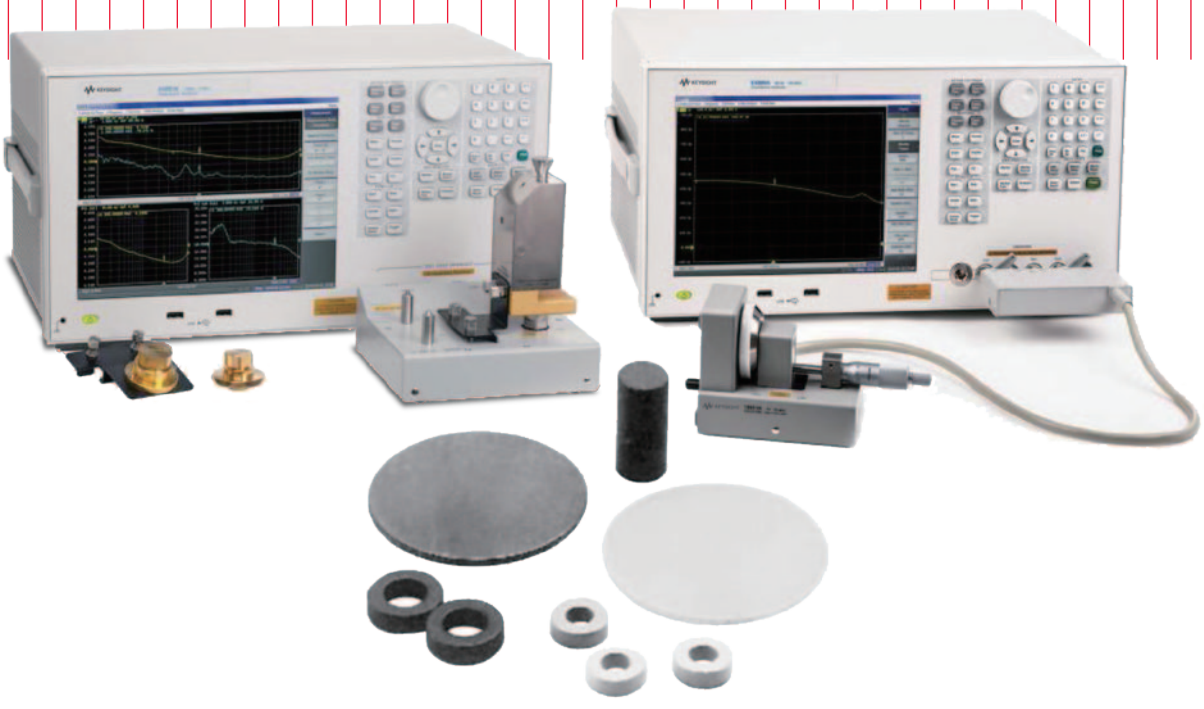
是德科技

使用 LCR 表和阻抗分析仪测量介电常数和导磁率的解决方案

应用指南



KEYSIGHT TECHNOLOGIES

使用 LCR 表和阻抗分析仪测量介电常数和导磁率的解决方案

应用指南 1369-1

1. 引言 3

2. 介电常数测试 4

2.1. 介电常数的定义 4

2.2. 平行板测量法 5

2.3. 介电常数测量系统 8

2.4. 使用 16451B 介电材料测试夹具的测量系统 8

2.5. 使用 16453A 介电材料测试夹具的测量系统 13

3. 导磁率测试 17

3.1. 导磁率的定义 17

3.2. 电感测量法 17

3.3. 导磁率测量系统 18

3.4. 使用 16454A 磁性材料测试夹具的测量系统 18

4. 结论 20

附录 21

A. 液体的介电常数测试 21

A.1. 使用 16452A 液体测试夹具的测量系统 21

A.1.1. 主要优势 21

A.1.2. 适合的 MUT 21

A.1.3. 结构 21

A.1.4. 主要技术指标 22

A.1.5. 操作方法 23

A.1.6. 特殊考虑事项 23

参考文献 24

1. 引言

近年来，电子设备技术获得了蓬勃发展，而这也使得电子元器件的材料特征成为决定电路特性的关键因素。例如，在制造数字(媒体)设备中常用的高容量多层片式陶瓷电容器(MLCC)时，必须要采用高κ值(介电常数)材料。此外，在选择材料之前还必须执行各项电气性能验证，例如频率和温度响应。

在电子设备以外的其他领域，对材料的电气特征进行测试也变得越来越普遍，因为材料的成分和化学变量(例如固体和液体)可能会用电气特征响应取代性能参数。

材料测试测量系统由三大部分组成，包括: 精密的测量仪器、用于夹持被测材料的测试夹具，以及能够计算和显示基本材料参数(例如介电常数和导磁率)的软件。测量介电常数和导磁率的方法目前有很多(见表1)。不过，本指南将主要介绍采用阻抗测量技术的方法，这些方法具有以下优势:

- 频率范围宽: 从20 Hz到1 GHz
- 测量精度高
- 测量的准备工作非常简单(材料制备、测量设置)

本指南首先在第2部分介绍介电常数的测量方法、测量系统和解决方案，而后在第3部分介绍导磁率的测量方法、系统和解决方案，最后在附录中说明适用于液体的电阻率测量系统和导磁率测量系统。

表1. 介电常数和导磁率参数的测量技术和测量方法

测量参数	测量技术	测量方法
介电常数	阻抗分析	平行板法
		S参数
		腔体
		真空
导磁率	阻抗分析	电感
	网络分析	反射波
		S参数
		腔体

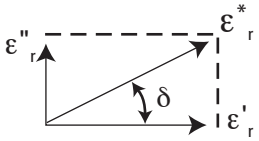
2. 介电常数测试

2.1. 介电常数的定义

介电常数描述的是材料与电场之间的相互作用。图1显示了介电常数的主要计算公式。介电常数(K)等于复数相对介电常数 (εr*)，或复数介电常数(ε*)与真空介电常数(ε0)的比值。复数相对介电常数的实部(εr')表示外部电场有多少电能储存到材料中; 对于绝大多数固体和液体来说，εr' >1。复数相对介电常数的虚部(εr")称为损耗系数，表示材料中储存的电能有多少消耗或损失到外电场中。εr' 始终 > 0，且通常远远小于εr'。损耗系数同时包括介电材料损耗和电导率的效应。

如果用简单的矢量图(图1)表示复数介电常数，那么实部和虚部的相位将会相差90°。其矢量和与实轴(εr')形成夹角δ。通常使用这个角度的正切值tan δ或损耗角正切来表示材料的相对“损耗”。术语“介电常数”在技术文献中又称为“介电常数”。在本应用指南中，术语“介电常数(permittivity)”将用来指介电常数(dielectric constant)和复数相对介电常数。

$$\kappa^* = \varepsilon^*_r = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} = \underset{\text{实部}}{\varepsilon'_r} - j\ \underset{\text{虚部}}{\varepsilon''_r} = \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0}\right) - j\ \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_0}\right)$$



$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''\ \text{虚部}}{\varepsilon_r'\ \text{实部}}$$

$$\tan\delta = D\ (\text{损耗系数})$$

κ^* = 介电常数

ε^*_r = 复数相对介电常数

ε_0 = 自由空间介电常数 $\left(\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}\ [F/m]\right)$

图1. 相对复数介电常数(εr*)的定义。

2.2. 使用平行板法测量介电常数

当使用阻抗测量仪器测量介电常数时，通常采用平行板法。图 2 显示了平行板法的概图。

平行板法在 ASTM D150 标准中又称为三端子法，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一个电容器，(注: 在本文以下部分中，被测材料无论是固体还是液体均用 MUT 表示。) 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，两个电极配备在夹持介电材料的测试夹具上。阻抗测量仪器将测量电容 (C) 和耗散 (D) 的矢量分量，然后由软件程序计算出介电常数和损耗角正切。

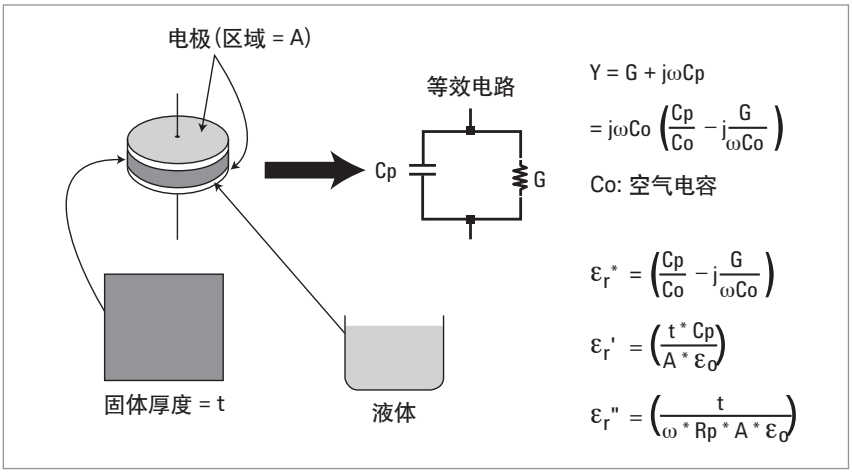


图 2. 平行板法

图 3 显示了实际测量中的电场流动。当简单地测量两个电极之间的介电材料时，在电极边缘会产生杂散电容或边缘电容，从而使得测得的介电材料电容值比实际值大。边缘电容会导致电流流经介电材料和边缘电容器，从而产生测量误差。

使用保护电极，可以消除边缘电容所导致的测量误差。保护电极会吸收边缘的电场，所以在电极之间测得的电容只是由流经介电材料的电流形成，这样便可以获得准确的测量结果。当结合使用主电极和保护电极时，主电极称为被保护电极 (guarded electrode)。

