

材料介电特性 的精确表征和



FSO2406-0011CN01

1 引言

在射频和微波频率范围内研究和开发应用时，材料测量是不可或缺的。PCB、微波电路设计、材料科学、生物研究、汽车工程以及计量和研究机构等需表征各种材料，以更好地了解其对电磁波传播的影响来实现更符合预期的设计，或检测制造工艺从而控制产品的质量等，来自不同应用领域的类似问题产生对精确表征和测量材料介电特性的持续需求。目前业内大多是通过矢量网络分析仪、阻抗分析仪和 LCR 表等测量仪器和算法软件，搭配各种专业的测量夹具，通过多种方法来实现对材料介电常数、磁导率等参数的准确测量。每种方法都有其适用领域，具体取决于几个因素，如测量频率、 ϵ_r 、 μ_r 预期值、测量精度、材料特性（例如各向同性和均匀性）、材料形态（例如液体、粉末、固体、薄片等）、样品大小限制、无损或无接触测试要求以及温度范围等。

本文讨论了基于矢量网络分析仪测量材料特性的同轴/波导传输线法，S 参数转换为介电常数和磁导率的算法并通过真实案例研究展示 VNA 作为高频材料特性表征工具的广泛适用性和鼎阳科技材料测试解决方案。注意，本文所讨论的转换算法仅适用于固体材料测量。

2 材料的介电特性

一般来说，材料可以分为绝缘体（即电介质）、导体和半导体。如果材料在施加外部电场时能储存能量则该材料归类为电介质。材料存储和耗散的电磁能量由介电常数和磁导率度量，表示材料的绝缘特性。介电常数是描述电介质与外加电场之间相互作用的物理参数，我们通常说的介电常数指的是相对介电常数，或者是绝对介电常数相对于自由空间介电常数之比。

$$K = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

其中， ϵ 是绝对介电常数， ϵ_r 是相对介电常数，自由空间介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$

介电常数 k （也称 Dk 、 ϵ_r ）是一个复数，实部 ϵ_r' 表征材料和外加电场作用时储能的大小，虚部 ϵ_r'' 表征耗能大小。用矢量图来描绘介电常数时，介电常数的实部和虚部之比称为介质的损耗角正切或者损耗因子（也称 D 、 Df ），给出了能量损耗部分与能量存储部分的比值，测量 MUT 固有的电磁能量耗散，其倒数称为品质因子 Q 。

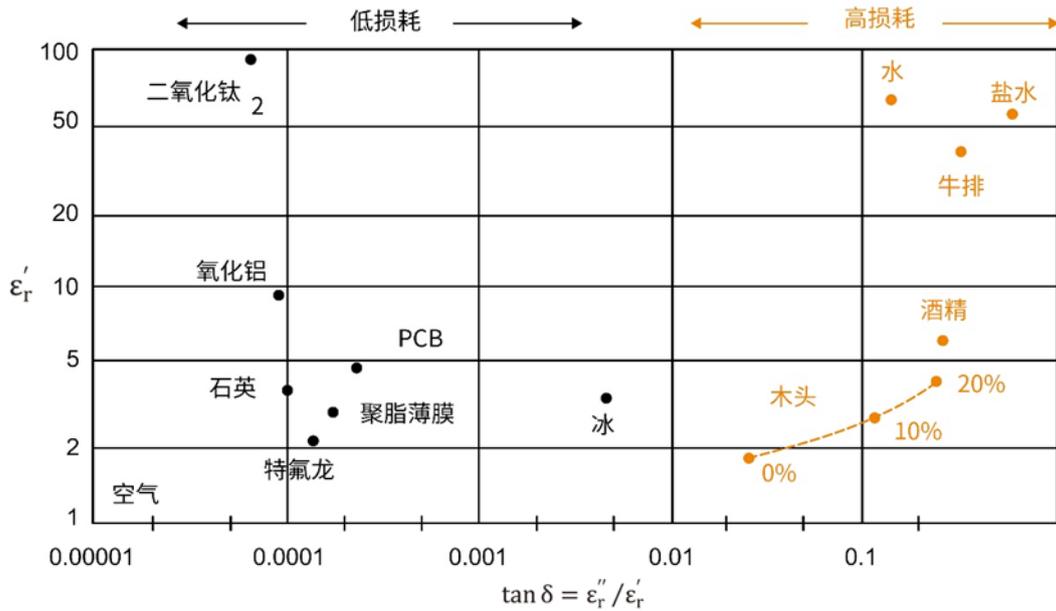
$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = D = \frac{1}{Q} = \frac{\text{Energy lost per cycle}}{\text{Energy stored per cycle}}$$

磁性材料一般用磁导率来衡量其与外加磁场相互作用的能力，我们通常说的磁导率指的是相对磁导率，或者是绝对磁导率 μ 相对于自由空间磁导率 μ_0 之比。

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r''$$

其中， μ 是绝对磁导率， μ_r 是相对磁导率，自由空间磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$

磁导率是一个复数，实部 μ_r' 表征材料和外加磁场作用时储能的大小，虚部 μ_r'' 表征耗能大小。同样磁性材料的损耗角正切的定义也是复磁导率虚部与实部之比。复磁导率的测量只适用于磁性材料，一些材料如铁（铁氧化物）、钴、镍及其合金具有明显的磁性，而大多数材料是非磁性的，磁导率非常接近自由空间磁导率，通常认为 $\mu_r=1$ 。



