

文章编号: 1006-2467(2019)12-1404-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.12.002

# 随机波浪作用下自升式平台的极值响应估计

许超超, 倪萍, 顾颖, 何军

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 提出一种用于估计随机波浪载荷作用下自升式海洋平台极值响应的参数化方法. 该方法采用移位广义对数正态分布模型近似计算平台随机响应的极值分布, 由紧邻分布尾部的两个支撑点及其超越概率估计模型参数, 从而减少估计极值响应分布尾部所需的响应样本容量. 将所提出方法用于某实际平台的极值响应分析的结果表明, 该方法具有数值精度高和计算费用小的优点, 适用于随机波浪载荷作用下自升式平台的可靠性及风险评估.

**关键词:** 自升式平台; 极值响应; 移位广义对数正态分布; 尾部分布

**中图分类号:** U 674.38

**文献标志码:** A

## Extreme Response Estimate of Jack-Up Platforms Under the Action of Random Wave Loads

XU Chaochao, NI Ping, GU Ying, HE Jun

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** For estimating the extreme response of the jack-up platform, a parametric method under the action of random wave loads is developed. The method approximates the extreme distribution of the stochastic response of the platform by using the shifted generalized lognormal distribution model. The model parameters are estimated by two supporting points and their exceeding probability in the adjacent tail distribution such that the size of the needed samples is reduced significantly. The extreme response analysis of a real platform shows that the proposed method has enough high numerical accuracy and needs relatively few computational costs, which is suitable for the reliability and risk assessment of the jack up platform under the action of random wave loads.

**Key words:** jack-up platform; extreme response; shifted generalized lognormal distribution; tail distribution

作为一种移动式钻井装备, 自升式海洋平台在我国海上油气资源开发中占据着重要地位. 在自存和作业工况下, 自升式海洋平台均遭受随机波浪的

作用. 平台运动方程的非线性导致平台的振动响应往往是非 Gaussian 分布的随机过程. 由于自升式海洋平台的可靠性及风险评估是基于平台的极限状态

收稿日期: 2018-05-25

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目深水半潜式支持平台研发——平台振动与噪声控制技术研究项目; 上海市自然科学基金项目 (16ZR1417300)

作者简介: 许超超 (1993-), 男, 浙江省宁波市人, 硕士生, 研究方向为结构可靠度计算.

通信作者: 何军, 男, 副教授, 博士生导师, 电话 (Tel.): 021-34207985; E-mail: junhe@sjtu.edu.cn.

进行的,所以确定随机波浪荷载作用下平台响应的极值分布,特别是极值分布的尾部(超越概率约为  $10^{-5} \sim 10^{-3}$ ),是非常有必要的.基于上述两个原因,研究随机波浪荷载作用下自升式海洋平台的极值响应估计问题,虽然比较困难,但具有非常重要的工程价值.

到目前为止,研究人员已经提出一些结构或海洋平台的极值响应估计方法. Shinozuka<sup>[1]</sup> 提出简单结构(如线性结构)极值响应估计的 Monte Carlo (MC)模拟方法,但对于非线性结构,MC 模拟方法所需的时间较长,且计算精度难以保证. Bucher<sup>[2]</sup> 基于 MC 模拟方法提出一种渐近抽样法,该方法仅需较少的样本数量(几千个样本)即可准确地估计线性或非线性结构的极值响应的尾部及微小超越概率.然而,这种渐近关系只对标准正态空间中的极限状态函数成立,当安全界限发生改变时,需要重新进行抽样. Luca 等<sup>[3]</sup> 采用尾部等价线性化法对一个平稳 Guassian 波浪过程作用下的自升式海洋平台进行横荡响应分析,结果表明:尾部等效线性化法对海洋结构的平稳响应分析具有良好的适用性;对于具有非平稳响应或高可靠性的结构,尾部等效线性化法的计算精度及效率明显降低. Balesdent 等<sup>[4]</sup> 在 Kriging 抽样法的基础上,提出一种方差缩减的 MC 模拟方法,工程试验结果表明,该方法在样本数量较少时仍有较高的计算精度.文献<sup>[5]</sup> 假设结构极值响应分布近似服从移位广义对数正态分布(SGLD),并结合两支撑点参数估计法,提出一种估计结构极值响应的加速模拟方法,相比于 MC 模拟方法,该方法大大提高了计算效率及计算精度.

