

第三版前言

1969年至1972年，我们陆续编写出版了《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》四本电子技术通俗读物，即电子技术讲座。本讲座自出版以来，颇受到广大读者的欢迎，至今总印数已达七百万册以上。这个事实从一个侧面反映了电子技术的普及很有必要。

本书——《晶体管整流电路》，作为晶体管电路知识的入门书，它的阅读对象是具有中等文化程度的广大读者以及非电专业的工程技术人员。有鉴于此，书中叙述力求通俗易懂。然而谁都知道，凡是亲身体验过的东西较容易学好，所以本书把整流技术的应用作为终点，并力求使书中所选用的实例有益于读者对整流电路原理的理解和激发他们去应用实践。

这次修订再版的《晶体管整流电路》，与前二版比较，有如下几方面的变动：

一、滤波在整流电路中占有重要地位，而原著中这部分内容阐述得过于简单，趁这次修订的机会，把滤波电路的基本原理大为加强了。并从工程应用的实际出发，为含有电容滤波整流电路的设计提供了一套图表和简易计算相结合的实用方法，使原理和应用融为一体。

二、倍压整流电路和小功率整流变压器各另立一章，以便使属于最基本的整流、滤波部分内容更加突出。对倍压整流电路的原理部分的叙述，全部作了重新组织。小功率整流变压器的内容按原理、参数、计算的顺序加以介绍。

三、整流电路的应用实例不专门立为一章，把各类范例分散在各章之内，以便使原理和应用结合得更为紧密。在应用实例中，增添了含有电容滤波整流电路方面的例子，并删去了与直流能耗制动雷同的例子。

四、电路基本知识从前二版的附录中移至第一章，这样变动的目的在于想告诉未学过电学的读者，阅读本书至少应当具备哪些电路知识。

参加《晶体管整流电路》初版编写和第二版修订工作的主要有刘家铨、郭维芹、王式正、周道宏、范茂兴、王国樑、赵铭纪等同志，这次修订工作由郭维芹承担。

“电子技术讲座”的编写和修订工作，得到本校庄正邦教授的具体指导。许多单位的技术人员和工人、我校不少教师和校友提供了大量资料，并得到他们的帮助和鼓励。讲座的编写又得到清华大学童诗白教授和黄昌宁同志的关怀和指导。在此，我们对上述单位和个人表示深切谢意。

本讲座出版以来，得到广大读者的热情鼓励，特别是许多读者来信来访，提出了不少宝贵的意见。我们表示衷心感谢。

限于编者水平，书中缺点和错误在所难免，望读者给予批评指正。

编者

一九八二年七月

目 录

1	电路基本知识	1
1-1	电路	1
1-2	交流电	6
1-3	电容	9
1-4	RC 电路	12
1-5	线圈	16
1-6	RL 电路	23
1-7	变压器	26
2	晶体二极管	29
2-1	半导体	29
2-2	$p-n$ 结	30
2-3	晶体二极管	35
	本章小结	40
3	整流电路	41
3-1	单相半波电阻负载整流电路	41
3-2	单相全波电阻负载整流电路	44
3-3	单相桥式电阻负载整流电路	48
3-4	三相桥式电阻负载整流电路	51
3-5	整流元件的串联和并联	54
3-6	整流元件的过电流、过电压保护	57
3-7	应用举例	59
	本章小结	70

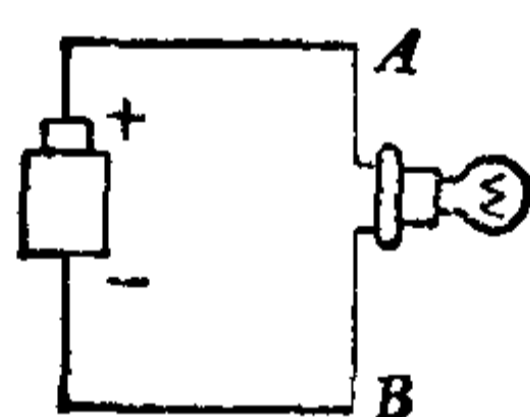
4	滤波器	74
4-1	电容滤波器	76
4-2	电感滤波器	89
4-3	复式滤波器	92
4-4	应用举例	95
	本章小结	98
5	倍压整流电路	101
5-1	二倍压整流电路	101
5-2	三倍压、多倍压整流电路	104
5-3	应用举例	107
	本章小结	110
6	小功率整流变压器	112
6-1	变压器的工作原理	112
6-2	整流变压器的设计步骤	115
6-3	整流变压器的计算举例	120
	本章小结	125
7	可控硅简介	126
7-1	可控硅整流元件工作情况	126
7-2	可控硅整流元件应用举例	129
	本章小结	137
	附录一 常用晶体二极管参数	139
	附录二 电气元件图形符号	146

电路基本知识

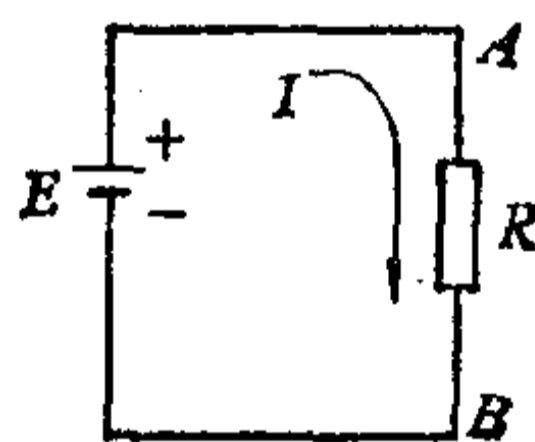
为了便于初学者学习晶体管电子技术，这里我们介绍一些最基本的电路知识。

1-1 电 路

用导线把电源和负载连接起来，形成回路，在回路中就有电流流过，我们称作电路。图 1-1(1) 是把电源(电池)和负载(小灯泡)连接起来的实物图。常见的电路图上，往往是用符号及文字来表示。如图 1-1(2) 所示，直流电源用符号 $\text{—}| \text{—}^+$ 及文字 E 表示；电阻用符号 $\text{—}\square\text{—}$ 和文字 R 表示(这里的负载即小灯泡，实际也是一只电阻)等等。



(1)



(2)

图 1-1

在电路中有开路、通路、短路三种情况，如图 1-2 所示。开关未按下，电路不通，灯泡不亮，这种情况叫开路(也叫断路)。

开关按下，电路接通，电流从电池正极经开关、负载流入

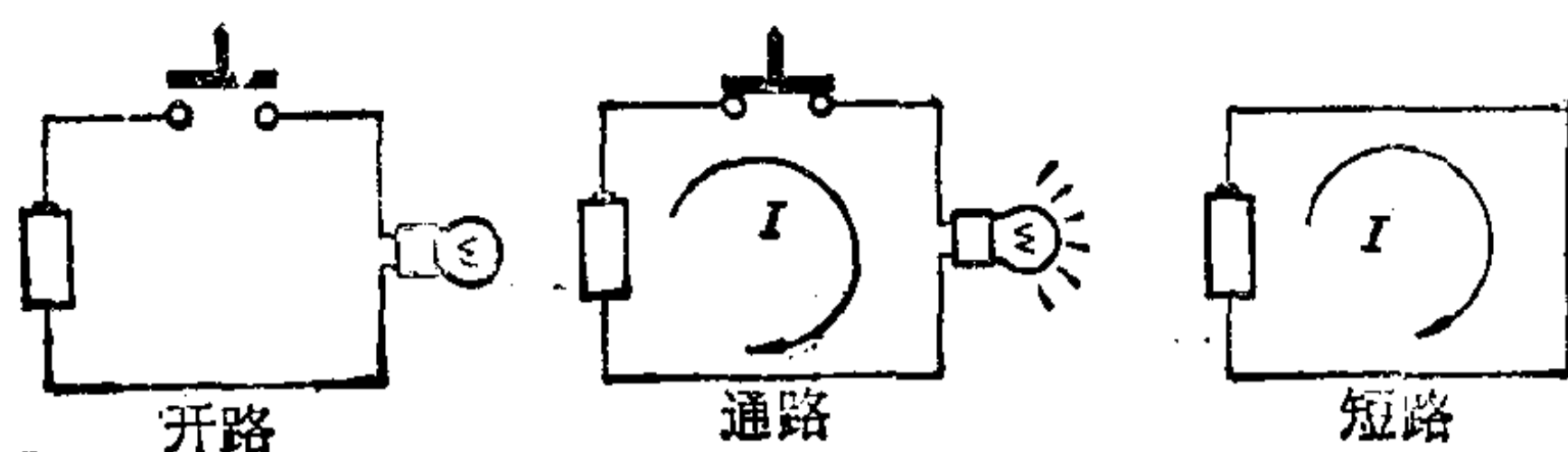


图 1-2

电池负极,灯泡发光,这种情况叫通路.

