

南海 2 号半潜式钻井平台疲劳寿命分析

张 磊 李润培

(上海交通大学海洋工程国家重点实验室)

摘 要

本文以南海 2 号半潜式钻井平台对角线斜撑与水平横撑连接处的 K 型节点为例进行疲劳寿命分析。首先, 建立整体结构有限元模型, 质量模型及水动力模型, 采用三维势流理论和 Morison 公式计算出结构所承受地波浪载荷。然后, 建立 K 型节点的有限元细化模型, 计算出的热点应力集中系数, 结合从整体有限元模型计算出的总体结构应力, 得到热点应力传递函数。应用谱分析方法求出结构交变应力范围及相应地循环次数, 最后根据 Miner 线性累积损伤规则进行节点的疲劳寿命评估。

关 键 字: 半潜式平台; k 型节点; 疲劳寿命分析

1 前 言

本文通过对南海 2 号半潜式平台结构中疲劳寿命的危险部位即对角线斜撑与水平横撑连接处的 K 型节点(图 4 所示 O 点)的弦杆截面突变处的疲劳寿命进行评估, 来确定该平台是否需要改造。

首先, 建立该平台的整体结构模型。将平台等效简化为一个空间刚架结构。甲板, 下体, 支柱, 撑杆等平台的主要结构均简化成为空间梁单元。在结构模型的基础上, 将平台的结构质量及设备质量分别以梁单元分布质量以及质量集中点的形式布置到空间刚架结构相应的梁单元和节点上, 得到平台的质量模型。针对半潜式平台一般具有大尺寸构件的结构特点, 分别建立对应于大尺寸构件的基于三维势流理论的水动力面元模型和对应于小尺寸细长构件的基于 Morison 理论的 Morison 水动力模型。利用三维势流理论和 Morison 公式, 计算得到平台所承受的水动力载荷。然后, 建立 K 型节点的有限元细化模型。K 型节点的管壁, 舱壁板以及节点内骨材的腹板均采用 4 节点壳单元, 骨材的面板则简化为空间梁单元。并在焊缝处进行有限元细化, 焊缝附近的单元尺寸大小近似为该处的板厚。通过对 K 型节点的有限元细化模型施加相应的单位载荷以及边界条件, 可以得到 K 型节点的热点应力集中系数, 进而得到热点应力传递函数, 并通过谱分析法求出结构交变应力范围及其相应的循环次数。最后, 根据 Miner 线性累积损伤理论, 求出管节点的疲劳损伤度及疲劳寿命。

2 整体有限元模型及水动力模型建立

本文采用挪威船级社 DNV 的 SESAM 程序系统分别建立南海 2 号半潜式钻井平台的整体结构有限元模型及水动力模型。将平台理想化为空间刚架模型。甲板, 下体, 支柱, 撑杆等平台的主要结构简化成为空间梁单元。南海 2 号半潜式钻井平台的总体空间刚架模型如图 1 所示。整个空间刚架模型包含 958 个梁单元。针对半潜式平台一般具有大尺寸构件的结构特点, 分别建立对应于大尺寸构件

的基于三维势流理论的三维水动力面元模型(图 2)和对应于小尺寸细长构件的基于 Morison 理论的 Morison 模型(图 3)。将两个水动力模型结合起来,得到南海 2 号半潜式钻井平台的水动力模型。利用水动力模型可以计算得到平台所受到的水动力载荷。其中水动力载荷可以传递到平台的整体结构模型上以便进行结构应力计算。

平台整体有限元模型的边界条件应该既要令平台不作刚体运动,也不能限制平台的变形,而且不能影响平台整体结构的受力,这样求出的相对变形和内力才是真实的。平台整体有限元模型的边界条件如图 4 所示(图中 a 点 $X=Y=Z=0$; b 点 $Y=Z=0$; c 点 $Z=0$)。

