

文章编号: 1671-7449(2024)06-0627-08

长线缆传输对冲击波超压信号影响分析及调理电路设计

周浩^{1,2}, 王胤^{1,2}, 毕荣^{1,2}, 何汇成^{1,2}, 穆继亮^{1,2*}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 引线测试法是将长线缆与待测装置传感器连接进行冲击波超压测试的主要方法, 测试过程中需多次检查线缆状态, 导致测试准备时间过长, 且待测装置内部通常采用单一恒流源, 难以适应多场景下不同长度线缆的测试需求。针对上述问题, 设计了一种适用于长线缆传输的调理电路, 该电路不仅能够检测传输线缆的通断状态, 还可根据现场传输线长度的变化, 改变传感器的驱动电流, 从而保证信号准确性。测试表明, 设计电路能够准确判断电电缆线通断状态, 并可通过上位机进行可视化显示, 在确保信号调理准确性的基础上实现了0~20 mA范围内恒流源可调, 有效地提高了仪器在不同环境下的测试效率及通用性。

关键词: 冲击波超压测试; 长线缆传输; 信号调理; 通断检测; 恒流源可调

中图分类号: TP274⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024084

引用格式: 周浩, 王胤, 毕荣, 等. 长线缆传输对冲击波超压信号影响分析及调理电路设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(6): 627-634.

ZHOU Hao, WANG Yin, BI Rong, et al. Analysis of impact of long cable transmission on shock wave overpressure signals and design of conditioning circuits[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(6): 627-634.

Analysis of Impact of Long Cable Transmission on Shock Wave Overpressure Signals and Design of Conditioning Circuits

ZHOU Hao^{1,2}, WANG Yin^{1,2}, BI Rong^{1,2}, HE Huicheng^{1,2}, MU Jiliang^{1,2*}

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The lead wire testing method is the main method for conducting shock wave overpressure testing by connecting long cables to the sensors of the device under test. During the testing process, the cable status needs to be checked multiple times, resulting in long testing preparation time. Additionally, the device under test usually uses a single constant current source, which makes it difficult to adapt to the testing needs of cables of different lengths in multiple scenarios. A conditioning circuit suitable for long-distance cable transmission has been designed to address the above issues. This circuit can not only detect

收稿日期: 2024-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62101513)

作者简介: 周浩(1998-), 男, 硕士生, 主要从事存储测试技术、系统设计与集成研究。E-mail: zhouhao202304@163.com。

* 通信作者: 穆继亮(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事微能源、纳器件与系统研究。E-mail: mujiliang@nuc.edu.cn。

the on/off status of the transmission cable, but also change the driving current of the sensor according to the length of the on-site transmission line, thereby ensuring signal accuracy. Tests have shown that the designed circuit can accurately determine the on/off status of cable lines, and can be visually displayed through the upper computer. Based on ensuring the accuracy of signal conditioning, it realizes the adjustable constant current source within the range of 0~20 mA, effectively improving the testing efficiency and universality of the instrument in different environments.

Key words: shock wave overpressure test; long cable transmission; signal-conditioning; on/off detection; adjustable constant current source

0 引言

目标靶毁伤参数测试是评价武器系统性能的有效手段,武器毁伤威力主要来源于爆炸产生的高温、破片以及冲击波,其中爆炸冲击波作为爆炸毁伤在中远距离上的主要伤害来源是毁伤威力测试的重中之重^[1]。现阶段冲击波测试主要有引线电测法和存储测试法两种,两者主要区别在于测试过程中是否采用长线缆传输^[2]。为了提高测试时效性,在地面常规试验中,引线电测法应用较广^[3],该方法通常将测试仪器放置于离爆心较远的安全位置,并通过多条长电缆线将仪器的多个采集通道与传感器连接,由于电缆线本身不易防护,爆炸产生的冲击波及破片极易导致传输线缆断裂^[4]。常规操作需在每次测试前后人为检查传输线缆状态,这种方式存在工作量大,效率低,检测结果可靠性差等问题;同时,长线缆传输中线缆电容会影响频率响应,在传输线缆较长的情况下,ICP传感系统会因驱动电流不足导致信号畸变^[5],影响设备最终测量结果的准确性。

针对上述问题,通过长线缆传输对信号传输的影响机理分析,提出了一种适用于长线缆传输条件下的调理电路,在传统ICP型传感器调理电路的基础上增加通断检测及恒流源可调功能,从而解决引线电测法中因长线缆传输带来的测试效率低和信号畸变问题。所提出的方案简化了引线电测法中测试准备的流程,提高了测试环节的工作效率,确保了冲击波超压信号的完整性。

1 长线缆传输对信号传输的影响

冲击波超压测试中常选用ICP型传感器对信号进行采集,相较于其他压电传感器,其内部集成了电荷放大器等高阻抗电路,并以低阻抗电压的形式输出,从而避免低噪声电缆问题,可利用

