

随机海况大型船舶流固耦合变形大偏差算法研究

陈 钊 章社生 李宇光
(武汉理工大学数学模型学会 武汉 430070)

摘要 研究航母级别的大型船舶长时间变形是有实际意义的。在随机海况条件下,根据波浪与船体的流固耦合相互作用,建立了大型船舶的变形大偏差算法数学模型,给出了大型船舶变形的大偏差和变形绝对值大偏差的计算原理,提出了船舶变形大偏差优化算法,并进行了实例计算分析,为研究船舶疲劳损伤提供了理论依据。

关键词 船舶,变形,大偏差,时间系列

中图法分类号 O24 文献标识码 A

Large Deviation Algorithm of Huge Ship Fluid Solid Coupling Deformation in Random Sea Wave Condition

CHEN Zhao ZHANG She-sheng LI Yu-guang
(Mathematical Model Society, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract It is of practical significance to study the long time deformation of large ship with carrier grade. In random sea state conditions, according to the wave and the hull of the fluid solid coupling interaction, the mathematical model of large deviation algorithm of the large ship deformation was built. The large deviation numerical principles of large ship deformation and absolute deformation were given. The ship deformation large deviation optimization algorithm and an example of calculation were shown. Our theory and results are useful for research on ship fatigue injury.

Keywords Ship, Deformation, Large deviation, Time series

1 引言

在风浪环境下,海洋上航行的航空母舰级别的大型船舶会发生变形^[1]。长时间的变形运动会产生金属疲劳效应^[2],这种疲劳效应不但降低了航行速度,而且导致船舶机械发生故障^[3]。机器故障导致失控是水上交通安全的主要危险源之一,因而研究船舶变形是有必要的^[4,5]。

针对船舶与海洋工程中涉及的大型船舶流固耦合的问题,国内外学者开展了数学物理建模、数值模拟和试验研究^[2,6],研究了波浪中大型船舶的运动响应^[7],计算了大型船舶在规则波中的共振^[8],研究了耦合动力传递机理,揭示了推进系统与船体变形的耦合形式与耦合机理^[9]。研究结果表明,波浪与船体之间存在相互耦合作用,会产生船体振动变形,这种变形积累到一定数量时,船体将产生金属疲劳效应。但这种积累变形量在理论上还没有深入研究。

本文将利用大偏差理论^[10,11]研究大型船舶在波浪中长时间积累变形的问题。本文第 2 节根据大偏差理论给出船舶变形大偏差的计算基础理论;第 3 节根据流固耦合模型给出大偏差船舶变形运动方程;第 4 节给出变形运动分析解;第 5 节给出船舶变形大偏差数值算法;第 6 节为实例计算;第 7 节为船舶变形绝对值大偏差的计算;最后总结全文。

2 船舶变形大偏差问题的提出

船舶受到波浪的拍击而变形,若波浪是随机变量,则船舶

变形 W 也为随机变量。在时刻 t_k ,测量的船舶变形量 $W_k = W(t_k)$,设 $\{W_k\}$ 是相互独立、同分布的随机变量系列,且均值为 0,方差为 1。取 $S_n = W_1 + W_2 + \dots + W_n$ 研究概率

$$P_n = P\left(\frac{S_n}{n} > w\right) \quad (1)$$

的收敛速度。若

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log P\left(\frac{S_n}{n} > w\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log P_n = -I(w)$$

则有近似式:

$$P\left(\frac{S_n}{n} > w\right) \approx e^{-nI(w)} \quad (2)$$

式(2)为平均变形量大于 w 的概率。当 $I(w) = 0$ 时,概率为 1。 $I(w)$ 的值越大,对应的概率越小。若 $I(w)$ 为 w 的单调上升函数,则变形量越大,对应的概率越小。船体疲劳损伤与变形幅度有直接的关系,大幅值变形发生的概率越大,其损伤速度越快。本文研究是为了通过计算船舶大偏差,来揭示船体疲劳损伤机理。

记 $G = (w, +\infty)$ 为开区间,则式(2)可以写为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log P\left(\frac{S_n}{n} \in G\right) = \lim_{\epsilon \rightarrow \infty} \epsilon \log P_\epsilon = -I(w) \quad (3)$$

式中

$$\epsilon = \frac{1}{n}, P_\epsilon = P\left(\frac{S_n}{n} \in G\right)$$

由大偏差理论^[10],当 G 为一般点集时,有下面定义。

定义 1 设 w 为完备可分离距离空间 $\{P_b, b > 0\}$, σ 为

本文受国家自然科学基金重点基金资助项目(51139005)资助。

陈 钊(1995-),男,助理研究员,主要研究领域为数值计算,E-mail:chenzhao@qq.com;章社生(1955-),男,博士,教授,主要研究领域为数值计算,E-mail:sheshengz@qq.com;李宇光(1967-),男,硕士,讲师,主要研究领域为工程计算,E-mail:Liyuguang@qq.com(通信作者)。

borel 子集代数上的一族概率测度, $x_0 \in X$, 当 $b \rightarrow \infty$ 时, 有 $P_b \Rightarrow \delta_{x_0}$, 这里 \Rightarrow 表示依分布弱收敛。若存在函数 $I(\star)$: $X \rightarrow [0, +\infty)$ 满足条件:

- (1) $I(\star)$ 不等于 0;
- (2) $I(\star)$ 是下半连续的, 当 $w_n \rightarrow w$ 时, 有 $\liminf_n I(w_n) \geq I(w)$;

- (3) 对任一常数 l , 集 $\{w: I(w) \leq l\}$ 为 X 中的紧集;
- (4) 对 X 中任一闭集 F , 有 $\liminf_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon P_\varepsilon(F) \leq -\inf_{x \in F} I(x)$;
- (5) 对 X 中任一开集 G , 有 $\limsup_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon P_\varepsilon(G) \geq -\inf_{x \in G} I(x)$ 。

则称 $\{P_b, b > 0\}$ 满足大偏差原理, 具有速率函数 $I(\star)$ 。当上下极限相等时, 则 $I(\star)$ 就是所求的收敛速率函数(或速率函数)。下面讨论船舶变形量系列 $\{P_n\}$ 计算速率函数的定理。

由大偏差理论^[10], 得定理 1。

定理 1 设船舶变形量 W_k 是独立、同分布的随机变量系列, 分布为 P , 取 $y_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n w_k$, 具有分布 P_n 。若母函数 $M(\theta) = E(e^{\theta w})$ 为有限值, 则 $\{P_n\}$ 满足大偏差原理, 且有速率函数:

$$I(w) = \sup_{\theta \in R} [\theta w - \log M(\theta)], x \in R \quad (4)$$

由上面定理, 容易证明推论 1—推论 4。

推论 1 若船舶变形量 W_k 是独立、同分布的随机变量系列, 分布为 P , 满足大偏差原理, 且有速率函数, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log P_n = -I(w)$$

推论 2 若船舶变形量 W_k 服从标准正态分布 $N(0, 1)$, 且相互独立, 则速率函数:

$$I(w) = \frac{w^2}{2} \quad (5)$$

推论 3 若船舶变形量 W_k 服从标准正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 且相互独立, 则速率函数:

$$I(w) = \frac{(w - \mu)^2}{2\sigma^2}$$

推论 4 若船舶变形量 W_k 服从离散分布 $p_i = P\{w = w_i\}, i = 1, 2, \dots, N$, 且相互独立, θ 在有限闭区间集合 F 中取值, 则速率函数为:

$$I(w) = \max_{\theta \in F} [\theta w - \log(\sum_{i=1}^N e^{\theta w_i} p_i)], x \in R \quad (6)$$

本节可以认为是大偏差理论的工程实际表述, 它给出了船舶变形大偏差计算的原理和公式, 以便读者阅读。

3 大型船舶流固耦合变形运动方程

设为 $Oxyz$ 为随船运动三维坐标, x 轴由船尾指向船首, z 轴垂直向上, $Oxyz$ 构成一个右手法则的坐标系, 坐标原点位于船舶重心与地心之间的海平面, 如图 1 所示。下面应用流体力学和弹性力学推导出大型船舶流固耦合变形运动方程。

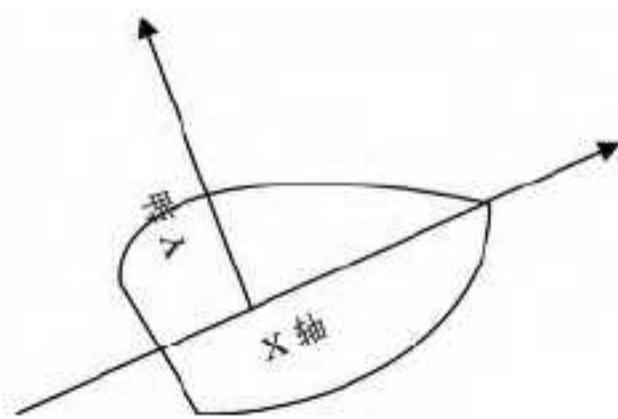


图 1 随船三维坐标中的 x 轴与 y 轴

设船舶在点 $P(x, y, z)$ 的位移为 (u, v, w) 。

3.1 流体动力

根据流体力学, 有流场势函数 ϕ 控制方程:

$$\Delta \phi = 0 \quad (7)$$

边界条件: (1) 物面不可穿透条件: $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$

(2) 线性自由面条件: $\frac{\partial \phi}{\partial z} + K_E \phi = 0, z = 0$

(3) 无穷远处辐射条件

$$|\phi| < C, \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \pm j K_E \phi \right| < \frac{C}{|x|}, x \rightarrow \pm \infty$$

其中, C 为常数。在截面 z 处的附加质量为:

$$\rho_m = \rho_w \operatorname{Re} \int_S n_k \phi(P) ds \quad (8)$$

其中, ρ_w 表示水的密度, 积分边界 S 为船体的截面的外表面, n_k 为法向矢量在 k 方程的分量。

3.2 弹性力学

根据弹性力学的理论, 有船体弹性运动方程:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= H e_x + G \Delta u, \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = H e_y + G \Delta v, \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= H e_z + G \Delta w + \rho_w g \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$e = u_x + v_y + w_z, G = \frac{E}{2 + 2\mu}, H = \frac{G}{1 - 2\mu}$$