基于 SGLD 的极值估计方法已被用于非线性结构的随机地震响应的极值估计中<sup>[5-6]</sup>.由于自升式海洋平台运动方程的非线性来源于非线性的波浪力,而不是来源于结构的滞回恢复力,该方法是否适用于随机波浪作用下自升式海洋平台的极值响应估计,需要进一步研究.本文通过发展基于 SGLD 的极值估计方法,提出一种随机波浪作用下自升式海洋平台极值响应的估计方法,并通过实际平台的极值响应分析验证所提方法的有效性.

## 1 随机波浪作用下自升式海洋平台的运动方程

设  $O-xyz$  坐标的  $z$  轴垂直向上, $x$  轴垂直纸面向外, $y$  轴水平向右.对于随机波浪荷载作用下的自

升式海洋平台,其力学模型可简化为一个单自由度系统,且通常具有类似于结构振动第一振型  $\psi(z)$  的整体变形.因此,自升式海洋平台的随机振动方程可写为<sup>[7]</sup>

$$\ddot{X} + 2\xi\omega_0\dot{X} + \omega_0^2 X = \frac{1}{m_{\text{eq}}} \sum_{j=1}^3 \int_{-d}^{\eta(y_j, t)} q(y_j, z, X(t), t | \{u_i, \bar{u}_i\}) \psi(z) dz \quad (1)$$

式中:  $X(t)$  为平台横荡位移;  $\dot{X}(t)$  为横荡速度;  $\ddot{X}(t)$  为横荡加速度;  $\xi$  为阻尼系数;  $\omega_0$  为平台的固有自振频率;  $m_{\text{eq}}$  为模型质量;  $y_j$  为沿波流向的桩腿位置,  $j = 1, 2, 3$ ;  $d$  为水深;  $\eta(y_j, t)$  为随机海浪波高;  $\psi(z)$  为平台的基本振型;  $q(y_j, z, x(t), t)$  为单位长度桩腿上的波浪荷载;  $u_i, \bar{u}_i$  为相互独立的标准正态分布随机变量.

考虑到波浪荷载的随机特性,需要重点分析平台随机振动的极值响应.平台横荡位移的极值响应定义为

$$Y = \max_{0 \leq t \leq T} X(t) \quad (2)$$

式中:  $T$  为平台振动持时.

对于小尺度海洋结构 ( $D/L \leq 0.2$ ,  $D$  为桩径,  $L$  为入射波波长), Morison 于 1950 年提出作用在海洋结构物单位长度桩柱上波浪力的计算公式<sup>[8]</sup>:

$$q(z, t) = \frac{1}{2} \rho C_D D v(z, t) |v(z, t)| + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} a(z, t) \quad (3)$$

式中:第 1 项为拖曳力;第 2 项为惯性力;  $v(z, t)$  和  $a(z, t)$  分别为水质点的水平速度和加速度;  $\rho$  为海水密度;  $C_D$  为拖曳力系数;  $C_M$  为惯性力系数.

由式(3)可知,水质点速度项  $v(z, t) |v(z, t)|$  使得 Morison 力表现出非线性的性质.采用随机等价线性化方法,将式(3)中的速度项作线性化处理,则可得

$$v(z, t) |v(z, t)| = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_v v(z, t) \quad (4)$$

式中:  $\sigma_v$  为  $v(z, t)$  的均方差.随机波浪力的等价线性化表达式为

$$q(z, t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_v \rho C_D D v(z, t) + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} a(z, t) \quad (5)$$

当海洋结构位移速度相对于水流速度不可忽略时, Morison 方程需做相应修改,修改后的 Morison 方程可表示为<sup>[8]</sup>

$$q = \frac{1}{2} \rho C_D D (v - \dot{x}) |v - \dot{x}| + (C_M - 1) \rho A (a - \ddot{x}) + \rho A a \quad (6)$$

式中： $A$  为桩腿横截面面积； $\dot{x}$  为结构位移速度； $\ddot{x}$  为结构加速度；系数  $(C_M - 1)$  表示由于结构的存在而产生的附加质量系数。拖拽阻力项引入相对速度  $\Delta v = v - \dot{x}$ ，将该项线性化后可得

$$q \approx \frac{1}{2} \rho C_D D \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{\Delta v} (v - \dot{x}) + C_M \rho A a - (C_M - 1) \rho A \ddot{x} \quad (7)$$

式中： $\sigma_{\Delta v}$  为  $\Delta v$  的均方差

## 2 自升式海洋平台的极值响应分布模型

自升式海洋平台的非线性性质使得从理论上推导平台极值响应的精确解变得非常困难，因此需要选择合适的分布模型来近似估计该平台的极值响应分布。Low<sup>[9]</sup> 基于移位对数正态分布模型及指数幂分布模型，提出具有 4 个参数的 SGLD 模型。对于服从 SGLD 的随机变量  $C$ ，其概率密度函数表达式如下：

$$f_C(s) = \frac{\alpha}{s-b} \exp \left[ -\frac{1}{\kappa \gamma^\kappa} \left| \ln \left( \frac{s-b}{\theta} \right) \right|^\kappa \right] \quad (8)$$

