

文章编号:1674-2869(2019)02-0194-05

分布式槽波地震仪模拟电路的研制

杨 柳¹,徐 曲²,唐 跃¹,柴修伟^{*3},李 智³

1. 湖北广播电视大学机电工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 湖北省安全生产应急救援中心,湖北 武汉 430070;
3. 武汉工程大学兴发矿业学院,湖北 武汉 430074

摘 要:为了得到准确的测量数据和较高的同步精度,设计一种能同步检测四通道的地震槽波信号的电路方案,对电源管理模块和信号调理单元设计方案进行了改进。电源管理模块使用低压差线性稳压电源,大大提高了电源的精度和稳定性,最大限度地抑制了电源本身的噪声,同时实现低功耗。在信号调理单元的设计中,选择低通滤波和程控放大器电路组合,提高对槽波信号的检测精度和电路抗干扰能力。结果表明设计的分布式槽波地震仪模拟电路系统稳定,具有较高的同步和信号检测精度,满足实际应用要求。

关键词:槽波地震仪;模拟电路;电源管理模块;信号调理

中图分类号:TP23 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2019.02.018

Development of Analog Circuit for Distributed in-Seam Seismograph

*YANG Liu¹, XU Qu², TANG Yue¹, CHAI Xiuwei^{*3}, LI Zhi³*

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hubei Radio and Television University, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Emergency Rescue Center for Production Safety, Wuhan 430070, China
3. Xingfa School of Mining Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: To obtain accurate measurement and high accuracy of synchronization, we designed a circuit that can synchronously detect four-channel signals from in-seam seismograph, in which the power module and signal processing unit were improved. We used a low-dropout linear regulator for the power management module, which significantly improved the accuracy and stability of the power supply and minimized the noise with low power consumption. In the signal conditioning unit, the low-pass filtering was combined with programmable amplifier circuits to improve the detection ability of the slot signal and the anti-jamming capability. The results show that the designed distributed slot wave seismograph analog circuit system is stable with high synchronization and signal detection accuracy, which meets the practical application requirements.

Keywords: channel wave seismograph; analog circuit; power management module; signal conditioning

在煤矿的地球物理勘探开发方面,槽波检测是近些年来一种比较新型的探测方法。利用槽波信号在煤层的透射和反射获取相应的频率、幅度和相位差等有用信息,通过上位机分析软件,反演出煤层的地质结构和分布^[1]。在运用“分布式”设

计理念的基础上,以同步精度高为特点的分布式槽波地震仪在直观效果和抗干扰能力及一致性方面表现俱佳^[2]。但在槽波地震仪的研制中,同步精度和弱信号的检测能力是影响仪器指标的关键,同时仪器需兼顾低功耗和抗干扰能力。在以往的

收稿日期:2018-08-18

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划项目(Q20174601);湖北省教育厅科学技术研究项目(D20171506);湖北省安全生产专项资金(鄂安监发(2017)35号);武汉工程大学科学研究基金(13125042)

作者简介:杨 柳,硕士,讲师。E-mail: 380286096@qq.com

***通讯作者:**柴修伟,博士,副教授。E-mail: 342650018@qq.com

引文格式:杨柳,徐曲,唐跃,等. 分布式槽波地震仪模拟电路的研制[J]. 武汉工程大学学报,2019,41(2):194-198.

槽波地震仪设计中,为了满足同步精度和弱信号的检测指标参数的要求,运用了比较复杂的多种电路。由此带来了一些问题:由于元器件过多带来的参数不一致,导致同步精度不易达到一致;弱信号放大级数较多,电路内部易产生干扰信号;电路复杂,导致功率损耗加大;元器件的集成性不够高,导致在复杂现场环境下外部干扰信号的防范困难。因此,本文从电路的电源管理和信号调理入手,设计合理的电路方案,提高同步检测精度和低功耗。

