

文章编号:1673-5005(2016)03-0155-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.03.021

基于振动响应的导管架平台极限承载能力分析

吕涛,徐长航,陈国明,赵康,刘红兵

(中国石油大学海洋油气装备与安全技术研究中心,山东青岛266580)

摘要:为评估到达一定服役期限的导管架平台结构安全性能,提出基于振动响应的平台时变极限承载能力分析方法。以东海某气田导管架平台为对象开展振动监测研究,采集不同海况下平台上部组块的加速度响应,通过随机减量法对平台振动响应数据进行特征函数提取,分别采用时序分析法和复指数法对预处理数据进行动力学参数识别。借助有限元分析建立不同损伤状态下平台固有频率数据库,通过与模态参数识别数据对比识别出平台结构健康状态。应用时域分析法进行平台非线性动力学分析,并结合极限承载能力评估准则建立动力极限承载能力分析方法。结果表明,基于振动监测分析结果的平台修正模型能较准确地反映在役平台结构健康状态,可实现平台的结构抗力的精确评估,得到不同服役期导管架平台结构时变抗力变化规律。

关键词:振动监测;导管架平台;动力学参数识别;时域分析;非线性动力学;极限承载能力

中图分类号:P 752 **文献标志码:**A

引用格式:吕涛,徐长航,陈国明,等.基于振动响应的导管架平台极限承载能力分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(3):155-162.

LÜ Tao, XU Changhang, CHEN Guoming, et al. Ultimate bearing capacity analysis of jacket platforms based on vibration response[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 155-162.

Ultimate bearing capacity analysis of jacket platforms based on vibration response

LÜ Tao, XU Changhang, CHEN Guoming, ZHAO Kang, LIU Hongbing

(Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to assess the safety of the jacket platform which has served for many years, ultimate bearing capacity analysis method based on vibration monitoring was proposed. Vibration monitoring was carried out at CEP jacket platform of a gas field in the East China Sea, and the acceleration responses of top side module were collected under different sea conditions. The characteristic function of platform vibration response was extracted using random decrement technique. Furthermore, time series analysis and complex exponential method were used to identify the dynamic parameters for the characteristic function. The frequency databases of different damage modes were established by finite element analysis of the platform under various damaged conditions. Health conditions of platform structure were recognized by comparing identification results of modal parameter with frequency database. Nonlinear dynamics analysis was conducted by time domain analysis method, and dynamic ultimate bearing capacity analysis method was established. Field application results show that the updating model based on vibration monitoring can reflect real health status of platform structure, and the structural resistance can be assessed accurately by conducting the ultimate bearing capacity analysis of model updating method, which leads to time-varying structural resistance of platform.

Keywords: vibration monitoring; jacket platform; dynamic parameters identification; time domain analysis; nonlinear dy-

收稿日期:2015-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51079159);中央高校基本科研业务费专项(15CX06056A,14CX02077A);山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2013EEQ028)

作者简介:吕涛(1989-)男,博士研究生,研究方向为海洋油气装备研发与结构安全评估。E-mail:coolvtao@126.com。

通讯作者:徐长航(1976-)男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为海洋油气工程、油气安全工程等。E-mail:changhangxu@upc.edu.cn。

namics; ultimate bearing capacity

随着海上油气资源的开发,越来越多的海洋平台即将达到甚至超过其设计寿命,从而进入老龄化服役阶段。由于平台在设计初期难以准确地估算其寿命,同时不同平台服役历史千差万别,因此有相当一部分海洋平台到达服役年限后仍有足够的强度和冗余度。通过结构健康监测手段获取海洋平台结构信息,并对其承载能力进行评估,能够为确定是否允许其继续服役提供必要的理论依据,具有极为重要的研究意义和应用价值。结构动力学参数可作为导管架平台结构健康状态监测的重要指标,对基于监测得到的结构动力响应信号进行动力学参数识别,能够实现结构损伤诊断、环境控制、等级评定等功能^[1-2]。具有较低固有频率导管架平台的动力响应易受到海洋环境载荷影响,且难以测量平台激励(系统输入)^[3],因此如何在不影响平台正常作业前提下利用环境激励下的动力响应测试进行动力学参数识别是目前大型土木工程结构健康监测的热点问题之一^[4]。振动响应也是评价极端环境载荷下平台极限承载能力的重要依据,Bolt等^[5-6]提出并完善了pushover法以对平台进行倒塌分析。API与DNV规范中推荐以静力弹塑性分析方法(Pushover)计算导管架平台的极限承载能力,从而达到评估平台抗力水平的目的^[7-8]。国内外学者在平台动力学参数识别算法及损伤敏感性评估方面开展了大量研究^[9],但在基于振动监测的平台服役期结构安全评估方面研究较少。笔者通过采集不同环境载荷下东海某导管架平台的加速度响应,对采集数据进行模态参数识别;应用有限元分析技术分析不同损伤状态下平台结构整体动力学参数的演化规律,进而进行平台损伤模式划分;实现平台不同服役期时变极限承载能力评估。

