

矢量网络分析仪校准方法研究

Research on Calibration Methods of Vector Network Analyzers

全凌云（中国电子科技集团公司第四十一研究所，山东

青岛 266555）

Quan Ling-yun (The 4th Institute of CETC, Shandong Qingdao 266555)

摘要：文章简单介绍了矢量网络分析仪的工作原理和误差修正原理，研究了矢量网络分析仪的校准方法及其适用范围，并探讨了实际校准过程中需要注意的一些问题。

关键词：矢量网络分析仪；误差修正；双端口校准

中图分类号：TM935

文献标识码：A

文章编号：1003-0107(2010)03-0061-03

Abstract: The working principle and error correction principle are introduced briefly in the paper. Calibration methods of vector network analyzers and their applicability are studied. Some noteworthy questions during real calibration are discussed finally.

Key words: Vector Network Analyzer; Error Correction; Dual Ports Calibration

CLC number: TM935

Document code: A

Article ID: 1003-0107(2010)03-0061-03

1 引言

矢量网络分析仪是一种高性价比、高性能的智能化测量仪器，它将激励信号源、S参数测试微波电路和幅相接收机有机的结合起来，集中在一个机箱内，集成了现代微波技术、电子技术和计算机技术，使其测量速度、测量精度和智能化程度都达到了很高的水平。高效、强大的误差修正能力、优良的硬件设备，使矢量网络分析仪能够对微波网络参数进行全面、精确的测量。

矢量网络分析仪的测量误差可分为系统误差、随机误差和漂移误差。矢量网络分析仪校准是消除系统误差对被测件的影响从而提高精度的一种方法，即通过测量已知的标准件，利用测量结果来表征系统，以消除分析仪的系统误差。在实际测量过程中，正确实施校准，是保证矢量网络分析仪测量精度的前提。

2 矢量网络分析仪的工作原理

矢量网络分析仪主要用于测量器件和网络的反射特性和传输特性，它由合成信号源、S参数测试装置、幅相接收机及显示等四部分组成，其原理框图如图1所示。合成信号源产生扫频信号，此信号与幅相接收机中心频率实现同步扫描；S参数测试装置用于分离被测件的入射信号R、反射信号A和传输信号B；幅相接收机将射频信号转换成频率固定的中频信号。为了真实测量出被测网络的幅度特性、相位特性，要求在频率变换过程中，被测信号幅度信息和相位信息都不能丢失，因此必须采用系统锁相技术。显示部分将测量结果以各种形式显示出来。

3 矢量网络分析仪误差修正的基本原理

3.1 误差源和误差类型

矢量网络分析仪的测量误差可分为系统误差、随机误差

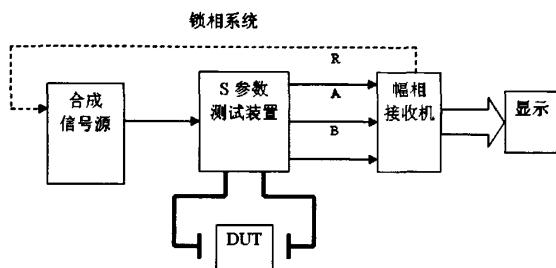


图 1 矢量网络分析仪原理框图

和漂移误差。系统误差是由于仪器的硬件电路性能指标不理想所引起。若这些误差不随时间而变，则它们可以通过校准来表征，且可以在测量过程中用数学处理方式予以消除。网络测量中所涉及的系统误差与信号泄漏、信号反射和频率响应有关。有六种类型的系统误差，即与信号泄漏有关的方向误差和串扰误差、与反射有关的源失配和负载阻抗失配误差、由测试接收机内部的反射和传输跟踪引起的频率响应误差。随机误差以随机方式随时间而变，因而它们不可预测，故不能通过校准来消除。造成随机误差的主要因素是仪表噪声（如取样器噪声和中频本底噪声）、开关重复性和连接器重复性。使用网络分析仪时，通过增大源功率、将中频带宽变窄或对迹线多次扫描取平均，可以有效降低噪声误差。矢量网络分析仪完成一次校准后，其测试性能还会随时间发生漂移，产生漂移误差。漂移误差主要是由温度变化引起的，可以通过辅助校准来消除。漂移的速率决定了需要进行辅助校准的频繁程度。精确控制环境温度，往往能将漂移误差减至最小，从而减少校准频次。

3.2 误差修正类型

误差修正有两种基本类型即响应（归一化）修正和矢量修正。

响应校准执行过程比较简单,但只能修正 12 种可能系统误差项中的少数几项(即反射和传输跟踪误差项)。响应校准是一种归一化的测量,参考迹线被储存至矢量网络分析仪的存储器,而所储存的迹线通过除法运算转会为供归一化用的测量数据。矢量误差修正正是消除系统误差的更彻底的方法。这类误差修正要求一个能测量相位和幅度的网络分析仪和一套已知其电气特性的校准标准。

