

海洋平台检测的无线低频振动传感器设计与验证

喻言^{*1,2}, 李志瑞¹, 王洁³, 张传杰⁴, 欧进萍⁵

1. 大连理工大学 电子科学与技术学院, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
3. 大连理工大学 电子信息与电气工程学部, 辽宁 大连 116024;
4. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451;
5. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 海洋平台是海上石油资源开发的基地, 对其进行低频振动检测获得振动数据是判定结构损伤的基础. 基于此, 开发了一种应用在海洋平台结构中的无线低频振动传感器与采集系统. 首先, 采用模块化方法研制了无线低频振动传感器, 并详细阐述了低频加速度传感器的选择与电源电路等模块的设计; 其次, 完成了无线低频振动传感器的嵌入式程序与主控端 PC 机上采集软件设计; 最后, 在振动台上完成了海洋平台振动无线测试模拟实验. 实验结果表明: 设计的无线振动传感器具有精度高、布设容易、低频性能好、可靠性高等特点, 适用于海洋平台的低频振动快速检测.

关键词: 海洋平台; 无线传感器; 低频; 加速度计; 振动检测

中图分类号: TP212.9; TN98 **文献标志码:** A

0 引言

海洋平台结构作为海上石油资源开发的重大基础性设施, 是海上生产作业和生活的基地, 它长期工作在恶劣的海上环境中, 受到冰、台风、巨浪等的作用而产生不同类型的振动, 但这些信号大多属于低频信号, 所以海洋平台属于低频结构物^[1,2]. 通常, 低频振动的频率范围在 5~10 Hz, 由于振动幅值不大, 人的直观感觉很小, 容易被人们忽略^[3]. 但持续长期的低频振动对平台的正常工作会造成影响, 甚至造成平台结构的损坏. 基于此, 对海洋平台结构进行无损检测, 确保其能够长期、安全、可靠地工作是一个重要的研究课题.

低频无损振动检测是指选用高灵敏度、高分辨率的加速度传感器对海洋平台结构进行振动加速度信号的提取, 再经过一次或两次积分得到速度或位移参量; 运用智能化算法对振动数据进行特征提取和分析, 判定结构损伤状态并采取相应

的保护措施^[4]. 低频加速度传感器的选取是关键, 其精度和灵敏度是整个系统可行的前提与保证.

通常传感器的连接采用有线方式实现, 但采用有线方式对海洋平台结构进行振动检测存在布设线缆困难、人力和资金耗费量大、后期甚至无法维护等缺点. 近年, 无线传感网络(WSNs)技术迅速发展, 用无线通信代替有线传输可在保证数据可靠传输的同时, 具有无需布线、简单方便等优点, 实现了低频振动采集的低成本、便携式、快速化^[5-7].

本文根据无线传感原理设计一款应用于海洋平台结构的无线低频振动传感器及其数据采集系统, 对其硬件研制进行详细阐述, 完成嵌入式软件与采集软件设计, 并利用实验验证所开发系统的可靠性与低频特性.

1 无线低频振动传感器节点设计

本文所设计的节点是低功耗的振动加速度采集节点, 是低频振动检测的基本功能单元, 具有微

收稿日期: 2011-06-07; 修回日期: 2012-09-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108060, 51161120359, 50921001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT12JR13); 辽宁省自然科学基金资助项目(201202039); “八六三”国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA092701); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP1110).

作者简介: 喻言*(1977-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yuyan@dlut.edu.cn; 欧进萍(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士.

小、廉价、电池供电、无线通信和自组织等特性^[8,9]。采用星型网络结构与主控端进行通信,组成无线传感网络,完成低频加速度数据的采集与无线传输。无线低频振动传感器采用硬件模块化的设计方法^[10],由低频加速度传感单元、加速度接口单元、微处理器单元、无线收发模块、存储模块、电源管理模块等部分组成。无线低频振动传感器的模块如图1所示。

