



阻抗测试基础

Fundamentals of Impedance Test

科技无限 服务创新

阻抗测试基础

Fundamentals of Impedance Test

01 / 阻抗基础

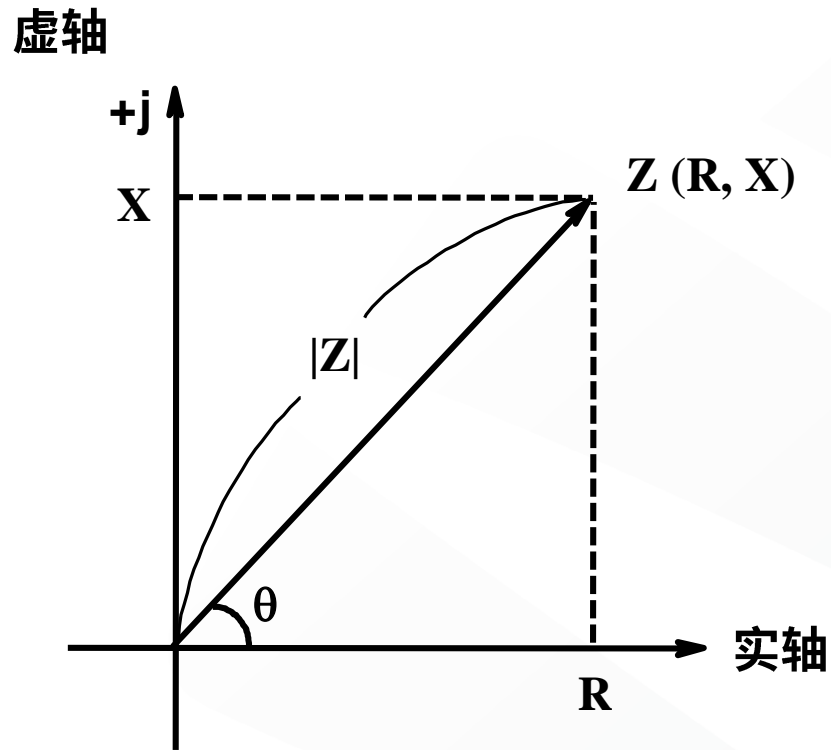
02 / 测试方法&仪器

03 / 应用方向

<http://www.jicheng.net.cn>



阻抗：元器件或电路对交流电的阻碍作用



$$Z = R + jX = |Z| \angle \theta$$

$$\text{实部 } R = |Z| \cos \theta$$

$$\text{虚部 } X = |Z| \sin \theta$$

$$\text{幅度 } |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\text{相位 } \theta = \tan^{-1}(X/R)$$

阻抗单位：欧姆 **ohm** (Ω)

导纳：阻抗的倒数， $1/Z=1/(R+jX) = Y=G+jB$

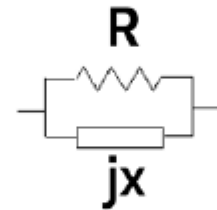
Real and imaginary components are serial



$$Z = R + jX$$

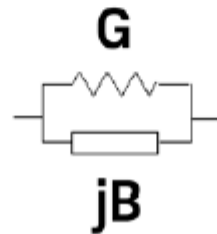
(Impedance is better to express)

Real and imaginary components are paralleled



$$Z = \frac{jRX}{R + jX} = \frac{RX^2}{R^2 + X^2} + j \frac{R^2X}{R^2 + X^2}$$

(Impedance makes it a bit complex)



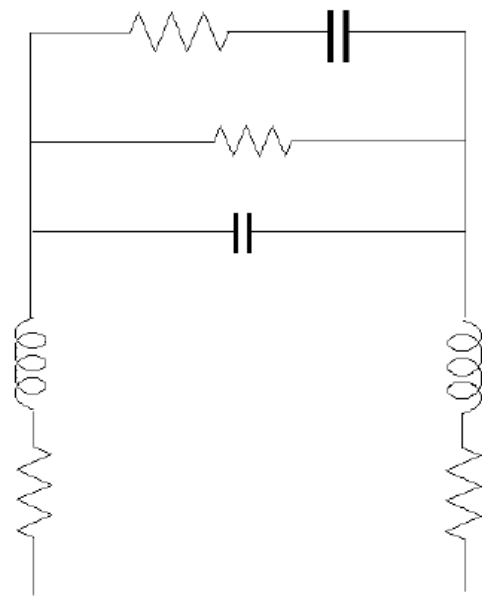
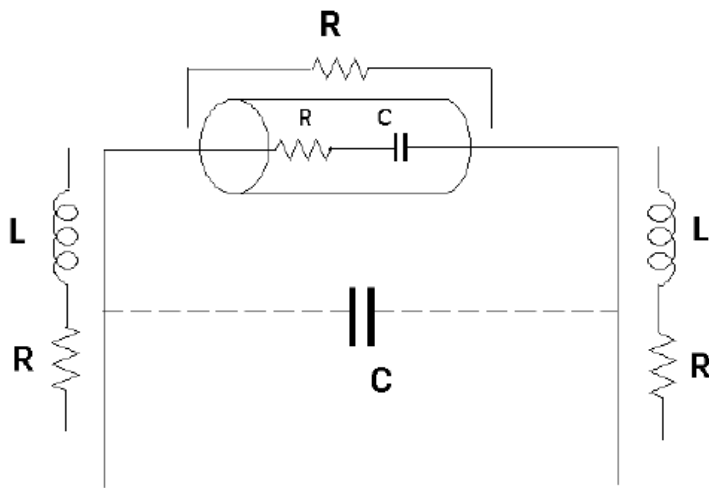
$$Y = G + jB$$

(Admittance is better to use)

一般情况，为了方便电阻和电抗的串联连接用阻抗表示，并联用导纳表示

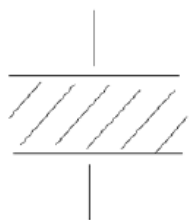
为什么要测阻抗?

L、C和R元件的主要属性通常由电容、电感或电阻在规定或标准条件下的标称值表示。然而，所有的电路元件都不是纯电阻的，也不是纯无感的。它们涉及这两个阻抗元件，意味着现实世界中的所有设备都有寄生电阻中的寄生电感、电容器中的寄生电阻、电感中的寄生电容等。不同的材料和制造技术会产生不同数量的寄生电容。许多寄生在元件中，影响元件的实用性和确定其电阻、电容或电感的精度。



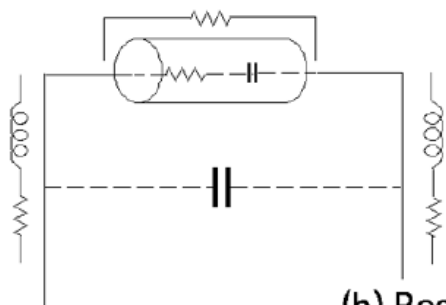
由等效电路表示的寄生元件

阻抗值的三种值



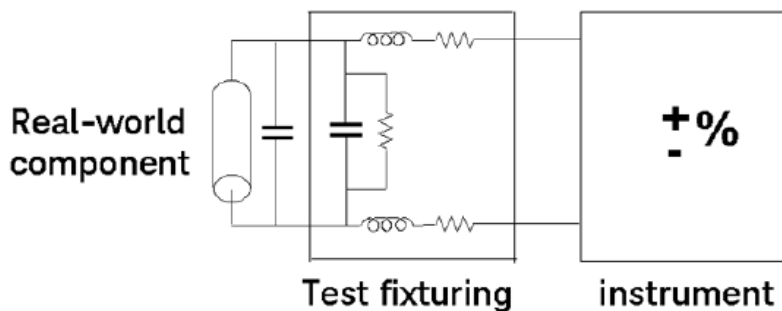
(a) Ideal value

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d}$$



(b) Real value

Real-world capacitor



(c) Measured value

(a) 理想值

理想元件的电容、电阻、电感的值，不考虑寄生影响，可通过数学关系定义。不依赖于频率。

(b) 实际值

电路元件的电阻和无功矢量的代数和，包括元件与寄生。由于寄生在不同频率下产生不同的阻抗矢量，因此实际值取决于频率。

(c) 测量值

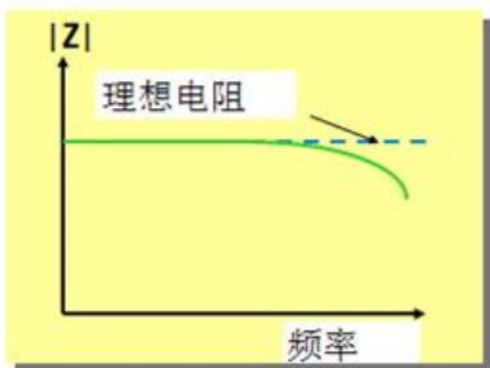
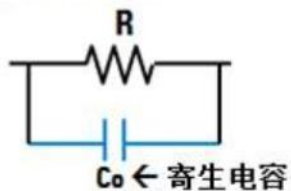
由测量仪器获得并显示的值，包含测量仪器的固有残差和误差。在一定的测量条件下，我们可以通过比较测量值与实际值的吻合程度来判断测量的质量。测量的目的是使测量值尽可能接近实际值。