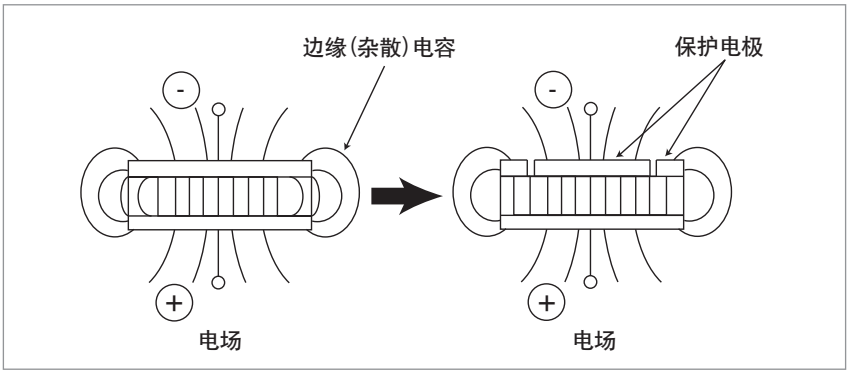


图 3. 保护电极的效应

接触电极法:

这种方法通过测量与 MUT 直接接触的电极的电容来推导出介电常数(图 4)。介电常数和损耗角正切通过以下公式 计算:

C_p: MUT的等效平行电容[F]
D: 耗散系数(测量值)
t_m: MUT的平均厚度[m]
A: 被保护电极的表面积[m^2]
d: 被保护电极的直径[m]
ε_0: 自由空间的介\电常数 = 8.854 x 10^{-12} [F/m]

公式:

$$\varepsilon_r = \frac{t_m \times C_p}{A \times \varepsilon_0} = \frac{t_m \times C_p}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \varepsilon_0}$$

$\tan \delta = D$

接触电极法不需要制备任何材料，而且测量操作非常简单，因此得到最广泛的使用。不过在用这种方法进行测量时，如果没有考虑到空气间隙及其影响，那么可能会产生严重的测量误差。

当电极直接接触MUT时，MUT与电极之间会形成一个空气间隙。无论MUT两面组成得多么平坦和平行，都不可避免会产生空气间隙。

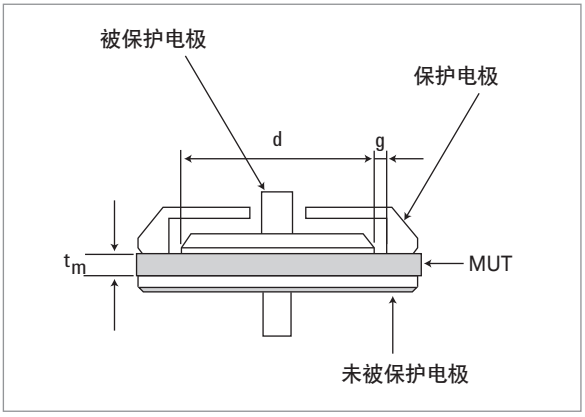


图4. 接触电极法

这个空气间隙会导致测量结果出现误差，因为测量的电容实际上是介电材料与空气间隙串联结构的电容。空气间隙的厚度与测量误差之间的关系可以用图5所示的公式来表示。

测量误差由MUT的相对介电常数(εr')、MUT的厚度(tm)和空气间隙的厚度(ta)决定的。表2计算出了测量误差结果实例。请注意，厚度较薄的材料和高 κ 值材料的影响大很多。

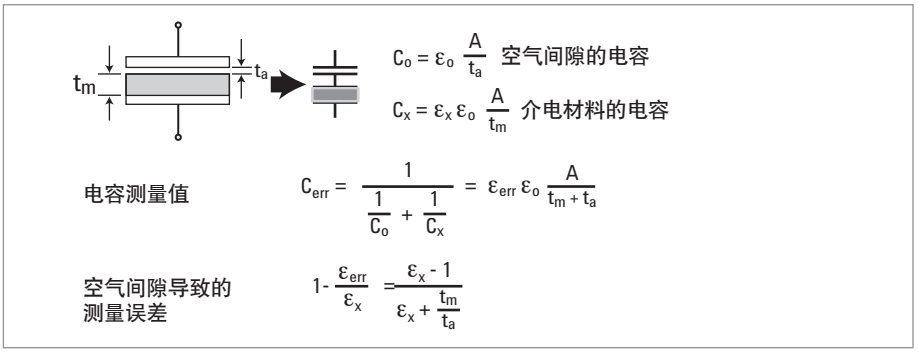


图 5. 空气间隙的影响

表 2. 空气间隙导致的测量误差

ta/tm	2	5	10	20	50	100
0.001	0.1%	0.4%	1%	2%	5%	9%
0.005	0.5%	2%	4%	9%	20%	33%
0.01	1%	4%	8%	16%	33%	50%
0.05	5%	16%	30%	48%	70%	83%
0.1	8%	27%	45%	63%	82%	90%

通过用薄膜电极接触介电材料的表面，可以减小空气间隙的影响。

虽然需要进行额外的材料制备(制作薄膜电极)，但可以实现最准确的测量。

非接触电极法

这种方法从概念上来说融合了接触电极法的优势，并避免了其缺点。它不需要薄膜电极，但仍可解决空气间隙效应。根据在有 MUT 和没有 MUT 时获得的两个电容测量结果推导出介电常数(图6)。

理论上，电极间隙 (tg) 应比 MUT 的厚度(tm)略微小一点。换句话说，空气间隙(tg-tm)应远远小于 MUT 的厚度(tm)。要想正确执行测量，必须满足这些要求。最少要进行两次电容测量，以便使用测量结果计算介电常数。参见右侧的公式。

C_s1: 未插入 MUT 时的电容 [F]
C_s2: 插入 MUT 时的电容 [F]
D_1: 未插入 MUT 时的耗散系数
D_2: 插入 MUT 时的耗散系数
t_g : 被保护/保护电极与未被保护电极之间的间隙 [m]
t_m: MUT 的平均厚度 [m]

公式:

$$\varepsilon_r' = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{C_{s1}}{C_{s2}}\right) x \frac{t_g}{t_m}}$$

$$\tan\delta = D_2 + \varepsilon_r' \times (D_2 - D_1) \times \left(\frac{t_g}{t_m} - 1\right) \text{ (when } \tan\delta << 1\text{)}$$

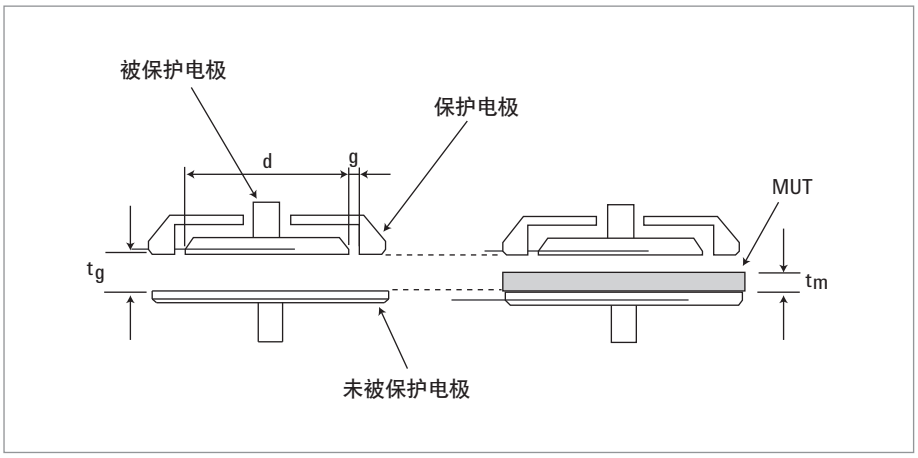


图6. 非接触电极法

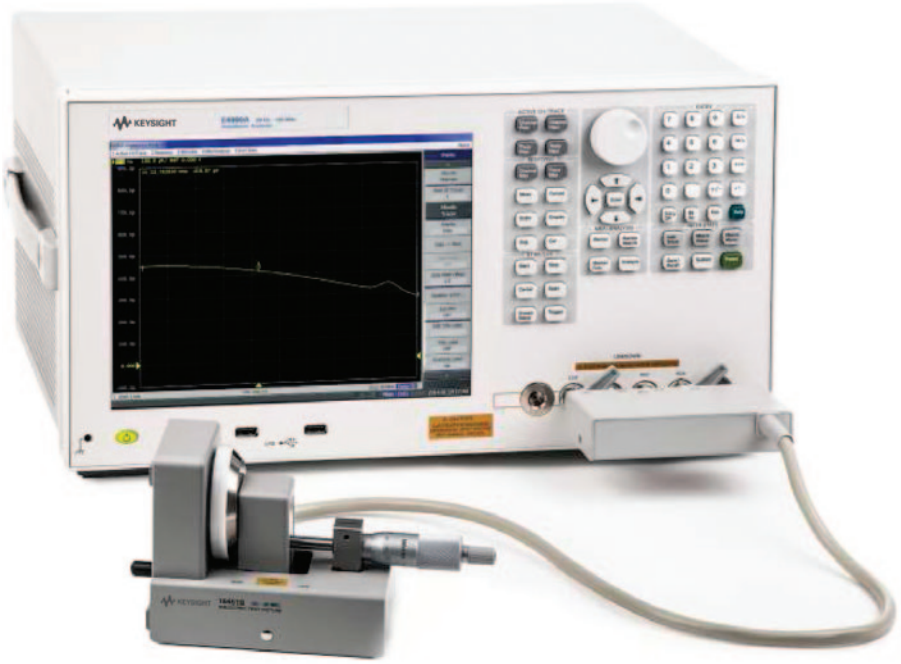
表 3. 平行板测量法的比较

方法	接触电极(不使用薄膜电极)	非接触电极	接触电极(使用薄膜电极)
精度	低	中	高
适用的MUT	具有平滑表面的固体材料	具有平滑表面的固体材料	薄膜电极必须应用到表面
操作	1次测量	2次测量	1次测量

