

水平运动模拟器复演随机海浪谱实验^{*}

薛米安^{1,2}, 邢建建², 苑晓丽³, 陈奕超², 罗柳钧²

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室 南京, 210098) (2. 河海大学港口海岸与近海工程学院 南京, 210098)
(3. 河海大学理学院 南京, 210098)

摘要 设计了一种水平随机运动模拟器,并基于模型实验研究了该水平运动模拟器复演宽频带 Bretschneider 谱(B谱)与窄频带 JONSWAP 谱(J谱)所生成随机运动位移的能力及其关键影响因素。通过改变谱峰周期和有效波高讨论了两种海浪谱所生成水平随机运动位移的极值及与随机运动位移相应的频谱密度特征,确定了谱峰周期及有效波高对水平运动模拟器冲程的影响规律。基于实测频谱密度与理论谱之间的拟合优度,发现该模拟器对宽频带的 B 谱具有较高的复演精度,而对能量分布相对集中的窄频带 J 谱的复演精度相对较低,并且发现谱峰周期是影响 J 谱实测谱与理论谱拟合优度的主要因素,同时由 J 谱生成的随机运动位移的标准差及相应频域中能谱密度的方差均大于 B 谱,表明 J 谱相对 B 谱而言是一种高离散度的谱型,在运动模拟器中很难被精确复演为随机运动位移。

关键词 运动模拟器;宽频带谱;窄频带谱;统计特征;快速傅里叶变换

中图分类号 TH115; TB534⁺.2

引 言

海洋工程结构物如浮式生产储卸油系统(floating production storage and offloading,简称 FPSO)、半潜式平台、大型液货船等主力海洋工程装备,长期遭受着风浪流等复杂动载荷的作用,尤其是在波浪作用下常常会引起上述结构物的剧烈运动。海洋波浪引发海洋结构物产生的运动属于随机运动。受造波港池模拟随机波浪能力的限制,实验中难以准确描述浮式结构物在复杂波浪场中的动态响应,给研究带来了诸多不便。由于海洋波浪的准确复演是海洋工程模型实验保证试验结果可靠性的重要因素,因此除建造精准的大型波浪水池外,随机运动模拟器成为复演极端波浪、地震等各种海洋环境的重要途径。

皮阳军等^[1]认为随机运动模拟器在装备研发和可靠性验证中具有举足轻重的作用,因此科研人员对各种类型的模拟器性能开展了卓有成效的研究。武伟等^[2]设计了一套能够提供典型海浪运动模拟的电液式振动台。于大泳等^[3]运用蒙特卡洛研究了对接机构运动模拟器并对其位姿精度进行了概率分

析。张元等^[4]设计并测试了一种新型的六自由度运动模拟器。梁凯等^[5]基于动态性能仿真测试分析了六自由度运动模拟器的各项性能指标。吴博等^[6]研究了液控运动模拟控制系统并分析了六自由度运动模拟器的静态及动态性能。凌明祥等^[7]研究了液压振动台的非线性摩擦力与参数辨识技术,为振动台加速度波形失真补偿提供了参考。Airouche 等^[8]研究了六自由度振动台谐波信号再生的高保真问题。然而上述研究鲜有提及运动模拟器对随机海浪谱的复演精度问题,同时海浪谱类型及主要参数对精度的影响也较少报道。但是这些因素对运动模拟器在海洋工程模型试验中的应用极其重要,直接关系到实验结论的精度,尤其是对于随机波浪激励下的液体晃动问题^[9-10],因此亟需开展各种海浪谱生成随机运动位移的试验。

实际海域中的海浪变化十分复杂,对于充分成长的海浪,可以被认为是一个平稳的随机过程。随机海浪也被称为不规则波。对不规则波的产生方法,Ketabdari 等^[11]认为可以通过有限数量正弦单色波的叠加、风生波时间序列的原型观测等方法获得。尽管不规则波是由具有不同频率和相位余弦或正弦函数叠加而成,但是不同海域的波浪特性不同,因此每种谱

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51679079);河海大学中央高校基本科研业务费资助项目(2018B12814,2019B19314)
收稿日期:2017-09-15;修回日期:2018-01-09

