

文章编号 : 1005-9865 (2009) 02-0054-04

## 基于海洋结构谱响应波浪载荷参数识别

李少华<sup>1,2</sup>, 聂雪媛<sup>2</sup>, 时忠民<sup>3</sup>, 刘玉军<sup>4</sup>, 龙述尧<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 力学与航空航天学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 3. 中海石油研究中心, 北京 100027; 4. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518067)

**摘要:**波浪谱是研究随机波浪的主要方法,也是海洋工程设计的重要依据。介绍在线性波情况下圆柱形结构响应施加了白噪声之后频域内的载荷识别方法,根据谱分析的方法,考虑线性波前后桩腿相位差的影响,比较单个频点反演与采样频率内利用对频率取矩法反演结果的准确度,结果表明在已知波浪谱的情况下利用矩来进行反演识别有明显的优越性。

**关键词:**载荷识别;波浪谱;Morison 方程;频域;海洋结构

**中图分类号:**P752 **文献标识码:**A

### Identification of wave force parameters based on spectral response of offshore structures

LI Shao-hua<sup>1,2</sup>, NIE Xue-yuan<sup>2</sup>, SHI Zhong-min<sup>3</sup>, LIU Yu-jun<sup>4</sup>, LONG Shu-yao<sup>1</sup>

(1. College of Mechanics and Aerospace, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Research Center, Ocean Oil Co., Beijing 100027, China; 4. Shenzhen Branch of Ocean Oil Co., Shenzhen 518067, China)

**Abstract:** Wave spectrum is not only the main method of studying random wave but also the important basis of ocean engineering's design. This paper presents the identification method of force parameters under the circumstance of linear wave theory in frequency domain through applying white noise to the cylindrical structural response. According to the method of spectral analysis, the effect of phase difference between the foremost and following legs about the linear wave is considered. The precision of the two identification methods is also compared between the single frequency and the quadrature about the frequency in the sampling frequency. The result shows that the identification method through the quadrature about the frequency has an obvious advantage on the condition that wave spectrum is known.

**Key words:** force identification; wave spectrum; Morison equation; frequency domain; offshore structures

海上结构物的波浪力计算分为两种:对于相对尺度大(结构物的特征尺寸与波长相比)的结构物,波力计算采用绕射理论或弗汝德—克雷洛夫假定;对于相对尺度小的结构物,波力计算采用莫里森方程<sup>[1]</sup>。而莫里森方程计算波浪力关键在于波浪理论和相应的拖曳力系数和惯性力系数的选取,对于复杂的结构物(例海洋平台)还有遮蔽系数、波浪运动系数和海流阻挡系数等等<sup>[2]</sup>。而规范中这些系数的选取多采用国外的标准,并不能确切反应出具体海况的实际情况,要准确测出这些参数并不容易,因此采用载荷识别的办法准确反演出这些参数有重要的现实意义。载荷识别分时域法和频域法两种<sup>[3]</sup>,对于随机海浪分析,常用谱分析的方法即频域里的方法进行分析计算。频域内利用不同频点反演的结果,由于结构的本身特性、傅里叶变换等种种因素的存在,导致在不同频点产生不同的反演结果,在有些频点误差过大甚至会出现错误的结果,而利用对频率取矩<sup>[4]</sup>的方法来进行反演识别,则避免了这种情况的出现。通过在响应上施加白噪声来模拟实际情况,

收稿日期:2008-08-07

作者简介:李少华(1980-),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事海洋平台波浪载荷参数识别研究。

通过不同频点的识别结果和利用矩的方法所得识别结果的对比,表明在具体激励频率不明确或已知波浪谱的情况下利用矩来识别有明显的优越性。

### 1 动力学方程

直至目前为止,在工程设计中作用在细长柱体上的波浪力计算仍广泛采用 Morison 方程:

$$P = \frac{1}{2} C_D A (u - \dot{x}) | u - \dot{x} | + C_M V \ddot{u} - C_m V \ddot{x} \tag{1}$$

