

探头电路的研制

《示波器电路专辑》编译组

宽帶示波器探头电路的研制

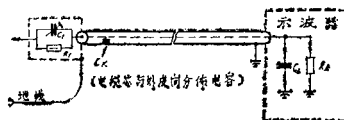
一、前 言

随着示波器频带的不断提高,联接示波器与被测电路的讯号传输电路其重要性逐渐被人们所重视。因为把一个快速讯号不失真地送入示波器是充分发挥示波器本身各项技术指标的前提,同时还要求示波器的输入电路对被测电路影响最小,也就是说输入电路必须有尽可能高的输入电阻和尽可能小的输入电容。

对频带只有几兆周的示波器而言,可以使用一根普通导线把被测讯号送入示波器,此时输入电容虽然可能大到几十微微法,但由于被测讯号变化速度较慢,因而影响并不显著。当示波器的频带提高到几十兆周时,那怕不太长的一根导线,它的自身电感和寄生电容与示波器的输入电容所构成的谐振频率很可能处在示波器的频带之中,这样被测讯号经传输导线还没有被送进示波器就已经产生了严重的失真,其结果破坏了示波器频带的均匀性,在某一个频率上将产生一个谐振峰。为了克服这一弱点,人们提出了采用输入探头的解决办法。其中的一种方式是有源探头,就是用电子管或场效应晶体管做跟随器探头,直接与被测电路连接,以减小引线电感与寄生电容的有害影响。另一种方式是无源探头即衰减器探头。本文专门叙述 100 兆周示波器的衰减器探头的高频补偿路、它的工作原理及设计中的一些问题,最后将给出测试结果。

二、衰减器探头的工作原理与上限频率的限制

衰减器探头如图(1)所示,由 R_1C_1 与 R_2C_2 构成。衰减比一般为 10:1 即衰减十倍。其中 C_1 是一个无感半可调电容器(容量约在 5~10 微微法左右)。 R_1C_1 一端装入



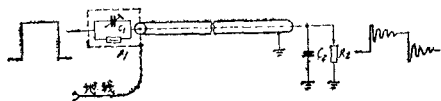
图(1) 衰减器探头原理图

探测头直接与被测电路接触, R_2C_2 为示波器本身的输入电阻与电容。 R_1C_1 与 R_2C_2 之间用同轴电缆线联接, 但由于电缆线在非匹配条件下工作, 只起屏蔽线的作用, 因而

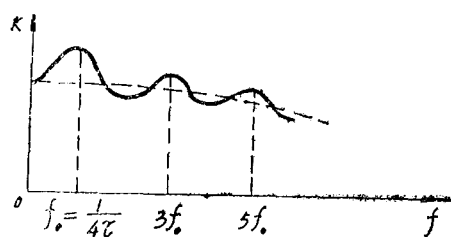
其芯线与外皮间的电容 C_k 与 C_2 并联。从理论上可以得出下面的结论：即在：

$$R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot (C_2 + C_k)$$

时,对任何频率衰减系数不变,也就是说,在低频时 C_1 和 $(C_2 + C_k)$ 的容抗近于无穷大,此时主要由 R_1 和 R_2 组成衰减器。而在高频时,容抗比电阻小的多,此时主要由 C_1 和 $(C_2 + C_k)$ 组成衰减器。但实际情况并非如此简单,一条在非匹配条件下工作的电缆线并不能看成是一个纯电容,它还有一个电感,因此讯号从它的始端到终端还有一个传输时间 τ ,这样就有反射波产生。当我们在探头的输入端送入一快速方脉冲,则在它的输出端将得到如图(2)a所示的波形。图(2)b为传输正弦波时的频率特性曲线。由于电



图(2)a



图(2)b

缆线有高频损耗,所以在输出端得到叠加到方脉冲上的反射波已接近于的正弦形的衰减振荡波形,其频率等于 $\frac{1}{4\tau}$ 。对于使用国产一米长电缆线的探头而言(例如国产SDV

