

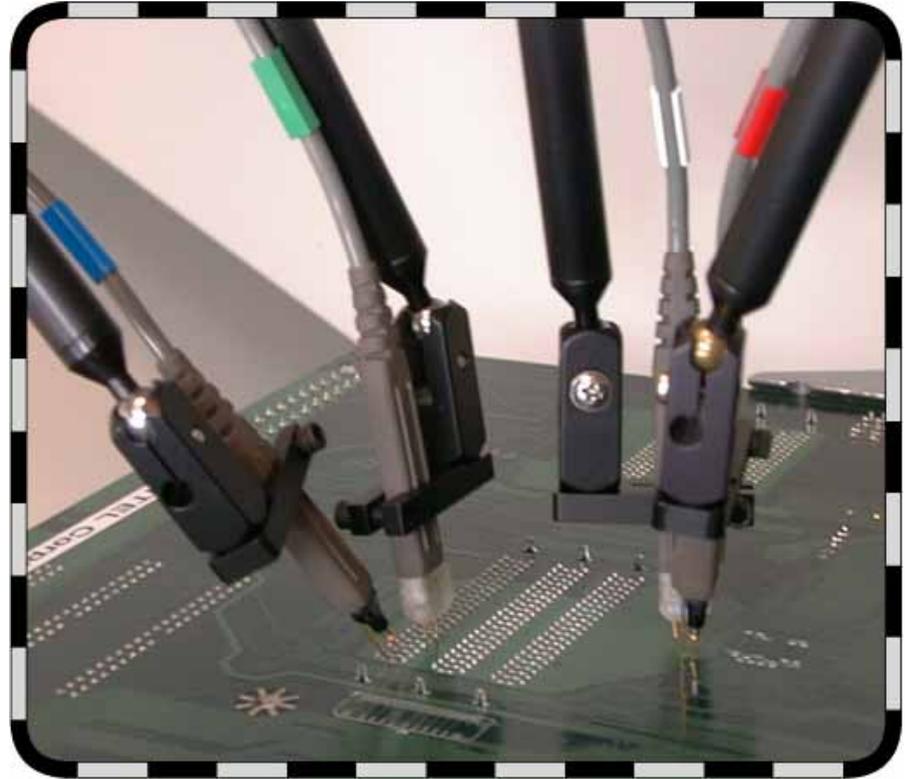
探头的原理及种类

Senior Application Engineer :周英航

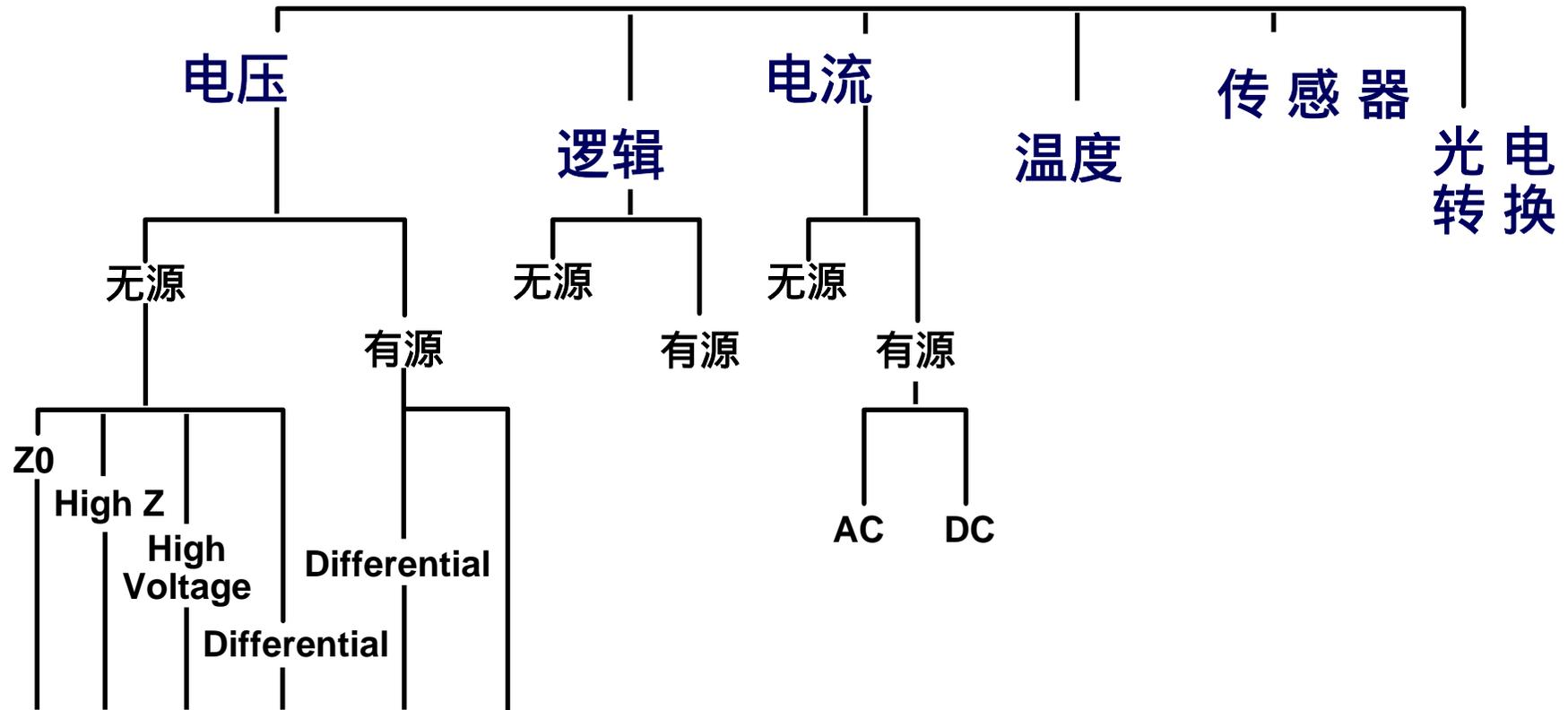
ying.hang.zhou@tektrotronix.com

探头的原理及种类

- ▶ 示波器功能的延伸
- ▶ 影响测量的准确性
- ▶ 不同的应用, 搭配不同的探头
- ▶ 探头的种类 :
 - 电压
 - 电流
 - 光/电转换 (O/E)
 - 逻辑
 - 物理量 : 温度, 压力...



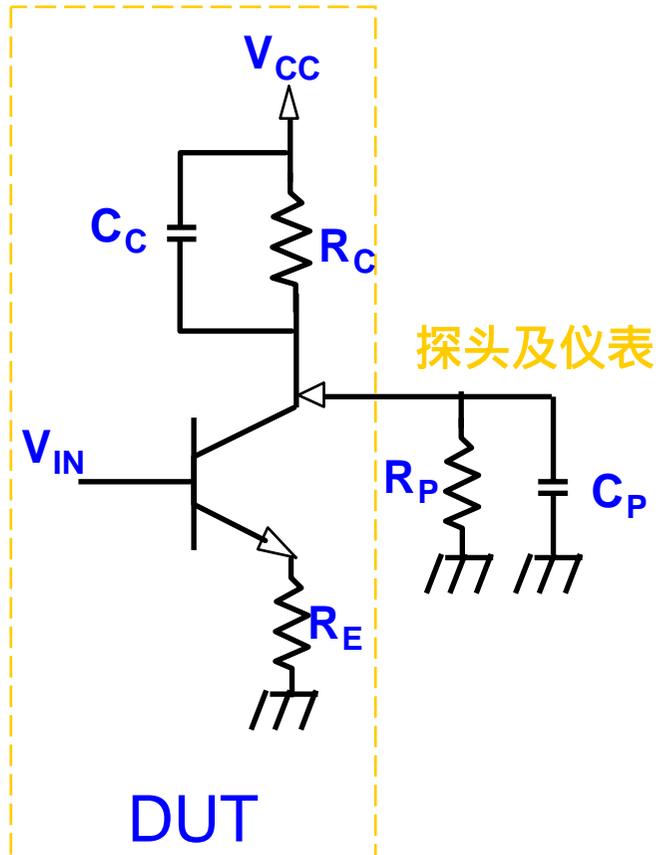
基本探头类型



探头如何影响测量精确度

- ▶ 要得到适当的测量结果，测量附件必须跟仪表及被测物(DUT) 密切配合。须考虑的项目包括：
 - 被测量的信号形式(电压、电流、逻辑、其他)；
 - 信号频率 (DC, Hz, kHz, MHz)；
 - 信号源阻抗(电阻、电容、电感)；
 - 待测物连接考虑(DUT及仪表)；
 - 仪表输入阻抗 (50 ohm, 1 Mohm, 其他)；
 - 仪表带宽或上升时间。

