

基于加速度传感器的微弱信号放大电路设计*

张慧敏

(重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘要:在地质振动勘探中存在微弱信号难以检测的问题。为了解决这一技术难题,提出了以仪表放大器和低通滤波器为核心器件的微弱信号放大检测装置。先详细阐述了该检测装置的电路结构,进而根据微弱信号特征,提出选择电子器件的有效方法以及在设计电路时需要注意的事项。最后采用集成程控增益仪表放大器 INA110 来设计微弱信号检测前置放大电路,采用 OPA1632 设计抑制电路噪声,并对微弱低频信号进行了测试,得到了理想的效果。

关键词:微弱信号,仪表放大器,幅频特性,相频特性,噪声分析

中图分类号:TP 274

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2016)03-0132-05

地质振动勘探主要是指通过获取地震波的振动信号^[1],来对信号进行算法分析处理进而得到地下地质结构图像的工作。对于整个过程而言,能否精确获取地震波的振动信号是至关重要的一个环节。目前地质振动勘探中探测地震波信号的传感器主要采用加速度传感器,这类传感器模量变化小,频率低,信号幅度小,特别是探测深度较大时反射信号非常弱,一般情况下这类电压信号只能达到微伏的量级,为了有效的利用这些信号,必须先对其进行调理和放大处理。“微弱信号”不仅仅是指振幅很小的信号,更重要的是指在大量噪声背景中的有用微弱信号。为了提取出有用信号,首先应考虑抑制噪声,然后再对信号进行幅度放大。因此,本文针对这一信号特性采用信号放大后直接高精度数字化方法来解决这一问题。

1 电路设计与实现

1.1 电路系统结构

振动加速度传感器信号,是一种频率较低的微弱信号。因此需要先通过精密仪表放大器将信号放大,提高信号强度,再利用低通滤波器,滤除在信号中混杂的高频噪声,最后将信号输入到模数转换芯片进行数字化采样处理。微弱信号放大检测电路整体结构如图 1 所示。

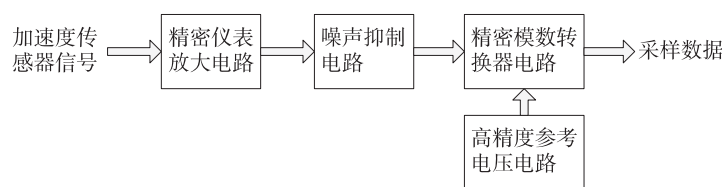


图 1 微弱信号放大检测电路整体结构图

Fig. 1 The structure diagram of amplification circuit for weak signal detection

1.2 仪表放大电路

由于传感器产生的信号十分微弱,容易被噪声信号覆盖,所以优先选择精密仪表放大器作为放大电路前级。仪表放大器是一种精密差分电压放大器^[2],是运算放大器的发展,且精度优于常用的运算放大器。仪表放大器具有高共模抑制比、较大的输入阻抗、较低的噪声、较低的失调漂移、较低的线性误差、增益设置灵活以及使用较

* 收稿日期:2015-03-20 修回日期:2016-01-14 网络出版时间:2016-04-29 18:37

资助项目:重庆市科技计划项目应用开发计划重点项目(No. cstc2014yykfB30001);重庆电子工程职业学院电子信息应用技术推广中心“基于 STM32 的无线路灯综合管理系统”(No. TG1306001)

作者简介:张慧敏,女,副教授,研究方向为电路与系统,智能信息技术等,E-mail: vigor_gp@163.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20160429.1837.034.html>

