

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.03.004

引用格式:熊久良,武占成,孙永卫,等.连续波多普勒引信单频连续波辐照效应规律分析[J].电讯技术,2015,55(3):250-255.[XIONG Jiuliang,WU Zhancheng,SUN Yongwei,et al.Rule Analysis of Single Frequency Continuous Wave Radiation Effects for Continuous Wave Doppler Fuze[J].Telecommunication Engineering,2015,55(3):250-255.]

连续波多普勒引信单频连续波辐照效应规律分析*

熊久良**,武占成,孙永卫,程二威

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所,石家庄 050003)

摘要:为研究单频连续波对连续波引信装置的辐照效应规律,在200 V/m场强范围内,对加电工作状态典型引信装置开展了单频连续波辐照效应试验。通过对比分析,提出了普适的单频连续波辐照下连续波多普勒引信装置效应规律。试验结果表明:引信装置具有最佳能量耦合方向,该方向且与引信装置的具体结构有关;天线为单频连续波辐照下引信装置的主要能量耦合通道,弹体作为天线的一部分也会产生影响;引信装置存在敏感频点和敏感频段,在本振频率附近,引信装置临界干扰场强可达几 V/m;不同引信装置抗单频连续波干扰的能力不同。

关键词:单频连续波;连续波多普勒引信;辐照效应;临界干扰场强;倍频效应

中图分类号:0441.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)03-0250-06

Rule Analysis of Single Frequency Continuous Wave Radiation Effects for Continuous Wave Doppler Fuze

XIONG Jiuliang, WU Zhancheng, SUN Yongwei, CHENG Erwei

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

Abstract: In order to research the effect rule of continuous wave doppler fuze (CWDF) equipment under single frequency continuous wave (SFCW) radiation, typical fuze experiments are done under 200 V/m field. Through comparison, the effect rule of CWDF equipment under SFCW radiation is advanced. The experiment results show that the fuze has the best coupling direction which is correlated to the configuration. Also, the fuze antenna is the mostly coupling entryways of the fuze, and the fuze body will affect the coupling capability. In addition, fuze has sensitive frequency and frequency range. Around the fixed frequency, the threshold interference field could be several V/m. Finally, the results show different fuze has different anti-jamming capability.

Key words: single frequency continuous wave; continuous wave doppler fuze; radiation effect; threshold interference field; times frequency effect

1 引言

目前,引信装置电磁环境效应问题已经成为国内外学者研究的热点^[1-5]。整体来看,电磁干扰可以

分为信息型干扰和能量型干扰^[6-7],目前对引信装置电磁干扰效应的研究也集中在这两个方面。文献[8-13]深入研究了强电磁脉冲环境对某型分米

* 收稿日期:2014-10-29;修回日期:2015-01-19 Received date:2014-10-29;Revised date:2015-01-19
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(613196);重点实验室基金项目(2013ECF06;9140C87010213JB34005)
Foundation Item: The National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (No. 613196); Scientific Funds for the Key Laboratory (2013ECF06;9140C87010213JB34005)

** 通讯作者: xiongjiuliang@163.com Corresponding author: xiongjiuliang@163.com

波无线电引信装置的电磁辐照效应,对其效应规律、作用机理以及防护方法进行了综合分析。文献[1, 14–16]对连续波辐照下某型无线电引信装置的电磁辐照效应进行了研究,得到该型引信装置的效应规律及失效机理。然而,纵观以上研究成果仍存在以下两个方面的问题:一是不同引信装置电路结构、工作特点不同,文献仅针对某型分米波无线电引信装置进行了研究,缺乏其他种类引信装置效应分析;二是文献中的研究结论仅对受试引信装置适用,是否有普适的效应规律需要进一步补充和研究。

针对以上问题,本文以典型连续波多普勒引信装置为研究对象,开展其在单频连续波下的辐照效应试验,分析受试引信装置的能量耦合通道和失效机理。在以上研究的基础上,结合文献[1]研究成果,提出了单频连续波辐照下连续波多普勒引信装置普适的效应规律。研究成果不仅对本文受试引信装置提高防护能力有实用价值和军事效益,而且对提高同类引信装置及他类引信装置电磁防护能力具有重要的指导意义。

