


文章编号: 1000-4874(2000)04-0144-06

柔性连接多浮体在不规则波中运动的预报方法

P 75
O 353.2

陈徐均¹, 沈庆¹, 孙芦忠¹, 吴有生² 

(1. 中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏南京 210007;

2. 中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082)

摘要: 本文介绍了一种频、时域杂交法, 用于预报柔性连接多浮体在波浪中的运动。其中采用三维频域法适时求解浮体的水动力系数, 在时域内求解浮体的运动方程, 可同时求解非线性锚链力, 连接器受力和护舷受力, 利用本方法预报了柔性连接的“口”字形六浮体系统在波浪中的运动, 结果与试验结果具有较好的吻合程度。

关键词: 多浮体; 非线性锚链力; 不规则波

中图分类号: O353.2 **文献标识码:** A

柔性连接

1 引言

海上浮动平台在海上资源的开发与利用中有着举足轻重的地位, 根据用途不同, 浮动平台可有多个单体通过一定的连接形式组合成不同的形状。为了减少连接器的受力、提高浮动平台的生存能力, 各单体间采用柔索栓接是一种可行的方法。这种柔性连接方式使得各单体间的受力很不明确, 从而给整个平台系统在波浪中运动的预报带来困难。

本文提出的频、时域杂交法的总体思路是: 利用海上浮体的频域格林函数求解浮体的水动力系数和波浪载荷; 根据锚链固定点(后简称锚固点)的适时位置求解非线性锚链力; 根据柔索栓接点(后简称连接点)的适时相对位置选择柔索受力(后简称连接力)的求解方程, 并求解连接力; 根据护舷固定点(后简称固定点)的适时相对位置选择护舷受力(后简称护舷力)的求解方程, 并求解护舷力; 用中心差分法求解浮体的运动方程。

2 运动方程与有关理论

2.1 运动方程

根据船舶耐波性理论^[1], 考虑波浪力及其它干扰力, 在平衡坐标系中, 浮体的运动方程可

收稿日期: 2000-02-24

作者简介: 陈徐均(1972~), 男, 讲师, 硕士。

表示为：

$$[m + A]\ddot{x} + [B]\dot{x} + [C]x = \{F_w\} + \{F\} \quad (1)$$

式中 m, A, B, C 分别为浮体的质量惯性矩阵、附加质量矩阵、附加阻尼矩阵和静水恢复力矩阵； $\{F_w\}, \{F\}$ 分别为波浪干扰力列阵和其它干扰力列阵； $\{x\}$ 为浮体的位移列阵； \dot{x}, \ddot{x} 分别为 $\{x\}$ 的一阶和二阶导数，体现为浮体运动的速度和加速度列阵。

2.2 不规则波的处理

根据 Pierson^[2]的方法，不规则波可考虑为规则波的叠加，即：

$$\zeta(t) = \sum_{j=1}^N \zeta_j \cos(\omega_j t + \epsilon_j) \quad (2)$$

式中 ω_j, ζ_j 分别为第 j 个波的频率和波幅， ϵ_j 为随机相位角。其中波幅可由波能谱得到：

$$\zeta_j = \sqrt{2S(\omega_j)\Delta\omega_j} \quad (3)$$

式中 $S(\omega_j)$ 为不规则波的谱密度， $\Delta\omega_j$ 为频率步长。

给定能满足精度尽量大的频率步长（即步长再减小时，不会引起 $\zeta(t)$ 过零点的增加），由 (2) 式可求得出不规则波波幅随时间变化的曲线，以每三个过零点之间的时间间隔为一个波周期 T （下称跨零周期），可见每个跨零周期内会有一个最大波峰和波谷，以最大波峰和波谷之差的绝对值为本波的波高 H ，波幅则设为波高的一半，跨零频率 ω 则为跨零周期倒数的 2π 倍。根据跨零周期、水深 H 可由下式求得波长 λ 。