同轴线缆进行远距离传输,用于各种恶劣环境下的现场测试^[6]。在引线测试法中,导线长度 l 与冲击波超压信号波长 λ 满足长线理论: $l > \lambda/10$ ^[7],此时,导线上沿线的电压、电流随时间和位置不断变化,导线等效于由多个四端口网络连接而成的分布参数系统。通常情况下,冲击波超压信号频率主要集中在60 kHz以下,对于频率小于1 GHz的线缆,可假设传输线的并联电导忽略不计,此时传输线等效电路^[8]如图1所示。

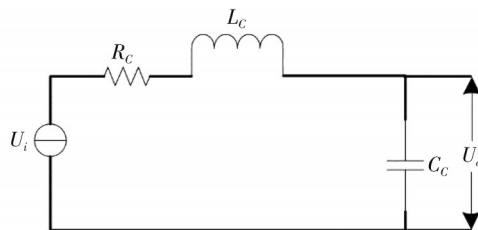


图1 传输线等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of transmission line

图1中, R_c 为传输线串联电阻, L_c 为传输线串联电感, C_c 为传输线并联电容,该电路输入输出函数 H_c 为

$$H_c = \frac{1}{L_c C_c s^2 + R_c C_c s + 1} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + j2\epsilon_r \frac{\omega'}{\omega_n}} \quad (1)$$

以RG-58/U同轴线缆为例,其单位长度的电路特性参数为: $L_c = 2.58 \times 10^{-7}$ H/m, $C_c = 100$ pF/m, $R_c = 0.35$ Ω /m,由式(1)可得,不同长度传输线缆幅频及相频特性曲线如图2所示。

由图2可见,随着传输线缆长度的增加,其自身可通过信号的上限截止频率减小而幅度基本不变。产生这种现象的主要原因在于,同轴线缆的芯线与其金属屏蔽层之间存在电缆电容,大小与传输线长度呈正比。当信号通过电缆时,电缆电容会进行充放电过程,由于电路中电流的限制,放大电路没有足够的电压来保持其转换速

率,导致信号波形畸变^[9]。

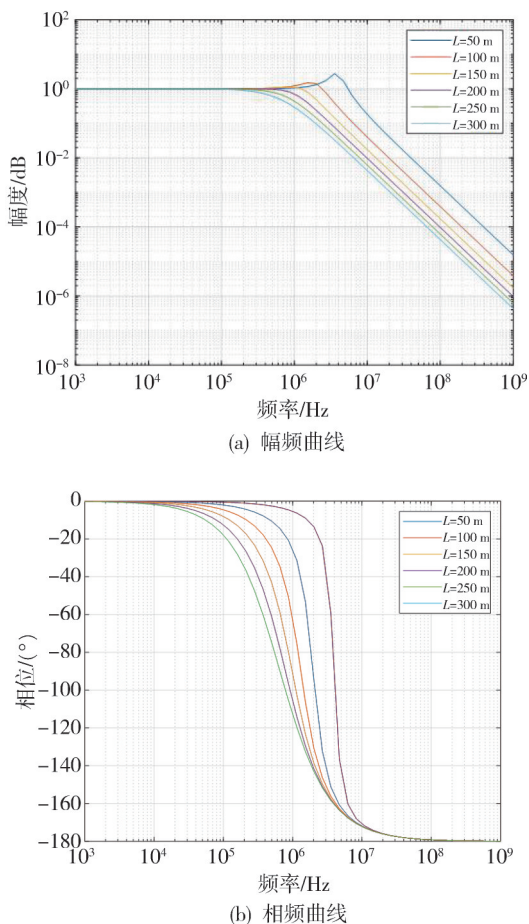


图 2 不同长度传输线幅频相频曲线
Fig. 2 Amplitude frequency phase frequency curves of transmission lines of different lengths

若在传输线缆上施加随时间变化的电流

$$i(t) = I \sin(2\pi ft), \tag{2}$$

则传输线缆电压为

$$v(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{I}{2\pi f C} \cos(2\pi ft). \tag{3}$$

当选定恒定电流电平时,传感器的最大带宽同电缆电容以及输出峰值电压的关系为

$$f_{\max} = \frac{10^9}{2\pi V_{\max} C (I_C - 1)}, \tag{4}$$

式中: f_{\max} 为传感器的最大频率, Hz; V_{\max} 为传感器最大峰值电压输出, V; I_C 为恒定电流, mA; 1 表示 ICP 型传感器本身供电电流。依上式, 选取不同长度电缆与 0~20 mA 驱动电流依次组合实验, 取传感器最大输出电压 5 V, 可得不同长度电缆即不同容值同驱动电流与线缆可通过信号最大频率曲线如图 3 所示。

