

* 设计·计算 *

渤海4号钻井船的疲劳损伤计算与分析

中国船级社海洋工程部(北京市100006) 段梦兰

中国科学院力学研究所(北京市100080) 柳春图

北方石油钻井公司(天津市300452) 姜渭渔 张玉泉

辽河油田工程技术研究院(盘锦市124010) 周金初

摘要 文章对渤海4号钻井船在我国渤中、辽东湾、东海和南海4大海域作业的疲劳损伤进行了详细的计算和分析,讨论了平台薄弱部位桩靴加强程度对平台疲劳损伤大小的影响及海流对平台损伤的作用。最后对渤海4号进行了充分的技术经济评价,为今后平台的合理使用、经济使用、安全作业提出了重要的建议。

叙词: 海洋钻井设备 疲劳 损伤 安全寿命 计算

一、渤海4号钻井船疲劳损伤评价的必要性和重要意义

渤海4号钻井船是渤海石油钻井公司最早购买的海洋石油钻井装置之一,于1977年正式投入使用,至今已连续钻井18a,作业水深从10~100m,曾经在我国渤海(渤海中部和辽东湾)、南海、东海和日本海等广大海域内作业过,并于1990年和1992年两次出国坞修。在长期的钻井作业和拖航过程中,平台经受了无数次复杂恶劣海况和工作载荷的作用,受到各种碰撞、拆装,特别是疲劳方面的损伤,其安全分析和疲劳损伤评价提到了紧迫的日程上。这一工作的紧迫性和重要意义具体体现在如下几个方面:

(1) 平台的设计寿命为20a,而渤海4号的实际使用寿命已达18a了,在此期间除了两次大修外没有间断过作业,因此平台实际上已经到了退役年限。若继续使用,必须对其作业的安全性和可靠性进行充分的论证和评价,以确保平台和作业人员生命的安全。

(2) 平台在经过1990年和1992年两次

大修后,1993年又在桩脚箱内及桩靴等处出现裂纹,这些疲劳扩展裂纹直接影响到平台的使用,给渤海4号的继续作业造成威胁。

(3) 随着我国海上油气田的不断发现,以及国家对海洋石油资源的迫切需求,海洋石油的勘探和开发规模越来越大。而由于国家财力的制约,海洋石油总公司对钻井装备的投资受到极大限制,在短期内不可能购置或生产新的钻井平台。因此必须对现有平台挖潜,延长在役平台的使用年限成为一项非常紧迫和具有全局战略性重要意义的任务。这样,渤海4号就成了渤海石油钻井公司第1条首当其冲的急需挖潜的老龄平台。公司成为钻井承包商后,老龄平台的延期使用就更具经济意义了。

(4) 渤海石油钻井公司现有8艘作业平台,其中只有渤海4号的作业水深超过90m,其它7座平台都只能在75m水深范围内作业,而我国东、南、黄海的油气资源大部分在80m水深以上。为了使公司能承担那些海域的作业任务,目前只能在渤海4号身上打算盘,使它能够在规定海域内作业,这样,渤

海4号在那些海域的安全就成为公司至关重要和极为关注的问题。

(5)对渤海4号在不同海洋环境条件下进行疲劳损伤评价,可以在平台现有损伤状况下确定和优化渤海4号今后的合适作业海域,对最好地利用平台和最大地延长平台的使用年限具有重要意义。

二、海洋工程结构疲劳损伤分析计算的方法与步骤

1. 根据海况资料进行波高累积频次的统计

1a中的长期海况是由若干种短期海况组成的,每一种短期海况可假定为一个平稳的高斯随机过程,其波高的峰值服从瑞利分布:

$$p(H) = \frac{4H}{H_s^2} \exp\left(-2\frac{H^2}{H_s^2}\right) \quad (1)$$

式中 H_s ——每一海况的有效波高值, m

$p(H)$ ——波高为 H 的概率密度

在波高为 $H \sim H + \Delta H$ 范围内的循环次数,可由积分得出:

$$n_i = n \int_H^{H+\Delta H} p(H) dH \quad (2)$$

式中 n ——该海况的总循环次数

利用式(2)可求出各个波高区间的循环次数,得出该海况的波高频次曲线。将所有海况的波高频次曲线迭加即得出该海域1a的总的波高频次曲线。

2. 进行波浪载荷计算, 计算作用在导管架上每一种波高所产生的波浪载荷

每一种波高在不同波向时所产生的波浪载荷按Morison公式计算:

$$dF = \frac{1}{2} C_D \rho D (v_N + v) |v_N + v| \cdot ds + C_m \rho A a_N ds \quad (3)$$

