

电磁环境下桥丝式电火工品安全性仿真研究

常新龙¹, 王建龙¹, 张磊²

(1. 中国人民解放军第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2. 96411 部队, 宝鸡 721013)

摘要: 采用等效天线负载法计算了电磁环境下桥丝式电火工品中的辐射感应电流, 结合具体算例模拟了核爆电磁脉冲和微波武器作用下桥丝中感应电流的热效应。研究表明, 核爆电磁脉冲不易造成桥丝火工品的意外发火, 但高功率微波武器的连续作用, 会导致桥丝式电火工品在极短的时间内发火。

关键词: 桥丝式电火工品; 安全性; 电磁环境; 感应电流

中图分类号: TB487; TJ765.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)23-0122-04

Simulation Study on Security of Bridge Wire Electric Explosive Device in Electromagnetic Environment

CHANG Xin-long¹, WANG Jian-long¹, ZHANG Lei²

(1. Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China; 2. Unit 96411 of PLA, Baoji 721013, China)

Abstract: The method of equivalent aerial and load was used to calculate the induced current in the bridge of bridge wire electric explosive device (EED) that caused by electromagnetic radiation. An example was used to simulate the heat effect of induced current at the interfaces between wire and powder of EED. Simulation result showed that the electromagnetic pulse of nuclear explosion usually does not cause explosion of EED, but the continuous action of high power microwave weapons can cause explosion of EED.

Key words: bridge wire EED; security; electromagnetic environment; induced current

火箭和导弹武器的点火、分离、姿态控制等, 都离不开电火工品的作用, 而桥丝式电火工品由于结构简单、发火可靠而被广泛应用; 同时也由于其结构的特殊性, 容易受到强电磁环境的作用而失效或爆炸。功率强大的雷达、定向电台以及电磁脉冲武器产生的射频等, 能引起火工品早炸或严重失效^[1]。针对桥丝式电工品的结构特点, 采用等效天线负载法, 结合具体算例, 计算了辐射电流的大小, 并对桥丝-药剂界面的升温效应进行了仿真分析。

1 电磁环境下桥丝式电火工品辐射电流的计算

外界电磁能量对电火工品危害的程度, 取决于外界电磁场对电火工品可能耦合的最大感应电流。因此, 在各种危害源存在的情况下, 分析电火工品中最大感应电流是极为重要的。现有计算电火工品中感

应电流的方法主要可分为 2 类: 一是场的方法^[2], 即分别计算电场与磁场在电火工品中可能引起的感应电流, 然后再将其相加, 这类方法是直接计算感应电流; 另一类是等效天线负载法, 即先将电火工品与其相连的电路等效为负载和天线, 然后计算作为负载的电火工品所耗散的功率(或电流)。这类方法的基本原理是把与电火工品相连的电路等效成各种形式的天线, 见图 1, 而将电火工品或整个电路的电阻看成负载, 通过计算负载的耗散功率或天线的有效口径来得到感应电流, 以估计周围的电磁场对电火工品的危害程度^[1]。

受到电磁脉冲、射频辐射作用的柱状导体, 包括鞭状短天线、金属引线、插件、环状天线等, 其尺寸远远小于电磁脉冲上限频率分量的波长, 可按偶极子和磁偶极子天线分析。天线从周围的电磁场中获取能量, 并将其耦合进入 EED。对于无法计算的因素, 作以下假

收稿日期: 2011-07-08

作者简介: 常新龙(1965—), 男, 河南南阳人, 博士, 中国人民解放军第二炮兵工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为失效物理与可靠性。

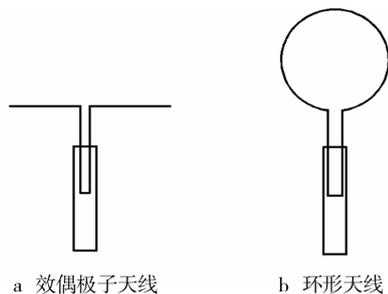


图1 各种形式的天线

Fig. 1 Some kinds of antennas

设:(1)导弹壳体的屏蔽效应可以忽略;(2)电路大小、几何形状等的影响是使电路处于获得能量的最佳方向;(3)周围导体的影响可忽略,地面反射效应使感应电流为最大;(4)电路导线的天线效应为非谐振的。

以上这些假设都将使电火工品处于最不安全的环境,从而可获得最保守的估计。对于双脚线而言,未短路的电火工品脚线起到偶极子天线的作用,短路的脚线起到环形天线的作用。

1.1 小尺寸柱状导体的等效与感应电流计算^[4-5]

