

自升式海洋平台升降装置动力分析及疲劳分析

付敏飞 严仁军

摘 要:介绍了使用 ANSYS 有限元软件对平台结构进行静力分析、动力分析和疲劳分析的方法。应用 ANSYS 软件可以直接对波流载荷作用下的平台进行有限元分析,而且建模简单、计算精度高。本文采用 ANSYS 软件建立起自升式平台的数学仿真模型,对自升式平台进行了动力响应分析,并且利用动力响应的分析结果得到平台构件的应力范围和循环次数,根据 P-S-N 曲线计算平台升降装置的疲劳损伤、估算升降装置的疲劳寿命。

关键词:自升式平台 有限元 动力响应分析 疲劳损伤 疲劳寿命

中图分类号:TH211+.6

文献标识码:A

文章编号:1006-7973(2007)06-0056-03

一、引言

在海洋工程领域,活动式平台有着广泛的用途。自升式平台作为可移动的海洋结构物,其数量占四种常用活动式平台中的三分之二。平台在服役期间,主要承受波浪、海流载荷的作用,因此波流载荷是平台设计的主控载荷。在波流载荷的作用下平台产生振动,平台构件产生交变应力,导致构件的疲劳损伤,所以设计平台时,不仅要考虑波流的极限载荷,还要考虑波流引起的疲劳载荷。因此必须对波流载荷下的平台进行动力分析和疲劳分析。

API 规范中提供了平台在波浪作用下疲劳校核的简化方法^[1],但该方法是一种近似方法,需要根据同类型平台详细的疲劳分析数据进行校准,这需要大量平台详细疲劳校核工作的积累,而我国目前缺乏这方面的资料,因此用该方法进行平台的疲劳分析会产生较大的误差。而使用 ANSYS 有限元软件可以比较好地完成平台动力分析和应力分析,得到平台构件的应力时间历程。并在此基础上,计算平台构件的疲劳损伤,进行疲劳强度校核。

二、平台有限元模型的处理及动力分析原理

在波浪、海流力的作用下,平台结构的基本动力方程可以用如下二阶微分方程表示:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

其中:[M]为结构质量矩阵,[C]为结构阻尼矩阵,[K]为结构刚度矩阵, $\{\ddot{u}\}$ $\{\dot{u}\}$ $\{u\}$ 分别是节点的加速度、速度和位移向量, $\{F(t)\}$ 表示结构的载荷向量。

如计算出作用在平台上的波流力,就可由上式求出平台的加速度、速度和位移响应。而一般的海洋平台的结构都比较复杂,求解式中需要给出平台的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵,解大量的微分方程,计算量很大。因此用有限元软件 ANSYS 进行平台的动力分析,平台有限元模型的建立和求解都比较方便,就可以直接求出平台构件的内力、应力时间历程,并且能保证比较高的计算精度。有限元软件 ANSYS

专门为计算圆管形构件的流体静力、动力效应而提供了 PIPE59 单元,可以直接计算作用在平台桩腿上的海流力、波浪力,而不用自己计算波浪力一时间历程,从而大大简化了计算过程,因此适合于平台在波浪载荷下的静力和动力分析。有关 ANSYS 软件进行结构分析的内容,以及波浪载荷下平台静态、动态响应的计算方法见文献^[4]。

对平台进行有限元离散化处理时,为了简化计算,做了以下处理:把平台甲板上的所有设备、设施简化成集中质量单元(MASS21);泥面以上、水面以下桩腿部分用 PIPE59 单元模拟;水面以上、船体以下及泥面以下桩腿部分用 PIPE16 单元进行模拟;平台船体甲板、舷侧板、舱壁板理想化为壳单元由 SHELL63 单元进行模拟;船体纵桁、肋板、龙骨、竖析、扶强材理想化为梁单元由 BEAM4 单元进行模拟。

建立平台的有限元模型以后,利用 ANSYS 软件提供的瞬态分析模块,就可以计算平台的动力响应。具体步骤:

