

高级损耗因子测量技术

一. 负损耗 D 问题

许多用户在使用 LCR 数字电桥或电容测量仪测量小损耗电容器时经常会遇到如下问题:

为什么使用上述仪表对电容器进行测量时损耗有时会显示负值?

从物理含义来说损耗表示电容器中耗能成分(即电阻成分)对储能成分所占的比重,而电阻是不可能为负的。

如对于串联等效方式损耗因子 $D = 2\pi f R_s C_s$

对于并联等效方式损耗因子 $D = 1/(2\pi f R_p C_p)$

以下从几个方面说明产生负损耗的原因,并讨论如何正确使用仪表的方法,以帮助理解和解决此类问题。

二. 负损耗 D 产生的原因

概括起来说,有以下几个方面原因可能会引起负损耗的产生:

- A. 测试仪表有限的准确度;
- B. 过度的补偿(过度的短路清“0”);
- C. 接触电阻的影响;
- D. 存在于测试电缆和测试端子间的复杂杂散参数。

A. 测试仪表有限的准确度

任何元件参数测试仪器的准确度均是有限的,由于有限的准确度便会造成测试的不确定性。从原理上,电容器的损耗在阻抗平面上可表示为阻抗矢量与虚轴夹角 δ 的正切值,图 1 所示。当电容器以串联等效方式描述时,损耗可以下述公式计算:

$$D = \frac{R}{|X_c|} = \omega RC = 2\pi f RC$$

当损耗很小时, D 准确度主要取决于 R 的测试准确度 ($R \ll 1/\omega C$)

一般地,定义若 A_e 为阻抗基本准确度(如图 1 情况,设 $A_e=0.001$),则一般存在:

$$X_{ce}(\text{容抗准确度}) = \pm A_e(1 + |Z - X_c|/X_c), \quad R_e(\text{电阻准确度}) = \pm A_e(1 + |Z - R|/R)$$

则 D 的测量误差情况为:

$$D_e = \frac{R(1 \pm A_e(1 + |Z - R|/R))}{|X_c|(1 \pm A_e(1 + |Z - X_c|/X_c))}$$

将图 1 数值代入此式,得 D 的仪表测试准确范围为: -0.0005—0.0015

或者用以下方法估算 D 的范围: $D_x \pm D_e$ 即可(实际损耗值)

