

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407764

基于波导装置的吸波材料电磁参数测量方法 不确定度分析*

杨辉¹ 吴刚¹ 吕佩文²

(1. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室(闽都创新实验室) 福州 350108;

2. 中国科学院福建物质结构研究所 福州 350002)

摘要:材料电磁参数采用复介电常数和复磁导率来表征。由于基于传输/反射法的电磁参数求解公式的非线性、诸多不确定度来源及其相关性,运用解析法分析材料电磁参数测量结果的不确定度极为复杂,本研究引入蒙特卡洛法以简化分析计算并研究影响系统不确定度的关键因素。对矢量网络分析仪测量S参数幅度和相位不确定度、波导夹具尺寸容差引入的不确定度进行了推导,并分析了各项不确定来源及概率密度函数。以聚四氟乙烯样品18~26.5 GHz频段电磁参数测量为例,使用蒙特卡洛法分析了其系统不确定度并给出了22 GHz频点处的不确定预算。阐释了样品电磁参数本身对测量不确定度的影响机理。研究表明:蒙特卡洛法可有效分析基于波导装置的材料电磁参数测量结果的不确定度。对于示例频段内的聚四氟乙烯样品,S参数幅值及相位不确定度的是影响电磁参数测量结果不确定度的主要因素。若被测样品电磁参数使矢量网络分析仪接收机接收功率处于底噪及串扰影响区,测量结果不确定度将显著增大。

关键词:电磁参数;传输/反射法;不确定度;蒙特卡洛法

中图分类号: TM934.33; TN806

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.1025

Uncertainty analysis for electromagnetic parameter measurement method of absorbing materials based on waveguide device

Yang Hui¹ Wu Gang¹ Lyu Peiwen²

(1. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The electromagnetic parameters of materials are characterized by complex permittivity and complex permeability. Owing to the nonlinearity of the formulas for solving electromagnetic parameters based on the transmission/reflection method, numerous sources of uncertainties and their correlations, it is extremely complicated to analyze the uncertainty of the measuring results of material electromagnetic parameters using the analytical methods. In this paper, Monte Carlo method is introduced to simplify the analysis and to study the key factors influencing the system uncertainty. The uncertainties of the amplitude and phase of the S parameters measured by the vector network analyzer and the uncertainties introduced by the dimensional tolerance of the waveguide fixture are deduced, and the various uncertainty sources and their probability density functions are analyzed. Taking the measurement of the electromagnetic parameters of PTFE sample at 18 to 26.5 GHz frequency band as an example, the systematic uncertainty of the measurement is analyzed using the Monte Carlo method, and an uncertainty budget at 22 GHz frequency point is given. The influence mechanism of the sample's own electromagnetic parameters on the measurement uncertainty is elucidated. The research results indicate that the Monte Carlo method can effectively analyze the uncertainty of the measuring results of material electromagnetic parameters based on waveguide devices. For the PTFE sample in the example frequency range, the uncertainties of the amplitude and phase of the S parameters are the main factors affecting the uncertainty of electromagnetic parameters measurement results. If the electromagnetic parameters of the tested sample cause the vector network analyzer receiver to receive power within the noise and crosstalk influence area, the uncertainty of the measurement

收稿日期: 2024-08-14 Received Date: 2024-08-14

* 基金项目: 中国福建光电信息科学与技术创新实验室(闽都创新实验室)(2020ZZ101)项目资助

results will increase significantly.

Keywords: electromagnetic parameters; transmission/reflection method; uncertainty; Monte Carlo method

0 引言

电磁参数是描述材料电磁特性的特征参数,在宽频带内常采用复介电常数和复磁导率来表征。材料电磁参数的测量是材料科学和微波工程应用方面一个重要的研究课题。精确的材料电磁参数测量方法对于电磁吸波材料、屏蔽材料、生物医学材料等材料的研发设计及应用选型有着重要的价值。

材料的电磁参数测量方法有传输/反射法、探头法、谐振腔法以及自由空间法等方法。其中,由 Weil 将 Nicolson、Ross 等提出的传输/反射法拓展至频域,因而简称 NRW 传输/反射法^[1]。因其具有装置简单通用、宽频带、精度较高等特点^[2]而得到了广泛应用。该方法将待测材料样品置入空气传输线(波导或者同轴线)中构成一个互易二端口网络,通过矢量网络分析仪测量该传输线的二端口网络 S 参数,继而由散射方程推算得到被测材料的电磁参数^[3]。由于矢量网络分析仪残余误差、测试夹具尺寸误差及测量过程中样品放置的随机性等诸多因素的影响,测定的电磁参数与实际电磁参数可能会有较大误差。如果不能系统性地了解材料电磁参数测试结果的不确定度,简单地应用单次或若干次的测试数据进行电磁功能材料仿真、设计及应用选型,就可能使得预期目标与实际应用结果产生很大的偏差。