影响阻抗的因素

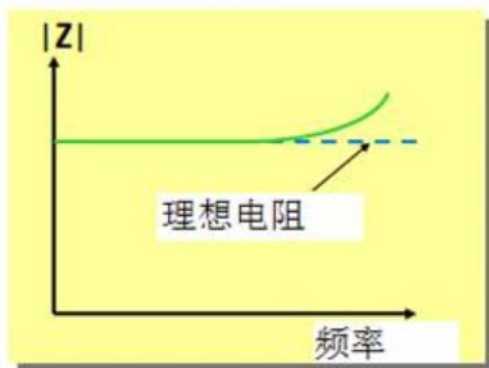
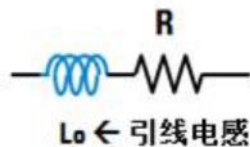
(a) 频率

由于寄生的影响，元件的阻抗会受到频率的影响。
例如：对于电容器，寄生电感是引起频率响应的重要因素。

1. 高阻值电阻

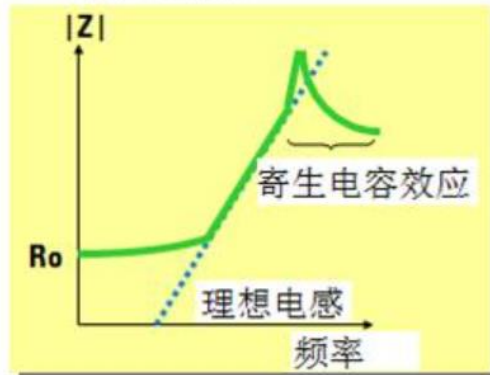
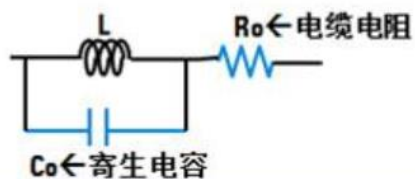


2. 低阻值电阻

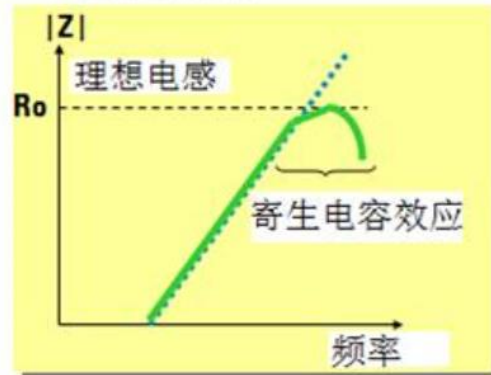
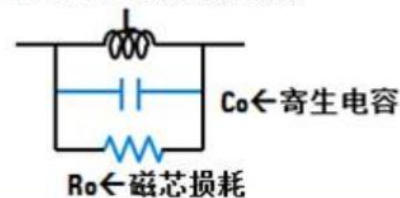


