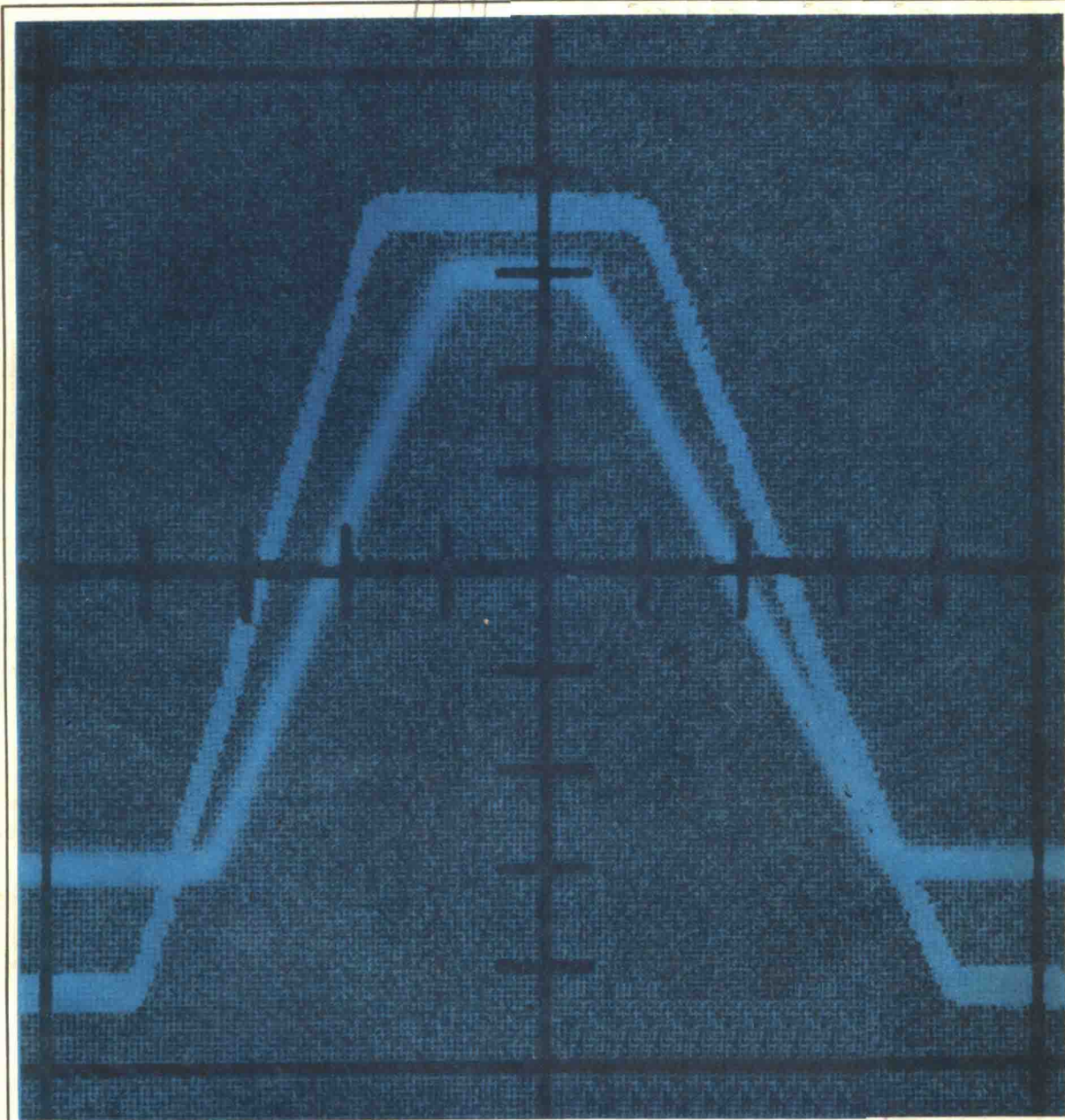


晶体管示波器 实用电路设计专辑



《示波器电路专辑》编辑组

晶体管示波器实用电路设计专辑

(二)

《示波器电路专辑》编译组

序 言

为了赶超世界先进水平、及时了解国外示波器制造技术发展动态与适应我国示波器研制、设计、生产和应用技术的需要。遵照伟大领袖毛主席“**洋为中用**”的教导，我们编译出了“晶体管示波器实用电路设计专辑”，供读者参考。

本专辑对国外同步示波器的垂直电路、水平电路、示波管显示电路及辅属电路技术的发展所采用的新设计方案、新的电路结构作了较为通俗和系统介绍，可供从事示波器研制工作的工人、科学技术人员以及高等院校科研之用。另外可供示波器专业厂工人与高等院校测量仪器专业师生“**普及与提高**”之示波器电路技术讲座之用。

在编辑出版过程中，承蒙上海科技大学、吉林工业大学、成都电讯工程学院、国营261厂孙瑞元同志与国营869厂林咏同志以及示波器专业厂的工程技术人员热忱协助，特别是得到了四机部一所领导的关怀和马天方同志大力支持加速出版工作进程，在此谨致以真诚谢意。

由于水平低，时间仓促，请读者对我们这种新尝试中的缺点和错误批评指正，以便把今后的示波器专题资料出版工作作得好一些。

编 者

一九七四年九月

目 录

序 言

- 1、同步示波器电路.....(1)
- 2、垂直放大器电路.....(20)
- 3、垂直方式转换电路.....(21)
- 4、示波管显示电路.....(23)
- 5、同步电路与延迟脉冲发生器电路.....(24)
- 6、场效应晶体管在示波器电路中的应用.....(27)
- 7、示波器电源指示灯控制电路.....(31)
- 8、取样示波器的取样电路分析.....(32)
- 9、热载流子混合二极管.....(40)

同步示波器电路

垂直电路

一、前言

本章介绍同步示波器垂直偏转系统的几个有关电路。

众所周知,垂直系统用于驱动示波管的Y偏转板,也是决定模拟测量仪器——同步

示波器性能的重要电路之一。下面就垂直放大器的输入阻抗、漂移、过电压输入保护电路等问题的解决方法,新方案、新电路予以一般性讨论。

二、输入电路

2.1 保护电路

几年前,在示波器垂直放大器输入电路与外同步输入电路中,为满足高输入阻抗之要求,仍采用电子管。但最近改为场效应晶体管。其结果获致低噪声、低漂移的输入电路,而且和电子管不同,在使用过程中 g_m 不会下降,但是,需要增加保护电路,以防止过大输入电压。