其中, E 为弹性模量; μ 为侧向收缩系数; ρ 为质量密度。

初值条件为:

$$\begin{cases} (u, v, w)|_{t=0} = (u_0, v_0, w_0) \\ (u_t, v_t, w_t)|_{t=0} = (u'_0, v'_0, w'_0) \end{cases}$$

边界条件: 在船体浸水面, 水和波浪的作用力为 F_{S1} ; 其它船体表面的作用力为 0。

由于考虑的是基础型船舶, 则考虑船体截面附近是二维流场。在船体 $z = z_0$ 截面, 对弹性方程积分, 利用边界条件, 当不计其它力时, 能够得到定理 2(推导复杂, 涉及船舶专业知识太多, 本文省略)。

定理 2 若船体质点在向上的弹性位移是时间和位置的二阶连续可导函数, 那么它在波浪中的线化形变方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - bw + f(x, t) \\ w(x, t=0) = 0, \frac{\partial w(x, t=0)}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial w(x=0, t)}{\partial x} = 0, \frac{\partial w(x=L, t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中

$$\begin{cases} \rho_{0m} = \rho + \frac{\rho_m}{S_x}, c^2 = G/\rho_{0m}, \rho_l = [-\rho_w g + \rho_w g \frac{S_0}{S_x}]/\rho_{0m} \\ b = \rho_w g \frac{d_0}{\rho_{0m} S_x}, H_1 = b H_w, f(x, t) = \rho_l + H_1 \sin(Kx - \omega t) \end{cases}$$

其中, S_x 为船体 z 截面积分值; S_0 为 $z = z_0$ 时浸水线下的面积; d_0 为截面常数。

4 变形运动分析解

在海洋波浪上航行的大型船舶, 在流体和固体的耦合作用下, 第 3 节推导出船舶变形初边值问题可写为^[12,13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + bw = f(x, t) \\ w(x, t=0) = 0, \frac{\partial w(x, t=0)}{\partial t} = 0, \frac{\partial w(x=0, t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial w(x=L, t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, t 为时间变量, x 为船舶截面到船尾的距离变量, $w = w(x, t)$ 为船舶变形函数, L 为船长, $f(x, t)$ 为流固耦合作用力, 由数学物理方法, 它的解为:

$$w = \sum_{k=0}^{\infty} S_k^*(t) \left[1 - \cos \frac{k\pi x}{L} \right] \frac{L}{k\pi} + g(t) \quad (12)$$

式中:

$$S_k^*(t) = \frac{2/L}{q_k} \int_0^t \int_0^L f_y(y, \tau) \sin \frac{k\pi y}{L} dy \sin q_k(t-\tau) d\tau,$$

$$q_k = \sqrt{b + \frac{c^2 k^2 \pi^2}{L^2}}$$

其中, $f_y(y, t)$ 为函数 $f(y, t)$ 对 y 的导数。函数 $g(t)$ 由下面初值问题决定:

$$\begin{aligned} f(0, t) + g''(t) - c^2 v_x(0, t) + bg(t) &= 0 \\ g(0) = 0, g'(0) &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

若 $f(x, t) = \rho_1 + H\beta \sin(Kx - \omega t)$

其中, ρ_1, K, ω, β 为参数, H 为波高。它的解为:

$$\begin{aligned} g = -c^2 \sum_{k=0}^{\infty} [q_{k1} C_g(q_k t) - q_{k1} C_g(\omega t) + q_{k2} S_g(q_k t) - \\ q_{k3} S_g(\omega t)] \frac{k\pi}{L} - G_c(\rho_1) + H_1 S_g(\omega t) \end{aligned} \quad (14)$$

式中

$$G_c(z) = \frac{z}{a} [1 - \cos(at)]$$

$$\begin{aligned} C_g(qt) = \frac{\cos(at)}{2a} \left[\frac{\cos(a-q)t-1}{a-q} + \frac{\cos(a+q)t-1}{a+q} \right] + \\ \frac{\sin(at)}{2a} \left[\frac{\sin(a-q)t}{a-q} + \frac{\sin(a+q)t}{a+q} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_g(qt) = -\frac{\cos(at)}{2a} \left[\frac{\sin(a-q)t}{a-q} - \frac{\sin(a+q)t}{a+q} \right] + \frac{\sin(at)}{2a} \\ \left[\frac{1 - \cos(q-a)t}{q-a} + \frac{1 - \cos(q+a)t}{a+q} \right] \end{aligned}$$

$$a = \sqrt{b}$$

因而, 船舶变形的解为:

$$\begin{aligned} w = H\beta u(x, t, \omega) - \frac{\rho_1}{a} [1 - \cos(at)] \\ u(x, t, \omega) = \sum_{k=0}^{\infty} S_k^*(t) \left[1 - \cos \frac{k\pi x}{L} \right] \frac{L}{k\pi} - c^2 \sum_{k=0}^{\infty} S_{gk}^* \frac{k\pi}{L} + \\ S_g(\omega t) \end{aligned} \quad (15)$$

