

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108901

基于储能电感的超声波发射电路本安化方法研究*

王飞宇^{1,2}, 雷志鹏^{1,2}, 李杰^{1,2}, 向学艺^{1,2}, 石港^{1,2}

(1. 太原理工大学矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室 太原 030024;

2. 太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室 太原 030024)

摘要:针对煤矿千米定向钻机钻进过程中应用超声波换能器对钻孔状态监测时存在需要高电压驱动和本质安全化无法兼备的问题,提出了一种基于储能电感的本安型超声波发射电路。介绍了发射电路的基本原理,理论研究了换能器等效阻抗和稳压管动态电阻对激励脉宽的影响;分析了发射电路内部和输出本质安全特性,据此给出了本质安全参数的判断标准和一种高电压本安型超声波发射电路参数计算方法。实验结果表明:在设计参数范围内,200 V幅值的激励脉冲宽度能够可达2~3 μs,大于设计值1.5 μs;测量储能电感电流为0.9 A,换能器等效电容为1.05 μF,分别小于本安条件下的电流1 A、电容100 μF。因此,本文所提方法得到的电路参数能够在输出高电压激励脉冲下,满足本质安全要求。

关键词: 超声波发射电路;本质安全型;储能电感;激励脉冲

中图分类号: TB552 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on intrinsic safety design of ultrasonic transmitting circuit based on energy storage inductance

Wang Feiyu^{1,2}, Lei Zhipeng^{1,2}, Li Jie^{1,2}, Xiang Xueyi^{1,2}, Shi Gang^{1,2}

(1. National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Province Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The high voltage driving and intrinsic safety cannot be combined when the ultrasonic transducer is used to monitor the drilling condition of kilometer directional drilling machines. To address this issue, an intrinsically safe ultrasonic transmitting circuit based on energy storage inductance is proposed. The basic principle of the transmitting circuit is introduced, and the effects of the equivalent impedance of the transducer and the dynamic resistance of the regulator on the discharge time and exciting pulse width of the energy storage inductance are studied theoretically. The internal and output intrinsic safety characteristics of transmitting circuit are analyzed. Then, a judgment standard of intrinsic safety parameters and a parameter calculation method of high voltage intrinsically safe ultrasonic transmitting circuit are illustrated. Experimental results show that the exciting pulse width of 200 V amplitude can reach 2 ~ 3 μs in the range of design parameters, which is greater than the design value of 1.5 μs. The measured energy storage inductance current is 0.9 A and the equivalent capacitance of the transducer is 1.05 μF. The current is smaller than 1 A and capacitance is smaller than 100 μF under intrinsically safe condition. Therefore, the circuit parameters obtained by the proposed method can meet the intrinsic safety requirements under the output of high voltage exciting pulse.

Keywords: ultrasonic transmitting circuit; intrinsic safety; energy storage inductance; exciting pulse

0 引言

近年来,为解决煤矿开采过程中的煤层瓦斯泄漏或

突出问题,煤矿企业选择引进千米定向钻机,在掘煤之前顺煤层钻进长距离大直径抽采钻孔,待瓦斯抽采完成之后,再进行煤矿开采工作^[1-2]。在千米定向钻机钻进过程中,不仅会遇到各种煤岩结构,而且煤体力学参数也会发

收稿日期:2021-11-22 Received Date: 2021-11-22

* 基金项目:山西省重点研发计划项目(202003D111008)、国家自然科学基金(51977137)项目资助

生变化,可能导致钻孔孔内损伤,出现塌孔、压钻等问题,严重制约千米定向钻机的钻进速度和煤矿瓦斯抽采生产安全^[3]。因此,有必要对钻孔孔内状态进行监测。

将超声波传感器放置于千米定向钻机的头部探杆处能够实时在线监测孔壁及壁外失稳情况。如监测数据可以上传至孔口计算机,还能对孔壁进行超声成像,方便司钻工人根据孔壁成像及时发现并解决钻孔可能存在的问题^[4]。传统的超声传感器已被广泛应用在以空气为媒介的测距与目标定位中,如王浩等^[5]以单片机作为核心设计了一套超声波收发可控的分体式超声测距系统,能够很好地满足移动机器人自主避障与跟随目标定位的需求,但诸如此类的超声波传感器存在驱动电压低,发出的超声波能量小等诸多问题。这些问题导致在测量钻孔状态时,超声波在穿过探杆壁、钻井液,遇到煤岩等多层介质时已经会发生巨大的损耗,以至于回波信号几近于无。诸如探伤仪、彩超等超声波应用装置能够发出较大的声波能量,灵敏地、清晰地呈现固体介质,如金属和人体中的裂纹、结石等,但这类装置的供电电源电压较高^[6-9]。如詹湘琳等^[10]研究的基于单片机的探伤仪发射电路,需要高达400 V的电源电压方能输出236 V的激励脉冲,发射大功率超声波信号。若将这样的装置应用在煤矿爆炸性气体环境,不仅超声信号和电路难以满足矿井防爆要求,而且使用的电源体积较大,无法放置在狭窄的千米钻机探杆内。为了拓展超声波测距技术在煤矿的应用,王宇等^[11]开发了一套基于Buck-Boost变换器的本安型超声测距系统,但该驱动系统的输出电压仍然被限制在百伏以内,导致当超声波发生器周围存在液体等煤质时,超声波穿透力不足,无法应用于存在钻井液的钻孔孔壁状态测量。朱建林等^[12]将超声波传感器用于混凝土的无损检测时,设计了250、500、1 000、1 500 V等多种等级的电压激励脉冲,已满足不同的测试距离。所用电源模块仅为12 V输入,便可以实现0~1 500 V的电压输出,但其电流输出仅为10 mA,由此可见,超声波换能器是电压型驱动器件,对电流的要求较小。

