

晶体管电路

(下 册)

清华大学 电子系 自动化系 《晶体管电路》编写小组

北京无线电二厂翻印

讀“風雪春曉”(代序)

石 言

尹家成同志是個青年戰士。他小學畢業後就在文具店當學徒，通過夜校學習和自修，達到初中水平。他1956年入伍，1957年一月入團，現在是無錫駐軍某部汽車修理所的中士修理工。這部長篇小說“風雪春曉”，是他的第一部作品。

文學愛好者的第一部作品，常常和本人的經歷有密切關係。這部小說中的秉雄，就是尹家成同志二哥的化身；秉雄的父母弟妹和作者的親屬有近似之處；而學徒生活的部分，當然也有作者的親身體會在內了。

不過，小說和生活的原樣已有很大的差異，和初稿不同了。

尹家成同志寫這部小說的動機很好。他的弟弟秉雄，是一個好學的青年，被舊社會害死了。他要把這悲劇告訴青年同志們：新中國是多麼光明幸福，右派分子是怎麼被肅清的。小說初稿中，秉雄是被流氓誘騙而為反動鄉長打死的。小說中秦保民的結局。小說最初的名字叫“太陽尚未升起的時候”。

但是，秉雄並沒有能走上革命的道路。初稿的材料比較片面，只有貫串全書的對立面——階級敵人羅雪月等，也沒有菊芬一家的故事。可以說，初稿還是在半成品的狀態。

目 录

第六章 调制式直流放大器	(223)
第一节 调制	(224)
(一) 调制器的工作原理	(224)
(二) 机械斩波器	(225)
小结	(226)
第二节 晶体管调制器	(227)
(一) 晶体管调制器的工作原理	(227)
(二) 晶体管调制器中噪声的来源和消除方法	(228)
第三节 场效应管调制器	(231)
(一) 场效应管的结构和基本工作原理	(231)
(二) 场效应管的特性与参数	(234)
(三) 场效应管放大器	(240)
(四) 场效应管调制器	(244)
小结	(246)
第四节 晶体管解调器	(246)
(一) 解调器的原理	(246)
(二) 晶体管相敏放大器	(248)
(三) 无零位输出的相敏放大器	(252)
小结	(253)
第五节 二极管相敏整流器	(254)
(一) 二极管相敏整流器的基本原理	(254)
(二) 二极管相敏整流器参数的选择	(256)
第六节 调制与解调的应用	(260)
(一) 温度变送器	(260)
(二) 双通道直流放大器	(264)
(三) 国产 XWD 型自动电位差计中的 JF-12 放大器	(267)
小结	(272)
第七章 交流功率放大器	(275)
第一节 从单管功率放大看功率放大器的矛盾	(275)
(一) 什么是功率放大	(275)
(二) 单管功率放大电路的分析	(276)
(三) 甲类功率放大器的矛盾	(285)
第二节 乙类推挽放大	(287)

(一) 解决失真问题的主导思想	(287)
(二) 乙类推挽放大电路的组成和工作原理	(287)
(三) 输出功率、效率、管耗和耐压	(288)
(四) 设计举例	(295)
(五) 输出变压器的制造工艺	(299)
第三节 无输出变压器的推挽功率放大器	(306)
(一) 一分为二看变压器	(306)
(二) 互补对称式电路	(307)
(三) 无输出变压器的功率放大电路举例	(309)
实验提纲	(313)
小结	(315)
第四节 功率放大管的散热	(315)
(一) 衡量散热能力的一个参数——热阻	(316)
(二) 热阻的计算	(317)
(三) 计算举例	(318)
第五节 功率放大管的并联和保护	(320)
(一) 晶体管的并联	(320)
(二) 晶体管并联后的均流问题	(322)
(三) 功率管的损坏和保护	(323)
小结	(332)
第六节 交流功率放大器的应用举例	(333)
(一) 3 瓦手提扩音器	(333)
(二) 伺服功率放大器	(336)
第八章 晶体管直流稳压电源	(341)
第一节 整流和滤波	(341)
(一) 单相半波整流和滤波	(342)
(二) 常用的整流滤波电路	(346)
(三) 整流滤波参数的选择	(349)
(四) 复式滤波器	(352)
小结	(355)
附录: 小功率电源变压器的设计与制造	(357)
第二节 晶体管直流稳压电源	(361)
(一) 硅稳压管稳压电路	(362)
(二) 串联型晶体管直流稳压电源的原理	(368)
(三) 串联型晶体管稳压电源的设计计算	(371)
(四) 稳压电源的调试步骤及调试中应注意的问题	(374)
小结	(378)
第三节 提高串联型晶体管稳压电源性能的措施及其应用电路举例	(378)