生成的不规则波仍具有自己的特性。在该研究中以 JONSWAP 谱(简称 J 谱)和 Bretschneider 谱(简称 B 谱)分别作为输入设计谱驱动平台按照指定的随机波谱作不规则运动,通过改变谱峰周期和有效波高分析不同参数下该模拟平台实际运动位移的能谱曲线与理论谱的差异性,并讨论两种设计谱所产生随机运动位移的主要统计特征。

1 海浪谱及其生成的随机运动位移

1.1 两种海浪谱表达式

J 谱的表达式^[12]为

$$S(f) = \beta H_s^2 T_s^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \cdot \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{0.06238(1.094 - 0.01915 \ln \gamma)}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (2)$$

$$T_p = \frac{T_s}{1.0 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \quad (3)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases} \quad (4)$$

其中: H_s 和 T_s 分别为有效波高和周期; T_p 和 f_p 分别为谱峰周期和频率; $\gamma=3.3$ 为谱峰增强因子。

B 谱的表达式为

$$S(\omega) = \frac{5H_s^2}{16\omega_p} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^5 \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \quad (5)$$

其中: H_s 为有效波高; ω_p 为谱峰频率。

该谱由 Bretschneider 在 1959 年通过无因次波高和无因次波长的联合分布函数导出的二参数谱,它适用于成长阶段或充分成长的风浪。该谱是以外观测的各种频率的波浪所贡献的能量代替各组成波提供的能量,所给出的谱实质上是波能在各种外观波长之间的分布。公式中的频率有的使用圆频率 ω (rad/s)表示,有的使用频率 f (Hz)表示,为了使得谱密度函数 $S(\omega)$ 与 $S(f)$ 之间能够相互转换,给出了如下的转换关系

$$S(f) = 2\pi S(2\pi f) = 2\pi S(\omega) \quad (6)$$

1.2 随机运动位移生成原理

不规则波由有限数个不同波幅、频率和相位的正弦波线性叠加而成,其波面表达式为

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (7)$$

其中: ω_i 为第 i 个线性波的频率; N 为线性波的个数; a_i 和 φ_i 为每个线性波的波幅和相位。

相位 φ_i 为 $0 \sim 2\pi$ 范围内的随机变量,波幅的表

达式为

$$a_i = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega} \quad (8)$$

其中: $\Delta\omega$ 为频率间隔。

根据线性造波理论,运动模拟器的水平运动速度可以表示为

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega} \cos(\omega_i t + \varphi_i)}{K_i} \quad (9)$$

其中: K_i 为转换函数。

其表达式为

$$K_i = \frac{2(\cosh 2kd - 1)}{\sinh 2kd + 2kd} \quad (10)$$

和不规则谱波面的表达式类似,由海浪谱生成的随机运动方程可写为

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (11)$$

其中: $x(t)$ 代表可产生一个随机的水平运动; a_i 和 ω_i 分别为每一个简谐波的振幅和频率; φ_i 为 $0 \sim 2\pi$ 范围内的随机变量。

在试验中,当需要产生一个随机位移时,首先根据海浪理论谱,利用傅里叶变换将其展开成一个电压时间序列值控制信号,此信号经运动控制卡转换成运动方向和速度两路数字控制信号送给伺服控制驱动器,驱动伺服电机做往复运动,从而带动水平模拟器做相应的随机运动。

1.3 测量仪器及试验工况

平台运动的实际位移由位移传感器实时测量。如图 1 所示,位移传感器一端固定在试验平台上,另一端与固定在地基上的结构物相连。试验中采用的位移传感器量程为 $0 \sim 50$ cm,精度为 $\pm 0.5\% F \cdot S$,采样频率为 100 Hz,通讯接口为 USB 型,可以直接连接在计算机上并通过基于 Visual Studio 软件平台开发的 SDA1000 型数据采集软件实时显示并保存位移数据。

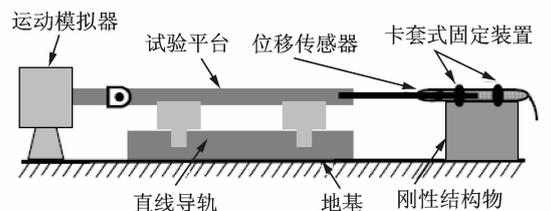


图 1 运动模拟装置中的位移传感器布置示意图

Fig. 1 Layout of displacement sensor in movement simulator

表 1 列出了两种设计谱的 9 组有效波高和谱峰周期,用于研究不同参数条件下海浪谱生成的随机

表1 B谱和J谱的9组有效波高 H 及周期 T Tab. 1 Significant wave height H and period T of B-spectrum and J-spectrum

