

毛主席语录

中国共产党是全中国人民的领导核心。没有这样一个核心，社会主义事业就不能胜利。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

我们必须全心全意地依靠工人阶级，团结其他劳动群众，争取知识分子，……

打破洋框框，走自己工业发展道路。

前 言

看万山红遍，层林尽染。面对着国内外一派大好形势，全国人民满怀胜利豪情，以战斗的步伐，跨入了社会主义革命和社会主义建设新高潮的一九七一年。我们热烈欢呼毛主席的无产阶级革命路线的胜利，衷心祝愿我们的伟大领袖毛主席万寿无疆！

今年，是我国实行发展国民经济第四个五年计划的第一年。毛主席教导说：“**我国人民应该有一个远大的规划，要在几十年内，努力改变我国在经济上和科学文化上的落后状况，迅速达到世界上的先进水平。**”要实现这一伟大战略目标，我们要以两个阶级、两条道路、两条路线斗争为纲，**鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。**要贯彻执行“**提高警惕，保卫祖国**”，“**备战、备荒、为人民**”的伟大战略方针，发扬**独立自主、自力更生、艰苦奋斗、勤俭建国**的革命精神。

应用电子技术，对我国工业、农业、科学技术、国防以及人民政治生活有着密切的联系。经过无产阶级文化大革命，彻底摧毁了以叛徒、内奸、工贼刘少奇为首的资产阶级司令部，粉碎了反革命修正主义路线，大破洋奴哲学、爬行主义。在毛主席的革命路线指引下，随着技术革新群众运动的蓬勃开展，应用电子技术，越来越广泛。广大工农兵对电子技术知识的需要也越来越迫切。

我们上海市业余工业大学，在驻校工人、解放军毛泽东思想宣传队和校革命委员会领导下，组织了以工人为主体，有革命干部、革命知识分子参加的“三结合”小组，编写电子技术讲

座。《晶体管放大与振荡电路》是继《晶体管整流电路》之后的第二讲。本书主要是搜集了上海地区在工业上应用电子技术革新的群众运动中涌现出来的一些资料，以及我校在教育革命实践中的部分教材，可供具有初中文化程度的工农兵读者自学。

在编写过程中，得到上海很多工厂，有关工业局（公司、厂）的工人电子技术训练班及各地有关单位的关怀和支持，我们表示深切感谢。

由于我们水平有限，缺点错误一定不少，希望广大工农兵读者给予批评指正。

1971 年 1 月

目 录

第一章 晶体三极管并不神秘.....	(1)
第一节 晶体三极管基本结构.....	(1)
第二节 晶体三极管的电流分配和放大作用.....	(3)
第三节 用于生产中的晶体管简单电路举例.....	(7)
第四节 晶体三极管的特性曲线.....	(13)
第五节 晶体三极管的粗测.....	(16)
本章小结.....	(22)
第二章 低频放大器.....	(24)
第一节 单管低频小信号放大器.....	(25)
第二节 多级放大器.....	(40)
第三节 功率放大器.....	(50)
第四节 放大器中的负反馈.....	(64)
第五节 应用实例.....	(74)
本章小结.....	(80)
第三章 直流放大器.....	(83)
第一节 直接耦合放大器.....	(83)
第二节 差动放大器.....	(86)
第三节 调制型直流放大器.....	(92)
第四节 应用实例.....	(95)
本章小结	(103)
第四章 晶体管直流稳压电源	(105)
第一节 硅稳压管稳压器	(106)
第二节 串联型负反馈稳压电路	(110)

第三节	串联型负反馈稳压电路的简单计算	(116)
第四节	应用线路举例	(125)
本章小结	(133)
第五章	自激振荡	(134)
第一节	LC 振荡回路中的电磁振荡	(134)
第二节	自激振荡的产生	(137)
第三节	LC 自激振荡线路分析	(140)
第四节	LC 自激振荡器应用举例	(150)
第五节	RC 自激振荡器	(158)
第六节	石英晶体振荡器	(167)
第七节	陶瓷滤波器控频振荡器	(171)
第八节	几个脉冲振荡线路	(175)
本章小结	(180)
附录一	关于晶体管电路中电流和电压方向及其正负值的规定	(181)
附录二	参数符号说明	(185)
附录三	晶体管几个参数的说明	(189)
附录四	国产晶体管参数选录	(200)
附录五	国产稳压管参数选录	(219)

第一章 晶体三极管并不神秘

晶体三极管又名半导体三极管,它与电子管相比,具有体积小、重量轻、坚固耐震,使用寿命长,可靠,省电等优点。因此,在国防、工农业生产和科学实验等方面得到了极为广泛的应用。可是,叛徒、内奸、工贼刘少奇及其代理人竭力鼓吹“专家治厂”,“洋奴哲学”等反革命修正主义路线,把那些资产阶级反动学术“权威”捧上了天,胡说什么“工人不懂 A、B、C,不能搞电子”,把工农兵排斥在电子技术门外,阻碍了我国电子技术的发展。无产阶级文化大革命以来,我国工人阶级高举毛泽东思想伟大红旗,发扬“**独立自主、自力更生**”的革命精神,大搞电子工业群众运动。例如:许多原来根本不接触电子技术的老木工、老漆工**破除迷信,解放思想**,土法上马,在短短 21 天的时间里造出了赶超世界先进水平的半导体元件,我国半导体工业,在毛主席革命路线的指引下,发展很快,并取得了很大成绩。

“卑贱者最聪明! 高贵者最愚蠢”。电子科学技术是劳动人民创造的。我们广大工农兵群众一定能掌握它,应用它,为发展工农业生产,实现生产过程的自动化和半自动化,为赶超世界先进水平作出贡献。

第一节 晶体三极管基本结构

晶体三极管比晶体二极管多一个极,从外形来看,三极管一般都是三个极(大功率管外壳是一个极)如图 1-1 所示。

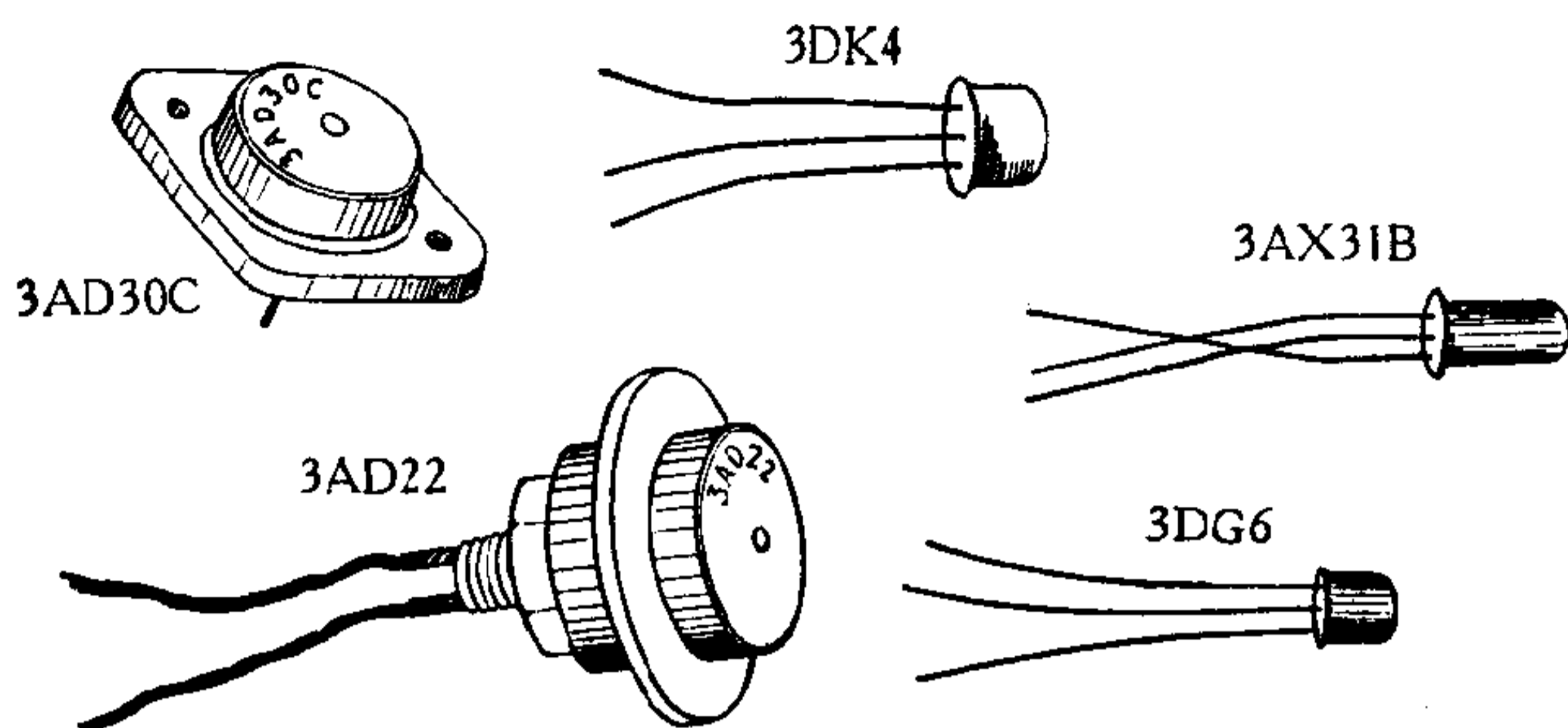


图 1-1

二极管有一个 p-n 结，用图 1-2(1) 符号表示，如果我们在一块半导体上制造二个 p-n 结，就形成晶体三极管了。根据组合方式的不同，晶体三极管有 p-n-p 型和 n-p-n 型两种 [见图 1-2 (2) 及 1-2 (3)]，但他们的工作原理是相同的。晶体三极管共有三个不同的导电区域：p-n-p 型晶体管中间是 n 区，二边是 p 区，n-p-n 型晶体管中间是 p 区，二边是 n 区。中间区域的电极称为基极，用 B 表示，其它两边一端是发射极，用 E 表示，一端是集电极，用 C 表示。其中发射极和基极形成一个 p-n 结，叫发射结，集电极和基极形成的那个 p-n 结，叫集电结。

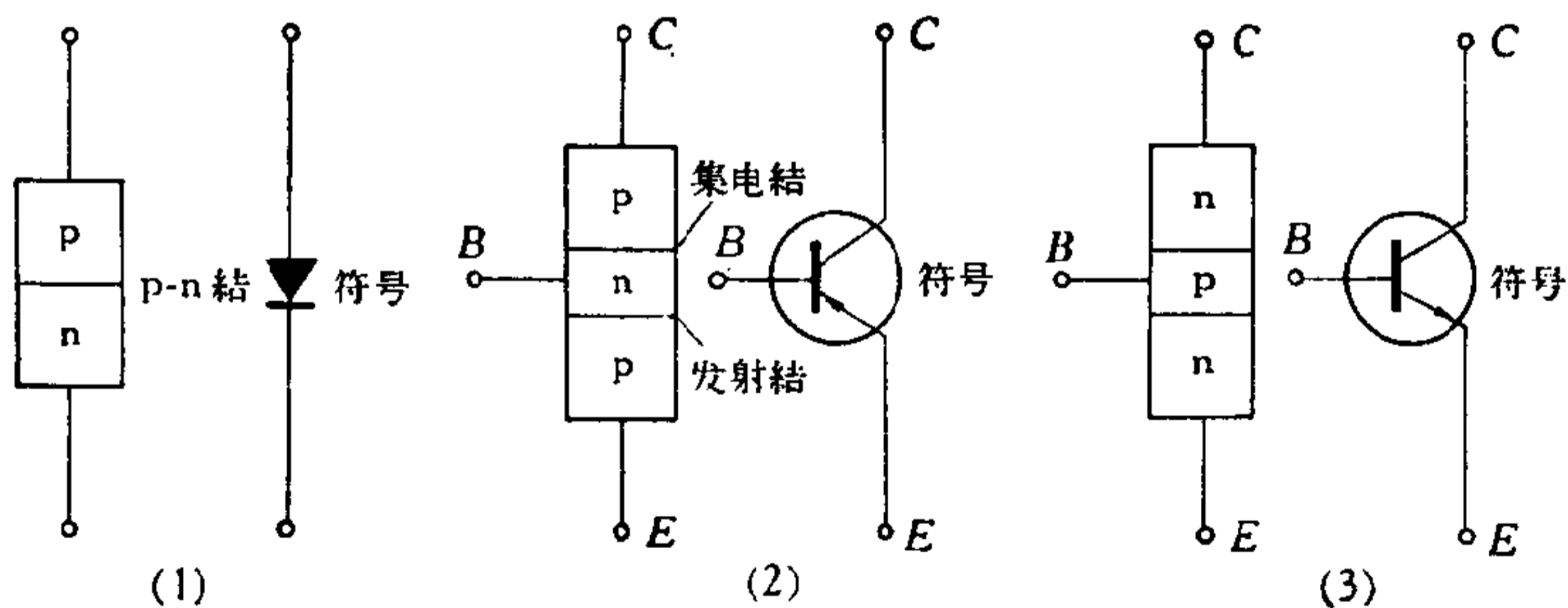


图 1-2

晶体三极管最主要的作用是放大作用,下面我们以 p-n-p 型晶体管为例来说明它的工作原理。

第二节 晶体三极管的电流分配和放大作用

毛主席教导我们：“一切真知都是从直接经验发源的。”把晶体三极管接成如图 1-3 所示，在线路中有三个电流：发射极电流用 I_E 表示，基极电流用 I_B 表示，集电极电流用 I_C 表示。

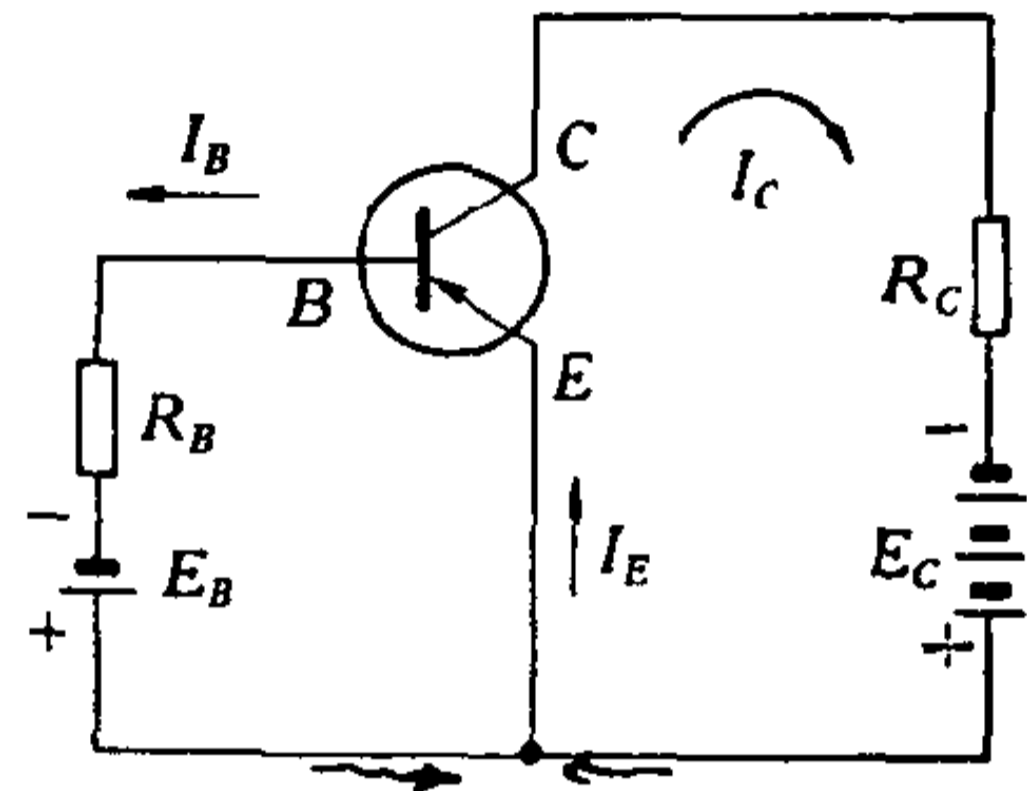


图 1-3

为了了解晶体三极管电流分配的规律，在图 1-3 电路中串接入三个电流表如图 1-4 所示，用来测量晶体管三个电流。在这里，我们将串接在集电极回路中的毫安表的内阻，作为图 1-3 中负载电阻 R_C ，由于毫安表内阻很小，如果测量时把基极电阻 R_B 调得过小，可能将管子烧毁，因此在基极回路中，用 5 千欧电阻来限制基极电流，起保护管子的作用，用 2 兆欧电位器作粗调，50 千欧电位器作微调。

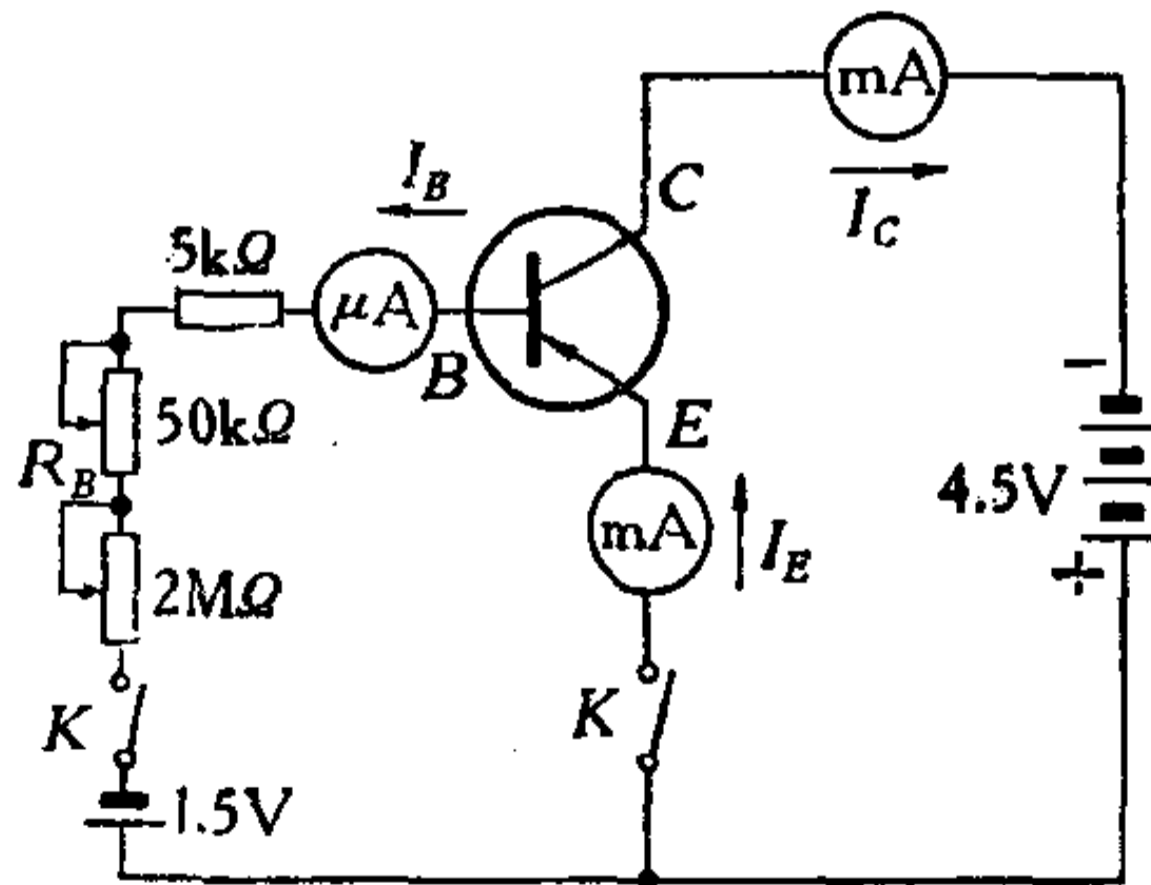


图 1-4

我们通过调节电位器改变基极电流 I_B 的大小，便可相应地得到集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 的数值，现将测得的数据列在表 1 中，通过这样的测量，我们从表中找出如下规律：

表 1

I_E 毫安 (mA)	0	0.300	1	2	3	5	10	20
I_C 毫安 (mA)	0.006	0.300	0.990	1.972	2.960	4.935	9.890	19.800
I_B 毫安 (mA)	-0.006	0	0.010	0.028	0.040	0.065	0.110	0.200

1. 表中纵向数据都是满足 $I_E = I_B + I_C$

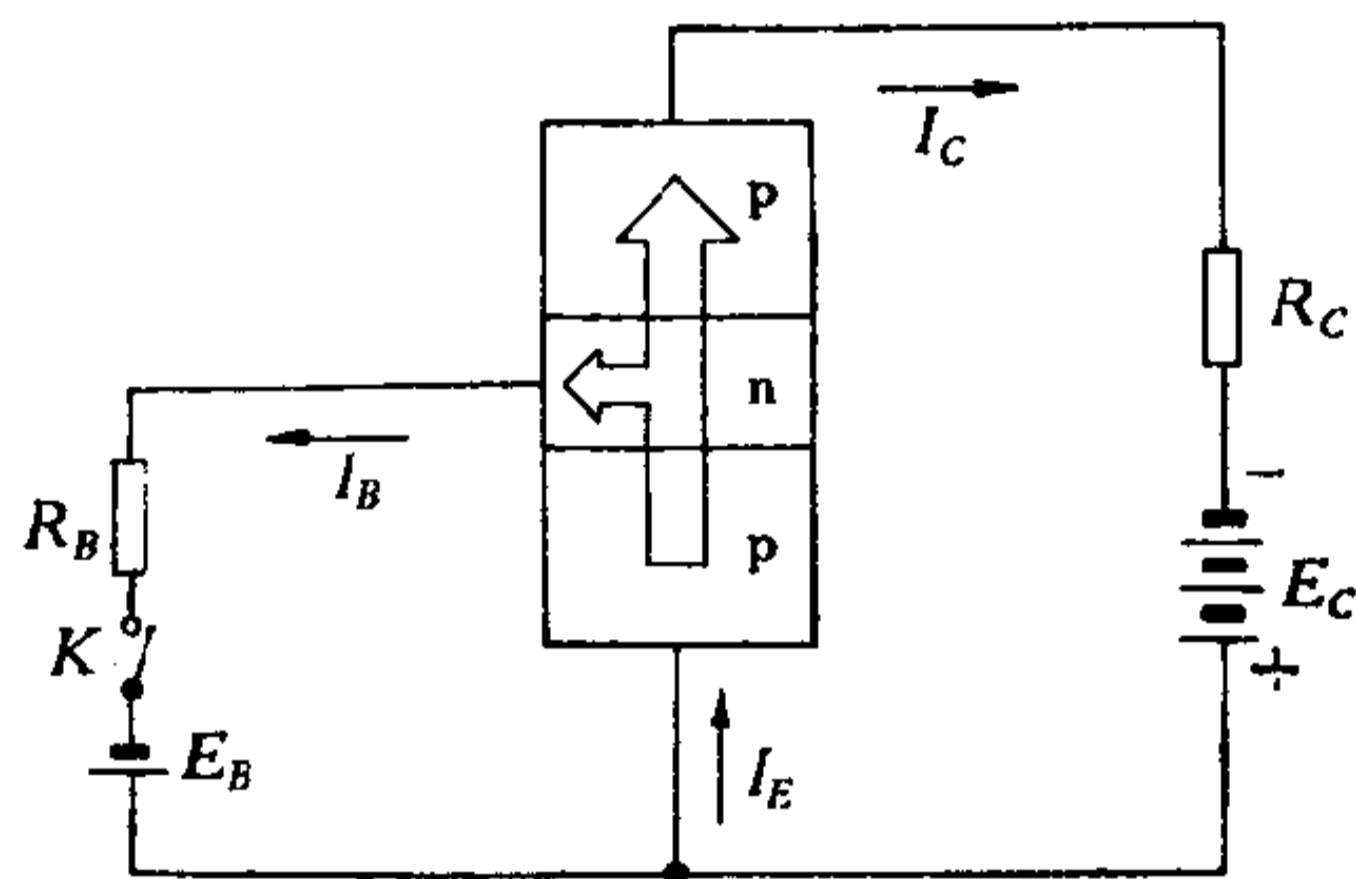


图 1-5

上式说明了发射极电流等于基极电流与集电极电流之和。其中基极电流很小，发射极电流绝大部分流向集电极。可以形象地用图 1-5 来描述。

2. 从表中我们

看到，当基极电流 I_B 从 0.010 毫安变化到 0.028 毫安时，集电极电流 I_C 却从 0.990 毫安变化到 1.972 毫安，这两个变化量相比 $\frac{1.972 - 0.990}{0.028 - 0.010} = \frac{0.982}{0.018} \approx 54$ ，也就是说集电极电流 I_C 的变化比基极电流 I_B 的变化大 54 倍，这就是共发射极电路的电流放大系数，通常用 β 来表示(或用 h_{fe} 表示)

即

$$\beta \approx \frac{\text{集电极电流 } I_C \text{ 变化量}}{\text{基极电流 } I_B \text{ 变化量}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

(Δ 表示微小变化量)

β 是晶体三极管主要参数之一， β 值的大小，除了由半导体材料的性质，管子的结构和工艺决定外，还与管子工作电流大小有关，也就是说这只管子在不同的工作电流下 β 是不一样的。

从表 1 中也可看出,不同的 I_C , β 也不同。

3. 在表中, $I_E = 0$ 时, I_C 不等于零,这个电流我们称它为集电极-基极的反向截止电流,用 I_{CBO} 来表示。 $I_E = 0$, 就是发射极断开,集电结加上反向电压,因此 I_{CBO} 相当于集电结二极管反向漏电流。如图 1-6(1) 所示。

还有表中当 $I_B = 0$ 时, I_C 不是零。这个电流我们称它为集电极-发射极的反向截止电流,又称穿透电流,用 I_{CEO} 表示,也就是 CE 两极接通电源, B 极断开,图 1-6(2) 所示。

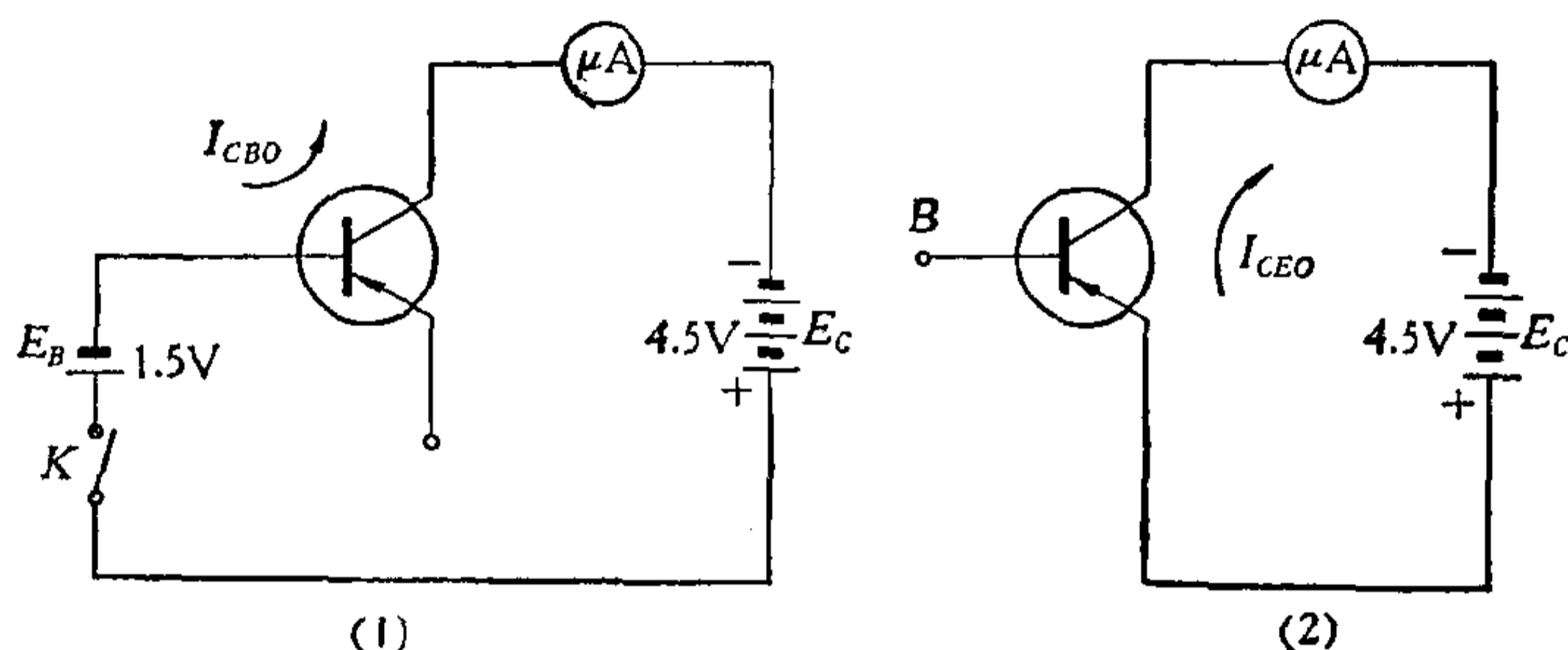


图 1-6

I_{CEO} 与 I_{CBO} 是晶体三极管质量指标的重要参数,它们之间关系从理论推导和实践证明是 $I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO}$,外界温度对它们有很显著的影响,当温度升高时, I_{CBO} 会很快增高,因为 I_{CEO} 比 I_{CBO} 大 $(1 + \beta)$ 倍,所以 I_{CEO} 增加得更为显著,会影响晶体管正常工作。 I_{CBO} 愈大, β 值愈高的晶体管,稳定性愈差。由上面所述,集电极电流 I_C ,不但是 $\beta \times I_B$,同时也还有 I_{CEO} ,所以电流相互关系应该是:

$$I_C = I_B \beta + I_{CEO}$$

上面讲到共发射极电路得到电流放大系数 β 。这里再介绍一种叫共基极电路,见图 1-7,一个晶体管用共基极接法后,它的输入电流为 I_E ,输出电流为 I_C 。电流放大系数,用

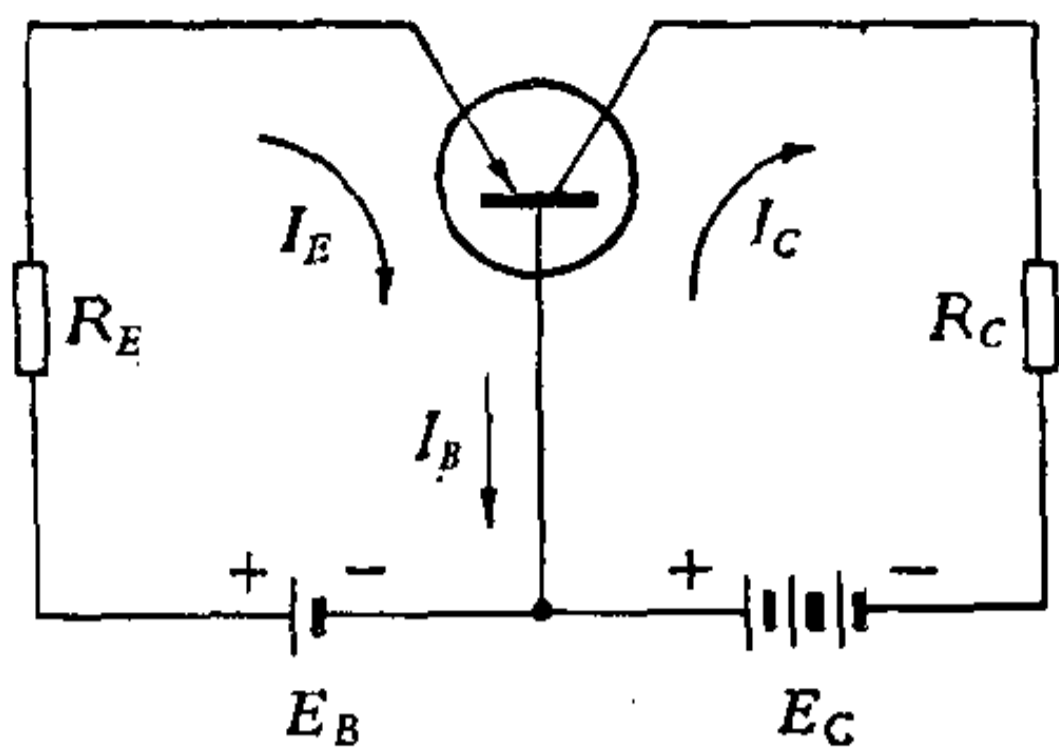


图 1-7 共基极电路

α 表示, 关系式: $\alpha \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$, 就是发射极发射到集电极电荷数的百分比, 例如发射极发射 100 个电荷, 集电极收到 98 个, 则 $\alpha = 0.98$ 。由此可知共基极电路没有电流放大作用, 常用于电压放大和

功率放大上。根据 $\beta \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 和 $\alpha \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$ 二个式子可找出 β 与

α 之间关系为:

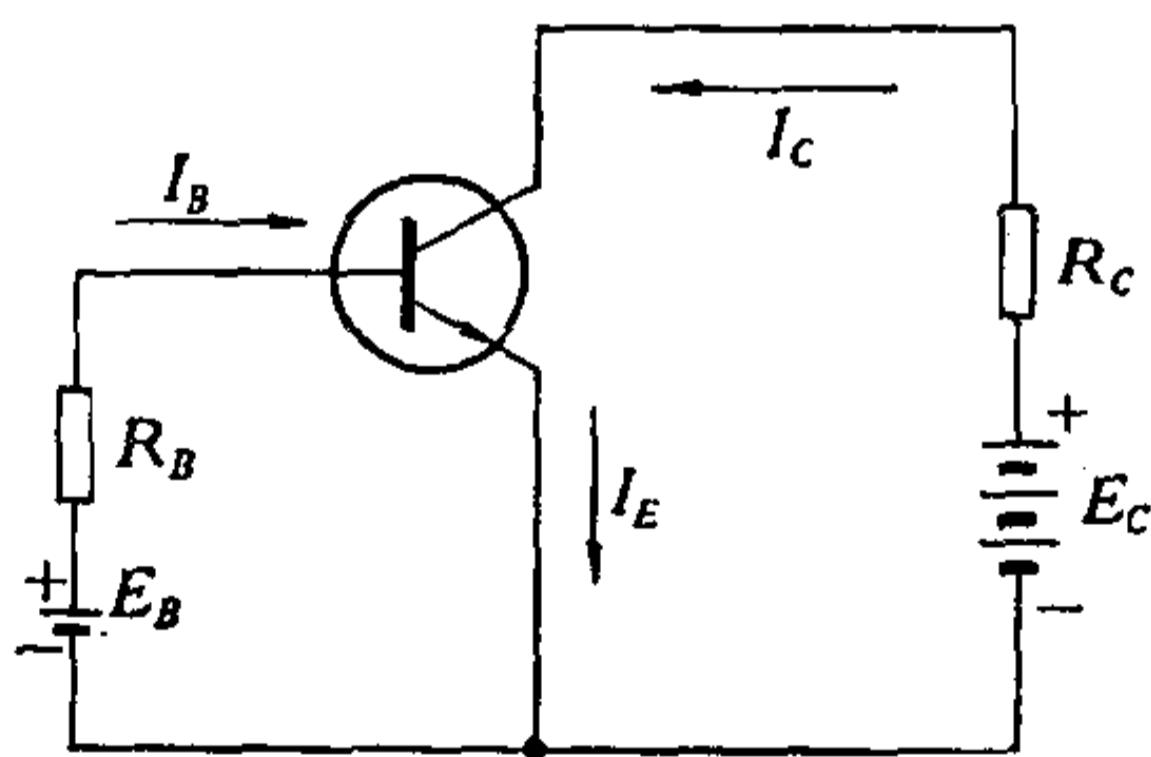
$$I_E = I_B + I_C$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \text{或} \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

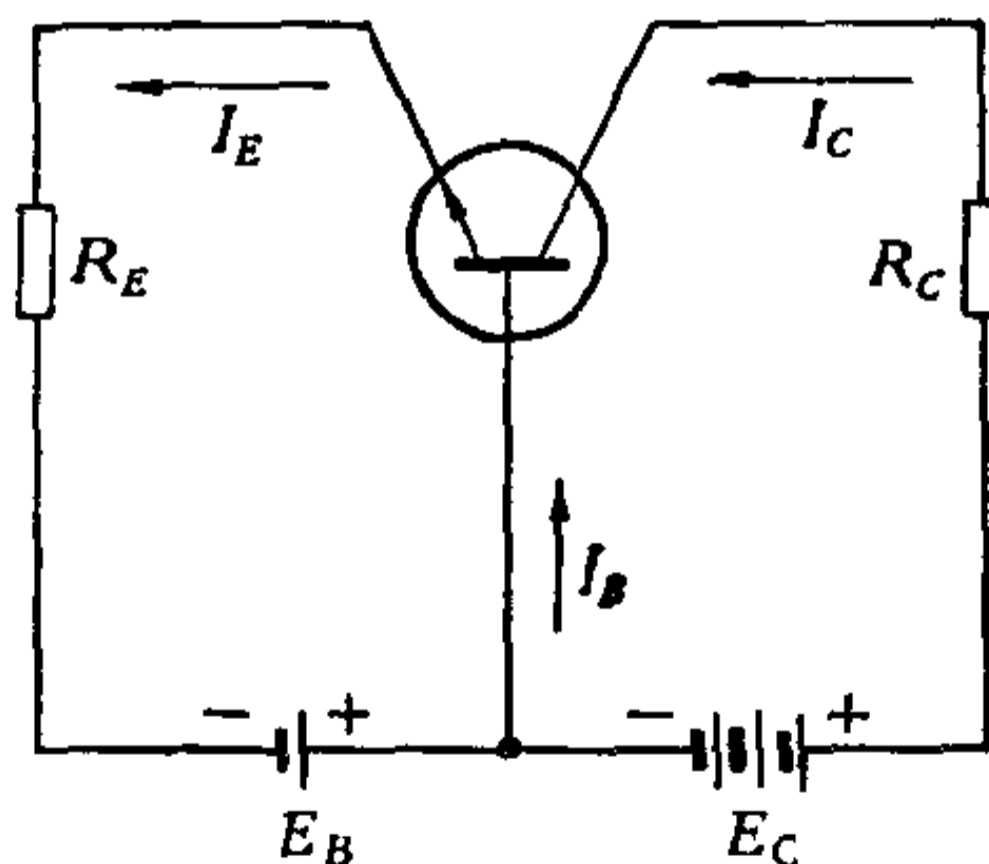
例如: $\alpha = 0.98$, 则 β 为

$$\beta = \frac{0.98}{1 - 0.98} = 49$$

上面讨论了 p-n-p 型晶体管的工作原理, n-p-n 型晶体管的工作原理与 p-n-p 型基本一样, 只要在电路中外接电源极性相反, 而电流方向也相反, 如图 1-8 所示。



(1) 共发射极电路



(2) 共集电极电路

图 1-8

第三节 用于生产中的晶体管简单电路举例

我们如何来应用晶体三极管的特性和原理呢？让我们先来分析一下图 1-9 所示电路，这三个电路中所用电源均为 20 伏， J 是高灵敏继电器，它的内阻是 3 千欧，吸动电流是 6 毫安，所不同的是图 (1) 电路中是串一只开关 K ，图 (2) 用一只 47 千欧的电位器，图 (3) 用一只晶体三极管 (3AX31B)。

图(1)当开关一合上，回路中有电流通过， $I_1 = \frac{E_c}{R} = \frac{20 \text{ 伏}}{3 \text{ 千欧}} \approx 6.7 \text{ 毫安}$ 。继电器吸动电流是 6 毫安，使继电器动作，从而去控制其它电器设备。

图(2)当电位器 R_1 调节到最大值时，电路中电流：

$$I_2 = \frac{E_c}{R_1 + R_2} = \frac{20 \text{ 伏}}{47 \text{ 千欧} + 3 \text{ 千欧}} = \frac{20 \text{ 伏}}{50 \text{ 千欧}} = 0.4 \text{ 毫安}$$

继电器不动作。若电位器 R_1 调节到零值时，电流：

$I_2 = \frac{E_c}{R} = \frac{20 \text{ 伏}}{3 \text{ 千欧}} \approx 6.7 \text{ 毫安}$ ，情况就同图(1)一样， J 就动作。

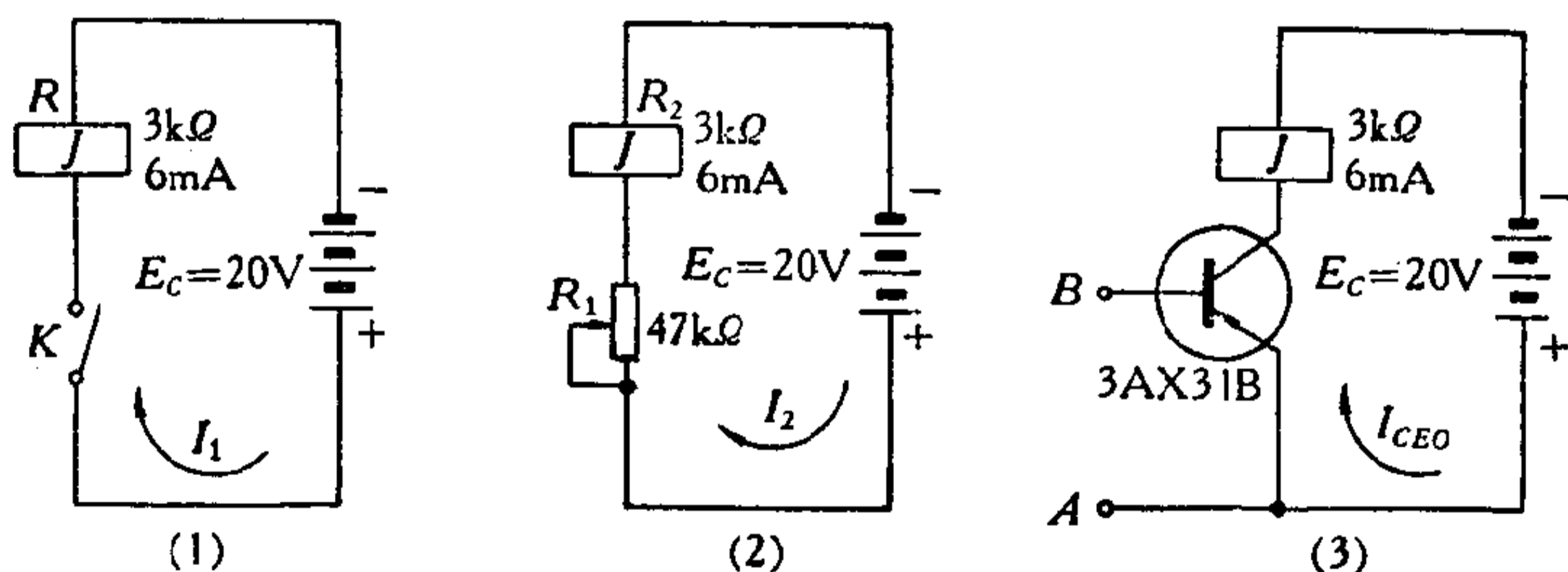


图 1-9

图(3)电路中换上一只晶体三极管 (3AX31B)，并多出 A B 两个接头来，前面讲过，晶体三极管基极没有电流，这只管子

就没有工作电流,只有穿透电流 I_{CEO} (从附录表查得 3AX31B

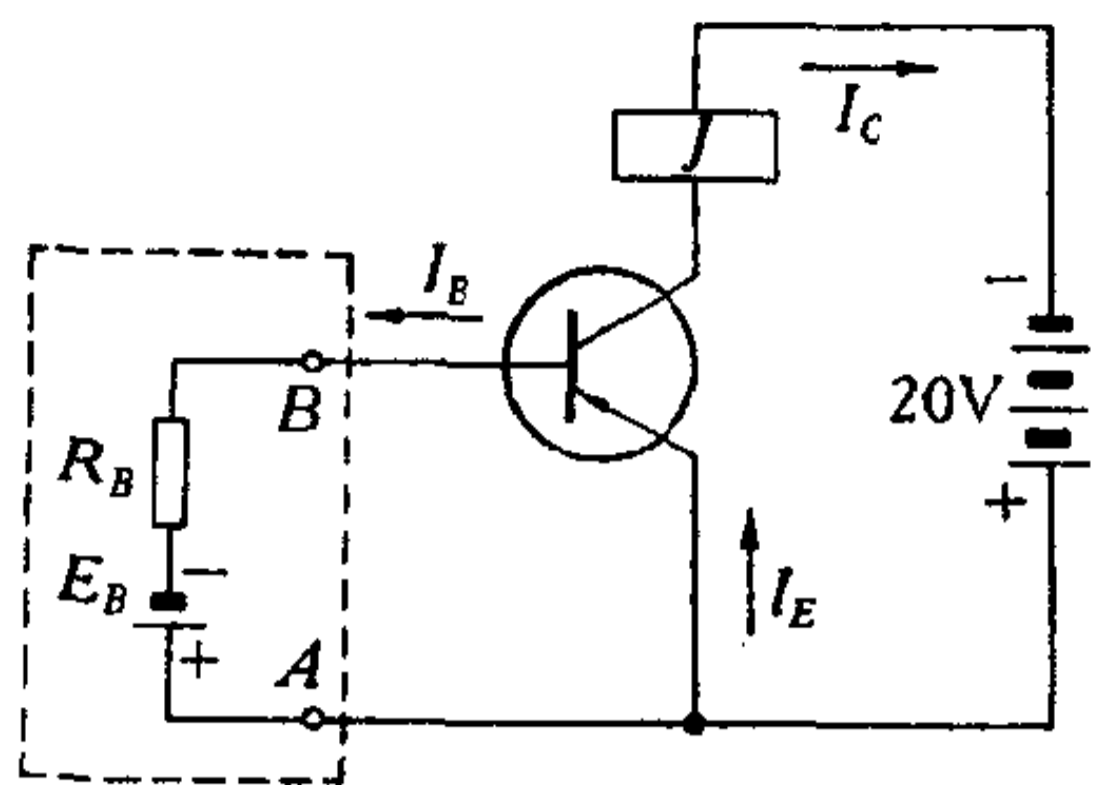


图 1-10

的 $I_{CEO} \leq 0.75$ 毫安),推不动继电器,但若在基极给它一个电流,如图 1-10 所示,管子马上有工作电流 I_C ,其大小等于 $\beta \times I_B$,所以我们只要在基极控制一定的电流,就能控制继电器动作。我们

把三种线路比较一下,它们都是用来控制继电器 J ,所不同的是:开关和电位器要用人去控制,而晶体三极管只要在 AB 两端给它一个微小电流,就能灵敏地自动控制继电器吸动,所以晶体三极管并不神秘,在有些场合中往往当作开关或电位器用罢了。

“理论的基础是实践,又转过来为实践服务。”人们了解了晶体三极管的特性,就能用来为生产服务,某厂是生产塑料丝的,过去拉丝机一断头就得人去关车接头,一个人只看一台机,工人老师傅在**“抓革命,促生产,促工作,促战备”**的号召鼓舞下,急生产所急,利用三极管的特性,简单地在 AB 两端串一只 2CR11 光电池,如图 1-11 所示。当拉丝断头时,挡板下落,光源照在光电池上,光电池受光时内阻很小,能为晶体管提供一定的基极电流 I_B ,经晶体管放大,则 $I_C = \beta I_B$,就可使

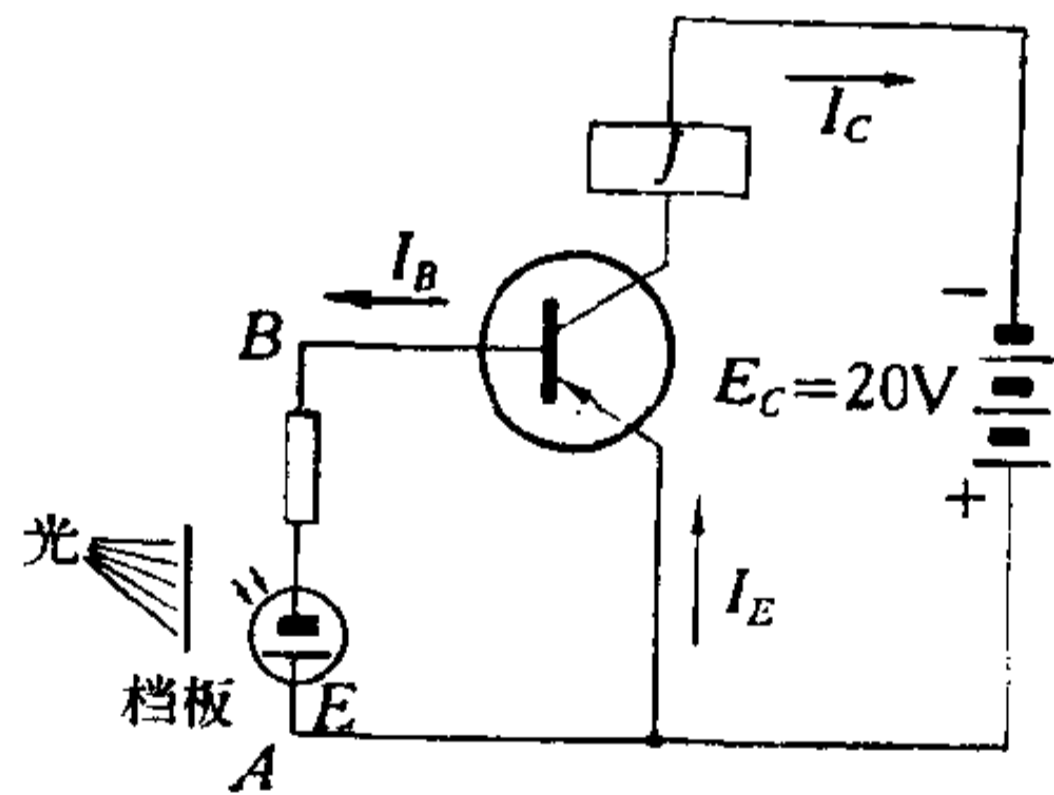


图 1-11

继电器 J 动作,再由 J 带动开关使机器停车,这样不但使停车自动,扩大看台数,同时也降低了劳动强度,提高了产品质量。

在上例的启发下,同样可以利用另一种光电器件,图 1-12

$R_{光}$ 是一只 625—A 型光敏电阻，它的性能光照时电阻小，光暗时电阻很大， $R_{亮} \leq 50$ 千欧， $R_{暗} \geq 50$ 兆欧，这两个阻值相差 1000 倍，我们简单估计一下基极电流和集电极电流(若 $\beta = 50$)。

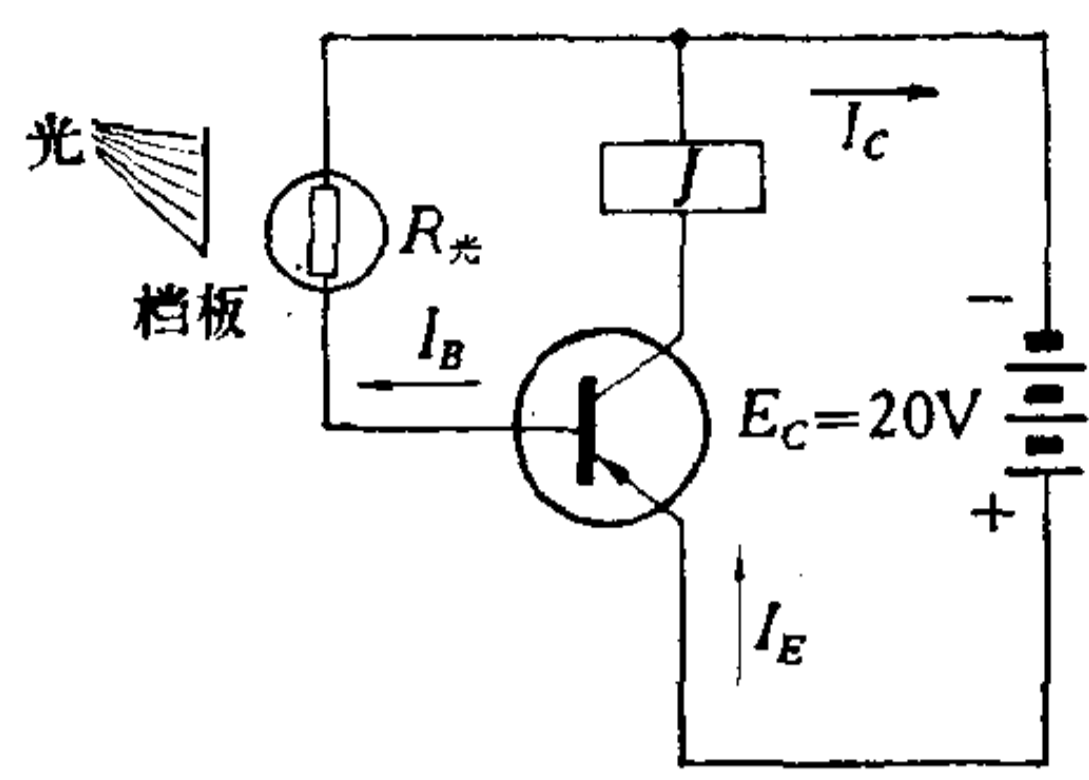


图 1-12

当光照时： $I_{B亮} = \frac{20 \text{ 伏}}{50 \text{ 千欧}} = 0.4 \text{ 毫安}$
 则： $I_{C亮} = 0.4 \times 50 = 20 \text{ 毫安}$ ，所以足够使 J 动作。

当光暗时： $I_{B暗} = \frac{20 \text{ 伏}}{50 \text{ 兆欧}} = 0.4 \text{ 微安}$
 则： $I_{C暗} = 0.4 \times 50 = 20 \text{ 微安}$ ，所以继电器不动作。

我们用这种原理同样也可以自动控制拉丝机，以上两个例子，都是利用光电变换，使光电池产生电流或光敏电阻改变阻值，从而达到自动控制的目的，这种元件我们称它光电转换元件，这种线路我们称它为光电继电器。

由此可见，晶体三极管不但起到开关和电位器的作用，更重要的是它有放大作用，能把微弱变化的电流讯号放大后推动控制机构。

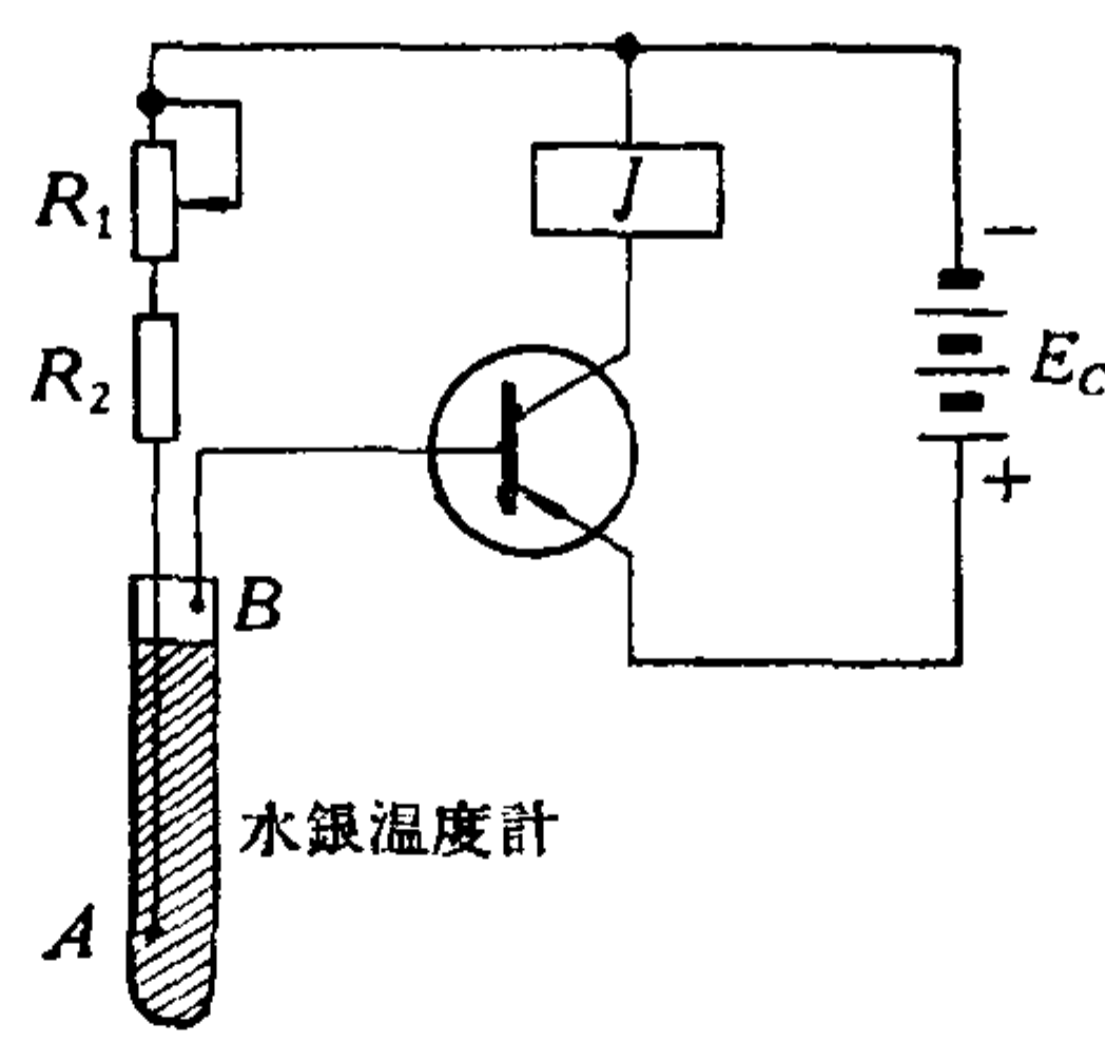


图 1-13 温度控制计

重要的是它有放大作用，能把微弱变化的电流讯号放大后推动控制机构。如果在晶体管的输入端接上不同的转换元件，我们还可以做出各种简单的控制电路，如温度控制计和液面控制器等。如图 1-13 是串一只水银温度计，当温度升高，水银上升到

B 点时, A 点 B 点接通产生基极电流, 从而继电器动作, 实现温度控制。图中 R_1, R_2 是限制基极电流的, R_1 可以调节基极电流的大小, R_2 起保护作用, 若万一 R_1 调到零时, 不使大电流通过基极而烧坏管子。

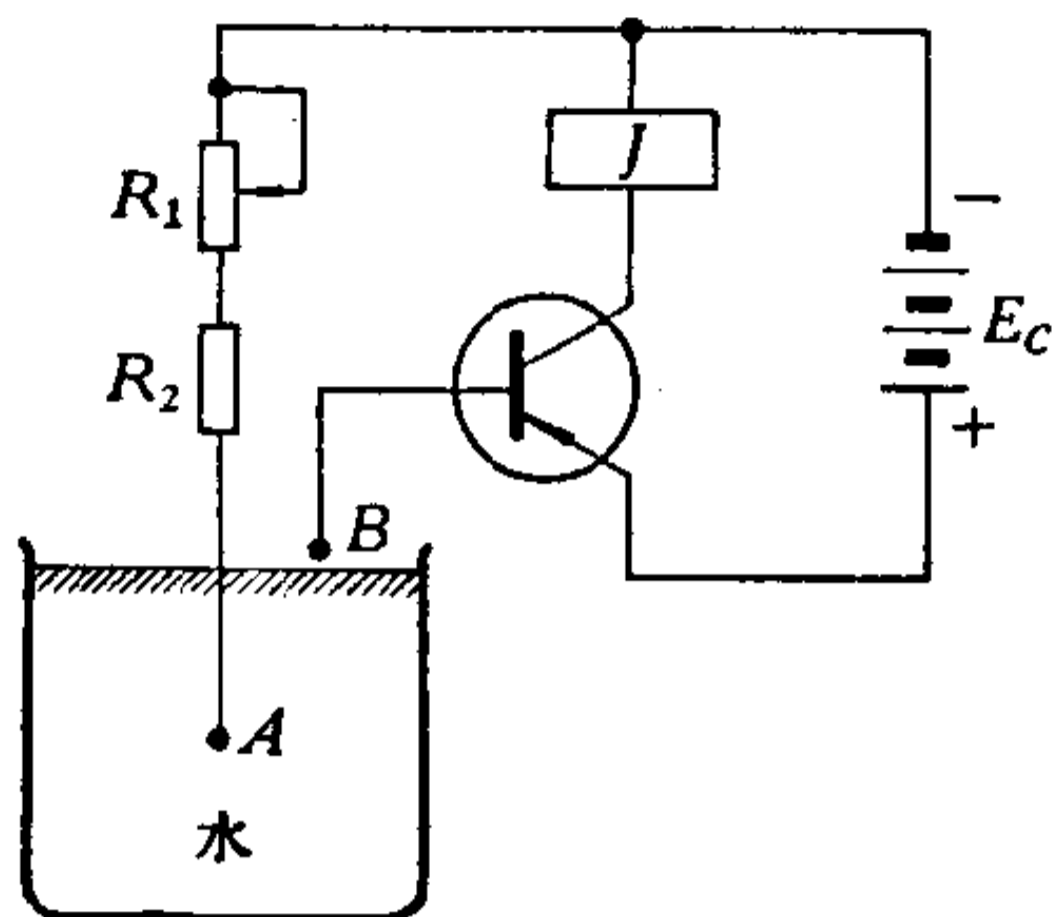


图 1-14 水位控制继电器

假如我们把线路中 $A、B$ 两个头插进水池中, 如图 1-14 所示, 就可以用来控制水位或作防汛警报, 道理与图 1-13 一样, 当水位上升把 AB 二点接通, 就有基极电流, 使晶体管导通去推动继电器 J 发出警报或切断水源, 达到自动控制水位和防汛警报。

图 1-15 中的基极电流, 是通过 $R_1 R_2$ 组成的分压器得到的, 由于 $R_1 R_2$ 能把 E_c 分成一个适合于基极要求的电压, 同时也能限制基极偏流的大小, R_E 是发射极电阻。用同样的方法, 把 AB 两个头插到水池中(图 1-16), 其工作原理就同前面

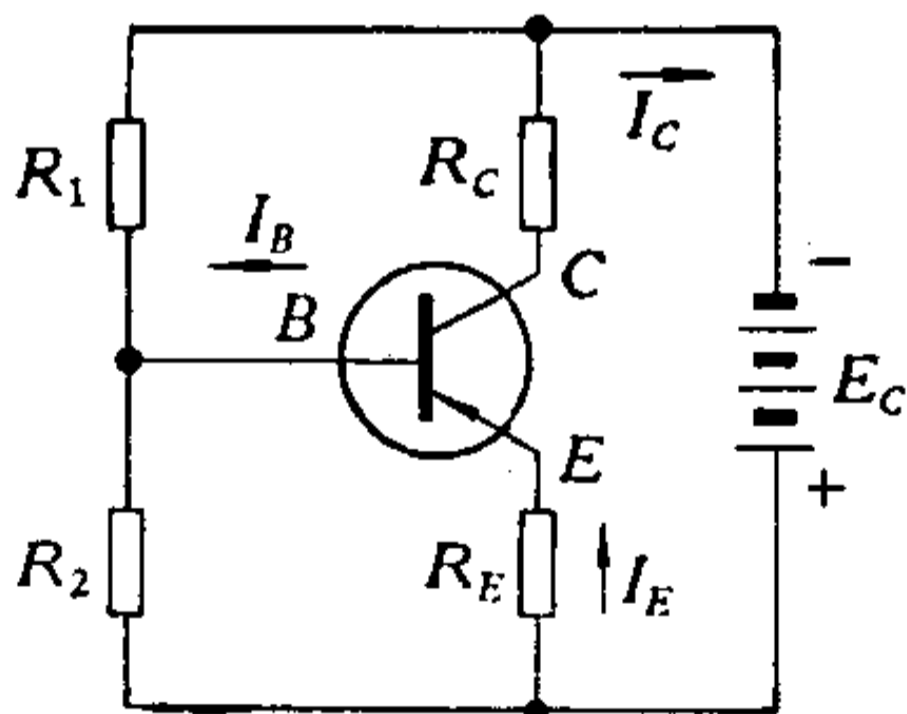


图 1-15

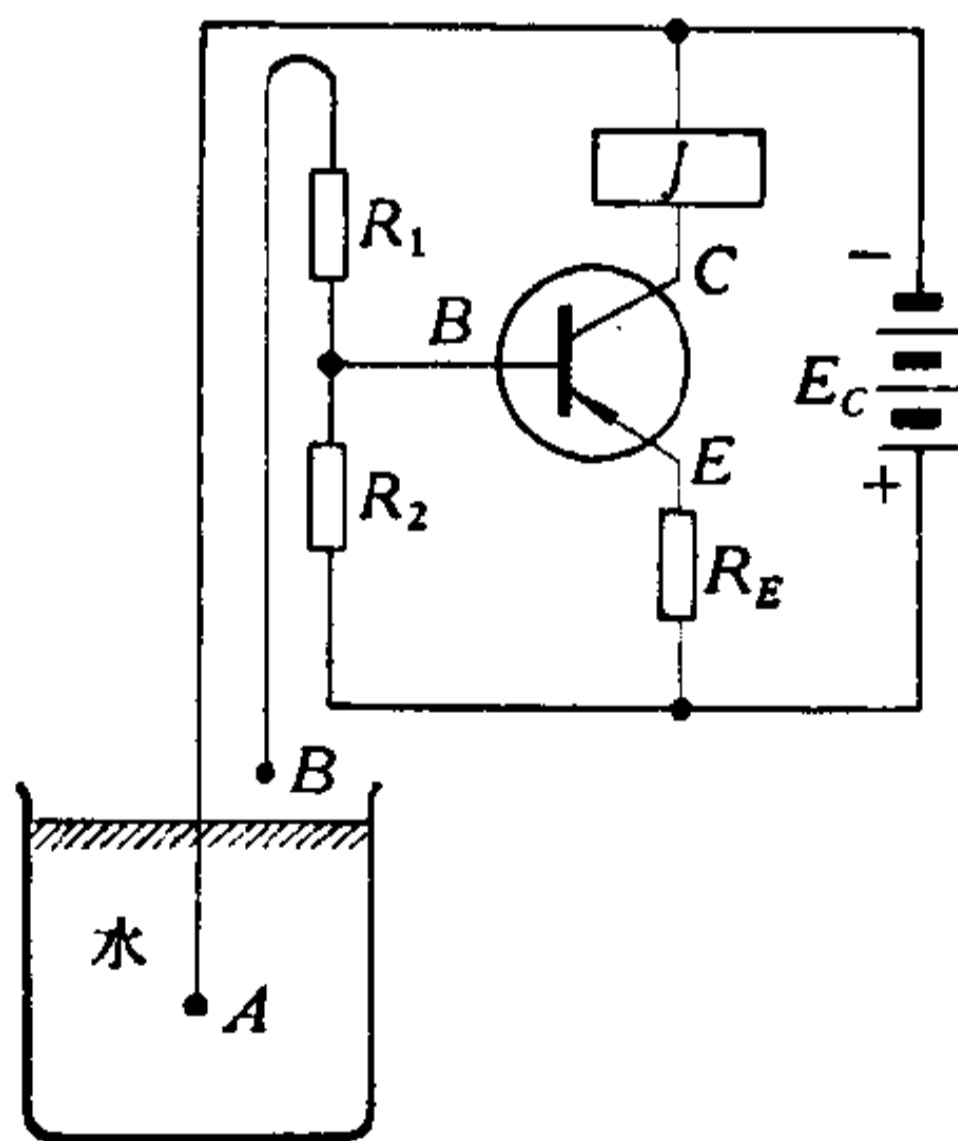


图 1-16 水位控制继电器原理图

的例子完全一样了。当水位低于 B 点时, AB 间断开, 晶体管得不到基极电流(无偏流), 管子不导通, 继电器 J 释放; 当水位上升到 B 点时, 由于水的导电性能比较好, 接通 AB , 晶体管就能通过 R_1 R_2 分压获得基极电流, 产生较大的集电极电流, 促使继电器 J 吸动, 如果我们用继电器来控制电动机的开关, 就能控制水位。图 1-16 是工作原理图, 实际水位控制电路如图 1-17 所示。

下面我们分析图1-17水位控制继电器的工作原理: 在水塔中竖一根木棒, 用绝缘体建立 a 、 b 、 c 三个水位, 用导线引出, c 点接地, 继电器 J 控制电动机的接触器 CJO 。线路能使水位自动保持在 a 、 b 之间, 即当水位升到最高点 a 时, 水泵自动停止送水, 当水位低到 b 时, 水泵又自动送水(b 点能任意调节)。

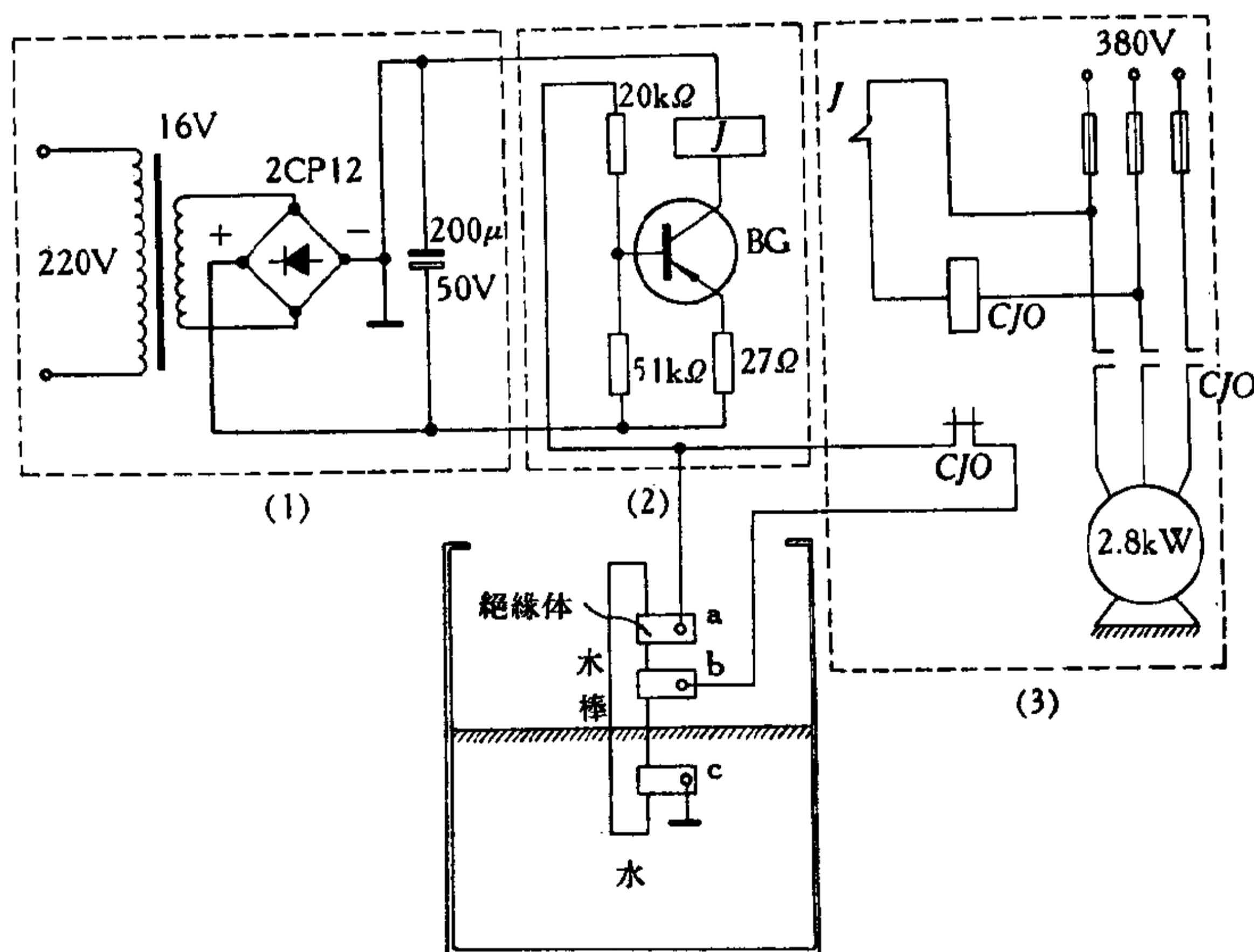


图 1-17 水位控制继电器

当水位在 b 点以下时, 晶体管无偏流, BG 不通, J 不吸动, CJO 接有电源, 电动机启动, 带动水泵往水箱里送水, 同时把 CJO 的常闭触点打开, 当水上升到 b 点时, 因为 CJO 常闭触点已断开, BG 仍不通, 水泵继续打水, 但当水位上升到 a 点时, 偏流从 BG 发射极经 20 千欧电阻经 a 点到 c 点成一回路, BG 导通, 继电器 J 吸动, 其常闭触头 J 打开, CJO 切断电源使水泵电机停下来, 同时 CJO 常闭触点闭合, 当水位下降离开 a 点时, 偏流还可从 BG 发射极经 20 千欧电阻, 再经 CJO 常闭触点和 bc 间水柱成一回路, J 仍能吸住, 水泵电机仍停着, 一定要等水位下降到 b 点以下时, 偏流切断, J 释放, 水泵又往水箱打水, 这样反复就能使水位自动保持在 ab 之间, 达到自动控制水位。

水位控制继电器由三部分组成。大家知道工厂里一般使用交流电源, 那就得先装一套整流电路, 如图 1-17(1) (虚线打框的线路), 电网电压经变压器降压, 再经二极管整流, 电容滤波, 就可得到合适的直流电源了。还有水塔水源要用水泵电动机打水, 电动机的电气线路见图 1-17(3), 晶体管控制线路见图 1-17(2), 若把这三个图并起来, 就成了自动控制水位的线路图了。若用方块图来表示就更清楚, 如图 1-18 所示。由此可见, 晶体三极管在实际应用中并不神秘, 我们完全可以掌握它, 为我国社会主义建设服务。

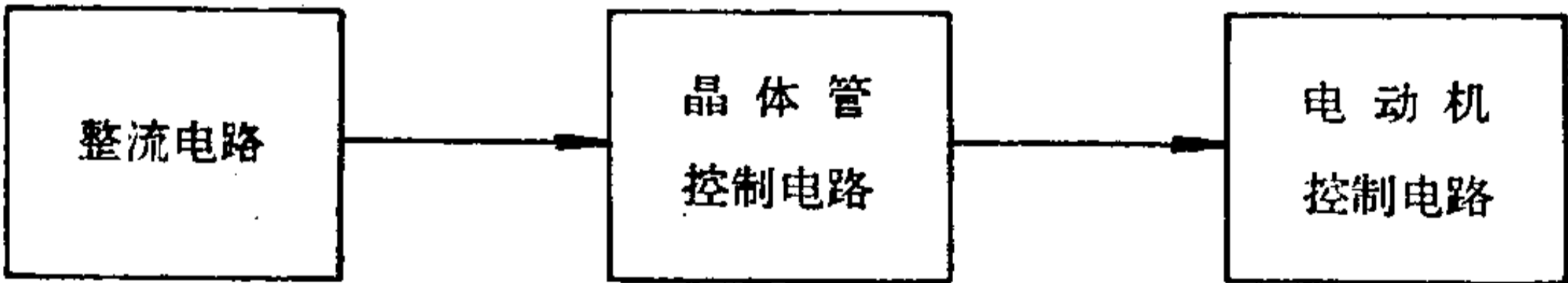


图 1-18

上面讲的例子都是用的 $p-n-p$ 型晶体管, 倘若碰到 $n-p-n$ 型晶体管时怎么办? 前面讲过, $n-p-n$ 的工作原理与 $p-n-p$

型晶体管基本相同，只是电源正负极要反接和电流方向相反而已。

第四节 晶体三极管的特性曲线

晶体三极管的特性曲线是表明管子“性格”的一种方法。用它就能确切地了解晶体三极管的工作性能。

什么是晶体三极管的特性曲线呢？把晶体三极管各极上的电压及电流之间的相互变化的对应点画成连续曲线。就象二极管中我们把二极管上加的电压及流过二极管的电流画成伏安曲线一样。由于晶体三极管有二个 p-n 结，因此它的电压电流特性曲线不象二极管那样简单，它有输入特性和输出特性。

1. 输入特性曲线

从图 1-19 中我们可以看出在晶体三极管基极输入回路中有一个输入电压在晶体管发射极至基极产生的电压为 U_{BE} 和一个对应的输入电流 I_B^* ，通过实验我们可以把两者之间与晶体管集电极和发射极间的压降 U_{CE} 相互关系画成曲线如图 1-20 所示，这就是输入特性曲线，从图中看到当 U_{CE} 从 0 变到 1 伏时，基极电流变化较明显，但当集电极电压从 1 伏增加到 10 伏时，曲线下移不多，同时象挤在一起，因此通常把 $U_{CE} = 1$ 伏以后的曲线只给出典型的一条，如图 1-21 所示。

从输入特性曲线中我们可以看出 U_{BE} 和基极电流 I_B 的关系是非线性的，这同二极管正向伏安特性相似。从图中可以看出晶体三极管在正常工作时基极电压 U_{BE} 很小，仅零点几

* 在晶体管手册中，p-n-p 型晶体管输入特性和输出特性曲线中的 U_{CE} 、 U_{BE} 、 I_C 、 I_B 都带有负号，请参阅附录一。本书中为初学者方便起见，一律不加负号，请读者注意。

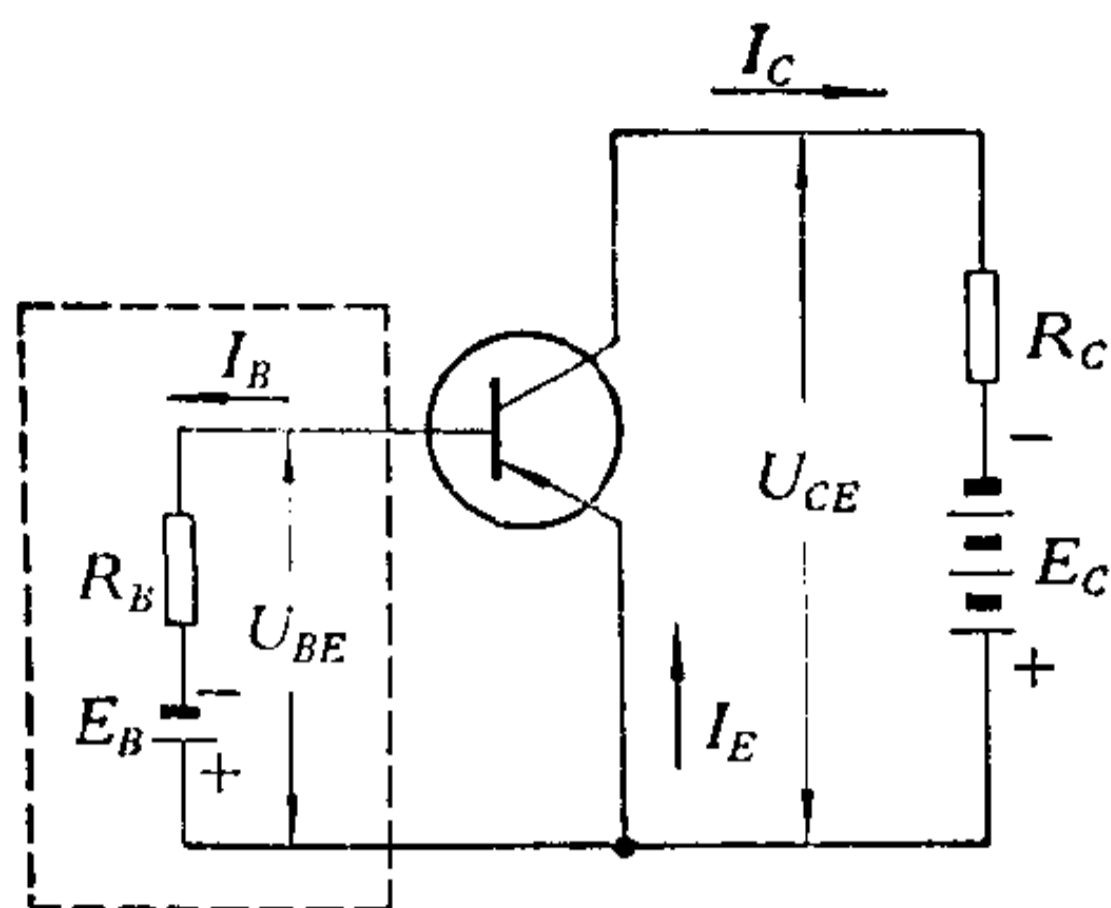


图 1-19

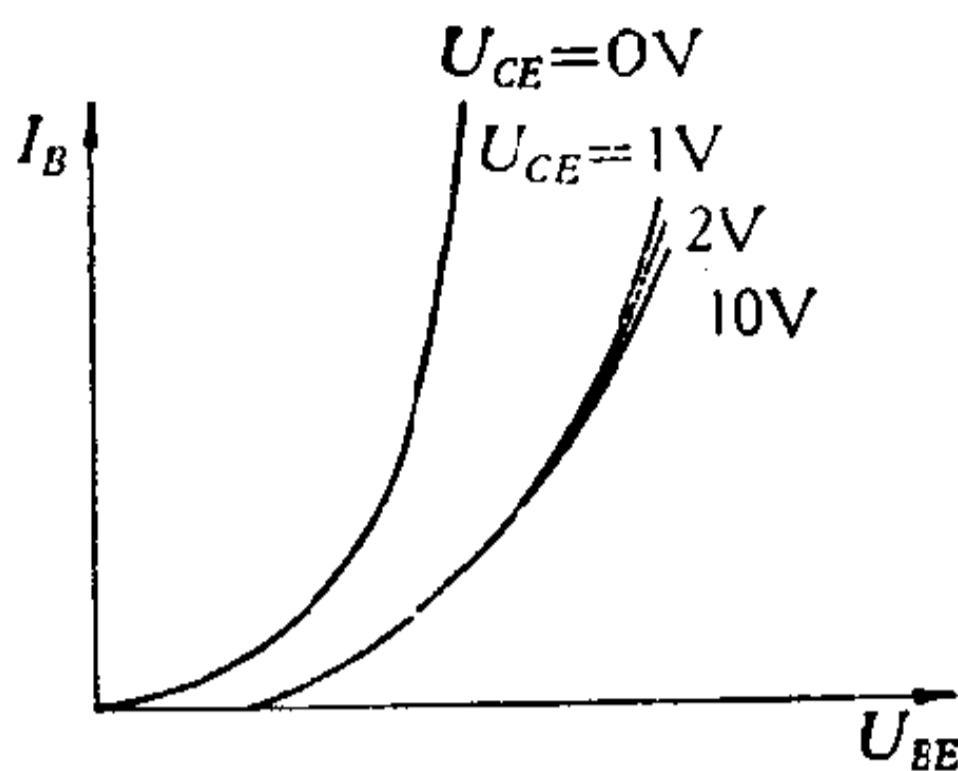


图 1-20

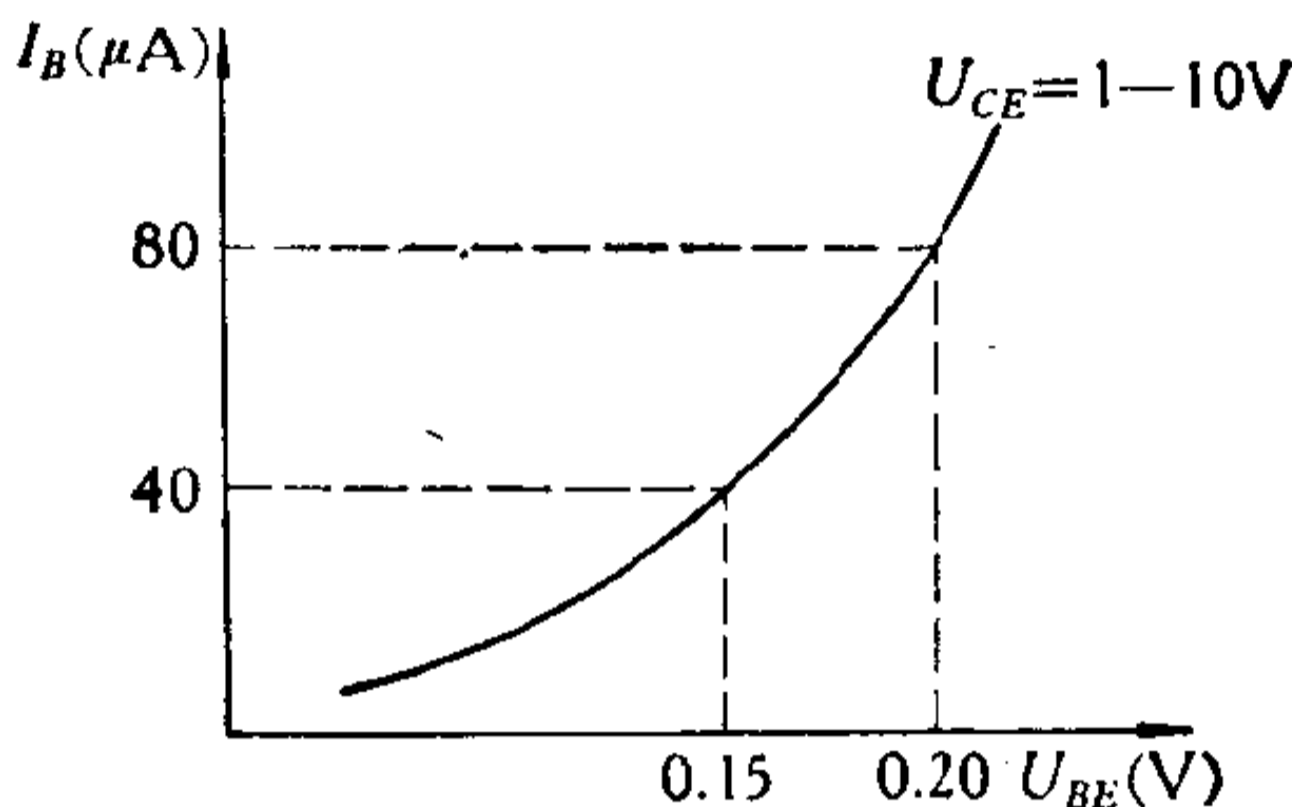


图 1-21

伏, 如果太大了会导致基极电流 I_B 剧烈增加而损坏晶体管。

2. 输出特性曲线

从图 1-19 中, 我们还可看出在晶体管集电极输出回路中

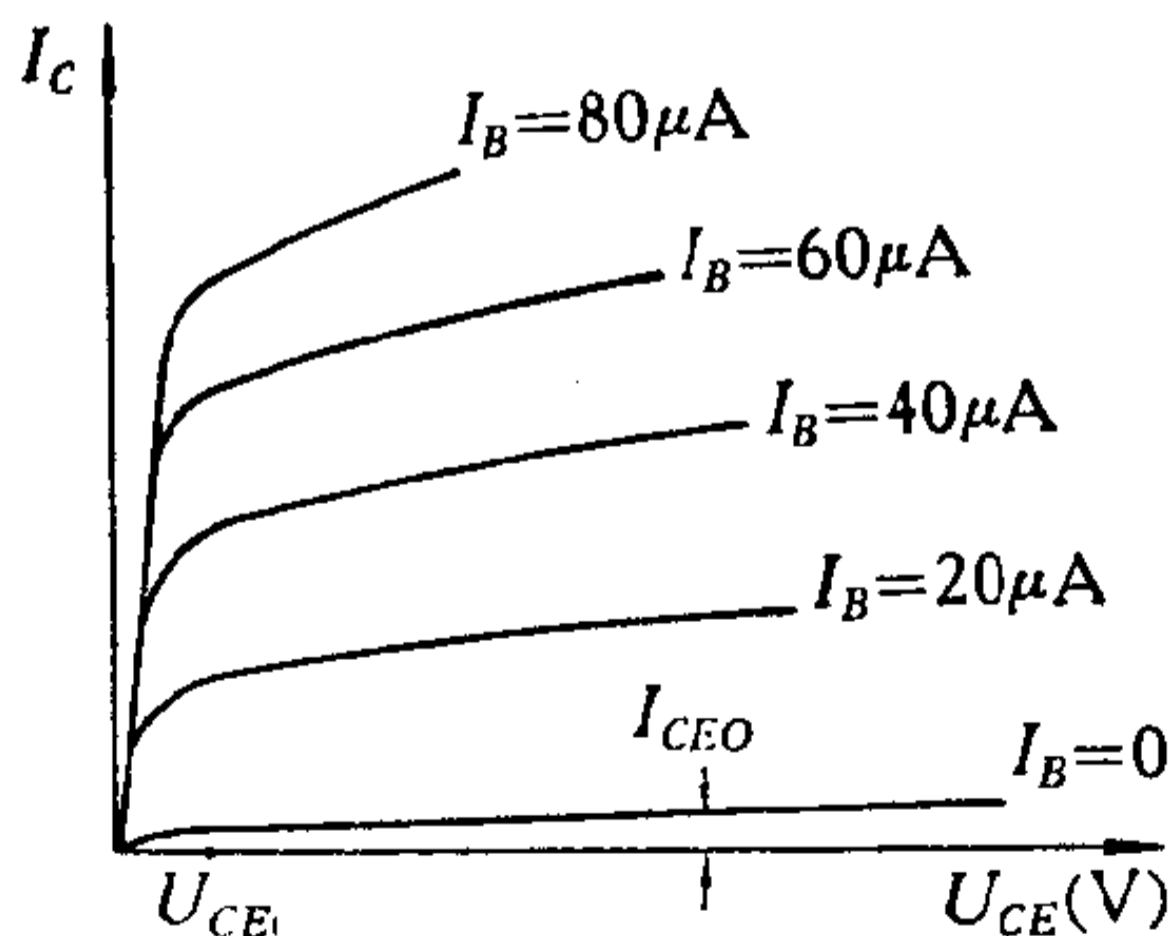


图 1-22

有一个输出电压 U_{CE} 和一个对应的输出电流 I_C , 我们也可以通过实验把输出电压和电流之间的相互关系画成曲线, 图 1-22 这就是输出特性曲线, 它反映了输入电流 I_B 在不同数值时(如图 1-23 中, $I_B = 0, 20, 40, 60 \dots$ 等)的输

出电流 I_C 与输出电压 U_{CE} 的对应关系。从输出特性曲线中我们可以看到：

(1) 在 U_{CE} 超过很小的电压 U_{CE1} 之后曲线很平坦，这是因为当集电极电压增大后，原来流向基极的电荷绝大部分被集电极拉过去了，所以集电极电压再增加，电流 I_C 变化很少。

(2) 在基极电流 I_B 不同时，曲线只是上下平行移动，这说明了当 I_B 有一个很小的变化，集电极电流 I_C 将产生很大的变化。大家知道 $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ ，所以讲曲线平行间隔的变化直接反映了电流放大系数 β 的大小。

(3) 在 $I_B = 0$ 时， I_C 并不等于零，这电流前面讲过称为穿透电流 I_{CEO} (或称漏电流)，我们将这条 $I_B = 0$ 的曲线以下的区域称为截止区。

当 U_{CE} 较小时，集电极电流 I_C 随 I_B 变化很小，我们称这个区域为饱和区。而间隔平坦的区域，我们称它为放大区，如图 1-23 所示，以后讲到放大器的工作范围就在放大区内建立工作点(第二章重点介绍)。

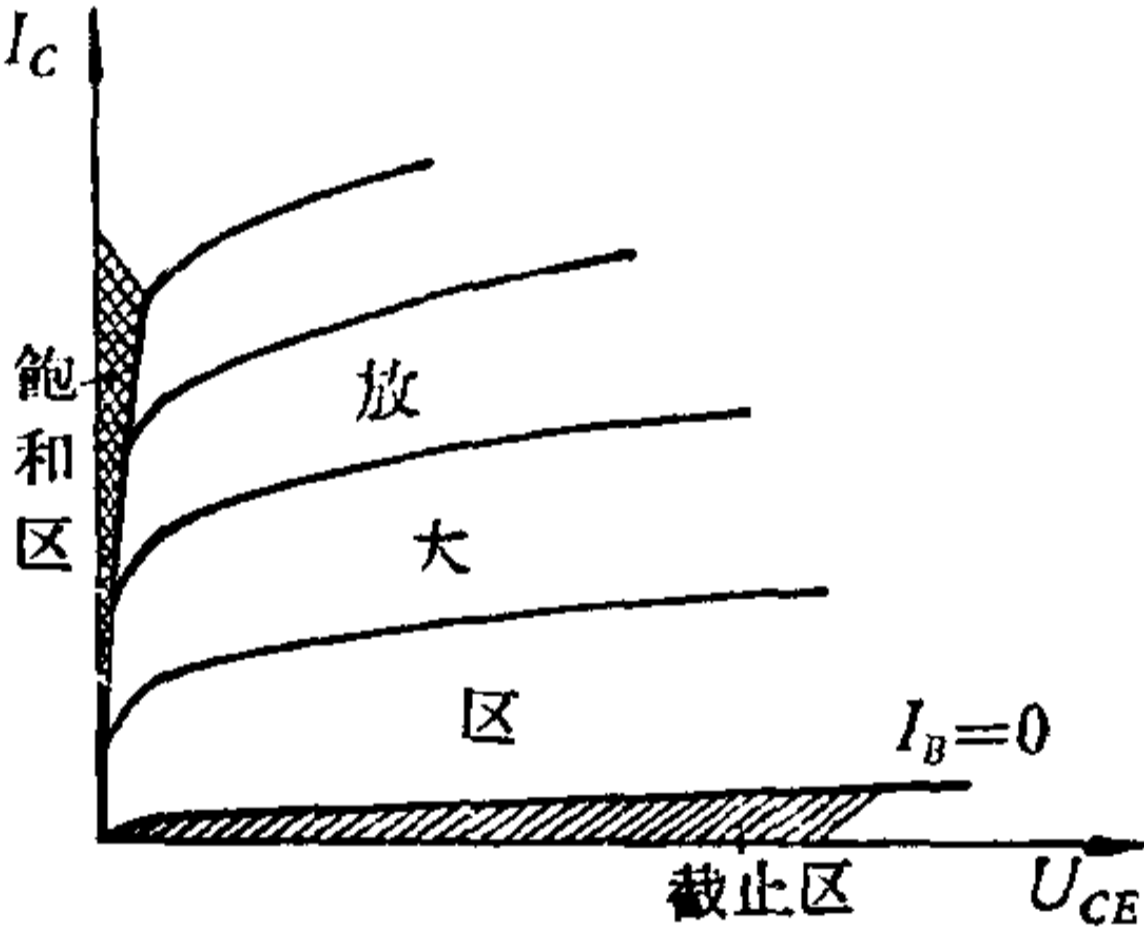


图 1-23

另外还要指出，前面讲到晶体管穿透电流 I_{CEO} 受温度影响很大，当温度上升时，特性曲线上的 I_{CEO} 也增大，而使整个特性曲线向上移动如图 1-24 所示，在不同温度下的输出特性曲线上升很大，这就是讲使用晶体管时，还得考虑环境温度情况，否则就不能正常工作，这也是晶体管的重大缺陷——对温度稳定性较差。

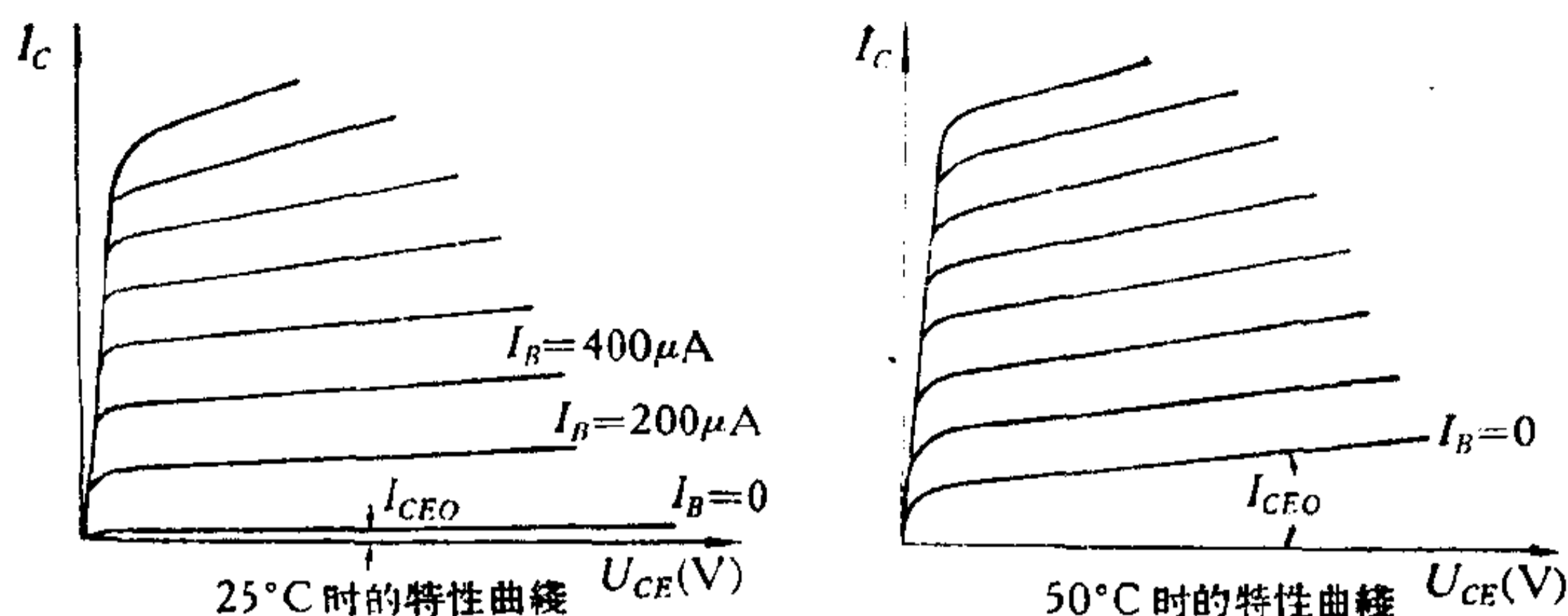


图 1-24

上面我们对常用的晶体管输入输出特性曲线作了一些介绍，在这里必须指出，不同型号的晶体三极管特性是不一样的，而且即使是同一型号的管子特性差异也很大。“**由于每一个事物内部不但包含了矛盾的特殊性，而且包含了矛盾的普遍性，普遍性即存在于特殊性之中**”，虽然各个晶体管特性不一样，但其输入输出电流电压之间的变化规律却是具有普遍性的东西，因此掌握这些普遍性的规律是很重要的。

第五节 晶体三极管的粗测

我们拿到一只管子时，首先要了解它的好坏和性能如何，是否符合使用要求。第一，根据管子型号在有关手册中找出它的管脚图，如图 1-25 所示，分清三个极的位置。

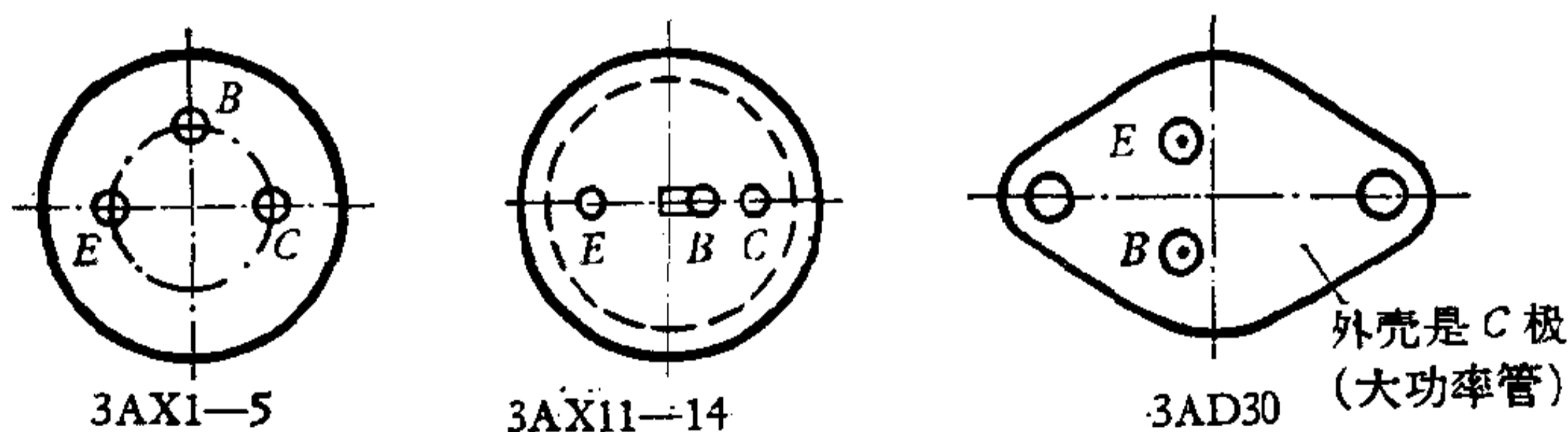


图 1-25

1. 测定 I_{CEO} (穿透电流)

我们分清了管脚后,按图 1-26 所示方法测量,即能测得 I_{CEO} ,万用表量程选在 1 毫安。电源直接用 4.5 伏,接在被测管上,电表的读数即是 I_{CEO} ,此数值越小,说明管子工作稳定性越好。倘若此数值很大,超过手册中规定的 I_{CEO} ,或用手指捏紧管壳而该电流有明显上升的话,说明此管对温度稳定性很差,就不能用于要求高的线路中。

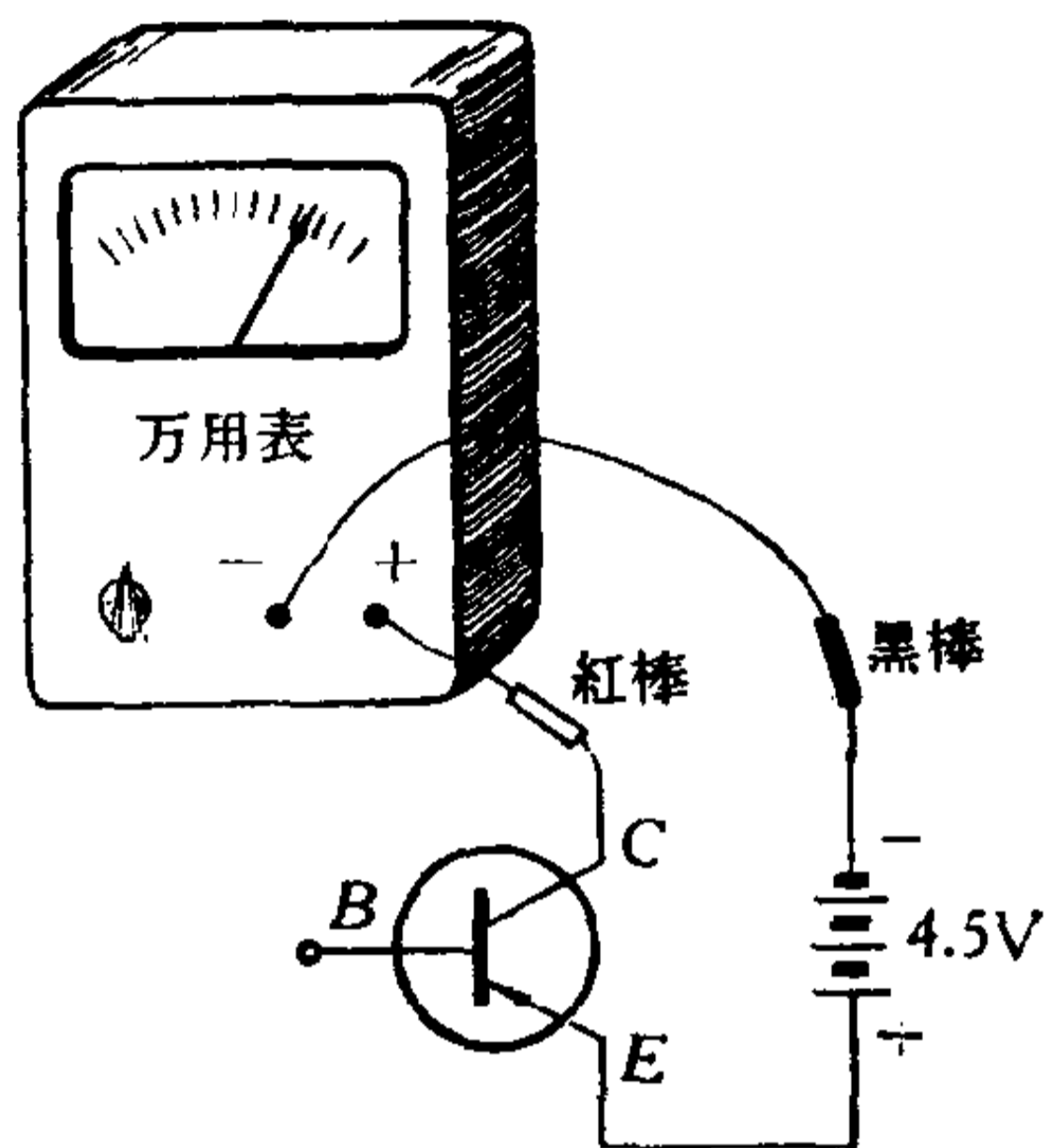


图 1-26

2. 测量近似 β (电流放大系数)

如果在图 1-26 电路中电源负端到被测管基极串接一只 450 千欧电阻 R_B 和一只开关 K 。如图 1-27 所示,我们就能测试管子的近似 β 。

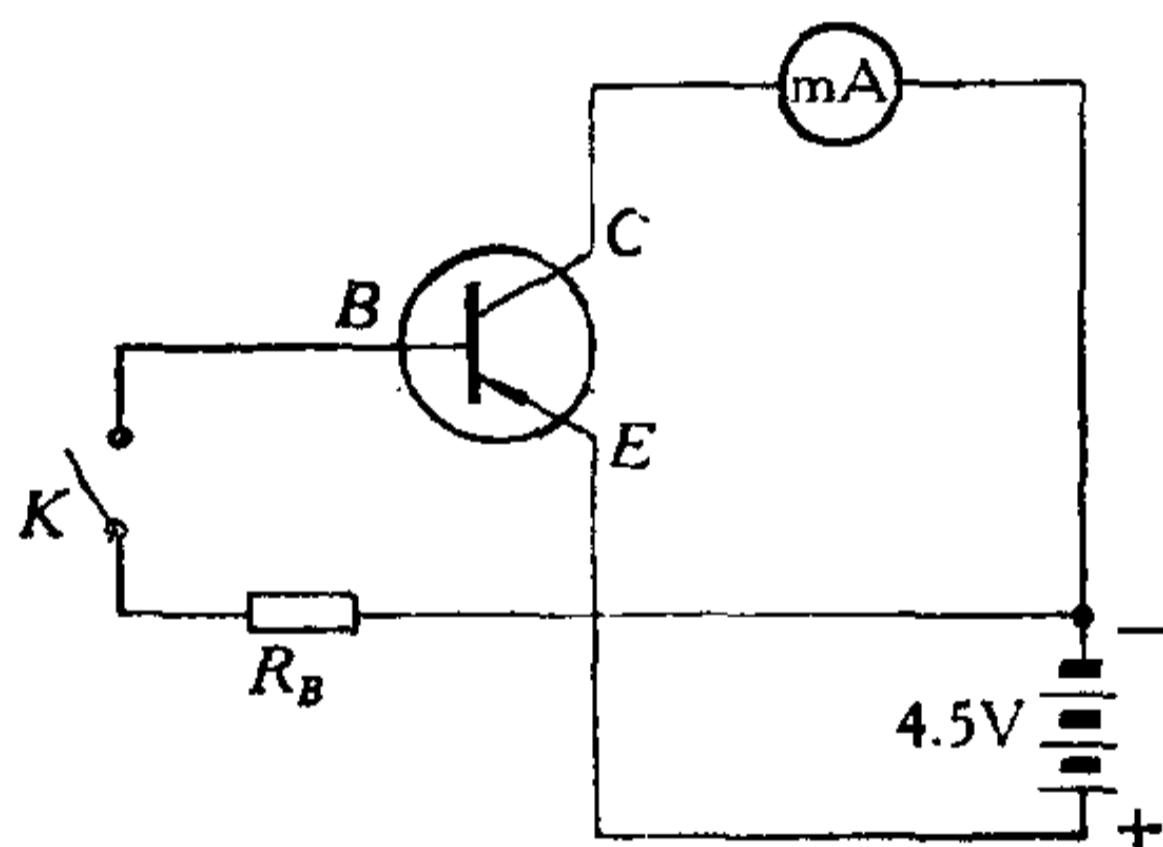


图 1-27

$$\text{因为 } \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

万用表选 5 毫安档,我们仍以 3AX31B 为例说明:

当 K 未按下时, $I_B = 0$, 电流表读数是 300 微安 (即 $I_{C1} = 300$ 微安)。

当 K 按下时 $I_B \approx \frac{E_C}{R_B} = \frac{4.5 \text{ 伏}}{450 \text{ 千欧}} = 10 \text{ 微安}$, 电表测得

1 毫安(即 I_{C2})。

因此

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{1000 - 300}{10 - 0} = \frac{700}{10} = 70$$

可见用图 1-27 既能测试 I_{CEO} , 又能测试近似 β 。

如果要测 n-p-n 型管子, 只要把电源反接一下就可以, 如图 1-28 所示, 为了测试方便起见, 我们增加一只双刀双掷开关, 如图 1-29, 这样既可测 p-n-p 管, 又可测得 n-p-n 管。

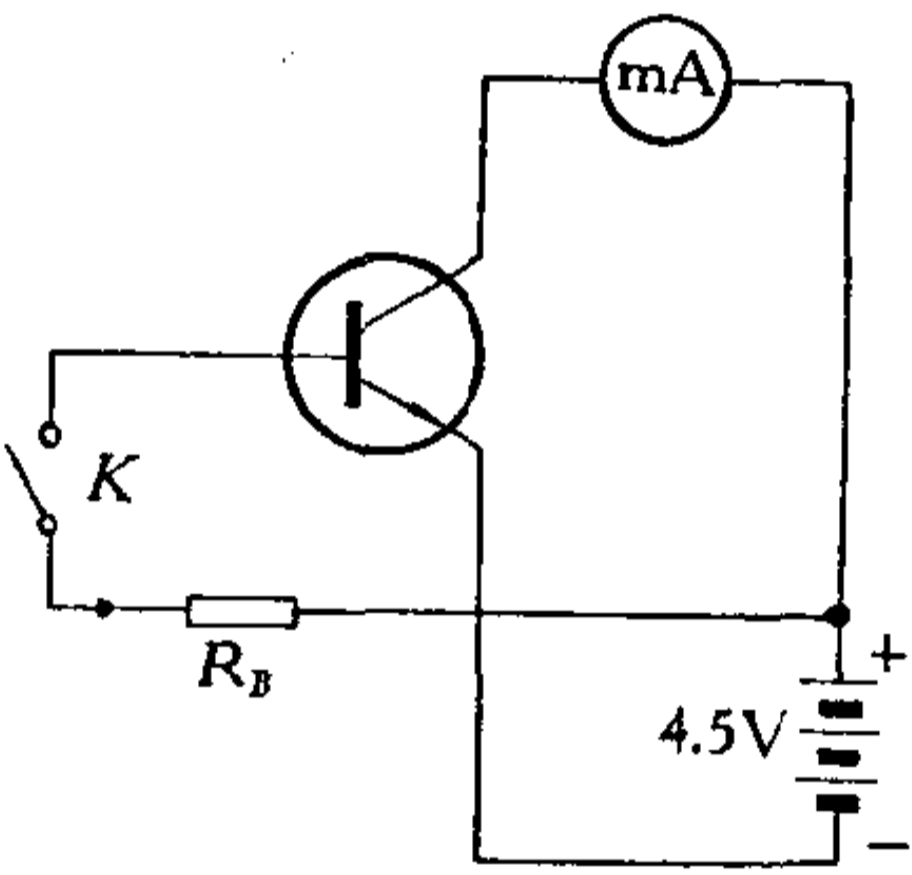


图 1-28

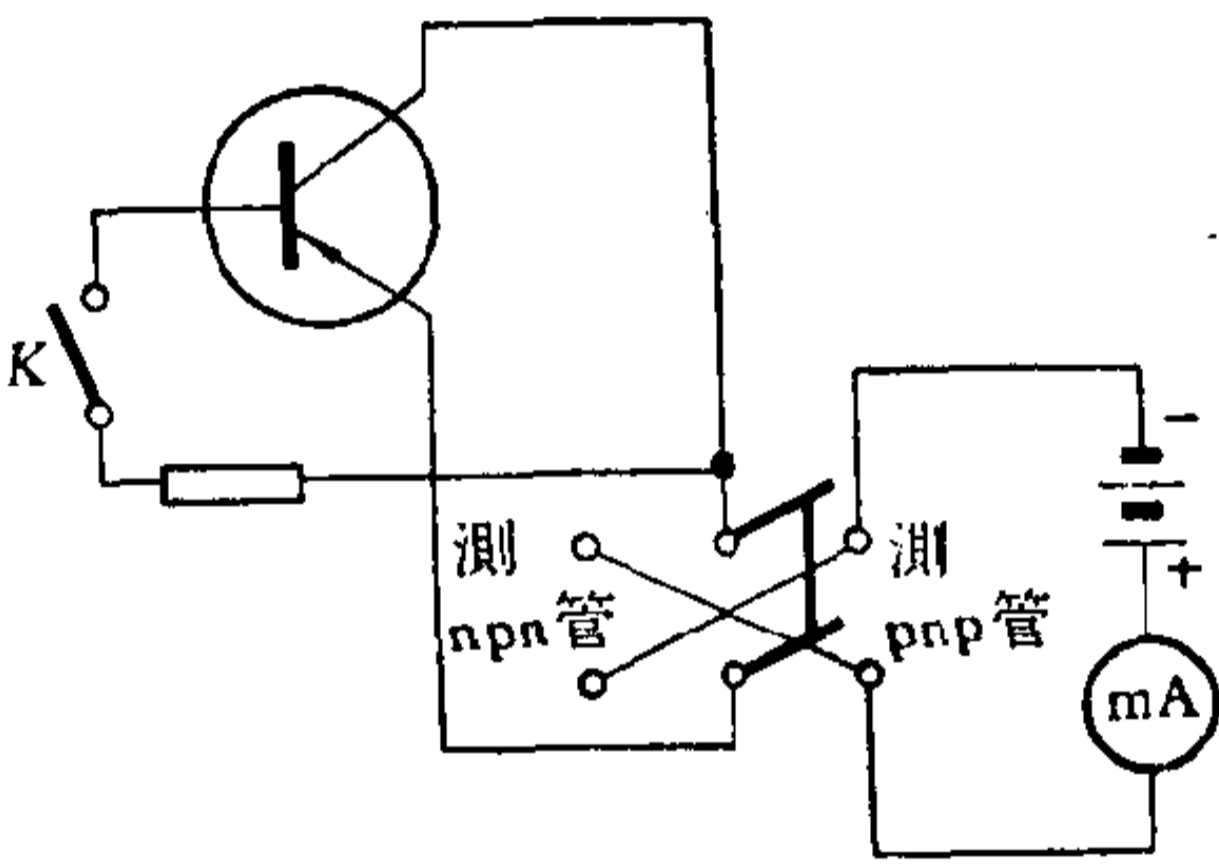


图 1-29

以上两种测试都要搭电路, 不方便, 在实用中工人师傅要知道管子性能, 一般用估测法, 如图 1-30 所示。

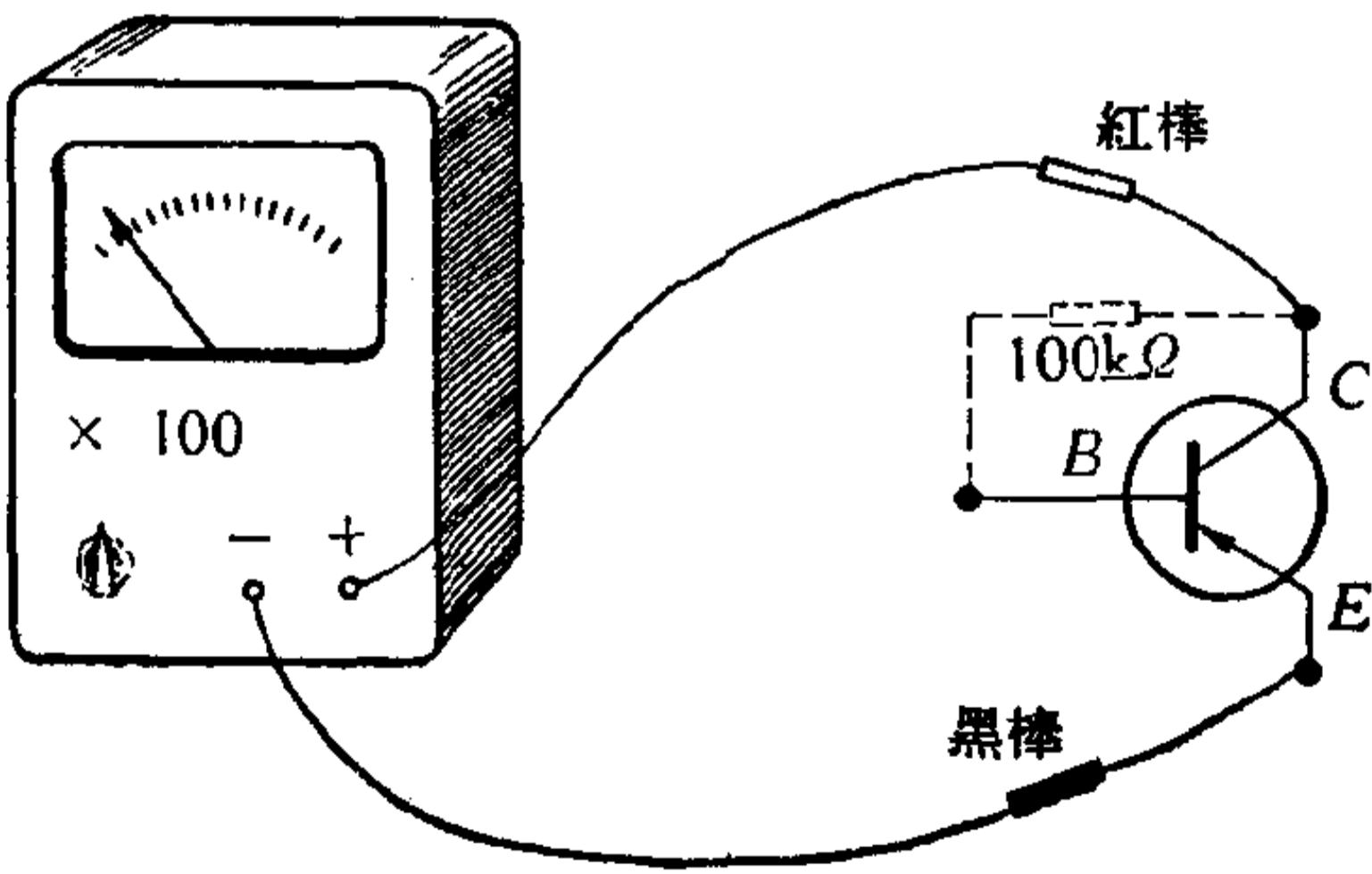


图 1-30

先测 $C-E$ 电阻,大于几十千欧以上的管子可用,阻值愈大愈好,若此值太小,说明穿透电流太大稳定性差。若数值不稳定,则噪声大。

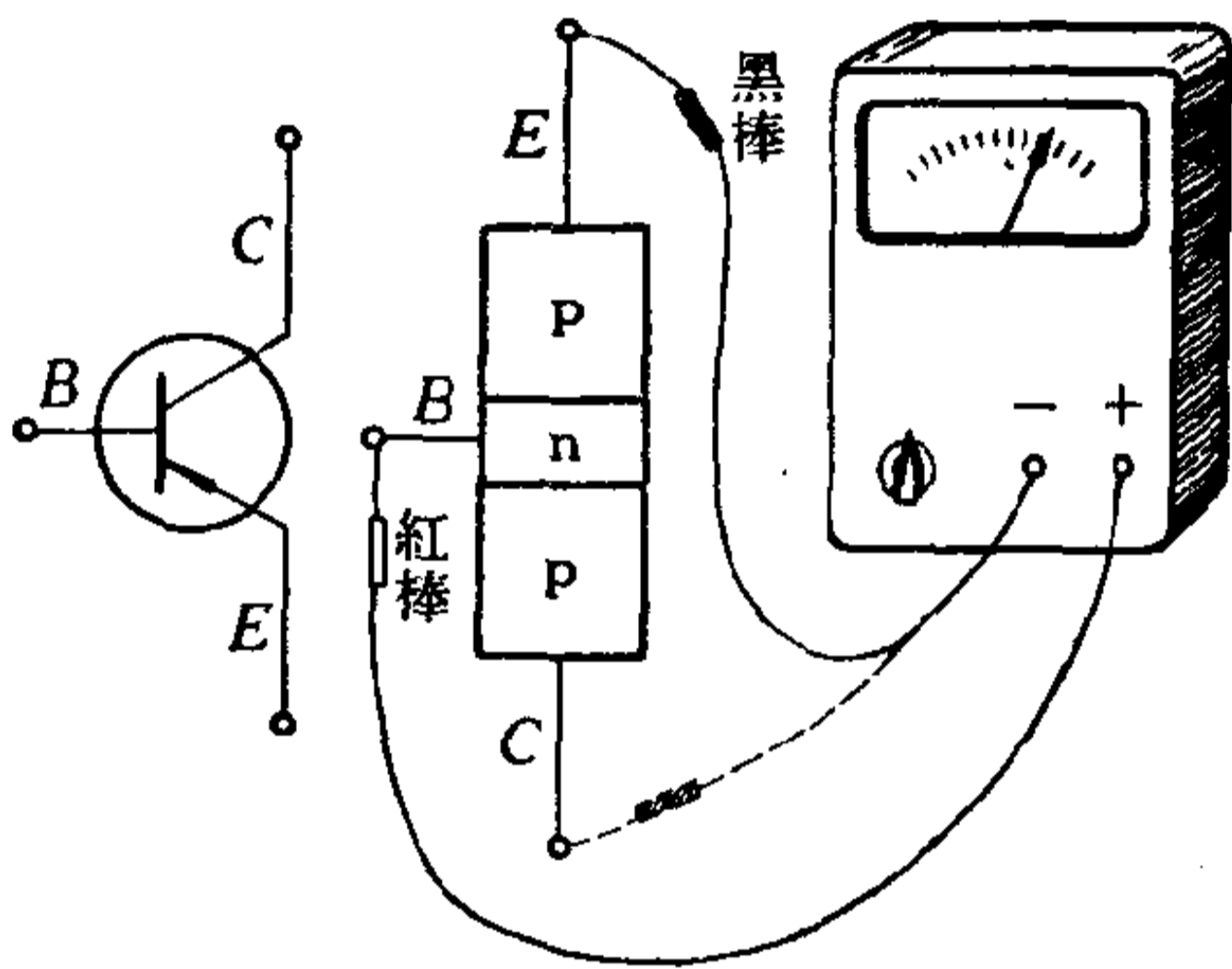
若在 BC 再接上 100 千欧电阻,测 $C-E$ 阻值为 5—10 千欧的管子好的,阻值愈小愈好。