图1所示为保护电路之一例。电路由 R_1 、 C_1 、 D_1 、 D_2 组成,当输入端1有过大输入信号时, D_1 、 D_2 对栅极电位钳位,可防止过大信号进入场效应管。 R_1 用于限制 D_1 、 D_2 的电流, C_1 用于防止高频增益降低, C_1 值应充分大于场效应管电路输入电容(约6pF),约为1000pF。在宽带示波器中,为了减少输入电容, D_1 、 D_2 常使用结电容较小的二极管,但这样二极管的结区也小,在过大信号进入时, C_1 的充电电流会导致 D_1 、 D_2 损坏。图2所示为图1电路的改进, C_1 的值减为60pF,以代替将直流到高频的输入衰减至9/10的作法,这样可以更好地起保护作用。设图2虚线右方电路的输入端电容为 C_D ,则按照公式 $C_1 \times R_1 = C_D \times R_2$,可决定 C_1 的数值。在图1、

图2所示的保护电路中,当正向电压过大时,栅极对于源极处于正向偏置状态,栅极电流通过 R_1 产生压降,不用 D_1 ,仍可起保护作用,但 R_1 应选择适当的数值,将其控制在场效应管栅极电流的范围以内。

在灵敏度为几十微伏的高灵敏度示波器中,由于 R_1 与栅极串联连接会增大噪声,所以也有改用速熔保险丝代替 R_1 的。测量时,如使用1/10的探头,则场效应管栅极串联接入9M Ω 的电阻,损坏场效应管的可能性很小;但在不接探头,场效应管前又不接衰减器,而用最大灵敏度测量时,应特别注意输入电压不得超过示波器的规定数值。

2.2 源跟随器电路

输入电路的场效应管接成源跟随器的形式。这种电路的特点是:在高频时也能维持高输入阻抗;各场效应管的 g_m 虽不同,但增益几乎相等;在 g_m 因温度而变化时,增益变化小,输出阻抗低。场效应管的参数受温度变化的影响很大,而且各个器件之间的差别也大,因此,在组成电路时应予注意,并应对场效应管进行挑选。图3所示采用电阻作源

负载的源跟随器电路，为了减少漂移， Q_1 和 Q_2 采用特性一致的场效管，并应使其管壳靠近。在高级示波器中，为了进一步减少漂移， Q_1 和 Q_2 采用装在一个管壳里的特性一致的两个场效管。场效管的 g_m 随温度而变化，为了保证增益不随温度变化，应提高源的负载阻抗，并应在源跟随器后设置射极跟随器。其中所用的晶体管 Q_3 、 Q_4 特性一致，并是热耦合的。图4所示源跟随器电路，用 Q_2 作 Q_1 的源负载，如 Q_1 和 Q_2 特性相等， $R_1 = R_2$ ，则输入端1的电位和输出端2的电位相等，输入输出无补偿。在图3所示电路中，场效管的特性不同则源电位也不同，而图4所示电路却没有这一缺点。如 Q_1 和 Q_2 热

耦合则漂移也可得到补偿。同时， Q_1 作为 Q_2 的漏极的负载，负载阻抗高，在 g_m 变化时增益变化也小。这一电路的缺点是，因源负载 Q_2 的各电极间固有电容，而带宽比电阻负载的电路窄。

场效管的漏极电流正负变化。如将漏极电流的温度系数给定在零点，可将漂移减至最小，但一般场效管的漏极电流很小，只有0.4~0.8mA，如将温度系数给定在零点，则管子将在 g_m 很小的工作点工作，带宽较窄。因此，在宽带示波器中，将漏极电流给定在2~8mA，采用双场效管和下述补偿电路以减少漂移。

三、漂 移 补 偿

示波器垂直放大电路的漂移应尽可能的小。一般的方法是，采用平衡式放大电路，并使初级到第三级电路中的半导体器件处于热平衡状态。这种放大电路可获得偏转灵敏度为5mV/diV，如在各级采用双半导体器件，可达50V/diV。图5和图6所示为另外两种漂移补偿电路。

要作出漂移量小的示波器宽带放大器是不容易的，带宽在几千赫以下时，可以采用单片集成电路、削波放大器电路等获得漂移量很小的放大器。图5所示电路系利用低漂移量放大器B补偿放大器A的漂移。设放大器A的增益为 A_1 、B的增益为 A_2 。

输入端1的信号和A的输出端2的信号经 $1/A_1$ 分压后进入放大器B的输入端3、4，取这两个信号的差放大 A_2 倍后，反馈至与放大器A输入端1'，如B的漂移忽略不计，则放大器的总漂移量为放大器A的漂移量的 $1/A_2$ 。

图6所示补偿电路，每隔一定时间检测出放大器A的漂移，并将漂移量反馈至放大器A进行补偿。它是每隔一定时间使输入端1接地，此时，在1'端加补偿信号，使输出端2的电位恒定。电容C用于在下次检测之前记忆补偿信号。

四、场 效 管 探 头

场效管探头是一种有源探头，在探头的头部用结型场效管作源跟随器，因而又叫做源跟随器探头。一般示波器常用的探头是阻容式无源探头。这两者各有优缺点，应予区别使用。在用示波器测量电子设备时，并联接入电路的探头，其阻抗应尽可能的高，

以免破坏被测电路的工作状态。示波器的输入端电阻为 $1M\Omega$ ，无源探头头部串联 $9M\Omega$ 的电阻，探头头部电阻即为 $10M\Omega$ ，相当大，信号可衰减至1/10。在高频时，输入电容也应当作阻抗考虑。示波器本身的输入电容约为15pF~20pF，加上与被测电路间的电缆