1 评估流程制定与实施

1.1 监测及评估流程建立

导管架海洋平台是一种长期服役的大型复杂结构系统,其实际安全性能状态与其作业环境和服役历史状况密切相关;此外,由于平台结构的载荷、结构和材料在整个生命周期内均存在着不确定性和变异性,因此必须对平台结构进行更为严格的长期监测与评估。

对于随机环境下复杂结构动力学参数识别,不同识别算法对振型的识别结果差异较大,但对固有

频率识别精度较高。基于这一特点,结合非线性动力承载能力评估技术,首先建立导管架服役周期内振动响应动态监测及安全评估流程如图1所示。

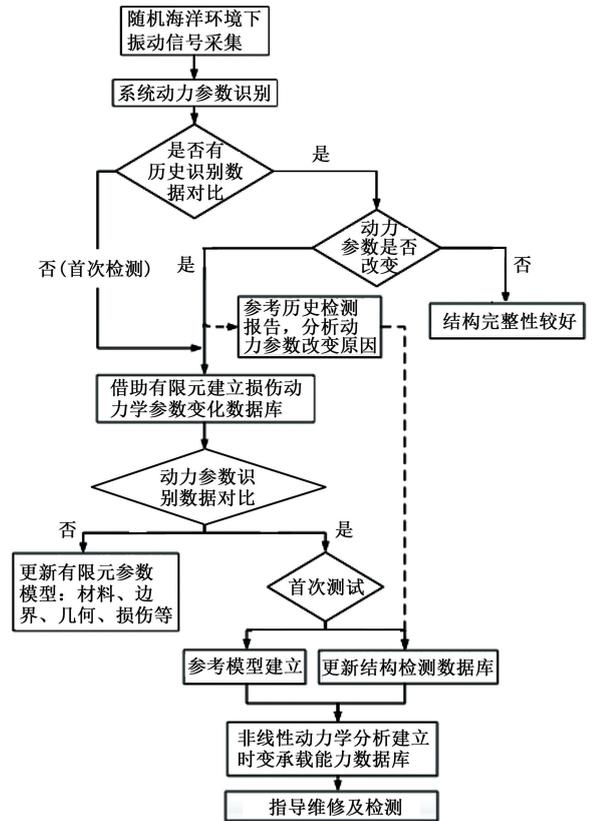


图1 导管架平台振动监测及评估流程

Fig. 1 Framework of vibration based structural health monitoring and evaluation of jacket platform

1.2 振动实时监测

实施振动监测的目标平台为东海某导管架平台,该平台于2005年完成海上安装,设计寿命30a,截止振动监测的实施日期,平台已服役10a。平台为八腿导管架结构型式,由12根裙桩固定于海底,上部结构包括模块支撑结构MSF及其上部作业模块及生活模块(图2),平台作业水深为90~100m。

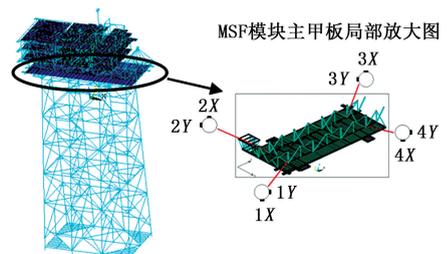


图2 加速度传感器布点示意图

Fig. 2 Scheme of acceleration sensor arrangement

振动监测采用的数据采集系统为美国 BDI STS-WiFi 无线结构测试系统。共布置 4 个测点(8 个通道),分别为 MSF 模块 B1、B4、A1、A4 主承载立柱,在每个测点测试 X 、 Y 两个方向加速度响应。详细测点的布置情况如图 2 所示。