1 电源管理模块

使用镍氢电池组进行供电的槽波地震仪非常便携,但电池电压需要转换成不同的电压值才能被后续电路器件所使用。本设计中选择直流斩波器(DC-to-DC converter, DC/DC)电源芯片DFA6-12S70输出7 V电压,再经由低压差稳压器(low-dropout regulator, LDO) TPS7A4701和TPS7A9533分别得到+5 V和+3.3 V电压;-5 V电压则是先由LT1931A转换成-7 V,再经过TPS7A3301芯片转换得到。

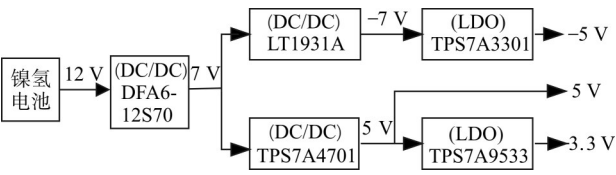


图1 模拟电源转换示意图

Fig. 1 Diagram of analog power conversion

DFA6-12S70 是一种隔离型 DC/DC 电源芯片。DC/DC 电源的主要特点是电源转换效率高,通常在 90%左右甚至更高。若直接使用线性电源将 12 V 转换成 5 V,则会因输入输出压差过大导致转换效率过低和芯片发热等问题。隔离型 DC/DC 电源的优点是将输入端电源可能存在的较大环境噪声与输出隔离开。TPS7A4701、TPS7A3301 和 TPS7A9533 是 TI 公司推出同一系列的线性电源芯片,3 款芯片均具有 1 A 以上的带负载能力,完全满足本设计中硬件电路功率的要求。该系列电源芯片除了本身具有低噪声特性外,同时具有很高的电源纹波抑制比(power supply rejection ratio, PSRR)。PSRR 较大的电源芯片会将输入端的电压信号纹波噪声在输出电源上得到很大程度抑制,进一步提高电源模块的低噪声要求和抗干扰能力^[3]。

本文设计的电源模块采用 DC/DC 电源和 LDO 电源组合的方式,既考虑了电源转换效率,又提高了电路的抗干扰能力,为模拟硬件电路的正常工作提供了保障。

2 信号调理单元

2.1 程控放大电路

信号调理单元的第一级与检波器电路相连接,为了使检波器输出的信号完全有效地被后续电路所接收,则信号调理单元的首级电路应具有较高的输入阻抗。系统选用的程控放大器是 PGA281,电路如图 2 所示。

