

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0022-05

云爆战斗部二次起爆引信抗电磁干扰方法

崔元博, 孔德仁

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京, 210094)

摘要: 为了增强云爆战斗部二次起爆引信在爆炸电磁环境中的抗干扰能力, 对典型引信电路进行了TVS限幅滤波功能设计, 并通过电磁辐射等效试验对其抗电磁干扰效果进行了验证; 在此基础上, 采用滤波整流抑制、防逆向串扰、光电耦合隔离、接地技术、过压保护等手段对二次起爆引信的起爆电路进行了抗电磁干扰加强设计, 并对其抗电磁干扰效果进行了不低于高能云爆战斗部爆炸电磁辐射干扰强度的等效测试。结果表明: 该方法在不改变引信结构的前提下, 能够将云爆战斗部二次起爆引信的电磁敏感度由V级降至I级。

关键词: 引信; 二次起爆; 爆炸电磁辐射; 引信电磁干扰; 防护电路

中图分类号: TJ43; TN97 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.005

Anti-Electromagnetic Interference Method for Secondary Detonation Fuze of Fuel Air Explosive

CUI Yuan-bo, KONG De-ren

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: In order to enhance the anti-electromagnetic interference ability of the secondary detonation fuze of the fuel air explosive (FAE) in explosive electromagnetic environments, a limited amplitude filtering function based on TVS was designed for typical fuze circuits, and its anti-electromagnetic interference effect was verified through electromagnetic radiation equivalent test. On this basis, methods such as filtering rectification suppression, anti-reverse crosstalk, optoelectronic coupling isolation, grounding technology and overvoltage protection were adopted to enhance the anti-electromagnetic interference design of the secondary detonation fuze detonation circuit, and the anti-electromagnetic interference effect was equivalently tested by electromagnetic radiation interference intensity not lower than that of high-energy FAE. The results show that this method can reduce the electromagnetic sensitivity of the secondary detonation fuze of FAE from level V to level I without changing the fuze structure.

Key words: Fuze; Secondary detonation; Explosive electromagnetic radiation; Fuze electromagnetic interference; Anti-interference circuit

云爆战斗部发挥作用一般需要经过2次起爆过程: 首先引爆云爆药剂容器, 将云爆药剂抛撒在空气中, 与空气混合形成可燃云团; 然后由二次起爆引信点燃可燃云团, 产生具有毁伤威力的高温火球和爆轰冲击波^[1-2]。云爆战斗部的二次起爆引信是一种高精度延时引信, 其电子元器件容易受到抛撒引爆时产生的

爆炸电磁辐射干扰^[3-5]。当爆炸电磁辐射强度超过了引信电磁干扰限值, 或其能量集中频段与引信敏感频段高度重合时, 会对二次起爆引信的起爆时间精度造成影响, 从而影响云爆战斗部的毁伤威力^[6-8]。二次起爆时间过早, 云爆药剂与空气混合不够充分, 会导致“蹿火”; 起爆时间过迟, 大量云爆药剂已落至地面, 无

收稿日期: 2023-04-10

作者简介: 崔元博 (1991-), 男, 博士, 从事爆炸电磁辐射测试技术及特性研究。

通讯作者: 孔德仁 (1964-), 男, 教授, 从事动态参量测试与计量技术研究。

基金项目: 中央军委装备发展部装备项目 (No. 995-14021006010401)。

法形成足量可燃云团,会导致“哑火”^[9-11]。因此,有必要进行云爆战斗部二次起爆引信抗电磁干扰方法研究。

本文首先对典型引信电路进行了滤波及限幅功能设计,并对其抗电磁干扰效果进行了试验验证;在此基础上,采用滤波整流抑制、防逆向串扰、光电耦合隔离、接地技术、过压保护等手段对二次起爆引信的起爆电路进行了抗电磁干扰加强设计,并对其抗电磁干扰效果进行了不低于高能云爆战斗部爆炸电磁辐射干扰强度的等效测试。

