脉动风;风谱;简谐波叠加法;物理模拟

中图分类号: U65 文献标志码: A 文章编号:1009-640X(2016)01-0017-06

自然界中,风、浪、流作用下,海洋工程结构物所受的风荷载约占总荷载的 1/10。但对水中漂浮结构物或船舶来说,若系泊系统阻尼不大,且风场主要能量的周期与系泊系统的振荡周期相近时,脉动风就有可能对系泊系统产生较大振荡,此时脉动荷载不容忽视[1]。1996 年,季春群等[2-3]应用 Longuet-Higgins 随机模型,列出了实现风速过程的表达式。张云彩[1]进行了风谱的试验室模拟。2006 年,唐筱宁等[4]通过物理模型试验,提出了采用不同船模模型比尺确定风速比尺的建议。2008 年,夏云强等[5]结合海洋工程物理模型试验风场模拟要求,研究了模型相似性、比尺效应、风速比尺,并给出了风速比尺的修正系数。2009 年,彭涛等[6]给出了模拟风场时,试验区距离风阵 3 m 以外,同时距离池壁大于 2.5 m 的建议,并模拟了两种风谱。本文基于风谱有关的特性,对试验方法进行了改进,在试验室进行了风谱模拟,并与有关文献进行了比对和探讨,通过试验进一步分析各种不同的主要控制参数对谱模拟的影响,为有关风试验提供了试验环境。

1 风谱及其谱模拟

风谱有 Davenport 谱、Harris 谱、Ochi & Shin 谱、API 谱 $^{[7-11]}$ 等。模拟方法大致有 3 种,如简谐波合成法、线性滤波法、小波分析法。本文采用简谐波叠加法模拟风谱,根据 Shinozuka 理论 $^{[12]}$,随机过程样本 G(t) 可

用下式表示:
$$G(t) = g(n\Delta t) = \sum_{j=1}^{M} \sqrt{2S_v(\omega_j) \Delta \omega} \cos(\omega_j n\Delta t + \varphi_j) + V_0$$
 (1)

式中: S_n 为随机过程 G(t) 的风功率谱; ω_j 为第 j 个角频率值; $\Delta\omega$ 为角频率增量; φ_j 为均匀分布在区间(0, 2π) 内的随机变量; V_0 为平均脉动风速; M 为一充分大的谱密度曲线等分份数; n 为随机过程控制信号总步长; Δt 为产生控制信号的时间间隔。

风谱分为陆地风谱和海洋风谱,其代表分别为 Davenport 谱和 API 谱。本文主要模拟海洋工程风环境,

收稿日期: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579156);水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401004);南京水利科学研究院院基金重大项目(Y214009)

作者简介: 杜齐鲁(1981—),男,山东济宁人,博士研究生,主要从事风浪流对浮体的作用研究。

E-mail: duqilu6963@163.com

所以选取 API 风谱来模拟脉动风,脉动风功率谱表达式为:

$$S(f) = [\sigma(z)]^{2}/f_{p} \times 1/[1 + 1.5f/f_{p}]^{5/3}$$
(2)

或:
$$S(\omega) = [\sigma(z)]^2/\omega_p \times 1/[1+1.5\omega/\omega_p]^{5/3}$$
$$f_p = 0.025V(z)/(z) , \omega_p = 2\pi f_p$$
(3)

$$\sigma(z) = 0.15(z/z_s)^{-0.125}$$
 $z \le z_s$, $\sigma(z) = 0.15(z/z_s)^{-0.275}$ $z > z_s$

式中: S 为随机风脉动功率谱; V(z) 为z 高度处的平均风速; z_s 为标准高度, 一般取 20 m; f_p 为由风谱测量获得的平均频率; $\sigma(z)$ 为z 高度位置风速脉动的标准差。

2 试验室脉动风模拟系统

试验设备为伺服驱动风机,超声波风速仪、可编程控制器 DYP-16EH 和人机界面 DOP-BO7S411。风机最高转速为3 000 r/min;伺服驱动风机,可以在较短的时间内改变风机的转速,本试验设置转速最快变换频率为2 Hz;WindSonic 超声风速风向仪,风速测量范围 $0\sim60~\text{m/s}$,误差 2%,分辨率 0.01~m/s,风向范围 $0^\circ\sim359^\circ$,误差± 3° ,分辨率 1° ,最大采集频率 4~Hz。