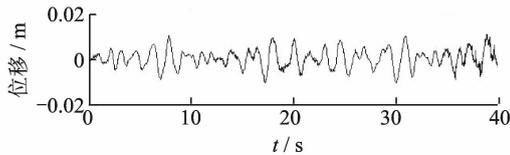
试验工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H/m	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.02	0.025	0.03
T/s	0.8	1.2	1.5	1.8	2.0	2.4	2.4	2.4	2.4

位移的统计特征。由谱密度函数可知,波浪谱的有效波高和周期给定后即可确定谱形。通过改变有效波高和周期,可改变谱形进而通过运动模拟器生成不同的随机运动位移。

2 随机运动位移及相应的频谱密度

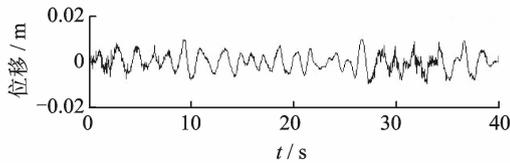
图2为不同谱峰周期和有效波高条件下两种海

浪谱B谱和J谱分别生成的实际水平随机运动位移。由图2可知,在相同的有效波高和谱峰周期条件下两种海浪谱所产生的随机运动位移没有显著的差别,并发现由两种能谱产生的不规则运动位移的极值也没有显著的变化。当有效波高固定不变时,由图2(a)~(c)及图2(A)~(C)可知两种实测海浪谱所生成的不规则运动位移的极值并不随着谱峰周期的增大而显著的增大或减小。当谱峰周期保持不



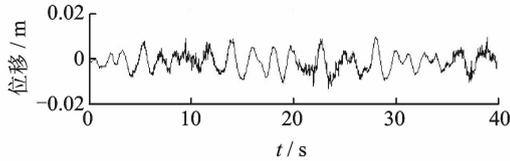
(a) B谱生成的位移(工况4)

(a) Displacement generated by B-spectrum (case4)



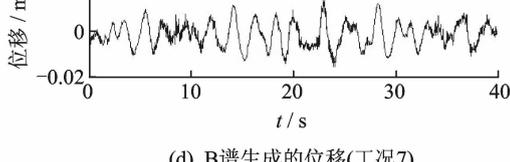
(b) B谱生成的位移(工况5)

(b) Displacement generated by B-spectrum (case5)



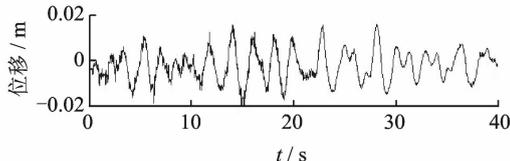
(c) B谱生成的位移(工况6)

(c) Displacement generated by B-spectrum (case6)



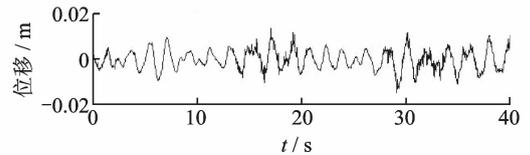
(d) B谱生成的位移(工况7)

(d) Displacement generated by B-spectrum (case7)



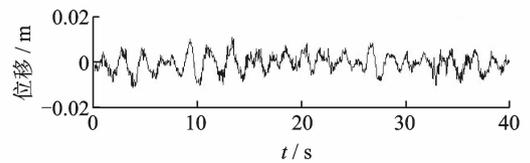
(e) B谱生成的位移(工况8)

(e) Displacement generated by B-spectrum (case8)



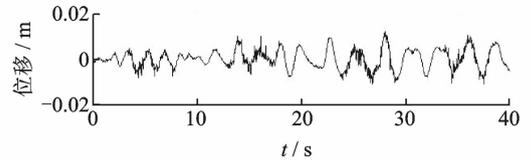
(A) J谱生成的位移(工况4)

(A) Displacement generated by J-spectrum (case4)



