

# HIOKI

## 线上讲座 阻抗 LCR测量的基础



日置电机株式会社  
技术2科

# 概要

- 1 . 阻抗是什么?
- 2 . 测量方法 (测量原理)
- 3 . 测量电缆的连接方法
- 4 . LCR测试仪测量条件的确定方法
- 5 . 复合元件的测量和等效电路模式
- 6 . 其他注意事项
- 7 . 产品介绍

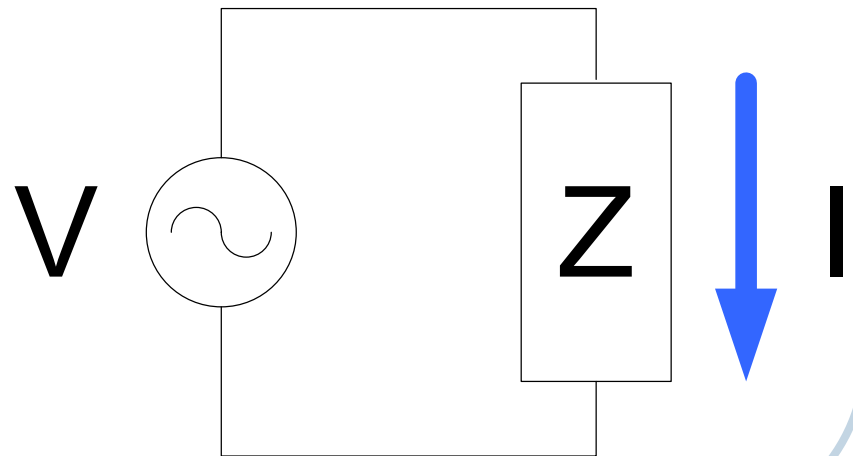
# 阻抗是什么？

- ◆ Z (阻抗) 单位:  $\Omega$  (欧姆)
- ◆ 表示交流电流流动的难度
- ◆ 在直流电路中, 电阻 (R) 起到阻碍电流的作用。
- ◆ 在交流电路中, 除了电阻 (R) 以外, 线圈 (电感 L) 或电容 (C) 也起到阻碍电流的作用。

- ◆ 直流电阻  $R = \frac{V}{I}$

- ◆ 阻抗  $Z = \frac{V}{I}$

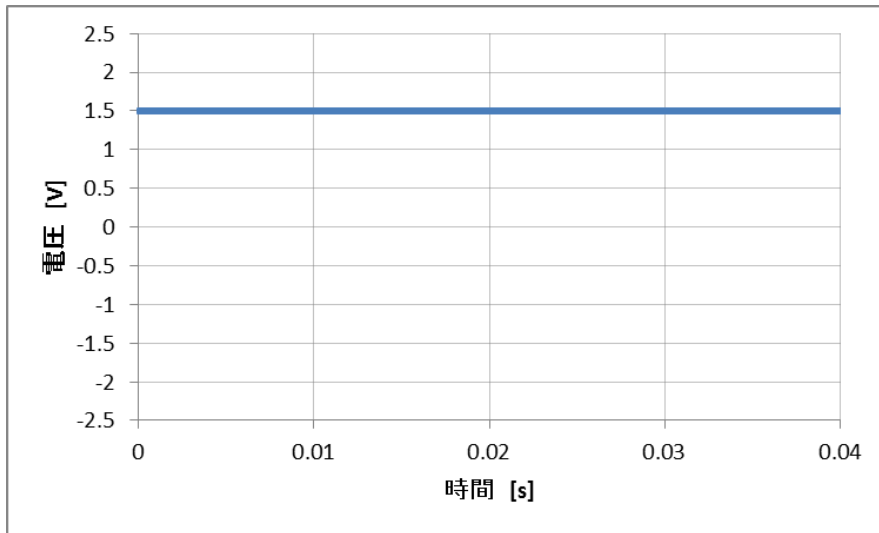
※ V(电压)[V], I (电流)[A]



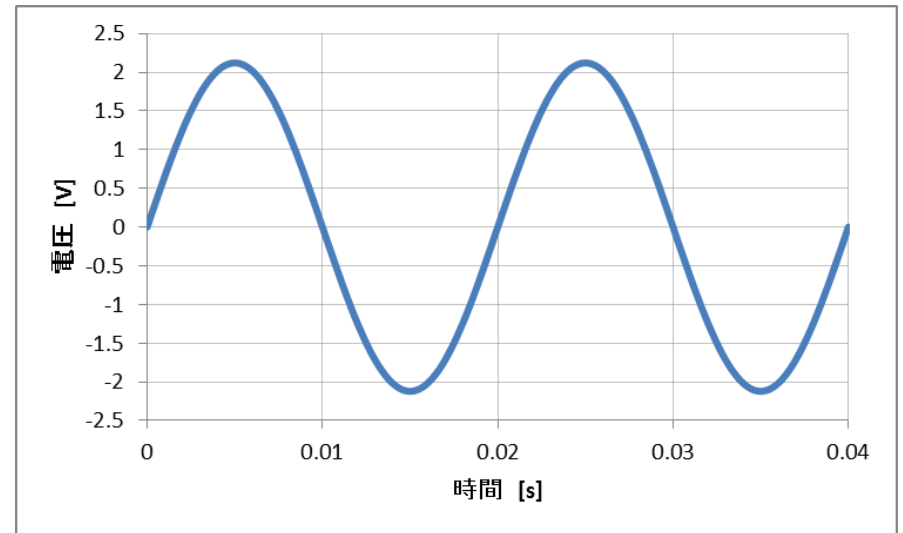
# 直流和交流

直流：方向（极性）不随时间变化

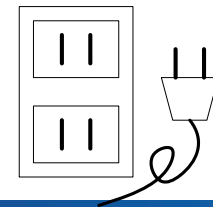
交流：方向（极性）周期性变化→具有与直流不同的特性



直流



交流



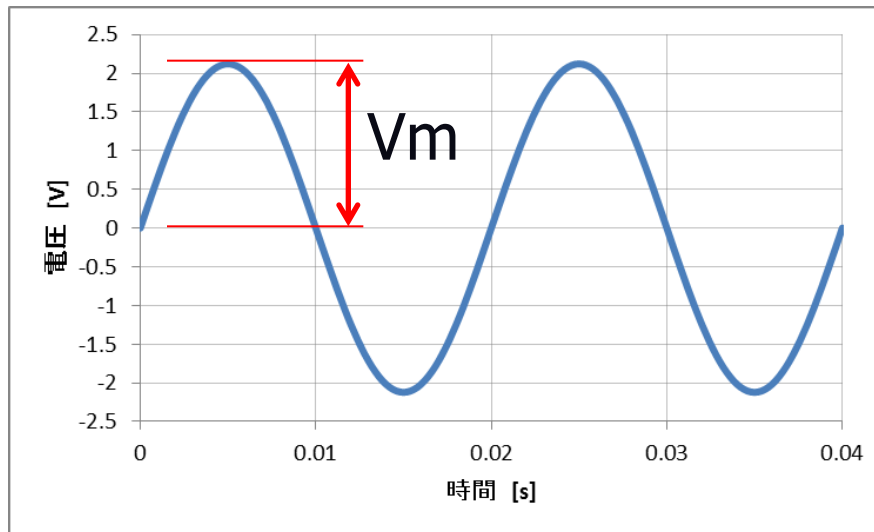
# 交流的大小

通常用有效值表示。

(有效值 · · · · 与直流相同工作量的交流值)

最大值和有效值存在以下关系。

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (V_{rms}: \text{有效值} \quad V_m: \text{最大值})$$

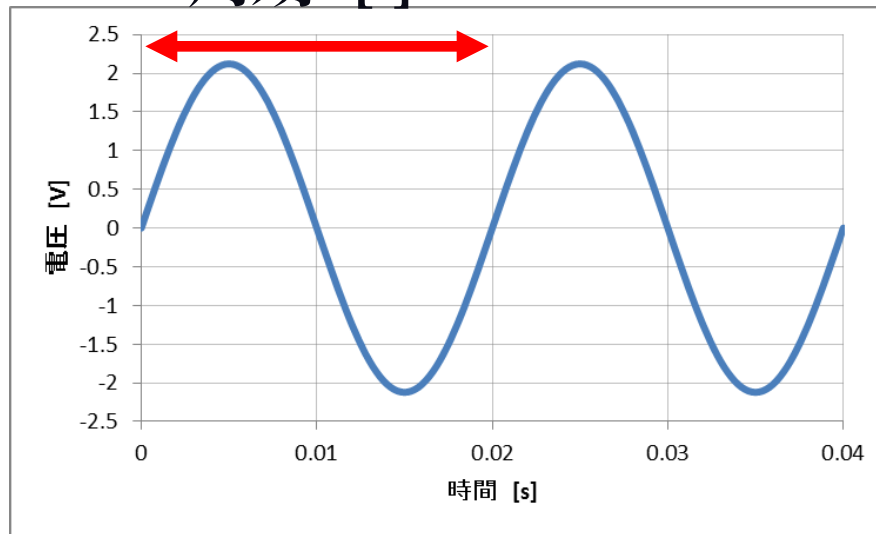


# 频率

周期 $T[s]$ 的倒数，符号是  $f$  单位是 $[Hz]$

$$\Rightarrow \text{频率 } f [Hz] = 1/T$$

周期 $T[s]$



也就是说…

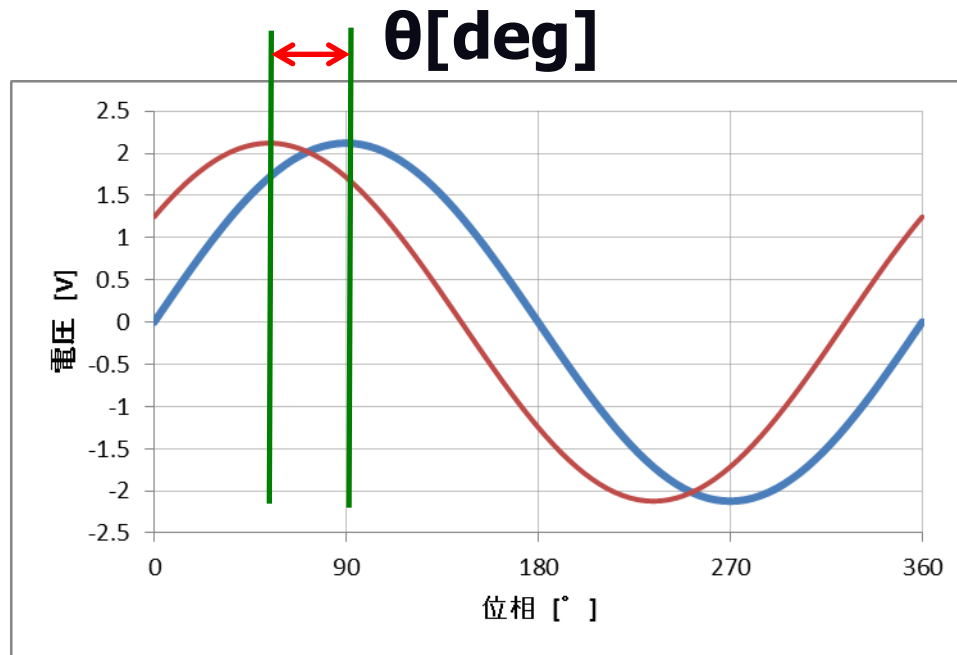
频率高→波形的变化快

频率低→波形的变化慢

# 相位

表示存在同样频率的2个交流波形的情况下，它们之间的时间差。(电压波形和电流波形的偏差)

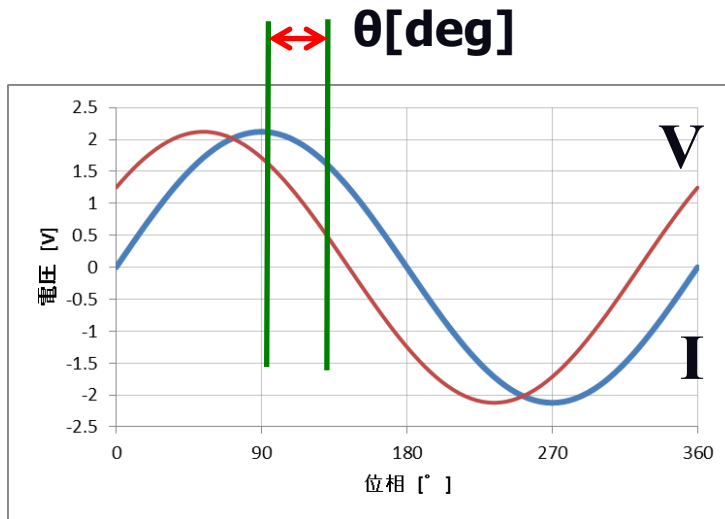
在LCR测试仪上，符号为 $\theta$  单位一般用 $[\text{°}]$ 或 $[\text{deg.}]$



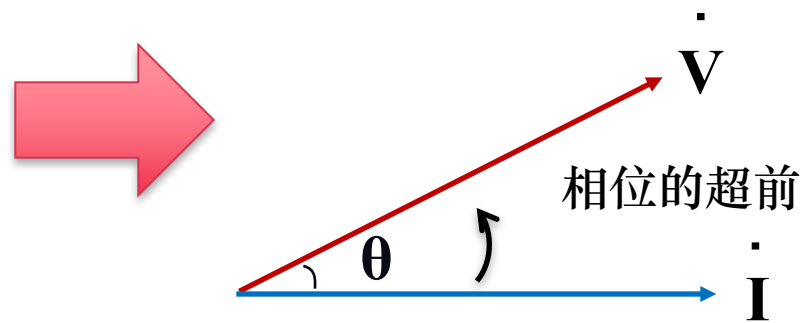
# 交流的矢量显示

相同频率的正弦波交流的大小或相位关系使用矢量显示。  
电压 (V) 相对电流 (I) 仅 $\theta$ [deg.]超前时为下图关系。

使用矢量显示时，在V或I上方加上表示矢量的点。



如果用矢量表示就是

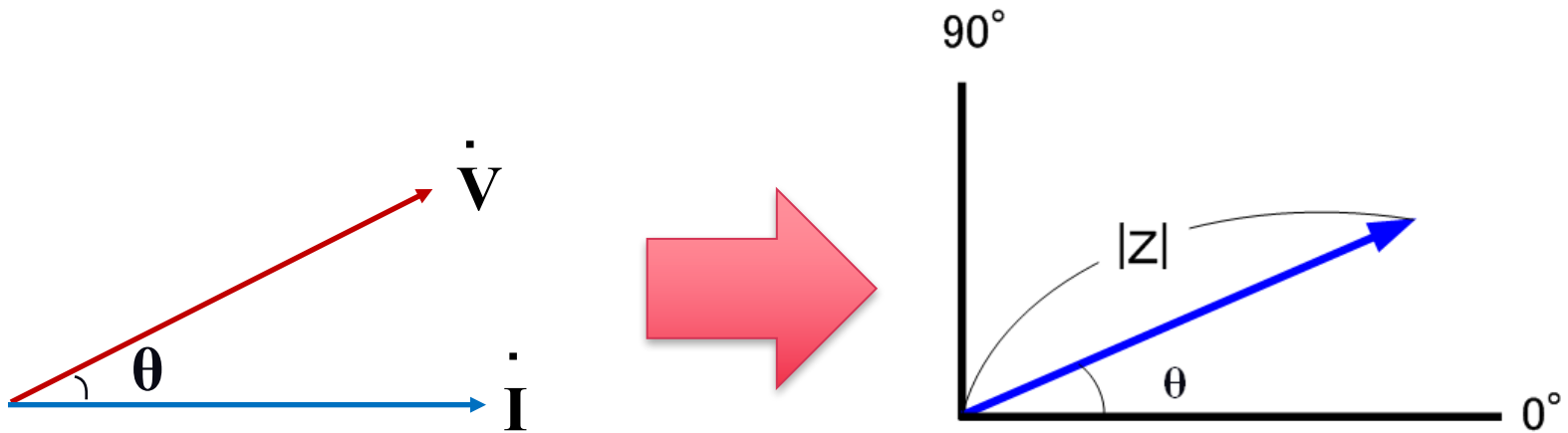




# 阻抗的矢量显示

## • 阻抗的计算

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{|V| \angle \theta_V}{|I| \angle \theta_I} = \frac{|V|}{|I|} \angle (\theta_V - \theta_I) = |Z| \angle \theta$$



