

瞬态高斯波包在船舶耐波性模型试验中的应用研究

刘震, 范余明, 王海波, 陈禧

(中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海市船舶工程重点实验室, 上海, 200011,

Email: liuzhen0829@126.com)

摘要: 在船舶耐波性模型试验中, 一般利用规则波或白噪声不规则波获得船舶的运动及加速度的响应幅值算子 (RAO) 曲线。一系列规则波试验耗时较长 (60 min 左右) 并且难以捕捉 RAO 曲线的峰值, 白噪声不规则波耗时相对较短 (10~30 min), 但可能会遭遇池壁反射的影响。基于瞬态波 (聚焦波) 包的耐波性模型试验耗时很短 (1~2 min), 可以显著提高试验效率。本研究首先在大型拖曳水池模拟了满足高斯波谱的不同聚焦波幅的瞬态波包, 然后针对一艘钻井船, 考虑其迎浪、首斜浪以及横浪状态, 开展了钻井船在瞬态高斯波包作用下的耐波性模型试验研究。研究发现: 试验模拟得到的瞬态高斯波包具有较好的波形和谱形特征; 利用聚焦波幅适当的瞬态高斯波包获得的钻井船垂荡、纵摇运动及垂荡加速度 RAO 结果与规则波及白噪声不规则波的试验结果吻合较好, 并且可以有效地捕捉 RAO 曲线的峰值; 为了获得合理的 RAO, 聚焦波幅不宜过大, 高斯波谱的谱峰周期需与相应摇荡运动固有周期相当。本研究对于提高船舶耐波性模型试验的效率具有重要意义。

关键词: 瞬态波; 高斯波包; 响应幅值算子 (RAO); 耐波性模型试验

1 引言

在船舶耐波性模型试验中, 一般利用规则波或白噪声不规则波获得船舶的运动及加速度的响应幅值算子 (RAO) 曲线。一系列规则波试验耗时较长 (60 min 左右) 并且难以捕捉 RAO 曲线的峰值, 白噪声不规则波耗时相对较短 (10~30 min), 但可能会遭遇池壁反射的影响。基于瞬态波 (聚焦波) 包的耐波性模型试验耗时很短 (1~2 min), 可以显著提高试验效率, 并且可以避免池壁效应的影响。因此, 开展基于瞬态波的试验技术研究对于提高船舶耐波性模型试验的效率具有重要的工程意义。

基于瞬态波的模型试验方法是由 Davis 和 Zarnick^[1]提出的, 他们利用线性扫频技术生

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目 and 装备预研基金 (41407010202) 资助

成一系列波长逐渐增大的波浪，通过定点聚焦得到瞬态波包，由于他们没有考虑造波机传递函数的影响，因此难以控制波列和波谱的形状。Takezawa 和 Hirayama^[2]通过引入造波机传递函数，改进了上述方法，可以得到谱形特征较好的瞬态波，但对波形的控制仍然需要改进。Clauss 和 Bergmann^[3]导出了基于高斯波谱（振幅波数谱）的瞬态波包的解析表达式，并且该解析表达式中包含波包聚焦时的最大波幅，研究表明基于该解析表达式可以模拟得到波形和谱形特征较好的瞬态波，并且利用该瞬态波包获得的船舶垂荡和纵摇运动 RAO 与规则波的结果吻合较好，值得注意的是他们导出的解析表达式无法直接体现有义波高的影响。Zhao 等^[4]基于包含有义波高的高斯波谱，模拟了满足中等海况的瞬态“新波”聚焦波群^[5]，研究了波浪气隙共振问题，由于采用了“新波”理论，可以有效模拟给定聚焦波幅的瞬态波。

