

# 一种使用矢量网络分析仪的阻抗测量改进方法

赵才军, 蒋全兴, 何 鹏, 邬昌峰

(东南大学电磁兼容研究室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 基于反射法理论提出了一种使用矢量网络分析仪测量集总参数元件阻抗的方法, 引入阻抗匹配电路, 拓宽了矢量网络分析仪的阻抗测量范围。通过对匹配电路二端口网络模型中参量  $A$  的分析, 给出相应的被测元件的阻抗计算式, 消除了夹具对测量结果的影响。采用矢量网络分析仪直接测量法和该阻抗测量法分别测量了 5 种不同阻值的金属膜电阻, 结果表明, 该阻抗测量方法的测量精度高于矢量网络分析仪直接测量的精度, 可在 30 kHz ~ 100 MHz 频率范围内实现几欧至千欧阻抗的精确测量。

**关键词:** 计量学; 阻抗测量; 反射法; 矢量网络分析仪; 阻抗匹配电路

**中图分类号:** TB973

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1158(2010)02-0160-05

## An Improved Method for the Measurement of Impedance with a Vector Network Analyzer

ZHAO Cai-jun, JIANG Quan-xing, HE Peng, WU Chang-feng

(EMC Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** Based on the reflection method theory, a method to measure impedance of lumped elements using a vector network analyzer (VNA) is presented. An impedance matching circuit is introduced to extend the impedance measurement range of VNA. The mathematic expression for calculating the impedance of a device under test (DUT) is obtained by analyzing 'A' parameter of two-port network model in the circuit, and the influence from the jig is eliminated. Five types of metal film resistors, which are classified by their resistance, are tested by both direct measurement using a VNA and the method presented. The results show that this method has higher accuracy than the direct measurement method and can accurately determine the impedance from several ohms to thousand ohms in the frequency range of 30 kHz to 100 MHz.

**Key words:** Metrology; Impedance measurement; Reflection method; Vector network analyzer; Impedance matching circuit

## 1 引 言

设计电路时, 需要根据实际情况选用元件(如电阻、电容、电感等)。虽然生产商给出了某一类元件参数的标称值和偏差, 而元件参数的准确值仍然需要使用仪表测量才可以得知。此外, 由于寄生参数的影响任何实际元件均呈现复数阻抗特性, 且元件在使用时呈现的阻抗特性与使用频率有关, 如在

高频时, 电容器可能呈现感抗特性, 而电感线圈则可能呈现容抗特性。因此, 在电路设计和元器件选用时, 必须精确测定元件随频率变化的复阻抗值。

在 MHz 频率以下使用时, 实际元件可看作集总参数元件, 即为理想电阻、理想电容和理想电感的串并联电路。集总参数元件复阻抗的测量方法通常有伏安法、电桥法和谐振回路法等<sup>[1]</sup>。伏安法操作简单、计算方便, 但准确度较差。电桥法和谐振回路法的共同缺点是操作繁琐、测量速度慢、自动化程度

收稿日期: 2008-06-11; 修回日期: 2009-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(50277007)

作者简介: 赵才军(1980-), 男, 安徽和县人, 东南大学博士研究生, 研究方向为电磁兼容技术和材料电磁参数测试技术。zhaocaijunzl@yahoo.com.cn

低。近几年出现了阻抗测量的专用仪器<sup>[2,3]</sup>,能够在较宽的动态范围内实现较为精确的阻抗测量,但该仪器功能单一、价格昂贵。将实际元件看作单端口网络,则可借助通用的多功能仪器——矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)测量该网络的反射系数,根据反射系数与单端口输入阻抗的关系来计算元件的复阻抗值。然而 VNA 仅能保证其特性阻抗附近的阻抗测量精度<sup>[4]</sup>,其阻抗测量范围较窄、实用性较低。本文在 VNA 阻抗测量功能的基础上,通过阻抗匹配技术拓展了 VNA 的阻抗测量范围,使 VNA 在 30 kHz ~ 100 MHz 频率范围内可以测量几欧至几千欧的集总参数元件的复阻抗值,并利用计算机构建复阻抗自动化测量系统。

