

# 矢量网络分析仪基本测试原理及其在地震电缆测试中的应用

孙华东\* 王元 薛冰悬 杨海

(东方地球物理公司装备服务处仪器服务中心, 河北涿州 072750)

## 摘 要

孙华东, 王元, 薛冰悬, 杨海. 矢量网络分析仪基本测试原理及其在地震电缆测试中的应用. 物探装备, 2012, 22(3): 183~186

矢量网络分析仪广泛应用于电子电路的设计与测试中, 也应用于测试地震电缆。本文主要介绍了矢量网络分析仪的基本组成、测试地震电缆的原理、测试的基本传输参数的物理意义以及具体测试方法。

**关键词** 矢量网络分析仪 地震电缆 电缆测试 传输参数

## ABSTRACT

Sun Huadong, Wang Yuan, Xue Bingxuan and Yang Hai. Application of vector network analyzer for seismic cable testing. EGP, 2012, 22(3): 183~186

Vector network analyzer is not only widely used in electronic circuit design and test, but also used for seismic cable testing. This article introduces the basic construction of vector network analyzer, its working principle and the physical meaning of the basic transmission parameters for seismic cable testing.

**Key words** vector network analyzer, seismic cable, cable test transmission parameters

## 0 引言

矢量网络分析仪广泛应用于电子电路, 尤其是应用在射频和微波等工作频率较高的电子电路及电子元件的设计与测试中。在地震电缆的测试中, 通常使用矢量网络分析仪对地震电缆的一些基本参数(包括特性阻抗、群延迟、驻波等)进行测试。了解矢量网络分析仪的结构特性, 掌握正确的使用方法, 并准确地理解测试中基本参数的物理意义, 才能保证测量工作的准确性。下面以 Agilent 公司的 4395A 型矢量网络分析仪为例进行分析。

## 1 矢量网络分析仪的组成

矢量网络分析仪一般由 4 个主要部分组成, 包括: 信号源装置、信号分离装置、幅相接收机、数据处

理和显示模块。

### 1.1 信号源装置

信号源装置是对系统提供激励的装置, 可以做频率扫描或功率扫描(即幅度扫描)。网络分析仪的信号源采用集成化频率综合器。

### 1.2 信号分离装置

信号分离装置必须有两种功能: 一是将入射信号的一部分作为求比值的参考, 用功率分配器或定向耦合器均可完成; 二是将被测网络(DUT)的输入分离出入射波(正向)和反射波(反向), 由定向耦合器来完成。功率分配器是电阻性的, 无定向性, 频带范围很宽。而定向耦合器的损耗很低, 且有较好的隔离度(约 50dB)和定向性(约 30dB)。

### 1.3 幅相接收机

幅相接收机是一台窄带-调谐接收机。它将一个本振源(LO)与一个射频(RF)信号混频, 得到较低的中频(IF)信号。该调谐接收机采用窄带中频滤

\* 孙华东, 男, 1983 年出生, 助理工程师。2009 年西安电子科技大学无线电物理专业硕士研究生毕业, 现主要从事地震勘探仪器的操作工作。

波器(3kHz中频带宽),产生相当低的噪音,可显著改善灵敏度。中频滤波器后采用ADC(模数转换器)和DSP(数字信号处理器),从中频信号中提取幅度和相位信息。

### 1.4 数据处理和显示模块

数据处理和显示模块用于解释与显示测试结果,其作用是对反射和传输数据进行格式化。如:线性扫描和对数扫描、线性格式和对数格式、极坐标图、Smith圆图、迹线标记、极限线、合格/不合格测试等数据的处理与显示。

## 2 测试地震电缆的基本原理

在对地震电缆相关参数进行测试时,通常将地震电缆视为是对二端口的网络(DUT)进行测试。二端口的网络测试是通过电子仪器对电子网络的基本参数来进行测试的。如图1所示,通常使用信号源对被测电子网络发射所需信号,并由一个接收机来接收通过该网络的信号,然后通过仪器来计算接收到的信号及其与信号源的关系,并通过相关公式计算出地震电缆基本参数的结果。

