

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002923

非接触式超声波流量计收发电路的设计与性能分析*

贾惠芹 王成云 张铁煜 白永鑫
(西安石油大学 电子工程学院 西安 710076)

摘 要:增大信噪比是提高非接触式超声波流量计测量精度的有效措施。但通过提高发射电压来增大信噪比,会损坏超声波传感器与接收电路,也会加剧收发电路的相互干扰。设计了一种针对复合管道流量测量用的超声波收发电路:在发射电路中以中轴变压器替代阻尼电阻,在接收电路中采用限幅桥电路来保护接收电路,并基于匹配电阻法来平衡收发电路。实验结果表明,设计的发射电路能够提高发射电压、减小放电时间,空载时对输出电压可放大 13.85 倍,带载时对输出电压可放大 4.5 倍,同时,接收电路能够有效抑制收发电路的相互干扰,并提高接收支路功率,接收电路对 5 V 以下信号的传输效率超过了 90%。把该电路应该到非接触式超声波流量计中,对难于穿透的复合管道中的流体进行多次重复测量,测试结果表明,该流量计的线性度和重复性都满足实际流量测量要求。

关键词:超声波流量计;大管径;发射电路;接收电路;中轴变压器;限幅桥;干扰

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Design and performance analysis of transceiver circuit of non-contact ultrasonic flowmeter

Jia Huiqin Wang Chengyun Zhang Tieyu Bai Yongxin
(School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710076, China)

Abstract:The increase of signal-to-noise ratio (SNR) is an effective measure to improve the measurement accuracy of an ultrasonic flowmeter. However, the increase of transmission voltage for higher SNR could damage the ultrasonic sensor and the receiving circuit; it also introduces higher mutual interference between the transmitting and receiving circuits. Proposing an ultrasonic transceiver design for flow measurement of composite pipes: In the transmission circuit, a central-axis transformer instead of a damping resistor is used. In the receiving circuits, a limiting bridge circuit is employed for protection. The experimental results showed that the optimized transmission circuit proposed in this paper could increase the transmission voltage and reduce the discharge time. The output voltage is amplified by 13.85 and 4.5 times without and with loads, respectively. At the same time, the receiving circuit can effectively suppress the mutual interference and improves the power of the receiving branch. The transmission efficiency of the receiving circuits for signals below 5 V exceeds 90%. The circuit design was applied to a non-contact ultrasonic flowmeter, and the fluid in the composite pipeline was measured. The test results showed that the linearity and repeatability of the flowmeter had met the actual requirements of the flow measurement.

Keywords:ultrasonic flowmeter; big diameter; transmission circuit; receiving circuit; central transformer; limiting the bridge; interference

0 引 言

基于超声波技术设计的流量计以非接触、安装方便、操作简单和成本低等特点目前在流量测量中得到了应

用^[1]。超声波流量计的测量原理主要包括时差法、相差法、频差法和多普勒法^[2-3]。其中,时差法应用最多、效果最好^[4-5]。但超声波信号在传播过程中受传输介质的影响较大,要透过附有多层衬胶、管径在 1 m 以上的复合管道、以及复杂流体衰减会更大^[6-9]。为了减小传播过程

中的衰减需要增加超声波的发射强度。目前增加超声波发射强度的主要方法有直接电源激励法、电容瞬间放电法和电感瞬间放电法等,但都存在瞬间发射的高压对电源和接收处理电路有瞬态冲击,因此需加限幅保护电路防止损坏^[10-11],同时收发电路之间相互干扰严重,因此导致测量精度和稳定性受到影响。为了提高超声波传播时间测量精度,可以利用信号延迟与数字增益的线性关系,进行增益补偿^[12]。詹湘琳等^[13]运用基尔霍夫电压定律推导了超声波发射电路的电容充放电时间,分析了电容电阻对发射电路的影响,确定了阻容参数的选择方法,得出可通过负载电阻(也被称为阻尼电阻)对脉冲超声波的长度进行调整的方法。王晓蕊等^[14]推导了电容充放电时间,并运用极限法分析了发射电路中电容电阻对充放电的影响。孙凌逸等^[15]设计了一种利用电感储能产生高功率脉冲的发射电路,同时设计了隔离电路和电压跟随电路,降低了发射电路和其它电干扰信号对接收电路的影响。杨波等^[16]提出的一种通过对激励和接收电路等效阻抗进行对称性设计提高测量系统互易性的测量电路,能够大幅降低零点误差并抑制温度漂移,使得流量测量结果更加准确稳定。综上所述,现有的文献主要是对电容式脉冲发射电路的电容充放电时间进行推导计算,以及各种形式超声波发射电路工作原理的介绍,大多都是基于超声波传感器仅用于发射或接收,并且所设计的超声波传感器的谐振频率在几十千赫兹以下。另外阻尼电阻一般都在几百欧姆,会增大电容放电时间。

本文旨在设计一种针对由多种材料组成的复合管道、且管道是 1 m 以上的大管径,用于测试多相流的流量检测用的超声波收发电路。在超声波发射电路用中轴变压器代替阻尼电阻输出高电压脉冲信号。因中轴变压器的阻值小,对放电时间影响小,还可以实现阻抗变换,使负载电阻上获得足够大的电压,并且当匹配合理时,负载可以获得足够大的功率,从而实现耦合升压和隔离接收反馈干扰。在超声波接收电路中则采用了限幅桥电路。对中高频下的发射电路、接收保护电路以及收发电路同时并联于超声波传感器时的相互干扰做了分析,设计了干扰消除电路,增加了接收信号的信噪比。