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi H}{\lambda}\right) \quad (4)$$

2.3 水动力系数和波浪外力

水动力系数和波浪外力的求解方法较多，一般可表示为：

$$A_{ij} + iB_{ij}\omega = \rho \iint_S \phi_i \frac{\partial \phi_j}{\partial n} dS = \rho \iint_{S_0} \phi_i n_j dS \quad (5)$$

$$F_{i,0} = \text{Re}\{\rho i a \omega^{-1} \iint_{S_0} (\phi_i + \phi_D) n_i dS\} \quad (6)$$

式中 ϕ_i, ϕ_j, ϕ_D 分别为辐射势、入射势和散射势，利用三维线性耐波性的有关理论^[1]可求解。由于不规则波跨零频率的不确定性，所以需将一系列跨零频率和波幅代入 (6) 式求解一系列波浪外力，而水动力系数一般则取前三个跨零频率的平均值为频率代入 (5) 式求解（严格地讲，浮体并不是作该频率的运动，但从工程的角度作这种近似是可以的）。

2.4 非线性锚链力

浮动平台的锚链系统一般由多根锚链组成，作用在锚链上的力有水动力、重力和张力等。具有明显的非线性特征，为简化计算，在设计阶段忽略水动力的作用是可行的。于是锚链力可由悬链线理论得到，有一定卧链长度的锚链对平台的作用力可由下式得到^[3]：

$$\begin{cases} \cosh B - 1 = h(\sinh B - B)/(L - X_1) \\ B = X_1/u \\ T_1 = W(L - X_1)/(\sinh B - B) \\ T = T_1 \sinh B \end{cases} \quad (7)$$

当无卧链长度时锚链对平台的作用力则由下式可求



$$\begin{cases} b^2(L^2 - h^2) = 2X_0^2(\cosh b - 1) \\ b = X_0/a \\ T_h = aW \\ T = WL + T_h(k^2 - 1)/2k, \quad k = a(1 - e^{-b})/(L - h) \end{cases} \quad (8)$$

式中 L, W, X_0, h 分别为锚链长、锚链单位长重量、投锚距离和锚固点到海底的距离。锚链参数 $a = T_h/w, w$ 为水中锚链单位长重量。

显然, 当投锚点固定时, 作用在平台上的瞬时锚链力为链固点位移的函数, 只要能求得锚固点的瞬时位移, 即可求得瞬时锚链力。

2.5 柔索连接力和护舷力

根据柔索只能抗位、护舷只能抗压的特性, 两者的变形受力关系分别为:

$$f = \begin{cases} k_s \Delta l_s / l_s & \Delta l_s > 0 \\ 0 & \Delta l_s \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$f_p = \begin{cases} k_p \Delta l_p / l_p & \Delta l_p < 0 \\ 0 & \Delta l_p \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中 k_s, k_p 分别为柔索和护舷的弹性系数; l_s, l_p 分别为柔索和护舷的原长(宽); $\Delta l_s, \Delta l_p$ 分别为柔索的瞬时伸长量和护舷的瞬时压缩量, 可分别根据柔索连接点和护舷固定点的瞬时位移来确定。

2.6 力的转换

无论是锚链力还是连接力和护舷力, 由于单链(索、舷)坐标系与整体坐标系的不一致, 所以求得的锚链力、连接力和护舷力需转换到整体坐标系中, 并向运动中心转化, 可按如下公式转换

$$\{f\} = [\lambda][\tau]\{f_s\} \quad (11)$$

式中 $[\lambda], [\tau]$ 分别为位移转换矩阵和坐标转换矩阵^[4], $\{f\}, \{f_s\}$ 分别为整体坐标系运动中心和单链(索、舷)坐标中各瞬时力列阵。则作用在各单体整体坐标系运动中心的瞬时外力为:

$$\{F\} = \sum_{i=1}^n \{f_s\}_i \quad (12)$$

式中 n 为作用在该单位上的所有锚链力、连接力和护舷力总数。

3 方程的求解

由于所求的是浮动平台在不规则波中的响应, 而不规则波的跨零频率及波幅均随时间而变化, 所以(1)式中除瞬时外力列阵 $\{F\}$ 与时间有关外, $A, B, \{F_s\}$ 也与时间有关, 即(1)式为多自由度体系非线性响应的动平衡方程, 在时刻 t 的动平衡方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} - [B]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} = \{P(t)\} \quad (13)$$

式中 $\{P(t)\}$ 为瞬时波浪力和瞬时外力的总列阵。应用求解多自由度体系非线性响应的中心差分法^[5], (13) 可写成如下迭代形式:

$$\left[\frac{M_i}{\Delta t^2} + \frac{B_i}{2\Delta t} \right] \{x\}_{i-\Delta} = \{P\}_i - \left[C + \frac{2M_i}{\Delta t^2} \right] \{x\}_i - \left[\frac{M_i}{\Delta t^2} - \frac{B_i}{2\Delta t} \right] \{x\}_{i+\Delta} \quad (14)$$

式中:

$$\{x\}_{i-\Delta} = \{x\}_i - \Delta t \{\dot{x}\}_i + 0.5 \Delta t^2 \{\ddot{x}\}_i \quad (15)$$

初位 $\{x\}_0, \{\dot{x}\}_0, \{\ddot{x}\}_0$, 取足够小的时间步长, 可由 (15)、(14) 式求得各单体在不规则波中的响应, 同时可求得各时刻的瞬时外力。

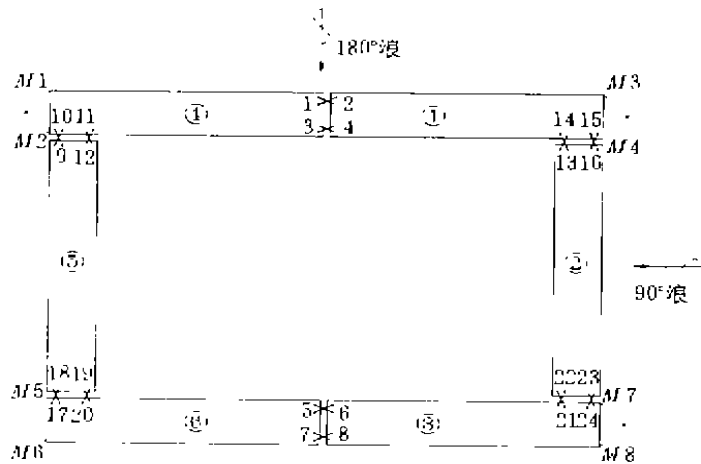


图 1

4 计算结果及与试验结果的比较

4.1 算例说明

本文算例采用的浮体系统是“口”字型柔性连接六浮体系统, 其结构形式如图 1 所示。各单体主尺度为 $80 \times 14 \times 2.8\text{m}$; 水深 20m ; 吃水 0.8m ; 锚链长 70m ; 单位长重 813.4N/m ; 图中 ①、②、③、④、⑤、和 ⑥ 为六个单体的编号; 1, 2, ..., 24 分别为单体间连接柔索编号; 每对连接柔索处设有橡胶护舷 (图中未标出); M1, M2, ..., M8 为固定浮体系统的锚链编号。

4.2 计算与试验结果比较

同种结构形式与海况条件的试验在上海交通大学海洋工程国家重点实验室进行, 试验中测量了 ⑤ 号单体的运动和所有锚链力。现给出四种海况的计算与试验结果的比较如表 1, 表中数据为工程有义值 (系指二分之一有义值与平均值的绝对值的和); 纵荡系指沿平台长度方向的运动, 而横摇则指沿单体长轴的转动。

