

多路起爆电路设计及特性分析

王 一¹, 刘择生², 赵旭瑞³, 秦栋泽¹

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2. 中国人民解放军 63850 部队, 吉林 白城 137001;
3. 晋西工业集团, 太原 030051)

摘要: 现有的多点起爆系统多采用爆炸逻辑网络, 只能以特定方式起爆, 缺乏灵活性, 且受导爆索传爆速度和传爆距离误差的影响, 难以满足自修复雷场中跳跃式智能封锁雷对于快速完成单点起爆或任意多点同步起爆的应用需求; 针对这一问题, 提出一种基于 STM32 的火工品多路起爆电路, 采用双端控制、低通滤波等设计方法保障起爆电路的安全性和抗干扰性, 结合所使用火工品的特性, 计算分析部分元器件的参数, 使用固定延时、并行起爆的起爆方式, 以减小火工品发火时间和起爆硬件延迟时间, 提高火工品起爆的快速性和同步性; 特性分析表明, 从 STM32 输出起爆驱动信号到火工品起爆的时延为 403.521 μs , 具有起爆快速性, 不计火工品发火时间差时起爆多路火工品的最大时间差为 0.246 μs , 具有起爆同步性。

关键词: 起爆电路; 火工品; 多点起爆; 快速性; 同步性

Design and Characteristic Analysis of Multi-channel Initiation Circuit

WANG Yi¹, LIU Zesheng², ZHAO Xurui³, QIN Dongze¹

(1. School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Unit 63850 of PLA, Baicheng 137001, China; 3. Jinxi Industrial Group, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Existing multi-point initiation systems often adopt explosive logic networks, which can only detonate in a specific way, lacking flexibility, and are affected by the detonation speed and distance errors of the detonating cord, and it is difficult to meet the application requirements of jumping intelligent blockade mines in self-healing minefields for quickly completing single point initiation or arbitrary multi-point synchronous initiation. In response to this problem, a multi-channel initiation circuit for initiating explosive devices based on STM32 is proposed, the design methods of dual terminal control and low-pass filtering are used to ensure the safety and anti-interference of the initiating circuit. Combined with the characteristics of the used initiating explosive devices, the parameters of some components are calculated and analyzed. A fixed delay and parallel initiating method is used to reduce the ignition time of the initiating explosive device and delay time of the initiating hardware, and improve the rapidity and synchronization of initiating explosive devices. The characteristic analysis shows that from the STM32 output detonation drive signal to the initiation of the initiating explosive device, the delay is 403.521 μs , it has the ability to detonate quickly. When ignoring the ignition time difference of the initiating explosive devices, the maximum time difference for initiating multiple initiating explosive devices is 0.246 μs , which meets the requirements of synchronous initiation.

Keywords: initiation circuit; initiating explosive devices; multipoint initiation; rapidity; synchronism

0 引言

在自修复雷场中, 跳跃式智能封锁雷不仅能够探测和定位周围其他地雷并交互信息, 而且可以通过跳跃机构完成自主移动。当雷场因作战爆炸或敌方排雷而破坏队形时, 跳跃式智能封锁雷可以通过跳跃机构完成自主移动, 自行愈合雷场^[1-2]。

智能封锁雷的跳跃机构由均匀周向布置的八路火工品燃爆点构成, 其起爆电路可根据主机命令控制火工品单路起爆、单路连续起爆或多路同步起爆, 从而完成指定方位角的单次或多次连续跳跃。起爆电路是跳跃机构的核心, 要求其不仅具有高安全性^[3], 而且具有起爆火工品的快速性和同步性, 安全性是指不误起爆火工品, 防止误跳跃;

快速性是指能快速响应主机命令, 衔接跳跃动作; 同步性要求多路火工品相互之间的起爆时间差尽量小, 减小跳跃方位角的偏差。

目前主要采用爆炸逻辑网络作为多点起爆系统, 如基于“拐角”效应的炸药装药爆炸逻辑网络和导爆索制成的多点起爆网络, 只能以特定方式起爆, 灵活性低, 受导爆索传爆速度和传爆距离误差的影响, 难以保障多点起爆的快速性和同步性^[4-6]。文献 [7] 设计了一种以等边三角形排列的平面多点起爆传爆网络, 经实验测试, 多点起爆同步性极差小于 0.6 μs 。文献 [8] 设计了一种刚性和柔性相结合的多点同步起爆网络, 测试结果表明, 多点同步起爆时间标准偏差为 0.59 μs 。本文提出了一种基于 STM32 的火工品多路起爆电

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-05-09。

作者简介: 王 一(1997-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事引信技术方向的研究。

通讯作者: 秦栋泽(1981-), 男, 山西吕梁人, 博士, 副教授, 主要从事引信技术方向的研究。

引用格式: 王 一, 刘择生, 赵旭瑞, 等. 多路起爆电路设计及特性分析[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 287-292.

