

声表面波微压力传感器的信号调理电路设计

邵 勤,李媛媛,刘 烨

(上海工程技术大学 电子电气工程学院,上海 201620)

摘 要:声表面波传感器因其独特的设计原理,具有体积小,无源无线,精度高等特点,在物理和生物领域应用广泛。针对声表面波输出频率信号采集复杂的问题,该文设计了一类信号调理电路,通过谐振选频电路稳定输出信号,并通过滤波、放大、整形将输出信号转变为方波信号,最终得到易于采集处理的频率信号。通过 Multisim 仿真证明,该电路有良好的信号调理能力,易集成。这为声表面波微压力传感器的信号采集和处理奠定了基础。

关键词:声表面波(SAW);信号调理;谐振;滤波;Multisim 仿真

中图分类号:TN65;TP212.6

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.06.019

Design of Signal Conditioning Circuit for SAW Micro Pressure Sensor

SHAO Meng, LI Yuanyuan, LIU Ye

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering and Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The surface acoustic wave (SAW) sensor is widely used in physics and biological fields because of its characteristics of unique design principles, small size, passive wireless, and high precision. Aiming at the complex problem of SAW output frequency signal acquisition, a kind of signal conditioning circuit is designed in this paper. The output signal is stabilized by the resonant frequency selection circuit, and is transformed into a square wave signal by filtering, amplifying and shaping. Finally, the frequency signal which is easy to be collected and processed is obtained. The Multisim simulation shows that this circuit has good signal conditioning ability and is easy to be integrated. This lays the foundation for signal acquisition and processing of SAW micro pressure sensor.

Key words: surface acoustic wave (SAW); signal conditioning; resonance; filtering; Multisim simulation

0 引言

声表面波(SAW)技术是由声学、电子学结合半导体材料学等学科而成的一门新兴的边缘学科。近几十年,随着新技术的出现,声表面波技术在智能驱动^[1]、环境监测^[2]及生物医疗^[3]等方面都有着广泛的应用前景。声表面波设备应用价值高,声表面波滤波器^[4]、声表面波振荡器^[5]已经得到广泛应用,但声表面波传感器还有待进一步研究。目前,声表面波传感器主要采用网络分析仪等工具进行试验研究,体积较大^[6];信号分析主要采用振荡法和改进后的差频法,后者克服了环境因素的干扰,但灵敏度不高,精度较低的问题仍未得到有效解决^[7]。

本文基于声表面波微压力传感器的设计原理和输出频率信号的特性,设计了一种对输出信号进行

预处理的调理电路。将传感器的输出信号进行调理并转换为易于采集和分析的方波电路,目的是降低声表面波输出信号的高频干扰,提高采集数据的精度。通过 Multisim 软件仿真可以实现信号调理功能。

1 声表面波传感器原理

常用的声表面波传感器^[8-9]多采用谐振型和延迟线型两种。谐振型传感器具有结构紧凑,插入损耗小,频率噪声特性优于延迟线型,但信号输出易受外围电路影响。延迟线型传感器具有结构简单,温度稳定性好,不易受外围电路干扰,频率稳定性高等特点,故本文采用声表面波延迟线结构作为传感器的基础结构。

声表面波延迟线型压力传感器的基本机构如图

收稿日期:2018-01-22

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61703269)

作者简介:邵勤(1995-),男,安徽蚌埠人,硕士生,主要从事智能传感器及检测方向的研究。通信作者:李媛媛(1979-),女,陕西西安人,副教授,博士,主要从事智能控制,智能传感器及检测方向的研究。E-mail:liyuanuedu@163.com。

1所示。其工作原理^[10]为:延迟线型压力传感器由两个叉指换能器(IDT)组成,分别为输入换能器和输出换能器。通过激励产生输入信号,再通过压电基片将输入信号转化成声表面波信号,输出换能器再将声表面波信号转化成输出的频率信号,最后对频率信号进行分析。

