# 第三章：高速电路板设计

- 基础
- 高速电路信号测量
- 地平面与布线
- 电源系统

# 一些基础

- 高速电路板设计主要考虑：
  - 无源电路元件如何影响信号传输（振铃和反射）
  - 信号之间的相互作用（串扰）
  - 电路与周围环境的作用（EMI）
- **Knee频率：**

$$F_{knee} = \frac{0.5}{T_r}$$

  - **Knee频率以下的频率成分代表信号的主要能量**
- **Lumped vs. Distributed System:**

$$l = \frac{T_r}{Delay}$$

  - 电路尺寸小于（1/6）$\ell$时，可视为集总参数电路

## ■ 3dB带宽 vs. RMS带宽

- 系统的频率响应和上升时间的关系为：$F_{-3dB} \approx \dfrac{k}{T_r}$ → 10-90%上升时间
- K为比例系数：

$$k = 0.338 \longrightarrow \text{高斯型脉冲响应响应系统}$$

$$k = 0.350 \longrightarrow \text{单极指数衰减脉冲响应系统}$$

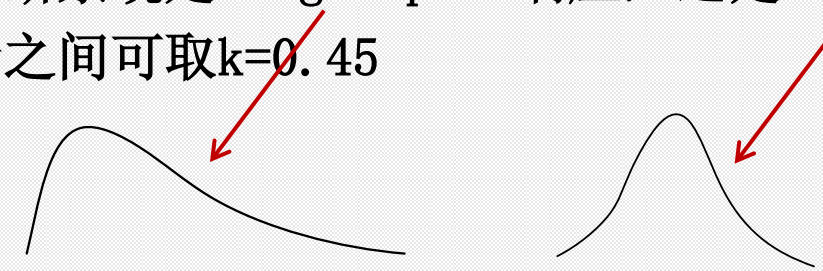
- 等效噪声带宽或RMS带宽：频率响应为H(f)的RMS带宽是等效的box-shaped的频率响应，在该带宽内通过的白噪声能量和实际H(f)内的白噪声的能量相等

$$F_{RMS} \approx \frac{k}{T_r}$$

$$k = 0.361 \longrightarrow \text{高斯型脉冲响应响应系统}$$

$$k = 0.549 \longrightarrow \text{单极指数衰减脉冲响应系统}$$

- 通过向系统（如示波器）输入一快上升沿的脉冲，观察系统输出脉冲的形状可以判断系统是single-pole响应，还是Gaussian type响应，在两者之间可取k=0.45



- 四种阻抗：电容、互容、电感、互感

— 电容：只要两个导体被充电到不同的电势，它们之间就存在电容

**The reluctance of voltage to build up quickly in response to injected power, or to decay quickly is called capacitance**

— 互容：两个电路之间存在着互容，相互之间的电场就互相影响

电路A通过杂散互容Cm，对电路B的影响为

$$I_M = C_M \times \frac{dV_A}{dt} \longrightarrow$$ A电路的电压变化率

由于互容引起的串扰可估算为： $$I_M = C_M \times \frac{dV_A}{dt} = C_M \times \frac{\Delta V}{T_r}$$

设电路B的输入阻抗Rb，串扰表示为串扰电压占激励电压的百分比：

$$Crosstalk = \frac{R_B I_M}{\Delta V} = \frac{R_B C_M}{T_r}$$

- 四种阻抗：电容、互容、电感、互感
  - 电感：哪里有电流，电流就产生磁场，他储存着驱动电流送入的能量。**The reluctance of current to build up quickly in response to injected power, or to decay quickly is called inductance**
  - 互感：两个电路环路之间通过磁场互相影响，就是互感

电路A通过杂散互感Lm，注入电路B的噪声电压为

$$Y = L_M \times \frac{dI_A}{dt} \longrightarrow \text{A电路的电流变化率}$$

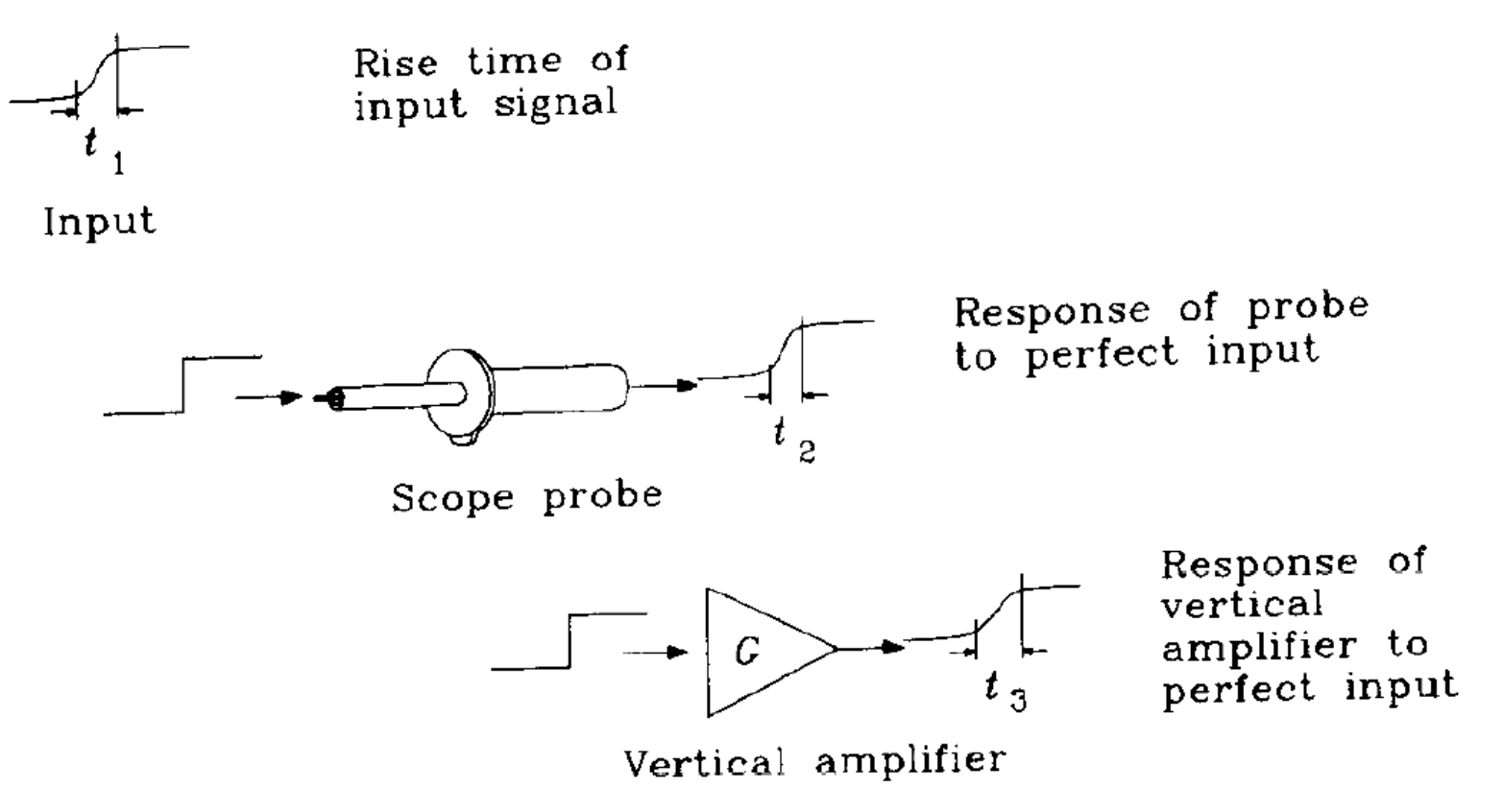
由于互感引起的串扰可估算为：

$$Y = L_M \times \frac{dI_A}{dt} = L_M \times \frac{\Delta V}{T_r \bullet R_A} \longrightarrow \text{A电路阻尼电阻}$$

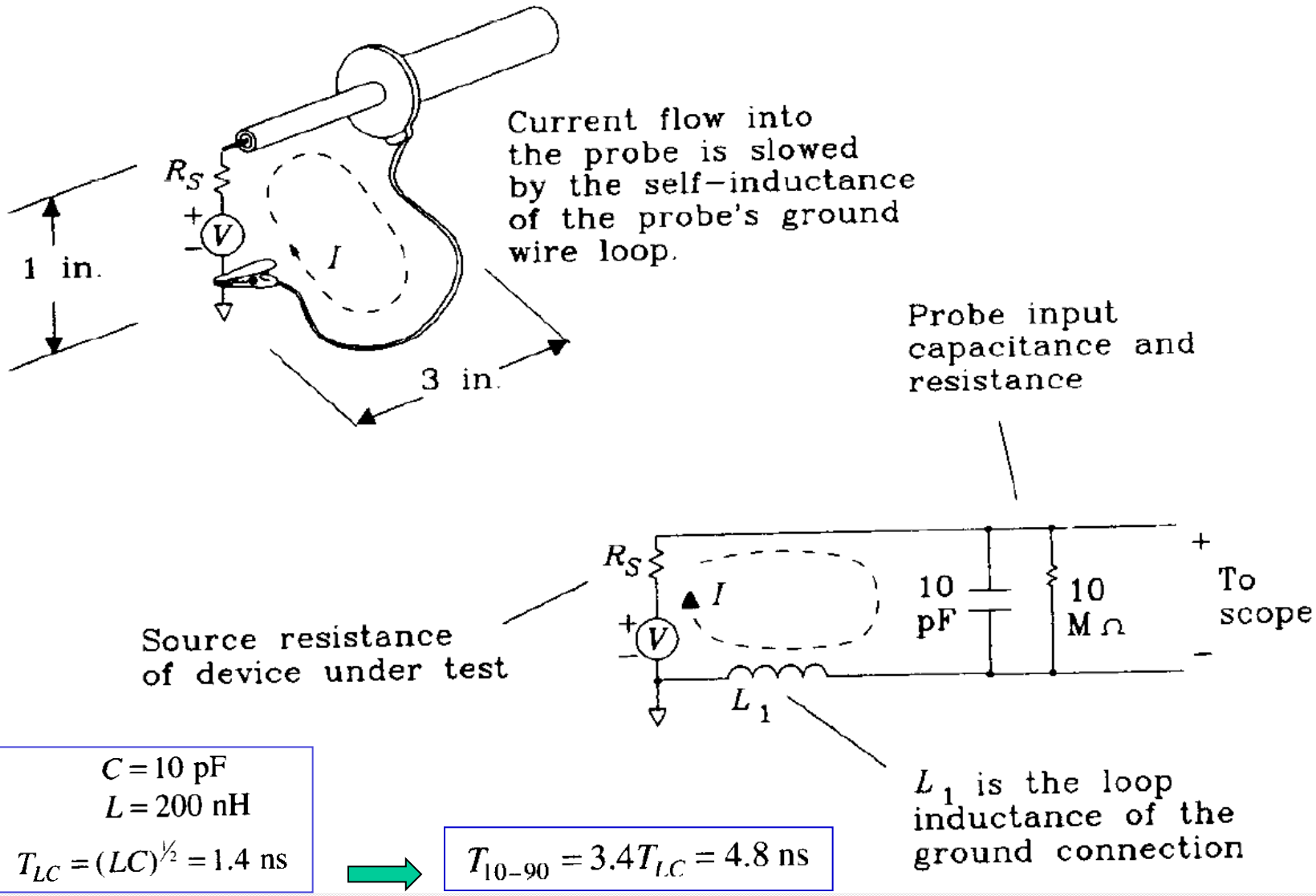
$$Crosstalk = \frac{L_M}{T_r \times R_A}$$