结合国内外学者现有研究经验,针对现有矿用超声波换能器驱动电压低和常规高电压超声波换能器不符合本质安全设备要求的问题,为实现利用超声波测量煤矿千米定向钻机钻孔孔壁状态,本文提出了一种基于储能电感放电的超声波发射电路,该电路能够使用+5 V本安电源供电,在满足本质安全型要求的基础上,能够限制储能电感电流的大小,输出百伏级激励脉冲驱动超声换能器正常工作。本文的工作主要聚焦在以下几点:理论分析了超声波换能器等效阻抗和稳压管动态电阻对储能电感放电时长的影响,并提出了与之对应的处理方法;理论分析了超声波发射电路的内部和输出部分本质安全特性,解释了感性电路的最小点燃曲线;针对本安化标准,

设计了发射电路参数计算方法,并通过实验验证了设计方法的有效性。

1 超声波发射电路的分析

1.1 发射电路的基本原理

图1为本文所使用的本安型超声波发射电路,该电路利用了电感电流换路前后无法跃变的原理,通过控制开关 S_1 和 S_2 的导通与断开来实现电感的换路,进而在换路瞬间改变输出电压,实现升压的目的。图1电路中 E 为电源,输出+5 V以内的低幅值直流电压; D_1 为快速续流二极管,防止储能电感电流突变至0; R_1 和 R_2 为限流电阻; D_2 为稳压管; R_o 为电路输出电阻。

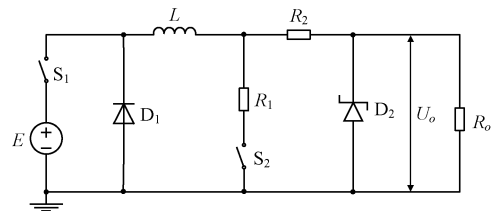


图1 本安型超声波发射电路

Fig. 1 Intrinsically safe ultrasonic transmitting circuit

发射电路的基本原理是:开关 S_1 控制电源供电,导通时发射电路才能正常工作。设置 R_1 为一小阻值电阻, R_o 为一大阻值电阻。当开关 S_1 和 S_2 均闭合时, R_1 所处支路电流较大, R_o 所处支路电流较小,几乎可认为处于断路状态,输出电压幅值与电源同步,在5 V以内,对超声波换能器几乎不产生影响。当 S_1 闭合, S_2 断开时,即换路的瞬间,储能电感电流无法突变, R_o 处将在短时间内流过较大电流。由于 R_o 阻值较大,其两侧的瞬态输出电压会远远大于电源电压,在稳压管 D_2 的配合作用下,能够形成超声波换能器驱动所需要的高电压脉冲。用高频信号控制开关 S_2 的导通与断开,能够使发射电路输出所需要的高频高压脉冲信号,其控制逻辑如图2所示。发射电路的高频换路使储能电感不断地进行充电与放电,控制输出电压脉冲的幅值与宽度。

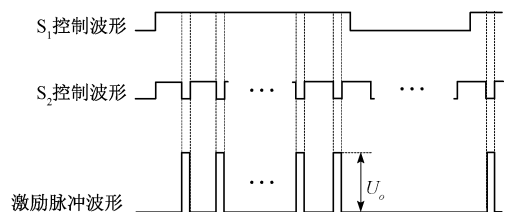


图2 激励脉冲时序波形

Fig. 2 Waveform of exciting pulse timing

1.2 超声波换能器的等效电路模型

上文超声波发射电路的讨论皆没有考虑负载 Z_m (超声波换能器) 的影响。当超声波换能器未被驱动时, 根据其电学特性可等效为一电容 C_o , 可由电容表测得。该参数通常被称为静态电容, 如图 3(a) 所示^[13]。施加区配激励脉冲, 驱动超声波换能器后, 换能器电参数可认为是在静态电容基础上串联一 RLC 支路, 详见图 3(b)。为了进一步描述驱动状态下的换能器参数, 用式(1)将其等效变换成电阻 R_m 与电容 C_m 的串联形式, 如图 3(c) 所示, R_m 、 C_m 的值分别如式(2)、(3)所示^[13]。