1 典型引信电磁干扰测试电路

典型引信电路主要包括电源电路、模拟电路和数字电路3部分。其中,电源电路以AMS1117作为主芯片,向电路提供3.30 V电压源,正常输入电压不超过4.80 V,电压调整范围为1.50~12.00 V,最大承受电压为15 V;模拟电路以AD9742作为主芯片,正常供电电压为3.30 V,D/A转换电路输出电压范围为-1.00~1.25 V,芯片负载电压不超过3.90 V;数字电路以EP4CE115F23I7N作为主芯片,正常输入电压范围为-0.50~3.60 V,绝对电压超过3.75 V容易引起扰动,绝对电压超过4.20 V会击穿芯片。当爆炸电磁辐射耦合在引信电路上时,可能产生浪涌效应击穿或热效应烧毁,轻则扰乱引信电路工作时序,重则导致电路完全失效。因此,需对引信电路受电磁干扰程度进行测试。遵循GJB 373B-2019引信安全性设计准则^[12]及GJB 8678-2015引信电磁辐射危害试验方法^[13]设计爆炸电磁辐射干扰引信等效试验。基于微带线结构的引信电磁干扰测试电路等效模型如图1所示。

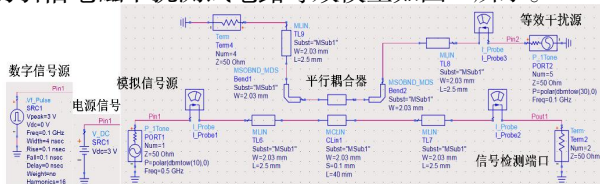


图1 典型引信电磁干扰测试电路等效模型

Fig.1 Equivalent model of typical fuze electromagnetic interference testing circuit

测试过程为:从PORT 2注入干扰信号,Pin 1为电源电路、模拟电路、数字电路信号源,Term 2为信

号检测端口,通过检测输出信号与信号源之间的差异,判定电路受干扰程度。信号分析主要采用2个参数指标:干扰电压值,即受到干扰后信号波动的最大值;干扰后模拟和数字信号波纹的振荡幅度,即干扰信号离散点坐标偏离度。

2 典型引信电路抗电磁干扰方法

2.1 典型引信电路抗电磁干扰设计

由于爆炸电磁脉冲具有上升沿快(8.357~43.536 ns)、脉宽窄(19.349~302.332 ns)、脉冲幅值高(120.2~4 195.1 V·m⁻¹)、频率分布广(1.5~847.0 MHz)的特点^[14],一方面,为了抑制干扰电磁脉冲传导,在引信电路抗干扰设计中需进行滤波功能设计,通过减小或消除耦合在引信电路上的电磁脉冲高频分量,使得基于频率选择性原理的耦合无法实现高频时的阻抗匹配,从而保护电路^[15-17];另一方面,为了限制干扰电磁脉冲电压、防止雪崩击穿,在引信电路抗干扰设计中进行限幅功能设计。根据引信电路功能和爆炸电磁脉冲信号特点,限幅瞬态防护器件的选用主要依据3个原则:瞬态器件的响应时间应快于脉冲信号的上升时间;瞬态器件的通流量应大于脉冲信号的最大耦合电流;瞬态器件的结电容应小于正常工作电路允许的最大结电容。抗干扰电路瞬态防护器件主要有气体放电管、压敏电阻、瞬态抑制二极管(TVS管),3种防护器件特性参数如表1所示。

表1 瞬态防护器件特性参数

Tab.1 Characteristic parameters of transient protection devices

器件类型	响应速度	典型电容值	最大通流量
气体放电管	10ns左右	< 2pF	大(10 kA左右)
压敏电阻	< 10ns	μF级	最大(50 kA左右)
瞬态抑制二极管	ps级	pF级	较小(1 kA左右)

由表1可见,只有TVS管的响应时间(ps级)快于爆炸电磁脉冲的最小上升时间(8.357 ns),并且TVS的通流量(1 kA左右)大于爆炸电磁脉冲在引信电路上的最大耦合电流(约几百安),因此采用TVS管作为引信抗干扰电路的瞬态防护器件。

