

基于超声换能器激励信号与接收信号的处理

孙文凯¹ 周 浩¹
SUN Wenkai ZHOU Hao

摘 要

井下超声换能器产生的声波在密度较大的油基泥浆中传播时幅值衰减较大，并且在不同温度下，超声换能器的阻抗存在差异。为提高对激励信号的接收，设计了一套针对超声换能器激励信号与接收信号的处理方案。发射端通过同向放大电路和阻抗匹配电路提高激励信号的幅值和换能器的驱动效率，利用FPGA进行不同温度下阻抗匹配电路的选择，并将温度信息通过无线通信传给上位机，便于随时监督换能器工作环境，接收端通过滤波电路和增益可调放大电路对信号进行进一步的处理。测试结果表明：所提出的设计方案有效提高了超声换能器在温度多变、密度较大的油基泥浆环境中的信号接收，具有良好的实用价值。

关键词

井下超声换能器；激励信号；接收信号；FPGA；上位机

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.031

0 引言

超声换能器作为一种能量转换的器件，既可以将电信号转换成声波信号，也可以将声波信号转换成电信号^[1]。基于超声换能器的能量转换特性，其在石油领域有着广泛的应用，可用于井下流量测量、管直径测量、外壳检查等，这些测量都需要换能器能够接收到低噪声且幅值较大的有效信号。超声换能器作为井下仪器的一种，在实际应用中会面临许多问题，一方面由于井下环境复杂，尤其是温度，会严重影响超声换能器的阻抗值，从而导致超声换能器的阻抗失配，进而使超声换能器的驱动效率大大降低；另一方面由于井下油基泥浆密度高且流动性差，信号的传播会受到较大的衰减，再加上噪声的影响，会使有用信号遭到污染，这两个方面的影响都会大大降低井下测量的准确性。基于以上两个方面的影响，为提升井下测量的准确性，设计了基于换能器的信号处理方案解决上述两个方面的问题，一方面通过对进入发射换能器的信号进行同相放大以及不同温度下的动态阻抗匹配以提升激励信号的幅值和发射换能器的驱动效率，另一方面通过对接收换能器接收到的信号进行滤波和放大处理以减小外部噪声的影响并提升信号的幅值，这部分电路主要通过FPGA和上位机对硬件电路进行控制。由于超声换能器的造价昂贵，长时间在高温环境下工作会使超声换能器造成损坏^[2]，所以利用FPGA与ESP32设计的无线通信模块将温度信息实时传递给上位机，以便实时监控超声换能器所处的温度。

1. 长江大学电子信息学院 湖北荆州 434023

1 超声换能器信号激励与接收方案

井下测量使用的超声换能器又称压电陶瓷超声换能器，其关键组件是压电陶瓷晶片，当压力或张力施加到陶瓷片上时，在陶瓷片的两端会产生极性相反的电荷，这些电荷通过电路转化成电流，这种效应称为压电效应，而这种效应是可逆的^[3]。基于超声换能器的压电效应及其可逆性，就可以实现电信号与声波信号之间的相互转换，正是因为这种特性，超声换能器在工业领域常被用来进行精确测量。

1.1 传统的信号激励与接收方案

利用超声换能器进行测量时，通常采用一对换能器，即一个发射换能器和一个接收换能器。发射换能器是将电信号转换成声波信号，接收换能器是将声波信号转换成电信号，基于超声换能器传统的信号激励与接收方案流程如图1所示。

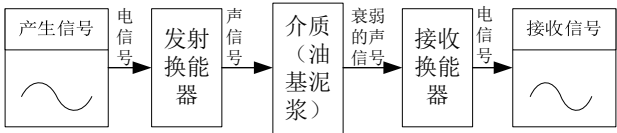


图1 传统的信号激励与接收方案流程图

理论上输入到发射换能器的信号幅值越大，最终收到的信号幅值也就越大，但实际应用中，压电陶瓷材料存在极限耐压，超过极限电压陶瓷材料会被击穿，从而损坏超声换能器。通过FPGA或单片机设计的DDS（直接数字频率合成）函数信号发生器产生正弦波信号，以驱动超声换能器。然而这些方式产生的正弦波信号幅值通常受限，最大只能达到几伏，另外超声换能器存在阻抗，最终输入到发射换能器的信