# 高速信号测量

- 信号上升时间的复合计算： $T_{\text{rise composite}} = \left(T_1^2 + T_2^2 + \cdots + T_N^2\right)^{1/2}$



## 注意示波器探头地环路自感对测量信号的影响（1）




$C = 10$ pF

$L = 200$ nH

$T_{LC} = (LC)^{1/2} = 1.4$ ns

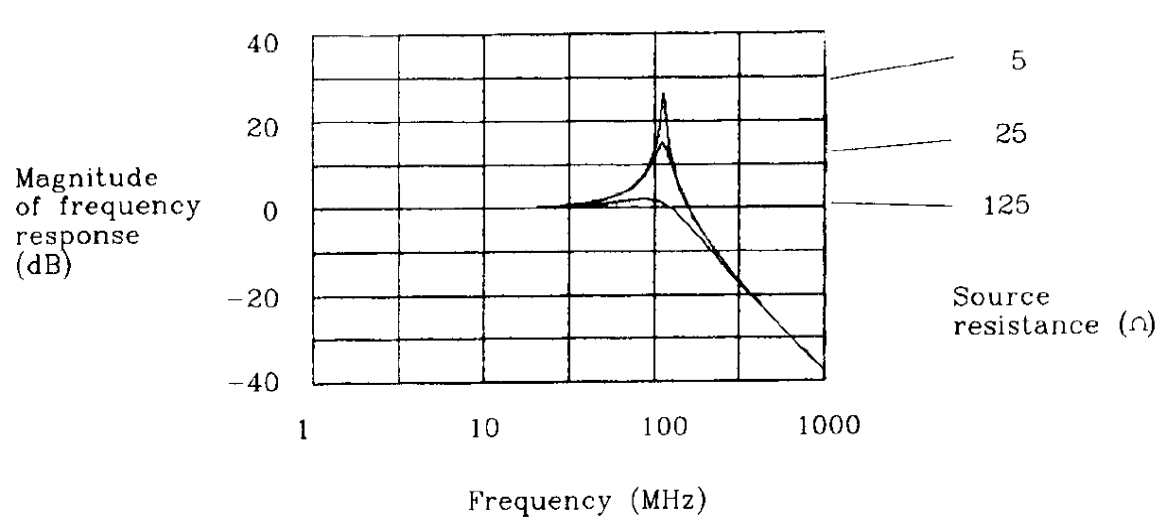
$T_{10-90} = 3.4 T_{LC} = 4.8$ ns

## 注意示波器探头地环路自感对测量信号的影响（2）

- 上述电路的Q值：Q值是环路储存能量与震荡衰减每弧度损失能量之比，Q值越高，电路在激励后会有较大的过冲

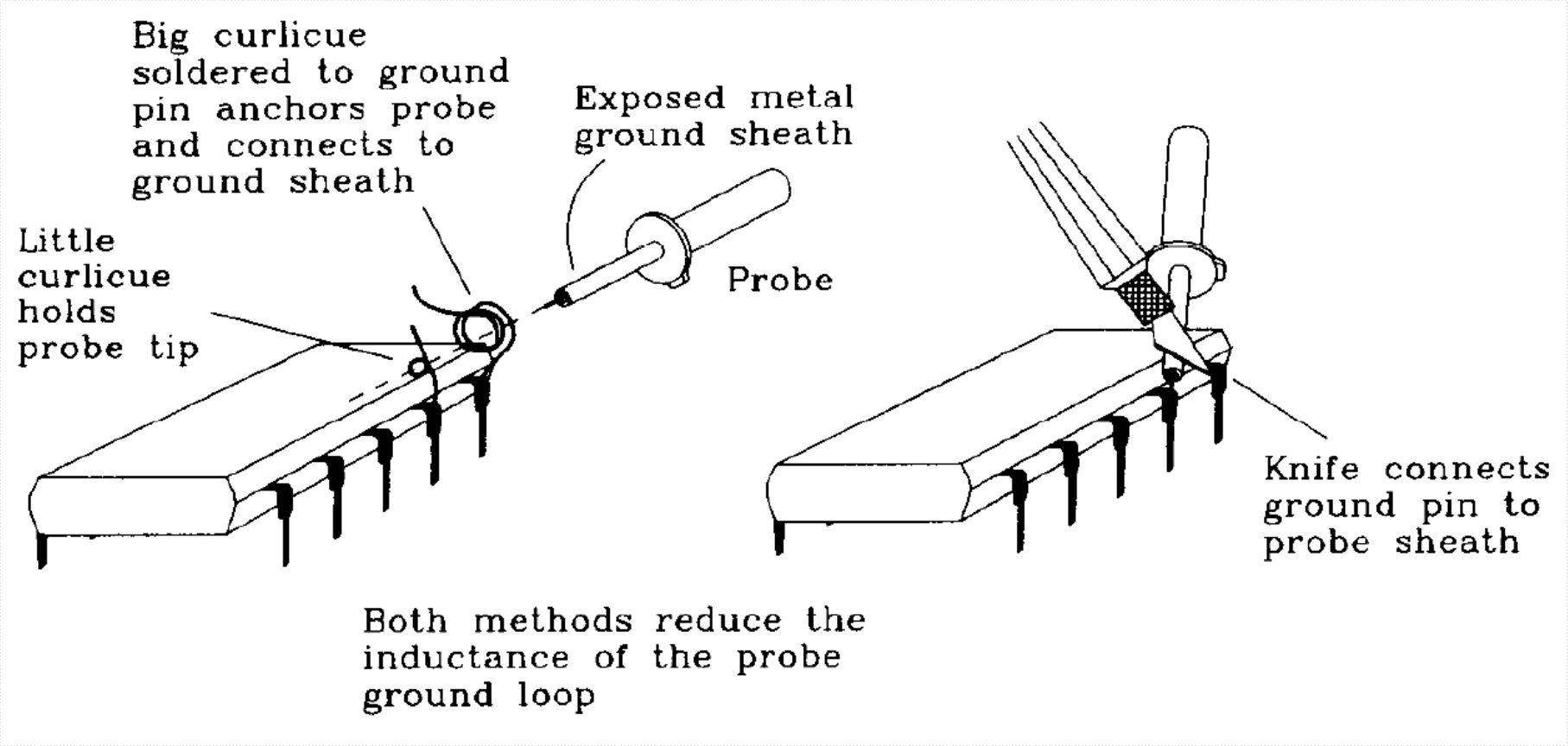
$$Q \approx \frac{(L/C)^{1/2}}{R_S}$$

- 不同逻辑驱动，Rs不同。上述参数使得在100MHz附近，不同Rs值造成不同的过冲现象。当然，若示波器带宽在100MHz以下，没有问题。

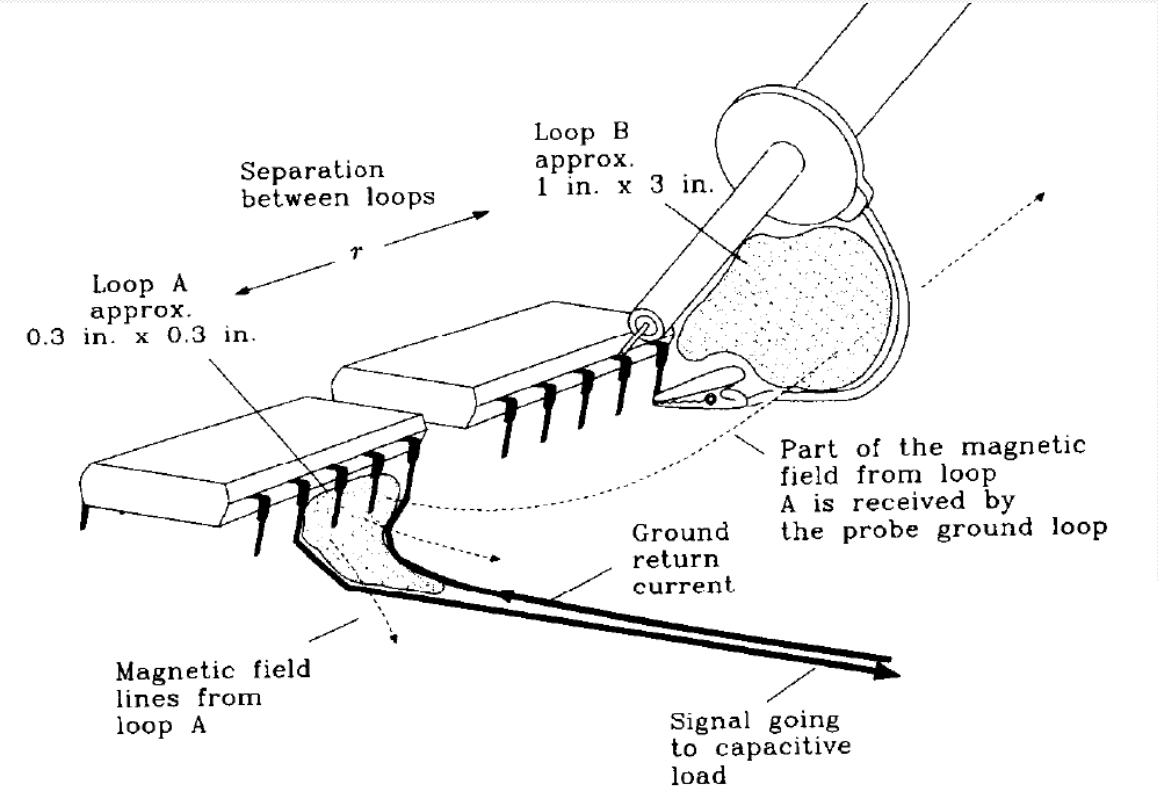


## ■ 注意示波器探头地环路自感对测量信号的影响（3）

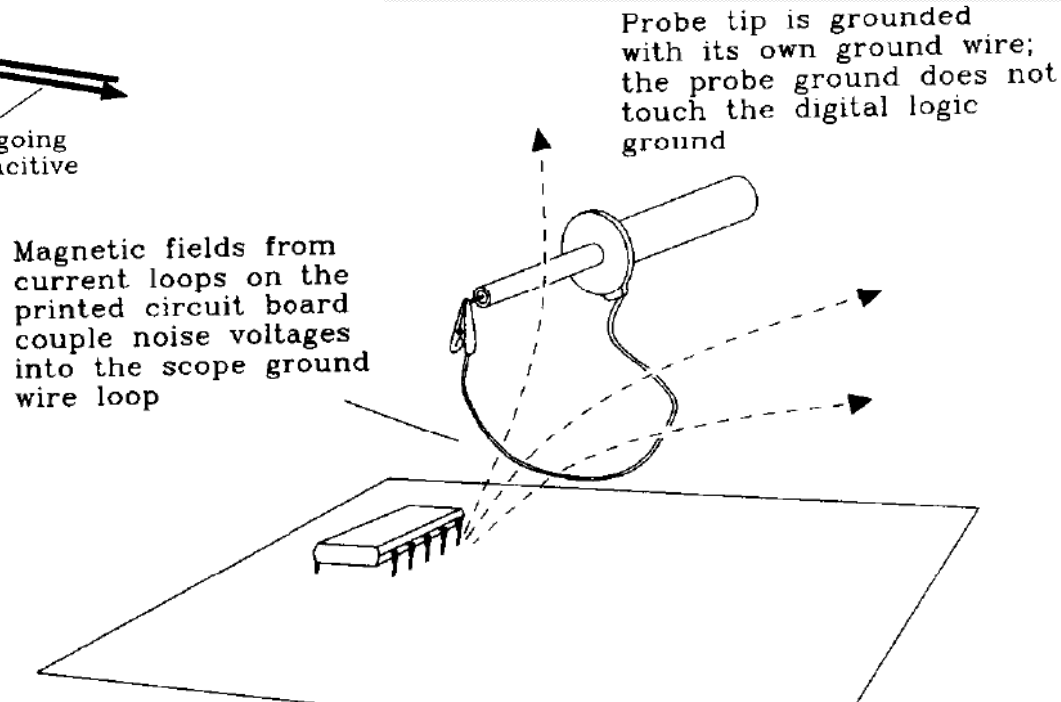
– 解决方法：尽量缩短地环路



# 示波器探头地环路对杂散信号的拾取



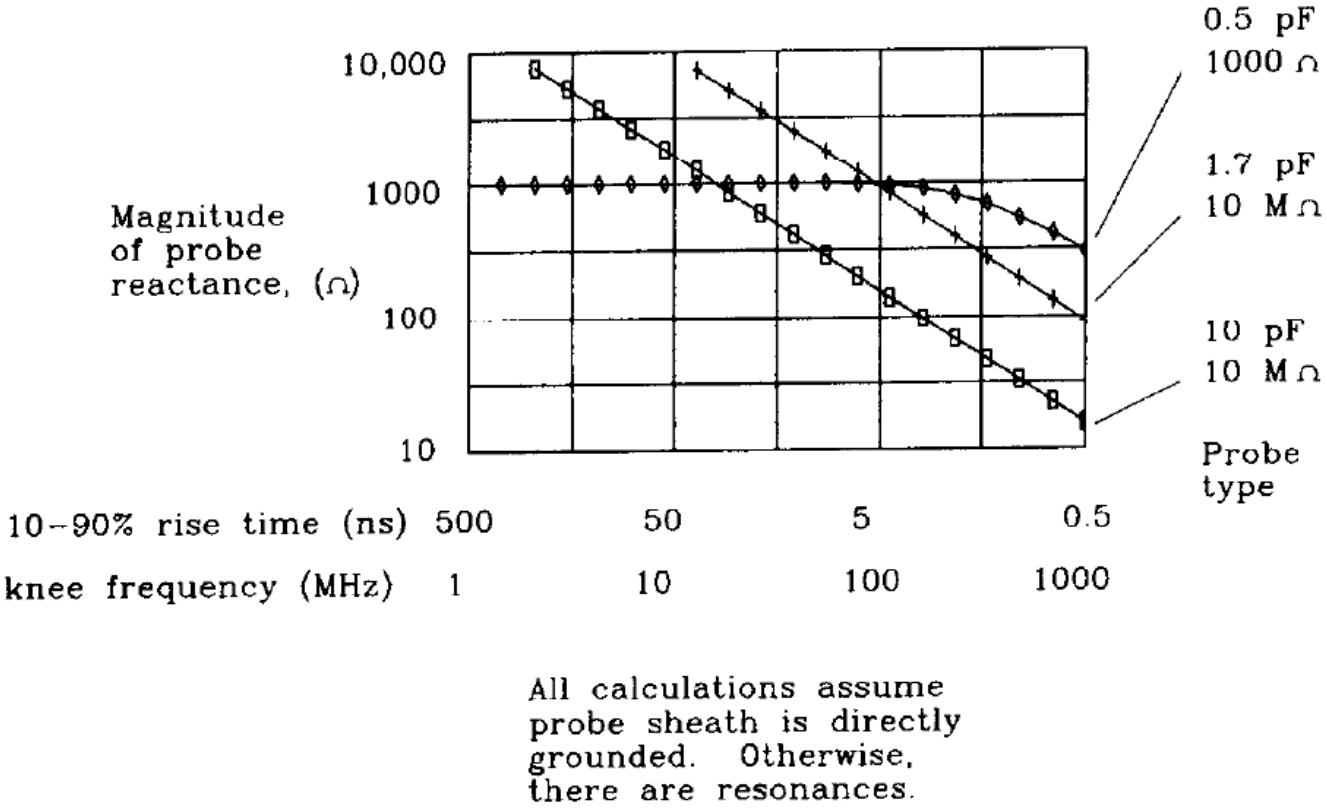

1. 将探头地尽量靠近待测点，减少地线面积
2. 探头地环路越短越好
3. 将地线夹和探头直接相连，就可测量到拾取的噪声



