文章编号：1006-1355(2019)03-0230-05

海上升压站振动测试和分析

朱瑞军[1]，何先龙[2]，金 波[3]，王 锋[1]，戚建功[1]，郑 涛[3]

（1. 国家电投集团江苏海上风力发电有限公司，江苏 盐城 224000；
2. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室，哈尔滨 150080；
3. 浙江华东工程安全技术有限公司，杭州 310000）

摘 要：近海风电场产生的电压需要经过海洋升压站升压后输送到陆地使用，振动检测和分析是海洋升压站的日常安全维护的重要手段，江苏某近海风电场升压站震感强烈，为了检测升压站的结构健康状况，测试此升压站的实际振动情况，组建振动检测系统，测试得到此升压站第1层和第4层2个水平向和垂直向振动加速度和振动速度的数据，并且对数据进行时程图和自功率谱的分析，发现此升压站高层振动强度大于底层振动强度，机电设备的振动对于升压站局部振动影响较大，严重时会影响正常生活和工作，振动1阶固有频率较低，结构振动能量主要集中在1阶固有频率处，但是第1层振动和第4层振动的主要频率在各个方向都有稍微的偏差，偏差不足1 %。测试和分析结果表明，机电设备对于升压站局部振动影响明显，此升压站可能存在结构连接松动的情况，研究结果可以为海洋升压站的快速故障诊断提供一定的参考。

关键词：振动与波；海洋升压站；振动检测；故障诊断；频谱分析

中图分类号：TU311.3 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2019.03.044

Vibration Test and Analysis of Ocean Booster Stations

ZHU Ruijun[1], *HE Xianlong*[2], *JIN Bo*[3], *WANG Feng*[1],
QI Jiangong[1], *ZHEN Tao*[3]

(1. National Electric Investment Group, Jiangsu Offshore Wind Power Co., Ltd., Yincheng 224000, Jiangsu China;
2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;
3. Zhejiang East China Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract : The voltage generated by the offshore wind farms needs to be transported to inland after boosting by ocean booster stations. Vibration detection and analysis are the important means for the daily safety maintenance of the ocean booster stations. In Jiangsu province, an ocean booster station of the offshore wind farm had a strong sense of vibration. In order to test the structural health and the actual vibration situation of the booster station, a vibration detection system was set up. The data of horizontal and vertical vibration accelerations and vibration velocities of the first and fourth floors of the booster station was measured. Then, the time history diagram and the self-power spectrum of the data were analyzed. It was found that the vibration intensity of the booster station increases with the rise of the floor, the vibration of the mechanical and electrical equipment has a great influence on the local vibration of the booster station and sometime the influence can be very serious. The first order natural frequency of vibration is low, and the vibration energy of the structure is mainly concentrated at this frequency. The main vibration frequencies of the first floor and the fourth floor have slight deviations in all directions, but the deviations are all less than 1 %. The results of test and analysis show that the influence of the mechanical and electrical equipment on the local vibration of the booster station is obvious and there may exists loose structural connection in the booster station. This study may provide some reference for the rapid fault diagnosis of the ocean booster stations.

Keywords : vibration and wave; ocean booster station; vibration detection; fault diagnosis; spectrum analysis

收稿日期：2018-09-04

基金项目：中国地震局工程力学研究所基本科研专项资助(2017B02)；中国电建集团华东勘测设计研究院“海上风电安全监测技术研究与应用”科研专项资助(KY2017-02-78)；国家电投江苏海上风电公司“海上风机基础及升压站在线监测系统与分析平台构建”科研专项资助(Dc170081Y)

作者简介：朱瑞军（1968-），男，江苏省南通市人，本科，工程师，主要研究方向为海上风力发电的研究。
E-mail: 572486754@qq.com

通信作者：何先龙，男，博士，副研究员，主要研究方向为结构安全监测技术与系统研发。
E-mail: 524245186@qq.com

我国近海风力资源丰富，目前海上风力发电站的建设逐渐覆盖整个东南近海海域，海上风力发电塔产生的电力资源需要经过海上升压站升压后传入内地并入电网，以满足内陆用电需要，海上升压站的安全对于整个风电场可持续运行具有十分重要的作用[1~3]，但是由于升压站在海面上工作，人员检修往往十分不便[4]，出现故障难以紧急处置，振动远程监测是维护海洋平台结构安全的重要手段[5,6]。