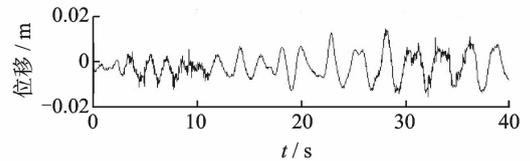
(B) J谱生成的位移(工况5)

(B) Displacement generated by J-spectrum (case5)



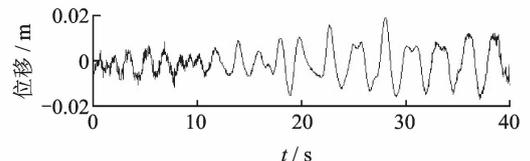
(C) J谱生成的位移(工况6)

(C) Displacement generated by J-spectrum (case6)



(D) J谱生成的位移(工况7)

(D) Displacement generated by J-spectrum (case7)



(E) J谱生成的位移(工况8)

(E) Displacement generated by J-spectrum (case8)

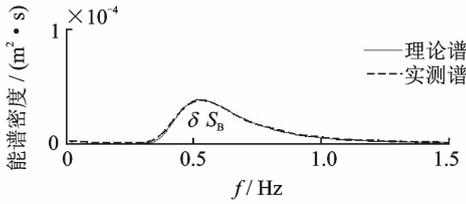
图2 不同谱峰周期和有效波高条件下海浪谱生成的实际平台运动位移

Fig. 2 The movement displacement generated by B-spectrum and J-spectrum with different period and significant wave height

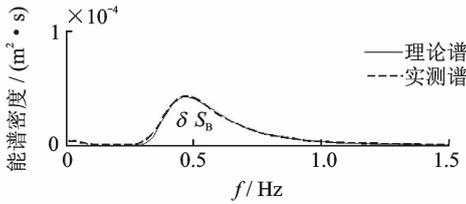
变时,由图 2(c)~(e)和图 2(C)~(E)可知两种实测海浪谱所生成的不规则运动位移的极值均随着有效波高的增加而显著增大。

为了进一步分析随机位移的频谱变化,图 3 给出了与图 2 相应的不同谱峰周期和有效波高条件下海浪谱生成的实际平台运动位移的实测频谱密度与

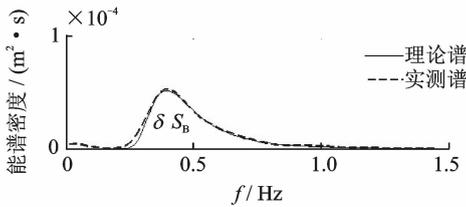
理论频谱密度的比较关系。从图 3 中可以看出,当两种海浪谱具有相同的有效波高和谱峰周期时,其谱形存在较大的差异,B 谱较平缓属于宽带频谱,J 谱较尖锐属于窄带频谱。因此 J 谱的波浪能量在频域上的分布也较 B 谱集中。当有效波高固定不变时,由图 3(a)~(c)及图 3(A)~(C)可知随着谱峰



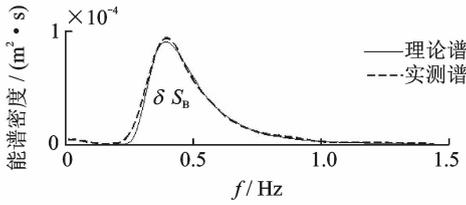
(a) B谱所生成位移的频谱密度(工况4)
(a) Energy spectral density of B-spectrum (case4)



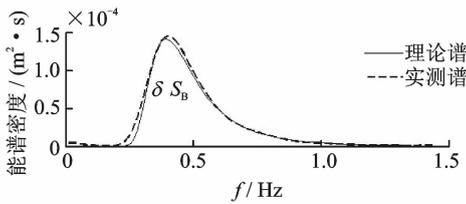
(b) B谱所生成位移的频谱密度(工况5)
(b) Energy spectral density of B-spectrum (case5)



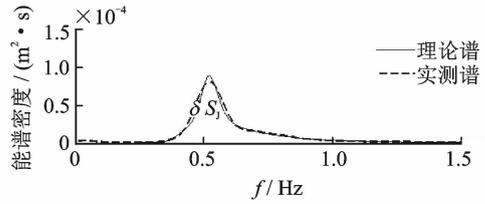
(c) B谱所生成位移的频谱密度(工况6)
(c) Energy spectral density of B-spectrum (case6)



