

上海市工人业余学校课本

电子技术

(试用本)

第三册



说 明

在毛主席无产阶级革命路线的指引下，本市工人业余教育蓬勃开展。为了培养“又红又专”的工人阶级技术队伍的需要，我们组织有关单位编写了这套电子技术教材。

电子技术教材共分五册。前三册是基础部分：第一册讲述直流、交流和整流电路；第二册讲述晶体三极管、低频放大器、功率放大器；第三册讲述直流放大器、稳压电源、正弦波振荡器、场效应晶体管电路。为了帮助学员掌握和运用所学过的内容，在各册后面均附有实验、习题及附录。后二册分别讲述脉冲电路和可控硅及其应用，供学过基础部分的同志选读。

这套教材是试用本，适合具有一定生产实践经验和相当于初中文化水平的工人使用。各单位在教学时可根据实际情况选用，也可穿插自编教材。

编写新教材，是教育革命的一个重要组成部分。由于我们缺乏经验，这套教材一定存在很多缺点和问题，希望广大学员和教师在试用中提出批评和修改意见。

上海市工人业余学校教材编写组

1973年4月

目 录

第一章 直流放大器	1
第一节 级间耦合	2
第二节 零点漂移	6
第三节 射极补偿电路	8
第四节 平衡放大电路	9
第五节 差动放大器	11
第六节 应用举例	16
小 结	25
习 题	26
第二章 直流稳压电源	27
第一节 硅稳压管稳压电源	28
第二节 简单串联式稳压电源	36
第三节 几种稳压电源简介	43
小 结	53
习 题	53
第三章 正弦波振荡器	56
第一节 振荡器的基本原理	56
第二节 RC 振荡器	59
第三节 LC 振荡器	70
第四节 变频与检波	89
小 结	103
习 题	104
第四章 场效应晶体管及其应用	106

第一节	场效应晶体管的工作原理与分类·····	106
第二节	场效应晶体管的特性·····	111
第三节	场效应管低频阻容耦合放大器·····	115
第四节	场效应晶体管的应用·····	139
小 结	·····	143
习 题	·····	146
实 验		
一、	平衡式差动放大器·····	147
二、	稳压电源·····	149
三、	RC 相移振荡器 ·····	152
四、	场效应晶体管特性测量·····	154
五、	场效应管共源低频放大电路·····	156
习题答案	·····	158
附 录		
一、	2CW 11~20 稳压二极管参数表 ·····	159
二、	2DW7 稳压二极管参数表·····	160
三、	3DO1、3DJ6、3DJ7 场效应晶体管参数表·····	160

第一章 直流放大器

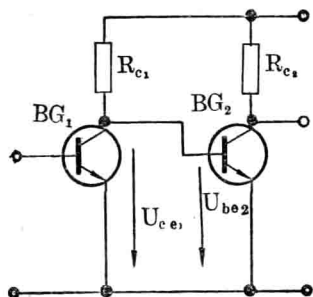
电子技术最先应用在无线电通讯方面，其放大的对象都是交流信号，随着电子技术的发展，它在工农业生产中的应用也越来越广泛，特别是无产阶级文化大革命以来，我国工人阶级遵照伟大领袖毛主席“独立自主、自力更生”的教导，土法上马，土洋结合，走自己发展工业的道路，大搞生产自动化和半自动化，其中多半应用了电子技术。

在自动控制及自动测量系统中，往往先要将一个非电量（如转速、温度、厚度、照度、流量、压力等）的变化，用传感器（如测速装置、热电偶、光电管等）转变为电量（如电压、电流、电阻等）的变化，再加以放大后输送到控制机构（如电动机、继电器、电磁铁等）去进行控制，或输送到仪表中去显示读数，从而达到自动控制及自动测量的目的，而这些被放大的电量，大都是变化极其缓慢即频率极低的信号，以恒温控制设备来讲，被控制的温度的变化，在一小时内的变化次数可能是极少的，因此这个变化的非电量被转换成电量后也是频率极低的信号。

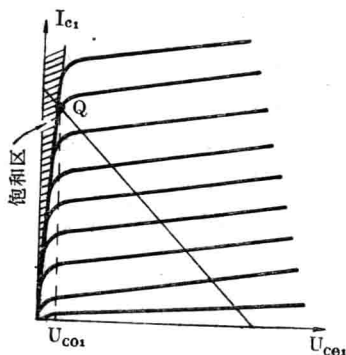
对于这种信号能不能应用交流放大器来进行放大呢？我们知道：一个信号总是要通过一定的方式逐级输送下去，而交流信号是依靠变压器或阻容来输送的。如果把直流信号输送到变压器的初级，那么变压器中流过的是直流而不是交流，因而不产生交变磁场，所以无法输送到次级；如果用阻容来输送，那么直流是流不过电容器的，也无法把直流信号传到下一级去。于是人们就应用了直流放大器来放大这种频率极低的信号。

第一节 级间耦合

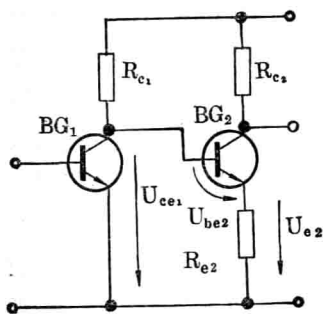
由上面的分析, 我们知道输送直流信号不能应用变压器耦合或阻容耦合, 那么能不能用一根导线把前后级直接连接起来如图 1-1(a) 呢?



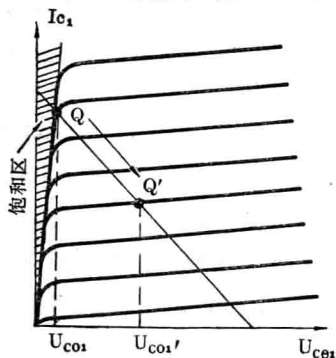
(a) $U_{ce1} = U_{be2}$



(b) 工作点接近饱和区



(c) $U_{ce1} = U_{be2} + U_{e2}$



(d) 工作点在线性区中央

图 1-1 后级发射极电位对前级工作点的影响

从图 1-1(a) 可见, BG_1 集电极与 BG_2 基极是同电位的, 但晶体管发射结的压降总是很低的, 即使硅管也只有 $0.7V$ 左右, 因此 BG_2 的基极电位不过 $0.7V$, 这样 BG_1 集电极工作

电压就被限制在这个极低的数值内, 工作点 Q 接近饱和区, 工作范围大受限制, 甚至进入饱和区而无法工作, 见图 1-1(b), 因此级间耦合的方法是直流放大器中的一个重要问题。

解决的办法之一是把后级发射极电位提高以增加前级集电极的工作电压, 来扩大工作点的线性工作范围。因此可以在 BG_2 发射极上串一电阻 R_{e2} , 见图 1-1(c), 在 I_{e2} 流过 R_{e2} 时将产生一个压降 $U_{e2} = I_{e2} R_{e2}$ 。因为 BG_1 集电极与 BG_2 基极同电位, 所以就使 BG_1 集电极电压增加了 U_{e2} 。从图 1-1(d) 可见这样处理后 BG_1 的线性工作范围较图 1-1(b) 有所增加。

但是, R_{e2} 的负反馈作用将削减电压放大倍数, 这在交流放大器中可以在电阻 R_{e2} 上并联一只交流旁路电容来得到改善。由于旁路电容对交流信号的阻抗很小, 相当于短路, 因此不起负反馈作用。但在直流放大器中, 旁路电容对缓慢变化的直流信号的阻抗还是很大的, 还有很大的反馈作用, 因此不能按交流放大器并联旁路电容的办法, 把它照搬过来。

如果我们用几只硅二极管串联起来代替 R_{e2} , 就既可以提高后级发射极电位, 又不致影响电路的原有放大倍数, 如图 1-2(a) 所示。其原理如下:

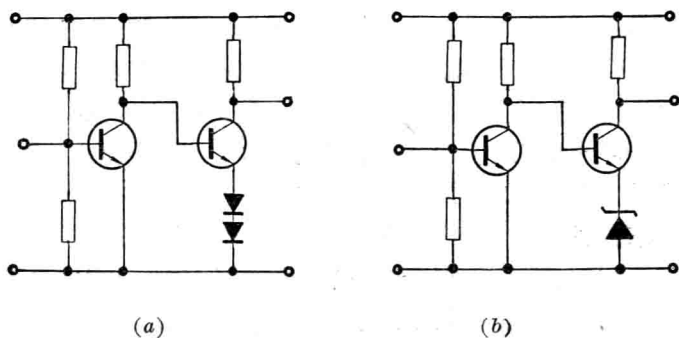


图 1-2 用硅二极管或稳压管代替 R_{e2}

$I(\text{mA})$

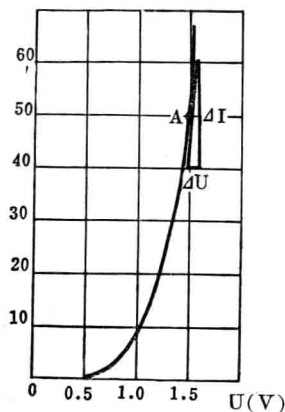


图 1-3 硅二极管正向伏安特性

试看图 1-3 所示的硅二极管的伏安特性曲线。从图上 A 点可见，当管子中通过 50mA 直流电时，管子两端的直流压降是 1.5V。这时它的电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1.5}{50} = 30 \Omega$$

称为静态电阻，是它工作在直流状态下表现的电阻。如果流过管子的是交流电，那么我们可以象求三极管输入电阻 r_{be} 那样，作 A 点的切线，从图中可见，当电流从 60mA 变化到 40mA 时，管子的

压降从 1.55V 变化到 1.45V，这个变化的电压和变化的电流的比值

$$R' = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{1.55 - 1.45}{60 - 40} = 5 \Omega$$

称为动态电阻，是它工作在交流状态下表现的电阻。可见硅二极管的动态电阻远小于静态电阻。因此用硅二极管代替 R_{e2} 后，它对于直流工作点的建立，有电阻、有压降，在直流情况下，同 R_e 的作用一样，从而提高了后级发射极电位，解决了前级集电极工作点的问题；但对于被放大的变化信号则电阻极小，如同短路，信号在它的上面几乎没有压降，全部落在三极管的发射结上，可以降低原有的放大倍数。

同理，还可使用稳压管来代替 R_{e2} ，达到与二极管同样的作用，其接法见图 1-2(b)。关于稳压管原理，我们将在下一章里学到。

还有一些解决直流放大器中级间耦合的方法，其原理不外乎从解决前级工作点着手，这里不再一一介绍。

关于直流放大器工作点的建立，同交流放大器相似，其不同之处在于交流放大器采用阻容耦合或变压器耦合，而直流放大器则是直接耦合的。前者由于电抗元件的隔直作用，级间直流电位互不影响；后者则不然，一级直流电位的变化，会影响到其他各级直流电位的变动，因此在调试工作点时要反复进行。直流放大器工作点的确立，一般不采用图介分析，而用计算的方法。

[例] 在图 1-4 电路中，电源 $E_c = 20\text{V}$ ，工作点取 $U_{ce1} = U_{ce2} = 6\text{V}$ ， $I_{c1} = 1\text{mA}$ ， $I_{c2} = 10\text{mA}$ ，第一级发射极加反馈电阻 $R_{e1} = 1\text{k}\Omega$ 。试计算 R_{c1} 、 R_{c2} 和 R_{e2} 。