如用一根导线直接和电源的两极相接触,此时电流几乎不经过负载而从导线中直接通过,这时的电流比正常情况下大得多,这种现象叫做短路. 电源短路时,会损坏电源和导线,甚至酿成事故. 在实际工作中应绝对避免发生短路现象.

我们知道电池有正极和负极,电池两端之间有电压,一节干电池电压约 1.5 伏. 在电工上也常常这样讲: 假设电池负极即 B 点电位为零伏, 则电池正极即 A 点电位就是 1.5 伏,可以看出 A 点和 B 点的电位差为:

A 点电位 $- B$ 点电位 $= 1.5$ 伏 $- 0$ 伏 $= 1.5$ 伏
等于电池的电压. 也就是说,电路中任意两点的电位之差,等于这两点之间的电压.

1. 欧姆定律

我们知道,在电路中有电流流过时,它必然还和其它一些东西例如电压和电阻发生联系. 实验证明,如果温度等其他条件不变,电流、电压和电阻三者间的关系是:

$$I(\text{电流}) = \frac{U(\text{电压})}{R(\text{电阻})} \quad (1-1)$$

上式表明: 加到一个电阻(阻值不变的情况下)上的电压越大,则电流越大; 电压增加几倍,电流也增加几倍. 电压和电流成正比这种规律,我们称它为欧姆定律.

根据欧姆定律,电压、电流、电阻三个量中,只要知道两个,就可以求出第三个。

已知电压、电流,则可根据式 $R = \frac{U}{I}$ 求出电阻。

已知电阻、电流,则可根据式 $U = IR$ 求出电压。

电压的单位用伏、毫伏、微伏表示;电流的单位用安、毫安、微安表示;电阻的单位用欧、千欧、兆欧表示。1伏=1安×1欧。各量大小单位有如下的换算关系:

1伏(V)=1000毫伏(mV)=1000000微伏(μ V);

1安(A)=1000毫安(mA)=1000000微安(μ A);

1千欧(k Ω)=1000欧(Ω);

1兆欧(M Ω)=1000千欧(k Ω)=1000000欧(Ω)。

【例1-1】某厂有一台镀锌设备,最高直流电压是12伏,最大电流是500安,求这时电镀槽的总电阻。

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12 \text{ 伏}}{500 \text{ 安}} = 0.024 \text{ 欧}$$

【例1-2】某直流电动机电枢内阻为1欧,通过的电流为3安,求内阻上的压降。

$$U = IR = 3 \text{ 安} \times 1 \text{ 欧} = 3 \text{ 伏}$$

2. 电阻的串联和并联

在实际应用中,往往有这样的事情,电路中的电阻需用某值(例如100千欧),而手头只有阻值比它小的电阻(例如两只50千欧)或较大的电阻(例如两只200千欧),这时我们可以用电阻的串联或并联来解决。

如图1-3(1)所示,两电阻串联后的总电阻为

$$R_{AB} = R_1 + R_2 \quad (1-2)$$

如图1-3(2)所示,两电阻并联后的总电阻为

$$R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-3)$$

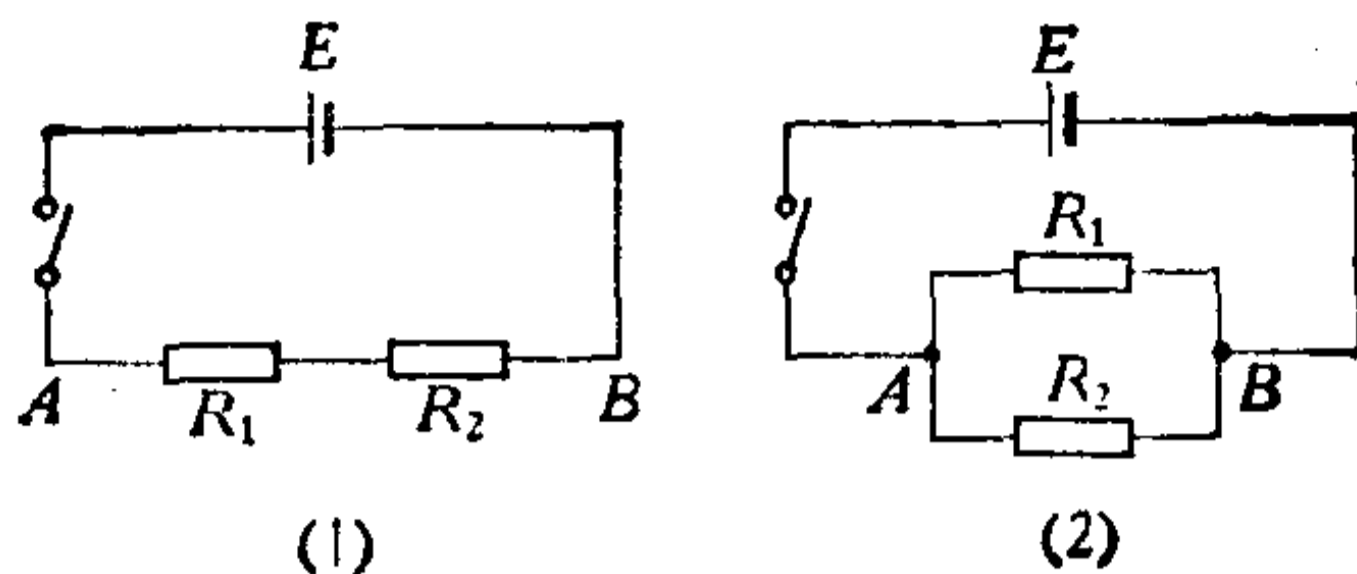


图 1-3

现在我们来计算一下：

(1) 需要总电阻 100 千欧，而手头只有两只 50 千欧电阻，那末就用串联来解决，根据公式(1-2)得：

总电阻 $R_{AB} = R_1 + R_2 = 50 \text{ 千欧} + 50 \text{ 千欧} = 100 \text{ 千欧}$ ，可以满足要求。

(2) 需要总电阻 100 千欧，而手头只有两只 200 千欧电阻，那末就用并联来解决，根据公式(1-3)得：

$$\text{总电阻 } R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{200 \text{ 千欧} \times 200 \text{ 千欧}}{200 \text{ 千欧} + 200 \text{ 千欧}} = 100 \text{ 千欧}$$

欧，可以满足要求。

两只或两只以上的电阻串联和并联也可以利用下面公式计算：

$$\text{串联 } R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

$$\text{并联 } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

3. 功率

电流流过电阻要消耗功率。消耗在电阻上的功率是流过电阻的电流 I 与加在这电阻上的电压 U 的乘积，可用式(1-4)表示：

$$P(\text{功率}) = UI = I^2R = \frac{U^2}{R} \quad (1-4)$$

电压的单位是伏(V),电流的单位是安(A),对应的功率单位是瓦(W)。此外,功率也用千瓦、毫瓦表示。1千瓦=1000瓦,1毫瓦=0.001瓦。例如上面例1-2中电枢电阻所消耗的功率为

$$P = I^2R = (3 \text{ 安})^2 \times 1 \text{ 欧} = 9 \text{ 瓦}$$

4. 电阻的种类

电阻的种类很多,目前工业生产上应用的一般有炭膜电阻、金属膜电阻和线绕电阻等(此外,还有一种炭质电阻)。炭膜电阻常用的有RT系列和RTX系列,电阻规格直接用数字标在电阻上,额定功率有:1/20瓦、1/16瓦、1/8瓦、1/4瓦、1/2瓦、1.0瓦、2.0瓦、5.0瓦、10瓦等。对阻值稳定性要求高及功率要求大的电阻常采用线绕电阻,常用的有RX系列和RXY系列(珐琅电阻),RXY系列额定功率有7.5瓦、15瓦、20瓦、25瓦、50瓦、75瓦、150瓦。