高斯波谱可以通过调节形状因子控制谱宽，但对于一些试验，可能需要谱宽更大的波谱。Grigoropoulos 等^[6]采用类似白噪声的带宽较宽的波谱，计及了通过实测获得的波浪传播的相位差，模拟了瞬态聚焦波群并开展了模型试验研究，发现基于该瞬态波获得的不同航速的船舶垂荡和纵摇运动 RAO 与基于规则波的结果较为一致。应用瞬态波浪开展模型试验，可能会遭遇非线性影响，Reilhac 等^[7]提出了利用波峰和波谷聚焦来消除瞬态波的非线性影响，研究发现采用该方法获得的船舶运动纵荡、垂荡及纵摇运动 RAO 与基于规则波和不规则波的结果吻合较好，但他们没有对聚焦波幅的非线性对模型试验结果的影响做深入研究。

以往的一些基于瞬态波的耐波性模型试验研究通常采用聚焦波幅较小的瞬态波包，然而聚焦波幅更大（即非线性更强）的瞬态波包是否适用以及波包的非线性对船舶运动及加速度 RAO 有何影响还有待研究。此外，以往的研究主要集中在船舶在迎浪条件下的垂荡和纵摇运动 RAO，对于斜浪和横浪条件下的船舶运动，特别是非线性特征明显的横摇运动，采用瞬态波能否对其做出有效预报还需深入研究。基于上述问题，本研究首先在大型拖曳水池模拟了满足高斯波谱的不同聚焦波幅的瞬态波包，然后针对一艘钻井船，考虑其迎浪、首斜浪以及横浪状态，开展了钻井船在瞬态高斯波包作用下的耐波性模型试验研究。

2 瞬态高斯波包的模拟

实验室一般通过模拟满足高斯波谱的瞬态聚焦波来获得瞬态高斯波包。本研究采用的高斯波谱为

$$S(f) = \frac{H_s^2}{16\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其中 H_s 为有义波高； f 为波浪频率 (Hz)； f_p 为谱峰频率； σ 为形状因子。模型试验中选取 $H_s=0.05$ m， $f_p=0.714$ Hz， $\sigma=0.16$ 。其中，谱峰频率的选取与船模垂直面运动（垂荡

和纵摇)固有频率相当。瞬态聚焦波的模拟通常利用线性叠加原理,在指定位置、指定时刻通过组成波的波峰叠加产生一个大波,相关理论可以参考 Rapp 和 Melville^[8]的工作,这里不做详细介绍。

表 1 给出了模型试验中瞬态高斯波包的工况参数。其中,试验水深 $d=5\text{ m}$,瞬态波的组成波数目 $N=100$, f_1 和 f_n 分别为组成波的最小和最大频率, f_c 为组成波的中心频率, k_c 为中心频率对应的波数, A 为基于线性理论假定的聚焦点处(距造波板 45 m)的波幅, Ak_c 为中心频率对应的组成波的无因次波陡,用来描述瞬态高斯波包的非线性程度。Chaplin 指出^[9]:基于等波陡谱的聚焦波在 $Ak_c=0.30$ 时开始出现波浪破碎现象。通过试验发现瞬态高斯波包开始破碎时的波陡 Ak_c 也在 0.30 左右,因此选取的用于船舶耐波性模型试验的高斯波包均为非破碎工况,以用来研究不同非线性程度的高斯波包对船舶运动及加速度 RAO 的影响。

图 1 给出了试验中在船首 6.5 m 处模拟得到的一个典型瞬态高斯波包时历。可以看到,聚焦目标位置附近的高斯波包最大波峰两侧的波面呈现出较好的对称性。图 2 给出了图 1 中瞬态波包对应的振幅谱与靶谱的对比。可以看到,聚焦目标位置附近模拟得到的振幅谱与靶谱的吻合程度令人满意。

表 1 模型试验中瞬态高斯波包的工况参数 ($d=5\text{ m}$)

工况	$f_1\sim f_n$ (Hz)	f_c (Hz)	$k_c(\text{m}^{-1})$	A (m)	Ak_c
TA005	0.25~1.2	0.725	2.115	0.050	0.106
TA008	0.25~1.2	0.725	2.115	0.080	0.169
TA012	0.25~1.2	0.725	2.115	0.120	0.254