矢量修正通过以下过程来消除各项系统误差:对已知校准件进行测量,将这些测量结果储存到矢量网络分析仪的存储器内,然后利用误差模型从后续测量中去除系统误差的影响。这个校准过程考虑了所有的主要系统误差源,可实现很高的测量精度。不过它比响应校准需要更多的测量标准和更多的测量步骤。矢量误差修正的两种主要形式是单端口校准和双端口校准(也叫全二端口校准)。

4 误差校准方法

4.1 校准件

对矢量网络分析仪校准之前首先要选好校准件。校准件即为标准件,其技术指标是可表征的且是已知的。常用的校准件有开路器、短路器、固定匹配负载、滑动匹配负载和精密空气线等。根据精密度的不同可将校准件分成经济型、标准级、精密级三个级别。经济型校准件主要有开路器、短路器和固定匹配负载;标准级校准件主要有开路器、短路器和滑动匹配负载;精密级校准件主要有开路器、短路器、低频固定负载和精密空气线。每一个校准件都有严格的数学定义,该数学定义通常存放在磁盘中供矢量网络分析仪调用。校准时应根据实际使用校准件的类型在矢量网络分析仪设置中进行相应的选择。

4.2 校准类型与适用范围

矢量网络分析仪常用的校准类型有:

- ①响应校准:仅修正传输跟踪或反射跟踪的一个误差项。
- ②响应与隔离校准:修正传输跟踪和串扰两个误差项。
- ③单端口校准:修正方向性、源匹配和反射跟踪三个误差项。
- ④双端口校准:修正正反两个方向的方向性、串扰、源匹配、负载匹配、反射和传输跟踪各六个误差项,总共 12 项误差。
- ⑤TRL* 校准:修正正反两个方向上的 8 个误差项。

应根据被测件所要求的精度等级选择合适的最快速的校准类型。不同的校准类型有不同的适用范围。不同校准类型适用的范围,如表 1 所示。

4.3 校准步骤

首先应根据被测件的测量需要选择不同的校准类型。如测量端口回波损耗或驻波比选择单端口校准;测量隔离度选择频响与隔离校准;测量器件的插入损耗采用响应校准;如果

表 1 不同校准类型适用的范围

校准类型	对应测量类型	去除误差	所需校准件
响应	对传输或反射测量精度要求不很高的情况下	反射跟踪或传输跟踪	传输采用直通、反射采用开路器或短路器
响应与隔离	高插损器件的传输测量或高回波损耗器件的反射测量,测量精度比单端口或全二端口校准差	在传输测量时传输跟踪 + 串扰或在反射测量时方向性	传输采用直通、反射采用开路器或短路器加负载
增强型响应	在对要求提高测量精度的传输或反射测量时,其精度比全二端口校准差	在反射测量时方向性、源匹配、反射跟踪和传输跟踪;在传输测量时传输跟踪和反射跟踪、源匹配、串扰	短路器、开路器、负载和直通
S ₁₁ 单端口	适应任何单端口器件或匹配好的双端口器件	方向性、源匹配、反射跟踪	短路器、开路器、负载
S ₂₂ 单端口	适应任何单端口器件或匹配好的双端口器件	方向性、源匹配、反射跟踪	短路器、开路器、负载
双端口	适应对双端口器件进行高精度的传输或反射测量	方向性、串扰、源匹配、负载匹配、反射跟踪、传输跟踪(正向和反向)	短路器、开路器、负载和直通(隔离时采用两个负载)
TRL*	适用于非同轴环境下的器件的传输或反射测量	方向性、串扰、反射跟踪和传输跟踪(正向和反向)	直通、反射、空气线或者是空气线、反射、匹配或者是直通、反射、匹配

既要测量器件的端口回波损耗又要测量插入损耗或端口增益就可采用双端口校准。下面以较为复杂的双端口校准为例介绍矢量网络分析仪的校准步骤:

步骤 1:根据被测件设置需要校准的频率范围。一般选择满足要求的最小的频率范围,这样可使波段转换数最少,加快校准速度,提高测量效率。

步骤 2:设置合适的测量点数。点数越少,每次扫描所用的时间越短。如想提高测量速度,可选择测量所需的最少点数。

步骤 3:设置合适的中频带宽。中频带宽越宽,测量速度越快,但会使示迹噪声更大、背景噪声更高。一般情况下,中频带宽减小 10 倍,背景噪声可降低 10dB。

步骤 4: 设置源功率。在一般的测试中,仪器默认的源功率即能满足要求。但在一些特殊的测试场合,需要对源输出功率作相应的调整。如测试电子开关的隔离度,一般要求测到-90dB 左右,此时就要采用不使被测件或矢量网络分析仪过载的最大源功率,以便提高矢量网络分析仪的动态范围。必要时打开平均功能,降低矢量网络分析仪背景噪声的影响,扩大动态范围。

