

无线电引信电磁辐射能量耦合路径研究

杨洁, 王彪, 王书平, 张希军

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003)

摘要: **目的** 为了确定外界电磁能量究竟如何进入到引信电路内部, 针对无线电引信的电磁能量耦合路径进行系统研究。**方法** 通过对多种引信进行不同形式的连续波、强电磁脉冲电磁辐射效应试验, 对比引信天线、孔缝、弹体、电源模块等部位的能量耦合可能性。分析连续波、强电磁脉冲电磁环境对无线电引信作用的耦合规律。**结果** 确定了电磁信号类型和引信接地结构是影响电磁能量耦合通道的关键因素, 揭示了前门耦合是连续波电磁辐射环境的最主要方式。**结论** 弹体或引信前端与电路共地的金属部件是强电磁脉冲辐射环境的主要能量路径, 从而为无线电引信抗电磁性能加固的实施提供了有益参考。

关键词: 无线电引信; 电磁辐射; 能量耦合; 连续波; 强电磁脉冲

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.04.005

中图分类号: TJ430.1; TM154.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)04-0021-05

Energy Coupling Path of Radio Fuze under the Electromagnetic Radiation Conditions

YANG Jie, WANG Biao, WANG Shu-ping, ZHANG Xi-jun

(Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Machine Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

ABSTRACT: Objective To determine the method for electromagnetic energy to enter the fuze circuit and carry out systematic research on the electromagnetic energy coupling path of radio fuze. **Methods** Through the continuous wave and EMP radiation examinations, different types of fuzes were tested and researched. The coupling probability, such as the fuze antenna, empty seam, elastomer and power module, were compared. The coupling rules of the radio fuze under the electromagnetic radiation were analyzed. **Results** The type of electromagnetic signal and the structure of fuze grounding were determined to be key factors affecting the coupling path of electromagnetic energy. The front door coupling was the main mode in continuous wave electromagnetic radiation environment. **Conclusion** The elastomer or the front metal parts, which was connected with the fuze grounding structure just after the antenna is the main path in the intense electromagnetic pulse environment. It could be more helpful in improving the electromagnetic resistance of the radio fuze.

KEY WORDS: radio fuze; electromagnetic radiation; energy coupling; continuous wave; intense electromagnetic pulse

无线电引信是指利用无线电波感知目标的近炸引信, 它处于战争“生与死”对抗的最前沿, 被称为现代武器系统终端效能的倍增器, 但其主要缺点之一就是易受电磁干扰^[1-2]。因此, 对于无线电引信的电磁敏感度、干扰机理与防护措施的研究一直都是各国争相研究的重点^[3-4]。我国在这方面也做了大量深入的科学研究, 并且制定了相应的军用标准^[5-6]。

在电磁辐射环境中, 外部的电磁能量耦合进入无线电引信电路内部, 带来的危险不容忽视。干扰源、耦合路径与敏感体是电磁干扰形成的三要素, 切断电磁耦合路径是防止电磁干扰形成的主要手段之一, 因此, 认清无线电引信的电磁能量耦合路径, 系统分析引信电磁能量耦合规律意义重大。文中在连续波电磁辐射和强电磁脉冲电磁辐射环境中, 研究了不同体制

无线电引信的能量耦合路径及其规律,为提高无线电引信的使用可靠性和安全性提供了有益借鉴。

1 连续波电磁辐射能量耦合路径研究

连续波电磁辐射能量耦合试验中,利用射频微波信号发生器产生所需的连续波信号,经相应的宽带功率放大器放大后由双向耦合器给辐射天线馈电。功率计经双向耦合器准确测量功率放大器的前向输出功率和后向反射功率,监视电磁能量辐射系统的工作状态。被试无线电引信置于辐射天线正前方固定位置,摆放姿态始终保持引信发火场强最小的最佳耦合姿态,试验区域的辐射电场强度由光纤场强计测量,受试引信的发火信号用专门研制的光电-光电转换器引入示波器进行测量。

