

北京工业学院电视教育小组 编

半导体电路基础

(第二册)

第一分册

科学出版社

内 容 简 介

本书是为教育部和中央广播事业局共同举办的电视教育讲座编写的电子技术教材。

本书共分四册。第一册包括半导体器件，低频小信号放大电路，负反馈及低频功率放大电路。

第二册分两个分册，内容包括直流放大电路，整流和滤波电路，直流稳压电源及自激正弦波振荡器，最后还介绍了半导体电路实验和电子测量仪器。

第三、四册为半导体脉冲数字电路。

本书可供具有中等文化程度工人、知识青年阅读，也可供大专院校、中等专业学校有关专业的师生参考。

半 导 体 电 路 基 础

(第二册 第一分册)

北京工业学院电视教育小组 编

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

西 安 新 华 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年7月第一版 开本 787×1092 1/32

1979年7月第一次印刷 印张 6 1/2

印数：0001—501,100 字数：150,000

统一书号：15031·208

本社书号：1281·15-7

定 价： 0.53 元

目 录

第五章 直流放大电路	367
第一节 直流放大电路的特殊问题	387
一、直流电位相互牵制问题	387
二、多级直流放大电路的零点漂移	392
第二节 差分放大电路	397
一、差分放大电路的工作原理	397
二、差分放大电路的分析方法	405
三、差分放大电路的其他几种接法	414
四、差分放大电路的差值特性	423
五、进一步减小差分电路零点漂移的途径	427
第三节 调制式直流放大电路	435
一、调制式直流放大器的基本原理	436
二、调制器原理	438
三、场效应管调制器	442
四、解调器原理	450
第四节 集成运算放大器简介	452
一、什么是集成运算放大器	453
二、线性集成电路结构上的特点	453
三、集成运算放大器举例	455
四、集成运放的简单应用	462
小结	469
思考题	470
练习题	472
附录 场效应管的工作原理和特性	474
一、结型场效应管的工作原理和特性	475
二、绝缘栅场效应管的工作原理和特性	486
三、场效应管与半导体三极管的比较	499
四、电路举例	502
第六章 整流和滤波电路	507
第一节 半波整流和电容滤波电路	508

一、半波整流电路	508
二、半波整流电容滤波电路	513
三、整流、滤波元件的确定	516
第二节 全波整流和电容滤波电路	518
一、全波整流电路	518
二、全波整流电容滤波电路	524
第三节 桥式整流和电容、电感滤波电路	526
一、桥式整流电路	526
二、桥式整流电容滤波电路	530
三、桥式整流电感滤波	534
第四节 倍压整流电路	539
一、二倍压整流电路	540
二、三倍压及多倍压整流电路	542
三、几种整流滤波电路的特性比较	545
第五节 整流滤波电路的设计	546
第六节 复合式滤波电路	550
一、LC 滤波电路	551
二、RC 滤波电路	554
三、半导体管有源滤波电路	557
四、 Γ 型 LC 滤波电路	560
第七节 小功率整流变压器的设计与制造	563
一、制造变压器的材料	563
二、设计步骤	564
三、设计举例	577
四、变压器制作的简单工艺	580
小结	582
思考题	583
练习题	585
附录 常用半导体整流二极管参数	586

第五章、直流放大电路

前面我们详细地讨论了低频交流信号的放大电路。但在自动控制系统和一些电子测量仪器中，所要放大的信号并不都是变化较快的交流信号，有很多是变化极为缓慢的、非周期性的信号，有时甚至是直流信号，或者说，需要放大的信号下限频率为零。很明显，要放大这样的信号，不能再用前面讨论过的阻容耦合或变压器耦合的交流放大器了，因为这种缓变信号将被耦合电容所隔断或被变压器的初级线圈所短路。因此，常常采用直接耦合放大电路实现对缓变信号的放大。所谓直流放大器就是能够放大直流或变化十分缓慢信号的放大器，或者说，直流放大器是下限频率为零的放大器。

