

海上固定式导管架平台 疲劳寿命评估及程序系统*

柳春图 王维明 丁克勤

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘 要 本文使用疲劳分析与断裂力学结合的方法, 对海上固定式导管架平台结构的疲劳裂纹, 从形成到扩展至其损伤容限或贯穿管壁厚的整个过程, 进行了分析评估。在 486 微机 on 构造了一个计算机分析程序系统 (ASFPOS), 该系统除了具有通常的平台静、动强度计算外, 可对平台的疲劳寿命、剩余寿命进行计算。当与平台在线裂纹监测系统组合后, 可实施对平台结构剩余服役寿命的适时预报。作为一个评估实例, 对某一固定式导管架平台进行了分析评估, 给出了结构的疲劳寿命。

关键词 固定式导管架平台; 疲劳寿命评估; 疲劳分析; 断裂力学; 程序系统

分类号 U 674.381; TP319

0 引 言

海上固定式导管架平台由一系列的空间导管架焊接组成, 其管节点是结构的主要构件, 几何形状复杂, 且由于焊接工艺的影响, 有残余应力存在及焊缝和热影响区内的夹渣、裂纹等缺陷, 致使局部应力集中严重, 常常成为固定式导管架平台结构疲劳失效源。因此, 对管节点的疲劳研究成为海洋平台断裂研究的重要内容, 引起了各个国家的普遍重视。作者结合在海洋工程结构方面近十年的理论和应用研究经验, 参考了国内外海洋结构设计规范, 将疲劳分析与断裂力学结合, 建立了一套适用于海上固定式导管架平台结构强度分析及疲劳寿命预测的计算机程序系统, 并已应用于实际平台的分析评估, 表明了程序系统的有效性。

1 固定式导管架平台结构的疲劳寿命评估方法

1.1 波浪等环境载荷的计算

海洋平台环境载荷包括波浪、海流、风载以及冰载等, 其中对疲劳强度起主要作用的是波浪载荷。

通过对特定海域的实地观测, 并经观测数据的统计处理, 获得该海域的波浪谱。依据 Airy 波理论或 Stokes 五阶波理论, 计算波浪对结构的作用力。使用 Morrison 方程计算波浪力:

$$d\bar{F} = \frac{1}{2} C_d \rho D \bar{U} |\bar{U}| ds + C_m \rho A \dot{U} ds$$

式中 $d\bar{F}$ 为作用在某一导管微元 ds 上的波浪力, ρ 是海水密度, \bar{U} 是水质点瞬时法向速度, \dot{U} 是水质点瞬时法向加速度, D 为导管外径, A 为导管横断面积, C_d 和 C_m 分别为阻力系数和惯性

* 收稿日期: 1996-06-04

柳春图, 男, 1935 年生, 研究生

系数 \bar{U} 、 $\dot{\bar{U}}$ 可由 Airy 或 Stoke's 波理论得到。

海流对结构的作用力由下式计算:

$$dF = \frac{1}{2} C_d \rho D U^2 ds$$

式中 dF 为 ds 微元上的海流力。

风载对结构的作用力由下式计算:

$$F = \frac{1}{2} C_d C_h C_s \rho_a V^2 A$$

式中 F 为风力, ρ_a 为空气密度, V 为风速, C_h , C_s 为考虑形状和高度的影响系数, A 是承受风压的投影面积。

1.2 平台结构的有限元分析

使用有限元前处理 CAD 系统, 建立固定式导管架平台的有限元模型。选择适当的单元类型, 适当的单元数目和节点数目, 引入结构的约束条件和载荷条件。使用有限元计算模块作结构的静态和动态有限元分析, 获得结构的静、动态应力分布和固有频率及模态。

1.3 管节点应力集中系数计算

管节点应力集中系数的计算有许多方法, 一般可使用数值方法、实验法或参数公式法。在实际使用中, 常使用参数公式法, 如 Kuang 公式等。对于管节点的应力集中系数计算, API 规范中推荐了一个参数公式表格(见表 1)。

表 1 管节点的应力集中系数

节点类型		α	轴向载荷	面内弯曲	面外弯曲
SCF Chord	K	1.0	2A	2/3A	3/2A
	T&Y	1.7			
	X $\beta < 0.98$	2.4			
	X $\beta \geq 0.98$	1.7			
$SCF_{brace} = 1 + 0.375 \left(1 + \sqrt{\tau/\beta SCF_{chord}} \right)$			1.8		

其中 $A = 1.8 \sqrt{U \tau \sin \theta}$, $\tau = t/T$, $\beta = d/D$, $U = D/2T$ 。 t , T 为各支、主管壁厚, θ 为主、支管夹角, d , D 为各支、主管外径。

