

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.04.013

火工品高频段射频阻抗测试技术*

赵 团 姚洪志 纪向飞 王可暄

陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家级重点实验室(陕西西安,710061)

[摘 要] 为测量高频段火工品射频阻抗,根据火工品脚线和矢量网络分析仪的结构特点,设计了火工品专用连接夹具,实现了同轴和平行线的有效连接。并对夹具引入的测量误差进行了修正计算,建立了基于矢量网络分析仪的高频段火工品射频阻抗测试系统。利用此系统,测量了火工品 1~18 GHz 范围内的射频阻抗,共出现了 5 个谐振点,在谐振点火工品从电磁环境中吸收的能量最大,为评价火工品在电磁环境中的安全性提供了数据支撑。

[关键词] 火工品;射频阻抗;测试;去嵌入

[分类号] TJ450.6

引言

火工品(EED)是武器弹药和装备的重要组成部分,广泛应用于武器毁伤系统的起爆与传爆,发射与推进系统的点火、传火与延期等方面。现代战场中,复杂电磁环境已经成为一种常态。作为武器系统中最敏感的装置,在生产、运输、使用、储存过程中,火工品的两根脚线可作为偶极子或单极天线,从环境电磁场中吸收射频能量,造成火工品性能降低甚至完全失效(瞎火)。因此,火工品电磁环境中的安全性也越来越受到人们的重视。

射频阻抗是评估火工品电磁环境安全性的重要参数,其值是频率的函数,随着试验频率的不同而变化。利用火工品射频阻抗分析,计算火工品在复杂电磁环境场中的谐振频率、响应规律,对评价火工品电磁危害具有重要的意义。只有了解和掌握了火工品在电磁环境中的敏感频率,才能采取正确的防护措施,保证火工品工业电雷管在射频环境下使用的安全性^[1]。

火工品射频阻抗可使用射频阻抗分析仪、矢量网络分析仪等仪器测量。射频阻抗分析仪试验频率范围有限,测量范围为 1~1 800 MHz。但是,随着卫星通讯、搜索雷达、跟踪雷达等超高频装备在战场上的使用,战场电磁环境的带宽已经变得越来越宽,射频阻抗分析仪已不能满足现代复杂电磁环境对火工品射频阻抗测试要求。因此,现阶段开展高频段(1~18 GHz)火工品射频阻抗的测试技术研究是十分迫切的。

1 测试系统

在现代测试技术中,二端口或四端口网络的性能测试一般选用矢量网络分析仪进行^[2]。火工品作为二端口网络,在高频段,火工品射频阻抗是分布参数,其值与传输线上电磁波的入射和反射紧密相关。 S 参数通常用来描述二端口网络之间输入和输出关系,通过测量火工品 S 参数,就可计算出火工品射频阻抗^[3]。 S 参数与输入阻抗的关系为

$$Z_i = Z_0 \frac{1 + S_d}{1 - S_d} \tag{1}$$

式中: Z_i 是输入阻抗; Z_0 是测量系统特征阻抗; S_d 是被测件 S 参数。

火工品脚线状态一般为平行线,具有差分端口的特征^[4]。而矢量网络分析仪输出端为同轴接口,为了完成火工品 S 参数的测量,通过研制同轴转平行线连接夹具,建立了基于矢量网络分析仪的火工品高频射频阻抗测试系统,如图 1 所示。

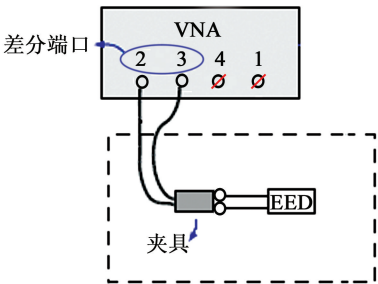


图 1 火工品高频射频阻抗测试系统框图

Fig. 1 Diagram of RF impedance test system for EED in high frequency

* 收稿日期:2015-11-11

基金项目:国防科技重点实验室研究基金战略投入性项目(20151026);国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ13001904)

作者简介:赵团(1980-),男,高工,主要从事火工品电磁环境效应研究。E-mail:zhaotuan213@sina.com

采用安捷伦的 N5230 型矢量网络分析仪, 频率范围为 10.0 kHz ~ 26.5 GHz。矢量网络分析仪和 EED 之间采用图 2 所示的夹具来连接。夹具采用层级传输线模型, 包含同轴段和平行线两部分。同轴段由两个 SMA 接头和两节同轴电缆组成, SMA 阴头可以连接到矢量网络分析仪端口, 两节同轴电缆间距逐步变少, 达到被测火工品输入脚线要求的间距, 末端把外导体焊接起来。平行线部分采用 SMA 内导体, 可以直接和 EED 插拔, 提高了测试的便捷性和电连接特性。

