

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202312028



非高斯波浪作用下深水高墩的非线性随机振动

张榕哲, 陈林聪

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 首先,建立非高斯波浪作用下深水高墩的随机动力学模型,采用泊松白噪声激励模拟非高斯随机波浪过程,利用达朗贝尔原理和伽辽金方法推导深水高墩的运动方程。然后,通过径向基神经网络法求解广义 FPK 方程,获得系统的瞬态响应概率密度函数。最后,考察不同结构参数对系统响应的影响,并采用蒙特卡罗模拟(MCS)验证理论解。结果表明:理论解与模拟结果吻合良好;浸入比和质量比增加均会放大高墩的响应;采用高斯模型会使结构设计偏于保守。

关键词: 深水高墩; 非高斯随机波浪; 泊松白噪声; 径向基神经网络; 瞬态响应

中图分类号: U 442.55

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)02-0233-08

Nonlinear Random Vibration of Deep-Water-High-Pier Under Non-Gaussian Wave Action

ZHANG Rongzhe, CHEN Lincong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A random dynamic model is established for deep-water-high-pier under non-Gaussian wave action, the non-Gaussian random wave process is simulated using Poisson white noise excitation, and the motion equation of the deep-water-high-pier is derived by D'Alembert principle and the Galerkin method. The radial basis function neural network method is used to solve the generalized FPK equation, obtaining the transient response probability density function of the system. The effects of different structural parameters on the response of the system are examined, and the theoretical solutions are verified by Monte Carlo simulation (MCS). The results show that the theoretical solutions agree well with the simulation results. The increase of immersion ratio and mass ratio will amplify the response of the high pier. Gaussian model tends to conservative structural designs.

Keywords: deep-water-high-pier; non-Gaussian random wave; Poisson white noise; radial basis function neural network; transient response

跨海大桥在促进旅游和经济社会发展方面发挥着至关重要的作用,是一个国家建筑技术的证明。与内陆环境不同,跨海大桥面临的环境更为复杂,波浪荷载是最关键的环境荷载之一^[1-3]。跨海桥梁的高墩为典型的柔性结构,波浪力会导致其强烈的非线性随机振动^[4],从而使桥梁发生局部或整体损坏^[5-6]。因此,研究波浪力下深水高墩的动力响应具有重要的现实意义。

收稿日期: 2023-12-25

通信作者: 陈林聪(1981-),男,教授,博士,主要从事工程结构随机振动的研究。E-mail:lincongchen@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12072118, 12372029);福建省杰出青年科学基金资助项目(2021J06024)

目前,已有许多学者对波浪力下高墩的动力学问题进行研究。李忠献等^[7]采用绕射波浪理论,分析波浪作用下深水桥梁桥墩的动力响应。Ti 等^[8]提出一种波浪作用下柔性高墩结构的响应分析方法。此外,一些水下振动台实验^[9-10]和波浪水槽实验^[11-12]也已被用于该方面的研究,但上述研究都将波浪视为确定性荷载,未考虑波浪的随机性特征。最近,Zhao 等^[13]视随机波浪为简单的高斯过程,研究高斯波浪力下结构的动力响应^[14-15]。然而,Zeng 等^[16]发现这种高斯激励模型不能很好地捕捉波浪的实际特征。同时,在浅水或复杂地形中的波浪常表现出明显的非高斯性,不仅会改变海面的几何形状,影响水粒子在海面上的运动路径,还会加速结构的疲劳损伤。目前,关于非高斯波浪力作用下结构随机振动的研究仍尚少^[17-18],特别是深水高墩结构还未得到较好的发展。基于此,本文对非高斯波浪作用下深水高墩的非线性随机振动进行研究。

1 模型概述

考察一个墩底固定在岩石地基上的实心圆形深水高墩,墩高为 H_0 ,直径为 d ,淹没在深度为 h 的水中,同时受到波浪作用。深水高墩示意图,如图 1 所示。图 1 中: x, y, z 为笛卡尔坐标系。

根据桥墩受载变形的力学特征,深水高墩的动力学模型可简化为均质弹性悬臂梁(图 2(a)),其中,高墩的上部结构可以近似视为一个质量为 m_g 的质量块;高墩中面轴向位移分量为 $v(y, t)$;中面横向位移分量为 $u(y, t)$;中线位移分量为 $s(y, t)$ 。