受电磁辐射的小尺寸柱状导体可按单极子或偶极子做近似的分析。偶极子天线及等效电路见图2。

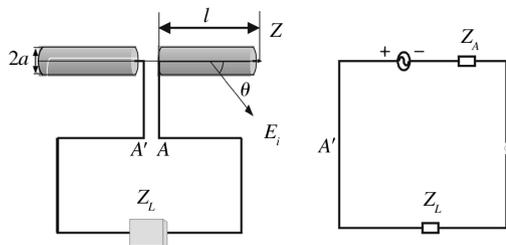


图2 偶极子天线及其准静态等效电路

Fig. 2 Dipole antenna and quasi-static equivalent circuit

图中偶极子的长度为 $2l$,天线的半径为 a ;入射电磁脉冲的电场场强为 E_i ,电场 E_i 和天线的夹角为 θ ; $V_s(t)$ 为等效电路的源电压,它等于天线的开路电压 $V_\infty(t)$; Z_L 为负载阻抗。 Z_A 为天线输入阻抗。 Z_A 近似为:

$$Z_A \approx \frac{1}{j\omega C_a} \quad (1)$$

式中: C_a 为天线的等效电容,对于偶极子天线, C_a 近似为:

$$C_a = \frac{l}{cZ_0} \quad (2)$$

式中: $c = 3 \times 10^8$ m/s; $Z_0 = 60[2\ln(2l/a) - 2]$ 。

等效电路中源电压:

$$V_s(t) = V_{ao}(t) = E_i(t)l_e \cos \theta \quad (3)$$

式中: l_e 为天线有效长度,对于偶极子天线, $l_e = l$ 。在频域,负载上的电压降按下式计算:

$$V_L(\omega) = E_i(\omega)l \frac{Z_L}{Z_L + Z_A} \quad (4)$$

对于入射的电磁场脉冲场的上限频率 ω_H ,当 $Z_L \ll 1/(\omega_H C_a)$,负载近似于短路,其电流为:

$$I_L(t) \approx E_i(t)l\omega_H C_a \cos \theta \quad (5)$$

1.2 环状导体的等效与感应电流的计算

由环状导体形成的典型环路及典型电路见图3,

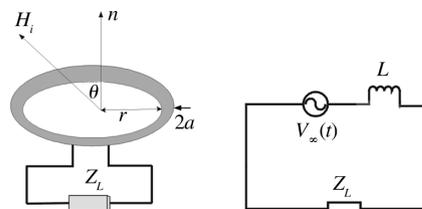


图3 环形天线及其等效电路

Fig. 3 Loop antenna and equivalent circuit

当环的半径 r 远小于入射波的波长 λ ,可视为磁偶极子天线。设环路面积为 S ,等效电感为 L ,负载阻抗 Z_L ,电磁脉冲磁场 H_i 与环路法线的夹角为 θ ,则环路的感生电势即开路电压为:

$$V_\infty(t) = \mu_0 \dot{S}H(t) \cos \theta \quad (6)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m,为自由空间磁导率。

当半径为 a ,长度为 l 的导体构成半径为 r 的环路, $a \ll r$,则自身环路的电感为:

$$L = \mu_0 [\ln(8r/a) - 2] \quad (7)$$

由等效电路,在频域负载上压降:

$$V_L(\omega) = j\omega\mu_0 SH(\omega) \cos \theta \frac{Z_L}{j\omega L + Z_L} \quad (8)$$

对于入射电磁脉冲的上限频率分量 ω_H ,当 $Z_L \gg \omega_H L$ 时,有:

$$V_L(t) \approx V_\infty(t) = \mu_0 \dot{S}H(t) \cos \theta \quad (9)$$

当负载短路,其电流为:

$$I_{LS}(t) = \frac{\mu_0 S}{L} \dot{H}(t) \cos \theta \quad (10)$$

2 桥丝式电火工品辐射电流发火的仿真算例

2.1 高空核电磁脉冲对 EED 安全性的影响分析

一般高空核爆炸电磁脉冲场强可以用简单的双

指数函数表达^[6]：

$$E(t) = E_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (11)$$

式中： E_0 为场强； k 为修正系数； α, β 为表征脉冲后、前沿的参数。其中： $\alpha = 4.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ， $\beta = 6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ， $k = 1.3$ ， $E_0 = 50 \text{ kV/m}$ ，上升时间 $t_r \approx (2.3 \pm 0.5) \text{ ns}$ ，半高宽 $\tau_{\text{FWHM}} \approx (23 \pm 5) \text{ ns}$ 。核电磁脉冲的上限频率 ω_n 可达 1 GHz ，利用偶极子天线进行耦合计算：

$$C_a = \frac{l}{cZ_0} = \frac{1}{18} \times 10^{11} \quad (12)$$

$$I_L(t) \approx E_i(t) l \omega_H C_a = E(t) = E_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \cdot l \omega_H C_a \quad (13)$$