1 超声波流量计的基本结构及工作原理

超声波流量计的收发电路基本结构如图 1 所示。从图 1 可以看出,该电路主要由发射电路、接收电路和控制单元组成。发射电路用于输出一个驱动信号,激励超声波传感器进行电声转换,其包括脉冲输出电路、脉冲发射电路和收发匹配网络;接收电路用于接收超声波传感器接收到的信号,其由接收限幅桥、前置放大器、滤波和整形单元组成;控制单元用于控制超声波发射信号和接收

流量处理结果,并切换收发支路分时工作。

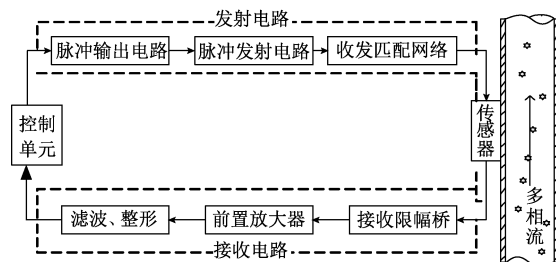


图 1 超声波流量计的收发电路基本结构

Fig. 1 Basic structure of transmitting and receiving circuit of ultrasonic sensor

发射电路的工作原理如下:通过脉冲输出电路产生一定频率的脉冲信号,经过脉冲发射电路将脉冲信号升压放大加载到超声波传感器,经过逆压电效应产生超声波信号。而收发匹配网络用于平衡收发支路阻抗,降低收发支路对彼此的影响。

对于接收电路,传感器相当于信号源,利用压电效应将超声波转换为电信号;接收限幅桥则能抑制高电压信号;前置放大器用于放大微弱的超声波信号,再经过滤波器滤除噪声信号;最后经过整形电路将余弦波转换为方波作为控制单元的中断信号。

2 超声波信号的收发电路设计理论

2.1 发射电路的设计原理

本文设计的超声波发射电路是基于场效应管导通或截止特性、二极管单向导电性和电容充放电特性,通过控制脉冲信号的高低电平控制场效应管截止(或导通)构成电容充(或放)电网络,从而实现脉冲信号放大升压的作用^[17-18]。脉冲发射电路如图 2 所示。

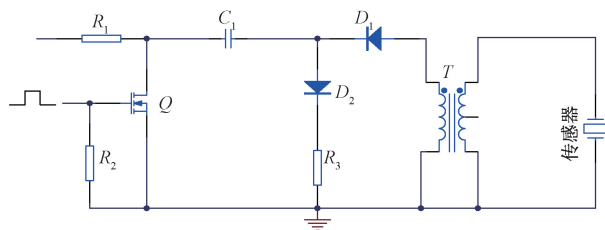


图 2 脉冲发射电路

Fig. 2 Pulse transmitting circuit

图 2 的脉冲发射电路是利用电容充放电特性,产生瞬间高压脉冲作用于超声波传感器,使压电陶瓷形成“逆压电效应”释放超声波信号。当图 2 的场效应管 Q 处于截止状态时,由 R_1 、 C_1 、 D_2 和 R_3 组成的网络对电容 C_1 进行充电;当场效应管 Q 处于导通状态时,由 C_1 、 Q 、 T 和 D_1

组成的网络对电容 C_1 放电, 输出瞬间负脉冲, 同时经中轴变压器 T 变比进一步升压, 中轴变压器改变负脉冲极性使其次级输出正脉冲。

1) 发射电路输出特性分析

分析发射电路时, 需要对电路做等效处理, 功率开关可等效为一个理想开关 K 和电阻 R_4 的串联。根据二极管的原理, 图 2 中充电回路中的二极管 D_1 、放电回路中的二极管 D_2 相当于图 3 的电阻 R_5 、 R_6 [19], 中轴变压器的原边可等效为 R_L 。脉冲发射等效电路如图 3 所示。

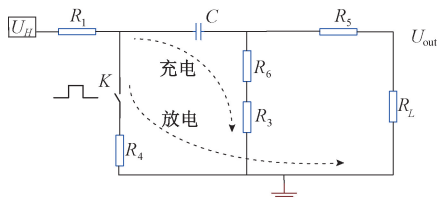


图 3 脉冲发射等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of pulse emission

充电过程: 根据基尔霍夫电压定律和充电回路电压方程, 可得出电容 C 充电电压 U_c 与时间 t 的关系式如式 (1) 所示。

$$U_c = U_H \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_3 + R_6} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (1)$$

式中: U_H 为直流电源电压, 电容充电时间常量 $\tau_1 = C(R_1 + R_3 + R_6)$ 。

当充电时间足够长, 即 $t \rightarrow \infty$ 时, 电容电压 $U_c \rightarrow U_H$, 可得充电时间 t 如式 (2) 所示:

$$t = C(R_1 + R_3 + R_6) \left[\ln \left(1 + \frac{R_3 + R_6}{R_1} \right) \right] \quad (2)$$

放电过程: 根据基尔霍夫电压定律和放电回路电压方程, 可得出电容放电方程如式 (3) 所示。

$$C(R_4 + R_L + R_5) \frac{dU_c}{dt} + U_c = \frac{R_4}{R_1 + R_4} U_H \quad (3)$$

其中, 放电时间常量 $\tau_2 = C(R_4 + R_L + R_5)$ 。解微分方程 (3) 得式 (4)。

$$U_c = \frac{R_4}{1 + R_4} U_H - \frac{R_1}{R_1 + R_4} U_H e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4)$$

中轴变压器的原边输出电压 U_{out} 如式 (5) 所示。

$$U_{out} = R_L I_C = R_L C \frac{dU_c}{dt} \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5) 得中轴变压器的原边输出电压 U_{out} 如式 (6) 所示。

$$U_{out} = - \frac{R_1 R_L}{(R_4 + R_L + R_5)(R_1 + R_4)} U_H e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (6)$$