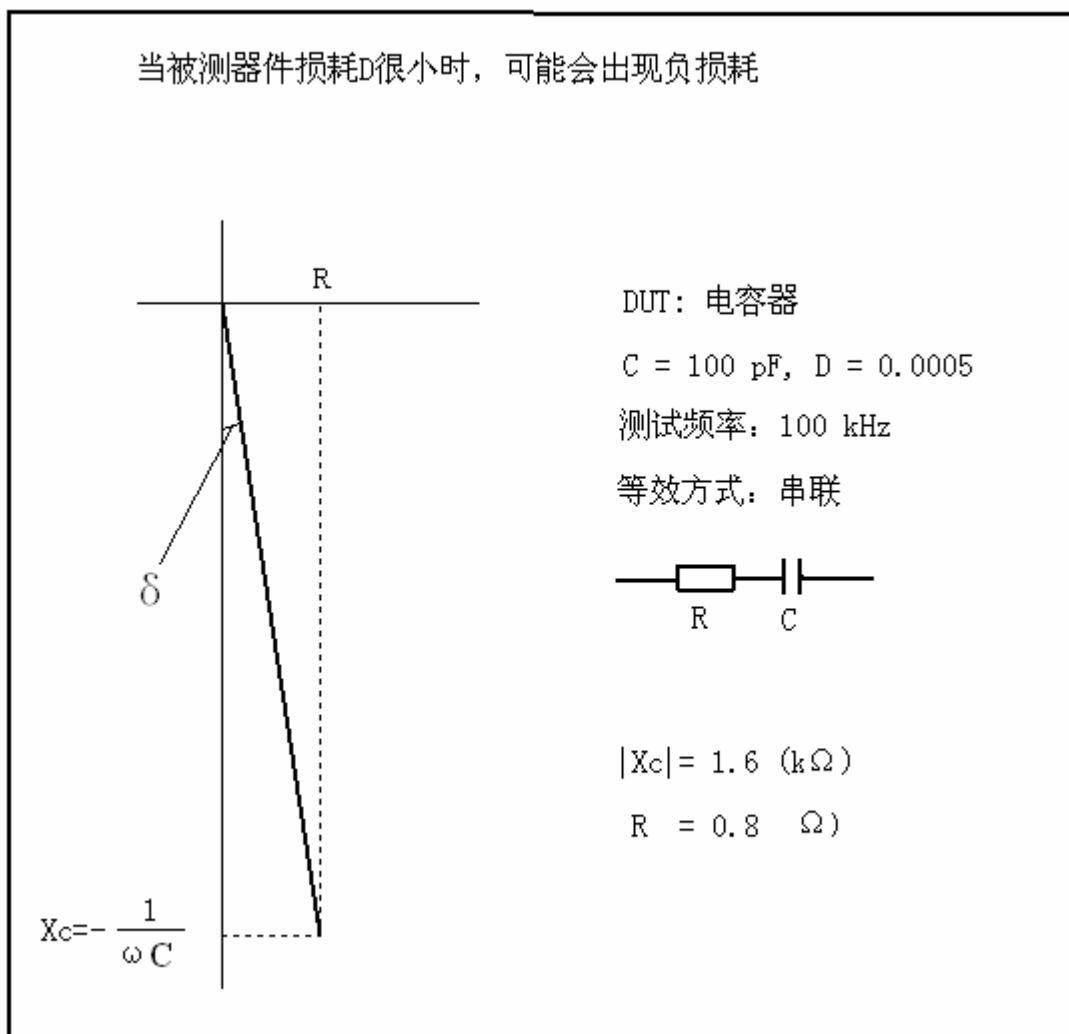
图中 $D_x=0.0005$, $D_e=0.001$, $D_x \pm D_e = -0.0005—0.0015$

以上说明,小损耗电容器测试时

出现负损耗是仪器有限的测量准确度所造成的，是正常情况。

可以用下述方法正确理解并估算。一方面，仪器在基本量程内其损耗准确性应在给定误差 1/2 内（并不说明所有仪器一定如此）；另一方面，损耗呈现的误差是固定的，可在测量时予以人为扣除。

需要注意的是，有些厂家的 LCR 产品在仪器的计算软件中进行了特殊处理，用户始终看不到有负损耗出现。实际是，仪器计算时把损耗进行了绝对值处理，出现负损耗也显示为正值，如 -0.0002 显示为 0.0002，这是极为有害的；鉴别的方法是将仪器参数显示调到串联电阻 R_s 显示，如 R_s 为负，但 D 显示为正值，则经过了该种处理。



抗平面上电容器损耗表示

B. 执行过度的补偿（过度的短路清“0”）

LCR 执行开路/短路清“0”时，短路清“0”可能主要对 D 测试值产生误差。

使用短路板执行清“0”时，短路板自身存在残余电感和接触电阻，由于短路清“0”过度便会造成损耗出现负值的情况。

假定短路板在 1MHz 时具有 $L_s=26\text{mH}$, $R_s=2\text{m}\Omega$ 的残余参数, 即 $R_s+jX_s=2\text{m}\Omega+j163\text{m}\Omega$ 。当测量 $C_s=100\text{nF}$, $D=0.0005$ 的电容器并进行短路补偿。

$$Z = R+jX = D/(\omega C_s)+j1/(\omega C_s) = 0.8\text{m}\Omega+j1.6\Omega$$

$$\text{仪器最后显示损耗 } D \text{ 为: } \frac{R - R_s}{X - X_s} = \frac{0.8\text{m}\Omega - 2\text{m}\Omega}{1.6\Omega - 0.163\Omega} = -0.000835$$

推荐在测量大电容值 (较小阻抗) 电容器时, 选用如下短路材料以减小负损耗的出现:

- ①残余参数较小的短路板 (最好表面镀金);
- ②较粗的多股低阻铜线;
- ③将测试夹直接短路, 注意将电压高低端相连, 电流高低端相连后再互连在一起。图 2 所示。

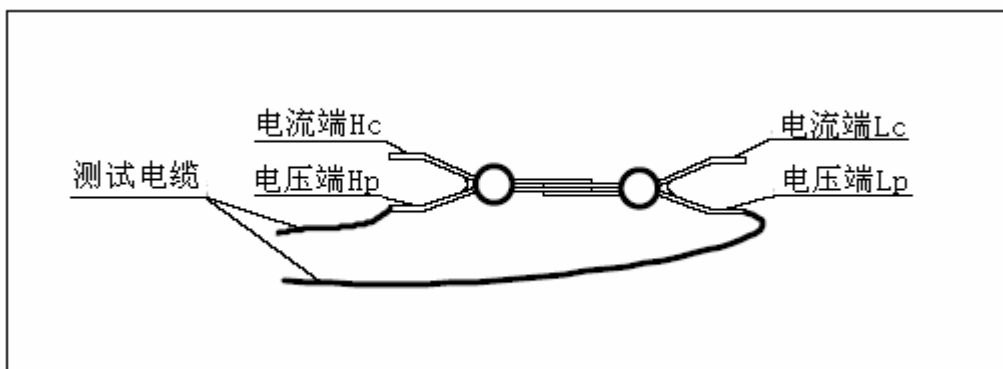


图 2. 正确的测试电缆测试端短路补偿连接法

C. 接触电阻的影响

DUT 电极与测试夹具或测试电缆电极间所存在的任何接触电阻都会对损耗造成测量误差。DUT 的 2 端或 4 端连接方式的接触电阻影响有所不同。

在 2 端连接的情况下, 接触电阻以串联方式叠加到 DUT 阻抗, 造成 D (损耗因子) 读数的正误差。一般地, 此误差可通过短路补偿消除。

在 4 端连接的情况下, 不同端子的接触电阻 R_{hc} 、 R_{hp} 、 R_{lc} 和 R_{lp} 对损耗的影响有所不同。 R_{hc} 减小施加于 DUT 的测试信号电平, 但它并不直接产生测量误差。 R_{lp} 通常可忽略这一影响。 R_{hp} 和 C_{hp} (同轴测试线的分布电容) 构成低通滤波器, 它会造成 H_p 输入信号的衰减和相移, 从而产生测量误差。 R_{lc} 和 C_{lc} 也构成低通滤波器, 在测量 DUT 的电流和相角时产生误差。由于最终耗散因素误差正比于 $-\omega R_{hp} \times C_{hp}$ 和 $-\omega R_{lc} \times C_{lc}$, **使 D 误差是负值, 并随频率的增加而增加。**

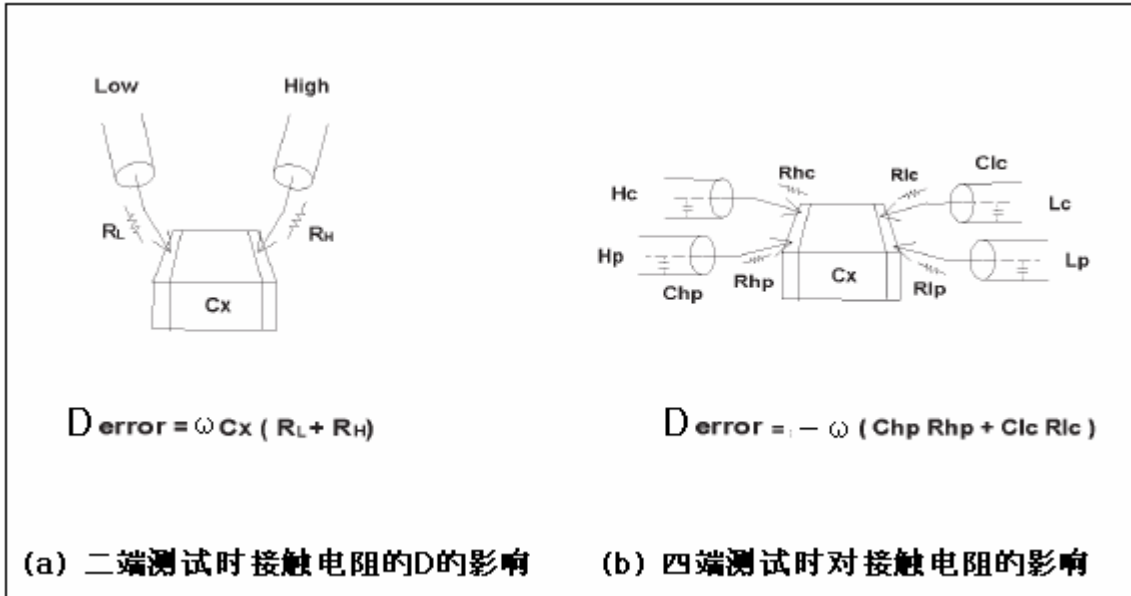


图 3. 测试电缆接触电阻对损耗的影响

D. 存在于测试电缆和测试端子间的复杂杂散参数

有很多测量条件下，复杂的残余参数不能使用简单的串联和并联等效电路建模。对于像使用长电缆、多路扫描器或机械处理器等情况下，从 DUT 到仪器测试端口间加入了复杂的网络，如图 4 所示，由于此网络的加入，使测量所得的阻抗和相位参数均产生了误差。使用短路/开路补偿将不能消除由于复杂网络的插入带来的测试误差。

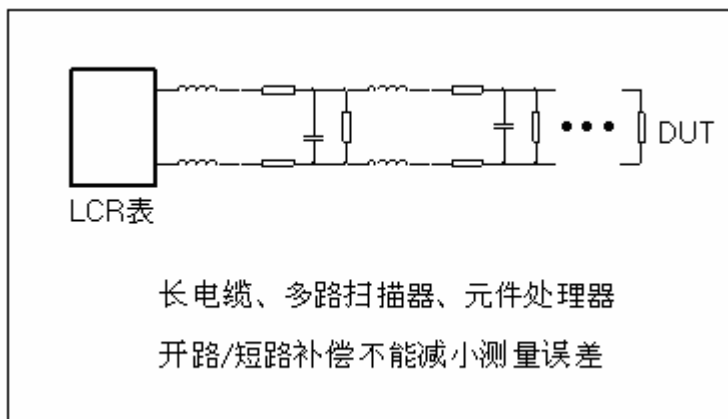


图 4. 复杂的杂散对测试的影响

三. 解决负损耗测试的一般方法

解决诸如 A、C、D 中所阐述问题最有效的方法是使用开路/短路/负载补偿技术。

开路/短路/负载补偿是一种适用于解决测试自身准确度有限、存在接触电阻和存在复杂残余参数的先进补偿技术。


为进行开路/短路/负载补偿，在测量 DUT 前先要进行 3 项测量，即把测试夹具端开路清“0”、短路清“0”以及连接基准 DUT（已知准确值的被测件）。

如何进行负载校准请参阅相关的仪器使用说明书。

在下述情况下应使用开路/短路/负载补偿：

- (1) 附加了无源电路或元件（例如外部 DC 偏置电路，平衡-不平衡变压器，衰减器和滤波器）。
 - (2) 使用扫描器，多路转换器或矩阵开关。
 - (3) 使用长测试电缆。
 - (4) 使用元件自动测试机。
 - (5) 使用客户制作的测试夹具。
 - (6) 以比测试仪器本身更高的准确度进行测量
- （注意：标准 DUT 应在更高准确度仪器上准确读取标准数据）。

对于简单的测量，如使用一般测试夹具测量轴向引线元件，就不需要使用开路/短路/负载补偿。开路/短路补偿足以适应这类测量。

 **北京海洋兴业科技股份有限公司**（证券代码：839145）

北京市西三旗东黄平路19号龙旗广场4号楼（E座）906室

电话：010-62176775 62178811 62176785

企业QQ：800057747 维修QQ：508005118

企业官网：www.hyxyyq.com

邮编：100096

传真：010-62176619

邮箱：market@oitek.com.cn

购线网：www.gooxian.com



扫描二维码关注我们

查找微信公众号：海洋仪器