连接, 电容量增加很大。虽然阻容式探头利用分割效应可减小探头输入电容, 但仍有 10pF 左右。这一电容在 100MHz 时为 150Ω , 300MHz 时为 50Ω , 不成为高阻抗。场效管探头为了减少输入电容, 采取了相应的措施。场效管装在探头头部, 尽量减小布线造成的寄生电容, 并利用阻抗变换驱动低阻抗同轴电缆, 防止增益减少和带宽变窄。图 7 所示为场效管探头之一例。为了尽可能缩小探头头部尺寸, 要求探头电路简单、元器件少。选择输入端电容小、跨导 g_m 大、栅极漏电流小的场效管用作源跟随器。但如用其输出直接驱动同轴电缆衰减太大, 故设置射极跟随器 Q_2 以减少衰减, 同时改善频率特性。这样, 在头部由于放大器的组成不平衡, 易产生温度漂移, 故需采用给定偏压使晶体管 Q_1 、 Q_2 温度系数相反的方法进行补偿。如需进行精密的漂移补偿, 则可采用本文介绍的其他电路。头部的 D_1 为过输入保护二极管。头部利用此种结构, 可将输入电容控制在 $3\text{pF} \sim 5\text{pF}$ 左右。

在场效管探头中, 仅依靠头部电路仍不能使频率特性平坦, 输出直流电平仍需调节, 而且有衰减存在, 为了弥补这些不足, 在探

头电缆一端设有辅助放大器。图 7 中的放大器即为辅助放大器, 输出端采用 50Ω 匹配电缆, 用 PNP 和 NPN 晶体管将放大器输出直流电平调至零伏, 具有必须的增益, 并进行波形整形。这一放大器应体积小、功耗少。由场效管探头的电路可知, 它与阻容式探头不同, 探头头部能放大的信号的大小是有限度的。因此, 必须根据输入信号的大小在头部使用电阻衰减器, 而这对使用带来了一些不便。接入衰减器可减少输入电容, 如 $10:1$ 的衰减器, 电容为 2.5pF , 这在观测高速信号时很有用。这种探头不仅可用于输入电阻为 $1\text{M}\Omega$ 的系统, 而且可用以将 50Ω 系统输入变换为高阻抗——将并联于辅助放大器输出端的 50Ω 电阻取下即可。高频场效管探头的典型性能如下:

头部输入电容	5pF 、 1.8pF ($1/100$)
频率特性	$\text{DC} \sim 450\text{MHz}$
增益	1
漂移	2mV/h
噪声	$<0.5\text{mVpp}$
功耗	$<2.5\text{W}$
最大输入	$\pm 10\text{V}$

五、交直流混合放大器

同步示波器的垂直放大器为直流放大器, 当输入信号为毫伏级以下的低电平时, 漂移和噪声都成问题, 减少漂移是个特别重要问题。直流放大器的漂移补偿方法已在另节中介绍, 下面介绍除漂移补偿外还带有其他特点的交流混合放大器见(图 8)。

图中, 交流放大器具有充分的带宽和增益 A_1 , 其输出不会产生漂移, 低频截止频率为 f_1 。直流放大器 I 是通带较窄的差分放大器, 漂移少, 噪声小, 其截止频率为 f_2 , 而 f_2 充分大于 f_1 。这一放大器通带内的增益 A_2

充分大于混合放大器的总增益。直流放大器 II 为宽带差分放大器, 增益为 A_3 。反馈电路为一种电阻衰减器, 衰减比 A_4 等于 $A_1 A_3$ 分之一。由此, 放大器总增益 A 为:

$$A = \frac{A_1 A_3 - A_2 A_3}{1 - A_2 A_3 A_4}$$

交流放大器的截止区, 如在直流时 A_1 为零, 据上式 $A_4 = 1/A_1 A_3$, 则总增益 A 为 $A_1 A_3$ 。

其次, 直流放大器 I 具有充分的增益, 且在交流放大器通带内 $f_1 < f < f_2$ 范围内, $A_2 \gg A_1 A_3$, 故总增益 A 为 $A_1 A_3$ 。这样,

由于直流放大器 I、II 和反馈电路形成的负反馈作用, 交流放大器的低频截止区获得补偿, 因而在总体上可与频率特性平坦的宽带直流放大器等效。这一混合放大器的优点是, 在设计交流宽带放大器时可以不受低频特性影响; 直流放大器 I 可采用漂移和噪声性能优异的低频放大器。因而可获得漂移和噪声性能优异的宽带直流放大器。缺点是电路复

杂。

一般同步示波器的前置放大器, 因为辅助电路多, 而且输入信号电平并不很低, 故采用此种混合放大器的较少; 但今后将可能在有源探头、高灵敏度放大器中采用。当将其用作微伏级信号放大器时, 直流放大器 I 可采用高级运算放大器常用的断续调制式直流放大器。

六、差分放大器

如所周知, 差分放大器不仅将两个电信号的差值放大, 并将其与同相信号分离开来。据此而特殊设计的性能优异的同步示波器放大器, 即用作示波器的放大器插件。差分放大器的重要性能之一, 即同相信号与差值信号的分离作用, 叫做同相抑制比, 用差分增益和同相增益之比表示。采用同相抑制比大的放大器, 可将迭加于大幅度同相信号上的小差值信号分离出来, 并充分放大后取出, 适宜于观测生物电信号或接地电流大的远距离信号。下面介绍带宽 1MHz 灵敏度几十微伏的示波器放大器输入电路。

图9中, Q_1 、 Q_3 及 Q_2 、 Q_4 为差分式共射一共基放大器。由正输入端 1 或负输入端 2 进入的信号经输入衰减器放大, 由输出端 3、4 可得到相位相反的两个输出。差分增益由 Q_1 、 Q_2 的电导 gm_1 、 gm_2 和 R_1 及负载电阻 R_2 决定。为了抑制同相增益, 采取了下述几种措施。场效应管 Q_1 、 Q_2 源极由高内阻恒流源供电。 Q_1 、 Q_2 及 Q_3 、 Q_4 对于由输入端 1、2 进入的等量的同相信号, 应具有相同的放大作用, 否则, 其差异将成为差值信号出现于输出端, 为此, Q_1 和 Q_2 及 Q_3 和 Q_4 采用了参数相近的装在同一管壳内的双管。但两个管子仍有差别, 可在工作状态下调节 VR_1 、

改变 Q_1 、 Q_2 的工作条件以取得平衡。

如果可用的同相信号不够大, 即使同相抑制比很大也无用处。因此, 由场效应管 Q_1 和 Q_2 的中点 5 取出同相信号, 利用射极跟随器 Q_5 和稳压二极管 ZD_1 使 Q_3 、 Q_4 基极电位与同相信号一致。由此, Q_1 、 Q_2 的偏压条件可保持稳定, 故可在很宽的电压范围内保持一定增益, 并保证很高的同相抑制比。只在放大差值信号时, 射极跟随器 Q_5 没有特殊作用。实际上要想在很宽的频率范围内取得较大的同相抑制比, 仅用图 9 的电路是不够的, 必须设置含有寄生电容的平衡电路。