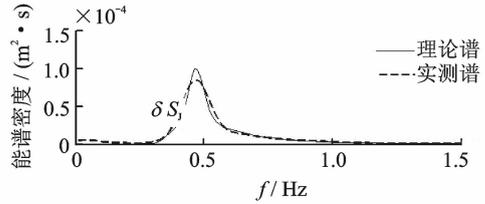
(d) B谱所生成位移的频谱密度(工况7)
(d) Energy spectral density of B-spectrum (case7)



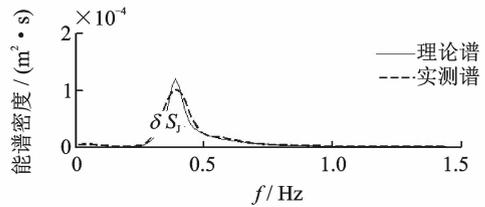
(e) B谱所生成位移的频谱密度(工况8)
(e) Energy spectral density of B-spectrum (case8)



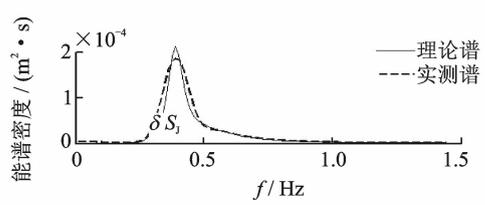
(A) J谱所生成位移的频谱密度(工况4)
(A) Energy spectral density of J-spectrum (case4)



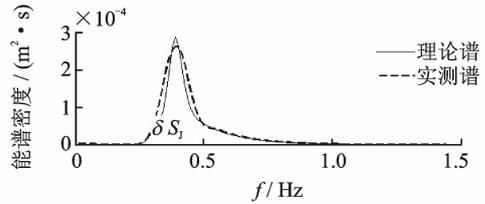
(B) J谱所生成位移的频谱密度(工况5)
(B) Energy spectral density of J-spectrum (case5)



(C) J谱所生成位移的频谱密度(工况6)
(C) Energy spectral density of J-spectrum (case6)



(D) J谱所生成位移的频谱密度(工况7)
(D) Energy spectral density of J-spectrum (case7)



(E) J谱所生成位移的频谱密度(工况8)
(E) Energy spectral density of J-spectrum (case8)

图 3 不同谱峰周期和有效波高条件下海浪谱生成的实际平台运动位移的实测频谱密度与理论频谱密度的比较
Fig. 3 Comparison of theoretical spectrum and measured spectrum of displacement generated by B-spectrum and J-spectrum with different period and significant wave height

周期的增大两种海浪谱的谱峰频率均由高频向低频推移,实测频谱密度的最大值也随着谱峰周期的增大而缓慢增加。当谱峰周期保持不变时,由图 3(c)~(e)和图 3(C)~(E)也可知两种实测海浪谱的频谱密度最大值随着有效波高的增加而显著增大。此外,从图 3 中还可以看出随着谱峰周期的增加实测频谱密度越来越偏离理论值,也就是低频运动越来越难被精确模拟,尤其是对于能量在频域上相对集中的 J 谱。

3 随机运动位移及其快速傅里叶变换结果的统计特征分析

通过对水平随机运动位移极值的统计分析可以确定谱峰周期 T 及有效波高 H 对水平运动模拟器冲程 d 的影响规律。图 4 给出了两种海浪谱所生成随机运动位移的最大值 d_{\max} 、最小值 d_{\min} 随谱峰周期 T 及有效波高 H 的变化关系。从图 4(a)中可以看出当有效波高 H 为 0.015 m 保持不变时,除由 B 谱生成水平随机运动位移的最大值随着谱峰周期的增加而减小外,B 谱所生成水平随机运动位移的最小值和 J 谱生成的水平随机运动位移的最大值及最小值均不随谱峰周期的增加而单调增加或减小。同时从图 4(a)中可以观测到,除图 2(B)(工况 2)中出现的由 J 谱所生成的一个较大的随机运动位移外,由两种海浪谱所生成水平随机运动位移的最大值与最小值之间并没有显著的差异。当谱峰周期为 2.4 s 保持不变时,从图 2(f)~(i)和(F)~(I)以及图 4(b)中可以看出两种海浪谱生成的随机运动位移的最大值随着有效波高的增加而增加;同一有效波高时两种海浪谱所生成随机运动位移的最大值与最小值没有显著差异。