电子电路中还常用电位器,它有三个接线端,中间一个可以滑动,它常用作分压器和可变电阻,接法如图1-4所示。

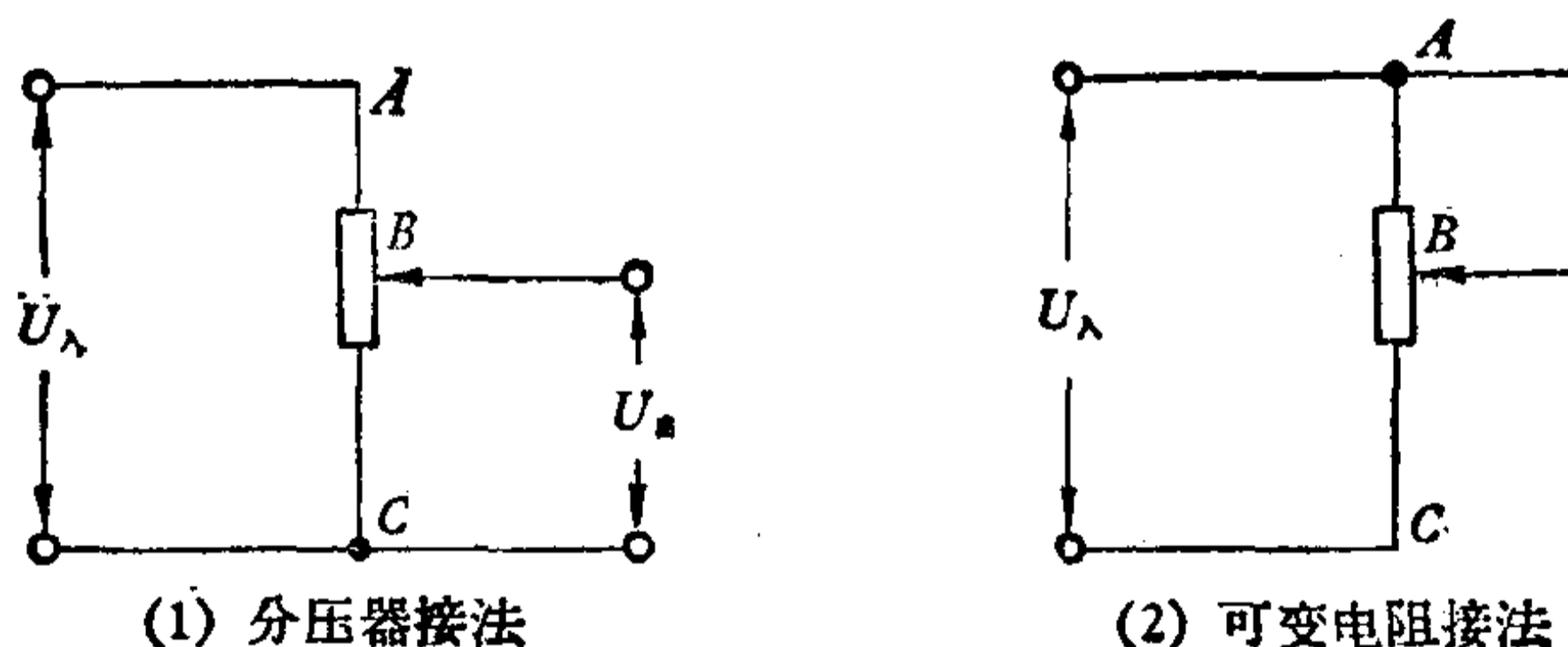


图 1-4

分压器接法中,输出电压 $U_B = \frac{R_{BC}}{R_{AC}} \cdot U_A$ 。

常用的电位器有：

线绕电位器，WX 系列，额定功率有 1 瓦、2 瓦、3 瓦等。

无开关炭膜电位器，WT 系列，额定功率有 0.1 瓦、0.25 瓦等。还有 WTH 系列，额定功率为 2 瓦。

带开关炭膜电位器，WT-K 系列，额定功率有 0.25 瓦等。

1-2 交 流 电

上面我们讲到的电流，它在电路中的流动方向是不变的，这种电流叫直流电流。另外，还有一种叫交流电流，它的大小和方向不断地变化着。我们平常照明用电，感应电动机用电都是交流电。那么交流电和直流电比较，有哪些特点呢？

1. 频率和周期

我们已经知道，如果把电阻 R 接在直流电源上，如图 1-1 (2)， A 点的电位总是比 B 点高，现在 R 接在交流电源上面，如图 1-5(1)， A 点的电位有时比 B 点高，有时比 B 点低，有规律地不断变化着，如图 1-5(2) 所示，所以在 R 上流过的电流也相应地有规律地变化着。图 1-5(2) 中，交流电压随时间是按正弦曲线变化的，故叫正弦交流电。

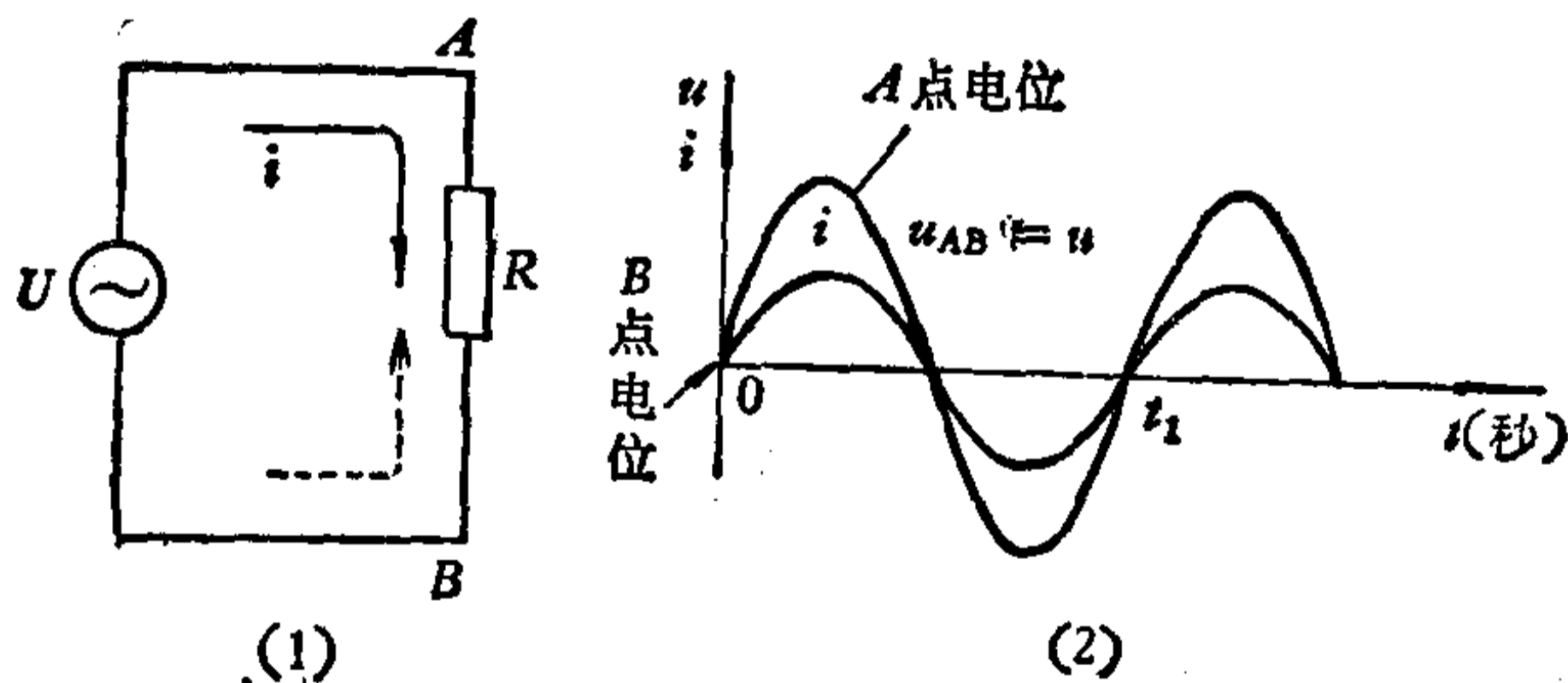


图 1-5

我们看图 1-5(2) A 点电位的变化情况。一开始, A 点电位和 B 点电位相等 $\rightarrow A$ 点电位比 B 点高 $\rightarrow A$ 点电位和 B 点电位相等 $\rightarrow A$ 点电位比 B 点电位低 $\rightarrow A$ 点电位和 B 点电位相等, 从 0 至 t_1 的时间称为一个周期, 用 T 表示, 单位是秒。

