

基于 ANSYS 的海洋平台自振特性分析

崔振南¹, 刘喜华², 吴育华¹

(1. 天津大学管理学院, 天津 300072; 2. 青岛大学师范学院, 山东 青岛 266071)

摘要:运用 ANSYS 应用程序软件, 以 CB25C(埕北 25C)平台为例进行了海洋平台自振特性分析。计算出平台的一、二、三、四、五、六阶自振频率, 并与实测结果进行比较, 发现计算结果在允许的误差范围内, 说明运用 ANSYS 应用软件对平台进行自振特性分析完全能够满足工程精度的要求。

关键词:平台; 自振频率; 分析

中图分类号:TE951

文献标识码:A

桩基平台作为目前海洋石油工业采用最多的平台形式, 它的稳定性与安全性直接关系到整个石油工业以至全球能源的供应。研究平台的稳定性与安全性也就成为科技工作者面临的一个重要课题。而平台的这些性能尽管受到它所面临的海况的影响, 但更大程度上还是取决于平台本身的结构与性能^[1]。平台的自振特性是平台本身的固有特性, 它依赖于平台本身的质量分布和刚度分布。计算平台的自振特性(频率与振型), 实质上就是求解无阻尼自由振动方程。本文利用等效团集质量法, 并应用模态原理以 ANSYS 软件为工具对 CB25C 平台进行自振特性分析。

1 模态解的思想

许多结构(包括桩基导管架平台)的响应都具有这样的特点: 在响应的初始阶段, 变形结构中包含有移行塑性铰(或铰线), 这时结构速度的空间分布形式随时间变化; 这一阶段之后, 变形结构中只包含驻定塑性铰(或铰线), 结构的响应趋于一种速度的空间分布形式而不随时间变化的模态^[2]。

从数学上讲, 速度的空间分布不随时间变化, 意味着速度表达式可以写成时间和空间变量分离的形式, 即

$$\dot{u}_i^*(X, t) = \dot{\omega}^*(t) \phi_i(X) \quad (1)$$

式中, $\phi_i(X)$ 表示速度的空间分布, 也就是速度模式, 或称为形状函数。 $\phi_i(X)$ 通常要规范化, 使得 $\dot{\omega}^*(t)$ 表示结构上某特征点的速度随时间变化的历程。上标“*”代表与模态解有关的量。

模态解要满足全部基本方程和边界条件, 处处不违反屈服条件, 但不一定满足初始条件。对于冲击载荷作用下的理想刚塑性结构, 在小变形假定下不计算体力, 其运动方程和几何关系是线性齐次的。

当模态 $\phi_i(X)$ 以某种方式取定后, 接下来就要求 $\dot{\omega}^*(t)$ 了, 这就把原来无限自由度的问题简化为一个单自由度系统的问题。由(1)式可求得加速度 $\ddot{u}_i^*(X, t)$ 了, 并且可以写为:

$$\ddot{u}_i^*(X, t) = \Omega(t) \cdot \dot{u}_i^*(X, t) \quad (2)$$

这表明在每一时刻, 恒定模态解的速度和加速度具有相同的空间分布形式。

利用虚功原理求 $\dot{\omega}^*(t)$ 。在冲击载荷作用下, 不计体力 F_i , 由虚功率原理可以推出

* 收稿日期: 2004-08-08

作者简介: 崔振南(1962-), 男, 山东人, 博士, 山东省资产管理公司总经理, 研究方向为金融工程与工程项目管理。

$$-\int_V \rho \ddot{u}_i \dot{u}_i dV = \int_V Q_j \dot{q}_j dV \quad (3)$$

将模态解(1)式代入(3)式并进一步推导得

$$\ddot{w}_i^*(t) = -\int_V Q_j^* k_j^* dV l \int_V \rho \phi_i \phi_i dV = -A^* \quad (4)$$

