

熊久良, 武占成, 孙永卫, 等. 无线电引信互扰效应规律研究[J]. 电波科学学报, 2015, 30(5): 903-909. doi: 10.13443/j.cjors.2014110401
XIONG Jiuliang, WU Zhancheng, SUN Yongwei, et al. Interactional effects rule of a certain radio fuze[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(5): 903-909. (in Chinese). doi: 10.13443/j.cjors.2014110401

无线电引信互扰效应规律研究

熊久良¹ 武占成¹ 孙永卫¹ 高乐南² 谢鹏浩¹

(1. 军械工程学院静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003; 2. 防空兵指挥学院, 郑州 450052)

摘要 针对部队实弹打靶中某型引信早炸率过高的问题, 提出了引信互扰效应试验方法, 开展了引信互扰效应试验, 分析了该型引信的互扰效应规律, 并确定了其失效机理. 试验结果表明: 引信相对速度、相对姿态、相对高度、辐射能量、辐射频率以及加电方式都会对引信临界互扰距离产生影响. 引信互扰效应机理为: 引信靠近过程中, 由于辐射能量及辐射频率接近而产生频率牵引, 导致检波电压信号波动, 从而推动引信执行电路误动作.

关键词 引信; 互扰效应; 临界互扰距离; 失效机理; 频率牵引

中图分类号 O441.1 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2015)05-0903-07

Interactional effects rule of a certain radio fuze

XIONG Jiuliang¹ WU Zhancheng¹ SUN Yongwei¹ GAO Lenan² XIE Penghao¹

(1. Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Air Defense Forces Command Academy, Zhengzhou 450052, China)

Abstract To solve the problem of high early-destruction rate of a certain fuze in target practice, an experiment method is proposed. Interactional effect experiments were done. And the interactional effects rules were analyzed. Also, the failure mechanism was got. The experiment results show that many factors affect the threshold interactional distance, such as relative velocity, relative pose, relative height, irradiation energy, irradiation frequency and power supply manner. The failure mechanism is that when the fuzes move to each other, frequency pulling occurs because the irradiation energy and frequency are close, and the detection voltage signal is fluctuate, which leads to the mis-action of the fuze.

Key words fuze; interactional effects; threshold interactional distance; failure mechanism; frequency pulling

引言

某军区高炮防空旅使用某型榴弹引信进行了实弹射击. 在单炮射击过程中, 未发生早炸情况; 改为连

齐射(8门炮集群射击), 引信发生早炸, 早炸率约为引信设计早炸率的5倍. 引信出现的问题使部队实弹射击训练工作一度终止, 造成了大量人力、物力、财力等资源的浪费. 从实弹射击结果可以看出, 引信之间

收稿日期: 2014-11-04

资助项目: 国防973项目(No. 613196); 重点实验室基金项目(No. 9140C87010213JB34005; 2013ECF06); 青年科学基金项目(51207168)

联系人: 熊久良 E-mail: xiongjiuliang@163.com

存在相互干扰,即所谓的电磁兼容^[1]问题.文献[2]在分析自差收发机的电磁兼容性中指出,引信齐射或连射过程中可能会存在电磁兼容问题.然而,遗憾的是,由于缺乏实弹打靶验证,引信的电磁兼容问题并没有引起太大的关注.目前,对于引信互扰效应的研究鲜见报道,具体研究更是缺乏针对性和系统性.针对以上问题,以实弹打靶引信为研究对象,提出了实验室内引信互扰效应试验方法,开展了互扰效应试验,分析了引信互扰效应规律,并确定了引信的失效机理.研究结论不仅对该型引信的战场应用具有重要的军事意义,对其他引信互扰效应的研究也提供了指导思路.

