

文章编号: 1003-1480 (2006) 01-0006-04

某型火箭弹电点火系统雷电辐照效应研究

檀朝彬, 易建政, 周星

(军械工程学院静电与电磁防护技术研究所, 河北 石家庄, 050003)

摘 要: 将 LSG-8015 型雷电浪涌发生器与平行板传输线配合, 模拟雷电电磁脉冲辐射场, 对整装状态下水平放置的火箭弹系统进行了辐照试验。结果表明: 1~12kV/m 场强范围内, 电点火系统感应电压随辐照场强的增加呈线性增加趋势。

关键词: 火箭弹; 雷电电磁脉冲; 电磁效应

中图分类号: TJ450.6 文献标识码: A

Study on the LEMP Radiation Effect to Rocket Electric Ignition System

TAN Chao-bin, YI Jian-zheng, ZHOU Xing

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, 050003)

Abstract: The experiment of electromagnetic radiation effect to rocket ignition system has been done by using LSG-8015 lightning surge generator, which establishes lightning electromagnetic pulse radiation field. In 1~12kV/m field strength, the induction voltage of rocket ignition system increased linearly with the increasing of radiation field strength.

Key words: Rocket; Lightning electromagnetism pulse; Electromagnetism effect

火箭弹电点火系统依靠电能引爆电点火具, 从而使火箭弹点火发射。在恶劣的电磁环境中, 火箭弹电点火系统中的电火工品可能会因外界电磁能量的作用而意外发火造成事故。雷电是大气间的一种长程放电现象, 闪击发生时, 电压高达几百万伏, 电流可达几十万安培, 电流上升率为几万安培/微秒, 可以产生强大的电磁辐射, 形成雷电电磁脉冲 (Lightning Electromagnetic Pulse, 简称 LEMP)。LEMP 峰值场强很高, 影响范围广 (达 103km), 是常见的天然强电磁脉冲干扰源之一, LEMP 在军械及航天领域造成事故很多。

本研究利用 LSG-8015 型雷电浪涌发生器与平行板传输线配合, 模拟 LEMP 对整装状态下水平放置的火箭弹进行了辐照试验, 对火箭弹电点火系统的感应电压与感应电场场强之间的关系进行了研究。

1 火箭弹电点火系统雷电辐照效应试验

1.1 火箭弹雷电辐照效应试验原理

LSG-8015 型雷电浪涌发生器可以输出 0~13kV

收稿日期: 2005-12-30

作者简介: 檀朝彬 (1977-), 男, 在读博士研究生, 从事电磁与静电防护研究。

基金项目: 国家科学技术进步奖 (J-245-2-08-R02)

电压下、符合 IEC61000-4-2 标准的 $1.2/50 \mu\text{s}$ 雷电电压复合波, 且具有较好的重复性。将雷电浪涌发生器的输出加到平行板传输线之间, 可以产生 $1.2/50 \mu\text{s}$ 的雷电感应电场。试验原理见图 1。

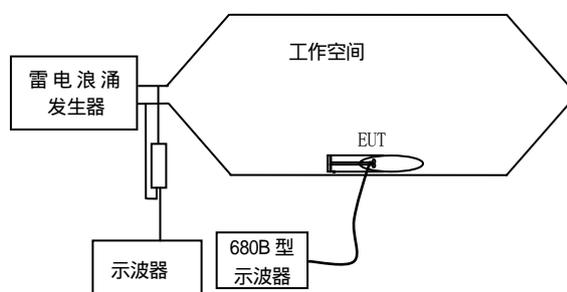


图 1 辐照试验装置原理示意图

Fig.1 Scheme of radiation experiment device

为了获得较高的电场场强, 平行板传输线终端采用开路形式。为了增大 LEMP 模拟装置的特性阻抗, 上端平行板用 1 组平行的金属导线代替, 这样可以进一步提高 LEMP 模拟装置的上限频率。

1.2 雷电复合波浪涌电压波形

用 LSG-8015 型雷电浪涌发生器配套的分压器对雷电浪涌发生器的放电波形进行测量, 可以得到 $1.2/50 \mu\text{s}$ 雷电复合波浪涌电压波形, 见图 2。

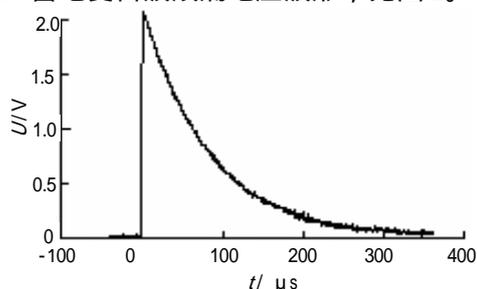


图 2 $1.2/50 \mu\text{s}$ 雷电复合波浪涌电压波形

Fig.2 Wave form of $1.2/50 \mu\text{s}$ lightning combination wave

1.3 火箭弹雷电辐照效应试验

为了分析电磁脉冲对火箭弹的作用机理及规律, 选取某型火箭弹水平放置于平行板传输线之间, 以模拟火箭弹在贮存、运输过程中的绝大多数状态。由于 LEMP 模拟装置上端平行板用 1 组平行的金属导线代替, 靠近上极板处场强畸变程度较下极板严重, 因此火箭弹水平放置于靠近下极板处, 并经绝缘板与下极板绝缘。弹体的高度小于极板间距的 $1/3$, 因此可忽略受试设备对极板间场分布的影响。火箭弹发动机装药、战斗部装药以及引信装

