

◇ 研究报告 ◇

相控阵井壁成像仪高压电源纹波噪声抑制研究*

王 俊^{1,2} 孔 超^{1†} 张碧星¹ 陶爱华³ 王文梁³

(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)

(3 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部油田技术研究院 廊坊 065201)

摘要 针对超声相控阵井壁成像仪工作环境恶劣以及超声脉冲发射所需高压电源纹波噪声对超声回波信号干扰大的问题,提出一种高温环境下高压电源纹波噪声抑制方法并进行设计分析。本方法综合开关电源与线性稳压电源各自的技术优势且注重纹波噪声抑制和耐高温设计。利用开关电源完成不同电压幅值的高效转换并在电源输出端增设专门的 EMI 滤波电路,再利用屏蔽罩对电源进行屏蔽,最后输出电压再经过一级线性稳压电路进一步进行稳压滤波。实测结果表明,利用该方法,电源的纹波与辐射噪声得到了抑制,有效减少电源对回波信号的干扰,且输出电压稳定,提高了超声相控阵井壁成像仪井下工作的稳定性。

关键词 超声相控阵,直流稳压电路,低纹波噪声,电磁兼容

中图分类号: O426.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2017)04-0365-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.04.013

The high voltage power supply ripple and noise rejection of phased array imaging system

WANG Jun^{1,2} KONG Chao¹ ZHANG Bixing¹ TAO Aihua³ WANG Wenliang³

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

(3 Well-Tech R&D Institute, China Oilfield Services Limited, Langfang 065201, China)

Abstract A basic method in the design of high voltage power supply ripple rejection of phased array imaging system was presented to solve the problems bring from the adverse circumstances of the ultrasonic phased array borehole imaging work environment and the severe interference on ultrasonic echo signal caused by high power supply. In this method, the technical advantages of switched-mode power supply and linear regulated power supply were combined and the ripple noise reduction and high temperature design were focused on. To suppress the ripple and noise, a specialized EMI filter circuit and a screening can was designed to the power source. Furthermore a linear regulated voltage circuit was added to the output port as well to obtain a better effect. From the results obtained so far, it showed that the ripple and noise were suppressed well and the output voltage was stable. With the help of this approach, the interference from the high power supply to the ultrasonic echo was restrained effectively, and the stability of the system working underground was improved.

Key words Ultrasonic phased array, Linear regulated power supply, Low ripple noise, Electromagnetic compatibility

2016-11-14 收稿; 2017-03-10 定稿

*国家自然科学基金项目 (11374324, 11474308)

作者简介: 王俊 (1990-), 男, 浙江人, 博士研究生, 研究方向: 声学。

† 通讯作者 E-mail: kongchao1983@163.com

1 引言

超声相控阵技术可通过控制各个独立阵元的延时,实现电子扫描和动态聚焦,在无需或少移动探头的情况下,产生不同形式的超声波波束,从而模拟各种斜聚焦探头的工作。利用超声相控阵技术只需将探头放在一个位置就可以生成被检测物体的完整图像,具有检测速度快,分辨率高,易于实现电子控制等优点^[1-4]。将该技术应用到石油测井中而设计的超声相控阵井壁成像仪可通过油管下井,检测套损及射孔情况具有广阔的应用前景^[5-8]。

但是在实际测井过程中,因为超声相控阵同时激发的阵元数量多,用于激励信号产生的电源不仅要求电压高,而且要求峰值电流大;另外,因为所用的压电陶瓷晶片体积小,所以接收的回波信号幅值非常微弱,极易受仪器电路的电噪声影响。特别是用于产生超声发射高压脉冲激励信号时所用的正负直流稳压电源,它产生的纹波噪声幅值有的甚至比回波信号还大,通过传导与辐射两种方式对回波信号造成严重干扰,极大增加了信号处理难度^[9-10]。图1是电源系统对超声相控阵井壁成像系统中的超声脉冲发射接收电路造成影响的示意图。

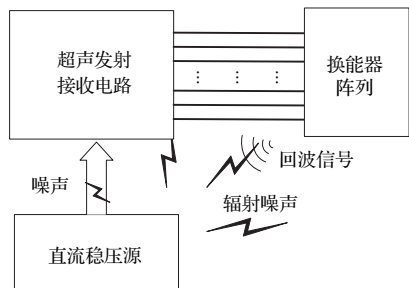


图1 电源对超声脉冲发射接收电路的影响示意图

Fig. 1 The diagram of the ultrasonic pulse transceiver circuit interfered with the power supply