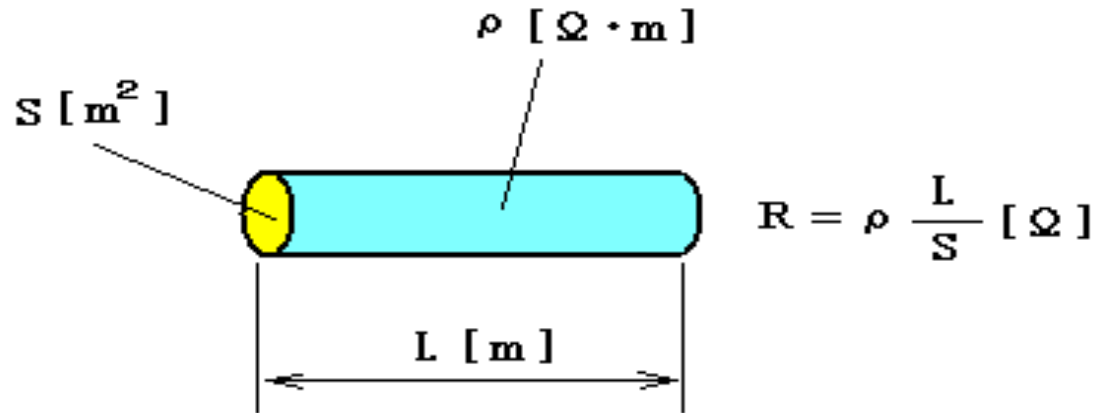
# 电阻是什么

R (电阻) 单位:  $\Omega$  (欧姆)

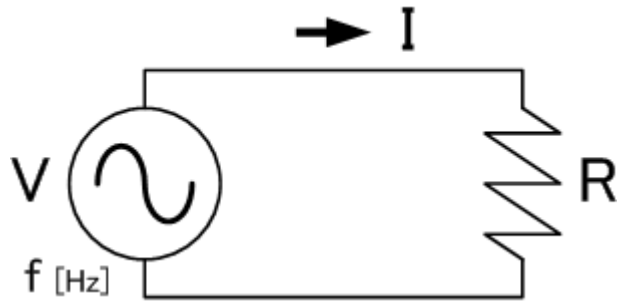
具有让电流难以流动的性质的东西

基本上来说, 不依赖于电压或频率

S:面积 L:距离  $\rho$ :电阻率

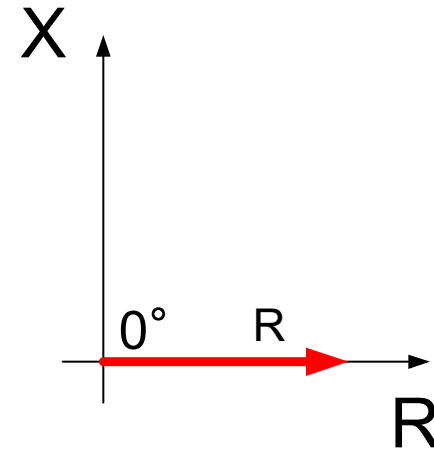
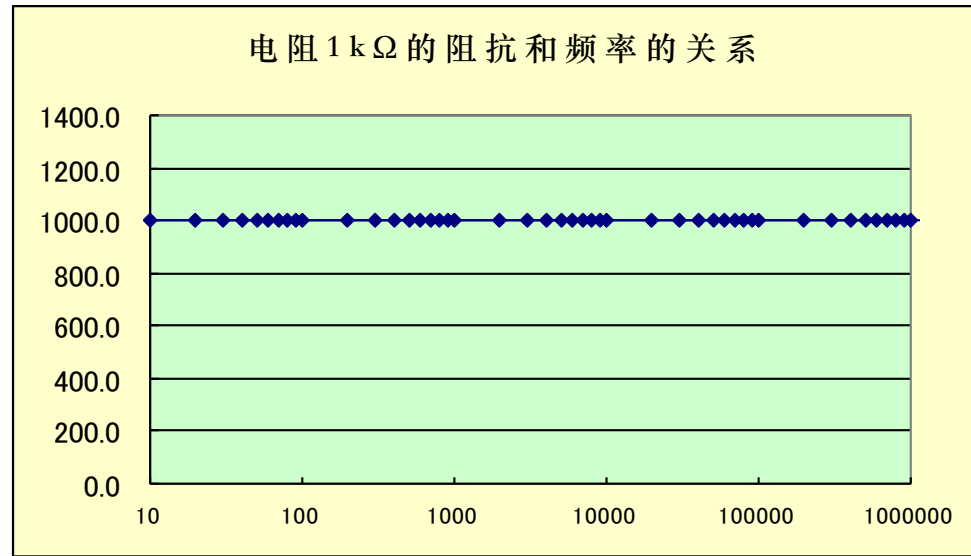


# 只有电阻的电路



在只有电阻的电路中，  
电流 $I$ 和电压 $V$ 之间  
不会产生相位差。  
两者之间的关系如下。

$$R = \frac{V}{I}$$

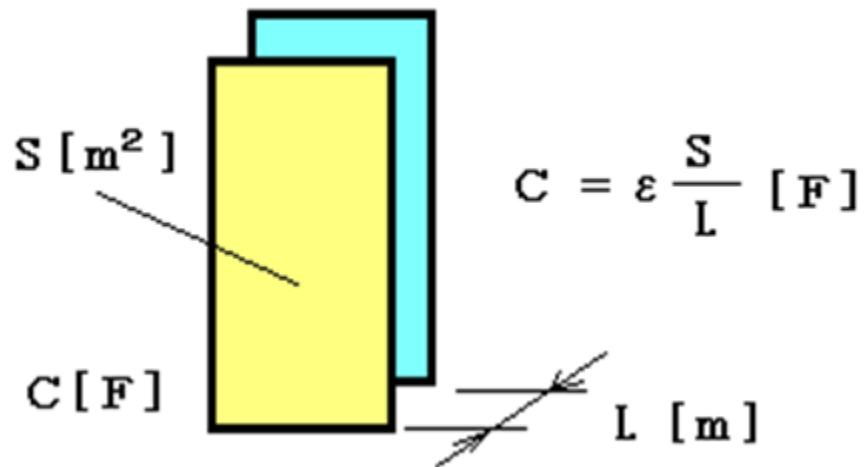


# 电容是什么

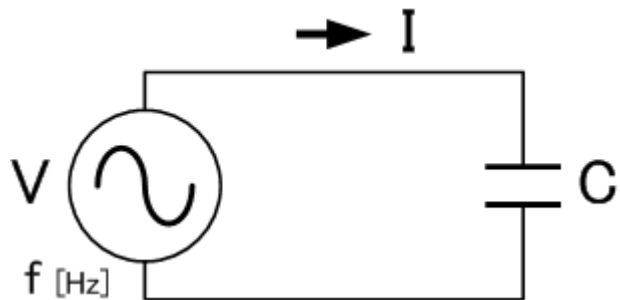
C (电容) 单位: F (法拉)

由1对夹带绝缘物的导电物组成的元件，带有积蓄电荷的性质。  
具有使高频的电流易于通过的性质。

S:面积 L:距离  $\epsilon$ :介电常数



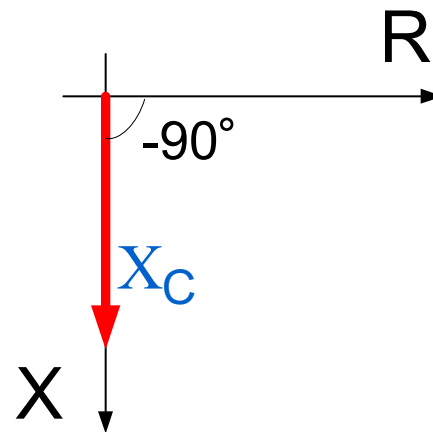
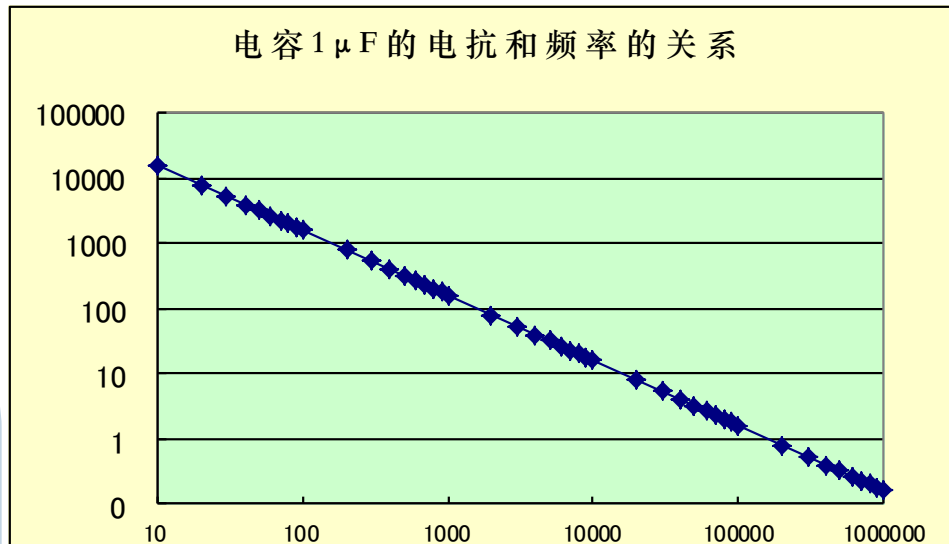
# 只有电容的电路



只有电容的电路中，电压 $V$ 相对电流 $I$ 滞后 $90^\circ$ 。

还有，电容有阻碍交流电流流动的作用，用容抗 $X_C$  [ $\Omega$ ]表示。

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega]$$

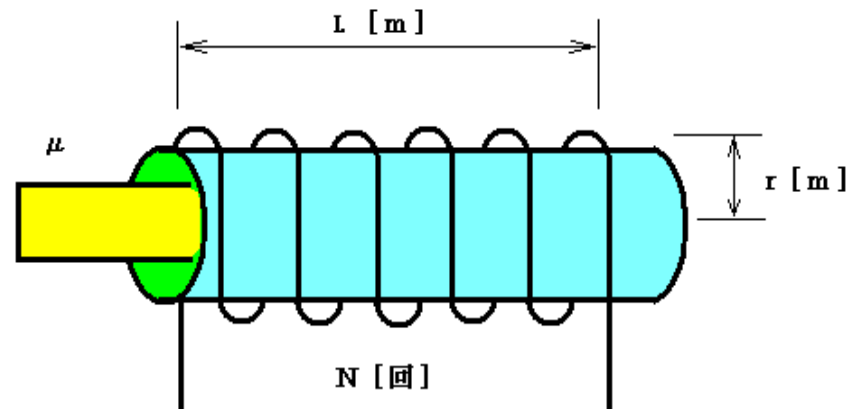


# 线圈（电感）是什么

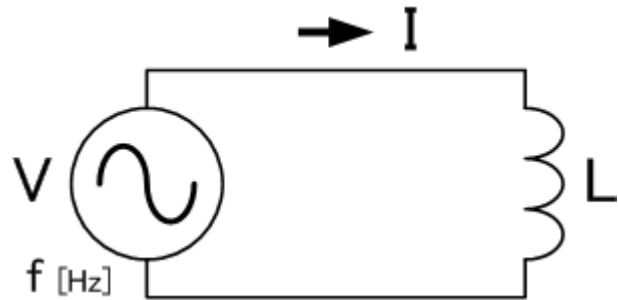
L（电感） 单位：H（亨利）  
导线卷绕的元件，带有制造磁场的性质。  
具有使高频的电流难以通过的性质。

$\mu$ : 导磁率  $r$ : 线圈的半径  $L$ : 线圈长度  
 $\lambda$ : 系数  $N$ : 圈数

$$L = \lambda \frac{\mu \pi r^2 N^2}{L} \text{ [H]}$$



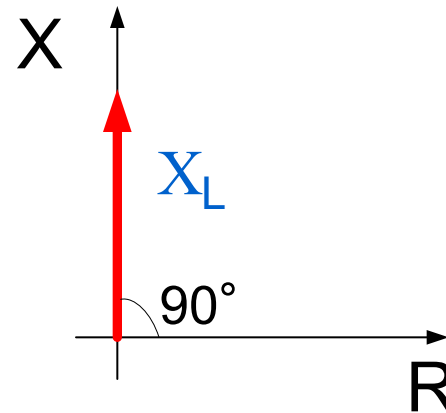
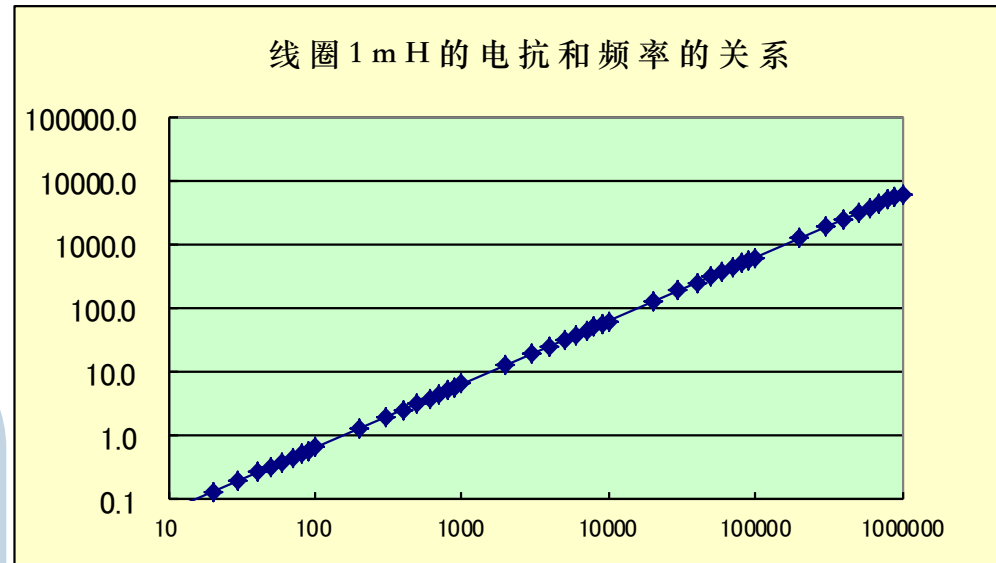
# 只有线圈（电感）的电路