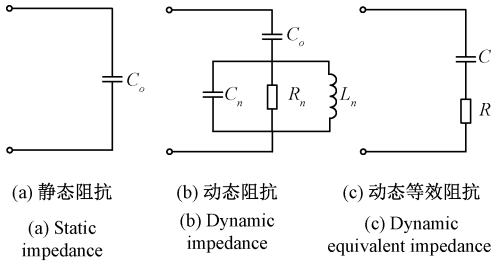


图3 换能器各工作状态下等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuits of the transducer in different working states

$$Z_m = R_m + \frac{1}{j\omega_m C_m} = \frac{1}{j\omega_m C_o} + R_n \left\| \frac{1}{j\omega_m C_n} \right\| j\omega_m L_n = \frac{\omega_m^2 L_n^2 R_n}{(1 - \omega_m^2 L_n C_n)^2 R_n^2 + \omega_m^2 L_n^2} + j \left(\frac{\omega_m L_n R_n^2 (1 - \omega_m^2 L_n C_n)}{(1 - \omega_m^2 L_n C_n)^2 R_n^2 + \omega_m^2 L_n^2} - \frac{1}{\omega_m C_o} \right) \quad (1)$$

式中: ω_m 表示换能器的驱动角频率。

$$R_m = \frac{\omega_m^2 L_n^2 R_n}{(1 - \omega_m^2 L_n C_n)^2 R_n^2 + \omega_m^2 L_n^2} \quad (2)$$

$$C_m = \frac{(1 - \omega_m^2 L_n C_n)^2 R_n^2 C_o + \omega_m^2 L_n^2 C_o}{(1 - \omega_m^2 L_n C_n) R_n^2 [1 - \omega_m^2 L_n (C_n + C_o)] + \omega_m^2 L_n^2} \quad (3)$$

需要说明的是: 等效变换后的驱动状态下电容 C_m 小于静态电容 C_o (静态电容 C_o 仅为 nF 甚至 pF 级), R_m 通常也只有几十 Ω ^[13]。因此, 在驱动状态下, 换能器等效阻抗 Z_m 对脉冲上升沿和下降沿的影响较小, 且其模值远大于 R_o , 对电感充放电时长的影响甚小。为了简化后期的分析设计, 本文将选择暂且忽略 Z_m 的影响。

1.3 电感放电分析

超声波发射电路工作时有充电和放电两个过程, 当开关 S_2 由断开至导通时, 电感开始充电, 开关 S_2 由导通至断开时, 电感 L 开始放电。图 2 激励脉冲时序波形表明, 激励脉冲主要是由电感放电过程时, 电感电流作用在输出电阻 R_o 上产生的。储能电感的放电模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} E \approx (R_D \parallel R_o) i_{L(t)} + L \frac{di_{L(t)}}{dt} \\ i_{L(0+)} = i_{L(0-)} = \frac{E}{R_S + R_L + R_1} \\ i_{L(\infty)} = \frac{E}{R_D \parallel R_o} \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_S 表示两个开关的导通总电阻, R_D 表示 D_2 的自身电阻。

放电过程中, 电感 L 放电时的时间常数 τ 可表示为:

$$\tau = \frac{L}{R_D \parallel R_o} \quad (5)$$

结合式(4)中的计算可得到电感电流放电时的时域表达式为:

$$i_{L(t)} = i_{L(\infty)} + (i_{L(0+)} - i_{L(\infty)}) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

结合式(5)和(6)可知, 电感 L 的放电时间主要受到 L 、 R_D 、 R_o 3 个参数的影响。其中 R_D 是一个随稳压管两端电压和电流变化而变化的量, 它能够提高电感放电时长。

激励脉冲的宽度一般通过储能电感放电时长来反映, 但二者又不完全等同。储能电感的放电时长为 τ , 在工程上一般认为经过 3~5 个 τ 后放电过程结束^[14]。然而, 即便电感电流 $i_{L(t)}$ 衰减至很小, 其与输出电阻 R_o 的乘积仍然可能维持在激励脉冲所要求的幅值。

在实际电路设计中, 为简化稳压管电阻动态变化带来的影响, 将忽略 R_D , 仅考虑 L 、 R_o 。若放电系数能够满足:

$$\frac{L}{R_o} = \tau \geq t_o \quad (7)$$

且 D_2 处于稳压阶段, 输出电阻 R_o 上的电流能够满足:

$$\frac{U_o}{R_o} \leq i_{L(t_o)} \quad (8)$$

即可将 R_D 的影响转化为激励脉宽的裕量, 调节开关 S_2 的触发信号占空比即可令激励脉宽达到所需的额定值, 使超声波换能器正常工作。

2 发射电路的本质安全特性分析

本文超声波发射电路使用本安电源, 若发生过电流短路, 认为短路保护装置能够在很短的时间内切断电源。从能量的角度来说, 当超声波发射电路中出现开路或短路故障时, 仅有电感与电容两种装置能够释放能量, 影响本安特性。本文的本安特性将从发射电路的内部和外部储能元件着手分析^[15]。

