

# 射频电缆参数测定试验

崔 炎 吕善伟

(北京航空航天大学 205 教研室)

## 1 引 言

在射频领域的工程中,经常采用同轴电缆及其配套的接头(见右图)对各个功能块、器件或振子单元进行连接(即馈电),对它们的基本要求是插损小、匹配好。在一些对相位比较敏感的应用中,同轴电缆的相移也是我们需要特别关注的。能够熟练地进行射频电缆参数的测量是射频(和通信工程)研究人员所应具备的一项基本技能。

## 2 相关的基本理论

### 2.1 什么是传输线

传输线这一概念是微波领域所特有的概念,总的说来,传输线就是用以从一处至另一处传输高频或微波能量的装置。那么传输线与我们传统意义上的“导线”有什么区别呢?一种直观的理解方法是:当一段长为1米的金属导线用来传输10KHz的信号时,它自身的长度只是信号波长的 $1/3 \times 10^4$ ,这样对于传输线两端的信号来说,可以认为是完全相同的;但当其用来传输150MHz的信号时,它自身的长度正好是传输

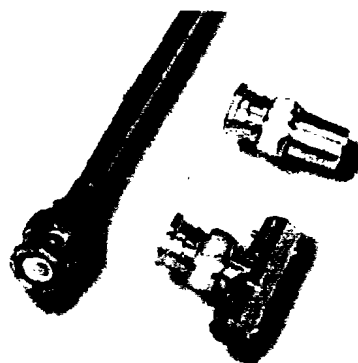


图 1

信号的半个波长,这样一种不严格的直观结果就是——在传输终端的信号与传输始端的信号正好反相!此时我们如果在进行系统分析时再忽略“导线”的作用显然就是错误的。上面这个例子的陈述是十分不严格的,实际上,当利用传输线进行高频信号传输时,将产生各种高频效应(诸如集肤效应),需要我们对各种不同的效应分别予以建模和分析,它决不仅仅是一个相位问题,叙述这个例子的目的是要以一种直观感性的方式提醒读者注意这样一个事实:即在射频频段内,任何连接器件对信号的传输都有影响,并且这种影响往往是不应被轻易略去的。

从上面的例子可以看出,传输线的概念是一个相对概念,它是各种金属连接导体在射频时的一个“别名”。现在比较常用的传输线有同轴线、波导和微带线。虽然它们都是“传输线”,但其传导电磁波的特点却各不相同。

### 2.2 如何分析传输线

上面提到了,既然在射频领域里,传输线对信号传递有不可忽略的影响,那么如何来定量地分析这种影响呢?总的说来,我们需要考虑如下两个问题:

(1)传输线的传输效率;

## (2) 传输线的相移与群时延特性。

如果从整个系统的角度来看,还应考虑传输线对其前、后端设备的影响,因此我们还需考虑如下两个问题:

- (1) 传输线的输入阻抗;
- (2) 传输线对后端呈现的输出阻抗。

为获得以上问题的满意答案,需要我们对传输线上的电磁场分布作详细的分析。对于类似于平行双导线这样的由两个平行导体组成的传输线系统,一种直观而有效的方法就是使用分布参数电路的概念,对线上各点的电压和电流的分布给出确定的解。然后由此定出上面几个问题的答案。然而这种方法并不是严格和普遍的。对于类似波导这样的单导体传输系统,普通意义上的“路”的分析方法是不适用的(当然,可以采用等效功率的方法对器件进行等效长线分析,但这牵涉到较多的物理概念,我们在这里不予考虑,有兴趣的同学可查看我们编写的《三通功分器测试》一文)——其主要原因在于在其内部某一截面上的电磁场不能对应一个单值的电压波和电流波。其实,对于传输线或其它微波应用来说,只有用“场”的概念进行分析才是严格的和准确的,之所以有的应用(如同轴线)能够用“路”的分析方法,是因为可以由在其上分布的电磁场以某种定义对应单值的电压波和电流波。

关于传输线的另外一个重要的分析内容就是所谓的传输模式问题。什么是传输模式呢?简单地说,传输模式就是在传输线中可能存在的不同的场的形式。我们知道,求解传输线场的实质就是求能够满足传输线边界条件的麦克斯韦方程组的解。几乎所有的传输线,都允许无穷多种的场解存在,每一个这样的解称为一种“模式”。显然,如果在传输线中同时存在这些不同形式的场,对实际使用和分析是不利的。但庆幸的是,对每一种传输线,都存在一个特定频率范围,当传输信号的频率落在该频率范围内时,能够保证在传输线中只存在唯一一种模式的电磁场,我们把该模式称为传输线的主模。显然单模传输将大大简化工程分析和设计任务,所以在进行信号传输时,除非有特殊应用,一般都采用单模传输。

同轴电缆是一种较为典型的传输线,其导行的电磁波的主模是我们常说的 TEM 模。同轴线的单模传输频带相当宽。对内、外径分别为 0.68mm 和 2.2mm 的 SYV-50-2-2 型同轴线而言,当频率低于 20GHz 时,就能实现单模传输。在测试时,我们应保证同轴线工作在单模传输模式下(TEM 模),只有这样,我们对 TEM 波的分析结果才能够直接应用到同轴线的分析中。在单模即 TEM 模传输方式下,其横截面上的电磁场可以对应单值的电压波和电流波,因此我们可以用经典的“路”的概念来对其进行分析,并对上面所提到的几个问题用一些简单明了的参数进行衡量。下面我们就给出有关同轴线的一些常用参数定义。

### (1) 插入损耗

所谓插损,直观上说就是信号经过传输线(更广泛的说是任意网络,通常是无源网络)后所损失掉的能量。同轴线信号传输的能量损耗主要来自两个方面:一个是金属导体上的损耗,即欧姆损耗。它的产生主要是由于金属具有有限电导率;另外一个为介质损耗,有两个原因能够引起介质损耗。一个是介质的导电率不为零,从而使传播常数变成复数,在电磁波的场解中引入了衰减因子。另外一个原因是,在频率很高的情况下,由于种种原因介质中的极化跟不上外加高频电场的变化,因而极化强度  $P$  的变化在相位上总是落后于电场强度  $E$ 。由于二者之间存在相位差,从而使相对介电常数及传播常数变为复数,同样也在电磁波的场解中引入了衰减因子。

用绝对的损耗值对传输损耗进行衡量显然是没有普遍意义的,因此工程上定义同轴电

缆的插入损耗为

$$\text{插损}(1L) = 20 \text{Log} |T| \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

其中 T 为传输系数,其定义为

$$T = \frac{V_2}{V_1} = |T| \angle \theta, \quad \theta \text{ 即相移} \quad (2)$$

$V_1$  和  $V_2$  分别为同轴电缆输入端和输出端的电压值。

在分析同轴电缆的损耗时,我们还常常使用衰减系数  $\alpha$  衡量传输损耗。

衰减系数  $\alpha$  来源于有耗系统中传播的电磁波的解:

$$E = E_m e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3)$$

$$H = H_m e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4)$$

可见,  $\alpha$  表征了电磁波在单位距离上的衰减量。同轴线中 TEM 波的衰减系数为

$$\alpha = \frac{R_s}{120\pi D} \frac{1 + \left(\frac{D}{d}\right)}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (5)$$

其中,  $D$  为外导体内直径,  $d$  为内导体外直径。  $R_s$  是同轴线金属的表面电阻,它决定于导体的磁导率  $\mu$ , 电导率  $\sigma$  和电磁波的频率  $f$ 。

## (2) 特性阻抗

在射频基础课程的学习中,大家对传输线特性阻抗的定义都是十分熟悉的。由于在单模传输方式下,同轴线上载行的是 TEM 波,所以可以用“路”的方法进行分析,所以对同轴线的特性阻抗的定义与普通的传输线的特性阻抗的定义是一致的,即入射“电压”与入射“电流”的比值。这里有一点应值得注意,就是虽然特性阻抗的定义涉及到了其上所载行的电压波和电流波,但它实际上是不依赖于电压波或是电流波的,它只与传输线本身的特征,如截面形状、尺寸及周围介质有关,是一个用于表征传输线固有特性的参数,这也是“特性”二字的由来。同轴线的特性阻抗的表达式为

$$Z_0 = \frac{60 \sqrt{\mu_r} \ln \frac{b}{a}}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{138 \sqrt{\mu_r} \lg \frac{b}{a}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

其中,  $b$  为同轴线外导体的内半径,  $a$  为内导体的外半径。

在电视发射和接收系统中使用的是特性阻抗为  $75\Omega$  的同轴电缆,而在其他工程应用中常使用特性阻抗为  $50\Omega$  的同轴电缆。

## (3) 相对介电常数 $\epsilon_r$

这里所说的相对介电常数  $\epsilon_r$  是指同轴线内外导体间介质的相对介电常数。如果我们知道了  $\epsilon_r$  和电缆的特性阻抗,我们就能够确定电缆的物理结构;反之如果我们知道了  $\epsilon_r$  和同轴线的物理结构,就能够确定同轴线的特性阻抗,见式(6)。

## (4) 回损测试

回损是用来衡量系统对输入信号能量反射强弱的一个物理量。它的定义式如下:

$$\text{回损 } R.L. = 20 \text{Log} |\Gamma| \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

其中  $\Gamma$  为反射系数,其定义式为

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (8)$$

式中  $Z_L$  为负载阻抗,  $Z_0$  为同轴线的特性阻抗。由于反射系数是反射电压与入射电压的比值, 所以回损是一个相对量。

## 2 试验原理及步骤

阅读 PNA3620 网络分析仪说明书

### (1) 同轴线的插损测试

a. 在主菜单下按[↓]键, 将光标移到《测: ××》下, 按[→]键使显示器出现《测: 插损》字样;

b. 将输出插口与输入插口 T 用两根电缆通过双阴对接起来, 见下图:

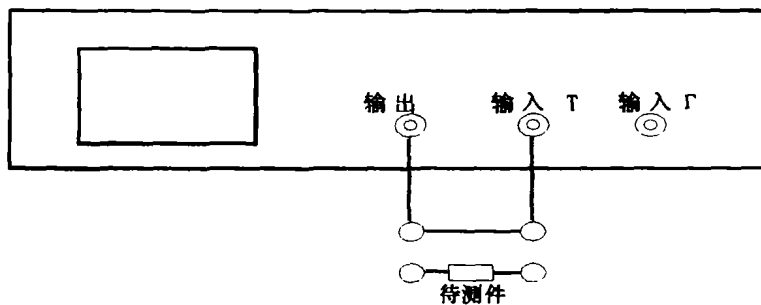


图 2 用 PNA 网络分析仪测试插损连接图

c. 按[↓]键使光标停在《校: 直通》下, 按[执行]键, 此时为直通状态, 即校最大值, 仪器会直接转入测试, 此时画面应为方格坐标, 测试值为 0dB;

d. 将待测件连接到两电缆之间, 即可进行测试;

e. 插损量程有四档, 可按[↓]键来选择, 最小一档为 0~2.5dB, 最大值可测 80dB。

注: 为减少漂移影响, 测小插损时应在校直通后立即测试, 随校随测。

### (2) 回损测试

由于回损这个概念本身涉及到同轴线后端的负载, 所以在测回损时应指明同轴线后端的负载情况。在本试验中, 我们采用匹配负载(50Ω)。

a. 按图 3 连接, 此时电桥测试端口应为开路;

b. 显示器主菜单上应为《测: 回损》, 若不是请利用[↓]和[→]键使出现《测: 回损》字样;

c. 按[↓]键使光标停在《校: 开路》下, 再按[执行]键, 此时显示器右下角频率在变动, 直到最后画面转成 50dB 回损方格坐标, 测试值在 0dB 线上;

d. 在测试端口接上被测件, 即可进行测试。

### (3) 特性阻抗测试

同轴线的特性阻抗不能通过直接测量得到, 这里有一种简单而巧妙的方法:

a. 首先测出同轴线终端开路时输入阻抗  $Z_0$ ;

b. 测出同轴线终端短路时输入阻抗  $Z_S$ ;

c. 利用下面的计算式计算出同轴线的特性阻抗。

$$Z_0 = \sqrt{Z_0 \cdot Z_S} \quad (9)$$

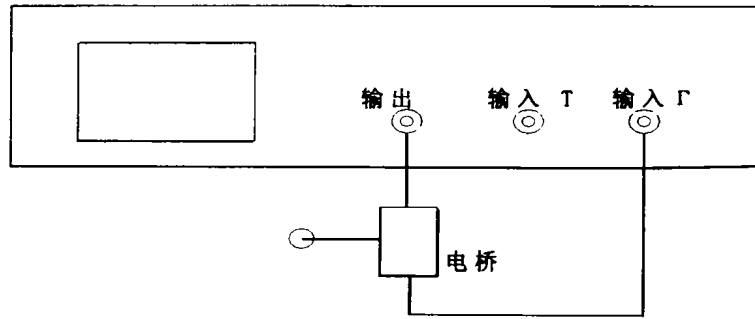


图3 用PNA测试回损连接图

那么这种简单的方法的原理是什么呢?

我们知道,传输线的输入阻抗公式为

$$Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg}\beta l}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg}\beta l} \quad (10)$$

可知当终端开路时,  $Z_L = \infty$ , 同轴线的输入阻抗为

$$Z_0 = -jZ_0 \operatorname{ctg}\beta l \quad (11)$$

当同轴线终端短路时,  $Z_L = 0$ , 其输入阻抗为

$$Z_S = jZ_0 \operatorname{tg}\beta l \quad (12)$$

因此,有

$$Z_0 \cdot Z_S = (-jZ_0 \operatorname{ctg}\beta l) \times (jZ_0 \operatorname{tg}\beta l) = Z_0^2 \quad (13)$$

即

$$Z_0 = \sqrt{Z_0 \cdot Z_S} \quad (14)$$

在进行同轴线的阻抗测量时,应按下面的步骤进行:

a. 在测回损后,按[暂停]键,屏幕出现暂停菜单,此时将光标移到《短路》下,在电桥测试端口接上短路器,然后按[执行]键,画面转成阻抗圆图,光标在零点闪动,拔掉短路器,光标在 $\infty$ 点闪动。

b. 接上待测负载,即可用圆图观察变化趋势,具体数值见闪点参数,不同频率点的数据可用按[→]或[←]键来得到,用75Ω桥时,测出的阻抗要乘以1.5倍。

c. 圆图有四档可按[↓]来选择。

#### (4)测介电常数

介电常数也不能通过直接测量得到,一种较为简单的方法是:

a. 首先选定某一频率  $f_0$  作为测试频率。这里值得注意的是,在选择频率时,一定要使激励源的信号波长大于待测同轴电缆物理长度的3倍。我们知道,阻抗圆图的一周对应的是1/2个相波长,如果传播信号的相波长小于电缆电长度的2倍,那么在测试时将出现终端位置“模糊”问题(相差半波长的整数倍),考虑到电缆的电长度要比其实际的物理长度长一些,所以,为避免在测试时出现终端位置模糊问题,所选取的信号波长应该是同轴电缆物理长度的3倍以上。

b. 将待测同轴线连接到网络分析仪上,使其终端开路,观察  $f_0$  频率点上同轴电缆输入阻抗在圆图上的位置,记下这个位置P。根据位置P,计算出该同轴电缆所代表的相波长,

记为  $\lambda_p$ 。

c. 应用下面的公式计算该同轴电缆的相对介电常数

$$\epsilon = \left( \frac{c}{f\lambda_p} \right)^2 \quad (15)$$

下面我们对上面的方法给予解释:

我们知道,同轴电缆中 TEM 模相速  $v_p$ (也是群速)为

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (16)$$

再考虑到  $v_p = f\lambda_p$ ,  $c =$  光速,故可得到式(15)。

## 4 测试结果及分析

试验的目的是提高工程技术人员的实践能力,为理论研究服务,并为其开辟新的方向。每作完一次试验,能否对试验结果作出合理的解释是十分重要的。如果你所做的试验,其相关的理论基础已经成熟,那么就要求你的试验结果能够被这些理论所解释,从而不断提高技术人员的理论水平和实践能力。为了提高试验效率和效果,一种较为简单实用的辅助方法是根据待测物的不同,通过查手册和相关资料,首先估算出要测量的参数可能取值的大概范围。

针对该试验,在这里我们给出上面列出的同轴线各参数取值的一个大概范围,供读者参考:

- a. 插入损耗:插入损耗的大小与同轴电缆的型号及频率有关,一般来讲对给定型号的同轴线,频率高时其损耗也大。对长为 5m 的 SYV-50-2-2 型同轴线,当频率升到 480MHz 以上时,其每米插入损耗达到 3dB。同轴电缆一般有两种形式,一种是在外导体和内导体间填满某种介质;另外一种是在内外导体间以固定的距离间隔插入支撑片,这样相当于导体间的“填充”介质接近空气状态。由于存在介质损耗,故前者总的损耗要大于后一种类型的电缆。
- b. 回损测试:在端接匹配负载的情况下,同轴线的回损是非常小的。5mSYV-50-2-2 型同轴线,端接匹配负载时,在 100~800MHz 范围内,其回损基本在 20dB 以上(这里有一点应该注意,即反射 dB 数越大,回损值应该越小,反之其回损值越大)。
- c. 特性阻抗:我们采用的是 SYV-50-2-2 型同轴线,其特性阻抗为 50Ω,所以测试值应在 50Ω 附近。
- d. 介电常数:前面我们提到过,同轴电缆一般有两种形式,一种是在外导体和内导体间填充损耗较小的介质;另外一种是在内外导体间以固定的距离间隔插入支撑片,这样相当于导体间的“填充”介质是空气,这种类型的电缆属于低损耗电缆,其造价较高。我们所测试的同轴电缆属于前一种,其中填充的介质为聚乙烯,其相对介电常数一般在 2.2~2.8 之间。

## 5 思考题

- (1) 在工作组网络中,我常常使用同轴线作为数据传输线。拿快速以太网为例,其上

的数据传输速率为 100Mbps, 试用  $50\Omega$  同轴电缆的测试结果说明, 同轴电缆的确能够满足该速率下的数据传输要求。如果我们要求在 100Mbps 的数据传输率下传输的损耗小于 3dB, 试根据试验结果估算网络的最大连接距离。

(2) 试分析在保证单模传输和损耗最小的前提下, 如何选择同轴线的尺寸。

## 附录: 国产同轴电缆型号说明

例: SYV-50-2-2

S-表示同轴射频电缆

Y-表示聚乙烯绝缘

V-表示聚氯乙烯护套

50-表示特性阻抗为  $50\Omega$

2-表示芯线绝缘外径

2~表示结构序号为 2

### 参 考 文 献

- 1 (美). R. E 柯林. 微波工程基础
- 2 吕善伟. 微波工程基础. 北京航空学院
- 3 吕善伟. 卫星电视接收站天馈线实用基础. 北京航空学院
- 4 南京普纳科技设备有限公司. PNA3620 系列 网络分析仪说明书