路,采用双端控制、低通滤波等设计方法保障起爆电路的安全性和抗干扰性,通过计算分析部分元器件参数,减小了起爆的硬件延迟时间和火工品的发火时间,提高了能量利用率,提高了起爆快速性和同步性,最后制板进行实验,完成对起爆电路的性能评估。该电路可为自修复雷场中智能封锁雷跳跃的应用需求提供设计参考。

1 多路起爆电路的设计原理

火工品是由火药或炸药制成的、一次性使用的小型爆炸元件和装置的总称,点火元件是火工品的重要构成部件,其作用就是点火。点火元件受外部能量的激励,发出火焰冲能或其他形式的能量并传递给起爆药,从而引爆火工品。其中,桥丝式电引火元件的能量转换方式是将电能转换为热能,金属桥丝具有电阻性质,在瞬时大电流的作用下温度骤然升高,热能通过热传导传递给起爆药,当能量达到起爆点时起爆^[9-10]。桥丝式电引火元件的激发需要瞬时输入较大的电流能量,可采用储能电容放电或直流电源供电的起爆方式,因储能电容放电是以脉冲形式输出能量,比直流电源的脉冲功率大,所以采用储能电容放电的方式可以减小起爆时间^[11]。

点火控制电路是控制储能电容放电的关键。若采用模拟电路的控制方式,电路设计复杂且控制不够灵活,本文采用 STM32 单片机作为点火控制电路的主芯片,通过 UART 与主机进行通信,可根据主机发送的命令灵活控制多路点火控制电路^[12]。

点火控制器件多采用继电器和场效应管,继电器易损坏可靠性低,NMOS 管无法实现储能电容与火工品的电气隔离,安全性低^[13]。本文采用晶闸管控制执行电路,能将储能电容与火工品安全隔离开来,控制灵敏。

图 1 为多路起爆电路系统框图,主要由升压电路、降压电路、执行电路、点火控制电路和 STM32 单片机组成。升压电路将外部电压升高后供执行电路的储能电容充电;降压电路将外部电压降低到 5 V 和 3.3 V 供后级电路使用;执行电路的储能电容充电至满电荷,在点火控制电路的驱动下放电;STM32 通过 UART 接收主机发送的命令,控制相应的点火控制电路输出起爆信号。

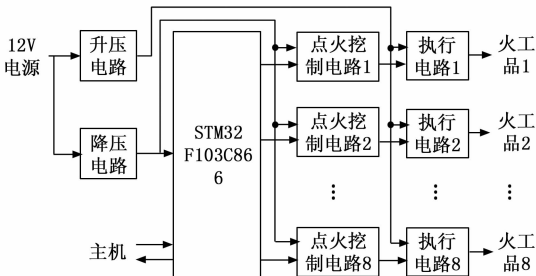


图 1 多路起爆电路系统框图

2 多路起爆电路的设计实现

2.1 电源电路

由于本文设计的多路起爆电路是用 12 V 电池供电的,

若直接供储能电容充电,其电压水平不足以可靠起爆火工品,而且随着使用时间变长,电池会出现输出电压降低、负载能力不足的问题,DC-DC 升压电路的输入电压范围宽,可以有效克服这一问题,将电池的输出电压升高并钳位在某一恒定电压。

选择 LM2577-ADJ 升压型 DC-DC 转换器作为升压电路的主芯片,该芯片外围元器件少、输入电压范围为 3.5 ~ 40 V,并且可根据需求调整输出电压,最高可达 60 V,在电路设计上更具灵活性^[14-15]。升压电路原理图如图 2 所示。

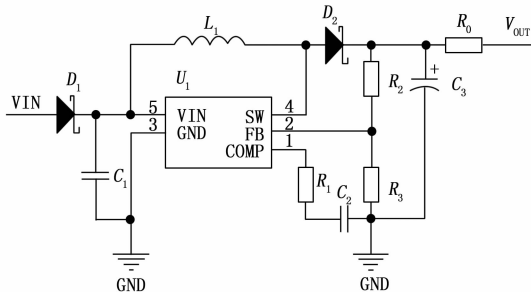


图 2 升压电路原理图

LM2577-ADJ 转换器内部的 52 kHz 固定频率振荡器控制 NPN 开关晶体管的导通状态,当晶体管导通时将能量储存在外接电感 L_1 中,当晶体管截止时外接电感 L_1 将能量输送到输出电容 C_3 ,所以调整晶体管的导通占比,即占空比,就能调整需要的输出电压。可以通过调节反馈网络 R_2 和 R_3 的比值来调整占空比,输出电压 U_{OUT} 为:

$$U_{OUT} = U_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) \quad (1)$$

基准电压 $U_{ref} = 1.23 \text{ V}$,本文 $R_2/R_3 = 11$,故 $U_{OUT} = 14.76 \text{ V}$ 。