为方便等特点^[3]。由于仪器放大器的诸多优良特性,所以较多应用于数据采集,放大弱小信号等方面。本文的设计中采用的是 TI 公司的 INA110 精密仪表放大器,电路原理如图 2 所示。它主要由两级差分放大器电路构成。如图 2 可知,芯片内部的运放 A1、A2 采用同相差分输入方式。所采用的同相输入的电路结构可以大幅度放大电路信号,但是对共模输入信号只起跟随作用。该特性可以减小前级输入的微弱信号在电路中的衰减;通过前级差分输入方式,这样能够有效提高电路中的差模信号的幅值比值(共模抑制比 CMRR)。在共模抑制比不变的情况下,运放以 A3 为核心部件组成的差分放大电路时,可大大降低对电阻的匹配要求精度。仪表放大器电路与常用的差分放大电路对比,其优势在于共模抑制性能更好,并且放大倍数的控制更加方便。

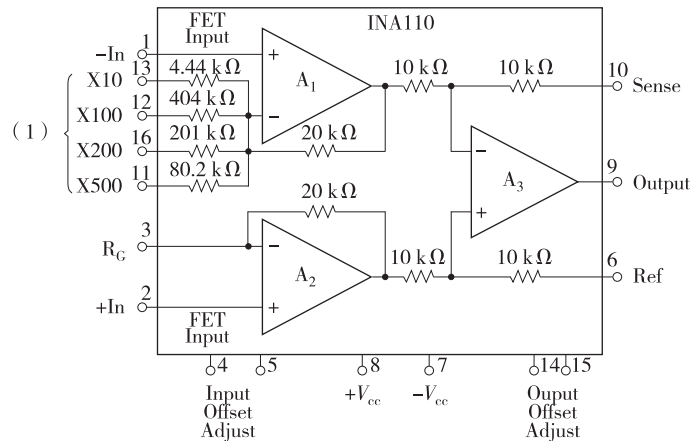


图 2 INA110 精密仪表放大器内部结构图^[3]

Fig. 2 The internal diagram of INA110 instrumentation amplifier^[3]

图 3 为精密仪表放大器电路原理图,加速度传感器产生的模拟信号从 J201 端口输入,INA110 设置为 200 倍放大模式,其中 R202 电阻设计为 0 Ω(以便输入级信号调整使用),电源采用双电压供电 ±6 V,输出端接入 100 Ω 电阻。

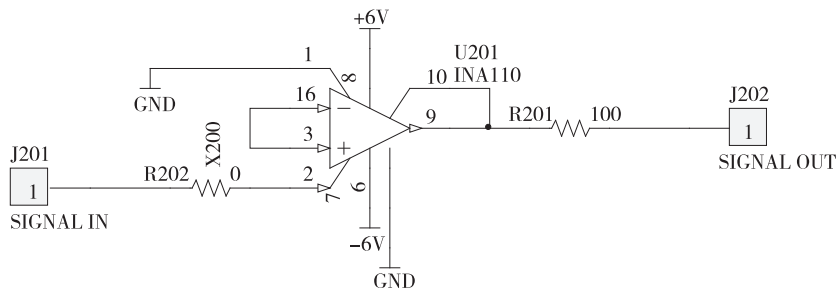


图 3 INA110 精密仪表放大器电路原理图

Fig. 3 INA110 instrumentation amplifier circuit schematic

1.3 噪声抑制电路

在微弱信号检测的过程中,抑制噪声非常重要。这是因为微弱信号很容易受到来自外界环境和元器件在工作时产生的噪声影响。因此在抑制噪声时,要综合考虑这几方面的因素。在进行微弱信号的检测时,为了减少集成运算放大器中的噪声干扰,应该选择接近理想运算放大器的芯片。

噪声抑制电路选用 TI 公司的 OPA1632 芯片^[4],同时也可作为驱动模数转换器(ADC)芯片使用。它提供了信号放大后的输出质量,且具有非常低的噪声和输出驱动等特点。该芯片的性能优异,其信号的失真度为 0.000 022%,电压噪声仅为 $1.3 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,增益带宽达到 180 MHz,芯片内部结构采用全差分结构,从而确保了最大信噪比、平衡输入和输出转换的动态范围。由于加速度传感器产生的频率范围通常在 DC~2 kHz,频率低,低频成分丰富,因此采用 OPA1632 芯片可以同时完成抑制噪声和增强输出驱动的要求。图 4 为 OPA1632 滤波及驱动电路原理图。