式中

$$\begin{aligned} S_k^*(t) &= q_{k1} C(q_k t) - q_{k1} C(\omega t) + q_{k2} S(q_k t) - q_{k3} S(\omega t) \\ S_{gk}^* &= q_{k1} C_g(q_k t) - q_{k1} C_g(\omega t) + q_{k2} S_g(q_k t) - q_{k3} S_g(\omega t) \\ C_g(qt) &= \frac{\cos(at)}{2a} \left[\frac{\cos(a-q)t-1}{a-q} + \frac{\cos(a+q)t-1}{a+q} \right] + \\ &\quad \frac{\sin(at)}{2a} \left[\frac{\sin(a-q)t}{a-q} + \frac{\sin(a+q)t}{a+q} \right] \\ S_g(qt) &= -\frac{\cos(at)}{2a} \left[\frac{\sin(a-q)t}{a-q} - \frac{\sin(a+q)t}{a+q} \right] + \frac{\sin(at)}{2a} \\ &\quad \left[\frac{1 - \cos(q-a)t}{q-a} + \frac{1 - \cos(q+a)t}{a+q} \right] \end{aligned}$$

$$C(x) = \cos(x), S(x) = \sin(x), a = \sqrt{b}$$

$$q_{k1} = \frac{2K}{q_k} k\pi \frac{\cos(KL - k\pi) - 1}{L^2 K^2 - k^2 \pi^2} \frac{1}{\omega^2 - q_k^2}$$

$$q_{k2} = \frac{2K}{q_k} k\pi \frac{\sin(KL - k\pi)}{L^2 K^2 - k^2 \pi^2} \frac{\omega}{\omega^2 - q_k^2}$$

$$q_{k3} = \frac{2K}{q_k} k\pi \frac{\sin(KL - k\pi)}{L^2 K^2 - k^2 \pi^2} \frac{q_k}{\omega^2 - q_k^2}$$

其中, H_1, K, ω 为参数, 能用波幅数据进行计算。因而给定一

个波浪的波幅 A , 就能计算出船舶变形值 $w = w(A)$ 。由线性迭加原理, 给定 M 个波:

$$y_j = \sum_{n=1}^M H_n \sin(K_n x - \omega_n t_j), j = 1, 2, \dots, N_i \quad (16)$$

对应的船舶变形时为:

$$w = \sum_{n=1}^N \beta H_n u(x, t, \omega_n) - \frac{\rho_1}{a} [1 - \cos(at)] \quad (17)$$

5 船舶变形大偏差数值计算原理

根据上面给出的计算公式, 大型船舶变形的计算步骤为:

(1) 在一固定地点, 实际测量的波高时间系列为 $\{z_k\}$, 由付里叶变换计算出波浪谱 $S = S(\omega)$ 。

(2) 由波浪谱计算波幅 $H: H = [2S(\omega)\Delta\omega]^{1/2}$, 其中 $\Delta\omega$ 为圆频率 ω 的步长。

(3) 计算波长 λ 和波数 $K: \lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2}, K = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

(4) 随机选取圆频率 $\omega = \omega_j, j = 1, 2, \dots$, 则海洋中的波浪可以表达为级数形式:

$$z = \sum_{j=1}^{\infty} H_j \sin(K_j x - \omega_j t)$$

(5) 在时间 $t = tk$, 求出船舶变形量 w_k , 则 $\{w_k\}$ 为时间系列。

(6) 用统计理论, 求出变形值 w_k 的概率分布 p_k 。

(7) 用下式求出母函数:

$$M(\theta) = E(e^{\theta w_k}) = \sum_{k=1}^N e^{\theta w_k} p_k$$

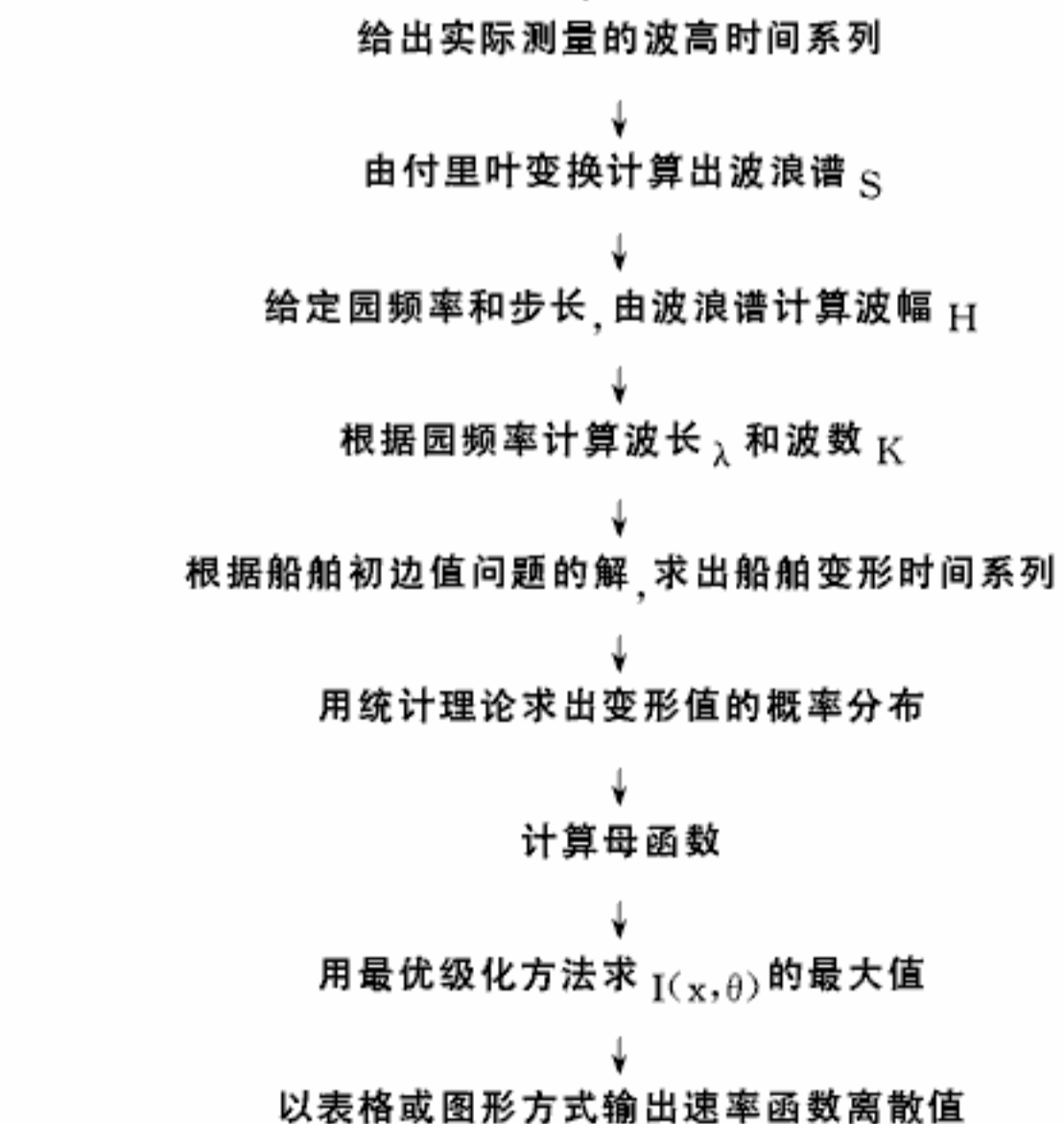
其中 N 为数据个数。

(8) 用最优化方法求 $I(x, \theta)$ 的最大值^[14]。

(9) 以表格或图形方式输出速率函数离散值。

由实测波高数据计算船舶变形的难度很大, 但将它转化为波浪谱就能用上面的公式计算变形。

上面步骤对应的流程为:



在离散情况下, 记 $y = \theta$, 收敛速率函数为:

$$I(x, y) = [yx - \log M(y)] = yx - \log \left[\sum_{k=1}^N e^{y w_k} p_k \right] \quad (18)$$

其中, x 为参数, y 为变量。求上式最大值的步骤为:

(1) 给出 x 的变化范围 $[a, b]$, y 的初值 $y = y_0$, 误差为 δ , 步长为 h 。

(2) 取 $[a, b]$ 区间中一点 $x = a + h_j$, 计算 $I(x, y-h), I(x,$

$y), I(x, y+h)$ 3 个值中的最大值点, 记为 y^* 。

(3) 若 $y^* = y, h < \delta$, 停止计算, 输出最大值点 $y^* = y^*(x)$ 。否则取 $h \rightarrow h/2$ 转步骤(2)。

(4) 若 $y^* = y-h$, 或 $y^* = y+h$, 则取 $y^* \rightarrow y$, 转步骤(2)。

6 船舶变形大偏差实例计算

在某一固定地点, 选取 $M=3000$ 个测量波浪高度值, 如图 2 所示, 利用 MATLAB 中的傅里叶变换模块求出波浪谱密度, 如图 3 所示, 取 $\Delta\omega=0.1, t=0, 1, 0.2, \dots, 100$ 。求出的船舶变形概率分布如图 4 所示。图 2 横轴为时间, 纵轴为波高。由图可知, 波浪高度是随机的, 这种随机波浪对船舶的作用力也为随机的。相应地, 船舶在这种波浪环境下运行的响应也是随机的。