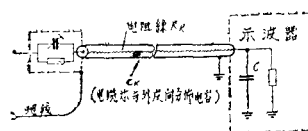
—100—3 $\frac{1}{0.52}$ 低损耗电缆线, $\tau=3.7\text{ns/m}$),反射波的频率大约为67兆周左右。如

果将送入探头的方脉冲的前后沿建立时间减慢到大于 2τ ,则在输出端得到的波形反射失真将会开始减少。显然建立时间越慢的波形,反射失真也越小。

为了能在通过较快方脉冲的前提下消除反射失真,一个办法是加大电缆芯线的损耗,以便使反射波在来回传输过程中被消耗掉。于是,用电阻丝来代替原电缆的紫铜芯线,则可以使反射失真显著的减小以至消除,如图(3)所示。

一般选用的电阻值为每米长度在300~500欧姆之间。

电阻选用太小反射失真消除不彻底,而太大又会使被传输的讯号的建立时间显著下降,因为这段电阻丝 R_k 与分布电容 C_k 和示波器输入电容 C_2 组成低通电路,其通频带不应低于允许的频带,合适的阻值由实验得出。这种探头



图(3)

适用于频带不超过60兆周的示波器中,因为探头本身的上限频率不可能超过100兆周

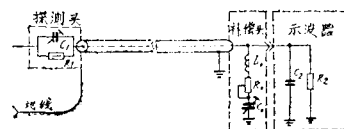
三、探头频带的进一步提高与高频补偿

上述用大电阻丝 R_k 来代替电缆芯线消耗反射波的方案显然是一个消极的办法，因为消除反射波的同时也必然要对被传输讯号本身加大高频损耗（被积分）。也就是用压缩探头上限频带的办法来换取反射失真的减少。显然，如果不从积极的办法上为消除反射失真找到出路，那么，探头本身将成为生产 100 兆周以上示波器的主要障碍。于是我们产生了一个这样的想法，从图（2）b 上可以看到，有反射时的传输频率特性曲线在 f_0 处由于反射波的叠加形成一峰值 A ，如图（4）所示：



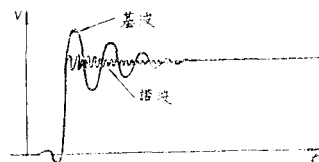
图（4）

这相当于一谐振曲线。如果我们在探头终端加一谐振频率为 f_0 的串联谐振电路，并在 f_0 这一点上形成一个方向相反的凹坑 B （如图 4 中虚线所示）对这一峰值进行修正，就可以得到一条比较平坦的曲线 C （如图 4 中点划线所示）。为了取得与原曲线形状 A 正好相反的曲线 B 要求串联谐振电路的频率，品质因数等参数，都必须与原电路相同。由 L_0 、 R_0 、 C_0 构成的高频补偿电路如图（5）所示：

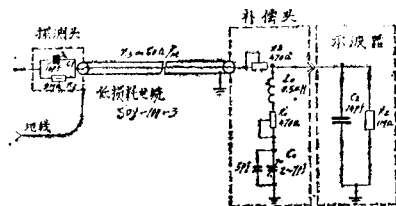


图（5）

为此，问题并没有彻底解决，在探头终端接入串联谐振电路只能对反射波的基波 f_0 （当然 f_0 是主要部分）进行旁路，而其谐波（主要是奇次谐波即 $3f_0$ ， $5f_0$ ……）依然存在，如图（6）所示。于是在探头输出端的波形上仍然有反射失真，只是比不加串联谐振电路时幅度小的多，而频率高于 f_0 。为了消除这一反射失真，显然再加一套串联谐振电路是不合算的，不但搞得线路即复杂又庞大，而且也不便于调整。于是我们就想到了前面已提到的借助电阻来消除反射波的办法。用低欧姆电阻丝来代替原电缆的芯线，并在探头终端与示波器输入端之间串接一半可调电阻，可以有效的消除剩余的反射失真，从而使探头在扩展上限频率的条件下，满意的消除了反射失真。经多次实验改进的 S201 探头电路原理图如图（7）所示。



