

文章编号 1004-924X(2012)11-2444-06

调幅式电容位移传感器的峰值检波电路设计

黄向东*, 刘立丰, 谭久彬, 马 标

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对调幅式电容位移传感器解调过程中由系统不确定相移导致的信号解调不准确问题,提出了一种基于改进的峰值保持电路的调幅式电容位移传感测量方法。首先,分析了调幅式电容位移传感器及其检测电路的工作原理,在研究调幅信号附加相移产生机理的基础上,提出了延迟反馈式峰值保持电路,用以去除附加相移对峰值解调的影响。然后,设计并制作了调幅式电容位移传感器,并对其各个性能指标进行了测试。最后,对实验结果和误差进行了分析。实验显示,提出的峰值保持电路的输出线性度优于 0.05%,制作的传感器在 0~25 μm 内数据测量稳定性优于 10 nm/30 min,传感器测量偏差最大值为 36 nm。结果表明,采用延迟反馈型峰值保持电路有效地解决了系统不确定相移带来的峰值检波不准确的问题,所制作的电容传感器满足了高精度测量的要求。

关键词:位移传感器;电容传感器;延迟反馈;相位延迟;峰值检波电路

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2444

Design of peak detector circuit for AM capacitive displacement sensor

HUANG Xiang-dong*, LIU Li-feng, TAN Jiu-bin, Ma Biao

(*Institute of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

* *Corresponding author, E-mail: huangxd@hit.edu.cn*

Abstract: To solve the problem of inaccurate peak demodulation resulted from the system uncertain phase shift in Amplitude Modulation (AM) for a capacitive displacement sensor, an AM capacitive displacement sensor based on an improved delayed feedback peak detector circuit was proposed and its applied functional blocks and circuits were investigated. Firstly, the measurement principles of the AM capacitive displacement sensor and its detection circuit were analyzed. Based on generation principle of phase shift with the AM signal, an improved delayed feedback peak detector was presented against the problem of inaccurate peak demodulation. Then, the AM capacitive displacement sensor was prototyped using printed circuit boards and its performance indicators were tested as well. Finally, experimental results and errors were discussed. It indicates that the linearity of the delayed feedback peak detector circuit is better than 0.05%, the data shift of prototyped sensor is less than 10 nm/30 min, and the maximum deviation of sensor is 36 nm within the measuring range of 0~25 μm .

收稿日期: 2012-06-15; **修订日期:** 2012-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金(面上)资助项目(No. 51075096); 黑龙江省留学归国人员基金资助项目(No. LC201038/40000045-6-10400-01)

It concludes that the delayed feedback peak detector circuit can effectively solve the problem of inaccurate peak detector resulted from the system uncertain phase shift, and the proposed AM capacitive sensor can satisfy the requirements of high precision measurement.

Key words: displacement sensor; capacitive sensor; delayed feedback; phase shift; peak detector circuit

1 引言

随着现代工业信息技术的发展,纳米技术和微机电系统(MEMS)在各行各业中均得到了广泛的应用。在纳米技术中,纳米测量技术、纳米加工技术和纳米结构并列为纳米技术的三大研究主题。纳米测量技术是纳米技术研究的重要组成部分,无论何种纳米测量技术都离不开传感器。传感器是自动测试、控制系统和信息系统的关键基础,其技术水平直接影响到自动化和信息化水平,自动化技术水平越高,对传感器技术依赖程度就越大^[1-4]。目前运用于高精度测量的传感器家族中,进行纳米分辨率测量的传感器主要可分为电容传感器、电感传感器、光干涉传感器三大类。其中,电容式位移传感器以其结构简单、分辨率高、稳定性好、抗干扰能力强、动态特性好、非接触测量等优点,被广泛应用于高精度的精密加工、高精度定位及高速高精度、大行程机器人的运行定位中^[5-7]。