只有线圈的电路中，电压 $V$ 对电流 $I$ 超前 $90^\circ$ 。

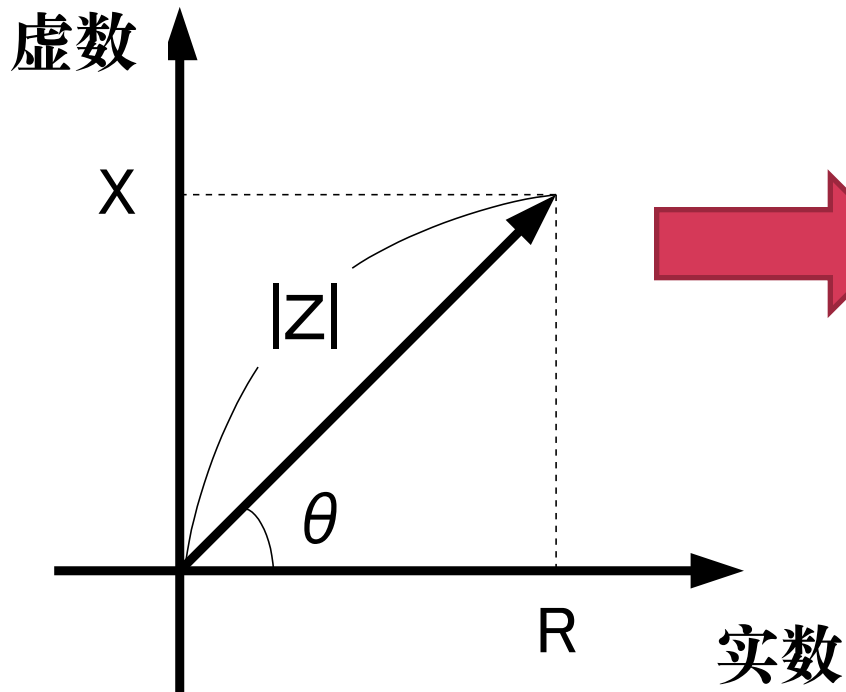
还有，线圈有阻碍交流电流的流动的作用，用感抗 $X_L$  [ $\Omega$ ]表示。

$$X_L = 2\pi fL[\Omega]$$



# 电感和电容的推导

电感L或电容C等的测量项目是根据Z和 $\theta$ 计算求出的。



- $L = X / (2\pi f)$   
 $= Z \cdot \sin \theta / (2\pi f)$
- $C = 1 / (2\pi f \cdot X)$   
 $= 1 / (2\pi f \cdot Z \cdot \sin \theta)$
- $R = Z \cdot \cos \theta$



# 关于参数Q和D

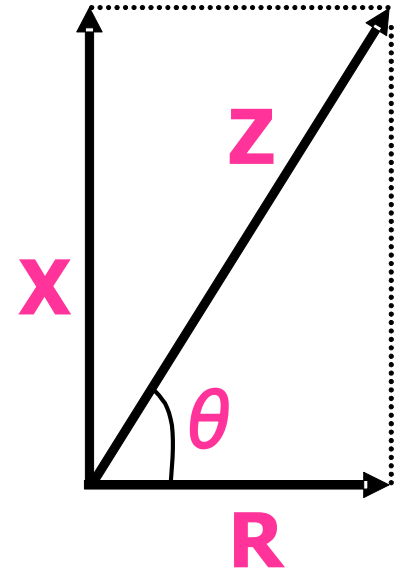
- Q(Quality factor)是表示电感纯度的数值。

- Q是电抗和电阻的比。Q值越高，说明电感的电阻成分小、纯粹

$$Q = \frac{X}{R}$$

$$Q = \frac{2\pi fL}{R} = \tan \theta$$

- 电容则测量损耗系数D(D=1/Q)



# 关于阻抗 总结

	相位差 $\theta$	电抗X	基于Z、 $\theta$ 的计算公式
R	无	$0[\Omega]$	$Z \cdot \cos\theta$
C	V相对I $90^\circ$ 滞后	$X_C = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega]$	$1 / (2\pi f \cdot Z \cdot \sin\theta)$
L	V相对I $90^\circ$ 超前	$X_L = 2\pi f L [\Omega]$	$Z \cdot \sin\theta / (2\pi f)$

# 测量方法

- 电桥法
- I-V法
- 自动平衡电桥法
- RF I-V法

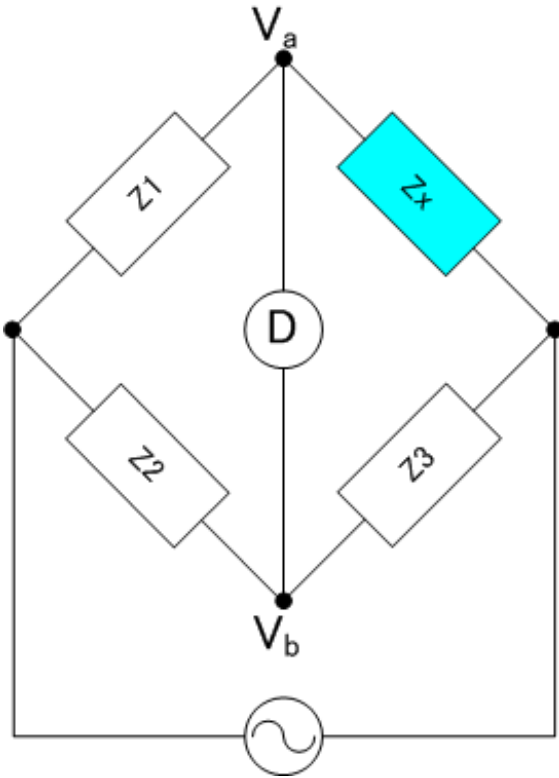
# 电桥法

- 调整 $Z_1 \sim Z_3$ ，  
不让电流流过电流计D

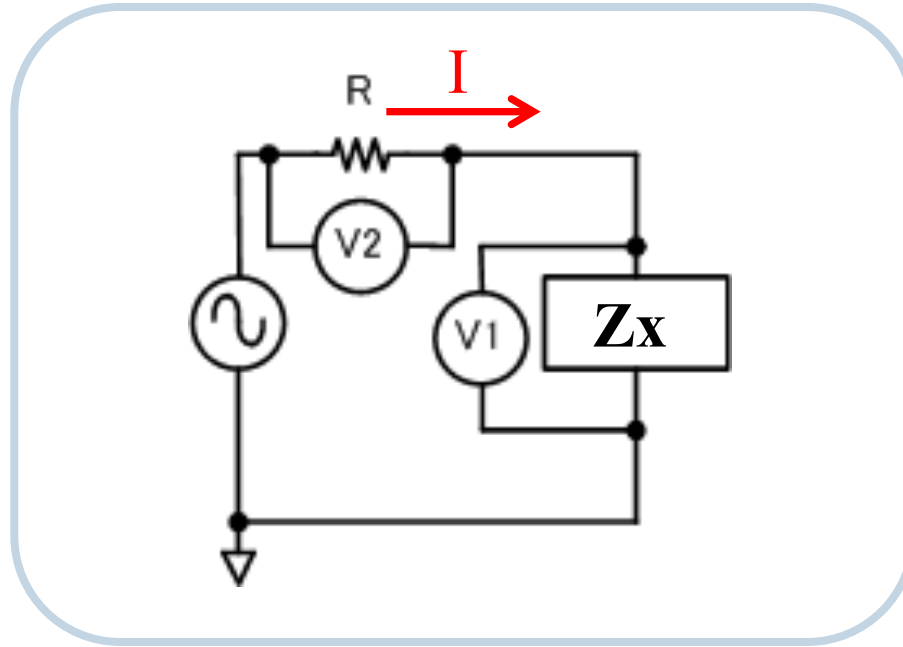
$$V_a = V_b \rightarrow \frac{Z_x}{Z_1} = \frac{Z_3}{Z_2}$$

- 未知的阻抗 $Z_x$ 通过下述公式求出。

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



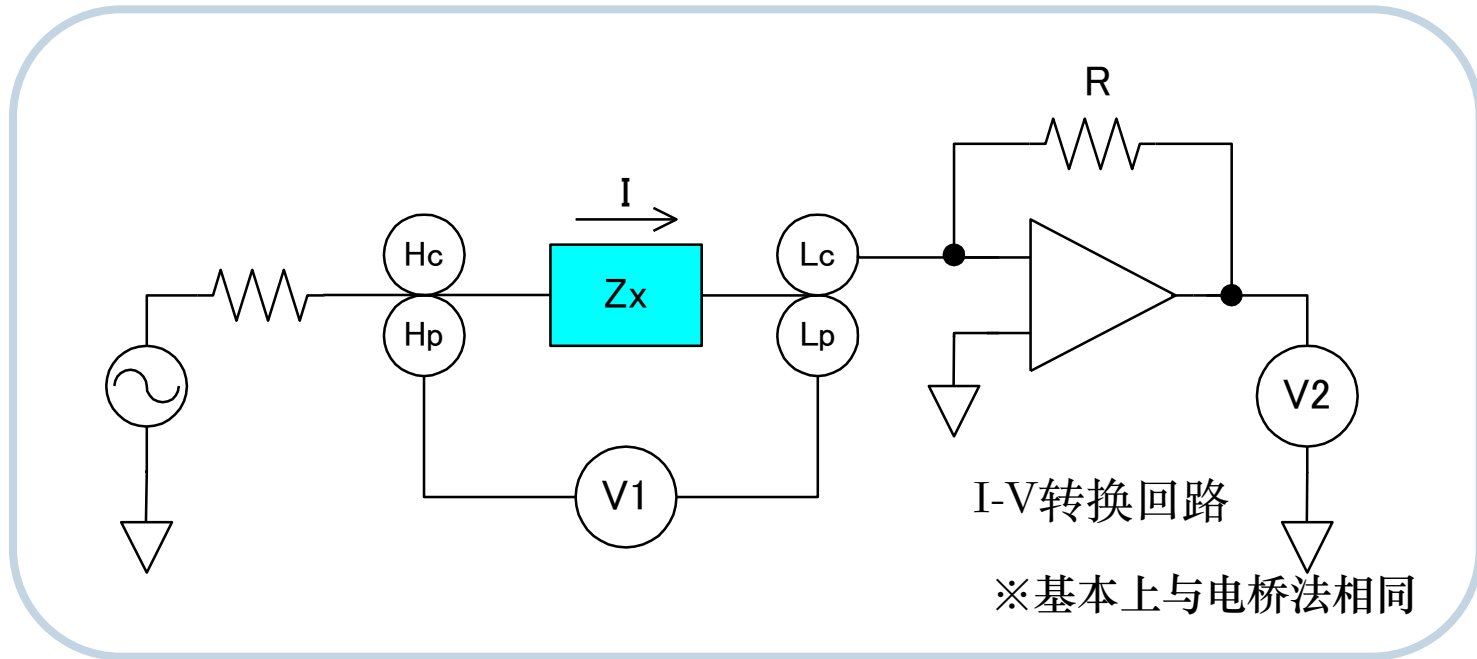
# I-V法



- 根据测量到的电压和电流求出阻抗
- 通过测量已知的电阻R的两端电压，计算求出电流。

$$Z_x = \frac{V1}{I} = V1 \frac{R}{V2}$$

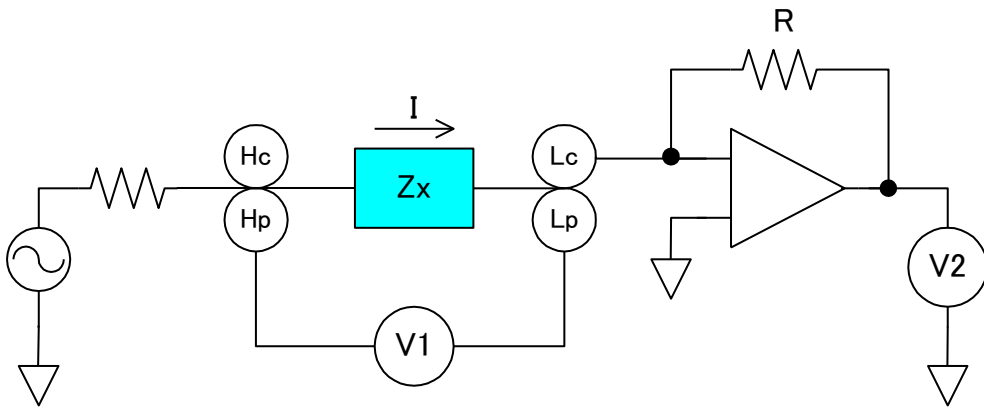
# 自动平衡电桥法



- I-V转换电路工作，使Lc端子为0V（平衡）。
- 检测被测物Z<sub>x</sub>两端的电压V1和流过Z<sub>x</sub>的电流I。

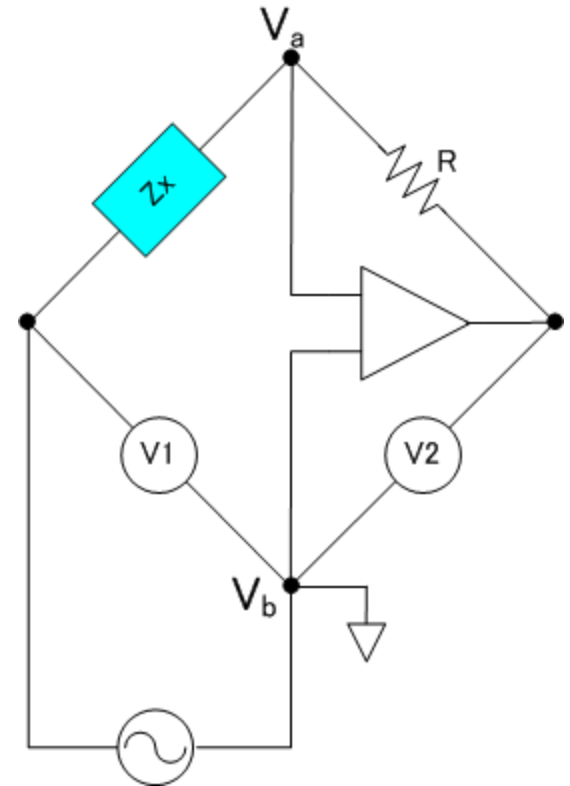
$$Z_x = \frac{V_1}{I} = V_1 \frac{R}{V_2}$$

# 自动平衡电桥法



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

- 实际上与电桥法原理相同



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

# 自动平衡电桥法

## 优点

- 覆盖广范围的频率 (1mHz~100MHz)
- 阻抗测量范围广

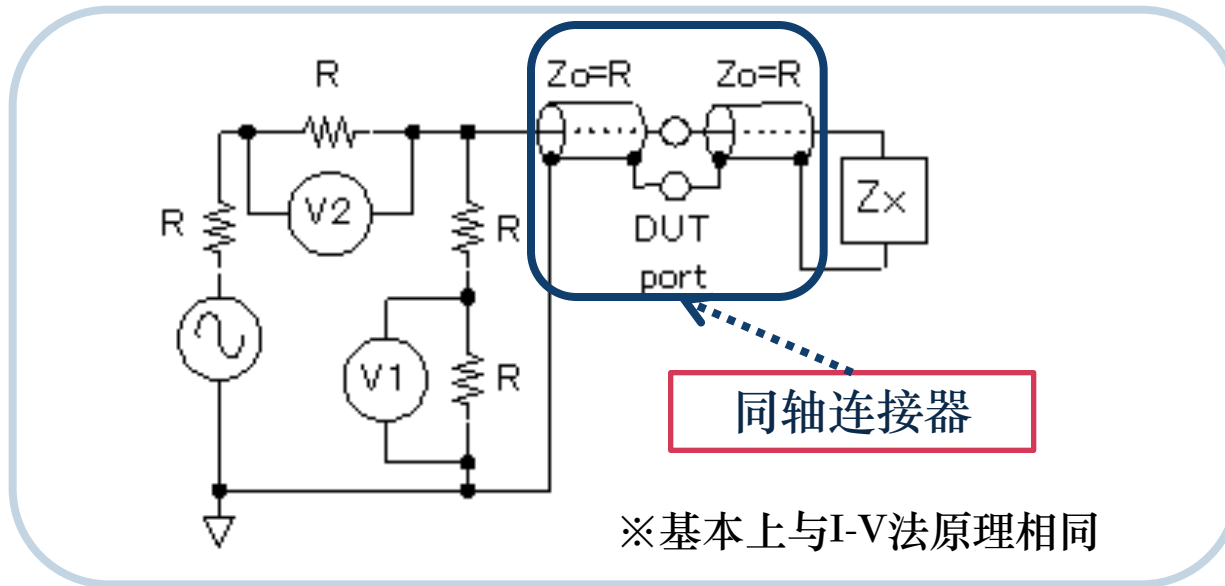
## 缺点

- 无法覆盖到高频
- 超过几MHz的频率, 需要复杂的I-V转换电路

⇒作为进一步测量高频的方法 . . .



# RF-IV法



- 测量被测物 $Z_x$ 的两端的电压 $V1$ 和流过 $Z_x$ 的电流（电流检测电阻的两端电压 $V2$ ）
- 通过匹配高频同轴的特性阻抗的回路和高频同轴连接器的使用，能够进行高频阻抗的测量

# RF-IV法

## 优点

- 能够以高精度（1%左右）且在高频下，用广范围阻抗量程进行测量（与网络分析仪相比）

## 缺点

- 测量带宽受限于测试头内的变压器，因此很难宽频化

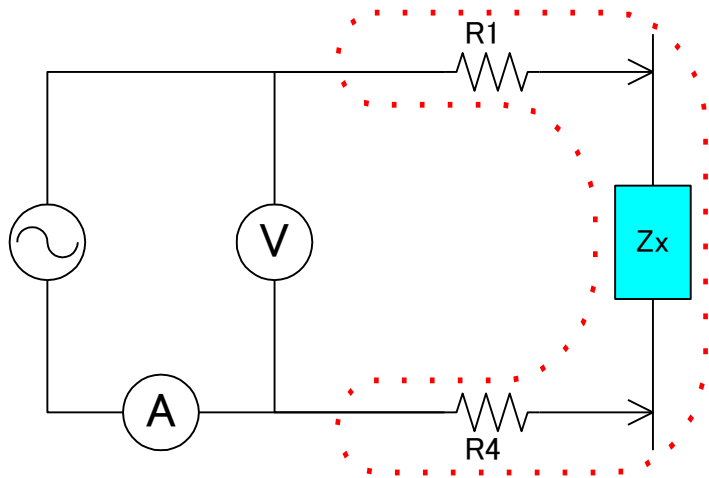
# 测量方法的总结

测量方法	优点	缺点
电桥法	高精度（0.1%程度）	不适合高速化
I-V法	接地的被测物也可测量	根据阻抗的大小受到电压计的影响
自动平衡电桥法	覆盖宽频（1mHz ~ 100MHz） 阻抗测量范围广 ※大多数的LCR测试仪采用	无法覆盖到高频 超过几MHz的频率下，需要复杂的I-V转换回路
RF I-V法	可以以高精度（1%左右）且在高频下，用广范围的阻抗测量量程进行测量。（与网络分析仪相比） ※高频LCR测试仪采用	测量带宽受限于测试头内的变压器，因此很难宽频化

# 2端子法 4端子法

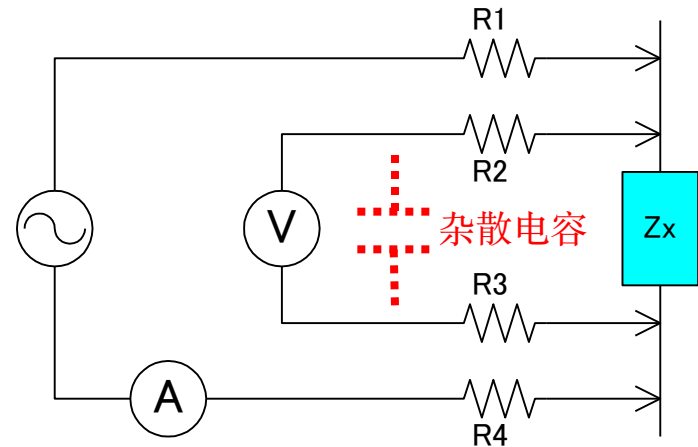
## 2端子法

- 测量值为  $Z_x + R_1 + R_4$
- $R_1, R_4$ : 电缆或接触电阻
- $Z_x$ 为低阻抗时误差大



## 4端子法

- 电压计阻抗大
- 测量值为  $Z_x$
- $Z_x$ 为低阻抗时很有效
- 有可能会受到电缆间杂散电容的影响



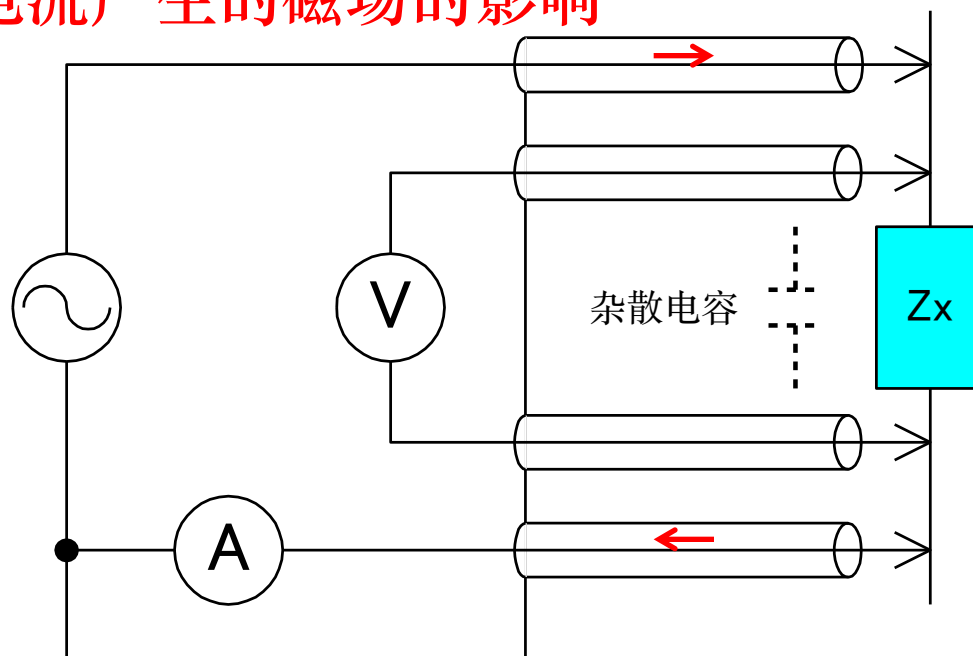
# 5端子法

## 使用屏蔽线



可以减少杂散电容的影响，减少从低阻抗到高阻抗的测量误差

受到测量电流产生的磁场的影响

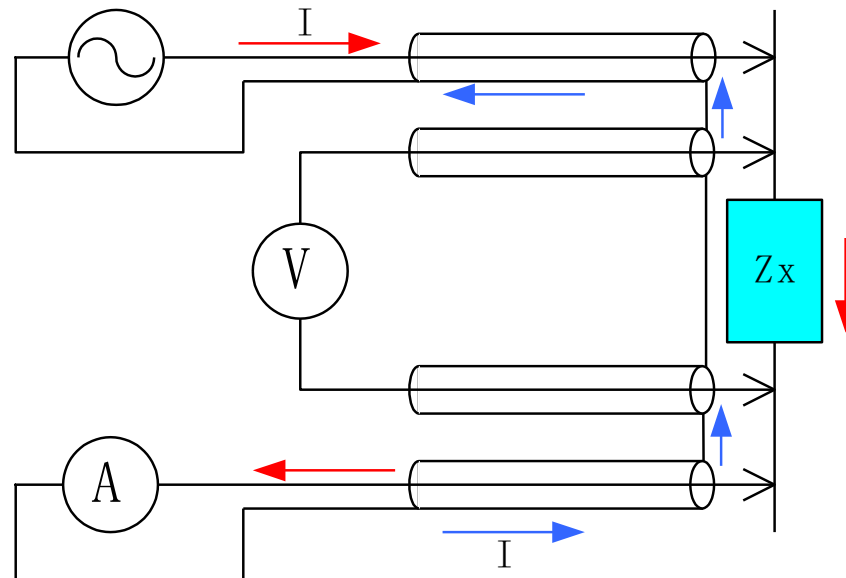


# 4端子对法

利用电缆的屏蔽，  
重叠电流的去路和回路



可以减少测量电流产生的磁场的影响，减少从低阻抗到高阻抗的测量误差



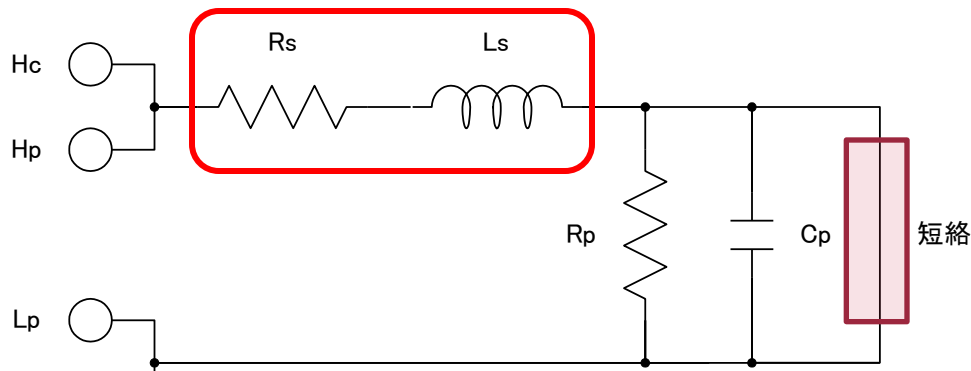
# 测试线的连接方法 (总结)

连接方法	优点	缺点
2端子法	简单·便宜	包含了电缆电阻、接触电阻，因此不适合低阻抗测量
4端子法	不受电缆电阻、接触电阻的影响	会受到电缆之间的杂散电容的影响
5端子法	减少杂散电容的影响 减少从低阻抗到高阻抗的测量误差	会受到测量电流产生的磁场的影响 ※可通过将电流路径的电缆做成绞线来减少影响
4端子对法	减少测量电流产生的磁场的影响 减少从低阻抗到高阻抗的测量误差 ※LCR测试仪一般是4端子对构造	需要连接电缆的屏蔽，制作返回路径

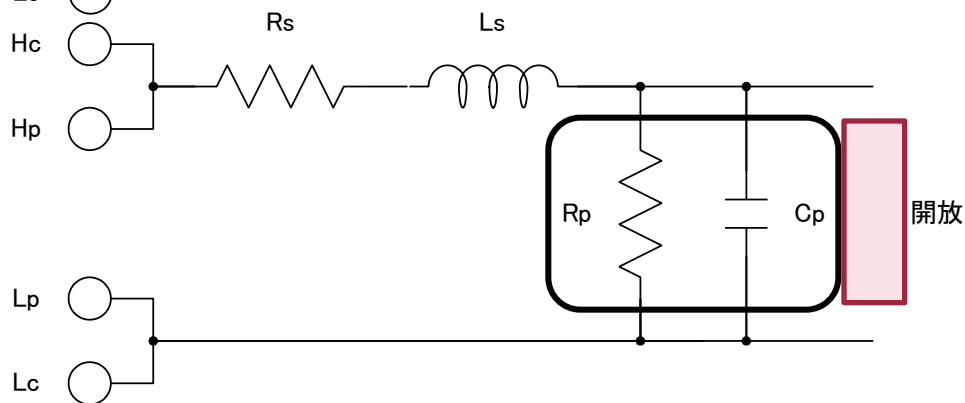
# 残余阻抗的补偿

通过短路补偿·开路补偿，补偿电缆的阻抗或探头之间的杂散电容。

短路补偿  
(阻抗为0)



开路补偿  
(阻抗为 $\infty$ )

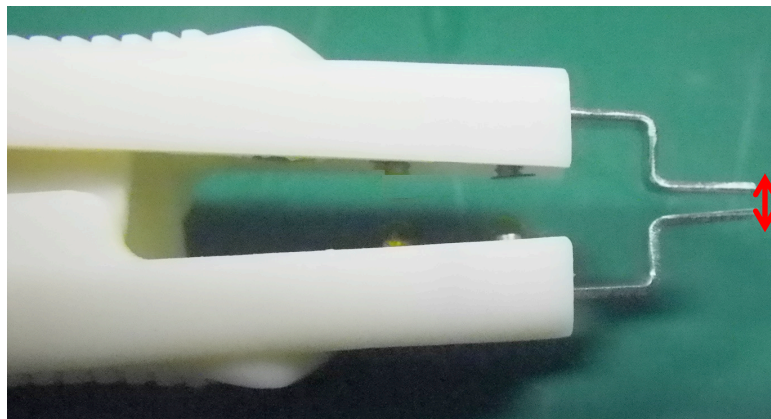
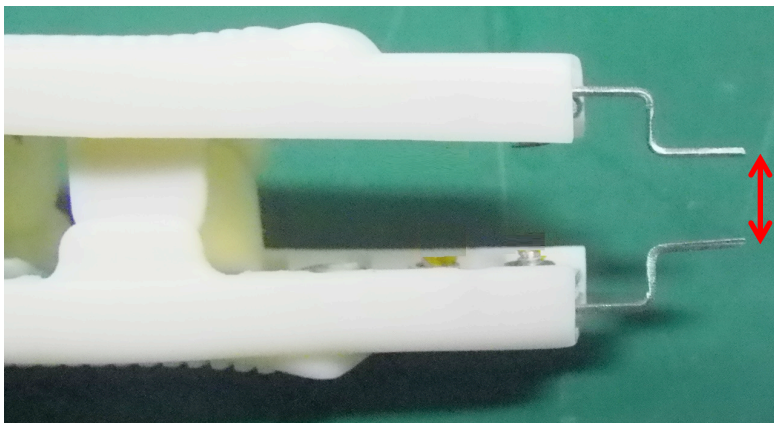


