

电子技术讲座 (二)

晶体管放大与振荡电路

(修订本)

上海市业余工业大学编

内 容 简 介

本书介绍晶体三极管、低频小信号放大器、负反馈放大器、功率放大器、直流放大器、稳压电源、自激振荡的工作原理和基本分析方法，各章列举了一些工农业生产中的应用实例和产品电路，供读者在实践时参考。

本书内容通俗易懂，深入浅出，可供有关工厂的工人和技术人员阅读，也可供高等院校、中专的有关专业的教师和学生参考。

电子技术讲座共四本，分别是：《晶体管整流电路》、《晶体管放大与振荡电路》、《晶体管收音机》、《晶体管开关电路》。

电子技术讲座(二) 晶体管放大与振荡电路 (修订本)

上海市业余工业大学编

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1976年8月第一次印刷 印张：9 3/4 插页：1

印数：0001—604,300 字数：221,000

统一书号：15031·98

本社书号：473·15—7

定价：0.62元

目 录

第一章 晶体三极管	(1)
第一节 晶体三极管的基本结构	(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	(15)
第五节 晶体三极管的简易测试	(19)
本章小结	(25)
第二章 低频小信号放大器	(27)
第一节 直流工作点的建立	(27)
第二节 偏置电路的稳定性	(39)
第三节 单级放大器	(47)
第四节 多级放大器	(52)
第五节 应用实例	(64)
本章小结	(68)
第三章 负反馈放大器	(70)
第一节 什么是负反馈	(70)
第二节 负反馈为什么能改善放大器的质量指标	(72)
第三节 单级负反馈电路	(77)
第四节 多级放大器中如何引入反馈	(87)
第五节 怎样判别负反馈电路	(92)
第六节 怎样合适选用负反馈	(94)
本章小结	(96)
第四章 功率放大器	(98)
第一节 单管功率放大器	(99)

第二节	乙类推挽功率放大器	(108)
第三节	无变压器功率放大器	(116)
第四节	功放集成电路	(127)
第五节	应用实例	(131)
本章小结		(140)
第五章	直流放大器	(142)
第一节	直流放大器中出现的新矛盾	(142)
第二节	差动放大器	(143)
第三节	调制型直流放大器	(154)
第四节	应用实例	(164)
本章小结		(180)
第六章	晶体管直流稳压电源	(181)
第一节	硅稳压管稳压器	(181)
第二节	串联型负反馈稳压电路	(185)
第三节	串联型负反馈稳压电路的简单计算	(192)
第四节	应用线路举例	(200)
本章小结		(211)
第七章	自激振荡电路	(213)
第一节	自激振荡的基本原理	(214)
第二节	LC 回路的选频特性	(216)
第三节	几种 LC 振荡电路	(221)
第四节	LC 振荡电路的调试	(230)
第五节	LC 振荡电路应用举例	(232)
第六节	RC 振荡器	(246)
第七节	石英晶体振荡器	(254)
本章小结		(259)
附录一	晶体管几个参数的说明	(260)
附录二	半导体器件参数选录	(270)

第一章 晶体三极管

无产阶级文化大革命和批林批孔运动，是使我国社会生产力发展的一个强大推动力，我国工人阶级和广大群众以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，狠批刘少奇、林彪一类鼓吹的洋奴哲学和爬行主义，破除迷信，解放思想，坚持独立自主、自力更生，在大搞技术革新和技术改造的群众运动中，广泛采用电子技术，取得了丰硕的成果。不少地区，由于依靠工人群众，走自力更生的道路，大力推广应用电子技术，在有些行业中实现了全行业生产自动化、半自动化，并正向着“电子群控”的新技术方向发展。

“卑贱者最聪明！高贵者最愚蠢。”电子技术是劳动人民创造的。广大工农兵群众就是能够掌握它，应用它。在毛主席革命路线指引下，广大群众掌握了电子技术，一定能够为巩固和加强无产阶级专政，为我国全面实现农业、工业、国防和科学技术的现代化作出贡献。