## 2 阻抗测量原理

### 2.1 VNA 直接测量原理

矢量网络分析仪(VNA)根据所测量的反射系数计算得到被测元件(DUT)阻抗。如图1所示的被测元件可看作单端口网络,则 VNA 测得的反射系数  $\Gamma$  可由下式决定

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

式中,  $Z_L$  为被测元件复阻抗;  $Z_0$  为网络分析仪特性阻抗。

由式(1)可以得到被测元件的阻抗计算式

$$Z_L = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \cdot Z_0 \quad (2)$$

这种通过测量反射系数计算被测元件阻抗的间接方法对于接近测量系统特性阻抗(一般为 50  $\Omega$  或 75  $\Omega$ )的阻抗值是精确的,但对于偏离系统特性阻抗的阻抗值则不太精确<sup>[4]</sup>。实际测得的反射系数的微小误差就可能导致计算得到的被测元件的阻抗值与真实值相比有较大的偏差,如对于 2 k $\Omega$  的阻抗测量,1% 的反射系数误差会导致 24% 的阻抗误差<sup>[5]</sup>。

### 2.2 使用匹配电路测量原理

鉴于 VNA 直接测量阻抗的特点,为了提高测量精度、拓宽可测范围,本文根据阻抗匹配原理<sup>[6]</sup>设计了阻抗匹配电路,使 VNA 测量端口的输入阻抗尽可能接近 VNA 的特性阻抗。阻抗匹配电路模块串联在矢量网络分析仪的测量端口与被测元件之间,见图2。

此时, VNA 的测量端口负载为

$$Z'_L = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_L}{Z_2 + Z_L} \quad (3)$$

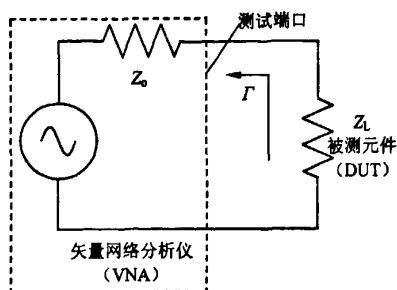


图1 矢量网络分析仪测量阻抗原理图

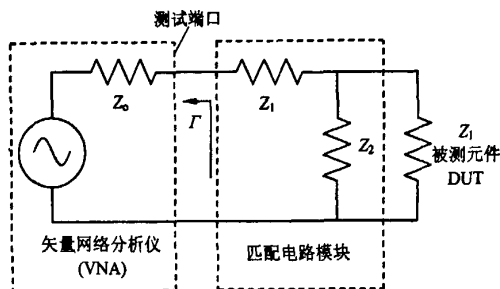


图2 匹配电路示意图

将式(1)中的  $Z_L$  替换为式(3)的  $Z'_L$ , 则 VNA 测得的反射系数为

$$\Gamma = \frac{Z'_L - Z_0}{Z'_L + Z_0} \quad (4)$$

式(3)和式(4)联立求解,可得被测元件的阻抗

$$Z_L = \frac{[(1 + \Gamma) \cdot Z_0 - (1 - \Gamma) \cdot Z_1] \cdot Z_2}{(1 - \Gamma) \cdot (Z_1 + Z_2) - (1 + \Gamma) \cdot Z_0} \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5)可知,理论上通过选择合适的  $Z_1$  和  $Z_2$ ,可以保证 VNA 测量端口负载的模  $|Z'_L|$  在其特性阻抗附近,从而使利用 VNA 精确测量在较宽范围内变化的元件的复阻抗成为可能,而与元件的阻抗类型和大小无关。