点火控制电路需要 5 V 的基准电压,STM32 芯片的工作电压为 3.3 V,因此 12 V 的外部电源需要经过降压变换后才能供后级电路使用,本文使用两个线性稳压器级联构成降压电路,转换效率高,其原理如图 3 所示。首先使用传统线性稳压器 7805 将 12 V 转换为 5 V,7805 三端稳压器的输入输出压差要求大于 2 V,输出电压误差小、性能稳定^[16]。然后使用低压差线性稳压器(LDO) AMS1117 将 5 V 转换为 3.3 V,LDO 具有成本低、噪音低等特点^[17]。级联设置的降压电路的外接元件只需要几个旁路电容,结构简单,占用 PCB 板面积小。

2.2 执行电路

一路执行电路原理如图 4 所示。二极管 D_4 、电阻 R_4 和储能电容 C_{12} 构成充电回路,升压电路的输出端经充电回路为储能电容 C_{12} 充电。当晶闸管 VT1 门极 G 的起爆信号拉高时,晶闸管 VT1 导通,由于导通后的晶闸管内阻几乎为零,所以储能电容 C_{12} 通过与晶闸管 VT1、火工品构成的放电回路迅速放电,从而起爆火工品。二极管 D_4 单向导通,防止储能电容通过电阻 R_4 放电。电阻 $R_5 \gg R_4$,保证储能电容充电至满电荷时的电压接近 U_{OUT} ,并且 R_5 与储能电容

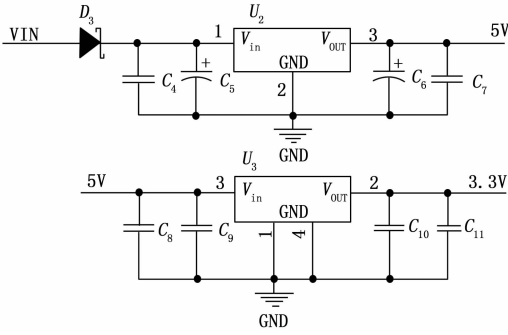


图 3 降压电路原理图

C_{12} 构成缓慢放电回路, 在未能起爆火工品时将 C_{12} 的电能量缓慢释放, 保证了跳跃机构失效时的安全性。

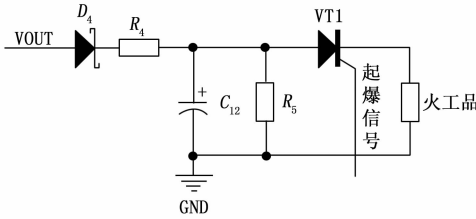


图 4 执行电路原理图

储能电容是执行电路的核心, 若其容值太小, 储存的能量不足以起爆火工品; 若其容值太大, 充放电速度缓慢, 所以合理选择储能电容, 有利于提高能量利用率, 减小火工品的发火时间。本文使用的火工品的电阻约为 5Ω , 以 1 A 恒定电流点火时的起爆能量约为 6 mJ , 起爆时间约为 1.2 ms 。

储能电容充电至满电荷时的电压近似于充电电压, 储存的能量 W_c 为:

$$W_c = \frac{1}{2} C U_{\text{OUT}}^2 \quad (2)$$

C 为储能电容的电容量, U_{OUT} 等于升压电路的输出电压, 为 14.76 V 。

在放电回路中, 电阻 $R_1 \gg$ 火工品电阻, 储能电容的放电过程可认为是一阶电路的零输入响应过程, 忽略导线电阻等因素的影响, 由基尔霍夫电压定律可得:

$$R_s C \frac{dU_c(t)}{dt} - U_{VT} + U_c(t) = 0 \quad (3)$$

式中, R_s 为火工品的阻值, U_{VT} 为晶闸管正向导通时的压降, 约为 1.7 V , 此式是一阶微分方程, 放电起始时刻储能电容两端电压为 U_{OUT} , 解得储能电容放电时电压随时间变化的表达式:

$$U_c(t) = (U_{\text{OUT}} - U_{VT}) e^{-t/R_s C} + U_{VT} \quad (4)$$

忽略晶闸管导通时的内阻, 根据欧姆定律, 放电电流随时间变化的表达式为:

$$I_c(t) = \frac{U_{\text{OUT}} - U_{VT}}{R_s} e^{-t/R_s C} + \frac{U_{VT}}{R_s} \quad (5)$$