交流电在一秒钟内反复变化的次数, 称为频率, 用 f 表示。频率的单位是赫 (或周/秒), 即一秒钟变化一次叫 1 赫, 变化十次叫 10 赫。我国工业用电的频率是 50 赫, 就是说一秒内变化 50 次。

周期 T 和频率 f 有以下关系:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-5)$$

2. 交流电的最大值、有效值、功率

我们先来看 50 赫的交流电通过电阻的情况, 参看图 1-6。50 赫的交流电压加在电阻 R 上, 在 0 秒时 (开始时) $u = 0$ 、 $i = 0$, 随后 u 逐步上升, A 点电位逐步上升, 比 B 点电位高, i 也逐步上升, 电流从 A 点流向 B 点, 当 u 到达最大值时 (用 U_M 表示), 交流电流 i 也达到最大值 (用 I_M 表示, $I_M = \frac{U_M}{R}$); 随后 u 又开始下降, 一直到 $u = 0$, i 也跟着下降, 直到 $i = 0$, 这时刚好是半个周期 ($\frac{1}{100}$ 秒); 再下去 u 变成负值, 就是 A 点电位比 B 点低了, 电流从 B 点流向 A 点, 一直到 u 达到负的最大值, i 也达到负的最大值; 以后 A 点电位又开始上升 (但还是比 B 点电位低, 电流还是从 B 点流向 A 点), 直到 $u = 0$, $i = 0$, 即 A 点和 B 点电位相等, 这时刚好是一个周期, 时间是 $\frac{1}{50}$ 秒。

和直流电一样, 交流电流流过电阻 R 也要消耗功率, 消耗

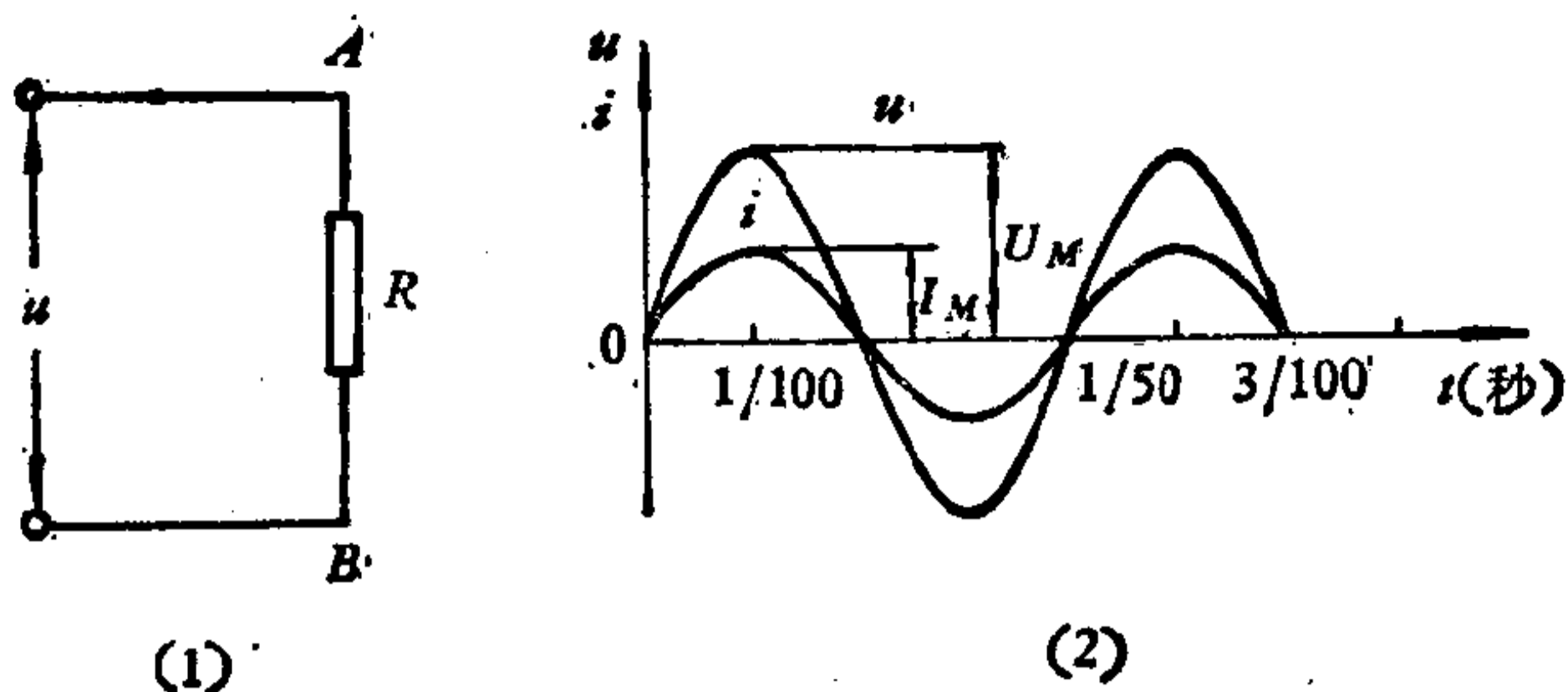


图 1-6

功率的大小和电压、电流的大小有关,但是由于加在电阻 R 的交流电压和交流电流的大小都是随着时间不断变化的,如果把最大值 U_M 和 I_M 直接相乘是不对的. 实践证明,交流电在电阻上消耗的功率等于 $\frac{U_M}{\sqrt{2}}$ 和 $\frac{I_M}{\sqrt{2}}$ 的乘积,即

$$P = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \frac{I_M}{\sqrt{2}} \quad (1-6)$$

设

$$U = \frac{U_M}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

U 称为交流电压的有效值, I 称为交流电流的有效值,则

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-7)$$

我们平常说的 220 伏, 100 安等都是指的交流电的有效值.

从上式可以看到,交流电流在电阻上消耗的功率和直流电一样,只不过这里的 U 和 I 是交流电的有效值.

电功率(P)和时间的乘积就是电功,即电功 = 电功率 \times 时间(单位是千瓦小时).

40 瓦灯泡照明 25 小时就是耗电 1 千瓦小时(火表上的 1 度),三盏 100 瓦灯泡照明 10 小时就是 3 千瓦小时(3 度).

1-3 电 容

电容是电子设备中的基本元件,它是一只储电器,直流电通不过,交流电能够通过。

电容器用符号 $\text{—}||\text{—}$ 表示,文字用 C 表示,见图 1-7. 单位用法拉 (F)、微法拉或微微法拉. 微法拉简称微法 (μF),

$1\mu\text{F} = \frac{1}{10^6}\text{F}$, 微微法拉简称微微法 (pF), $1\text{pF} = \frac{1}{10^{12}}\text{F}$.