典型引信电路抗电磁干扰设计等效模型如图2所示。由图2可见,电源抗干扰电路采用2个滤波电容和1个限幅电路,其中限幅电路采用5个TVS管(每

个TVS管限值电压0.70V,将干扰电压限制在3.50V以下;模拟抗干扰电路采用4个TVS管组成的限幅电路将干扰电压限值在2.80V以下,并采用LC高通滤波器降低干扰信号的波纹振幅;数字抗干扰电路采用5个TVS管组成的限幅电路将干扰电压限制在3.50V以下,并采用RLC限波器,通过产生与干扰信号相同频率的谐振频率滤除干扰信号。

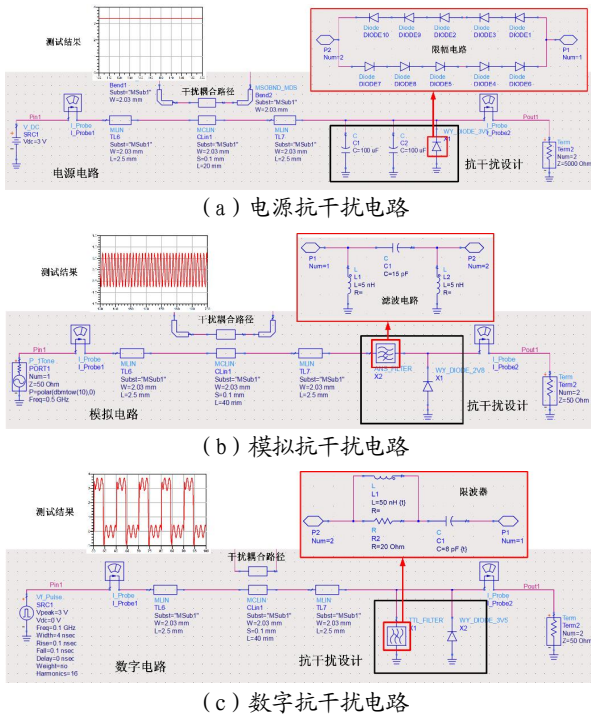


图2 典型引信电路抗干扰设计等效模型

Fig.2 Equivalent model of anti-interference design of typical fuze circuit

2.2 典型引信电路抗电磁干扰测试

为了精准分析引信对爆炸电磁干扰的敏感度,将引信电路受干扰程度分为正常运行(I级)、扰乱(II级)、降级(III级)、损坏(IV级)、摧毁(V级)5种等级。其中,电路损坏或摧毁通过电源电路的干扰电压值判断;电路扰乱或降级主要由通信误码率判定,而通信误码率受模拟电路和数字电路的输出信号影响。GJB 8678-2015 引信电磁辐射危害试验方法^[13]规定干扰信号参数限值允差小于15%为无影响,允差在15%~60%为受影响状态。对采取抗电磁干扰设计的典型引信电路进行电磁辐射等效试验,测试引信上的干扰电压和干扰信号的波纹振幅,测试结果如表2所示。由表2可知,引信电路抗干扰设计对于降低爆炸电磁辐射干扰电压和干扰信号波纹振幅具有明显

作用。初始电磁敏感度分别为II、III、IV级的引信电路,经抗干扰设计后的电磁敏感度均降至I级;但是初始电磁敏感度为V级的引信电路,经抗干扰设计后的电磁敏感度降为II级,仍达不到正常运行(I级)标准,因此有必要在典型引信电路抗干扰设计的基础上,进一步对云爆战斗部二次起爆引信的抗电磁干扰能力进行加强设计。

表2 典型引信电路抗电磁干扰测试结果

Tab.2 Typical fuze circuit anti-electromagnetic interference test results

初始电磁敏感度	电源电路干扰电压 /V	模拟电路		数字电路		抗干扰后电磁敏感度
		干扰电压 /V	波纹振幅 /%	干扰电压 /V	波纹振幅 /%	
II	3.3	1.0	0	3.0	5	I
III	3.2	1.1	5	3.1	5	I
IV	3.4	1.2	10	3.3	10	I
V	4.0	1.6	20	3.6	15	II