将放电电流大于 1 A 的时间定义为起爆电流持续时间 t_s , 由式 (5) 解得:

$$t_s = R_s C \cdot \ln \frac{U_{\text{OUT}} - U_{VT}}{R_s - U_{VT}} \quad (6)$$

火工品在这段时间内获得的能量 W_s 为:

$$W_s = \int_0^{t_s} I^2(t) R_s dt = \int_0^{t_s} \left[\frac{(U_{\text{OUT}} - U_{VT})^2}{R_s^2} e^{-2t/R_s C} + \frac{2U_{VT}(U_{\text{OUT}} - U_{VT})}{R_s^2} e^{-t/R_s C} + \frac{U_{VT}^2}{R_s^2} \right] R_s dt = \frac{C(U_{\text{OUT}} - U_{VT})^2}{2} (1 - e^{-2\ln(U_{\text{OUT}} - U_{VT})/R_s - U_{VT}}) + 2CU_{VT}(U_{\text{OUT}} - U_{VT})(1 - e^{-\ln(U_{\text{OUT}} - U_{VT})/R_s - U_{VT}}) + CU_{VT}^2 \ln \frac{U_{\text{OUT}} - U_{VT}}{R_s - U_{VT}} \quad (7)$$

由火工品的起爆能量可解得储能电容最小容值 $C = 51.3 \mu\text{F}$, 考虑到火工品温升阶段的热量散失和电容器的偏压特性^[18], 取 $C = 100 \mu\text{F}$ 。起爆火工品的能量利用率 η :

$$\eta = \frac{W_s}{W_c} \times 100\% \quad (8)$$

代入数据, 得 $\eta = 73.44\%$, 具有较高的能量利用率。

电容确定后, 其充电速度由充电电阻 R_1 决定, 充电时储能电容电压随时间变化的表达式为:

$$U_c(t) = U_{\text{OUT}} (1 - e^{-t/R_1 C}) \quad (9)$$

经测量, 单片机上电复位期间, 其 GPIO 会输出一个脉宽为 2.58 ms 的脉冲, 有可能误导通晶闸管使储能电容放电。控制储能电容的充电速度, 即使误放电, 其储存的能量也不应起爆火工品, 即:

$$W_c = \frac{1}{2} C U_c^2 (2.58 \times 10^{-3}) < 6 \text{ mJ} \quad (10)$$

解得 R_1 最小值 $R_{1,\text{min}} = 13.27 \Omega$, 因电容的动态电气特性, 充电电流太大会影响电容的容值和等效串联电阻、电感, 造成电容的不完全充电, 所以取 $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ 。

2.3 点火控制电路

点火控制电路利用 STM32 单片机控制三极管的通断实现对执行电路中晶闸管的驱动, 一路点火控制电路原理如图 5 所示。STM32 选用 ST 公司的 STM32F103C8T6, 它是一款基于 ARM Cortex-M 内核 STM32 系列的 32 位的微控制器, 程序存储器容量是 64 kB ^[19]。它有 48 个引脚, 除必要引脚外, 使能了 2 个与主机通讯的 UART 引脚和 16 个输出起爆驱动信号的 GPIO 引脚。STM32 接收到主机发送的命令后, 内部处理信息, 控制相应序号的点火控制电路起爆火工品, 如起爆火工品 1, GPIO1 和 GPIO2 输出起爆驱动信号 1 和起爆驱动信号 2, 起爆驱动信号 1 高电平有效, 起爆驱动信号 2 低电平有效, 此时三极管 Q_1 截止 Q_2 导通, 输出起爆信号导通晶闸管。

三极管 Q_1 、 Q_2 作为开关元件应工作在截止区和饱和区, 为了提高三极管的开通速度以迅速起爆火工品, 可以增大基极电流防止三极管深度饱和, 但同时也要考虑到 STM32 的 GPIO 输出电流有限, 所以要合理选择 R_{21} 、 R_{22} 的阻值。例如 R_{22} , 三极管 Q_1 的集电极电流 I_c 为:

$$I_c = \frac{5\text{V}}{R_{20}} = \frac{5\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 2.5 \text{ mA} \quad (11)$$

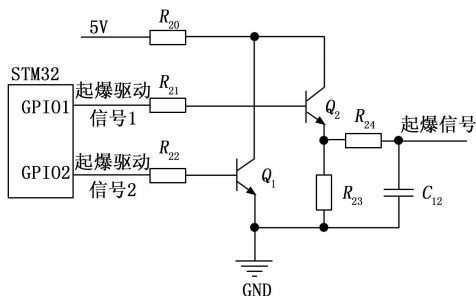


图 5 点火控制电路原理图

要使其工作于饱和区，基极电流最小为 $25\ \mu\text{A}$ ， R_{22} 阻值最大为：

$$R_{22(\text{max})} = \frac{3.3\text{V} - 0.7\text{V}}{25\ \mu\text{A}} = 104\ \text{k}\Omega \quad (12)$$