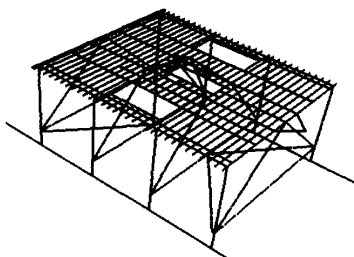


图 1 空间刚架模型

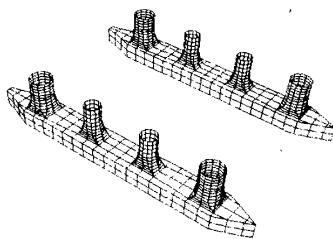


图 2 三维水动力面元模型

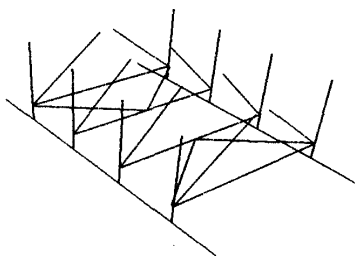


图 3 Morison 水动力模型

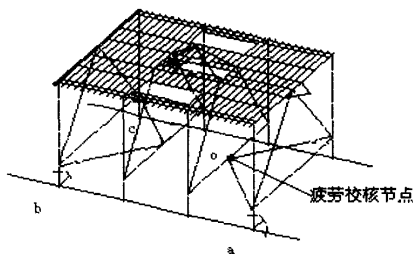


图 4 有限元模型边界条件

3 南海 2 号半潜式钻井平台波浪载荷计算

进行平台运动和波浪载荷计算之前,必须建立平台的水动力模型和质量模型。水动力模型和质量模型的建立在第一节中已有介绍。在平台水动力模型和质量模型基础上,选定若干浪向和波浪周期,采用挪威 DNV 的 SESAM 程序系统中 WADAM 模块求出对应于选定的各个浪向和波浪周期组合的运动及载荷的传递函数。本文从 0° 到 180° 之间,间隔 15° 共选取 13 个浪向,每个浪向下从 3~22 秒共取 15 个周期,如表 1 所示。浪向角定义为:沿船长方向指向船首为 0° ,指向船尾为 180° ;沿船宽方向,指向左舷为 90° 。在进行平台结构疲劳强度谱分析的时候,认为这 13 个浪向是以等概率作用在平台上。

WADAM 可以自动地将计算得到的波浪外载荷和运动加速度传递到 SESAM 程序系统的有限元分析模块 SESTRA 中,然后 SESTRA 自动将从 WADAM 中传递过来的波浪载荷分布到平台的空间刚架有限元模型上,并将运动加速度转换为有限元模型中各个结构节点上的惯性力,从而实现在动力平衡状态下计算平台的结构位移和内力。

表 1 计算规则波的波浪周期和波长

波浪周期 (s)	波浪频率(rad/s)	波长(m)	波长/船长
22	0.285599	754.9055	6.976945
20	0.314159	623.8884	5.766067
18	0.349066	505.3483	4.670502
16	0.392699	399.2881	3.690278
14	0.448799	305.7047	2.825367
12	0.523599	224.5993	2.075779
11	0.571199	188.7257	1.74423
10	0.628319	155.9716	1.441512
9	0.698132	126.3371	1.167626
8	0.785398	99.82202	0.92257
7	0.897598	76.42619	0.706342
6	1.047198	56.14981	0.518945
5	1.256637	38.99296	0.360379
4	1.570796	24.95551	0.230642
3	2.094395	14.03747	0.129736

4 K 型节点疲劳寿命分析

管节点是海洋平台结构中最重要也是最为薄弱的环节，其疲劳寿命分析是海洋平台疲劳寿命校核的重要内容。

4.1 K 型节点疲劳寿命分析的步骤

(1) 建立 K 型节点精细有限元模型

根据南海 2 号半潜式钻井平台的 K 型节点结构可知，K 型节点弦杆横截面发生变化处将具有最低的疲劳寿命。建立 K 型节点精细有限元模型（图 6、图 7 所示），整个 K 型节点精细有限元模型共有 124289 个节点，127162 个单元。

