

文章编号: 1001-3482(2007)02-0010-05

海洋平台损伤检测的发展现状与展望

赵玉玲

(济南大学 土木建筑学院, 山东 济南 250022)

摘要: 针对海洋平台损伤检测技术进行了分析, 总结了国内外海洋平台损伤检测技术的最新进展。对各种检测方法进行了分类与比较, 分析了不同检测方法的基本原理及其适用范围, 提出了海洋工程结构损伤检测的二步法, 可以综合利用不同的损伤检测方法, 更准确、有效地对平台进行损伤检测。

关键词: 海洋平台; 结构; 损伤检测; 动力检测

中图分类号: TE95.07 **文献标识码:** A

The Review and Prospect of Crack Detection Methods in Offshore Platform

ZHAO Yu-ling

(School of Civil Engineering, Jinan University, Jinan 255022, China)

Abstract: Crack detection methods in offshore structures are analyzed. And the newest development in the area of crack detection is also summarized. Different methods of crack detection are classified and compared. The basic theory and the scope of the application are shown. At last, the two-step method of crack detection in offshore structure is given. This two-step method is a combined way of different crack detection methods. It can be used to find the crack accurately and effectively.

Key words: offshore platform; structure; crack detection; dynamic detection

3 结束语

电缆信号传输是一个亟待解决的难题。本文对半个多世纪来各类电缆信号传输的设计进行了归纳, 总结出了设计的基本要求和难点, 为今后的设计提供了参考依据和攻关方向。

参考文献:

- [1] 张绍槐. 智能油井管在石油勘探开发中的应用与发展前景[J]. 石油勘探技术, 2004, 32(4): 1-4.
- [2] Crites, et al. Combination Fluid Conduit And Electrical Conductor[R]. US2178931, 1939.
- [3] Michael J J, David R H, Darrell C H, et al. Telemetry Drill Pipe: Enabling Technology for the Downhole Internet[R]. SPE/IADC 79885, 2003.
- [4] Denison, et al. Telemetry Drill String with Piped Electrical Conductor[R]. US4095865, 1978.
- [5] Chevalier, et al. Assembly Providing an Electrical Connection Through a Pipe Formed of Several Elements [R]. US4806115, 1989.
- [6] Chevalier. Assembly for Effecting an Electric Connection Through a Pipe Formed of Several Elements[R]. US4557538, 1985.
- [7] 孙铭新, 韩来聚. “湿接头+有线随钻”测量方式在短半径水平井中的测量实践[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(3): 36-37.
- [8] Robert A C. Telemetry Drill Pipe With Pressure Sensitive Contacts[R]. US4445734, 1984.
- [9] Paul L, Philip H, Jackie E S. Smart Drilling with Electric Drillstring[R]. SPE/IADC 79886, 2003.
- [10] 堵永国, 张为军, 胡君遂. 电接触与电接触材料(二)[J]. 电工材料, 2005, (3): 42-48.

收稿日期: 2006-05-23

作者简介: 赵玉玲(1962-), 女, 山东临清人, 实验师, 主要从事建筑工程专业教学、科研与实验工作, 共发表论文 20 篇, 主持各类科研课题 6 项。

随着海洋石油工业的迅猛发展,越来越多的海洋平台投入使用,同时也有许多现役平台已经接近甚至超过设计寿命。为了保证平台的安全运行,需要对平台结构进行损伤检测与评估。上世纪 70 年代以来,国外一些大型石油公司相继进行了许多平台的监测工作,早期的研究大多以环境与载荷的关系为主要内容,而且大量研究是通过对应力的监测和静态检测方法来分析平台的疲劳寿命及整体强度安全性^[1]。国内许多专家也通过对应力和加速度进行检测,建立结构安全评估系统^[2]。

随着参数识别和安全度评估理论研究的不断深入,以及传感器、测试设备和计算机软件、硬件的发展,损伤检测的研究进展越来越快^[3],针对海洋平台,出现了许多不同的检测方法,这些损伤检测技术有很多种分类方法,可按检测信息进行分类,也可按检测功能或检测技术的使用范围进行分类等。有的检测方法比较直观,有的检测方法需要对检测数据进行分析与辨识。对于非直观的检测方法,可分为检测技术与数据分析 2 个环节。

