

传感器的测量方式,绝大部分不符合阿贝原则,测针越长阿贝误差越大。所以要尽量选择短的测针。接触式传感器的测针的制造,也需引入新材料、新工艺来提高测针的刚度和结构阻尼。

其次是要选择合适的摩擦速度。测量领域相对于制造领域,摩擦速度都偏低,所以测量领域的摩擦颤振容易被忽视,但是摩擦颤振一旦发生,对测量结果的影响是很大的。根据对表1和表2的数据进行综合分析,如果在转速6r/min发生了摩擦颤振,可以将转速从6r/min降到2r/min,接触式传感器系统的颤振会在不同程度上得到抑制。

最后是根据谐波响应分布情况,选择正确的滤波范围。如果选择了合适的测针、速度后,还是发生了颤振,就需要根据谐波响应的性质来选择正确的滤波范围。高次谐波响应有轮廓本身的谐波响应和颤振发生的谐波响应两种类型,需要通过多次实验区分响应类型。然后要选择正确的滤波范围。滤波范围有多种,比如1~50upr、1~150upr和1~500upr(upr为一个圆周轮廓每圈产生的周期波的个数)等,对滤波设置进行改变,能滤掉不同的波形。在图3的试验中,如果设定1~50upr滤波设置,就会把90次轮廓谐波响应(该响应是轮廓本身的有效谐波响应)错误地滤掉,所以应该选择1~500upr滤波设置,只滤掉812次谐波响应,而保留90次谐

波响应。选择正确的滤波范围的前提是区分谐波响应类型,然后根据谐波分布选择正确滤波范围。

### 3 结论

经过实验分析可知,接触式传感器的摩擦颤振,是本文所述的机加金属外圆柱零件的圆度测量结果大幅失真的原因;在滤除传感器摩擦颤振发生的谐波响应时,也要根据谐波响应的类型,选择正确滤波范围。

本文从测量的角度入手,分析抑制颤振的方法,对颤振的发生机理将是有益的验证和补充。在接触式传感器的设计与制造方面,应该提供更广的摩擦速度选择区间、更多的滤波范围组合方式、性能更好的测针等。在航空航天、船舶和机械等领域,研究测量、抑制摩擦颤振的前景是很广阔的。

#### 参考文献

- [1] 黄毅,王太勇,张莹,等. 机械系统中摩擦颤振机理的非线性分析. 中国机械工程, 2008(7)
- [2] 孔祥臻,王勇,蒋守勇,等. 基于Stribeck模型的摩擦颤振补偿. 机械工程学报, 2010(3)
- [3] 夏新涛,张青雷,李如强,等. 轴承套圈加工表面谐波分布特征研究. 磨床与磨削, 1997(4)
- [4] 朱庆保. 圆度误差的自适应测评及应用. 计量技术, 2000(4)
- [5] 张毅. 发动机柱形回转体谐波测量及分析. 计测技术, 2012(2)

## 基于矢量网络分析仪实现微波器件的群时延测量

卢娟 李智

(深圳市计量质量检测研究院,深圳 518055)

**摘要** 群时延是系统的重要指标之一,而群时延的测量一直是测量领域的难点和热点。本文采用PNA矢量网络分析仪测量微波器件的群时延,并结合实验,给出了测试结果和不确定度。

**关键词** 矢量网络分析仪;群时延;测量不确定度

doi:10.3969/j.issn.1000-0771.2013.7.08

### 0 引言

群时延是指群信号通过线性系统或网络传播时,系统对信号整体产生的时延,是系统的重要指

标之一。如何进行快捷、精密的群时延测量一直是测量领域的难点和热点。本文论述的方法是通过一台矢量网络分析仪完成对微波器件精密群时延测量的全过程。首先通过理论推导,建立了矢量网

络分析仪  $S_{21}$  相位测量值与整个系统群时延之间的数学联系,然后,结合实验来验证其方法和测量结果的正确性。

### 1 矢量网络分析仪测量群时延的原理

群时延数学表达式为:

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} -\frac{\varphi(\omega + \Delta\omega) - \varphi(\omega)}{\Delta\omega} \quad (1)$$

式中,  $\tau_g(\omega)$  为群时延(s);  $\varphi$  为相移( $^\circ$ );  $\omega$  为角频率( $^\circ/\text{s}$ )。

