

引用格式:冯勤,赵勇.东海导管架平台改造优化的频谱疲劳分析法[J].油气藏评价与开发,2025,15(6):1096-1103.

FENG Qin, ZHAO Yong. Improved spectral fatigue analysis method for retrofit of jacket platforms in East China Sea[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(6): 1096-1103.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.06.016

东海导管架平台改造优化的频谱疲劳分析法

冯勤,赵勇

(中国石化上海海洋油气分公司,上海 200125)

摘要:利旧东海海上导管架油气生产平台作为CO₂海上封存注入平台研究是东海CCS(碳捕集与封存)项目的实施重要研究内容。因此,针对已建导管架平台准确的疲劳分析计算将尤为重要。基于结构系统和波浪加载机制线性假设的频谱疲劳分析方法,在计算海上导管架结构上的波浪荷载和随后的结构响应时,可以有效地描述环境海浪条件的随机性,常常被用于海上导管架平台设计,也适用于旧导管架结构的重新评估。尽管这种方法非常适合应用于波高和波浪力非线性不太严重的深水场景海上平台设计和疲劳分析,但该方法仍然在没有仔细考虑由于波高和波浪力之间的严重非线性因素而可能导致计算误差的情况下,被广泛用于浅水导管架平台的设计和评估。产生这种误差的主要原因是在生成随机波浪谱和结构应力相应谱之间的传递函数时,因上述波高和波浪力之间存在的严重非线性导致难以为一组波周期选择适当正确的对应波高。该研究的重点是聚焦于浅水平台频谱疲劳分析方法可能存在的计算误差,介绍了减少频谱疲劳分析方法误差研究的优化计算结果,并提出了1种新的技术方法,即如何通过使用波高和周期联合概率密度函数,在海况波谱和结构应力相应谱之间获得更准确的传递函数,减少浅水平台频谱疲劳分析中的误差,从而合理地利用单个局部海况数据。因此,频谱疲劳分析法可以更精确地计算海上导管架结构管结点的疲劳损伤和寿命。这种改进的频谱疲劳分析法已被应用于东海导管架平台的设计评估。研究将疲劳分析结果与常规频谱疲劳分析方法的结果进行了对比和讨论。此外,由于现有设计软件中用于计算疲劳损伤的波高概率密度函数仅对窄带频谱有效,对宽带频谱造成额外误差。该研究对改进宽带频谱疲劳损伤计算也进行了讨论。这种改进的频谱疲劳分析法将可运用于海上CO₂注入利旧导管架平台的结构疲劳寿命分析计算。

关键词:导管架;频谱分析;疲劳损伤;波浪荷载;概率密度

中图分类号:TE54

文献标识码:A

Improved spectral fatigue analysis method for retrofit of jacket platforms in East China Sea

FENG Qin, ZHAO Yong

(Sinopec Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200125, China)

Abstract: The research on utilizing offshore jacket platforms in the East China Sea as offshore CO₂ sequestration and injection platforms is a critical component for the implementation of the East China Sea CCS project. Therefore, it is particularly important to perform accurate fatigue analysis and calculation for the existing jacket platforms. The spectral fatigue analysis method, based on the assumption of linearity of both structural system and wave loading mechanism, can effectively capture the randomness of environmental wave conditions when calculating wave loads and the subsequent structural responses on offshore jacket structures. This method is commonly utilized for the design of offshore jacket platforms and is also suitable for the reassessment of existing jacket structures. Although this method is highly suitable to be applied in offshore platform design and fatigue analysis for deepwater scenarios where nonlinearities between wave height and wave force are not very severe, it has still been widely utilized for the design and assessment of shallow water jacket platforms without carefully considering the possible calculation errors due to strong nonlinear factors between wave heights and wave forces. These errors primarily result from difficulties in choosing appropriate wave heights for a series of wave periods required for producing transfer functions between random wave spectra and structural stress response spectra, due to the significant nonlinearity between wave heights and wave forces mentioned above. This study focused on the potential calculation errors in the spectral fatigue analysis method for shallow water platforms. It presented optimized calculation results from research aimed at reducing the errors in the spectral fatigue analysis method and proposed a new technical approach. This approach could produce more accurate transfer functions between sea state spectra and structural stress response spectra by using the joint probability density function of wave height and period, thereby reducing errors in the spectral fatigue analysis of shallow water platforms and