3 二次起爆引信抗电磁干扰方法

3.1 二次起爆引信电路抗电磁干扰设计

二次起爆引信起爆电路抗干扰设计如图3所示。

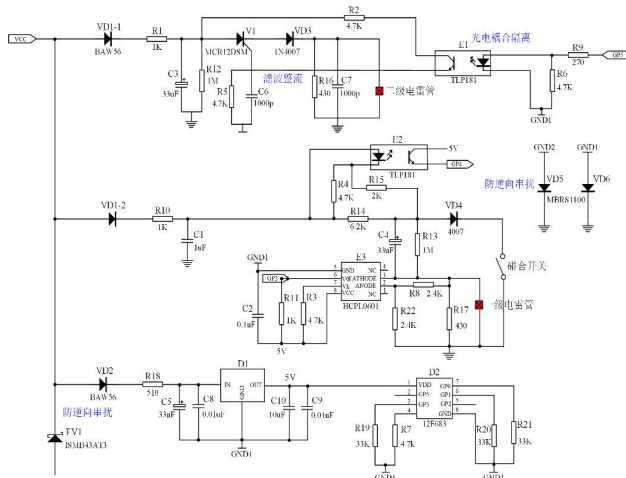


图3 二次起爆电路抗干扰设计

Fig.3 Anti-interference design of secondary detonation circuit

其工作过程为:VCC为二次起爆电路提供9V电压,当碰合开关闭合后一级电雷管电路导通,TVS管VD1-2、VD4和光电耦合器E2依次导通,GP4发出启动指令,经过高精度延时到达二级电雷管电路,GP5发出高电平起爆指令,TVS管VD1-1、VD3和光电耦合器E1依次导通,二级电雷管通电并引爆。此过程中引信受到的电磁干扰包括:爆炸电磁辐射干扰(击穿器件VD1-2、V1、VD3形成通路而导致电雷管误触发提前起爆)以及电雷管上电爆燃产生的干

扰。因此采用多重滤波整流电路 (R16、C7、R5、C6、R12、C3)抑制瞬态电流干扰,采用光电耦合隔离(E1、E2)进行电气隔离阻挡干扰信号,采用接地电路和TVS管(VD1-1、VD1-2、VD5、VD6)阻止逆向串扰电压,采用过压保护器件(FV1)防止电源电压异常过高同时滤除噪声。

3.2 二次起爆引信电路抗电磁干扰测试

由于爆炸电磁信号上升时间短、幅值大,当爆炸电磁脉冲耦合至引信电路时,会对引信电路各模块形

成谐振频率扰动,引信电路感应电流或电压一般为重叠减幅的正弦波或方波。因此,为了实现二次起爆引信抗干扰电路等效测试,向电路各模块注入干扰信号源,等效干扰强度不低于某型高能云爆战斗部爆炸电磁辐射耦合干扰强度:干扰持续时间大于等于1s,正弦干扰信号最大幅值大于等于10V,波纹振荡幅度大于等于120%,干扰频段为0.01~1×10³ MHz,信号功率大于等于75 dBm。二次起爆引信电路抗干扰等效测试如图4所示。