式中 dF ——作用在长度为 ds 的一小段导

管上的波浪载荷, N/m

ρ ——海水质量密度, N/m³

v_N ——水质点的瞬时法向速度, m/s

a_N ——水质点的瞬时法向加速度, m/s²

v ——海水流速, m/s

D ——导管横截面直径, m

A ——导管横截面积, m²

C_D ——阻力系数

C_m ——惯性力系数

水质点的 v_N 和 a_N 可根据 Airy 波或 Stokes 波理论计算。

式(2)中考虑了海流的影响,海流取全年的平均值,其速度随水深的变化由 API 规范确定:

$$v_x = v_s \left(\frac{x}{h}\right)^{1/7} \quad (4)$$

式中 v_x ——距离泥线 x 处的海流速度, m/s

v_s ——水线海流速度, m/s

x ——距泥线高度, m

h ——水深, m

3. 进行结构的有限元计算, 得出各个杆件所受的内力

将结构模拟以一空间钢架,图1是平台在东海的有限元结构模型,图2是桩腿的布

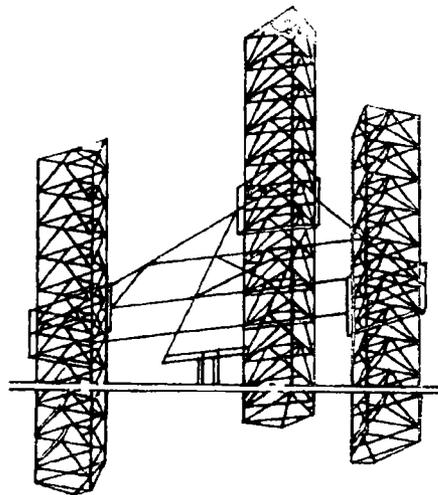


图1 渤海4号在东海的有限元结构模型

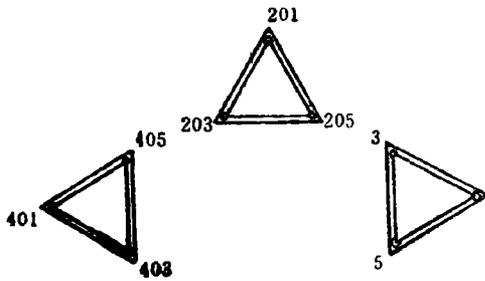


图2 桩腿布局及其节点编号

局及箱体上9根桩腿的单元编号,这是工程上最关心的疲劳危险部位。

4. 利用参数公式或有限元法计算各个疲劳危险部位的应力集中系数SCF

根据API规范,所有管节点的应力集中系数均用参数方程法求出,如表1。

表1 管节点的应力集中系数SCF

节点类型	形状系数 α	轴向载荷	面内弯曲	面外弯曲
主管SCF				
K	1.0			
T & Y	1.7			
X	—			
$\beta < 0.98$	2.4	$\alpha \cdot A$	$2/3 \cdot A$	$3/2 \cdot A$
X	—			
$\beta \geq 0.98$	1.7			
支管SCF	$1.0 + 0.375(1 + \sqrt{\tau/\beta}) SCF_{Chord} \geq 1.8$			