国内外学者在对 NRW 传输/反射法做一些改进的同时,对其方法的测量不确定度做了一定的理论分析。例如, Yuto 等^[4]开发了一种新的算法,即在 S 参数表达式中引入一个优化加权因子,以尽量减少不确定度,用于使用传输/反射法计算高损耗材料的介电常数的不确定度分析。赵飞等^[5]将谐振法获得的相对介电常数测量结果作为参考值,对波导传输线法标定的标准样片的相对介电常数的准确性进行了指标验证,获得了不确定度较小的材料介电参数测量值。Kazemipour 等^[6]研究了太赫兹频段下材料介电常数的测量,提出的简单的封闭形式表达式显示了算法的介电常数对每个输入参数的敏感性。冀元等^[7]对基于传输/反射原理的自由空间法电磁参数测量进行了不确定度分析,给出了各项误差传递系数和不确定度具体数值。Chong 等^[8]提出了一种基于波导六端口反射计和脊形波导的复杂介电常数测量系统,给出了具有最佳准确性的波导的一般理论模型、仿真和实现,与文献中的参考值相比,误差在可接受范围内。Sharma 等^[9]使用专门设计的样品支架和精密加工的材料进行测试,无需去嵌入参考面,与传统的 NRW 方法相

比,不确定度评估有所简化。一种用于准确测量中高损耗材料介电常数的改进方法由 Wang 等^[10]提出,以克服传统波导方法中的空气间隙问题,对宽侧空气间隙具有很高的容差,避免了样品组装过程中的倾斜和位移的影响,与传统的波导法相比,相对介电常数实部及介电损耗角正切的相对误差显著降低。

然而,对于 NRW 传输/反射法中重要的不确定度来源——矢量网络分析仪散色参数的不确定度、波导夹具尺寸容差鲜见详细的研究与论述。且散色参数间具有相关性,若作为独立变量分析不确定度并不精确。本研究较为系统地考虑了基于波导装置的材料电磁参数测试方法的各项不确定来源及其相关性,使用蒙特卡洛法分析了系统不确定度并给出了不确定预算,关于样品电磁参数本身对测量不确定度的影响也作了论述。明确地了解材料电磁参数测量的不确定度来源及预算大小,才能精确掌握材料性能指标,并对材料进行合理地设计运用。

1 波导 NRW 传输/反射法原理

采用波导装置作为 NRW 传输/反射法测试传输线,使用矢量网络分析仪作为 S 参数测量仪器,并使用稳幅稳相电缆连接波导同轴转换器。装载样品的波导夹具示意图如图 1 所示,端口 1(即面 1)与端口 2(即面 4)为波导校准后的参考面, L_1 为端口 1 与样品距端口 1 较近侧(即面 2)的距离, L_2 为端口 2 与样品距端口 2 较近侧(即面 3)的距离, L 为样品长度, H 为整个测试夹具长度。使用矢量网络分析仪测量面 1 及面 4 间的 S 参数 S_{11} 、 S_{21} 。

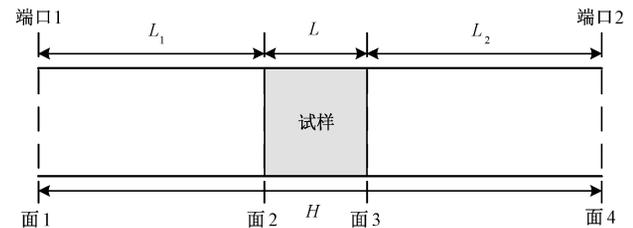


图 1 装载样品的波导夹具示意图

Fig. 1 Diagram of the waveguide fixture for loading the sample

1.1 去嵌入

因面 1 与 2 之间、面 3 与 4 之间存在介质填充(如空气等),而样品电磁参数的计算是以被测样品端面的 S 参数作为实际计算参量,故需对介质做对应的去嵌入修正:

$$S'_{21} = S_{21} \cdot e^{j(H-L)\gamma_0} \quad (1)$$

$$S'_{11} = S_{11} \cdot e^{2jL_1\gamma_0} \quad (2)$$

$$\gamma_0 = \sqrt{k_0^2 - k_c^2} \quad (3)$$

式中: S'_{11} 、 S'_{21} 为被测样品端面的 S 参数; 波数 $k_c = \pi/a$, $k_0 = 2\pi/\lambda$, a 为矩形波导横截面内壁的宽, λ 为测量频率对应波长。