2.3. 介电常数测量系统

本部分将讨论采用平行板法的两种测量系统。首先是 16451B 介电材料测试夹具，它能够测量高达 30 MHz 的固体材料。其次是 16453A 介电材料测试夹具，它能够测量高达 1 GHz 的固体材料。本指南将在下列子标题之后详细介绍这些测量系统:

1) 主要优势
2) 适用的 MUT
3) 结构
4) 主要技术指标
5) 操作方法
6) 特殊考虑事项
7) 测量实例



适用的测量仪器: E4990A、4285A、E4980A 和 E4981A

2.4. 使用 16451B 介电材料测试夹具的测量系统

2.4.1. 主要优势

- 可以在高达 30 MHz 的频率范围内实现精密测量
- 提供 4 个电极 (A 至 D) 以适应接触电极法和非接触电极法以及各种 MUT 尺寸
- 保护电极可以消除边缘电容的影响
- 附件可以简化开路和短路补偿
- 可以与任何具有 4 端子对配置的阻抗测量仪器结合使用

2.4.2. 适用的MUT

适用的介电材料为表面光滑且厚度均匀的固体薄板。适用介电材料的大小取决于所使用的测量方法和电极类型。电极A和B用于无需制作薄膜电极的接触电极法。电极C和D用于需要制作薄膜电极的接触电极法。当采用非接触电极法时，使用电极A和B。在这种方法中，我们建议您对介电材料进行处理，使其厚度仅为几毫米。

电极A与电极B的差别是直径不同(电极C与电极D同样如此)。电极A和C适合较大的MUT尺寸，电极B和D适合较小的MUT尺寸。表4和表5显示了每种电极适用的MUT尺寸。图7到10显示了每种电极的外形尺寸。

表4. 电极A和B适用的MUT尺寸

电极类型	材料直径	材料厚度	电极直径
A	40mm至56mm	t ≤ 10mm	38mm
B	10mm至56mm	t ≤ 10mm	5mm

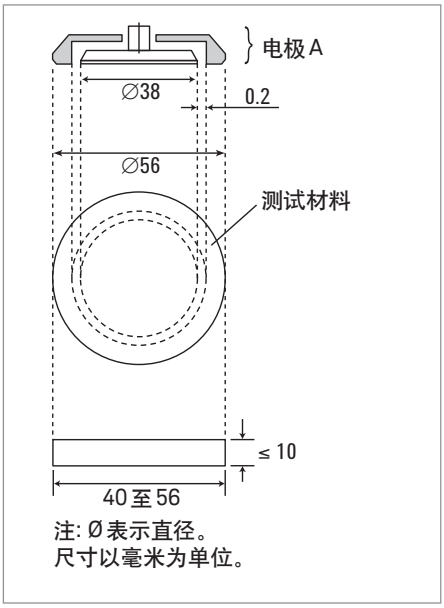


图7. 电极A的直径

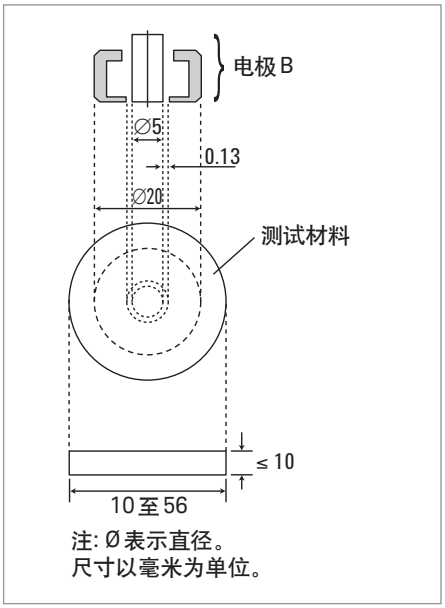


图8. 电极B的直径

表5. 电极C和D适用的MUT尺寸

电极类型	材料直径	材料厚度	电极直径*
C	56mm	t ≤ 10mm	5至50mm
D	20mm至56mm	t ≤ 10mm	5至14mm

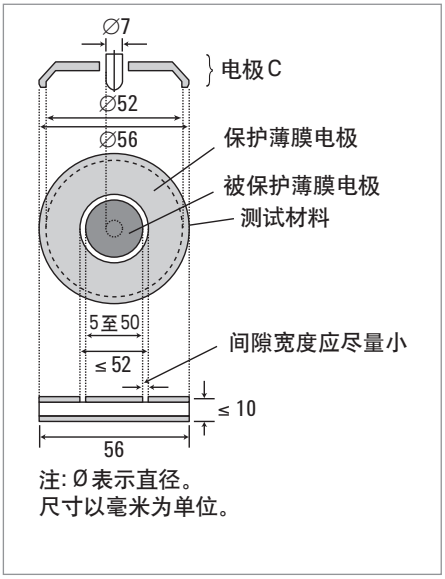


图9. 电极C的直径

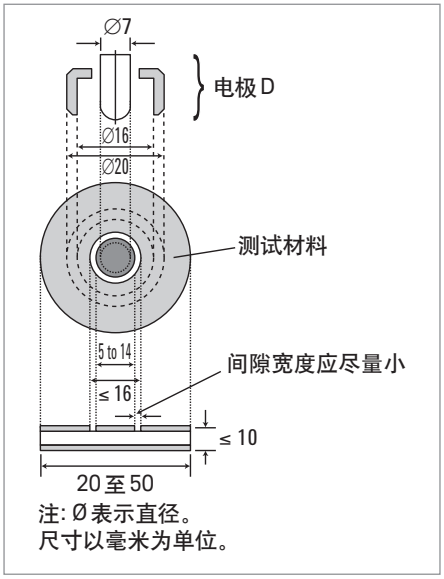


图10. 电极D的直径

2.4.3. 结构

为了避免边缘电容所导致的测量误差，可以使用三端子配置(包括保护端子)。图 11 显示了16451B的结构。

16451B中的电极由以下部分组成：

1. 未被保护电极，连接至测量仪器的高端。
2. 被保护电极，连接至测量仪器的低端。
3. 保护电极，连接至测量仪器的保护端子(BNC连接器的外部导体)。

保护电极包围被保护(或主)电极，并吸收电极边缘的电场，从而可以保证介电常数测量的精确性。

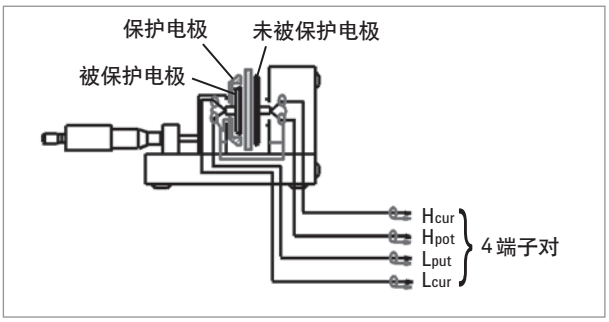


图11. 16451B的结构

2.4.4. 主要技术指标

表6. 16451B的主要技术指标

频率	⩽ 30MHz
最大电压	±42V
工作温度	0°C至55°C
端子配置	4端子对, BNC
电缆长度	1m
补偿	开路/短路*

表 6 列出了主要技术指标。图 12 和 13 显示了使用 Keysight E4990A 时的测量精度。关于测量精度的详细信息，请参见《阻抗测量附件选型指南》(5965-4792CHCN)

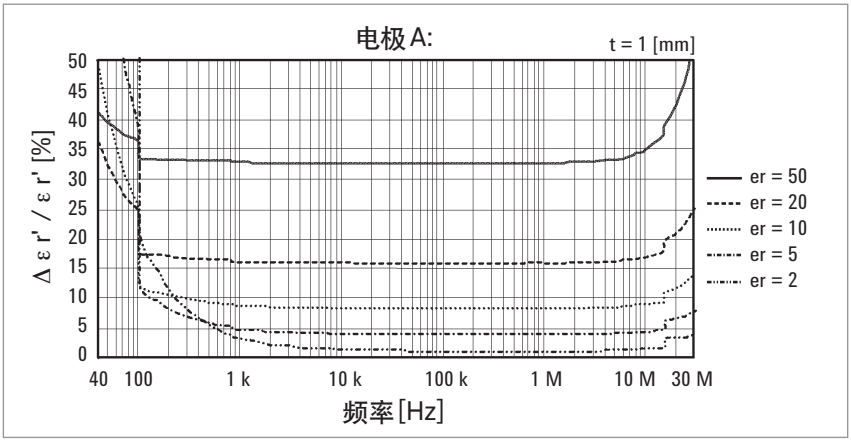


图12. 介电常数测量精度(补充数据)

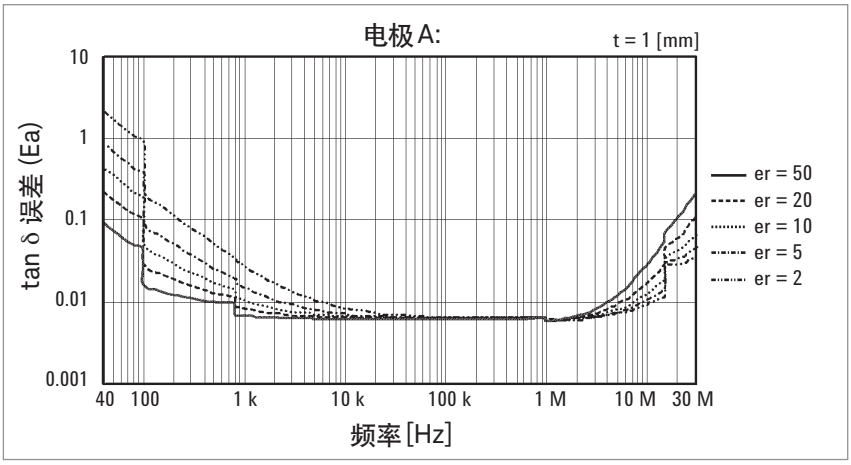


图12. 介电常数测量精度(补充数据)