电阻与频率

• 1. 普通电感



• 2. 高磁芯损耗的电感

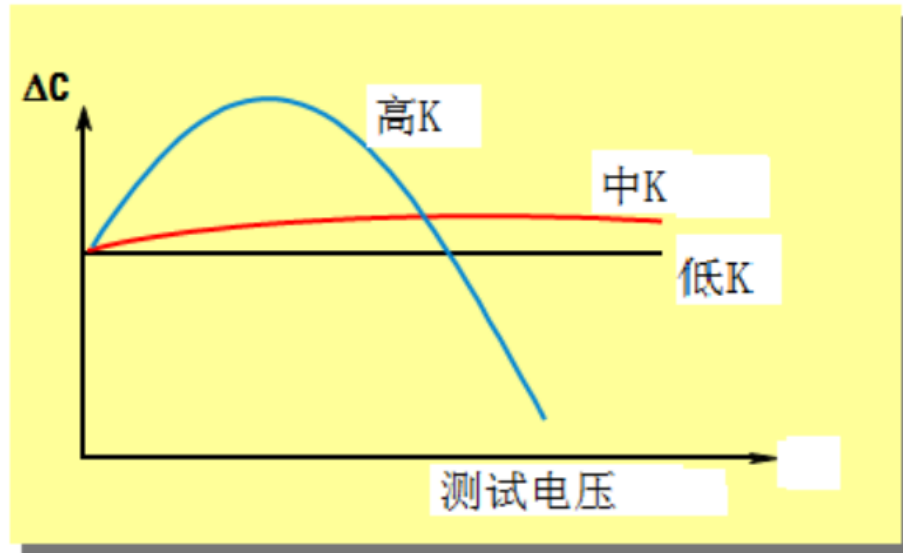


电感与频率

影响阻抗的因素

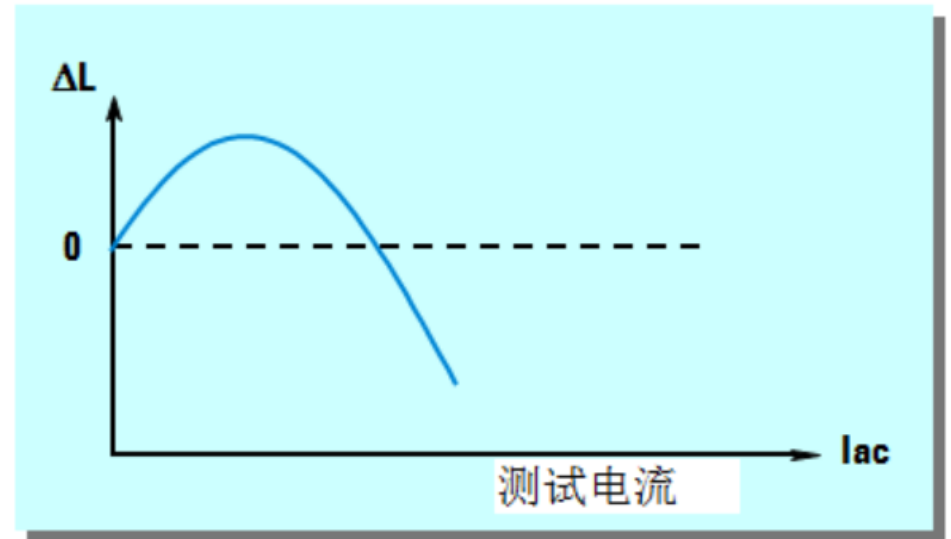
(b) 测试信号电平

施加的信号电平可能会影响某些部件的测量结果。
例如：陶瓷电容器的阻抗与测试电压相关。



电容受测试电压的影响

$$C = K \epsilon_0 \frac{A}{d}$$



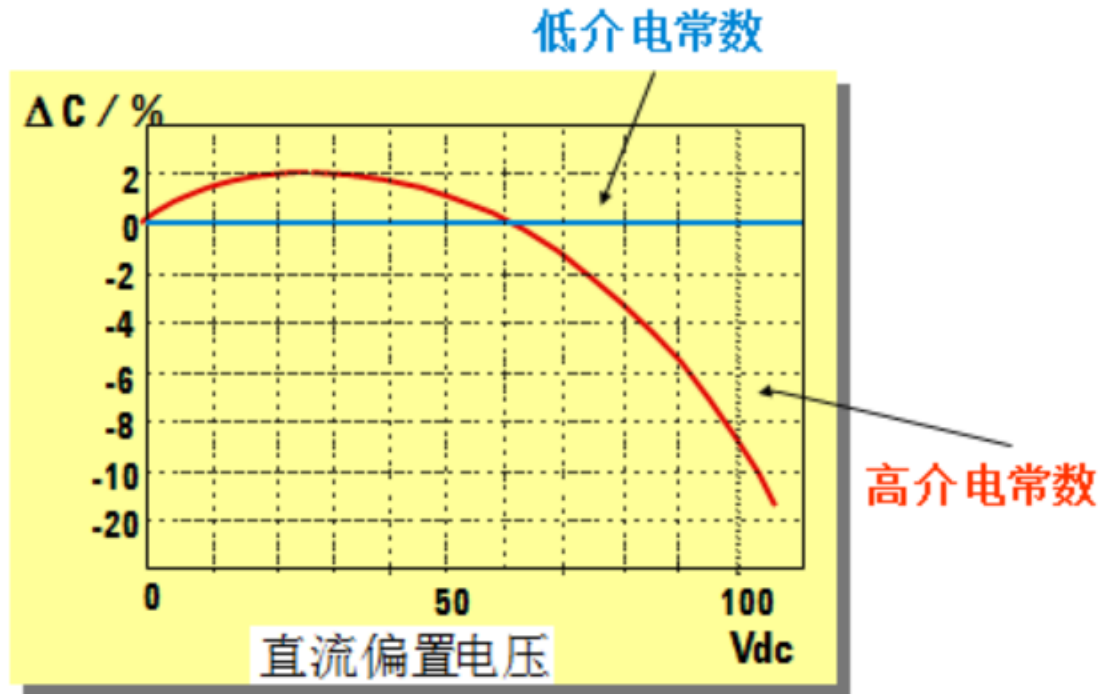
线圈电感受测试电流的影响

影响阻抗的因素

(c) 直流偏置

直流偏压依赖性在半导体器件中非常普遍，如二极管和晶体管。

一些无源元件也依赖于直流偏压，如高K型介电陶瓷电容器的电容会发生变化取决于施加的直流偏压。



电容受偏置电压的影响

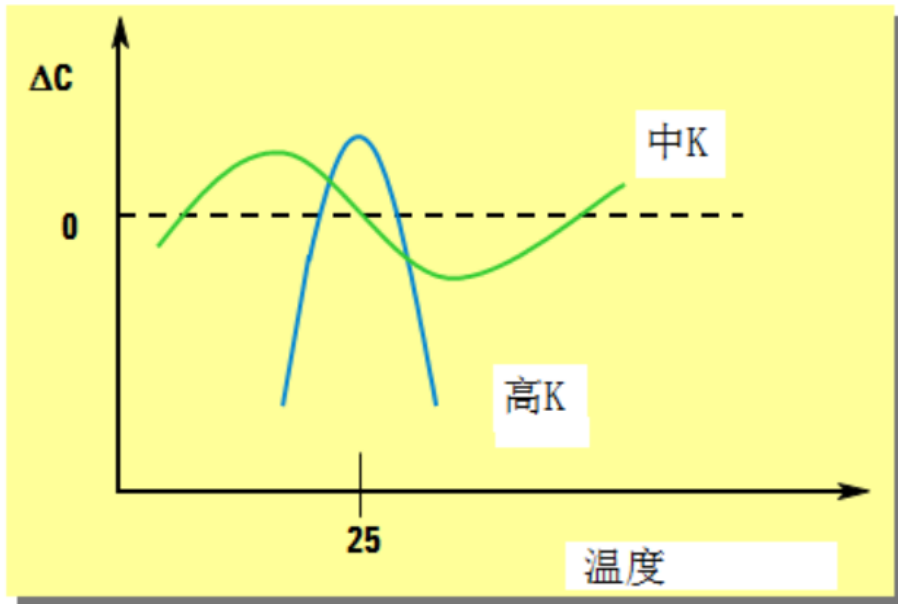
影响阻抗的因素

(d) 温度

大多数类型的部件都与温度有关，温度系数是电阻、电感和电容器的重要规范。

(e) 其他因素

其他物理和电气环境，例如湿度、磁场、光、大气、振动和时间，可能会改变阻抗值。

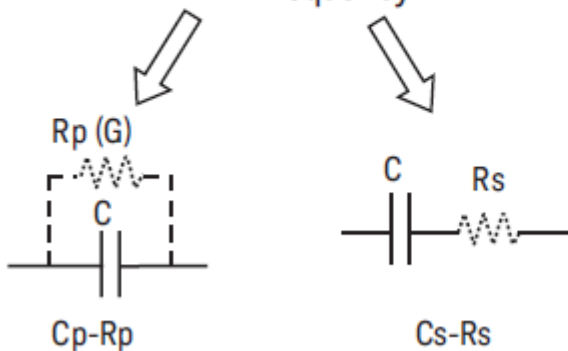
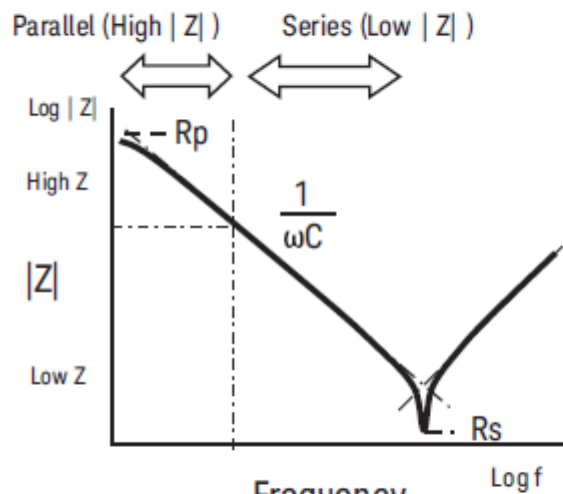
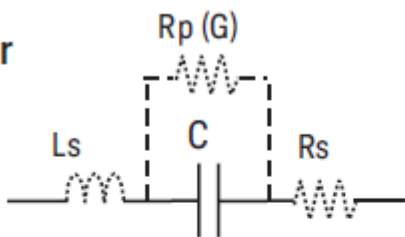


电容受温度的影响

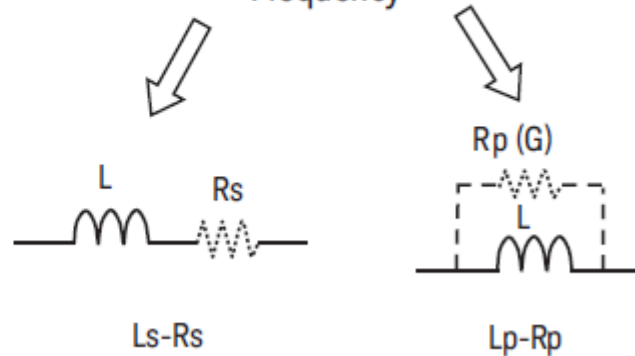
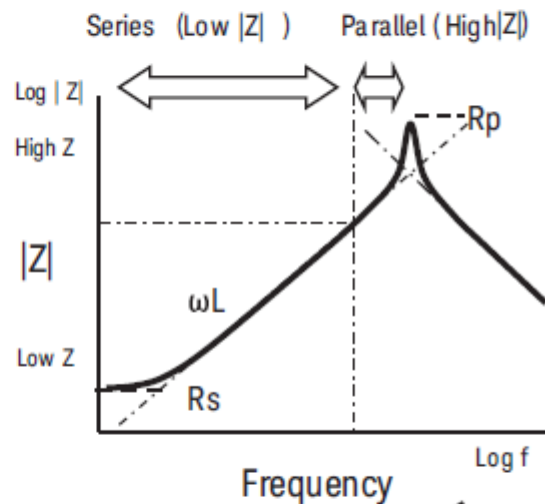
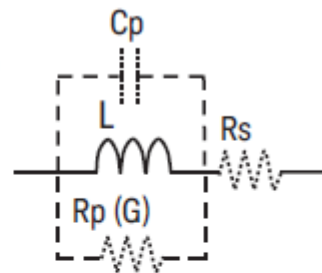
等效电路模型

即使有寄生的影响，元件的等效电路也可以用简单的串联或并联电路表征。

(a) Capacitor

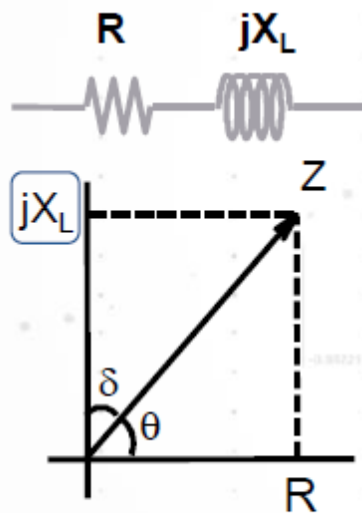
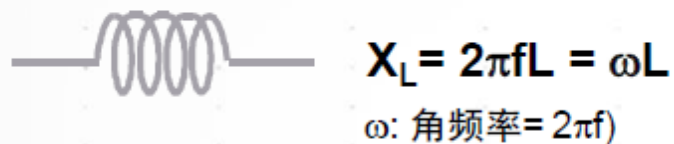


(b) Inductor



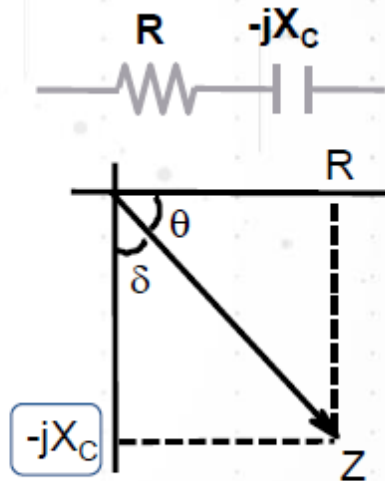
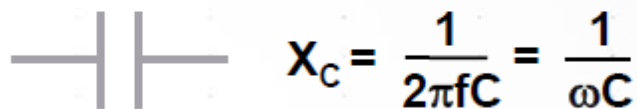
阻抗参数