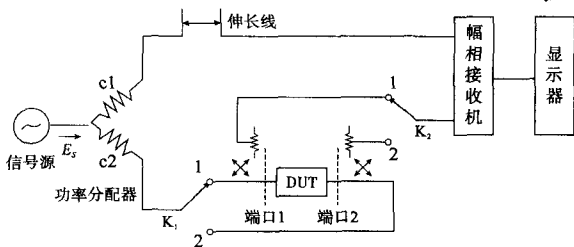


图1 测试地震电缆的基本原理示意图

在图1所示的系统中,加上两个宽频带开关,通过程控开关 $K_1$ 、 $K_2$ 自动切换位置组合即可组成一个可以测试4个S参数(表示被测网络的功率波,见3.2.4)的综合测试系统。当 $K_1$ 和 $K_2$ 都连通1时,可以测量 $S_{11}$ ;当 $K_1$ 连通1、 $K_2$ 连通2时,可以测量 $S_{21}$ ;当 $K_1$ 连通2、 $K_2$ 连通1时,可以测量 $S_{12}$ ;当 $K_1$ 和 $K_2$ 都连通2时,可以测试 $S_{22}$ 。

## 3 矢量网络分析方法及其基本参数

### 3.1 矢量网络分析方法简介

矢量网络分析是指在一定的频率范围内,通过激励-响应来测试线性网络的传输与阻抗特性并建

立数据模型的过程。而矢量是指信号模型的幅度和相位信息,网络是指电子网络。矢量网络分析方法,就是通过对被测网络的频率扫描和功率扫描,来测试信号的幅度与相位的影响,以精确表征被测网络的一种方法。

测试地震电缆时,将电缆视为一个二端口的电子网络。根据测试原理,信号在经过二端口网络时,信号的人射能量( $R$ )在传输过程中会有部分能量( $B$ )通过该网络,部分能量( $A$ )被反射回来,如图2所示。利用这些能量的幅度和相位信息,可定量描述该测量网络的传输特性和反射特性。

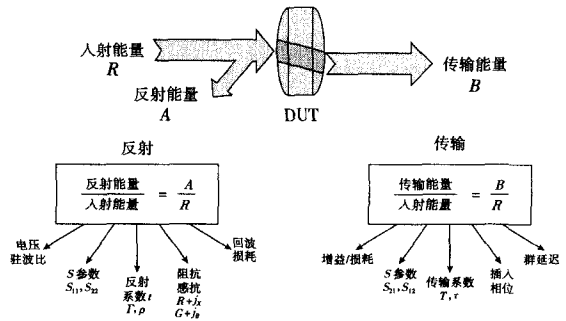


图2 二端口网络测试参数

### 3.2 被测网络基本参数的物理意义

首先,定义描述该网络的基本传输参数:

- $V_1$ ——入射电压;  $I_1$ ——入射电流;
- $V_T$ ——传输电压;  $I_T$ ——传输电流;
- $V_R$ ——反射电压;  $I_R$ ——反射电流。

应用上述基本参数,通过相关公式计算可以导出描述网络特性的相关参数。

#### 3.2.1 被测网络的阻抗

在矢量网络分析中,测试信号是一个交流信号,其阻抗是一个矢量,用复数 $Z$ 来表示(如图3所示)。

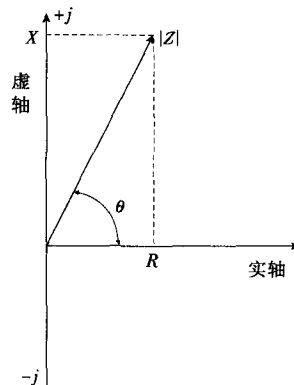


图3 复数阻抗

则:

$$\text{复数阻抗 } Z = R + jX = |Z|\theta \quad (1)$$

$$\text{阻抗的幅度 } |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2)$$

$$\text{阻抗的相位 } \theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) \quad (3)$$

$$\text{阻抗的实部 } R = |Z|\cos\theta \quad (4)$$

$$\text{阻抗的虚部 } X = |Z|\sin\theta \quad (5)$$

### 3.2.2 被测网络的反射参数

以  $Z_0$  表示被测网络的特性阻抗,  $Z_L$  表示被测网络上某一点的阻抗, 则:

$$\text{反射系数 } \Gamma = \frac{V_R}{V_I} = \rho\varphi = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$