2 试验装置与方法

为方便与文献[1]结论进行对比,本文采用与文献[1]相同的试验系统方法:利用信号发生器产生一定频率的等幅正弦波信号,由功率放大器放大后通过双向耦合器由喇叭天线辐射等幅正弦波,对被试无线电引信装置进行辐照。通过调节信号发生器的输出电平、功率放大器的增益倍数或被试无线电引信装置与辐射天线之间的距离来调节辐照强度。

本文以两种连续波多普勒引信装置为研究对象(分别记为 A 型引信装置和 B 型引信装置),其中 A 型引信装置为分米波引信装置,B 型引信装置为米波引信装置。参照文献[1]的方法对受试引信装置进行适应性改装。摸底试验表明:低于200 V/m的单频连续波对非加电状态下受试引信装置的安全性没有影响,但能使加电状态的引信装置意外发火。因此,本文主要对正常加电状态引信装置进行研究。

3 试验结果与分析

3.1 最佳能量耦合方向试验结果与分析

文献[1]研究结果表明,引信装置受试姿态会影响引信装置临界干扰场强。为此,定义 (x,y,z) 代表(水平角度,俯仰角度,自转角度),如图 1 所示。根据受试引信装置结构特点,规定 A 型引信装置

(0,0,0)姿态为:引信装置正对天线,弹体轴线与辐射场传播方向一致,三角环天线平面平行于水平面,装定口垂直向上。B 型引信装置(0,0,0)姿态为:引信装置装定孔正对天线,弹体轴线与辐射场传播方向垂直,引信装置竖直向上。利用研制的试验台^[17]对不同姿态下的受试引信装置进行辐照试验。根据文献[1,15]研究结论,调幅波对引信装置的作用效果最为明显,并且引信装置的最佳能量耦合方向与连续波辐照源类型无关。因此,为方便测试,本文采用文献[15]中调幅波对不同姿态下的受试引信装置进行试验,以确定最佳能量耦合方向。典型姿态下 A 型引信装置与 B 型引信装置试验结果分别如图 2 和图 3 所示。