第一节 晶体三极管的基本结构

晶体三极管是具有三个电极的半导体器件，它的基本特点是能起“放大”和“开关”作用。与电子管相比，晶体三极管具有体积小、重量轻、坚固耐震、使用寿命长、可靠、省电等优点，应用广泛。常见的管形如图 1-1 所示。

我们知道，二极管有一个 PN 结，用图 1-2(1) 符号表示。如果在一块半导体上制造二个距离很近的 PN 结，这样就形

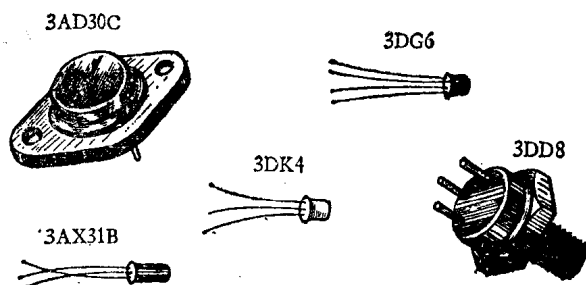


图 1-1

成晶体三极管了。根据组合方式的不同，晶体三极管有 PNP 型和 NPN 型两类[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：PNP 型晶体管中间是 N 区，两边是 P 区，NPN 型晶体管中间是 P 区，两边是 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 PN 结，叫发射结，集电极和基极形成的那个 PN 结，叫集电结。

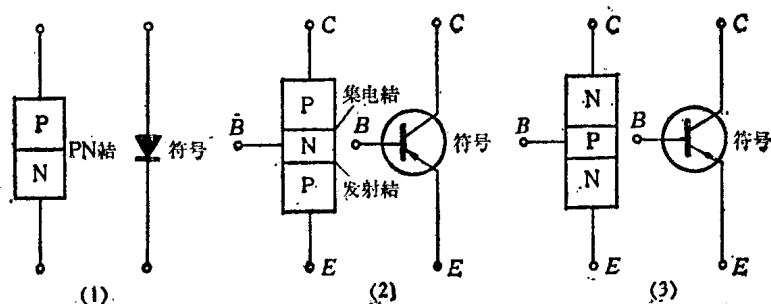


图 1-2

晶体管可以用锗单晶制造，也可以用硅单晶制造，因此，按晶体管制作材料的不同，有锗晶体管和硅晶体管等。

晶体三极管主要具有放大作用，下面我们以 PNP 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 I_E ，基极电流 I_B 和集电极电流 I_C 。

为了了解晶体三极管中电流分配的规律，在图 1-3 电路中串接入三个电流表，如图 1-4 所示，分别用来测量晶体管的三个电流。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。

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

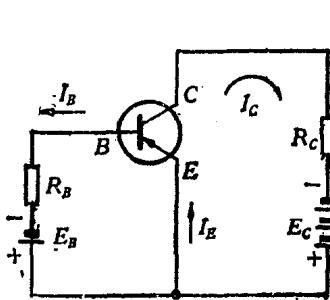


图 1-3

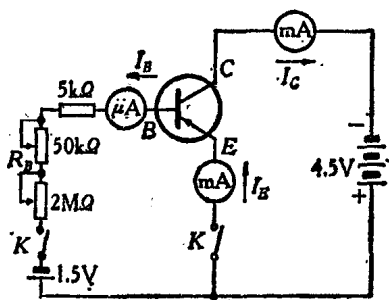


图 1-4

据列在表 1-1 中,通过这样的测量,我们可从表中找出如下规律:

表 1-1

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

(1) 表中纵向数据都满足 $I_E = I_B + I_C$ 。

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,发射极电流极大部分流向集电极。可以形象地用图 1-5 来描述。

