

毫米波近炸探测器超宽带电磁脉冲防护 加固措施研究

陈凯柏^{1a}, 刘少华², 毕军建^{1b}, 高敏^{1a}, 周晓东^{1c}

(1.陆军工程大学石家庄校区 a.导弹工程系 b.电磁环境效应国家级重点实验室 c.弹药工程系, 石家庄 050003; 2. 陆军装备部, 北京 100089)

摘要: **目的** 研究毫米波引信近炸探测器超宽带(Ultra-wideband, UWB)电磁脉冲防护加固措施, 提高引信的电磁防护能力。**方法** 利用超宽带辐照试验平台, 开展辐照试验, 通过测试, 确定受损探测器的损伤部位, 明确辐照效应机理, 并提出针对性加固措施。**结果** 超宽带电磁脉冲可使探测器出现死机或硬损伤的现象, 受试探测器的效应场强阈值在50~80 kV/m。死机可在重启后恢复, 而硬损伤为不可恢复现象。**结论** 毫米波引信近炸探测器对超宽带电磁脉冲较为敏感, 锁相环回路是探测器的敏感部位。探测器暴露在辐照场下的射频电路和天线窗口是超宽带能量的主要耦合通道。采取改进元器件布局、更换器件和屏蔽线等加固措施后, 探测器超宽带的防护能力有较大提升, 证明了加固措施的有效性。

关键词: 引信; 近炸探测器; 超宽带电磁脉冲; 防护加固; 辐照试验; 硬损伤

中图分类号: TJ43+4.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)11-0027-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.11.004

Protection and Reinforcement Measures of Ultra-wideband Electromagnetic Pulse for Millimeter Wave Proximity Detector

CHEN Kai-bai^{1a}, LIU Shao-hua², BI Jun-jian^{1b}, GAO Min^{1a}, ZHOU Xiao-dong^{1c}

(1. a. Department of Missile Engineering, b. National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, c. Department of Ammunition Engineering, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China;
2. Army Equipment Department, Beijing 100089, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the electromagnetic protection capability of the fuze and study the reinforcement measures of ultra-wideband electromagnetic pulse protection for the proximity detector of the millimeter wave fuze. The ultra-wideband irradiation test platform is used to carry out the irradiation test, through which the damaged part of the damaged detector is determined, the irradiation effect mechanism is clarified, and targeted reinforcement measures are proposed. The ul-

收稿日期: 2022-09-07; 修订日期: 2022-11-01

Received: 2022-09-07; Revised: 2022-11-01

基金项目: 重大专项(2017-JCJQ-ZD-004)

Fund: Major Special Projects (2017-JCJQ-ZD-004)

作者简介: 陈凯柏(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高功率微波效应。

Biography: CHEN Kai-bai (1996-), Male, Doctoral candidate, Research focus: high-power microwave effect.

通讯作者: 周晓东(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新概念弹药技术。

Corresponding author: ZHOU Xiao-dong (1976-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: new concept ammunition technology.

引文格式: 陈凯柏, 刘少华, 毕军建, 等. 毫米波近炸探测器超宽带电磁脉冲防护加固措施研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 024-033.
CHEN Kai-bai, LIU Shao-hua, BI Jun-jian, et al. Protection and Reinforcement Measures of Ultra-wideband Electromagnetic Pulse for Millimeter Wave Proximity Detector[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 024-033.

tra-wideband electromagnetic pulse can cause the detector to crash or hard damage, and the threshold of the effect field strength of the detector under test is between 50 kV/m and 80 kV/m. A crash can be recovered after a restart, while hard damage is unrecoverable. The millimeter wave fuze proximity detector is sensitive to ultra-wideband electromagnetic pulses, and the phase-locked loop is the sensitive part of the detector. The RF circuit and antenna window of the detector exposed to the radiation field are the main coupling channels of the ultra-wideband energy. After the reinforcement measures such as improving the layout of components and replacing components and shielding wires, the ultra-wideband protection capability of the detector is greatly improved, which proves the effectiveness of the reinforcement measures.

