

# 矢量网络分析仪的时频域阻抗测量技术

刘丹 李树彪 庄志远

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

**摘要:**由于传输线阻抗不连续性导致的串扰问题会严重影响信号传输的质量,从而导致信号完整性问题。从矢量网络分析仪阻抗测试原理出发,通过对比网络仪开路校准及端口补偿后的 Smith 圆图测量结果、阻抗和相位格式测量结果,说明网络仪频域 3 种测量格式所表述的阻抗信息;利用矢量网络分析仪时域变换功能从时域上对传输线进行评估,可以获得传输线阻抗不连续点和各位置阻抗信息。最后通过对一段 3.5 mm 传输线的测试,说明如何利用矢量网络分析仪的频域和时域同时对传输线特性尤其是阻抗特性进行评估,为传输线测试提供了一种新的方法。

**关键词:**阻抗;时域变换;Smith 圆图;Chirp-Z

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Frequency and time domain impedance test technique based on VNA

Liu Dan Li Shubiao Zhuang Zhiyuan

(The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Crosstalk caused by discontinuities of transmission lines can seriously affect the quality of signal transmission, which leads to the problem of signal integrity. By introducing the principle of impedance test in vector network analyzer, and comparing the open response calibrated measurement result under Smith chart format, port extension compensated Smith chart format, impedance format and phase format, the paper describes the information stated by these three different formats under frequency domain; Using time transform function of the vector network analyzer to evaluate transmission line under time domain, that can get the transmission line impedance and the impedance discontinuity location information. The measurement result of a 3.5 mm transmission line explains how to use the vector network analyzer to evaluate the impedance characteristics of one transmission line under both frequency and time domain; this provides a new method for transmission line test.

**Keywords:** impedance; time transform; Smith Chart; Chirp-Z

### 0 引言

电缆等传输线是微波系统器件互联的基本单元,传输线的好坏影响着整个系统的性能指标,然而在实际生产中,传输线及电缆等会因为制造公差而导致线上各点的阻抗分布不均,传输线的阻抗测试是评估传输线性能的有效方法,研究阻抗变换对信号质量的影响,也是从根源上研究信号完整性问题<sup>[1]</sup>。

射频同轴电缆等传输线的阻抗测试分为特性阻抗、局部特性阻抗、平均特性阻抗和输入阻抗,其中根据 GB/T 17737.1 和 IEC61196-1-108 测试方法获得的平均特性阻抗,需要通过公式计算才能获得之外,特性阻抗和输入阻

抗都可以利用矢量网络分析仪进行测试得到<sup>[2]</sup>。相对于时域反射计(TDR)只能获得特性阻抗,矢量网络分析仪因为可以同时获得频域和时域的测试信息、校准去除连接误差以及大动态范围、强大的软件功能等因素,从而能获得更高的测试效率、更好的测试结果。本文采用 AV3672 系列矢量网络分析仪对传输线阻抗进行测试分析,对频域和时域测量结果进行对比,帮助读者了解如何利用矢量网络分析仪测量和分析传输线阻抗特性。

### 1 原理

#### 1.1 频域阻抗测试原理

传输线是用于传输电磁能量和信号的线路,可分为波

导传输线、横电磁波传输线和表面波传输线<sup>[3]</sup> 3种类型。微波信号的能量传输一般是通过传输线来传导,传输线的主要参数是阻抗和损耗,可用等效分布参数表示,均匀传输线模型如图1所示,其电报方程为:

$$-dV(z) = (R + j\omega L)I(z)dz \quad (1)$$

$$-dI(z) = (G + j\omega C)[V(z) + dV(z)]dz \quad (2)$$

式中:V代表电压,z为阻抗,I为电流,R为串联电阻,L为串联电感,G为并联电导,C为并联电容<sup>[4]</sup>。传输线的串联电阻R导致传输损耗,与传输线长度、介质类型、走线宽度、厚度有关;传输线尺寸、材料导磁率、传输线走线等是传输线电感值的决定因素;板材的厚度、材料导磁率及走线是传输线电容值的决定因素;传输线走线、介电常数、损耗因数、板材厚度是传输线电导值的决定因素。