第一节 直流放大电路的特殊问题

采用直接耦合放大电路，解决了缓变信号的放大问题，但是也带来了需要认真解决的新问题。一是直流电位的相互牵制问题；二是多级直流放大电路的零点漂移问题。现分别讨论如下。

一、直流电位相互牵制问题

为了弄清直接耦合放大电路各级之间直流电位的相互影响，现在我们讨论如图 5-1 所示的两个参数相同单级放大电路直接耦合时的情形。

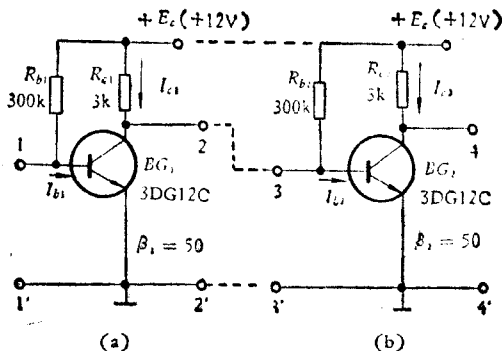


图 5-1 单级放大电路

第二章我们已经讨论了固定偏置电路的静态工作点的计算。若两只管子的特性相同,则由电路参数可知,两个放大电路静态基极电位应是相同的,即认为 $U_{b1} = U_{b2} \approx 0.7V$; 两个放大电路的静态集电极电位也应是相同的,即 $U_{c1} = U_{c2}$, 其中

$$\begin{aligned}
 U_{c1} &= E_c - R_{c1}I_{c1} = E_c - R_{c1}\beta_1 I_{b1} \\
 &= E_c - R_{c1}\beta_1 \frac{E_c - U_{be1}}{R_{b1}} \\
 &= 12 - 3 \times 50 \times \frac{12 - 0.7}{300} \approx 6.3V
 \end{aligned}$$

若将图 5-1(a) 放大电路的输出端 2-2' 与图(b)放大电路的输入端 3-3' 分别连接起来,并共用一个电源(如图中虚线所示)时,直流电位会发生怎样的变化? 对放大电路的工作有什么影响呢?

很明显,当两个单级放大电路直接耦合后, BG_1 的集电极电位就是 BG_2 的基极电位,即 $U_{c1} = U_{b2}$ 。由于三极管输入特性曲线很陡,所以 BG_2 的基极与发射极之间的电压 U_{be2} 不会有很大的增加,必然迫使第一级管子 BG_1 的集电极电位下降

到 BG_2 的基极电位, 即 $U_{c1} = U_{b2} \approx 0.7V$, 此时, BG_1 的管压降 $U_{ce1} \approx 0.7V$. 可见, 直接耦合的结果, 由于直流电位的相互影响, 使第一级管子 BG_1 处于接近饱和的状态.

直接耦合后, 第二级的偏流电阻也不再仅仅是 R_{b2} 了, 第一级集电极电阻 R_{c1} 同时也起着第二级偏流电阻的作用, 并且由于 R_{c1} 比 R_{b2} 小得很多, 它对第二级的影响是很大的, 使第二级的静态基流大大增加, 因而使 BG_2 处于深度饱和状态. 如果管子允许的耗散功率较小, 而且集电极电阻 R_{c2} 也较小时, 甚至还可能使三极管 BG_2 烧毁.

图 5-1 的两级放大电路, 如果用耦合电容连接成交流放大电路, 每级的静态工作点相互独立, 则可正常工作. 但是直接耦合后, 由于直流电位的相互影响, 致使放大电路不能正常工作. 当然如果事先将 BG_1 的集电极电位 U_{c1} 调整到 $0.7V$, 直接耦合后放大电路虽然能够工作, 但是动态范围也还是很小的. 所以, 直接耦合放大电路必须很好地解决直流电位相互牵制的问题.