式中,  $\rho$  为反射系数的模值,  $\varphi$  为其相位角。

$$\text{电压驻波比 } V_{\text{SWR}} = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (7)$$

回波损耗(Return Loss) $R_{\text{RL}}$

$$R_{\text{RL}} = -20 \lg \rho \quad (8)$$

### 3.2.3 被测网络的传输参数

$$\text{传输系数 } T = \frac{V_T}{V_I} = \tau\varphi \quad (9)$$

式中,  $\tau$  为传输参数的模值,  $\varphi$  为其相位角。

插入损耗(Insert Loss) $I_{\text{IL}}$

$$I_{\text{IL}} = -20 \lg \left| \frac{V_T}{V_I} \right| = -20 \lg \tau \quad (10)$$

$$\text{增益 } G_{\text{Gain}} = 20 \lg \left| \frac{V_T}{V_I} \right| = 20 \lg \tau \quad (11)$$

### 3.2.4 被测网络的 S 参数

矢量网络分析中, 经常使用 S 参数来表示被测网络的功率波, 即用人射功率波和反射功率波的方式来定义网络的输入、输出关系。如图 4 所示, 当在端口 1(左端)有入射波  $a_1$  时, 其中一部分由于该端口的失配而被反射, 成为该端口出射波  $b_1$  的一部分;  $a_1$  的其余部分经网络传输到端口 2(右端), 成为端口 2 的出射波  $b_2$  的一部分; 同样, 当在端口 2 也

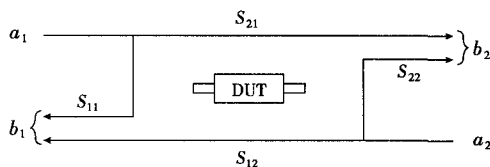


图 4 二端口网络的 S 参数

有入射波  $a_2$  时, 情况也相同。把端口 1 的两股出射波合在一起构成  $b_1$ , 把端口 2 的两股出射波合在一起构成  $b_2$ 。

由此, 定义 S 参数为:

$$\begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, 各参数的含义为:

端口 2 无人射能量时, 端口 1 的反射系数  $S_{11}$

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}, a_2 = 0 \quad (13)$$

端口 2 无人射能量时, 端口 1 的传输系数  $S_{21}$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}, a_2 = 0 \quad (14)$$

端口 1 无人射能量时, 端口 2 的反射系数  $S_{22}$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}, a_1 = 0 \quad (15)$$

端口 1 无人射能量时, 端口 2 的传输系数  $S_{12}$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}, a_1 = 0 \quad (16)$$

以上所列参数可基本描述信号被测网络在传输过程中的传输与反射特性。通过这些参数的测试, 可评定被测网络性能的优劣。

## 4 地震电缆的测试

在使用矢量网络分析仪 Agilent 4395A 对地震电缆进行测试时, 由于其接口为 N 型非平衡信号接口, 所以首先需要使用一个巴伦(BALUN, 平衡-不平衡转换器)将分析仪发射的不平衡信号变换为平衡信号, 然后通过插针输入到地震电缆中; 在电缆的出口再使用一个巴伦将该平衡信号变换为不平衡信号, 然后再返回到分析仪中。测试电缆时, 将地震电缆视为一个二端口的电子网络, 根据前面所述的二端口电子网络的参数和测试原理进行测试。

### 4.1 地震电缆衰减、时延、回损、串音等参数的测试

地震电缆衰减、时延、回损、串音等参数的测试过程相对简单, 可直接通过测试仪读出数值。

下面以 428XL 地震电缆的衰减测试为例, 简要讲述地震电缆的测试过程。

首先校准矢量网络分析仪。校准步骤为:

(1) 设置频率范围为 1~30MHz, 中频频率为

1kHz,格式选择为对数,扫描点数为401;