式中:  $P$  是单位长度桩柱上的水平波浪力,  $C_D$ 、 $C_M$  和  $C_m$  分别是拖曳力系数、质量系数(惯性力系数)和附加质量系数,  $u$  和  $\dot{u}$  分别是该段桩柱处(离海底以上高度  $z$ ) 波浪水质点的水平速度和水平加速度,  $\dot{x}$  和  $\ddot{x}$  分别为该段桩柱的水平速度和水平加速度,  $\rho$  为海水密度,  $A$  表示该段桩柱垂直于波向的投影面积(对于圆柱形桩柱,  $A = 1 \times D$ ,  $D$  为桩柱直径),  $V$  为该段桩柱排水体积(对于圆形桩柱,  $V = 1 \times D^2/4$ )。当圆柱形结构的振动速度与加速度较小时 ( $\dot{x} \ll u$  和  $\ddot{x} \ll \ddot{u}$ )<sup>[5]</sup>, 将  $A$  与  $V$  代入式(1)得:

$$P = \frac{1}{2} C_D D u | u | + \frac{1}{4} C_M D^2 \ddot{u} \tag{2}$$

式中:  $u$  和  $\dot{u}$  是根据波浪海况条件(波浪周期  $T$ 、水深  $d$ 、波高  $H$ 、波长  $L$  等)来选取适宜的波浪理论(见表 1), 选定波浪理论后就确定下来相应的  $u$  和  $\dot{u}$ 。在用海浪谱进行计算时,须对拖曳力项进行线性化处理可得:

$$P = \frac{1}{2} C_D D \sqrt{\frac{8}{\pi}} u u + \frac{1}{4} C_M D^2 \ddot{u} \tag{3}$$

式中:  $u$  为水质点水平速度的标准差,  $u = \sqrt{\int_0^d S_u(\omega) d\omega}$ 。

则对于简单(只须考虑拖曳力系数和惯性力系数)结构,结构的动力方程可表示为:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = F(C_D, C_M, t) \tag{4}$$

式中:  $M$ 、 $C$  和  $K$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,  $F(C_D, C_M, t)$  是式(2)的等效结点载荷(按有限元中分布载荷等效为结点载荷的处理方法<sup>[6]</sup>)。如果载荷函数是波面方程的函数,那么可以进一步表示为<sup>[7]</sup>:

$$F(C_D, C_M, t) = A(C_D, C_M) \eta(t) \tag{5}$$

式中:  $A(C_D, C_M)$  为  $C_D$ 、 $C_M$  和高度  $z$  的函数,  $\eta(t)$  为波面方程。

表 1 波浪理论的适用范围

Tab. 1 The application scope for wave theories

满足的条件	采用的波理论
$T \sqrt{g/d} < 6.0$ (相当于 $d/L > 0.2$ ), $H/d < 0.2$	采用线性波理论
$T \sqrt{g/d} = 10.0$ (相当于 $d/L = 0.1$ )	采用斯托克斯五阶波理论
$T \sqrt{g/d} > 10.0$ (相当于 $d/L < 0.1$ )	采用椭圆余弦波理论

### 2 频域内参数识别方法

把式(4)两边进行傅里叶变换可得:

$$(-M \omega^2 + i C \omega + K) X(\omega) = A(C_D, C_M) \eta(\omega) \tag{6}$$

即  $X(\omega) = (-M \omega^2 + i C \omega + K)^{-1} A(C_D, C_M) \eta(\omega) = H(\omega) A(C_D, C_M) \eta(\omega) \tag{7}$

则响应谱与波浪谱之间的关系可写为:

$$S_u = H(\omega) A(C_D, C_M) \bar{A}^T(C_D, C_M) \bar{H}^T(\omega) S \tag{8}$$

式中:  $\bar{A}^T$  与  $\bar{H}^T$  分别是  $A$  和  $H$  的转置共轭。

如果已知波浪谱  $S$  和结构的频响函数  $H(\omega)$ , 要反演出这  $C_D$ 、 $C_M$  两个参数只需要测得两个响应(要有一定的时间间矩)如  $X_1(t)$  和  $X_2(t)$ , 把他们进行离散傅里叶变换得  $X_1(\omega)$  和  $X_2(\omega)$ , 然后代入式(8)中, 分别取不同的频率  $\omega$ , 建立方程组:

$$\begin{cases} \frac{1}{T} X_1(\omega) \bar{X}_1(\omega) = [H(\omega) A(C_D, C_M) \bar{A}^T(C_D, C_M) \bar{H}^T(\omega) S]_{1 \times 1} \\ \frac{1}{T} X_2(\omega) \bar{X}_2(\omega) = [H(\omega) A(C_D, C_M) \bar{A}^T(C_D, C_M) \bar{H}^T(\omega) S]_{2 \times 2} \end{cases} \tag{9}$$

