

文章编号: 1005-9865(2001)01-0014-05

海洋导管架平台随机响应混合分析方法^{*}

金伟良, 郑忠双, 邹道勤, 李海波

(浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 采用将结构的解析分析和数值求解方法相结合的固定式海洋平台随机响应混合求解方法, 考虑波浪-结构相互作用和基于最小二乘法原理的非线性曳力的影响。采取两个步骤, 第一步进行与结构有关的特征值分析; 第二步基于谱方程进行响应估计, 进行海洋平台的线性和非线性数值分析。

关键词: 海洋平台; 随机响应; 非线性曳力; 波浪-结构相互作用; 混合分析方法

中图分类号: P751; O 324 **文献标识码:** A

Hybrid method for stochastic response analysis of offshore platform structures

J N Wei-liang, ZHENG Zhong-shuang, ZOU Dao-qin, LI Hai-bo

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A hybrid solution combined with analytical and numerical methods is proposed to compute the stochastic response of the fixed offshore platforms to random wave, taking into account of wave-structure interaction and non-linear drag force on the basis of a least-squares procedure. The program is developed using two steps: the first is eigenanalysis, which is related to the structure, and the second is response estimation based on spectral equations. The numerical analysis is carried out for both linear and non-linear platform motions.

Key words: offshore platform; stochastic response; non-linear drag force; wave-structure interaction; hybrid analysis

当前“深海”的概念已不是 80 年代而言的深海, 导管架平台已向张力腿平台发展, 但动力分析依然是需要的。对深水平台设计而言, 由于平台的固有周期变得越来越接近于海洋周围环境的周期, 因此, 动力响应特性更为明显, 浅水区采用的静力或者准静力分析方法将不再适用。海洋平台及其相关构件(如升降梯)柔性增加, 要求设计者考虑更严格的动力响应分析; 只有通过环境荷载效应的深入理解, 特别是来自波浪水动力的影响, 才能确保海洋平台设计的可靠性和有效性。

许多有关深水海洋平台结构动力响应分析的研究, 都是基于线性波浪理论, 因为它能对高斯随机海况的波浪运动提供合理的近似(Borgman; Malhorta and Penzien; Berge and Penzien; Chang and Tung)^[1, 2, 3, 9]。然而, 从高斯自由表面波高出发, 已经观察到海洋波浪的非线性特性(Dunwoody; Spidsoe and Hilmansen; Marthinsen and Winterstein)^[8]。通过海洋平台的自然频率研究, 发现结构系统的刚度非常接受线性(Langen and Spidsoe)。因此, 非高斯响应的来源可能是波浪运动过程和水动力作用机理。

本文提出了基于结构分析和数值求解的固定式海洋平台随机响应混合求解方法, 考虑了波浪-结构相互作用和非线性曳力的影响, 并进行了海洋平台的线性和非线性数值分析。

^{*} 收稿日期: 2000-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59805410; 59779002)

作者简介: 金伟良(1961-), 男, 浙江杭州人, 教授, 主要从事海洋工程、结构工程方面的研究。

1 基本理论

1.1 波浪运动

随机波浪是由无限多个带随机相角的 A iry 波组成, 随机海浪中的流体质点速度和加速度如下:

$$u(z, t) = H_u(\omega, z) \eta(t) \quad (1)$$

$$a(z, t) = H_u(\omega, z) \dot{\eta}(t) \quad (2)$$

$$H_u(\omega, z) = \frac{\omega \cosh(kz)}{\sinh(kh)} \quad (3)$$

式中: h 是水深; $\eta(t)$ 和 $\dot{\eta}(t)$ 分别是波浪高程及其导数; 且频率 ω 和波数 k 满足下列色散方程

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (4)$$

从方程(1)和(2), 可知波浪水平速度和加速度是均值为零的、遍历的稳态过程, 其各自的互相关谱密度可表示为:

$$S_{uu}(z, \omega) = \omega^2 \frac{\cosh(kz_1) \cosh(kz_2)}{\sinh^2(kh)} S_m(\omega) \quad (5)$$

$$S_{ua}(z, \omega) = i\omega^3 \frac{\cosh(kz_1) \cosh(kz_2)}{\sinh^2(kh)} S_m(\omega) \quad (6)$$

$$S_{au}(z, \omega) = -S_{ua}(z, \omega) \quad (7)$$

$$S_{aa}(z, \omega) = \omega^4 \frac{\cosh(kz_1) \cosh(kz_2)}{\sinh^2(kh)} S_m(\omega) \quad (8)$$