一些常见材料的介电特性

3 传输线法

传输线法需要将 MUT 放置在一段矩形波导或同轴传输线中,使用校准之后的网络分析仪测试高频信号激励下传输线的反射特性 S_{11} 和传输特性 S_{21} ,通过算法将 S 参数转换为介电常数和磁导率。传输线法假设只有基本波导模式(即波导中的 TE 模式和同轴线中的 TEM 模式)传播,被测样品要求根据标准波导尺寸精密加工,样品需要填充夹具横截面且壁上没有气隙。如果被测样品装入波导测量夹具后,被测样品边沿与波导测量夹具内壁存在缝隙会引入测量结果偏差。因此,传输线法的关键在于能够制造具有平面、垂直于长轴且已知厚度 $>20\text{--}360\lambda$ 的 MUT。同轴传输线可以覆盖 18 GHz 以下比较宽的频率范围,但环状样品制作相对困难。波导传输线可以将测试频率延伸至毫米波波段,且矩形样品较容易加工。但由于波导传输线本身的频率覆盖是分段的,所以使用波导传输线测试材料的频率覆盖也是分段的。传输线法测量介电常数和磁导率的误差一般小于 5% ,损耗因子的误差一般小于 10% 。另一个需要考虑的是传输线路固定装置的传导或辐射损耗导致的衰减,损耗角正切的常用值为 0.01 ,因此 $\tan \delta < 0.01$ 的材料是不可表征的。

| | |
|------|---|
| S 参数 | S_{11}, S_{21} |
| 测量参数 | 介电常数, 磁导率 |
| 样品制备 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 材质结构均匀 2) 样品长度方向引入的插入损耗不能过大, 样品插入损耗分贝值应小于测量系统动态范围分贝值至少 20 dB 3) 可以进行机械加工尺寸形状样品(环形或矩形), MUT 边沿与夹具内壁不要留有缝隙, 表面光滑且两个端面与传输线的轴线垂直, 样品加工前应仔细测量波导装置横截面的尺寸, 明确样品加工可实现的最小公差 4) 样品长度和测试频率相关, 长度不能过长, 样品长度应小于标准波导的深度, 不能过短, 使得样品装入波导后, 在选取的最低测量频率点处保证在样品长度方向引入的相位变化量值远大于网络分析仪的相位不确定度量值 |
| 优点 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 可测量频带范围较宽、各向异性材料 2) 可测量中高损耗的样品 3) 可测量 MUT 的复相对介电常数和磁导率 |

| | |
|----|--|
| 限制 | <ol style="list-style-type: none"> 1) 测量精度受气隙效应的影响 2) 波导传输线的测量结果只能覆盖一段频率范围 3) 当样品长度是材料的半波长整数倍时，测量精度较低 4) 低频受限于实际样本长度，起始频率一般高于 100-500 MHz 5) 有限的低损耗分辨率，不适合低损耗材料、液体材料以及薄膜材料等的测量 6) 对样品的制造要求高，需要材料能够被机械加工成需要的尺寸且材料尺寸的加工精度直接影响测试结果，特别是环形样品（一般是破坏性的） |
|----|--|

4 转换算法

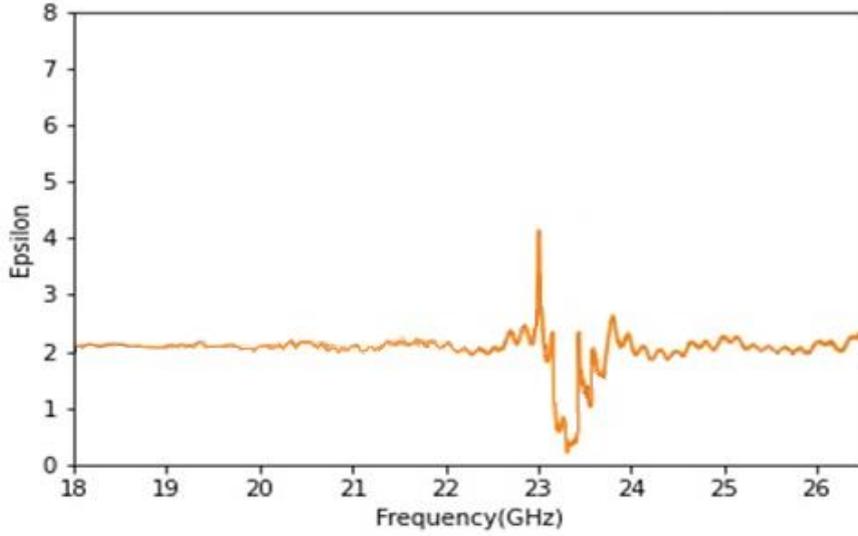
有多种 S 参数转换为介电常数和磁导率的算法，每种转换算法各有优势和局限性，特定的方法适用于特定的材料，为了精确测量材料的介电特性，用户需知道合适的测量和转换方法。NRW 算法快速且不迭代，但当 MUT 尺寸为测量频率对应半波长的整数倍时测量精度下降，这通常无法避免，尤其是在需要进行宽带测量时，低损耗材料可能存在不连续性。NIST Iterative 算法虽然比 NRW 算法更复杂，但有助于克服与样品尺寸相关的问题，并且适用于长样品和表征低损耗材料。非迭代法引入了有效电磁参数，且只适用于磁导率 $\mu_r = 1$ 情况下的介电常数计算。

| Materials | Length | Magnetic Properties | Measurement Methods | Conversion Methods | S-Parameters | Dielectric Properties | Speed | Accuracy |
|-----------------|--------|---------------------|---------------------|--------------------|---|----------------------------|-------|----------|
| Lossy solids | Short | non-magnetics | TR | NRW | S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 或 S_{11} 、 S_{21} | ϵ_r 、 μ_r | Fast | Medium |
| Lossy solids | Short | magnetics | TR | NRW | S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 或 S_{11} 、 S_{21} | ϵ_r 、 μ_r | Fast | Medium |
| Low loss solids | Long | non-magnetics | TR | NIST Iterative | S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 或 S_{11} 、 S_{21} | ϵ_r 、 $\mu_r = 1$ | Slow | Good |
| Low loss solids | Long | non-magnetics | TR | New Non-Iterative | S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 或 S_{11} 、 S_{21} | ϵ_r 、 $\mu_r = 1$ | Fast | Good |