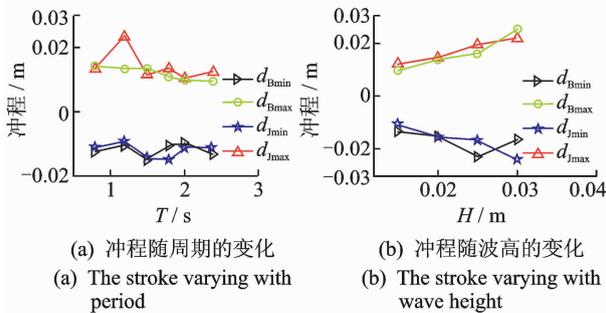


图 4 两种海浪谱所生成随机运动位移的最大值、最小值随谱峰周期 T 及有效波高 H 的变化

Fig. 4 The maximum/minimum value of displacement generated by B-spectrum and J-spectrum with different period T and significant wave height H

标准差也被称为标准偏差,反映了一组数据的离散程度。从图 5(a)中可以看出随着谱峰周期 T 的增加,J 谱所生成水平随机运动位移的标准差 σ_j 均大于由 B 谱生成水平随机运动位移的标准差 σ_B ,表明 J 谱生成的随机位移数据集具有较大的离散度,主要原因是 J 谱比 B 谱的能量在频域上的分布较集中。此外,从图 5(a)中也可以发现两种海浪谱所生成随机运动位移数据的标准差并不随谱峰周期的增加而单调的增加或减小。当周期等于 1.5 s 时两种海浪谱生成的随机运动位移都具有最大的标准差,即位移数据具有较高的离散度。从图 5(b)中可以看出,两种海浪谱所生成随机运动位移的标准差也随着有效波高的增大而增大;同时由 J 谱生成的随机运动位移的标准差均大于由 B 谱所生成随机运动位移的标准差,表明两种海浪谱生成的随机运动位移数据的离散程度也随着有效波高的增大而增大,且 J 谱所生成随机运动位移数据的离散程度大于 B 谱所生成随机运动位移数据的离散程度。

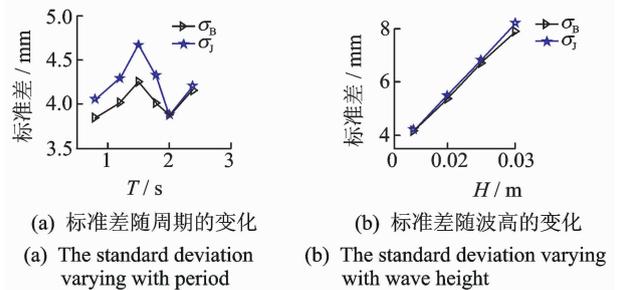


图 5 两种海浪谱所生成随机运动位移的标准差随谱峰周期 T 及有效波高 H 的变化关系

Fig. 5 The standard deviation of displacement generated by B-spectrum and J-spectrum with different period T and significant wave height H

实测频谱密度与理论谱之间的拟合优度 R^2 反映了模拟器复演随机运动的精度。图 6(a) 显示除工况 2 外 B 谱实测谱与理论谱之间的拟合优度均大于 J 谱实测谱与理论谱间的拟合优度并且随着谱峰周期的增加 J 谱实测谱与理论谱间的拟合优度逐渐减小,这是由于随着谱峰周期的增加 J 谱的谱型越来越尖锐,能量也越来越集中在峰值频率上。上述分析表明,该水平运动模拟器能够较精确地复演宽频带的 B 谱,拟合优度 R^2 可以达到 0.99 以上,而对具有较大谱峰周期的窄频带 J 谱所生成的随机运动位移并不能较精确地复演且 R^2 随着谱峰周期

的增大而减小,表明谱峰周期是影响窄频带 J 谱复演精度的主要因素。当谱峰周期不变时,随着有效波高的增大,图 6(b)显示 B 谱的拟合优度均大于 J 谱的拟合优度,主要原因如图 3 所示。和 J 谱相比,B 谱是一种宽频带谱,能量在频率上的分布相对分散,所生成随机运动位移的离散程度较小,数据较稳定,因此水平模拟器能够较准确地复演由 B 谱生成的随机运动。此外,由图 6(b)也可发现随着有效波高的增加,两种海浪谱实测谱与理论谱的拟合优度基本上保持不变,J 谱型的拟合优度在 0.975 左右,B 谱型的拟合优度约为 0.995。