表中 $A = 1.8\sqrt{\gamma} \tau \sin \theta$

$$\tau = \frac{t}{T}, \beta = \frac{d}{D}, \gamma = \frac{D}{2T}$$

t 、 T 为各主管壁厚, d 、 D 为各主管外径, θ 为主、支管夹角。

根据API的要求,桩腿和桩脚箱连接处的应力集中系数一律取6.0。

5. 计算动力放大系数DAF

动力放大系数由下式给出:

$$DAF =$$

$$\frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{T_s}{T_w}\right)^2\right]^2 + 4\lambda^2 \left(\frac{T_s}{T_w}\right)^2}} \quad (5)$$

式中 T_s ——结构固有周期, s

T_w ——波浪周期, s

λ ——阻尼系数

6. 将内力计算结果乘以动力放大系数和应力集中系数得出疲劳危险部位的热点应力

7. 选取适当的S—N曲线, 计算每一海况产生的损伤

对普通管节点, 每一海况下的疲劳损伤由API规范中的X曲线所确定的S—N曲线求出。其它和桩腿连接的节点, 其S—N曲线的选定分两种情况, 如这些节点设有加强板或属于搭接节点, 其S—N曲线采用UK DEN F曲线; 如没有加强板或不是搭接节点, 则选用UK DEN T曲线。

依据上述原则选出的S—N曲线列于表2。

表2 计算疲劳损伤所采用的S—N曲线 (kN/cm²)

曲线类型	10 ⁰	10 ⁷	10 ⁸
X	274.50	6.92	4.09
F	801.36	3.40	2.40
F	1141.85	5.30	3.30

8. 累加1a中各个海况产生的损伤, 得出1a的总损伤量

9. 取1a总损伤量的倒数即为导管架的疲劳寿命; 疲劳寿命除以安全系数(取为2.0)就得出平台的安全使用寿命

累积损伤计算方法:

对于给定工况, 其1a的疲劳损伤度按下式计算:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

其中, n_i 为该工况1a内出现的次数, N_i 为该工况单独存在时结构的失效寿命(结构失效时总的循环次数), 由所选用的S—N曲线确定。对某一海区, 其全年的累积损伤根据Miner法则为:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (7)$$

于是,疲劳损伤寿命即可由下式得出(单位为a):

$$L = \frac{1}{D} \quad (8)$$

三、渤海4号疲劳损伤分析计算与评价

本次计算包括了渤海4号作业过的我国所有海域,即渤中、辽东湾、南海和东海。由于计算结果表明平台疲劳损伤的危险部位为桩腿和沉箱的连接处,即桩靴部位(节点1、3、5、201、203、205、401、403、405),在各海域又都计算了桩靴部位加强对疲劳损伤的影响。加强的措施均为连接根部加固环向加强筋,其厚度均为3.8 cm,长度分别为76 cm和115 cm两种。此外,根据API RP 2A-WSD的最新规范,在作疲劳分析时不考虑海流的作用。尽管如此,本文还是计算了渤海4号在南海海域作业时海流对其损伤与寿命的影响。上述考虑的最终计算结果分别讨论如下。

1. 渤海4号在渤海中部的损伤与寿命,有如下结果

(1) 桩靴处没有加强时,最大损伤位于节点3,其次为节点405、5和403。这4个节点处于同一损伤水平,均属于没有加强时的危险部位。

(2) 加强到76 cm后,最大损伤发生在节点5,其次为403、3和405,与没有加强时的情况相似。这4个节点的损伤实际相差无几,均为疲劳敏感区。

(3) 加强到115 cm时,情况和前两者有较大的区别,即疲劳危险部位减少到只有两处,为节点5和403。两处的损伤量相差很小。

(4) 加强长度从0到76 cm,最大损

伤处的疲劳寿命提高了1.976倍,非疲劳危险区的节点寿命提高更大(如节点201提高了44倍);当加强长度自76 cm提高到115 cm时,危险部位的寿命提高了45.76倍,节点405则提高了168倍。可见,增强长度越大,疲劳损伤越小,但减小的幅度有一个最佳增强长度,这一值可通过计算优选得出。当然,工程所要求的是允许损伤量,并非最小损伤或损伤减小幅度,但从加强的影响方面来说,允许损伤量对应着某一加强长度(当增强厚度一定时)。显然,损伤量、增强厚度和长度之间存在一个最佳匹配关系,这一关系可通过计算加以确定。