因 GPIO 输出电流一般不超过 $5\ \text{mA}$ ， R_{22} 阻值最小为：

$$R_{22(\text{min})} = \frac{3.3\text{V} - 0.7\text{V}}{5\ \text{mA}} = 520\ \Omega \quad (13)$$

综上取 R_{22} 的阻值为 $680\ \Omega$ 。

3 安全性、抗干扰性分析

火工品是一类敏感的小型爆炸元件，对起爆电路的安全性和抗干扰能力要求极高，因此在电路设计中，必须考虑安全性和抗干扰能力。

如前文所述，STM32 单片机上电复位时 GPIO 会输出一个脉冲，有可能误点火，通过控制储能电容的充电速度，即使误放电，其储存的能量也不应起爆火工品，增强电路的安全性。

在点火控制电路中，使用两只三极管对起爆信号进行双端控制，当且仅当起爆驱动信号 1、2 分别为高电平和低电平时输出起爆信号。因 STM32 上电复位时 GPIO 的状态一致，所以双端控制设计可避免上电复位时的脉冲误点火。除此之外，硬件受电磁干扰或程序跑飞时可能导致 GPIO 输出固定电平或脉冲，双端控制设计可抑制共模干扰，增强电路的安全性。

对起爆信号的输出进行滤波处理，能够有效滤除线路上的尖峰干扰。在图 5 的点火控制电路中， R_{24} 和 C_{12} 组成 RC 低通滤波网络，增强了起爆信号的抗干扰能力，防止尖峰干扰误起爆火工品。

软件安全性与抗干扰能力同样不可忽视。在 UART 通信中使用奇偶校验增强通信安全性，防止传输数据突变误起爆火工品。

4 实验验证与特性分析

4.1 电路仿真实验

在制作 PCB 板进行实验前，为验证 GPIO 能否可靠控制储能电容放电起爆火工品，使用 Multisim 软件搭建执行电路（图 4）和点火控制电路（图 5），电路设置供电电源为升压电路的输出电压，即 $14.76\ \text{V}$ ；用两只开关 S_1 、 S_2 分别模拟 STM32 单片机的 GPIO1 和 GPIO2，开关闭合表示 GPIO 输出高电平，开关断开表示 GPIO 输出低电平， S_1 默

认断开， S_2 默认闭合；用一个 $5\ \Omega$ 电阻模拟火工品，剩余元器件的型号、容差、封装均与实际元件相同，可以得到最接近实际情况的仿真结果。使用四通道示波器的 A 通道测量火工品电阻两端的电压，B 通道和 C 通道分别测量起爆驱动信号 1 和起爆驱动信号 2 的波形，其仿真波形图如图 6 所示。

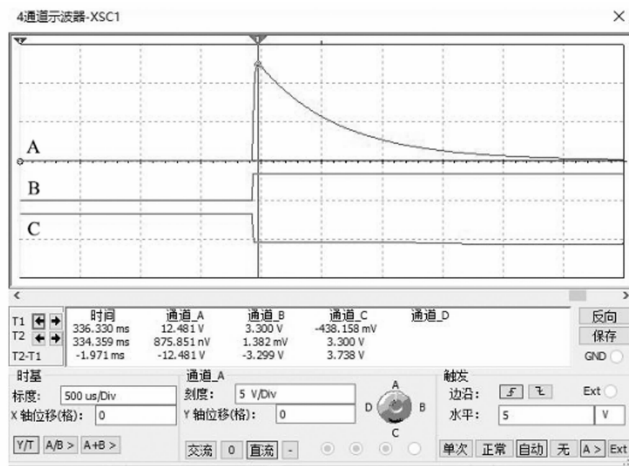


图 6 仿真波形图

由图 6 可知，电路初始状态为：起爆驱动信号 1 为低电平且起爆驱动信号 2 为高电平，此时储能电容处于充电状态，不对火工品放电。当起爆驱动信号 1 为高电平且起爆驱动信号 2 为低电平时，储能电容迅速对火工品放电，放电尖峰电压约为 $12.481\ \text{V}$ ，略低于直流电源电压。仿真结果表明，GPIO 输出的起爆驱动信号能够可靠控制储能电容对火工品放电。

4.2 起爆功能实验

将八路火工品起爆电路集成到一块 PCB 上，使用 Altium Designer 软件进行布局走线，控制器件与控制信号走线尽量短而等长，经制板、元器件焊接得到的多路起爆电路 PCB 板如图 7 所示，使用 $5\ \Omega$ 电阻代替火工品进行实验。