从图示得出, 传感器的最大带宽与驱动电流成

正比, 与电缆电容成反比。因此, ICP 传感器的恒流源应随电缆长度的改变而改变, 以此保证传输信号的准确性。

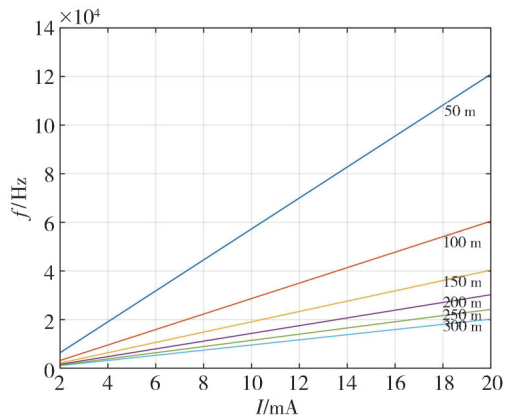


图 3 一定恒流源下电缆长度与最大频率关系
Fig. 3 The relationship between cable length and maximum frequency under a certain constant current source

此外, 在现场测试过程中, 弹药发生爆炸时产生的冲击波、破片等产物急速向四周扩张, 传输线缆在经受着较大瞬态压力的同时, 面临着被破片击中的风险, 从而造成线缆的不可重复使用。通常在测试前后需对线缆状态进行人工筛查。然而, 人工检查方式往往耗费大量时间, 难免会出现疏漏。因此, 需要采用更高效准确的方法来检查线缆状态, 以确保信号传输的稳定和可靠性。

综上所述, 长传输线缆的使用主要从两个方面对测试结果造成影响: 1) 线缆的通断状态会影响测试效率; 2) 线缆内部存在电缆电容, 随长度的增加, 传感器所需驱动电流增大, 同时也影响着信号传输的最大频率, 造成采集信号的丢失及畸变。

2 关键技术实现

2.1 通断检测电路设计

基于上述线缆通断造成测试效率低、易发生信号丢失等问题, 本文设计线缆通断检测电路, 通过硬件电路辅助检查的方式, 节约了测试准备时间, 提高了检测的可靠性。线缆通断检测电路设计如图 4 所示。

设计选用双路电压比较器, 其内部集成的两个独立的电压比较器方便电路设计, 节省布局空间。输出电平无需进行转换, 可直接由 MCU 读取。比较器 1、2 的正负输入端连接在一起并通过分压电阻与传感器接口相连, 其电压为 V_a , 另外两个输入端提供开路基准电压 V_b 及短路基准电压

V_c 。比较器通过将 V_a 同 V_b 、 V_c 两个基准电压进行比较从而输出相应状态的电平,由后端MCU采集处理,并显示到上位机完成信息交互。电压比较器输入输出状态关系如表 1 所示。