步骤 5: 执行校准。在校准菜单中选择校准类型(有的还需选择校准件的型号),根据提示在矢量网络分析仪的两个端口依次连接开路器、短路器和负载,测量完成后把端口的校准件取下,把两个端口的电缆直接相连,进行直通校准,最后选择完成全二端口校准的软菜单键,全二端口校准就完成了。也可以先进行直通校准再进行开、短路和负载校准,关键是要保证所选的校准类型与端口实际连接的校准件一致,同时还要注意开路器、短路器和负载的阴头、阳头选择问题。有的仪器阴头、阳头选择时要根据端口来确定,如中国电子科技集团公司第 41 研究所生产的 AV3618、AV3620 等矢量网络分析仪,还有的是根据外接的校准件来确定,如 AV3629 和 AV3629A、AV3629D 等。

5 校准过程中常见问题的分析

5.1 设置不当所带来的问题

常见的现象是校准后的曲线测量速度很快但抖动较大,给读取测量值带来困难,尤其是在测量小插损部件时。此问题很可能是校准时忘记或忽略设置中频带宽所引起的。如果以开机默认的较大中频带宽(几 kHz~几十 kHz)进行校准,校准曲线抖动会比较大,给测量结果带来较大的读数误差。忘记设置中频带宽还有可能导致矢量网络分析仪动态范围不能满足测试要求的问题。此时要把中频带宽设置得足够小,例如 10Hz 甚至 5Hz 或 1Hz,再把端口输出功率设置为允许最大值,必要时打开平均功能,即可得到理想的动态范围,但测量速度会变慢。矢量网络分析仪的动态范围和测量速度是成反比的,实际测量过程中,需要综合考虑被测件的测量要求和矢量网络分析仪的指标,在动态范围和测量速度之间进行权衡取舍。如果被测件和矢量网络分析仪的指标差别很大,用较大的中频带宽和不加平均的情况下远远满足要求,此时就没必要牺牲速度来提高指标。但如果被测件的要求和矢量网络分析仪的指标差别不是很大,但还是有一定的余量,此时就可以把中频带宽的值适当的减小到需要的程度,把测量速度控制在一定的范围之内。如果被测件的要求和矢量网络分析仪的指标之间差别很小,此时就必须把中频带宽设置为足够小,同时打开平均功能,将端口输出功率提高到允许的最大值,以提高矢量网络分析仪的动态范围。

5.2 校准件、校准电缆的问题

如果矢量网络分析仪输出曲线是正常的,而校准后的曲线出现不正常,那么就极有可能是校准件或校准电缆出现问题所致。一般校准用的电缆都有两根,在校准的过程中如果总

是出现一个端口的曲线不正常或指标不好的现象,此时就要考虑是仪器本身的问题还是该端口的电缆或校准件有问题,不妨把两个端口的电缆互换一下,看校准后的曲线是不是受到影响,如果端口的曲线随端口电缆的互换而出现互换的现象,就说明与仪器无关,是电缆或校准件的问题,此时可把电缆取下,在仪器端口直接校准,如果校准后的曲线正常就说明校准件正常而是电缆有问题,也可以用一根电缆把两个端口连接起来进行直通响应校准,如果校准后的曲线正常说明该电缆没问题,换另外一根电缆用同样的方法检验,就可判断电缆的好坏。

如果怀疑校准件有问题,可以通过在端口直接加校准件进行单端口校准,把电缆的影响排除在外,从而确定校准件有没有问题。在连接或拆卸校准件时,正确的操作是要转动外螺套,内螺套不要转动,否则容易损坏校准件内导体,导致校准件的重复性不太好。

5.3 其它问题

5.3.1 连接问题

校准时连接电缆的松紧要适度,太紧太松都不合适,电缆的位置要放平,不要扭曲变形,连接时尽量用力矩扳手,保证每次连接的松紧程度比较一致,在连接校准件过程中要转动外螺套,不要转动内螺套,否则损坏校准件的同时也会给校准结果带来影响。

5.3.2 器件清洁问题

有时校准的曲线不理想是由于校准件或电缆内有污垢或灰尘所造成,定期清洁校准件和电缆的外螺纹和接头内部是很必要的。

5.3.3 人员问题

校准的好坏和人的因素也直接相关。相同的仪器、电缆和校准件,不同的人校准后的曲线不同,经验丰富的人员会得到更为理想的校准结果。在连接系统时用力要均匀,既不要拧的太紧损伤电缆和校准件,也不要拧的太松给校准带来较大的不确定度。另外,矢量网络分析仪的测试端口要特别注意防静电,防止带电操作。带电操作轻则容易造成测试端口灵敏度下降,重则直接烧毁测试端口的电子开关、取样器(混频器)或定向耦合器,造成不必要的损失。

6 结束语

本文从实际出发,根据被测件的指标要求,综合考虑矢量网络分析仪在校准过程中应注意的问题,选择合适的校准方法,以达到既能满足测量精度要求又能提高测量效率的目的。

参考文献:

- [1] Agilent Technologies Network Analyzers User's Guide[S].
- [2]《数字通信测量仪器》编写组.数字通信测量仪器[M].北京:人民邮电出版社,2007.

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(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量测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悉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悉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>