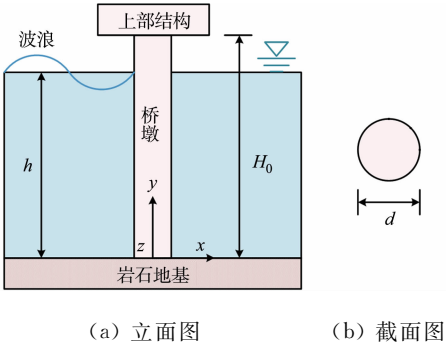


图 1 深水高墩示意图

对高墩任一中面截面(图 2(b))进行受力分析,利用达朗贝尔原理建立平衡方程,有

$$\left. \begin{aligned} \rho A \ddot{u} - F &= H', \\ \rho A \ddot{v} &= V', \\ M' + H(1+v') - Vu' &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式(1)中:符号'和 \cdot 分别表示对 y 和 t 的偏导数; ρ 为高墩的密度; A 为高墩的横截面积; F 为波浪荷载; H 为横向力与轴向力的水平分量之和; V 为横向力与轴向力的垂直分量之和; M 为弯矩, $M=EI\kappa$, E 为弹性模量, I 为横截面惯性矩, κ 为曲率。

将力矩平衡方程两边除以 $1+v'$,并对 y 求导,可得

$$\left(\frac{M'}{1+v'} \right)' + H' - \left(V \frac{u'}{1+v'} \right)' = 0. \tag{2}$$

为求得曲率的表达式,根据图 2(c),引入几何关系,有

$$\left\{ \sin \theta = \frac{u'}{s'}; \cos \theta = \frac{1+v'}{s'} \right\} \Rightarrow (s'-1) \approx v' + \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2). \tag{3}$$

式(3)中: θ 为横截面旋转角。

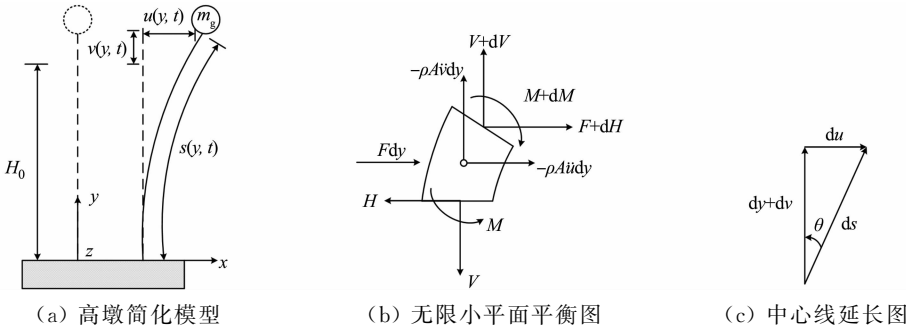


图 2 深水高墩模型

Fig. 2 Model of deep-water-high-pier

忽略高墩的微小轴向变形($|s'-1| \ll 1$),并略去高阶项(v'^2),可得

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial \sin \theta} \cdot \frac{\partial \sin \theta}{\partial y} = \frac{u''}{1+v}, \\ v' &= -\frac{1}{2} u'^2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

综合式(1),(3),(4)(具体推导过程不赘述),式(2)可写为

$$\rho A \ddot{u} + EI \{ u'''' + [u'(u'u'')]'\} + [\rho A u'] \int_{H_0}^y \int_0^\tau (\dot{u}'^2 + u' \ddot{u}') dy d\tau \}' + m_g u'' \int_0^{H_0} (\dot{u}'^2 + u' \ddot{u}') dy = F. \quad (5)$$

式(5)中: τ 为积分的内部变量。

此外,波浪荷载 F 通常采用 Morison 方程表示,即

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho_w d (v_w - \dot{u}) |v_w - \dot{u}| + C_M \rho_w \frac{\pi d^2}{4} \dot{v}_w - C_m \rho_w \frac{\pi d^2}{4} \ddot{u} = f - C_m \rho_w \frac{\pi d^2}{4} \ddot{u}. \quad (6)$$

式(6)中: C_d 为拖曳系数; C_M 为惯性系数; C_m 为附加质量系数; ρ_w 为水的密度; v_w 为瞬时水流速度; f 为时变波浪力。

将式(6)代入式(5),可得系统的运动方程为

$$\left(\rho A + C_m \rho_w \frac{\pi d^2}{4} \right) \ddot{u} + EI \{ u'''' + [u'(u'u'')]'\} + [\rho A u'] \int_{H_0}^y \int_0^\tau (\dot{u}'^2 + u' \ddot{u}') dy d\tau \}' + m_g u'' \int_0^{H_0} (\dot{u}'^2 + u' \ddot{u}') dy = f. \quad (7)$$