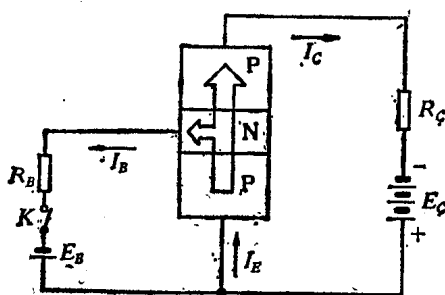


图 1-5

(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,这两个变化量之比为 $\frac{1.972 - 0.990}{0.028 - 0.010} = \frac{0.982}{0.018} \approx 54$,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 是晶体三极管的主要参数之一, 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, 还与管子的工作电流大小有关, 也就是说一只管子在不同的工作电流下 β 是不一样的。从表 1-1 中也可看出, 不同的 I_C , β 也不同。

(3) 表中 $I_B=0$ 时, I_C 不等于零, 我们把这个电流称为集电极-基极的反向截止电流, 用 I_{CBO} 来表示。它是发射极断开, 集电结加上反向电压时流过集电结的反向漏电流。如图 1-6(1)所示。

还有, 表中当 $I_B=0$ 时, I_C 不是零。我们把这个电流称为集电极-发射极的反向截止电流, 用 I_{CEO} 表示。它是基极断开, 流过发射极、集电极之间的电流, 习惯上又称穿透电流, 如图 1-6(2)所示。

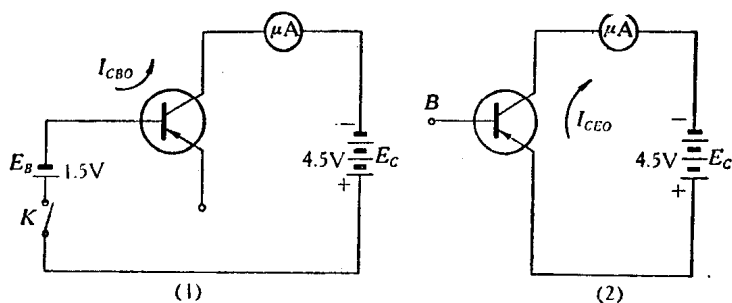


图 1-6

I_{CEO} 与 I_{CBO} 是晶体三极管质量指标的重要参数, 它们之间的关系是 $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$, 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 , 不仅仅是 βI_B , 同时还要加上 I_{CEO} , 所以电流相互关系应该是:

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

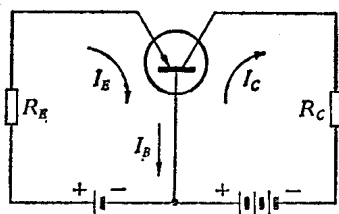


图 1-7 共发射极电路

上面得到的电流放大倍数 β , 是集电极电流 ΔI_C 与基极电流 ΔI_B 的比值, 它意味着把 ΔI_B 作为输入电流, ΔI_C 作为输出电流, 这样发射极自然成为输入与输出的公共端, 电路这种连接方式,

称为共发射极电路。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 α 表示, 其关系式为 $\alpha \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$, 可以看出, α 就是在单位时间内发射极发射到集电极的电荷数与发射极发射出的电荷总数的百分比, 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, 常用作电压放大和功率放大。根据

$\beta \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 和 $\alpha \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$, 可找出 β 与 α 之间关系为:

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

例如, $\alpha = 0.98$, 则 β 为

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

上面讨论了 PNP 型晶体管的工作原理, NPN 型晶体管的工作原理与 PNP 型基本一样, 只要把外接电源极性反过来, 而电流方向也相反, 如图 1-8 所示。

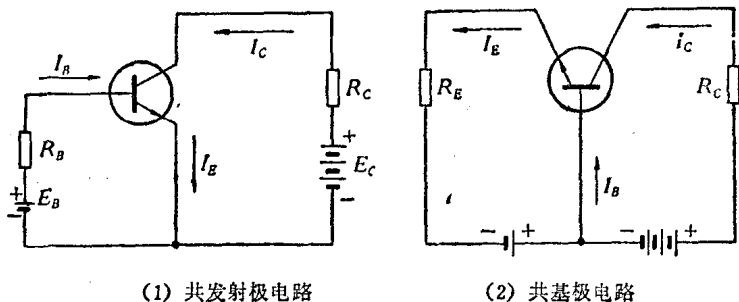


图 1-8

第三节 用于生产中的晶体管简单电路举例

知道了晶体管的特性和原理后，我们如何来应用它呢？为此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) 中串一只开关 K ，图(2) 中用一只 47 千欧的可变电阻器，图(3) 中用一只晶体三极管。