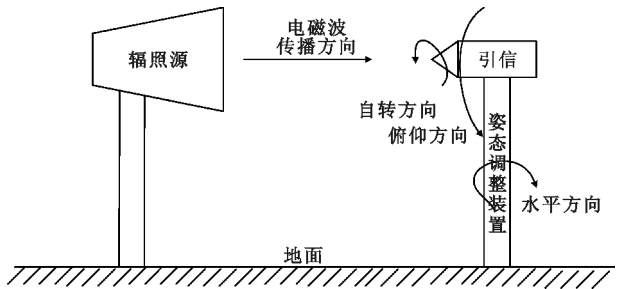


图 1 引信装置姿态示意图

Fig. 1 Sketch map of fuze's pose

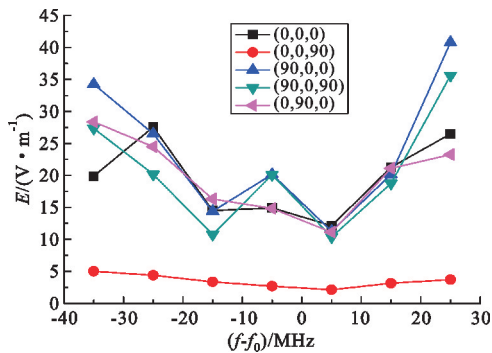


图 2 不同姿态下 A 型引信装置试验结果

Fig. 2 Experiment results of A fuze in different pose

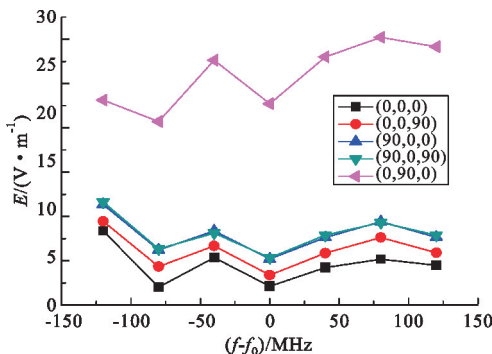


图 3 不同姿态下 B 型引信装置试验结果

Fig. 3 Experiment results of B fuze in different pose

图 2 和图 3 为不同辐照频率下典型姿态时受试引信装置临界干扰场强,图中横坐标为辐照频率 f 与受试引信装置本振频率 f_0 的频差值。

从图 2 中可以看出,不论何种姿态,弹体自转 90° 后的姿态对能量的耦合能力要强于 0° 姿态。按姿态 $(0,0,90)$ 放置时,引信装置临界干扰场强仅约为其他姿态临界干扰场强值的 25%。因此,此姿态为 A 型引信装置最佳能量耦合方向。从图 3 中可以看出,不论何种姿态, 0° 姿态对能量的耦合能力要强于 90° 姿态。按姿态 $(0,0,0)$ 放置时,引信装置临界干扰场强最小,而按姿态 $(0,90,0)$ 放置时,引信装置临界干扰场强约为 $(0,0,0)$ 姿态时的 10 倍。因此, $(0,0,0)$ 姿态为 B 型引信装置最佳能量耦合方向。

3.2 能量耦合通道试验结果与分析

从受试引信装置结构来看,电磁波能量作用于两种受试引信装置的可能耦合通道都包括前端未屏蔽的天线、连接过程中不可避免的孔缝以及弹体。为确定主要能量耦合通道,选取各项参数正常的受试引信装置,对引信装置正常状态、屏蔽天线状态、屏蔽孔缝状态以及去掉弹体状态四种情况进行调幅波辐照对比试验,测试相同辐照频率不同条件下受试引信装置临界干扰场强。典型试验结果如图 4 和图 5 所示。

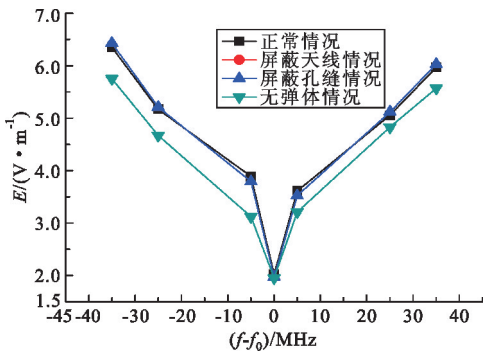


图 4 不同条件下 A 型引信装置试验结果
Fig. 4 Experiment results of A fuze in different condition

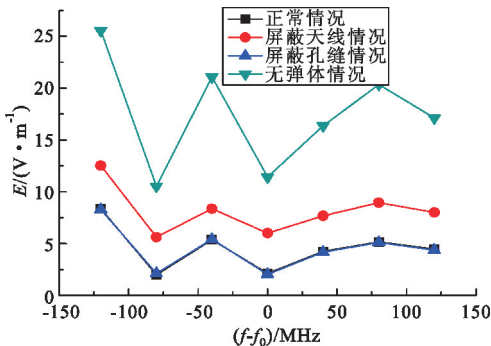


图 5 不同条件下 B 型引信装置试验结果
Fig. 5 Experiment results of B fuze indifferent condition

从图 4 中可以看出:

(1) A 型引信装置天线屏蔽后,在 200 V/m 的场强范围内,不再出现意外发火。与正常状态引信装置辐照情况相比,引信装置临界干扰场强出现了较大的改变,因此可以得出结论:天线是一条导致引信装置起爆的主要能量耦合通道;

(2) 对比正常辐照情况和屏蔽孔缝情况临界干扰场强可知,屏蔽所有孔缝后,引信装置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,孔缝不是导致引信装置起爆的主要能量耦合通道;

(3) 对比正常辐照情况和无弹体情况临界干扰场强可知,配弹引信装置临界干扰场强比无弹体引信装置临界干扰场强略大,最大增加约 9%。但整体来看,临界干扰场强值变化不大,说明弹体会影响引信装置对辐照能量的接收能力,但影响程度有限,不是引信装置的主要能量耦合通道。同时,此试验结果也证明了 A 型引信装置天线可以配用不同弹体,具有较好的通用性。这一结论也与引信装置厂家设计结论一致。

从图 5 中可以看出:

(1) 对比正常状态引信装置,屏蔽引信装置天线后,B 型引信装置临界干扰场强增大超过了 50%,可见,引信装置天线影响引信装置对辐照能量的耦合强度,是 B 型引信装置一条重要的能量耦合通道;

(2) 屏蔽所有缝隙后,相较正常状态结果,引信装置临界干扰场强没有明显改变,考虑测试误差的影响,可知孔缝不是引信装置的主要能量耦合通道;