4.1 Nicholson-Ross-Weir (NRW)

4.1.1 算法简介

NRW 法根据 S 参数直接计算介电常数和磁导率，需要测量 MUT 的四个 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{12} 参数或一对 S_{11} 、 S_{21} 参数。当被测样品为低损耗材料，且被测样品长度是测量频率对应半波长的整数倍时，本算法可能因相位模糊问题造成计算结果偏差。故尽可能使用短的样品，通常该方法的最佳样品厚度为 $\lambda_g/4$ 。下面是 SNA5000A 材料测量模式下使用 NRW 方法测定聚四氟乙烯 (PTFE) 介电常数的曲线图。



从图中可以看出，NRW方法在样品半波长的整数倍处测得的值是跳变的。这是由于在与半波长相对应的点上， S_{11} 会变得非常小，而VNA在测量小 S_{11} 相位时不确定度非常大，最终导致频率出现跳变。这种情况可以通过减少样品的长度来改善，但当样品的 ϵ_r 、 μ_r 未知时很难确定合适的取样长度。

| 优点 | 限制 |
|--------------|-----------------------|
| 1) 计算速度快 | 1) 在半波长整数倍相对应的频率上存在跳变 |
| 2) 适用于波导和同轴线 | 2) 材料长度影响算法性能，只适用于短材料 |
| | 3) 不适用于低损耗材料 |

4.1.2 计算步骤

根据被测样品S参数测量得到的 S_{11} 、 S_{21} ，计算复相对介电常数和相对复磁导率的步骤如下：先计算出中间变量 x ， Γ ，再计算出中间变量 T ， Λ ，最终计算出 ϵ_r 、 μ_r 。

通过VNA测量得到材料的 S_{11} 和 S_{21} 之后，通过下列公式求解出反射系数 Γ 和传输系数 T 。

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (1.1)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (1.2)$$

联立上式，计算中间变量 x ，解得反射系数 Γ 和传输系数 T ：

$$x = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (1.3)$$

$$\Gamma = x \pm \sqrt{x^2 - 1} \quad (1.4)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (1.5)$$

计算中间变量 Λ ，最终算得复相对磁导率 μ_r 和复相对介电常数 ϵ_r ：

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\epsilon_r * \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right)^2 \quad (1.6)$$

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{\Lambda(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} + \frac{1}{\Lambda^2} \right) \quad (1.8)$$

在计算 Λ 的过程中，涉及到相位模糊的问题，当材料长度增加一个波长倍数时，传输系数 T 的相位并不会改变，如下所示：

$$\ln\left(\frac{1}{T}\right) = -\ln(|T|) - j\varphi + j2\pi n \quad (1.9)$$

计算得到 T 之后，无法确定上式中 n ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 的值，可以通过两种方法确定。

第一种方法是通过群时延确定，因为经过材料的时延是材料总长度的函数。求出 ε_r 和 μ_r 后比较测量的实际群时延和计算的理论群时延，从而找到 n 的正解。

计算出的理论群时延为：

$$\tau_{cal} = L \frac{d}{df} \sqrt{\frac{\varepsilon_r \mu_r f^2}{c^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}} = \frac{L f \varepsilon_r \mu_r + f^2 \frac{1}{2} \frac{d(\varepsilon_r \mu_r)}{df}}{c^2 \sqrt{\frac{\varepsilon_r \mu_r f^2}{c^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (1.10)$$

测量出的实际群时延为：

$$\tau_{meas} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df} \quad (1.11)$$

τ_{meas} 可以直接通过矢量网络分析仪测量得到，而 τ_{cal} 随着 n 的变化而变化。

当 $\tau_{cal-k} - \tau_{meas} \approx 0$ 时， $n=k$ 为正确的解。

第二种方法是利用样本中的 ε_r^* 和 μ_r^* 的初始猜测值，通过 λ_g 来估计 n 值。

$$\frac{1}{\Lambda} = j \left(\frac{\gamma}{2\pi} \right), \quad \text{其中 } \gamma = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_r^* \mu_r^* - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right)^2} \quad (1.12)$$

$$\text{Re} \left(\frac{1}{\Lambda} \right) = \frac{1}{\lambda_g} \quad (1.13)$$

通过上式求解 λ_g ，从而确定 n 值。

4.1.3 简化计算步骤

当已知被测样品为非磁性材料，此时 $\mu_r = 1$ ，可以对NRW算法进行简化，通过式(1.6)和(1.7)直接求得复相对介电常数 ε_r ，且该方法不会受到相位模糊的影响。

代入 $\mu_r = 1$ 到式(1.7)中，变换可得，

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}} \quad (1.14)$$

联立式(1.6)和(1.14)可得，

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \left(\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = \left(\frac{\varepsilon_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) \quad (1.15)$$

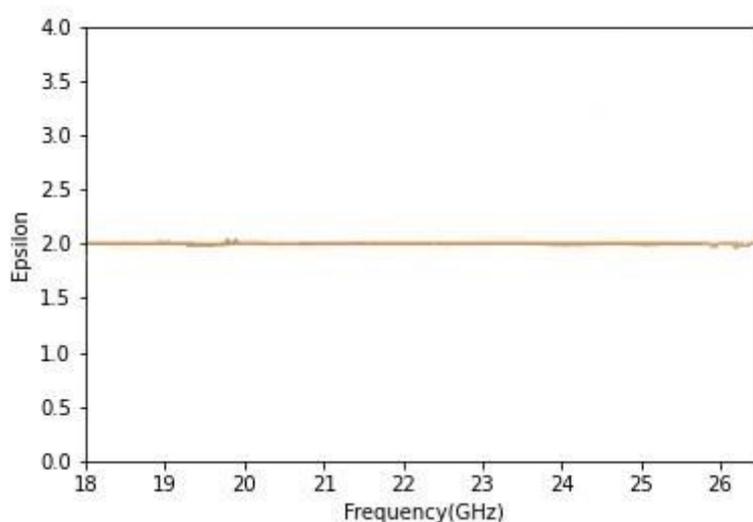
解得，

$$\epsilon_r = \left(\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma}\right)^2 \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2}\right) + \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \quad (1.16)$$