在超声相控阵井壁成像系统中需要将地上200 V的直流电压转换为用于激励超声信号的 ± 90 V的正负电压,需要一个可靠的直流稳压电源。目前,构成直流稳压电源的方法主要有两种:线性稳压电源和开关稳压电源。线性稳压电源的稳定度高,输出纹波小,但是当输入输出电压差值比较大时,调整管功耗大,电源发热严重,转换效率低,在井下高温环境作业电路极易发生爆管短路等问题。而

开关稳压电源由于功率晶体管工作在导通和关断状态,所以晶体管功率损耗非常小,发热少,电源转换效率高,又因为它的体积相对线性稳压电源可以做的更小,更适合在井下作业。因此现在测井仪器中井下探管的电源一般都采用开关电源。但是其输出纹波噪声非常大,对超声回波信号存在严重干扰。

为此本文结合开关电源和线性稳压电源各自的技术优势:首先利用开关电源模块完成200 V到90 V的高效转换,再利用直流稳压电路对转换后的电压进行滤波稳压以减少输出纹波。针对超声相控阵井壁成像仪特殊的工作环境利用噪声抑制原理提出一种有效的电源纹波噪声抑制方法,从而减少电源噪声对回波信号的影响,降低信号处理难度,确保超声相控阵井壁成像系统接收回波信号的完整性和准确性^[11-12]。

2 相控阵井壁成像仪纹波噪声分析及抑制方法

电磁兼容问题包括三要素:干扰源、耦合通路和敏感设备,对以上任何一项要素采取有效措施都可以减少电磁干扰问题。实验测试发现,超声相控阵井壁成像仪回波信号中的噪声干扰主要由两部分组成:一个是20 MHz~50 MHz范围内的高频噪声干扰,另一个则是500 Hz~1 kHz范围内的低频干扰,它们都源于用于电压转换的DC-DC开关电源模块。针对这些纹波噪声,本文主要通过利用EMI滤波器来阻断耦合通路的方法来实现电源高频噪声的抑制并利用线性稳压电源进一步抑制电源的低频纹波。整体方案框图如图2所示,首先为了屏蔽开关电源的辐射噪声并提高模块的散热效果,特制金属壳体对模块进行屏蔽封装。其次,为了防止DC-DC模块的噪声经导线传导入下级的同时通过导线辐射噪声影响回波,在输出端口设计专门

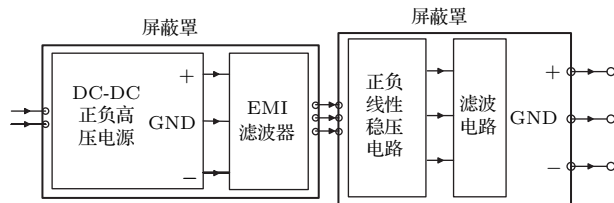


图2 纹波噪声抑制方案框图

Fig. 2 Ripple and noise rejection schematic diagram

的EMI滤波器,阻断噪声的传导路径,尤其是高频噪声的传导,并在金属壳体内注满导热硅脂,增加散热效果的同时一定程度上减小机械振动对电路的影响。经EMI滤波器后输出的正负电压再经过线性稳压电路和滤波电路使电压更稳定,纹波更小。

2.1 EMI滤波器设计

为了抑制高频干扰信号由开关电源进入后续电路,设置专门的EMI滤波器阻断开关电源高频噪声的耦合途径。这是因为滤波器可以在电流路径上产生一个不连续的阻抗特性,将射频能量反射回去,从而衰减导线上的干扰信号。其电路结果示意图如图3所示。

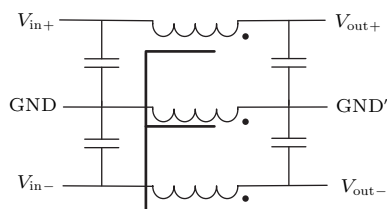


图3 EMI滤波电路

Fig. 3 EMI filter circuit

电容选用0.01 μF 的耐高温贴片陶瓷电容,其等效串联电感小,谐振频率在50 MHz左右而且故障模式是断路,可以保证系统能在150 $^{\circ}\text{C}$ 高温环境下正常工作。在电源输出端增设该电容主要是作为旁路电容用于抑制高频纹波,另外为了改善电容的高频特性,选择并联多个电容,并采用堆叠焊接方式,以增加空间利用率。实测结果表明,增加该旁路电容后,虽然高频噪声的峰峰值由原来的300 mV降到了100 mV左右,但是该噪声仍对系统采集到的回波信号有一定干扰,通过改变电容值结果也并未有所改善。