## 3 夹具设计

为了验证上述测量方法的可行性,设计制作了图3所示的阻抗测量夹具。其中,电阻  $R_1$ 、 $R_2$  采用 1% 精度的高精密金属膜电阻,以保证测量夹具具有稳定的高频性能,  $R_1$  和  $R_2$  的标称值分别为 47  $\Omega$  和 6.8  $\Omega$ 。电阻  $R_1$  的一端和 N 型 Female 同轴接头的外导体相连,另一端与电阻  $R_2$  的一端共同连接在被测元件的引线接入点 A 处。电阻  $R_2$  的另一端与同轴接头的内导体共同连接在被测元件引线的接入点 B 处。所有元件固定在支撑板上以保持结构的稳定性。

为了解夹具的电气特性,在夹具加工完成后,使用 HP8753ES (Agilent) 在 30 kHz ~ 200 MHz 范围内测量了夹具的驻波比,测量结果见图 4。由图可以看出夹具在 30 kHz ~ 100 MHz 频率范围内驻波比均小于 1.2,表明夹具在此频率范围内的阻抗匹配较好,反射小,电气特性稳定。

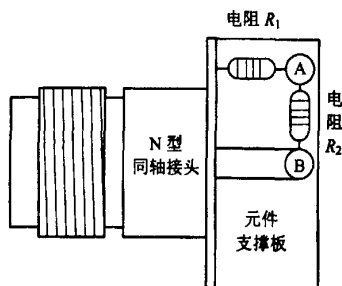


图 3 阻抗匹配测量夹具

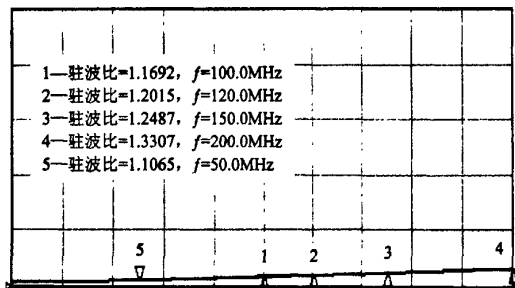


图 4 夹具驻波比测量曲线 (30 kHz ~ 200 MHz)

#### 4 阻抗的测量与计算方法

由第 2 节分析可知,若将式(5)中的  $Z_1$  和  $Z_2$  分别用图 3 中的  $R_1$  和  $R_2$  代入,理论上通过 VNA 测得的反射系数可以计算得到被测元件在 30 kHz ~ 100 MHz 频率范围内的复阻抗。然而,由于夹具电路中寄生参数等因素的影响,根据实际测得的反射系数是无法通过式(5)求出被测元件在误差允许范围内的复阻抗。用来消除夹具影响的等效电路模型<sup>[5,7]</sup>只是实际夹具在理论上的近似,并不能完全消除夹具的影响。因此,本文将夹具作为一个二端口网络考虑,通过特定的方法明确此二端口网络的端口电压电流特性。由于二端口网络端口的电压电流特性包含了整个夹具内部电磁参数的信息,因此无需考虑夹具的内部结构,可以从数学上完全消除夹具寄生参数的影响。

若将夹具上被测元件接入点 AB 端看作一个端口,则图 3 所示的夹具可以等效为一个二端口元件,

如图 5 所示。当使用 A 参数矩阵来表征该二端口元件,则夹具端口的电压电流关系可表示为

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

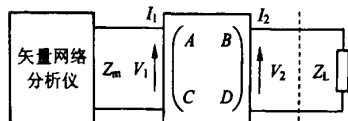


图 5 夹具等效二端口网络

将夹具 AB 端所接阻抗记为  $Z_L$ , 根据 VNA 测得的反射系数计算得到的阻抗记为  $Z_m$ , 则

$$Z_m = \frac{V_1}{I_1} = \frac{AV_2 + BI_2}{CV_2 + DI_2} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (7)$$