若忽略中轴变压器自身损耗, 理想状态下, 输入功率

等于输出功率, 故有式 (7)。

$$\frac{-U_{out}}{U'_{out}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

式中: U_{out} 和 U'_{out} 分别为中轴变压器的原边和副边电压; N_1 和 N_2 分别为中轴变压器原边和副边匝数。

将式 (6) 代入式 (7) 得中轴变压器副边的输出电压如式 (8) 所示。

$$U'_{out} = \frac{N_2}{N_1} \frac{R_1 R_L}{(R_4 + R_L + R_5)(R_1 + R_4)} U_H e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (8)$$

得放电时间 t 如式 (9) 所示。

$$t = C(R_4 + R_L + R_5) \left[\ln \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) \right] \quad (9)$$

中轴变压器原边内阻 $R_L = 3 \Omega$ 很小, 对放电时间 t 影响较小, 一般阻尼电阻 $R_L \approx 500 \Omega$; 中轴变压器还可以谐振升压, 显然相比采用阻尼电阻, 中轴变压器缩短了放电时间 t , 增大了输出电压 U'_{out} 。而且中轴变压器在实现阻抗变换的同时, 使负载获得了更大的电压和功率。

2) 发射电路的输出响应分析

本文采用传递函数法分析发射电路的输出响应。发射电路 s 域等效电路如图 4 所示。

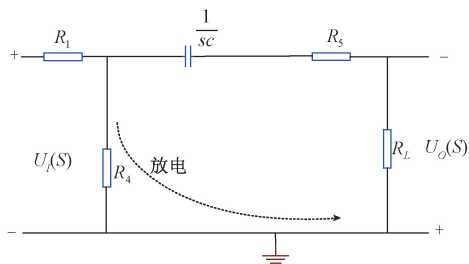


图 4 s 域放电回路等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of s -domain discharge circuit

根据基尔霍夫电压定律, 得到 s 域放电回路输出与输入关系如式 (10) 所示。

$$U_O(s) = \frac{R_4 // \left(\frac{1}{sC} + R_5 + R_L \right)}{R_1 + R_4 // \left(\frac{1}{sC} + R_5 + R_L \right)} U_I(s) \frac{R_L}{\frac{1}{sC} + R_5 + R_L} \quad (10)$$

放电回路传递函数 $H(s)$ 如式 (11) 所示。

$$H(s) = \frac{U_O(s)}{U_I(s)} = \frac{[R_4 // \left(\frac{1}{sC} + R_5 + R_L \right)] R_L}{[R_1 + R_4 // \left(\frac{1}{sC} + R_5 + R_L \right)] \left(\frac{1}{sC} + R_5 + R_L \right)} \quad (11)$$

将式 (11) 整理化简得式 (12)。

$$H(s) = \frac{R_4 R_L C s}{R_1 + R_4 + [(R_1 + R_4)(R_5 + R_L) + R_1 R_4] C s} \quad (12)$$

对式(12)的传递函数进行傅里叶分析,取 $s = j\omega$ 得式(13)。

$$H(j\omega) = H(s) \big|_{s=j\omega} = \frac{R_4 R_L C j\omega}{R_1 + R_4 + [(R_1 + R_4)(R_5 + R_L) + R_1 R_4] C j\omega} \quad (13)$$

式(13)的幅频特性 $|A(j\omega)|$ 和相频特性 $\varphi(j\omega)$ 分别如式(14)和(15)。

$$|A(j\omega)| = \frac{R_4 R_L C \omega}{\sqrt{(R_1 + R_4)^2 + [(R_1 + R_4)(R_5 + R_L) + R_1 R_4] C^2 \omega^2}} \quad (14)$$

$$\varphi(j\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{[(R_1 + R_4)(R_5 + R_L) + R_1 R_4] C \omega}{R_1 + R_4}\right) \quad (15)$$

式(14)中,当 $\omega \rightarrow \infty$, $|A(j\omega)| \rightarrow \frac{R_4 R_L}{((R_1 + R_4)(R_5 + R_L) + R_1 R_4)}$ 。电路参数 $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 13 \text{ m}\Omega$, $R_5 = 50 \text{ }\Omega$, $R_L = 3 \text{ }\Omega$, $C = 0.22 \text{ }\mu\text{F}$, 则 $|A(j\omega)| \approx 3.678 \times 10^{-7}$ 故得发射电路的幅频特性曲线如图5所示。式(15)中,当 $\omega = 0$ 时, $\varphi(j\omega) = \frac{\pi}{2}$, $\omega \rightarrow \infty$ 时, $\varphi(j\omega) \rightarrow 0$ 。故得相频特性曲线如图6所示。