KEY WORDS: fuze; proximity detector; ultra-wideband electromagnetic pulse; reinforcement; irradiation test; hard damage

无线电引信通过无线电波获取目标信息,能够在预定位置起爆,被称为是现代武器系统终端效能的倍增器^[1-3]。毫米波引信由于具有定距精度高、体积小、抗干扰能力强等特点,被视为无线电引信发展的重点^[4]。然而,毫米波引信包含大量电子元器件,特别是引信近炸探测器,往往由高度集成的电路结构或芯片组成,在超宽带电磁脉冲辐照下易受干扰,严重影响弹药毁伤效能。因此,亟需开展相关研究切实提高近炸探测器的电磁防护能力^[5]。

引信的超宽带辐照效应机理是防护加固技术研究的前提,相关研究成果集中在仿真分析^[6-14]和试验研究^[15-25]2个方面。文献[6]研究了引信壳体对电磁脉冲的屏蔽效能,并通过实验验证了壳体的防护效果。文献[7]建立了引信壳体及其电路板模型,分析了电磁脉冲与壳体孔缝的耦合规律。文献[8-9]建立了引信贴片天线模型和射频前端电路,对前门耦合通道进行了详尽分析。文献[10]对地雷引信内部线缆建模,计算了超宽带环境下的线缆感应电流,验证了屏蔽盒的屏蔽效果。文献[11]利用电磁拓扑理论分析了电磁脉冲和微带线耦合效应,其研究结果可为引信的电磁脉冲耦合响应分析提供一定参考。文献[12]通过仿真软件,对某引信配用弹体的谐振频点、耦合增强区域等进行了研究。文献[13]研究了在强电磁脉冲环境下引信腔体的屏蔽效能,通过仿真试验发现,脉冲上升时间对限幅器泄漏电压峰值的影响最大。文献[14]利用多物理场分析软件,对电点火头的主要组成器件N型晶体管的电磁损伤机理进行了分析。文献[15-18]通过辐照试验,发现超宽带电磁脉冲可通过后门耦合进入引信电源模块,导通执行电路中的晶闸管,使引信意外发火,并通过加入电感的方法增强了执行电路的抗干扰能力。文献[15,19]通过试验发现,超宽带电磁脉冲可通过后门耦合作用干扰无线电引信的正常工作,执行电路是引信的敏感部位,脉冲的脉宽越窄,对执行电路的影响越大,该结论与文献[13]中的仿真结果相似。对执行电路加固后,引信的效应阈值显著增强。文献[20-23]发现超宽带电磁脉冲可直接作用于引信天线和圆柱屏蔽腔体,或是通过弹体耦合引起共地电位的不正常波动,使引信发火。文献[24]对某引信近炸探测器进行了辐照试验,确定了探测器的最敏感姿

态,但是并未对引信的发火原因做进一步分析。

总结以上文献可知,目前成果多以分米波和米波引信为研究对象,对毫米波引信的超宽带电磁脉冲效应研究不足。对引信执行电路研究充分,提出了可行的防护措施,但对近炸探测器的辐照效应机理和防护加固研究不足。因此,本文以毫米波引信近炸探测器为研究对象,通过辐照试验明确了其辐照效应及受损部位,并提出针对性加固措施,大幅提高了受试探测器的效应阈值,有效降低了其效应等级。研究结论可为毫米波引信的电磁防护设计提供参考。

1 试验

1.1 辐照试验装置

辐照试验装置如图1所示。试验时,超宽带辐照源正对受试探测器及配弹发射电磁脉冲,探测器的触发信号输出端通过同轴屏蔽线缆和光纤转换器连接至示波器。弹体旁放置场强监测天线,用以记录每次发射的脉冲波形。为保护实验室仪器设备,同时也避免超宽带脉冲信号因为反射造成质量下降,试验在室外开阔场地进行。

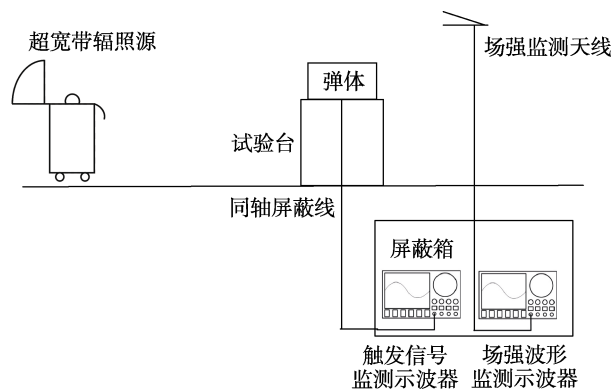


图1 辐照试验装置组成
Fig.1 Composition of irradiation test setup

超宽带辐照源的结构如图2所示,主要由控制系统、脉冲功率源和抛物面天线3部分组成。其中,脉冲功率源是产生电磁脉冲的关键部分。储能电源充电完毕后,控制系统输出控制信号,对脉冲变压器放电,