1 常规检测方法与新兴的检测方法

对于海洋平台结构,常规的检测技术主要有目测、照相和摄像、磁粉检测、超声检测、射线检测、渗透和电位等检测方法。近年来,随着检测技术的不断发展,出现了许多新的检测方法,其中主要有涡流检测法、交流电位降法、交流电磁场测量法、光测法、磁膜探伤和进水构件测试法等。

a) 目测 目测是常用的一种检测方法,它具有直观、可靠的特点,缺点是不易发现微观缺陷。I 类目测为全面的、一般性的外观宏观检查;II 类目测为详细的外观检查,一般根据 I 类目测的结果来确定检查的部位和内容,通常需要借助一些仪器,可以利用水下摄像的方法,对图像进行观察与分析。

b) 磁粉检测 磁粉检测是利用物理学上的磁化原理,即磁化材料,例如钢铁等被磁化后,在不连续区域会产生磁漏现象,这时在该区域放置小的磁粒,会沿着漏磁区分布,从而使不连续区域能够被显示出来。根据选用的磁粉探伤仪器的不同,磁粉检测可以分为线圈、磁轭和探针法 3 种。

c) 超声检测技术 超声检测技术是利用超声波在媒质中的传播特性来实现对非声学量的测定。超声检测法是一种接触式单点检测方法,测量壁厚精度较高,但检测效率低。近 10 a 来,由于电子技术及压电陶瓷材料的发展,使超声检测技术得到了

迅速的发展。最新的超声检测技术以电磁超声和激光超声为代表。电磁超声技术在工业无损检测中已有较多的应用并取得了较好的效果。激光超声技术由于设备庞大、发射和接收灵敏度受到一定限制,而未应用于实际工程领域。

d) 漏磁检测技术 漏磁检测技术的基本原理为,采用合适的励磁回路将强磁场作用于由铁磁性材料制成的管道,并将其磁化饱和,当被检测区域存在裂纹或腐蚀等缺陷时,材料局部的磁导率降低,该区域的磁场会发生畸变,导致一部分磁场从材料中外泄出来,形成管道表面局部区域的漏磁场。采用布置在励磁回路之间并处于管道同一横截面的若干片霍尔元件组成的检测单元来检测漏磁场的变化,即可获得反映管道缺陷状况的信号。

e) 射线检测 利用 X 射线和 γ 射线的穿透性,对于有缺陷和无缺陷的材质,射线的穿过量是不同的,根据射线穿过材质后留下的不同影像,可以判断材料的缺陷情况。射线检测方法可以发现材质内部的缺陷,但是这种方法比较昂贵,而且射线对人体有害。

f) 染色渗透检测 染色渗透技术是对结构的局部表面进行涂层,涂料则渗透到裂缝里,观察表面就可发现表面的裂纹。这种检测方法用来寻找具有有限尺寸的不连续区,如材料的裂纹、搭接、开口及表面的气孔等。这种方法可以用于具有任何物理特性的材料,只要有一个不吸收处理材料的表面,且与处理材料相容即可。渗透检测分为颜色反差渗透和荧光渗透 2 类。

g) 电位检测 电位检测主要是用来测量牺牲阳极的保护电位和阴极保护系统的结构保护电位。测电位采用电位仪,电位仪有 2 种,一种是水面上采用电压表读数的;另一种为水下潜水员读数的。

h) 涡流检测法 利用导电材料能够产生涡流电流,并且电流强度随着交流频率的增大而增强这一原理,通过交流线圈的电流所产生的交流磁场将感应出和其方向相反的涡流磁场,过程变化主次线圈以适当位置放置在被测物上,将会发现彼此相反的 2 个磁场会发生偏差,这种偏差是由于材质的导电性、均匀性和几何形状偏差引起的,并且能测量出偏差值。

i) 磁膜检测 磁膜检测是磁粉检测的一种改进的方式,在水下,喷洒磁粉后,很容易被海水稀释和冲掉,从而影响检测效果。使用磁膜可以得到磁粉的影像载体,使得待记录的裂纹显示以及场强和

磁场方向能够永久记录,就可无须使用水下摄影即可在水下或水面上对不连续区域进行质量分析。

j) 进水构件测试法 当存在穿透型裂纹时,海水将渗透到平台构件内部,使含缺陷的构件进水,可以用超声或射线检测方法探测构件内部是否有水,依此来判断构件是否存在缺陷。进水构件法适合于检测穿透型裂纹或其他使水渗透到构件内部的缺陷,其优点是速度快、效率高而且成本低。

