

# 使用矢量网络分析仪测试SPD传输特性

目前市场上用于电信和信号网络的电涌保护器 (SPD) 种类繁多。如何测试评价信号电涌保护器的传输特性, 已成为大家较为关心的问题。本文基于GB/T18802.21—2004/IEC 61643—21:2000 《低压电涌保护器 第21部分: 电信和信号网络的电涌保护器 (SPD) ——性能要求和试验方法》中的要求, 分析了使用矢量网络分析仪测试 SPD 传输特性的有关技术、性能指标和应用中的问题。

◎上海市防雷中心 赵 洋 蔡振新

网络分析仪 (Network Analyzer) 是反映高频元件和装置性能的最重要的测试工具之一。现代网络分析仪可以测量元件的幅值、相位和群时延特性, 并能通过史密斯圆图来显示端口阻抗与反射特性的关系。

GB/T18802.21—2004/IEC 61643—21:2000 《低压电涌保护器 第21部分: 电信和信号网络的电涌保护器 (SPD) ——性能要求和试验方法》是关于信号SPD测试的推荐国家标准, 其第6.2.3节为传输特性试验。其中 6.2.3.2 插入损耗、6.2.3.3 回波损耗及 6.2.3.6 近端串扰试验 (NEXT) 都需要依靠网络分析仪来完成。但是标准中只给出了这几个试验的电路简图而没有详细的试验方法, 给完成测量带来了困难。下面我们来讨论一下如何通过使用网络分析仪和其他装置来实现这些试验。

## 试验装置

试验时需要使用网络分析仪、同轴引线、对称试验引线和匹配电阻。网络分析仪

没有平衡输出端时, 需使用平衡/不平衡转换器。这些试验装置中各器件的测量带宽至少应为 1~100 MHz。

### 1. 网络分析仪

首先介绍一下关于网络分析仪的基本概念和操作, 以我们使用的美国 Agilent 公司生产的 8712ET 经济型射频网络分析仪为例, 其中 ET 代表是传输/反射分析仪。

(1) 8712ET的基本原理 8712ET是在一台射频网络分析仪的基础上增加了若干硬件、软件构成。图1是 ET 射频网络分析仪的内部组成框图, 它由激励信号源、信号分离装置, 含功分器和定向耦合器, 分别提取被测试件 (DUT) 输入和反射信号; 接收机及处理显示单元组成。

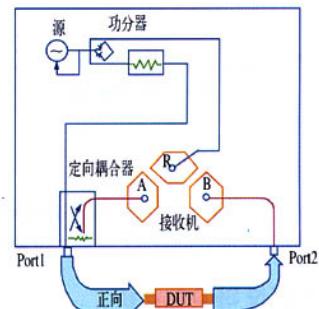


图1 ET 射频网络分析仪的内部组成

在进行测量时, 仪器发出扫频信号, 信号通过输出口送到待测设备, 信号通过设备后送回网络分析仪。由于待测设备接口的输入阻抗与网络分析仪输出阻抗不可能理想匹配, 因而会反射一部分信号。网络分析仪对输出和输入信号进行比较可得出待测设备的传输指标, 如增益、插入损耗、分

## 关键词 /Keywords

网络分析仪 •  
SPD •  
传输特性 •

配损耗等, 对输出和反射信号进行比较可得出待测设备的反射指标, 如回波损耗等。

(2) 8712ET 主要参数和特点 8712ET 的频率范围是 300 kHz~1.3 GHz, 频率分辨率是 1 Hz, 频率精度  $< 5 \times 10^{-6}$ ; 在不配置衰减器时输出功率范围为 0~+16 dBm, 配置衰减器后可达 -60~+15 dBm; 系统阻抗有 50 Ω 和 75 Ω 两种; 既可进行窄带检测, 又可进行宽带检测, 100 dB 的动态范围, 扫描速度快 (50 ms 完成一次扫描); 具有各种接口, 通过 GPIB 接口数据能用 PC 应用软件分析、处理。

(3) 网络分析仪的误差及校准 网络分析仪在测试过程中的主要误差分为三类: 系统误差, 随机误差和漂移误差。系统误差是由于仪器内部测试装置的不够理想引起, 它是可预示并可重复出现的。如果认为其是不随时间变化的, 便可以进行定量描述从而在测试过程中可以通过校准消除。