由图5和6所示的放电回路传递函数的幅频特性和相频特性曲线可以看出,图2所示发射电路对高频信号适用性较好。

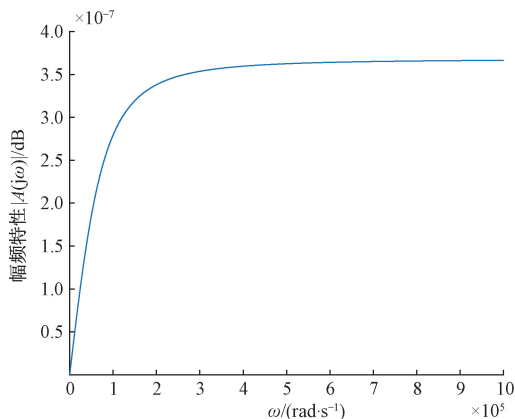


图5 幅频特性曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic curve

2.2 接收限幅桥电路设计原理

1) 接收限幅桥电路设计

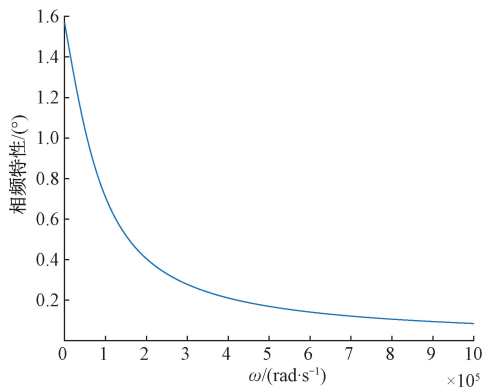


图6 相频特性曲线

Fig. 6 Phase frequency characteristic curve

若发射电压过高对接收处理电路会造成损坏和引入严重干扰,因此需要限幅处理,接收限幅桥电路如图7所示。此部分电路设计关键是要满足高抑制性和高传输效率,即对高电压抑制效果好同时对微弱接收信号传输效率高。而本文设计的接收限幅桥通过互感导通将发射电压和接收信号幅值控制在5V以内,从而实现对后续接收处理和其他电路的保护。经过测试,此接收限幅桥电路能够抑制1kV高电压,并且对3V以下接收信号传输效率高达99%以上。

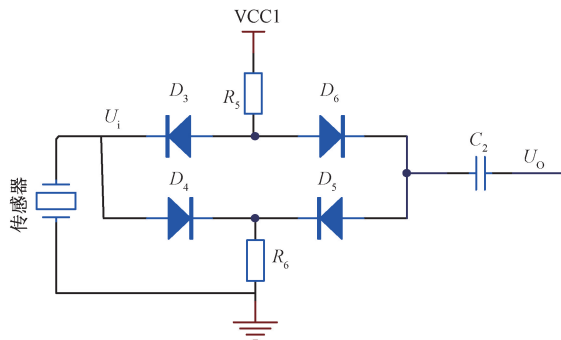


图7 接收限幅桥电路

Fig. 7 Receive limiting bridge circuit

在中频高压电路中二极管工作速度和耐压值是影响此电路特性的因素。若工作速度缓慢则会影响桥式互感传输效率,造成有用信号严重损失,导致接收信号微弱后续电路无法正常应用;若其耐压值不够会发生二极管反向击穿失去限幅功能,从而损坏整体电路。

图7利用开关二极管的开关特性以及非线性工作区的工作特性,通过调节图7中 R_5 和 R_6 阻值可调整桥互感效率,从而提高有效信号传输效率^[20]。此外电阻耐压值也很重要,在实验中发现如果电阻额定功率过低,当瞬间发射电压到1kV时会改变电阻特性导致电阻损坏,最终影响接收限幅桥电路性能。

2) 二极管工作频率和耐压值的设计

图7所示的接收限幅桥电路中,设二极管最大反向击穿电压为 U_{BR} ,而通常最大反向工作电压 U_R 是最大反向击穿电压 U_{BR} 的 $1/2$ 。当超声波传感器用做发射传感器时,脉冲发射电路最终输出电压为 U'_{out} 。此时若 $U'_{out} > V_{CC1}$,则接收限幅桥电路中二极管 D_3 、 D_5 截止; D_4 、 D_6 导通; D_4 两端电压 $U_{D4} = U'_{out} - U_D$,其中 U_D 是二极管导通压降; D_3 外接反向电压为 U'_{out} ,因此二极管最大反向击穿电压 $U_{BR} > U'_{out}$,否则二极管会被反向击穿而损坏。

设二极管最高工作上限截止频率为 f_M ,若信号实际频率 $f_s > f_M$,由于二极管结电容的作用,将不能很好地体现其单向导电性。

2.3 收发电路间干扰耦合分析与阻抗匹配

1) 收发电路间干扰源分析

超声波传感器的发射电路和接收限幅桥电路理论上分时实现收发功能,但是由于存在一些储能器件、切换时间间隔和其他回路,收发部分彼此之间仍然存在干扰,严重影响其正常工作。实现此电路最大难点是如何平衡高压脉冲发射与接收限幅桥之间对彼此功能的干扰问题。

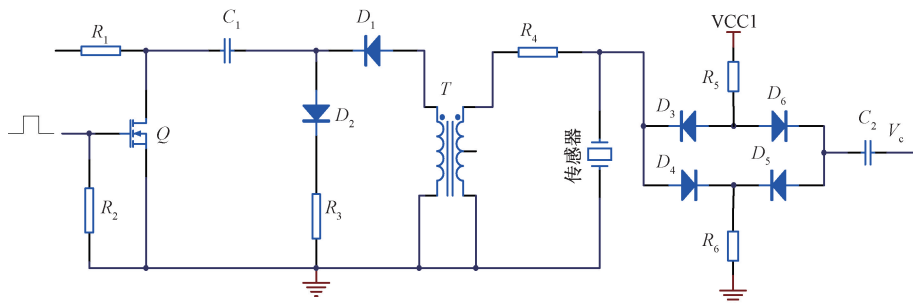


图8 同一超声波传感器收发电路

Fig. 8 Transceiver circuit of the same ultrasonic sensor

在超声波传感器做发射时,电阻 R_4 会对发射电压产生分压。将传感器等效为电阻 R'_0 ,简化后的发射电路如图9所示。

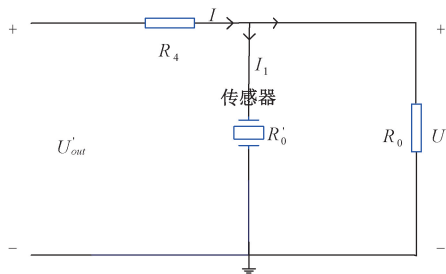


图9 发射等效电路

Fig. 9 Transmitting equivalent circuit

实验所用超声波传感器内阻为 $R'_0 = 500 \Omega$, $R'_L = 15 \Omega$, $R_0 = 1.011 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 0.997 \text{ k}\Omega$ 。