海洋升压站工作环境复杂，经常遭受大风、海浪、潮汐等侵袭[2]，历史上经常出现海洋平台振动较为剧烈的情况，不仅影响海洋平台上作业环境和工作人员的身心健康[7]，严重的会造成人员伤亡和财产损失，例如1964年，美国阿拉斯加库克湾两座新建成的钻井平台被海冰推倒；1999年－2000年冬季，渤海JZ20-2中南平台，由于冰激振动导致了平台管线断裂，使高压天然气大量喷出[8]；2004年，中海石油湛江分公司经营的某海洋平台，生产过程中出现振动过大的现象，导致整个平台严重颤动，直接影响平台上的正常生产和生活[9]；本文测试的升压站，工作人员在施工过程中经常能感受到升压站整体存在比较剧烈的振动，测试结果可以为升压站安全做出评估，避免产生重大的财产损失。

1　升压站测试情况

本次测试的升压站位于江苏省盐城市滨海县某海上风电场，升压站结构如图1所示。

升压站由基础桩和甲板构成，甲板总共4层，测试活动在甲板的1层和4层展开，由于测量所用信号线长度限制，甲板1层和4层的速度信号的检测时间是分开的，首先使用振动速度型超低频传感器测得甲板4层振动数据，然后将测试设备放置在甲板1层进行速度信号的检测，最后使用升压站上已经安装布线的加速度型传感器，同时测量甲板1层和4层的振动加速度数据，两种传感器都是三分量传感器，可以同时测量此升压站南北向、东西向和竖直向的振动情况。由于1层和4层的速度检测时间不一致，并且速度和加速度测量时间和测试内容也不一致，本次测试比较全面，能够真实反应出升压站



图1　升压站图片

实际振动的情况。另外1层和4层加速度测试时间一致，也可以得出1层和4层同时间振动的具体情况。

振动测试所用设备全部为北京腾晟桥康科技有限公司和中国地震局工程力学研究所联合研发的结构低频振动测试系统，主要由QZ2012低频测振速度计、QZ2013力平衡加速度计、G01NET-2高精度动态数据采集仪、G01NET振动信号分析软件构成。此类型测试系统已经广泛用于海上风力发电厂的海洋平台和风电塔架振动测试。

2　振动测试时域分析

2.1　振动速度时域分析

QZ2012低频测振速度计，具有低频下限低，灵敏度高的优点，先测试此升压站4层的3个方向振动速度情况，测点布置在升压站东南边，测试10分钟数据时程图如图2所示。

然后将低频速度测试设备放置在1层甲板上，进行速度测试工作，放置位置为东北角，测试所得一层速度时程图如图3所示。（下文图中从左至右依次为南北向、东西向和竖直向振动时程图与分析）。

根据振动速度测试数据，统计10分钟内振动速度最大值如表1所示。

虽然两次测试时间有所差异，但是时间间隔较短，间隔时间不足1小时，升压站附近风速、水流等环境变化不是特别明显，比照统计表可以看出升压

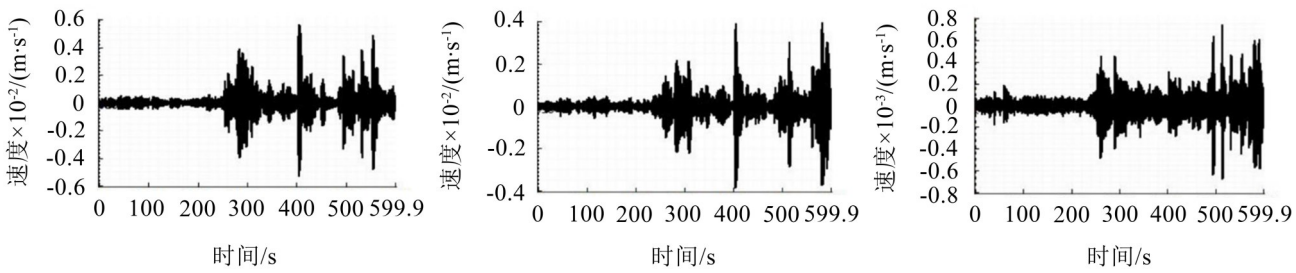


图2　升压站4层振动速度时程图

表 1 10分钟内振动速度最大值统计表

层数	振动速度最大值速度/(m·s^{-1})		
	南北向	东西向	竖直向
1层	0.002 841	0.003 784	0.000 375
4层	0.005 681	0.003 971	0.000 739