式中: $S_{uu}(z, \omega)$ 是速度自谱; $S_{au}(z, \omega)$ 和 $S_{ua}(z, \omega)$ 是速度和加速度互谱; $S_{aa}(z, \omega)$ 是加速度自谱; $S_m(\omega)$ 代表通常海洋平台设计所用的单边波浪谱, 如 Pierson- Moskowitz 或 JON SWAP 波浪谱模型。

1.2 波浪力模型

对海洋平台结构, 考虑到波浪- 结构相互作用时的相对运动, 则 Morison 波浪力可描述成如下形式 (Bendat and Piersol)^[7]

$$f(z, t) = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} a(z, t) - (C_M - 1) \rho \frac{\pi D^2}{4} \ddot{x}(z, t) + C_D \frac{\rho}{2} D r(z, t) |r(z, t)| \quad (9)$$

式中: C_M 是惯性力系数; C_D 是曳力系数; ρ 是流体密度; D 是圆柱直径; z 是竖向坐标变量; t 代表时间; $a(z, t)$ 是流体质点加速度; $\ddot{x}(z, t)$ 是海洋平台结构加速度; $r(z, t)$ 表示流体和海洋平台结构之间的相对速度, 即:

$$r(z, t) = u(z, t) - \dot{x}(z, t) \quad (10)$$

方程(8)中非线性项 $r(z, t) |r(z, t)|$ 由 Dunwoody 和 Bendat^[7] 及 Bendat 和 Piersol^[7] 所采用的三次多项式最小二乘方法所似表达为:

$$r(z, t) |r(z, t)| = \sigma_r(z) \sqrt{\frac{2}{\pi}} r(z, t) + \frac{1}{3\sigma_r(z)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} r^3(z, t) \quad (11)$$

式中: σ_r 是相对速度 $r(t)$ 的均方根。

2 谱响应的混合分析

海洋平台结构的运动偏微分方程可表示为

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F \quad (12)$$

式中: M 、 C 和 K 分别是结构质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别是结构加速度、速度和位移向量; F 是按照 Morison 方程计算的波浪力向量。

$$F = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} a - \rho (C_M - 1) \frac{\pi D^2}{4} \ddot{x} + \frac{\rho}{2} C_D D \frac{1}{3\sigma_r} \sqrt{\frac{2}{\pi}} (3\sigma_r^2 r + r^3) \quad (13)$$

方程(12)可通过引入下列形式的正则坐标变换

$$x = \varphi(z) Y_j(t) \quad (14)$$

式中: $\varphi(z)$ 是第 j 阶无阻尼振型; $Y_j(t)$ 是相应的第 j 阶振幅。代入方程(12)、方程(13), 可求第 i 阶正则方程

$$M_i \ddot{Y}_i + C_i \dot{Y}_i + K_i Y_i = F_{Ti}(t) + F_{Di}(t) \quad (15)$$

式中: M_i 、 K_i 和 C_i 分别是广义质量矩阵、广义刚度矩阵和广义阻尼矩阵, $i = 1, 2, \dots, N$,

$$M_i = \int_0^h \rho (m_s + m_a) \Phi_i^2 dz \quad (16)$$

$$C_i = 2\xi_i \omega_i M_i \quad (17)$$

$$K_i = \omega_i^2 M_i \quad (18)$$

式中: m_s 是结构质量; m_a 是附加水动质量; ω_i 是第 i 阶模态频率。广义惯性力和曳力可按如下表示

$$F_{Ti}(t) = \int_0^h P_i(z) \ddot{u}(z, t) dz \quad (19)$$

$$F_{Di}(t) = \int_0^h Q_i(z) \left[r(z, t) + \frac{r^3(z, t)}{3\sigma^2(z)} \right] dz \quad (20)$$

式中: h 是水深, 且

$$P_i(z) = \Phi_i(z) C_M \rho \frac{\omega_i^2}{4} \quad (21)$$

$$Q_i(z) = \Phi_i(z) C_D \frac{\rho}{2} \omega_i \sqrt{\frac{2}{\pi} \sigma_r} \quad (22)$$