为此,为了进一步抑制高频噪声,在开关电源输出电缆和下级电路输入电缆处增设共模扼流圈。因为开关电源中20 MHz~50 MHz范围内的干扰主要是由共模噪声引起的。当扼流圈的磁路环绕着供电电路的发送导线,因为流过共模电流时磁环中的磁通方向相同,因而相互叠加,从而具有相当大的电感量,对共模电流起到很好的抑制作用,其缠绕方式如图4所示。

扼流圈选用进口的耐高温环形磁芯。将正负电源输出端的+90 V输出线,地线以及-90 V输出线

按三线的形式缠绕在环形耐高温磁芯上。因为绕线之间距离越近,杂散电容越大,所以缠绕时要求输入与输出引线分别布置在磁芯的两侧,缠绕次数不宜过多,从而减少它们之间的杂散电容。实测结果表明,在本系统中当缠绕圈数在四圈半时对系统高频噪声的抑制效果最佳,最终将高频噪声抑制在30 mV以内。

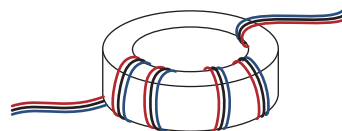


图4 三路共模扼流圈

Fig. 4 Fundamental diagram of common mode choke

2.2 线性稳压电路设计

虽然利用滤波器使得高频噪声得到了较好的抑制,但是尝试了几种不同的滤波电路发现低频噪声的抑制并不理想。而在本系统中,因为工作频率为500 kHz,所以低频噪声纹波噪声对回波信号影响才是最大的。为了有效抑制开关电源的低频噪声,最终采用在开关电源输出之后,接低压差线性稳压器(Low dropout regulator, LDO)进行滤波,这是减少纹波和噪声最有效的办法之一。由于目前市场上没有合适的LDO芯片可适应井下高温高压的工作需求所以需要利用分立的耐高温器件设计专门的串联型稳压电路用于系统 $\pm 90\text{ V}$ 开关电源的稳压滤波,如图5所示,正稳压电路由NPN晶体管组成,负稳压电路由PNP晶体管组成。此时:

$$V_{\text{out}+} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot V_{\text{ref}}, \quad (1)$$

$$V_{\text{out}-} = \frac{R_3 + R_4}{R_3} \cdot V_{\text{ref}}, \quad (2)$$

其中: $V_{\text{out}+}$ 是输出正电压, $V_{\text{out}-}$ 是输出负电压, $R_1 \sim R_4$ 分别是图5中所示的电阻值, V_{ref} 是基准电压。

导致线性稳压电路输出噪声的主要来源是基准电压源,由基准产生的噪声在输出端被放大,增大基准电压源的旁路电容可以使基准噪声降低。另外,误差放大器的放大度提得越高,输出电压纹波成分也越小。

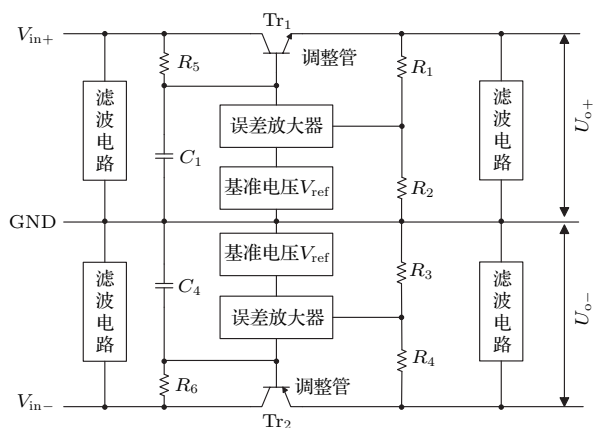


图5 线性稳压电路

Fig. 5 Linear voltage circuit

为了增加稳压电路的滤波效果,在调整管基极与地之间添加一个耐高温瓷片电容,从而调整管 Tr_1 ,偏置电阻 R_5 与瓷片电容 C_1 构成电容倍增电路进行有源滤波。在这种结构中,滤波电阻 R_5 兼作 Tr_1 的偏置电阻,假设 Tr_1 的放大倍数为 β ,由于流过 R_5 的电流很小,为输出电流的 $1/(1+\beta)$ 故 R_5 可取较大的值(一般为几十千欧姆)即使纹波得以较大的降落,也不会使直流损失太大。另外滤波电容 C_1 接于晶体管的基极回路,便可以选取较小的电容达到较大电容的滤波效果,其折合到发射极回路的等效电容为 $(1+\beta)C_1$ 。

