

是德科技

材料介电特性的测量基础

应用指南



目录

序言	3
介电原理	4
介电常数	4
导磁率	7
电磁传播	8
介电机理	10
取向(偶极子)偏振	11
电子和原子偏振	11
弛豫时间	12
德拜关系式	12
科尔-科尔图	13
离子电导率	13
界面或空间电荷偏振	14
测量系统	15
网络分析仪	15
阻抗分析仪和LCR表	16
夹具	16
软件	16
测量技术	17
同轴探头法	17
传输线法	20
自由空间法	23
谐振腔法	26
平行板法	29
电感测量法	30
方法比较	31
是德科技解决方案	32
参考资料	33
网络资源	34

序言

各行各业都需要对它们所用的材料有非常清晰的了解，以便缩短设计、进厂检验、流程检测和质量保证等阶段所花费的时间。每种材料都具有一些独特的电气特征，与介电特性有关。通过对介电特性进行精确测量，科技人员和工程师能够获得宝贵的信息，从而在具体应用中恰当地运用这些材料，创造更可靠的设计或监测生产流程，改进质量控制。

介电材料测量可以为许多电子应用提供关键设计参数信息。电缆绝缘体损耗、基片阻抗或介质谐振器频率都与材料介电特性有关。信息也有助于改进铁氧体、吸收器和封装设计。通过充分认识介电特性，航空航天、汽车、食品和医药行业中的最新应用也获益匪浅。

是德科技提供多种仪器、夹具和软件，用于测量材料的介电特性。是德科技测量仪器(例如网络分析仪、阻抗分析仪和LCR表)能够覆盖最高1.1 THz的频率范围。用于夹持被测材料(MUT)的夹具分别适用于同轴探头法、平行板法、同轴/波导传输线法、自由空间法和谐振腔法。下表显示了是德科技材料测试解决方案所能测量的产品。

表 1. 材料测量应用实例

行业	应用/产品
电子	电容器、基片、PCB、PCB天线、铁氧体、磁记录头、吸收器、SAR体模材料、传感器
航空航天/国防	隐身技术、RAM(雷达波吸收材料)、雷达天线罩
工业材料	陶瓷和复合材料: IC封装、航空航天与汽车零部件、水泥、涂料和生物植入
	聚合物和塑料: 纤维、基片、薄膜、绝缘材料
	水凝胶: 一次性尿片、软性隐形眼镜
	液晶: 显示器
	橡胶、半导体和超导体
	其他包含此类材料的产品: 轮胎、涂料、粘合剂等
食品和农业	食品保鲜(变质)研究、微波食品开发、包装、含水率测量
林业和矿业	木材/纸制品含水率测量、含油量分析
制药和医疗	药物研究和生产、生物植入体、人体组织定征、生物量、化学浓缩、发酵

介电原理

本文将讨论介电常数和导磁率两种介电特性。另一种材料特性——电阻率不属于本文讨论的范围。关于电阻率及其测量的信息请参见是德科技应用指南1369-1¹。必须注意，介电常数和导磁率不是恒定不变的。频率、温度、方向、混合、压力和材料分子结构等因素都可能对它们产生影响，使它们发生变化。

介电常数

材料如果在受到外部电场作用时能够储存电能，就称为“电介质”。当给平行板电容器施加直流电压时，如果两板之间存在介电材料，那么可以储存比没有介电材料(真空)时更多的电荷。介电材料可以通过中和电极上的电荷，使电容器储存更多电荷，而通常情况下，这些电荷将流向外部电场。介电材料的电容与介电常数有关。当在平行板电容器上并联直流电压源 v 时(图1)，两板之间有介电材料的配置可以比没有介电材料(真空)的配置储存更多的电荷。

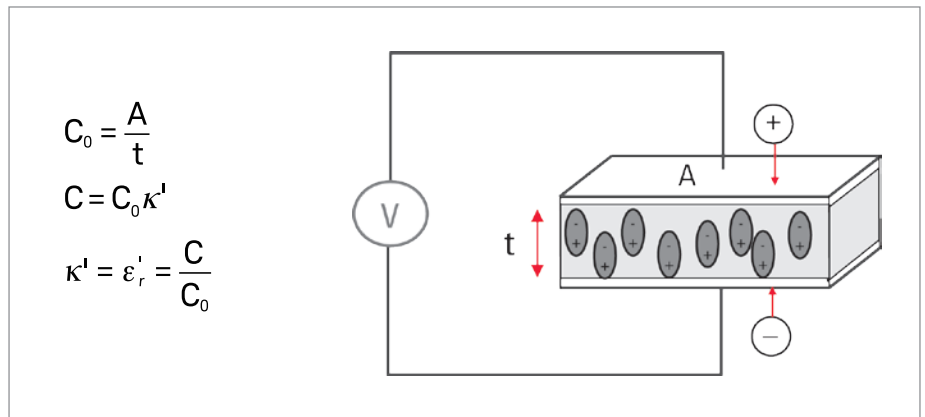


图1. 平行板电容器, 直流实例

其中， C 和 C_0 分别是有和没有电介质时的电容； $\kappa' = \epsilon'_r$ 是实际介电常数或介电常数， A 和 t 分别是电容器平板的面积和间距(图1)。介电材料可以通过中和电极上的电荷，使电容器储存更多电荷，而通常情况下，这些电荷将流向外部电场。根据上面的方程式可知，介电材料的电容与介电常数有关。如果在同一个电容器上并联交流正弦电压源(图2)，得到的电流将包括充电电流 I_c 和与介电常数有关的损耗电流 I_l 。材料中的损耗可以用与电容器(C)并联的电导(G)表示。

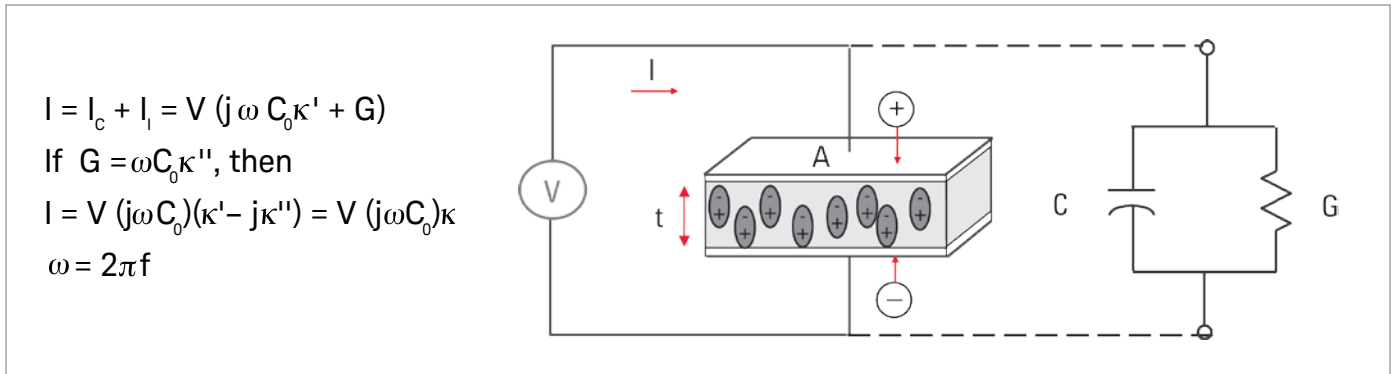


图2. 平行板电容器, 交流实例

复数介电常数 κ 由实部 κ' (表示储存电荷) 和虚部 κ'' (表示损耗电荷) 组成。下面的符号可以互换表示复数介电常数

$$\kappa = \kappa^* = \epsilon_r = \epsilon_r^*$$

根据电磁理论, 电位移 (电通量密度) D_f 的定义是:

$$D_f = \epsilon E$$

其中, $\epsilon = \epsilon^* = \epsilon_0 \epsilon_r$ 是绝对介电常数, ϵ_r 是相对介电常数, $\epsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ F/m 是自由空间介电常数, E 是电场。

介电常数描述的是材料与电场 E 的相互作用, 是一个复数。

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

介电常数 (κ) 等于相对介电常数 (ϵ_r), 或绝对介电常数 (ϵ) 与自由空间介电常数 (ϵ_0) 之比。介电常数的实部 (ϵ_r') 表示外部电场有多少电能储存到材料中。介电常数的虚部 (ϵ_r'') 称为损耗因子, 表示材料中有多少电能耗散到外部电场。介电常数的虚部 (ϵ_r'') 始终大于 0, 通常远远小于 (ϵ_r')。损耗因子同时包括电介质损耗和电导率的效应。

如果用简单的矢量图(图3)表示复数介电常数, 实部和虚部的相位将会相差 90° 。其矢量和与实轴(ϵ_r')形成夹角 δ 。材料的相对"损耗"等于损耗电量与储存电量的比值。

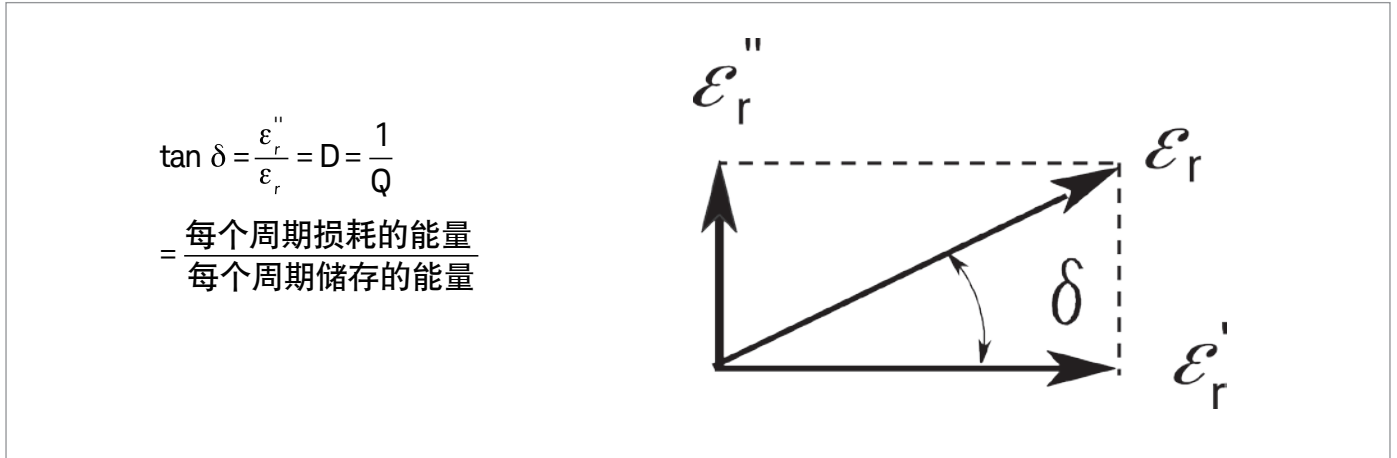


图3. 损耗正切矢量图

损耗正切或 $\tan \delta$ 定义为介电常数的虚部与实部之比。D 表示耗散因子, Q 表示品质因数。损耗正切 $\tan \delta$ 可以读成 tan delta、损耗正切角或耗散因子。有时, "品质因数或 Q 因数" 也用来描述电子微波材料的特性, 等于损耗正切的倒数。对于损耗非常低的材料, $\tan \delta \approx \delta$, 所以损耗正切可以用角度单位毫弧度或微弧度来表示。

导磁率

导磁率(μ)描述了材料与磁场的相互作用。为了分析导磁率可以用一个电感加电阻来进行类比,其中用电阻表示磁性材料中的磁芯损耗(图4)。如果在电感上并联直流电流源,则磁芯材料中的电感与导磁率有关。