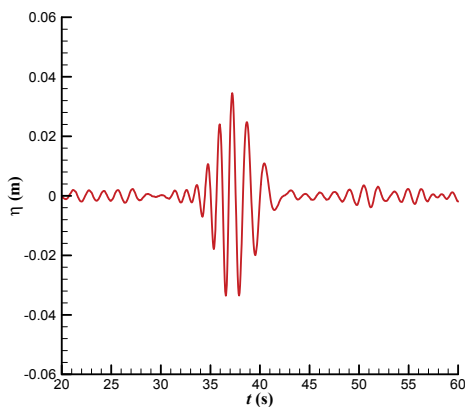


图 1 试验中模拟得到的典型瞬态高斯波包时历(船首前 6.5 m 处)

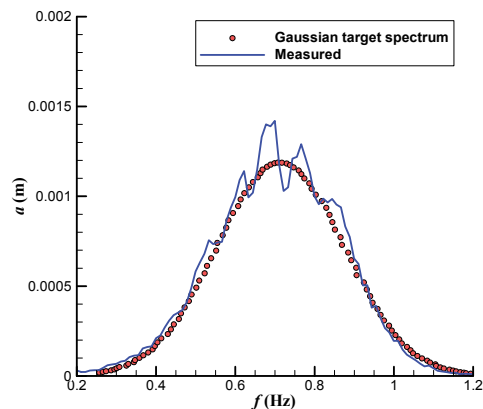


图 2 试验中模拟得到的振幅谱与靶谱的对比

3 模型试验装置和描述

模型试验是在中国船舶及海洋工程设计研究院 (MARIC) 的大型拖曳水池中开展的。水池长 280 m, 宽 10 m, 试验水深为 5 m。水池的一端为摇板式造波机, 可以生成规则波和不规则波; 另外一端为斜坡式消波滩, 用于消除波浪反射。试验模型为一艘钻井船, 模型缩尺比为 1:40, 对应装载状况为设计吃水, 表 2 给出了钻井船的主尺度参数。试验准备期间, 利用惯量架对船模重心高度和惯性半径进行调整, 满足几何相似要求。为适当约束船舶漂移且不影响船舶的主要摇荡运动, 在船模头部和尾部各布置两根连接弹簧的钢丝绳, 两根钢丝绳之间的夹角为 90° , 弹簧刚度的选取确保系泊的船模纵荡和横荡运动固有周期远离模型试验中波浪的主要周期范围。试验中考虑其迎浪 180° 、首斜浪 135° 以及横浪 90° 状态。图 3 给出了模型试验系泊系统布置图。图 4 给出了一张波浪中模型试验的照片。

采用非接触式光学六自由度运动测量仪测量船模在波浪中的 6 个自由度运动, 即: 纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇及首摇。通过对重心处垂荡运动进行二次微分获得重心处的垂荡加速度。模型试验的采样频率为 20 Hz。

在耐波性模型试验之前, 开展了倾斜试验、静水衰减试验, 以确保船模重心高度和惯性半径调整的准确性。为了验证基于瞬态高斯波包获得的船舶耐波性模型试验结果, 同时开展了规则波及白噪声不规则波试验。规则波试验采用一系列等波高试验, 波高实船值为 2 m, 周期实船值为 5~25 s, 并且在船舶主要运动固有周期附近加密。白噪声不规则波的有义波高实船值为 2.4 m, 周期实船值为 5~25 s, 试验时间对应实船值为 1 h。

表 2 钻井船主尺度参数

项目	符号	单位	实船	船模
总长	L_{oa}	m	179.8	4.4950
垂线间长	L_{pp}	m	168.0	4.2000
型宽	B	m	32.0	0.8000
型深	D	m	15.5	0.3875
设计吃水	d	m	9.2	0.2300
排水量	Δ	t	41315.1	0.6298
重心纵向位置 (距尾垂线)	LCG	m	81.72	2.0430
重心垂向位置 (距基线)	VCG	m	13.03	0.3258
横摇惯性半径	R_{xx}	m	13.2442	0.3311
纵摇惯性半径	R_{yy}	m	46.2437	1.1561

