

示波器探头相关 理论与推导

修订页

[illegible]

目录

1	探头补偿推导.....	1
2	示波器与探头组合后输入电容如何影响信号上升时间.....	6
2.1	RC 电路的零状态响应.....	7
2.2	加入示波器探头等效电路后现象.....	9
3	探头地线电感是如何引起振铃的.....	11
3.1	推导:	13
4	总结:	15

1 探头补偿推导

示波器使用前探头必须校准（校准按钮位于 BNC 接头下方孔的位置），否则测量信号失真。

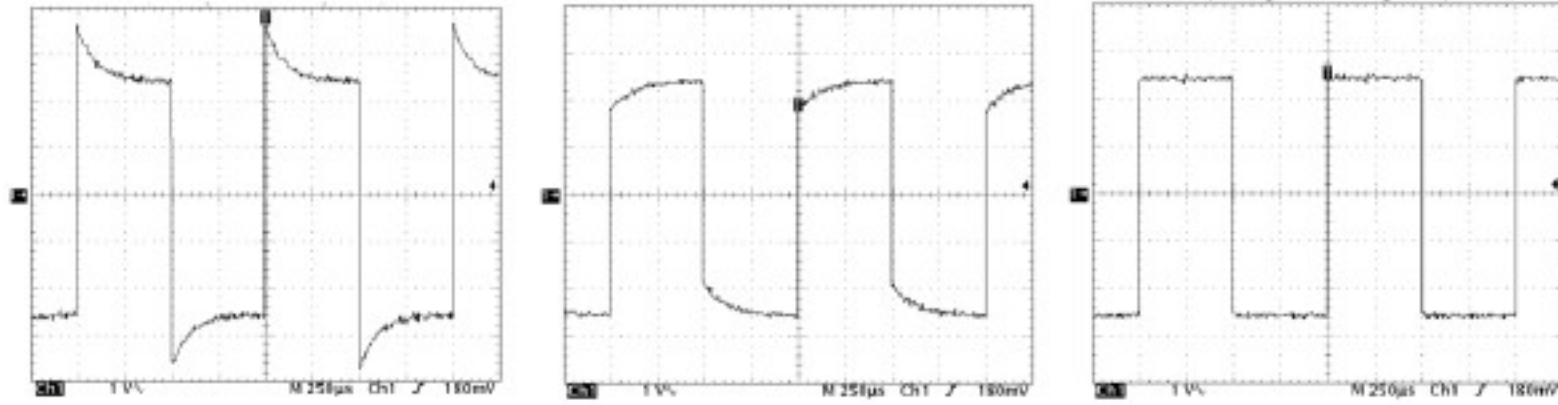


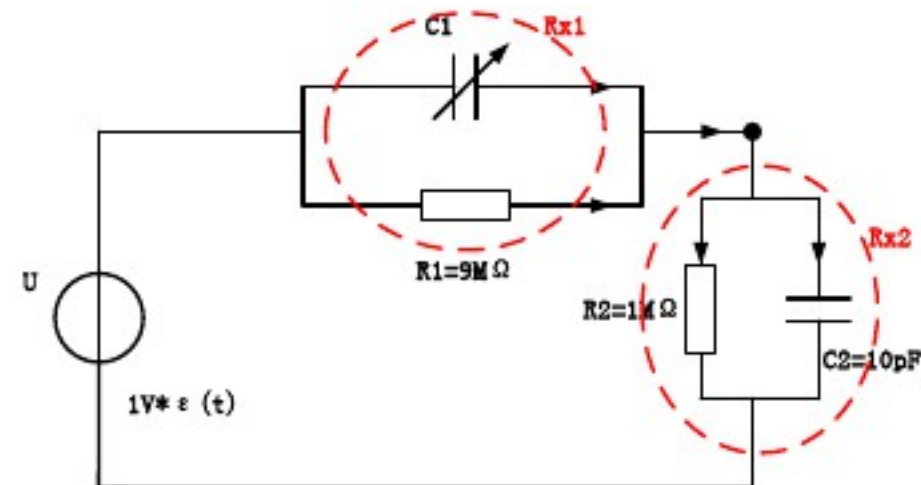
图 1-1 过度补偿、补偿不足、正确补偿（Tektronix）



图 1-2

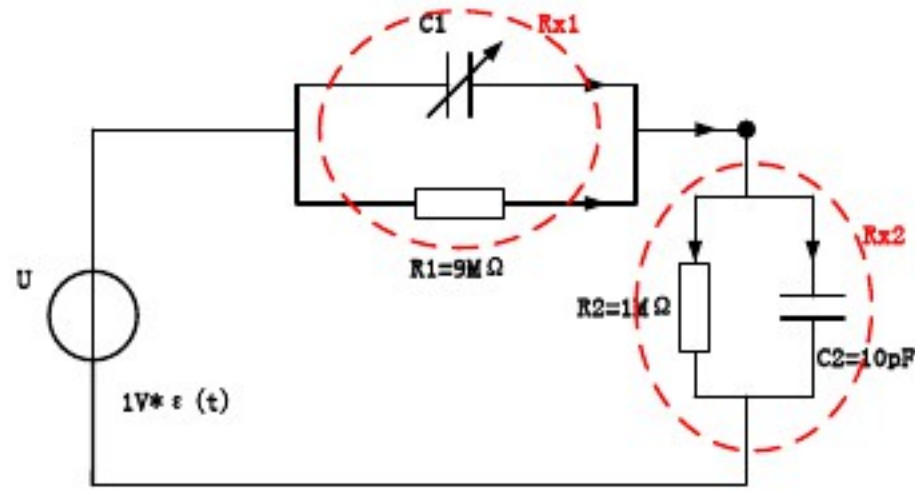
一般信号经过电容与电阻的组合，输入与输出必然是与频率相关。这使得示波器对方波信号（边沿携带无穷信号频率分量）产生失真。这种影响可以通过补偿电容的设置消除。

原理如下：



证明: $R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2$ 时, 右侧 $U_{R_{x2}} = U \cdot 1/10$, 与频率无关。

