Vol.46 Special Nov. 2005

文章编号: 1000-4882(2005)S-0207-08

规则波作用下张力腿平台的非线性动力响应

曾晓辉,刘洋,沈晓鹏,吴应湘 (中国科学院力学研究所工程科学研究部,北京 100080)

摘要

建立了一种考虑多种非线性因素的张力腿平台(TLP)模型,其中包括六自由度有限位移、各自由度之间的耦合、瞬时湿表面、瞬时位置、自由表面效应、粘性力等因素引起的非线性。推导出 TLP 六自由度非线性运动方程。对典型平台 ISSC TLP 进行了时城上的数值计算,求得该平台在规则波作用下的六自由度运动响应。用退化到线性范围的解与已有解进行了对比,吻合良好。数值结果表明,综合考虑非线性因素后响应有明显改变。

关键词:张力腿平台(TLP);非线性;动力响应

1 引言

张力腿平台(TLP)是一种典型的深海平台。它是一种半顺应、半固定式的平台,在海浪作用下会产生明显的纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇、首摇等 6 自由度运动,因此其动力响应分析是海洋工程力学中的一个重要问题。国际上许多学者开展了相关研究。Ahmad^[1]在 TLP 动力响应研究中考虑了粘性力、面内漂移等因素。Ahmad, Islam 和 Ali^[2]研究了风载对平台的影响。Chandrasekaran 和 Jain^{[3][4]}研究了一种三角形的 TLP 平台,计算了三角形和四边形平台的动力响应。进而他们对这两种形式 TLP 平台动力响应的数值解进行了比较。Williams and Rangappa^[5]发展了一种近似的半解析方法,用来计算由多个立柱组成的理想化 TLP 的水动力载荷、附连水质量和阻尼系数。Yilmaz^[6]研究了圆柱群的辐射和绕射问题,提出了一种可以考虑各个柱子间相互作用的分析方法。

现有对张力腿平台非线性动力响应的研究一般多集中于流场的非线性,未考虑有限位移对 TLP 动力响应的影响,更没有综合考虑各种非线性因素。而实际上 TLP 的非线性响应是在多种因素共同作用下产生的,有必要研究各种非线性因素综合作用下的动力响应。目前在分析 TLP 的动力响应时,一般假设 6 个方向位移是一阶无穷小量(角位移尤其如此)。个别文献声称他们的方法可以适用于分析平动位移有限的情况。然而仔细研究其方法可以发现,事实并非如此。因为他们在推导刚度矩阵时,在给某一方向位移的同时,限制了其他 5 个方向的位移,因而这样做并不能处理同时有几个方向有限位移的情况。对于有限位移问题来说,刚度矩阵应建立在变形后的瞬时位置而不是初始位置上。如果要研究有限位移情况,必须同时考虑几个自由度的位移(不能限制其中任意一个),在瞬时位置上研究平衡方程。

上述简化做法使 TLP 的动力分析变得很简便。然而这实际上是给问题附加了很强的限制条件,因此不可能适用于所有工况,尤其是一些极端不利的情况。显然,放松 "一阶无限小位移" 这一限制条件,引入 "有限位移",可使分析方法适用于更一般的工况。考虑有限位移后,还会引入其他非线性因素:各个自由度之间产生了耦合作用;浮体所受水动力与瞬时浸没深度、瞬时位置有关(即,水动力是动力响应的函数)。虽然计入这些因素会使问题变得更复杂,但我们的分析表明,这样做是必要的。在本文之前,考虑上述非线性因素和粘性力,我们曾研究了 TLP 式单圆柱体的动力响应^[7]。结

学术论文

果表明,考虑有限位移等非线性后,TLP式单圆柱体的动力响应与没考虑上述因素的结果有明显不同。

有鉴于此,在上述工作的基础上,本文研究一种典型 TLP 平台的非线性动力响应。涉及到的非 线性因素包括六自由度有限位移、各自由度之间的耦合、瞬时湿表面、瞬时位置、自由表面效应、粘 性力等。本文分析中的主要假设是

- ① TLP 的位移不局限于一阶无穷小量,可以是任意量;
- ② TLP 立柱和沉箱的直径足够小,绕射效应可以忽略;
- ③ 根据柱体在波浪场中的瞬时位置,用 Morison 公式计算波浪力;
- ④ 波浪水质点速度和加速度分布考虑自由表面修正。

2 理论推导

典型的 TLP 平台是由四根立柱和四个沉箱组成,如图 1 所示。OXYZ 是空间固定坐标系,O 点位于 TLP 平台静平衡时的重心处,OXY 平面与静水面平行; $G\xi\eta\zeta$ 是与平台一起运动的随体坐标系,G 是平台的重心。在初始时刻, $G\xi\eta\zeta$ 与 OXYZ 重合。TLP 的位移用 X_1, X_2, X_3 和 X_4, X_5, X_6 来表示。其中 X_1, X_2, X_3 是 TLP 的平动位移,即重心 G 在 OXYZ 坐标系中的坐标; X_4, X_5, X_6 代表 TLP 的转动位移,它们是 $G\xi\eta\zeta$ 相对于 OXYZ 的欧拉角。在本文中, $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 可以是任意大小的量,而不仅限于一阶无穷小量。

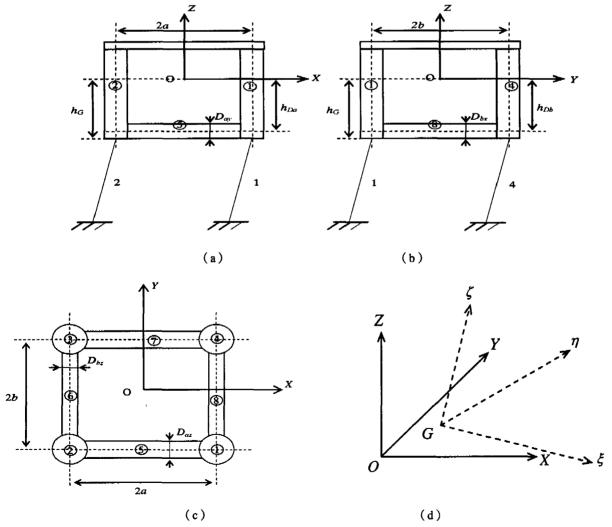


图 1 TLP 的示意图和坐标系

坐标系 $G\xi\eta\zeta$ 和 OXYZ 之间的坐标转换关系为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix}$$
(1)

式中

$$t_{11} = \cos X_5 \cos X_6 \qquad t_{12} = -\cos X_5 \sin X_6 \qquad t_{13} = \sin X_5$$

$$t_{21} = \sin X_4 \sin X_5 \cos X_6 + \cos X_4 \sin X_6$$

$$t_{22} = -\sin X_4 \sin X_5 \sin X_6 + \cos X_4 \cos X_6 \qquad t_{23} = -\sin X_4 \cos X_5$$

$$t_{31} = -\cos X_4 \sin X_5 \cos X_6 + \sin X_4 \sin X_6$$

$$t_{32} = \cos X_4 \sin X_5 \sin X_6 + \sin X_4 \cos X_6 \qquad t_{33} = \cos X_4 \cos X_5$$

根据牛顿定理,可得到 TLP 六自由度运动的控制方程:

$$\begin{pmatrix}
M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_3
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
\ddot{X}_1 \\
\ddot{X}_2 \\
\ddot{X}_3 \\
\dot{\omega}_1 \\
\dot{\omega}_2 \\
\dot{\omega}_3
\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}
F_1 \\
F_2 \\
F_3 \\
F_4 - (I_3 - I_2)\omega_2\omega_3 \\
F_5 - (I_1 - I_3)\omega_3\omega_1 \\
F_6 - (I_2 - I_1)\omega_1\omega_2
\end{pmatrix} (2)$$

式中M是 TLP 的质量, I_i (i=1, 2, 3)是绕惯性主轴的惯性矩, F_i 是外力(i=1, 2, 3)和外力矩(i=4, 5, 6), ω_i (i=1, 2, 3)是角速度分量,变量上的点表示对时间求导。角速度可由以下三式求出:

$$\omega_1 = \dot{X}_4 \cos X_5 \cos X_6 + \dot{X}_5 \sin X_6 \tag{3}$$

$$\omega_2 = -\dot{X}_4 \cos X_5 \sin X_6 + \dot{X}_5 \cos X_6 \tag{4}$$

$$\omega_3 = \dot{X}_4 \sin X_5 + \dot{X}_6 \tag{5}$$

下面给出作用在 TLP 上的外力。从推导中可看出,这些外力与 TLP 的瞬时位置、速度、加速度 是耦合的。

2.1 流体动力矢量

当 TLP 平台运动到任意位置时,TLP 的立柱和沉箱不再保持初始时刻的铅垂和水平方向,而是指向某一倾斜方向。在用 Morison 公式计算水动力时,式中的水质点加速度、水质点与柱体的相对加速度和相对速度要采用垂直于柱体的分量,而且相对加速度和相对速度都与 TLP 的运动有关(即载荷与响应非线性耦合)。

下面针对某个立柱,给出水动力计算公式(沉箱上的情况与此类似)。利用改进的 Morison 公式,可求出作用于单位长度倾斜柱体上的水动力矢量 f_n :

$$\vec{f}_{n} = \rho \frac{\pi D^{2}}{4} \vec{V}_{n} + C_{a} \rho \frac{\pi D^{2}}{4} \vec{V}_{m} + C_{d} \frac{\rho D}{2} |\vec{V}_{m}| \vec{V}_{m}$$
 (6)

上式中 ρ 是海水密度, C_a 是附加质量系数, C_d 是阻力系数, $\vec{V_n}$ 是垂直于柱体的水质点加速度矢量, $\vec{V_m}$ 和 $\vec{V_m}$ 是水质点相对于柱体的加速度和速度垂直于柱体的分量。法向加速度 $\vec{V_n}$ 由下式给出:

$$\vec{V}_{n} = \vec{e}_{3} \times (\vec{V} \times \vec{e}_{3}) \tag{7}$$

学术论文

式中 \vec{V} 是水质点加速度,其分布采用 Chakrabarti^[8]的修正方法, \vec{e}_3 是柱子轴线在任意瞬时的单位矢量。同理,可求得相对法向速度 \vec{V}_m :

$$\vec{V}_m = \vec{e}_3 \times (\vec{V}_r \times \vec{e}_3) \tag{8}$$

式中 $\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_s$, \vec{V} 是水质点速度矢量, \vec{V}_s 是柱体上某点的运动速度。同样可求得相对法向加速度 \vec{V}_r :

$$\vec{V}_m = \vec{e}_3 \times (\vec{V}_r \times \vec{e}_3) \tag{9}$$

式中 $\vec{V}_{r} = \vec{V} - \vec{V}_{r}$ 。

沿柱子浸没深度积分,就可求得作用在整个立柱上的水动力矢量:

$$\vec{F}_{w} = \int_{-h_{c}}^{-h_{c}+h_{c}} \vec{f}_{n} d\zeta \tag{10}$$

式中 h_G 是重心距平台底部距离, h_i (i=1,2,3,4)为第 i 号立柱浸入流体中的瞬时深度,这两者都是沿着立柱轴线方向度量。将水动力产生的力矩积分,可得到水动力对平台主轴的力矩矢量:

$$\vec{M}_{Gw} = \int_{-h_G}^{-h_G + h_i} \left(\vec{r}_G \times \vec{f}_n \right) d\zeta \tag{11}$$

2.2 流体静力矢量

由于浮力 $\overline{F_n}$ 的方向始终铅垂向上,所以TLP仅有垂荡方向受力:

$$\left| \overrightarrow{F_B} \right| = \rho g \pi R^2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) + \rho g D_{ay} D_{az} \cdot 4a + \rho g D_{bx} D_{bz} \cdot 4b$$
 (12)

式中, D_{ay} , D_{az} , D_{bz} ,a,b 如图 1 所示。立柱浸没深度 h_i (i=1,2,3,4) 时刻变化,与 TLP 的瞬时位置及波面高度有关。

当 TLP 发生转动时,立柱的浮心将不在圆柱的对称轴上,产生偏移。立柱和沉箱的浮力会对平台重心产生合力矩。下面给出立柱 1 的浮力和力矩,其他立柱和沉箱与此类似。

立柱 1 浮力的大小 $F_{B1}=\rho g\pi r^2 h_1$,方向垂直向上,r 为立柱半径。发生偏移后浮心 B 在随体坐标系中的坐标为 (B_x,B_y,B_z) :

$$B_x = -\frac{r^2}{4h_1}\frac{t_{31}}{t_{33}} + a$$
, $B_y = -\frac{r^2}{4h_1}\frac{t_{32}}{t_{33}} - b$, $B_z = \frac{h_1}{2} + \frac{r^2}{8h_1}\frac{t_{31}^2 + t_{32}^2}{t_{33}^2} - h_G$

由立柱 1 浮力产生的力矩 \vec{M}_{GB} 为

$$\vec{M}_{GB} = \vec{r}_{GB} \times \vec{F}_{B1} \tag{13}$$

 \vec{r}_{GB} 是浮心 B 相对于 TLP 重心 G 的位置矢量。

2.3 张力腿张力矢量

现有文献在求系索拉力时,往往只分析线性解耦情况,因此通常只考虑发生某个自由度运动引起的系索伸长量。然而平台实际上同时发生六自由度运动,理应研究六个方向位移共同存在时,系索的伸长量。下面求系索伸长量时同时考虑六个自由度位移。显然,这也会引入六个自由度之间相互耦合产生的非线性因素。

以 1 号张力腿 AB 为例说明,A 点位于 1 号立柱底部,B 点固定在海底。当 TLP 运动到任意位置

时, $A \setminus B$ 两点的坐标分别为 (A_x, A_y, A_z) , (B_x, B_y, B_z) , 其中,

$$(A_{\chi}, A_{\gamma}, A_{z})^{T} = \begin{pmatrix} X_{1} + t_{11}a - t_{12}b - t_{13}h_{G} \\ X_{2} + t_{21}a - t_{22}b - t_{23}h_{G} \\ X_{3} + t_{31}a - t_{32}b - t_{33}h_{G} \end{pmatrix}, \qquad (B_{\chi}, B_{\gamma}, B_{z})^{T} = \begin{pmatrix} a \\ -b \\ (h_{G} + L) \end{pmatrix}$$

L为张力腿初始长度。于是可求得1号张力腿的张力矢量:

$$\overline{F}_{t} = (T_{0} + \frac{ES}{L}(L_{1} - L)) \cdot \frac{\overrightarrow{AB}}{\left| \overrightarrow{AB} \right|}$$
(14)

 T_0 、E、S 分别是张力腿的初始张力,杨氏模量和截面积, L_1 (= $|\overline{AB}|$)是张力腿的瞬时长度。张力对重心 G 产生的力矩是

$$\vec{M}_{Gt} = \vec{r}_{GA} \times \vec{F}_{Gt} \tag{15}$$

 r_{CA} 是 A 点相对于 TLP 重心 G 的位置矢量。

同理可求得其他三个张力腿的张力和力矩。

2.4 作用在 TLP 上的外力和力矩矢量

前面几节以平台立柱 1 为例推导了作用在 TLP 上的外力和力矩。按照同样方法,可求出其他立柱和沉箱上的外力和力矩。对作用在 TLP 所有立柱、沉箱上的流体动力、流体静力、张力腿张力以及 TLP 重力等外力求矢量和,可得 TLP 所受外力的主向量:

$$\vec{F} = \vec{F}_{w} + \vec{F}_{R} + \vec{F}_{Ot} - Mg\vec{k} = F_{1}\vec{i} + F_{2}\vec{j} + F_{3}\vec{k}$$
 (16)

 \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} 是固定坐标系 OXYZ 的基矢量,Mg 是 TLP 的重量。同样的,将所有外力对 TLP 重心产生的力矩矢量相加,即可得 TLP 所受外力矩的主矩:

$$\vec{M} = \vec{M}_{Gw} + \vec{M}_{GR} + \vec{M}_{Gt} = F_4 \vec{e}_1 + F_5 \vec{e}_2 + F_6 \vec{e}_3 \tag{17}$$

 $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ 是随体坐标系 $G\xi\eta\zeta$ 的基矢量。

3 数值分析

从上面的推导我们可看出,作用于 TLP 上的外力和力矩都是平台响应的非线性函数。因此,在有限位移情况下,TLP 六自由度运动方程(2)是耦合的非线性微分方程组。本文采用经典的四阶 Runge-Kutta 法在时域上数值求解这个非线性微分方程组,用 FORTRAN 语言编制了响应的数值计算程序。下面给出一个典型平台(ISSC TLP 平台)的算例。该平台的参数如表 1 所示。

立柱半径 立柱间距 沉箱宽度 沉箱高度 7.5m 10.5m 86.25m 8.44m 排水量 张力腿长度 立柱初始吃水 总质量 $54.5 \times 10^6 \, \text{kg}$ $40.5 \times 10^6 \text{ kg}$ 415.0m 35.0m 首摇惯性矩 重心距底部的高度 横摇惯性矩 纵摇惯性矩 98.07×109 kgm² $82.37 \times 10^9 \, \text{kgm}^2$ $82.37 \times 10^9 \, \text{kgm}^2$ 38.0m

表 1 ISSC 平台参数^[9]

首先计算了一阶无限小位移(这是本文任意位移情况的特例)线性情况下,该平台在波浪角为

22.5° 时纵荡、横荡和首摇方向的传递函数,并与已有解进行了比较。结果表明,本文线性解与 Taylor 给出的解⁹¹匀合良好。图 2~图 4 给出了对比情况。

之后在综合考虑有限位移等多种非线性因素的情况下,计算了平台的非线性动力响应,并与一阶无限小位移情况下相应的线性解作了对比。图 5~图 10 给出了波浪周期为 8.5s, 波浪角为 22.5°, 波高分别为 8m 和 12m 时,这两种情况下 ISSC TLP 的稳态响应。从图中可看出,非线性因素对该平台动力响应影响明显。

4 结论

本文建立了一种综合考虑多种非线性因素(有限位移、六个方向运动自由度的耦合、瞬时位置、瞬时湿表面、自由表面效应、粘性力等)的 TLP 平台动力响应分析方法,推导出相应的计算公式,并用 FORTRAN 语言编制了数值计算程序。

分别在退化到线性的情况下和综合考虑多种非线性因素的情况下计算了规则波作用下 ISSC TLP 平台的动力响应。前者的计算结果与已有的线性计算结果吻合较好,而后者得到的动力响应则与前者 有显著差别。从本文的数值分析结果可看出,非线性因素对 TLP 平台的动力响应有较大影响。建议 在设计 TLP 平台的时候,计人非线性因素的影响。

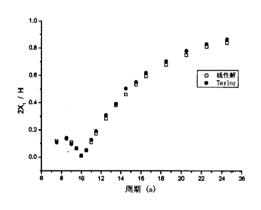


图 2 纵荡方向的传递函数

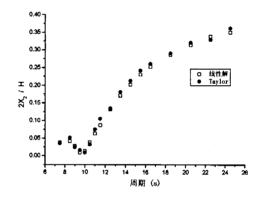


图 3 横荡方向的传递函数

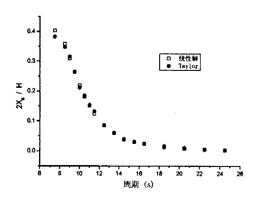


图 4 首摇方向的传递函数

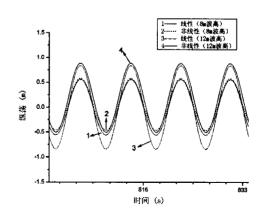
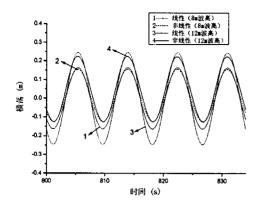


图 5 纵荡方向的稳态响应



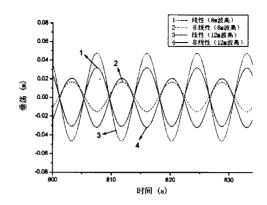
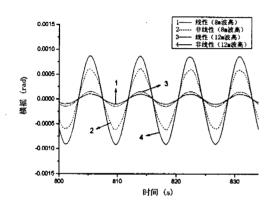


图 6 横荡方向的稳态响应

图 7 垂荡方向的稳态响应



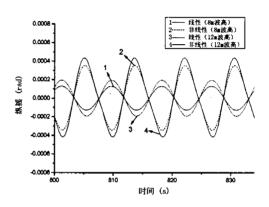


图 8 横摇方向的稳态响应

图 9 纵摇方向的稳态响应

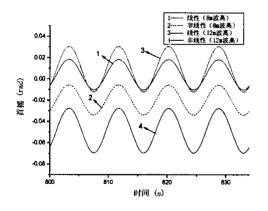


图 10 首摇方向的稳态响应

致 谢

本文工作得到中国科学院知识创新工程(KJCX2-SW-L03)、国家高技术研究发展计划("十五"863 计划海洋资源开发技术主题 2004AA617010)的资助,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Ahmad S. Stochastic TLP response under long crested random sea [J]. Computers & Structures, 1996, 61(6): 975-993.
- 2 Ahmad S, Islam N and Ali A. Wind-induced response of tension leg platform [J]. Journal of Wind Engineering and

学术论文

- Industrial Aerodynamics, 1997, 72(1-3): 225~240.
- 3 Chandrasekaran S and Jain A K. Dynamic behaviour of square and triangular offshore tension leg platforms under regular wave loads [J]. Ocean Engineering, 2002, 29(3): 279~313.
- 4 Chandrasekaran S and Jain A K. Triangular configuration tension leg platform behaviour under random sea wave loads [J]. Ocean Engineering, 2002, 29(15): 1895~1928.
- 5 Williams A N and Rangappa T. Approximate hydrodynamic analysis of multicolumn ocean structures [J]. Ocean Engineering, 1994, 26(21): 519~573.
- 6 Yilmaz O. Hydrodynamic interactions of waves with group of truncated vertical cylinders [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1998, 124(5): 272~279.
- 7 Zeng X H, Shen X P, Wu Y X. Nonlinear dynamic response of floating circular cylinder with taut tether[A]. Proceedings of The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference [C], Korea, 2005, 1: 218~224.
- 8 Chakrabarti S K. Hydrodynamics of Offshore Structures [M]. Computational Mechanics Publications, 1987.
- 9 Taylor R E, Jefferys E R. Variability of hydrodynamic load predictions for a tension leg platform [J]. Ocean Engineering, 1986, 13(5): 449 ~ 490.

Nonlinear Dynamic Response of TLP in Regular Waves

ZENG Xiao-hui, LIU Yang, SHEN Xiao-peng, WU Ying-xiang (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract

In this paper, a theoretical model for analyzing the nonlinear behavior of a TLP is developed, in which various nonlinearities are taken into account, i.e. finite displacement, coupling of the six degrees of freedom, instantaneous position, instantaneous wet surface, free surface effects and viscous drag force.

Based on the theoretical model, the comprehensive nonlinear differential equations are deduced. Then the nonlinear dynamic analysis of ISSC TLP in regular waves is performed in the time domain. The degenerative linear solution of the proposed nonlinear model is verified with existing published one. Furthermore, numerical results are presented which illustrate that nonlinearities exert a significant influence on the dynamic responses of the TLP.

Key words: Tension Leg Platform (TLP); nonlinearity; dynamic response