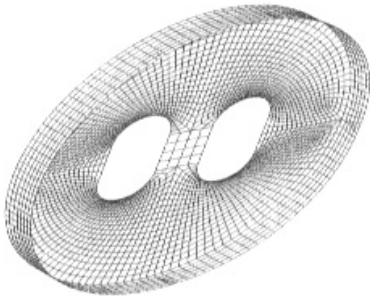


图 5 弦杆截面变化处有限元划分

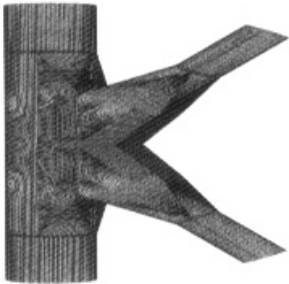


图 6 K 型节点精细网格有限元模型

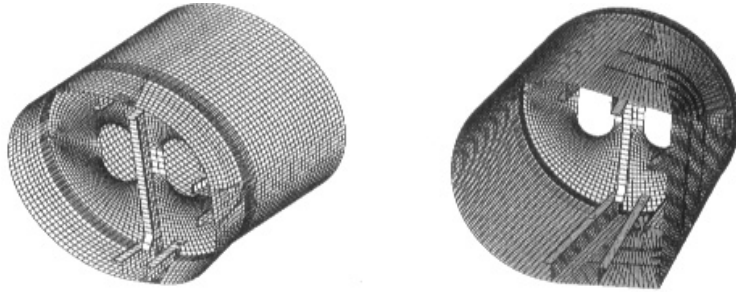


图 7 K 型节点弦杆细化图

(2) 边界条件和单位载荷加载

计算 K 型节点弦杆的应力集中系数时, 将撑杆的两端作刚性固定, 弦杆两端释放所有自由度。建立 K 型节点有限元模型时, 为了尽量减小边界条件可能对弦杆热点区域应力集中系数计算的影响, 撑杆与弦杆均从杆件截面变化处向外延伸了大于管径两倍的距离。这样处理, 可以得到较为真实的应力分布, 并能基本消除边界条件和加载位置对热点区域应力分布的影响。通过在 K 型节点中的弦杆 (水平横撑) 的两端施加单位轴向载荷、单位面内弯矩和单位面外弯矩, 分别计算 K 型节点中弦杆在三种不同外载荷下的应力集中系数。所施加的轴向力和弯矩成组出现, 且大小相等, 方向相反。图 8 (a), (b), (c) 分别为轴向力载荷, 面内弯矩和面外弯矩的加载示意图。

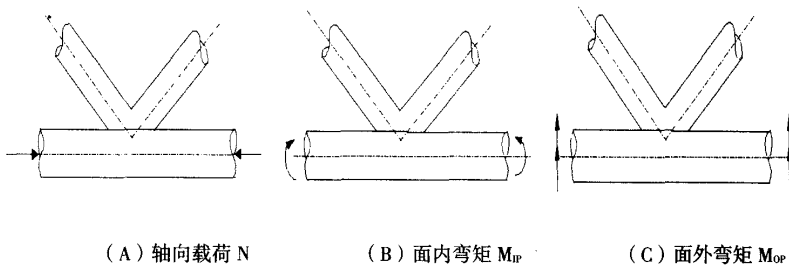


图 8

(3) K 型节点弦杆应力集中系数的计算

结构在波浪载荷作用下, 各个管状构件在远离节点处截面中的应力, 称为名义应力

($\sigma_{nominal}$)。通过有限元分析可以计算得到焊趾端部应力, 记做几何应力。发生最大几何应力的点称为“热点”, 相应的应力称为“热点应力”($\sigma_{hotspot}$)。由于几何突变导致的应力集中系数可以定义为: $SCF = \sigma_{hotspot} / \sigma_{nominal}$ 。沿着主应力的方向读取各单元的主应力值, 然后插值计算热点处的应力。根据 DNV 规范, 选用垂直于目标裂纹 45° 范围内的主应力, 作为疲劳循环主应力, 图 9 给出了主应力方向范围的示意图。然后根据有限元分析得到的校核点附近区域内的主应力分布, 再按照图 10 所示应力插值曲线, 采用外插值法, 由距离校核点 $1/2$ 和 $3/2$ 处的应力值向校核点 (hot spot) 进行线性插值, 得到进行疲劳寿命计算需要的热点处的应力。弦杆只有在接近 K 型节点处, 与斜撑连接一面的焊缝所在横截面 (180° 范围内横剖面) 有较大的应力集中现象, 因此, 只在弦杆截面突变处的焊缝线上 180° 圆弧范围内取了 5 个应力集中系数计算点。如图 11 所示。表 2 给出了这 5 个点的应力集中系数。