号幅值会衰减得非常厉害。此外，超声换能器本身存在阻抗，且其阻抗值会随着温度变化而改变，即保持 DDS 输入到发射换能器的正弦波信号幅值和频率不变，在不同温度下测得发射换能器的驱动效率有较大的差别。正弦波信号通过发射换能器转换成声信号并在介质中传播，声波信号会再次衰减，最终测得通过接收换能器接收到的信号幅值会非常小，且伴随着各种噪声，如果介质是密度大、流动性差的油基泥浆，接收换能器甚至会接收不到有用信号。

1.2 改进后的信号激励与接收方案

传统的信号激励与接收方案在环境复杂的井下很难完成信号接收工作，针对传统方案所遇到的问题提出改进后的新方案。新方案中，在发射端，引入了同向放大电路，这将有助于增加激励信号的幅值，从而更好地驱动发射换能器，同时，通过阻抗匹配可以有效提升输入到发射换能器的信号幅值，可以在一定程度上缓解超声换能器的阻抗失配问题，从而提高驱动效率。在接收端，引入滤波电路，以减少外部噪声的影响，从而提升接收到的信号的准确性，同时，增加一个增益可调放大电路用来调整信号的放大倍数，使最终信号达到想要的幅值，图 2 是改进后的信号激励与接收方案流程图。

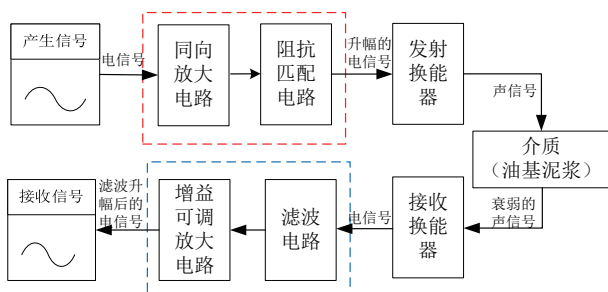


图 2 改进后的信号激励与接收方案流程图

上面虚线方框内为发射端信号处理电路，包括同向放大电路和阻抗匹配电路，下面虚线方框内为接收端信号处理电路包括滤波电路和增益可调放大电路。

2 发射端信号处理电路

2.1 同向放大电路

通过 FPGA 控制 DDS 模块产生正弦波，其幅值通常较小，一般不超过 $3.3 V_{pp}$ ，为了增大激励信号的幅值，需要对其进行放大处理。通常可以选择变压器组成的放大电路或者运放器组成的放大电路，由于变压器属于感性负载，会影响后续的超声换能器的阻抗匹配，所以选择运放器组成放大电路，既可满足超声换能器的驱动要求，也可以避免由变压器带来的阻抗匹配问题，由运放器组成的同向放大电路原理图如图 3 所示。

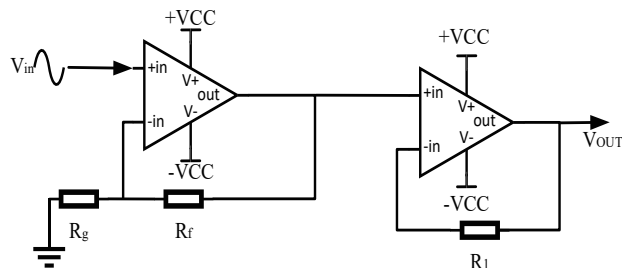


图 3 同向放大电路原理图

同向放大电路是对 DDS 模块产生的正弦波信号进行放大处理，其主要分为两级，第一级为同向比例放大器，第二级为电压跟随器。由于电压跟随器具有输入阻抗高，输出阻抗低的特点，使得它对上一级电路呈现高阻态，而对下一级电路呈现低阻态，在一定程度上可以避免由于输出阻抗较高，而下一级输入阻抗较小时产生的信号损耗^[4]。采用这种电路结构，能够有效地提升信号的幅值，同时减小信号损耗，确保信号传递稳定性和高效性。