为了对比引信天线、弹体、孔缝、电源模块以及天线前端模块对连续波电磁辐射能量的耦合作用,分别开展下列对比试验:利用金属屏蔽罩对引信前端进行全屏蔽,对比分析引信天线对电磁能量耦合作用的影响;利用铝箔对引信孔缝进行屏蔽,对比分析孔缝对电磁能量耦合作用的影响;屏蔽电源模块,对比分析电源模块对电磁能量耦合作用的影响;利用相同引信配用不同弹体,对比分析弹体大小对电磁能量耦合作用的影响;配用相同弹体情况下焊掉引信天线,对比分析引线天线前端未加屏蔽的器件、电路或导体的影响。通过对上述不同状态的无线电引信进行连续波辐照效应试验,从不同引信临界发火场强的测试结果可以分析出连续波电磁能量耦合进入无线电引信电路内部的主要能量耦合通道。

选取两种不同型号的受试引信各1发,按照上述方案对不同状态的引信进行不同频率下的调幅波辐照对比试验,测试得到引信处于不同状态时的临界发火场强,具体结果如图1、图2所示。

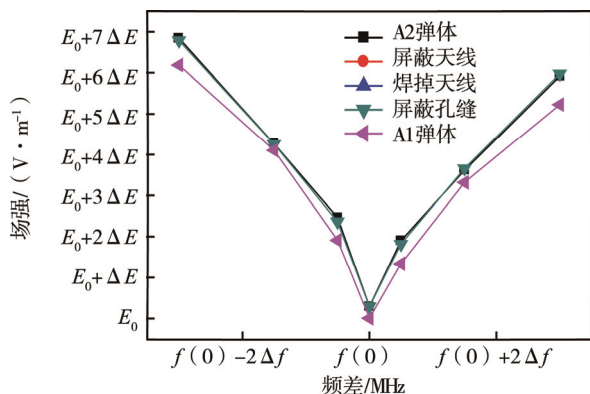


图1 1#引信临界干扰场强与频差关系

对于1#引信,由于屏蔽天线和焊掉天线后引信的临界发火场强大于500 V/m,所以在图1中没有体现。从图1中可以看出,相较于配用A2, A1弹体和

屏蔽孔缝时引信的临近干扰场强,屏蔽天线和焊掉天线后,在500 V/m的场强范围内,1#引信在试验频点上不再出现意外发火。可得出结论:天线是导致1#引信意外发火的一条主要能量耦合通道。同时,对比屏蔽天线和焊掉天线结果可知,引信前端未屏蔽的器件、电路或导体的存在并不影响引信临界干扰场强。因此,引信前端未屏蔽的器件、电路或导体不是引信的主要能量耦合通道。

对比配用A2($\phi 152$ mm)弹体和屏蔽孔缝(同样配用A2弹体)情况下引信的临界干扰场强可知,屏蔽所有孔缝后,引信在同一辐照频率下的临界干扰场强没有明显改变,其测量值的波动主要来源于测量误差。从而可知,孔缝不是导致1#引信意外发火的主要能量耦合通道。

对比不同弹体情况下的试验结果可知,配用大弹体A2情况下的临界干扰场强要比配用小弹体A1($\phi 130$ mm)下的临界干扰场强略大。可见,配用大弹体时引信的接收能力要略低于配用小弹体时引信的接收能力。这主要是由于弹体与引信天线共地连接,使得引信天线接收能力产生微弱变化导致。整体来看,临界干扰场强值变化不大,说明弹体虽会影响引信对辐照能量的接收能力,但影响程度有限,不是引信的主要能量耦合通道。综上所述,1#引信对连续波的主要能量耦合通道为天线。