收稿日期:2024-12-02。

第一作者简介:冯勤(1960—),男,博士,教授级高级工程师,从事海洋石油工程研究设计工作。地址:上海市浦东新区锦康路50弄中国石化浦东科研中心,邮政编码:200125。E-mail:fengqin.shhy@sinopec.com

基金项目:中国石化科研项目“东海西湖二氧化碳地质封存技术研究”(P22715)。

enabling rational utilization of individual local sea state data. Therefore, fatigue damage and service life at the tubular joints of offshore jacket structures could be calculated more accurately. The improved spectral fatigue analysis was applied to the design assessment of jacket platforms in the East China Sea. The results of the fatigue analysis were compared and discussed with those obtained by conventional spectral fatigue analysis methods. In addition, the wave probability density function used for computing fatigue damage in the existing design software was only effective for the narrow-band spectra, and it caused additional errors for the broad-band spectra. This study also discussed improvements in the calculation of fatigue damage for the broad-band spectra. This improved spectral fatigue analysis method can be applied to the structural fatigue life analysis and calculation of the offshore CO₂ injection retrofitted jacket platforms.

Keywords: jacket; spectral analysis; fatigue damage; wave load; probability density

疲劳失效是导致海洋导管架结构平台焊接接头结构失效的主要原因之一。因此,疲劳分析在海洋导管架平台的设计中起着重要作用,并已成为强制性设计规范要求的分析手段。与其他疲劳分析方法相比,频谱疲劳分析方法具有许多优点,如相比于确定性疲劳分析、时程疲劳分析和断裂力学疲劳分析等。推荐频谱疲劳分析方法的主要原因是其计算效率高,结构响应可以假设为遵循线性、高斯、平稳和随机响应。然而,该方法的限制性在于要求系统是建立在线性响应假设基础上。海上结构物可能受到许多非线性因素的影响,如桩基、结构物在波浪撞击后的响应以及波高与波浪力的非线性关系等。因此,可能基于这些因素,使得频谱技术的运用受到一定程度的制约。

频谱分析方法的主要特点是:使用一系列具有不同周期和相应波高的规则波来确定性地获得传递函数。首先,这一系列规则波被定义为基本波;然后,通过将传递函数乘以相关海况波浪谱来获得应力反应谱;最后,可以采用几种方法计算疲劳损伤和疲劳寿命。然而,必须指出的是:如果波高与结构应力响应关系实际上是非线性的,那么传递函数计算将取决于基本波的波高和波周期的选择。当非线性响应变得显著时,如果不能使用确定性方法较精确地确定海洋的随机性,则需要更严格的方法来选择基本波情况,以确保计算的准确性。

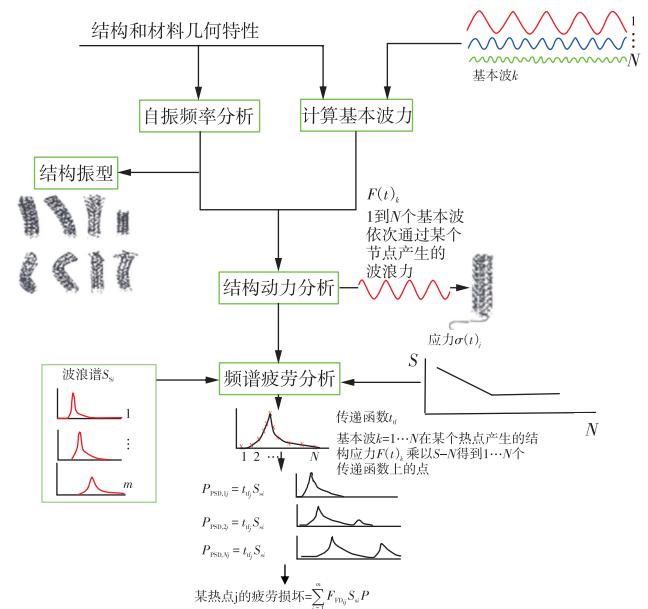
由于海浪的随机性,海上浅水平台通常会经历各种各样的随机载荷作用。理论上,频谱疲劳分析技术不应大量用于此类平台的疲劳分析,部分原因是此类系统存在较严重的非线性问题,并且因为缺乏建立传递函数较精确的计算技术。该研究介绍了作者研发的1种改进的海上导管架平台疲劳计算方法,以及为中国石化最近的海上项目设计典型浅水平台的实际疲劳评估案例,这种东海导管架平台将来可能改造为海上CO₂封存注入平台。