试验前,应先将风速仪放置在风机的前端试验段有效风区内,标定出风机转速与风速的关系。风机由计算机控制的伺服驱动器控制,通过调节计算机信号,得到各种大小不同的风速,以进行非定常风的模拟。

3 风谱的试验室模拟

模拟的脉动风是一个随机过程。风的大小可以用概率论中的统计数字特征来描述,例如:风速平均值、标准差、变异系数等。也可以用时域上的相关函数和频域上的功率谱密度来表示,因此,只要两者曲线保持一致,就认为随机脉动风模拟过程是正确的[13]。

3.1 随机脉动风的模拟

由于采用简谐叠加法进行风谱模拟,首先进行了正弦风的多次吹试,试验结果见图 1~4。

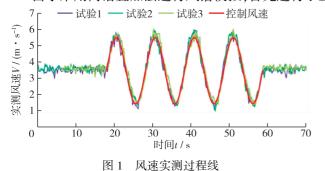


Fig. 1 Measured wind speed process

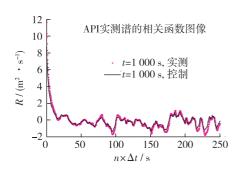


图 3 实测过程与控制过程相关函数曲线

Fig. 3 Correlation function curves of control and measured values

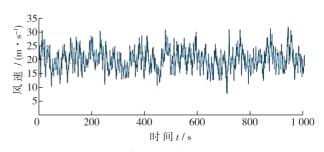


图 2 脉动风速实测过程线

Fig. 2 Measured random wind speed process

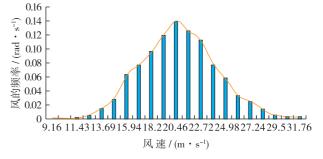


图 4 风速直方图

Fig. 4 Column diagram of wind speed process

图 1 显示吹试效果良好,性能稳定。图 2 为脉动风实测过程线;图 3 为随机脉动风控制过程与实测过程的相关函数图,表明风机的吹风过程是按照控制过程进行的。图 4 为风速直方图,平均风速约为 20 m/s,从分布图上看,概率服从假设的高斯分布。

3.2 风谱模拟的试验对比

为了验证风谱模拟的有效性,本文分别对张云彩和彭涛等试验 $^{[1,5]}$ 进行了试验室模拟。张云彩试验中API 风谱脉动风模拟试验采用给定风速 42.69 m/s,风压中心高度 z=22.27 m,计算风频率范围为 $0.005\sim0.7$ rad/s,试验模型比尺为 1/70,风速采样时间1 290 s,采样频率为 20 Hz;本文模型比尺 1/140,风速采样时间1 200 s,采样频率为 4 Hz,试验结果对比见图 5。彭涛等试验风压中心高度取 10 m,平均风速为 12 m/s。本文模型比尺 1/40,采样频率为 4 Hz,图 6 为其试验结果对比图。

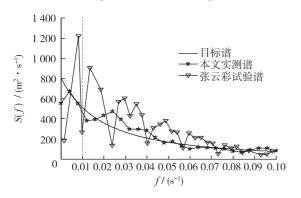


图 5 与张云彩等试验结果对比

Fig. 5 Comparison with test results of Zhang Yun-cai

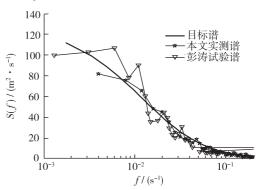


图 6 与彭涛等试验结果对比

Fig. 6 Comparison with test results of Peng Tao

从试验结果看(图 5 和 6),与目标曲线相比较,两条试验风谱曲线在高频区(如 f<0.07 Hz)与目标谱曲线均非常吻合,但在低频区长周期段(如 f>0.07 Hz)则出现了一定程度的波动性,由于试验室试验时长有限,影响了长周期风的模拟。但本文实测谱曲线更贴近目标谱,波动性与波幅更小,风谱的模拟更有效。

3.3 对风谱主要控制参数的研究

随机脉动风模拟过程中,影响谱模拟的因子较多,有信号产生的时间间隔 Δt ,模拟时长 t,谱形等分份数 M 等。为研究这些参数因子对谱的影响,做了如下控制条件的试验。