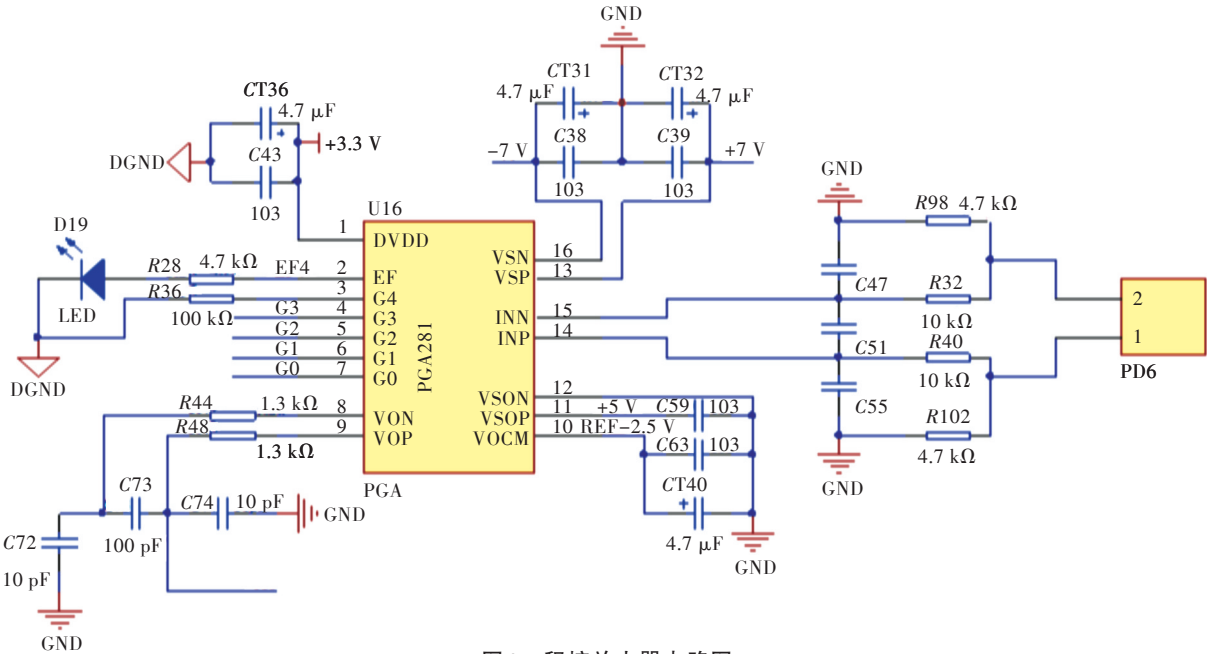


图2 程控放大器电路图

Fig. 2 Programmable amplifier circuitry

PGA281 是 TI 公司推出的一款高精度仪表放大器,输入阻抗大于 1 GΩ,具有数控增益和信号完整性测试功能。该放大器可通过自动归零技术来提供偏移电压,同时具有近零的偏移和很小的增益漂移等出色的性能,而且基本没有 1/f 噪声。在较宽的频带范围内,PGA281 可以提供高达 140 dB 的共模抑制比,这使得该放大器具有较高的分辨率和测量精度^[4]。芯片输入阻抗大、功耗小,而且使用简单,外围电路少,非常适合用在系统的前端。

PGA281 首先将四通道的检波器信号进行增益放大,然后传送至模数转换器(analog-to-digital converter,ADC)进行同步采样。PGA281 在 5 个 I/O 口(G0、G1、G2、G3、G4)的控制下,除了可提供 2 组、每组 8 档的放大增益外,还能对输入信号进行 3 档衰减。配合芯片轨到轨输出和完全差分的设计,拓宽了系统的后续使用范围,同时为仪器的升级提供硬件平台支撑。本设计中选用 1、2、4、8、16、32 和 64 的增益倍数,在硬件系统上直接将“G4”脚接地,再通过控制 I/O 口来选择增益。系统上电初始化后,仪表放大器 PGA281 增益引脚赋值“1010”,将增益设置为最大,之后根据需要可以

在参数设置环节中再进行调节。

2.2 低通滤波器电路

煤矿巷道是一种半封闭环境,因各种施工机械的存在而有较强的干扰信号。对于这些信号,作为电气设备共同终端的大地也是干扰信号的进入源^[5]。而就槽波地震信号而言,其有用频率范围为 10~4 000 Hz,可以采用滤波器滤除大于 4 000 Hz 的频带外干扰信号。本文设计的低通滤波器电路为典型的二阶巴特沃斯低通滤波器^[6],电路如图 3 所示,其电路传递函数为:

$$A_u(s)=\frac{A_{u0}\omega_c^2}{s^2+\frac{\omega_c}{Q}s+\omega_c^2}$$

其中品质因数 Q 为 0.707,截止频率 ω_c 约等于 27 kHz。就这个系统的滤波器终端频率而言,在其为单电源供电时约 13 kHz,仅为双电源供电时的 1/2。电路采用芯片 ADA4528,其最大失调电压为 2.5 μV,最大失调电压温漂为 0.015 μV/℃。1 kHz 信号增益为 100 时的噪声密度仅为 5.6 nV。最小共模抑制比为 135 dB,具有轨到轨输出功能,完全满足仪器的性能需要^[7]。