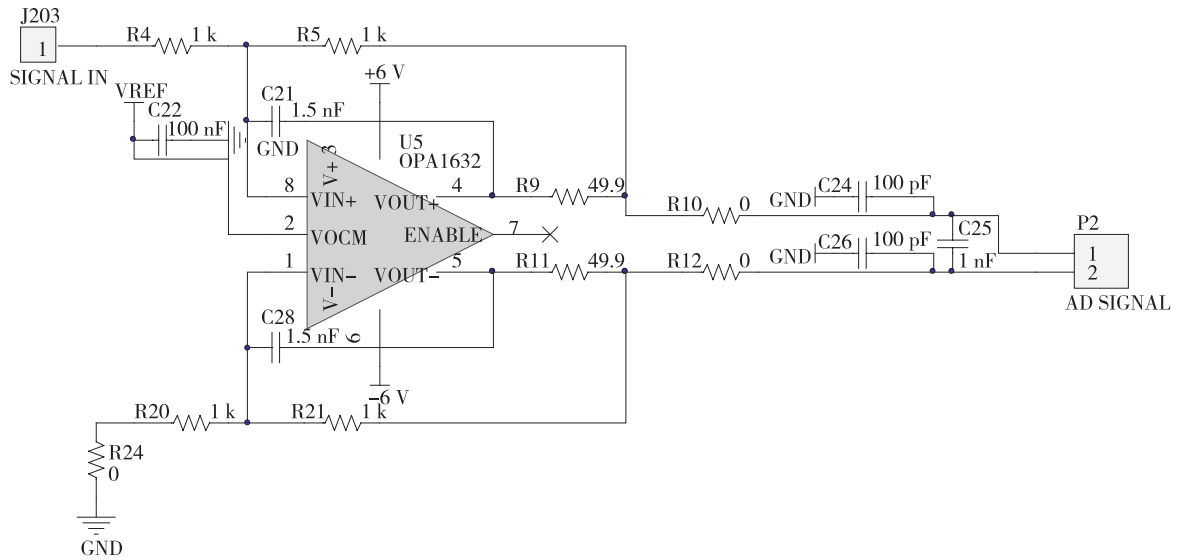


图 4 OPA1632 滤波及驱动电路原理图

Fig. 4 OPA1632 filter and drive circuit schematic

1.4 模数转换电路设计

检波器设计中,采用 TI 公司的 ADS1271 精密 ADC 芯片进行信号采样转换,图 5 是 ADS1271 采样电路原理图。图中在 ADS1271 差分模拟信号输入端,OPA1632 作为运放驱动芯片,在 AINP 和 AINN 之间并联 1 nF 的电容,并在每一个模拟输入端与地之间连接 100 pF 电容,保证了 AC 的性能^[5]。在参考电压电路输出端,设计了 OPA350 组成的参考电压滤波器电路,保证了电压噪声输入带宽噪声 ≤ 3 mVRMF,进一步提升了 ADS1271 的采样精度。ADS1271 是一个 24 位, $\Delta-\Sigma$ 模转换器(ADC)其数据速率可达 105 ksp/s,提供了一个良好的直流精度和出色的 AC 性能^[6]。高阶稳定斩波调制器能够实现非常低的漂移低通带噪声,同时板载数字抽取滤波器抑制调制信号的带外噪声。