方便起见,引入无量纲参数,有

$$u^* = \frac{u}{H_0}, \quad y^* = \frac{y}{H_0}, \quad \tau^* = \frac{\tau}{H_0}, \quad t^* = \sqrt{\frac{EI}{\rho A H_0^4}} t, \quad m = \frac{m_g}{\rho A H_0}, \quad \xi(t) = \frac{H_0^3}{EI} f. \quad (8)$$

将无量纲参数代入式(7)后,可得相应的无量纲运动方程为

$$\left(\frac{EI}{H_0^3} + C_m \rho_w \frac{EI}{\rho H_0^3} \right) \ddot{u}^* + \frac{EI}{H_0^3} \{ u^{*''''} + [u^{*'}(u^{*'} u^{*''})']'\} + \frac{EI}{H_0^3} [u^{*'} \int_1^{y^*} \int_0^{\tau^*} (\dot{u}^{*'}^2 + u^{*'} \ddot{u}^{*'}) dy^* d\tau^*]' + \frac{mEI}{H_0^3} u^{*''} \int_0^1 (\dot{u}^{*'}^2 + u^{*'} \ddot{u}^{*'}) dy^* = \frac{EI}{H_0^3} \xi(t). \quad (9)$$

深水高墩的振动以基本模态为主导,现基于假设模态法,可将位移变量 $u(y^*, t^*)$ 近似表示为

$$u = \varphi(y^*) X(t^*). \quad (10)$$

式(10)中: $X(t^*)$ 为广义位移; $\varphi(y^*)$ 为模态振型函数^[19],表达式为

$$\varphi(y^*) = \left(\frac{\sin \beta H_0 + \sinh \beta H_0}{\cos \beta H_0 + \cosh \beta H_0} \right) (\cosh \beta H_0 y^* - \cos \beta H_0 y^*) + (\sin \beta H_0 y^* - \sinh \beta H_0 y^*). \quad (11)$$

式(11)中: β 为待定系数,求解公式为

$$m \beta H_0 (\cos \beta H_0 \sinh \beta H_0 - \sin \beta H_0 \cosh \beta H_0) + \cos \beta H_0 \cosh \beta H_0 + 1 = 0. \quad (12)$$

将式(10)代入式(9),利用伽辽金方法离散化处理并考虑阻尼,可得

$$(1 + \alpha_2 X^2) \ddot{X} + \mu \dot{X} + \omega^2 X + \alpha_1 X^3 + \alpha_2 X \dot{X}^2 = \eta \xi(t). \quad (13)$$

式(13)中: μ, ω, η 分别为系统的线性阻尼系数、基频和激励系数; α_1, α_2 分别为曲率非线性系数和惯性非线性系数。

注意到波浪激励 $\xi(t)$ 是不连续的,具有典型的非高斯特征,可用随机时刻下的具有随机振幅的离散随机脉冲序列^[20]表示。该过程通常用泊松白噪声^[21]模拟,其形式导数由复合泊松过程 $C(t)$ 表示,有

$$C(t) = \sum_{i=1}^{N_T} Y_i U(t - t_i). \quad (14)$$

式(14)中: N_T 为泊松计数过程; $U(\cdot)$ 为阶跃函数; Y_i 为第 i 次脉冲到达时刻 t_i 的随机振幅,且每个随机振幅与到达时刻相互独立。

复合泊松过程增量存在的关系为

$$E[dC(t)^i] = \lambda E[Y(t)^i] dt. \quad (15)$$

设 $X_1 = X, X_2 = \dot{X}$, 式(13)可写为状态方程, 即

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2, \\ \dot{X}_2 &= -\frac{\mu X_2 + \omega^2 X_1 + \alpha_1 X_1^3 + \alpha_2 X_1 X_2^2}{1 + \alpha_2 X_1^2} + \frac{\eta}{1 + \alpha_2 X_1^2} \xi(t). \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

支配该系统响应概率密度 $p = p(x_1, x_2, t)$ 的广义 FPK 方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(\mathbf{x}, t | x_0, t_0)}{\partial t} &= -m_1 \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} (m_2 p) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} (b_{22} p) - \\ &\frac{1}{3!} \frac{\partial^3}{\partial x_2^3} (b_{33} p) + \cdots + \frac{1}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x_2^n} (b_{nn} p) = K(p). \end{aligned} \tag{17}$$