2 全局检测方法与局部检测方法

按检测结构的范围分,损伤检测技术可分为全局损伤检测方法和局部损伤检测方法。对于大型复杂结构,不可能对于每个构件逐一进行局部检测,于是出现了全局检测方法。全局损伤检测方法是利用结构整体特性参数对损伤情况做出初步的判断。由于结构都可以看作是由刚度、质量、阻尼矩阵组成的力学系统,结构一旦出现损伤,结构参数也随之发生改变,从而导致系统的频响函数和模态参数的改变,所以,结构的特性参数的改变可视为结构损伤发生的标志。

局部损伤检测方法主要用于探测结构的局部损伤。局部损伤检测方法又分为 2 类:一类是利用结构局部的动态响应进行检测。该技术适用于小型规则结构,而对于海洋平台结构,用这种技术来检测结构的每一部分是不可能的,因此,这种局部损伤检测技术仅用于检测平台的特别部件,如桩腿结构;另一类是利用磁粉、超声波、漏磁检测、渗透、射线和电位等技术对结构的某些局部进行定期检测。

3 静态检测方法与动力检测方法

工程结构的检测方法按检测物理量的变化形态可分为静态检测方法和动力检测方法。静态检测方法是直接量取构件的尺寸、测量结构材料的强度和弹性模量,进行结构分析以确定结构的安全状态与可靠性水平。由于这种方法的特点直接而且可靠,我国现有的结构可靠性评价及损伤鉴定标准主要依据该方法。但对于大型工程结构,其构件多,且常有隐蔽部分,所以静态检测方法在实际应用中存在工作量大、效率低等缺点。

结构动力检测法是利用结构的动力响应进行结构性态识别的方法,其基本思想来源于机械故障诊断。但对海洋平台结构的检测与机械故障诊断不同,其最大的区别是机械设备可以人为激振,以获取最能反映结构性态的动力响应,而平台结构难以有

效地人为激振,而且测量信息的信噪比低。现在,随着计算机技术和数字化动力响应测量技术的发展,使得动力检测技术能够高效、快捷地对大型复杂结构进行检测^[5]。

基于动力特性参数的检测方法主要包括对结构的模态参数(包括固有频率和振型)、结构的物理参数(如刚度参数),以及对结构的动态响应特性(如传递函数)进行检测^[6]。

3.1 基于固有频率变化的损伤检测技术

固有频率是模态参数中最容易获得的一个参数。利用固有频率的变化进行损伤检测的优点是固有频率容易获得且测试精度比较高。但是,利用频率难以识别结构的早期损伤。Paula F Viero, Ney Roitman^[4]研究了导管架平台基于模态特性参数的损伤检测方法。R. N. Coppolino 和 S. Rubin^[5]考虑深水导管架平台模型,在不同杆件失效时,研究结构的前 25 阶固有频率和振型的变化量对损伤的敏感度。Lalu Mangal 等人^[6]通过实验分析和数值模型计算,研究了固定式平台在不同位置有损伤时以及甲板质量改变时的固有频率和时域响应。

3.2 基于振型变化的损伤检测技术

虽然振型的测试精度低于固有频率的测试精度,而且振型的测量难度与费用都高,但是振型包含更多的损伤信息,利用振型变化可以进行损伤定位。用振型识别结构早期损伤的方法很多,常用的方法有模态置信度判据法、振型曲率法,例如振型变化图形法。

对于工程结构的损伤检测,许多文献是针对简单梁结构进行的,如 F. Ismail, A. Ibrihim & H. R. Martin^[7]分析了损伤对悬臂梁固有频率的影响, A. K. Pandey 等人^[8]利用振型曲率和柔度矩阵的变化来发现损伤并对损伤进行定位。张兆德,王德禹等人^[9]针对平台结构损伤进行了研究,利用平台上部局部结构的振型判断平台下部的损伤,并对损伤进行初步定位。

3.3 基于柔度变化的损伤检测技术

在模态满足归一化的条件下,柔度矩阵是频率的倒数和振型的函数。随着频率的增大,柔度矩阵中高频的倒数影响可以忽略不计。这样只要测量前几个低阶模态参数和频率就可获得精度较好的矩阵。根据获得损伤前后的 2 个柔度矩阵的差值矩阵,求出差值矩阵中各列中的最大元素,通过检查每列中的最大元素就可找出损伤的位置。

3.4 基于刚度变化的损伤检测技术

当一个结构发生损伤时,刚度矩阵一般提供的信息比质量矩阵多。利用刚度矩阵的变化进行损伤检测有很多人在研究,因为结构发生较大的损伤时,其刚度将发生显著的变化。但是,结构发生微小的损伤($<5\%$)时,这类方法将无法进行损伤检测。