$b < s < \infty$

式中： $s$  为平台横荡响应位移； $b$  为位置参数； $\theta$  为模参数； $\gamma > 0, \kappa > 0$  分别为型参数（双参数）；系数  $\alpha$  的表达式为

$$\alpha = \frac{1}{2 \kappa^{1/\kappa} \gamma \Gamma(1 + 1/\kappa)} \quad (9)$$

$\Gamma(\cdot)$  为伽马函数。由式(8)可得 SGLD 模型的累积分布函数理论表达式为

$$F_C(s) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sgn} \left( \frac{s-b}{\theta} - 1 \right) \times g \left( \frac{1}{\kappa}, \frac{1}{\kappa} \left| \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{s-b}{\theta} \right) \right|^\kappa \right) \quad (10)$$

$b < s < \infty$

式中：

$$g(v_1, v_2) = \frac{1}{\Gamma(v_1)} \int_0^{v_2} u^{v_1-1} e^{-u} du$$

为不完全伽马函数。

由于 SGLD 模型综合了移位对数正态分布及指数幂分布模型在偏态及峰态上的分布特性，在形状上拥有足够的灵活性，所以特别适用于近似估计平台极值响应的分布，尤其是尾部分布。

目前，估计 SGLD 模型中的 4 个参数常采用矩

方法、最大似然法等方法。但是，这些方法的计算量大且效率不高，对微小首次穿越概率问题的尾部估计不够准确，并不适用于非线性随机振动系统。He 等<sup>[5]</sup> 提出“两支撑点参数估计法”用以提高计算效率。该方法的基本思想：由随机模拟方法估计出两个较大的超越概率  $P_1 \approx 10^{-1}, P_2 \approx 10^{-2}$  及两者对应的样本点  $s_1, s_2$ ；在两个支撑点  $(s_1, P_1)$  和  $(s_2, P_2)$  已知的情况下，分别用  $1 - P_1$  和  $1 - P_2$  替换式(10)中的  $F_C(s)$ ，并用  $s_1, s_2$  替换变量  $s$ ，得到下列非线性方程组：

$$\left. \begin{aligned} 1 - P_1 &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sgn} \left( \frac{s_1-b}{\theta} - 1 \right) \times \\ &\quad g \left( \frac{1}{\kappa}, \frac{1}{\kappa} \left| \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{s_1-b}{\theta} \right) \right|^\kappa \right) \\ 1 - P_2 &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sgn} \left( \frac{s_2-b}{\theta} - 1 \right) \times \\ &\quad g \left( \frac{1}{\kappa}, \frac{1}{\kappa} \left| \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{s_2-b}{\theta} \right) \right|^\kappa \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(10)中的  $b$  及  $\theta$  可由  $\gamma$  及  $\kappa$  确定<sup>[9]</sup>，故非线性方程组式(11)实际上含有两个独立变量  $\gamma$  和  $\kappa$ ，可由牛顿迭代法求解，进而得到自升式海洋平台极值响应的近似 SGLD。由于超越概率  $P_1$  和  $P_2$  可通过较少的响应样本进行估计，使得该平台的极值响应及其尾部分布的估计效率大大提高，加快了随机模拟的收敛速度。

## 3 随机波浪谱和自升式海洋平台的响应样本

大量海浪实测记录统计分析表明：近海结构物所受的随机波浪力是均值为 0 的平稳随机过程。因此对于一般海况，可以认为其波高是服从 Gaussian 分布的。这里考虑线性长峰波，则  $\eta(y, t)$  为<sup>[7]</sup>

$$\eta(y, t) = \sum_{i=1}^n s_i \cos(\omega_i t - k_i y + \epsilon_i) = \sum_{i=1}^n [u_i c_i(y, t) + \bar{u}_i \bar{c}_i(y, t)] \quad (12)$$

式中： $\epsilon_i$  为相位差； $\omega_i$  和  $k_i$  分别为离散频率和波数，

$$\omega_i^2 = k_i g \tanh(k_i d)$$

$g$  为重力加速度； $c_i(y, t)$  和  $\bar{c}_i(y, t)$  为基函数，

$$\begin{aligned} c_i(y, t) &= \bar{\sigma}_i \cos(\omega_i t - k_i y) \\ \bar{c}_i(y, t) &= -\bar{\sigma}_i \sin(\omega_i t - k_i y) \\ \bar{\sigma}_i^2 &= S(\omega_i) d\omega_i \end{aligned}$$