继而在脉冲形成线上形成初级脉冲。初级脉冲由火花隙开关转化为超宽带强电磁脉冲, 通过抛物面天线向外发射。

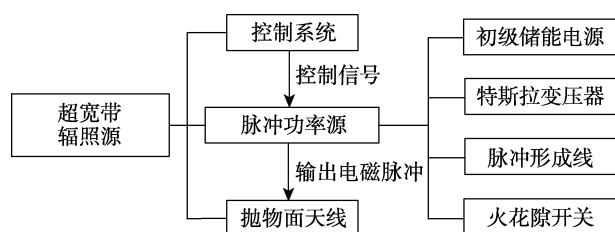


图 2 超宽带辐照源结构

Fig.2 Composition of the ultra-wideband source generator

利用场强监测天线对辐照场强进行测试, 场强随距离的变化关系如图 3 所示。可以看出, 脉冲最大辐照场强可达 436 kV/m。试验中, 该辐照源可产生水平传播、垂直极化的超宽带电磁脉冲, 脉冲上升前沿小于 1 ns, 脉冲宽度约为 5 ns, 能量集中在 500 MHz 内。

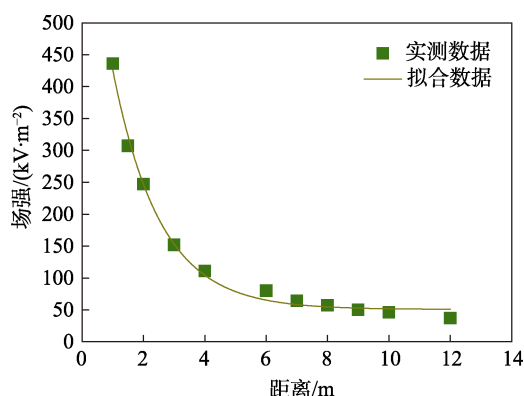


图 3 辐照场强-距离关系曲线

Fig.3 Relation of radiation field strength to distance

1.2 受试探测器工作原理

受试探测器电路结构如图 4 所示。探测器工作时, 信号处理模块向锁相环回路发送同步控制信号,

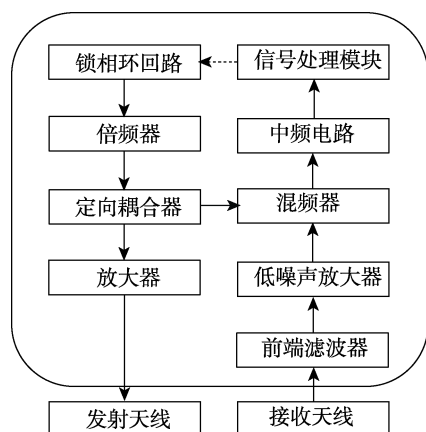


图 4 受试探测器结构

Fig.4 Structure of detector under test

控制其产生周期调频信号, 再由倍频器将该信号变换至毫米波段。在定向耦合器的作用下, 毫米波信号一部分作为本振信号, 另一部分作为天线发射信号。回波信号经过滤波混频放大后, 送至信号处理模块, 经算法处理获取弹目距离信息。当距离达到预设门限时, 探测器输出触发控制信号。

1.3 试验方法

前期试验现象表明, 受试探测器在竖直状态下最易受到干扰, 超宽带电磁脉冲对非加电无线电引信没有影响^[15]。因此, 本文仅对加电探测器的辐照效应进行研究, 受试姿态为竖直状态。根据试验现象, 定义效应等级为以下 3 类: 0 级, 无任何影响; 1 级, 探测器出现死机现象, 能够通过设备重启恢复; 2 级, 探测器在辐照后出现探测失效, 不能输出触发信号, 该现象无法通过设备重启恢复。辐照试验方法如下:

- 1) 按文献[22]中所述方法改装受试探测器, 使其能与配弹装配, 测试探测器是否能够正常工作。
- 2) 测试受试探测器的工作状态, 将受试探测器与配弹置于辐照场中, 将各装置放置在相应位置处。
- 3) 连接各个装置, 通过配弹内的电源对探测器加电。不断调整脉冲发射参数和探测器受试距离, 每次试验后测试探测器的工作状态, 观察示波器的显示情况。
- 4) 记录试验数据, 分析失效机理。