为了使图 5-1 的放大电路直接耦合后能够正常工作, 只要把第二级 BG_2 管子的发射极电位垫高, 也就是使 BG_2 基极电位提高到 BG_1 集电极电位的高度即可, 当然也应使 $U_{be2} \approx 0.7V$.

垫高发射极电位的方式很多, 经常采用的是在发射极上接电阻的方法, 如图 5-2 所示. 发射极电阻 R_e 的阻值应由三极管 BG_1 集电极电位 U_{c1} 和第二级管子 BG_2 的射极电流 I_{e2} 所决定, 即

$$R_e = \frac{U_{c1} - U_{be2}}{I_{e2}}$$

这种直接耦合的放大电路, 其优点是元件少, 结构简单, 在集成电路中被广泛采用. 它的缺点是由于 R_e 的负反馈作

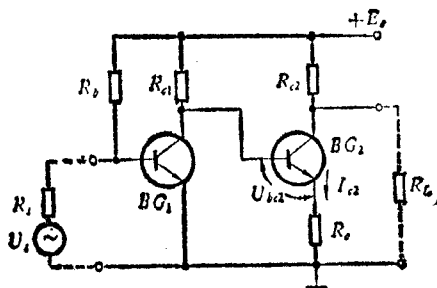


图 5-2 直接耦合放大电路

用使放大器的放大倍数下降。

现在要问,能不能在 R_e 两端并联一个电容器来消除这种负反馈作用呢? 请读者自己给出答案。

为了解决既要垫高射极电位, 又不使放大倍数因深度负反馈而下降太多, 通常用稳压管(其特性在第七章详述)代替 R_e , 因为在满足稳压管一定工作电流的范围内, 稳压管两端的电压是稳定的, 因而可以垫高发射极电位, 而且在正常工作条件下稳压管的动态内阻很小, 所以负反馈作用也就很小了, 放大倍数下降的也很少。如果需要垫高的电位不是太高, 还可以用二极管代替 R_e , 因为二极管的正向电压不高, 而且正向的动态电阻也很小, 所以有时利用二极管垫高射极电位, 也可以达到要求。

应该指出, 在利用 NPN 型三极管的直接耦合放大电路中, 正常工作状态时, 各级的集电极电位总是高于它本级的基极电位, 当级数增多, 集电极电位逐级升高, 这一方面要求电源提供更高的电压, 另一方面输出端可能偏离所要求的初始直流电位。这些都是实际中需要解决的问题。

直接耦合多级放大电路, 除了各级之间直流电位相互影响之外, 在接入信号源或负载时(如图 5-2 虚线所示), 由于信

号源内阻或负载电阻的分流作用，也会影响放大电路的直流电位。特别是放大电路输入端与输出端的初始直流电位偏离零电位很远时，影响更为严重。这种输入端与输出端初始直流电位不为零的直接耦合放大电路，作为专用设备中的放大环节是可以的，因为在专用设备中放大电路的输入信号源和负载都是固定的，可以事先考虑到初始电位不为零这一条件来设计整个系统。但是作为通用设备中的直流放大器则往往是不适宜的。例如，通用示波器等设备中的直流放大器，如果放大器的初始直流电位不为零，那么示波器用于观察不同电路的波形时，相当于接入具有不同内阻的信号源，由于信号源内阻对直流放大器的影响，有可能使示波器在一些场合不能正常工作，这显然是不能允许的。因此，作为通用设备中的直流放大器通常要求它的输入端与输出端初始直流电位为零。这样，只有当有信号输入时，输入端与输出端的电位才随之变化。怎样才能使输入端与输出端初始直流电位为零呢？

使直流放大电路输入端与输出端初始直流电位为零，在单电源放大电路中是有困难的，因此，一般都采用双电源电路。图 5-3 所示的两级直流放大电路，就是采用了正电源 E_1 和负电源 E_2 的双电源供电。通过反复调整偏流电阻 R_{b1} 和发射极电位器 R_w ，可以使放大电路有合适的工作点，还能使输入端的直流电位对地为零。