2. 在辽东湾

(1) 没有加强时最大损伤在节点3,处于同一水平的还有节点5、203、205、403和405,均为疲劳敏感部位。

(2) 加强长度为76 cm时,最大损伤处仍为节点3,其次是5、403和405。这4个节点的损伤量相近,同为危险部位。

(3) 加强为115 cm,疲劳危险部位只存在节点5和403,两处损伤相近。

(4) 加强长度从0到76 cm,最大损伤处的寿命提高了2.04倍,非疲劳敏感部位的节点如201提高了44.4倍;加强长度自76 cm增加到115 cm,危险部位的寿命提高了46.2倍,节点405则提高了163.2倍。

显然,辽东湾的结果和渤中是相同的。

3. 在南海

(1) 没有加强时最大损伤发生在节点403,相近损伤的节点有3、5和405,而且桩靴处其它节点的损伤也较大,最大与最小的损伤量只相差2.03倍。可见,桩靴处的所有节点均属疲劳敏感区,这和前两个海域有所不同。

(2) 加强到76 cm,最大损伤处于节点3,其次是5、403和405,它们同为危险部位。

(3) 加强为115 cm, 最大损伤发生在节点5和403, 同一损伤水平的有节点3和405, 敏感部位比前两个海域增多了。

(4) 加强长度从0到76 cm, 最大损伤处的寿命提高了2.33倍, 非疲劳敏感区的节点201则提高了11.64倍; 当加强长度自76 cm增加到115 cm后, 危险部位的寿命提高了13倍, 节点405则提高了16.85倍, 其它节点的提高倍数还要小些。

可见, 南海的情况和前两个海域有些差别。

4. 在东海

显然, 比较其它3个海域, 东海的情况发生了极大的变化。

(1) 没有加强时桩靴处各节点的损伤均很大, 而且各自相差很小, 最大损伤只是最小损伤的1.65倍, 所有节点同时处于危险状态。

(2) 加强为76 cm时, 最大损伤发生在节点403和5, 紧接着是节点3和405, 而且节点203和205也只是最大损伤的0.4倍。

(3) 加强为115 cm时, 损伤的情况和76 cm时相近, 即最大损伤发生在403和5, 其次为节点3、405和203、205。

(4) 加强长度从0到76 cm, 最大损伤处的寿命只提高了1.18倍, 提高倍数最多的是节点201, 为5.16倍; 加强长度自76 cm增大到115 cm, 最大损伤处的寿命也只提高了1.64倍, 节点201也只提高了3.386倍。可见, 在东海, 采取桩靴处加强的措施对提高平台疲劳寿命的作用不显著, 必须提出其它有效的办法。

5. 4大海域的比较

从上述分析可知, 渤海4号在所作业的海域经受的疲劳和损伤的特性是不同的, 对比起来, 具有如下特点:

(1) 共同点

①平台的最大损伤位置均发生在桩腿与

沉箱的连接部位, 即桩靴处, 具体位置在节点3、5及403、405。

②桩靴的加强均不同程度地提高了平台的疲劳寿命, 特别在渤海、辽东湾和南海3大海域, 渤海4号的疲劳寿命得到显著提高; 而在东海, 加强的措施所起的作用不大, 必须寻求其它改善措施。

③加强长度直接影响着平台的疲劳寿命。在一定长度范围内, 长度的增长对寿命提高的影响不大, 只有超过这一临界长度, 加强越长, 寿命提高才越快。此外, 寿命的最大增加幅度对应着一临界加强长度, 这两个临界加强长度可通过计算进行优选。

④桩靴处不同部位对加强长度的敏感程度各不相同, 但对长度最敏感的部位在4大海域均发生在节点201处, 该处损伤减小的幅度最大。

(2) 相异点

①渤海4号在渤海中的损伤最轻, 寿命最长, 其次为辽东湾和南海, 在东海的损伤最大, 寿命最短。这显然和作业水深及海况条件有直接关系。

②渤海4号的疲劳敏感位置在渤海和辽东湾均有4处, 而在南海和东海则扩展到整个桩靴部位, 其中尤以东海更为显著, 而且疲劳损伤的程度相当大。平台在这一海域作业必须相当慎重。