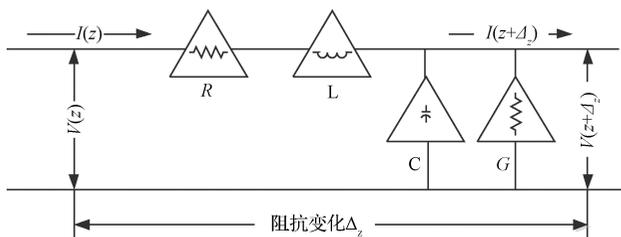


图1 变换为 $\Delta z$ 的传输线模型

进一步整理式(1)、(2),得:

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad (3)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \quad (4)$$

将式(3)、(4)相比并整理得到阻抗公式:

$$z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (5)$$

式(5)考虑了传输线损耗,是传输线阻抗的标准表达式,式中L、C是常量,与频率无关;R、G与频率相关,因此不同频率下传输线特性阻抗表现的也不一样。

对于一个传输线,其阻抗值也可以通过传输线S参数测量值计算得出:

$$(S) = \frac{1}{D_s} \begin{pmatrix} (Z^2 - Z_0^2) \sinh \gamma l & 2 \times Z \times Z_0 \\ 2 \times Z \times Z_0 & (Z^2 - Z_0^2) \sinh \gamma l \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$Z^2 = Z_0^2 \frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2} \quad (7)$$

式(7)由式(6)通过[ABCD]参数形式变换得出<sup>[5]</sup>,从中可以看出,传输线阻抗与传输线反射参数 $S_{11}$ 和传输参数 $S_{21}$ 相关。

### 1.2 时域阻抗测试原理

频域下的阻抗测试结果可以用于分析传输线的输入阻抗,然而对于确定被测件尤其是传输线各位置阻抗特性无疑是困难的,传输线阻抗特性或者信号完整性方面的测试,往往采用阶跃脉冲直接测量法,即时域法(TDR法)。

信号在传输路径中传输时,每一时刻都会感受到瞬态

阻抗,如果传输线阻抗受控,则瞬态阻抗就等于传输线的特性阻抗<sup>[6]</sup>。假设传输线某两个区域的瞬态阻抗不同,则当信号通过阻抗突变区域时,就会在突变点(两阻抗区域的交界面)处,前向信号和反向信号产生电压和电流的回路。

设入射信号电压为 $V_s$ ,反射电压为 $V_R$ ,传输电压为 $V_L$ ,根据基尔霍夫定律,交界面两侧无论电压还是电流都是相等的,既 $V_s + V_R = V_L$ ;同理电流关系式为 $I_s + I_R = I_L$ ;阻抗变换处左端电阻为 $Z_0$ ,右侧为 $Z_L$ ,根据电压、电流、电阻关系可以推导出阻抗变换处电阻 $Z_L$ 为:

$$Z_L = \frac{V_s + V_R}{V_s - V_R} \cdot Z_0 = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \cdot Z_0 \quad (8)$$

式(8)中 $\rho$ 即为反射系数,等于反射电压与入射电压的比值。

如图2所示,TDR测试仪产生阶跃信号送入被测传输线,测量入射电压与反射电压之比,根据式(8)获得传输线上每一时刻的阻抗值,从而确定传输线各点阻抗,判断阻抗不连续点的位置。矢量网络分析仪作为频域测试设备,入射到被测件的是不同频率、不同功率的正弦信号,与TDR测试仪阻抗测试原理不同,因此要利用矢量网络分析仪实现时域阻抗测试功能,需要用到矢量网络分析仪的时域变换功能。