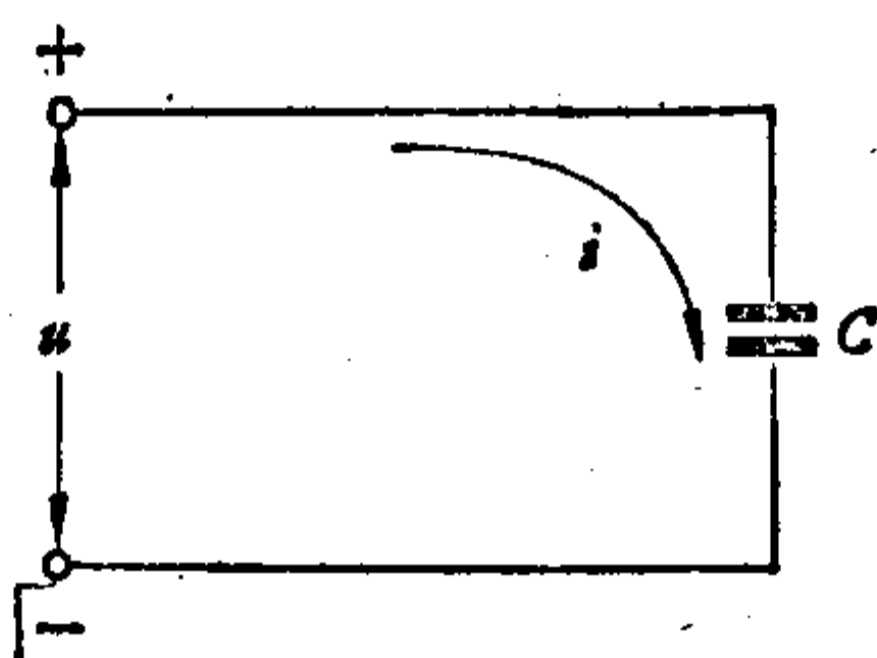


图 1-7

任何事物都是一分为二的,电容一方面能够通过交流电,同时,也对交流电有一定的阻力,这种阻力称为容抗,用 X_C 表示,单位也是欧姆. 和电阻一样,电容也可以得出类似电流定律的公式:

$$I = \frac{U}{X_C} \quad (U, I \text{ 均为有效值}) \quad (1-8)$$

我们在生产过程中早已知道在交流电压 U 的大小一定时,电容 C 越大, I 越大; C 越小, I 越小. 另外 I 的大小不仅和 U 的大小有关,而且和交流电的频率 f 有关. 在 U 和 C 不变时, f 越高, I 越大; f 越低, I 越小. 也就是电容的容抗 X_C 和 f, C 成反比,即

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1-9)$$

因为

$$2\pi f = \omega$$

所以

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (1-10)$$

从公式(1-9)可以看出,因为 f 、 C 在分母里,所以 f 和 C 越大, X_C 越小.

工业用电 $f = 50$ 赫, $2\pi f = 2 \times 3.14 \times 50 = 314$, 所以 $\omega = 314$.

直流电的 $f = 0$, 所以 X_C 为无限大, 直流电不能通过电容. 在电子电路里, 我们常用它来作隔直流通交流用. 在低频放大器中作为级间耦合, 只准交流信号通过, 不让直流进入下一级. 利用 f 越高, X_C 越小的特性, 我们可以选择一定数值的电容 C , 使高频的容抗很小, 而低频容抗很大, 这样就把高频和低频分开, 这种电路叫滤波器.

电容也能串联或并联使用, 如图 1-8 所示.

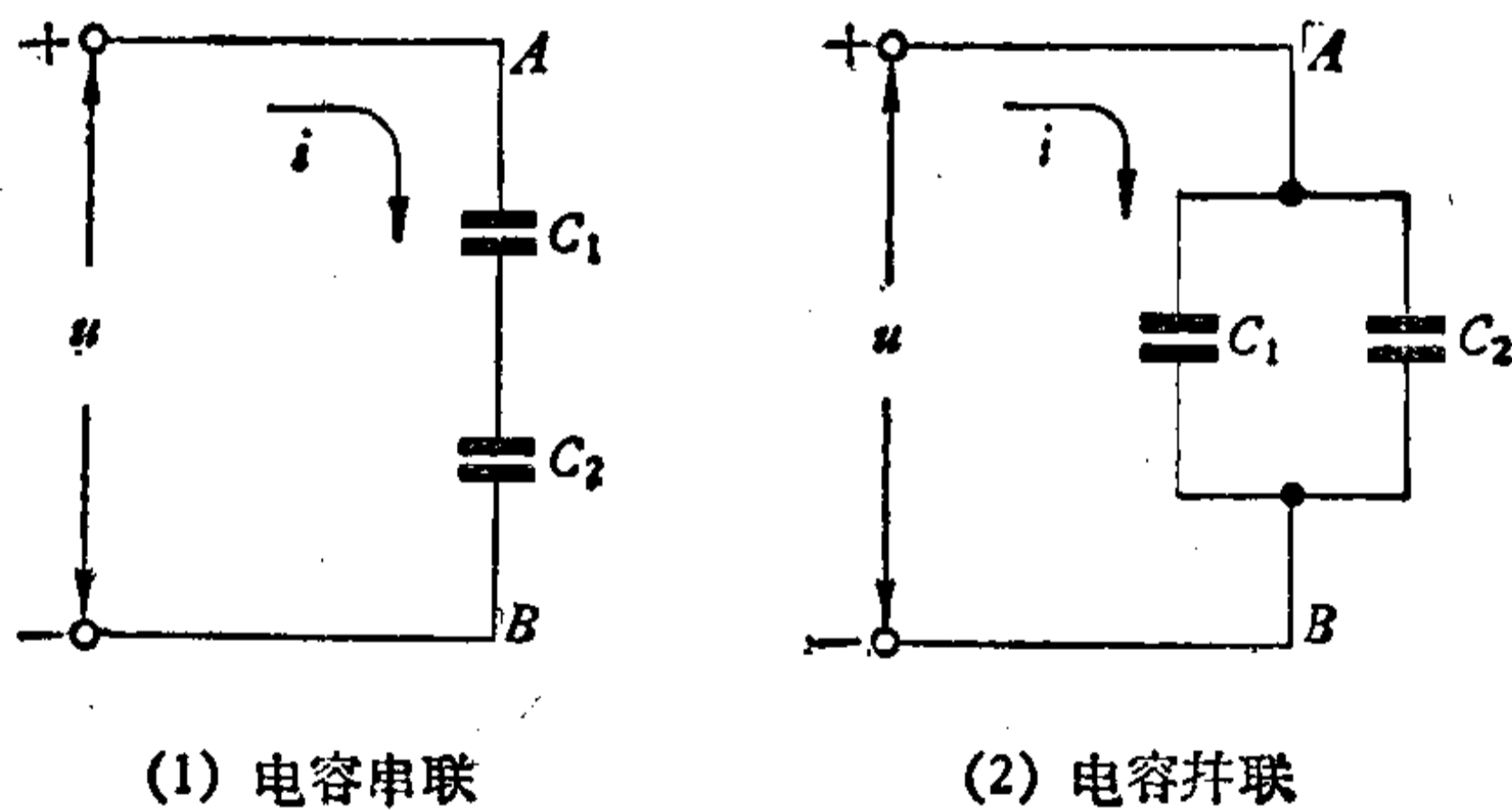


图 1-8

电容串联: $C_{AB} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (1-11)$

电容并联: $C_{AB} = C_1 + C_2 \quad (1-12)$

【例1-3】 假如 $C_1 = 200$ 微微法, $C_2 = 300$ 微微法

串联： $C_{AB} = \frac{200 \times 300}{200 + 300} = 120$ 微微法

$C_{AB} < C_1, C_{AB} < C_2$ ，所以串联后总电容减小。

并联： $C_{AB} = 200 + 300 = 500$ 微微法

$C_{AB} > C_1, C_{AB} > C_2$ ，所以并联后总电容增加。

可见电容串并联和电阻串并联的情况恰恰相反。

电容并联时，每只电容上所受的电压相等，等于总电压“ U ”。电容串联时，各只电容上所受的电压之和等于总电压“ U ”，电容大承受电压小，电容小承受电压大，选择电容时应注意电容的耐压要大于它所承受的电压。

电容器的种类很多，按电容量能否改变来分，有可变电容器和固定电容器。可变电容器如收音机中用的单连和双连电容器。电子电路中主要用固定电容器，按材料分，有薄膜电容器、云母电容器、纸质电容器、金属膜纸电容器、电解电容器、

表 1-1

类 别	名 称	简 称	符 号	次 序
主 称	电 容 器	容	C	第一字
介质材料	纸 质	纸	Z	第二字
	电 解	电	D	
	云 母	云	Y	
	瓷 介	瓷	C	
形 状	筒 形	筒	T	第三字
	管 形	管	G	
	立式矩形	立	L	
结 构	密 封	密	M	第四字
大 小	小 型	小	X	

聚苯乙烯电容器、瓷介电容器等等种类，其型号见表 1-1。

如 CZGX 表示小型纸质管状电容器。

电解电容器的特点是有正、负极性，使用时，必须按照标定极性接，+ 接正，- 接负，否则就会损坏。一般金属壳电解电容器的金属外壳是负极，而和外壳绝缘的那片焊片是正极。目前，还有一种无极性的电解电容器，使用时可不分极性，但不可当作交流电容使用。使用电容器时，还特别要注意耐压的大小。

