

基于 CST 软件的电火工品射频安全性分析*

杨培杰^① 谭志良^① 谢鹏浩^① 纵兆春^②

①军械工程学院静电与电磁防护研究所(河北石家庄,050003)

②总装备部驻九江地区军事代表室(江西九江,332000)

[摘 要] 为了研究电火工品在复杂电磁环境下的射频安全性,针对某型电火工品建立了偶极子天线模型。基于 CST 电磁仿真软件,仿真得到了该天线模型的增益参数,进一步仿真计算得到了在频率为 0.75GHz、电场强度为 195V/m 的电磁环境下,进入到该电火工品的射频功率,并与实际计算结果进行了对比验证。通过多频点仿真计算,得到了该天线模型的增益随频率变化的规律,即在 0.5~2.0GHz 的频率范围内,天线模型的增益随着频率的增大而增大。

[关键词] 电火工品 CST 仿真 增益 射频功率

[分类号] TJ45

引言

随着无线电技术的飞速发展,战场的电磁环境越来越复杂、密集。人为的和自然的、敌方的和我方的、对抗的和非对抗的各种电磁信号充斥于作战空间,形成了一个信号密集、种类繁多、对抗激烈、动态多变的战场电磁环境。这种复杂多变的电磁环境对电发火弹药中的电火工品的影响也越来越明显,对电火工品的性能和生存构成了威胁^[1-2]。尽管电火工品的种类繁多,但到目前为止,桥丝式电火工品在武器装备中使用还是最普遍的。根据统计,现在使用的电火工品大约 90% 是属于桥丝式的^[3]。处在特定环境中的桥丝式电火工品,其电极引线可以作为接收天线来吸收射频能量,从而引起电火工品的误作用。因此,可以将桥丝式电火工品等效成为天线模型,通过专业的天线仿真软件仿真得到天线的电参数,计算进入到电火工品的射频功率,总结电火工品电磁能量耦合规律,分析电火工品射频安全性。

1 电火工品的天线模型

各种桥丝式电火工品的基本结构相似,主要由电极引线、桥丝、点火药和壳体等组成,如图 1 所示。

电发火弹药中的电火工品本身及其相关发火线路,都可能把射频能量引入电火工品中,起到无线电波接收天线的作用^[4]。通常耦合到电火工品中的射频能量很小,不足以导致其意外发火或失效,但在某些条件下则可能由于射频能量的作用引起电火工品的早发火和电发火弹药的误作用。此外,长期受

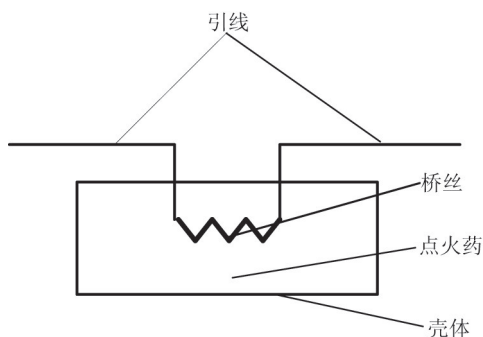


图 1 桥丝式电火工品结构简图

到低于发火能量的射频作用,也可能使电火工品正常发火的可靠性降低^[5-6]。射频波的能量对电火工品的作用主要表现在两个方面,即电流和电压的作用。电流作用时,感应电流由电火工品的脚线输入到桥丝时,能使桥丝加热到发火药的发火点,使产品早作用或失效;电压作用时,则在脚—壳之间会发生击穿而使炸药起爆,这与静电起爆的方式类似。

双引线式电火工品,引线在发火电路未短路时,起偶极天线作用;发火电路短路时,起环形天线作用。接收天线放在外来电磁场内可感应出电流,并在其输出端产生一个电动势^[4,7-8]。此电动势在电发火系统中通过发火线路向桥丝负载输送电流。

图 2 为电火工品天线模型等效电路图。其中, V_a 为电磁场在天线上产生的感应电动势, Z_a 为天线等效阻抗, Z_{EED} 为电火工品射频阻抗。

* 收稿日期:2012-05-31

基金项目:国家自然科学基金(61001050)

作者简介:杨培杰(1989~),男,硕士,主要从事电磁防护理论与技术方面的研究。E-mail:yangpeijie0426@163.com

通讯作者:谭志良(1964~),男,教授,主要从事电磁兼容与电磁防护领域的研究。

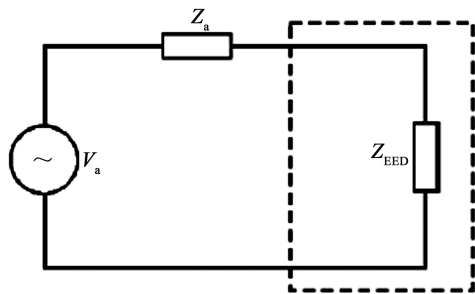


图2 天线模型等效电路图

射频场在天线上感应的电动势 V_a ，可表示为：

$$V_a = \frac{E\lambda}{\pi} \left(\frac{R_a G}{120} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中： E 为射频场电场强度； λ 为射频波波长； R_a 为天线等效阻抗的电阻分量； G 为等效天线的增益。