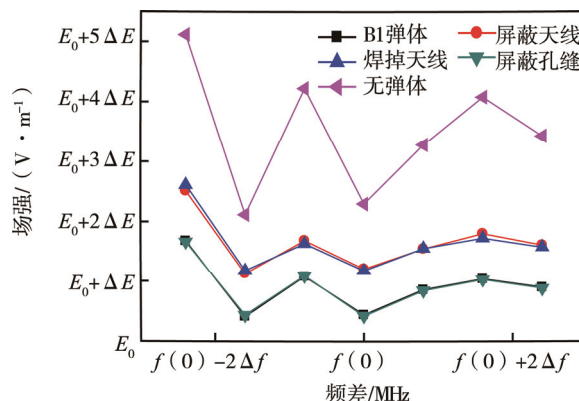


图2 2#引信临界干扰场强与频差关系

B1($\phi 130$ mm)弹体为2#引信试验中正常配用的弹体。从图2中可以看出,对比正常配弹引信,屏蔽引信天线后,2#引信临界干扰场强增大接近50%,可见,引信天线是2#引信一条重要的能量耦合通道。对比正常配弹情况,屏蔽天线和去掉天线状态临界干扰场强变化程度基本相同,可见,引信前端未屏蔽的器件、电路或导体的存在并不影响引信临界干扰场强。因此,引信前端未屏蔽的器件、电路或导体不是引信主要能量耦合通道。

屏蔽所有缝隙后,相较正常配弹结果,引信临界干扰场强没有明显改变,考虑测试误差的影响,可以确定孔缝不是引信的主要能量耦合通道。对比正常配

弹状态,无弹体情况下受试引信临界干扰场强的增幅最大超过了 200%,可见,弹体影响着引信对辐照能量的耦合强度,即弹体也是引信一条重要的能量耦合通道。对比无弹体试验结果与屏蔽天线试验结果还可以看出,弹体对辐照能量耦合能力的影响程度要大于天线。出现这一结果的原因是,受试引信为弹体天线,弹体作为天线的主要部分影响辐射能量的接收能力。综上所述,2#引信对连续波的主要能量耦合通道为天线和弹体。

选择第三种型号的无线电引信(记为 3#引信),通过等幅正弦波电磁辐照效应试验来分析其主要电磁能量耦合通道,结果见表 1。可以看出,改装天线(将天线一个管腿断开)后,在同样的电磁辐照环境

中,引信的临界发火场强增大了 5 倍左右,可见,天线是导致引信起爆的主要能量耦合通道之一。屏蔽装定环孔和顶部进气道后,引信在同一电磁辐照环境下的临界发火场强没有明显改变,表明装定环孔和顶部进气道不是主要能量耦合通道。屏蔽电源模块后的引信在相同等幅正弦波辐照下,临界发火场强也只有少量浮动,可见电源模块耦合能量对无线电引信的临界发火场强影响不大,即不是主要耦合路径。去掉弹体后的引信在相同频率等幅正弦波辐照下,临界发火场强明显增大,增幅达到 40%以上,说明弹体是等幅正弦波耦合入无线电引信内部的主要通道之一。综上所述,3#引信对连续波的主要能量耦合通道也是天线和弹体。

表 1 改装前后 3#引信临界发火场强试验

辐照频率	V/m							
	未改装天线	改装天线后	未屏蔽装定环孔和顶部进气道	屏蔽装定环孔和顶部进气道后	未屏蔽电源	屏蔽电源	带弹体	去掉弹体
$f(0)$	66.5	>200	76.2	69.3	56.4	55.1	60.2	108.4
$f(0)+\Delta f$	48.3	186.4	66.2	67.2	50.1	54.2	53.5	99.1
$f(0)+2\Delta f$	11.2	66.3	23.7	21.9	13.7	13.9	12.6	20.5
$f(0)+3\Delta f$	86.9	>200	86.4	78.7	66.9	65.4	68.4	120.3
$f(0)+4\Delta f$	112.6	>200	117.6	97.9	97.6	87.3	103.2	169.7
$f(0)+5\Delta f$	120.1	>200	139.1	140.0	130.1	125.0	135.6	>200

1#, 2#, 3#引信均为自差式连续波多普勒引信,在电气结构上其天线与弹体采用“共地”连接(即弹体与电源地端以及信号处理电路地端连通)。弹体作为引信整体等效天线的组成部分之一,其尺寸的变化会改变引信天线的等效结构和尺寸大小,造成天线接收电磁能量效能的明显变化,进而表现出弹体对电磁辐射能量耦合的影响作用。鉴于 1#, 2#, 3#三种受试引信采用了不同的天线结构,弹体在各引信中发挥的等效天线作用有大有小,故在试验中弹体对电磁能量耦合的影响作用表现得有强有弱。可见,在连续波电磁辐照环境中,连续波电磁能量耦合入自差式连续波多普勒内部的主要“窗口”就是引信的“天线”(此天线为大天线内涵,指的是引信整个等效天线结构)。