由于结构处于海洋动态载荷作用下, 故应考虑一个动态放大因子 DAF, 其值为:

$$DAF = \left\{ \left[1 - \left(T_s/T_w \right)^2 \right]^2 + 4\lambda^2 \left(T_s/T_w \right)^2 \right\}^{-1/2}$$

其中 T_s 为结构的一阶固有周期, T_w 为某一波高的波浪周期, λ 为相应的阻尼系数。

1.4 平台结构热点应力及幅值

固定式导管架平台的热点位置常常位于焊接管节点的主、支管的焊缝处。对于同时承受轴向力、面内弯矩、面外弯矩的管节点, 其最大热应力为:

$$\sigma_{hs} = |SCF_{ax} \sigma_{ax}| + \left[\left(SCF_{ipb} \sigma_{ipb} \right)^2 + \left(SCF_{opb} \sigma_{opb} \right)^2 \right]^{1/2}$$

式中 σ_{ax} 、 σ_{ipb} 和 σ_{opb} 分别为主管或支管单元端部节点位置的轴向力、面内弯曲应力和面外弯曲应力, SCF_{ax} 、 SCF_{ipb} 和 SCF_{opb} 分别为相应的轴向、面内和面外弯曲的应力集中系数。为获取某热点处最大热点应力幅值, 应在一个波浪周期内, 选取二个位相, 分别使该点取得最大和最小

热点应力, 于是可获得最大热点应力幅值。

1.5 S-N 曲线的选用

根据 API 的建议, 对于普通管节点, 某一波高波浪力下的疲劳损伤可由规范中给出的 X 型 S-N 曲线计算。而对于与桩腿联接的节点, 其 S-N 曲线的选择应视节点局部是否有加强板或为搭接节点而定。当有加强板时, 应采用规范中的 F 型 S-N 曲线, 当为搭接节点时, 则选用 T 型 S-N 曲线。本文选用了 API 规范中的 X 型 S-N 曲线, 其表达为:

$$N = 2 \times 10^6 (\Delta\sigma/100)^{-4.38}$$

式中 $\Delta\sigma$ 为应力水平 (MPa), N 为疲劳失效循环数。

1.6 疲劳裂纹形成寿命的计算

对于给定海况, 各级波浪载荷作用下, 结构在一年内的疲劳损伤, 可使用 Miner 法则计算:

$$D_{damage} = \sum n_i/N_i$$

其中 n_i 为第 i 级波浪一年内出现的次数, N_i 为该波浪力下, 由 S-N 曲线确定的疲劳寿命。于是, 结构疲劳裂纹形成寿命 (单位: 年) 为:

$$N_f = 1 / (\sum n_i/N_i)$$

1.7 疲劳裂纹扩展寿命的断裂力学分析

上面疲劳分析获得的 N_f 为平台结构的疲劳裂纹形成寿命, 其分析假定结构无裂纹存在。但实际平台并非如此。为对结构作出更好的评估, 应对平台存在的裂纹进行断裂力学分析。

由线弹性断裂力学理论, 对于管节点的表面裂纹, 其应力强度因子为:

$$K = M (M_m \sigma_n + M_b \sigma_b) \sqrt{\pi a} / \Phi$$

式中 σ_n 、 σ_b 分别为管的膜应力、弯曲应力分量, a 为裂纹深度, M_m 和 M_b 为膜应力及弯曲应力的修正系数, Φ 为第二类完全椭圆积分。

裂纹的损伤容限值可由临界裂纹表示。一种观点认为: 临界裂纹可由断裂韧性确定, 近似取为 $a_c = K_{Ic}^2 / \pi (Y\sigma)^2$ (一般 $a_c < T$ (壁厚)); 另一种观点认为: 可直接取管壁厚, 即 $a_c = T$ 。当裂纹 $a = a_c$ 时, 即认为结构破坏。

裂纹扩展寿命由 Paris 公式计算:

$$da/dN = C_a (\Delta K)^{m_a}, \quad dc/dN = C_c (\Delta K)^{m_c}$$

式中 C_a, m_a 和 C_c, m_c 为裂纹深 a 、裂纹长 c 方向上的材料常数。若考虑海水腐蚀, 则各常数取海水环境下的相应值。裂纹扩展寿命按一定的时间间隔步长, 迭代计算:

$$a_{i+1} = a_i + \int_{N_i}^{N_{i+1}} C_a [\Delta K(\sigma, a, c_0)]^{m_a} dN$$

$$c_{i+1} = c_i + \int_{N_i}^{N_{i+1}} C_c [\Delta K(\sigma, c, a_0)]^{m_c} dN \quad (i = 0, 1, 2, \dots)$$

式中 a_0, c_0 为初始裂纹尺寸, 可取实测值。若无实测值时, 可取 $a_0 = 2\text{mm}$ 左右, $c_0 \approx 10 \sim 30\text{mm}$ 。经 n 次迭代, 使 $a_n = a_c$, 即可获得平台结构的疲劳裂纹扩展寿命 N_{pe} 。一般可认为平台的疲劳寿命 $N = N_f + N_{pe}$ 。当考虑各参数为随机变量时, 可使用概率断裂力学进行上述分析计算。