将式(7)变换可得

$$Z_L = \frac{DZ_m - B}{A - CZ_m} \quad (8)$$

式(8)中的 A、B、C、D 四个参数通过以下步骤获得:首先,将 VNA 测量端面通过其附带的校准元件校准至测量电缆末端,即夹具前端,如图 6 所示。其次,将夹具连接至测量电缆,在元件接入点 AB 处(参看图 3)分别为开路、短路及端接已知负载  $Z_{std}$  三种情况下测量夹具的输入阻抗,假设分别为  $Z_{open}$ 、 $Z_{short}$  和  $Z_{stdm}$ 。则由式(7)可得

$$\begin{aligned} Z_{open} &= \frac{A}{C} \\ Z_{short} &= \frac{B}{D} \\ Z_{stdm} &= \frac{AZ_{std} + B}{CZ_{std} + D} \end{aligned} \quad (9)$$

联合式(8)和式(9)可得

$$Z_L = \frac{Z_{stdm} - Z_{open}}{Z_{short} - Z_{stdm}} \cdot \frac{Z_m - Z_{stdm}}{Z_{open} - Z_m} \cdot Z_{std} \quad (10)$$

式(10)中所含参数均为已知或可测参数,因此,在无需了解夹具内部结构及其等效电路等信息的情况下即可实现阻抗测量。

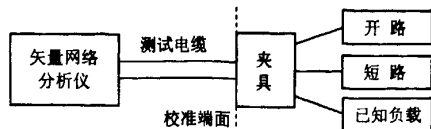


图 6 消除夹具影响的方法

## 5 实验验证

为了验证所提出方法的可行性及理论推导的正确性,本文建立了以 HP8753ES 为中心的集总参数元件复阻抗的自动化测量系统,见图 7。多种阻值的金属膜电阻元件(南京无线电十一厂 RJ16 金属膜电阻器)作为被测元件(DUT),分别采用 VNA 直接测量和使用夹具测量了元件复阻抗值以作对比。

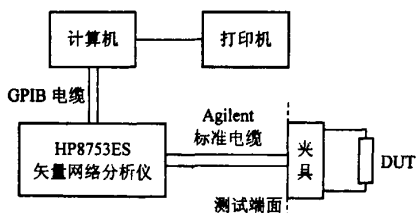


图7 集总参数元件复阻抗自动化测量系统

VNA 直接测量金属膜电阻之前,将电阻器的引线分别与 N 型 Female 同轴接头的内外导体焊接,焊接时保证电阻器紧贴在 N 型同轴接头的末端。测量时,将同轴接头连接在测量电缆的末端,同轴接头对测量结果的影响通过在计算程序中加入电长度补偿的方法去除<sup>[8]</sup>。采用式(2)计算直接测量得到的电阻器复阻抗值,其中反射系数  $\Gamma$  需要利用下式进行电长度补偿

$$\Gamma = \Gamma_m \exp(2\gamma_0 l) \quad (11)$$

式中,  $\Gamma_m$  为 VNA 直接测量得到的反射系数;  $\gamma_0 = j2\pi f/c$  为传播常数,  $f$  为频率,  $c$  为真空光速,  $j$  是虚数符号;  $l$  是 N 型同轴接头的物理长度。

利用夹具测量金属膜电阻之前,通过螺纹将夹具连接在测量电缆的末端,采用上述方法消除夹具影响:夹具 AB 端(参看图 3)空接时为开路状态,AB 端用最短铜导线(截面直径 2 mm)连接时为短路状态,AB 端用一已知阻抗的金属膜电阻(精度 1%,标称值为 47  $\Omega$ ,准确阻抗值用 HP8753ES 直接测量得到)连接时为端接已知负载状态。分别存储以上 3 种状态下 VNA 测得的复阻抗值以备测量电阻器阻抗使用。

特性阻抗为 50  $\Omega$  的 VNA 可以精确测量特性阻抗附近的阻抗值,因此首先测量了直流电阻  $R_{dc}$  为 47.1  $\Omega$ ,精度为 1% 的金属膜电阻器(含引线)以验证本文元件复阻抗测量方法的精度,实测元件复阻抗曲线如图 8 所示,电阻部分(复阻抗实部)  $\text{real}(Z)$  与直流电阻  $R_{dc}$  比较曲线如图 9 所示。