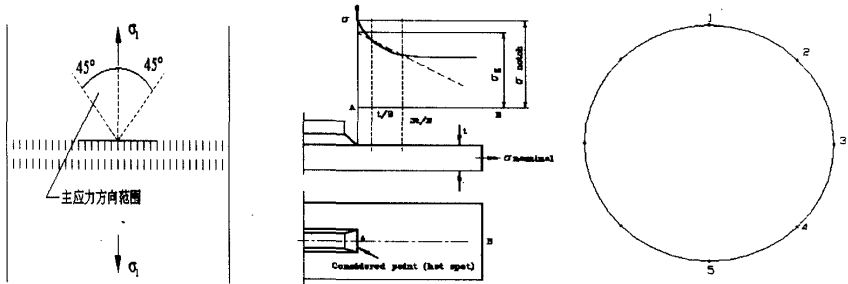


图 9 主应力方向范围 图 10 焊缝处主应力分布及主应力外插曲线 图 11 计算点

表 2 应力集中系数

计算点	轴向应力集中系数	面内弯矩集中系数	面外弯矩集中系数
1	1.34	0.00	1.20
2	1.85	1.14	1.36
3	1.30	1.18	0.00
4	1.83	1.14	1.36
5	1.33	0.00	1.20

(4) 计算 K 型节点应力响应传递函数

采用谱分析方法计算 K 型节点疲劳寿命,首先要获得 K 型节点在规则波中的应力响应传递函数。本文采用 Airy 波理论,在给定波高 2m (1m 波幅)的规则波中,综合应用三维势流理论和 Morison 方法,计算得到 15 个波浪周期和 13 个浪向下整体结构有限元模型中 K 型节点杆端有关部位的名义应力传递函数。将 K 型节点三种载荷,即轴向力,面内弯矩,面外弯矩的作用下得到的名义应力分别乘上相应的应力集中系数并相加后就得到了 K 型节点弦杆截面突变处的热点应力传递函数。

(5) 应力谱的计算及 S-N 曲线的选定

在任一短期海况中,波浪作为一个均值为零的平稳正态随机过程,其统计特性可用功率谱来确定。根据 DNV 相关规范,本文采用适用于无限风区充分发展波浪的 Pierson-Moskowitz 谱(简称 P-M 谱)。P-M 谱以有义波高 H_s 和平均跨零周期 T_z 为参数,可以写为:

$$S(\omega) = \frac{H_s^2 \cdot 4\pi^3}{\omega^5 T_z^4} \exp\left(-\frac{16\pi^3}{\omega^4 T_z^4}\right) \tag{1}$$

对于船舶、平台等线性系统,响应谱等于波浪谱乘以系统的响应幅值算子(RAO),则结构内部应力谱密度为: $S_R(\omega) = S(\omega) \cdot |H(\omega)|^2$ 式中: $S_R(\omega)$ 应力谱密度函数; $H(\omega)$ 应力响应传递函数; $|H(\omega)|^2$ 响应幅值算子; $S(\omega)$ 波浪谱密度函数。

得到应力谱密度后,可以计算应力谱的各阶矩,令应力谱 n 阶矩为 $m_n = \int_0^\infty \omega^n S_R(\omega) d\omega$

这样交变应力的统计特征也就完全确定下来:

有义波高: $H_s = 4\sqrt{m_0}$; 跨零率: $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$; 带宽系数: $\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}$

在预报南海二号平台的交变应力范围及其相应的循环次数时采用了墨西哥湾海域的波浪散布图, 因为墨西哥湾当地海域的海况与南海 2 号目前实际工作的中国南海海域相似, 甚至更为恶劣, 因此采用墨西哥湾海域波浪散布图对于南海 2 号平台的疲劳寿命评估将会导致保守结果。表 3 给出了墨西哥湾海域的波浪散布图。

表 3 墨西哥湾海域波浪散布图 ($\sum P = 10000$)

		Tz (s)								
		5.6	6.3	7.7	9.1	10.5	11.9	13.3	14.7	16.1
Hs (ft)	1.6	72	352	464	232	64	8	0	0	0
	4.9	24	368	1240	1336	704	224	48	8	0
	8.2	0	104	592	1040	824	384	120	32	8
	11.5	0	24	144	352	384	224	88	32	8
	14.8	0	0	32	88	120	80	40	8	0
	18.0	0	0	8	24	32	32	8	8	0
	21.3	0	0	0	0	8	8	0	0	0

本文计算分析中采用 DNV RP203 中推荐的 S-N 曲线。根据 K 型节点的结构形式和焊接类型, 在 K 型节点的疲劳计算中采用海水有牺牲阳极保护的 E 曲线。其主要参数见表 3。

表 3 海水中有牺牲阳极保护的 E 曲线

S-N 曲线	$N < 10^6$		$N > 10^6$		厚度修正指数 k
	Log (a)	m	Log (a)	m	
E 曲线	11.610	3.0	15.350	5.0	0.20

