

海洋重力仪的电容式微位移传感器正弦激励源设计

邓浩 廖成旺 邓涛 丁伟 王浩

(中国地震局地震研究所 武汉 430071)

摘要: 介绍基于差动电容设计的电容式微位移传感器的工作原理,对检测电路的输入和输出关系进行了详尽的推导,确定使用直接数字合成技术(DDS)研制的正弦激励源电路,并运用 matlab-simulink 进行仿真数据,结果表明,幅值稳定度可达到 0.000 001 V,频率稳定性达到 0.000 1 Hz,该系统解决了以往正弦电路中幅值稳定度和高频时频率稳定度差的问题,提高了海洋重力仪的观测精度。

关键词: 海洋重力仪; 电容式微位移传感器; 正弦激励源

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Sinoidal excitation source design of capacitive micrometer for marine gravimeter

Deng Hao Liao Chengwang Deng Tao Ding Wei Wang Hao

(Institute of Seismology, CEA, 40 Hongshan Side Road, Wuhan 430071, China)

Abstract: The principle of capacitive micrometer developed with differential capacitance is systematically introduced and computed through deriving the relationship between input and output. The sinusoidal excitation source using the Direct Digital Synthesis technology is set up in Simulink simulation system. The simulation results shows that amplitude stability and high frequently stability achieve to 0.000 001 V and 0.000 1 Hz. It is better than past, Moreover, it has increased the precision of marine gravimeter.

Keywords: marine gravimeter; capacitive micrometer; sinoidal excitation source

1 引言

海洋重力仪在海洋地质构造,海洋资源勘探,军事,地球物理等领域有重要的应用。目前广泛使用的是第三代海洋重力仪,这类海洋重力仪是将一绕有线圈的检测质量置于均匀磁场中,使用高精度电容式微位移传感器来测量重力变化引起的检测质量位移的微小变化。其中电容式微位移传感器的激励源采用一个可擦除可编程只读存储器(EPROM)和一个数模转换器(DAC)组成,但是用这种方法产生的信号频率一般都限制在 100 kHz 以下,而且幅值和频率稳定度不高,尤其是在高频时,不能满足高精度测量的要求。

本设计在此基础上,提出采用直接数字合成(DDS)技术,设计出适用于海洋重力仪的信号发生电路,并进行仿真分析,利用 DDS 产生的正弦波信号具有高精度,高分辨率和高稳定度的特点,提高海洋重力仪的观测精度。

2 电容式微位移传感器

海洋重力仪是相对重力仪,海洋重力场变化引起的检

测质量位移很小,要求检测电路有很高的精度,根据 CHZ 型海洋重力仪的数据,其系统增益约为 $0.01 \mu\text{m}/\text{mgal}$,如果要达到 0.01 mgal 的测量精度,则要求电容测微仪的分辨力达到 $0.000 1 \mu\text{m}$ 。为了获得高精度,本文采用交流电桥式电容检测方法(图 1)来测量位移的微小变化。

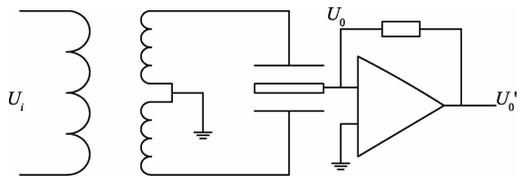


图 1 交流电桥式电容检测

检测质量与两个极板形成差动电容与一个变压器次级绕组组成桥式电路,高频正弦波信号通过变压器的初级线圈耦合到两个次级线圈对电路进行激励,检测质量的微位移形成的电压经检测质量输出,然后进行放大,检波等数据处理。

图中 U_i 表示正弦激励信号, U_o 表示桥式输出信号, C_1

和 C_2 分别表示电容动极板与电容上、下定级板之间形成的电容。变压器的初级线圈和次级线圈的匝数比为 2:1。

设两次级线圈的阻抗为 Z , 当动极板位于差动电容中心位置时, 输出电压 $U_i = 0$; 当动极板向下移动 $X(t)$ 时, 由平行极板电容 C 公式:

$$C = \frac{\epsilon s}{d} \quad (1)$$

式中: ϵ 为绝对介电常数, s 为极板面积, d 为平行极板间距, 得到:

$$C_1 = \frac{\epsilon s}{d + x(t)} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon s}{d - x(t)} \quad (3)$$

根据 KVL 定理可得:

$$\frac{U_0 - \frac{1}{2}U_i}{1/j\omega C_1} \cdot Z = \frac{1}{2}U_i \quad (4)$$

$$\frac{U_0 - \frac{1}{2}U_i}{1/j\omega C_2} \cdot Z = \frac{1}{2}U_i \quad (5)$$