1-4 RC 电 路

上面讨论过，直流电是不能通过电容器的，如图 1-9(1)，把电容器接在直流电源上，当稳定以后，电流表(A)指示零，没有电流流过电容。对图 1-9(2) 电路来讲，当开关 K_1 一合上时，电流表的指针马上偏转，然后又回到零。打开 K_1 ，再合上 K_2 ，电流表指针往相反方向偏转，然后又回到零。由此可见 K_1 、 K_2 闭合后的短暂时间内，电容器中有电流通过。所以对交变电流来讲，电容器提供了低阻抗路径，或者把它看作为一个“容器”。

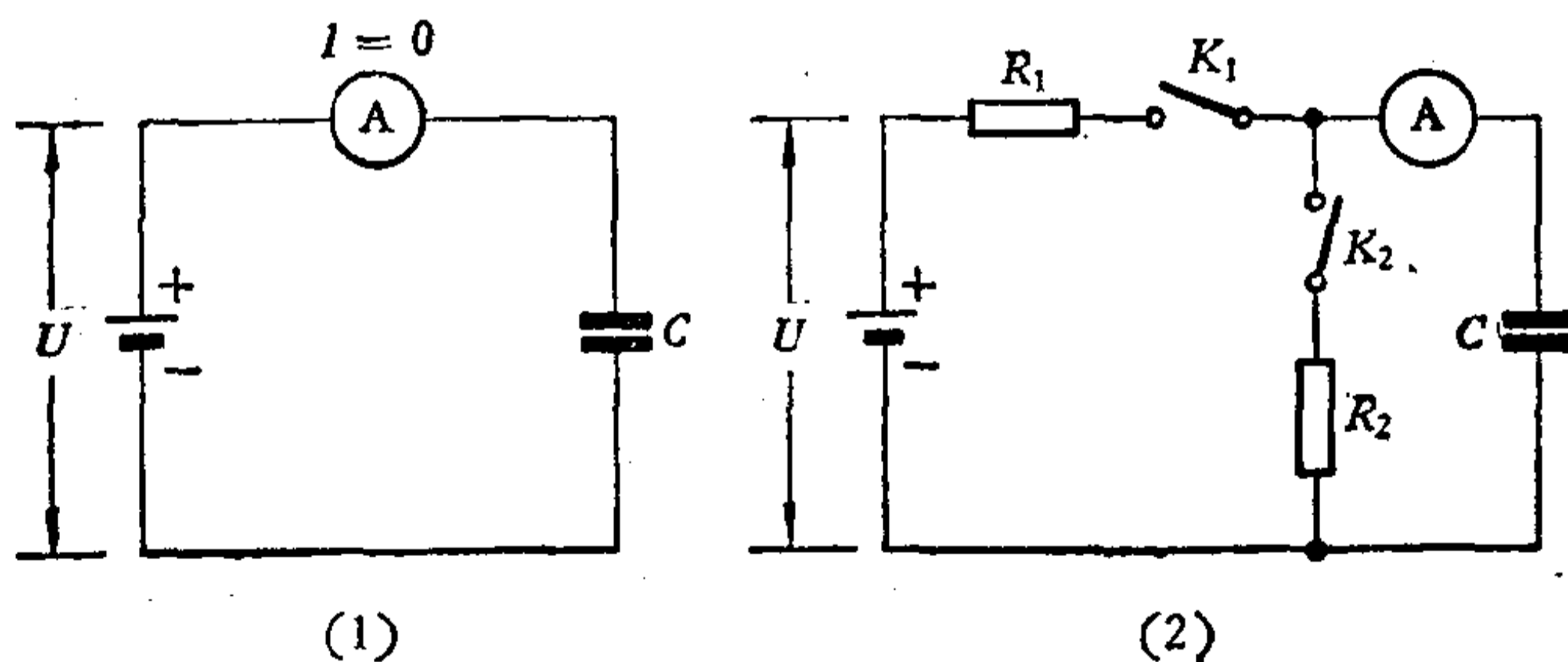


图 1-9

K_1 合上后，电容器 C 充电，它储有电荷；打开 K_1 合上 K_2 ，

电容器 C 放电, 它向负载 R_2 放出电荷, 充、放电过程中电容器上的电压 u_C 和电流 i_C 随时间变化的规律如图 1-10 所示。

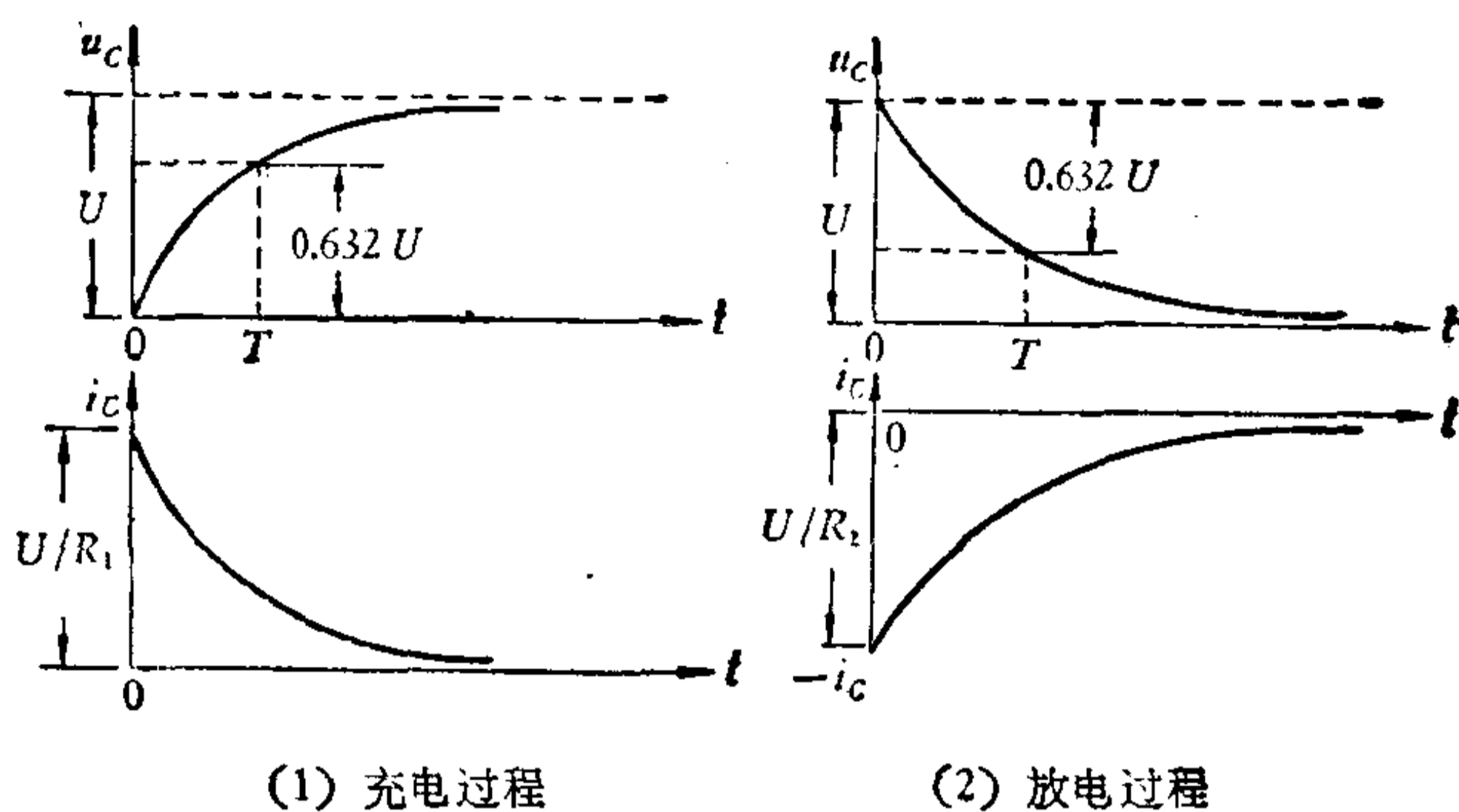


图 1-10

1. 充电过程

由图 1-11 可见, 在 K_1 未闭合时, $i_C = 0$, $u_C = 0$.