1 频谱疲劳分析的基本步骤

对于大型空间框架海上结构,疲劳分析可以分为2个阶段:第一阶段是整体结构分析,必须考虑结构的所有部分在预期寿命内由随机环境载荷条件导致的结构响应,在每个管结点处考虑了典型的8个热点应力点,并选择适当的S-N(S为疲劳设计曲线应力幅,N为循环次数)

曲线、近似应力集中系数(SCF)和米勒法则作为第一阶段的分析计算;第二阶段涉及使用更复杂的疲劳理论分析最关键的结点,该理论研究具有特定几何形状和应力集中系数管状结点中的裂纹扩展。

由于结构尺寸规模和复杂性(通常有数百个构件),第一阶段,即整体分析,会产生大量的计算工作量。然而,这2个阶段都需要对(随机和统计时变性的)结构响应进行完整仿真。因此,获得这一仿真的准确方法至关重要。频谱分析法现在通常被认为是获取这些信息的最合适方法,并被广泛地应用于海上导管架平台的结构设计。然而,对于非常大的复杂导管架,如果不对结构几何形状进行适当的简化,使用经典频谱技术推导必要的传递函数实际上是不可能的。因此,使用基本波的确定性方法来获得这些传递函数,单位化后在频谱上产生相应的传递函数。频谱疲劳分析的程序如图1所示,可简要



注: k 为基本波编号, $k=1,2,\dots,N$; N 为基本波总数; $F(t)_k$ 为1到 N 个基本波随时间 t 依次通过某个节点产生的波浪力,单位 n ; i 为波浪谱编号, $i=1,2,\dots,m$; m 为波浪谱编号总数; $\sigma(t)_i$ 为随时间 t 变化的应力,单位 Pa ; j 为应力编号, $j=1,2,\dots,x$; x 为热点个数; S 为应力,单位 Pa ; N 为循环次数; P_{PSD} 为功率谱密度; t_{ij} 为传递函数; F_{FD} 为疲劳损伤; S_{Si} 为输入波浪谱通过传递函数得到对应的应力谱; P 为应力谱每年出现的概率。

图1 频谱疲劳分析步骤示意图

Fig. 1 Schematic diagram of procedure for spectral fatigue analysis

分为以下4个主要阶段:①对于动力敏感平台,开展结构自振频率分析,求解结构的振型和固有频率^[1]。②计算水中穿越导管架结构的每个波浪在多个时间增量下的静态波浪力。③对于每种基本波情况,将阶段①获得的力变为结构上每个结点处的谐波载荷。这是通过将每个结点处的力的时间历程正弦拟合为正弦波来实现的。一旦产生这些谐波载荷,则谐波应力可以除以产生应力的波高进行单位化,以获得传递函数上的一个点。④将所选海况波浪谱乘以由阶段③中的点组成的传递函数。

阶段①至③用于生成传递函数,阶段④生成结构反应谱,从而计算疲劳损伤和疲劳寿命。

波浪荷载程序生成了所考虑的每种基本波情况下结构上每个结点的谐波荷载情况。然后,可以使用稳态响应程序通过求解:

$$F(t) = M\ddot{X} + C\dot{X} + KX \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为随时间变化的外力,单位N; M 为质量矩阵; \ddot{X} 为加速度向量; C 为阻尼矩阵; \dot{X} 为速度向量; K 为刚度矩阵; X 为位移向量。

式(1)可以计算每个基本波情况下每个非耦合自由度的稳态位移。然后,通过线性组合的单个响应获得所有结点载荷的响应,同时考虑每个响应的相位。用此方法,可以为每个构件端周围的特定位置设置传递函数。每个结点热点应力的检查点步骤如下:①选择应力集中系数;②通过从稳态响应程序中读取的值乘以上述步骤中的值,获得基本波 k 的应力范围;③传递函数上的点 m_p 是应力的平方,由基本波情况的波高进行单位化;④对 $m_p=1,2,3,\dots,N$ (传递函数上的点数)重复上述步骤^[2]。

