

文章编号:1001-4500(2006)04-0036-06

Truss SPAR 平台桁架的疲劳分析方法

郭 斌,唐文勇,张圣坤

(上海交通大学,上海 200030)

摘 要:根据 SPAR 平台的柱状特点,从线性系统运动方程出发,推导了 SPAR 平台的垂荡响应函数,选择 P—M 波浪谱,得出垂荡响应谱,由垂荡响应谱得出作用于桁架的疲劳载荷谱。通过细化有限元网格计算热点应力,采用 Goodman 公式修正应力幅值,基于规范的 S—N 曲线计算了管节点的疲劳寿命。

关键词:SPAR 平台;疲劳分析;功率谱

中图分类号:P752

文献标识码:A

陆上资源的日渐枯竭,资源开发向海洋,尤其是深海进军已成必然趋势,深海平台的研究对我国海洋油气开发具有重要的战略意义。目前国际上出现了各种新型的深海采油平台,其中 SPAR 平台可应用深度最大,结构最为新颖。

SPAR 平台分为两种:传统 SPAR(Classic SPAR)和桁架式 SPAR(Truss SPAR)。两者之间的不同在于桁架式 SPAR 没有传统 SPAR 所具备的储存功能,传统 SPAR 的壳体是一个吃水深、中空的垂直圆筒,而桁架式 SPAR 的壳体是一个吃水浅、中空的圆筒与向下扩展的桁架结构的组合体。因此桁架式 SPAR 更轻,更节约成本,两者的运动性能基本一致。

SPAR 平台在长期作业期间,结构受到不断变化的环境载荷作用,其疲劳强度问题十分突出,但目前各船级社对相关的疲劳评估方法的指南还没有成文,具体的评估过程也存在一定的难度。本文对桁架式 SPAR 的桁架部分的疲劳分析方法进行了探讨。首先从线性系统运动方程出发,推导了 SPAR 平台的垂荡响应函数,选择 P—M 波浪谱,得出垂荡响应谱,由垂荡响应谱得出作用于桁架的疲劳载荷谱。应用 MSC. PATRAN/NASTRAN 软件,采用热点应力法分析了具体管节点的疲劳情况,研究结果对桁架式 SPAR 平台的深入研究和开发具有实际工程意义。

1 SPAR 平台结构形式

本文以 Boomvang—Nansen SPAR 平台为例探讨整个平台桁架的疲劳评估方法。该平台 2002 年 5 月建成,油田位于墨西哥湾 East Breaks 112 和 643,平台处水深 1100 m,日原油生产能力为 4 万 bbl。采用了多种创新技术:单个多腔浮力筒;节省空间的水面井口装置;3 m 宽距调节器;海底井口应力接合点的内部链索接合器(为 107 m 额定钻探偏移误差设计);所有顶端拉紧的提升管的张力监测;为将来输入或输出管线直径可增加到 4m 预留的通过壳体的接头;在 1128 m 水深处打桩。其结构见图 1,结构数据如下:

硬舱(HARD TANK)直径:27.44 m

水线面面积(A_{wl}):591.03 m²

总吃水:150.30 m

硬舱吃水:57.32 m

桁架高度:87.80 m

压载舱高度:5.18 m

干舷:15.63 m

固定压载:7450 ton

可变压载:2500 ton

总质量:21310 ton

2 SPAR 平台桁架的疲劳载荷处理

收稿日期:2005-11-07

作者简介:郭斌(1979—),男,硕士生。

基金项目:国家自然科学基金专项基金资助项目(项目批准号:50323004)。

船舶及海洋结构通常被认为是线性系统,其特性不随时间变化。那么疲劳载荷谱的获得就可以通过波浪谱乘以传递函数得到。当输入过程为波浪,响应过程为交变应力时,传递函数就是结构在圆频率为 ω 的规则余弦波作用下,应力幅值与波幅值之比。较常用的求传递函数的方法是建立整体结构有限元模型,用 SESAM 软件的 WADAM 模块计算作用在整体模型上的波浪压力和惯性力,然后用 SESTRA 模块进行准静力有限元分析得到各节点和单元的应力传递函数。