调幅式电容位移传感器,工作时其载波信号经过幅值运算电路和信号调理电路,传感器位移信号被调制于幅度信息中,然后通过幅值检波将信号从调幅波中解调出来。信号的解调采用模拟

方法和数字方法,模拟解调电路的稳定性和精度完全取决于运算放大器、电阻、电容和电感元件的特性,易受外界干扰,稳定性差;而传统的数字解调方法,如数字相敏检波方法,由于解调过程依赖于参考信号,而实际上电路中存在电容、电感器件,会造成调幅信号和参考信号之间的相位关系发生变化而无法准确捕捉到调幅信号的峰值,导致幅值解调不准确^[8]。针对以往调幅式电容位移传感器中存在的以上问题,本文将延迟反馈式峰值保持技术应用在调幅式电容传感器的信号解调上,使得峰值采样的准确性不受相位延迟的影响。实验证明,该方法在保证传感器稳定性和线性度的同时,可消除调幅信号的相位延迟影响,准确地提取信号峰值。

2 调幅式电容位移传感器的工作原理

2.1 传感器系统的结构组成

图 1 所示为调幅式电容位移传感器的结构框图。整个传感器测量系统可分为三部分,第一部分是前置电路,第二部分是信号调理电路,最后一部分是解调电路。解调电路的输出由数据采集器采集,通过计算采集的数据计算还原出传感器的位移信号。

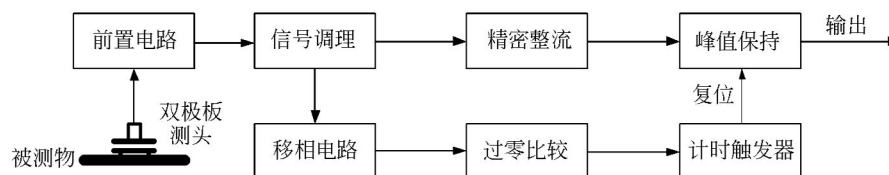


图 1 传感器系统原理图

Fig. 1 Block diagram of sensor system

2.2 传感器信号的调制过程

传感器的前置电路原理如图 2 所示。前置电路是基于变压器电桥的调幅运算电路,其主要作用是将由电容极板间隙的变化引起的传感器电容值

变化信息调制至正弦载波信号的幅值信息里,并对传感器信号进行前置放大。该电路最主要的优势是对杂散电容的有效抑制。

文献[9-10]研究并总结了电容传感器的运算

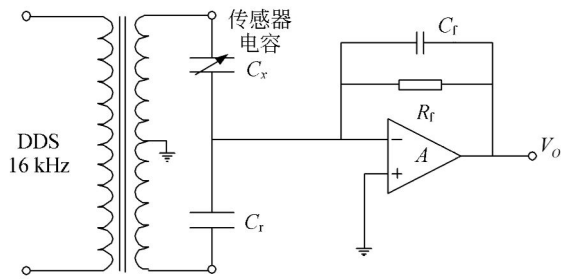


图 2 前置电路原理框图

Fig. 2 Block diagram of front end circuit

调制电路,并对此 AC 桥路有着深入讨论,文献[9]的研究表明当载波信号频率为 16 kHz 时,前置电路对杂散电容的抑制效果最好。因此,本文中 DDS 产生的载波信号频率选择为 16 kHz。文献[10]总结了电容传感器常用的运算电路,指出变压器电桥调幅电路是最准确的抗杂散测量方法之一。

前置电路完成了传感器信号的调制和初步放大,再由单位带通滤波器和交流放大电路组成的信号调理电路对调幅信号进一步去噪和放大处理,提升调幅信号信噪比,为后续检波电路做好准备。