电流曲线见图 4。

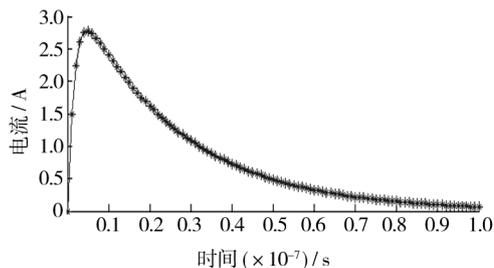


图 4 核电磁脉冲辐射下桥丝上感应电流的波形
Fig. 4 Waveform of induced currents in wire under the action of electromagnetic pulse of nuclear explosion

结合仿真模型，得到桥丝与药剂面升温曲线，可以判断火工品是否发火。计算结果见图 5。

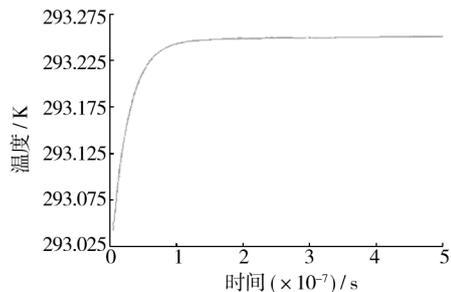


图 5 辐射感应电流作用下桥丝与药剂接触面的升温曲线
Fig 5 Time-temperature curve of bridgewire and explosive interface under the action of radiation induced currents

从计算结果可以看出，在感应电流作用下药剂与桥丝界面升温并不十分显著，原因是虽然高空核电磁脉冲产生的耦合电流的峰值达到 3 A 左右，超过火工品的安全电流，但由于核爆的单次性以及单个脉冲的作用时间太短（约 100 ns ），导致热量不易积累，从而

使火工品内部温度变化不大。而该火工品在 5 A 直流电作用下，大约需要 3.8 ms 可以发火，见图 6。

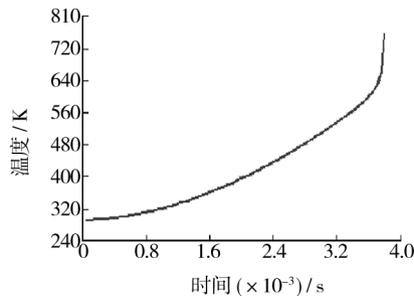


图 6 5 A 直流电作用下火工品桥丝与药剂接触面的升温曲线
Fig 6 Time-temperature curve of bridge wire and explosive interface under the action of DC of 5 A

2.2 高功率微波武器对 EED 安全性的影响分析

某高功率微波武器用高斯脉冲调制下的正弦电磁波作近似，其入射波电场为^[8]：

$$E_{\text{inc}}(t) = \begin{cases} E_0 \frac{t}{t_0} \sin(2\pi f_0 t) & (0 < t < t_1) \\ E_0 \sin(2\pi f_0 t) & (t_1 < t < t_1 + \tau) \\ E_0 \frac{\tau + 2t_1}{t_1} \sin(2\pi f_0 t) & (t_1 + \tau < t < 2t_1 + \tau) \end{cases} \quad (14)$$

式中： E_0 为电场峰值， $E_0 = 65 \text{ kV/m}$ ； f_0 为载波频率， $f_0 = 3 \text{ GHz}$ ； t_1 为脉冲上升时间和衰落时间， $t_1 = 10 \text{ ns}$ ； $E_{\text{inc}}(t)$ 的方向和桥丝的轴线平行。计算出其在该火工品上产生的耦合电流，见图 7。

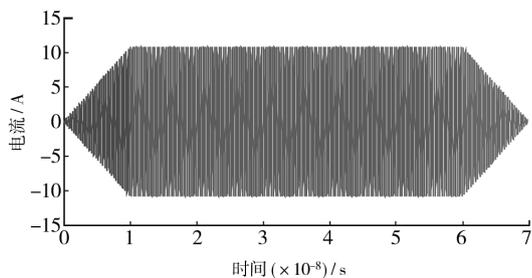


图 7 高功率微波辐射下桥丝上感应电流的波形
Fig. 7 Waveform of induced currents in wire under the action of high power microwave weapons