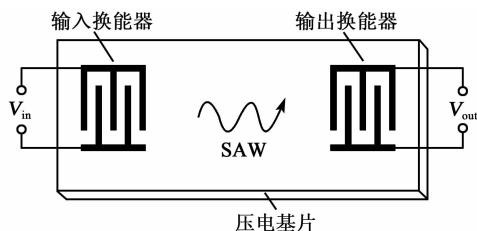


图1 延迟线型声表面波设计结构

叉指换能器的基本设计结构如图2所示。图中, a 为叉指的指条宽度, p 为叉指的指间距离, w 为叉指的声孔径长度。

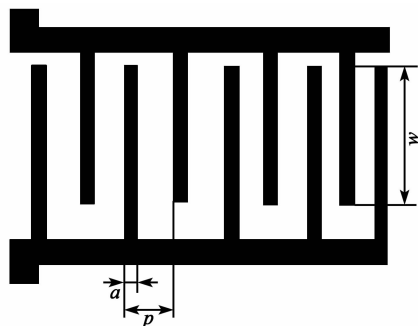


图2 IDT基本结构

IDT对声波进行激励时,表现方式是一系列的超声源,激励产生的声波会互相叠加。根据波的干扰原理,只有当 p 等于SAW半波长($\lambda_0/2$)的整数倍时,声波同相叠加,IDT激励的声表面波信号最大^[11]。得到:

$$f_0 = v_s / (2p) \quad (1)$$

式中: v_s 为SAW波速; f_0 为SAW的同步频率。

本文传感器设计采用的IDT是余弦平方函数加权IDT,由于 LiNbO_3 材料具有较高的压电系数和机械品质因数^[12],声衰减相对其他材料较小,化学稳定性好,机械加工性好,因此,传感器基片采用 128° 的同向 LiNbO_3 晶体作为压电基片材料。

2 调理电路设计

2.1 调理电路原理

本文信号发生装置设计选用双路声表面波微压力传感器:一路为测试元件,一路为对比元件。先将传感器接入谐振电路进行选频后输出,再通过混频

器将两路输出混合,混频器的输出作为信号调理电路的输入,以降低环境噪声中温度和电磁等信号的干扰。

将混频信号通过滤波器进行滤波,消除因器件和混频电路带来的高频杂波干扰,滤波后的信号由于幅值较小,需要通过放大电路进行放大,再通过整形得到方波信号。对信号进行采集和分析,系统结构图如图3所示。

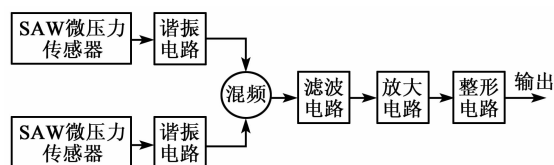


图3 调理电路设计结构

本文电路分析中,将混频前的电路部分称为信号发生模块,混频后的电路部分设计称为信号处理模块。下文将对两种模块的设计进行详细的描述。

2.2 信号发生模块设计

由于声表面波微力传感器产生的信号较小,在调理电路中,谐振电路主要目的是将SAW传感器输出的震荡信号稳定后,再将有效频率通过选频输出,因此,谐振电路由放大器和LC选频网络组成。谐振电路图如图4所示。放大器选用2N2221, R_{b1} 、 R_{b2} 为基级偏置电阻, R_e 为发射极电阻, C_1 、 C_2 为耦合电容, C_e 为旁路电容, C_3 和 L_1 、 L_2 共同构成选频网络。

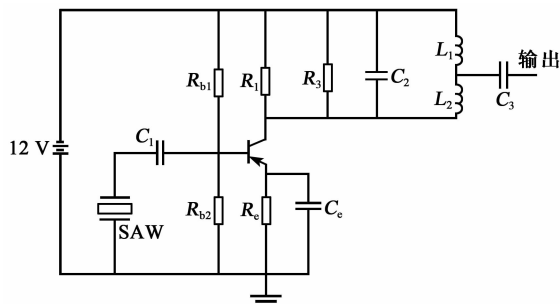


图4 谐振电路

谐振电路的主要参数分为两部分:设置静态工作点和设置选频回路参数。由于声表面波器件产生的信号小,放大器的工作电流 I_{CQ} 一般在 $0.8 \sim 1.2 \text{ mA}$,本文设计电路中取其工作电流为 1.5 mA ,设 R_e 为 $1 \text{ k}\Omega$ 。相关参数计算如下:

$$V_{EQ} = I_{EQ} R_e \quad (2)$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} \quad (3)$$

故

$$V_{EQ} = 1.5 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega = 1.5 \text{ V} \quad (4)$$

$$V_{BQ} = V_{EQ} + V_{BEQ} \quad (5)$$

式中 $V_{BEQ} = 0.7 \text{ V}$ 为硅管的发射结电压, 则

$$V_{BQ} = 1.5 \text{ V} + 0.7 \text{ V} = 2.2 \text{ V} \quad (6)$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - V_{EQ} = 12 \text{ V} - 2.2 \text{ V} = 9.8 \text{ V} \quad (7)$$

$$R_{b2} = V_{BQ} / \alpha I_{BQ}, \quad \alpha = 5 \sim 10 \quad (8)$$

$$I_{BQ} = I_{CQ} / \beta = 1.5 \text{ mA} / 50 = 0.03 \text{ mA} \quad (9)$$

$$R_{b2} = V_{BQ} / (10 I_{BQ}) = 2.2 \text{ V} / 0.3 \text{ mA} = 7.3 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

