

# 矢量网络分析仪的误差修正

张文涛

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 山东 青岛 266555)

**【摘要】**矢量网络分析仪具有强大的测试功能,但由于硬件能做到的程度以及试用方法的不同,会给实际测量带来不确定的误差,本文主要从误差来源、校准方式、校准件类型讨论了如何取得最大测试准确度的问题。

**【关键词】**测量误差;误差修正;校准件

## 0 前言

矢量网络分析仪具有强大的测试功能,但是矢量网络分析仪的硬件不可能是完美无缺的,因此在使用过程中往往通过误差修正技术以补偿硬件的不完美,提高矢量网络分析仪的测量精度。

## 1 测量误差的来源

矢量网络分析仪的测量误差基本可以分为系统误差、随机误差和漂移误差三大类。

### 1.1 系统误差

系统误差,即由于被测件的不匹配和泄漏、测试通道和参考通道的隔离、系统频率响应造成的重复性误差,这些误差是可以通过校准消除的,校准后的指标反映了矢量网络分析仪的测量精度,主要由校准标准件的性能和所采用的误差修正模式决定。

### 1.2 随机误差

随机误差是不可重复的误差项,如测试信号源的相位噪声、测量过程中或校准过程中连接端口的测量重复性和开关重复性等都属于随机误差,在测试仪器中减小随机误差的最有效方法是对测试数据进行平均或平滑处理。

### 1.3 漂移误差

漂移误差包括频漂、温漂和测试装置校准和测量中的其他物理变化,测量稳定性主要来源于漂移误差,由矢量网络分析仪的初始指标、校准标准件的性能和误差修正模式决定。

## 2 矢量网络分析仪的误差修正

在实际测量中,系统误差是测量不确定性的最重要来源,系统误差能够被量化出来,因而能够被修正从而消除对测试结果的影响。为准确修正矢量网络分析仪的系统误差,把系统误差具体归为以下几类:方向性、源匹配、负载匹配、隔离和频率响应。

### 2.1 系统误差分类

#### 2.1.1 方向性

在分析仪中,定向耦合器的作用是从正向传输波中分离出反向波,它用来检测来自被测件的反射信号。理想情况下,定向耦合器能够完全地从入射信号中分离反射信号,只有反射信号出现在耦合输出端,然而实际的耦合器不可能是理想的,由于泄漏,少量的入射信号会出现在耦合输出端。衡量定向耦合器的性能指标就是方向性,由方向性引起的误差与测试装置的特性无关,对于反射较小的器件测量,方向性是主要的误差来源。

#### 2.1.2 源匹配

源匹配是由于测试装置和信号源之间以及转接器和电缆之间负载不匹配而出现在接收机输入端口的信号矢量和。在反射测量中,源匹配误差信号是由被测件反射的部分信号经信号源反射回被测件再由被测件反射的信号。在传输测量中,源匹配误差信号是由测试装置反射到信号源再由信号源反射回来的信号。源匹配愈大,误差愈小。由源匹配引起的误差取决于测试装置输入阻抗和信号源之间的匹配。测试端面的阻抗不匹配愈大,带来的误差愈大。

#### 2.1.3 负载匹配

负载匹配是由于测试端口的输出端不是理想匹配而造成的,即被测件的输出端口和分析仪的接收机端口的阻抗不匹配。一部分传输信号由接收机端口反射回被测件,反射信号一部分再次反射回接收机端口,一部分通过被测件作为反向信号进入源端口,如被测件插损小,则由接收机端口反射的信号和由源再次反射的信号会造成很大的误差。

负载匹配数值愈大,误差愈小。负载匹配带来的误差既影响传输测量也影响反射测量,误差的大小取决于被测件的输出端和接收机端口的阻抗匹配。

#### 2.1.4 隔离

如同方向性在反射测量中带来的误差,网络分析仪信号传输通道间的能量泄漏也给传输测量带来误差。隔离是由于参考和测试通道信号之间的干扰而出现在分析仪数字检波器处的信号的矢量和,包括测试装置内的信号泄漏和接收机的 RF 和 IF 部分的信号泄漏。

隔离带来的误差取决于被测件的特性。隔离会给高损传输测量带来误差,但对大多数测量来说,隔离影响是很小的,因而无须修正。

#### 2.1.5 频率响应

频率响应是所有测试装置的幅度和相位随频率变化而变化的矢量和。这些变化包括信号分离器件、测试电缆、转接器以及参考通道和测试通道之间的变化。频率响应包括传输响应和反射响应,既影响传输测量也影响反射测量。