有 100 千欧接入和无 100 千欧,测 $C-E$ 阻值,两者相差愈大,放大性能愈好。

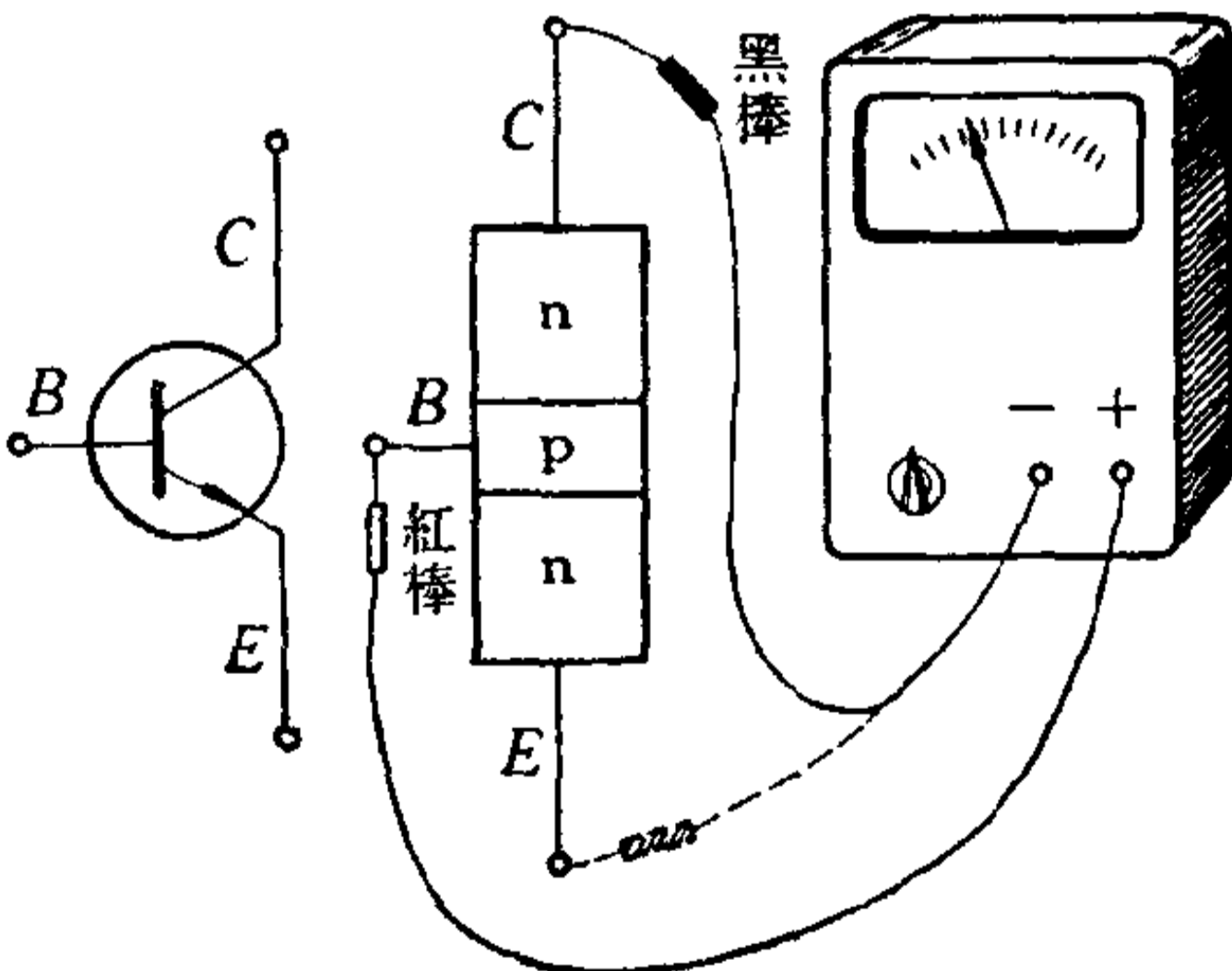
上面介绍了有型号的晶体管而同时有手册可查管脚图的粗略测试。但是当你手上没有手册和晶体管型号模糊不清时,那怎么办呢? 我们可以根据晶体三极管的特性及 $p-n$ 结与三个引线的内部联系,来判别三个极的排列位置。

3. 判断基极

我们用万用表电阻档 ($R \times 100$ 或 $R \times 1000$) 测量晶体三极管 $p-n$ 结阻值的特性,首先判别出基极来,如图 1-31 所示, $p-n-p$ 管的基极-发射极,基极-集电极均为正向所接 (黑棒是表内电池正极,红棒是表内电池负极),应



测 $p-n-p$ 型晶体三极管



测 $n-p-n$ 型晶体三极管

图 1-31

该是低阻值， $n-p-n$ 管的基极-发射极，基极-集电极 均为反向，应是高阻值。因此我们以基极为基准，就能准确地找出基极和管型(是 $p-n-p$ 还是 $n-p-n$ 管)。

测试时可以任意选取三个极中一根先假定作为基极，用万用表电阻档。红棒接“基极”，黑棒分别接触另二个头，如果测得均为低阻值，则红棒接的是所要找的基极，而且管子是 $p-n-p$ 型的。再将红黑棒对调一下(即黑棒接基极，红棒分别接触另二个头)。若读数均为高阻值，则上述判别的基极是正确的。

如果红棒接触“基极”照上述所测结果均为高阻值，黑棒接触“基极”测得结果均为低阻值，则所接的“基极”是 $n-p-n$ 型的基极。若测得结果一个是高阻一个是低阻值时，则原假定的“基极”是错了，就需另换一个头作“基极”再测试，直到满足要求为止。

4. 判断发射极与集电极

基极和管型由上述方法判别出来了，剩下二只脚要判别

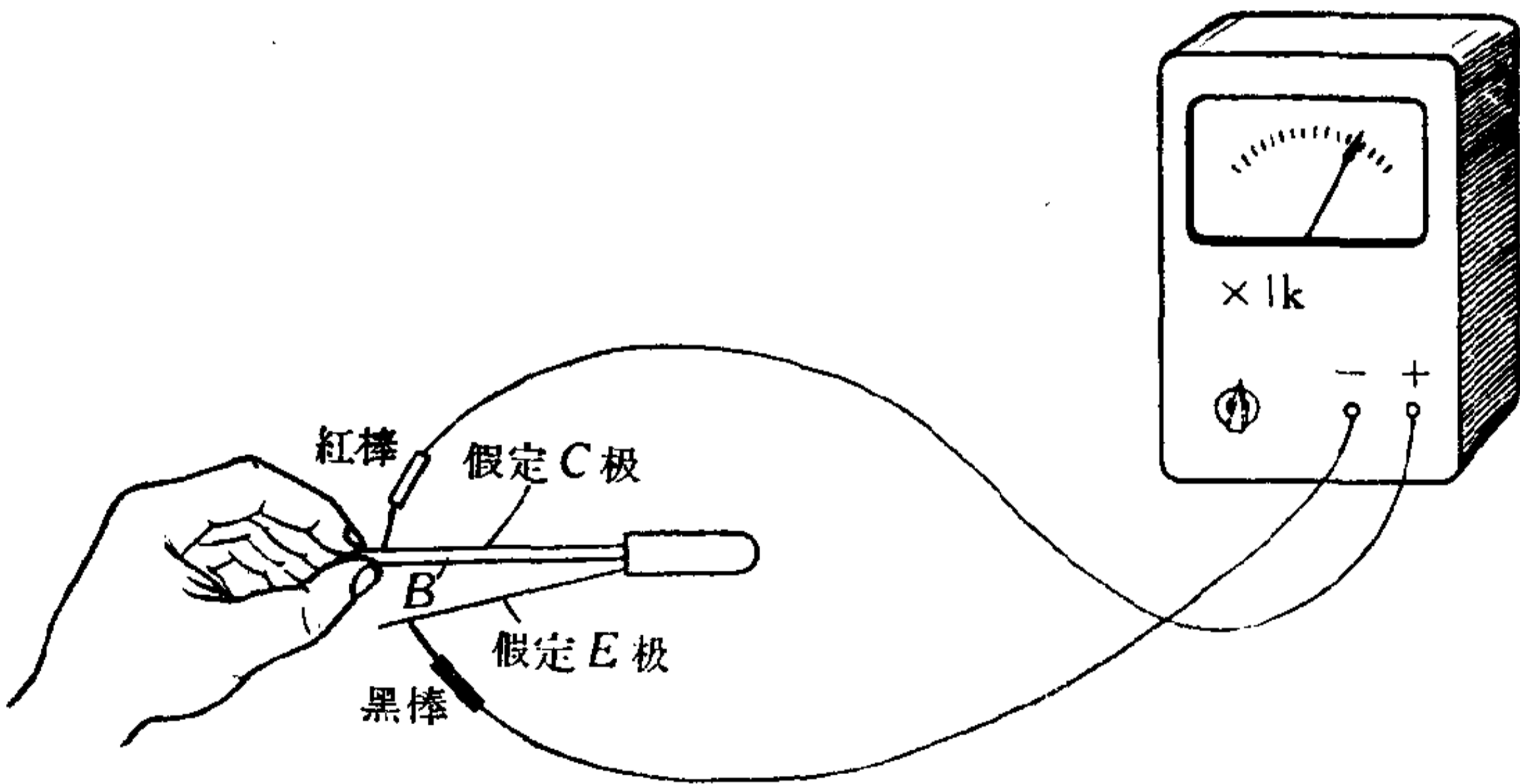


图 1-32

谁是发射极，谁是集电极就更容易了。如图 1-32 所示，我们假定红棒接的是集电极 C ，黑棒接的是发射极 E ，再用手指捏住 B 、 C 二极，但不能使 B 、 C 直接接触，并读出其阻值，然后再把这个假定相反测试，将其读数相比较，若第一次阻值小，则第一次假定是对的，红棒接的是集电极 C ，为什么呢？我们可用图 1-33(1) 来表示，第一次用手指捏住又不接触，就好比在基极-集电极上串接一只电阻 $R_{手}$ （约 50 千欧—100 千欧），这样的线路我们一看就知道管子是导通的，因为基极有偏流，所以电阻小了。

若用第二次假定来测量，就如图 1-33(2) 一样，这样的电路管子是不通的，所以电阻就大了，用这样简单的方法就能判别晶体管的三个极，以避免接错而影响正常工作和损坏管子，

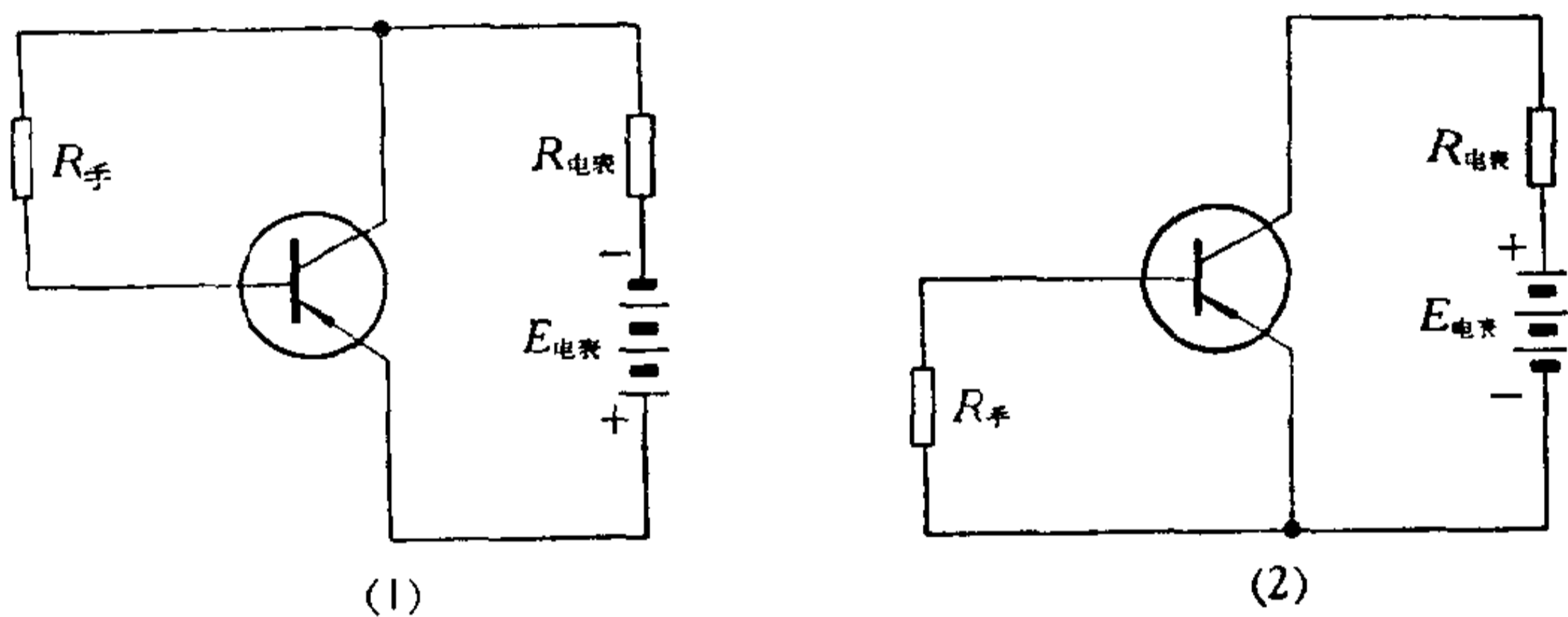


图 1-33

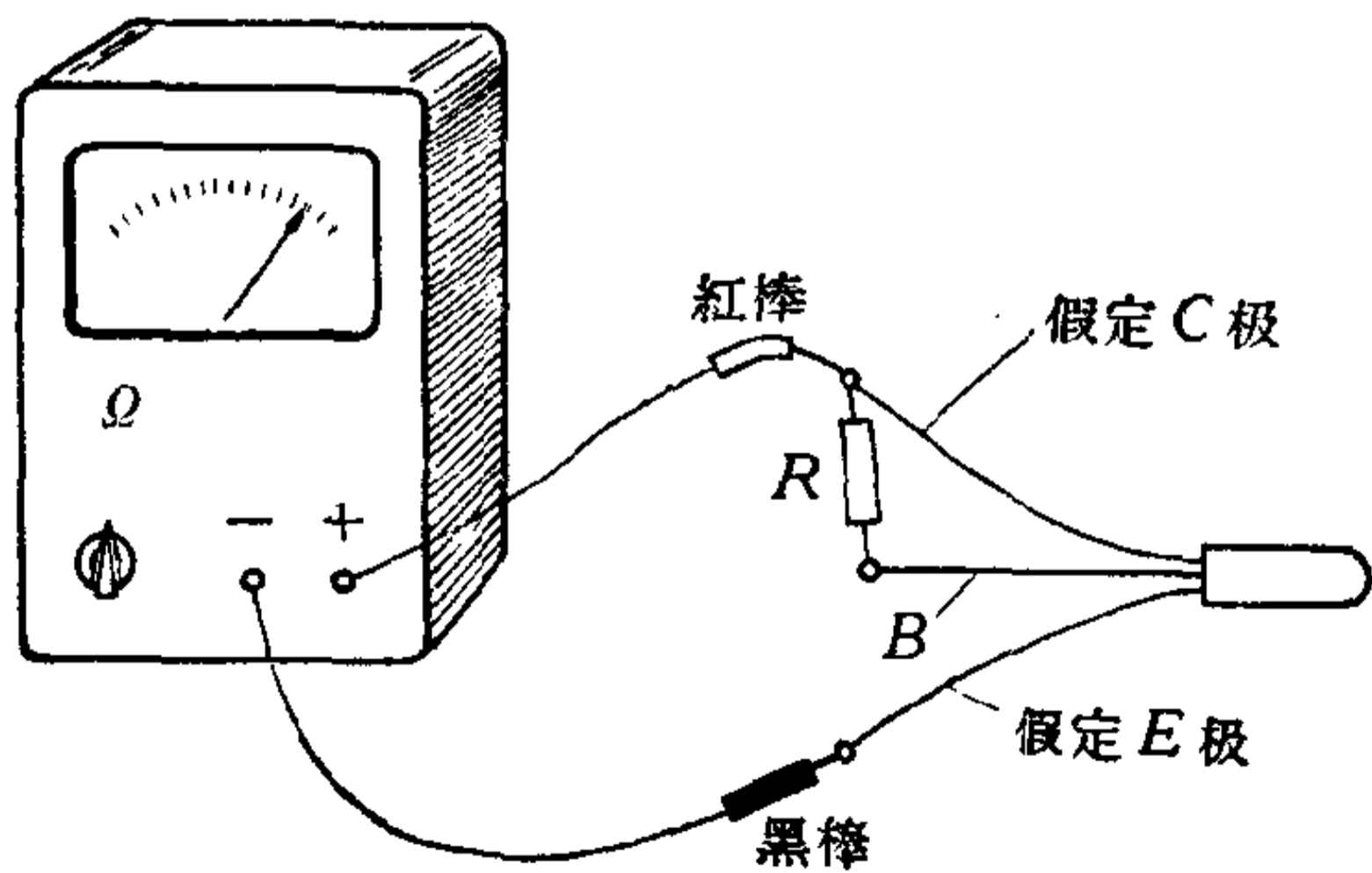


图 1-34

倘若 $R_{\text{手}}$ 用一只固定电阻 R 代替串进去测量, 那得出的结论更可靠了, 如图 1-34 所示, 方法与上述手捏一样, 原理也完全一样, 测得阻值小的一种假定是对的。

5. 判別管子是硅管还是锗管

我们已经从上面一些测试知道了三个极和 p-n-p 型或 n-p-n 型, 如果还想知道它是什么材料制造的, 那末只要测试一下其正向特性就能判別出来。

因为硅管的正向压降一般为 0.6—0.7 伏, 而锗管的正向压降只有 0.2—0.3 伏左右, 所以只要在图 1-35(1) 上测量一下 U_{BE} 的数值, 若 U_{BE} 为 0.5—0.9 伏即为硅管, 若测得 U_{BE} 为 0.2—0.3 伏即为锗管。在图 1-35(2) 中为两种材料管子的输

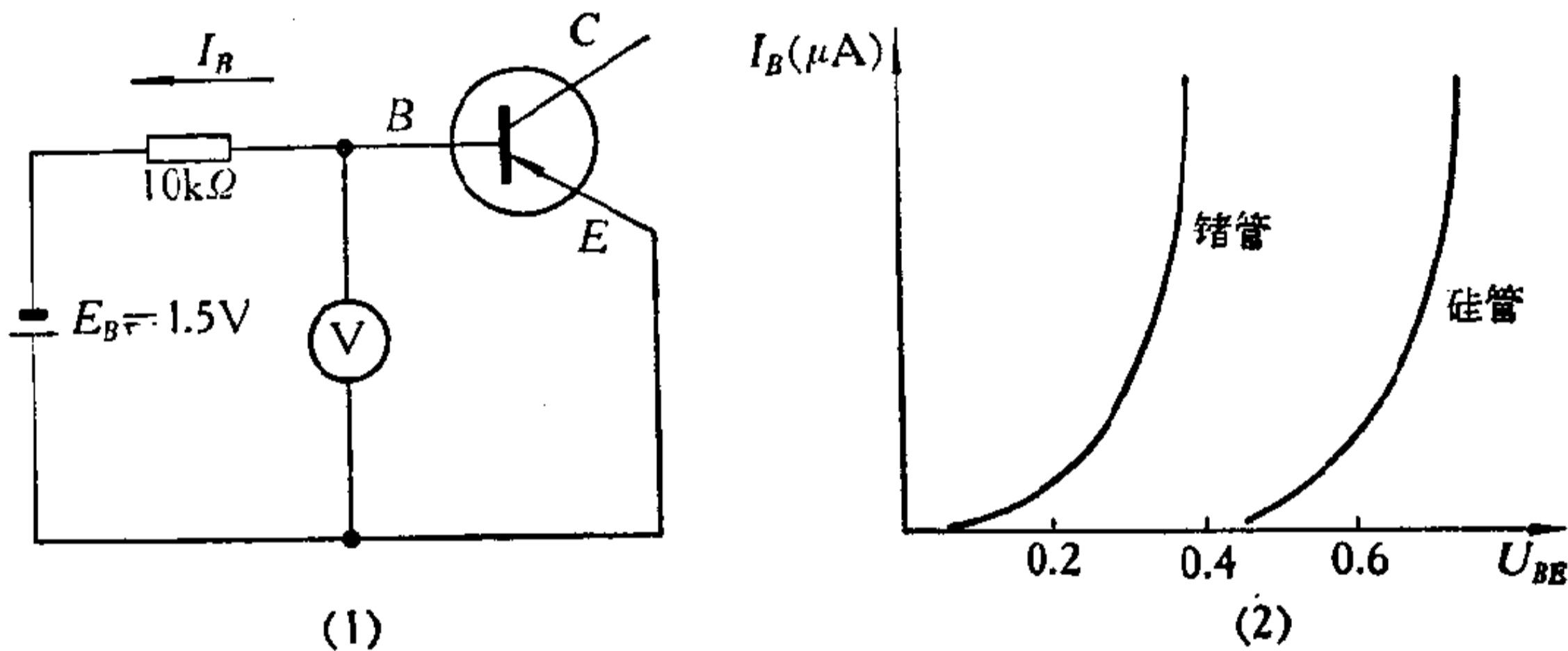


图 1-35

入特性曲线, 也能看出锗管与硅管的正向特性差异很大。

若对 n-p-n 管的测试, 只要把 E_B 和电流表的极性反接一下, 视其压降数值范围来判別锗管还是硅管。

本章小结

1. 晶体三极管基本类型有 p-n-p 型和 n-p-n 型两种, 它

们的作用原理基本相同,就是在接线中电源正负相反,电流方向也相反。

2. 晶体三极管内部电流分配是: 发射极电流 I_E 绝大部分分配到集电极形成 I_C , 只有很小部分分配到基极形成 I_B , 它们之间关系是: $I_E = I_B + I_C$, 根据晶体管内部电流分配的关系, 我们就能利用它来作“放大”, 即只要基极信号电流有微小变化, 就能引起集电极电流很大的变化, 也就是老师傅们经常说的: 集电极电流是基极电流的 β 倍。

3. 晶体三极管的参数和特性曲线是用来表明管子性能和它所适用范围的。本章介绍了 α 和 β 是表明晶体管放大能力大小的。 I_{CEO} 和 I_{CBO} 主要是反映管子对温度影响的稳定性能, 还有其它参数将在以后介绍。

晶体三极管的特性曲线能较全面地表示管子的性能, 不同型号的管子有不同的参数和特性曲线, 同时即使同一型号的管子, 它的特性(参数和曲线)也有较大的差异, 目前工厂给出的特性参数和曲线, 仅是典型的数据, 它只能供大家作为参考。

第二章 低頻放大器

有线广播是我国广播事业的一个重要组成部分，它是传播毛泽东思想的重要工具。

广播站能把伟大领袖毛主席的最新指示和无产阶级司令部的号召迅速及时地传达下去，能把工农兵听毛主席的话，照毛主席指示办事，无限忠于毛主席的先进事迹及时在广播里宣传，有力地推动了活学活用毛泽东思想的群众运动。

扩音机是广播站的一个重要组成部分，也是工厂、农村、部队和学校中普遍使用的一种宣传工具。扩音机是一个低频放大器，它由几个单级放大器组成。一般扩音机是由前置放大和功率放大组成，其方框图如图 2-1 所示。

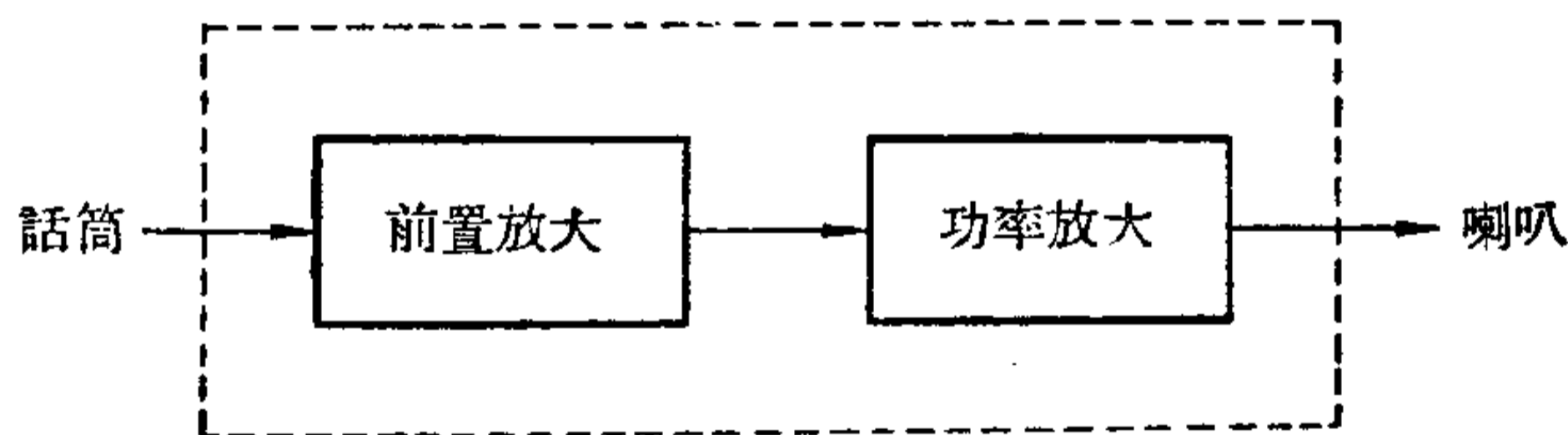


图 2-1 扩音机方框图

在广播站里，播音员对着话筒讲话，话筒就把声音转变为强弱不断变化的电信号，这种电信号称为音频电信号。从话筒里出来的微弱的音频电信号送到扩音机放大，放大后的音频信号通过广播线送到喇叭放出声音，把毛主席的最新指示和党中央的战斗号令传到工农兵的心坎上。

在工农业生产中，我们经常会遇到一些快速或缓慢变化的量，如物体的振动、摆动、转动，以及物体所发出的光、热

等的变化，可以用一定的方法变换成低频交流信号。所以除了象扩音机那样的日常遇见的低频放大器之外，在生产上很多检测、控制设备中，低频放大器也是用得很普遍的，这时低频放大器输出可带动继电器、电动机和指示电表等装置。

伟大领袖毛主席教导我们：“人们的认识，不论对于自然界方面，对于社会方面，也都是一步一步地由低级向高级发展，即由浅入深，由片面到更多的方面。”对于低频放大器我们先从比较简单的单管低频小信号放大器开始，然后进一步讨论多级放大器和低频大信号放大器(功率放大器)。

第一节 单管低频小信号放大器

1. 基本工作原理

图 2-2 是一个最简单的单管低频放大器线路。这里所说的低频，是指频率在 20 周到 20 千周的音频范围。

图中 E_C 是集电极电源， R_C 是集电极电阻， E_B 是基极电源， R_B 是基极电阻。当输入端通过电容 C_1 加入一个交流信号电压 u_{λ} ，我们就在输出端相应得到一个放大的信号电压 $u_{\text{出}}$ 。

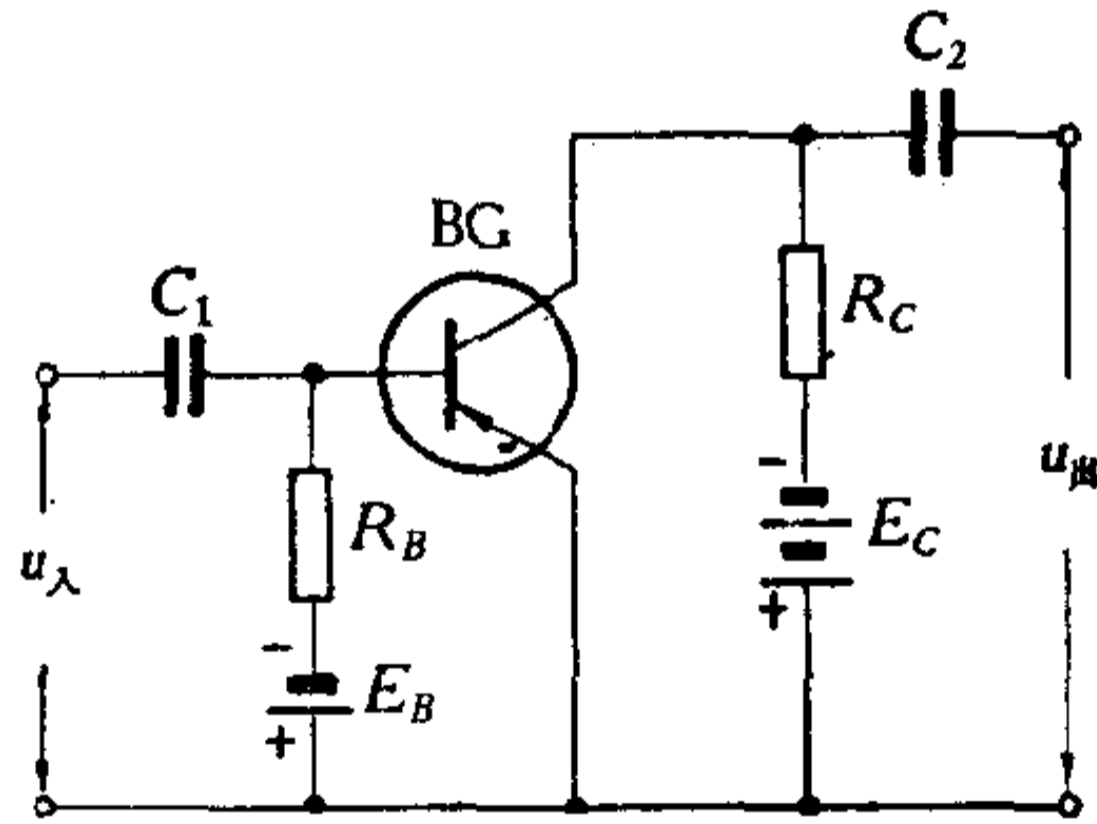


图 2-2

(1) 在交流信号 u_{λ} 未加入时，晶体管基极电压 U_{BE} ，基极电流 I_B ，集电极电流 I_C 和集电极电压 U_{CE} 都是不变化的直流。

I_B 和 I_C 分别由下式决定：

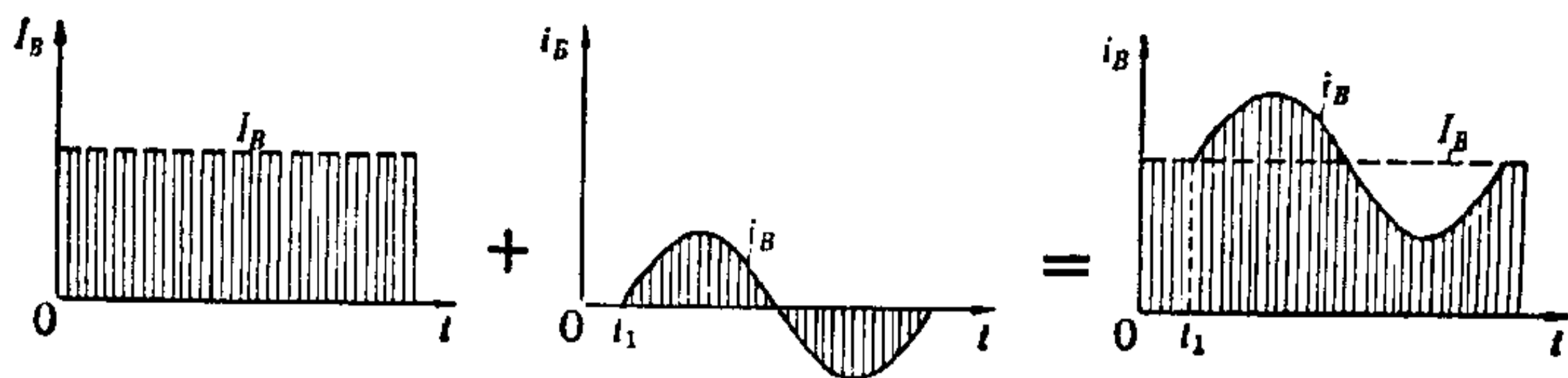


图 2-3

$$I_B \approx \frac{E_B}{R_B}$$

$$I_C \approx \beta I_B$$

(2) 当交流信号 u_λ 通过电容 C_1 加到晶体管基极时，基极电流将发生变化，我们将基极电流中的变化部分记作 i_B 。

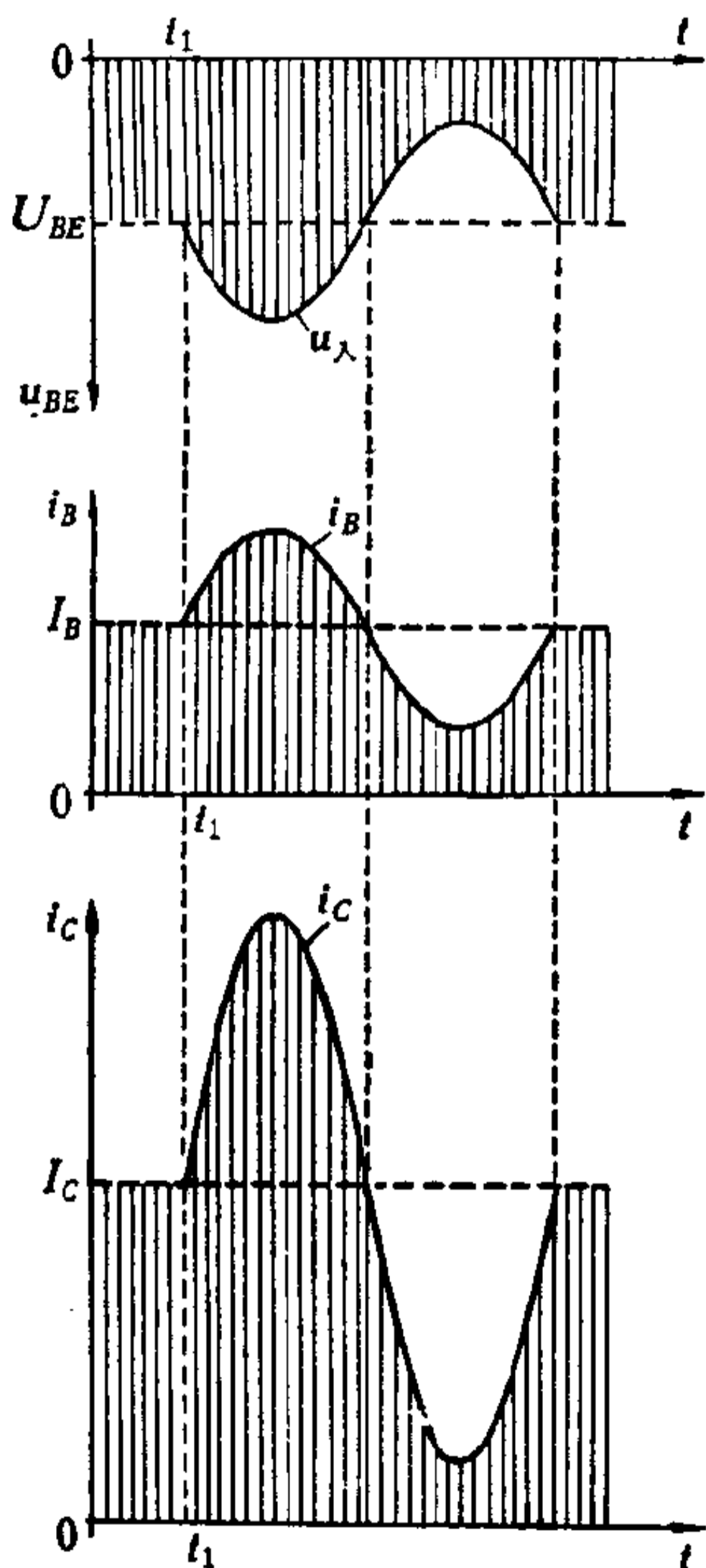


图 2-4

这时的基极电流可以看作二个电流合成：一个是直流 I_B ，一个是交流 i_B ，如图 2-3 所示。

由于基极电流变化引起集电极电流也跟着变化。那么集电极电流也可以看作二个电流的合成：一个是直流 I_C ，一个是交流 i_C ，有信号时的集电极电流为 $I_C + i_C$ ，见图 2-4 所示。

显然集电极电流在 R_C 上将引起电压降 $u_c = I_C R_C + i_C R_C$ 。我们知道 u_c 的直流部分 $I_C R_C$ 不能通过 C_2 ，而交流部分则可以通过 C_2 获得输出电压 $u_{\text{出}}$ 。

图 2-5 画出了单管放大器的输入、输出电压电流波形。从图 2-5 中我们可以看出：在放大器的输入端加入一个交流信号 u_λ ，在放大器的输出端就可以得

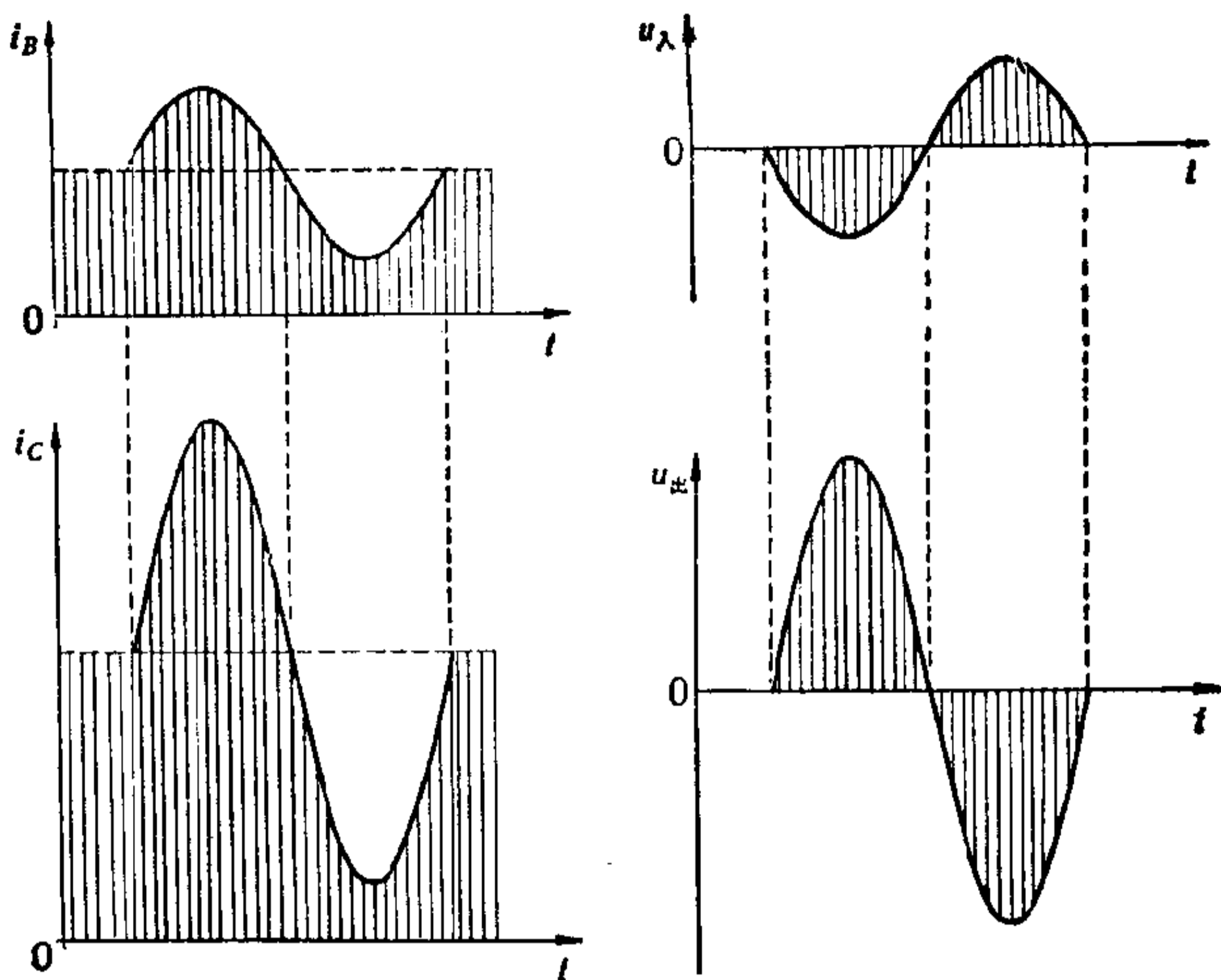


图 2-5

到一个放大后的输出信号 u_π , 这就是放大器的基本工作原理。

我们称输出信号电流与输入信号电流之比叫电流放大倍数(又称电流增益) K_i 。

$$K_i = \frac{i_\pi}{i_\lambda} \approx \frac{i_C}{i_B}$$

大家知道 $\beta \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$, 这里的 ΔI_C 和 ΔI_B , 就是集电极和基极电流的变化部分 i_C, i_B 。

所以

$$K_i \approx \frac{i_C}{i_B} = \beta$$

对于输出信号电压与输入信号电压之比我们叫做电压放大倍数(又称电压增益) K_u 。

$$K_u = \frac{u_\pi}{u_\lambda}$$

而电压放大倍数与电流放大倍数的乘积则叫做放大器的功率放大倍数(又称功率增益) K_P 。

$$K_P = K_i \cdot K_u$$

毛主席教导我们：“不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”要进一步了解晶体管放大器，除了摸清晶体管的“脾气”之外，还必须了解它和它以外的 R_B 、 R_C 、 E_B 、 E_C 的关联，只有这样才能做好一个放大器。

2. 负载线与工作点

图 2-6 是一个单管放大器实际线路，我们先看一看在没有交流信号输入时，即所谓静止状态下其输入输出端的情况。输入端基极电流 I_B 由下式可得：

$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{E_C}{R_B} = \frac{6 \text{ 伏}}{135 \text{ 千欧}} \approx 45 \text{ 微安}$$

因为 $E_C \gg U_{BE}$

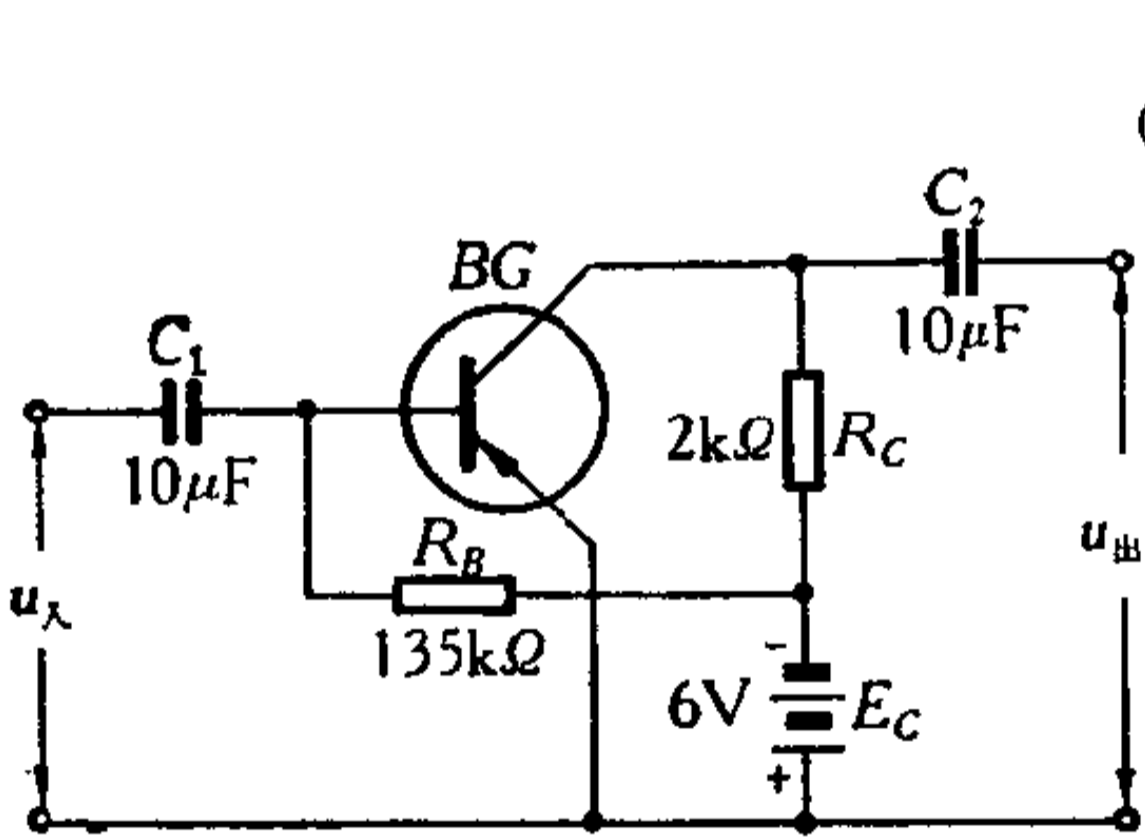


图 2-6

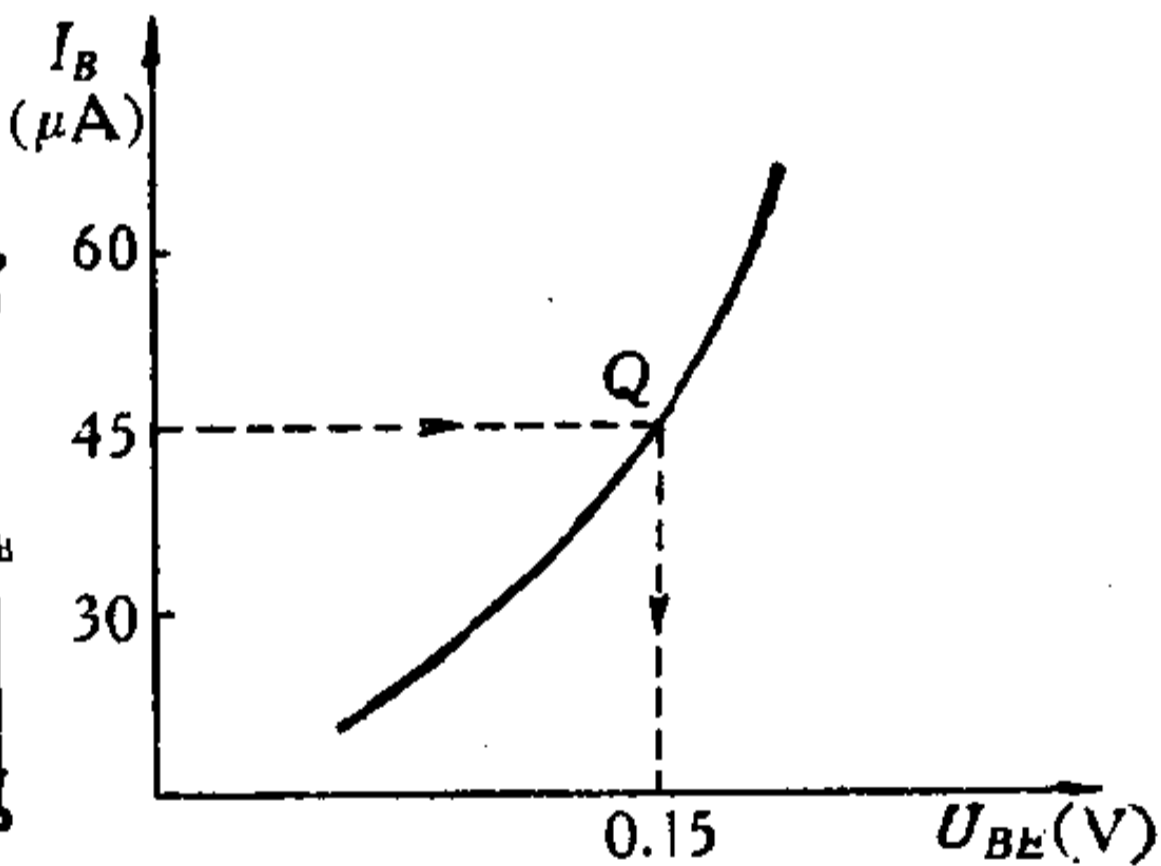


图 2-7

这时从晶体管的输入特性曲线可以找出对应的基极电压 $U_{BE} = 0.15$ 伏。如图 2-7 所示。

为了决定放大器输出端的情况，我们暂时将放大器在 AB 处分成二部分。如图 2-8(1) 所示。左边是管子，其 U_{CE} 和 I_C 的关系应由管子输出特性决定，在 $I_B = 45$ 微安时，管子相

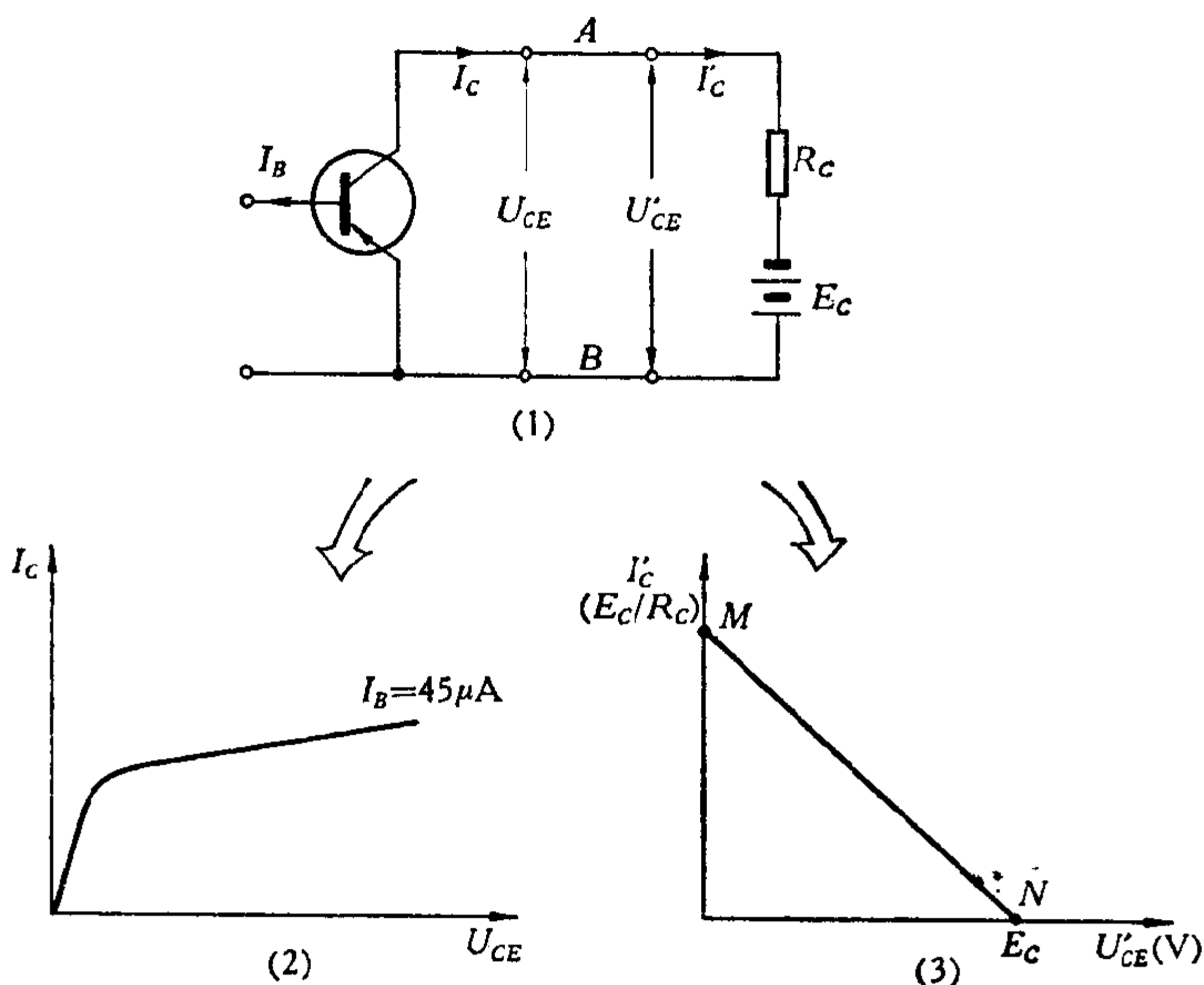


图 2-8

应的输出特性曲线如图 2-8(2) 所示。右边部分是 R_C 和 E_C ，其电流电压关系可由电流定律写为：

$$U'_{CE} = E_C - I'_C R_C$$

这个关系也可以用图来表示，如图 2-8(3) 所示，从图中可以看到 U'_{CE} 和 I'_C 的关系是一条直线。在 E_C 选定之后，这条直线完全由负载 R_C 来决定，所以常常称这条直线为“负载线”。

既然负载线是一条直线，那么只要二点就能够决定这条直线。平时常用 $U'_{CE} = 0$ ， $I'_C = \frac{E_C}{R_C}$ 的 M 点和 $I'_C = 0$ ， $U'_{CE} = E_C$ 的 N 点来决定负载线。

事实上，放大器的负载同管子不是分开的， I_C 就是 I'_C ， U_{CE} 就是 U'_{CE} 。我们将图 2-8(2) 与 2-8(3) 画在一个座标上，

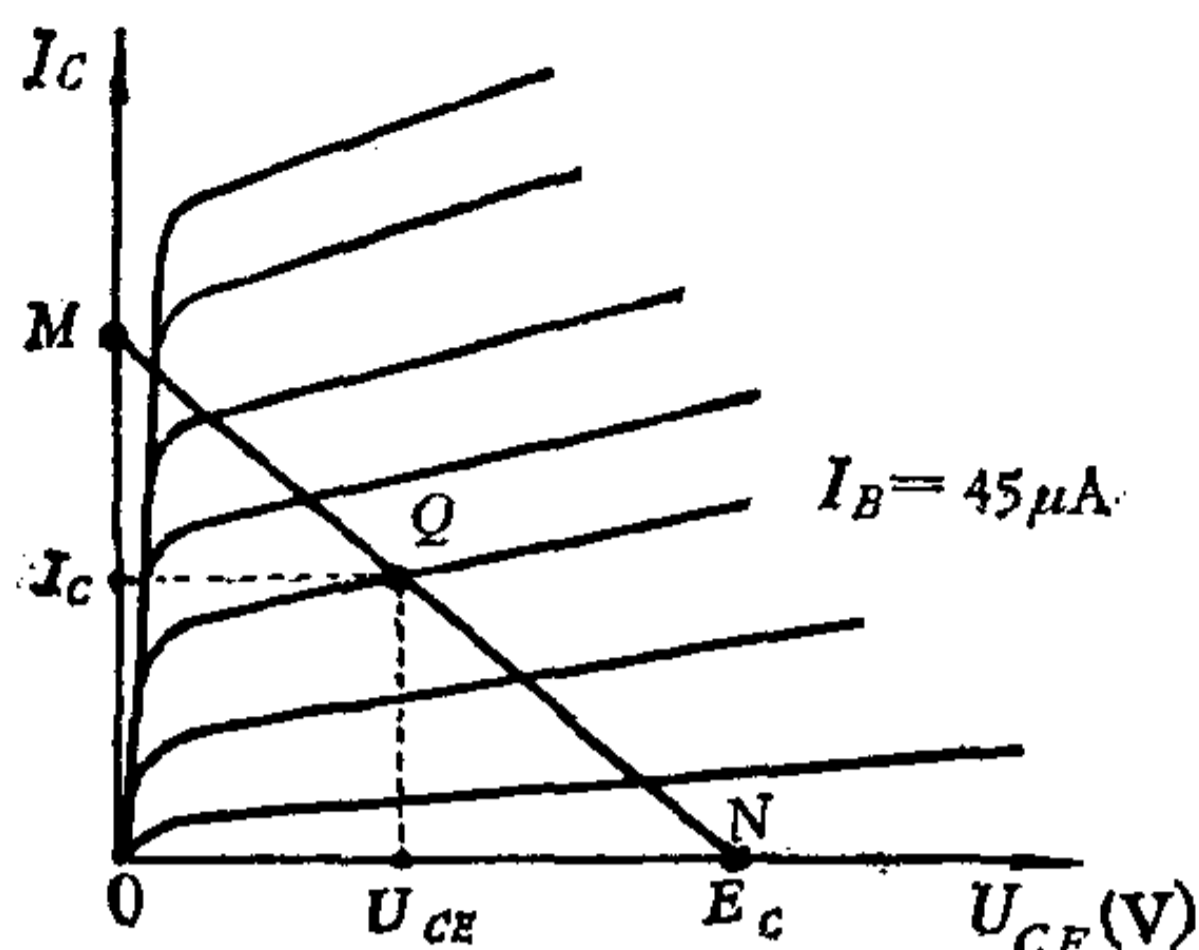


图 2-9

从整体来看，要电流电压同时满足左右二边的关系，只有 MN 直线与特性曲线的交点 Q 才行。这个交点 Q 的电流电压关系就是在静止工作状态下放大器的电流电压关系，所以称 Q 点为放大器的静态工作点（亦称直流工作点），

如图 2-9 所示。现在我们再来看在放大器输入端加入交流信号的情况。假设输入正弦信号 u_{λ} 的最大值为 0.02 伏，从输入特性曲线上可以找出对应的基极电流 i_B 的变化规律。其最大值为 15 微安，如图 2-10(1) 所示。同样，对于放大器的输出端，只要我们将 i_B 的波形画在图 2-10(2) 中即可得出 i_C 和 u_{CE} 的波形，由图中可以看出：

第一， i_C 的最大值为 0.5 毫安， u_{CE} 的最大值为 1 伏。因此我们可以知道这个放大器的放大倍数。

$$\text{电流放大倍数 } K_i = \frac{i_C}{i_B} = \frac{0.5 \text{ 毫安}}{15 \text{ 微安}} = 33$$

$$\text{电压放大倍数 } K_u = \frac{u_{\text{出}}}{u_{\lambda}} = \frac{1 \text{ 伏}}{0.02 \text{ 伏}} = 50$$

$$\text{功率放大倍数 } K_P = K_i \cdot K_u = 1650$$

第二，我们还可以看到输入电压 u_{BE} 和输出电压 u_{CE} 的极性是相反的（亦称相位相反或相差 180° ）。

第三，从图中我们还可以看出输入信号波形与输出信号波形（除了相位差 180° 外），基本上保持一样。这说明放大器的工作区域选得比较合适，如果工作区域选择得不好，输出波形就会走样，即产生失真。从图 2-11 所示的情况很容易说

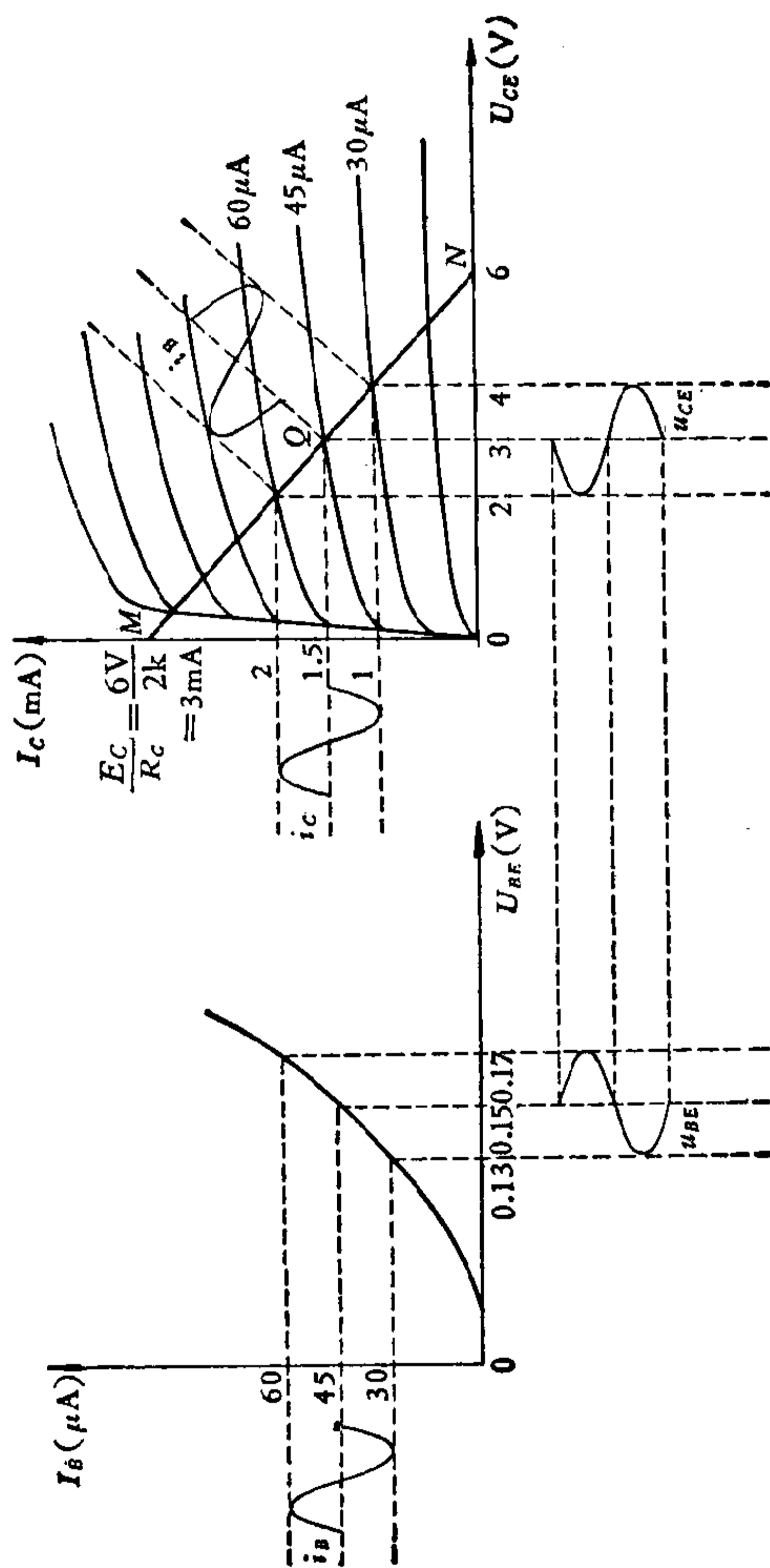


图 2-10

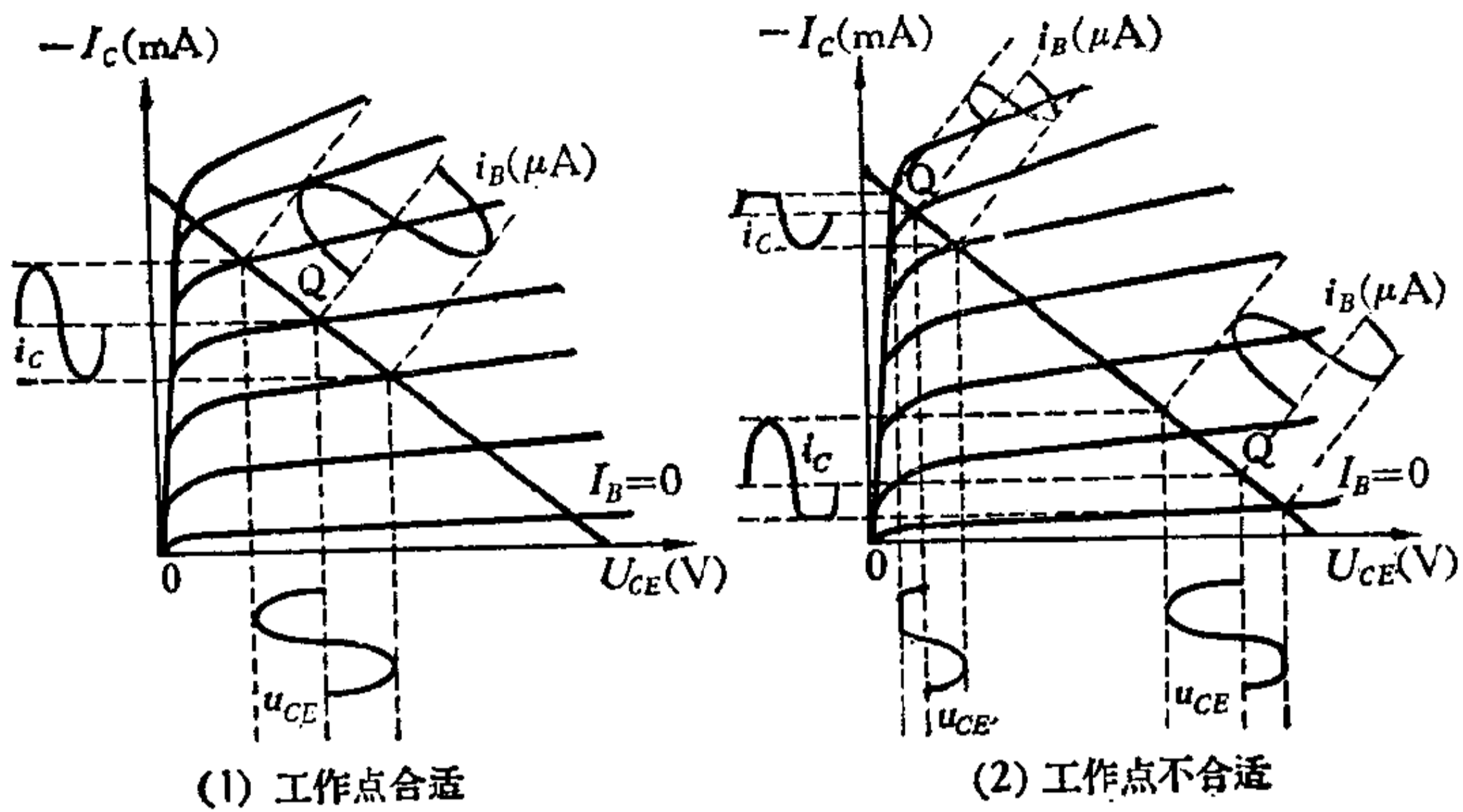


图 2-11

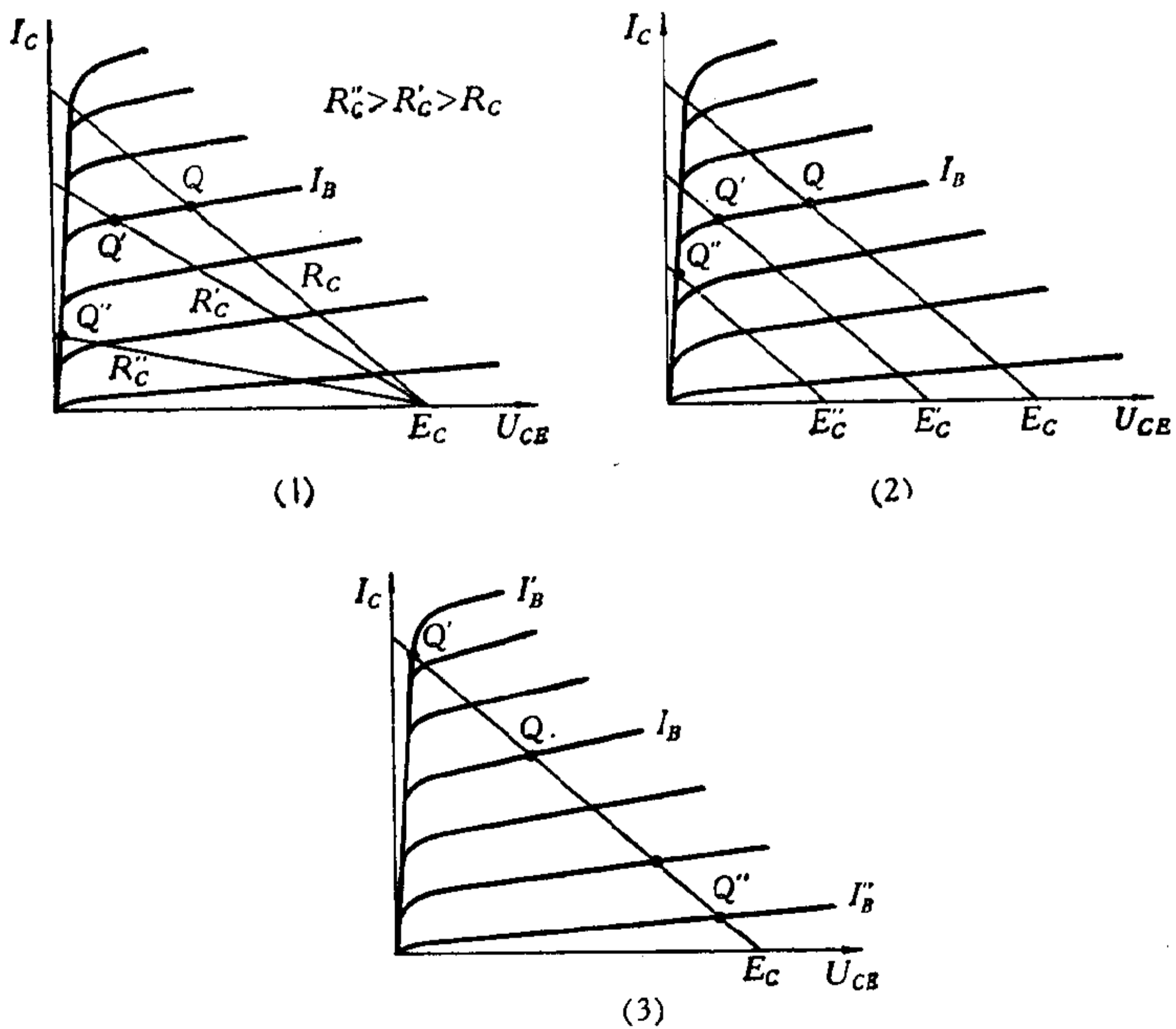


图 2-12

明这个问题。

放大器的基本任务就是将信号不失真地进行放大,要使信号不产生失真,必须选择合适的工作区域。在低频小信号放大器中,由于信号很小,工作区的选择主要决定于放大器的静态工作点。影响静态工作点的因素很多,例如在 E_C 和 I_B 决定之后,不同的负载 R_C ,静态工作点是不一样的,如图 2-12(1);在 I_B 和 R_C 决定之后,不同的 E_C 这个工作点也不一样,如图 2-12(2) 所示;在 I_B 变化时静态工作点的变化如图 2-12(3) 所示。一般 R_C , E_C 都事先决定了,所以静态工作点就决定于 I_B 的选择。下面我们将给大家介绍建立放大器基极直流电流 I_B (亦称偏流)的方法。提供偏流的电路常称为偏流电路或偏置电路。

3. 晶体管放大器的偏置电路

一般常用的偏置电路如下:

(1) 固定偏置电路

上面讨论的图 2-6 所示的电路就是固定偏置电路, E_C 通过 R_B 供给偏流 I_B , R_B 称为偏流电阻, E_C 通过 R_C 供给集电极电压。

$$I_B \approx \frac{E_C}{R_B}$$

从上式可知,我们要选择合适的偏流 I_B ,在 E_C 一定时,只要选择合适 R_B 就可以了。如图 2-6 上, $R_B = 135$ 千欧时 $I_B = 45$ 微安, $U_{CE} = 3$ 伏, $I_C = 1.5$ 毫安。

由于这种电路当 R_B 选定后,基极偏流 I_B 也就固定了,所以称为固定偏流电路。

下面举例说明固定偏流电路的简单计算:

设 $E_C = 12$ 伏, $R_C = 2$ 千欧, $I_B = 60$ 微安,管子的 $\beta = 50$,

求 R_B 和 U_{CE} 。因为 $R_B \approx \frac{E_C}{I_B} = \frac{12 \text{ 伏}}{0.06 \text{ 毫安}} = 200 \text{ 千欧}$

由于 $\beta \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 我们可以把直流 I_C 和 I_B 看作是从零变到 I_C 和 I_B 的(忽略 I_{CEO} 的影响)所以

$$\beta \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_C - 0}{I_B - 0} = \frac{I_C}{I_B}$$

根据上式可得 $I_C \approx \beta I_B = 50 \times 0.06 \text{ 毫安} = 3 \text{ 毫安}$

在集电极电路中

$$U_{CE} = E_C - I_C R_C = 12 \text{ 伏} - 3 \text{ 毫安} \times 2 \text{ 千欧} = 6 \text{ 伏}$$

由于以上的计算是近似的,也由于晶体管本身参数不一致,故计算后必须在实践中调整。调节 R_B 可以改变晶体管的直流

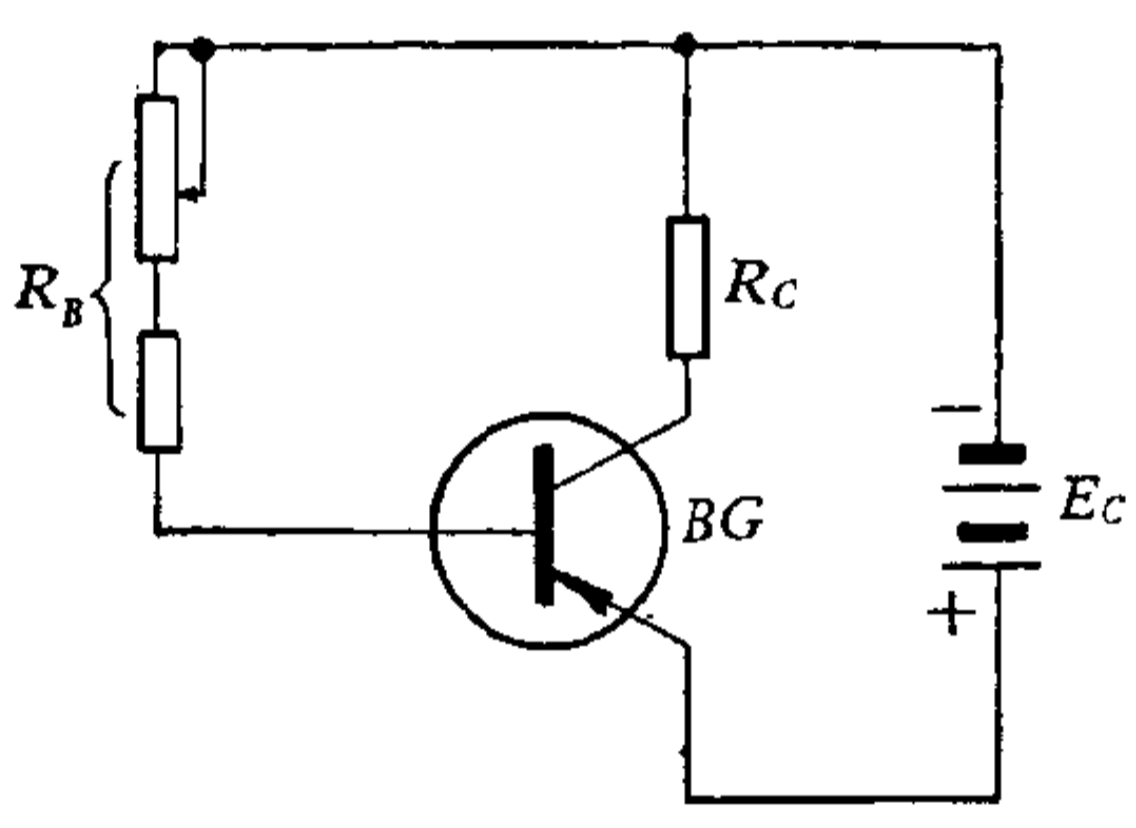


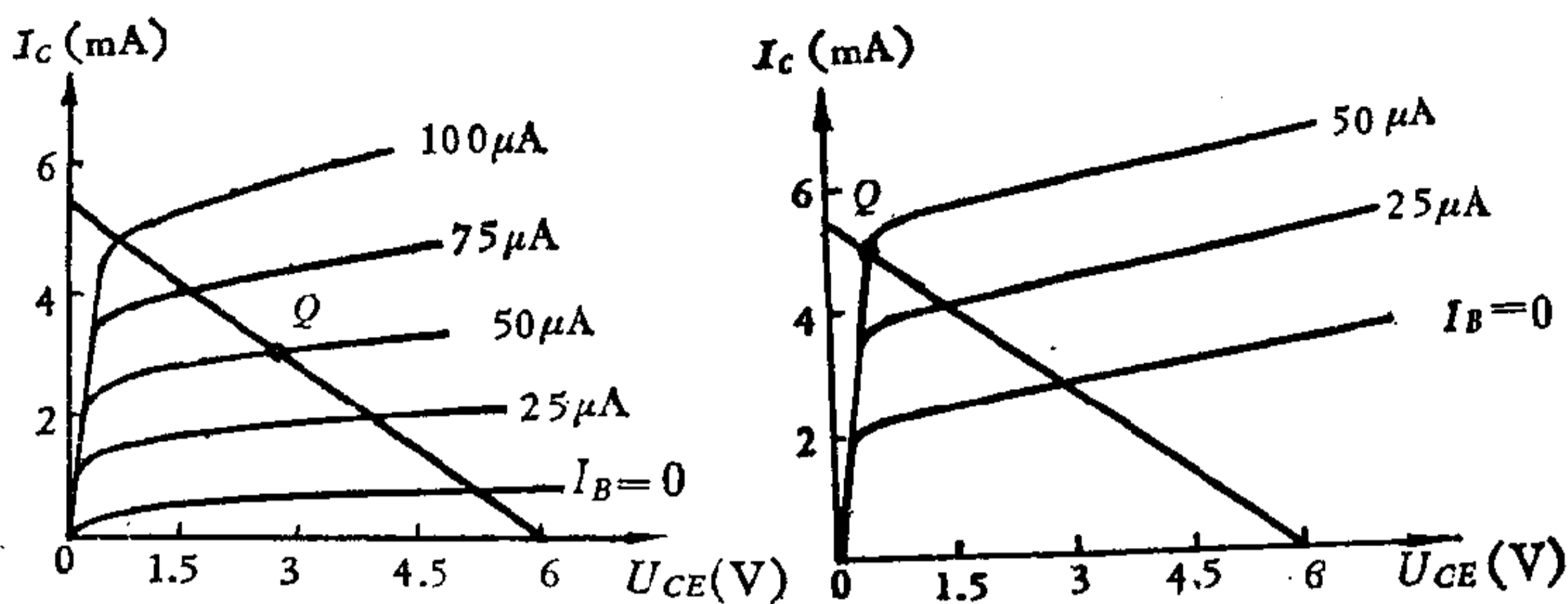
图 2-13

工作点,一般在计算好 R_B 后用一只固定电阻和一只电位器串联来代替,如图 2-13 所示。接固定电阻是为了防止在调整中不小心电位器变到零值时使偏流过大而烧坏管子。调整后仍可改接一只固定电阻。

固定偏置电路最大优点是线路简单,但这种电路有严重缺点,即当晶体管由于环境温度变化或其参数的变动使工作点产生偏移时,不能自动补偿。如图 2-14 所示。

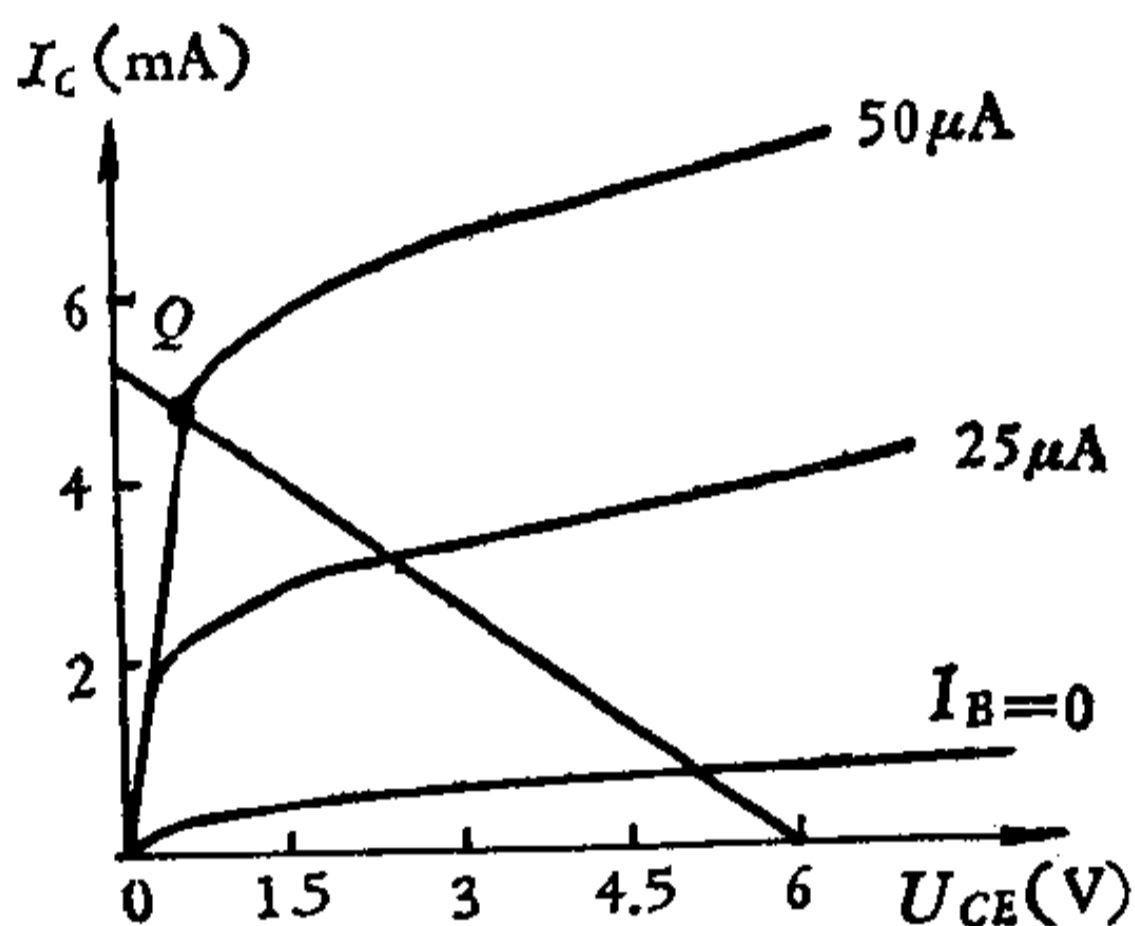
从图 2-14(2) 中可以看出:当温度升高时,相当于特性曲线上升,由于固定偏流法基极电流保持不变,将使工作点移到不合适的地位去。从图 2-14(3) 也可看出:当管子的 β 变大后,相当于特性曲线上升和间隔变宽,这时工作点也要移到不合适的地位去。

(2) 电压负反馈偏置电路



(1) 正常情况

(2) 温度升高后



(3) β 变大后

图 2-14

为了提高工作点的稳定性,减少由于温度变化,更换晶体管或晶体管本身参数变化而引起工作点的偏移,必须采取措施。最常用的是“负反馈”措施。

所谓“反馈”是指在输出中取出一部分反送给输入端。所谓“负反馈”是指反送的信号与输入信号相位相反,对输入信号起减弱作用。

图 2-15 就是用电压负反馈法供给晶体管偏流的电路。图中 R_B 跨接在基极和集电极之间,它不仅供给所需偏流,

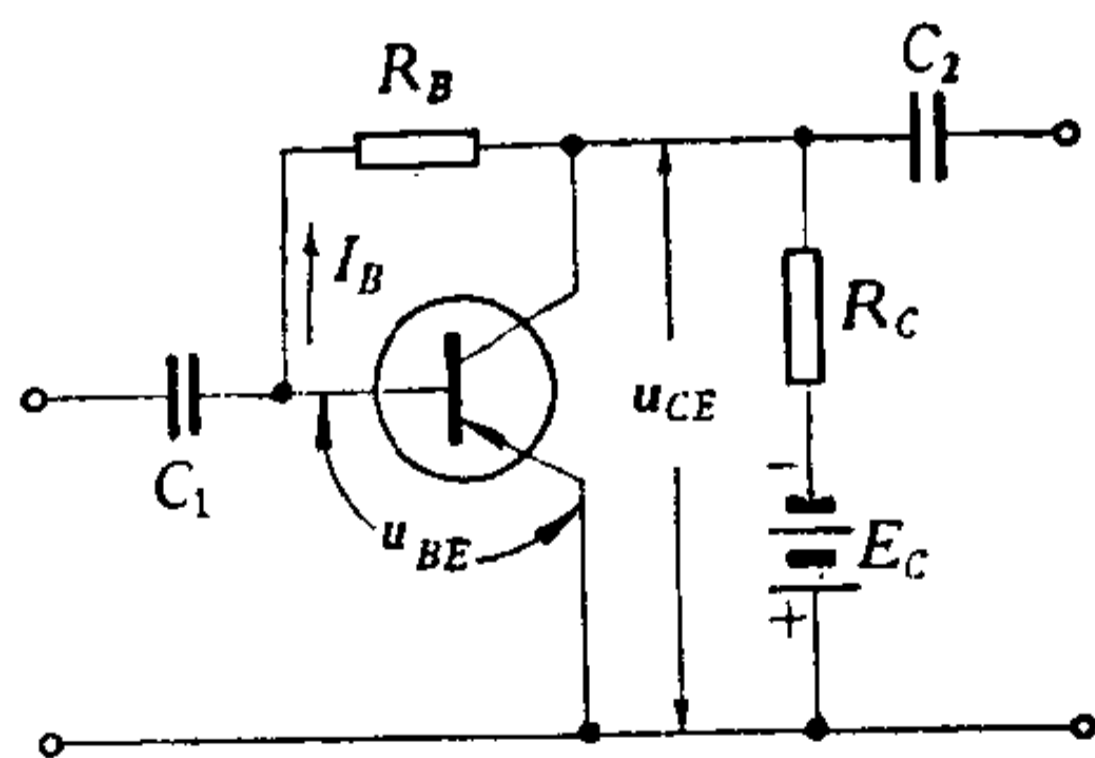


图 2-15 电压负反馈偏置电路

同时还有电压负反馈作用。假设 I_C 由于某种原因产生了变化,致使工作点偏离原来位置时,负反馈将会使工作点有回到原来位置的趋势。例如: I_C 增大,则电路将引起一系列变化而最终使 I_C 自动减小。其大致过程如下:

$$\begin{array}{c} I_C \uparrow \rightarrow U_{RC} \uparrow \rightarrow U_{CE} \downarrow \\ \downarrow I_C \leftarrow \downarrow I_B \leftarrow \downarrow U_{BE} \leftarrow \end{array}$$

↑表示增大 ↓表示减小* →表示引起

可见这种电路具有自动补偿的作用,所以它比固定偏置电路稳定。从电路中可见

$$I_B = \frac{U_{CE} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{U_{CE}}{R_B}$$

下面举例说明电压负反馈偏置电路的简单计算:

设 $E_C = 15$ 伏, $U_{CE} = 6$ 伏, $I_C = 3$ 毫安,管子 $\beta = 60$, 求 R_B 和 R_C 。

在集电极电路中: $E_C - U_{CE} = I_C R_C$

所以

$$R_C = \frac{E_C - U_{CE}}{I_C} = \frac{15 \text{ 伏} - 6 \text{ 伏}}{3 \text{ 毫安}} = 3 \text{ 千欧}$$

由于

$$I_B \simeq \frac{I_C}{\beta} = \frac{3 \text{ 毫安}}{60} = 0.05 \text{ 毫安}$$

因为

$$I_B = \frac{U_{CE}}{R_B}$$

所以

$$R_B = \frac{U_{CE}}{I_B} = \frac{6 \text{ 伏}}{0.05 \text{ 毫安}} = 120 \text{ 千欧}$$

虽然计算是完成了,但还必须到实践中去检验,在实践中对 R_B 须稍加调整才能完全符合要求。

* 本书用↑表示增大, ↓表示减小,都是对电压降及电流的绝对值变化而言。例如,在 p-n-p 管中, U_{CE} 从 -2 伏变化到 -3 伏,用 $U_{CE} \uparrow$ 表示。

这种电路也有一定的局限性,虽然 R_B 愈小,稳定性愈好,但电路的工作点 U_{CE} 和 I_C 一旦决定后, R_B 也随着被确定了,所以 R_B 的大小,不能单从稳定性来选取;另外当 R_C 较小时, I_C 的变化对 U_{CE} 的影响不大,尤其是负载为变压器时,反馈作用很小,达不到稳定的目的,于是人们又进行改进,电流负反馈电路就是一种改进。

(3) 分压式电流负反馈偏置电路

图 2-16 是分压式电流负反馈电路。基极偏流是由 R_1 和 R_2 分压供给,反馈电阻 R_E 串接在发射极电路中,它起稳定直流工作点的作用。当 I_C 发生改变时,经过一系列的变化,会阻止 I_C 的改变。其大致过程如下:

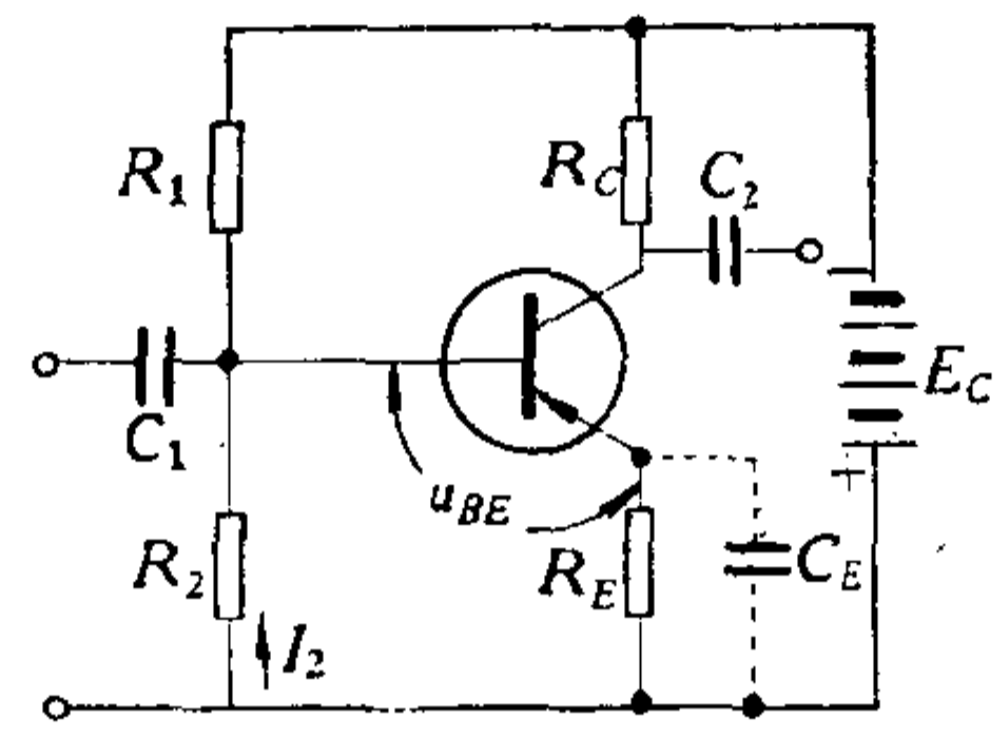


图 2-16 分压式电流负反馈偏置电路

$$\begin{array}{c}
 I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow I_E R_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \\
 \downarrow I_C \leftarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow I_B
 \end{array}$$

R_E 愈大,反馈愈大,稳定性好,但 R_E 愈大,损耗直流和交流能量愈大,所以 R_E 要根据需要合理选择。为了避免交流能量在 R_E 上损耗,常常在 R_E 二端并接一旁路电容 C_E ,使交流旁路。如图 2-16 中虚线所示。

分压式偏置电路使用的元件较多,电路是复杂一些,但是它具有良好的温度稳定性,只要我们将 R_1 、 R_2 、 R_E 几个电阻搭配好,就既可满足稳定性的要求,又可选择合适的工作点,因此是放大器中应用得较多的偏置电路。

前面我们对放大器的基本工作原理,静态工作点,偏置电路等都作了一些介绍。下面我们以分压式电流负反馈偏置电路为例,介绍一些简单的计算方法和原则,以便大家在装调放

大器时能够做到胸中有数。

(1) 晶体管：一般低频小信号放大器对管子的要求不高，普通的低频小功率晶体管都好用。大概说来：穿透电流 I_{CEO} 小，截止频率高，噪声小的管子较好。而管子的 β 只要能满足要求就行了。

(2) 电源电压 E_C 、 E_B ：为了方便，一般 E_B 和 E_C 都是共用一个电源 E_C 。在晶体管已选定的情况下电源电压 E_C 只要不超过管子的击穿电压就行了。电源电压太小，放大器工作范围较小，一般 E_C 多用 4.5 伏，6 伏，9 伏，12 伏，18 伏等，看实际可能来决定。

(3) 集电极 I_C ：在小信号放大器中 I_C 取得很小，通常在 0.5 毫安—5 毫安范围。原因是：集电极电流小些可以减少放大器功率损耗和噪声。如果 I_C 太小，管子的 β 将显著减少，降低了放大器的增益，这也是我们不希望的。 I_C 的最大值不能超过管子的最大允许电流 I_{CMO} 。

(4) 发射极反馈电阻 R_E ：经验证明， R_E 上的电压 U_{RE} 在 0.5—2 伏之间已能使放大器很稳定的工作。在 I_C 确定后， $R_E \approx \frac{U_{RE}}{I_C}$ 。一般在小电流时 R_E 约几百欧至几千欧范围（在大电流时，约几欧至几十欧，有时甚至仅零点几欧）。

(5) 分压电阻 R_1 、 R_2 ：由于基极电压是由 R_1 、 R_2 分压取得，这个电压受到 I_B 变化的影响会反过来影响工作点的稳定。 R_1 、 R_2 值愈小， I_B 变化对基极电压影响愈小，即稳定性好，但对交流输入信号的旁路作用大，所以 R_1 、 R_2 值也应当根据需要折中考虑。一般取 R_1 、 R_2 中流过的电流

$$I_2 = \frac{E_C}{R_1 + R_2}$$

I_2 通常取得比 I_B 大 10 至 20 倍， I_2 取得愈大，电路稳定

性愈好,不过 R_1, R_2 上的功率损耗也愈大。小信号放大器中一般 I_2 约几十微安至几百微安。在 I_2 决定后,可由下式算得 R_1, R_2

$$R_2 \approx \frac{I_C R_E}{I_2}$$

$$R_1 = \frac{E_C - R_2 I_2}{I_2}$$

(6) 集电极负载电阻 R_C : R_C 大, 则电压增益高, R_C 上的功率损耗越大。一般 R_C 在几百欧至十千欧范围内选择。

(7) 电容 C_1, C_2, C_E 的选择: 电容 C_1, C_2 和 C_E 都是通过交流信号的。但是大家知道, 对于不同的频率, 它们的容抗是不同的, 频率愈低, 容抗愈大, 电压降亦愈大。这样信号通过 C_1, C_2 的损失较大, 而信号在 C_E 上的压降增加以后, 由于负反馈的结果将使放大器增益降低。因此, C_E, C_1 和 C_2 都选得比较大。 C_E 常取几十至几百微法, C_1, C_2 常取几微法至几十微法。

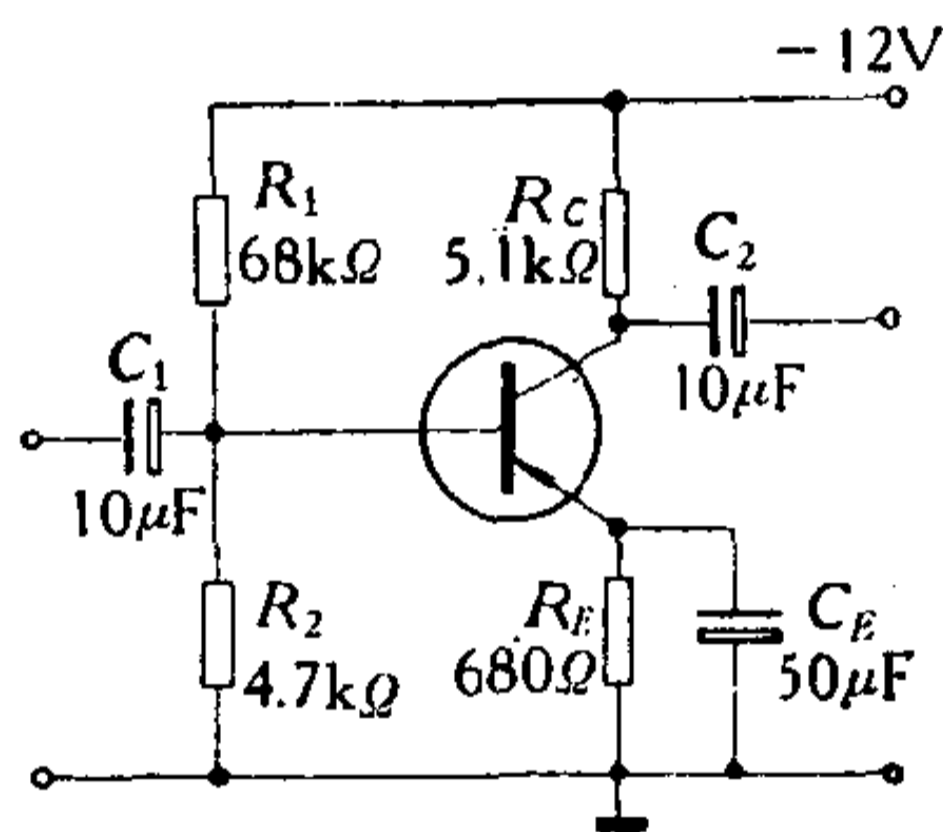


图 2-17

图 2-17 为小信号放大级, 电源电压为 12 伏, 设管子的 $\beta = 60$, 选定直流工作点 $I_C = 1$ 毫安, $U_{CE} = 6$ 伏。

1. 取 R_E 上压降为 0.7 伏, 则

$$R_E = \frac{0.7 \text{ 伏}}{1 \text{ 毫安}} = 700 \text{ 欧}$$

(取标称值 680 欧)

$$2. R_C = \frac{E_C - U_{EC} - U_E}{I_C} = \frac{12 \text{ 伏} - 6 \text{ 伏} - 0.7 \text{ 伏}}{1 \text{ 毫安}} = 5.3 \text{ 千欧}$$

(取标称值 5.1 千欧)

$$3. I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1 \text{ 毫安}}{60} = 16 \text{ 微安}$$

$$4. \text{取 } R_1, R_2 \text{ 上电流 } I_2 = \frac{12 \text{ 伏}}{R_1 + R_2} = 10I_B = 160 \text{ 微安}$$

$$\text{这时 } R_2 = \frac{I_C R_E}{I_2} = \frac{1 \text{ 毫安} \times 680 \text{ 欧}}{160 \text{ 微安}} = 4.2 \text{ 千欧}$$

(取标称值 4.7 千欧)

$$R_1 = \frac{E_C - R_2 I_2}{I_2} = 70 \text{ 千欧}$$

(取标称值 68 千欧)

5. C_E 取 50 微法, C_1, C_2 取 10 微法。

“真理的标准只能是社会的实践。”在实际应用时,只要适当的调节偏置电阻 R_1 即可获得合适的工作状态。由于在实际生产中所碰到的问题是千变万化的,对放大器的要求当然也就不一样。我们必须根据实际情况,通过反复的实践才能真正掌握它,应用它。

第二节 多级放大器

在实际应用中,有时放大器的输入功率很小,只有几个微瓦,而输出功率却需要几十瓦,单靠一级放大器显然是不行的。是不是可以将单级放大器连接起来,将信号一级一级地逐级进行放大呢?我们说这是完全可以的。这就是多级放大器。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。不解决桥或船的问题,过河就是一句空话。不解决方法问题,任务也只是瞎说一顿。”**用什么方法可以把放大器一级一级地连接起来组成多级放大器?这是我们在多级

放大器中需要首先解决的。

1. 耦合与匹配

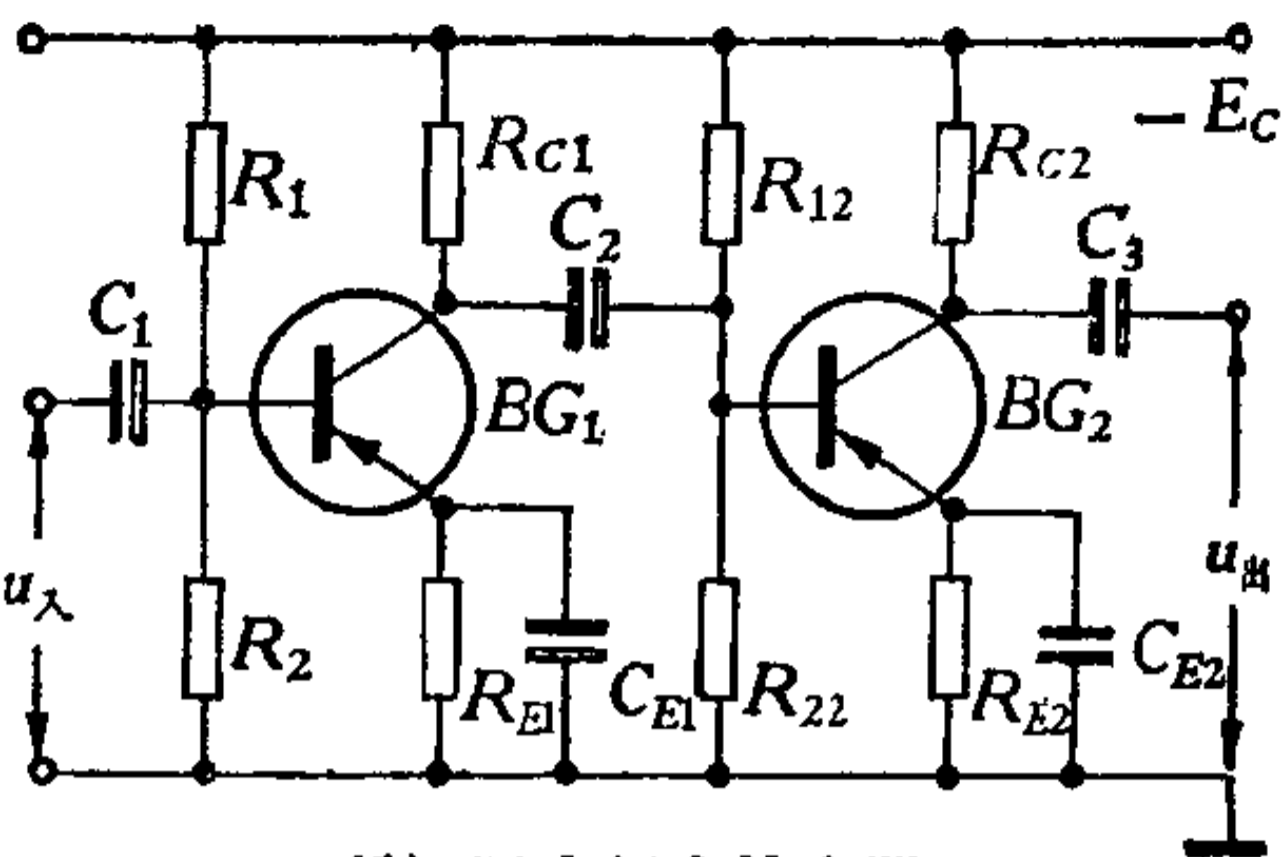
1) 耦合:

我们把放大器级与级之间的连接称之为耦合，耦合要解决的任务就是将信号从前级送到后级。常用的级间耦合方式有阻容耦合，变压器耦合与直接耦合等，如图 2-18 所示。

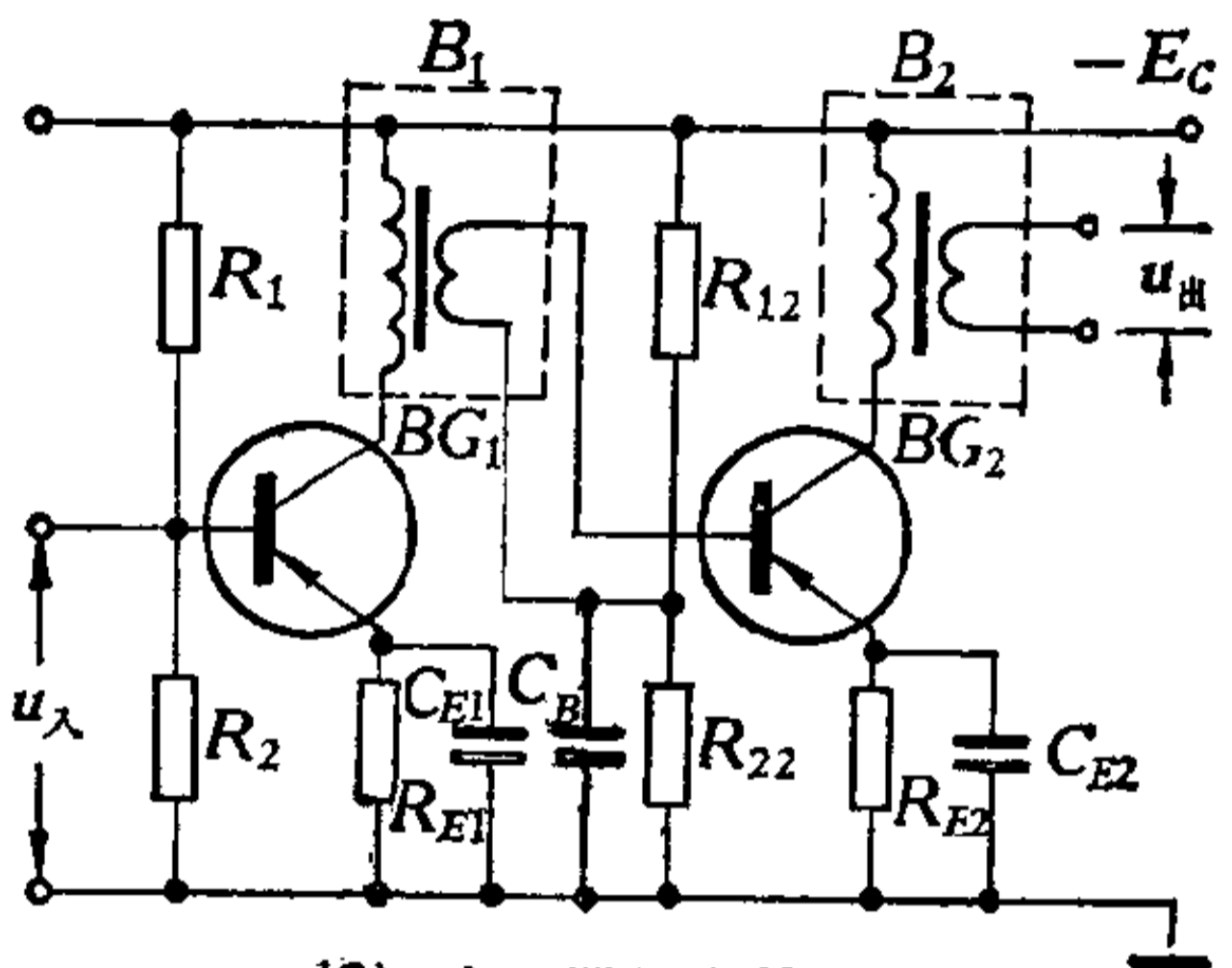
所谓阻容耦合就是用电阻、电容把前后二级连起来，如图2-18(1)所示，其中每一个单级放大器可用上节中任意一种方式建立直流工作点，图中是分压式电流负反馈偏置电路。

C_1, C_2, C_3 是耦合电容（也叫交连电容），其作用是让交流信号顺利地传给下一级，由于电容的隔直作用，所以

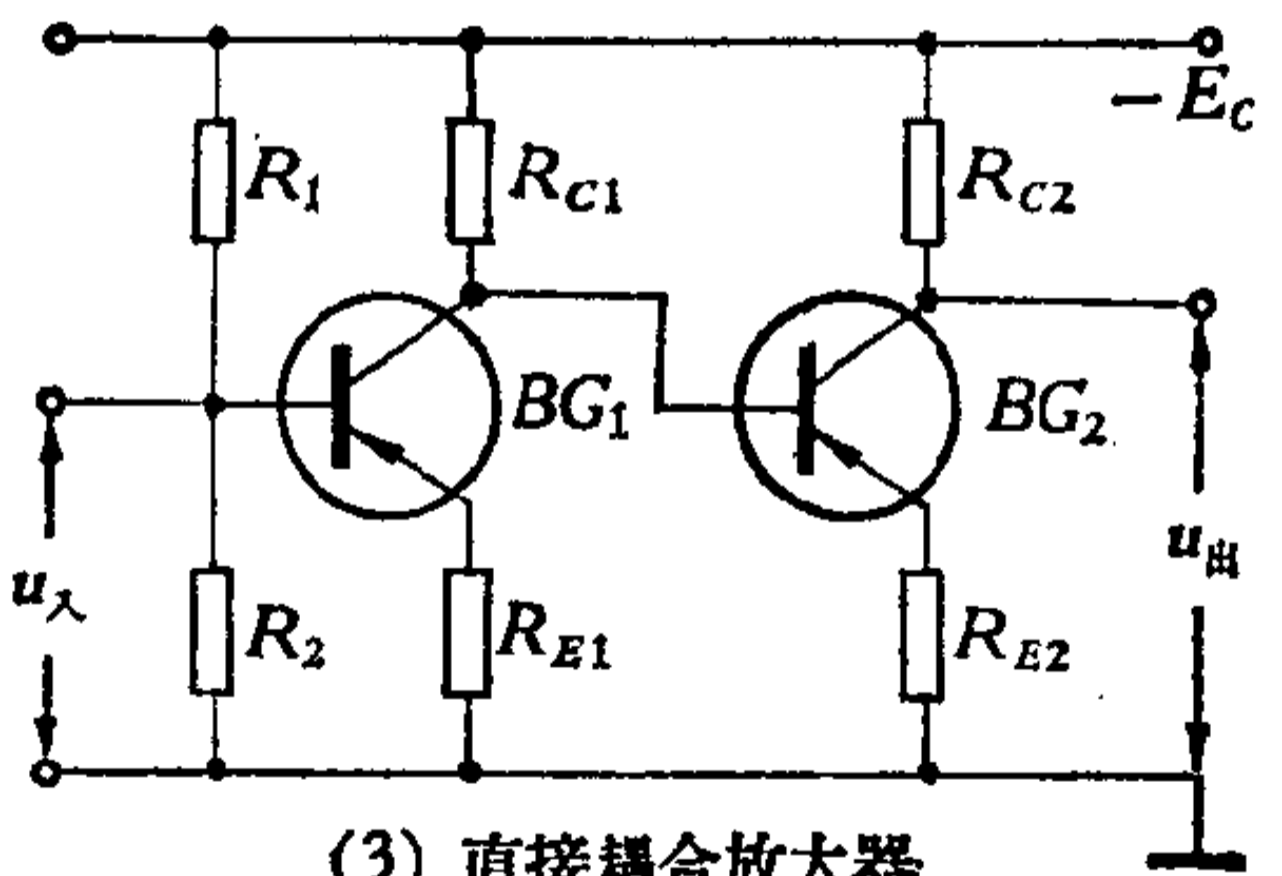
直流不能通过耦合电容，这样前一级的元件不影响后一级的直流工作状态，后一级的元件也不会影响前一级的直流工作状态，故各级直流工作点可以单独考虑。



(1) 阻容耦合放大器



(2) 变压器耦合放大器



(3) 直接耦合放大器

图 2-18

图 2-18(2) 所示为变压器耦合放大器。其前后级的连接是用变压器 B_1 和 B_2 来实现的。由于变压器也有隔直作用，各单级放大器直流工作状态没有相互影响，故各级直流工作点也可以单独考虑，图中是用分压式电流负反馈偏置电路。

图 2-18(3) 所示是直接耦合放大器，其前后级是直接连在一起的。由于这种直接连接没有隔直作用，前后级直流工作状态将相互影响，因而产生了一些特殊的问题，我们放在第四章直流放大器中来讨论。

2) 匹配:

把放大器一级一级地连接起来，除了考虑信号的传送之外，还必须考虑连接时前后级的相互影响。如果采用阻容耦合或变压器耦合，由于电容或变压器的隔直作用，前后级之间的直流工作状态是没有影响的，故只要考虑交流工作的影响就可以了。

大家知道：当我们在晶体管输入端加入一个交流电压 u_λ 时，在其输入端必然产生一个交流输入电流 i_λ ，这个现象同我们在一个阻抗上加一个交流电压 u_λ 而产生一个交流电流 i_λ 是完全一样的。因此，晶体管从它的输入端 B 、 E 来看（对交流而言），完全可以等效为一个阻抗 Z ，我们把这个等效阻抗称为晶体管的输入阻抗，记作 Z_λ 。在频率较低时，往往

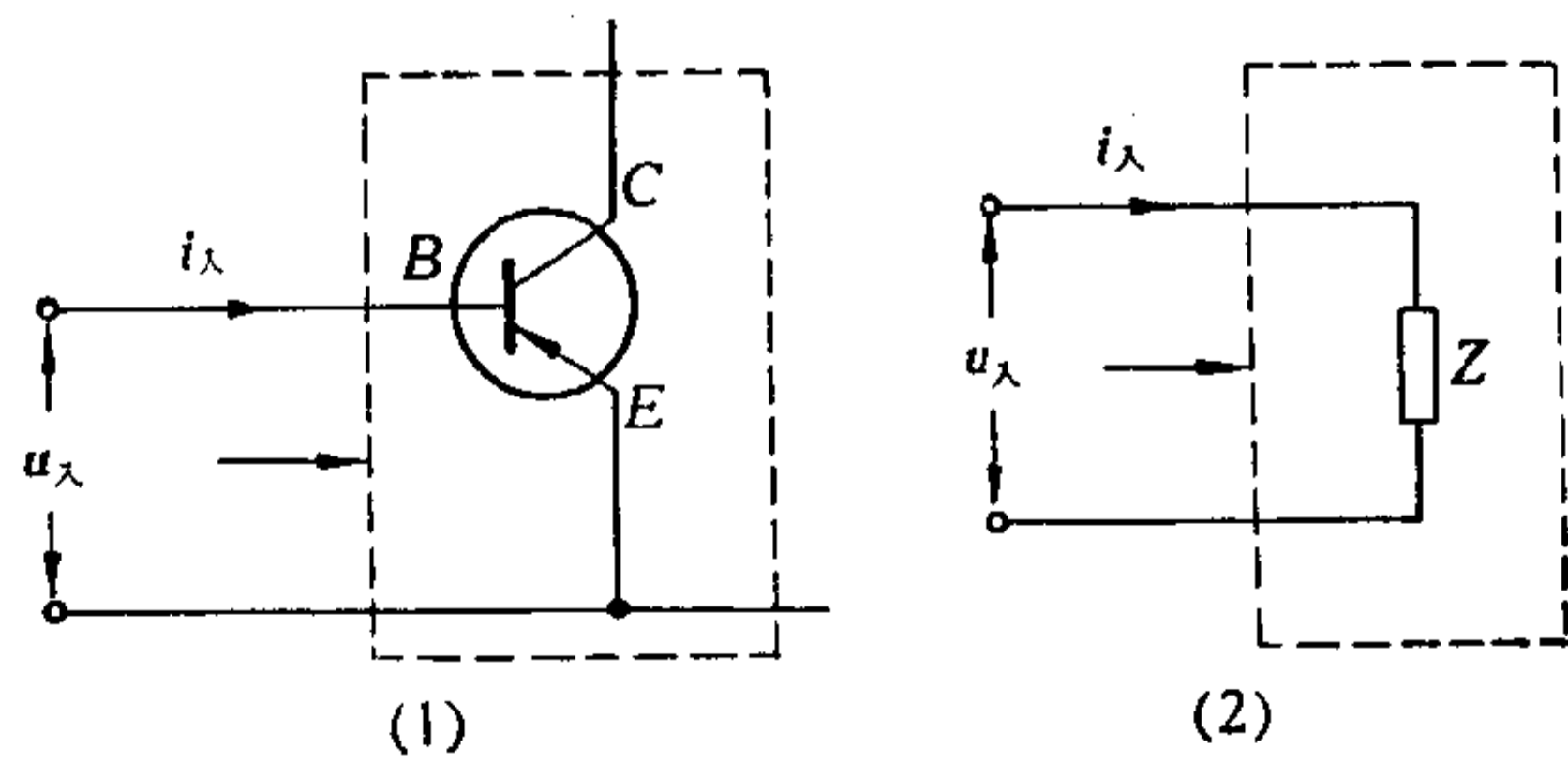


图 2-19

忽略其电抗部分,只考虑其电阻部分,这就是通常所谓的输入电阻 R_{λ} 。由于三极管基极与发射极之间的发射结是处于正向工作状态,因此这个电阻较小。锗 p-n-p 低频小功率管 R_{λ} 约 1 千欧左右,而锗低频大功率管 R_{λ} 约几十欧。同样从晶体管的输出端 E 、 C 两点看进去的交流阻抗,就称为晶体管的输出阻抗,记作 $Z_{\text{出}}$ 。其电阻部分常称为输出电阻 $R_{\text{出}}$ 。由于三极管集电极与发射极之间,除了有处于正向工作的发射结之外,还有处于反向工作的集电结,因此 $R_{\text{出}}$ 是较大的。对于锗 p-n-p 低频小功率管 $R_{\text{出}}$ 大于几十千欧,而锗大功率管 $R_{\text{出}}$ 大于几千欧。

对于一个晶体管放大器,在它的输入端若将晶体管部分等效为一个电阻 R_{λ} ,那么从图 2-20 可以看出这个放大器在输入端也只不过相当于一个电阻而已。我们把这个电阻 R_{λ} 称为放大器的输入电阻。

图 2-20(3) 是在 C_1 , C_E , E_C 对交流短路时,放大器输入端的等效电路。

由于 R_{λ} 较小,所以图 2-20(1) 所示放大器的输入电阻也是很小的。

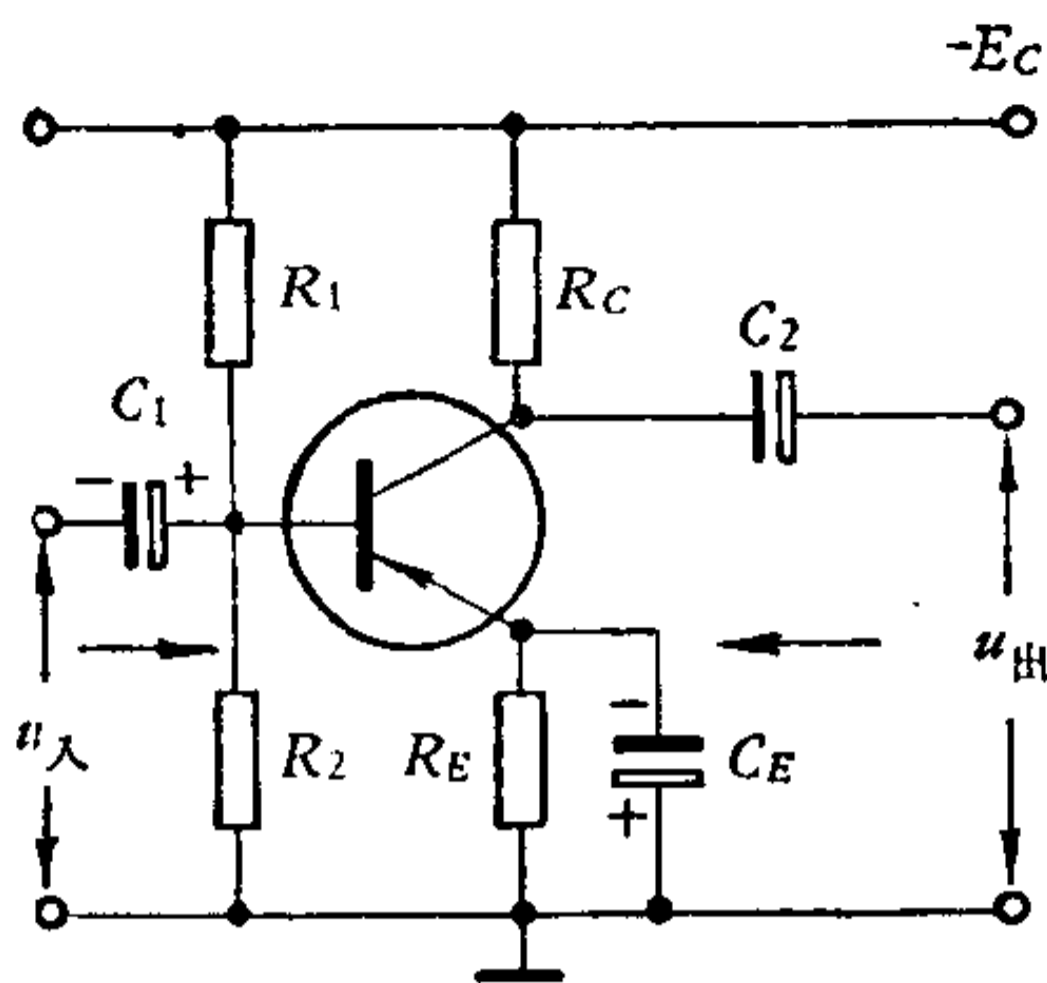
在放大器的输出端,除了晶体管的输出电阻 $R_{\text{出}}$ 以外,还有一个被放大了的交流信号 $u_{\text{出}}$,所以晶体管放大器在输出端就相当于图 2-20(4) 所示的电路。