考虑导管架平台为低频结构,选用工作频率在 $0 \sim 150$ Hz 的低频传感器,采样频率为 20 Hz,现场监测情况如图 3 所示。

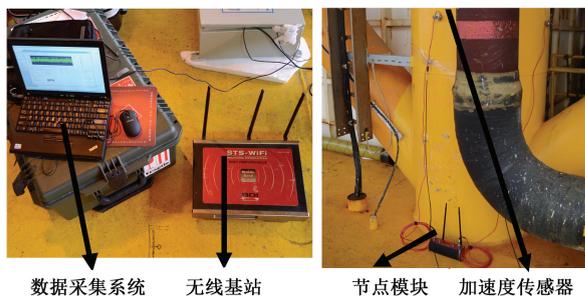
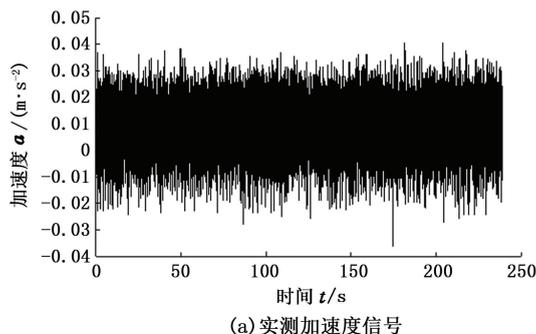
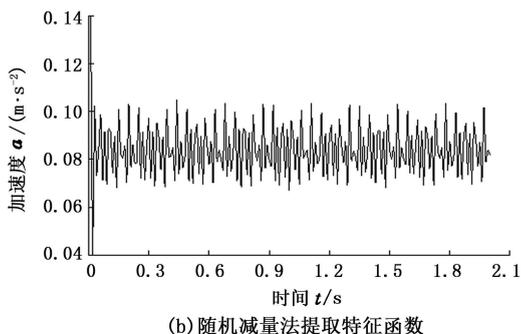


图 3 现场监测布置图

Fig. 3 In-situ monitoring scenario



(a) 实测加速度信号



(b) 随机减量法提取特征函数

图 4 随机减量法处理前后信号曲线

Fig. 4 Relation between vibration data and time with random decrement treatment

2.2 模态参数识别

时序分析法和复指数法是目前常用的两种结构动力学参数识别方法。其中时序分析法主要利用 AR 自回归、MA 滑动平均和 ARMA 自回归滑动平均等参数模型对有序随机振动响应数据进行处理,从而得到结构的动力学参数。复指数法则首先将结构的自由振动响应或脉冲响应函数表示为复指数函数和的形式,然后应用线性方法确定其中的动力学参数。

将通过随机减量法提取的特征函数分别采用 ARMA 法与复指数法进行模态参数识别,结果如图 5 所示。由图 5 可知,复指数法和 ARMA 法计算得到的拟合曲线跟特征函数曲线有很好的拟合度。

2 监测信号分析方法

随机海洋环境载荷下平台结构响应幅值较小,且测试过程受环境噪声及平台作业影响,基于输出响应的动力学参数识别方法带来极大挑战。针对不同工程检测对象和识别要求,国内外学者提出一系列环境激励下动力学参数识别方法,如:基于功率谱的峰值法、特征系统实现算法^[10]、ARMA 模型时间序列分析法^[11]、复指数法、随机子空间法^[12]等。在对原始数据进行预处理后,应用 ARMA 方法和复指数法进行平台动力学参数识别。

2.1 信号预处理

随机减量法是从结构的随机振动信号中提取其自由振动响应的一种处理方法,可为实现动力学参数时域识别提供质量良好的输入数据,因此该方法适用于环境载荷下大型结构(桥梁、海洋平台等)特征函数的提取分析^[13]。这里应用随机减量法对 8 个通道测得的实际振动响应数据进行预处理,图 4 给出以 MSF 模块上测得的 A_1 测点 X 轴方向振动加速度信号的处理结果。

基于信号预处理得到的特征函数进行平台结构固有频率识别。在应用 ARMA 法和复指数法时,由于噪声信号的存在,往往须提高模型的阶次,有时增加的噪声模态比真实模态的阶数还要多,这势必产生噪声构成的虚假模态。目前有多种模态定阶和真假模态的判别准则,本文采用一种较为通用的稳定图法,该方法基于虚假模态对不同阶次模型较敏感易变的原理进行真假模态判别。在考察不同模态阶数模型的前提下,假如这些模型的拟合曲线与实测曲线都吻合较好,那些同时出现次数最多的、稳定的模态被识别为系统的真实模态。另一方面,还可以通过分析识别得到的各阶模态阻尼比来识别虚假模态,通常阻尼比大于 20% 或者小于 1% 时,便可认为