3 延迟反馈式峰值保持电路的原理

3.1 相位延迟的产生原理

根据调幅式电容传感器的结构,调理电路输出为:

$$V_o = k \frac{\Delta C}{C_f} U_s \sin(\omega t + \beta), \quad (1)$$

其中: k 是信号调理电路的综合放大倍数, ΔC 是被测电容与参考电容容值之差, C_f 是前置电路的分辨力放大电容, U_s 是 DDS 产生的载波信号的幅值。注意到,调幅信号相对于载波信号,存在一个相位延迟 β ,如图 3 所示,A 为 DDS 产生的传感器载波信号,B 为待解调的调幅信号,C 为调幅信号经过精密全波整流的信号和峰值保持信号。一般来说,附加相移 β 的形成原因可以总结如下 2 点:

(1) 载波信号里存在相位的量化误差,为了得到幅度高度稳定的载波信号,一般采用数字合成的方法产生载波信号,而 DDS 对相位的量化不可避免地存在误差;

(2) 载波信号经过前置电路和调理电路后形成调幅信号,在此过程中,容性器件和运放的延迟使信号存在相位延迟,加之电子元器件参数易受温

度等环境因素影响而导致相位延迟 β 并不是固定不变,这对准确提取信号峰值造成了极大的困难。

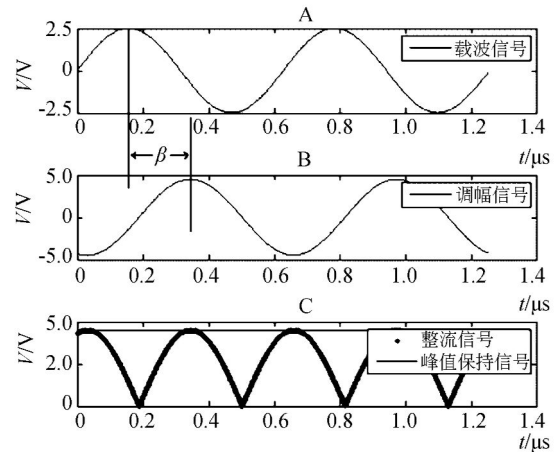


图 3 传感器电路信号对比图

Fig. 3 Comparison of sensor circuit signals

检波电路完成传感器信号的解调运算,是传感器系统电路的关键部分之一,其目的是准确地提取调幅信号的峰值。在式(1)中系统附加相移 β 的存在,使载波信号和调幅信号不同步。

传统的相敏检波过程如图 4 所示。

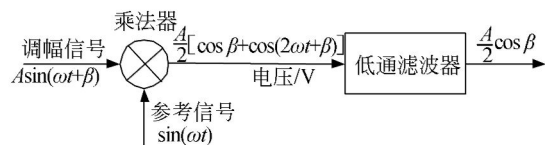


图 4 相敏检波示意图

Fig. 4 Schematic of phase sensitive detector

传统的相敏检波要求待解调信号和参考信号同步,若待解调信号和参考信号含有一个相位延迟 β ,将导致检波输出的精度变化 $\cos \beta$ 倍。显然,利用传统的同步检波对调幅信号进行精密解调极为困难。

如图 3(c) 所示,本文把峰值保持直接应用于调幅式电容传感器的信号解调中,峰值保持电路在信号的峰值过后将峰值信息以直流电压的形式保持,保持的直流电压信号由数据采集卡采集。由此可以看出,峰值保持技术提取信号峰值,不需要知道信号峰值的准确相位信息,配合图 1 所示的由调幅信号产生的控制信号,控制采样的开启时间和复位时间,便能准确地完成信号的峰值提取。本文对保持电路进行了改进,使之达到电容传感器的高精