(一) 稳压电源稳定度的估算方法及改善措施	(378)
(二) 提高稳压电源温度稳定性的措施	(388)
(三) 扩大稳压电源输出电压调节范围的措施	(389)
(四) 过电流保护	(391)
(五) 应用电路举例	(395)
第九章 正弦波振荡器	(401)
第一节 自激振荡	(402)
(一) 放大器的自激振荡	(402)
(二) 正弦波振荡的条件	(403)
(三) RC 电路的频率特性	(404)
(四) RC 移相式振荡器	(410)
小结	(415)
第二节 采用 RC 选频网络的正弦波振荡器	(418)
(一) RC 选频网络的频率特性	(418)
(二) 采用 RC 串—并联选频网络的正弦波振荡器	(424)
(三) 采用双 T 选频网络的正弦波振荡器	(426)
(四) RC 选频放大器	(429)
(五) RC 正弦波振荡器实例	(430)
第三节 LG 振荡器	(436)
(一) LG 振荡器的原理	(436)
(二) 几种常见的 LG 振荡器及其应用	(438)
(三) LG 振荡器的设计考虑	(446)
(四) 石英晶体振荡器	(448)
小结	(450)
第十章 可控硅元件及其应用	(454)
第一节 可控硅元件	(456)
(一) 可控硅的工作原理	(457)
(二) 可控硅的基本伏安特性与电压定额	(460)
(三) 可控硅的额定正向平均电流、正向平均压降与温升	(462)
(四) 控制极特性及触发电压、电流及功率	(465)
(五) 可控硅的开通与关断过程	(467)
(六) 可控硅的串并联应用	(469)
(七) 可控硅元件的保护	(471)
小结	(475)
第二节 可控整流	(476)
(一) 研究可控整流要抓住哪些矛盾	(476)
(二) 单相半波可控整流	(478)
(三) 双半波可控整流	(485)

(四) 单相桥式可控整流	(486)
(五) 三相可控整流	(494)
小结	(499)
第三节 触发电路	(499)
(一) 单结晶体管	(500)
(二) 单结晶体管的自振荡电路	(502)
(三) 单结晶体管的同步振荡电路	(504)
(四) 触发电路的参数选择	(507)
(五) 触发电路举例	(508)
小结	(511)
第四节 有源逆变	(511)
(一) 电能的流转	(511)
(二) 单相半波逆变电路	(512)
(三) 双半波逆变电路及单相桥式逆变电路	(513)
(四) 三相半波及三相桥式逆变电路	(516)
(五) 逆变失败与控制角的限制	(519)
(六) 有源逆变的应用举例	(522)
小结	(525)
第五节 逆变器与直流断续器	(525)
(一) 逆变器	(526)
(二) 直流断续器	(532)
小结	(534)
第六节 交流调压	(534)
(一) 单相交流调压	(534)
(二) 双向可控硅及其在交流调压中的应用	(536)
(三) 三相交流调压	(538)
小结	(539)
第十一章 晶体管电路的应用	(540)
(一) 晶体管直流微伏计(JZW—1 型)	(540)
(二) 宽频带放大器	(542)
(三) 线性组件及其应用	(544)
(四) 电阻炉精密温度控制仪(DWT—702 型)	(547)
(五) 小功率角度随动系统	(550)
符号的补充说明	(553)

毛主席语录

客观事物中矛盾着的诸方面的统一或同一性，本来不是死的、凝固的，而是生动的、有条件的、可变动的、暂时的、相对的东西，一切矛盾都依一定条件向它们的反面转化着。

第六章 调制式直流放大器

内 容 提 要

本章扼要地介绍了放大器中常用的调制器和解调器。调制与解调实质上是交流、直流互相转化的问题。要求能够通过对驱动电压（调制或解调电压）与信号电压的大小和相位（或极性）的分析，了解调制与解调的原理和各种调制器、解调器的特点，并能正确地分析、选用电路。

第三节介绍了场效应管的特性及场效应管调制器。场效应管是一种新型的半导体器件，掌握它的特性是本章的另一个重点。

直接耦合放大器能够放大直流或缓慢变化的信号，但漂移也同时被逐级放大，因此要做出零点漂移很小的直流放大器是比较困难的。一般晶体管制成的直流放大器的电压漂移折合到输入端是毫伏数量级的，目前生产的固体线性组件漂移指标也在几十微伏以上，所以用它们来放大微伏数量级的直流信号显然是很难办到的。阻容耦合的交流放大器尽管抑制了漂移，但低频特性不好，不能用来放大直流或缓慢变化（即低频）的信号。由此看出，缓慢变化的信号和漂移构成了一对矛盾，如何将信号和漂移分开，进而放大信号，抑制漂移，就成为这里的“当务之急”了。

毛主席教导我们：“我们不但要提出任务，而且要解决完成任务的方法问题。我们的任务是过河，但是没有桥或没有船就不能过。”调制器和解调器就如同解决上述任务的“桥”或“船”。图6—1是实现这项任务的一种方案。首先通过调制器将微弱的直流信号变换为交流信号，经过交流放大以后，加以解调又变换为与输入相对应的、放大的了

直流信号，从而实现了放大微弱直流信号的目的。由于这种调制式直流放大器的漂移很小，所以在控制系统和微弱直流信号的量测仪表中获得广泛的应用。图 6—41、6—45、6—47 就是这种调制式直流放大器的应用实例。

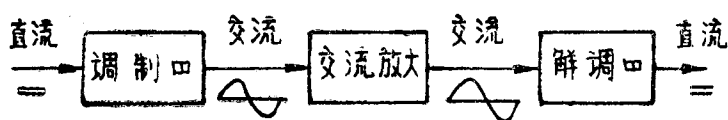


图 6-1 调制式直流放大器的结构图

综上所述，只要掌握调制和解调这两个新的环节，就可以利用已经学过的交流放大器的知识，解决低零漂直流放大器的问题，而调制和解调实质上就是交流、直流互相转化的问题。

第一节 调 制

调制就是把直流或缓慢变化的信号变换为一定频率（例如 50 周/秒）的交流信号。交流信号的幅度要随直流信号的大小变化，而相位则要随直流信号的极性变化，如果直流信号的极性改变时，交流信号的相位应改变 180° 。扼要地说，所谓调制就是用直流信号去调制交流波形的幅度。

（一）调制器的工作原理

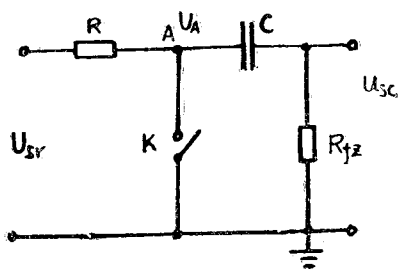
调制器是怎样将直流信号变换为交流信号，从而完成调制任务的呢？交流和直流是对立的统一，在一定的条件下它们能够统一起来，又能够互相转化。那么这个条件是什么呢？让我们通过图 6—2 来说明这个问题。

当开关 K 以一定频率打开和关闭时，电路的“ A ”端一会儿和地短路，一会儿又开路，如果在电路的输入端加一个直流信号 U_{sr} ，则在“ A ”端就得到一个脉动电压 U_A ，再经过电容 C 的隔直作用，在调制器的输出端就可以得到一个交流的方波信号 u_{sc} ，如图 6—2(b) 所示。 u_{sc} 的频率和开关 K 的动作频率相同，幅度则决定于输入信号的大小。

当输入信号为负时，开关 K 仍和以前一样开闭，那么如图 6—2(c) 所示，调制器输出端所得到的交流信号和前一种情况的相位恰好相反。这说明，交流输出信号的相位随输入信号的极性变化，而输出信号的幅度则随输入信号的大小改变，这就是调制的过程。

显然，实现调制必须具备两个条件：（1）具有开关作用的元件；（2）这个开关必须按照一定的频率动作，而这个频率应该同我们所要求的调制器输出端的交流信号的频率一致。

如果我们用具有开关作用的机械触点、晶体管、场效应管等元件代替图 6-2(a) 中的开关 K ，就可以做成各种调制器（或称斩波器）。



(a)

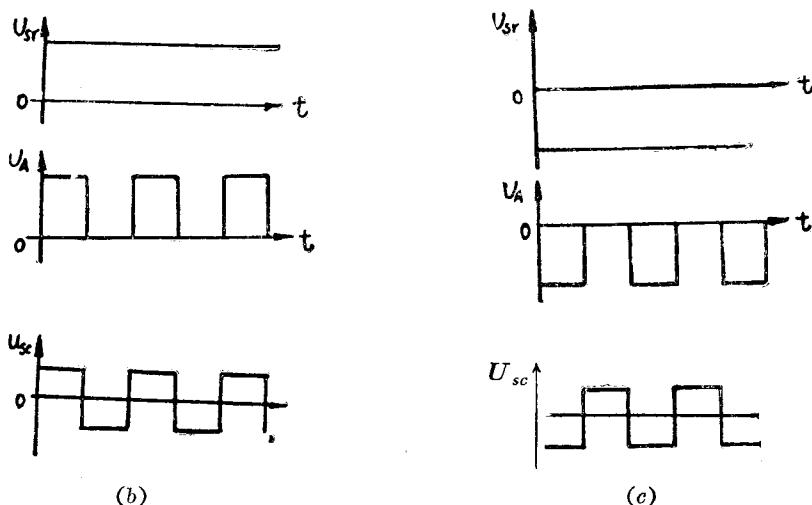
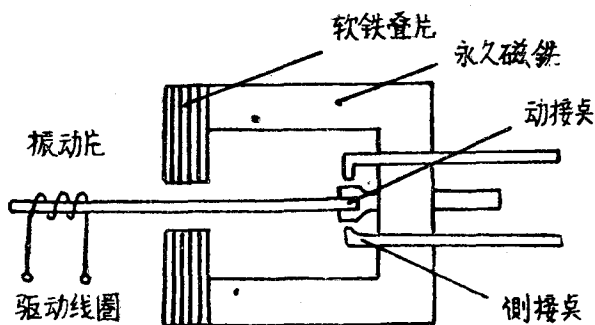


图 6-2 调制器工作时的波形图

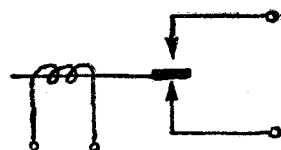
(二) 机械斩波器

机械斩波器也称机械振子，它的基本结构是一个由交流线圈驱动的单刀双掷开关（有时也有几对触点）。图 6-3 (a)、(b) 是北京牌 ZB-2-6.3 型斩波器的结构图和示意图。

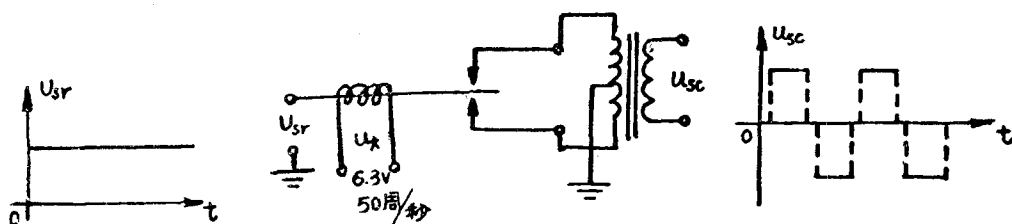
如果将 50 周/秒的 6.3 伏交流电压加在驱动线圈上，线圈中形成 50 周/秒的交变磁场，使振动簧片反复磁化，而簧片又处在永久磁铁所形成的固定磁场中，所以簧片将受到磁场力的作用交替地向上、下两个方向偏转，从而使动接点与两个侧接点交替接通。在每个周期内，动接点与两个侧接点分别接通一次，换句话说，在每秒钟内，动接点与每一个侧接点接通 50 次。如果在振子的输入端加一个直流电压 U_{sr} ，就能够在输出端得到一个 50 周/秒的方波电压 u_{sc} 。由机械振子和输入变压器组成的调制器如图 6-3 (c) 所示。



(a) ZB-2-6.3 型机械振子的结构图



(b) 振子的示意图



(c) 由机械振子和输入变压器组成的调制器
图 6-3 机械振子的结构、符号及其应用

ZB-2-6.3 型斩波器的主要技术指标如下：

最佳工作频率	50 周/秒
驱动线圈电压	6.3 V
驱动线圈电流	< 80 mA
接点容量 (接点允许的最大电压、电流)	3 V、2 mA
噪声 (负载电阻 1 MΩ)	< 100 μV
寿命	500 小时

小 结

从以上分析可以看出，一个按一定频率动作的开关就可以将直流信号变换为交流信号，从而实现调制。调制器输出端的交流信号的幅值决定于输入直流信号的大小，相位则随直流信号的极性变化。交流信号的频率和驱动开关动作的电压频率相同，而大小与驱动电压的大小无关。

机械振子的最大优点是噪声小，零漂小，缺点则是工作频率低，寿命短，因此在实际应用中，也经常利用半导体元件制成各种无触点的调制器，例如晶体管调制器、场效应管调制器等。

第二节 晶体管调制器

(一) 晶体管调制器的工作原理

晶体管不但具有放大作用，而且还能起开关作用，也就是说，当晶体管饱和时 ($U_{ce} \approx 0$)， c 、 e 间相当于短路，而当晶体管截止时 ($I_c \approx 0$)，则 c 、 e 间呈现很大的电阻，相当于开路。利用晶体管的这种开关特性，就可以做成各种晶体管调制器。

图 6-4 是最简单的晶体管调制器。在晶体管 T 的基极和发射极之间加一个交流调制电压 u_i ，在 u_i 的正半周，基极电位高于发射极电位，使晶体管饱和；反之，在负半周晶体管截止。这样就可以用晶体管代替图 6-2 中的开关 K ，如果在调制器输入端加一个直流信号，在输出端即可得到需要的交流信号。电压变换的关系可参考图 6-2。

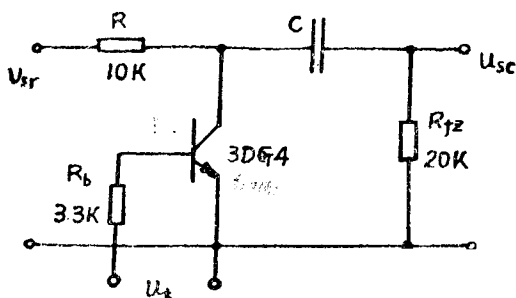


图 6-4 晶体管调制器

从图 6-4 可以看出，如果把晶体管看成理想开关，而且忽略电阻 R 上压降，调制器的变换效率最大为 50%，调制器的变换效率规定如下：

$$\text{变换效率} = \frac{\text{输出电压的平均值[注]}}{\text{输入直流电压}} \quad (6-1)$$

由于调制器一般都位于整个放大电路的最前面，直接接在信号源上，因此通常都要考虑它的输入电阻。设 U_{sr} 为调制器的输入电压， I_{srd} 和 I_{srt} 分别为开关断开和接通的两个半周期内信号源给调制器的输入电流的峰值（取绝对值），则调制器的输入电阻规定为

$$R_{srt} = \frac{U_{sr}}{\frac{I_{srd} + I_{srt}}{2}} \quad (6-2)$$

图 6-4 中，电容 C 起隔直作用，但 C 选得过大，将使直流信号的过渡过程时间延长。

[注] 输出电压的平均值系指输出电压经全波整流后的平均值。

思考题

1. 图 6-4 中, 如果调制电压 $u_{t1}=1V$, 输出电压 $u_{sc1}=0.1V$ 。那么, 如果 $u_{t2}=1.5V$, 问这时 $u_{sc2}=?$
2. 图 6-4 中, 如果要求输出电压的频率为 1 千周/秒, 问调制电压的频率应选多少?
3. 图 6-5 的电路能否实现调制? 为什么?

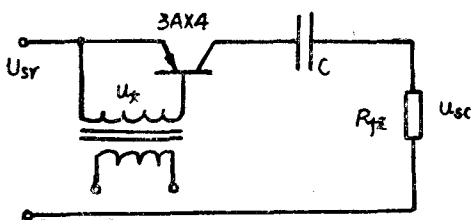


图 6-5

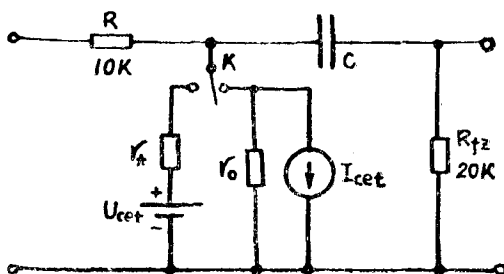


图 6-6 晶体管调制器的部分等效电路

(二) 晶体管调制器中噪声的来源和消除方法

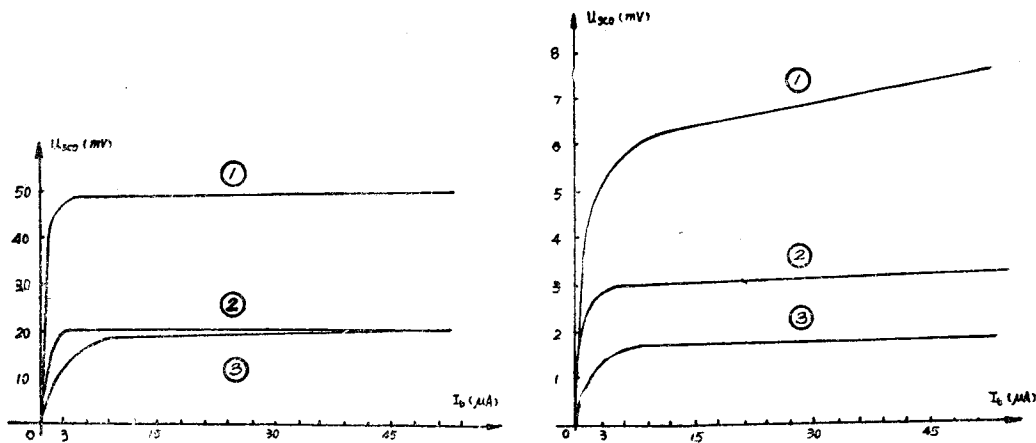
上面讲到, 利用调制器把直流信号变换为交流信号, 解决了放大和漂移的矛盾, 从而使直流放大器跃进到一个新的水平。但是问题不等于全部解决了, 毛主席教导我们: “矛盾存在于一切事物的发展过程中”, 调制器在没有信号输入时, 往往还有输出, 它的频率一般情况下同调制频率 (即输出信号的频率) 一样, 称为噪声。这样, 在存在噪声的情况下, 小于噪声的信号输出, 我们就无法辨别了。因此在这里噪声和灵敏度构成了一对新的矛盾, 只有降低噪声输出, 才能提高调制器的灵敏度。

调制器为什么有噪声? 对于机械振子来讲, 噪声主要是由交流驱动线圈与输入回路之间的电磁感应引起的, 在结构上如能很好地屏蔽, 机械振子的噪声通常可以做得很低。例如当负载电阻为 $1M\Omega$ 时, 噪声可小于 $100\mu V$; 而当负载电阻比较低的情况下, 噪声可以远小于 $100\mu V$ 。

晶体管调制器的噪声则是由于晶体管并非理想开关元件所造成的。当晶体管饱和时, c, e 间的电压并不为零, 而是存在一个饱和压降 U_{cet} ; 当它截止时, 也不是完全开断, 还存在着反向电流 I_{cet} 和输出电阻 r_o , 除此之外也还有晶体管极间电容所引起的瞬变过程等等。这些都是引起噪声的原因。由于这些参数大都随环境温度的变化而变化, 因此引起调制器噪声的漂移, 从而影响到整个放大器的指标。晶体管调制器的噪声电压一般在几百微伏, 有的则达到毫伏数量级。

图 6-6 是图 6-4 的晶体管调制器的部分等效电路, 开关 K 倒在右侧时, 相当于晶体管截止; K 倒在左侧时, 相当于晶体管饱和。 r_t, r_o 分别代表晶体管饱和与截止时的等效电阻。

实验表明，晶体管调制器的噪声电压和以下各种因素有关：晶体管的型号，参数（主要是反向电流与饱和压降），基极注入的电流 I_b ，晶体管 c 、 e 的接法（在 b 、 e 间加调制电压，称为正接；在 b 、 c 间加调制电压，称为反接），负载电阻，环境温度等等。为了说明问题，采用图 6-4 的调制器电路，对几种晶体管进行了实验，噪声电压 u_{sc0} 和 I_b 的关系如图 6-7 的曲线所示。实验中调制电压是 1 千周/秒的方波，因为晶体管只在半个周期内导通，所以测量到的 I_b 是平均值，实验时负载电阻开路。



(a) 晶体管 c 、 e 正接时，噪声电压和 I_b 的关系

(b) 晶体管 c 、 e 反接时，噪声电压和 I_b 的关系

曲线号数	晶体管型号	$I_{ce0}(U_{ce}=2V)$	$\beta(U_{ce}=2V, I_c=1mA)$
①	3AX3	$200\mu A$	40
②	3AX3	$80\mu A$	40
③	3DG4	≈ 0	29

图 6-7 晶体管调制器噪声电压 u_{sc0} 和 I_b 的关系

“有比较才能鉴别”。从实验结果的分析、比较中，我们可以找出影响噪声大小的主要原因以及减小噪声电压的方法：

1. 噪声电压 u_{sc0} 随基极注入电流的增加而增加，当 I_b 从零开始增加时， u_{sc0} 增加较快，当 I_b 大于一定数值时， u_{sc0} 就增加得很慢了。但是为了保证调制器的稳定性，必须使晶体管可靠地“开”、“关”，所以基极电流不能选得太小，一般应大于 $10\mu A$ ，尤其是硅管更要注意到这一点。

2. 晶体管 c 、 e 反接时比 c 、 e 正接时，噪声电压约可减小十倍左右，这对合金结晶体管（如 3AX 系列）都是适用的。因此，许多晶体管调制器中，晶体管都采用反接法，如图 6-8、图 6-9 等。

3. 晶体管的质量也是非常重要的。晶体管的反向电流和饱和压降愈小，调制器的噪声电压也愈小。因此，这一条也就成为挑选晶体管的根据。

当调制电压的频率比较高时，晶体管极间电容的作用开始表现出来，使晶体管饱和、截止相互转化时出现尖峰电压，因此，有时选用动态特性较好的开关管（3DK 系列）来做调制器。

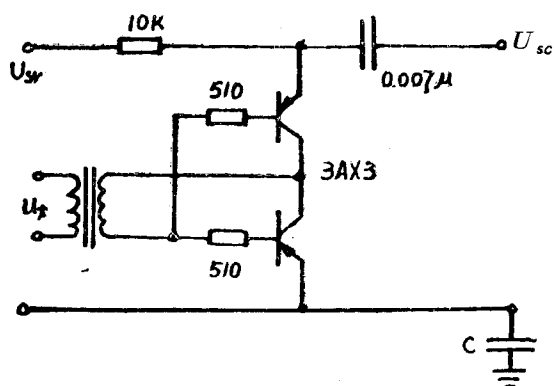
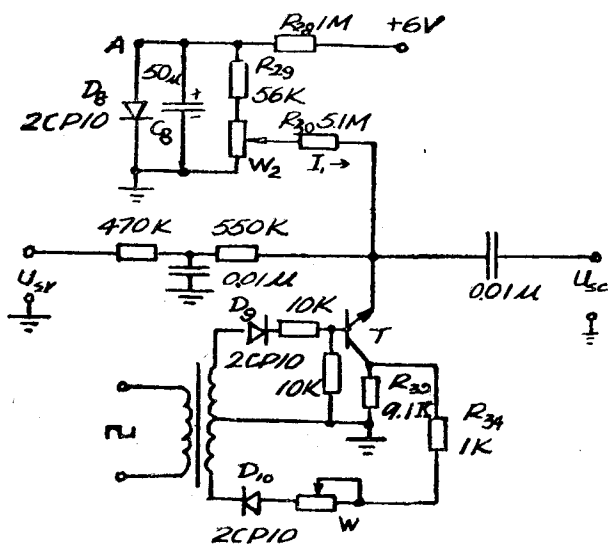
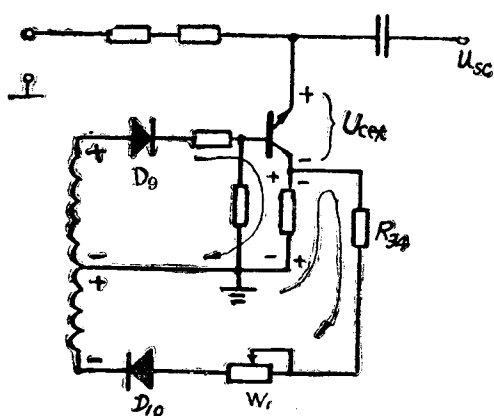


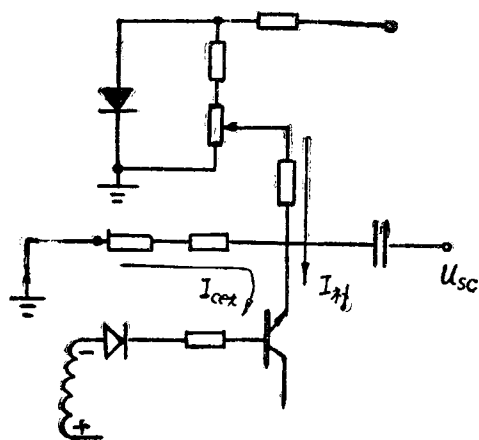
图 6-8 利用差动补偿法减小噪声电压



(a) 原理图



(b) 电压补偿部分



(c) 反向电流的温度补偿

图 6-9 利用补偿法减小温度的影响

4. 噪声电压与负载电阻有关。一般来说, 负载电阻愈大, 反向电流流过 R_{fz} 产生的压降就大, 因此噪声电压也愈大。

5. 噪声电压与环境温度有关。这是因为当温度升高后, 晶体管的反向电流也将增加, 从而引起噪声电压增大。在温度变化剧烈的工作条件下, 就会引起调制器的噪声漂移。如果我们将两个温度特性相近的晶体管对接起来, 如图 6-8 所示, 由于两个晶体管的饱和电压极性相反、反向电流方向相反, 互相补偿, 噪声电压就可以大大地减小, 这种方法称为差动补偿法。图中两个晶体管同时饱和、同时截止, 好象两个串联的开关。采用经过仔细挑选的成对晶体管(它们的反向电流、饱和压降及其温度特性相同或接近)作成的调制器, 噪声电压可以减小到 $100\ \mu V$ 左右。

为了减小噪声电压及其漂移, 还可以采用如图 6-9 的补偿法(它是图 6-45 中采用的调制器电路)。 D_{10} 、 W_1 、 R_{32} 、 R_{34} 组成电压补偿电路, 如图 6-9 (b), 当调制管 T 导通时, 补偿电路在 R_{32} 上产生一个与 U_{cet} 相反的电压, 调整 W_1 能使噪声电压得到适当的补偿。 D_8 、 R_{28} 、 R_{29} 、 W_2 、 R_{30} 组成电流温度补偿电路, 如图 6-9 (c)。 $I_{补}$ 是补偿电流, I_{cet} 是 T 截止时的反向电流, 当温度升高时, I_{cet} 增大, 而 D_8 的正向电压降低, $I_{补}$ 减小, 总电流保持不变。适当地选择二极管 D_8 的工作点和 $I_{补}$, 就可以克服或削弱 I_{cet} 随温度变化对噪声电压所产生的影响。经过补偿后的晶体管调制器, 噪声可以减小到微伏数量级。

图 6-9 的调制器电路比较复杂, 在一种条件下调整好之后, 在其他的条件下又可能需要重新调整。毛主席教导我们:“外因是变化的条件, 内因是变化的根据”, 如果还需要再进一步提高调制器的质量, 就需要从调制元件的质量上下功夫, 所以选用高质量的半导体元件(例如场效应晶体管)来做调制元件, 就成为发展的趋向了。

第三节 场效应管调制器

场效应管是一种新型的半导体器件, 它和晶体管不同; 晶体管是电流控制元件, 而场效应管的工作完全取决于电场的作用, 具有电压控制的特点。它的输入阻抗很高, 可达 $10^9 \sim 10^{12}$ 欧姆以上, 是任何晶体管所不能比拟的。同时场效应管具有噪声低、抗辐射能力强等优点, 因此, 在短短的几年内, 场效应管被广泛应用到各种电子电路中, 可作交、直流电压放大器, 场效应管调制器等。因为它耗电少, 制造工艺简单, 目前也大量制成集成电路, 应用到数字电路中。场效应管为什么会有这些特点呢? 遵循毛主席关于“感觉到了的东西, 我们不能立刻理解它, 只有理解了的东西才更深刻地感觉它”的教导, 在认识场效应管调制器之前, 先要了解场效应管的特性。

(一) 场效应管的结构和基本工作原理

场效应管按其结构不同, 可分为三种类型: 结型场效应管, 绝缘栅场效应管和薄膜场效应管。我们只介绍前面两种。

图 6-10 (a) 是 N 型沟道结型场效应管的结构示意图。它是在 N 型硅两端引出两

个电极，一个叫作源电极（以 S 表示），一个叫作漏电极（以 D 表示），而在中间的区域扩散两个 P 型区，引出电极，作为栅极（以 G 表示），两个 P 型区中间的区域称为导电沟道。可以看出，栅极和源漏中间形成了两个 $P-N$ 结，结型场效应管的符号如图 6-10 (b) 所示。

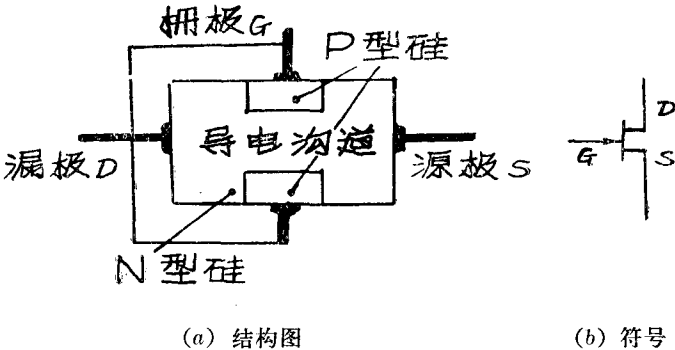


图 6-10 N 型沟道结型场效应管的结构图和符号

绝缘栅场效应管的结构如图 6-11 (a)，它以一块薄的轻度掺杂（即杂质浓度较低）的硅片作衬底，在其中再扩散两个高掺杂的 N 型区，分别作源极（ S ）和漏极（ D ），隔离两个 N 型区的间隙表面覆盖着绝缘层（二氧化硅或氮化硅），从它上面引出一个电极，作为栅极（ G ）。绝缘栅场效应管的符号如图 6-11 (b)。

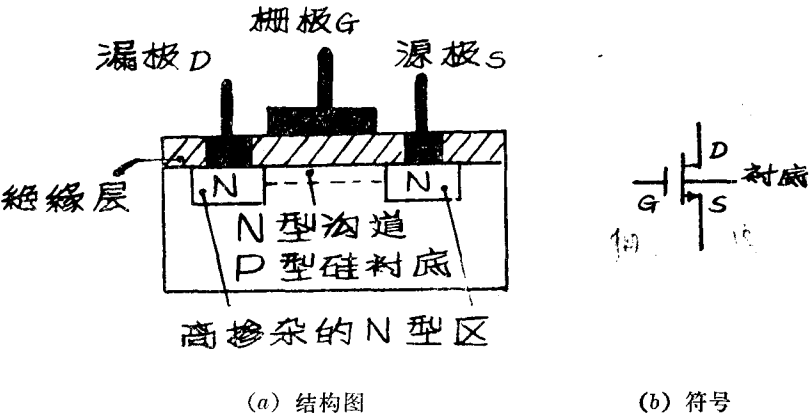
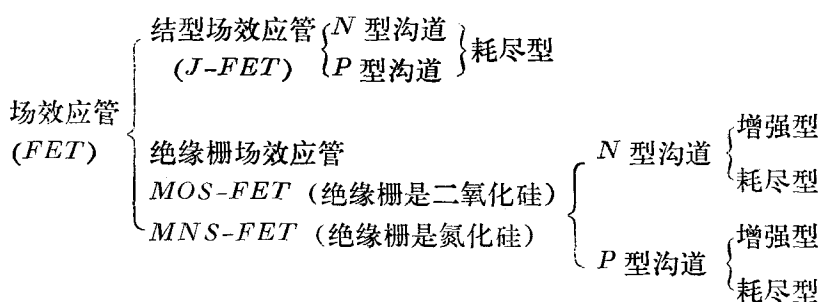


图 6-11 N 型沟道绝缘栅场效应管的结构图和符号

如果制造绝缘栅场效应管时，在两个 N 型区中间的 P 型硅内扩散一 N 型硅薄层，那么在两个高掺杂的 N 型硅间就形成了一个导电沟道。这种管子在加电压之前，源漏之间就存在导电沟道的，称为耗尽型场效应管（下面将介绍它的意思），反之，在加电压之前，源漏间没有导电沟道的，称增强型场效应管。对于结型场效应管来说，源漏两极之间，在栅压等于零时，就已经存在着一定的导电沟道，因此它只有耗尽型这样一种结构形式。

由于作衬底的硅可以是 N 型，也可以是 P 型，那末导电沟道也会有 P 型和 N 型两种，所以场效应管具有如下几种类型：

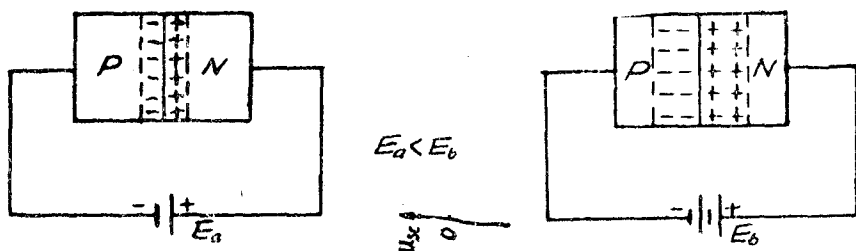


如上无十四厂生产的 3DO1 系列是绝缘栅 N 型沟道耗尽型场效应管。3DJ6 系列是 N 型沟道结型场效应管。

尽管场效应管的类型不同，结构上有差别，但它们的导电原理基本上是相同的，都是利用外加电压使器件内部电场变化，引起导电沟道变化，从而改变了管子的导电特性。下面，我们以结型场效应管为例说明以上的变化过程。

从结构上来看，场效应管内部存在两个 $P-N$ 结和一个导电沟道，所以，它的导电特性是与 $P-N$ 结的特性以及半导体导电特性（电阻率）紧密地联系在一起的。

首先，我们复习一下，第二章已经学过的 $P-N$ 结的特性。在反向偏置下， P 型半导体和 N 型半导体的交界面附近形成一个空间电荷区，如图 6-12 (a)，在这一区域中大都带带电的粒子，载流子（电子、空穴）很少，所以有时也称它为耗尽区。当反向偏置电压增大时，耗尽区加宽，如图 6-12(b)。



(a) 反向偏置的 $P-N$ 结产生空间电荷区 (b) 反向偏置电压增大空间电荷区加宽

图 6-12 反向偏置 $P-N$ 结的特性

图 6-13 是场效应管工作原理图。在漏源回路 DS 之间加正电压 E_D ，栅源回路 GS 之间加负电压 E_G ，这时，栅极电位对源极和漏极都是负的，两个 $P-N$ 结都是反向偏置。因此，在 $P-N$ 结附近存在着耗尽区，其宽窄随栅压的大小变化。两个耗尽区的中间区域是漏、源间的导电沟道，可以看出，当漏极电源电压 E_D 和电阻 R_D 一定时，如果栅极电压愈负，耗尽区就愈宽，导电沟道愈窄，电流 I_D 就愈小。

由此，我们可以得出场效应管导电的几个特性：

(1) 因为栅源间的 $P-N$ 结是反向偏置，所以栅源之间的电阻（也称输入电阻）很大，几乎不取电流，也就是说，场效应管的输入电阻很大。

(2) 从图 6-13 中可以看出，漏极电源 E_D 实际上是加在 N 型半导体两端的，因此，在一般情况下，漏源之间总是有电流流通的，重要的一点是，这个电流主要是由 N 型