同理,调整管 Tr_2 ,偏置电阻 R_2 与瓷片电容 C_2 同样构成电容倍增电路进行有源滤波,进一步减小低频噪声,改善电源的纹波特性。

2.3 LC滤波电路分析

在线性稳压电源输出端预设一级LC滤波电路进行滤波。LC滤波器也称为无源滤波器,是一个经典的谐波补偿装置,具有结构简单、成本低、运行可靠性较高等优点,适合井下的高温环境应用。在本系统中,因为经过前两级滤波处理纹波噪声已经获

得较好抑制,满足系统要求,故本单元暂时闲置。当系统在实际恶劣环境中进行工作时,前两级滤波效果如果不能满足要求,本单元作为噪声抑制的最后一道预设方案,将根据情况选择合适的电感电容对滤波效果进行改善,提高系统的可靠性。

3 试验结果

为了验证本文所述方案的有效性,依据本文所述方案对超声井壁成像仪高压电源进行滤波屏蔽及稳压,并利用示波器观察电路效果。

在测量电源输出纹波时设置示波器的耦合方式为AC耦合,并根据需要设置带宽限制功能。过程中,示波器选用最灵敏的量程档,以减少示波器自身的噪声干扰,探头采用短地线进行接地而不使用带鳄鱼夹的长地线,以减少额外噪声的引入。

在不设置带宽限制的情况下,测得电源输出电压高频纹波情况如图6所示,各图示波器时间轴显示均为50 ns/div。图6(a)为开关电源的原始输出高频纹波,示波器幅值显示为100 mV/div,纹波幅值约300 mV_{pp}。在开关电源增加所述旁路电容后,输出纹波如图6(b)所示,示波器幅值显示为30 mV/div,纹波幅值约100 mV_{pp}。图6(c)为最终高频纹波输出效果,示波器幅值显示为30 mV/div,纹波幅值在30 mV_{pp}以内。

对输出电压低频纹波测试时,将示波器的带宽限制功能设在20 MHz,从而减少高频噪声影响纹波测量,提高测量的准确性。经测量,在20 MHz带宽限制下输出电压纹波情况如图7所示,各图示波器时间轴显示均为2 ms/div。图7(a)是开关电源输出的低频纹波,示波器幅值显示为20 mV/div,可以看到在未经线性稳压电路滤波时,开关电源输出电压低频纹波约为80 mV_{pp},而经过所述线性稳压电

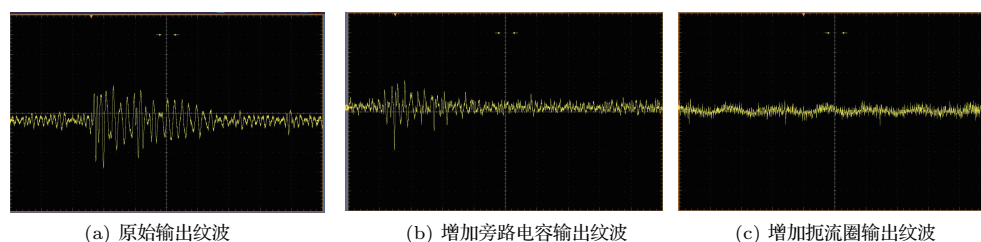
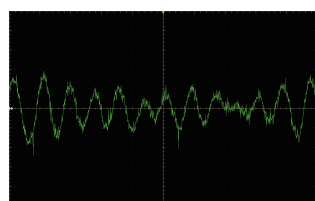