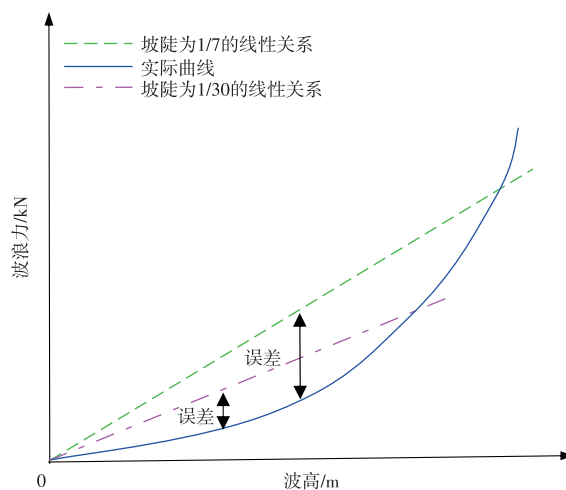
结点周围的每个热点都需要生成这样的传递函数。使用这些传递函数,可以通过将海况波浪谱乘以传递函数计算应力反应谱,从而获得对任何选定海况的响应。在海工结构设计中,使用最广泛的是Pierson-Moskowitz(皮尔森-莫斯科维茨波)谱和JONSWAP(北海联合海浪)谱公式^[3]。Pierson-Moskowitz谱是针对完全开放的海洋状况获得的^[4],可以用有效波高和跨零周期表示。JONSWAP谱是Pierson-Moskowitz谱的修改谱,考虑了较恶劣的海况情景。

2 频谱疲劳分析中的非线性

波浪是作用在海上导管架上的环境载荷中最重要的荷载。为了计算波浪力,需要使用合理的波浪理论,根据空间坐标计算作为时间函数的波粒子速度和加速度。这些波粒子的速度和加速度通过莫里森方程计算波浪力。一般来说,非线性关系由3个因素导致:①波浪理论可能是

非线性的;②波浪荷载程序通常计算局部海平面的荷载,而不是平均水位;③莫里森方程中的阻力项是非线性的。

对于频谱疲劳分析方法,应力传递函数是通过在时域中周期波扫描通过结构体而产生的。这是通过记录结构在具有特定频率和选定波高的波浪作用下所有构件的应力循环波来实现的。应力范围由波高单位化,以获得传递函数在指定横坐标值下计算相应纵坐标值。对于每个特定频率,结构上每个点的波浪力和波高之间的实际关系可以用曲线来描述。如图2所示,利用波浪力对波高的线性化直线替代相应的实际曲线。



注:误差为实际曲线线性化不同坡陡所产生的误差。

图2 波浪力与波高的线性和实际关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of linear and actual relationship between wave force and wave height

传递函数上的相关点由相对于波高的单位化应力组成。因此,传递函数上的每个点都是所示波频率下每单位波幅的应力振幅的函数。传递函数上的点数等于所选基本波的数量。1组典型的关系如图3所示。

如果物理过程确实是线性的,那么为每个波频率所选择的波高具体数值并不重要,因为任何选择都会导致相同的传递函数结果。而对于浅水平台,特别是当波浪力和合成应力涉及非线性效应时,所选用的波高将涉及非线性影响。因此用于确定应力响应的波高,以及用于线性化问题的波高,必须在某种适当的基础上进行选择。出于安全原因,通常选择最大的非破碎波高作为基本波波高,然而这必然会过高估算疲劳损伤。这是因为特定海况波浪谱中存在的实际波高远低于最大的非破碎波高^[5-7]。

为了研究波浪力和波高之间非线性关系的影响,对典型的东海导管架平台进行分析,其结构模型如图4所示。

表2 北向波浪的年分布
Table 2 Annual distribution of northward waves

波高/ m	波周期对应的次数/次															
	0.5 s	1.5 s	2.5 s	3.5 s	4.5 s	5.5 s	6.5 s	7.5 s	8.5 s	9.5 s	10.5 s	11.5 s	12.5 s	13.5 s	14.5 s	15.5 s
0.25	378 691	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 036
0.75	0	0	0	0	0	5 738	67 970	37 869	22 276	6 644	6 011	2 744	2 525	2 338	0	0
1.25	0	0	0	0	7 013	51 640	208 766	46 285	14 851	3 322	0	0	0	0	0	0
1.75	0	0	0	0	7 012	63 115	233 041	29 454	3 713	0	0	0	0	0	0	0
2.25	0	0	0	0	0	22 951	145 651	16 831	3 713	0	0	0	0	0	0	0
2.75	0	0	0	0	0	11 476	126 230	12 623	3 713	0	0	0	0	0	0	0
3.25	0	0	0	0	0	5 738	67 970	12 623	0	0	0	0	0	0	0	0
3.75	0	0	0	0	0	0	33 985	8 415	0	0	0	0	0	0	0	0
4.25	0	0	0	0	0	0	9 710	8 415	0	0	0	0	0	0	0	0
4.75	0	0	0	0	0	0	4 855	4 208	0	0	0	0	0	0	0	0
5.25	0	0	0	0	0	0	4 855	4 208	0	0	0	0	0	0	0	0
5.75	0	0	0	0	0	0	0	4 208	0	0	0	0	0	0	0	0
6.25	0	0	0	0	0	0	0	4 208	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