1. 解法一：



阻抗解析

$$R_{x1} = \frac{\frac{1}{j\omega C_1} \cdot R_1}{\frac{1}{j\omega C_1} + R_1} = \frac{R_1}{j\omega R_1 C_1 + 1}$$

$$R_{x2} = \frac{\frac{1}{j\omega C_2} \cdot R_2}{\frac{1}{j\omega C_2} + R_2} = \frac{R_2}{j\omega R_2 C_2 + 1}$$

$$\frac{U_{R_{x2}}}{U} = \frac{R_{x1}}{R_{x1} + R_{x2}}$$

$$= \frac{\frac{R_1}{j\omega R_1 C_1 + 1}}{\frac{R_1}{j\omega R_1 C_1 + 1} + \frac{R_2}{j\omega R_2 C_2 + 1}} \quad \text{分子分母同乘以 } j\omega R_1 C_1 \text{ 得}$$

$$= \frac{R_1}{R_1 + \frac{j\omega R_1 C_1 + 1}{j\omega R_2 C_2 + 1} \cdot R_2}$$

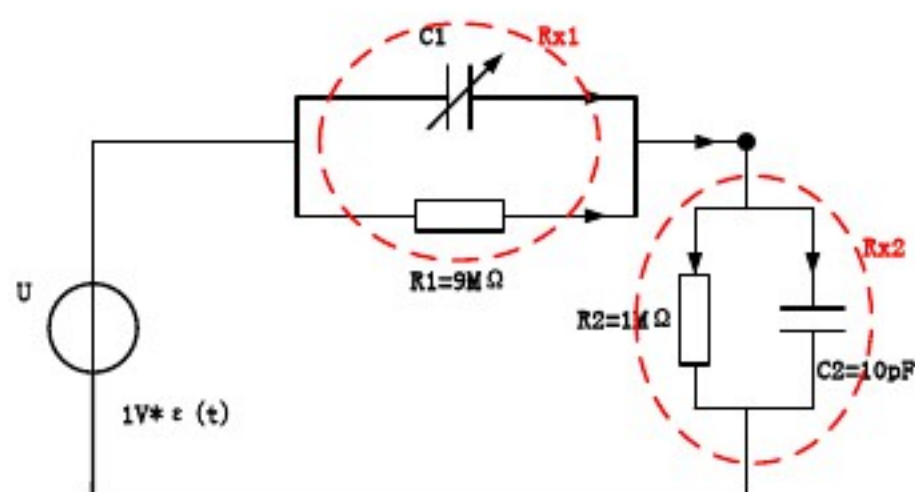
当满足条件

$$\frac{j\omega R_1 C_1 + 1}{j\omega R_2 C_2 + 1} = 1$$

则 $R_1 C_1 = R_2 C_2$

$$\frac{U_{R_{x2}}}{U} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{10} \quad \text{与 } f \text{ 无关。}$$

2. 解法二：
时域分析



设电容 C_2 两端的电压为 $U_{C_2}(t)$

$$i_{C_2} = C_2 \frac{dU_{C_2}(t)}{dt}$$

$$i_{R_2} = \frac{U_{C_2}(t)}{R_2}$$

$$U_{C_1}(t) = U - U_{C_2}(t)$$

$$i_{R_1} = \frac{U - U_{C_2}(t)}{R_1}$$

$$i_{C_1} = C_1 \frac{d(U - U_{C_2}(t))}{dt}$$

在右上角黑色节点处列 KCL 方程：

$$i_{C_2} + i_{R_2} = i_{R_1} + i_{C_1}$$

即：

$$\begin{aligned} eq1 &= i_{C_2} + i_{R_2} - i_{R_1} - i_{C_1} \\ &= C_2 \frac{dU_{C_2}(t)}{dt} + \frac{U_{C_2}(t)}{R_2} - \frac{U - U_{C_2}(t)}{R_1} - C_1 \frac{d(U - U_{C_2}(t))}{dt} \end{aligned}$$

导入 matlab 解方程求 $U_{C_2}(t)$ 并作图：

注：初始条件，不满足换路定律。

$$\begin{cases} -C_1 U_{C_1}(0^+) + C_2 U_{C_2}(0^+) = -C_1 U_{C_1}(0^-) + C_2 U_{C_2}(0^-) = 0 \\ U_{C_1}(0^+) + U_{C_2}(0^+) = U \end{cases}$$