$S(\omega_i)$  为海浪谱。变量  $u_i, \bar{u}_i$  与振幅  $e_i$  和相位差  $\epsilon_i$  的关系如下：

$$e_i = \sigma_i \sqrt{u_i^2 + \bar{u}_i^2}$$
$$\epsilon_i = \arctan\left(\frac{\bar{u}_i}{u_i}\right)$$

单位长度桩腿上作用的波浪力  $q(y,z,t)$  可以通过修改后的 Morison 方程计算,代入相应参数后

可得

$$q(y,z,t) = \rho s [C_M \dot{v}(y,z,t) -$$
$$(C_M - 1) \dot{v}_{leg}(y,z,t)] +$$
$$\frac{1}{2} \rho D C_D (v(y,z,t) - v_{leg}(y,z,t)) \times$$
$$|v(y,z,t) - v_{leg}(y,z,t)| \tag{13}$$

式中:  $v(y,z,t)$  为  $y$  处水质点的水平速度;  $v_{leg}(z,t)$  为自升式平台桩腿的速度,

$$v(y,z,t) = \frac{\partial \varphi(y,z,t)}{\partial x}$$

$$v_{leg}(z,t) = \dot{\psi}(z) \dot{X}(t)$$

$\varphi(y,z,t)$  为波势. 对于线性单向波,位于  $\varphi(y,z,t)$  处水质点的水平速度为<sup>[7]</sup>

$$v(y,z,t) =$$
$$\sum_{i=1}^n a_i \frac{g k_i \cosh[k_i(z+d)]}{\omega_i \cosh(k_i d)} \cos(\omega_i t - k_i y + \epsilon_i) =$$
$$\sum_{i=1}^n [u_i v_i(y,z,t) + \bar{u}_i \bar{v}_i(y,z,t)] \tag{14}$$

$$v_i(y,z,t) =$$

$$\sigma_i \frac{g k_i \cosh[k_i(z+d)]}{\omega_i \cosh(k_i d)} \cos(\omega_i t - k_i y)$$

$$\bar{v}_i(y,z,t) =$$

$$- \sigma_i \frac{g k_i \cosh[k_i(z+d)]}{\omega_i \cosh(k_i d)} \sin(\omega_i t - k_i y)$$

计算随机波浪激励下平台位移响应样本的流程如图 1 所示. 为了获得平台横荡响应的样本,首先需要

通过 Mathematica 程序生成  $u_i$  和  $\bar{u}_i$ , 并将其代入

式(12)获得一个波高样本;然后,将这一波高样本代

入式(13)得到相应的 Morison 力样本;最后,将所获



图 1 平台响应样本计算流程图

Fig. 1 Calculation flowchart of platform response sample

得的波高样本和 Morison 力样本共同代入式(1),通过 4 阶 Runge-Kutta 法数值求解该线性微分方程,以获得自升式海洋平台的一个运动响应样本;将上述求解过程重复  $N$  次,即可得到  $N$  个平台响应样本.

4 算例分析

4.1 自升式海洋平台模型及其响应样本

研究所用自升式海洋平台为文献[10]中使用的平台,其简化示意图如图 2 所示. 假定:  $d=90$  m; 平台主体位于 3 条具有相同结构的桩腿上,每条桩腿长  $L_{leg}=80+35.2=115.2$  (m);考虑单项波流向位于  $y=0$  m 处的 2 条桩腿,上波腿和下波腿间的水平距离  $\Delta y=52$  m.

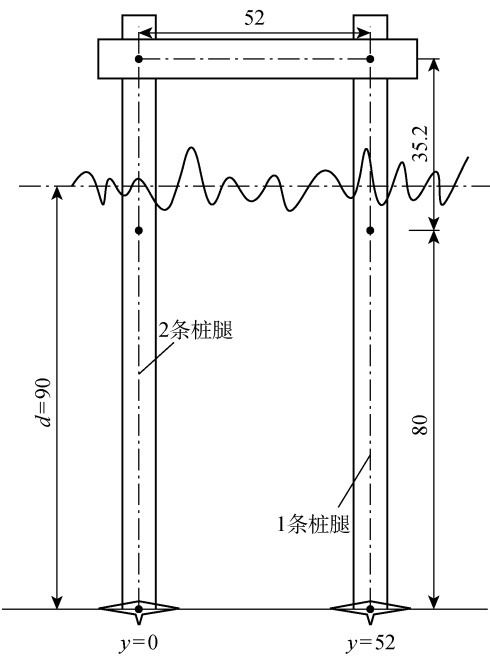


图 2 简化后的自升式海洋钻井平台模型(m)