1. 选择瞬态动力分析类型(Transient),指定求解控制选项:分析选项、求解方法选项、时间积分效果、瞬态积分参数。

2. 定义阻尼形式、瞬态分析的开始和结束时间、载荷时间步长、荷载步内加载方式以及子载荷步数等。

3. 进行动力分析。求解完成后,进入 ANSYS 软件时间历程后处理器(POST26),提取出平台各个节点和单元的结果。包括节点的位移、速度、加速度,单元的内力、应力一时间历程。

三、平台的疲劳分析

在平台静力、动力分析的基础下,进行平台的疲劳分析。根据有限元分析计算得到的波流载荷下平台构件的应力时间历程,可以计算出平台构件的疲劳应力范围和循环次数,从而可以估算平台构件的结构损伤和疲劳寿命。

波流载荷下平台应力不一定是周期性的等幅循环应力,

收稿日期:2007-4-10

作者简介:付敏飞 男(1981—) 武汉理工大学交通学院 硕士 (430063)

研究方向:船舶与海洋结构物设计制造

所以要对应力一时间历程进行循环计数, 本人使用了雨流计数法进行应力循环计数。计算平台构件的疲劳损伤时, 作以下假设:

1. 疲劳损伤符合线性累积疲劳损伤理论, 即:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{pi}} = 1$$

时, 结构发生破坏。

式中: p 代表疲劳可靠度, k 为块谱数, N_{pi} 为可靠度 P 下应力为在应力 S_i 下对应的循环次数。 n_i 为在应力 S_i 下的实际循环次数。

2. 疲劳损伤达到临界值时结构发生疲劳破坏, 即 $D \geq 1$; 其中, D 疲劳损伤。

作用在平台上的波浪和海流载荷是变化的, 因此要计算多种波流载荷下平台的疲劳损伤。波浪和海流参数服从一定几率分布, 可以根据波浪和海流参数的联合几率分布划分成多个工况, 计算平台在每个工况下的疲劳损伤, 再根据每个工况占的比例, 计算出平台在服役期的总疲劳损伤。工况划分的越细, 计算结果精度越高。总疲劳损伤 D_0 计算公式为:

$$D_0 = \sum_{i=1}^k D_i p_i$$

式中: D_i 、 p_i 为第 i 个工况下管节点疲劳损伤和工况比例, k 为工况个数。

因此, 波流载荷作用下平台的疲劳分析过程为:

1. 根据波浪和海流的几率分布, 划分工况;
2. 计算出所有工况下平台构件的应力一时间历程;
3. 用雨流计数法对平台单元的应力一时间历程计数, 得到各应力水平下的应力循环次数;
4. 根据线性累积疲劳损伤原理计算节点的疲劳损伤;
5. 根据每个工况的比例, 计算构件危险节点在服役期的总疲劳损伤, 所有节点中, 疲劳损伤最大的节点即为平台构件的危险点;

6. 计算平台(危险点)的疲劳寿命, 或校核服役期内平台(危险点)的疲劳损伤是否达到临界疲劳损伤, 并估算寿命。

根据以上方法, 就可以对波浪和海流载荷下平台的疲劳强度进行校核。另外, 由于平台的疲劳应力不是对称的循环应力, 所以还需要使用 Goodman 图对 P-S-N 曲线进行修正。

四、计算实例

根据以上方法, 对胜利三号平台进行波流载荷下的动力分析和疲劳分析。该平台动力分析中用到的参数为: 平台工作水深 25m, 拖曳系数 $C_D=1.0$, $C_M=2.0$ 。波浪理论用 Stoke 五阶波理论, 在程序中只填写一组波浪参数和一组海流参数。

1. 计算模型

计算模型为胜利作业三号平台, 尺度为: 主体长 38m, 型宽 34m, 型深 4.2m; 拖航排水量为 2700t, 拖航吃水为 2.2m, 干舷为 2.0m。得到平台的有限元模型如图 1。