在观测具有一定直流电位的微弱信号, 即带有偏置电压的低电平信号时, 在一输入端上接入等量的偏置电压即可。在图 9 中只介绍了放大器, 实际上在前一级还有输入衰减器, 它对同相抑制比极为重要, 而且, 两个输入衰减器必须在宽广的频率范围内, 对两个输入端具有相同的衰减特性。其中也带有各种平衡调节电路, 此处均从略。

目前使用的同步示波器差分放大器, 在低频时的同相抑制比为 10^5 (无衰减器)、 10^3 (带衰减器); 在 100KHz 时分别为 10^3 、 5×10^2 。同相信号范围在最高灵敏度 $50 \mu V$ 时为 $\pm 10V$ 。

七、输出放大电路

驱动示波管偏转, 需要有 12~150V 的输出。为此, 垂直放大器末级应具有较大的动态范围; 并要求末级的增益较大, 而其前一级放大电路的动态范围较小。

末级所用的晶体管要求具有较大的集电极损耗, 因而其集电极电容较大。采用这种晶体管时, 利用图10、图11所示电路, 可获得较大的增益而又不致使频带跌落很多。

图 10 所示电路叫做共射—共基连接电路, 常用于同步示波器末级。 Q_1 、 Q_2 无电压增

益, 可使用耐压低而 f_T 高的晶体管。 Q_3 、 Q_4 为基极接地, 用 f_T 较低的晶体管, 频带也不致跌落太多。这一电路的缺点是 Q_1 和 Q_2 中流过与 Q_3 、 Q_4 相同的电流, 用于宽带同步示波器时, 难以找到适合用作 Q_1 和 Q_2 的大集电极电流、 f_T 又高的晶体管。

图11中、 Q_3 、 Q_4 射极接地, Q_1 、 Q_2 为射极跟随器, Q_3 、 Q_4 用低阻抗驱动, 这样, Q_1 和 Q_2 便于挑选。这一电路用在 200~300 MHz 宽带示波器中。

八、结

同步示波器的垂直放大电路, 似乎功能比较单纯, 但通过上面介绍的几个例子可以知道, 其电路变化多端, 很有讲究。但限于篇幅, 只介绍了一部分, 其中有的是尚未实际应用但比较新颖的设想。今后, 在提高常

论

态特性和环境特性、降低价格、减少功耗, 增加新功能的过程中, 垂直系统将进一步得到改善。随着集成电路的采用, 在电路结构上也可能引起很大的变化。

水 平 电 路

一、前 言

本章介绍与时间轴有关的电路。时间轴的输入分为接自垂直电路或外接的同步信号; 其输出为达到同步信号给定的同步电位时(有时是延迟任意时间后)开始触发扫描。同步示波器所采用的时间轴电路为触发扫描

方式, 在同步信号达到所选定的斜率和电平时产生锯齿波, 这一特点决定了同步示波器的功能和使用性。下面介绍和讨论这种触发扫描。

二、触发电路

触发电路为同步输入信号达到给定的同步电平时产生脉冲的电路。这一触发脉冲驱动扫描电路, 并产生各种时间的锯齿波。触发脉冲的生产是利用具有滞后作用的负阻

器件, 将同步输入信号换为快速上升的方波, 再经微分后获得的。目前, 负阻器件一般都采用隧道二极管的双稳电路。隧道二极管产生频率响应非常高的同步信号, 因此,

已可用触发扫描 300MHz 以上的同步信号。

图1为 50MHz 同步示波器的同步电路示例。隧道二极管由TR₃或TR₄的集电极电流驱动,因其极性不同,可利用开关二极管 D₁~D₄,与两个晶体管之一连接,以选择正斜率或负斜率的同步信号。同步电平可利用改变差分放大器一端直流电位的方法进行选定。

下面参照图 2 说明隧道二极管的工作。隧道二极管特性如图中 S 形曲线所示,当电流处于 I_p和 I_v之间时,对应于一个电流值可取得两个电压值。这两部分分别叫做低压区

和高压区。当隧道二极管电流值超过 I_p时,即迅速跃向高压区,并在电流值降至 I_v以下时才再回到低压区。现在假设,隧道二极管和晶体管集电极一样,以高输出阻抗恒流驱动,负载上连接电阻 R,并上下移动负载线(斜度为 1/R 的直线)的变化电流,则可以设想:在输入正弦波电流时,其输出电压波形近似方波(如图所示)。这样,隧道二极管所产生的急剧的电压变化,经图 1 中的 R₁₀和 L₁微分,再经 TR₅放大后,即成为触发脉冲输出。

三、自动触发振荡器

自动触发振荡器是示波器电路中一种进行特殊工作的电路,简单地说,这种电路用于判断触发脉冲的有无并可在无触发脉冲时改变偏压使扫描电路自激振荡。

图3为自动触发振荡器的电路图。TR1和 TR2 组成一种射极耦合单稳触发振荡器, TR3用于 TR1集电极输出波形的整形,当其导通时,流经电阻 R7 的电流使扫描电路停止自激,准备进行由触发脉冲控制的触发扫描。

在无触发脉冲时, TR2 导通, TR1 截止, TR3 无电流流通,扫描电路自激;当触发脉冲通过 D1 进入后,由 TR1、TR2 组成的单稳触发振荡器翻转, TR3 饱和,扫描电路停止自

激。单稳触发振荡器经给定时间后复原,因 R5 对 C 充电需要时间, TR3 恢复截止需要时间较长,通常取 20ms,并据此确定 R4、R5 和 C 的值。

这时,如再有触发脉冲进入, TR1 又导通, TR3 饱和时间又延长 20ms。这样,只要有时间间隔小于 20ms 的脉冲连续进入, TR3 就持续饱和。因此,这一电路可以判断频率大于 50Hz 的触发脉冲的有无,并转换扫描电路使其处于自激状态或者由触发脉冲控制的触发扫描状态。在同步示波器的扫描工作方式中,自动工作方式即如上述,它通常不能对小于 50Hz 的信号同步。