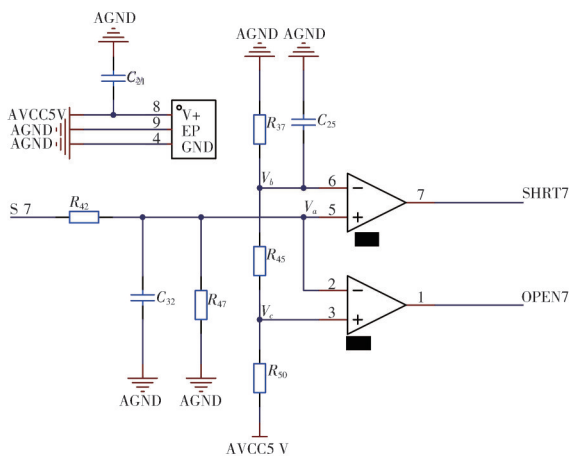


图 4 线缆通断检测电路

Fig. 4 Cable on/off detection circuit

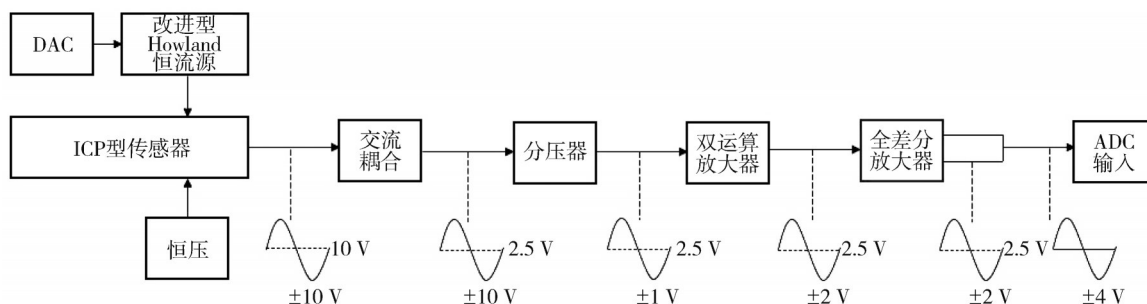


图 5 调理框图及信号链电平

Fig. 5 Adjustment block diagram and signal chain level

可调恒流源调理模块由恒压恒流源、分压器、交流耦合、双运算放大器以及全差分放大器构成。由前文所述,ICP 型传感器需要恒流源驱动才能运行,大小与线缆长度相关,因此,本设计通过 DAC 控制恒流源的输入电压从而实现可控恒流源,保证了传感器的正常工作。ICP 型传感器输出最大信号电平为 ± 10 V,并带有 8~14 V 的直流分量。耦合电容与比例为 10:1 的电阻分压器串联,将信号降至 ± 1 V。双运算放大器用于增益级和共模缓冲器,放大有效信号,调整阻抗,为交流信号提供与 ADC 基准电压相同的偏置电压且增益为 2,输出大小为 (2.5 ± 2) V 信号。全差分放大器将单端信号转换为差分信号,提高输出信号的抗干扰能力,并将信号继续放大 2 倍,差分放大器的输出共模也设置为 2.5 V,最终放大器的最大差分输出为 ± 4 V 并传输至 ADC 进行处理。

表 1 比较器输入输出状态关系

Tab. 1 Comparator input output state relationship

V_a 、 V_b 及 V_c 关系	比较器 1 输出	比较器 2 输出	线缆状态
$V_b < V_a < V_c$	1	1	导通
$V_a < V_b$	0	1	短路
$V_a > V_c$	1	0	断路

2.2 可调恒流源调理电路设计

2.2.1 电路总体设计

ICP 传感器的输出不能直接由 ADC 进行采集,需经过恒流恒压源为其供电^[10]。传统调理电路恒流源输出固定,不利于测试系统在不同测试环境下的便捷使用,系统通用性较低;同时,其通频带较窄(100 kHz),易导致信号失真,无法满足本系统应用需求。针对如上问题,本文提出一种可调恒流源调理电路设计思路,该电路可经后端上位机控制电流输出值,实现不同应用场景下的电流源功能扩展,增加其通用性。可调电路恒流源信号调理框图及信号链电平如图 5 所示。

2.2.2 可调恒流源设计

为降低不同测试环境下使用不同长度线缆对信号传输的影响,提出了可调恒流源的设计方案,本方案通过 DAC 将数字量转换成电压作为改进型 Howland 恒流源的输入端,从而实现由 MCU 控制电流大小的可调恒流源,保证了测试系统的实用性,具体电路设计如图 6 所示。

改进型 Howland 恒流源是由差分放大器在分流电阻上施加电压的电路,从而产生能够驱动大范围负载的双极性压控恒流源。相比于传统 Howland 恒流源电路,改进型电路额外增加了一个运算放大器构成电压跟随电路,从而改进了电流源输出阻抗,几乎消除了反馈电流,以驱动正反馈回路,这样在设计中便可在 $R_1 \sim R_4$ 选取上使用较小阻值,从而避免因大电阻和寄生电容导致的带宽限制以及稳定性降低等问题,降低热噪声。在设计中保证电阻有如

下关系 $R_1/R_2=R_3/R_4$, 因此, 改进型 Howland 恒流源输出电流 i_0 可由式(5)表示。

$$i_0 = \frac{u_{in+} - u_{in-}}{R_0} \quad (5)$$

由上式可知恒流源输出电流 i_0 与输入电压 $u_{in+} - u_{in-}$ 成正比关系, 在分流电阻 R_0 确定的情况下, 其大小仅取决于输入电压值。根据改进型 Howland 恒流源这种输入输出特性, 设计中使用 DAC 将数字量转换成电压作为恒流源输入从而达到精准控制恒流源输出电流大小的目的, 其电压输出范围可依下式计算。

$$V_{out} = \frac{DAC_data}{2^N} \times V_{REFIN}, \quad (6)$$

式中: N 为 DAC 位数; DAC_data 为 MCU 加载到 DAC 寄存器中二进制数的十进制等效值; V_{REFIN} 为参考电压, 设计中为 5 V, 因此设计中 DAC 可在 0~5 V 电压范围内可调。

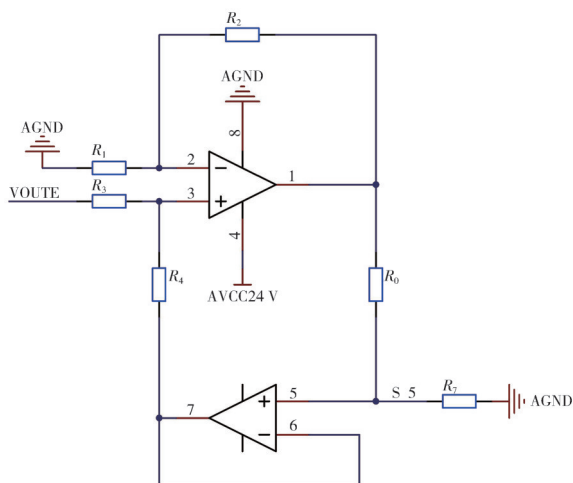


图 6 改进型 Howland 恒流源电路

Fig. 6 Improved Howland constant current source circuit

2.2.3 交流耦合

ICP 传感器的低频响应主要与传感器放电时间常数以及信号调理电路中的耦合电容两个因素相关^[11], 直流耦合会产生零漂问题, 因此大多数调理电路中采用交流耦合。设计选用 1 μ F 钽电容实现交流耦合, 通过隔直通交的特性滤除直流分量。此电容后面连接一个串联电阻, 形成一个截止频率低于 1 Hz 的高通滤波器, 决定信号调理模块输出下限截止频率。

