

一种具有高动态范围的前置放大电路设计及实现^{*}刘松^{1,2}, 吴先梅^{1,2}, 孔超¹

(1.中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 压电式电容型传感器在工作时能输出正比于被测物理量的电荷量, 具有较好线性度的同时也具有较高灵敏度, 在许多领域中都得到了广泛应用, 但该类传感器在工作时所产生的电荷量通常比较微弱, 需要对其适当放大以便后续进行处理。通过分析压电式电容型传感器的等效电路模型, 结合电路理论和 Multisim 仿真, 设计了前置放大电路。由于该前放电路主要针对小信号的放大需求进行设计, 在大信号输入时输出信号会产生畸变。而在实际工程应用中, 常出现输入信号中小信号和大信号并存的情况。为了能够对输入信号动态范围较大时的小信号和大信号都实现无失真放大, 改进了之前的前置放大电路设计, 对其进行了 Multisim 仿真和实验电路测试。结果表明改进后的前置放大电路在输入信号频率为 10 kHz 时, 其输入信号电压幅值最高可达 600 mV, 且小信号和大信号的放大均无失真, 放大倍数也基本相同, 说明该电路设计实现了高动态范围的输入信号的无失真放大需求。

关键词: 压电式传感器; 前置放大电路

中图分类号: TN721

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200601

中文引用格式: 刘松, 吴先梅, 孔超. 一种具有高动态范围的前置放大电路设计及实现[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 114-121.

英文引用格式: Liu Song, Wu Xianmei, Kong Chao. Design and implementation of a preamplifier circuit with high dynamic range[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(11): 114-121.

Design and implementation of a preamplifier circuit with high dynamic range

Liu Song^{1,2}, Wu Xianmei^{1,2}, Kong Chao¹

(1.State Key Laboratory on Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A piezoelectric capacitive sensor can output charges directly proportional to the physical quantity to be measured in work. Due to excellent linearity and high sensitivity, it has been widely used in many fields. However, since the quantity of charges generated by such a sensor in work is relatively weak, it is necessary to amplify the charge signal for subsequent processing properly. A preamplifier circuit is designed by analyzing the equivalent circuit model of the piezoelectric capacitive sensor combined with circuit theory and Multisim simulation. As the circuit is mainly designed for amplifying signals with small amplitudes, the output signal will be distorted once it is used for an input signal with large amplitude. But in practical engineering applications, small and large input signals often appear at different conditions. To realize distortionless amplification for both small and large input signals, the design of the former preamplifier circuit is improved. Then Multisim simulation and experimental circuit testing are also carried out successively. The simulating and experimental results both show that when the input signal frequency is 10 kHz, the input signal with the amplitude up to 600 mV can be distortionless amplified by this improved preamplifier circuit. There is also no distortion when amplifying small signals. The amplification ratio is almost the same for small and large signals. These results prove that the preamplifier circuit design can realize distortionless amplification for an input signal with a high dynamic range.

Key words: piezoelectric sensor; preamplifier circuit

0 引言

随着电子信息科学与技术的发展, 传感器技术已在交通、机械、电力等领域中广泛应用, 与之相应的传感器信号处理技术也取得了长足进步。现有的许多传感器, 如

压电式加速度传感器、PVDF 压电薄膜传感器、压电式水听器等电容型传感器^[1]在工作时能输出正比于被测物理量的电荷量, 在具有较好线性度的同时也具有较高的灵敏度。但该类传感器在工作时所输出的电荷量都比较微弱, 为了能方便地提取并处理该信号, 通常需要相配套的前置放大电路对该电荷进行转换以及适当放大^[2-4]。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11674351)

电路与系统

Circuits and Systems

目前,学者们的研究重点主要在微电荷的采集及信号的放大。韩星晨等^[5]基于 PVDF 压电薄膜的等效电路模型设计了相配套的前置放大电路,并分析了电路中的噪声,由电路的实验测试结果与理论计算结果相符合表明其前置放大电路设计的正确性。张微等^[6]针对油气井出砂检测中压电式传感器检测到的出砂信号弱、频率高等特点,研究并设计了相配套的前置放大电路,它是由电荷放大器、带通滤波器、过载指示等电路组成,其电路 Multisim 仿真与实验测试的结果表明该前置放大电路适用于检测出砂信号。胡志峰^[7]针对许多领域中所涉及的微弱信号检测,研制了一种高增益、低噪声、输出无失真的前置放大电路,其电路仿真与实验测试的结果表明该前置放大电路能无失真地放大低频微弱信号。刘伟群等^[8]理论分析了分别使用电荷放大器和电压放大器作前置放大电路的前级信号采集电路时对压电式传感器动态性能的影响,其实验测试结果表明:当使用电压放大器作压电传感器的前级信号采集电路时会有更好的动态性能。