随机误差是不可预知的, 因为它以随机形式存在, 会随时间变化, 因此不能通过校准消除, 随机误差的主要来源为: 仪表内部噪声, 开关动作可重复性和连接器可重复性。

漂移误差由仪器在校准后测试装置的性能漂移引起。漂移误差主要是由于温度变化造成, 可通过再一次校准消除。

对于 ET 系列网络仪在传输测量时需要使用电缆连通 RF 输出端口和 RF 输入端口进行响应校准 (Response Cal), 消除两端口之间的频响误差。在反射测量时要通过使用三个校准件 (短路, 开路和负载) 来完成单端口校准 (One – port Cal), 校准的思路是通过对校准件的测试得到网络分析仪系统误差项的具体数值, 然后通过计算对被测试结果进行修正处理, 该项校准可消除系统方向性误差, 原失配误差和反射跟踪误差, 从而得到被测件的真实值。

仪器进行校准的接口端面在校准完成后称为校准面, 当被测件和校准面直接连接时, 测试精度为最高。

## 2. 平衡/不平衡转换器 (Balun)

矢量网络分析仪主要用于测试射频元件, 因而大多数都不是被设计用来测试差动参数的。矢量网络分析仪的射频端口为单端且特性阻抗为固定的 50Ω 或 75Ω, 但是差分元件没有固定的阻抗值, 所以其无法向差分元件提供差分信号。

而广泛使用的串接在计算机网络和电话网络中的信号SPD是典型的多端口器件, 因而无法直接使用矢量网络分析仪对此类产品进行测量。为了解决这类将平衡电路和单端电路连接的问题, 我们可以使用平衡 / 不平衡转换器。平衡/不平衡转换器 (Balun) 是从平衡到不平衡的阻抗匹配用的变量器, 其通常成对的使用, 完成单端口到多端口的连接和阻抗变换。

试验用平衡 / 不平衡转换器应具有对射频干扰 (RFI) 的屏蔽, 其性能要求如表 1 所示。

表 1 试验用平衡 / 不平衡转换器性能要求 (1~100 MHz)

参数	数值
初级阻抗 <sup>1</sup>	50 Ω, 75 Ω (不平衡)
次级阻抗 <sup>2</sup>	100 或 150 Ω (平衡)
介入衰减	最大 1.2dB
回波损耗, 两个方向	最小 20dB
回波损耗, 共模	最小 20dB
额定功率	最小 0.1W
纵向平衡度 <sup>3</sup>	最小 60dB
输出信号平衡度 <sup>3</sup>	最小 50dB
共模反射衰减 <sup>3</sup>	最小 50dB

1—初级阻抗应与网络分析仪相同。  
2—次级阻抗应与对称试验引线的标称特性阻抗 (100 Ω 或 150 Ω) 一致。  
3—按 ITU – T 建议 G.117 测量, 网络分析仪用 50 Ω 负载校准。

## 试验方法

### 1. 反射测量

在复杂系统中有大量的由级联组成的电路, 次一级电路的输入阻抗就是上一级电路的负载。首先以传输线为例介绍一下不同负载情况下反射特性变化的规律。当传输线端接负载与传输线特性阻抗相

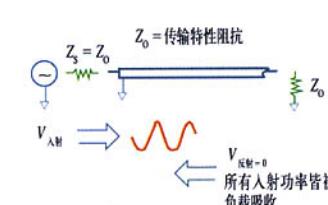


图 3 全匹配

同时, 输出到负载上的信号功率最大, 如图 3。传输线上只有正向传输信号, 信号波形为恒定包络正弦波, 传输效果等效为无穷

长传输线。

当传输线终端开路或短路时,所有输入信号功率被反射到入射端,造成全反射。传输线终端开路时,开路端电流为零,端点反射信号电流与输入信号电流幅度相等,相位相反。而反射信号电压与输入信号电压同相。满足欧姆定理。传输线终端短路时,开路端电压为零,端点反射信号电压与输入信号电压幅度相等,相位相反。而反射信号电流与输入信号电流同相。满足欧姆定理。发生全发射时,传输线上同时存在正