3.3.1 对信号产生时间间隔长短的研究 t 取1 000 s, M = 250, Δt 分别取 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 2.7, 3.0, 3.5 和 4.0 s 共 8 种工况。风谱试验结果见图 7, 实测风谱特征值统计如表 1。

表 1 不同 Δt 的实测风谱特征值统计

Tab. 1 Statistical characteristic values of wind spectrums of different Δt

$\Delta t/\mathrm{s}$	目标谱面积 S_1	实测谱面积 S_2	谱面积比 S ₂ /S ₁	偏差	$\Delta t/s$	目标谱面积 S_1	实测谱面积 S_2	谱面积比 S_2/S_1	偏差
1.0	10. 02	9. 53	0. 951	4.9%	2. 7	10. 02	8. 89	0. 887	11. 3%
1.5	10.02	9. 16	0. 913	8.7%	3.0	10.02	8. 66	0.864	13.6%
2.0	10.02	9. 12	0.909	9.1%	3.5	10.02	8. 55	0. 853	14. 7%
2. 5	10.02	8. 46	0. 849	15. 1%	4. 0	10.02	8. 74	0.872	12.8%

由图 7 可见,当 $\Delta t \in [1.0 \text{ s}, 2.5 \text{ s}]$ 时,谱模拟曲线比 $\Delta t \in [2.7 \text{ s}, 4.0 \text{ s}]$ 工况要理想,实测谱曲线波动性较弱,模拟稳定,这与表 1 中数据也相对应。表中[1.0 s, 2.5 s]工况时的实测目标方差值普遍小于[2.7 s, 4.0 s]工况,谱面积偏差也相应地比后者工况小,因此,在模拟风谱时, Δt 取值宜小不宜大,但同时, Δt 越小,试验对风机的响应要求也会提高,所以 Δt 的选取要考虑风机的性能状况。

3.3.2 对模拟时长的研究 Δt 取 1 s, M = 250, t 分别取 150, 200, 300, 400, 500, 650, 850 和1 000 s共 8 种工

20

10

0

0.5

1.0

 $w / (\text{rad } \cdot \text{s}^{-1})$

(e) $\Delta t = 300 \text{ s}$

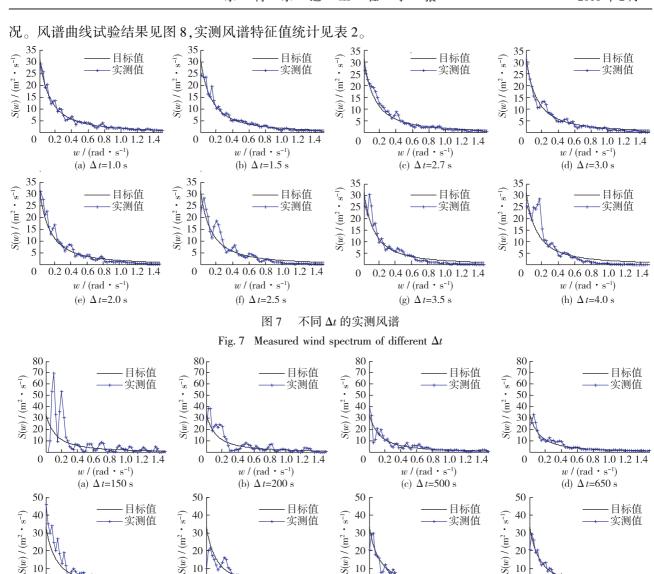


图 8 不同时长的实测风谱

1.5

1.0

 $w / (\text{rad } \cdot \text{s}^{-1})$

(f) $\Delta t = 400 \text{ s}$

20

10

0

0.5

1.0

 $w / (\text{rad } \cdot \text{s}^{-1})$

(g) $\Delta t = 850 \text{ s}$

20

10

0

0.5

 $w / (\text{rad } \cdot \text{s}^{-1})$

(h) $\Delta t = 1000 \text{ s}$

1.5

1.0

1.5

Fig. 8 Measured wind spectrum of different durations

表 2 不同 t 的实测风谱特征值统计

Tab. 2 Statistical characteristic values of wind spectrums of different durations