2.1 发射电路的内部本质安全特性分析

发射电路的内部本质安全特性分析,主要考虑电感发生意外断路时产生电火花的引燃能力^[15]。针对本文的发射电路,电感断路将发生在电源供电与没有电源供电两种状态下。当开关 S_1 闭合,电源对电路供电。若电感发生意外断路,断路两端产生电火花的能量将由储能电感和电源两部分提供,该状态下电感放电最为严重^[15-17]。

当电感突然断路并开始放电时,假设电感的放电时间为一常数 T 。放电时间 T 内消耗于开断电极两端的总能量为 W ,其全部用于点燃气体混合物。若气体混合物恰能引爆的能量为一定常值 W_{\min} ,根据放电电流线性衰减模型可得出^[18]:

$$W_{\min} = \int_0^T u_{(t)} \times i_{(t)} dt = \frac{EIT}{6} + \frac{1}{2}LI^2 \quad (9)$$

式中: $u_{(t)}$ 为开断火花电极两端放电电压, $i_{(t)}$ 为开断火花电极两端放电电流, I 为最小电感电流。根据式(9)便可计算出不同电感值和不同电源电压下的最小点燃曲线^[16]。

在得到感性电路的最小点燃曲线后,根据曲线中的最小电感电流便可判断该感性电路是否满足本质安全要求。为了使所设计电路达到本质安全,能够工作在易燃易爆的瓦斯矿井环境下,电路的最大电感电流 $I_{L_{\max}}$ 与最小点燃电流 I_B 应满足:

$$I_{L_{\max}} \leq I_A = \frac{I_B}{K} \quad (10)$$

式中: K 为安全系数,一般取1.5~2.0。

2.2 发射电路的输出本质安全特性

与发射电路的内部本质安全特性不同,输出本质安全特性需要考虑容性负载(超声波换能器)短路时带来的危害。发射电路发生短路时的危害主要来源于两个方面,一方面是发射电路自身输出侧短路时,导致流过储能电感的电流超出最小电感电流的范围;另一方面是带载状态下,所接容性负载即超声波换能器短路放电产生的危害,具体如图4所示。

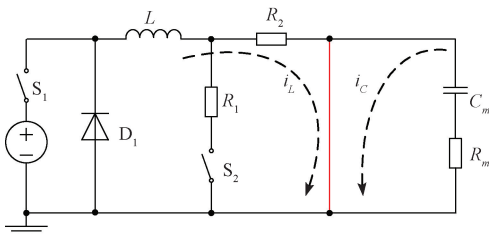


图4 输出侧短路时电路状态

Fig. 4 Circuit state when the shorted output port

当输出侧发生短路事故时,流过储能电感 L 的电流将会发生变化。

当开关 S_2 断开时,储能电感处将流过电流 i_L 。

$$i_L = \frac{E}{R_{S_1} + R_L + R_2} \quad (11)$$

当开关 S_2 闭合,且忽略开关电阻 R_S 以及电感自身电阻 R_L 的影响时,流过储能电感 L 的电流可认为是 $I_{L_{\max}}$ (非短路状态下的最大电感电流)与 i_L 的和。

因此,本文取 $I_{L_{\max}}$ 为 $0.9I_A$, i_L 为 $0.1I_A$ 。

$$I_{L_{\max}} = 0.9I_A = 0.9 \frac{I_B}{K} \quad (12)$$

这样,在忽略开关电阻 R_S 以及电感自身电阻 R_L 的情况下, R_2 可取 $10R_1$ 。

关于驱动状态下容性负载,即超声波换能器的最大允许电压,可根据简单电容电路的最小点燃电压曲线判断其是否满足本质安全要求^[16]。

3 本安型超声波发射电路的设计

本安型超声波发射电路的设计是在给定直流电源 E 、输出激励脉冲幅值和宽度的前提条件下进行的。本文的电路采取低压本安型电源供电;输出激励脉冲幅值可根据超声波换能器确定;激励脉宽 t_o 与超声波换能器中心频率 f_o 有关,即^[10]:

$$\frac{3\pi}{t_o} = 2\pi f_o \quad (13)$$

式中: f_o 为换能器中心频率。

由前文的分析可知,激励脉宽 t_o 与电感 L 、输出电阻 R_o 、最大电感电流 $I_{L_{\max}}$ 等参数相关,即

$$t_o = f(L, R_o, I_{L_{\max}}) \quad (14)$$

$$I_{L_{\max}} = f(E, L) \quad (15)$$

在已知 E 、 t_o 的基础上,仅需确定 L 或 R_o 中任意一值方可进行下一步的设计。本文选择先给 L 赋以初值 L_0 ,计算 R_o ,分析设计结果与理论值之间的误差,根据误差决定是否需要进行进一步调节 L 的值。本安型超声波发射电路参数计算流程如图5所示。

首先,给储能电感 L 赋以初值 L_0 ,根据感性本质安全型电路的最小点燃曲线和式(12)获得电感最大电流 $I_{L_{\max}}$,其中充电回路中的限流电阻 R_1 由下式计算,

$$R_1 = \frac{E}{I_{L_{\max}}} - R_L - R_S \quad (16)$$

然后,根据脉冲宽度公式(13),计算出激励脉宽 t_o 。根据1.2节的分析,本步骤只考虑 L 、 R_o 对脉宽的影响。储能电感 L 的放电常数根据式(7)计算,且令 t_o 与 τ 相等。此时可能出现式(7)与(8)无法同时满足,也就是说电感放电时长能够满足激励脉宽要求,但在激励脉宽的后段,激励脉冲幅值会发生衰减,即无法维持脉冲波形。