L (感抗)



$$Q = \text{品质因数} = \frac{X_L}{R} = \frac{-X_C}{R}$$
$$= \tan \theta$$

C (容抗)



$$D = \text{耗散系数} = \tan \delta$$
$$= \frac{1}{Q}$$

阻抗测试基础

Fundamentals of Impedance Test

01 / 阻抗基础

02 / 测试方法&仪器

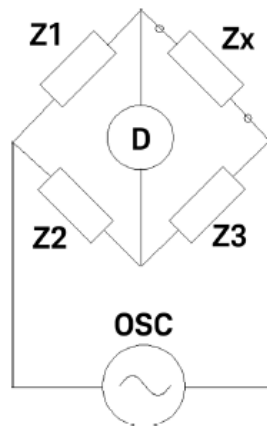
03 / 应用方向

<http://www.jicheng.net.cn>



阻抗测试方法

Bridge method

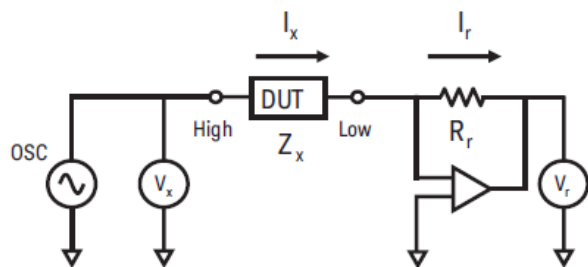


$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3$$

当没有电流流过检测器 (D) 时，可以通过其他电桥元件的关系得到未知阻抗 (Z_x) 的值。各种类型的电桥电路，采用L、C和R元件的组合作为电桥元件，用于各种应用。

阻抗测试方法

Auto-balancing bridge method



$$\frac{V_x}{Z_x} = I_x = I_r = \frac{V_r}{R_r}$$

$$\rightarrow Z_x = \frac{V_x}{I_x} = R_r \frac{V_x}{V_r}$$

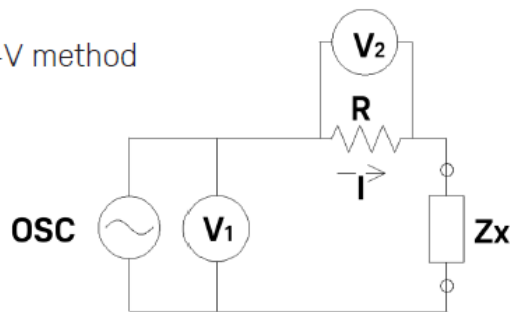
电流 I_x 通过 I-V 转换器的操作与流过量程电阻器 (R_r) 的电流 I_r 平衡。低点的电位保持在零伏 (因此称为虚拟接地)。被测器件的阻抗是通过在高端 (V_x) 和跨 R_r (V_r) 测量的电压来计算的。

注: 在实践中, 自动平衡电桥的配置因仪器类型而异。

一般来说, 在通常低于 100kHz 的低频范围内, LCR 电表的 I-V 转换器使用简单的运算放大器。由于放大器的性能限制, 这种类型的仪器在高频精度方面有缺点。宽带 LCR 仪表和阻抗分析仪采用 I-V 转换器, 由精密零位检测器、相位检测器、积分器 (环路滤波器) 和矢量调制器组成, 以确保在 1 兆赫以上的宽频范围内具有高精度。这种仪器的最大频率可达 120 兆赫。

阻抗测试方法

I-V method

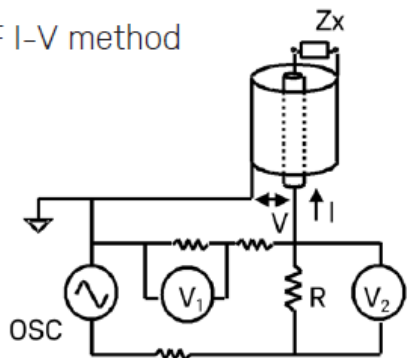


$$Z_x = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{V_2} R$$

未知阻抗 (Z_x) 可由测量的电压和电流值计算得出。电流是通过一个精确已知的低值电阻 (R) 上的电压测量值来计算的。实际上, 使用一个低损耗变压器来代替 R , 以防止在电路中放置一个低值电阻造成的影响。然而, 变压器限制了适用频率范围的低端。

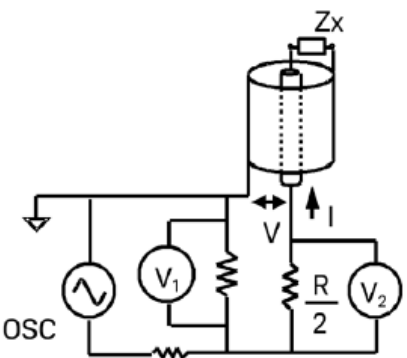
阻抗测试方法

RF I-V method



Low impedance type

$$Z_x = \frac{V}{I} = \frac{2R}{\frac{V_2}{V_1} - 1}$$



High impedance type

$$Z_x = \frac{V}{I} = \frac{R}{2} \left[\frac{V_1}{V_2} - 1 \right]$$

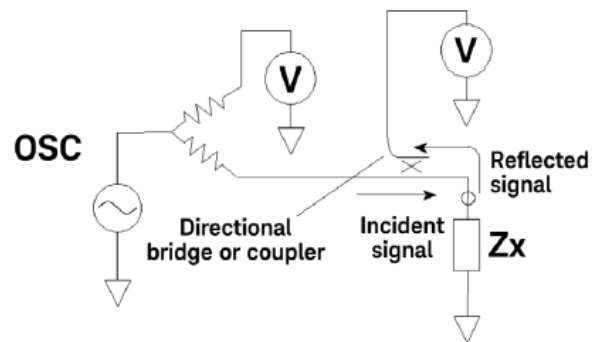
而射频I-V测量方法基于I-V方法

相同的原理以不同的方式使用阻抗匹配测量电路（50Ω）和高频率运行的精密同轴测试端口。有两种类型的电压表和电流表，适合于低阻抗和高阻抗测量。

被测器件的阻抗由测量的电压导出和电流值，如图所示。电流流过被测件的电流是通过已知R上的电压测量计算得出的。实际上，使用低损耗变压器代替R。变压器限制了适用频率范围的低端。

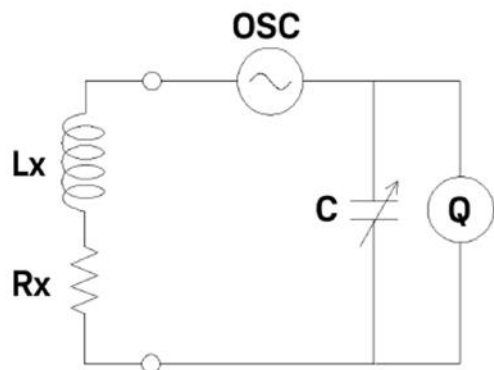
阻抗测试方法

Network analysis method



反射系数是通过测量入射信号与反射信号的比值得到的。使用定向耦合器或电桥检测反射信号，并使用网络分析仪提供和测量信号。由于该方法测量DUT处的反射，因此在更高的频率范围内是可用的。

Resonant method

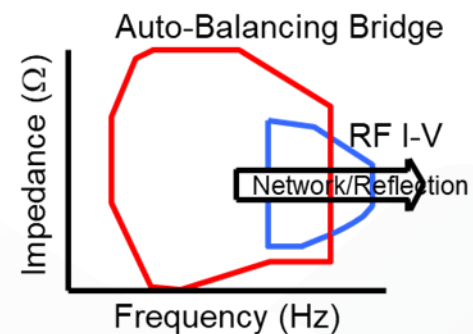


当通过调整调谐电容器 (C) 将电路调整到谐振时，从测试频率、C值和Q值获得未知的阻抗 L_x 和 R_x 值。Q是直接放置在调谐电容器上的电压表测量的。由于测量电路的损耗很低，可以测量高达300的Q值。除了此处所示的直接连接，串联和并联连接可用于各种阻抗测量。

阻抗测试方法对比

测试方法	优点	缺点	频率范围
电桥法	高精度（0.1%典型值） 宽频率覆盖 低成本	需要手动平衡 单台仪器频率覆盖范围窄	DC to 300MHz
谐振法	高Q值精度	需要调谐到共振 低阻抗测量精度	10kHz to 70MHz
I-V法	接地装置测量 适合探头类型测试需要	探头限制工作频率范围	10kHz to 100MHz
RF I-V法	高精度（1%典型值） 高频宽阻抗范围	工作频率范围受测试头的限制	1MHz to 3GHz
网络分析仪法	从低频到射频的宽频率覆盖范围 当未知阻抗接近特征阻抗时，具有良好的精度	当测量频率改变时需要重新校准 窄阻抗测量范围	5Hz and above
自动平衡电桥法	从低频到高频的宽频率覆盖范围 在宽阻抗测量范围内保持高精度 接地设备测量	高频范围不可用	20Hz to 120MHz

Keysight阻抗测试

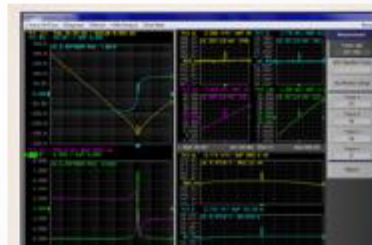


Summary

Method	Frequency Range	Impedance Range	Terminal Connections	# of Ports
Auto-Balancing Bridge	$20 \leq f \leq 110 \text{ MHz}$	$1 \text{ m}\Omega \leq Z \leq 100 \text{ M}\Omega$ (10% acc)	4-Terminal Pair, BNC, 7 mm	1
RF I-V	$1 \text{ MHz} \leq f \leq 3 \text{ GHz}$	$0.2 \leq Z \leq 20 \text{ k}\Omega$ (10% acc)	7 mm	1
Network Analysis	$f \geq 300 \text{ kHz}$	$Z \cong Z_0$	7 mm, N-Type	$N \geq 1$

LCR表&阻抗分析仪

台式 LCR 表	阻抗分析仪
点频	扫频
数字显示	图形显示(轨迹和通道)
更多应用场景,大批量产线测试,来料检测,研发/实验室,低频材料	一般应用,元器件/电路设计,研发/实验室,低频/射频材料
较高精度/ 高速	最高精度
专注速度和精度	许多分析功能, 详细评价被测物特性
开路/短路/负载补偿修正	开路/短路/负载补偿修正
承担得起的价格	比较昂贵但是更多功能, 比如频标和等效电路分析
各种测试夹具	最丰富测试夹具选择



E4980A/AL高精度LCR表

7 位显示, 16 种参数

USB 接口
(只用于存储器件)

(后面板)
LAN/GPIB, 装载机/扫描器接口 (可选)

0.05% 基本精度

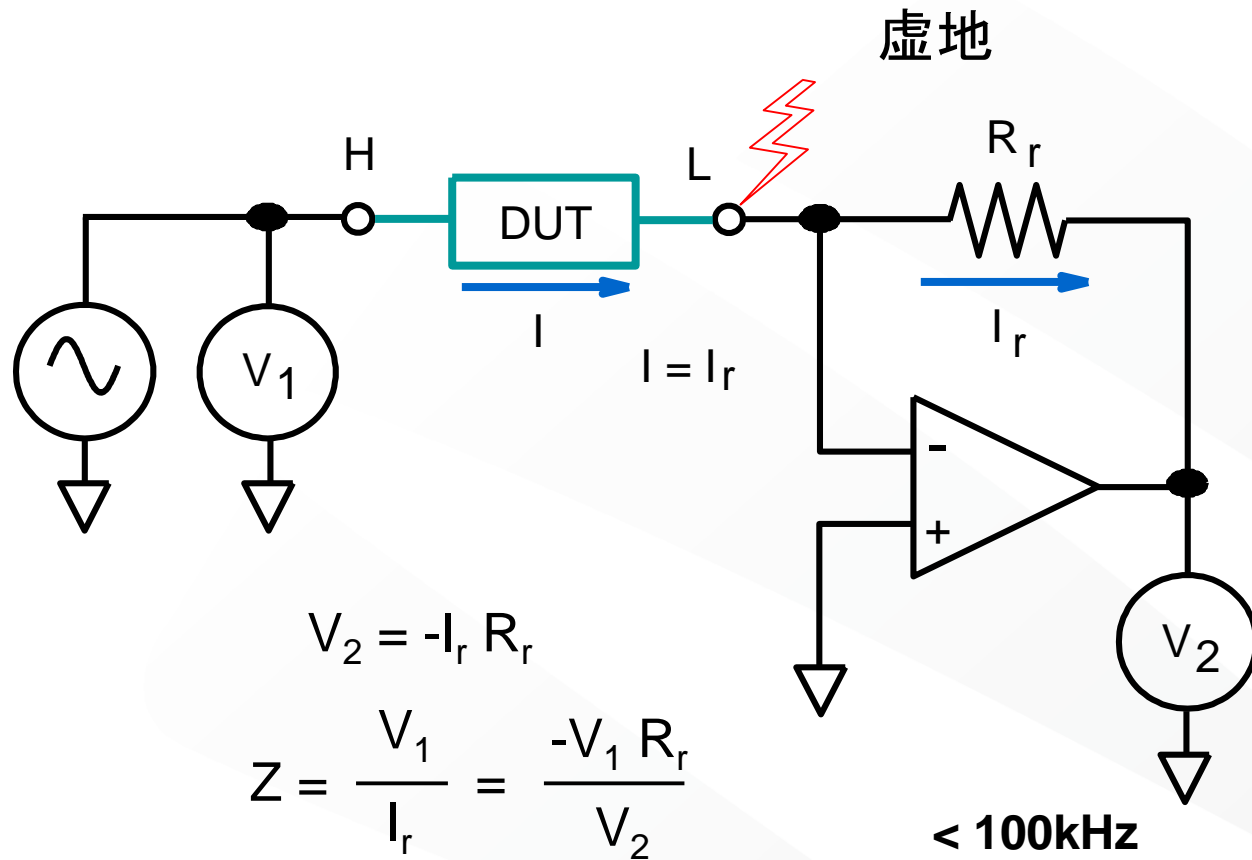
$\pm 10\text{ V max DC 源}$
(可选)

0.1 mV – 2V rms (std), 20 V rms max
和 0 至 $\pm 40\text{ V dc}$ 偏置 (可选)

达 201 点的表格扫描

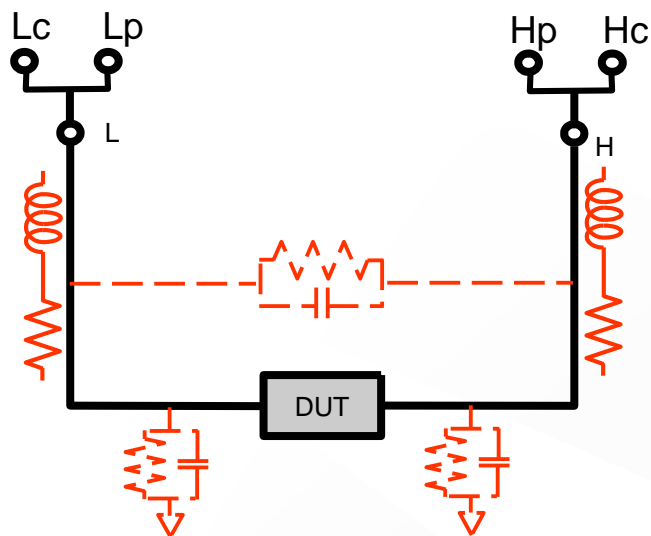
LINE	SEQ	FREQ[Hz]	Q[F]	D[-]	OP
101	110.1 k	999.462	+ 2.80263	n	
102	110.2 k	999.434	+ 2.80183	n	
103	110.3 k	999.406	+ 2.80103	n	
104	110.4 k	999.378	+ 2.80023	n	
105	110.5 k	999.350	+ 2.80000	n	
106	110.6 k	999.322	+ 2.80042	n	
107	110.7 k	999.294	+ 2.80176	n	
108	110.8 k	999.266	+ 2.80366	n	
109	110.9 k	999.238	+ 2.80773	n	
200	120 k	999.457	+ 2.80296	n	

自动平衡电桥法

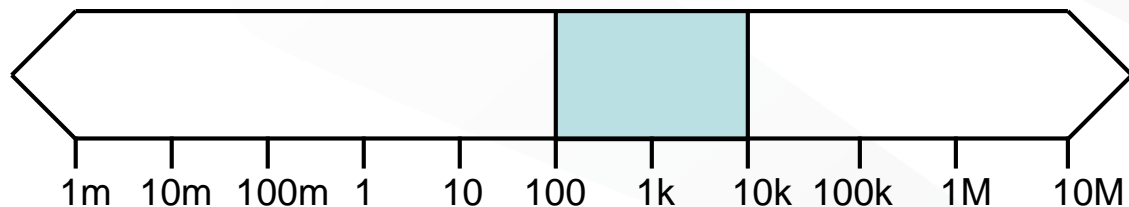


2端(2T)连接

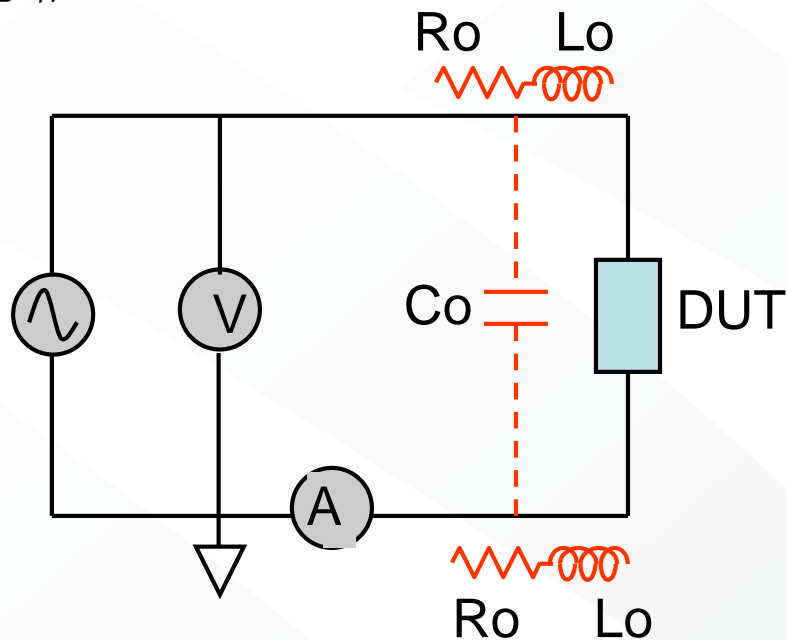
A. 连接方法



C. 阻抗测量范围 (Ω)



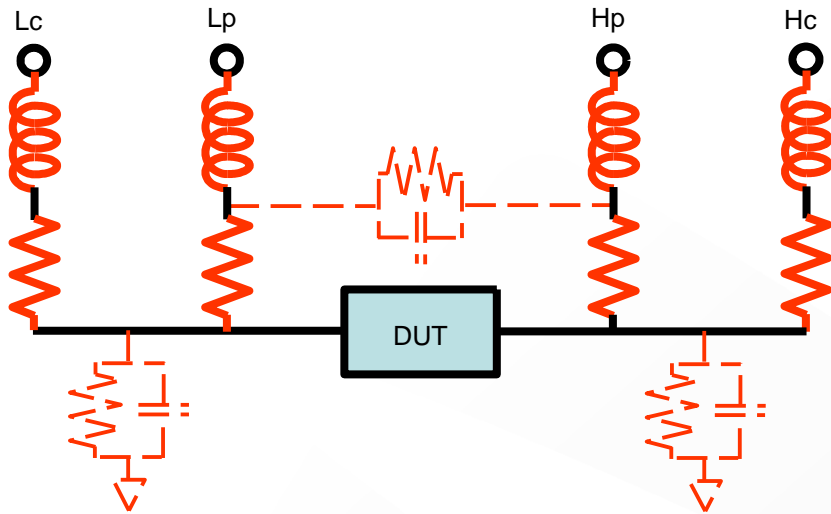
B. 电路



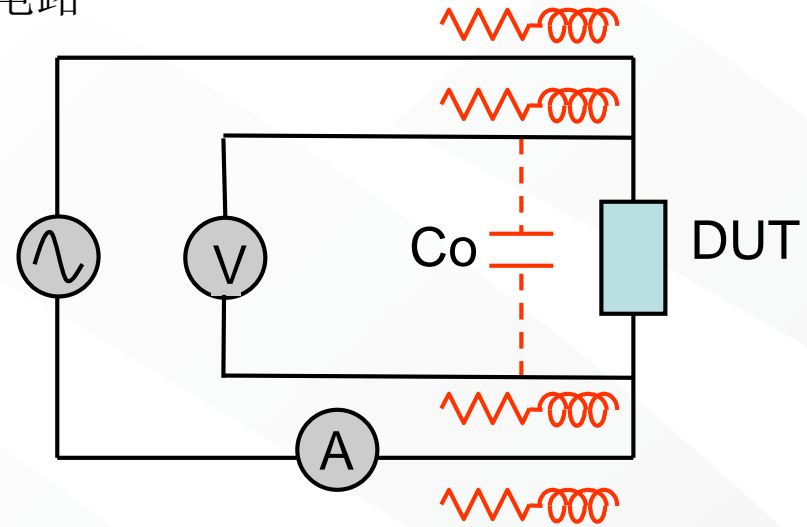
- 最简单
- 误差多
 - 引线电感/电阻
 - 杂散电容

4端(4T)连接

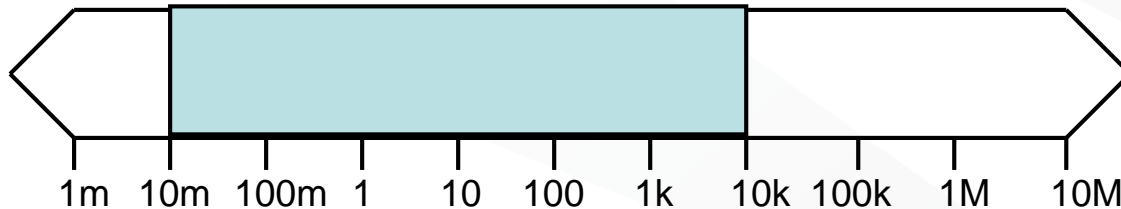
A. 连接



B. 电路



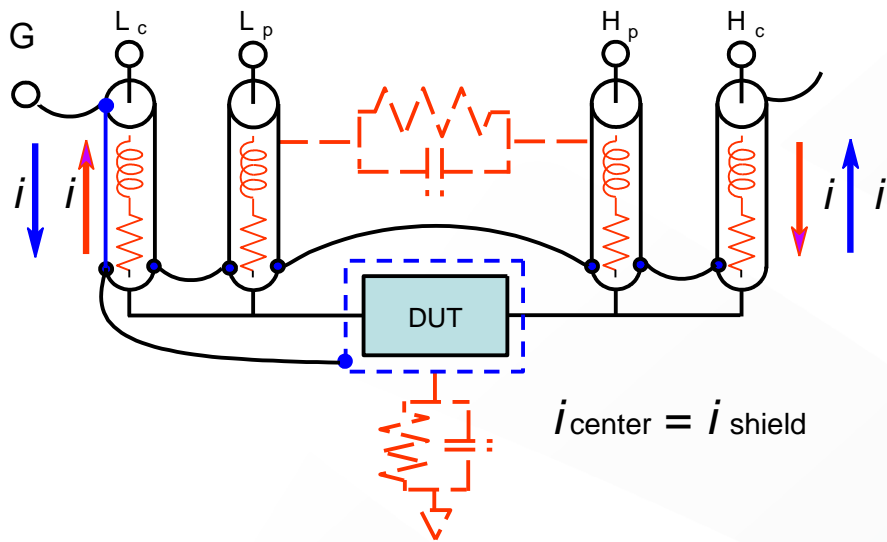
C. 测量阻抗范围 (Ω)



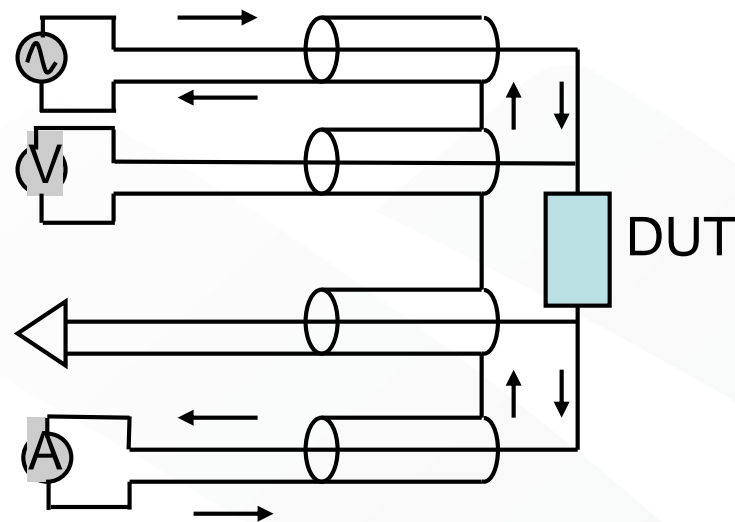
- 减小引线电感影响
 - ✓ 信号源电流通路和电压电缆彼此独立
- 互感问题

4端对(4TP) 连接

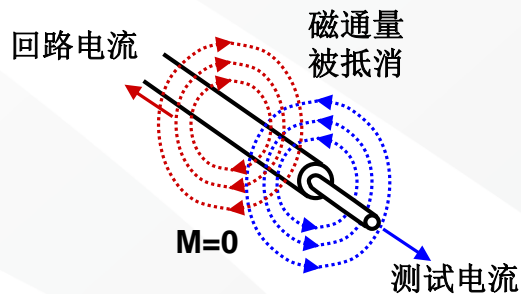
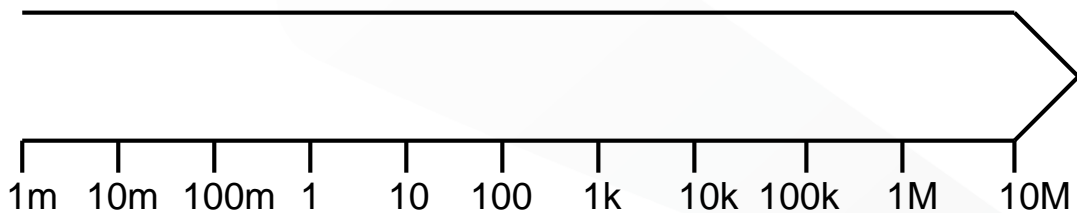
A. 连接



B. 电路



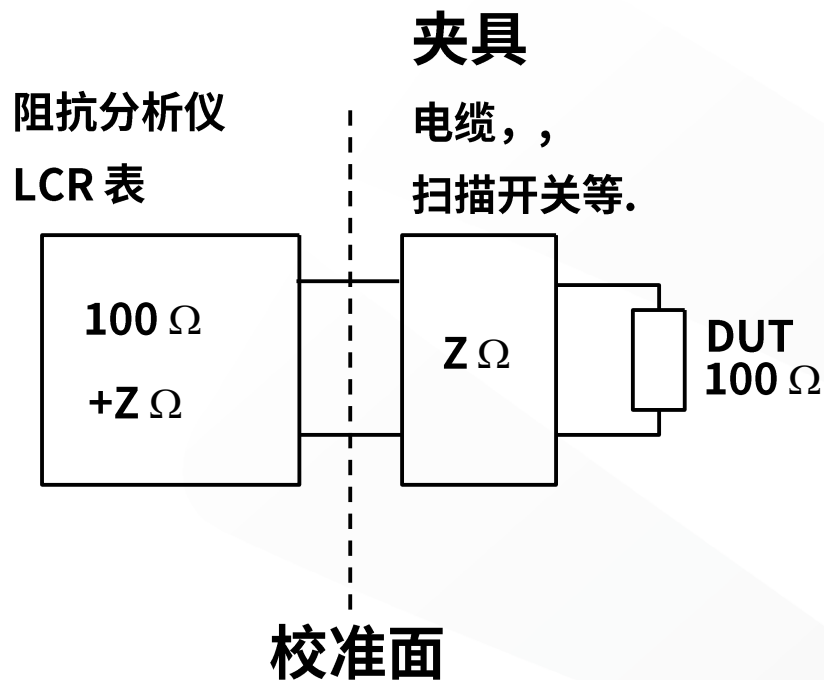
C. 阻抗测量范围 (Ω)



- 外导体抵消了内导体产生的磁通
- 扩展低阻抗范围到1毫欧

校准与补偿

- 校准：定义一个参考平面，在这个平面上能得到规定的测量精度，这个平面称为校准平面。（测试结果可以溯源）
- 补偿：抵消掉DUT与校准面之间的误差



■ 两种补偿方法:

- OPEN/SHORT 补偿
- OPEN/SHORT/LOAD 补偿

测试夹具



16034E SMD/片状测试夹具

频率: ≤ 40 MHz
最高电压: ± 42 V 最大峰值
(交流+直流)



16034G 小型 SMD/片状测试夹具

频率: ≤ 120 MHz
最高电压: ± 42 V 最大峰值
(交流+直流)



16034H SMD/片状测试夹具

频率: ≤ 120 MHz
最高电压: ± 42 V 最大峰值
(交流+直流)
适用于阵列型器件



16089A/B/C 片状延长电缆

线夹类型: A/B/C: 开尔文
频率: 5 Hz 至 100 kHz
电缆长度: A/B/C: 0.94 m
最高电压: ± 42 V 最大峰值
(交流+直流)



16334A SMD/片状器件镊子

频率: ≤ 15 MHz
最高电压: ± 42 V 最大峰值
(交流+直流)



16047A 轴向和径向测试夹具

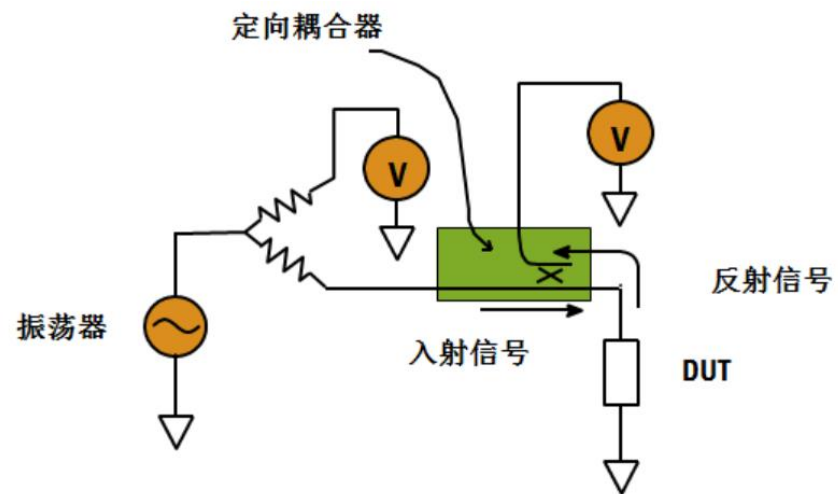
频率: ≤ 13 MHz (开尔文触头)
最高电压: ± 42 V 最大峰值
(交流+直流)



16047E 测试夹具

频率: ≤ 120 MHz
最高电压: ± 42 V 最大峰值
(交流+直流)

网络分析仪



方法：
反射法、串联直通法、并联直通法



E5061B

E5061B阻抗测试方法

	典型频率范围	测量精度为 10% 的测试 范围	测试夹具	应用实例
S 参数端口 1 反射	5 Hz 至 3 GHz	1 Ω 至 2 k Ω	是德科技 7 mm 测试 夹具与 16201A 端子 适配器	电感器、变压器、 射频电容器、 射频二极管
增益相位串联直通 (T: 50 Ω 20 dB, R: 1 M Ω 20 dB)	5 Hz 至 30 MHz	3 Ω 至 40 k Ω	Keysight 4TP 测试夹具	谐振器、压电式传感器、 小型电容器、大型电感器
S 参数端口 1-2 并联 - 直通	100 kHz 至 3 GHz ¹	1 m Ω 至 80 Ω	用户准备的同轴探头或 并联 - 直通测试电路板	高频 PDN 应用 (旁路电容器、 PCB 级 PDN 测量)
增益相位并联直通 (T: 50 Ω 0 dB, R: 50 Ω 20 dB)	5 Hz 至 30 MHz	<1 m Ω 至 5 Ω	用户准备的同轴探头或 并联 - 直通测试电路板	低频 PDN 应用 (直流 - 直流转换器、 大型旁路电容器、 PCB 级 PDN 测量)
S 参数端口 1-2 串联 - 直通	5 Hz 至 3 GHz	8 Ω 至 40 k Ω	用户准备的串联 - 直通夹具	谐振器 (频率 > 30 MHz)

