

应答器发射与控制电路的设计与实现

廖帆, 朱代柱, 杨文生

(上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 应答器通常在水下测量、定位与导航等领域发挥着不可或缺的作用, 针对某项目对水下测量用应答器在长效性、实时控制等方面的需求, 设计了应答器的发射与控制电路。发射电路采用集成音频功率放大器 TAS5412 作为主体电路, 并结合换能器的阻抗特性以及调谐匹配方法, 实现宽带高效匹配; 通过单片机以及 I²C 总线对发射机的工作状态进行控制。该应答器既可根据遥控指令与参数, 选择预存信号波形进行应答, 也可以实时计算应答的信号波形, 使用灵活方便, 应答声源级可控。湖上和海上试验的结果表明, 该应答器发射与控制电路工作稳定可靠, 满足长效使用的工程应用需求。

关键词: 应答器; 水下测量; 发射电路; 控制电路

中图分类号: TB565

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-04-0391-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.006

Design and implementation of the transmitting and control circuits of underwater acoustic transponder

LIAO Fan, ZHU Dai-zhu, YANG Wen-sheng

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: Underwater acoustic transponder usually plays an indispensable role in underwater measurement, positioning and navigation. For the demand of a long-term real-time control underwater acoustic transponder, a set of transmitting and control circuits is designed. The transmitting circuit uses the D-class power amplifier as a main circuit and combines the impedance characteristic of transducer and tuning matching method to achieve high efficient broadband matching, and the working state of the transmitting circuit is monitored by single-chip microcomputer and I²C-to-USB converter. In this way, the transponder can select the stored signal waveform according to the remote control instruction and parameters to respond, and can also calculate the signal waveform in real-time. This transponder is very flexible and easy to control the acoustic source level. The results of lake and sea trials show that the transmitting and control circuits of the transponder are stable and reliable, can meet the needs of long-term engineering application.

Key words: transponder; underwater acoustic measurement; transmitter circuit; control circuit

0 引言

随着水声技术的发展, 我国海洋科学研究和工程应用不断地向深海、远海快速发展, 尤其是对水下目标定位的应用越来越广泛。应答器常常作为模拟目标, 在水下测量、定位与导航等领域发挥着不可或缺的作用^[1]。发射电路是水声应答器的核心部分, 其性能优劣直接决定了应答器的作用距离与工作时间^[2]。此外, 因应答器的工作地点远离试验平台, 为了便于水下布放与回收, 要求其体积小、工作时间长、作用距离远、可远程实时遥控。

本文针对项目实际的应用需求设计了一款以集成音频功率放大器 TAS5412 作为主体的发射电路, 通过单片机以及 I²C 总线对发射机的工作状态进行实时控制^[3-4], 并通过湖上试验与海上试验对该应答器进行测试, 验证了其可靠性与长效性。

1 应答器设计

应答器主要被用来模拟水下运动目标, 通过母船发射的信号, 做出相应的应答, 可远程遥控并长效工作^[5-7]。该应答器主要由供电模块、主控模块、功放模块、匹配模块、接收模块、收发合置模块以及收/发换能器组成。设备组成框图如图 1 所示。图 1 中, I²C 为两线式串行总线(Integrated Circuit, I²C); CPU 为中央处理器(Central Processing Unit, CPU); DC-DC 为直流-直流转换器(Direct Current-

收稿日期: 2018-04-09; 修回日期: 2018-05-17

作者简介: 廖帆(1989-), 男, 湖北汉川人, 硕士, 工程师, 研究方向为水声电子工程。

通讯作者: 廖帆, E-mail: 710272057@qq.com

Direct Current Converter, DC-DC)。

由于应答器采用锂电池供电,工作时远离试验平台,布放和回收很不方便。为了保证应答器高处理速度、低功耗目的以及长时间有效地在水下工作,根据项目使用需求选择 TI 公司的 TMSF28335 板作为该应答器的主控板。该主控板具备强大的数字逻辑处理功能,通过该主控板实现无线控制、为功放电路提供信号源以及 I²C 控制。

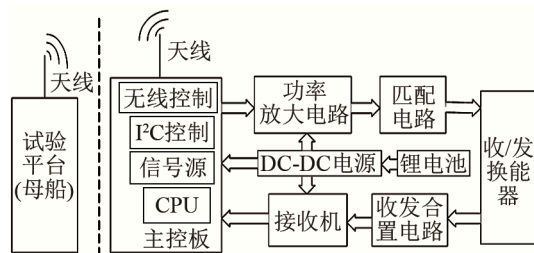


图1 应答器总体设计框图

Fig.1 Overall block diagram of the transponder

1.1 发射与匹配电路设计

发射电路作为应答器的重要组成部分,其性能参数直接决定了应答器的工作性能。发射电路的主要构成是功率放大器。传统的水声功率放大器多采用甲乙类或者乙类功放,此类功率放大器的缺点是体积大、效率低、发热严重,一般不应用在水下应答器中。