四、扫描电路

扫描电路由触发脉冲触发,可产生线性良好的锯齿波。在高级同步示波器中,扫描电路输出的锯齿波,其扫速转换达 27 个档级,

最快扫速比最慢扫速快 1×10^6 倍。而且以恒定电位和最小的延迟时间启动,并在恒定电位结束。

4.1 密勒积分电路

用恒定电流对电容充电,其两端电压对时间呈直线增加。

在探讨使电容器充电电流恒定的过程

中,出现了多种锯齿波发生电路。在同步示波器中,大多采用一种利用负反馈的电路,叫做密勒积分电路。这种电路输出阻抗低、负载电路对锯齿波精度,线性影响小,在高速 0.1V/

ns至低速0.2V/s 的范围内良好特性。图4为密勒积分电路原理图,下面解释其原理。A为输出和输入反相、输入阻抗充分高的放大器,因电压 E_T 而流经定时电阻 R_T 的电流 I_T 为定时电容 C_T 的充电电流。当密勒积分电路处于静态不产生锯齿波时,闭合开关S, I_T 经S流入 r 。在其产生锯齿波时S开路, I_T 对 C_T 充电,其两电压逐渐变化,放大器输入端幅度为输出端幅度与增益量的倒数,如果增益充分大,则输入端的幅度接近于零,电容 C_T 的充电电流 I_T 近似恒定电流。由此可知, C_T 两端电压呈线性变化,如输入端无摆动,则输出端线性下降。这样,密勒积分电路很容易地产生线性良好的锯齿波。

当锯齿波达到适当电位时,闭合开关S, C_T 的电荷即通过S和 r 放电而复原。 r 值可以减小而与 C_T 、 I_T 的值无关,因此,锯齿波的回程时间可以很小。

在实际电路中,S使用半导体二极管,叫做隔离二极管。当密勒积分电路处于不产生锯齿波的静态时,放大器既不饱和也不截止,而是处于输出电位恒定的有源状态,可在隔离二极管截止时以最小的延时产生锯齿波;在因温度变化而导致特性改变或因变更锯齿波的斜率而改变 I_T 时,可用比较器进行修正,以保持锯齿波启动电位不变。图5为密勒积分电路实例。图中TR4、TR5组成比较器;TR3为进行密勒积分的放大器,接有场效应管源跟随器以获得高输入阻抗; D_1 为隔离二极管,起相当于图4中S的作用。当密勒积分电路处于静态时,TR1截止,此时,流入 R_T 的定时电流流经 D_1 、 R_2 和 R_1 , D_2 也导通,比较器比较密勒积分器的输出和TR4基极的+12V电位,其输出通过 D_2 、 D_1 接至密勒积分器输入端。当密勒积分器输出端电压因某种原因而变化时,比较器的输出即通过 D_2 、 D_1 传输至密勒放大器输入端,密勒积分器的输

出端电压立即得到修正,经常保持在12V。这样,TR3既不饱和也不截止,而是处于工作区,输出保持恒定电平。在启动锯齿波时,TR1导通,其集电极电位上升, D_1 、 D_2 截止,原流经 D_2 的电流流入 D_3 ,比较器断开;同时,流经 D_1 的定时电流,却对定时电容 C_T 充电,开始密勒积分。在终止锯齿波时,TR1截止, D_1 、 D_2 再次导通, C_T 的电荷经 D_1 放电(原文为“充电”,疑误),输出电位又稳定在原来的电平上。使隔离二极管截止的信号叫做扫描门信号,在门信号持续期间,密勒积分电路的输出电位持续下降。

4.2 释抑电路

当密勒积分电路输出达到规定电位时,释抑电路即输出释抑信号使扫描门信号终止。在释抑信号持续期间,锯齿波保持着停止。释抑信号的持续时间,可保证锯齿波在达到规定电位后完全恢复到起始电平,并有一定的余量。

图6为常用的释抑电路图。TR1、TR2为双稳触发振荡器,其输出——TR2集电极电流为释抑信号。使TR2导通的信号经 D_2 进入的密勒积分电路并输出负向锯齿波;使TR2截止的信号为通过 D_1 进入的正信号。与扫描门信号相同的信号进入TR3基极,此时,在 D_1 阳极的RH和CH接点的电位保持接近于零。这时 D_1 截止。在密勒积分进行期间TR2截止,密勒积分进行后, D_2 导通,TR2基极电位下降趋近于TR1基极电位时,在TR2中电流开始流通,双稳触发振荡器TR1、TR2迅速翻转,TR2导通。这时,TR2基极电位急剧下降 D_2 截止;扫描门信号为TR2集电极电流使释抑信号终止,密勒积分电路输出开始上升。触发振荡器的TR1和TR2分别保持截止和导通状态,但当进行下述工作时,触发振荡器再次翻转,使释抑信号终止;

在扫描门信号终止的同时, TR^3 也截止, R_H 对 CH 充电, TR^3 集电极电位缓慢上升。经充分时间后, $D1$ 导通, 这一电流使 TR^2 基极变正, 触发振荡器翻转, 释抑信号终止。在这段时间内, 密勒积分电路的输出可充分复原。释抑信号的终止, 是 R_H 供给的电流的作用。如将 $S1$ 转换至“单次”位置, 则释抑信号一直不终止, 电路进行单次扫描工作, 此时, 需用外接脉冲翻转触发振荡器——通常按下“复位”按钮即可。

4.3 扫描门电路

扫描门信号用于截止密勒积分电路的隔离二极管并使该电路产生锯齿波。扫描门电路大都由隧道二极管双稳电路和受其驱动的开关晶体管组成。门信号在触发脉冲触发隧道二极管时开始, 在释抑信号产生时结束。图7为扫描电路, 下面根据图7和图8介绍