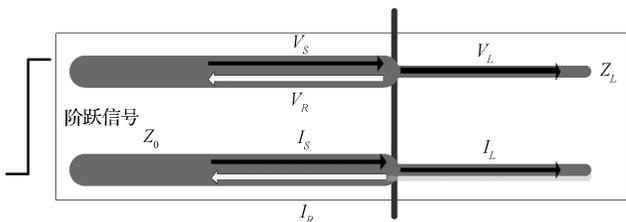


图2 传输线阻抗变换示意

矢量网络分析仪时域变换功能采用Chirp-Z反变换算法,将频域数据转换为时域数据<sup>[7]</sup>,Chirp-Z变换可以从任意频率开始,对输入数据进行窄带高分辨率的谱分析,方便网络仪将任意频率范围内的频域数据转换为时域数据。网络仪时域变换功能提供低通冲激、低通阶跃、带通冲激3种变换模式,其中低通阶跃激励模式下的反射S参数计算阻抗与TDR工作模式是相同的。

### 2 分析

矢量网络分析仪软件提供了多种测量结果显示格式:对数幅度、线性幅度、实部、虚部、Smith圆图、极坐标、阻抗、相位等,方便用户对被测件测量结果进行全方位分析。

Smith圆图是射频工程师观察被测件匹配特性的有效工具,Smith圆图的最初设计目的就是计算被测件的阻抗。其原理是将归一化的终端阻抗的复数值映射到一个圆形的图表上<sup>[8]</sup>,以开路校准 $S_{11}$ 参数的Smith圆图为例,如图3所示,与图中O点相切的每一个圆代表某一阻值,图中短路箭头所指之处的电阻值为0, $Z^L = Z^0$ 处的电

阻值等于系统阻抗(一般为 50 Ω 或者 75 Ω),开路箭头所指之处电阻值无穷大。



图3 开路校准后 S11 参数的 Smith 圆图

Smith 圆图按照式(9)将复反射系数( $\Gamma$ )与被测件的阻抗一一对应。

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (9)$$

以被测件测试端口为 1 端口为例,此时反射系数为  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  为 0,由式(8)和式(9)得到:

$$Z = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (10)$$

式(10)即为网络仪阻抗计算公式。

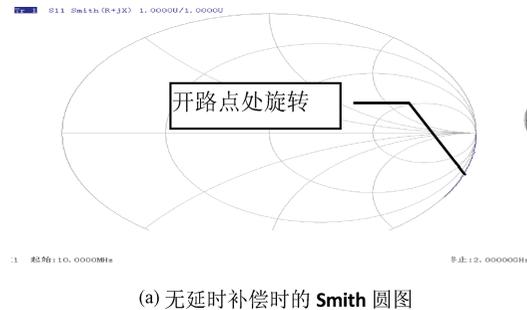
对于同一个二端口网络,当负载不变时,其输入阻抗不变,而输入阻抗与反射系数有关,与特征阻抗无关。

图 3 的光标读数表示了当前频率点的复阻抗结果:阻抗实部(电阻)、阻抗虚部(电抗)及等效电感。图中测试曲线围绕  $R = \infty$  的圆周进行旋转,旋转的角度与被测传输线的长度有关:

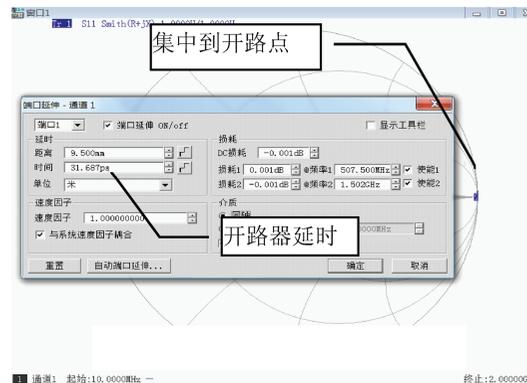
$$\theta = C' 4\pi fl \quad (11)$$

式(11)中  $l$  为被测件传输线长度,在图 3 中  $l$  与校准开路器延时及等效电感、电容相关,长度(延时)固定时,角度  $\theta$  随着频率的变化而变化,因此图 3 中校准后的迹线是围绕  $R = \infty$  圆周进行旋转的曲线,而不是围绕在开路点处。可以通过端口延伸功能补偿校准件产生的时延,如图 4 所示,上图为选择 85052D 校准件的阴头开路器进行开路响应校准后的 Smith 圆图,下图为自动端口延伸功能补偿延时后的 Smith 原图,可以看出补偿后的迹线位于开路点处。