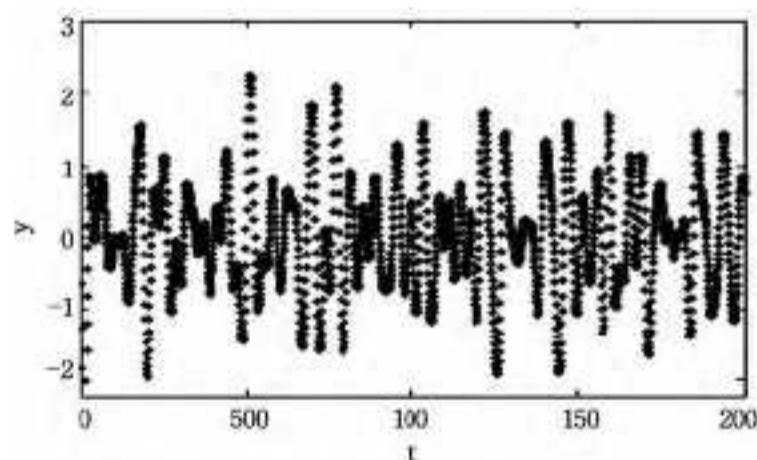


图 2 波高随时间的变化

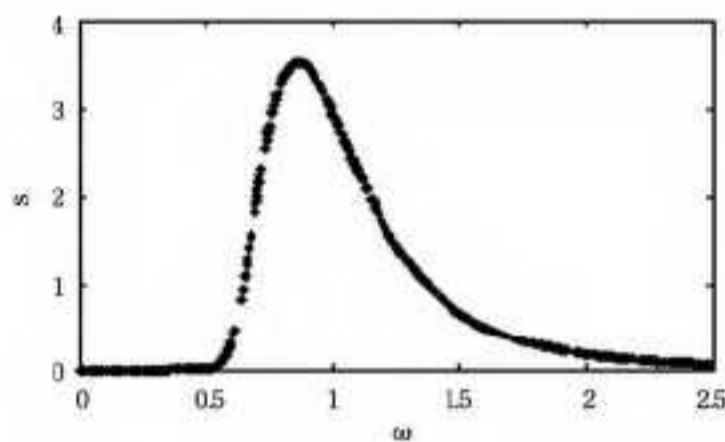


图 3 波浪谱密度

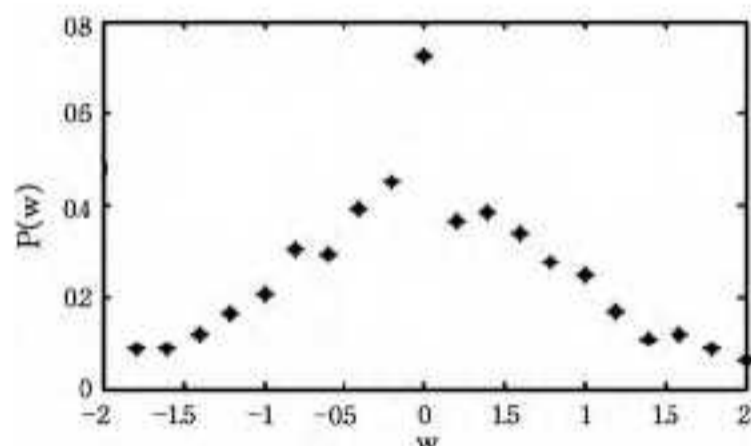


图 4 船舶变形概率分布

图 3 横轴为圆频率, 纵轴为谱密度。由图可知, 谱密度具有一个峰值。当圆频率趋于 0 或趋于无穷大时, 谱密度值趋于 0。

由波浪谱密度可以构造海洋上随机波浪的表达式:

$$y_j = \sum_{n=1}^M A_n \sin(K_n x - \omega_n t_j), j=1, 2, \dots, N_t$$

其中圆频率用随机方法选取, 然后计算出对应的船舶变形时间系列为:

$$w_j = \sum_{n=1}^N H_n u(x, t_j, \omega_n) - \frac{\rho_1}{a} [1 - \cos(at_j)]$$

根据变形数据, 计算出最小值 w_m 和最大值 w_x , 在最小值和最大值之间取 P 个点, 求两点之间的变形数据个数, 再除以总数据个数, 其值为变形发生的频率 $P(w)$, 对应的值绘于图 4, 其中横轴为变形量, 纵轴为频率。在计算中, 参数取值: $L=1; c=0.02; \rho_1=0.03$ 。

由图可知, 在 $w=0$ 点附近, 频率有一高点值, 它对应船

船的小幅变形。在变形取较大值时, 频率不为 0, 说明船舶存在较大幅度的变形。这种较大幅度的变形将引起船体和机械设备损坏。

由变形数据, 计算出频率 p_k , 再求出母函数: $M(\theta) = \sum_{k=1}^N e^{\theta w_k} p_k$ 的数值, 然后用优化方法求出速率函数离散值, 其值绘如图 5 所示。