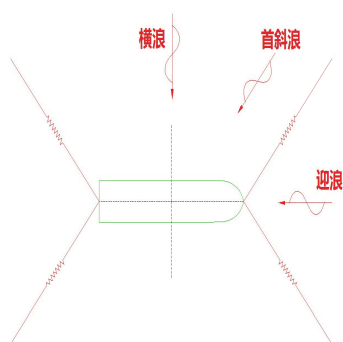


图3 模型试验系泊系统布置

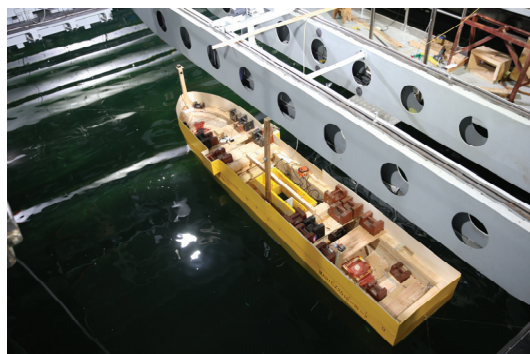


图4 波浪中模型试验照片

4 结果与讨论

模型试验结果包括静水垂荡、横摇和纵摇运动自由衰减试验结果以及迎浪、首斜浪和横浪条件下主要运动及加速度 RAO。在计算瞬态波及白噪声不规则波作用下船舶运动及加速度 RAO 时，首先利用快速傅里叶变换（FFT）分别得到相应的响应谱和波浪谱，然后通过响应谱与波浪谱相除即可获得 RAO，试验结果均已换算至实船。

4.1 静水自由衰减试验结果

钻井船在静水中的垂荡、横摇、纵摇运动自由衰减试验结果如图 5 至图 7 所示。由静水自由衰减试验结果分析得到的固有周期和无因次阻尼系数如表 3 所示。

表 3 静水自由摇荡衰减试验结果

垂荡		横摇		纵摇	
固有周期(s)	阻尼系数	固有周期(s)	阻尼系数	固有周期(s)	阻尼系数
8.6	0.236	21.3	0.021	8.4	0.187

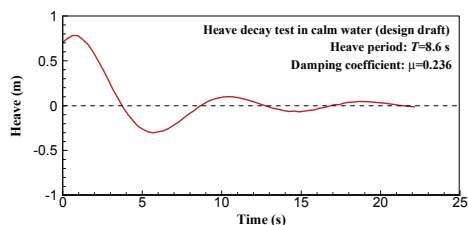


图5 垂荡运动自由衰减曲线

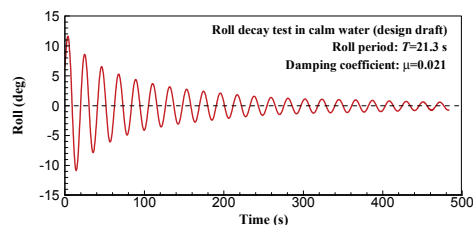


图6 横摇运动自由衰减曲线

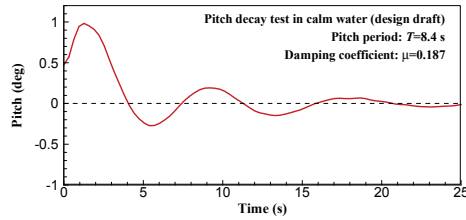


图7 纵摇运动自由衰减曲线

4.2 运动 RAO

图8至图10分别给出了钻井船在迎浪、首斜浪和横浪条件下的垂荡运动RAO。从图中可以看到，基于规则波与白噪声的垂荡运动RAO总体上随着波浪周期的增大而增大，并逐渐趋于一个稳定值（1 m/m左右）。在首斜浪和横浪时垂荡运动RAO在7.2 s左右出现了峰值，可能是受到月池内流体活塞运动的影响。值得注意的是，在横浪时，垂荡运动RAO在21 s左右出现了较小的谷值，这可能是由于钻井船在21 s时发生了显著的横摇谐摇运动对垂荡运动的影响（图14）。

