

# 适用于矢量网络分析仪的一种 简易高效的波导校准方法

**摘 要:** 本文提出了矢量网络分析仪波导元件的校准方法和简单的步骤。

**关键词:** 矢量网络分析仪 波导校准 测量

为测量波导电路的散射参数无需昂贵的成套标准波导元件即可校准现代的矢量网络分析仪(VNA)。通过使用指标较低的滑动匹配负载能够确定低反射负载的特性,因而可把它用作标准电路。类似地,可以把 VNA 作为发射/接收机测量基准电路的几何参数从而确定一个标准的开路。

通常,在使用矢量网络分析仪(VNA)之前需要用一套包括短路、开路和匹配负载等三种标准电路对其进行校准。随主机配套的附件常为一套同轴元件。

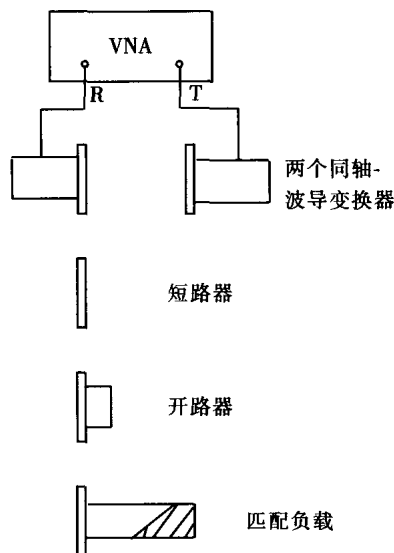


图 1 使用短路器、开路器和匹配负载校准件的传统 VNA 校准方法。

图 1 中所示的一套分离的配套元件是 VNA 进行波导电路复数散射参数测量时所需要的。这些配套元件可以从许多制造厂取得;然而,它们是昂贵的,即使在微波工程方面具有某些技术基础的任何用户能够制做这些元件也是如此。本文的目的在于探讨 VNA 用户怎样才能建立一套低成本的标准波导配套元件并符合给定的频率范围。本处避免使用任何复杂的方法,诸如那些已经提出的适用于很宽频带 VNA 使用的传输线-反射-匹配(line-reflect-match)或传输线-反射-反射-匹配(line-reflect-reflect-match)。

## 问题的提出

考虑采用 HP8714B 型矢量网络分析仪的普通用户。这种矢量网络分析仪是一种廉价的仪器,工作频率范围为 300kHz-3GHz。它通常配备标准的 N 型同轴元件。此处假定用户在 2.4 和 2.5GHz 之间测量 WR112/V 型波导中的阻抗和散射参数。这是工业、科学和医学(ISM)频段,在这个频段中大多数微波功率工业装置都是用于进行材料的处理。

制做一对同轴波导的变换是很容易的。在文献中已有许多此种变换设计的阐述。在波导中插入渐变的吸收材料制成波导匹配负载也是不难的。短路器可以用一块金属板盖住法兰盘制做,而开路则用可转  $\lambda_g/4$  距离的短路来完成。

这些元件都可以用于校准 VNA。如果波导的法兰盘在机械上加工精细而且焊接良好,则意味在 2400 和 2500MHz 之间短路和开路没有损耗。然而,开路在 2.4 和 2.5GHz 之间是不理想的,因为它的相位、阻抗和复数反射系数是频率和波导内尺寸以及长度 D 的函数。为了在 VNA 的校准中作为标准元件使用必须确定开路的特性。

## 开 路

开路的反射系数取决于频率,如:

$$P^0 = -\exp -j4\pi \frac{D}{C} \sqrt{\omega^2 - \omega_c^2}$$

其中

$C$  = 真空中的光速 (299,792.5km/s)

假如 D 和波导截止频率  $\omega_c$  恰好是已知的,则可以把确定开路的系数  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  的值当作电容量对  $\omega$  的 Mac Laurin 级数计算:

$$C_0 + C_1 \omega + C_2 \omega^2 + C_3 \omega^3 = \frac{-0.02}{\omega \tan \left[ 2\pi \frac{D}{C} \sqrt{\omega^2 - \omega_c^2} \right]}$$

在 VNA 用户指南中推荐并阐述了这种校准。因而,根据假定所建立的匹配负载具有低的反射系数,就可以像使用标准的同轴配套元件一样使用这三种波导元件校准 VNA。同轴-波导变换器的特性不需要已知;它

们的缺陷已包含在校准之中。

改进方法

用改进标准元件技术指标的方法可以提高 VNA 的测量精度。

重新规定匹配负载的指标

假定已将匹配负载插入波导。它的复数反射系数将会以环形在史密斯原图上描绘出来。其半径是可移动负载的反射幅度；环形的中心原是校准 VNA 的匹配负载的残余反射系数。图 2 示出构造的滑动负载，它们由支持锥形的橡胶部件（一种廉价的、有损耗的材料）的塑料滑座等组成。用尼龙螺杆在波导内拉动滑座。图 3 表示在史密斯原图上形成的环。匹配负载的残余反射系数  $|P^0|$  为  $P_M^0 = 5 \cdot 10^{-3} \exp -j42^\circ$ 。数据图表也证明了可测出高精度的低反射系数，因为围绕  $|P^0|$  的低数值的刻度已被放大，即使 VNA 还未校准。最终的  $P_M^0$  可以使匹配负载作为标准的匹配负载对 VNA 进行重新校准。