药均被去除 (各种装药均为绝缘介质, 对火箭弹影响很小, 可忽略)。火箭弹发动机内置 2 只并联结构的某型电点火具, 严格模拟整装状态火箭弹电结构。

强场环境中为了排除强电磁场对测试的干扰, 通常采用光电转换-光纤传输-光电转换的光纤测量方法, 并且光电转换装置和示波器需置于屏蔽室中。考虑到本试验的最高场强为 12kV/m , 场强不算太高。而光纤测量设备价格昂贵, 所以拟用同轴电缆测试。将同轴电缆一端与测试示波器相连, 另一端保持开路状态置于 LEMP 模拟装置强场环境中, 选取不同位置在不同电压下进行放电试验。结果为示波器均无感应信号, 这说明 12kV/m 场强环境对测试同轴电缆的影响并不明显, 不足以对测试结果形成较大影响。因此电点火具两端的感应电压可以经同轴电缆引出到示波器, 用于观察记录。

试验测得感应电压波形见图 3。

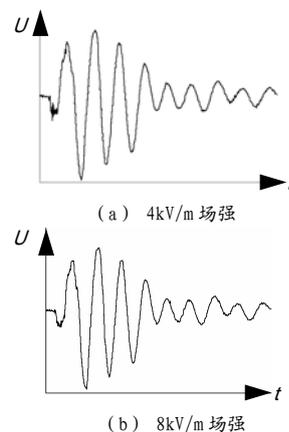


图 3 不同场强下感应电压波形

Fig.3 Wave form of induced voltage at different E level

$1\sim 12 \text{ kV/m}$ 场强范围辐照场强条件下, 火箭弹电发火系统感应的电压波形具有较好的相似性, 感应电压波形的上升沿很陡, 波头前沿高频部分的感应电压很高, 而其低频部分的感应电压较低。因此, 火箭弹对数十兆以上的感应电场具有较高的耦合效率。

对火箭弹电发火系统感应的电压进行测试的数据见表 1。

由表 1 可以看出, 在 $1\sim 12 \text{ kV/m}$ 场强范围内火

表1 火箭弹电点火系统感应电压测试数据

Tab.1 Induced voltage test data of rock ignition system

辐照场强 $E/(kV \cdot m^{-1})$	U_{Max}/V	U_{Min}/V	U_{RMS}/V	峰值 范围/V
0	0	0	0	0
1	0.46	0.60	0.13	1.06
2	0.85	1.06	0.24	1.91
3	1.15	1.41	0.33	2.56
4	1.55	1.94	0.45	3.49
5	1.91	2.37	0.55	4.28
6	2.34	2.86	0.68	5.20
7	2.60	3.10	0.74	5.70
8	3.06	3.78	0.88	6.84
9	3.44	4.16	0.99	7.60
10	3.60	4.40	1.04	8.00
11	4.04	4.84	1.16	8.88
12	4.40	5.07	1.23	9.47

注： U_{Max} 为最大感应电压正峰值； U_{Min} 为最大感应电压负峰值； U_{RMS} 为感应电压均方根值。

箭弹电点火具两端的感应电压随着辐照场强的加大呈线性增加趋势。感应电压波形具有很高的相似性。感应电压的负峰值的绝对值大于正峰值电压。感应电压的正峰值、负峰值及均方根都呈线性增加趋势。这说明火箭弹点火系统感应电压与辐照电场场强之间具有相关性。