4.2 NIST Iterative

4.2.1 算法简介

NIST 迭代法采用 Newton-Raphson 求根法进行计算，仅适用于计算介电常数，需要测量 MUT 的四个 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{12} 参数或一对 S_{11} 、 S_{21} 参数。如果设置恰当的材料介电常数的初始估计值，该方法能很好地迭代出准确的结果。当样品厚度是半波长的整数倍 ($n\lambda_g/2$) 时，该方法不会像 NRW 方法一样出现不准确峰值，适用于测量长样品和低损耗材料。NIST 迭代法计算步骤是先在选定频率点上设定被测样品的介电常数初始值，再根据被测样品 S 参数测量值，通过逐步迭代的算法得到被测样品的介电常数最终值。下面是 SNA5000A 材料测量模式下使用 NIST 迭代方法测定聚四氟乙烯 (PTFE) 介电常数的曲线图。



如图所示，使用该方法可通过 S 参数获得稳定的介电常数，且可对任意长度的样品进行测量，同时通过设置 $\mu_r = 1$ 将 NRW 方法中存在的稳定性降至最低，但在此设置下只能测量非磁性材料。

| 优点 | 限制 |
|---|---|
| 1) 平滑的介电常数结果，无跳变 2) 计算结果精确 3) 可使用任意长度的样本 4) 适用于低损耗和高损耗材料 | 1) 仅适用于介电常数测量 2) 需要对介电常数进行初值估计，如果初值选择不恰当会出现迭代失败的情况 |

4.2.2 计算步骤

在进行测量前，需要进行复相对介电常数和复相对磁导率的初始值选取。由于涉及运算方程有多个解，需要考虑运算方程根值的合理性，得到一个合适的运算方程根值。基本的考虑如下：当运算方程解导致根值趋于不稳定结果，应不选取此方程解；当选用的根值在进行重复迭代运算时导致运算结果上下剧烈波动或突然变为另一根值的运算结果，可以认为选用的根值错误，应重新选取初始值进行迭代计算。

反射系数计算如下，

$$\Gamma = \frac{\frac{\gamma_0}{\mu_0} - \frac{\gamma}{\mu}}{\frac{\gamma_0}{\mu_0} + \frac{\gamma}{\mu}} \quad (2.1)$$

电磁波在空气中的传播常数 γ_0 和在材料中的传播常数 γ 可通过下式确定，

$$\gamma_0 = j \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2} \quad (2.2)$$

$$\gamma = j \sqrt{\frac{\omega^2 \mu_r \varepsilon_r}{c^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2} \quad (2.3)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (2.4)$$

联立式 (2.3) 和 (2.4)，代入 $\mu_r = 1$ 得，

$$\gamma = j \sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2} \quad (2.5)$$

代入 $\mu_r = 1$ ，计算反射系数 Γ 和传输系数 T ，

$$\Gamma = \frac{\frac{\gamma_0}{\mu_0} - \frac{\gamma}{\mu}}{\frac{\gamma_0}{\mu_0} + \frac{\gamma}{\mu}} = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0 + \gamma} \quad (2.6)$$

$$T = e^{-\gamma L} = e^{-jL \left(\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2} \right)} \quad (2.7)$$

求解下列 2 个方程中的任意一个都可以确定复相对介电常数，

$$F(\varepsilon_r) = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12} - \left[e^{-2\gamma_0(L_{air}-L)} \right] \frac{T^2 - \Gamma^2}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.8)$$

$$F(\varepsilon_r) = \frac{S_{21} + S_{12}}{2(1 - \Gamma^2 T^2)} - T(1 - \Gamma^2) e^{-j\gamma_0(L_{air}-L)} \quad (2.9)$$

根据设定的复相对介电常数初始值计算得到 $F(\varepsilon_r)$ 的实部和虚部后，计算得到雅可比矩阵 J ，

$$\begin{aligned} F(\varepsilon_{r1}) &= f_1(\varepsilon', \varepsilon'') \\ F(\varepsilon_{r2}) &= f_2(\varepsilon', \varepsilon'') \\ J &= \begin{pmatrix} \frac{f_1(\varepsilon' + h, \varepsilon'') - f_1(\varepsilon' - h, \varepsilon'')}{2h} & \frac{f_1(\varepsilon', \varepsilon'' + h) - f_1(\varepsilon', \varepsilon'' - h)}{2h} \\ \frac{f_2(\varepsilon' + h, \varepsilon'') - f_2(\varepsilon' - h, \varepsilon'')}{2h} & \frac{f_2(\varepsilon', \varepsilon'' + h) - f_2(\varepsilon', \varepsilon'' - h)}{2h} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.10)$$

其中， ε' ， ε'' 表示复相对介电常数的实部和虚部， h 表示无穷小值。

$$\varepsilon_{n+1} = \varepsilon_n + J^{-1} \varepsilon_n \quad (2.11)$$

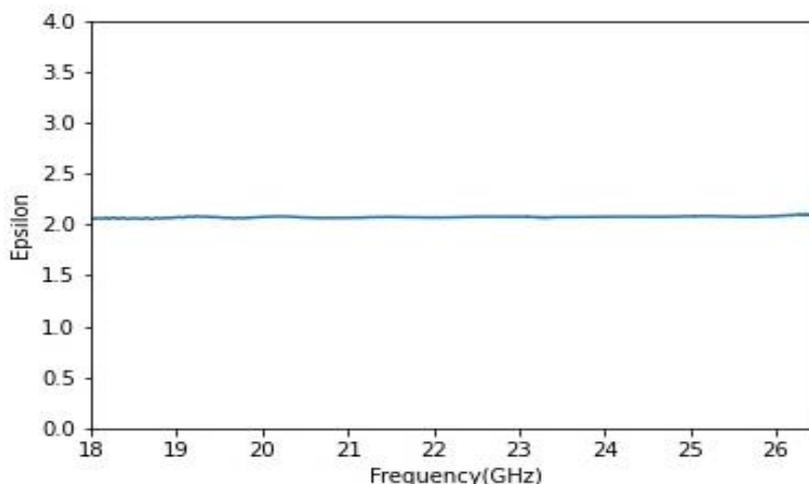
得到 ε_{n+1} 后判断是否满足收敛条件，若满足则停止迭代，否则继续运算，

$$\max[|(\varepsilon'_r)_{n+1} - (\varepsilon'_r)_n|, |(\varepsilon''_r)_{n+1} - (\varepsilon''_r)_n|] < a \quad (2.12)$$