时长 t/s	目标谱面积 S_1	实测谱面积 S_2	谱面积比 S_2/S_1	偏差	时长 t/s	目标谱面积 S_1	实测谱面积 S_2	谱面积比 S_2/S_1	偏差
150	10. 03	13. 34	1. 33	33.0%	500	10. 03	12. 61	1. 257	25.7%
200	10. 03	10. 96	1. 094	9.4%	650	10. 03	8. 97	0. 894	10.6%
300	10. 03	9. 42	0. 94	6.0%	850	10. 03	8. 94	0. 891	10.9%
400	10. 03	10. 15	1. 011	1.1%	1 000	10. 03	9. 53	0. 951	4.9%

从图 8 的谱形图来看, 当时长 t 为 150 s 时, 实测风谱谱形波动幅度最大, 所以时长 150 s 不足以满足谱 模拟,需要加大试验时长。随着试验时长 t 的增大,谱模拟趋于稳定,波动幅度减小。可见,风试验时长越 长,实测风谱曲线就越接近目标谱曲线。随机脉动风模拟时间的长短是决定实测谱曲线波动剧烈程度和波

20

10

0

0.5

1.5

幅大小的因素之一。表 2 风谱方差值反映了实测谱相对目标谱的波动性大小, t 为 150 s 时, 方差值 4.348 和 偏差率 0.33 在所有试验工况中最大。当时长加长为 200 s 时, 实测目标谱方差值降为 1.559, 时长 300 s 之后, 方差值和偏差率都在某个小范围上下波动, 所以, 风模拟时长是有最低值范围的, 最短时长建议控制在 300~400 s 区间, 但同时也要结合物理模型试验本身的模拟时长来确定。

3.3.3 对谱形等分份数的研究 t 取1 000 s, Δt 取 1 s, M 分别取 50, 100, 125, 150, 175, 200, 225 和 250 工况, 试验结果见图 9, 实测风谱特征值统计如表 3。

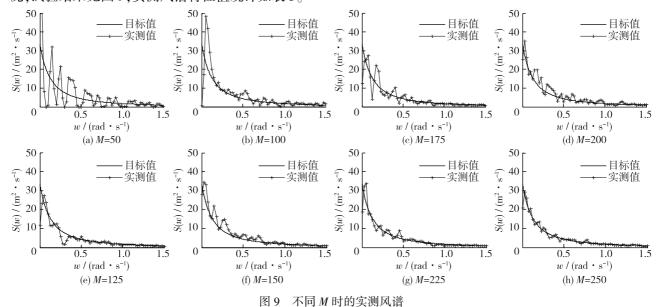


Fig. 9 Measured wind spectrum of different value M

表 3 不同 M 的实测风谱特征值统计

Tab. 3 Statistical characteristic values of wind spectrums of different M

M 值	目标谱面积 S_1	实测谱面积 S_2	谱面积比 S ₂ /S ₁	偏差	M 值	目标谱面积 S_1	实测谱面积 S_2	谱面积比 S ₂ /S ₁	偏差
50	10. 02	10. 98	1. 095	9.5%	175	10. 02	8. 55	0. 852	14. 8%
100	10.02	11.46	1. 14	14.0%	200	10.02	11.51	1. 147	14.7%
125	10.02	9. 42	0. 939	6.1%	225	10.02	9. 47	0. 944	5.6%
150	10.02	11. 33	1. 129	12.9%	250	10.02	9. 53	0. 951	4.9%

M 为目标风谱的等分份数,图 9 反映了系列值 M 下谱模拟的效果。当 M 为 50 时,实测谱曲线波动最大,随着 M 的增加,实测谱曲线波动性逐渐减小,当 M 为 125 时,实测谱开始趋于稳定,这也可从表 3 的实测风谱值相对目标谱方差值的变化看出同样的规律。这也与文献[13]中所述当 M 值越大模拟就越趋于目标谱的说法相一致。

4 结 语

基于脉动风风谱特性,进行了脉动风的试验室模拟。研究了各种不同控制因子对谱模拟影响的规律,给出了各参数合理的取值范围。物理模型,试验结果满足概率统计有关参数特征,模拟效果优于有关文献成果,为下一步动力水运工程研究提供了脉动风试验环境。

参考文献:

[1] 张云彩. 阵风及其谱模拟[J]. 海洋工程, 1996, 14(2): 20-27. (ZHANG Yun-cai. Gust simulation[J]. The Ocean

- Engineering, 1996, 14(2): 20-27. (in Chinese))
- [2] 季春群, 黄祥鹿. 海洋工程模型试验的要求及试验技术[J]. 中国海洋平台, 1996, 11(5): 234-237. (JI Chun-qun, HUANG Xiang-lu. Test requirement and technology in model experiment of ocean engineering[J]. China Offshore Platform, 1996, 11(5): 234-237. (in Chinese))
- [3] 季春群, 盛振邦. 海洋工程环境条件模拟[J]. 中国海洋平台, 1996, 11(4): 191-193. (JI Chun-qun, SHENG Zhen-bang. Environment simulation of ocean engineering[J]. China Ocean Platform, 1996, 11(4): 191-193. (in Chinese))
- [4] 唐筱宁, 夏运强, 杨洪旗, 等. 波浪物理模型试验中风速比尺确定方法初探[J]. 海岸工程, 2006, 25(1): 1-5. (TANG Xiao-ning, XIA Yun-qiang, YANG Hong-qi, et al. A preliminary study on the determination method of wind speed scale in physical wave model test[J]. Coastal Engineering, 2006, 25(1): 1-5. (in Chinese))
- [5] 夏运强,李华军,唐筱宁.海洋工程物理模型试验中风场模拟方法研究[J].工程力学,2008,25(1):28-33. (XIA Yunqiang, LI Hua-jun, TANG Xiao-ning. Wind simulation in physical model experiment of ocean engineering [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1):28-33. (in Chinese))
- [6] 彭涛,杨建民,李俊. 海洋工程试验池中风场模拟[J]. 海洋工程,2009,27(2):8-13. (PENG Tao, YANG Jian-min, LI Jun. Simulation of wind field in a laboratory basin[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2):8-13. (in Chinese))
- [7] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near ground in high winds [J]. Royal Meteor Soc, 1961 (87): 194-211.
- [8] SURESH K K. Random number sensitivity in simulation of wind loads[J]. Wind and Structures, 2000, 3(1): 1-10.
- [9] HARRIS R I. The nature of the wind, modern designing of wind sensitive structures [R]. London: Construction Industry Research and Information Association, 1971: 29-55.
- [10] SIMIU E. Wind spectra and dynamic along wind response [J]. Journal of the Structural Division, 1974, 100(9): 1897-1910.
- [11] 舒新玲, 周岱, 王泳芳. 风荷载测试与模拟技术的回顾及展望[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 6-10. (SHU Xin-ling, ZHOU Dai, WANG Yong-fang. Review and prospect on measurement and simulation techniques of wind load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(3): 6-10. (in Chinese))
- [12] SHINOZUKA M. Digital simulation of random processes and its applications [J]. Sound and Vibration, 1972, 25(1): 111-128.
- [13] 阎石,郑伟. 简谐波叠加法模拟风谱[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2005, 21(1):1-4. (YAN Shi, ZHENG Wei. Wind load simulation by superposition of harmonic[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2005, 21 (1):1-4. (in Chinese))

API simulation spectrum in ocean engineering based on physical model tests

DU Qi-lu, HUANG Hai-long, ZHOU Yi-ren, ZUO Qi-hua (Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In marine engineering environment, the wind is one of the main loads. At present, the physical model tests for the ocean engineering usually adopt the uniform wind to simulate equivalent wind load. But the natural wind is uneven and has a strong random pulsation. Under the condition of uniform and uneven wind, the vessel load has large difference between them. Before studying the force and motion of ship in the randomly fluctuating wind field, it is necessary to establish a random wind test environment. Thus, grasping the law of simulating the wind field is the first step and has more practical meaning. In this study, a programmable servo driver is used for controlling the response time of the wind machine. Based on the features of the random wind spectrum, some physical wind model tests have been carried out in the laboratory. Compared with other model tests, the results of the present experiment show better. Meanwhile, studies of the different effects of the main control factors of spectrum simulation have been done to provide the necessary data for determining suitable parameters in the tests, such as signal interval time and testing time, and to further offer random wind experiment environment for researches of dynamic water transport engineering.

Key words: fluctuating wind; wind spectrum; harmony superposition; physical simulation