

用来激励高频超声换能器的电激励源

苏公雨 刘文利

(清华大学电子工程系 北京 100084)

1994年5月31日收到

1996年1月31日定稿

摘要 讨论了超声换能器的几种激励方法,分析了三种常用激励方法在激励高频超声换能器时的特点及其局限性.我们用雪崩 MARX 电路制作的单极窄脉冲能有效地激励频率高达 100 MHz 的换能器并取得了较好的结果.

关键词 单极窄脉冲, 高频超声换能器, 雪崩电路

Exciting source for high frequency ultrasonic transducer

Su Gongyu, Liu Wenli

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Methods electrically exciting an ultrasonic transducer are discussed. Three kinds of commonly used high-frequency exciting methods are analysed for their merits and limitations. The chosen MARX circuit based on avalanche mode gives an efficient unipolar pulse with satisfying result (amplitude greater than 400 V with rise time less than 5 ns) on a 100 MHz ultrasonic transducer.

Key words Unipolar pulse, High-frequency ultrasonic transducer, Avalanche tube circuit

1 引言

在超声检测设备中,用来激励超声换能器的电激励源是极其重要的一部分,它的性能直接影响了激励声脉冲的波形和输出功率,从而影响着系统的纵向分辨率及检测灵敏度.在超声检测设备中常用的激励方式大致可分为窄带激励(一般采用调制脉冲法)和宽带激励(主要有阶跃脉冲、方波、单极窄脉冲等)两类.窄带激励能够精确地控制发射信号的能谱、效率高、可以提供相位信息,缺点是频带窄、波形不甚理想.宽带激励因其激励换能器得到的波形好

应用声学

而被广泛采用.我们的高频超声检测系统为获得高的分辨率及较小的盲区,所采用的声探头频率为 100 MHz^[1],用来激励此探头的激励源必须在 100 MHz 在上有足够的激励效率,并且激励出声信号的周期数要少,因此在我们的系统中选用了宽带的单极窄脉冲激励法.

2 用作快速开关的几种器件的比较

产生宽频带激励信号的激励源一般是用一个极快速的电子开关通过对储能元件的放电来实现的,如图 1 所示.为了使输出波形中的高频分量丰富,必须使用具有高速开关能力的电

子器件作开关,又由于需要输出激励信号的瞬时功率大,这就要求器件的开关脉冲电流要大。

超声波探伤仪中常用的激励源是以可控硅充当电子开关的,可控硅能够瞬时开关极大的电流,但是由于用它制作的激励源有效激励的工作频率低于 20 MHz,所以不适合于高频应用。

利用三极管雪崩区的开关特性(开关电流能力达 10^9 - 10^{11} A/s,瞬时功耗很大,可以产生开关时间为 ns 量级的输出波形),产生的激励信号能对工作于 500 MHz 以下的超声换能器进行有效的电激励,如再加一级由阶跃二级管构成的整形电路,则可以产生前沿达 300 ps 量级的输出波形^[2],以用来激励更高频率的声换能器。

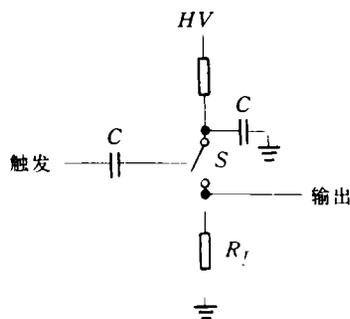


图1 快前沿脉冲的产生电路

可控硅和雪崩管作开关的缺点是一旦它们打开,在电流降至零之前几乎不能再控制它们,这样也就无法精确地控制脉冲的持续时间。另外,由于开关时间的限制,其触发频率不可能做高。例如,可控硅最高触发频率只能达 5 kHz,要使雪崩三极管的触发频率达到 10 kHz(超声检测系统的要求),也要以降低脉冲的输出幅度为代价。

场效应管(包括 HEXFET 和 VMOS)是一种产生脉宽和幅度都可调脉冲的理想元件。由于 VMOS 管具有无需功率驱动、输出功率大、开关速度快、延迟小等优点,可以用来产生高频高速、幅度宽度连续可调、结构简单、成本低的矩形脉冲信号源。VMOS 管也有其局限性,

其开关速度还是不够快,用来产生能有效激励 50 MHz 以下的换能器的信号源还可以,频率若再增加,则激励效率就会降低。因此我们选用三极管的雪崩效应来产生所需要的脉冲源。