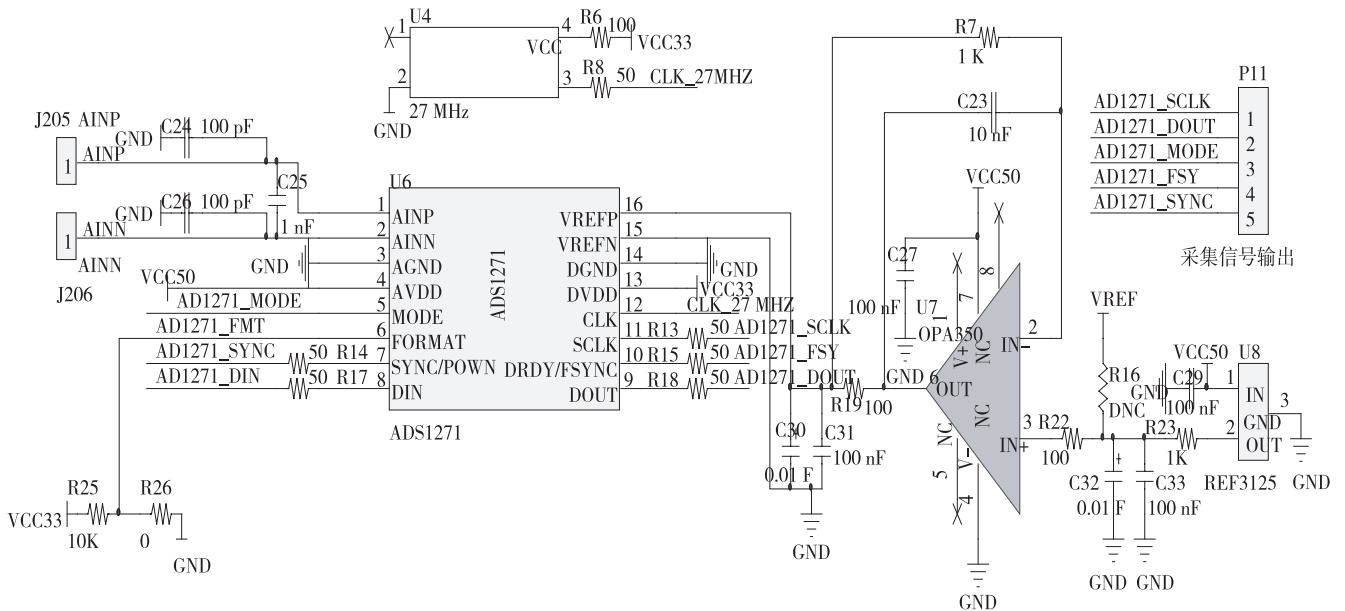


图 5 ADS1271 采样电路原理图

Fig. 5 ADS1271 sampling circuit schematic

2 电路测试

本文按照上文设计的电路原理图制作了电路板,如图 6 所示。选用的测试仪器为 KeySight DSO-X2012A

数字示波器,为了便于开展数据后分析,将示波器显示波形以数据形式传输给计算机,然后再进行幅频、相频等特性分析处理^[7]。

在放大电路中提到过通频带的概念,也即放大电路输出信号的幅度和相位会跟随信号频率的变化而发生变化的现象。通常放大电路的低频段对比中频段以及高频段对比中频段,信号幅值都会有所下降,同时还会发生一定的相移。在电路雪中将该现象称为放大电路的频率特性。放大电路的频率特性它分为幅频特性和相频特性两方面。因为放大电路的带通特性不一致,导致不同频率的信号增益各不相同,从而导致放大后的输出波形失真。设定输入信号 20 mV,频率为 449 Hz 的微弱信号,对其进行微弱信号放大,信号幅度达到 1.2 V,频率为 449 Hz,采用 KeySight DSO-X2012A 数字示波器测量获得实时信号如图 7 所示,从图中可以看到波形没有失真且无噪声叠加,采用失真度测量仪测量其失真度 $THD \leq 2\%$,性噪比 SNR 达到 81 dB。

图 8 为噪声抑制和屏蔽电路(即 OPA1632 电路)幅频特性曲线,从图中可以看到抑制频率点在 1 kHz,满足加速度传感器信号频率范围,同时对高频噪声具有较好的抑制作用,带内平坦度较好,起伏小于 0.5 dB。