2 测试数据分析

建立火箭弹点火系统感应电压与辐照电场场强之间的线性方程：

$$U_+ = A_1 + B_1 \times E \quad (1)$$

$$U_- = A_2 + B_2 \times E \quad (2)$$

$$U_{RMS} = A_3 + B_3 \times E \quad (3)$$

(1)~(3)式中：

U_+ ——感应电压正峰值，V；

U_- ——感应电压负峰值，V；

U_{RMS} ——感应电压均方根值/V；

$A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ ——待定系数。

对火箭弹电点火系统感应的峰值电压和均方根电压作电场场强相关性分析，见图4。

由图4可以得到其相关系数为：

$$A_1=0.089\ 67 \quad A_2=0.178\ 13 \quad A_3=0.029\ 47 \quad B_1=0.361$$

$$98 \quad B_2=0.426\ 59 \quad B_3=0.103\ 01$$

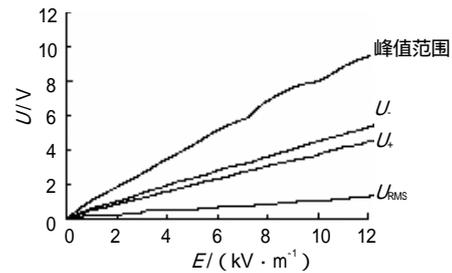


图4 感应的峰值电压和均方根

Fig.4 RMS and peak value of induced voltage

3 火箭弹电点火系统吸收的电磁能量

火箭弹电点火系统中电点火具吸收的电磁能量的计算表达式为：

$$W = \int U(t)^2 / R dt \quad (4)$$

(4)式中：

W ——电火工品吸收的电磁能量，J；

$U(t)$ ——电火工品两端感应电压，V；

R ——电火工品电阻，。

由于电火工品两端的感应电压 $U(t)$ 的时间表达式很难求得，所以电火工品吸收的电磁能量可以由示波器测试的感应电压均方根和脉冲持续时间估算得到。

12kV/m 电场场强下感应电压的均方根值为 1.23V，利用公式：

$$W = (U_{RMS}^2 / R)t \quad (5)$$

(5)式中：

U_{RMS} ——感应电压的均方根值，V；

R ——电火工品电阻阻值，；

t ——电压脉冲持续时间，s。

电压脉冲持续时间大约为 $2\ \mu s$ ，2只火工品并联电阻为 1.92，忽略热量耗散，则可求得 12kV/m 场强下一次放电电火工品吸收的电磁能量为：

$$W = (1.23^2 / 1.92) \times 2 \times 10^{-6} = 1.57 \times 10^{-6} \text{ J}$$

由于电点火系统采用 2 个电火工品并联的结构，则每个电火工品吸收的电磁能量约为 0.001mJ。某型电火工品的发火能量为 mJ 量级，12kV/m 场强下 0.001mJ 的感应能量不至对其安全性构成威胁。

依据火箭弹中某型电火工品吸收能量与辐照电

场场强之间的关系：

$$W = (U_{RMS}^2 / R)t = ((A_3 + B_3 \times E)^2 / R)t \quad (6)$$

可以得出，若每个电火工品吸收的电磁能量为1.38mJ（某型电火工品临界发火能量为1.38mJ），则其安全辐照电场场强约为500kV/m。这相当于200kA雷电放电电流条件下，距雷击通道中心约100m处的场强。此时，直击雷和感应雷在闪电通道周围产生的电磁、热、电动力和高电压效应对火箭弹的破坏作用会远远大于雷电电磁脉冲场对火箭弹电点火系统造成的影响和破坏。

4 结论

通过火箭弹电点火系统雷电辐照效应试验可得到如下结论：

(1) 1~12 kV/m 场强范围内火箭弹电点火具两端感应电压的正峰值、负峰值及均方根都随辐照场强的增加呈线性增加趋势。火箭弹点火系统感应电压与辐照电场场强之间呈正相关趋势。在一定辐照电场场强范围内，为线性相关。

(2) 1~12 kV/m 场强范围内，不同辐照场强下，火箭弹电点火具两端感应电压波形具有很高的相似性。感应电压波形的上升沿很陡，火箭弹对高频电场具有较高的耦合效率。

(3) 通常情况下，环境中的雷电电磁脉冲不会对火箭弹电点火系统的安全性构成威胁。值得注意的是能量与电场场强呈二次方的关系增长。随着现代电子对抗武器装备的发展，超宽带（UWB）和高功率微

波（HPM）武器能够将电磁能量压缩在一个极窄的频域和时域范围内，从而产生很高的场强，对火箭弹电点火系统的安全性构成威胁。

由于试验仪器输出电压的限制，只做了0~12kV/m 场强范围内火箭弹电点火系统辐照试验。12kV/m 以上场强火箭弹点火系统感应的电压和吸收的能量与辐照场强之间的关系可能会由于高场强条件下介质的非线性化而有所不同，有待进一步研究。

参考文献：

- [1] 周壁华,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, 2001.
- [2] 路宏敏. 工程电磁兼容[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [3] Deyannis C., Xifaras D. Effects of shipboard compartment fuel fire and fire extinguishing on rf signal propagation in the 2.4 GHz ISM band [D]. Master's thesis, 2000.
- [4] 马宏萱,杨洁,刘天新. 射频对桥丝式电火工品性能的影响[J]. 火工品, 2003, (3): 15~17.
- [5] 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, (5): 17~19.
- [6] 魏明. 典型数字电路单元的 LEMP 效应与加固技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 1999.
- [7] 李锦荣. 电火工品电磁危害分析 [J]. 火工品, 1992, (4): 24~31.
- [8] 陈福梅. 火工品原理及设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.