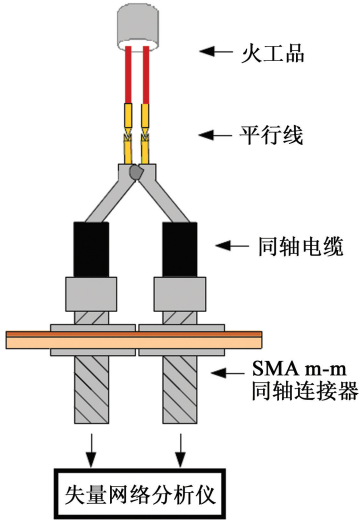


图 2 夹具结构示意图

Fig. 2 Configuration of the test adapter

2 夹具去嵌

由于夹具的嵌入使用, 导致矢量网络分析仪的校准面和被测件 EED 的测量面不在同一个平面上, 矢量网络分析仪的测试数据包括 EED 的测试结果和夹具引入的测试误差。为了去除夹具对测量结果带来的影响, 必须对矢量网络分析仪的测量数据进行后处理, 即夹具的去嵌, 从而得到 EED 的真实结果。测试系统原理框图如图 3 所示。

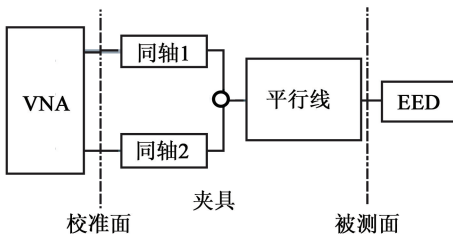


图 3 测试系统原理框图

Fig. 3 Block diagram of the element in the measurement

从测试系统可知, 矢量网络分析仪测量的 S 参数由夹具和 EED 两个二端口网络 S 参数级联而成, 由于在处理级联二端口网络时, S 参数不便于计算, 而使用传输散射矩阵 (T) 方便快捷^[5]。

二端口网络 S 参数的定义为

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

T 参数的定义为

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_2 \\ a_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

则 S 参数和 T 参数的转换关系为

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{S_{21}} \begin{bmatrix} S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22} & S_{11} \\ -S_{21} & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{T_{22}} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12}T_{21} - T_{11}T_{22} \\ 1 & -T_{21} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在 T 参数模型下, 夹具的 T 参数等效为同轴部分的 T 参数和平行传输线部分的 T 参数。因此, 测量结果 T 参数 T_M 和同轴部分 T 参数 T_C 、平行传输线部分 T 参数 T_P 、EED 部分 T 参数 T_{EED} 的关系为

$$[T_M] = [T_C] \cdot [T_P] \cdot [T_{EED}]. \quad (6)$$

对于任意的矩阵, 在其存在逆矩阵的情况下, 均存在如下关系:

$$[T] \cdot [T]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得:

$$[T_{EED}] = [T_C]^{-1} \cdot [T_M] \cdot [T_P]^{-1}. \quad (8)$$

从式(8)可知, 如果知道同轴部分和平行传输线部分 T 参数, 就可计算火工品的 T 参数^[6]。根据微波传输线理论, 传输线的特征阻抗为 Z_c , 则其 S 参数为

$$S = \frac{1}{D_s} \begin{bmatrix} (Z_c^2 - Z_0^2) \operatorname{sh} \gamma l & 2Z_0 Z_c \\ 2Z_0 Z_c & (Z_c^2 - Z_0^2) \operatorname{sh} \gamma l \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中: $D_s = 2Z_0 Z_c \operatorname{ch} \gamma l + (Z_c^2 + Z_0^2) \operatorname{sh} \gamma l$; Z_0 是矢量网络分析仪的特征阻抗; γ 是线的复传播常数; l 是线的长度。利用此公式, 下面将分别计算两部分的 S 参数。

1) 同轴部分。

同轴电缆和矢量网络分析仪的特征阻抗都是 50 Ω 。因此, 这部分的 S 参数仅仅取决于传输损耗和相位变化。当每个同轴电缆端接短路线, 通过测量它们的反射系数, 就可计算其 S 参数。

2) 平行线部分。

由于平行线部分为短线, 可视为无耗线。在式(9)中唯一未知的是这部分的特征阻抗, 其值可用式(10)来计算^[7]:

$$Z_c = \frac{1}{\pi \sqrt{\epsilon_0}} \operatorname{arch} \frac{s_p}{d_p}. \quad (10)$$

式中: s_p 为脚线之间的间距; d_p 为脚线的直径; μ_0 为

真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; ϵ_0 为真空介电常数, $1/36\pi \times 10^{-9} \text{ F/m}$ 。