通过在正则运动方程两边乘以各自的相应共轭项, 就可获得最后以期望值形式表示的运动方程。通过引入高斯闭合近似方法, 用低阶矩的组合代替来减小统计矩的阶次。谱响应方程的最后形式可表示为

$$S_{YY}(\omega) = H^*(\omega) [S_{II}(\omega) + S_{ID}(\omega) + S_{DI}(\omega) + S_{DD}(\omega) + S_{D3}(\omega)] H(\omega) \quad (23)$$

式中: $S_{YY}(\omega)$ 是广义位移 Y 的响应幅谱; ω 是圆频率 (rad/s); $H(\omega)$ 是复频率响应函数; $H^*(\omega)$ 是 $H(\omega)$ 共轭复数; 下标 I 表示惯性力, 下标 D 表示曳力。波浪以五个谱项组成的形式表示, $S_{II}(\omega)$ 是惯性力项, $S_{ID}(\omega)$ 和 $S_{DI}(\omega)$ 是惯性力与一次曳力的互谱项, $S_{DD}(\omega)$ 是一次曳力项, $S_{D3}(\omega)$ 代表三次曳力校正项。

另外

$$H_i(\omega) = \frac{1}{(k_i - \omega_i^2 M_i) - j\omega[C_i + C_{wi}(\omega)]} \quad (24)$$

$$C_{wi} = 2 \int_0^h Q_i(z) \Phi_i(z) dz \quad (25)$$

$$S_{II}(\omega) = \int_0^h \int_0^h P_i(z_1) P_i(z_2) S_{aa}(\omega) dz_1 dz_2 \quad (26)$$

$$S_{ID}(\omega) = 2 \int_0^h \int_0^h P_i(z_1) Q_j(z_2) S_{au}(\omega) dz_1 dz_2 \quad (27)$$

$$S_{DI}(\omega) = 2 \int_0^h \int_0^h Q_i(z_1) P_j(z_2) S_{ua}(\omega) dz_1 dz_2, \quad (28)$$

$$S_{DD}(\omega) = 4 \int_0^h \int_0^h Q_i(z_1) Q_j(z_2) S_{uu}(\omega) dz_1 dz_2 \quad (29)$$

$$S_{D3} = \frac{2}{3} \int_0^h \int_0^h \frac{Q_i(z_1) Q_j(z_2)}{\sigma_r^2(z_1) \sigma_r^2(z_2)} S_{rr}^{*3}(\omega) dz_1 dz_2 \quad (30)$$

式中: $C_{wi}(\omega)$ 是频率相关水动力阻尼, 式(24)的 j 等于 $\sqrt{-1}$; 方程(30)中最后一项表示相对运动速度谱的三重卷积。除了上述所列的方程外, 为获得求解结果, 需要下列方程:

$$\sigma_r^2(z) = \int_0^h S_{rr}(\omega) d\omega \quad (31)$$

$$S_{rr}(\omega) = S_{uu}(\omega) - j\omega \int_0^h \Phi_i(z) [S_{uy_k}(\omega) - S_{yu}(\omega)] + \omega^2 \int_0^h \Phi_i(z) \Phi_m(z) S_{y_i y_m}(\omega) \quad (32)$$

$$S_{yu}(\omega) = H_i(\omega) \int_0^h [2Q_i(z) - j\omega P_i(z)] S_{ua}(\omega) dz \quad (33)$$

$$S_{uy}(\omega) = H_i^*(\omega) \int_0^h [2Q_i(z) - j\omega P_i(z)] S_{ua}(\omega) dz \quad (34)$$

式中: S_{rr} 表示相对速度自谱; S_{yu} 和 S_{uy} 是广义位移 Y 和流体质点速度 u 之间的互谱。

广义响应谱 $S_{YY}(\omega)$, 可以直接从方程(23)求解就能获得。最后, 不同位置处的转换响应谱就可从下列方程求得:

$$S_{xx}(z, \omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Phi_i(z) \Phi_j(z)$$

(35)

位移响应的方差可按式获得:

$$\sigma_{xx}^2 = \int S_{xx}(\omega) d\omega$$

(36)