1 试验装置与方法

由于试验引信为米波引信,以近炸功能为主,同时兼有碰炸和自炸功能.因此,试验过程中不能与外界物体碰触.为保证试验的安全性和可靠性,按照文献[3]的方法对引信进行改装,并将引信电源信号、发火信号和检波电压信号引出以方便引信供电和测试.以引信是否输出发火信号为判断标准,来评判引信间是否产生了互扰效应.考虑到两引信互扰是多引信互扰的基础,仅对两引信的互扰效应进行研究.

从实弹打靶情况来看,引信齐射过程中互扰效应与引信间的相对状态有关,而与每发引信的绝对状态无关.因此,构建两引信互扰效应试验系统如图1所示.控制系统用来调整试验参数、发送控制指令并显示部分受试设备状态参数;状态调整装置接收控制指令,调整两受试引信的相对状态;信号监测系统用来实时测试和记录受试引信的频谱变化情况以及重要响应信号(发火信号等).由于受试引信对外界干扰环境较为敏感,为了保证试验的准确性,整个试验系统放置于屏蔽室中,控制系统和状态调整装置进行整体屏蔽.

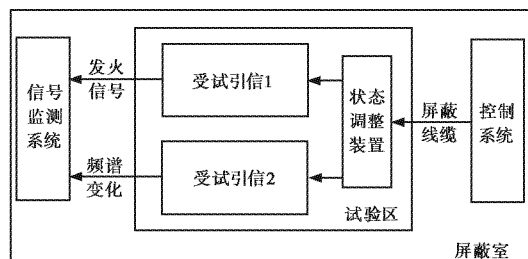


图1 试验配置图

考虑到两引信相对状态的影响因素主要包括:相对速度、相对姿态、相对高度、辐射能量、辐射频

率、加电方式等.因此,进行两引信互扰效应试验时,需要研究以上因素对引信互扰效应规律的影响.为定量的评价引信互扰效应程度,定义引信临界互扰距离为:两引信间产生相互干扰而导致引信意外起爆的最大距离.可见,临界互扰距离越大说明引信越易产生相互干扰.具体试验方法如下:1)选取20发受试引信,编号为1#~20#,固定受试引信辐射状态,利用接收天线、频谱仪和示波器等,在相同辐射条件和测试条件下测试并记录引信辐射能量、辐射频率等基本性能参数;2)受试引信处于同一水平面内,一发引信固定,另一发引信移动,采用直流稳压源为两发受试引信供电.调整两受试引信的相对状态,研究不同因素对引信临界互扰距离的影响;3)试验过程中实时监测引信辐射参数及发火信号,记录引信的试验状态和结果.

2 试验结果与分析

2.1 最强能量耦合姿态试验结果与分析

现有文献研究表明,引信不同姿态具有不同的能量耦合能力^[4-5].为针对性地开展研究,选择受试引信最强能量耦合姿态进行各类试验是比较合理的.为此,根据文献[6]的方法,利用等幅正弦波作为辐照源对受试引信不同姿态进行辐照试验.

根据引信的结构特点,规定以引信装定孔正对天线,弹体轴线与辐射场传播方向垂直,引信竖直向上为(0,0,0)参考姿态,其中 (x, y, z) 代表(水平角度,俯仰角度,自转角度).取1#~3#试验引信与弹体正常连接后置于等幅正弦波辐射场中.对引信加电,调整配弹引信处于几种典型受试姿态.不断调整辐射频率及场强,对不同姿态受试引信进行辐照试验,测试引信的临界干扰场强^[6-7].试验中发现3发引信的试验规律相似,取1#引信(主频为 f_0)的试验数据进行分析,试验结果如图2所示.