1.2 求解复相对介电常数和复相对磁导率

设置中间变量 X 、 Γ 、 T 、 Λ 为:

$$X = \frac{S'_{11}{}^2 - S'_{21}{}^2 + 1}{2S'_{11}} \quad (4)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (5)$$

$$T = \frac{S'_{11} + S'_{21} - \Gamma}{1 - (S'_{11} + S'_{21})\Gamma} \quad (6)$$

$$\Lambda^2 = - \left[\frac{2\pi L}{\ln T} \right]^2 \quad (7)$$

其中, 式(5)可得两个计算结果, 这里只选取 $|\Gamma| \leq 1$ 的计算结果。

求解式(4)~(7), 可计算出被测试样的复相对介电常数 ϵ_r 和复相对磁导率 μ_r :

$$\epsilon_r = \frac{1}{\mu_r k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2 \right) \quad (8)$$

$$\mu_r = \frac{2\pi}{\Lambda \sqrt{k_0^2 - k_c^2}} \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) \quad (9)$$

2 基于蒙特卡洛法的测量不确定度分析

依据不确定度评定理论, 被测量的合成不确定度由各个分量的不确定度合成而得。基于以上的测量模型, 其不确定度来源主要有^[11-13]如下 5 方面。

- 1) 矢量网络分析仪测量 S 参数幅度和相位不确定度;
- 2) 波导夹具尺寸容差引入的不确定度;
- 3) 矢量网络分析仪信号源的频率不确定度;
- 4) 样品厚度不确定度;
- 5) 样品在波导夹具中位置不确定度。

2.1 矢量网络分析仪测量 S 参数幅度和相位不确定度的确定

S 参数幅度和相位测量不确定度由矢量网络分析仪不确定度计算说明^[14]可知, S_{11} 与 S_{21} 具有相关性, 并非是完全独立变量, 需考虑其相关性。矢量网络分析仪校正后其网络内仍有残余误差、动态精度等系统误差存在, 矢量网络分析仪的噪声、连接件重复性及线缆稳定性等随机误差仍影响散色参数测试结果, 其前向误差模型如图 2 所示。

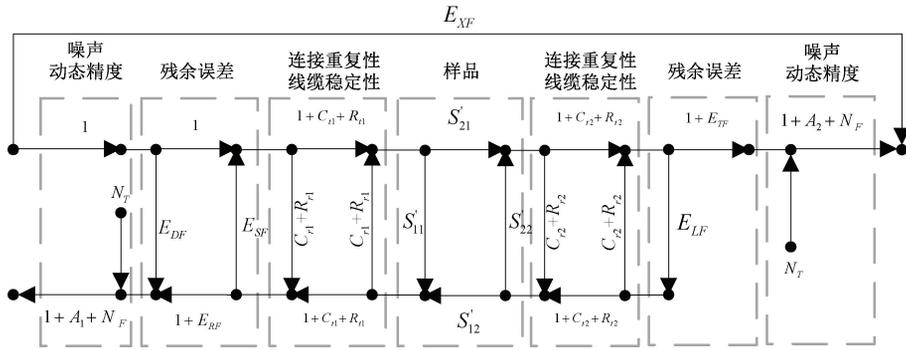


图 2 矢量网络分析仪校正后前向误差模型

Fig. 2 Forward error model of vector network analyzer after correction

图(2)中, E_{DF} 为前向残余方向性误差, E_{SF} 为前向残余源匹配误差, E_{LF} 为前向负载匹配误差, E_{TF} 为前向传输跟踪误差, E_{RF} 为前向残余反射跟踪误差, E_{XF} 为前向串扰误差, C_{n1} 及 C_{n2} 分别为端口 1 和 2 的线缆幅值传输稳定性, C_{r1} 及 C_{r2} 分别为端口 1 和 2 的线缆反射稳定性, R_{n1} 及 R_{n2} 分别为端口 1 和 2 的连接器传输重复性, R_{r1} 及 R_{r2} 分别端口 1 和端口 2 的连接器反射重复性, N_F 为矢网底噪, N_T 为矢网迹线噪声, A_1 及 A_2 分别为矢网的动态精度。这些误差数值可参阅矢网、线缆及连接器的规格书或校准证书获得。

任何测量结果都是实际测试响应与所有不确定度来源的矢量和。每个不确定度来源的精确影响取决于其大小和与实际测试响应的相位关系。当不确定度来源响应的相位未知时, 假设相位为最坏情况, 即假设系统不确定度与稳定性不确定度相位相同时, S'_{11} 与 S'_{21} 的幅度及相位不确定度由式(10)~(13)确定^[15]。

$$u(S'_{11mag}) = \sqrt{(u_{s1m} + u_{s1})^2 + u_{n1}^2} \quad (10)$$

$$u(S'_{11phase}) = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(u_{s1p} + u_{s1})^2 + u_{n1}^2}}{S_{11}} \right) + 2C_{TP1} \quad (11)$$

$$u(S'_{21mag}) = \sqrt{(u_{s2m} + u_{s2})^2 + u_{n2}^2} \quad (12)$$

$$u(S'_{21phase}) = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(u_{s2p} + u_{s2})^2 + u_{n2}^2}}{S_{21}} \right) + C_{TP1} + C_{TP2} \quad (13)$$