2 结果与分析

2.1 辐照试验现象

对 2 枚相同的探测器 A、B 进行试验, 分别使用单脉冲、5 Hz/1 s、25 Hz/1 s、25 Hz/5 s、25 Hz/10 s 各 5 次的触发方式进行辐照试验, 记录效应试验现象。探测器 A B 的效应等级如图 5 所示。可以看出, 在竖直状态下, 该探测器的效应阈值在 50~80 kV/m。在超宽带电磁脉冲辐照下, 探测器 A 一共出现死机和硬损伤 2 种辐照效应现象, 其中死机现象可以通过设备重启恢复。当辐照场强达到 436 kV/m 时, 探测器 A 在辐照后出现探测失效, 在有目标时无法输出触发信号, 且该现象为不可恢复现象。将探测器 A 静置 1 h 后, 测试其工作状态, 发现探测器 A 仍无法输出控制信号, 多次进行设备重启仍未恢复, 这说明受试探测器可能出现硬损伤。为保存试验样本, 未对探测器 B 进行更高强度的辐照试验。

2.2 损伤节点分析

为确定探测器的损伤部位, 对探测器 A 进行损伤节点分析。从结构上看, 探测器需要接收到来自信号处理模块的同步控制信号才能输出触发信号。同步控制信号决定了扫频周期的变换, 在下发同步控制信

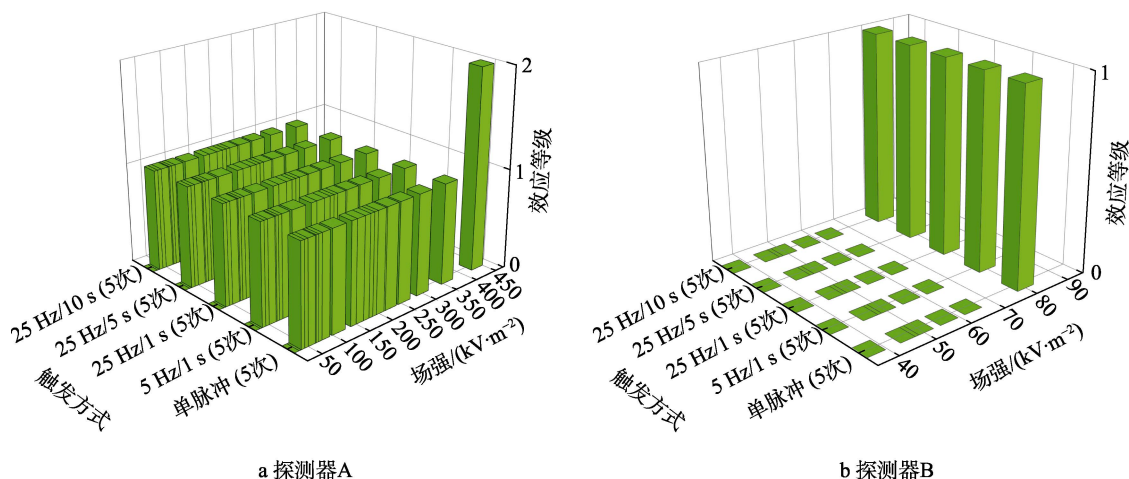


图 5 效应等级

Fig.5 Effect level of detector A and B

号时, 中频输出信号可以观察到明显的突变(如图 6 中虚线圈标记)。因此, 首先测试同步控制信号和中频输出信号, 判断信号处理模块和射频回路的功能是否正常。

探测器 A 的同步控制信号和中频输出信号如图 7 所示。可以看出, 信号处理模块可以正常下发同步控制信号, 未受到辐照损伤。当控制信号下发时, 中频

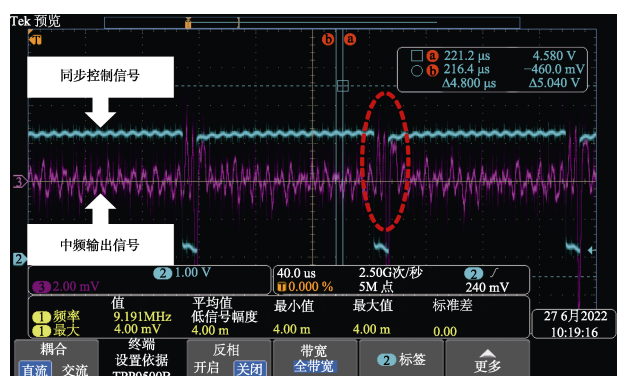


图 6 正常状态下同步控制信号与中频输出信号

Fig.6 Synchronous control signal and intermediate frequency output signal in normal state