3 利用雪崩三极管产生单极窄脉冲

由理论分析知道,用雪崩效应产生的单极脉冲的前沿(一般为 2-4 ns)决定了其频谱,前沿越快则高频分量越大,以 RC 常数衰减的后沿,则影响激励声脉冲的输出功率。为了弥补单极脉冲频带宽造成的能量损失,提高系统的探测灵敏度,必须使其激励电压较高。用雪崩效应能够产生前沿小于 3 ns,幅度可达上万伏的高压阶跃脉冲。在超声检测系统中激励电压也不宜太高,例如高电压会带来电源干扰、对操作者可能造成伤害、高输出功率对接收电路会造成饱和甚至损坏等。理论分析和实验表明,采用前沿 4 ns,底宽 12 ns,幅度 400 V 的单极窄脉冲足以满足我们的高频超声检测系统(激励 100 MHz 的超声探头)的探测灵敏度要求。

有关用雪崩电路来产生快前沿阶跃脉冲的原理在很多文献中^[3]都有极其详尽的分析,此处不再重复,只是就本系统激励源制作中的部分体会简述一下:

3.1 器件的选择

我国有生产雪崩晶体管的专业厂家,如哈尔滨半导体器件厂生产的 3DB1 和 3DB2 系列雪崩三极管,雪崩性能很好,雪崩电压从 15V (3DB1A)到 375V(3DB2N),雪崩上升时间在 3 ns 以内,触发延迟时间小于 6 ns,很适合于产生大幅度快前沿窄脉冲。除了专用的雪崩管之外,一些开关管和晶体管在雪崩区的应用也可以获得较好的雪崩效果。例如普通的开关三极管 2N3904, 2N2369, 2N5551 都能可靠地产生雪崩效应。表 1 中列出了几种可用于产生雪崩效应的三极管的参数。

用基本的电路达到较大的输出幅度,必须选择击穿电压高的管子,缺点是高击穿电压管子入选率较低,其触发延迟较大,雪崩上升时

间也较慢。我们选用 2N5551，是因为在电性能上它可以替代国产的高击穿电压的 3DB2N，同时它又非常便宜，便于从众多的管子中进行挑选。

表 1 几种三极管的雪崩参数

($C_s = 4700 \text{ pf}$, $R_L = 50 \Omega$)

参数 型号	击穿电压 $BV_{CBO}(V)$	雪崩上升 时间 $t_r(ns)$	脉冲底宽 $t_w(ns)$	脉冲幅度 $U_a(V)$
2N2369	65	2.0	120	40
2N3904	120	2.3	120	100
2N5551	350	2.8	120	300
3DB2N	275	3.0	120	300
BT41D	200	2.5	120	140

3.2 单级应用时的技术要求及其局限性

图 2 为基本的雪崩脉冲产生电路，储能元件电容 C 由直流高压通过电阻 R_c 进行充电，充电常数为 $R_c C$ 。 $R_c C$ 值应保证满足本系统主振周期的要求即小于 $100 \mu s$ ，以使每周期都能在 C 上储存有足够的电荷，但 R_c 的降低会使流过三极管集电极的电流增大，导致损坏三极管，只有靠减小 C 来达到此目的， C 的减小意味着输出脉冲幅度的降低(表 2 中列出了不同大小的储能电容对输出脉冲幅度及脉冲前沿的影响)。在单级晶体管雪崩的情况下输出脉冲幅度较低，达不到本系统的要求。

3.3 级联的 MARX 电路

为了在主振周期为 $100 \mu s$ 的情况下也能得到大的功率输出，必须采用多级雪崩管级联

表 2 储能电容对雪崩性能的影响

	2N5551 $R_L = 50 \Omega$					
	56	240	470	1000	1500	3300
C (pf)	56	240	470	1000	1500	3300
上升时间 $t_a(ns)$ 10—90%	1.9	2.7	2.8	3.5	3.6	3.7
脉冲底宽 t_w (ns)	16	60	120	240	400	800
输出幅度 U_a (V)	160	200	300	310	320	320

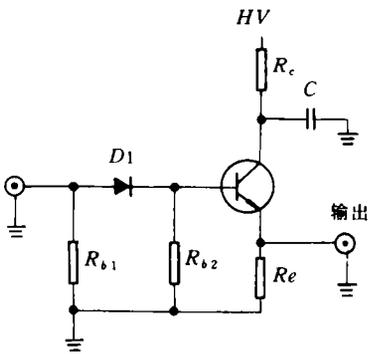


图 2 雪崩脉冲的产生电路

的方法。级联的方法有串联、并联和 MARX 电路三种，但由于串联电路需要更高的直流供电电压；并联的办法存在“封锁”问题很难达到同时触发；采用经典高压技术中的 MARX 电路，使多个晶体管级联可方便地获得较高的输出电压应用声学