2.2.4 双运算放大器

设计选用双运算放大器用于增益级和共模缓冲器, 电路如图 7 所示。双运算放大器一端以电压跟随器的方式连接, 其输出端与运算放大器相

连, 使得电压跟随电路的输入阻抗极大而输出阻抗极小, 由于系统均为单电源供电, 运放电源轨输入范围为 0~5 V, 为防止波形失真, 电压跟随器输出 2.5 V 基准电压加至交流耦合后, 在提高带负载能力的同时, 使后端信号均以 2.5 V 电压基准进行转换, 保证信号完整性。

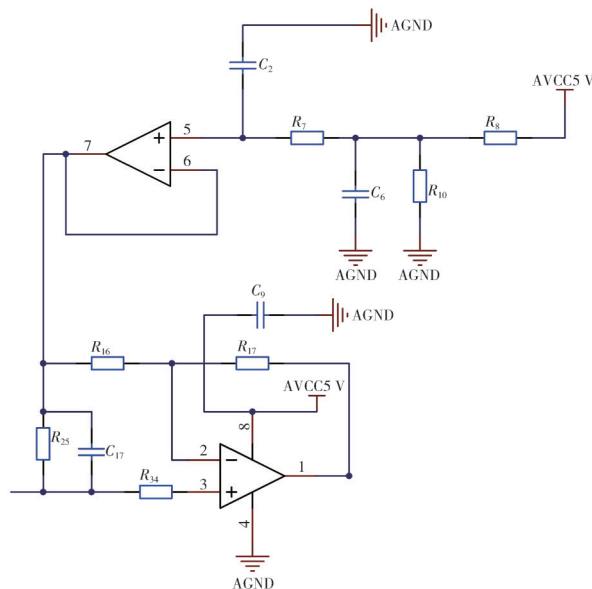


图 7 双运算放大器电路

Fig. 7 Dual operational amplifier circuit

2.2.5 全差分放大器

设计选用全差分放大器作为单端至差分转换器, 不仅具有放大信号的作用, 还可以增强器件驱动能力以驱动 ADC, 此外该器件还用作低通滤波器以将输入带宽限制为 200 kHz 与 ADC 输入范围相匹配, 有助于抑制不需要频带上的噪声信号从而提高信噪比, 设计电路如图 8 所示。芯片的 V_{cm} 引脚用于设置放大器的输出共模电压, 满足 ADC 输入电压范围的需求, 更好地利用 ADC 的动态范围, 其值可由下式确定。

$$V_{cm} = \frac{V_{REF}}{2}, \quad (7)$$

式中: V_{REF} 为 ADC 的满量程输入, V。设计中将 V_{cm} 引脚设置为 2.5 V。电阻 R_{28} , R_{14} 系统增益的值分别设定为 2k 及 1k, 既能提供全差分放大器所需增益, 又能限制通过反馈网络的电流, 从而最大限度降低系统的功耗。在差分输出端各串联一个阻值尽可能小的电阻, 该电阻与负载电容构成一阶低通滤波器, 可以降低容性负载与引脚电感反应导致脉冲响应中出现高频振荡和相位余量不足造成的影响。