桁架式 SPAR 平台由于其水线面结构为一直立的柱状体,可以不考虑浪向的影响,而且柱状体结构在波浪中的受力和运动已经有较成熟的理论。本文中分析的桁架结构完全处于水中,其底部没有与海底接触,可以将桁架结构的分析模型简化成顶部与硬舱刚性固定,桁架结构仅仅受到压载舱和升沉板由于垂荡作用而施加于桁架的交互作用力。可以通过公式推导求得作用于桁架部分的外力。首先根据结构特点计算出结构的垂荡响应函数,然后根据波浪谱通过垂荡响应函数求得垂荡响应谱。将桁架部分独立出来,根据求得的垂荡响应谱就可以得到桁架的疲劳载荷功率谱。

2.1 垂荡响应函数(RAO)

从多自由度线性系统的运动方程出发获得垂荡响应函数:

$$Mq'' + Cq' + Kq = Q \quad (1)$$

式中 M 、 C 和 K 分别为质量阵、阻尼阵和刚度阵; Q 为广义力; q 为广义坐标。

在垂荡响应函数的计算中,只考虑垂直方向上的运动和力。则式(1)改写为:

$$(M + A_{zz})Z'' + \beta_0 Z' + C_{zz}Z = F_z(t) \quad (2)$$

其中 M 为平台总质量; A_{zz} 为附加水质量; β_0 为阻尼系数; C_{zz} 为恢复系数; Z 为垂向位移。 $F_z(t)$ 为垂向激励力:

$$F_z(t) = F_z \sin(\omega t + \alpha) \quad (3)$$

其中 ω 为波浪的圆频率, α 为初始角度。

$$\text{根据参考文献[2],有 } F_z = F_{z1} + F_{z2} \quad (4)$$

式中, F_{z1} 为自由液面升高导致的升力; F_{z2} 为附加水质量带来的阻力,表达式分别为:

$$F_{z1} = \rho g \zeta_a \{0.25\pi D^2 \cos(hk(h-t))/\cos(hkh)\} \quad (5)$$

$$F_{z2} = -\omega^2 \zeta_a \{A_{zz} \sin(hk(h-t))/\sin(hkh)\} \quad (6)$$

式中 D 是 SPAR 的外径; h 为水深; $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长。

可以把规则波看成是自由液面升高,则波高 ζ_a 为:

$$\zeta = \zeta_a \sin \omega t \quad (7)$$

$$\text{恢复系数 } C_{zz} \text{ 为}^{[3]}: C_{zz} = C_{hy} + C_{mr} \quad (8)$$

式中 C_{hy} 为水力恢复系数; C_{mr} 为锚链力恢复系数,计算公式分别如下:

$$C_{hy} = \rho g A_{wl} \quad (9)$$

$$C_{mr} = \frac{\bar{\omega}}{2} [d/(2T) - \tan(nhd/(2T))] \quad (10)$$

式中 ρ 为海水密度; g 为重力加速度; A_{wl} 为水线面面积; $\bar{\omega}$ 为锚链在水中的单位长度的重量; d 为锚链线的总水平距离; T 为预张力。

$$\text{阻尼系数 } \beta_0 \text{ 为: } \beta_0 = \beta_{zz} + \beta_{zzw} |Z'| \quad (11)$$

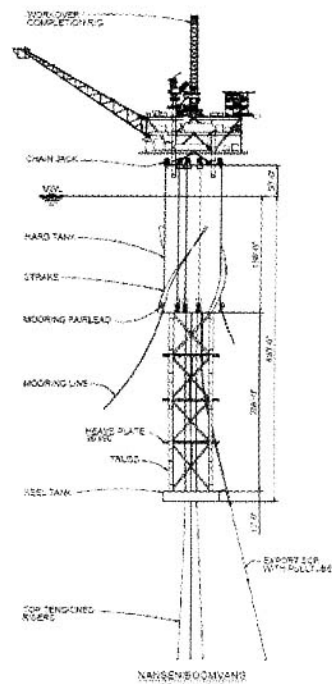


图 1 Boomvang-Nansen SPAR 平台结构

$$\beta_{zz} = 2\pi C_f [F_z(\omega, \mu = 0)/\zeta_a] \quad (12)$$

式中, $C_f = \omega^3 \cosh^2 kh / \{4\pi g^3 kh \tanh kh [1 + (\sinh 2kh)/2kh]\}$, μ 为入射角。

$$\text{垂荡阻尼为:} \quad \beta_{zzw} = 0.5 \rho C_{dz} S \quad (13)$$

$$C_{dz} = 0.82$$

$$\text{附加水质量 } A_{zz} \text{ 为:} \quad A_{zz} = A_{zz1} + A_{zz2} \quad (14)$$

式中, A_{zz1} 为柱体附加水质量; A_{zz2} 为升沉板上的附加水质量。 A_{zz1} 的计算公式如下^[4]:

$$A_{zz1} = C_m \rho A_{wl} h_s \quad (15)$$

其中 C_m 为附加质量系数, 对圆柱体取 $C_m = 1$; h_s 为柱体高度。

A_{zz2} 由绕流公式求得, 绕流公式形式如下:

$$F_D = C_D \frac{\rho u_0^2}{2} A \quad (16)$$

式中, u_0 为来流流速, 即垂荡速度; A 为绕流物体在垂直来流方向上投影的面积, 即升沉板的面积; C_D 为绕流阻力系数, 它主要与物体的形状及雷诺数 ($Re = ul/\nu$, 其中 l 是物体的特征长度) 有关, 这里由于绕流物体为平板, 厚度可以忽略, 取 $C_D = 1.98$ 。

$$A_{zz2} = C_D \rho Z'^2 \frac{A}{2} \quad (17)$$

$$\text{垂向位移 } Z \text{ 为:} \quad Z = Z_a \sin(\omega t + \alpha_z) \quad (18)$$

$$\text{则 } Z' = Z_a \omega \cos(\omega t + \alpha_z), \quad Z'' = -Z_a \omega^2 \cos(\omega t + \alpha_z) \quad (19)$$

把(3)~(19)代入(2)中, 令 $\omega_0 = \sqrt{C_{zz}/(M + A_{zz})}$ (ω_0 为垂荡的固有频率), 可以得到垂荡响应函数为(响应曲线见图 2):

$$(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\beta_{zz} + \frac{3}{4}\beta_{zzw}Z_a^2\omega^2)\omega^2 = (F_z/Z_a)^2 \quad (20)$$

2.2 波浪谱

水动力分析中要用到的墨西哥湾的环境参数如下:

有义波高: 7.30m 名义周期: 11.210s 风速: 33.04m/s 流速: 1.81m/s

本文中选取双参数 P-M 波浪谱, 其形式如下^[6]:

$$S_\eta(\omega) = 173 H_s^2 / (T_0^4 \omega^2) \exp[-691 / (T_0^4 \omega^4)] \quad (21)$$

其中 H_s 为有义波高; T_0 为名义周期。波浪谱的曲线见图 3。

2.3 垂荡响应谱

将波浪谱和垂荡响应函数结合起来就可以获得平台的垂荡响应谱。其公式如下:

$$S_{zz} = RAO^2 \times S_\eta(\omega) \quad (22)$$

S_{zz} 为垂荡响应谱, 见图 4。

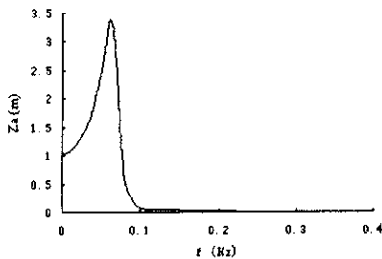


图 2 垂荡响应函数

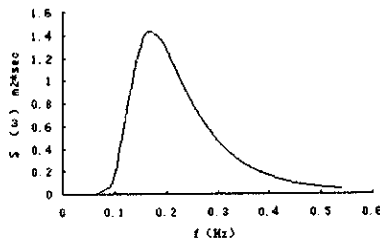


图 3 波浪谱

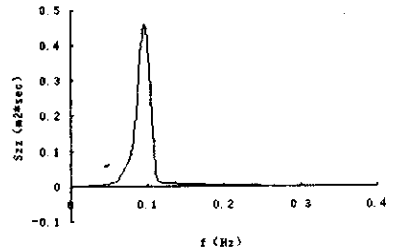


图 4 垂荡响应谱

2.4 桁架部分疲劳载荷谱

响应谱求得之后就可以计算垂荡的标准差和名义振动周期。

$$\text{标准差:} \quad \sigma = \sqrt{\mu} \quad (23)$$

$$\mu = \int_0^{\infty} S_{\eta}(\omega) d\omega \quad (24)$$

$$\text{名义振动周期:} \quad T = 2\pi \sqrt{\mu/\eta} \quad (25)$$

$$\eta = \int_0^{\infty} \omega^2 S_{\eta}(\omega) d\omega \quad (26)$$

桁架结构仅仅受到压载舱和升沉板由于垂荡作用而施加于桁架的交互作用力。

垂荡运动时压载舱的载荷功率谱:

$$F_b = M_b(g + Z'') - \rho g v \quad (27)$$

其中 M_b 为压载质量,包括固定压载和动压载; v 为压载舱体积,

作用于升沉板上的力可以通过绕流公式计算:

$$F_D = C_D \rho Z'^2 A / 2 \quad (28)$$

3 热点应力计算

建立桁架整体有限元模型,在整体有限元模型中所有的管均用板单元模拟,为了减少模型规模,非应力集中部分板单元可以划分为粗网格。同时,底部压载舱的结构简化成一块均匀受力的加筋板(见图 5)。节点处按照图 6 方式设置加筋和肘板以避免应力过分集中,其中主管如图所示位置加了三圈筋,其他连接节点处加端部导角的肘板。为简化计算只考虑动压载装满的情况,载荷工况分别为:(1)垂荡波峰点,此时 F_b 最小, F_D 为 0,获得载荷谷值;(2)垂荡的波谷点,此时 F_b 最大, F_D 为 0;(3)下沉运动通过平衡位置的点,此时 F_b 达到均值, F_D 达到负值最大;(4)上升运动通过平衡位置的点,此时 F_b 达到均值, F_D 达到正值最大。后面三个工况的计算结果可以确定载荷峰值,则应力幅值即为两者之差。应力均值为两者均值。按照 weibull 分布给模型加载极端载荷,即百年一遇的风暴载荷^[7]。工况 4 下管节点处的静力计算结果见图 7。

从静力计算结果可看出升沉板和压载舱处交汇的管节点处应力集中较大,加筋和加肘板后,应该注意对横向管进行加强,因为横向管受力较小,结构也较弱,加肘板之后由于力的传递容易出现应力较大的情况。通过计算得出:压载舱处管节点的载荷计算考虑工况 1 和工况 2,升沉板处管节点载荷计算考虑工况 1 和工况 4(最顶部的升沉板处最危险)。

整体模型分析后,对需要计算热点应力的部位细分单元,单元长度取板厚量级左右,采用过渡方法,其余部位仍然按照粗网格划分,重新计算获得热点应力。细化模型见图 8。

设板厚为 t ,则根据 DNV 规范^[8],热点处的应力由距离该点 $t/2$ 和 $\frac{3}{2}t$ 处的应力插值得到。

由于平均应力值很大,热点应力法求得的应力幅值需要经过 Goodman 公式修正:

$$\sigma_a = \Delta\sigma / (1 - \sigma_m / \sigma_b) \quad (27)$$

其中 σ_a 是修正后的应力幅值; $\Delta\sigma$ 和 σ_m 是有限元分析求得的应力幅值和应力均值; σ_b 是材料强度极限。

由于有限元分析中的载荷是考虑百年一遇的风暴,假设疲劳应力范围长期服从 Weibull 分布,可以根据下面公式求得等效应力幅值^[9]:

$$\sigma_e = \sigma_L \Gamma(1 - m/\xi)^{1/m} / (\ln N_L)^{1/\xi} \quad (28)$$

$S-N$ 曲线用 DNV 给出的修正公式(针对阴极保护的 T 曲线的管节点)^[8]