周期联合概率分布^[10]。

用于频谱疲劳分析的导管架平台是中国石化在东海海上油气田项目中设计的,水深80.7 m,是由1个4腿导管架结构组成,用于支撑井口平台上部组块。该上部组块结构能够承载天然气生产所需的所有设施和操作载荷。每条腿上分别有2个裙桩。平台具有9根套管,其中5根套管为预留。导管架平台可容纳3个立管。

采用海洋工程界普遍接受的海工结构设计分析软件SACS建立了该导管架平台的三维计算机仿真模型。设备包括重量报告中定义的设备重量、管道重量和重心。上部结构包括3层:主甲板(标高+48.3 m)、中间甲板(标高+34.8 m TOS, TOS为钢梁上表面)、下部甲板(标高+26.3 m TOS)。图4显示了计算机生成的模型。

波长和周期之间的关系如下^[9]:

$$L = \frac{T^2 g}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2)$$

式中: L 为波长,单位m; T 为周期,单位s; g 为重力加速度,单位m/s; d 为水深,单位m。

波高与波长之比称为波陡,如下所示:

$$S_m = \frac{H}{L} = \frac{2\pi H}{gT^2} \quad (3)$$

式中: S_m 为波陡; H 为波高,单位m。

只要波高与波长之比不超过1:7的理论破碎极限,给定高度的波浪在物理上可能存在较多的相关周期。但是,此参数没有类似的下限。为了证明相关波浪周期选

择波高的敏感性,在疲劳寿命计算中,为基本波分别选择不同的波陡值1/10和1/20的非破碎波高。表3给出了平台上5个特定位置的典型疲劳寿命结果。可以看出,由于基本波情况的不同选择,疲劳寿命结果存在很大差异。

此外,Shell(壳牌)公司1990年使用频谱疲劳分析方法对1970年安装在英国北海的旧导管架平台进行了评估,设计寿命为30 a。疲劳分析结果表明:有许多管结点的疲劳寿命小于10 a。然而,10 a后,对46个结点进行了结构检测,仅发现2个结点有裂纹迹象。因此,有必要在进行疲劳分析计算时优化疲劳损伤的计算,降低疲劳计算误差。

4 疲劳损伤计算的改进

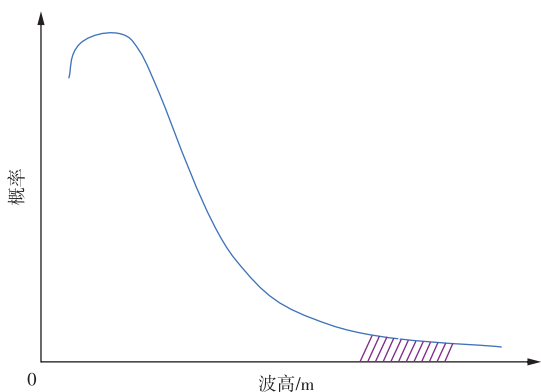
如前文所述,为每个有意义的波浪周期选择相应的基本波波高是1个极其重要的问题。如果选择最大非破碎波高,则每种海况下的波高范围可能远低于所使用的基准波高,因此大多数应力响应将被严重高估。由于非线性S-N关系,应力谱中的较小误差也可能导致疲劳损伤或疲劳寿命计算中的重大误差。然而,如果在实际海况的波高范围内适当地选择合理的基本波波高,则可以将误差最小化。基于这一概念,使用波高周期联合密度函数来确定每个相关波浪周期合理的基准波波高。通过使用这种方法,可以在更严格的基础上选择基本波数据。因此,可以减少与疲劳响应相关的误差。