4 实验验证

本文设计的超声波发射电路为爆炸性气体环境用电器设备的 I 类电气设备 (即用于煤矿瓦斯气体环境的电气设备), 其主要性能指标为: 电源电压 E 为 +5 V, 输出激励脉冲电压 U_o 为 200~220 V, 超声波中心频率 f_o 为 1 MHz, 其对应的脉宽 t_o 为 1.5 μ s。在文献 [16] 提供的 I 类电感电路最小点燃曲线中, 纵坐标表示电感量, 其中以 $L=1$ mH 为起点, 向上增加梯度为 1 mH, 向下减小梯度为 0.1 mH, 本文选择从此处赋值, 即赋电感初值 L_o 为 1 mH。按照上一节中电路计算要求, 在赋电感初值后, 计算 R_o 约为 677~1 334 Ω , 取 $R_o=1 334 \Omega$, 确定本安型超声波发射电路参数及其它相关器件参数如表 1 所示。

表 1 本安型超声波发射电路设计参数及器件选型
Table 1 Design parameters and device selection of intrinsically safe ultrasonic transmitting circuit

元件名称	元件参数
电阻 $R_{s1}, R_{s2}, R_L/\Omega$	0.5, 0.5, 0.01
电阻 $R_1, R_2, R_o/\Omega$	4.5, 45, 1 334
电感 L/mH	1
开关器件 MOS 管	IRF740
续流二极管	FR107
稳压管	1N5388

本文采用安布雷 DYW-1M-01J 超声波换能器, 该换能器在驱动状态下的等效阻抗 R_m 约为 90 Ω , C_m 约为 1.05 μ F。

为了验证上述理论分析结果, 检验本安型超声波发射电路参数计算方法的可行性, 搭建了如图 6 所示实验平台。在图 6 中, $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 分别表示可调直流本安电源、超声波发射电路、信号发生器、滑动变阻器、超声波换能器、示波器; a_6 表示电流探头, 用来测量流过储能电感的电流波形。

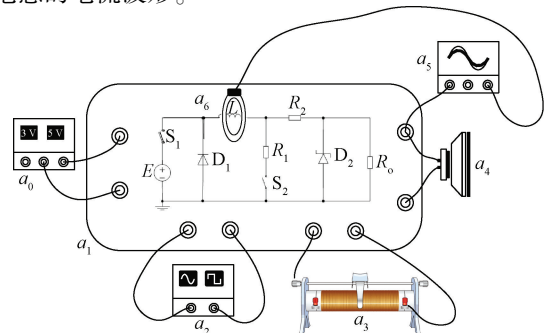


图 6 实验电路
Fig. 6 Experimental circuit

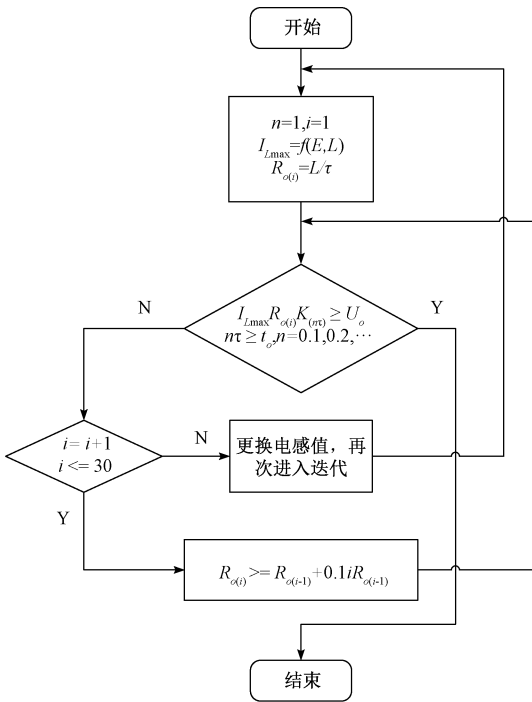


图 5 电路参数计算流程图

Fig. 5 Calculating flow chart of circuit parameters

因此需判断式 (7) 与 (8) 是否矛盾。若矛盾则调节输出电阻 R_o 阻值。 R_o 的调节方法是: 增大 R_o 会使 τ 变小, 但 R_o 调节到一定程度会致使 $t_o \approx n\tau$ 。设 $n\tau$ 时刻储能电感电流的衰减系数为 $K(n\tau)$,

$$K_{(n\tau)} = \frac{i_{L(n\tau)}}{i_{L(0+)}} = \frac{i_{L(\infty)} + (i_{L(0+)} - i_{L(\infty)}) e^{-\frac{n\tau}{\tau}}}{i_{L(0+)}} \quad (17)$$