是虚假模态。

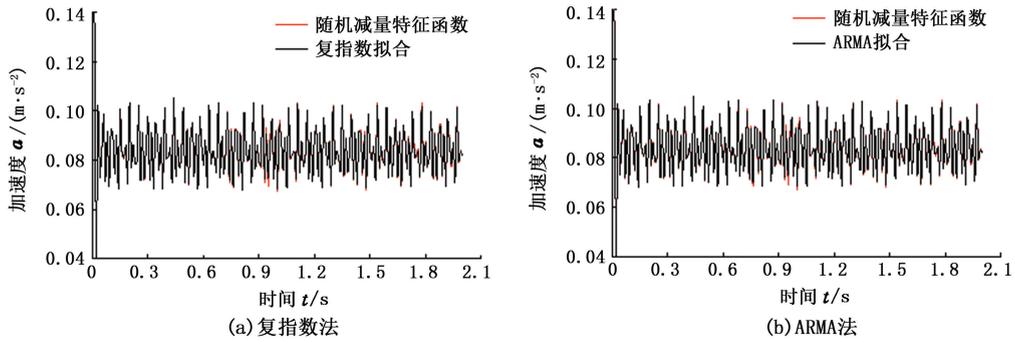


图5 两种方法下的拟合曲线

Fig.5 Fitting curves analysis using two methods

通过稳定图法和阻尼比删除法对辨识模态频率进行筛选,最终所得4个测点对应的前两阶固有频率如表1所示。

表1 模态辨识结果

Table 1 Modal identification results

模态阶数	不同测点各阶固有频率 f/Hz				平均值	设计值
	点1	点2	点3	点4	f_a/Hz	f_d/Hz
1	0.3294	0.3105	0.3191	0.3273	0.3216	0.3439
2	0.3632	0.3507	0.3595	0.3692	0.3607	0.3916

3 基于固有频率分布图的平台结构健康状态判定

对于服役过程中的导管架平台,往往缺少历史监测数据。可以借助有限元计算获得不同损伤状态下平台结构固有频率变化规律,从而建立固有频率分布数据库,对比所识别固有频率可实现平台健康状态的评估。

3.1 固有频率对结构损伤的敏感性分析

由于存在结构腐蚀、构件缺陷、材料老化、疲劳等损伤,导管架平台的抗力势必会发生衰减,同时引起平台结构刚度矩阵的变化。Lemaitre 提出等效应变假设^[14]对结构损伤工况进行简化处理,即假设材料各项同性,无损伤构件在有效应力作用下产生的应变等效于实际损伤构件由于名义应力作用而产生的应变。对于一维线弹性材料,损伤体现在弹性模量的衰减,表示为

$$\bar{E} = (1-D)E. \quad (1)$$

式中, E 、 \bar{E} 分别为损伤前后材料的弹性模量, N/m^2 ; D 为损伤因子。

假设平台有限元分析模型中所有单元为潜在损伤单元,损伤通过刚度衰减模拟。定义单元 j 的刚度衰减系数 D_j ,当 $D_j=1$ 时为没有损伤,当 $D_j=0$ 时

为 100% 损伤。结构整体刚度矩阵 $[K]$ 表示为

$$[K] = \sum_{j=1}^m [A]_j^T D_j [K]_j [A]_j = \sum_{j=1}^m D_j [K]_j^G. \quad (2)$$

其中

$$[K]_j^G = [A]_j^T [K]_j [A]_j.$$

式中, $[K]_j$ 为完好的单元 j 的刚度矩阵; m 为单元个数; $[A]_j$ 为单元 j 在整体刚度矩阵中的位置矩阵; $[K]_j^G$ 为考虑单元 j 位置的刚度矩阵。

单元 j 对刚度变化的第 k 个特征值的敏感因子 $\xi_{kj}^{[15]}$ 为

$$\xi_{kj} = \frac{\partial \lambda_k}{\partial D_j} = \frac{\{\varphi_k\}^T [K]_j^G \{\varphi_k\}}{\{\varphi_k\}^T [M] \{\varphi_k\}}. \quad (3)$$