由于噪声抑制电路对信号相位影响较大,根据放大器工作原理,要对它的相频特性进行分析。产生失真的原因是放大电路对不同频率成分信号的不同相移。图 9 为噪声抑制和屏蔽电相频特性曲线,从图中可以看到在 0~10 kHz 范围内,相移变化控制在 2 deg 范围内,对加速度传感器信号的相移特性影响较小,满足信号需求。

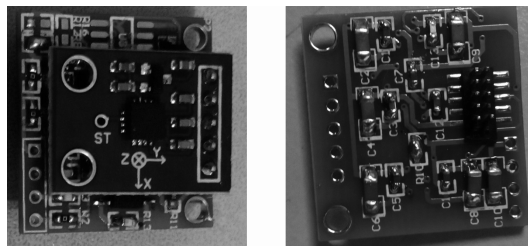


图 6 微弱信号放大检测电路实物图
(左图为正面,右图为背面)

Fig. 6 The picture of weak signal amplification block
(left to front, right to back side)

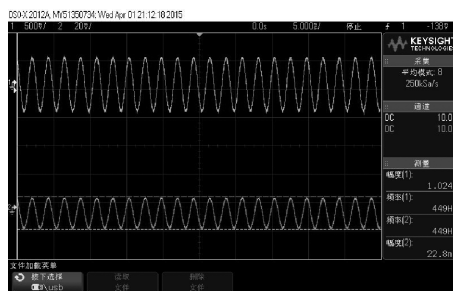


图 7 数字示波器实时信号图

Fig. 7 The wave of digital oscilloscope
real time signal

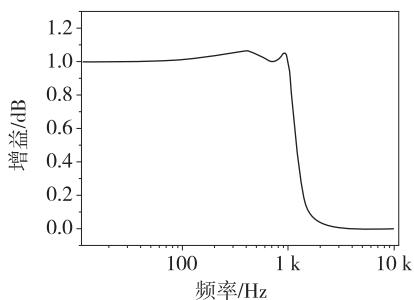


图 8 噪声抑制和屏蔽电幅频特性曲线

Fig. 8 The curve of noise suppression and shielding
electric amplitude frequency characteristic

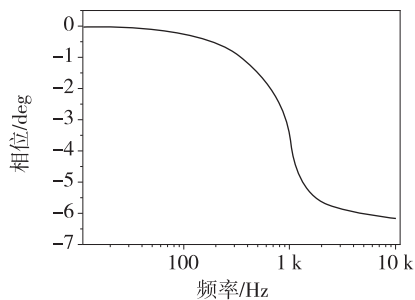


图 9 噪声抑制和屏蔽电相频特性曲线

Fig. 9 The curve of noise suppression and shielding
electric phase frequency characteristic

根据输出信号特点,设计该放大器的主要目标是提高增益,降低噪声^[6]。其一,采用多个放大器级联是提高增益的最直接的措施。这种直接的措施也造成了一定的弊端,那就是引入了噪声,噪声会随着引入级数的增加而增加。致使整个系统的不稳定。而文中的电路设计中采用了一级放大,一级滤波,即两级级联方式。其二,存在关系式: $NF_{TOTAL} = 1 + (NF_1 - 1) + (NF_2 - 1)/A_{V1} + \dots + (NF_n - 1)/A_{V1} A_{V2} \dots A_{VM}$,式中 NF_{TOTAL} 表示总的噪声系数, NF_1 表示第 1 级噪声系数, A_{V1} 表示第 1 级放大器电压增益,以此类推。上式表明了多级放大电路噪声系数与电压增益的关系。由此可见多级放大电路总噪声主要取决于第一级,因此这里重点考虑第 1 级 INA110 的噪声测试。图 10 为噪声分析测试曲线图,从图中可以看到在 0~10 kHz 频率范围内,总噪声值较低在 10 μ V 以内,但随着频率的提高噪声量也越来越大。