同向放大电路输出 V_{out} 为：

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \cdot V_{in} \quad (1)$$

即输入信号放大 $1 + (R_f/R_g)$ 倍。

2.2 超声换能器等效电路

超声换能器的等效电路相当于电阻、电容和电感通过串并联的方式组合成的电路^[5]，超声换能器串联谐振等效电路模型如图 4 所示，其中左边虚线方框内为静态支路，右边虚线方框内为动态支路。其中 R_0 为介电损耗电阻，可忽略不计， C_0 为静态电容， C_1 、 L_1 、 R_1 分别为动态电容、动态电感、动态电阻^[6-8]。

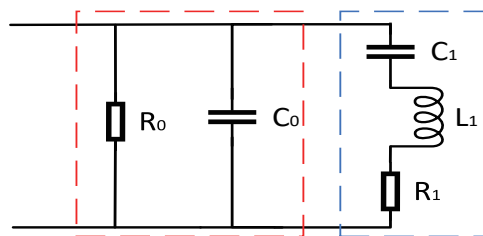


图 4 超声换能器串联谐振等效电路

超声换能器动态支路阻抗 Z_1 为：

$$Z_1 = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) \quad (2)$$

当 R_1 、 C_1 、 L_1 满足谐振频率，称之为串联谐振，串联谐振频率 f_s 为：

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3)$$

由公式 (2) 可知，串联谐振频率 f_s 取决于动态电感 L_1 和动态电容 C_1 。

换能器总阻抗 Z 为:

$$Z = R + jX = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (4)$$

式中: R 为换能器阻抗实部, X 为换能器阻抗虚部, L 为换能器总的等效电感, C 为换能器总的等效电容。

在理想情况下, 当超声换能器在其谐振频率附近工作时, 动态支路的相位会趋近于零, 此时动态电容 C_1 的容性和动态电感 L_1 的感性相互抵消, 即 $\omega L_1 - 1/(\omega C_1) = 0$, 动态电路成为一个纯阻性电路。然而, 在实际应用中, 超声换能器的动态电容和动态电感并不是完全恒定的, 它们可能受到多种因素的影响, 其中一个重要的因素是温度。当超声换能器工作在不同温度下, 其谐振频率 f_s 也不尽相同。

2.3 匹配电路设计

在进行超声换能器阻抗匹配时需要设计相应的匹配电路对换能器进行阻抗匹配, 从而使通过换能器的电流与电压同相, 以提高发射换能器的驱动效率。由于超声换能器工作在固定的频率下, 而其谐振频率 f_s 会随着温度变化而改变, 所以在不同温度下超声换能器需要与之温度下相对应的阻抗匹配电路。

由 2.2 节了解到超声换能器的等效电路, 利用 LCR 测试仪测量不同温度下换能器的阻抗值, 通过 ADS (advanced design system) 软件对换能器等效电路进行阻抗匹配。其主要通过史密斯 (Smith) 圆图进行阻抗匹配, 图 5 为通过 Smith 圆图所得的 Π 型阻抗匹配电路^[9], 其中 ZS^* 为信号源的输出阻抗, 其阻抗值 $ZS^* = (50 + j0)\Omega$, ZL 为换能器阻抗, 通过 LCR 测试仪测量所得。 ZS^* 与 ZL 之间为超声换能器的匹配电路, 通过串并联电感和电容组成。

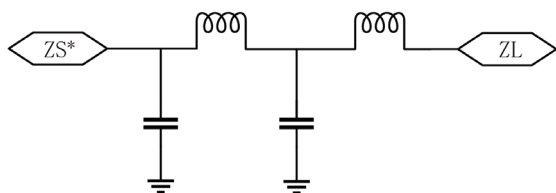


图 5 Π 型阻抗匹配电路

3 接收端信号处理电路

3.1 滤波电路设计

发射换能器发出的信号经过油基泥浆会衰减得非常厉害, 且伴有噪声, 此时接收换能器接收到的信号幅值非常小, 所以对于接收换能器接收到的信号, 首先通过带通滤波器进行滤波处理, 再进行放大。对于滤波器来说, 有源滤波器的阶数越高, 滤波效果更接近理想砖墙式滤波器^[10], 本方案选用二阶滤波器即可满足测试要求, 其原理图如图 6 所示。