矢量网络分析仪的阻抗格式表示的是被测件绝对阻抗值,既复阻抗的模。频域下阻抗格式表明每个激励频率下被测件的输入阻抗变化,以开路响应校准后的  $S_{11}$  曲线为例,此时阻抗格式显示的迹线有 3 处极大点,其他频率下的阻抗值则比较小,将阻抗格式迹线与相位格式迹线一起观察,可以更加清晰的观察各频点处的相位与阻抗响应,如图 5 所示,光标所示相位为 0 时阻抗为无穷大,说明在光标所示的频率下,被测件表现为开路特性,迹线最大值和相位为 0 点的位置与校准件的延时相关。



(a) 无延时补偿时的 Smith 圆图



(b) 利用端口延伸补偿后的 Smith 圆图

图 4 开路校准后延时补偿对比图

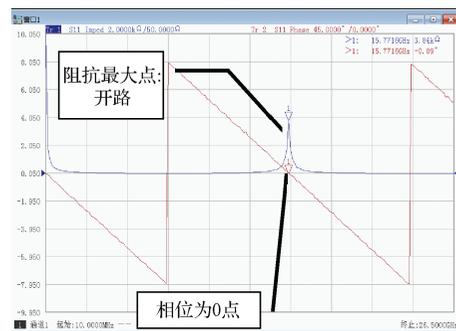


图 5 相位格式与阻抗格式

在上述测量基础上,选择使能时域功能,选择默认的带通冲激模式,观察  $S_{11}$  曲线阻抗格式。

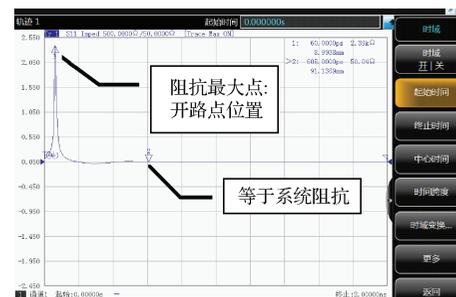


图 6 矢量网络分析仪时域阻抗

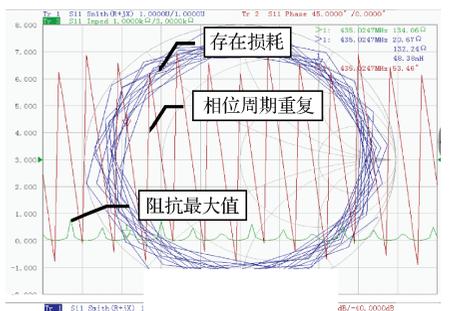
从图中可以看出,经过时域变换后,光标 1 所示阻抗最大位置为校准件开路点所在位置,正脉冲响应形状也表

明被测件为开路特性;光标 1 显示延时为 60 ps,正好等于校准件延时的 2 倍(反射响应);光标 2 为传输线特性阻抗(50 Ω),与校准件特性一致。

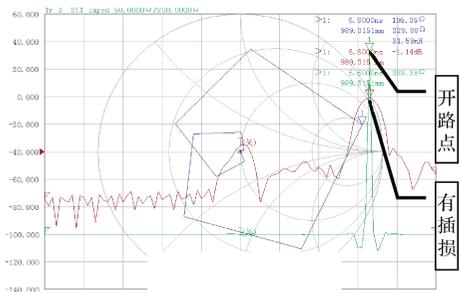
矢量网络分析仪时域变换功能不仅在断点不连续性测试上有很好的应用,其时域门功能还可以有效的去除指定的不连续点引入的干扰<sup>[9]</sup>。然而当有多处不连续点(阻抗变换点)时,由于掩蔽效应导致的测量误差使得阻抗测试出现偏差,这时可以利用 IPC-TM-650 规程中选择最佳测量区域来避开微波反射<sup>[10]</sup>,也可以利用多重反射的计算方法求解出被测非均匀平面的传输线特性阻抗。