式(17)中: $K(\cdot)$ 为广义 FPK 方程的微分算子, \mathbf{x} 为状态向量, $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$; 相应系数 $m_1, m_2, b_{22}, b_{33}, \cdots, b_m$ 分别为

$$\begin{aligned} m_1 &= x_2, \quad m_2 = \frac{\mu}{1 + \alpha_2 x_1^2} x_2 + \frac{\omega^2}{1 + \alpha_2 x_1^2} x_1 + \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_2 x_1^2} x_1^3 + \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2 x_1^2} x_1 x_2^2, \\ b_{22} &= \lambda E[Y^2] \left(\frac{\eta}{1 + \alpha_2 x_1^2}\right)^2, \quad b_{33} = \lambda E[Y^3] \left(\frac{\eta}{1 + \alpha_2 x_1^2}\right)^3, \quad \cdots \\ b_m &= \lambda E[Y^n] \left(\frac{\eta}{1 + \alpha_2 x_1^2}\right)^n. \end{aligned}$$

上式中: $E[\cdot]$ 为数学期望符号。

此外, 广义 FPK 方程的初始条件与边界条件分别为

$$\left. \begin{aligned} p(\mathbf{x}, t | x_0, t_0) &= p(\mathbf{x}, t_0) = \delta(\mathbf{x} - x_0), \\ \lim_{x \rightarrow \pm \infty} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} p(\mathbf{x}, t | x_0, t_0) &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

由于广义 FPK 方程中存在无穷阶偏导数项, 通常需经过适当截断对其进行数值求解。

2 径向基神经网络法

一种求解广义 FPK 方程的径向基神经网络法^[22]如下。假设式(17)的瞬时解为

$$p^*(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k)) = \sum_{j=1}^N q_j(k) Q_j(\mathbf{x}, \mu_j, \sigma_j). \tag{19}$$

式(19)中: N 为激活函数的个数; $\sigma_j = (\sigma_{j,1}, \sigma_{j,2})$, $\mu_j = (\mu_{j,1}, \mu_{j,2})$ 分别为第 j 个激活函数的标准差与中心; $\mathbf{q}(k) = (q_1(k), q_2(k), \cdots, q_N(k))$ 为一组时变的未定权值系数, k 为时间步数, 时刻 $t = k\Delta t$, Δt 为时间步长, $k = 1, 2, \cdots, n$; $Q_j(\mathbf{x}, \mu_j, \sigma_j)$ 为激活函数, 其多元高斯函数形式为

$$Q_j(\mathbf{x}, \mu_j, \sigma_j) = \prod_{i=1}^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j^2}} \cdot \exp\left[-\frac{(x_i - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right]. \tag{20}$$

瞬时解(式(19))和多元高斯函数(式(20))满足归一化条件, 即

$$\left. \begin{aligned} \int_{\mathbf{R}^2} p^*(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k)) d\mathbf{x} &= 1, \\ \int_{\mathbf{R}^2} Q_j(\mathbf{x}, \mu_j, \sigma_j) d\mathbf{x} &= 1. \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

据此, 可进一步推导出 $\mathbf{q}(k)$ 的约束条件为

$$\sum_{j=1}^N q_j(k) = 1. \tag{22}$$

利用有限差分法, 式(17)左边时间导数项可近似为

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [p^*(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k+1)) - p^*(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k))] + \tau_t. \tag{23}$$

式(23)中: τ_t 为与一阶有限差分近似相关的截断误差。

将瞬时解(式(19))和式(23)代入式(17), 可得到局部误差为

$$e(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k)) = -p^*(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k)) + p^*(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k-1)) + K[p^*(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k))] \Delta t =$$

$$p^*(\mathbf{x}, \mathbf{q}(k-1)) + \sum_{j=1}^N q_j(k) w_j(\mathbf{x}). \tag{24}$$

式(24)中:

$$w_j(\mathbf{x}) = -\mathbf{Q}_j(\mathbf{x}, \mu_j, \sigma_j) + K[\mathbf{Q}_j(\mathbf{x}, \mu_j, \sigma_j)]\Delta t. \tag{25}$$

利用采样技术, 建立损失函数, 有

$$L(\mathbf{q}(k)) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} e^2(x_i, \mathbf{q}(k)). \tag{26}$$