探头如何影响测量测量系统



NOTE: V_{CC} 为交流接地

- ▶ 没有探头及仪表

$$\text{Gain} = \frac{-R_C}{R_E}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_C C_C}$$

- ▶ 有探头及仪表

$$\text{Gain} = \frac{-(R_C || R_P)}{R_E}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi (R_C || R_P)(C_C + C_P)}$$

探头带宽 v.s. 系统带宽

- ▶ 示波器的测量中，探头是必备的，所以探头带宽亦会影响测量结果，其上升时间影响公式如下：

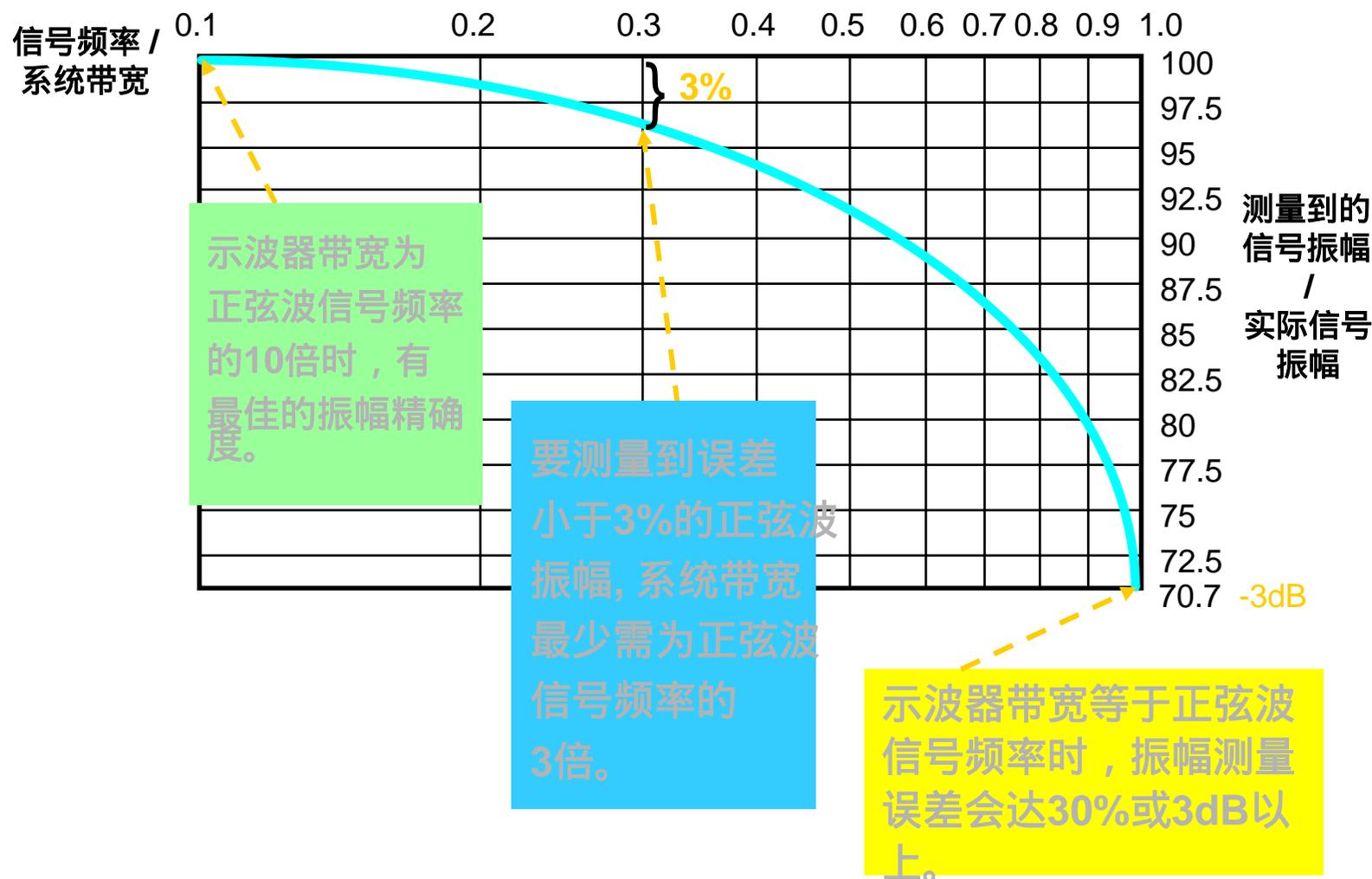
$$\text{测量值}_{\text{上升时间}} = \sqrt{(\text{信号}_{\text{上升时间}})^2 + (\text{示波器}_{\text{上升时间}})^2 + (\text{探头}_{\text{上升时间}})^2}$$

- ▶ 由于带宽和上升时间成倒数关系故其带宽公式如下：

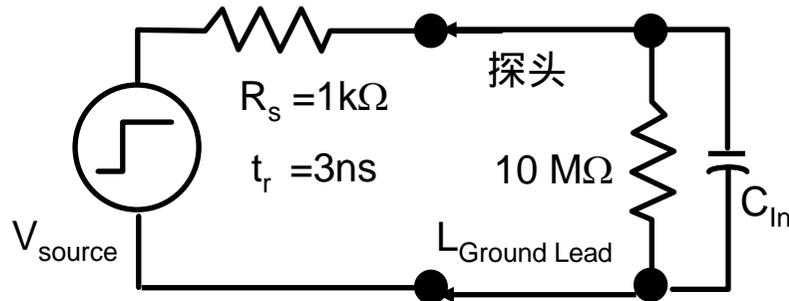
$$\frac{1}{\text{测量带宽}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\text{信号带宽}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\text{示波器带宽}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\text{探头带宽}}\right)^2}$$