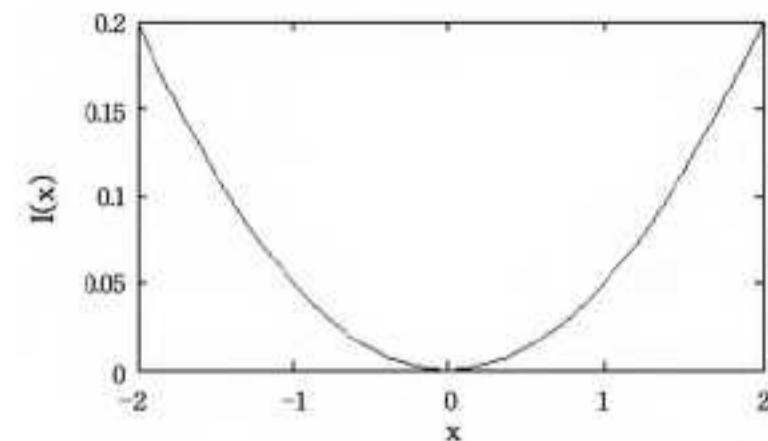


图 5 收敛函数 $I(x)$ 随 x 的变化

7 船舶变形绝对值大偏差计算

由于变形引起船舶的损坏只与变形的绝对值有关, 本节将计算变形绝对值的收敛速率。由于取绝对真值, 计算原理与前面章节略有不同, 对应的定理和推论也亦然。

由随机过程理论, 容易证明引理 1—引理 3。

引理 1 在时刻 t 和 s , 船舶变形 $w(t)$ 和 $w(s)$ 是独立、同分布的随机变量, 则 $|w(t)|$ 和 $|w(s)|$ 也是独立、同分布的随机变量。

引理 2 设船舶变形时间系列 $\{w(t_k)\}$ 是独立、同分布的随机变量, 则它的绝对值时间系列 $\{|w(t_k)|\}$ 也是独立、同分布的随机变量。

定理 3 设船舶变形时间系列 $\{w(t_k)\}$ 是独立、同分布的随机变量, 分布为 P , 取 $y_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |w_n|$, 具有分布 P_n 。若母函数 $M(\theta) = E(e^{\theta|w|})$ 为有限值, 则 $\{P_n\}$ 满足大偏差原理, 且有速率函数:

$$I(x) = \sup_{\theta \in R} [\theta x - \log M(\theta)], x \in R$$

证明: 由于船舶变形时间系列 $\{w(t_k)\}$ 是独立、同分布的随机变量, 分布为 P , 由上面引理可知, 绝对值时间系列 $\{|w(t_k)|\}$ 也是独立、同分布的随机变量。则由大偏差基本定理可知, $y_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |w_n|$, 具有分布 P_n 。又由于母函数 $M(\theta) = E(e^{\theta|w|})$ 为有限值, 则 $\{P_n\}$ 满足大偏差原理, 且有速率函数:

$$I(x) = \sup_{\theta \in R} [\theta x - \log M(\theta)], x \in R$$

证毕。

由上面定理, 得推论 5—推论 7。

推论 5 若 x 和 θ 在有限闭区间集合的并集 F 中取值, 则船舶变形绝对值时间系列速率函数为:

$$I(x) = \max_{\theta \in F} [\theta x - \log(M(\theta))], x \in R$$

证明: 由于 x 和 θ 在有限闭区间集合的并集 F 中取值, 则最大值为上确界值。证毕。

推论 6 若 x 和 θ 在有限闭区间集合的并集 F 中取值, 船舶变形绝对值的概率分布是离散的概率 $p_i, i=1, 2, \dots$, 则船舶变形绝对值时间系列速率函数为:

$$I(x) = \max_{\theta \in F} [\theta x - \log(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\theta w_i} p_i)], x \in R$$

(下转第 98 页)

[3] Swift R A, Batill S M. Application of neural networks to preliminary structural design [C] // Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 32nd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 1991;335-343

[4] Lancaster P, Salkauskas K. Surfaces generated by moving least squares methods [J]. Mathematics of computation, 1981, 37 (155); 141-158

[5] Liu G R, Gu Y T. An introduction to meshfree methods and their programming [M]. Springer Nether Lands, 2005; 1-479

[6] 左传伟, 聂玉峰, 赵美玲. 移动最小二乘方法中影响半径的选取

[J]. 工程数学学报, 2005, 22(5); 833-838

[7] Yuan Z B, Nie Y F, Jie O Y. Adaptive moving least square approximations and its application [C] // Aip Conference Proceedings. 2010; 976-981

[8] 于成龙, 刘莉, 龙腾, 等. 基于优化的改进移动最小二乘代理模型方法 [J]. 航空计算技术, 2013, 43(1); 85-88

[9] 赵钦. 无网格方法应用及影响其求解精度的研究 [D]. 西安, 西安理工大学, 2005

[10] 娄路亮, 曾攀. 影响无网格方法求解精度的因素分析 [J]. 计算力学学报, 2003, 20(3); 313-319

(上接第 63 页)

推论 7 若 x 和 θ 在有限闭区间集合的并集 F 中取值, 船舶变形的概率分布是离散的, 且关于 $w=0$ 对称, 若 $P(W=-w_i)=P(W=w_i)=p_i, i=-N, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$, 则船舶变形绝对值时间系列速率函数为:

$$I(x) = \max_{\theta \in F} [\theta_x - \log(p_0 + \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N e^{\theta w_i} p_i)], x \in R$$

选取图 5 中的数据, 计算出船舶变形绝对值时间系列速率函数绘于图 6, 由图可知, 速率函数的零点不是 $x=0$ 的点, 而是 $x=4$ 附近的点。当 x 小于 4 时, 速率函数迅速上升; 当 $x > 4$ 时, 速率函数上升得慢一些。与上节相比较, 船舶变形绝对值大偏差的收敛值大, 说明考虑绝对真值变形, 船体疲劳效应速度加快。