式(26)中: N_s 为样本点数。

结合约束条件(式(22)), 构造一个扩展损失函数为

$$L_s(\mathbf{q}(k)) = L(\mathbf{q}(k)) + r(k) \left(\sum_{j=1}^N q_j(k) - 1 \right) = \mathbf{z}^T(k) \mathbf{B} \mathbf{z}(k) - \mathbf{z}^T(k) (\mathbf{c}_1(k) - \mathbf{c}_2) + g(k-1). \tag{27}$$

式(27)中: $r(k)$ 为拉格朗日乘子; 权值向量 $\mathbf{z}(k) = [q_1(k), q_2(k), \dots, q_N(k), r(k)]^T$; 向量 $\mathbf{c}_2 = [0, 0, \dots,$

$1]^T$; 参数 $g(k-1) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} p^{*2}(x_i, \mathbf{q}(k-1))$; 矩阵 \mathbf{B} , 向量 $\mathbf{c}_1(k)$ 分别为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} & & & 1 \\ \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} [w_j(x_i)][w_j(x_i)]^T & & & \vdots \\ & & 1 & \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_1(k) = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ \frac{2}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} [w_j(x_i)][\mathbf{Q}_j(x_i)]^T & & & \vdots \\ & & 0 & \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

式(27)最小化的必要条件为

$$\frac{\partial L_s}{\partial \mathbf{z}(k)} = (\mathbf{B} + \mathbf{B}^T) \mathbf{z}(k) + \mathbf{c}_1(k) - \mathbf{c}_2 = 0. \tag{28}$$

求解式(28), 可得最优权值系数为

$$\mathbf{z}^*(k) = (\mathbf{B} + \mathbf{B}^T)^{-1} [\mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_1(k)]. \tag{29}$$

将最优权值系数 $\mathbf{q}^*(k)$ 代入瞬时解中, 可得系统的瞬态概率密度函数为

$$\left. \begin{aligned} p(x_1, k) &= \int_{-\infty}^{\infty} p^*(x_1, x_2, \mathbf{q}^*(k)) dx_2, \\ p(x_2, k) &= \int_{-\infty}^{\infty} p^*(x_1, x_2, \mathbf{q}^*(k)) dx_1. \end{aligned} \right\} \tag{30}$$

3 数值结果分析

为保证文中方法的精度和有效性, 采用蒙特卡罗模拟(MCS)结果进行对比验证。高墩部分参数为 $H_0=172\text{ m}$, $d=13.04\text{ m}$, $\rho=2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $E=30\text{ GPa}$, $I=1\,419.32\text{ m}^4$, $C_m=1.0$, $\rho_w=1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\mu=0.001$ 。此外, 采用的蒙特卡罗模拟样本数为 1.0×10^9 。

首先, 设置初始概率密度满足正态分布, 将中心域 $\Omega_G = [-2, 2] \times [-8, 8]$ 统一划分为 50×50 的网格, 取网格节点作为激活函数的中心, 则激活函数的个数 $N=50 \times 50$ 。类似地, 样本域 $\Omega_s = [-4, 4] \times [-16, 16]$ 可划分为 100×100 的网格, 样本点的个数 $N_s=100 \times 100$, 时间步长 $\Delta t=0.1\text{ s}$ 。需注意, 在以下参数分析中, 可根据具体情形对样本域进行细致调整, 以保证计算结果的精度。同时, 考虑到高阶偏导数项对广义 FPK 方程的贡献很小, 现仅保留前 8 阶项。

在泊松与高斯白噪声激励下(等强度 $I_p = \lambda E[Y^2] = D=0.1$), 高斯和泊松情形瞬态响应的结果如图 3 所示。图 3 中: λ 为平均到达率; $E[Y^2]$ 为均方值; D 为高斯激励强度; 符号表示模拟结果; 直线表示理论解, 下文类似。由图 3 可知: 在泊松白噪声激励下, 系统的响应略小于相应的高斯白噪声激励情形, 但随着平均到达率 λ 的增加(如当 $\lambda=25$ 时), 两种结果几乎重合, 这说明以往研究采用的高斯白噪声波浪模型的响应结果偏大, 导致高墩结构的设计偏保守, 同时也说明在激励强度不变的情况下, 泊松白噪