其中, u_{s1m} 及 u_{s1p} 分别为 S'_{11} 幅值及相位的系统不确定度, u_{s2m} 及 u_{s2p} 分别为 S'_{21} 幅值及相位的系统不确定度, u_{s1} 及 u_{s2} 分别为 S'_{11} 及 S'_{21} 线缆及连接器的稳定性不确定度, u_{n1} 及 u_{n2} 分别为 S'_{11} 及 S'_{21} 噪声引入的不确定度, C_{TP1} 及 C_{TP2} 分别为连接端口 1 和 2 的线缆的相位传输稳定性。以上误差项均是图 2 中各误差的函数, 可由误差模型信号流图推导而得^[16]。该误差模型忽略了信号源的幅度不确定度、系统整体的温漂因素。

基于式(10)~(13), 考虑到采用协方差的合成不确定度模型的复杂性, 本研究采用蒙特卡洛数值计算方法来评估测量结果的不确定度。

2.2 波导夹具尺寸容差引入的不确定度的确定

基于波导装置的吸波材料电磁参数测量方法最高可适用于太赫兹频段, 频率越高, 波导夹具的尺寸容差引入的不确定度越显著。对于矩形波导, 单位长度的传播衰减常数及相位常数的计算公式为^[17]:

$$\alpha \approx \frac{\sqrt{\pi f \mu_0 \rho}}{h} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\mu_0}} \cdot \frac{\left(1 + 2h/w \left(w - \frac{(4 - \pi)r^2}{h}\right) (\lambda/a)^2\right)}{\sqrt{1 - (\lambda/a)^2}} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon_r}}{c} \sqrt{1 - (\lambda/a)^2} \quad (15)$$

其中, f 为测量频率, μ_0 、 ε_0 分别为自由空间的磁导率和相对介电常数, c 为真空中光速, ρ 为夹具导体的电阻率, ε_r 为夹具内填充介质的相对介电常数, h 及 w 为波导夹具横截面高度及宽度, r 为矩形波导的边缘半径。由此可知, h 、 w 及 r 的不确定度将传递至波导的传播常数。

由波导夹具宽度及高度尺寸容差引入的反射系数不确定度分别可表示为^[18]:

$$u(|\Gamma_w|) \approx \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda}{w \sqrt{1 - (\lambda/2w)^2}} \right)^2 \frac{u(w)}{w} \quad (16)$$

$$u(|\Gamma_h|) \approx \frac{u(h)}{2h} \quad (17)$$

反射系数合成不确定度取:

$$u(\Gamma_s) = \sqrt{u^2(|\Gamma_w|) + u^2(|\Gamma_h|)} \quad (18)$$

式中: h 、 w 的不确定度将传递至波导的反射系数。波导夹具 S 矩阵可表示为:

$$S_w = \begin{pmatrix} u(\Gamma_s) & e^{-(\alpha+j\beta)H} \\ e^{(\alpha+j\beta)H} & u(\Gamma_s) \end{pmatrix} \quad (19)$$

2.3 蒙特卡洛法评估测量不确定度

蒙特卡洛法是一种基于统计采样进行数值计算的不确定度分析方法^[19], 又称随机抽样过程或计算机统计模拟方法, 对于矢量网络分析仪 S 参数不确定度评估, 相比于其他任何解析方法, 蒙特卡洛法的计算需求更低且更灵活。

1) 确定各影响变量不确定度的分布

(1) 矢量网络分析仪测量 S 参数不确定度是将测量所得的 S 参数代入到式(10)~(13)中获得; 波导夹具尺寸容差引入的 S 参数不确定度由式(19)中的 $u(\Gamma_s)$ 及 $e^{-(\alpha+j\beta)H}$ 的统计标准差获得。考虑最坏的情况, 两者的合成不确定度取两类不确定度分量的方和根。

(2) 设矢量网络分析仪信号源的频率不确定度满足正态分布:

$$u(f) \sim N(\mu_f, \sigma_f^2) \quad (20)$$

其中, 矢量网络分析仪信号源频率的偏值 μ_f 及标准差 σ_f 一般由仪器计量报告给出^[20]。

(3) 样品厚度及样品在波导夹具中位置由螺旋测微器或游标卡尺测量, 不确定度符合矩形分布^[21]。

$$u(L) \sim U(a_L, b_L) \quad (21)$$

$$u(L_1) \sim U(a_{L1}, b_{L1}) \quad (22)$$

式中: a_L 、 b_L 分别为样品厚度不确定度的上下限; a_{L1} 、 b_{L1} 分别为样品在波导夹具中位置测量不确定度的上下限, 可依据测量器具计量报告给出。