门电路隧道二极管的工作。

释抑信号持续期间, 隧道二极管流通反向电流, 其工作点为图8中的C点, 此时即使触发脉冲经 $D1$ 进入, 其状态也不翻转。释抑信号终止时, 工作点近至A点; 触发脉冲进入时, 即越过隧道二极管低压区电流的峰值点P, 电压急剧上升, 工作点移至高压区B。于是, 图7中的 $TR1$ 导通, 门信号开始产生, 密勒积分电路产生锯齿波。锯齿波达到规定电位时, 释抑信号进入门电路隧道二极管, 工作点由B跃至C点, $TR1$ 截止, 扫描结束, 密勒积分电路复位。这是普通触发扫描的一个循环, 如果释抑信号终止时, 工作点不在A点而是处于超过P点的电流偏置状态, 即使无触发脉冲进入, 也将在释抑信号终止的同时产生门信号, 扫描电路自激。当上述自动触发振荡器不接受触发信号时, 通过 $R3$ 的电流流入隧道二极管, 完成这一工作。

五、水平放大器

水平放大器用于驱动示波管的水平偏转板。偏转板采用推挽驱动, 灵敏度较高的每一刻度(1格)为10V左右, 要获得满屏幕偏转需要有大于100V的幅度。这样, 推挽放大器的一端为50V, 而且水平放大器输出需要有相当大的动态范围。此外, 水平偏转板间电容约为2.7pF, 其各自的对地电容约为4.5pF, 换算成单端对地电容约为10pF, 再加上布线的杂散电容、未级晶体管集电极电容, 则为20pF左右如果屏幕。上面的扫描速度为1ns/div, 则电压按5V/ns的比例变化, 因此, 电容上有200mA的充电电流。由于上述原因, 水平放大器未级需采用耐高压的晶体

管; 如要获得高速扫描, 这种晶体管还应在大电流时具有良好的高频特性。但在电阻负载的大幅度放大器中, 晶体管导通方向的高速性能优于截止方向。这是因为在导通方向上对负载电容充电的是晶体管, 在截止方向上是电阻的缘故。同步示波器水平轴仅在光点由左向右扫描时需要高速性能, 由右向左回扫时光迹消隐, 不要求高速性能。因此, 在高速扫描水平放大器中, 对正偏转板采用PNP晶体管, 对负偏转板采用NPN晶体管。图9为这种水平放大器的未级, 可进行1nS/div的高速扫描。

示波管电路

一、前言

同步示波器的最终目的是显示波形。因此,使示波管稳定工作的电路在整机中占

1.1 示波管

测试用的示波管种类很多,下面以最近广泛采用的后加速偏转放大式示波管为主进行介绍。

示波管分单加速式和后加速式两种。前者仅在阴极(K)和第2阳极(P2)加1~3.5KV的高压,偏转灵敏度和亮度较差,不宜用于测试高速现象;后者如图1(b)所示,电子束用第2阳极加速、偏转板偏转,再经加有高压(10~20KV)的第3阳极(P3)加速后到达萤光屏。这种型式的示波管辉度高,便于测试高速现象,频带较宽的示波器均采用此种示波管。

这种后加速式示波管又分许多种,目前采用较多的是后加速偏转放大式,其偏转板和第3阳极间装有网栅电极,在后加速区形成发散电子透镜,可对电子束加速的同时偏转放大。

利用这种方法Y轴偏转灵敏度已可达到3V/Cm,而灵敏度的提高取决于同步示波器的晶体管化、宽带化和减少功耗。在示波管中不仅加速方法已有上述改进,偏转系统也有所改进。如频率增高时,取决于示波管杂散电容和电感量固有的谐振频率即成问题,板状单行偏转板因电子渡越时间的关系,限制了示波管的工作频率。因此,在宽带示波器中采用了行波电场示波管,其偏转板如图3所示分成N段并与延迟时间 $t_d = \frac{T}{N}$ (T为通过偏转区的电子的渡越时

有重要位置。示波管电路通常由示波管及高压电源、辉度控制电路、示波管特性补偿电路组成。

间)的延迟元件相连接,使加在示波管电子束上的电场的相位与电子移动时间相一致,从而将工作频率扩展N倍。这种示波管与本文第一部分所示放大器相连接,可用于100~200MHz同步示波器中。

1.2 高压电源

示波管需要有高压才能工作,获得高压的方法有许多种,在简单的示波器中,是直接使用电源变压器次级绕组的输出。

通常,因示波管加速电压的变化直接影响偏转率,故高压电源需进行稳压。在大部分示波器中,是利用直流一直行变换器升压获得高压,并将该电压分量反馈以控制振荡强度。

1.3 示波管电路

图4中的示波管,第2阳极电压对阴极为+1.5kV,第3阳极电压为+15kV。实际上第2阳极电压给定为+50V,阴极电压为-1.45kV,第3阳极电压为+13.5kV。

T₁是铁氧体磁心的振荡变压器,兼升压变压器作用:它与晶体管Q₁组成哈脱莱振荡电路,产生频率约30KHz的正弦波电压。

示波器电源接通后,通过R₁₀电流流入Q₁基极,并通过T₁的集电极绕组(3—4)开始流通。集电极电压开始下降,在基极绕组(1—2)上感应电压使Q₁电流增大。在此期间C₅负向充电。当Q₁饱和时,流经绕组的电流不再变化。Q₁集电极电压开始上

升。随之，在基极绕组上感应电压可减少 Q_1 的电流，使 Q_1 趋向截止。于是，振荡电路触发并持续振荡，将 T_1 次级绕组升高的电压进行整流、滤波，从而获得各种直流高压。

次级绕组（9—10）的输出经 D_3 整流后用作阴极电压，这一电压经分压器反馈至 Q_1 基极，以保证阴极电压稳定。

Q_1 和 Q_2 组成误差放大器。现假设阴极电压因负载变化而产生微小的正向变化。这一变化表现为 Q_1 基极电压上升， Q_1 集电极电流增加， Q_2 射极电流增加。因此， Q_3 基极被偏置于更加导通的方向上。

如上所述， C_5 在振荡的每半周充电至负电位，作为 Q_4 基极电压的自偏压源进行工作。 C_5 两端与 Q_3 相连， Q_3 电流增加到导致 Q_4 基极电压上升振荡强度增加。由此，抑制了阴极电压的变化，使阴极电压获得稳定。

Q_4 射极直接接地，如图5所示，当 Q_4 截止时，基—射极间有很大的反偏压，因而有击穿的危险。 D_1 可对 Q_4 起保护作用——当 Q_4 截止时，射极与地断开，基—射极间的电位差消失，防止了基—射结击穿。图4次级绕组（7—8）的输出经 D_2 整流后，与下