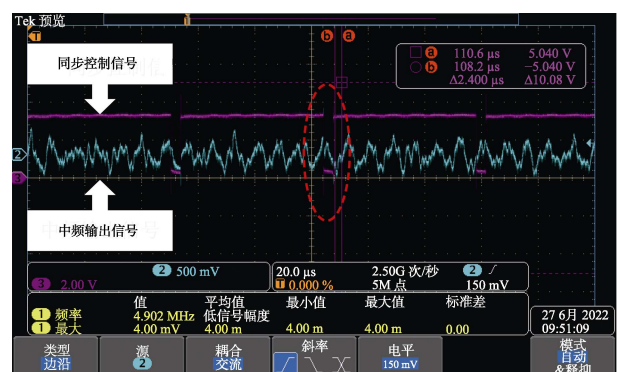


图 7 探测器 A 的同步控制信号与中频输出信号

Fig.7 Synchronous control signal and intermediate frequency output signal of detector A

输出信号没有观察到明显突变(如图 7 中虚线圈标记信号), 这说明在射频回路中存在损伤节点, 干扰了信号处理的正常流程。

为找出损伤节点, 使用函数发生器和示波器测试探测器 A 的中频电路。由于中频输入由相差为 90° 的 2 路 IQ 信号组成, 所以需要设置函数发生器同时产生一个正弦信号和余弦信号。示波器上观察到的中频电路输出信号如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 中频输出虽然存在削顶现象, 但是输出波形与输入波形基本保持一致, 说明中频电路未受到辐照损伤。

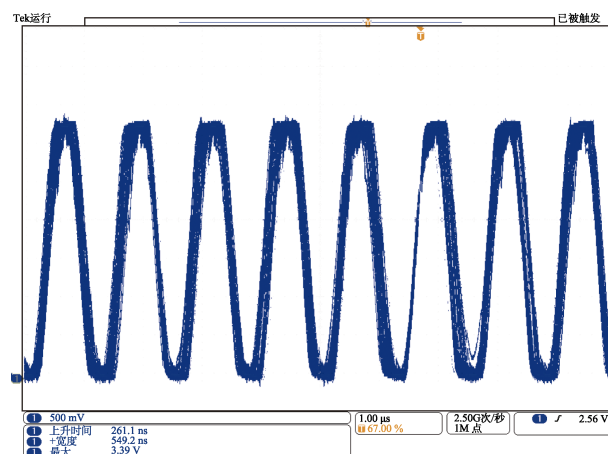


图 8 中频电路输出信号

Fig.8 Intermediate frequency circuit output signal

由于探测器的射频芯片集成了收发天线和接收链路, 所以难以对低噪声放大器、混频器等节点进行测试。但是, 射频芯片上留有测试节点, 在芯片正常工作时, 该节点可监测到频率约为 1 GHz 的射频信号。使用频谱仪测试该节点信号, 测试结果如图 9 所示。可以看出, 在 1.08 GHz 处有一个明显谱峰, 这说明射频芯片未受到辐照损伤。

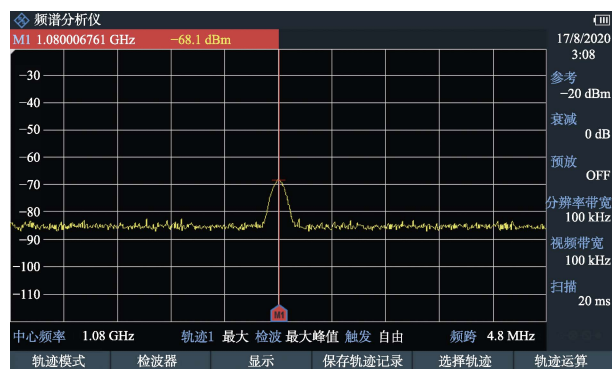


图 9 射频测试节点信号
Fig.9 Radio frequency test node signal

由于锁相环回路输出信号在毫米波段, 现有测试设备无法直接测量, 所以只对回路中的晶振输出信号进行测试, 测试结果如图 10 所示。可以看出, 晶振输出信号稳定, 未受到辐照损伤。

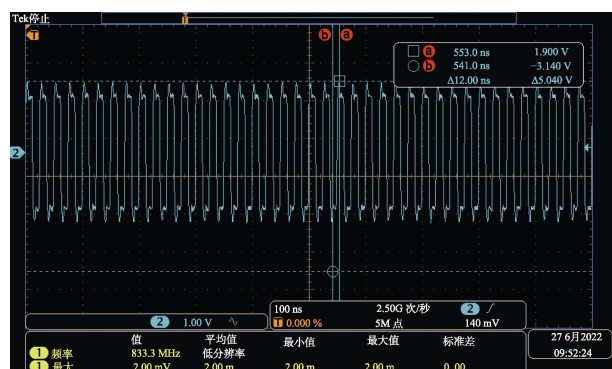


图 10 晶振输出信号
Fig.10 Crystal oscillator output signal

2.3 效应机理分析

文献[15]中研究结果表明, 脉冲能量可能通过以下几种途径耦合进入受试探测器: 通过天线进入受试探测器, 导致探测器硬损伤; 通过壳体上的孔缝进入弹体内部, 导致探测器硬损伤; 通过弹体直接耦合并作用于共地回路, 继而将电压波动传导至探测器; 通过未屏蔽的探测器顶部进入探测器内部, 瞬态场直接作用于敏感部位, 导致探测器硬损伤。