③桩靴处加强对减小渤海4号在渤海、辽东湾和南海作业时的损伤具有显著的作用, 但在东海所起的作用甚小, 必须采取其它的措施。

6. 海流的影响

根据API的最新规范, 在计算平台结构的损伤时可以不考虑海流的作用。尽管如此, 本文仍计算了南海海流对渤海4号疲劳寿命的影响, 结果表明, 海流对渤海4号的损伤作用不大, 可以忽略。具体地说, 计入海流以后, 寿命的最大减小量只有1.49%,

最小减小量为0.18%，可见，海流的作用相当小。

四、技术经济评价

本文的计算对渤海4号钻井船未来的安全作业、平台作业寿命的延长和渤海4号的经济使用、合理使用具有重要意义，将给渤海石油钻井公司带来显著的经济效益，具体体现在如下5个方面：

(1) 从日立造船厂购进渤海4号时的出资是\$2500万圆，平台本身的价值是昂贵的，虽然18a来连续不断地作业，为我国海洋石油的勘探和开发作出了巨大贡献。这\$2500万圆的巨额资金早是一笔死数，而这一笔投入的效益是逐渐延伸的、逐步发挥的。过早地将这种还能发挥的效益打一个句号，是对这笔投入资金的一大浪费，甚至有可能只利用了其中的1/2，从而使这一投入的损失就达千万美元。

(2) 根据计算，平台在渤海中部的疲劳寿命至少是90a，在辽东湾至少是30a。因此，如果不出其它方面（非疲劳损伤方面）的安全问题，平台今后十几年内在这两个海域内作业是可靠的。保守地说，渤海4号在这两个海域如有延期10a的使用寿命，以钻井船每天\$3万圆的租金计算，也将产生\$10800万圆的经济效益。

(3) 渤海石油钻井公司成为专业生产承包商后，公司的业务范围将延伸到渤海以外的东、南、黄海，甚至外海。渤海4号作为作业水深最大的钻井船，是公司首先考虑的船只，而且它有在东海作业的历史。根据这次计算结果，渤海4号在南海至少还可作业6a，在该海域参与市场竞争具有可靠的保障，这对平台在南海参加国际竞标活动，为公司增加外汇收入具有重要意义。

(4) 东海平湖是目前我国海洋石油开采的一大海域，已向国内外招标。为了节约

国家外汇，也为了中外公司能够反投标，渤海4号理所当然地将参与那里的油气田开发。然而，根据本次对东海海域的计算，渤海4号在那里的寿命只有半年多，加强后寿命也只有1a。因此渤海4号在东海作业必须相当慎重，否则将出现灾难性的事故，给公司造成巨大经济损失和人员伤亡。尽管如此，由于本次计算采用的海洋环境资料是具有局部性的，不能反映整个大油田广大海域的全部环境条件，于是渤海4号在非台风季节的某些局部海域作业仍然是安全可靠的，可以参加局部海域的钻井作业，但事先必须进行针对性的疲劳损伤分析计算，以确保平台的安全和提高作业人员的心理承受能力。

(5) 本文的一个重要结论是，桩靴处加强并不是所有海域都能提高平台使用寿命的一大举措。总的结论是，平台在渤中和辽东湾作业可以不加强桩靴，在南海作业建议加强，而在东海必须采取其它有效办法。这一结论对渤海4号在东海和南海作业具有重要意义，特别是东海，避免了一般认为桩靴处加强能较好地解决平台延期一段作业时间所带来的可能的重大事故。

总之，本文的计算是及时的，异常重要的，它避免了平台可能的盲目作业和可能的灾难性事故，所得到的一系列结论对渤海4号的合理使用和延期作业具有重要的指导意义，产生的经济效益和社会效益是巨大的。

致谢：第一作者感谢“中国博士后科学基金”对本文的资助。

(收稿日期：1996-01-20)