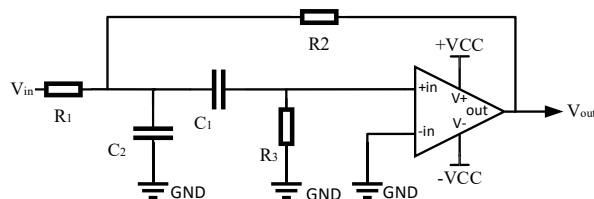


图 6 二阶带通滤波电路

图 6 中二阶带通滤波器中心角频率 ω_0 为:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_3 C} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (5)$$

式中: $C = C_1 = C_2$ 。

二阶带通滤波器中心频率 f_0 为:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (6)$$

二阶带通滤波器中心频率带通增益 $A_0 = 1$, 其通带带宽 BW_p 为:

$$BW_p = \frac{1}{C} \left(\frac{2}{R_3} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} (1 - A_0) \right) \quad (7)$$

3.2 增益可调放大电路设计

在工业应用中, 确保最终接收到的信号幅值可控是非常重要的, 在不同温度、介质等工作条件下, 信号可能会有所变化, 而这可能影响到接收到的信号幅值。为了应对这种情况, 可以采用增益可调放大电路的方法。因为在不同温度或者不同密度的介质下, 最终通过滤波电路所得的信号幅值会有所差异, 所以在信号滤波后, 可以通过增益可调的放大电路, 将最终的信号幅值维持在所需的范围内。

增益可调放大电路主要由两个器件组成, 第一部分为增益可调放大器, 其主要通过三个电压引脚 (VCOM、GPOS、GNEG) 进行控制, 其中 VCOM 为共模电压, GPOS 为正增益控制输入, GNEG 为负增益控制输入。GPOS 接 +5 V 电源, GNEG 接地 (0 V), VCOM 通过一个可变电压进行控制, 当 VCOM = +2.5 V 时增益为零, 当 $0 V < VCOM < +2.5 V$ 时增益为负, 当 $+2.5 V < VCOM < +5 V$ 时增益为正, 通过控制输入到 VCOM 引脚的电压即可控制对输入信号的增益。第二部分为电压输出数模转换器, 以十六位的 DAC8830 为例, 其提供范围从 0 V 到 V_{REF} 的单极输出电压, 其电压输出真值表如表 1。

表 1 单极性输出电压真值表

DAC 锁存内容 MSB LSB	模拟电压输出
1111 1111 1111 1111	$V_{REF} \times (65\ 535/65\ 536)$
1000 0000 0000 0000	$V_{REF} \times (32\ 768/65\ 536) = 0.5 V_{REF}$
0000 0000 0000 0001	$V_{REF} \times (1/65\ 536)$
0000 0000 0000 0000	0 V