Fig. 2 Simplified model of jack-up platform model (m)

由于桩腿下部属于铰接构造,而上部与船体之间属于刚接构造,故其基本振型取为<sup>[7]</sup>

$$\psi(z) = \sin\left[\frac{\pi(z+d)}{2L_{leg}}\right] \tag{15}$$

简化后的自升式海洋平台模型的主要特征参数为: 平台的主体质量  $m_{hull} = 1.61 \times 10^4$  t; 桩腿质量  $m_{leg} = 1.93 \times 10^3$  t;  $\omega_0 = 0.757$  rad/s;  $\xi = 0.02$ ;  $A = 3.94$  m<sup>2</sup>;  $D = 8.44$  m;  $C_M = 2.0$ ;  $C_D = 1.1$ . 该平台所处海况的环境参数为:  $\rho = 1.025$  t · m<sup>3</sup>;  $d = 90$  m; 采用 Jonswap 谱定义随机波浪; 有义波高  $H_s = 12$  m; 平均跨零周期  $T_z = 10$  s; 计算得到的有效频谱范围

的上下限分别为  $\omega_H=1.2\text{ rad/s}$ ,  $\omega_L=0.3\text{ rad/s}$ ; 采用等分频率法取  $\Delta\omega=0.0184\text{ rad/s}$ , 即频域离散点数  $K=\frac{\omega_H-\omega_L}{\Delta\omega}\approx 50$ . 由于海浪将以  $\frac{2\pi}{\Delta\omega}\approx 342\text{ s}$  的周期重复出现, 为保证模拟结果与实际海浪情况相符, 取  $T=250\text{ s}$  作为计算周期.

采用 MC 抽样法每次抽取  $K$  组  $u_i, \bar{u}_i$ ; 将有效频率范围  $\omega_H-\omega_L$  划分为  $K$  个子区间, 获得对应于给定有义波高和跨零周期的 Jonswap 谱的离散表达式; 将上述参数代入式(12)和(13), 即可得到随机海

浪波高和作用于每个桩腿上的波浪力; 最后, 采用 4 阶 Runge-Kutta 法数值求解自升式海洋平台简化模型在随机波浪力作用下的横荡响应. 时间间隔  $\Delta t=0.25\text{ s}$ , 每个  $\Delta t$  时间段的求解过程均产生一个平台的横荡数值, 则  $T=250\text{ s}$  内所有响应的最大值即为所模拟的平台横荡响应的极值样本.

图 3 为  $y=0\text{ m}$  和  $y=52\text{ m}$  桩腿处的 5 个随机海浪波高样本; 由 4 阶 Runge-Kutta 法求得的、与这些波高样本相对应的自升式海洋平台横荡响应样本如图 4 所示.