请务必让电缆在与实际测量时相同的状态下执行补偿。



# 开路补偿的影响示例

镊子型探头前端的宽度的差别导致产生0.3pF杂散电容的差别  
根据实际的被测物的宽度进行补偿是非常重要的



LCR USB

Cp **0.2386pF**

OFF

OFF

OFF

Vac 978.9mV  
Iac 1.478μA

INFORMATION 1/2

FREQ	1.0000MHz	SPEED	MED	OPEN	OFF
V	1.000V	TRIG	INT	SHORT	OFF
LIMIT	OFF	AVG	OFF	LOAD	OFF
RANGE	AUTO 1MΩ	DELAY	0.0000s	CABLE	0m
LOW Z	OFF	DCBIAS	OFF	SCALE	OFF
JUDGE	OFF				

2014-03-14 08:03:39

LCR USB

Cp **0.5502pF**

OFF

OFF

OFF

Vac 978.8mV  
Iac 3.413μA

INFORMATION 1/2

FREQ	1.0000MHz	SPEED	MED	OPEN	OFF
V	1.000V	TRIG	INT	SHORT	OFF
LIMIT	OFF	AVG	OFF	LOAD	OFF
RANGE	AUTO 1MΩ	DELAY	0.0000s	CABLE	0m
LOW Z	OFF	DCBIAS	OFF	SCALE	OFF
JUDGE	OFF				

2014-03-14 08:04:10

# 测量条件的设置

## 测量频率的选择、测量信号电平的选择

- 符合厂家规定的条件
- 符合实际回路的工作条件

有一些元器件根据测量条件不同，测量结果会变化，因此统一条件是很重要的

# 测量条件的设置

- JIS C5101规定了电容器的测量条件

电容器的种类	电容范围	测量频率	支持机型
除电解电容器以外的电容器	1000pF以下	100kHz, 1MHz, 10MHz (1MHz基准)	3506-10
	超过1000pF 10 $\mu$ F以下	1kHz或10kHz (1kHz基准)	3504-40
	超过10 $\mu$ F	50Hz (60Hz) 或 100Hz (120Hz)	3504-50 3504-60
电解电容器	-	100Hz ~ 120Hz	3511-50 IM3523

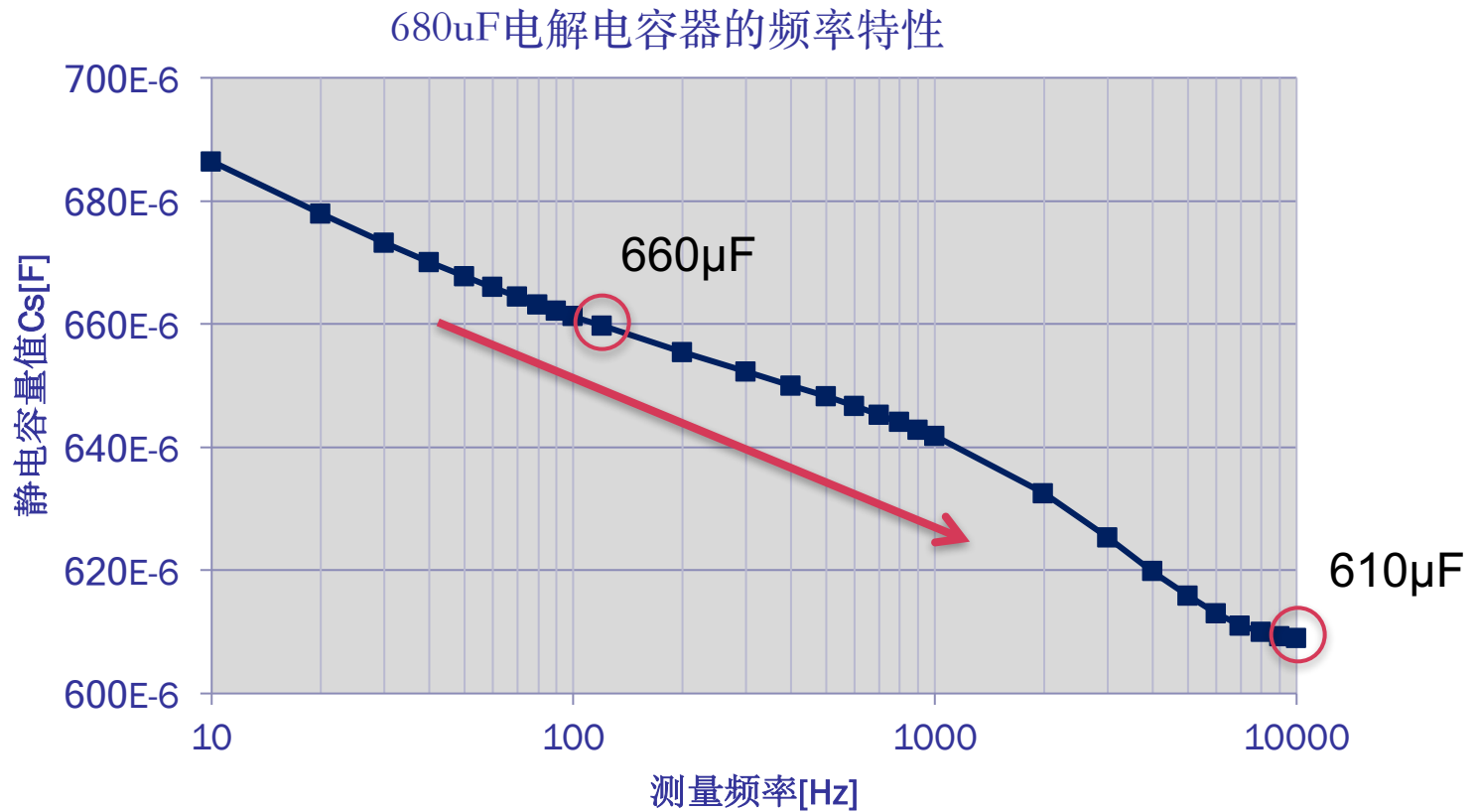
【参考】  
NICHICON株式会社  
铝电解电容器数据表

## ■技术参数

项 目	
分类温度范围	-55~+105 $^{\circ}$ C
额定电压范围	4~50V
额定静电容量范围	0.1~1500 $\mu$ F
额定静电容量容差	$\pm$ 20% (120Hz, 20 $^{\circ}$ C)

# 测量条件的设置

- 额定容量680 $\mu$ F电解电容器的频率特性



# 测量条件的设置

## JIS C5101-22表面贴装用固定磁电容器种类2 (高介电常数)

额定静电容量	额定电压	测量频率	测量电压
$C \leq 100\text{pF}$	全部	1MHz	$1.0 \pm 0.2\text{Vrms}$
$100\text{pF} < C \leq 10\mu\text{F}$	超过6.3V	1kHz	$1.0 \pm 0.2\text{Vrms}$
	6.3V以下	1kHz	$0.5 \pm 0.2\text{Vrms}$
$C > 10\mu\text{F}$	全部	100Hz 或 120Hz	$0.5 \pm 0.2\text{Vrms}$

### 测量条件

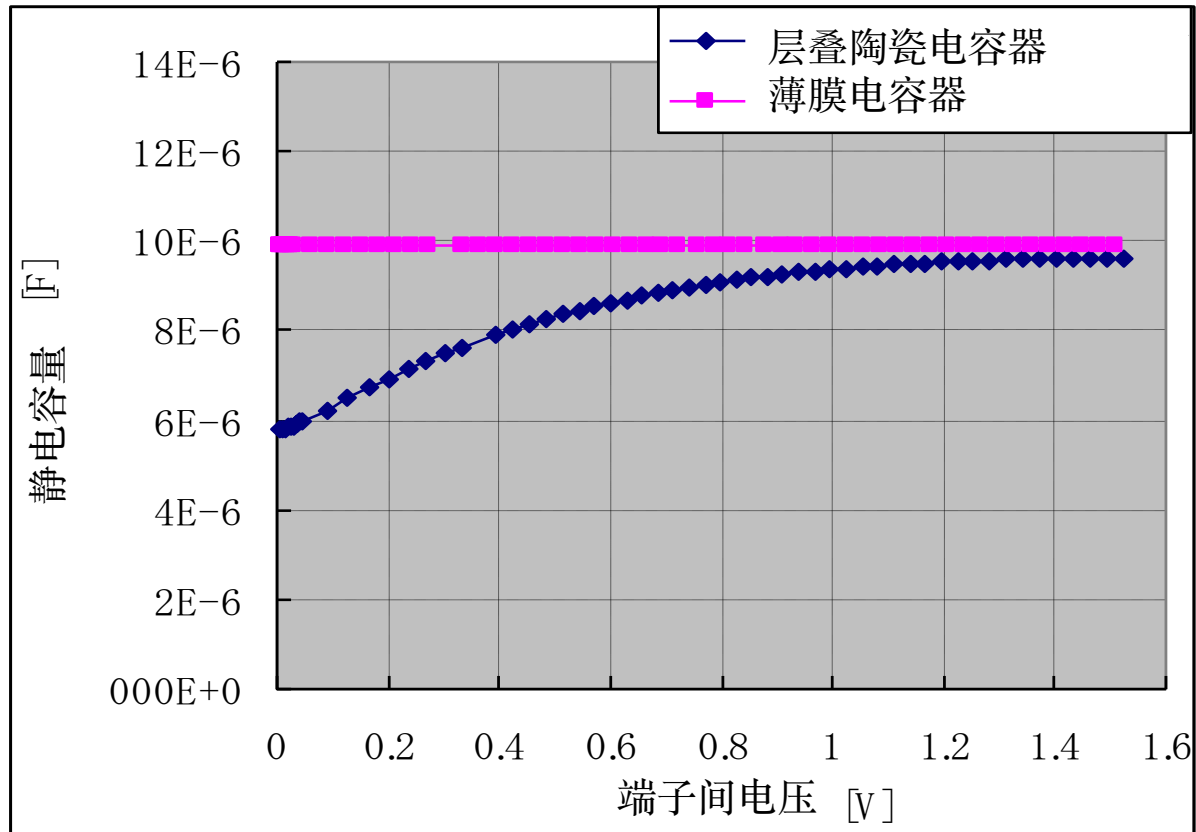
公称静电容量	测量频率	测量电压
*1 $C \leq 10\mu\text{F}$ (10V 以上)	$1 \pm 0.1\text{kHz}$	$1.0 \pm 0.2\text{Vrms}$
$C \leq 10\mu\text{F}$ (6.3V 以下)	$1 \pm 0.1\text{kHz}$	$0.5 \pm 0.1\text{Vrms}$
$C > 10\mu\text{F}$	$120 \pm 24\text{Hz}$	$0.5 \pm 0.1\text{Vrms}$

#### 【参考】

村田制作所  
片式多层陶瓷电容器数据表

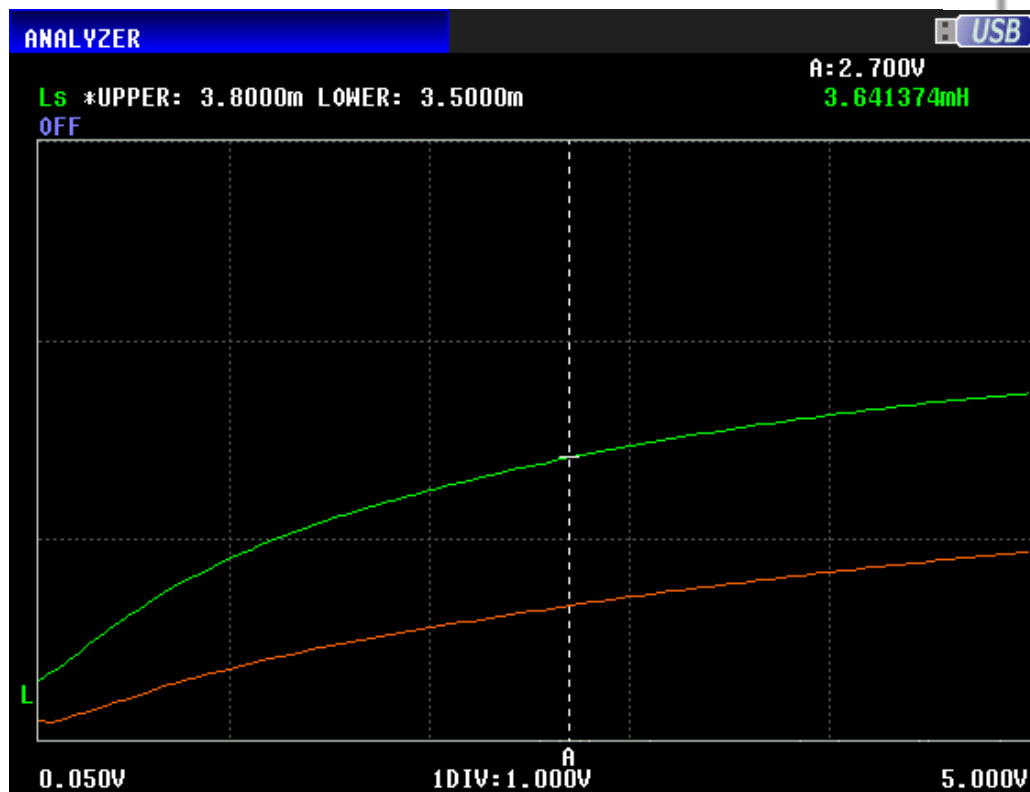
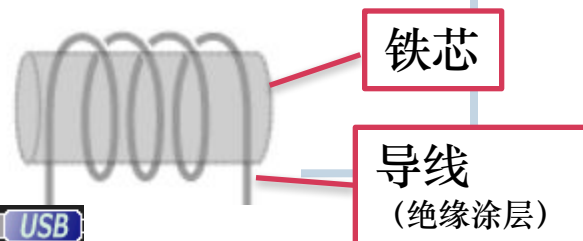
# 测量条件的设置

- 高介电常数（种类2）的陶瓷电容器具有电压依赖性



# 测量条件的设置

- 铁芯电感（线圈）具有电流依赖性
- 根据测量电流，L值不同



线圈1kHz和100kHz的电平特性（IM3570测量）

# 测量条件的设置

## ■ 电气的特性

### □ 特性规格表

【参考】  
TDK电源电路用电感器数据表

L ( $\mu\text{H}$ )	容差	测量频率 (kHz)	直流电阻 ( $\Omega$ )		额定电流 (A)*	
			max.	typ.	ldc1	ldc2
1.3	$\pm 30\%$	100	0.022	0.019	2.56	4.32
1.8	$\pm 30\%$	100	0.028	0.023	2.22	3.88
2.7	$\pm 30\%$	100	0.033	0.028	1.82	3.53
3.3	$\pm 30\%$	100	0.037	0.032	1.74	3.26

如果数据表上没有记载测量信号电平相关，则需要向厂家确认。

电感没有记载的情况有很多。

注意测量频率、测量信号的大小（电压、电流）这类的测量条件

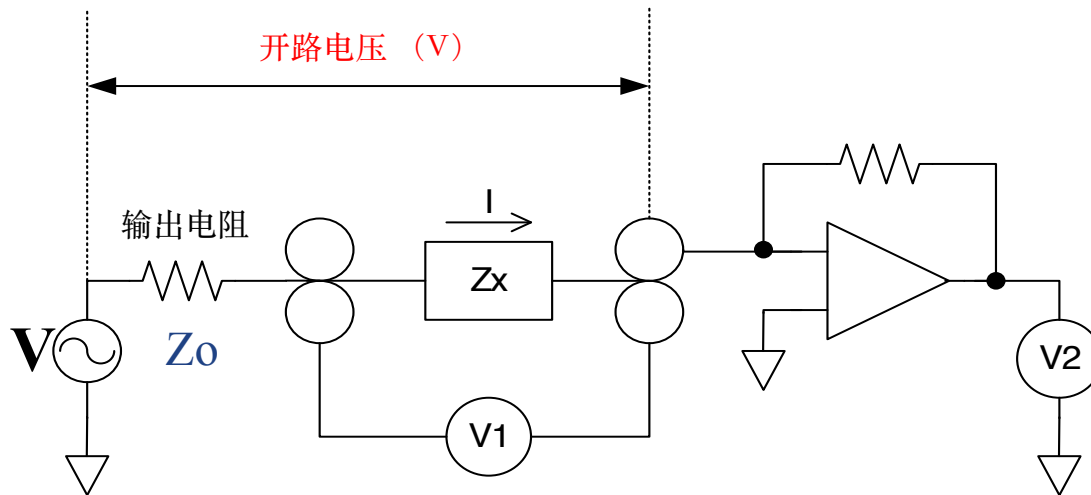


# 测量信号电平的设置

测量信号电平的设置有 3 种类型

- 开路电压设置 (V设置)
- 恒电压设置 (CV设置)
- 恒电流设置 (CC设置)

# 测量信号电平的设置



开路电压设置 (V) : 设置开路电压电平

※根据输出电阻, 施加的电压·电流不同

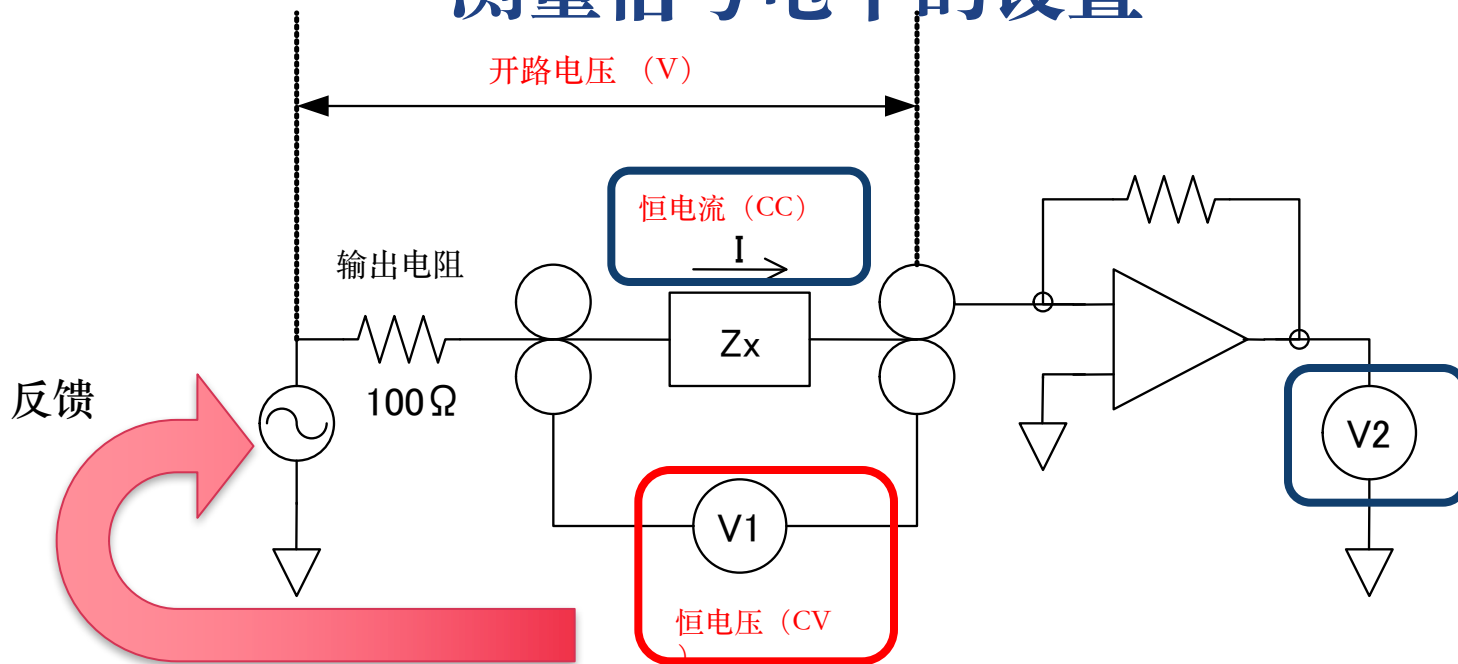
$$V1 = \frac{Zx}{Zo + Zx} V$$

有因为测量仪器而输出电阻不同的情况

→即使设置相同, 实际施加在被测物上的电压、电流也不相同!

⇒ 因此 . . .

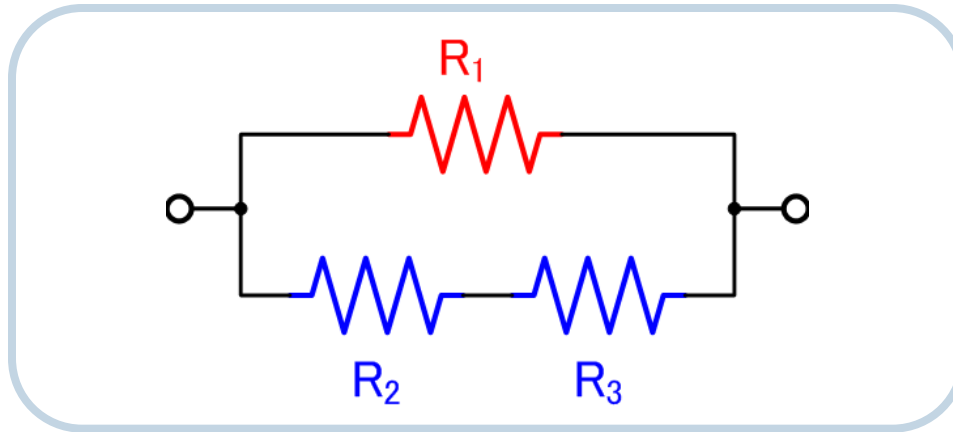
# 测量信号电平的设置



- 恒电压设置 (CV) : 设置被测物端子之间的电压电平  
→ 测量高介电常数的MLCC等具有电压依赖性的元件时  
※用软件控制发生部分让V1(电压) 达到设定值
- 恒电流设置 (CC) : 设置流过被测物的电流电平  
→ 测量铁芯电感等具有电流依赖性的元件时  
※用软件控制发生部分让I(电流) 达到设定值

# 复合元件的测量

例如、如果用LCR测试仪测量这样的元件，

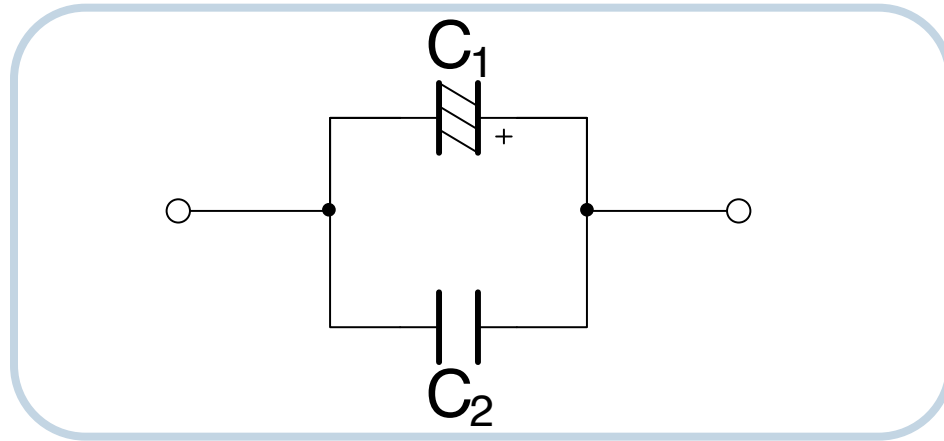


则得到的测量值为 
$$\frac{R_1 \times (R_2 + R_3)}{R_1 + (R_2 + R_3)}$$

无法只分离R1进行测量

# 复合元件的测量

同样的，如果用LCR测试仪测量这样的元件



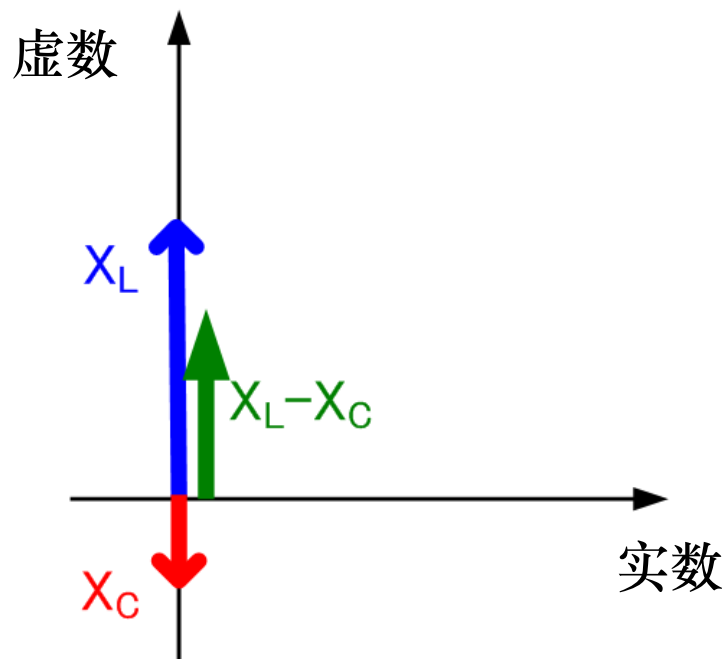
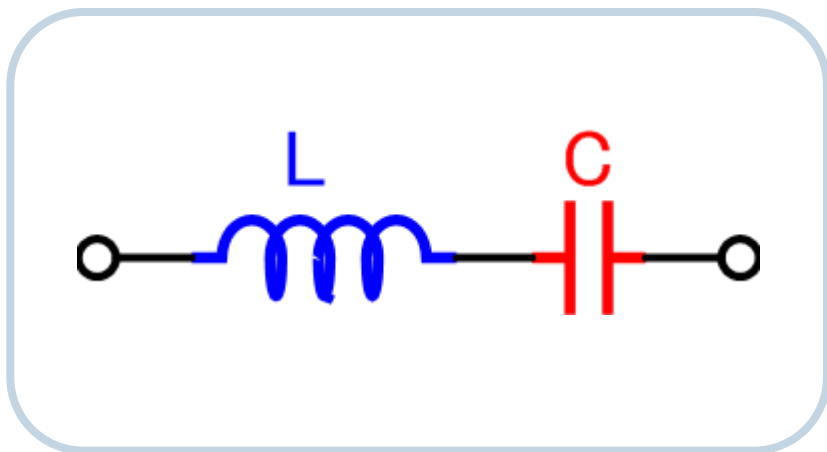
则得到的测量值为

$$C_1 + C_2$$

无法只分离C1进行测量

# 复合元件的测量

那么，如果用LCR测试仪测量这样的元件

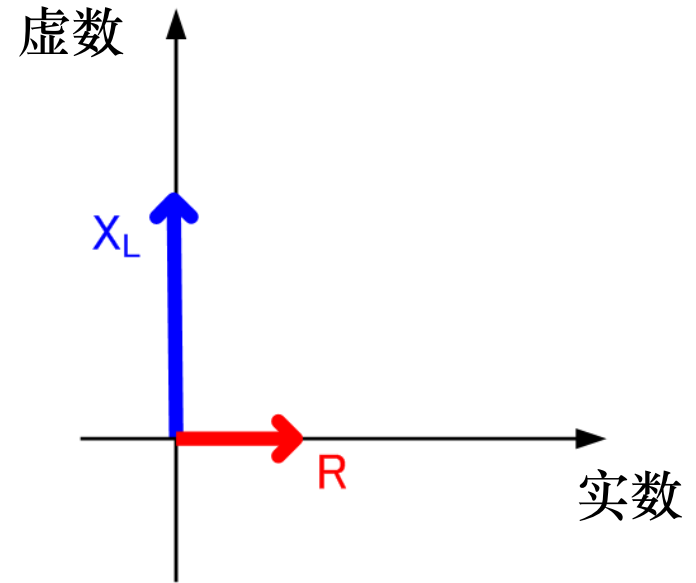
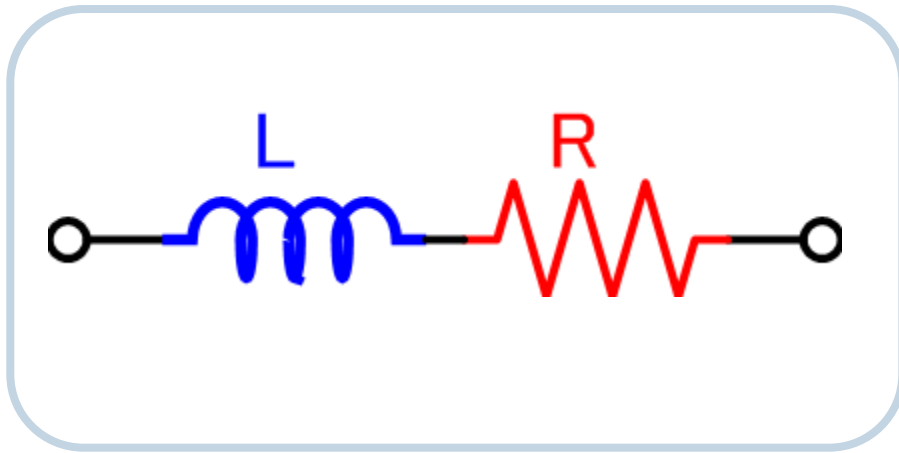


- 测量值为 $X_L - X_C$

( $X_L$ : L的电抗  $X_C$ : C的电抗)

因为两者都是虚数成分，因此无法分离 $X_L$ と $X_C$ 进行测量。

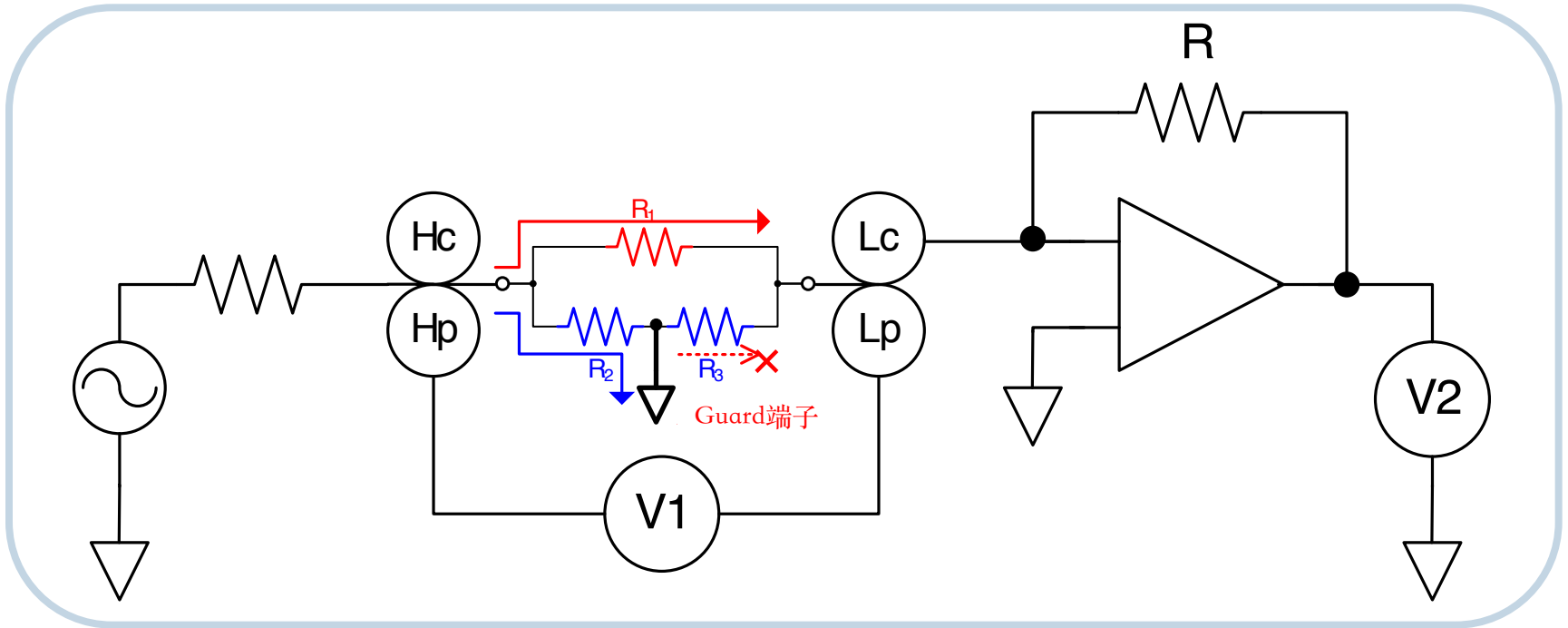
# 复合元件的测量



可以分离L和R进行测量。

L是虚数成分、R是实数成分，因此可以分离。

# 复合元件的测量



- 如果像图中一样连接guard端子，就可以测量 $R_1$

$R_2$ 电流被guard端子吸收

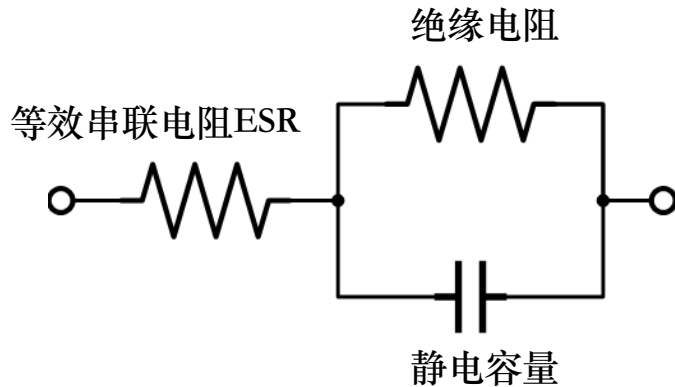
$R_3$ 电流不流过

※ $R_1 \gg R_2$ 、 $R_2 \neq 0$ 时，测量精度不会提高



# 等效电路

一般的电容器的等效电路如下



等效串联电阻：电解质、电极等的电阻  
(阻抗小)

绝缘电阻：泄漏电流引起的电阻  
(阻抗大)

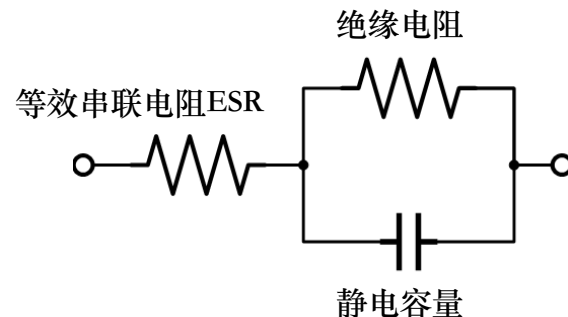
可将等效串联电阻和静电容量、绝缘电阻和静电容量分离进行测量


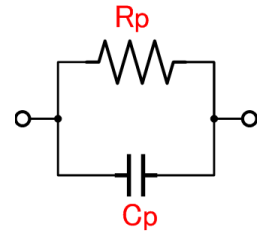
等效串联电阻和绝缘电阻无法分离。

根据串联电阻和绝缘电阻其中影响大的一方改变测量方法

# 等效电路

## 等效电路的选法

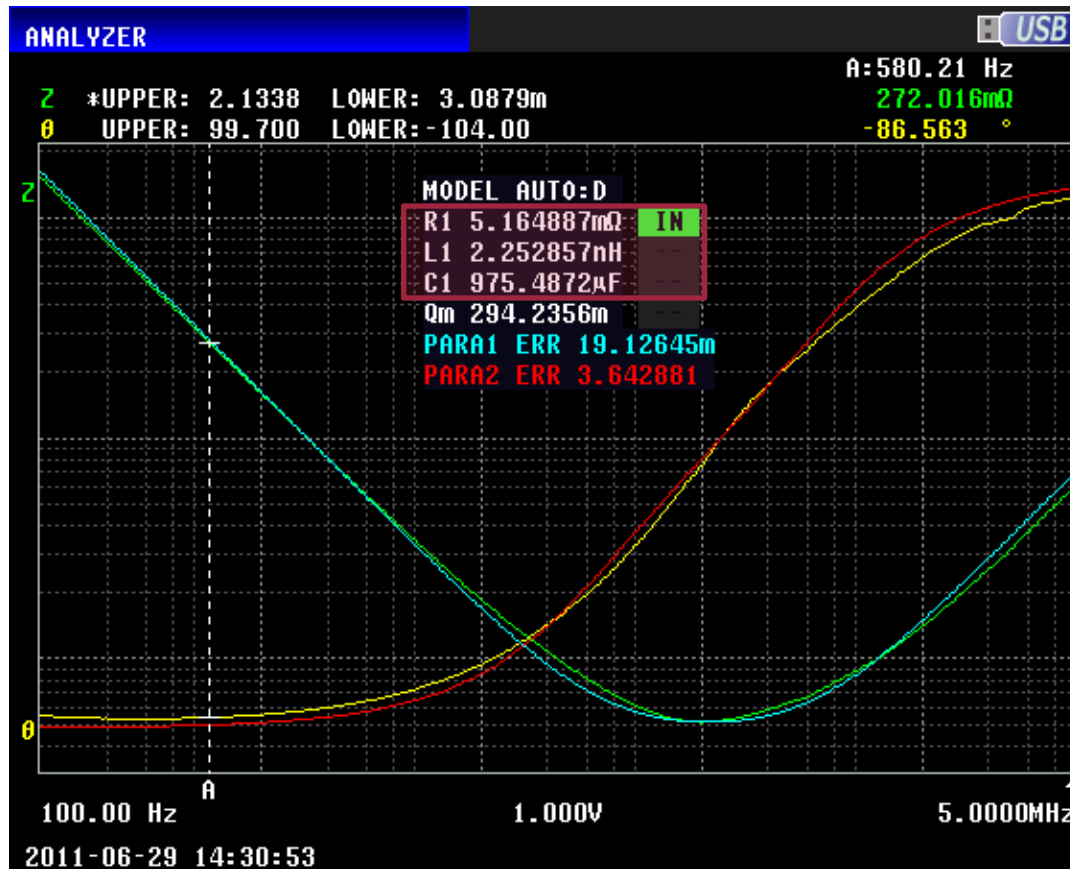


电容器 静电容量	电容器的 阻抗	对测量值 影响大的成分	已考虑了影响的 等效电路
大	小	等效串联电阻	 <p>串联等效电路</p>
小	大	绝缘电阻	 <p>并联等效电路</p>