4.3 New Non-Iterative

4.3.1 算法简介

非迭代法与 NRW 法十分相似，不同的是它引入了有效电磁参数，且只适用于导磁率 $\mu_r = 1$ 情况下的介电常数计算，使用 MUT 的四个 S 参数 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 或仅两个 S 参数 S_{11} 、 S_{21} 来计算。该方法的优点是可以在任意样品长度的整个频率范围内保持稳定，同时在与样品半波长的整数倍相对应的频率上不会出现跳变。与 NIST 迭代法相比，它不需要对介电常数进行初值估计，而且计算速度非常快，精确度与迭代法相当。下面是 SNA5000A 材料测量模式下使用新的非迭代方法测定聚四氟乙烯 (PTFE) 介电常数的曲线图。



该方法与 NRW 和 NIST 迭代法进行比较，在与样品中半波长的整数倍相对应的频率上没有出现跳变，所获得的介电常数的精确度与迭代法相当。

| 优点 | 限制 |
|---|---------------|
| 1) 平滑稳定的复相对介电常数结果，无跳变 2) 计算精确 3) 可使用任意长度的样本 4) 快速、非迭代、无需估计初始 | 1) 仅适用于测量介电常数 |

4.3.2 计算步骤

计算反射系数 Γ 和传输系数 T 的方法与 NRW 相同，公式如下：

$$x = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (3.1)$$

$$\Gamma = x \pm \sqrt{x^2 - 1} \quad (3.2)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (3.3)$$

解得反射系数 Γ 和传输系数 T 后，计算中间量 $\frac{1}{\Lambda^2}$ ，

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\varepsilon_r * \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right)^2 \quad (3.4)$$

$$\lambda_{og} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (3.5)$$

定义有效电磁参数 ε_{eff} , μ_{eff} ,

$$\mu_{eff} = \frac{\lambda_{og}}{\Lambda} \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\lambda_{og}}{\Lambda} \left(\frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right) \quad (3.7)$$

最后计算复相对介电常数和复相对磁导率,

$$\mu_r = \mu_{eff} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_r = \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \right) \varepsilon_{eff} + \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \frac{1}{\mu_{eff}} \quad (3.9)$$

新的非迭代算法仅适用于 $\mu_r = 1$ 的情况, 代入得,

$$\varepsilon_r = \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \right) \varepsilon_{eff} + \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \quad (3.10)$$

4.4 空气间隙补偿方法

当被测样品与放置在波导传输线中时, 样品表面与波导表面存在空气间隙时可建立一个电容串联电路模型, 利用这一模型可对介电常数和磁导率进行修正。应用此项修正的前提是样品表面与波导表面存在空气间隙很小, 并且样品介电常数量值处在小量值至中等量值之间。

样品的实相对介电常数按下式修正:

$$\varepsilon'_{rc} = \varepsilon'_r \frac{d(1 + \tan^2 \delta)[b - (b - d)\varepsilon'_r(1 + \tan^2 \delta)]}{[b - (b - d)\varepsilon'_r(1 + \tan^2 \delta)]^2 + b^2 \tan^2 \delta} \quad (4.1)$$

式中:

d —— 被测样品的高度, 单位为米(m);

b —— 波导装置内壁的高度, 单位为米(m);

被测样品的介质损耗指数按下式修正:

$$\varepsilon''_{rc} = \varepsilon''_r \frac{b \tan \delta}{b - (b - d)\varepsilon'_r(1 + \tan^2 \delta)} \quad (4.2)$$

被测被测样品的实相对磁导率按下式修正:

$$\mu'_{rc} = \mu'_r \frac{b}{d} - \frac{b - d}{d} \quad (4.3)$$

被测样品的磁损耗指数按下式修正:

$$\mu''_{rc} = \mu''_r \frac{b}{d} \quad (4.4)$$

5 材料测量示例

传输线法的典型测量系统由一台矢量网络分析仪、同轴或波导传输线以及计算介电常数和磁导率的材料测量选件组成，校准类型为 TRL，使用非迭代法、NIST 与 NRW 算法进行计算。将一个待测样品放置在波导测量装置内，波导装置两端通过波导同轴转换器连接至经过校准的网络分析仪，分别测量 S11、S22、S21 和 S12 参数，选择合适的数据处理方法，代入 S 参数值计算介电常数和磁导率，即可完成材料测量。为了得到精准的测量结果，将波导同轴转换器连接到分析仪端口后，进行材料测量前要充分预热。