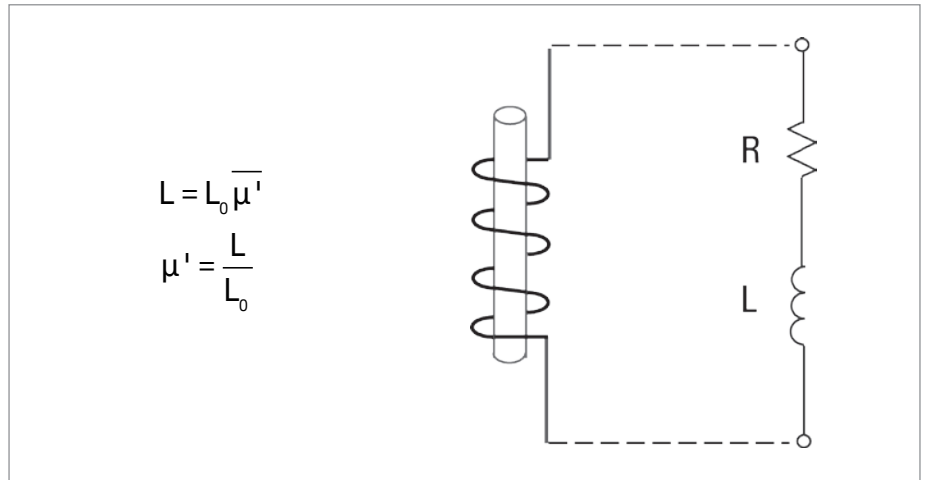


图4. 电感器

在方程式中, L 是材料的电感, L_0 是线圈的自由空间电感, μ' 是实际导磁率。如果在同一电感器上并联一个交流正弦电流源, 得到的电压将包含感应电压和与导磁率有关的损耗电压两部分。磁芯损耗可以用与电感器 (L) 串联的电阻 (R) 表示。复数导磁率 (μ^* 或 μ) 由表示电能储存项的实部 (μ') 和表示电能损耗项的虚部 (μ'') 组成。相对介电常数 μ_r 是相对于自由空间的介电常数:

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

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 是自由空间导磁率

铁(铁氧化物)、钴、镍及其合金等材料具有较大的磁性; 但许多材料没有磁性, 其导磁率与自由空间的导磁率 ($\mu_r = 1$) 非常接近。另一方面, 所有材料都具有介电特性, 因此本文讨论的重点主要是导磁率测量。

电磁波传播

在时变条件下(例如正弦波), 电场和磁场会同时出现。电磁波在自由空间中的传播速度可以达到光速 $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 但在材料中的传播速度慢得多。电磁波有不同的波长。信号波长 λ 与频率 f ($\lambda=c/f$) 成反比, 因此随着频率的增加, 波长会减小。例如在自由空间中, 10 MHz 信号的波长为 30 m, 而 10 GHz 信号的波长仅为 3 cm。电磁波的传播在很多方面是由材料的介电常数和导磁率决定的。我们从"光的角度"来分析电介质特性。假设在自由空间中有一个材料平板(MUT), 一个 TEM 波入射到其表面(图 5), 从而产生入射波、反射波和发射波。由于材料中的波阻抗 Z 与自由空间阻抗 η (或 Z_0) 不等(更低), 因此会出现阻抗失配, 产生反射波。一部分能量会渗透到样品中。波一旦进入平板, 波速 v 就会变得比光速 c 慢。根据下面的方程式可知, 波长 λ_d 比自由空间中的波长 λ_0 更短。由于材料始终会产生某些损耗, 波会出现衰减或插入损耗。为了方便计算, 不考虑第二个边界处的失配。

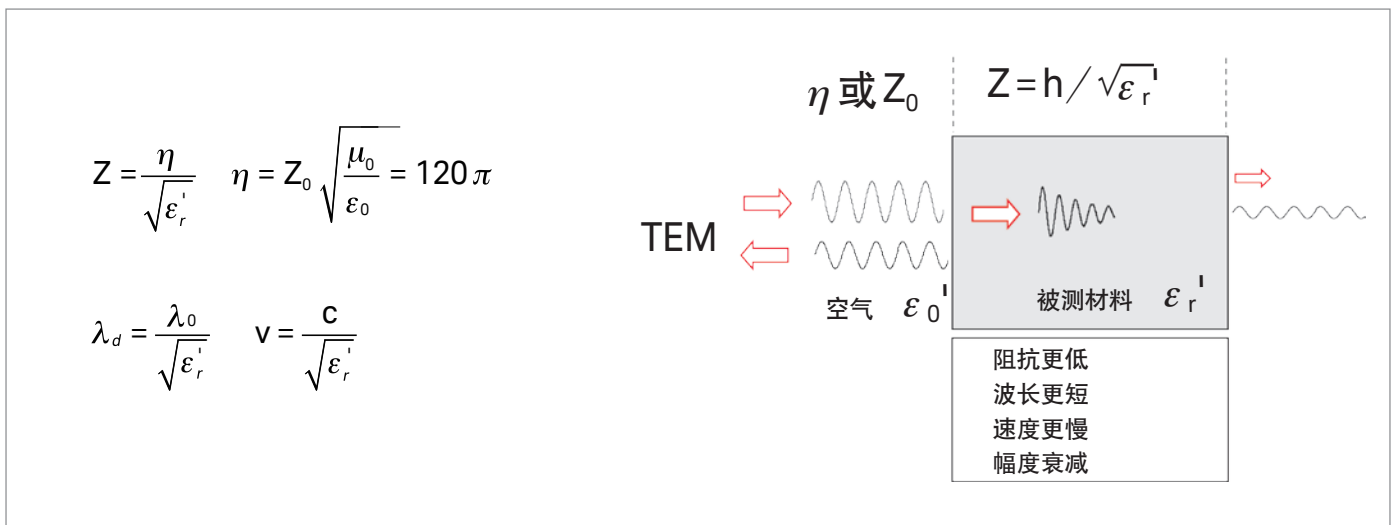


图 5. 反射和发射信号

图6描述了在样品无限长(不考虑样品背面的反射)条件下,被测材料(MUT)介电常数与反射系数 $|\Gamma|$ 之间的关系。可以看出,介电常数的值较小时(20以下),较小的介电常数变化就会导致反射系数有很大的变化。在此范围内用反射系数进行介电常数测量,灵敏度较高,因此精度也较高。相比之下,当介电常数的值较大时(例如70至90之间),反射系数随介电常数的变化极小,测量的不确定度就会比较大。

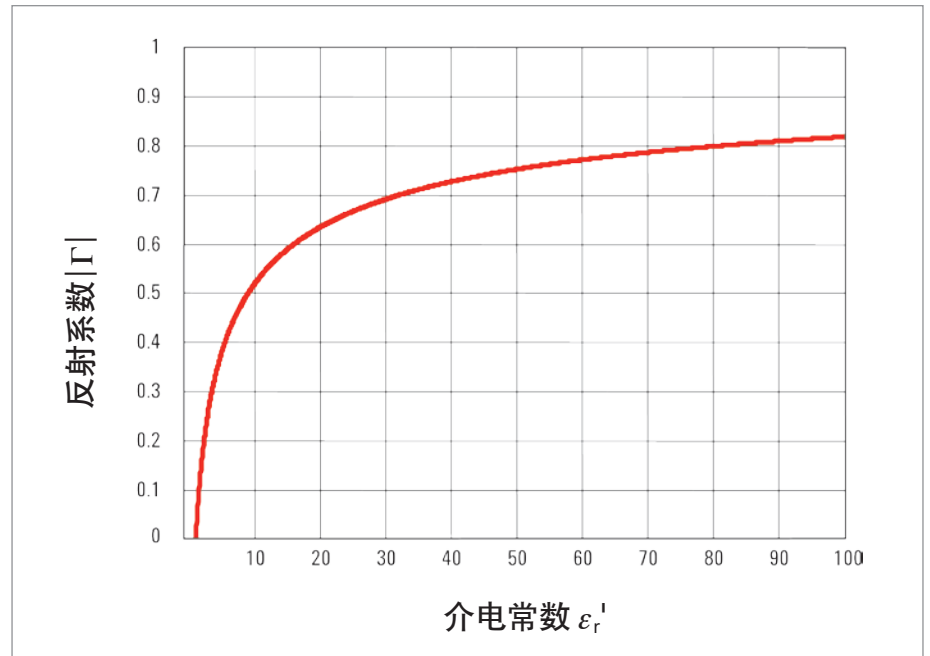


图6. 反射系数与介电常数的对比

介电机理

材料自身的多种介电机理或极化效应(图7)。介电材料中包含有序排列的电荷载流子，这些载流子如果受到电场作用，将会发生位移。极化导致电荷对电场进行补偿，正电荷和负电荷会朝相反方向移动。

从微观角度上看，有多种介电机理会对介电特性产生影响。偶极子取向和离子传导在微波频率上会发生强烈的相互作用。例如，水分子是永久性偶极子，在交替电场的作用下会发生旋转。这些机理具有非常大的损耗——这可以解释为什么微波炉能够加热食物。原子和电子机理相对较弱，在微波范围内通常是恒定不变的。每个介电机理都具有特征的“截止频率”。随着频率的增加，较慢的机理会依次退出，只剩下较快的机理，用 ϵ' 表示。损耗因子(ϵ_r'')将会在每个临界频率上达到相应的峰值。对于不同的材料，每个机理的幅度和“截止频率”都是独一无二的。水在低频范围内具有非常强的偶极子效应，但是其介电常数在22 GHz附近会明显下降。另一方面，PTFE没有偶极子机理，其介电常数在毫米波范围内也是非常恒定的。

谐振效应通常与电子或原子偏振有关。弛豫效应通常与取向偏振有关。

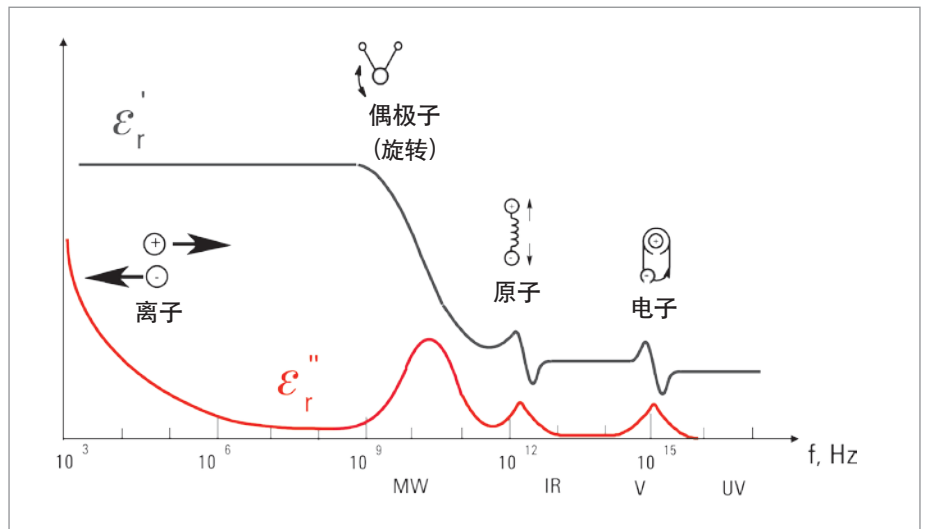


图7. 介电机理的频率响应

取向(偶极子)偏振

分子是由多个原子组成，这些原子会共享一个或多个电子。电子的重新排列可能导致电荷分布失衡，形成永久性偶极矩。在没有电场作用的条件下，这些力矩的方向是随机的，不存在偏振。电场 E 将在电偶极子上施加扭矩 T ，该偶极子将旋转到与电场方向对齐，导致取向偏振发生(图8)。如果电场方向改变，扭矩也将随之改变。

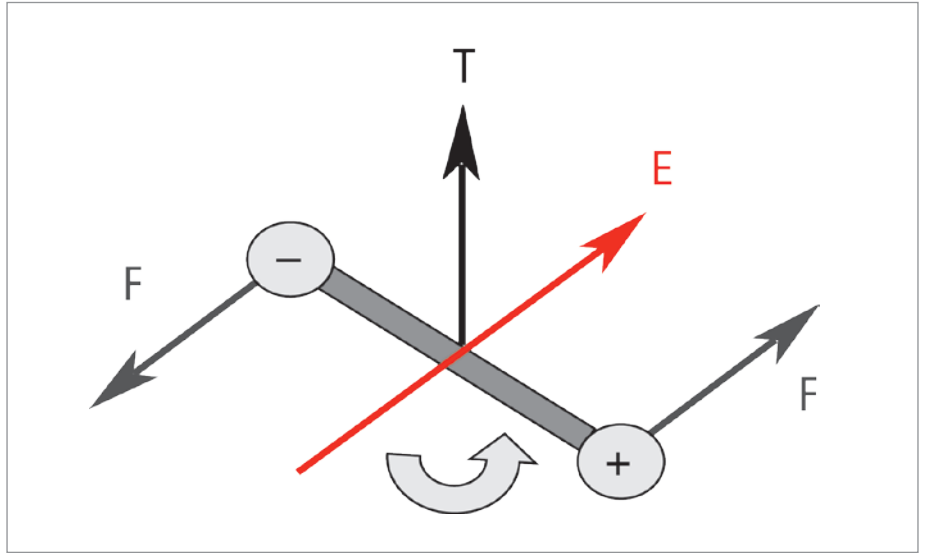


图8. 电场中的偶极子旋转

偶极子取向过程中产生的摩擦将会导致电介质损耗。偶极子旋转会导致 ϵ_r' 和 ϵ_r'' 同时在弛豫频率上发生变化(通常是在微波范围内发生)。我们前面提到过，水是一种具有强烈取向偏振的物质。