在 K_1 闭合瞬间, 电容器两端电压 $u_C = 0$ (电容器两端电压不能突变), 所以电源电压都降在电阻 R_1 上, 设电阻 R_1 上的压降为 u_{R1} , 因为

$$U = u_{R1} + u_C$$

$t = 0$ 时, $u_C = 0$. 所以

$$u_{R1} = U$$

$$i_C = \frac{u_{R1}}{R_1} = \frac{U}{R_1} \quad (1-13)$$

因此闭合瞬间电流最大, $i_C = \frac{U}{R_1}$ (这说明通过电容器的电流可以突变).

随着电流 i_C 的通过, 电容器两端的电压逐步上升, 直到 $u_C \approx U$ (\approx 表示近似相等), 因为

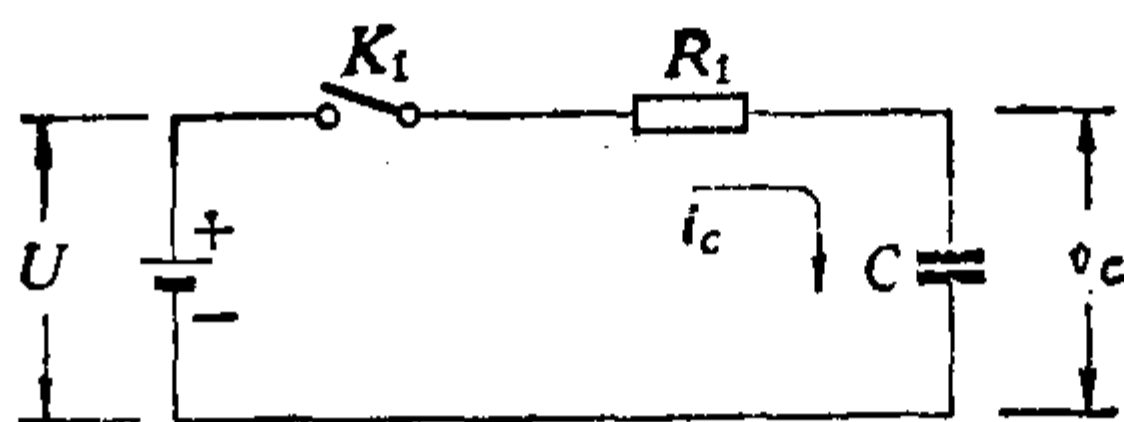


图 1-11

$$U = u_{R1} + u_C$$

$$U \approx u_C$$

所以

$$u_{R1} \approx 0, \quad i_C = \frac{u_{R1}}{R_1} \approx 0$$

可见到稳定的时候, $i_C = 0$.

2. 放电过程

由图 1-12 可见, 在 K_2 未闭合前, $u_C = U, i_C = 0$.

在 K_2 闭合瞬间, 电容器电压 $u_C (=U)$ 就加到电阻 R_2 上, 所以

$$i_C = \frac{u_C}{R_2} = \frac{U}{R_2}$$

随着 i_C 流过电阻, 电容 C 两端电压逐步下降, 一直到 $u_C \approx 0$, 所以

$$i_C = \frac{u_C}{R_2} \approx 0$$

图 1-10(2) 中 i_C 画在时间 (t) 轴下面, 表示放电电流和充电电流方向相反.

3. 充放电时间常数

充放电时间的长短, 和电压 U 无关而和 R 、 C 的大小有关.

在 U 和 R 一定时, C 愈大, 为了充到相同的电压, 就需要更

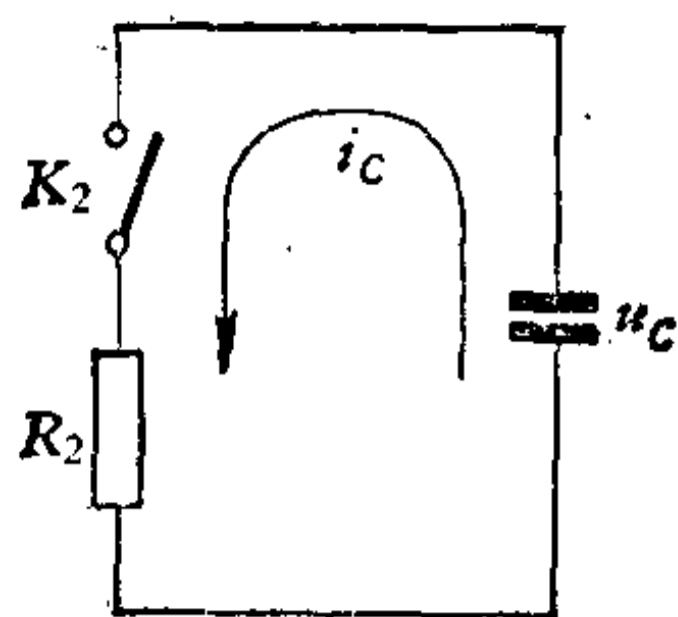


图 1-12

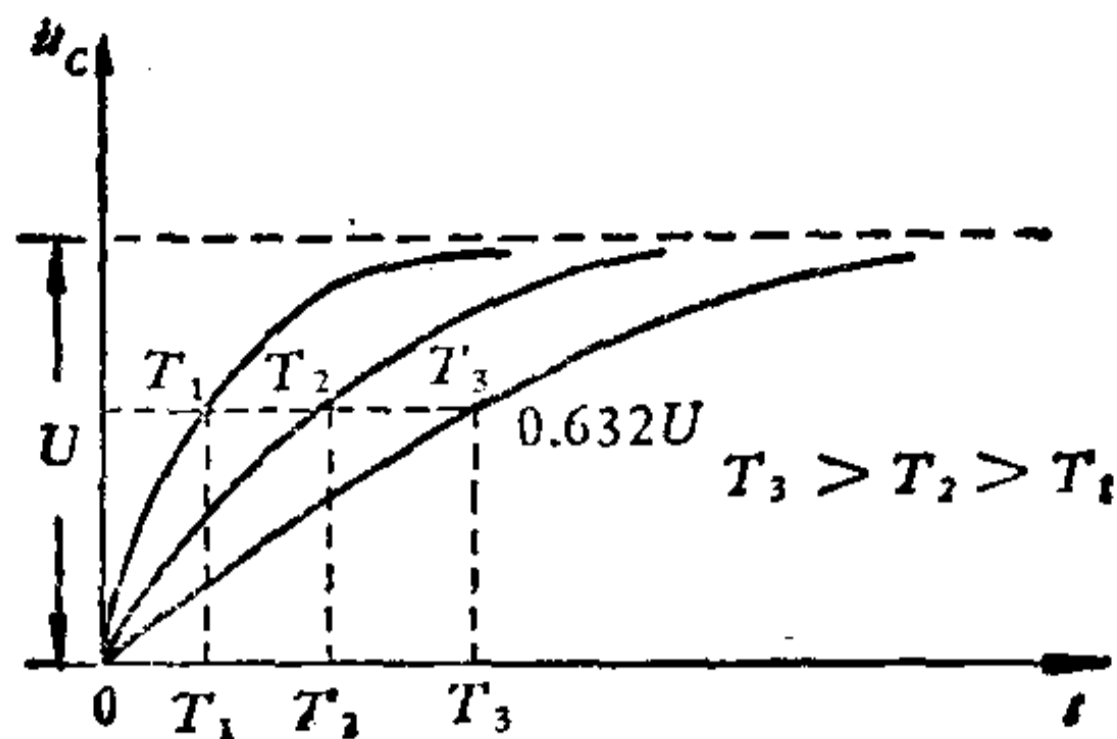


图 1-13

多的电荷,而起始充电电流 $i_{\text{最大}} = \frac{U}{R}$ 不变,可见为了达到相同的电压,就需要较长的时间.

如果 U 和 C 一定, R 愈大则起始电流 $i_{\text{最大}} = \frac{U}{R}$ 就愈小,充电速度当然就要减慢. 当 R 和 C 一定时,如果 U 增加,虽然起始电流 $i_{\text{最大}} = \frac{U}{R}$ 提高了,但是电容器所需充的电压也提高了,所以时间不变. 放电过程和充电过程一样.