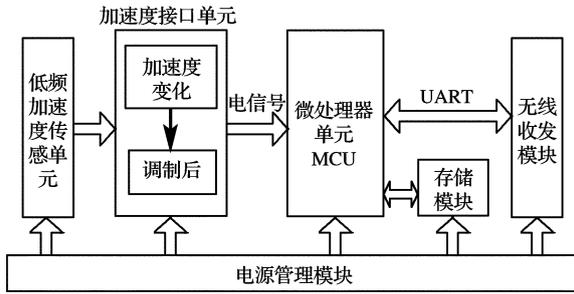


图1 无线低频振动传感器模块

Fig.1 Wireless low frequency vibration sensor module

加速度接口单元主要用于对低频加速度传感器采集到的加速度信号进行多路选择和 A/D 转换,并把数据传送到微处理器单元;微处理器单元对各单元电路进行控制,对采集到的数据进行预处理,把数据存入存储模块或传给无线收发模块进行无线发送;存储模块主要对微处理器单元传送过来的数据进行缓存,弥补微处理器单元存储空间不足的缺陷;无线收发模块用于接收主控端指令,向主控端发送振动数据包;电源管理器模块为各个单元电路提供电源,保证各单元能够正常工作。

1.1 低频加速度传感单元机理分析

低频振动检测对加速度传感单元的精度和低频特性等参数要求较高。目前常见的振动加速度传感器类型主要有机械式、力平衡式、MEMS、压电类等。一般机械传感器的固有频率较高,信噪比低,检测低频振动时会导致输出信号微弱,淹没在“噪声”中难以提取;MEMS 传感器以独立的芯片式设计,具有较好的线性动态范围、灵敏度和可靠性等,但由于工艺水平限制精度较差,目前 MEMS 仅在精度不高的振动测试中广泛应用;压电类传感器采用压电晶体材料制备,工作频带较宽、寿命长、安装便利、体积较小、不易损坏,可根据需求设定精度,但价格较高;力平衡式加速度传感单元通过测量振动位移推算加速度,频响范围较宽、动态范围较广、低频性能好、价格适中,可以

满足低频振动检测的需求。因此,力平衡式传感器被选作低频振动信号的传感单元。

力平衡式加速度传感器是一类将被测参量转换成力或力矩,再利用反馈力调节平衡系统的闭环类传感器。图2所示为电容式力平衡加速度传感器的基本原理,它由质量块 M 、三明治型可变电容器、放大器、反馈电路和扭曲线圈组成。它利用可变电容器的极板间距变化来改变电容值,经电子电路调制将电容变化提取出来,获得测量的加速度值。当测量对象运动时,电容器的动片和定片间距发生变化,该间距经电路变成弱电压信号,经放大后由反馈电路以电流形式传递给 M 上的线圈,线圈与磁场的作用产生一个与被测物体加速度加载给 M 的方向相反、大小相等的安培力,来平衡物体运动产生的作用力,这就是“力平衡”传感器的由来。传感器调制输出的电压与电容器极板运动的位移成正比,而该位移又与传感器检测物体的运动加速度成正比,因此,调制输出的电压即为传感器壳体的运动加速度^[11]。

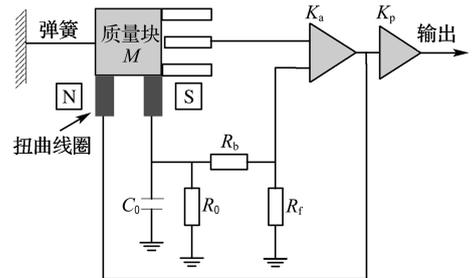


图2 力平衡式加速度传感器基本原理

Fig.2 Basic schematic of force balance accelerometer

1.2 电源管理模块的设计

基于所设计的无线低频振动传感器要实现低功耗、快速检测等要求,选取了集安全、可靠、可充电等特性于一体的 +24 V 锂电池进行供电。所开发节点的各组成单元所需电压不同,包括 ±15 V、±12 V 和 +3.3 V,因此需要对电压进行变换。为减少电压纹波,提高各单元电路电压的稳定性,电源电路采用了两级电压变换结构设计:第一级选择 DC/DC 直流电压转换芯片来实现 +24 V 到 ±15 V、+3.3 V 的变换,DC/DC 电压转换芯片通过调整其 PWM(脉冲占空比)来控制输出有效电压大小。第二级采用 LDO 型三端固定稳压器 7812、7912 实现 ±15 V 到 ±12 V 的变换,LDO 型三端固定稳压器具有输出稳定性好、使用方便、输出过流过热自动保护等特性。电源管理模块电路如图3所示。