### 3 实验验证

通过实测一个 3.5 mm 转 2.4 mm 接头和一根 2.4 mm 电缆对比矢量网络分析仪时域、频域阻抗测试效果。实验采用 3672 高性能矢量网络分析仪,首先复位网络仪,选择【校准】、【非向导校准】、【开路响应】,选择校准件为 85056D 阴头开路器,校准后新建 2 条  $S_{11}$  迹线,分别设置格式为 Smith 圆图、相位、阻抗,如图 7 所示。从上图可以看出相位为 0 时阻抗最大(开路),与开路定义一致;Smith 圆图可看出此时反射系数接近但不为 1,表明电缆存在损耗,旋转的曲线表示电缆相位响应为周期性重复;下图为时域变换后的 Smith 圆图、阻抗和对数幅度格式曲线,图中光标所指点为开路点,此时反射幅度最大(迹线 2),阻抗最大(迹线 3),离开路点最近(迹线 1);同时迹线 1 表明除开路点外,电缆其它位置的阻抗均为 50 Ω 左右,说明电缆没有断点。



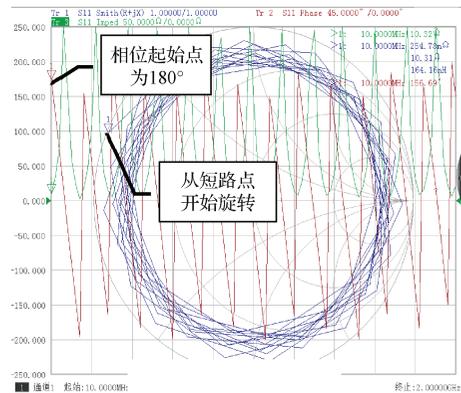
(a) 开路校准频域特性图



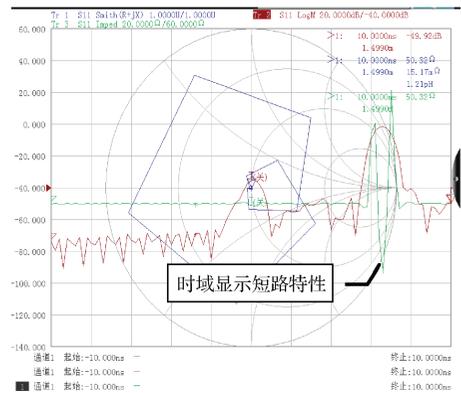
(b) 开路校准时域特性图

图 7 长电缆频域、时域阻抗测试曲线(开路校准后)

图 8 所示迹线与图 7 测试条件相同,除了校准时采用短路器进行校准,对比图 7 和图 8 可以看出,开路器校准后,低频点相位从 0°开始,短路器则从 180°,Smith 圆图开路器从开路点开始旋转,短路器则从短路点开始旋转;时域变换后 Smith 圆图开路校准后图形与短路校准后图形变化方向是相反的;时域阻抗一个表现为开路特性(正尖峰),一个表现为短路特性(负尖峰)。



(a) 短路校准频域特性图



(b) 短路校准时域特性图

图 8 长电缆频域、时域阻抗测试曲线(短路校准后)

### 4 结论

随着信号传输速率的增加,信号在传输线中的传输质量测试也越来越迫切。对高速信号传输线测试问题进行了分析,从频域、时域两个方向介绍了网络仪传输线阻抗测试原理及应用,从而帮助用户更好的利用网络仪对高速传输线进行测试。利用端口延伸功能对被测传输线长度引起的延时进行补偿,如果需要进一步对测量端口的阻抗、电抗等特性进行补偿,可以通过网络仪提供的端口匹配电路方法,通过调整端口匹配电路的并联、串联方式和 R、L、C、G 值,使端口达到更加理想的状态。

(下转第 50 页)