两式相除可得:

$$U_0 = -\frac{U_i}{2d}X(t) \quad (6)$$

可以看出: 检测质量偏离中心位置的距离 $X(t)$ 与差动电容的输出电压 U_0 成线性关系, 故由差动电容的输出电压可以求出检测质量偏移的距离。要求给变压器初级线圈施加一正弦波激励信号, 为保证电容测微电路的测量精度, 对激励源 U_i 的幅值和频率稳定性有很高的要求。激励源幅值的变化必然导致两次级线圈电压不相等, 会造成电容桥路有零点残余电压的出现。当激励信号源幅值不稳导致次级线圈之间存在幅值差值 ΔU 时, 检测质量在中心位置时输出电压为 $\Delta U/2$, 测量误差 U_ϵ 为:

$$U_\epsilon = \frac{\Delta U}{2} \left(1 + \frac{\Delta d}{d}\right) \quad (7)$$

式中: Δd 为检测质量偏移中心位置的位移, d 为中心位置距离定级板的距离。

量程-精度比是电容测微传感器的重要指标之一。若要求电容测微仪的精度达到 $0.001 \mu\text{m}$, 量程为 1 mm , 则量程-精度比为 $100\,000:1$, 则要求激励源的幅值稳定度必须高于 $1/100\,000$ 。

3 正弦激励源的设计

传统的模拟电路是以文氏桥振荡电路为核心, 其产生的信号频率和相位调整困难, 早期的数字式信号发生器基本是用 EPROM 和 DAC 实现的, 但产生的正弦波频率受

限于 EPROM 的读写速度。为了获取高精度的微位移电容测量系统, 需采用更高频率, 更高稳定度的激励源。实验证明, DDS 方法可以克服载波信号幅值和频率稳定性低及谐波失真大, 系统线性度差等不足。其原理是以一个固定频率精度的时钟为参考时钟源, 通过数字信号处理技术产生一个频率和相位可调的输出信号。基于此, 本文选取专用的 DDS 芯片 AD9953 为核心设计一路信号发生器。

AD9953 是美国亚德诺半导体公司生产的一款专用 DDS 芯片, 突出优点是具有高达 14 位的相位分辨率, 32 位的频率分辨率和 14 位内部集成的 DAC, 相位和频率调节分辨率高, 输出信号波形失真小, 同时该芯片采用 SPI 串行通信, 与单片机接口电路简单, 易于实现控制。本文采用 PIC 单片机 (pic18f452) 作为 AD9953 的微控制器, 由于 AD9953 输出的是模拟差分电流信号, 所以需要将电流信号转换成电压信号, 使用差分运放 AD620 作为 I/V 转换电路。

为加快研发进度, 和保证研发品质, 十分有必要对所设计的信号发生器进行仿真分析。笔者选取基于 matlab 环境下的 simulink 框图设计仿真软件包, 将模拟出真实的 AD9953 内部工作环境, 达到实验的目的。

4 simulink 仿真模型

首先在 simulink 中根据 DDS 的工作原理建立 DDS 系统模型, 如图 2 所示。

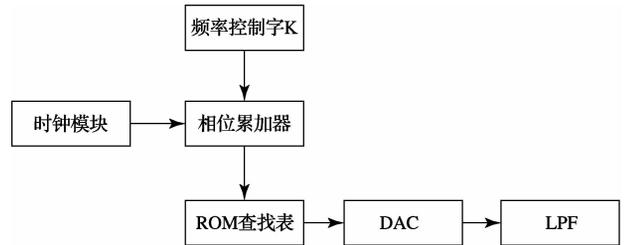


图 2 DDS 系统

其中时钟模块用 sources 模块中的 plus generator 来产生; 频率控制字 K 用 sources 模块中的 constant 来代替; 相位累加器由 subsystem 中的 triggered subsystem, math function 中的 mod 函数, 自定义模块中的 S 函数构成; ROM 查找表用 lookup tables 中的 direct lookuptable 模块 (该模块包含 DAC 模块); LPF 用库 signal processingBlockset 下 Filter designs 中的 analog filter design 模块构成。信号显示使用 sinks 中的 scope, power spectral density 模块实现其功能。建立的 simulink 模型如图 3 所示。