题。要想利用同一传感器分时复用实现收发功能,通常最简单最直接方法是利用模拟开关切换控制,或者使用光电耦合器和继电器等。首先,要同时满足 1 kV 高压、 1 MHz 中频和 $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温性能指标的模拟开关、光电耦合器和继电器很困难;其次,脉冲发射电路放电网络电流方向与超声波传感器部分振荡接收电流方向一致,故无法利用二极管单向导电性等原理抑制发射网络对接收性能的干扰。

2) 收发电路的阻抗匹配设计

由于器件选取困难和电流复杂性,无法继续使用模拟开关、光电耦合器、继电器和二极管抑制平衡干扰。本文提出了一种平衡干扰的方法,其电路如图8所示。图8电阻 R_4 是有效降低干扰的关键,其原理是根据电流与阻抗的关系,即并联分流原理。因为当超声波传感器左右两端阻抗不平衡时,电流会尽量走阻抗相对小的支路,而 R_4 恰恰是增大了超声波传感器左端支路阻抗,使绝大部分接收电流通过右端支路。匹配 R_4 阻值可使收发效率最大,最大程度抑制平衡干扰,最终实现同一超声波传感器分时复用收发功能。

$$U = \frac{R_0 // R'_0}{R_4 + R_0 // R'_0} U'_{out} \quad (16)$$

$$\text{将实验参数代入式(16),得超声波传感器两端电压} \\ U \approx 0.25 U'_{out} \quad (17)$$

设超声波传感器支路电流为 I_1 ,功率为 P_1 ;接收支路电流为 I_2 ,功率为 P_2 。则可得到超声波传感器支路输出功率 P_1 与总输出功率(即 P_1 与 P_2 之和)的比例系数 β :

$$\beta = \frac{P_1}{P_1 + P_2} = \frac{UI_1}{U(I_1 + I_2)} = \frac{R_0}{R_0 + R'_0} \quad (18)$$

将相应实验数据代入式(18)得 $\beta \approx 0.669$ 。收发等效电路如图10所示。

当超声波传感器做接收器时,根据图10可知,此时传感器相当于信号源,电流为 I ,发射支路电流为 I_1 ,接收支路电流为 I_2 。由KCL定理得:

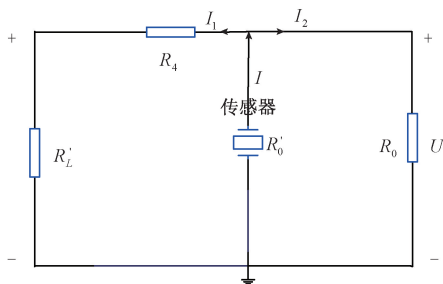


图 10 收发等效电路

Fig. 10 Transceiver equivalent circuit

$$I = I_1 + I_2 \quad (19)$$

由于发射支路和接收支路是并联关系,因此,支路电压相等;而两支路阻抗不相等则支路功率不同。

根据并联分流原理得式(20)和(21)。

$$I_1 = \frac{R_0}{R_0 + R_4 + R'_L} I \quad (20)$$

$$I_2 = \frac{R_4 + R'_L}{R_0 + R_4 + R'_L} I \quad (21)$$

接收支路获得的超声波传感器输出功率效率为 η 。

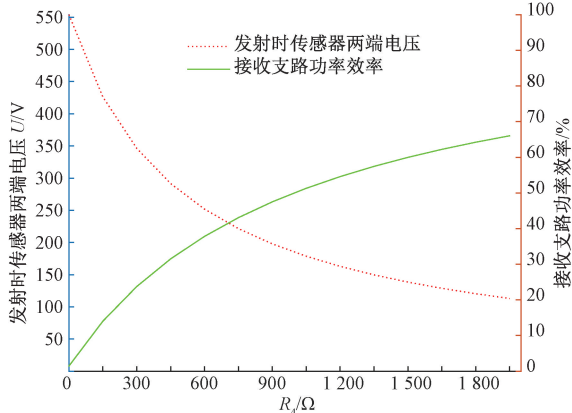
$$\eta = \frac{UI_2}{UI} \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)得:

$$\eta = \frac{R_4 + R'_L}{R_0 + R_4 + R'_L} \quad (23)$$

将相应电路参数代入式(23),得到超声波传感器输出功率效率 $\eta = 0.5$ 。

根据以上理论分析和相应电路参数得到 R_4 对传感器收发电路影响的拟合曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出, R_4 虽然会降低发射电压,但可以提高接收效率。因此,结合实际需求可调试出一个 R_4 的最佳工作值。

图 11 R_4 对超声波传感器收发电路影响曲线Fig. 11 The influence curve of R_4 on the transceiver circuit of ultrasonic sensor

而中轴变压器 T 在发射中通过正向变比升压;传感器接收时,由于次级线圈阻抗比较大,因此可进一步补充 R_4 增大左端支路阻抗;同时次级到初级反向传输效率很低有利于提高右端支路信号分量,进一步增大有效接收信号利用率,提高信噪比降低后续处理难度,有助于提高系统可靠性与测量准确度。

3 测试与分析

3.1 脉冲信号的参数对输出电压影响分析

从图 2 可以看出, R_1 具有分压作用,可以调节场效应管 Q 的 D 极输入电压。由于场效应管 Q 的 G 极和 S 极之间的漏电流 i_{GS} 较大,存在损坏场效应管的隐患,故利用 R_2 来衰减漏电流,从而对场效应管 Q 起一定保护作用;二极管 D_1 和 D_2 主要是利用其单向导电性构成电容 C_1 的充放电网络。场效应管 Q 的 G 极输出的脉冲频率越高,对应图 2 的 Q 、 C 、 D 和 T 的工作频率要求也越高,如果器件工作速度相对控制脉冲频率过低,将抑制整体电路升压功能,达不到预期升压效果,因此电路和控制信号频率匹配是关键;同时控制脉冲信号发送间隔也是关键,既不能太短也不宜过长,否则都会降低其升压效果。综上所述,电源电压、控制信号波形、频率和占空比都是影响超声波发射电路输出电压的因素。