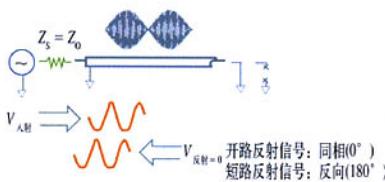


图 4 全反射

向输入信号和同功率的反射信号。这两个信号在传输线上矢量叠加,形成驻波。

驻波的波峰为输入信号电压的 2 倍,谷值为 0,如图 4 所示。

在其他情况下,如特性阻抗为 50 ohm 的传输线终端接 25 ohm 电阻时,输入信号的一部分被反射。反

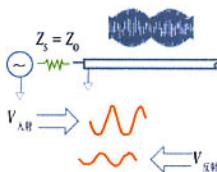


图 5 部分反射

射信号和输入信号进行矢量叠加从而引起波形包络起伏变化,如图 5 所示。

从上面几个例子我们可以看出当阻抗不匹配时,就

会产生反射信号。从这个角度理解可以认为造成器件端口反射的根本原因是阻抗不匹配,研究器件的反射特性和研究器件的端口阻抗是等效的。设信号源阻抗  $R_s$ ,负载阻抗为  $R_L$ ,其完美的匹配条件为  $R_L = R_s$ 。对于非纯阻性的阻抗来讲功率最大传输效率条件为共轭匹配,即  $Z_L = Z_s^*$  (例如  $Z_L = 4 + 5j$ ,其复共轭为  $Z_L^* = 4 - 5j$ )。

全面描述反射特性应包括反射中的幅值和相位两方面参数,为了定量反映反射特性需要定义一些参数。

①反射系数 是反射信号与入射信号的电压比值,反射系数为矢量,包含幅度和相位信息,分别反映反射信号与入射信号的幅度比值和相位差。

$$\text{反射系数 } \Gamma = \frac{V_{\text{反射}}}{V_{\text{入射}}} \rho \angle \phi = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

式中,  $Z_1$ ——不连续处之前的传输线的特性阻抗或源的阻抗;  $Z_2$ ——不连续处之后的阻抗或源和负载之间的结合处看去的负载阻抗。

②回波损耗 是反射信号和输入信号功率的比值,为标量。

$$\text{回波损耗} = -20 \lg(\rho), \rho = |\Gamma|$$

③电压驻波比 是通过传输线上信号包络起伏大小来定义,当全匹配时,传输线上只有输入信号,包络恒定。

$$\text{电压驻波比} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$

对于信号 SPD 其电压驻波比的优选值为小于 1.2,推荐值为小于 1.15。通过计算能得到电压驻波比 1.2 所对应的反射系数的模为

$$\text{由 } 2.2 \rho = 0.2 \text{ 得 } \rho = 0.091$$

由此得在 SPD 预定使用的传输应用频率范围内回波损耗应不小于  $-20 \lg(\rho) = 20.83 \text{ dB}$ 。同理得当电压驻波比小于 1.15 时回波损耗应不小于  $23.12 \text{ dB}$ 。

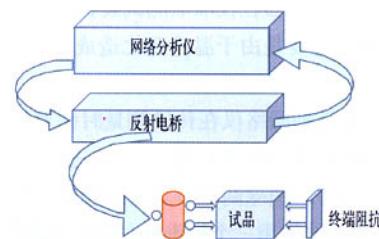


图 6 标准中给出的测量回波损耗的连接示意

标准中给出的测量回波损耗实验方法是利用长度最长为 1m,并具有合适的特性阻抗的引入导线来测量。利用图 6 的电路采用短接线来代替 SPD,然后再插入 SPD 分别进行测量,测量值用分贝表示。推荐的试验电平是  $-10 \text{ dBm}$ 。这种方法并更适合以往使用的标量网络仪。

我们采用的方法如下:①将网络分析仪的通道 1 (channel 1) 设定为反射测量。②将网路分析仪的开始—截止频率设定 SPD 预定使用的传输应用频率。③在网络分析仪的输出端接平衡/不平衡转换器,接着在平衡/不平衡转换器的平衡端经行校准。由于是反

射测量, 需要进行短路、开路和负载三步校准。④将被测SPD的输入端连接至平衡/不平衡转换器的平衡端, 在被测SPD的输入端连接匹配电阻。⑤观察和分析数据, 如图7所示。