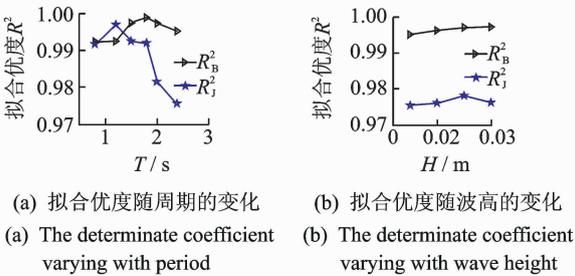
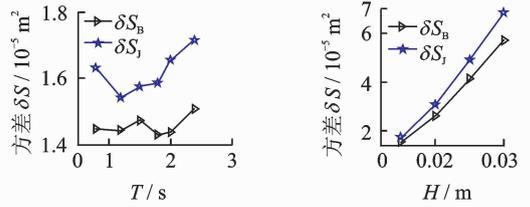


图 6 两种海浪谱的实测频谱与理论谱的拟合优度 R^2 随谱峰周期 T 及有效波高 H 的变化关系
 Fig. 6 The determinate coefficient R^2 between theoretical spectrum and measured spectrum of displacement generated by B-spectrum and J-spectrum with different period T and significant wave height H

频谱密度对频率的积分可以给出信号的方差,同时也反映了信号能量的大小。对图 3 中 9 组实测频谱密度曲线在频域上进行积分可获得频谱密度的方差,即实测频谱密度曲线与频率轴之间的面积 δS ,该值不仅反映了实测谱数据的离散程度也一定程度上反映了能量的大小。从图 7 (a) 中可以看出 J 谱实测频谱密度对频率的积分 δS_J 在有效波高为 0.015 m、谱峰周期 0.8~2.4 s 范围内均大于 B 谱实测频谱密度对频率的积分 δS_B ,表明 J 谱频谱密度的离散程度及在频域上的总能量均大于 B 谱频谱密度的离散程度和在频域上的总能量。从图 7 (b) 中可以观测到,频谱密度函数对频率的积分面积即实测谱型的方差也随着有效波高的增加而增加且 J 谱实测谱的方差大于 B 谱实测谱的方差,和图 5(b) 得出的结论一致,表明 J 谱相对 B 谱而言是一种高离散度的谱型,同时离散程度随着有效波高的增加而增加。



(a) 方差随周期的变化 (b) 方差随波高的变化
 (a) The variance varying with period (b) The variance varying with wave height

图 7 两种海浪谱的实测频谱密度对频率的积分面积即方差 δS 随谱峰周期 T 及有效波高 H 的变化
 Fig. 7 The variance of measured spectrum of displacement generated by Bretschneider spectrum and JONSWAP spectrum with different period T and significant wave height H

4 结束语

选择典型的宽频带 B 谱和窄频带 J 谱,通过实验研究了水平运动模拟器模拟这两种海浪谱型所生成随机运动位移的主要统计特征、复演精度以及谱峰周期和有效波高对生成的随机运动位移的主要统计参数的影响规律。得出如下结论:a. B 谱相比 J 谱是一种具有较高离散程度的谱型;b. 水平运动模拟器对 B 谱的复演精度大于对 J 谱的复演精度,且谱峰周期是影响 J 谱复演精度的主要因素;c. 有效波高保持不变时,两种海浪谱生成的随机运动位移的统计值并不随着谱峰周期的增加而单调的增加或减少;d. 谱峰周期保持不变时,两种海浪谱生成的随机运动位移的最大值、标准差及实测频谱密度函数的方差均随着有效波高的增大而单调的增大。

本研究一方面直接给出了该类型运动模拟器精确模拟不同类型谱的能力;另一方面也为在实验室内界定该类型随机运动模拟器精确模拟窄频带 J 谱的周期范围提供了方法借鉴,最终为合理利用该实验装置准确模拟不同的运动环境提供了科学参考依据。该实验装置可被广泛应用于简谐或随机波浪激励下液舱或储液罐内的液体晃荡问题研究,获取液舱或储液罐内的压力分布规律,为优化设计液货舱结构提供科学实验数据^[13-14]。