5.1 测量条件

测量仪器：鼎阳科技矢量网络分析仪 SNA5032A

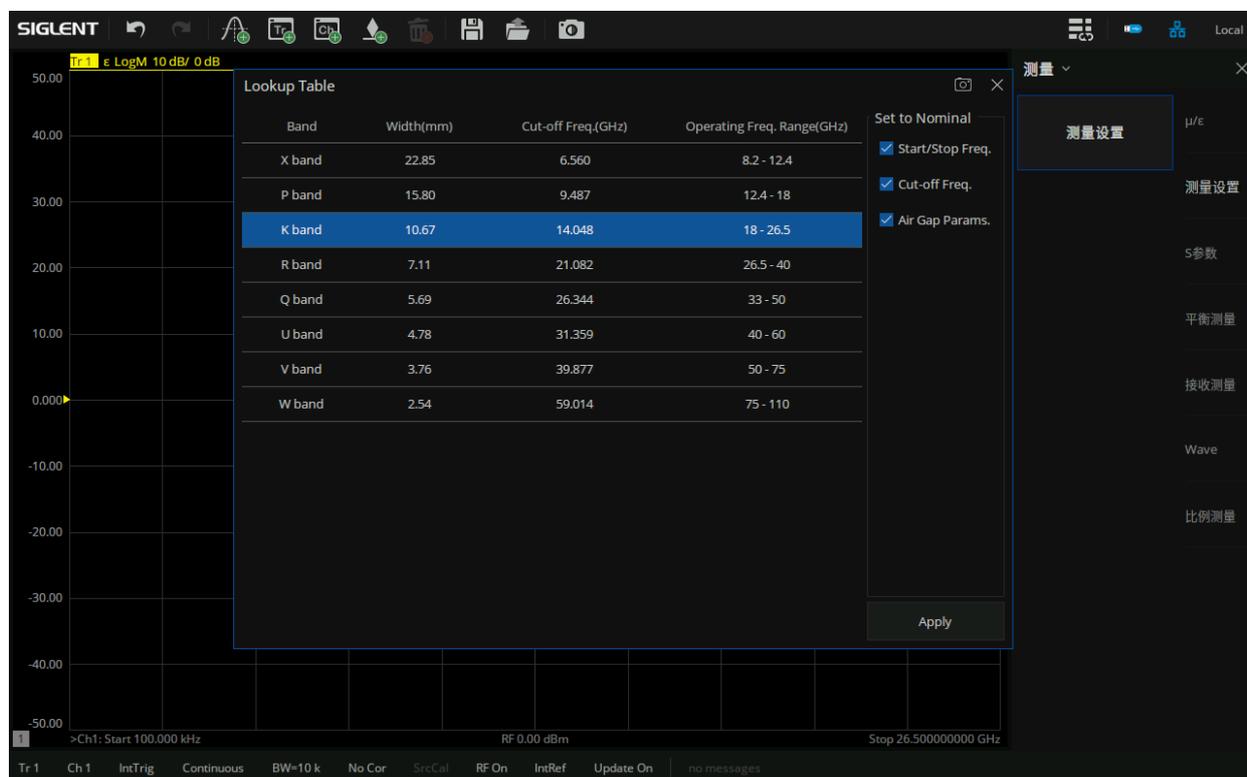
测量材料：聚四氟乙烯

测量工装：同轴线缆、波导夹具

测量目的：通过矩形波导容器，测量聚四氟乙烯的介电常数

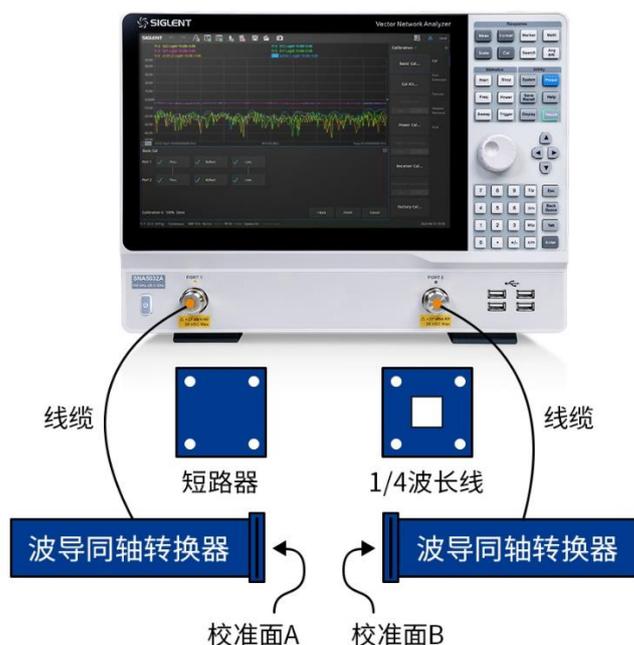
5.2 夹具参数设置

在测量前需要结合测量条件对仪器进行一系列设置（测量模式、扫描频率范围、中频带宽、扫描点数等）。点击 **Meas** > **Mode** > **MATERIAL** 进入材料测量模式并显示配置对话框，可根据波导夹具的信息通过 **Quick Setting** 快速设置相关参数，点击 **Lookup...** 进行波导夹具相关参数的选择和设置，根据当前测试条件，选择 **K band** 类型波导，点击 **Apply** 应用波导配置，自动设置网络分析仪当前的频率范围，回到主配置界面完成预配置。

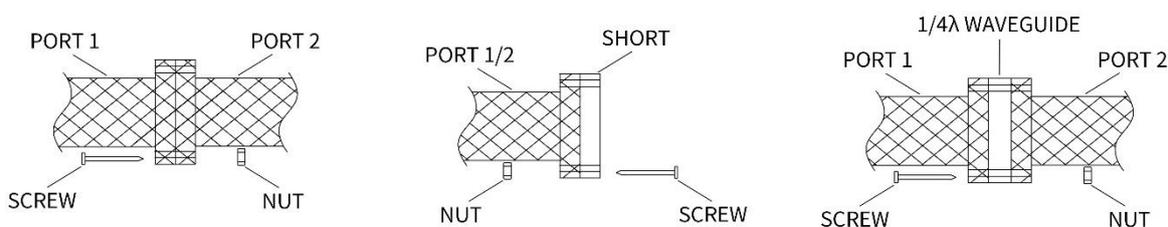


5.3 波导 TRL 校准

网络分析仪连接同轴波导转接器后进行校准，将校准平面延伸到转接器两端。鼎阳科技提供了频率范围为 18GHz-26.5GHz 的波导校准方案，可执行直通-反射-线路 (TRL) 校准，通过 3 种简单的连接方式即可把测量装置误差模型中所有的误差项求出，如图所示。使用 TRL 校准时，在校准面 A 和校准面 B 分别连接短路器完成 Reflect 校准，在校准面 A 和校准面 B 之间连接 1/4 波长偏移片完成 Line 校准，校准面 A 和校准面 B 直接连接完成 Thru 校准，分别完成各项校准，最终完成所有 TRL 校准。