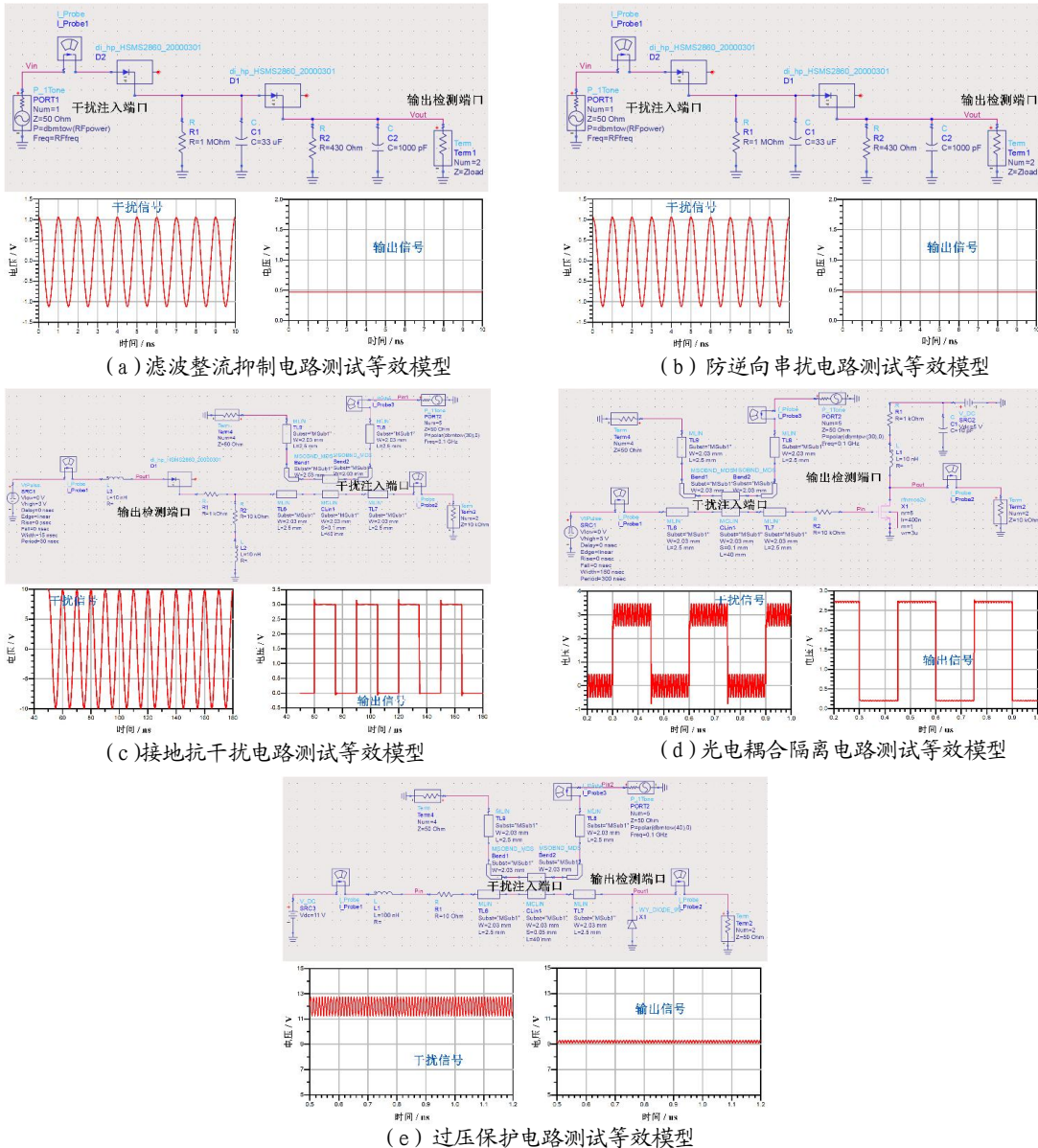


图4 引引起爆电路抗干扰等效测试

Fig.4 Equivalent anti-interference test of fuze detonation circuit

图4(a)为滤波整流抑制等效测试模型,主要测试V1、VD3、R5、C6、R16、C7组成电路的抗干扰

效果;图4(b)为防逆向串扰等效测试模型,主要测试VD1-1、VD1-2、VD2器件的抗干扰效果;图4(c)

为接地抗干扰等效测试模型，主要测试 GND1/2、VD5/6 组成电路的抗干扰效果；图 4 (d) 为光电耦合隔离等效测试模型，主要测试 E1、E2 组成电路的抗干扰效果；图 4 (e) 为过压保护等效测试模型，主要测试 FV1 器件的抗干扰效果。测试结果如表 3 所示。由表 3 可知，通过对二次起爆引信起爆电路的抗电磁干扰强化设计，电路各模块对高能电磁辐射的敏感度均为 I 级，能够在高能云爆战斗部爆炸电磁环境下正常运行。

表 3 引信起爆电路抗爆炸电磁干扰等效测试结果
Tab.3 Equivalent test results of anti-explosive electromagnetic interference for fuze detonation circuit