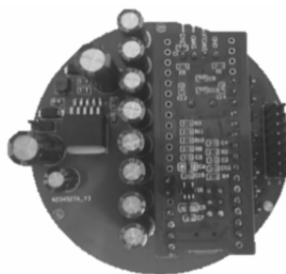


图 7 多路起爆电路 PCB 板

串口通信波特率为 $921\ 600\ \text{bps}$ ，每一组起爆驱动信号由一个 $8\ \text{bit}$ 的字符命令控制，每一帧数据包括 $1\ \text{bit}$ 起始位、 $8\ \text{bit}$ 数据位、 $1\ \text{bit}$ 奇校验位和 $1\ \text{bit}$ 停止位。

图 8 为一组起爆驱动信号与相应起爆信号的波形图，示波器 1、2 通道分别测量起爆驱动信号 1 和 2，3 通道是相应的起爆信号，当且仅当起爆驱动信号 1 为高电平且起爆驱动信号 2 为低电平时输出起爆信号。

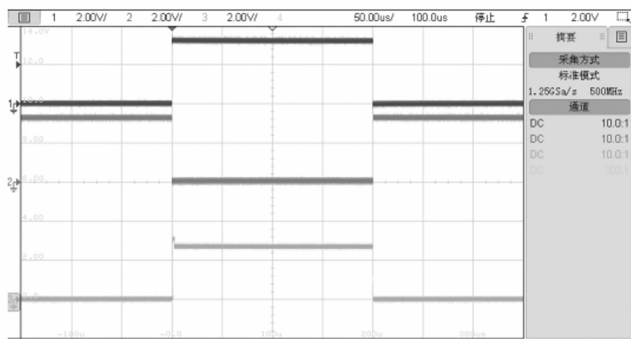


图 8 起爆驱动信号和起爆信号波形图

图 9 是一组起爆驱动信号和相应火工品两端电压波形图, 1、2 通道同上, 3 通道测量火工品两端电压。当起爆驱动信号有效, 即输出起爆信号时, 储能电容对火工品放电。因储能电容不完全放电、热量损耗等因素, 火工品的尖峰电压 $U_p = 12.25 \text{ V}$, 略低于储能电容的充电电压。由图中光标可知, 起爆电流持续时间 $t_s = 500 \mu\text{s}$, 火工品电压波形也是按指数衰减的零输入响应过程, 计算得这段时间内火工品获得的能量 W_s 为:

$$W_s = \int_0^{t_s} I^2(t)R_s dt = \int_0^{5 \times 10^{-4}} \frac{U_p^2}{R_s} e^{-2t/R_s C} dt = 6.49 \times 10^{-3} \text{ J} \quad (14)$$

大于其发火能量, 火工品能可靠起爆。

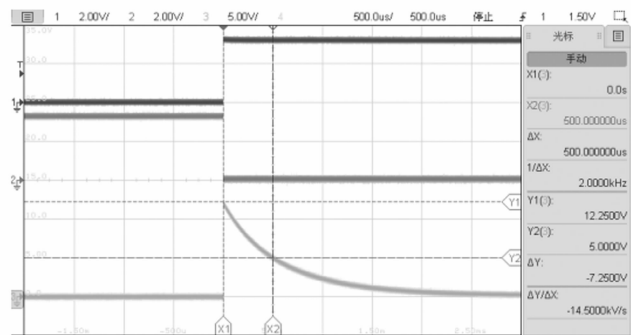


图 9 起爆驱动信号和火工品两端电压波形图

4.3 快速性分析

起爆快速性是指 STM32 单片机能够根据主机命令控制相应 GPIO 输出起爆驱动信号, 迅速起爆火工品。从 STM32 输出起爆驱动信号到火工品起爆的时延主要包括硬件延迟时间 t_d 和火工品发火时间 t_{fire} 。

硬件延迟时间 t_d 主要受控制器件开通速度、线路阻抗等因素影响, 本文通过合理选择三极管基极限流电阻、缩短 PCB 走线的方法减小硬件延迟时间。调整图 9 的时基标度得到 $1 \mu\text{s}/\text{Div}$ 的波形图 10, 由光标位置可知硬件延迟时间 t_d 约为 $1.578 \mu\text{s}$ 。

在放电回路中, 储能电容充电电压和回路电阻一定, 火工品发火时间 t_{fire} 主要受储能电容容值影响, 本文在保证可靠起爆的基础上选择储能电容 $C = 100 \mu\text{F}$, 提高了能量利