声的非高斯性与 λ 的取值有关,随着 λ 的增大而减弱。

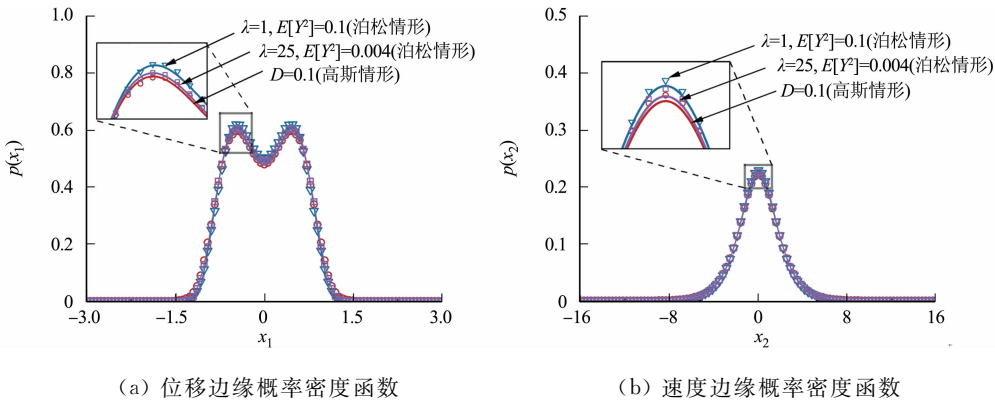


图 3 泊松和高斯情形瞬态响应对比图($t=440\text{ s}$)

Fig. 3 Comparison of transient response between Poisson and Gaussian scenarios ($t=440\text{ s}$)

不同浸入比(h/H_0)的参数,如表 1 所示。在泊松白噪声激励下,不同浸入比的位移边缘概率密度函数,如图 4 所示。由图 4(a)可知:随着 h/H_0 增大,位移边缘概率密度函数曲线向两边扩散,呈扁平化趋势,放大了系统的响应,结构的振动位移分布偏向于更大值,可能会引起高墩结构的失效,在实际工程设计中需引起重视。由图 4(b)可知:随着时间变化,出现概率峰值向另一个更小的概率峰值过渡的现象,随着 h/H_0 增大,位移边缘概率密度函数形态发生拓扑结构改变,图像由单峰变为双峰,这意味着较大的浸入比参数会诱导系统发生随机 p -分岔,使系统从原先的单稳定状态转变为双稳定状态,激发了结构振动的不稳定性,增加了极端振动事件发生的概率,不利于高墩的设计及振动控制。对比模拟结果,理论解均具有较高的精度,验证了径向基神经网络法在预测高墩系统瞬态响应方面的有效性。

表 1 不同浸入比的参数

Tab. 1 Parameters of different immersion ratios

h/H_0	m	λ	$E[Y^2]$	ω^2	α_1	α_2	η
0.5	0	5	0.02	12.116 4	73.550 2	8.360 2	0.087 4
0.8	0	5	0.02	10.657 8	64.696 3	7.353 8	0.277 2
1.0	0	5	0.02	8.830 3	53.602 5	6.092 8	0.410 6

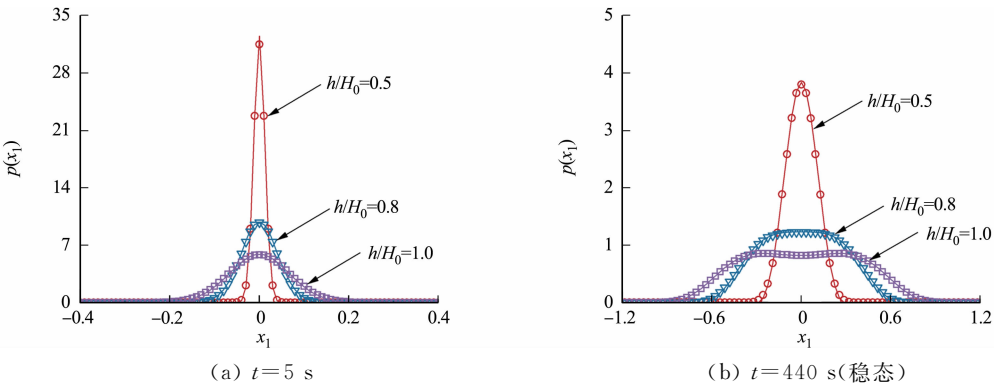


图 4 不同浸入比的位移边缘概率密度函数

Fig. 4 Probability density functions of displacement edges for different immersion ratios

不同质量比(m)的参数,如表 2 所示。保持 $h/H_0=1$ 不变,不同质量比下系统的位移边缘概率密度函数,如图 5 所示。

表 2 不同质量比的参数

Tab. 2 Parameters of different mass ratios

m	h/H_0	λ	$E[Y^2]$	ω^2	α_1	α_2	η
0	1	5	0.02	8.830 3	53.602 5	6.092 8	0.410 6
0.05	1	5	0.02	7.352 2	29.599 1	5.584 3	0.440 6
0.10	1	5	0.02	6.291 5	14.580 2	5.161 5	0.471 1

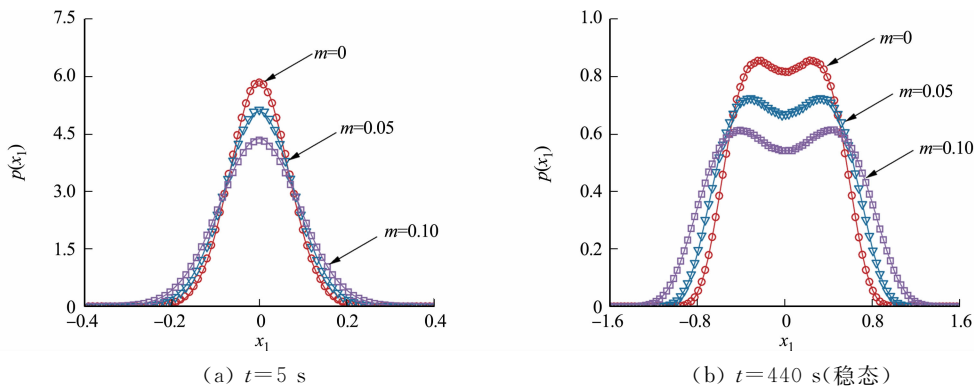


图 5 不同质量比下的位移边缘概率密度函数

Fig. 5 Probability density functions of displacement edges for different mass ratios

由图 5 可知:质量比对系统位移边缘概率密度函数的影响规律与浸入比类似,随着 m 的提高,位移边缘概率密度函数峰值均呈现出不断下降的趋势,系统的响应被放大;位移边缘概率密度函数随时间的演化规律与浸入比情形基本一致,但质量比情形下概率图像出现的双峰状更为陡峭,且陡峭程度随 m 的增大而增大,这说明质量比的增加会使系统处于更加不稳定的状态,增加了结构可靠性降低的可能性,从而引发高墩结构失稳甚至破坏等安全问题。

综上所述,浸入比和质量比是深水桥墩优化设计的两个重要参数,在深水高墩结构的实际优化设计中,可通过适当减小这两个参数,以实现结构更好的动力响应控制和抗振性能。

4 结论

利用达朗贝尔原理和伽辽金法建立非高斯波浪力作用下高墩结构的非线性随机动力学方程。在此基础上,采用径向基神经网络法求解广义 FPK 方程,得到系统响应概率密度函数的理论解,探究浸入比和质量比对系统响应的影响规律。结果表明,深水高墩结构响应随着 h/H_0 和 m 的增大而增加,在实际工程设计中要权衡这两个重要参数的影响;波浪激励模型的选取对高墩结构设计有着重要影响,采用高斯白噪声波浪模型会导致设计偏于保守。文中结果可为深水高墩的优化设计提供一定的参考,所得的半解析理论解在结构设计和振动控制方面也有着很大的潜力,可被进一步开发和应用。

参考文献:

[1] ISTRATI D, BUCKLE I, LOMONACO P, *et al.* Deciphering the tsunami wave impact and associated connection forces in open-girder coastal bridges[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2018, 6(4): 148. DOI:10.3390/jmse6040148.

[2] TI Zilong, ZHANG Mingjin, LI Yongle, *et al.* Numerical study on the stochastic response of a long-span sea-crossing bridge subjected to extreme nonlinear wave loads[J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109287. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.109287.

[3] HUANG Bo, LUO Wenlong, REN Qingyang, *et al.* Random wave forces on the submerged box-girder superstructure of coastal bridges based on potential flow theory[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 248: 110739. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.110739.

[4] WEI Kai, HONG Jie, JIANG Mochen, *et al.* A review of breaking wave force on the bridge pier: Experiment, simulation, calculation, and structural response[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2022, 9(3): 407-421. DOI:10.1016/j.jtte.2021.03.006.

[5] FANG Chen, TANG Haojun, LI Yongle, *et al.* Stochastic response of a cable-stayed bridge under non-stationary winds and waves using different surrogate models[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 199: 106967. DOI:10.1016/j.oceaneng.2020.106967.