参 考 文 献

[1] 皮阳军,王宣银,罗晓晔,等. 六自由度舰船运动模

- 拟器随机海浪谱模拟[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4):375-378.
- Pi Yangjun, Wang Xuanyin, Luo Xiaohua, et al. Random wave spectrum simulation of six degrees of freedom ship motion simulator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4):375-378. (in Chinese)
- [2] 王伟, 刘少军, 李流军. 深海采矿升沉补偿系统海浪运动模拟平台及其运动控制[J]. 现代制造工程, 2009(7):10-14.
- Wu Wei, Liu Shaojun, Li Liujun. The single freedom ship motion simulation platform and its control in heave compensation system for deep-sea mining[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(7):10-14. (in Chinese)
- [3] 于大泳, 丛大成, 韩俊伟. 对接机构运动模拟器的精度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(2):264-268.
- Yu Dayong, Cong Dacheng, Han Junwei. Accuracy analysis of motion simulator of docking mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(2):264-268. (in Chinese)
- [4] 张元, 孙丽丽, 王健, 等. 新型六自由度运动模拟器及其性能测试[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(4):38-43.
- Zhang Yuan, Sun lili, Wang Jian, et al. New six-degree freedom motion simulator and its performance study[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19(4):38-43. (in Chinese)
- [5] 梁凯, 苏建刚, 邱铭铭. 六自由度运动模拟器性能指标分析[J]. 电光与控制, 2008, 15(6):83-87.
- Liang Kai, Su Jiangang, Qiu Mingming. Analysis on performance indexes of a six-degree-of-freedom motion simulator [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(6):83-87. (in Chinese)
- [6] 吴博, 吴盛林, 杨灏泉, 等. 运动模拟器控制系统的设计和实验研究[J]. 液压与气动, 2004(2):65-67.
- Wu Bo, Wu Shenglin, Yang Haoquang, et al. Design and experiment study of motion simulator control system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004(2):65-67. (in Chinese)
- [7] 凌明祥, 朱长春. 液压振动台非线性摩擦力测量与参数辨识[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4):687-691.
- Ling Mingxiang, Zhu Changchun. Measurement and identification of nonlinear friction force for electro-hydraulic servo shaking table[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4):687-691. (in Chinese)
- [8] Airouche A, Aknouche H, Bechtoula H, et al. Performance of the CGS six DOF shaking table on the harmonic signal reproduction[J]. Periodica Polytechnical-Civil Engineering, 2018, 62(1):102-111.
- [9] Faltinsen O, Timokha A. Sloshing[M]. New York: Cambridge University Press, 2009:1-606.
- [10] Xue Mian, Zheng Jinhai, Lin Pengzhi, et al. Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure[J]. Ocean Engineering, 2017, 136(8):178-189.
- [11] Ketabdari M, Ranginkaman A. Simulation of random irregular sea waves for numerical and physical models using digital filters[J]. Transaction B: Mechanical Engineering, 2009, 16(3):240-247.
- [12] Hadi M, Reza F, Vahid J, et al. Energy harvesting from sea waves with consideration of airy and jonswap theory and optimization of energy harvester parameters [J]. Journal of Marine Science and Application, 2015, 14(4):440-449.
- [13] Xue Mian, Lin Pengzhi. Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing[J]. Computers & Fluids, 2011, 52(1):116-129.
- [14] 薛米安, 陈奕超, 苑晓丽, 等. 不同海浪谱激励下矩形液舱内液体晃荡试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(3):261-268.
- Xue Mian, Chen Yichao, Yuan Xiaoli, et al. Experimental study of liquid sloshing in rectangular tank excited by sea-wave spectrum[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(3):261-268. (in Chinese)



第一作者简介:薛米安,男,1981年12月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为液体晃荡及减晃机制、结构振动测试、多相流数值水池开发等。曾发表《Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing》(《Computers & Fluids》2011, Vol. 52, No. 1)等论文。

E-mail: coexue@hhu.edu.cn

通信作者简介:苑晓丽,女,1982年9月生,博士、副教授。主要研究方向为材料计算模拟及流固耦合等。

E-mail: xlyuan@hhu.edu.cn