站4层振动幅度明显高于1层振动幅度，4层南北向和竖直向振动速度幅度约是1层的2倍，东西向振动幅度变化比较小，4层东西向振动速度幅度比1层大5 %左右。升压站振动速度幅度呈现随高度增加而增加的现象。

2.2 振动加速度时域分析

然后，同时使用QZ2013力平衡加速度计测量1层和4层振动加速度数据，8个加速度传感器已经预先安装在升压站上，本次测量采用的是4层东南角和1层东北角加速度传感器，每个加速度传感器都可以测量3个方向的振动情况。由于4层东南角加速度传感器固定位置有电机设备的干扰，采集到的数据中包含与结构无关的高频成分，高频主要集中在25 Hz，本文采用截至频率为10 Hz的低通滤波器进行信号滤波处理，得到4层和1层的结构振动加速度信号时程图如图4、图5所示。

统计图4、图5中10分钟振动数据及数据滤波前振动加速度最大值，如表2所示。

表 2 10分钟内振动加速度最大值统计表

层数		振动加速度最大值速度/(m·s^{-1})		
		南北向	东西向	竖直向
滤波前	1层	0.023 51	0.023 17	0.030 776
	4层	0.042 115	0.045 811	0.030 203
滤波后	1层	0.022 52	0.023 456	0.007 35
	4层	0.023 738	0.033 917	0.007 569

从表2可以看出，振动加速度速度最大值在各个方向上随着平台层数增高都有增大的趋势，其中滤波前，4层振动加速度最大值相对于1层，南北向增加79.14 %，东西向增加97.72 %，竖直向减少1.86 %，10 Hz的低通滤波后南北向增加5.41 %，东西向增加44.6 %，竖直向增加2.98 %，另外滤波前升压站4层南北向和东西向振动加速度过大，当振动加速度大于0.04 m/s^{2}时，绝大部分人会感觉到振动。