在知道了放大器的输出与输入端的等效电路之后,我们就可以画出放大器的级间耦合等效电路,如图 2-21 所示。

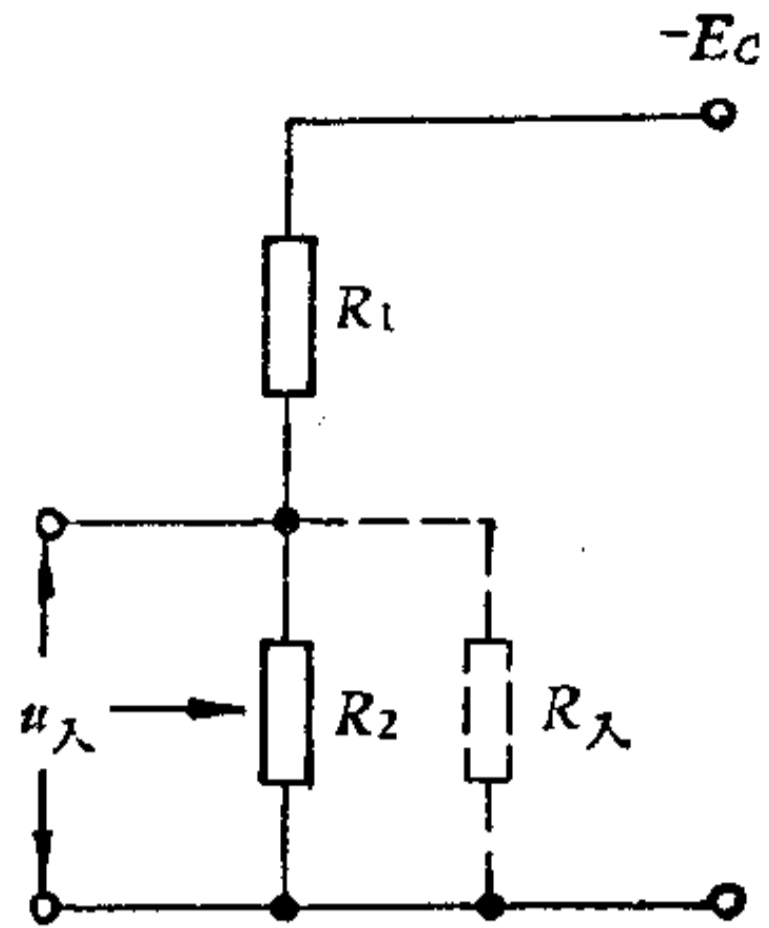
其中 $R_{\text{出}1}$ 是前级放大器的输出电阻, $R_{\lambda 2}$ 是后级放大器的输入电阻, $u_{\text{出}1}$ 是前级放大器的输出交流信号电压。

现在我们先用一个实际的例子来说明这种电路的功率传输问题。假设 $u_{\text{出}1} = 5$ 伏, $R_{\text{出}1} = 50$ 千欧,

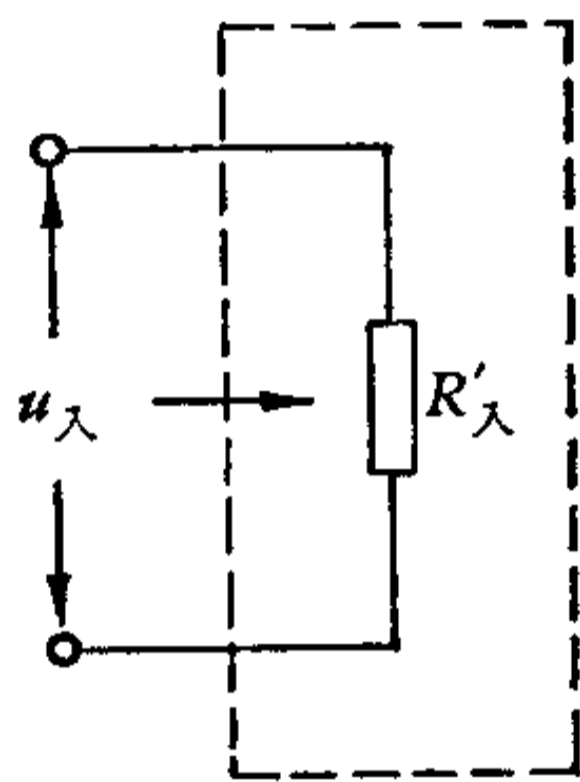
$R_{\lambda 2} = 1$ 千欧时, $R_{\lambda 2}$ 上获得的功率为:



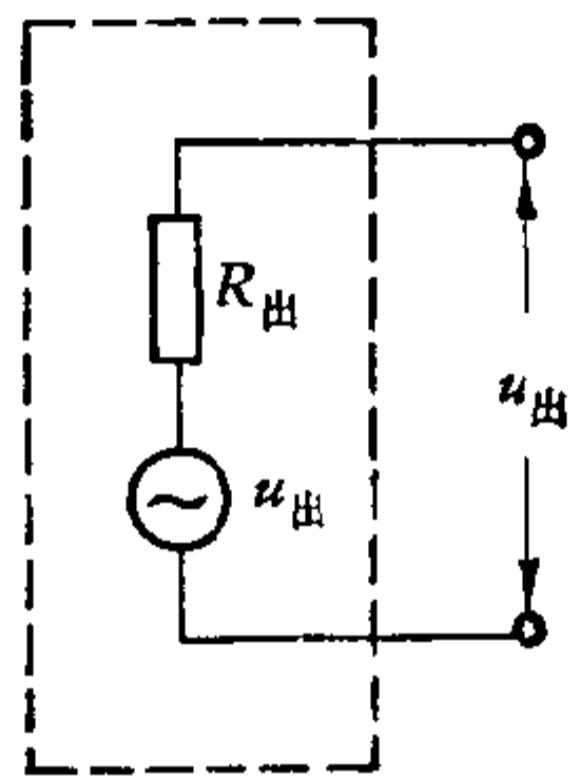
(1) 分压式偏置放大器



(2) 在 C_1, C_E, C_C 对交流短路时的等效电路



(3)



(4)

$$R'_{\text{入}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{\text{入}}}}$$

图 2-20

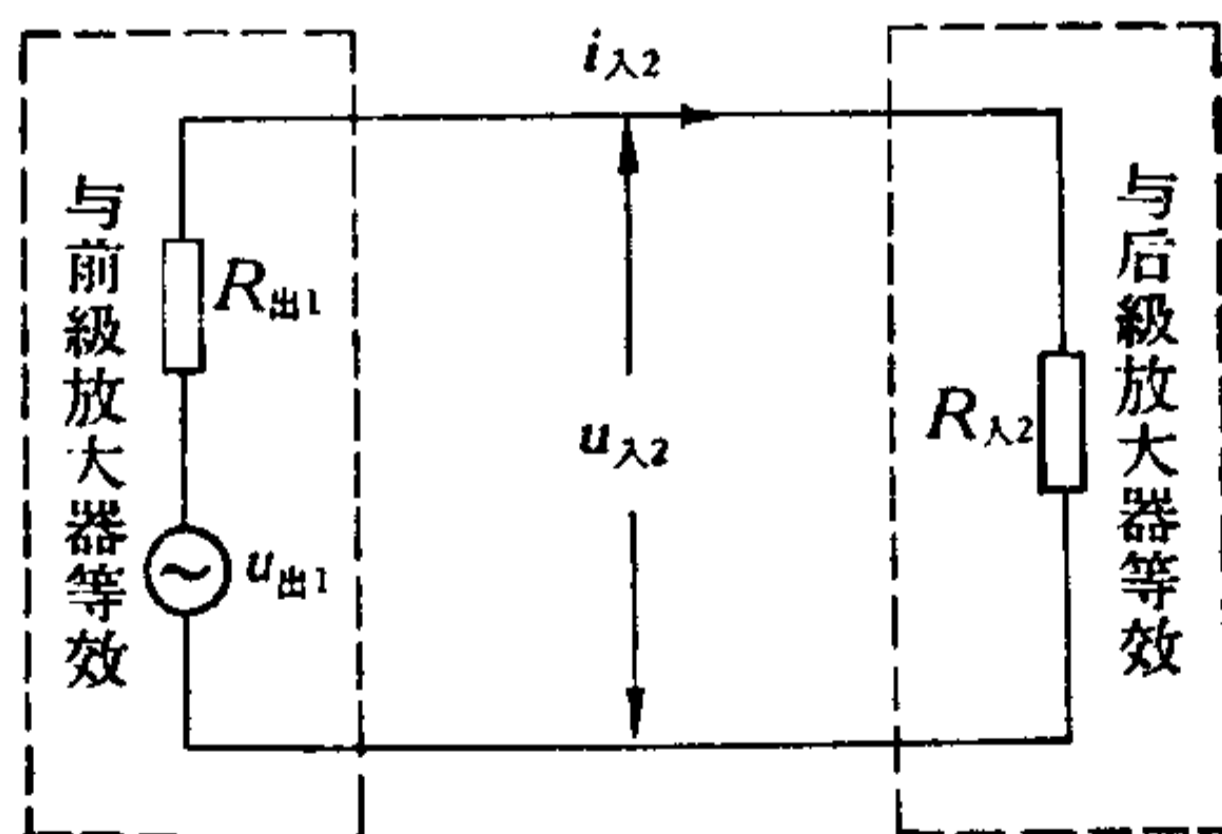


图 2-21

$$P_R = \left(\frac{u_{\text{出1}}}{R_{\text{出1}} + R_{\lambda 2}} \right)^2 R_{\lambda 2}$$

$$= \left(\frac{5 \text{ 伏}}{50 \text{ 千欧} + 1 \text{ 千欧}} \right)^2 \times 1 \text{ 千欧} \approx 0.01 \text{ 毫瓦}$$

在 $R_{\lambda 2} = 50 \text{ 千欧}$ 时, $R_{\lambda 2}$ 上获得的功率为:

$$P_R = \left(\frac{5 \text{ 伏}}{50 \text{ 千欧} + 50 \text{ 千欧}} \right)^2 \times 50 \text{ 千欧} \approx 0.125 \text{ 毫瓦}。$$

在 $R_{\lambda 2} = 500 \text{ 千欧}$ 时, $R_{\lambda 2}$ 上获得的功率为:

$$P_R = \left(\frac{5 \text{ 伏}}{50 \text{ 千欧} + 500 \text{ 千欧}} \right)^2 \times 500 \text{ 千欧} \approx 0.041 \text{ 毫瓦}。$$

由此可见,后级的输入阻抗无论是很大,或是很小,由前级送至后级的信号功率都较小。只有当后级输入阻抗同前级输出阻抗相等时,后级将获得最大的信号功率,我们称这种情况为“阻抗匹配”。

“阻抗匹配”是一个多级放大器中常常要考虑的问题。

2. 多级阻容耦合放大器

前面我们谈过,在阻容耦合放大器中,由于耦合电容的隔直作用,前后级之间的直流工作状态没有相互影响,而交流工作时后级放大器只不过相当于一只电阻 R_{λ} 。这样一来,多级放大器的每一个单级就可以单独考虑了,图 2-22 就是一个这样的放大器。

在交流时我们可以认为 C_E, C_1, C_2, E_C 是完全短路的,这时图 2-22 的电路就等效为图 2-23 的电路。

对于图 2-23 的电路,我们很容易求出它的电流放大倍数 K_i :

$$K_i = \frac{i_{\text{出}}}{i_{\lambda}}$$

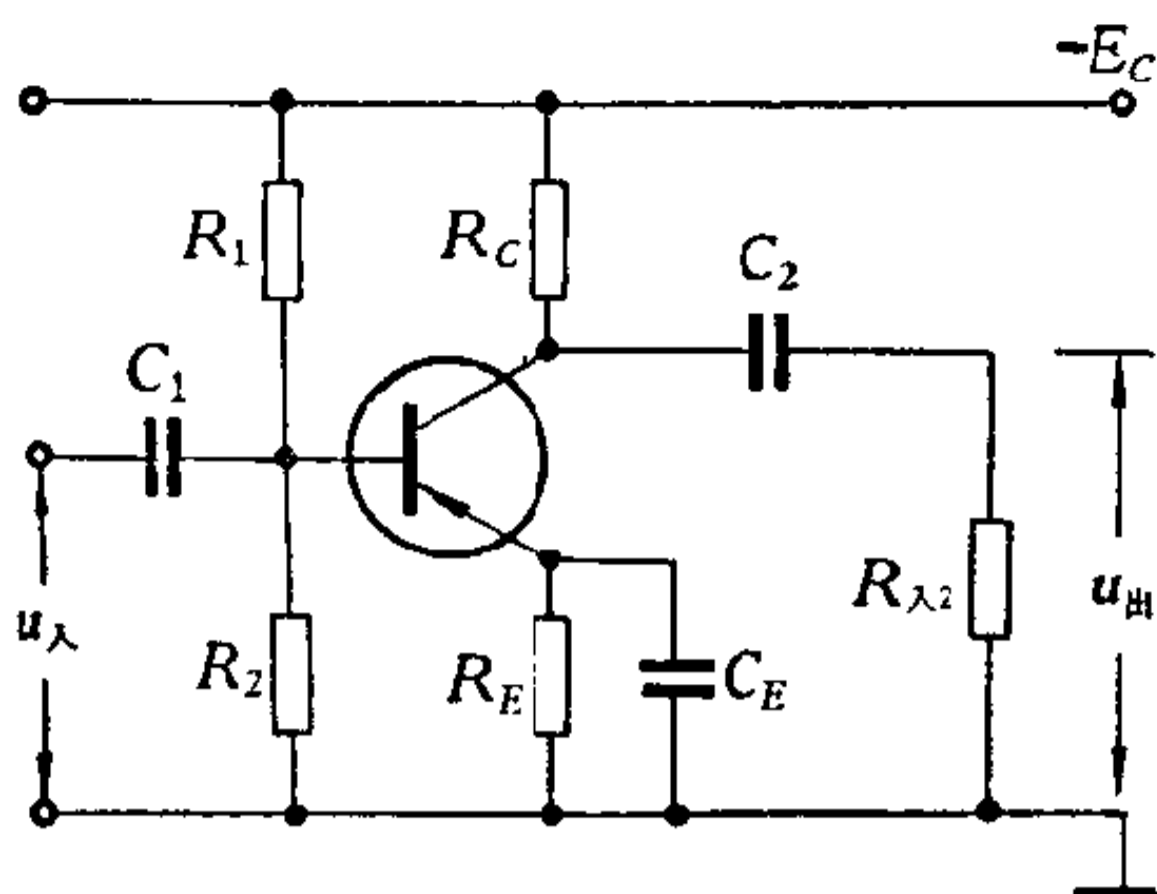


图 2-22

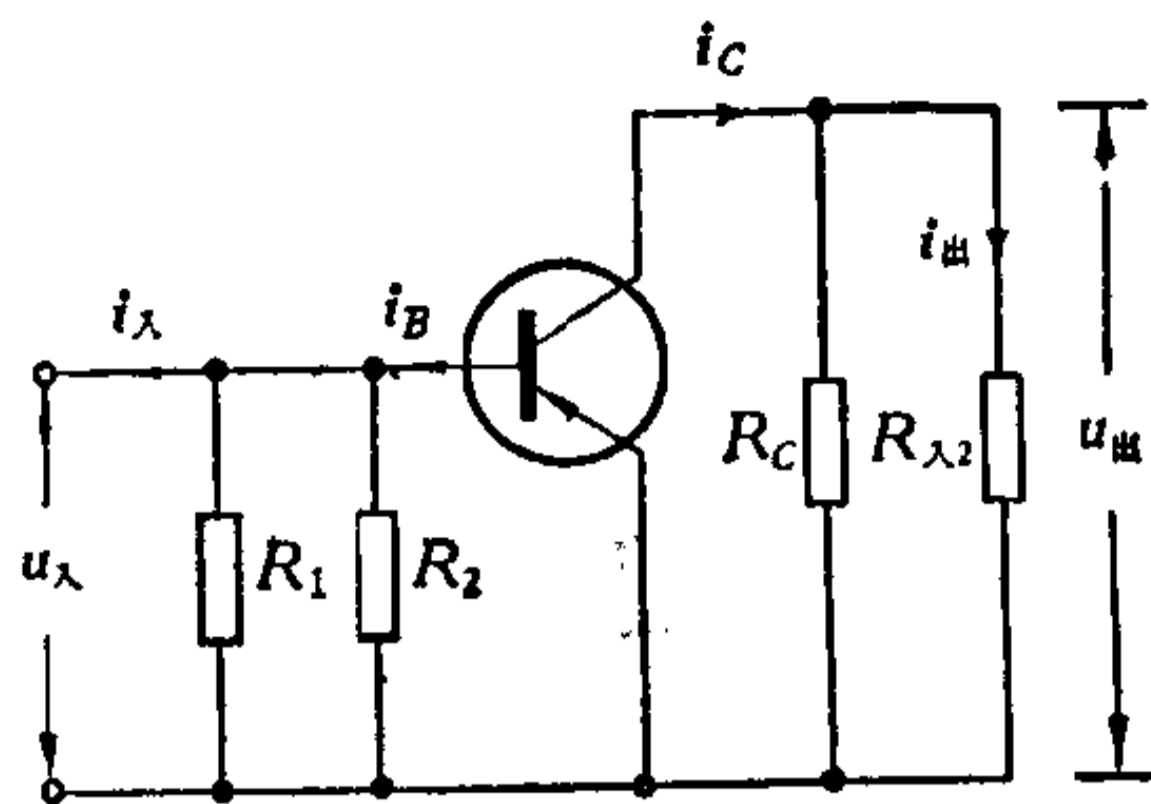


图 2-23

因为

$$i_{\text{出}} = i_C \frac{R_C}{R_C + R_{\lambda 2}} = \beta_1 i_B \frac{R_C}{R_C + R_{\lambda 2}}$$

(β_1 是本级晶体管电流放大系数)

$$i_B = i_{\lambda} \frac{R'}{R' + R_{\lambda 1}}$$

$$\left(R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, R_{\lambda 1} \text{ 是本级晶体管输入电阻} \right)$$

所以

$$K_i = \beta_1 \frac{R'}{R' + R_{\lambda 1}} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_{\lambda 2}}$$

在晶体管输入电阻 R_{λ} 较 R' 和 R_C 小得多时, 上式可简化成 $K_i = \beta_1$

而电压放大倍数

$$K_u = \frac{u_{\text{出}}}{u_{\lambda}} = \frac{i_C \cdot \frac{R_C R_{\lambda 2}}{R_C + R_{\lambda 2}}}{i_{\lambda} \cdot \frac{R' R_{\lambda 1}}{R' + R_{\lambda 1}}}$$

$$\therefore i_C = \beta_1 i_B = \beta_1 i_{\lambda} \frac{R'}{R' + R_{\lambda 1}}$$

$$\therefore K_u = \beta_1 \frac{R'_C}{R_{\lambda 1}} \left(R'_C = \frac{R_C R_{\lambda 2}}{R_C + R_{\lambda 2}} \right)$$

式中 R'_C 是 R_C 和 R_{λ_2} 的并联电阻, 我们称 R'_C 为放大器的交流负载。大家知道 R_C 是放大器的直流负载, 由此可见放大器的交直流负载是不一样的。

对于多级放大器的 K_i 和 K_u 只要将各单级的 K_i 和 K_u 乘起来就是了。

在这里还必须指出的是, 我们要放大的交流信号一般不是一个单一的频率, 而是一个频率范围。理想的放大器应对所有频率具有一样大小的放大倍数, 但实际上是不可能的, 放大器只能在一定的频率范围内运用。如某放大器的频率范围是 200 周至 5 千周, 即指 200 周和 5 千周处的放大倍数仅仅是中间频率处放大倍数的 0.7 倍。我们把放大倍数与频率的关系画成曲线, 如图 2-24 所示。我们常把这条曲线称为放大器的频率特性, 这个 200 周到 5 千周的频率范围有时也称为放大器的通频带。

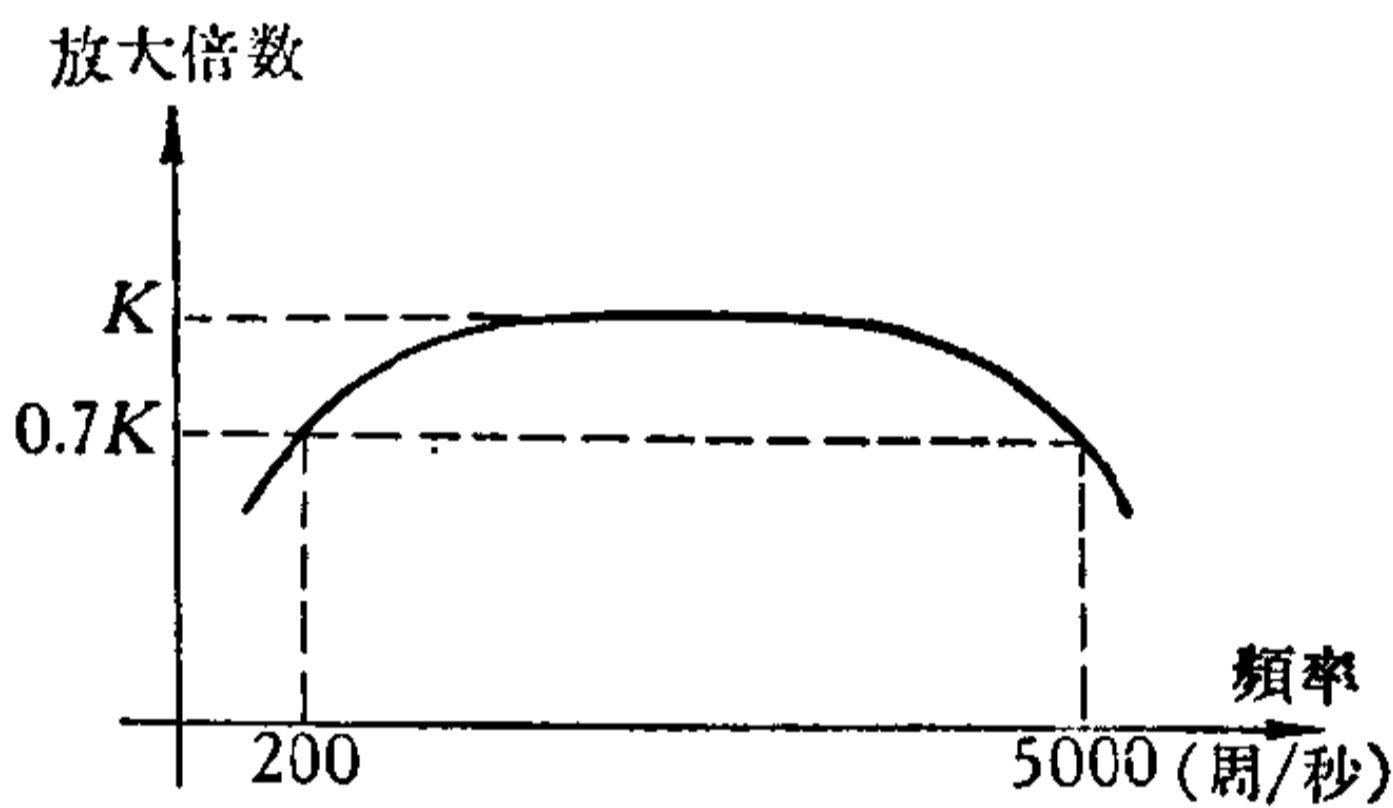


图 2-24

阻容耦合放大器
结构简单, 制作方便, 有较宽的通频带, 因而它的应用是很广泛的。不过由于前后级输入, 输出阻抗相差很大, 不能很好“匹配”, 故放大器的效率较低。

图 2-25 是一只电机轴承侦听器。它是由二级阻容耦合放大器组成, 输入装置是用一根传输杆接触正在运转的电机轴承的端盖, 轴承的振动通过传输杆传给了耳塞机的膜片, 从而产生低频信号。

由于振动频率较低, 耦合电容采用 $20\mu F$, 低频信号通过二级放大后, 在另一个耳塞机 (它为第二级的负载) 中得到一

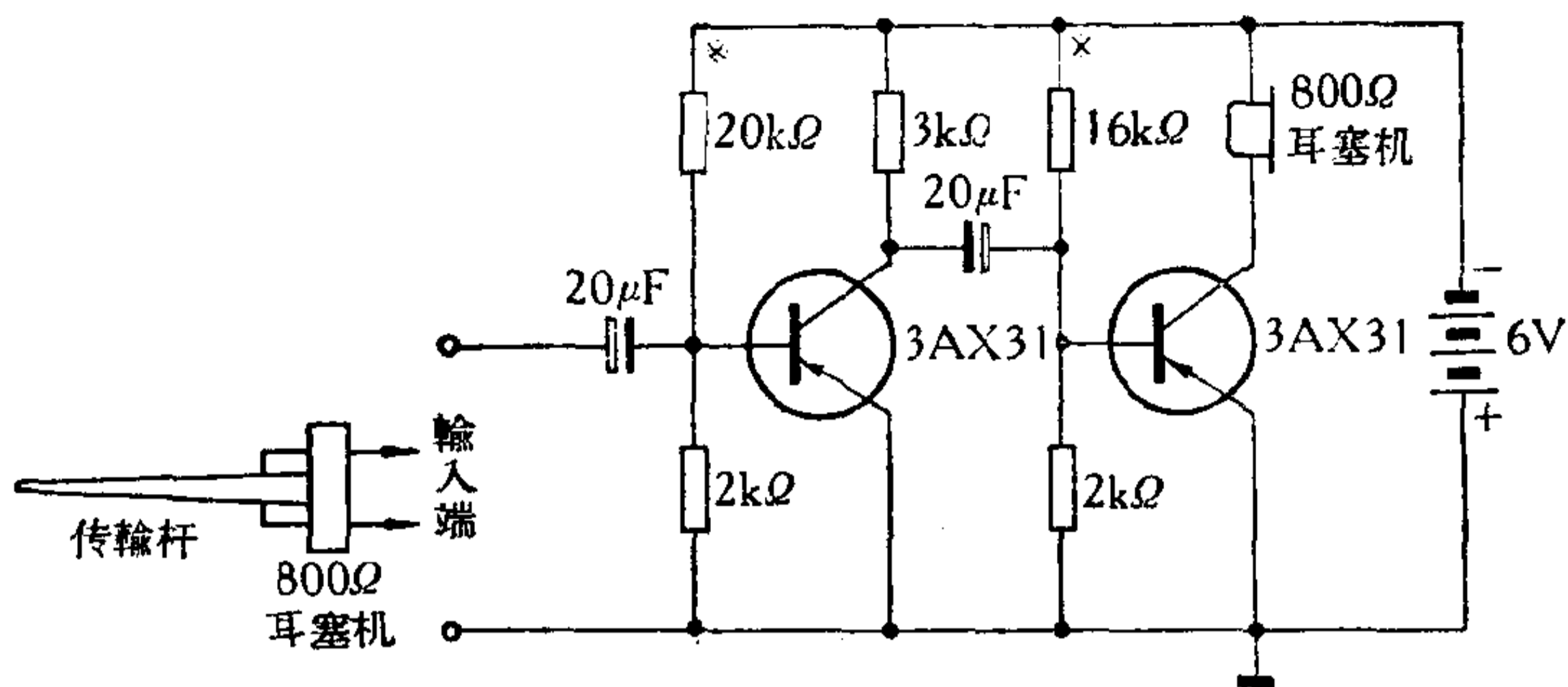


图 2-25 电机轴承侦听器

个放大的低频信号,根据声音的大小和有无规律,可以判断电机运转是否正常。

3. 变压器耦合放大器

从前面的讨论可知,阻容耦合放大器的主要缺点是级间阻抗不匹配,致使放大器效率不高,而变压器耦合可以达到较好的匹配,效率大大提高。

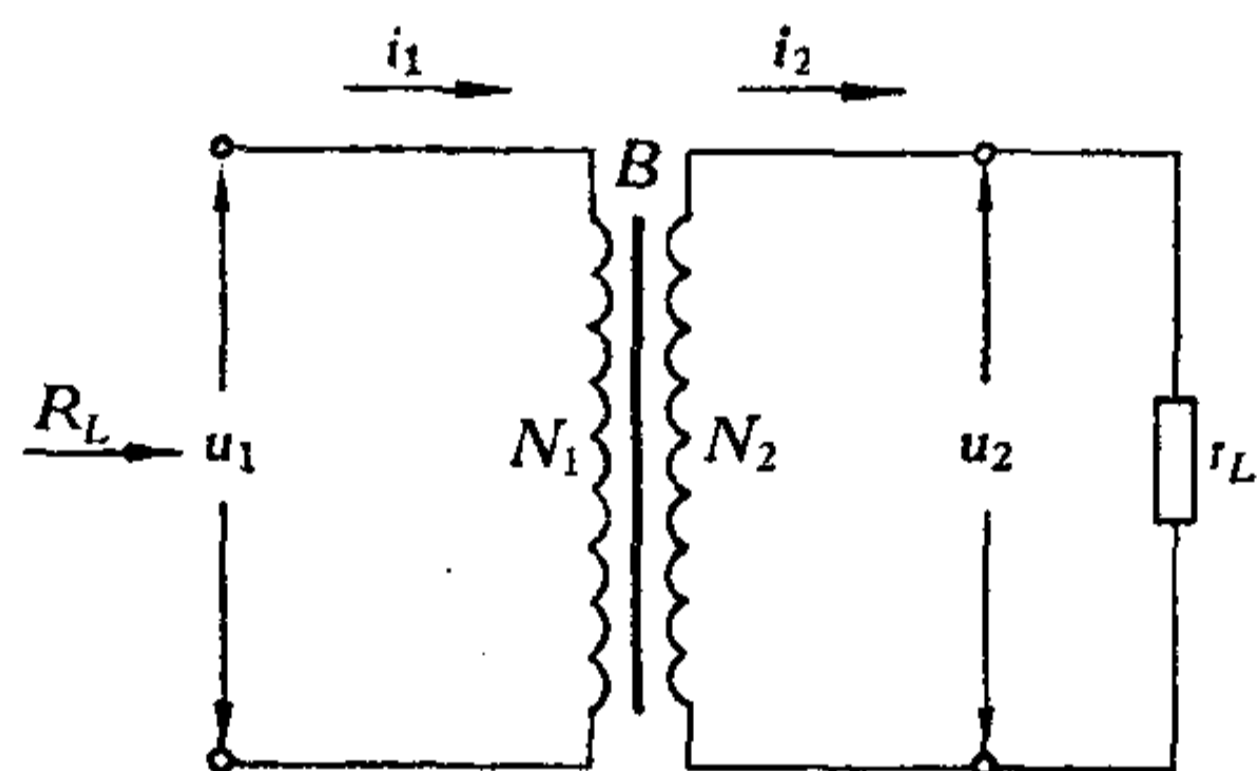


图 2-26

变压器不但可以变换交流信号的电压和电流,而且可以变换阻抗。图 2-26 就是次级接有负载的变压器,根据变压器两边功率相等的关系可得出

$$I_1 U_1 = I_2 U_2$$

若用 $n = \frac{N_1}{N_2}$ 代表初次级线圈匝数比,从初级两端看进去的阻抗为 $R_L = \frac{U_1}{I_1}$ 。

变压器初次级电压电流关系为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = n$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n}$$

则

$$\frac{R_L}{r_L} = \frac{U_1/I_1}{U_2/I_2} = \frac{U_1/U_2}{I_1/I_2} = n^2$$

即

$$R_L = n^2 r_L$$

从上式可知,当 r_L 是固定的数值时,只要改变匝数比就可以改变 R_L 。

图 2-27 是一个变压器耦合放大器,输入信号经第一级放大后,通过变压器 B_1 传送到第二级去, B_1 的次级绕组一端接 BG_2 基极,另一端通过电容 C_2 和 C_E 加到 BG_2 的发射极。这里第二级的输入阻抗 $R_{\lambda 2}$ 就是上面的 r_L ,一般为 1 千欧左右,而第一级的输出阻抗约几十千欧,只要我们适当选取变压器的匝数比 n ,就可使 r_L 反映到变压器初级的阻抗 R_L 与第一级输出阻抗接近。举例来说,若第一级的输出阻抗 $R_{\text{出}1} = 30$ 千欧,第二级的输入阻抗 $R_{\lambda 2} = 1$ 千欧,则阻抗匹配的匝数比 n 为:

$$n = \sqrt{\frac{R_{\text{出}1}}{R_{\lambda 2}}} = \sqrt{\frac{30}{1}} = 5.5$$

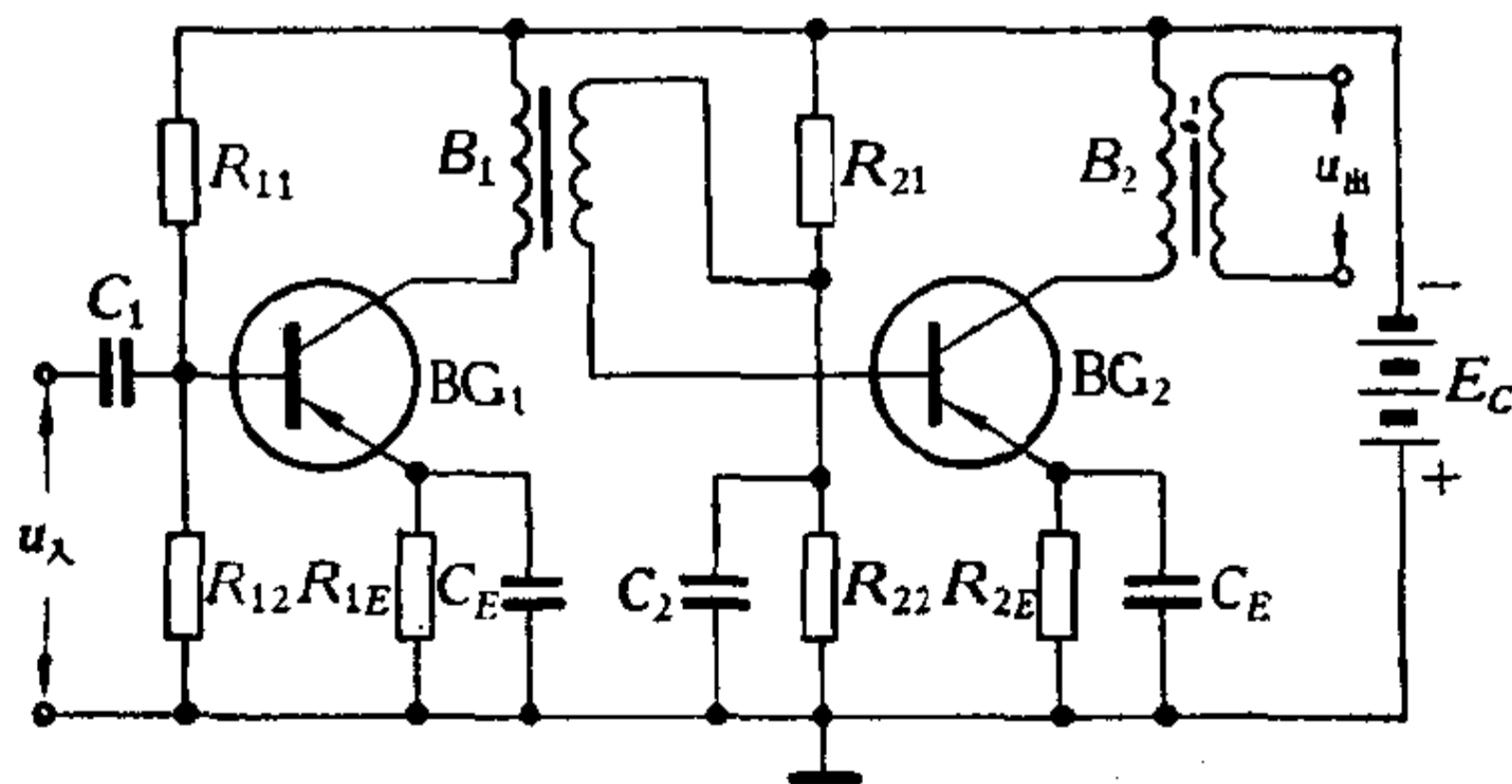


图 2-27 变压器耦合放大器

在实际绕制变压器时，往往把计算得到的匝比减小一些（例如在上例中可减小到 $n = 3$ ），这样虽然电路不是工作在完全匹配的状态，但可以使放大器失真减小。

由于变压器耦合放大器可以获得较高的效率，尤其适合于在大信号下工作的功率放大器或功率放大器的前一级中使用。不过因为使用了变压器，同阻容耦合放大器比较电路要复杂些，成本也要高些。

第三节 功率放大器

微弱的信号经过放大器放大之后，一般总是用来控制某种执行机构，如图 2-28 所示。图中放大器由二部分组成，小信号放大器（前置放大器）和功率放大器（大信号放大器）。小信号放大器的任务是将微弱信号放大，推动功放级工作，因此要求有较大的增益；功率放大器的任务是供给负载需要的功率，控制负载工作，而负载要求的功率一般比较大，这样功率放大器不仅要有大的信号电压输出，而且要有大的电流输出，也就是说要有大的功率输出。

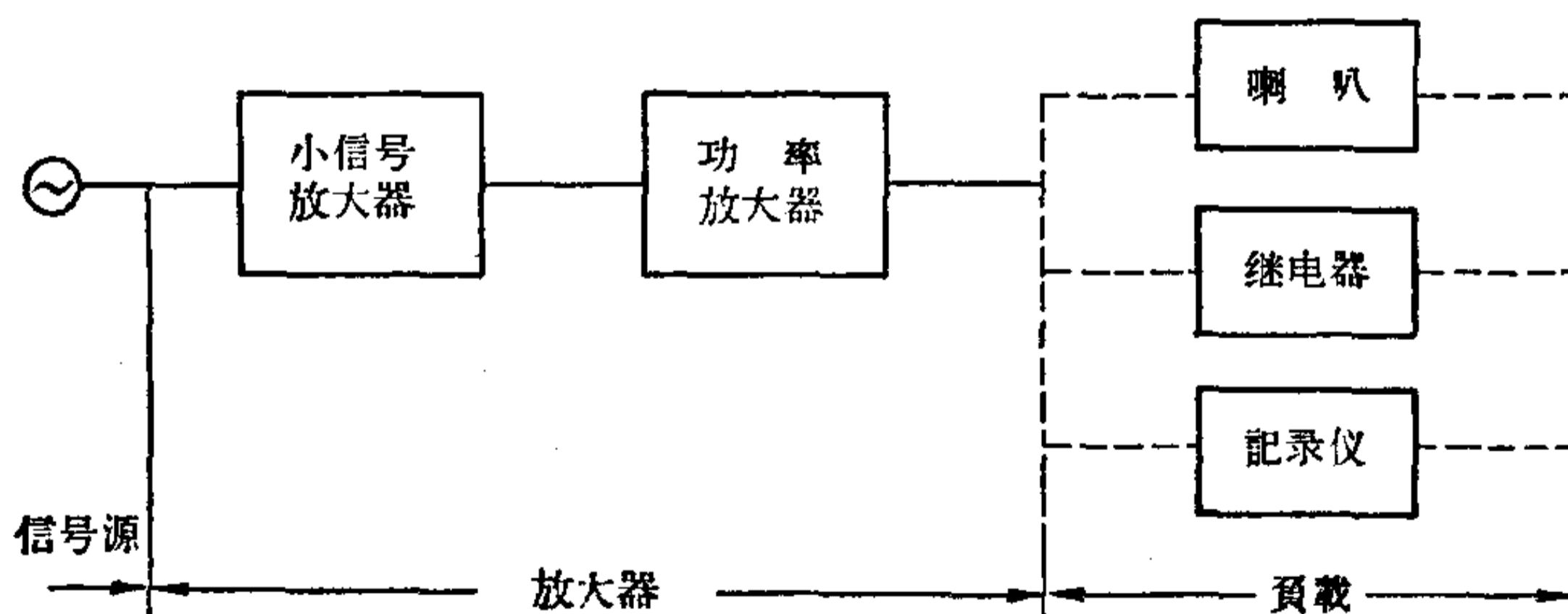


图 2-28

功率放大器主要任务是要求有大的功率输出，所以它和小信号放大器的电路形式和工作状态都不相同。功率放大器

与小信号放大器比较有如下特点:

1) 功率放大器中,晶体管工作的电压和电流变化幅度都很大,接近管子极限运用状态。图 2-29 画出了晶体管的输出特性曲线和管子的极限工作区域,管子的极限工作区域由晶体管三个参数决定: 即 U_{CM} , I_{CM} , P_{CM} 。

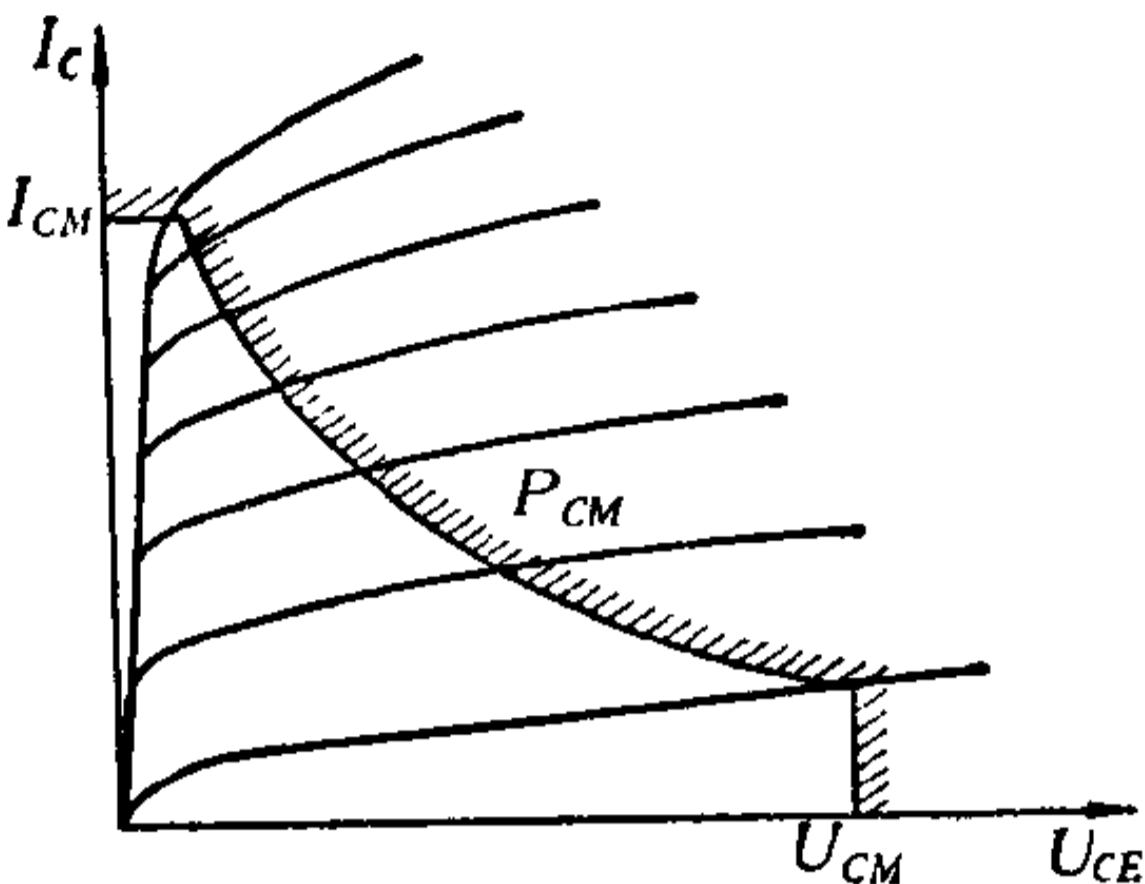


图 2-29

① 最大集电极电压 U_{CM} (伏), 决定 U_{CM} 因素很多, 定义见附录。使用时, 加在集电极与发射极之间的电压不能超过 U_{CM} , 因此也就限制了功率放大器电压幅度。图 2-29 中过 U_{CM} 作垂直线表示 U_{CM} 的极限区。

② 最大集电极电流 I_{CM} (安或毫安), 定义见附录。图 2-29 中, 过 I_{CM} 作水平线表示 I_{CM} 的极限区。

③ 最大集电极耗散功率 P_{CM} (瓦或毫瓦), 集电极耗散功率为集电极流过的电流 i_c 与管子的压降 u_{CE} 相乘积, $P_c = i_c \cdot u_{CE}$, 管子的耗散功率使管子的温度上升, 因此管子的耗散功率有一定的定额, 叫做最大集电极耗散功率 P_{CM} , 运用时超过它, 管子就会烧坏。功率放大器中, 工作时集电极的耗散功率应小于 P_{CM} , 小信号放大器中由于工作的电流和电压都不大, 因此工作时集电极耗散功率远远低于 P_{CM} , 这样小信号放大器中晶体管没有被充分利用。

2) 电路应具有较高的效率: 功率放大器中, 为了得到较高的电能利用率和减轻管子负担, 应用时还要考虑到电路具有较高的效率, 功率放大器的效率是:

$$\text{效率}(\eta) = \frac{\text{负载上交流输出功率}}{\text{集电极回路直流输入功率}}$$

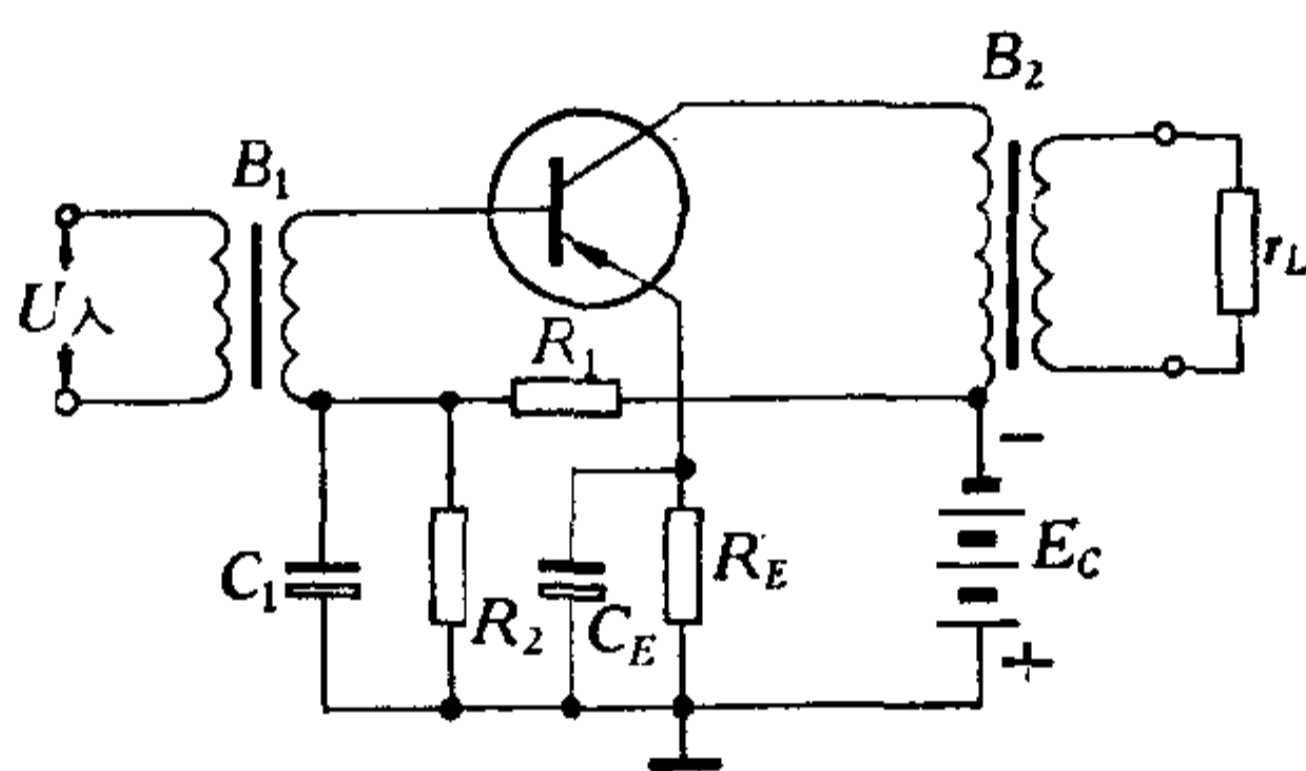
功率放大器中采用不同工作状态的电路，其效率各不相同，而小信号放大器中一般不考虑效率。

3) 采用变压器作阻抗变换，功率放大器中既要获得最大输出，又要失真小，因此放大器有一个最佳负载，而终端负载必须与放大器的最佳负载匹配，绝大多数功率放大器都采用变压器耦合来实现阻抗变换的，这和小信号放大器中普遍采用 RC 耦合不同。

4) 由于功率放大器中电压电流变化幅度较大，使放大器非线性失真增加，同一管子输出功率越大，非线性失真也大。小信号放大器中由于电压电流变化小，所以非线性失真很小。

1. 单管功率放大器

图 2-30 是典型的单管功率放大器，图中 B_1, B_2 是输入、



输出变压器，其作用是阻抗匹配和传递功率。 R_1, R_2 和 R_E 是建立和稳定工作点的电阻， C_E, C_1 为旁路电容。 R_E 一般较小，否则损耗太大。

图 2-30

图 2-30 单管功率

放大器的直流负载为变压器初级绕组的电阻，一般很小，可以忽略。图 2-31 画出了直流负载线，它是一条从 E_C 开始的几乎是垂直的直线。图 2-30 单管功率放大器的交流负载 R_L 为：

$$R_L = n^2 r_L \quad (n \text{ 为变压器的匝数比})$$

交流负载线与直流负载线的交点就是工作点 Q ， Q 点选择在极限线 P_{CM} 以下的直流负载线上， Q 点位置比较高，静态电流较大，图 2-31 画出了交流负载线 MN ，它是一条通过 Q 点

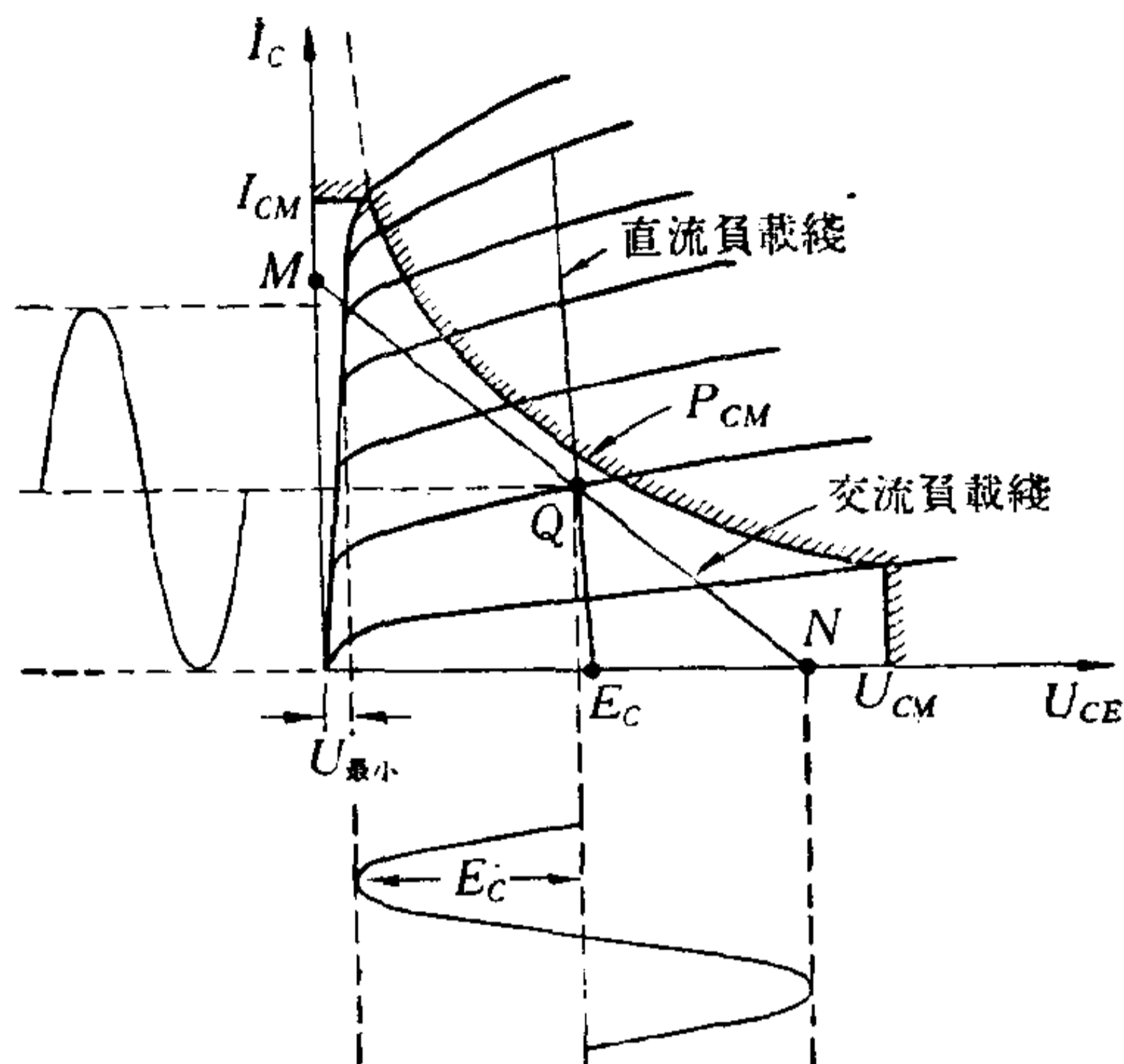


图 2-31

的斜线,它的斜率决定于 R_L 。

1) 晶体管的选择:

根据理论分析,单管功率放大器的最大输出功率为管子最大集电极耗散功率的一半:即 $P_{出} = \frac{1}{2} P_{CM}$

根据上式可选择晶体管,如需要输出功率为 50 毫瓦,则可选 3AX31A,其 $P_{CM} = 125$ 毫瓦。

如果我们在管子的外壳上装一个散热器(散热板,散热片),增大管子的散热面积,使热量容易散发掉,这样,管子允许的最大耗散功率就可以提高。例如:在使用功率管时,

小功率管 3AX81	不加散热器	$P_{CM} = 150$ 毫瓦
	加 15×36 毫米 ² 的散热器	$P_{CM} = 200$ 毫瓦
大功率管 3AD18	不加散热器	$P_{CM} = 2$ 瓦
	加 $300 \times 300 \times 4$ 毫米 ³ 的散热器	$P_{CM} = 50$ 瓦

一般都要装散热器,散热器的规格(即散热面积)可以从手册

中查得。散热器可买成品,也可以自制。

2) 电源电压的选取:

采用变压器耦合,在工作过程中,变压器中感应出来的电压与电源相串联,集电极瞬间电压可能达到供电电源的二倍,所以电源电压一般选

$$E_C \leq \frac{1}{2} U_{CM}$$

3) 输出变压器的匝数比 n 的计算:

从图 2-31 可以看出,集电极最大电压要小于 E_C 值,如果交流负载是 R_L , 根据公式 $P = \frac{U^2}{R_L}$ 则:

$$P_{\text{出}} \approx \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} E_C\right)^2}{R_L} = \frac{E_C^2}{2R_L}$$

(忽略了管子饱和压降 $U_{\text{最小}}$)

所以

$$R_L = \frac{E_C^2}{2P_{\text{出}}}$$

例如功率放大器,电源电压 $E_C = 6$ 伏,输出功率为 50 毫瓦,若变压器效率 η_B 取 0.7, 则 $P_{\text{出}} = 50 \text{ 毫瓦} \times \frac{100}{70} = \frac{500}{7} \text{ 毫瓦} = 71.4 \text{ 毫瓦}$ 。则 $R_L = \frac{6^2}{2 \times 71.4 \text{ 毫瓦}} = 252.1 \text{ 欧}$ 。

若负载是 8 欧的喇叭,即 $r_L = 8$ 欧,这样就可以求出输出变压器的匝数比:

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{r_L}} = \sqrt{\frac{252.5}{8}} = 5.6$$

为了减小单管功率放大器的失真,直流工作点一般取在交流负载线的中点,以保证工作时放大器全周期导电,这种工作状态称为“甲类”状态,单管功率放大器又称为甲类功率放

大器。甲类功率放大器只用一只管子,线路简单,成本低。但是无信号输入时,管子静态工作电流较大,所以管子损耗很大,效率低,甲类功率放大器的理想效率只能达到 50%,因此这种电路只能用在要求输出功率较小的场合,或在大功率输出功放级的前级作推动级用。

2. 推挽功率放大器

图 2-32 是乙类推挽功率放大器的典型电路。从图中可以看到,在静态时基极和发射极之间的电压为零,因此 $I_B = 0$,

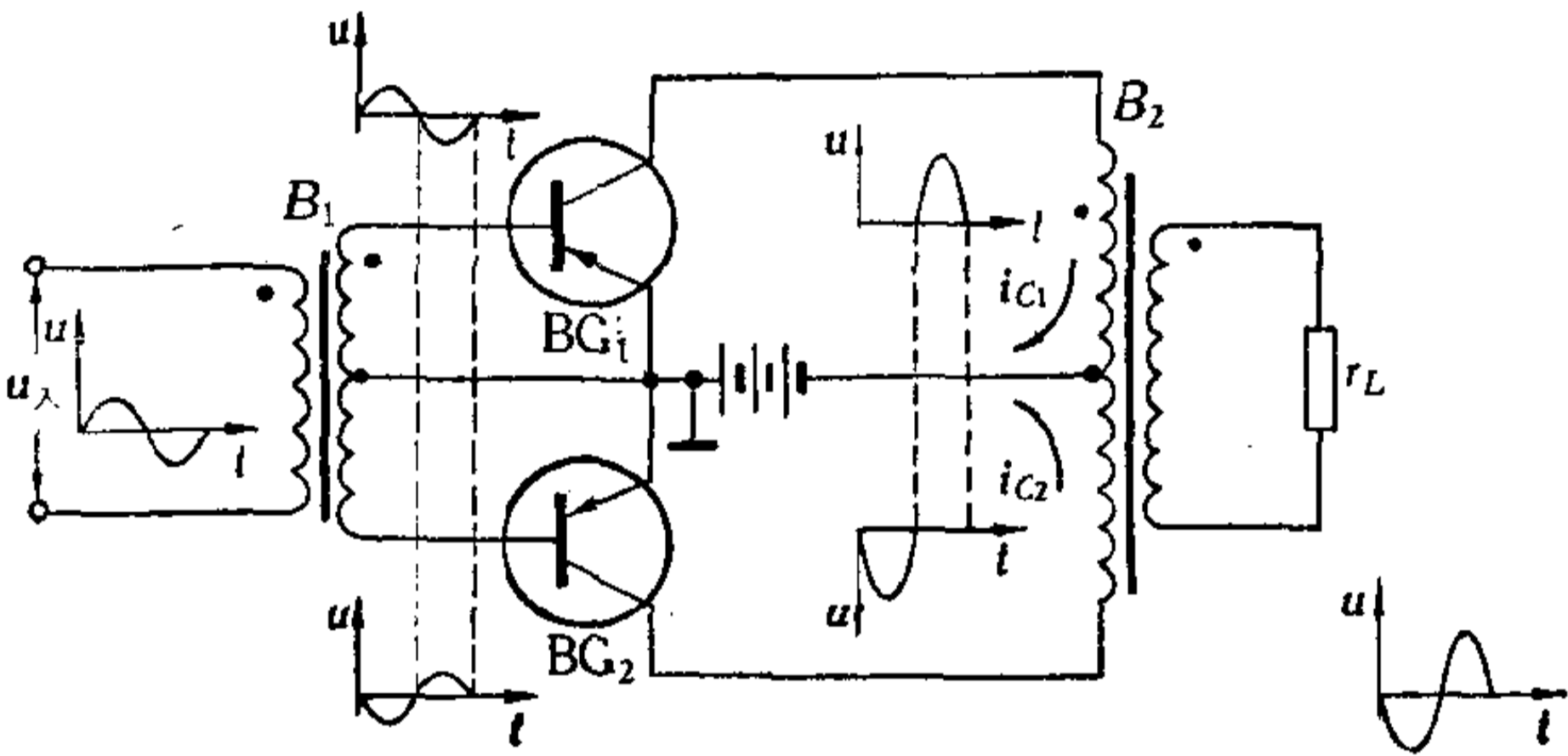


图 2-32

使二管基本处于截止状态。当交流信号通过 B_1 输入时,在变压器次级二端(即二管基极)对地而言得到了极性相反的二个交流信号,见图。在输入信号正半周时, BG_1 的基极与发射极之间加正信号,使 BG_1 截止, BG_2 基极与发射极之间加负信号,使 BG_2 导通,信号经过 BG_2 放大在负载上得到一个负半周信号(电流 i_{C2} 方向如图所示)。反之输入信号负半周时, BG_2 截止, BG_1 导通,信号经过 BG_1 放大在负载上得到一个正半周信号(电流 i_{C1} 方向如图所示),所以在负载上得到放大后的完整信号。

因为每只管子在一个周期内只有半个周期导电,这种工

作状态称为“乙类”工作，所以上面所讨论的线路称为乙类推挽功率放大器。

1) 晶体管的选择:

根据理论分析，乙类推挽功率放大器的最大输出功率近似为一只管子的最大集电极耗散功率的五倍，即：

$$P_{\text{出}} = 5P_{CM}$$

实际应用中一般做到三倍左右。

例如，负载上所需功率为 50 瓦，由于输出变压器有损耗，要求管子的输出功率 $P_{\text{出}}$ 略为增加，若变压器效率为 0.8 则：

$$P_{\text{出}} = \frac{50}{0.8} \text{ 瓦} = 62.5 \text{ 瓦}$$

我们选用两只 3AD30C 作推挽管，其 P_{CM} 为 20 瓦，能满足要求。

2) 电源电压 E_C 的选取:

晶体管集电极瞬时电压最大值可能比电源电压大一倍，这是因为在工作过程中，和截止管相连的那半个输出变压器线圈中所感应的电动势是和电源电压加在一起的。可见工作点电压(即电源电压)不能超过晶体管最大允许集电极电压的一半，否则，晶体管有被击穿的可能。所以

$$E_C \leq \frac{1}{2} U_{CM}$$

3) 交流负载电阻和输出变压器匝数比 n 的计算:

图 2-33 负载电阻 r_L 对于每只管子来说，它的集电极交流负载电阻 R_L 为

$$R_L = \left(\frac{\frac{1}{2} N_1}{N_2} \right)^2 r_L = \frac{1}{4} n^2 r_L$$

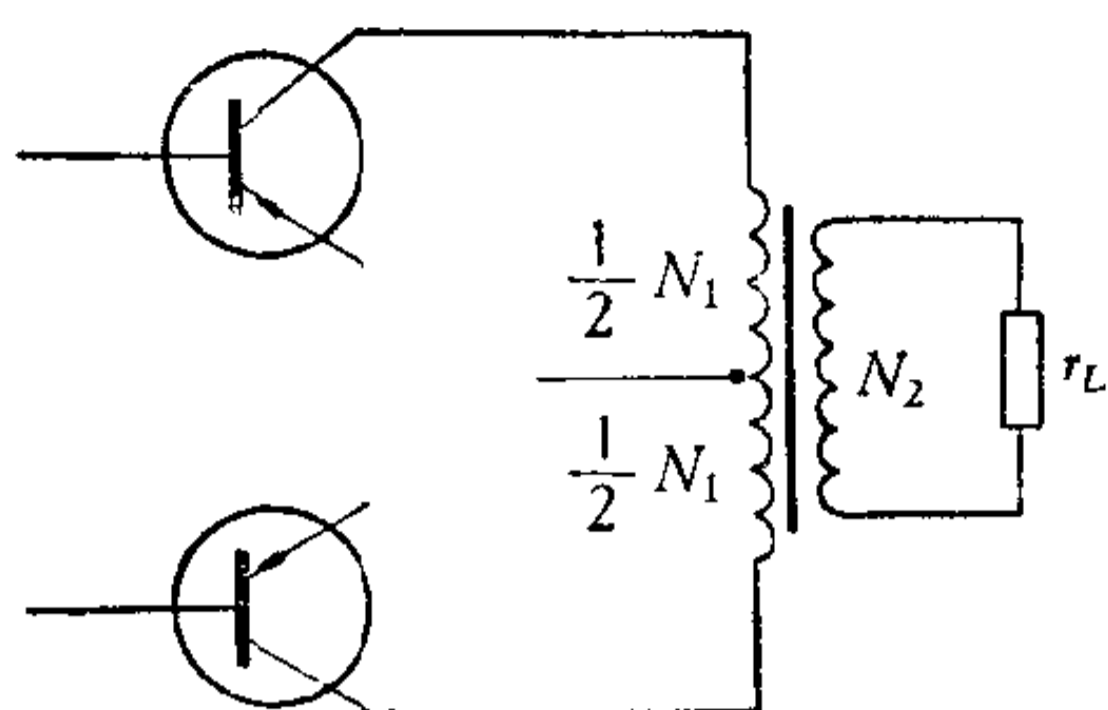


图 2-33

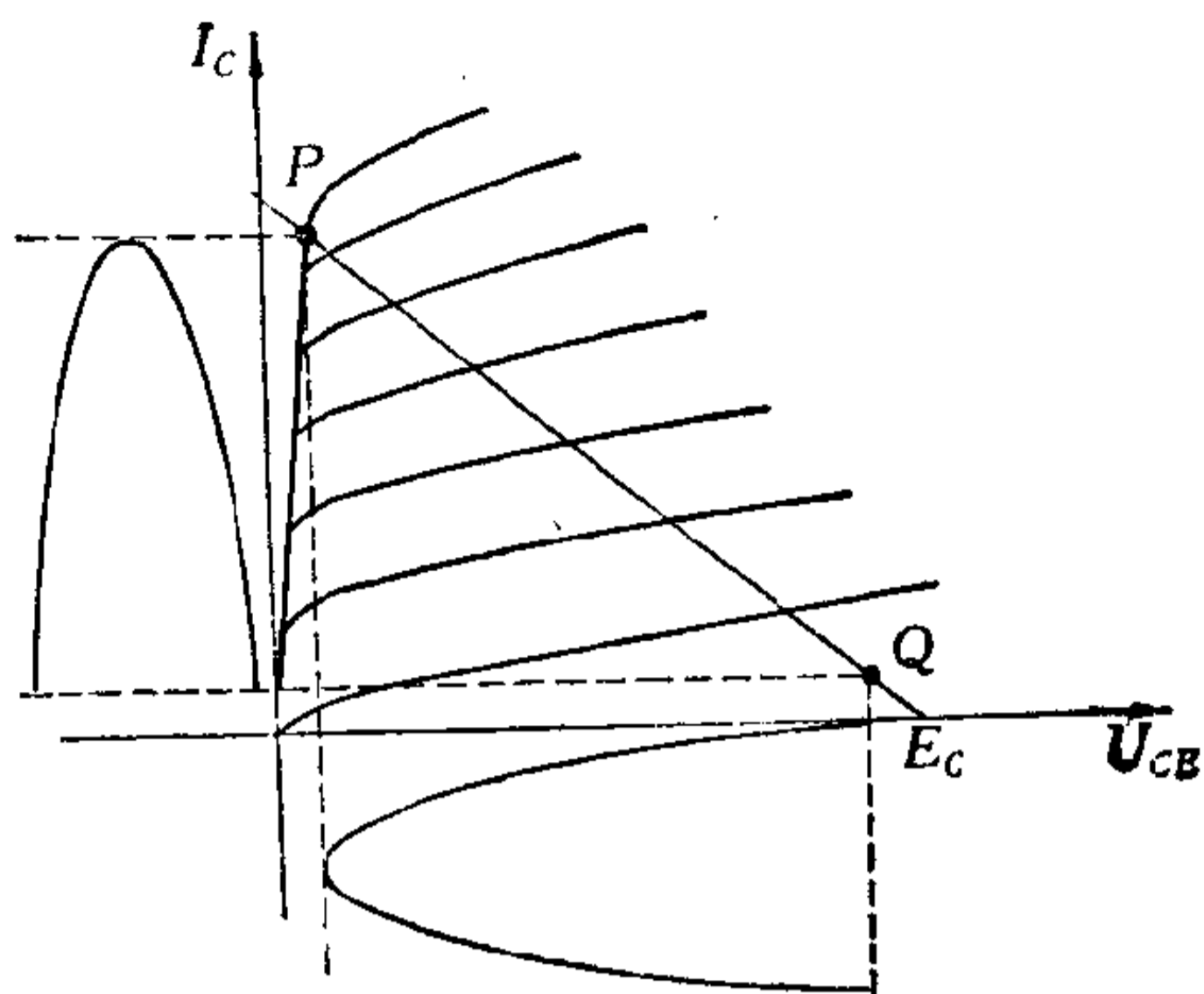


图 2-34

其中

$$n = \frac{N_1}{N_2}$$

从图 2-34 上可以看出,集电极电压的最大值约为 E_c ,所以输出功率

$$P_{\text{出}} \approx \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} E_c\right)^2}{R_L}$$

则

$$R_L \approx \frac{E_c^2}{2P_{\text{出}}}$$

如果 $E_c = 24$ 伏, $P_{\text{出}} = 62.5$ 瓦

那么
$$R_L = \frac{24^2 \text{ 伏}^2}{2 \times 62.5 \text{ 瓦}} = 4.6 \text{ 欧}$$

若负载电阻 r_L 为 8 欧,变压器效率为 0.8,则输出变压器的匝数比

$$n = \sqrt{\frac{\eta_B \times 4 \times R_L}{r_L}} = \sqrt{\frac{0.8 \times 4 \times 4.6}{8}} = \sqrt{1.84} = 1.36$$

若负载电阻 r_L 为 16 欧,则输出变压器的匝数比

$$n = \sqrt{\frac{\eta_B \times 4 \times R_L}{r_L}} = \sqrt{\frac{0.8 \times 4 \times 4.6}{16}} = \sqrt{0.92} = 0.96$$

以上计算例子的线路图见图 2-35 所示。

由于乙类推挽功率放大器,在没有信号时不损耗能量,只有在有信号输入时,才从电源吸收能量,因而效率大大提高了,理想效率可达 78%。

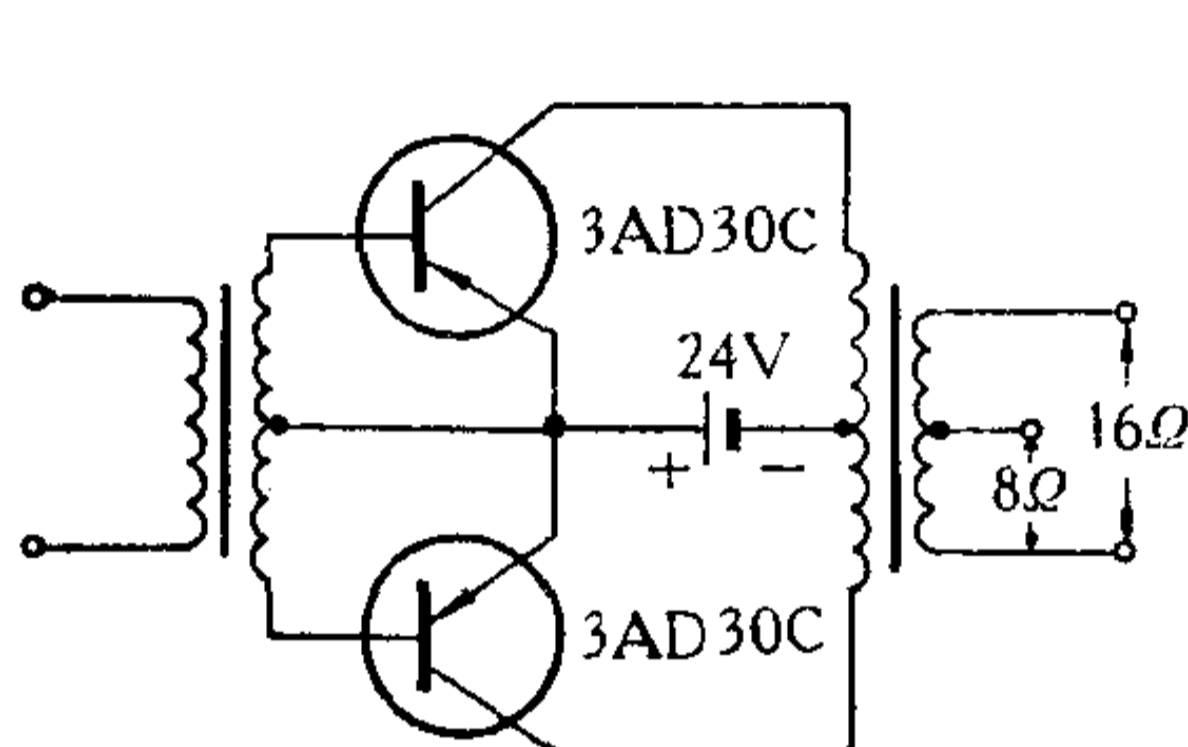


图 2-35

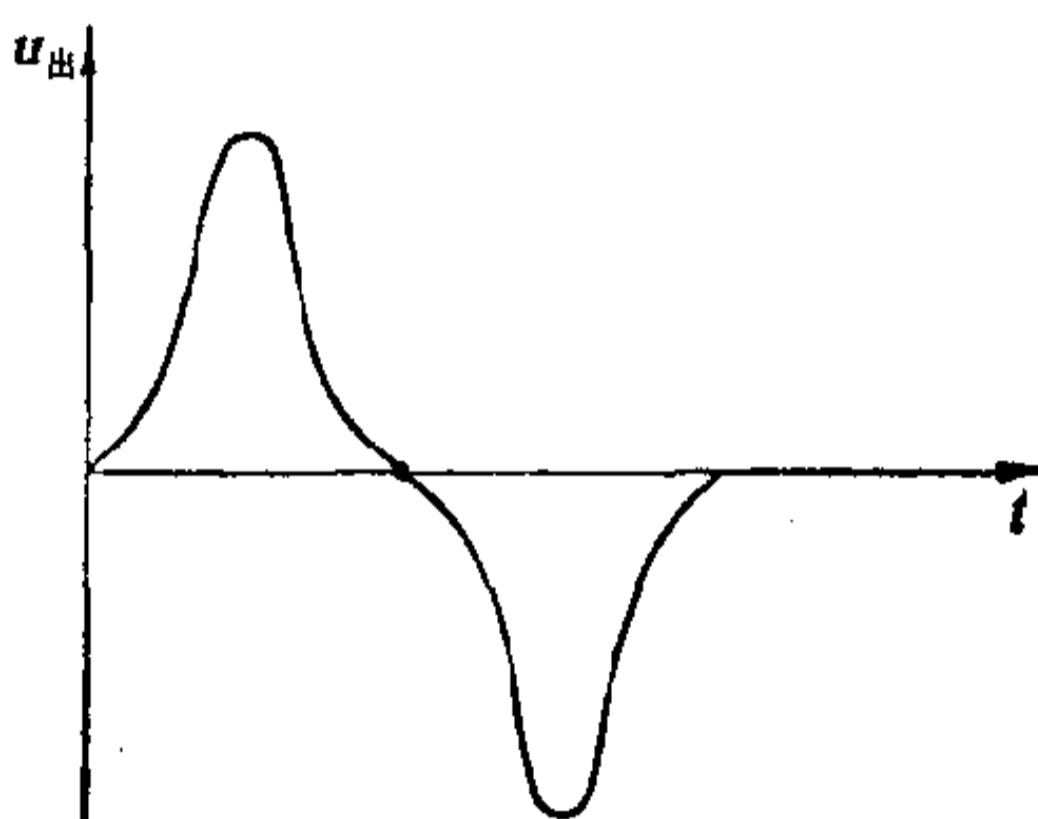


图 2-36

由于这种放大器是推挽工作,所以两只管子特性尽量一致,不然会引起失真或两管中 β 大的一只容易过热。

由于晶体管在电流很小时的特性是非线性的,所以两管轮流工作时,有可能在它们“交接班”时衔接不好,造成较大的失真,如图 2-36 所示,这种失真常称为“交越失真”。为了减小交越失真,必须在输入端加一很小的正向偏压,使起始工作点不在零点,这个偏压的大小,对于锗晶体管约为 0.1—0.2 伏;对于硅晶体管大约为 0.6 到 1 伏,或者用集电极电流来表示,对于小功率放大器约为几毫安,大功率放大器约为几十毫安。这个起始工作点可以利用基极接分压电阻 R_1 , R_2 来取得。图 2-37 就是这种推挽放大器,图中 R_1 , R_2 和 R_E 起建立工作点和稳定工作点的作用。为了减小损耗, R_2 , R_E 数值较小,对

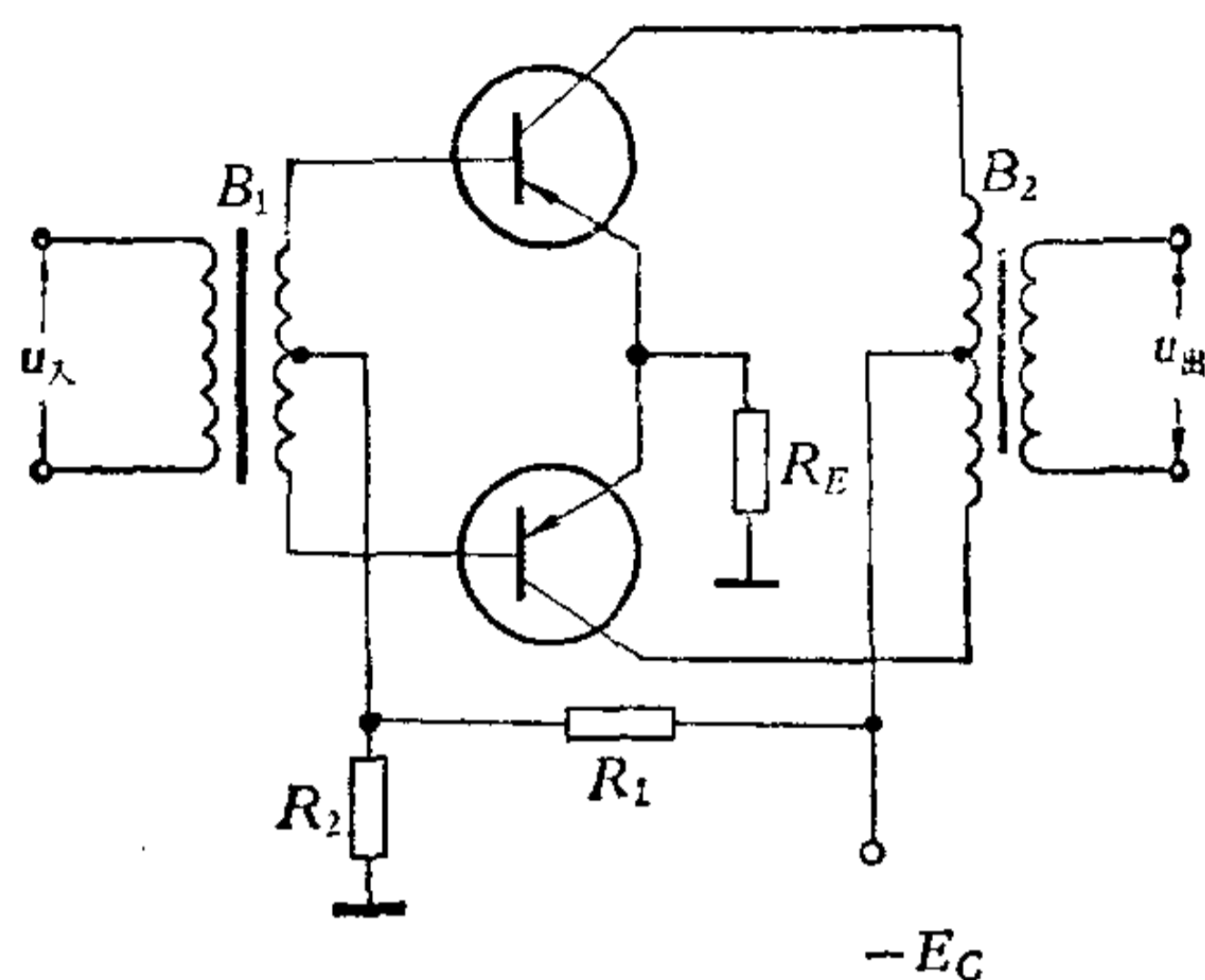


图 2-37

于小功率放大器,通常 R_2 在 25—500 欧之间,而 R_E 只有几欧姆;对于大功率放大器, R_2 约在几欧至几十欧范围内, R_E 仅为零点几欧,有时为了提高输出功率,就干脆不接 R_E ,将发射极接地。

3. 正确处理功率放大器的几个关系

毛主席教导我们：“不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”上面讲了功率放大器的基本原理与计算,但在设计时会遇到很多矛盾,这就是如何处理好输出功率与损耗功率的关系,输出功率与功率增益以及非线性失真之间的关系。

1) 管子的输出功率与损耗功率的关系

我们知道,功率放大器所输出的功率是从集电极电源那儿取得的。电源给出的直流功率除了一部分变成有用的功率输送给负载外,另外一部分就变成无用的热能消耗在晶体管上,即晶体管的耗散功率。输出功率占所消耗的电源功率的比重愈多,即效率愈高,对于甲类工作效率低于 50%,乙类工作效率不高于 78%。因此,放大器的输出功率受到晶体管

最大允许耗散功率的限制。但是，不是说有了大功率晶体管就等于有大功率输出了。大的功率管只是为放大器输出大的功率提供了可能性。可能性不等于现实性。怎样才能取到尽可能大的输出功率呢？在前面讨论阻抗匹配时讲到，当负载电阻等于内阻时，输出功率最大，在功率放大器中用输出变压器，就是为了选择合适的负载，实现阻抗变换，使电路尽可能地减少损耗功率、提高效率。应当指出：在设计功率放大器时，通常不使负载与内阻达到完全的匹配，因为输出功率除了与功率损耗有矛盾外，还与非线性失真、功率增益等因素有关，因此还需从这些方面去考虑。这里可以提供几种典型晶体管在推挽运用时输出功率的参考数据：

晶 体 管	输 出 功 率
3 AX 31	100 毫瓦—400 毫瓦
3 AX 81	250 毫瓦—800 毫瓦
3 AD 6	3 瓦—15 瓦
3 AD 30	20 瓦—50 瓦
3 AD 18	75 瓦—100 瓦

2) 输出功率与功率增益的关系

输出功率是放大器送给负载功率的能力，功率增益是用来表征放大器放大功率的本领（功率增益 $K_p = \frac{\text{输出功率 } P_{\text{出}}}{\text{输入功率 } P_{\text{入}}}$ ）。

初学者往往容易把输出功率和功率增益二者混淆。其实一个具有很高功率增益的放大器，其输出功率未必很大。譬如能够输出 25 瓦的功率放大器，其功率增益可能比输出 100 毫瓦的功率放大器要低。对于同一个功率放大器来说，在负载匹配时输出功率最大，而它的功率增益几乎与负载成正比，因此功率放大器不能同时获得最大输出功率和最大功率增益。二者发生矛盾如何处理？毛主席教导我们：“矛盾着的两方面中，

必有一方面是主要的,他方面是次要的。”在功率放大器中,功率增益与输出功率二方面的矛盾,一般说输出功率是主要的,是起主导作用的方面。但是我们也不能忽视功率增益这个非主要方面,若功率增益过小,也会影响输出功率,这时候功率增益就会从非主要方面向主要方面转化。

3) 输出功率与非线性失真的关系

前面讲乙类推挽放大器有小信号失真(即交越失真),而功率管无论在甲类或乙类运用时,为了获得大的功率输出,输出信号的电压、电流的幅度总是很大,这就带来了大信号失真的问题(称非线性失真)。为什么会出现这种失真呢?主要是由晶体管产生的。我们从晶体管输出特性曲线看, I_B 特性曲线族的间隔是很不均匀的, I_B 愈大时,曲线族间隔愈接近,这说明电流放大系数 β 是变化的, I_c 越大, β 值愈小。因此当信号很大时,靠波形顶部这部分波形就会变得“胖”了,形成波形失真,这就使得输出电流幅度不能很大,输出功率的提高受到非线性失真的限制。如果将负载电阻取得过大也不好,不但输出功率会减小,且会出现波形削顶现象。因此,输出功率与非线性失真产生了矛盾。对要求有好的音质的高传真扩音机来说,非线性失真是主要矛盾方面,在一些波形要求不太高的设备或需要有大功率的有线广播的扩大机,就把输出功率放在首位了。对非线性失真度的要求也是相对的。因此在允许的非线性失真下,尽可能地提高输出功率。

上面几个矛盾,彼此间也有内在联系的,各对矛盾之间,又互相成为矛盾。譬如管子损耗大,势必影响功率增益和失真度的改善;功率增益过低,对前级输入功率的要求也相应提高了,因此如果把它们机械地割裂开来孤立地看待是错误的,就会顾此失彼,收不到好的效果。

在设计功率放大器时,一般说输出功率与非线性失真之

间的矛盾是主要矛盾。因此在处理这些矛盾时，不能平均地对待。“将欲取之必先与之”，不失则不得。为了更好地解决输出功率和非线性这对矛盾，常常采取牺牲部分功率增益的办法，来改善非线性失真和提高输出功率，这个办法就是下节要讨论的负反馈。

4. 功率放大器的调整

功率级的调试主要是统一输出功率和非线性失真的矛盾，即要达到最大输出，又要满足失真要求。

因为功率放大级的管子处于充分利用的状态，即其工作电压，电流已接近管子的额定值，调试时稍有不慎就容易造成管子的过载和损坏，所以在调试过程中应经常注意观察总电流值和管子的发热情况，特别是第一次通电之前应仔细检查电路。例如电源极性有无认错，管脚有无搞错，有无金属残屑引起的短路等等。对于大功率(50 瓦，100 瓦)功率放大器的调整，第一次通电最好采用逐步升压法；见图 2-38 所示。在

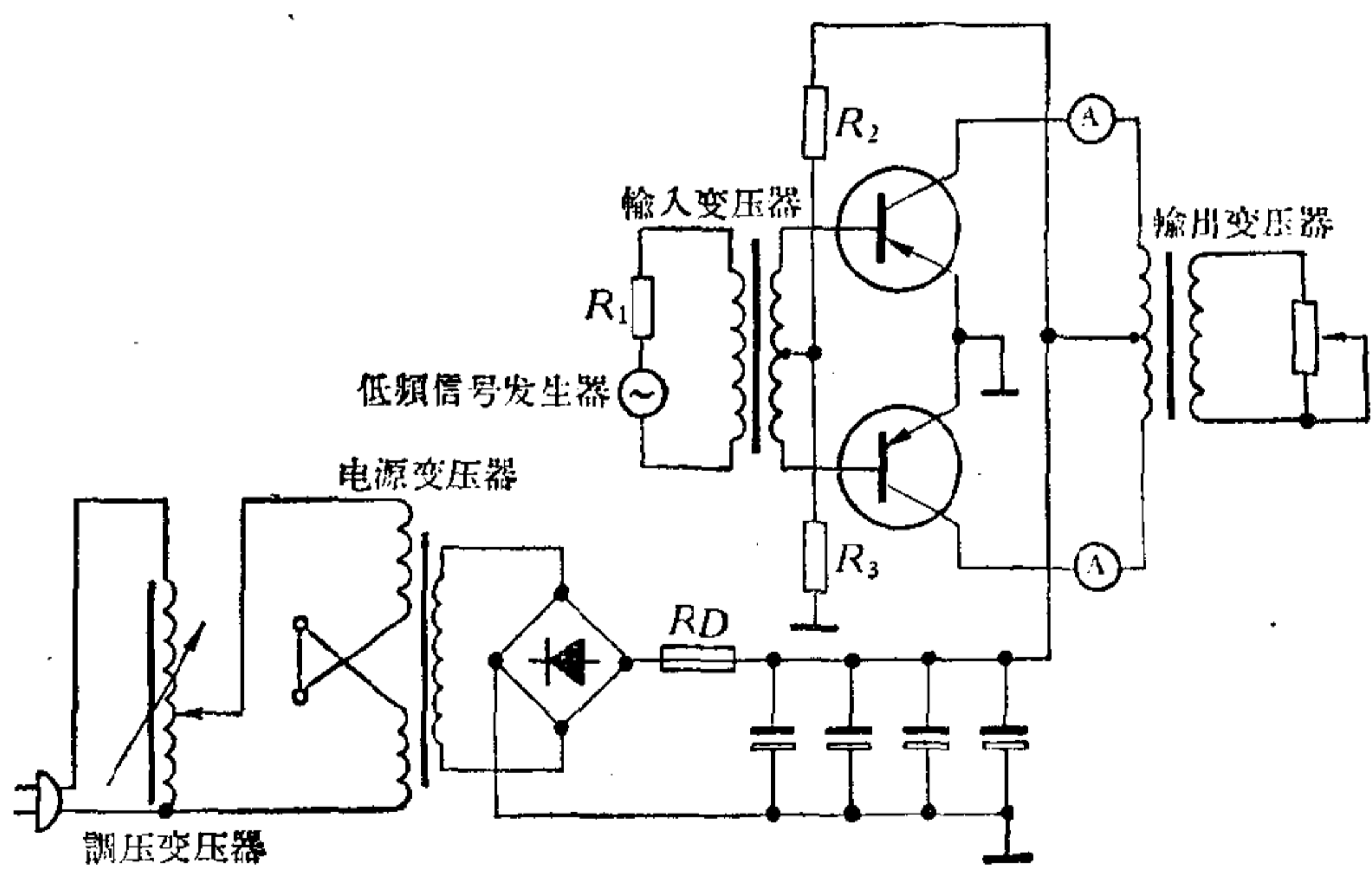


图 2-38

输入信号为零的条件下,将电源电压由低到高地调到额定值,在逐渐调高的过程中每升压一次应观察一、二分钟时间,密切注意总电流和管子温升,发现异常即切断电源检查。在缺乏逐步升压的条件时,可以在电源中串接一个适当阻值的限流电阻,然后逐步减小阻值,逐步增加电流,同时也应密切注意电路电流和管子温升,发现异常也应切断电源检查。

实践证明,对于变压器绕组接错,管脚接错,反馈极性错接,以及一些电源短路等的错接故障,都能在降压情况下发现和排除,大大减少了设备损坏的可能性。通电正常后,即可逐步加入信号,一面测量输出电压,电流的数值和波形,一面监视电路电流和管子温升。

1) 输出功率

输出功率与阻抗匹配有关,调试有输出变压器的电路时,可对输出变压器次级多抽几个抽头来凑试最佳匹配或者用滑线电阻作为负载,试出最佳负载值,然后根据实际负载值来修改输出变压器的匝数比。调试时若发现没有输出或输出功率很小,问题大多是输出、输入变压器的推挽绕组有一组反接,推挽管有一管未接入或损坏,推动管偏置电阻变值或漏接,推动管的管脚错接和虚焊、假焊等。

2) 波形

小信号时波形失真(例如交越失真),大信号时波形良好,这大多是推挽管偏置电流太小所引起,对于扩音机来说,小信号时的失真危害性不大,如不十分严重可不予考虑。大信号时的失真将明显影响音质,造成原因是管子不对称或推动级工作点未调好。其他如瞬变失真见图 2-39(1) 所示,主要是由输出变压器的漏磁引起的。又如线路产生自激时的波形见图 2-39(2) 所示,则可采用强负反馈措施和改进接线排列等。电路正常工作后,应继续观察较长时间,监视管子温升,对

于推挽电路应注意二管温升是否平衡，有散热板的应注意散热板与管子的温度，如果电路参数正常，而温度过高，则表示散热板面积不够或通风不良，如果它们之间的温差过大，则表示管子与散热板的接触不良，热阻大，应给予改善。

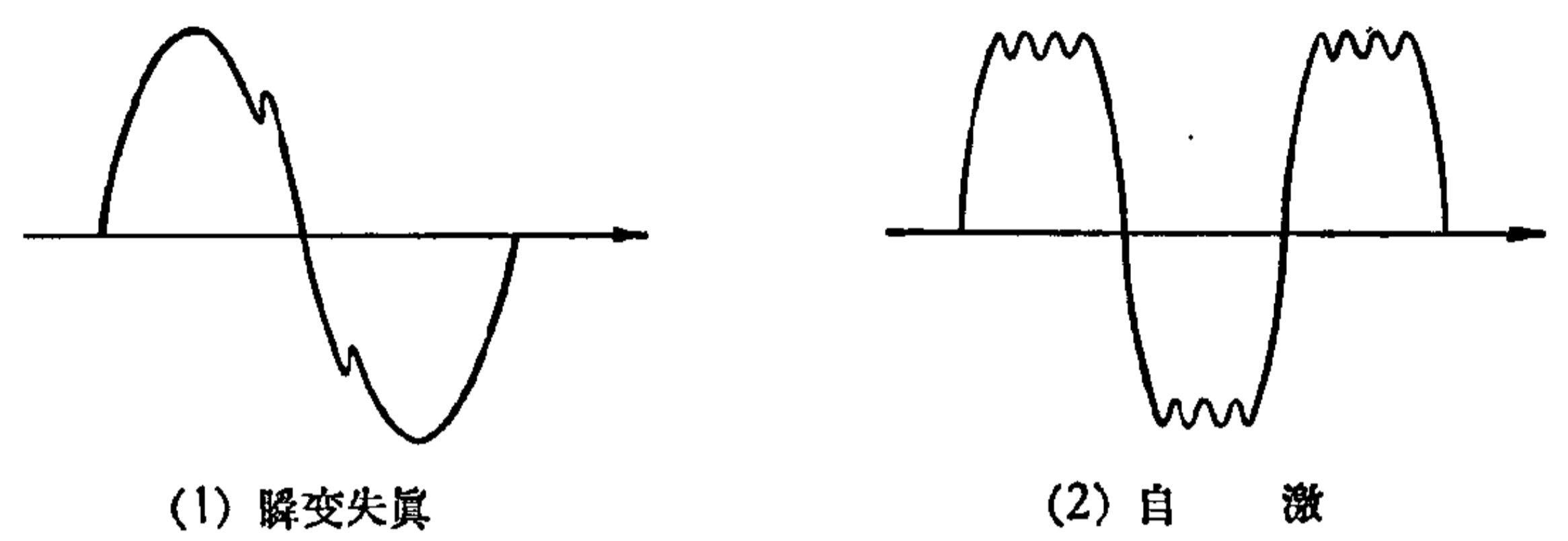


图 2-39

最后还要做一下频率响应的特性，在调试中改善频响的方法主要是采用负反馈电路。电路调试结束应记录各点电压电流的数值和波形，绘出电路图供使用和维修人员参考。

第四节 放大器中的负反馈

1. 负反馈的基本概念

“反馈”就是将输出信号通过一定的方式送回到输入端去（见图 2-40）。如果送回去的信号有削弱输入信号的作用，使

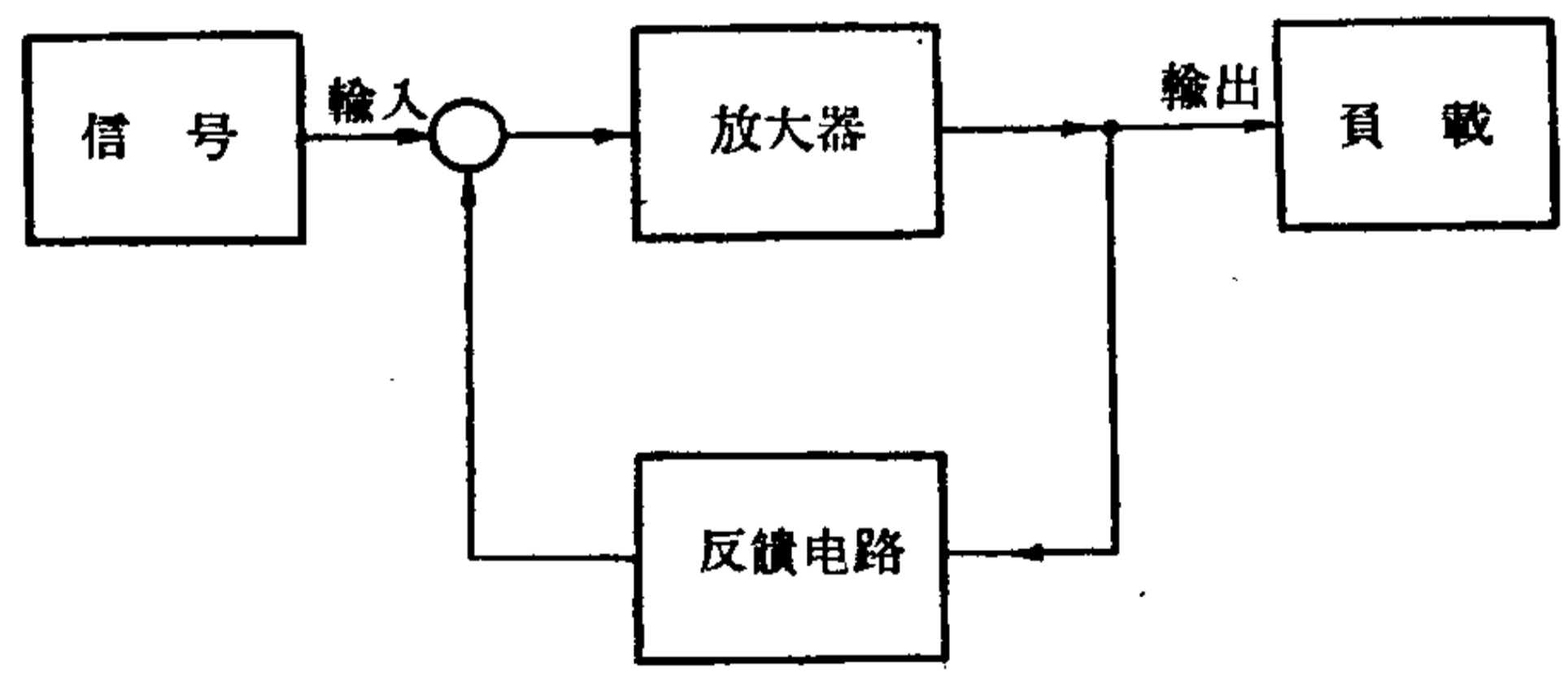


图 2-40 负反馈电路方框图

放大倍数减少,那末,这种反馈就称为“负反馈”。

放大器中加了“负反馈”以后,虽然放大倍数下降了,但是我们还是经常要用到它。因为它除了如前面讨论过的可以稳定放大器的直流工作点外,还可以减少放大器失真、稳定放大倍数、加宽频带、减少噪音、改变输入输出阻抗等。

我们先讨论一下利用“负反馈”改善波形失真的原理。如图 2-41(1) 所示,放大器的输入信号是正弦波,若由于放大器中晶体管输入电阻不是常数、 β 不是常数(特别是在大信号应

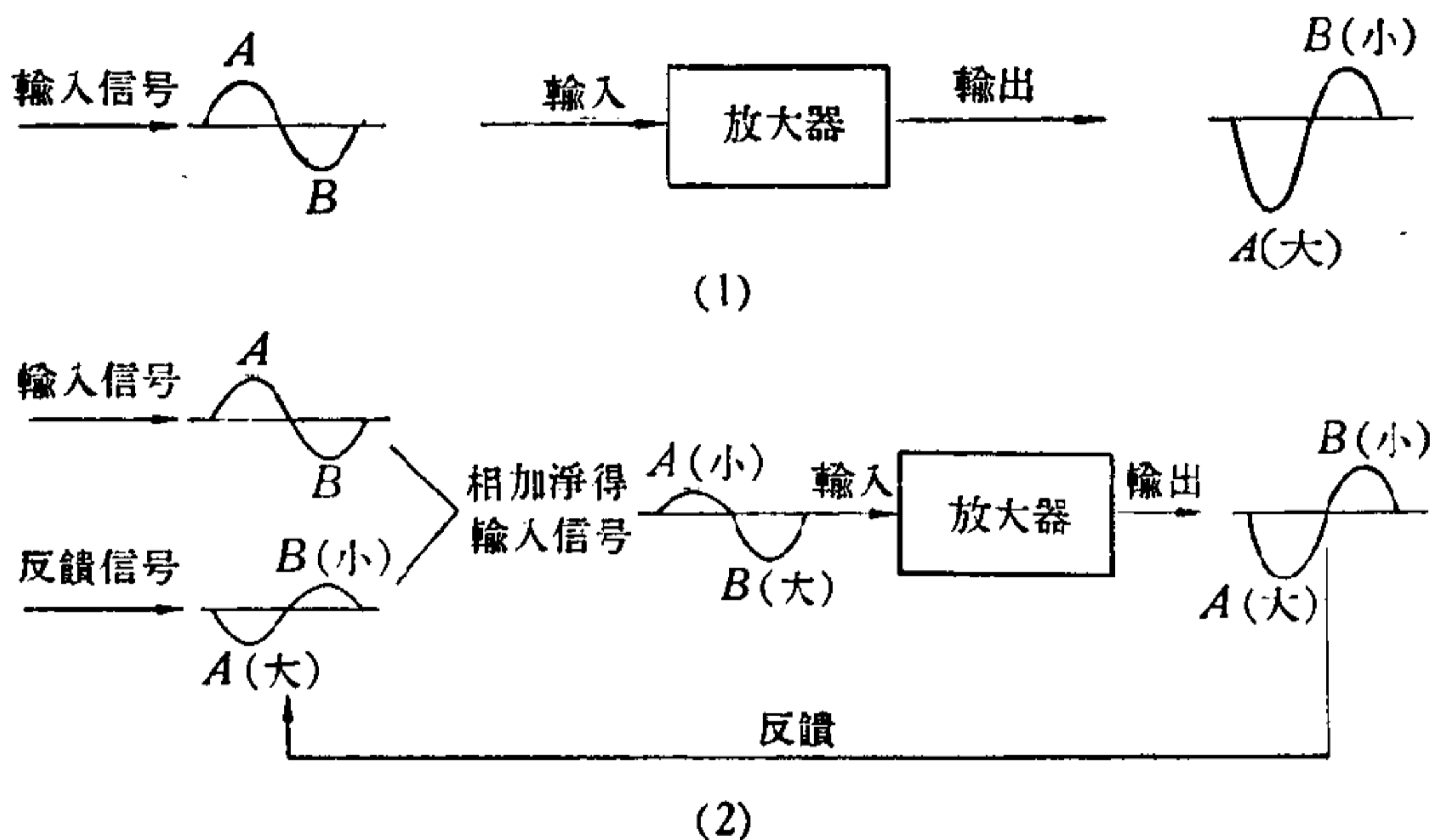


图 2-41 负反馈可以减小放大器失真的原理

用的情况下更为显著)等原因,使 A 半周放大倍数大, B 半周放大倍数小,因而出现了输出端有失真的波形。

我们将这信号反馈到输入端,这信号也同样是失真的。放大得大的半周 A 对原来信号的削弱作用大,而另一半周 B 的情况恰好相反,所以经过反馈后[图 2-41(2)],真正送到放大器里去的净输入信号变成 A 小, B 大。这样一来,就使得输出信号的 A 半周小些, B 半周大些,这就改善了输出波形。当然 A 变小些和 B 变大些的最后结果还是 A 大于 B ,不过比

没有反馈时的差距拉小了一些。

用同样的方法，还可以解释利用负反馈减少放大器的噪音，改变输入输出阻抗、加宽频带等原理。

2. 反馈方式

根据“负反馈”电路与放大器输出端的连接方式，可以分为“电压负反馈”和“电流负反馈”两种。“电压负反馈”的特点是：从输出端引入的反馈电压 u' 与输出电压成正比，可以写成 $u' = Ku_{\text{出}}$ (K 为某一常数)；“电流负反馈”的特点是从输出引入的反馈电压 u' 与输出电流成正比： $u' = R'i_{\text{出}}$ 。这两种电路的方框图分别见图 2-42 及图 2-43。

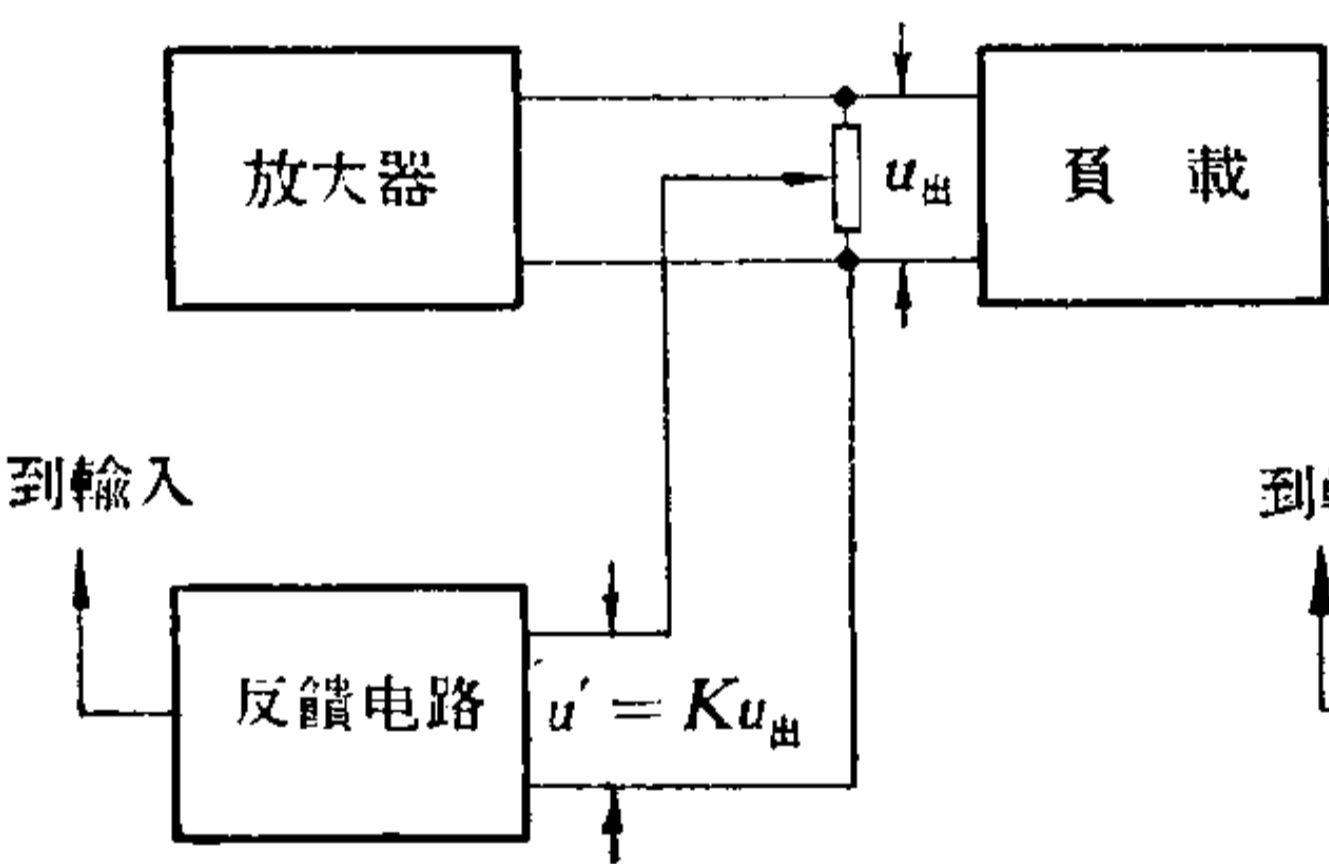


图 2-42 电压负反馈原理方框图

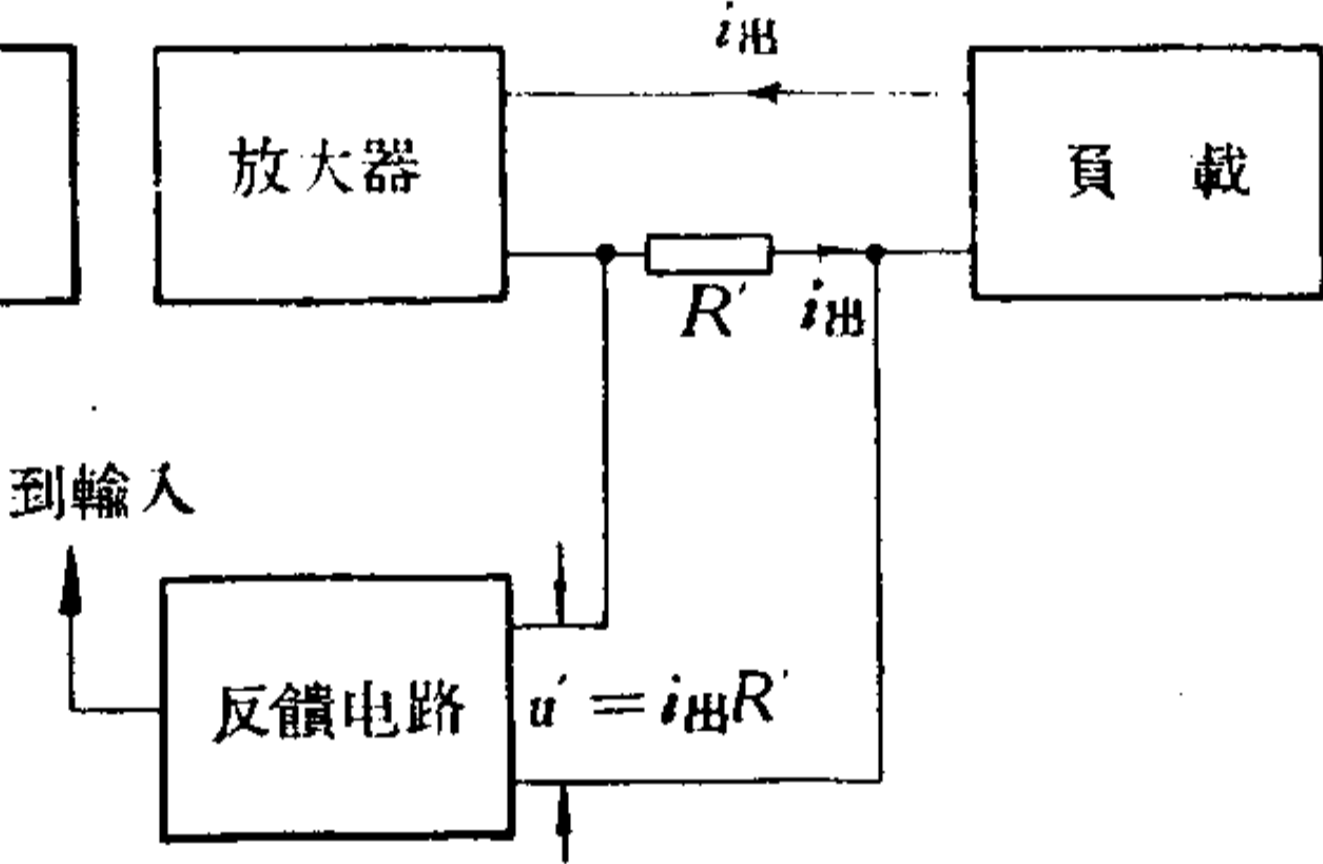


图 2-43 电流负反馈原理方框图

另一方面，从反馈电路与放大器输入端的连接方式来分，

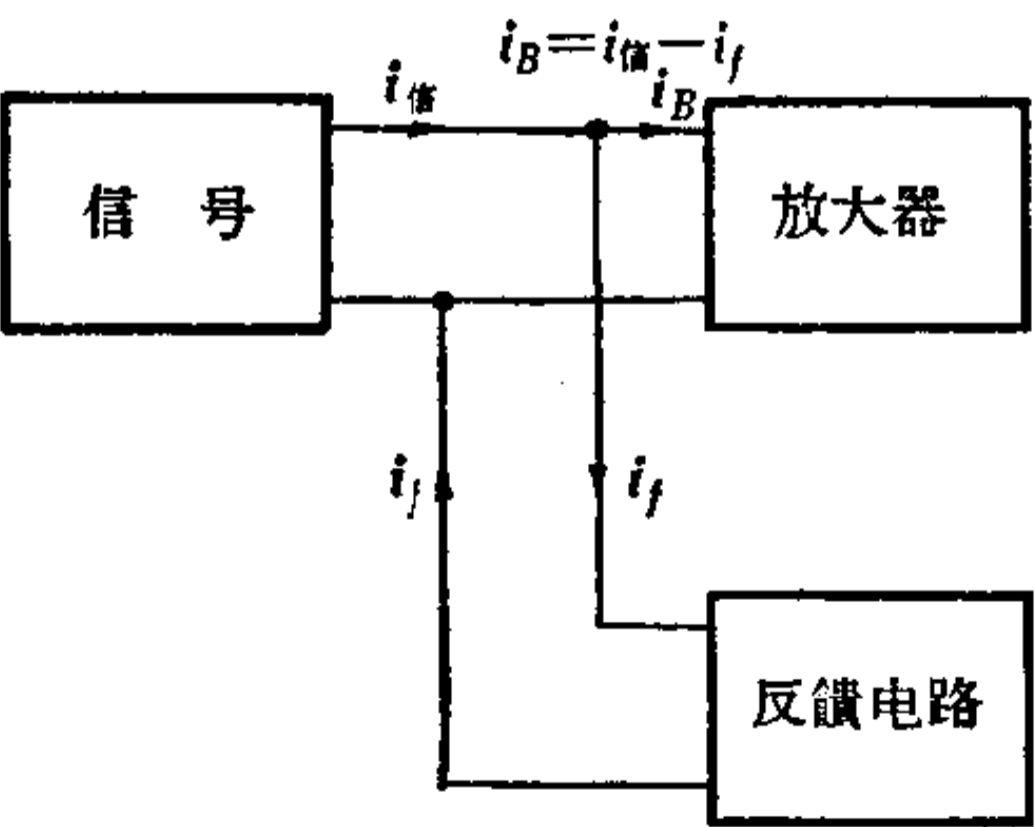


图 2-44 并联负反馈原理方框图

可以分为“并联负反馈”及“串联负反馈”两种。“并联负反馈”的特点是 $i_B = i_{\text{信}} - i_f$ ；“串联负反馈”的特点是 $u_{BE} = u_{\text{信}} - u_f$ 。这两种电路的原理方框图分别见图 2-44 及图 2-45。

同时考虑到反馈电路

与放大器输出、输入端的不同接法，那末负反馈方式可以分为：“串联电压负反馈”，“串联电流负反馈”，“并联电压负反馈”，“并联电流负反馈”四种。我们把上述讨论的不同的反馈方式的构成特点归纳成表 2-1 的形式。

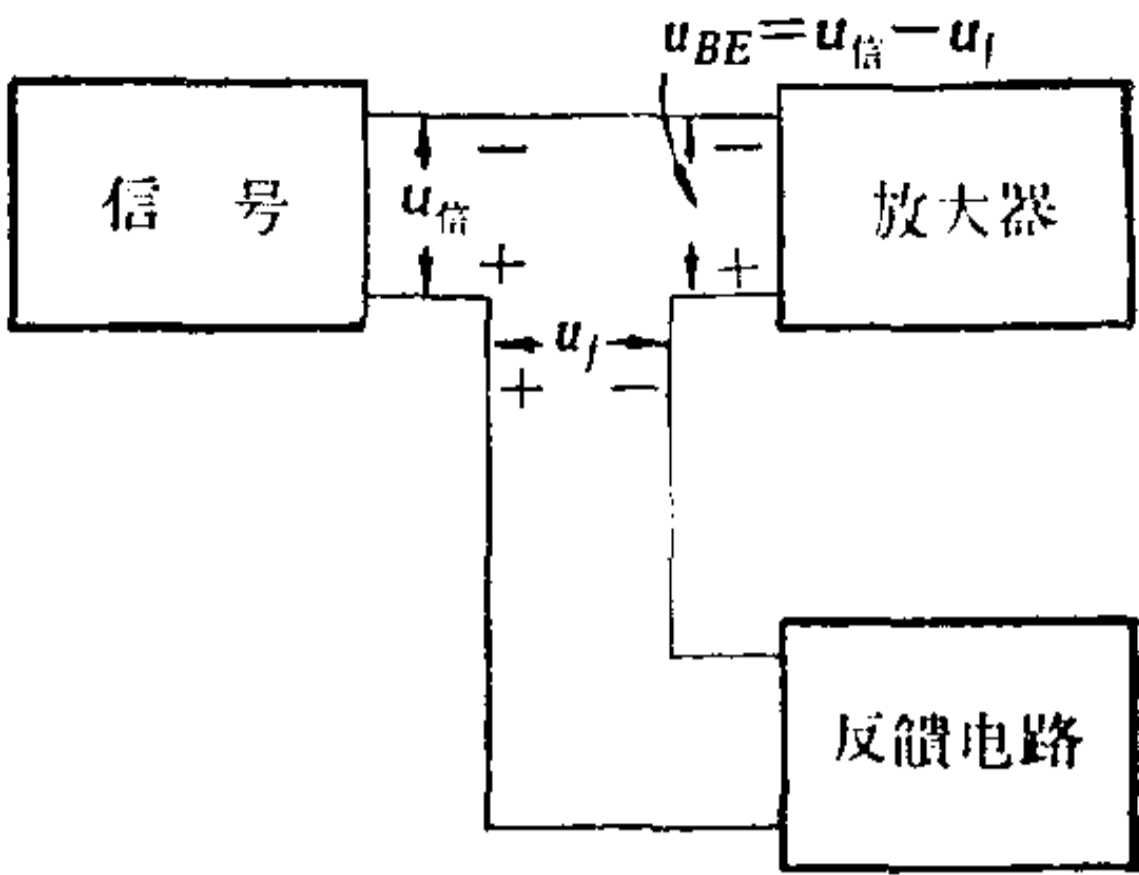


图 2-45 串联负反馈原理方框图

表 2-1

负反馈方式		特	点
从输入端看	串联负反馈	净输入电压	$u_{BE} = u_{信} - u_f$
	并联负反馈	净输入电流	$i_B = i_{信} - i_f$
从输出端看	电压负反馈	从输出取出电压	$u' = Ku_{出}$
	电流负反馈	从输出取出电压	$u' = R'i_{出}$

3. 常用负反馈放大电路举例

例一：射极跟随电路(电压串联负反馈)

电路见图 2-46。其反馈电压 u_f 由 R_L 两端取出。从输入端看,满足 $u_{BE} = u_{信} - u_f$ 所以是串联负反馈；而反馈电压 $u_f = Ku_{出} = u_{出} (K=1)$ ，与 $u_{出}$ 成正比，所以总的说是属于电压串联负反馈。其主要特性为：

① 电压放大倍数近似为 1。
这个特性是不难解释的，因为 $u_{出} = u_{信} - u_{BE}$ ，而 $u_{BE} \approx 0$ ，

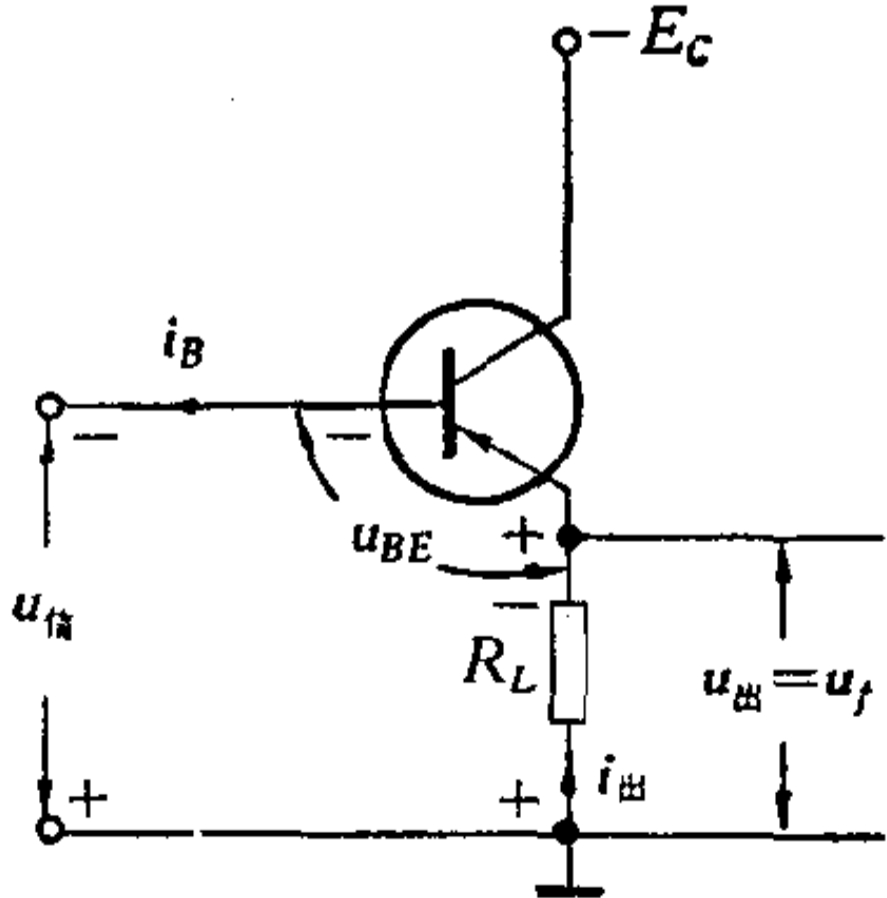


图 2-46 射极跟随电路

所以 $u_{\text{出}} \approx u_{\text{信}}$

$$K_u = \frac{u_{\text{出}}}{u_{\text{信}}} \approx 1$$

由此可见，输出信号是跟随着输入信号电压变化而变化的，也就是说射极端与基极端信号的相位一致。

② 输入阻抗高。

因为

$$R_{\lambda} = \frac{u_{\text{信}}}{i_B}$$

而

$$i_B \approx i_{\text{出}}/\beta, \quad u_{\text{信}} \approx u_{\text{出}}$$

故

$$R_{\lambda} \approx \frac{u_{\text{出}}}{i_{\text{出}}} \beta = R_L \beta$$

这就是说，输入电阻是负载电阻的 β 倍。使用了射极跟随电路后，阻抗提高了，也就减轻了信号源的负担。其物理意义，可以如图 2-47 加以说明(设管子 $\beta = 100$)。

图(1)中没有加射极跟随电路时，若 $u_L = u_{\text{信}} = 1$ 伏，则信号源供应电流为 10 毫安。当加了射极跟随电路后[图(2)]

因为 $i_L = i_E = \frac{u_L}{R_L} = \frac{1 \text{ 伏}}{100 \text{ 欧}} = 10 \text{ 毫安}$

$i_{\text{信}} = i_B \approx \frac{i_E}{\beta} = \frac{10 \text{ 毫安}}{100} = 0.1 \text{ 毫安}$