- ▶ 由此式也可看出，示波器及探头的带宽越宽，则对测量带宽的影响越小，也就是说测量带宽越接近信号带宽。

系统带宽 v.s. 正弦波振幅



探头输入电容及信号源阻抗

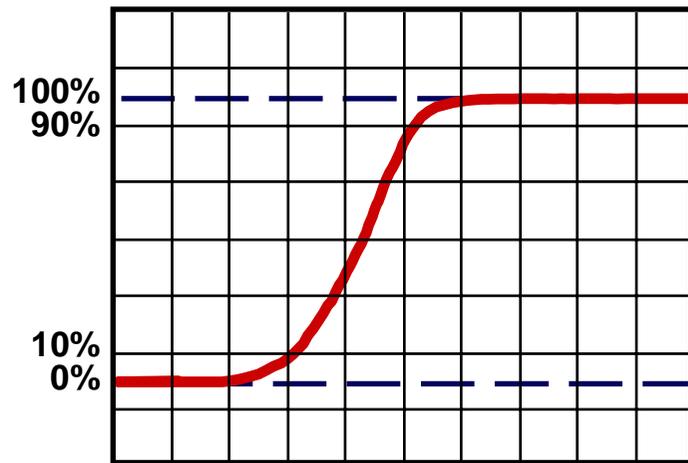


电容负载 C_{in}
使上升时间 t_r
增加

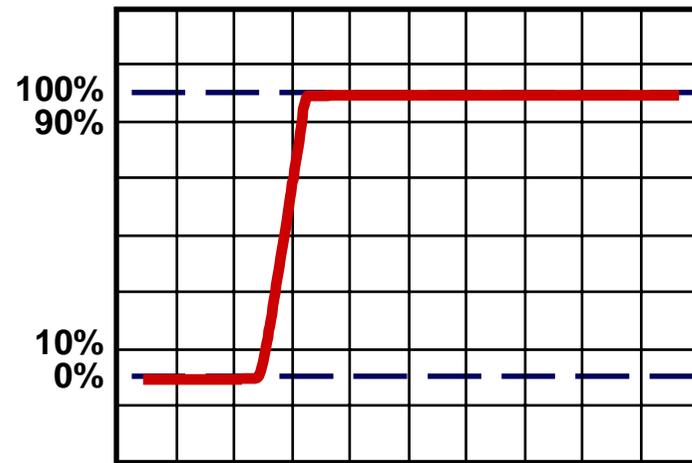
$$t_r \approx 2.2 (R_s * C_{in})$$

$$C_{in} = 100pF \approx 220 ns (1X \text{ 探头})$$

$$C_{in} = 10pF \approx 22 ns (10X \text{ 探头})$$

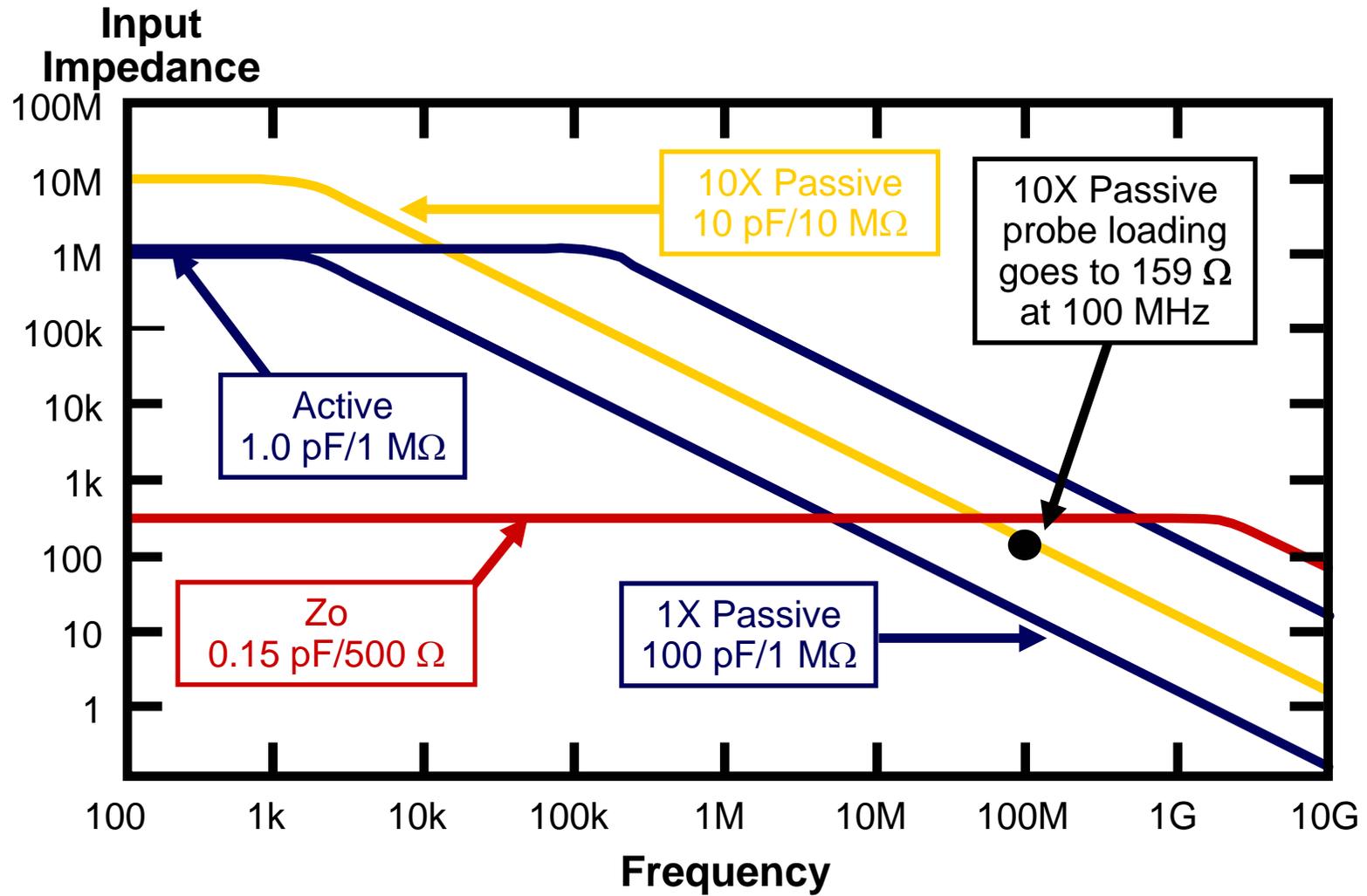


● 1X 被测探头的上升时间波形



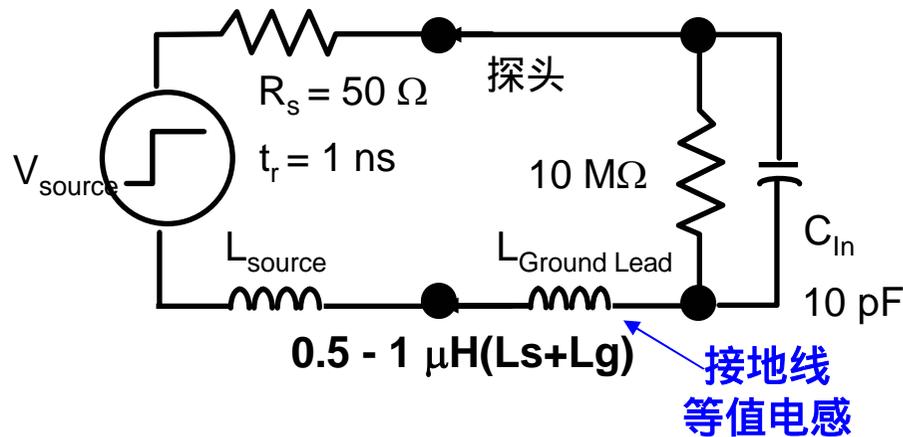
● 10X 被测探棒的上升时间波形

探头输入阻抗



探头接地线的电感效应

- ▶ 电感效应造成阻抗不匹配，带宽越宽影响越大。
- ▶ 接地线的长短会影响电感效应的大小，结果会产生脉冲信号的振荡



一个10X被测探头 $C_{in}=10\text{ pF}$ 及
6英寸接地线的等效线路



左侧等效线路的探头所造成的振荡

典型6英寸接地线探头所造成的的振荡频率

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \boxed{50 - 70\text{ MHz}} \quad \text{或} \quad \boxed{t_r = 7 - 5\text{ ns}}$$