(3) 对比无弹体情况可知,无弹体受试引信装置临界干扰场强比有弹体临界干扰场强值增幅超过了 300%,可见,弹体影响着引信装置对辐照能量的耦合强度,即弹体也是引信装置一条重要的能量耦合通道;

(4) 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要大于引信装置天线的影 响。出现这一结果的原因是:受试引信装置为弹体天线,弹体作为天线的一部分影响辐射能量的接收能力。综上所述,B 型引信装置的主要能量耦合通道为天线和弹体。

3.3 效应规律试验结果与分析

为研究受试引信装置临界干扰场强随辐照频率的变化规律,确定受试引信装置敏感频段,分别选取 5 发改装好的受试引信装置,以最佳能量耦合姿态置

于单频连续波辐射场中进行辐照试验,辐照场强最高值为200 V/m。试验发现各引信装置试验现象相似,取其中一发引信装置(主频为 f_0)试验数据进行分析,A、B 引信装置临界干扰场强与频率系数($n=f/f_0$, f 为辐射频率)的关系分别如图 6 和图 7 所示。

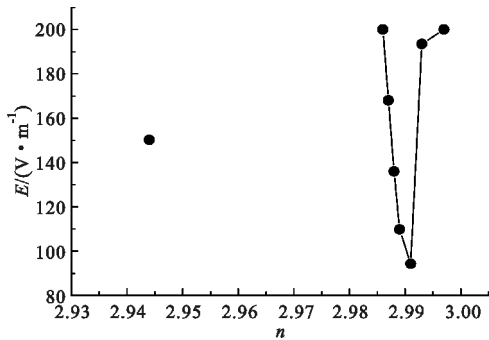


图 6 A 型引信装置临界干扰场强与频率系数关系图
Fig. 6 Relationship between threshold interference field and frequency coefficient of A fuze

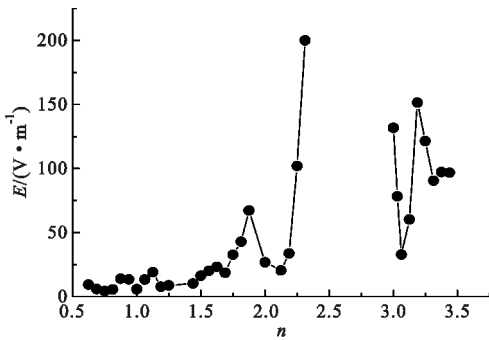


图 7 B 型引信装置临界干扰场强与频率系数关系图
Fig. 7 Relationship between threshold interference field and frequency coefficient of B fuze

A 型引信装置试验中辐照频率 $f_0/2 \sim 3f_0$,辐照频率涵盖了引信装置三倍频范围。从试验结果可以看出:

(1)一定频率单频连续波辐照能使处于工作状态的 A 型引信装置意外发火,辐照频率不同,引信装置临界干扰场强不同;

(2)A 引信装置存在辐照敏感频点和敏感频段。在200 V/m场强范围内,A 型引信装置仅在频率约为 $2.944f_0$ 的频点以及 $2.986f_0 \sim 2.997f_0$ 的频段范围内出现意外发火,而在其他频点处无发火现象;

(3)引信装置具有“倍频效应”,即在倍频附近引信装置容易出现意外发火,且临界干扰场强较小。对 A 型引信装置来说,200 V/m 范围内引信装置在三倍频附近的最低场强小于100 V/m;

(4)A 型引信装置具有较强的抗单频连续波干扰的能力。

分析图 7 中 B 型引信装置辐照效应结果可以看出:

(1)一定频率单频连续波辐照能使处于工作状态的 B 型受试引信装置意外发火,辐照频率不同,引信装置临界干扰场强不同;

(2)受试引信装置存在辐照敏感频点和敏感频段。可以看出,在 200 V/m 辐照场强范围内,在 $0.625f_0 \sim 2.313f_0$ 及 $3f_0 \sim 3.438f_0$ 的辐照频率内引信装置较易发火,而 $2.75f_0 \sim 2.938f_0$ 的辐照频率内,引信装置没有出现发火现象;

(3)B 型引信装置也具有“倍频效应”,本振频率附近引信装置临界干扰场强小于6 V/m,在二倍频附近引信装置临界干扰场强小于21 V/m,三倍频附近引信装置临界干扰场强小于61 V/m;