矢量网络分析仪可以测量二端口网络之间的相移。图 1 所示为一接有信号源  $b_g$  和负载  $Z_L$  的二端口网络,  $\Gamma_g$  和  $\Gamma_L$  分别为信号源和负载的反射系数,  $a_1$  和  $b_1$  分别是二端口网络端口 1 入射波和出射波的复数波幅,  $a_2$  和  $b_2$  分别是二端口网络端口 2 入射波和出射波的复数波幅。其中在一般情况下,二端口网络的相移即为  $b_2$  和  $a_1$  之间的相位差。

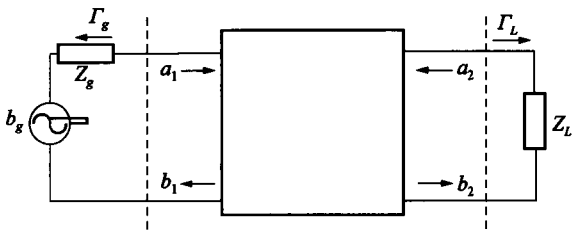


图 1 二端口网络的相移

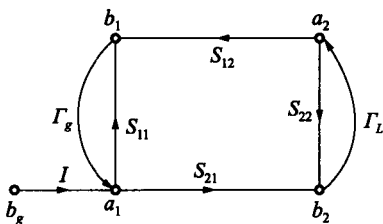


图 2 二端口网络相移的信号流图

那么整个系统的信号流图如图 2 所示。  $S_{11}$ 、 $S_{21}$ 、 $S_{12}$  和  $S_{22}$  分别为二端口网络的散射参数。由流图很容易得到:

$$a_1 = \frac{b_g}{(1 - S_{11}\Gamma_g - \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_g\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L})} \quad (2)$$

$$b_2 = \frac{S_{21}b_g}{(1 - S_{11}\Gamma_g)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_g\Gamma_L} \quad (3)$$

则由式(2)和式(3)可以得到相移  $\varphi$  为:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arg\left(\frac{b_2}{a_1}\right) \\ &= \arg\left[\frac{S_{21}(1 - \Gamma_L\Gamma_g)}{(1 - S_{11}\Gamma_g)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_g\Gamma_L}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

当信号源匹配,  $\Gamma_g = 0$ , 则式(4)变为:

$$\varphi = \arg\left(\frac{S_{21}}{1 - S_{22}\Gamma_L}\right) \quad (5)$$

若信号源匹配, 而且二端口网络输出端接有匹配负载, 即  $\Gamma_L = 0$ , 则式(5)变为:

$$\varphi = \arg(S_{21}) \quad (6)$$

从式(4)和式(6)可以看出二端口相移的测量结果主要与散射参数  $S_{21}$  有关, 也与两端口网络的其他散射参数及相连接的源和负载的反射有关。而由式(1)可知相移和时延有必然的联系, 因此, 用经过校准的网络分析仪上测量  $S_{21}$  可以得到整个系统的群时延。

由于  $\omega = 360^\circ \times f$ , 代入式(1), 得到:

$$\begin{aligned} \tau_g(f) &= -\frac{1}{360^\circ} \times \frac{d\varphi(f)}{df} \\ &= \lim_{\Delta f \rightarrow 0} -\frac{1}{360^\circ} \times \frac{\varphi(f + \Delta f) - \varphi(f)}{\Delta f} \end{aligned} \quad (7)$$

当频率差  $\Delta f$  很小时, 系统地群时延可以近似地表示为:

$$\begin{aligned} \tau_g(f) &= \lim_{\Delta f \rightarrow 0} -\frac{1}{360^\circ} \times \frac{\varphi(f + \Delta f) - \varphi(f)}{\Delta f} \\ &\approx -\frac{1}{360^\circ} \times \frac{\Delta\varphi}{\Delta f} \end{aligned} \quad (8)$$

即频率差  $\Delta f$  很小时, 群时延可以用相位差和频率差之比近似表示。式(8)表示的是中心频率为  $(f + \frac{\Delta f}{2})$ , 频率范围为  $f \sim (f + \Delta f)$  波群的群时延。

由式(8)可得, 群时延测量不确定度为:

$$u(\tau_g) = \frac{u(\Delta\varphi)}{360^\circ \times \Delta f} \quad (9)$$

式中,  $\Delta f$  常被称为孔径, 其取值大小是否合理关系到群时延测量精度高低和分辨力大小, 也关系到测量结果是否有意义。  $\Delta f$  的选取需遵循三条原则:

1) 根据信号频率和系统带宽选择合适的  $\Delta f$ 。根据式(8)可知,  $\Delta f$  越小测量越真实。

2) 根据时延测量准确度和分辨力要求选择  $\Delta f$ 。根据式(9)可知,  $\Delta f$  越大测量准确度越高。

3) 根据被测时延值来选择  $\Delta f$ 。根据式(8), 群时延的最大值为:

$$\tau_{g\max} = \frac{1}{360^\circ} \times \frac{\Delta\varphi}{\Delta f} \Big|_{\Delta\varphi=360^\circ} = \frac{1}{\Delta f} \quad (10)$$

为了使群时延测量结果不产生模糊,  $\tau_{g\max}$  应该大于被测群时延  $\tau_g(f)$ , 即:

$$\tau_{g\max} = \frac{1}{\Delta f} > \tau_g(f) \quad (11)$$

由式(11)可以得到:

$$\Delta f < \frac{1}{\tau_g(f)} \quad (12)$$

## 2 应用矢量网络分析仪的时延测量实验

我们用经过校准的网络分析仪对美国 TELE-DYNE 公司的延迟线 MBG-1152 进行群时延测量。选取网络分析仪为 Agilent PNA E8358, 校准件为 Agilent 85052D。

被测延迟线 MBG-1152 在中心频率 4.3GHz 处的标称时延为  $\tau_{g\text{ref}} = 1.016\mu\text{s}$ 。将  $\tau_{g\text{ref}}$  代入式(12), 可知  $\Delta f < 0.98\text{MHz}$ 。设置网络分析仪中心频率在 4.3GHz, 频带宽度为 10MHz, 测试点数为 201, 此时  $\Delta f$  约为 50kHz。网络分析仪进行完全二端口校准后, 将延迟线的两端分别接在网络分析仪的两个端口之间, 选择  $S_{21}$  测量 delay 的功能, 可以看到延迟线 MBG-1152 的时延基本上为一条直线, 在 4.3GHz 频率处重复测量 10 次, 取平均值, 得到群时延测量结果  $\tau_g = 1.014\mu\text{s}$ , 测量误差  $\Delta\tau_g = -2\text{ns}$ 。

此次测量的不确定度主要来源于重复测量, 网络分析仪本身的相位测量误差和系统相位扫迹噪声。

重复测量引入的不确定度分量为:

$$u_1(\tau_g) = 3.8\text{ns}$$

网络分析仪在此频段校准后相位测量不确定度为  $0.7^\circ$ , 按均匀分布规律, 取  $k$  为  $\sqrt{3}$ , 代入式(9), 得到由网络分析仪相位测量误差所带来的不确定度分量为:

$$u_2(\tau_g) = \frac{0.7^\circ}{\sqrt{3} \times 360^\circ \times 50\text{kHz}} = 22.5\text{ns}$$

网络分析仪的系统相位扫迹噪声  $\pm 0.01^\circ$ , 按均匀分布规律, 取  $k$  为  $\sqrt{3}$ , 代入式(9), 得到由系统相位扫迹噪声带来的测量不确定度分量为:

$$u_3(\tau_g) = \frac{0.01^\circ}{\sqrt{3} \times 360^\circ \times 50\text{kHz}} = 0.3\text{ns}$$

合成不确定度为:

$$u_c(\tau_g) = \sqrt{u_1^2(\tau_g) + u_2^2(\tau_g) + u_3^2(\tau_g)} = 22.8\text{ns}$$

选取覆盖因子  $k=2$ , 得到此次群时延测量结果的扩展不确定度为:

$$U = ku_c(\tau_g) = 45.6\text{ns}$$

## 3 结束语

由上述分析可知, 矢量网络分析仪可以达到非常高的群时延测量精度, 可进行非常准确、快捷的群时延测量, 但是此方法的测量结果和测量不确定度与孔径  $\Delta f$  有很大的关系, 目前我们主要靠经验选择合适的  $\Delta f$ , 希望以后会有更好的方法来选择  $\Delta f$ 。

### 参考文献

- [1] 闫润卿, 李英惠. 微波技术基础(第4版)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011
- [2] 黄坤超. 时延测试方法研究[D]. 电子科技大学, 2007
- [3] 张惠君, 陈淑芳. 应用矢量网络分析仪测定变频器的群时延特性[J]. 时间频率学报, 2005(6)
- [4] 李德儒. 析线性网络的时延特性[J]. 重庆邮电学院学报, 2000(9)
- [5] 梁军, 刘旺, 孙圣和. 网络分析仪误差模型及应用[J]. 计量技术, 2002(6)
- [6] 陈伟, 王桂琼. 传输反射测试仪误差校正分析及其应用[J]. 计量技术, 2004(7)

## 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>