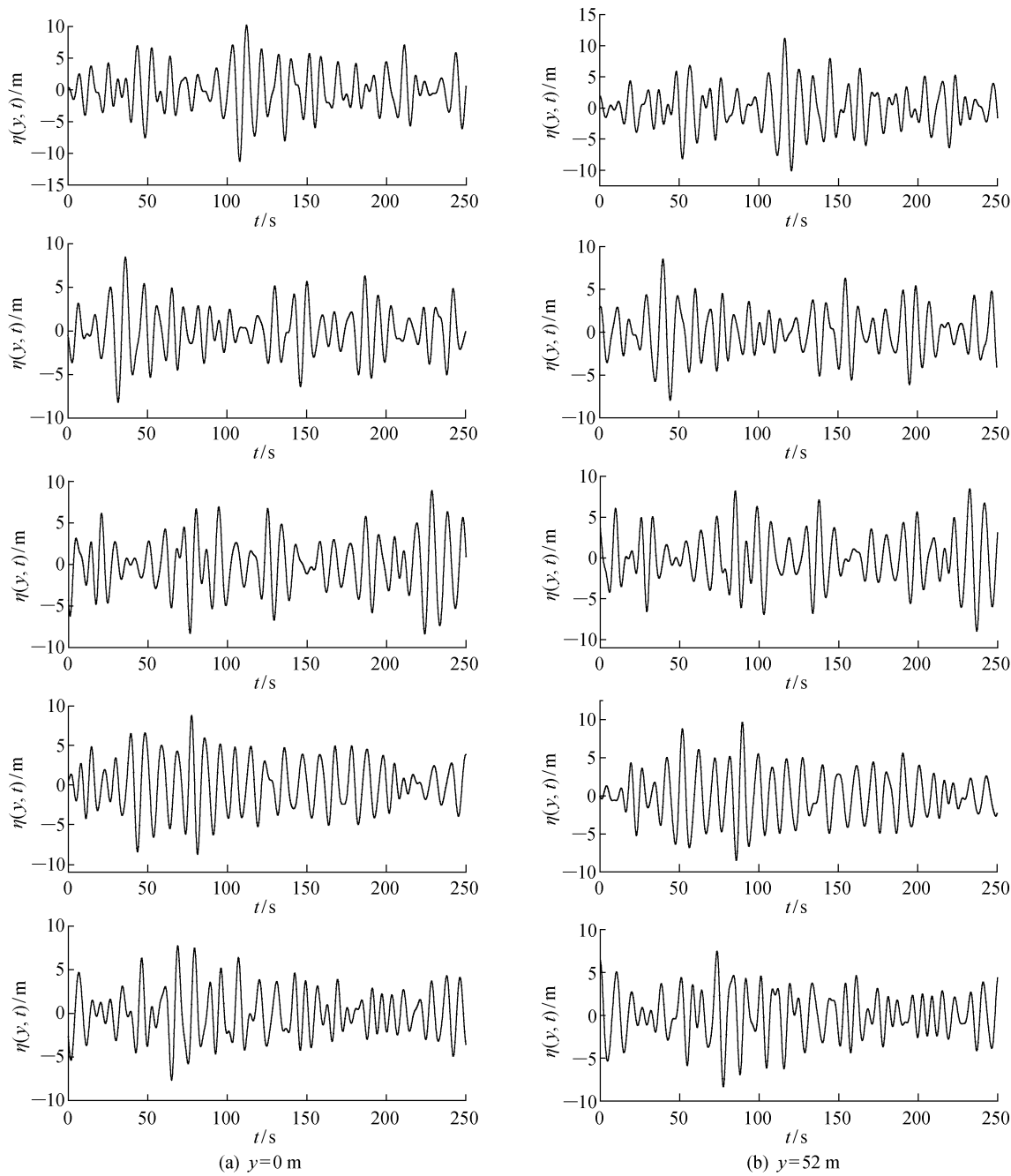


图 3 桩腿处的 5 个随机海浪波高样本  
Fig. 3 Five stochastic wave elevation samples on the leg

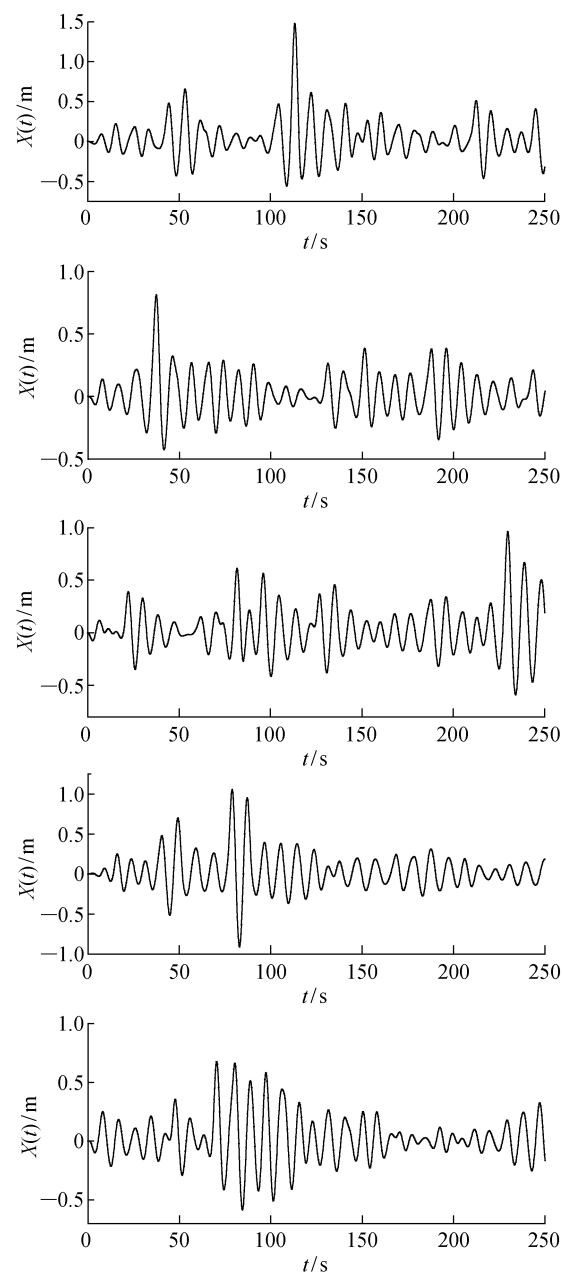


图 4 5 个平台响应样本

Fig. 4 Five platform response samples

4.2 极值响应及超越概率估计

重复上述数值模拟求解过程  $10^5$  次. 假设平台横荡的安全界限  $\zeta=3.7\text{ m}$ , 则在 10 万个样本容量下得到平台横移的超越概率  $P_f=9\times 10^{-5}$ , 相应的可靠度指标  $\beta=3.745\ 55$ .

假设两个支撑点处的超越概率为  $P_1=10^{-1}$ ,  $P_2=10^{-2}$ , 由  $2\times 10^3\sim 5\times 10^3$  个极值样本确定两个超越概率较大的支撑点  $(s_1,P_1)$  和  $(s_2,P_2)$ , 利用两支撑点参数估计法估计移位广义对数正态分布模型的 4 个参数, 从而近似得到结构响应极值的尾部分布函数  $F_C(s)$ . 平台横荡位移  $s>\zeta$  表示失效, 故超