电子和原子偏振

当电场推动原子核相对于周边电子发生位移时，中性原子中会发生电子偏振。当相邻的正离子和负离子在电场的作用下发生"伸展"时，会发生原子偏振。对于许多干性固体，尽管实际谐振是在更高频率上发生，但是绝大部分偏振机理都处于微波频率上。在红外和可见光频率范围内，必须将电子沿轨道旋转的惯性考虑在内。原子可以用振荡器模型来描述，其具有类似于机械弹簧和质量系统的阻尼效应(图7)。在除谐振频率之外的其他频率上，振动幅度将非常小。电子和原子机理远远小于谐振，在 ϵ_r' 中只占极小部分且恒定不变，几乎是无损的。谐振频率通过谐振响应 ϵ_r' 和最大吸收峰值 ϵ_r'' 来识别。在谐振频率以上，这些机理的作用将消失殆尽。

弛豫时间

弛豫时间 τ 衡量的是材料中的分子(偶极子)的移动性。位移的系统现在必须与电场方向对齐, 以便返回随机均衡值的 $1/e$ (或偶极子现在必须在电场中取向)。液体和固体材料的分子处于凝聚态, 即使在电场中也无法自由移动。恒定不变的碰撞将导致内部摩擦, 因此分子将缓慢转动并按照指数规律接近取向偏振的最终状态, 其弛豫时间常数为 τ 。当电场关闭后, 这一顺序将反转, 最终恢复随机分布, 时间常数相同。弛豫频率 f_c 与弛豫时间成反比: 在弛豫频率以下的频率上, 电场的交替速度将变慢,

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c}$$

足以使偶极子能够跟上电场的变化。由于偏振能够完全形成, 所以损耗 (ϵ_r'') 与频率直接成正比 (图 9)。随着频率的增加, ϵ_r'' 会连续增加, 但是受偶极子对齐和电场之间相位滞后的影响, 储存电能 (ϵ_r') 开始减少。在弛豫频率以上的频率上, 由于电场交替过快而无法影响偶极子的旋转, 取向偏振消失, ϵ_r'' 和 ϵ_r' 将会同时下降。

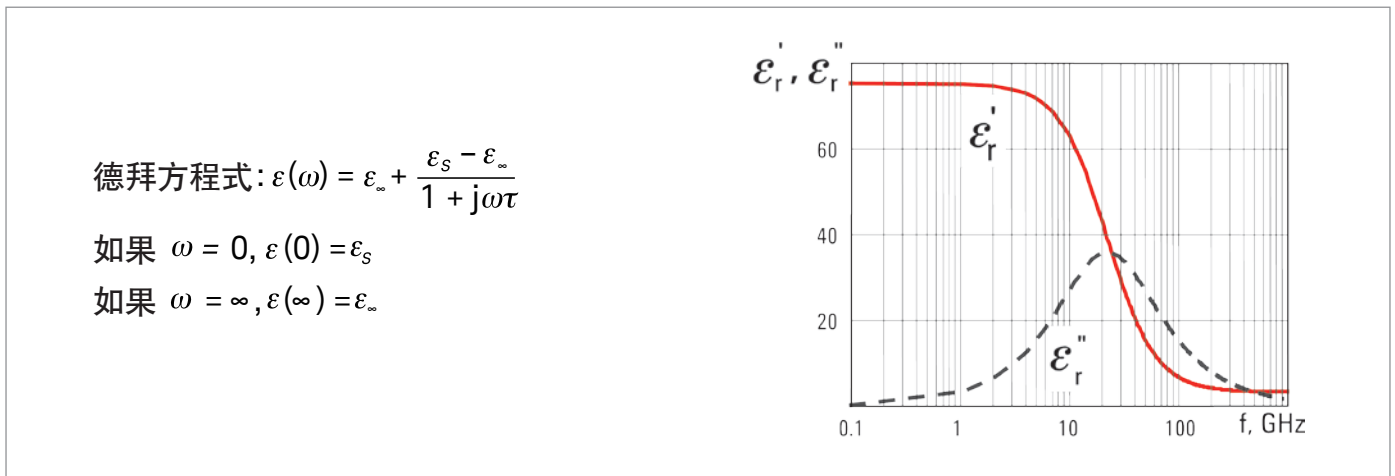


图 9. 水在 30°C 时的德拜弛豫

德拜关系式

具有单一弛豫时间常数的材料通过德拜关系式进行建模, 它由频率决定, 在介电常数中表现为特征响应 (图 9)。 ϵ_r' 是高于和低于弛豫的常数, 在弛豫频率 (22 GHz) 附近发生跳变。另外, ϵ_r'' 稍高于和低于弛豫, 在弛豫频率上的跳变区域中达到峰值。

在计算以上曲线时, 介电常数的静态(直流)值为 $\epsilon_s = 76.47$, 介电常数的光(无穷频率)值为 $\epsilon_\infty = 4.9$, 弛豫时间 $\tau = 7.2$ ps。

科尔-科尔图

复数介电常数还可以在科尔-科尔图中显示，纵轴表示虚部(ϵ_r'')，横轴表示实部(ϵ_r')，频率作为独立的参数(图 10)。科尔-科尔图在某种程度上类似于史密斯圆图。具有德拜关系式所表示的单一弛豫频率的材料，将显示为半圆，圆心位于 $\epsilon_r''=0$ 横轴上，损耗因数峰值位于 $1/\tau$ 。具有多个弛豫频率的材料将显示为半圆(对称分布)或弧形(不对称分布)，其圆心位于 $\epsilon_r''=0$ 横轴下方。

图 10 中的曲线为半圆，圆心在 x 轴上，半径为 $\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}$ 。介电常数虚部最大值 $\epsilon_r''_{\max}$ 等于半径。频率在曲线上沿逆时针移动。

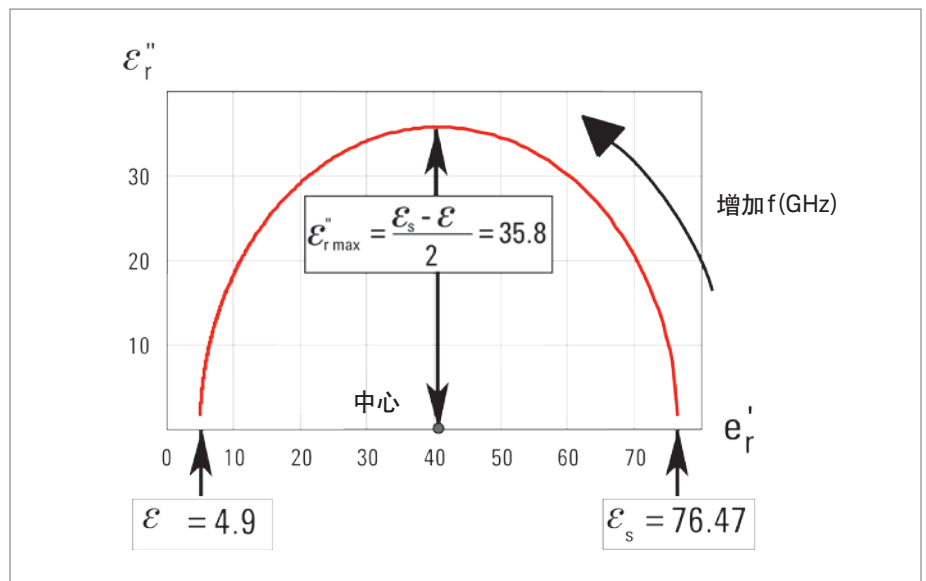


图 10. 图 9 的科尔-科尔图

离子电导率

测得的材料损耗实际上可以表示为电介质损耗(ϵ_{rd}'')和电导率(σ)的函数。

$$\epsilon_r'' = \epsilon_{rd}'' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

在低频范围内，总体电导率可能是由许多不同的传导机理组成，但是在大多数材料中离子电导率是最普遍的。溶剂(通常是水)中的自由离子所产生的电解传导对 ϵ_r'' 有极大影响。离子电导率只会增加材料中的损耗。在低频范围内，离子电导率的效应与频率成反比，表现为 ϵ_r'' 曲线的 $1/f$ 斜率。

界面或空间电荷偏振

当电荷在原子、分子、固体或液体的结构中受到区域限制，将发生电子、原子和取向偏振。材料中还含有电荷载流子，当施加低频电场时，电荷载流子可以在材料中进行迁移。当这些电荷的迁移运动受到阻碍时，就会发生界面或空间电荷偏振。电荷可以在材料界面中被捕获。当电荷不能在电极上自由放电或进行替换时，其运动也有可能受到阻碍。这些电荷的积聚导致的场失真会增加材料的总体电容，表现为 ϵ_r' 的增加。

在低频范围内，材料混合物在彼此不接触(由非导电区隔离)的导电区内会表现出麦克斯韦-瓦格纳效应。如果电荷层非常薄且远远小于离子尺寸，那么电荷会独立地与临近粒子上的电荷发生响应。在低频范围内，电荷有时间在导电区的边界上积聚，导致 ϵ_r' 增加。但在高频范围内，电荷没有时间进行积聚，由于电荷的位移与导电区的尺寸相比非常小，所以不会发生偏振。随着频率的增加， ϵ_r' 会减小，损耗表现出与常规离子电导率相同的 $1/f$ 斜率。

在这个低频范围内还可能发生许多其他介电机理，使介电常数发生明显变化。例如，如果电荷层在厚度上接近或超过粒子尺寸，那么就会发生胶状悬浮。此时，由于响应受到临近粒子电荷分布的影响，所以麦克斯韦-瓦格纳效应不再适用。

测量系统

网络分析仪

通过测量已知物理尺寸的材料反射和/或发射性能，可以获得相应的数据，根据它们可以表征材料的介电常数和导磁率。PNA系列、ENA系列和FieldFox等矢量网络分析仪可以在9 kHz至1.1 THz频率范围内进行扫描高频激励响应测量。(图12)。矢量网络分析仪由信号源、接收机和显示器组成(图11)。信号源向被测材料发送一个单一频率信号。接收机调谐到该频率并探测材料所反射和发射的信号。根据测得的响应可得出该频率上的幅度和相位数据。信号源随后步进到下一个频率，重复上述测量，得到随频率变化的反射和传输测量响应。关于网络分析仪功能和体系结构的详细信息请参见应用指南1287-1²和1287-2³。

简单的元件和连接线路在低频上表现出色，但在高频上却截然相反。在微波频率范围内，波长与器件物理尺寸相比变得非常小，因此两个临近点可能具有极大的相位差。要想分析器件在高频下的特性，必须放弃低频集总电路元件方法，改用传输线路理论。由于在高频范围内存在着辐射损耗、电介质损耗和电容耦合等效应，因此微波电路变得更复杂和昂贵。要想设计出完美无缺的微波网络分析仪，需要投入大量时间和成本。