表3 平台特定位置的疲劳寿命结果
Table 3 Fatigue life results at specific locations of platform

结点	杆件编号	波陡 1/20	超出百分比 0.10%	超出百分比 0.20%	超出百分比 0.30%	超出百分比 0.50%	超出百分比 1.00%	波陡 1/15
102	14-0102	3 386.4	13 875.2	17 760.3	20 645.2	25 031.8	33 687.1	1 358.4
	0102-0103	119.5	1 008.5	1 269.6	1 471.1	1 778.7	2 388.9	52.2
	0094-0102	103.7	909.0	1 144.2	1 325.2	1 602.3	2 150.6	45.6
101	0105-0101	153.1	1 053.9	1 338.2	1 569.8	1 905.5	2 623.2	66.4
	0096-0101	134.7	997.0	1 264.6	1 483.0	1 799.3	2 474.5	58.5
	0096-0101	968.5	1 855.2	2 381.7	2 797.6	3 431.3	4 744.5	360.6
94	0094-0096	175.4	323.5	413.1	484.3	592.6	817.1	70.3
	0094-0102	985.0	2 405.1	3 019.8	3 483.6	4 158.9	5 426.4	371.7
	14-0094	178.1	417.6	522.1	601.4	717.8	937.2	72.2
17	17-0101	1 124.9	1 807.0	2 345.9	2 776.6	3 402.5	4 731.6	454.8
	1004-17	1 108.8	1 821.5	2 364.4	2 799.0	3 429.3	4 769.0	448.5
	1004-17	5 007.1	13 776.1	17 008.5	19 353.6	22 309.3	28 322.0	2 163.3
	17-21	616.1	5 504.3	6 486.2	7 220.3	8 120.7	9 667.5	250.9
14	14-0102	825.7	1 205.6	1 560.6	1 824.1	2 221.5	3 035.7	337.9
	1001-14	810.6	1 208.8	1 564.7	1 828.9	2 227.3	3 043.0	331.9
	1001-14	4 680.0	11 333.4	13 684.3	15 545.6	17 969.3	22 690.2	2 020.0

在选择基本波情况时,考虑相关海况中的实际波高数量似乎具有重要的意义。基于这一理念,提出了1种解决基本波波高选择的方法。这种方法的基础是寻找并采用反映不同海域实际海洋状况的真实海况中的波浪分布。然后,可以通过选择超出百分比的方法来确定与每个相关基本波周期合理一致的波高。该百分比超出值对应于高度大于某个指定值的波浪发生的概率。随着超出百分比值的减小,相应的波高也会增加,直到高度大于百分比值0.10%对应高度的波浪不可能出现。图5给出了超出0.10%百分比的典型关系。

在选择超出百分比值时需要注意,因为预期的目标必须是在估计中获得零误差。疲劳损伤通过斜率为 b (通常约为4)的非线性S-N图与应力范围有关。波高



注:紫色阴影部分为超出百分比0.10%。

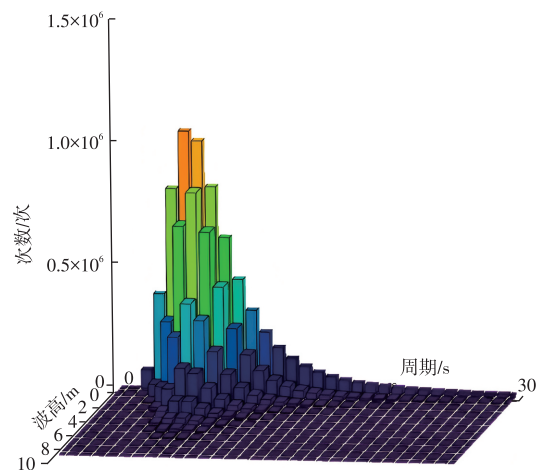
图5 用于定义基本波波高的百分比超标值示例

Fig. 5 Example of percentage exceedance value used to define fundamental wave height

和疲劳结果之间可能存在额外的非线性关系,因此,最初明显的超出百分比0.50%是不正确的。使用Longuet-Higgins波高-周期联合概率密度函数来获得波高和周期的分布。

图6显示了通过二元Longuet-Higgins概率分布的单个波高和相关波周期的分布^[10]。BISHOP等^[6]给出了计算的细节。图7显示了不同百分比超越值估计的基本波波高。

图7所示的结果表明:相关波浪周期的基本波波高对不同的超出百分比值变化很大。图8显示了基于典型浅水导管架平台上特定管节点改进的频谱分析方法



注:箱宽为1.0 m和0.1 s。

图6 波高和周期概率分布柱状图

Fig. 6 Histogram of wave heights and period probability distribution

的疲劳损伤校准结果。这些结果已通过时域参考值进行了单位化,因此频谱疲劳分析计算疲劳寿命量化值大于1.0反映的疲劳寿命大于时间历程结果。所以,建议使用0.5至0.1之间的超出百分比值来确定基本波数据^[11-12]。