式中, $\{\varphi_k\}$ 为第 k 阶模态的模态向量; $[M]$ 为整体刚度矩阵。

由于结构损伤造成结构固有频率变化的敏感度为

$$\zeta_{kj} = \frac{\partial f_k}{\partial D_j} = \frac{\xi_{kj}}{8\pi^2 f_k}. \quad (4)$$

式中, f_k 为第 k 阶模态的固有频率, Hz 。

3.2 基于仿真数据库的平台失效模式判别

平台结构的整体损伤(整体腐蚀、老化等)通过引起结构整体刚度的降低造成平台横向、纵向振动频率改变,而局部损伤(船舶碰撞、地基冲刷)则导致结构局部刚度降低从而改变刚度降低方向的振动频率。通过有限元计算建立不同损伤状态下的平台固有频率变化数据库,在工程应用方面可以将基于振动监测及模态识别的动力学参数与其比对,最终实现平台损伤模式的判别。

依据平台设计图纸,建立 CEP 平台 ANSYS 有限元模型,分析得出平台前 3 阶振型如图 6 所示。由图 6 可知,平台前三阶振型分别为整体横摇、纵摇以及扭转。

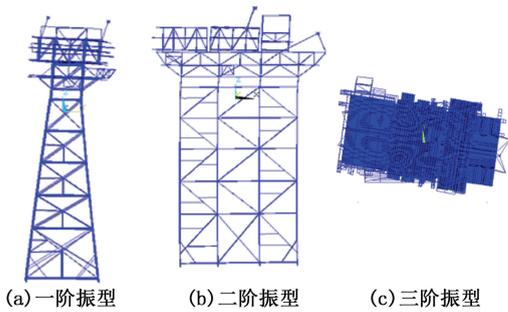


图6 平台前三阶模态振型

Fig. 6 The first three order modal vibration mode of platform

基于目标平台实际作业状态,结合国内外大型土木结构振动监测分析现有成果,基于理论假设及简化原则构建不同损伤工况下的平台结构动力学分析模型:

(1) 环境改变(主要是温度)会引起结构固有频率变化,但其变化程度与由于结构刚度退化或损伤而引起的变化相比可忽略不计^[16]。

(2) 参考平台年检报告,假设该平台在服役期间桩土作用并未发生退化,因此建模时不须考虑由于边界条件发生改变而造成的固有频率变化因素。

(3) 只有结构损伤造成结构刚度退化时,固有频率才会发生变化,而结构整体退化的损伤模型可通过减小弹性模量来实现^[17]。

以调研所得工程中可能发生的损伤类型为依据,这里分别考虑平台整体刚度衰减、上部组块质量改变、关键杆件缺失、关键杆件刚度衰减等多种损伤工况,开展不同损伤模式下的平台模态分析。其中平台整体刚度衰减工况模拟时弹性模量减小量为1%到10%(间隔为1%)。平台上部组块质量改变则通过调整上部组块M1、M2、M3、MSF的密度实现,每次分别改变各模块质量的20%~50%。关键杆件缺失分为主承载桩腿和斜撑的缺失,其中主桩腿缺失考虑主桩腿A1上的一段单元(大约0.5 m)失效;关键杆件刚度衰减工况则主要考虑主桩腿A1和ROW1面的斜撑刚度衰减30%。最终计算得到与各种损伤工况相对应的平台一阶横摇频率—纵摇频率分布,其分布情况如图7所示。

由图7可知,平台整体刚度衰减时,横、纵摇频率的变化近似呈线性关系,随着整体刚度的衰减,一阶横、纵摇固有频率逐渐减小;横、纵摇频率变化对主桩腿和斜撑的局部刚度衰减敏感度较小,但对主桩腿和斜撑失效敏感度较大,且杆件失效时横、纵摇频率的变化幅值取决于失效位置和失效程度对横、

纵向刚度的影响程度。由此也验证了振动监测技术不适用于平台局部构件小损伤的识别;平台上模块质量改变时,横纵摇频率的变化也近似呈线性关系,但是线性离散程度较整体刚度衰减高。

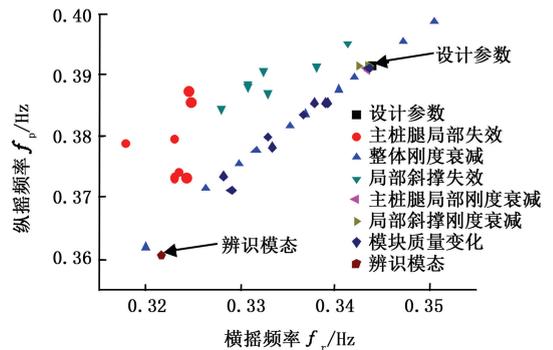


图7 多种损伤工况下平台横摇—纵摇频率分布

Fig. 7 Platform rolling-pitch frequency distribution under different damage conditions