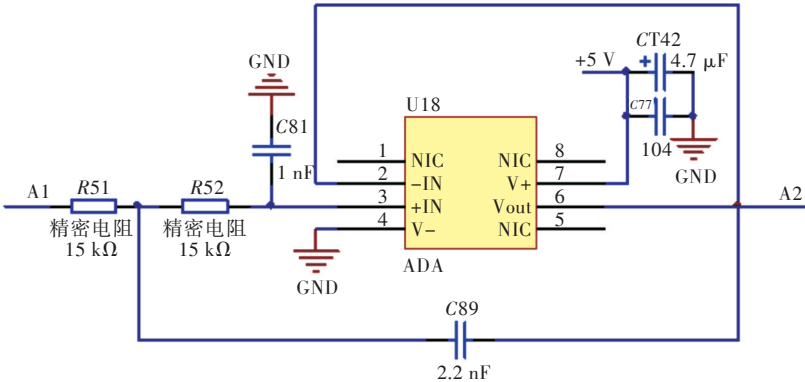


图 3 低通滤波器电路图
Fig. 3 Low-pass filter circuitry

3 测试实验分析

3.1 电源噪声测试

系统电源噪声水平也是衡量模拟电路的一项重要指标,测量系统电源在工作时的噪声,如图 4 所示。由图 4 可以看出,系统各电源的平均噪声不超过 -5~+5 mV。

3.2 低通滤波电路测试

测试时,利用 CA1642-20 数字合成信号发生器输出 10 Hz、峰峰值为 2.5 V、带有 2.5 V 直流偏置的正弦信号。信号经过增益为 1 的程控放大器后直接进入低通滤波器,再利用 GDS-1102A 数字存

储示波器测量低通滤波器的输出信号电压峰峰值和频率^[8]。

由图 5 可以看出,低通滤波器的截止频率约为 12.7 kHz,而且在小于 4 kHz 的频带范围内,信号基本没有衰减或放大的变化,符合设计要求。

3.3 程控放大模块精度测试

通过分压器分压产生 -2.5~2.5 V 的连续可调电压,将该电压同时接入四路差分放大电路,经过放大和滤波之后再分别进入 ADC 器件进行同步采样。

对 ADC 连续采集 100 次所得电压求平均值,作为单次采集的结果。同时利用 6 位半数字万用

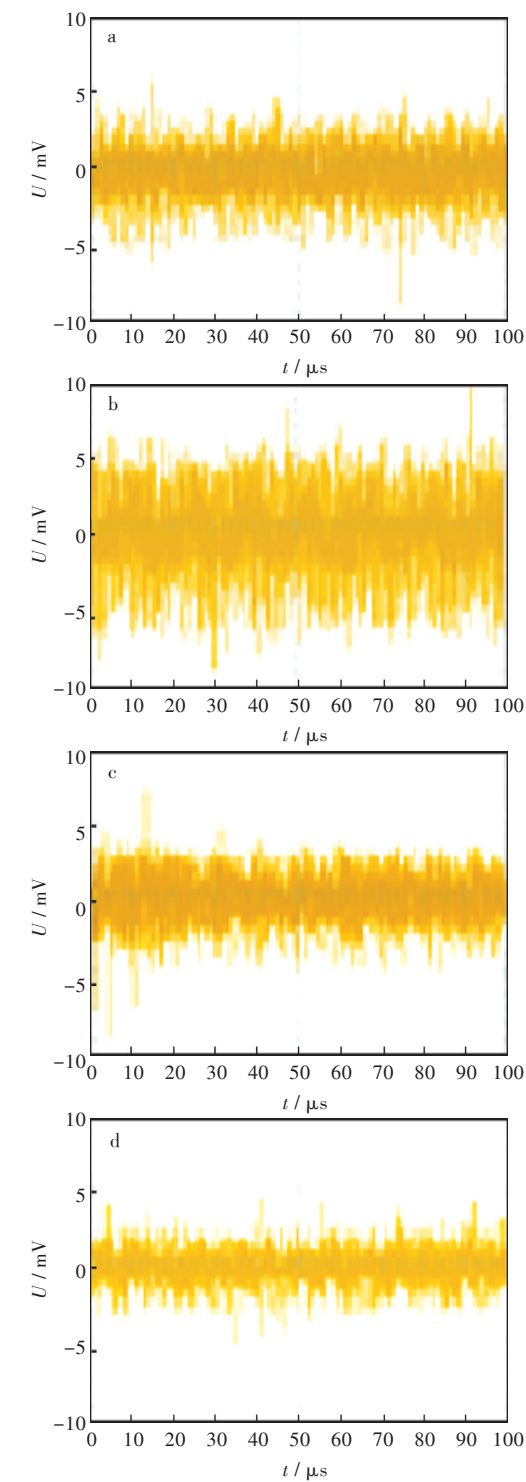


图4 系统各电源噪声图像：
(a) 7 V,(b)-7 V,(c) 5 V,(d) 3.3 V
Fig. 4 Noise images of system powers:
(a) 7 V,(b)-7 V,(c) 5 V,(d) 3.3 V