* 当使用5MHz 以上的4285A或E4990A时, 除了开路和短路补偿之外, 还必须执行负载补偿。
详细信息请参见第2.4.5部分的操作方法。

2.4.5. 操作方法

图14显示了使用16451B执行介电常数测量的流程图。下面详细说明流程图中的每一个步骤:

第1步. 制备介电材料: 制作适当大小的MUT。参考图7到图10。如果采用的是使用薄膜电极的接触电极法，那么将薄膜电极贴到MUT表面。

第2步. 连接被保护电极: 选择适当的电极并把它安装到16451B上。

第3步. 连接16451B: 将16451B连接到测量仪器的未知端子上。

第4步. 电缆长度补偿: 将测量仪器的电缆长度补偿功能设置为1 m。设置过程参见测量仪器的操作手册。

第5步. 补偿16451B的剩余阻抗: 使用配备的附件在特定频率上执行开路和短路补偿。此操作必须在将被保护电极和未被保护电极调整成平行之前实施。

第6步. 调整电极: 为了提高测量性能，测量系统提供了一个机械装置，用于将被保护电极和未被保护电极调整为相互平行。完成此项调整后，若使用接触电极法，可以最大限度减少出现空气间隙的可能性; 而若是使用非接触电极法，则可以形成厚度均匀的空气间隙。调整过程在16451B的操作手册中详细说明。

第7步. 设置测量条件: 在测量仪器上设置频率和测试电压等测量条件。设置过程参见测量仪器的操作手册。

第8步. 补偿16451B的剩余阻抗: 使用配备的附件对第7步中设置的测量条件实施开路和短路补偿。

当使用高于5 MHz的Keysight 4285A或E4990A时，也必须执行负载补偿，因为对于高频测量来说，很难忽略剩余阻抗，开路和短路补偿都无法消除这种剩余阻抗。

为了补偿16451B的频率响应，使用在100 kHz上的测量值作为标准值，在高频上加以负载补偿。把通过在电极之间形成空气间隙(不插入任何物体)而生成的空气电容当成16451B的负载器件。表7列出了通过调整电极之间的空气间隙高度而获得的推荐的电容值。假设空气电容与频率无关、没有损耗且响应平坦。那么使用100 kHz (G假设为零)处的电容值(Cp)进行负载补偿。

第9步. 插入MUT: 在电极之间插入MUT。

第10步. Cp-D测量: 测量电容(Cp)和耗散系数(D)。当采用非接触电极法时，需要在插入和不插入MUT的情况下执行两次Cp-D测量。

第11步. 计算介电常数: 如前面第2.2部分讨论的内容，使用适当的公式计算介电常数。

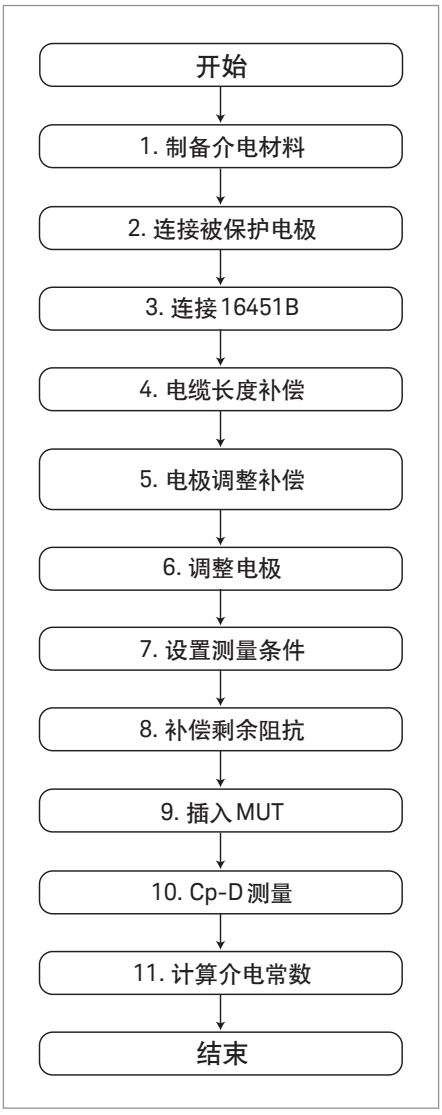


图14. 16451B的测量过程流程图

表7. 负载值

电极	推荐的电容*
A	50 pF ± 0.5 pF
B	5 pF ± 0.05 pF
C、D	1.5 pF ± 0.05 pF

* 在100 kHz处测得的Cp值

2.4.6 特殊考虑事项

前面提到过，要减少MUT与电极之间的空气间隙的影响，比较实用的方法是使用薄膜电极通过接触电极法进行测量(参见第2.2部分)。16451B配有电极C和D以实施这种方法。

受到压力就会变形的被测材料不能保持规定的厚度。此类MUT不适合用接触电极法进行测量，而应采用非接触电极法。

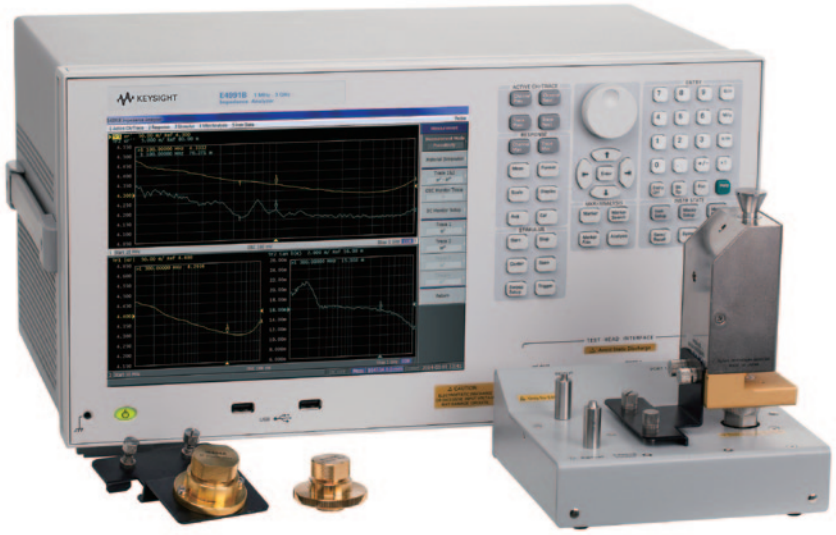
在应用非接触电极法时，要求电极间隙tg比MUT的厚度最多大10%。使用薄膜材料很难形成10%的电极间隙。因此我们推荐只对厚度超过几毫米的材料应用这种方法。

16451B上的测微计经过专门设计，可以在用户使用非接触电极法进行测量时形成精密间隙。采用接触电极法是无法精确测量MUT的厚度的。这是因为测微计的标度在很大程度上取决于相互平行的保护电极和未被保护电极。我们建议您使用单独的测微计来测量MUT厚度。

2.5. 使用16453A介电材料测试夹具的测量系统

2.5.1. 主要优势

- 宽频率范围: 1 MHz至1 GHz
- 选件E4991B-002(材料测量软件)内置在E4991B中的固化软件能够消除边缘电容效应
- 开路、短路和负载补偿
- 使用选件E4991B-002(材料测量软件)内置在E4991B中的固化软件，可以直接读取复数介电常数
- 使用选件E4991B-002和E4991B-007，可以实施从-55°C到+150°C的温度特征测量



适用的测量仪器: E4991B(选件E4991B-002)*

*在进行温度响应测试时，需要使用选件E4991B-007温度特征测试套件。E4991B中预装了Microsoft Excel VBA实例程序，该程序可以提供温度舱控制和测量设置功能。您可以将该程序复制到外部PC上。

2.5.2. 适用的MUT

适用的介电材料为表面光滑且厚度均匀的固体薄板。图15显示了适用的MUT尺寸。

2.5.3. 结构

图16显示了16453A的结构。上方的电极配有内置弹簧，使MUT可以紧紧固定在电极之间。您可以调整所施加的压力。

16453A与16451B不同，未配备保护电极。原因是高频保护电极只会产生更大的剩余阻抗，而频率特征非常差。未减少边缘电容效应，E4991B选件E4991B-002(材料测量)固化软件提供了根据仿真结果进行校正的功能。

另外，剩余阻抗作为导致测量误差的另一个重要原因，也无法通过开路和短路补偿完全去除。为此，测量系统提供了PTFE作为负载补偿器件。

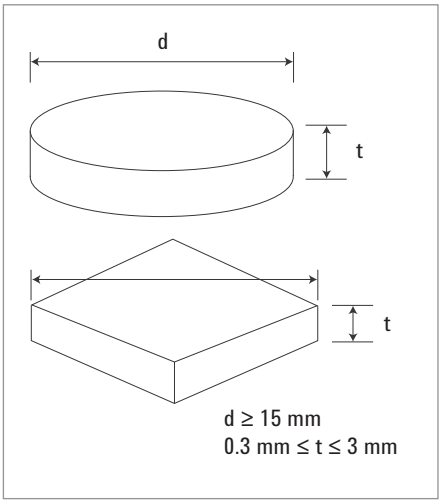


图15. 适用的MUT尺寸

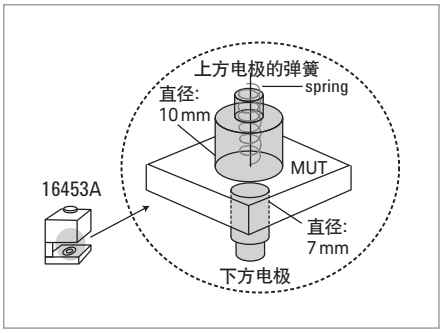


图16. 16453A的结构

2.5.4. 主要技术指标

表8. 16453A的主要技术指标	
频率	1 MHz至1 GHz
最大电压	±42V
工作温度	-55°C至+150°C*
端子配置	7mm
补偿	开路、短路和负载