以图7所示不同损伤状态下平台固有频率分布情况为依据,结合前文通过现场实测数据分析得到的目标平台辨识模态参数结果(表1),能够实现平台损伤模式的判定。综合表1和图7可以看出,实测横摇固有频率比设计参数下计算结果偏小(约6.5%),而实测纵摇固有频率则偏小7.9%,由此说明该平台频率改变可能原因是上部模块质量改变或整体刚度衰减。结合该平台维修改造记录发现该平台在服役期间没有发生大的改造,因此排除因上部模块质量发生改变引起频率变化的可能。由分析和监测结果表明,该平台主要发生了整体刚度衰减(衰减程度约8.3%)。

4 平台时变动力极限承载能力分析

基于结构动力学参数识别的平台健康状态判定可知,随着服役期增加导管架平台发生了结构整体刚度下降。此类损伤的存在将对平台抵抗台风、强震等极端环境的承载能力产生重要影响,因此须对平台在不同服役阶段进行极限承载能力分析。基于极限承载能力的平台强度安全评估可以通过储备强度系数^[18]实现,其定义如下:

$$R_s = F_u / F_d \quad (5)$$

式中, F_u 为结构倒塌时所承受的总载荷; F_d 为平台的设计载荷。

储备强度系数 R_s 能够反映平台体系整体抗力水平,各规范中通常规定其取值一般要大于1.6^[7]。

4.1 非线性动力学模型及分析

非线性静力推覆分析(push-over法)是采用增

量方式逐级对设计载荷进行放大,直至结构发生倒塌,然后通过抗力曲线对结构不同阶段的承载性能进行评估。常规 push-over 分析方法使用准静态载荷等效波浪等环境动载荷,而忽略附加水质量、阻尼以及惯性力等动力学因素影响^[19]。基于时域分析法的极限承载能力分析可以考虑多种动力学及非线性因素,从而实现平台抗力水平的精确评估。

在 ABAQUS 中建立平台非线性倒塌分析模型,通过 AQUA 模块对平台进行波浪、风以及海流载荷的模拟。参考该平台百年一遇环境设计参数确定模拟参数,其中风速取为 64.7 m/s,波浪选用五阶斯托克波,波高为 22.9 m,周期为 13.7 s,海流流速为 1.979 m/s。

以百年重现期载荷为设计载荷,对平台分析模型施加时变环境动载荷得到平台的动态响应,通过对设计载荷乘以载荷系数的方式实现对载荷的放大,直至平台动态响应出现失稳的趋势。这里以环境载荷的作用方向 0° 为例,给出平台结构失效塑性应变以及动态响应分析结果,如图 8、9 所示。

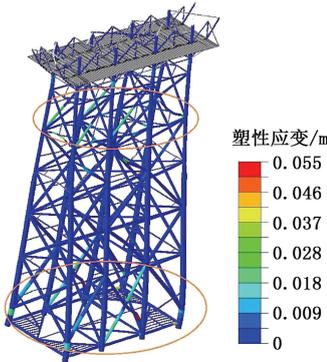


图 8 平台倒塌塑性应变

Fig. 8 Plastic strain graph of platform collapsed state

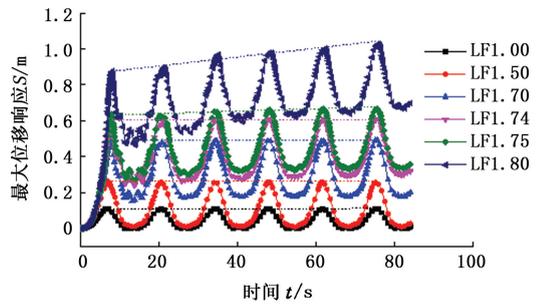


图 9 平台最大位移响应时变曲线

Fig. 9 Time-varying curve of platform maximal displacement response

从图 8 中可以看出,平台在 0° 环境载荷作用下导管架失效模式为上层斜撑与下层斜撑发生塑性破坏,改变主桩腿的载荷分配从而引起 ROW1、ROW2 桩腿的屈曲。由图 9 可知,只有当载荷系数达到 1.75 时,随着环境动载荷的循环作用,平台最大位移响应随时间越来越大,结构出现失稳倒塌的趋势。该平台的动力极限强度储备强度系数为 1.75,大于标准中规定的 1.6,满足抗极端环境载荷的能力。