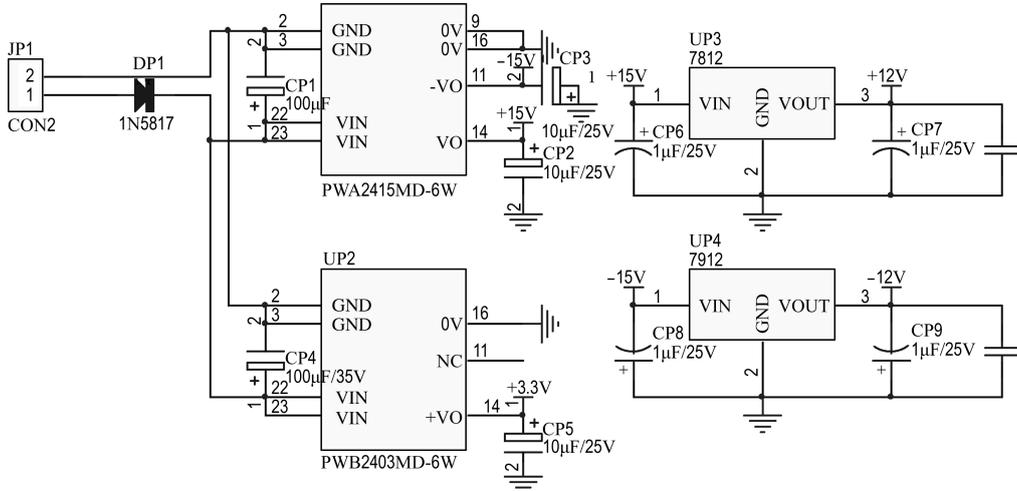


图 3 电源管理模块电路

Fig. 3 Power management module circuit

1.3 其他电路设计

加速度接口单元由多路选择(MUX)和 A/D 转换构成,首先选用多路开关芯片 MAX4051 进行 8 路的通道选择,然后采用 24 位的高精度 ADC 芯片 ADS1248 实现模拟量到数字量的转换。

微处理器单元采用高性能 16 位微处理器 MSP430F5438,该系列微处理器具有超低功耗特性,在 1.8~3.6 V 的工作电压性能高达 25 MIPS,可达到无线传感器节点的低功耗等要求;存储模块采用大容量 Flash 存储器,该通用 NAND 型存储器体积小、存储量大,能够弥补微处理器单元存储空间不足的缺陷,实现对海洋平台大量振动数据的缓存功能。

无线收发模块采用基于 ZigBee 的 2.4 GHz 频段 CC2520 无线射频芯片与放大前端 CC2591 进行设计. CC2520 无线射频芯片是工作在 2.4 GHz 免授权 ISM 频带的 TI 公司第二代 ZigBee/IEEE 802.15.4 无线射频收发器. CC2591 工作在 2.4 GHz 的射频前端,主要面向低功耗与低电压应用,可提高接收灵敏度和发射功率,增加无线传输距离和信号强度^[12]。

对上述各单元进行设计、调试后,集成的无线低频振动传感器实物图如图 4 所示。

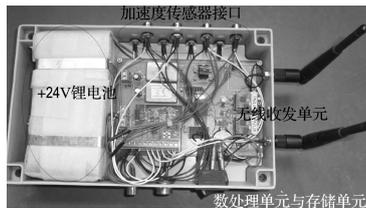


图 4 无线低频振动传感器

Fig. 4 Wireless low frequency vibration sensor

2 无线低频振动传感器采集系统的软件设计

无线低频振动传感器采集系统软件设计由两部分组成:无线低频振动传感器的嵌入式程序与主控端 PC 机上的采集软件。

2.1 无线低频振动传感器的嵌入式程序

嵌入式程序由 ADC 驱动、存储器驱动、无线驱动、数据初步分析与诊断等程序组成,可实现对各单元电路控制,接收控制中心的参数设置命令,完成参数设定,进行数据采集、初步处理、存储、无线传输等操作。

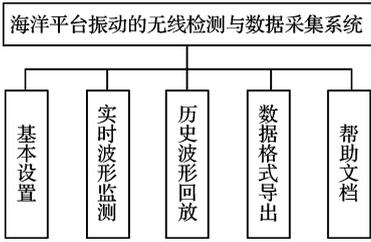
工作流程如下:上电后无线低频振动传感器首先进行初始化,进入无线接收状态,等待主控端的命令. 主控端首先完成参数的设定,然后发送命令. 无线低频振动传感器接收到主控端的开始采集命令后,各通道即开始采集加速度数据,直到接收到主控端的停止采集命令即结束采集。