* 必须与配有选件E4991B-002和E4991B-007的E4991B配合使用。

表8列出了主要技术指标。图17和18显示了使用E4991B时的测量精度。关于测量精度的详细信息，请参见从仪器附送的操作手册。

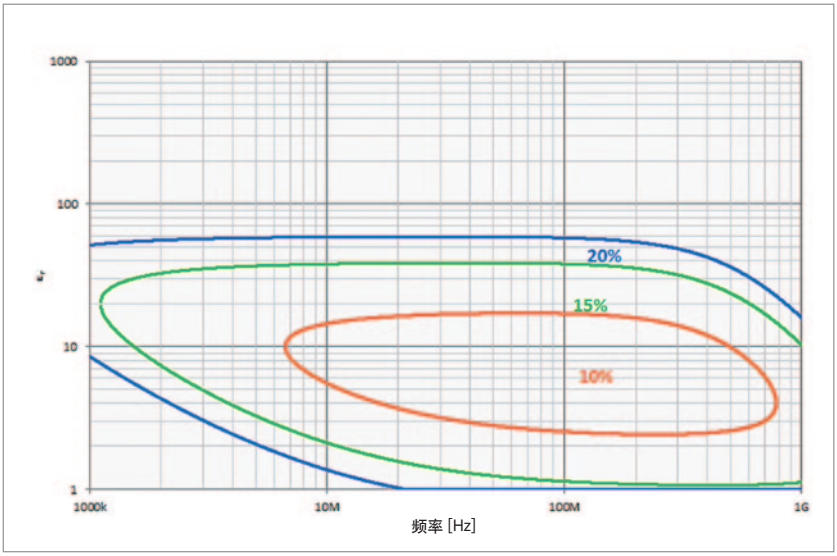


图17. 介电常数测量精度(补充数据)

2.5.5. 操作方法

图19显示了使用16453A和E4991B执行介电常数测量的流程图。下面详细说明流程图中的每一个步骤: 更详细的信息，请参见《E4991B快速入门指南(Quick Start Guide for the E4991B)》。

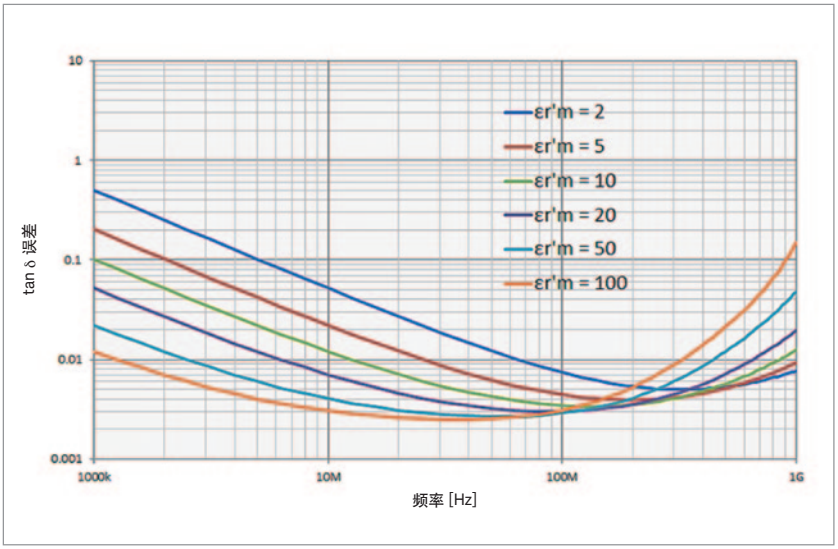


图18. 损耗角正切测量精度(补充数据)

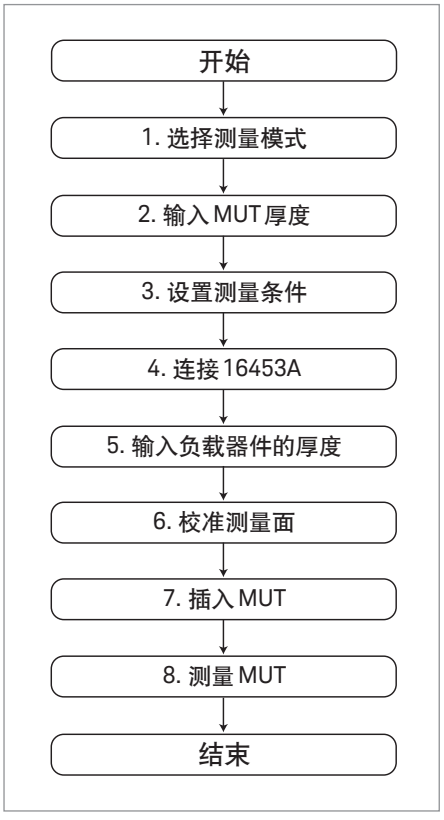


图19. 16453A的测量过程流程图

第1步. 选择测量模式: 在E4991B的实用工具菜单中选择介电常数测量。

第2步. 输入MUT的厚度: 将MUT的厚度数据输入E4991B。使用测微计测量厚度。

第3步. 设置E4991B的测量条件: 在测量仪器上设置频率、测试电压和测量参数等测量条件。

第4步. 连接16453A: 把16453A连接到E4991B的7mm端子。

第5步. 输入负载器件的厚度： 在实施补偿之前，向E4991B输入所配备的负载器件(PTFE板)的厚度。

第6步. 校准测量面: 执行开路、短路和负载校准。

第7步. 插入MUT: 在电极之间插入MUT。

第8步. 测量MUT: 测量结果将在屏幕上显示。使用游标功能，可以对数据进行分析。

2.5.6. 特殊考虑事项

与前面提到的测量系统一样，MUT与电极之间形成的空气间隙可能是测量误差的主要原因。厚度较薄的材料和高 k 值材料最容易产生这种效应。粗糙表面的材料(图20)也会受到空气间隙的类似影响。

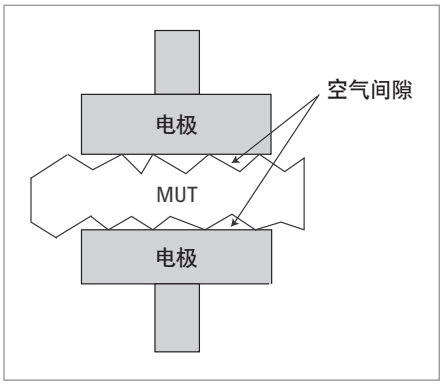


图20. 粗糙表面的介电材料

为了消除MUT和电极之间出现的空气间隙，可以使用薄膜电极接触介电材料的表面。图21和22显示了这种方法。形状和尺寸正好适合16453A的电极利用高导银膏或烧银(fired-on silver)焊接在介电材料上。MUT的形状应按照图21所示的方式进行整理，并且薄膜电极的厚度应比介电材料更薄。在这种情况下，将焊接的薄膜电极放置到MUT上的适合位置以紧密接触16453A的电极至关重要(图22)。遵循这个过程可以保证测量结果更加准确和可靠。

此外，如果MUT非常薄，例如大约为100µm，那么可以把3或4块其他MUT叠放到一起，再进行测量。这样可以减小空气间隙，提高测量精度。MUT必须具有光滑表面，且不会受力变形。

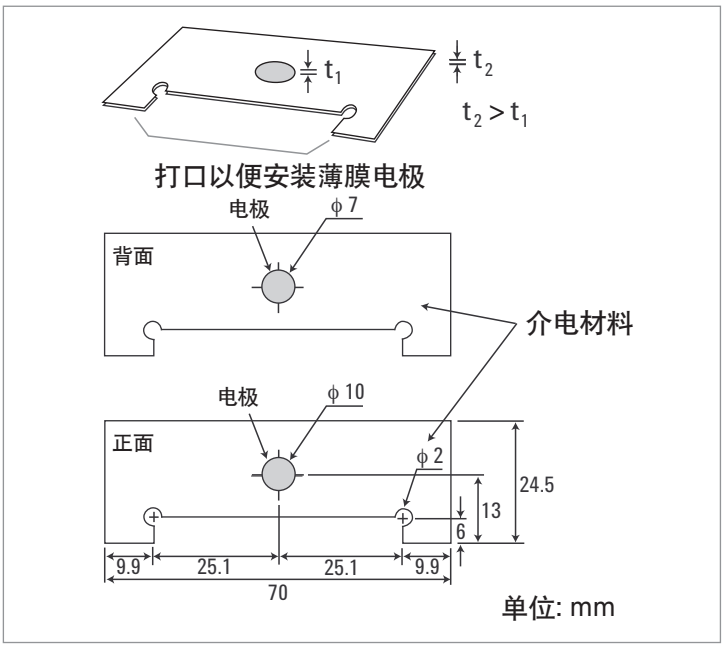


图21. 焊接的薄膜电极的尺寸

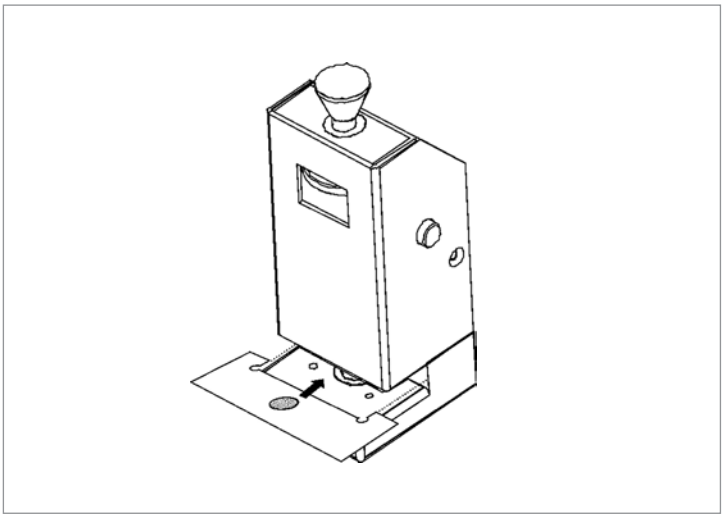


图22. 将焊接的薄膜电极放置到MUT上

需要考虑的另一个问题是上方电极弹簧压力的调整机制。弹簧的压力应尽量大，以便最大限度减少MUT与电极之间出现空气间隙的可能性。不过，如果MUT在受到极大压力后会发生变形，那么就会影响到其厚度，最终导致测量结果不准确。为了实现稳定的测量，应将弹簧压力的大小调整到不会使MUT变形的程度。