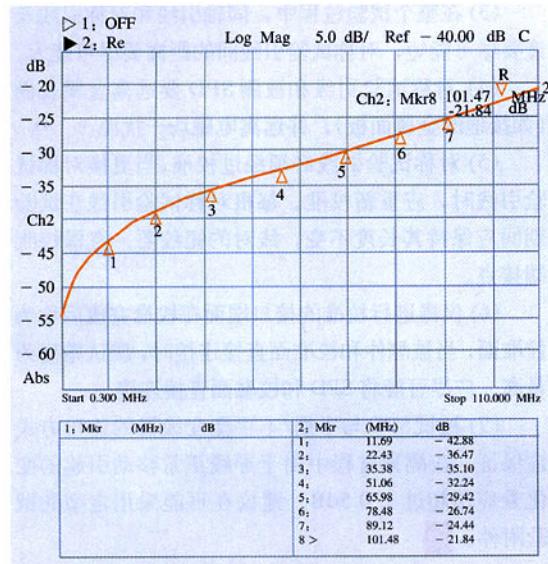


图7 回波损耗的测试波形

## 2. 传输测量

(1) 插入损耗测试 插入损耗测试 (insertion loss) 属于传输特性测试。与反射参数的定义相似, 可以得到传输参数。传输系数为信号电压比值, 包含幅度信息和相位信息, 为矢量。



图8 传输特性

$$\text{传输系数} \quad \Gamma = \frac{V_{\text{输入}}}{V_{\text{传输}}} = \tau \angle \phi$$

在这里插入损耗指的是由于在传输系统中插入一个SPD所引起的损耗。它是在SPD插入前传递到后面的系统部分的功率与SPD插入后传递到同一部分的功率之比。插入损耗通常用分贝(dB)来表示。

$$\text{插入损耗 (dB)} = -20 \text{Log} \text{MOD} (\tau) = -20 \text{Log} \tau$$

$$\text{增益 (dB)} = 20 \text{Log} \text{MOD} (\tau) = 20 \text{Log} \tau$$

标准中指出“在传输的频率范围内, 测得的图

8~图9中平衡/不平衡转换器和测试引入线的综合损耗应不超过3dB。在SPD预定使用的传输应用频率范围内测量和记录插入损耗。”标准中的这一项是对测量装置提出要求。而不是将平衡/不平衡转换器和测试引入线的综合损耗加上SPD插入损耗不超过3dB, 应当避免这种误会。插入损耗(dB) = -20LogMOD(τ) = -20Log τ。插入损耗在SPD预定使用的传输应用频率范围内的参考值为1.0 dB, 常规值为0.5dB, 优选值为0.3dB。

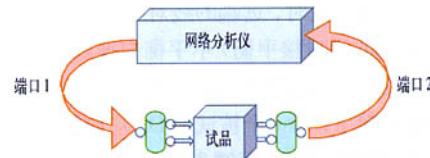


图9 标准中给出的测量插入损耗的连接示意

我们使用的方法如下: ①将网络分析仪的通道1 (channel 1) 设定为传输测量。②将网路分析仪的开始—截止频率设定SPD预定使用的传输应用频率。③在网络分析仪的输出端和输入端接平衡/不平衡转换器, 接着用有合适的特性阻抗的导线连接两个平衡/不平衡转换器的平衡端进行响应校准。④将被测SPD的输入端连接至两个平衡/不平衡转换器的平衡端之

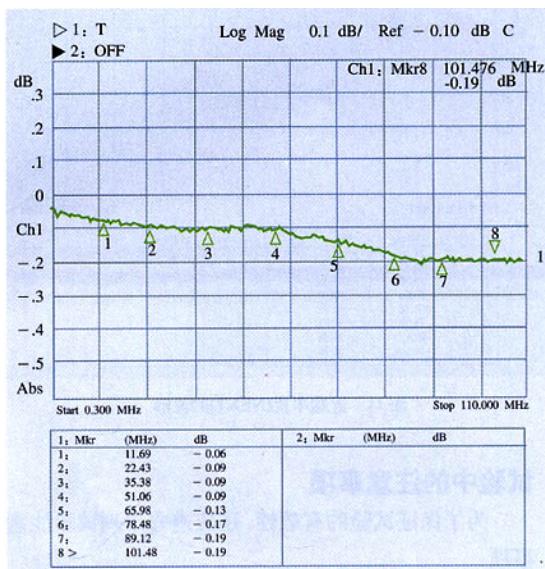


图10 插入损耗的波形

间。⑤观察和分析数据, 如图 10 所示。

(2) 近端串扰测试 近端串扰测试属于传输特性测试。其测量 SPD 内一个回路耦合到另一个回路的信号, 测量时对网络分析的操作和插入损耗测量基本一致。该测试是将一小段对称试验引线端接到被测 SPD 上进行扫频电压测量得出的。平衡的信号加到 SPD 的主串回路上, 在被串回路上测量近端的感应信号。