$$U_{C_2}(0^+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U$$



图 1-3 欠补偿（下）与过补偿（上）

2 示波器与探头组合后输入电容如何影响信号上升时间

没有出色的示波器探头，也没有出色的示波器，只有示波器与探头匹配，才能是一台出色的电子测量仪器。好马配好鞍，探头挑选不适会影响信号质量。

虚线左侧为信号源模型，右侧为加入示波器简化的示波器探头后的等效电路图。

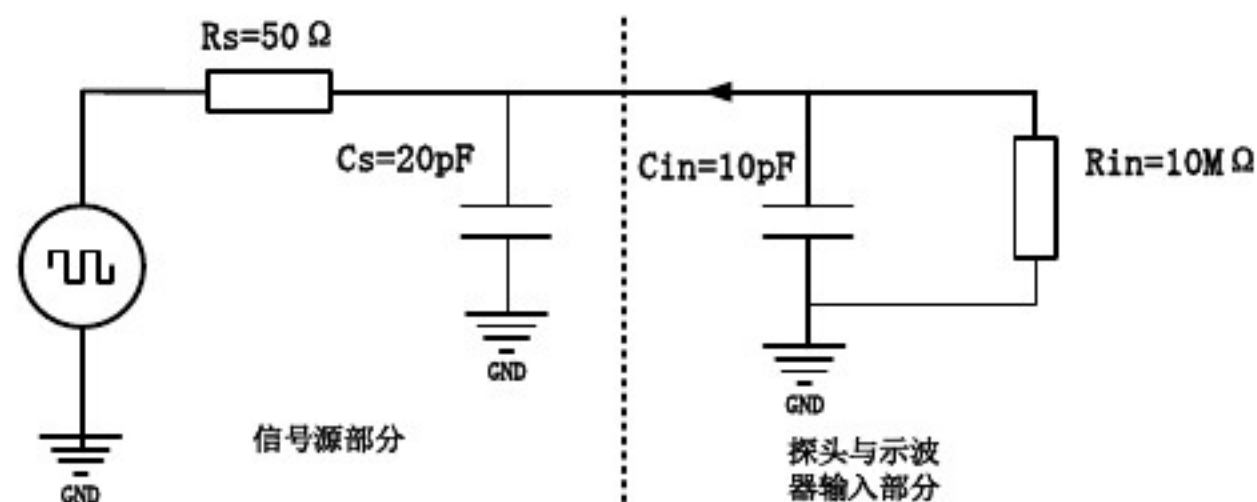


图 2-1

2.1 RC 电路的零状态响应

在信号发生器方波信号刚产生，虚线左侧信号源部分可以等效成 RC 电路的零状态响应，U 为 1V 的电压源， $R=50\Omega$ ， $C=20\text{pF}$ 。

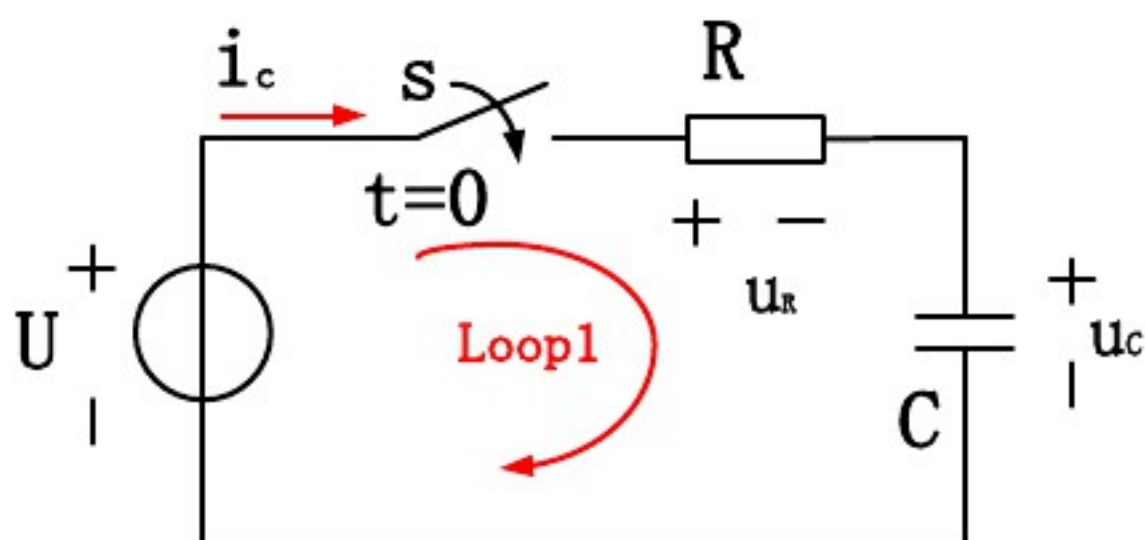


图 2-2

设电容两端的电压为 u_c ，参考方向如图所标示
对红色回路 Loop1 列 KVL 方程得

$$u_R + u_c = U$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = U$$

导入 matlab 符号函数求解微分方程

```
syms R C uc(t) U
eq1=R*C*diff(uc,t)+uc-U;
cond=uc(0)==0;
dsolve(eq1,cond)
```

解得：

$$u_c(t) = U - Ue^{-\frac{t}{RC}}$$
$$= U(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