等效模型	注入电压/V	注入波纹振幅/%	输出电压/V	输出波纹振幅/%	敏感度等级
滤波整流电路	2.1	150	0.48	0	I
防串扰电路	11	150	5.0	5	I
接地电路	20	120	0~3.0	1	I
光电隔离电路	0~3	100	0.3~2.7	2	I
过压保护电路	11~13	150	9.0	5	I

4 结论

本文建立了典型引信电磁干扰测试电路等效模型，提出了典型引信电源电路、模拟电路、数字电路抗电磁干扰设计方法，通过检测引信电路信号变化得到了不同影响状态（正常、扰乱、降级、损坏、摧毁）下的引信敏感度等级，试验表明采用限幅滤波设计能够有效降低引信在大部分爆炸电磁辐射环境下的敏感度，但是仍需要强化高能云爆战斗部爆炸电磁环境下的二次起爆引信的抗电磁干扰能力。采用滤波整流抑制、防逆向串扰、光电耦合隔离、接地技术、过压保护等手段对二次起爆引信的起爆电路进行了抗电磁干扰加强设计，将云爆战斗部二次起爆引信的电磁敏感度由 V 级降至 I 级，确保其能够在强电磁环境中正常运行，提升了武器系统稳定性。

参考文献：

- [1] 畅博, 王世英. 二次起爆型云爆战斗部爆炸抛撒过程及毁伤作用[J]. 战术导弹技术, 2016(06): 111-117.
- [2] 王世英, 计冬奎. 二次起爆云爆战斗部的发展趋势[C]// OSEC 首届兵器工程大会论文集, 2017.
- [3] Cui Y B, Kong D R, Jiang J, et al. Research on electromagnetic radiation mechanism during detonation of energetic material[J]. Sensors, 2022, 22(7): 2 765.
- [4] 施长军, 丁刚, 郭莎, 等. 云爆战斗部二次起爆引信抗干扰方法[J]. 火箭与制导学报, 2016, 36(04):51-54.
- [5] 杨洁, 王彪, 王书平, 等. 无线引信电磁辐射能量耦合路径研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(04): 21-25.
- [6] 崔元博, 商飞, 孔德仁, 等. 爆炸场电磁辐射特性测试技术研究[J]. 火工品, 2019(5): 1-5.
- [7] 崔元博, 孔德仁. 某型弹静爆过程中电磁辐射频谱分析[J]. 火工品, 2020(5): 18-22.
- [8] 张鹏, 朱平安, 马翰宇, 等. 炮射云爆战斗部二次起爆时间的试验研究[J]. 火炸药学报, 2008(05): 55-58.
- [9] 崔元博, 商飞, 孔德仁. 云爆弹爆炸电磁辐射测试试验研究[J]. 测试技术学报, 2020, 34(2): 99-103.
- [10] Cui Y B, Kong D R, Jiang J, et al. Research on electromagnetic radiation characteristics of energetic materials[J]. Magnetochemistry, 2022, 8(5): 57.
- [11] 吉童安, 姜文忠, 付胜华, 等. 燃料空气炸药二次起爆引信与爆轰云雾动态交会浓度检测方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(11): 2 327-2 332.
- [12] GJB 373B-2019 引信安全性设计准则[S]. 北京:中央军委装备发展部, 2019.
- [13] GJB 8678-2015 引信电磁辐射危害试验方法[S]. 北京:中国人民解放军总装备部, 2015.
- [14] 崔元博, 孔德仁, 张学辉, 等. 典型炸药爆炸过程中电磁辐射特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(06): 70-80.
- [15] 曹长德, 蔡文晶, 邵李焕, 等. 一种电子引信抗电磁干扰封装技术[J]. 电子与封装, 2010, 10(07): 4-6.
- [16] Cui Y B, Jiang J, Kong D R, et al. Study on electromagnetic radiation interference caused by rocket fuel[J]. Sensors, 2021, 21(23): 8 123.
- [17] 郑福泉, 姜文忠, 杨金刚, 等. 引信强电磁脉冲效应仿真与评估方法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(01): 21-24, 28.