2.2 主控端的采集软件

主控端的采集软件主要完成对无线低频振动传感器的参数设置、数据采集、数据导出、数据存储、数据分析等功能. 采用模块化的设计方式,主要由基本设置模块、实时波形监测模块、历史波形回放模块、数据格式导出模块、帮助文档模块等构成. 主控端的采集软件模块及其软件界面如图 5 所示。

基本设置模块根据需要对无线传感器节点的状态、无线通道、采样速率、数据存储路径等参数进行设定;实时波形监测模块可以显示采集数据的实时波形,并进行存库操作;历史波形回放模块可实现对各通道在过去从某一时间开始的波形进行查看,方便分析;数据格式导出模块将采集到某

一时间段的加速度数据导入到指定文件中；帮助文档模块为用户快速方便使用采集软件提供快捷帮助信息。



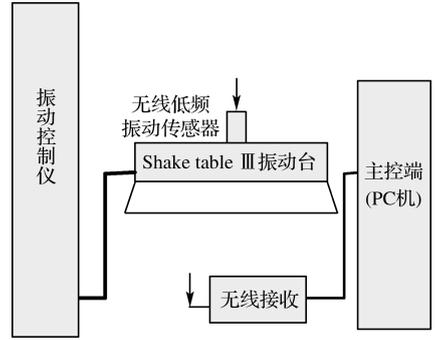
(a) 采集软件模块图



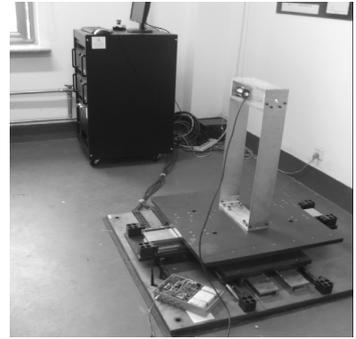
(b) 采集软件界面

图 5 主控端的采集软件

Fig. 5 PC acquisition software



(a) 实验框图



(b) 实验测试现场

图 6 水平振动实验

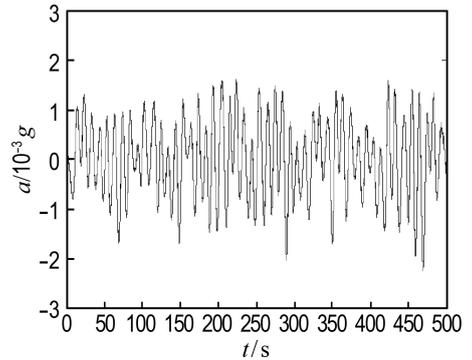
Fig. 6 Horizontal vibration experiment

3 实验验证

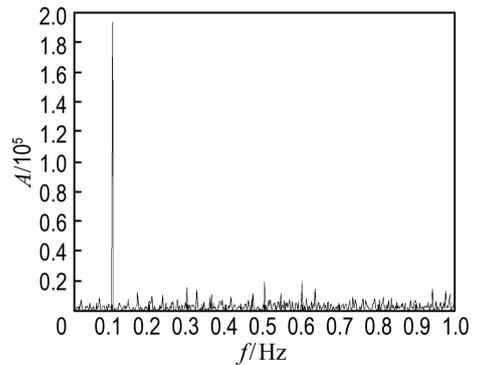
为验证所开发的无线低频振动传感器节点的可靠性和低频性能，在标准的水平振动台 Shake table III 上进行水平振动测试。无线低频振动传感器水平方向布置在振动台的中心位置处，与主控端的无线接收单元进行通信，采集水平方向的加速度信号。实验组成框图与现场测试图如图 6 所示。

振动控制设备分别产生频率为 0.1、0.2、0.5 Hz，振幅为 0.03 m 的水平振动，来模拟海浪对平台的作用，控制中心以 100 Hz 的采样频率进行数据采集。对加速度数据进行 Matlab 处理，分析其时域与频域特性，可以得出无线低频振动传感器的可靠性与低频敏感程度。图 7~9 分别为 0.1、0.2 和 0.5 Hz 的时域与频域比较图。