图（6）



图(7) S201探头电路原理图

S201探头分两部分——探测头与补偿头。探测头与补偿头之间用一根SDy—100— $3\frac{1}{0.52}$ 型低损耗电缆联接。 C_1 是一个圆筒状无感电容器。 R_1 选用1/2瓦金属膜电阻，并将 R_1 装在圆筒电容器 C_1 之中。 R_2 是每米51~60欧姆的电阻丝，用它来代替SDy—100— $3\frac{1}{0.52}$ 型低损耗电缆原来的铜芯线。补偿电路是由 R_4 、 L_0 、 R_0 、 C_0 构成的，其中 R_4 与 R_0 为WH7型0.25瓦470欧姆半可调电阻。 C_0 为CCW—7型2~7pF小型半调电容器与CCX—y型5pf/40V固定电容器相并联（也可以采用一个CCW—7型6~20pf小型半调电容器）。为调整方便起见，我们把 L_0 选为固定值。根据第二节图(2)b的实验分析我们知道电缆反射波基波的频率。

$$f_0 = \frac{1}{4\tau}$$

根据串联谐振回路的分析我们知道补偿电路的谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}$$

由图(4)的补偿原理，可得出：

$$\frac{1}{4\tau} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}$$

$$L_0 = \frac{4\tau^2}{\pi^2 \cdot C_0}$$

根据我们所用的电缆测得每米延迟时间 τ 约等于3.7ns，即电缆反射波的基波频率 f_0 约等于67MC。 L_0 计算公式中的调谐电容 C_0 的容量应选半调电容变化量的中间值，我们选定 C_0 等于10pf，将 τ 、 C_0 的数值代入 L_0 计算公式，得：

$$L_0 = \frac{4 \times (3.7 \times 10^{-9})^2}{(3.14)^2 \times 10 \times 10^{-12}} = 0.55 \mu\text{H}$$

因此我们选定 L_0 为0.5微亨， C_0 为半调电容(5pf+2~7pf)。 L_0 、 R_0 、 C_0 构成一谐振频率约为65.5~83.0兆周的谐振槽路，用以补偿电缆传输的失真。

四、测试结果

S201探头的脉冲特性:

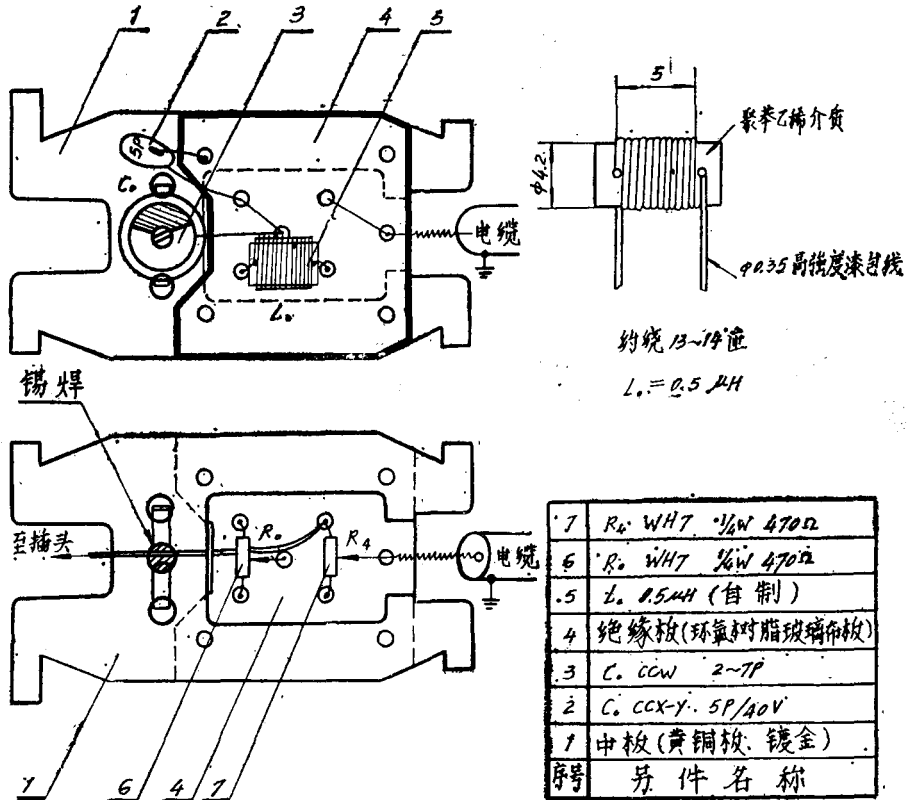
我们把S201探头与国外频宽200兆周的晶体管同步示波器的探头进行了比较。将示波器垂直灵敏度均掷于10mv/cm档, 水平扫描速率开关掷于2ns/cm档, 两个不同类型的探头同时观测一个建立时间为0.8ns上冲5%的快速方脉冲。经仔细调整S201探头的补偿电路后, 在示波器的屏幕上所观测到的两个脉冲的建立时间几乎完全相同(约1.6ns)。