(4)B 型引信装置抗单频连续波干扰的能力要比 A 型引信装置差。

4 讨论

本文两种受试引信装置与文献[1]受试引信装置同为连续波多普勒引信装置,对比分析三种引信装置单频连续波辐照效应结果可知:

(1)引信装置存在最佳能量耦合方向,不同引信装置最佳能量耦合方向与引信装置的具体结构有关。影响引信装置能量耦合能力的因素包括弹体方向、天线方向、辐射波传播方向等,其中弹体对引信装置能量耦合能力的影响程度也决定了引信装置的通用性,从本文的研究结果可以看出,A 型引信装置通用性最好,B 型引信装置通用性最差;

(2)无论何种引信装置,其可能的能量耦合通道都包括天线、弹体、孔缝以及其他暴露在空气中的部分^[1]。由于引信装置上面的孔缝较小且非人为预留,一般孔缝不是主要的能量耦合通道。天线为单频连续波主要能量耦合通道,而弹体作为天线的一部分会影响整个引信装置对辐射能量的接收能力。弹体对天线的的影响程度越强,单频连续波通过弹体产生影响的比重越大;

(3)试验中发现,200 V/m 场强下,无论单频连续波辐照频率多大,都不会对非加电工作状态的受试引信装置产生影响;

(4)一定频率单频连续波辐照能使处于工作状态的引信装置意外发火,辐照频率不同,引信装置临

界干扰场强不同;

(5)引信装置存在辐照敏感频点和敏感频段,即引信装置在特定辐射频率下临界干扰场强较小;

(6)引信装置存在“倍频效应”,即引信装置在本振频率及倍频附近其临界干扰场强较小。在本振频率附近,引信装置的临界干扰场强可达几 V/m;

(7)同一辐照频率下,不同引信装置临界干扰场强有较大的差别,即引信装置具有不同的抗单频连续波干扰的能力。从本文研究结果可以看出,A型引信装置抗单频连续波干扰能力最强,文献[1]中受试引信装置次之,B型引信装置最弱。

5 结束语

本文以连续波多普勒引信装置为研究对象,提出了普适的连续波多普勒引信装置单频连续波辐照效应规律,其研究结论对于其他引信装置的效应研究及防护加固具有重要的指导意义。然而,应该提到的是,本文的结论是在三种连续波多普勒引信装置辐照效应的基础上提出的,由于引信装置的部分规律与引信装置的结构有关,因此,下一步的研究中还需增加试验对象,对连续波多普勒引信装置效应规律进行扩展和验证。

参考文献:

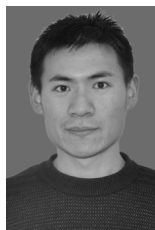
- [1] 费支强,魏光辉,耿利飞. 正弦波辐照对无线电引信装置的作用机理研究[J]. 电波科学学报,2010,25(2): 318-321.
FEI Zhiqiang, WEI Guanghui, GENG Lifei. Effecting mechanism of sine wave irradiation to radio fuze[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(2): 318-321. (in Chinese)
- [2] DU Liqun, JIA Shengfang, NIE Weirong, et al. Fabrication of fuze micro-electro-mechanical system safety device[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(5): 836-840.
- [3] 廖辉荣,李国林. 机载自卫电子战系统对引信装置信号侦察的作用评估[J]. 电讯技术,2011,51(3):106-110.
LIAO Huirong, LI Guolin. Essentiality of Airborne Self-Protection Electronic Warfare System to Scout Fuze Signal[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(3): 106-110. (in Chinese)
- [4] 尹洪伟,李国林,隋鉴. 一种新的 LFM 引信装置距离欺骗干扰抑制算法[J]. 电讯技术,2014,54(1):52-57.
YIN Hongwei, LI Guolin, SUI Jian. A New LFM Fuze Distance Deception Jamming Suppression Arithmetic[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(1): 52-57. (in Chinese)

- [5] 冯延彬,李国林,路翠华,等. 基于混合信号仿真技术的高功率微波与无线电引信装置耦合效应分析[J]. 电讯技术,2013,53(6):807-811.
FENG Yanbin, LI Guolin, LU Cuihua, et al. Analysis of High Power Microwaves Effect on Radio Fuze by Mixed Signal Simulation Technology[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(6): 807-811. (in Chinese)
- [6] Giri D V, Tesche F M. Classification of Intentional Electromagnetic Environments(IEME)[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 322-328.
- [7] 齐杏林,刘尚合. 引信装置信息型和功率(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.
QI Xinglin, LIU Shanghe. Conception and Characteristic Analyze of Fuze's Information-type Interference and Energy-type Interference[J]. Journal of Detection & Control, 1999, 21(2): 32-35. (in Chinese)
- [8] 张鑫,崔占忠,徐立新,等. 主动式静电引信装置电场分析[J]. 仪器仪表学报,2011,32(8):1898-1902.
ZHANG Xin, CUI Zhanzhong, XU Lixin, et al. Electrostatic field analysis of active electrostatic fuze[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(8): 1898-1902. (in Chinese)
- [9] 闫岩,崔占忠. 超宽带无线电引信装置抗干扰性能研究[J]. 兵工学报,2010,31(1):13-17.
YAN Yan, CUI Zhanzhong. Anti-jamming performance of UWB radio fuze[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(1): 13-17. (in Chinese)
- [10] 李刚,毕军建,刘尚合,等. 超宽谱电磁脉冲对无线电引信装置的耦合及防护加固[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1332-1336.
LI Gang, BI Junjian, LIU Shanghe, et al. Coupling mechanism between radio fuze and ultra band spectra electromagnetic pulse and enhancement of radio fuze[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(8): 1332-1336. (in Chinese)
- [11] 王绍光,魏光辉,陈亚洲,等. 超宽谱对无线电引信装置的作用效应实验研究[J]. 高电压技术,2006,32(11):78-80.
WANG Shaoguang, WEI Guanghui, CHEN Yazhou, et al. Experimental research on the radiation effect of the UWS-HPM to radio fuze[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 78-80. (in Chinese)
- [12] 王绍光,魏光辉,陈亚洲,等. 无线电引信装置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)
- [13] 李刚,赵月飞,刘尚合,等. 无线电引信装置执行电路

- 抗超宽谱电磁脉冲研究[J]. 高电压技术,2007,33(3):128-131.
- LI Gang,ZHAO Yuefei,LIU Shanghe,et al. Research on the amelioration of radio fuze's execution circuits against UWS-EMP[J]. High Voltage Engineering,2007,33(3):128-131. (in Chinese)
- [14] 费支强,魏光辉,耿利飞. 正弦波对无线电引信装置耦合通道及作用机理[J]. 现代防御技术,2011,39(1):37-40.
- FEI Zhiqiang,WEI Guanghui,GENG Lifei. Coupling entryways and effecting mechanism of sine wave irradiation to radio fuze[J]. Modern Defence Technology,2011,39(1):37-40. (in Chinese)
- [15] 陈亚洲,程二威,费支强,等. 无线电引信装置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)
- [16] 费支强,魏光辉,耿利飞. 无线电引信装置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.
- FEI Zhiqiang,WEI Guanghui,GENG Lifei. Research on the effects and effecting mechanism of sweep frequency wave irradiation to radio fuze[J]. Journal of Ordnance Engineering College,2010,22(5):17-21. (in Chinese)
- [17] 熊久良,武占成,孙永卫,等. 能量型电磁干扰下无线电引信装置辐照效应试验方法[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)

作者简介:



熊久良(1986—),男,山东临沂人,博士研究生,主要从事电磁兼容方面的研究;

XIONG Jiuliang was born in Linyi, Shandong Province, in 1986. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns electromagnetic compatibility.

Email:xiongiuliang@163.com

武占成(1963—),男,河北石家庄人,1997年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要从事电磁兼容方面的研究;

WU Zhancheng was born in Shijiazhuang, Hebei Province, in 1963. He received the Ph. D. degree in 1997. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns electromagnetic compatibility.

孙永卫(1968—),男,山东海阳人,2002年获博士学位,现为教授、硕士生导师,主要从事电磁兼容方面的研究;

SUN Yongwei was born in Haiyang, Shandong Province, in 1968. He received the Ph. D. degree in 2002. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns electromagnetic compatibility.

程二威(1983—),男,河南周口人,2006年获硕士学位,现为讲师,主要从事电磁兼容方面的研究。

CHENG Erwei was born in Zhoukou, Henan Province, in 1983. He received the M. S. degree in 2006. He is now a lecturer. His research concerns electromagnetic compatibility.