越概率  $P_f=1-F_C(\zeta)$ . 由基于样本数  $N=2\times 10^3$ ,  $3\times 10^3$ ,  $4\times 10^3$ ,  $5\times 10^3$  的 SGLD 模型获得的超越概率和直接由 MC 模拟方法计算得到的超越概率对比如图 5 所示. 由图 5 可见: 当  $\zeta\leq 2.3\text{ m}$  时, MC 模拟方法获得的计算结果与基于 SGLD 模型得到的近似结果较为吻合; 当  $\zeta>2.3\text{ m}$  时, 由于样本容量  $(2\times 10^3\sim 5\times 10^3)$  个) 太小, MC 模拟方法并不能给出合理的超越概率估计值.

由 SGLD 模型计算得到的超越概率和当  $N=$

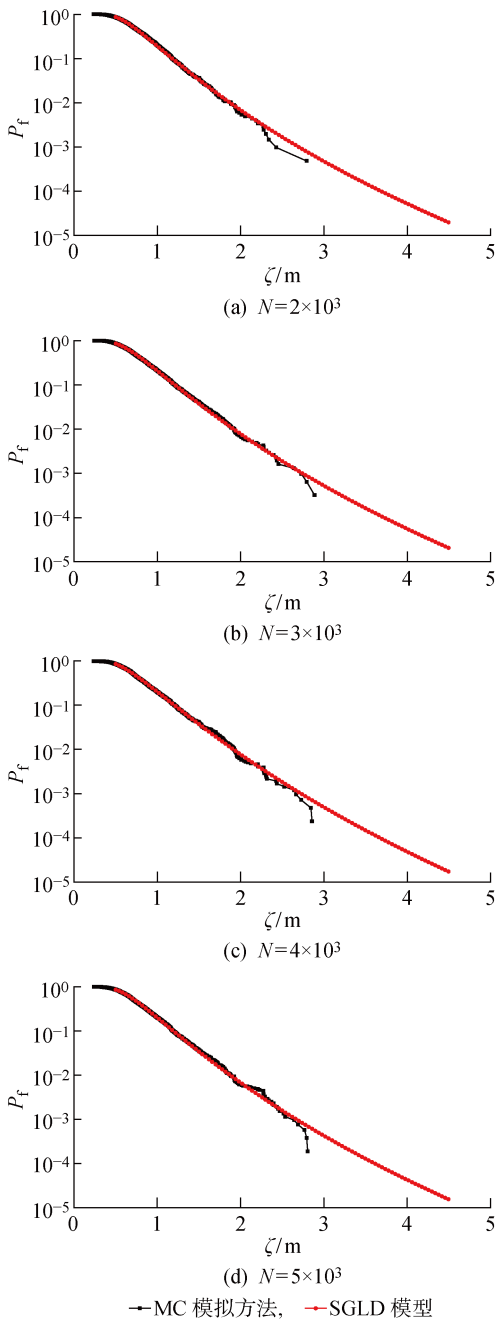


图 5 不同  $N$  下 SGLD 模型与 MC 模拟方法对比  
Fig. 5 The comparison of SGLD model MC simulation method fitting curves at different  $N$