图6 输出电压高频纹波对比

Fig. 6 Comparison of high-frequency ripple from output voltage

路滤波处理后输出电压纹波有效抑制在 10 mV_{pp} 以内, 如图7(b)所示, 图中示波器幅值显示为 10 mV/div 。



(a) 开关电源输出低频纹波



(b) 经过线性稳压电源后输出低频纹波

图7 输出电压低频纹波对比

Fig. 7 Comparison of low-frequency ripple from output voltage

实际测量输出直流电压情况如图8所示, 示波器幅值显示为 20 V/div 。幅值大的信号是超声井壁成像仪高压电源输出的正电压, 幅值小的信号是经过本文所述方法处理后输出的正电压。可以发现未经本方法处理前, 电源上电瞬间存在一个较大的过冲电压, 大约过了 800 ms 输出电压才稳定下来。而经过处理后输出电压稳定, 避免了过冲电压对后续电路的影响。

综上, 文本提出的方案不仅电源纹波噪声抑制效果明显, 而且输出电压稳定无明显过冲电压。

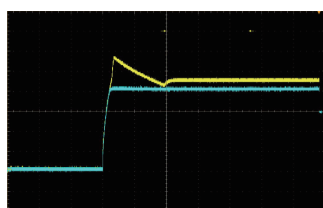


图8 电源输出直流电压

Fig. 8 Output DC voltage of power supply

4 结论

为了减少高压电源对超声相控阵井壁成像仪接收回波信号的干扰, 本文提出一种在井下高温空间受限情况下的电源纹波噪声抑制方案。首先利用专门的EMI滤波器和屏蔽罩抑制电源对外的传导噪声和辐射噪声, 再利用线性稳压电路和LC滤波电路对输出电压再次滤波稳压。实验证明, 本方法

不仅可以有效抑制电源纹波噪声而且电源上电过冲电压问题也得到了有效解决。由上述分析和测试结果可知, 本文提出的电源纹波噪声抑制方案有效、可靠, 用其作为超声相控阵发射电路的激励电源纹波噪声抑制方案不仅工作稳定且对回波信号影响小, 减小了后续数据采集, 信号处理和缺陷识别的难度。

参 考 文 献

- [1] 孔超, 冀映辉, 蔡炜, 等. 超声相控阵控制、采集与全并行处理系统设计[J]. 应用声学, 2011, 30(2): 105-111.
KONG Chao, JI Yinghui, CAI Wei, et al. The design of control—Acquisition and fully parallel processing phased array ultrasonic system[J]. J. Appl. Acoust., 2011, 30(2): 105-111.
- [2] MOLES M, DUBÉN, LABBÉS, et al. Review of ultrasonic phased arrays for pressure vessel and pipeline weld inspections[J]. J. Press. Vessel. Technol. Trans. Asme., 2005, 127(3): 351-356.
- [3] 刘冬冬, 师芳芳, 张碧星. 超声相控阵技术在管材检测中的应用[J]. 无损检测, 2013, 35(5): 1-3.
LIU Dongdong, SHI Fangfang, ZHANG Bixing. Application of ultrasonic phased array technology in tube detection[J]. Nondest. Test., 2013, 35(5): 1-3.
- [4] 鲍晓宇. 相控阵超声检测系统及其关键技术的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [5] 师芳芳, 邓方青, 吴先梅. 超声相控阵井壁成像研究[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 454-455.
SHI Fangfang, DENG Fangqing, WU Xianmei. Borehole wall imaging by ultrasonic phased array[J]. Tech. Acoust., 2008, 27(5): 454-455.
- [6] 吴先梅, 张碧星. 井下超声相控阵聚焦声场的有限元分析[J]. 声学技术, 2012, 31(5): 25-26.
WU Xianmei, ZHANG Bixing. Finite element analysis on ultrasonic focusing of phased array in a borehole[J]. Tech. Acoust., 2012, 31(5): 25-26.
- [7] ZHANG B X, LIU D D, SHI F F, et al. Ultrasonic focusing and scanning with multiple waves[J]. Chin. Phys. B, 2013, 22(1): 312-317.
- [8] ZHANG B X, XIE F L, DONG H, et al. Ultrasonic guided wave focusing by a generalized phased array[J]. Acoust. Phys., 2013, 59(1): 97-102.
- [9] 中国机械工程学会无损检测分会编. 超声波检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 51-53.
- [10] 张小飞, 王茁, 周有鹏. 超声检测中的噪声处理[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 200-202.
ZHANG Xiaofei, WANG Zhuo, ZHOU Youpeng. Noise processing in ultrasonic testing[J]. Nondest. Test., 2002, 24(5): 200-202.
- [11] 卢川治朗. 实用电源电路设计手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- [12] 阿姆斯特朗. 电子产品实用EMC设计技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.