述Z轴放大器增辉信号组合，以调节示波管的辉度。

次级绕组（9—11）的输出用 D_4 —abcd四个二极管进行四倍压整流，以获得+13.5kV的直流电压，供给第3电极。

1.4 示波管校正电路

高灵敏度示波管对各种电极的尺寸精度、装配精度有更高的要求。但是在现实中存在的种种问题，造成有效屏幕减小和射束中心错位。应采用下述方法校正：调节 R_{25} 、 R_{28} ，以改变流经 L_1 、 L_2 的电流产生的直流磁场，使通过示波管中心的射束移位；同时，校正Y及X偏转的正交性。在X偏转板、Y偏转板之间装有屏蔽电极，此外还装有防止玻璃内表面上的电荷影响Y偏转的屏蔽电极，这些电极的电压分别通过 R_{30} 、 R_{31} 保持接近于偏转板平均电压，校正有效扫描区四周的图形失真。因屏蔽板和偏转板影响射束会聚而产生的象散，用 R_{32} 进行校正。 R_{24} 用于校正射束倾斜。在采用内刻度示波管时， R_{24} 可用于校正刻度线和射束的倾斜。

二、Z轴放大器

Z轴放大器用于驱动示波管控制栅 G_1 。通常，用Y轴和X轴表示垂直轴和时轴，Z轴则用亮度调制。

对应于同步示波器的不同工作状态，需相应控制示波管Z轴，即光迹的亮度。Z轴放大器的工作大致可分为以下几种：

A. 放大增辉信号，如图6所示，在扫描复原及停扫期间截止示波管射束电流，使光迹仅在扫描期间出现于屏面上；

B. 放大交替消稳信号，当垂直轴放大器进行双踪交替工作时，在切换瞬间消稳屏面上的光迹；

C. 放大外接辉度调制输入信号；

D. 利用辉度调节器，任意控制屏面上的光迹亮度；

E. 利用A项中增辉信号的交替信号，在垂直轴放大器进行双踪交替工作时，产生触发信号送往交替电路。

图7所示为Z轴放大器典型例。包括基极接地晶体管在内的电路为输入放大电路。上述增辉输入信号、转换消稳输入信号、外输入信号均加至 Q_1 射极。电阻 R_5 、 R_9 、 R_8 阻值的选定，应保证在无增辉信号时（即在扫描停止的消隐状态时）与输出放大器相接的二

极管 D_1 截止。

负极性增辉信号进入射极时,通过 Q_1 的电流增加,集电极电压下降, D_1 导通,电流自输出电路流入。

输出放大电路为反馈放大电路。射极跟随器 Q_2 的输出与 Q_{10} 基极相接, Q_{10} 集电极又通过 R_2 对 Q_2 基极反馈。

$Q_4 \sim Q_9$ 是 Q_{10} 的恒流负载,其工作和一个 pnp 晶体管相同。采用串联 6 个 pnp 晶体管的形式,是因为目前高压大功率高速 pnp 晶体管种类少,而且价格高昂。串联中每个晶体管的功耗是单个晶体管的 $1/6$, 散热不成问题。

增辉信号通过 D_1 流入此输出电路,其大部分自 R_2 流入。其输出电压大体上取决于其电流值和反馈电阻值的乘积。如增辉电流为 10mA 、 R_2 为 $10\text{k}\Omega$, 则可得到 100V 的增辉输出电压。因此,改变 D_1 的导通电平,即可控制流向 R_2 的电流,变更输出电压——这一工作由辉度调节器(即“辉度”旋钮)进行,调节“辉度”旋钮,即可改变输出电压,连续变更示波管光迹亮度。

在 Q_1 集电极压降至某一电压时, D_1 即切断输入输出电路,以防止 Q_1 的工作进入饱和区而产生开关时间延时。

增辉输出电压通常需要 $70 \sim 100\text{V}$, 还需要有相当快的上升时间。假设同步示波器的最快扫描时间为 $50\text{ns}/\text{cm}$, 增辉输出信号的上升时间为 $50\text{ns}/\text{cm}$, 而且扫描和增辉信号是在同一时间启动,则在示波管上距光迹起点 1cm 处虽然有信号但并无光迹出现。实际上上升时间不可能是零,允许光迹前段部分消稳,但这样,仍要求上升时间应快达 $20 \sim 30\text{ns}$ 。电路 Q_3 、 $Q_4 \sim Q_9$ 就是为满足这一目的而设计的。

大幅度信号的晶体管上升时间特性,大多数是在向电流增加方向时获得高速开关特性,在电流减少方向上则特性极坏。特别是容性负载与其输出端相接时,这种差别很显著。上述 Z 轴放大器的负载也是容性的,其电容值因示波管的种类、结构和安装而有所不同,约在 $10 \sim 20\text{pF}$ 左右。

pnp 晶体管的正向开关速度快,可满足 Z 轴放大器的输出条件,故采用了下述的电路程式: $Q_4 \sim Q_9$ 为 Q_1 的恒流负载,同时将增辉输入信号的上升部分通过射极跟随器 Q_2 送往 Q_4 基极,以缩短输出电压的上升时间。此种电路程式,输出电压为 90V , 上升时间为 25ns , 已应用于实际的同步示波器中。

三、校准电压发生电路

测试仪表需要和标仪表比较进行校准,同步示波器也不例外。但示波器带有校准电压发生器电路,便于进行校准。同步示波器的灵敏度、垂直轴输入衰减器、测试用的探头相位特性都需要校准,其校准电压采用方波。

产生方波的方法有许多种:利用水平扫描电路驱动脉冲的分量产生方波;对正弦波削波形成方波;利用触发振荡器或间歇振荡器产生方波振荡;利用石英振荡器件或压电器件产生振荡,脉冲分频后再整形形成方波等。最近,波示管普遍采用内刻度,相应地

对测量精度要求日益严格。不仅需提高校准电压精度,而且还要求其能作为频率标准校准扫描时间。图 8 所示为其一例,振荡电路中采用压电音叉器件,方波重复频率可保持在 $1000\text{Hz} \pm 0.7\text{Hz}$ 以内而无需调节。 Q_1 、 Q_2 和压电音叉器件组成正弦波振荡器获得稳定的正弦波,经 Q_3 、 Q_4 组成的整形电路变换成方波后,由于 Q_5 的开关作用即可取得以零伏为基准电平的方波校准电压。方波输出幅度的精度取决于输出分压器的电阻误差。这种电路比以前的电路调节部位少,而且工