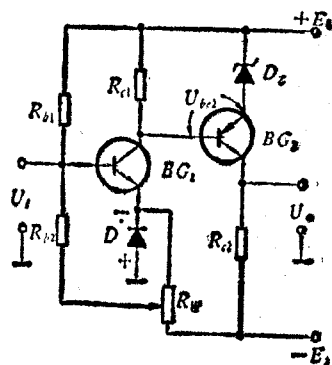


图 5-3 输入端与输出端初始直流电位为零的电路

由于 BG_1 是 NPN 型三极管，在正常工作状态时，其集电

极电位比基极电位高得多；而 BG_2 是 PNP 型三极管，在正常工作状态下，其集电极电位比基极电位低得多。利用 NPN 型三极管与 PNP 型三极管相互搭配使用，使多级直流放大器的直流电位得到调整，避免了用同一类型三极管的多级放大器要求过高的电源电压，以及使输出端的初始直流电位偏离零值。

选择合适的稳压管 D_z ，使稳压管上的电压 U_{Dz} 与 U_{be2} 之和等于 R_{e1} 上的电压降，使 BG_2 有合适的工作点。再调整电阻 R_{e2} 的阻值，就可以使放大电路输出端的初始直流电位为零。

应该指出， BG_1 发射极所接二极管 D 是处于正向导通状态。如果选择二极管的特性使它与三极管 BG_1 发射结 ($c-b$) 的特性相似，则二极管两端的电压 U_D 与三极管的 U_{be1} 是大小相等，极性相反。因此，二极管可以起到温度补偿作用。

综上所述，直接耦合放大电路直流电位的相互牵制、相互影响是设计和应用直流放大器必须注意解决的问题。通过上面的分析可以看出，只要认真对待，这个问题也并不难解决。真正需要用大力解决的还是多级直流放大电路的零点漂移问题。

二、多级直流放大电路的零点漂移

1. 什么叫做直流放大电路的零点漂移

在第二章里，我们已经讨论了阻容耦合交流放大电路的工作点稳定问题。我们知道，当温度变化时，三极管的参数也发生变化，因而引起放大电路工作点的缓慢移动，但在阻容耦合交流放大电路中，各级工作点的缓慢变化不会通过隔直电容加到下一级去，更不会逐级放大，所以只要采用一定形式

的偏置稳定电路就能达到稳定工作点的目的，满足实际上的要求。可是，在直流放大电路中，因为直接耦合，所以第一级工作点的缓慢变化会被逐级放大，使输出电压偏离其初始值，而且放大倍数越大，偏离初始值越严重。在直流放大电路中，我们把输入信号为零时，输出电压偏离其初始值的现象称为零点漂移，简称零漂或漂移。

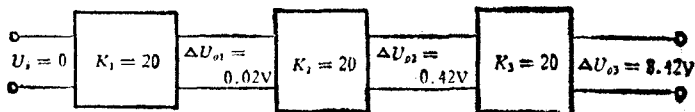


图 5-4 三级直流放大器的方框图

直流放大器的级数越多、放大倍数越大，输出端的漂移现象也越严重。例如有一个三级放大器，其方框如图 5-4 所示。每级的放大倍数为 20 倍。若由于温度的变化使每级输出电压变化量为 20mV。而且假定前级的漂移与后级漂移是同相加的。很明显，第一级输出的漂移电压为 20mV，第二级输出的漂移电压除了本级的 20mV 以外，还包括第一级输出的漂移电压经过第二级放大后的部分（400mV），而且这是第二级输出的漂移电压的主要成分，它比第二级本身的漂移电压要大得多。同理可知，第三级输出的漂移电压，主要是第一级的漂移经过第二、三两级放大后的部分。