射频场进入到电火工品的功率 P_{EED} ，则由下列公式计算：

$$P_{EED} = I^2 R_{EED} = \frac{V_a^2 R_{EED}}{(R_a + R_{EED})^2 + (X_a + X_{EED})^2} \quad (2)$$

式中： I 为负载端感应电流； X_a 为天线等效阻抗的电抗分量； R_{EED} 为电火工品的电阻分量； X_{EED} 为电火工品的电抗分量。

当接收天线处于最大限度吸收射频波的方向，且天线与负载之间阻抗匹配时，负载能够最大限度地接收射频功率。即当 $R_a = R_{EED}$ ， $X_a = -X_{EED}$ 时，电火工品能够最大限度地接收射频功率。

2 仿真模型的建立与结果分析

CST MICROWAVE STUDIO 由 CST 公司出品，广泛应用于通用中高频无源器件仿真，适用于整个电磁波和光波波段的电磁及电磁兼容仿真，可以进行各类天线及天线阵、天线布局、RCS、FSS、平面对无源器件仿真，集成时域有限积分法、时域传输线矩阵、频域有限积分、频域有限元等多种算法^[9]。因此，本文选用了该软件进行电火工品偶极子天线模型的仿真研究，计算天线模型的增益。

2.1 仿真模型的建立

参考相关资料，针对某型号电火工品，建立其偶极子天线模型，如图3所示。偶极子天线两臂为实心圆柱体，材料为镀银的铜导线，故设置为理想导体，两臂长度 l 分别为 100 mm，直径 d 为 0.3 mm。两臂之间间隔 $2d$ 的距离，用于天线馈电，只考虑远场特性，将馈电方式设置为离散端口馈电。圆柱体的中心为坐标原点，取 z 轴的正方向为向上的方向。在仿真频率的选择上参照 GJB1389A—2005 中的相

关规定^[10]，将频率范围设置为 0.5 ~ 2.0 GHz。

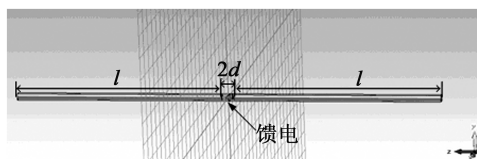


图3 偶极子天线仿真模型图

2.2 仿真结果分析

图4为 $l = 100\text{mm}$ 、频率为 0.75 GHz 时偶极子天线远场方向图，得到辐射天线的增益为 2.235 dBi。根据互易原理，接收天线和发射天线的作用过程是可逆的^[11]，同一副天线作为发射和接收天线时的增益是相同的，只是物理含义有所不同。因此，该天线作为接收天线时，该频率下的增益也为 2.235 dBi。

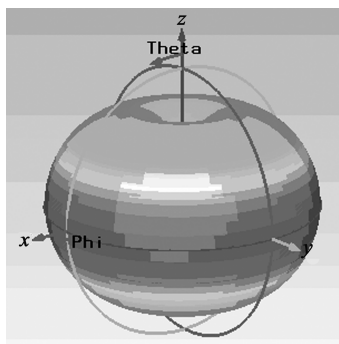


图4 偶极子天线三维远场图

当该偶极子天线作为接收天线暴露的频率为 0.75 GHz 的电磁环境时，天线的长度 $l = \lambda/4$ ，此时偶极子天线呈谐振状态。在谐振状态下，天线的等效阻抗 $R_a = 73.1\Omega$ 。假设电场强度为 195 V/m，结合仿真得到 0.75 GHz 频率下该天线的增益 $G = 2.235\text{dBi}$ ，将其代入公式(1)得到了在该条件下天线可能接收到的最大感应电动势 $V_a = 25.06\text{V}$ 。

由天线原理可知，当接收天线与负载阻抗匹配时，负载能够最大限度地接收射频功率。即当 $R_a = R_{EED} = 73.1\Omega$ ， $X_a = -X_{EED}$ 时，电火工品桥丝端和引线构成的接收天线阻抗匹配，结合以上仿真结果，由式(2)得到耦合进入电火工品负载端的最大射频功率 $P_{\max} = 2.147\text{W}$ 。

在实际情况下，电火工品和天线阻抗并不匹配。取文献[12]中的例子：某型号电火工品的电极引线长度为 10 cm，将其暴露在频率为 0.75 GHz、电场强度为 195 V/m 的电磁环境当中，测量得到该电火工品射频阻抗为 $1 + j75(\Omega)$ 。求该电火工品耦合得到的射频功率大小^[12]。

本例中电磁环境的频率与以上仿真的频率相同，均为 0.75 GHz。在该频率下，该电火工品射频阻抗为 $1 + j75(\Omega)$ ，结合以上仿真结果，将其代入到式