从图8中可以看到，在迎浪条件下，基于3个工况的瞬态高斯波包获得的垂荡运动RAO在5~20 s的周期范围内与基于规则波及白噪声获得的垂荡运动RAO吻合较好；在20~25 s的范围内，随着瞬态高斯波包非线性的增加，差异逐渐增大。这主要是由于采用的高斯波谱在这个周期范围内的能量较小，因此带来了较大的误差。如图9和图10所示，首斜浪和横浪条件下基于瞬态高斯波包的垂荡运动RAO曲线的规律与迎浪条件下的相似。

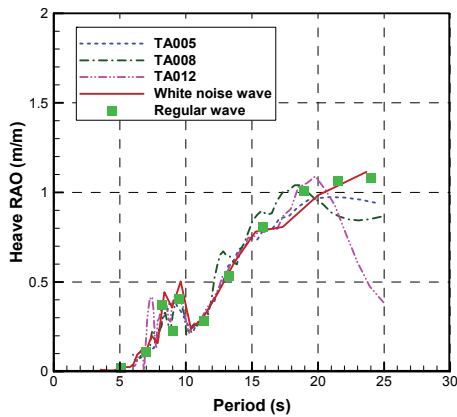


图8 迎浪时垂荡运动RAO

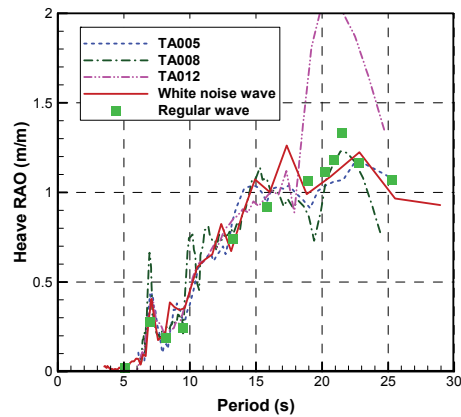


图9 首斜浪时垂荡运动RAO

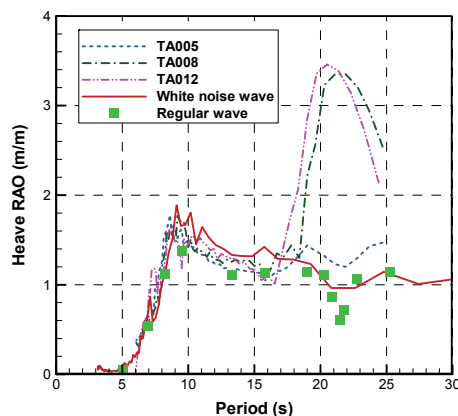


图 10 横浪时垂荡运动 RAO

图 11 和图 12 分别给出了钻井船在迎浪和首斜浪条件下的纵摇运动 RAO。从图中可以看到，在迎浪和首斜浪时，钻井船纵摇运动具有显著的波频特性。钻井船迎浪时的纵摇运动 RAO 峰值周期为 12 s（波长/船长=1.3），在纵摇固有周期（8.4 s）附近出现了一个较小的峰值。这说明在迎浪时钻井船的纵摇运动不是在其谐摇发生时最大，而是取决于波长和船长之比，这与一般船舶的纵摇运动特性是相似的，即当波长和船长相当时纵摇运动最为显著。首斜浪时，纵摇运动 RAO 峰值周期为 8.5 s 左右，与静水自由衰减试验得到的纵摇固有周期（8.4 s）接近，说明首斜浪时钻井船纵摇运动在其固有周期附近最大，即发生谐摇时运动幅值最大。