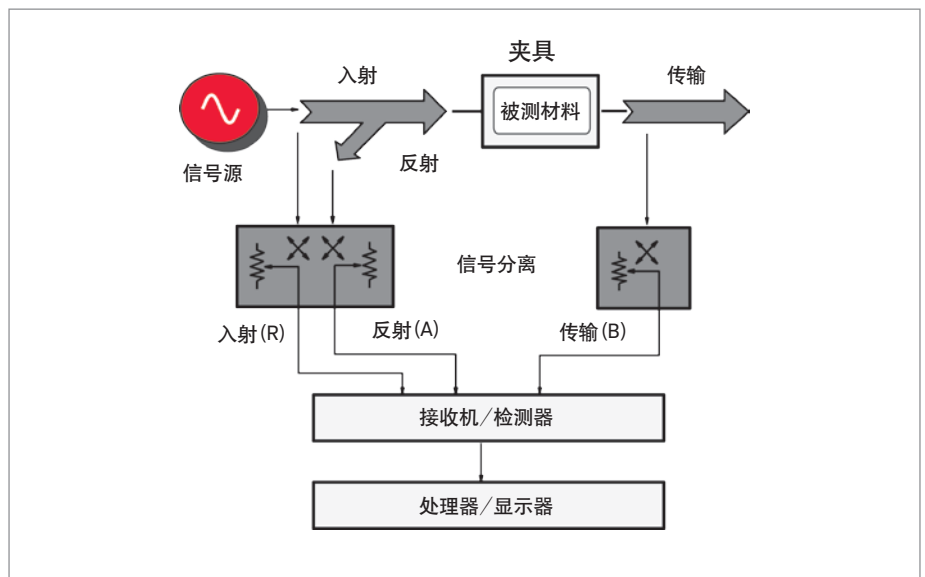


图11. 网络分析仪

一种方法是使用测量校准，它能够消除由系统缺陷所导致的系统性(稳定和可重复的)测量误差，但它无法消除由噪声、漂移或环境因素(温度、湿度、气压)导致的随机误差。因此，一旦测量系统稍有变化便会产生误差，很容易影响到微波测量的性能。良好的测量实践方法可以最大限度减少这些误差，例如先目测所有连接器上是否有污垢或损坏，在校准后最大限度减少测试端口电缆的移动。有关网络分析仪校准的详细信息请参见应用指南1287-3⁴。

阻抗分析仪和 LCR 表

使用阻抗分析仪和 LCR 表 (例如图 12 中列出的仪器) 可以测量材料在低频范围内的特性。使用交流电源为材料提供激励信号, 并监测材料上的实际电压。通过测量材料的尺寸及其电容和耗散因子, 可以推导出材料的测试参数。

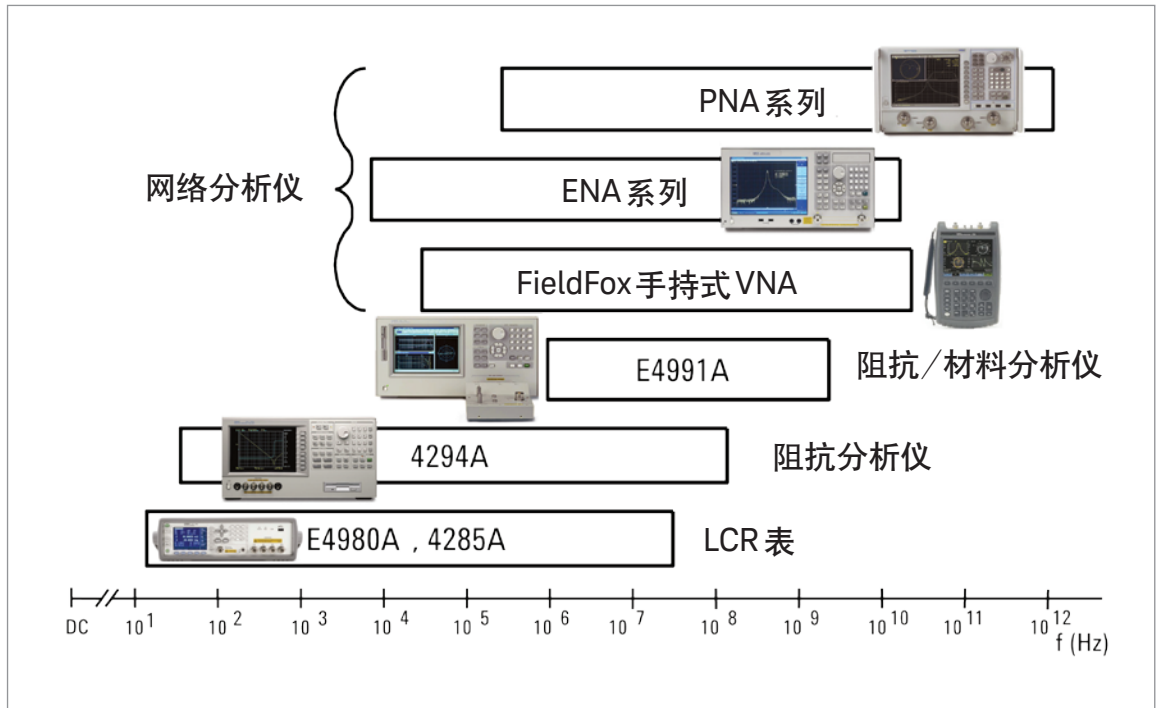


图 12. 用于电介质测量的是德科技仪器的频率范围

夹具

在使用网络分析仪、阻抗分析仪或 LCR 表测量材料的介电特性之前, 需要使用测量夹具 (或样品夹持器), 一方面以可预测的方式对材料施加电磁场, 另一方面使材料可以连接到测量仪器。夹具的类型根据选用的测量技术以及材料的物理特性 (固体、液体、粉末、气体) 而定。

软件

仪器得到的测量数据不一定是直接可用的。在这种情况下, 需要使用软件将测得的数据转换为介电常数或导磁率。另外, 软件还可以对夹具和 MUT 之间的相互作用进行建模, 从而提取出大部分材料特性。

测量技术

同轴探头法

同轴探头法的特点

- 宽带
- 简单方便(不需破坏材料)
- 有限的 ϵ_r 精度和 $\tan \delta$ 低损耗分辨率
- 最适合液体或半固体

对材料的要求

- "半无限"厚度
- 非磁性
- 各向同性和均质
- 平坦表面
- 无空隙

同轴探头是传输线截断后的一部分。通过将探头浸入液体或用其接触固体(或粉末)材料的平坦表面,对材料进行测量。探头上的场将"边缘"送入材料中,随着它们与被测材料的接触而缓慢发生变化(图13)。反射信号 S_{11} 可以通过测量得到,它与 ϵ_r^* 有关。

使用同轴探头法的典型测量系统是由网络分析仪或阻抗分析仪以及同轴探头和软件组成。软件和探头均包含在85070E介电探头套件中。在许多情况下,还需要使用外部计算机通过GPIB接口控制网络分析仪。82357A USB至GPIB接口可以非常方便和灵活地实现这一连接。对于PNA系列和ENA系列网络分析仪,软件能够直接安装到分析仪中,无需使用外部计算机。

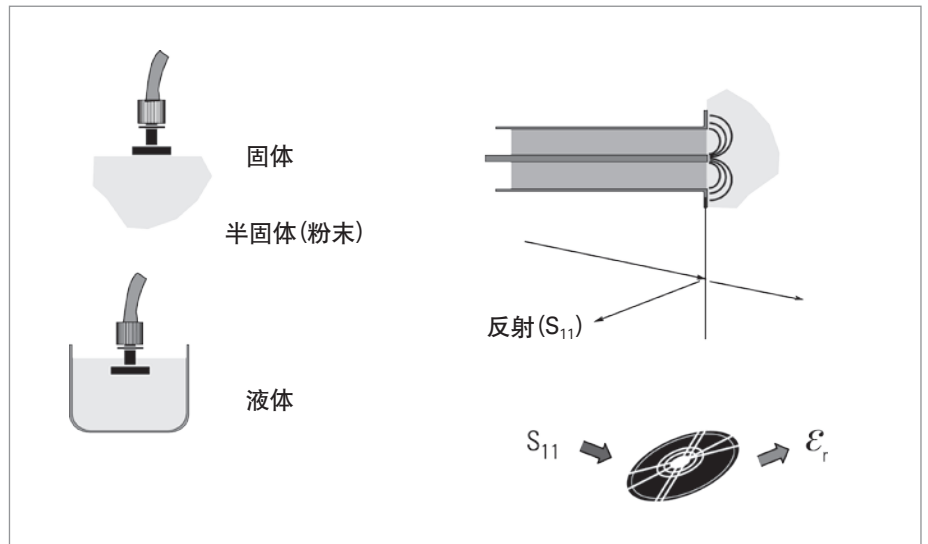


图13. 同轴探头法

图 14 显示了 85070E 套件提供的 3 个探头；高温探头 (a)、细长探头 (b) 和高性能探头 (c)。图中 (a) 为高温探头，右侧是短路件。(b) 的底部是 3 个细长探头，上面为短路件，还有几个其他附件。(c) 为高性能探头，上面是短路件。

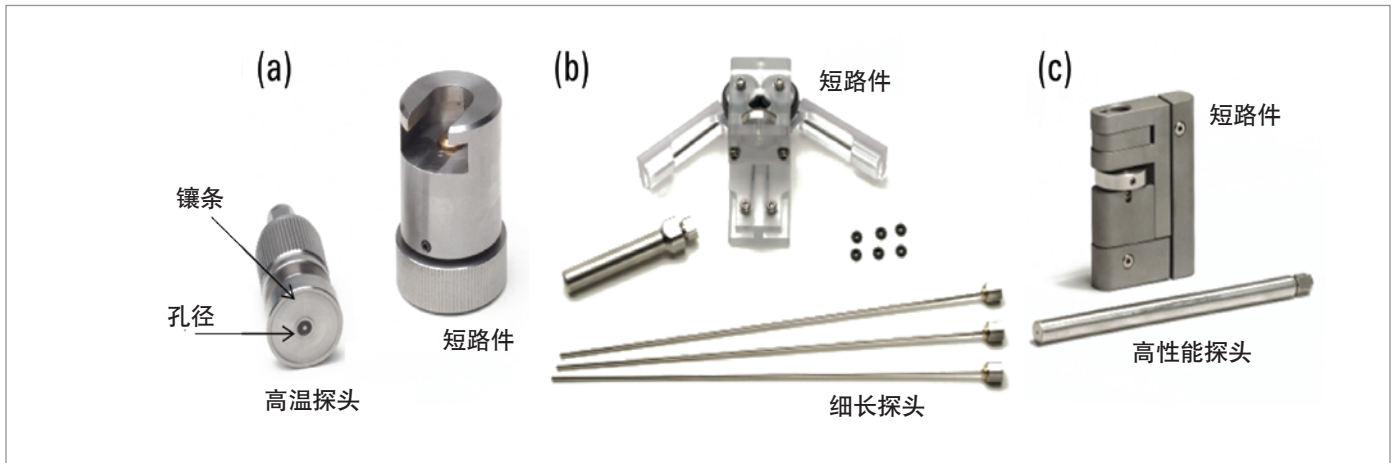


图 14. 三种介电探头配置

高温探头(a)的设计使得它非常坚固耐用，由于采用了玻璃金属密封结构，因而能够防止化学品的腐蚀或摩擦。探头能够承受 -40 至 $+200$ °C 的温度范围，因此可以测量材料特性随频率和温度的变化。大边缘使探头能够对平面固体材料、液体和半固体材料进行测量。细长探头(b)能够很轻松地装进发酵罐、化学反应室或其他小孔径的设备中。同时，细长的设计还使它适用于更小的样品体积。该探头最适用于测量液体和柔润的半固体。对于可浇铸材料，探头的价格足够经济，可伸入到材料中无需取回。这种探头用作消耗品，因此以三个一套的方式提供。细长探头套件还包含密封的细长夹持器，适用于套件中包括的 2.2mm 外径至 10mm 内径支架，以及市场上销售的 "Midi (中长)" 型适配器和套管。高性能探头(c)的细长设计融合了出色的坚固性和耐高温性以及宽频率范围，适合在您要求最苛刻的应用中使用。探头的探针端和连接器端都经过密封，因此是我们最坚固耐用的探头。探头能够承受 -40 °C 至 $+200$ °C 的温度范围，因此可以测量材料特性随频率和温度的变化。探头经过热压处理，非常适合灭菌要求很高的食品、医药和化工行业应用。细长探头能够很轻松地装进发酵罐、化学反应室或其他小孔径的设备中。小直径还使它能够与最小样品尺寸的所有是德科技探头配合使用。这对于测量液体、半固体以及平面固体材料非常有帮助。其他详细信息请参见 "介电探头技术概述"⁶ 和 "软件在线帮助"⁷。

介电探头与是德科技网络分析仪和 E4991A 阻抗分析仪兼容。使用阻抗分析仪时，高温探头的额定带宽为 10 MHz。

在进行测量前，必须在探头端进行校准。三项校准可以纠正反射测量中可能存在的方向性、跟踪和信号源失配误差。为了去除掉这三种误差项，可以做三个标准件的测试。根据预期值与实际值之差，可以消除测量中的系统(可重复)误差。这三个已知的标准件分别为空气、短路件和蒸馏水。即使是在校准完探头之后，还有一些误差源可能影响测量的精度。误差源主要有三种：