式中: $i_{L(0+)}$ 表示电感放电电流初值, $i_{L(\infty)}$ 表示电感放电电流稳态值。

根据式 (4) 可知 $i_{L(\infty)}$ 近似为 0, 所以进一步得到:

$$K_{(n\tau)} = \frac{i_{L(n\tau)}}{i_{L(0+)}} = e^{-n} \quad (18)$$

若满足:

$$\frac{U_o}{R_o} \leq K_{(n\tau)} I_{Lmax} \quad (19)$$

即可认为所给初值 L_o 和调节后的输出电阻 R_o 满足设计要求, 可作为发射电路的参数使用。计算中, n 使用枚举法, 从 1 枚举至式 (19) 成立, 但根据电感放电特性, n 取至 5 即可认为完成。

若 R_o 调节至一定程度后, 仍然无法满足设计要求, 则可认为所赋电感初值 L_o 不合理, 应当调节电感值后返回到第一步重新进行计算。

经图 5 流程设计出的超声波发射电路输出的激励脉冲幅值满足既定要求, 但激励脉宽大于既定要求, 存有较大的裕量, 尚需调节 S_2 的导通占空比减小激励脉宽。

4.1 超声波换能器对发射电路的影响

一般超声波换能器触发信号频率为几十赫兹到几千赫兹^[10]。本文设置超声波换能器的触发信号(开关 S_2 的控制信号)频率为 1 kHz, 导通占空比为 50% 的方波, 在输出端不接超声波换能器即空载状态下的输出波形如图 7(a) 所示。图 7(a) 中, 在触发信号的下降沿, 超声波发射电路实现一次电流的换路, 输出端激发电压激励脉冲, 表明设计的超声波发射电路与理论分析相一致。

保持触发信号频率, 波形、占空比等不变, 带载状态下的实验结果如图 7(b) 所示。图 7(b) 中, 激励脉冲随触发信号变化的趋势与空载状态下几乎一致, 但不同的是, 在激励脉冲消失后, 输出会有一振荡波, 亟待进一步处理。

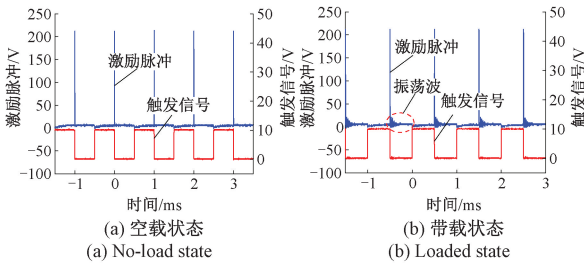


图 7 不同状态下激励脉冲时序波形

Fig. 7 Waveforms of exciting pulse in different states

为了观察激励脉冲的微观变化情况, 本文调整了实验结果的横轴分度值, 获得了空载和带载状态下的单激励脉冲波形, 分别如图 8(a) 和 (b) 所示。两幅图中的激励脉冲宽度皆达到了 $3 \mu\text{s}$, 大于理论值的 $1.5 \mu\text{s}$, 表明稳压管的存在能够显著提高激励脉宽, 且超声波换能器的等效阻抗 Z_m 对激励脉宽的影响不大, 能够按照本文 1.2 节所述, 在做电路参数设计时忽略 Z_m 的影响, 同时也表明前述电路参数设计方法能够满足要求。两幅图的不同之处在于, 带载状态下的激励脉冲比空载下在上升沿和下降沿略微平缓, 表明负载即超声波换能器是一容性器件, 验证了本文 1.2 节的理论分析。

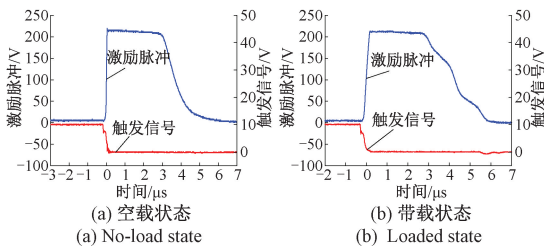


图 8 不同状态下单激励脉冲波形

Fig. 8 Single exciting pulse waveform in different states

另外, 无论是图 7 激励脉冲时序波形, 还是图 8 单脉冲波形, 带载状态下与空载状态波形大致相同, 表明在限

制了电感电流后, 该激励脉冲仍然具有足够的带载能力, 能够连续驱动该超声波换能器, 发出超声波。

4.2 触发信号占空比对波形的影响

按照前述本安型超声波发射电路的设中的要求, 若要使激励脉宽达到既定的 $1.5 \mu\text{s}$ 尚需进一步调整触发信号的占空比。本文将触发信号的占空比由 50% 调整至 99.837%, 分别测量了带载状态下脉冲时序、空载和带载状态下单脉冲波形, 分别如图 9、10(a) 和 (b) 所示。

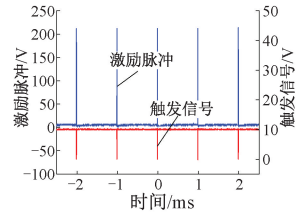


图 9 99.837% 占空比带载状态下激励脉冲时序波形
Fig. 9 Timing waveform of exciting pulse under load with 99.837% duty cycle