表测出ADC输入端的电压值,并将输入电压做拟合曲线,再根据拟合公式计算出拟合电压和输出电压的差,测试数据见表1^[9]。

由表1的数据可得,拟合电压和输出电压无明显的差别,互差部分平均偏差为0.8 mV,程控单元部分电路测量精度在设计指标要求之内^[10]。

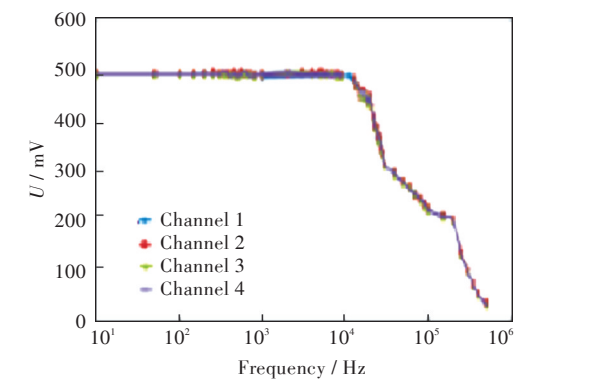


图5 低通滤波器波特图
Fig. 5 Low-pass filter Bode curves

表1 程控放大单元测试数据

Tab. 1 Testing data of programmable amplification V			
输入电压	输出电压	拟合电压	互差电压
-2.283	-2.283 1	-2.282 27	-0.000 83
-1.627	-1.627 4	-1.626 64	-0.000 76
-0.916	-0.910 6	-0.909 91	-0.000 69
-0.31	-0.310 1	-0.309 47	-0.000 63
-0.022	-0.022 2	-0.021 6	-0.000 6
0.007	0.007 1	0.001 31	-0.000 6
0.056	0.056 6	0.057 194	-0.000 59
0.175	0.175 1	0.175 682	-0.000 58
0.314	0.314 1	0.314 669	-0.000 57
0.626	0.626 1	0.626 637	-0.000 54
1.295	1.295 5	1.295 97	-0.000 47
2.292	2.292 2	2.292 571	-0.000 37

3.4 通道一致性测试

程控放大器增益设置为64,ADC的采样率频设置为12 kHz,信号发生器产生2 mV、240 Hz的正弦波。将系统的输入端同极性短接,然后再分别与信号发生器的输出端相连,用采集站系统采集信号发生器产生的波形,并将数据传输至上位机,利用上位机软件(中国地质大学开发的专用软件)进行显示^[11]。

由图6可以看出,相同输入信号情况下,采集站系统的4个通道的输出波形基本一致,本文设计地震仪的模拟电路的通道一致性良好。

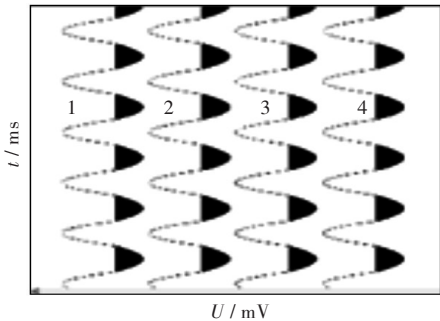


图6 系统通道一致性测试

Fig. 6 Channel conformance testing of system

3.5 野外震源实地测试

为验证地震仪整体性能及系统可靠性和稳定性,需要结合震源进行实验。考虑到井下巷道的特殊工作环境,采用人工锤击的方法,在地表浅层地震试验场进行模拟实验^[12]。

按照地震勘探的方式放置检波器,顺序依次为通道 1、通道 2、通道 4 和通道 3^[13]。采用小锤激发地震,地震波的强度较小,因此,检波器的间距较小,约为 40 cm。激发后,采集站采集地震波数据^[14]。采集完成后,用上位机读取数据并配合上位机软件(中国地质大学开发的专用软件)绘制波形,如图 7 所示。图 7 中 4 个通道的波形数据符合地震波的传播规律,槽波地震仪符合设计要求^[15]。