选择将对想要测量的对象（电容器）影响较大的成分考虑在内的等效电路。  
也有由于频率关系影响的要素改变的情况。

# 等效电路分析功能的活用

扫描测量频率，通过等效电路分析  
分离各参数进行测量。



导电聚合物电容器  
等效电路模型

# 测量时的注意事项

实际测量时会有各种各样的要素影响测量值。

测量仪器的设置

外来干扰

测量对象的特性

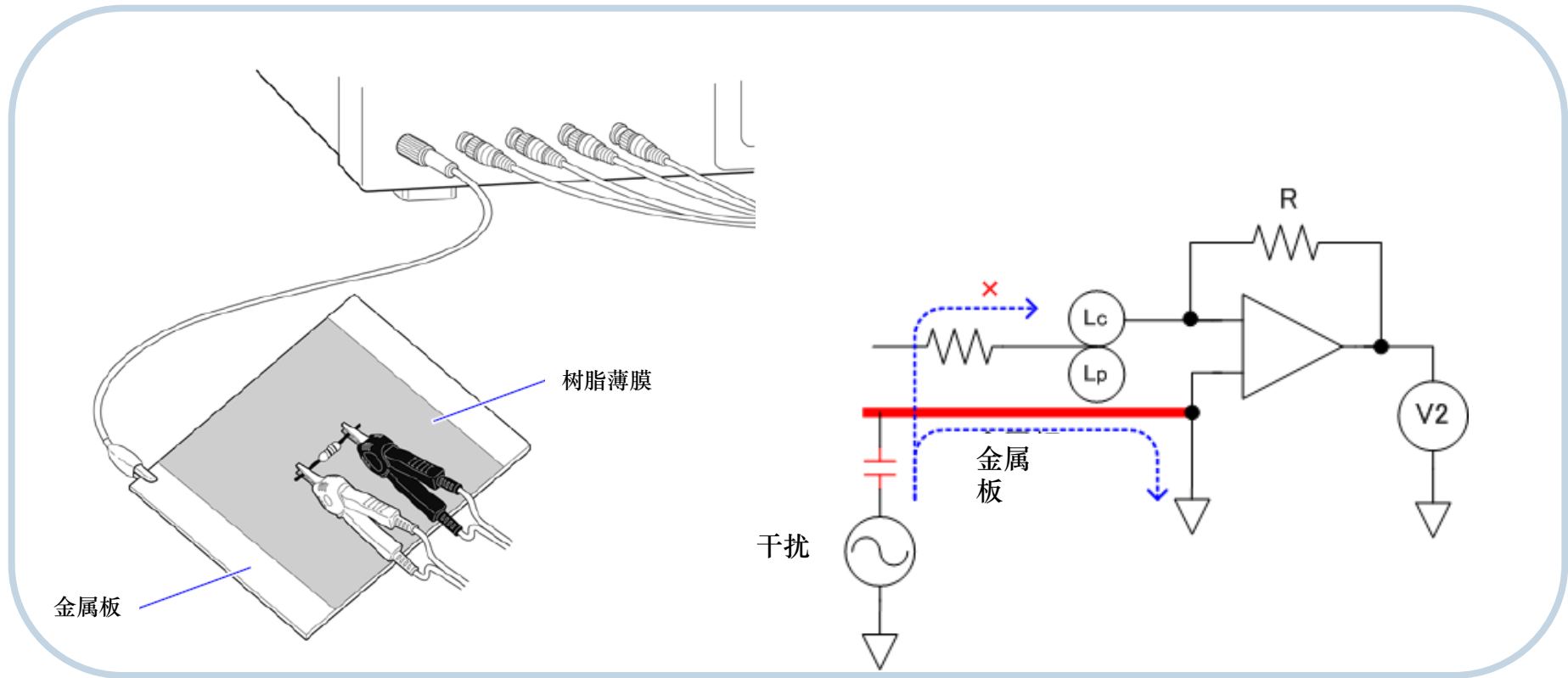
供电情况

电缆扫描器

接触部分

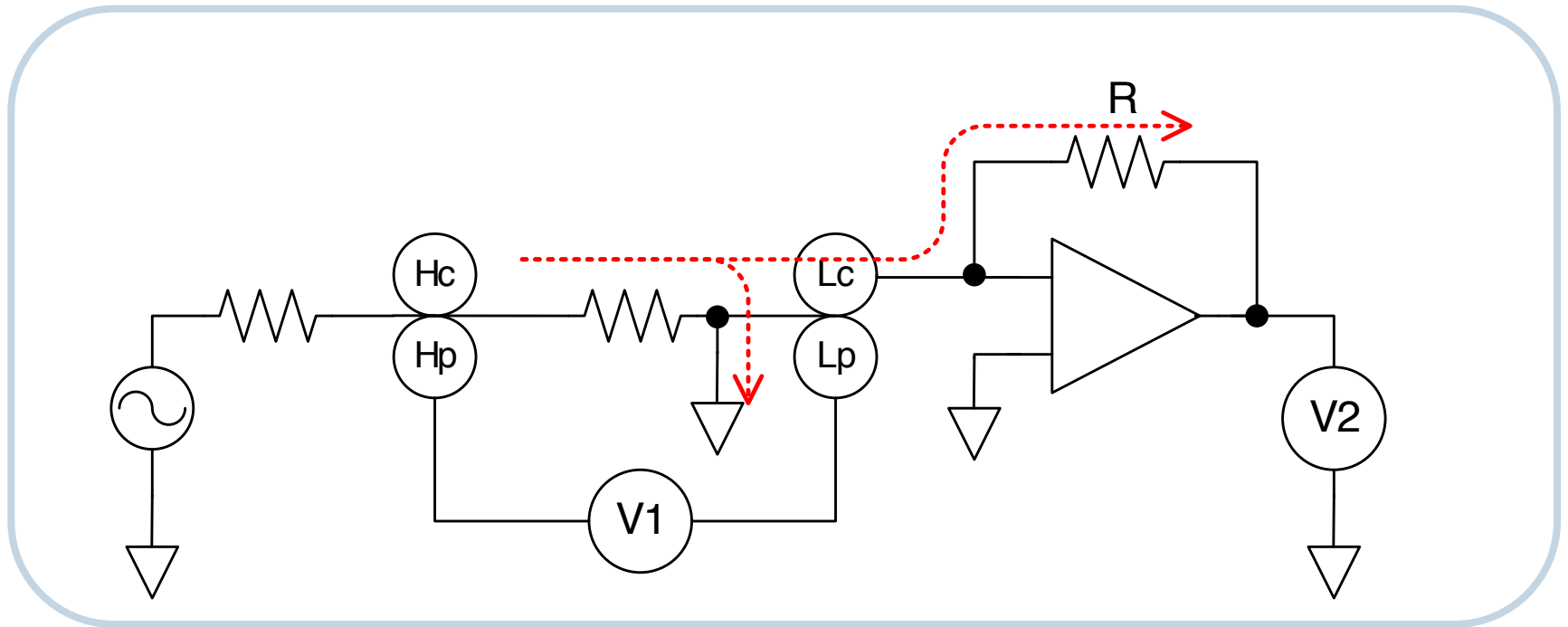
周围环境

# 高阻抗元件的测量



- 高阻抗元件的测量容易受到外来干扰的影响，测量值会不稳定。  
→如果在连接了guard端子的金属板上测量就能够稳定

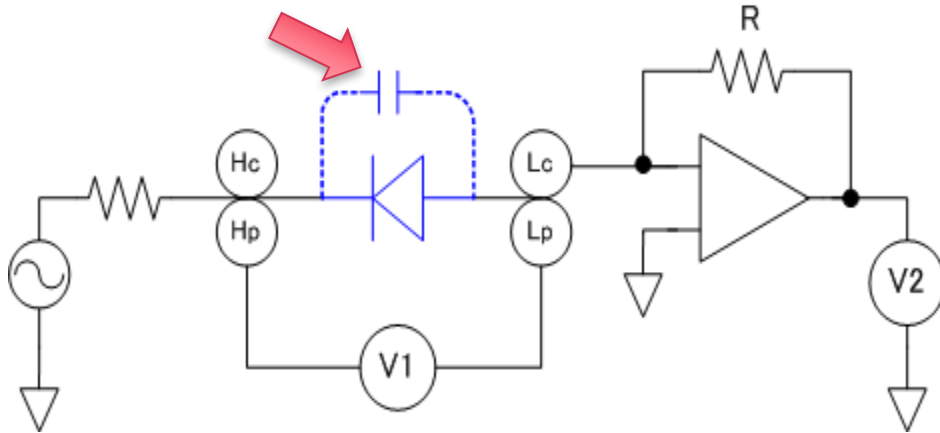
# 接地的被测物的测量



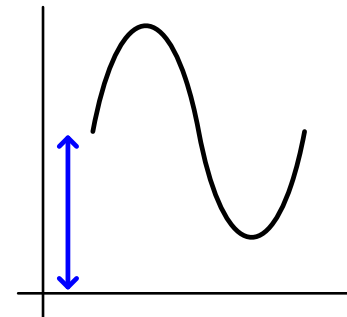
- 如果测量接地的被测物，被测物电流会分流到接地侧，因此无法测量

→ 将被测物从接地绝缘

# 二极管的结电容的测量

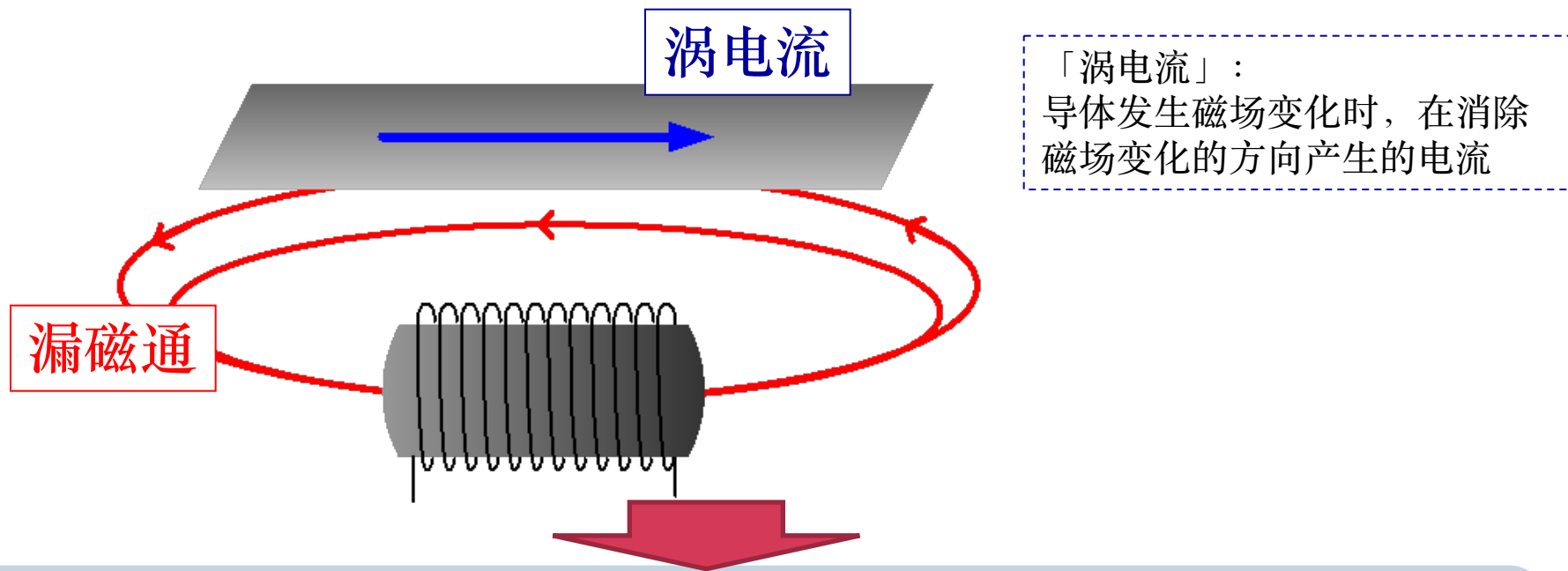


- 二极管如果顺时针方向进行偏置的话，会变成ON状态，从而无法测量结电容。
  - ①降低测量信号电平到不会让二极管ON的电压
  - ②在交流信号上加上DC偏置，在二极管不会ON的范围内进行测量。



# 测试治具等的影响

电感的附近如果有导体，那么电感发出的漏磁通  
会造成涡电流流过导体，对测量值发生影响

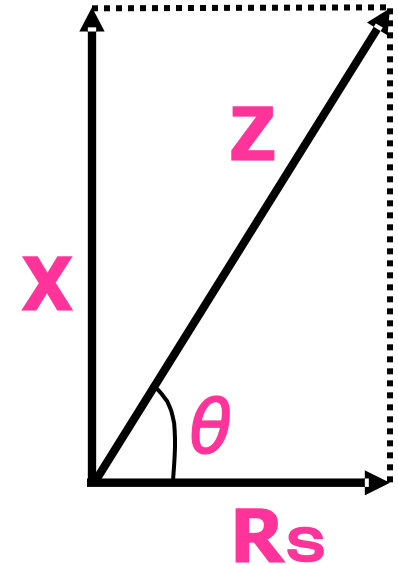


如果测试治具或测量台面的材质、距离不同，  
那么测量值可能会发生变化



# 在线圈测试中 $R_{dc}$ 和 $R_s$ 的区别

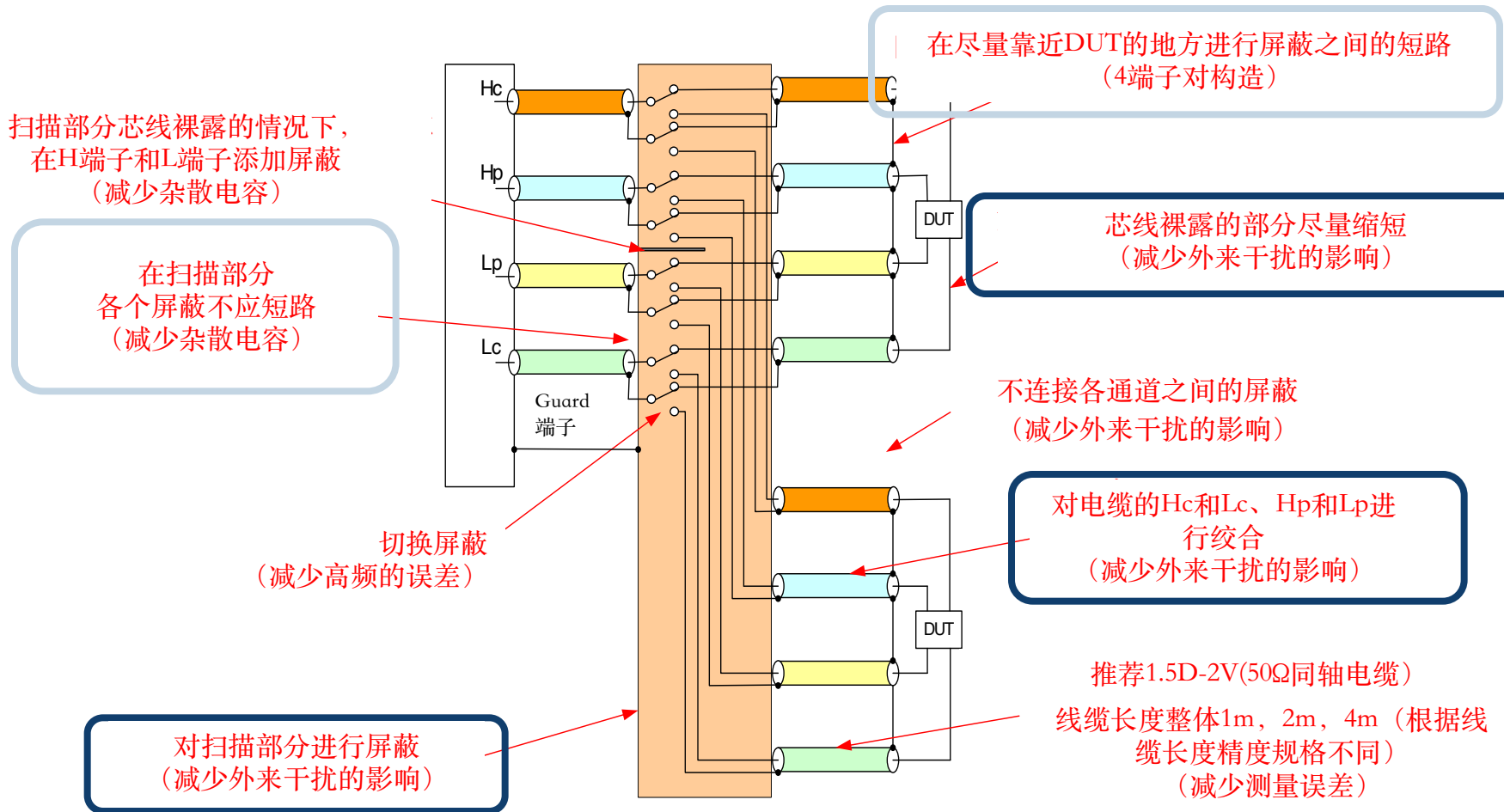
- $R_s$ （串联等效电阻）是指  
→针对交流信号的阻抗 $Z$ 的实数成分
- $R_s$ 中含有「**线芯造成的损耗**」、「**绕组造成的损耗**」。  $R_{DC}$ 就是绕组线本身的电阻，包含「绕组造成的损耗」。  
因此、 $R_s$ 比 $R_{DC}$ 大。



「**线芯造成的损耗**」……也称为「铁损」。  
有消除线芯的磁场变化而产生的电流（涡电流）所造成的损耗和线芯磁化时产生能量损耗。  
「**绕组造成的损耗**」……也称为「铜损」。  
由于集中在线材的表面流过的趋肤效应，越是高频的信号，在交流时线材的电阻越大。

$R_s$ 和 $R_{dc}$ 的测量值不同

# 扫描器的注意事项



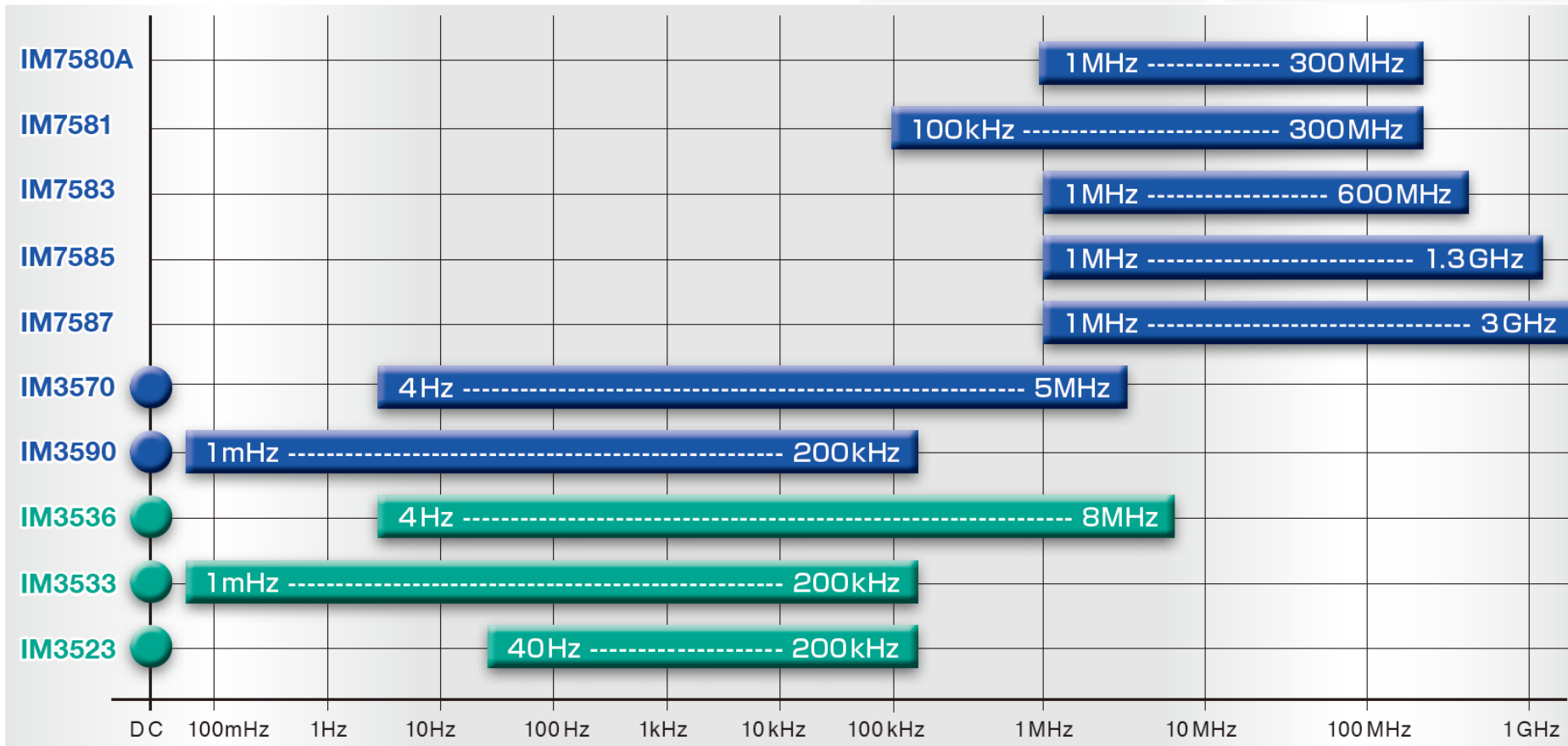
# HIOKI LCR测试仪 · 阻抗分析仪

## 测量频率

产品阵容丰富，对应广泛测量频率

阻抗分析仪

LCR测试仪



# HIOKI C测试仪

Cメータ 3506-10		1.5ms		1kHz ○	1MHz ○	
			低容量电容器用的C测试仪 MLCC、薄膜电容器的生产			
Cハイテスタ 3504		2ms		120Hz ○	1kHz ○	
			大容量MLCC用的C测试仪 大容量MLCC的分选机 (3504-50/-60)、贴片机 (3504-40)			

**感谢您的聆听!**

**HIOKI**

© 2016 HIOKI E.E. CORPORATION