作上式图可得

电容上的电压 **uc** 是缓慢增加，最终经过一个过渡过程达到稳态值 $U=1V$ 。
从 10%-90%定义为信号的上升时间，此图中约为 2.2ns。

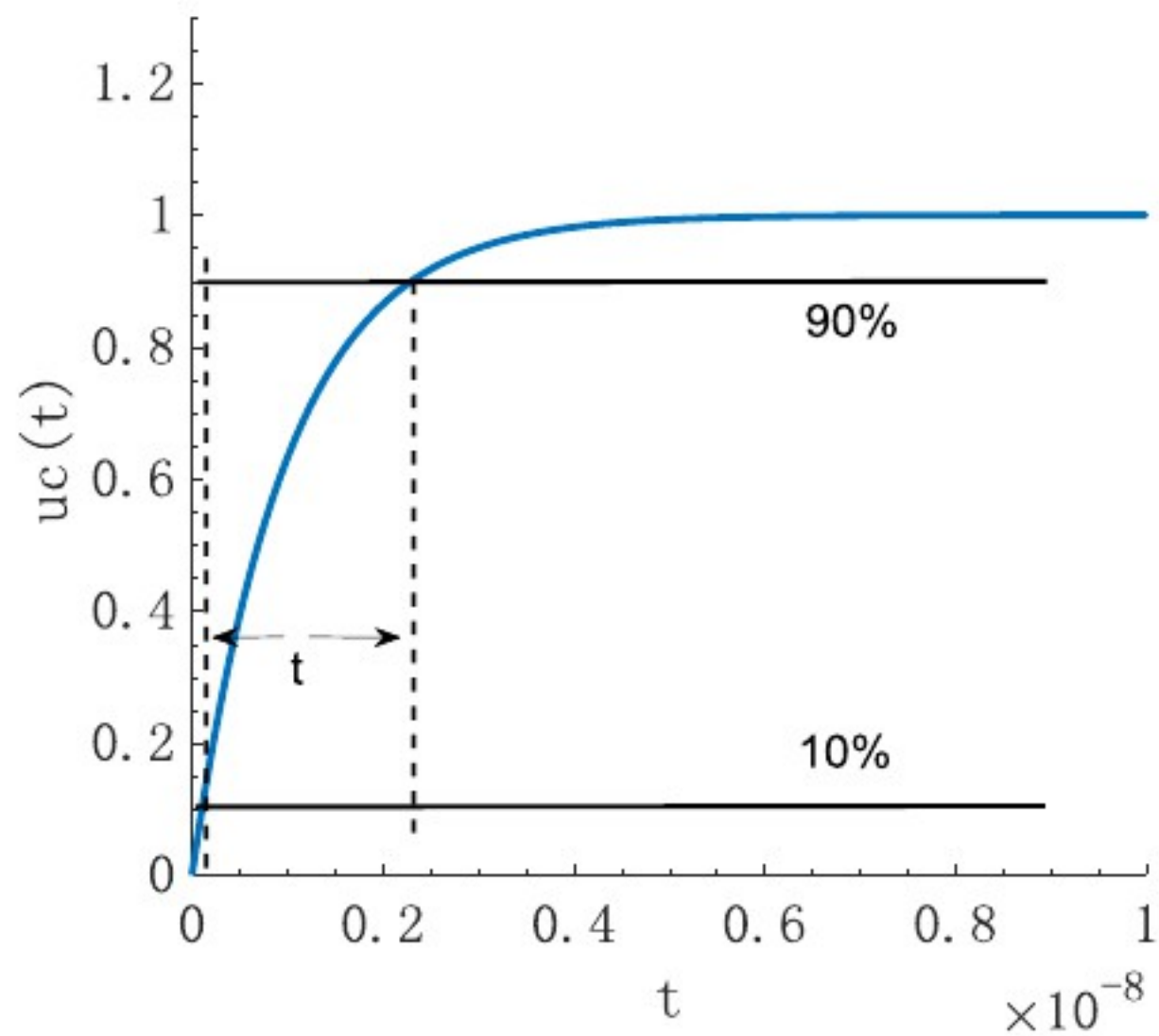


图 2-3

2.2 加入示波器探头等效电路后现象

加入探针后的电路图

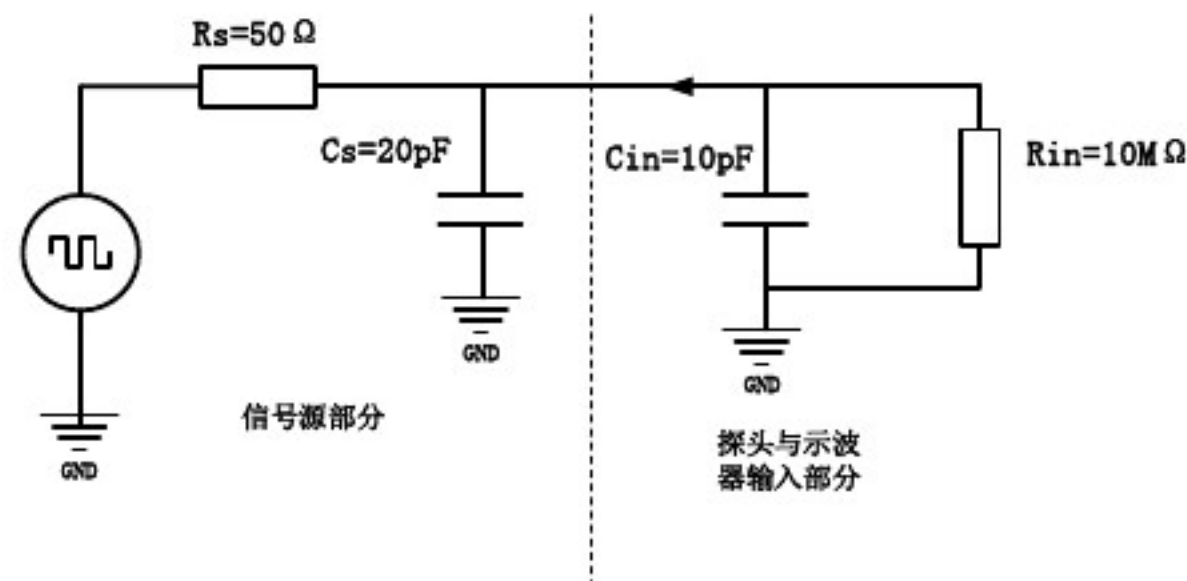


图 2-4

等效电路图

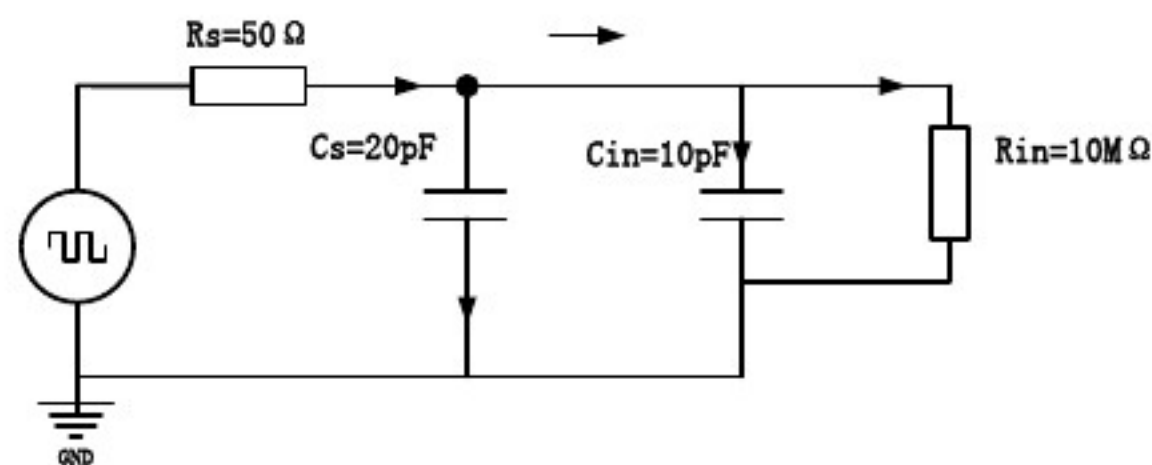


图 2-5

1. 从 KVL 角度：
电阻 R_{in} （探头与示波器组合后等效输入电阻）为 10M ，其两端电压为 C_{in} 与 C_s 两端电压，则流经 R_{in} 的电流很小，可以忽略不计，从而对于黑色节点处 R_s 流过的电流，等于两个电容上的电流。 $i_{R_s} = i_{C_s} + i_{C_{in}}$ ， R_{in} 的影响忽略不计，可以直接拿掉，对 KVL 方程无影响。
2. 从戴维南等效角度：
虚线左侧电路可以理解为独立源与两个电阻串联，根据戴维南定理，左侧可以等效为：1.独立源置零，左侧输入电阻为 $R_s // R_{in} = 50\ \Omega$ 、2.开路电压， R_{in} 两端电压 R_s 与 R_{in} 分压所得电压几乎为独立源电压。
得：等效电路为独立源+ R_s 的串联， R_{in} 可直接拿掉，不影响后续虚线右侧电路。