可见，一个多级直流放大器，其输出端的漂移，主要是取决于输入级的零点漂移。因此，要减小多级直流放大器的零点漂移，必须着重在第一级加以解决。否则当有用信号很微弱时，有可能被零点漂移所“淹没”，使放大器输出电压中的信号和漂移难以分辨。更严重的是，单是由于漂移电压的影响，就可能使多级直流放大器的末级进入饱和或截止状态，使放

大器不能正常工作。可见，零点漂移是直流放大器中十分突出的问题。因此，既要提高放大倍数，又要减小零点漂移，这是设计与制造高质量直流放大器的主要矛盾。

2. 怎样衡量零点漂移的大小

如果有两个直流放大器，第一个放大器输出端的漂移电压为 5V ，其放大倍数为一千倍；第二个放大器输出端的漂移电压为 10V ，其放大倍数为一万倍。这两个放大器哪个漂移大呢？单从输出漂移电压的大小还不能判定放大器质量的优劣，还必须同时考虑放大倍数的不同。如果两个放大倍数不同的放大器，其输出端的漂移电压相同，那么显然是放大倍数大的质量好。因此，在实际应用中通常把输出电压的漂移值除以放大器的电压放大倍数，作为衡量直流放大器性能优劣的一个重要指标，通常称为折算到输入端的等效漂移电压，简称输入漂移电压。若把电压关系换成电流，便得输入漂移电流。

输入漂移(电压或电流)的重要意义，就在于它确定了放大器正常工作时所能放大有用信号的最小值。当输入的有用信号小于输入漂移时，则输出端的有用信号也必然小于输出的漂移分量，在输出端很难分辨出有用信号来。因此，输入漂移(电压或电流)是评定直流放大器性能好坏的重要指标之一。

到此，我们可以很容易回答上面提出的问题，因为第一个放大器的输入漂移电压为 5mV ，而第二个放大器的输入漂移电压为 1mV ，所以第一个放大器的漂移较大，因而性能较差。

3. 产生零点漂移的原因

产生零点漂移的原因很多，如温度的变化(包括环境温度

的变化及三极管工作时由于管耗引起结温的变化), 电源电压的波动以及电阻等电路元件参数的变化等, 都会引起放大器的零点漂移。其中又以温度的变化使三极管参数随之变化所引起的漂移最为严重。通常把对应于温度每变化 1°C 时, 所引起放大器的等效输入漂移称为温度漂移, 简称温漂。在第二章中已经指出, 无论硅管还是锗管, 当温度每升高 1°C 时, 三极管 EB 结的电压 U_{be} 就要减小 2mV 左右, 而电流放大系数 β 则要增加 $0.5\sim 1.0\%$ 。至于三极管的反向饱和电流 I_{cbo} , 则大体上是当温度上升 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ 时增加一倍。不过, 在常温下锗管的 I_{cbo} 较大, 例如小功率锗管的 I_{cbo} 一般在几个微安的数量级, 而小功率硅管的 I_{cbo} 要比锗管小两到三个数量级。所以采用硅管的直流通路, 其反向饱和电流 I_{cbo} 对放大器漂移的影响往往可以忽略。

直流放大器很多是采用双电源供电, 电源电压的波动, 也要引起放大器输出电压的漂移, 这是比较容易理解的。不过还应指出的是, 接在集电极电路中的电源, 其波动所引起的输出漂移电压折算到输入端时应除以放大器的电压放大倍数, 因而相应的输入漂移电压是比较小的; 而接在发射极电路中的电源波动所引起的漂移电压, 对放大器的影响要大得多, 因为这个波动电压是直接加在放大器的输入端。因此, 直流放大器对电源稳定度的要求要比交流放大器高得多。同样, 直流放大器对电路元件质量的要求也比交流放大器高得多。