2.5.7. 测量实例

如图 23 所示，结合使用 E4991B 和 16453A，可以获得环氧树脂玻璃的频率特征测量结果。

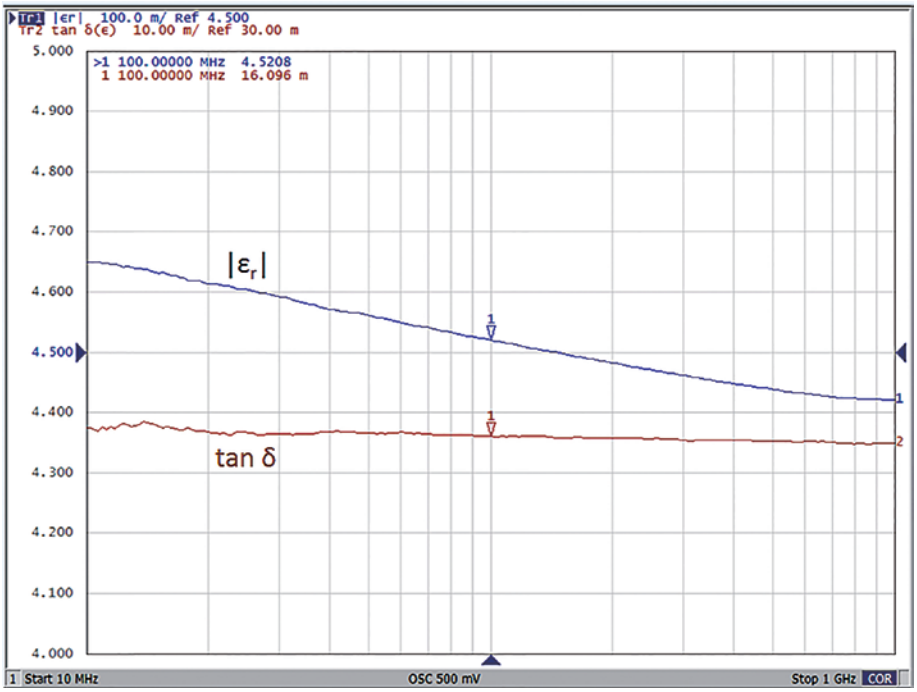


图 23. 环氧树脂玻璃的频率响应 (εr = 4.5)

3. 导磁率测试

3.1. 导磁率的定义

导磁率描述了材料与磁场的相互作用。它等于电感B与磁场H的比值。复数相对导磁率(μr*)由表示电能储存项的实部(μr')和表示能量耗散项的虚部(μr")组成。如图26所示，它也是相对自由空间导磁率(μ0)的复数导磁率(μ*)。

磁性材料的无效导磁率使用损耗角正切tan δ表示。tan δ等于(μr")与(μr')的比值。术语"复数相对导磁率"在技术资料中通常简称"导磁率"。在本应用指南中，术语"导磁率"将用来指复数相对导磁率。

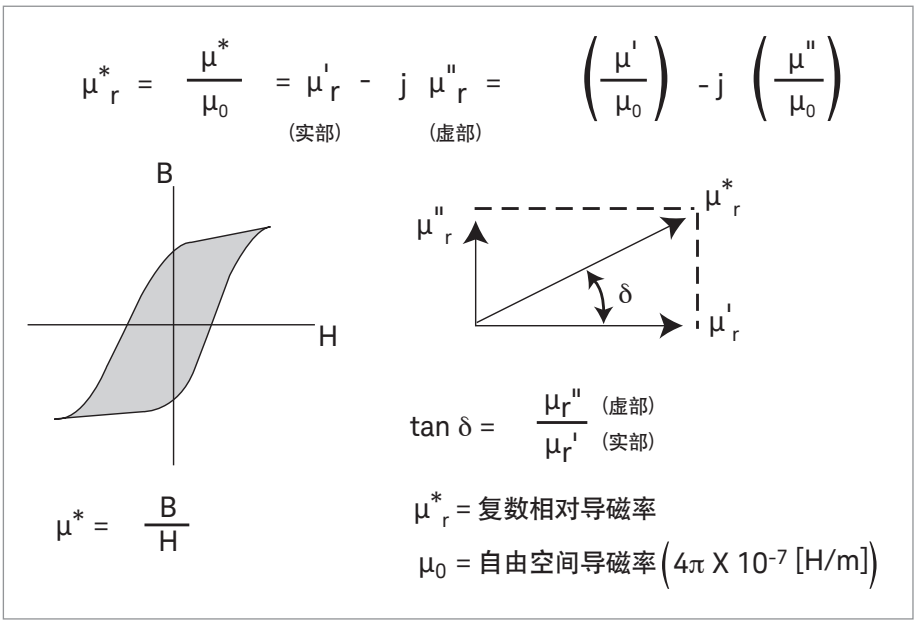


图24. 复数导磁率(m*)的定义

3.2. 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测量仪器来完成。根据电感测量结果，可以用下式推导出有效导磁率:

$$\mu_e' = \frac{\ell L_{eff}}{\mu_0 N^2 A}$$

$$\mu_e'' = \frac{\ell (R_{eff} - R_w)}{\mu_0 N^2 \omega A}$$

R_{eff}: 磁芯损耗(包括线路电阻)的等效电阻
L_{eff}: 环形线圈的电感
R_w: 线路电阻
L_w: 空心线圈的电感
N: 匝数
ℓ: 磁芯的平均磁路长度[m]
A: 环形磁芯的横截面积[m^2]
ω: 2π f(频率)
μ_0: 4π x 10^{-7} [H/m]

取决于应用的磁场和测量在磁滞曲线上的位置，导磁率可以用度数(例如初始值或最大值)分类。初始导磁率是制造商最常用的参数，因为与磁场有关的大部分工业应用都使用低功率电平。

本应用指南主要介绍有效导磁率和初始导磁率，它们可以用电感测量法推导得出。

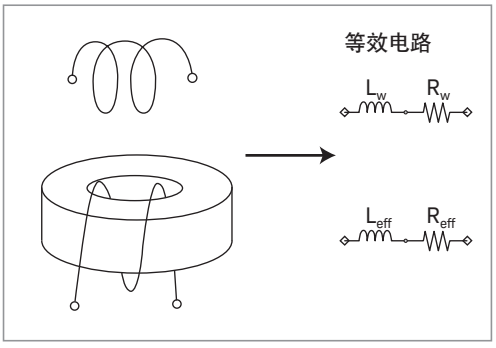


图25. 除了有效导磁率的方法

* 有些制造商甚至对于应用高功率电平的磁性材料也使用初始导磁率。

3.3. 导磁率测量系统

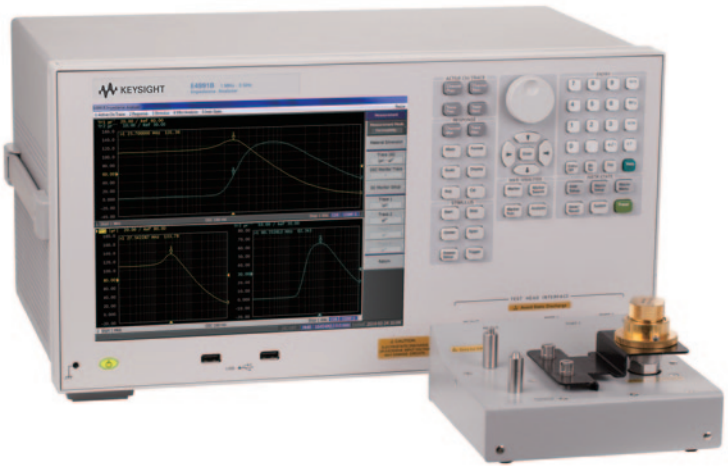
下面的部分将说明使用16454A磁性材料测试夹具的导磁率测量系统。

3.4. 使用16454A磁性材料测试夹具的测量系统

3.4.1. 主要优势

- 宽频率范围: 1 kHz至1 GHz
- 测量非常简单，无需在磁芯周围缠绕线圈
- 提供两种夹具装配件，以适应不同的MUT尺寸
- 使用E4991B(选件E4991B-002材料测量软件)或E4990A，可以直接读取复数导磁率测量结果。
- 使用E4991B选件E4991B-002和bE4991B-007，可以实施从-55°C到+150°C的温度特征测量

*在进行温度响应测试时，需要使用选件E4991B-007温度特征测试套件。E4991B中预装了Microsoft Excel VBA实例程序，该程序可以提供温度舱控制和测量设置功能。您可以将该程序复制到外部PC上。E4990A不包括高温测试探头前端。



适用仪器: E4991B(选件E4991B-002)*、E4990A和42942A

3.4.2. 适用的MUT

适用的磁性材料只能是磁芯。图26显示了适用的MUT尺寸。

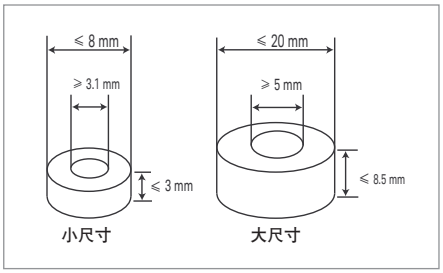
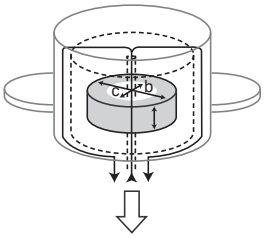