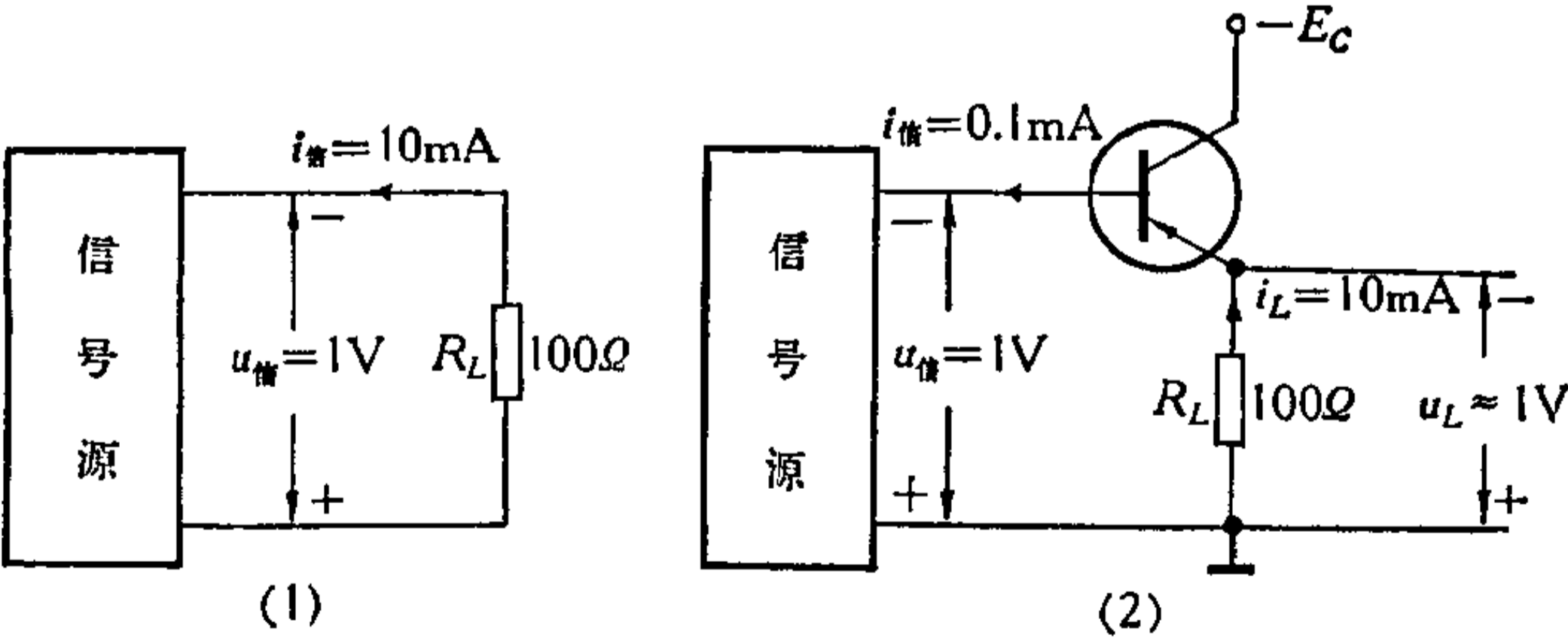


图 2-47 射极跟随电路能减轻信号源负担的说明

显然,加了射极跟随电路后,在供给负载同样大小电压信号时,信号源供应的电流大大下降了,即驱动功率大大下降了。

③ 输出阻抗小。

因为前面已推导出 $u_{\text{出}} \approx u_{\text{信}}$, 当 R_L 变化较大时, $u_{\text{出}}$ 不变,这就说明此种负反馈电路有“定压输出”性能,或者说其输出阻抗小。为什么呢? 我们将放到后面再讨论它(解释见图 2-56 及有关说明)。

例 1: 图 2-48 是用于 50 瓦扩大机输入级的实际电路。它主要是用作提高输入阻抗,以便和阻抗较高的话筒相匹配。线路中接有 $R_B = 100$ 千欧,目的是要减小偏置电阻对信号源的分流作用。

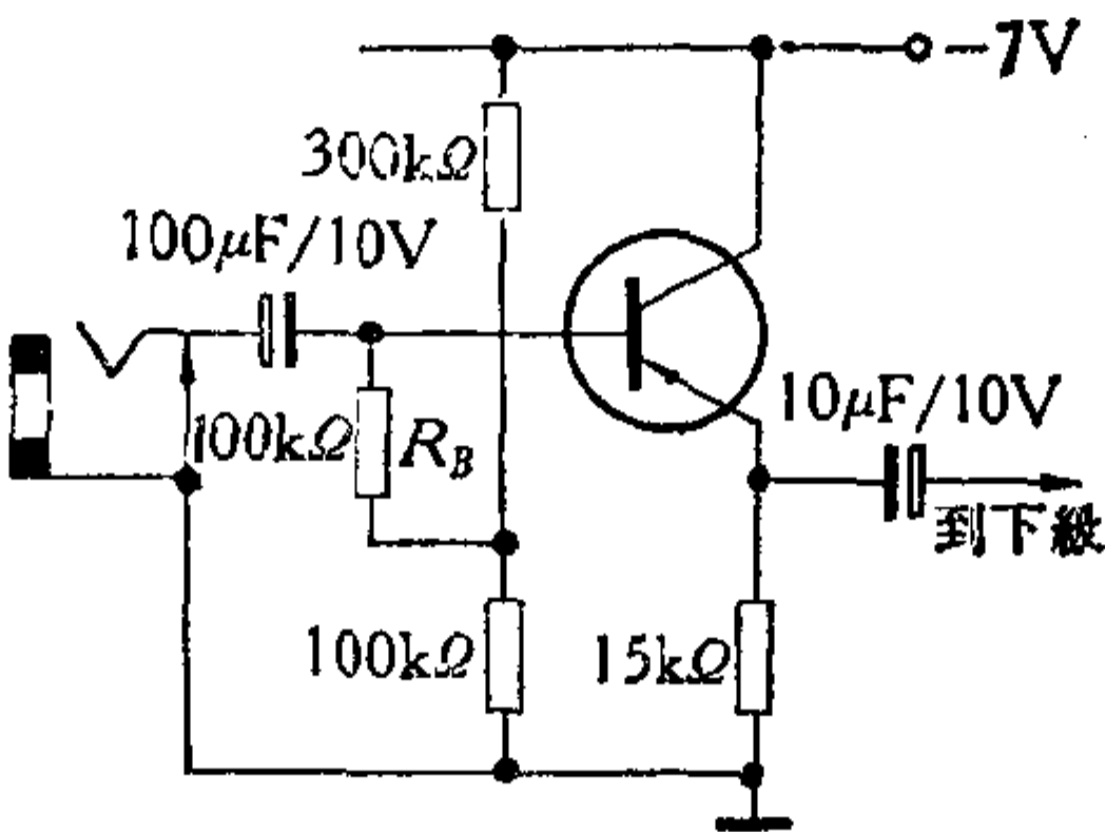


图 2-48 射极跟随电路实例

例 2: 电流串联负反馈电路

电路见图 2-49, 其反馈电压从 R_E 中取出。 $u_f = i_E R_E \approx i_{\text{出}} R_E$, 近似与负载电流 $i_{\text{出}}$ 成正比,因此属于电流负反馈,又因为 $u_{BE} = u_{\text{信}} - u_f$, 所以总的说是属于“电流串联负反馈”电路。其特性为:

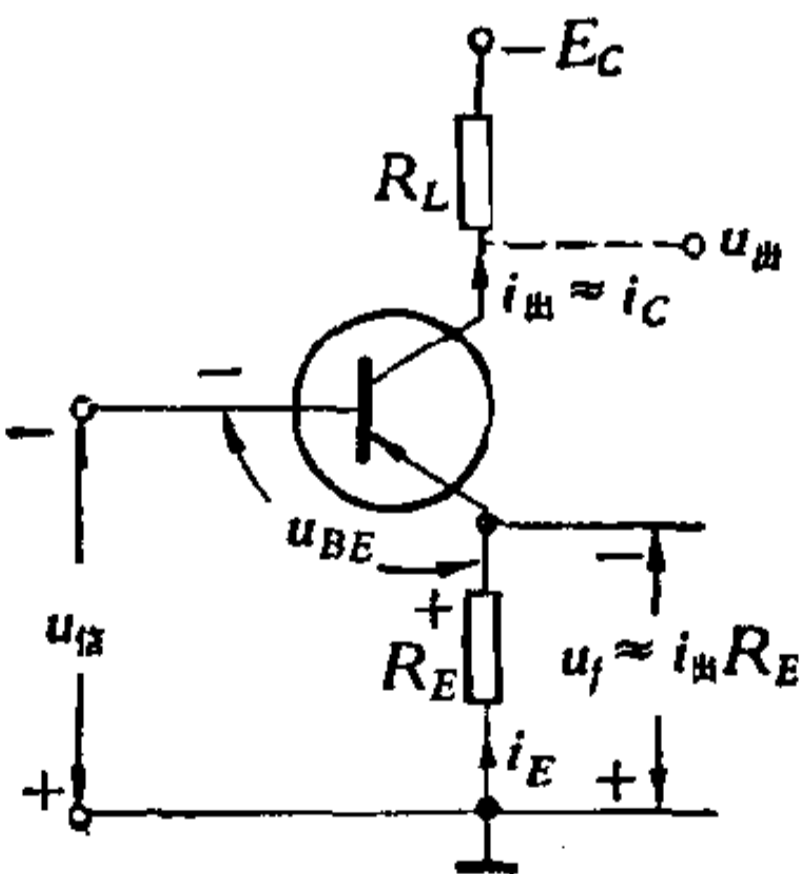


图 2-49 电流串联负反馈电路

① 输出阻抗较大:

因为

$$i_E = \frac{u_f}{R_E} = \frac{u_{\text{信}} - u_{BE}}{R_E}$$

$$u_{BE} \approx 0$$

所以 $i_E \approx \frac{u_{\text{信}}}{R_E}$

$$i_{\text{出}} \approx i_E = \frac{u_{\text{信}}}{R_E}$$

由此可见：输出电流 $i_{\text{出}}$ （这里即集电极电流）主要是由信号电压 $u_{\text{信}}$ 及射极电阻 R_E 决定的,负载电阻 R_L 变化时, $i_{\text{出}}$ 不变,即有“恒流输出”性能,也就说明了这种电路的输出阻抗较高(解释见图 2-56)。

② 输入阻抗较高。

这和射极跟随电路相似,可以近似推出：

$$R_{\text{入}} \approx \beta R_E$$

③ 电压放大倍数可以如下推出：

$$u_{\text{出}} = i_{\text{出}} R_L \approx i_E R_L \approx \frac{u_{\text{信}} - u_{BE}}{R_E} R_L \approx \frac{u_{\text{信}}}{R_E} R_L$$

$$\text{所以 } K_u = \frac{u_{\text{出}}}{u_{\text{信}}} \approx \frac{R_L}{R_E}$$

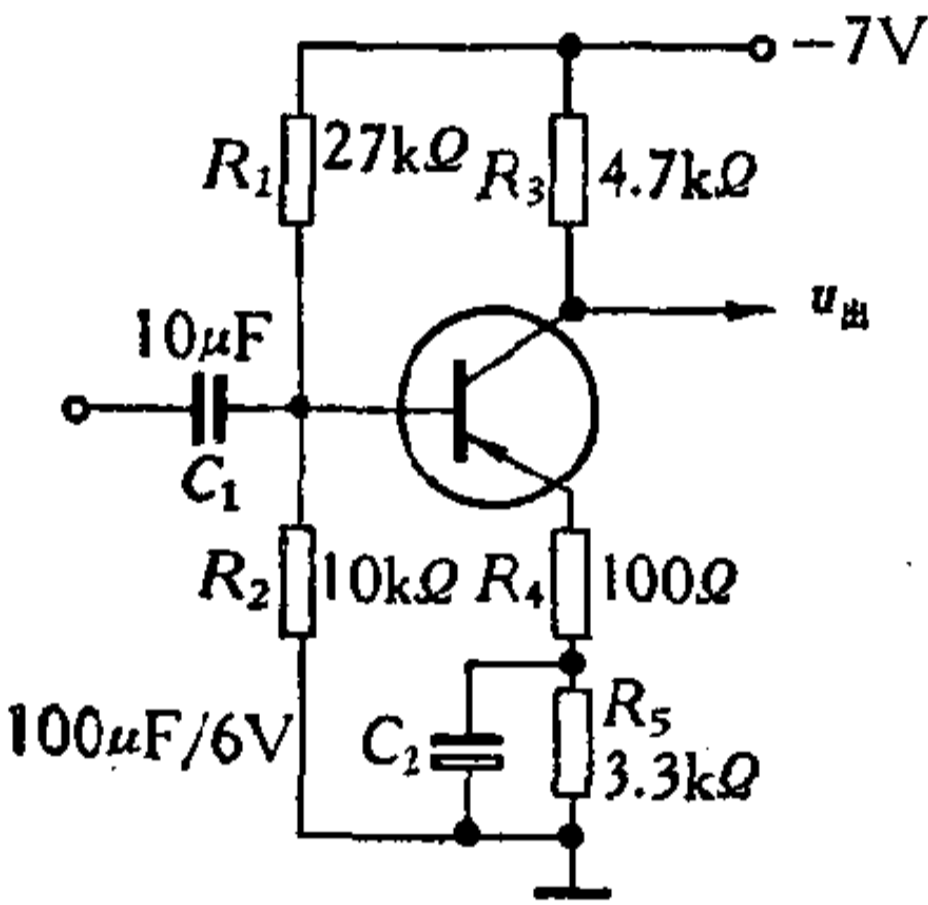


图 2-50

由这个式子，我们可以看到 R_L 变大, R_E 变小,可以增加电压放大倍数,这式子对于调试可作参考,但同时要兼顾对工作点稳定性的影响。

图 2-50 是用于 50 瓦扩大机的串联电流负反馈电路的实例。

其中 R_5 是起着稳定静态工作点作用的反馈电阻。当输入交流信号时,由于有 C_2 的旁路作用,故 R_5 对交流信号不起反馈作用,而 R_4 对稳定工作点和交流信号都有反馈作用。

例 3： 电流并联负反馈电路。

电路见图 2-51。反馈电阻是 R_f , 反馈电压 $u_f = i_E R_E \approx i_{\text{出}} R_E$, 它与输出电流近似成正比,所以是电流负反馈。再从输入端看 $i_B = i_{\text{信}} - i_f$, 所以总的说：这种电路属于电流并联负反馈。经理论及实践证明,它具有较高的输出阻抗及较低的输入阻抗。一个实际电路见图 2-52。

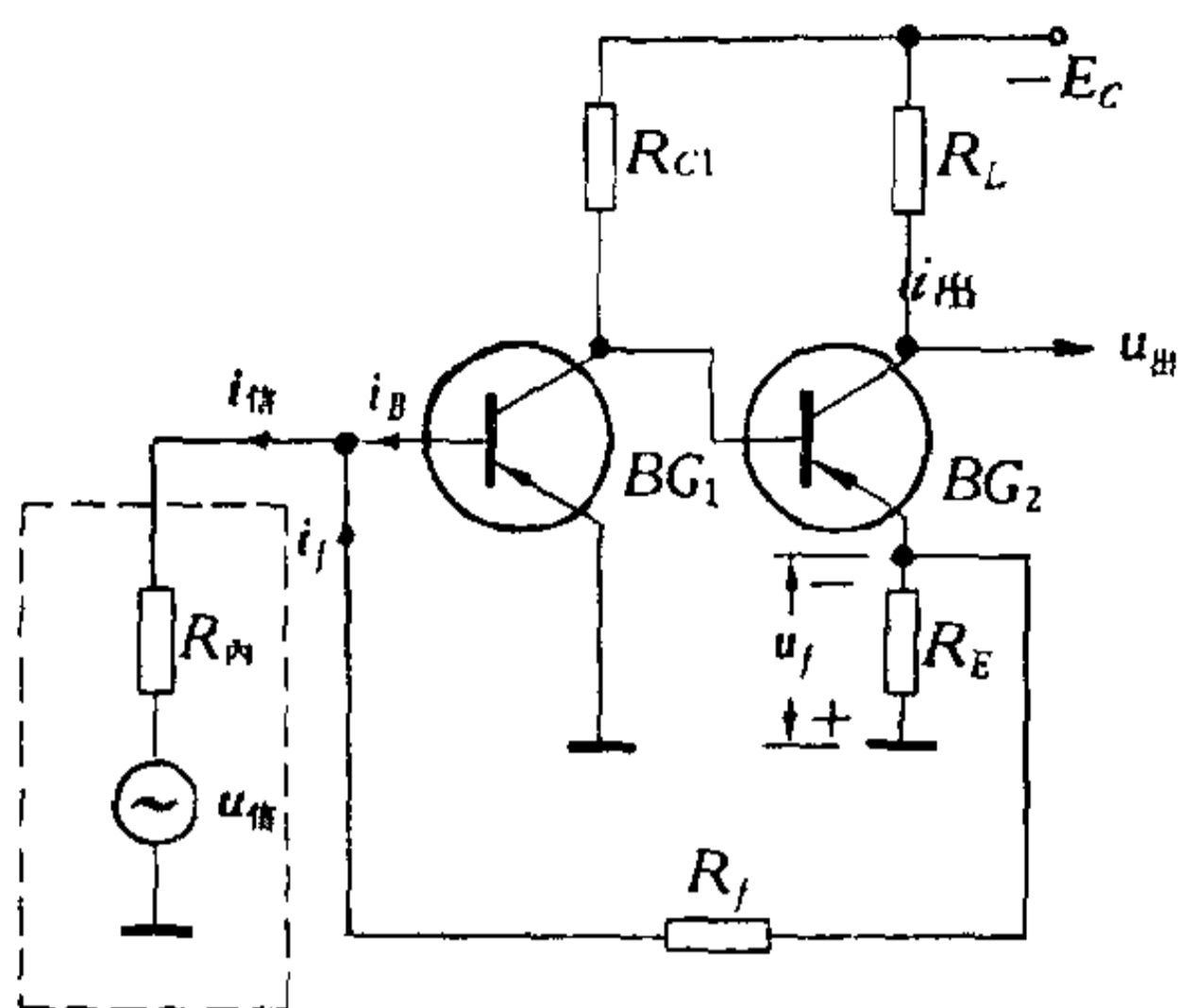


图 2-51 电流并联负反馈

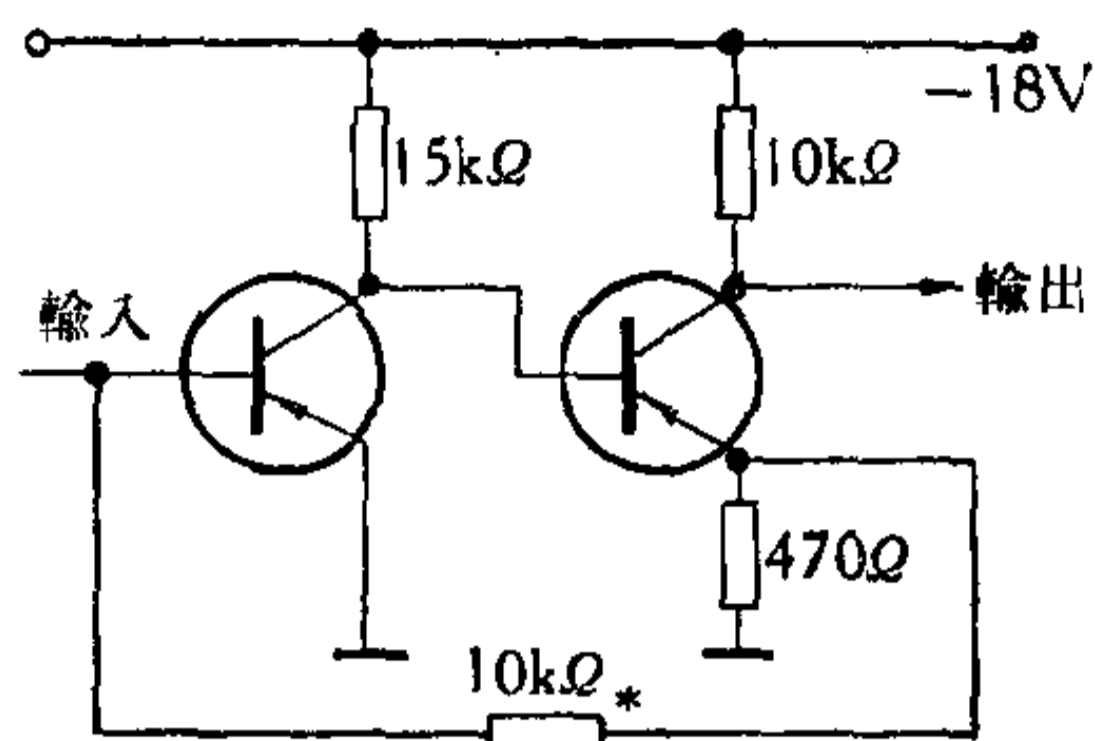


图 2-52 电流并联负反馈实例

例 4: 双管的电压串联负反馈电路。

这里,我们举出了用在 50 瓦扩大机中的推动级电路 (图 2-53)的例子。对于这种电路,可以依照前面讨论过的方法进行分析,容易得知它是属于电压串联负反馈电路。

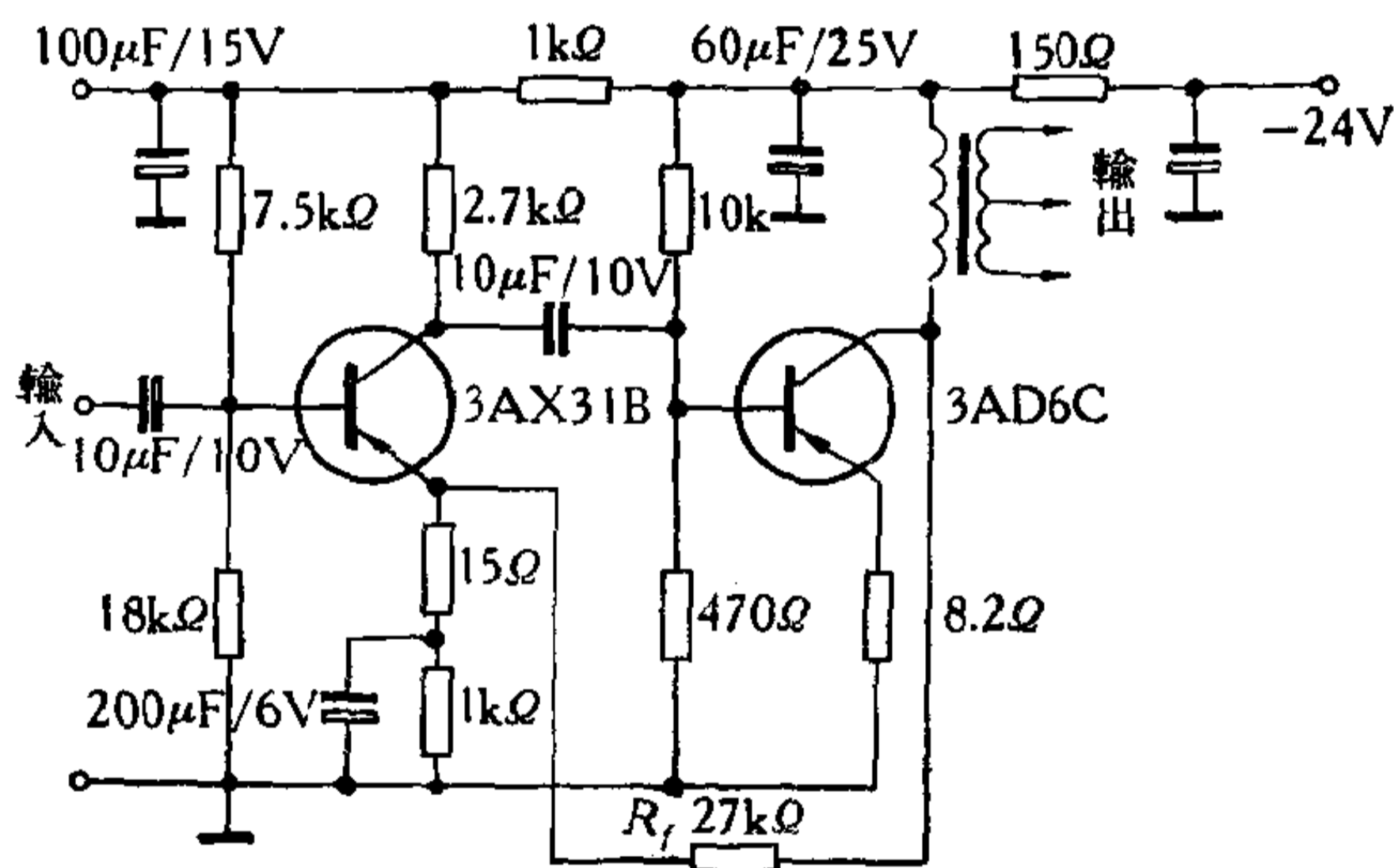


图 2-53

4. 关于负反馈电路中的一些其它问题

(1) 如何判别一个电路中的反馈是“负反馈”?

这个问题很重要,因为反馈电路接法接错的话,可能使其

反馈信号不是削弱了输入信号,而是增强了输入信号的作用,使放大倍数增加,引起了振荡(振荡概念见第五章),这在低频放大电路中是不允许的。因此有必要讨论一下判别“负反馈”的方法。

在判别时,首先假定交流信号源处于某个瞬时极性,然后根据前面已讨论过的放大器的集极与基极瞬时极性相反,射极与基极瞬时极性相同的关系,逐级地推出各点瞬时极性,最后可以判断反馈到输入端的电压瞬时极性是否使得信号源对放大器输入端的作用削弱了,假如是削弱的话,就是“负反馈”。

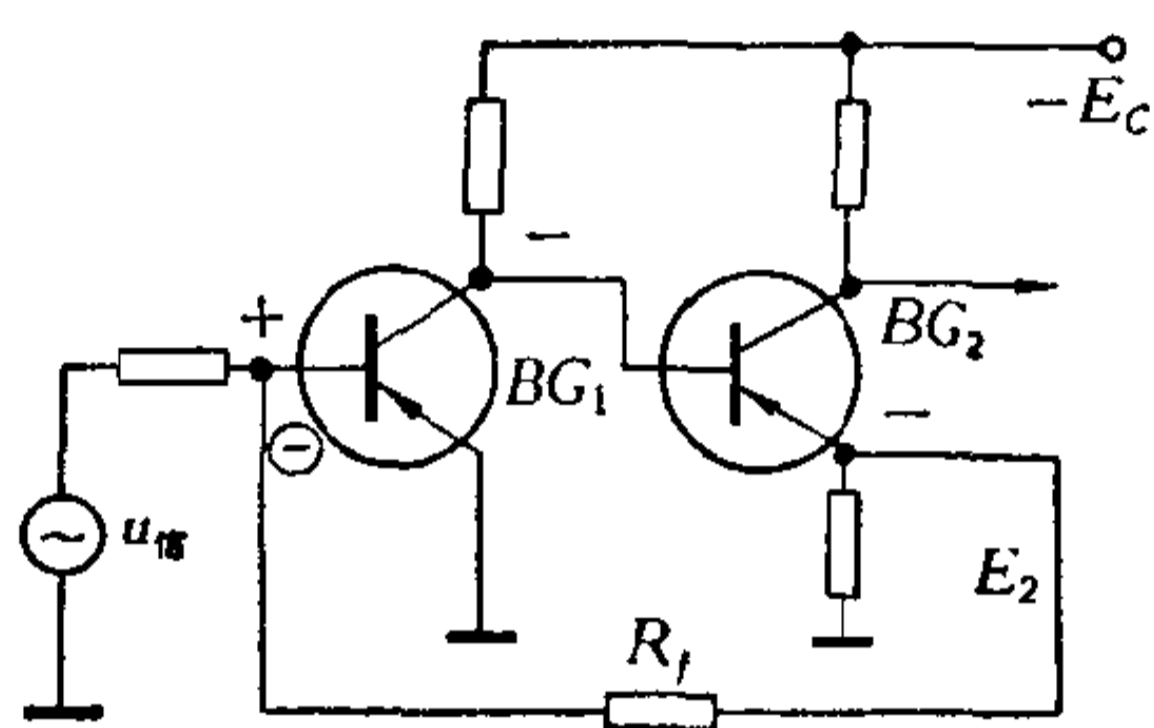


图 2-54

现举图 2-52 电路的例子,我们把它重画在图 2-54 中并标出各点的瞬时极性,用+和-表示。显然,从 E_2 处引出的反馈电压的瞬时极性是负的,它通过 R_f 加到 BG_1 基极上(用 \ominus 表示),削弱了信号源正极性的作用,因此是“负反馈”。

又如图 2-53 的电路,我们将电解电容都看成短路(交流阻抗很小),简化成图 2-55,并逐级标出瞬时极性,可以看到从 BG_2 集极 C_2 引出的正极性反馈电压(用 \oplus 表示)加到 BG_1 射极 E_1 ,使 E_1 电位提高,而削弱了加在基极 B_1 的信号作用,使 u_{BE1} 减小,所以是“负反馈”。

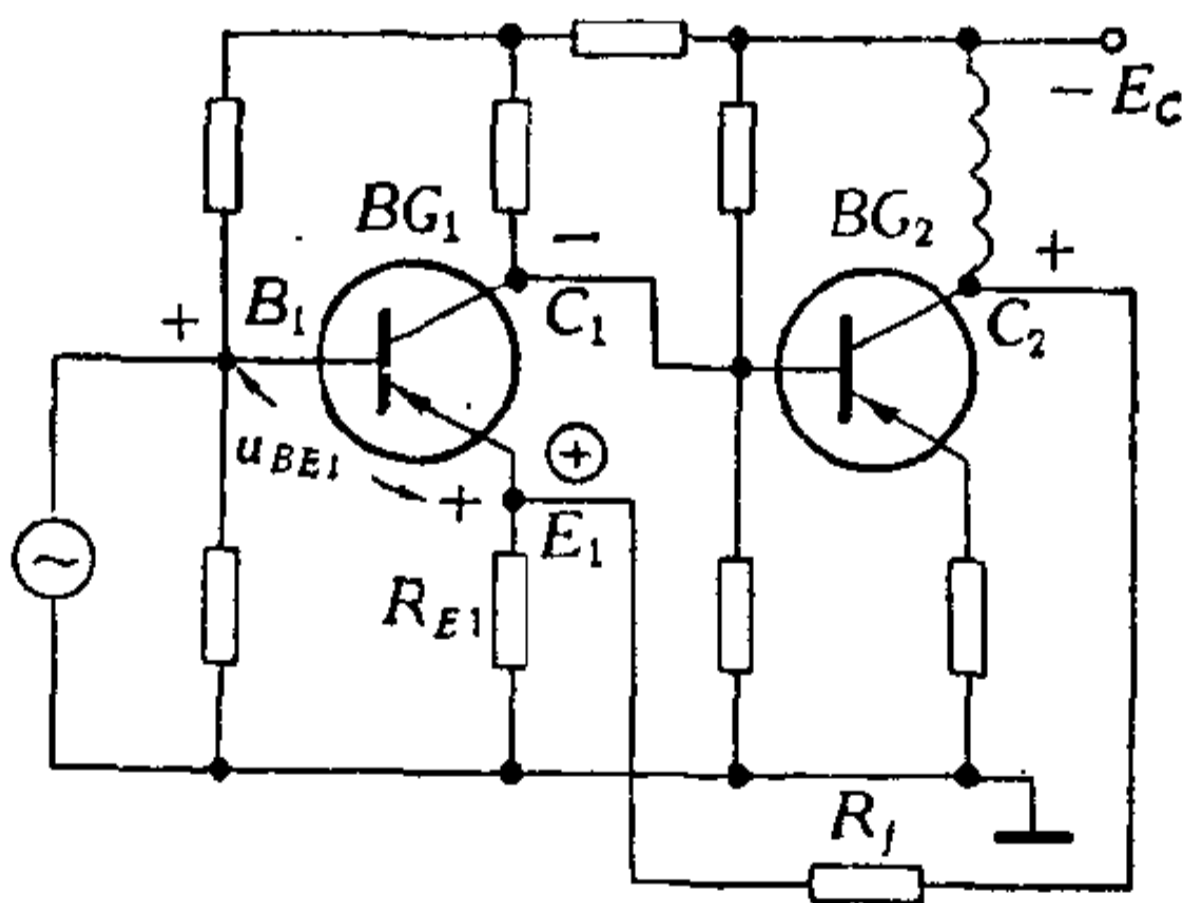


图 2-55

(2) 什么情况下选择什么形式的负反馈呢?

对于具体情况作具体的分析。但从要求放大器有合适的

输入输出阻抗来说,有下面几条规律:

当要求放大器有高输出电阻(即有恒流输出性能)时,用电流负反馈。

当要求放大器有低输出电阻(即有定压输出性能)时,用电压负反馈。

当要求放大器有高输入电阻时,用串联负反馈。

当要求放大器有低输入电阻时,用并联负反馈。

这里需解释一下,为什么说输出电阻低的电路有定压输出性能,而输出电阻高的电路有恒流输出性能。实际上,我们可从图 2-56 中,说明这个问题。

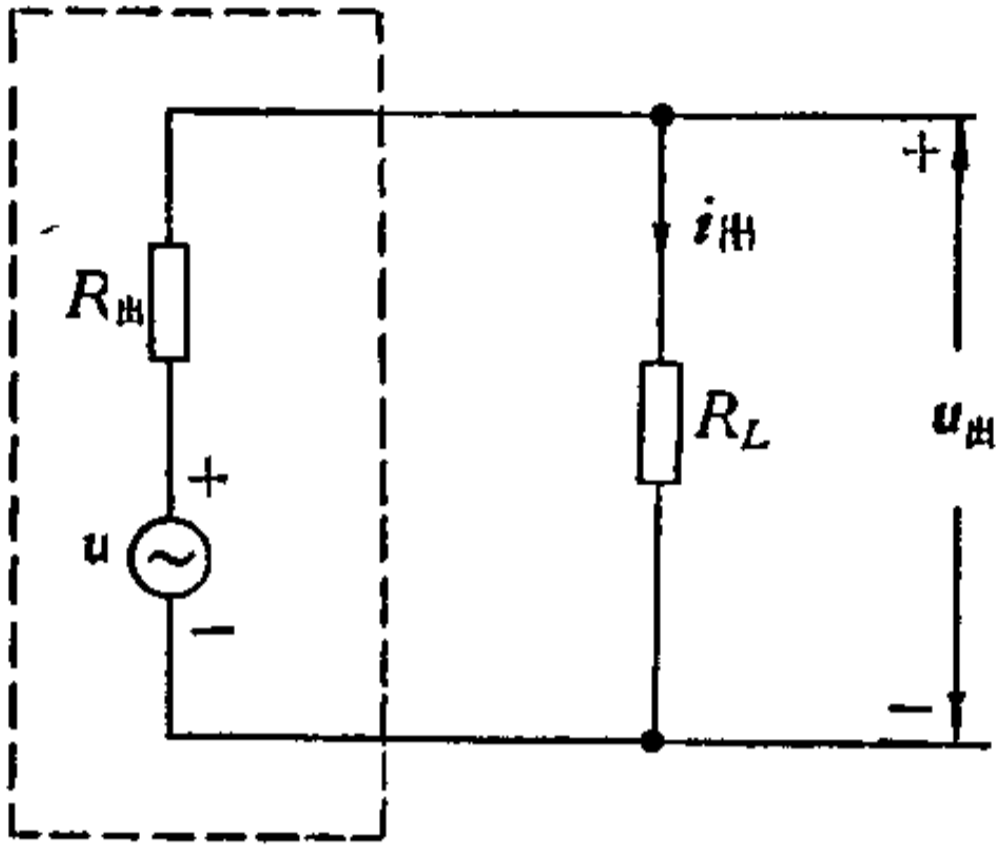


图 2-56

因为
$$i_{\text{出}} \approx \frac{u}{R_{\text{出}} + R_L}$$

显然,当输出电阻比 R_L 大很多 ($R_{\text{出}} \gg R_L$) 时:

$$i_{\text{出}} \approx \frac{u}{R_{\text{出}}}$$

输出电流与 R_L 无关,即 R_L 在满足 $R_{\text{出}} \gg R_L$ 的条件下,当 R_L 变化时, $i_{\text{出}}$ 仍稳定在 $i_{\text{出}} = \frac{u}{R_{\text{出}}}$ 大小,即具有恒流输出性能了。

当输出电阻比 R_L 小很多 ($R_{\text{出}} \ll R_L$) 时:

$$u_{\text{出}} = i_{\text{出}} R_L = \frac{u}{R_L + R_{\text{出}}} R_L \approx u$$

输出电压与 R_L 无关,电路具有定压输出性能。在实际工作中,我们要求一些放大器具有“定压输出”或“恒流输出”

的性能。例如农村广播网中使用的扩音机，要求喇叭负载变化时仍能正常工作，就要加“电压负反馈”措施，以达到“定压输出”。在第四章中讨论的直流稳压电路中，为了使得负载电流变化时，输出电压仍然稳定，也要加“电压负反馈”。

在一些电镀设备、电动单元组合仪表、稳流电源中都要求电路有“恒流输出”的性能。在这些电路中，都加有“电流负反馈”。

(3) 总的说：放大器中的负反馈是提高放大器一系列质量指标的有力措施，但事物都是“一分为二”的。负反馈放大器的一系列优点是在减少了放大倍数的条件下获得的。鉴于反馈放大器的设计计算较麻烦，事实上也不一定有这个必要。一般说，总是先设计一个放大器使其放大倍数比原来要求的大些，然后再引进负反馈进行调试，使其满足生产要求。

第五节 应用实例

1. 手提式扩音机

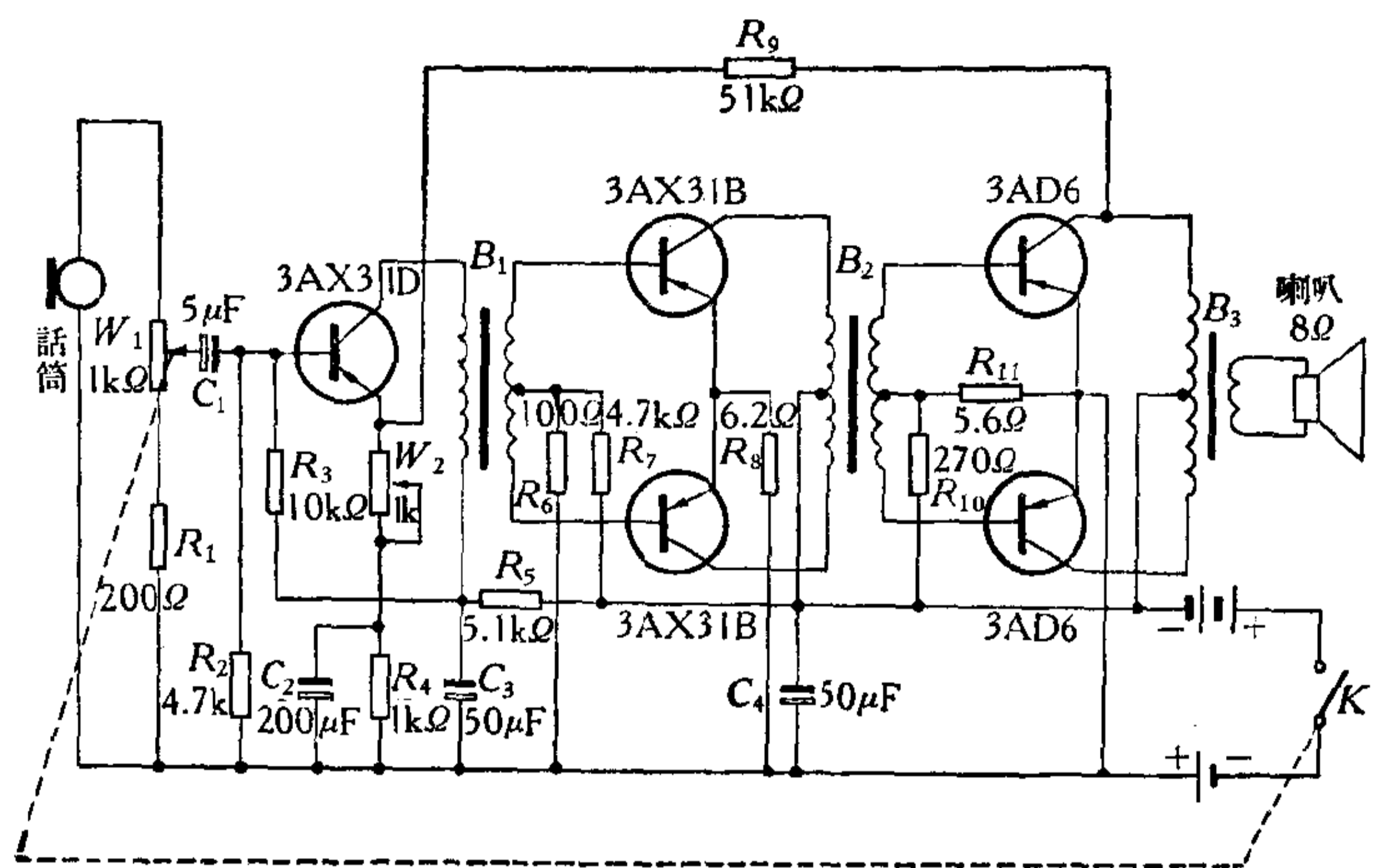
本机由 6 伏干电池供电，其输出功率最大可达 3 瓦。

本机的电原理图见图 2-57 所示，共有三级放大，第一级是由 3AX31D 担任前置放大，当传声器(话筒)被声音所迫振动后，其产生的音频电流输入该级的基极，经放大后之信号由变压器耦合至第二级两基极。第二级是由两只 3AX31B 组成推挽式音频推动电路，信号经再次放大，再由变压器耦合至第三级两基极，第三级由两只 3AD6 组成的推挽式功率放大器，输入信号经功率放大后，由输出变压器推动扬声器。

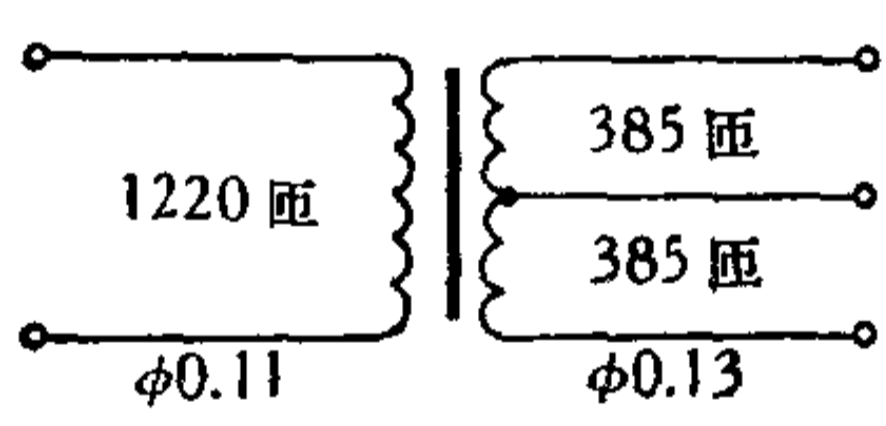
三级放大均系共发射极电路接法，全部增益(指功率放大倍数)约为 60 分贝($\text{分贝} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$)，全机在最大输出功率时

的最大电流为 1.2 安培,无信号输入时为 70 毫安,调节 W_1 就可以改变输出功率的大小。为了获得所需的频率特性以及较小的非线性失真,放大电路接有负反馈电阻,其中 W_2 , R_9 为电流负反馈电阻, R_9 为多级负反馈电阻。

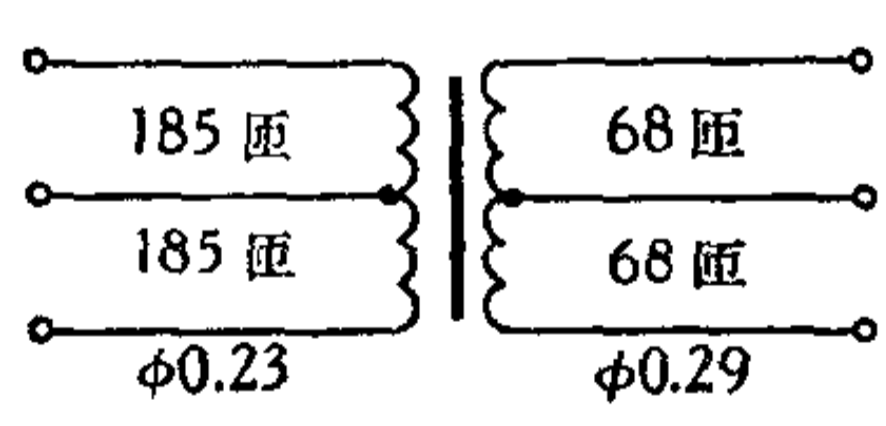
如果扩大机的放大倍数过高,会产生啸叫声。一般可以



B_1 ——电压变压器 $S = 5.5 \times 5.5 \text{mm}^2$
材料: 镍铁钼合金
E 型铁芯



B_2 ——推动变压器 $S = 5.5 \times 5.5 \text{mm}^2$
材料: 镍铁钼合金
E 型铁芯



B_3 ——输出变压器 $S = 10 \times 10 \text{mm}^2$
材料: 矽钢片
E 型铁芯

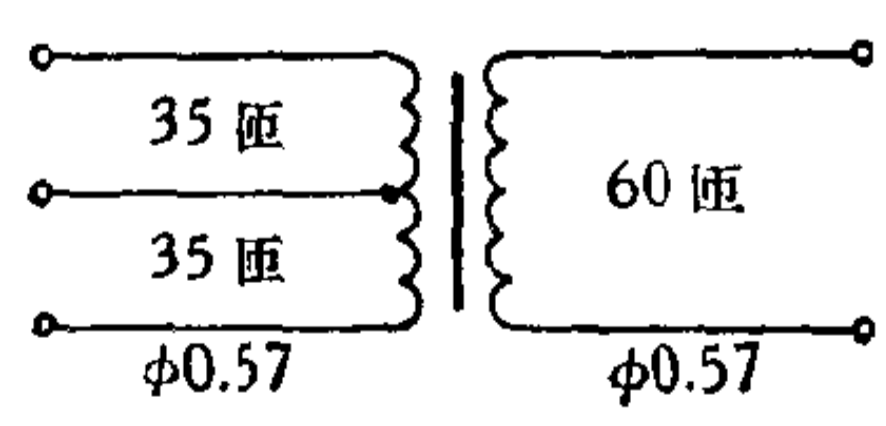


图 2-57 手提式扩音机线路图

通过增强负反馈来解决(改小 R , 或增大 W_2 的阻值)。

目前有些手提式扩音机采用灵敏度较高的压电晶体话筒,因输入信号有显著提高,可以把图 2-57 电路的激励级改成单管。

2. 50 瓦晶体管扩音机

50 瓦晶体管扩音机原理图见图 2-58 所示,本机可使用交、直流两种电源。直流电源由 6 伏电瓶三只串联供电,交流电源 110 伏或 220 伏经电源变压器变压至次级两组各 17 伏,经全波整流电路滤波后得到直流电源。使用直流电源时, D_2 作保护用,以免电源极性接反而损坏机器。

前置放大器共五级,第一级采用射极输出器,以提高输入阻抗与话筒阻抗匹配,第一级的基极分压电阻加接 R_2 , R_3 (100 千欧)也是提高输入阻抗的措施。当传声器 II 和拾音输入时,由于拾音器阻抗很高,因此在拾音器输入加接电阻 R_1 ,为了改善高音特性,在 R_1 上并联电容 C_5 ,传声器 II 不接入信号时,由于传声器 II 不能接地短路,噪声输入较大,为了减小噪声输入,在传声器 II 输入加接电容 C_4 。第二级至第四级为共发射极小信号放大器,在第二级输出处串接 4.7 千欧和 6,800 微微法并联的低音衰减电路,这是因为高音可从 6800 微微法直通,而低音只能从 4.7 千欧上通过而受到损耗。 W_1 , W_2 为音量控制电位器,调节 W_1 , W_2 可以改变输出功率的大小。第三级输出处并接由 C_{16} , R_{28} , R_{29} 组成的串联支路,在 R_{29} 上可以输出一部分信号电压,若输出信号电压送至另一台的拾音器时,可使两台 50 瓦的扩音机合成 100 瓦扩音机使用。第五级为甲类功率放大器,它的输出供给下级推挽功率放大器提供一定输入功率。扩音机最后输出级为推挽功率放大器。为了提高放大器的稳定性和改善非线性失真,加宽通带,放大

器各级都加了不同程度的反馈, R_{15} , R_{18} , R_{26} , R_{33} , R_{38} 都是电流负反馈电阻。从 BG_7 集电极用 R_{39} 电阻负反馈至 BG_6 的发射极也能改善音质和减小失真。从输出用一阻容并联电路负反馈至 BG_6 的发射极, 这样改善了放大器的频率响应和失真, 同时具有较好的负载调整率。功放集电极至集电极之间加接阻容串联电路以提升低音。为了提高电路的稳定性和减小交流声, 供电电路加接三级去耦滤波器 R_{20} , C_1 ; R_{35} , C_{16} ; R_{41} , C_{22} 。

扩音机的整机频率响应为 150 周至 6000 周。

扩音机的扬声器配接适当是很重要的, 若配接不适当, 不但会使输出失真, 减小输出功率, 严重的甚至烧毁扬声器及晶体管。下面结合图 5-28 所示 50 瓦扩音机谈谈扬声器应如何配接。

配接扬声器时, 不仅使扬声器和扩音机的阻抗要配接适当, 而且二者功率也要配接适当。

该 50 瓦扩音机有 8 欧输出和 250 欧输出两个接头, 是为了适应不同情况下配接扬声器的需要。8 欧输出的接头, 只要所接扬声器的阻抗及功率相当, 就可以直接和它连接应用。

例一: 如有 25 瓦 16 欧扬声器两只, 欲将它接在扩音机的 8 欧输出端, 只需把两只扬声器直接并联配接。因为, 两只 16 欧扬声器并联后的总阻抗反 8 欧, 而且每只扬声器所分担的功率为 25 瓦, 在扬声器额定功率范围内, 这样的配接是正确的。

例二: 如有两只 15 瓦 8 欧的扬声器, 是否可按图 2-59 (1) 所示把它们直接并接在扩音机 8 欧的接头处呢? 不能, 原因是两只 8 欧的扬声器并联之后总阻抗为 4 欧, 与扩音机的输出阻抗不匹配了, 容易引起扩音机过载而烧毁晶体管

及损坏扬声器。正确的接法应象图 2-59(2) 所示。先把两只 8 欧扬声器串接在一起，而后与一只 25 瓦 16 欧的假负载电阻并联起来，接于 8 欧输出端。不难看出，这样连接后，负载总阻抗为 8 欧，每只扬声器上所分担的功率为 12.5 瓦。加接假负载电阻是为了凑足输出功率和实现阻抗匹配，以防止扩音机或扬声器的过载。

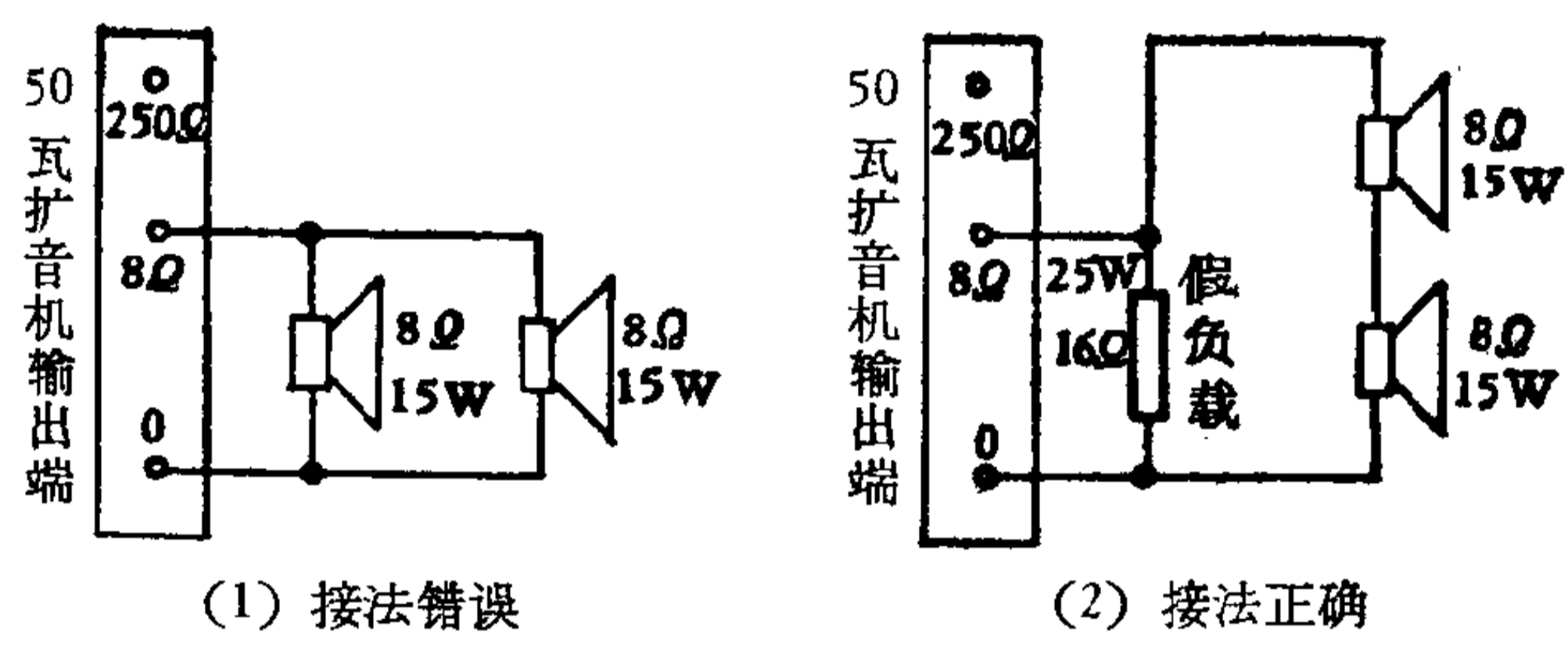


图 2-59

50 扩音机的 250 欧输出端，系供扬声器装置距离较远时加接线间变压器（或称输送变压器、线路变压器）之用。在工矿企业、人民公社、机关学校使用的扩音机，一般扬声器距离播音室较远，实际需要线路比较长，应从扩音机高阻抗接头输出，此时扬声器与扩音机之间须采用线间变压器耦合，以实现阻抗匹配。

例三：假若有大小不同功率扬声器 6 只（10 瓦 8 欧 4 只，5 瓦 4 欧 2 只），作为 50 瓦扩音机的负载，均须使用线间变压器作阻抗变换，该如何配接呢？我们首先可以采用下式算出不同功率扬声器线间变压器的初级阻抗：

$$R_{初} = \frac{P_{出}}{P_{扬}} \times r_L$$

式中： $R_{初}$ 为线间变压器的初级阻抗
 $P_{出}$ 为扩音机的输出功率

$P_{\text{扬}}$ 为扬声器分担功率

r_L 为扩音机的输出阻抗

设 $R_{\text{初1}}$ $R_{\text{初2}}$ 分别为 10 瓦、5 瓦扬声器线间变压器的初级阻抗，则有

$$R_{\text{初1}} = \frac{50 \text{ 瓦}}{10 \text{ 瓦}} \times 250 \text{ 欧} = 1250 \text{ 欧}$$

$$R_{\text{初2}} = \frac{50 \text{ 瓦}}{5 \text{ 瓦}} \times 250 \text{ 欧} = 2500 \text{ 欧}$$

然后，可根据本章第二节介绍的计算变压器匝数比的公式

$n = \sqrt{\frac{R_{\text{出}}}{R_{\text{入}}}}$ 来计算，这里 $R_{\text{出}}$ 为线间变压器初级阻抗， $R_{\text{扬}}$ 为

扬声器的阻抗，因此，10 瓦扬声器线间变压器的匝数比

$$n = \sqrt{\frac{1250 \text{ 欧}}{8 \text{ 欧}}} = 12.4, \text{ 5 瓦扬声器线间变压器的匝数比}$$

$$n = \sqrt{\frac{2500 \text{ 欧}}{4 \text{ 欧}}} = 25。 \text{线路配接方法而图 2-60 所示。}$$

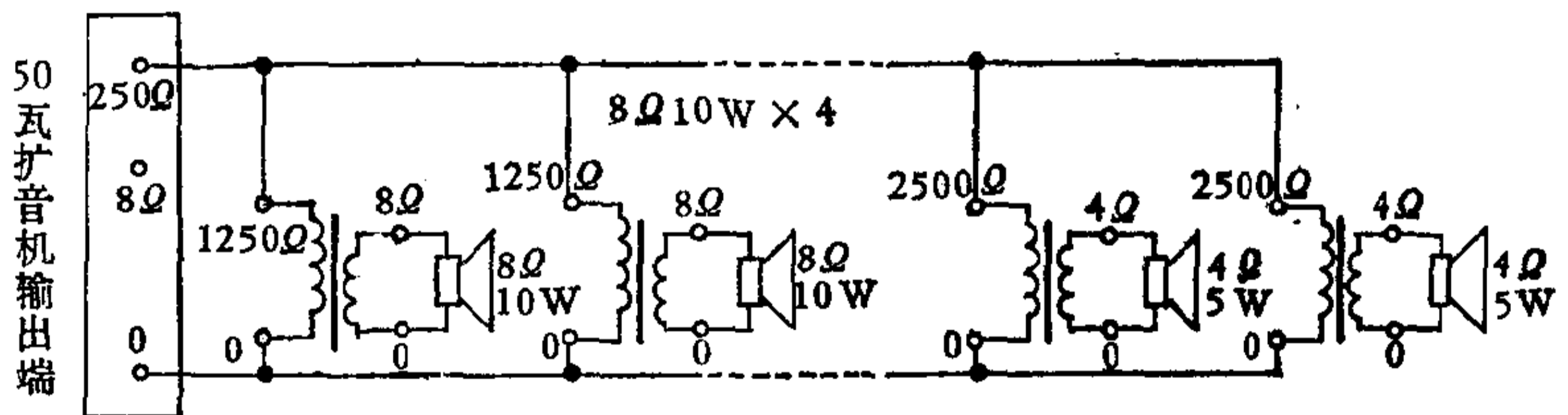


图 2-60

市售各种规格线间变压器的初次级线圈均有不同阻抗的抽头，可供使用者选用。若遇到线间变压器初级阻抗与所需接入的阻抗略有出入时，可接在近似的阻抗端子上。譬如，一般 10 瓦线间变压器的初级抽头有 1000 欧、1500 欧 2000 欧

等好几档,如果按计算需接 1250 欧的阻抗,此时,我们可以把它接在 1500 欧的端子上。通过下面计算,扬声器所承受的实际功率

$$P_{\text{扬}} = \frac{P_{\text{出}} r_L}{R_{\text{初}}} = \frac{50 \text{ 瓦} \times 250 \text{ 欧}}{1500 \text{ 欧}} = 8.33 \text{ 瓦}$$

因此,是符合要求的。

在安装扬声器输送线时,不宜采用过长的线路和过细的导线,因为扬声器的阻抗一般是很低的。如果线路过长或导线过细,导线上的电阻值相对扬声器阻抗来说就很可观了,结果大部分能量将会消耗在线路上,降低了有效功率的输出,同时会引起失真。因此把扬声器配接在低阻档作直接输送时,导线要粗一些,短一些。必要用长线路时,应采用线间变压器。

本章小结

1. 低频放大器晶体管工作点的选择;对于小信号放大器工作点 Q 只要选择在晶体管特性的线性区域即可。甲类功率放大器的工作点 Q 选择在靠近 P_{CM} 极限区域以下的直流负载线上。乙类推挽功率放大器的工作点 Q 则选择在集电极电流 $I_C \approx 0$, 电压接近 E_c 的位置上。

2. 放大器的偏置电路有固定偏置,电压反馈式偏置,分压式电流负反馈偏置等等。其中以分压式偏置电路热稳定性较好,固定偏置较差。在热稳定性要求高的地方,可采用热敏电阻,温度补偿二极管等进行温度补偿。对于锗管,由于 I_{CBO} 较大一般采用分压式偏置电路。对于硅管,由于其 I_{CBO} 只有毫微安数量级,一般可采用固定偏置。

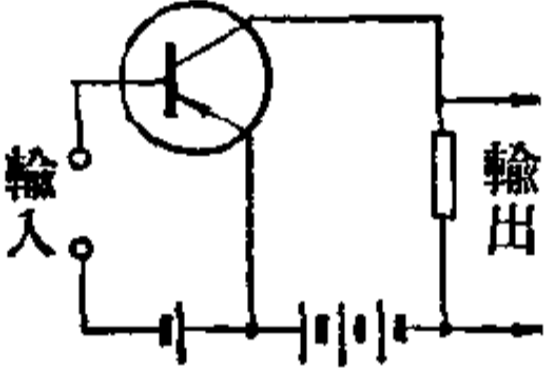
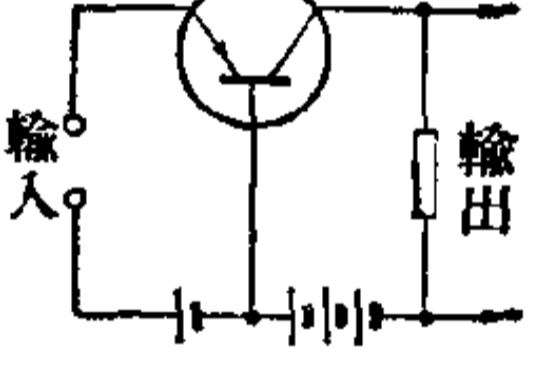
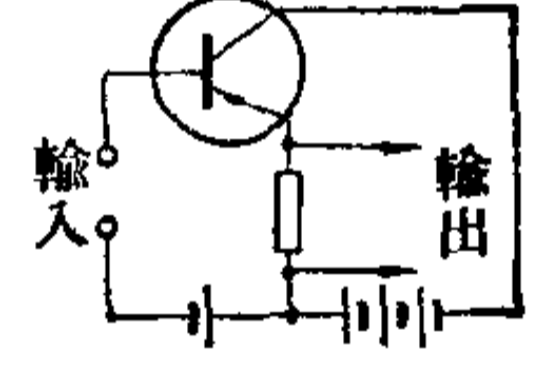
3. 由于功率放大器输出功率大,要求输入的信号亦大,容

易产生较大的非线性失真。因此在功率放大器中一方面要注意效率，另一方面还必须注意怎样在允许的非线性失真下获得较大的功率输出，一般采用变压器耦合来进行阻抗变换，以获得所要求的最佳负载。

在小信号放大器中，输入信号小，失真亦小，只希望获得较大的增益，效率很少考虑。 有时为了获得较大的增益需注意“匹配”问题。

4. 晶体管放大器有三种基本组态，即共基极接法共发射极接法和共集电极接法，每种组态都有自己的特点，详见下表。

5. “负反馈”是改善放大器性能指标的重要措施。它能提

组态	共发射极电路	共基极电路	共集电极电路
<div> <div>电路图</div> <div>指标</div> </div>			
电流放大倍数 K_i	β	$\alpha(<1)$	$1 + \beta$
电压放大倍数 K_u	大	大	小(<1)
功率放大倍数 K_p	最大	不大	不大
输入阻抗 R_{in}	小	最小	最大
输出阻抗 R_{out}	大	最大	最小
失真情况	失真较大	失真较小	失真较小
频率特性	差	好	好
稳定性	最差	较好	较好
用途	由于功率放大倍数大而用得最广	用于极高频率的放大和振荡	用作阻抗变换器

高放大倍数稳定性,稳定工作点,加宽频带,减小非线性失真,减小噪音,改变输入输出电阻等。这种具有“负反馈”的放大电路是我们经常使用到的。

第三章 直流放大器

在毛泽东思想阳光普照下的伟大的祖国，一个社会主义革命和社会主义建设新高潮正在兴起，我国工人阶级发扬了“**独立自主、自力更生**”的革命精神，土法上马，大搞电子工业群众运动，实现生产过程的自动化和半自动化。在双水内冷发电机机组中，在纯氧顶吹转炉炼钢中，在造纸机分部传动调速设备中都应用了自动调节设备。历史雄辩地说明：人民群众有无限的创造力，什么洋框框，洋、大、全，都被中国工人阶级踩在脚下！

在自动控制和自动测量的生产过程中，首先要将一些参数(如温度、转速、照度等等)用传感器(如热电偶、测速装置、光电元件等等)转变为电量，这些微弱的电信号的极性往往是固定不变的(直流信号)或者是变化极为缓慢的(频率很低的信号)，经放大后输出至控制机构。直流放大器的主要作用就是放大直流或频率很低的微弱信号。对于这些信号的放大不能应用阻容耦合或变压器耦合放大器，因为直流或缓变的信号在阻容或变压器耦合的放大器中会被耦合电容的隔直作用隔掉，或者被变压器初级线圈所呈现的低阻抗短路，只有采用直接耦合方式的放大器才能将这些信号无阻碍地一级一级放大后送到输出端。

第一节 直接耦合放大器

“直接耦合”是否只是把阻容耦合放大器的耦合电容短路

连接后就可以了呢？也就是说是否仍照阻容耦合放大器一样来考虑建立直流工作点呢？我们说不能这样，因为这里有着前级跟后级的牵制问题。我们知道阻容耦合放大器的耦合电容，一方面是起着放大器的前后级耦合作用，另方面又起着前后级的隔直作用(阻隔前后级的直流联系)，因此低频放大器前后级的直流工作点是没有牵连的。而直接耦合放大器是后

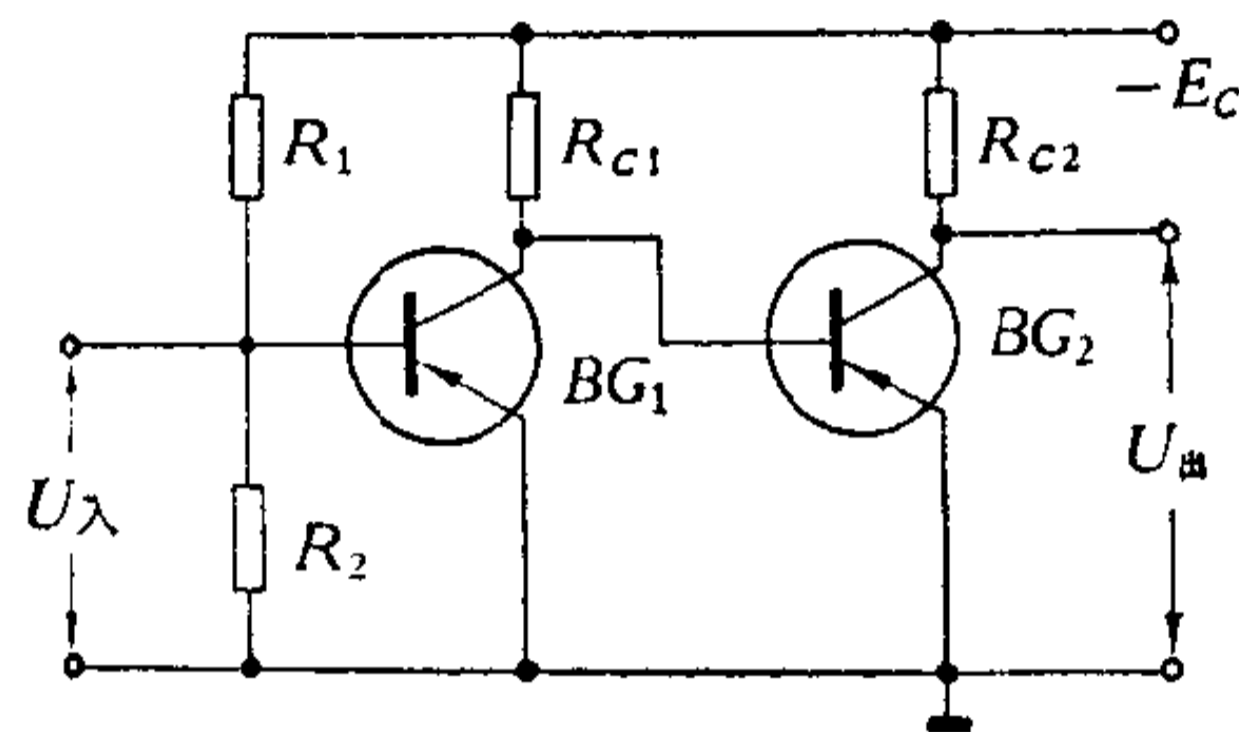


图 3-1

级基极直接与前级集电极连接，即后级基极电位就是前级集电极的电位，并且前级的负载电阻 R_{C1} 同时又是后级的基极电阻(见图 3-1)，可见直流放大器前后级之间是相互牵制的。

由于晶体管发射结的正向压降是很低的，一般仅零点几伏，因此与晶体管 BG_2 基极相连接的前级 BG_1 的集电极电位也只能被限制在这样小的范围内，也就影响了前级的线性工作范围，更为严重的是，当前一级工作状态选得不当，如集电极电阻 R_{C1} 阻值太小， BG_1 集电极电位就越负，会使 BG_2 的基极电流过大，导致后级管子 BG_2 烧坏。所以在直接耦合放大器中必须采取一定的措施来保证合适的工作点。

在图 3-2 的直接耦合放大电路中，后级晶体管

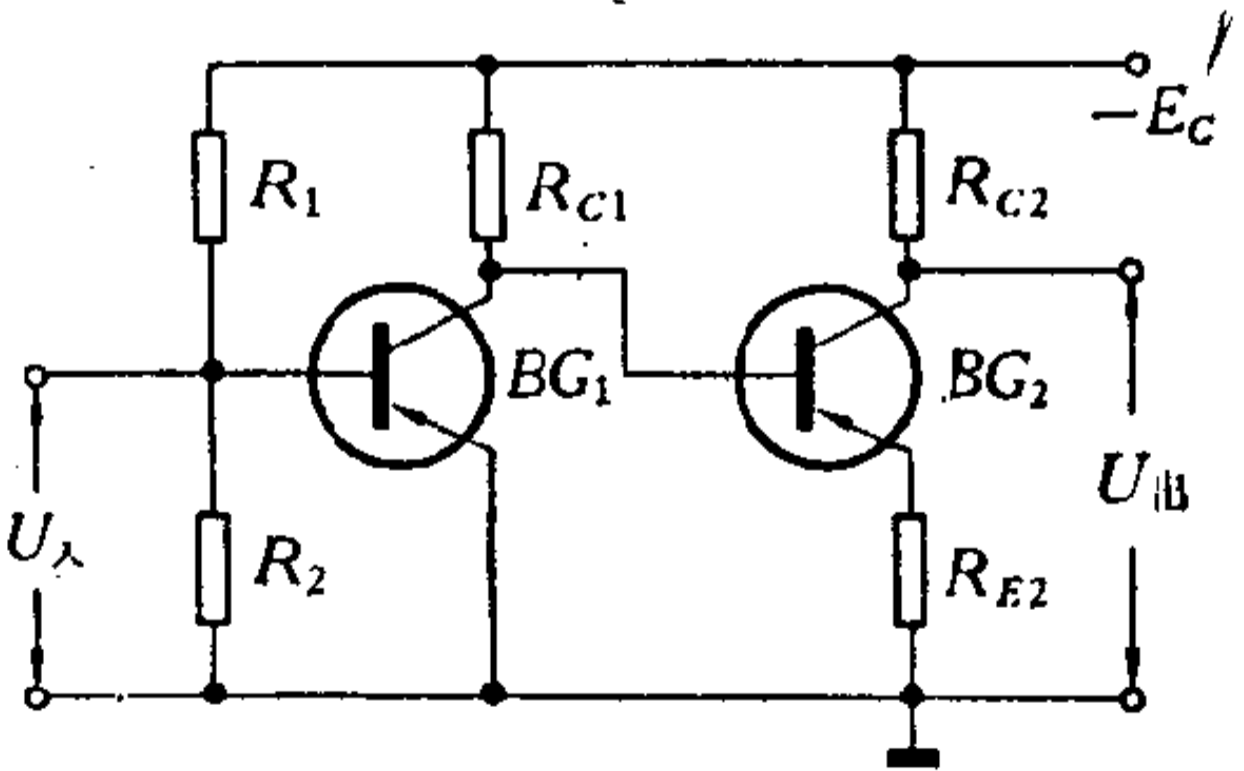


图 3-2

发射极接电阻 R_{E2} ，在集电极电流流过 R_{E2} 时会产生压降 $U_{R_{E2}}$ ，此时前级管压降 U_{CE1} 增大了 ($U_{CE1} = U_{BE2} + U_{R_{E2}}$)，所以扩

大了放大器的线性工作范围。但是电阻 R_{E2} 有负反馈作用,使放大倍数下降。如果用稳压管或硅晶体二极管代替电阻 R_{E2} 可克服此矛盾,既扩大了放大器的线性工作范围,又不降低放大器增益。如图 3-3 所示。

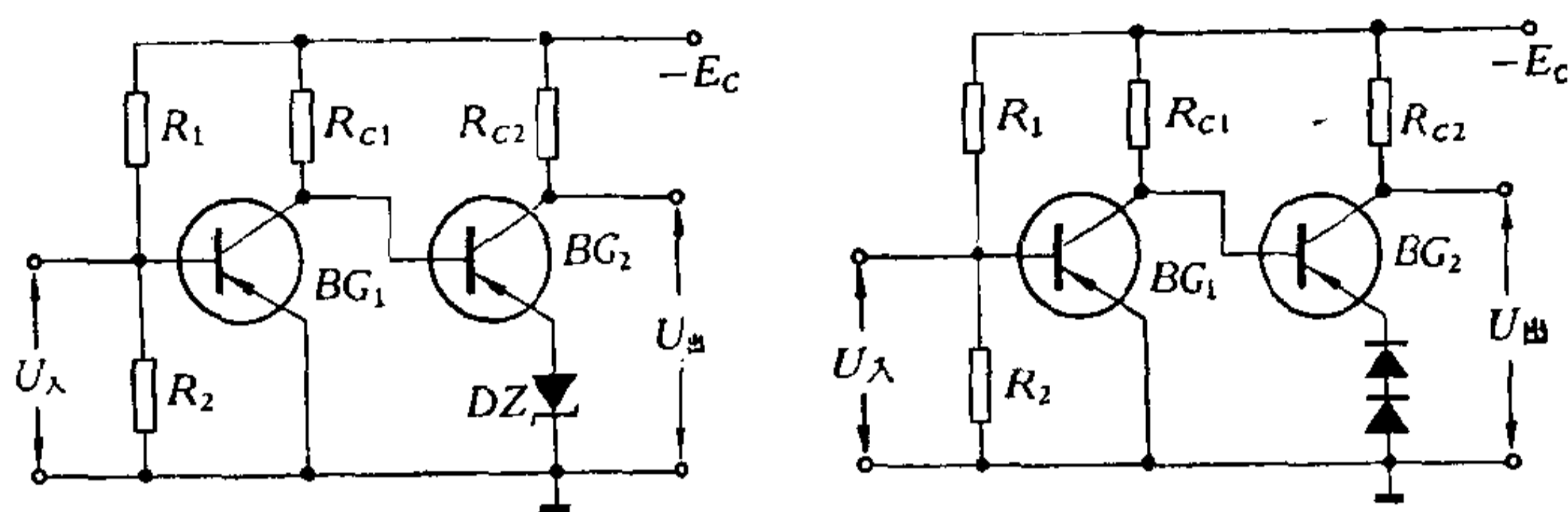


图 3-3

在生产实际中常应用另一种具有电流并联负反馈的两级直接耦合放大电路,如图 3-4 所示。放大器中输出电流的一部分通过电阻 R_F 反馈到输入端,当管子 BG_1 由于温度上升,使得 I_{C1} 增加时,引起 BG_1 的集电极电位变正一些,使 BG_2 的集电极电流 I_{C2} 减小,这样在电阻 R_{E2} 上的压降就减少,于是通过反馈电阻 R_F 加到 BG_1 基极上的电流减小,促使 I_{C1} 减小。这样的过程,使电路有稳定作用。我们知道,在直接耦合电路中由于级间的互相牵制会造成电路的不稳定,而这里却利用级间的互相牵制使电路的工作稳定。这说明“在一定的条件下,坏的东西可以引出好的结果”,在这里,条件是重要的,没有负反馈这个条件,电路是不会从不稳定向稳定转化的。根据第二章学过的负反馈原理,可以看出

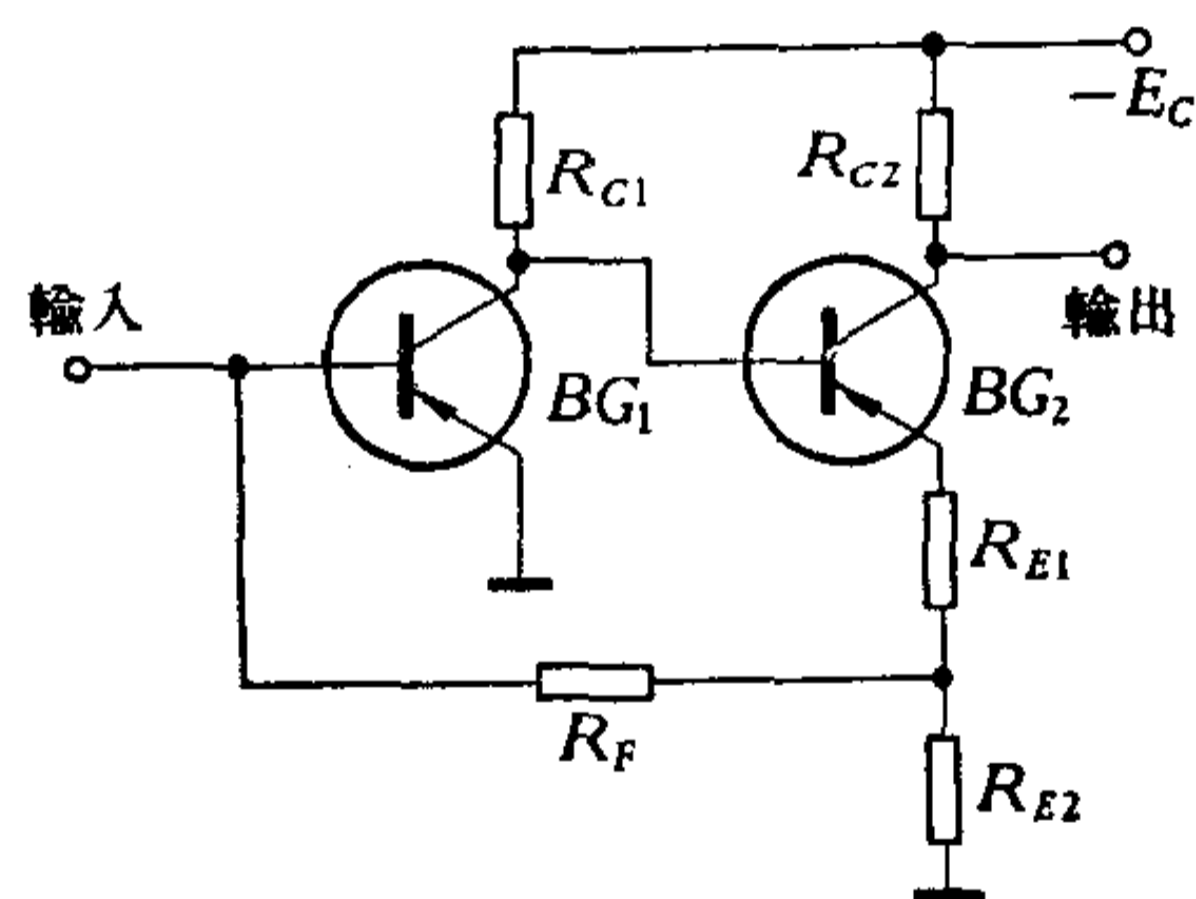


图 3-4

由于负反馈的引入，减小了放大器的输入阻抗和增加了放大器的输出阻抗。

此电路调试时可以调节反馈电阻 R_F 的大小或者改变电阻 R_{E1} 与 R_{E2} 的分压比。 R_{E2} 越大或者 R_F 越小，负反馈越强，电路的稳定性也越好，但增益损失越多。由于此电路的稳定性好，低频放大性能也好，所以在交流宽频带放大器中也得到了广泛的应用。目前工厂中生产的型号 5 G 722 集成电路是有反馈对的宽频带放大器。其管壳外形图与电路图如图 3-5 所示。整个电路有 10 根外引线，用作放大器时，将(8)、(9)

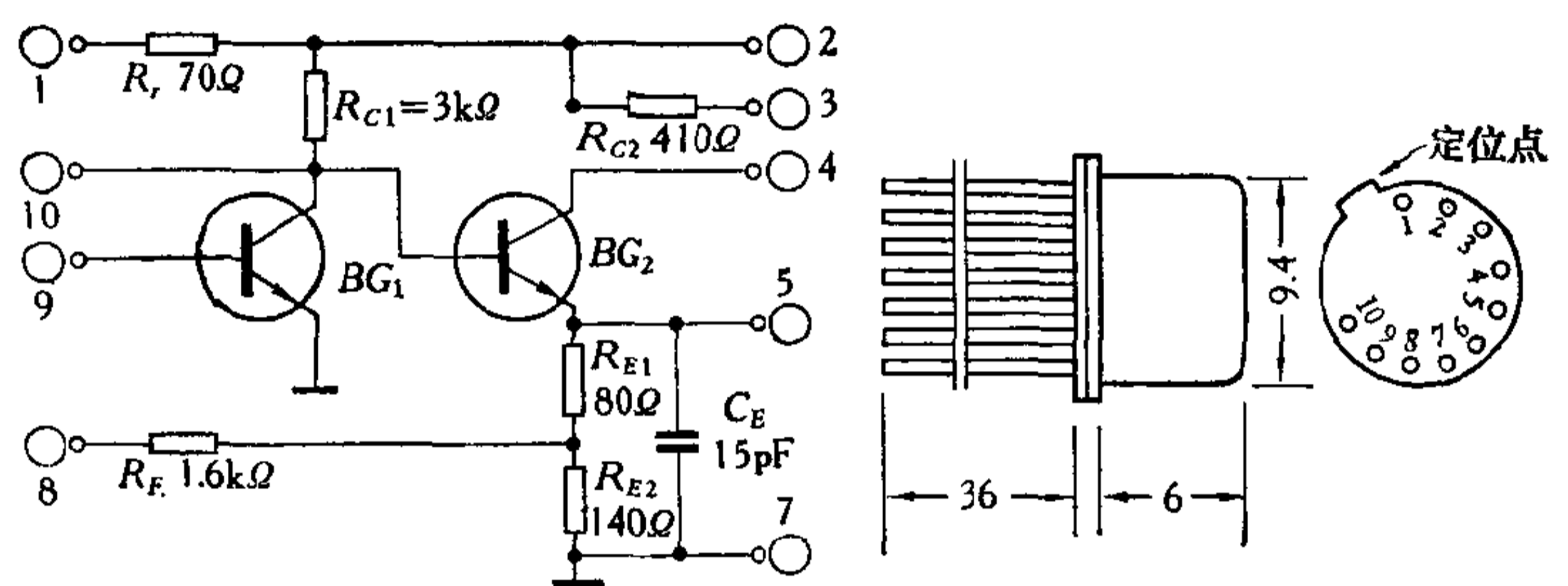


图 3-5

脚相连作输入端；(3)、(4)脚相连作输出端；在(1)、(7)或(2)、(7)处接入电源电压。电容器 C_E 起频率补偿作用。5G722 集成电路有多种用途，例如作放大器、振荡器等等。

第二节 差动放大器

直接耦合放大电路能够放大缓慢变化的信号，那么晶体管参数随温度的变化，电源电压的变动以及电阻数值的变化也将同样会通过各级得到放大，这就是说，即使输入端不加信号，输出端的输出也不是零，这种现象习惯上称作“零点漂移”。

“研究任何过程,如果是存在着两个以上矛盾的复杂过程的话,就要用全力找出它的主要矛盾。”在晶体管直流放大器中产生漂移的原因很多,主要原因是晶体管穿透电流 I_{CE0} 、基极与发射极间电压 u_{BE} 以及电流放大系数 β 随温度的变化。特别是第一级的影响最大,因为最后一级晶体管穿透电流随温度的变化,只影响本级的工作,而第一级的变化经逐级放大后,影响了整个放大器的工作。

上一节用直接耦合的方式解决直流放大器级间耦合的问题,克服零点漂移用什么方法呢,“不同质的矛盾,只有用不同质的方法才能解决。”克服零点漂移除了电源稳压,电阻精选外,更重要是用温度补偿线路。差动线路就是克服零点漂移最有效方法之一。

1. 差动放大器的工作原理

在图 3-6 的差动线路中,信号从 AB 端输入,从 CD 端输出,它的工作原理是这样的:当输入端加一个正电压时,它通过限流电阻 R_B 加在晶体管 BG_1 和 BG_2 基极上。如果当电阻 R_E 取得足够大,可

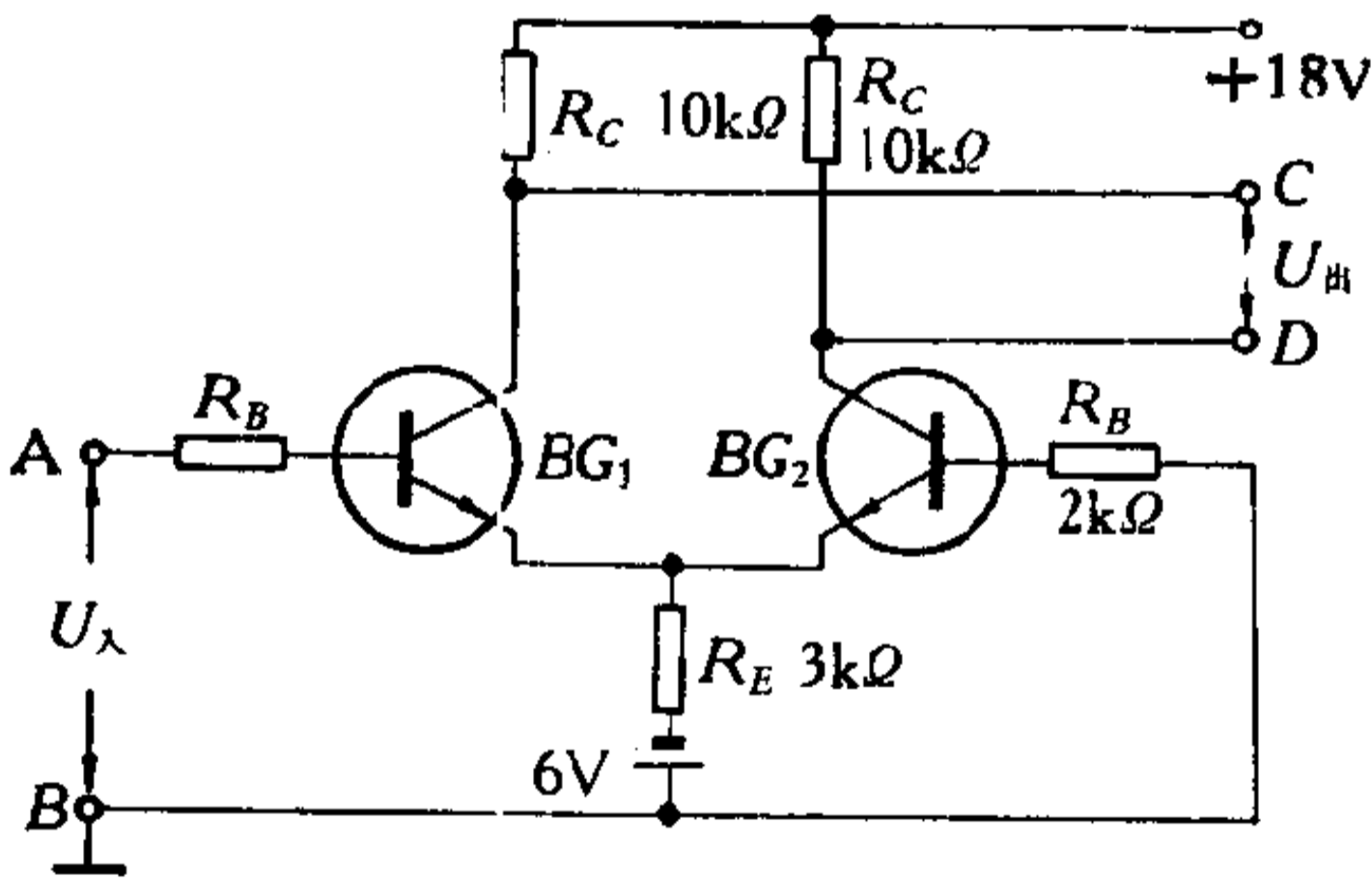


图 3-6

以认为它是开路,那末加在 BG_1 与 BG_2 基极上的电压大小相等,方向相反, BG_1 基极上加的正电压,使 BG_1 电流 I_{C1} 增大,而 BG_2 基极上加的负电压,使 BG_2 电流 I_{C2} 减小。于是 BG_1 的集电极电位降低,而 BG_2 的集电极电位升高,在 CD 端就有电压输出了。

差动放大器为什么能够补偿零点漂移呢？在差动电路中是选择两个参数特性一致的晶体管。当温度变化时，晶体管参数变化引起两管集电极电流变化也是一样的，所以在输出端就不会有因温度变化而引起的输出了。这里不仅两只管子的特性要挑选，在安装排列时还要使他们所处的环境条件一致，有时将两个管子及部件装入同一容器，并用硅橡胶灌注封闭，这称为“热槽”，这样两个管子所处的条件几乎完全一致了。实际上两个管子的参数不可能完全一致，所以往往在电路

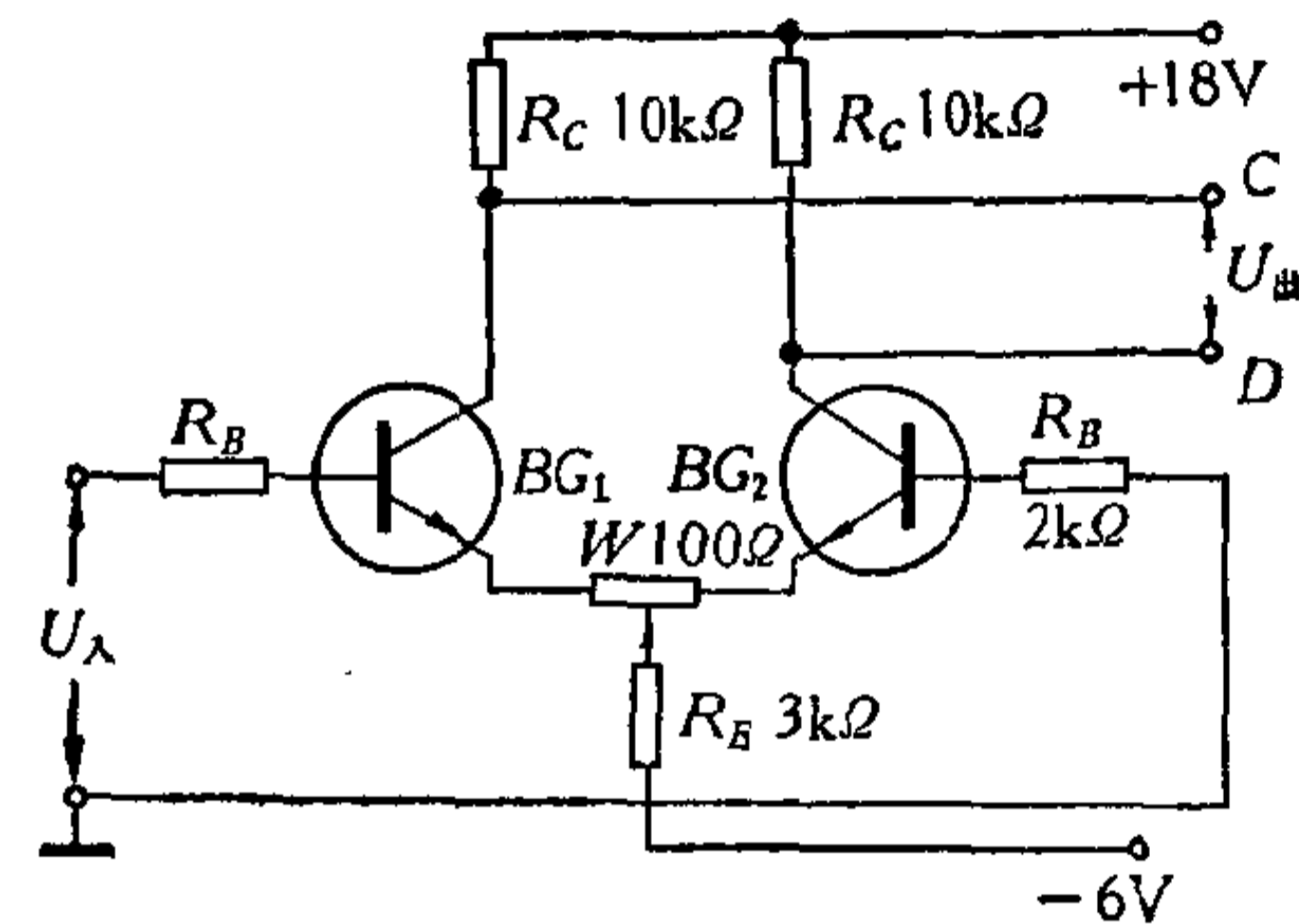


图 3-7

中加一个调零电位器 W 来调节两管的初始工作状态，使初始输出为零。如图 3-7 所示。

在差动电路中，发射极电阻 R_E 有什么作用呢？当晶体管参数随温度变化时，例如温度升高，将引起两管的集电极电流增大，两管电流在电阻 R_E 上的压降对漂移有负反馈作用，使参数随温度变化的影响减小。另一方面，电阻 R_E 对信号来说是没有影响的，因为当信号输入时，一个晶体管的集电极电流增大，另一个晶体管集电极电流减小，二者大小是相等的，在电阻 R_E 上的压降就不会改变。所以电阻 R_E 对信号是没有负反馈作用的。

2. 几种差动放大电路

上面介绍的差动电路中，通常电阻 R_E 取得足够大，否则电阻 R_E 的分流作用，将使输入信号加在两个晶体管基极上的

电压大小不相等,电阻 R_E 对信号就有负反馈作用了。若采用图 3-8 的对称输入的差动电路可避免这种情况,对称输入电路中输入信号是两个大小相等、相位相反的信号 $U_{\lambda 1}$ 和 $U_{\lambda 2}$,电路的工作原理、补偿零点漂移的原理与上面介绍的单端输入电路完全一样。以上两种差动电路从输入端来看有单端输入与

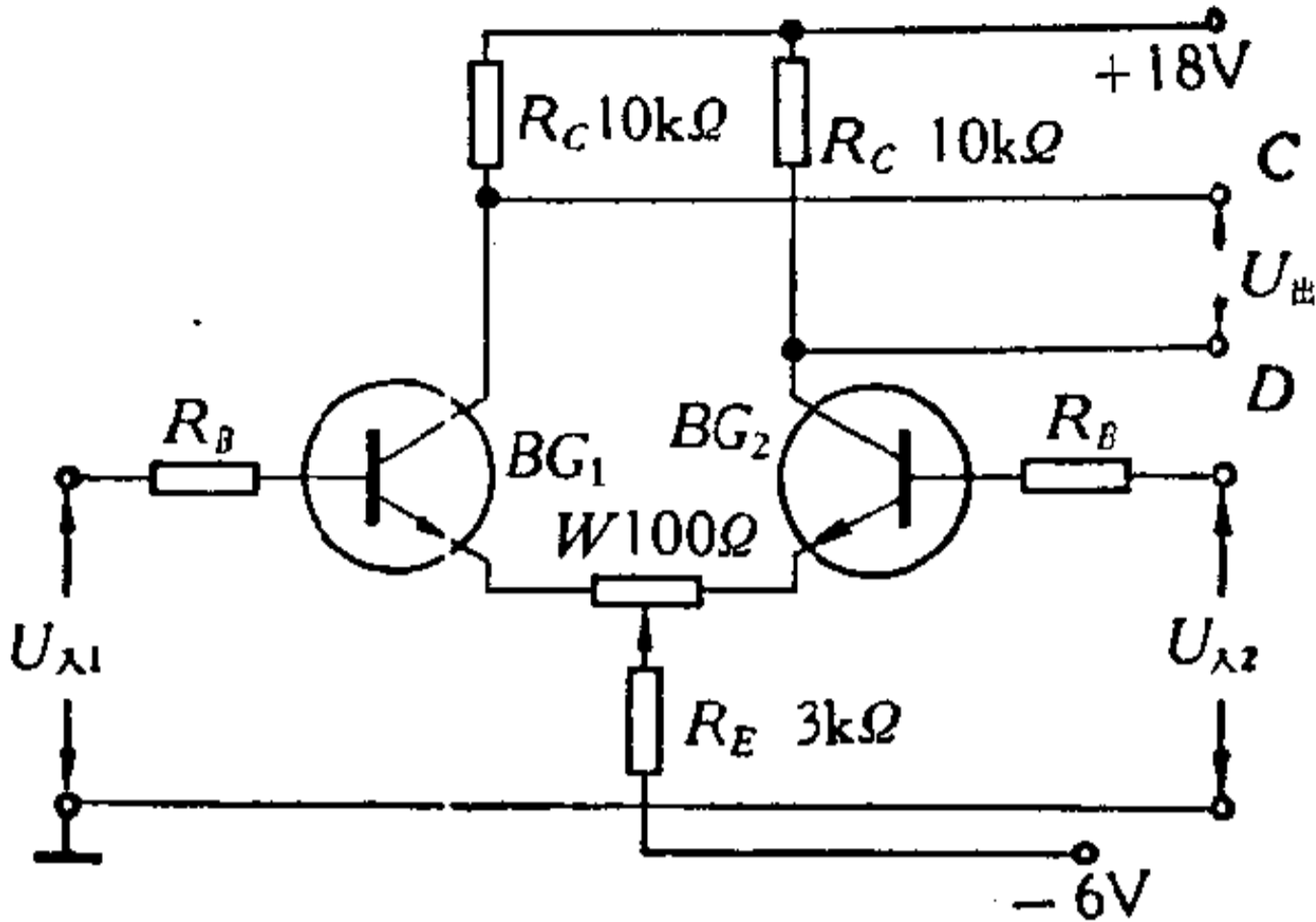


图 3-8

对称输入之分。从输出端来看都是对称输出。这种对称输出的差动电路,它的电压放大倍数可用下式表示。

$$K_u = \beta \frac{R_c}{R_\lambda}$$

式中 β ——管子的电流放大系数,两个管子的 β 是相同的;
 R_c ——负载电阻;
 R_λ ——放大器的输入电阻。

上式表明差动电路的电压放大倍数与单管放大电路是相同的。

在某些场合,不需要两个端点作为输出,而只要有一端输出,另一端接地。这时可用单端输出电路。图 3-9(1) 是输出信号与输入信号同相位的单端输出电路,图 3-9(2) 是输出信号与输入信号反相位的单端输出电路。单端输出电路中也是挑选两个参数特性一致的晶体管来补偿零点漂移的。

在各种差动电路中,补偿零点漂移的关键是挑选两只参数特性一致的晶体管。电路中发射极电阻 R_E 的作用是对漂移有负反馈作用而对信号是没有负反馈作用的。由于电阻

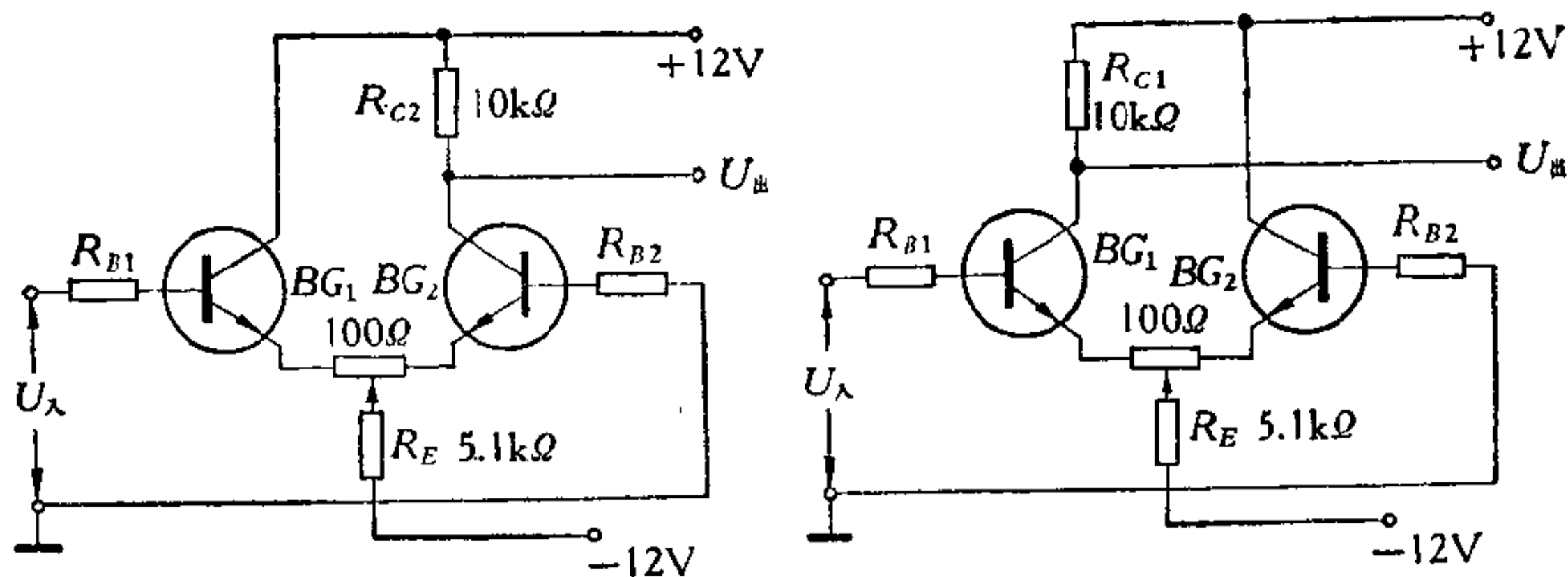


图 3-9

R_E 对漂移有负反馈作用，显然 R_E 应尽量取得大些。但从减小电源功率损耗的角度来看，却希望 R_E 取得小些，二者是矛盾的。

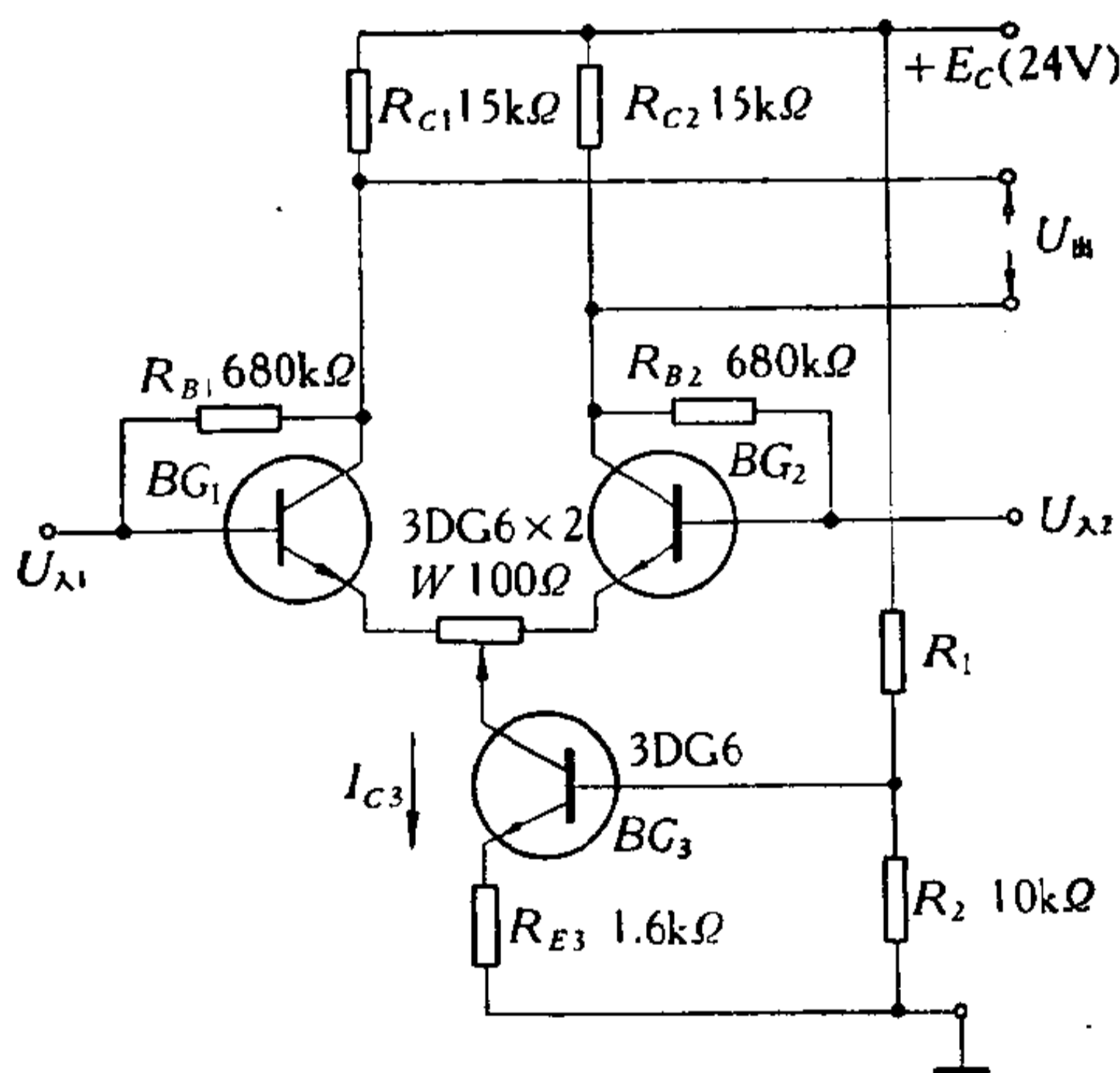


图 3-10

用晶体三极管来代替电阻 R_E 可解决此矛盾，在图3-10 的电路中晶体三极管 BG_3 采用了深的电流负反馈，保证电流 I_{C3} 恒定，减小漂移，而且所需电源功率不大。

应该指出，用差动放大器补偿零点漂移不是绝对完全补偿的，因为“所谓平衡，就是矛盾的暂时的相对的统一。”

我们通常说的完全补偿，只不过在一定温度变化范围内，漂移不很显著而已。

3. 差动放大器的估算与调试

以图 3-10 的差动放大器为例进行简单估算,在估算时先根据设计要求,给出一些必要的条件。例如负载要求及电源电压等等。如果负载电阻是后级放大器的输入阻抗约为 125 千欧,要求最大输出电压为 8 伏,电源电压 $E_C = 24$ 伏。

选择晶体管与决定晶体管的工作状态:

差动放大器中必须选择二个参数特性一致的晶体管,现选择二只型号为 3 DG 6 的硅管,因为硅管的穿透电流 I_{CEO} 小,对减小漂移有利。所选晶体管的 β 值在 70—130 之间。

由于要求放大器的最大输出电压 8 伏,所以每管的管压降应大于 4 伏。取管压降 $U_{CE1} = U_{CE2} = 6$ 伏。在决定晶体管的集电极电流时,一方面从放大器线性工作状态考虑,晶体管集电极静态工作电流应比输出负载电流大得多(这里最大输出负载电流为 $\frac{8 \text{ 伏}}{125 \text{ 千欧}} \approx 64$ 微安);另一方面从减小晶

体管噪声考虑,晶体管集电极静态工作电流应取小些,例如小于 1 毫安。这里选取两管的集电极电流为:

$$I_{C1} = I_{C2} = 0.75 \text{ 毫安。}$$

R_{C1} 、 R_{C2} 、 R_{B1} 、 R_{B2} 的选择:

为了保证最大输出能达到 8 伏,在 R_{C1} 和 R_{C2} 上的电压降 U_{RC} 至少大于 4 伏,现取 10 伏。

$$R_{C1} = R_{C2} = \frac{10 \text{ 伏}}{0.75 \text{ 毫安}} = 13 \text{ 千欧} \quad \text{取 } 15 \text{ 千欧}$$

电阻 R_{B1} 、 R_{B2} 是对晶体管 BG_1 、 BG_2 的偏流电阻,它是为基极电流提供通路的,因此

$$R_{B1} = \frac{U_{CB1}}{I_{B1}} = \frac{U_{CE1} - U_{BE1}}{I_{C1}/\beta} = \frac{6 \text{ 伏} - 0.7 \text{ 伏}}{0.75 \text{ 毫安}/100}$$

= 700 千欧, 取标称值 680 千欧 $R_{B2} = R_{B1} = 680$ 千欧

分配 BG_3 的管压降 U_{CE3} 及 R_{E3} 上的电压降 U_{RE} :

因为 $U_{CE3} + U_{RE} = E_C - U_{RC1} - U_{CE1} = 8$ 伏

如果 U_{RE} 取 2 伏, 则 $U_{CE3} = 6$ 伏。

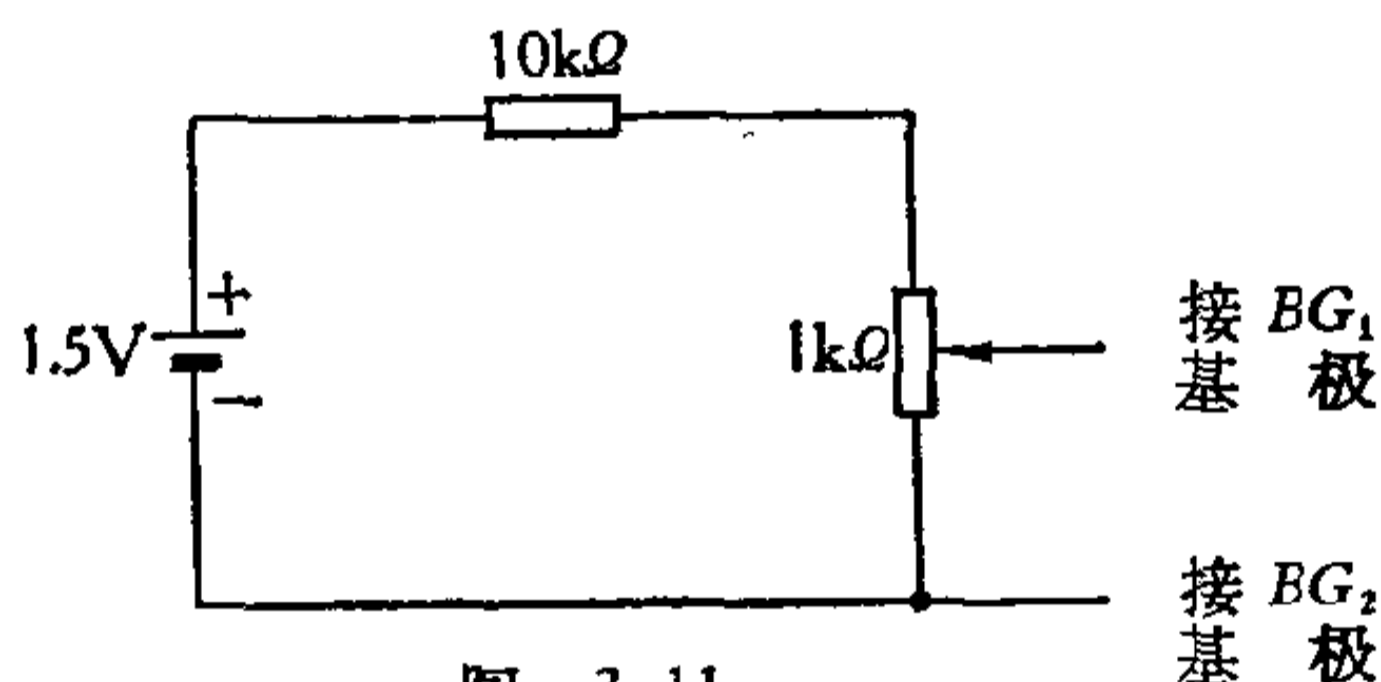
计算 R_{E3} 和确定 R_1 、 R_2 :

因为 $I_{E3} \approx I_{C1} + I_{C2} = 1.5$ 毫安

$$\text{所以 } R_{E3} = \frac{U_{RE}}{I_E} \approx \frac{2 \text{ 伏}}{1.5 \text{ 毫安}} = 1.5 \text{ 千欧} \quad \text{取 } 1.6 \text{ 千欧}$$

BG_3 的偏置电阻 R_1 与 R_2 计算方法前面已介绍过, 一般 R_1 取几十千欧至几百千欧, R_2 约几千欧至几十千欧, 这里 R_2 取 10 千欧, 通过调整 R_1 的大小, 来调整的 BG_3 工作点。

调整时, 先将放大器输入端短路, 调节电阻 R_1 , 使 BG_3 的发射极电流为 1.4—1.6 毫安, 假使调节电阻 R_1 而 BG_3 的



电流达不到要求, 应适当减小 R_{B1} 及 R_{B2} 的阻值。然后测量 R_{C1} 及 R_{C2} 上的电压降均在 10 伏左右。若电压不同, 可调节 W 使其对称, 此

时输出电压应为零。然后在输入端(对图 3-10 线路来说, 输入端即为 BG_1 与 BG_2 的基极)接以可调直流稳压源(或采用图 3-11 的电池分压)作为放大器的信号源, 微微调节输入电压, 视输出电压在 8 伏以下线性变化, 即满足要求。

第三节 调制型直流放大器

零点漂移及级与级之间的牵连是直流放大器的二个特殊

问题，在阻容耦合的交流放大器中这些都可以不考虑。我们可将交流放大器这一特点应用在放大直流的场合中，这就是直—交—直变换放大电路，它在输入信号很小而又要求低漂移的场合中得到了广泛的采用。这种方法是先把直流或缓慢变化的信号变换成一个有一定频率的交变的电信号（调制），经过几级交流放大后再变换到原来的直流或缓慢变化的状态（反调制）。按直—交—直方法组成的放大电路，有时称为调制型直流放大器。

调制型放大器的示意图如下：

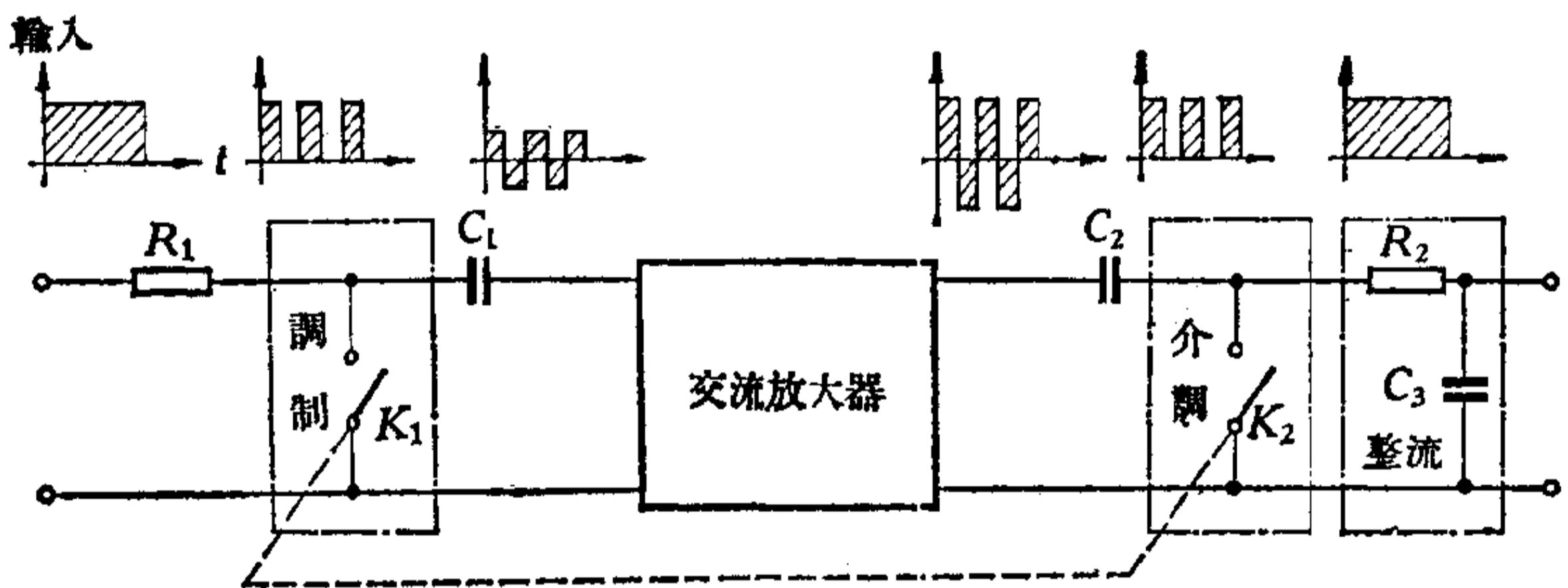


图 3-12

在输入直流波形时，通过开关 K_1 的断开和闭合，此直流波形被截成一段一段，此波形由于电容器 C_1 的隔直作用成为交变的波形，经过交流放大器的放大就是放大了的交流波形，又在开关 K_2 的作用下恢复了直流成分，最后在电阻 R_2 和电容 C_2 的作用下成为输出放大了的直流波形。其中开关 K_1 与开关 K_2 是同步的。

1. 晶体管调制器

调制器是将直流或缓变信号变换成一定频率的交流信号。本章应用实例 5，介绍的晶体管放大器中用了振动变流器，

就是一种机械振动式调制器，它将直流调制成 50 周/秒的交流信号。机械振动式调制器具有开关性能好，漂移小、阻抗范围宽等优点，也存在着寿命短，耐震性差，变换频率低等缺点。而晶体管调制器虽然有漂移较大的缺点，但它小型轻巧，寿命长，变换频率高以及灵敏度高(可制成 10—20 微伏以下)等优点，目前得到了广泛的应用。

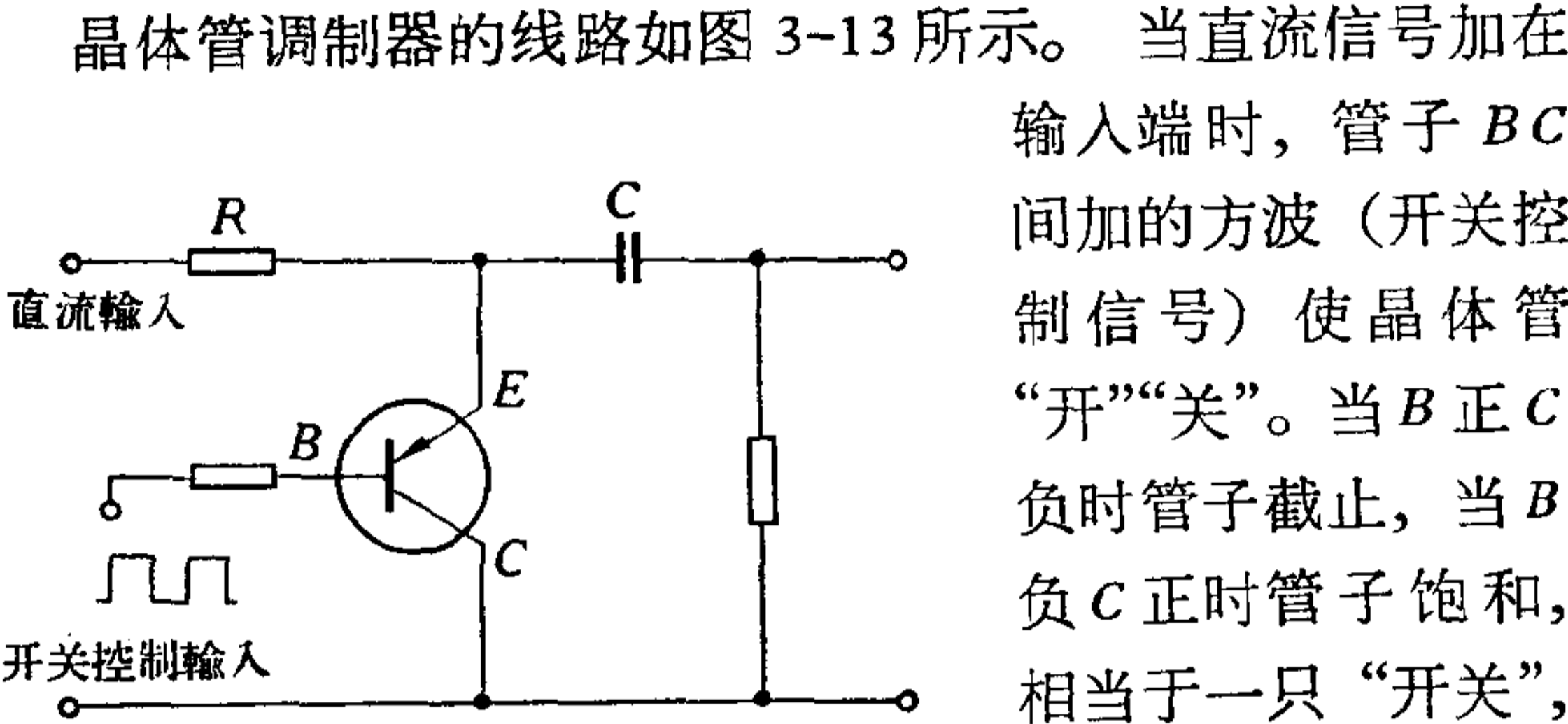


图 3-13

但是晶体三极管的开关特性并不是完全理想的。在饱和时发射极和集电极之间有残余电阻和残余电压存在，在截止时发射极和集电极之间有漏电阻和漏电流存在。采用反接法，即把管子的 E 极和 C 极倒过来用以及选择硅平面外延管、锗合金管作为“开关”管（如 3 DK 2，3 AG 72）可减小这些因素的影响。电路中开关控制信号常采用几百周/秒到几千周/秒的方波，以减小市电（50 周/秒）的影响，在要求不高的地方也有用频率 50 周/秒的开关控制信号。

晶体管调制器的缺点是剩余电压和漏电流随温度变化的漂移大，作为低电平用的晶体管调制器，常用二只晶体管进行差动连接来补偿。如图 3-14 所示。当直流信号加在输入端时，开关控制信号能使晶体管 BG_1 、 BG_2 同时闭合，同时断开。

闭合时,两管的剩余电压大小相等、极向相反,可相反补偿;同样在断开时,两管的漏电流方向相反可以相互补偿。由此可见,做调制器的两个管子应挑选残余电压和漏电流温度系数相同,使温度漂移控制在几十微伏数量级。