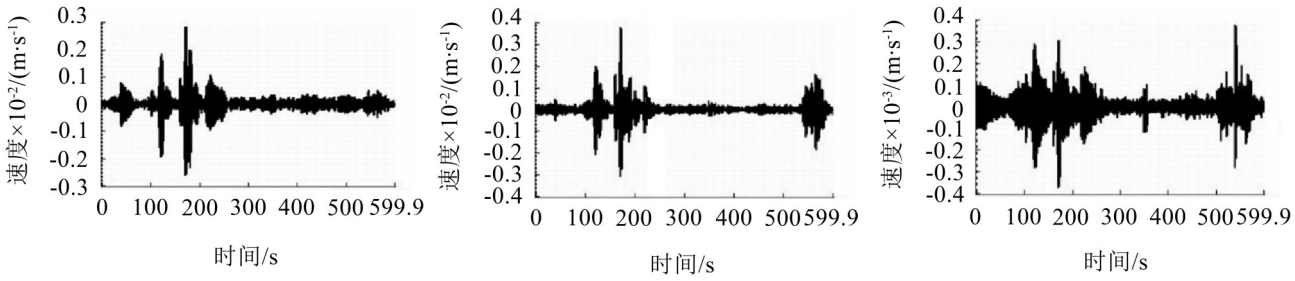


图 3 升压站1层振动速度时程图

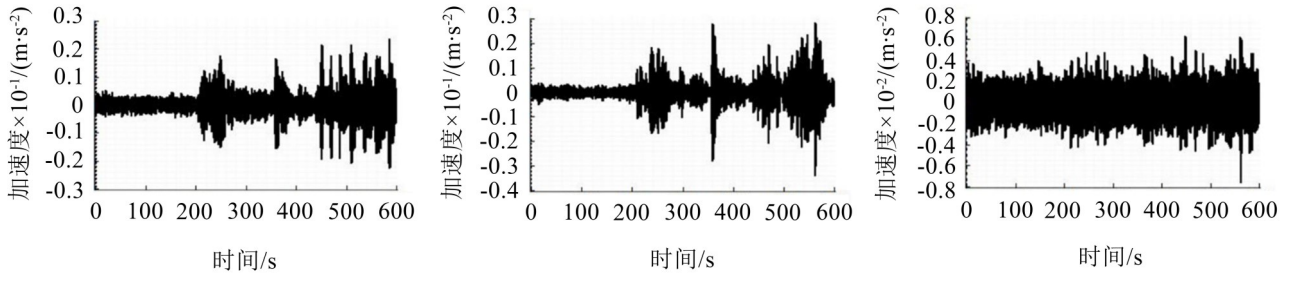


图 4 升压站4层振动加速度时程图

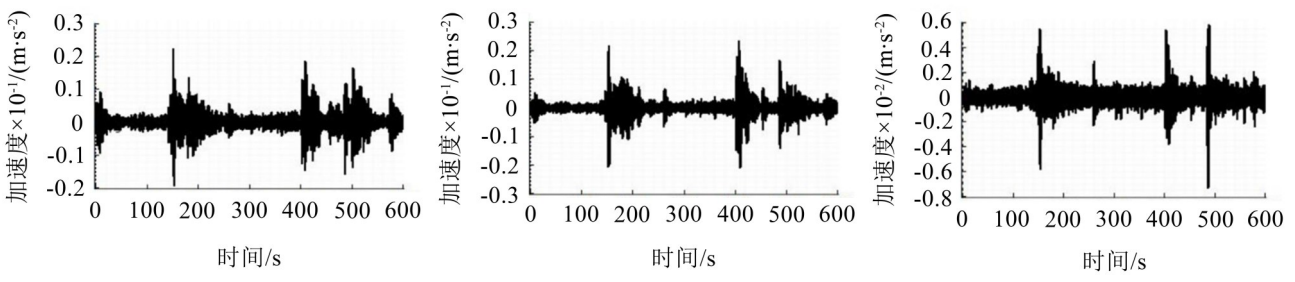


图 5 升压站1层振动加速度时程图

3　振动测试频域分析

使用自功率谱分析的方法，分析此升压站振动的固有频率，对图2－图5中的振动数据进行自功率谱变换，绘制出对应的频域曲线如图6－图9所示，图中从左至右依次为南北向、东西向、竖直向的振动数据自功率谱。

对滤波前振动数据进行频域分析，发现振动加速度数据在25 Hz处振动能量比较突出，振动速度数据在25 Hz处不明显，主要原因是振动速度传感器距离机电设备较远，而振动加速度传感器距离机电设备较近，且振动加速度传感器在升压站施工过程中已经固定，无法移动位置，滤波前典型的加速度数据自功率谱图如图10所示。

从图6－图9可以看出升压站振动主要集中在1阶固有频率处，结构振动固有频率较低，1层和4层的振动加速度和振动速度传感器测量得到的固有频率值比较接近，统计各图中的固有频率值如表3所示。

由表3可以看出此次测试使用不同传感器在不同时间的同一区域内得到的固有频率值一致，1层南北向振动1阶固有频率为1.06 Hz，东西向振动1阶固有频率值为1.08 Hz，垂直向振动1阶固有频率值为1.08 Hz，四层振动固有频率值与一层得到的固有频率值稍有不同，南北向为1.07 Hz，东西向为1.09 Hz，竖直向为1.07 Hz，水平振动固有频率值稍