来求解,可求得  $C_D$ 、 $C_M$ 。式中  $T$  为采样周期,下标  $1 \times 1$  表示矩阵中的第一行第一列对应的元素,下标  $2 \times 2$  同理。由于在采样频率内采用不同频点的来建立方程组求解,可得到有不同误差的  $C_D$ 、 $C_M$  结果,甚至在有的频点求得结果就是错误的,为避免这种情况的发生,利用采样频率内对频率取矩的方法来进行识别反演,把式(9)两边对频率 取矩得:

$$\begin{cases} \int_0^T \frac{1}{T} X_1(\omega) \bar{X}_1(\omega) d\omega = \int_0^T [H(\omega) A(C_D, C_M) \bar{A}^T(C_D, C_M) \bar{H}^T(\omega) S] J_{1 \times 1} d\omega \\ \int_0^T \frac{1}{T} X_2(\omega) \bar{X}_2(\omega) d\omega = \int_0^T [H(\omega) A(C_D, C_M) \bar{A}^T(C_D, C_M) \bar{H}^T(\omega) S] J_{2 \times 2} d\omega \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\omega$  为采样频率。

### 3 线性波前后桩柱相位差的处理

对于线性波式(3)可表示为:

$$P = A \cos(kx - \omega t) + B \sin(kx - \omega t) \quad (11)$$

式中:  $k$  为波数,  $A = \frac{1}{2} C_D D \sqrt{\frac{8}{u}} \frac{\text{ch} k z H}{\text{sh} k d 2}$ ,  $B = \frac{1}{4} C_M D^2 \frac{\text{ch} k z H}{\text{sh} k d 2}$ 。

则前一桩腿(假定  $x=0$  处)  $P$  的傅里叶变换为:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_1 &= A \int_0^T \cos(-\omega t) e^{-i \omega t} dt + B \int_0^T \sin(-\omega t) e^{-i \omega t} dt \\ &= \frac{A}{2} (e^{-i \omega t} + e^{i \omega t}) e^{-i \omega t} dt + \frac{B}{2i} (e^{i \omega t} - e^{-i \omega t}) e^{-i \omega t} dt \end{aligned} \quad (12)$$

后一桩腿( $x$  处)  $P$  的傅里叶变换为:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_2 &= A \int_0^T \cos(kx - \omega t) e^{-i \omega t} dt + B \int_0^T \sin(kx - \omega t) e^{-i \omega t} dt \\ &= \frac{A}{2} (e^{i(kx - \omega t)} + e^{-i(kx - \omega t)}) e^{-i \omega t} dt + \frac{B}{2i} (e^{i(kx - \omega t)} - e^{-i(kx - \omega t)}) e^{-i \omega t} dt \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $\tau = x/c$ ,  $c$  为波速。令  $-\omega t = -s$  作代换可得:

$$\tilde{P}_2 = \frac{A}{2} (e^{-is} + e^{is}) e^{-i(s+\omega\tau)} ds + \frac{B}{2i} (e^{-is} - e^{is}) e^{-i(s+\omega\tau)} ds = e^{-i\omega\tau} \tilde{P}_1 = e^{-ikx} \tilde{P}_1 \quad (14)$$

图 1 给出了随着桩柱间距增大考虑相位差与不考虑相位差的区别。横坐标为桩柱间距  $x$ (如图 2 所示结构,前后桩柱间距分别取 15 m、25 m、35 m、45 m、55 m、65 m) 与波浪谱(图 3 所示) 峰值频率对应的波长  $L$  之比,纵坐标为 1 结点水平方向考虑相位差与不考虑相位差的响应谱之差的绝对值在整个频域上的积分与各自考虑相位差载荷峰值对应响应谱值  $A$  之比。其它材料性质及波浪条件见计算算例。从图 1 中可以看出随着间距的增大,不考虑相位差误差是逐渐增大的。

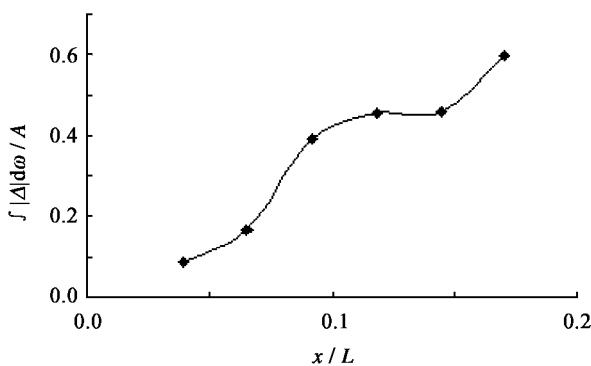


图 1 考虑相位差与不考虑相位差的响应谱误差随桩腿间距变化情况

Fig. 1 The error of response spectrum varying with the distance of legs with and without phase difference