2. 晶体管反调制器

反调制器是将经过交流放大器放大后的交流信号变为直流（反调制）。反调制器有各种型式，这里仅介绍一种利用晶体管开关特性构成的晶体管反调制器

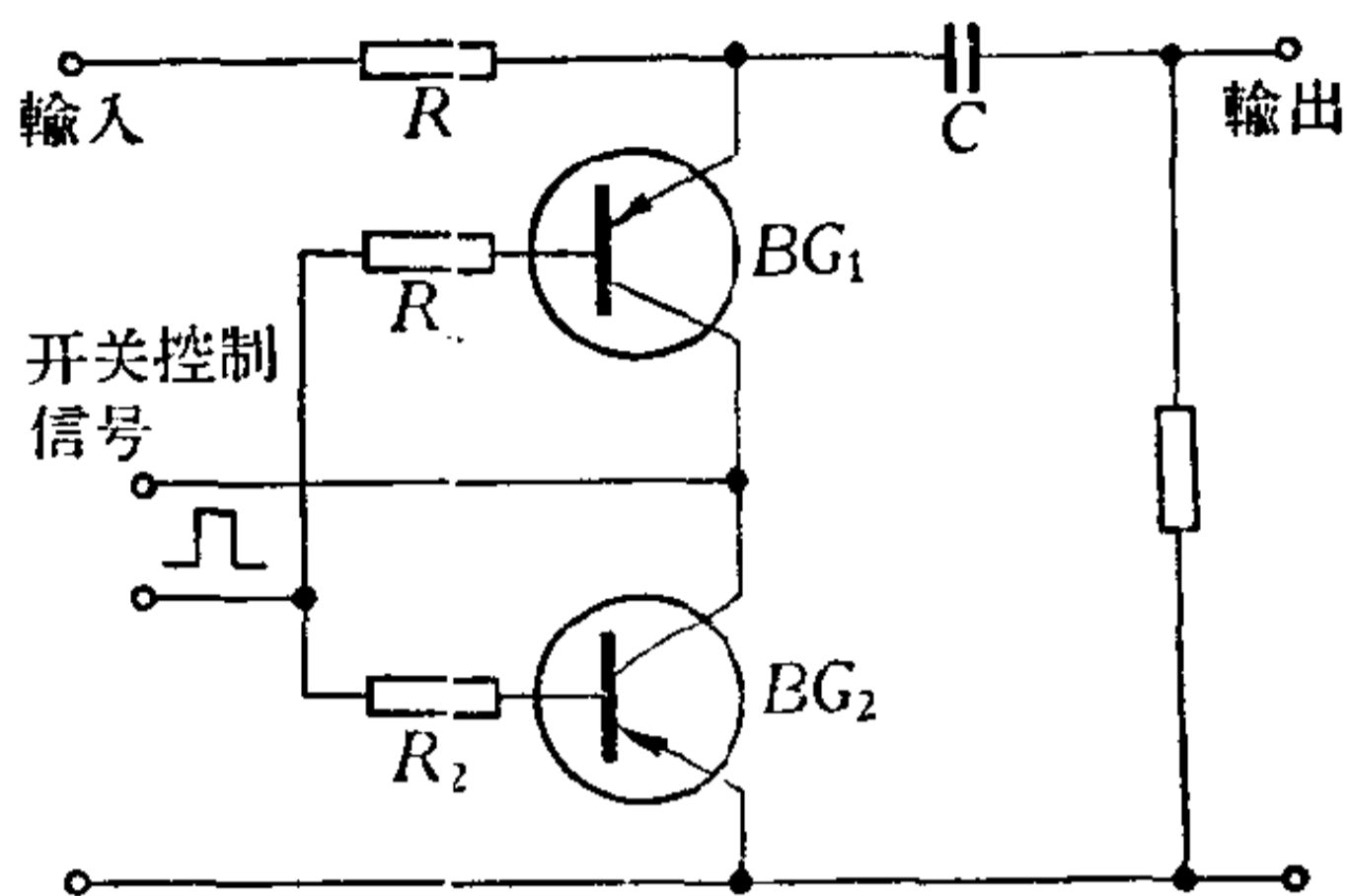


图 3-14

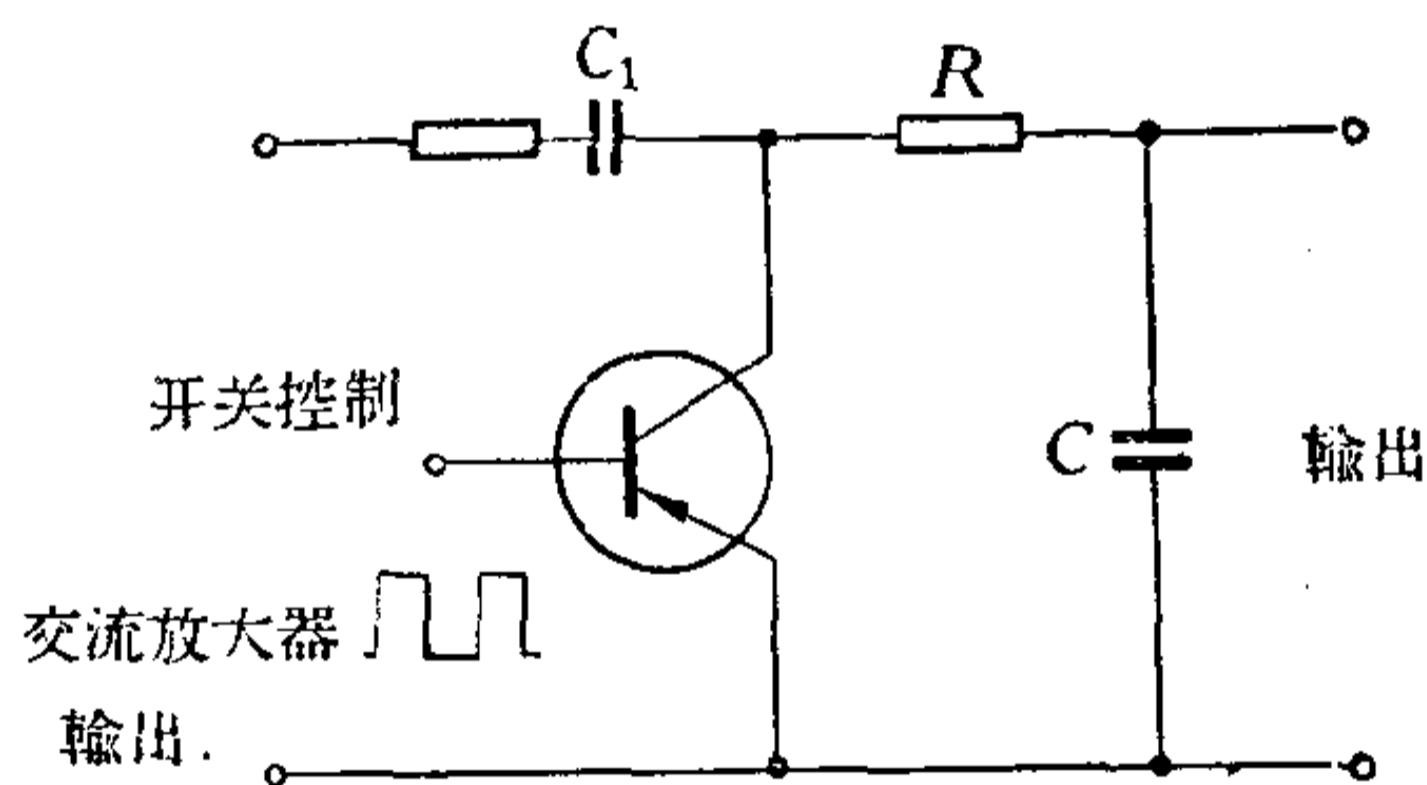


图 3-15

(图 3-15)。线路与调制器相同，在反调制器中“开关”管的控制信号应与调制器中开关控制信号同步。因为反调制器是在交流放大器的输出端进行，而调制是在交流放大器的前端，所以对反调制器的要求不及调制器高。

行,而调制是在交流放大器的前端,所以对反调制器的要求不及调制器高。

第四节 应用实例

1. 控制滑差电机激磁电流的三级直接耦合放大器

图 3-16 是放大器线路图,因为滑差电机激磁线圈有额定

工作电压,一般都有几十伏,所以前面二级用分压式供给集电极直流工作电压。而且采用分压方法可调节管子的集电极电压,使工作点处于线性区。输入端所接的 1.6 千欧是限流电

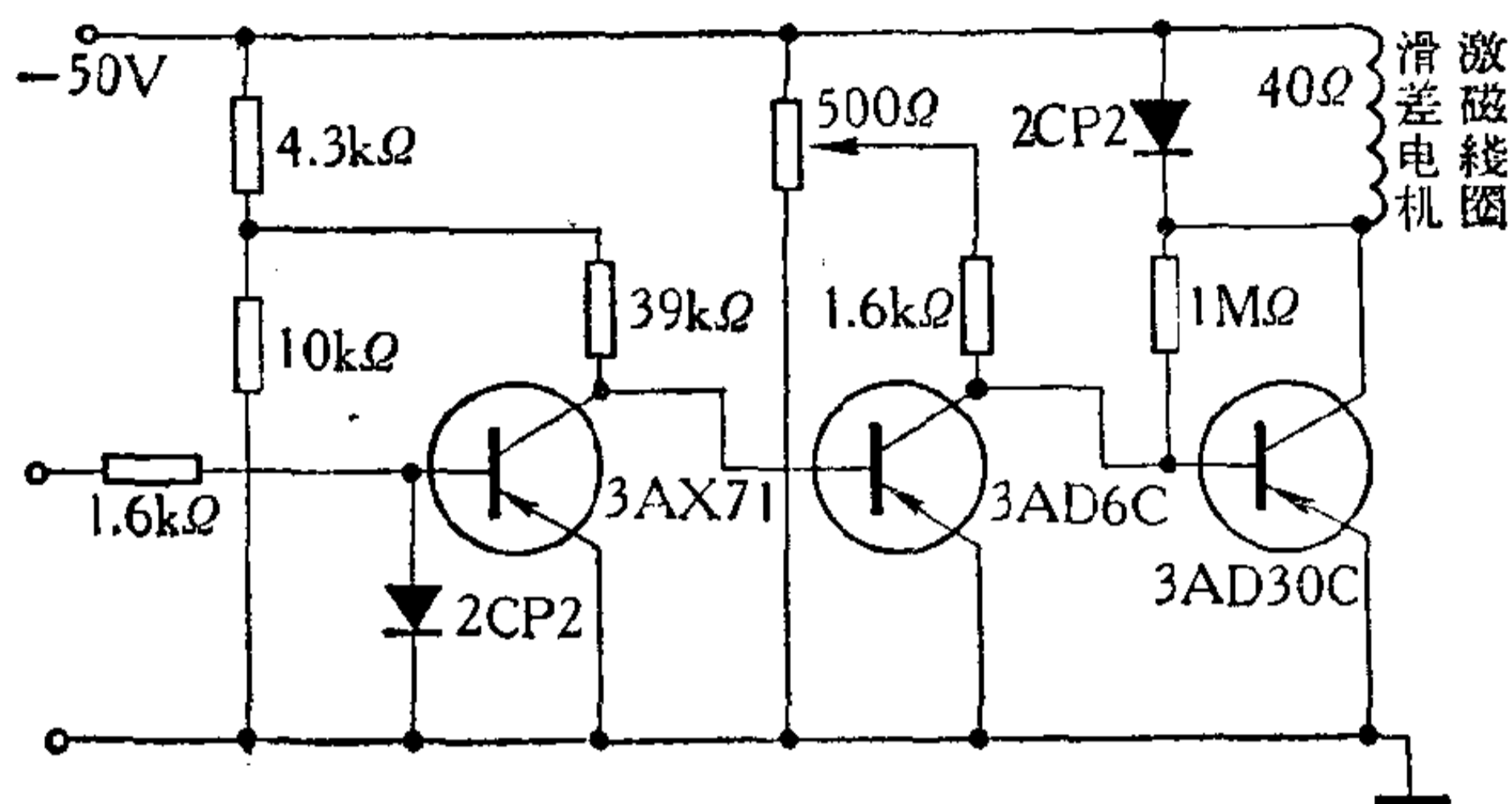


图 3-16

阻,防止第一级管子的基极电流过大。第一级基极接二极管 2 CP 2 是用来补偿零点漂移,因为晶体二极管是由 p-n 结组成的,它的反向饱和电流随温度变化的特点与晶体三极管一样。当温度升高时,第一级 3 AX 71 的电流 I_C , I_B 要增大,此时晶体二极管的反向饱和电流也增大,使基极电流 I_B 减小, I_C 也随之减小。这样使晶体管工作稳定,只要适当挑选,可以很好补偿。末级中二极管是将滑差电机线圈中反电势短路用的,防止 3AD30C 受反电势的冲击而损坏。

2. 测量微小电流的仪器

量限为 1 微安的电流表(图 3-17)。

此仪器采用一级差动放大器,输出接 50 微安的电流表,其测量范围为 0—1 微安。

此仪器可应用于晶体管参数的测量。

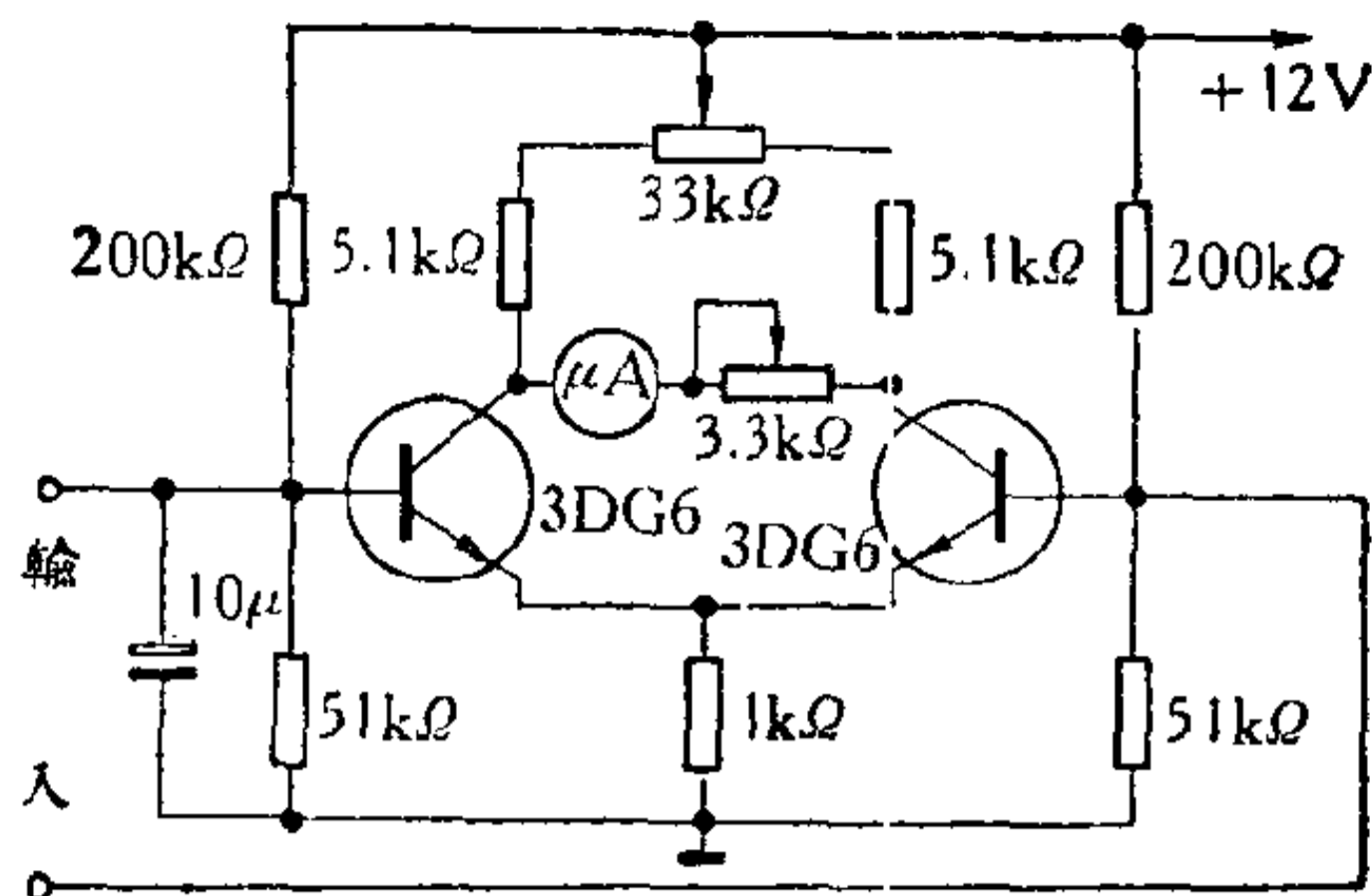


图 3-17

3. 可控硅直流系统中的直流放大器

在无产阶级文化大革命中,造纸工人怀着“中国人民有志气,有能力,一定要在不远的将来,赶上和超过世界先进水平”的革命壮志,决心彻底革掉造纸机的落后机械传动的命,生产更多更好的宝书用纸。1968年某造纸厂工人仅以短短的四十多天紧张战斗,就完成了造纸机实现可控硅电气分部传动,这一技术革新,对今后实现造纸机械自动化、半自动化很有意义。

图 3-18 是造纸机可控硅电气部分传动装置中的放大单元。放大器的输入信号是变化缓慢的毫伏量级电压,它由一级差动放大电路和二级射极跟随电路组成。晶体管 BG_1 , BG_2 构成对称差动放大电路,是为了减少温度变化或电源波动等引起的不稳定性,也就是解决零点漂移问题。 BG_3 与稳压管 DZ 组成恒定器,以提供 BG_1 , BG_2 稳定的电流, BG_4 , BG_5 和 BG_6 , BG_7 组成的二级射极跟随器作为阻抗变换,使放大器的输出阻抗很小和获得一定的功率输出。整个传动装置要求放大器在没有输入信号时,输出为零,所以线路采用双端对称输出。连接在差动级的电位器 W_1 起平衡调零作用。电位器 W_2 有负反馈作用,调节该电位器阻值大小,可以调节

放大器的放大倍数，因为它对交流信号有旁路作用，电阻值调得越小，负反馈越弱，电路的放大倍数也就越大。调节 W_2

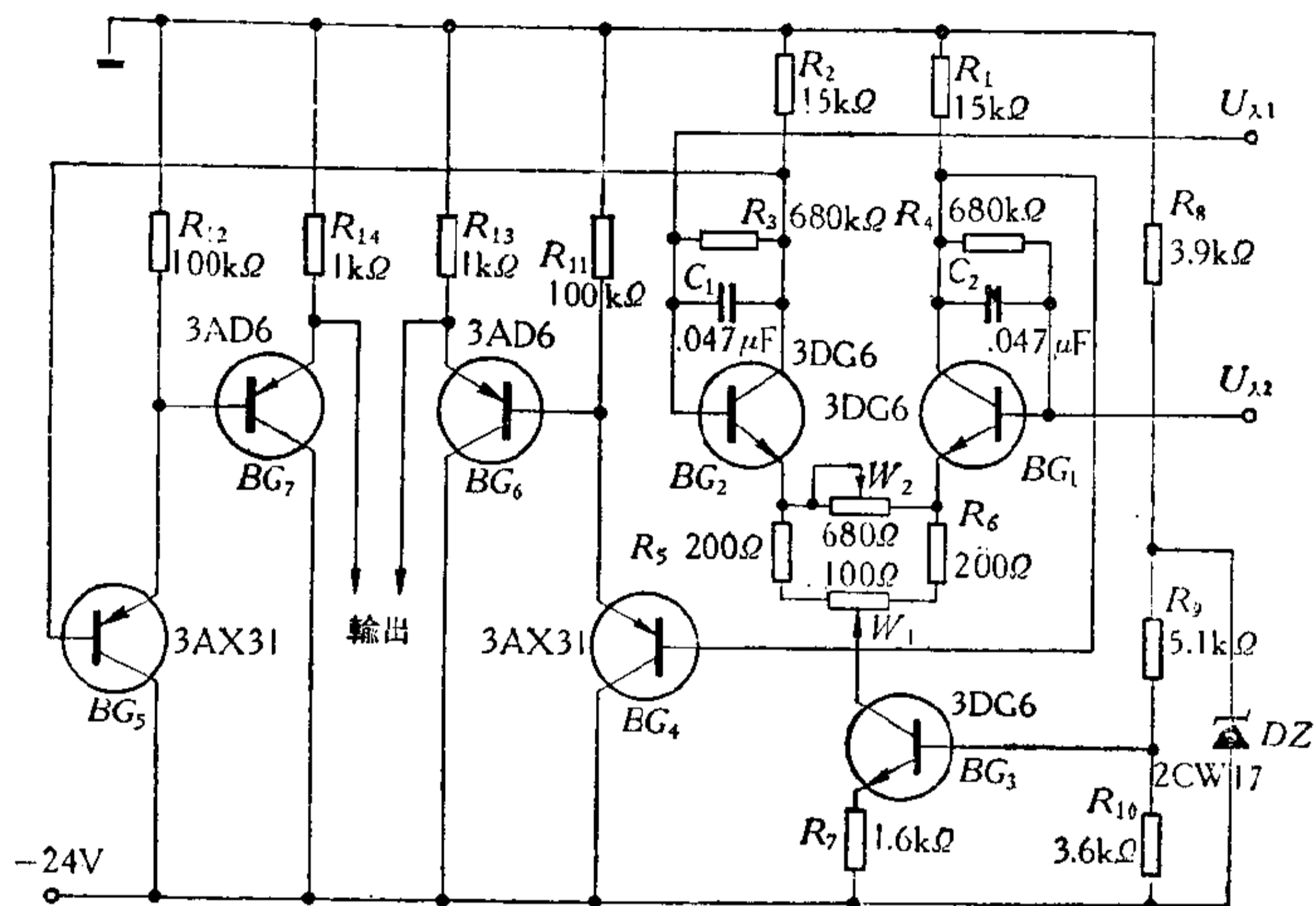


图 3-18

可使放大器的电压放大倍数从 70 至 250 倍变化。需注意,在调节放大倍数之后,放大器的调零需重新调整。 我们知道直接耦合放大器的第一级对零漂影响最大，因此 BG_1 BG_2 BG_3 采用硅管,电阻 R_3 R_4 为 BG_1 BG_2 提供偏流，并有负反馈作用,并接在 R_3 R_4 上的电容器 C_1 C_2 对高频有负反馈，使放大器对输入突然变化有缓冲作用。 晶体管 BG_1 BG_2 应选得对称,其 β 值和 I_{CBO} 值尽可能接近一致。 β 值一般在 70—130 之间即可。

4. 直流毫伏变送器

图 3-19 是 FS-22 型直流毫伏变送器。 这是一种调制型直流放大器。它可将 75 毫伏的直流信号放大至 5 伏输出,是

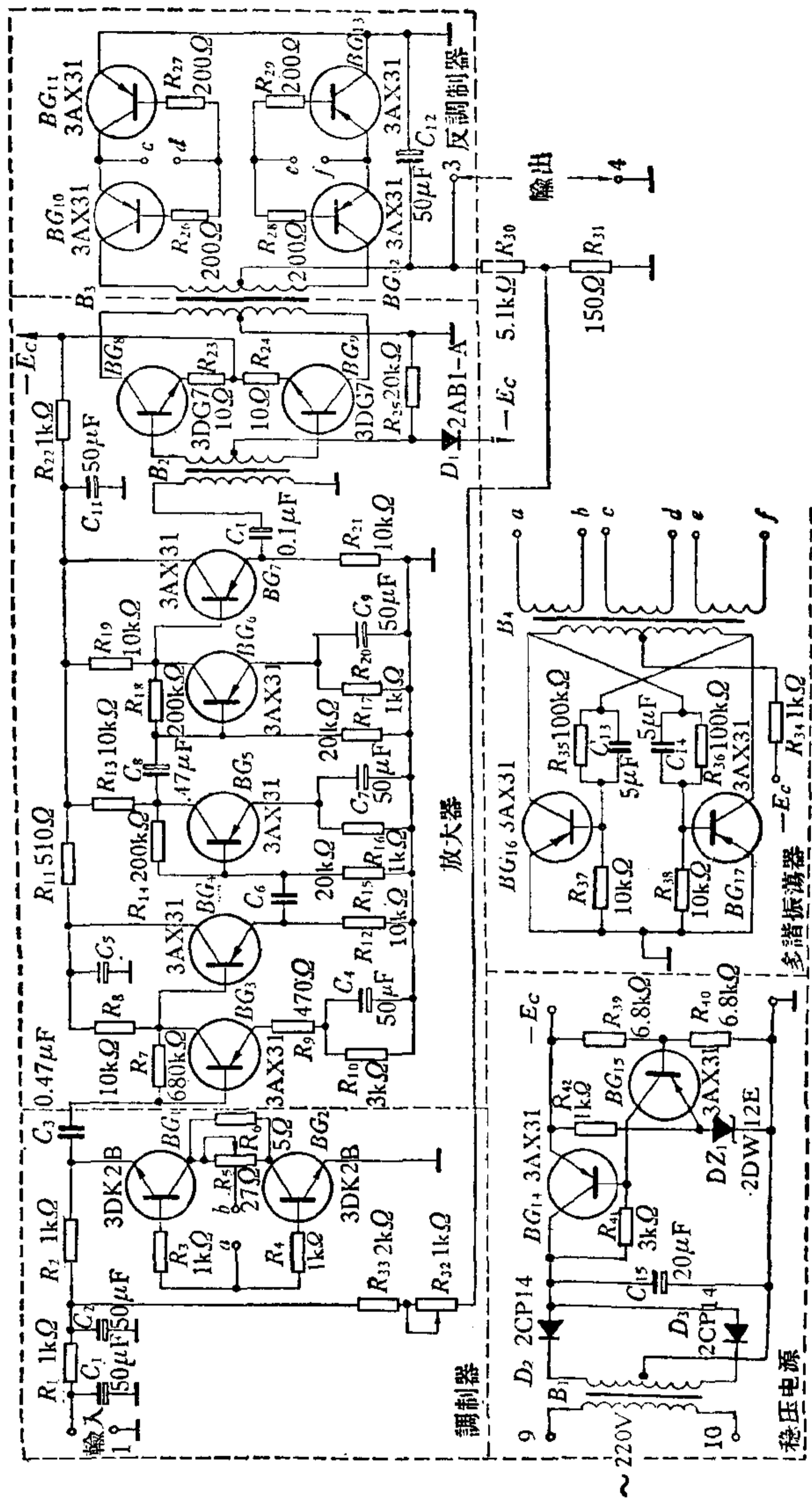


图 3-19 FS-22 型直流毫伏变送器电路图

目前作为电力系统中电量变送器配套使用的产品之一，它本身尚可作一般低阻抗、低电平直流信号放大器用。

该直流毫伏变送器的结构原理如下：直流毫伏信号从(1)(2)端输入，晶体管 BG_1 BG_2 组成串联型调制器，将所输入的直流信号调制成交流，再由 BG_3 至 BG_7 组成的五级前置放大器进行交流放大， BG_8 , BG_9 是推挽级，起功率放大作用。最后把信号送至反调制器，将交流信号再调制成直流电压，由(3)(4)端输出，从图 3-19 看出，反调制分别由 BG_{10} 和 BG_{11} , BG_{12} 和 BG_{13} 组成的两个串联反调制器完成的，由于这两个串联反调制器，是交替导通和截止的，所以构成了全波整流。可以提高解调效率。 BG_{16} , BG_{17} 是多谐振荡器，由它产生频率为 2 千周的方波，作调制器及反调制器的开关控制信号。在调制器 BG_1 及 BG_2 的集电极间串入一个电位器，作为调零微调。 R_{32} R_{33} 是反馈电阻，调节 R_{32} ，可改变放大器的负反馈深度，也是用来调整输出电压幅值的。此变送器的电源，是由晶体管 BG_{14} , BG_{15} 及稳压管 DZ 组成的稳压电源供给的。

5. 自动平衡记录调节仪表中的放大器

在伟大领袖毛主席“自力更生”、“艰苦奋斗”、“走自己工业发展道路”的伟大方针指引下，广大工人技术人员狠批了叛徒、内奸、工贼刘少奇所推行的要以仿为主等修正主义路线，在短期内试制成功了自动平衡记录调节仪。这种显示仪表在工业生产中使用极为广泛，它的试制成功，是毛主席革命路线的胜利。

在这种显示仪表上配用一定的传感器，可以在化工、石油、冶金、发电等工矿企业及国防、科研等单位用于对被测对象进行自动测量、指示和记录。如果带有各种不同类型的附

加装置后,还能对被测对象进行各种自动调节。

自动平衡记录调节仪表的简要原理如图 3-20 所示:

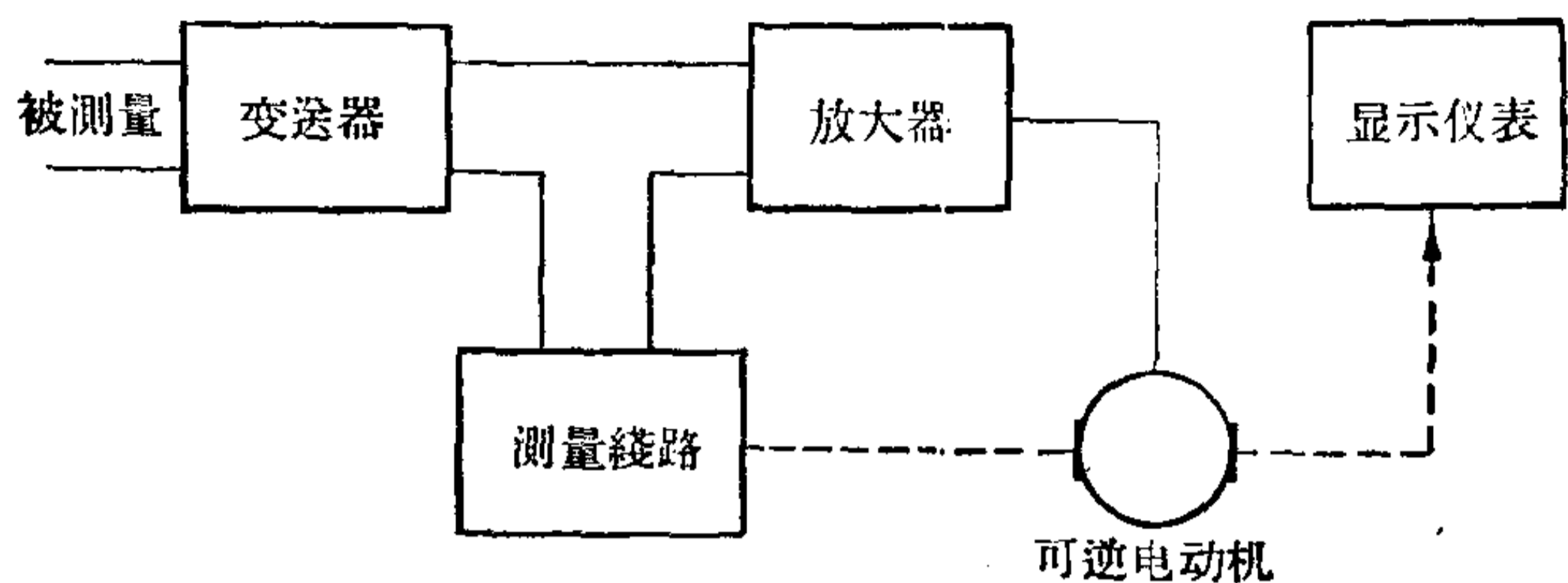


图 3-20

被测量(例如温度)经传感器(热电偶或热电阻)变换成电量(电势或电阻)加在测量线路(电位差计或电桥)时,产生一不平衡信号,经晶体管放大器放大后,输出了足以驱动可逆电动机的功率,使可逆电动机转动,从而通过一组传动系统带动了指示机构及其与测量线路中滑线电阻相接触的滑动臂,直至线路趋平衡为止,此时,没有不平衡电压输入放大器,可逆电动机便停止转动,所有线路处于平衡状态。所以说可逆电机的转是为了不转。但平衡是相对的,不平衡是绝对的,这种平衡很快被新的不平衡(如炉内温度的变化等)所打破,这个新的不平衡信号将重新使可逆电机旋转,从而在新的基础上达到新的平衡。这就是自动平衡电路中的对立统一规律。

自动平衡记录调节仪中晶体管放大器由输入级、电压放大级、功率级组成。它的原理线路图见图 3-21。

输入级由机械振动变流器与输入变压器组成,将输入的微弱直流信号转换为 50 周交流信号。振动变流器的振动触点是常开式的。输入变压器用坡莫合金罩以屏蔽外磁场干扰影响。

电压放大器采用共发射极直接耦合的四级放大线路,经

由输入变压器 B_1 传输的交流信号经由四级放大后再由耦合变压器 B_2 传输至功率级。在 BG_2 , BG_3 的发射极串接硅二极管 (2 CP 6 A) 是为了扩大放大器的线性工作范围, 克服直接耦合级间联接所出现的增益和线性工作的矛盾, 同时又有利于各台放大器间直流电压工作点的一致性, 在第四级放大管 BG_4 基极由 51 千欧电阻引出的深度负反馈, 使得电压放大级的工作比较稳定。热敏电阻 R_t 更进一步提高了低温时的工作稳定性。

放大器的增益调整, 由第四级发射极的电阻 51 欧、510 欧及电位器 1 千欧, 电容 100 微法组成以调节电流反馈量大小来实现的。

电压放大级的直流电源经晶体三极管 BG_5 及 RC (20 千欧, 50 微法) 组成的晶体管滤波电路, 滤除交流波纹后供给, 同时 RC 滤波电路也具有去耦作用。

功率级由二个晶体功率管 3AD6C 接成相敏电路, 借耦合变压器 B_2 获得电压放大级和功率放大级的匹配。功率级的输出驱动了可逆电动机, 并根据输入信号的极性顺转或逆转。

本章小结

1. 直流放大器的主要作用是放大直流或者缓慢变化的信号。晶体管直流放大器的主要问题是级间耦合和零点漂移问题。级间耦合采用直接耦合方式。克服零点漂移的方法很多, 如: 电源稳压、电阻老化、晶体管用硅管 (硅管的 I_{CBO} 小) 各种温度补偿线路及差动线路等等。

2. 差动放大电路是补偿零点漂移的最有效的方法之一。在差动电路中最重要的是挑选晶体管, 要选特性参数一致的两个晶体管, 而且要把它们装在同一个散热器设备上。现

在工厂中生产一种集成电路——差分对管，把两只管子做在同一个基板上，温度条件就完全一样了。

3. 要求对零点漂移更小的场合常采用调制型放大电路。在调制型放大器中，调制器的质量是很重要的。随着更多和更新式的晶体管的出现和大量生产，场效应管和变容二极管在调制器中得到了越来越广泛的应用。

4. 在直流放大器中，仅从零点漂移来看，直接耦合方式漂移最大(毫伏数量级)，差动电路次之(几百微伏数量级)，调制型电路最小(几个一几十微伏数量级)，但是我们选用电路时，应从实际情况出发，不能认为线路越复杂，越好，以免造成人力物力浪费。

第四章 晶体管直流稳压电源

大海航行靠舵手,干革命靠毛泽东思想!

毛主席是我们心中的红太阳,毛泽东思想是我们革命航程中永放光芒的灯塔。为了让全中国和全世界革命人民得到更多的毛主席的著作,造纸工人怀着对伟大领袖毛主席的无限忠心,发扬“**独立自主、自力更生**”的革命精神,把可控硅技术用于造纸机分部传动中,产量大大增加,质量也大大提高,用电也比以前节省得多了。在可控硅分部传动调速系统中要求给定电压十分稳定,即它受电网电压波动或负载变化的影响要很小,整个系统才能正常工作。这里给定电压就由直流稳压电源提供的。

由此可见,在电网电压波动或负载变化时,精密仪器设备中的电源电压的变化要限制在很小的范围内,否则会造成误差,甚至使设备不能正常工作,此时就应当采用稳压电源。而在一般的电子电路中,当电源电压变化一点,对电路影响不大时,就不一定要用稳压电源了。

本章要解决的主要问题就是稳压,所谓稳压就是当电网电压或负载变化时,要使输出电压基本不变。下面我们就围绕稳压电源的基本原理、参数及应用线路等来进行讨论。

目前在小功率的电子设备中广泛采用的稳压电源有两种:一是用硅稳压管,二是用晶体三极管组成的负反馈电路。

第一节 硅稳压管稳压器

我国工人阶级高举毛泽东思想伟大红旗,多、快、好、省地发展电子工业,电子工业战线上的广大工人群众豪迈地提出:“踢掉洋框框,多造志气管,打击帝修反!”他们革命加拼命,大搞群众运动,大闹工艺革新,在短短的几年里,硅稳压管无论在品种、质量、数量上都有了很大的发展。

硅稳压管是怎样工作的呢? 我们知道整流二极管不能运用在反向击穿区,否则管子会损坏而失去其单向导电性能,但是

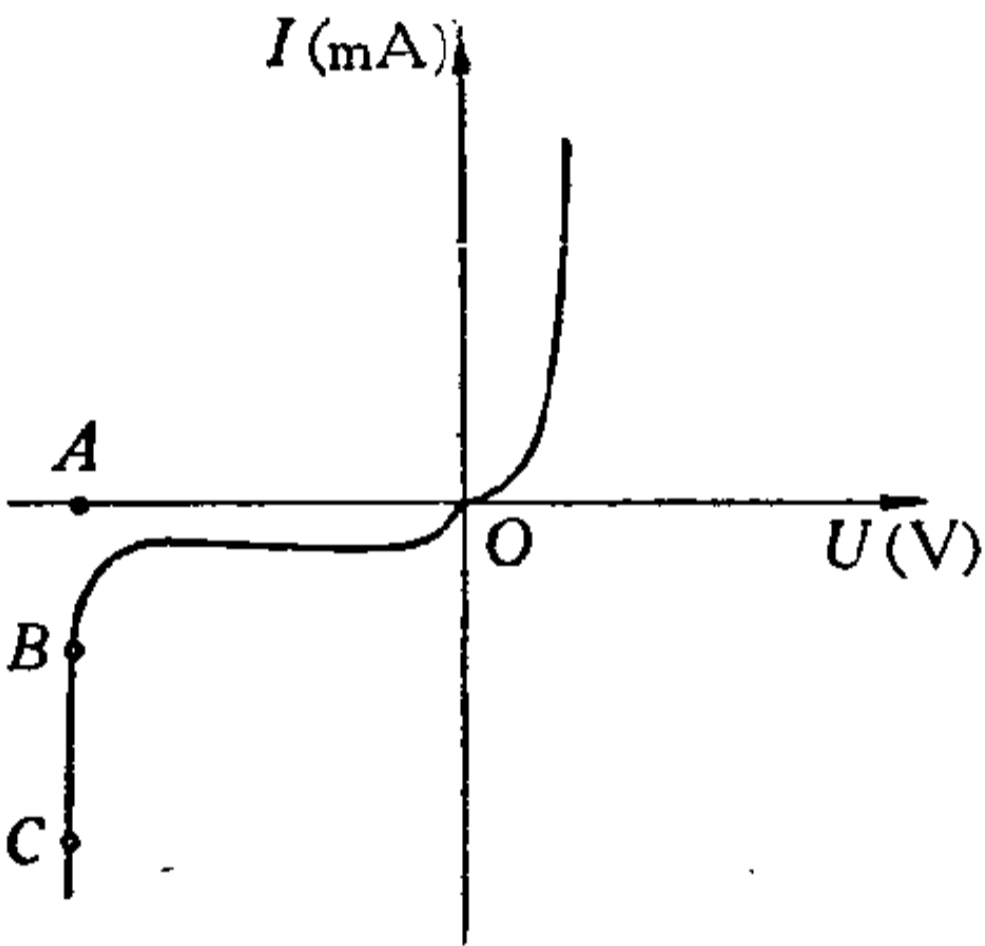


图 4-1 硅稳压管特性

是目前大量生产的硅稳压管却是做成在反向击穿区工作。硅稳压管的特性曲线如图 4-1 所示。它工作在反向电压下,当电压高到对应于 A 点的电压时,管子就反向击穿,此时,即使反向电流增加很多,电压却几乎保持不变 (BC 段几乎垂直),我们利用硅稳压管这一特点

来进行稳压,因此和整流二极管不同,硅稳压管就是工作在反向击穿区,只要流过管子的电流小于这个管子的最大允许电流,或者说只要这个管子的耗散功率不超过最大耗散功率,稳压管就不会烧坏。

硅稳压管常用的符号是:

硅稳压管的主要参数:

稳定电压 U_z 。即对应于图 4-1 中 A 点的电压。

测试电流 I_z 。此值接近于图 4-1 中 B 点的电流,通常稳压管的工作电流大于此值,使它有较好的稳压作用。

最大工作电流 $I_{Z\text{最大}}$ 或 $I_{Z\text{允许}}$ 。

最大耗散功率 P_Z 。 $P_Z = I_{Z\text{最大}} U_Z$ ，当手册中没给出 $I_{Z\text{最大}}$ 时， $I_{Z\text{最大}}$ 可由此式算出。

动态电阻 R_Z 。动态电阻的大小与图 4-1 中 BC 这段直线的斜度有关，这段线越垂直，就是动态电阻越小，稳压管的稳压性能也越好。国产稳压管的型号用 2CW、2DW 命名。

如 2CW 19: $U_Z = 11.5\text{—}14$ 伏， $I_Z = 5$ 毫安

$$I_{Z\text{最大}} = 17 \text{ 毫安}, P_Z = 250 \text{ 毫瓦}$$

$$R_Z \leq 35 \text{ 欧}$$

2DW 7C: $U_Z = 6.1\text{—}6.5$ 伏， $I_Z = 10$ 毫安

$$I_{Z\text{最大}} = 30 \text{ 毫安}, P_Z = 200 \text{ 毫瓦}$$

$$R_Z \leq 10 \text{ 欧}$$

1. 硅稳压管稳压器的的工作原理

用硅稳压管做成的稳压电源如图 4-2 所示。

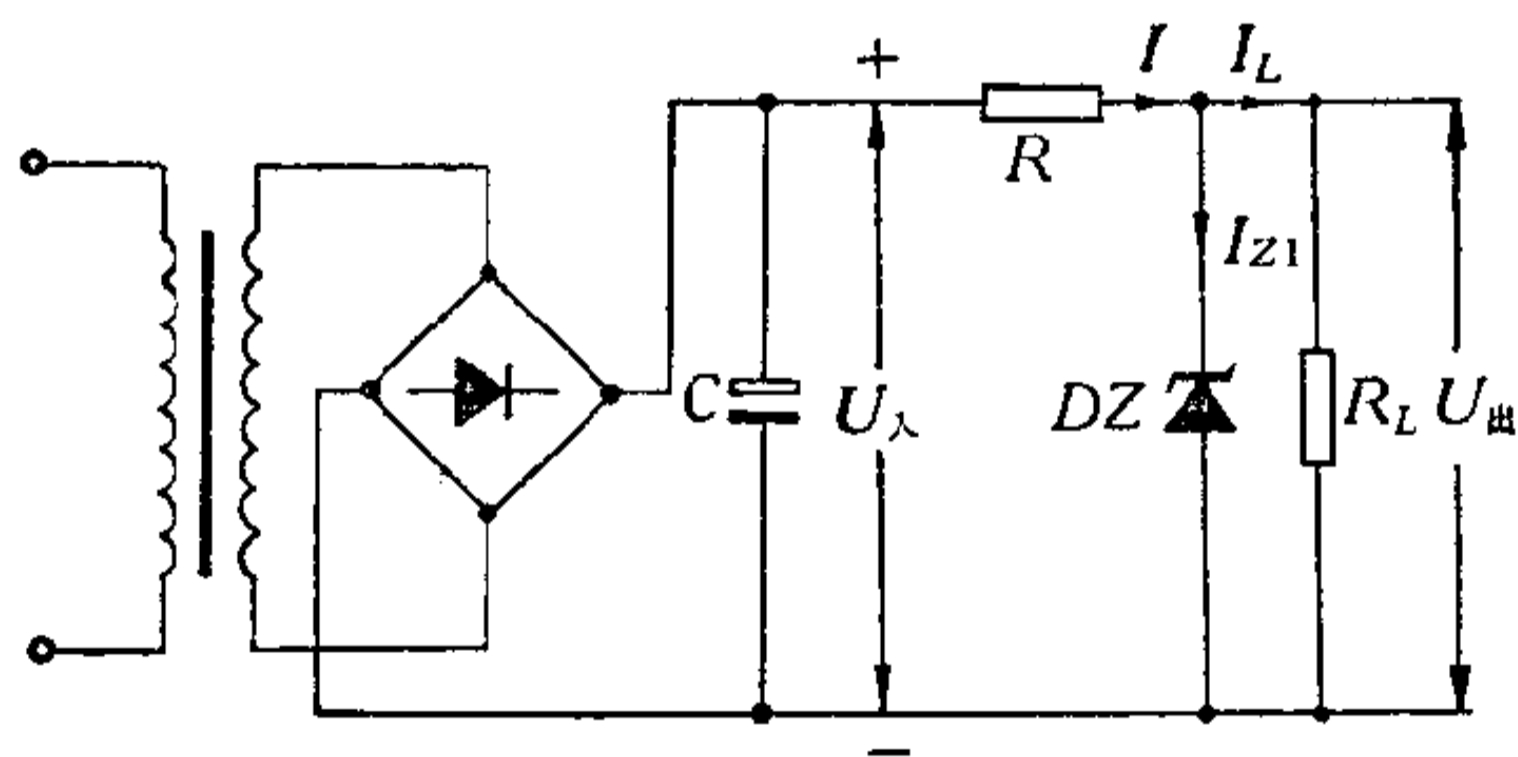


图 4-2 硅稳压管稳压器电路

图中: R 是限流电阻, R_L 是负载电阻, DZ 是硅稳压管, 作调整元件用, 在使用时要注意接法, 如图 4-2 所示。

如当 $U_{\text{入}}$ 升高而引起 $U_{\text{出}}$ 变大时, DZ 的电流 I_{Z1} 增加, 于是 R 上的压降增加, 从而保持了 $U_{\text{出}}$ 的稳定。同样, 当 $U_{\text{入}}$ 下

降而引起 $U_{\text{出}}$ 下降时, I_{Z1} 减小, R 上压降减小而保持 $U_{\text{出}}$ 稳定。

2. 硅稳压管稳压器中各元件的选择

首先是选择稳压管。前面已经提到过稳压管的主要参数是 U_Z , I_Z , 负载要求的电压 $U_{\text{出}}$ 和电流 I_L 也是已知的。在一般情况下, 我们就可以按 $U_Z = U_{\text{出}}$ 及 $I_Z \approx I_L$ 初选管子。或取 $I_{Z\text{最大}} \approx (2-3)I_L$ 。这是因为当负载电阻 R_L 开路时, 所有电流都要流过稳压管, 另外当电源电压上升时, 也会使流过管子的电流增加。

然后决定输入电压 $U_{\text{入}}$: 取 $U_{\text{入}} = (2-3)U_{\text{出}}$ 。

再决定限流电阻 R : 参见图 4-2。

$$\text{电阻阻值 } R = \frac{U_{\text{入}} - U_{\text{出}}}{I} = \frac{U_{\text{入}} - U_{\text{出}}}{I_{Z1} + I_L} \quad (4-1)$$

流过管子的电流 I_{Z1} 可选得略大于 I_L

电阻额定功率 $P_R \geq (2-4)I^2R$

确定了稳压线路以后, 最好还要校验一下两种极端情况。一是当 $U_{\text{入}}$ 最大, 负载开路时, 稳压管流过的电流最大, 这一电流值应小于 $I_{Z\text{最大}}$, 否则会烧坏管子。用公式表示就是 $\frac{U_{\text{入最大}} - U_{\text{出}}}{R} \leq I_{Z\text{最大}}$ 。如果不能保证这一条, 可加大 R 或选

$I_{Z\text{最大}}$ 较大的管子。二是当 $U_{\text{入}}$ 最小, 负载电流最大时, 即 $(U_{\text{入最小}} - I_{L\text{最大}}R)$ 取得最小值时, 它应当大于硅稳压管的反向击穿电压 U_Z , 用公式表示就是 $(U_{\text{入最小}} - I_{L\text{最大}}R) > U_Z$, 否则稳压管到不了击穿区, 不能起稳压作用。

3. 举例

例 1: 要求 $U_{\text{出}}$ 为 12 伏, 负载电阻为 2 千欧。

根据 $U_Z = U_{\text{出}} = 12 \text{ 伏}$, $I_L = \frac{12 \text{ 伏}}{2 \text{ 千欧}} = 6 \text{ 毫安}$, 查手册
 可选 2CW5, 其参数为: $U_Z = 11.5\text{—}14 \text{ 伏}$, $I_Z = 5 \text{ 毫安}$,
 $P_Z = 0.28 \text{ 瓦}$, 则 $I_{Z\text{最大}} = \frac{P_Z}{U_Z} = \frac{280}{12} = 23 \text{ 毫安}$

定输入电压 U_{λ} 为 30 伏

限流电阻 $R = \frac{U_{\lambda} - U_{\text{出}}}{I_{Z1} + I_L}$ 选流过稳压管的工作电流 I_{Z1}

$= I_L = 6 \text{ 毫安}$, 因流过管子的
 电流 I_{Z1} 大于手册上给出的
 I_Z , 故有较好的稳压作用。

代入式中则 $R = \frac{30 - 12}{6 + 6}$
 $= \frac{18 \text{ 伏}}{12 \text{ 毫安}} = 1.5 \text{ 千欧}$ 。

其稳压线路如图 4-3 所
 示。

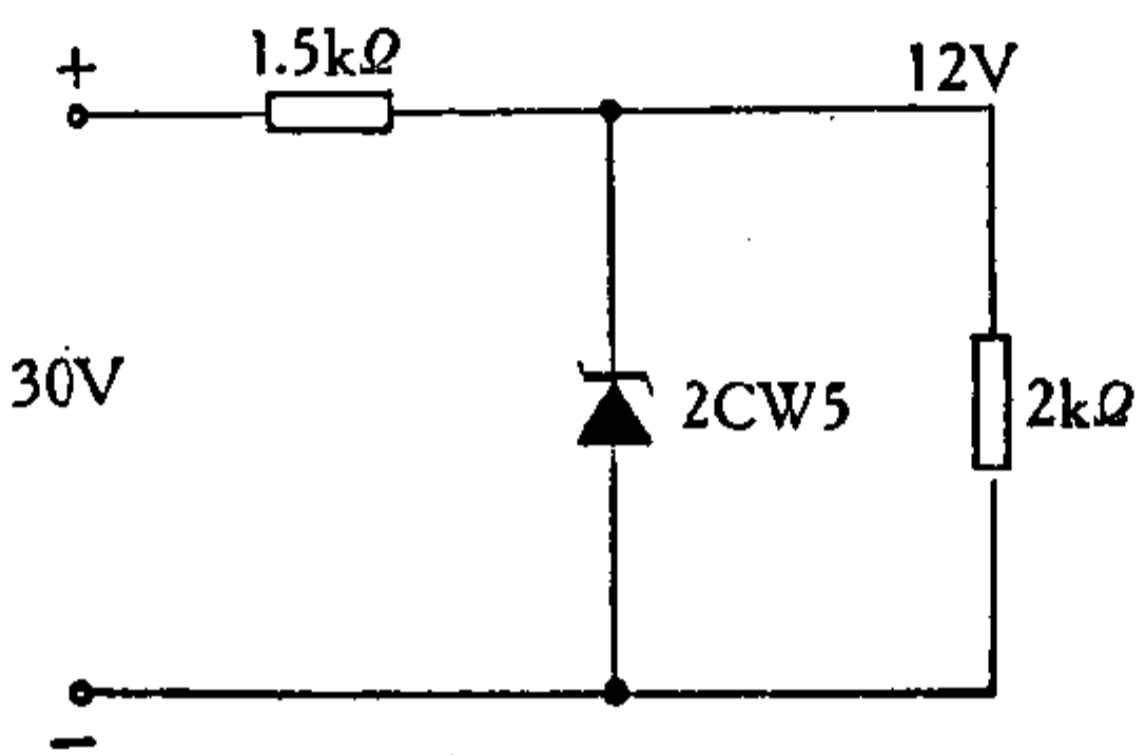


图 4-3

例 2: 要求稳压在 1.4 伏左右, 负载电流约 1 毫安。

稳压很低的稳压管目前比较少。大家回忆一下, 硅二极管正向特性也有一段比较“垂直”, 其电压大约 0.7 伏, 如图 4-4 所示, 这样就可构成如图 4-5 所示的稳压电路。输出电压约 1.4 伏, 电源电压为 6 伏。这种线路已成功地应用在收

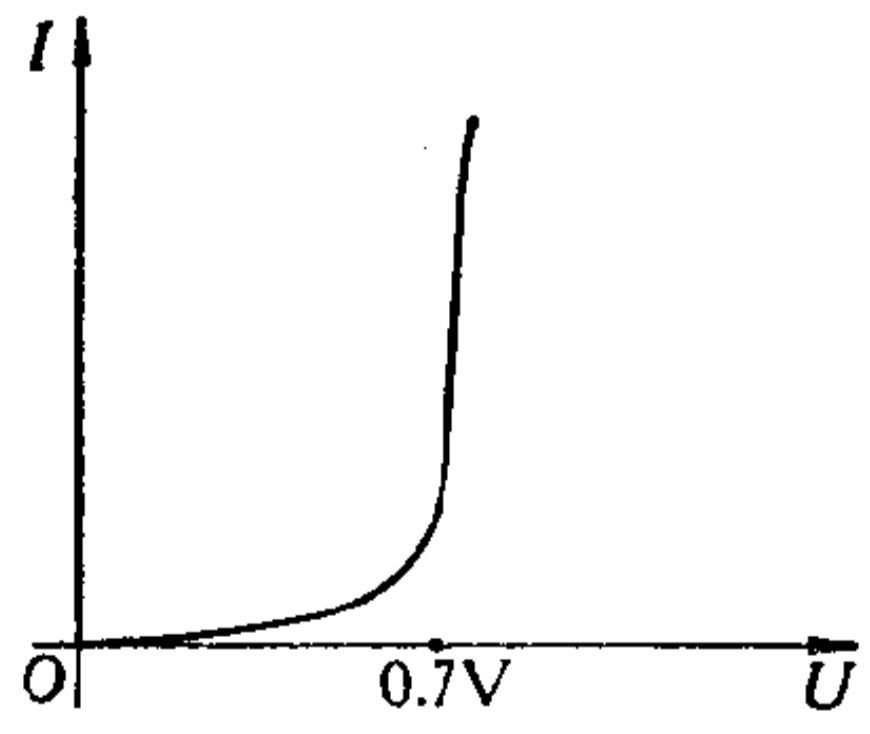


图 4-4 硅二极管正向特性
也具有稳压性能

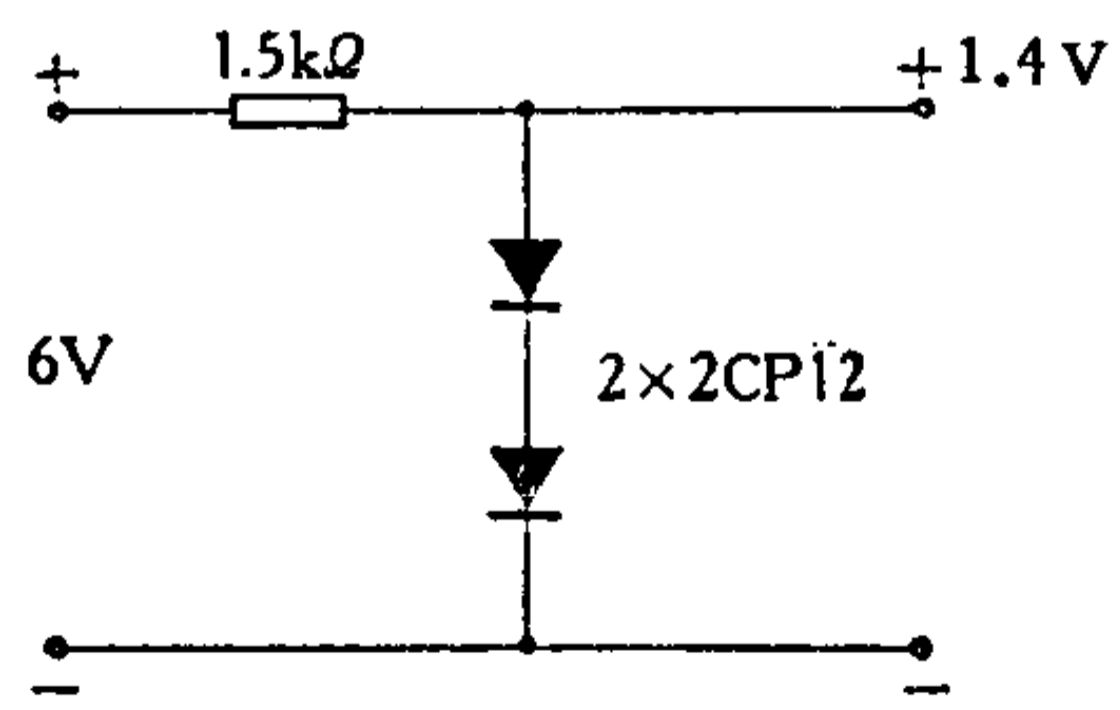


图 4-5 硅二极管正向稳压电路

音机上。当电池电压从6伏下降到3伏时,输出电压仍比较稳定,这种线路可作为晶体管收音机变频和中放级的电源。能保证它们正常地工作。

这种线路还用在限幅保护电路中,以保证当输入电压升高时,输出最大不超过某一数值。

以上几种硅稳压管稳压线路突出的优点是线路简单。但有如下几个缺点:一是输出电压由稳压管稳定电压决定,不能任意调节。二是因为负载电流的变化是由稳压管的电流来补偿。故输出电流受到稳压管电流的限制,不易做得很大。三是稳压精度不够高。但有一点必须说明,目前生产的某些稳压管,如2DW7其稳压精度比较高,可以组成代标准电池电路。

第二节 串联型负反馈稳压电路

当前在生产上用得最多的是串联型晶体管负反馈电路。

1. 串联型负反馈稳压器

我们来看图4-6的分压电路,当输入电压 $u_{\text{入}}$ 增加时,我们如果把可变电阻的阻值增大,使它把输入电压 $u_{\text{入}}$ 的增加量全部承担下来,这样,输出电压可以维持不变。若 $u_{\text{入}}$ 不变而负载电流增加,流过 $R_{\text{变}}$ 的电流也增加,这时如果相应减小 $R_{\text{变}}$ 的阻值,使 $R_{\text{变}}$ 上的压降不变,仍可维持输出电压不变。实际上,这个可变电阻是用晶体管来代替,如图4-7所示,阻值的改变也并非用手去调节,而是将输出电压取出一部分(或全部)去调节晶体管所呈现的阻值。由于这个晶体管是作调整用的,故这个晶体管称调整元件,这种调整元件与负载串联的稳压电路称串联型稳压电路。由于用了晶体管作调整管,能

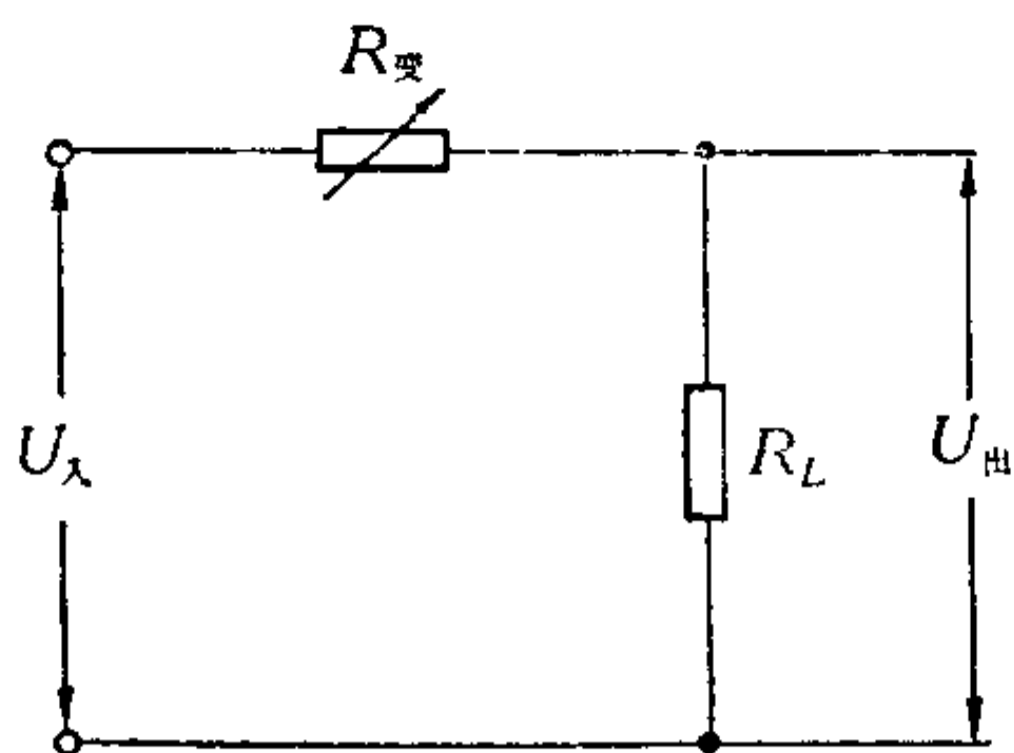


图 4-6

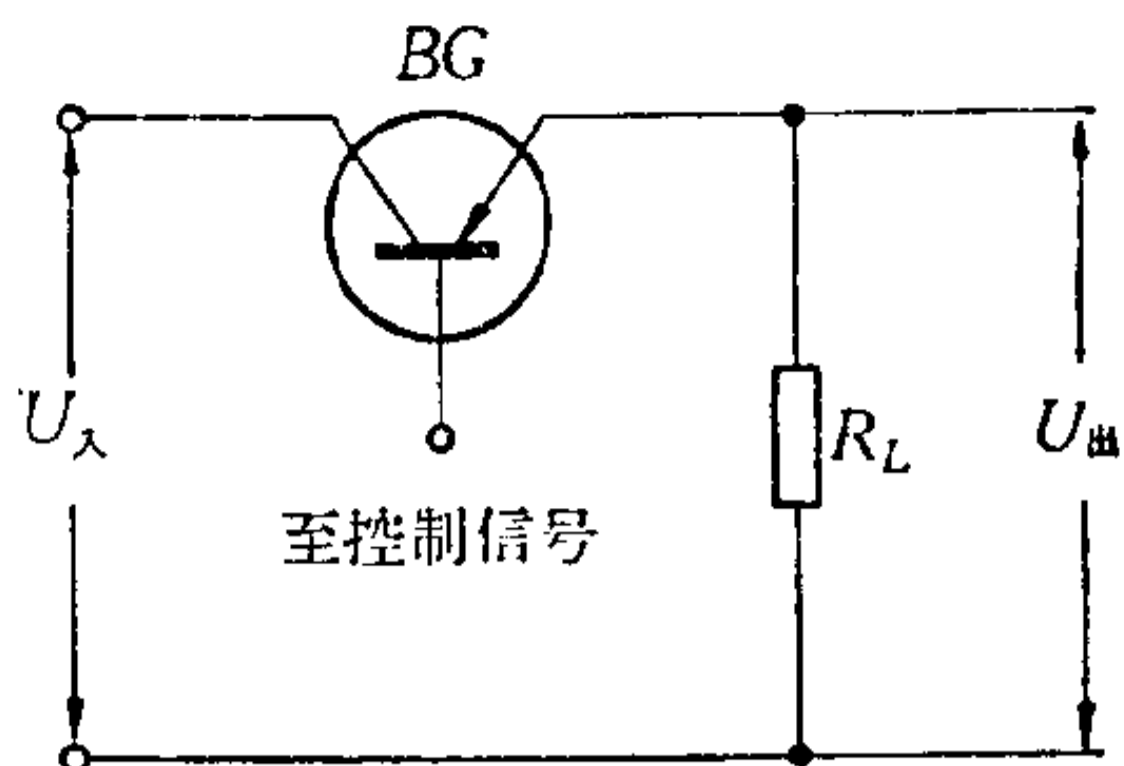


图 4-7

够在比较大的工作电流下工作，可以克服硅稳压管稳压线路的输出电流受稳压管电流限制的缺点。

图 4-8 为串联型负反馈稳压电路原理图。

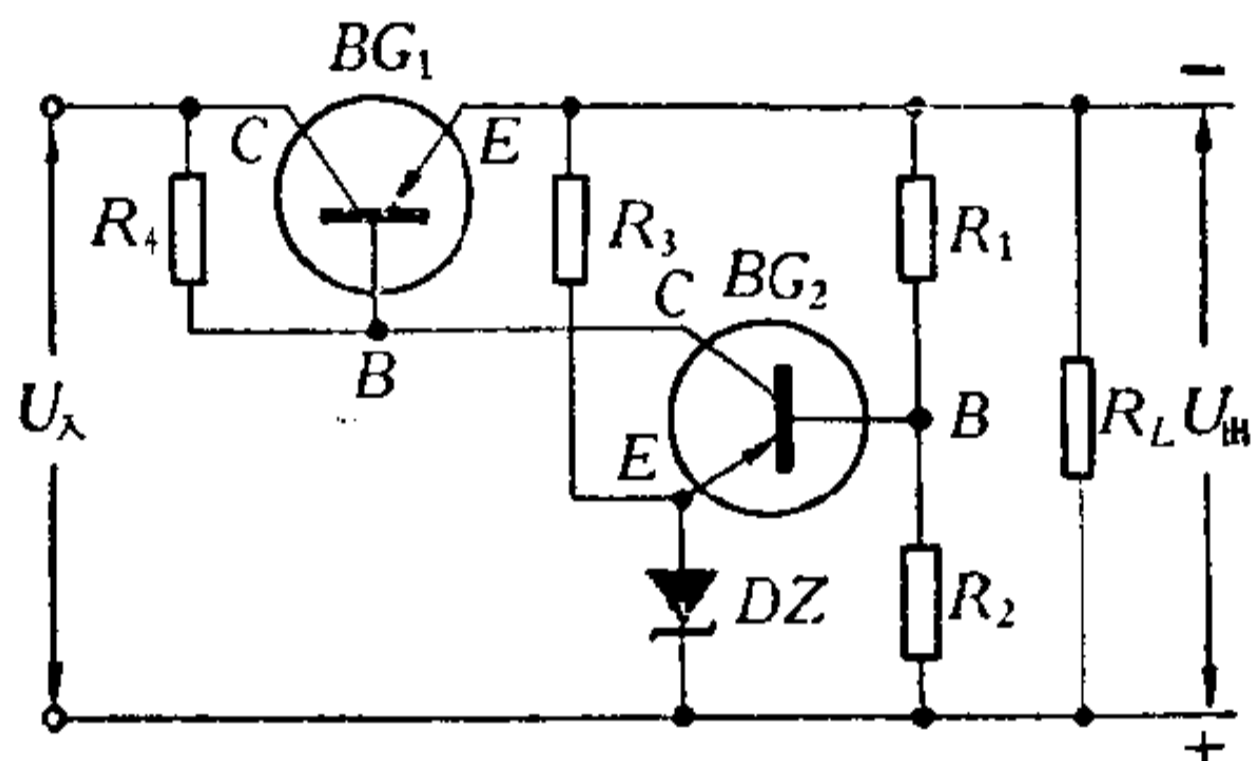


图 4-8 串联型负反馈稳压电路原理图

我们可将图 4-8 中各部分画成方框图。

由图可看出 BG_1 接成射极输出器，起调整作用。 R_1 、 R_2 组成分压器，起到“取信号”的作用。 DZ 为硅稳压管，作基准电压。 R_3 提供稳压管电流通路。 BG_2 接成放大器，起比较和放大的作用。 R_4 为 BG_2 的负载电阻，同时也是 BG_1 的偏流电阻。

电路工作原理：

如果由于电网电压升高或者负载减轻，而使输出电压 $U_{出}$ 增加，则分压器（由 R_1 R_2 构成）电阻 R_2 的电压相应增加，因

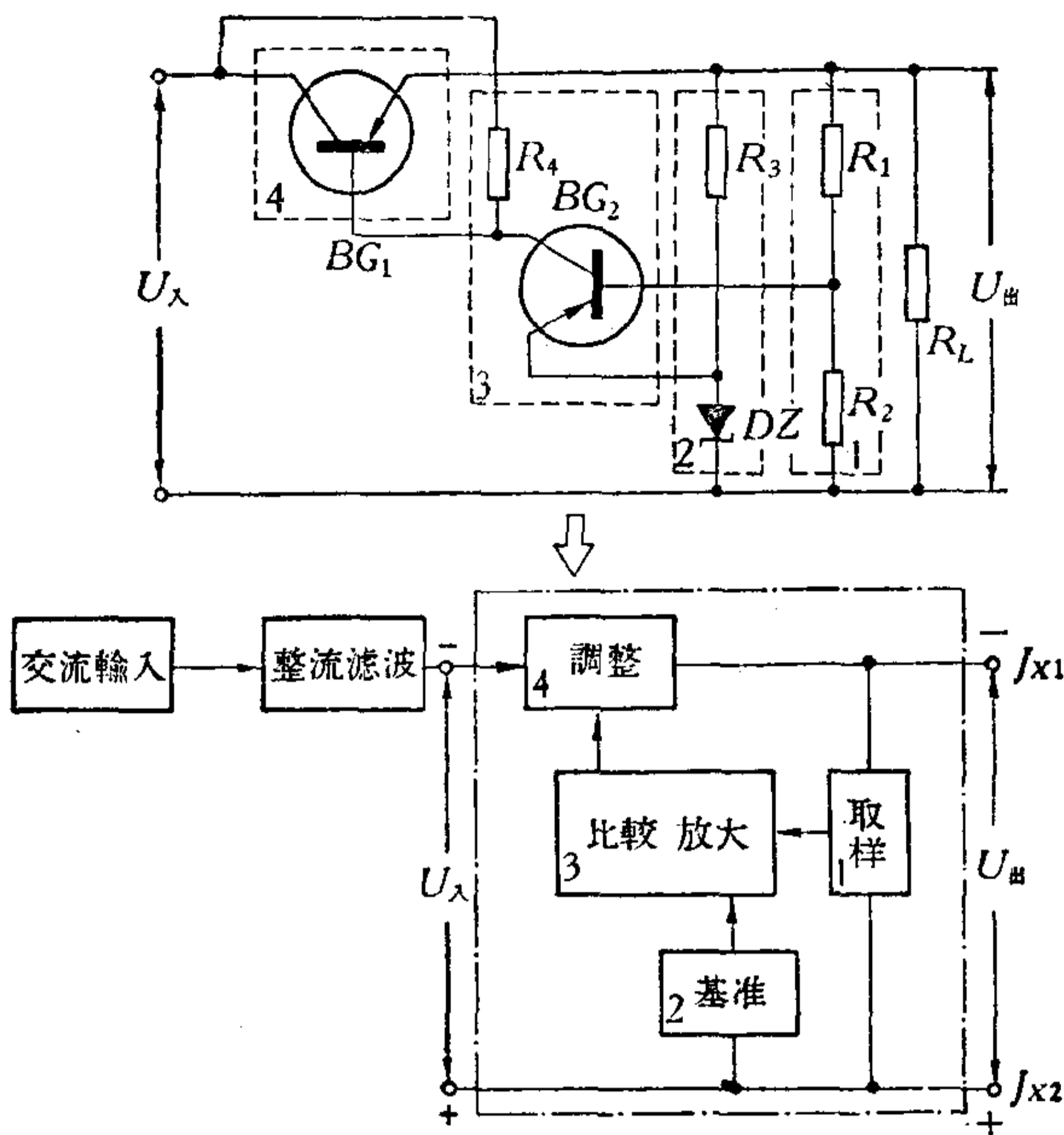


图 4-9 串联型负反馈稳压电源方框图

为硅稳压管 DZ 两端电压不变,所以 BG_2 管子的 U_{BE} 就增加,于是流过 BG_2 集电极的电流 I_{C2} 增加,使 BG_1 的基极电流 I_{B1} 减小,因此 I_{C1} 减小, BG_1 管的管压降增加,当然会导致 $U_{\text{出}}$ 下降,这样就可以使输出电压 $U_{\text{出}}$ 几乎保持不变。同样的道理,当 $U_{\text{出}}$ 因某种原因而下降时,通过负反馈作用又会使 $U_{\text{出}}$ 上升,从而使 $U_{\text{出}}$ 几乎保持不变。

下面我们对电路的各部分简单分析一下:

(1) 取样电路及基准电压

R_1 及 R_2 组成分压器,就是我们这里的取样电路,起到“取信号”的作用。从图 4-8 中可以看出在 R_2 上的电压 U_{R2} 为:

$$U_{R2} = U_{\text{出}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx U_Z \text{ (稳压管的稳定电压)}$$

所以

$$U_{\text{出}} \approx U_Z \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4-2)$$

从上式可以看出，改变 R_1 、 R_2 分压比就能改变输出电压 $U_{\text{出}}$ 。为了能够调节输出电压的大小，我们只要在图 4-8 上的 R_1 、 R_2 中插进一个电位器 W ，如图 4-10 所示，改变电位器的触点即可调节输出电压 $U_{\text{出}}$ 。

从(4-2)式可知，分压器 R_1 、 R_2 分压比的稳定性能对输出电压的稳定性能也有关系，从

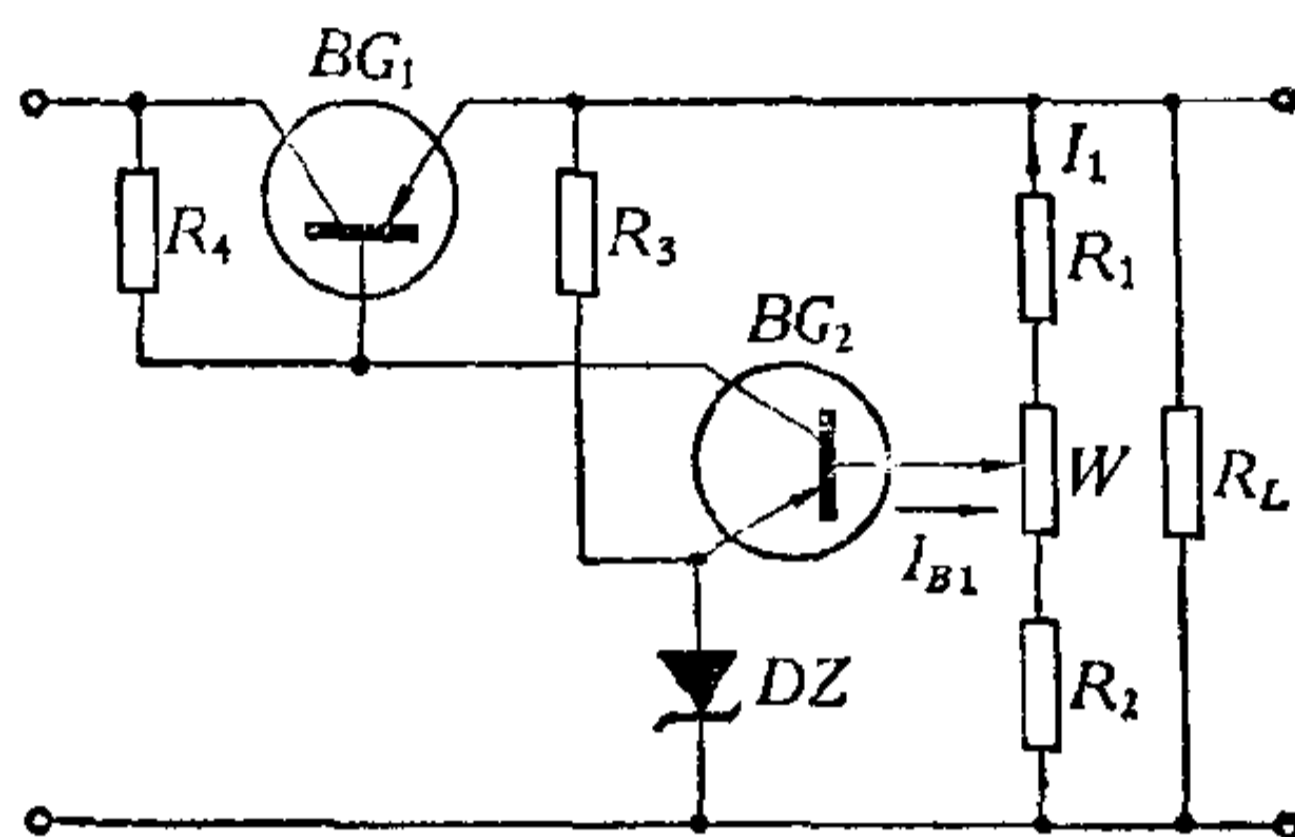


图 4-10 可调电压稳压器

图 4-10 上可以看出在 R_2 上流过的电流为 I_1 ，而在 R_1 上流过的电流则为 $(I_1 + I_{B1})$ ，由于 I_{B1} 是一个变量，它将影响分压比的稳定性能，为了减小 I_{B1} 的影响，我们取 I_1 比 I_{B1} 大得多。

下面再讨论一下基准电压。晶体管稳压电路中的基准电压通常用硅稳压管来获得，我们讨论的图 4-10 的电路用 R_3 及 DZ 组成硅稳压管稳压器，这种稳压器在本章第一节中已详细讨论过。稳压电路的稳定性能与基准电压的稳定性能有很大关系，基准电压的稳定性能越好，稳压电路的稳定性能也越好。在有些精密的稳压电源中就采用标准稳压管 2DW7 作基准电压，以提高稳压电路的稳定性。稳压管的工作电流取得比较大，稳定性能也较好。稳压管的击穿电压选得比输出电压低，从取样电路得出的信号与基准电压相比较，其差值

就是比较信号,作为放大管 BG_2 的输入。

(2) 放大部份及调整部份

比较信号经放大管 BG_2 放大后,控制调整管 BG_1 ,使稳压电源输出电压的变化反映在调整管 BG_1 的集电极和发射极上(即 U_{CE}),从而使输出维持稳定。

由此可见,放大器的稳定性好些,则稳压电源输出电压的稳定性亦好些。有些比较精密的仪器中,稳压电源的放大部份用差动电路,克服温度对电路的影响,从而大大提高稳压电源的稳定性,这种稳压电源电路在本章第三节中介绍。

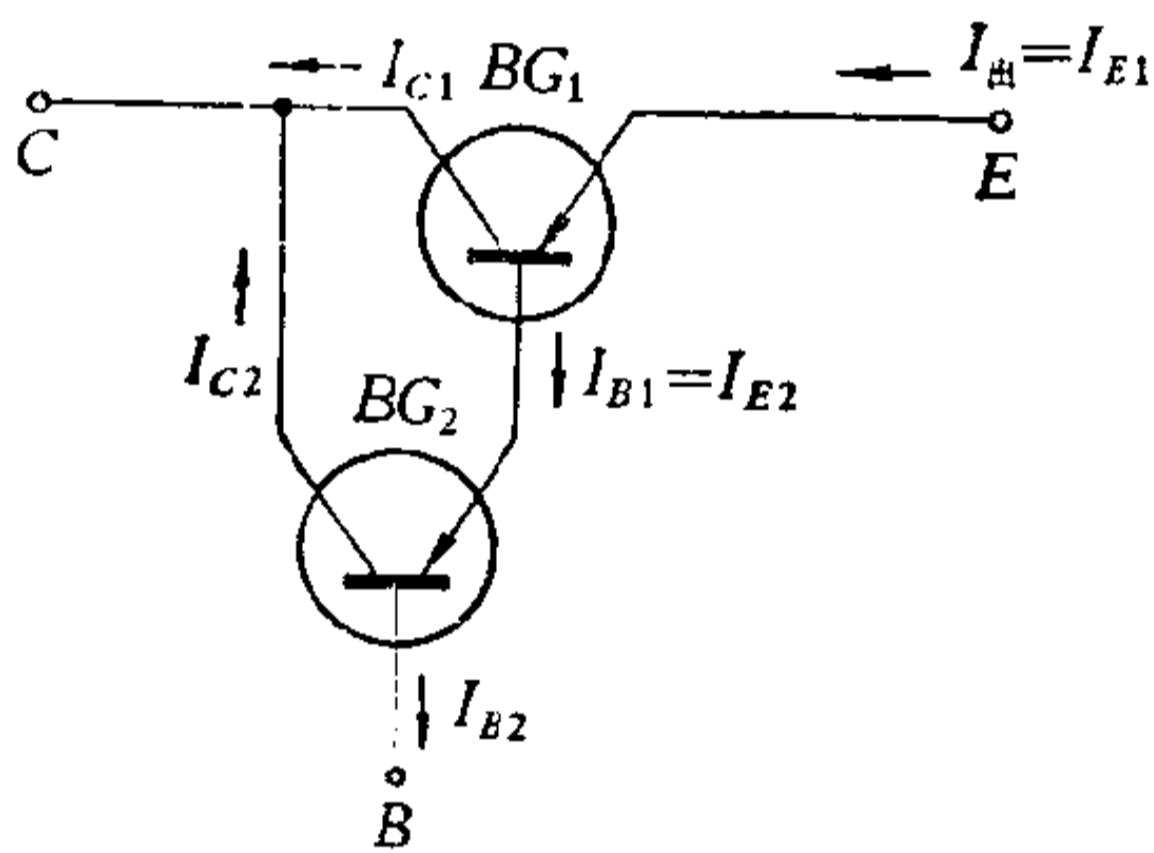


图 4-11

我们知道,调整管中流过的电流基本上就是输出电流 I_{th} 。若 I_{th} 较大,就要求有足够大的电流供给调整管的基极。通常在晶体管的电流放大系数 β 较小时,为了减小控制调整管的推动电流,可利用组合晶体管来作调整

管如图 4-11 所示。若 β_1 、 β_2 是图中晶体管 BG_1 、 BG_2 的电流放大系数,则:

$$\begin{aligned} I_{th} &= I_{E1} = I_{C1} + I_{B1} = \beta_1 I_{B1} + I_{B1} = (1 + \beta_1) I_{B1} = (1 + \beta_1) I_{E2} \\ &= (1 + \beta_1)(I_{C2} + I_{B2}) = (1 + \beta_1)(\beta_2 I_{B2} + I_{B2}) \\ &= (1 + \beta_1)(1 + \beta_2) I_{B2} \approx \beta_1 \beta_2 I_{B2} \end{aligned}$$

即组合晶体管的电流放大系数近似为两管电流放大系数的乘积。这样很小的 I_{B2} 可以控制很大的 I_{th} 。同理,如果用三个管子按同样方法连接,则总的电流放大系数 $\beta \approx \beta_1 \beta_2 \beta_3$ 。

我们知道温度增高时,管子的反向截止电流 I_{CBO} 变大。从图 4-12 可看出 BG_1 的 I_{CBO} 和 BG_2 的发射极电流方向相反。本来 BG_1 的发射极电流受 BG_2 发射极电流的控制,现

在 BG_1 中的 I_{CBO} 使 BG_2 发射极电流减小，也就是 BG_1 的 I_{CBO} 使 BG_2 对 BG_1 的控制作用减弱甚至消失。高温时 I_{CBO} 很大，空载（或轻载）时 I_{E2} 很小，为了在高温空载（或轻载）时 BG_1 不致失控，就在 BG_1 基极加接电阻 R ，如图4-12所示。这时 BG_1 的 I_{CBO} 通过电阻 R 流入，而不影响 BG_2 对 BG_1 的控制。图中 R 的数值可近似由下式决定：

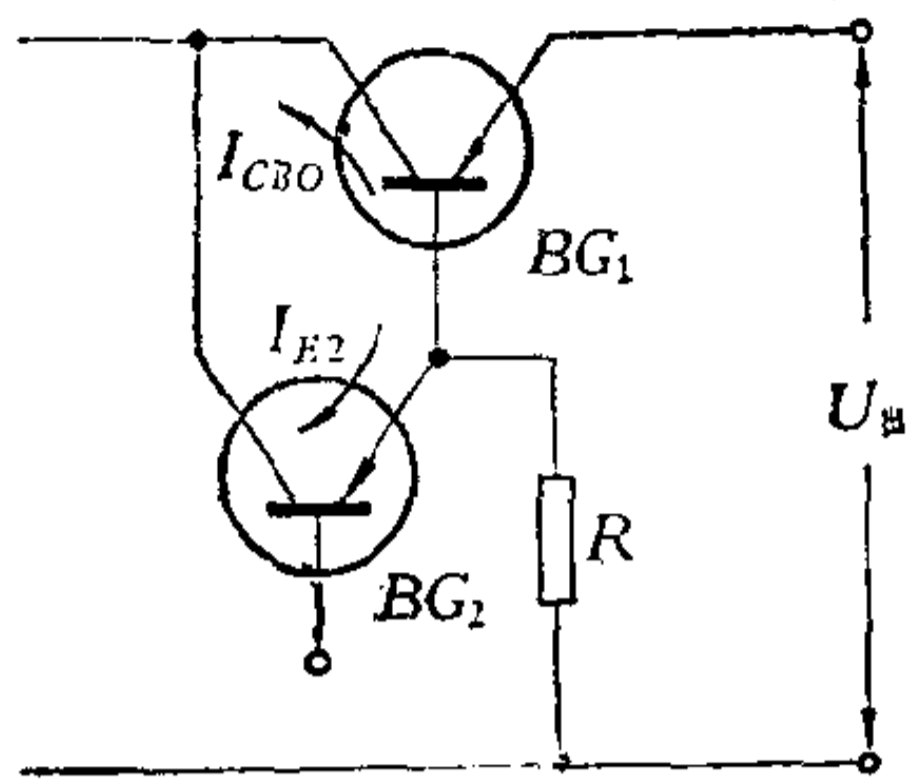


图 4-12

$$R \approx \frac{U_{in}}{I_{CBO}} \quad (4-3)$$

式中 I_{CBO} 以高温时的数值代入。

在有些场合，温度及负载变化不大时，就不一定要接电阻 R 。

上面我们对可调输出电压的稳压电源各个组成部分大致分析了一下，这种稳压电路已能克服硅稳压管稳压器所存在的问题，在很多地方都有应用，我们在本章第四节应用电路中还要介绍这类电路的实际例子供大家参考。

2. 具有辅助电源的稳压电路

上面讨论的图 4-10 这种串联稳压线路尚有不足之处，它对于输入电压的突然跳变不能很好的稳定，因为这种突然变化可通过电阻 R_4 直接加在调整管基极上，从而通过调整管放大而出现在输出端。另外图 4-10 电路中放大器的电源即输入电压 U_{in} 也是未经稳定的，为了克服这个缺点，我们不将 R_4 直接接到电源输入端而使放大器的电源稳压，如图 4-13 所示。但是在该线路中为了使稳压管 DZ_2 正常工作，必须使

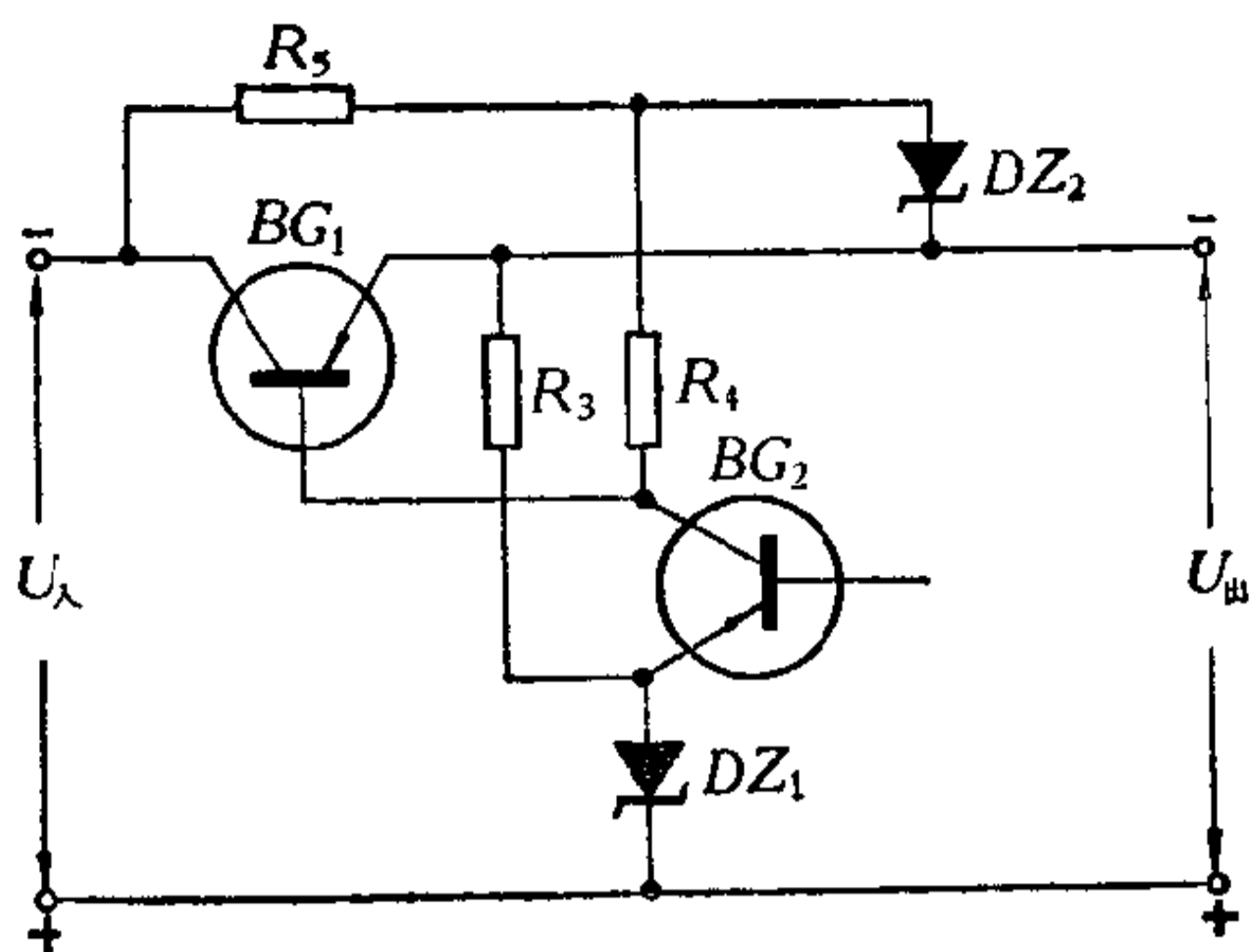


图 4-13

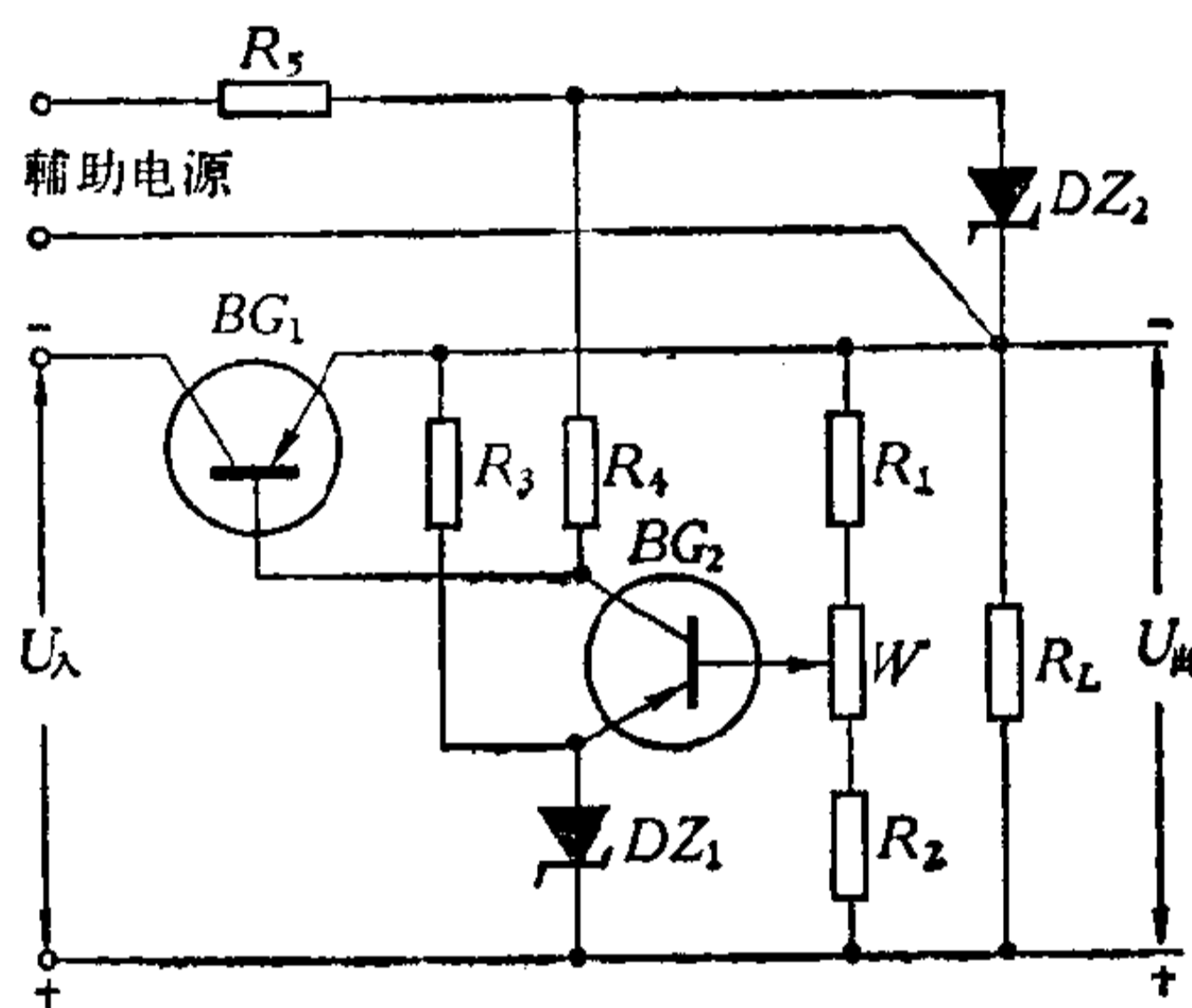


图 4-14

调整管 BG_1 的管压降 U_{CE1} 大于 DZ_2 的工作电压，这样就增加了 BG_1 的功率损耗。解决这个矛盾的方法是增加一个辅助电源如图 4-14 所示。

这时放大器的电源是稳定的，等于输出电压加上 DZ_2 的电压，该电路提高了输出电压的稳定性，尽管这种电路较复杂，但应用仍较广泛。

上面所介绍的一些线路，并非越复杂越好，在实际运用中，我们要按实际情况决定

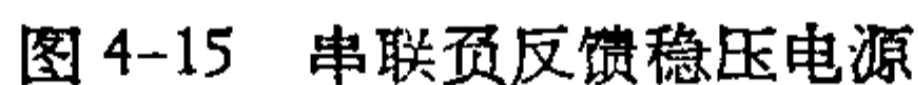
工作方针，根据设备对稳压的要求和本着节约闹革命的原则来决定线路。

第三节 串联型负反馈稳压电路的简单计算

用前面学过的原理，下面着重分析输出电压 12 伏、输出电流 1 安的稳压电路，另外在本章第四节中列出一些稳压电源线路供同志们参考。

毛主席教导我们：“马克思主义者看问题，不但要看到部

将图 4-15 和前面图 4-9 的方框图比较可知:交流电源经整流滤波以后作为稳压器的输入 U_A ; 取样电路由电阻 R_2 R_3 及电位器 W_1 构成;基准电压由 DZ_2 提供;放大部分由 BG_1 及 BG_2 组成差动电路;取样及基准相比较作为放大器的输入;放



电路中各部分和前面本章第二节中提出的电路基本上是一样的,只是放大部分采用差动电路,因为差动放大器可以使温度对管子的影响互相抵消,那么稳压电源的稳定性也就大大提高。

下面简单谈谈这种稳压电源中放大部分的工作原理:

若电源波动或负载变化引起稳压电源输出电压增加, 则通过 R_2 、 W_1 及 R_3 的分压, 使 BG_1 基极对地的电压增加, 可是 BG_2 的基极接稳压管, 其基极对地的电压是固定不变的, 那么 BG_1 的集电极电流增加, 这就引起 BG_1 的集电极电阻 R_4 上的压降增加。图 4-15 中, R_4 的压降是 U_{12} , 整个调整管的基极和发射极间的电压是 U_{34} , 由此图可以看出:

$$U_{12} + U_{34} = U_{Z1} \quad (4-4)$$

上式中 U_{Z1} 是稳压管 DZ_1 的击穿电压, 是稳定不变的。从式 (4-4) 可以看出, 若 R_4 两端压降 U_{12} 增加, 则 U_{34} 减小。 U_{34} 减小结果使调整管的集电极电流减小, 集电极与发射极间电压增加, 从而使输出维持不变。

1. 调整部分的计算

图 4-15 中 BG_3 、 BG_4 、 BG_5 三个管子构成组合晶体管作调整管。不过在这个电路中, BG_3 的集电极接到 5 这一点去了, 这在后面还要说明。

晶体管稳压电源的稳定程度与调整管及其工作点的选择有很大的关系, 如选择不当, 就不能达到预期的效果。管子的选择是从能够承受最大集电极损耗功率 P_{CM} 、最大集电极电流 I_{CM} 和最大集电极电压 BU_{CEO} (注意, 在有些产品目录中常用 BV_{CEO} 表示, 定义见附录) 来考虑的, 工作点确定是从稳定范围来考虑的。

一般计算稳压电路时, 已知所需稳定电压 $U_{\text{出}}$ 和输出电流 $I_{\text{出}}$ 。

稳压电源的输入电压约比输出电压高 3—6 伏, 并允许它有 $\pm 10\%$ 的波动。

调整管上的电压 $U_{CE} = U_{\text{入}} - U_{\text{出}}$, 流过管子的电流 I_C 近

似为输出电流 $I_{\text{出}}$ ，管子损耗的功率 $P_C = U_{CE} I_C$ ，选择管子时，管子的极限运用参数均应大于上述三个量，并有一定余量。

现在稳压电源输出电压 12 伏，输出电流 1 安。

取输入电压为 16.5 伏 $\pm 10\%$ ，即在 14.85 伏至 18.15 伏范围内变化。

流过调整管的最大电流近似为输出电流 1 安。

满载时，调整管最大压降为：

$$18.15 \text{ 伏} - 12 \text{ 伏} = 6.15 \text{ 伏},$$

所以调整管集电极最大损耗功率为：

$$6.15 \text{ 伏} \times 1 \text{ 安} = 6.15 \text{ 瓦}.$$

若考虑稳压电源前滤波电容等的作用，那么在空载时稳压电源输入电压是满载时的 1.5 倍左右。

空载时，调整管最大压降为：

$$1.5 \times 18.15 \text{ 伏} - 12 \text{ 伏} = 17.15 \text{ 伏}$$

查晶体管特性手册，根据 $I_{CM} > 1 \text{ 安}$ ， $P_{CM} > 6.15 \text{ 瓦}$ ， $BV_{CEO} > 17.15 \text{ 伏}$ ，选取 3 AD 25 作调整管，为了减小控制电流，与 3 AD 8 和 3 AX 31 组成组合管。

3 AD 25 与 3 AD 8 基极接地电阻分别为：

$$R_{10} = \frac{U_{\text{出}}}{I_{CBO}} = \frac{12 \text{ 伏}}{19 \text{ 毫安}} = 630 \text{ 欧}, \text{ 取 } 620 \text{ 欧}.$$

$$R_9 = \frac{U_{\text{出}}}{I_{CBO}} = \frac{12 \text{ 伏}}{4.2 \text{ 毫安}} = 2.8 \text{ 千欧}, \text{ 取 } 2 \text{ 千欧}.$$

式中 I_{CBO} 以管子高温时的数值代入。

从手册中看出 3 AD 25、3 AD 8 及 3 AX 31 三种管子的 BV_{CEO} 是不同的，3AD25 及 3AD8 的 BV_{CEO} 较高，而 3AX31 的 BV_{CEO} 较低。在电路中 3 AD25、3AD8 及 3AX31 这三个管子的发射极电位基本上是一样的，因为输入电压变化到最高且负载空载时，调整管上的压降最大，要使调整管上压降最

大时 3AX31 不致发生反向击穿, 就将 3AX31 的集电极接到图4-15 中的 5 这一点, 也就是将 3AX31 与稳压管 DZ_1 并联, 而 DZ_1 的电压是在 8 伏左右稳定不变的。

2. 基准、取样电路及放大电路(包括辅助电源)的计算

击穿电压在 6—7 伏的稳压管一般稳压性能较好; 稳压管的工作电流取得大一些, 稳压性能亦好一些。一般稳压管击穿电压在 6 伏以上有正温度系数, 在 6 伏以下有负温度系数, 在 6 伏左右近似为零温度系数, 即稳定电压不随温度变化, 由于以上种种原因, 稳压电源常采用 6—7 伏的稳压管作基准电压, 其工作电流常选 10 毫安以上。标准稳压管 2DW7, 它内部已进行温度补偿, 对于需要零温度系数的情况可采用。

我们这里, 基准电压 U_{Z2} 取 6.5 伏, 选 2DW7 稳压管, 工作电流 I_{Z2} 定为 10 毫安,

$$R_6 = \frac{U_{\text{出}} - U_{Z2}}{I_{Z2}} = \frac{(12 - 6.5) \text{ 伏}}{10 \text{ 毫安}} = 0.55 \text{ 千欧}, \text{ 取 } 510 \text{ 欧}$$

差动放大器采用 3AX31 低频小功率管, 其集电极电流均取 2 毫安。为了提高稳定性, 使 R_2 、 R_3 中的电流 I_1 比 BG_1 的基极电流 I_{B1} 大得多, 取 I_1 为 10 毫安, 则

$$R_2 + R_3 = \frac{U_{\text{出}}}{I_1} = \frac{12 \text{ 伏}}{10 \text{ 毫安}} = 1.2 \text{ 千欧}$$

而 $I_1 R_3 = U_{Z2}$, 所以

$$R_3 = \frac{U_{Z2}}{I_1} = \frac{6.5 \text{ 伏}}{10 \text{ 毫安}} = 650 \text{ 欧}$$

故 $R_2 = (R_2 + R_3) - R_3 = 1.2K - 0.65K = 0.55K$, 为了可以调节输出电压, 在 R_2 、 R_3 中插入一电位器, 今取 270 欧。 R_2 、 R_3 分别减小为 350 欧和 550 欧。

差动放大器发射极电阻 R_5 上流过电流近似为两管集电极电流之和,即 $2 \text{ 毫安} + 2 \text{ 毫安} = 4 \text{ 毫安}$,而 R_5 上电压近似等于稳压管的电压 6.5 伏 ,所以

$$R_5 = \frac{6.5 \text{ 伏}}{4 \text{ 毫安}} = 1.75 \text{ 千欧}, \text{ 取 } 1.8 \text{ 千欧}。$$

辅助电源 DZ_1 取 $2CW15$, 击穿电压为 8 伏 , 辅助电源输入电压取 $30 \text{ 伏} \pm 10\%$, 取流过稳压管的电流为 10 毫安 , 而其负载电流即 BG_1 的集电极电流 2 毫安 , BG_3 的集电极电流约 1 毫安 , 所以

$$R_{13} = \frac{30 \text{ 伏} - 8 \text{ 伏}}{10 \text{ 毫安} + 2 \text{ 毫安} + 1 \text{ 毫安}} = \frac{22 \text{ 伏}}{13 \text{ 毫安}} \approx 1.8 \text{ 千欧}$$

为使差动放大器工作状态对称, BG_1 的集电极到发射极之间电压应与 BG_2 的相等。这样, R_4 上电压就等于稳压管 DZ_1 的电压 8 伏 。

所以 $R_4 = \frac{8 \text{ 伏}}{2 \text{ 毫安}} = 4 \text{ 千欧}, \text{ 取 } 3 \text{ 千欧}。$

R_{12} 是平衡电阻, 这里取 270 欧 。

输出端加接 R_1 是为了在空载时提供调整管穿透电流的通路, 今调整管穿透电流取 30 毫安 则

$$R_1 = \frac{12 \text{ 伏}}{30 \text{ 毫安}} = 0.4 \text{ 千欧}, \text{ 取 } 390 \text{ 欧}。$$

输出端加接电容 C_1 , 减小稳压电源输入端突变对输出端的影响, 一般取几百微法至几千微法, 今取 $500 \text{ 微法}/15 \text{ 伏}$ 。

电容器 C_2 主要是抑制稳压电源内部产生自激振荡, 一般取 0.01 微法 , 今取 0.01 微法 。

输入端加接快速熔断器 RD , 以免过载时损坏调整管。

以上介绍简单的粗略计算, 以供同志们在实践中作一初步的依据, 最后还必须要经过实践来调整。

计算所得电路的全部数据列于图 4-16 中。

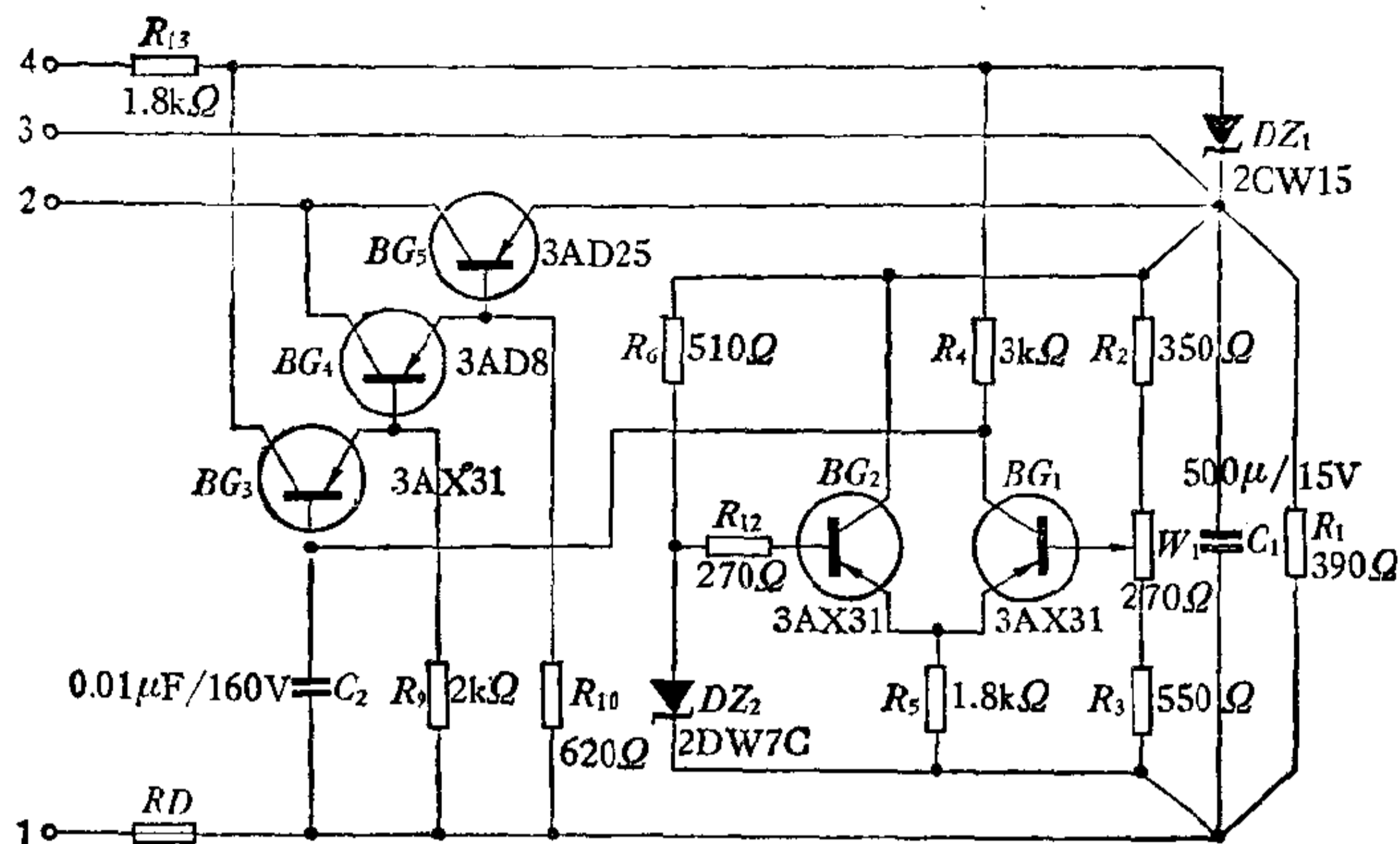


图 4-16 12 伏 1 安定压式直流晶体管稳压电源

3. 串联型负反馈稳压器的调整

毛主席教导我们：“自由是对必然的认识和对客观世界的改造。”一些没有调试过稳压电源及经验不足的同志，对调试稳压电源感到害怕，怕烧毁晶体管。按照辩证唯物主义的观点，一切事物的规律都是可知的，稳压电源的调整规律，也是容易掌握的，唯一的办法就是实践。

调整步骤大致如下(以图 4-16 线路为例)：

- (1) 按图 4-17 接测试设备。
- (2) 在调试前，过细地检查线路，接线是否正确，焊接是否牢固。
- (3) 检查整流部分，将 2 与 4 处断开，合上电源开关 K，调节调压器，使输入电压逐渐上升，看整流电压是否正常。在交流输入电源为 220 伏时，测量主电源及辅助电源整流滤波后的电压是否符合设计要求。
- (4) 分别将 2、4 处联结，为防止意外事故先不接负载。将

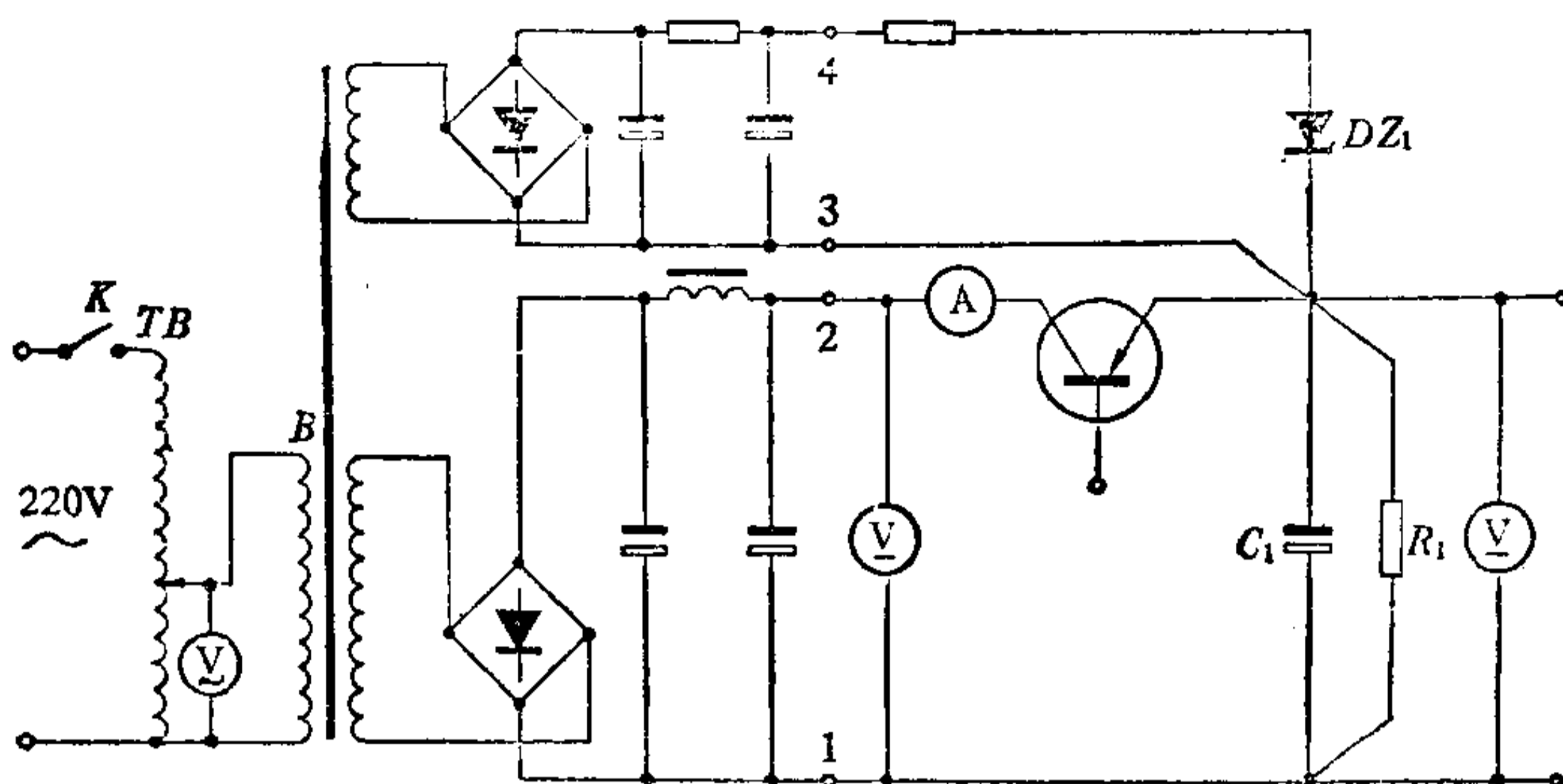


图 4-17 串联型负反馈稳压器调整仪器接线图

调压器从零往高处调，观察稳压电源直流输入电压直流输出电压以及调整管压降是否正常。调节过程中若发现有输入电压而无输出电压且电流很小，应检查调整管是否处于截止状态，或者接线有否接好；如果发现电流很大，而输出电压很小，输入电压几乎全部降在调整管上，此时可能负载短路，应立即断开电源，待排除故障后，方可继续调试。

(5) 将电网电压调在 220 伏，检查基准电压及辅助电源稳压是否良好。可将电压表直接并接于 DZ_1 及 DZ_2 上测量电压。或通过测量电阻 R_6 及 R_{13} 上的压降来检查其工作电流是否符合设计要求。

(6) 然后，检查差动放大器的工作状况。通过测量 R_5 上电压，看其电流大小，此电流为 BG_1 及 BG_2 两个管子电流之和，工作电流大小可改变 R_5 来获得。通过测量 R_4 上电压降检查每个管子的工作电流。调节两管电流的平衡可以通过改变 R_4 或 R_{12} 来达到。若发现 BG_1 的电流过小，可以减小 R_4 或加大 R_{12} 来增大 BG_1 的电流，减小 BG_2 的电流。

(7) 调整输出电压，如果实际测得的输出电压低于设计要求（即 12 伏），可将电位器 W_1 往下调节；反之，将 W_1 往上

调节即可。

(8) 检查调整管上最大承受电压。稳压电源不接负载,将输出电压调在最低,在将输入电网电压往 242 伏调高过程中,用电压表测量调整管的管压降,检查是否超过 BU_{CEO} (BU_{CEO} 为晶体管手册中给出的晶体管的共发射极反向击穿电压。)注意,此时最易造成调整管的电压击穿,这里所选用的 3AD25 及 3AD8 均应满足此要求。

(9) 接上负载,使负载电流达到额定电流(即 1 安),调节调压器使电网电压变动 $\pm 10\%$,看输出电压稳定的程度。

在电网电压为 242 伏,工作电流维持 1 安时,测量调整管管压降。根据管子损耗功率 $P_C = U_{CE} \cdot I_C$ 检查作组合调整管的各管子 P_C 是否超过额定值。

在电网电压降至 198 伏时,看调整管是否有调整作用。若此时调整管上压降低于 0.5 伏,要设法提高稳压电源直流输入电压。

然后,将输入电压维持在 220 伏不变,改变负载电阻,使负载电流在 0—1 安范围内变动,看其对输出电压的影响(即负载调整率的好坏)。

(10) 纹波电压的大小也是稳压电源的指标之一,其大小可以用电子管毫伏表并接在稳压源输出端测得,或用示波器观察波形。如发现电源有自激振荡现象或纹波电压较大,可以调整电容 C_2 的容量,或在 BG_1 的集电极、基极间跨接电容。

对于串联式稳压电源电压调整率与负载调整率小于千分之一指标的,输出电压应该用电位差计测量。

对于工作电流较大的稳压电源,在安装时要特别注意接线方式,在流过大电流的回路中接线应尽可能选粗些,且取得短些,使导线的铜阻减小到最低限度,以减小电源内阻。

第四节 应用线路举例

1. 简单的晶体管稳压电源

图 4-18 的电源,输出电压 12 伏,输出电流 500 毫安。是供给某电子设备用的。调整管用 3AD6C 及 3AX31B 组成组合管,以提高调整灵敏度。稳压器输出端并有 100 微法的电容,以进一步减小输出端可能出现的纹波。这种稳压电源的输出电压与稳压管反向击穿电压相近而不能调节,适用于所需电流较大而稳定度不是很高的场合。

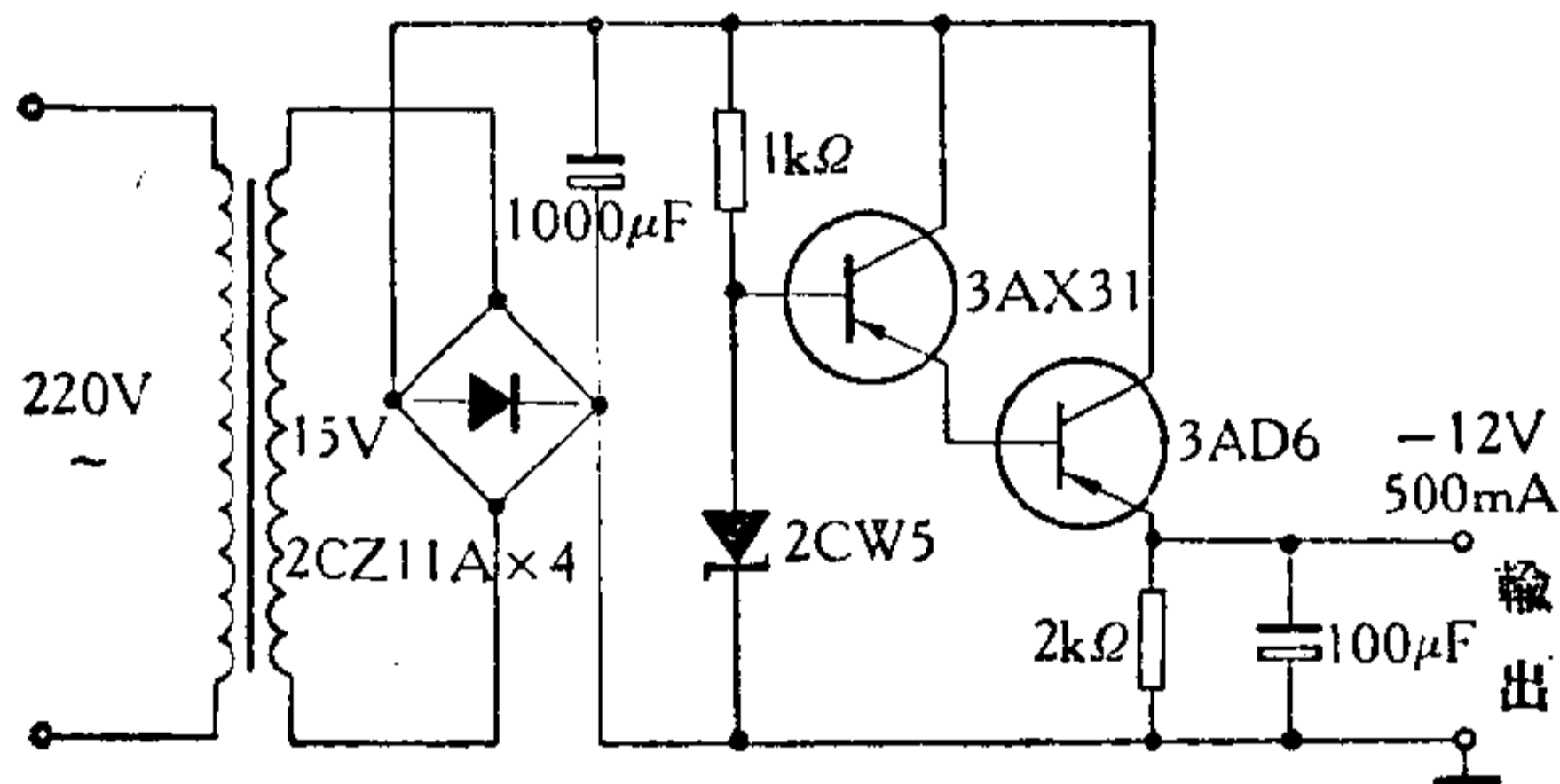


图 4-18

2. 单管放大晶体管直流稳压电源

本电路特点简单实用,其输出电流 50 毫安(图 4-19)。

C_2 为耦合电容,它使输出端的波动不通过取样电阻直接耦合到放大管 BG_2 的基极,因此输出电压的纹波很小。适用于普通电子电路的电源。 C_1 大约在 0.1—1 微法之间,可由调试决定。

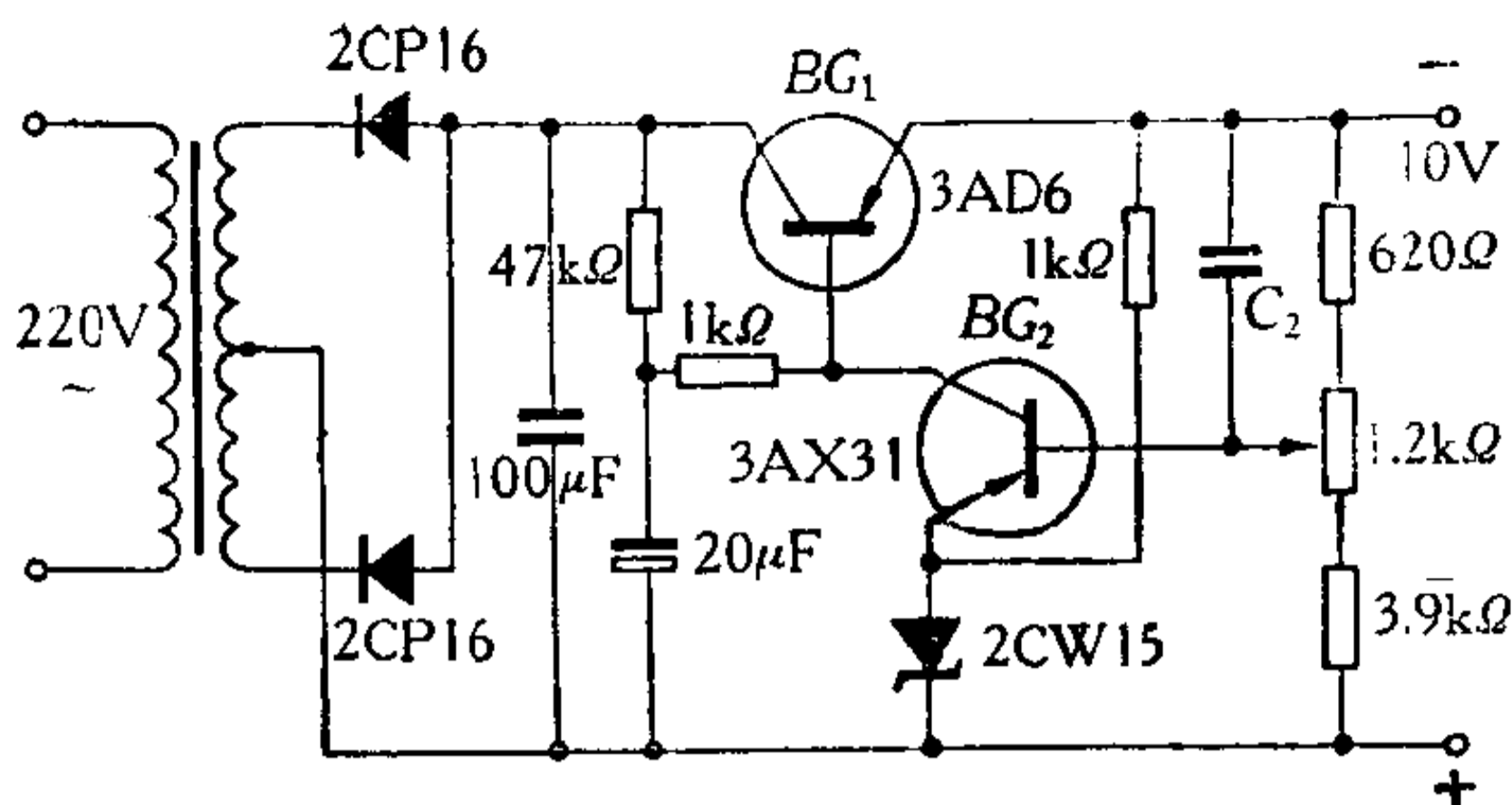


图 4-19

3. 6 伏 5 安定压式直流晶体管稳压电源

图 4-20 是 6 伏 5 安的直流稳压电源。它的调整管由 BG_3 , BG_4 和 BG_5 , BG_6 组合成的, BG_5 , BG_6 是并联的, 这是因为考虑到用一个 3AD18B 不能满足功率损耗的缘故。在有些线路中还有用三个或四个晶体管并联的, 此时各管应流过相等的电流, 发射极接平衡电阻 R_{10} 和 R_9 来减小管子的一致性和 I_{CBO} 的影响, 一般该电阻上的压降选在 0.1 伏到 1 伏

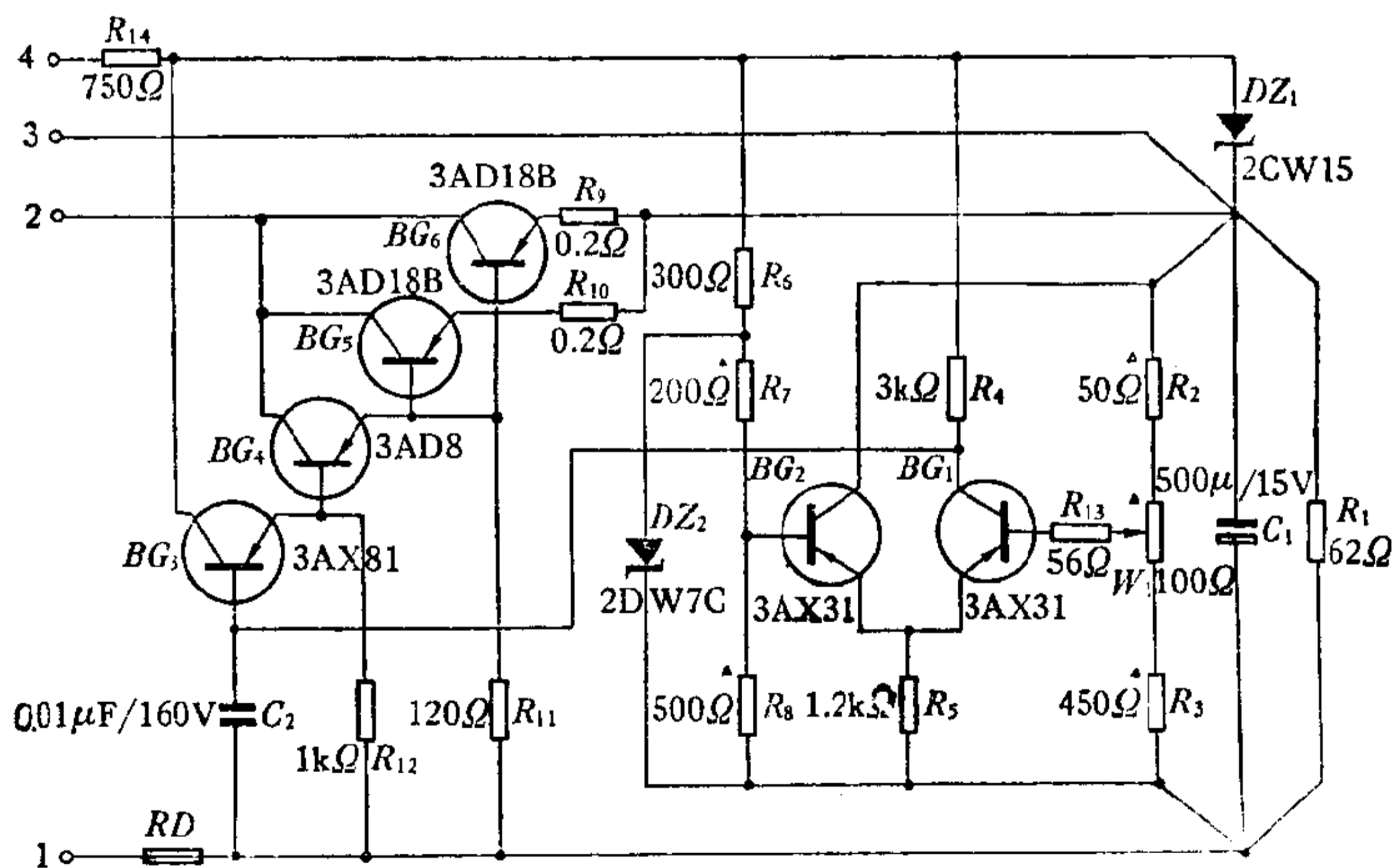


图 4-20 6 伏 5 安定压式直流晶体管稳压电源

在该电路中因为输出电压接近于稳压管 DZ_2 的电压, 因此利用 R_7 和 R_8 对稳压管 DZ_2 的电压进行分压后作为基准电压。

标有△记号的电阻是采用金属膜电阻或用温度系数较小的锰铜丝绕制。

图 4-21 是 30 伏 0.2 安的直流稳压电源，在一般输出电压比较高的场合，若仍然采用 2DW7 硅稳压管，就应该把稳压管接成图 4-21 这种形式，因为 DZ_2 接在上方后，可以使差动放大器的 BG_1 与 BG_2 在输出电压较高时，其集电极和基极间仍处于低压状态。此时为了使 BG_1 与 BG_2 仍有合适的工作点，可以把差动放大器的射极电阻 R_5 取大些。

由于 DZ_2 的接法和图 4-16 不同, 差动放大器的输出端应由 BG_2 集电极引出, 使线路保持负反馈, 起到稳压作用。

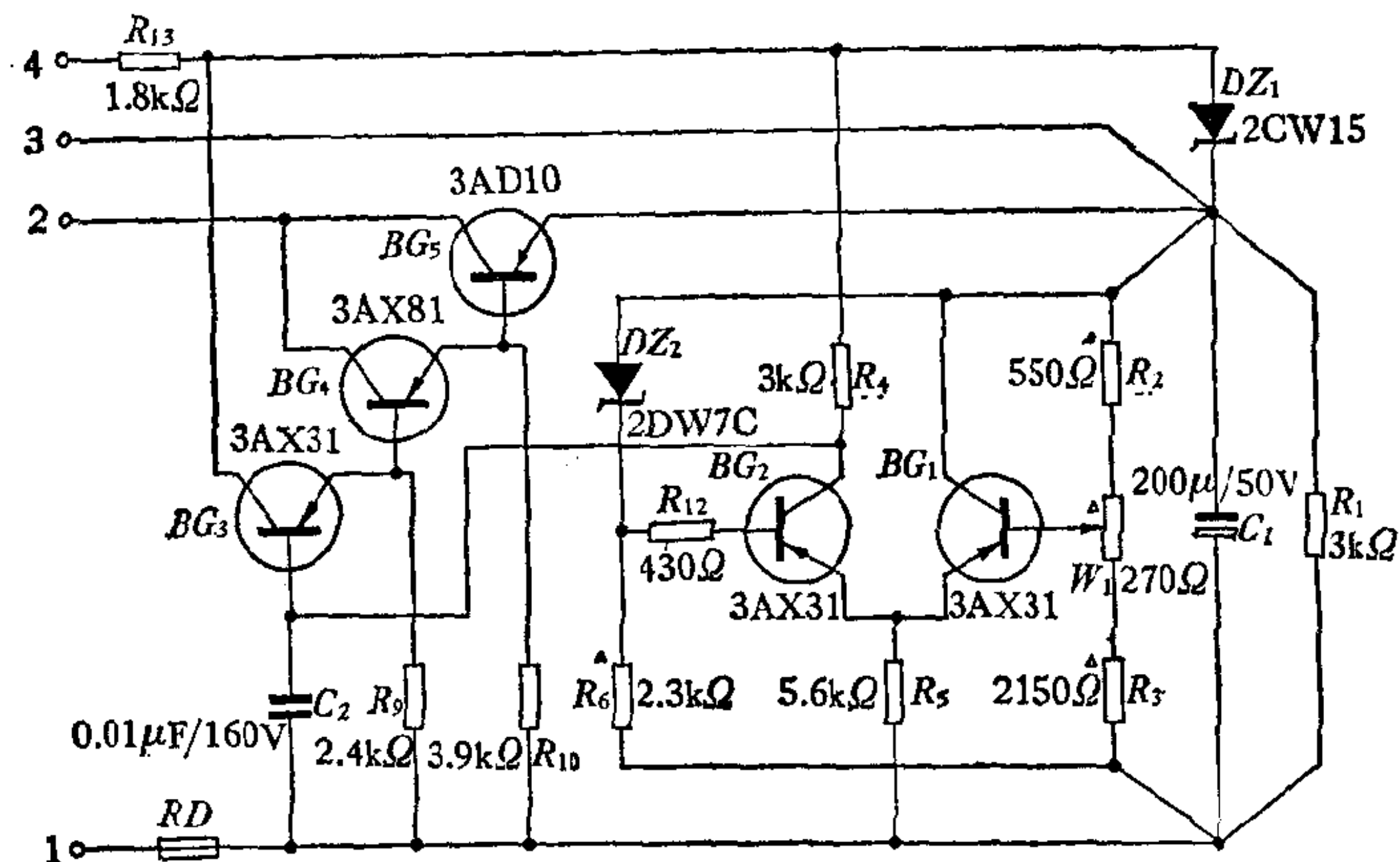


图 4-21 30 伏 0.2 安定压式直流晶体管稳压电源

当输出电压增加时,通过 R_2 , W_1 和 R_3 的分压作用使 BG_1 基极对地电压增加,而 BG_2 的基极接了稳压管,因此 BG_2 基极对地电压的增加量和输出电压的增加量相等,此时, BG_2 基极电压的变化大于 BG_1 基极电压的变化,所以 BG_2 集电极电流增加, BG_1 集电极电流减小, R_4 上压降增加,使调整管电流减小,输出电压也就下降而维持不变。

标有 \triangle 记号的电阻是采用金属膜电阻或用温度系数较小的锰铜丝绕制。

5. 有短路保护的直流稳压电源

在串联型晶体管稳压电源中,若负载被短路或过载,则调整管要流过很大的电流而被烧毁。由于热熔保险丝和快速继电器的启动都很慢,不适用于作保护稳压电源之用,因此在串联型稳压电源中,通常采用电子保护线路。图 4-22 电路中采用的是双稳态保护电路。

关于双稳态电路将在本讲座第四讲中将要介绍。我们在这里仅作简单说明。图中 BG_7 与 BG_8 组成双稳态触发电路, R_1 是一个阻值仅零点几欧的电阻,作为取短路或过载信号用的。该保护电路的工作原理如下:

正常情况下 R_1 上的压降很小, BG_7 导通, BG_6 截止,二极管 D_3 不通,保护电路不起作用。

当短路或过载时, R_1 上的压降大大增加,正端加在 BG_7 的基极上,使 BG_7 基极电位升高,则 BG_7 截止。此时 BG_7 的集电极电位降低,通过 R_{15} 与 R_{16} 分压加在 BG_6 基极上使 BG_6 导通, BG_6 集电极电位升高使二极管 D_3 导通,将短路或过载信号送给 BG_3 使其基极电位升高而截止,保护了调整管。

当故障排除后,需要合上开关 K 使稳压电源正常工作。

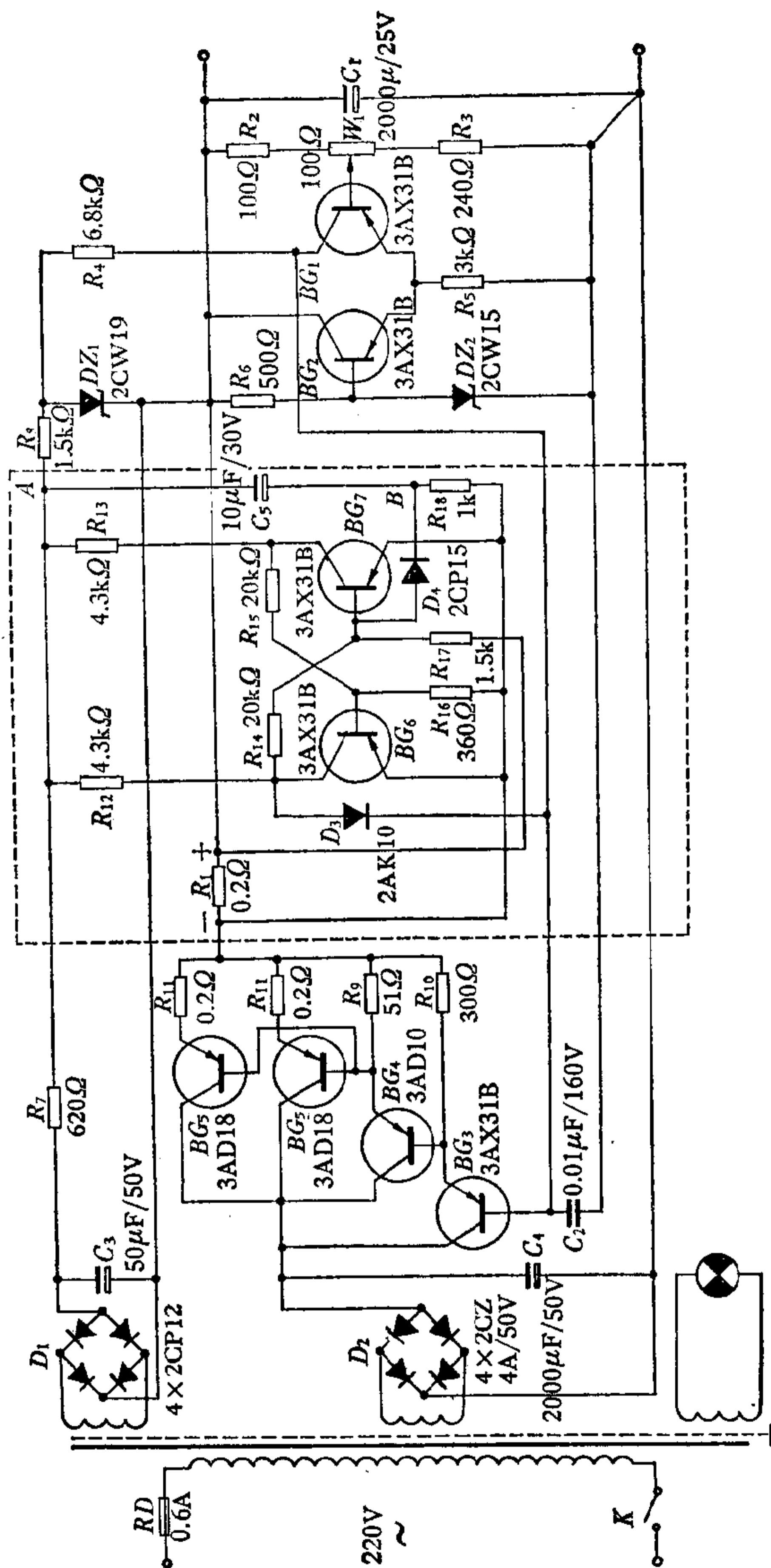


图 4-22 有短路保护的直流稳压电源 (12 伏 4 安)

6. 可调式直流晶体管稳压电源

图 4-23 可调式稳压电源由调整管, 差动放大器, 基准电压, 二个辅助电源及主电源整流滤波电路所组成。工作原理与定压式稳压电源基本相似。现将图 4-23 中的差动放大器, 基准电压等部分简单画成图 4-24 所示(以某一档为例)。该稳压电源是直接从输出取样的, 基准电压利用上辅助电源中的稳压管 DZ_1 获得。下辅助电源和稳压管 DZ_2 为差动放大器提供工作电流。

前面介绍的定压式稳压电源其输出电压与基准电压关系为:

$$U_{\text{出}} = U_z \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

因为, $\frac{R_1 + R_2}{R_2}$ 总是大于 1 的, 所以稳压器的输出电压一定大于基准电压的。图 4-23 线路可以使输出电压从 0.5 伏至几十伏范围可调, 原因是它的基准电压从上辅助电源中取得, 从图 4-24 分析为:

$$\frac{U_{\text{出}}}{U_{\text{出}} + U_{Z1}} \approx \frac{R_3}{R_3 + R_2}$$

令分压器的分压系数 $\frac{R_3}{R_3 + R_2} = a$, 代入上式并整理得:

$$U_{\text{出}} \approx \frac{a}{1 - a} U_{Z1}$$

上式说明了图 4-13 线路输出电压与基准电压的关系。如果基准电压 $U_{Z1} = 6$ 伏, 当 $a = 0.1$ 时, 代入上式得 $U_{\text{出}} \approx 0.66$ 伏; 当 $a = 0.7$ 时, $U_{\text{出}} = 14$ 伏, 故改变 $R_2 R_3$ 的分压比, 输出电压能在很宽的范围调节。电位器 W_1 是实现输出电压微调的。 W_2 用来调整放大器工作点的。

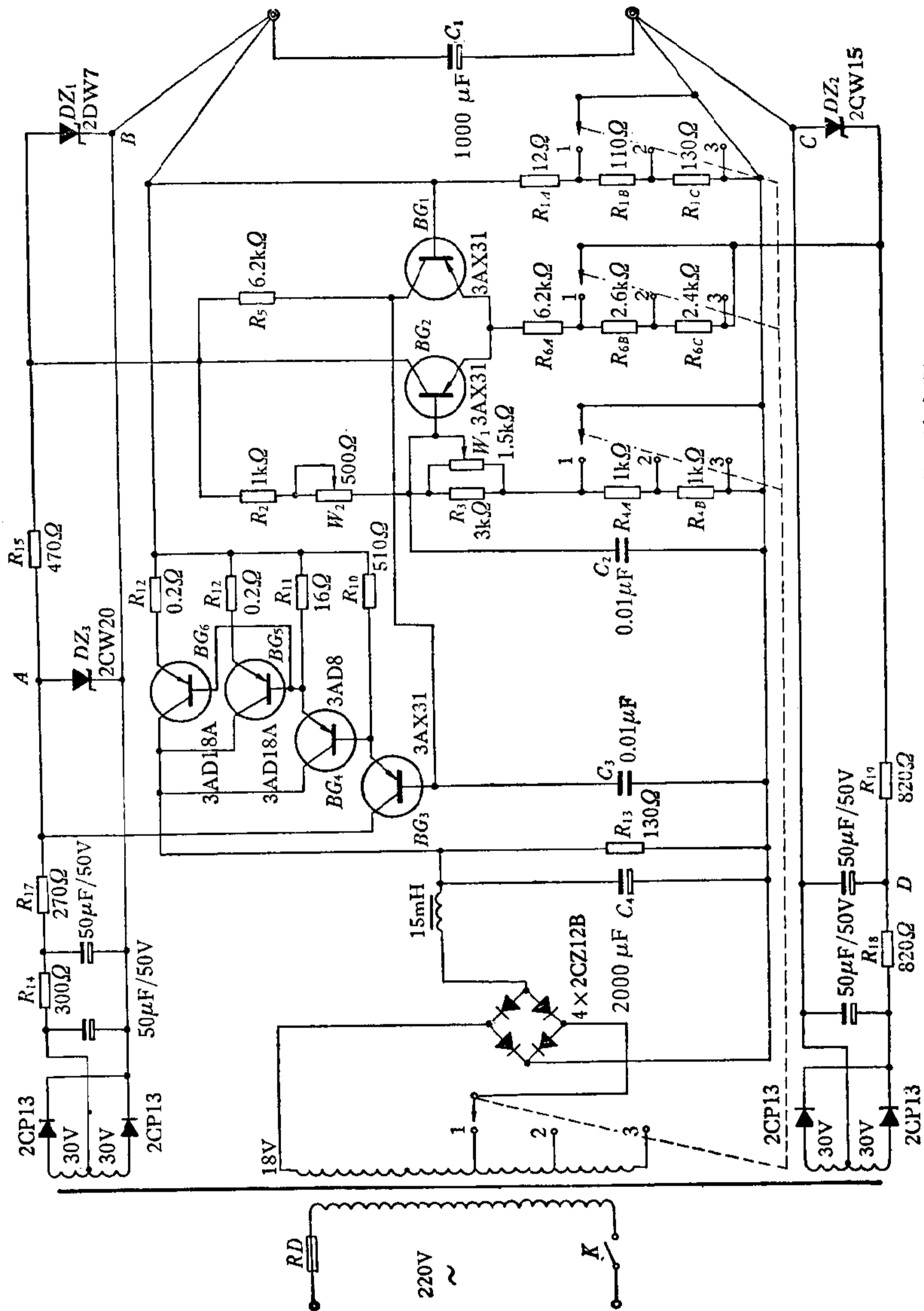


图 4-23 0.5—15 伏 2 安可调式直流晶体管稳压电源

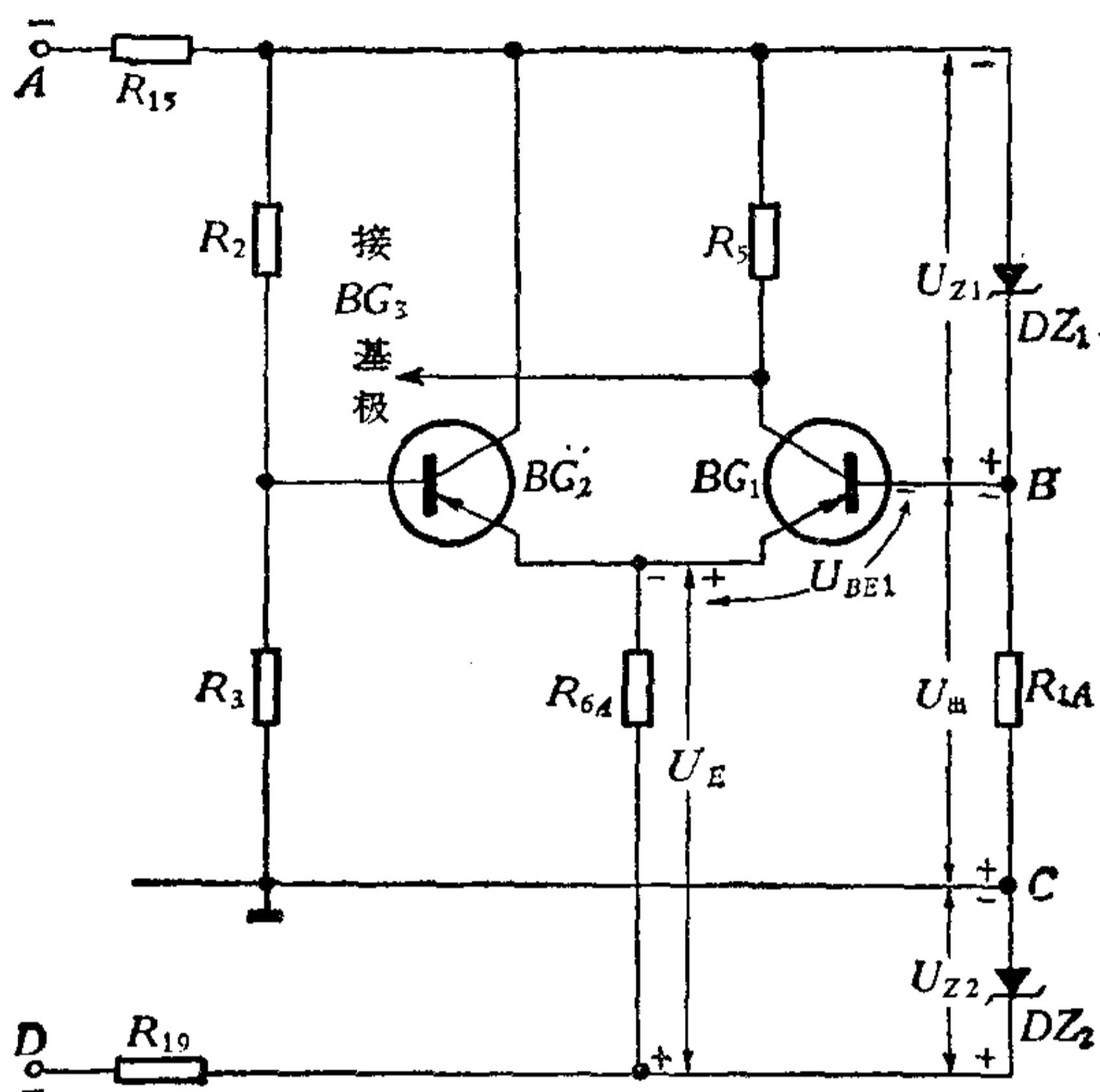


图 4-24

下面我们讨论 DZ_2 的作用，从图 4-24 看，先假若没有 DZ_2 ，即 $U_{Z2} = 0$ ，则：

$$U_{出} = U_E + U_{BE1} \approx U_E = (I_{E1} + I_{E2})R_{6A}$$

很明显，差动放大器的工作电流随着输出电压 $U_{出}$ 的改变而变化，这样输出电压就不能很低。有了 DZ_2 之后，我们从图 4-24 看到， U_E 与 U_{Z2} 的电压极性是相反的，即

$$U_{出} \approx U_E - U_{Z2}$$

作为 DZ_2 的稳压管 2CW15 的击穿电压在 8 伏左右，因此，在输出电压调到接近于零伏的情况下， R_{6A} 上也有 8 伏电压，从而保证放大器有正常的工作电流。为了在输出电压调得较低时，不致使调整管上有较大电压降和消耗较多功率，此稳压电路采用分档调节（输出电压粗调分作 0.5 伏至 5 伏、5 伏至 10 伏、10 伏至 15 伏三档），差动放大器的射极耦合电阻 R_{6A-C} 、分压器电阻 R_{4A-B} ，及电阻 R_{1A-C} 均与变压器输入端

实现同步调节。

本章小结

1. 目前广泛采用的晶体管直流稳压器有两种形式：一是硅稳压管稳压器，二是用晶体三极管组成的负反馈稳压器。功率大的稳压电源可采用可控硅电路。

2. 硅稳压管稳压器线路的突出优点是线路简单。但有如下几个缺点：一是输出电压不能任意调节。二是输出电流不易做得很大。三是稳压精度不够高。

串联负反馈稳压器基本上克服了硅稳压器的缺点：输出电压可调节，输出电流可以做得相当大，稳压精度较高，但是这种稳压电路较复杂。我们可以根据实际需要选择适当的稳压电路。

3. 硅稳压管工作在反向击穿区，使用时与负载并联。

串联负反馈稳压器是利用晶体三极管作调整元件，与负载相串联。调整元件可看作可变电阻，从输出电压中取出一部分(或全部)电压去调节调整管所呈现的电阻而维持输出电压不变。

为了在过载或短路时不烧坏调整管，需加保护电路。

我们应按实际情况决定工作方针，根据节约的原则和设备对稳压的要求来决定电路。

第五章 自激振蕩

伟大领袖毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”晶体管自激振荡器是生产斗争和科学实验中发展出来的一种电子线路，它与放大线路有着许多共同点，但又有其特殊性。自激振荡器不需要外加输入讯号，线路本身可以产生讯号的这一特点区别于放大器。自激振荡器简称振荡器，是一种很有用的电子线路。例如我国第一颗人造地球卫星向全世界播送庄严的《东方红》乐曲；每天，北京的红色电波向全世界传播革命的真理，这都是由振荡器所产生的高频电波传送的。振荡器广泛地作为讯号源，是生产、科学实验的重要设备。在工业生产中利用振荡器附加一些其他线路，制成各种自动控制开关，促进操作自动化和安全保护，提高效率等。半导体钟、电子手表也以振荡器为其“心脏”。用高频振荡升压产生直流高压，比用 50 周交流电安全，设备也简单轻巧。大功率振荡器的振荡功率可达几十千瓦以上，用在冶炼金属，烘干木材，金属零件的淬火，焊接，打孔以及塑料缝合等方面。目前振荡技术在工业中的应用发展非常迅速。振荡技术随着新的电子器件和元件的发展也在不断发展着。

第一节 LC 振荡回路中的电磁振荡

产生正弦波的振荡电路，最常见的是 LC 振荡线路。这类振荡线路中，都有电感 L 和电容 C 组成的振荡回路。振荡回

路的主要作用是使振荡器产生频率一定的正弦波。图 5-1 是振荡线路中常用的 LC 振荡回路，它具有产生电磁振荡的能力，下面加以说明。

把图 5-2(1) 回路中的开关 K 倒向“1”，电池先向电容 C 充电，经过一段时间之后，把 K 从“1”移开倒向“2”，这时，回路中就发生了电磁变换现象，如图 5-2(2) 所示，其过程是先由充了电的电容 C 向电感 L 放电，在电容器向电感放电的时间内，原来充在电容器中的电能逐渐变成电感中的磁能。当电容器上的电荷放完时， C 两端电压降至零，这时虽然 C 上不再放电了，但是我们知道通过

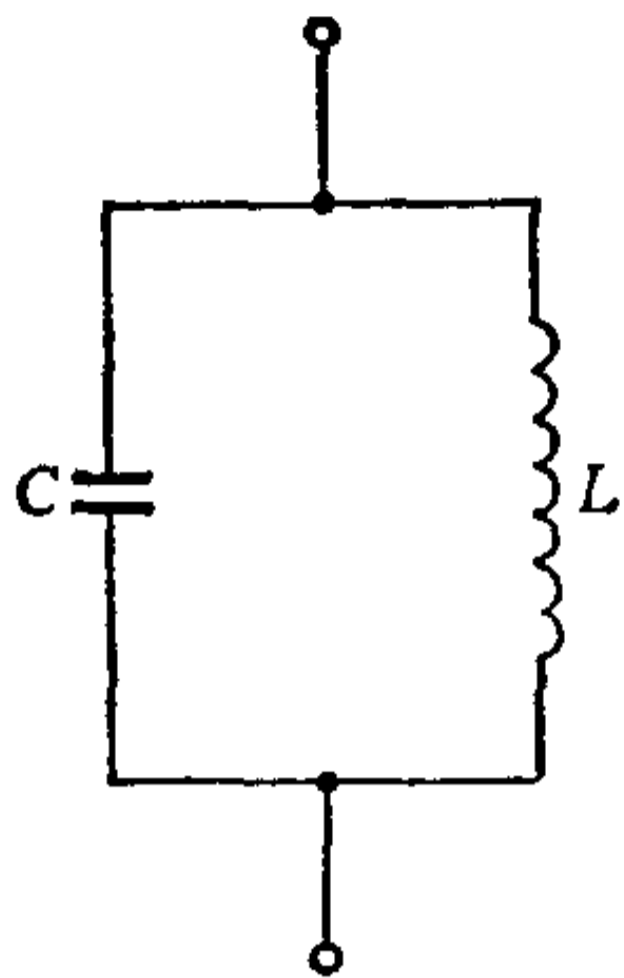


图 5-1 LC 振荡回路

电感线圈的电流是不能突变的，或者说，流过线圈的电流不可能一下子消失，因此电流仍按原方向继续流动。维持电流继续流动的是线圈中所贮存的磁场能量。当电流在回路中继续流动时， L 就反过来向 C 充电，于是在电容器两端重新出现电荷，但电容器上的电压极性和原来相反，如图 5-2 (3) 所示，在 L 向 C 反向充电的过程中， L 中的电流逐渐减小， C 上的电压逐渐增大，线圈的磁能又逐渐变成电容器的电能。当 L 中的电流减小到零时，线圈周围的磁场消失，磁能全部转变

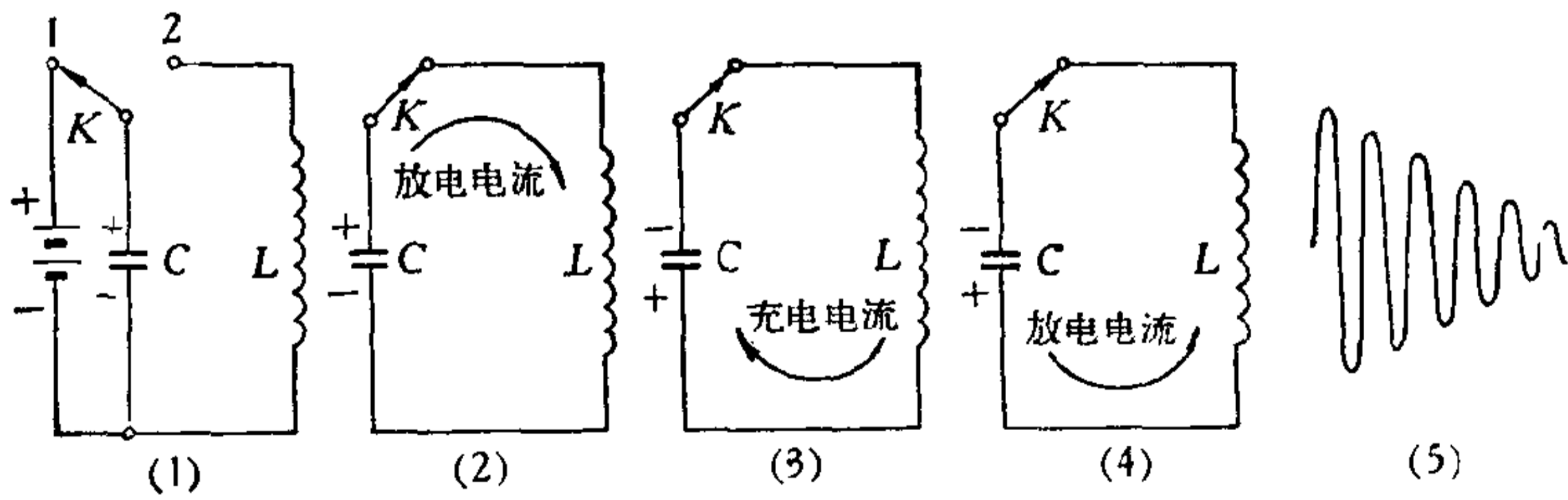


图 5-2 振荡回路中的电磁振荡

为电能,之后 C 又向 L 放电,如图 5-2(4)。与前一过程比较,只是此时电容放电电流的方向相反了,其余过程与前一过程一样,回路中电流如此反复循环的现象,就叫做回路里产生了电磁振荡(简称振荡)。可见振荡实际上是回路中的电磁交替变换过程。通过这种过程,回路把原来的直流电能变换成交流电能。回路二端就有正弦交流电压产生,称为振荡电压,如图 5-2(5) 所示。

振荡电压的频率与组成回路的 L 、 C 值有关,实践证明,可用下式表示:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-1)$$

式中 f_0 以每秒多少周(周/秒)为单位; L 是组成振荡回路的电感量以亨为单位; C 是组成振荡回路的电容量以法为单位; $\pi = 3.14$ 是一个常数。由此可见, f_0 只与组成回路的 LC 值有关,通常称 f_0 为这个振荡回路的固有频率或谐振频率。

例如机床限位接近开关中振荡回路的电感量 L 为 0.5 毫亨,电容量 C 为 0.0022 微法,那末回路的固有频率可用公式 (5-1) 算得:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.5 \times 10^{-3} \times 2200 \times 10^{-12}}} \\ &= \frac{1}{6.28\sqrt{5 \times 22 \times 10^{-14}}} = \frac{10^7}{6.28\sqrt{5 \times 22}} \\ &= \frac{10^7}{6.28 \times 10.5} \approx 150 \times 10^3 = 150 \text{ 千周} \end{aligned}$$

振荡回路的固有频率 f_0 , 是振荡回路的一个重要参数。

振荡回路另一个重要参数称为品质因数 Q 。 Q 值是回路电抗与其中的电阻之比,振荡回路的许多特性都与其 Q 值有

关。

表示 Q 值的公式为:

$$Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\omega C r} \quad (5-2)$$

式中: ω 称为角频率, $\omega = 2\pi f$;

L 是组成振荡回路的电感量, ωL 是回路感抗;

C 是组成振荡回路的电容量, $\frac{1}{\omega C}$ 是回路容抗;

r 是回路中的电阻。

象图 5-1 的振荡回路,虽然并没有接入真正的电阻,但组成振荡回路的元件总有一点电阻,同时在回路产生振荡时,也难免要有电波发射,这些就组成了回路电阻 r 。

由公式可见,回路的电抗愈大, r 愈小,回路的 Q 值也愈大,一般振荡用的 LC 回路 Q 值从几十到二百左右,处理得好的,还能高些。在振荡器中,回路 Q 值愈大,效果就愈好。回路 Q 值可用专门仪器 Q 表测量出来。

第二节 自激振荡的产生

LC 振荡回路具有产生振荡的能力,但象图 5-2 所示情况,振荡不能持久,其原因就是因为振荡回路本身存在电阻要消耗电能,故在振荡发生的同时,回路把电能逐步消耗掉,又因为没有能及时地补充电能的条件,所以振荡产生后很快就消失了。由此可见,必须及时地,持续不断地供给振荡回路一定数量的电能,补充其消耗才能维持振荡持续不断,自激振荡线路就是根据这个要求构成的。振荡线路的任务,第一要产生振荡,第二要维持振荡持续不停,可见构成 LC 振荡器有二个必要的组成部分: 一、 LC 振荡回路; 二、供给 LC 振荡回

路维持振荡的能量。上面所讲的道理就象钟摆作来回摆动一样,首先要有一个钟摆,其次必须有拧紧的发条来推动它,钟摆才能摆动不停。

下面解释振荡器中产生自激振荡的过程。这是人们从实践中总结了对振荡现象的大量感性认识后所得到的理性认识,能说明各种各样振荡线路共同的本质。

现在,看一个熟悉的例子。我们知道:正常的扩音过程是人的声音通过话筒变成电信号之后,送到扩音机中放大,然后再由喇叭变成声音放出来。象图 5-3(1) 所示。但是,如果把喇叭对着话筒如图 5-3(2) 那样,由扩音机放大后喇叭出来的声音,重新送回到话筒去,再由扩音机放大,之后喇叭又把放大了的声音送回到话筒……如此反复循环,喇叭中便会

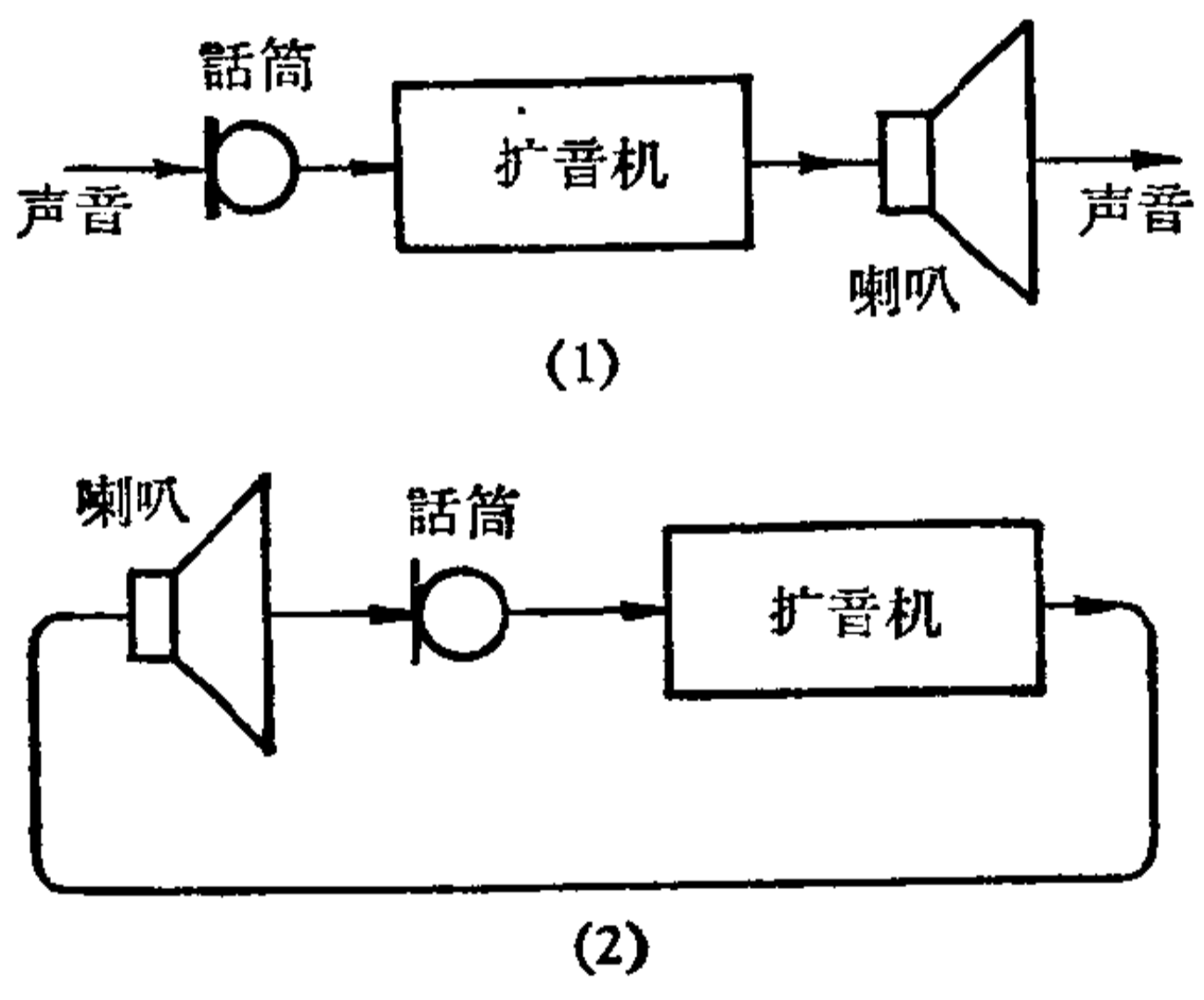


图 5-3 扩音机外部反馈示意图

出现啸叫声,这是扩音系统产生了自激振荡的现象。当然出现了“振荡”,便破坏了扩音系统的正常工作,没有用处。但是这个例子对我们了解什么是自激振荡及振荡产生原理是十分有用的。

在总结了各种振荡线路的特点之后,把振荡线路的共同性画成方块图如图 5-4,这个方块图能够帮助我们从复杂的线路中找出振荡线路的主要组成部分,同时也说明了构成振荡线路的基本原则。

现在,以图 5-5 的具体振荡线路为例,进行说明。图 5-5 的放大器部分就是用振荡回路作为负载的晶体管放大线路,

这一线路有点象变压器耦合放大器，只是这里用 LC 振荡回路作为晶体管的负载。晶体管放大器供给振荡回路能量使之维持振荡。反馈是通过振荡回路电感 L 一侧的耦合线圈 L_1 引出，送回到放大器输入端，再经放大器放大后从振荡回路获得输出

讯号，再经 L 与 L_1 的耦合获得反馈，这里所指的反馈，同第二章中所讲过的一样，都是从输出端反馈回到输入端，不

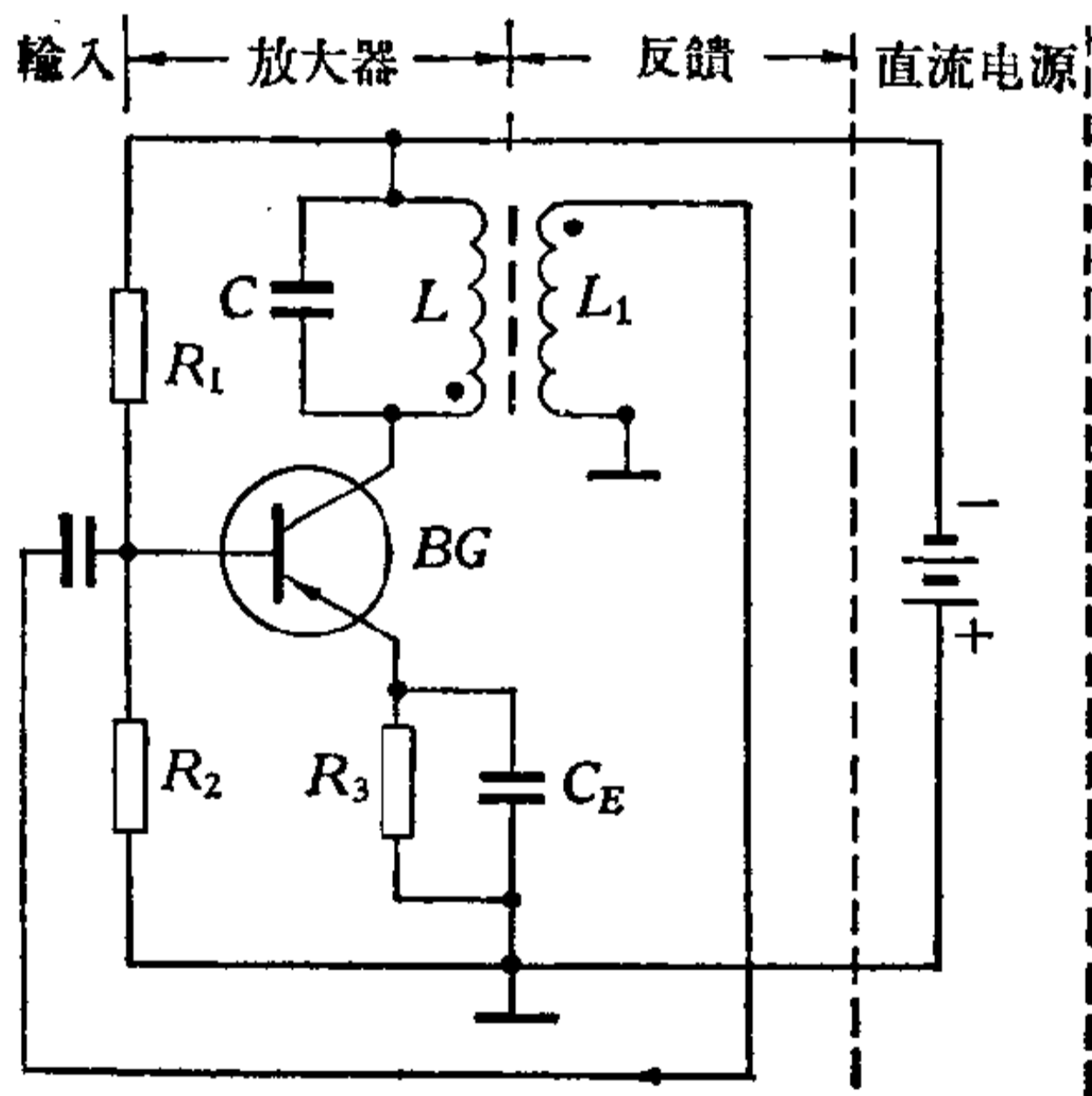


图 5-5 变压器反馈振荡线路

但在振荡线路中要求具有正反馈，即要求反馈到输入端的信号与输入信号同相。这样，反馈信号就可以代替输入信号，在一定条件下，线路就能产生自激振荡。由此可见，自激振荡器只要加进直流电源，输出端就有交流信号输出，其输入讯号可通过线路内部正反馈取得。

但有一个问题，既然输出讯号是由输入讯号放大而来，输入讯号又通过输出讯号反馈而来，那末最初的输入讯号又是怎么产生的呢？毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。任

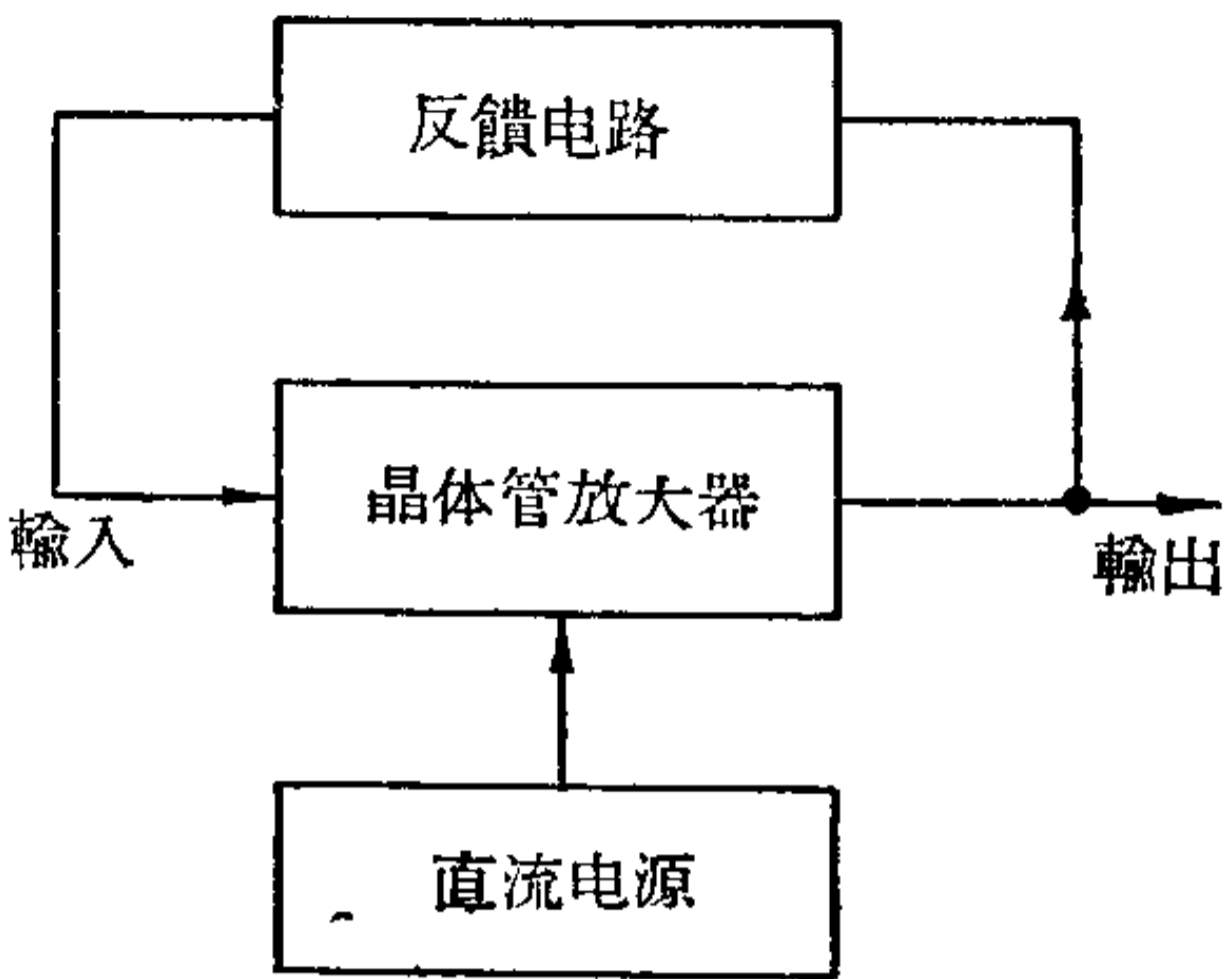


图 5-4 自激振荡线路组成部分

何事物内部都有这种矛盾性，因此引起了事物的运动和发展。”振荡线路在接通直流电源的那一瞬间，线路中便有一个电冲击，由于振荡线路是一个闭合循环系统，它本身具有反馈、放大讯号的能力，因此不管电冲击发生在线路中的那一点，最终总是要传送到输入端的。这就成了最初的输入信号。所以只要振荡条件满足，直流电源一旦接通，振荡便立刻产生。

这里所谓的振荡条件又是什么呢？实践证明，产生并维持振荡的条件有二个：第一，就是刚才说过的要正反馈（称为自激振荡的相位条件）；第二，由输出端反馈到输入端的信号要足够大，称为自激振荡的幅度条件。自激振荡线路必须同时满足这二个振荡条件，而且也只要满足了这两个条件，就可以产生、维持振荡。

综合上面讨论可以看出：组成 LC 自激振荡线路最基本的部分有：（1）能加入直流电源的直流通路；（2）以振荡回路为负载的晶体管放大器；（3）从放大器输出端反馈到输入端的反馈电路。

下面结合具体的振荡线路加以分析。

第三节 LC 自激振荡线路分析

上面我们简要地说明了产生振荡的过程和组成振荡线路的必要部分，下面分析几种典型的 LC 振荡线路，并以变压器反馈振荡线路为例，解释两个振荡条件。用以获得正弦信号的晶体管 LC 振荡线路形式很多，从反馈来看，有变压器反馈、电感反馈和电容反馈等。从晶体管的接法来看，有共基极、共发射极和共集电极三种组态。

1. 变压器反馈振荡线路

图 5-6(1) 是用在接近开关中的振荡器(见实例),它代表了一种典型的变压器反馈振荡线路。振荡回路接到晶体管集电极,回路上的振荡信号通过反馈线圈 L_1 与振荡线圈 L 的耦合反馈到晶体管基极,故称为变压器反馈振荡线路。

在这一线路中, W 、 R_1 、 R_2 、 R_3 是偏置电阻,偏置电流通过线圈 L_1 加到基极,集电极直流电源通过线圈 L 供给,以上就构成了该线路的直流通路。线圈因其直流电阻不大,故通常认为是直流短路。高频旁路电容 C_1 、 C_2 ,对于振荡频率呈现极低的电抗,与并接的 R_2 、 R_3 比较,其电抗可忽略不计,故分析时认为高频短路。直流电源在这里认为对高频短路的。根据以上分析,可画出图 5-6(1)的高频等效电路如图 5-6(2)。

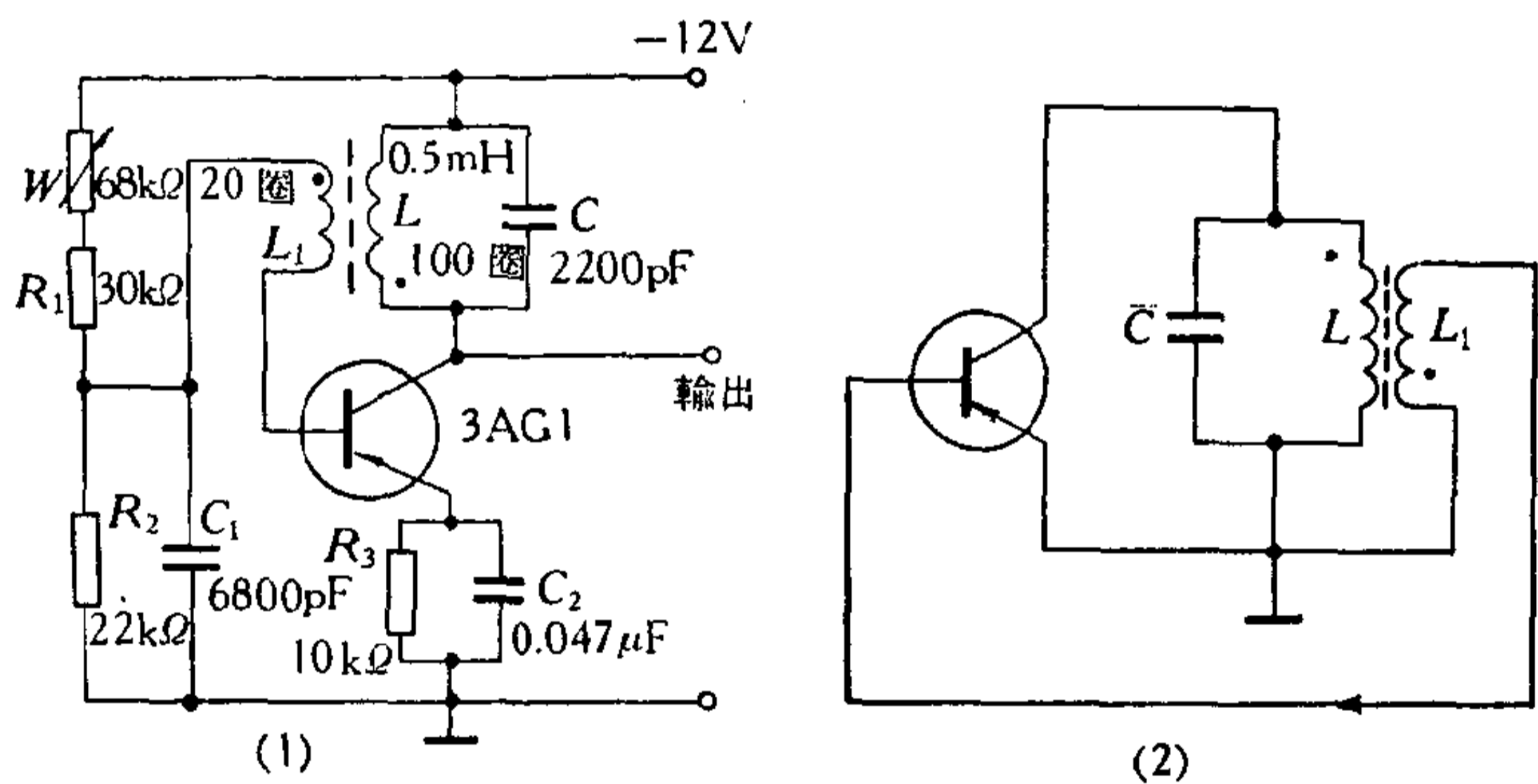


图 5-6 变压器反馈振荡线路及其高频等效电路

现从图 5-6(2) 来分析该线路中振荡建立的过程。假定直流电源接通时,在振荡回路内产生了电冲击,出现了一个不大的信号,这一信号通过反馈线圈 L_1 反馈到晶体管基极,成为晶体管放大器的最初输入讯号,经放大后,在晶体管集电极振荡回路上就有信号输出。这一信号又被 L_1 反馈到晶体管

基极再放大,再反馈回去……如此反复循环,振荡便能建立起来。其过程大致如此。

是不是只要具有如图 5-6 所示形式的线路都能振荡呢?要实现线路振荡必须满足相位条件和幅度条件。所谓相位条件,实际上要求满足正反馈。为了达到正反馈, L_1 与 L 的接法有一定要求,如果接错就不起振荡。至于幅度条件,就是说 L_1 感应出来的信号,反馈到晶体管输入端作为输入信号时,其大小至少不能小于前一次输入信号的幅度,如果小了,那末振荡幅度将一次比一次小,最终振荡就要停止,所以,不满足幅度条件是不能维持振荡的。这靠晶体管足够的放大倍数和一定的反馈量来满足。线路中建立、维持振荡的过程,可分二个阶段来看,在振荡刚开始的时候,这时信号还很小,要求反馈信号的幅度一次比一次大,振荡幅度才有可能逐步增大起来,没有这一点是不行的,否则即使线路中产生了振荡,但却十分微弱的话,我们也无法利用。振荡幅度的增大,受晶体管非线性特性的限制,最终自动稳定在某一水平上,处于相对稳定状态,我们就可以从输出端得到大小几乎恒定的等幅振荡信号,如果把示波器接至线路输出端,便可以看到幅度一样大小的正弦振荡波,称为等幅振荡。从开始振荡到最后达到幅度较大的等幅振荡,是振荡线路建立振荡的全过程,这一过程实际上是十分短暂的,通常应用中不必考虑其影响。

振荡信号的输出,可以附加一个与回路电感 L 耦合的线圈或用一只电容器接到输出端,耦合出来。振荡器的振荡频率,大致上等于 LC 振荡回路的固有频率 f_0 ,可用公式 5-1 计算。图 5-6 线路的振荡频率,已在前面计算过,大约 150 千周。

图 5-7 是收音机中用作本机振荡的变压器反馈振荡线路, R_1 、 R_2 、 R_3 是偏置电阻,集电极直流电源通过线圈 L_1 加

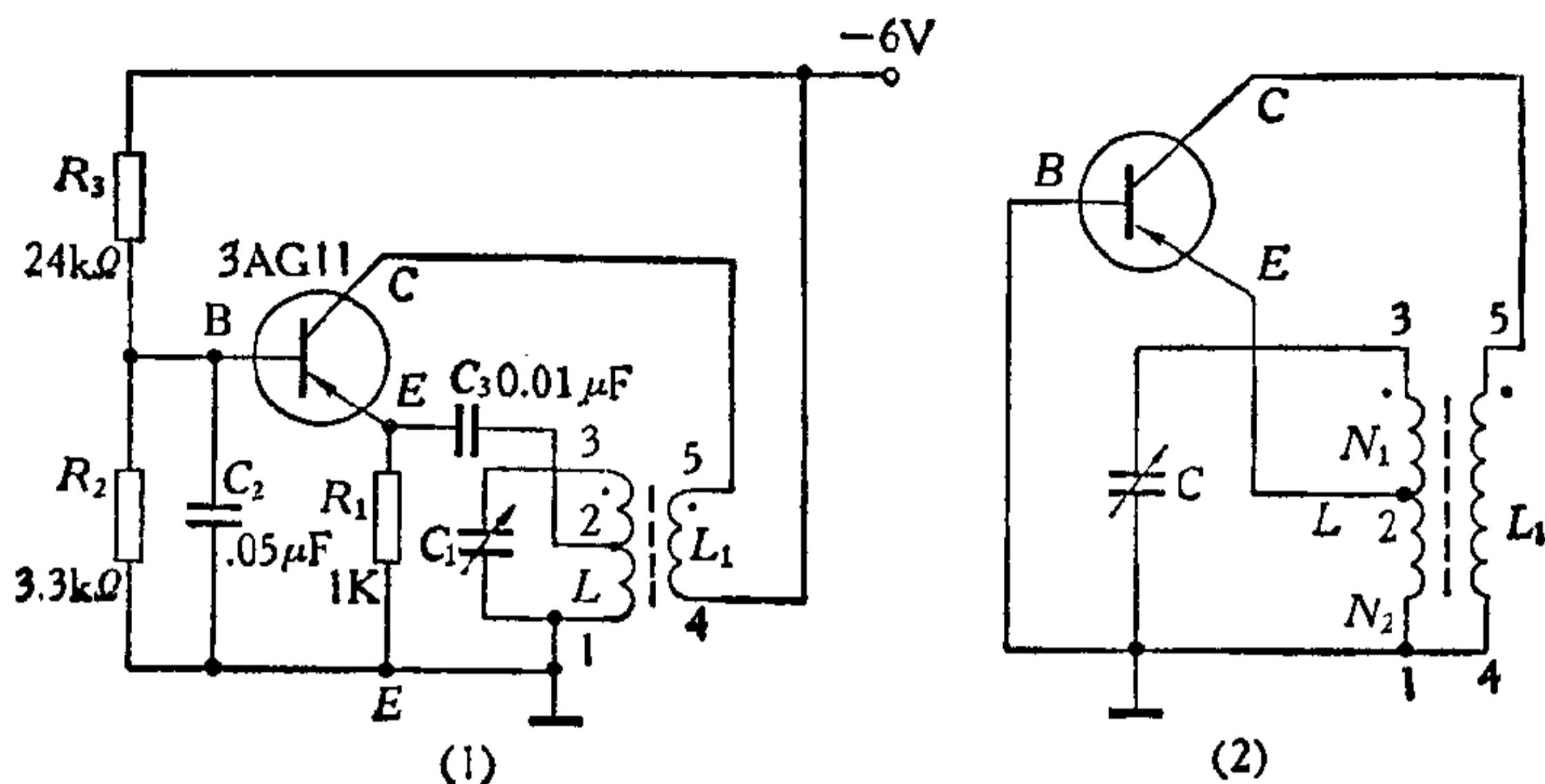


图 5-7 共基极变压器反馈振荡线路及其等效电路

入,电容 C_2 使基极对高频旁路, C_3 是隔直流电容。振荡回路接在发射极与地(基极)之间,其高频等效电路如图 5-7(2)。这一线路中晶体管与回路的接法有一特点,就是晶体管发射极 E 接到回路电感的抽头 2 上。这样联接之后,影响振荡频率很小,但解决一个重要问题。从图 5-7(2)可看出,共基极振荡线路中,振荡回路 with 晶体管输入阻抗并联。我们知道:共基极电路的输入阻抗是极低的,振荡器工作时振荡回路呈现出的阻抗往往要比它大几十倍,若晶体管发射极直接接在线圈的 3 上,就形成低的晶体管输入阻抗与高阻抗振荡回路直接并联,这将大大降低振荡回路的 Q 值,将使振荡减弱、波形变坏等等,严重时甚至不起振荡。为了改善上述情况,不使两个大小相差十分悬殊的阻抗直接并联,通常是把晶体管发射极 E 接到线圈的抽头 2,这样,就只有 1, 2 这部分回路与晶体管联接。晶体管接入振荡回路的多少,用接入系数 P 表示,

$$P = \frac{N_2}{N_1 + N_2}。实际上 P 代表电感线圈总圈数与接入线圈$$

之比。根据阻抗变换关系可知: 1, 2 二点之间的回路阻抗比回路总阻抗减少 P^2 倍。例如晶体管收音机本机振荡线圈

LT F-1-1 的总圈数 $N_1 + N_2 = 153$ 圈, 抽头 2 处的圈数 N_2 为 $8\frac{1}{2}$ 圈, 这样

$$P^2 = \left(\frac{N_2}{N_1 + N_2} \right)^2 = \left(\frac{8.5}{153} \right)^2 \approx 0.3\%$$

这相当于把与振荡回路并联的晶体管输入阻抗提高 300 倍, 这样, 二个阻抗的大小就比较接近, 从而大大提高振荡线路的性能。所以, 晶体管振荡线路中常常采用这种部分接入的办法。下面还可以看到, 共发射极线路中晶体管的集电极, 也用类似的办法部分接入振荡回路, 解决晶体管输出阻抗与振荡回路之间阻抗不匹配的问题。

图 5-7 的振荡线路用于收音机作本机振荡, 为了收听不同的电台, 回路中用可变电容器, 改变电容 C 可改变振荡频率, 是一种可变频率振荡器, 其振荡频率从 1 兆周 (1×10^6 周/秒) 左右到 2 兆周以上, 适用于中波段。

“有比较才能鉴别。”上面二种线路都是采用变压器反馈, 这是共同点。其不同点: 晶体管的接法不同。共发射极线路因其功率增益比共基极线路大, 所以容易满足幅度条件, 故容易起振, 这是共发射极线路的优点。但共基极线路的振荡频率比较稳定, 对晶体管 β 要求不高, 即使是 β 低的管子, 也能振荡。另外, 如果用同型号的晶体管采用共基极线路比共发射极线路可以振荡到较高频率, 这一点, 可以从晶体管的 f_α 大于 f_β 这一事实知道, 所以共基极线路应用也十分广泛。

最后, 变压器反馈振荡线路根据晶体管不同接法, 两线圈之间的接法也不同, 共发射极线路两线圈的同名端(加有黑点的)反接, 而共基极线路两线圈同名端正接。这在图 5-6、5-7 中已标明, 不能接错。否则由于不满足相位条件而不起振荡。当然如果接错了因而线路不振荡时、只要将其中的任一线圈

反接一下即可。

变压器反馈线路有容易起振的特点，而且调节也比较容易，是一种工业中应用很广泛的振荡线路。

2. 电感反馈振荡线路

LC 自激振荡线路中，反馈耦合除采用变压器外，常见的还有电感反馈线路。图 5-8(1) 就是电感反馈的振荡线路，其中 R_1 、 R_2 、 R_3 是偏置电阻，直流电源通过线圈加入。 C_2 是发

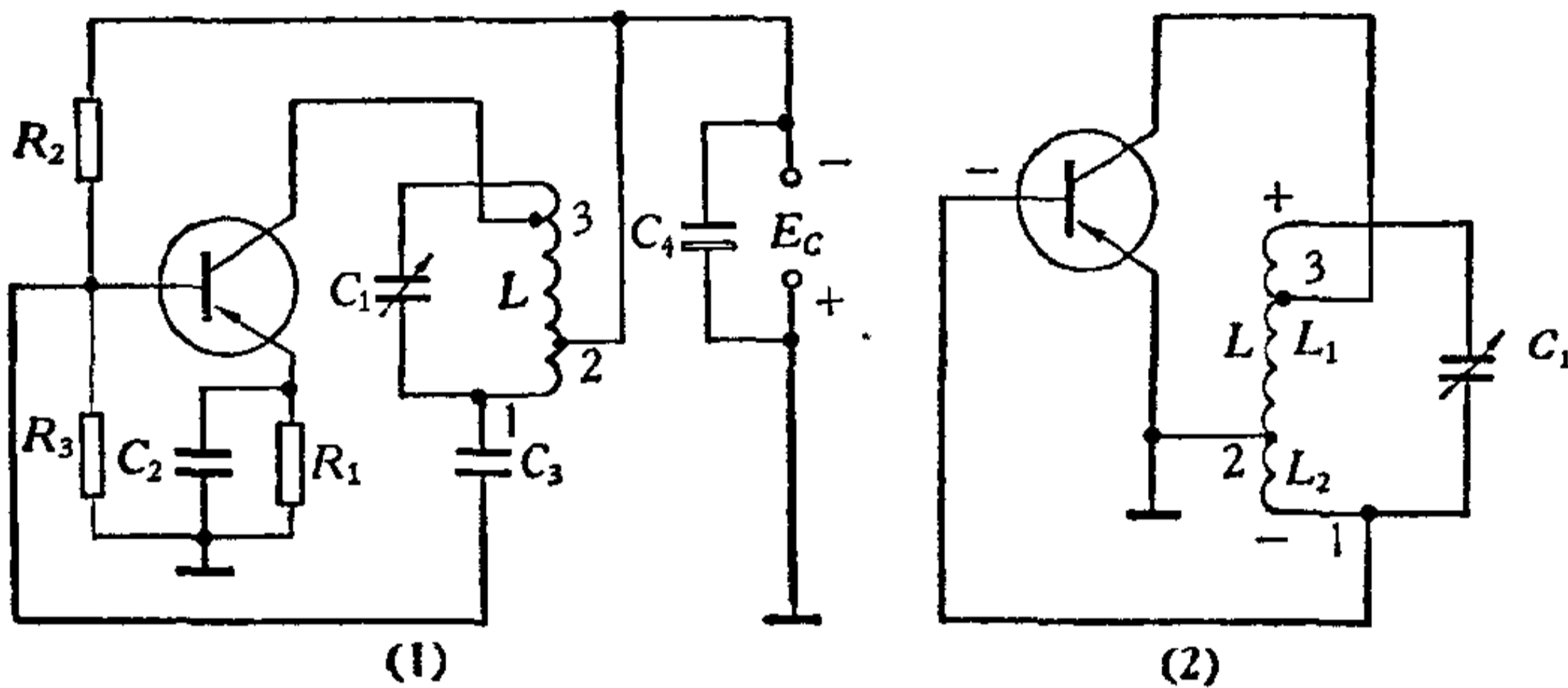


图 5-8 电感反馈振荡线路及其等效电路

射极高频旁路电容使发射极高频接地，故为共发射极线路。 C_3 是隔直流电容，对高频看作短路，故可认为基极接在线圈的 1 端。线圈 2 端接电源，通过电容 C_4 高频短路。这样可画出其高频等效电路如图 5-8(2)，由图可以看出， LC 回路接在集电极与基极之间，反馈线圈 L_2 是回路线圈的一段，通过这段线圈将反馈信号送入基极。现在来看一下线路的相位条件，假定基极信号为负值时，晶体管集电极信号为正值，2 端高频接地，为零电位。显然，此时从 1 端取出的信号为负，与基极相位一样，所以是正反馈，满足相位条件。

电感反馈振荡线路较之其他振荡线路的优点是容易起振。在绕制电感线圈 L 时，只要在 $1/4$ 到 $1/8$ 处抽个头 (2

端) 即可, 至于在何处抽头最好, 要结合整个线路共同考虑, 最后还要在制作时反复调试确定。这种线路的缺点是振荡频率稳定性和波形都较差。

实用上计算频率时, 仍可按照公式 (5-1), 不过这里的电感量应取 L_1 与 L_2 之和, 即 $L \approx L_1 + L_2$, 故振荡频率为:

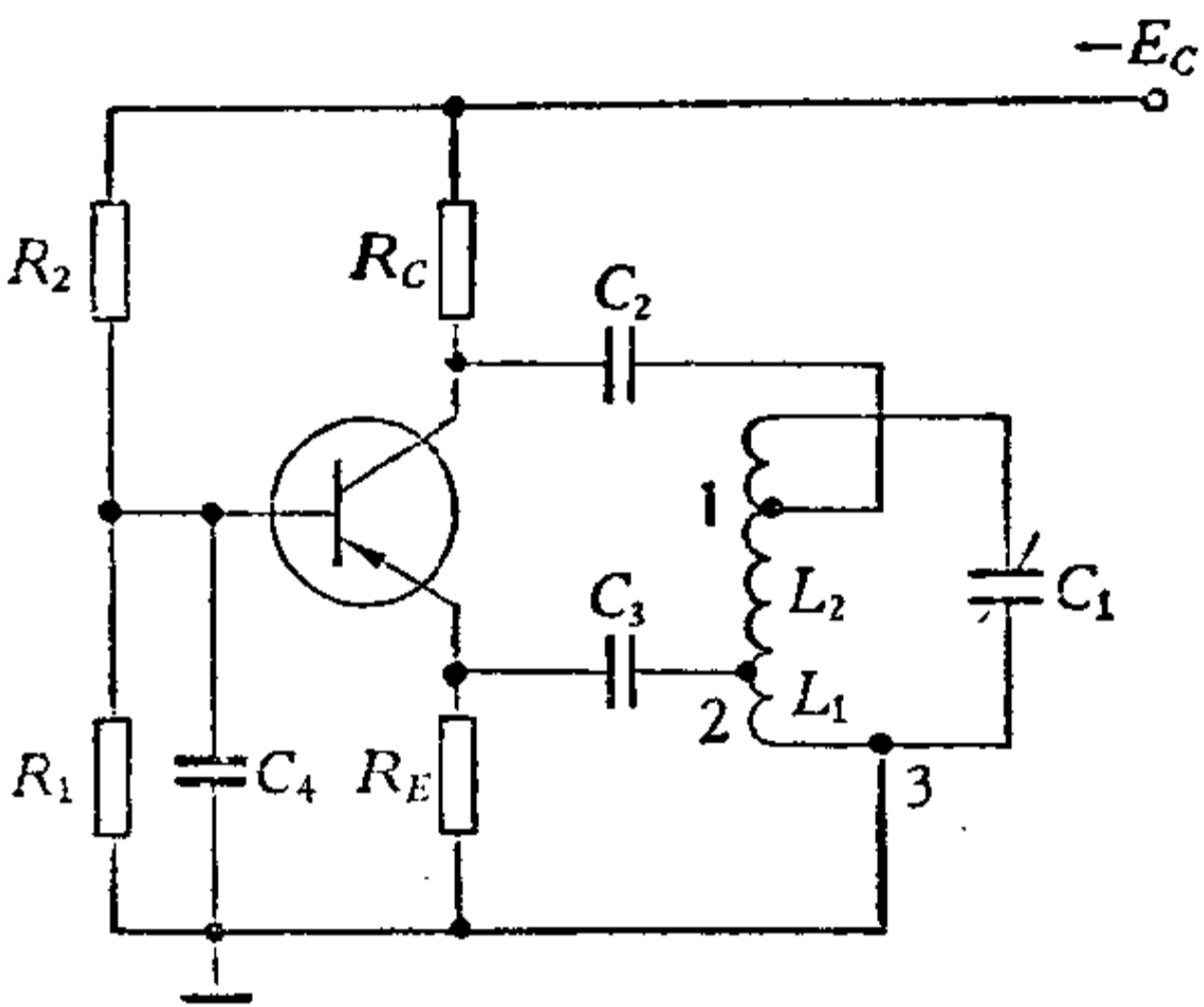


图 5-9 共基极电感反馈振荡线路

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C_1}} \quad (5-3)$$

电感反馈振荡线路也有共基极形式, 如图 5-9 所示。其工作原理与前面所讲的一致, 这里不再重复了。

3. 电容反馈振荡线路

把输出端的讯号反馈回输入端也可利用电容作为反馈元件。如图 5-10 所示。

图中 R_1 、 R_2 是偏置电阻, 直流电源通过 R_c 加到晶体管集电极, C_3 是隔直流电容, C_4 是发射极旁路电容, L 和 C_1 、 C_2 组成的振荡回路接在集电极与基极之间, C_1 、 C_2 串联组成回路电容, 从图中可以看出: C_2 接在基极与发射极之间, 故从 C_2 上取出反馈信号送到基

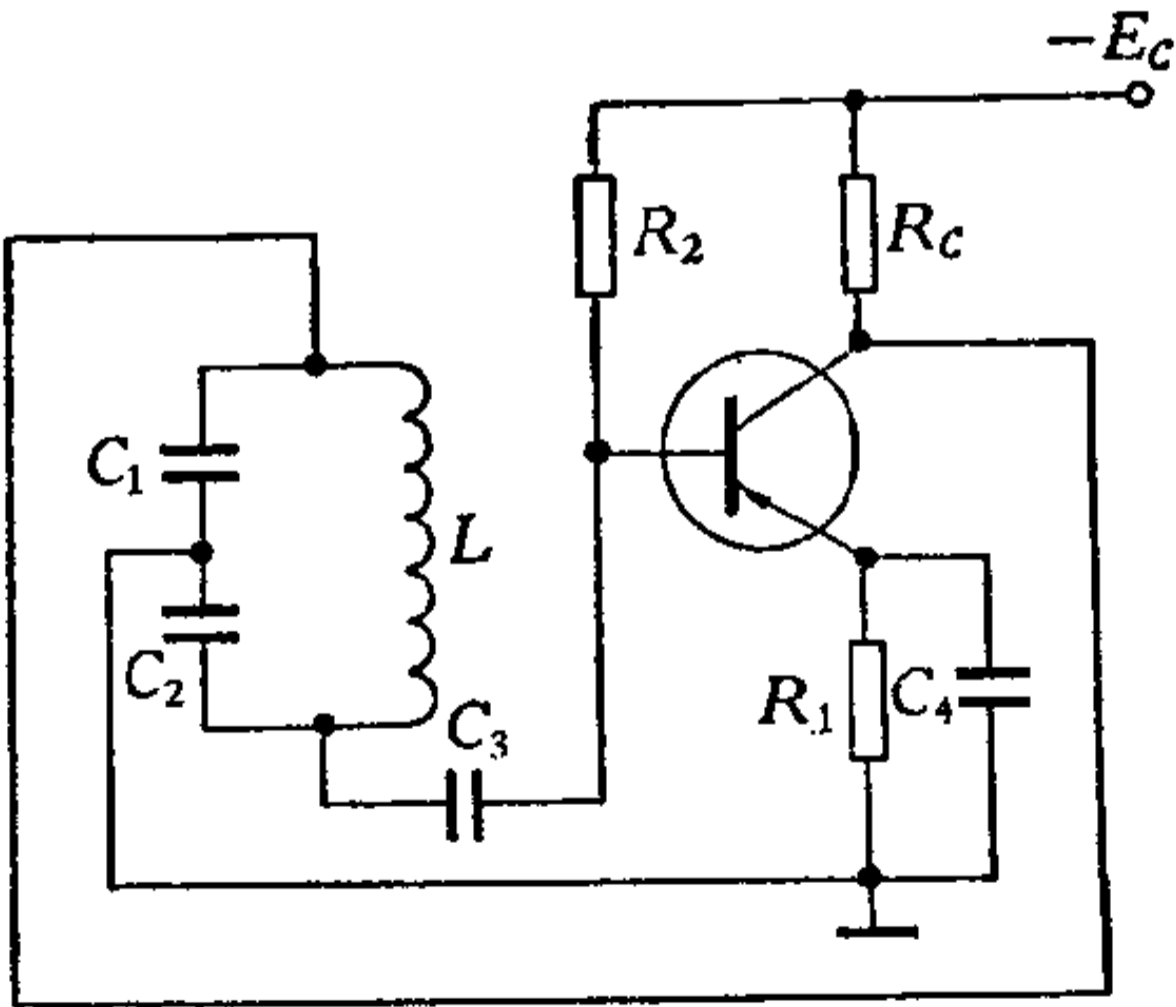


图 5-10 共发射极电容反馈振荡线路

极。由于这种反馈是由电容器来完成的，故称为电容反馈线路。这种振荡线路的振荡频率为：

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\text{总}}}}$$
$$C_{\text{总}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (5-4)$$

从理论上讲改变 L 或 C_1, C_2 都可改变振荡频率，但实际上这种线路通常不用改变 C_1, C_2 来改变频率的，因为改变了 C_1, C_2 之比就会改变反馈信号的大小，会影响振荡幅度，甚至会造成停振，如果只改变 C_1, C_2 的电容量不改变它们的比值就必须采用双连可变电容器才行。所以实际上改变振荡频率的方法，都是加接一只可变电容 C_V ，振荡回路形式如图 5-11 所示，这样变动电容 C_V 改变振荡频率时不致影响 $C_1 C_2$ 之比。此时振荡回路的总电容应为：

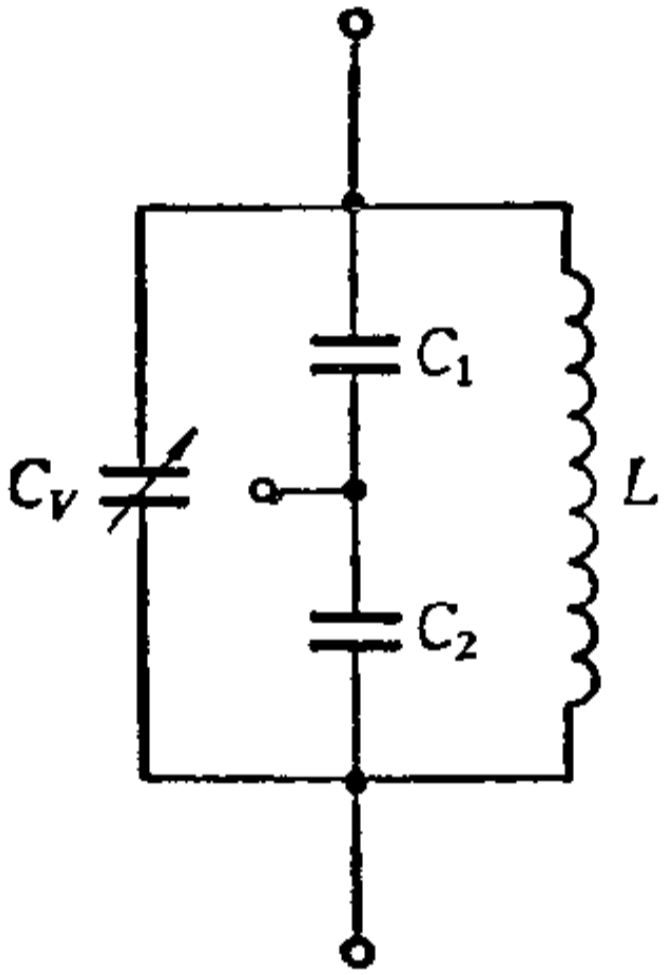


图 5-11

$$C_{\text{总}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_V \quad (5-5)$$

在电容反馈线路基础上略加变化可以构成一种如图5-12所示的振荡线路。

这种线路只是在振荡回路的电感支路中串联了电容 C ，经过这一改变之后，振荡出来的频率就比较稳定，即在电源电压变动，周围温度变化，更换晶体管等条件变化时振荡频率的变动比上述各种线路都要小。

在满足 $\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \gg C$

的条件下，其振荡频率

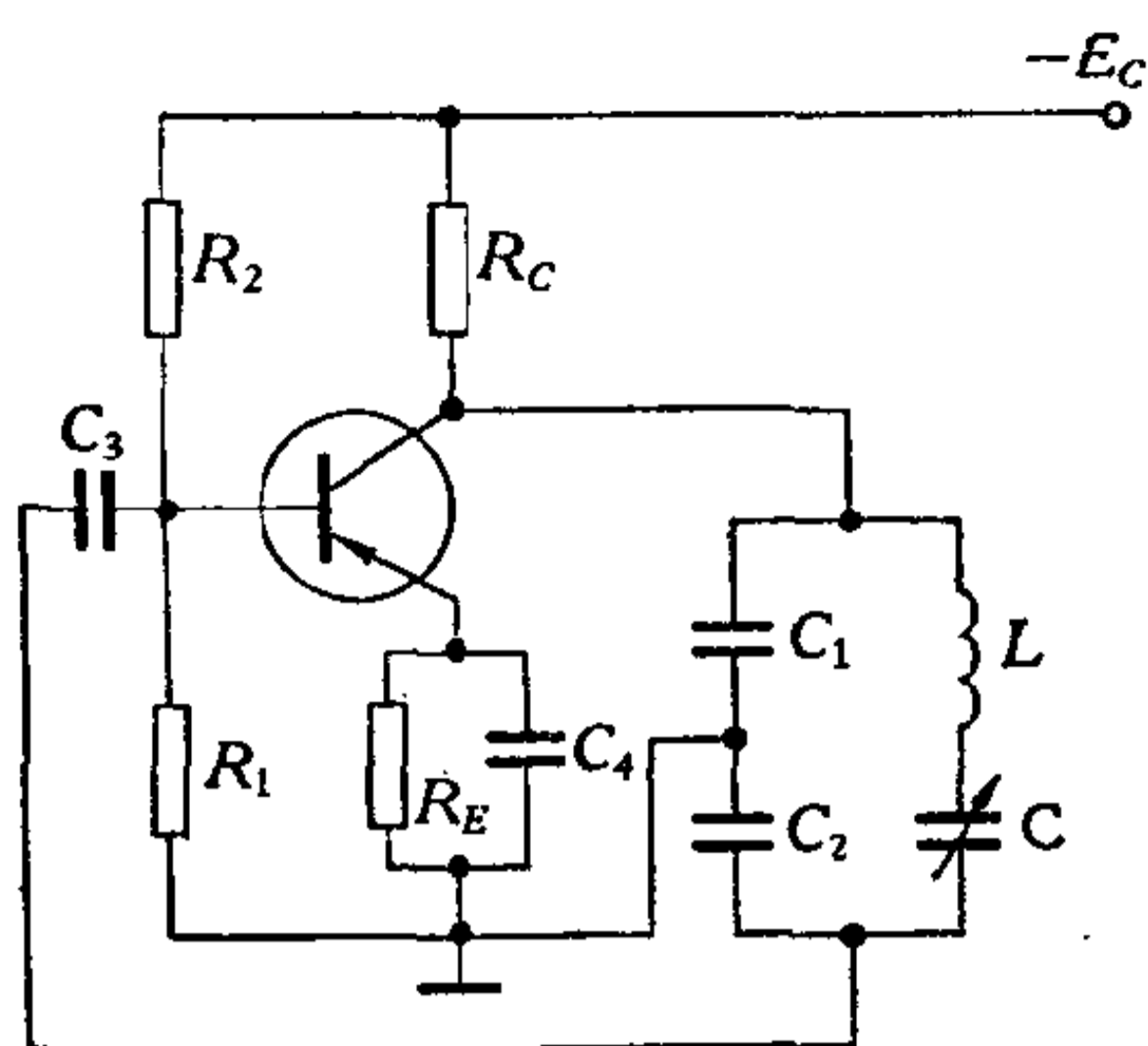


图 5-12 改进型电容反馈振荡线路

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-6)$$

在电容反馈振荡线路中，电容 C_1 、 C_2 既是决定振荡频率的回路电容，又是提供反馈讯号的反馈元件，故相互牵制，经过这种改进之后，在很大程度上克服了这种牵制，使线路调整方便。

电容反馈振荡线路有振荡波形良好，频率比较稳定的优点，常采用在要求比较高的场合。电容反馈振荡线路也可采用共基极线路。

上面，我们大致分析了几种常见的 LC 振荡线路的工作原理，在实际制作时，大致上要考虑下面几方面的问题。

一、晶体管的选用：

LC 振荡器一般可以工作在频率较高的情况下。因此选管时应满足以下两个要求：(1) 频率：晶体管手册上标出的最高振荡频率 f_{\max} 是指功率增益等于 1 时的频率，在此频率下，晶体管只能勉强维持振荡而没有功率输出。而当振荡频率低于最高频率 f_{\max} 时，才能输出一定的功率。例如：我们要做 10 兆周的振荡器时必须选用 f_{\max} 大于 10 兆周的管子。在实际应用中，为了能从振荡器中取出必要的功率，常使晶体管工作在低于 $1/3 f_{\max}$ 的频率。例如，3AG11 的 f_{\max} 为 30 兆周，用它作中波收音机振荡管，效果就很好（最高振荡频率为 2 兆周），而作短波（最高到 24 兆周）就不太好了。(2) 功率：晶体管集电极的最大散耗功率，手册上以 P_{CM} 来表示，使用时不能超过，以免损坏，特别是高频管，由于结构上的

关系,必须严格防止超过。如 3AG11 的 P_{CM} 为 50 毫瓦,而收音机本机振荡所需的功率约在 1 毫瓦左右,因此 3AG11 是足以胜任的。

概括起来说:就是在符合节约的原则下,尽量采用 f_{max} 高, P_{CM} 大的管子。当然晶体管的 β 也宜选大的好。

二、LC 振荡回路:

上面说过: 振荡线路的振荡频率,大致上等于 LC 振荡回路的固有频率,用公式 (5-1) 计算。所以 LC 回路是决定振荡频率的主要因素,在无线电设备中和某些场合,我们不希望振荡频率跟着环境温度、电压变化等等因素随便变动(频率不稳),也就是说,在我们不改变 L 或 C 时希望振荡频率要稳定,这就要注意 LC 元件的质量,在绕制高频线圈时,最好要绕在高频损耗小的象高频瓷,有机玻璃等骨架上,以提高回路的 Q 值。绕线要紧密,不要松松夸夸,如果用镀银铜线效果更好,有条件的绕好后能防潮处理都有助于振荡的稳定。对频率稳定要求较高的场合,电容器选用陶瓷电容器,云母电容器等品种,一般不用纸质电容器,这样整个回路的 Q 值高,不但容易起振,而且振荡出来的波形良好,频率稳定。

三、晶体管静态工作点选择:

一般地说,只要用可变电阻象调整放大器工作点那样调整到满足要求即可。实践证明:把静态工作点调得低一些,就是调得象推挽放大器的静态工作点那样,使晶体管乙类工作,可以提高效率,省电,但振荡功率可能要稍小些。

四、选用什么线路:

在工业生产中或有特殊要求场合,要看具体情况而定,力求经济有效,器材来源容易,控制方便等,并可以根据电感、变压器反馈线路容易起振,电容反馈线路振荡品质较高等特点结合考虑。振荡器强度的控制,可以用改变晶体管的静态电

流或改变反馈的办法达到。增大时要防止晶体管损坏,减小时要注意不使停振。共发射极与共基极线路比较,由于普通的晶体管输入阻抗不高,故共基极线路不如共发射极线路容易起振。

第四节 LC 自激振荡器应用举例

毛主席教导我们:“**马克思主义看重理论,正是,也仅仅是,因为它能够指导行动。**”上面我们对自激振荡器作了初步的分析,下面我们向大家介绍一些工业中应用实例,供大家参考。

1. 金属探测仪

锯木行业中,常因木材内部有元钉之类的金属物,锯木时损坏锯条,严重的甚至造成工伤事故。金属探测仪就是用来在木材中发现金属物的一项电子设备。在无产阶级文化大革命中,工人老师傅们高举毛泽东思想伟大红旗,在伟大领袖毛主席“**自力更生**”方针的指引下,向帝、修、反宣战,自行设计制造出了金属探测仪。现在金属探测仪在竹木、塑料、食品等行业多方面获得广泛的应用。

金属探测仪的探测头子需要频率 15 千周的信号供应,这个信号由 LC 自激振荡器产生获得,图 5-13 即为该设备中的振荡线路,线路工作原理如下:

这是一只推挽振荡线路,为分析方便起见暂且不看 BG_2 管及其线路,先看 BG_1 所组成的线路, L 和 C 组成的振荡回路接在 BG_1 的集电极上,基极上的信号是通过 L_{1-1} 和 L 变压器反馈取得的,所以这是变压器反馈振荡线路。

在第二章中讲到:推挽线路可以提高放大器的输出功率

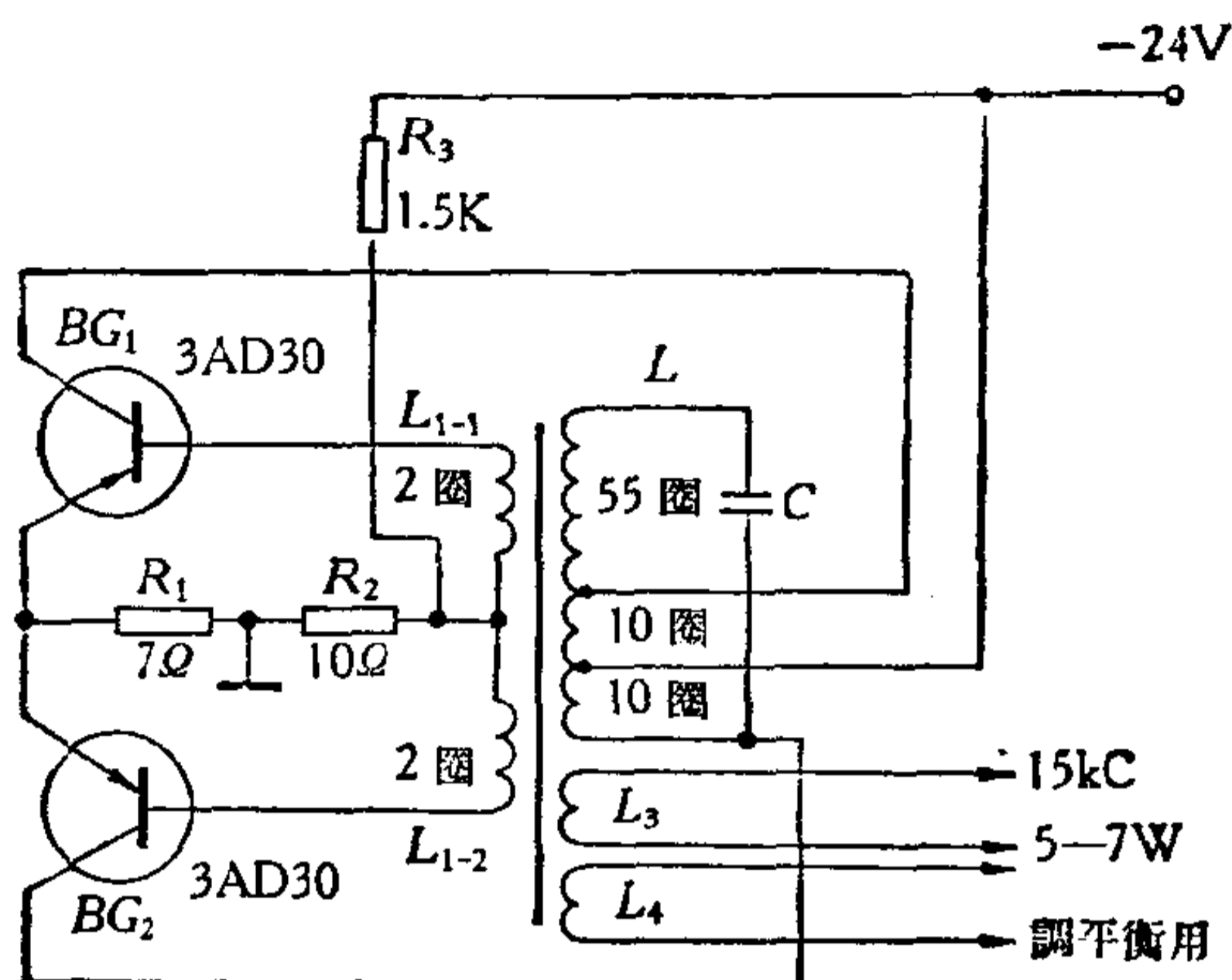


图 5-13 金属探测仪中的 15kC 振荡器

和效率。同样，自激振荡线路也可以用推挽线路来提高输出功率。图中 BG_2 与 BG_1 就组成了推挽振荡线路。 BG_2 的线路和 BG_1 是完全一样的，二个管子及线路是对称的。

在图 5-13 的线路中， R_1 接在二个管子的发射极和地之间，起电流负反馈作用使线路工作稳定。如果这个电阻取得大点，稳定性可以好些，但输出功率就要减小；如果从输出功率的角度看， R_1 取得越小越好，但是稳定性就会变差。因此选择 R_1 要从输出功率和稳定性要求二个方面来考虑决定。

R_2 、 R_3 组成分压式偏置线路。晶体管静态工作点的选择与推挽功率放大器相似。

L_3 是功率输出线圈，线路正常工作时，可以得到 5—7 瓦的输出功率供给后面部分应用。 L_4 是后面线路部分要求的补偿平衡用的线圈，只要有一定的电压输出即可。

L 采用 $\phi 0.71$ 毫米高强度漆包线， L_1 、 L_3 、 L_4 采用 $\phi 0.31$ 高强度漆包线。磁芯采用 $\phi 42$ 毫米圆形铁淦氧磁体，由于振荡功率大， BG_1 和 BG_2 必须加装适当面积的散热板。

2. 自动控制中的振荡开关

在图 5-14 所示的变压器耦合振荡线路中,我们可以调整静态工作点,使其不振荡时集电极电流很小,这样当振荡器振荡时,集电极电流就增大。这个道理与乙类工作状态的放大器一样。乙类工作状态的特点是无信号时晶体管的静态工作电流很小,而有输入信号时集电极电流变大。所以线路振荡时就相当于有信号输入,电流就增大;停振时,相当于没有信号,静态电流就很小。

如果在晶体管的集电极中串进一只高灵敏继电器,那末这种电流的变化就会使继电器吸动或释放,这就组成了振荡

开关。另外,这种电流的变化,也使 E 点电位发生相应变化,如果利用这种变化去控制后级也可以。

应用振荡开关的关键问题,是如何把我们所需控制的对象与振荡器中的“振荡”和“不振荡”联系起来。下面我们举例说明。

某厂利用振荡开关按图

5-15 组成了一个过电流时

间积累仪,这个厂为了统计某一电力变压器的过负荷情况,它用一只电流表,在最大允许电流相对应位置放上停止振荡的开关元件,当负荷电流超过这一值时,电流表指针偏转到停振位置时,该元件使振荡器停止振荡,继电器动作,使电钟通电走动;当负荷减小时,电流表的指针离开停振位置,振荡器起振,电钟电源被切断,这样过电流的时间就记录下来了。如果

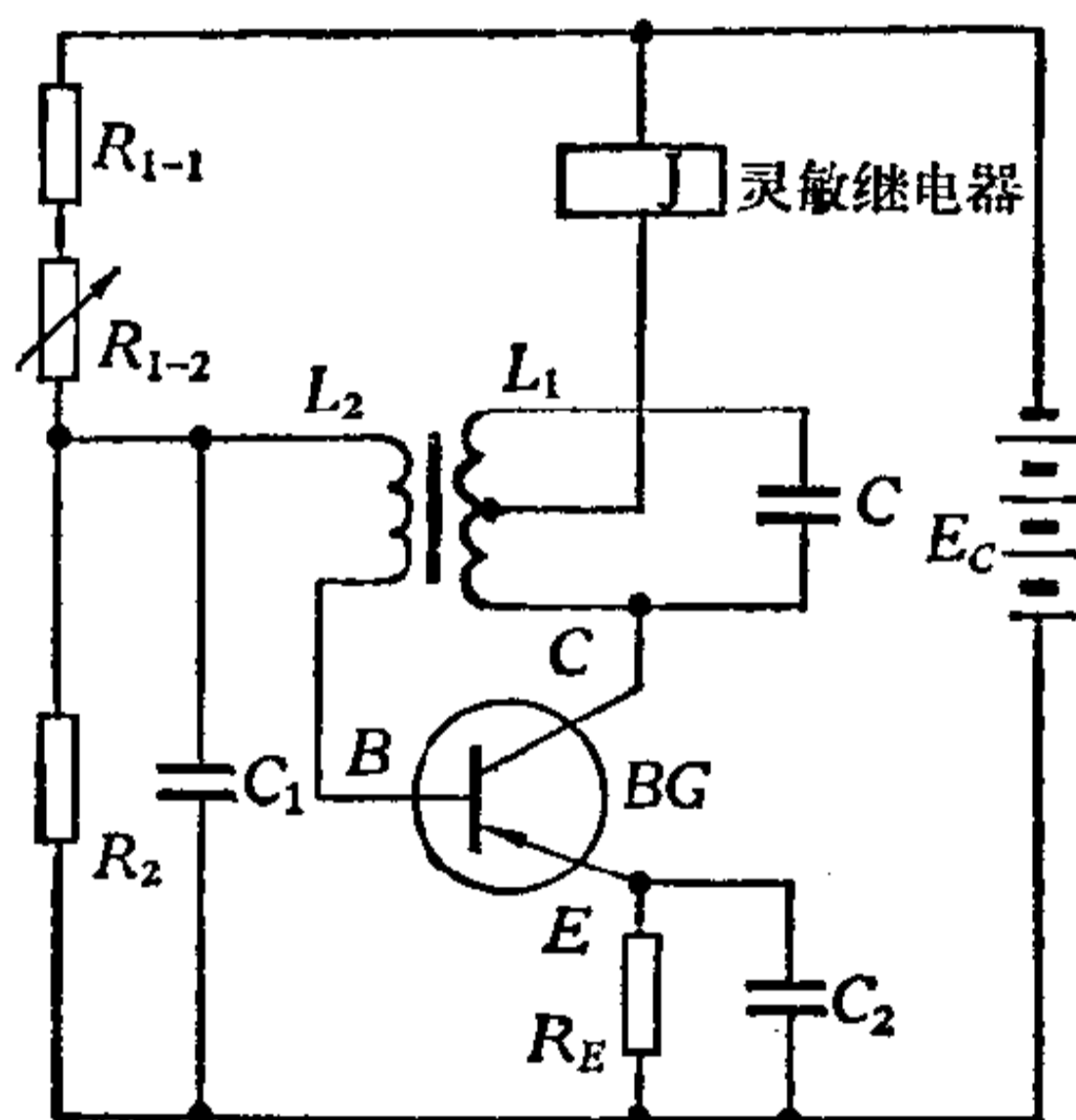


图 5-14 振荡开关原理图

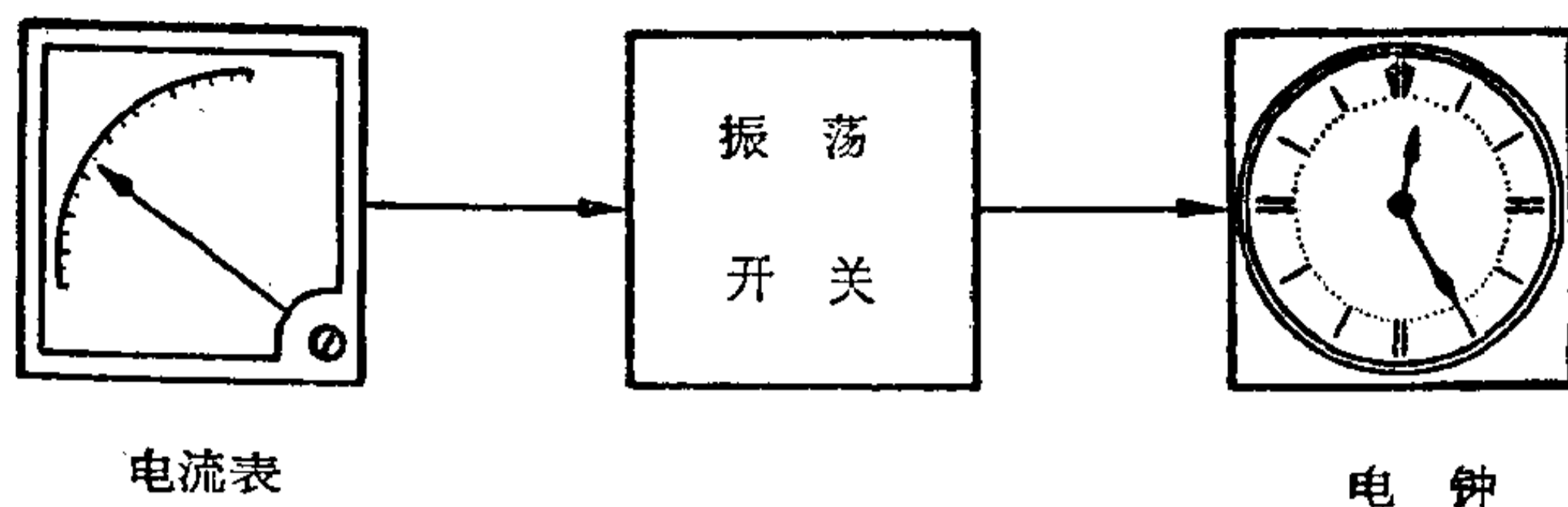


图 5-15 过电流时间积累示意图

振荡开关不去控制电钟,而去控制线路中的磁力启动器,那末就可组成过电流保护装置。

下面介绍几种振荡开关具体线路:

机床限位用的接近开关。

机床上常用行程开关控制机件移动的路程,一般是靠机床上机件接触推动开关动作的,晶体管接近开关是一种新设备,它不需要接触或机械推动就能起一般行程开关所起的作用。晶体管接近开关基本原理是当振荡器振荡线圈有金属片靠近它时,金属片内感生涡流,由于涡流的去磁作用,削弱了两线圈之间的耦合,破坏幅度平衡条件而停止振荡,金属片离开时,振荡又恢复。利用“振荡”——“停振”,配合其他线路,便组成了接近开关,其原理如图 5-16 所示。

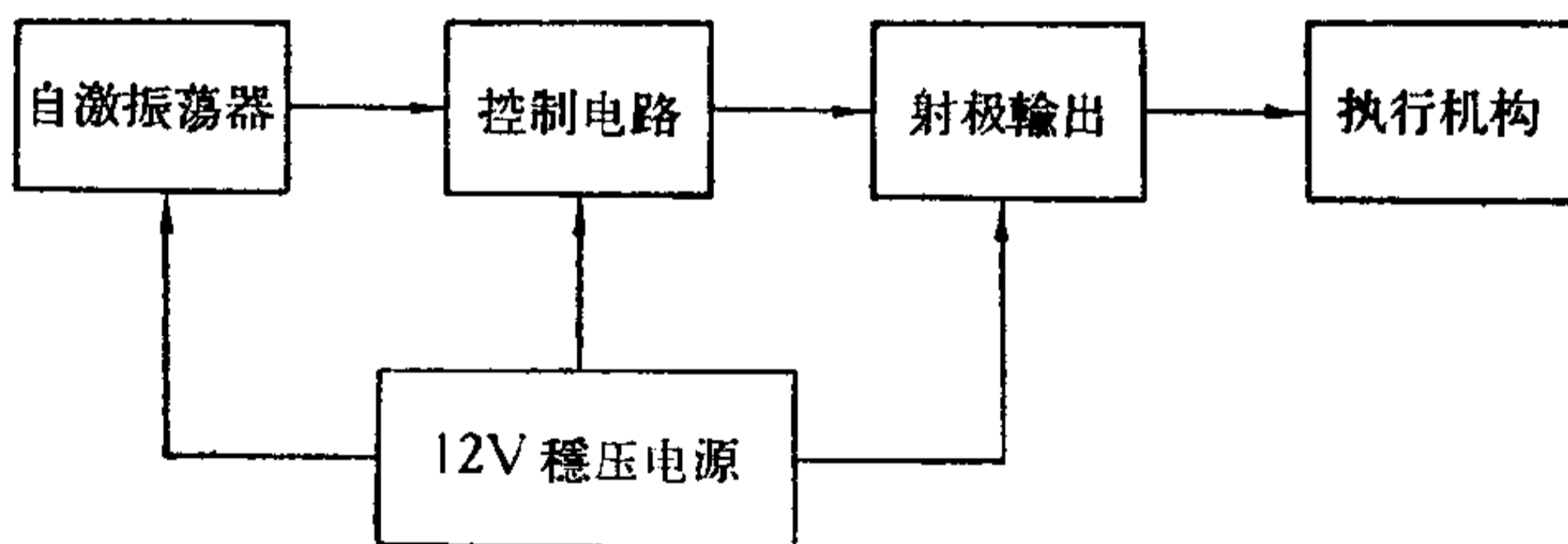


图 5-16 接近开关示意图

晶体管接近开关的主要部分是 LC 振荡器,图 5-17 是接近开关中用的共发射极变压器反馈振荡线路。

为什么这种线路在有金属片接近时会停振呢? 因为接近

开关中振荡线圈的结构如图 5-18 所示。上面我们已经讲过，从 L_1 加到晶体管输入端的反馈信号是用来维持振荡的，反馈的大小与 L_1 、 L_2 之间的耦合程度有关，金属片逐渐接近线圈， L_1 、 L_2 之间耦合逐渐被削弱，反馈信号也逐渐减少，当金属片接近到某一位置时，反馈减小到不足以维持幅度条件时，振荡便停止。当金属片远离这个位置时，反馈又加强，振荡恢复，这就是接近开关“振荡”“停振”的原因。

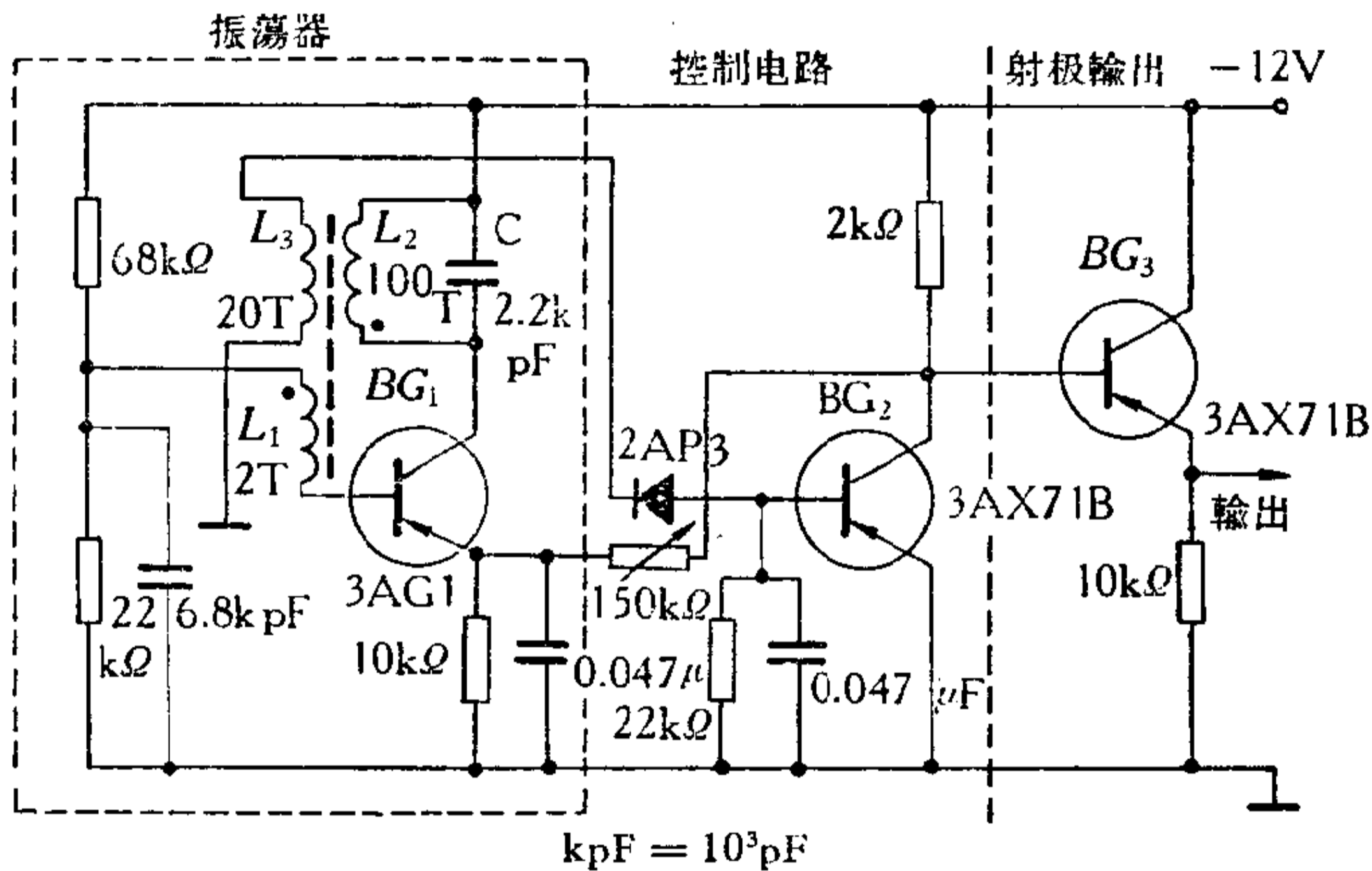


图 5-17 接近开关原理图

振荡线圈 L_1 、 L_2 、 L_3 绕在同一个磁心上， L_1 用直径 0.17 毫米漆包线绕 2—3 圈，放在上层， L_2 是用同样的漆包线绕

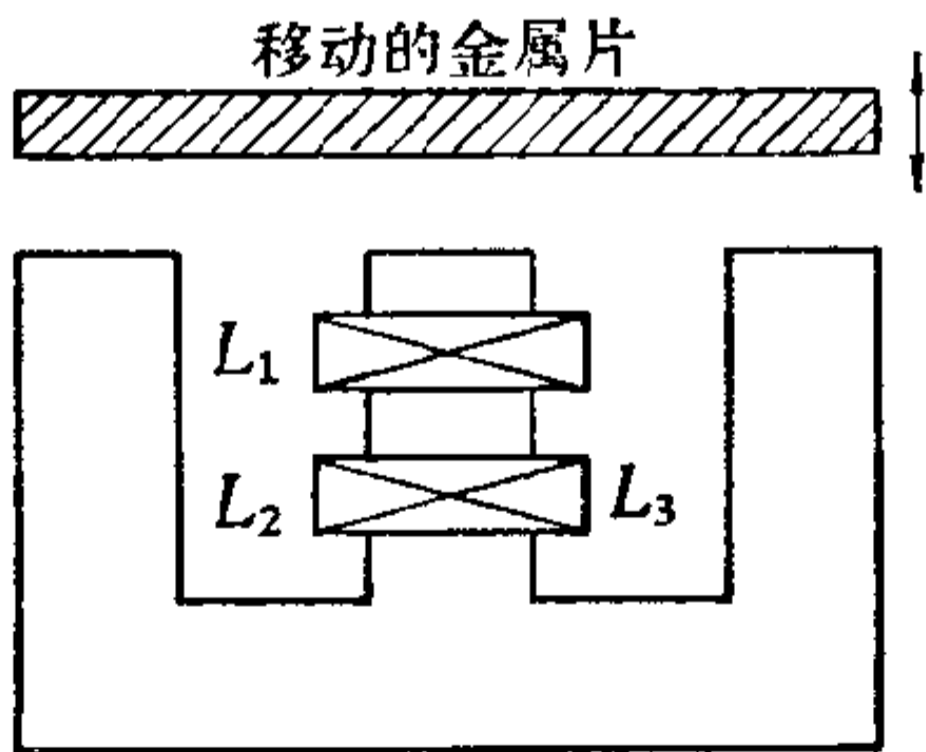


图 5-18 线圈结构图

100 圈放在第二层，在 L_2 的外层再绕 20 圈左右作为 L_3 ，磁芯 MX 100 长为 18 毫米。振荡频率为 150 千周左右。

配合振荡线路的后级线路是这样工作的：当振荡器振荡时 L_3 感应一个高频电压，经二极管 2AP3 整流后，晶体管 BG_2 基极上

便获得一个负电压,推动 BG_2 使之处于饱和状态,此时 BG_2 集电极电压接近于零, BG_3 截止。停振时, L_3 上无高频电压, BG_2 基极电位为零因而截止, BG_3 导通,在射极电阻 10 千欧上就有接近 -12 伏电压输出。这种输出可以带动继电器或电磁线圈,再控制其他作用元件,也可以触发可控硅。线路中接入的 150 千欧电阻,在这里促使振荡器起振迅速,停振干脆。

接近开关具有寿命长,可靠,反应迅速,定位精确等一系列优点。目前已被广泛应用于机床限位,传动装置限位和快速自动计数等。

保护装置中的振荡开关。

在有些场合,由于具体条件不同可以采用另外形式的振荡开关。这里再介绍一种用电容反馈振荡线路组成的振荡开关如图 5-19(1) 所示。在线路中 C_2 与 C_x 串联组成回路电容,反馈信号通过隔直流电容 C_1 加到基极,发射极通过旁路电容 C_3 高频接地,形成了共发射极电容反馈振荡线路。其高频等效电路如图 5-19(2) 所示,开关是由 C_x 变化起作用的,因为 C_x 直接关系到反馈的大小,如果由于 C_x 的变化,反馈减小到不足以维持振荡,线路就停止振荡。在 BG_1 维持振

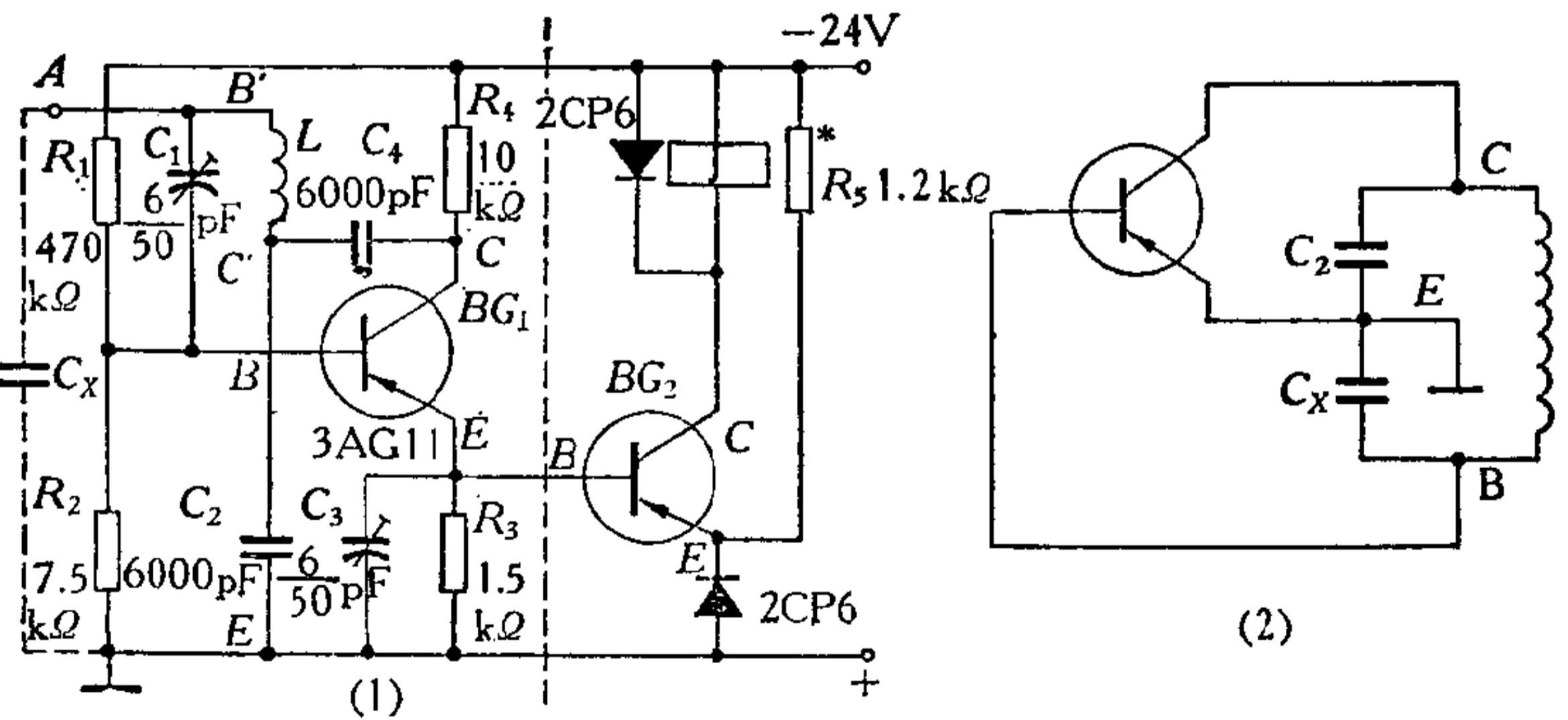


图 5-19 电容反馈振荡开关原理线路及其等效电路

荡时,调节到使串接在 $B G_2$ 集电极电路内的继电器 J 吸住,停振时,继电器 J 释放。

这一线路应用也很广,例如利用人体对地的分布电容,可以做成保护装置。只要在 A 端接一块金属板,或一根导线,那么当人体接近金属板时,人体与金属板之间形成了一个电容,这个电容相当于 C_x ,靠近或远离使 C_x 发生变化,继电器就可动作发出警报或切断电源。

二块金属板可以组成一个电容,改变金属板之间的距离,也可以改变电容值,因此这一线路还可以应用于位移控制,比较其他位移控制有灵敏度高,不需要直接接触等优点。

如果把电压表或电流表改装一下,把表的指针做成一个金属小片,在表面上固定一个金属片,这二个片就组成了一个电容,当指针移动时,电容也相应改变,这一电容作为 C_x 接到线路中,可以做成不同的控制。

3. 电压表幅度校准用的 100kC 振荡器

上面我们讲过电感反馈振荡线路。图 5-20 就是一个共发射极电感反馈振荡线路的例子。图 5-20 的线路原来是用在 HFJ-8 型超高频晶体管毫伏表中的。因为电压表的读数往