2 程序系统构成及功能

程序系统 A SFPOS 由五大功能模块构成: 波浪等环境载荷计算; 结构有限元计算; 热点应

力计算;结构疲劳分析;结构断裂力学分析。各模块在DOS平台上一主控菜单统一控制下运行。各模块组成如图1所示。WAVE模块计算波浪载荷;有限元计算模块利用了Super-SAP中的部分执行模块来作静、动态和模态计算;HOT模块为热点应力计算,可求出任一管节点的热点应力和幅值;FLIFE模块可计算疲劳裂纹形成寿命;PLIFE模块可计算裂纹扩展寿命(也可附加PSCM模块,作概率断裂力学计算);SD2BEDIT为有限元前处理CAD系统;SVIEW模块为有限元后处理CAD系统。另外,还包括一些辅助模块等。

3 实例

某固定式导管架平台,其有限元模型如图2所示,共有744个梁单元组成。图3示出了经程序计算获得的二个危险管节点的热点应力幅值与有效波高的关系。该两点疲劳寿命评估结果为16年和24年,与设计服役寿命吻合。

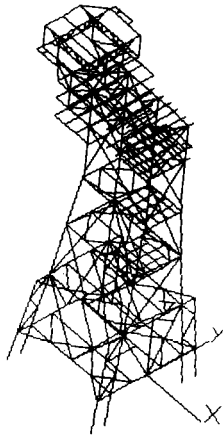


图2 平台有限元模型

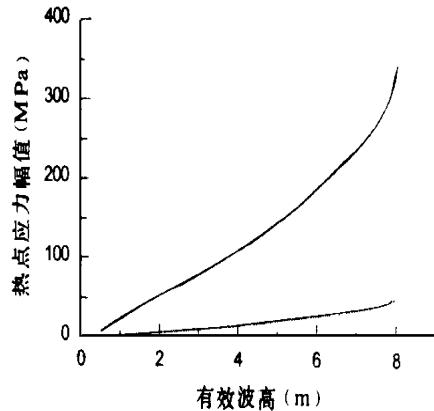


图3 两个危险点的应力幅值

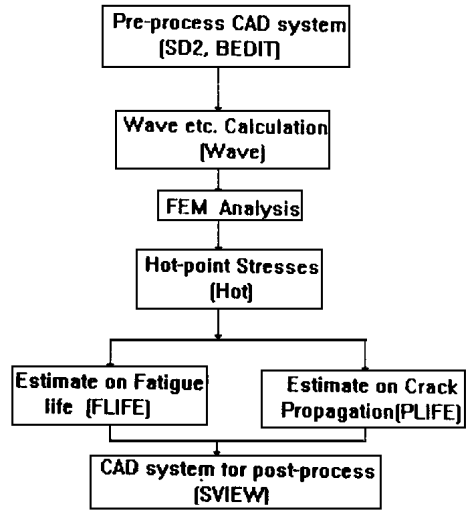


图1 ASFPOS程序系统

参 考 文 献

- 1 American Petroleum Institute *Planning, Designing and Constructing Fixed Off shore Platforms* API RP2A-WSD, 20th Edition. Washington: API, 1993: 54
- 2 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学. 天津: 天津大学出版社, 1991: 90
- 3 柳春图, 吴犀甲. 含轴向裂纹柱壳裂纹尖端应力应变场及应力强度因子计算. 力学学报, 1987, 19: 125~135
- 4 张延宏, 柳春图, 梅红. 管节点疲劳寿命估算的统计分析方法. 海洋工程, 1990, 8: 15~23
- 5 薛以年, 徐纪林, 李禾. 焊接接头热影响区的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率. 实验力学, 1990, 5: 80~86

6 Murakami Y. Stress intensity factors handbook, Vol 2 Oxford: Pergamon Press, 1987: 698

Assessment on fatigue life of the fixed jacket platforms on sea and programme system

Liu Chuntu, Wang Weinong and Ding Keqin

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080, P. R. China)

Abstract

The assessment method of the fixed jacket platforms on sea was introduced based on a cooperation of fatigue analysis and fracture mechanics calculation in the paper, which involved with the process from fatigue crack formation to propagation to its damage tolerance. A programme system (ASFPOS) with the function of doing static and dynamic FE analysis was constructed to assess fatigue life or remaining fatigue life of platforms. As soon as the programme system is combined with in-line crack monitoring system, it may be used to predict remaining service life of platforms. As an example, a real fixed jacket platform was analyzed and the fatigue life was predicted.

Key words: fixed jacket platform; fatigue life assessment; fatigue analysis; fracture mechanics; programme system