- 电缆稳定度
- 空隙
- 样品厚度

在进行测量之前必须留出足够的时间，以使电缆(将探头连接到网络分析仪)变得稳定，并确保在校准和测量之间电缆不会曲折。电子校准更新功能可以在每次测量前，在几秒钟的时间内自动对系统进行再次校准。这样，几乎可以消除电缆的不稳定度和系统漂移误差。

对于固体材料，探头与样品之间的空隙可能产生严重的误差，除非样品表面经过加工，达到至少与探头表面一样平坦的程度。对于液体样品，探头尖端的气泡可能就像固体样品上的间隙一样，导致严重误差。

样品还必须具有足够的厚度，与探头相比需达到“无限”厚。有一个简单的方程式⁶可以计算高温探头样品的大概厚度，以及推荐的细长探头样品厚度。一种简单实用的办法是将短路件放置在样品后，检查它是否会影响测量结果。

图 15 显示了使用高温探头在室温(25 °C)下测量甲醇的介电常数和损耗因子所得结果的对比，以及使用科尔-科尔模型进行的理论计算。在科尔-科尔计算中使用了以下参数：

$$\epsilon_s = 33.7, \epsilon_\infty = 4.45, \tau = 4.95 \times 10^{-11}, \alpha = 0.036$$

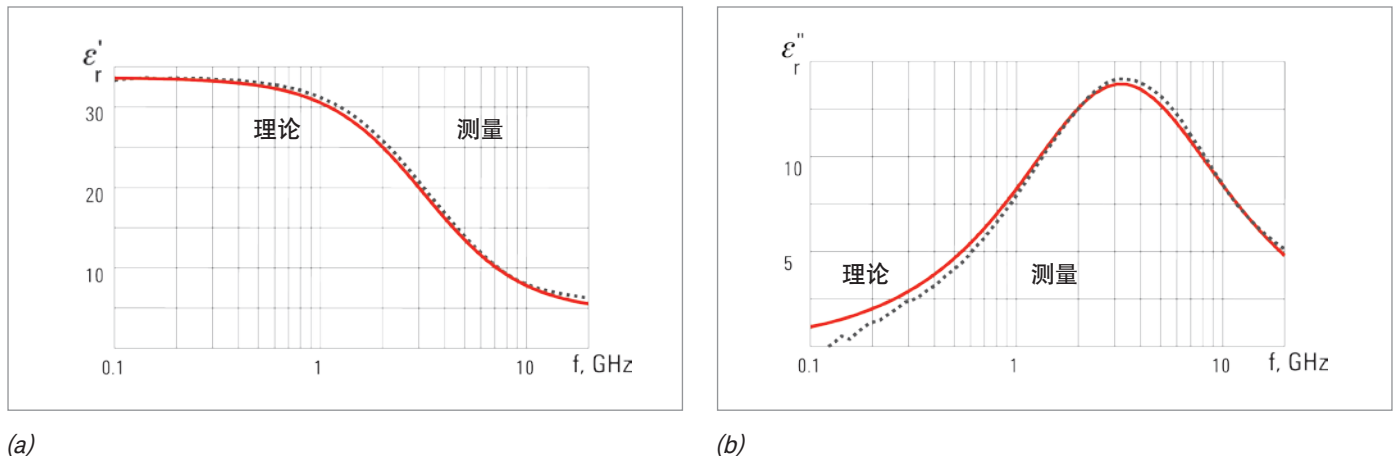


图 15. 使用科尔-科尔模型在 25 °C 下测量甲醇的介电常数(a)和损耗因子(b)所得结果的比较

介电探头法的缺点是在某些条件下，与其他测量方法(例如使用 85071E 的传输线法和谐振器法)相比，它的精度很有限。

传输线法

传输线法需要将材料置于一部分封闭的传输线内部。线路通常是一段矩形波导或同轴空气线(图 16)。 ϵ_r^* 和 μ_r^* 根据反射信号(S_{11}) 和发射信号(S_{21}) 的测量结果计算得出。

对材料的要求

- 样品填充到夹具横截面中
- 夹具壁没有空隙
- 表面平坦光滑, 与长轴垂直
- 均匀介质

传输线法的特点

- 宽带 — 最低频率受到实际样品长度的限制
- 有限的低损耗分辨率(取决于样品长度)
- 可测量磁性材料
- 使用波导夹具时测量各向异性材料

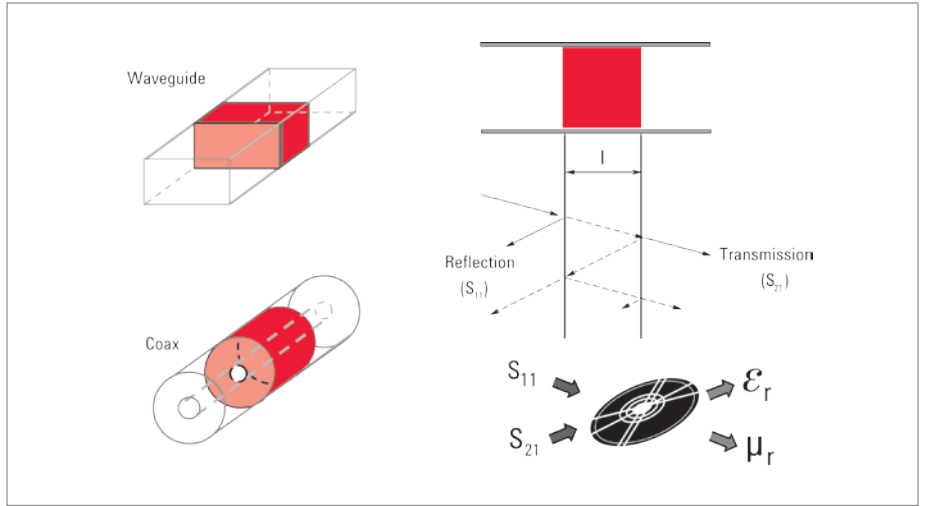
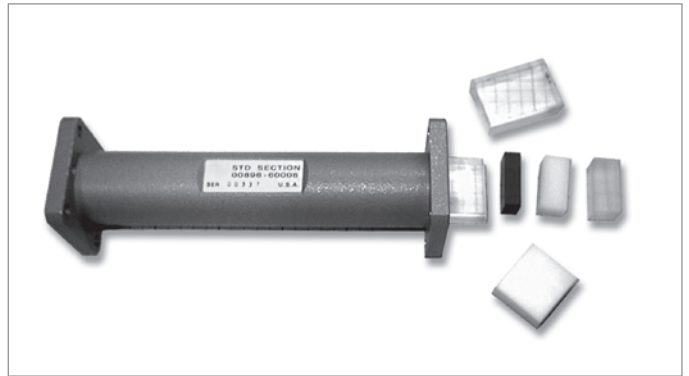


图 16. 传输线法; 波导和同轴线路实例

同轴传输线法覆盖非常宽的频率范围，但是环形样品的制造难度会极大增加(图 17(a))。波导夹具的频率范围可以扩展到毫米波频率，样品的制造比较简单，但是它们的频率范围是分段的(图 17(b))。采用传输线法的典型测量系统由矢量网络分析仪、同轴空气线或波导以及软件(例如 85071E，执行 ϵ_r^* 和 μ_r^* 的转换)组成。可以用外部计算机来控制网络分析仪，两者通过 LAN、USB 或 GP-IB 接口进行连接。82357B USB 至 GPIB 接口可以灵活方便地实现这一连接。对于 PNA 系列和 ENA 系列网络分析仪，软件可以直接安装到分析仪中，无需使用外部计算机。有关 85071E 材料测量软件的详细信息请参见技术概述⁸和软件在线帮助⁹。



(a)



(b)

图 17. 同轴 7 毫米空气线和样品 (a), X 频段直波导和样品 (b)

同轴样品的夹持器推荐使用是德科技验证套件中的 50 Ω 空气线(图 17(a))。11644A 系列中的每个波导校准套件都包含一个精密波导(图 17(b))，可用波导类夹具。

图 18 显示了在 X 频段波导中对两个树脂玻璃样品的介电常数 (a) 和损耗正切 (b) 进行测量的结果。这两个样品的长度分别为 25 毫米和 31 毫米。使用的夹具是 X11644A 校准套件中的 140 毫米长精密波导 (图 17 (b))。网络分析仪是 PNA，校准类型为 TRL，使用精密 NIST 算法⁹ 进行计算。在下面的两个图中有两对轨迹，是对同样品进行测量得到的两种不同测量结果。每个图顶部的两个测量结果是在样品夹具未经校准情况下测得的。

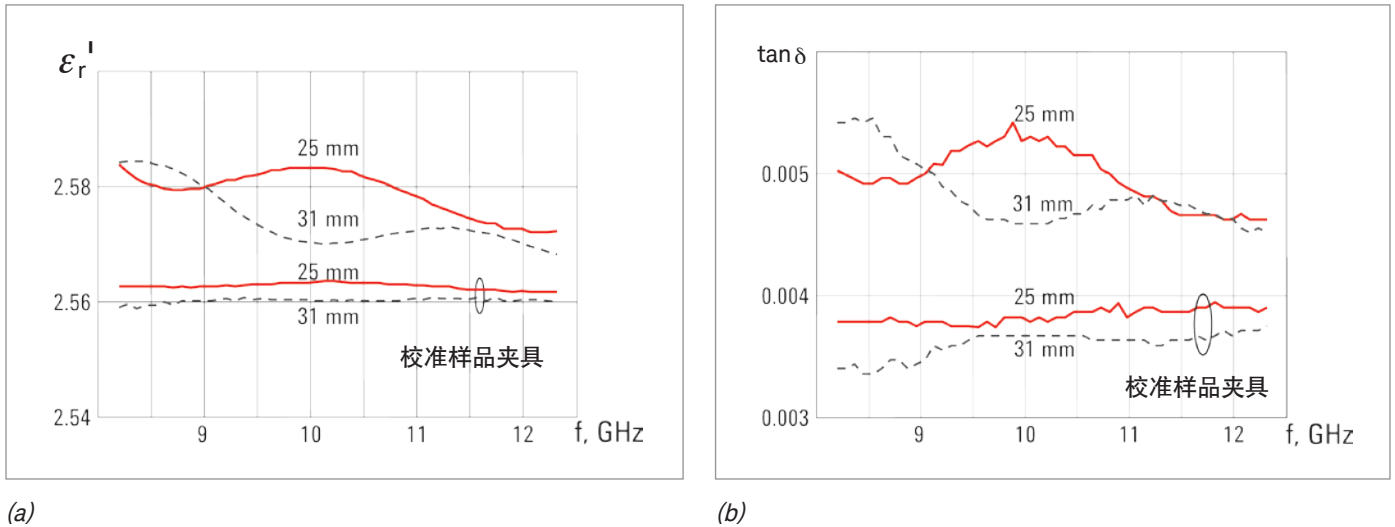


图 18. 在 X 频段波导中对两个分别长 25 毫米和 31 毫米的树脂玻璃样品进行测量获得的结果

在这种情况下，85071E 软件会根据样品长度和夹具的长度，将校准平面扩展到样品面，但是这样不能补偿波导的损耗。同样样品的底部两个测量结果是在样品夹具处经过校准，且波导损耗和电长度经过校准的情况下测得的。正如预期的一样，当对夹具进行校准之后，损耗正切曲线 (b) 显示较低值，随着频率的变化，它们相对保持恒定。这是因为波导损耗不再添加到样品损耗中。使用 PNA 网络分析仪时，除了对夹具进行校准之外，还可以执行夹具去嵌入，也能带来相同的效果。这种方法要求在校准之后测量空置的样品夹具。