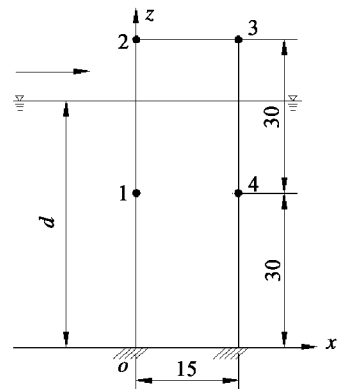


图 2 算例结构

Fig. 2 The example structure

### 4 计算算例

如图 2 所示导管架,外径为 1.64 m,壁厚 0.5 m,弹性模量  $EI = 2.1 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,密度  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ,水深  $d = 48 \text{ m}$ ,波浪有效周期  $T = 11.6 \text{ s}$ ,有效波高  $H = 9.2 \text{ m}$ 。由周期计算得到的波长  $L = 156.5 \text{ m}$ ,  $D/L = 0.01 < 0.2$ ,满足 Morison 方程的适用条件。 $T \sqrt{g/d} = 5.24 < 6.0$ ,  $H/d = 0.192 < 0.2$ ,满足线性波的适用范围。波浪谱取中国国家科委海洋组海浪预报方法研究小组提出的被中国交通部港口工程技术规范所采用的规范谱(为理论计算,不考虑波谱的适用性),如图 3 所示。

由于是数值计算,须先算得要测的响应,在正算过程中取拖曳力系数  $C_D = 1.2$ ,惯性力系数  $C_M = 2.0^{[8]}$ ,同时桩柱最小相对间距  $l/D = 15/1.64 > 4$  不考虑遮蔽系数。用 ANSYS 导出质量矩阵  $M$  和刚度矩阵  $K$ ,加比例阻尼  $\gamma = 0.01$ ,然后构造波面方程在频域里的函数:  $(\omega) = \sqrt{TS} e^i$ ,式中  $T$  为采样周期  $500 \text{ s}$ ,采样频率取  $3 \text{ s}^{-1}$ ,为  $0 \sim 2$  内的随机实数,代入式(7)求得  $X_1(\omega)$  和  $X_{13}(\omega)$ ,再分别进行傅里叶逆变换来求得时域响应  $X_1(t)$  和  $X_{13}(t)$  (分别为 1、3 结点的水平位移)。

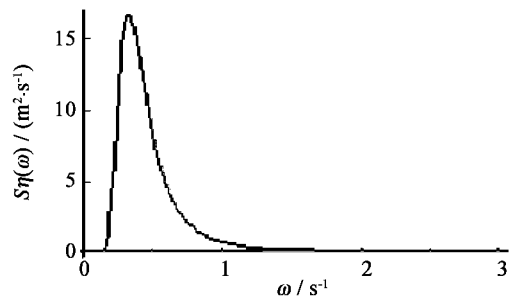


图 3 波浪谱

Fig. 3 The wave spectrum

反算过程:把  $X_1(t)$  和  $X_{13}(t)$  分别加上幅值为各自时域幅值 1% 的白噪声,然后分别进行离散傅里叶变换得  $X_1(\omega)$  和  $X_{13}(\omega)$ ,把  $C_D$ 、 $C_M$  当作未知数进行计算,代入式(10)中,求解方程组解得  $C_D = 1.14192$  (相对误差为 4.84%)、 $C_M = 2.0485$  (相对误差为 2.43%)。

若取不同频点值处的  $X_1(\omega)$  和  $X_{13}(\omega)$  代入式(9)中,则可求得不同的  $C_D$ 、 $C_M$  值(称之为频点法)。两种方法求得的结果见图 4、图 5,为了清楚地比较结果,把纵轴值取小,图中曲线不连续部分表示在该处求得结果值大于纵轴最大值。

从图中和计算结果数据可以看出,在加噪声的情况下,用频点法反算的结果有个别频点比用矩法所得结果误差要小,从整个采样频率上来看,用矩法反演比频点法反演要优越得多,不用选取合适的频点值去计算,而且结果值也有较高的准确度。在有的频点处加的噪声产生的振幅与该频点处波浪载荷产生的振幅相当甚至还大,所以反算出的结果误差较大甚至不可取,而在整个采样频域里看,噪声产生的振幅则相对较小。对于随机波浪这类具有统计特性的载荷,用矩法来进行反演比单个频点进行计算有明显的优越性。