3.5 基于能量变化的损伤检测技术

在利用能量变化识别损伤技术中,由于表达能量所用的参数不同,这就产生了多种方法。有些方法利用模态参数表达能量,有些方法不仅用到模态参数同时还引入了有限元模型信息,其中主要有能量传递比法和应变能法。

3.6 基于传递函数(频响函数)变化的损伤检测技术

Jiann-Shiun Lew^[10]根据传递函数的变化,提出了一种损伤检测的方法。认为由损伤引起的传递函数的变化唯一地由损伤的类型和位置确定。David C.等学者^[11]利用频响函数数据和有限元模型,结合最小秩摄动理论,并假设所有产生损伤的方案情况,成功地对一桁架结构进行了损伤检测。Mark J等人^[12]提出了另一种传递函数识别损伤的方法,即传动函数法(Transmittance Function)。定义是结构上任意二点加速度的互谱与二点中任意一点的自谱的比值,复传动函数就描述了结构性质的变化,根据TF的变化就可识别结构早期损伤。

4 基于动力学模型修改的损伤检测方法

基于动力学模型损伤检测的有效性诊断及诊断的灵敏程度决定于合适的数学模型及征兆参数的确定。在工程结构进行有限元建模时,某些假设条件会使所建立的模型不能完全地反映结构的动态特性,需要根据结构试验模态的测试数据对其进行修改。模型修改主要用于把试验结构的振动反应记录与结构计算的结果相比较,利用直接或间接测得的模态参数、时程记录、频响函数等,不断修改结构的物理参数,减少分析模型与实验模型之间的差异。现有的模型修改方法分为全局法和局部法2类。全局法是指结构的动态响应参数直接重建或修改结构整体的质量、刚度矩阵。而局部法一般是用结构的灵敏度分析法、矩阵元素修正法、最佳矩阵逼近法、子结构误差修改法或频率响应函数法等方法来不断调整结构的各个物理参数。

损伤会引起有限元模型中系数矩阵的变化,这一变化可以用一摄动量来表示,损伤主要与刚度矩阵相关联。利用上述模型修改的方法,可以对无损

伤模型和有损伤模型以及不同位置和不同程度损伤的模型进行比较,从理论上研究各种损伤模型的特性与无损模型的差异,从而确定损伤。所以,通过模型修改的方法可以检测损伤的存在和定位。

5 基于小波方法的损伤检测

在旋转机械的故障诊断中,利用信号分析法或基于结构系统的动力学试验参数的方法,通过对应力、加速度信号的测量,对所获得的信号进行数值滤波、进行快速富利叶变换(FFT),进行频谱分析,得出结构的系统动态特性参数,从而判断其安全状况。工程结构损伤检测的关键就是处理损伤结构的振动信息,从中发现信号奇异性。所采用的方法是根据傅里叶变换收敛于零的快慢来判定信号的奇异性及奇异性强弱,但是,傅里叶变换缺乏局部性,傅里叶分析的时间分辨率和频率分辨率是相互矛盾的,难以确定奇异点的位置与谱分布。

自20世纪90年代以来,小波方法应用于信号处理技术。用小波方法进行信号分析,选择合适的小波基,将传感器检测到的信号在不同尺度下的小波正交基上进行分解,获得信号在各个尺度上的模值分布图,用正常结构信号与损伤结构信号的小波分解进行对比,依此来发现奇异点。由于小波变换中引入了尺度参数,构成的时间窗和频率窗使其在频率域内低频时有高的分辨率,而且在高频时在时域内也有高的分辨率。小波变换这种新兴的时频分析方法,具有良好的时频局部性,通过时频窗的灵活变换来突出损伤信号中的不同频率成分,有效地提取损伤特征信息,便于准确识别损伤^[13]。

J. C. Hong, Y. Y. Kim, H. C. Lee 和 Y. W. Lee^[14]利用小波变换研究具有对称损伤杆件的损伤识别;Ser Tong Quek, Quan Wang, Liang Zhang, Kian-Keong Ang 等人^[15]以杆为研究对象,研究了小波技术对损伤的敏感性;Quan Wang, Xianmin Deng^[16]用小波方法对杆内部的损伤进行了研究。LI Dong-sheng, LI Dongsheng, ZHANG Zhaode 和 WANG Deyu 等人^[17]利用小波方法对海洋平台上的动力检测信号进行分析,可以更好地判断平台构件的损伤。