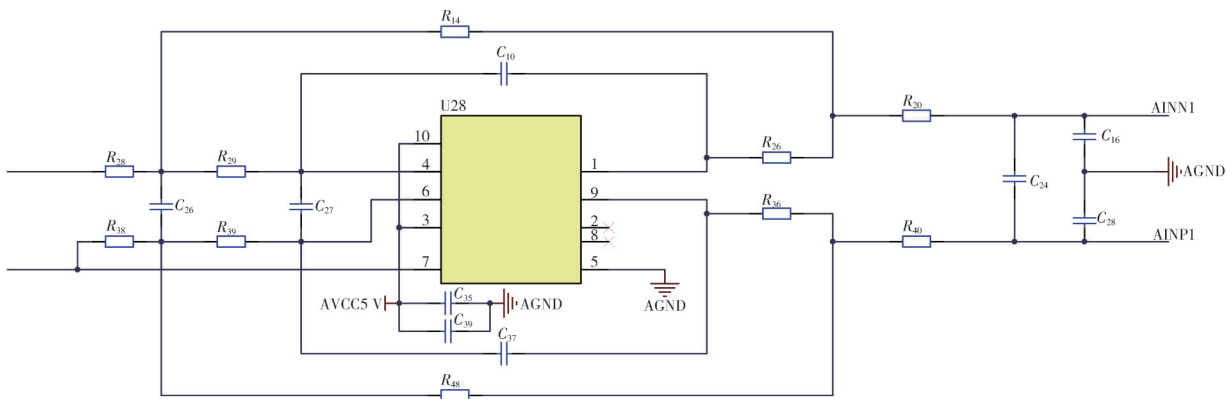


图8 全差分放大器电路

Fig. 8 Fully differential amplifier circuit

差分放大器通过调节 R_{14} 、 C_{10} 阻容值的大小决定上限截止频率，冲击波信号的最高频率能够达到 100 kHz 左右，测试系统采样频率设置为 1 M，满足奈奎斯特采样定律，然而在实际工程中由于各种因素影响不能达到上述理想情况，因此，要求采样频率应为被采信号最大频率的 5~10 倍。本设计中选取截止频率为 200 kHz，既满足 ADC 的输入频率范围，又能保证实际使用中信号不失真，从而很好地消除冗余频段下的噪声。电阻电容与上限截止频率 f_c 的关系为

$$C_{10} = \frac{1}{2\pi f_c R_{14}} \quad (8)$$

由上可知，本设计中的可调恒流源调理电路

硬件均选用基本运放及成熟芯片，其输出范围为 0~20 mA，通频带为 200 kHz，可同时满足冲击波超压测试多通道数据采集系统对多路不同输入值恒流源的需求，相比传统固定恒流源供电方式，该设计具有结构简单和低成本特点，且具有良好的通用性、便捷性和集成度。

3 系统性能测试与分析

3.1 调理电路仿真测试

使用 Tina-TI 对设计调理电路进行仿真验证，仿真电路如图 9 所示。通过仿真对通断检测，对可调恒流源输出、信号链电平以及最终输出信号频谱图进行测试。

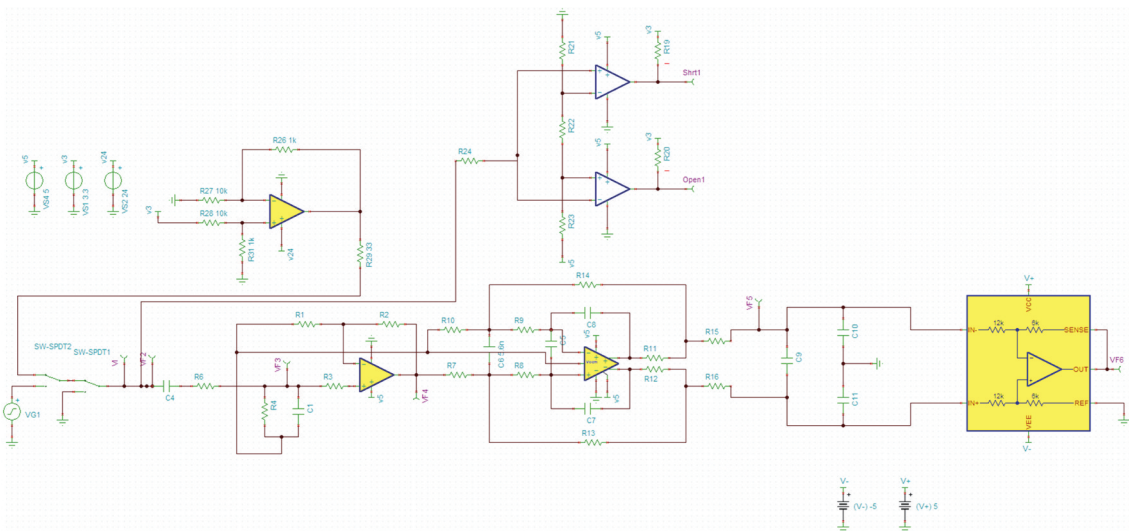


图9 调理电路仿真图

Fig. 9 Simulation diagram of conditioning circuit

通常情况下 ICP 传感器需要 2~20 mA 恒流源供电才能正常工作^[12]。对恒流源输出进行仿真，在输入端施加 DAC 最大输出电压 5 V，其仿真结

果如图 10 所示，表明恒流源最大输出可达 20 mA，符合预期设计，满足现场测试过程中不同线缆长度对驱动电流的要求。

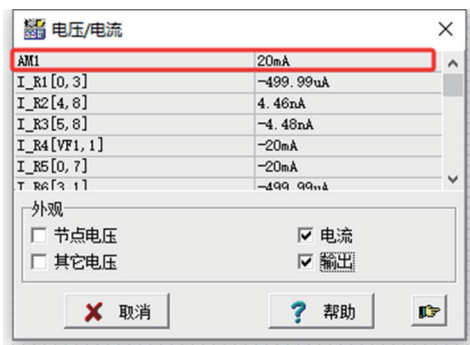


图 10 恒流源输出仿真测试结果图

Fig. 10 Simulation test results for constant current source output

通过虚拟示波器对调理电路中的关键电压节点进行信号测量，测试电压随时间变化结果如图 11 所示。其中 VF1~6 分别对应图 6 中理论信号链电平，从仿真结果可知，设计电路能够完成预期设计电平调理需求。