自由空间法

对材料的要求

- 大尺寸、平坦、平行表面样品
- 均匀介质

自由空间法的特点

- 非接触, 对材料无破坏
- 高频 — 低端受到实际样品尺寸的限制
- 适合在高温条件下使用
- 对于各向异性材料, 天线偏振可能发生变化
- 可测量磁性材料

自由空间法使用天线将微波能量聚焦在或穿透过材料厚板或薄板。这种方法不需要接触材料, 适用于在高温和恶劣环境中对材料进行测试。图 19 显示了两种典型的自由空间测量装置: S 参数配置(上方)和 NRL 弧形框(下方)。使用自由空间法的典型测量系统由矢量网络分析仪、夹具(天线、隧道、弧形框等)和 85071E 软件组成。可以用外部计算机来控制网络分析仪, 两者通过 LAN、USB 或 GP-IB 接口进行连接。82357B USB 至 GPIB 接口可以灵活方便地实现这一连接。对于 PNA 系列和 ENA 系列网络分析仪, 软件可以直接安装到分析仪中, 无需使用外部计算机。

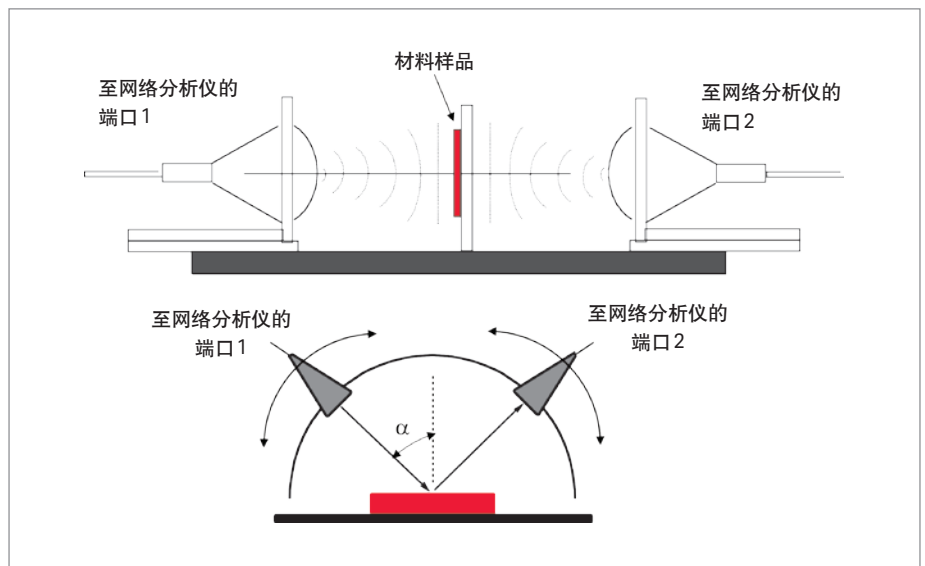


图 19. 自由空间测量装置

在自由空间环境中，由于不需要接触或碰触样品，所以很容易进行高温测量(图 20)。样品可以置于温箱中进行加热，温箱留有"窗口"，可以隔绝材料但允许微波通过。是德科技不提供适用于此类测量的温箱。图 20 显示了基本的装置。

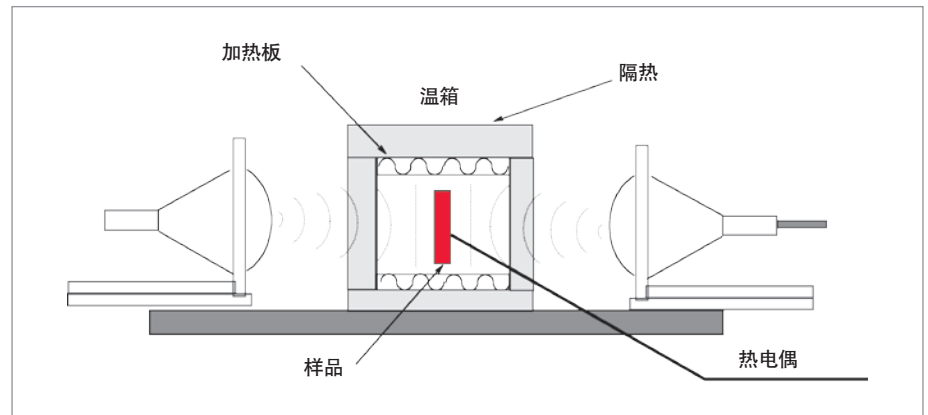


图 20. 自由空间中的高温测量

用自由空间法测量材料时，对网络分析仪的校准是一个难题。自由空间校准标准件由于是"无连接器的"，因此带来了特殊的问题。根据不同的操作的方便性和预期精度，用户可以进行简单的校准，例如响应校准，也可以进行非常复杂的校准，例如全双端口校准。

85071E 软件提供了一种自由空间校准方法供用户选择使用，即 GRL (选通匹配、反射、传输线)。这个校准程序与其他一些校准方法，比如 TRM (直通、反射、匹配) 和 TRL (直通、反射、传输线) 相比，它更容易使用且成本更低。采用这一方法必须使用配有时域选件的网络分析仪、适合的自由空间法的夹具和金属校准板。该选件还包括选通隔离/响应校准，可以减少因样品边缘的衍射效应以及天线间多次剩余反射而产生的误差。85071E 软件可以自动设置所有自由空间校准定义和网络分析仪参数，显著缩短设计时间。校准向导可以逐步引导用户轻松完成校准过程。

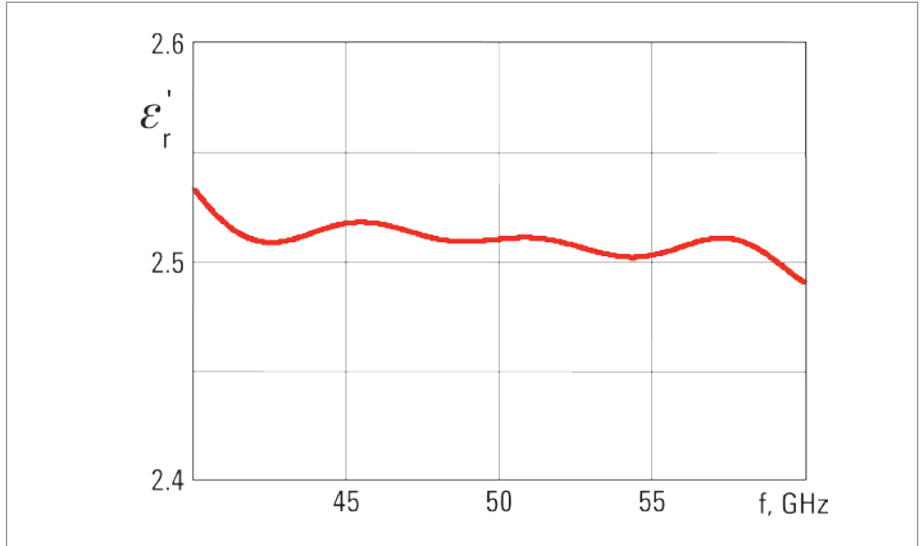


图21. 聚苯乙烯样品在U频段(40–60GHz)中的测量结果

图21显示了在使用GRL校准后的PNA网络分析仪和85071E软件在U频段(40–60GHz)中测量聚苯乙烯材料的测量结果。夹具由标准增益喇叭和即时可用的支架组成，可以看出如果做了GRL校准，即使采用最简单的设置，也可以进行高难度的测量。如果要进行更精密的测量，推荐您使用更高刚性的、配有聚焦喇叭的夹具。

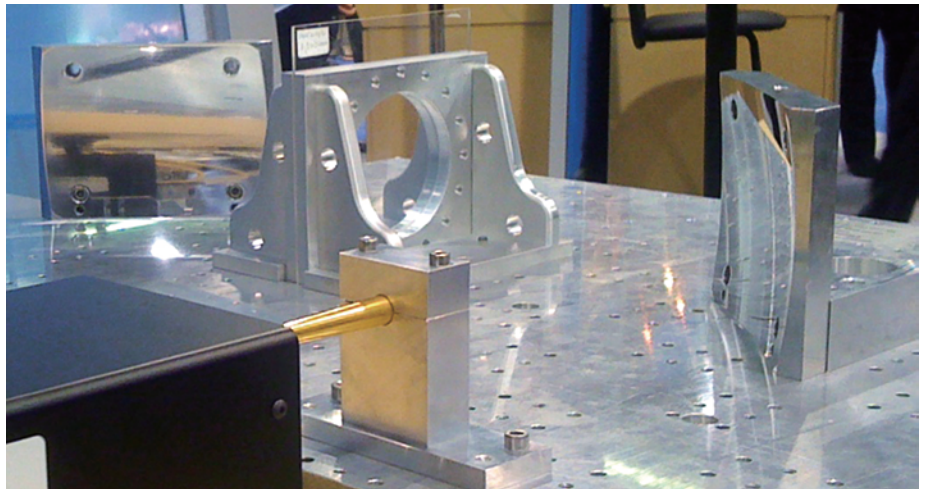


图22. 330–500GHz Thomas Keating Ltd. 准光学平台, 包括高斯光束喇叭、聚焦镜和样品夹持器。

在毫米波和亚毫米波频率范围内，准光学平台是最适用的。它们可以从Thomas Keating Ltd公司或通过是德科技特殊处理工程部门购买。是德科技型号：

60至90GHz	准光学平台	85071E E02
75至110Ghz	准光学平台	85071E E01
90至140GHz	另一组喇叭	85071E E22
140至220GHz	另一组喇叭	85071E E23
220至325GHz	另一组喇叭	85071E E18
325至500GHz	另一组喇叭	85071E E24

其他频率产品以及覆盖多个频段的平台根据用户请求提供。

谐振腔法

谐振腔法与宽带测量方法的比较

谐振腔法

- 高阻抗环境
- 可以对小尺寸样品进行适当的测量
- 只能在一个或几个频率上进行测量
- 非常适合测量低损耗材料

宽带测量法

- 低阻抗环境
- 需要较大的样品才能进行适当的测量
- 可以在"任意"频率上进行测量

谐振腔体有比较高的Q值，能够在特定频率上发生谐振。将一片材料样品插入到腔体中，会改变腔体的谐振频率(f)和品质因数(Q)。根据这些测得的参数，可以计算出材料在单一频率上的复数介电常数。典型的测量系统由网络分析仪、谐振腔体夹具以及计算机软件组成。

谐振腔法也有许多不同的子方法和夹具类型: Keysight 85071E 选件 200 谐振腔体软件支持三种子方法: 分裂圆柱法、分离介质谐振器法和 ASTM D2520¹⁰ 腔体微扰法。可用外部计算机来控制网络分析仪，两者通过 LAN、USB 或 GP-IB 接口进行连接。对于 PNA 系列和 ENA 系列网络分析仪，软件可以直接安装到分析仪中，无需使用外部计算机。是德科技还为分裂圆柱法¹³和分离介质谐振器法¹⁴提供了高Q值谐振腔体夹具。

分裂圆柱谐振器

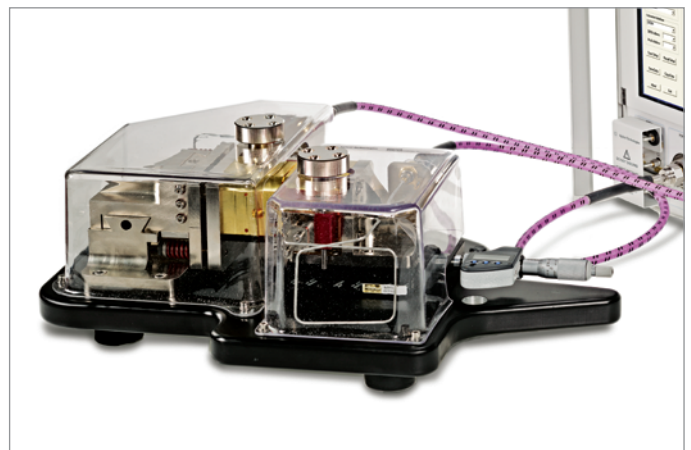
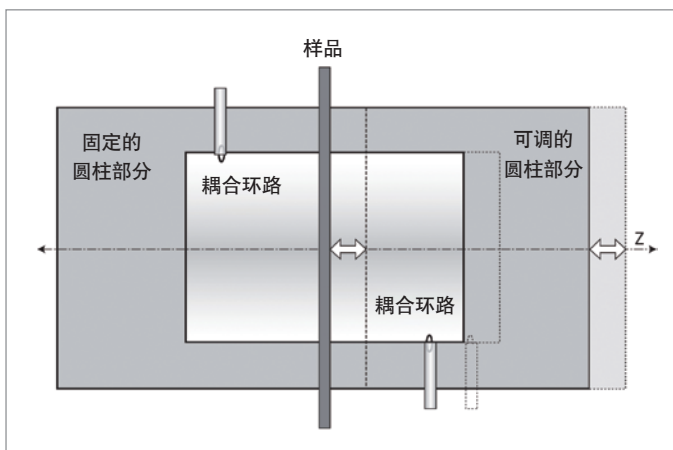