峰值位移响应的期望值按下式给出:

$$Z_{peak} = \mu \sigma_{xx} = \sigma_{xx} \left(\sqrt{2 \ln \nu T} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln \nu T}} \right)$$

(37)

式中: T 是波浪持续时间; ν 按下式给出

$$\nu = \left\{ \frac{\omega^3 S_{xx}(\omega) d\omega}{S_{xx}(\omega) d\omega} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(38)

以上公式的计算求解分两步来完成, 第一步进行与结构有关的特征值分析; 第二步基于谱方程进行响应估计, 结构通常模拟为一个多自由度的无阻尼振子, 以确定其自然频率和振型。用此信息, 并假定所需要每一模态的临界阻尼值, 就可形成 Rayleigh 型的阻尼矩阵。在求解的第二部分, 获得结构响应的迭代解。这个部分综合了本文所列的方程; 当引入曳力的多项式近似的三次项时, 需要进行三重卷积估计。

3 应用数值算例

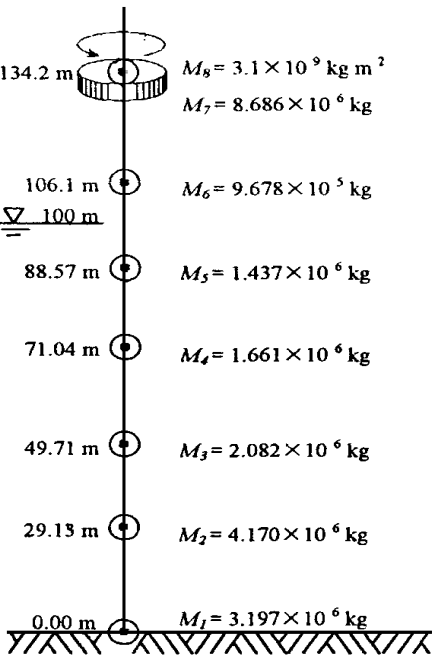
通常海洋平台结构可离散为一系列有限单元的集合。图 1 所示的海洋平台模拟为一维等效集中质量模型, 其第一阶频率等于 3.37rad/s, 相应的模态阻尼等于 5% 临界值, 并且考虑了海洋平台甲板的扭转影响。采用本文所提的方法, 分析了图 1 所示海洋平台结构随机波浪载荷作用下海洋平台的线性响应分析 (仅考虑方程 (10) 中的一阶项) 结果见图 2 和图 3, 并考察了不同振型对随机响应结果的贡献。由此, 可知一阶模态对随机响应的结果起主要贡献作用。比较图 2 和图 3, 发现海水中平台构件的位移响应大于平台甲板位移响应。响应谱有两个典型峰值。第一个峰值相对应于波浪谱的峰值, 而第二个峰值则接近于海洋平台的固有频率。图 4 和图 5 显示了非线性响应谱和线性响应谱。从图 4 和图 5 可以发现, 当考虑三次曳力项时, 其响应值大于仅考虑一次曳力项时的响应值。

表 1 列出了平台甲板的位移均方根响应和峰值位移响应值。线性与非线性均方根位移响应的最大误差是 11.27%, 峰值位移响应 11.22%。海况越严重, 响应越大; 海况 4 的响应是海况 1 的 15 倍。

表 1 平台甲板均方根位移响应和峰值位移响应

Tab. 1 Offshore deck s.r.m.s displacement response and peak displacement response value

工况	海 况		均方根 (r.m.s) 位移响应			峰值位移响应 (mm)		
			(mm)			(-) / %		
	$H_s(m)$	$T_s(s)$	linear	non-linear	(-) / %	linear	non-linear	(-) / %
1	11.4	15.4	18.9	20.1	6.35	46.49	49.42	6.30
2	7.9	10	7.1	7.9	11.27	17.47	19.43	11.22
3	7.5	9	5.1	5.6	9.80	12.55	13.78	9.80
4	4	7.1	1.2	1.3	8.33	2.95	3.20	8.47