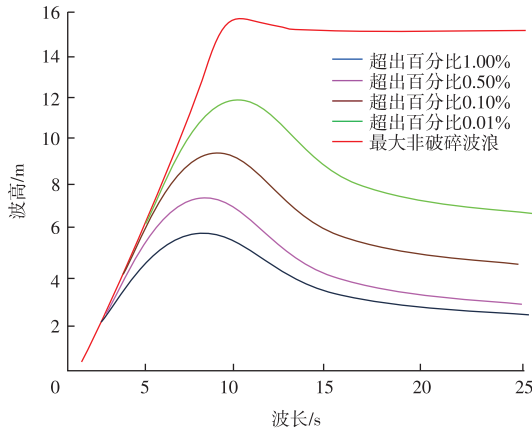


图7 用于特定选定百分比超标值的基本波情况
Fig. 7 Fundamental wave conditions used for specifically selected percentage exceedance values

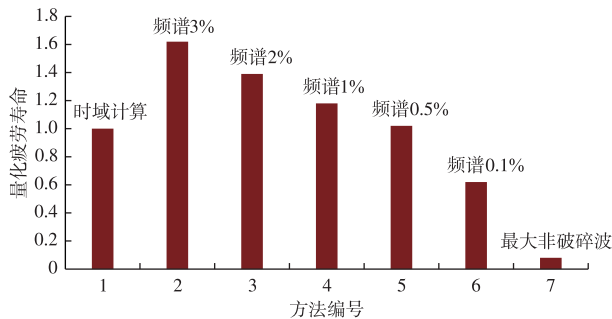


图8 典型浅水导管架平台特定接头处的疲劳寿命
Fig. 8 Fatigue lives at specific joint of typical shallow water jacket platform

5 使用改进频谱疲劳分析的东海平台

敏感性研究的结果显示,更好地选择基本波数据将给出更合理的疲劳损伤计算。根据拟议的超出百分比值,如图8所示,典型浅水平台的疲劳分析中使用了超出百分比0.50%的值。这种浅水导管架平台通常具有约1.5 s的最长固有周期,平台将对波浪载荷采用拟静力响应分析。因此,可以忽略动态响应。

平台上7个重要管结点的最低疲劳寿命结果如表4所示。结果表明:与优化的频谱疲劳分析法相比,如果使用1/10和1/20的波浪梯度来确定的基本波数据,通常会较严重高估疲劳寿命。

表4 平台特定位置的疲劳

Table 4 Fatigue at specific locations of platform	瑞利分布/a	达尔克分布/a	误差/%
左下	151.6	198.7	31
右下	88.6	119.8	35
底部	67.5	112.1	66
左	255.4	296.2	16
右	144.4	178.8	24
左上	116.7	153.8	32
右上	152.7	194.4	27

6 频谱疲劳分析中的宽带波谱

在现在流行的商业设计软件对于导管架的频谱疲劳分析方法中,疲劳损伤的计算通常采用瑞利概率密度函数。然而,其仅适用于窄带应力反应谱。在宽带频谱中使用瑞利概率密度函数可能会导致疲劳损伤计算的准确性出现重大误差。这就需要确保应用替代概率密度函数来计算宽带波谱的疲劳损伤。

Dirlik 基于大量数值模拟提出了1种更精确的概率密度函数^[5],可用于计算疲劳损伤,对宽带谱有更为合理的结果。Dirlik公式基于谱矩 M_0 、 M_1 、 M_2 和 M_4 的参数,可以表示如下:

$$P(S) = f(M_0, M_1, M_2, M_4) \quad (4)$$

$$P(S) = \left(\frac{D_1}{Q} e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{R^2}} + D_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}} \right) / 2\sqrt{M_0} \quad (5)$$

其中 $Z = \frac{S}{2\sqrt{M_0}} \quad (6)$

$$\gamma = \frac{M_2}{\sqrt{M_0 \times M_4}} \quad (7)$$

$$x_m = \frac{M_1}{M_0} \sqrt{\frac{M_2}{M_4}} \quad (8)$$

$$D_1 = \frac{2(x_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2} \quad (9)$$

$$R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2} \quad (10)$$

$$D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 - R} \quad (11)$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2 \quad (12)$$

$$Q = \frac{1.25(\gamma - D_3 - D_2 R)}{D_1} \quad (13)$$

式中: S 为应力,单位Pa; $P(S)$ 为应力范围 S 的概率密度

函数; D_1 为第1个经验系数; D_2 为第2个经验系数; D_3 为第3个经验系数; Q 是第1个经验尺度参数; Z 为归一化的应力范围; R 为第2个经验尺度参数; γ 为不规则因子,描述载荷过程的不规则程度; X_m 为基于谱矩的参数。