测试夹具



16047E



16201A



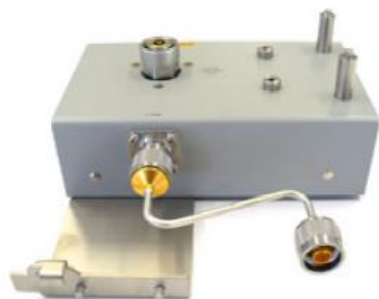
16196A/B/C/D SMD 测试夹具



16198A 底电极 SMD 测试夹具



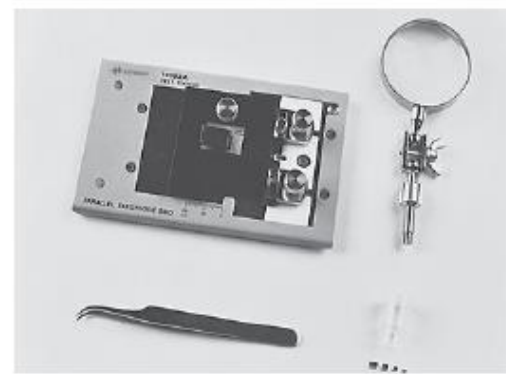
16034E



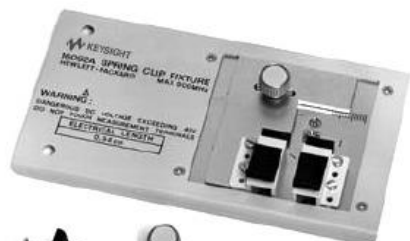
16201A



16197A 底电极 SMD
测试夹具



16192A 平行电极 SMD 测试夹具



16092A



阻抗测试的选择

- 1、阻抗参数的确定
- 2、阻抗测试的条件
- 3、测试仪器的选择
- 4、正确的测试夹具
- 5、校准和补偿

Keysight阻抗测试

LCR 表



E4981A
电容表



E4980A/AL
高精度 LCR 表

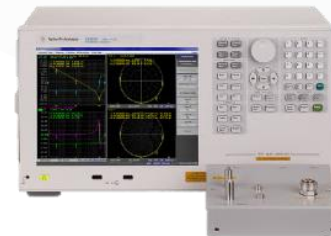


E4982A
射频 LCR 表

阻抗分析仪



E4990A
Impedance Analyzer



E4991B
Impedance Analyzer

网络分析仪



E5061B
LF-RF网络分析仪



E5063A
RF-MW网络分析仪

其他品牌阻抗测试



Tonghui同惠



Chroma致茂電子



IET



Hioki日置



Hameg惠美



Wayne Kerr稳科



GW Instek固纬

阻抗测试基础

Fundamentals of Impedance Test

01 / 阻抗基础

02 / 测试方法&仪器

03 / 应用方向

<http://www.jicheng.net.cn>



目标客户与产品

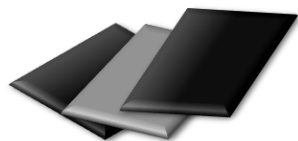
材料制造商

元件制造商

子系统制造商

最终产品制造商

陶瓷
铁氧体
石英晶体
晶圆片
SMD 封装
其它



电容器
电感器
EMI 滤波器
变压器
电阻器



晶体管
VCOs
电池
电路板
电缆
其它

CKT 模块
PLL 模块
电源
LCD
HDD
其它

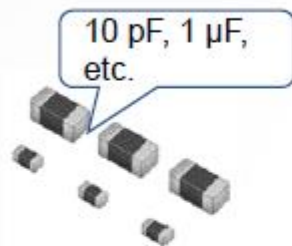


移动设备
计算机
汽车电子
其它



应用

电容



10 pF, 1 μ F,
etc.

C: 电容值
D: 耗散系数

电感



100 nH, 1 mH,
etc.

L: 电感值
Q: 品质因数

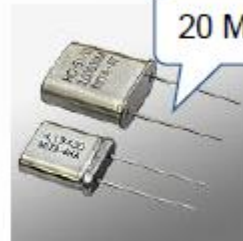
电阻



1 kohm

R: 电阻值

谐振器

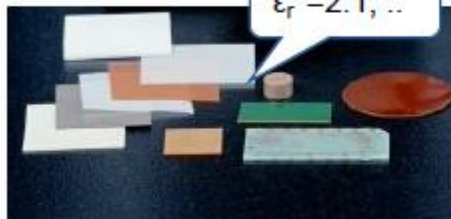


20 MHz

Z: 谐振阻抗
Fr: 谐振频率

这些都是阻抗相关的测试参数!

材料



$\epsilon_r = 2.1, \dots$

ϵ_r : 相对电容率
 μ_r : 相对磁导率

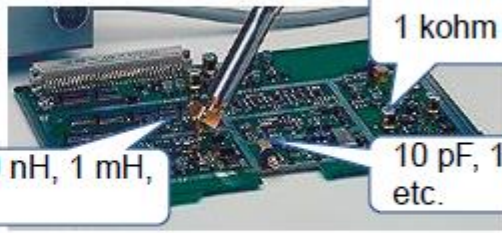
半导体Wafer晶片



10 pF, 1 μ F,
etc.

C-V: 电容-电压测试

电路内测试



1 kohm

100 nH, 1 mH,
etc.

10 pF, 1 μ F,
etc.

Z: 阻抗
C: 电容
L: 电感

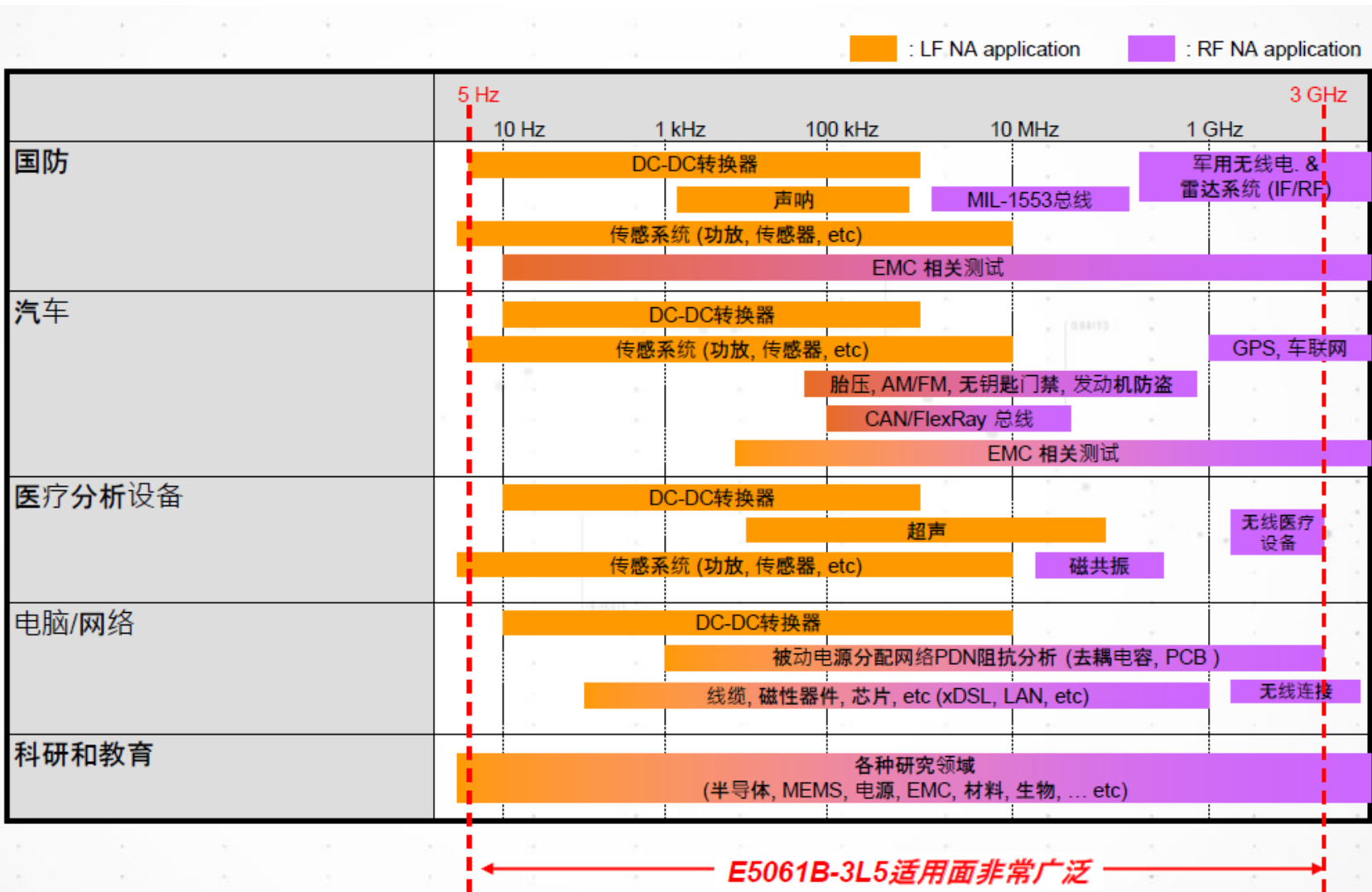
测试项举例

材料测试:

- 1、介电常数 ϵ 表征材料在外部电场作用下储存电荷的能力，介电材料的电容与介电常数有关。
- 2、导磁率 μ 描述了材料与磁场的相互作用，与电感有关。

DUT	E4980A 精密 LCR 表, 20Hz 至 2MHz
电容器 	C: 电容, R: 寄生电阻, D: 损耗因素
电感器 	L: 电感, R: 寄生电阻, Q: 品质因素
电阻器 	R: 电阻, L: 寄生电感, C: 寄生电容
变压器 	L: 电感, M: 互感, R: 电阻, 匝数比
电缆 	分布常数 
材料 	ϵ_r : 相对介电常数 μ_r : 相对透磁率
开关/连接器 	C: 杂散电容

E5061B 目标应用



Thanks for Watching !

谢谢观赏