通过测量夹具, 知 $s_p = 2.6 \text{ mm}$, $d_p = 1.0 \text{ mm}$ 。按式(10)计算结果为 $193.8 \text{ } \Omega$ 。夹具的特征参数如表 1 所示。

表 1 夹具特征参数

Tab. 1 Characterization parameter of adapter

夹具部位	特征阻抗/ Ω	长度/ mm	2 GHz 损耗/ dB
同轴电缆 1 [#]	50.0	85.6	0.24
同轴电缆 2 [#]	50.0	84.3	0.22
平行线	193.8	26.8	0

3 测试

火工品高频段射频阻抗测试系统如图 4 所示。所用样品为桥丝式火工品(未装药), 桥丝为镍铬电阻合金丝, 直径 $8 \text{ } \mu\text{m}$, 桥距 2.6 mm , 电阻 $10 \text{ } \Omega$, 脚线长 25 mm , 样品如图 5 所示。

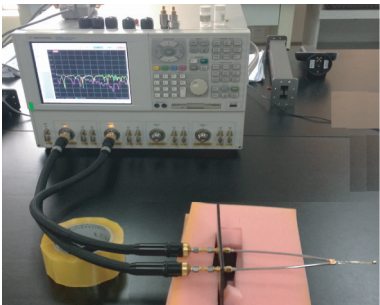


图 4 测试系统
Fig. 4 Experimental system

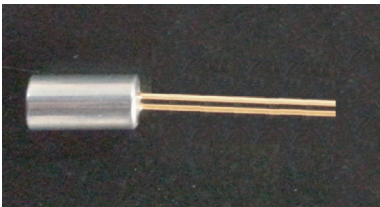


图 5 桥丝式火工品
Fig. 5 Bridge wire EED

- 测量步骤如下:
- 1) 分别计算夹具同轴部分和平行线部分的 S 参数 S_c 和 S_p ;
 - 2) 校准网络分析仪, 用夹具连接被测火工品到矢量网络分析仪, 测量夹具和火工品的 S 参数 S_M ;
 - 3) 将 S 参数转换为 T 参数: T_c 、 T_p 、 T_M , 计算 T_c 、 T_p 的逆矩阵 T_c^{-1} 、 T_p^{-1} , 用式(8)计算修正的 T 参数, 得到被测火工品的 T 参数 T_{EED} ;
 - 4) 将被测火工品的 T 参数 T_{EED} 转换为 S 参数 S_{EED} ;

- 5) 利用式(1), 计算被测火工品输入阻抗。
- 为了精确测量, 测量必须在电磁环境干扰较小的场所进行, 测量和校准时必须保持在同一个面上。火工品高频段 S 参数: S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 、 S_{22} 测试结果如图 6 所示。

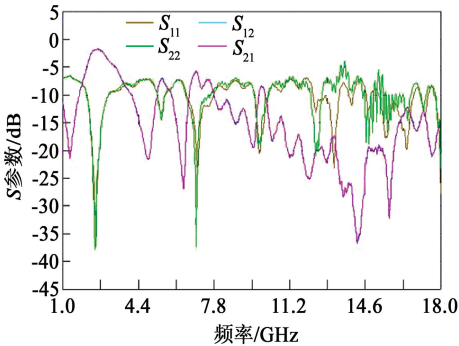


图 6 S 参数测试结果
Fig. 6 Test results of the S parameter

从结果可以看出, 在 $13 \sim 18 \text{ GHz}$ 频段, S_{11} 和 S_{22} 参数不相等, 为了减少夹具不对称造成的影响, S_d 参数可用下面公式计算:

$$S_d = \frac{1}{2}(S_{11} - S_{12} - S_{21} + S_{22})。$$

(11)

利用 S 参数, 按照上述测量步骤就可得到火工品高频段射频阻抗, 其计算结果如图 7 和图 8 所示。

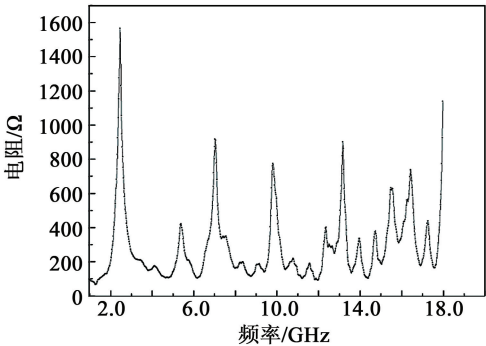


图 7 射频阻抗中电阻部分
Fig. 7 Resistance section of RF impedance

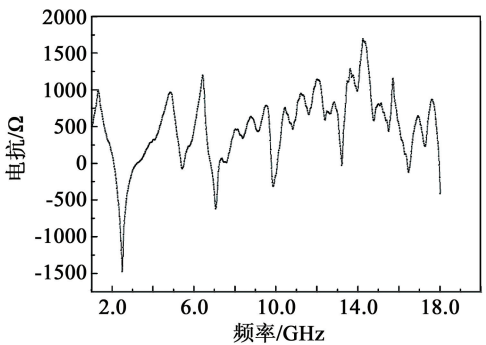


图 8 射频阻抗中电抗部分
Fig. 8 Reactance section of RF impedance

火工品射频阻抗的电阻部分 R , 可用于火工品等效天线有效孔径 A_e 的计算。对于未接入武器装

置的火工品,在脚-脚发火方式时, A_e 为^[8-9]