度测量要求。

3.2 峰值保持电路的工作原理

图 5 所示为延迟反馈式峰值保持电路框图。

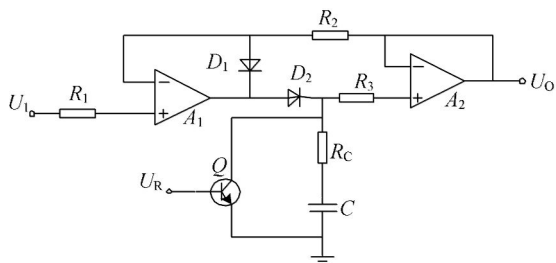


图 5 延迟反馈峰值保持电路简图

Fig. 5 Block diagram of delayed feedback peak detector circuit

该电路是一个正峰值保持电路,分为两部分,一部分为峰值保持部分,另一部分为复位电路部分。由于电子元器件的特性,该电路工作时有 3 个延时单元,分别为运放 A_1 、保持器电容 C 和运放 A_2 。运放 A_1 的直接负反馈被二极管 D_1 阻断,其负反馈是由运放 A_2 的输出 U_o 经过电阻 R_2 提供;而 U_o 的输出相比输入延时 3 个单元,因此运放 A_1 的反馈是延时的。

调幅信号经过整流电路后变成正峰值信号, U_1 未达到峰值时, D_1 截止, D_2 导通, 信号经过运放 A_1 对保持器电容 C 充电, 保持器电压逐渐增大, 经过 A_2 电压跟随, U_o 输出逐渐增大。由于 D_1 的阻断, 使得 A_1 的输出不能反馈给负输入端, 经过 3 个延时单元后反馈给 A_1 。因此, 当 U_1 到达峰值时, U_o 并没有达到峰值, 使得 A_1 负输入端未跟随上 U_1 , 信号进一步放大, 导致过充, 使得输出峰值高于实际峰值, 但 D_1 的存在钳制了信号的进一步放大, 极大地抑制了过充。当 U_1 从峰值下降时, 某时刻, A_1 负输入端大于正输入端, 此时 D_1 导通, D_2 截止, A_1 输出电压被钳制, 进入保持状态, 等待复位或者输入电压继续增大。实践证明, 这种延迟反馈峰值保持电路对于快速变化的信号峰值提取是有效的。

由以上分析可知, 延时反馈虽然解决了快速变化峰值的提取问题, 却带来了延迟过充的问题, 现象是保持电路的输出电压比输入电压的峰值更大。本文通过以下两种改进方法解决该问题:

在峰值保持电容 C 上串接电阻 R_c , 串接 R_c 后, 第二级运放的输入阻抗增大了 R_c 倍, 使得高频

衰减减小, 高频响应大大提高;

根据需要合理选择第一级第二级运放, 在图 5 所示的延迟反馈式峰值保持电路中, 要求第一级运放的电容驱动能力足够强, 压摆率 (SR) 应足够大, 以起到捕捉电压峰值的作用, 避免第一级运放工作在非线性区, 而第二级运放的压摆率小一些以补偿跟随速度不足的问题。综合需要, A_1 选择 LF356, A_2 选择 OP41, 实验结果说明, 峰值保持效果较好。

4 实验及结果分析

研制了基于延迟反馈式峰值保持技术的调幅式电容传感器, 首先对所提出的峰值保持电路进行了输出性能实验, 然后进行了传感器指标测试。为了测试传感器测量电路的性能, 将 PI 公司的压电陶瓷平台 P-753.21C 内置的电容传感器两极板代替测头, 接入前置电路, 用压电陶瓷驱动电源驱动压电陶瓷微位移平台运动, 然后用制作的传感器测量电路进行测试。

4.1 峰值保持电路实验

以泰克的 AFG3252 信号发生器输出峰值为 0 ~ 8.5 V, 频率 16 kHz 的标准正弦波信号, 测试图 5 所示的峰值保持电路性能, 对于不同峰值正弦波信号进行测试, 所研制的保持电路输出电压测试结果如图 6 所示。