如上所述,矢量网络分析仪的系统误差包括方向性、源匹配、负载匹配、隔离、传输跟踪和反射跟踪,每种误差又包括正向和反向两种,因此矢量网络分析仪共包括 12 种系统误差。系统误差的修正就是针对以上 12 项误差项进行去除误差。

### 2.2 误差修正技术分类

常用的误差修正包括响应校准、响应与隔离校准、单端口校准、TRL 校准和全二端口校准,其校准精度由低到高分别为:

响应校准:有效去除传输测量和反射测量中测试装置的频率响应误差。响应校准是最简单的一项校准,适用于对精度要求不是很高的测量。

响应和隔离校准:在传输测量中,有效去除频响和隔离误差;在反射测量中,能有效去除频率响应和方向性误差。适用于高损耗、匹配良好的器件的测量。

单端口校准:去除反射测量中的方向性、源匹配和频响误差。测单端口器件或接适当终端的双端口器件的反射参数时精度很高。

TRL 校准:修正双端口器件四个 S 参数。因为分析仪的硬件无法完全修正源匹配和负载匹配误差,因而精度较全二端口校准低。

全二端口校准:对双端口器件的传输和反射测量,能够修正正反向的方向性、源匹配、负载匹配、隔离和频响误差。给出最高的幅值和相位精度。

通常情况下校准精度越高,校准后系统越稳定。

## 3 矢量网络分析仪的校准件

用矢量网络分析仪测量被测件之前,首先要选择校准件和校准方法,校准件即为标准件,其技术指标是已知的且是可表征的,常用的校准标准有开路器、短路器、固定匹配负载、滑动匹配负载和精密空气线等。校准件根据测试精度不同分成三个级别,即:经济级校准件,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。每个标准都有严格的数学定义放在存储器中供矢量网络分析仪调用。

理想的开路器阻抗为无限大,对入射波全反射且反射系数的模值是 1 相位为零,理想的短路器阻抗为零,与开路器的特性相类似,所不同的是反射系数的相位为 180 度。实际上理想的开路器和短路器是不存在的,尤其是开路器,由于终端边缘电容的影响,其反射系数的相位偏离理想值,随着频率的升高相位偏移增大。

理想的匹配负载全部吸收入射波,且反射系数为(下转第 42 页)

采用理论弹道引导测控系统进行跟踪捕获目标,一旦跟上目标后,测控站向指控中心发送引导数据,指控中心实时应用软件对测量装备信息进行处理,用于引导其他装备跟踪捕获目标。雷达装备采用反射式方式跟踪目标,遥测装备对空间目标S频段的下行信号进行侦测,获取相应的无线电信号;如果满足光学装备跟踪条件时,可利用计算机引导跟踪目标。

### 2.2.5 实时处理

接受通信处理机CCP送来的输入包,对该输入包进行解码,解调出各测量装备的实时输入数据;并对输入数据进行时间检择,对通过检择的数据进行修正,如果该测量装备为雷达,则进行电波折射修正,如果该测量装备为光学装备,则进行光波折射修正;并根据数据优先级,选择合适的测量信息;如果该引导方案需要多台装备测量信息时,则需要进行时间对齐;对对齐后的信息进行平滑、滤波、坐标转换等处理形成各测量站的引导数据;将该数据进行反加工,形成输出信息,打包向通信处理机发送。

### 2.2.6 数据分析

数据分析主要是指利用动态联合空间目标的数据,对测控系统完成试验任务的能力进行评估、检验。采用的方法有两种:一种是实时数据分析;一种是事后数据分析。

## 3 空间目标动态联合跟踪的任务

通过对空间目标的研究发现,由于空间目标具有飞行距离远(200km~2000km),飞行速度快(4000m/s~8000m/s),其飞行特性与战略导弹相似的特点。因此,充分利用现有卫星资源并通过测控系统联合跟踪空间目标可以实现如下目的:

- 3.1 通过联合跟踪空间目标实施接近实战条件下的训练;
- 3.2 检验靶场各个测控装备和系统的综合参试性能以及检验任务准备情况;

(上接第81页)零,目前用作校准件的匹配负载一般能吸收入射波能量的98%以上,相当于回波损耗34dB。在校准件中,不论是固定还是滑动匹配负载非理想性引入的误差,均未采取补偿措施,定义标准的数据非常简单,即:反射系数 $\Gamma=0$ 。