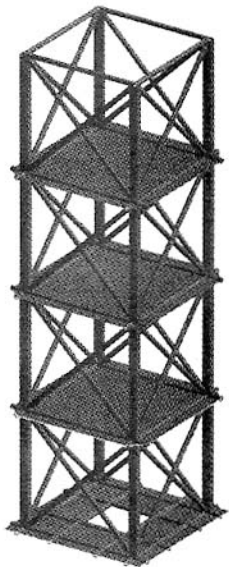


图 5 整体模型

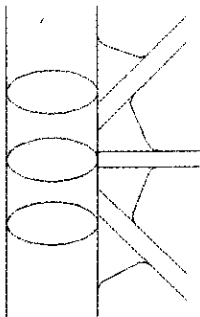


图 6 局部结构加强图

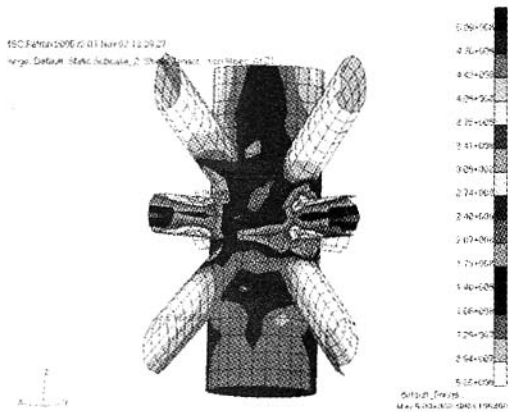


图 7 计算结果

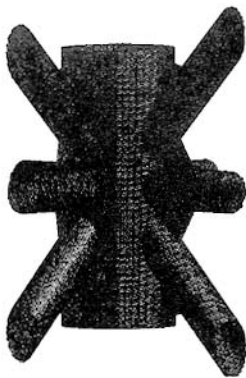


图 8 网格细化图

①当 $\Delta\sigma > 19.0\text{MPa}$ 时, $\log N = 12.16 - 3.0 \log S$
②当 $\Delta\sigma < 19.0\text{MPa}$ 时, $N \geq 2 \times 10^8$
在计算寿命时用到的应力周期(即垂荡振动周期)根据式(25)求得。
计算结果见下表:

表 管节点疲劳寿命

管节点所在部位	平均应力 σ_m (MPa)	应力幅值 $\Delta\sigma$ (MPa)	Goodman 公式修正后 σ_e (MPa)	等效应力幅 σ_e (MPa)	寿命 (年)
压载舱处	351	86	188.7	25.35	41.4
第一层升沉板处	298	78	144.98	23.28	53.4
第二层升沉板处	305	80	151.76	23.67	50.8
第三层升沉板处	323	83	166.25	24.39	46.4

5 结语

通过上面的计算表明:根据 SPAR 平台的特性,求得其垂荡响应谱,进而推导出桁架部分的疲劳载荷的方法是可行的。桁架部分可以简化为顶部固定的模型进行分析。从分析的结果可以看到压载舱处的管节点疲劳寿命最短,其次是第三层升沉板处。整个结构的寿命较长,说明结构的设计是偏安全的,未考虑横飘和轴向旋转对疲劳载荷的影响可能也是原因之一。

参考文献

- [1] Bangs A S. SparTEC Inc. Design of the Truss Spars for the Nansen/Boomvang Field Development[J]. OTC 2002—14090, 6—9 May 2002— Houston, Texas U. S. A.
- [2] 聂武,刘玉秋. 海洋工程结构动力分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2002.
- [3] Agarwal A K, Jain A K. Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves[J]. Ocean Engineering 30 (2003): 487—516.
- [4] 李润培,王志农. 海洋平台强度分析[M]. 上海:上海交通大学出版社,1992.
- [5] Marcio de Abreu Grove, A Concept Design and Hydrodynamic Behavior of a SPAR Platform, OMAE2003—37166, June 8—13, 2003 —Cancun, Mexico
- [6] 徐德伦,于定勇,随机海浪理论[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [7] Wang J, Zhang B, Berg S. Truss Spar Time Domain Inplace Structural Strength Analysis[J]. OTC 2002—14299, 6—9 May 2002— Houston, Texas U. S. A.
- [8] DNV Fatigue strength analysis for mobile off shore units[S]. 1998.
- [9] 胡毓仁. 船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 北京:人民交通出版社,1996.

ANALYSIS METHOD OF TRUSS FATIGUE OF TRUSS SPAR

GUO Bin, TANG Wenyong, ZHANG Shengkun

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 20030, China)

Abstract: This paper analyzes the fatigue life of truss parts of a Truss SPAR. The heave response amplitude Operator of SPAR platform is deduced from the motion function of linear system. The heave response spectrum is obtained by choosing P-M wave spectrum. The fatigue loading spectrum is gotten through heave response spectrum. The hot-stress is calculated by finite element method, and then the Goodman function is used to modify the stress amplitude. The fatigue life of tubular joints is carried out based on S-N curves.

Key words: SPAR platform; fatigue analysis; power spectrum

(上接第 54 页)

动时间在 10s 以内,当靠近无线电通讯有较高要求时,可采用专用滤波器予以过滤,以满足相关要求。

参考文献

- [1] 刁集山. 交流电动机软起动控制技术及其应用[M]. 太原:山西煤炭出版社,1996.
- [2] 陆让之,张声钺,黄春兰. 船舶电机学[M]. 人民交通出版社,1991.

APPLICATION OF SOFT STARTER ON PLATFORM

CUI Haiyang

(China Classification Society Qingdao Branch, Qingdao 266071 China)

Abstract: This paper introduces the working principle and basic function of the soft starter and points out the advantage of the soft starter applying to offshore platform.

Key words: soft starter, asynchronous motor, application, offshore platform