取标称电阻 $8.2 \text{ k}\Omega$, 有

$$R_{b1} = [(V_{CC} - V_{BQ}) / V_{BQ}] R_{b2} = [(12 \text{ V} - 2.2 \text{ V}) / 2.2 \text{ V}] \times 8.2 \text{ k}\Omega = 36.5 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

本文设计的声表面波微压力传感器中心频率为 50 MHz , 故设计谐振电路选频网络的工作频率为 50 MHz 。

谐振频率:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi LC}} \quad (12)$$

C_1 、 C_2 值为 $1 \text{ nF} \sim 0.01 \mu\text{F}$, C_e 的取值通常约为 $0.1 \mu\text{F}$ 。滤波电感 L_1 、 L_2 的取值一般在 $200 \sim 300 \text{ nH}$, 具体大小按照实际要求选取。 LC 选取只需设置其中任意一个参数, 通过式 (12) 计算另一个参数即可。

2.3 信号处理模块设计

2.3.1 滤波电路设计

声表面波传感器经过谐振电路后, 由混频器进行混频, 得到的中频信号常含有高频分量, 高频分量对于中频信号来说是干扰信号, 因此需要通过滤波器滤除^[13-14]。本文设计的滤波器为有源低通滤波器, 具有良好的隔离性。具体设计电路如图 5 所示。

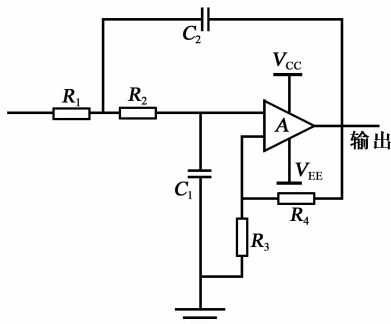


图5 二阶有源低通滤波器

滤波器截止频率及相关参数计算如下:

滤波器截止角频率:

$$\omega^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (13)$$

截止频率:

$$f_c = \omega / 2\pi \quad (14)$$

通带内放大倍数:

$$A_{uf} = 1 + \frac{R_1}{R_3} \quad (15)$$

品质因数:

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2) + R_1 C_1 (1 - A_{uf})} \quad (16)$$

为了计算简单, 本文取 $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 50 \text{ nF}$ 。

2.3.2 放大整形电路设计

混频后的输出信号经滤波后幅值较小, 不满足整形电路的幅值要求, 因此需要对滤波后的信号进行放大。本文采用 AD826 运算放大器来设计放大整形电路。AD826 具有低功耗, 低成本的特点。设计电路如图 6 所示, 图中同比例放大器的放大倍数 $A = 1 + R_1 / R_2$, C_1 、 C_2 为放大电路的滤波耦合电容。根据 AD826 用户手册, R_3 的功能是防止放大器输出信号不匹配, R_L 的功能是防止输出信号失真, 整形部分选用施密特触发器 74HC14, 通过简单的门电路设计比较器, 将输出正弦信号整形成方波信号, 以便进行声表面波输出信号的采集和传输。

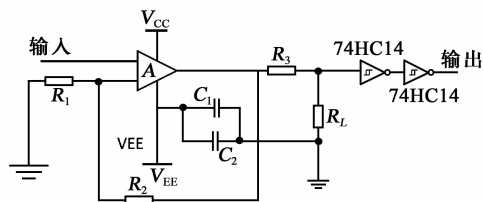


图6 放大整形电路

将上述电路图整合, 按调理电路结构图进行连接, 整体结构如图 7 所示。

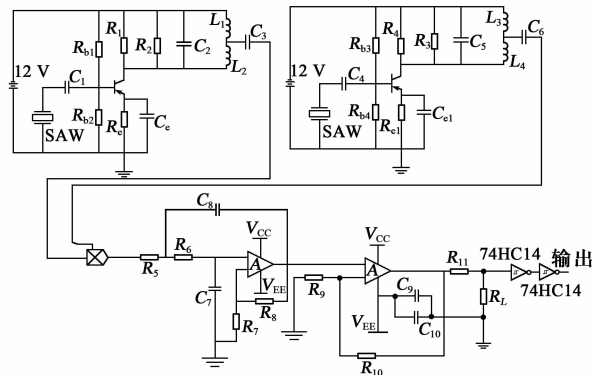


图7 调理电路整体结构图

本文设计的声表面波微压力传感器中心频率为 50 MHz。通过网络分析仪对传感器的分析,微压力引起的频率幅度约为 600 kHz,因此,电压源频率分别为 50 MHz,50.6 MHz。仿真结果如图 8、9 所示。

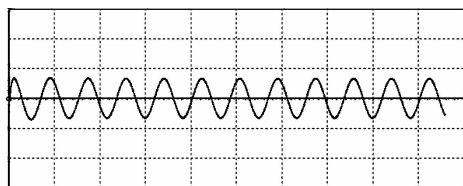


图 8 滤波后的信号输出

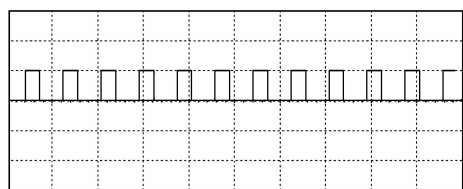


图 9 调理电路输出信号

3 结束语

近年来,声表面波传感器发展迅速,其应用领域日益广泛。随着声表面波传感器信号处理技术及外围集成电路的成熟发展,作为新型传感器,其将在智能制造和智能控制等领域取得突破性的进展。

本文通过对声表面波微压力传感器信号的分析 and 调理电路的设计,降低了传感器在信号采集上的难度,提高了信号采集效率,为声表面波传感器的信号采集提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] QI A, YEO L Y, FRIEND J R. Interfacial destabilization and atomization driven by surface acoustic waves [J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(7):1842-793.
- [2] BINDER A, FACHBERGER R. Wireless SAW temperature sensor system for high-speed high-voltage motors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(4): 966-970.
- [3] 张希. 声表面波传感器及其在肺癌标志物与毒素快速检测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [4] 董加和, 陈运祥, 冷俊林, 等. ZnO/蓝宝石结构声表面波滤波器试验研究[J]. *压电与声光*, 2015, 37(6): 954-956.

DONG Jiahe, CHEN Yunxiang, LENG Junlin, et al. An experimental study on SAW filter with ZnO/sapphire structure [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2015, 37(6):954-956.

- [5] WEI C L, CHEN Y C, CHENG C C, et al. Highly sensitive ultraviolet detector using a ZnO/Si layered SAW oscillator[J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(11): 3059-3062.
- [6] 文常保, 党双欢, 朱博, 等. 基于 WIFI 的无线声表面波传感器信号采集系统[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(10):1552-1557.
- [7] 李炜. 声表面波传感器测试电路的研究[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2007.
- [8] 王琼. 无源无线声表面波温度传感器的设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [9] 张朋, 陈明, 何鹏举, 等. 基于电话活性高分子声表面波 CO 气体传感器研究[J]. *压电与声光*, 2010, 32(5): 709-712.

ZHANG Peng, CHEN Ming, HE Pengju, et al. Study on surface acoustic wave CO gas sensor based on electroactive polymers [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2010, 32(5):709-712.

- [10] 武少南, 卢文科. 声表面波微力传感器的研究[J]. *仪表技术*, 2014(7):52-54.

WU Shaonan, LU Wenke. A study of micro-force sensor for surface acoustic wave [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014(7):52-54.

- [11] 李媛媛. 声表面波微力传感器的研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [12] 王俊, 李媛媛. 柔性阵列式声表面波微力传感器的研究 [J]. *化工自动化及仪表*, 2017, 44(5):466-471.

WANG Jun, LI Yuanyuan. Research on flexible array surface acoustic wave sensor [J]. *Control and Instruments In Chemical Industry*, 2017, 44(5): 466-471.

- [13] 陈业斌, 王仁伟, 李颖. 无线传感器网络中基于采样的时空数据恢复 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2017(6): 127-133.

CHEN Yebin, WANG Renwei, LI Ying. Sampling aware based accurate spatial temporal data compleset for wireless sensor networks [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2017(6): 127-133.

- [14] 王阳阳, 彭东林, 陈锡侯, 等. 基于“互联网 + ”思维的时栅位移传感器研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2016(4):116-119.

WANG Yangyang, PENG Donglin, CHEN Xihou, et al. Research on time-grating displacement sensor based on “internet plus” thinking [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2016(4): 116-119.