(2) 分别用通路、短路和负载进行S参数的校准,校准时最好连上巴伦再进行,这样能够减少巴伦对测试结果的影响。

校准结束后,按图5所示将地震电缆连接到矢量网络分析仪,选择 $S_{21}$ 参数测试电缆的衰减,测试结果如图6所示。

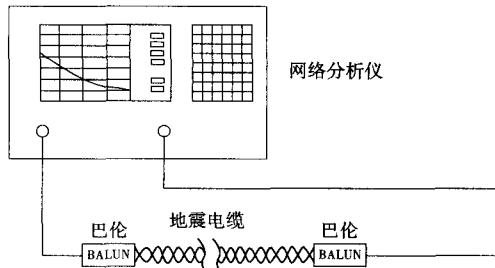


图5 地震电缆的测试框架图

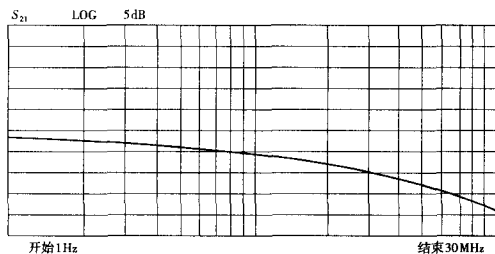


图6 地震电缆衰减测试结果

从图6可以看到,该地震电缆衰减值随传输信号频率的升高呈对数下降的趋势,并能够准确读出某一频率下的衰减值。

地震电缆其它参数的测试与上述衰减测试过程相似。在测试前先对测试仪进行校准,对不同的测试参数,地震电缆的连接与测试仪的选项不同。例如,进行时延测试时,地震电缆的连接方式与衰减测试相同,选择测试仪中的Format→Delay即可;进行回波损耗测试时,选择 $S_{11}$ 参数测试即可;进行串音测试时,将地震电缆一个数传对的一端通过巴伦连接到测试仪信号发射端口,其另一端用终端匹配电阻来匹配,然后将待测数传对的近端或远端通过巴伦连到测试仪的信号接收端口,来测量它的S参数,从而读出待测数传对的近端或远端的串音值。

#### 4.2 地震电缆特性阻抗、传输速度等参数的测试

在进行地震电缆的特性阻抗、信号传输速度等测试时,测试步骤相对繁琐,需要经过数学运算才能得到测试结果。在测试地震电缆的特性阻抗时,选

择测试仪的Format→Smith chart(史密斯圆图)格式,然后分别读出地震电缆在终端开路、短路状态下所需频率点的阻抗值 $Z_{op}$ 、 $Z_{st}$ ,再根据下面公式计算特性阻抗 $Z_0$ :

$$Z_0 = \sqrt{|Z_{op}| |Z_{st}|} \quad (17)$$

计算地震电缆的传输常数 $\gamma$ 为:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \frac{1}{d} \arctan \sqrt{\frac{Z_{st}}{Z_{op}}} \quad (18)$$

式中, $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为衰减常数和相位常数, $j$ 为虚数单位, $d$ 为地震线缆的长度。

信号的相速度,即传输速度 $v_p$ 为:

$$v_p = \omega / \beta \quad (19)$$

式中, $\omega$ 为角频率。

#### 4.3 应用矢量网络分析仪解决在地震电缆维修中的快速定位问题

矢量网络分析仪测试准确、方便、功能较强。掌握地震电缆的测试原理与过程可以帮助解决在地震电缆维修中快速定位的问题。例如,在地震电缆的测试过程中,若发现其衰减较大,回波损耗较强,则可以说明电缆内部有损坏甚至有断点;若其串音较强,则极有可能是地震电缆的接头处损坏或插针有故障。以上只是列举了矢量网络分析仪在地震电缆维修中的大致定位方法,至于如何利用测试结果来精确定位,还需进一步实验。

## 5 结束语

本文从矢量网络分析仪的基本组成出发,介绍了地震电缆的基本测试原理,并阐述了其测试地震电缆基本参数的物理意义。通过实例说明了矢量网络分析仪可对地震电缆的基本传输参数进行测试,方便对地震电缆的传输性能进行评估与维修。

#### 参 考 文 献

- 1 吕洪国. 现代网络频谱测量技术[M]. 北京:清华大学出版社,2000
- 2 李国林,雷有华. 射频电路测试原理[R]. 清华大学,2005
- 3 Agilent. Agilent technologies impedance measurement handbook. 2003

收稿日期:2012-02-01

## 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测量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练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练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>