胜利作业三号平台的第一座自升式修井作业平台, 其升降系统的固桩架采用了一种新型、复杂的结构形式 柱壳加

环筋和纵筋式结构, 共有 3 条环筋、4 条纵筋组成。其中柱壳用 shell63 模拟, 环筋、纵筋用 beam4 模拟, 其有限元模型如图 2。



图 1 平台的有限元模型

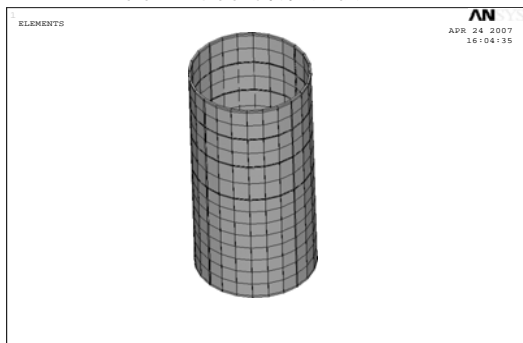


图 2 固桩架的有限元模型

2. 载荷工况

为简化计算, 只考虑波浪载荷和海流载荷组合的情况, 不考虑其他载荷。由于缺乏波浪和海流参数联合几率分布的资料, 因此, 假设波浪高度和海流速度没有关系, 海流速度按设计资料规定, 在所有工况中保持不变, 根据波浪的参数划分工况。由于波流作用方向对该平台构件疲劳应力的影响较小, 为了简化计算, 不考虑波流方向的分布, 按波流同向, 沿 X 轴正向传播。波浪和海流工况划分见表 1。

表 1 波浪与海流工况

工况	波高, m	波浪周期, s	水面流速, m/s	工况比例
1	1	4.5	1.285	0.1
2	2	6.0	1.285	0.1
3	3	6.3	1.285	0.1
4	4	7.0	1.285	0.1
5	5	7.5	1.285	0.1
6	6	9	1.285	0.1
7	6.6	9	1.285	0.1
8	7	9	1.285	0.1
9	7.6	9	1.285	0.2

3. 动力分析

根据上面划分的工况, 对平台进行动力分析, 计算得到平台节点的位移响应和平台构件的应力一时间历程。波流参数为波高 7.6m、周期 9s、表面流速 1.285m/s (该参数对应着风暴自存状态下波浪和海流工况), 表 3 列出了平台的自振特性, 图 1 为平台固桩架应力最大点 (294 单元) 的应力一时间历程。

表 2 平台的自振频率

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
频率, Hz	0.387	0.392	0.533	3.132	3.374	3.682	3.860	3.911

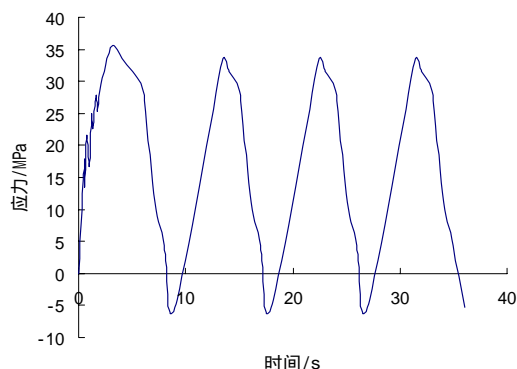


图3 应力—时间响应曲线

4. 疲劳分析

根据表 1 给出的波浪和海流参数的工况,可以计算每个波流载荷作用下平台的疲劳应力,依照 DNV 规范,选取焊接条件下存活率为 97.6% 单斜率 P-S-N 曲线,其形式如下:

$$\log N = a - m \log S$$

式中: S 为循环应力范围; a 为 S-N 曲线的交点; m 为 S-N 曲线斜率的负倒数, N 为循环应力 S 下的疲劳循环次数。这里取 $a=12.76$, $m=3.0$, 那么 P-S-N 曲线就可表示为:

$$\log N = 12.76 - 3 \log S$$

Goodman 等寿命曲线:

$$\frac{S_a}{S_{eq}} + \frac{S_m}{\sigma_b} = 1$$

式中: (S_a, S_m) 为应力循环范围, σ_b 为极限静应力, S_{eq} 与之等效的等幅循环应力。

根据 Goodman 修正原则,应力 (S_a, S_m) 与等幅循环应力 S_{eq} 具有相同的疲劳循环次数。所以 Goodman 的修正公式为:

$$S_{eq} = \frac{S_a \cdot \sigma_b}{\sigma_b - S_m}$$

5. 结果分析

动力分析计算出的平台最大稳态位移为 18.27mm, 平台最大动应力幅度(最大值和最小值之差)为 40.41MPa。平台的疲劳损伤计算结果见表 2。

表3 平台疲劳损伤

工况	应力范围, MPa	疲劳循环次数	实际循环次数	工况比例	疲劳损伤度
1	18.15	962432127	7008000	0.1	0.000728
2	20.35	682820827	5256000	0.1	0.000770
3	23.25	457858339	5005714	0.1	0.001093
4	25.46	348678205	4505143	0.1	0.001292
5	28.92	237905857	4204800	0.1	0.001767
6	31.07	191856378	3504000	0.1	0.001826
7	35.77	125731234	3504000	0.1	0.002787
8	38.32	102264170	3504000	0.1	0.003426
9	40.41	84044938	3504000	0.2	0.008338

把各个工况的疲劳损伤累计起来就是平台一年的疲劳损伤度:

$$D_0 = 0.022029$$

平台升降装置的估算寿命:

$$L = \frac{1}{D_0} = 45.4 \text{ 年}$$

有设计资料得知,平台的使用年限是 20 年,也就是说平台升降装置在使用年限内不会发生疲劳破坏,平台在设计上是合理的。

五、结论

1) 给出了使用 ANSYS 有限元软件对平台结构进行静力分析、动力分析和疲劳分析的方法。ANSYS 软件可以方便地对波流载荷作用下的平台进行静力、动力有限元分析,而且使用 ANSYS 软件建立的有限元模型简单,计算结果精度较高。

2) 平台的第一阶自振周期 2.58,由计算条件可知,平台的结构自振频率很好的避开了波浪的固有频率,避免与波浪发生共振。

3) 平台的动力响应和应力响应的周期基本一致,都近似等于波浪本身的周期。

4) 疲劳分析时,划分的工况越多,则疲劳校核的精度也越高,但工况多了会导致计算量增加。对于一般上程,划分工况的数量在 10~20 时,就可以保证分析精度。

5) 平台在服役期间还要考虑其他疲劳载荷的作用(例如地震、风、冰载荷等),计算出其他疲劳载荷下的疲劳损伤可以直接相加。

6) 没有考虑平台的腐蚀对疲劳寿命的影响,实际上随着平台服役期加长,结构逐渐腐蚀,会降低平台的疲劳寿命。

7) 没有考虑升降装置往复运动而产生的交变应力影响,故计算结果偏于保守。

参考文献

- [1] 孟昭禅,任贵永.海上自升式平台工作原理和基本特性.天津大学,中国海洋工程,1994.2
- [2] 王泉.自升式修井平台升降系统强度安全可靠性分析.钻井工艺研究院,石油矿产机械,2002.4
- [3] 柳春图,秦太验,徐永君.具有凹坑损伤的海洋平台桩腿有限元分析.中国科学院力学研究所海洋工程部,2002.2
- [4] 杨树耕,藤明清,孟昭瑛,任贵永.采用 ANSYS 程序的导管架平台结构有限元分析.天津大学建筑工程学院,2000.10
- [5] 彭熙民.“港海一号”自升式平台动力分析[J].中国海洋平台,2001
- [6] 李茜,杨树耕.采用 ANSYS 程序的自升式平台结构有限元动力分析.天津大学建筑工程学院,2003.8
- [7] 孙玉武,聂武.自升式海洋平台后服役期的疲劳强度及寿命分析.哈尔滨工程大学,2001.2
- [8] Williams MS, et al. Non-linear dynamic analysis of offshore Jack-up units [J]. Computer and Structure, 1998