分析(4)式发现, \ddot{w}^* 实际上与时间无关,是个常数,记为 $-A^*$ 。它表明,若在响应过程中模态形式不变,它实际上是一个单自由度匀减速运动。反映结构上特征点速度的 $\dot{w}^*(t)$ 也就可以写成:

$$\dot{w}^*(t) = \dot{w}_0^* - A^*(t) \quad (5)$$

式中, \dot{w}_0^* 为 $\dot{w}^*(t)$ 的初值。对应于模态解的结构响应时间 t_f^* 和特定点的最终位移 \dot{w}_f^* 为

$$t_f^* = \frac{\dot{w}_0^*}{A^*} \quad (6)$$

$$\dot{w}_f^* = \frac{1}{2} \dot{w}_0^* t_f^* = \frac{(\dot{w}_0^*)^2}{2A^*} = \frac{K_0^*}{\int_V Q_j^* \dot{q}_j^* dV} \quad (7)$$

其中, $K_0^* = \frac{1}{2} (\dot{w}_0^*)^2 \int_V \rho \phi_i^* \phi_i^* dV$ 是模态解的初始动能。然后再利用收敛性定理逐步将模态解逼近真实解。

2 等效团集质量法原理

通常所用的集中质量法主要是按动能相等的原理来改变质量分布的,这种方法自由度少,质量矩阵呈对角型分布,系数没有耦合项,因而是改变质量分布较好的形式之一。如果将按动能相等原理推导单元团集质量及其系数,可进一步提高集中质量法的精度^[3,4]。

假设任一具有分布质量的杆单元,振动曲线为 $y(x, t)$,任一时刻的动能为

$$T(t) = \frac{1}{2} \int_0^l m(x) \left[\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right]^2 dx \quad (8)$$

进行一系列推导后。根据动能相等原理, $T(t) = T'(t)$, 得团集质量 M 为

$$M = \frac{\int_0^l m(x) \left[\sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(x) \dot{q}_j(t) \right]^2 dx}{\left[\sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(l) \dot{q}_j(t) \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(l) \dot{q}_j(t) \right]^2} \quad (9)$$

对于自振特性计算,若只考虑起主要作用的第一振型,团集质量公式可简化为

$$M = \frac{\int_0^l m(x) \varphi_1^2(x) \dot{q}_1^2(t) dx}{\varphi_1^2(0) \dot{q}_1^2(t) + \varphi_1^2(l) \dot{q}_1^2(t)} = \frac{\int_0^l m(x) \varphi_1^2(x) dx}{\varphi_1^2(0) + \varphi_1^2(l)}$$

当质量分布均匀时,

$$M = \frac{m(x) \int_0^l \varphi_1^2(x) dx}{\varphi_1^2(0) + \varphi_1^2(l)},$$

相应的团集质量系数为

$$u = \frac{\int_0^l \varphi_1^2(x) dx}{l [\varphi_1^2(0) + \varphi_1^2(l)]}$$

如果所取的单元一端为支点,这时只要取 $\varphi_l(0) = 0$ 或 $\varphi_l(l) = 0$ 即可。

利用动能相等的原理还可把多个已经团集的质量再进行团集,以使结构的自由度数目进一步减少。

3 建立平台单元结构模型

3.1 创立关键点

先根据已知条件确定各关键点,然后计算各关键点坐标。由于 CB25C 平台导管架三面斜度均为 16:1,因而三条腿在同一个平面上呈等边三角形。以黄海平均海平面为 XOY 面,以竖直方向为 Z 轴,以 AC 连线的中垂线为 X 轴,以 B 至 AC 轴垂线的中点为原点,以垂直 X 轴在 XOY 平面内的直线为 Y 轴建立空间坐标系,计算各关键点坐标^[5]。

3.1.1 嵌固点的确定

渤海湾的桩基导管架平台,嵌固点一般取在距泥面 5~6D 处^[6],CB25C 平台的泥面位于 -12.5 m 处,桩腿直径为 1.34 m。故嵌固点应取在: $-12.5 - 1.34 \times 5 = -19.2$ 和 $-12.5 - 1.34 \times 6 = -20.54$ 范围之内。取一整数,嵌固点 z 向坐标为 -20 m。