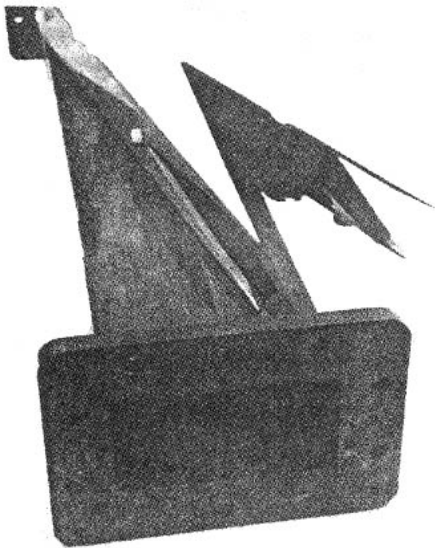


图 2 滑动匹配负载

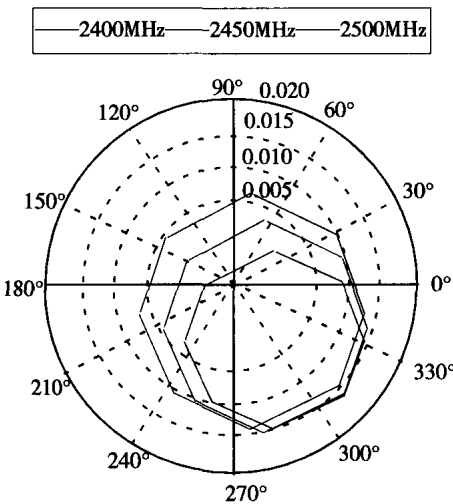


图 3 滑动匹配负载作为位移函数的图表。

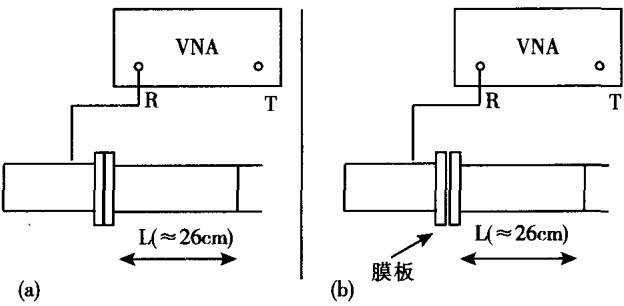


图 4 VNA 测量(a)用波导长度 L 部件和(b)用长度为 L 的谐振空腔以重新确定开路。

重新确定开路

提高  $C_1$  参数的精度来确定开路也是可能的。在 RG112/V 波导部件中将匹配负载滑座预先滑动到接近距离法兰盘为 L(260cm) 处，如图 4 所示。可以用 VNA 在不同的频率测量这个电路的反射。

在法兰盘之间插入一张金属薄片（具有隙缝）将波导部件变成矩形的空腔。使用 VNA，可以测出空腔的谐振频率即使 VNA 还没有完全校准。用  $\omega_m (\omega_{r2}, \omega_{r3}, \omega_{r4})$  表示  $TE_{10n} (TE_{102}, TE_{103}, TE_{104})$  模的谐振频率。通过二次或三次测量可以精确地获得  $TE_{10}$  传播模式的截止频率（它用波导管尺寸、a 来表示）和电路的长度 L。公式为：

$$\omega_m^2 = \omega_c^2 + \left(\frac{C}{2}\right)^2 \left[\frac{n}{L}\right]^2$$

根据最佳值  $\omega_c$  和 L 可以计算出以前曾在频域测得相位 ( $\arg^\circ \rho^\circ$ )。因此，可比较实验值和计算值。 $\omega_c$  和 L 的数值可以获得  $\pm 10^{-4}$  的精度，而在测量值和计算值之间相位差值仅为  $\pm 0.5^\circ$ 。从而可以确定  $C_1(\omega)$  的精确表并用以重新校准 VNA。

开路的  $C_1(\omega)$  的确定与任何几何测量无关，而是仅取决于频率的测量。将 VNA 用作发射/接收机以表示选择的第二种参考电路。当然这个方法可以按不同的 L 值和不同的频率重复进行。当然，该方法也可以看作是一种可变的短路校准方法。假如开路是宽频带的，或者配备另外的波导元件，此方法能在宽频带领域工作。

作为决定性的优点，这种自身含有的方法除了 VNA 本身以外不需要其他设备。这种方法除了提供参考电路的 VNA 校准外，它应该适用于定向耦合器的测量或者用于工业材料的介电常数测量等许多情况。

结束语

本文提出了一种 VNA 波导校准方法。虽然程序并不是特别新鲜的，它却是非常精确的而且仅仅需要一些简单又廉价的波导元件。

(李鼎新)

## 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>