从频率特性的测试结果来看完全可以满足100兆周晶体管同步示波器的要求。

五、附录

甲、S201探头补偿电路装配。

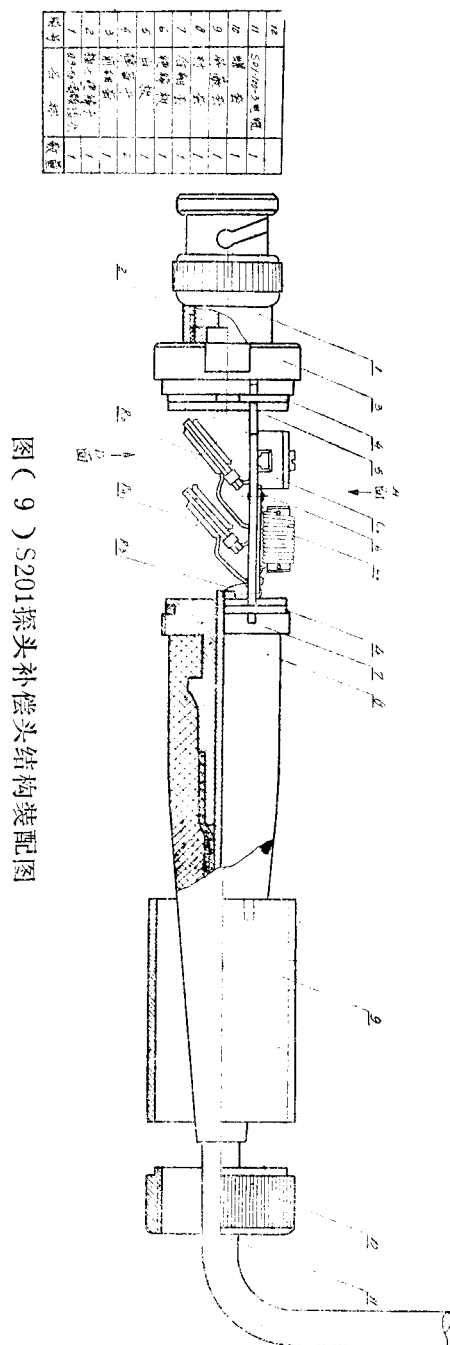
S201探头补偿电路装在补偿头里。 R_0 、 L_0 、 R_4 、 C_0 等元件均装在一块0.5mm厚的环氧树脂玻璃布板上。补偿电路的布线图如图(8)所示



图(8)补偿电路布线图

R_4 、 R_0 、 C_0 均采用标准件，而电感 L_0 是用 $\phi 0.35\text{mm}$ 高强度漆包线在一个直径为 $\phi 4.2\text{mm}$ 的聚苯乙烯介质芯架上绕制成的。