为进一步验证天线是否无线电引信对连续波电磁能量耦合的主要通道,对调频引信(4#)同样进行对比试验。将未改装引信和焊掉天线后的引信进行同一条件下的扫频连续波电磁辐照试验,典型场强下的试验结果见表 2。可见,扫频波不能使摘除天线后的调频引信意外发火,说明扫频波干扰主要是通过引信的天线耦合进入受试引信的高频电路。故调频引信的“天线”同样是连续波电磁能量的主要耦合通道。

表 2 改装前后 4#引信试验结果

受试引信及其编号		场强			
		E_1	E_2	E_3	E_4
未改装引信	1	发火	发火	发火	发火
	3	发火	发火	发火	发火
	5	不发火	发火	发火	发火
摘除天线后引信	2	不发火	不发火	不发火	不发火
	4	不发火	不发火	不发火	不发火
	6	不发火	不发火	不发火	不发火

综上所述,在连续波电磁辐照环境中,无线电引信的“天线”是外界电磁能量耦合入引信内部电路、引发引信意外发火的主要通路。

2 强电磁脉冲电磁辐射能量耦合路径研究

为了确定强电磁脉冲电磁辐射环境中无线电引信的主要能量耦合路径,选择利用超宽带电磁脉冲(UWB EMP)、雷电电磁脉冲(LEMP)作为典型的强电磁脉冲来开展试验研究。将不同状态下的 2#—4#引信置于强电磁脉冲辐照环境中,通过引信发火率的

变化来分析引信各部位对外界电磁能量的耦合作用大小。

取正常受试引信和焊掉天线的引信、屏蔽天线前端部件的引信、屏蔽孔缝的引信以及更换配用弹体的引信分别进行 UWB EMP 辐照对比试验。采用单次触发方式,每个场强下进行 10 次试验,记录各状态引信的意外发火率,试验结果如图 3、图 4 所示。