压，图 3 为我们采用的用 4 只 N5551 构成的 MARX 电路。可画出此电路在充电期间和放电期间的等效电路如图 4。

在触发脉冲来临之前，各储能电容 C 处于并联状态，通过充电电阻 R 和 R_e 被充电到电源电压，当触发信号加入后，由于三极管工作在雪崩区，以极快的速度打开(相当于 $K1$ 快速闭合)，在第一个雪崩管击穿的瞬间， A 点仍保持原充电电位，对第二级的三极管而言，它在短瞬间承受比静态充电电压值高的电压，导致其从稳态迅速进入负阻雪崩区域，从而使开关 $K2$ 闭合。这一过程直至第四个三极管为止，就可在 D 点获得四倍于单级放电的输出幅度(实际稍小一些)。

4 结果

由于主振频率的限制， C 值选择较小，故输出脉冲幅度在四级情况下得到 450 V ，脉冲

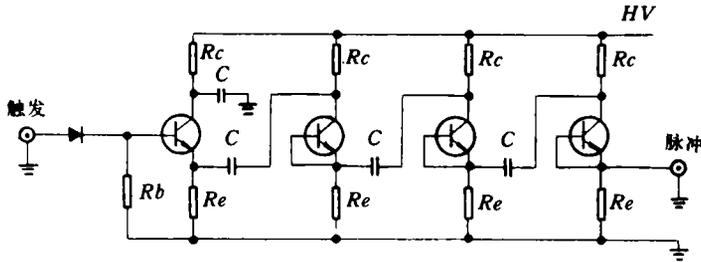


图3 雪崩 MARX 电路

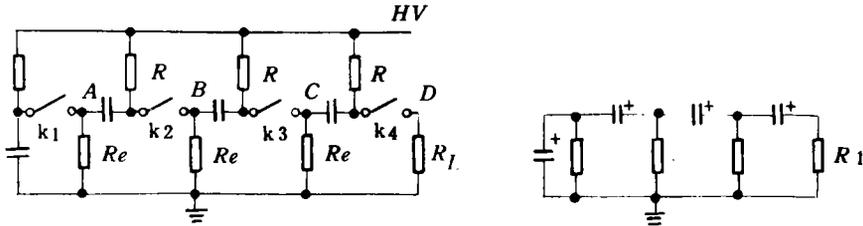


图4 MARX 电路的等效电路

前沿 4 ns, 脉冲底宽为 12 ns 的单极窄脉冲。用此信号源激励中心频率为 100 MHz 的聚焦超声探头, 得到的由镜头端面的反射回波信号 (此换能器用 36° Y 切割的 LiNO₃ 制成), 其峰峰值可达 9 V^[1], 可见此激励源的高频激励效率是很高的。

参 考 文 献

- [1] 苏公雨, 乐光启. 无损检测, 1995, 17(3): 61—64.
- [2] Benzel D M, Pocha M D. *Rev. Sci. Instrum*, 1985, 56 (7).
- [3] Baker R J. *Rev. Sci. Instrum*, 1991, 62(4).

(上接第 18 页)

- 工作频率 22 kHz
- 最大转速 30 rpm
- 最大扭矩 1.91 kg·cm
- 最大负载 6.5 kg

4 结论及讨论

(1) 纵扭复合换能器采用普通压电晶片, 具有结构简单, 功率调节范围宽等特点。

(2) 转子的旋转方向可通过调节马达的工作频率来改变, 该超声马达能在 22.0 kHz 和 24.6 kHz 分别实现正、反方向的转动。但后者转动时扭矩较小。

(3) 实验研究中发现定子与转子接触面的

大小对转动情况影响比较明显, 接触面存在最佳值。接触面过大会停止转动, 过小时则转动扭矩减小, 这可能是定子表面质点的非同相振动的影响, 对此尚待进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 周铁英等. 压电超声马达研究新进展, 1994 年全国声学学术会议论文集, 上海, 51—56.
- [2] 程存第. 超声技术——功率超声及其应用, 陕西师范大学出版社, 1993, 232—246.
- [3] 孙国武等. 大功率矩形换能器的设计, 中国声学学会 1995 年青年学术会议论文集, 西北工业大学出版社, 1995, 511—514.
- [4] 栾桂冬等. 压电换能器和换能器阵(上), 北京大学出版社, 1990, 197—210.