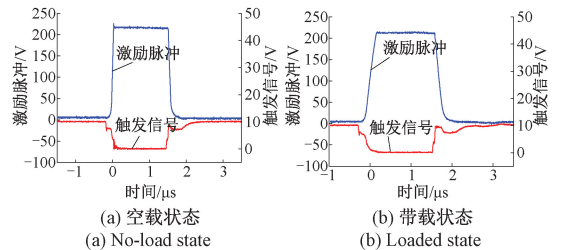


图 10 99.837% 占空比不同状态下单激励脉冲波形
Fig. 10 Single exciting pulse waveform in different states with 99.837% duty cycle

图 9 表明, 调整触发信号占空比能够有效的消除因超声波换能器影响产生的振荡波, 使带载下激励脉冲与空载条件下保持一致, 达到理论设计要求。图 10(a) 与 (b) 表明, 控制触发信号占空比能够调整激励脉宽, 即下降沿更陡, 使其与超声波换能器发射声波频率相匹配。

4.3 本安分析

按照本文所选参数计算, 取安全系数 K 为 1.5, 该参数下的最大电感电流 $I_{L_{\max}}$ 约为 $0.9 \times 1.5 = 1.35 \text{ A}$, 小于感性电路的最小点燃曲线对应的 $1 \times 1.5 = 1.5 \text{ A}$, 同时满足式 (12) 要求。

带载状态下触发信号占空比为 99.837% 时的储能电感电流实际波形如图 11 所示。在该图中, 储能电感电流在触发信号下降沿会迅速降低, 在进入高电平后逐渐上升至峰值约 0.9 A 并维持至下一个下降沿。结果表明, 电感电流变化趋势与文 1.1 节理论分析基本一致, 其电感电流保持在电源电压与电感值约束下的最小电感点燃电流以内, 发射电路内部满足本质安全型要求。

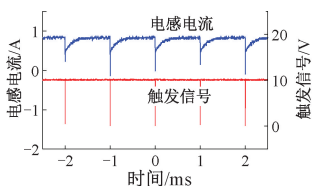


图 11 储能电感电流波形

Fig. 11 Current waveform of energy storage inductance

取安全系数 K 为 1.5, 电压 $U=220 \times 1.5=330$ V。根据文献[16]提供的 I 类电容电路火花放电最小点燃电压实验曲线, 在串联 0Ω 下, 330 V 对应的电容为 $100 \mu\text{F}$ (串联 90Ω 对应的电容会更大), 远大于负载超声换能器的等效电容部分 $C_m=1.05 \mu\text{F}$, 发射电路输出部分满足本质安全型要求。

4.4 稳压管对激励脉宽的影响

为了进一步研究稳压管对激励最大脉宽的影响, 在已计算的输出电阻 R_o 范围, 调节滑动变阻器进而改变其大小, 分别得到最大激励脉宽的计算值与实验值, 结果如图 12 所示。

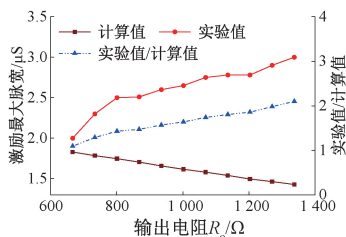


图 12 不同输出电阻下的最大激励脉宽

Fig. 12 Maximum exciting pulse width under different applied resistance

图 12 表明, 在设计参数范围内, 200 V 幅值的激励脉冲宽度最小达到了 $2 \mu\text{s}$, 最大达到了 $3 \mu\text{s}$, 皆大于设计值 $1.5 \mu\text{s}$; 相较于计算值, 实验值最小提高了 1.09 倍, 最大提高了 2.1 倍。进一步证明, 按照本文所提供的设计流程, 在忽略稳压管动态电阻影响的前提条件下, 使计算值恰好等于既定要求值, 能够简化设计步骤, 又能给所设计的激励脉宽留下充足的裕量, 以备进一步调节激励脉冲参数, 方便了本安型超声波发射电路的设计。

5 结 论

本文针对高电压超声换能器驱动电路的本质安全化问题, 在储能电感放电理论的基础上, 设计了本安型超声波发射电路, 理论研究了超声换能器与稳压管动态电阻对储能电感放电时间的影响, 分析了电路的本质安全参数, 得到了电路中各元件参数、最大电感电流等与

超声波激励脉冲基本参数的关系, 提出了一种本安型超声波发射电路设计方法, 使得电路参数能够在满足激励脉冲匹配脉宽的前提下留有充足的裕度, 保证电路为驱动超声波换能器提供足够的能量的同时, 仍能满足本质安全要求。