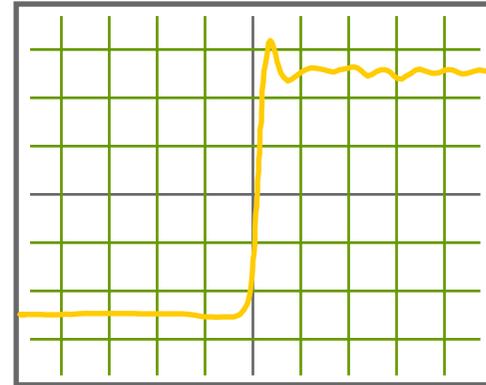
探头接地线的电感效应



电源线直接连接



BNC 探头连接



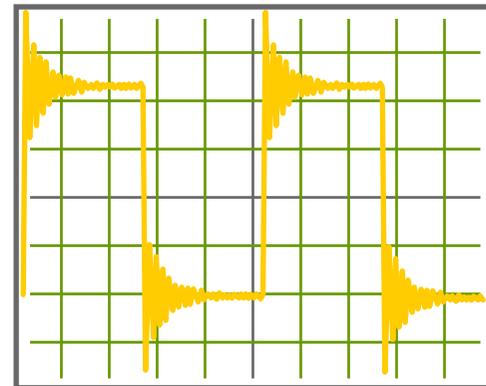
1" 接地线



3" 低阻抗接地线



6" 接地线



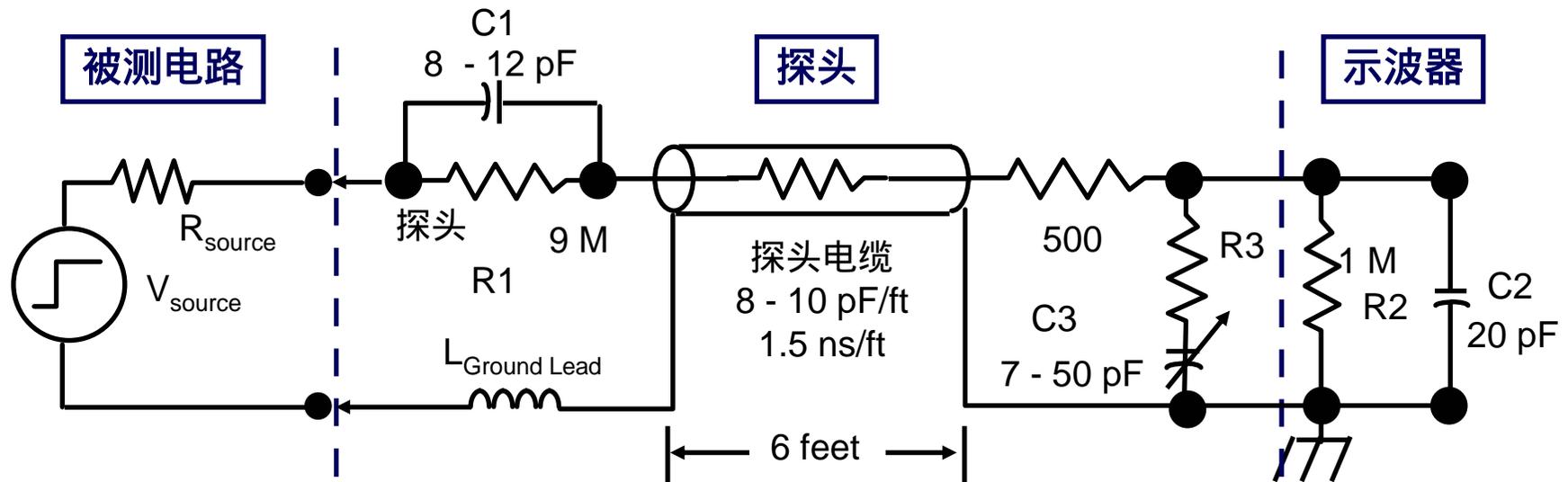
未接接地线

探头传输延迟

测量时序、功率、及延迟时重要的考虑

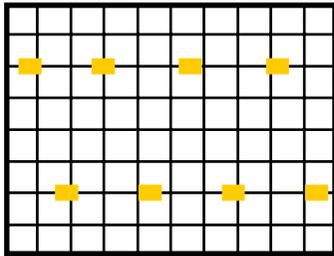
- ▶ 典型的探头延迟范围在 4 ns 到 8 ns。
- ▶ 不同的探头会造成不同的延迟，需用示波器 “deskew(抗歪斜)” 的功能来消除探头的延迟。
- ▶ 同型探头间的延迟应越小越好，典型的应在 200 ps 之内。

被测探头的低频(LF)补偿



被测探头的低频(LF)补偿

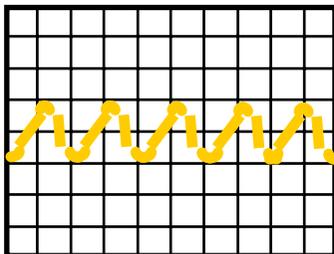
正确补偿



1 ms/div

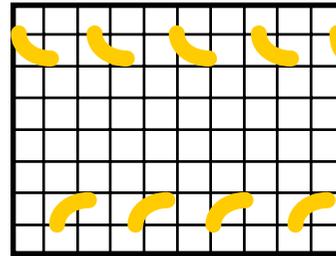


1 μ s/div

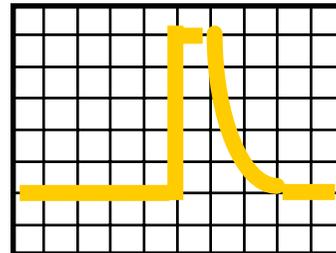


50 kHz

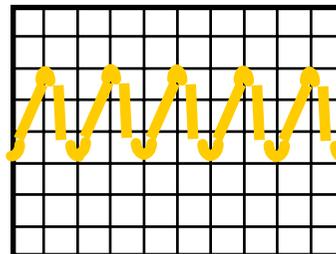
过补偿



1 ms/div

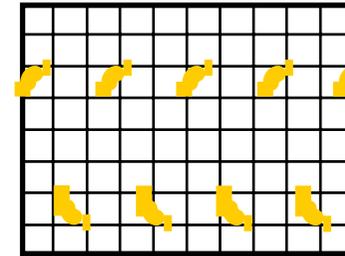


1 μ s/div

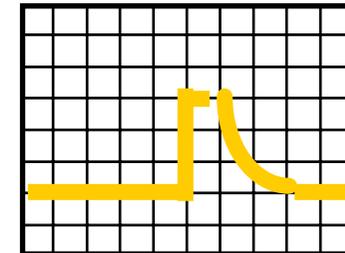


50 kHz

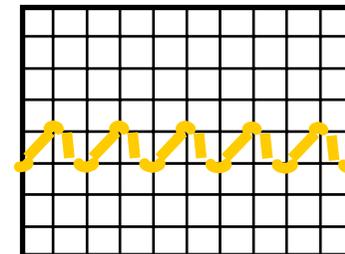
欠补偿



1 ms/div



1 μ s/div

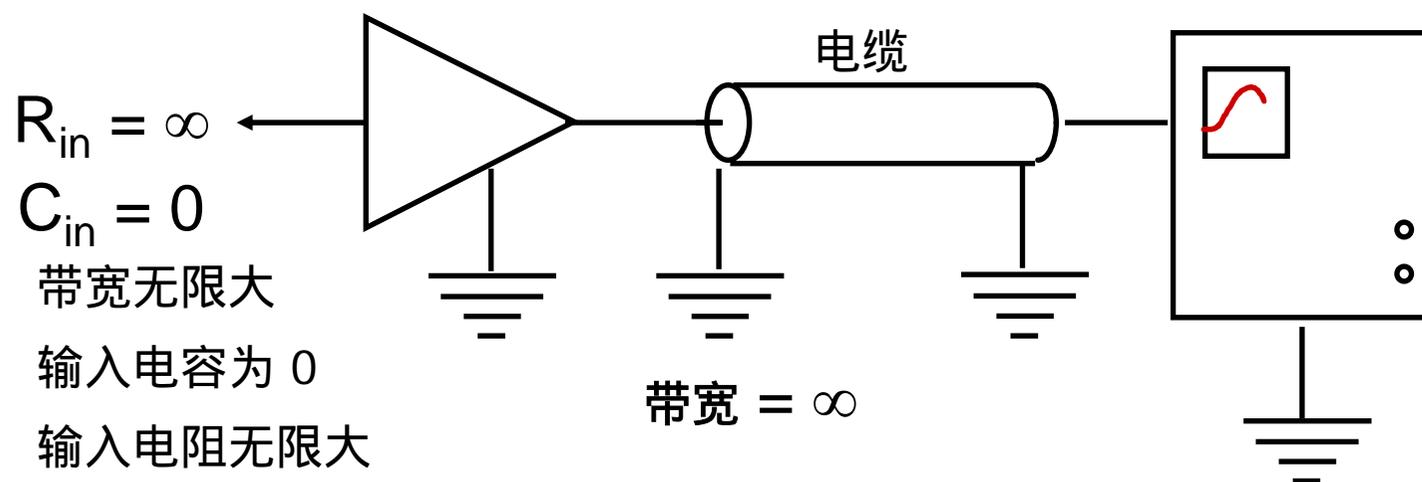


50 kHz

理想电压探头

理想的电压探头模型

- 理想的探头是没有负载效应, 也就是不对测量造成任何影响。

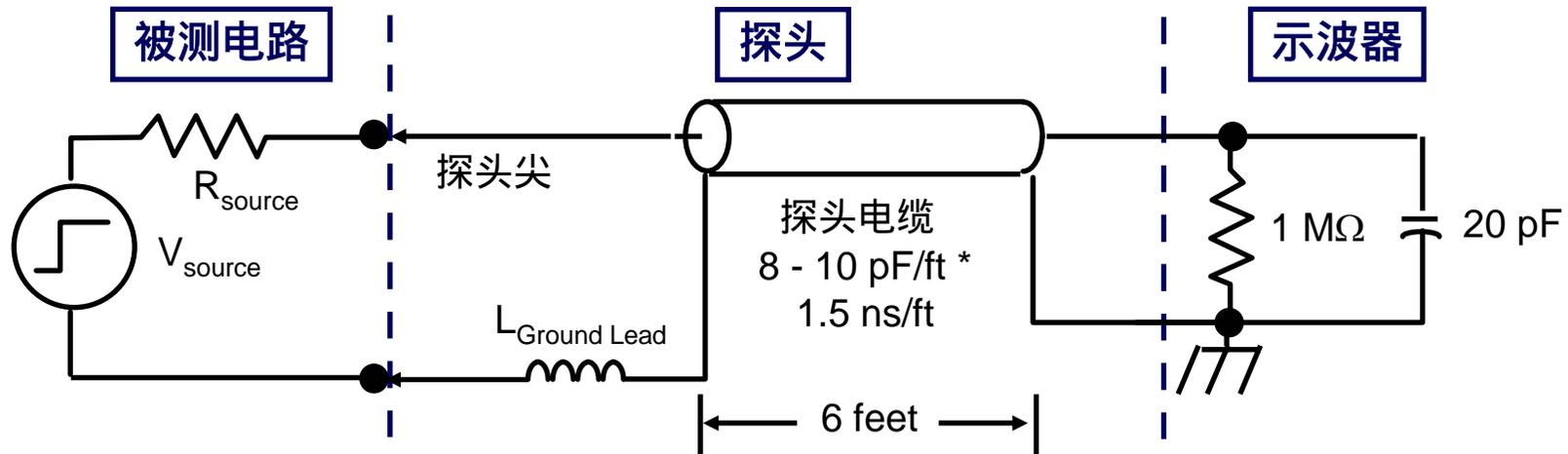


- ▶ 带宽无限大
- ▶ 输入电容为 0
- ▶ 输入电阻无限大
- ▶ 动态范围无限大(Dynamic Range)
- ▶ 1:1衰减
- ▶ 无延迟
- ▶ 无相位偏移(Phase Shift)
- ▶ 机械结构适合测量应用