2) 不确定度分量离散抽样计算

对每个不确定度来源在其指定的概率密度函数中离散抽取 M 个样本值。通过式(8)、(9)可以计算得到复相对介电常数 ε_r 和复相对磁导率 μ_r 的第 i 个模型值。重复计算 M 次, 可以得到 M 个复相对介电常数 ε_r 的模型值及 M 个复相对磁导率 μ_r 的模型值:

$$\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \dots, \varepsilon_{ri}, \dots, \varepsilon_{rM}; \mu_{r1}, \mu_{r2}, \dots, \mu_{ri}, \dots, \mu_{rM}$$

M 的选取与被测量的分布、给定的包含概率以及规定的数值容差有关, 在通常情况下当设定的包含概率为 95%, 包含区间修约到 1 或 2 位有效数字时, M 取约 10^6 。

3) 电磁参数估计值及其标准不确定度

复相对介电常数 ε_r 和复相对磁导率 μ_r 估计值即其 M 个模型值的平均值:

$$\bar{\varepsilon}_r = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \varepsilon_{ri} \quad (23)$$

$$\bar{\mu}_r = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mu_{ri} \quad (24)$$

而该估计值的标准不确定度为:

$$u(\bar{\varepsilon}_r) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\varepsilon_{ri} - \bar{\varepsilon}_r)^2}{M - 1}} \quad (25)$$

$$u(\bar{\mu}_r) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\mu_{ri} - \bar{\mu}_r)^2}{M - 1}} \quad (26)$$

3 参考物质实测及不确定度分析

测试系统实物图如图3所示,矢量网络分析仪型号为是德科技的E5080B-2N0,稳幅稳相线缆型号为是德科技的85133D,波导型号为是德科技的K11644A,测试频段为K频段(18~26.5 GHz)。经过K波导TRL校准后测试系统的各误差项如表1所示。另,矢量网络分析仪动态精度 A_1 及 A_2 分为幅值动态精度及相位动态精度,均与矢量网络分析仪接收机的接收功率相关,可通过曲线拟合或查表法获取幅值及相位动态精度数值。校准及测试过程中,禁止了线缆的弯折并对线缆做了固定以最小化形变与位移^[22],忽略线缆相位传输稳定性误差项。



图3 测试系统实物图
Fig. 3 Test system diagram

表1 波导TRL校准后测试系统的各误差项
Table 1 Error terms of the test system after waveguide TRL calibration

误差项	数值	单位
E_{DF}	-50	dB
E_{SF}	-59	dB
E_{LF}	-50	dB
E_{RF}	0.000 76	
E_{TF}	0.002 8	
E_{XF}	-139	dB
C_{i1}, C_{i2}	0.006 9	
C_{r1}, C_{r2}	-54	dB
$R_{i1}, R_{i2}, R_{r1}, R_{r2}$	0.002	
N_F	-131	dBm
N_T	0.001 3	dB

被测样品为聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE)材料,其复相对介电常数理论值为 $\epsilon_{r,j} = 2.1 - j0.002$,复相对磁导率理论值为 $\mu_{r,j} = 1 - j0$ 。波导夹具的 w 取 10.671 ± 0.008 mm, h 取 4.318 ± 0.008 mm, r 取 0.12 ± 0.01 mm,波导夹具厚度 H 的尺寸容差取 ± 0.02 mm^[23],样品厚度 L 及样品在波导夹具中位置 L_s 的测量容差均取 ± 0.01 mm,均取矩形分布。矢量网络分析仪信号源频率不确定度 $u(f)$ 为 $f \times 10^{-7}$ 。使用前述蒙特卡洛法评估不确定度如图4和5所示。