谱矩 M_n 的计算方法如下:

$$M_n = \int_0^\infty f^n G(f) df \quad (14)$$

式中: $G(f)$ 为功率谱; n 为谱矩的阶数, $n=0, 1, 2, 4$; f 为频率,单位 Hz。

为了证明由于应用瑞利概率密度函数导致的疲劳损伤计算误差,从疲劳分析程序中提取了1个典型的反应谱,如图9所示,并用于找到所需的谱矩: $M_0=18.277$, $M_1=1.788$, $M_2=0.188$, $M_4=0.003 12$ 。分别使用瑞利概率密度函数和Dirlik公式计算了8个热点处典型接头的疲劳寿命。从表4可以看出,使用瑞利概率密度函数的重要管结点的疲劳寿命通常大于Dirlik公式的疲劳寿命,最大误差可达66%。

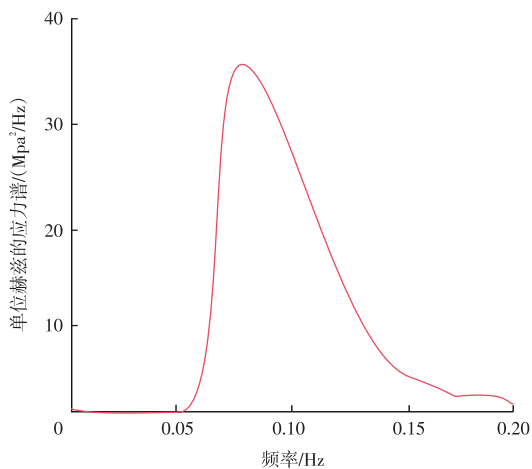


图9 典型应力反应谱

Fig. 9 Typical stress response spectrum

7 结论

1)在频谱疲劳分析计算中选择基本波波高的重要性。使用波浪波陡来确定基本浪波高的方法可能会对相关波浪周期造成很大的不确定性,因此疲劳寿命结果可能会被严重地高估或低估。优化的频谱疲劳分析法可以很好地提高疲劳计算精度。因此,在海上结构疲劳分析计算中具有相当大的运用潜力。

2)在宽带应力反应谱的频谱疲劳分析中,瑞利概率密度函数的运用导致了疲劳损伤计算结果过于保守。Dirlik公式可以很好地改善宽谱频谱疲劳分析中的误差。

参考文献

- [1] BATHE K J, WILSON E L. Solution methods for eigenvalue problems in structural mechanics[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 6(2): 213-226.
- [2] BISHOP N W M. Dynamic fatigue response of deepwater offshore structures subjected to random loading[J]. Structural Engineering Review, 1991.
- [3] HASSELMANN K. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[J]. Dtsch Hydrogr Z, 1973, 8: 1-95.
- [4] PIERSON W J, MOSKOWITZ L. Proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1964, 69(24): 5181-5190.
- [5] BISHOP N W M, SHERRATT F. Fatigue life prediction from power spectral density data[J]. Recent Developments, Environmental Engineering, 1989.
- [6] BISHOP N W M, FENG Q, SCHOFIELD P, et al. Spectral fatigue analysis of shallow water jacket platforms[J]. Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, 1996, 118(3).
- [7] BISHOP N W M, WITZ J. An appraisal of the deterministic-spectral method for estimating fatigue damage of offshore structures[J]. Spectrum Analysis, 1994.
- [8] BATTJES J A. Long-term wave height distributions at seven stations around the British Isles[J]. Deutsche Hydrografische Zeitschrift, 1972, 25(4): 179-189.
- [9] MAREX Technology Ltd report. A reassessment of environmental conditions in the rough field[R]. Report No.1091, 1991.
- [10] LONGUET-HIGGINS M S. On the Joint Distribution of Wave Periods and Amplitudes in a Random Wave Field[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 1983, 389: 241-258.
- [11] BISHOP N. W M, FENG Q, et al. Application of the deterministic-spectral fatigue analysis method using platforms operating in non-linear wave loading conditions[J]. Proceeding of the 15th Int Conf on OMAE, 1997.
- [12] FENG Q, LARGE R. Prediction of fatigue life of shallow water offshore platforms using spectral fatigue analysis method[C]// International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2010.

(编辑 常燕)