典型的电压探头规格

型式	带宽	上升时间	输入电容	输入电阻
1X 无源探头	15 MHz	23 ns	100 pF	1 M Ω
10X无源探头	100 MHz - 500 MHz	3.5 ns - 700 ps	13 pF - 8 pF	10 M Ω
Z0无源探头	3 GHz - 9 GHz	120 ps - 40 ps	1 pF - 0.15 pF	500 Ω
有源探头	500 MHz - 4 GHz	700 ps - 100 ps	2 pF - 0.4 pF	10 M Ω - 100 k Ω

1X 电压探头 – 无源



优点：

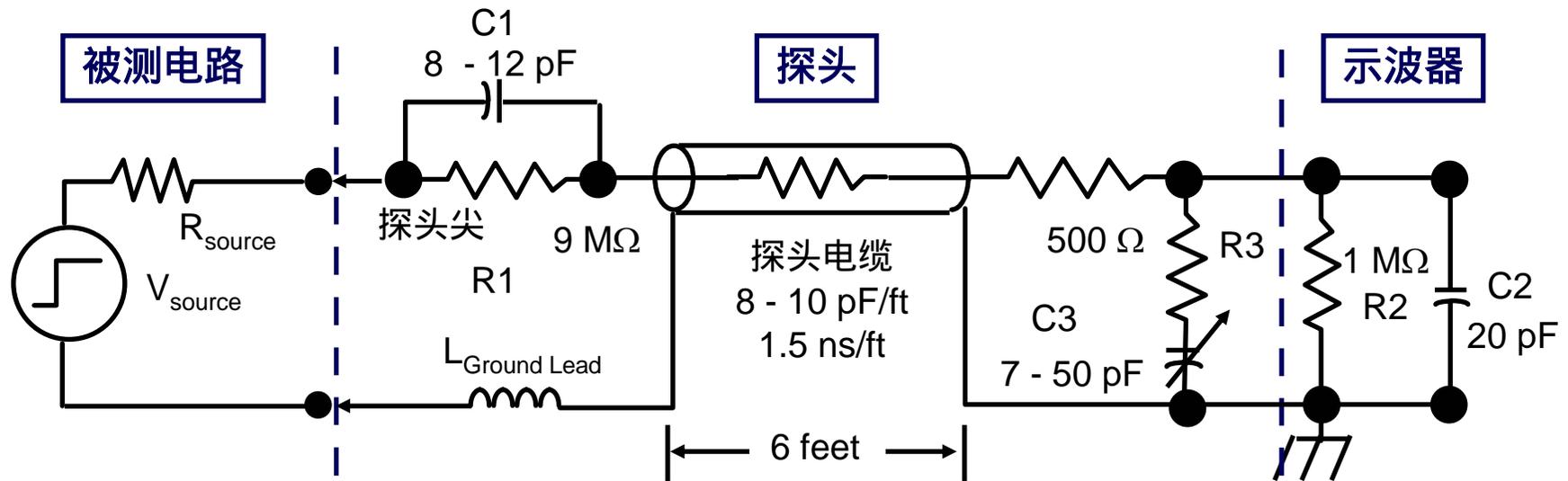
- 1X 没有衰减
- 价格便宜

缺点：

- 高反射量
- 输入电容太大
- 低带宽

* 典型 50 Ω 电缆约有 30 pF/ft 的电容量

10X 电压探头 – 无源



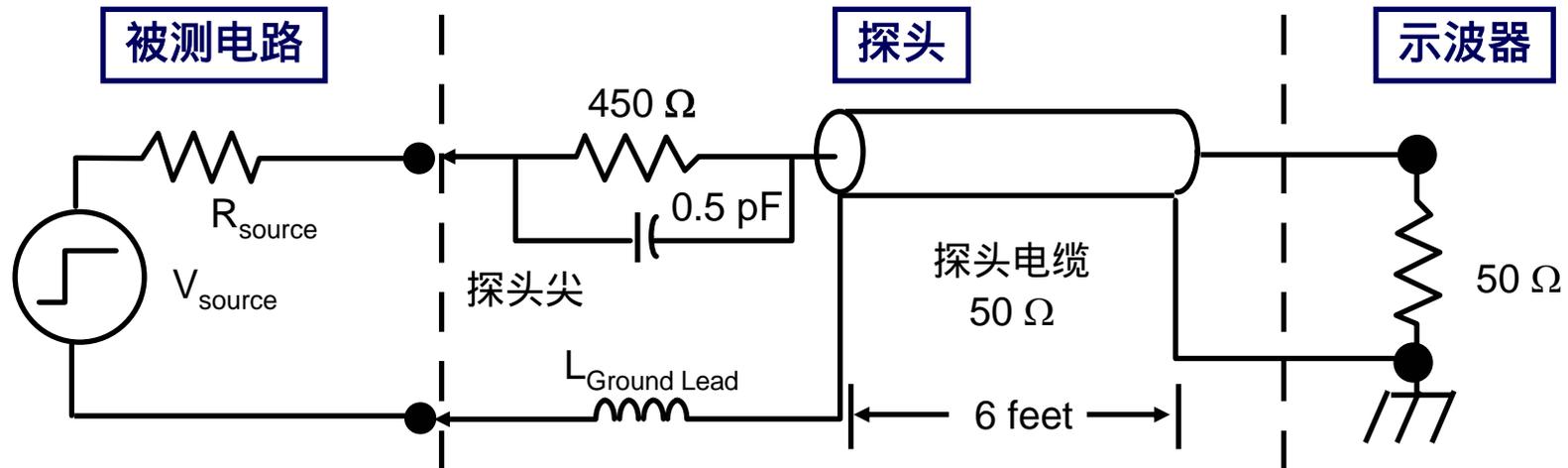
优点：

- 高输入电阻
- 宽动态范围
- 价格合理
- 机械结构坚固
- 比1X探头的输入电容低

缺点：

- 输入电容仍太高
- 跟 $50\ \Omega$ 系统不兼容
- 必须进行补偿

50 Ω 10X 电压探头- 无源



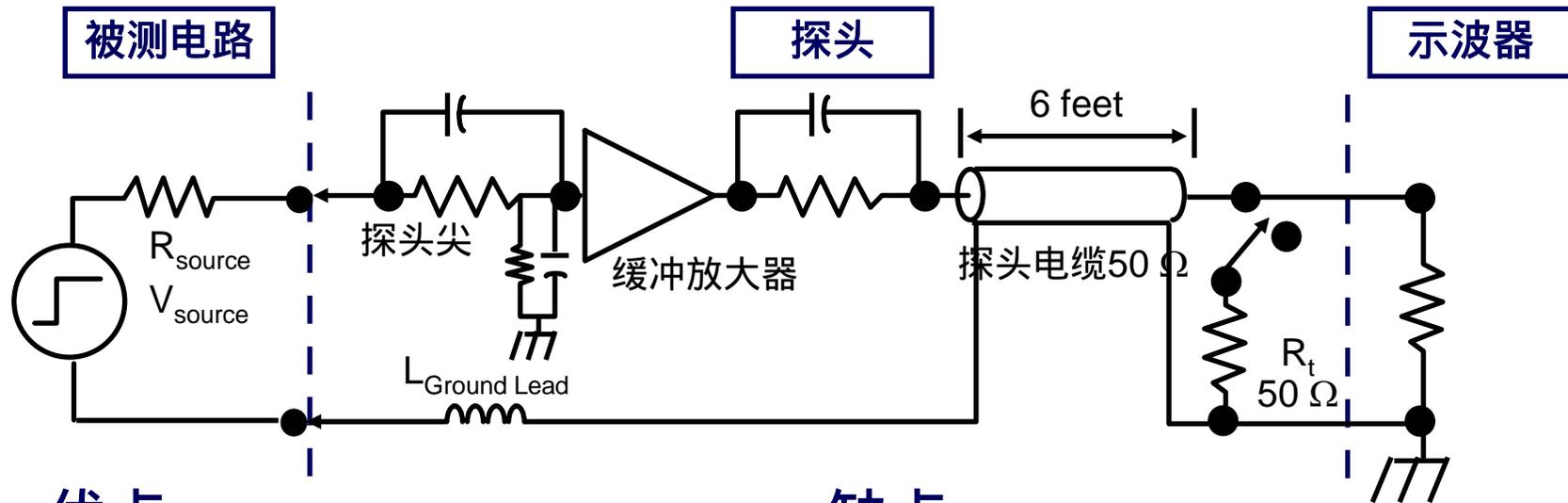
优点：

- 低输入电容
- 宽动态范围
- 加上终端电阻与50 Ω及1M Ω系统兼容
- 无需补偿

缺点：

- 低输入阻抗
- 必须有50 Ω的终端

10X 电压探头- 有源



优点：

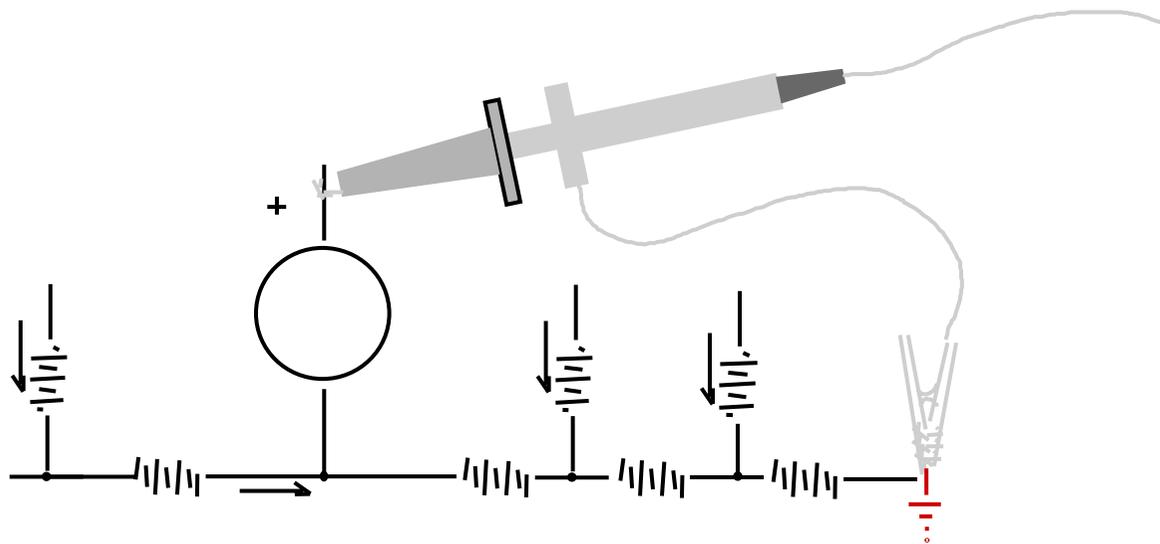
- 低输入电容
- 高输入电阻
- 加上终端电阻与50 Ω 及1M Ω 系统兼容
- 无需补偿