近端串扰测试中, 规定施加试验信号的那一端为近端, 不直接与测量仪器连接的另一端为远端。

测量近端串扰时, 远端的线对端接匹配电阻。试验回路近端的线对接平衡/不平衡变换器的平衡端, 非试验回路的近端可以不端接匹配电阻。

一般情况下, 对一个被试 SPD, 应测量该 SPD 上的全部相邻回路组合的近端串扰。对于 4 回路以下的信号 SPD, 应测量 SPD 的全部回路组合的近端串扰。

近端串扰对于模拟电话线的传输是一个重要的指标。在 SPD 预定使用的传输应用频率范围内近端串扰值应小于 40dB, 如图 11 所示。

不平衡变器和匹配电阻。

(2) 在 SPD 端接前、端接期间和端接后, 同轴引线和对称试验引线都要避免过度弯曲、打结和变形等, 以避免其特性劣化。

(3) 在整个试验过程中, 同轴引线和对称引线长度要尽可能短, 对称试验引线间的距离要尽可能大。

(4) 对称试验引线和被测 SPD 要远离金属表面(如接地的金属面板), 并远离电磁场干扰源。

(5) 对称试验引线必须经过校准, 当更换对称试验引线时, 应重新校准。每根对称试验引线在试验期间应保持其长度不变, 线对的扭绞要一直保持到端接点。

(6) 仪器进行校准的接口端面在校准完成后称为校准面, 当被测件和校准面直接连接时, 测试精度为最高。应尽可能将 SPD 和校准面直接连接。

(7) 被试 SPD 与平衡/不平衡变换器的连接方式应保证, 在测量过程中由于导线正常移动引起的变化量应不超过  $\pm 0.5$  dB。建议在可能采用定型的试验附件。

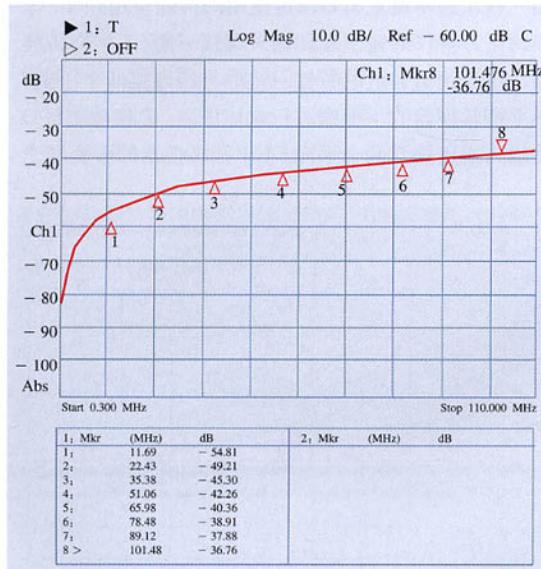


图 11 近端串扰(NEXT)的波形

## 试验中的注意事项

为了保证试验的有效性, 还应遵守下列试验注意事项:

(1) 在整个试验过程中, 应采用符合要求的平衡/

## 微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养; 现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地, 推出多套微波射频以及天线设计培训课程, 广受客户好评; 并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书, 帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 微波射频测量仪器操作培训课程合集

搞硬件、做射频, 不会仪器操作怎么行! 对于射频工程师和硬件工程师来说, 日常电路设计调试工作中, 经常需要使用各种测试仪器量测各种电信号来发现问题、解决问题。因此, 熟悉各种测量仪器原理, 正确地使用这些测试仪器, 是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能, 该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟悉掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

### 矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器; 该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装, 包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材, 能够帮助微波、射频工程师快速地熟悉掌握矢量网络分析仪使用操作…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



### 示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器, 因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解, 也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解, 能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>