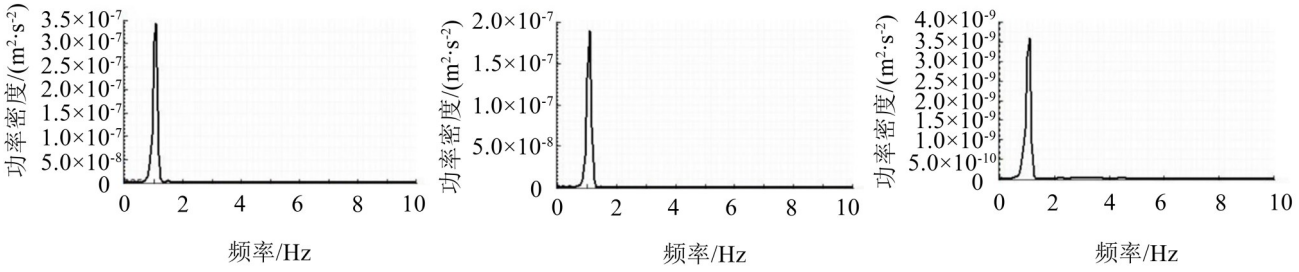


图6　升压站4层振动速度自功率谱图

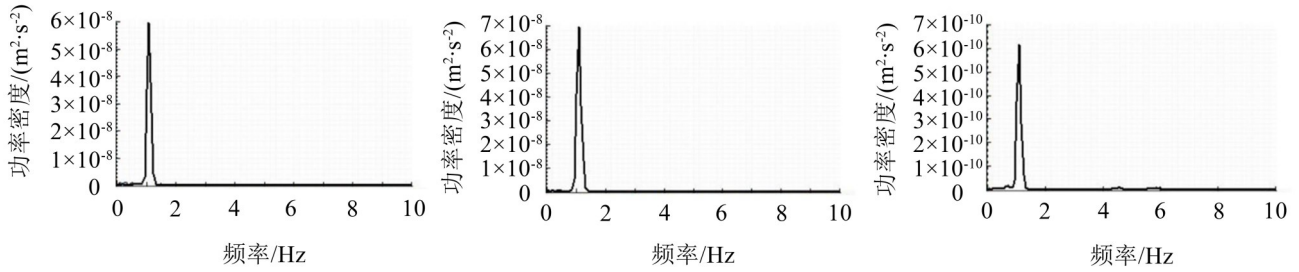


图7　升压站1层振动速度自功率谱图

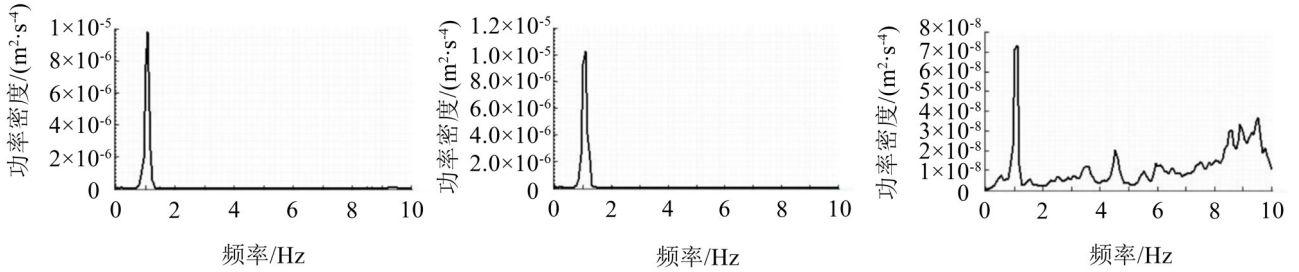


图8　升压站4层滤波后振动加速度自功率谱图

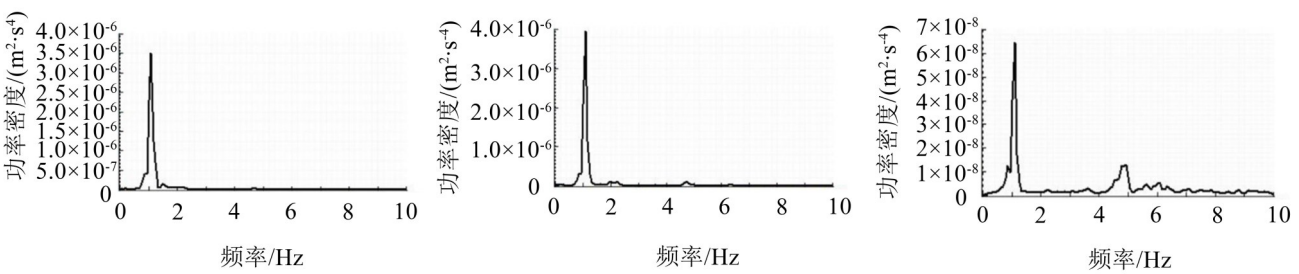


图9　升压站1层滤波后振动加速度自功率谱图

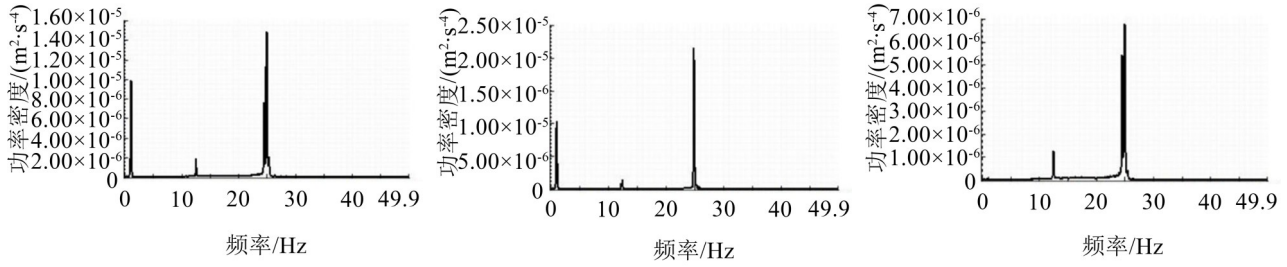


图 10 升压站4层滤波前振动加速度自功率谱图

表 3 各传感器测得的1阶固有频率值

传感器类型	层数	1阶固有频率值/Hz		
		南北向	东西向	垂直向
速度型	1层	1.06	1.08	1.08
	4层	1.07	1.09	1.07
加速度型	1层	1.06	1.08	1.08
	4层	1.07	1.09	1.07