从以上测量结果可以看出,所设计的放大电路可以作为传感器后级信号放大电路。所设计的电路能够将传

传感器输出的 mV 级信号放大 200 倍, 后经过滤波降噪后再将信号输出到 A/D 转换芯片上, 同时需要注意信号幅值范围不能超出 A/D 芯片所能接收的信号范围。通过示波器观察波形可知, 放大器输出的响应信号中没有涵盖其它频率成分的信号, 由此说明该放大电路的频率响应特性具有较好的性质。同时, 该电路工作稳定可靠, 噪声小, 达到了设计要求。

3 结论

本文针对地质勘探中振动加速度传感器产生的信号微弱、频率低等特点, 从实际电路角度出发, 设计了由仪表放大电路、噪声滤波电路和屏蔽电路组成的小信号放大电路, 通过仿真分析软件开展了电路的仿真分析实验和理论推导, 研究表明该电路系统能够在输入信号非常微弱的情况下获得较高的增益和信噪比, 经过放大后的信号能够被 A/D 芯片所接收, 达到常规 A/D 芯片的输入要求。

参考文献:

- [1] Manik T, Barry Z. Some recent developments in the acquisition and processing of seismic data[J]. *Tectonophysics*, 1998, 286(1-4): 123-142.
- [2] Franco S. Design with operational amplifiers and analog integrated circuits[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1988.
- [3] Data sheet for fast-settling FET-input instrumentation amplifier INA110[Z]. "TI" SBOS147A, 2005.
- [4] Data sheet for high-performance, fully-differential audio operational amplifier[Z]. "TI" SBOS286B, 2010.
- [5] Data sheet for wide bandwidth analog-to-digital converter ADS1271[Z]. "TI" SBAS306F, 2007.
- [6] Johnson D J, Johnson J R, Hilburn J L. Electric circuit analysis[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1989.
- [7] 张禹. 便携式电磁计程仪故障诊断系统的分析与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013, 1: 45-47.
Zhang Y. Analysis and research of portable electromagnetic log fault diagnosis system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013, 1: 45-47.
- [8] 张石锐, 郑文刚, 黄丹枫, 赵春江. 微弱信号检测的前置放大电路设计[J]. 微计算机信息, 2009(23): 223-224.
Zhang S R, Zheng W G, Huang D F, Zhao C J. The design of preamplifier circuit based on weak signal detection[J]. *Microcomputer Information*, 2009(23): 223-224.

Design of Amplifier Circuit of Weak Signal Based On Acceleration Sensor

ZHANG Huimin

(Department of Communication, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: According to the technical requirement of weak signal detection of geological prospecting in the vibration, the paper designed the instrumentation amplifier and lowpass filter for weak signal amplifying and detecting circuit of main structure. Combined with the characteristics of weak signals are discussed suppression and isolation circuit noise, and puts forward a selection method of circuit elements in the circuit to reduce noise interference design matters needing attention. This paper introduces the design of the detection of weak signal preamplifier circuit using an integrated Programmable Gain Instrumentation Amplifier INA110, inhibit circuit design using OPA1632 noise, and the weak low frequency signal was tested, and obtained the ideal effect.

Key words: weak signal; instrumentation amplifier; amplitude-frequency characteristics; phase-frequency characteristics; noise analysis

(责任编辑 许 甲)

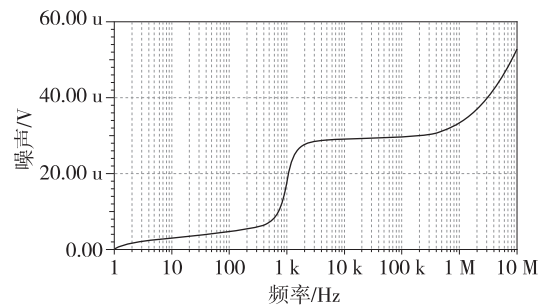


图 10 噪声分析测试曲线图

Fig. 10 The curve of noise analysis