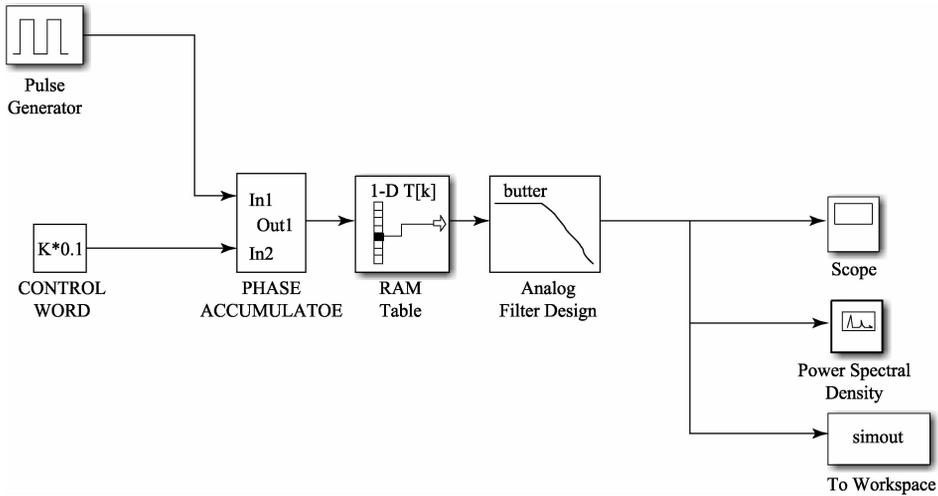


图 3 simulink 仿真模型

5 simulink 仿真实验与仿真结果

主要的仿真参数:输入频率 $f_{clk}=1\text{ MHz}$,ROM 查找表的位数 N 为 8 位,LPF 选 4 阶 butterworth 低通滤波器,截止频率为 2 MHz。

取频率控制字为 $K=2$,进行仿真,得到 DDS 输出信号波形和功率谱密度分布图如图 4 和 5 所示。

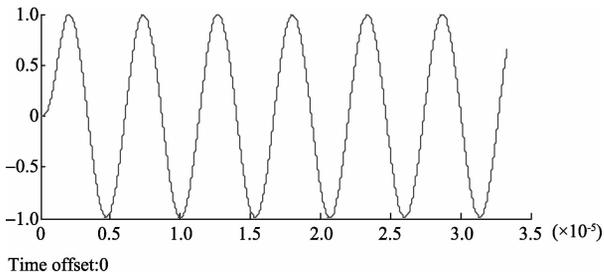


图 4 DDS 输出示波器波形

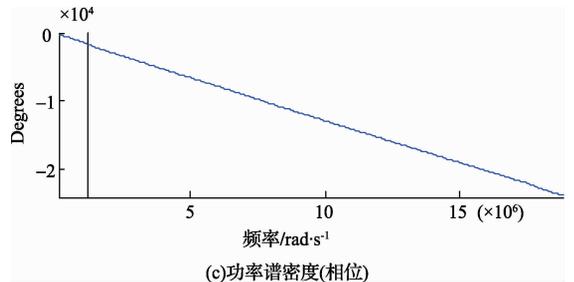
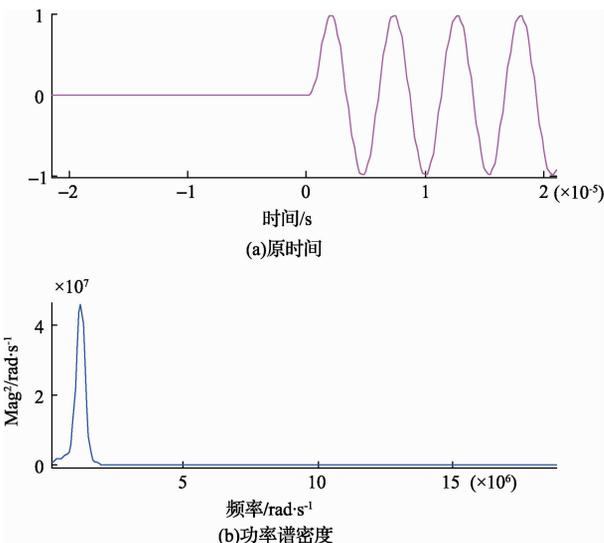


图 5 功率谱密度

由图 4 可以看出 DDS 输出正弦波频率为 125 kHz,与实际计算相符。由图 5 可以看出 DDS 输出不含杂散信号,频率稳定度达到 0.000 1 Hz,幅值稳定度达到 0.000 001,能够满足海洋重力仪中的电容测微精度要求。

6 结 论

针对海洋重力仪微位移检测的特殊要求,构建变压器桥式差动电容检测电路,并采用专用 DDS 芯片 AD9953 设计正弦信号发生电路,在此基础上,在 simulink 平台上进行仿真数据,仿真结果表明输出频率稳定度达到 0.000 1 Hz,幅值稳定度达到 0.000 001 V,满足实验要求。

参考文献

- [1] 李强,王名钢,杨尧.快速原型中 Simulink 模型的代码自动生成[J].电子测量技术,2009,32(2):33-36.
- [2] 胡国庆,蔡亚先.一种高精度电容测微器[J].地壳形变与地震,1986(7):255-260.
- [3] 孙超,林占江.基于 DDS 的雷达任意波形信号源的研究[J].电子测量与仪器学报,2008,22(4):34-39.
- [4] 郑志霞,冯建勇.MEMS 接触电容式高温压力传感器的温度效应[J].电子测量与仪器学报,2013,27(12):41-47.

(下转第 97 页)