图23. Keysight 85072A 10GHz分裂圆柱谐振器

分裂圆柱谐振器是分成两半的柱状谐振腔体。样品夹入到两个半柱的中间。一个半柱是固定的，另一个是可调的，来适应不同厚度的样品。根据样品厚度、柱长以及分裂圆柱谐振器在空载和载入样品两种条件下的 S 参数测量结果，可以计算出介电常数、 ϵ' 和损耗正切或 $\tan \delta$ 、 $\tan \delta$ 。使用位于科罗拉多波尔得的 NIST¹⁴ 所开发的模式匹配模型，可以计算在 10GHz TE_{011} 模式下的介电常数和损耗正切角。此外，还可以测量没有干扰模式存在的更高阶 TE_{0np} 模式²。IPC 采用这种方法作为 TM-650 2.5.5.13 标准测试方法。¹⁵

分离介质谐振器

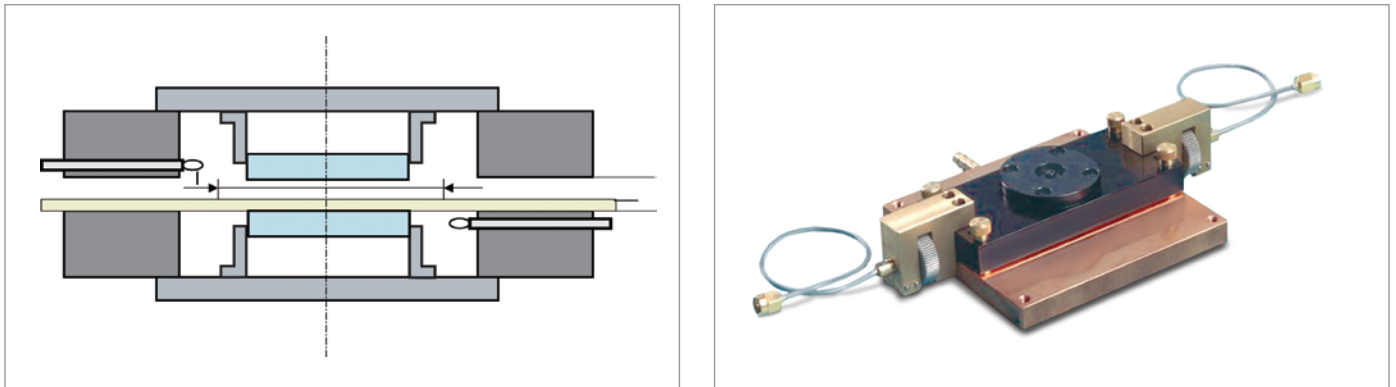


图 24. QWED 5GHz 分离介质谐振器 (Keysight 85071E-E04)

QWED 分离介质谐振器采用低损耗介电材料构建，因此能够提供比传统全金属腔体更高的 Q 因数和更出色的热稳定度。使用这种方法测量低损耗和薄板材料的复数介电常数及损耗正切，测量步骤最简单，精度最高¹⁶。用户可以从 QWED 或通过是德科技特殊处理工程部门购买到非常便宜的 1 至 22GHz 单一频率夹具。

是德科技型号:

1.1 GHz	85071E E19
2.5 GHz	85071E E03
5 GHz	85071E E04
15 GHz	85071E E15
22 GHz	85071E E07

其他频率的型号根据用户请求提供。

腔体微扰 (ASTM D2520)

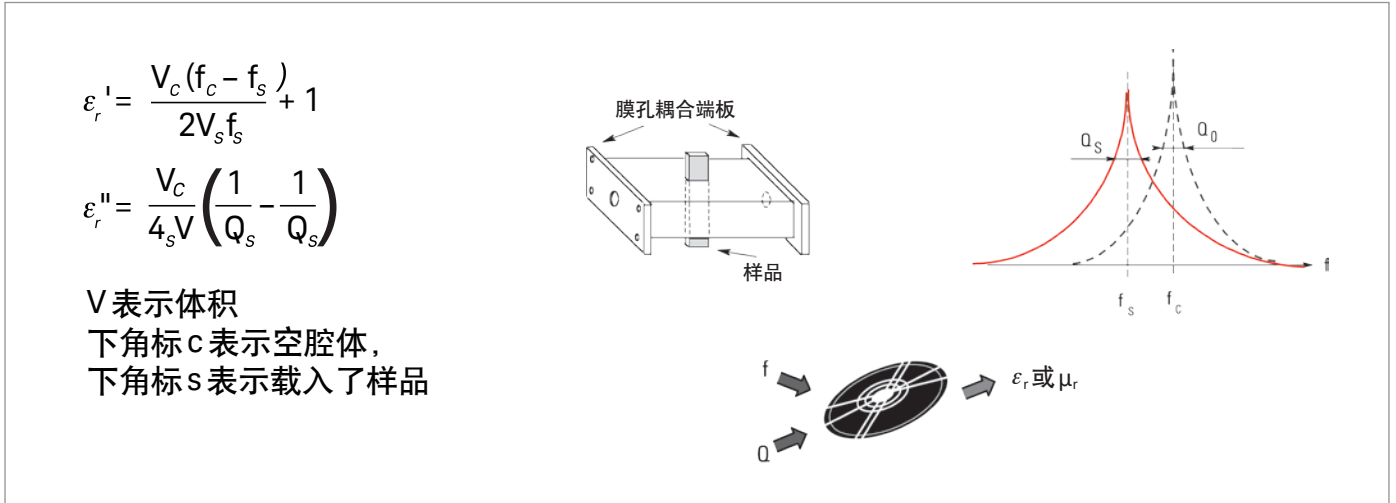


图 25. 谐振腔体测量

ASTM 2520¹⁰ 腔体微扰法使用配有膜孔耦合端板、在 TE_{10n} 模式下工作的矩形波导(图 25)。在进行电介质测量时，应将样品放置到最大场强处。虽然是德科技不提供现成的、适用于腔体微扰法的谐振器夹具，但用户可以很容易地将精密直波导改造成这种夹具，例如用 11644A 系列波导校准套件中的产品进行改造。用户还需要在波导中点钻一个孔，以及制造两个膜孔耦合端板。膜孔尺寸为 $b/2.2$ ，其中 b 是波导横截面的最小尺寸。如果通过波导中点处的孔插入样品，那么奇数个半波长将使最大电场到达样品位置，从而可以测量样品的介电特性。(偶数个半波长将使最大磁场到达样品位置，从而可以测量样品的磁性特性。)

腔体微扰法要求样品非常小，以便尽量减少对腔体内电磁场的干扰，减少测得的谐振频率和腔体 Q 因数的变化。这种假设可以简化测量原理，从而可以使用上面的方程式来计算材料的介电特性。

平行板法

平行板法在 ASTM 标准 D150¹² 中又称为三端子法，其原理是通过在两个电极之间插入一个材料或液体薄片组成电容器，然后测量其电容，根据测量结果计算介电常数。在实际测试装置中，测试夹具均配有两个电极，用来加持介电材料。阻抗测量仪器测量电容(C)和耗散(D)的矢量分量，然后通过软件程序计算介电常数和损耗正切。该方法最适合对薄膜或液体进行精确的低频测量。采用平行板法的典型测量系统主要由阻抗分析仪或 LCR 表，以及工作频率至 1 GHz 的夹具(例如 16451B 和 16453A 电介质测试夹具)组成。是德科技提供了 16452A 测试夹具，用于进行液体测量。有关平行板法和其他是德科技低频材料测量解决方案的详细信息，请参见应用指南 1369-1 (P/N 5980-2862EN)¹ 和 380-1¹¹。

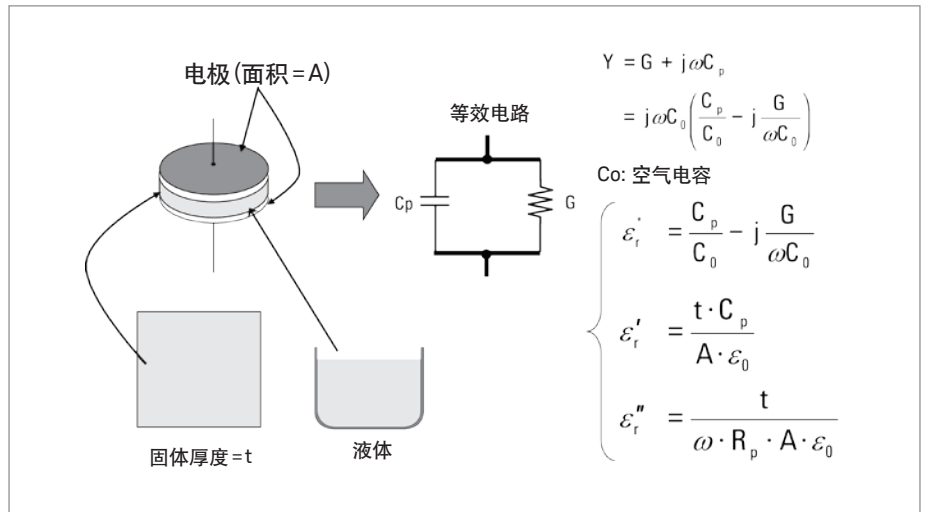


图 26. 平行板法



图 27. Keysight 16451B 和 16453A 电介质测试夹具以及阻抗分析仪

电感测量法

磁性材料的相对导磁率通常又称为有效导磁率，它可通过含有闭合环路(例如环形磁芯)的磁芯电感器的自感推导得出。通过在磁芯上缠绕导线，再测量导线两端的电感，便可以非常方便地测量出有效导磁率。这种测量通常使用阻抗分析仪来完成。根据电感测量结果可以推导出有效导磁率。Keysight 16454A 磁性材料测试夹具可以在放入环形磁芯后形成单匝电感，并不会出现磁漏，因此是测量磁性材料的理想结构。有关电感测量法的详细信息，请参见应用指南1369-1 (P/N 5980-2862EN)¹。

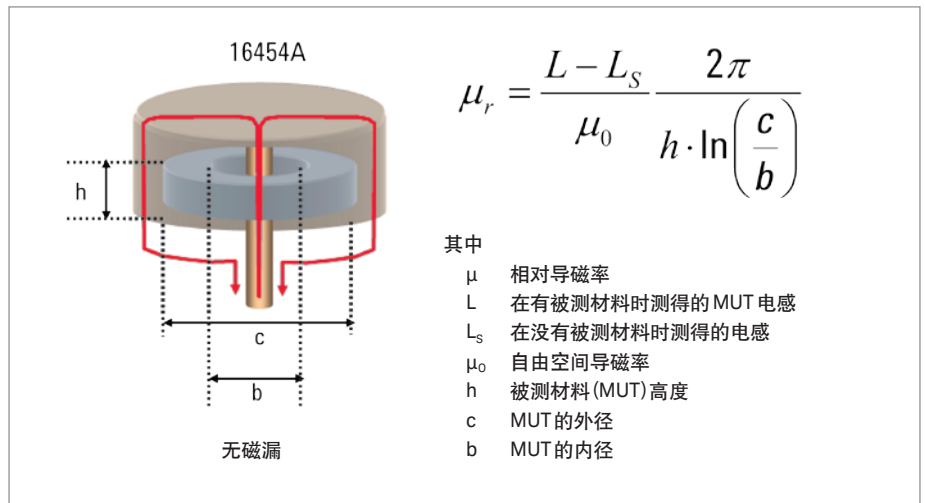


图 28. 电感测量法

各种测量方法的比较

在选择最适合的测量方法时，必须考虑到多个重要因素，例如精度、方便性，以及材料的外形和形态。下面总结了部分需要考虑的重要因素：

- 频率范围
- ϵ_r 和 μ_r 预期值
- 要求的测量精度
- 材料属性 (例如均质、各向同性)
- 材料形态 (例如液体、粉末、固体、薄片)
- 样品大小限制
- 对材料的破坏和非破坏性
- 接触或非接触
- 温度
- 成本