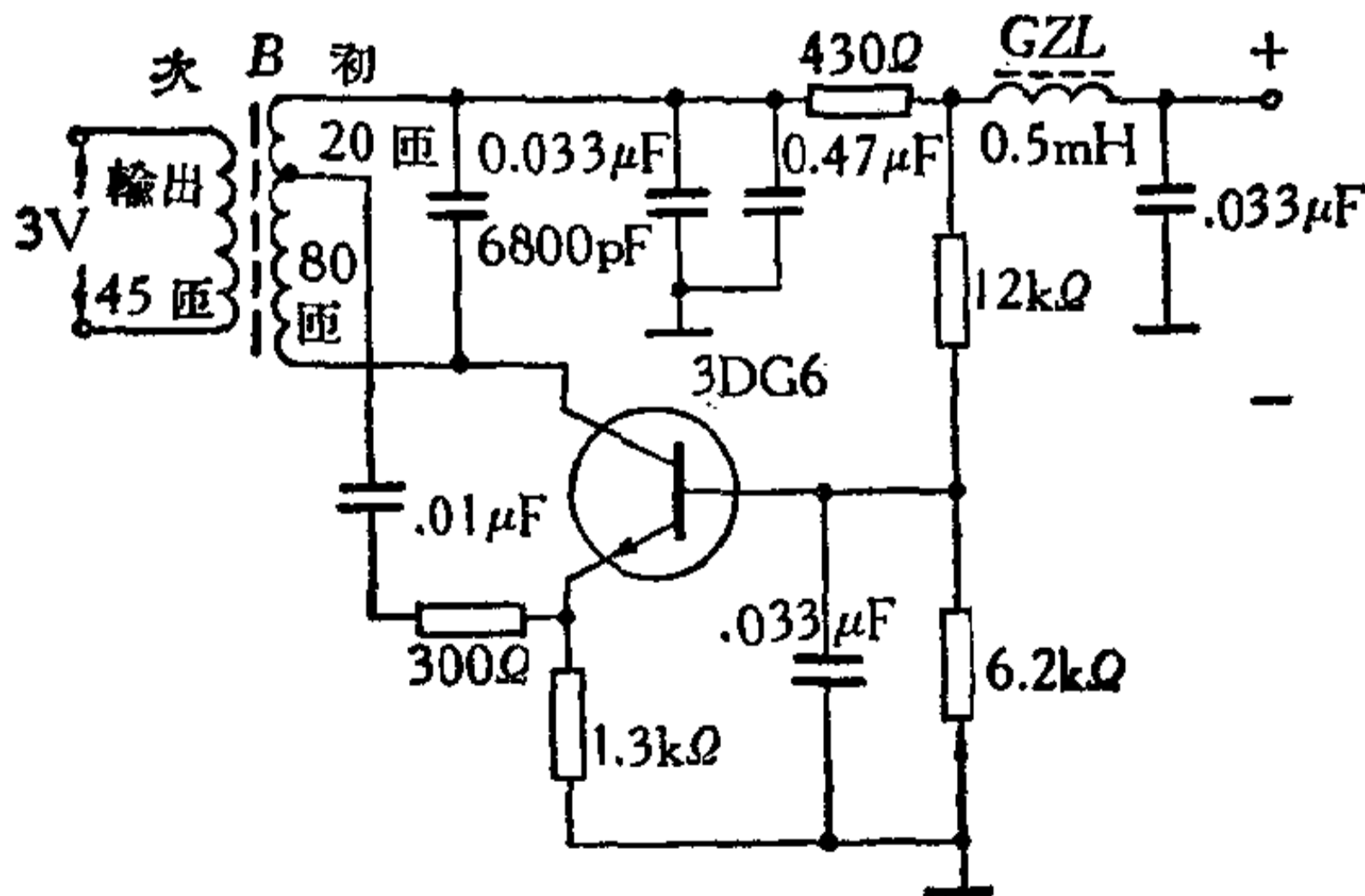


图 5-20 电感反馈振荡器

往要受到各种影响而不准,如果每次都用一个表来校核它,不但麻烦,有时也办不到,所以就在电压表内附加这个振荡器,用它的输出电压来校准电压表的读数。

这一振荡线路的振荡频率为 100kC, 输出电压为 3 伏。因为用它作为标准。所以要求它输出电压幅度稳定。振荡器的振荡电压幅度,直接受到直流电源电压变化和晶体管工作状态变化等影响。所以,稳定幅度除直流电源要稳定外,在线路中加了较深的负反馈,晶体管用稳定性较好的硅管等措施。

线路中的变压器绕在磁芯上,初级绕 100 圈。在 20 圈处抽头作为反馈线圈,次级绕 45 圈。都用 $\varnothing 0.07 \times 7$ 的多股线绕制,以提高振荡回路的 Q 值。

这一线路,适用于要求振荡幅度稳定的场合。

4. 电感比较仪中的振荡器

某厂生产的小型电感比较仪是精密测量金属工件几何尺寸的晶体管化电子仪器,精度达 0.5 微米,其示意图如图 5-21 所示。其中的振荡器是电容反馈振荡线路,产生频率为 4kC 的振荡,线路如图 5-22 所示。电容反馈振荡线路的优点是振荡频率较稳,波形也比较好。

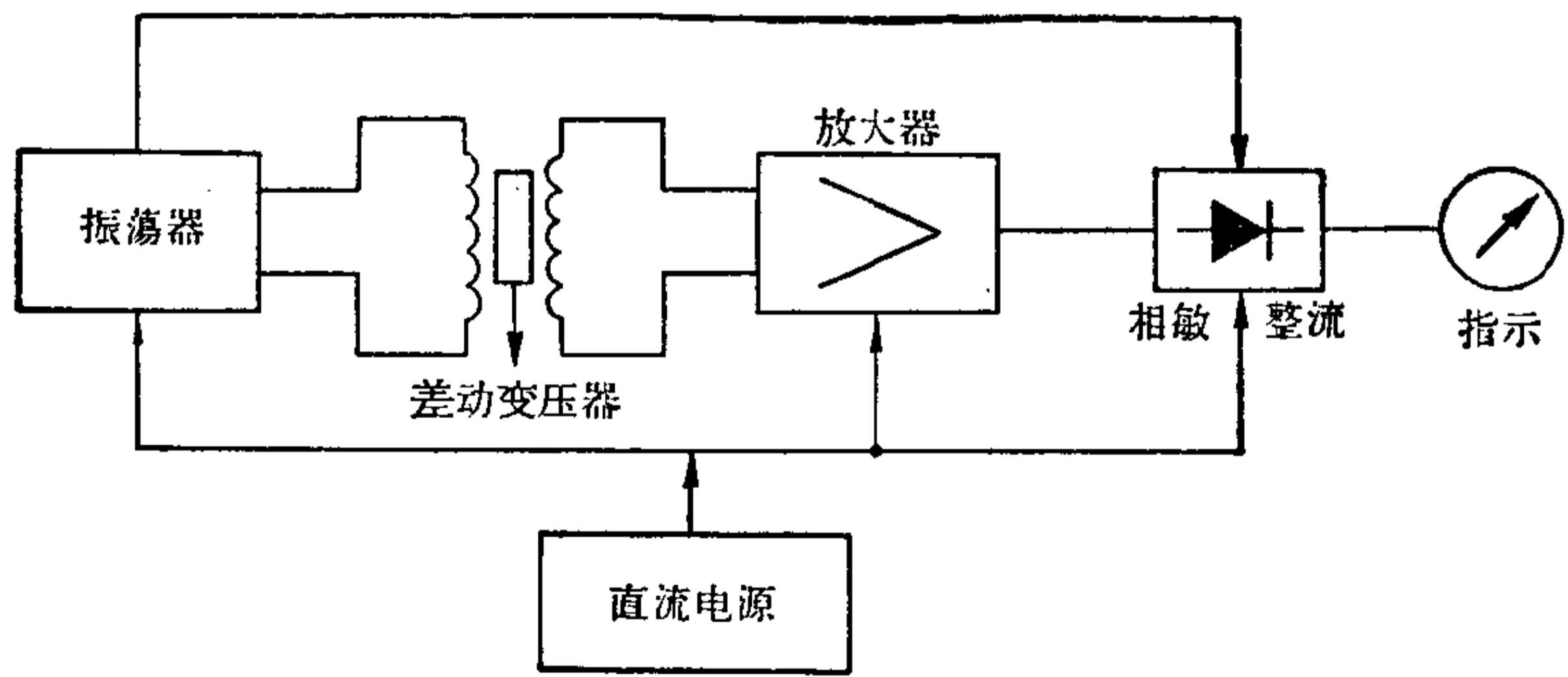


图 5-21 电感比较仪示意图

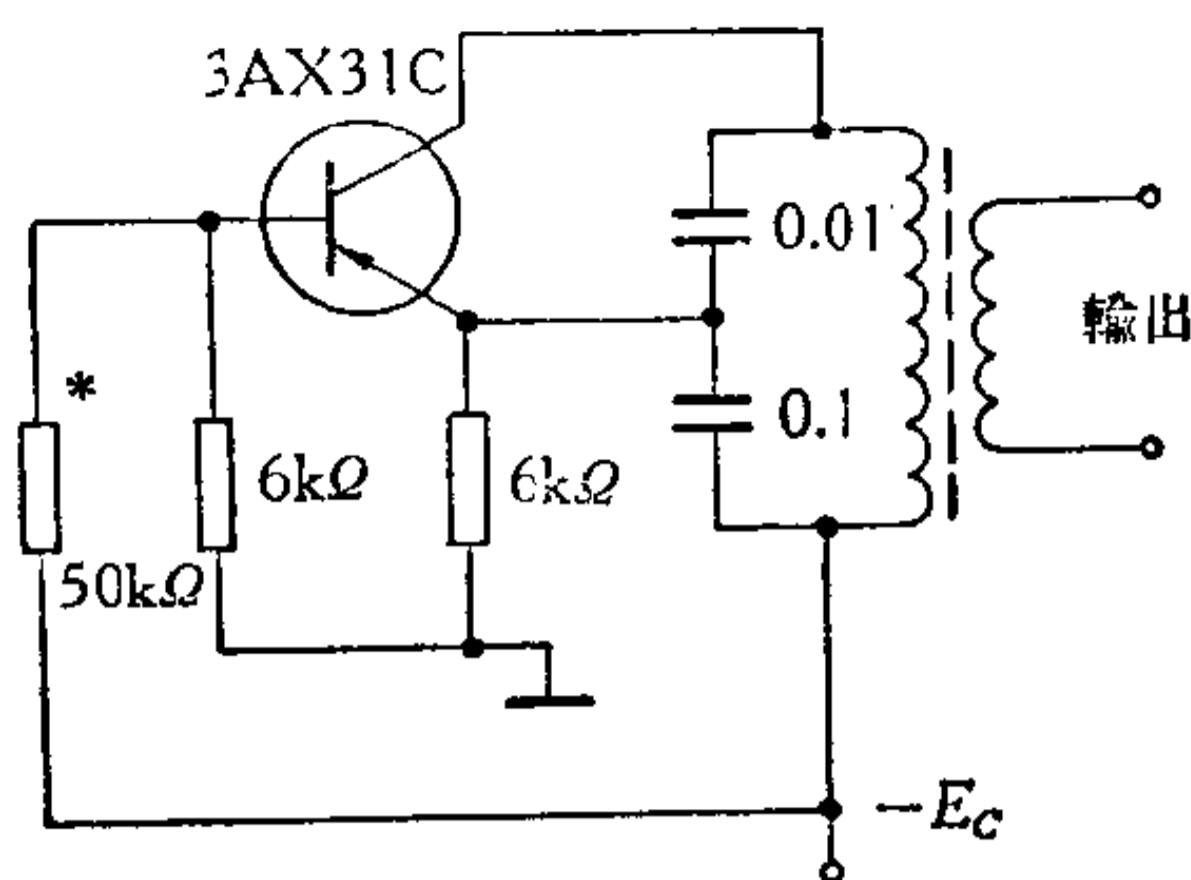


图 5-22 电容反馈振荡线路

第五节 RC 自激振荡器

在此之前，我们所讲的振荡线路都由振荡回路决定振荡频率。从公式 5-1 可知，振荡频率愈低，所需的 LC 值愈大，因此，在频率较低时，由于 LC 值大了之后，其体积也大，实用上，就产生一些缺点。所以，在音频或超音频范围（一般不超过 200kC），常使用 RC 振荡线路，可得良好的振荡波形和稳定的幅度。

RC 振荡线路与 LC 振荡线路一样，即也要满足相位平衡和幅度平衡这二个振荡条件，才能产生和维持振荡。

1. 电桥振荡线路工作原理

在各种 RC 振荡器中，应用比较广泛的是一种电桥振荡线路。这种线路由二级阻容耦合低频放大器和一只 RC 电桥组成。其示意图如图 5-23 所示，其典型线路如图 5-24 所示，

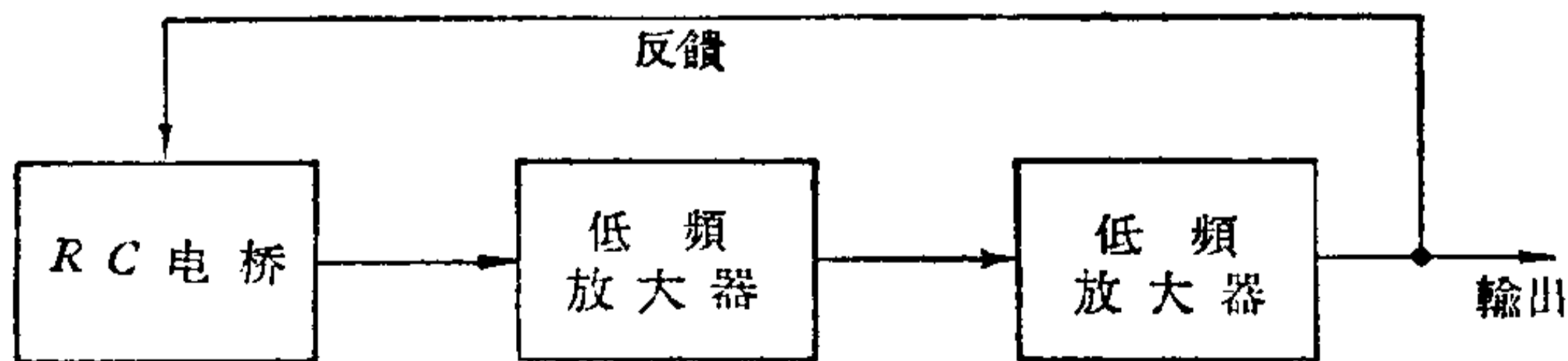


图 5-23 RC 电桥振荡器示意图

线路中二级低频放大线路是大家熟悉的。线路左边部分是 RC 电桥，电桥有 AB ， BE 和 AD ， DE 四个桥臂，分别由 R_S 、 C_S ； R_P 、 C_P 和 R_i ； R_F 组成，电桥的四个端点为 A 、 B 、 D 、 E 。 A 点通过隔直流电容 C_F 接到第二级放大器的输出端， B 点接在第一级放大管 BG_1 的输入端， D 点接在 BG_1 发射极

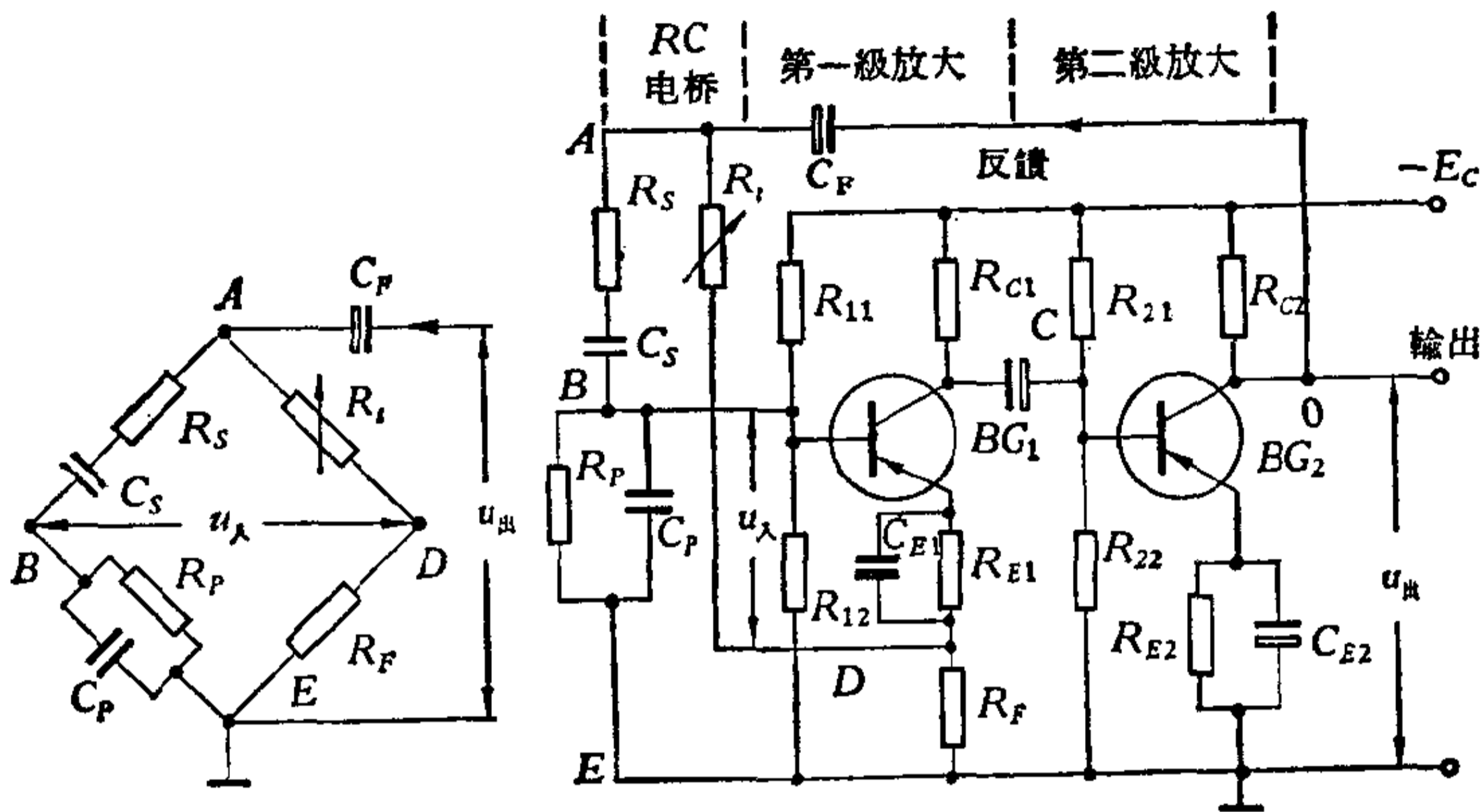


图 5-24 RC 电桥振荡线路及其电桥

电路中的 R_{E1} 与 R_F 之间，由于 C_{E1} 的交流短路作用，所以对交流来说， D 点相当于直接接在 BG_1 的发射极， E 点为接地点，据此，我们可以知道从输出端反馈回来的讯号相当于加在电桥的 AE 之间，通过电桥加在 BD 之间的讯号才是实际上加在第一级放大器输入端的讯号。这样，求解这种振荡线路的相位条件可从 B 、 D 之间的讯号 u_{λ} 与输出讯号 $u_{\text{出}}$ 入手。

在这种线路中，因为通过二级放大，总放大倍数已相当大，所以这里分析时，假定幅度条件已经满足，只要相位条件满足，振荡便能产生。下面简单地说明电桥的作用原理。

从线路的输入端 B 点到输出端 O 点，是二级共发射极放大线路，讯号从输入到输出共经过二次倒相，所以 O 点的输出

讯号,通过电容 C_F 反馈到 A 点的讯号与 B 点的输入讯号同相,是正反馈的关系。

那么把 A 点的反馈讯号直接送到 B 点不是同样也能振荡吗? 实践证明是能够起振的。但是这种振荡得不到正弦波,要获得频率一定的正弦波,必须在线路中加进控制振荡的线路,这里用 RC 电桥。从图 5-24 可见反馈信号 $u_{\text{出}}$ 加在电桥的 AE 两端,送到晶体管 BG_1 输入端的信号 $u_{\text{入}}$ 从电桥 BD 两端取出,由于 RC 电桥对通过它的信号有选择作用,所以通过电桥之后,只有某一频率的信号唯独能满足相位条件。这样,振荡器就产生等于该频率的正弦波。

电桥振荡器的振荡频率,由组成电桥的 RC 值决定,用下式计算:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_S C_S R_P C_P}} \quad (5-8)$$

实用上往往采用

$$R_S = R_P \quad C_S = C_P$$

此时

$$f = \frac{1}{2\pi R_S C_S} = \frac{1}{2\pi R_P C_P} \quad (5-9)$$

式中频率 f 、电阻 R 、电容 C 的计算单位分别为周、欧、法。

电桥的另外 AD , DE 二臂是给 BG_1 加负反馈的电阻分压线路,从图 5-24 可以看到,反馈到 AE 之间的信号通过 R_i 与 R_F 的分压加到 BG_1 的发射极,起稳定振荡幅度的作用。 R_i 是热敏电阻,它的特性是温度升高电阻值变小,可以起到容易起振和自动补偿环境温度变化对振荡的影响。

由于电桥可以控制振荡频率和稳定振荡幅度,所以这种电桥振荡线路可以获得频率、幅度都比较稳定的正弦波,上面所讲的概括起来说,这种电桥振荡线路的工作,依靠二级高放大倍数的低频放大器提供足够的反馈信号,由 RC 电桥控制

振荡频率和稳定振荡幅度。

2. RC 电桥振荡线路实用举例

“走自己工业发展道路”，还是跟在洋人后面爬行，是工业战线上两条路线斗争的焦点。上海某厂工人同志经过二个月奋战，花很少的代价，造出了开钨钢模孔的 60 瓦超声波钻孔设备。

超声波钻孔设备的示意图如图 5-25，其中的 RC 电桥振荡器的线路如图 5-26。

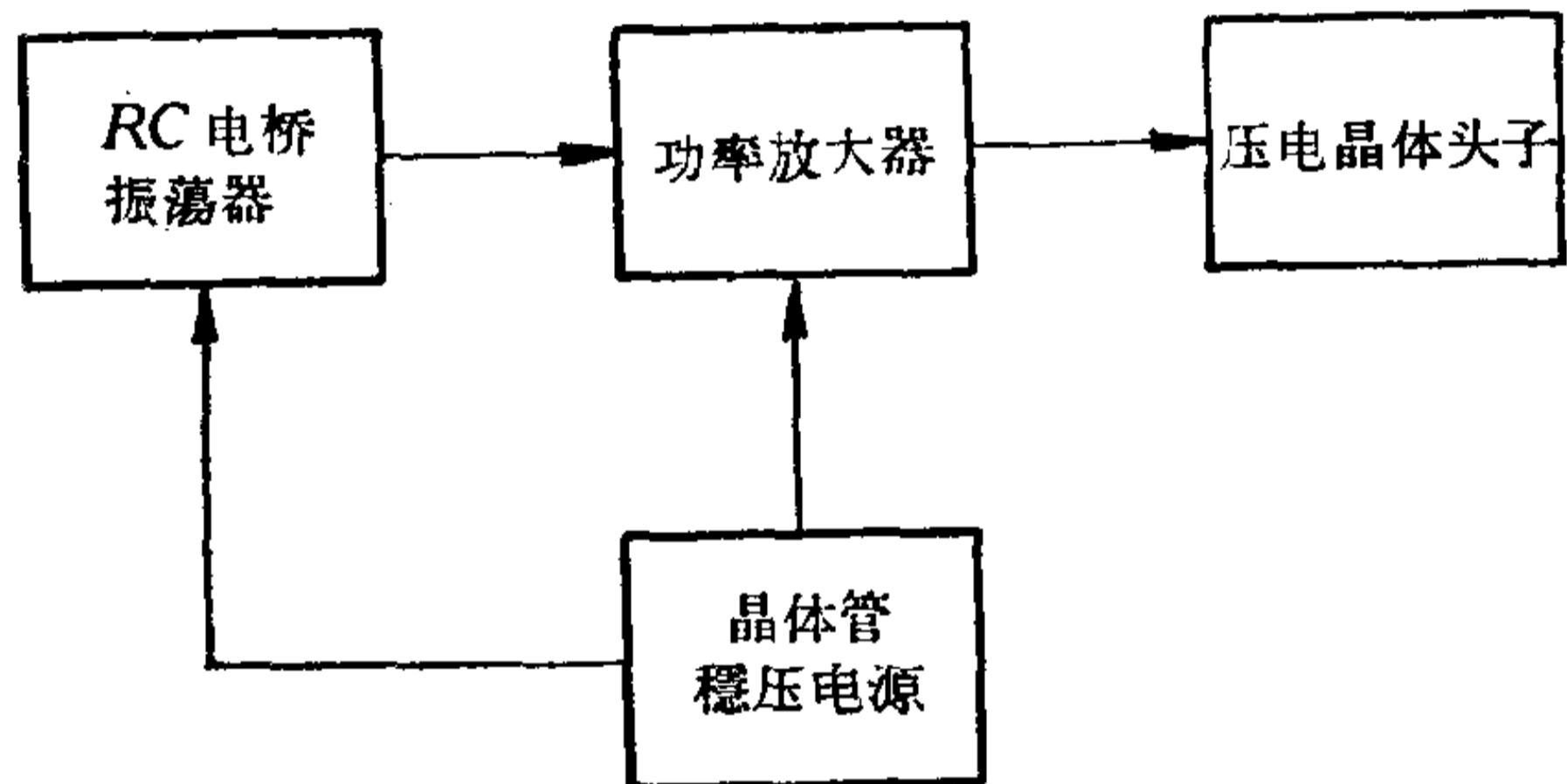


图 5-25 超声波钻孔示意图

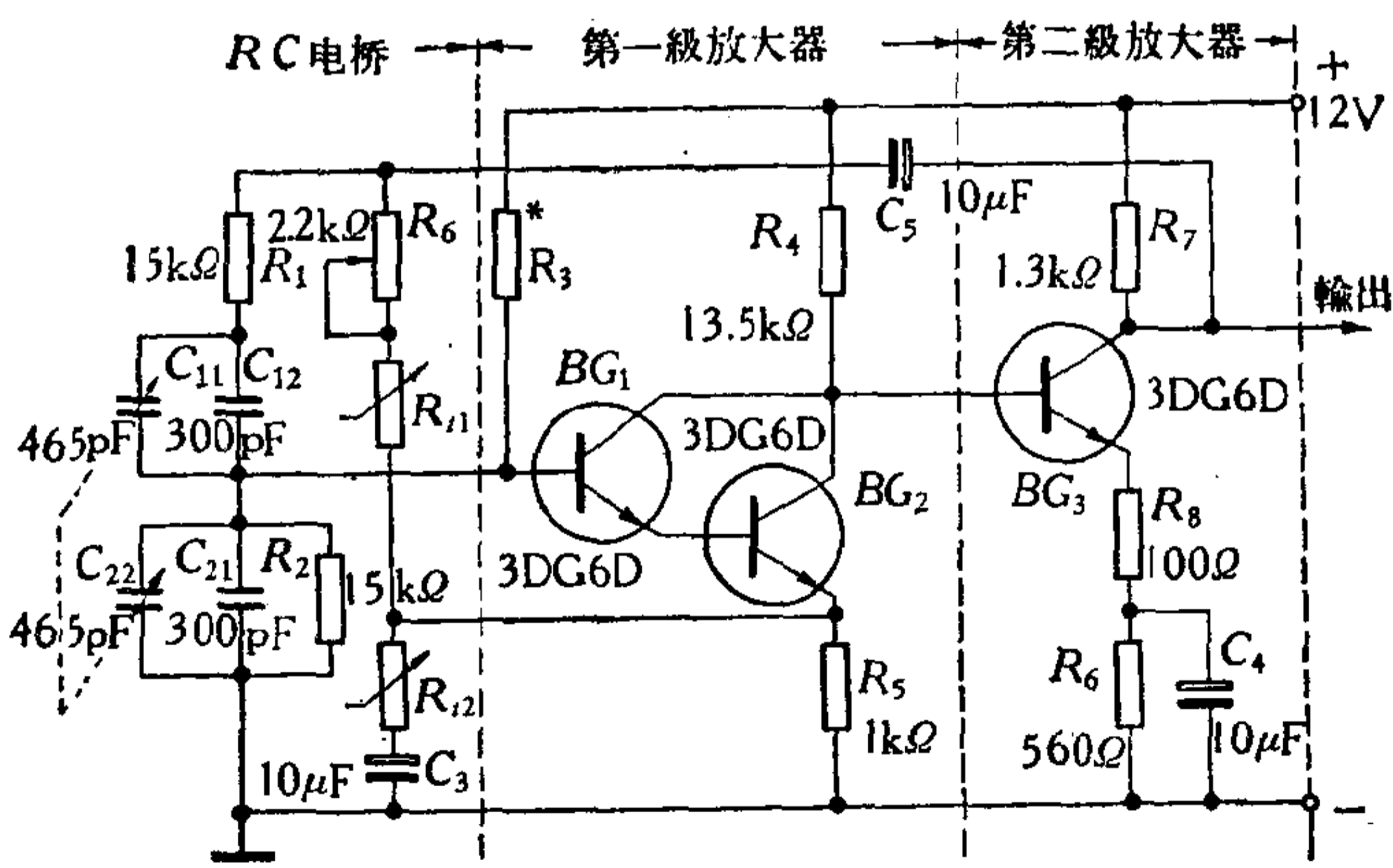


图 5-26 组合管 RC 电桥振荡线路

线路与上面所讲的原理线路略有不同，这是根据实用上的要求所作的修改。图中虚线以左为 RC 电桥，串联在反馈线路内的电位器 R_6 ，用来改变负反馈的大小， C_3 为隔直流电容。 C_{11} 与 C_{22} 为双连可变电容器，用于改变振荡频率。振荡频率为 15—23 千周。

第一级放大器采用了组合晶体管(参阅第四章图 4-11 及其说明)，这是常常采用的措施，通常由于普通晶体管的输入电阻太低和放大倍数有限，线路不容易起振，组合晶体管大大提高输入电阻和放大倍数，故能克服上述缺点。第二级放大器与第一级直接耦合，在其输出端取出反馈信号通过 C_5 加给电桥。

另一种提高放大器输入电阻的方法是采用场效应晶体管，放大器第一级改用场效应晶体管后，输入电阻大大提高，线路容易起振，图 5-27 是音频信号源中的振荡线路部分。

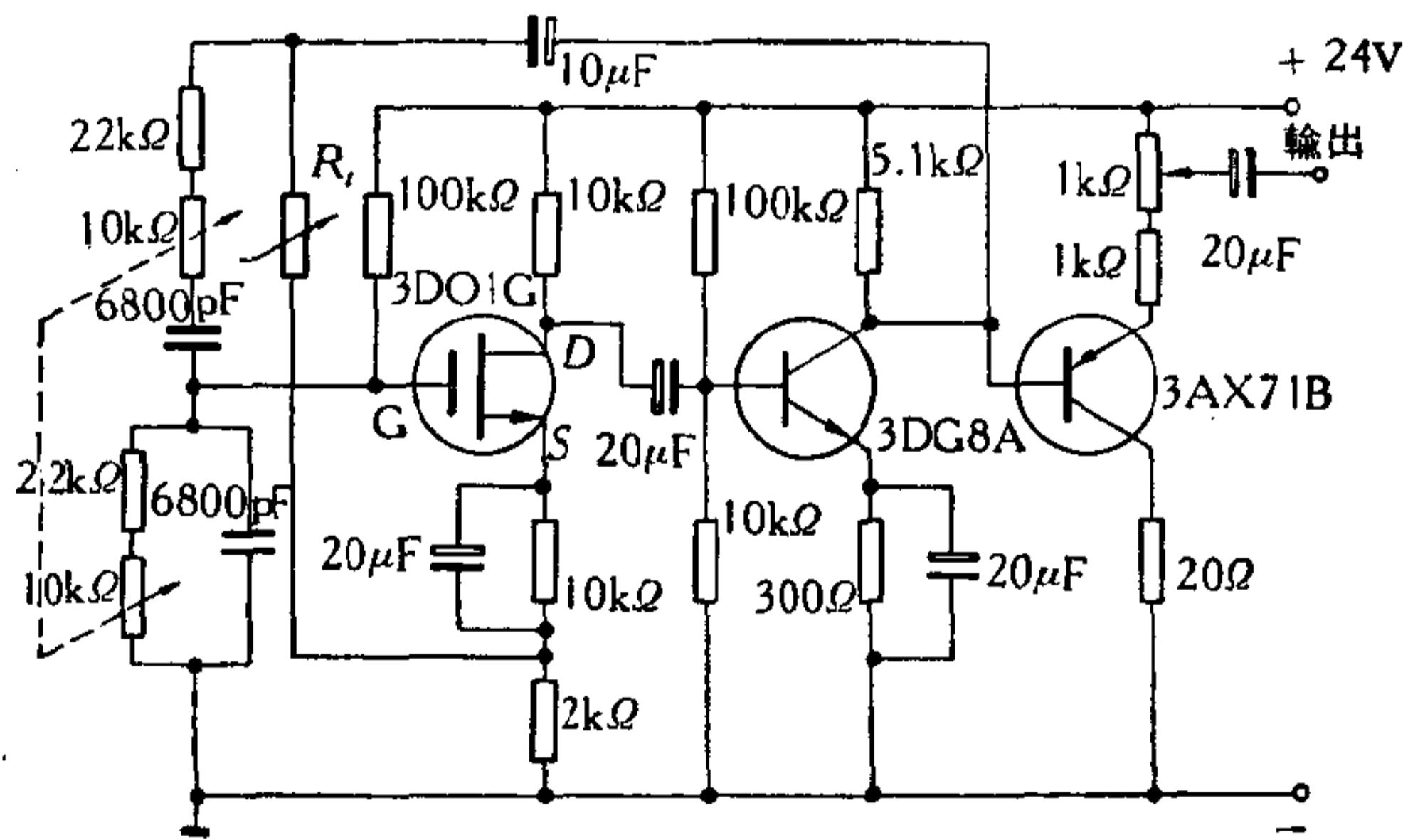


图 5-27 场效应管 RC 电桥振荡线路

整个线路第一级放大器用场效应晶体管，第二级用硅管 3DG8A，第三级是射极输出，减少后面线路对振荡线路的影

响,起前后隔离作用,振荡频率用 10 千欧双连电位器改变。

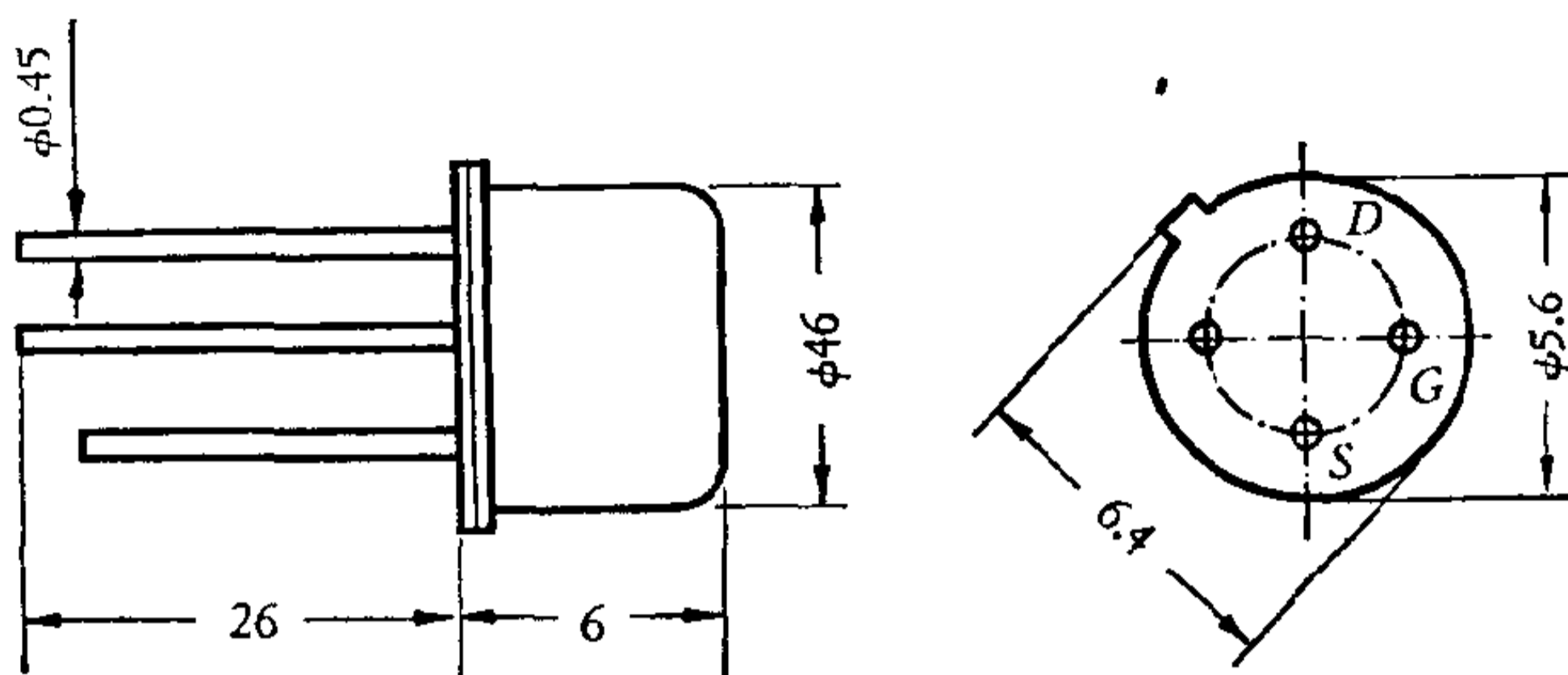


图 5-28 3DO1 场效应管外形图

场效应晶体管是一种新型的晶体管,产品类型很多,它的特殊优点是输入电阻可高达 1000 兆欧以上。

场效应管也有三个电极,分别为栅(G)、源(S)、漏(D)见图 5-28。如果用普通晶体管来比拟,栅相当于基极,源相当于发射极,漏相当于集电极。3DO1 系列场效应管的电压加接法如图 5-29, D 相对于 S 接正电压, G 相对于 S 可接正电压或负电压视工作要求而定。

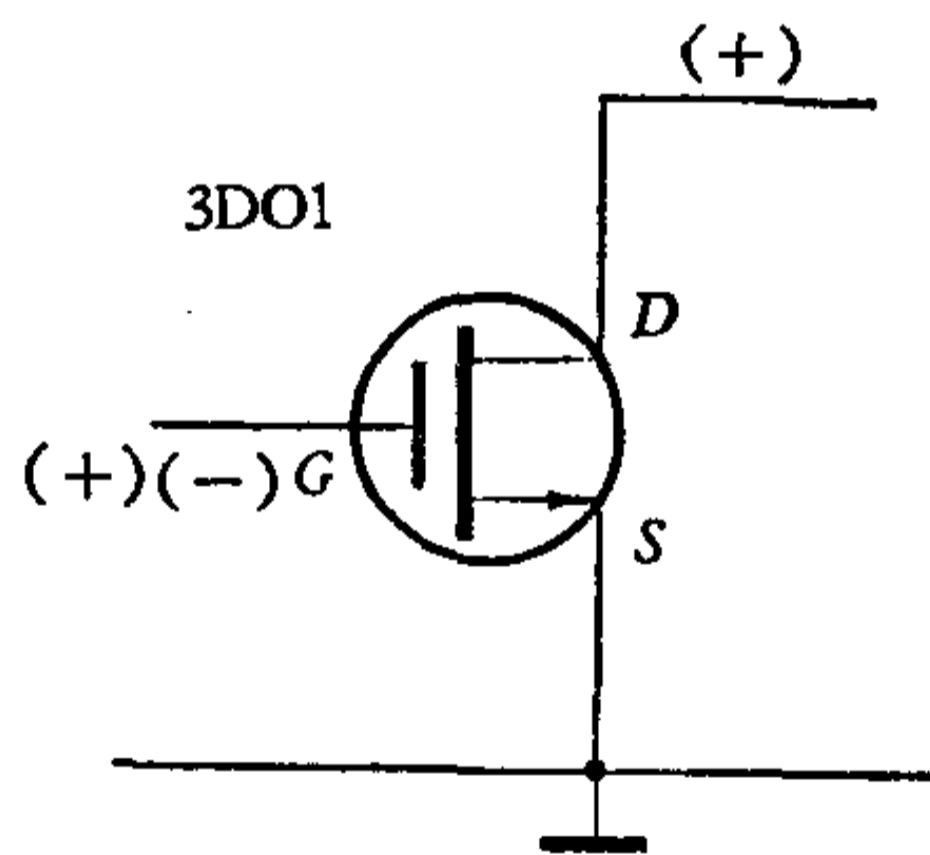


图 5-29

场效应管的高输入阻抗特点,使线路设计大为简化,象阻容耦合放大器级间阻抗匹配的问题,变得容易处理。同时场效应管的噪声低、动态范围大,这些都是它的优点。但是场效应管如果使用不当,容易损坏,工人师傅在实践中摸索出一套防止损坏管子的经验。这些是:

1. 电烙铁预先烧热,焊接场效应管时,把插头拔掉,避免因电烙铁接地不良损坏管子;
2. 接入电路时先接 D 、 S 后接 G ;
3. 使用的仪器设备,包括直流电源都必须接地良好,使用前用

起辉电压较低 (50 伏左右) 的氖泡检查仪器外壳及接地端, 氖泡应不亮才可使用; 4. 加接保护二极管, 如果场效应管用在

第一级小信号输入时, 在其栅极加接硅二极管 (如 2CP16) 如图 5-30, 这样当栅极电压超过二极管导通电压时, 二极管把 $G-S$ 短路, 从而保护了管子, 不被损坏。

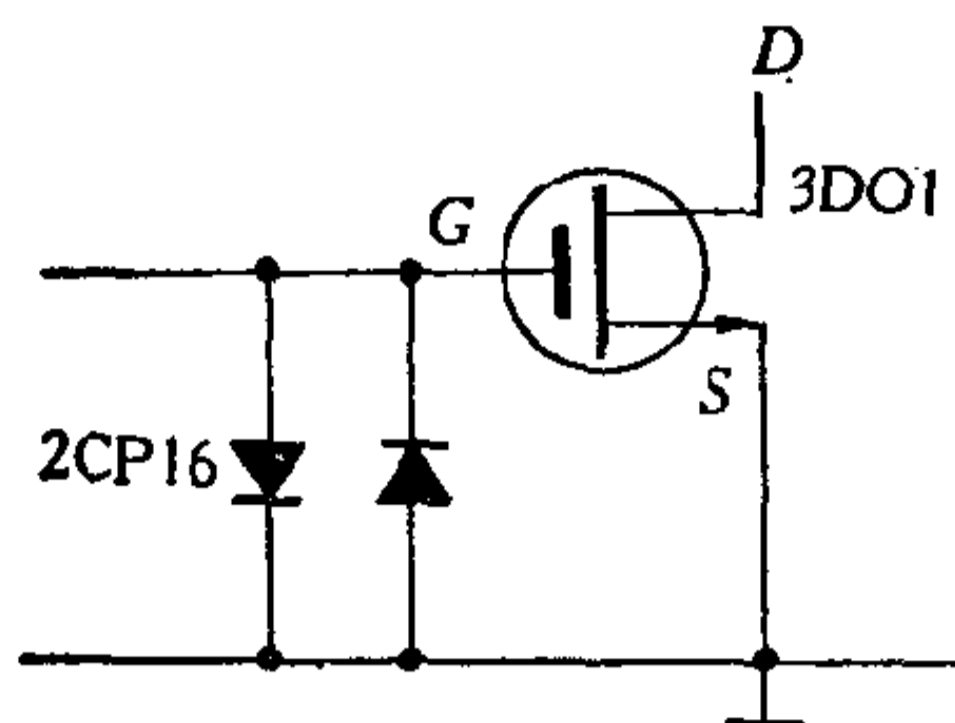


图 5-30

场效应管的损坏, 大多是输入端击穿。正常的 3DO1 系列管子用万用表 10 K 档测量 $G-S$, $G-D$, 表针都应不动。如果

发现表针偏转, 说明管子已坏。

3. RC 相移式振荡器

RC 相移振荡器实质上是具有正反馈的单级阻容耦合放大器 (频率可选择的)。

从前面 RC 桥式振荡器的讨论中, 我们已经知道这类振荡器的特点, 下面介绍一个实际使用的 RC 相移振荡线路, 它由晶体管 BG_1 和三节 RC 链式网络组成。

它的原理很简单, 经过晶体管放大后的信号相位差 180° , 三节 RC 共相移 180° , 因此反馈同相。满足相位条件, 幅度条件要求放大器有足够的增益来满足, 实践证明, 晶体管 BG_1 的 $\beta_{最小} \approx 45$ 才

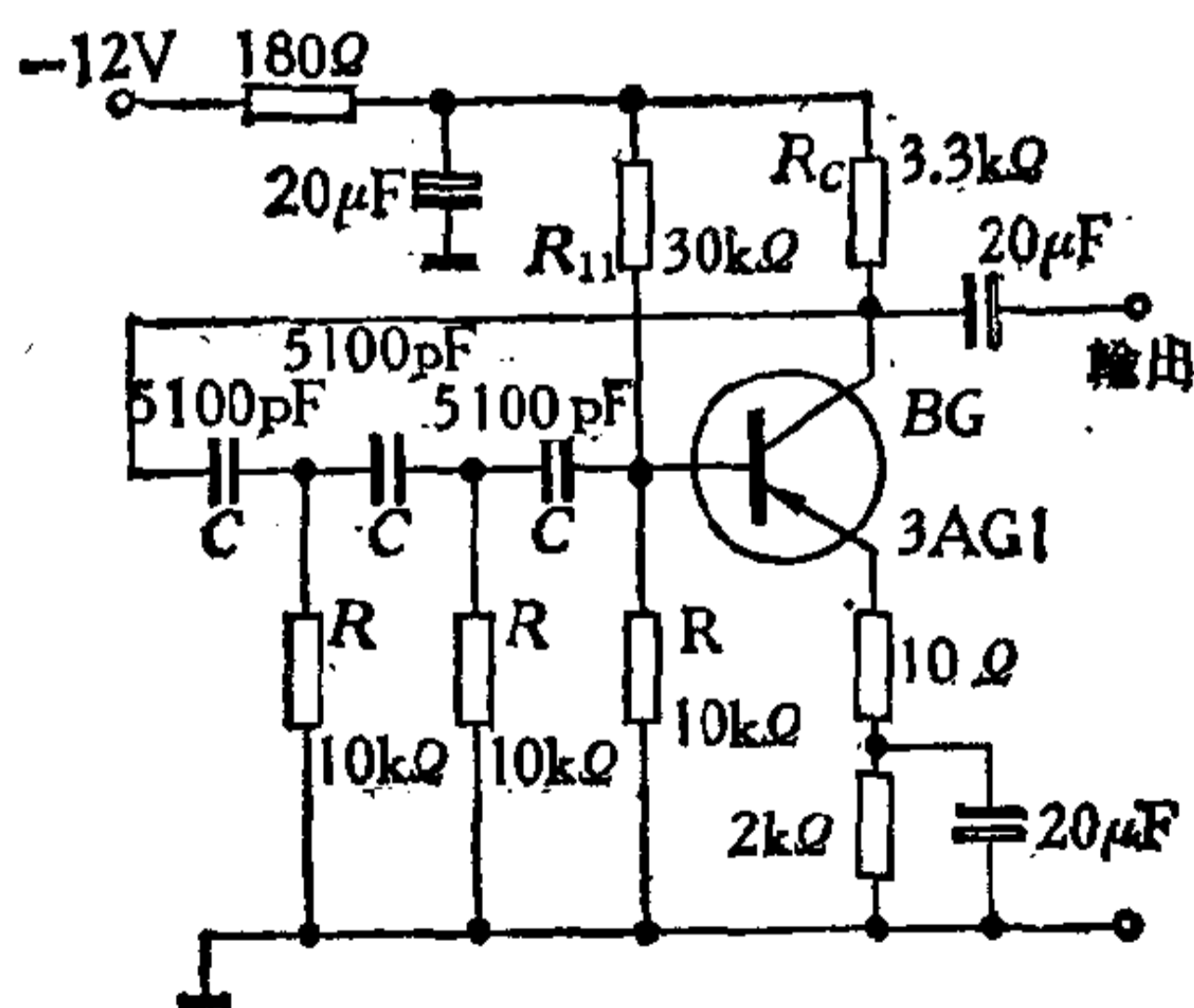


图 5-31 RC 相移振荡线路

起振，因此 RC 相移振荡器用的晶体管 β 要选高一些。振荡频率近似关系式为：

$$f \approx \frac{1}{15 \cdot 4CR}$$

选频网络中的任何一个 R 值改变时，振荡频率就要随着改变。因此有时用一个电位器代替 R 作为微调频率之用。

为什么用三节链式？我们能不能用两节呢？ RC 网络相移最多是 90° ，但这时幅度为 0，所以必须要用三节或更多的 RC 网络才能使在某一频率下反馈回来的电压能够满足相位条件。

下面是实际应用在晶体管测试仪器中的 RC 相移振荡器， BG_2 是一级射极输出器，避免负载变化对振荡线路的影响。

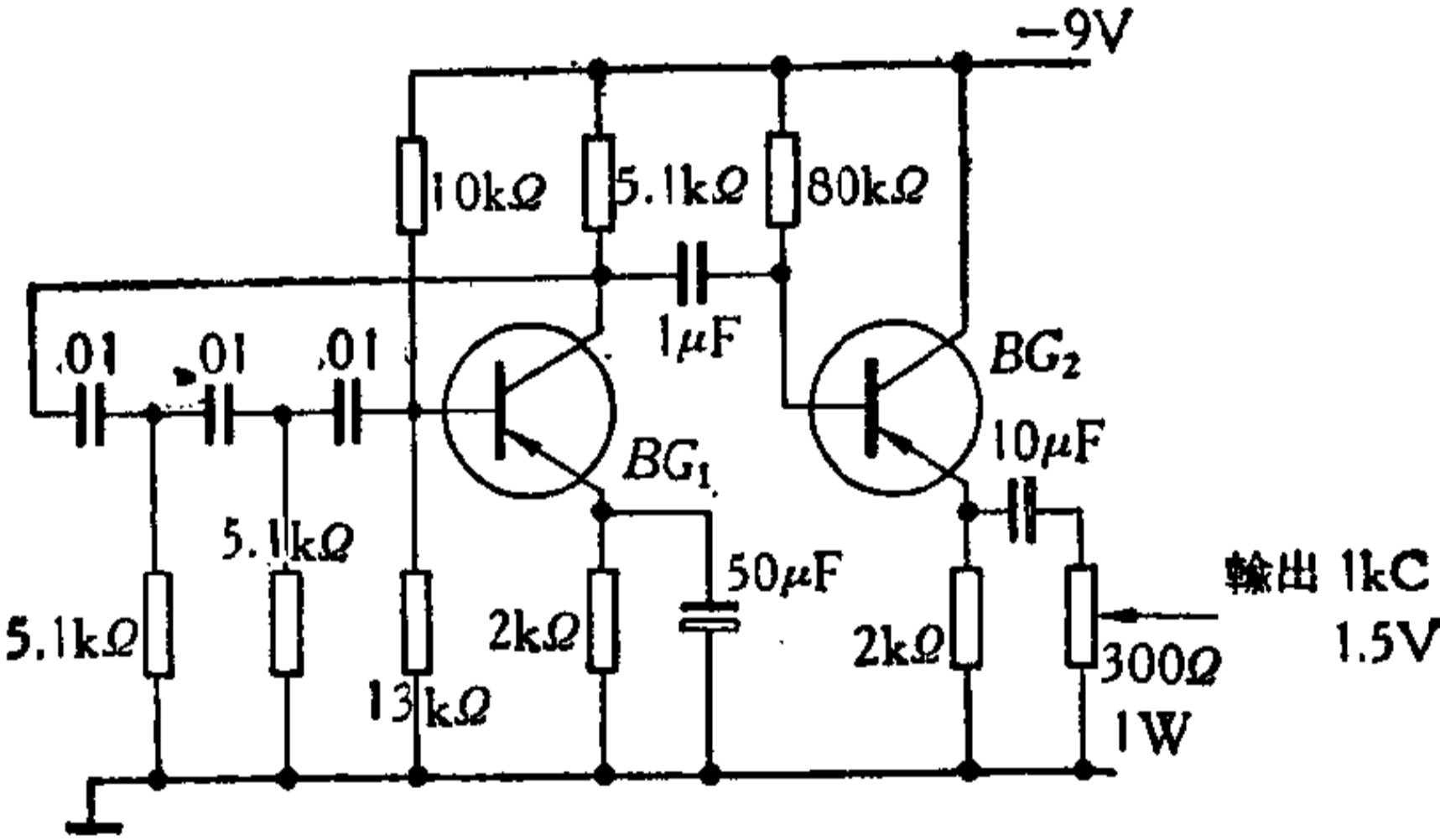


图 5-32 RC 相移振荡线路

“同世界上一切事物无不具有两重性（即对立统一规律）一样”， RC 相移振荡器虽然简单，但由于 RC 相移网络特性差，所以振荡出来的波形就差些。

另外一种 RC 相移振荡器如图 5-33 所示，与前述线路比较一下可以看出， RC 链式网络中 R 与 C 的位置互换一下，这一种线路常用来产生频率为数十千周/秒的正弦振荡。

由理论分析证明：

振荡频率 $f_0 \approx \frac{1}{2\pi RC} \sqrt{6 + 4 \frac{R}{R_c}}$

起振条件 $\beta \geq 29 + 23 \frac{R}{R_c} + 4 \left(\frac{R}{R_c}\right)^2$

常取 $\frac{R_c}{R} = 5$ 左右。这时要求晶体管 $\beta \geq 34$ ，通常 β 要取大些起振才容易。

从上面 RC 振荡器讨论中可以看到：它们都应用了具有选频特性的 RC 网络，还有一种也是由 RC 组成的双 T 选频

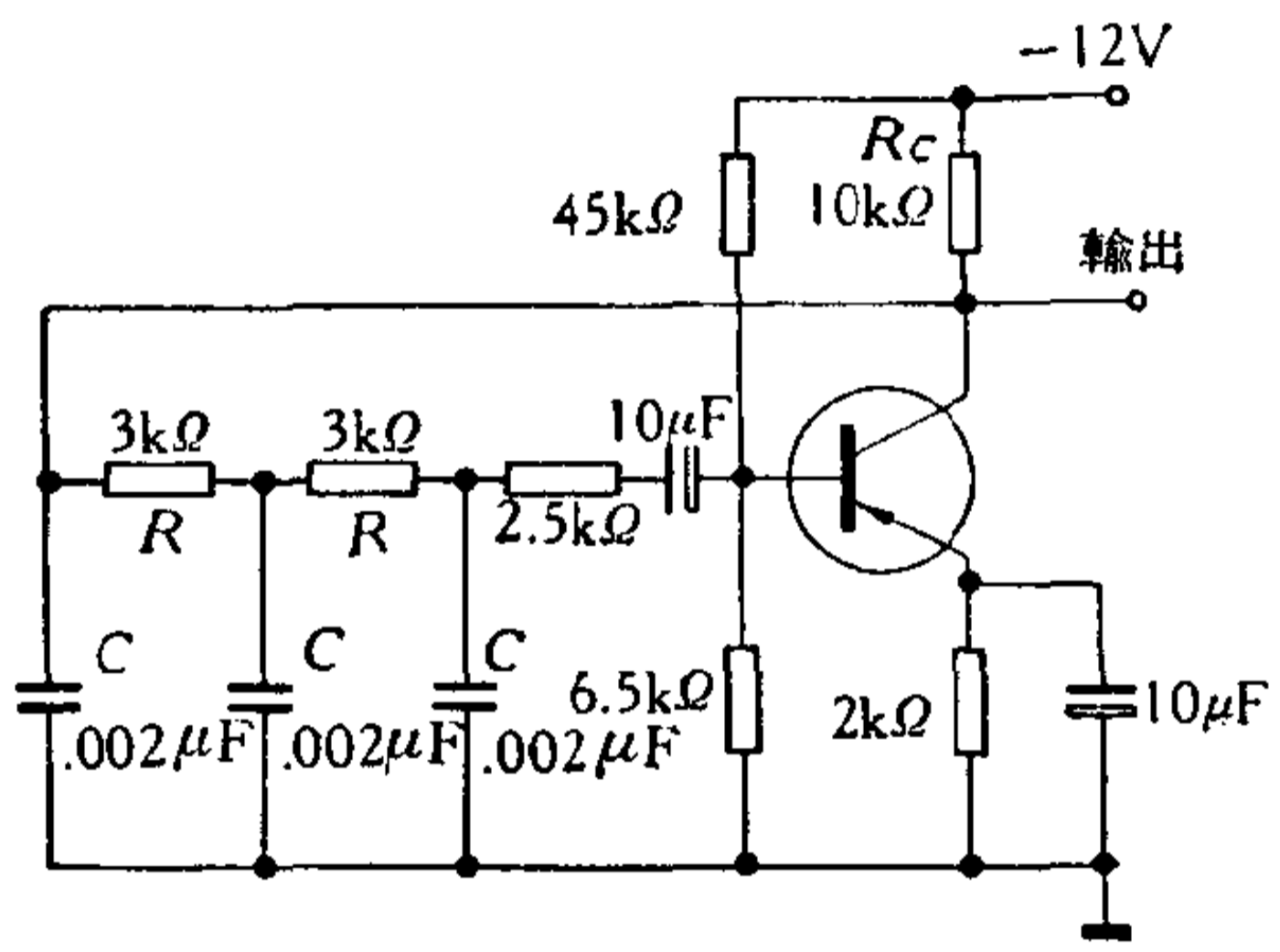


图 5-33 另一种 RC 相移振荡线路

网络，也可以和晶体管组成振荡器。这里不多赘述。通过实践我们将会得到更多的认识。

RC 振荡器和 LC 振荡器比较，有如下优点：1. 频率稳定；2. 可获得很低的频率，甚至可达到几秒一周，这对工业上应用有较大的意义；

3. 结构紧凑，轻巧，经济；4. f 正比于 $\frac{1}{RC}$ ，因此可以有 10:1 的大范围频率复盖。

“世界上的事情是复杂的，是由各方面的因素决定的。看问题要从各方面去看，不能只从单方面看。”桥式振荡器有独特的优点，可是为了满足相位条件，晶体管必须有两级，其次，放大器的输入阻抗和输出阻抗都应该足够大，比反馈网络的电阻大，以使选择性不受影响。因此第一级就采用复合管，也就是说三只管才能振荡，或者第一级就要采用场效应管。RC

相移振荡器通常只需要一个晶体管和选频网络相配合，因此比较经济方便，常用在轻便的测试设备和遥测系统中。

第六节 石英晶体振荡器

在近代电子设备中广泛应用着频率高度稳定的各种石英晶体振荡器。毛主席教导我们：“我们必须打破常规，尽量采用先进技术”。我国工人阶级对伟大领袖毛主席无限忠诚，对帝、修、反无比仇恨，遵循伟大领袖毛主席关于“自力更生”的教导，意气风发，斗志昂扬，“抓革命，促生产，促工作，促战备”，创造出各种频率稳定度极高的振荡器，其中石英晶体振荡器就是其中一个方面。

在频率稳定度要求较高的振荡器中，往往采用“石英晶体”来代替 LC 振荡回路。这是因为它较之 LC 回路来说：品质因数 (Q 值) 非常高，一般就有几万，甚至百万以上，而普通线圈只能几百，而且石英晶体受温度影响极小，甚至有的趋近于 0，振荡频率高度稳定。

常用“石英晶体”外貌如图 5-34 所示。

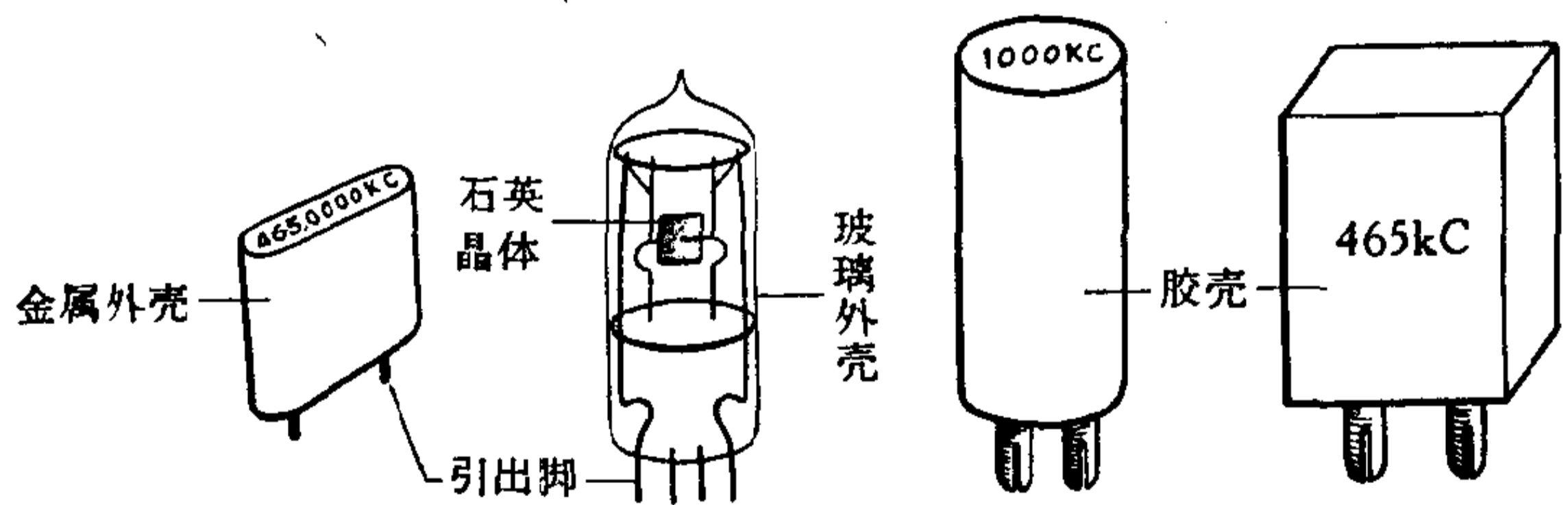


图 5-34 几种石英晶体外形图

石英晶体为什么能代替 LC 振荡回路呢？它的原理究竟是怎么回事呢？

毛主席教导我们：“不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”遵循毛主席的教导，下面先来了解石英晶体在电路中性质。

石英晶体在电路中的符号，如图 5-35(1)，中间是石英晶片，夹持在两个金属膜中间，从 1, 2 两端看过去相当于一个平板电容器，不工作时相当于一个电容 C_0 (图 5-35(2)) 石英片相当电容的介质，金属膜相当电容极板。

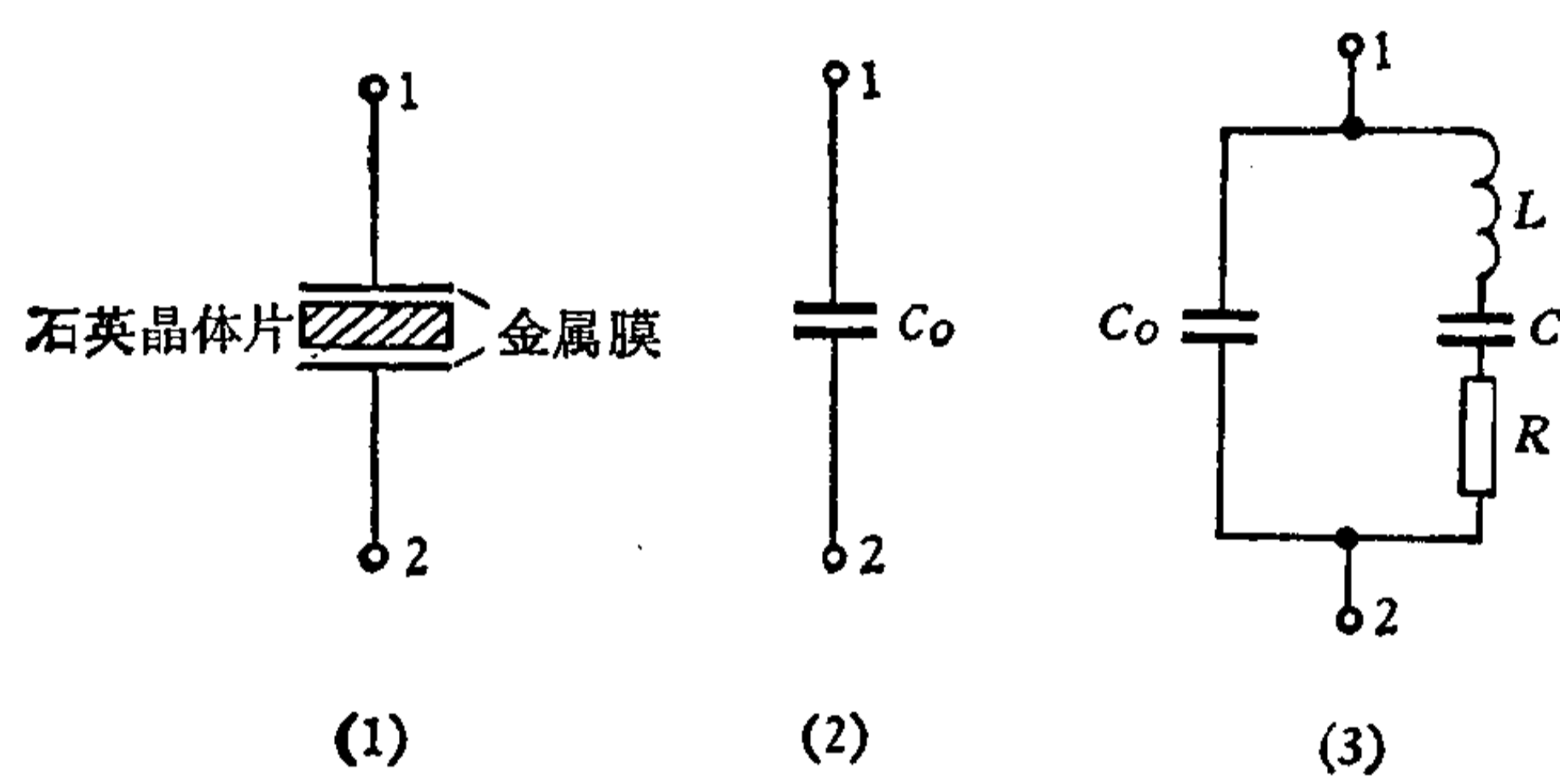


图 5-35 石英晶体等效电路

当工作时相当于一个振荡回路 (图 5-35(3)) 其固有频率都标明在石英晶体的外壳上，其等效回路中 R 、 L 、 C 的数值可以实验求出。通常 C 约 0.1 微微法； C_0 约 22 微微法； R 约几欧；电感 L 约百分之几亨到 100 亨。由此可见，晶体主要特点是它的电感很大，电容很小很小，所以 Q 值很高，这是一般 LC 回路所不能比拟的。

常用石英晶体振荡器的电路有三大类型。

第一种类型是把石英晶体当作电感接入电路中，称为石英晶体振荡器。如图 5-36 是利用 1 兆周石英晶体做成的电路，它的原理和我们前面讨论过的电容反馈式电路是一样的。

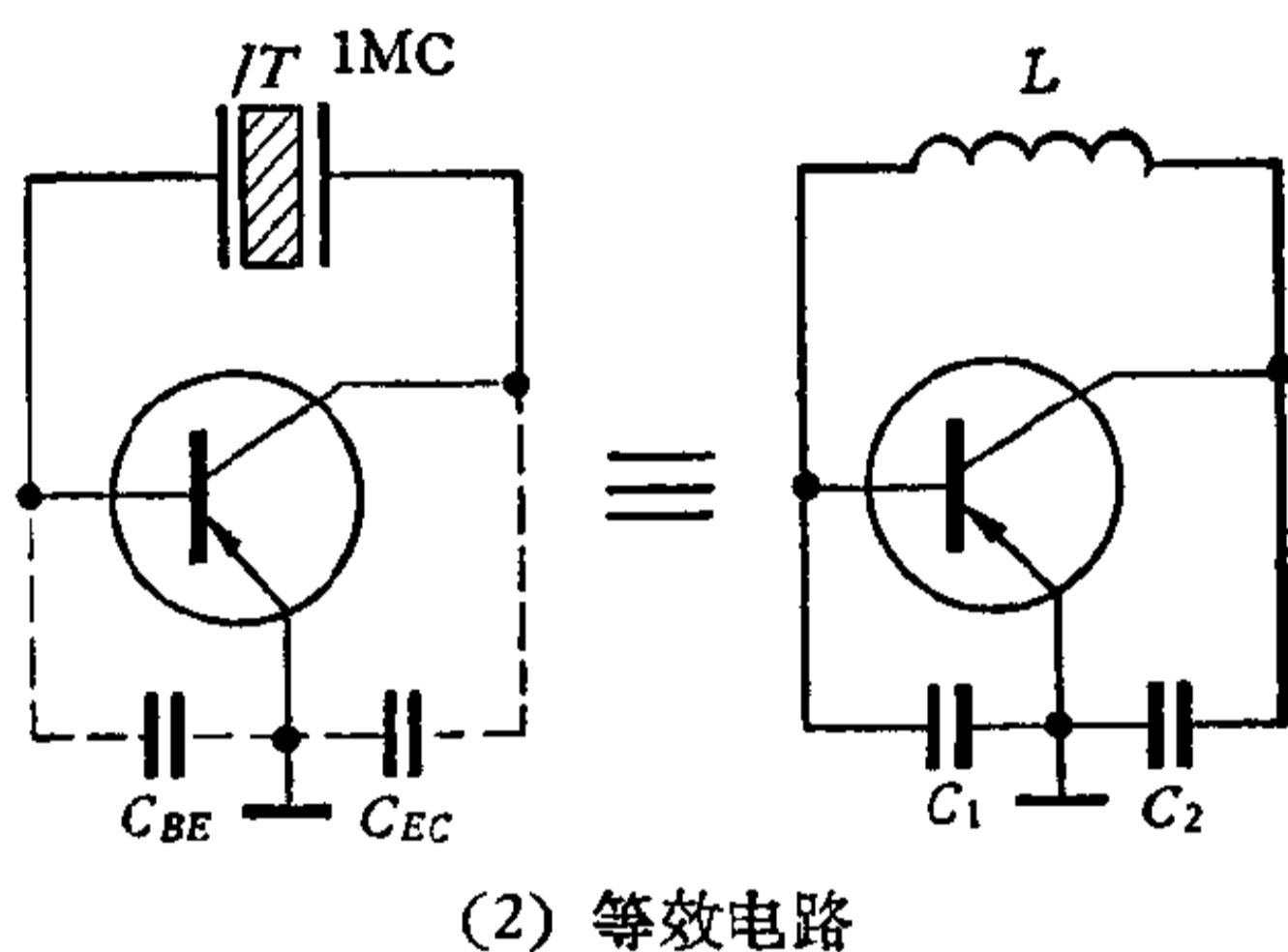
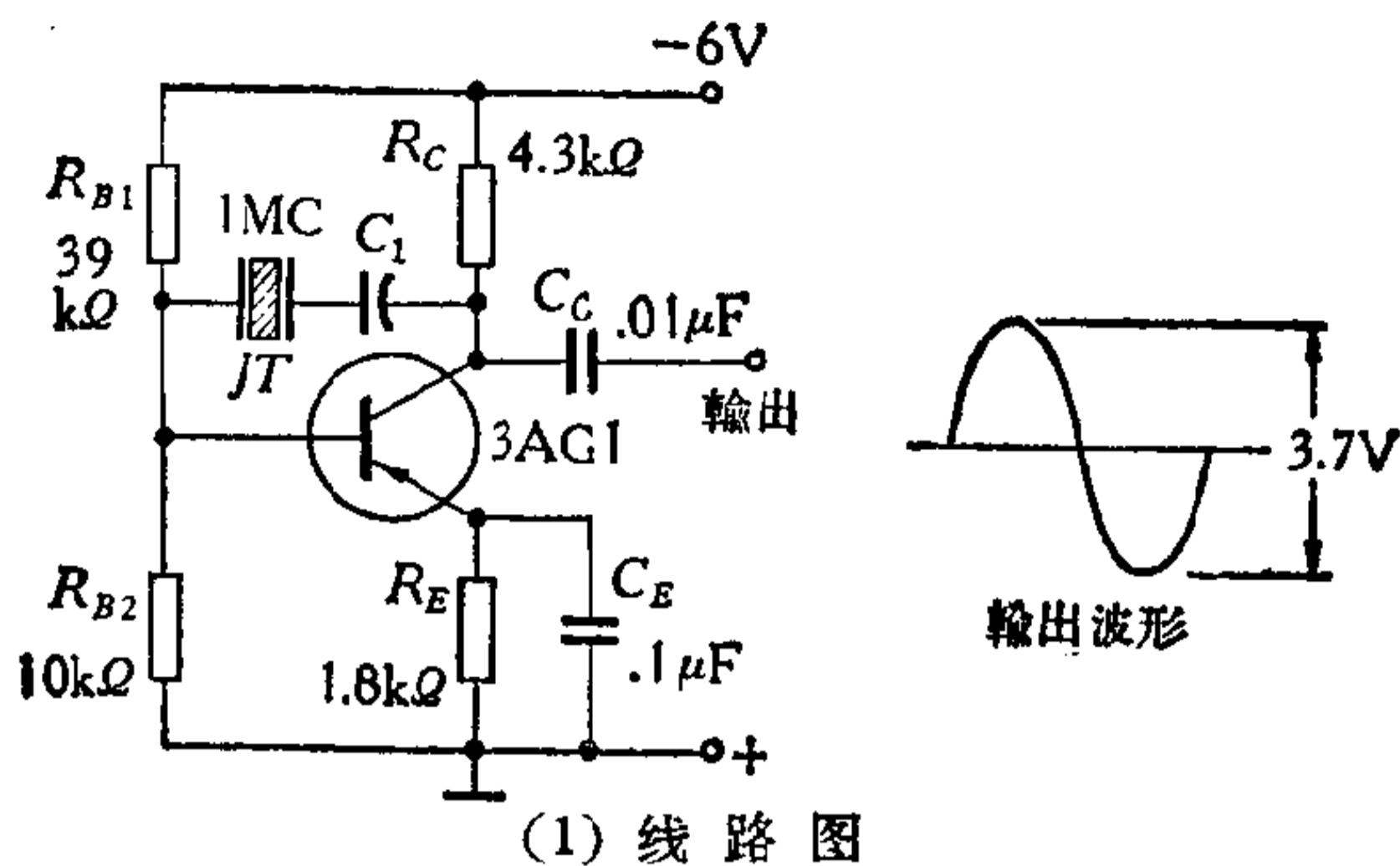


图 5-36 单管石英晶体振荡器

R_{B1} 、 R_{B2} 、 R_E 是偏置电阻， C_1 微调电容，可调节反馈量， C_C 和 C_E 是隔直流电容和旁路电容都是提供高频通路用的，在高频电路中相当于短路，因此高频等效电路可画成如图 5-36(2) 所示， JT 表示石英晶体，相当于电感， C_{BE} 、 C_{CE} 都是利用晶体管的极间电容，组成了电容反馈式振荡器。

由于利用晶体管极间电容，它们数值不大于 20 微微法，因此振荡频率要做得比

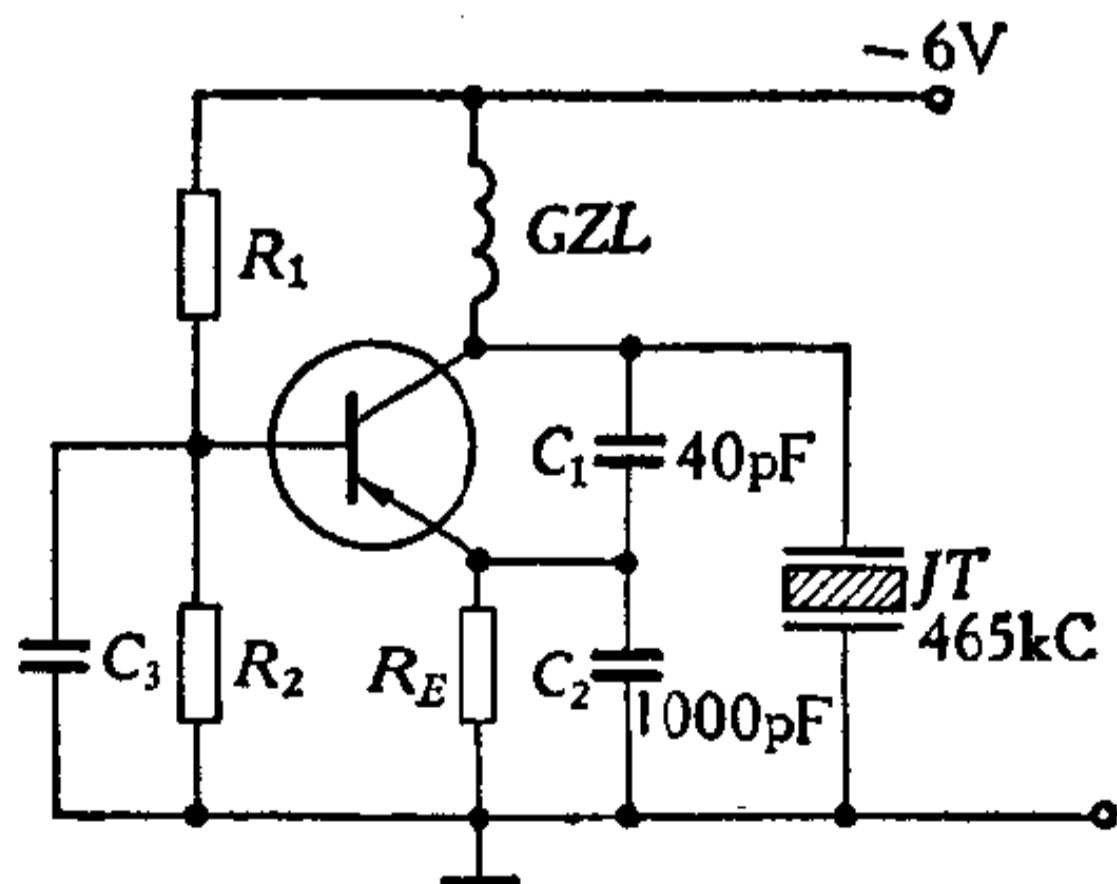


图 5-37

较高。频率低时就要外接电容器，我们试用 465 千周石英晶体时就要外接电容。如图 5-37。

反馈回路由电容 C_1 、 C_2 组成，它的数值要取得大一些，使得振荡频率接近于石英晶体的固有频率。

第二种类型是把石英晶体作为串联谐振元件来使用，接成的电路称为石英晶体控频振荡器。如图 5-38 是利用 465 千周(或者 1 兆周)石英晶体制成的电路。

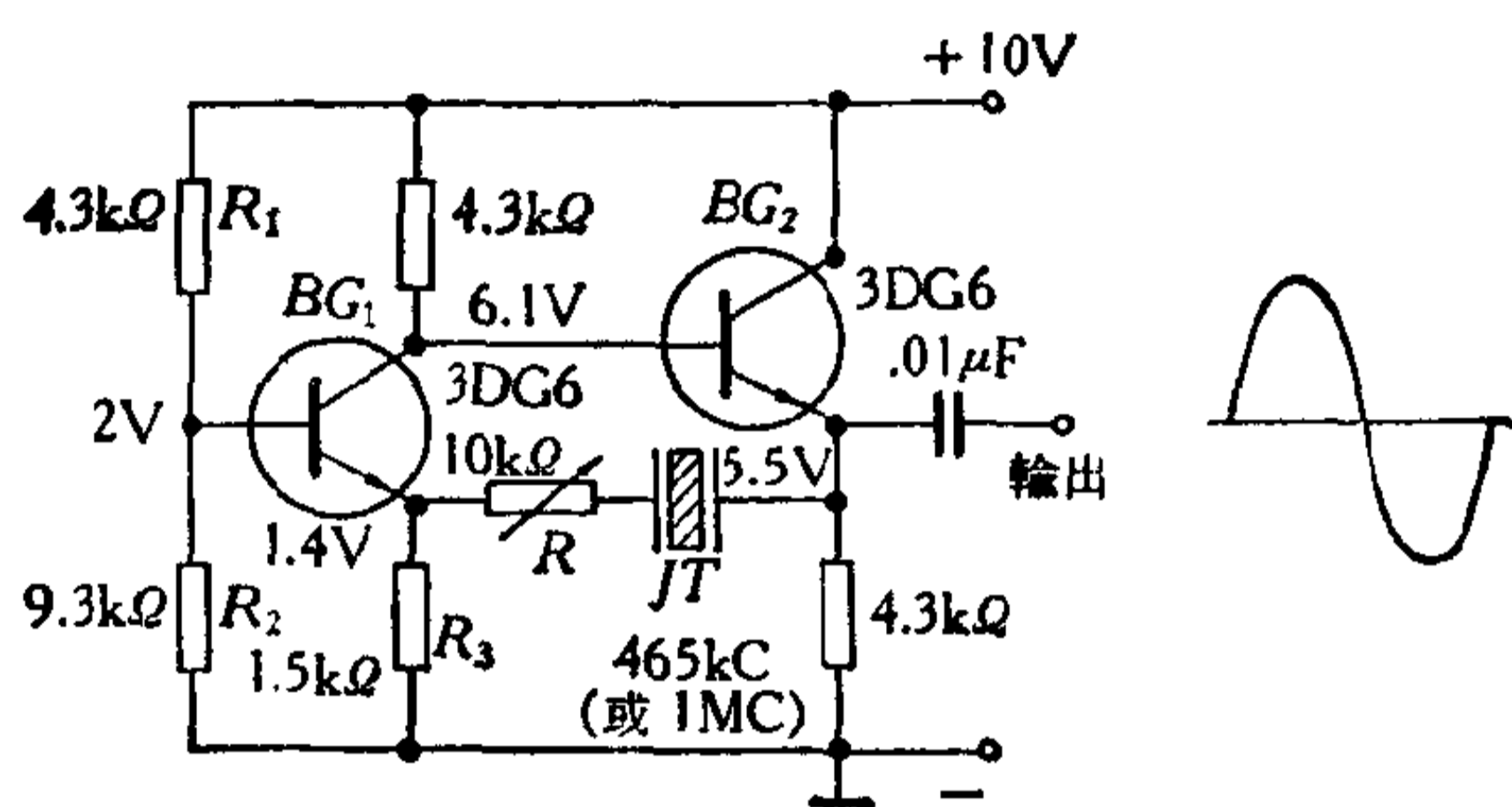


图 5-38 两管石英晶体振荡器

BG_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 构成一级晶体管放大器，如果石英晶体直接串入不起振荡，因为放大器输入阻抗很小，输出阻抗很大。所以接入 BG_2 射极输出器可以使 BG_1 输入同输出满足阻抗匹配， BG_2 射极低阻抗输出供给 BG_1 射极低阻抗输入，即能产生振荡。

这里石英晶体起着开关的作用，即只有当振荡频率等于石英晶体固有频率时才能通过它，才得到能量反馈。否则由于石英晶体呈现极大阻抗而使 BG_2 输出端与 BG_1 输入端接近开路状态。通过石英晶体的选频网络作用，故振荡器只工作于石英晶体的固有频率上。

调节电阻 R (10 千欧) 以调节反馈量的大小，反馈量太小将停振，反馈量太大波形将失真，或者得到近似于矩形波。

另一种石英晶体控频振荡器如图 5-39，图为共基极石英控频的电容反馈振荡电路，振荡回路和发射极之间串接进一块石英晶体，相当于一个开关，只有当振荡频率等于 465 千周石英固有频率时才通路，才有反馈，因而振荡。

这种石英晶体控频振荡器应用得比较广泛，工业中已经较多采用。如探伤仪振荡部分、石英钟……。

“我们必须学会全面地看问题，不但要看到事物的正面，也要看到它的反面。”石英晶体也有来源不易，制造复杂，造价较贵，结构脆弱，怕震动的缺点。

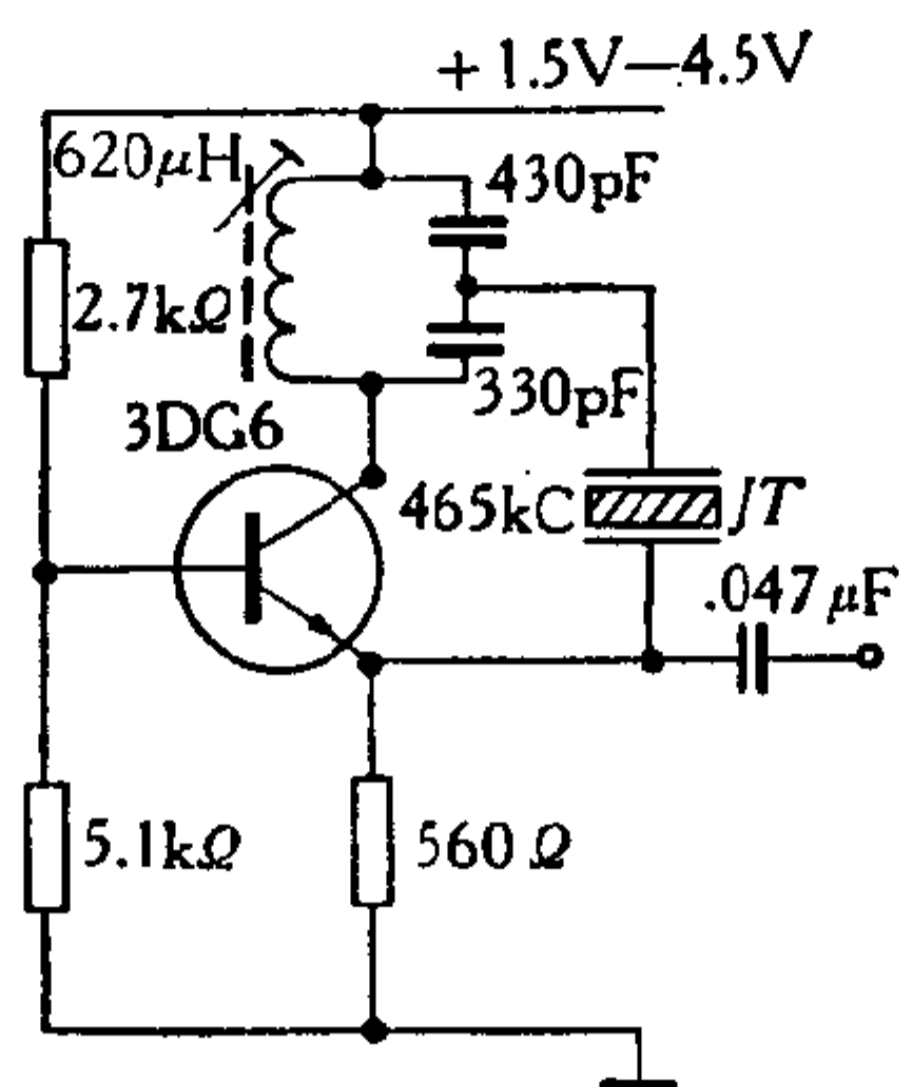


图 5-39 石英控频振荡线路

第七节 陶瓷滤波器控频振荡器

随着伟大祖国的社会主义革命与社会主义建设的飞速发展，对电子工业生产要求也越来越高，中国工人阶级按照毛主席关于“**人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进**”的教导，发扬艰苦奋斗，勤俭建国的精神，走自力更生的道路，在发展电子工业方面，创制了许多新型元件。高质量的陶瓷滤波器也是其中之一。

电容器和电感线圈的品质因数较低，因此稳定性很差，后来出现了石英晶体，稳定性大大提高，但石英晶体有上面讲的缺点，特别是结构脆弱怕震动，体积较大，因此与微小型化固体化发展不太适应。

陶瓷滤波器实质是一种机械滤波器，体积小，重量轻， Q

值高,稳定性好,又是非调节的,价格低,耐震动,对微型组合件及固体电路发展影响很大,可成为固体组件的一部分。

陶瓷滤波器可以广泛应用于电路中,组成振荡器,选择性放大器等等。目前陶瓷滤波器有二极性、三极性、多极性之分。它的外型结构有好多种,也在不断发展,常见的有片状,圆盘状。图 5-40 是几种陶瓷滤波器的外貌,很象小型电介电容器。

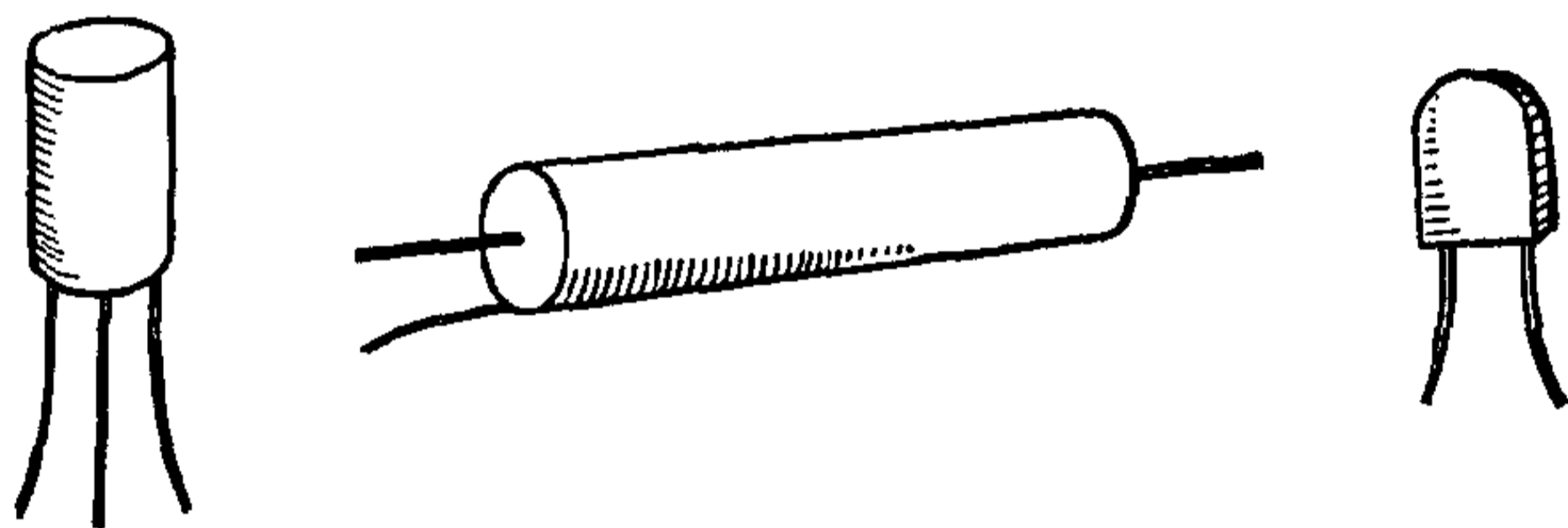


图 5-40 陶瓷滤波器外形图

陶瓷滤波器的原理实际是利用陶瓷压电材料的压电效应。如图 5-41。



图 5-41

电信号输入后,通过机电换能转换成机械振动,由始端传到终端,再由机电换能还原成电,由于机械振动对频率响应很尖锐,所以 Q 值很高。

陶瓷滤波器的一种结构如图 5-42 是二极性。陶瓷圆形薄片夹持在二个金属片中间。当输入信号频率为 f_0 时,陶瓷滤波器上出现与其本身固有频率相等的信号电压,因而产生机械振动,类似于振荡回路,如图 5-42(3)。

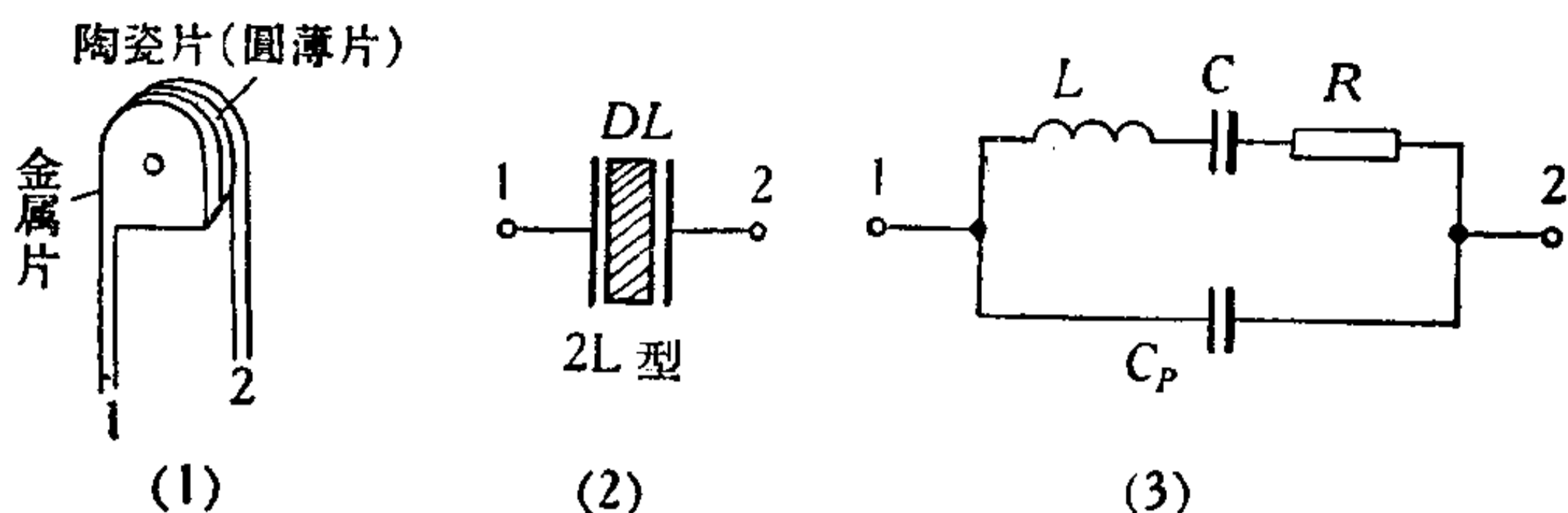


图 5-42 二极性陶瓷滤波器及其等效电路

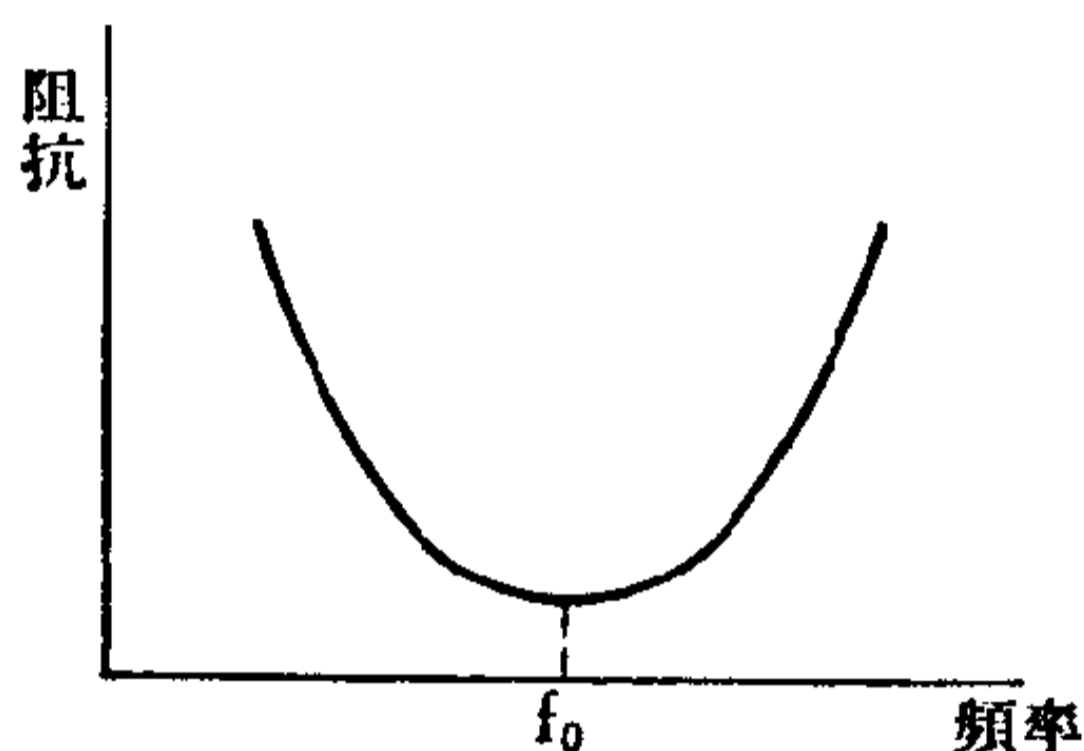


图 5-43 陶瓷滤波器的阻抗特性

2L 型中, 例如 2L465A 型号的陶瓷滤波器 $f_0 = 465$ 千周 ± 2 千周, 谐振阻抗不大于 36 欧, 选择性 465 千周偏离 ± 10 千周时大于 6 分贝。图 5-42 (2) 是它的电路符号, (3) 是它的等效电路。

图 5-44 是三极性的一种结构, (2) 是它的电路符号, 图 5-44(3) 是它相应的等效振荡回路和简化后的振荡回路。与

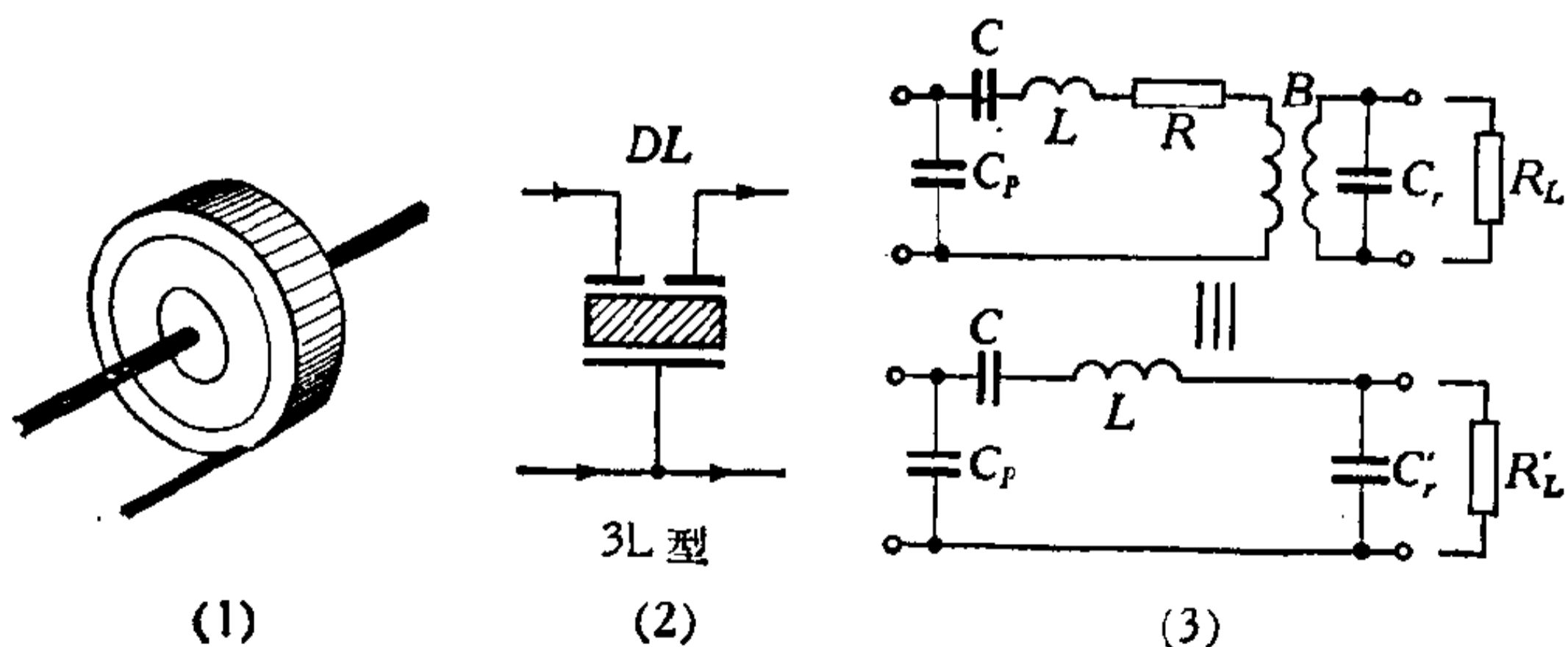


图 5-44 三极性陶瓷滤波器及其等效电路

器还应用在中频扫频仪及其他设备中。

第八节 几个脉冲振荡线路

前面介绍的都是正弦波振荡电路,输出为连续的正弦波。在很多场合,例如:在礼花焰火自动施放中,在高频高压去静电中,在低耗电指示灯中,在电子手表,半导体钟,显示仪器供电线路中,也用到自激振荡线路,但它们对输出的波形要求不严格,这里的要求主要是线路简单,效率高,经济。在这一节中,就是要介绍几个符合这些要求的脉冲振荡线路。

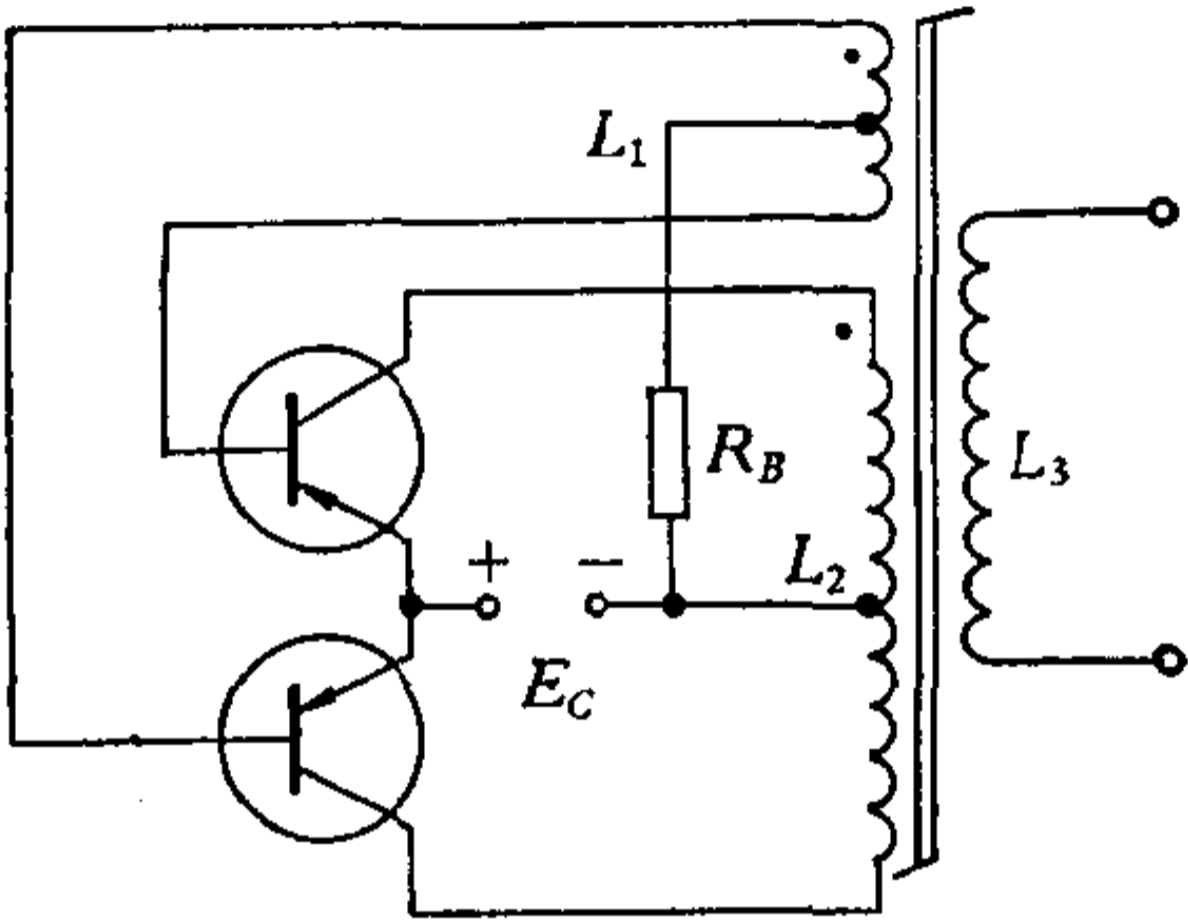


图 5-47 高频高压振荡线路

1. 高频高压发生器

原理图参见图 5-47, 图中二个三极管组成变压器耦合振荡器, 变压器 L_1 , L_2 两线圈的极性保证了构成正反馈。 BG_1 , BG_2 在线路中如同开关一样, 在 L_2 两端能得到近似的矩形波经 L_3 升压后, 可得到高电压输出, L_2 的输出电压可以加到放电间隙上产生火花点燃节日礼花, 也可以加到放电针头上产生放电去除静电, 还可以经过整流滤波得到直流高压, 从而构成所谓“直流电压变换器”。

如图 5-47 中, 选 BG_1 BG_2 为 3AD30C, $R_B = 500$ 欧, L_1 用 $\phi 0.31$ 漆包线绕 2×5 匝, L_2 用 $\phi 1.2$ 漆包线绕 2×20 匝, L_3 用 $\phi 0.16$ 漆包线绕 6000 匝, 铁芯选用 14×14 铁氧体

磁芯， E_c 选用 12—24 伏，这样，在 L_3 两端可得到一万伏左右的电压，能使 10—30 毫米左右的空气隙击穿放电，流过电源 E_c 的电流大约为 1—4 安。这样的线路已经用于礼花点火和去静电设备中。

图 5-48 中，可得到多种电压，可用作示波器，扫频仪等设备中的供电装置，铁芯采用铁氧体 $EE\ 12 \times 12$ ，线圈线径可根据负载要求具体选定。

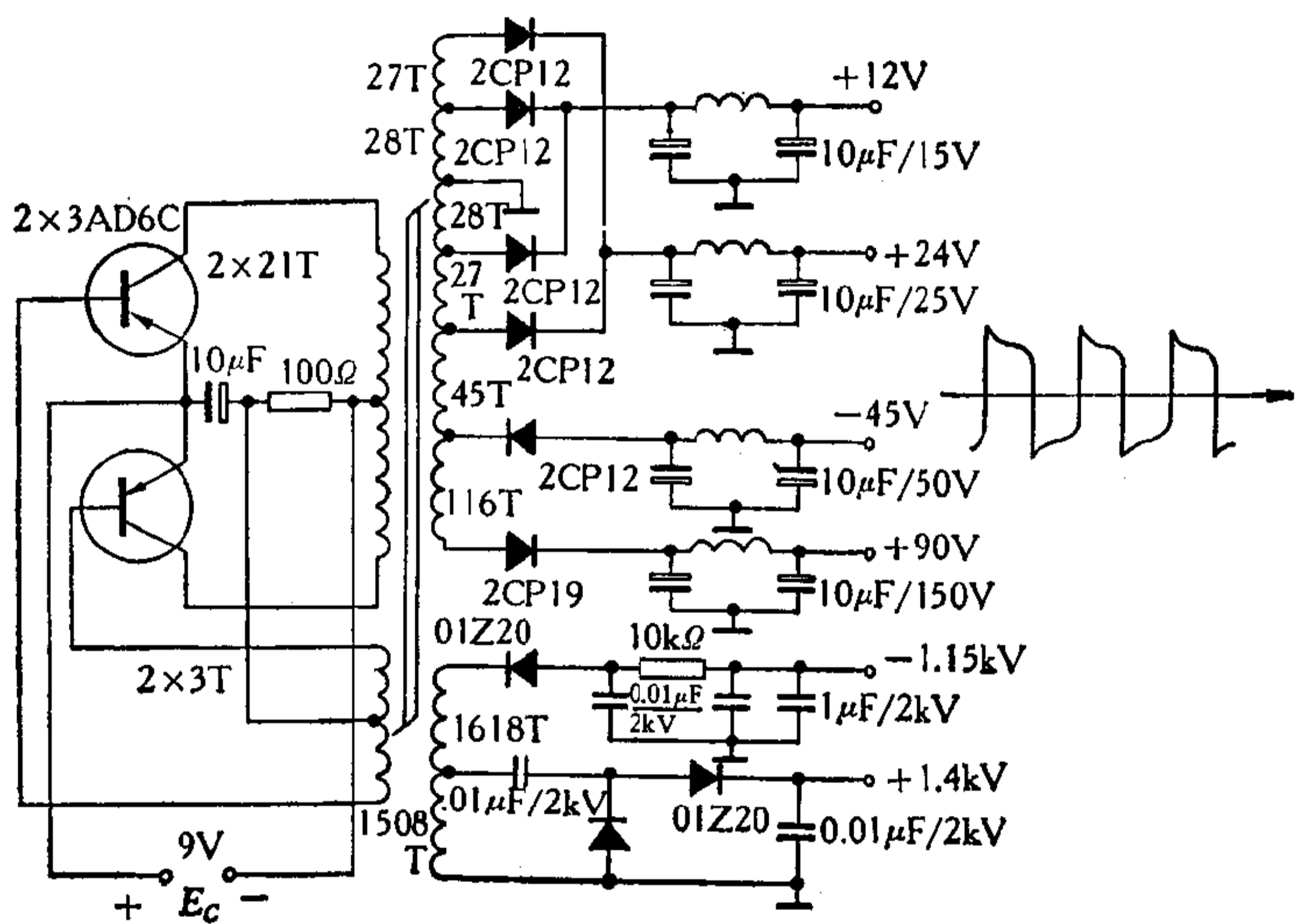


图 5-48 直流电压变换器一例

2. 低功耗指示灯

在采用电池作电源的晶体管设备和收音机中，一般不按装指示灯，因目前常用作为指示灯的钨丝型小电珠，耗电量都较大，这样会降低电池使用寿命。如图 5-49 (1)所示，采用振荡器及高频升压，来点燃氖管作为指示灯或其它用途。 L_2 、 L_3 和 BG 组成变压器耦合振荡器， L_1 是高频升压线圈，把振荡

电压升至 60 伏以上，使氖管点燃，这一线路采用 6 伏电源。耗电为 5 毫安左右，若 R_1 用得小些，氖管可以亮些，但电流要增加。

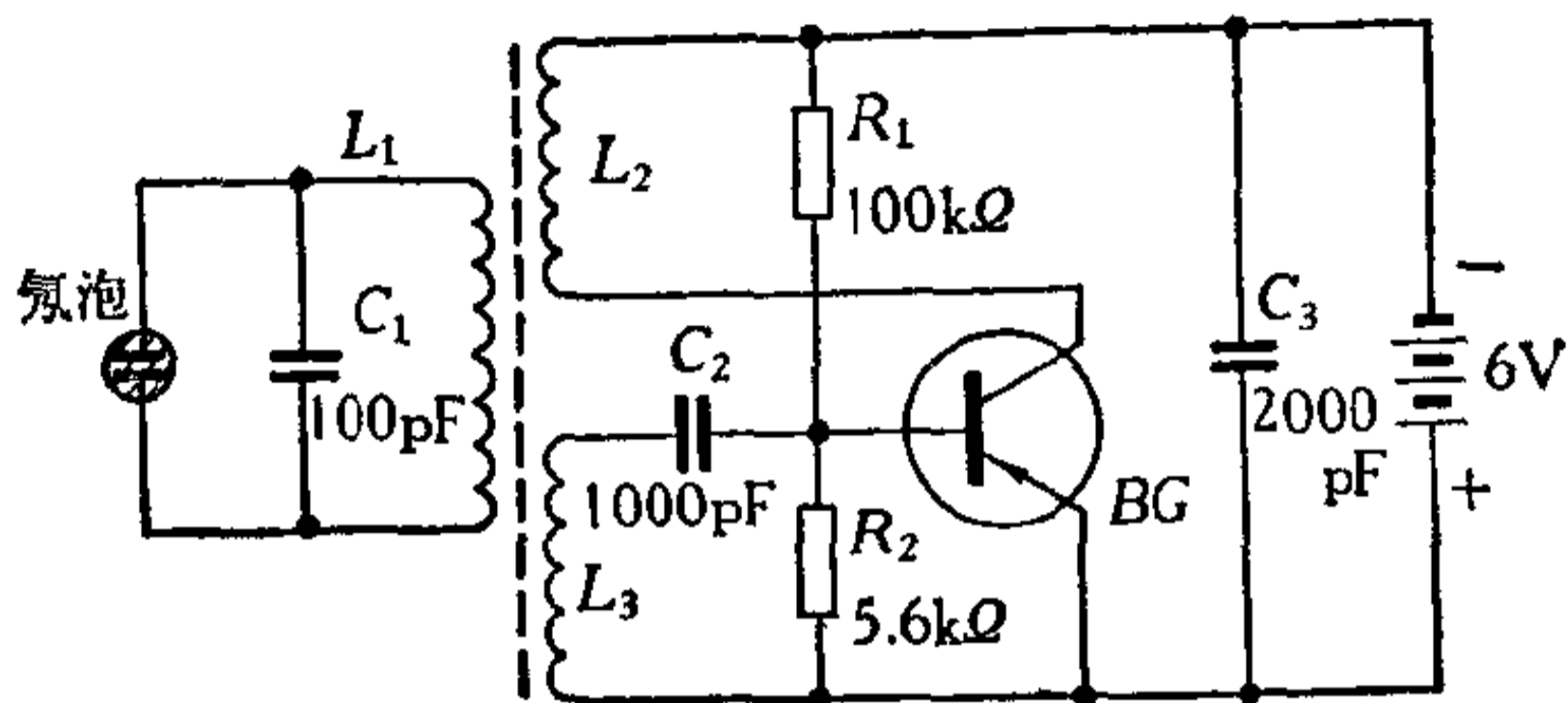


图 5-49(1) 低耗电指示灯

元件选择：

振荡线圈和升压线圈的制造如图 4-49(2) 所示。

晶体管 BG 可以任意型号的高频管，其质量要求不高。

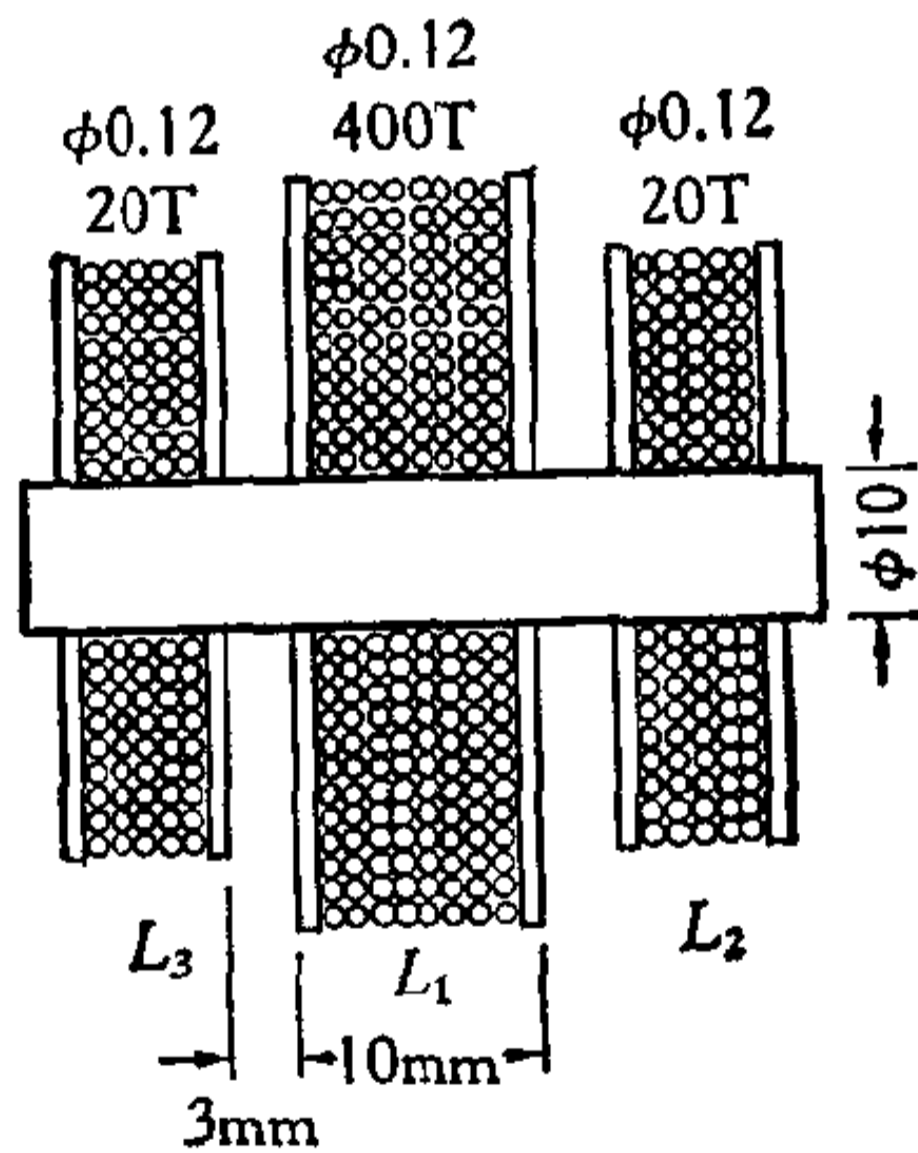


图 5 49(2)

3. 半导体钟

半导体钟是近年来振荡技术在钟表工业上的新应用。

半导体管钟是采用晶体三极管等电子元件所构成的共发

射极开关电路。周期性地使电池中的电能转换成磁能，并与固定在摆轮上的磁钢相互作用，使摆轮周而复始地摆动。参见图 5-50，在晶体管钟摆轮内侧上各放一块磁钢，并使二磁钢极性相反。这样在磁钢摆轮片与摆轴之间构成了一个磁回路，在摆轮片上的两块磁钢之间就有磁力线贯穿着。当摆轮向某一个方向转动而掠过线圈时，线圈切割磁钢间的磁力线，因此在线圈 L_1 中就产生感应电压，当线圈 L_1 中感应电压如图 5-50 所示时，就有偏流 I_B ，使晶体管导通，于是在线圈 L_2 、电池、晶体管的发射极、集电极这一回路中，就有被放大的电流 I_C 流通。 I_C 在线圈中形成磁场，它的极性与磁钢的极性相同，就推斥摆轮继续转动，在一定的电池电压下，摆幅可以始终保持一定的角度。

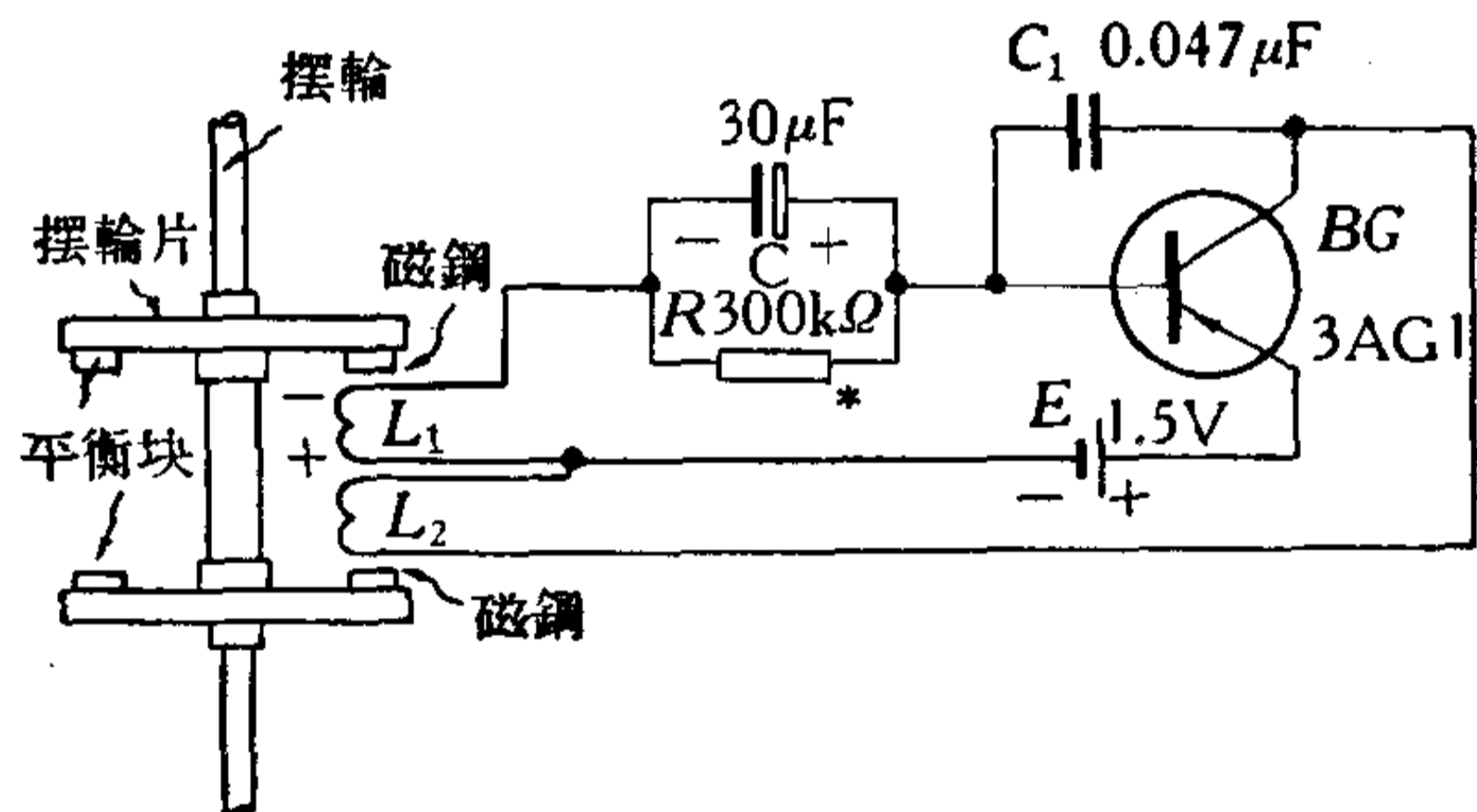


图 5-50 半导体钟振荡线路

晶体管在电路中起着开关作用。因此对管子要求并不高。一般用 3AG1, 3AX31, 3AX71, 3AX72 都能工作，管子 β 值 100—150 为宜。采用高频管子主要因为高频管截止频率高，容易起振。

电介电容 C 是旁路电容，它的电容量应有足够大，一般选用 10—30 微法就可以了。

金属膜电容 C_1 的作用是消除电路中不必要的高频寄生

振荡, 由于 L_1L_2 两个线圈耦合得很紧, 容易产生自激高频振荡, 使线圈 L_2 有高频电流流过, 引起很强的高频磁场, 大大减弱了对磁钢的推力, 使摆轮不能工作, 而且还大量消耗电能, 这只电容主要作用就是消除这种有害的寄生振荡。

电阻 R 是晶体管的偏流电阻, 阻值小了偏流增大, 耗电过多。

线圈 L_1 、 L_2 采用高强度漆包线, 同向二根并绕 1800 匝, L_1 直径 0.03 毫米, L_2 直径为 0.05 毫米。

电子手表的基本工作原理也与此类似。

最后, 我们介绍一架探测自来水管的设备。这是由二只振荡器同时工作的, 振荡出来的讯号, 同时加到二极管 2AP10。在平时这二只振荡器的振荡频率基本一致, 故其频率之差为零, 所以在耳机内无讯号声音, 当发现水管时, 第一级振荡器线圈的电感量 (探头) 发生变化, 这样经过 2AP10 检波作用, 便产生差拍讯号, 经 3AX71 放大后, 在耳机内便听到声音。