分别改变输入信号的波形、占空比、频率和直流输入电压 U_H 来测试电路性能,分析以上参数变化对输出电压影响。实验结果如图 12 所示。

分别对频率为 1 MHz、幅值 3.3 V 的脉冲信号、正弦、方波和三角波的升压效果进行测试。从图 12(a)可以看出,图 2 的发射电路对脉冲信号升压作用最好,同频率其他 3 种波形的输入会导致电源电流增大;从图 12(b)可以看出,频率为 100 kHz ~ 1 MHz 的脉冲信号,输出电压在最大值上下波动较小,但是 400 kHz 以下时会发生失真现象;从图 12(c)可以看出,频率为 1 MHz、幅值 3.3 V 的脉冲信号,调整其占空比也可调整电路输出脉冲信号幅值,因为不同占空比对电容充放电时间比不同,通过实验测试可知 50% 占空比时输出电压最好,占空比 > 80% 时输出波形严重失真;从图 12(d)可以看出,频率为 1 MHz、幅值 3.3 V 的脉冲信号,输入直流电压 U_H 与输出电压呈正比关系。

经过多次试验分析得出,此电路对占空比 50%、频率为 1 MHz 脉冲信号匹配性较好,且输出电压最理想。相比 $U_H = 40$ V,发射电路不连接超声波传感器和接收电路空载时超声波发射电路输出电压可达 554 V、放大了 13.85 倍;带负载时其输出电压可达 179 V、放大了 4.5 倍。

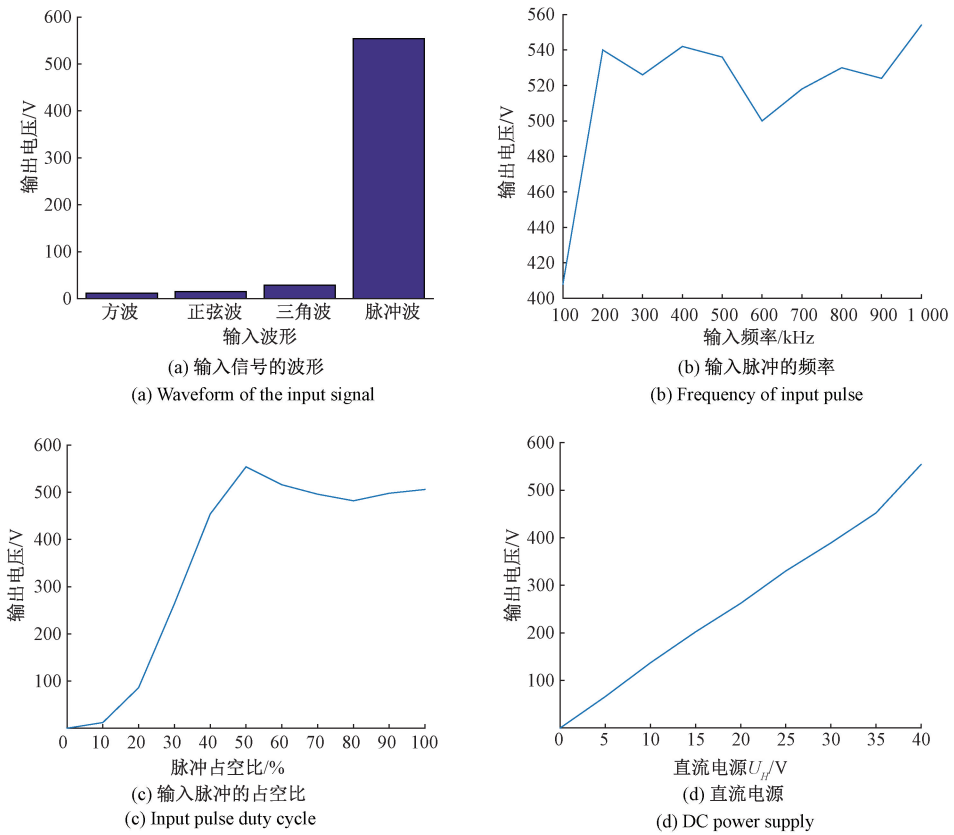


图 12 脉冲信号的参数对输出电压影响

Fig. 12 Effect of pulse signal on output voltage

3.2 接收限幅桥电路传输效率测试

由表 1 实验结果表明,当 $R_5 = R_6 = 10\text{ k}\Omega$;图 7 中输入 $U_i < 5\text{ V}$,输出 $U_o \geq 90\%$ 的高效率传输;输入 $U_i > 5\text{ V}$,由于限制通过电压不能高于 5 V ,因此输出效率与输入成反比,而且输出波形随输入电压增大逐渐失真;不同电路所得结果存在微小差异。调整 R_5 、 R_6 可以改变限幅值和传输效率。在本次实际应用中,超声波传感器接收的信号幅值基本都 $< 5\text{ V}$,因此在满足限幅的基础上,为了最大程度提高接收信号传输效率,经过试验可得出 $R_5 = R_6 = 10\text{ k}\Omega$ 是此次设计应用的最佳值。另外此限幅桥对负脉冲抑制效果很好,完全可以保护发射信号对其他电路损害。

表 1 限幅桥传输效率

Table 1 Limiting bridge transmission efficiency		
输入/V	输出/V	效率/%
0.050	0.050	99.60
0.100	0.100	100.00
0.368	0.365	99.10
0.984	0.936	95.10
3.860	3.580	92.70
5.800	4.100	70.69
7.680	4.320	56.25
9.600	4.540	47.29

3.3 不带负载时的收发电路性能分析

首先测试不带负载情况,图 2 中场效应管 Q 的 G 极控制 1 MHz 、占空比 50% 、幅值 3.3 V 且周期数为 3 的脉冲信号;场效应管 Q 的 D 极输入 40 V 直流电源 U_H ,电路发射部分测试结果如图 13 所示。从图 13 可以看出,发射电路的输出电压基本稳定在 554 V 。

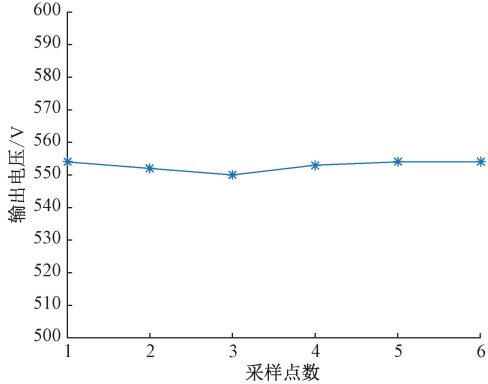


图 13 发射控制信号与输出电压的关系

Fig. 13 Relationship between emission control signal and output voltage

3.4 加载负载时收发电路的性能分析

实验用的超声波传感器的工作频率和控制脉冲信号

的频率分别选择为 1 MHz、500 和 125 kHz。对整体电路进行测试,其发射和接收部分测试结果如图 14 所示。

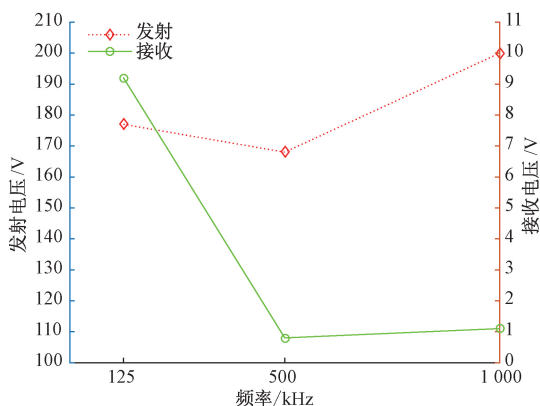


图 14 带不同频率负载时收发电压

Fig. 14 Transmission and received voltage with different frequency loads

从图 14 可以看出,对同一电路接入不同频率负载传感器和输入不同频率控制脉冲后,由于负载阻抗不同,电路参数不完全匹配,所表现出的结果差异明显;不同频率脉冲所对应发射电路充放电时间不同,因此发射波形幅值也有差别。

3.5 电路应用实例

超声波收发电路的性能是影响超声波流量计测量稳定性的重要因素。把本文设计的超声波收发电路应用在非接触式超声波流量计中,对 $0 \sim 550 \text{ m}^3/\text{d}$ 范围内的流量进行测量,以验证电路的性能。测试时的基本参数如下:管道内径 30 mm、衬胶厚度 2 mm、声波频率 1 MHz。得到的流量测量原始数据曲线如图 15 所示。

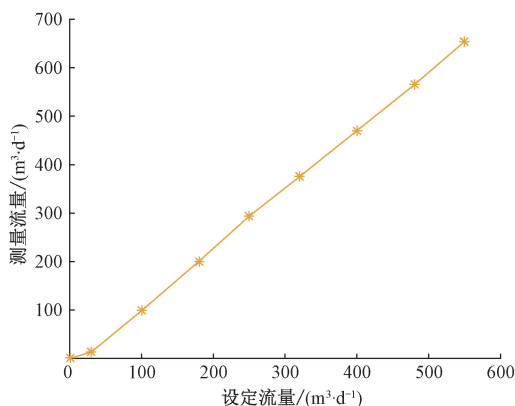


图 15 流量测量曲线

Fig. 15 Flow measurement curve

由图 15 可以看出,测量数据曲线线性变化趋势

较好,而且多次测量数据重复性好,表明在不同流量时本文设计的超声波收发电路性能满足实际流量测量要求。

4 结 论

本文针对具有复合管道中多相流体的非接触式流量测量问题,采用超声波流量测量原理,设计了超声波发射电路和接收电路以及收发电路之间的干扰耦合平衡电路,并应用在非接触式超声波流量计中,对具有衬胶的复合管道中的流体进行流量测量。通过进行重复性试验,其电路性能如下:利用中轴变压器代替传统超声波发射电路中的阻尼电阻后,不仅提高了发射电压,还减小了放电时间。该脉冲发射电路具有空载时可对脉冲信号放大 13.85 倍、带负载时可对脉冲信号放大 4.5 倍。接收限幅桥电路对小信号的传输效率超过 90%,且对高压信号有抑制作用。 R_4 匹配网络不仅能有效平衡收发电路间相互干扰,而且当超声波传感器做接收时还可提高接收支路功率。

参考文献

- [1] 檀盼龙,韩思奇.时差法超声波流量测量技术研究现状与应用[J].无线互联科技,2018,140(16):37-38.
TAN P L, HAN S Q. Research status and application of the transit time ultrasonic flow measurement [J]. Wireless Internet Technology, 2018,140(16):37-38.
- [2] 范思航,时文娟,黄艳芝,等.超声波多普勒流量计换能器器的研究与应用[J].国外电子测量技术,2014,33(2):84-88.
FAN S H, SHI W J, HUANG Y ZH, et al. Investigation and application of transducer of ultrasonic Doppler flowmeter [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(2):84-88.
- [3] 田雷,徐科军,沈子文,等.基于气体超声波流量计的间歇激励和信号处理[J].电子测量与仪器学报,2017,31(11):1774-1781.
TIAN L, XU K J, SHEN Z W, et al. Intermittent excitation and signal processing based on ultrasonic gas flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017,31(11):1774-1781.
- [4] 李冬,孙建亭,杜广生,等.结构参数对超声波流量计水流特性影响的研究[J].仪器仪表学报,2016,37(4):945-951.
LI D, SUN J T, DU G SH, et al. Study on the influence of structure parameters on flow characteristics of ultrasonic [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(4):945-951.
- [5] SIMURDA M, LASSEN B, DUGGEN L, et al. A

- Fourier collocation approach for transit-time ultrasonic flowmeter under multi-phase flow conditions[J]. Journal of Computational Acoustics, 2017, 25(4): 7.
- [6] 杨理践, 张晓丹, 高松巍, 等. 超声波在管道防腐层剥离内检测中的传播特性研究[J]. 电子测量与仪器报, 2018, 32(10): 9-18.
- YANG L J, ZHANG X D, GAO S W, et al. Research on the propagation characteristics of ultrasonic wave in the detection of pipeline coating[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10): 9-18.
- [7] 王芳芳, 曾云, 张振凯, 等. 大管径超声波测流误差的影响因素及修正分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 146-153.
- WANG F F, ZENG Y, ZHANG ZH K, et al. Influencing factors and correction analysis of large diameter ultrasonic flow measurement error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 146-153.
- [8] 杜晓泽, 刘胜祥. 时差法超声波流量计流量系数影响因素分析[J]. 工业计量, 2019, 29(2): 14-15, 38.
- DU X Z, LIU SH X. Analysis of factors influencing flow coefficient of ultrasonic flowmeter by time difference method[J]. Industrial Metrology, 2019, 29(2): 14-15, 38.
- [9] 张全兴. 超声波非均匀介质传播衰减特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- ZHANG Q X. Study on the attenuation laws of ultrasonic propagation in the inhomogeneous media[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [10] 李泽, 姜明顺, 吕珊珊, 等. 高精度超声波液位测量系统设计[J]. 自动化仪表, 2018, 39(11): 56-59.
- LI Z, JIANG M SH, LU SH SH, et al. Design of high precision level measurement system[J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(11): 56-59.
- [11] 康怡, 孙世超. 环鸣法声速仪超声波发射/接收电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2012(1): 65-67.
- KANG Y, SUN SH CH. Transmitting/receiving circuit design for ultrasonic based on sing-around velocimeter[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(1): 65-67.
- [12] 燕学智, 王海云, 王昕. 超声波飞行时间测量的数字增益补偿[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 82-90.
- YAN X ZH, WANG H Y, WANG X. Digital gain compensation for ultrasonic flight time measurements[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 82-90.
- [13] 詹湘琳, 石志超. 超声波探伤发射电路的分析设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(1): 143-146.
- ZHAN X L, SHI ZH CH. Analysis and design of ultrasonic inspection transmitting circuit[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(1): 143-146.
- [14] 王晓蕊, 张晓青, 贾三山. 超声波探伤发射电路及参数分析[J]. 仪表技术与传感器, 2012(9): 34-36.
- WANG X M, ZHANG X Q, JIA S SH. Ultrasonic inspection transmitting circuit and parameter analysis. Instrument Technique and Sensor, 2012(9): 34-36.
- [15] 孙凌逸, 高钦和, 蔡伟, 等. 低压电源驱动的超声波发射接收电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2010(10): 81-83.
- SUN L Y, GAO Q H, CAI W, et al. Ultrasonic transmitting and receiving circuit based on DC low voltage[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(10): 81-83.
- [16] 杨波, 曹丽. 利用互易性电路设计降低超声流量测量的零点误差和温度漂移[J]. 声学学报, 2012, 37(6): 629-630.
- YANG B, CAO L. Reciprocal circuit design to reduce zero error and thermal drift in ultrasonic flow metering[J]. Acta Acustica, 2012, 37(6): 629-630.
- [17] 许文俊, 瞿少成, 等. 一种基于 STM32 的超声波发射与接收电路的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(17): 90-94.
- XU W J, QU SH CH, et al. Design and implementation of ultrasonic transmitting and receiving circuit based on STM32[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(17): 90-94.
- [18] 王杰. 脉冲超声波的发射与接收电路设计[J]. 自动化应用, 2011(10): 48-51.
- WANG J. A kind of emitting and receiving circuit for pulsed ultrasonic[J]. Automation Application, 2011(10): 48-51.
- [19] 詹湘琳, 石志超. 数字超声波探伤仪发射电路的参数分析[J]. 中国民航大学学报, 2017(1): 52-55.
- ZHAN X L, SHI ZH CH. Parameter analyses of transmitting circuit in digital ultrasonic inspection instrument[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2017(1): 52-55.
- [20] 徐琳, 王润田, 芦俊. 基于超声波的发射和接收电路设计[J]. 舰船科学技术, 2016(S1): 203-205.
- XU L, WANG R T, LU J. The design of transmitting and receiving circuit based on ultrasonic[J]. Ship Science and Technology, 2016(S1): 203-205.

作者简介



贾惠芹, 1996 年于西安科技大学获得学士学位, 1999 年于西安科技大学获得硕士学位, 2003 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安石油大学教授, 主要研究方向为超声波流量检测方法研究、电磁法储层探测方法研究。

E-mail: jiahq@xsyu.edu.cn

Jia Huiqin received B. Sc. and M. Sc. both from Xi'an University of Science and Technology in 1996 and 1999. Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2003, respectively. Now she is a professor at Xi'an Petroleum University. Her main research interests include ultrasonic flow detection method, reservoir detection method by electromagnetic method.



王成云, 2017 年于河西学院获得学士学位, 现为西安石油大学硕士研究生, 主要研究方向为多相流超声波流量检测技术。
E-mail: 1273389684@qq.com

Wang Chengyun received B. Sc. from Hexi University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Xi'an Petroleum University. His main research interests include ultrasonic flow detection technology of multiphase flow.