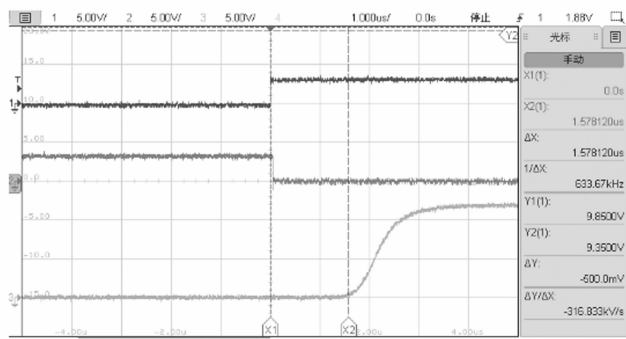


图 10 $1 \mu\text{s}/\text{Div}$ 的实验波形图

用率, 减小了火工品发火时间 t_{fire} , 解下列积分上限方程式:

$$W = \int_0^{t_{\text{fire}}} I^2(t)R_s dt = \int_0^{t_{\text{fire}}} \frac{U_p^2}{R_s} e^{-2t/R_s C} dt \quad (15)$$

W 是火工品的发火能量, U_p 是火工品两端的尖峰电压, R_s 是火工品内阻, 解得 $t_{\text{fire}} = 401.943 \mu\text{s}$ 。

综上所述, 起爆快速性的影响因素如表 1 所示, 从 STM32 输出起爆驱动信号到火工品起爆的总时延 $t = 403.521 \mu\text{s}$, 具有起爆快速性。

表 1 起爆快速性的影响因素

影响因素		措施
硬件延迟时间 t_d	控制器件开通速度	计算选择三极管基极限流电阻
	线路阻抗	缩短 PCB 走线
火工品发火时间 t_{fire}	储能电容容值	计算选择储能电容容值

4.4 同步性分析

多路起爆电路 PCB 最多可起爆八路火工品, 依次编号 1~8。起爆同步性要求多路火工品同时起爆时, 其相互之间的起爆时间差尽量小。起爆同步性主要受起爆驱动信号输出时间差 Δt_T 、硬件延迟时间差 Δt_d 和火工品发火时间差 Δt_{fire} 影响。

同厂同批次的桥丝式电火工品在相同起爆条件下, 发火时间精度主要受制造工艺误差影响, 如桥丝直径和长度误差、药头质量误差等。文献 [9] 选取若干发同厂同批次的 LTNR 系刚性 $16 \mu\text{m}$ 桥径点火头进行测试, 其发火时间标准差为 $24.4 \mu\text{s}$ 。文献 [20] 使用 20 发桥丝电阻一致、药头质量在 $12 \sim 15 \text{ mg}$ 的点火头进行试验, 其发火时间标准差为 $31.0 \mu\text{s}$ 。因此, 合理的制造工艺误差对桥丝式电火工品的性能没有明显影响, 满足同步性要求。在实际应用中, 选用电阻误差小、药头质量误差小的火工品可提高发火时间精度。本实验使用 5Ω 电阻代替火工品, 模拟在制造工艺上没有误差, 因此实验中忽略火工品发火时间差 Δt_{fire} 。

起爆驱动信号的输出由主机发送命令控制。为减小 UART 串行通信传输命令对起爆驱动信号输出同步性的影响, 采用固定延时、并行输出的方法。因 STM32 单片机可对同一组的多个端口同时进行赋值操作, 所以使能同一组端口, 即 GPIOB 的 PB0~PB15, 作为输出起爆驱动信号的

GPIO。当 STM32 通过 UART 接收到命令时，开启固定延时，确保延期内接收到全部命令，然后根据命令判断各 GPIO 的输出状态，并行输出起爆驱动信号，因此，起爆驱动信号输出时间差 $\Delta t_T = 0$ 。

硬件延迟时间差 Δt_d 主要由控制器件开通速度不同、线路阻抗不同等因素造成，因此，使用同批次相同参数元件、PCB 等长走线等措施可以减小硬件延迟时间差 Δt_d 。以火工品 1 为参照，两两进行实验，图 11 中通道 1、2 分别为火工品 1、2 同时起爆时的波形图，由光标位置可知，两火工品起爆的硬件延迟时间差 $\Delta t_d = -110 \mu s$ 。同理可得各火工品与火工品 1 的硬件延迟时间差，如表 2 所示。分析可知，同时起爆包含火工品 2 和 6 的多路火工品时的硬件延迟时间差 Δt_d 最大，为 $0.394 \mu s$ 。

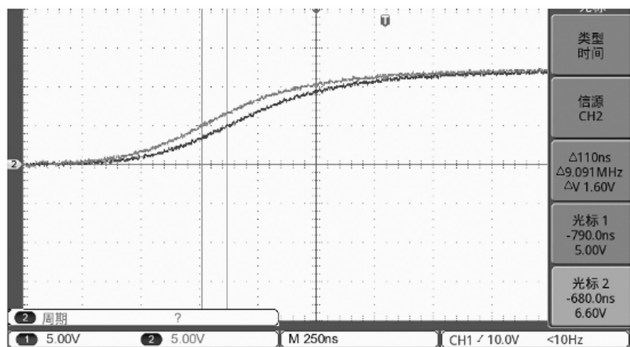


图 11 火工品 1 和 2 同时起爆波形图

表 2 各火工品与火工品 1 的硬件延迟时间差

火工品	$\Delta t_d / \mu s$
2	-0.110
3	0.028
4	0.066
5	-0.054
6	0.136
7	-0.038
8	0.082