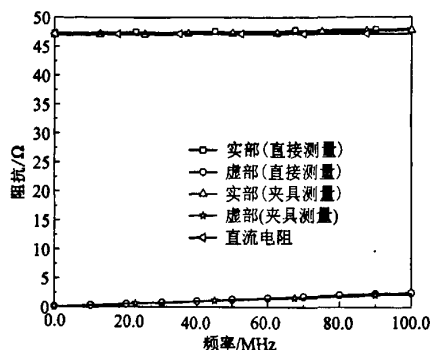


图8 金属膜电阻(直流 47.1  $\Omega$ )复阻抗测量曲线 (30 kHz ~ 100 MHz)

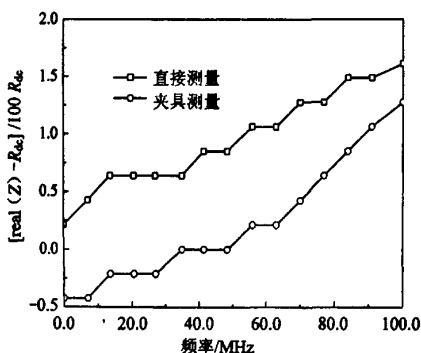


图9 金属膜电阻(直流 47.1  $\Omega$ )阻抗实部与直流阻值比较 (30 kHz ~ 100 MHz)

由图 8 可见,使用夹具测量得到的元件复阻抗值与 VNA 直接测量得到的复阻抗值在整个测量频率范围内具有很高的符合度。以电阻器直流电阻值作为参考,两种测量方法得到的复阻抗值在测量频率范围内相差不超过 0.85% (参看图 9)。此外,图 8 和图 9 同时表明金属膜电阻器可以在较高频率下使用,且在较宽的频率范围内具有较稳定的电气特性。金属膜电阻器的这个特点可以作为测量其它金属膜电阻器复阻抗的基础。

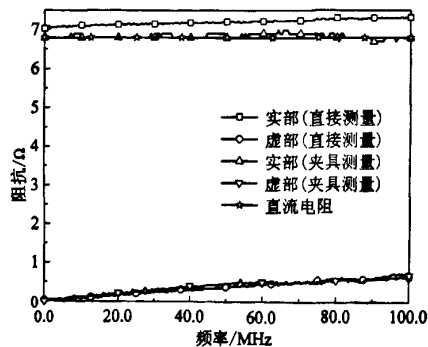


图10 金属膜电阻(直流 6.8  $\Omega$ )复阻抗测量曲线 (30 kHz ~ 100 MHz)

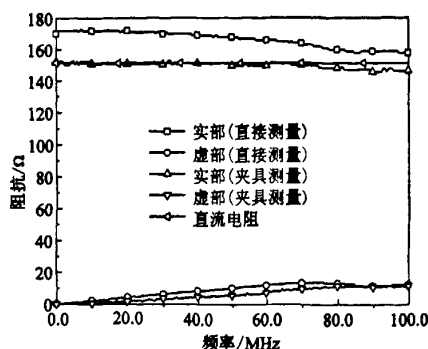


图 11 金属膜电阻(直流 151.4  $\Omega$ )复阻抗测量曲线  
(30 kHz ~ 100 MHz)

为了进一步对比本文方法与直接测量的精确度,另外测量了直流电阻值分别为 6.8  $\Omega$ 、151.4  $\Omega$ 、500.8  $\Omega$  及 1 000  $\Omega$  其它的金属膜电阻器,图 10、图 11 为直流电阻值 6.8  $\Omega$  和 151.4  $\Omega$  的金属膜电阻器复阻抗测量曲线。两种方法在不同测量频率(50 MHz、100 MHz)下的所有金属膜电阻器的测量结果的综合比较参看图 12。