图 29 对已经讨论过的测量方法进行了快速的比较。

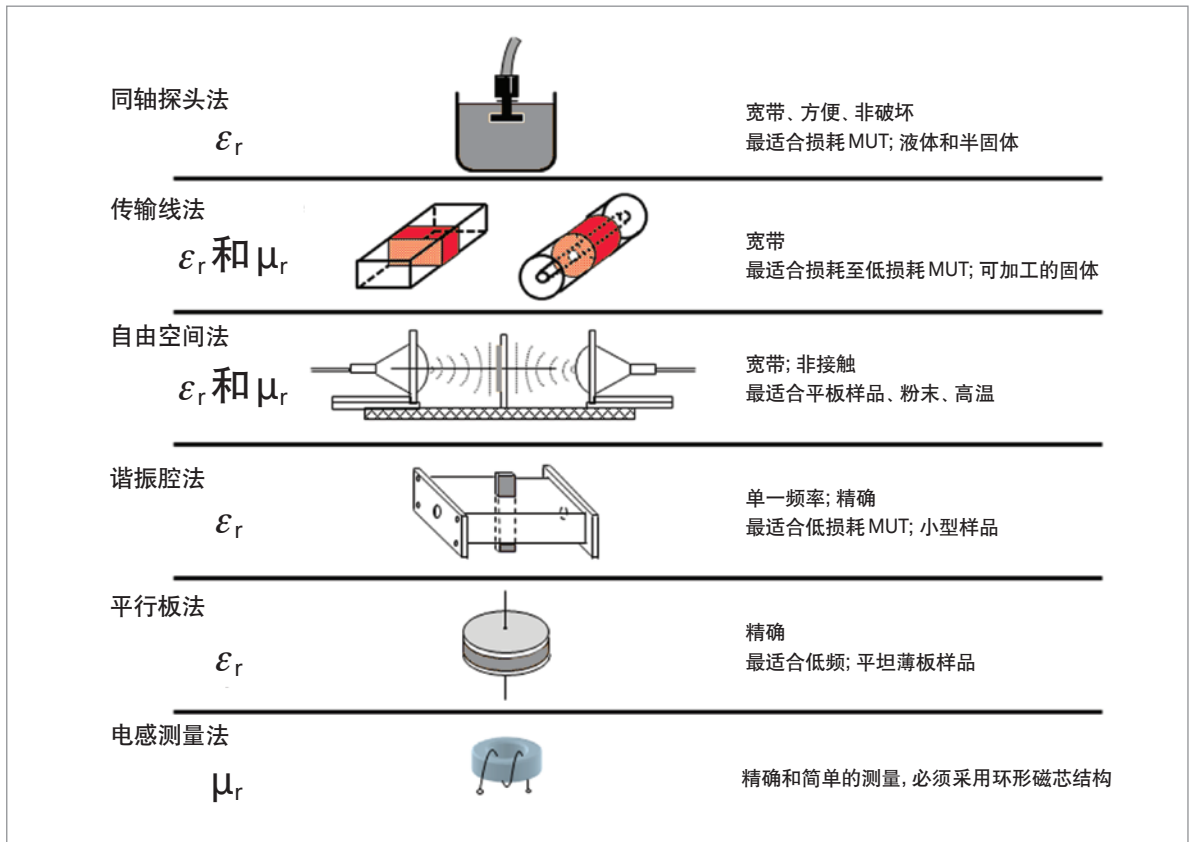


图 29. 测量方法汇总

是德科技解决方案

是德科技提供了多种测试夹具，可用于测量大多数类型的材料的介电特性。图30显示了是德科技的各种测试夹具，用户可以根据材料类型和频率范围选择使用。

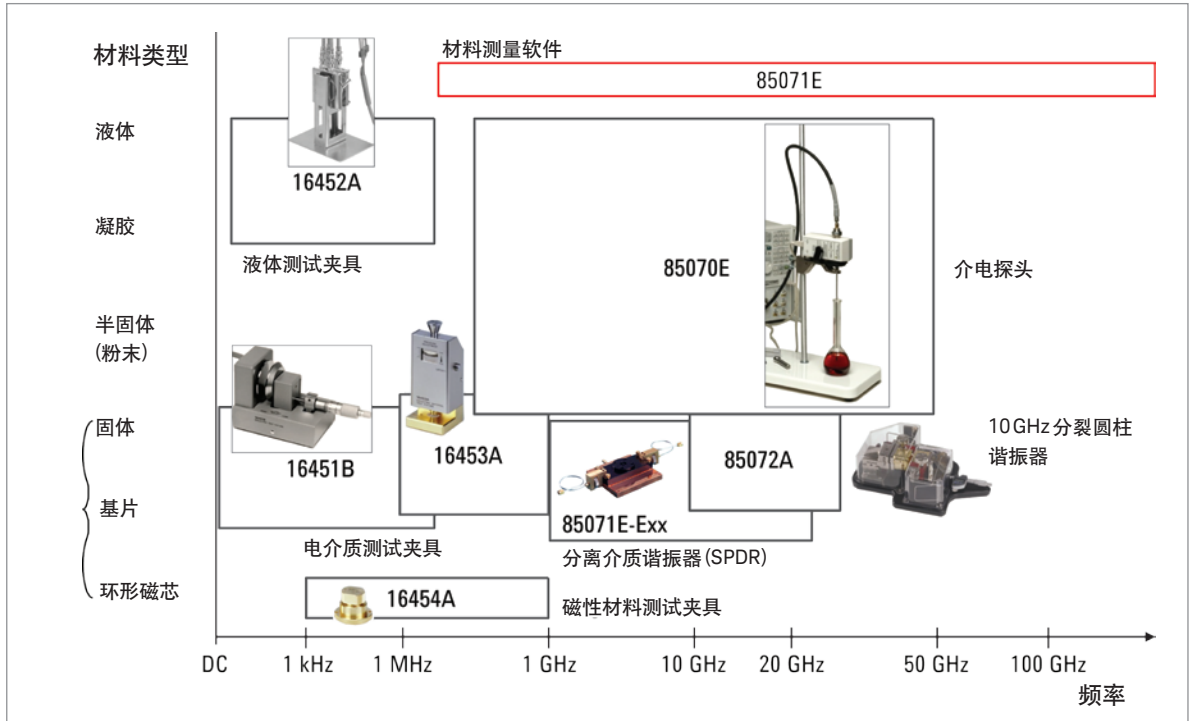


图30. 材料测量夹具

是德科技还提供了功能强大的软件，帮助客户自动完成复数介电常数和导磁率的测量分析。85071E材料测量软件可以简化使用是德科技网络分析仪测量复数介电常数和导磁率的过程。这款简单易用的软件可以引导用户完成设置和测量，立即将S参数网络分析仪数据转换为您需要的数据格式，并在数秒钟内显示结果。结果可以各种格式的图表显示：

ϵ_r' 、 ϵ_r'' 、 $\tan \delta$ 、 μ_r' 、 μ_r'' 、 $\tan \delta_m$ 和科尔-科尔

是德科技提供多种测量方法和数学模型，能够满足大多数的应用需求。

自由空间校准选件支持是德科技独有的GRL(选通反射线路)校准，适用于在自由空间中测量材料。弧形反射率选件可以自动执行常见的NRL弧形框法，以测量样品表面的反射。谐振腔体选件提供了最高的损耗正切精度和分辨率。

图31汇总了是德科技夹具和兼容的测量仪器。

		PNA	ENA	FieldFox	E4991A	4294A	E4980A	4285A	方法
85 070E	介电探头套件	•	•	•	•				同轴探头法
85071E Exx	分离介质谐振器 (SPDR)	•	•	•					谐振腔法
85072A	10 GHz 分裂圆柱谐振器	•							谐振腔法
16451B	介电材料测试夹具					•	•	•	平行板法
16452A	液体测试夹具					•	•	•	平行板法
16453A	介电材料测试夹具				•				平行板法
16454A	磁性材料测试夹具				•	•			电感法

图31. 是德科技仪器和夹具

参考资料

1. *Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers*, 5980-2862EN, 2008年10月28日
2. *矢量网络分析的基本原理*, 5965-7707CHCN, 2012年12月12日
3. *Exploring the Architectures of Network Analyzers*, 5965-7708E, 2000年12月6日
4. *Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements*, 5965-7709E, 2002年3月27日
5. D. V. Blackham、R. D. Pollard, 使用同轴探头进行介电常数测量的改进方法, *IEEE Trans. on Instr. Meas.*, 第46卷, 第5期, 1997年10月, 1093-1099页
6. 技术概述, *Keysight 85070E Dielectric Probe Kit*, 5989-0222EN, 2012年6月14日
7. 85070 软件在线帮助: <http://na.tm.keysight.com/materials/downloads.html>
8. 技术概述, *Keysight 85071E Materials Measurement Software*, 5988-9472EN, 2012年6月14日
9. 85071 软件在线帮助: <http://na.tm.keysight.com/materials/downloads.html>
10. 在微波频段和 1650° 温度条件下测量固体电绝缘材料复数介电常数的 ASTM 测试方法, ASTM 标准 D2520, 美国材料与测试学会
11. Dielectric constant measurement of solid materials using the 16451B dielectric test fixture, 5950-2390, 1998年9月
12. ASTM, "固体电绝缘材料的 A-C 损耗特征和介电常数的测试方法", ASTM 标准 D 150, 美国材料与测试学会
13. 技术概述, *Keysight 85072A 10GHz Split Cylinder Resonator*, 5989-6182EN, 2012年5月8日。
14. M.D. Janezic, "使用分裂圆柱谐振器进行无损相对介电常数和损耗正切测量", 博士论文, 科罗拉多大学博尔德分校, 2003年。
15. IPC TM-650 2.5.5.13 使用分裂圆柱谐振器测量相对介电常数和损耗正切
16. 用于对基板进行介电测量的是德科技分离式介电谐振器, 5989-5384CHCN, 2006年7月19日

myKeysight

myKeysight
www.keysight.com/find/mykeysight
个性化视图为您提供最适合自己的信息!



3年保修
是德科技卓越的产品可靠性和广泛的3年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。



是德科技保证方案
www.keysight.com/find/AssurancePlans
5年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。



www.keysight.com/go/quality
Keysight Technologies, Inc.
DEKRA Certified ISO 9001:2008
Quality Management System

是德科技渠道合作伙伴
www.keysight.com/find/channelpartners
黄金搭档：是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

www.keysight.com/find/materials

www.keysight.com/find/na

www.keysight.com/find/impedance

www.keysight.com/find/ecal

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：www.keysight.com/find/contactus

是德科技客户服务热线

热线电话：800-810-0189、400-810-0189
热线传真：800-820-2816、400-820-3863
电子邮件：tm_asia@keysight.com

是德科技(中国)有限公司

北京市朝阳区望京北路3号是德科技大厦
电话：86 010 64396888
传真：86 010 64390156
邮编：100102

是德科技(成都)有限公司

成都市高新区南部园区天府四街116号
电话：86 28 83108888
传真：86 28 85330931
邮编：610041

是德科技香港有限公司

香港北角电器道169号康宏汇25楼
电话：852 31977777
传真：852 25069233

上海分公司

上海市虹口区四川北路1350号
利通广场19楼
电话：86 21 26102888
传真：86 21 26102688
邮编：200080

深圳分公司

深圳市福田区福华一路6号
免税商务大厦裙楼东3层3B-8单元
电话：86 755 83079588
传真：86 755 82763181
邮编：518048

广州分公司

广州市天河区黄埔大道西76号
富力盈隆广场1307室
电话：86 20 38390680
传真：86 20 38390712
邮编：510623

西安办事处

西安市碑林区南关正街88号
长安国际大厦D座501
电话：86 29 88861357
传真：86 29 88861355
邮编：710068

南京办事处

南京市鼓楼区汉中路2号
金陵饭店亚太商务楼8层
电话：86 25 66102588
传真：86 25 66102641
邮编：210005

苏州办事处

苏州市工业园区苏华路一号
世纪金融大厦1611室
电话：86 512 62532023
传真：86 512 62887307
邮编：215021

武汉办事处

武汉市武昌区中南路99号
武汉保利广场18楼A座
电话：86 27 87119188
传真：86 27 87119177
邮编：430071

上海MSD办事处

上海市虹口区欧阳路196号
26号楼一楼J+H单元
电话：86 21 26102888
传真：86 21 26102688
邮编：200083