解决由于电源波动和电路元件参数变化而引起的漂移, 通常是采用高稳定度的电源和选用高质量的电路元件。解决由于温度变化所引起的温度漂移, 在简单的直流放大电路中采用温度补偿的办法; 在要求高的场合, 则应采用下一节将要讨论的差分放大电路。

4. 温度补偿电路

所谓温度补偿电路，就是在放大电路中接进另外一个对温度敏感的元件，利用这个元件随温度的变化，来抵消温度对三极管的影响，以达到减小漂移的目的。

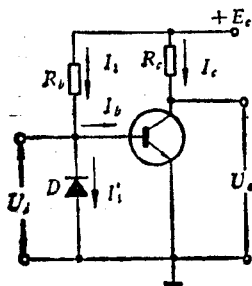


图 5-5 利用二极管反向电流温度补偿电路

图 5-5 是利用二极管 D 的反向电流进行温度补偿的最简单电路。放大电路的基极与地之间接入一个反向连接的二极管 D ，当温度上升，三极管参数变化，使集电极电流 I_c 增加，引起输出端电压的漂移。可是同时二极管的反向电流 I_D' 也随温度升高而增加。流过 R_b 中的电流 I_b 等于 I_b 与 I_D' 之和，所以 I_b 随着温度的升高反而减小，因而牵制了 I_c 的增加。这里就是利用二极管这个对温度敏感的元件，抵消温度对三极管的影响，达到减小漂移的目的。

同样，利用二极管正向导通电压随温度变化的特性也可以达到温度补偿的目的。如图 5-3 电路中接在 BG_1 发射极电路中的二极管 D ，就可以起到温度补偿的作用。因为当温度升高时，一方面，三极管 BG_1 的发射结上的电压 U_{be} 减小，而基极的电位不变，这是使 I_b 和 I_c 增大的因素，使输出漂移增加；另一方面，二极管 D 两端的电压 U_D 也减小，使 BG_1 发射极的电位提高，限制了 I_b 和 I_c 的增大，达到了减小漂移的目的，起到了温度补偿的作用。在实际电路中，温度补偿二极管有时用同类型的三极管接成。因为同类型三极管的温度系数更接近，所以温度补偿的效果也更好。

上面所讨论的温度补偿电路，虽然具有简单、经济的优

点,但是这种二极管补偿的办法,很难作到全面补偿,特别是当温度变化范围较大,补偿的效果就更不理想。所以这种简单的温度补偿电路,只能用在零点漂移要求不太高的放大器中。要更好的解决这一问题,通常是采用差分电路。

以上我们着重讨论了直流放大器的特殊问题,也就是它与交流放大器的不同点,这是由于要放大的信号变化十分缓慢,采用直接耦合方式而带来的问题。可是,要从所放大的信号大都是变化量来说,直流放大器与交流放大器又有很多共同点。

首先,直流放大器在设置静态工作点的目的,选择工作点的原则以及静态工作点的计算等方面与交流放大器是一样的。另外,直流放大器的工作原理,分析方法也和交流放大器是相同的。例如,在交流放大器中导出来的有关放大倍数、输入、输出电阻等的计算公式在直流放大器中仍然适用。所以在直流放大器的分析与计算中,经常直接引用这些方法和计算公式。

第二节 差分放大电路

一、差分放大电路的工作原理

差分放大器又称差动放大器或差值放大器。由于它比较完善地解决了直流放大器中的增益与零点漂移的矛盾,因而获得了十分广泛的应用。

上面我们已经讨论过利用电流负反馈稳定工作点的偏置电路以及利用温度敏感元件的温度补偿电路。在此基础上发展起来的差分放大电路,可以更有效地减小由于三极管的 U_{be} 、 β 和 I_{co} 随温度变化所引起的漂移。