针对第 1 种假设, 试验用超宽带电磁脉冲的频率主要在 2 GHz 内, 而受试探测器的工作频率远高于辐照信号频率范围。此外, 探测器视轴与弹体轴线一致, 而前期试验表明, 受试探测器与配弹在竖直状态下效应等级最高, 此时贴片天线收发电磁波的极化方向与脉冲极化方向垂直, 接收的能量应为最小值。若天线为能量的主要耦合通道, 竖直状态下受试探测器的效应等级应该最低。因此, 天线并非能量耦合的主要通道。

针对第 2 种假设, 根据孔缝耦合理论可知^[7], 当

缝隙尺寸不大于波长的 1/8 时, 耦合能量可忽略不计。发射脉冲能量集中在 500 MHz 内, 对应波长为 600 mm, 而探测器与配用弹体由螺纹紧密连接, 周身并无明显缝隙, 因此认为孔缝不是主要耦合通道。

针对第 3 种假设, 结合前期试验, 发现受试探测器与配弹在竖直状态下的效应等级最高。由于试验用超宽带电磁脉冲为垂直极化波, 若将探测器腔体及弹体整体视为“接收天线”, 能量有可能通过共地回路进入受试探测器, 导致其损伤。为明确耦合路径, 基于该假设设计对照试验, 使用铜箔贴纸完整包裹引信风帽, 使其形成金属屏蔽层。以探测器 B 为受试对象, 将其与配用弹体以竖直姿态置于辐照场内。将屏蔽风帽安装在探测器 B 顶部, 而后进行辐照试验, 试验过程中, 示波器端未观察到触发信号。辐照试验后, 对探测器 B 进行测试, 发现其未出现死机或是硬损伤等效应现象, 这说明配用弹体不是超宽带能量的主要耦合通道。

针对第 4 种假设, 探测器感知目标需要发射和接收电磁波, 为了提高回波信号质量, 探测器顶部一般设置天线窗口。在辐照试验时, 探测器顶部电路完全暴露在辐照场中, 可能导致敏感元器件损伤。

综合以上试验结果和分析可知, 超宽带电磁脉冲主要通过后门耦合作用于受试探测器, 暴露在辐照场下的射频电路和探测器顶部的天线窗口是能量的主要耦合通道。探测器在辐照下会出现死机和硬损伤 2 种效应现象, 损伤部位为锁相环回路。

3 防护加固措施及验证

基于以上分析, 对受试探测器采取针对性加固措施: 改进受试探测器的电路结构, 除射频集成芯片外, 其余电路部分均放置于射频板的背面; 对探测器中所用的电容电阻等敏感器件重新选型, 在不影响精度的情况下, 尽量提高传输信号的频带动态范围; 将探测器内的普通高温连接线更换为同轴屏蔽线, 进一步降低耦合能量。

由于选用的射频芯片集成了收发天线, 因此无法将射频芯片移至背面。通过以上改进措施, 射频板上的部分敏感电路能够避免脉冲直接辐射, 增强了电路的稳定性。将传输线更换为同轴屏蔽线后, 不仅减少了外部辐射耦合干扰, 同时也降低了探测器内部的传导耦合干扰。采取加固措施后, 虽然增加了探测器天线与射频部分之间的过渡结构, 一定程度上降低了信号传输质量, 但是在测试中该探测器仍能满足精度要求。

对改进后的探测器 C 进行测试, 其效应等级数据见表 1。可以看出, 加固后探测器的抗干扰能力显著增强, 无论是哪种触发方式, 都未能使探测器 C 出现效应现象。

表 1 探测器 C 效应等级数据
Tab.1 Effect level data of detector C

场强/(kV·m ⁻¹)	触发方式	效应等级	场强/(kV·m ⁻¹)	触发方式	效应等级
50	单脉冲 (5 次)	0	163.80	单脉冲 (5 次)	0
	100 Hz/1 s (5 次)	0		100 Hz/1 s (5 次)	0
57	单脉冲 (5 次)	0	186.22	单脉冲 (5 次)	0
	100 Hz/1 s (5 次)	0		100 Hz/1 s (5 次)	0
64	单脉冲 (5 次)	0	220.19	单脉冲 (5 次)	0
	100 Hz/1 s (5 次)	0		100 Hz/1 s (5 次)	0
80	单脉冲 (5 次)	0	270.13	单脉冲 (5 次)	0
	100 Hz/1 s (5 次)	0		100 Hz/1 s (5 次)	0
110.09	单脉冲 (5 次)	0	300.74	单脉冲 (5 次)	0
	100 Hz/1 s (5 次)	0		100 Hz/1 s (5 次)	0
155.34	单脉冲 (5 次)	0			
	100 Hz/1 s (5 次)	0			

4 结论

本文结合试验和理论分析,研究了毫米波近炸探测器的超宽带电磁脉冲辐照效应机理,确定了探测器的损伤部位,并据此提出了相应的加固措施。验证试验表明,探测器的防护能力有较大提升。由此得出以下主要结论:

1) 受试毫米波探测器在超宽带电磁脉冲辐照下会出现死机和硬损伤 2 种效应现象,其中死机现象可以通过重启恢复,硬损伤现象为不可恢复现象。

2) 受试探测器的损伤部位为锁相环回路,探测器未屏蔽的射频电路是超宽带能量的主要耦合通道。

3) 根据失效机理,提出针对性防护加固措施,结果表明,改进后探测器的抗干扰能力显著提高。

参考文献:

- [1] ARORA V K. Proximity Fuzes Theory and Techniques[M]. New Delhi: Defence Research & Development Organisation, 2010.
- [2] DAO Xin-yu, GAO Min, LI Chao-wang, et al. Adaptive Leakage Signal Cancellation Algorithm in Heterodyne FMCW System[J]. Digital Signal Processing, 2021, 108: 102882.
- [3] DAO Xin-yu, GAO Min, CHEN Kai-bai. Minimum Correlation Estimation of Leakage and Echo Signals for FMCW Radar[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(10): 2294-2298.
- [4] 岛新煜, 高敏. 毫米波近炸引信发展现状及关键技术[J]. 飞航导弹, 2018(5): 86-90.
DAO Xin-yu, GAO Min. Development Status and Key Technologies of Millimeter Wave Fuze[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(5): 86-90.
- [5] 齐杏林, 刘尚合, 李宏建. 引信信息型和功率(能量)型干扰的概念及其特性分析[J]. 探测与控制学报, 1999, 21(2): 32-35.
- [6] 郑福泉, 娄文忠, 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(1): 21-24.
ZHENG Fu-quan, LOU Wen-zhong, YANG Jin-gang, et al. Simulation and Evaluation Method of Fuze Electromagnetic Pulse Coupling Effect[J]. Journal of Detection & Control, 2020, 42(1): 21-24.
- [7] 李永亮, 闫晓鹏, 郝新红, 等. 超宽带电磁脉冲对典型引信的耦合效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 229-233.
LI Yong-liang, YAN Xiao-peng, HAO Xin-hong, et al. Coupling Effect of Ultra Wideband Electromagnetic Pulse on Typical Fuze[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7): 229-233.
- [8] 陈凯柏, 高敏, 周晓东, 等. 调频连续波引信超宽带电磁脉冲前门耦合效应[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(3): 528-535.
CHEN Kai-bai, GAO Min, ZHOU Xiao-dong, et al. Front-Door Coupling Effect of Ultra-Wideband Electromagnetic Pulse for FMCW Fuze[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(3): 528-535.
- [9] 李明典, 刘景萍, 李巍. 调频引信对 UWB-HPM 的前门耦合效应及防护研究[J]. 微波学报, 2021, 37(S1): 253-257.
LI Ming-dian, LIU Jing-ping, LI Wei. Research on the Front Door Coupling Effect and Protection of UWB-HPM of FM Fuze[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(S1): 253-257.
- [10] 马世川, 蒋丹, 张帆, 等. 线缆耦合对地雷 WB-HPM 辐照效应试验影响分析[J]. 火控雷达技术, 2021, 50(1): 113-118.

- MA Shi-chuan, JIANG Dan, ZHANG Fan, et al. Analysis on the Influence of External Wire Coupling on WB-HPM Irradiation Effect Test of Mine[J]. Fire Control Radar Technology, 2021, 50(1): 113-118.
- [11] 赵建鹏, 侯德亭, 胡涛, 等. PCB 电路电磁脉冲效应混合仿真方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(2): 263-267.
- ZHAO Jian-peng, HOU De-ting, HU Tao, et al. Hybrid Simulation for Electromagnetic Pulse Effects on PCB Circuits[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(2): 263-267.
- [12] 谢鹏浩, 毕军建, 胡小锋. 对典型结构弹体的电磁耦合规律数值分析[J]. 军械工程学院学报, 2014, 26(2): 39-42.
- XIE Peng-hao, BI Jun-jian, HU Xiao-feng. Analysis on Electromagnetic Coupling Law of one Typical Projectile Body[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2014, 26(2): 39-42.
- [13] 陈凯柏, 高敏, 周晓东, 等. 高功率微波对毫米波引信耦合效应分析[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(11): 42-48.
- CHEN Kai-bai, GAO Min, ZHOU Xiao-dong, et al. Analysis of Coupling Effect of High-Power Microwave on Millimeter Wave Fuze[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(11): 42-48.
- [14] 王陶蓉. 机电引信抗电磁干扰分析及实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- WANG Tao-rong. Analysis and Experimental Study of Electro-Mechanical Fuze Anti-Electromagnetic Interference[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [15] 李刚, 毕军建, 刘尚合, 等. 超宽谱电磁脉冲对无线电引信的耦合及防护加固[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1332-1336.
- LI Gang, BI Jun-jian, LIU Shang-he, et al. Coupling Mechanism between Radio Fuzes and Ultra Band Spectra Electromagnetic Pulse and Enhancement of Radio Fuzes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(8): 1332-1336.
- [16] 王韶光, 魏光辉, 陈亚洲, 等. 超宽谱对无线电引信的作用效应实验研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 78-80.
- WANG Shao-guang, WEI Guang-hui, CHEN Ya-zhou, et al. Experimental Research on the Radiation Effect of the UWS-HPM to Radio Fuze[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 78-80.
- [17] 王韶光, 魏光辉, 陈亚洲, 等. 无线电引信的超宽谱辐照效应及其防护[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1873-1878.
- WANG Shao-guang, WEI Guang-hui, CHEN Ya-zhou, et al. Radiation Effects of Ultra-Wide Spectrum on Radio Fuze and Its Protection[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1873-1878.
- [18] 李刚, 赵月飞, 刘尚合, 等. 无线电引信执行电路抗超宽谱电磁脉冲研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 128-131.
- LI Gang, ZHAO Yue-fei, LIU Shang-he, et al. Research on the Amelioration of Radio Fuze's Execution Circuits Against UWS-EMP[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 128-131.
- [19] 肖雪荣, 陈亚洲. 超宽谱电磁脉冲宽度变化对无线电引信的影响[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 47-49.
- XIAO Xue-rong, CHEN Ya-zhou. Influence to Radio Fuzes when Width of Ultra Band Spectra Electromagnetic Pulse Changed[J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition), 2009, 33(1): 47-49.
- [20] 熊久良. 典型米波无线电引信电磁脉冲辐照效应[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3371-3380.
- XIONG Jiu-liang. Irradiation Effect of EMP on Typical Metric Wave Radio Fuze[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3371-3380.
- [21] 熊久良, 武占成. 超宽带对典型调频引信安全性的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1997-2002.
- XIONG Jiu-liang, WU Zhan-cheng. Effect of Ultra-Wide Band on Security of Typical Frequency Modulation Fuze[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1997-2002.
- [22] 熊久良, 武占成, 孙永卫, 等. 能量型电磁干扰下无线电引信辐照效应试验方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2783-2790.
- XIONG Jiu-liang, WU Zhan-cheng, SUN Yong-wei, et al. Experimental Method of Radio Fuze Radiation Effect under Energy-Type Electromagnetic Interference[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2783-2790.
- [23] 熊久良, 武占成, 孙永卫, 等. 多自由度全自动引信辐照实验台的研制与性能测试[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1715-1721.
- XIONG Jiu-liang, WU Zhan-cheng, SUN Yong-wei, et al. Development and Performance Measurement of Multi-DOF and Fully Automatic Fuze Irradiation Experimental Platform[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1715-1721.
- [24] 付胜华, 娄文忠, 苏子龙, 等. 引信-超宽带强电磁脉冲效应阈值试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(10): 2075-2080.
- FU Sheng-hua, LOU Wen-zhong, SU Zi-long, et al. Threshold Test Study of Fuze-Ultrawideband High Electromagnetic Pulse Effect[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(10): 2075-2080.

责任编辑: 刘世忠