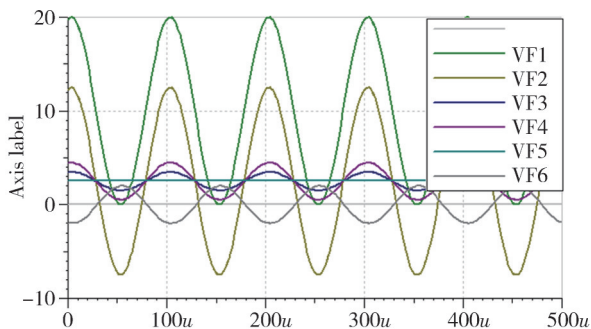


图 11 信号电平仿真测试图

Fig. 11 Signal level simulation test chart

最后对电路进行交流传输特性分析，验证其是否能完成预计调理功能，其输出信号频谱图如图 12 所示。从图中可知，调理电路在 -3 dB 增益处的频率约为 192.89 kHz，满足上文论证中所要求的 200 kHz 截止频率。

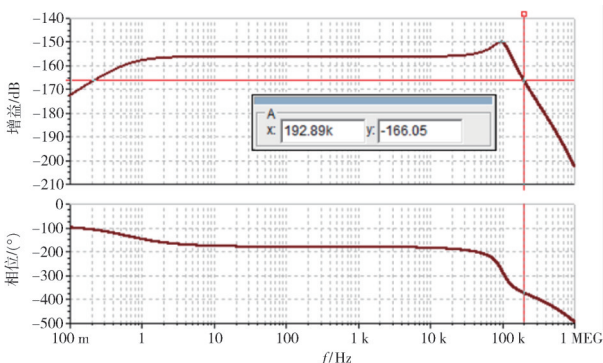


图 12 输出信号频谱图

Fig. 12 Output signal spectrogram

3.2 调理电路现场测试

在上述通断检测仿真基础上，进行实际测试，

人为制造线缆开路、短路、导通三种状态，并将准备好的线缆依次连接至测试装置的各通道，其中 1、2 通道对应的线缆为正常状态，3、4、5 通道不连接传感器模拟开路状态，6、7、8 通道将线缆内部铜线短接模拟短路状态，装置启动后自检并通过上位机反馈线缆状态信息，如图 13 所示。实验表明测试装置能够较好地反馈测试线缆的实际状态，达到设计预期目标。



图 13 线缆状态测试图

Fig. 13 Cable status test diagram

使用信号发生器代替 ICP 型传感器通过长电缆连接至设备，通过上位机改变驱动电流值并显示当前输出信号波形。信号发生器输出信号幅值定为 (10 ± 10) V，频率由 10 kHz 不断递增，根据上文理论分析，在最大输出信号截止频率满足大于冲击波超压信号主要频率范围的前提下，选取合适恒流源，观察上位机输出波形是否完整。试验结果如表 2 所示，在现场测试中可按照表中参考数值选取系统驱动电流。

表 2 不同线缆长度下的适配恒流源及最大传输频率

Tab. 2 Adaptive constant current source and maximum transmission frequency under different cable lengths

线缆长度/m	电缆电容/pF	驱动电流/mA	最大通过频率/kHz
50	5 000	6	100
100	10 000	8	100
150	15 000	11	100
200	20 000	13	105
250	25 000	16	110
300	30 000	20	92

同时，为验证整体电路系统的可靠性及实用性，进行某型号车载火炮冲击波超压测试实验。测试中火炮装药量为 42.7 g，水平设计靶板，射击高度 1 m，将传感器置于钢制外壳构成测量节点并埋于距爆心 3、4、5 m 位置处，节点通过同轴电缆与远端掩体内的设备相连，为验证可调恒流源功能，分别使用 100、200、300 m 长度线缆进行测试