## ■ 示波器探头的负载效应（1）

– 主要考虑探头和被测电路在Knee频率时的源阻抗和探头的输入阻抗，常用探头有三种：

(1) 10 × passive probe with 0.5-pF, 1000-Ω input
(2) 10 × FET active input probe with 1.7-pF, 10-MΩ input
(3) 10 × passive probe with 10-pF, 10-MΩ input.




1. 要使探头对被测信号造成不大于10%的影响，要选择探头阻抗10倍于源阻抗
2. 10pf探测在3ns上升时间信号来看仅100Ω输入电阻
3. 探头电容越小，意味着轻负载和高测量性能

## ■ 示波器探头的负载效应（2）

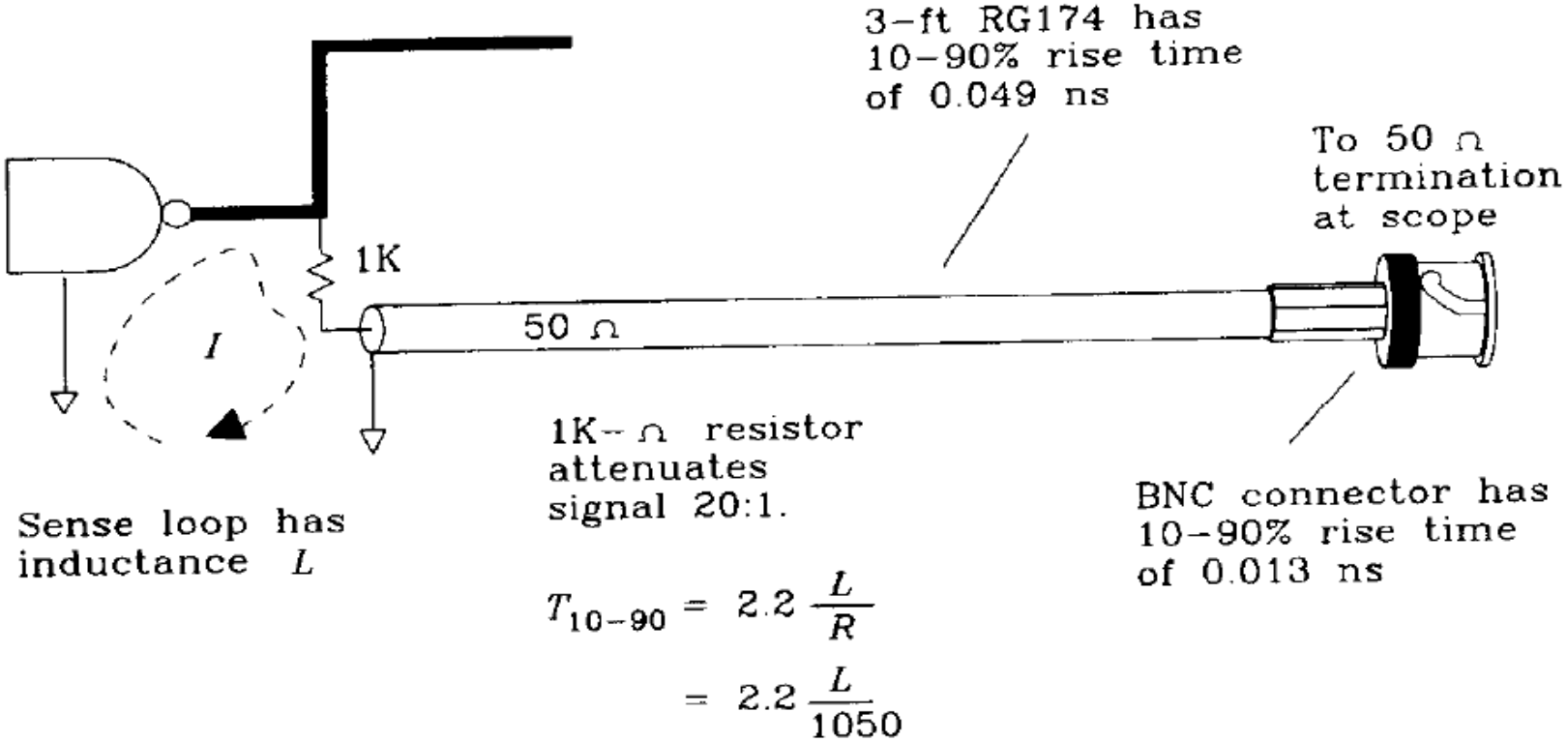



**Figure 3.14** Shop-built 20:1 probe.

1. 要使10pf探头能够测量上升时间小于2ns的信号，可以考虑分压测量
2. 用1KΩ串联探头，示波器只得到20：1的分压，但l环路的上升时间减小
3. 探头支路的总电容为1K电阻的寄生电容（约0.5pf）和探头电容的串联，很小！可以较精确地测量信号，代价是电压灵敏度降低了20倍。

## ■ 避免探头屏蔽电流对测量的影响

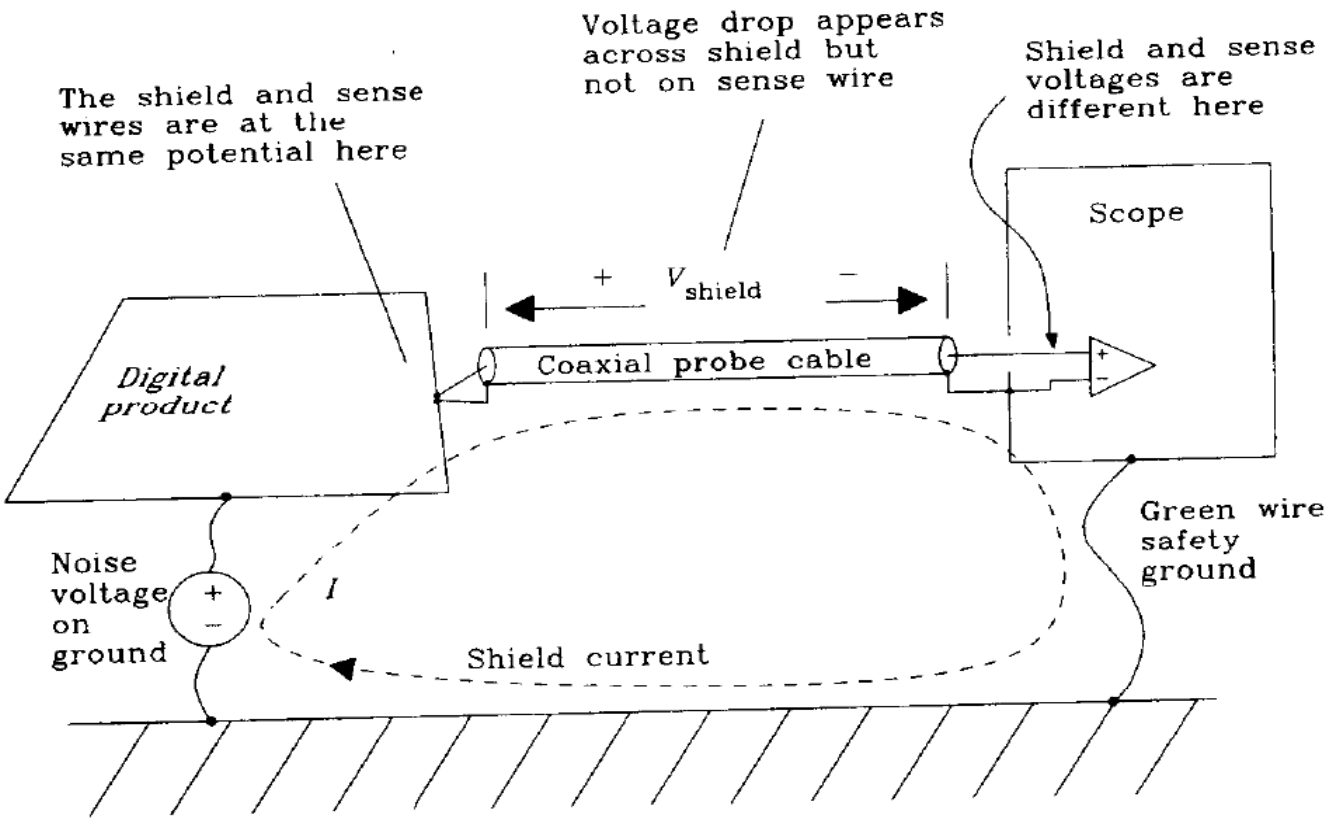



**Figure 3.17** Noise pickup from probe shield currents.

1. 任何在逻辑地和机壳地之间的电压差都会产生沿屏蔽线流动的电流，在信号线上没有该电流，在屏蔽线上有电压降：Vshield=Rshield X I
2. 将探头信号线和屏蔽线同接在逻辑地上，示波器上就能观察到该电压差。
3. 屏蔽电压差与屏蔽线的电阻有关，与屏蔽线的电感无关。

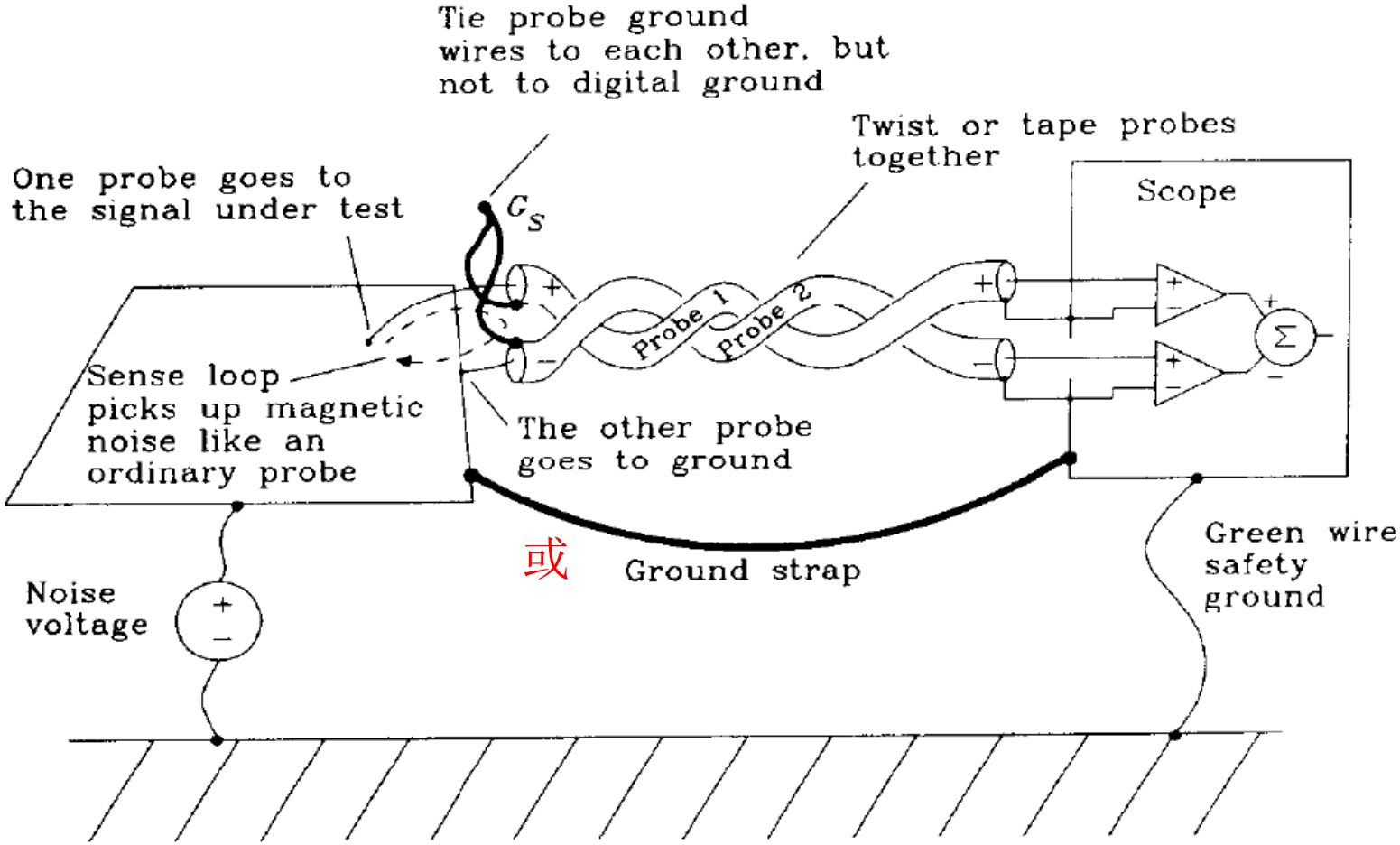



**Figure 3.18** Using differential probing to eliminate shield current noise.

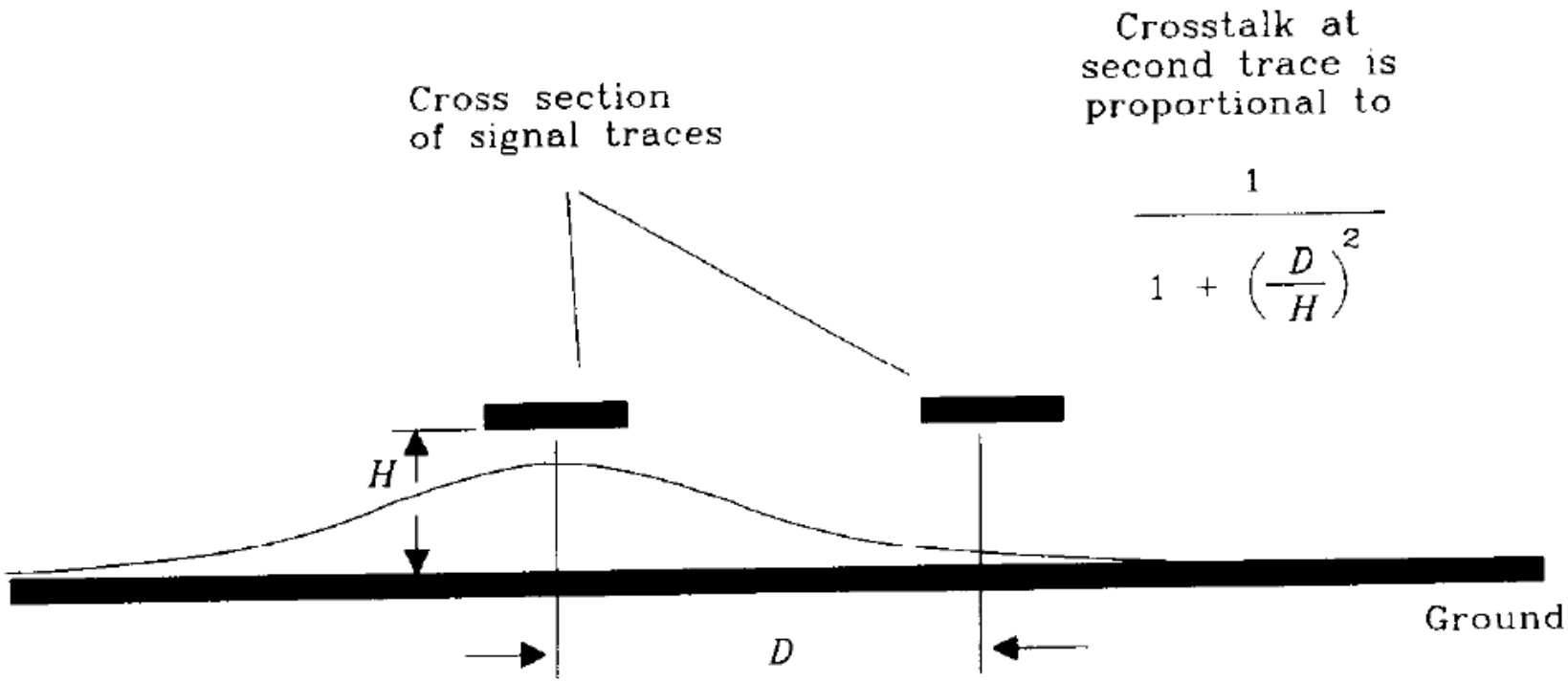
1. 降低屏蔽线电阻
2. 在逻辑地和示波器地之间增加分流通路
3. 关掉部分电路，仅开通待测部分
4. 屏蔽线上串接电感（在100KHz-10MHz范围内很有效）
5. 考虑将示波器保护地暂时断开
6. 使用1：1探头，而不是10：1探头，后者使屏蔽电压大10倍
7. 重新设计电路板使地噪声最小
8. 使用差分探头（或自制差分探头）如图

# 地平面与布线

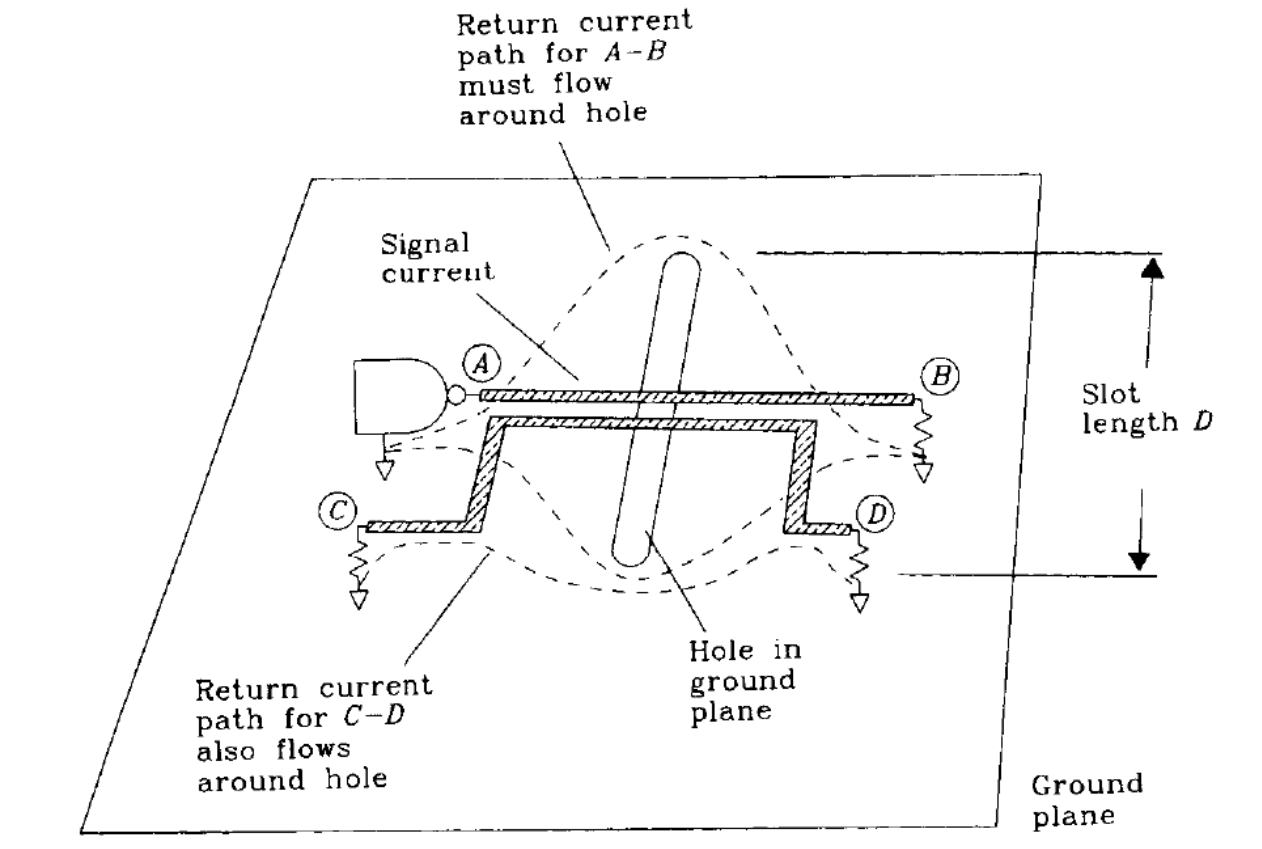
- 高速电路中电源、地平面和布线主要三方面考虑：
  - 提供稳定的参考电压
  - 分配整个电路电源
  - 控制信号间的串扰
- 低速电路中，电流总是沿着最小电阻路径回流。在高速电路中，电流总是沿着最小感抗回路。最小感抗回路直接位于信号线下方，使得整个电流回路面积最小。
- 高速电路中，串扰主要依赖于两个回路之间的互感和互容，互感串扰往往大于或至少等于互容串扰

## ■ 有固定完全地平面的两个信号间的串扰

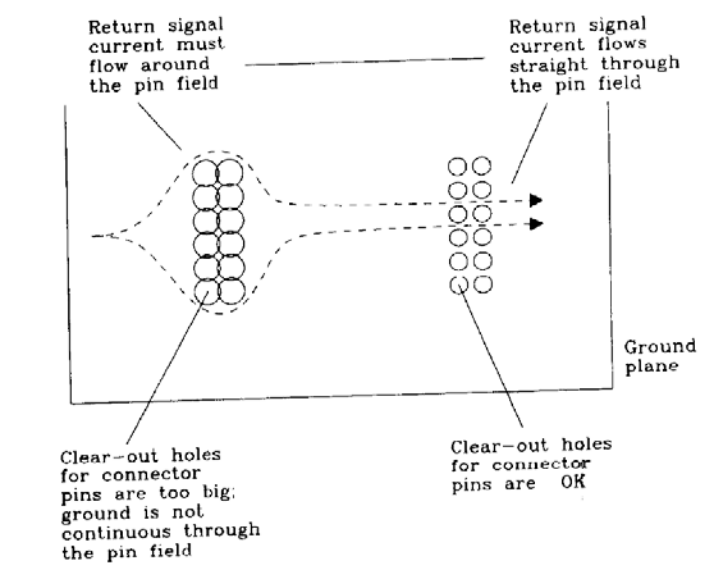
$$\text{Crosstalk} \approx \frac{K}{1+(D/H)^2}$$



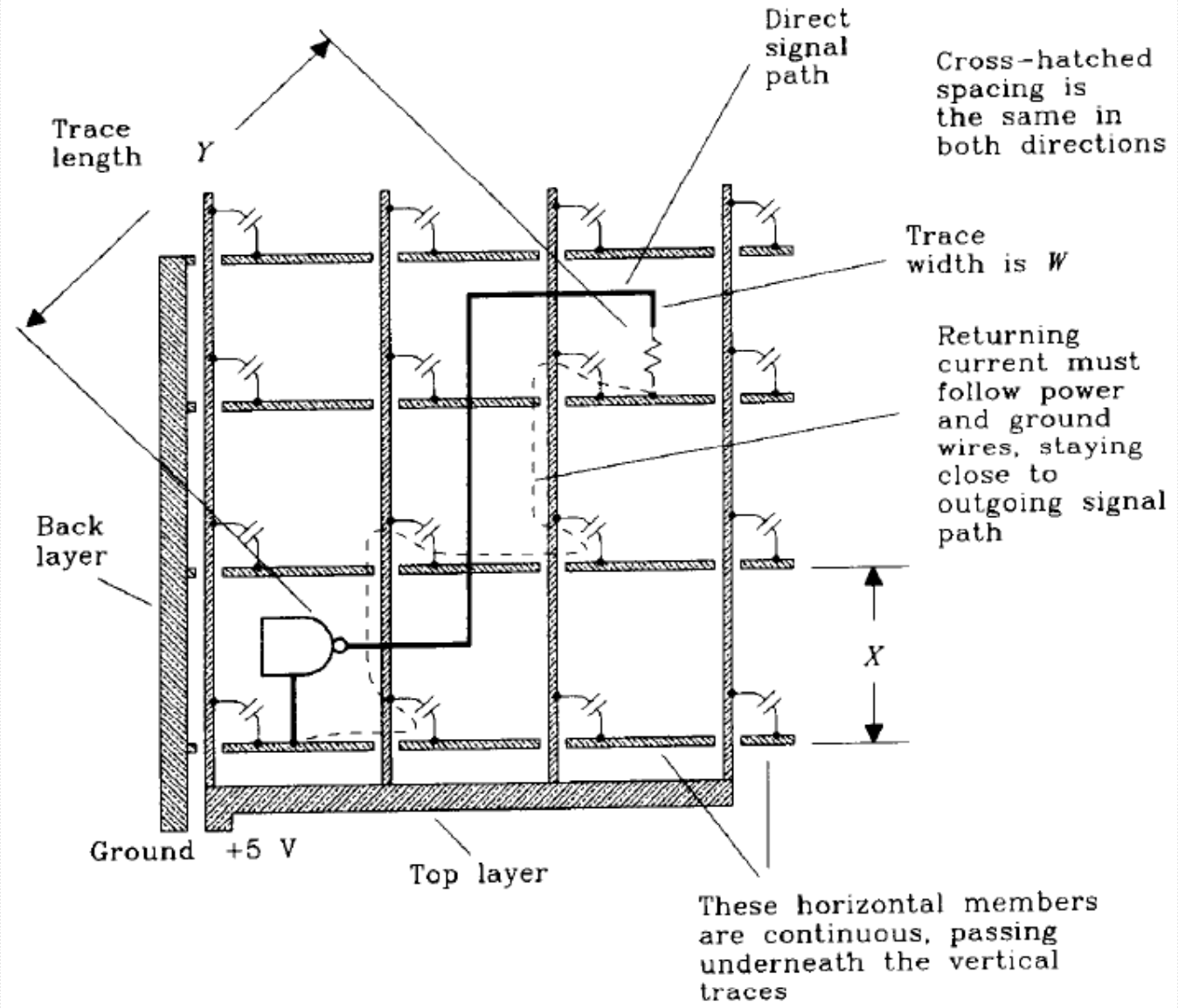
- 开槽地平面上的串扰



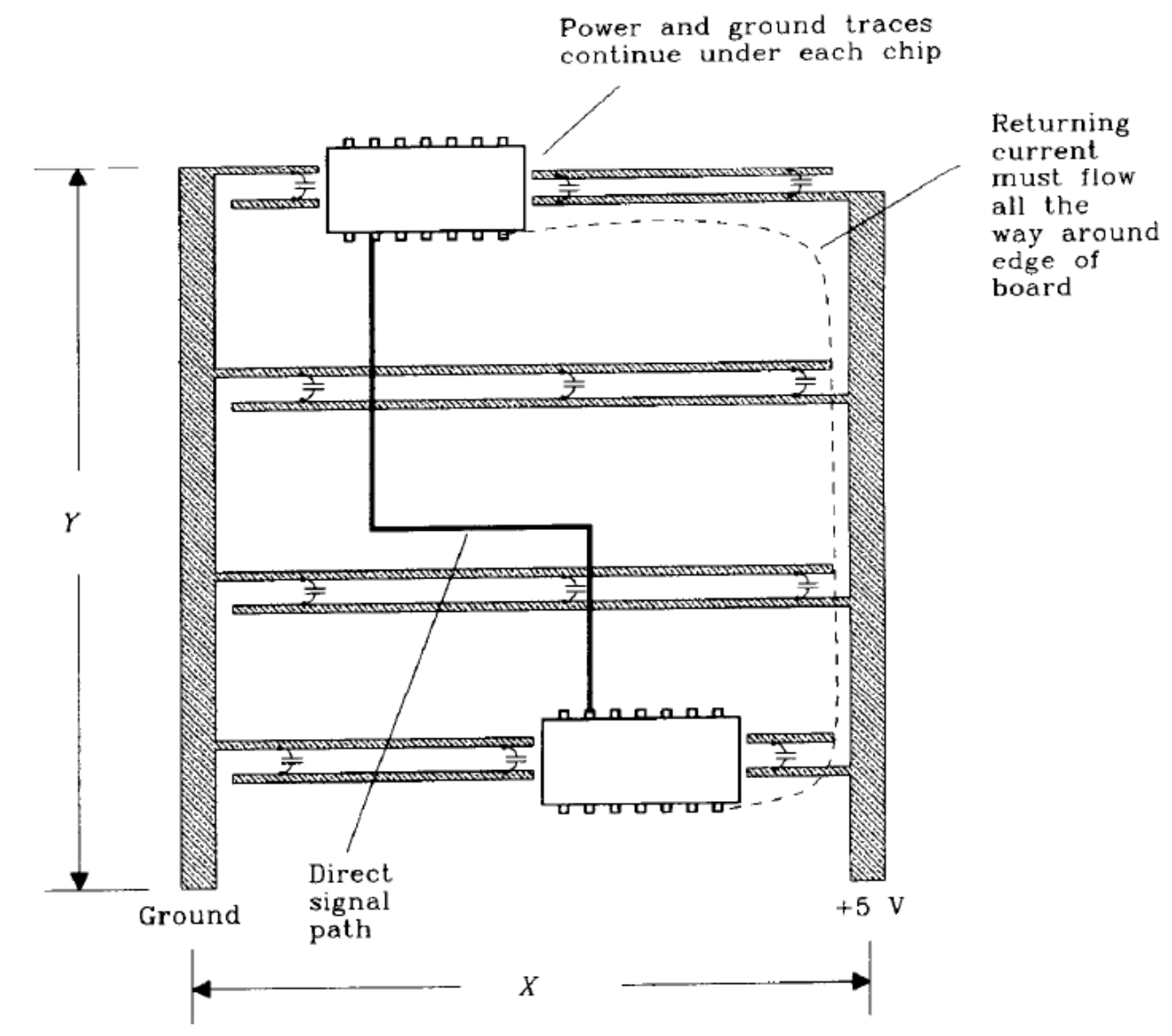

1. 产生多余的电感
2. 使上升时间变慢
3. 使互感串扰增大



## ■ 双层板上电源和地平面要构成栅格结构（1）

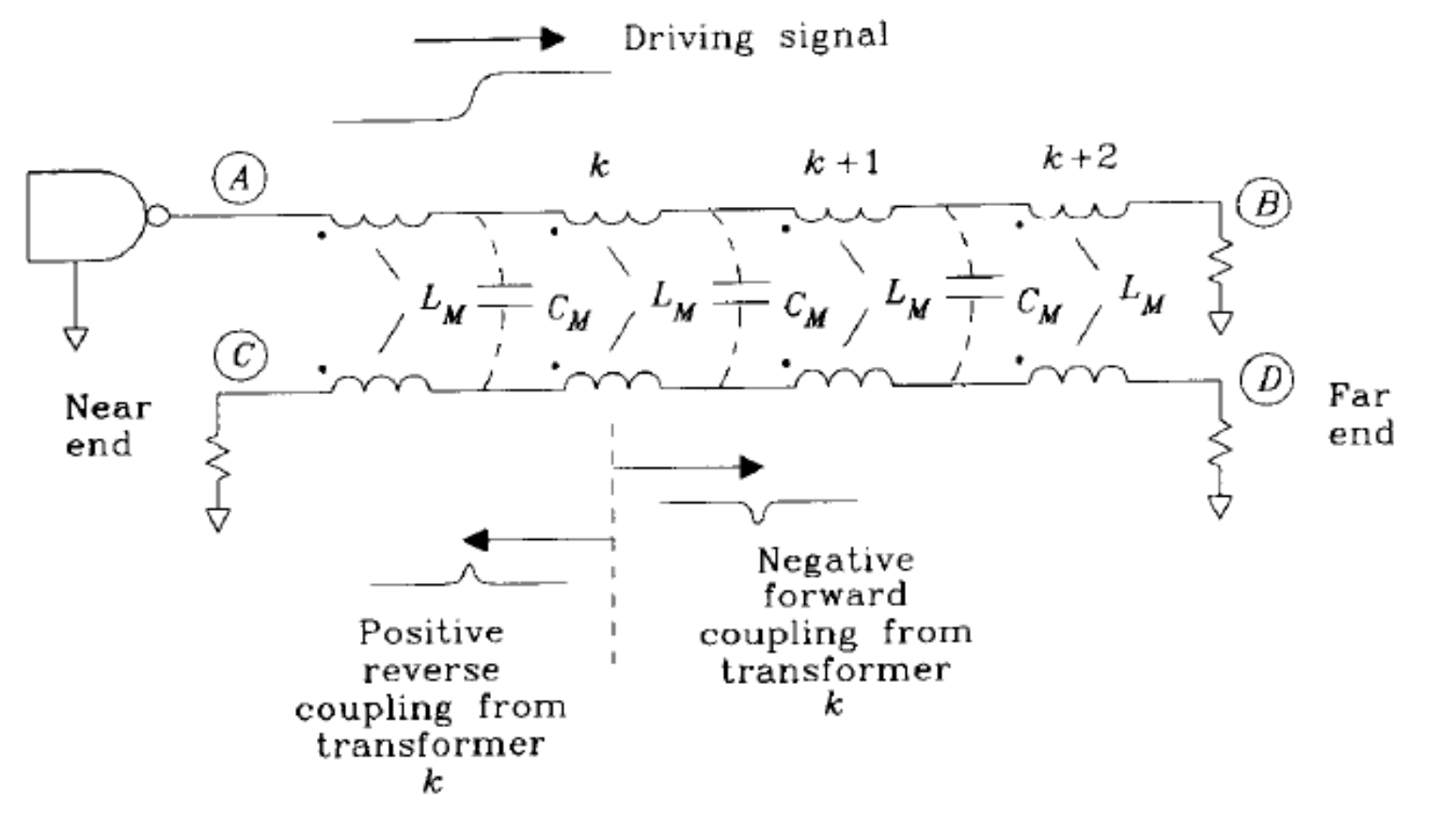


## ■ 双层板上电源和地平面要构成栅格结构（2）



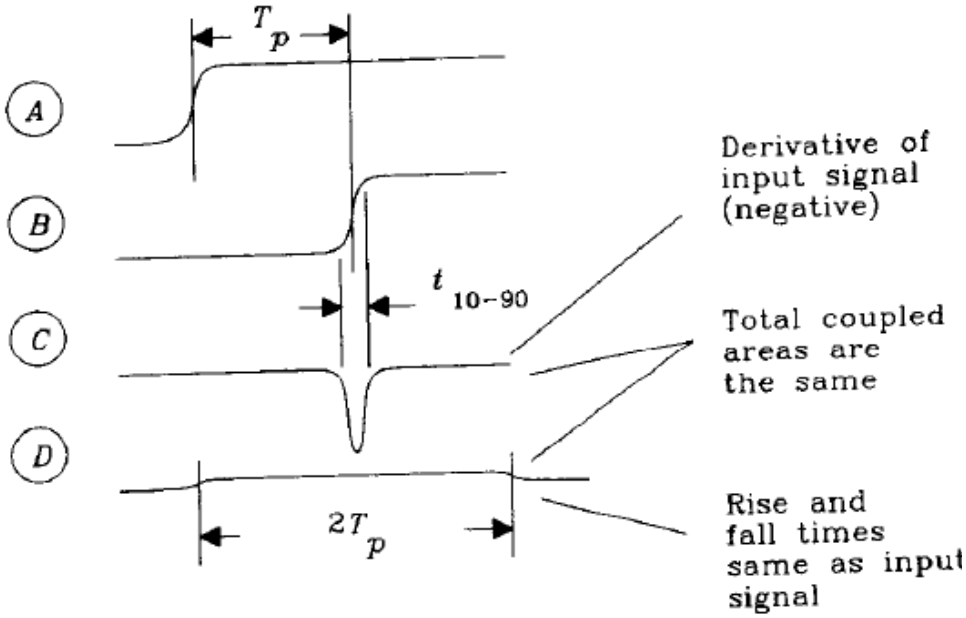

1. 避免手指式结构
2. 大量分布的去耦电容起到至关重要的作用，要尽量缩短电容引脚长度
3. 双层板中，常用一对Guard Trace将敏感信号线并行隔开，可以将串扰减小一个量级。在多层板中，由于有坚实的电平面陪伴，Guard Trace没有用了

## 长线之间的串扰：



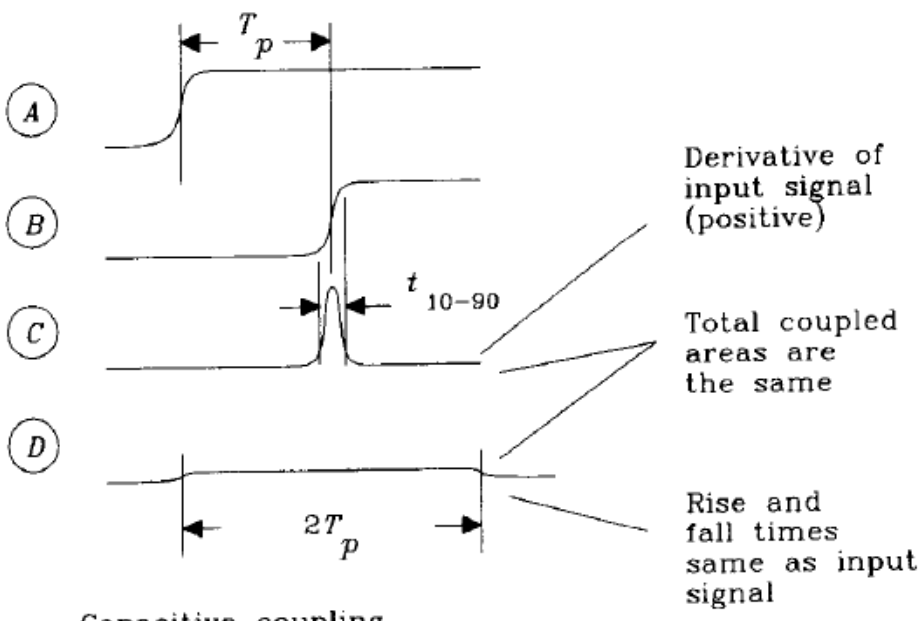

- 互感耦合相当于小变压器耦合机制
- 互容耦合Cm

# 长线之间的串扰（2）




Inductive coupling has opposite polarities in the forward and reverse directions

互感耦合



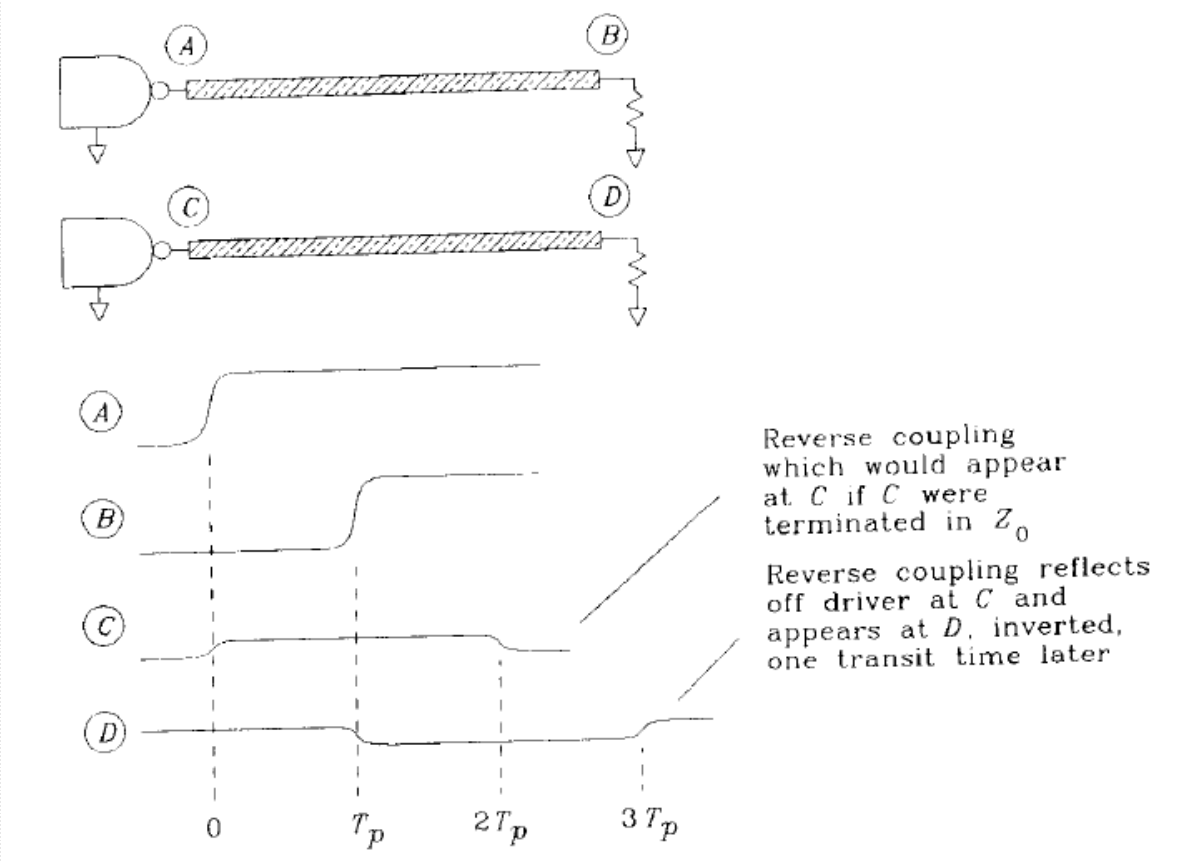

Capacitive coupling has the same polarities in the forward and reverse directions.

互容耦合

1. 通常情况，在坚实的地平面上，互感耦合和互容耦合基本相当，因此前向串扰电压基本抵消，但后向串扰电压叠加加强
2. Strpline显示特别好的互感和互容串扰平衡，因而前向串扰基本没有
3. Microstrips电场从空气中传播，互容串扰叫互感小，导致小的负前向串扰
4. 其他情况（地面有槽等不完全），互感串扰要大得多，前向串扰为负且大，前向串扰从不必反向串扰大。

## ■ 长线间串扰（3）

通常采用末端匹配方式，近端串扰在始端要被反射回去（反射系数-1），因此在末端得到负的反射后的串扰电压




反向串扰可以表示为：对于线长大于一半信号上升时间情况，反向耦合可以建立起全幅度

$$\text{Reverse coupling}(t) = \alpha_R\left[V(t) - V(t-2T_p)\right]$$

反向串扰耦合系数　　输入驱动电压

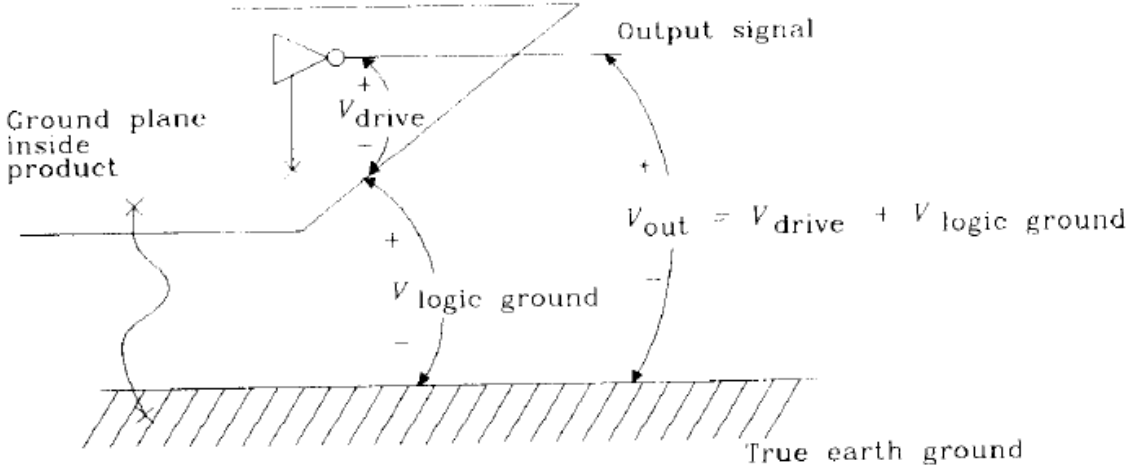
$$\alpha_R \approx \frac{1}{1+(D/H)^2}$$

D是两线间距

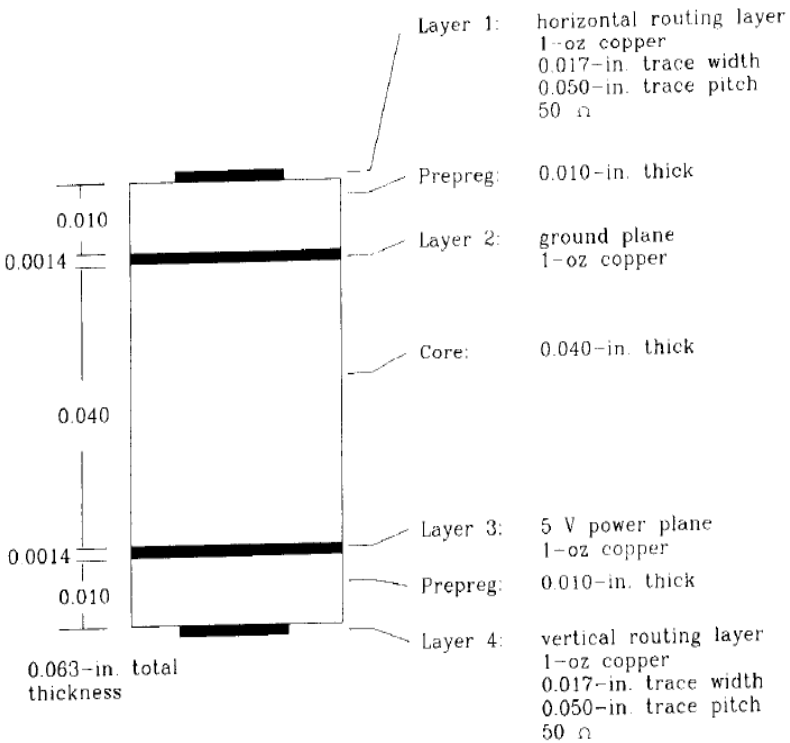
H两线离地平面高度（in）

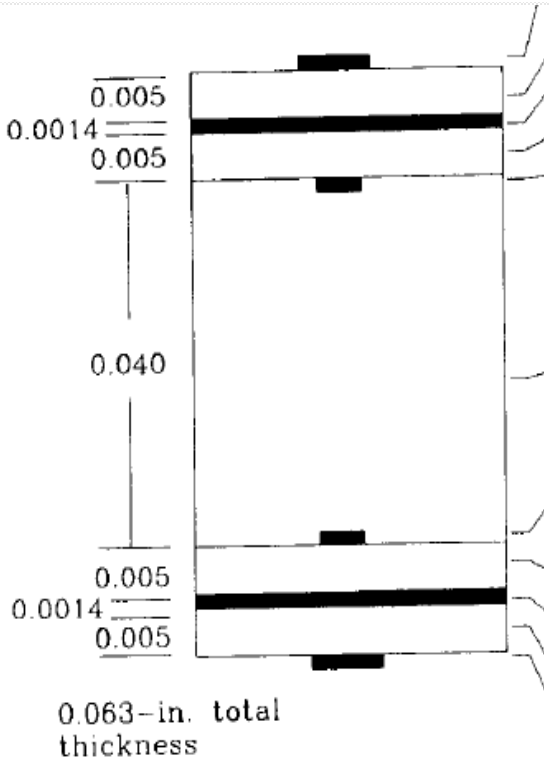
■ 在始端使用小的串联阻尼电阻，结合终端匹配，可以有效减小反向串扰

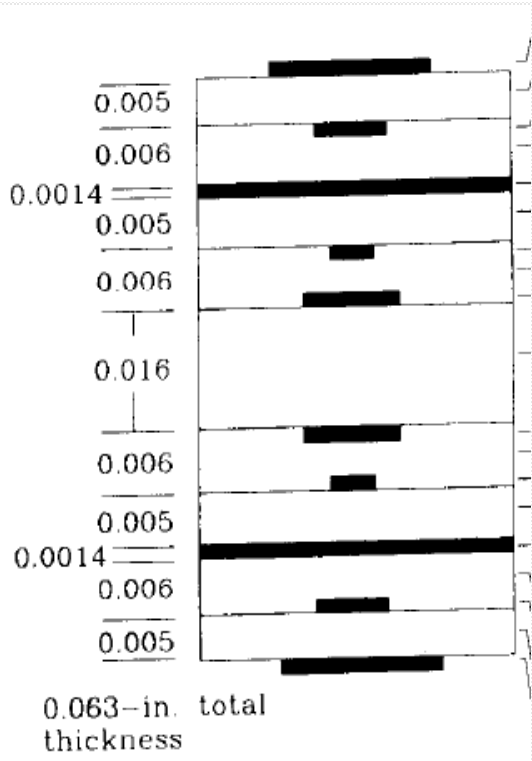
# 布线层安排




A ground connection at high frequencies between logic ground and true earth ground may be ineffective.

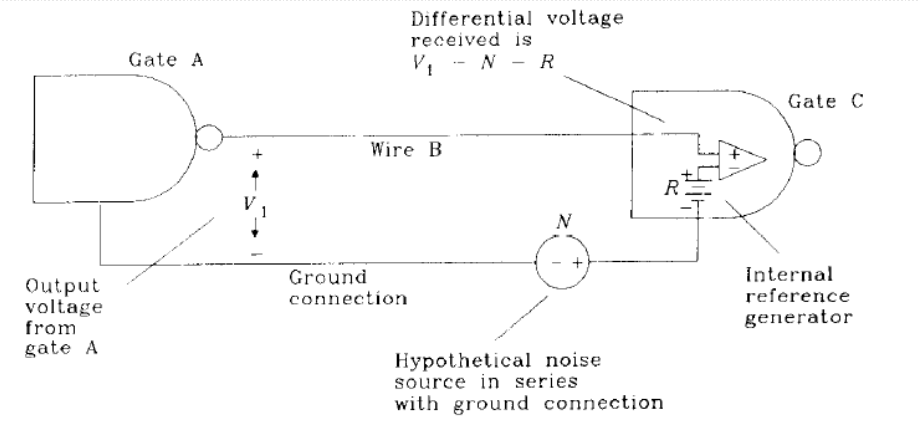


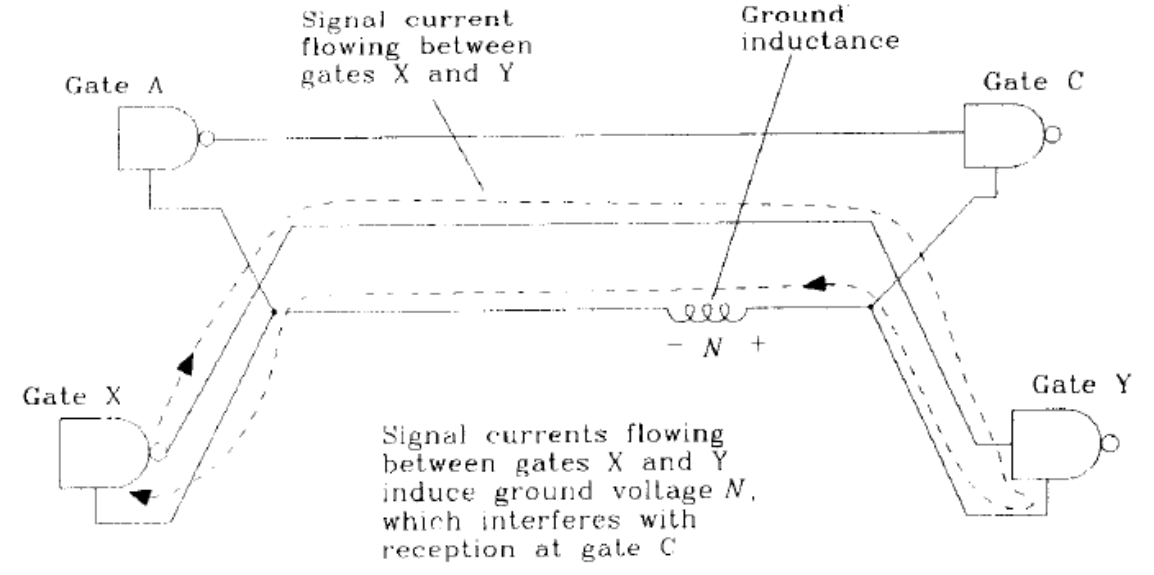



# 电源系统

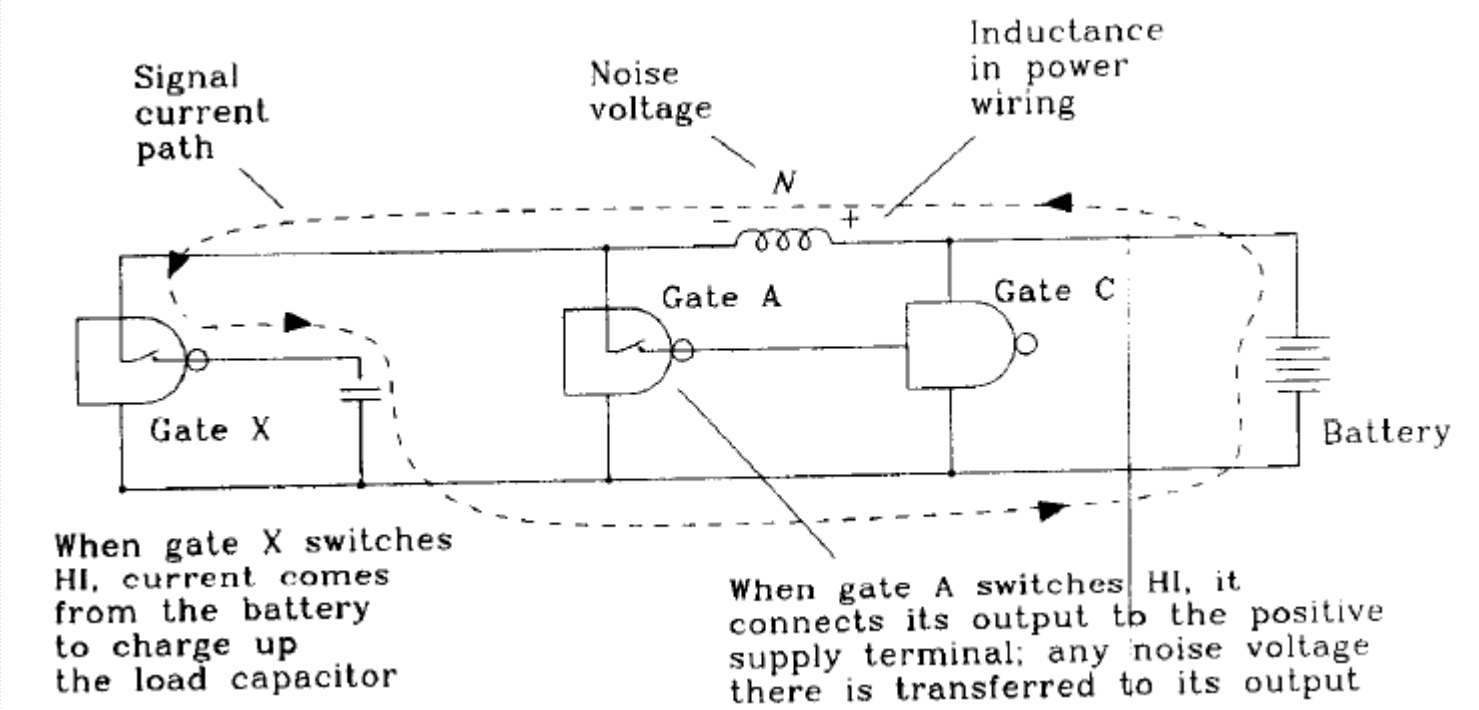
- 作用：分配电源到所有逻辑设备；提供稳定的电压参考
- 原则1：在各逻辑门之间要使用低阻抗的地连接，即需要坚实的地平面



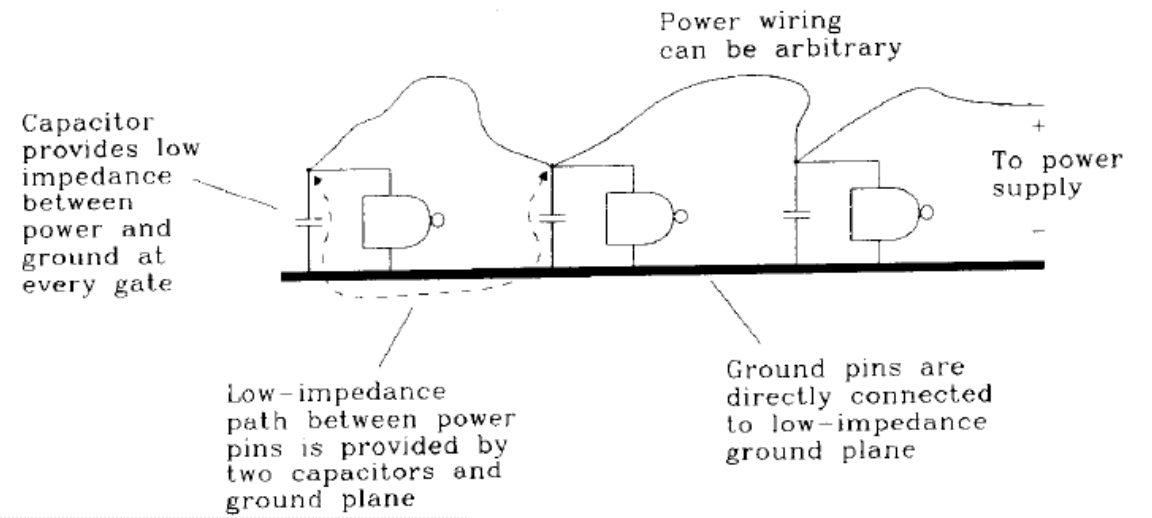

- 公共通道噪声

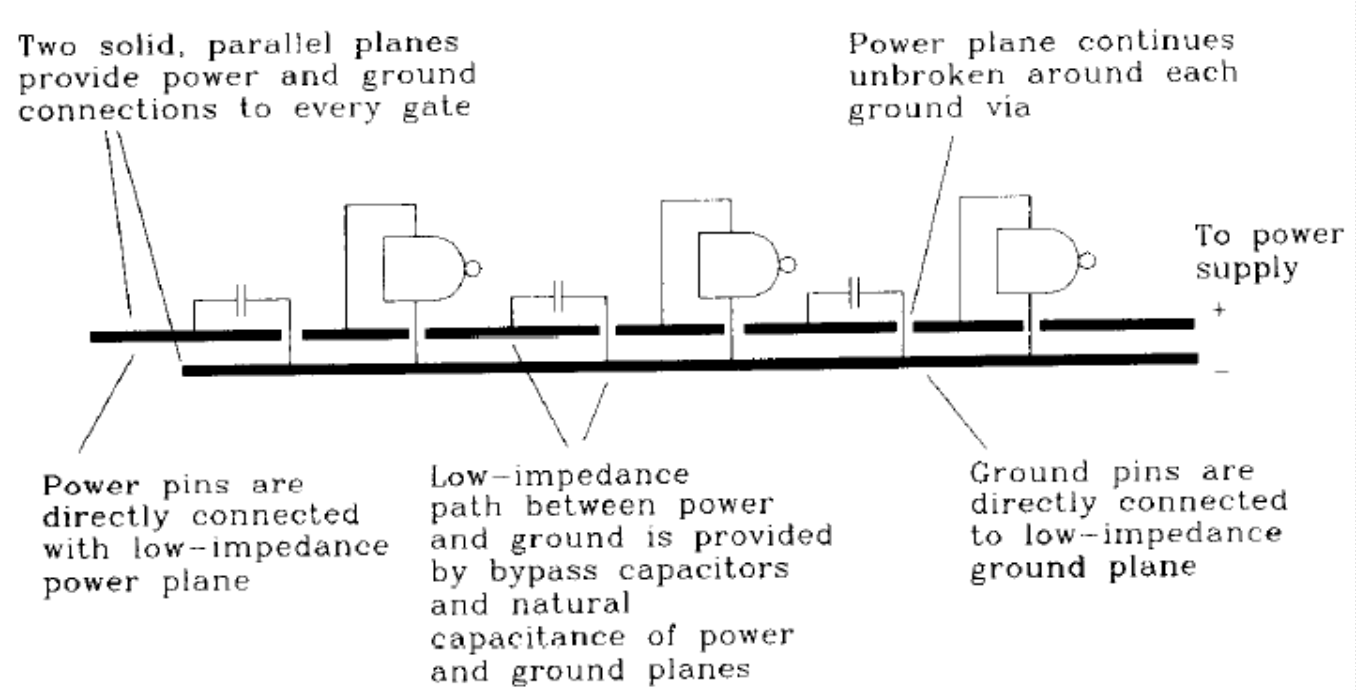


- 原则2：各逻辑门之间要使用低阻抗电源线（电源平面）

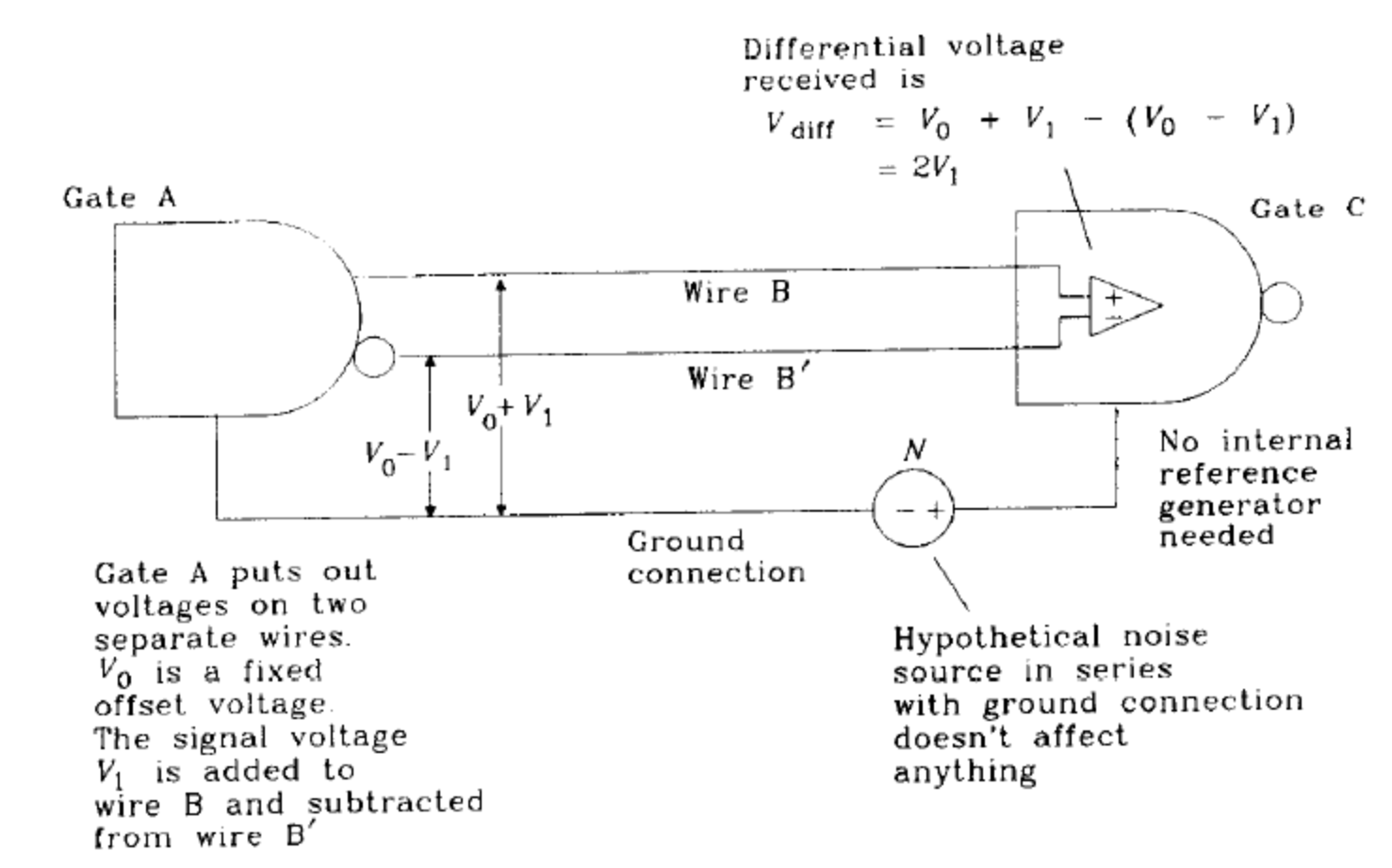


## ■ 原则3：在电源和地平面之间一定要有低阻抗通道



- 采用差分信号传输，可以降低上述三原则的要求



- 统一电压分配
  - 低内阻的电源，连线，大的滤波电容和小的滤波电容阵列，构成多层电源分布系统
  - 分配线要用粗线，降低电阻
  - 分配线的电抗不能指望用粗线来降低，因为电感式连线直径的对数函数。使用较宽的平行布线结构要比用园线分布电源好
  - 产分信号传输对对电源电压波动的抑制能力强
  - 旁路电容在高频时提供低阻抗通道，使用大量的小旁路电容可以获得低电感