波导校准连接示意图



Thru



Reflect

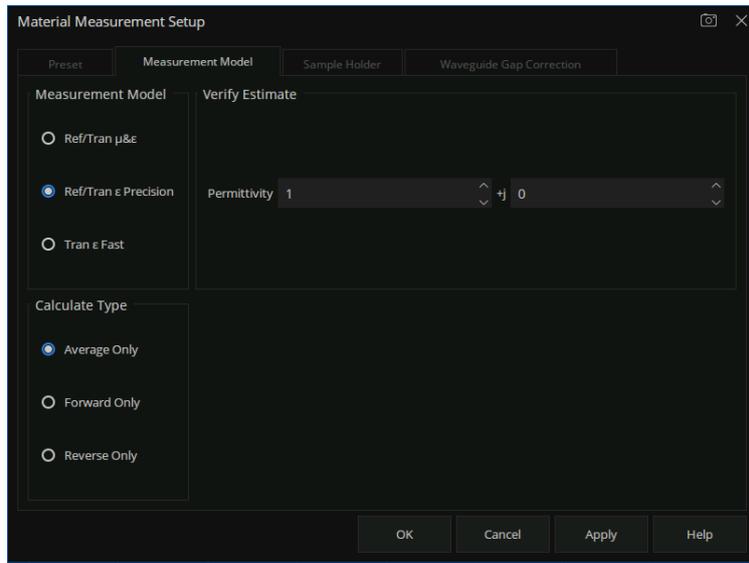


Line

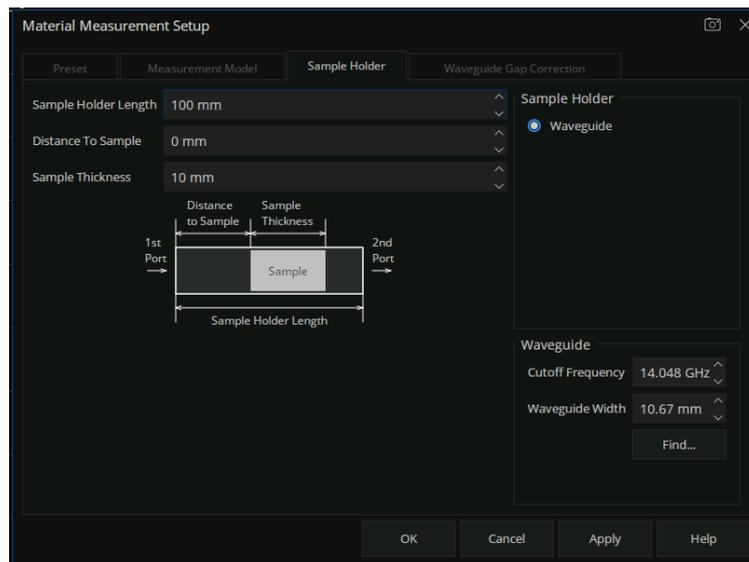
5.4 材料测量设置

1. 配置测量模型：根据材料类型、测量目标需要选择合适的测量模型，并配置当前材料样品数

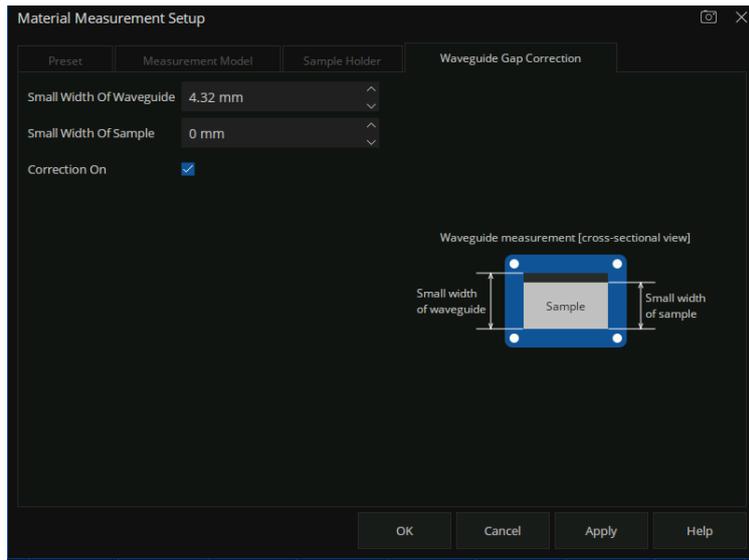
据。本例中选择基于 NIST 迭代法的 Ref/Tran ϵ Precision 测量模型，根据当前材料特性预设合适的介电常数初值用于模型迭代。



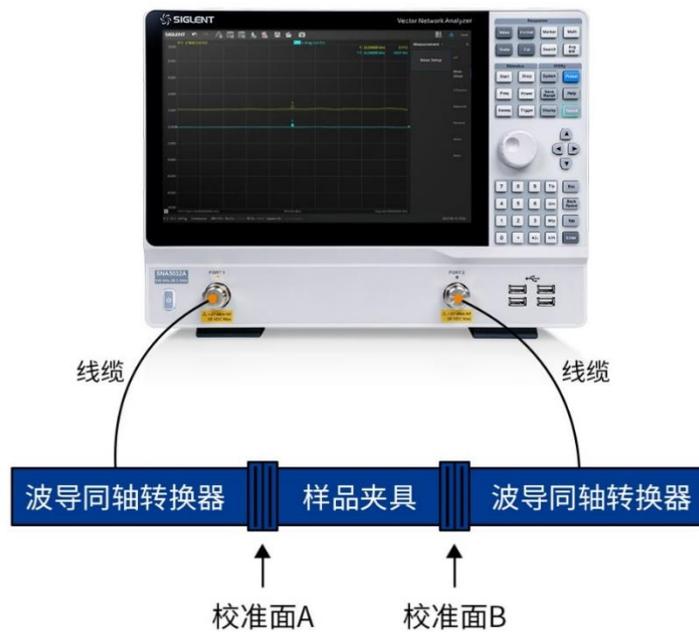
2. 配置样品夹具参数：配置波导夹具长度、样品与前向端口参考面的距离、样品长度。