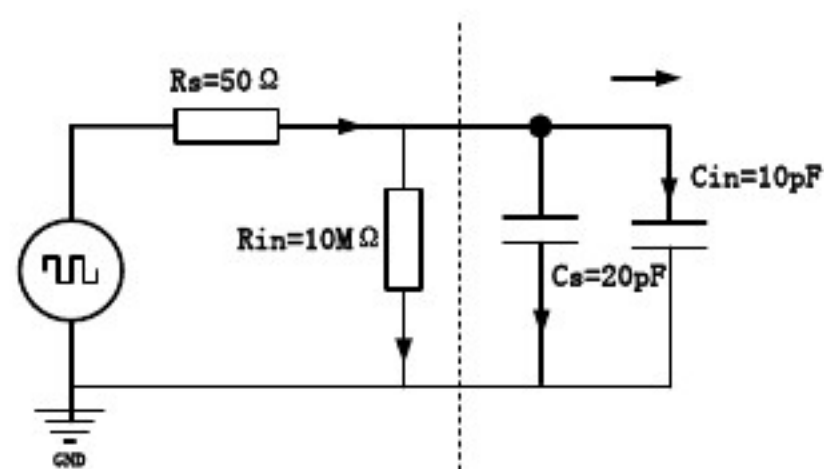


图 2-6

最终等效电路为下图所示

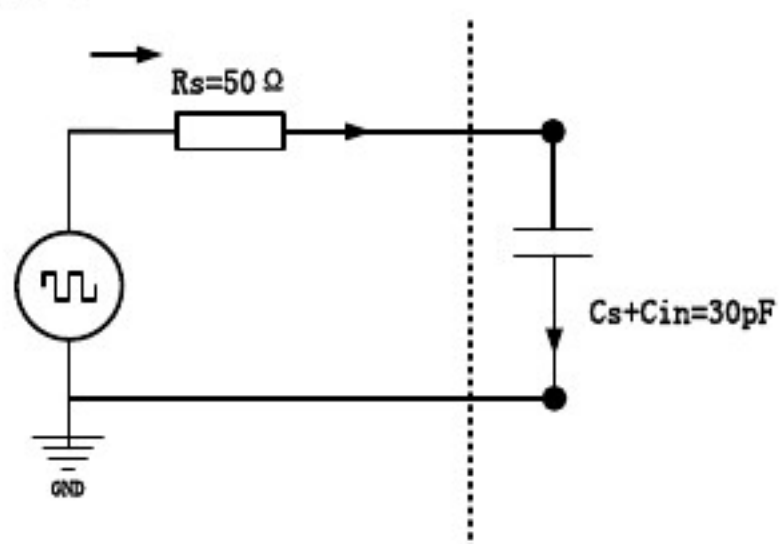


图 2-7

时域分析其零状态响应可得等效电容上的电压 $U_c(t)$ 曲线为

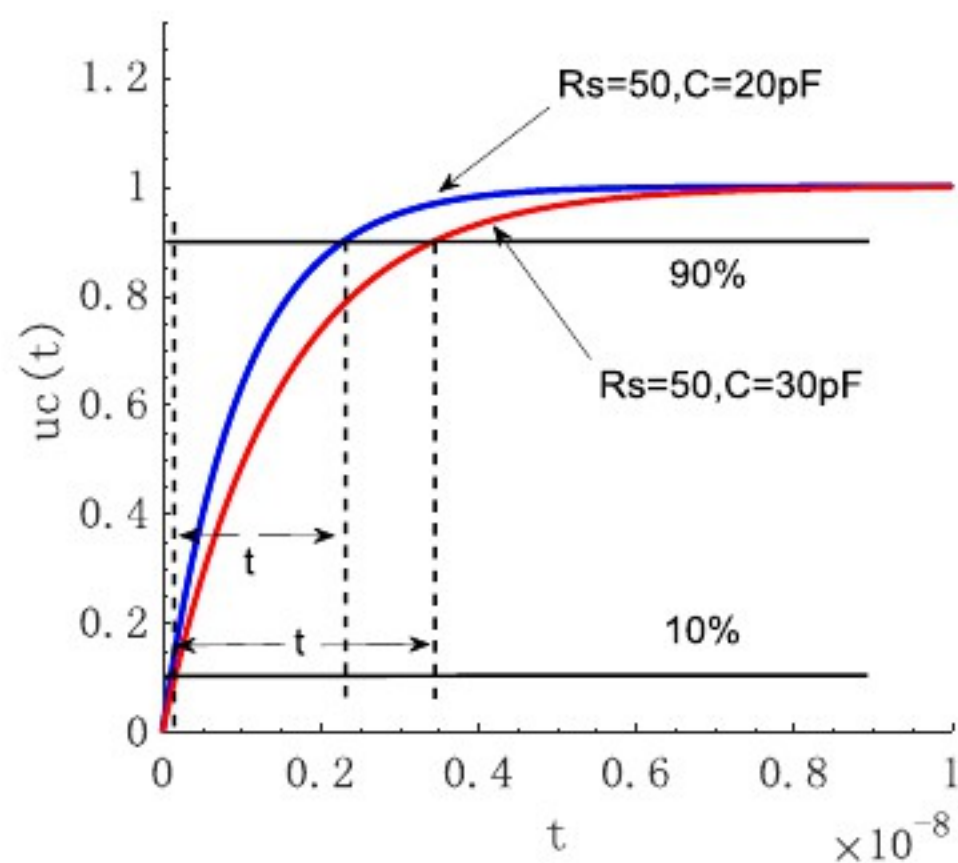


图 2-8

由图可知，信号的上升时间明显变慢，探头的电容效应将会影响信号的边沿。
 时域表现为：信号上升时间变慢
 频域表现为：信号高频分量削弱

3 探头地线电感是如何引起振铃的

过长的地线会引入电感，形成 RLC 谐振电路。对阶跃响应出现振铃现象。为避免这种因为测试测量方法引入的失真波形，要求使用合适的探头，并尽量减小探头地线夹的长度，从而降低振铃。

