

电容器ESR测量的方法及问题

The Methods and Problems of Capacitor ESR Measurement

Knowles Capacitors, 英国诺里奇

许多不同类型的电容器带有许多不同的参数；每一类型都适合于一系列的应用。随着工作频率要求的提高，电子系统尺寸减小，电量使用越来越关键，最重要的参数是品质因数(Q)和等效串联电阻(ESR)。要对多层陶瓷电容(MLCC)的这些参数进行测量和表征，采用有限的标准化测试方法来比较竞争产品是困难的。

在本文中，Knowles讲述了高品质因数MLCC的ESR测量，这可能是最需要的参数，描述了其在用的测试方法以及Knowles如何测试该公司数据表上的参数。

Q、ESR、功率

Q是品质因数，是耗散因子(DF)的倒数，表示电容器的损耗。

$$Q = \frac{1}{DF} \quad (1)$$

Q越高，DF越小，损耗越小。ESR为等效串联电阻(R_s)，表示对RF电流的有效电阻。ESR反映了电介质和电极的损耗特性。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2)$$

其中f是频率(Hz)，C为电容值(F)， X_C 为电容电抗(Ω)。则

$$R_s = DF \times X_C \quad (3)$$

电容上消耗的功率(W)表示为

$$P = I^2 R_s \quad (4)$$

其中I为流经电容的电流均方根值(A)。

了解ESR值是重要的，因为它决定了射频功率应用中所用器件的适宜性。如果ESR值太高，由于 I^2R 损耗引起的自发热会太大，部件会过热而失效。ESR也决定了器件的计算最大额定电流。

作为一个例子，考虑一个运行在940MHz

GSM900频段的手机基站。47pF的高Q电容，其ESR在940MHz时约为0.088 Ω ，作为这个50 Ω 系统的耦合电容器。注入电容器的射频功率为40W。根据 $P=I^2R$ ，其中 $R=Z+ESR$ ，得到电路电流为0.89A。为了计算电容器的功率消耗，我们把这个电流代回 $P=I^2R$ ，这里 $R=ESR$ ，得到70mW。电容器消耗的功率可简单地由ESR与电路总阻抗的比值乘以系统功率得出

$$\frac{ESR}{(Z + ESR)} P \quad (5)$$

如果ESR值远远小于Z，其变化相对于总电路阻抗可以忽略。忽略后得到

$$\frac{ESR}{Z} P \quad (6)$$

采用相同的计算，47pF超低ESR的电容，在940MHz的ESR=0.07 Ω ，电容上的功率消耗为56mW，减少了20%。该电容允许系统的运行温度更低或功率更高。

不同的电介质和电极组合表现出不同级别的Q和ESR。低频时，电介质材料是主导因素；高频时金属损耗则变得突出起来。X7R材料用于



图2：传统配置的Boonton 34A。

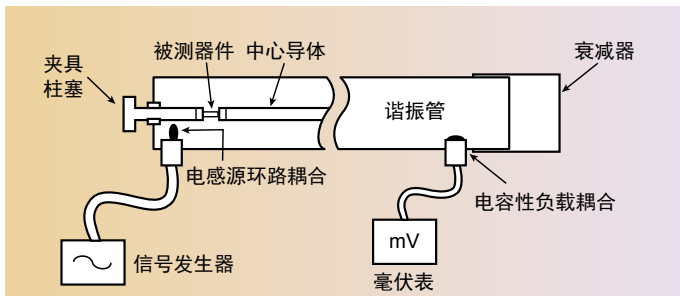


图1：谐振管。



图3：配置VNA的Boonton 34A。

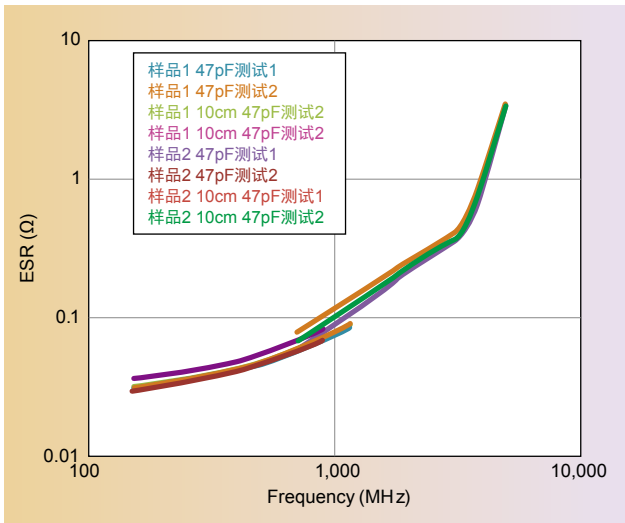


图4: 用Boonton 34A和10cm管测量47pF电容的ESR。

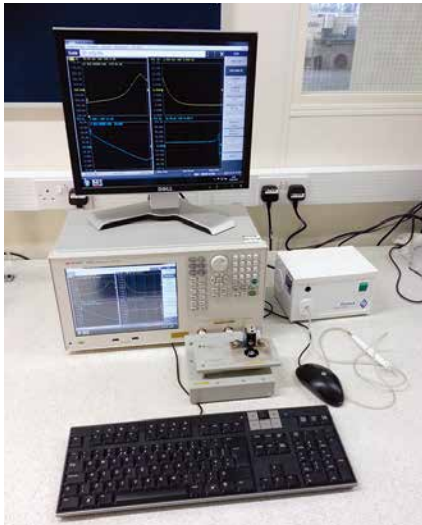


图5: Keysight E4991B带夹具。

低频, 1kHz时测得的典型DF值约为百分之一到二, 对应的Q为50到100。C0G/NP0材料在1MHz测得的Q值在600到1000之间。

在实验室条件下, 1MHz时测量Q, 得到的值较高, 为10000或更高。然而, 实际应用时高速机器上进行100%测试的极限约2000。在1MHz以上进行Q的100%测试是不实际的。考虑导线和接触电阻时, 电容电桥和LCR表都不够准确, 快速的高频

测量是不可能的。尽管测量工作频率附近的Q和ESR是必要的, 但是, 这有可能导致测试偏差和精度不准, 引发解释数据的问题。

ESR测量

通常有两种测量方法来确定Q和ESR: 同轴谐振管、扫描阻抗分析仪或两者的组合。这里将逐一讨论。

同轴谐振管测量

在“高”频即约100MHz到1.2GHz时, 确定Q和ESR的最准确的方法, 是采用谐振线同轴夹具。这样的工业标准管在许多年前得到开发, 如Boonton 34A型, 由Boonton Electronics Corp. 制造, 被设计与射频频毫伏表和信号发生器一起使用 (图1和图2)。

采用这种有历史影响的装置, 调节信号发生器直至毫伏表上出现峰值, 可测 $\lambda/4$ 、 $3\lambda/4$ 、 $5\lambda/4$ 和 $7\lambda/4$ 的谐振频率。对于每一个谐振频率, 调整频率直至表读数降至谐振值的50%来确定3dB带宽。该管的特点是采用开路和短路来测量 $\lambda/4$ 和 $3\lambda/4$ 的频率和带宽。然后, 电容器芯片插入两个导体之间, 并由短路柱夹住。通过一组完整的测量, 可以计算在谐振频率处的ESR和Q。借助三到五个频率处的数据, 画出ESR与频率点, 绘制其间一条“最合适”的曲线。谐振点之间的响应曲线假定为相对线性关系。

Boonton谐振管系统的开发要早于矢量网络分析仪 (VNA) 的出现。现在通常采用一个VNA来代替信号发生器和毫伏表 (图3)。随着可用图形峰值看到谐振, 频率和带宽可以很容易地读取。现代VNA设备允许数据直接输出到计算程序中。

谐振管方法仍然是测量小型MLCC

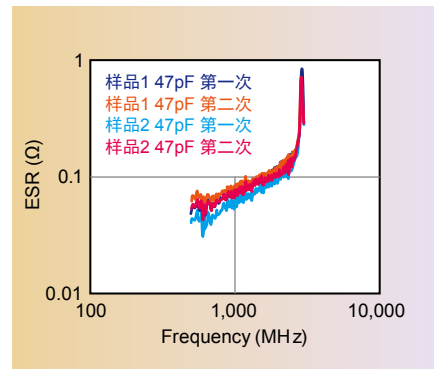


图6: 使用Keysight E4991测量47pF电容的ESR。

SKYSTAR Web: www.skyastar.com
Tel: +86-20-82258599
珠海思开达技术有限公司 E-mail: sales@skyastar.com

20GHz微波信号源 高性价比



SSG1000 series

- ◆最小频率步进: 1μHz
- ◆自动闭环功率控制
- ◆宽频率范围: 10MHz ~ 20GHz
- ◆电池可选配
- ◆支持外部或内部脉冲调制: 20ns
- ◆支持外部或内部触发的快速扫频: 20ns
- ◆输出功率可达+20dBm@9GHz

小体积 射频光收发模块

6GHz MINI Tx/Rx



3GHz XFP-RF Tx



1.2GHz SFP-RF Rx



特点

- ◆优异的EMI/EMC性能
- ◆高动态范围和低相位噪声
- ◆小体积和低功耗
- ◆光纤传输可达60公里

应用

- ◆卫星与无线通信
- ◆遥测、跟踪与控制
- ◆相控天线阵
- ◆GPS信号传输

从产品 到解决方案

RF微波 毫米波

Ducommun (杜克曼)是一个成立于1849年, 营额七亿美元员工五千的美国上市公司。

在标准及定制毫米波放大器产品的设计, 测试和制造方面, Ducommun 积累了45年的经验

Ducommun

• 大功率, 单一直流供电/内部偏置电路



32-36 GHz 3-W 功率放大器

- AHP-34043530-01
- 增益: 30 dB (最小值)
- 增益平坦度: +/- 2.0 dB (最大值)
- 功率: 34 dBm (P1dB), 35 dBm (Psat)



26-40 GHz 低噪声放大器

- ALN-33144030-01
- 增益: 30 dB (最小值)
- 增益平坦度: +/- 1.0 dB (最大值)
- 噪声系数: 4.0 dB (典型值)

欲了解更多信息, 请联系我们的销售团队
☎ +1 (310) 513-7256
✉ rfsales@ducommun.com
📱 微信号: rfsalesducommun

式方系联

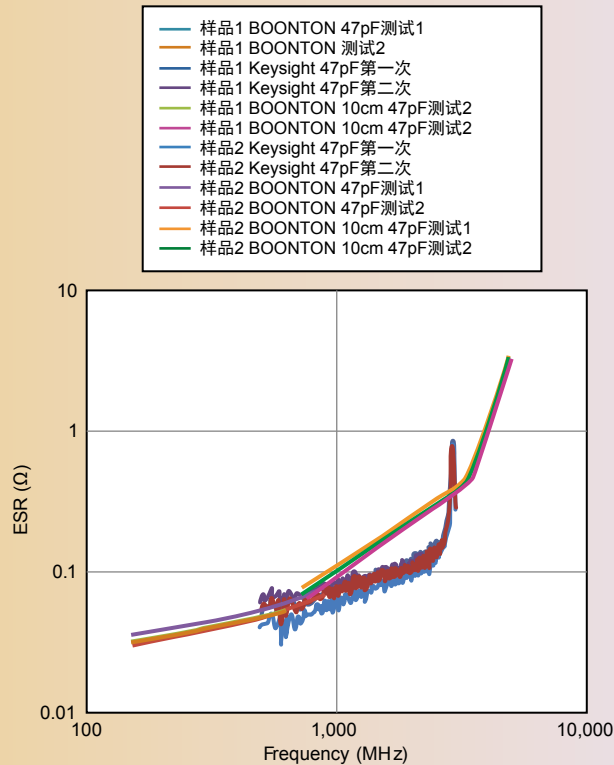


图7: Boonton和Keysight测量的比较。

的ESR和Q的唯一相对准确的途径。这可由ESR测量的国际标准EIA-RS-483成文时得到证实, 其中指定使用该设备。但是, 该测量方法有一些局限性。谐振管的运行频率范围受到物理长度限制, 频率范围约100MHz到1.25GHz。EIA-RS-483反映了这一点, 它只覆盖那个范围内的ESR测量。在一些MLCC厂家发布的数据中也能看到提供的是1到1.5GHz的数据。采用该方法测量标准范围之外的频率, 必须制造和标定一个新的谐振管。Boonton生产的唯一商用谐振管是34A, 任何其它型号的谐振管都是“自制的”, 其质量和指标或许不如Boonton的好。

电容器内部的谐振或许会引发问题, 必须加以考虑。MLCC的ESR响应不是线性的, 峰值出现在并联谐振频率 (PRF) 处, 此处电容响应是不稳定的。如果管的谐振接近于MLCC PRF峰, 则测试结果需要忽略。由于从谐振管看不到MLCC的PRF值, 需要有经验的操作者来辨识哪个测量结果必须从曲线中消除。举例来说, 采用两个谐振管来测量47pF MLCC的ESR: 1) 用Boonton 34A测量至1.2GHz; 2) 用自制10cm谐振管在700MHz至5GHz范围测量 (图4)。注意两个管之间响应的剧烈变化以及

GHz范围的读数升高。该MLCC的PRF约2.6GHz, 次级谐振频率约5GHz, 致使从更小的管得到的测量结果远超从Boonton 34A得到的1.2GHz处的数据。

扫描阻抗分析仪测量

鉴于同轴谐振管测量的局限性, 需要有一个测量ESR的替代方案。扫频法多用于关于频率的测量, 可更好地了解器件的性能。

通过将部件焊接到板上, 测量使用VNA生成S参数的响应, 然后逆向建模确定ESR, 从而有可能获得相当准确的读数。尽管这不如谐振管精确——重要的是要仔细地补偿测试板——但这的确具有优势来产生一个扫描响应来突出在系统中的任何共振。(后面将讨论隔离器用扫频测量结果的准确性问题。)

为了便于测试, 最好使用这样的测试设备, 它允许被测设备 (DUT) 可直接放置到一个已知特性的测试夹中进行直接测量。这类设备的一个例子是Keysight E4991阻抗分析仪 (图5), 它本质上是一个带有经修改的前端界面的VNA, 可以直接测量MLCC的ESR、Q、Z和C。它能进行最高达3GHz的扫描测量。这现在成为表征MLCC的标准方法, 越来越多地被电容器厂商和用户采

用。不同的夹具适用于测量不同的芯片尺寸。

然而，需要特别重视的是该方法存在一个局限。分析测量数据的精度可知，如Keysight的文档所述，测量MLCC的超小ESR很困难。误差和不确定性可通过精度的一个例子加以很好地说明，在500MHz时测量一个51pF MLCC，其 $Z_x=6.153\Omega$ 、 $R_s=0.026\Omega$ 、 $DF=0.00423$ 以及 $Q\approx 250$ 。根据Keysight的E4991A数据表进行精度计算得到：

$$Z_S = 13 + 0.5f(\text{MHz}) = 263 \text{ m}\Omega \quad (7)$$

$$Y_O = 5 + 0.1f(\text{MHz}) = 55 \text{ }\mu\text{S}$$

$$E_a = 0.8\%$$

$$E_b = \left(\frac{Z_S}{|Z_X|} + Y_O |Z_X| \right) \times 100 = 4.27\%$$

$$C_S = (E_a + E_b) \sqrt{1 + DF^2} = 5.07\%$$

$$R_S = (E_a + E_b) \sqrt{1 + Q^2} = 1200\%$$

这样，不确定度为 $R_S = 0.026 \pm 0.312\Omega$ 。

请注意，此计算不包括测试夹具的精度和不确定度。假设采用Keysight的16197测试夹具来测试MLCC，计算精度为

$$Z_e = A + \left(\frac{Z_S}{Z_X} + Y_O Z_X \right) \times 100 = 2\%$$

其中 (8)

$$A = 1.2f(\text{GHz}) = 0.3\%$$

$$Z_S = 30 + 150f(\text{GHz}) = 105 \text{ m}\Omega$$

$$Y_O = 2 + 30f(\text{GHz}) = 17 \text{ }\mu\text{S}$$

$$R_{eS} = \frac{Z_e}{DF} = 473\%$$

这里，不确定度为 $R_{eS} = 0.026 \pm 0.123\Omega$ 。合成精度和不确定度为

$$\sqrt{0.312^2 + 0.123^2} = 0.335 \quad (9)$$

或 $R_S = 0.026 \pm 0.335\Omega$ 。

这种测试方法的精度不是非常适合于隔离器。但它得到的曲线确实包括PRF共振并对确定器件实际性能更有用。对前述谐振管测量的47pF MLCC，图6所示为E4991测得的数据。将两组数据放在一起（图7），我们可以清楚地看到：PRF共振是如何影响谐振管测量的，以及在隔离器中谐振管测量与扫描测量是如何不精确。

Boonton和扫频的组合测量

比较Boonton和扫频测量方法，它们都得到不精确度可接受的结果。任何一种测试方法都不能用于隔离器；但是，将它们进行组合可以交叉检查结果并确认所采用的读数是合理准确的。正是如此，Knowles采用的流程是：

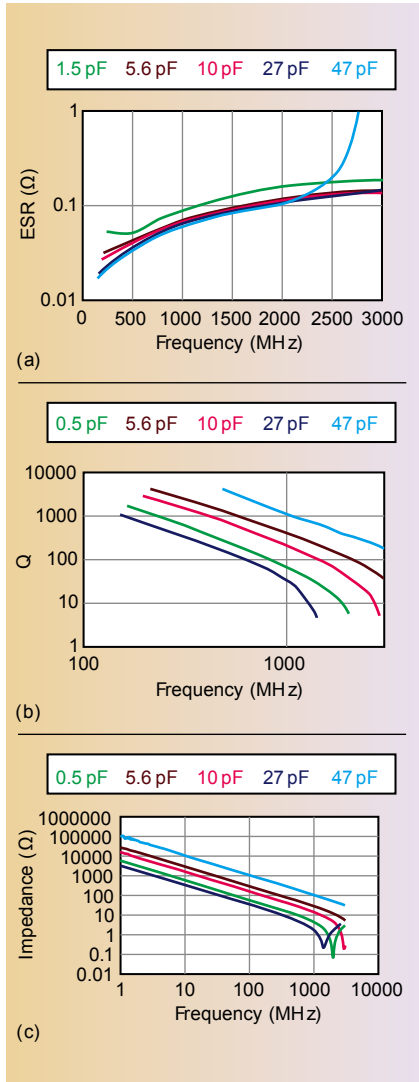


图8：Boonton 34A和Keysight E4991B分析仪组合测量，采用16197测试夹具 (a) ESR；(b) Q；(c) 阻抗。

- 采用Boonton 34A测试器件，通常依据EIA-RS-483，最大频率为1.2GHz；
- 利用Boonton测试结果验证Keysight E4991装置，以表明校准是尽可能准确的；
- 在Keysight E4991上进行扫频测量；
- 合并这两组读数。

使用这种方法，绘制出ESR、Q和Z的曲线（图8）。

测试夹具的变化

在定义Knowles检验体系时，尺寸0603到1206的MLCC贴片的所有数据采用Keysight 16197表面贴装夹具测得。另一个夹具Keysight 16196也可用于测试。它有一系列的夹具专门针对从0603及更小尺寸的特定MLCC。16196、16197夹具之间的主要区别是与MLCC的连接：

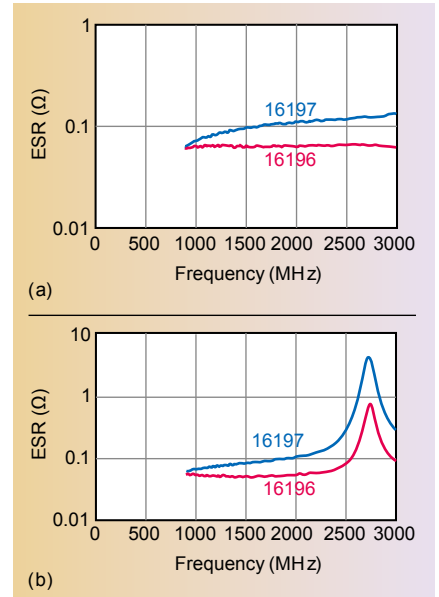


图9：电容器ESR测量比较，使用两种测试夹具 (a) 18pF；(b) 56pF。

16196只接触贴片的一端，而16197接触终端的底部焊盘。没有任何一种连接能真正代表一个焊接到电路板上的MLCC，但他们确实允许不同的MLCC的对比测试。对同一器件用16196和16197夹具测试得到不同的测试结果是不寻常的（图9）。因此，当进行比较时，应在同一类型的夹具上测量其性能。

结论

ESR和其相关的数据（即Q和Z）是电路设计的重要考虑因素，但公认难以测量。比较不同的公司提供的数据或测量和验证供应商的数据同样很难。与这些测量相关联的困难和不准确意味着这些参数总是以“典型”数据的形式给出。MLCC是通过电容值和工作电压来定义的。对材料和设计的良好控制意味着性能的一致，虽然实际测量的数据可能会有变化。

最好将ESR看作一个比较测量结果，这意味着同一天在同一系统中用相同的补偿装置对元件进行测量将获得相关性能的良好指示。与来自其他渠道或其他时间测得的数据进行比较，可能不能给出一个关于该部件将在电路中如何表现的真实情景。即使是考虑对比试验数据时，切记它是来自于安装在测试夹具的器件，可能不能完全代表一个焊接到电路上的器件。操作的适宜性必须始终通过实际电路中的评价得到验证。因此，提供ESR、Q和Z曲线的目的是指示MLCC在某给定工作频率范围内的性能。■（译者：车延博）