3. 配置空隙补偿：如果样品和波导之间存在空隙需配置空隙补偿，配置样品高度、波导截面高度，勾选 **Correction On** 根据波导和样品的高度信息对计算结果进行修正。

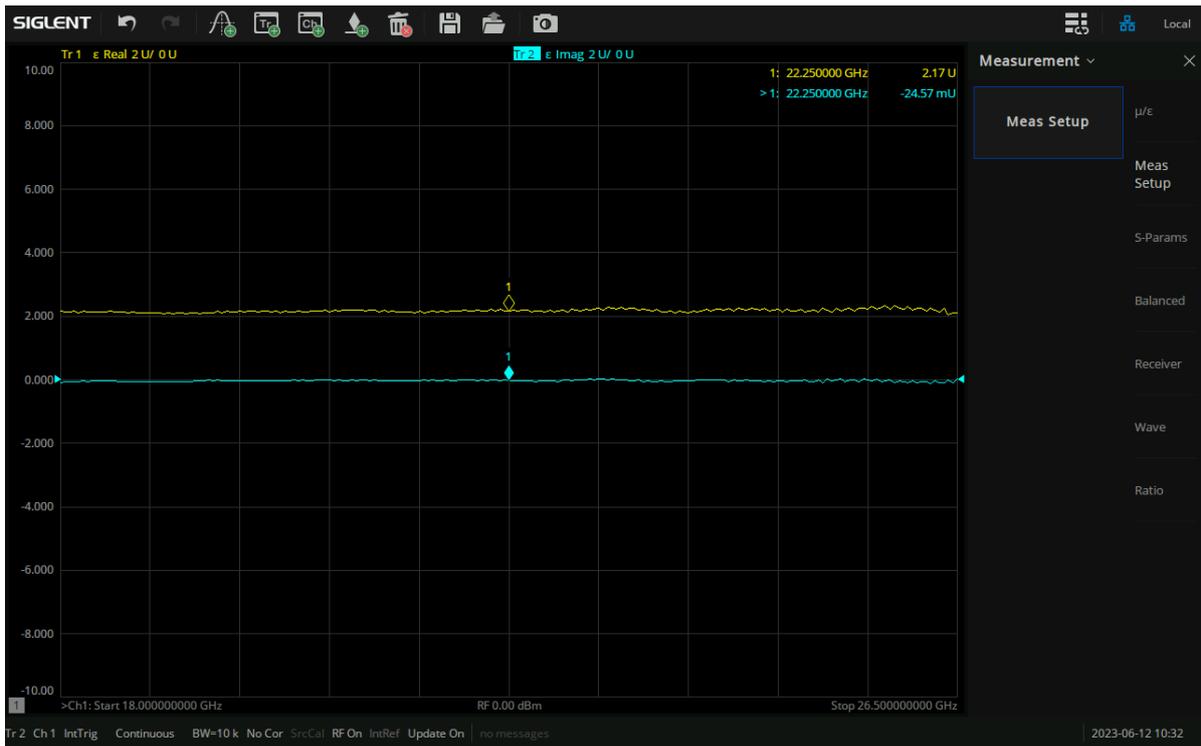


5.5 样品参数测量



材料测量连接示意图

将一切都配置完成后，开始测量聚四氟乙烯的介电常数。将样品从波导端口装入波导中，装入样品时应小心，避免样品损坏，装入后样品一侧表面应与波导参考面齐平。设置测量模式为 ϵ ，数据格式设置为实部，测量结果如下图所示。测量磁导率时，Measurement Model 需要设置为 Ref/Tran μ & ϵ ，设置测量模式为 μ ，数据格式设置为实部。



6 总结

鼎阳科技材料测量的全套解决方案，包括 SNA 系列矢量网络分析仪、MT 材料测量分析软件、KWR42A 波导校准件，可以帮助用户高效、精确的表征和测量材料的介电特性。SNA 系列矢量网络分析仪兼具出色的测量完整性和经济适用性，通过测量向导指引用户完成测量过程，测量结果可用多种格式绘制 (ϵ_r 、 μ_r 、 $\tan \delta$ 、 ϵ_r'' 、 ϵ_r' 、 μ_r' 、 μ_r'' 、 $\tan \delta_\mu$)，帮助用户更好地分析测量结果，非常适合实验室、研究机构和教育教学环境。

关于鼎阳

鼎阳科技 (SIGLENT) 是通用电子测试测量仪器领域的行业领军企业，A股上市公司。

2002年，鼎阳科技创始人开始专注于示波器研发，2005年成功研制出鼎阳第一款数字示波器。历经多年发展，鼎阳产品已扩展到数字示波器、手持示波表、函数/任意波形发生器、频谱分析仪、矢量网络分析仪、射频/微波信号源、台式万用表、直流电源、电子负载等基础测试测量仪器产品，是全球极少数能够同时研发、生产、销售数字示波器、信号发生器、频谱分析仪和矢量网络分析仪四大通用电子测试测量仪器主力产品的厂家之一，国家重点“小巨人”企业。同时也是国内主要竞争对手中极少数同时拥有这四大主力产品并且四大主力产品全线进入高端领域的厂家。公司总部位于深圳，在美国克利夫兰、德国奥格斯堡、日本东京成立了子公司，在成都成立了分公司，产品远销全球80多个国家和地区，SIGLENT已经成为全球知名的测试测量仪器品牌。

联系我们

深圳市鼎阳科技股份有限公司
全国免费服务热线：400-878-0807
网址：www.siglent.com

声明

 SIGLENT® 鼎阳 是深圳市鼎阳科技股份有限公司的注册商标，事先未经允许，不得以任何形式或通过任何方式复制本手册中的任何内容。
本资料中的信息代替原先的此前所有版本。技术数据如有变更，恕不另行通告。

技术许可

对于本文档中描述的硬件和软件，仅在得到许可的情况下才会提供，并且只能根据许可进行使用或复制。