缺点：

- 高价位
- 动态范围有限
- 机械结构较不坚固
- 须额外电源

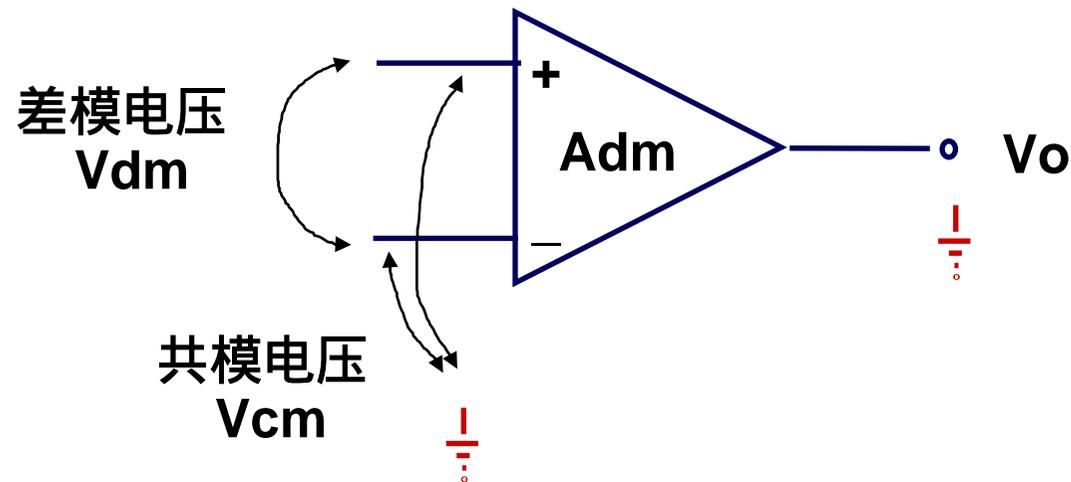
何时使用差分电压探头

- ▶ 不以接地电为参考点
 - 浮地(Floating)测量
 - 平衡(Balanced)信号
- ▶ 接地点并不是很好的参考点时
 - 低振幅 ($<10\text{ mV}$) : 接地点噪声信号大于信号振幅
 - 高速度 ($t_r < 2\text{ ns}$) : 接地点离信号点太远



共模及差模

- ▶ 共模(Common Mode)电压 V_{cm} 及共模增益 A_{cm} :
 - 两个输入端对地的电压差为 V_{cm} , 经过差模放大器后的增益为 A_{cm}
- ▶ 差模(Differential Mode)电压 V_{dm} 及差模增益 A_{dm} :
 - 两个输入端间的电压差为 V_{dm} , 经过差模放大器后的增益为 A_{dm} 。



共模抑制比(CMRR)

▶ CMRR(Common Mode Rejection Ratio) :

差模增益 A_{dm} 与共模增益 A_{cm} 的比值，即：

$$\underline{CMRR = A_{dm}/A_{cm}}$$

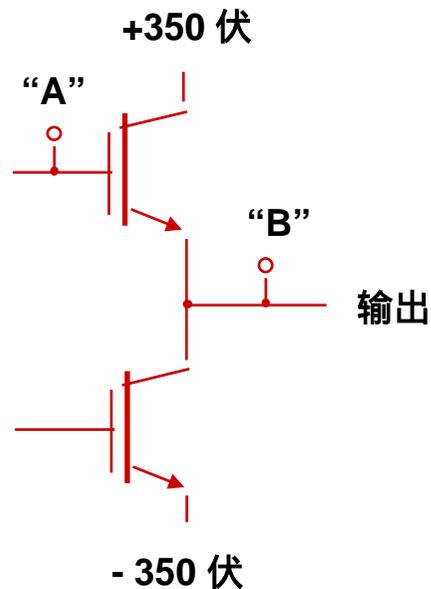
或

$$\underline{dB(CMRR) = 20\log(A_{dm}/A_{cm})}$$

若 A_{cm} 趋近于零，则 $CMRR$ 趋近无限大，代表一理想的差分放大器
所以针对差分探头而言 $CMRR$ 值越大越好。

CMRR 为什么重要

- ▶ 差分探头的CMRR规格若不好，则共模电压会加入差模电压内，造成测量上的误差，下面为一实例。



实例:

$$V_{CM} = +/- 350V (700 V_{PP})$$

$$V_{DM} = +/- 5V (10V_{PP})$$

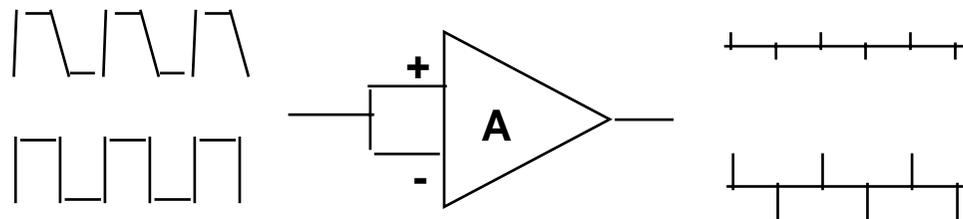
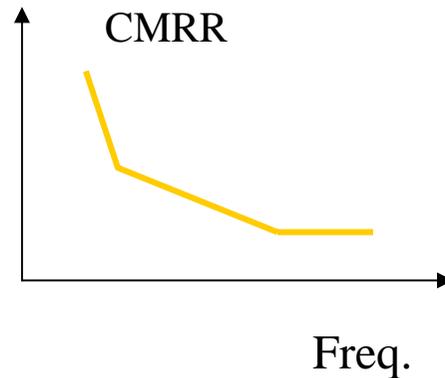
$$CMRR = 200:1$$

$$CM_{error} = 700 / 200 = 3.5 V_{PP}$$

$$= \underline{35\% \text{的误差}}$$

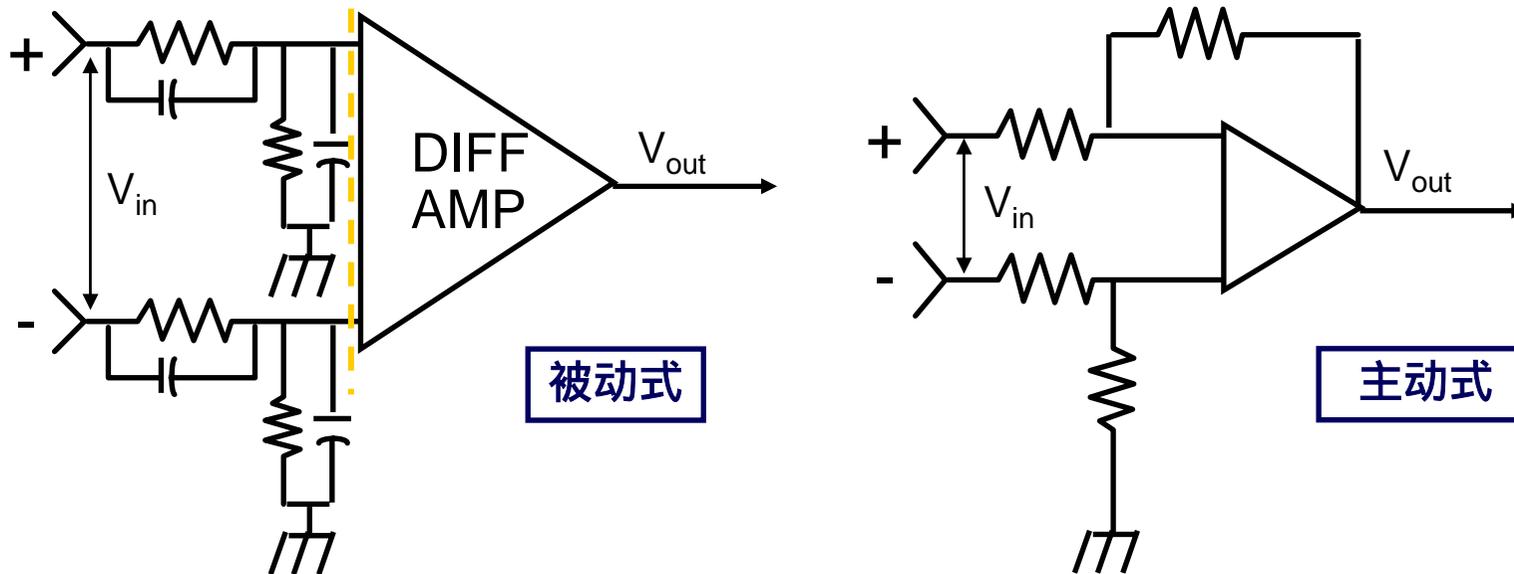
CMRR的规格

- ▶ CMRR值越大越好一般在60dB(1000:1)附近
- ▶ 随着频率增加CMRR会逐渐减小。



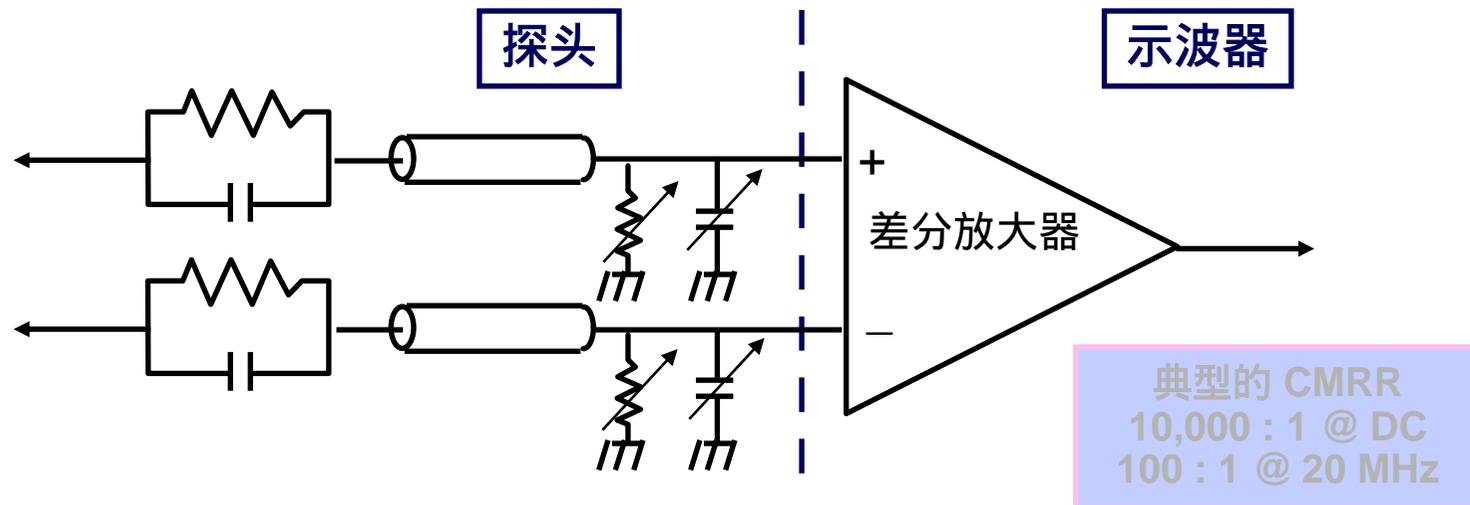
越快的边沿会产生更多的共模电压

电压探头—差分



- ▶ 无源差分探头必须将两支探头的延迟、衰减、及补偿，做精确的调校。
- ▶ 假如没有做精确的调校，CMRR将会严重的下降。
- ▶ 有源差分探头由于有OP放大器做缓冲，因此不须要做这些调校。