其计算公式为:

$$D = \nu_0 T_d \sum_{i=1, j=1}^{\text{all sea states all headings}} r_{ij} \left[\frac{(2\sqrt{2}m_{0ij})^{m_1}}{\bar{a}_1} \Gamma \left(1 + \frac{m_1}{2}; \left(\frac{S_0}{2\sqrt{2}m_{0ij}} \right)^2 \right) + \frac{(2\sqrt{2}m_{0ij})^{m_2}}{\bar{a}_2} \gamma \left(1 + \frac{m_2}{2}; \left(\frac{S_0}{2\sqrt{2}m_{0ij}} \right)^2 \right) \right] \quad (2)$$

式中: ν_0 : 平均跨零率, 单位 Hz; T_d : 设计生命周期, 单位: 秒;

r_{ij} : 对应第 i 个短期海况及第 j 个浪向的应力循环次数; m_{0ij} : 应力响应谱的 0 阶矩;

\bar{a}_1, m_1 : S-N 曲线参数, $N < 10^6$ (海水中);

\bar{a}_2, m_2 : S-N 曲线参数, $N > 10^7$ (空气中);

$\gamma(\cdot)$: 不完全 Gamma 函数; $\Gamma(\cdot)$: 不完全 Gamma 补函数

(6) Miner 累积损伤理论

结构在交变应力作用下的疲劳损伤是一个累积的过程。总的疲劳损伤量可通过把不同幅值的应力循环造成的疲劳损伤按适当的累加而得到。当疲劳损伤量达到某一数值时, 就将发生疲劳破坏。不同的累加原则有不同的疲劳累积损伤模型。目前海洋平台最常用的疲劳累积损伤模型都采用 Miner 线性累积损伤理论来建立。这一理论认为: 结构在多级恒幅交变应力作用下发生疲劳破坏时, 其总损伤量是各应力范围水平下的损伤分量之和。若在结构的使用周期 T 内, 且交变应力范围水平共有 n 级, 则结构的疲劳损伤度为:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

式中: D 为结构发生疲劳破坏时的总损伤量, n_i 为第 i 级应力范围 S_i 的循环次数; N_i 为在应力范围为 S_i 的恒幅交变应力作用下结构达到破坏所需的循环次数。

5 计 算 结 果

K 型节点弦杆上计算参考点的疲劳寿命见表 5 所示。

表 5 K 型节点弦杆疲劳寿命

计算点	轴向应力集中系数	面内弯矩集中系数	面外弯矩集中系数	疲劳寿命 (年)
1	1.34	0.00	1.20	251
2	1.85	1.14	1.36	54
3	1.30	1.18	0.00	909
4	1.83	1.14	1.36	56
5	1.33	0.00	1.20	258

6 结 论

计算表明,在南海 2 号半潜式钻井平台中具有最低疲劳寿命的 K 型节点的弦杆截面突变处为 54 年的寿命。

根据南海 2 号的运行报告,该平台到目前为止已正常运营了近 24 年,而正常运营操作时间只占总时间的 55%,另外考虑到南海 2 号的良好保养记录,可以认为现存的南海 2 号半潜式钻井平台仍然具有 20 年以上的疲劳寿命。但是在对南海 2 号半潜式钻井平台进行进一步的升级改造之前,必须对疲劳关键节点进行仔细的检查。

参 考 文 献

1 李润培,王志农.海洋平台强度分析 [M] 上海交通大学出版社,1992
2 刘应中,缪国平.船舶在波浪上的运动理论 [M] 上海交通大学出版社,1987
3 胡毓仁,陈伯真.船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 人民交通出版社,1996
4 [Det Norske Veritas – Recommended Practice RP – C203 Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures, October 2001

Fatigue Life Analysis for NANHAI–Semi–submersible Drilling Platform

ZHANG Lei LI Run–pei

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University)

Abstract

A fatigue life analysis for the K-joint of Nanhai-II semi-submersible drilling platform, where the chord is connected with the horizontal diagonal brace, is carried out in this paper. In the analysis, A 3D finite element model, a mass model and a hydrodynamic model of the platform are formed. And the wave loads acting on the structures are calculated using 3D potential theory and Morison equation respectively. The stress concentration factors of hot spot are obtained with the employment of fine mesh model of the K joint. The stress range and number of cycles of the joint are determined by spectrum analysis method. Finally, the fatigue strength of K joint is analyzed according to S – N curve and Miner Accumulative Law.

Key words: semi–submersible drilling platform; K–joint; fatigue life analysis