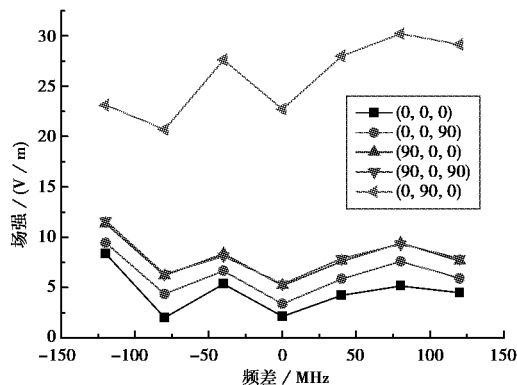


图2 不同姿态下引信试验结果

图 2 为不同辐照频率下典型姿态受试引信临界干扰场强,图中横坐标为辐照频率与受试引信主频的频差.从图中结果可以看出,按姿态(0,0,0)放置时,引信临界干扰场强最小,即为受试引信最强能量耦合姿态.后续的试验中将以此姿态考量引信的互扰能力.

2.2 引信互扰效应规律试验结果与分析

2.2.1 不同相对速度引信互扰效应试验

为分析相对速度对引信互扰效应的影响,进行两组试验.一组试验选取 17 号引信固定放置,5 号引信运动;另一组选取 16 号引信固定放置,9 号引信运动.试验过程中,两引信处于同一水平面内,全部采用竖直放置方式,以不同速度、最强能量耦合姿态接近,对两引信同时加电,观察引信频率变化和发火情况,记录不同速度下两引信的临界互扰距离.结果如表 1 和表 2 所示.

从表 1 和表 2 中可以看出,两引信相对静止状态下(即相对速度为 0),在试验条件下不会造成引信意外发火.在较慢的速度时($<0.4\text{ m/s}$),引信间也不存在相互干扰.但是,只要大于一定速度($>0.4\text{ m/s}$),引信互扰效应使得两引信同时出现意外发火现象,发火瞬间引信频率变为同一数值,并且只要产生了互扰效应,引信临界互扰距离与相对速度无关.对比试验结果还可以发现,随着相对速度的变化,引信临界互扰距离变化不大,考虑到测试误差,17 号和 5 号引信的临界互扰距离约为 50 cm,16 号和 9 号引信的临界互扰距离约为 135 cm.同时,对比不同引信组合相同速度下(0.8 m/s)临界互扰距离值发现,即便在相同试验条件下,不同引信组合也会有不同临界互扰距离,即引信本身的辐射特性(辐射能量、辐射频率等)也会影响临界互扰距离.

表 1 17 号与 5 号引信不同相对速度下互扰效应结果

试验结果	相对速度/(m/s)					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
17 号引信发火情况	否	否	是	是	是	是
5 号引信发火情况	否	否	是	是	是	是
临界互扰距离/cm	0	0	50	49	47	49

表 2 16 号与 9 号引信不同相对速度下互扰效应结果

试验结果	相对速度/(m/s)					
	0	0.3	0.5	0.7	0.8	1
16 号引信发火情况	否	否	是	是	是	是
9 号引信发火情况	否	否	是	是	是	是
临界互扰距离/cm	0	0	135	130	134	133

2.2.2 不同姿态引信互扰效应试验

第 2.2.1 节试验已经证明,17 号与 5 号引信能够产生互扰效应,为此,本试验中采用 17 号引信固定放置,5 号引信运动方式进行不同相对姿态下的对比试验.试验过程中,两引信处于同一水平面内,调整两引信姿态使两引信夹角不断变化,利用直流稳压源对两受试引信同时加电,观察受试引信频率变化和发火情况,记录不同姿态下引信意外起爆瞬间两引信的临界互扰距离.试验结果如表 3 所示.

表 3 中定义两引信竖直向上为 0° 夹角,引信头相对为 180° 夹角.从表中结果可以看出,不同姿态下引信的临界互扰距离不同,即引信临界互扰距离与两引信的相对姿态有关.两引信竖直向上姿态下,引信临界互扰距离最大为 50 cm;引信头相对时,引信临界互扰距离最小约为 9 cm.这主要是因为受试引信为弹体天线,其天线方向图呈横 8 字型,辐射能力两边最强,中间最弱.可以看出,引信姿态的改变实际上是改变了引信的辐射(或接收)的能力,从而影响了引信的相互干扰能力.另外,试验中发现引信发生互扰效应时两引信同时意外发火,并且发火瞬间引信频率变为同一数值.

表 3 不同姿态下引信临界互扰距离

试验结果	相对姿态/ $(^\circ)$				
	0	45	90	135	180
17 号引信发火情况	是	是	是	是	是
5 号引信发火情况	是	是	是	是	是
临界互扰距离/cm	50	36	27	20	9

2.2.3 不同相对高度引信互扰效应试验

在实际射击中,特别是连续射击时,存在两发引信高度不同的情况.即便是在齐射过程中,两发引信的相对高度也不会相同.为研究不同相对高度对引信互扰效应的影响,特别进行以下试验:17 号引信固定放置,5 号引信以不同相对高度最强能量耦合姿态靠近.利用直流稳压源对两受试引信同时加电,观察受试引信频率变化和发火情况,记录不同相对高度下引信的临界互扰距离.结果如表 4 所示.

从表 4 的试验结果可以看出,同一相对姿态下,引信临界互扰距离受相对高度的影响,相对高度越低,引信临界互扰距离越大.当相对高度大于 40 cm 时,引信间不再产生互扰效应.另外,试验中发现引信发生互扰效应时两引信同时意外发火,并且发火瞬间引信频率变为同一数值.

表 4 不同相对高度引信临界互扰距离

试验结果	相对高度/cm							
	15	25	30	35	40	47	53	55
17# 引信 发火情况	是	是	是	是	否	否	否	否
5# 引信发 火情况	是	是	是	是	否	否	否	否
临界互扰 距离/cm	50	35	10	4	0	0	0	0

表 5 不同辐射能量下引信互扰效应结果

试验结果	受试引信组合						
	5#/16#	9#/3#	15#/16#	9#/16#	15#/3#	5#/9#	16#/3#
频差/MHz	0.5	0.5	0.5	0.33	0.33	0.83	0.83
固定引信发火情况	是	是	是	是	是	是	是
移动引信发火情况	是	是	是	是	是	是	是
临界互扰距离/cm	55	75	150	135	230	52	38

2.2.5 不同频差引信互扰试验

为研究不同频率差对引信互扰效应的影响,试验中采用更换不同频差引信组合进行对比试验.选用辐射能量相近的 2#、3#、6#、16# 作为运动引信,不断更换固定放置引信.两引信在同一水平面内,采用竖直放置方式以最强能量耦合姿态靠近,对两受试引信同时加电,观察受试引信频率变化和发火情况,记录不同频差下引信临界互扰距离.共选取 2 组引信进行试验,试验结果如表 6 和表 7 所示.

表 6 9# 固定放置时引信互扰效应结果

试验结果	受试引信组合			
	9#/16#	9#/3#	9#/2#	9#/6#
频差/MHz	0.33	0.5	1.67	2.67
固定引信发火情况	是	是	否	否
移动引信发火情况	是	是	否	否
临界互扰距离/cm	135	75	0	0

表 7 15# 固定放置时引信互扰效应结果

试验结果	受试引信组合			
	15#/3#	15#/16#	15#/2#	15#/6#
频差/MHz	0.33	0.5	1.5	2.5
固定引信发火情况	是	是	否	否
移动引信发火情况	是	是	否	否
临界互扰距离/cm	230	150	0	0

从表中数据可以看出,不同频差下,引信临界互

2.2.4 不同辐射能量引信互扰试验

为研究不同辐射对引信互扰效应的影响,试验中采用频差相同,而辐射能量不同的引信组合进行对比试验.共选取 7 组引信进行试验,试验结果如表 5 所示.从表 5 可以看出,相同频差不同辐射能量下,引信临界互扰距离不同.可见,引信互扰效应受到引信辐射能量大小的影响.另外,试验中发现引信发生互扰效应时引信同时意外发火,并且发火瞬间引信频率变为同一数值.

扰距离不同,频差越小,临界互扰距离越大,即引信相互间越容易干扰.可见,引信互扰效应必须满足一定频差范围.另外,对比表 6、表 7 试验数据还可以看出,不同引信组合即便有相同的频差,引信临界互扰距离有很大差别.这从一个侧面证明了引信辐射能量对引信互扰距离也有影响.试验中也发现引信发生互扰效应时两引信同时意外发火,并且发火瞬间引信频率变为同一数值.

2.2.6 不同加电方式引信互扰试验

在以上试验中两受试引信全部采用同时加电的方式.在试验中发现,引信加电方式不同产生的互扰效应也有区别.为研究不同加电方式对引信互扰效应的影响,进行如下试验:选 5 组引信进行对比试验,标记为 c#/d#,c# 引信固定,d# 引信移动,移动引信先加电,固定引信瞬间加电.不同加电方式下互扰效应试验结果如表 8 和表 9 所示.

从表 8 中可以看出,移动引信先加电,而固定放置引信瞬间加电时会使先加电引信意外起爆,而瞬间加电引信并没有起爆.相同加电方式下,对换两引信放置方式并不改变引信临界互扰距离.试验过程中,瞬间加电引信起爆后,继续移动引信,两引信仍会出现同时起爆现象(此时,运动时间远小于自炸时间,可排除自炸引起发火的可能).比较表 8 和表 9 可知,不同加电方式下引信临界互扰距离不同,不同时加电条件下引信临界互扰距离远大于同时加电结果.比较 17#/5# 引信可知,同时加电条件下,引信临界互扰距离为 50 cm,而不同时加电条件下,临界互扰距离为 227 cm,远远大于同时加电结果.比较

17 #/15 # 引信可知,同时加电条件下,两引信不会产生互扰效应,而不同时加电情况下,引信仍可产生互扰效应. 另外,试验中发现两引信不同时加电时,

只有先加电引信输出发火信号,但是发火瞬间两引信频率仍变为同一数值.

表 8 不同时加电下引信互扰效应结果

试验结果	受试引信组合							
	17 #/5 #	5 #/17 #	17 #/16 #	16 #/17 #	17 #/15 #	15 #/17 #	17 #/20 #	20 #/17 #
发火引信	5 #	17 #	16 #	17 #	15 #	17 #	20 #	17 #
临界互扰距离/cm	227	227	244	242	115	114	75	73

表 9 同时加电下引信互扰效应结果

试验结果	受试引信组合			
	17 #/5 #	17 #/16 #	17 #/15 #	17 #/20 #
发火引信	17 #/5 #	17 #/5 #	无	无
临界互扰距离/cm	50	38	0	0

2.3 作用机理分析与验证

2.3.1 理论分析

对于有源干扰而言,根据干扰频率与接收引信自差机振荡器本身频率的接近程度,接收引信的工作状态会出现三种情况:

1) 当干扰频率 ω_s 比固有频率 ω_0 相差很大时,外电动势对振荡电压起调制作用,使振荡频率 ω 也在其固有频率 ω_0 附近作周期性的变化.

2) 当干扰频率与固有频率相差不太大也不太小时,则振荡器的频率受干扰的影响,产生差拍振荡现象,其差拍频率为 $\Omega = |\omega_0 - \omega_s|$,振荡器的振幅包络线按差拍频率变化. 此时,振荡频率与回路谐振频率有一定的失调,这种失调频率随外加电动势的频率 ω_s 的变化规律如图 3 所示.

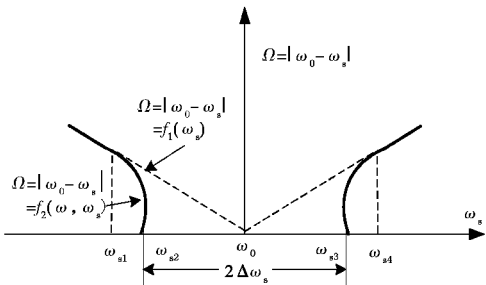


图 3 振荡频率牵引与占据示意图

图 3 中,纵坐标表示干扰频率与振荡器固有频率的差 $|\omega_0 - \omega_s|$;横坐标表示干扰频率 ω_s ;坐标原点既表示横坐标上 $|\omega_0 = \omega_s|$,又表示纵坐标的零点. 当 ω_s 与 ω_0 相距较远时($\omega_s < \omega_{s1}$, $\omega_s > \omega_{s4}$),振荡频率基本不受干扰的影响,完全由电路参数所决定,

此时振荡器固有频率表示为 $\omega_0 = \omega_s + \Omega$. 其中,差频 Ω 用图中虚线表示,随外加电动势的频率 ω_s 作线性变化. 当 ω_s 接近 ω_0 (尚未进入 $\omega_0 \pm \Delta\omega_s$ 范围) 时,即 ω_s 在 $\omega_{s1} \sim \omega_{s2}$ 和 $\omega_{s3} \sim \omega_{s4}$ 两个区间,差频 Ω 按图中实线变化. 这就意味着实际振荡频率被牵引到偏向于外电动势频率. 在这种情况下,振荡器的工作频率不仅由电路参数决定,而且受外加电动势的牵制,与外加电动势的频率和振幅都有关系. 振荡器在这种情况下是一种不稳定的工作状态.

3) 当干扰频率与振荡器频率进一步接近到一定程度时,如图 3 中实线变化到 $\Omega = 0$ 处,振荡器频率完全受干扰频率控制,也就是说,振荡器频率不再决于回路参数,而是随干扰频率的改变而改变. 在这个区间内,振荡频率 $\omega = \omega_s$. 这种现象称为频率占据现象,产生频率占据的范围 $2\Delta f_s$ 为占据频带. 占据频带的宽度主要决定于外加干扰的强度,外加干扰愈强,占据频带愈宽.

从频率牵引理论可知,两引信以一定姿态相互靠近时,对于一发引信而言,另一发引信相当于外加有源干扰信号. 由于引信生产中的频率散布问题,使得引信辐射能量和辐射频率相差都较小,容易产生频率牵引. 当牵引条件足够时,就可以在引信检波电压端产生与牵引时间相当脉宽的脉冲信号,从而推导引信执行电路误动作,导致引信意外发火.

2.3.2 试验验证

为验证引信的互扰机理,取 7 组能够产生互扰效应的引信组合,进行二组试验. 第一组试验同时测试产生引信互扰效应时两引信的检波电压信号;第二组试验测试不同引信组合下,产生互扰效应过程中各引信辐射频率和辐射能量的变化情况.

试验中发现,引信产生互扰效应瞬间可同时检测到检波电压和发火信号. 并且检波电压产生波动,电压波动峰值约为 2.5 V. 根据引信信号处理特点,该检波电压信号完全能够导致引信误动作. 可见,引信互扰效应的产生根本原因是引信相互靠近过程

中,由于引信辐射能量和辐射频率达到要求产生了频率牵引,从而导致了引信意外发火。

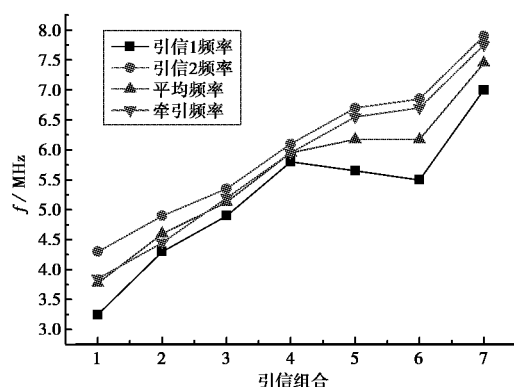


图4 频率变化情况

图4为7组引信互扰过程中辐射频率 f_1 、 f_2 ;牵引频率 f 以及两频率的平均值 $(f_1+f_2)/2$ 的变化情况。保密起见,图中数据为对一标定频率 f_0 的差值。试验过程中发现,只要发生互扰效应,两引信的辐射频率会牵引到同一频率上。这一现象再次证明了引信互扰过程中确实发生了频率牵引。然而,与日常认识不同的是,发生频率牵引时,牵引后的频率 f 与其中任何一个引信的频率都不同,而是被频率到两引信频率中间的频率上,即 $f \neq (f_1+f_2)/2$ 。通过对引信辐射能量的测试可知,牵引频率会更靠近辐射能量大的引信的频率。由于引信之间频率的差别较小,因此,在一般的计算中可以认为牵引频率为两引信频率的平均值。这一结论与文献[2]得出的结论相同。

3 结 论

两引信互扰效应试验说明,由于引信生产过程中频率的散布性使得引信互扰问题无法避免。研究发现,引信相对速度、相对姿态、相对高度、辐射能量、辐射频率以及加电方式等因素都会对引信临界互扰距离产生影响。不同时加电条件下,频差为2.17 MHz的引信临界互扰距离可达227 cm。引信互扰效应机理为:由于引信生产中的频率散布问题,使得引信辐射能量和辐射频率相差都较小,容易产生频率牵引,使得引信检波电压发生波动,从而推导引信执行电路误动作,导致引信意外发火。

参考文献

[1] 林泽祥, 兰强. 天线的电磁兼容技术[J]. 电波科学学报, 2007, 22(1): 170-173.

LIN Zexiang, LAN Qiang. EMC technique of antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(1): 170-173. (in Chinese)

[2] 白钰鹏, 施聚生, 郝新红. 自差收发机的电磁兼容性分析[J]. 探测与控制学报, 2002, 24(1): 33-36.
BAI Yupeng, SHI Jusheng, HAO Xinhong. The analysis of electromagnetic compatibility of the autodyne transceiver[J]. Journal of Detection & Control, 2002, 24(1): 33-36. (in Chinese)

[3] 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.
XIONG Jiuliang, WU Zhancheng, SUN Yongwei, et al. Experimental method of radio fuze radiation effect under energy-type electromagnetic interference [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2783-2790. (in Chinese)

[4] 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): 0732181-0732185.
LI Yongliang, YAN Xiaopeng, HAO Xinhong, et al. Coupling effect of ultra wideband electromagnetic pulse on typical fuze [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7): 0732181-0732185. (in Chinese)

[5] 王绍光, 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.
WANG Shaoguang, WEI Guanghui, CHEN Yazhou, et al. Radiation effects of ultra-wide spectrum on radio fuze and its protection [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1873-1877. (in Chinese)

[6] 费支强, 魏光辉, 耿利飞. 正弦波辐照对无线电引信的作用机理研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(2): 318-321.
FEI Zhiqiang, WEI Guanghui, GENG Lifei. Effecting mechanism of sine wave irradiation to radio fuze [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(2): 318-321. (in Chinese)

[7] 陈亚洲, 程二威, 费支强, 等. 无线电引信调幅波电磁辐射环境效应研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1187-1192.
CHEN Yazhou, CHENG Erwei, FEI Zhiqiang, et al. Radiation environment effects of amplitude modulation wave on a certain radio fuze [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(6): 1187-1192. (in Chinese)

作者简介



熊久良 (1986—), 男, 山东人, 军械工程学院静电与电磁防护研究所在读博士研究生, 研究方向为电磁防护理论与技术。



孙永卫 (1968—), 男, 山东人, 博士, 军械工程学院静电与电磁防护研究所教授、硕士生导师, 研究方向为电磁防护理论与技术。



武占成 (1963—), 男, 河北人, 博士, 军械工程学院静电与电磁防护研究所教授、博士生导师, 研究方向为电磁防护理论与技术。