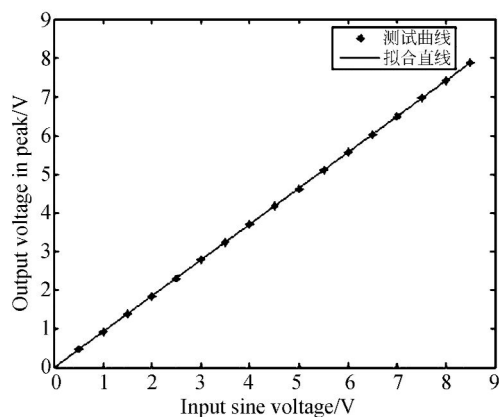


图 6 峰值保持电路性能曲线

Fig. 6 Function curve of peak detector circuit

实验显示, 峰值保持电路输出线性度为 0.05%, 保持电路能准确地提取信号的峰值, 性能较好。

4.2 稳定性测试

测试静态下传感器的数据漂移, 测试了压电陶

瓷内置电容传感器一系列位移点的输出电压稳定性。电容传感器位移 $1.28 \mu\text{m}$, 传感器峰值保持输出的稳定性如图 7 所示, 用六位半表每隔 30 s 记录一个数据, 测试时间为 30 min。

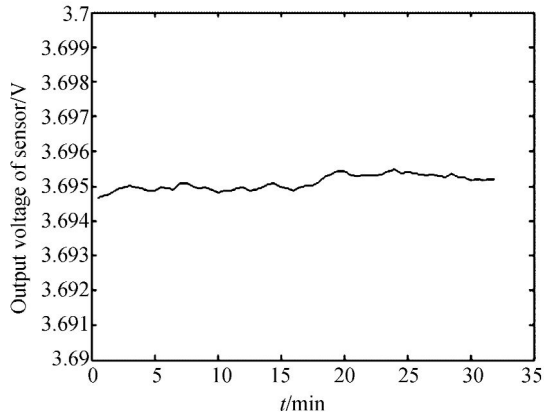


图 7 位移 $1.28 \mu\text{m}$ 稳定性实验曲线

Fig. 7 Stability experimental curve on $1.28 \mu\text{m}$

由实验可得, 传感器输出漂移量为 0.83 mV , 转换为位移漂移量大约为 7 nm 。因此在电容传感器位移为 $1.28 \mu\text{m}$ 时, 输出 30 min 内漂移大约 7 nm 。由于压电陶瓷作为位移发生器存在一定的迟滞和蠕变, 而压电陶瓷驱动电源的输出电压也存在波动, 这些都会引起输出位移的漂移, 因此实际电容传感器漂移量应小于 7 nm 。此外, 对其他测试点做相同测试, 漂移量均低于 $10 \text{ nm}/30 \text{ min}$ 。

4.3 传感器应用于位移测量的比对实验

该实验中应用经检定的德国米铍公司 CS02 型电容传感器作为标准测量仪器, 其分辨力为 2 nm , 线性度为 $0.2\% \text{ FSO}$ 。采用 PI 公司的压电陶瓷作为位移发生装置, 对所研制的电容传感器进行位移测量比对实验。

利用 CS02 型电容位移传感器给出标准位移输出值, 研制的电容传感器给出其测量值, 数据比对如表(1)所示。

表 1 位移测量结果

Tab. 1 Results of displacement measurement

测量次数	位移测量值	标准值	测量偏差 (μm)
1	0.997	0.998	-0.001
2	3.265	3.241	0.024
3	5.809	5.773	0.036
4	7.198	7.234	-0.036
5	8.701	8.680	0.021
6	11.858	11.835	0.023
7	15.093	15.080	0.013
8	18.464	18.454	0.01
9	21.849	21.848	0.001
10	25.275	25.280	-0.005

由上述的测量结果可知, 利用所研制电容传感器进行位移比对测量, 其测量偏差的最大值为 36 nm 。

5 结 论

根据调幅式电容传感器对信号解调的高精度要求, 将改进的延迟反馈式峰值保持电路应用于幅值解调, 并详细介绍了调幅式电容传感器系统的电路结构和检测原理以及各个模块的工作原理。制作了以延迟反馈式峰值保持技术为信号解调方法的调幅式电容传感器, 并对该传感器的各个性能指标进行了系统的测试。实验结果证明: 峰值保持电路的输出线性度优于 0.05% ; 在 $0 \sim 25 \mu\text{m}$ 内数据测量稳定, 常温下漂移优于 $10 \text{ nm}/30 \text{ min}$; 传感器在满量程范围内与米铍电容传感器进行比对, 其最大偏差为 36 nm 。总体上, 制作的传感器满足了超精密测量的要求。