电压探头—无源差分



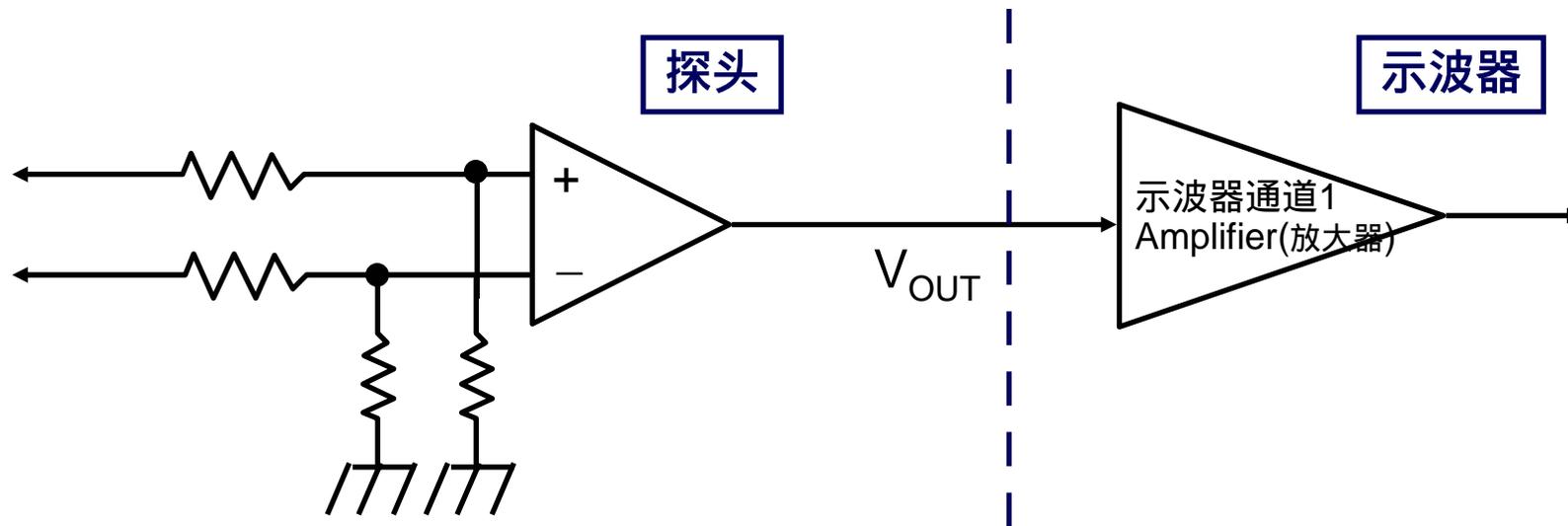
优点：

- 比无源探头的CMRR高
- 宽动态范围
- 机械结构坚固
- 两支探头可以作较远的分离

缺点：

- 须要两个不同的输入
- 与50 Ω系统不兼容
- 须补偿

电压探头—有源差分



优点：

- 低输入电容
- 比无源差分探头的CMRR高
- 与50 Ω 及1M Ω 单端(Single-ended)系统兼容
- 探头尖非常小

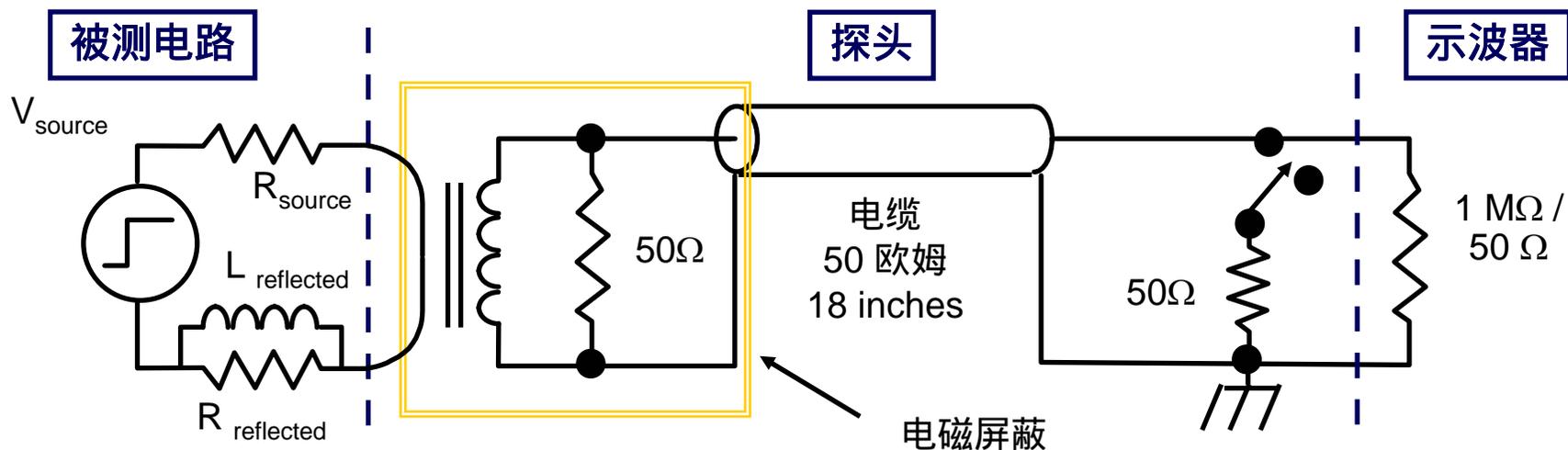
缺点：

- 高价位
- 有限的动态范围
- 须额外的电源

电流探头的特性

- ▶ 探头的交流反应，依据变压器的动作，将电流转为电压。
- ▶ 直流测试，须在变压器上加一霍尔效应 (Hall Effect) 感应器
- ▶ 两种型式可用：
 - 固定核心(Fixed Core) – 须要打开导体(conductor)来连接。
 - 分离核心(Split Core) – 允许直接附在导体上(clipping around)。
- ▶ 以极低的嵌入阻抗(L reflected & R reflected)，使 DUT的电容性负载达到最小。
- ▶ 提供电子绝缘，允许无参考地点测量。

电流探头—无源



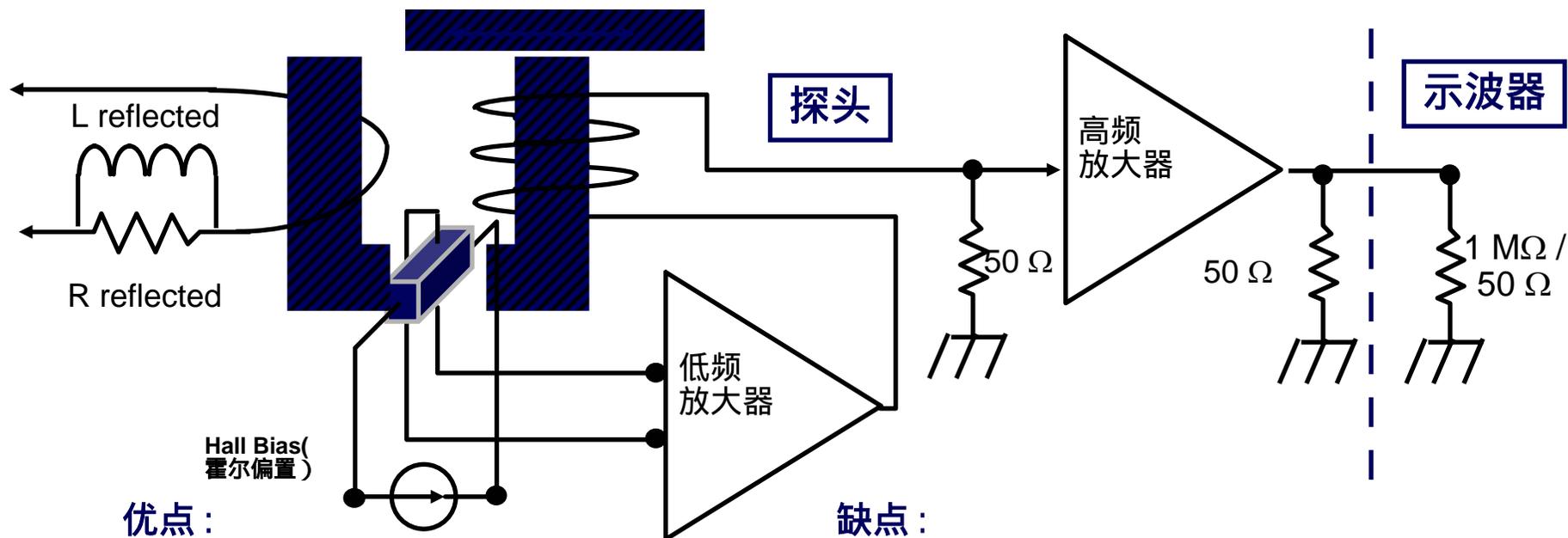
优点：

- 宽的 AC 带宽
- 价格不贵
- 提供电子绝缘
- 低 DUT 负载
($R_{reflected}$ 典型 1 to 2 Ω
 $L_{reflected}$ 典型 5 μH)

缺点：

- 只能测量 AC
- 固定核心须要打开导体连接
- 直流电使核心饱和

电流探头—有源



优点：

- AC 及 DC 测量
- 与 50 Ω 及 1 M Ω 单端 (Single-ended) 系统兼容
- 提供电子绝缘
- 低 DUT 负载
($R_{\text{reflected}}$ 典型 $\ll 1 \Omega$
 $L_{\text{reflected}}$ 典型 $< 5 \mu\text{H}$)

缺点：

- 较贵
- 机械结构较不坚固
- 体积较大
- 须额外的电源

结论

- ▶ 探头一定会给DUT带来负载。
- ▶ 无源探头一定要进行补偿。
- ▶ 系统带宽包括示波器、探头及被测信号。
- ▶ 精确的测量工具的系统带宽最好是待测信号的3到5倍。
- ▶ 尽可能使用低输入电容及短地线。
- ▶ 使用正确的连接方式接触测试点。