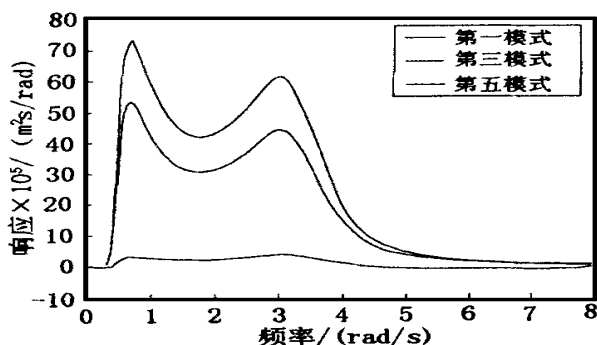


图2 高程134.2m处的甲板线性位移响应谱

Fig.2 Deck's linear displacement response spectrum at elevation 134.2m

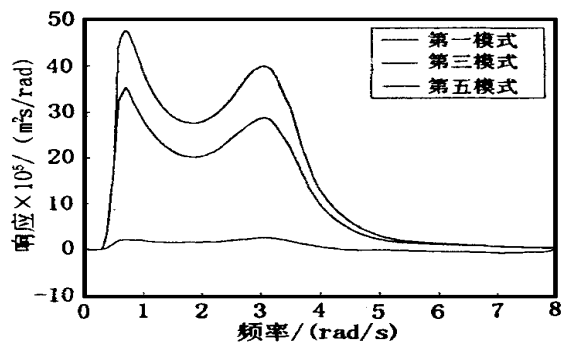


图3 高程88.57m处的构件线性位移响应谱

Fig.3 Components' linear displacement response spectrum at elevation 88.57m

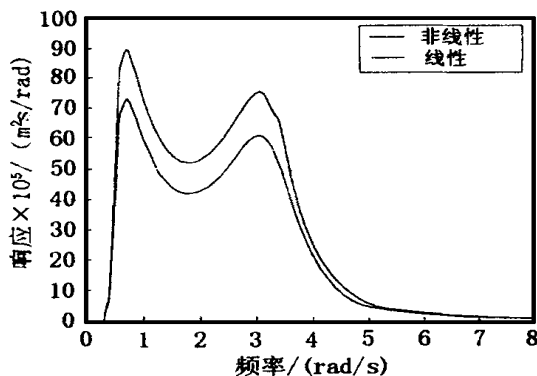


图4 高程134.2m处的甲板线性与非线性位移响应谱

Fig.4 Deck's nonlinear response spectrum in contrast to linear response at elevation 134.2m

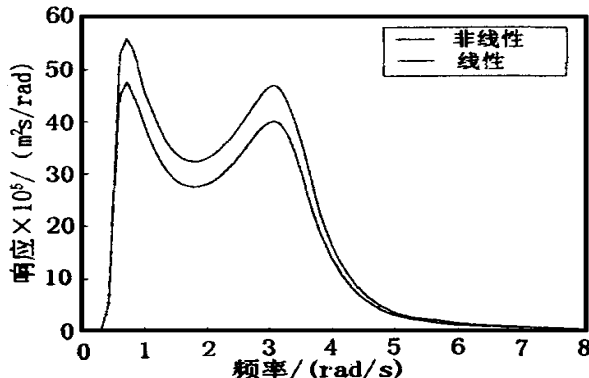


图5 高程88.57m处的构件线性与非线性位移响应谱

Fig.5 Components' nonlinear response spectrum in contrast to linear response at elevation 88.57m

4 结 语

本文结合结构分析和数值求解的固定式海洋平台随机响应混合求解方法,并且考虑了波浪-结构相互作用和非线性曳力的影响,进行了实际海洋平台的随机响应分析,数值结果表明随机分析方法是合理的、可行的。由本文的分析结果,可得出如下结论:

- 1) 一阶模态对海洋平台的结构响应起主要贡献;
- 2) 海洋平台结构的响应谱有两个典型峰值,第一个对应于波浪谱的峰值,第二个峰值对应于平台结构的基本频率;
- 3) 海洋平台浸于水中的构件的响应值大于甲板的响应值;
- 4) 海洋平台结构的非线性响应值大于线性响应值;
- 5) 海况越严重,平台结构的响应也越大。

参考文献:

- [1] Malhorta A K, Penzien J. Response of offshore structures to random wave forces [J]. J. Struct. Div., ASCE, 1970, 2155-2173
- [2] Penzien J, Kaul M K, Berge B. Stochastic response of offshore towers to random sea waves and strong motion earthquake [J]. J. Computers and Structures, 1972, 733-756
- [3] Berge B, Penzien J. Three-dimensional stochastic response of offshore towers to wave forces [J]. OTC 2050, 1974, 173-190
- [4] Clough R W, Pensien J. Dynamic of structures [M]. McGraw Hill Book Co., Inc., New York, 1974
- [5] Godeau A J, Deleuil G E, Doris C G, et al. Statistical analysis of nonlinear dynamic response of fixed structures to random waves, fatigue evaluation [J]. OTC 3030, 1977, 493-502

(下转第37页)

径, 低频区的波高可明显地减小。

4) 外壁透空圆柱上的波浪力存在一快速下降区, 下降区对应的波浪频率随内外柱半径比的减小而增大, 但内外径之比的大小对最大波浪力的影响不大。

参考文献:

- [1] Chwang A T, Chan A T. Interaction between porous media and wave motion [J]. *Annu Rev. Mech.*, 1998, 30: 53-84
- [2] Yang G. Numerical model of wave effects on permeable vertical barriers above the seabed [D]. M A Sc thesis, Dept of Civil Engrg, University of British Columbia, Vancouver, Canada 1996
- [3] Twu S W, Lin D T. Wave reflection by a number of thin porous plates fixed in a semi-infinitely long flume [A]. *Proceedings of the 22nd Coastal Engineering Conference [C]*. ASCE, Delft, The Netherlands, 1990, 1046-1059
- [4] Madsen O S. Wave transmission through porous structures [J]. *Jour. Wtrwy. Harb. and Coast. Engrg. Div.*, ASCE 1974, 102(1): 169-188
- [5] Zhu S, Chwang A T. Performance of a caisson-type porous wave absorber [A]. *Proc. of Int. Hydrodynamics [C]*. Seoul 1998, 2: 913-918
- [6] Chwang A T. A porous wave maker theory [J]. *Jour. of Fluid Mech.*, 1983, 132: 395-406
- [7] Dalrymple R A, Martin P A. Wave diffraction through offshore breakwaters [J]. *Jour. Wtrwy. Harb. and Coast. Engrg.*, ASCE 1990, 116: 727-741
- [8] Yu X P. Diffraction of water waves by porous breakwaters [J]. *Jour. Wtrwy. Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE 1995, 121(6): 275-282
- [9] 吴建华, 万卓培, 方颖. 水平多孔板导致之近岸陷波[J]. *水动力学研究与进展*, 1998, 13(1): 49-58
- [10] Sollitt C K, Cross R H. Wave transmission through permeable breakwaters [A]. *Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference [C]*. ASCE, Vancouver, B. C., Canada 1972, 1827-1846
- [11] Dalrymple R A, Losada M A, Martin P A. Reflection and transmission from porous structures under oblique wave attack [J]. *Jour. Fluid Mech.*, 1991, 224: 625-644

(上接第 18 页)

- [6] Sigbjørnsson R, Mørch M. Spectral analysis of nonlinear wave load effects on offshore platforms [J]. *Eng. Struct.*, 1982, 29-36
- [7] Bendat J S, Piersol A G. Decomposition of wave forces into linear and non-linear components [J]. *J. Sound Vibration*, 1986, 106(3): 391-408
- [8] Spidsoe N, Brathaug, H P, Skjstad O. Nonlinear random wave loading on fixed offshore platforms [J]. *OTC 5101*, 1986, 193-191
- [9] Chang M T, Tung C C. An approximate method for dynamic analysis of offshore structures to wave action [J]. *Eng. Struc.*, 1990, 10-123
- [10] Sant E W, Niedzwecki J M. Response of flexible structures in random seas [J]. *Eng. Struct.*, 1990, 12, 279-284
- [11] Kareem A, Hsieh C C, Tognarelli M A. Frequency-domain analysis of offshore platform in non-gaussian seas [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 668-683
- [12] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995
- [13] 钟应华. 固定式海洋平台结构动力及随机响应分析[J]. *海洋工程*, 1997, 15(2): 1-11
- [14] 钱江, 王秀喜. 导管架平台非线性随机响应分析[J]. *海洋工程*, 1992, 10(1): 10-19