$1 \times 10^5$  时由 MC 模拟方法估计的超越概率如图 6 所示。由图 6 可见:当超越界限较小时,基于 SGLD 模型的计算结果与 MC 模拟结果十分吻合;当超越界限变大、超越概率接近甚至小于  $10^{-4}$  时,由于样本容量仍然不够大,MC 模拟方法不能获得合理的超越概率估计,而基于样本容量相对较少的 SGLD 模型则能够获得超越概率的合理计算值。因此,基于 SGLD 模型的加速方法能够在很大程度上提高自升式海洋平台微小超越概率分析的计算效率,且具有较高的准确性。由于获得了系统响应的尾部分布函数,所以在  $\zeta$  发生改变时,SGLD 模型可以通过直接将本次抽样获得的尾部分布函数代入新的安全界限值来求得新的  $P_f$ ,即  $P'_f = 1 - F_c(\zeta')$ ;而采用直接 MC 模拟方法求解更大界限对应的失效概率时,需要增加几个数量级的样本数。从这个角度来说,基于 SGLD 模型和两支撑点参数估计法的加速模拟方法的计算效率更高。

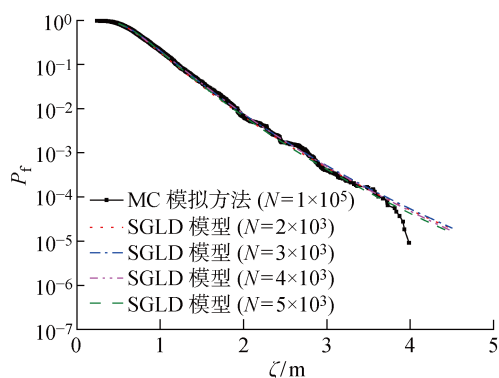


图 6 SGLD 模型拟合结果与  $N=1 \times 10^5$  时 MC 极值分布对比

Fig. 6 Comparison of SGLD model fitting results and  $10^5$  times MC extreme value distribution

## 5 结论

本文提出一种估计随机波浪作用下自升式海洋平台极值响应的加速模拟方法。以某自升式平台为例,具体论述了该方法的分析流程及平台响应样本的计算方法,并验证了该方法的计算精度和计算效率。研究的主要结论有:

(1) 在估计自升式海洋平台的极值响应时,本文方法一般只需  $2 \times 10^3$  个响应样本即可非常准确地估计出超越概率为  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  的平台极值响应尾部分布;而直接 MC 模拟方法则至少需要  $10^6$  个样本数据,才能粗略估计具有相同超越概率的尾部分布。因此,与直接 MC 模拟方法相比,本文方法具

有很高的计算效率。

(2) 为了得到超越概率介于  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  的尾部分布,两个支撑点的超越概率可近似选为  $P_1 = 10^{-1}$ ,  $P_2 = 10^{-2}$ 。

(3) 在计算精度大致相同的条件下,如果需要进一步提高本文方法的计算效率,可以采用 Sobol 抽样或者拉丁超立方方法来估计两个支撑点的超越概率。

## 参考文献:

- [1] SHINOZUKA M. Monte Carlo solution of structural dynamics[J]. **Computers & Structures**, 1972, 2(5/6): 855-874.
- [2] BUCHER C. Asymptotic sampling for high-dimensional reliability analysis[J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 2009, 24(4): 504-510.
- [3] LUCA G, ARMEN D K. Tail-Equivalent Linearization Method in frequency domain and application to marine structures [J]. **Marine Structures**, 2010, 23(3): 322-338.
- [4] BALESDENT M, MORIO J, MARZAT J. Kriging-based adaptive Importance Sampling algorithms for rare event estimation[J]. **Structural Safety**, 2013, 44(2334): 1-10.
- [5] HE J, GONG J. Estimate of small first passage probabilities of nonlinear random vibration systems by using tail approximation of extreme distributions[J]. **Structural Safety**, 2016, 60: 28-36.
- [6] HE J. Approximate method for estimating extreme value responses of nonlinear stochastic dynamic systems[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2015, 141(7): 04015009.
- [7] JENSEN J J, CAPUL J. Extreme response predictions for jack-up units in second order stochastic waves by FORM [J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 2006, 21(4): 330-337.
- [8] MADSEN H O, KRENK S, LIND N C. Methods of structural safety[M]. NY, USA: Prentice-Hall Inc, 1986: 50-63.
- [9] LOW Y M. A new distribution for fitting four moments and its applications to reliability analysis [J]. **Structural Safety**, 2013, 42(3): 12-25.
- [10] CASSIDY M J, TAYLOR R E, HOULSBY G T. Analysis of jack-up units using a constrained New-Wave methodology [J]. **Applied Ocean Research**, 2001, 23(4): 221-234.

(本文编辑:石易文)