图26. 适用的MUT尺寸

3.4.3. 结构

16454A的结构和测量理念见图27。当磁芯插入到16454A中时，就组成了没有任何磁漏的理想的单匝电感器。从包含夹具的磁芯的电感可以推导出导磁率。



$$\dot{\mu} = \frac{(\dot{Z}m - \dot{Z}sm)\ 2\pi}{j\omega\mu 0 \quad h \ln \frac{c}{b}} + 1$$

$\dot{\mu}$	相对导磁率
$\dot{Z}m$	无磁芯时的阻抗测量值
$\dot{Z}sm$	有磁芯时的阻抗测量值
μ_0	自由空间导磁率
h	被测材料(MUT)高度
c	MUT的外径
b	MUT的内径

图27. 16454A的结构和测量概念

3.4.4. 主要技术指标

表9. 16454A的主要技术指标	
频率	1 kHz至1 GHz
增大直流偏置电流	±500 mA
工作温度	-55°C至+150°C
端子配置	7 mm
补偿	短路

前面的表 9 列出了 16454A 的主要技术指标。图 28 和 29 显示了使用 E4991B 或 E4990A 时的测量精度。

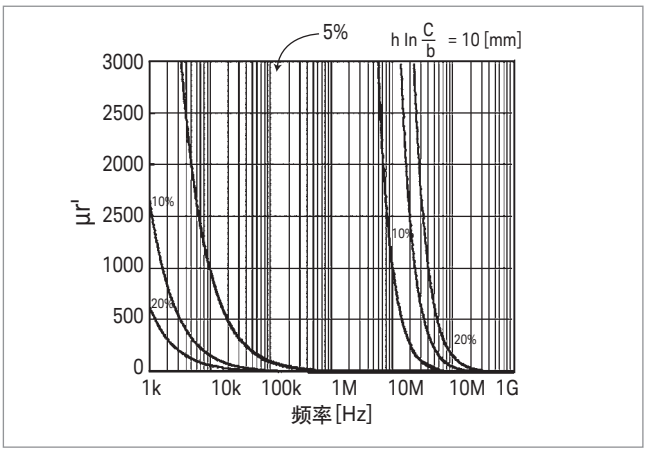


图 28. 导磁率测量精度(补充数据)

3.4.5. 操作方法

图 30 显示了使用 16454A 执行导磁率测量的流程图。下面详细说明流程图中的每一个步骤:

第 1 步. 校准测量仪器: 使用 E4991B 时，校准 7 mm 端子。使用 E4990A 时，在 42942A 的 7 mm 端子上执行设置。

第 2 步. 连接 16454A: 将 16454A 连接到测量仪器的 7 mm 端子。如果使用的是 E4991B，则选择导磁率测量模式。

第 3 步. 补偿 16454A 的剩余阻抗：只插入 MUT 夹具并执行短路补偿。

第 4 步. 输入 MUT 的尺寸: 把 MUT 的尺寸输入到测量仪器的菜单中。使用测微计测量尺寸。

第 5 步. 插入 MUT: 将 MUT 连同夹具一起插入到 16454A 中。

第 6 步. 设置测量条件: 在测量仪器上设置频率、测试信号电平和测量参数等测量条件。

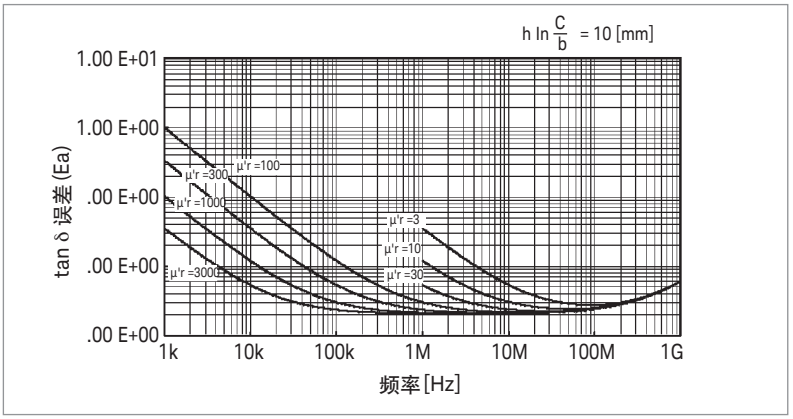


图 29. 损耗角正切测量精度(补充数据)

第 7 步. 测量 MUT: 测量结果将在屏幕上显示。使用游标功能，可以对数据进行分析。

当使用 E4991B (选件 E4991B-002) 时，内置固化软件的标准配置包括材料测量功能。详细信息请参见《E4991B 操作手册》。



图 30. 16454A 的测量过程流程图

3.4.6. 特殊考虑事项

当测量高介电常数(接近10或更高)的磁性材料时，在1 GHz附近无法获得精确的测量结果。导磁率是从MUT和夹具的合并阻抗中的电感值推导出来的。测得的阻抗应包括电感和极小量的电容。如果磁性材料的介电常数很高，那么电流会通过MUT与夹具之间的间隔流动。这相当于一个电容器与MUT的电感器并联。并联的LC电路可能会在预定频率上产生阻抗谐振。介电常数越高，则谐振频率越低，很难进行精密测量。

3.4.7. 测量实例

图31显示了铁氧体磁芯的频率特征测量结果。使用E4991B和16454A可以获得图31中的结果。

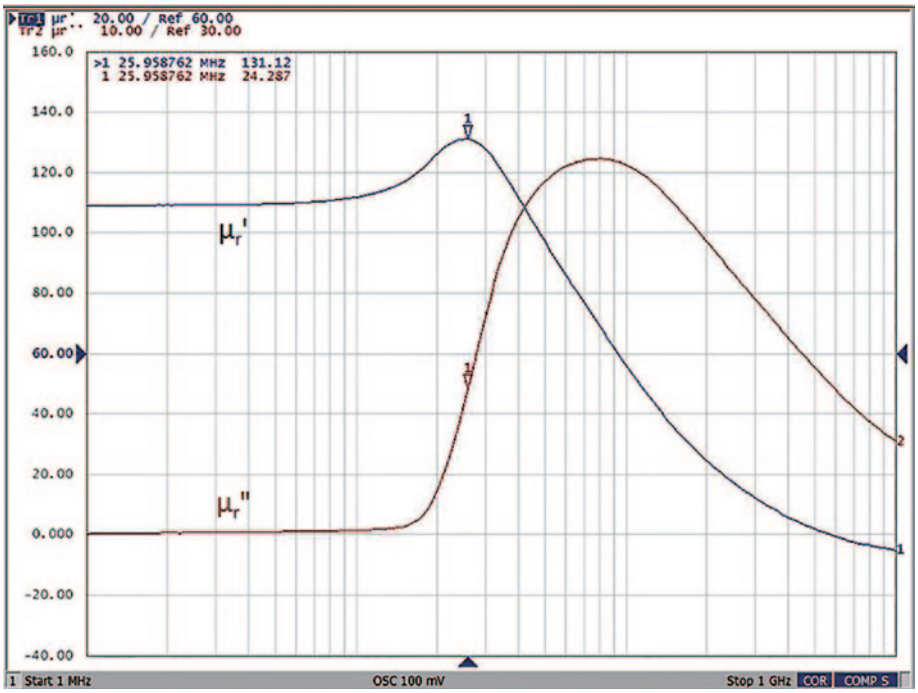


图31. 铁氧体磁芯的频率响应(μr = 120)

4. 结论

本应用指南讨论了使用阻抗测量技术测量介电常数和导磁率的方法。

讨论内容包括各种测试夹具的结构、适用的MUT尺寸、操作方法和特殊的考虑事项。根据本应用指南介绍的技巧，您可以很容易地选择能够满足测量需求和条件的测量解决方案。

附录

A. 液体介电常数测试

介电常数测量还经常用于液体特征的测试。测量不会改变液体本身的特征，并且可以实施非常简单和快速。因此，它们在研究领域得到了广泛的使用。本部分将讨论 16452A 液体测试夹具作为液体介电常数测量系统，采用平行板法测量液体介电常数的方法。

A.1. 使用 16452A 液体测试夹具的测量系统

A.1.1. 主要优势

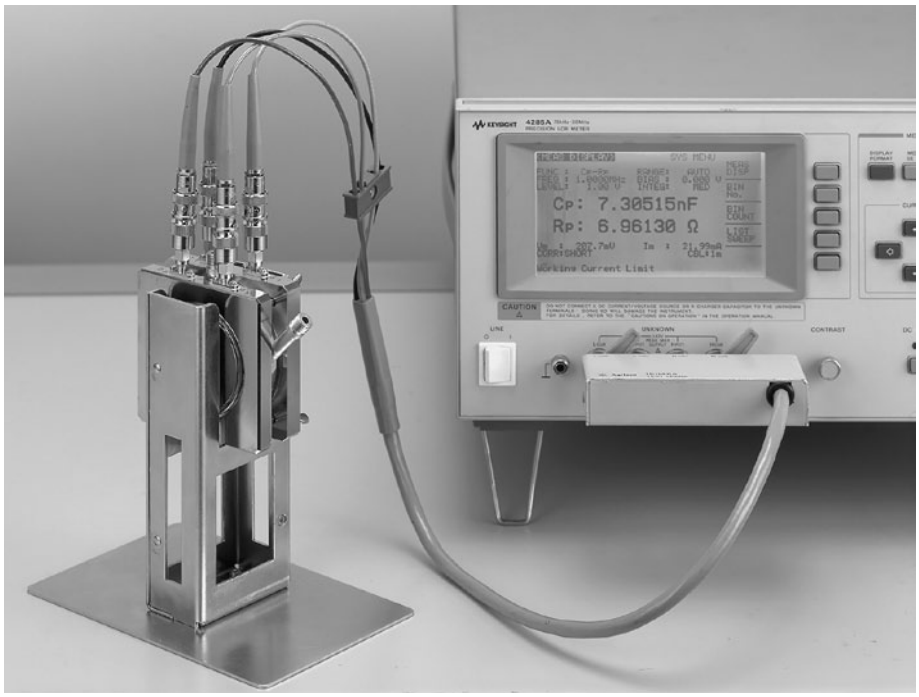
- 频率范围宽: 从 20 Hz 到 30 MHz
- 能够测量塑料树脂、油基化学产品等
- 只需少量测试液体便可执行测量，不会浪费 MUT
- 可以在 -20°C 至 +125°C 的范围内执行温度特征测量
- 可以与任何具有 4 端子配置的阻抗测量仪器结合使用