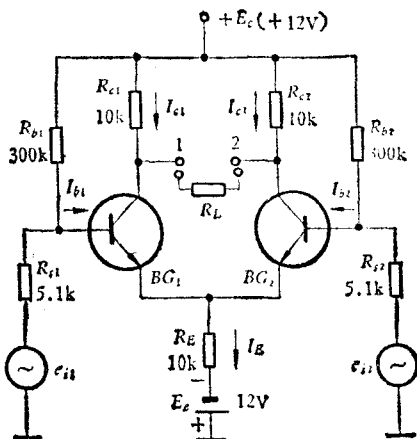


图 5-6 差分放大电路的基本形式

差分放大电路的基本形式如图 5-6 所示。它是由两个相同的单管放大电路构成的。其中三极管 BG_1 和 BG_2 应是挑选特性一致的，电路元件参数也应相同，即 $R_{c1} = R_{c2}$ ， $R_{b1} = R_{b2}$ 。两管发射极所接的公共电阻 R_E 的数值一般要选得较大。信号电压由两个三极管的基极输入，放大后，输出电压由两个三极管的集电极取出。这种差分电路是怎样抑制零点漂移的呢？

1. 差分放大电路对零点漂移的抑制

差分放大电路抑制零点漂移的原因，主要是两管发射极所接的公共电阻 R_E 对漂移信号有很强的负反馈作用。

如果没有外加信号，只是由于温度(或电源电压)的变化而引起两管集电极电流同时变化，在电路对称和两管温度变化相同的条件下，两管集电极电流的变化量应是大小相等，方向相同，即 $\Delta I_{c1} = \Delta I_{c2} = \Delta I_c$ ，同样两管发射极的电流变

化量也应是大小相等方向相同, 即 $\Delta I_{c1} = \Delta I_{c2} = \Delta I_c$ 。因此, 流过电阻 R_E 的总电流增量应为两管电流增量的和, 即 $\Delta I_E = \Delta I_{c1} + \Delta I_{c2} = 2\Delta I_c$, 在 R_E 上建立的电压增量为 $\Delta U_e = 2\Delta I_c R_E$ 。很明显, 由于 R_E 上的增量电压 ΔU_e 的负反馈作用, 可以使漂移减小。具体地说, 就是当温度升高, 两管集电极电流 I_{c1} 、 I_{c2} 同时增加, 两管发射极电流 I_{e1} 、 I_{e2} 也同时增加, R_E 上的电压就增加。结果使加在两只管子发射结上的电压 U_{be1} 、 U_{be2} 同时减小, 因而使两管的基流 I_{b1} 、 I_{b2} 同时减小, 这就限制了 I_{c1} 、 I_{c2} 的增加。同时我们还看到, 在相同的负反馈电压增量的情况下, 由于 $\Delta U_e = 2\Delta I_c R_E$, 而且发射极电流变化量 ΔI_e 与集电极电流变化量 ΔI_c 又很接近, 即 $\Delta I_e \approx \Delta I_c$, 所以 R_E 越大, 两管集电极电流变化量就越小, 集电极电压的变化也就越小, 因而每管集电极电压的漂移也越小。这就是说, 当 R_E 很大时, 它对漂移信号的负反馈作用很强, 差分放大电路对漂移信号的放大倍数可以很小, 因而达到抑制零点漂移的目的。

换言之, 差分放大电路输出端的零点漂移电压折算到输入端时, 相当于在放大电路的两个输入端加上大小相等, 极性相同的输入漂移信号电压。通常, 我们把这种大小相等, 极性相同的信号叫做共模信号, 差分放大器的输入端加上共模信号叫做共模输入。由于 R_E 对共模信号的负反馈作用, 使差分电路对共模信号的放大倍数可以很小, 有时甚至小于 1, 因而达到抑制共模信号的效果。而零点漂移又可看作是一种共模信号, 所以也达到抑制零点漂移的目的。差分放大电路抑制零漂的过程还可以写成如下简单的形式*:

* 本章所用的符号 U 和 I , 分别代表反映信号电压的变化量和电流的瞬时值。