第一级振荡器的线圈即为探头, 其尺寸为 17 厘米 \times 17 厘米, 共 25 圈, 以 12.5 圈为中心抽头。该设备的原理线路如图 5-51 所示。

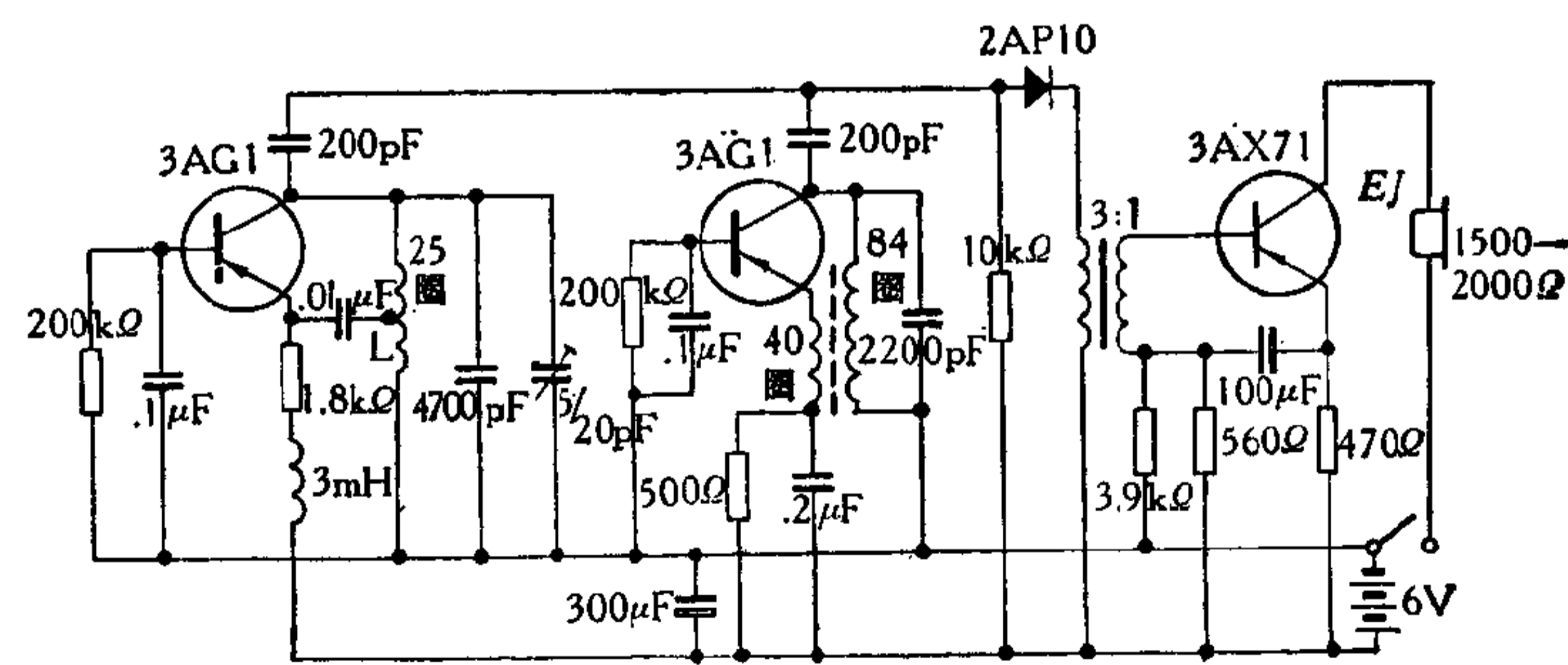


图 5-51 探测自来水管设备的原理图

本章小结

1. 本章讨论的 LC 、 RC 及利用晶体、陶瓷滤波器等组成的自激振荡器,都是用来产生连续的正弦波。其中 RC 振荡器都用在低频,其余几种一般使用在频率较高的场合。

2. 自激振荡器都要同时满足相位条件和幅度条件,才能产生,维持连续不断的振荡。相位条件就是要满足正反馈,幅度条件就是要满足反馈到输入端的讯号应不小于前一次的讯号。

3. LC 振荡线路有变压器反馈,电感反馈,电容反馈三种; RC 振荡线路列举了桥式,相移式二种,另外尚有石英晶体和陶瓷滤波器振荡线路,这些都是正弦振荡器。本章中还提到非正弦振荡线路(图 5-47, 5-48, 5-50)。

4. 本章中提到的场效应晶体管,陶瓷滤波器是新型的电子器材,不但在振荡线路中,而且在其它线路中都能应用。

5. 振荡技术在工业中的应用是十分广泛的,这里举的例子只是在目前应用中极小的部分,供大家参考。

附录一 关于晶体管电路中电流和电压方向及其正负值的规定

一、电路中的电正流方向

从辩证唯物主义的观点看来，一切物质运动形式都包含着矛盾。电流是物质的一种运动形式。晶体管的电流是由作用在各个极上的电位差之间的矛盾通过晶体管本身内部结构的矛盾特殊性而引起的。

对于 p-n-p 型晶体管来说，作用在基极 B 上的电位比发射极低(负)，作用在集电极 C 上的电位更低，根据电流从高位流向低电位的规律来分析，电流是从发射极流入，从基极和集电极流出，如图 1 所示。

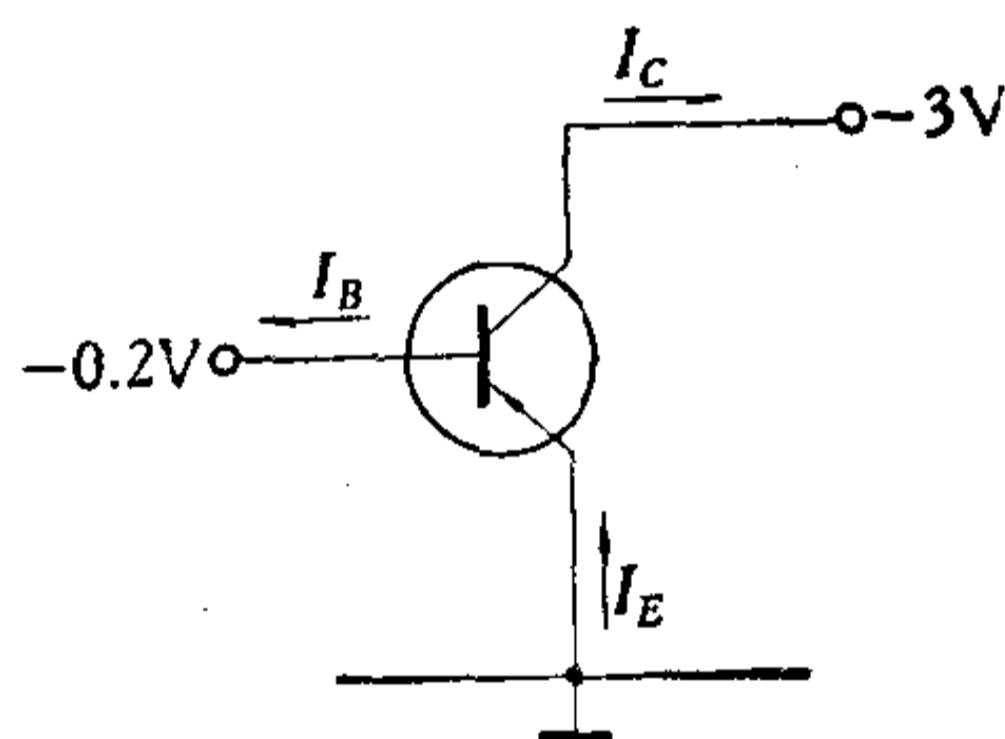


图 1

对于 n-p-n 型晶体管来说，作用在基极 B 上的电位比发射极为高(正)，作用在集电极 C 上的电位更高，正好和前者相反，所以电流是从基极和集电极流入，从发射极流出，如图 2 所示。

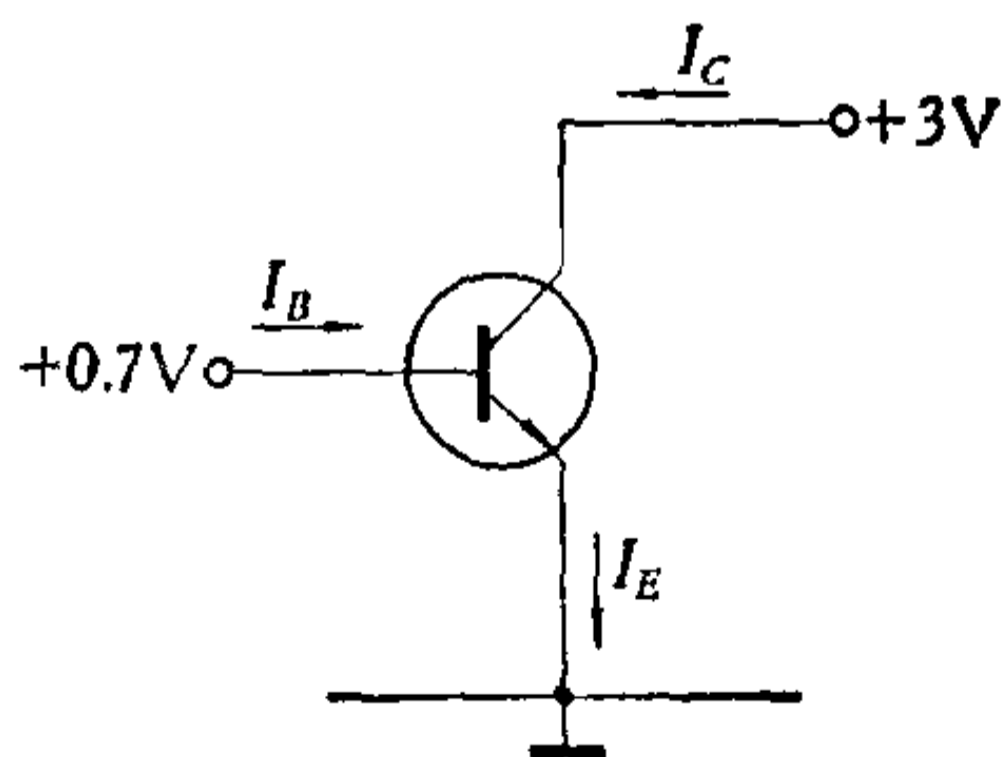


图 2

这些都是晶体管电路中电流的实际流向，称为“实际正方向”。我们在实践中也总是希

望按照电路中电流的实际正方向来研究、分析和认识问题。但在有些时候,为了某种方便,我们也可以主观地假定一个电流的正方向(称为“假定正方向”),例如当某一电路的实际电流流向尚未确定时,为了便于分析,先主观地给它一个“假定正方向”;又如电路中的电流流向并不固定(如交流电),在分析时也要给它一个“假定正方向”;有时在晶体管电路中为了使p-n-p 和 n-p-n 二种不同型的管子能统一图表、公式、特性曲线和分析方法,或者为了某种分析的方便,人为地规定一些假定正方向。若“假定正方向”和“实际正方向”符合,则电流为正电流,反之为负电流。

如果在研究晶体管的电流时,我们以各极电流均流进晶体管为电流的“假定正方向”(如图 3 所示),那末,对于 p-n-p 型晶体管来说,标出的 I_C , I_B 电流值就多一个负号,这个负号表示了电流“实际正方向”和“假定正方向”相反。

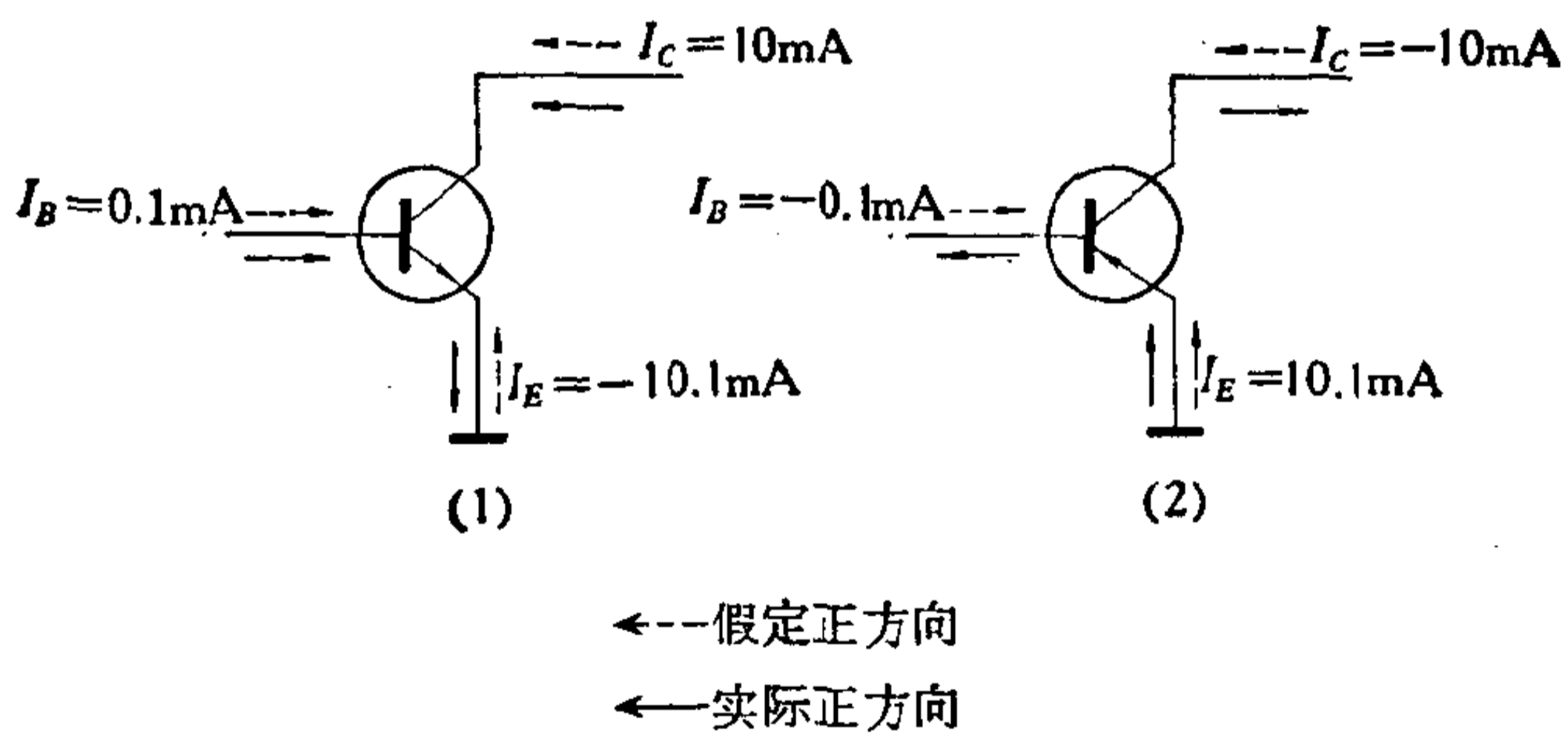


图 3

有些晶体管手册和产品目录的特性曲线和图表就是按照图 3 的“假定方向”列出的,所以对于 p-n-p 型晶体管来说 I_C 和 I_B 是负值, I_E 是正值,但对 n-p-n 型晶体管来说 I_C 和 I_B 是正值,而 I_E 是负值。

二、电路中的电压正方向

上述“电流”正方向的道理同样适用于“电压”。“电压”又称“电位差”，它总是针对电路中某二个点来说的，所以通常采用二个字的下标来表示二点间的电压。如以 u_{AB} 表示 A 、 B 二点间的“电压”， u_{CD} 表示 C 、 D 二点间的“电压”，下标的第二个字表示参考点，譬如 u_{AB} 就是以 B 点为基点（即参考点）时 A 点对于 B 点相比较的电位。这样 u_{AB} 和 u_{BA} 虽然都表示 A 、 B 二点之间的“电位”，但由于它们的参考点不同，所以二者数值相同而正负相反。这就是我们要讨论的“电压正方向”问题。

这个问题就好比水的沸点温度比冰点温度高（正） 100°C 和水的冰点温度比沸点温度低（负） 100°C 一样，是同一事物的二种阐述方法。

电压的“实际正方向”是从“高电位点”指向“低电位点”，如果我们选用的参考点是“低电位点”，那么这个“假定正方向”就和“实际正方向”相符。

图 4 所示是一节电压为 1.5 伏的干电池， A 点为正极， B 点为负极。

u_{AB} 就是电压的“实际正方向”，即 $u_{AB} = 1.5$ 伏，如果我们以 A 点为参考点，那么 $u_{BA} = -1.5$ 伏，这里的负号就反映了“假定正方向”与“实际正方向”相反。我们说，不论是 $u_{AB} = 1.5$ 伏（“假定正方向”和“实际正方向”相同），或 $u_{BA} = -1.5$ 伏（“假定正方向”和“实际正方向”相反），它只是同一事物的两种表示方法。

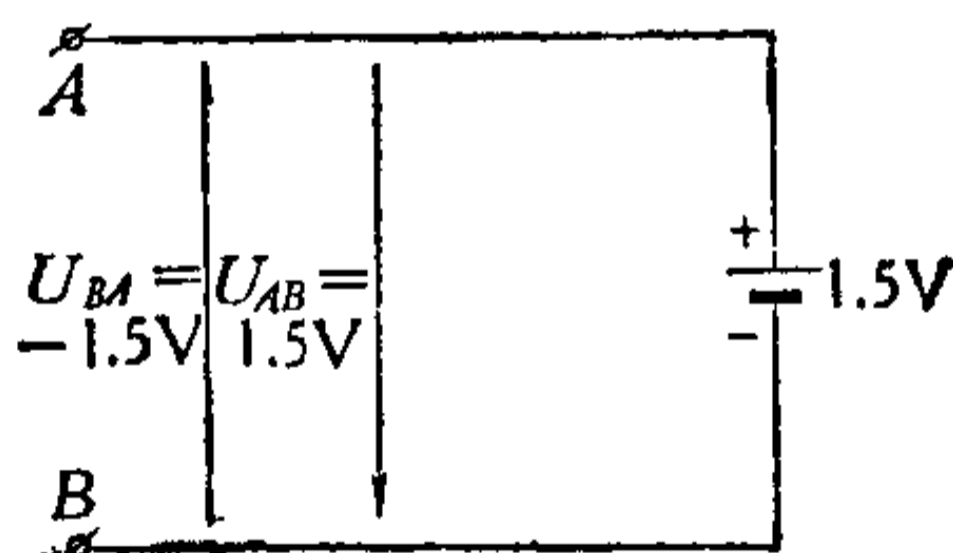


图 4

晶体管手册和产品目录中有关集电极 C 和发射极 E 之间的电压正方向通常采用 u_{CE} ，基极 B 和发射极 E 之间的电压正方向通常采用 u_{BE} ，因此对于 $p-n-p$ 型晶体管来说这里 u_{CE} 和 u_{BE} 就是负值，而 $n-p-n$ 型晶体管的 u_{CE} 和 u_{BE} 就是正值。

“参考点”的问题除了供分析电路的需要外，在具体电路中也是有实际意义的。

在电子电路中，即使是线路纵横、元件繁多，但以信号流程来看，从输入信号和各级之间的耦合到输出信号，都有一个公共的参考点，这个参考点通常就称它为“接地点”。电路中所注的“电压”或“波形”，一般也就是指该点对“接地点”而言的。顺便说明一下：电子电路中的“接地点”和一般电工技术上的电气“接地点”是二回事。

附录二 参数符号说明

- BG ——晶体三极管
- E ——晶体三极管发射极
- B ——晶体三极管基极
- C ——晶体三极管集电极
- I_C ——集电极直流电流
- I_B ——基极直流电流
- I_E ——发射极直流电流
- i_C ——集电极交流电流瞬时值
- i_B ——基极交流电流瞬时值
- i_E ——发射极交流电流瞬时值
- I_{CBO} ——发射极开路,集电极-基极反向截止电流
- I_{CEO} ——基极开路,集电极-发射极反向截止电流
- I_Z ——硅稳压管的测试电流
- I_{CM} ——最大集电极电流
- U_{CE} ——集电极-发射极间直流电压
- U_{BE} ——基极发-射极间直流电压
- U_{CB} ——集电极-基极间直流电压
- U_{CM} ——最大集电极电压
- $U_{出}$ ——直流输出电压
- $U_{入}$ ——直流输入电压
- $u_{入}$ ——交流输入电压
- $u_{出}$ ——交流输出电压
- $U_{最小}$ ——晶体管饱和电压降

U_Z ——硅稳压管稳定电压
 u_{BE} ——基极-发射极间交流电压
 u_{CE} ——集电极-发射极间交流电压
 u_f ——反馈电压
 E_C ——集电极电源
 E_B ——基极电源
 $P_{出}$ ——放大器的输出功率
 P_Z ——硅稳压管的耗散功率
 P_{CM} ——集电极最大耗散功率
 R_E ——发射极电阻
 R_B ——基极电阻
 R_F ——反馈电阻
 W ——电位器
 R_t ——热敏电阻
 R_Z ——硅稳压管的动态内阻
 R_L ——放大器的交流负载
 $R_{光}$ ——光敏电阻
 R_C ——放大器集电极负载电阻
 $R_{入}$ ——放大器输入电阻
 $Z_{入}$ ——放大器输入阻抗
 K_i ——电流放大倍数(电流增益)
 K_u ——电压放大倍数(电压增益)
 K_P ——功率放大倍数(功率增益)
 r_L ——负载电阻
 η ——功率放大器的效率
 η_B ——变压器效率
 N ——变压器初次级线圈匝数
 n ——变压器初次级线圈匝数比

B ——变压器
 Q ——晶体管静态工作点
 β ——共发射极电流放大系数
 α ——共基极电流放大系数
 RD ——熔断器
 J ——继电器
 CJO ——交流接触器
 D ——二极管
 DZ ——稳压管
 K ——开关
 S ——面积
 \textcircled{A} ——电流表
 \textcircled{V} ——直流电压表
 \textcircled{V} ——交流电压表
 ZD ——指示灯
 f ——频率
 BV_{CBO} ——发射极开路,集电极-基极反向击穿电压
 BV_{CEO} ——基极开路,集电极-发射极反向击穿电压
 BV_{CER} ——基极-发射极间串联电阻后的集电极-发射极
 击穿电压
 BV_{CES} ——基极-发射极间短路后的集电极-发射极击穿
 电压
 BV_{EBO} ——集电极开路,发射极-基极反向击穿电压
 V_{CES} ——集电极-发射极饱和电压
 $V_{\dot{B}ES}$ ——基极-发射极饱和电压
 h_{iE} ——共发射极小讯号短路输入阻抗
 h_{rE} ——共发射极小讯号开路电压反馈系数
 h_{fE} ——共发射极小讯号短路电流放大系数

h_{oE} ——共发射极小讯号开路输出导纳
 h_{iB} ——共基极小讯号短路输入阻抗
 h_{rB} ——共基极小讯号开路电压反馈系数
 h_{fB} ——共基极小讯号短路电流放大系数
 h_{oB} ——共基极小讯号开路输出导纳
 f_a ——共基极截止频率
 f_β ——共发射截止频率
 f_T ——特征频率
 f_M ——最高振荡频率
 r_{BB} (或 r'_{bb})——基极扩展电阻
 C_{OB} ——共基极输出电容
 C_c ——集电结电容
 N_F ——噪声系数
 T_{jM} ——最高允许结温
 T_a ——晶体管使用的环境温度
 R_T ——晶体管热阻

附录三 晶体管几个参数的说明

一、极限参数

晶体管具有体积小、重量轻、耗电少、寿命长和可靠性好等优点，致使晶体的生产和使用都得到很大发展。但使用不当容易损坏。造成管子损坏的原因很多，而其中主要的是因我们有些同志，对晶体管极限参数的意义不了解或注意不够，在使用时将管子的电压、电流、功率超过额定值而引起的。毛主席教导我们说：“自由是对必然的认识和对客观世界的改造。”因此了解晶体管极限参数的意义，对于我们合理使用晶体管，防止管子损坏，很有必要。

1. 晶体管的击穿电压

在晶体管产品目录中，通常列出 BV_{CBO} 、 BV_{CES} 、 BV_{CER} 、 BV_{CEO}^* 等参数，在前面统称为最大集电极电压 U_{CM} 它们的意义表示在图 1 中。

BV_{CBO} ：发射极开路，集电极基极间击穿电压。

BV_{CEO} ：基极开路，集电极发射极间击穿电压。

BV_{CER} ：发射极基极间接有电阻时，集电极发射极间击穿电压。

BV_{CES} ：发射极基极间短路，集电极发射极间击穿电压。

* 本讲座中电压符号都用 U 表示的，而目前国产晶体管器件手册中大多用 V 来表示电压，我们在这里仍保持手册中采用的符号表示方法，便于读者使用时查对。

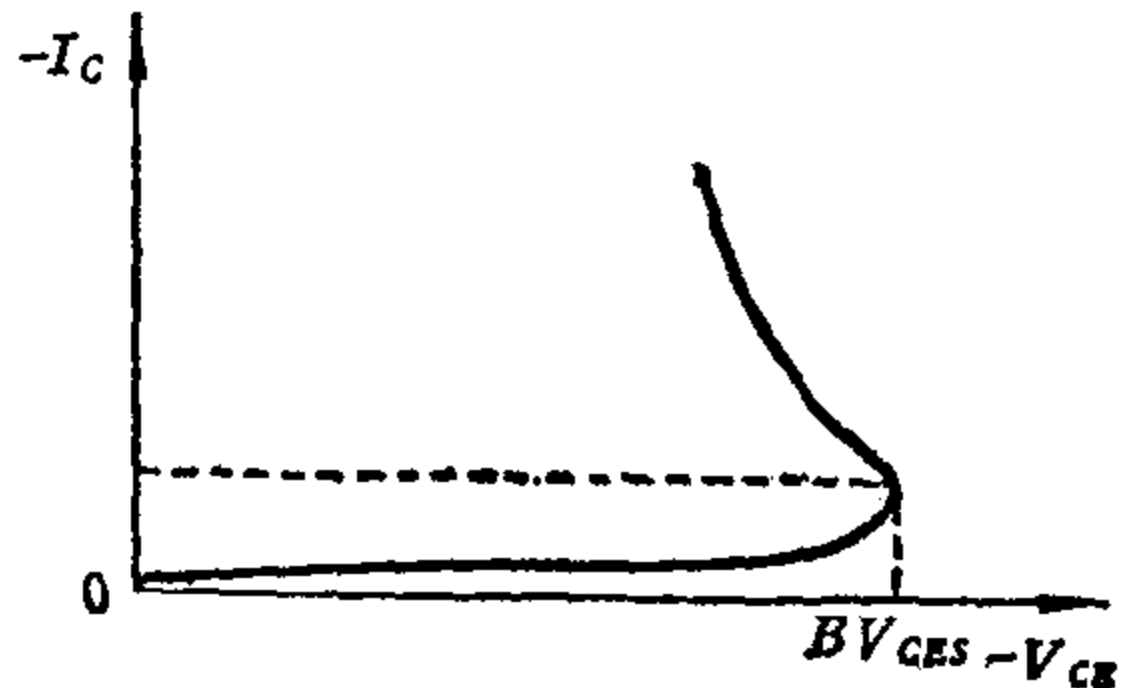
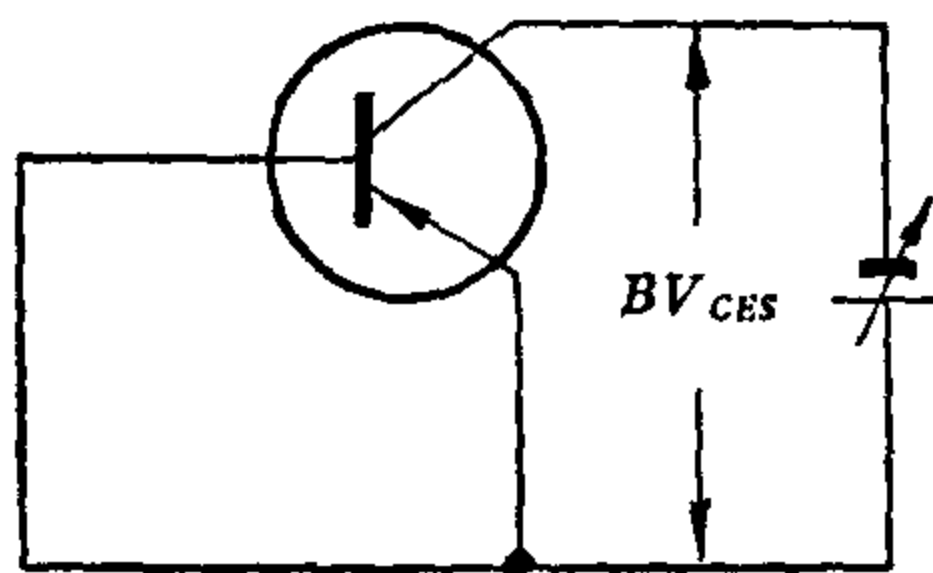
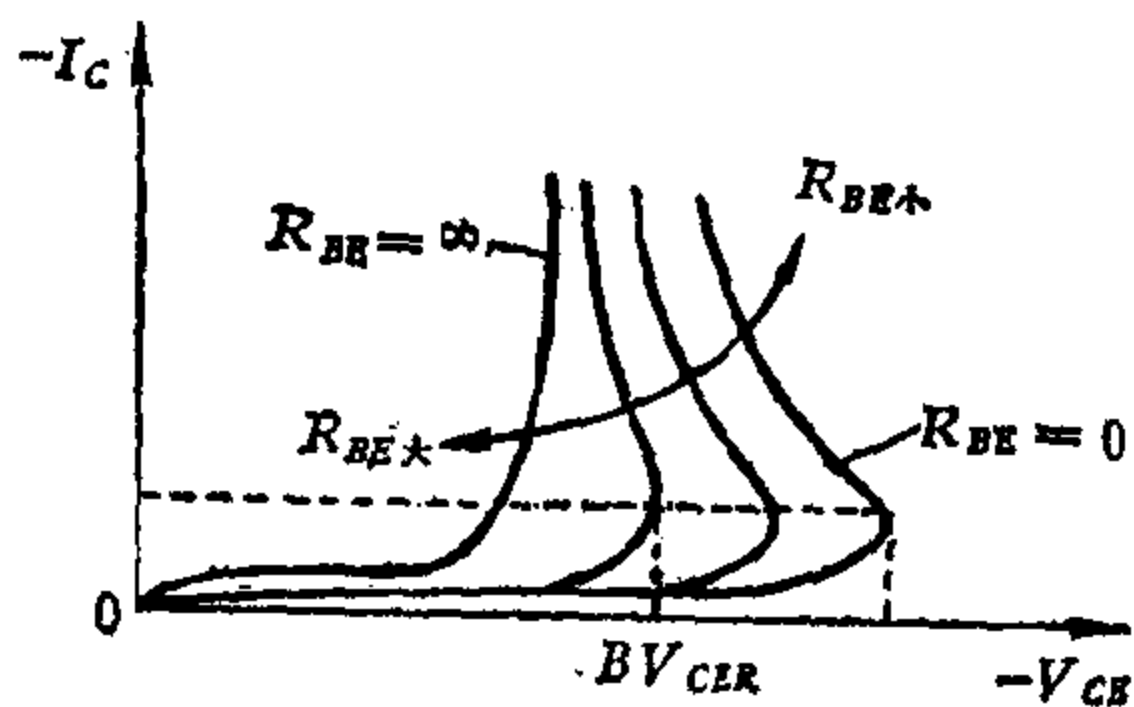
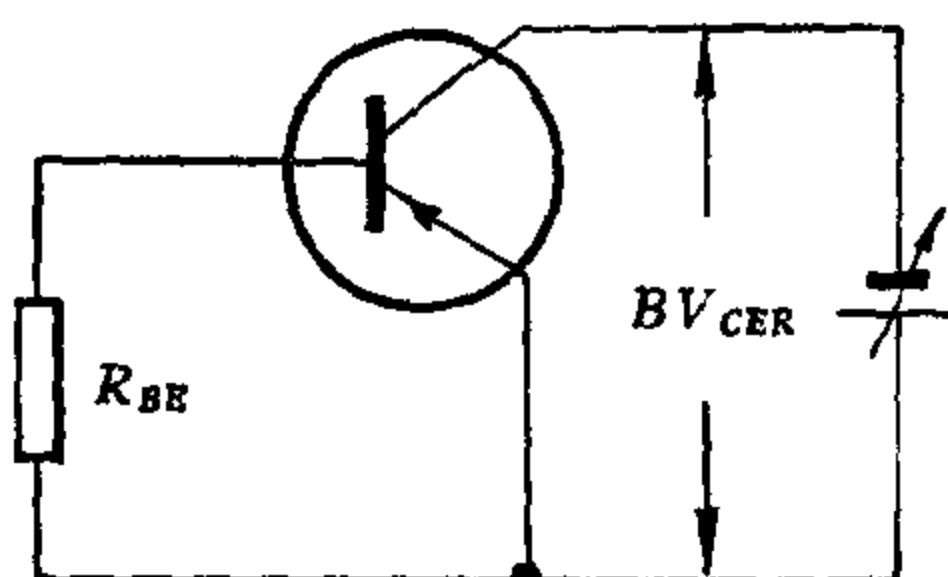
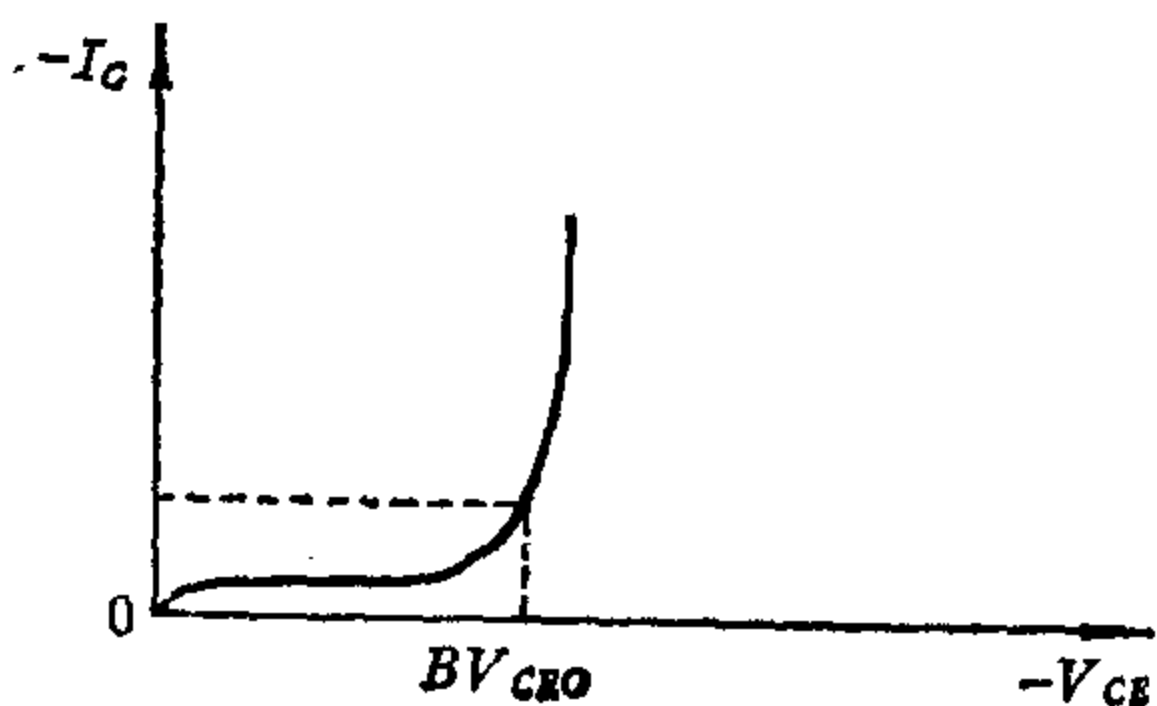
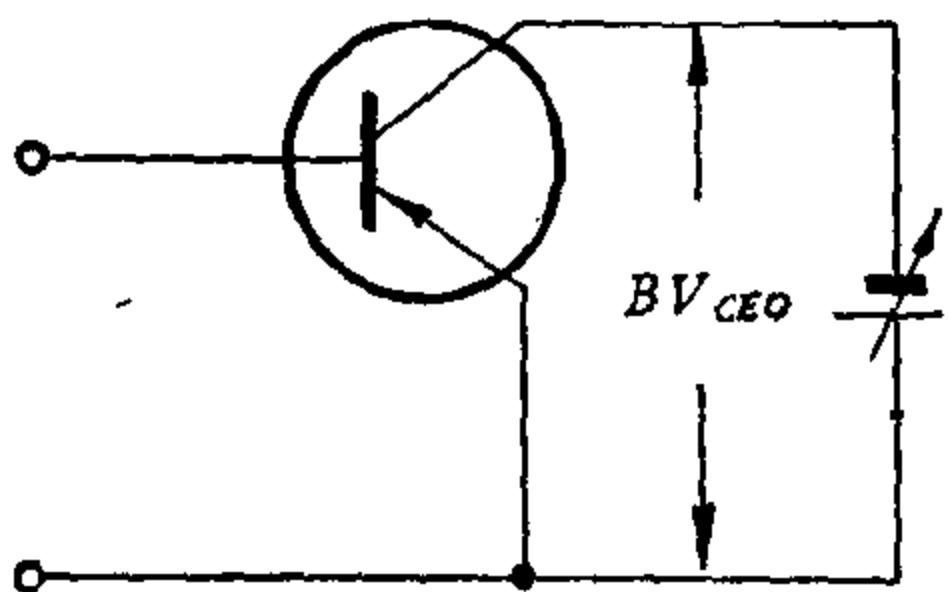
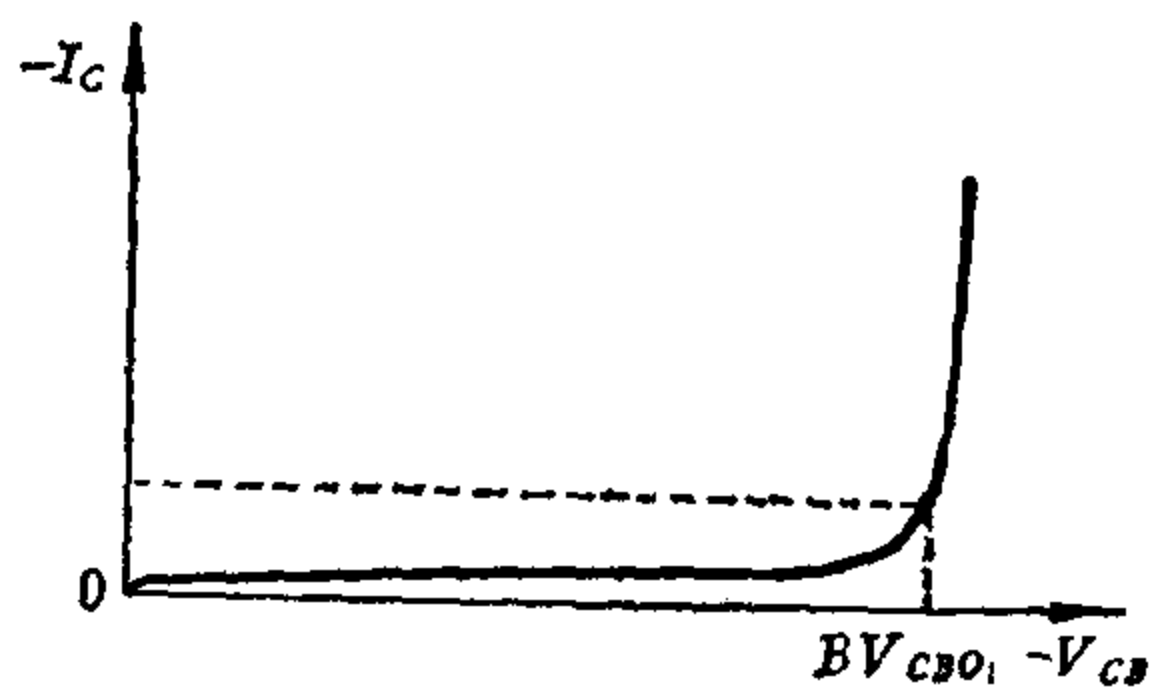
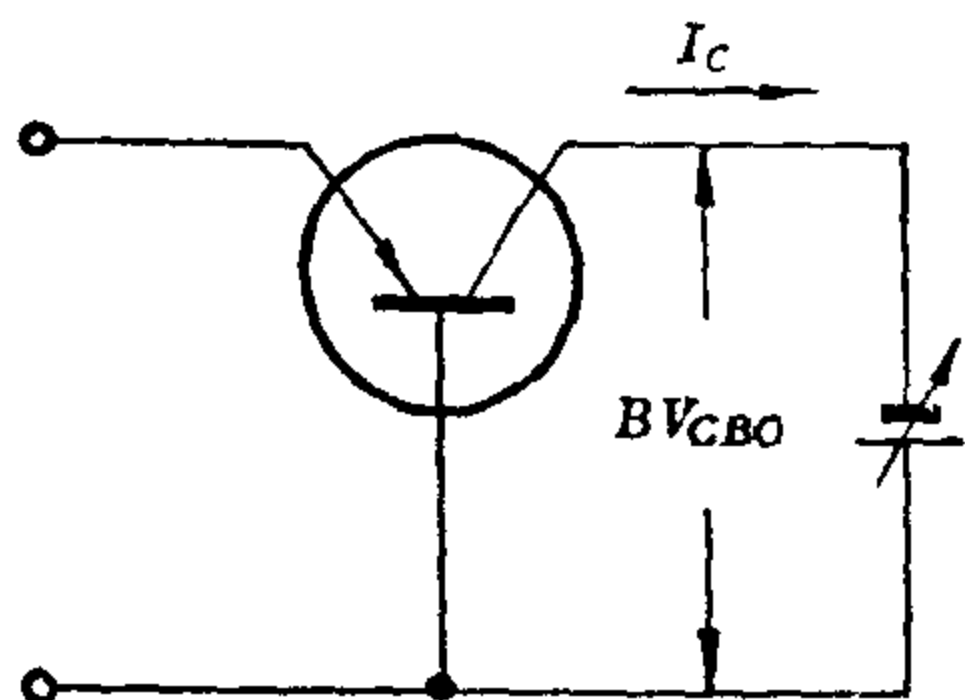


图 1

晶体管的反向击穿电压，是在特定的集电极反向漏电流情况下测得的。例如，假若规定电压 BV_{CBO} 在集电极电流为 10 微安时测量，那时将发射极引出端开路，晶体管的集——基电压增加到集电极漏电流为 10 微安时为止，因此，该晶体管的 BV_{CBO} 额定值，就等于所给出 10 微安电流时的外加集电极电压值。

从图 1 中看到：

- (1) 晶体管一旦超过额定电压，就可能出现很大的电流，以致将管子烧毁，所以使用晶体管时，电压不能超过额定值。
- (2) 这些集电极击穿电压数值间的大小关系为：

$$BV_{CBO} > BV_{CES} > BV_{CER} > BV_{CEO}$$

(3) 由上可见，基极接地的电路，能承受最高的电源电压，发射极接地，基极开路时，能承受的电压最低， BV_{CER} 的大小与电路中所接 R_{BE} 有关， R_{BE} 越大， BV_{CER} 则越小，图 2 表示了 3AD18 型晶体管的 BV_{CER} 与 R_{BE} 的关系。

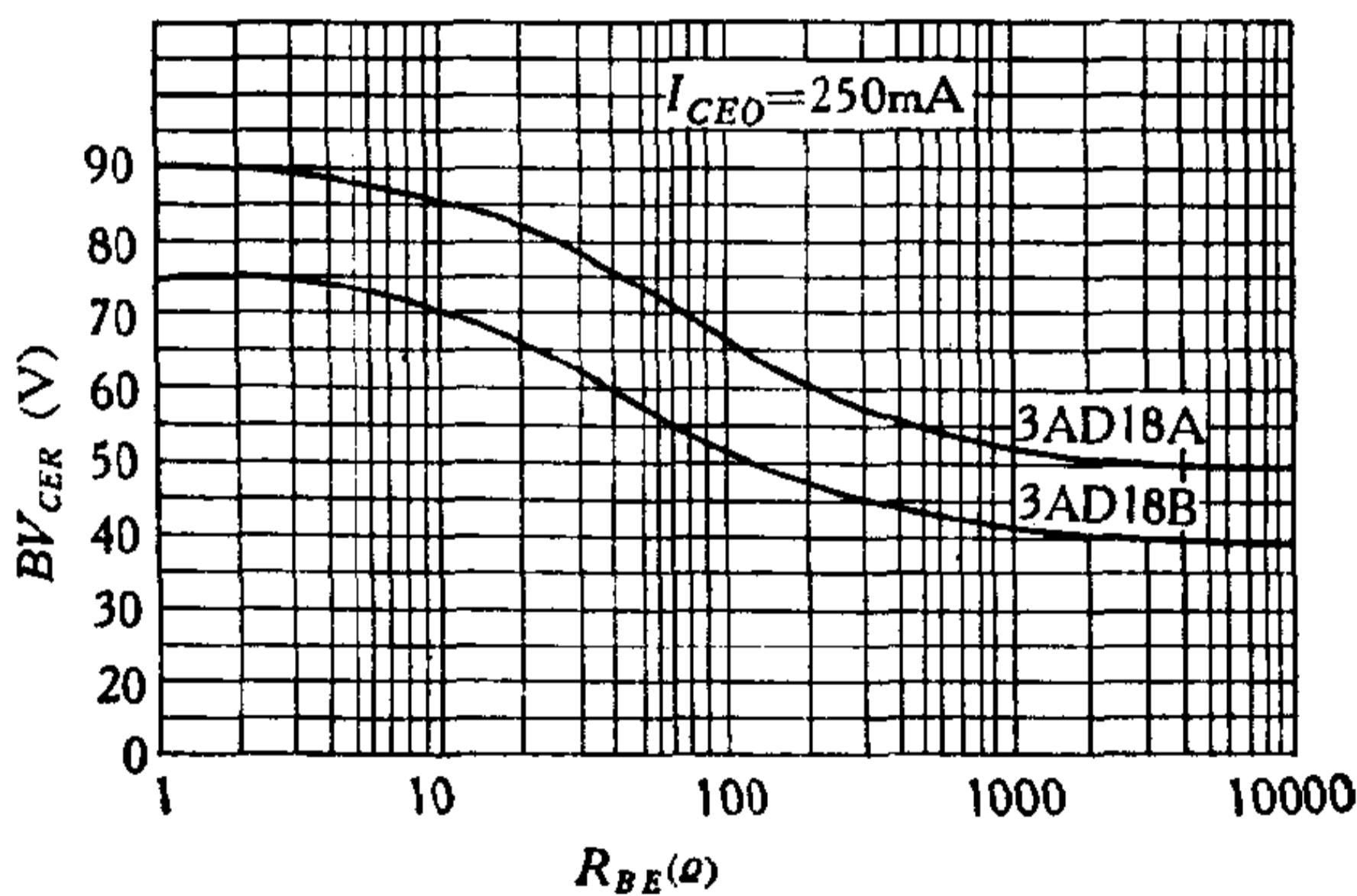


图 2

上述这些参数有什么实用意义呢？

处于共基极运用的晶体管，它的最大耐压是 BV_{CBO} 。运

用在共发射极的电路,如果是采用固定偏置,由于射极至基极不接电阻,相当于基极开路,其最大允许电压应为 BV_{CEO} ;若是分压式偏置电路,其击穿电压要由射、基极所接 R_{BE} 阻值的大小来确定,当所接 R_{BE} 值比较小时,譬如象工作于乙类状态的功率放大器,有时候发射极与基极之间只有通过变压器绕组,直流电阻值是很小的,相当于短路,因此,在此情况下,集电极与发射极的耐压可以 BV_{CES} 来考虑。在共集电极电路中,因为输入阻抗总希望做得很高,射、基极间不可能接有很小阻值的电阻,因此击穿电压相应下降,例如稳压电源中的调

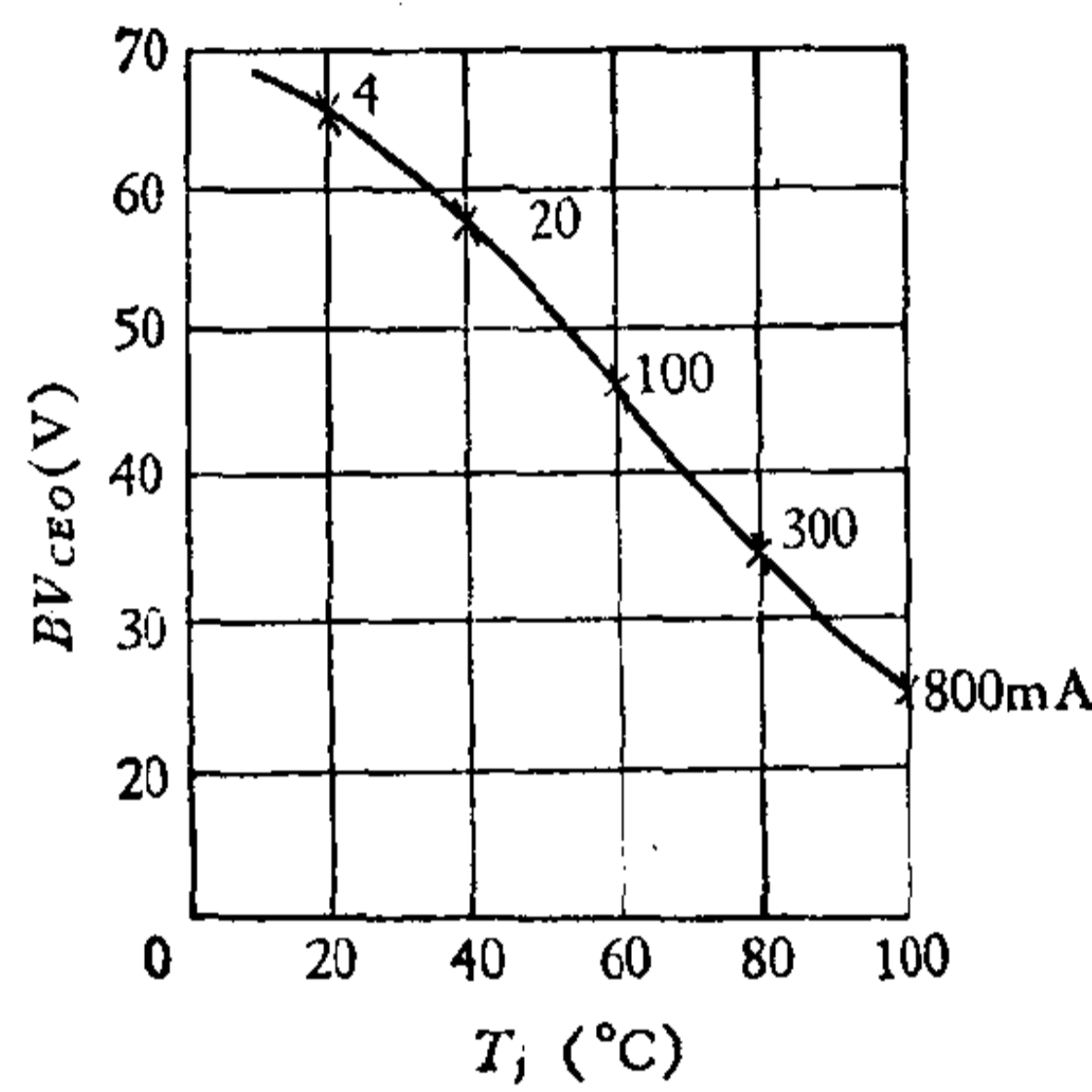


图 3

整管,一般最高工作电压不宜超过 BV_{CEO} 。

一般在产品目录中给出的最大电压,是在常温下(25°C)的值,但晶体管在高温情况使用时,其最大允许电压要较 25°C 下的最大允许电压低得多,如图 3 所示。因此在高温情况运用的晶体管,需留有一定的耐压余量。

在产品目录中,还给出基极和发射极间反向击穿电压 BV_{EBO} 这个参数,对于一般合金管(如 3AX31, 3AX81 等) BV_{EBO} 值较大,使用时矛盾不大,而合金扩散管和台面管的 BV_{EBO} 较小,仅 1 至 4 伏左右,使用时得注意,必要时需加保护措施。

2. 晶体管最大允许电流

晶体管最大允许电流,根据不同类型管子不同特性有不同订法,一般可以由下列三种方法定出:

(1) 晶体管电流放大倍数 β 下降到 $1/3$ 时对应的工作电流可定为最大电流,如图 4 所示。

(2) 晶体管压降与电流的乘积不超过 P_{CM} ,从而定出最大电流,如图 5 所示。

(3) 晶体管引线能承受的最大电流。

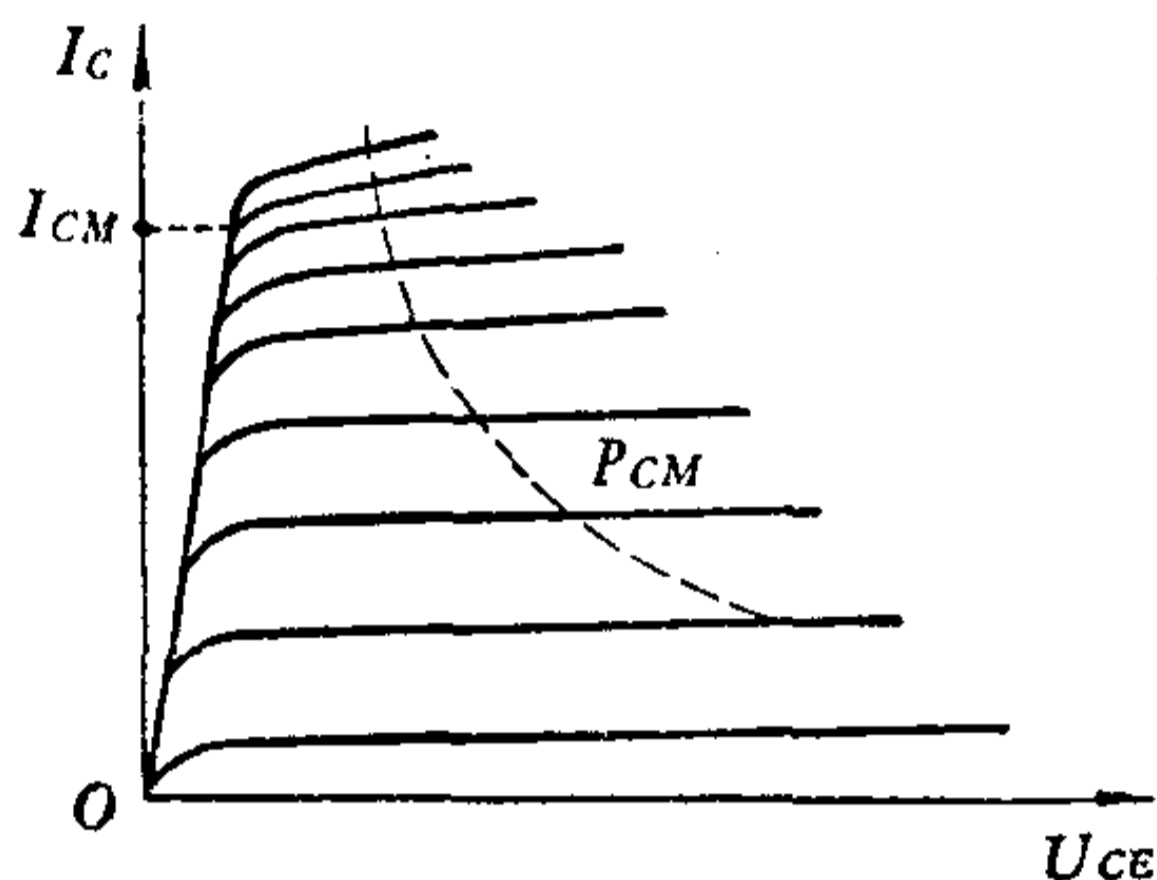


图 4

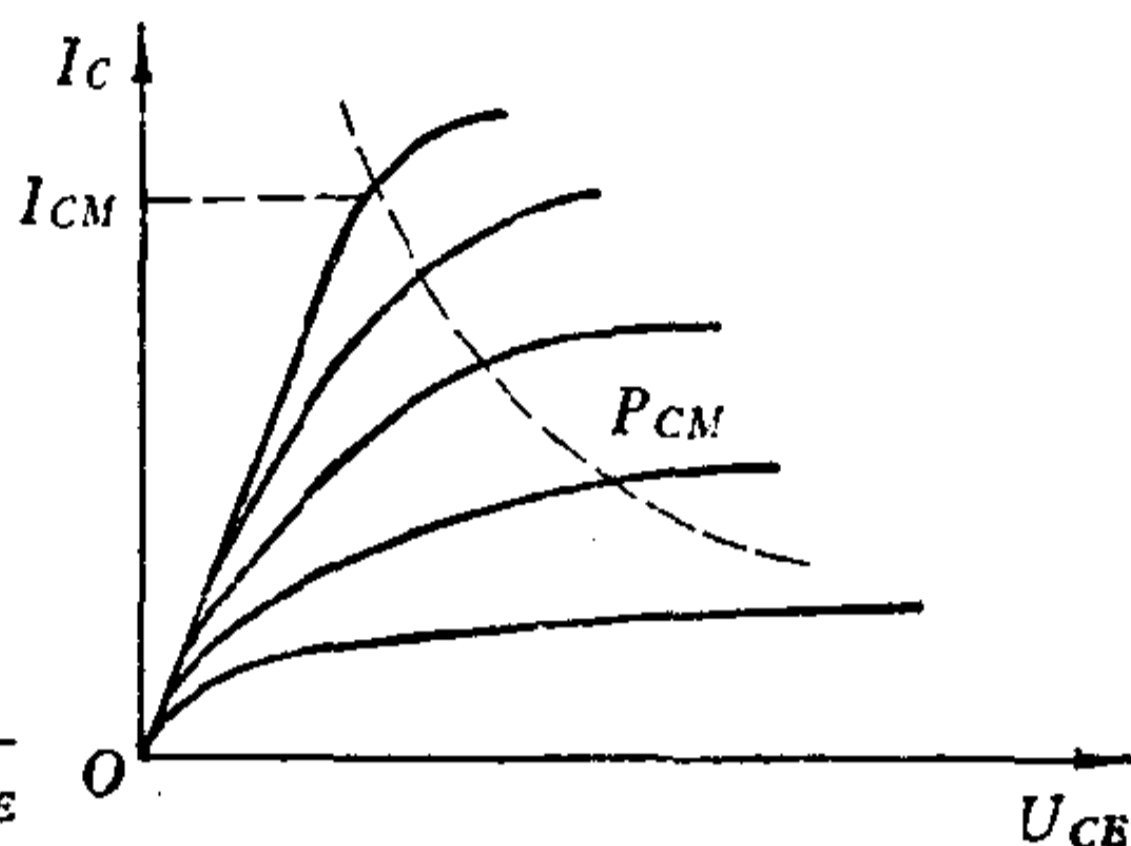


图 5

3. 最大功率损耗

在第二章中已讨论过,使用晶体管的耗散功率超过额定的 P_{CM} ,管子就有烧坏的危险,那末 P_{CM} 由什么因素决定的呢? 限制晶体管最大功率损耗的 P_{CM} 的主要因素,是热阻 R_T , 最高允许结温 T_{jM} 和周围环境温度 T_a 。

最高允许结温 T_{jM} : 晶体管的恶化伴随着 p-n 结温的升高而加剧,所以晶体管工作有受最高结温的限制。最高结温 T_{jM} 在某些产品目录中给出,对锗材料制成的晶体管在 75°C — 100°C ,硅晶体管在 100°C — 150°C 。由此可见,通常锗管的工作温度上限是 70°C — 90°C ,若要在接近或超过上述温度范围的环境中工作时,则只能选用硅管。

热阻 R_T : 它是表示热扩散的物理量,单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$ 或 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,一个晶体管热阻的大小,与晶体管的几何形状结构和材料有关,并由晶体管的安装方法以及周围条件(有否散热器

及冷却装置)所决定,散热条件越好,热阻越小。

最高允许结温 T_{jM} 、热阻 R_T 及最大允许功率损耗 P_{CM} 有如下关系:

$$P_{CM} = \frac{T_{jM} - T_a}{R_T}$$

因此,对于给定的环境温度 T_a ,为增加 P_{CM} ,就得设法降低热阻 R_T ,及使用结温高的晶体管。

例: 3 AX 41 型晶体管的结温 T_{jM} 为 75°C ,热阻 $R_T \leq 0.5^{\circ}\text{C/mW}$,在环境温度 25°C 时,其最大允许损耗功率应为:

$$P_{CM} = \frac{75^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{0.5^{\circ}\text{C/mW}} = 100\text{mW}$$

如果晶体管要在环境温度 45°C 可靠工作,读者可将 $T_a = 45^{\circ}\text{C}$ 代入上式,算得 P_{CM} 为 60mW ,由此可见, P_{CM} 受环境温度影响较大,实际使用时,以温度考虑, P_{CM} 应比产品目录中在 25°C 条件下所给出的要适当降低些。

对大功率晶体管,在产品目录中,通常给出的 P_{CM} ,有附加散热片的和不附加散热片的二种,还应指出,目前,3AD6 及 3AD30 的目录中所标明的 R_T ,只是管子的内热阻(从 p-n 结到管壳)并不包括外热阻(管壳与空气接触的热阻),计算时,还要把它考虑进去。

4. 使用晶体管应注意的几个问题

(1) 晶体管使用时能不能超过产品目录所给出的 P_{CM} 、 U_{CM} 和 I_{CM} 值? 超过了又有什么危险?

P_{CM} 值一般是不允许超过的。如果将工作点选在 P_{CM} 曲线上或超过 P_{CM} 一些,管子虽然并不立即烧毁,但管子的性能却受到影响。

U_{CM} 值通常是不允许超过的。即使是瞬时超过额定的反

向击穿电压，也会导致管子击穿损坏。市售业余品晶体管的耐压，往往低于产品目录列出的数值，使用时更应注意。

I_{CM} 值并非绝对不能超过。对合金管（如 3AX1—3AX10、3AX31、3AX81、3AD6、3AD30 等）来说，如不考虑因电流过大而 β 值下降，集电极电流 i_c 可以适当超过 I_{CM} 值，只要使用时集电极电流 i_c 与集电极电压 u_{CE} 的乘积不大于 P_{CM} 所允许的值；但是，对于合金扩散管（如 3AG11—3AG14、3AG22—3AG24 等），因 I_{CM} 是由饱和线和耗散线交点来制定的（见图 5），如过流，就成为超过功率损耗的问题了。这些都是由于 I_{CM} 的规定不同而引起的。

特别要指出的是：晶体管工作时集电极最大允许电流 I_{CM} 和最大允许集电极击穿电压 U_{CM} 不能同时达到，否则将大大超过 P_{CM} 值。

因为产品目录 P_{CM} ， U_{CM} 区都是在温度为 25°C 下给出的，使用时应以工作可能最高温度来考虑 P_{CM} 和 U_{CM} ，同时根据允许最大电流来决定 I_{CM} ，因此我们可以象图 6 那样来作负载线（ R_L 或 R'_L 分别为负载电阻）。

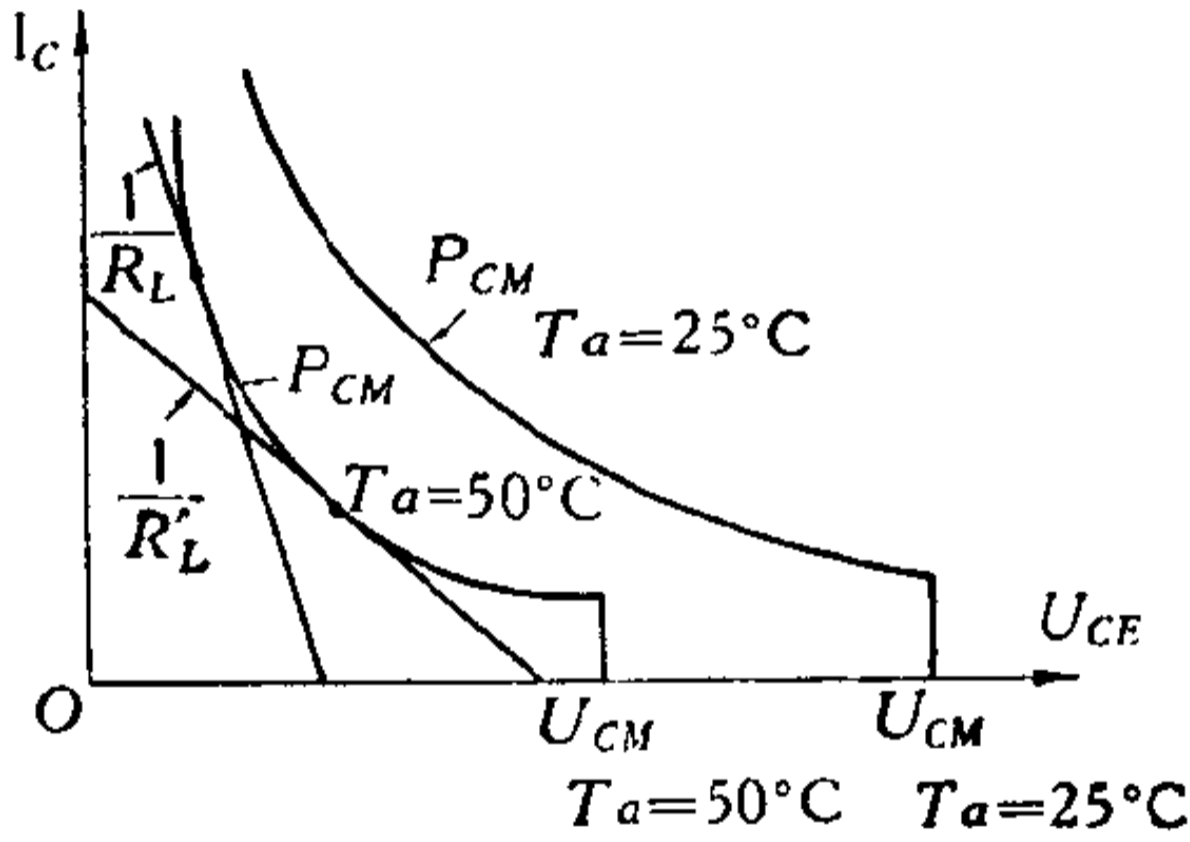


图 6

还应注意，在输出用变压器耦合时，它的直流负载线只能按 R'_L 作法，它的电源电压应低于 $\frac{1}{2} U_{CM}$ 。

(2) 为什么有时候只用万用表测量一下晶体管的正反向电阻，管子就损坏了？

利用万用表测量晶体管正反向电阻以检验质量或判别电极的方法，只适用于合金管。上面已提及，合金扩散管、台

面管的射-基极间反向耐压 BV_{EBO} 非常低,如 3 AG 11 的 $BV_{EBO} \leq 0.5$ 伏,而万用表的电池至少有 1.5 伏,用万用表测量这类管子的反向电阻时,往往容易使发射结击穿而管子失效。另外,在用万用表测量晶体管时,量程应选在 $R \times 100$ 或 $R \times 1K$ 上,不要放在 $R \times 1$, $R \times 10$ (因为此时电流太大) 及 $R \times 10000$ (使用此档时,表内电池通常是 22.5 伏,电压太高) 上,否则也会造成晶体管的击穿或烧毁。

(3) 为什么有时候线路接有电源时,晶体管的基极引线一断开管子就毁坏了呢?

前面讲到当基极断开时集电极和发射极间的反向击穿电压 BV_{CEO} 较低,很容易造成电压击穿。因此在安装或焊接晶体管时,最好先断开电源,尤其不能在电源接通的情况下断开基极引线。如果必须在电源加上后连接晶体管,则应先接通基极,次之发射极,最后集电极。拆下时按相反次序进行,即先拆下集电极,次是发射极,最后是基极。对于小功率晶体管,制造厂往往把它的集电极引出线故意剪短一些,这不仅是为了识别电极的需要,主要是因为晶体管检验测试时(插进管座时)保证安全。

二、交 流 参 数

在晶体管产品目录中列有 h_{iE} , h_{rE} , h_{fE} , h_{oE} (或 h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22}) 等参数,这些都是共发射极小讯号运用时主要参数,统称为 h 参数。其定义如下:

输出端交流短路时晶体管输入阻抗

$$h_{iE} = \left. \frac{v_{BE}}{i_{BE}} \right|_{v_{CE} = 0} \quad (\text{或 } h_{11})$$

输入端交流开路时晶体管反向电压传输比

$$h_{rE} = \left. \frac{v_{BE}}{v_{CE}} \right| i_B = 0 \quad (\text{或 } h_{12})$$

输出端交流短路时,晶体管正向电流传输比(电流放大倍数)

$$h_{fE} = \left. \frac{i_C}{i_B} \right| v_{CE} = 0 \quad (\text{或 } h_{21})$$

输入端交流开路时晶体管输出导纳(即输出阻抗的倒数)

$$h_{oE} = \left. \frac{i_C}{v_{CE}} \right| i_B = 0 \quad (\text{或 } h_{22})$$

这些参数有什么用处,输入阻抗 h_{iE} , 与以前讲的电路的输入阻抗 R_i 是否一回事,输出导纳 h_{oE} 是否就是以前介绍的电路输出阻抗 R_o 的倒数呢?

我们从上述 h 参数定义知道,它们都是在一定条件下测得的,如 h_{iE} 是在输出端交流短路情况下测出的,输入阻抗 h_{oE} 是在输入端交流开路情况下测得的参数。但实际电路在输出端总是接有一定的负载电阻 R_L , 在输入端的信号源总有一定的内阻抗 $R_{\text{内}}$ 的。而 R_i 是考虑了负载 R_L 的电路输入阻抗, R_o 是考虑了信号源内阻 $R_{\text{内}}$ 的输出阻抗。

在对共发射极低频小信号放大器运用时,如前置放大器,我们可以根据上述 h 参数以及负载电阻 R_L , 信号源内阻 $R_{\text{内}}$ 来计算电路的输入阻抗、输出阻抗。

关系式如下:

输入阻抗:

$$R_i = h_{iE} - \frac{h_{fE}h_{rE}}{h_{oE} + \frac{1}{R_L}}$$

输出阻抗:

$$R_o = \frac{1}{h_{oE}} - \frac{h_{rE}h_{fE}}{h_{iE} - R_{\text{内}}}$$

三、频率参数

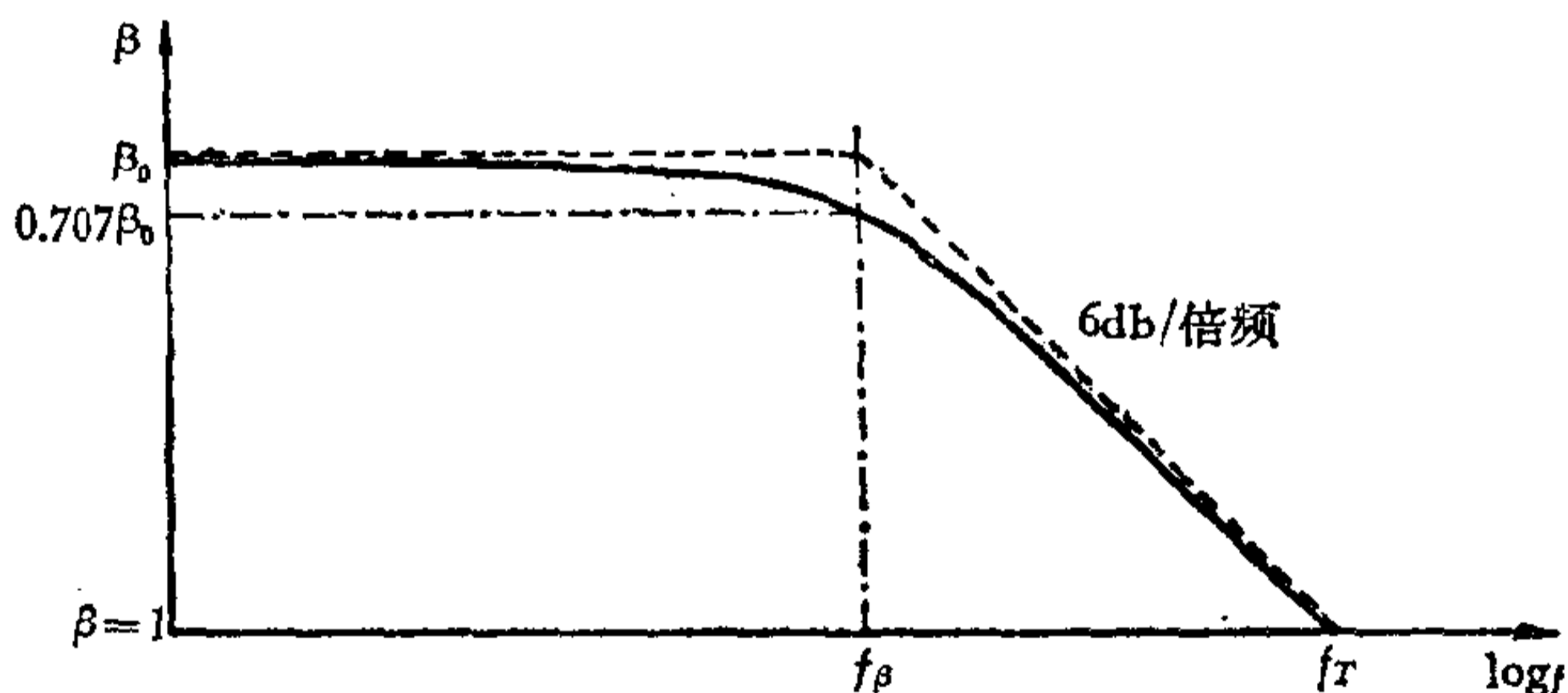
晶体管频率特性的好坏,通常用 $f_a(f_{aB})$ 、 f_β (或 f_{aE})、 f_T 和 f_{max} 四个参数来表示。

f_a 、 f_β 两个参数表示放大器的电流放大倍数 α 及 β 的绝对值随频率升高而降低到低频值 α_0 及 β_0 的 0.707 倍时对应的频率。 f_a 称共基极截止频率, f_β 称共发射极截止频率。

它们之间的关系是

$$f_\beta = \frac{f_a}{\beta}$$

f_T 表示 β 随频率变化, 其绝对值降低到 1 时对应的频率称特征频率 (有的手册标为 f_1) 见图 7。从图看到从频率 f_β 至



虚线为近似值

图 7

f_T 这段范围, 频率减小一半时增益增加一倍, 即频率与增益的乘积是一个常数, 故又称增益带宽频率, 可用下式表示:

$$f_T \approx \beta f$$

其中: f 为晶体管的运用频率(4—5) $f_\beta > f > f_T$, β 为晶体管工作在 f 下的共发射极电流放大倍数。

根据上式可以由 f_T 方便地估计使用频率 f 下的管子 β

值。

f_T 与 f_a 的关系,对合金管 $f_T \approx 0.8 f_a$,对合金扩散管、台式管、平面管 $f_T \approx (0.5-0.8)f_a$

f_{\max} 为晶体管获得功率增益等于 1 时的最高频率,即最高振荡频率。 f_{\max} 不仅考虑到 f_a 之值,而且考虑到晶体管集电极的结电容 C_C 和基极扩展电阻 $r_{bb'}$ (这两个参数也在手册中给出),对频率的影响其值由下式确定。

$$f_{\max} = \sqrt{\alpha f_a / 8\pi r_{bb'} C_C}$$

综上所述,可以得出这样结论,对同一个晶体管,在同一工作点运用时,可以用上述四个参量来表示频率特征,其结果:

$$f_\beta < f_T < f_a < f_{\max}$$

用于共发射极电路的放大或振荡,选用 f_T 应大于最高应用频率的 3 至 5 倍。

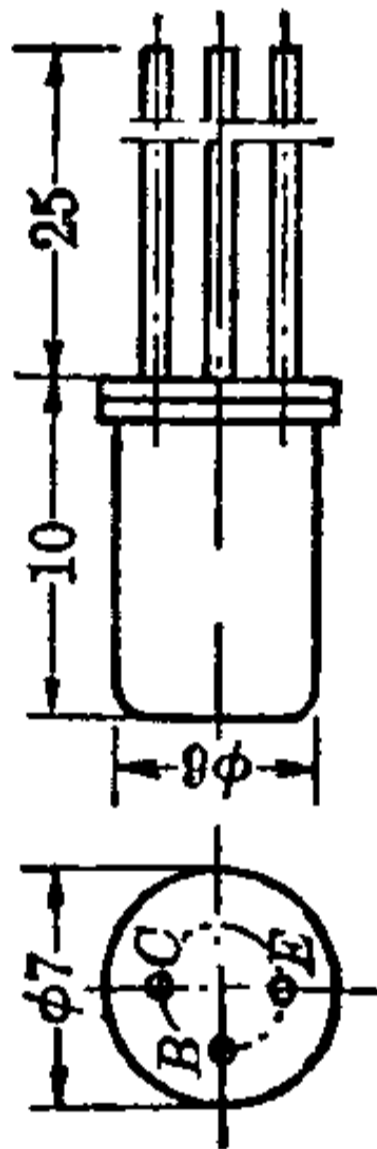
我国生产的晶体管产品目录中,低频管的频率特性常用 f_a 或 f_β 表示,高频管用 f_T 表示频率特性的较多。

参数符号	I_{CBO}	I_{EBO}	I_{CEO}	V_{BES}		V_{CES}	h_{FE}
单位	μA	μA	μA	mV		mV	—
测试条件	$V_{CB} = -6V$	$V_{EB} = -6V$	$V_{CE} = -6V$	$V_{CE} = -6V$ $I_C = -100mA$	$V_{CE} = -1V$ $I_C = -2mA$	$V_{CE} = V_{BE}$ $V_{CB} = 0$ $I_C = -125mA$	$V_{CE} = -1V$ $I_C = -100mA$
型号							
3 AX 31 A	≤ 20	≤ 20	≤ 1000				30—200
3 AX 31 B	≤ 10	≤ 10	≤ 750	≤ 170	≤ 500	≤ 650	50—150
3 AX 31 C	≤ 6	≤ 6	≤ 500	≤ 170	≤ 500	≤ 650	
3 AX 31 D	≤ 12	≤ 12	≤ 750	$\leq 160^*$			
3 AX 31 E	≤ 12	≤ 12	≤ 500	$\leq 160^*$			

* 测试时 $I_C = -1mA$

参数符号	单位		测试条件	参数值	型号	h_{iE}	h_{rE}	h_{fE}	h_{oE}	$f\beta$	K_P	N_F
	$k\Omega$						μV	kC	db	db		
	$V_{CE}=-6V$ $I_C=-1mA$ $f=1kC$		$V_{CE}=-6V$ $I_C=-1mA$ $f=1kC$			$V_{CE}=-6V$ $I_C=-1mA$ $f=1kC$	$V_{CE}=-6V$ $I_C=-1mA$ $f=1kC$	$V_{CE}=-6V$ $I_C=-10mA$	$V_{CE}=-6V$ $I_C=-4-68mA$ $P_O=200mW$	$V_{CE}=-1V$ $I_C=-0.2mA$ $f=1kC$ $R_g=500\Omega$ $\Delta f=100C$		
3 AX 31 A										≥ 8	21—30	
3 AX 31 B										≥ 8	21—30	
3 AX 31 C										$\geq 8^*$	38—48**	≤ 15
3 AX 31 D	0.5—4	$\leq 13 \times 10^{-4}$	30—150	≤ 100	$\geq 15^*$	38—42**	≤ 8					
3 AX 31 E	0.5—4	$\leq 10 \times 10^{-4}$	20—85	≤ 100								

* 测试时 $I_C=-1mA$
** 测试时 $V_{CE}=-1V, I_C=-1mA, f=1kC$



外形图 3 AX 31 型

3 AX 81 型低频小功率三极管

主要用途:

适用于低频甲类、乙类功率放大电路中。

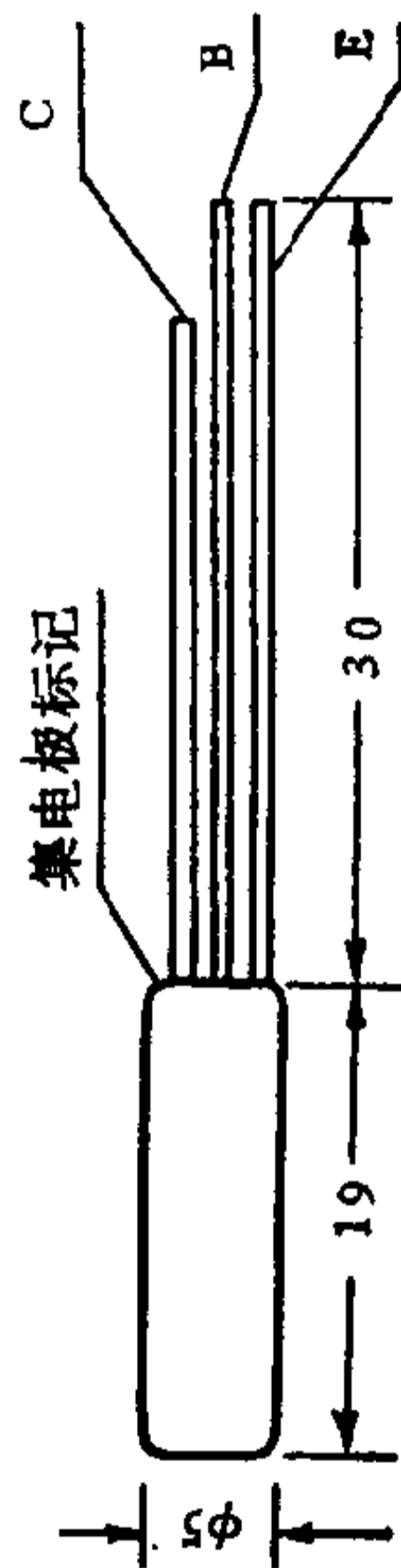
极 限 参 数

参数符号	P_{CM}	I_{CM}	BV_{CBO}	BV_{EBO}	BV_{CEO}	R_T
单位	mW	mA	V	V	V	$^{\circ}\text{C}/\text{mW}$
测试条件			$I_C = -4\text{mA}$	$I_E = 4\text{mA}$	$I_C = -4\text{mA}$	
型号						
3 AX 81 A	200	200	20	7	10	0.25
3 AX 81 B	200	200	30	10	15	0.25
3 AX 81 C	200	200	20	7	10	0.25

主 要 参 数

参数符号	参数值		测试条件	型号	I_{CBO}	I_{EBO}	I_{CEO}	V_{BE}		h_{FE}
	单位	单位			μA	μA	μA	mV		
					$V_{CB} = -6V$	$V_{EB} = -6V$	$V_{CE} = -6V$	$V_{CE} = -6V$ $I_C = -2mA$	$V_{CE} = -0.7V$ $I_C = -200mA$	$V_{CE} = -1V$ $I_C = -175mA$
					≤ 30	≤ 30	≤ 1000	≤ 160	≤ 650	30—250
					≤ 15	≤ 15	≤ 700	≤ 160	≤ 650	40—200
3 AX 81 C					≤ 30	≤ 30	≤ 1000	≤ 160	≤ 650	30—250

参 数 值	参 数 条 件	单 位	参 数 符 号	V_{CES}			f_{β}	K_P	K_f
				mV					
				$V_{CE} = V_{CBE}$ $I_C = -20\text{mA}$	$V_{CE} = V_{BE}$ $I_C = -100\text{mA}$	$V_{CE} = V_{RE}$ $I_C = -250\text{mA}$			
3 AX 81 A	≤ 250	≤ 400	≤ 650				19—28	≤ 6	
3 AX 81 B	≤ 250	≤ 400	≤ 650	≥ 6			19—28	≤ 6	
3 AX 81 C	≤ 250	≤ 400	≤ 650	≥ 10			19—28	≤ 6	



外形图 3 AX 81 型低频小功率三极管

3 AD 6 型低频大功率三极管

主要用途:

适用于电子设备的低速开关, 低频放大电路和直流电压变换器电路中。

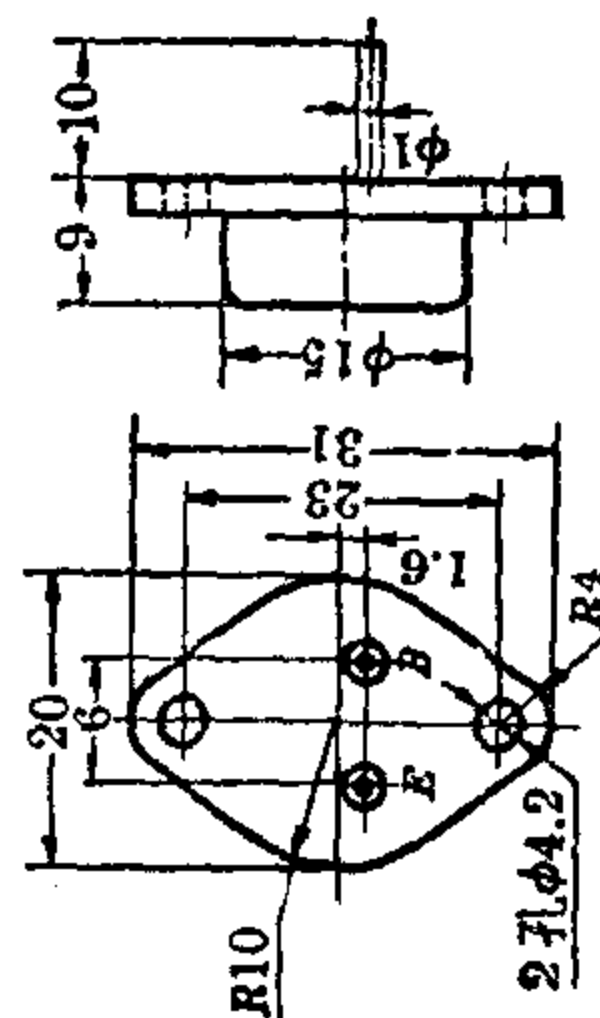
极 限 参 数

参数符号	P_{CM}^*	I_{CM}	BV_{CBO}	BV_{CEO}	BV_{EBO}	R_T	T_{jM}
单位	W	A	V	V	V	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	$^{\circ}\text{C}$
测试条件	附加120×120×4mm ³ 铝散热片						
型号			$I_C = -5\text{mA}$	$I_C \approx -10\text{mA}$	$I_E = 5\text{mA}$		
3 AD 6 A	10	2	50	18	20	2	90
3 AD 6 B	10	2	60	24	20	2	90
3 AD 6 C	10	2	70	30	20	2	90

* 不加散热片时, P_{CM} 为 1W

主 要 参 数

参数符号	I_{CBO}	I_{CEO}	I_{EBO}	V_{CES}	V_{BES}	h_{eE}	f_{β}
单位	mA	mA	mA	V	V	—	kC
测试条件	$V_{CB} = -20V$	$V_{CE} = -10V$	$V_{EB} = -10V$	$I_C = -2A$	$I_C = -2A$	$V_{CE} = -2V$	$V_{CE} = -6V$ $I_C = -200\mu A$ $R_C = 5\Omega$ $I_E = 200mA$
参 数 值	$V_{CB} = -20V$	$V_{CE} = -10V$	$V_{EB} = -10V$	$I_B = -200mA$	$I_B = -200mA$	$I_C = -2A$	
型 号							
3AD6A	≤ 0.4	≤ 0.25	≤ 0.5	≤ 0.8	≤ 1.2	12—100	≥ 2
3AD6B	≤ 0.3	≤ 0.25	≤ 0.5	≤ 0.8	≤ 1.2	12—100	≥ 4
3AD6C	≤ 0.3	≤ 0.25	≤ 0.5	≤ 0.8	≤ 1.2	12—100	≥ 4



外形图 3AD6型

3 AD 30 型低频大功率三极管

主要用途:

适用于电子设备的低速开关, 低频放大电路和直流电压变换器电路中。

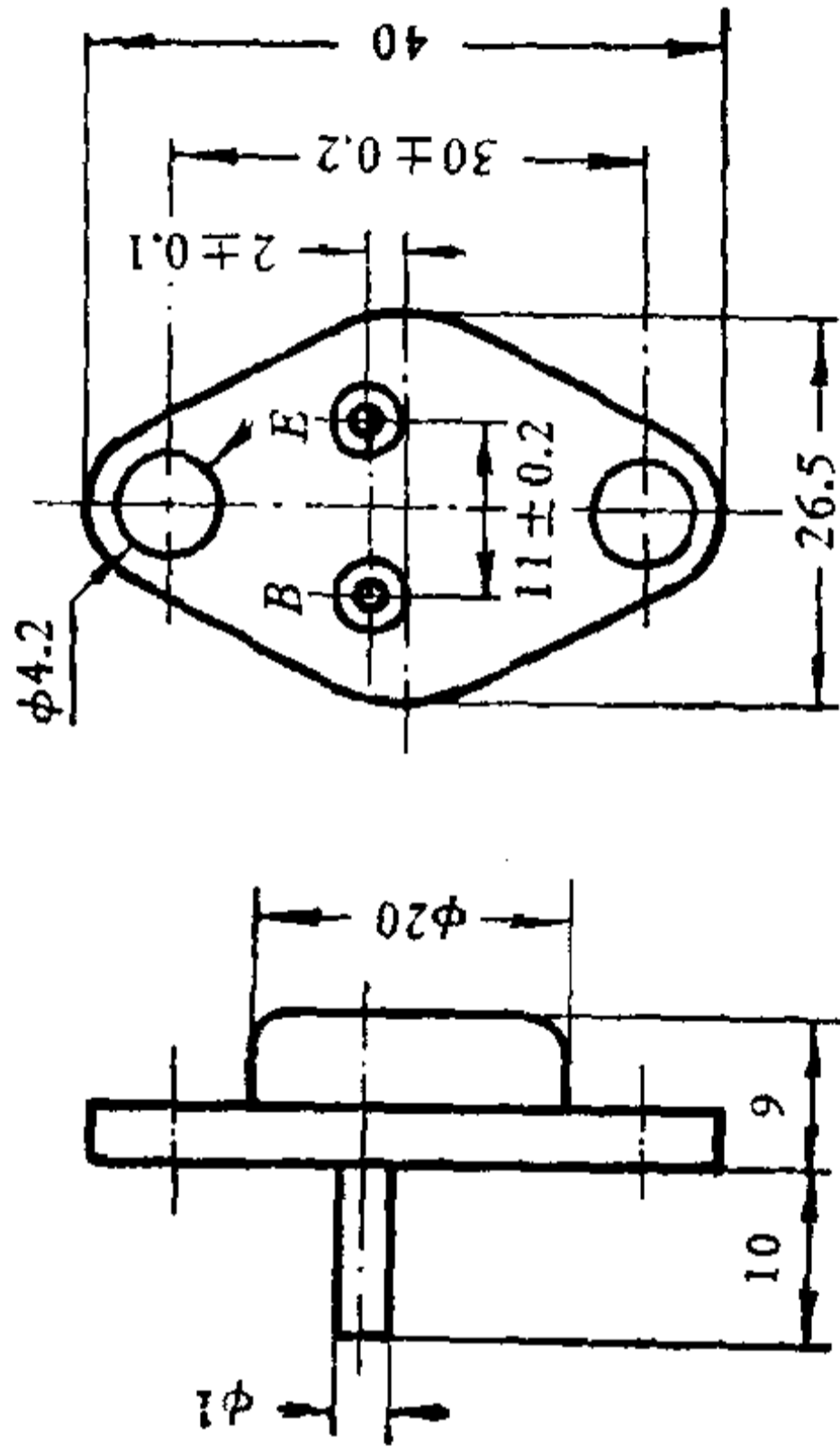
极 限 参 数

参数符号		P _{CM} *	I _{CM}	BV _{CBO}	BV _{EBO}	BV _{CEO}	R _T	T _{jM}
参数值	单位							
测试条件		W	A	V	V	V	°C/W	°C
型号		附加 200 × 200 × 4mm ³ 铝散热片		I _C = -10mA	I _E = 10mA	I _C = -20mA		
3 AD 30 A		20	4	50	20	12	1	85
3 AD 30 B		20	4	60	20	18	1	85
3 AD 30 C		20	4	70	20	24	1	85

* 不加散热片时, P_{CM} 为 2W

主要参数

参数符号	I_{CBO}	I_{EBO}	I_{CEO}	V_{BES}	V_{CES}	k_{IE}	f_{β}
单位	mA	mA	mA	V	V	—	kHz
测试条件	$V_{CB} = -20V$	$V_{EB} = -10V$	$V_{CE} = -10V$	$I_C = -4A$	$I_C = -4A$	$V_{CE} = -2V$	$V_{CE} = -6V$ $I_C = -400\mu A$ $R_C = 5\Omega$ $I_E = 400mA$
参数值							
型号							
3 AD 30 A	≤ 0.5	≤ 0.8	≤ 15	≤ 1.5	≤ 1.5	12—100	≥ 2
3 AD 30 B	≤ 0.5	≤ 0.8	≤ 10	≤ 1.5	≤ 1	12—100	≥ 2
3 AD 30 C	≤ 0.5	≤ 0.8	≤ 10	≤ 1.5	≤ 1	12—100	≥ 2



外形图 3AD 30型

3 AD 18 型低频大功率三极管

主要用途:

适用于电子设备的低频功率放大器和直流电压变换器中。

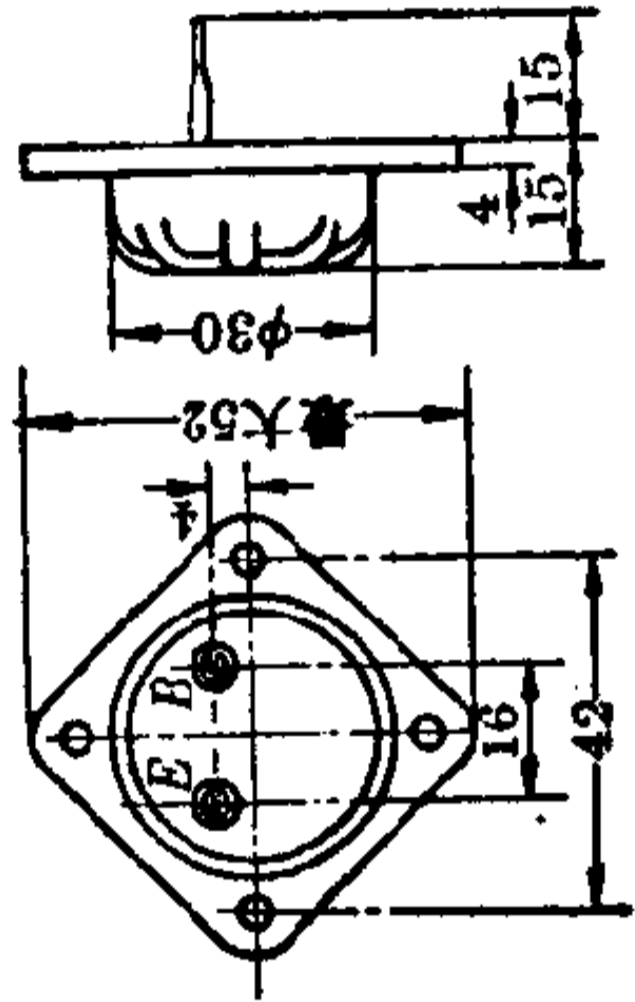
极 限 参 数

参数符号	P_{CM}^*	BV_{CEO}	BV_{CBO}	BV_{EBO}	I_{CM}	R_{θ}	T_{jM}
单位	W	V	V	V	A	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	$^{\circ}\text{C}$
测试条件	附加 $300 \times 300 \times 4\text{mm}^3$ 铝散热片						
型号							
3 AD 18 A	50	40	80	40	15	1	90
3 AD 18 B	50	20	50	40	15	1	90
3 AD 18 C	50	60	80	40	15	1	90
3 AD 18 D	50	60	120	80	15	1	90

* 不加散热片时, P_{CM} 为 2W

主要参数

参数符号	f_a	h_{fE}	V_{CES}	I_{CBO}	I_{EBO}
单位	MC	—	V	mA	mA
测试条件	$V_{CB} = -12V$ $I_C = -1.2A$	$V_{CE} = -2V$ $I_C = -5A$	$I_B = -2A$ $I_C = -12A$	$V_{CB} = -10V$	$V_{EB} = -10V$
型号					
3 AD 18 A	≥ 0.1	≥ 25	≤ 0.9	≤ 1	≤ 1.2
3 AD 18 B	≥ 0.1	≥ 15	≤ 0.9	≤ 1	≤ 1.2
3 AD 18 C	≥ 0.1	≥ 15	≤ 1.0	≤ 1	≤ 1.2
3 AD 18 D	≥ 0.1	≥ 25	≤ 0.9	≤ 1	≤ 1.2



外形图 3 AD 18 型

3 AG 1 型高频小功率三极管

主要用途:

- 3 AG 1 B 型用于收音机中频放大级。
- 3 AG 1 C 型用于中波收音机混频放大级。
- 3 AG 1 D 型用于短波 (12 MC) 收音机混频振荡级。
- 3 AG 1 E 型用于短波 (18MC) 收音机混频振荡级。
- 3 AG 1 FJ 型用于短波 (30MC) 收讯机中作放大, 混频及振荡级(军级)。

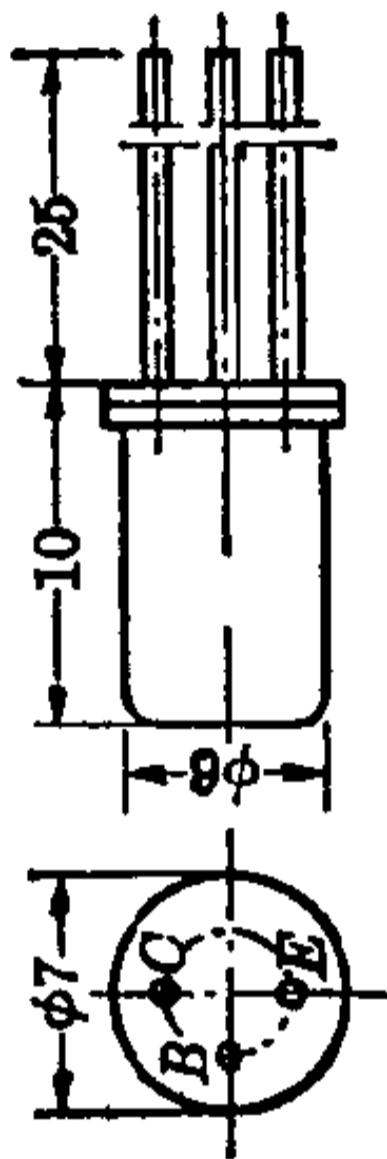
极 限 参 数

参数符号 单位 测试条件 型号	P_{CM} mW	I_{CM} mA	BV_{CBO} V	BV_{EBO} V	BV_{CEO} V	R_f °C/mW
3 AG 1 B	50	10	12	0.8	$I_C = -0.5mA$ 8	1
3 AG 1 C	50	10	20	0.8	$I_E = 0.5mA$ 10	1
3 AG 1 D	50	10	20	0.8	$I_C = -1mA$ 10	1
3 AG 1 E	50	10	20	0.8	10	1
3 AG 1 FJ	50	10	20	≥ 1.5	≥ 15	1

主 要 参 数

参数符号	I_{CBO}	I_{EBO}	h_{FE}	f_T	$r_{bb'}$	C_c
单位	μA	μA	—	MC	Ω	pF
测试条件	$V_{CB} = -6V$	$V_{EB} = -0.5V$	$V_{CB} = -6V$ $I_E = 1mA$ $f = 1KC$	$V_{CB} = -6V$ $I_E = 1mA$ $f = 10MC$	$V_{CB} = -6V$ $I_E = 1mA$ $f = 5MC$	$V_{CB} = -6V$ $I_E = 0$ $f = 5MC$
参 数 值						
型号						
3 AG 1 B	≤ 7	≤ 20	20—200	≥ 25	≤ 100	≤ 7
3 AG 1 C	≤ 7	≤ 20	30—200	≥ 40	≤ 70	≤ 6
3 AG 1 D	≤ 7	≤ 20	30—200	≥ 50	≤ 70	≤ 5
3 AG 1 E	≤ 7	≤ 20	30—200	≥ 65	≤ 50	≤ 4

参数符号	I_{CBO}	I_{EBO}	f_T	$ Y_{fE} $	R_{iE}	R_{oE}	$r'_{bb'}$	h_{fE}
单位	μA	μA	MC	mA/V	Ω	k Ω	Ω	—
测试条件	$V_{CB} = -6V$	$V_{EB} = -0.5V$	$V_{CE} = -6V$ $I_E = 1mA$ $f = 10MC$	$V_{CE} = -6V$ $I_E = 1mA$ $f = 25MC$			$V_{CB} = -6V$ $I_E = 1mA$ $f = 5MC$	$V_{CE} = -6V$ $I_E = 1mA$ $f = 1kC$
参 数 值	≤ 10	≤ 10	≥ 65	≥ 20	≥ 100	≥ 4	≤ 35	30—300
型号	3 AG 1 FJ							



外形图 3AG1型

3 AG 11—14 型高频小功率三极管

主要用途:

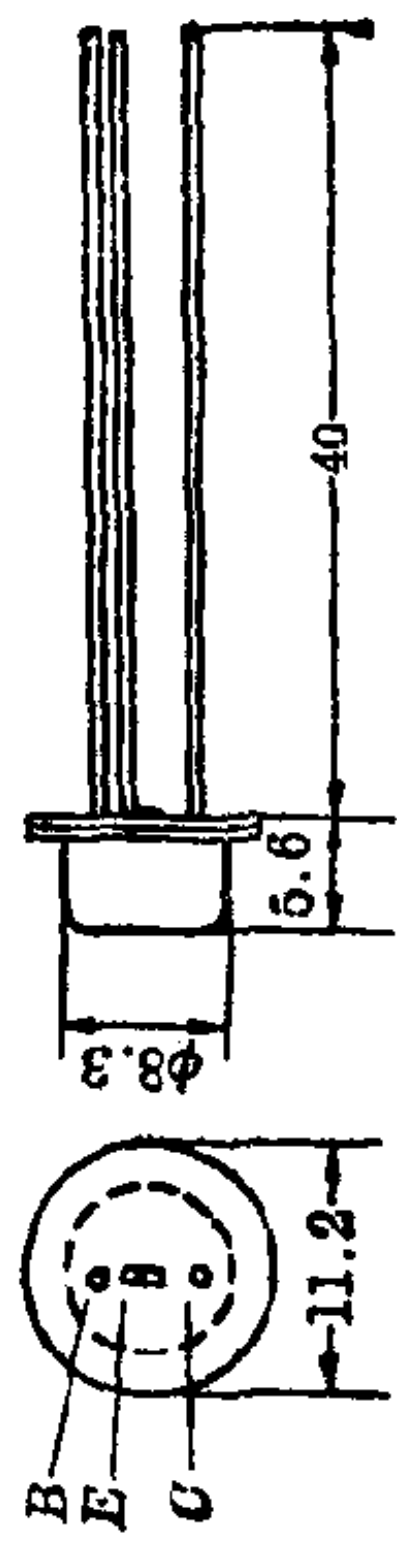
适用于电子设备的高频放大、振荡电路中。

极 限 参 数

参数符号 单位 测试条件 参 数 值 型号	BV_{CB}	BV_{EBO}	P_{CM}	I_{CM}	T_{jM}
	V	V	mW	mA	°C
3 AG 11	20	1	60	10	85
3 AG 12	20	1	60	10	85
3 AG 13	20	1	60	10	85
3 AG 14	20	1	60	10	85

主 要 参 数

参数符号	单位		测试条件		参 数 值		型号		
I_{CBO}		h_{fB}	h_{oB}	h_{iB}	f_{max}	$r_{bb'}$	C_{OB}		
μA	—	$\mu\bar{O}$	$V_{CB}=-6V$ $I_E=1mA$ $f=1kC$		MC	nS	pF		
$V_{CB}=-6V$					$V_{CB}=-5V$ $I_E=7.5mA$	$V_{CB}=-6V$ $I_E=1mA$ $f=5MC$	$V_{CB}=-6V$ $f=5MC$		
					≥ 30	≤ 3500	≤ 15		
					≥ 60	≤ 1500	≤ 10		
					≥ 120	≤ 1000	≤ 5		
					≥ 120	≤ 1000	≤ 5		
3 AG 11	≤ 10	≥ 0.95	≤ 5	≤ 50					
3 AG 12	≤ 5	≥ 0.95	≤ 5	≤ 50					
3 AG 13	≤ 5	0.95—0.98	≤ 5	≤ 50					
3 AG 14	≤ 5	0.98—0.997	≤ 5	≤ 50					



外形图 3 AG 11—14 型

3 DG 6 型高频小功率三极管

主要用途:

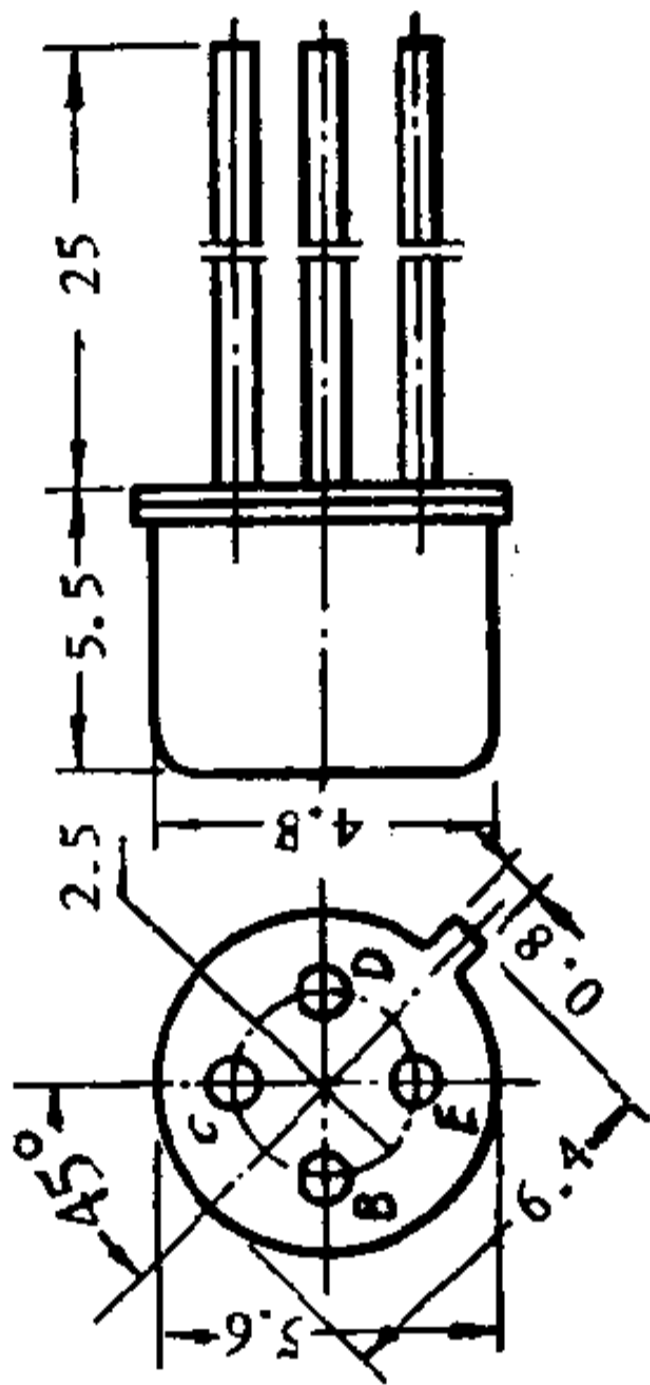
适用于电子设备的变频级、振荡级和变频放大电路中。

极 限 参 数

参数符号	P_{CM}	I_{CM}	BV_{CBO}	BV_{EBO}	BV_{CEO}	T_{jM}
单位	mW	mA	V	V	V	°C
测试条件			$I_C=100\mu A$	$I_E=-100\mu A$	$I_C=200\mu A$	
型号						
3 DG 6 A	100	20	30	4	15	150
3 DG 6 B	100	20	45	4	20	150
3 DG 6 C	100	20	45	4	20	150
3 DG 6 D	100	20	45	4	30	150

主 要 参 数

参数符号	I_{CBO}	I_{EBO}	I_{CEO}	V_{BES}	h_{fE}	f_T	C_{OB}	K_P
单位	μA	μA	μA	V	—	MC	pF	db
测试条件	$V_{CB}=10V$	$V_{EB}=1.5V$	$V_{CE}=10V$	$I_C=10mA$ $I_B=1mA$	$V_{CB}=10V'$ $I_C=3mA$	$V_{CE}=10V$ $I_C=3mA$ $f=30MC$	$V_{CB}=10V$ $I_C=3mA$ $f=5MC$	$V_{CB}=10V$ $I_C=3mA$ $f=100MC$
参 数 值	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 1.1	10—200	≥ 100	≤ 4	≥ 7
3 DG 6 A	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 1.1	20—200	≥ 150	≤ 3	≥ 7
3 DG 6 B	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 1.1	20—200	≥ 250	≤ 3	≥ 7
3 DG 6 C	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 1.1	20—200	≥ 150	≤ 3	≥ 7
3 DG 6 D	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 1.1	20—200	≥ 150	≤ 3	≥ 7



外形图 3 DG 6 型

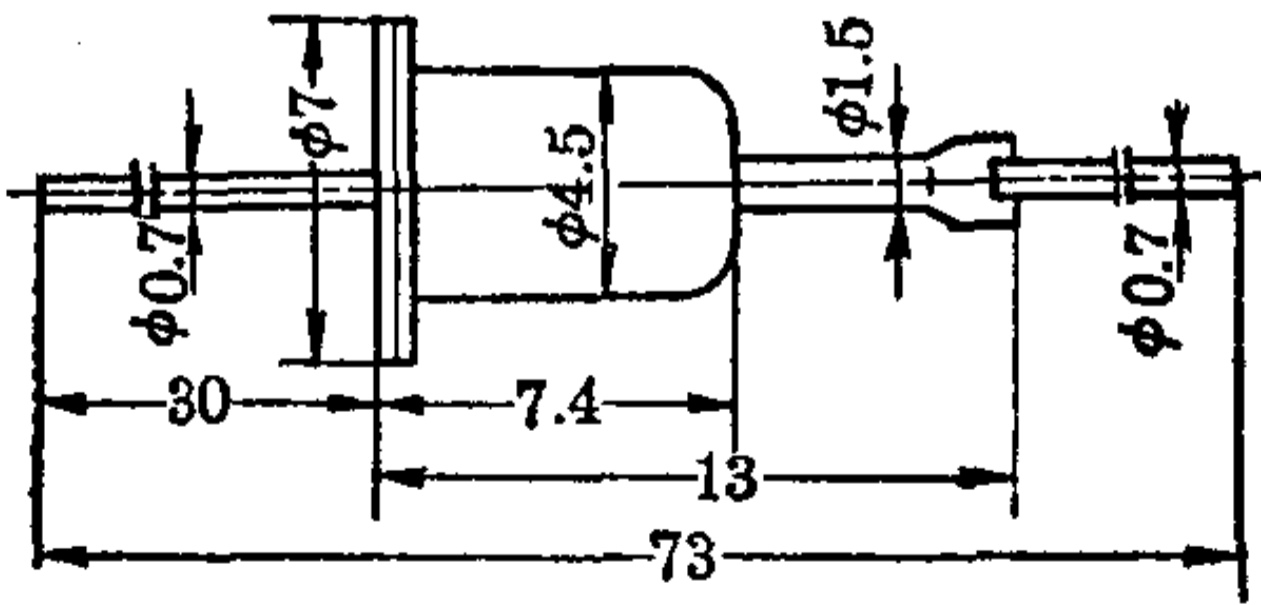
附录五 国产稳压管参数选录

2 CW 1—2C W 6

主要用途：
用于电子设备的稳压线路中。

主 要 参 数

参数名称		稳定电压	电压温度系数	耗散功率	最大稳定电流	动态电阻		正向压降	反向电阻
单 位		V	%/°C	mW	mA	Ω		V	MΩ
测试条件		稳定电流为 5mA	稳定电流为 5mA	20—50°C		稳定电流		正向电流为 50 mA	$U_R=1V$
						1 mA	5 mA		
型 号	2 CW 1	7— 8.5	≤0.07	280	33	≤12	≤ 6	≤1	>10
	2 CW 2	8— 9.5	≤0.08	280	29	≤18	≤10	≤1	>10
	2 CW 3	9—10.5	≤0.09	280	26	≤25	≤12	≤1	>10
	2 CW 4	10—12	≤0.095	280	23	≤30	≤15	≤1	>10
	2 CW 5	11.5—14	≤0.095	280	20	≤35	≤18	≤1	>10
	2 CW 6	13.5—17	≤0.10	280	—	≤45	≤21	≤1	>10



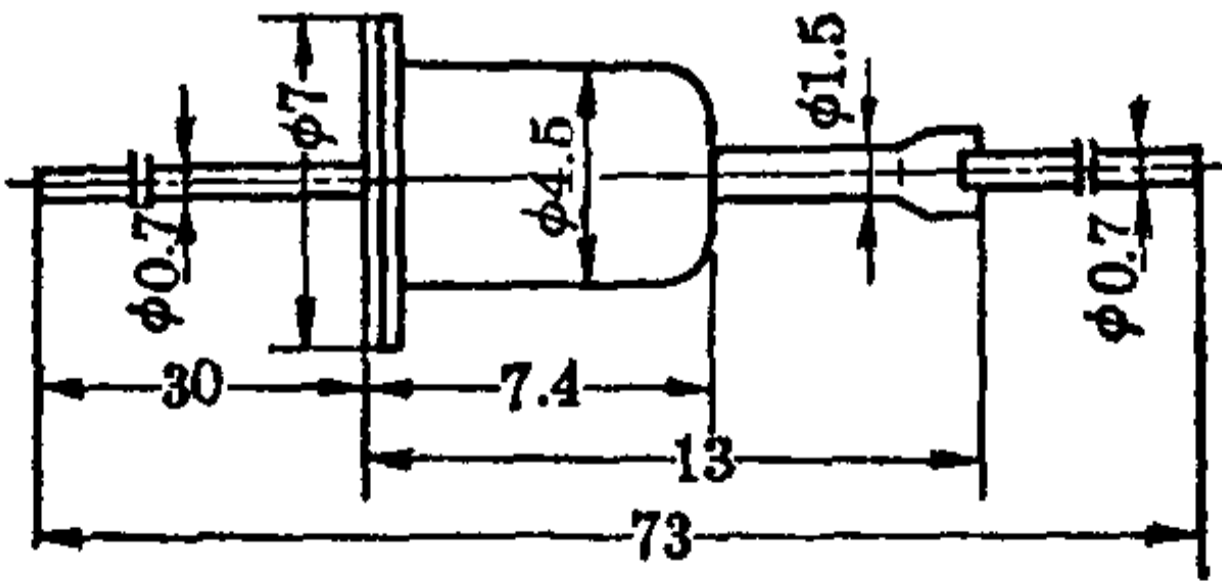
外形图 2 CW 1—2 CW 6 型

2 CW 11 — 2 CW 20

主要用途：
用于电子设备的稳压线路中。

主 要 参 数

参数名称		稳定电压	电压温度系数	耗散功率	最大稳定电流	动态电阻	正向压降	稳定电流	反向电阻
单 位		V	%/°C	mW	mA	Ω	V	mA	M Ω
测试条件		工作电流 等于 稳定电流	工作电流等于 稳定电流 25—75°C	—60— +50°C	—60— +50°C	工作电 流等于 稳定 电流	正向电 流为 50 mA	工作电 压等于 稳定 电压	
型 号	2 CW 11	3.2—4.5	—0.05—+0.03	250	55	≤ 70	≤ 1	10	> 10
	2 CW 12	4—5.5	—0.04—+0.04	250	45	≤ 50	≤ 1	10	> 10
	2 CW 13	5—6.5	—0.03—+0.05	250	38	≤ 30	≤ 1	10	> 10
	2 CW 14	6—7.5	+0.06	250	33	≤ 15	≤ 1	10	> 10
	2 CW 15	7—8.5	+0.07	250	29	≤ 15	≤ 1	5	> 10
	2 CW 16	8—9.5	+0.08	250	26	≤ 20	≤ 1	5	> 10
	2 CW 17	9—10.5	+0.09	250	23	≤ 25	≤ 1	5	> 10
	2 CW 18	10—12	+0.095	250	20	≤ 30	≤ 1	5	> 10
	2 CW 19	11.5—14	+0.095	250	18	≤ 40	≤ 1	5	> 10
	2 CW 20	13.5—17	+0.095	250	15	≤ 50	≤ 1	5	> 10



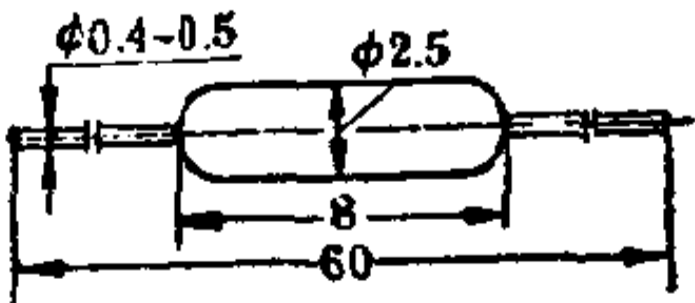
外形图 2 CW 11 — 2 CW 20 型

2CW7, 2CW7A—2CW7N

主要用途：
用于电子设备的稳压线路中。

主要参数

参数名称		稳定电压	电压温度系数	耗散功率	最大稳定电流	动态电阻		正向压降	反向电阻
单位		V	%/°C	mW	mA	Ω		V	MΩ
测试条件		7,7A—7D型稳定电流10mA 7E—7N型稳定电流5mA		-60°C— +50°C		稳定电流		正向电流为50 mA	反向电压为1V
						5 mA	10 mA		
型号	2CW7	2.5—3.5	-0.06—+0.02	250	71		≤80	≤1	≥10
	2CW7A	3.2—4.5	-0.05—+0.03	250	55		≤70	≤1	≥10
	2CW7B	4—5.5	-0.04—+0.04	250	45		≤50	≤1	≥10
	2CW7C	5—6.5	-0.03—+0.05	250	38		≤30	≤1	≥10
	2CW7D	6—7.5	+0.06	250	33		≤15	≤1	≥10
	2CW7E	7—8.5	+0.07	250	29	≤15		≤1	≥10
	2CW7F	8—9.5	+0.08	250	26	≤20		≤1	≥10
	2CW7G	9—10.5	+0.09	250	23	≤25		≤1	≥10
	2CW7H	10—12	+0.095	250	20	≤30		≤1	≥10
	2CW7I	11.5—14	+0.095	250	18	≤40		≤1	≥10
	2CW7J	13.5—17	+0.095	250	14	≤50		≤1	≥10
	2CW7K	16.5—20	+0.10	250	12.5	≤60		≤1	≥10
	2CW7L	19.5—23	+0.10	250	10.5	≤70		≤1	≥10
	2CW7M	22.5—26	+0.11	250	9.5	≤85		≤1	≥10
	2CW7N	25.5—30	+0.11	250	8	≤100		≤1	≥10



外形图 2CW7, 2CW7A—2CW7N型

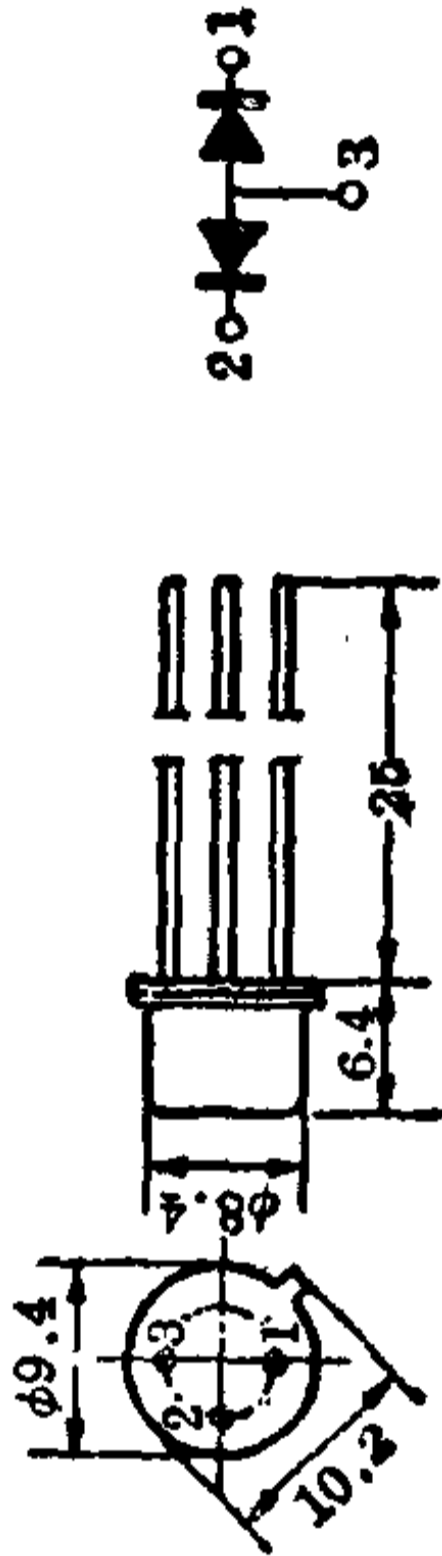
2DW7A—2DW7C

主要用途:

用于电子设备中的精密稳压源

主要参数

参数符号	稳 定 电 压	电 压 温 度 系 数	耗 散 功 率	最 大 稳 定 电 流	工 作 动 态 电 阻	稳 定 电 流
参 数 值	V	%/°C	mW	mA	Ω	mA
单 位						
测 试 条 件	工 作 电 流 等 于 稳 定 电 流	工 作 电 流 等 于 稳 定 电 流 25—75°C	-60—+50°C	-60—+50°C	工 作 电 流 等 于 稳 定 电 流	工 作 电 压 等 于 稳 定 电 压
型 号						
2DW7A	5.8—6.6	0.005	200	30	≤ 25	10
2DW7B	5.8—6.6	0.005	200	30	≤ 15	10
2DW7C	6.1—6.5	0.005	200	30	≤ 10	10



外形图 2DW7A—2DW7C型