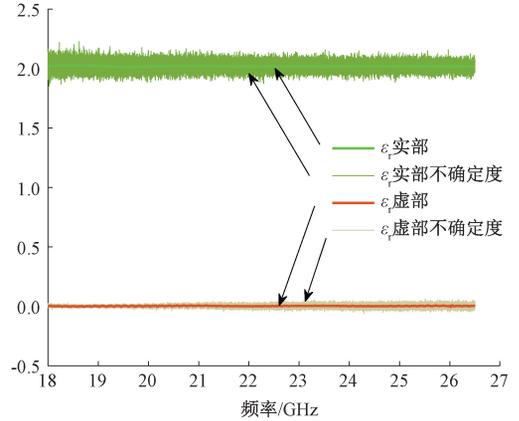


图4 聚四氟乙烯样品复相对介电常数
Fig. 4 Complex relative permittivity of PTFE sample

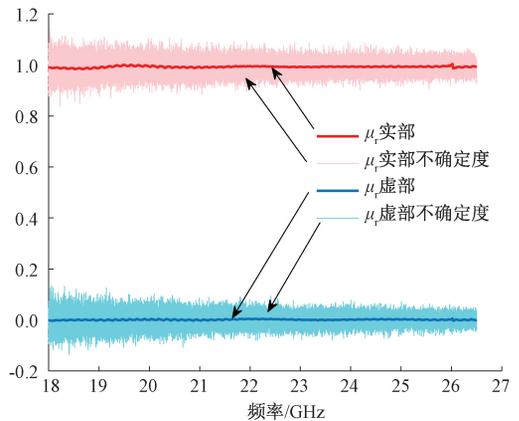


图5 聚四氟乙烯样品复相对磁导率
Fig. 5 Complex relative permeability of PTFE sample

将其不确定度来源分为若干类,取K波段中间频点处,通过数值计算各不确定度来源单独作用时对最终不确定度的贡献得到其不确定预算如表2所示。分析不确定预算表可知,对于K波段聚四氟乙烯样品,S参数幅值及相位不确定度的是电磁参数测量结果不确定度的主要因素,波导尺寸容差及样品厚度与位置容差是电磁参数测量结果不确定度的次要因素,而矢量网络分析仪信号源频率不确定度影响较小。不同频段不同样品,各不确

定度来源对测量结果不确定度的贡献可能不同,例如频段升高时,波导尺寸容差的影响将愈发显著^[24]。

表 2 聚四氟乙烯样品电磁参数测量
22 GHz 处的不确定预算

Table 2 Uncertainty budget for measuring electromagnetic parameters of a PTFE sample at 22 GHz

不确定来源	标准不确定度			
	ϵ_r 实部	ϵ_r 虚部	μ_r 实部	μ_r 虚部
S11 幅值及相位	0.043 8	0.002 1	0.035 1	0.015 6
S21 幅值及相位	0.019 9	0.003 3	0.015 9	0.033 3
信号源频率	1.40×10^{-14}	2.08×10^{-17}	7.78×10^{-16}	1.78×10^{-17}
波导尺寸	0.001 8	0.005 7	0.009 6	0.004 6
样品厚度及位置	0.005 1	0.000 02	0.000 3	0.000 01
合成不确定度	0.047 6	0.006 6	0.038 8	0.033 2

4 样品电磁参数对测量不确定度的影响

除了矢量网络分析仪、波导夹具、连接器及线缆等测试条件因素外,被测样品的内禀电磁参数对测量结果的不确定度也有影响。

矢量网络分析仪端口 1 和端口 2 处均有接收机。一般将矢量网络分析仪动态精度图中接收机的接收功率低于 -100 dBm 的区域称为底噪及串扰影响区,此区域内仪器动态精度恶化明显。基于表 1 参数及矢量网络分析仪规格书中动态精度曲线,当信号源输出功率为 -20 dBm,中频带宽为 10 Hz 时,反射系数与传输系数幅值对 S_{21} 与 S_{11} 幅值及相位不确定度的影响如图 6 所示。