前置放大电路在大多数情况下都是用于对小信号进行放大,但对于长期用于现场检测和监测的压电类传感器,由于受到环境温度、湿度、雨雪天气等因素的影响,其接收到的振动信号或声波信号幅值差距可能达到几十倍甚至几百倍,这种小信号和大信号并存的情况就要求与传感器配套的前置放大电路能够对输入信号动态范围比较大的信号实现无失真放大,而之前很少有人开展这方面的研究工作。

为了能够对输入信号动态范围较大时的小信号和大信号都实现无失真放大,基于压电式电容型传感器的等效电路模型,根据实际工程检测中的高输入需求,设计了一种在输入信号频率为 10 kHz 时,输入信号幅值最高达 600 mV 且输出无失真的前置放大电路。

1 前置放大电路设计

适用于压电式电容型传感器的前置放大电路主要作用有两点:(1)将压电式电容型传感器的高阻抗输出变换为低阻抗输出;(2)放大压电式传感器输出的微弱信号。由此可知,与压电式电容型传感器相配套的前置放大电路设计应包括前级信号采集、滤波以及放大三部分。

1.1 前级信号采集电路

图 1 为前级信号采集电路的电荷源等效电路图。图(a)中 C_a 为压电式传感器的等效电容, R_a 为压电式传感器的等效电阻, C_e 为连接电缆的等效电容, C_i 为运算放大器的输入电容, R_i 为运算放大器的输入电阻, U_i 为运算放大器的输入电压。将电路图(a)简化为电路图(b),其中 $R_i = (R_a R_i) / (R_a + R_i)$, $C_i = C_a + C_e + C_i$ 。

然后根据交流电的欧姆定律可得:

$$\begin{cases} i = i_c + i_R = C_i \frac{dU_i}{dt} + \frac{U_i}{R_i} \\ i = \frac{dQ_0}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

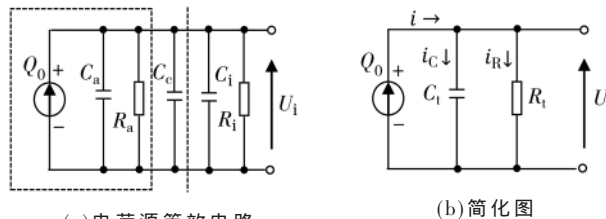


图 1 电荷源等效电路图

化简式(1)后可得:

$$\frac{dQ_0}{dt} = C_i \frac{dU_i}{dt} + \frac{U_i}{R_i} \quad (2)$$

假设是在稳态简谐输入的情况下,即 $Q_0 = Qe^{j\omega t}$, $U_i = Ue^{j\omega t}$ 。将它们代入式(2)中,可化简为:

$$U = \frac{Q}{C_i + 1/(j\omega R_i)} \quad (3)$$

在实验测试该电路时,因为所选运算放大器的输入电阻 R_i 为 $10^6 \Omega$ 量级、运算放大器的输入电容 C_i 为微法量级,而压电式传感器的等效电阻 R_a 是 $10^8 \Omega$ 以上,所以当测量频率较高(1 kHz 以上)时,有 $C_i \gg 1/(j\omega R_i)$,由此可将式(3)简化为:

$$U = \frac{Q}{C_i} \quad (4)$$

又因为压电式传感器的等效内部电容 C_a 为皮法量级,而所用的连接电缆的等效内部电容 C_e 也在 50 pF/m 量级,所以 $C_i \gg C_a + C_e$,因此 $C_i \approx C_i$,由此可将式(4)简化为:

$$U = \frac{Q}{C_i} \quad (5)$$

即压电式传感器因形变而产生的电荷会尽可能多地累积在前级信号采集电路的输入电容上并被转换为电压。综上所述,前级信号采集电路如图 2 所示,为后续统一整体电路的元器件标识,替换了部分电路元器件标识,即 $C_0 = C_a + C_e$, $C_1 = C_i$, $R_1 = R_i$ 。

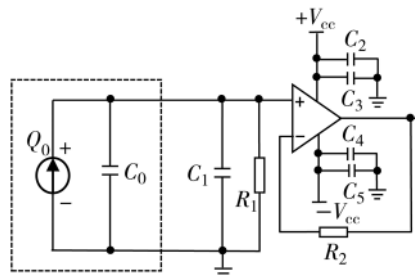


图 2 前级信号采集电路图

且对于前级信号采集电路的时间常数 $\tau(\tau=RC)$,其数值越大,表明能检测到的信号频率越低,即该电路的低频响应越好。因此,可以适当增大运算放大器的输入电阻 R_i 值,以提高电路的低频测量能力。