由于泥面(即 -12.5 m 处),各点坐标是已知的,即 A 桩所在的编号为 11 的点坐标为 (4.602 5, -4.602 5, -12.5), B 桩对应点 (-4.602 5, 0, -12.5), C 桩对应点的坐标为 (4.602 5, 4.602 5, -12.5)。若令 A 桩对应嵌固点的编号为 1,坐标为

$$x = 4.602\ 5 + \frac{20 - (-12.5)}{12.5 - (-4.5)} (4.602\ 5 - 3.811\ 5) = 5.344\ \text{m}, y = -5.344\ \text{m}$$

3.1.2 其它关键点的确定

对于设计泥面以上的杆件,凡杆件交叉点,集中载荷作用点、杆件横截面特性变化点、桩与设计泥面交接点一般设置为节点;运用与确定嵌固点同样的方法可以得到其它关键点的坐标。例如,根据已知的泥面(-12.5 m)和水下 4.5 m 的平面图计算海平面处所对应的三个点的坐标如下:

$$l = 9.244 \frac{[0 - (-12.5)]}{[-4.5 - (-12.5)]} (9.244 - 7.623\ 6) = 6.712$$

即所对应的三点坐标分别为 (3.356 5, -3.356 5, 0), (-3.356 5, 3.356 5, 0)。同样的方法可以计算其它关键点处的坐标。

3.2 定义单元类型

严格按照已知图纸标定连线后,接下来的问题就是如何将单元与图中的结构一一对应。因为该平台有浸水部分,所以用到了 PIPE59 管单元,同样由于有未浸水部分,要使用管单元 PIPE16,此外还有梁单元,故也有梁单元 BEAM4。

对于梁单元又要次梁对结构自振频率影响较小,为简单计,不考虑次梁对结构刚度的贡献,也就是上部结构只考虑主梁的影响。

由于桩腿的内部结构为双层套管,采取将它们刚度叠加的方法分别进行分析,例如泥面处的 PIPE59 单元,该段为加强段,外管为 1 352 mm×30 mm,内管为 1 200 mm×26 mm,将二者进行折合

$$\frac{\pi}{32} [(1\ 352^4 - 1\ 322^4) + (1\ 200^4 - 1\ 174^4)] = \frac{\pi}{32} (1\ 352^4 - x^4),$$

得到 $x = 1\ 302.7\ \text{mm}$,运用同样的方法可以得到其它截面管的等效截面。

由于主要的工作是计算结构的自振频率,对抗弯、抗扭等指标影响不大的因素不再给予考虑。按照 ANSYS 的计算规则定义不同的单元类型。

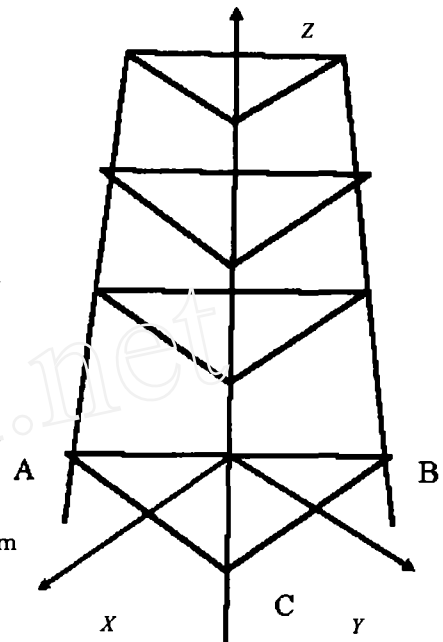


图 1 CB25C 平面结构示意图

3.3 定义材料属性

一般地,对平台进行分析时,平台腿柱只考虑内外管钢材的面积和质量,而对于内外管的水泥砂浆的影响则不予考虑。这里将此方法进行改进,并做了有益的尝试。对于双层管的水泥砂浆,将其质量加到等效的钢管上,而对于它的弹性模量 E ,泊松比 μ 的变化则不予考虑。以泥面处的桩为例计算其等效密度,

$$\rho = \frac{\frac{\pi}{4}[(1\ 352^4 - 1\ 322^4) + (1\ 200^4 - 1\ 174^4)] \times 7\ 800 + \frac{\pi}{4}(1\ 322^2 - 1\ 200^2) \times 2\ 400}{\frac{\pi}{4} \times (1\ 352^2 - 1\ 303.6^2)} = 13\ 474\ (\text{kg/m}^3)$$