4.2 平台极限承载力时变分析

根据振动监测信号动力学参数识别与基于频率分布的平台结构健康状态判定可知,目标平台在服役过程中无较大局部损伤,结构整体刚度衰减 8.3%,因此这里分别对设计参数下(服役初期)以及服役 10 a 后结构出现刚度衰减的平台建立有限元分析模型。考虑平台结构材料非线性以及结构非线性,鉴于平台结构的对称性,分别对环境载荷作用方向 0°、45°、90° 三种工况下平台动力极限承载能力进行分析。计算得出 3 种工况下的平台最大位移与基底剪力的关系,如图 10 所示。

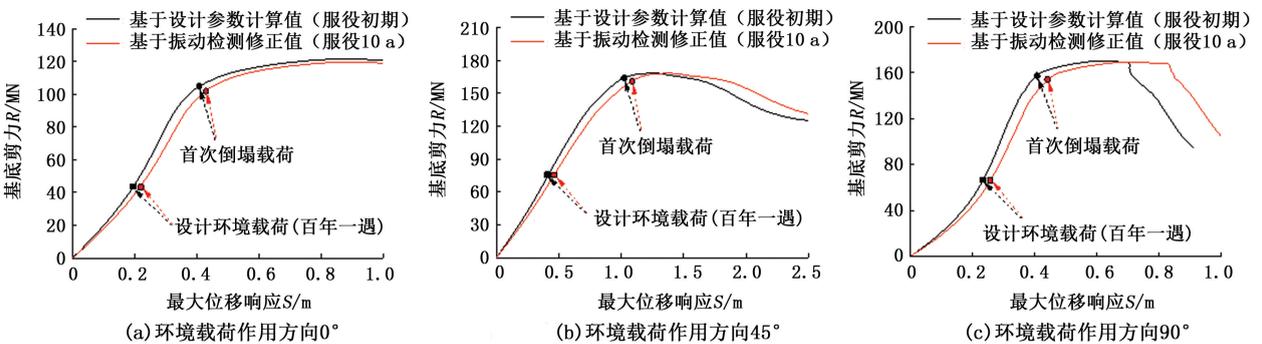


图 10 不同服役期限平台动力极限承载能力曲线

Fig. 10 Dynamic ultimate bearing capacity curves of platforms serving in different period

由图 10 可知,不同方向载荷作用下的基于设计参数(服役初期)与基于振动监测数据修正(服役 10

a) 的平台极限承载能力变化规律基本相同,但在载荷 90° 作用下平台的刚性最大。载荷 0° 作用下服役

初期和服役 10 a 后的平台极限承载力分别为 104.8 和 101.6 MN,随着服役期的增加下降约 3.05%;载荷 45°作用下服役初期和服役十年后的平台极限承载力分别为 163.9 和 161.3 MN,随着服役期的增加下降了 1.59%;载荷 90°作用下服役初期和服役十年后的平台极限承载力分别为 157.7 和 154.2 MN,随着服役期的增加下降 2.22%。

5 结 论

(1) 采用随机减量法对监测加速度信号进行特征函数提取,得到目标平台的前两阶固有频率为 0.3216、0.3607 Hz,分别小于其前两阶设计固有频率 0.3439、0.3916 Hz。

(2) 基于建立的平台模型仿真数据库得到平台不同损伤工况下的动力学参数变化规律,其横、纵摇频率随着结构整体刚度衰减呈线性正相关变化,且对结构局部损伤敏感程度较低。对比现场监测识别出的固有频率,目标平台在服役过程中发生整体刚度衰减的程度为 8.3%。

(3) 通过非线性动力推覆分析得到目标平台极限载荷工况下的失效模式为由于斜撑塑性破坏引起的 ROW1、ROW2 桩腿的屈曲,其极限强度储备系数为 1.75,满足抗极端环境载荷的能力。在其 10 a 服役过程中,平台 0°、45°以及 90°载荷作用下的极限承载力分别下降了 3.05%、1.59%及 2.22%。

参考文献:

- [1] BLACK J L. Using vibration measurements to assess structural integrity: ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering [C]. Honolulu: Hawaii, 2009:141-145.
- [2] 李洪涛,刘跃,徐长航,等. 基于振动与声发射信息融合的海洋平台损伤定位方法实验[J]. 天然气工业, 2013,33(4):120-124.
LI Hongtao, LIU Yue, XU Changhang, et al. An experimental study of damage detection/location methods in offshore platforms using vibration and acoustic emission data [J]. Natural Gas Industry, 2013,33(4):120-124.
- [3] MANGAL L, IDICHANDY V G, GANAPATHY C. Structural monitoring of offshore platforms using impulse and relaxation response[J]. Ocean Engineering, 2001,28(6): 689-705.
- [4] REN W X, ZONG Z H. Output-only modal parameter identification of civil engineering structures[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2004,17(3/4):429-444.
- [5] BOLT H M, BILLINGTON C J, WARD J K. Results

from large-scale ultimate load tests on tubular jacket frame structures: Offshore Technology Conference [C]. Houston: Texas, 1994.

- [6] WESTLAKE H S, PUSKAR F J, OCONNOR P E, et al. The role of ultimate strength assessments in the structural integrity management (SIM) of offshore structures: Offshore Technology Conference [C]. Houston: Texas, 2006.
- [7] API RP 2A-WSD. Recommended practice for planning, design and constructing fixed offshore platforms—working stress design[S]. America: American Petroleum Institute, 2007.
- [8] DNV. Best practice guideline for use of non-linear analysis methods in documentation of ultimate limit states for jacket type offshore structures[S]. Norway: Det Norske Veritas, 1999.
- [9] SALAWU O S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review[J]. Engineering Structures, 1997,19(9):718-723.
- [10] 杨和振,李华军,黄维平. 海洋平台结构环境激励的实验模态分析[J]. 振动与冲击, 2005,24(2):129-133.
YANG Hezhen, LI Huajun, HUANG Weiping. Experimental modal analysis of offshore platform under operational conditions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005,24(2):129-133.
- [11] 欧进萍,何林,肖仪清. 基于 ARMA 模型和自由振动提取技术的海洋平台结构参数识别[J]. 应用数学和力学, 2003,24(4):398-404.
OU Jinping, HE Lin, XIAO Yiqing. Parameters identification in offshore platform using ARMA model and technology of extracting free vibration signal [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2003,24(4):398-404.
- [12] 杨佑发,李帅,李海龙. 环境激励下结构模态参数识别的改进 ITD 法[J]. 振动与冲击, 2014,33(1):194-199.
YANG Youfa, LI Shuai, LI Hailong. Improved ITD method for structural modal parameter identification under ambient excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(1):194-199.
- [13] 黄方林,何旭辉,陈政清,等. 随机减量法在斜拉桥拉索模态参数识别中的应用[J]. 机械强度, 2002,24(3):331-334.
HUANG Fanglin, HE Xuhui, CHEN Zhengqing, et al. Application of random decrement technique to modal parameter identification of cables for a cable-stayed bridge [J]. Journal of Mechanical Strength, 2002,24(3):

- 331-334.
- [14] LEMAITRE J. Evolution of dissipation and damage in metals subject to dynamic loading [C]. Japan: Proc ICM-1, Kyoto, 1971.
- [15] MESSINA A, JONES I A, WILLIAMS E J. Damage detection and localization using natural frequency changes: proceedings of Conference on Identification in Engineering Systems [C]. UK: Swansea, 1996: 67-76.
- [16] ROECK D G, PEETERS B, MAECK J. Dynamic monitoring of civil engineering structures: proceedings of IASS-IACM 2000, Computational Methods for Shell and Spatial Structures [C]. Chania: Greece, 2000.
- [17] WILLIAMS E J, MESSINA A. Applications of the multiple damage location assurance criterion [J]. Key Engineering Materials, 1999, 167: 256-264.
- [18] 朱本瑞, 陈国明, 林红, 等. 极端波浪载荷下导管架平台抗倒塌性能评估 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 135-141.
ZHU Benrui, CHEN Guoming, LIN Hong, et al. Anti-collapse performance assessment of jacket offshore platforms in extreme storm waves [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(3): 135-141.
- [19] 金书成, 柳春光. 导管架海洋平台结构静力弹塑性分析方法研究 [J]. 海洋工程, 2010, 28(4): 111-116.
JIN Shucheng, LIU Chunguang. Study on pushover analysis method for jacket platforms [J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(4): 111-116.

(编辑 沈玉英)