精密空气线是最高阻抗标准,无介质支撑,内外导体的加工精度在5微米以下,可当作理想的空气线,其误差在千分之二左右。定义空气线的数据主要有空气线的延时,取决于空气线的物理尺寸及精度,传输系数为1,反射系数为零。

在测量校准时,根据分析仪的软菜单依次测量校准件的反射、传输和隔离特性,将校准件的实测数据作为已知条件,误差失配器的误差项为未知项,满足一组复杂的矢量方程,通过解方程组求出误差失配器的所有12项误差。不同的校准件和校准方法满足不同的方程组。校准件的精度决定了矢量网络分析仪的测试精度。

(上接第89页)深速度过快时便出现开裂。

### 4.3 工件表面拉毛

表面拉毛影响工件的表观质量,可能由于凹模圆角表面粗糙、不光滑,反拉深中严重影响工件的外形质量;其次,模具或板料表面不清洁,有脏物或砂粒,形成硬质点,在板料表面形成严重的磨粒磨损,划伤工件和模具表面,影响工件质量和降低模具寿命。一般在拉深前要清理模具和板料表面,为了提高模具表面的硬度,增强耐磨损性,对模具表面进行磷化、镀铬或氮化处理。另外,拉深时,模具与工件表面均有摩擦存在,应采取合理的润滑措施(如石墨、硫磺、黄油、塑料薄膜等)降低摩擦系数及其拉深力,在提高材料的极限变形程度的同时避免拉毛现象的产生,从而提高模具寿命和工件质量。

## 5 结论

宽凸缘圆筒形件在拉深时变形程度较大,内部金属流动复杂,很容易出现成形障碍,特别是多次拉深中,采用压边圈反拉深法能够有

- 3.3 检验中心计算机、测控装备计算机软件系统的可靠性、正确性,验证计算机引导方案的可行性;
- 3.4 实现对雷达、光学和遥测装备的动态测量精度检查;
- 3.5 采用雷达数据对遥测测角数据动态测量精度进行检查,验证遥测交会引导方案的正确性和可行性;
- 3.6 训练并提高测控装备操作手在接近实战条件下的高空捕获目标的能力;
- 3.7 研究利用跟踪空间目标增加对雷达、光测装备动态标校手段的方法;
- 3.8 检验雷达装备的目标特性跟踪情况,分析相关卫星的雷达散射特性;
- 3.9 建立符合靶场需要的空间目标数据库;

## 4 结束语

以上设想方案尚处于论证和试验阶段,还需要在今后的试验工作中进一步加以探索和证实。如果确实能够将空间目标资源充分应用于测控系统的联合跟踪训练当中,将会对参试测控装备和系统的性能检查(尤其是对装备的动态测量性能和精度的检查)以及对装备操作手捕获目标能力的训练上起到至关重要的作用。

### 【参考文献】

- [1]董子峰.信息化战争形态论.解放军出版社,2004年6月.
- [2]孙朝,顾鲁青.运用联合跟踪空间目标实现靶场测控系统仿真.海上靶场学术,2005年.
- [3]孙朝.军事装备信息化试验理论研究.国防工业出版社,2006年.

[责任编辑:张艳芳]

## 4 结束语

目前,矢量网络分析仪在军事、民用领域发挥着越来越强大作用,在使用矢量网络分析仪的过程中,为了提高测量精度和测量稳定性,应选用校准精度高的误差修正技术、性能高的校准标准件、初始指标高的矢量网络分析仪。

### 【参考文献】

- [1]李立功.现代电子测试技术.2008.
- [2]董树义.近代微波测量技术.1995.

[责任编辑:曹明明]

效减少起皱和开裂现象的发生。在模具试模中,采用合理的工艺条件是提高工件质量的有力保证。

### 【参考文献】

- [1]魏春雷.冲压工艺与模具设计[M].北京理工大学出版社,2007.
- [2]赵升吨,林军.筒形件液压拉深的研究现状及进展[J].锻压装备及制造技术,2008,6:13-17.
- [3]钟翔山.球壳正反拉深复合模设计[J].金属加工,2008,23:46-47.
- [4]朱正才.拉深件破裂起因探讨[J].锻压装备与制造技术,2008,5:71-73.
- [5]毛俊东,徐岩,等.润滑对板料胀形和拉深性能的影响[J].机械制造与自动化,2008,5:40-42.

作者简介:杨翀(1978—),男,硕士,从事压力容器、锅炉等设备的安全分析、无损检测及理论研究。

[责任编辑:张慧]

## 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>