参考文献

- [1] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 258-267.
LIU J ZH, SUN H T, LEI Y, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 258-267.
- [2] 林柏泉, 李庆钊, 杨威, 等. 基于千米钻机的“三软”煤层瓦斯治理技术及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1968-1973.
LIN B Q, LI Q ZH, YANG W, et al. Gas control technology and applications for the three-soft coal seam based on VLD-1000 drilling systems [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1968-1973.
- [3] 张建明, 刘庆修, 田宏亮, 等. 煤矿井下千米定向钻机液压控制特性分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 341-345.
ZHANG J M, LIU Q X, TIAN H L, et al. Performance analysis of hydraulic control for kilometer directional rig used in underground coalmine [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 341-345.
- [4] ELAHIFAR B, ESMAEILI A, FRUHWIRTH R K, et al. Wellbore instability monitoring by using 4D imaging of ultrasonic caliper logs in real time drilling [C]. International Petroleum Technology Conference, 2013: 70-73.
- [5] 王浩, 谭振文, 王治彪, 等. 基于 STM32 的分体式超声测距与目标定位系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(2): 58-61.
WANG H, TAN ZH W, WANG ZH B, et al. Separated ultrasonic ranging and targeting system based on STM32 [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(2): 58-61.
- [6] 尹昱, 陈振华, 肖峰, 等. 不锈钢疲劳微损伤的非线性超声检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 68-73.
YIN Y, CHEN ZH H, XIAO F, et al. Nonlinear ultrasonic testing method for fatigue micro-damage of stainless steel [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 68-73.
- [7] 谢从珍, 张尧, 郝艳捧, 等. 应用超声波探伤仪检测复合绝缘子的内部缺陷[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2464-2469.

- XIE C ZH, ZHANG Y, HAO Y P, et al. Application of ultrasonic flaw detector to internal defects in composite insulators [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):2464-2469.
- [8] 毕津滔, 张永德, 孙波涛. 基于电磁跟踪与超声图像的介入机器人穿刺导航方法及实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7):253-262.
- BI J T, ZHANG Y D, SUN B T. Puncture navigation method and experiment study of interventional robot based on electromagnetic tracking and ultrasound image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7):253-262.
- [9] WEAR K A. Ultrasonic attenuation in human calcaneus from 0.2 to 1.7 MHz [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2001, 48(2):602-608.
- [10] 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.
- [11] 王宇, 孔维正, 靳宝全, 等. Buck-Boost型本安超声驱动系统设计[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6):1582-1588.
- WANG Y, KONG W ZH, JIN B Q, et al. The design of intrinsic safety Buck-Boost ultrasonic driving system [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6):1582-1588.
- [12] 朱建林, 向礼丹, 柳莎莎, 等. 超声波传感器在混凝土无损检测系统中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2008(7):1290-1294.
- ZHU J L, XIANG L D, LIU SH SH, et al. Ultrasonic sensor application in concrete nondestructive inspection system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008(7):1290-1294.
- [13] 姜兴刚, 张德远. 超声换能器过固有谐振区匹配理论[J]. 机械工程学报, 2007(3):182-186.
- JIANG X G, ZHANG D Y. Matchine theory of ultrasonic transducer at its passed inherent resonance zone [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007(3):182-186.
- [14] 邱关源, 罗先觉. 电路[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- QIU G Y, LUO X J. Circuit [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [15] 刘树林, 刘健, 寇蕾. 开关变换器的本质安全特性分析与设计[J]. 电工技术学报, 2006(5):36-41.
- LIU SH L, LIU J, KOU L. Intrinsically safe behavior of switching converters and its design [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006(5):36-41.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 爆炸性环境 第4部分:由本质安全型“i”保护的设备:GB 3836.4-2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Explosive atmospheres-Part 4: Equipment protection by intrinsic safety "i": GB 3836.4-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [17] 赵永秀, 刘树林, 马一博. 爆炸性试验电感电路分断放电特性分析与建模[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7):1698-1704.
- ZHAO Y X, LIU SH L, MA Y B. Analysis and modeling of inductor disconnected discharged characteristics based on explosive test [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7):1698-1704.
- [18] 孟庆海, 胡天禄. 低压电感电路最小点燃电流和电感之间的关系[J]. 西安矿业学院学报, 1998(4):370-373.
- MENG Q H, HU T L. The relationship between the minimum ignition current and inductance of low voltage inductance circuits [J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1998(4):370-373.

作者简介



王飞宇, 2020年于安徽大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为矿用智能电器、电力设备状态在线监测。

E-mail: feiy_wang@163.com

Wang Feiyu received his B.Sc. degree from Anhui University in 2020. He is currently a master student at Taiyuan University of Technology. His main research interests include mining intelligent electrical appliances and on line monitoring of power equipment status.



雷志鹏(通信作者), 2005年于华东交通大学获得学士学位, 2010年于太原理工大学获得硕士学位, 2015年于太原理工大学获得博士学位, 现为太原理工大学副教授, 主要研究方向为电气绝缘测试与诊断、矿用智能与新型电器。

E-mail: leizhipeng@163.com

Lei Zhipeng (Corresponding author) received his B.Sc. degree from East China Jiaotong University in 2005, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Taiyuan University of Technology in 2010 and 2015, respectively. He is currently an associate professor at Taiyuan University of Technology. His main research interests include the test and diagnosis of electrical insulation, intelligence techniques for electrical apparatuses of coal mine.