[6] LI Chao, WU Guoyi, LI Luxi, *et al.* A comprehensive performance evaluation methodology for sea-crossing cable-stayed bridges under wind and wave loads[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114816. DOI:10.1016/j.oceaneng.2023.114816.

- [7] 李忠献,黄信.地震和波浪联合作用下深水桥梁的动力响应[J].土木工程学报,2012,45(11):134-140. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2012.11.002.
- [8] TI Zilong,YOU Hengrui. Time domain boundary element modeling of coupled interaction between ocean wave and elastic bridge pier[J]. Ocean Engineering,2023,269:113527. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.113527.
- [9] DING Yang,MA Rui,SHI Yundong,*et al.* Underwater shaking table tests on bridge pier under combined earthquake and wave-current action[J]. Marine Structures,2018,58:301-320. DOI:10.1016/j.marstruc.2017.12.004.
- [10] YUN Gaojie,LIU Chunguang. Shaking table tests on a deep-water high-pier whole bridge under joint earthquake, wave and current action[J]. Applied Ocean Research,2020,103:102329. DOI:10.1016/j.apor.2020.102329.
- [11] XU Bo,WEI Kai,QIN Shunquan,*et al.* Experimental study of wave loads on elevated pile cap of pile group foundation for sea-crossing bridges[J]. Ocean Engineering,2020,197:106896. DOI:10.1016/j.oceaneng.2019.106896.
- [12] FANG Qinghe,LIU Jiabin,HONG Rongcan,*et al.* Experimental investigation of focused wave action on coastal bridges with box girder[J]. Coastal Engineering,2021,165:103857. DOI:10.1016/j.coastaleng.2021.103857.
- [13] ZHAO Z,LOW Y M. Extreme value analysis of high-dimensional Gaussian vector processes[J]. Journal of Sound and Vibration,2023,567:118067. DOI:10.1016/j.jsv.2023.118067.
- [14] ZHU Haitao,GENG Guoqian,YU Yang,*et al.* Probabilistic analysis on parametric random vibration of a marine riser excited by correlated Gaussian white noises[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics,2020,126:103578. DOI:10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103578.
- [15] CHEN Jia,YANG Jianming,SHEN Kunfan,*et al.* Probability density analysis of nonlinear random ship rolling[J]. Journal of Ocean University of China,2023,22(5):1227-1242. DOI:10.1007/s11802-023-5323-0.
- [16] ZENG Yan,ZHU Weiqiu. Stochastic averaging of quasi-nonintegrable-Hamiltonian systems under Poisson white noise excitation[J]. Journal of Applied Mechanics,2011,78(2):021002. DOI:10.1115/1.4002528.
- [17] ER Guokang,ZHU Haitao,IU V P,*et al.* Probability density function solution to nonlinear ship roll motion excited by external Poisson white noise[J]. Science China Technological Sciences,2011,54:1121-1125. DOI:10.1007/s11431-011-4342-z.
- [18] SONG Xiancang,JIA Yonggang,WANG Shuqing,*et al.* A modified straightforward spectral representation method for accurate and efficient simulation of the stationary non-Gaussian stochastic wave[J]. Ocean Engineering,2020,205:107308. DOI:10.1016/j.oceaneng.2020.107308.
- [19] PRATIHER B,DWIVEDY S K. Nonlinear response of a soft magneto elastic cantilever beam with end mass under static and dynamics magnetic field[J]. Journal of Vibration and Control,2011,17(9):1394-1406. DOI:10.1177/1077546309-358972.
- [20] KUMAR P,NARAYANAN S,GUPTA S. Stochastic bifurcation analysis of a duffing oscillator with coulomb friction excited by poisson white noise[J]. Procedia Engineering,2016,144:998-1006. DOI:10.1016/j.proeng.2016.05.032.
- [21] LIU Weiyan,YIN Xunru,GUO Zhongjin,*et al.* Feedback stabilization of quasi nonintegrable Hamiltonian systems under combined Gaussian and Poisson white noise excitations[J]. Probabilistic Engineering Mechanics,2023,71:103407. DOI:10.1016/j.probenmech.2022.103407.
- [22] 叶文伟,陈林聪,孙建桥.泊松白噪声激励下强非线性系统的半解析瞬态解[J].力学学报,2022,54(12):3468-3476. DOI:10.6052/0459-1879-22-381.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)