从图 11 中可以看到，在迎浪条件下，基于 TA005 的瞬态高斯波包获得的纵摇运动 RAO 与基于规则波及白噪声获得的纵摇运动 RAO 吻合较好，并且可以有效地捕捉 RAO 曲线的峰值；随着高斯波包非线性的增强，基于瞬态高斯波包的 RAO 与基于规则波和白噪声获得的纵摇运动 RAO 的差异变得更为明显，尤其是在 20~25 s 的周期范围内。产生较大差异的原因来自两个方面，一方面是由于采用的高斯波谱在这个周期范围内的能量较小带来了较大的误差；另一方面可能是由于波浪非线性的影响。如图 12 所示，首斜浪条件下基于瞬态高斯波包的纵摇 RAO 曲线规律与迎浪条件下的相似。

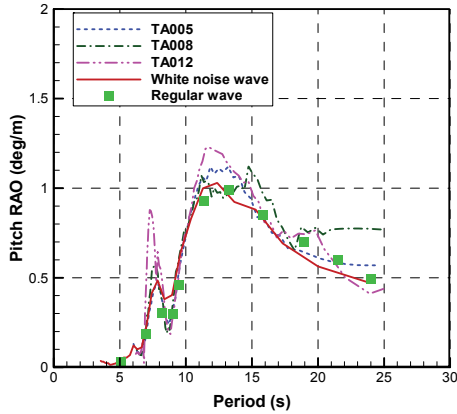


图 11 迎浪时纵摇运动 RAO

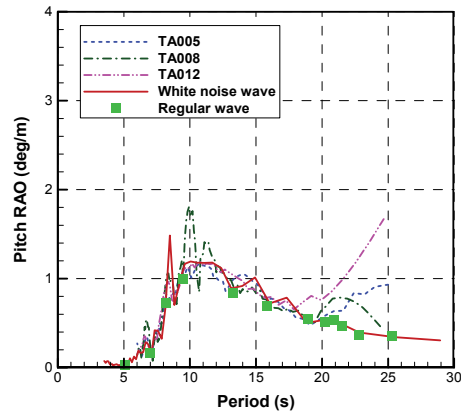


图 12 首斜浪时纵摇运动 RAO

图 13 和图 14 分别给出了钻井船在首斜浪和横浪条件下的横摇运动 RAO。在首斜浪和横浪时，基于规则波或白噪声获得的钻井船横摇运动 RAO 最大值达到 7 deg/m 左右，横摇运动 RAO 峰值周期均在 21 s 左右，与静水衰减试验结果获得的横摇固有周期（21.3 s）一致。

从图 13 中可以看到，在首斜浪条件下，基于 TA005 工况的瞬态高斯波包获得的横摇运动 RAO 与基于规则波及白噪声获得的横摇运动 RAO 存在较小差异，随着瞬态高斯波包非线性的增强，在 18~25s 的周期范围内的差异显著增大。分析其原因，一方面是由于模型试验所采用的高斯波谱的谱峰周期 1.4 s（对应实尺度 8.9 s）与船模横摇固有周期 3.4 s（对应实尺度 21.3 s）相差较大，即在 2.9~4.0 s（对应实尺度 18~25s）的周期范围内能量较小，导致误差较大；另一方面，可能是由于波浪非线性的增强，导致非线性的横摇运动，致使基于瞬态高斯波包获得的横摇运动 RAO 在钻井船横摇固有周期附近与基于规则波和白噪声的结果存在较大差异。从图 14 中可以看到，在横浪条件下，波包非线性对横摇运动 RAO 的影响更为显著。

4.3 加速度 RAO

图 15 至图 17 分别给出了迎浪、首斜浪和横浪条件下船舶重心处垂荡运动加速度的 RAO。从图中可以看到，基于工况 TA005 的瞬态高斯波包获得的垂荡加速度 RAO 曲线与基于规则波和白噪声获得的 RAO 曲线在整个周期范围内（5~25 s）具有较好的一致性，随着瞬态高斯波包非线性的增强，相应的 RAO 曲线在峰值附近及周期较大的区域出现较大的波动，与运动 RAO 相似，主要是由于波浪非线性影响以及所采用的高斯波谱在低频范围内能量分布较少带来的误差。