(2),得到了在阻抗不匹配的情况下,进入到电火工品的射频功率 $P_{\text{EED}} = 0.056 \text{ W}$ 。

由于模型建立过程中材料参数设置以及软件算法引起的误差,对仿真影响很小,故认为仿真结果是合理的。将 CST 仿真计算的结果与文献[12]中的计算结果对比:在频率为 0.75 GHz 、场强为 195 V/m 的电磁环境中,阻抗匹配条件时,仿真计算得到进入到电火工品的最大射频功率为 2.147 W ,文献[12]中得到的最大射频功率为 2.100 W ;阻抗不匹配的条件时,仿真计算得到进入到电火工品的射频功率为 0.056 W ,而文献[12]中得到的射频功率为 0.055 W 。仿真计算结果与文献中的结果基本一致。

为了研究不同的频率对天线增益的影响,定义远场监视器,计算在不同的频点下天线的增益。当 $l = 100 \text{ mm}$,频率分别为 0.50 、 0.75 、 1.00 、 1.25 、 1.50 、 1.75 GHz 和 2.00 GHz 时的辐射天线增益参数仿真结果如图 5 所示。

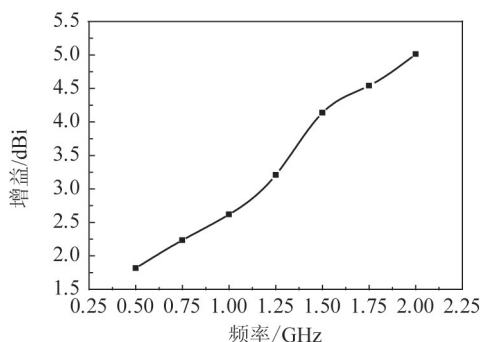


图 5 偶极子天线增益与频率的关系图

由图 5 可知,在 $0.50 \sim 2.00 \text{ GHz}$ 的频率范围内,天线的增益随着频率的增大而增大,增益的变化会引起射频波在天线上产生的电动势的变化,进而影响进入到电火工品中的射频功率。

3 结论

建立了电火工品的偶极子天线模型,通过专业

天线仿真软件 CST,对天线模型的辐射远场特性进行分析,得到了天线模型的增益系数,进一步仿真计算得到了在阻抗匹配和不匹配两种条件下,进入到电火工品中的射频功率。仿真计算结果与实际计算结果基本保持一致,说明用 CST 软件分析电火工品的射频安全性是可行的;通过多频点仿真分析,得到了天线模型的增益与频率的变化关系,即在一定范围内,随着频率的增大,天线模型的增益也在增大。

参 考 文 献

- [1] 刘尚合,胡小锋. 电磁环境效应及对军事装备的影响[J]. 兵器知识,2009(8A):19-21.
- [2] 李金明,安振涛,罗兴柏,等. 射频对电火工品的影响及防护措施[J]. 爆破器材,2004,33(5):17-19.
- [3] 陈福梅. 火工品原理与设计[M]. 北京:兵器工业出版社,1990.
- [4] 杨培杰,李金明,王阵. 电火工品等效天线模型的建立与分析[J]. 装备环境工程,2012,9(2):46-47,53.
- [5] 陈飞,周彬,秦志春,等. 半导体桥火工品的防静电和防射频技术[J]. 爆破器材,2010,39(3):28-32.
- [6] 陈亚洲,乔治军,刘尚合,等. 雷电电磁脉冲对电火工品的发火危险性研究[J]. 兵工学报,2001,22(3):419-422.
- [7] 克劳斯. 天线[M]. 3 版. 章文勋,译. 北京:电子工业出版社,2011.
- [8] 常新龙,王建龙,张磊. 电磁环境下桥丝式电火工品安全性仿真研究[J]. 包装工程,2011,32(23):122-125.
- [9] 张敏. CST 微波工作室用户全书[M]. 成都:电子科技大学出版社,2004.
- [10] 中国人民解放军总装备部. GJB 1389A—2005 系统电磁兼容性要求[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2006.
- [11] 王新稳,李延平,李萍. 微波技术与天线[M]. 3 版. 北京:电子工业出版社,2011.
- [12] 李锦荣. 电火工品射频阻抗测量及其应用[J]. 火工品,1995(1):11-14.

Analysis of Radio Frequency Safety on Electric Explosive Device Based on the CST Software

YANG Peijie^①, TAN Zhiliang^①, XIE Penghao^①, ZONG Zhaochun^②

^①Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College (Hebei Shijiazhuang, 050003)

^②Jiujiang Military Representative Office, General Armament Department (Jiangxi Jiujiang, 332000)

[ABSTRACT] In order to study the radio frequency safety on electric explosive device (EED) in complex electromagnetic environments, a dipole antenna model for a certain type EED was established. Based on the CST software, the gain parameter of the antenna model was obtained. For further simulation, the radio frequency power into the EED at a frequency of 0.75 GHz and an electric field strength of 195 V/m was calculated. The simulation results were compared with the practical calculation results. Through the multi-frequency simulation, it implies the tendency that the antenna gain is increasing as the frequency increases in the $0.5 \sim 2.0 \text{ GHz}$ frequency range.

[KEY WORDS] EED, CST, simulation, gain, radio frequency power