综上所述，起爆同步性的影响因素如表 3 所示，不计火工品发火时间差 Δt_{fire} 时，起爆多路火工品的最大时间差为 $0.246 \mu s$ ，具有起爆同步性。

表 3 起爆同步性的影响因素

影响因素		措施
起爆驱动信号输出时间差 Δt_T	UART 串行通信	固定延时、并行输出
硬件延迟时间差 Δt_d	控制器件开通速度差	选用同批次相同参数元件
	线路阻抗差	PCB 等长走线
火工品发火时间差 Δt_{fire}	制造工艺误差	选用电阻误差小、药头质量误差小的火工品

5 结束语

本文针对智能封锁雷的跳跃机构，提出了一种基于

STM32 的多路起爆电路。在电路设计上采用双端控制、低通滤波等方法提高电路的安全性和抗干扰能力。基于参数计算选择关键元器件，使用固定延时、并行起爆的起爆方式，以减小火工品的发火时间和起爆硬件延迟时间。特性分析表明：从 STM32 输出起爆驱动信号到火工品起爆的时延为 $403.521 \mu s$ ，具有起爆快速性；不计火工品发火时间差时，起爆多路火工品的最大时间差为 $0.246 \mu s$ ，具有起爆同步性。该电路简单可靠、PCB 体积小，能与主机通讯、功能灵活，可为自修复雷场中智能封锁雷跳跃的应用需求提供技术支持。

参考文献:

- [1] 秦栋泽, 聂宏斌, 陆世杰, 等. 自修复雷场自修复能力分析 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2009, 30 (2): 143-146.
- [2] 殷希梅, 王占操, 张运兵, 等. 地面区域封锁弹药综述 [J]. 兵工自动化, 2014, 33 (7): 79-82.
- [3] 赵燕文. 基于电引信的多功能起爆控制电路研究与设计 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [4] 修忠明. 基于引信电子安全和解除保险装置的多点起爆控制技术 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [5] 韩克华, 任西, 张玉若, 等. 定向战斗部直列式多点起爆系统设计 [J]. 火箭与制导学报, 2013 (6): 78-81.
- [6] 党瑞荣, 谢雁, 宋国亮, 等. 爆炸逻辑网络电子安全控制系统研究 [J]. 火工品, 2008 (5): 18-21.
- [7] 许碧英, 李公法, 高桂萍. 平面多点同时起爆网络的设计 [J]. 火工品, 2004 (3): 1-4, 1.
- [8] 胡华权, 裴明敬, 张德志, 等. 曲面多点同步起爆网络研制 [J]. 火工品, 2008, 124 (6): 5-8.
- [9] 王文斌. 电子雷管用电子点火元件研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [10] 韩体飞, 郭敦杰, 张晔, 等. 桥丝式电点火头发火能量的输出形式 [J]. 火工品, 2016 (5): 21-24.
- [11] 周庆, 焦清介. Ni-Cr 桥丝式电火工品发火规律 [J]. 四川兵工学报, 2015, 36 (4): 144-147.
- [12] 陈海峰, 聂伟荣. 基于 STM32 的引信多用途起爆电路设计 [J]. 火力与指挥控制, 2018, 43 (4): 148-151.
- [13] 张爱军, 朱军伟, 程时兵. 一种基于 DSP 的半导体桥起爆电路的设计 [J]. 火工品, 2011 (4): 8-11.
- [14] 王杰. 设施农业环境信息低功耗无线采集系统设计 [D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
- [15] 王清辉, 顾朋, 李建华. 多重空气净化器控制系统设计 [J]. 龙岩学院学报, 2015, 33 (5): 52-56, 78.
- [16] 严黎明. 基于人机工程学的老年人助行器设计与研究 [D]. 西安: 西京学院, 2022.
- [17] 简铨, 肖清泉, 阮昊, 等. 一种高压、宽输入的 LDO 电路设计 [J]. 智能计算机与应用, 2023, 13 (3): 123-128.
- [18] 沈超, 付丽璋, 吴世通, 等. 电容放电式火工品点火电路参数设计与仿真 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32 (1): 67-7.
- [19] 郭小焯, 王洋. 基于 STM32 的手持式气体检测仪 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 265-271.
- [20] 陈余华. 一种高精度安全型点火药头在电子雷管中的应用 [J]. 科学技术创新, 2020 (31): 158-159.