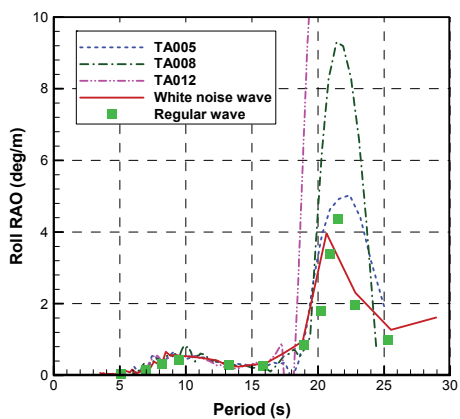


图 13 首斜浪时横摇运动 RAO

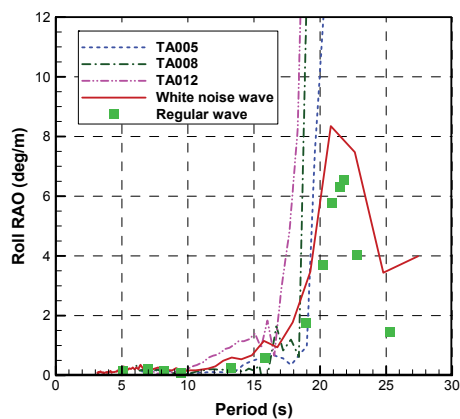


图 14 横浪时横摇运动 RAO

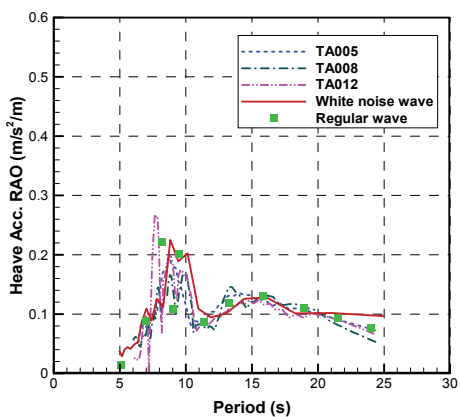


图 15 迎浪时船舶重心处垂荡运动加速度 RAO

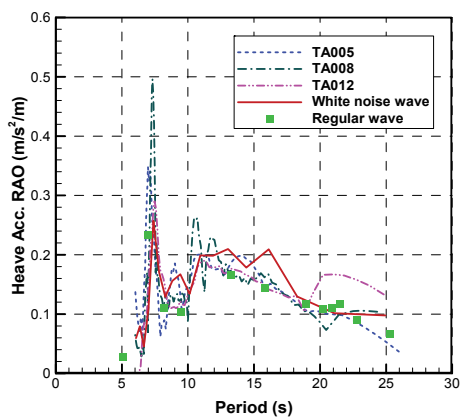


图 16 首斜浪时船舶重心处垂荡运动加速度 RAO

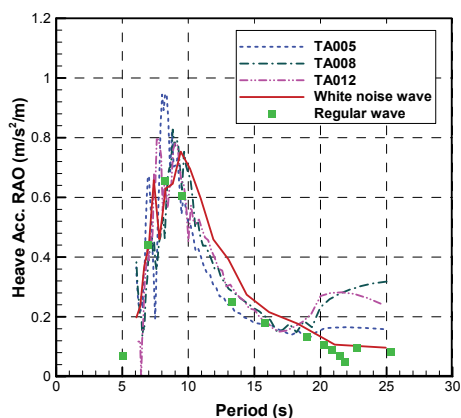


图 17 横浪时船舶重心处垂荡运动加速度 RAO

5 结论

本研究在大型拖曳水池中模拟了满足高斯波谱的不同聚焦波幅的瞬态波包，然后针对一艘钻井船，考虑其迎浪、首斜浪以及横浪状态，开展了钻井船在瞬态高斯波包作用下的耐波性模型试验研究。