在图(1) 中，当开关一合上，回路中就有电流通过， $I_1 = \frac{E_0}{R} = \frac{20 \text{ 伏}}{3 \text{ 千欧}} \approx 6.7 \text{ 毫安}$ ，而继电器吸动电流是 6 毫安，故此时继电器动作，从而去控制其它电器设备。

在图(2) 中，当电位器 R_1 调节到最大值时，电路中电流为：

$$I_2 = \frac{E_0}{R_1 + R_2} = \frac{20 \text{ 伏}}{47 \text{ 千欧} + 3 \text{ 千欧}} = \frac{20 \text{ 伏}}{50 \text{ 千欧}} = 0.4 \text{ 毫安}$$

继电器不动作。若电位器 R_1 调节到零值时，电流为：

$$I_2 = \frac{E_0}{R} = \frac{20 \text{ 伏}}{3 \text{ 千欧}} \approx 6.7 \text{ 毫安}$$

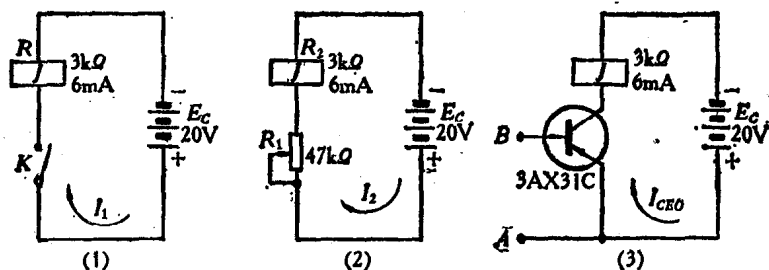


图 1-9

情况就同图(1)一样, J 动作。

图(3)电路中换上一只晶体三极管(3AX31C),并多出A,B两个接头。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} (从附录查得3AX31C的 $I_{CEO} \leq 0.50$ 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 βI_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可变电阻用罢了。

“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。工人老师傅急生产所急,利用三极管的放大特性,做成拉丝断头自动停机装置,方法很简单,在晶体管基极回路内串一只2CR11硅光电池,如图1-11所示。当拉丝断头时,挡板下落,光线照在硅光电池上,硅光电池两端出现电压,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

可使继电器 J 动作,再由 J 带动开关使机器停车, 实现了拉丝断头自动停车,扩大看台数,降低了劳动强度,提高了产品质量。

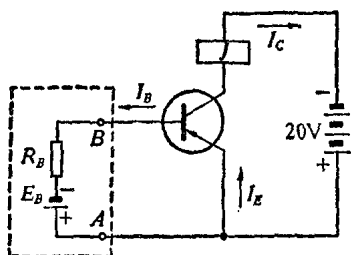


图 1-10

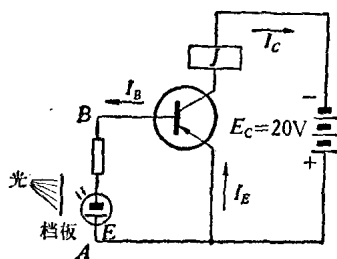


图 1-11

在上例的启发下,同样可以利用另一种光电器件,图1-12中 $R_{\text{光}}$ 是一只 625-A 型光敏电阻,它在光照时电阻小,光暗时电阻很大, $R_{\text{亮}} \leq 50$ 千欧, $R_{\text{暗}} \geq 50$ 兆欧,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 $\beta = 50$)。