通过对 0.1、0.2 和 0.5 Hz 的时域与频域比较可以看出，无线低频振动传感器具有很高的可靠性，能够很好地采集低频振动信号。特别是频域方面能够很好地反映低频振动的作用（如表 1 所示），具有很高的灵敏度。无线低频振动传感器所采集到的数据能够真实地反映水平振动的低频特点，适合用在海洋平台的低频振动检测中。无线传感器性能指标如表 2 所示。



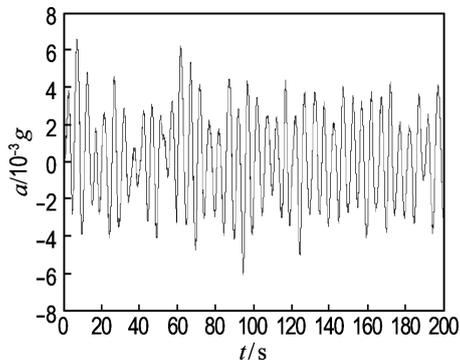
(a) 时域



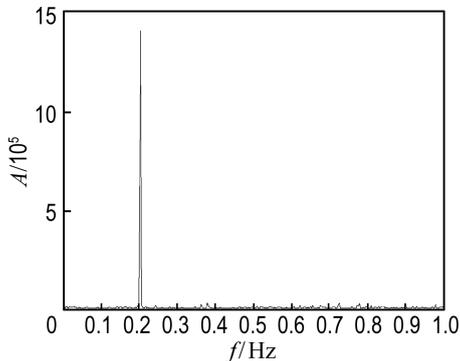
(b) 频域

图 7 0.1 Hz 时频分析

Fig. 7 Time and frequency analysis at 0.1 Hz



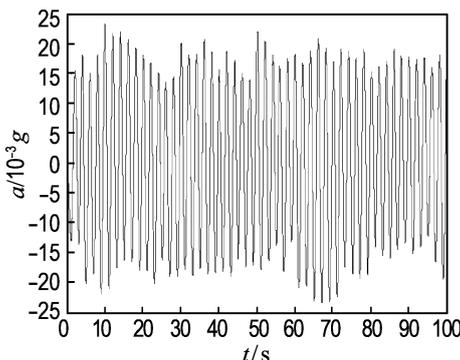
(a) 时域



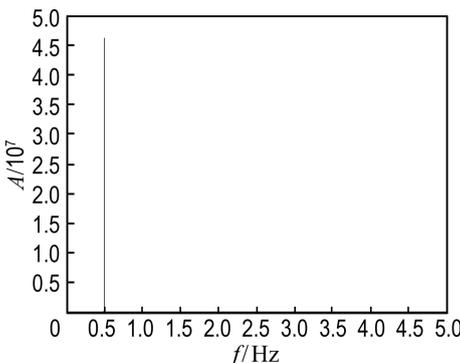
(b) 频域

图 8 0.2 Hz 时频分析

Fig. 8 Time and frequency analysis at 0.2 Hz



(a) 时域



(b) 频域

图 9 0.5 Hz 时频分析

Fig. 9 Time and frequency analysis at 0.5 Hz

表 1 频率误差分析

Tab. 1 Error analysis of frequency

工况(参考频率)/Hz	无线实测频率/Hz	相对误差/%
0.1	0.102	0.2
0.2	0.203	1.5
0.5	0.504	0.8

表 2 无线传感器性能指标

Tab. 2 Performances of wireless sensor

性能指标	参量
频段/GHz	2.4
点对点通信距离/m	400
传感器精度/ $10^{-3}g$	0.06
供电电压/V	+12~24(DC)
连续采集时间/h	50
组网	128 点可扩展
传感器测量范围/g	± 2
传感器通道/个	8
工作温度/ $^{\circ}C$	-20~+85
A/D 位数	20 位

4 结 论

本文针对海洋平台结构的低频振动特点,设计了一款对平台结构进行快速低频振动检测的无线低频振动传感器及采集系统.利用水平振动台实验模拟海浪对平台作用,验证其可靠性与优良低频性能.研究表明,所开发的无线低频振动传感器节点可靠性高、布设容易,适合在海洋平台结构的低频振动检测中应用;实现了低频振动检测的低成本、便携式、快速化,具有广阔的应用前景.