并选取相应恒流源,将测试结果经Matlab分析处理,其结果如图14所示。

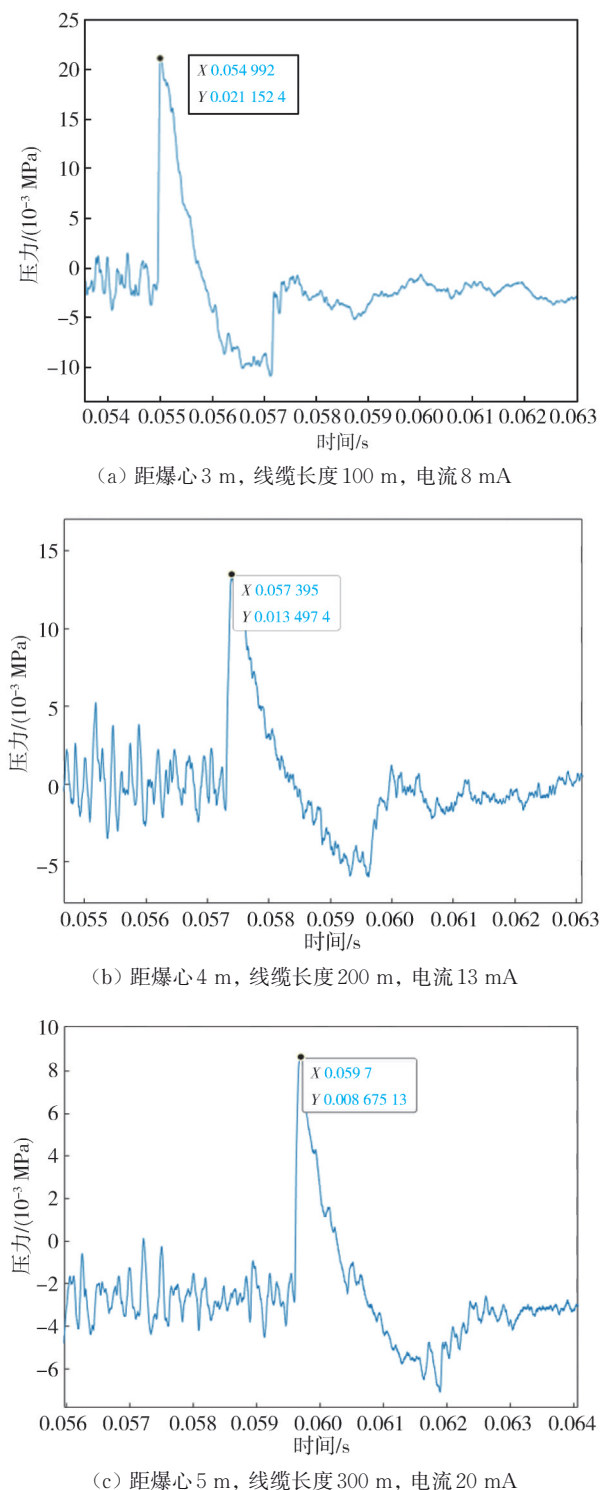


图14 冲击波超压测试结果图

Fig. 14 Result chart of shock wave overpressure test

试验结果表明在选取合适大小的驱动电流时,不同长度传输线缆下测得的冲击波超压信号符合理想冲击波信号特征且数据未出现畸变,幅

值误差较小,表明设计电路能够完成对驱动电流源的调整,具有良好的应用价值。

4 结 语

本文针对引线测试法中长传输线在现场测试环境下出现的测试效率低、信号传输易发生畸变等关键问题,设计了一种满足通断检测及恒流源可控功能的信号调理电路,该调理电路主要由通断检测、可控恒流源、交流耦合、双运算放大以及全差分放大5个主要部分构成,在满足ICP型传感器输出调理的基础上,实现了对线缆状态的查询显示以及针对不同长度电缆的恒流源调节。通过模拟仿真及现场测试的方式,验证了电路的可靠性及实用性,设计可准确判断电缆线通断状态,并通过上位机进行可视化显示。同时,在满足信号调理需求的基础上,实现了恒流源在0~20 mA范围内可调。该电路设计方案为冲击波超压测试提供了一种全新的设计思路,具有一定的工程价值及研究意义,具备广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈学文. 爆炸冲击波毁伤威力快速评估测试系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [2] 冯铭瑜, 王真, 易芳. 恒流源对ICP传感器高频响应的影响[J]. 中国科技信息, 2018(10): 57-58.
FENG Mingyu, WANG Zhen, YI Fang. Influence of constant current source on high frequency response of ICP sensor[J]. China Science and Technology Information, 2018(10): 57-58. (in Chinese)
- [3] 洪桐萱, 唐仁明. 测量岩体中爆炸应力波参量时的长线效应[J]. 爆炸与冲击, 1981, 1(2): 69-78.
HONG Minxuan, TANG Renming. The long wire effect when measuring the blast stress wave parameters in rock mass[J]. Explosion and Shock Waves, 1981, 1(2): 69-78. (in Chinese)
- [4] 李金强. 基于eMMC的弹载高速多参数采集存储系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [5] 李肖姝, 杜红棉, 郭富智, 等. 长线缆传输和驱动电流对冲击波信号的影响[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(10): 1-4.
LI Xiaoshu, DU Hongmian, GUO Fuzhi, et al. Effect of long cable transmission and drive current on shock wave signal [J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(10): 1-4. (in Chinese)

(下转第641页)