当光照时

$$I_{B\text{亮}} = \frac{20 \text{ 伏}}{50 \text{ 千欧}} = 0.4 \text{ 毫安}$$

$$I_{C\text{亮}} = 0.4 \times 50 = 20 \text{ 毫安}$$

所以足够使继电器动作。

当光暗时

$$I_{B\text{暗}} = \frac{20 \text{ 伏}}{50 \text{ 兆欧}} = 0.4 \text{ 微安}$$

$$I_{C\text{暗}} = 0.4 \times 50 = 20 \text{ 微安}$$

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,晶体三极管不但能起到开关和可变电阻的作用,更重要的是它有放大作用,能把微弱变化的电流信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。图 1-13 是在基极回路中串一只水银温度计,当温度升高,水银上升到 B 点时, A, B 两点接通产生基极电流,

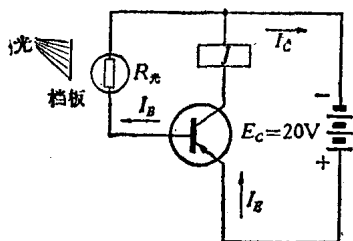


图 1-12

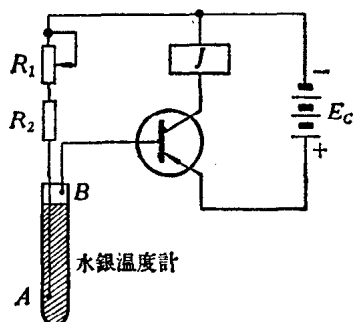


图 1-13 温度控制计

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,以免当 R_1 调到零时,不致引起过大的基极电流而损坏管子。

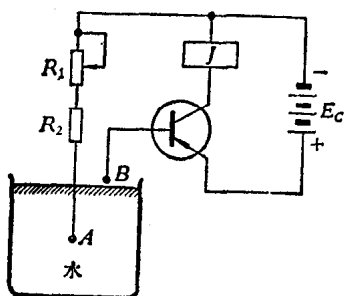


图 1-14 水位控制
继电器

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 两点接通时,就有基极电流流过,使晶体管导通,通过继电器 J 发出警报或切断水源,达到自动控制水位和防汛报警。

图 1-15 中的基极电流,是通过 R_1 , R_2 组成的分压电路得到的, 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 A , B 两个头插到水池中(图 1-16), 其工作原理就同前

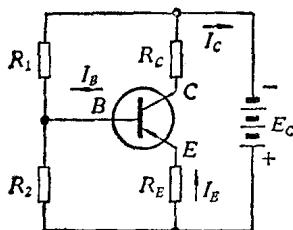


图 1-15

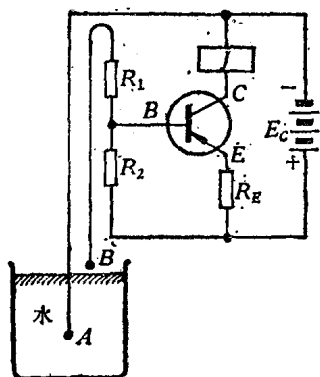


图 1-16 水位控制继电器原理图

面的例子完全一样了。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, 利用水的导电性能, 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, 它是由整流电源、晶体管控制电路、电动机电气线路三部分组成。

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, 再用导线引出, 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, 当水位低于 b 时, 水泵又自动送水 (b 点可以任意调节)。