从图 10 和图 11 可以发现,通过本文方法测量的阻抗实部与金属膜电阻器直流电阻值符合得较好,而 VNA 直接测量值与相应的直流电阻值相差则较大,但两种方法测得的复阻抗虚部的结果具有一致性,由此可以通过阻抗测量结果的实部来比较本文阻抗测量方法与使用 VNA 直接测量之间的差别。

图 12 给出了两种方法分别在两个频率下所测得的阻抗实部的综合比较。在 50 MHz 下,使用夹具测量的结果在整个阻抗范围内均具有很高的精度( $<0.05\%$ ),在 100 MHz 下,使用夹具测量的结果在 500  $\Omega$  以下仍然保持较高的精度,而直接测量的结果在两个频率下仅在 47.1  $\Omega$  附近才具有较高的精度。

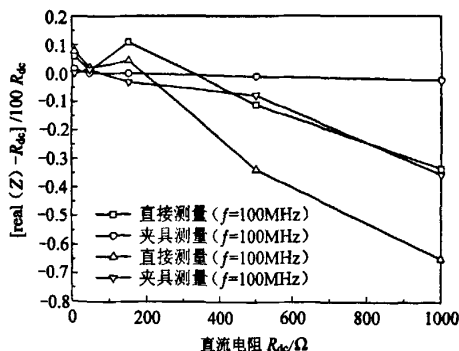


图 12 阻抗实部与直流阻值比较  
(50 MHz 和 100 MHz)

由此可得出如下结论:使用 VNA 直接测量,仅在其特性阻抗值(本文为 50  $\Omega$ )附近的被测元件的阻抗测量结果比较精确,但测量与其特性阻抗相差较大的阻抗值时则出现较大的测量误差,此结论与文献[5]的叙述相符;而使用本文的阻抗测量方法得到的元件复阻抗的测量结果表明该方法在较宽的阻抗范围内的测量精度均明显高于 VNA 直接测量时的精度。

## 6 小 结

在 VNA 测量端口与被测元件之间引入阻抗匹配电路,从理论上保证阻抗测量结果的精确性。针对实际匹配电路寄生参数带来的误差问题,通过开路、短路以及已知负载 3 种补偿方法确定包含匹配电路电气特性的参量 A,从而得到数学上消除了匹配电路夹具对测量结果的影响。实验采用两种方法测量了多种阻值的金属膜电阻,测量结果表明,本文方法在 30 kHz ~ 100 MHz 频率范围内的测量精度高于 VNA 直接测量时的精度,将 VNA 的可测阻抗范围从特性阻抗附近的较窄范围拓展至几欧姆至千欧姆的较宽范围,并且利用计算机等其它设备配合下可实现阻抗的自动化测量,而无需另外购买专门的阻抗测量仪器。

## [参 考 文 献]

- [1] 陈尚松,雷加,郭庆. 电子测量与仪器[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [2] Agilent Technologies Inc. Agilent LCR Meters, Impedance Analyzers and Test Fixtures [Z]. 2006.
- [3] Agilent Technologies Inc. Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer [Z]. 2005.
- [4] Agilent Technologies Inc. Agilent Advanced impedance measurement capability of the RF I-V method compared to the network analysis method [Z]. 2001.
- [5] 安捷伦科技有限公司. 能提供达 3 GHz 的可重复阻抗测量的分析仪[J]. 国外电子测量技术,2001,(2):39.
- [6] Jing S H, Jiang Q X. An Alternative Method to Determine the Initial Permeability of Ferrite Core Using Network Analyzer [J]. IEEE Trans on EMC, 2005, 47(3):651-657.
- [7] 陶峰,黄成,吴建辉. 射频阻抗测量夹具建模技术的研究及应用[J]. 电子器件. 2007,30(3):1075-1078.
- [8] Agilent Technologies Inc. Agilent De-embedding and Embedding S-Parameter Networks Using a Vector Network Analyzer [Z]. 2004.

## 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>