利用同样的方法可以计算其它高度处的等效密度。

3.4 网格化

由于 CB25C 平台结构复杂,如果利用 element 做链接进行自动剖分,自由度个数将达到 1 000,超过普通版 ANSYS 的允许范围。这里可以通过 Meshtool 工具条中的 set 选项设定的单元类型、材料属性、单元编号进行链接,在此之前不能将关键点转化为节点,否则很容易造成在关键点处由关键点转化而来的节点和用 Meshtool 工具条 Mesh 后的节点重合,以致由关键点产生的节点浮于由 Meshtool 工具条 Mesh 后所产生的节点之上,容易产生错误。将单元类型等链接好后,用 lines 选项中的 set 将指定的单元进行剖分,一般情况下,对于较短的单元不必再进行分割,而对于较长的单元,分为 2 或 3 段比较合适,分割过细虽然可以大幅度减少节点数目,但这样做容易使结果失真。将管线进行分割后再利用 Mesh 命令进行剖分,通过这样两个步骤,既可以有效减少节点数目,使之不受自由度的限制,又能够满足精度的要求。

3.5 等效载荷的计算

根据《中华人民共和国海上固定平台建造与入级规范》的要求,作用在平台上的使用载荷分为固定载荷和活载荷。进行设计分析时应根据平台的类型和使用要求,考虑所以可能影响结构或构件的使用载荷。

1) 固定载荷是指作用在平台上的不变载荷,当水位一定时载荷为一定值。固定载荷主要包括:a、平台在空气中的总量,如结构自重(包括导管架、桩、浇注填充物)、防腐阳极块总量、上部结构总量、附属结构总量,以及固定不变的机械设备、管道、容器重量等;b、作用于平台水下部分的浮力。

2) 活载荷包括:a、与平台使用有关的载荷,按其时间变化与作用可分为可变载荷和动力载荷;b、数值或作用位置变化缓慢的可变载荷均可作为固定载荷处理,如:可移动的钻井设备和生产设备重量;存放的套管、器材等供应品重量;储备的液体、消耗品、生活给养和堆货重量;此外,还应考虑有影响的海生物附着和冰的聚积所增加的质量。由于要计算的是 CB25C 平台的自振频率,对于周期性载荷、冲击性载荷,直升机升降所引起的载荷,靠船所引起的载荷不予考虑^[7]。

3.6 加载

根据载荷条件和要计算的响应的分析类型,选择模态分析。然后对模型进行加载,包括约束、力、表面分布载荷等。

由海洋平台计算规则,在嵌固点 1、2、3 处三个方向约束均为 0。对于节点上作用的集中载荷按照它们的作用方向即沿 z 轴负方向施加。

4 实测结果与 ANSYS 计算结果的对比分析

4.1 自振频率计算结果

对于已经建立的模型进行求解。结果如表 1 所示。

表 1 CB25C 平台各阶自振频率(f/Hz)

一阶	2.201 2	二阶	2.280 3	三阶	2.317 6
四阶	5.356 2	五阶	5.623 8	六阶	7.476 4

根据海上实测的结果,一阶自振频率为 2.21,二阶自振频率为 2.29,三阶自振频率为 2.31,……由于 CB25C 计量平台自振频率的计算结果与实际测量值差距不大,初步计算结果与实际情况基本吻合,故认为平台的整体刚度变化不大,仍维持在设计范围内。

4.1 位移计算结果

表 2 是 CB25C 计量平台具有代表性的几个节点一阶振型时的位移情况,其中 UX 为主振方向。

表 2 CB25C 平台关键节点 UX 方向位移图(位移 x/m)

NODE	UX	UY	UZ
1	0.000 0	0.000 0	0.000 0
25	0.494 49	0.211 50E-02	0.155 12E-05
34	0.557 77	0.216 09E-02	0.179 78E-04
83	0.577 40	0.214 91E-02	0.177 67E-04
120	0.874 04	0.210 87E-02	0.150 72E-04
142	0.906 25	0.208 11E-02	0.144 48E-04
154	0.931 96	0.209 48E-02	0.147 02E-04
175	0.976 74	0.201 20E-02	0.139 72E-04
240	1.000 00	0.197 23E-02	0.137 53E-04