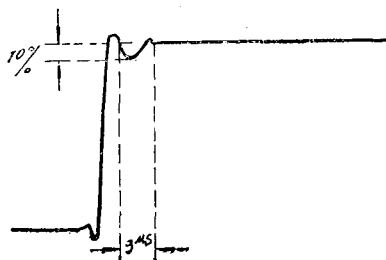
补偿头的BNC型接头采用标准件Q9-50y，其他另件均需专加工制做。补偿头的结构装配图见图(9)所示。



乙、焊接工艺需加注意的两个问题。

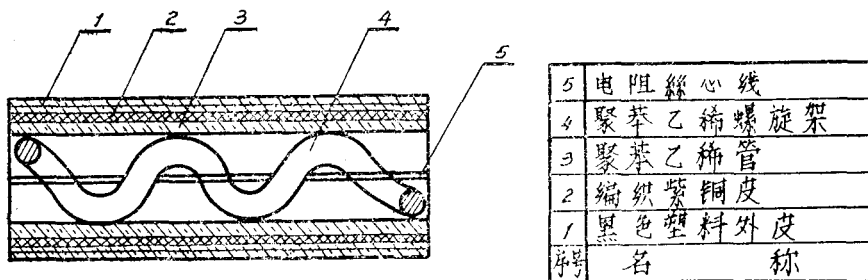
(1) 焊接补偿电路时, 最好采用 $\phi 1$ 的松香芯焊锡丝(严禁使用焊油)。用棉花球擦拭各焊点时要尽量少用酒精或汽油, 避免松香溶剂流到各另部件的缝隙之中, 否则将会影响高频特性。

(2) SDy-100-3电缆编织紫铜皮与补偿头之间的联接需要锡焊。在焊接时, 即不能把聚苯乙稀管烫坏, 而且又要焊的牢固。通常往往用大量的酒精棉花球包着电缆, 用150~200瓦的电烙铁及 $\phi 3$ 的松香芯焊锡丝焊接。我们在实践中发现这样装配出来的探头, 频宽往往上不去。当输入一个建立时间为0.8ns的快速方脉冲, 而在输出的方脉冲上有一个约 $3\mu s$ 左右的凹坑, 如图(10)示即存在着一个很大的时间常数。



图(10)

其原因是SDy-100-3低损耗电缆中间芯线是用聚苯乙稀螺旋架支撑起来的, (如图11所示), 酒精或汽油非常容易渗进去。当用大烙铁一焊松香就立即挥发, 挥发的松香又非常容易溶解在酒精或汽油之中, 这样电缆芯线及腔壁上就附着了簿簿的一层松香溶剂, 它将严重的影响高频特性。这样装接出来的探头频宽很窄脉冲特性也很差, 因



图(11) SDy-100-3低损耗电缆结构

此, 满足不了100兆周示波器的要求。

通过实践, 我们认为最好是用电烙铁分别镀锡, 用少量蒸馏水润湿棉花球包着电缆, 进行快速焊接, 用以防止电缆聚苯乙稀管及塑料外皮烫毁。这样装接出来的探头基本

上都能达到设计要求。

六、结 束 语

以上我们叙述了 100 兆周示波器的衰减器探头的高频补偿电路，它的工作原理与设计中的一些问题以及我们在实践中的初步体会。因为我们的工作做的还不够深入，即使有一点体会也是比较浮浅的，教训还是不少的，不可能在此一一列举。我们本着毛主席“**实践——理论——实践**”的教导，小结一下做过的点滴工作，供从事这一方面工作的同事们参考，为在今后的实践中发扬成绩，克服缺点，共同努力做好这一工作。

下期予告:

示波器探头电路专辑

序 言

1. 示波器探头电路
2. 宽带示波器探头电路
3. SFP—2型源跟随器探头
4. 示波器探头
5. 250MHz 宽带示波器探头
6. 示波器的宽带晶体管放大器与探头电路
7. 示波器探头电路之一CP—502型探头
8. 示波器探头电路之二P6008型探头
9. Tektronix公司探头介绍
10. CB—1059A型250MHz探头

探头电路的研制

出版: 北京计算所宽带示波器小组

发行: 旅大第43号邮政信箱

1974年六月

工本费: