

纸机可控硅调速

下 册

西北轻工业学院

一九七五年六月

第七章 直流放大器及运称放大器

§ 7-1 直流放大器应用的必要性及特殊性

在前几章中，我们讲述了交流信号的放大问题。但是实际的生产过程中还存在著一种虽非很弱的交流信号，而是属于变化缓慢的直流信号的情况，这时就必须应用到放大直流信号的放大器，我们叫它直流放大器。

(一) 直流放大器的用途：

在自动控制、称量装置以及电子测量技术中，常会遇到要放大的信号是变化极为缓慢的直流信号，或者是具有非周期特点的超低频的信号。在这种情况下，上述信号电压不能用电阻电容耦合的办法，或者用变压器耦合的办法来加以放大，这是因为直流信号，或是变化很慢的信号不能通过电容器，并且很容易被变压器的初级线圈所呈现的低值阻抗所短路。

另外由于新型电子技术的发展，电子元件要微型化。为了适应固体集成电路的需要，也必须研究电子电路的直接耦合问题，因为过去分立元件中应用的体积庞大的耦合电容及耦合变压器，已经成为技术进一步发展的障碍。

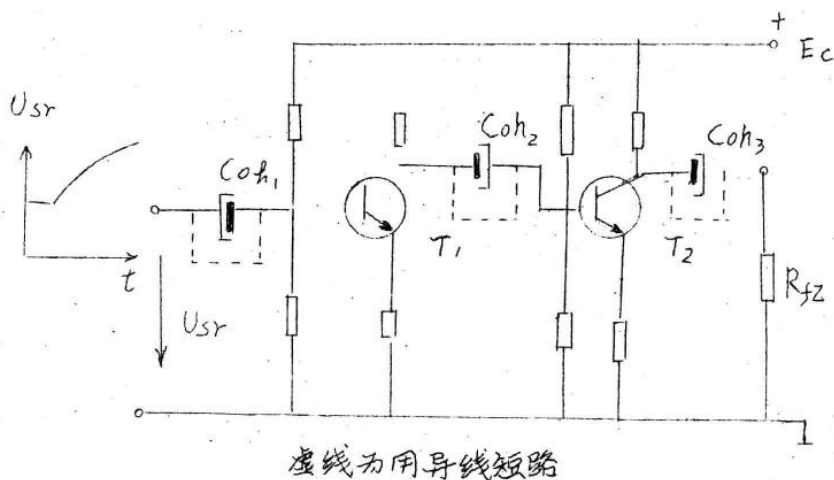
此外，在一些工业控制及测量技术中，有时虽然放大的信号也是交流信号，但是为了减小仪器的体积及重量，或是为了达到减小信号传递过程中的相移，这时也要用到直流放大器。

(二) 直流放大器的特殊性

直流放大器与我们前面讲过的交流放大器有那些不同呢？我们还是用一个例子来说明。

(1) 直流放大器工作点的建立

如图 7-1 所示的是一个两级交流放大器，显然当这个放大器的输入端加进一个缓慢变化的信号 U_{sr} 时，我们可以发现，由于 C_{oh_1} 的存在，电容器的隔直流作用，会使 T_1 管的基极接受不到 U_{sr} 的电压信号，当然 T_1 管也不会将此信号放大。同理，由于



C_{oh_2} 、 C_{oh_3} 的存在会使直流电压信号不能从第一级放大器送到第二级去，第二级直流电压的变化无法送到负载上去。要想放大直流信号，就必须将电路中的耦合电容器除去，并用导线联接起来，拼成直流信号的通路，这样就拼成了一个直流放大器，我们根据它耦合的方法称为“直接耦合放大器”。

这种直接耦合的方法可以使每一级放大器的输入输出信号，实现直流传递。但是我们很快就会发现，这种直接使前后级联接起来的方法，破坏了原放大器输入输出回路的工作点，简单的用导线联接起来，就会使第一级放大器输出端较高的工作点电压，直接加到后一级放大器比较低的输入端工作点电压上，这样后一级放大器管子就会因过负荷而烧坏。反过来看，前一级放大器晶体管的集电极电压如下降达到后级输入基极电压的水平，由于一般晶体

管基极电压都很小，这样的工作点会使第一级放大器不能进行正常放大。因此直流放大器的第一个特点是：在多级直流放大器中，各级静态工作点的合理安排建立，使之达到能放大的目的，要比交流放大器复杂一些。

此外，由于直耦放大器建立了各放大级之间的通路。在多级放大器中，由于工作点的不稳定，会引起第一级的静态电位的缓慢变化，被逐级放大，使输出电压严重的偏离起始值，由这种原因产生的输出电压我们称它为零点漂移电压。显然如果这种漂移电压不能很好的使它减小，那么当漂移电压的大小接近或超过了有用的输入信号，那么输出信号就会被零点漂移所淹没，放大器的输出信号就失去它所表示的意义了。因此在使用制作直流放大器时，由于直流放大器的这一特殊性，决定了直流放大器的第二个特点：直流放大器存在零点漂移现象，要应用直流放大器，就必须从电路上、元件上减小零点漂移电压的数值。

§ 7-2 多级直流放大器的耦合方法和另点漂移现象

(一) 几种常用的多级直流放大器耦合方法

为了解决直流放大器在直耦情况下，各级放大器均有一个能正常工作的工作点，所以下面我们简单的介绍一下直流放大器的工作点建立方法。

对于一个单级直流放大器来讲，工作点的建立与交流放大器一样，只要把放大器输入端的电容去掉即可。因为在输入端通过适当的偏置电路即可保证放大器具有合适的工作点。

然而对于两级，或是两级以上的直流放大器电路，就必须首先解决各级放大器的工作点在耦合后如何稳定的建立起来。

(1)，对同类型晶体管，可应用降低前级集电极工作电流的方法。

在前边我们分析直流放大器的特殊矛盾时指出，在多级直流放大器中，由于前级晶体管的集电极电压高远大于 $0.7V$ ，与后一级晶体管放大器基极电压低（ $0.7V$ 左右）直接耦合不起来，所以在实际应用中，为了能顺利地建立起正常的工作点，我们不得不将如图 7-1 所示电路中的放大器第一级的参数加以改变，使第一级晶体管的集电极电压能在未联接起来以前就等于 $0.7V$ 左右；那么联起来之后（如图 7-2 所示），就可以使第一第二两级放大器都处于正常工作范围，而不致于使后一级达到饱和状态。

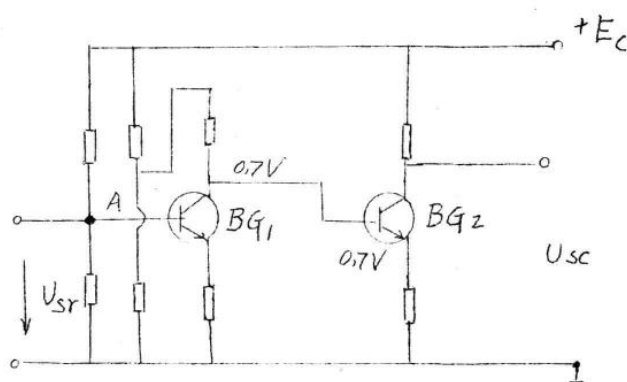


图 7-2 降低前级集电极电压的直接耦合放大器

为此目的，我们在电路中将 BQ_1 管的负载电阻不直接接到电源上，而是采用一个分压器，将第一级放大器的负载接到分压器的 A 点上，调节分压器的比值，就可以达到调节 $U_{CBQ_1} = 0.7V$ 的目的。

采用这种方法的缺点是：放大器的第一级管子的工作电压降很低，工作点远离饱和区，造成第一级放大器线性范围小，信号略大就可能造成失真。但由于这种耦合方法最简单，所以在第一

级放大之前，纹号若比 $0.7V$ 小很多的弱电平纹号时，这种方法仍是一种可行的方法。因此有些多级放大器的前置级，採用此种电路方案。

(2) . 提高第二级放大器的基极电位的方法：

我們不可以採用提高后一级放大器的基极电位的方法，来达到前后级联接电位接近。即使图 7-2 中使 BG_2 的基极电位提高到 BG_1 管的集电极电位的水平。这就拼成图 7-3 电路

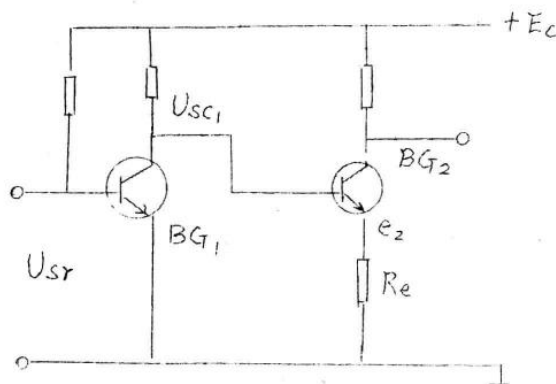
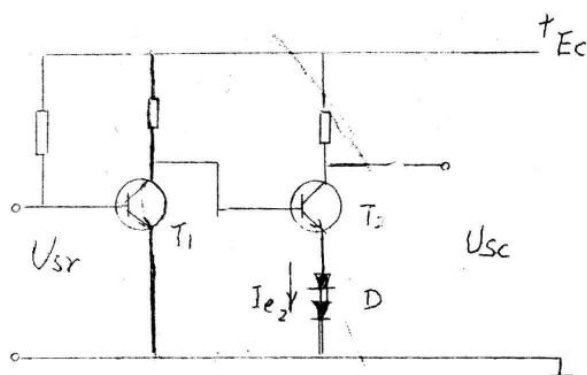


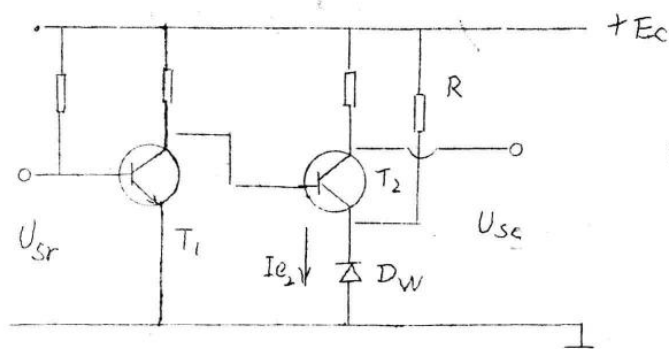
图 7-3 应用发射极电阻
来調正工作点

这个电路使第一级放大器 T_1 管工作压降高放大倍数大，同时由于有 R_e 的作用第二级放大器的工作电流在 R_e 上产生压降，提高了 e_2 的工作电位，使 T_2 管不至于达到饱和。这个方案的缺点是：由于第二级接入 R_e ，将造成第二级具有较强的电流负反馈作用，使第二级放大倍数下降很多。

为了克服后一级放大器由于接入 R_e 后，引起第二级放大倍数下降的缺点，我們可以在很多电路方案中见到，应用二极管代替 R_e ，如图 7-4 (a) 所示。



a) 利用二极管
调整工作点



b) 利用硅稳压
管调整工作
点

图 7-4 第二级放大器基极接二
极管或稳压管的电路

由于流过二极管的电流和二极管的正向压降基本无关，即其动态内阻很小，应用二极管接入基极电路，这样既提高了 C_2 的电位（每个硅二极管的正向压降大约是 $0.6 \sim 0.7V$ ，如要电压更高可以采用二个以上二极管串联应用），保证了合适的工作点，又可以使第二级放大倍数不受损失。由于硅稳压管 D_W 具有良好的稳压性能，它的内阻很小，而输入电压稳定，是一个良好的稳压源，并可以根据不同型号的稳压管特性，与电路要求的静态工作点相配合应用。因此用它代替硅二极管可以得到良好的结

果，如图 7-4 (b) 所示。这里的电阻 R 是当稳压管要求的稳定工作电流不能由 BG_2 管的静态工作电流 I_{e2} 提供的話，可由电源 E_c 经 R 提供，改变 R 即可調正通过稳压管 D_W 的工作电流。（一般目前尚没有稳压值很低的稳压管，所以稳压值若在 3 伏以下，还是要用上述硅二极管正向工作电路）

(3) 应用 PNP 管和 NPN 管的直接耦合方法

前已介绍的第二种方法，即抬高基极电压的方法，有一个缺点，即当放大级数增多时，会出现随着级数的增加，基极电位会越抬越高，最后会使后一级晶体管的压降很低，因此当级数越多，就要求电源电压越高才成。这种电源电压发生累积的问题，会给电源供给造成一定的困难。为解决这一问题，往往在电路中采用 NPN 晶体管与 PNP 晶体管进行直接耦合，应用 NPN 管与 PNP 管供电要求的极性不同，达到组合使用电源的目的。这种电路如图 7-5 所示，它常用于可控硅触发电路的前置放大电路中。

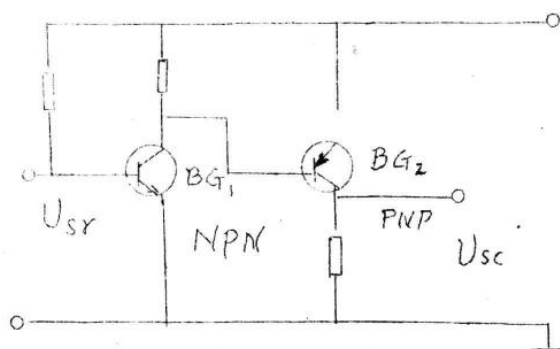
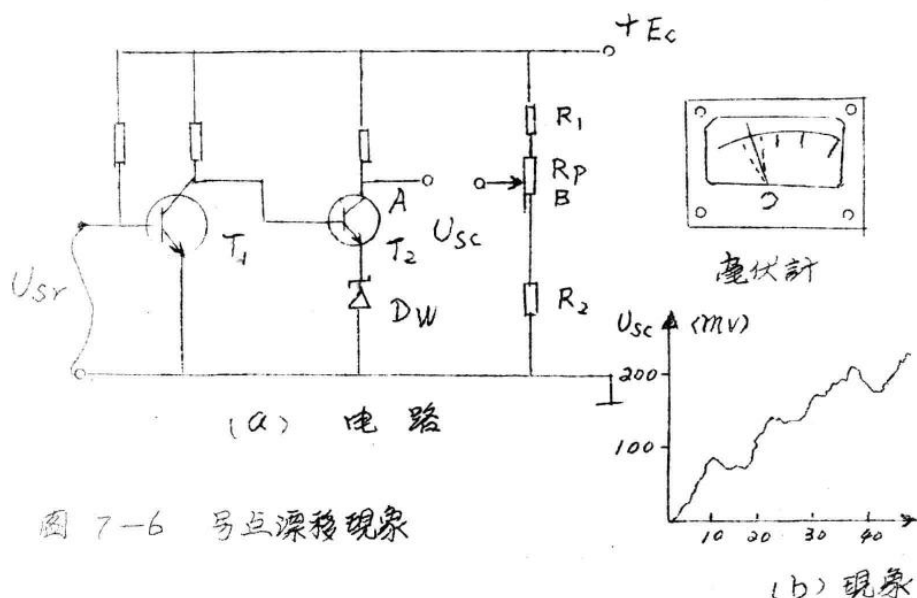


图 7-5 PNP 管与 NPN 管直接耦合电路

(二) 零点漂移现象，及其克服方法

前已讲过直流放大器是用来放大缓慢变化的信号的。在实际应

用中我们会发现，对于两级以上的直流放大器，即使放大器的输入端短路，其输出端也会有信号输出。如图 7-6 所示



我们即使应用 R_1, R_p, R_2 分压器电路调正 B 点电压，使 $U_A = U_B$ ，这样 $U_{sc} = 0$ ，但经过一段时间从输出的毫伏计上可以看到指针离开零点，呈现无规律的波动，如图 7-6 (b) 曲线所示。这就是直流放大器的另点漂移现象。而且我们发现：放大器级数越多，放大倍数愈大，则这种另点漂移现象在放大器输出端造成影响也愈严重。

实践表明：要想解决直流放大器的另点漂移问题，如何减小放大器的第一级的另点漂移是关键问题。因为第一级的另点漂移会被后几级放大器所放大，成为一个较大数值的漂移信号，其严重性远超过后几级所具有的另点漂移电压值。

由于直流放大器总的放大倍数越高，它的漂移也愈严重。

因此对于直流放大器为了比较优劣，为了表示它质量的好坏，单看输出端另点漂移的电压值还不行，还应考虑到放大器的放大倍数的不同。这是因为，如果我们把输出电压的漂移限制在同样的大小，放大倍数越高，则越困难。因此在实际应用中总是把输出电压的漂移除以放大倍数，用来说明放大器漂移的程度。

$$\text{即：输入漂移电压 } (V_{os}) = \frac{\text{输出漂移电压 } (V_{es})}{\text{放大倍数 } K}$$

$$\Delta U_{sc} / K = \Delta U_{sr}$$

上述输出电压的漂移值除以放大倍数所得的电压值，相当于折算到输入端所具有的另点漂移值。这也是直流放大器的一个重要指标，我们在后面将要讲到。如果将电压关系转换成电流就可以得到输入漂移电流，有了输入漂移的值，就确定了直流放大器正常工作时，输入信号的最小值，因为输入信号比输入漂移小时我们将难于从放大器的输出中区分出信号与漂移。

(1) 产生另点漂移的原因

为什么直流放大器会产生另点漂移现象呢？我们必须通过分析另漂产生的原因，才可能找到抑制另漂的办法。

实践表明：环境温度变化，是产生放大器的另点漂移的重要原因，而放大器的供电不稳定，电阻元件的阻值变化，则是次要原因。

(A) 晶体管参数随温度变化所引起的另点漂移

毛主席教导我们：“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用”。温度只是引起漂移

的外因，在温度的影响下，晶体管的内部产生了变化，则是产生另漂的原因。前边我们介绍晶体管的特性时已经指出，晶体管的某些参数例如：反向饱和电流 I_{cbo} ，管子 eb 结的正向压降 U_{be} 及晶体管的电流放大倍数 β 值，都要随温度的变化而变化。

应该说明：晶体管的反向饱和电流 I_{cbo} ，它是由存在于晶体管内部的少数载流子运动所形成的。它的数值会随温度的升高，由于少数载流子数是增加而增高。一般 I_{cbo} 与温度成近似的指数关系即温度越高， I_{cbo} 增加也越快。值得说明的是实验表明锗管的 I_{cbo} 随温度变化增长的速度是比硅管要小一些，但是由于硅管的 I_{cbo} 绝对值很小（一般为毫微安级）而锗管则较大（一般为数十微安）所以在很多直流放大器中，毫无例外的应用硅管作成直流放大器的，或是作为直流放大器的前置级。

实验表明：不管是硅管还是锗管，在 I_c 不变的条件下，温度每升高 1°C ， $|U_{be}|$ 就要减小 2 mV 左右。它是由于当温度升高后 p_n 结阻挡层电阻减小所形成。对于不同型号的管子 U_{be} 的温度源数大致在 $-2\text{ mV}/^\circ\text{C} \sim -2.5\text{ mV}/^\circ\text{C}$ 的范围内。

由实验的曲线表明，晶体管的 β 值会随温度的变化而变化。当温度每升高 1°C ，则 β 要增加 $0.5 \sim 0.1\%$ 。

(B) 供电的电源电压波动，造成另点漂移

如果直流放大器的供电不稳定，那么很容易造成直流放大器各级偏流的改变，经过本级负载电阻将此变化形成一个漂移电压耦合到下一级，形成放大器的另点漂移。因此直流的大器的供电源一般要求由稳压电源供电，以减小电源波动造成的影响。

(C) 电阻元件的不稳定性造成另点漂移

由于拼成放大器所使用的电阻元件老化不够，在应用的过程中往往会发生阻值的微变，这种电阻的改变，也会破坏直流放大器的原始工作点，从而形成另点漂移。不过这种电阻元件的阻值不稳定性，造成的另漂还是较小的，并且在高质量的直流放大器中我们可以应用稳定性高的电阻，例如，精密金属膜电阻达到减小温度漂移及噪声电势的目的。

(2) 克服另点漂移的方法：

我们在这里主要介绍一下温度变化造成的另点漂移，如何从电路上采取措施给予减小。从本质上讲，由于温度引起了晶体管内部参数的变化，才造成电路的另漂，因此要求半导体制造技术能制造出受温度影响最小的管子用来作直流放大器较好。例如目前随着半导体技术的发展，已经能生产许多受温度影响较小的硅管、场效应管，并且新型的中规模集成电路产品本身就具有较高的指标，可以直接应用拼成集成电路直流放大器，而其另点漂移数值也很小，这才是根本的办法。

在一般制作分立元件的直流放大器情况下，措施到 I_{cbo} 是引起另点漂移的重要原因，所以选用晶体管很重要，要尽量选用反向饱和电流 I_{cbo} 小的管子来达到抑制放大器的另点漂移的目的。前边介绍由于硅管的反向饱和电流 I_{cbo} 要比锗管小几百倍所以应优先选用，此外还应注意选用噪声系数小的晶体管（手册中一般噪声系数用 N_F 表示），并通过调整工作点的方法来改善噪声的影响。

从电路上看归纳起来，为了达到减小另点漂移的目的，有下

述几种常见的电路。

第一种：采用负反馈电路，应用反馈方法抑制工作点的变化，使放大器受温度变化所造成的变化减小。

第二种：采用非线性元件补偿的电路（热敏电阻，二极管，三极管）利用它们具有负的温度系数和其它特性达到补偿的目的。

第三种：采用相互补偿电路，即利用前后级间漂移电压方向相反，从而使总的漂移得到抵消或削弱。

第四种：采用差动电路，它是利用平衡电路中的元件，当受温度影响引起参数变化时，由于桥成桥路，对输出端来讲可以互相抵消不产生影响。

第五种：采用调制式直流放大器，充分发挥交流放大器另漂小的特长，可以不用直流放大器，实现将直流信号进行放大。

第一种方法，实质是应用电流负反馈方法，使放大器工作点稳定，它可以使放大器在温度变化后所产生的另漂减小，但不能消除。与交流放大器稳定工作点的道理相同，我们就不单独举例讨论。

关于补偿的方法：应用的各式各样电路很多，我们仅举一个常用的二极管补偿方法进行说明。至于差动方法，目前在直流放大器中是主流，我们单独设一节进行讲述。

温度补偿电路：

(A) 应用二极管反向电流进行温度补偿的方法。

所谓温度补偿电路，就是在放大器中，接入另外一个对温度敏感的元件，利用这个元件随温度的变化，去抵消温度对晶体管的响应，以达到最后使输出电压漂移减小的目的。

图 7-7 就是一个简单的温度补偿电路。

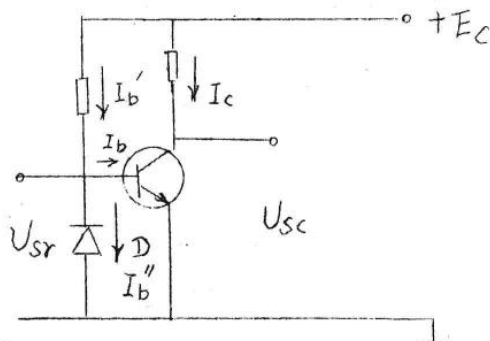


图 7-7 利用二极管反向电流进行温度补偿

显然从 I_b' 偏流中分走的 I_b'' 将增多，而流入基极的电流 I_b 比以前减少。如果配合得好，就可以达到维持 I_c 不变的目的。显然图中的二极管 D，也可以用具有负的温度系数的热敏电阻，硅稳压管（一般稳定电压低于 5V 的硅稳压管具有正的温度系数，高于 7V 的硅稳压管具有负的温度系数）代替，这时都会有当温度上升时，由于非线性元件的负温度系数，会使电阻减少，使 I_b'' 支路电流增加，达到补偿的目的。

这种补偿的办法简单，经济，容易做到。但是由于二极管比温度补偿元件的温度特性和晶体管的温度特性很难一致，尤其是要在一个较大的温度范围实现这点更加困难，所以实际去做的时候

在未接入补偿二极管 D 之前，当温度升高时， I_c 将增加，造成 U_{sc} 的漂移。但是如果我们接入一个二极管如图 7-7 所示。由于二极管处于反接状态，其反向电流也随温度的增高而增加，这样

候要求越高，补偿二极管就越难挑选。因此，这种方法只能应用在一些要求不高的放大器电路中。

显然为了解决温度特性一致性的问题，採用另一支同类型的晶体管来进行温度补偿是比较合理的。因为实践中证明在同一型号的管子中挑选温度特性相近的两只管子，总是比较容易的。下面要讨论的差动式直流放大器电路，就是用同样两只晶体管来实现温度补偿的。

§ 7-3 差动式直流放大电路

前面介绍的几种减小零点漂移的电路，只能部分的减小零点的漂移。对于要求精度高的直流放大器，毫无例外的都是用差动式直流放大器拼成，下面我们介绍这种电路及其特点。

(一) 差动平衡式放大电路

(1) 平衡电桥原理

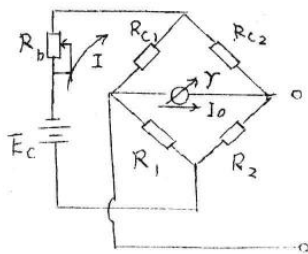


图 7-8

平衡电桥电路

为了理解差动平衡式放大电路可以减小零点漂移的原理，我们先介绍一下平衡电桥的工作原理。见图 7-8 所示。

由电桥对称我们可以知道对

于如图 7-8 所示的桥路其中线

电流为：

$$I_0 = I \frac{R_{C2} R_1 - R_{C1} R_2}{Y_0 (R_1 + R_2 + R_{C1} R_{C2}) + (R_{C1} + R_1)(R_{C2} + R_2)}$$

因此要使电桥平衡（即使 $I_0 = 0$ ）

只要满足 $R_{C2} R_1 = R_{C1} R_2$ 的条件即可，这时由于 $I_0 = 0$ ，

$$U_{Sc} = I_0 \cdot Y_0 = 0$$

在上述平衡电桥的情况下，显然可以看出，在表示 U_{Sc} 项中，并无 E_c 因素出现，故在平衡电桥条件下，桥路的输出与电源电压无关，即电源电压变化了，也不影响输出为零的平衡状态。

(2) 差动式平衡放大器的基本原理:

我们如果将晶体管放大电路也组成一个类似上述平衡电桥的电路, 就可以得到一个差动式直流放大器的最基本的线路。如图 7-9 所示

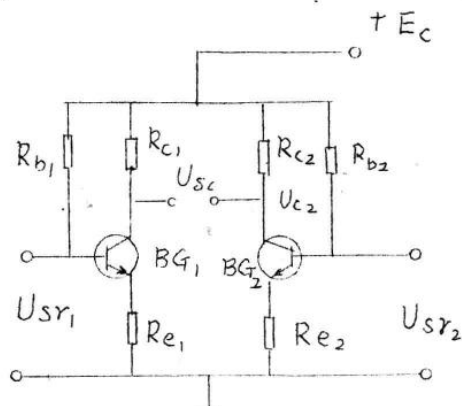


图 7-9 差动平衡放大器原理图

在图 7-9 上, $R_{B_{G1}}$, R_{e1} , 和 $R_{B_{G2}}$, R_{e2} 的电阻相当于上述平衡电桥的 R_1 , R_2 电阻, R_{c1} 及 R_{c2} 分别为 B_{G1} 及 B_{G2} 集电极负载电阻, 在 B_{G1} 及 B_{G2} 的基极输入端, 分别输入信号电压 U_{sr1} 及 U_{sr2} , 这个所拼成的平衡电路的中点连线即为放大器电路的输出端, 有输出电压 U_{sc} 。

在这里我们是将晶体管看成为一个受输入信号调节的可变电阻, 因为当输入信号使 B_{G1} 的 I_{c1} 增大时, 相当于晶体管 B_{G1} 电阻减小的情况。当输入信号使 B_{G1} 的集电极电流 I_{c1} 减小时, 相当于 B_{G1} 晶体管电阻增大的情况。

从这个桥路的结构上, 我们可以看出: 在这个串联电路中, 两边是完全对称的。即 $R_{b1} = R_{b2}$, $R_{c1} = R_{c2}$, $R_{e1} = R_{e2}$, B_{G1} 及 B_{G2} 我们也是挑选特性近似一致的 (即 β , U_{cb} , I_{cbo} 参数均相近的), 并且接入到同一个电源上去。故我们称它是平衡放大电路。