由表 1 中数据的比较可以看出, 对于单体的运动, 除 90° 浪纵荡和横摇偏大于试验值, 各浪向首摇明显小于试验值 (偏大) 外, 其余各值均与试验值具有较好的吻合程度。对于锚链力, 除 2m 波高 180° 浪时的计算值偏大于试验值外, 其余各值也均与试验值具有较好的吻合程度。

5 结语

本文介绍的柔性连接多浮体在波浪中运动的预报方法, 采用频域方法求解浮体的水动力系数, 而在求解方程中引入结构动力学中的增量平衡方程, 利用中心差分法逐步求解浮体在不规则波中的运动和受力, 使得方法中具有时域的特性。从计算结果与试验结果的比较看, 该方法具有一定的工程实用价值, 可以为柔性连接多浮体的设计、制造与架设提供参考依据。

表1 计算与试验结果的比较

项目名称	单位	1m 波高				2m 波高			
		90°浪		180°浪		90°浪		180°浪	
		计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值
纵荡	m	1.407	0.441	0.295	0.240	1.748	0.906	0.333	0.221
横荡	m	0.266	0.283	1.726	1.529	0.163	0.702	2.166	2.313
垂荡	m	0.225	0.190	0.279	0.256	0.307	0.317	0.520	0.595
横摇	°	3.747	0.673	2.250	2.285	4.716	0.901	2.988	3.266
纵摇	°	0.068	0.174	0.343	0.321	0.116	0.495	0.809	0.596
首摇	°	0.192	1.270	0.447	1.828	0.228	1.522	0.559	1.860
M1 力	kN	48.02	44.88	53.71	46.77	45.52	47.09	75.69	49.31
M2 力	kN	44.35	45.66	64.45	58.88	46.50	47.22	76.67	63.95
M3 力	kN	57.32	51.97	60.05	58.84	65.72	54.40	90.89	55.67
M4 力	kN	57.91	47.66	61.36	55.49	63.34	48.07	91.32	67.12
M5 力	kN	48.50	49.25	55.17	46.33	48.38	57.32	71.23	48.03
M6 力	kN	41.35	53.83	55.34	51.55	46.78	61.34	71.89	61.76
M7 力	kN	61.29	46.65	56.34	49.21	65.24	57.27	68.15	53.44
M8 力	kN	54.30	50.12	54.42	59.59	55.93	58.75	72.96	63.40

参 考 文 献:

[1] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪中的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1986.

[2] PIERSON W J JR. Wind generated gravity waves[A]. Advances in Geophysics, Vol. 2[C]. New York: Academic Press, 1955.

[3] Q MIAO, S DU, S DONG and Y WU. Hydrodynamic analysis of a moored very large floating structure [A]. International Workshop on Very Large Floating Structures VLFS'96[C]. Hayama, Japan, 1996: 201-208.

[4] 陈徐均, 孙芦忠, 沈庆, 郑峰. 海上浮体受系泊锚链系统影响的非线性处理[J]. 工程兵工程学院学报, 1998, 13(1): 40-48.

[5] 俞载道. 结构动力学基础[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987.

A prediction method of motions of a moored flexibly joint multibody floating system responding to irregular waves

CHEN Xu-jun¹, SHEN Qing¹,

SUN Lu-zhong¹, WU You-sheng²

- (1. Engineering Institute of PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007;
2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082)

Abstract: A hibrid frequency doman and time domain method was introduced to predict the motions and mooring forces of a flexibly joint multi-body floating system responding to waves. The three-dimensional frequency method was used to obtain the hydrodynamic coefficients and the equations of motions were solved in time domain. The motions, nonlinear mooring forces and attaching forces between the adjacent bodies could thus be numerically computed at the same time. The motions and nonlinear anchor forces of rectangular-frame-type six-body floating system were predicted. The comparison between the numerical prediction and the experimental results shows good agreement.

Key words: multi-body floating system; nonlinear anchor forces; irregular waves