以 A 点即第 25 关键点为例,实际测量结果为(0.49,0.19E-02,0),将动态应变仪转换 90°后的实测结果为(0.51,0.21E-02,0),Z 方向的实测结果为 0,是因为变化实在太小,尽管仪器上有接近于 0 的微小显示但难以读出。

显然,实测结果与理论计算结果相差不多,在允许的误差范围内。因而可以认为以 ANSYS 软件进行平台自振特性分析是成功的。

参考文献:

- [1] 罗传信,王柳君.海洋固定平台桩基非线性分析[R].第二届离岸工程学术会议论文,1983.
- [2] 余同希,华云龙.结构塑性动力学引论[M].合肥:中国科技大学出版社,1994.
- [3] 张相庭,王志培,黄本才.结构振动力学[M].上海:同济大学出版社,1992.
- [4] ROY R Crag Jr. 结构振动力学[M].常岭,李振邦译.北京:人民交通出版社,1996.
- [5] 杨树耕,等. ANSYS 软件的基本功能与解题过程[J].中国海洋平台,2000(2),40-46.
- [6] 中国船舶检验局.海上固定平台建造与入级规范[S].北京:中国船舶工业出版社,1992.
- [7] Bao Ying bin, Li Run Pei, Gu Yongning, Dynamic Plastic Analysis of Ship Platform Collision[J]. China Ocean Engineering, 1998(1):93-95.

(下转第 47 页)

(3)样品 B22(PbO 的质量分数为 10%,经 850 °C 保温 10 h 处理)的各项性能为: $\epsilon_r=15.68$, $Q=2\,598$, $\tau_f=75.9\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] Hsu Cheng-Shing, Huang Cheng-Liang. Effect of CuO additive on sintering and microwave dielectric behavior of LaAlO_3 ceramics[J]. Mat. Res. Bul, 2001(36): 1939-1947.
- [2] Wang Ning, Zhao Mei-Yu, Yin Zhi-Wen. Effects of Ta_2O_5 on microwave dielectric properties of BiNbO_4 ceramics [J]. Materials Science and Engineering, 2003, B 99:238-242.
- [3] 肖汉宁,彭文琴,邓春明.微晶陶瓷的制备技术、性能及用途[J]. 中国陶瓷,2000, 36(5):31-33.
- [4] [英]P. W. 麦克米伦. 微晶玻璃[M]. 翻译:王仞千,北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [5] 张忱. 日本微波介电陶瓷的发展现状和趋势[J]. 材料导报,1995(5):46-48.

Influence of Pb and Ba on Microwave Dielectric Properties of Glass Ceramic

DING Cai-ping, QI Ping, JING Yue-lin

(Department of physics, College of Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The effects of Pb and Ba on the microwave dielectric properties were investigated in $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-La}_2\text{O}_3$ glass ceramic system in which BaO substituted for MgO and PbO substituted for La_2O_3 and its dielectric properties were measured by perturbation theory. The results show that the additive BaO had no effect on the dielectric properties of the system; but the additive PbO made ϵ_r increase apparently when the mass fraction of PbO was 10%. The Q value remained large. It was suggested that the addition of PbO did not make the dielectric loss increase. The property of the optimum sample obtained in experiment is $\epsilon_r=15.68$, $Q=2598$, and $\tau_f=75.9\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Key words: PbO; BaO; glass ceramic; dielectric properties

(上接第 42 页)

Analysis of Natural Frequency on Sea Platform Based on ANSYS

CUI Zhen-nan¹, LIU Xi-hua², WU Yu-hua¹

(1. School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Teacher College, Qingdao university, Qingdao 266071, China)

Abstract: The natural frequency on the sea platform CB25C is analyzed based on ANSYS, Compared with the measured data. The results ANSYS method show that is enough to meet engineering demand.

Key words: platform; natural frequency; analysis