参考文献:

- [1] 李达成, 王佳. 纳米科学测量与传感技术[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(1): 76-78.
LI D CH, WANG J. The measurement and sensor in nanometer scale science [J]. *Chinese Journal of*

Scientific Instrument, 1995, 16(1): 76-78. (in Chinese)

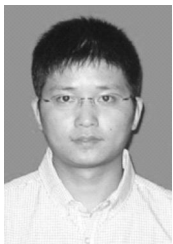
- [2] HEERENS W C. Application of capacitive techniques in sensor design [J]. *Phys. E: Sci. Instrum*, 1986, 19(11): 897-906.
[3] NURUL A, ALAM A H M Z, KHAN S. Design of capacitive measuring systems for high frequency

- band sensor transducer [C]. ICCCE, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010:11-13.
- [4] 马洪宇,黄庆安,秦明. 谐振式 MEMS 温度传感器设计 [J]. 光学精密工程, 2010,18(9):2023-2027. MA H Y, HUANG Q A, QIN M. Design of resonant MEMS temperature sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(9):2023-2027. (in Chinese)
- [5] 赵振刚,刘晓为,王鑫,等. 基于 555 多谐振荡器检测的碳纳米管湿敏传感器 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(1):119-122. ZHAO ZH G, LIU X W, WANG X, *et al.*. Carbon nanotube sensors based on 555 multivibrators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(1):119-122. (in Chinese)
- [6] MANET G, LUCAS V D H, XIUJUN L. A contactless capacitive angular-position sensor [J]. *Proceedings of IEEE Sensors*,2002,1(2):880-884.
- [7] 赵玉刚,邱东. 传感器基础[M]. 北京:中国林业出版社;北京大学出版社,2006,8:1-2. ZHAO Y G, QIU D. *Basis of Sensor* [M]. Beijing: China Forestry Press; Peking University Press, 2006, 8:1-2. (in Chinese)
- [8] 赵维谦,谭久彬,刘冰峰,等. 改善调幅式传感器测量电路精度的措施[J]. 仪器仪表学报. 2001,22(3):247-230. ZHAO W Q, TAN J B, LIU B F, *et al.*. Measurements of improving the precision of amplitude modulation measurement circuit of inductance sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(3): 247-230. (in Chinese)
- [9] ANDREW L H. Displacement transducers based on reactive sensors in transformer ratio bridge circuits [J]. *Instrument Science and Technology*, 1982, 15(6): 597-606.
- [10] HUANG S M, STOTT A L, GREEN R G, *et al.*. Electronic transducers for industrial measurement of low value capacitances [J]. *Phys. E: Sci. Instrum*, 1988, 21(3):242-250.

作者简介:



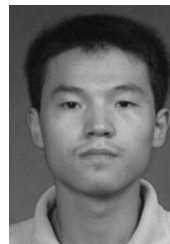
黄向东(1970—),男,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所副教授,硕士生导师,主要从事超精密光电传感测量研究。E-mail: huangxd@hit.edu.cn



刘立丰(1986—),男,江西赣州人,硕士研究生,2010年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事电容传感器测量和信号处理方面的研究。E-mail: flever2flower@gmail.com



谭久彬(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长,主要从事超精密仪器工程与超精密加工、测量一体化装备技术方向的研究。E-mail: jbtan@hit.edu.cn



马标(1989—),男,安徽宿州人,硕士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事电容传感器测量和信号处理等方面的研究。E-mail: giftbird@126.com