从图 7 可以看出该电流的峰值达到十几安，超过了该火工品的发火电流。如果在此微波连续照射下，即出现连续的感应电流，桥丝上产生的热足可以让钝感火工品爆炸。用 ANSYS 软件进行仿真试验可以得到火工品的发火时间，药剂与桥丝交界面升温曲线

见图 8。

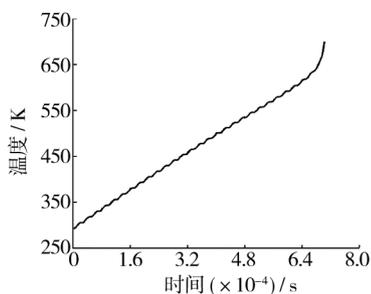


图 8 高功率微波辐射下火工品桥丝与药剂接触面的升温曲线

Fig. 8 Time-temperature curve of bridge wire and explosive interface under the action of high power microwave weapons

从图 8 可以看出,升温曲线在 $700 \mu\text{s}$ 左右出现拐点,这说明在高功率微波辐射下,该钝感火工品在极短的时间内就可以发火。

3 结论

从研究电火工品的安全性入手,利用等效负载天线法,对电磁辐射产生的感应电流进行了计算,分别给出了 2 种常见天线模型的等效电路和辐射感应电流的计算公式;模拟了高空核电磁脉冲和高功率微波武器形成的强电磁场,并结合某型桥丝式电火工品的参数,对感应电流的热效应进行了仿真分析,得出以下结论。

1) 桥丝中感应电流大小不仅与引线长度有关,而且也与引线分布形状有关。

2) 仿真分析结果显示,核爆电磁脉冲下产生的

感应电流虽然已超过桥丝火工品的安全电流,但不易导致桥丝式电火工品的发火。

3) 大功率微波武器的照射能在短时间内引起火工品的爆炸,对电火工品的威胁较大。

从高功率微波辐射下桥丝上感应电流波形可以发现,感应电流是一种高频率的交变电流,如果在电火工品点火线路上加装电感元件,利用电感通直流阻交流的特点,就能对高功率微波武器的危害起到很好的防护作用。

参考文献:

- [1] 李金明,安振涛,可勇,等. 电磁屏蔽在弹药包装中的应用[J]. 包装工程,2004,25(1):91-93.
- [2] L D S FRIDAY, J W A DAMS. A Statistical Characterization of EEDS Relevant to EMC Assessment[J]. National Bureau of Standards Technical Note 1094.
- [3] Thomas A Baginshi. Hazard of Low Frequency EM Coupling of Overhead Power Transmission Lines to EED[J]. IEEE Trans on EMC,1988(4).
- [4] 林昌禄. 天线工程手册[K]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [5] 周璧华,陈彬,石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [6] Description of HEMP Environment-radiated Disturbance. IEC61000-2-9,1996.
- [7] 陈斌,王廷永,高成. 电磁脉冲作用下近地电缆外皮感应电流的全波分析[J]. 微波学报,2000(5):549-553.
- [8] 周美林,蔡瑞娇,韩敦信. 火工品的内电磁脉冲效应研究[J]. 电子学与探测技术,2006,26(4):409-413.

(上接第 76 页)

参考文献:

- [1] 国家军用包装标准体系表课题组. 国家军用包装标准体系表. 1992.
- [2] 张学金. 美军兵器装备包装标准体系分析及启示[J]. 包装工程,2009,30(10):39-42.
- [3] 黎仕林. 新形势下加强后勤动员建设的几点思考[J]. 国防,2007(12):14-16.
- [4] MIL-STD-2073 1E, STANDARD PRACTICE FOR MILITARY PACKAGING[S].
- [5] MIL-STD-648D, SPECIALIZED SHIPPING CON-

TAINERS[S].

- [6] 栾恩杰,胡星光. 国防科技名词大典——兵器[M]. 北京:航空工业出版社,2002.
- [7] MIL-STD-1904A, DESIGN AND TEST REQUIREMENTS FOR LEVEL A AMMUNITION PACKAGING [S].
- [8] MIL-STD-1905A, DESIGN AND TEST REQUIREMENTS FOR LEVEL B AND LEVEL C AMMUNITION PACKAGING [S].