当水位在 b 点以下时, 晶体管无偏流, BG 不通, J 不吸

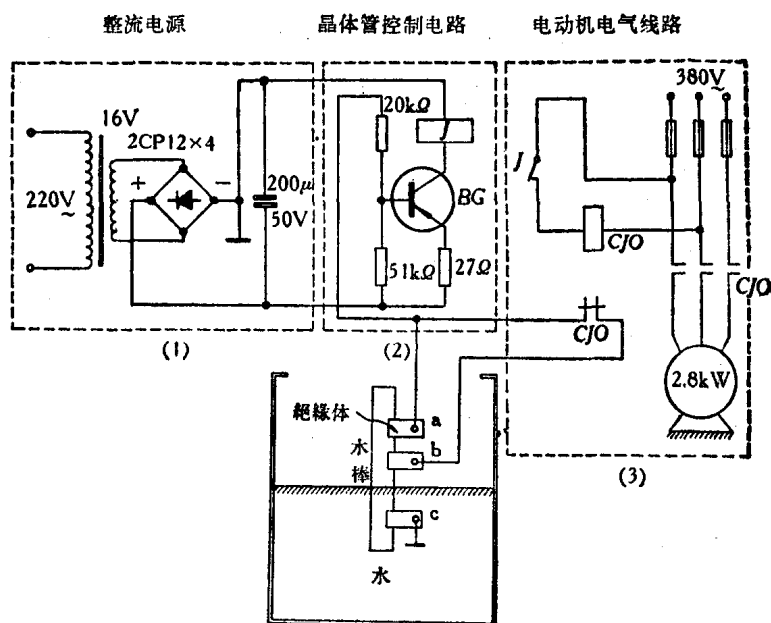


图 1-17 水位控制继电器

动,它的常闭触头使 CJO 线圈保持通电, CJO 常开触头闭合,电动机正常运转,带动水泵往水箱里送水。这时, CJO 的常闭触点处于断开状态。当水上升到 b 点时,由于 CJO 常闭触点断开, 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20千欧电阻由 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,常闭触头 J 还是断开,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。

油酱行业的职工利用自动控制水位的原理，革新成功了酱油控量机，实现了售货的自动控量。图 1-18 就是酱油控量机的原理图。

我们先结合图 1-18(1)，(2) 来分析一下酱油控量机的工作原理。平时计量容器中液面处于 a 的位置，当按下斤两选择开关 KJX 和品种选择开关 KJV 时，晶体管导通，继电器 J_1 通电，它的常开触点闭合，常闭触点脱开。

再按下按钮开关 AN ，则图 1-18(2) 中的第一、第二两条通路接通， J_2 、 J_3 通电自保。此时由于 J_2 的常开触点闭合，使第三条通路中出液电磁阀的线圈通电，打开出液阀，计量容器

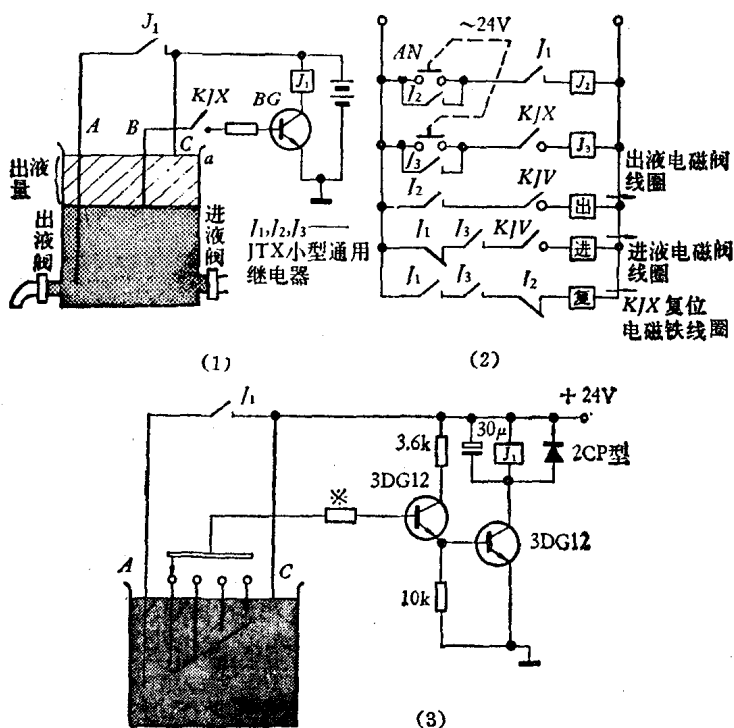


图 1-18