



海洋固定平台动力疲劳分析程序 DYFAT 及其与 SACS 的比较

孙复中 高志龙

(中国船舶及海洋工程设计研究院)

深水固定式桩基导管架平台在随机海浪的作用下,由于其结构自振频率处在遭遇的波浪频率范围内,平台的动力响应会在构件中引起很大的应力放大。在长期较大的交变应力作用下,导管架管节点热点处会产生疲劳,疲劳破坏是该类平台结构破坏的主要形式。因此对深水导管架平台进行动力疲劳分析是必不可少的。

随着近海油田开发逐步向深海发展,国外对深水导管架平台的动力分析进行了较系统的研究,开发了多种不同的计算方法。归纳起来有两种,一是频域谱分析法,二是时域积分法。80年代初,我国近海油田开发出现了高潮,国内许多单位和学者对此也进行了不少研究,取得了很大进展,但在工程实际应用中各种方法都还有其不足之处。频域法计算方便,特别适用于结构特性与频率有关的线性系统,对弱非线性系统也可经线性化后迭代求解。但因传递函数不是常数,对不同海浪需分别计算其各自的传递函数,失去了谱分析法省时的特点。时域法虽可用于计算线性和非线性外力作用下系统的动力响应。但需对每一短期海浪在较长的时历范围内计算外力的时历变化,并在很短的时步内数值积分。计算工作量很大,精度也不一定高。对于结构特性与频率有关的系统,时域法就无能为力了。

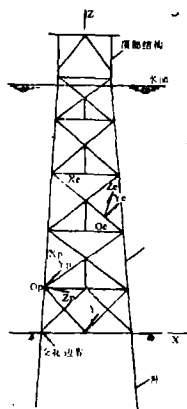
导管架平台在海浪中的动力响应是一非线性系统。波浪外力是强非线性的,桩基也有较大的非线性影响,严格地讲也与频率有关。对于这样的系统,采用频域法理论上有欠合理,很难处理浪流合成的非线性外力,计算时间也不省。采用时域法,时历积分所化时间太长,特别是对疲劳分析,且很难处理与频率有关的桩基影响。对于桩基的非线性动力特性,两种方法都有很大困难。因为此结构的非线性使结构的自振频率和振型均与运动幅值有关。虽也可用迭代法解,但计算工作量太大,工程应用上是无法接受的。基于这些考虑,中国船舶及海洋工程设计研究院的作者从工程应用出发,在适当简化的前提下,提出了一套比较合理的、省时的时频域联合分析模态组合法,并编制了相应的程序。为了证实其合理性和可靠性,此程序在美国船级社与他们公司租用的美国工程动力公司的 SACS 程序进行了详细的比较。

1. 基本原理和计算方法

时频域联合分析模态组合法是根据海浪的长期分布,采用加权平均的方法把具有同样有义波高、不同平均周期的海浪谱加权平均为一短期加权海浪谱。按此加权海浪谱模拟海浪运动的时历变化并计算海浪和流的合成载荷的时历。应用约束分析模态组合法,并把时域的载荷转换至频域中,求解结构的模态位移。由此模态位移和单位模态应力直接总合得管节点各点处的应力时历和应力谱。由此应力谱和材料的 S-N 曲线根据迈纳 (Miner) 法则计算结构的累积损坏率和疲劳寿命。

(1) 基本假定及座标系统。本方法假定,导管架平台在长期非平稳随机海浪中的动力响应可为一系列确定概率的短期平稳海浪中的动力响应的总合;运动响应的幅值是微幅的,结

构自振频率和振型与响应的幅值大小无关；组成导管架平台结构的构件截面尺寸与波长相比为小数（小于 1/5 波长），波浪外力和流体动力是非线性的；短期海浪中应力响应的幅值分布仍符合瑞雷（Rayleigh）分布。按此基本假定，导管架平台在非平稳随机海浪中的动力疲劳分析成为一个求解线性结构，在非线性外力作用下的平稳随机响应的问题。



分析中采用三种不同方向的右手直角坐标系，整体结构坐标系 $OXYZ$ ，单体坐标系 $O_pX_pY_pZ_p$ 和面内面外坐标系 $O_pX_pY_pZ_p$ ，见图1。

(2) 运动方程和模态综合。导管架平台结构主要由上部平台、导管架和桩基三部分组成。整个结构经有限元离散后，以整体结构坐标表示的运动方程表示为：

$$[M_s] \{\ddot{S}\} + [C_s] \{\dot{S}\} + [K_s] \{S\} = \{F_s(t)\} \quad (1)$$

其中 $[M_s]$ 、 $[C_s]$ 和 $[K_s]$ 分别为整个结构的质量、阻尼和刚度阵； $\{F_s(t)\}$ 为浪流合成引起的外力阵； $\{S\}$ 、 $\{\dot{S}\}$ 和 $\{\ddot{S}\}$ 分别为结构的位移、速度和加速度向量。

此运动方程的自由度数目极大，且结构各部分处于不同的介质中，直接求解运动方程比较困难。现采用拘束分枝模态综合法，把上部平台和

图1 坐标系 管架作为主体结构，桩基部分作为分枝结构。求解时先把桩基的质量和刚度按拘束模态的特性缩聚（或称对接加载）至主体结构和分枝结构的界面处。缩聚质量和刚度阵为

$$[M_{dd}] = [\phi_r]^T [M_p] [\phi_r] \quad [K_{dd}] = [\phi_r]^T [K_p] [\phi_r] \quad (2)$$

其中 $[\phi_r]$ 为桩的拘束模态，即桩端单位位移引起的桩体位移阵，可由桩的静力分析得。桩的阻尼阵如无可靠的数据可并入结构的总阻尼中，以比例阻尼表示。如有桩基的动力分析数据则可将桩基的阻抗矩阵作为缩聚的质量、刚度和阻尼阵。桩基的阻抗矩阵一般是与频率有关的。为简化起见，求解桩基阻抗矩阵时可按海浪的平均周期计算。

分别求解对接加载后主体部分和分枝部分的模态，然后按界面处的位移连续条件得模态综合矩阵。

$$[T_\phi] = \begin{pmatrix} \phi_s & 0 \\ \phi_b & 0 \\ \phi_b & 0 \\ \phi_r \phi_b & \phi_p \end{pmatrix} \quad (3)$$

此拘束分枝模态综合法的特点是界面处的自由度并不出现在模态综合运动方程中。深水导管架桩的数目很多，界面处的自由度数很大，此方法大大减少了模态综合运动方程的阶数。但模态综合后运动方程仍是耦合的且保留了桩的模态。此运动方程可进一步减缩和解耦得综合模态运动方程：

$$[M_\phi] \{\ddot{\eta}\} + [C_\phi] \{\dot{\eta}\} + [K_\phi] \{\eta\} = \{F_\phi(t)\} \quad (4)$$

$$\text{其中,} \quad [M_\phi] = [\phi]^T [M] [\phi] \quad (5)$$

总体结构坐标系的位移与模态位移间的关系为：

$$\{S\} = [T_\phi] \{x\} = [\phi] [T_\phi] \{\eta\} \quad (6)$$

结构运动方程经模态综合并解耦减缩后，运动方程的阶数可取得很低。一般对导管架平台在随机海浪中的运动响应模态取10~20阶就足够了，对自升式平台阶数可取得更少

(3) 波浪外力和流体动力。为了简化海浪的长期分布节省疲劳分析的时间, 本文提出了加权平均谱的概念。加权平均谱是把具有不同概率的有义波高相同, 但平均周期不同的海浪谱加权平均为一个短期海浪。其二向度加权平均谱表示为:

$$\overline{S_{hh}}(\omega, \beta) = \sum_{T_m} p(T_m | H_s) S_{hh}(\omega, \beta) \quad (7)$$

其中 $S_{hh}(\omega, \beta)$ 为海浪谱; $p(T_m | H_s)$ 为平均周期 T_m 对有义波高 H_s 的条件概率。未加权的海浪谱仍可由 P-M 谱、ITTC 谱和 JONSWAP 谱等表示, 其数学表示可见有关文献。由此加权海浪谱按埃利 (Airy) 波的线性叠加模拟海浪水质点的速度和加速度与流合成后可表示为:

$$\begin{aligned} \{\dot{h}(t)\} &= \{v_e\} + \sum_{\omega} \sum_{\beta} \frac{\omega \sqrt{2 S_{hh}(\omega, \beta) \Delta \omega \Delta \beta}}{2} \left\{ \begin{array}{l} u_2 \cos \alpha \cos \\ u_2 \sin \alpha \cos \\ u_3 \sin \end{array} \right\} (k \times \cos \alpha + k y \sin \alpha - \omega t + \delta) \\ \{\ddot{h}(t)\} &= \sum_{\omega} \sum_{\beta} \frac{\omega^2 \sqrt{2 S_{hh}(\omega, \beta) \Delta \omega \Delta \beta}}{2} \left\{ \begin{array}{l} u_2 \cos \alpha \sin \\ u_2 \sin \alpha \sin \\ -u_3 \cos \end{array} \right\} (k \times \cos \alpha + k y \sin \alpha - \omega t + \delta) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{其中 } u_2 = \frac{\cosh kz}{\sinh kD}, u_3 = \frac{\sinh kz}{\sinh kD}, k = \frac{\omega^2}{g \tanh kD} \quad (9)$$

此处 $\{v_e\}$ 为流速向量; α 为波向角; δ 为均布概率的随机相位角; k 为波数; D 为水深。

由于埃利波是一种线性的有限水深微幅波。其水质点的运动只算至静水面。而真实海浪的波面升高并不是一个小数, 且波面处水质点的运动对结构动力响应有很大影响。特别是对导管架平台, 因其自振频率较高, 对应的共振波长很短, 这些短波的水质点运动随深度的减小极快, 因此有必要对埃利波作适当修正。本文的修正方法是把随机海浪的波面高度作为水深, 此水深是随时间和位置变化的, 组成随机海浪的各不同波长的埃利波沿波长各点处的水质点运动和压力均以此变化的水深计。求出每一瞬时导管架水面附近各杆件与随机波面的交点和杆件各点处所对应的波面高度, 以此波面高作为水深计算杆件各点的水质点运动。由此海浪水质点运动和结构的相对速度和加速度按莫里森 (Morison) 公式计算波浪外力和流体动力, 表示为:

$$\{f_e(t)\} = \rho A [C_m] \{\ddot{h}_e - \ddot{s}_e\} + \rho A [\ddot{S}_e] + \frac{1}{2} \rho [D] [C_d] \{\dot{h}_e - \dot{s}_e\} |v_v| \quad (10)$$

其中 $[C_m]$ 和 $[C_d]$ 分别为杆件的惯性力和曳力系数对角阵; A 为截面积; $[D]$ 为截面尺度对角阵; $|v_v|$ 为海浪和结构的相对速度垂直于杆件轴线的分量的绝对值; 下标 e 表示单体座标。将单体座标的运动转换至整体座标系, 上式表示为:

$$\{f_e(t)\} = \rho A [C_m] [T] \{\ddot{h}\} - \rho A [C_m - 1] [T] \{\ddot{S}\} + \frac{1}{2} \rho [D] [C_d] [T] \{\dot{h}\} |V_v| - \frac{1}{2} \rho [D] [C_d] [T] \{\dot{S}\} |V_v| \quad (11)$$

此处 $[T]$ 为整体座标至单体座标的转换矩阵。

式(11)中第一、三项为波浪外力, 第二、四项为流体动力。其中第三、四项力是与相对速度垂直分量绝对值有关的非线性力, 由于相对速度在求解运动分程前是未知的, 此两部分力的计算比较困难。本文采用两种分法:

一是迭代解, 把第四项流体动力阻尼力作为外力处理。首先假定结构速度为零, 计算外力并求解运动, 再以此运动的结构速度和波浪的相对速度计算外力和求解运动, 直至收敛。此方法理论上未作任何假定, 计算中计入了速度二次项引起的非线性力, 但需迭代计算。

二是假定结构的运动与波浪运动相比为一小数。忽略结构运动平方项的力, 保留结构运

动和波浪运动乘积项的力。此时式 (11) 中的 $|V_v|$ 可以垂直杆件轴线的波浪速度绝对值 $|h_v|$ 代替, 将式 (11) 中的流体动力移至运动方程左侧, 作为附加质量惯性力和流体动力阻尼力, 剩下的以单体坐标表示的波浪外力为 (仍以 $\{f_e(t)\}$ 表示):

$$\{f_e(t)\} = \rho A [C_m] [T] \{\dot{h}\} + \frac{1}{2} \rho [D] [C_d] [T] \{\dot{h}\} | \dot{h}_v | \quad (12)$$

此沿杆件长度分布的单体坐标表示的波浪力转换成整体坐标表示的节点力, 可表示为:

$$\{F_s(t)\}_j = \sum_{i=1}^m [T]_{ij}^T [T_o]_{ij} \{f_e(t)\}_{ij} \quad (13)$$

其中 $[T_o]_{ij}$ 为杆件 i_j 的分布力转换成 i 节点的相当节点力的转换矩阵, m 为 j 节点的杆件数。 j 节点处的附加质量和流体动力阻尼系数为:

$$[M_h]_j = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} \rho A_{ij} l_{ij} [T]_{ij}^T [C_m - 1] [T]_{ij}$$

$$[C_h]_j = \sum_{i=1}^m \frac{1}{4} \rho l_{ij} [T]_{ij}^T [D]_{ij} [C_d] [T]_{ij} | \dot{h}_v | \quad (14)$$

其中 l_{ij} 为杆件的长度。为简化起见此处的 $| \dot{h}_v |$ 可以该速度的平均值代替。

一般地讲, 导管架平台刚度较大, 结构运动响应与波浪运动相比是很小的, 式 (13)、(14) 表示的波力和流体动力系数在工程上已够精确, 不需要用迭代法解。对自升式平台, 运动响应较大用迭代法求解较好。 (下期待续)

(上接第20页)

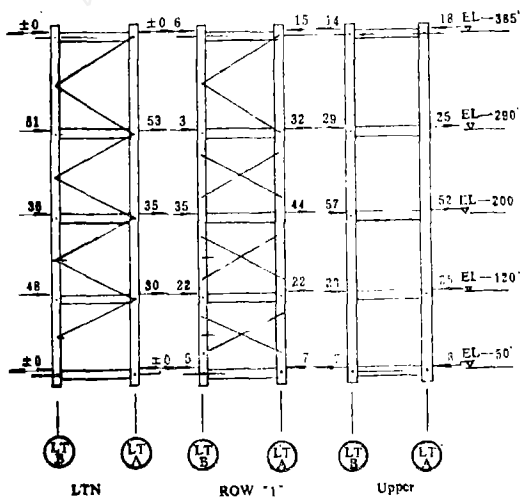


图 7 切割 JK-LBN-06 拉筋后的尺寸

4. 修复过程中应注意的几个问题

修复过程中在 LTN-B 侧 EL-200'-0" 处曾出现千斤顶支座 $\phi 16''$ 斜支撑生根处, 因工字钢强度不足, 在顶的过程中出现变形, 而使支座后倾, 后用撑杆 ($\phi 12''$) 把千斤顶支座连到 LTN A 侧滑道工字钢上, 问题得到解决。

在水下桁架建造过程中, 因为有焊接应力, 故校正变形时不可一下子断开数量过多的拉筋, 应先断开几根, 用千斤顶顶一下看看效果如何, 如还不行, 再适当断开拉筋, 总之要及时测量, 多次分析, 不能急于求成。

拉筋实测下料时, 要沿管子 0° 、 90° 、 180° 、 270° 、实测四个数据, 不能用一个实测数据下料否则断开拉筋组对时, 间隙无法保证。

5. 体会

(1) 惠州 21-1 导管架的水下桁架变形校正是 OPFC 公司首次对长 102 m、重近 1100t 的庞大结构物整体变形校正的先例, 是今后校正大型钢结构整体变形的有益经验。

(2) 最根本的办法是避免变形, 因此在海洋工程建造中应牢牢抓住以下几个环节:

1) 单根杆件的尺寸控制; 2) 小片或大片的尺寸控制; 3) 空间组对时的尺寸控制。才能控制好整体结构的变形。

design of the equipment. If timely correction of the deformation is neglected, the dimensional control of jacket structures and construction schedule will certainly be impaired.

DYFAT Program for Dynamic Fatigue Analysis of Fixed Platform and Its Comparison with SACS..... Sun Fu-zhong and Gao Zhi-long (21)

A practical method for dynamic fatigue analysis is put forward, ie, the combined time/frequency domain analysis model synthesis. On the basis of wave distribution, weighted average is employed to synthesize wave spectrums and simulate wave time history, calculate the combined loads of wave and current. Solution of the motion, determination of stress time history and spectrums of tubular joints, and estimation of fatigue life of the structure are all mentioned.

Repair of a Soviet Jack-up Drilling Rig..... Xie Jian-wn (25)

The major repair items of a Soviet jack-up drilling rig are presented. Strict adherence to the contract requirement, project management, schedule and quality control will ensure smooth carryout and in-time completion of the work. Lessons learned and experience gained are summed up.

Manoeuvring of Towed Drilling Rig..... Su Rong-ting (29)

The deep water navigational lane of Huang-pu River is narrow, full of twists and turns, vying with all kinds of ship and boat. All these bring difficulties to the manoeuvring operation. Taking the "Exploration-1" drilling rig as an example, the author recommends his eight year experience in manoeuvring different towed rigs on the Huang-pu River. A brief account of the same operation on the south water lane of the Yangtse River and on the sea is also given.

Offshore Installation of HZ21-1 SPMS.....Yan Ting-song (32)

This paper concerns with the make-up and major parameters of Hui-zhou 21-1 single point mooring system with the stress placed on its offshore installation processes, including survey of sea floor condition before work start, pinpointing of the single point centre and the eight mooring points, and the layout of anchors and anchor chains. In addition, description of the tensioning of chain legs, adjustment of mooring buoy and chain leg length and connection between them, cutting-off of the surplus anchor chains, etc, are given as well.

Application of Microcomputer Controlled Pipe Cutter

in HZ 21-1 Jacket Construction..... Bai Bing-ren and Li Han-liang (35)

The MPM-G microcomputer controlled pipe cutter is a key tool in jacket construction site. It is used to cut braces with simple T-, K- and Y- joints and also those with complicate tubular joints as well. The main technical indicators, functions, input cutting parameters and accuracy control methods are presented, precautions for operation mentioned.