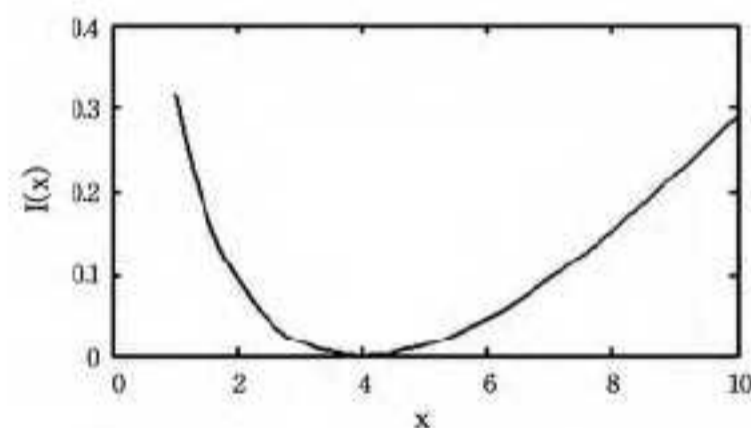


图 6 船舶变形绝对值时间系列速率函数

结束语 根据大偏差理论, 本文研究了大型船舶的变形积累, 得到了流固耦合大偏差计算原理。由实测波浪数据构造波浪谱, 根据波浪谱产生随机海浪, 然后研究波浪与船体的相互作用, 通过数值计算出船舶变形随时间的演化, 最后优化计算船舶变形大偏差。

根据文中公式, 大偏差主要是计算速率函数 $I(w)$ 。文中公式表明, $I(w)$ 的值越大, 对应平均变形量 S 的概率越小。若 $I(w)$ 为 w 的单调上升函数, 则平均变形量越大, 它对应的概率越小。船体疲劳损伤与变形幅度有直接的关系, 大幅值的变形发生的概率越大, 其损伤速度越快。本文研究是为了通过计算船舶大偏差来揭示船体疲劳损伤机理。本文提出的船舶大偏差算法研究了船体疲劳损伤机理。

参 考 文 献

[1] Li Zhi-xiong, Yan Xin-ping, Li Qin, et al. Model reference robust control for marine propulsion systems with model uncertainty caused by hull deformation [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2013, 21(4); 400-409

[2] 严新平, 李志雄, 刘正林, 等. 大型船舶推进系统与船体耦合动力学研究综述 [J]. 船舶力学, 2013, 17(4); 439-449

[3] Roemen R, Grevink J. An advanced approach to the design of shaftlines and bearing arrangements for fast ferries [J]. Wartsila Technical Journal, 2009, 32(1); 47-53

[4] 陈秋丽, 何明, 王琰, 等. 面向海洋监测的水声传感器网络节点定位算法 [J]. 计算机科学, 2015, 42(2); 29-32

[5] Li Zhi-xiong, Yan Xin-ping, Tain Zhe, et al. Blind vibration component separation and nonlinear feature extraction applied to the nonstationary vibration signals for the gearbox multi-fault diagnosis [J]. Measurement, Elsevier, 2012, 46(1); 259-271

[6] Li Y, Zhang C S, Wu R. Ruin estimates of diffusion models under constant interest rate [J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 2003, 19(1); 79-84

[7] Ruan Xiang-kui, Yang Ping, Yan Xin-ping, et al. Study on Hull Deformation at Supports of Propulsion Shaft of a Large Container Ship [C] // The 4th International Conference on Frontiers of Manufacturing and Design Science (ICFMD 2013). HongKong, 2013

[8] Dong Cong-lin, Yuan Cheng-qing, Liu Zheng-lin, et al. Marine Propulsion System Reliability Research Based on Fault Tree Analysis [J]. Advanced Shipping and Ocean Engineering, 2013, 2(1); 27-33

[9] Chen Xin, Li Meng-yu, Zhang She-sheng. A Parallel Algorithm of Non-Linear Fluid-Solid Coupling Problem for Hydrofoil [J]. Journal of Algorithms & Computational Technology, 2014, 8 (3); 249-266

[10] 廖玉麟. 大偏差理论及其应用 [J]. 长沙铁道学院学报, 1987(1); 15-25

[11] Gao Fu-qing, Ren Jia-gang. Large deviations for stochastic flows and their applications [J]. Science in China Series A, 2001, 44: 1016-1033

[12] Schulten P. The Interaction between diesel engine, ship and propeller during maneuvering [D]. Netherlands; Technische Universiteit Delft, 2005

[13] Chen Xin, Zhou Xin-cong, Zhang She-sheng, et al. A numerical fluid-solid coupling model for the dynamics of ships in atrocious sea conditions [J]. Journal of Algorithms & Computational Technology, 2015, 9(2); 163-175

[14] 国冰磊, 于炯, 廖彬, 等. SQL 能耗建模及优化研究 [J]. 计算机科学, 2015, 42(10); 202-207