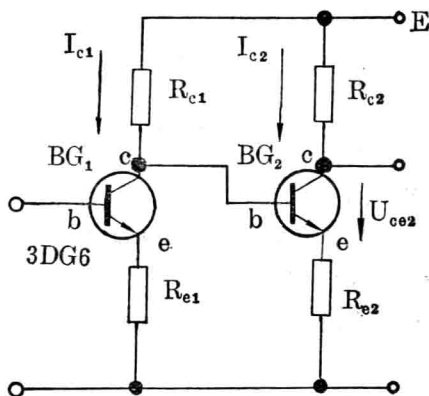


图 1-4 直流放大器级间耦合计算举例

解：略去 BG_1 的基极电流，则

$$I_{c1} = I_{e1} = 1\text{mA}$$

R_{c1} 上的压降

$$\begin{aligned} U_{Rc1} &= E_c - U_{e1} - U_{ce1} \\ &= E_c - I_{c1}R_{e1} - U_{ce1} \\ &= 20 - 1 \times 1 - 6 \\ &= 13\text{V} \end{aligned}$$

应取

$$R_{c1} = \frac{U_{Rc1}}{I_{c1}} = \frac{13}{1} = 13 \text{ k}\Omega$$

这时 BG_1 的集电极电位

$$U_{c1} = E_c - U_{Rc1} = 20 - 13 = 7 \text{ V}$$

如果没有 R_{e2} , 则 BG_2 的基极偏压也将是 7V 左右。这样大的正向电压, 将破坏 BG_2 的正常工作, 甚至烧坏管子。为此, 必须把后级发射极的电位提高到 $U_{e2} = U_{b2} - U_{be2} = 7 - 0.7 = 6.3 \text{ V}$ 左右。

由于 $I_{e2} \approx I_{c2}$, 则

$$R_{e2} = \frac{U_{e2}}{I_{c2}} = \frac{6.3}{10} = 0.63 \text{ k}\Omega \quad (\text{取 } 620\Omega)$$

$$R_{c2} = \frac{E_c - I_{c2}R_{e2} - U_{ce2}}{I_{c2}} = \frac{20 - 10 \times 0.63 - 6}{10} = 0.77 \text{ k}\Omega$$

(取 750Ω)

为了使 R_{e2} 加入后不降低放大倍数, 最好挑选一只工作电流为 10mA, 稳压值在 6.3V 左右的稳压管(如 2DW7C)来代替 R_{e2} 。

第二节 零点漂移

在图 1-5 中, 当我们把 BG_1 输入端短路(按理说没有信

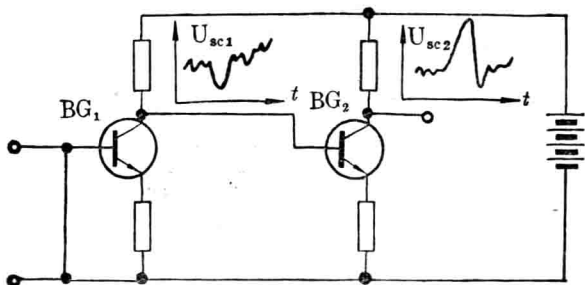


图1-5 零点漂移

号输入了)后,将发现 BG_1 及 BG_2 的输出端,存在着变化极为缓慢的信号输出,并且后级比前级大。这种现象叫做零点漂移,就是信号离开原来基准点上下漂动的意思。

“我们看事情必须要看它的实质,而把它的现象只看作入门的向导,一进了门就要抓住它的实质”。

零点漂移主要是由于晶体管参数因温度而变化及电源电压的变化所引起的,其中温度变化是主要因素。

我们已经学习过:晶体管反向饱和电流 I_{CBO} 随着温度升高而增加。实际上晶体管的其他参数也会随着温度的变化而变化,如温度每增加 1°C ,发射结电压 U_{be} 将减少 2.4mV , β 将增加 $0.5\sim 1\%$ 。

其次晶体管输出电压

$$u_{ce} = E_c - i_c R_c,$$

电源 E_c 的任何变化将直接影响输出 u_{ce} 。晶体管基极电源对输出的影响更大,它的变化相当于输入信号的变化,而会被放大器加以放大。

这些变化虽然是非常缓慢微弱的,但是直流放大器就是能够放大变化缓慢的信号,那么这些干扰信号就会与有用的输入信号混在一起,一级一级地被放大,严重时甚至这些干扰信号“淹没”了有用的输入信号,致使放大器失去作用,因此克服零点漂移就成为直流放大器的另一个重要方面。克服的方法很多,先从晶体管着手。我们在第二册中已学过硅管 I_{CBO} 随温度的变化很小,因此在直流放大器中大多采用硅管。但仅仅这样还是不够的,还要在电路中采取各种措施加以克服,如采用各种负反馈电路、射极补偿电路、平衡电路及差动电路等。关于负反馈电路原理与方法我们在第二册中已学过,下面只介绍直流放大器中常用的射极补偿电路、平衡电路及差动电路。

第三节 射极补偿电路

用电流负反馈的偏置电路可以提高电路的热稳定性减少零点漂移,但反馈电阻 R_e 的接入将降低放大器的增益。为此可象图 1-2 那样,用硅管或稳压管代替 R_e 以减少增益的损耗。但是在对零点漂移抑制要求较高的直流放大器中,电流负反馈电路还不能满足需要,因此还得采取一些其他措施。

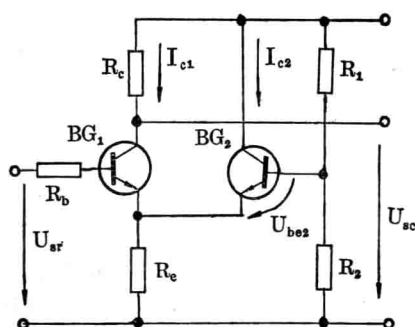


图 1-6 射极补偿电路

图 1-6 是射极补偿电路。 BG_1 和 R_e 组成一个带有电流负反馈的共发射极放大电路, BG_2 和 R_e 组成射极输出器的形式,起温度补偿作用。

当输入信号 U_{sr} 为某一恒定值时,设温度升高而两管穿透电流

I_{CEO1} 、 I_{CEO2} 增加,则同时将引起 I_{c1} 、 I_{c2} 的增加。 R_e 对 I_{c1} 的增加原来就有抑制作用,今 I_{c2} 的增加使 R_e 上的压降进一步增加,而使 BG_1 基极电流进一步减少,从而使 I_{c1} 减少。可见 BG_2 有加深 R_e 电流负反馈的作用。

在 $b_2-e_2-R_e-R_2$ 回路中, BG_2 的发射结电压

$$U_{be2} = U_{R2} - (I_{e1} + I_{e2})R_e$$

当输入信号 U_{sr} 有变化时,若 I_{c1} 增加则 I_{e1} 增加,由上式可知 U_{be2} 将随着 I_{e1} 的增加而降低, I_{e2} 因之减少。这样两管发射极电流在 R_e 上一个增加一个减少,相互抵消,因此 R_e 对信号基本上无反馈作用,对工作点的稳定作用比没有 BG_2

时强得多。这个电路比单管放大电路多了一个 BG_2 ，但 BG_2 不起放大作用，而起温度补偿作用；第一级如用锗管，可使零点漂移比单管放大器减少约 10 倍，如用硅管，可以减少数百倍；因此被广泛应用于自动控制系统及稳压电源（见下一章）的输入级。

在两管 β 相同的情况下，本电路的电压放大倍数

$$K_u \approx -\frac{\beta R_c}{2(R_b + r_{be})}$$

式中 R_b 为基极外接线限流电阻或信号源内阻；

r_{be} 为 BG_1 输入电阻，在手册上记为 h_{ie} ，一般为 300Ω 左右。

第四节 平衡放大电路

为了获得较大的放大倍数，一般我们总是把一个个单级放大器串联起来如图 1-7(a)。但是在直流放大器中，它们的工作电流和电压是值得密切注意的，因为只要前级由温度变化而工作点稍有变化，就相当于有一个虚假的信号输入，经逐级放大，最后足以“淹没”有用的信号而失去原来放大有用信号的作用。

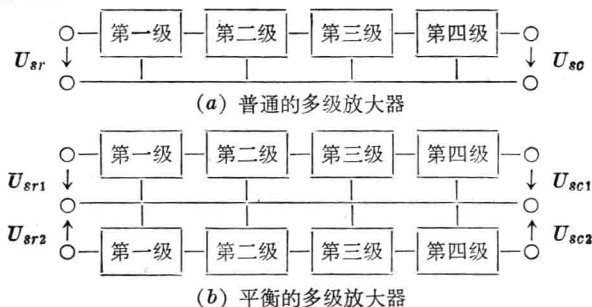


图 1-7 多级放大器的不同联接法

改善的办法之一，是把另一个与图 1-7(a) 同样的放大器和前者平行连接起来如图 1-7(b) 所示。这样虚假信号在上下两个放大器中同样被放大，在输出端，由于 A 、 B 电位同时增加相同的数值达到了平衡，它们之间的电位差保持不变而没有输出，即与没有虚假信号输入前一样。这种电路叫做平衡放大电路。

平衡放大电路原理如图 1-8(a) 所示。从图中可以看出它是二个独立的单级放大器，按图 1-7(b) 方式联接起来，它的输出取自二管的输出端。在二管参数及元件相同的条件下，当二管因温度而参数变化时，相当于在两管基极加上一个大小相等方向相同的输入信号 u_{sr} ，这个信号叫做共模信号。共模信号经各管放大后，各管将同时分别有输出，而且 $u_{sc1} = u_{sc2}$ ，

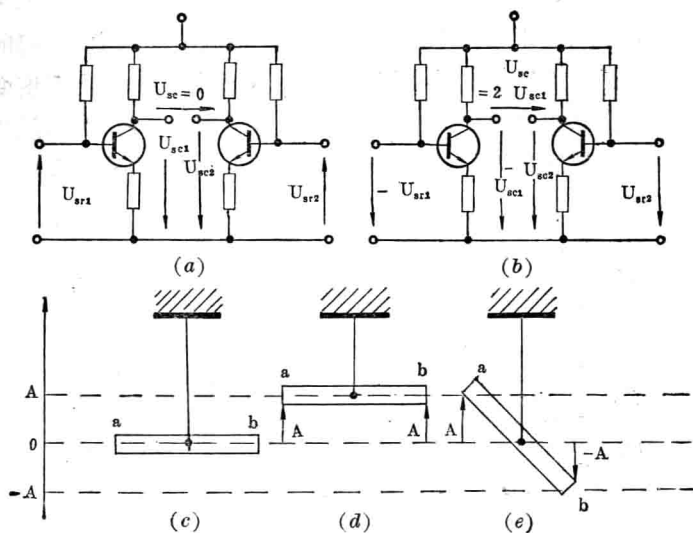


图 1-8 平衡放大器工作原理

整个电路输出

$$u_{sc} = u_{sc1} - u_{sc2} = 0$$

这样就通过平衡的结构把虚假的共模信号抵消了。作个比喻,在一根棒的中心用绳子穿起来再把它挂起来,这时棒两端 a 、 b 高低相等,如图 1-8(c) 所示。如果收紧绳子则 a 、 b 将同时提高 A , 两端高低还是相等,如图 1-8(d) 所示。

如果在电路两端分别送入两个大小相等方向相反的信号,如图 1-8(b) 所示,这个信号叫做差动信号,也就是交流功率放大器中的推挽信号,左管基极的负信号经放大而输出增加,右管正信号经放大而输出减少,整个电路的输出 $u_{sc} = u_{sc1} - (-u_{sc2}) = 2u_{sc1}$ 。因此加入差动信号后得到的输出是一边输出的二倍。再以图 1-8(c) 为比喻,如果棒的 a 端上升 A , b 端下降 A , 如图 1-8(e) 所示,则两端高低相差 $A - (-A) = 2A$ 。

可见平衡放大电路中每边既能放大共模信号也能放大差动信号,但在输出端,放大后的共模信号由于电路二边平衡而抵消了。

平衡放大电路比起单管放大电路来性能好得多,因此为直流放大器中所常用。在输出端接上指示仪表就可用作测量仪器,把输出继续加以放大去推动执行元件,就可以作为自动检测及自动控制用。

第五节 差动放大器

平衡放大器对共模信号由于在输出端相互抵消而成了较进步的直流放大器,但“运动在发展中,又有新的东西在前头,新东西是层出不穷的。”人们在实践中把平衡放大器又加以改进,使它只能放大差动信号而抑制共模信号,这就是差动放大器,也称差分放大器。

一、平衡式差动放大器

平衡式差动放大器的基本电路如图 1-9 所示，其中两管参数及其余元件都相同。

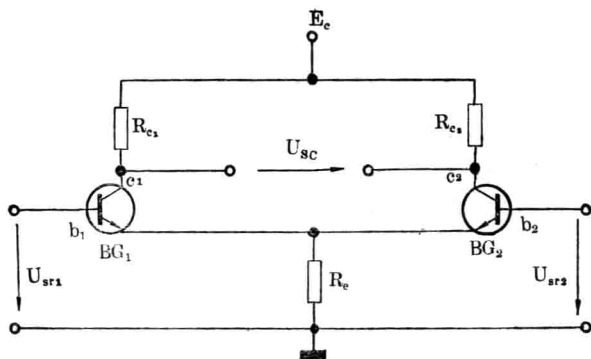


图 1-9 差动放大器基本电路

由图可见，它和平衡电路在结构上的差异，仅仅是把平衡电路中的两个发射极电阻合并为一个。

当温度变化而两管参数变化，或两管基极同时受到大小相等方向相同的干扰信号时，相当于两管基极输入一对共模信号而两管集电极电流同时上升，因此 R_e 上流过的是被放大的共模信号的两倍，将产生两倍于单管时的负反馈作用去抑制两管因共模信号而引起的集电极电流的上升。

当差动信号输入时，两管中流着两个大小相等方向相反的变化了的集电极电流，它们在 R_e 上刚巧相互抵消，所以 R_e 仅对虚假的共模信号有负反馈作用，对有用的差动信号没有负反馈作用。因此差动放大器能放大差动信号，但对共模信号则抑制在输出之前。

如在两管基极分别输入一对差动信号, 设 b_1 为负、 b_2 为正, 则集电极 c_1 电位上升, c_2 电位下降, c_1 、 c_2 间即有电压输出

$$U_{sc} = U_{sc1} - (-U_{sc2}) = 2U_{sc1}。$$

通过计算, 可以得出如下结论:

即输出电压 U_{sc} 与输入电压之差 ($U_{sr1} - U_{sr2}$) 成正比。这就是差动放大器名称的来源。

这种平衡式差动放大器电路的放大倍数

$$K_u = - \frac{\beta R_c}{R_{b1} + r_{be}}。$$

也就是等于单管的放大倍数。

实际上要求两个三极管的参数完全一样是困难的, 为此, 再加一个调零电位器 R_w 于两管发射极之间, 如图 1-10 所示。

在 U_{sr} 为某一恒定值时, 如果因参数不一致而 $I_{c1} < I_{c2}$, 即可将 R_w 的滑臂向左移一些以增加反馈量, 直到使 $I_{c1} = I_{c2}$ 为止。 R_w 一般取 $0.1 \text{ k} \sim 1 \text{ k}\Omega$ 。

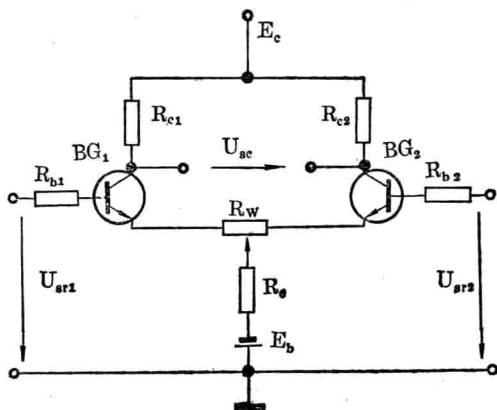


图 1-10 加有调零电位器的差动放大器

从差动放大器原理可知, R_e

越大, 对共模信号的抑制作用越大, 但 R_e 的增大将降低原有的集电极电压, 为此常在 R_e 下面串接一个电源 E_b , 以提升集电极电位。