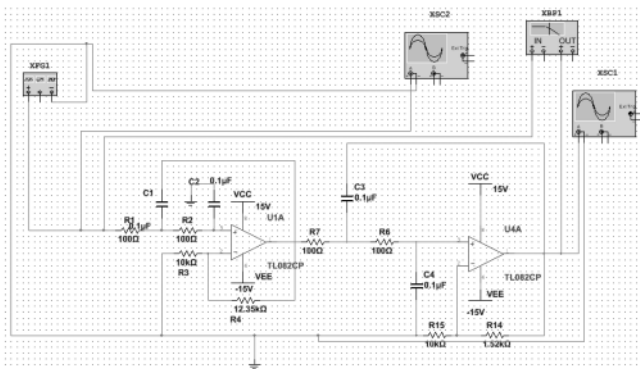
1.2 滤波电路

微弱的电荷信号经前级信号采集电路后转换为电

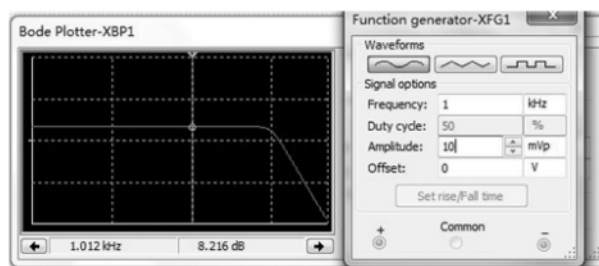
《电子技术应用》 <http://www.chinaaet.com>

电路与系统

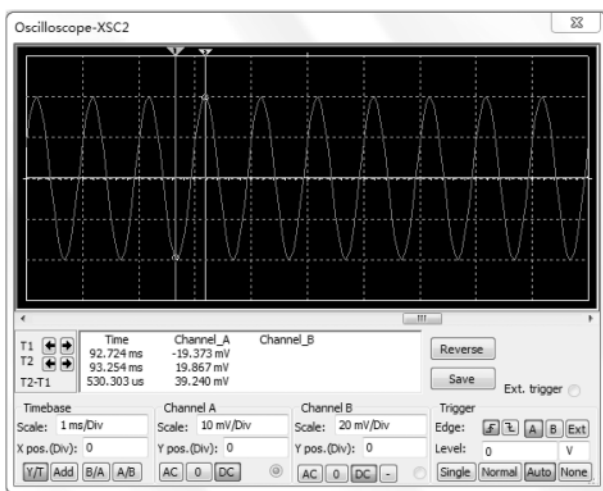
Circuits and Systems



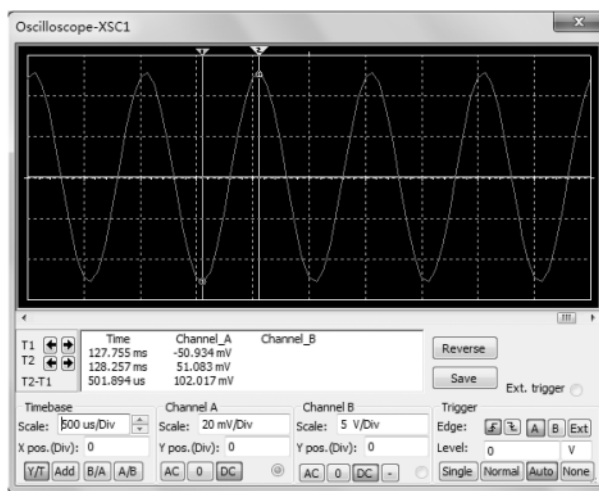
(a) 电路仿真图



(b) 幅频特性曲线仿真结果



(c) 输入信号仿真图



(d) 输出信号仿真图

图6 四阶巴特沃斯低通滤波电路

的信号峰值为设定输入峰值的2倍,如图6(b)所示设定函数信号发生器的输入峰值为10 mV,而图6(c)所示示波器显示的信号峰值为20 mV。后面的仿真设置也一样,不再一一解释。

分析图6(b)~图6(d)所示四阶巴特沃斯低通滤波电路的仿真结果后可得出:四阶巴特沃斯低通滤波电路的通频带内增益平稳,在临近截止频率附近没有出现因为相移而产生的“增益隆起”现象。根据增益计算公式 $A(\text{dB}) = 20\lg(V_o/V_i)$,得出增益为 $20\lg(102.017/39.240) = 8.3 \text{ dB}$ 。

2.2 带通滤波电路及放大电路仿真

任何电路的设计都离不开电源,在模拟电路的设计中对电源尤为敏感。为降低50 Hz的电源工频干扰,已在前级信号采集电路后加了一个一阶高通滤波,它能滤除部分低频干扰信号。其后,将滤波电路部分设计为带通滤波,其阻带会再次降低干扰,从而有助于提高信噪比。图7(a)为带通滤波电路及放大电路的Multisim仿真图。

分析图7(b)~图7(d)所示带通滤波电路及放大电路的仿真结果后可得:带通滤波电路的通频带内增益平稳,当输入信号的频率为10 kHz,输入信号的幅值为130 mV时,此时增益为 $20\lg(26.373/514.638) = 34.14 \text{ dB}$ 。继续研

究该电路,在输入信号的频率为10 kHz时,逐渐增大输入信号的幅值,同时观察输出信号是否无线性失真以及无信号“截断”。经数次仿真发现,在保证输出信号无畸变的情况下,输入信号的幅值最大只能到140 mV。当输入信号的幅值超过140 mV时,输出信号会发生畸变,且随着输入信号幅值的进一步增大,输出信号的畸变会越来越严重。产生这种非线性失真并不是由于电路中元器件选择不合适,而是由于信号源输入的信号过大导致运算放大器在放大时出现了双向失真。

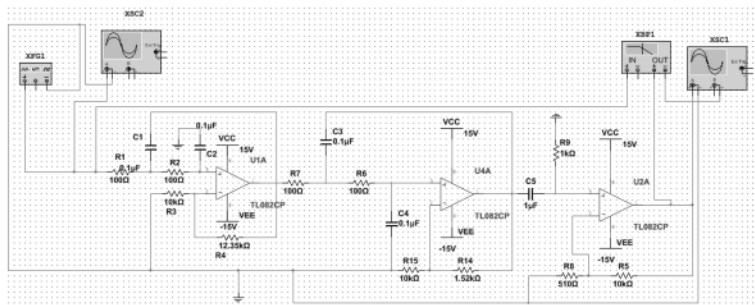
3 改进电路与仿真分析

现有一结构健康监测的现场应用需求,要求在输入信号的频率为10 kHz时,增益要在20 dB以上,并且输入信号的幅值最高要能到600 mV。根据前文所述,图5所示的前置放大电路明显未能满足该工程应用的需求,因此需对此电路进行改进,改进后的带通滤波及放大电路图如图8所示。

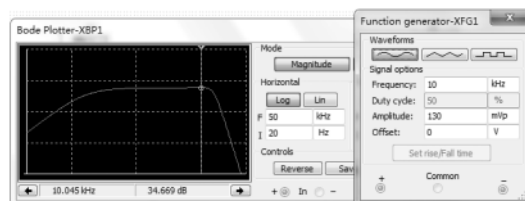
改进后的带通滤波及放大电路图由两个滤波电路级联组合而成,第一级为二阶压控低通滤波电路,第二级为三阶有源低通滤波电路。对三阶有源低通滤波电路进行分析,其传递函数为:

电路与系统

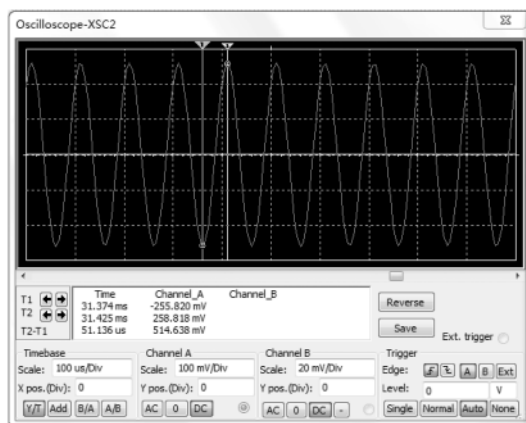
Circuits and Systems



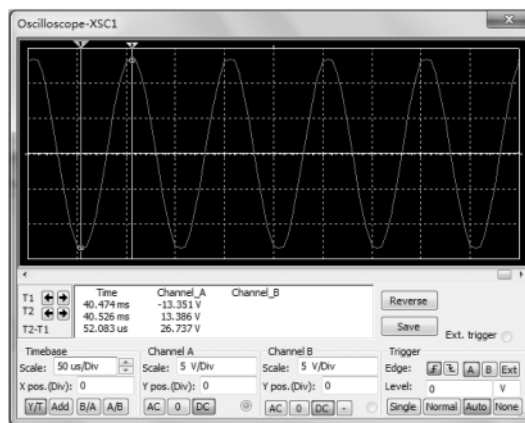
(a) 电路仿真图



(b) 幅频特性曲线仿真结果



(c) 输入信号仿真图



(d) 输出信号仿真图

图 7 带通滤波电路及放大电路

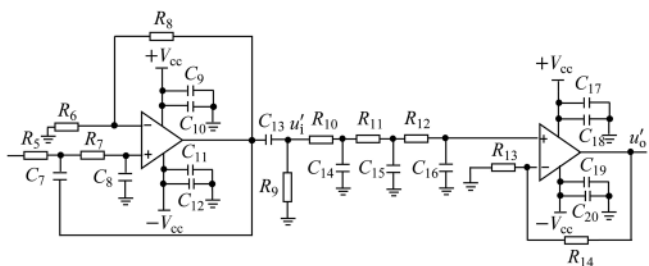


图 8 改进后的带通滤波及放大电路图

$$A_u(s) = u_o(s)/u_i(s) =$$

$$A_{up} \left[\frac{(R_{10}C_{14} + R_{11}C_{15} + R_{12}C_{16})s + R_{10}R_{11}R_{12}C_{14}C_{15}C_{16}s^3}{(R_{10}R_{11}C_{14}C_{15} + R_{10}R_{12}C_{14}C_{16} + R_{11}R_{12}C_{15}C_{16})s^2 + 1} \right] \quad (12)$$

其中 $A_{up} = 1 + R_{14}/R_{13}$ 。将 s 替换为 $j\omega$, 同时令 $R_{10} = R_{11} = R_{12} = R$, $C_{14} = C_{15} = C_{16} = C$, 则 $\omega_0 = 1/(RC)$, 便可得该三阶有源低通滤波电路的频率特性为:

$$A_u(j\omega) = \frac{A_{up}}{1 + 3(j\omega/\omega_0) + 3(j\omega/\omega_0)^2 + (j\omega/\omega_0)^3} \quad (13)$$

应用 Multisim 对其中的三阶有源低通滤波加一阶高通滤波组合电路进行仿真, 如图 9 所示。

分析图 9(b)~图 9(d)所示三阶有源低通滤波加一阶高通滤波组合电路的仿真结果后可得: 在电阻及电容不变的情况下, 输入信号的幅值明显扩大, 可以达到 600 mV

以上, 但此时信号增益为 $20\lg(11.304/2.370) = 13.62 \text{ dB}$, 明显降低了。

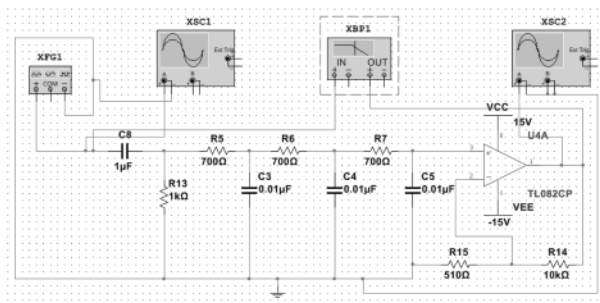
随后对改进后的带通滤波及放大电路进行 Multisim 仿真, 如图 10 所示。

分析图 10(b)~图 10(d)所示改进后带通滤波及放大电路的仿真结果后可得: 在输入信号的频率为 10 kHz 时, 增益为 $20\lg(26.723/2.368) = 21.06 \text{ dB}$, 且输入信号幅值满足了最大达 600 mV 的需求。与图 7 所示电路对比后可知, 改进后的电路是用三阶有源低通滤波电路替换图 7 电路中的二阶压控低通滤波及放大电路, 即取图 9 所示三阶有源低通滤波电路的高输入信号幅值优点并结合二阶压控低通滤波电路的稳定性好的优点, 虽使得整体前置放大电路的放大倍数有所减小, 但换取了输入信号幅值的提升。

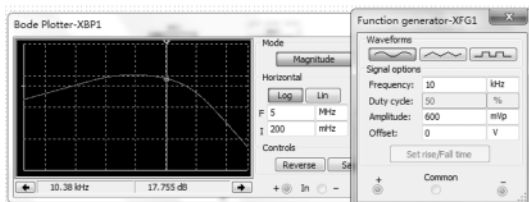
之后对改进后的前置放大电路进行仿真, 主要关注改进后的前置放大电路能否满足工程的需求, 并绘制该改进电路的幅频特性曲线。图 11 为改进后的前置放大电路图。图 12(a)所示为改进后的前置放大电路的幅频特性曲线仿真图。图 12(b)、图 12(c)分别为输入信号、输出信号的仿真图。

分析图 12 所示改进后前置放大电路的仿真结果可得: 在输入信号的频率为 10 kHz 且输入信号的幅值为 600 mV 时, 增益为 $20\lg(24.701/2.357) = 20.42 \text{ dB}$ 。由此可知, 改进后的前置放大电路能满足实际工程应用的需求。

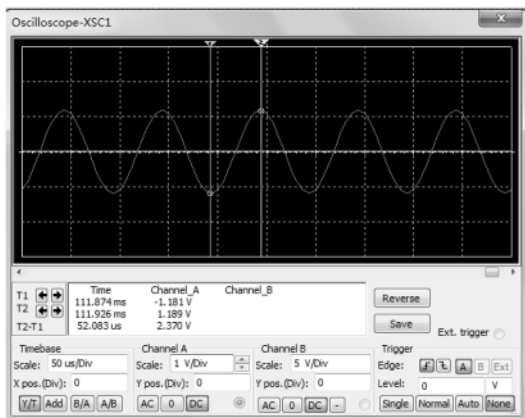
电路与系统 Circuits and Systems



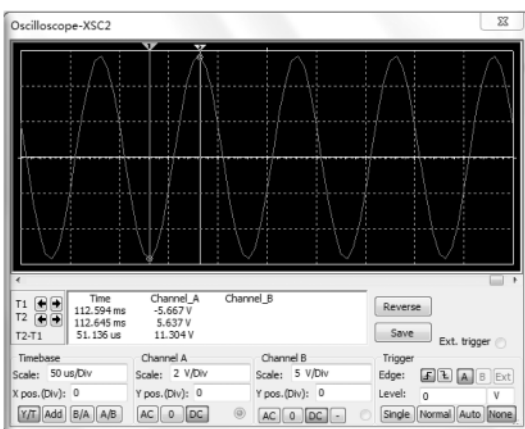
(a) 电路仿真图



(b) 幅频特性曲线仿真结果

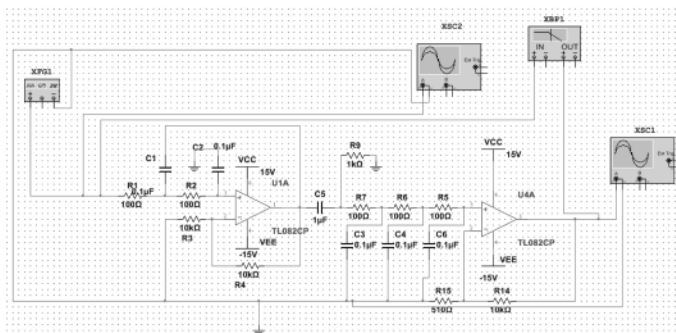


(c) 输入信号仿真图

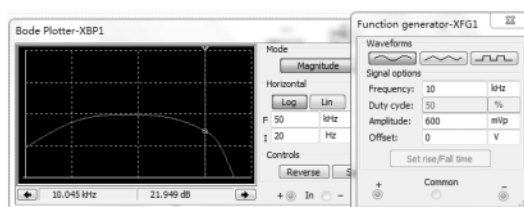


(d) 输出信号仿真图

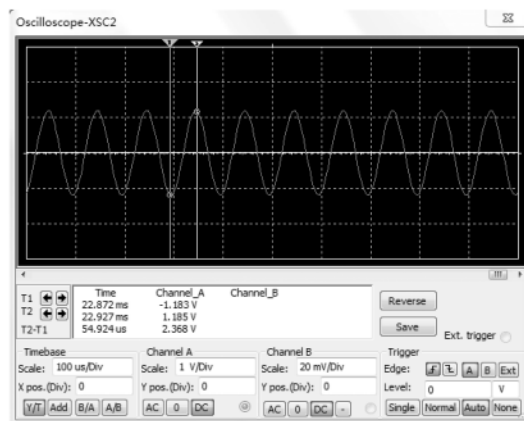
图9 三阶有源低通滤波加一阶高通滤波组合电路的幅频特性曲线和输入输出信号仿真图



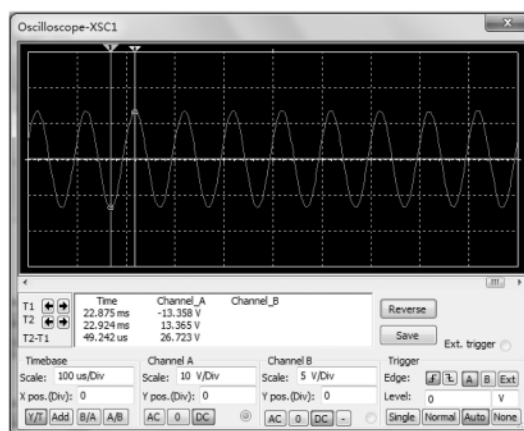
(a) 电路仿真图



(b) 幅频特性曲线仿真结果



(c) 输入信号仿真图



(d) 输出信号仿真图

图10 改进后的带通滤波及放大电路

4 实验测试结果

为了输入信号可控,同时输出信号方便观察,在实验测试时是应用函数信号发生器产生标准的正弦信号,

然后通过连接线接入改进后的前置放大电路,而后电路的输出信号是由数字示波器显示。为了能够设计出高稳定性的前置放大电路,实验测试电路的电阻都是选用稳

电路与系统 Circuits and Systems

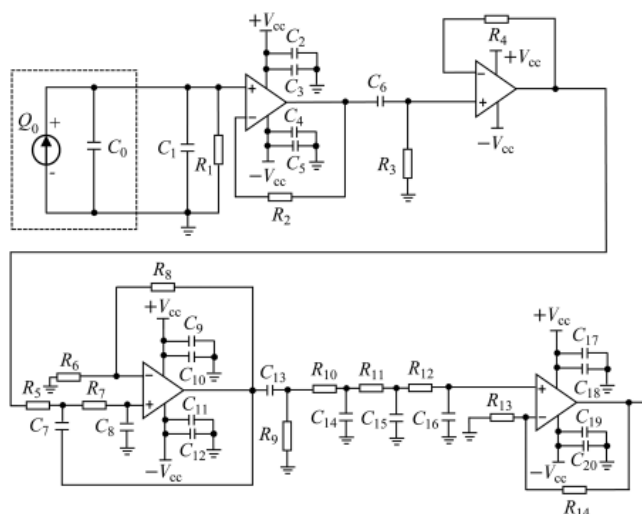
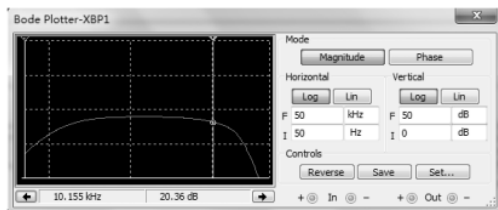
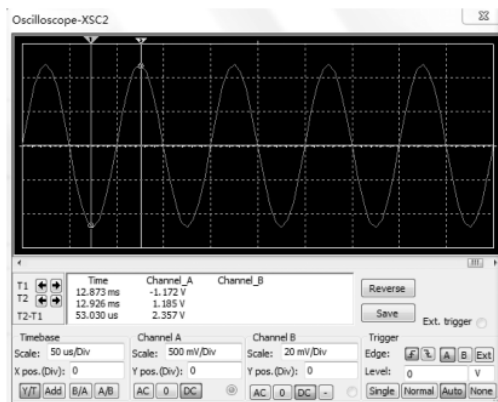


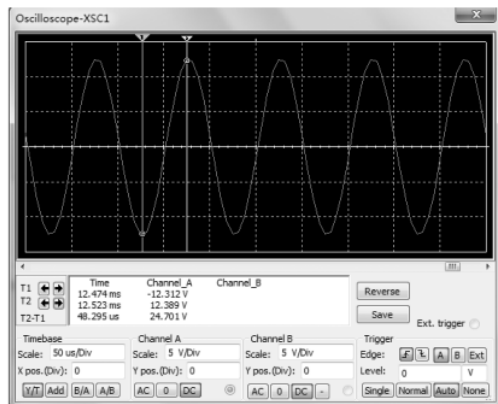
图 11 改进后的前置放大电路图



(a) 幅频特性曲线仿真结果



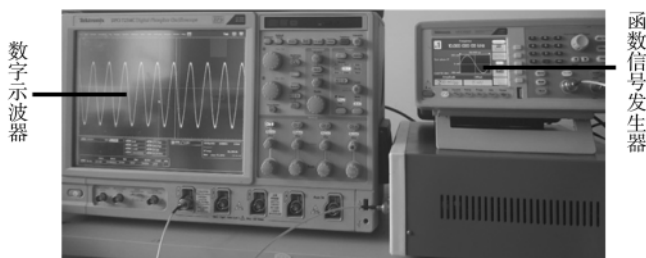
(b) 输入信号仿真图



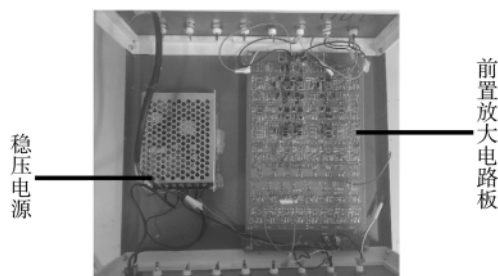
(c) 输出信号仿真图

图 12 改进后前置放大电路的幅频特性曲线和输入输出信号仿真图

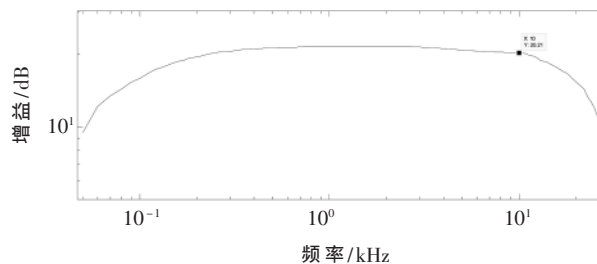
定性好且精度高的精密电阻,电容是选用稳定性和绝缘电阻高的精密电容。实验测试系统如图 13 所示。



(a) 实验装置图



(b) 前置放大电路



(c) 幅频特性实测曲线

图 13 实验测试系统图及幅频特性实测曲线

由图 13(c)实验测量数据所绘制的幅频特性曲线可知,在输入信号的频率为10 kHz时增益为20.21 dB,与图 12(a)Multisim 仿真的改进后前置放大电路幅频特性曲线显示的在输入信号频率为10 kHz时增益为20.36 dB相比,两者的误差为0.15 dB。这是因为电路的Multisim仿真数据是在理想条件下模拟所得,而电路的实验数据是在电路内部噪声干扰、外部电磁干扰、元器件质量有差等影响测量准确性的现实条件下测量所得,两者会不可避免地存在着一定的误差,但误差很小,改进后的前置放大电路可以满足实际工程应用的需求,能有效地降低干扰,并且其通频带内平坦度较好。另外,对输入信号幅值为1 mV的小信号也进行了实验测量,测试结果表明,该前放电路对小信号的放大能力与大信号的放大能力相同,并没有因为电路设计针对输入信号动态范围的变化而受到影响。

5 结论

基于压电式电容型传感器的等效电路模型,设计了相配套的前置放大电路,理论分析了前级信号采集电路

电路与系统

Circuits and Systems

与带通滤波电路,并为了满足实际工程应用的需求,对此前置放大电路进行了改进。用 Multisim 对电路进行了仿真设计,并对改进后的电路进行了实际测试。实测结果表明改进后的前置放大电路对幅值为 600 mV 的大信号和 1 mV 的小信号具有相同的放大能力,实现了对高输入动态范围信号的无失真放大。

参考文献

- [1] SHARAPOV V. Piezoceramic Sensors[M]. Springer, 2012.
- [2] SHARAPOV V. Measuring circuits of piezoelectric sensors[M]. SHARAPOV V. Piezoceramic Sensors. Springer, 2011: 99-112.
- [3] LIN G M, ZHOU F, LI C F. Research on design and non-linear of piezoelectric pressure sensor[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 530-531: 50-53.
- [4] 李道华, 李玲. 传感器电路分析与设计[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [5] 韩星晨, 吴先梅, 丁贝贝, 等. PVDF 薄膜传感器前置放大模块设计及实验研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 187-191.
- [6] 张微, 高国旺, 李汉兴, 等. 新型压电式传感器前置放大

电路的设计[J]. 电子测试, 2010(6): 10-14.

- [7] 胡志峰. 应用于低频微弱信号检测的前置放大电路设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [8] LIU W Q, FENG Z H, LIU R B, et al. The influence of preamplifiers on the piezoelectric sensor's dynamic property[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(12): 240.
- [9] 高明甫, 杨勇, 孔令斌. 二阶压控电压源低通滤波器设计[J]. 电子技术, 2010, 47(3): 73-75.
- [10] 刘小群. 基于 Multisim 的四阶有源低通滤波器的设计与仿真[J]. 新技术新工艺, 2011(6): 34-36.

(收稿日期: 2020-07-01)

作者简介:

刘松(1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 信号与信息处理。

吴先梅(1974-), 通信作者, 女, 研究员, 主要研究方向: 超声传播与成像, E-mail: wuxm@mail.ioa.ac.cn。

孔超(1983-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 高性能超声电子系统设计。

“边缘计算”专栏征稿启事

随着 5G、物联网、工业自动化以及智能制造的蓬勃发展, 边缘设备数量激增致使数据量达到了泽字节(ZB)级别, 为中心网络带来了巨大的压力。同时增强现实、虚拟现实等众多新兴应用的出现对网络延迟、抖动、数据安全等提出了更高的要求, 传统云计算在以上方面表现乏力, 而具有低时延、高带宽、高可靠、海量连接、异构汇聚和本地安全隐私保护等特点的边缘计算应运而生。

为了更好地促进边缘技术在各垂直行业实现数字化转型, 推动未来技术发展, 汇聚行业技术创新力量, 展示国内外边缘计算技术相关研究成果以及最新进展, 洞悉边缘计算产业的未来趋势, 《电子技术应用》杂志拟于 2021 年第 4 期推出“边缘计算”主题专栏。欢迎相关领域研究者大力关注, 踊跃投稿!

1. 征稿范围(包括但不限于以下方面)

- (1) 边缘计算体系架构与技术发展研究
- (2) 边缘计算结合网络与通信技术发展趋势研究
- (3) 边缘计算结合物联网技术发展及应用
- (4) 边缘计算结合大数据技术发展及应用
- (5) 边缘计算结合 AR\VR 技术发展及应用
- (6) 边缘计算结合人工智能技术发展及应用
- (7) 各行业对边缘计算的需求及典型行业应用

2. 稿件要求: 文章需具有创新性且未在其他期刊公开发表过。文中图表需清晰, 文字规范。详见《电子技术应用》投稿须知(<http://www.chinaaet.com/about/notice/>)。

3. 截稿日期: 2021 年 1 月 31 日。

4. 投稿方式: 请登录《电子技术应用》官网(<http://www.ChinaAET.com/>), 投稿页面中选择“边缘计算”专栏投稿, 按要求提交。

专栏特约主编: 林荣恒 博士

北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副教授, 中国计算机学会服务计算专委会专委委员。长期从事云计算与大数据等的研究, 研究方向集中在行业特别是工业大数据等方面, 先后完成 30 余项国家及省部级项目。长期担任《Transactions on Service Computing》、《通信学报》等国内外知名期刊的审稿人。

专栏编辑: 毕晓东(010-82306085; bixd@chinaaet.com)

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所