A.1.2.适用的 MUT

样液容量由所使用的隔离板决定。隔离板可以调整电极之间的间隙，这同样会改变空气电容。表 10 列出了可用的隔离板及对应的样液容量。

A.1.3. 结构

图 32 显示了 16452A 的结构。三个液体入口可以简化注水和排水，夹具可以容易地拆除，使您可以清洗电极。电极、隔离板、液体入口和出口通常使用镍制作，O 环用氟橡胶制成。



适用仪器: E4990A 和 E4980A

表 10. 隔离板与样液的关系

样液容量	3.4 ml	3.8 ml	4.8 ml	6.8 ml
空气电容(无液体)	34.9 pF ±25%	21.2 pF ±15%	10.9 pF ±10%	5.5 pF ±10%
隔离板厚度	1.3 mm	1.5 mm	2 mm	3 mm

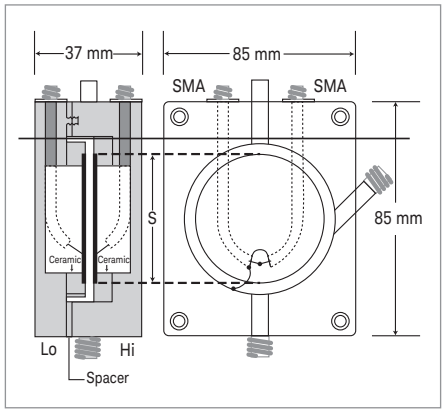


图 32. 16452A 的结构

表 11. 用于 16452A 的 1 m 电缆

温度	部件编号
0°C 至 55°C	16048A
-20°C 至 125°C	16452-61601
-20°C 至 125°C	16048G(仅限 E4990A)

A.1.4. 主要技术指标

表12. 16452A的主要技术指标	
频率	20Hz至30MHz
最大电压	± 42V
工作温度	-20°C至125°C
端子配置	4端子对, SMA
补偿	短路

表12列出了16452A的主要技术指标，测量误差使用下式计算:

测量误差 = A + B + C [%]

误差A: 参见表 13
误差B: 当εr' = 1时; 参见图33
误差C: 测量仪器的误差

表13. 误差A	
隔离板的厚度(mm)	B(%)
1.3	0.005 x MRP
1.5	0.006 x MRP
2.0	0.008 x MRP
3.0	0.020 x MRP

M.R.P是测量相对介电常数

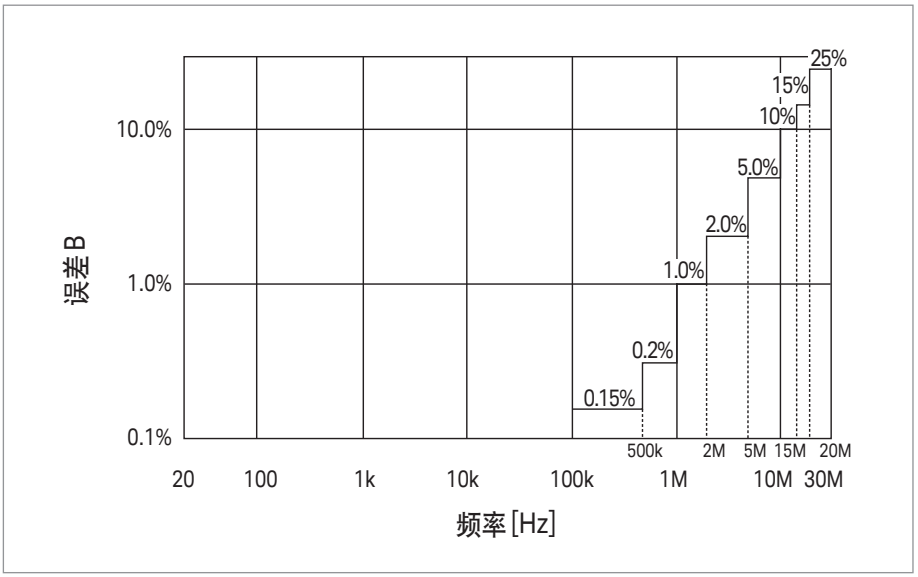


图33. 相对测量精度(补充数据)

A.1.5. 操作方法

图34显示了使用16452A执行液体介电常数测量的流程图。下面详细说明流程图中的每一个步骤:

第1步. 装配16452A并插入短路板: 当连接高电极和低电极时，在两者之间插入短路板。然后把SMA-BNC适配器连接到夹具端子，并在液体出口上盖上盖子，以使16452A做好测量准备。

第2步. 把16452A连接到测量仪器: 根据工作温度和测量仪器的情况，选择适合的1 m电缆。将16452A连接到测量仪器的未知(UNKNOWN)端子上。

第3步. 补偿电缆长度: 将测量仪器的电缆长度补偿功能设置为1 m。设置过程参见测量仪器的操作手册。

第4步. 检查16452A的短路剩余阻抗: 为验证16452A装配得是否正确，可以在1 MHz频率上测量短路板，并检查测量值是否处于规定的范围内。此项验证应在短路补偿之前实施。详细信息请参见16452A随附的《操作手册》。

第5步. 设置测量条件: 在测量仪器上设置频率和测试电压等测量条件。测量参数应设置为Cp-Rp。设置过程参见测量仪器的操作手册。

第6步. 执行短路补偿: 通过电极之间插入的短路板执行短路补偿。

第7步. 测量空气电容: 移除短路板，插入适合样液体积要求的隔离板。通过参数Cp-Rp来测量电极之间的空气电容。

第8步. 倒入液体: 将液体倒入夹具的入口。

第9步. 测量液体: 对夹具中的液体执行Cp-Rp测量。

第10步. 计算介电常数: 介电常数和损耗系数通过以下公式计算:

$$\varepsilon_r' = \frac{C_p}{C_0} \qquad \varepsilon_r'' = \frac{1}{\omega C_0 R_p}$$

Cp: MUT的等效平行电容 [F]
C0: 空气的等效平行电容[F]
Rp: MUT的等效平行电阻[Ω]
ω: $2\pi f$(频率)

第11步. 倒出液体: 从夹具出口倒出液体。

A.1.6. 特殊考虑事项

如果液体具有体积电导率，例如盐(Na+ Cl-)溶液或离子溶液，那么很可能无法测量。这是因为这些液体会产生电极极化现象，使得测量它们的电容时无法获得正确结果。甚至对于无体积电导率的液体(例如水)执行低频测量，也有很大的可能性会出现电极极化。

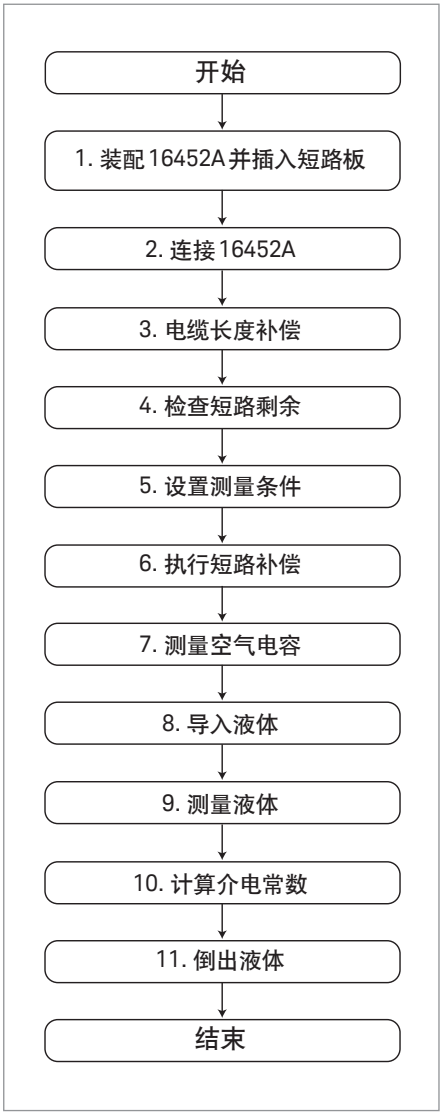


图32. 16452A的测量过程流程图

参考资料

1. *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，美国材料试验学会

2. *ASTM，“绝缘材料的 D-C 电阻或电导的测试方法”，* ASTM 标准 D 257，美国材料试验学会

3. 应用指南 1297，*“介电常数和导磁率测量解决方案”，* 5965-9430CHCN

4. 应用指南 380-1，*“使用 16451B 介电材料测试夹具测量固体材料的介电常数”，* 5950-2390

5. 阻抗测量附件选型指南，5965-4792CHCN

6. Keysight 16451B 操作和服务手册，部件编号 16451-90020

7. Keysight 16452A 操作和服务手册，部件编号 16452-90000

8. Keysight 16454A 操作和服务手册，部件编号 16454-90020

网络资源

请访问我们的网站:
www.keysight.com/find/impedance
以了解关于阻抗测试解决方案的更多信息，
www.keysight.com/find/lcrmeters 以了解关于 lcr 表的详细信息。

关于材料分析的更多信息，请访问:
www.keysight.com/find/materials

myKeysight

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

www.lxistandard.org
局域网扩展仪器(LXI)将以太网和Web网络的强大优势引入测试系统中。
是德科技是LXI联盟的创始成员。

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。

本应用指南以前称为应用指南1369-1

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

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

本文中的产品指标和说明可不经通知而更改
©Keysight Technologies, 2013-2014
Published in USA, August 3, 2014
出版号: 5980-2862CHCN
www.keysight.com