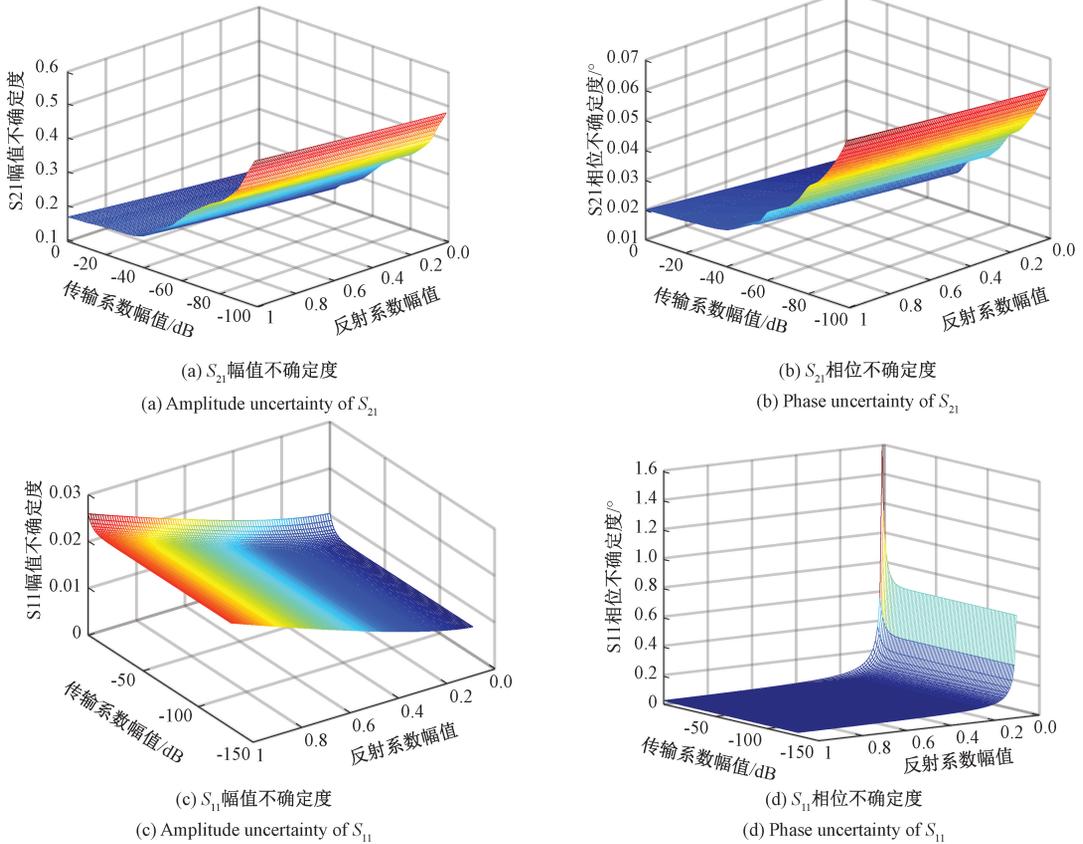


图 6 反射系数与传输系数对 S 参数不确定度的影响

Fig. 6 Influence of reflection coefficient and transmission coefficient on the uncertainty of S parameters

被测样品的电磁参数决定了其反射系数 R 及衰减系数 A ,具体公式可参考文献[25],而传输系数 T' 由式(27)确定^[26]。

$$T' = |S_{21}|^2 = 1 - R - A \tag{27}$$

矢量网络分析仪信号源功率一定的情况下,样品的反射过强(>0.8)或衰减过大(<-90 dB),都将导致传输系数较小,则矢量网络分析仪端口 2 处接收机接收功率

较小,由图 6 可知,此时 S_{21} 参数幅值及相位不确定度显著增加。另外,反射系数较小时(小于 0.1),矢量网络分析仪端口 1 处接收机接收功率较小, S_{11} 参数相位不确定度也显著增加。

测量结果的不确定度越大,测量结果的质量越低,其使用价值也越低。故为保证测量结果的质量,被测样品的电磁参数应在适当的范围内,使矢量网络分析仪各端

口处接收机工作于线性区域。

5 结 论

本研究指出基于波导装置的材料电磁参数测试方法的各项不确定来源,包括矢量网络分析仪校正后网络内的残余误差、动态精度、波导尺寸等系统误差,矢量网络分析仪的噪声、连接件重复性及线缆稳定性等随机误差,以及样品尺寸、位置的测量误差。由于基于传输/反射法的电磁参数求解公式存在非线性,测试方法有诸多不确定度来源且来源间具有相关性,本研究引入蒙特卡洛法以简化解析法分析材料电磁参数测量结果的不确定度的复杂度。以K波段聚四氟乙烯样品为例,本研究使用蒙特卡洛法给出了其系统不确定度及不确定预算,S参数幅值及相位不确定度的是电磁参数测量结果不确定度的主要因素。关于样品电磁参数本身对测量不确定度的影响也分析了其作用机理。本研究对于材料电磁参数的精确测量具有指导作用。未来,拟将研究此不确定度分析方法在基于同轴或自由空间装置的材料电磁参数测量方法的不确定度分析中的推广应用。

参考文献

- [1] SONG ZH Q, XU L Q. Design of a broadband measurement system of dielectric constant based on parallel plate waveguide[C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2022;1-3.
- [2] 周梦雨, 陈宇滨, 和玉光, 等. 基于遗传算法的吸波材料P波段电磁参数的计算与优化[J]. 航空材料学报, 2024, 44(3): 102-110.
ZHOU M Y, CHEN Y B, HE Y G, et al. Calculation and optimization of P-band electromagnetic parameters of absorbing materials based on genetic algorithm [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(3): 102-110.
- [3] WANG W J, LIU G, WANG Y, et al. A more accurate measurement method of the dielectric material properties with high tolerance using an overmoded waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(4): 2363-2369.
- [4] YUTO K, MASAHIRO H, MICHITAKA A, et al. New uncertainty analysis for permittivity measurements using the transmission/reflection method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1748-1753.
- [5] 赵飞, 裴静, 徐沛, 等. 波导传输线法标准样片相对介电常数指标的标定与验证[J]. 计量技术, 2018(12): 7-9.
ZHAO F, PEI J, XU P, et al. Calibration and verification of relative dielectric constant of standard sample using waveguide transmission line method [J]. Measurement Technique, 2018(12): 7-9.
- [6] KAZEMIPOUR A, WOLLENSACK M, HOFFMANN J, et al. Analytical uncertainty evaluation of material parameter measurements at THz frequencies[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2020, 41: 1199-1217.
- [7] 冀元, 唐章宏, 李永卿, 等. 40~110 GHz 介质材料自由空间法电磁参数测量[J]. 安全与电磁兼容, 2021(4): 45-50.
JI Y, TANG ZH H, LI Y Q, et al. Electromagnetic parameter measurement of dielectric material free space method at 40~110 GHz[J]. Safety & EMC, 2021(4): 45-50.
- [8] CHONG CH Y, HONG T, HUANG K M. Design of the complex permittivity measurement system based on the waveguide six-port reflectometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71(4): 1-12.
- [9] SHARMA A, DUBEY S. Dielectric characterization for solids with an improved NRW procedure and uncertainty estimation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72.
- [10] WANG W J, JIANG W, YAO Y L, et al. An improved waveguide method for accurate complex permittivity measurement of medium/high-loss material [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(6): 066005.
- [11] 全国电磁屏蔽材料标准化技术委员会. GB/T 35679-2017 固体材料微波频段使用波导装置的电磁参数测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Technical Committee for Standardization of Electromagnetic Shielding Materials. GB/T 35679-2017 Electrical properties of solid materials in the microwave band using waveguide devices Magnetic parameter measurement method[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [12] 王依超. 材料复介电常数超高温测试技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
WANG Y CH. Research of ultra-high temperature measurement technique for complex permittivity of materials [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [13] HORIBE M. Improvement of measurement uncertainty of THz waveguide vector network analyzers [C]. ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), 2021: 1-4.