有增大，竖直向振动固有频率值稍有减小，但是整体来说变化率较小，不足1 %，每个数值基本都能反映此升压站的1阶固有频率值，1层和4层固有频率稍有不同，升压站结构连接可能存在不紧密的情况。

另外由图10可以看出，4层机电设备附近的振动加速度数据在25 Hz处振动能量比较突出，竖直向振动基本集中在25 Hz处，完全淹没了结构振动固有频率的影响，结合表2可以知道，滤波前后振动加速度最大值变化明显，升压站4层滤波后南北向振动最大值减小43.64 %，东西向振动最大值减小25.96 %，竖直向减小了74.95 %，在加速度测量中，1层和4层加速度是同时测量的，滤波前出现加速度最大值1层比4层大的情况，说明机电设备对于平台的局部振动影响较大，4层水平振动严重的地方，绝大部分人会有所感觉，影响正常的海洋平台生活和工作。

4 结 语

海洋升压站是海上风电生产的电力集中和传输的重要平台，振动检测是海洋升压站结构健康诊断的重要手段[10–11]，本文所检测的升压站由于振动明显，影响了平台上的日常作业和生活，此次测试工作测量了平台1层和4层的水平和竖直3个方向的振动速度和振动加速度的数据，数据量比较丰富，分析这些数据主要得出以下几个结论：

从振动信号的时域分析可以发现，此海洋升压站水平和竖直向的振动强度高层普遍大于低层，滤波处理前，升压站4层水平向振动加速度幅值过大，绝大部分人能感觉到振动，会对平台工作和生活带来影响。

4层的振动加速度传感器放置在海洋平台机电设备附近，而振动速度传感器放置位置与振动加速度传感器有一段距离，从振动的频域分析来看，加速度信号的频域特性受25 Hz的干扰较大，所以此海洋平台25 Hz的振动是由机电设备的运转引起的，属于局部震动。

分析振动的频率可以发现，此海洋升压站3个方向结构振动的1阶固有频率均为为1.08 Hz左右，1层和4层各个方向的振动固有频率稍有差异，但是差异不超过1 %，可能存在升压站结构连接不紧密的情况。

参考文献：

[1] 左晶晶. 冰区海上升压站整体结构安全评价[D]. 大连：大连理工大学，2016.

[2] 刘福来，张略秋，武江. 海上风电场海上升压站抗震设计[J]. **武汉大学学报**（工学版），2013(S1)：144-147.

[3] 郄鑫，张哲，胡君慧，等. 海上风电场升压变电站电气布置研究[J]. **供用电**，2015(1)：64-67.

[4] 陈楠. 海上风电场升压站电气设计及其可靠性评估[D]. 广州：华南理工大学，2011.

[5] LOUTAS T H, SOTIRIADES G, KALAITZOGLOU I, et al. Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements[J]. **Applied Acoustics**, 2009, 70(9): 1148-1159.

[6] 李洪涛，史玉峰，翟建习，等. 海洋平台振动监测技术试验研究[J]. **中国安全科学学报**，2012，22(12)：46-50.

[7] 林近山，赵东，王均刚，等. W12-1海洋平台振动测试及振源分析[J]. **济南大学学报**(自然科学版)，2006，20(1)：70-74.

[8] 李化凤. 海洋平台结构振动控制方法研究[D]. 大连：大连理工大学，2007.

[9] 马汝建，赵东，熊永功，等. 海洋平台振动测试及分析[J]. **济南大学学报**(自然科学版)，2004，18(2)：114-116.

[10] 李峰，徐长航，刘初升，等. 基于振动测试的海洋平台损伤识别试验研究[J]. **煤炭技术**，2011，30(8)：207-209.

[11] 王长青. 基于振动响应的海洋平台结构损伤诊断技术研究[D]. 中国海洋大学，2006.