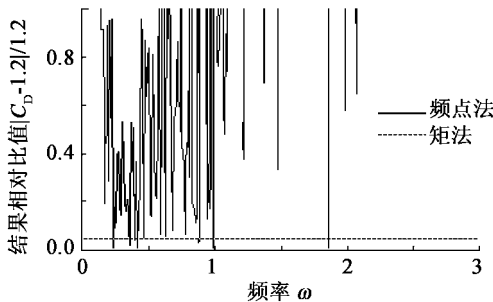


图 4 两种方法拖曳力系数反演结果对比

Fig. 4 The identification results of drag coefficient with two methods

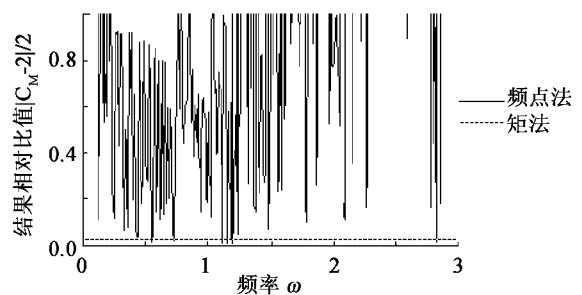


图 5 两种方法惯性力系数反演结果对比

Fig. 5 The identification results of inertia coefficient with two methods

### 5 结 语

在频域里利用对频率取矩的方法来识别波浪作用在圆柱形桩柱上的拖曳力和惯性力系数。算例表明:在频域内利用矩法进行识别能够满足一定的误差精度,而且可以避免选取不同频点会得到不同误差甚至是错误的结果,但在激励频率不明或在已知载荷谱、波浪谱的情况下,利用矩法进行识别有明显的优越性。

(下转第 62 页)

表 4 考虑和不考虑 P- 效应时 UC 值在不同区间的单元个数以及最大的 UC 值  
 Tab. 4 The element number in different ranges of UC values and the max UC in two conditions taking account of P- and taking no account of P-

UC		0.8~1.0	>1.0	最大 UC
单元个数	不考虑 P- 效应	99	15	1.21
	考虑 P- 效应	118	31	1.27

#### 4 结 语

1) 考虑 P- 效应后, 结构顶部最大位移增大最高达 27%, 最大内力增大最高达 48%。因此对于井架这类高耸结构应该考虑 P- 效应的影响, 否则可能造成结果偏于危险;

2) 通过算例分析可知, 在风载和船的摇摆荷载共同作用下, P- 效应的影响更加显著;

3) 在最大钩载起控制作用的工况下, 井架大腿的应力不是很大, 最大应力单元位于天车底座上;

4) 在风载起控制作用的工况下, 井架的应力较大, 且内力较大的单元位于人字架与井架大腿相交处。

#### 参考文献:

- [1] 朱 君, 姜民政. 井架机构化失效的结构系统的可靠性分析[J]. 机械强度, 2002, 24(3): 405 - 408.
- [2] 机械设计手册联合编写组. 机械设计手册(上册)[M]. 北京: 科学技术出版社, 1989.
- [3] 王春梅, 刘永勤, 等. HX190B 海洋修井机井架静力结构分析[A]. ANSYS 中国用户论文集[C]. 2004.
- [4] 李 静, 仝兴华. 钻采井架钢结构的力学分析[J]. 建筑技术开发, 2004, 31(4): 16 - 18.
- [5] 张爱林, 等. 服役井架结构的双重非线性分析[J]. 石油学报, 1996: 106 - 111.
- [6] 王元清, 周国强. 含损伤缺陷采油井架钢结构双重非线性承载性能分析[J]. 建筑结构学报, 2000, (12): 62 - 67.
- [7] API 4F[S]. 2nd Ed, 1995.

(上接第 57 页)

#### 参考文献:

- [1] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- [2] 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——工作应力设计法(增补 1)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [3] 张韶光, 等. 海洋平台振动载荷识别研究进展[J]. 济南大学学报, 2004, 18(4): 332 - 336.
- [4] 李少华, 时忠民, 等. 频域内利用载荷谱的特征进行识别[J]. 中国海洋平台, 2006, 21(6): 1 - 3.
- [5] 张学志, 黄维平, 李华军. 考虑流固耦合时的海洋平台结构非线性动力分析[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(5): 823 - 826.
- [6] Hartnett M, Mitchell P. An analysis of the effects of the leg spacing on spectral response of offshore structures[J]. Advance in Engineering Software, 2000, 31: 991 - 998.
- [7] Brebbia C A, Walker S. Dynamic Analysis of Offshore Structures[M]. London: Newnes-Butterworths, 1979.
- [8] 陈 宽. 近海工程导论[M]. 北京: 海洋出版社, 1988.