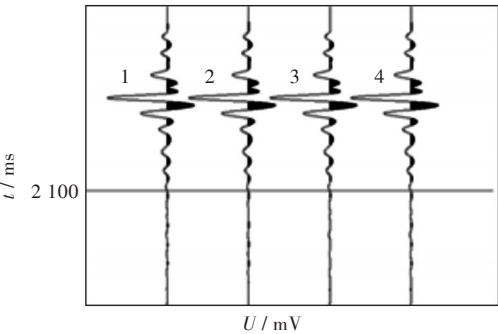


图 7 四通道地震波同步检测波形

Fig. 7 Synchronous detection of waveforms of seismic wave

4 结 语

本文设计的分布式槽波地震仪模拟电路主要包括电源管理模块和信号调理单元两部分。电源管理模块采用 DC/DC 电源和 LDO 线性电源组合,提高了电路抗干扰性能,满足地震仪低功耗要求;信号调理单元采用程控放大器串接二阶有源低通滤波器方式。测试和实验表明,模拟电路具有信号检测精度高、同步性好、系统稳定等特点。

参考文献

[1] 杜艳艳,冯磊,李松营,等.平行巷道条带异常体在透射槽波层析成像中造成的假象[J].地球物理学进展,2017,32(6):2430-2435.

[2] 李旭,童乔凌.高分辨率无线分布式浅层地震仪的设计[J].自动化仪表,2016,37(4):88-92.

[3] 徐洪川.低噪声、高 PSRR LDO 电压调节器的设计[D].贵阳:贵州大学,2009.

[4] 任仲雨.基于可编程运放 PGA281 的放大电路设计[J].军民两用技术与产品,2015(22):67.

[5] 梅永.有源二阶低通滤波器灵敏度和噪声的优化设计[J].信息技术,2017(4):1-4.

[6] 武远征,王亚君,刘海辉.高精度步进增益程控滤波器设计[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2018,38(4):211-215

[7] HARTOGH P,ILYUSHIN Y A. A passive low frequency instrument for radio wave sounding the subsurface oceans of the Jovian icy moons: an instrument concept [J]. Planetary and Space Science, 2016, 130: 30-39.

[8] 姬广忠,杨建华,张广学,等.槽波振幅衰减系数 CT 成像技术应用[J].中国煤炭地质,2015,27(9):75-78.

[9] 赵朋朋,张军,刘毅.槽波反射法在工作面小构造探测中的应用[J].中州煤炭,2016(10):138-141.

[10] 皮娇龙,滕吉文,杨辉,等.地震槽波动力学特征物理-数学模拟及应用进展[J].地球物理学进展,2013,28(2):958-974.

[11] BELOV A I,KUZNETSOV G N. Method and results of estimating acoustic characteristics of bottom-sediment upper layers in the shelf region using seismic exploration instruments[J]. Physics of Wave Phenomena, 2015, 23(2):154-160.

[12] 胡泽安.槽波信号提取方法综述[J].黑龙江科技信息,2013(9):43.

[13] 刘刚,何召全,陈效辉.槽波地震勘探在煤矿中的应用[J].中小企业管理与科技(上旬刊),2013(6):253-254.

[14] 闫伟民,马俊,巴音贺希格,等.水平多层介质中流体层声波场的理论求解与数值分析[C]//中国地球物理学学会第二十三届年会论文集.青岛:中国海洋大学出版社,2007.

[15] 赵玉玲.基于光斑位置检测系统的双通道数字锁相放大器研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2018.

本文编辑:苗 变