增益可调放大电路原理图如图 7 所示。

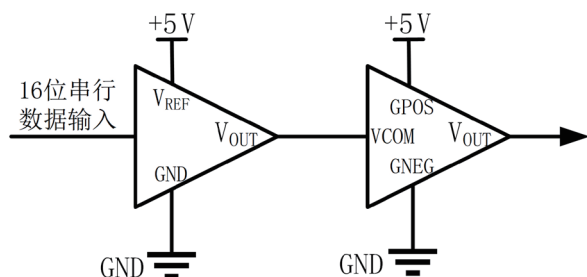


图 7 增益可调放大电路

4 上位机与 FPGA 控制

4.1 FPGA 控制模块

FPGA 控制主要有 5 个模块组成，整个信号处理方案通过 FPGA 与上位机进行控制，FPGA 控制框图如图 8 所示。

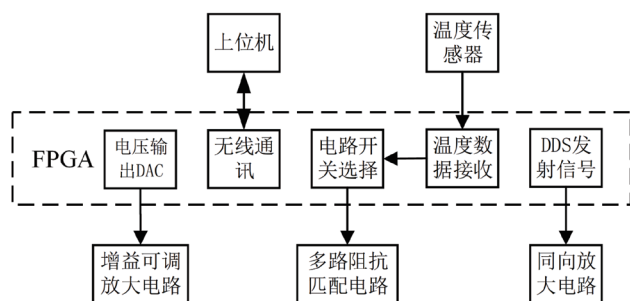


图 8 FPGA 控制框图

(1) DDS 函数信号发生器产生正弦波模块，该模块负责生成 DDS（直接数字合成）函数信号，产生固定频率的正弦波信号。

(2) 温度数据接收模块，该模块用于接收来自超声换能器工作环境的温度数据，通过温度传感器进行测量。

(3) 阻抗匹配电路开关模块，这个模块是根据温度数据，控制阻抗匹配电路的开关状态，从而选择对应温度下的阻抗匹配电路。

(4) 无线通信模块，该模块通过 ESP32 与上位机进行无线通信，可以显示温度、信号的波形、频率、幅值，也可以控制 DAC 锁存内容。

(5) V_{REF} 输出电压 DAC 控制模块。

首先由 FPGA 控制 DDS 函数信号发生模块产生固定频率的正弦波信号，正弦波信号在进入同向放大电路和阻抗匹配电路之前，温度传感器会测量超声换能器所处的环境温度，并向 FPGA 传递温度数据，FPGA 会根据接收到的温度数据控制阻抗匹配电路开关去选择相应温度的阻抗匹配电路。然后在信号接收端，信号会经过滤波电路和增益可调放大电路。最终的信号可以通过上位机进行观察，上位机通过无线通信模块发送命令给 FPGA 电压输出 DAC 控制模块，输出相应

的 DAC 锁存数据，控制 VCOM 的值，即改变增益可调放大电路的增益，从而实现上位机远程控制输出信号的幅值。

4.2 上位机

利用 LabVIEW 设计上位机，其结果显示如图 9 所示，其可以显示温度、信号的波形、频率、幅值，也可以通过调整四个旋钮改变 DAC 锁存数据来控制增益。

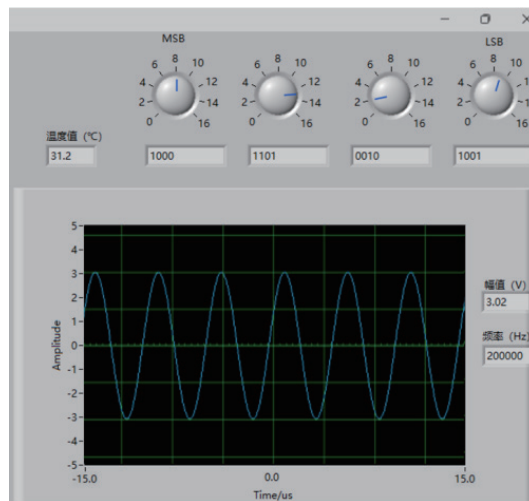


图 9 上位机结果显示

5 结论

本文介绍了一项基于超声换能器的激励信号与接收信号处理方案，主要由硬件电路、FPGA 和上位机三个关键部分组成。硬件电路包括发射端信号处理电路（包括同向放大电路和阻抗匹配电路）以及接收端信号处理电路（包括带通滤波电路和增益可调放大电路）组成。整个系统由 FPGA 和上位机协同控制，二者通过无线通信模块连接。该方案实现了实时传输温度，在上位机上显示信号的波形、频率、幅值的目的。同时，上位机具备向 FPGA 发送指令以控制硬件电路的功能，从而实现了远程控制。经过实验验证，该方案达到了预期效果。实验结果表明，在井下复杂的环境中，基于超声换能器的信号接收和处理方案有效提升了信号传输效率，为井下测量和检测提供了可行的信号处理方案。

参考文献：

- [1] 彭钟, 陈燕, 袁懋诞, 等. 高温压电陶瓷及高温超声换能器的研究进展 [J]. 中国陶瓷, 2021, 57(8): 10-16.
- [2] 许光, 吴培荣, 刘振君. 高频换能器功率疲劳分析 [J]. 声学技术, 2015, 34(3): 283-286.
- [3] 毛剑波. 压电陶瓷换能器在超声波测距仪中的应用 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2005(6): 696-698.
- [4] 赵树军. CMOS 轨到轨电压跟随器的设计及优化 [J]. 黑龙江工程学院学报 (自然科学版), 2013, 27(2): 61-64.