$$A_e = \frac{4.67 \times 10^4 \times L^2 d^2}{\pi \lambda^2 R} \quad (12)$$

式中: L 为脚线长度; d 为脚线间距; λ 为波长; R 为射频阻抗电阻分量。

进入系统的射频功率为

$$P = \bar{p} \times A_e \quad (13)$$

式中: \bar{p} 为射频场强或功率密度。

图 7、图 8 可知,在测试频率范围内,出现了 2.85、7.24、10.10、13.25 GHz 和 18.00 GHz 共 5 个谐振点,此时的射频功率 P 最大。如果 P 小于火工品最大不发火射频功率,则该火工品在电磁环境中是绝对安全的^[10]。因此,火工品射频阻抗是很有用的安全性能参数。

4 结论

1) 通过设计火工品射频阻抗测试夹具,建立了高频段火工品射频阻抗测试系统,测量了 1 ~ 18 GHz 火工品射频阻抗,为高频段火工品射频阻抗的测量提供了一种新的测试方法。

2) 从测量结果可知,在整个频率范围内,共出现了 5 个谐振点,在谐振点,火工品吸收的功率最大,为评价火工品在电磁环境中的安全性提供了数据支撑。

参 考 文 献

- [1] 王可喧,白颖伟,任炜,等. 电热火工品连续电磁波环境下响应规律[J]. 含能材料,2012,20(5):610-613.
WANG K X, BAI Y W, REN W, et al. Response rule of hot-wire EED in continuous electromagnetic environment [J]. Energetic Material, 2012, 20(5):610-613.
- [2] 段飞,赵学强,曹志英. 矢量网络分析仪的端口延伸和去嵌入功能的研究[J]. 科技信息,2011(11):495, 843.

DUAN F, ZHAO X Q, CAO Z Y. The research of port extension and de-embedding of vector network analyzer [J]. Science & Technology Information, 2011(11):495, 843.

- [3] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [4] FAN W, LU A, WAI L L, et al. Mixed-mode S-parameter characterization of differential structures[C]//Electronics Packaging Technology. 2003 5th Conference (EPTC 2003). IEEE, 2003:533-537.
- [5] 李新伟,易磊. 非标器件 S 参数去嵌入测试方法研究[J]. 计量与测试技术,2014,41(6):30-32,34.
LI X W, YI L. Research on the testing method of S device parameter of non-standard [J]. Metrology & Measurement Technique, 2014, 41(6):30-32,34.
- [6] PANTOJA J J, PENA N, RACHIDI F, et al. Susceptibility of electro-explosive devices to microwave interference [J]. Defence Science Journal, 2013, 63(4):386-392.
- [7] PANTOJA J J, PENA N M, ROMAN F, et al. Wideband experimental characterization of differential antenna [C]//6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE, 2011:2135-2139.
- [8] 赵团,姚洪志,纪向飞,等. 电火工品电磁危害问题探讨[J]. 火控雷达技术,2014,43(增刊):132-135.
- [9] 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.
LI J R. Determination and application for RF impedance of EED[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1995(1):11-14.
- [10] 纪向飞,封青梅,赵团,等. 桥丝式火工品射频致瞎评估[J]. 火工品,2012(6):44-48.
JI X F, FENG Q M, ZHAO T, et al. Research on RF dudding assessment of EED[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(6):44-48.

Test Technique of RF Impedance of EED in High Frequency

ZHAO Tuan, YAO Hongzhi, JI Xiangfei, WANG Kexuan

National Key Laboratory of Applied Physics and Chemistry,

Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] To measure RF impedance of EED in high frequency band, the special adapter was designed to connect coaxial cable and EED according to the configuration feature of EED and vector network analyzer. Error from the adapter was calculated and corrected, and the measurement system of EED RF impedance was built on the base of vector network analyzer. Using this system, RF impedance of EED from 1-18 GHz was measured. In the results, there appear five resonance points, and energy of EED absorbed from electromagnetic environment is the biggest at these points, which can afford data support to evaluate the safety of EED in electromagnetic environment.

[KEYWORDS] initiating explosive devices (EED); radiated frequency (RF) impedance; measurement; de-embedding