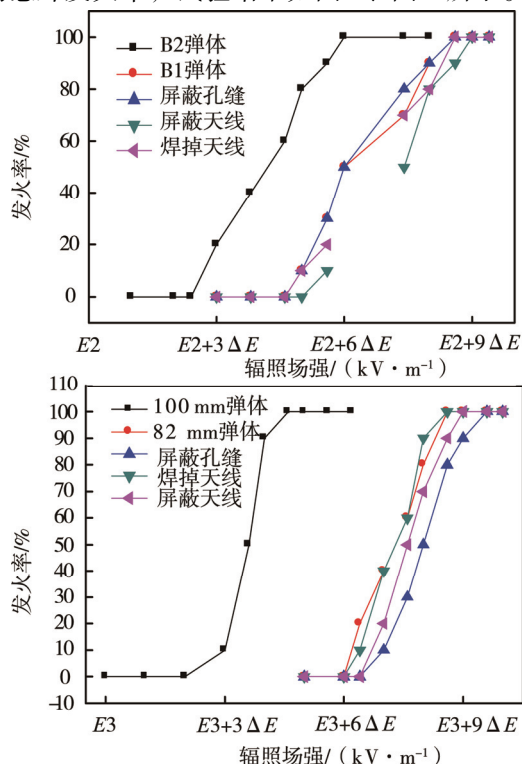


图3 不同条件下引信发火率

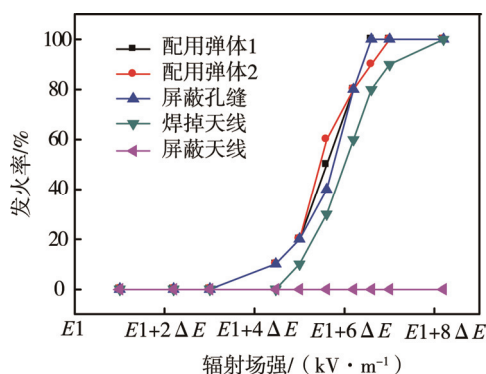


图4 不同条件下4#引信发火率

从图3可以看出,焊掉引信天线或是屏蔽孔缝、屏蔽天线前端部件后,同一强度的UWB EMP辐照作用下,受试引信的发火率未出现明显变化。可见,天线、孔缝以及引信前端部件均不是UWB EMP耦合入无线电引信的主要通道。配小弹体时引信的测量结果要比配用大弹体时高出近33%,说明弹体是UWB EMP辐照下无线电引信的主要能量耦合通道。综上所述,2#,3#引信在UWB EMP辐照作用下的主要能

量路径是弹体。

从图4可以看出,屏蔽孔缝或配用不同弹体的情况下,引信的发火率基本没有变化,可知孔缝、弹体均不是主要能量耦合通道。焊掉天线后,不同场强下引信的发火率都出现小幅度降低,说明天线的存在对UWB辐射能量的耦合产生了一定程度的影响,但这种影响并不大。完全屏蔽天线前端后,引信不再出现意外发火,说明引信前端未屏蔽的圆柱腔体是UWB辐射能量作用于引信具体电路的主要途径。综上所述,4#引信在UWB EMP辐照作用下的主要能量路径是引信前端未屏蔽的圆柱腔体。

对比上述结论,2#,3#,4#引信的UWB EMP能量耦合主要通道不同,究其原因这是由于受试引信接地结构不同造成的。2#,3#引信的天线与弹体共地,而4#引信采用浮地连接,其T型平面天线直接焊接在圆柱腔体表面,引信高低频电路则全部屏蔽于圆柱腔体内部,而圆柱腔体被风帽材料覆盖且与弹体“浮接”。一方面,试验用UWB EMP主频与受试引信的工作频率相差较远,引信天线对UWB辐射能量的接收能力较弱。另一方面,对于共地连接的引信而言,耦合到弹体上的能量能够通过公共地端作用到电源或信号处理电路,影响引信的正常工。对于不共地连接的引信,弹体上耦合的电磁能量无法作用到引信内部电路,故仅有通过与内部电路地端相连的引信前端金属圆柱腔体耦合外部的强电磁脉冲能量,从而导致内部电路无法正常工作。

为验证上述结论的适用范围,在LEMP辐照环境下同样对引信主要能量耦合通道进行试验研究。取1#引信,以最强能量耦合姿态置于LEMP辐照场中,进行电磁脉冲能量耦合通道的对比试验。选取5.4/70 μs波形开展LEMP辐照试验,在同一场强下进行10次辐照试验,统计各场强下受试引信的发火率,结果如图5所示。

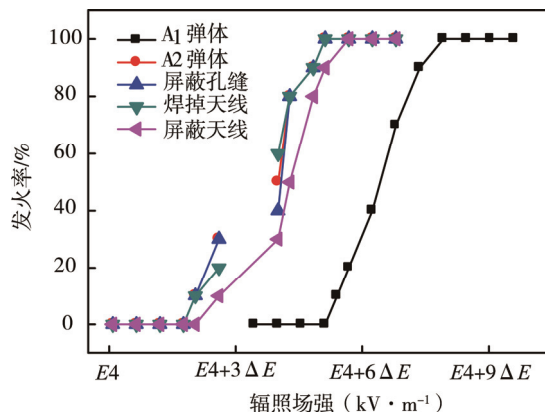


图5 不同条件下引信发火率

从图5中可以看出,引信焊掉天线和屏蔽孔缝后,在相同LEMP辐照场强下的发火率基本没有变

化,说明引信天线和孔缝都不是主要能量耦合通道。完全屏蔽引信前端后,引信的发火率以及耦合到发火信号端耦合电压均出现小幅度下降,也就是说,引信前端会在一定程度上影响引信对辐照能量的耦合强度。对比配用不同弹体的情况,很明显配用大弹体A2时引信的发火率或发火信号端耦合电压明显高于配用小弹体A1的情况,可见在LEMP辐照下,引信配用大弹体更容易发火。即弹体是LEMP辐照下引信的主要能量耦合通道。

综上所述,在强电磁脉冲辐照环境中,弹体是采用“共地”连接电气结构无线电引信的主要能量耦合通道,引信前端与内部电路共地的金属屏蔽腔体是采用“浮地”连接电气结构无线电引信的主要能量耦合通道。

3 结论

在电磁辐射环境中,无线电引信的天线、弹体、孔缝以及其他未屏蔽的电路部分都是外部电磁能量进入其内部电路的通道/途径。每一条通路都有自己的限制条件,对于不同的电磁信号,经过每个通道进入引信内部的能量大小各不相同。引信内部电路中干扰信号的形成是电磁能量通过多个通道进入内部电路后的综合作用结果。外部电磁能量的辐射特性不同,其进入引信内部电路的途径也就有主次之分,通过理论和试验分析,可以得出以下相关结论。

1) 天线、弹体以及引信前段与天线共地的未屏蔽金属腔体都可能是外界电磁能量进入无线电引信的主要能量耦合通道。

2) 外界电磁信号类型以及无线电引信的接地结构是影响电磁能量耦合通道的关键因素。

3) 在连续波电磁辐照环境中,前门耦合是外界电磁能量进入引信内部电路的主要耦合方式。

4) 在强电磁脉冲电磁辐照环境中,后门耦合是外界电磁能量进入引信内部电路的主要耦合方式。

5) 对于弹体和内部电路共地的引信,“弹体”是电磁能量耦合的主要途径(或之一)。

6) 对于弹体与内部电路不共地的引信,与内部电路共地的“金属腔体”是强电磁脉冲电磁能量耦合的主要途径。

参考文献:

- [1] SHAN Yi, HE Jun, HUANG Wen-yi. Ultra-low-voltage-trigger Thyristor for On-chip ESD Protection without Extra Process Cost[J]. Journal of Semiconductors, 2009(7): 67—71.
- [2] FUJIO T, SHOJI N. Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine Generating System Using a Current Source Thyristor Inverter[C]// Proceedings of 11th International Conference on Electrical Machines and Systems. 2008.
- [3] 段大鹏, 江秀臣, 孙才新. IGBT 的原理性电学模型与动态特性仿真[J]. 高电压技术, 2008(1): 38—45.
- [4] JEON K S, AHN C H, PARK J D, et al. Integrated IC-like Thyristor-based Switching Structure for Pulse Current Generation to Electronic Ignition[C]// Conference Proceedings of CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference(Volume 2). 2006.
- [5] 王韶光, 魏光辉, 陈亚洲, 等. 超宽谱对无线电引信的作用效应试验研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 78—80.
- [6] 熊久良, 武占成, 孙永卫, 等. 能量型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.
- [7] DU Li-qun, JIA Shen-fang, NIE Weirong, et al. Fabrication of Fuze Micro-electro-mechanical System Safety Device[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(5): 836—840.
- [8] 费支强, 魏光辉, 付立. 无线电引信干扰与防护[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 71—73.
- [9] 魏光辉, 陈亚洲, 孙永卫. 微波辐照对无线电引信的影响与作用机理[J]. 强激光与粒子束, 2009, 6(5): 71—73.
- [10] 熊久良, 武占成, 孙永卫. 连续波 Doppler 引信扫频波辐照效应[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4220—4225.
- [11] 费支强, 魏光辉, 耿利飞. 无线电引信扫频波辐照效应及作用机理研究[J]. 军械工程学院学报, 2010, 22(5): 17—21.
- [12] JAVOR V, RANCIC P D. A Channel-base Current Function for Lightning Return-stroke Modeling[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(1): 245—249.
- [13] VERNON C. A Novel Procedure to Represent Lightning Return Strokes-current Dissipation Return Stroke Models [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 748—755.
- [14] 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—1877.
- [15] 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.

[1] SHAN Yi, HE Jun, HUANG Wen-yi. Ultra-low-voltage-