本文选用工作效率较高的推挽式 D 类功率放大器,采用集成音频功率放大器 TAS5412 作为发射电路的主电路,其具有体积小、效率高、可长时间工作等特点,并结合换能器的阻抗特性,实现宽带高效匹配。针对项目需求,应答器的主要技术指标如下:

发射声源级: 150~180 dB, 源级控制精度 1 dB;

电源供电: 锂电池供电 250 W, 输出电压 24 V;

在主动发射声呐中,发射声源级 L_s 主要取决于换能器的轴向声功率,它与加到换能器上的电功率 P 、换能器的电声转换效率 η 以及发射指向性指数或聚集系数 D_1 的关系为:

$$L_s = 170.5 + 10 \lg(\eta P) + D_1$$

其中, P 的单位为 W。

设发射换能器的电声转换效率为 40%, 指向性指数 $D_1 = 3$ dB, 由此可以计算应答器的发射电路所需电功率为 112 W。

本文选用 TI 公司生产的 TAS5412 作为发射电路的主电路。TAS5412 是专为音频功放设计的单片集成的 D 类功率放大器,用 24 V 电源时,在 2 Ω 负载下,采用并行桥接模式(即将两通道的输入、输

出并联)最大输出功率可达 150 W,在散热环境良好的条件下可长时间工作,不仅具有效率高、体积小、散热快的特点,而且内部集成了调制单元、驱动单元以及各种保护单元,大大地增加了系统稳定性。此外, TAS5412 功放芯片内部集成保护电路,本文通过单片机采集其内部输出的工作状态信息,完成对发射电路的状态监测和保护。发射电路组成框图如图 2 所示。图 2 中, DSP 为数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)。

TAS5412 是一个双输入双输出的音频功率放大器,为了满足发射声源级的要求,在设计时将其输入、输出的双通道进行并联,从而提高其输出功率。同时,在功放输出与匹配输入之间增加了一个 1:19 的变压器,通过变压器与电感共同组成的匹配网络,使功放的输出阻抗与换能器的负载阻抗相匹配,以提高发射机的发射功率。在散热方面,结合应答器圆筒外形结构特征,采用热传导方式,将铝质散热块设计成楔形结构,内部采用螺杆收紧斜面,将散热块与筒壁、功放芯片紧密贴合,从而达到有效的散热效果。

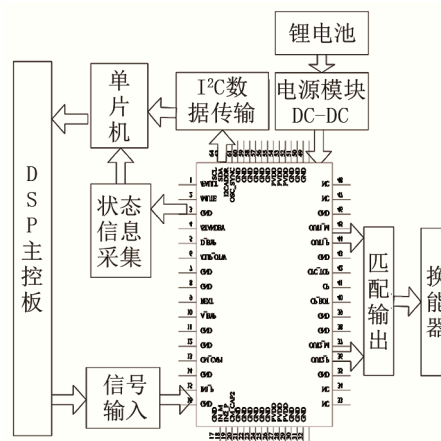


图2 发射电路组成框图

Fig.2 Block diagram of the transmitting circuit

1.2 遥控设计

应答器在使用时远离试验平台,通过 Labview 软件设计了遥控操作界面, TI 公司 TMSF28335 板作为应答器的主控开发平台主要完成的是对发射电路的信号输入、状态采集,以及远程操作的参数控制。应答器在工作时通过应答器参数控制界面可完成对发射机输入信号的设置。应答器参数控制界面可完成对已存储信号的声源级、信号类型、信号频率、信号的脉宽以及应答器处于应答模式状态下的延时量进行远程操作控制。

该应答器既可以利用已存储的信号波形进行应答,也可以根据遥控参数实时计算信号波形进行

应答。

由于该应答器使用时远离试验平台，而且处于水下，工作时不易观察监控其工作状态，为了便于获取水下应答器的工作状态，该应答器设计了工作状态自检电路。发射电路中的功放芯片 TAS5412 集成了 I²C 数据接口总线模块，可通过 I²C 总线将自检信息下发，并通过 I²C 总线将自检信息状态返回到 PC 机，供操作人员监控其水下工作状态。

应答器的功率放大电路与换能器的阻抗匹配电路不可能保证在同一信号幅度下每一个频点的输出声源级保持在一条很平坦的直线，即存在 3 dB 的起伏。为使显控界面中设置的发射声源级与应答器实际发射声源级保持一致，在设计应答器显控操作界面时，通过 Matlab 中的曲线拟合函数 $y_1 = \text{polyfit}(x, y, N)$ ，使得在同一信号幅度下，保证每一个频率点的输出声源级与实际设置的声源级保持一致。采用曲线拟合方法使应答器的应答声源级更加精准，满足工程测试的需求。

1.3 收发合置电路设计

本文中的应答器通过收发合置的换能器来进行信号的应答，收发合置电路如图 3 所示，其工作原理如下：

(1) 当需要应答器来发射信号时，功放 TAS5412 输出通过变压器以及匹配网络后输出给换能器，此时二极管 D1、D2 导通，且将接收机两端的电压被钳位在 0.7 V 左右，功放经匹配输出后的负载等效于 R1、R2 串联后与换能器并联，由于 R1、R2 串联后的阻值远远大于换能器的内阻，因此，功放的输出功率基本上都加载在换能器两端；

(2) 当需要应答器接收信号时，此时发射电路停止工作，二极管 D1、D2 截止，换能器两端的负载相当于 R1、R2 与接收机串联，然而接收机的内阻远远大于(R1+R2)的阻值，因此，换能器接收到的信号大部分加载在接收机两端。

其中，D3 与 D4、D5 与 D6 反向并联，其作用是可防止发射信号造成接收机电路的阻塞现象。阻塞现象是当发射大功率信号时，有少部分信号会通过 R1、R2 后加载在接收机两端，而在接收机的输入端一般会添加隔直电容，这少部分信号将对接收机的隔直电容充电。当发射脉冲结束后，隔直电容存储的电能量释放需要一段时间，放电期间会导致模拟放大器的工作点发生偏移，严重时会使模拟电路的工作点进入非线性区，从而导致接收机在这段时间内不能正常工作，而二极管 D3 与 D4、D5 与 D6 反向并联恰好可以将这部分储存的信号钳位在

二极管导通的电压值，使得隔直电容上的能量被限制在有限值上，缩短电量释放时间，从而有效地阻止接收机阻塞现象的发生。

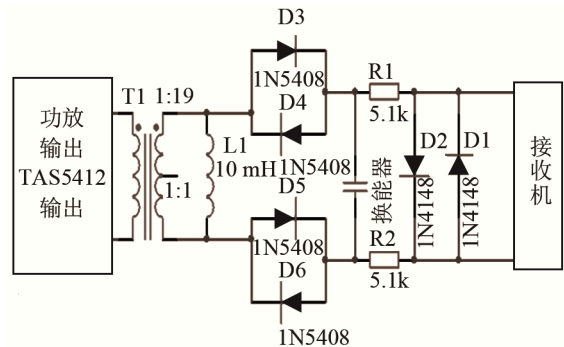


图 3 收发合置电路图

Fig.3 Schematic diagram of the transceiver circuit

2 湖试与海试结果

项目组进行了湖上试验，将应答器的换能器和标准水听器均吊放于水下 30 m 处，两者相距 1.5 m，测得应答器在同一个输入信号幅度情况下不同频率点的声源级，如图 4 所示。

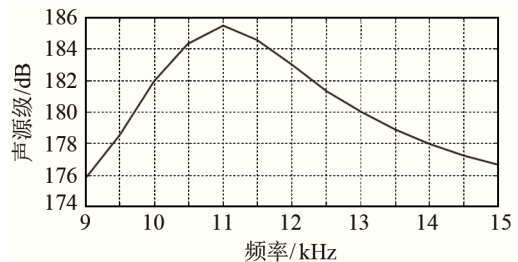


图 4 同一输入信号幅度，不同频率下的声源级

Fig.4 The sound source levels for the same input amplitude and different frequencies

测得应答器在不同频率下的最大声源级如图 5 所示。

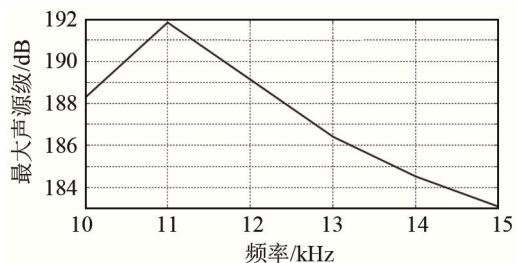


图 5 不同频率下的最大声源级

Fig.5 The maximum sound source levels at different frequencies

为了验证应答器发射声源级的线性度，将信号源的幅度按 3 dB 的步长逐级增加，图 6 为应答器在某一频率下，发射声源级与输入信号幅度之间的关系。

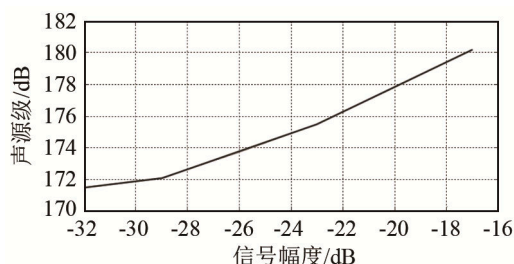


图6 同一频率下, 发射声源级与输入信号幅度的关系
Fig.6 The sound source levels for the same frequency and different input amplitudes

以上测量结果表明, 本文设计的应答器在中心频率处最大声源级为 192 dB, 在工作频带 5 kHz 内源级不小于 183 dB、且工作线性度良好, 以上指标结果满足项目的应用需求。

该应答器在湖上试验后又随项目参加了海上试验, 试验结果表明, 该应答器在远离母船工作时, 可远程遥控应答, 工作长效、稳定, 布放与回收方便, 满足工程应用需求。此外, 经过多次回收和布放以及恶劣的工作环境的试验, 其发射电路工作状态依旧稳定, 使其工程可靠性得到了进一步考核。

3 总 结

应答器的发射电路采用集成的音频功放, 通过设计外围滤波电路、采集电路、隔离电路以及单片机状态采集监测电路等使得发射电路更加稳定可靠, 实现了音频功放向声呐发射设备的转化应用。此外, 集成音频功放相较传统分立器件搭建的功率放大器不仅在稳定性和可靠性方面有明显优势, 而且其电路板尺寸缩减近一半, 大大地节省了安装空间, 缩小了其外部尺寸结构。

采用软件化的界面设计保证了应答器控制电路的操作灵活方便, 适用性强, 可满足更广泛的工程应用需求。

本文所设计应答器在自主信号检测与分析、参数解算、应答波形生成、指令遥控等方面性能稳定

可靠, 可长效工作, 布放灵活方便, 满足工程应用需求, 发射电路和控制电路在其中得到了充分的验证。

参 考 文 献

- [1] 陈可钦, 王永恒. 一种水声应答器发射电路的设计与实现[J]. 通信电源技术, 2013, 30(3): 41-44.
CHEN Keqin, WANG Yongheng. Design and implementation of a small and high efficient underwater acoustic transmitter[J]. Telecom Power Technology, 2013, 30(3): 41-44.
- [2] 王士龙, 傅翔毅, 施国全. 宽带声呐发射机匹配电路的设计与实现[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 368-370.
WANG Shilong, FU Xiangyi, SHI Guoquan. The design and realization of Broadband Sonar transmitter's matching circuits[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(3): 368-370.
- [3] 杨家庚, 张玉涛, 马锦垠. 单片机和数字信号处理器实现的水声应答机[J]. 电子测量技术, 2013, 36(8): 89-92.
YANG Jiageng, ZHANG Yutao, MA Jinyin. Acoustic responder design based on MCU and DSP[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(8): 89-92.
- [4] 杨家庚, 孙昕. MSP430 单片机在水声应答释器中的应用[J]. 电子设计工程, 2013, 21(14): 156-158.
YANG Jiageng, SUN Xin. Application of MSP430 MCU in acoustic release responder[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(14): 156-158.
- [5] 白鑫, 钱志博, 陈洁. 一种水声应答器电子系统的设计[J]. 电子测量技术, 2009, 32(10): 8-11.
BAI Xin, QIAN Zhibo, CHEN Jie. Design of underwater acoustic transponder electronic system[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(10): 8-11.
- [6] 王建国. 水声释器硬件电路设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
WANG Jianguo. The design and realization of sonar releaser hardware circuitry[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [7] 李文虎. 超短基线定位系统水声应答器的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
LI Wenhui. Design and implementation of transponder in ultra short base line positioning system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [8] 曹卫平, 梁兴东. 应用于匹配网络的负阻抗变换器研究[J]. 微波学报, 2012, 28(4): 85-96.
CAO Weiping, LIANG Xingdong. Study on negative impedance converter used in matching network[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(4): 85-96.