一种机载同构型双余度通道总线通信方法研究

王晓航¹ 罗德杰¹ 宋 丫¹

WANG Xiaohang LUO Dejie SONG Ya

摘要

余度通道控制管理技术是非常重要的设计方法,可以提高数据采集的控制与管理水平,在机载产品应用领域发挥非常重要的作用。同构型余度控制管理涉及到同构型设计下两个通道的数据交互,首先通过对双余度通信模式下,双通道总线不同的故障模式分析,实现机载双余度通道产品的总线通信设计,然后阐述了与上位机的数据交互流程,从数据流及通道故障切换角度对双余度通道切换方法进行了说明。

关键词

同构型; CCDL; 双余度; 总线通信

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.032

0 引言

各行各业的产品在设计要求上不尽相同,机载电子产品在机载电子系统中的应用有更高的要求,普通的单余度产品设计在安全性及可靠性等方面有不足之处。受到时间、空间、震动以及可能的外部恶劣环境影响,一些产品需要更高可靠性、更具安全性的系统以保障产品在系统长期复杂环境下的综合稳定性。面对以上问题,可以在产品设计上进行改进。双余度产品设计比单余度设计具有更高的可靠性及安全性,在以上几个方面更具有优势。

同构型双余度模型设计不仅具有双余度模型设计的安全性、可靠性等优点,同时也增加了系统容错能力^[1],可以实现系统故障重构功能,降低了产品设计的复杂度。CCDL交叉通道链路数据传输是双通道之间数据传输的有效手段^[2]。通过内部交叉传输通道进行数据交互,不仅可以实现机载产品的高性能内部数据共享,也可以对产品及系统内部的管控

逻辑、系统数据集成等能力进行提升。

1 同构型结构模型设计

1.1 余度技术

余度技术是同构型结构模型设计的基础,在硬件设计层面,通过使用完全相同的元器件、电路设计、模块设计以及结构设计,同一台产品实现双通道的硬件相同。除了设计层面的相似设计,在实际应用中,也应结合产品研制过程中的重量、体积、安装位置等要素,建立同构型架构,建设余度通道模型系统。

软件设计层面,可通过通道信号,对同一台产品的通道进行区分,以保证同一软件状态下,基于同构型双余度硬件产品在使用时的一致性。软件的余度处理一般分为冗余并列型或备份转换型^[3]。冗余并列型产品的余度管理技术指的是,在产品运行过程中,冗余的架构同时并行开展计算及数据处理工作,各自并行工作时相对独立,不会受到冗余通道的数据干扰,数据实时性较高。备份转换型产品在工作时

1. 航空工业西安航空计算技术研究所 陕西西安 710065

[5] 韩旭,章康宁,郑海祥.超声换能器的“电感-变压器”阻抗匹配模型研究[J].声学技术,2015,34(4):380-384.

[6] 汪明,姚成章.一种超声换能器阻抗匹配的研究[J].电声技术,2015,39(12):46-48.

[7] 徐晓伟.压电超声换能器的阻抗匹配分析[J].压电与声光,2014,36(5):745-747.

[8] 谈聪,董添奇.基于超声流量计的动态阻抗匹配系统设计[J].信息技术与信息化,2023(1):54-57.

[9] 孟恩林,刘桐,李丽华.基于匹配圆的一种 Smith 圆图

分区算法[J].计算机与数字工程,2018,46(10):1962-1965+2093.

[10] 马淑欣,杨璐霞,韩丙辰,等.水声信号处理中的高阶有源带通滤波电路设计[J].湖北大学学报(自然科学版),2023,45(4):593-599.

【作者简介】

孙文凯(1999—),男,湖北随州人,硕士研究生,研究方向:信号检测与控制。

(收稿日期:2023-08-03)