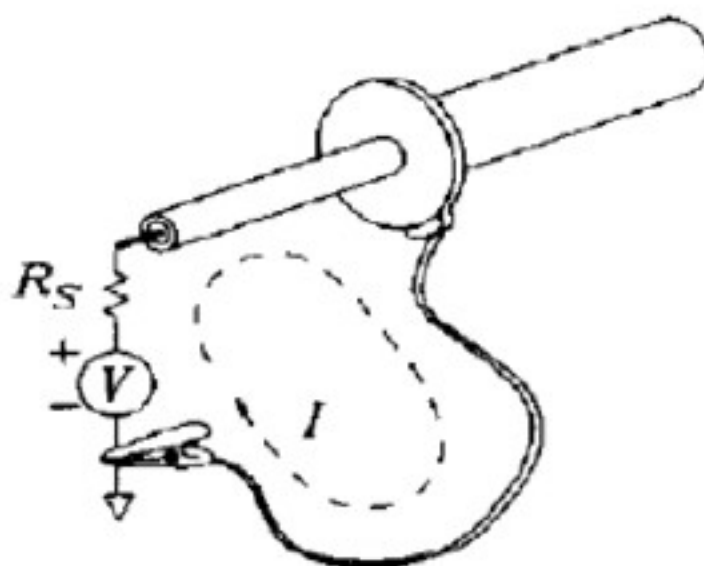


图 3-1

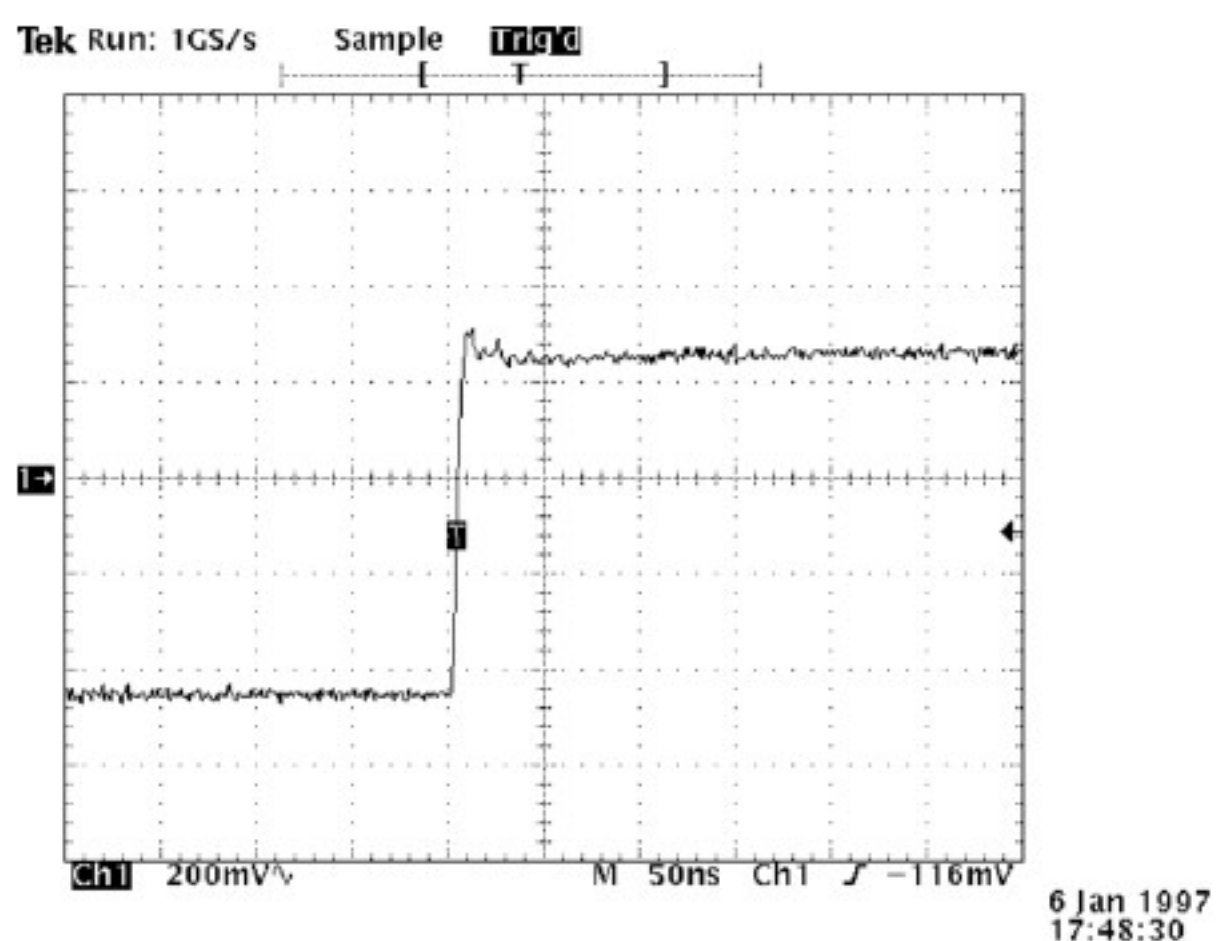


图 3-2 6.5 英寸探头地线

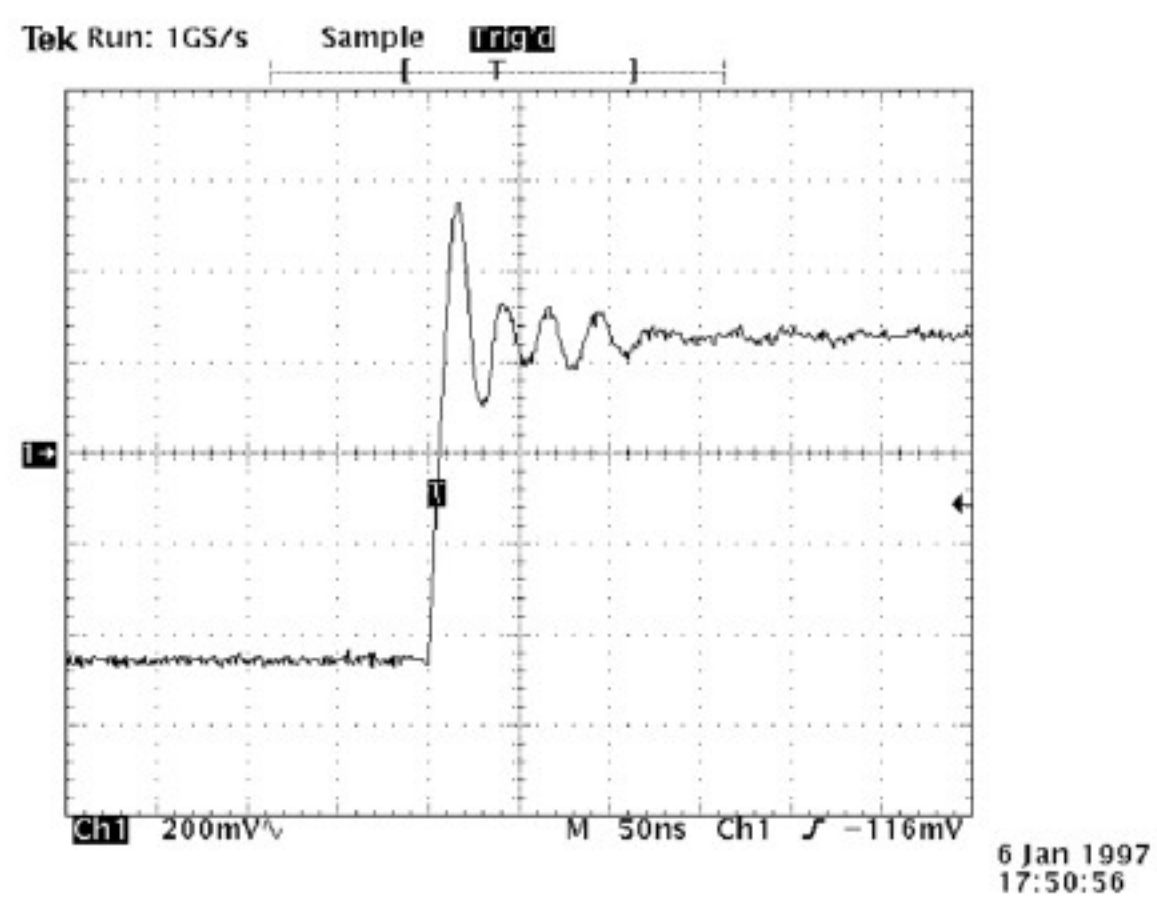


图 3-3 28 英寸探头地线

3.1 推导:

如下图所示, 信号源为 U , 信号源内阻为 R_s , 虚线右侧为示波器等效输入电路。红圈内 R_{in} 为 $10M$ 几乎不索取电流可直接拿去。则 R_s 与 C_{in} 与 L 形成 RLC 谐振电路。

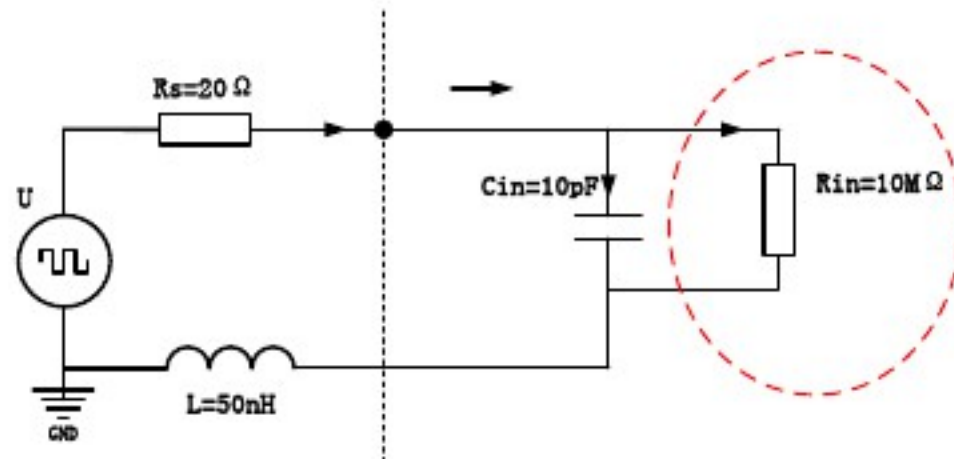


图 3-4

列写回路方程, 导入 `matlab` 可得对阶跃信号的响应。

```
syms L C U uc(t) R
L=50*1e-9;
C=10.*1e-12;
U=1;
R=20;

eq1=uc+L*diff(C*diff(uc,t),t)-U+R*C*diff(uc,t);
Duc=diff(uc,t);
cond=[uc(0)==0,Duc(0)==0];
y=dsolve(eq1,cond);
% pretty()

t=0:0.01*1e-11:(8000*1e-11)-0.01*1e-11;
fs=1/(0.01*1e-11);
%ezplot(y,t);
fx=matlabFunction(y);
val=fx(t);
axis auto
hold on
plot(t,val,'LineWidth',3)
hold on
```