(1) 试验中模拟得到的瞬态高斯波包具有较好的波形和谱形特征。

(2) 利用聚焦波幅较小的瞬态高斯波包 ($Ak_c=0.106$) 获得的钻井船垂荡、纵摇运动及垂荡加速度 RAO 结果与规则波及白噪声不规则波的试验结果吻合较好，并且可以有效地捕捉 RAO 曲线的峰值；聚焦波幅增大 ($Ak_c=0.169$ 、 0.254) 对钻井船运动及加速度 RAO 的影响比较明显，RAO 本质上属于线性范畴，过强的非线性波浪激励难以获得合理的结果。

(3) 本模型试验采用的瞬态高斯波包的谱峰周期靠近垂荡和纵摇运动固有周期，但是远离横摇运动固有周期，横摇运动 RAO 的结果与常规试验方法得到的结果差别较大，主要是由于采用的瞬态高斯波包在横摇固有周期附近的成分能量较小引起的，横摇运动 RAO 的获取需要采用谱峰周期靠近横摇固有周期的高斯波包。

参 考 文 献

- 1 Davis, M C. and Zarnick, E E. Testing ship models in transient waves[C], Proceedings of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR, Bergen, Norway, 1964.
- 2 Takezawa and Hirayama. Advanced experiment technique for testing ship models in transient water waves[C]. Proceedings of the 11th Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR, University College, London, 1976.
- 3 Clauss G F and Bergmann J. Gaussian wave packets – a new approach to seakeeping tests of ocean structures[J]. Applied Ocean Research, 1986, 8(4): 190-206.
- 4 Zhao W, Wolgamot H A, Taylor P H and Taylor R E. Gap resonance and higher harmonics driven by focused transient wave groups [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 812: 905-939.
- 5 Tromans, P. S., Anaturk, A. R. and Hagemeyer, P. A new model for the kinematics of large ocean waves – application as a design wave[C]. Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference, Edinburgh, UK, 1991.
- 6 Grigoropoulos G J, Florios N S and Loukakis T. A. Transient waves for ship and floating structure testing[J]. Applied Ocean Research, 1994, 16: 71-85.
- 7 Reilhac P, Bonnefoy F, Rousset J M and Ferrant P. Improved transient water wave technique for the experimental estimation of ship responses [J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27: 456-466.
- 8 Rapp R J and Melville W K. Laboratory measurements of deep water breaking waves[J]. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 1990, 331: 735-800.

9 Chaplin J R. On frequency-focusing unidirectional waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1996, 6: 131-137.

Study on the application of transient Gaussian wave packets in model testing of ships

LIU Zhen, FAN She-ming, WANG Hai-bo, CHEN Xi

(Marine Design and Research Institute of China, Shanghai Key Laboratory of Ship Engineering, Shanghai, 200011. Email: liuzhen0829@126.com)

Abstract: In sea-keeping model tests of ships, regular waves and white-noise irregular waves are frequently utilized to obtain response amplitude operators (RAOs) of the motion and acceleration of these ships. A series of experiments by means of regular waves needs a long duration (approximately 60 min) and is difficult to capture peak value of the RAOs. Although using white-noise irregular waves has a relatively short duration (10~30 min), the reflection of tank walls may affect the testing results. The experiment based on transient waves (focused waves) holds a quite less duration (1~2 min) and thus significantly improve the testing efficiency. In this study, the transient wave packets satisfying a Gaussian spectrum were generated in a large towing tank to conduct sea-keeping model tests of a drilling ship under the condition of head waves, oblique waves and beam waves, respectively. It is found that the measured transient Gaussian wave packets hold better wave profile and spectral characteristics. It is demonstrated that the RAOs of the heave and pitch motions as well as the heave acceleration by the transient Gaussian wave packet with a suitable specified focused amplitude are in good agreement with those obtained by regular waves and white-noise irregular waves, and can effectively capture the peak value of the RAOs. In order to obtain rational RAOs, the specified focused amplitude should not be too large and the peak period of the Gaussian wave spectrum should be close to the nature periods of the corresponding motions of the ship. This study is of significance for improving the efficiency of the sea-keeping model testing of ships.

Key words: Transient wave; Gaussian wave packet; response amplitude operator (RAO); sea-keeping model test.