作稳定,适宜于制造集成电路。在SS—4500 A、SS—4100 等集成电路化同步示波器中即

其作为电压校准电路。

四、电 源 电 路

电源电路向同步示波器各个电路供给必要的直流电压。

同步示波器和其他计量仪表一样,不应因初级电源电压变化或直流电源中的噪声而影响示波器性能。即不应影响偏转灵敏度、扫描时间等。对向那些电路供电的电源电压进行稳压,是保证工作稳定的简单而可靠的方法,因此,在所有示波器中均备有稳压电源。例如,带宽100MHz的台式示波器,备有-15V、+15V、+65V 三种稳压电源和+130V的非稳压电源,以保证全部电路工作。

图9所示为目前应用的标准的稳压电源电路,下面加以说明。

晶体管 Q_2 、 Q_3 组成差分放大器,基准电压二极管 D_1 向 Q_2 基极供给基准电压。差分放大器起下述作用:当+12V因某种原因产生微小的电压变化时,这一变化即传至 Q_3 ,并与 Q_2 基极电压进行比较,由此获得的误差电压经放大后反馈至12V电源,以保持其电压为+12V。

Q_2 和 Q_3 应选配特性一致的晶体管,以便在组成放大器时,两者的参数因温度产生的变化完全相同,并且不致显现在稳压电源输出上。分压电阻 R_1 、 R_2 以及然纳二极管 D_1

也应选择温度系数小的。

晶体管 Q_1 为限流电路,直流电流顺箭头方向流动,如果电阻 R_3 为 0.35Ω ,通常工作电流为1A,则在 Q_1 基—射极间出现0.35V电压;如果 Q_1 导通时基—射极间偏压为0.7V,则 Q_1 截止,其集电极开路,对稳定工作毫无影响;如+12V短路,则其电流增大。随之 R_3 的电流增加,当其增至2A时,即产生0.7V的压降, Q_1 导通,电流自 R_L 流出, Q_4 基极电压下降, Q_5 射极电压即+12V电源电压下降,并稳定在使短路电流为2A的电压上。因此可防止 Q_4 、 Q_5 因电流过大而击穿。此时, Q_5 功耗增大,应采用适当的晶体管。

目前, $Q_1\sim Q_4$ 的电路已制成集成电路,广泛用于示波器电源电路。

一般来说,要获得上述直流电压首先要利用电源变压器取得必需的交流电压,再经整流、滤波后送往稳压电路;最近,为了提高交流输入一直流输出的变换效率,正在研究多种方法。图10所示为其一例:将交流输入直接整流,滤波后驱动振荡电路,并将次级绕组输出整流以获得必需的直流电压。此种电路振荡频率较高,变压器铁心小而轻,可减轻整机重量。输出电压的稳压是通过输出电压反馈至振荡电路方法来实现。

五、探

头

探头是同步示波器的主要附件。

探头有两种:电压探头和电流探头。电压探头包括10:1无源探头,电子管阴极跟随器探头、场效应管源跟随器探头、低输入电容的HZ探头、高阻高压探头等。电流探头无需切断测量电路,利用电流互感器的原

理可测量电流。下面介绍使用最广泛的阻容式无源探头和电流探头的电路。

电压探头起连接信号源和示波器的作用,同时对于信号源来说,又可起提高输入阻抗减少负载效应的作用。还可用以消除信号源以外的感应干扰和连接高压信号源。这

种电压探头的代表是10:1阻容无源探头,其基本电路如图11所示。

在此电路中,如能满足条件 $R_1 \times C_1 = R \times C_0 + C_i$,则其衰减比基本与频率无关,但实际上因为 W_1 是同轴!线,其高频信号响应曲线复杂,脉冲响应曲线产生很大的上冲,,故不宜于用作宽带示波器探头。

探头和示波器配用时,因为各种同步示波器的输入电容不同,同类示波器中每台机器的输入电容不同,每台机器通道1、通道2的输入电容也不同,所以, C_1 及 C_i 采用可变电容以满足条件 $R_1 \times C_1 = R_2 \times C_2$ 。

图12为实用的宽带同步示波器探头电路。 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 C_2 、 L_1 、 L_2 用于高频补偿,将方波特性调至最佳状态。这一电路和同步示波器SS—311配用,其带宽为DC~300MHz—3dB,输入阻抗为10M Ω /8.5pF。用示波器测量电流波形时,一般将一只纯电阻作为接入电流通路,取样电阻测量其两端电压的方法;下面介绍的电流探头,利用钳通的方法,不必切断电流通路,即可测得电

流值。图13为等效电路。

电流探头拾取电流的部分,为初级绕组圈数为1匝的电流互感器。其次级绕组的输出接次级至示波器输入端,初级电流 i 在感应出次级电流,通过电阻 R 并在两端产生压降,显示在示波器屏面上。其高频特性基本上取于线圈匝数和绕法,特别在多层线圈时,绕法对特性影响大。实质上这是个减少杂散电容的问题,应采用使电容量平衡的绕法,如图14所示。

由于变压器耦合,在低频时灵敏度很差,50Hz时要比10kHz衰减约20dB。为了补偿这种低频衰减和提高灵敏度,需采用电流探头放大器。当探头配用这种放大器时,其低频特性在50Hz可改善至-3dB,如图15所示。

示波器今后将继续向宽带化、高速化、小型化、集电路化、低功耗化方向发展,这主要取决于元器件和电路技术的发展。

垂直电路图

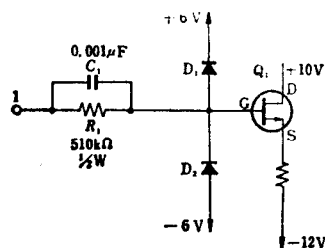


图1 场效管保护电路

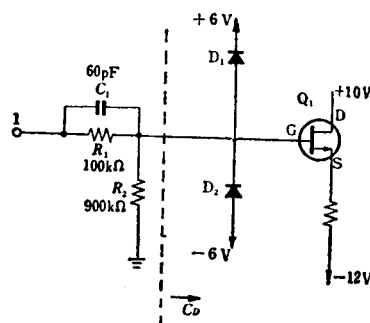


图2 场效管保护电路