对阶跃信号的响应如下图所示：

- 地线 L 越长，电感越大，从而振铃幅度越大，频率越小，衰减越慢。
- 地线 L 越小，电感越小，从而振铃幅度越小，频率越大，衰减越快。

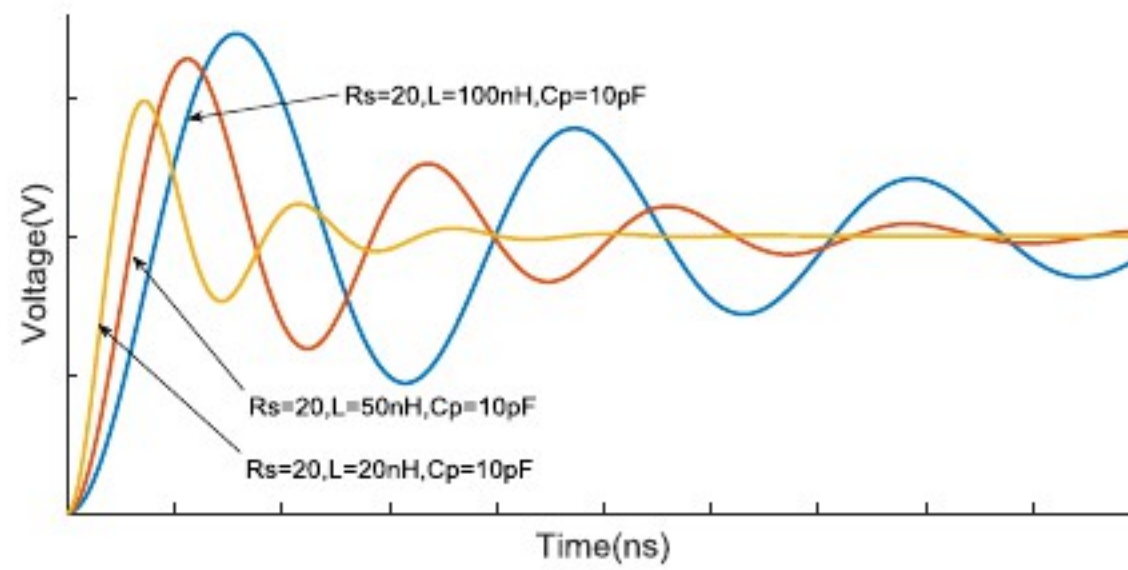
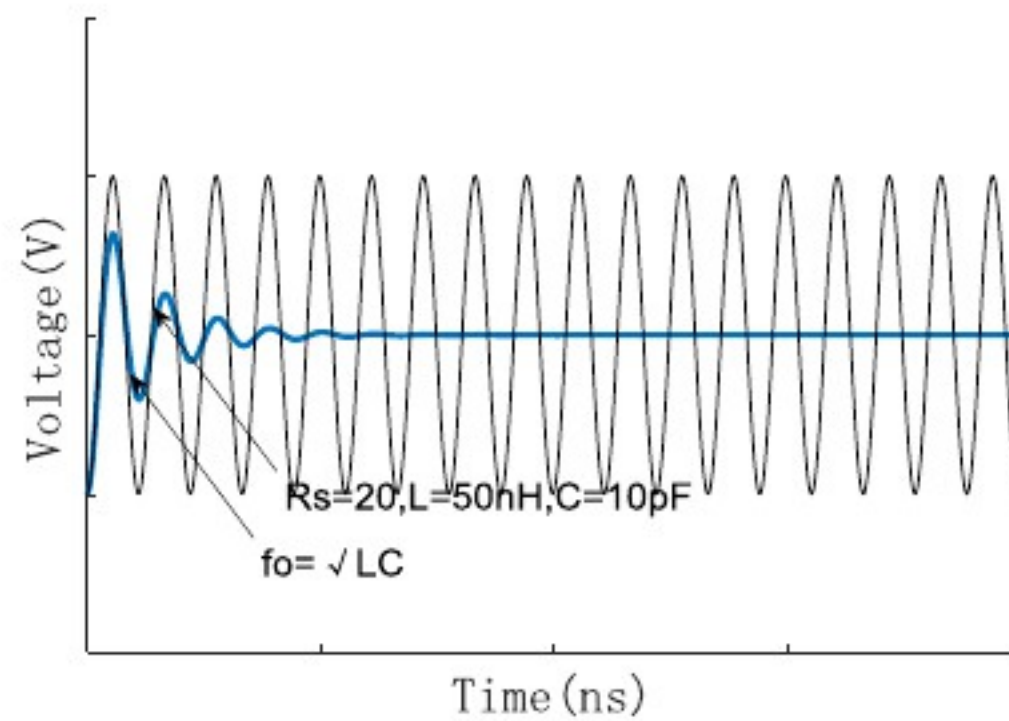


图 3-5 时域解析

振铃频率 $f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$



4 总结:



1. 输入电容要求我们使用档位合适的探头 X1/X10/有源探头，尽可能降低输入电容，提高所能测量更快的信号边沿。
2. 电感效应要求我们示波器所接地线尽量短，在某些场合下使用专门的探头进一步降低电感效应。
3. 补偿设置要求在拿到示波器探头做实验之前，就立即进行校准参数，使之匹配，防止信号失真。

参考文献

- [1] http://www.eepw.com.cn/article/201702/338127_2.htm
- [2] http://blog.sina.com.cn/s/blog_60f319e301016yi9.html
- [3] <https://www.mydigit.cn/forum.php?mod=viewthread&tid=1348>
- [4] http://education.rigol.com/education_document7.html
- [5] <https://max.book118.com/html/2016/0529/44287414.shtm>
- [6] <https://wenku.baidu.com/view/c2ab0f1ab7360b4c2e3f6461.html>
- [7] 对几种不满足换路定则的动态电路初始条件的教学研究
- [8] 电容端电压跃变条件分析
- [9] 探头 ABC 入门手册 Tektronix
- [10] 深入了解示波器 Tektronix
- [11] DS4000E_UserGuide_CN Rigol