参考文献:

[1] 欧进萍,肖仪清,黄虎杰,等. 海洋平台结构实时安全监测系统[J]. 海洋工程, 2001, 19(2):1-6.
 OU Jin-ping, XIAO Yi-qing, HUANG Hu-jie, et al. Real time safety monitoring system for offshore platform structures [J]. **The Ocean Engineering**, 2001, 19(2):1-6. (in Chinese)

[2] 周亚军,赵德有. 基于结构参数随机性的海洋平台振动模糊逻辑控制研究[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(5):700-703.
 ZHOU Ya-jun, ZHAO De-you. Research on fuzzy logic control of structural vibration for offshore platforms based on random uncertainty factors [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2004, 44(5):700-703. (in Chinese)

[3] 严普强,乔陶鹏. 工程中的低频测量与其传感器[J]. 振动测试与诊断, 2002, 22(4):247-253.

- YAN Pu-qiang, QIAO Tao-peng. Measurement of low frequency vibration in engineering and its transducers [J]. **Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis**, 2002, **22**(4):247-253. (in Chinese)
- [4] 周智, 欧进萍. 土木工程智能健康监测与诊断系统[J]. 传感器技术, 2001, **20**(11):1-4.
ZHOU Zhi, OU Jin-ping. System of smart health monitoring and diagnosis in civil engineering [J]. **Journal of Transducer Technology**, 2001, **20**(11):1-4. (in Chinese)
- [5] 喻言, 欧进萍. 海洋平台结构振动监测的无线传感实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, **39**(2):187-190.
YU Yan, OU Jin-ping. Wireless sensing experiments for structural vibration monitoring of offshore platform [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2007, **39**(2):187-190. (in Chinese)
- [6] YU Yan, OU Jin-ping, ZHANG Jun, *et al.* Development of wireless MEMS inclination sensor system for swing monitoring of large scale hook structures [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009, **56**(4):1072-1078.
- [7] Lynch J P. Decentralization of wireless monitoring and control technologies for smart civil structures [D]. Stanford:Stanford University, 2002.
- [8] Ian F A, Weilian S, Yogesh S, *et al.* A survey on sensor networks [J]. **IEEE Communications Magazine**, 2002, **40**(8):102-114.
- [9] 高英明, 金仁成, 王立鼎, 等. 嵌入式无线传感器网络节点设计与通信研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, **48**(5):749-753. (in Chinese)
GAO Ying-ming, JIN Ren-cheng, WANG Li-ding, *et al.* Study of embedded wireless sensor node design and communicating realization [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2008, **48**(5):749-753. (in Chinese)
- [10] YU Yan, OU Jin-ping. Design, calibration and application of wireless sensors for structural global and local monitoring of civil infrastructures [J]. **Smart Structures and Systems**, 2010, **6**(5):641-659.
- [11] 李彩华, 李小军, 颜世菊. 无方向性力平衡加速度传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2008, **27**(11):78-80.
LI Cai-hua, LI Xiao-jun, YAN Shi-ju. Design of nondirectional force balance accelerometer [J]. **Transducer and Microsystem Technologies**, 2008, **27**(11):78-80. (in Chinese)
- [12] Texas Instruments. CC2520 Datasheet [EB/OL]. [2009-06-20]. <http://www.ti.com>.

Design and validation of wireless low frequency vibration sensor for offshore platform inspection

YU Yan^{*1,2}, LI Zhi-rui¹, WANG Jie³, ZHANG Chuan-jie⁴, OU Jin-ping⁵

- (1. School of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
4. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China;
5. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Offshore platform is the base for ocean oil resources development, and it is an effective means to determine offshore platform's injuries to inspect its low frequency vibration. A kind of wireless sensor and its acquisition systems for low frequency vibration inspection of offshore platform are presented. Firstly, the wireless low frequency vibration sensor is designed by modularization method, the choice of low frequency accelerometer and the design of power circuit are illustrated. Secondly, the embedded programs of the wireless low frequency vibration sensor and PC's acquisition software are introduced. Finally, inspection experiments using wireless low frequency vibration sensors on shake table are performed. The experimental results show that, the designed wireless low frequency vibration sensor has the characteristics of high resolution, easy installment, good low frequency performance and reliability, so it is very suitable for fast vibration inspection of offshore platform.

Key words: offshore platform; wireless sensor; low frequency; accelerometer; vibration inspection