- [14] 郑贤哲, 年夫顺, 袁国平. 矢量网络分析仪动态范围原位拓展方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11), 62-69.
ZHENG X ZH, NIAN F SH, YUAN G P. An in-suit method for expanding the dynamic range of VNA[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 62-69.
- [15] 王敏. 矢量网络分析仪测量不确定度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
WANG M. Research on vector network analyzer measurement uncertainty[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [16] STELSON A C, HAGERSTROM A M, JARGON J A, et al. Quantifying receiver nonlinearities in VNA measurements for the WR-15 waveguide band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(5): 2743-2749.
- [17] STENARSON J, THIDO T N, ZHAO H, et al. Sensitivity analysis of TRL calibration in waveguide integrated membrane circuits[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(5): 558-565.
- [18] SELLONE M, OBERTO L, SHAN Y Y, et al. Comparison of s-parameter measurements at millimeter wavelengths between INRIM and NMC [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(7): 1810-1817.
- [19] 魏明明. 蒙特卡洛法与 GUM 评定测量不确定度对比分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 17-25.
WEI M M. Comparative analysis of measurement uncertainty evaluation with Monte Carlo method and GUM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 17-25.
- [20] 全国无线电计量技术委员会. JJF 1495-2014 矢量网络分析仪校准规范[S]. 国家质量监督检验检疫总局, 2014.
National Technical Committee on Radio Metrology. JJF 1495-2014 Calibration specification for vector network analyzers [S]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, 2014.
- [21] ZAKHAROV I, NEYEZHMAKOV P, BOTSUURA O. Verification of the indicating measuring instruments taking into account their instrumental measurement uncertainty [J]. Measurement Science Review, 2017, 17(6): 269-272.
- [22] 刘振, 张瑞江. 射频电缆的幅相稳定性测试研究[J]. 数字通信世界, 2021(4): 9-11, 40.
LIU ZH, ZHANG R J. Research on amplitude and phase stability test of RF cable [J]. Digital Communication World, 2021(4): 9-11, 40.
- [23] International Electrotechnical Commission. Hollow metallic waveguides-Part 2: Relevant specifications for ordinary rectangular waveguides: IEC 60153-2 [S]. Geneva: IEC, 2016.
- [24] SHANG X, RIDLER N, SUN W, et al. Preliminary Study on WM-380 waveguide TRL calibration line standards at the UK's national physical laboratory[C]. 2019 92nd ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG). IEEE, 2019: 1-4.
- [25] 谭俊杰, 赵国梁, 徐晨. 陶瓷基吸波复合材料研究进展[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(5): 849-863.
TAN J J, ZHAO G L, XU CH. Progress of ceramic-based composites for microwave absorption [J]. Journal of Ceramics, 2023, 44(5): 849-863.
- [26] HUANG M R, HUANG Y, YANG H, et al. Ti3C2Tx MXene/Fe3O4/carbon fiber fabric/water polyurethane composite fabrics for electromagnetic interference shielding and thermal management [J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(13): 14921-14935.

作者简介



杨辉(通信作者), 2011年于南京理工大学获得学士学位, 2014年于东南大学获得硕士学位, 现为闽都创新实验室工程师, 主要研究方向为电磁功能材料研发及测试。

E-mail: yanghui@fjoel.cn

Yang Hui (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science & Technology in 2011 and M. Sc. degree from Southeast University in 2014, respectively. Now he is an engineer in Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China. His main research interests include development and testing of electromagnetic functional materials.



吴刚, 1989年于北京科技大学获得学士学位, 1994年-1996年丹麦技术大学访问学者, 现为闽都创新实验室高级工程师, 主要研究方向为电磁吸波材料、导电橡胶。

E-mail: wug@fjoel.cn

Wu Gang received his B. Sc. degree from University of Science and Technology Beijing in 1989 and he was a visiting scholar at the Technical University of Denmark from 1994 to 1996. Now he is a senior engineer in Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China. His main research interests include electromagnetic absorbing material and conductive rubber.