除了上述损伤检测技术之外,还有灵敏度法、神经网络法和遗传算法等。但这些方法各自都有不足之处,有待于继续研究解决。

6 总结与展望

损伤检测技术正在向多学科交叉的方向发展。

由于各类大型复杂结构都有自己的特点,包含了海洋工程、材料结构和振动理论等多门学科知识。因此,研究结构的损伤检测,把振动理论与信号处理、模式识别、人工智能、控制理论和材料结构等多学科技术结合起来是一个发展趋势。目前,在线损伤检测方法的研究也是一个热点,在线损伤检测方法具有实时性、连续性和预报性,有巨大的实用价值和理论价值,且应用前景广阔。目前,对该类方法的研究是一个发展趋势,但是需要解决的理论问题很多,例如,如何处理工作环境激励中存在非白噪声的信号、如何处理环境激励以面力或体力为主的情况等问题。

近年来,无损检测技术的进展主要包括以下 3 个方面:

a) 无损检测技术正在从一般的无损检测向自动无损检测和定量无损检测发展,引入计算机和数字图像处理技术进行检测和分析数据,以减少人为因素的影响,提高检测的可靠性。

b) 无损检测技术在向微观缺陷检测技术、在线检测技术和在役检测技术发展。研究微观缺陷的存在与发展,可以及早发现缺陷,采取措施,避免重大损失发生。在线和在役检测技术可以更好地缩短检测时间,不影响正常生产,减少经济损失。

c) 开展无损检测新原理、新方法、新技术的探索研究。

参考文献:

- [1] Rogers L M, Monk R G. Detection and monitoring of cracks in offshore structures [C]. OTC5554, 1987.
- [2] 申仲翰. 涸 11-4 平台综合强度监测技术及实施运行系统 [J]. 海洋工程, 1997, 15(2): 24-31.
- [3] 马宏伟. 结构损伤探测的基本方法和研究进展 [J]. 力学进展, 1999, 29(4): 513-527.
- [4] Viero, Paula F. Application of Some Damage Identification Methods in Offshore Platforms [J]. Marine Structures, 1999, 12(2): 107-126.
- [5] Coppolino R N, Rubin S. Detectability of structural failures in offshore platforms by ambient vibration monitoring [C]. OTC 3865, 1980.
- [6] Lalu Mangal, et al. Structural monitoring of offshore platforms using impulse and relaxation response [J]. Ocean Engineering, 2001, 28(6): 689-705.
- [7] Ismail F, Ibrahim A, Martin H R. Identification of Fatigue Cracks From Vibration Testing [J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 140(2): 305-317.
- [8] Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [9] 张兆德, 王德禹. 基于模态参数的海洋平台损伤检测 [J]. 振动与冲击, 2004, 24(3): 5-10.
- [10] Jiann-Shium Lew. Using transfer function parameter changes for damage detection of structures [J]. AIAA Journal, 1995, 33(11): 2189-2193.
- [11] David C, Zimmerman, et al. Structural damage detection using frequency response function [C]. Proceedings of 13th IMAC, 1995: 179-184.
- [12] Mark J S, et al. Detecting structural damage using transmittance function [C]. Proceedings of 15th IMAC, Florida, 1997: 638-644.
- [13] 程正兴. 小波分析算法与应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [14] Hong J C, Kim Y Y, Lee H C, et al. Damage Detection Using the Lipschitz Exponent Estimated by the Wavelet Transform: Applications to Vibration Modes of a Beam [J]. International Journal of Solids and Structures 2002, 39: 1803-1816.
- [15] Ser-Tong Quek, Quan Wang, et al. Sensitivity analysis of crack detection in beams by wavelet technique [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43: 2899-2910.
- [16] Wang Quan, Deng Xiaomin. Damage detection with spatial wavelets [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(23): 3443-3468.
- [17] LI Dongsheng, ZHANG Zhaode, WANG Deyu. Damage Detection Methods for Offshore Platforms Based on Wavelet Transforms [J]. China Ocean Engineering, 2005, 19(4): 701-710.

江汉油田钢管厂首批海底管线 直缝钢管成功下线

2006-11-27, 江汉油田钢管厂直缝钢管分厂为福建炼化企业海底管线项目生产的 $\phi 711 \text{ mm} \times 11.5 \text{ mm}$ 钢管成功下线, 这是该厂首次为国内海底穿越管线项目提供产品。随着我国管线建设的发展, 众多在建和拟建的海底管线全部采用标准高、性能好的直缝钢管作为管材, 这使得该厂的直缝钢管拥有了广阔的市场前景。此次为福建炼化企业加工的 1 100 t 直缝钢管, 钢板钢级为 X60, 执行标准为 API-5L。

(摘自中国石油信息网)