数学分析和实践都证明了充放电快慢只与 R 和 C 的乘积有关,用 τ 表示 RC 的乘积:

$$\tau = RC \quad (1-14)$$

若 R 为欧姆, C 为法拉,则 T 的单位刚好是秒,所以就把 τ 称为 RC 回路的时间常数.

对充电曲线进行数学分析,发现时间常数 τ 就是充电充到输入电压的 0.632 倍时所需的时间. 当充电充到 2τ 时,电容上的电压 $u_c = 0.865U$, 3τ 时, $u_c = 0.95U$,当达到 5τ 时, $u_c = 0.993U \approx U$. 因此,一般充电时间达到 5τ 时(有时到 3τ 时)就可以认为电容上的电压已达到输入电压值.

从图 1-13 可以看出, τ 愈大,充电速度愈慢.

在电子电路里,充电和放电过程常常在一起,充了电以后接着就放电,如图 1-9(2) 所示,当然这时 K_1 、 K_2 两开关由其

它元件(如晶体管)代替。由于 R_1 和 R_2 一般是不等的(即充电回路和放电回路是分开的),则 RC 时间常数 $\tau_{充}$ 和 $\tau_{放}$ 不等(见图 1-14),在生产上就可以利用这种现象。

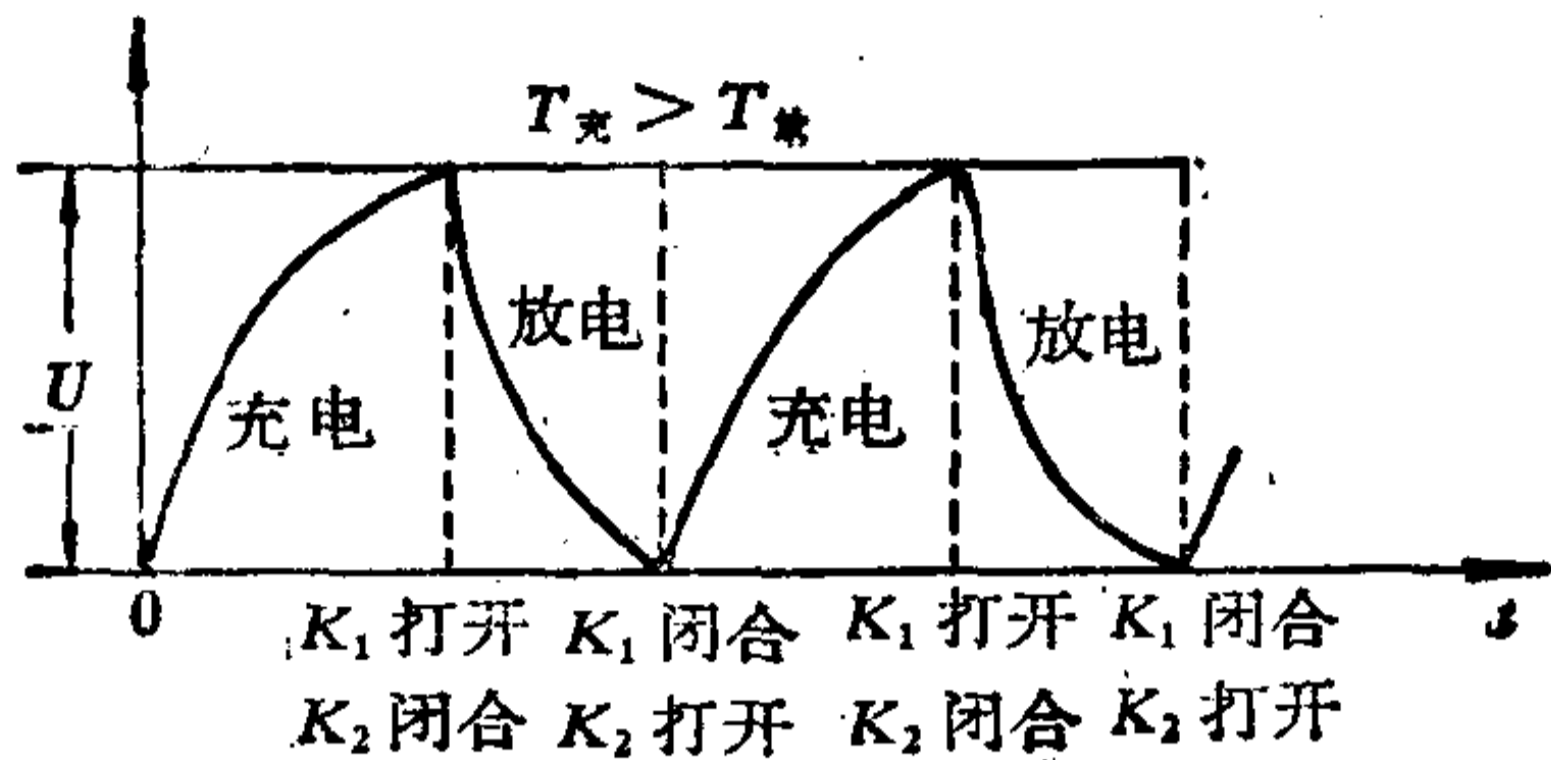


图 1-14

4. RC 充放电电路在生产中的应用举例

图 1-15 就是电火花加工的简单原理图。

R 为限流电阻, C 为电容器, 接通电源后, 电源经限流电阻向电容 C 充电, 电容 C 两端的电压逐步上升, 因为电容两端的电压就是电极和工件两端的电压, 因此当电容 C 两端的电压上升到高于电极和工件间间隙的击穿电压时, 电容就通过电极、介质、工件放电, 从而达到电蚀金属的目的。

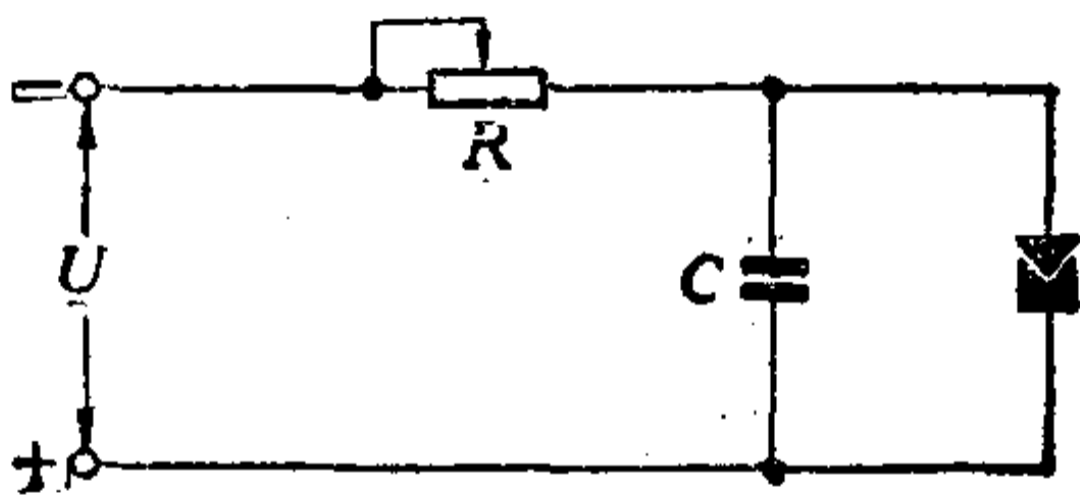


图 1-15

1-5 线 圈

线圈也叫电感器,它是电路中的重要元件之一,为了更好

地理解线圈的性能及其在电路中的作用，让我们先从最简单的电磁现象谈起。

1. 电流的磁效应

把磁针放在通电导线的周围，它就会象放在磁铁附近一样，受到力的作用而发生偏转，这种力称为电磁力。和磁铁一样，通电的导线周围也存在着磁场，磁场对磁针作用，使其偏转。

磁场可以形象化地用一些曲线(叫“磁力线”)来表示，例如，图 1-16 中画出了通电线圈的磁场的磁力线和条形磁铁的磁场的磁力线，由图可见，两者是极为相似的。磁力线是有方向性的，我们规定：磁力线上每点的切线方向表示放在该点的小磁针 N 极所指的方向，而磁力线的疏密程度则表示磁场的强弱。

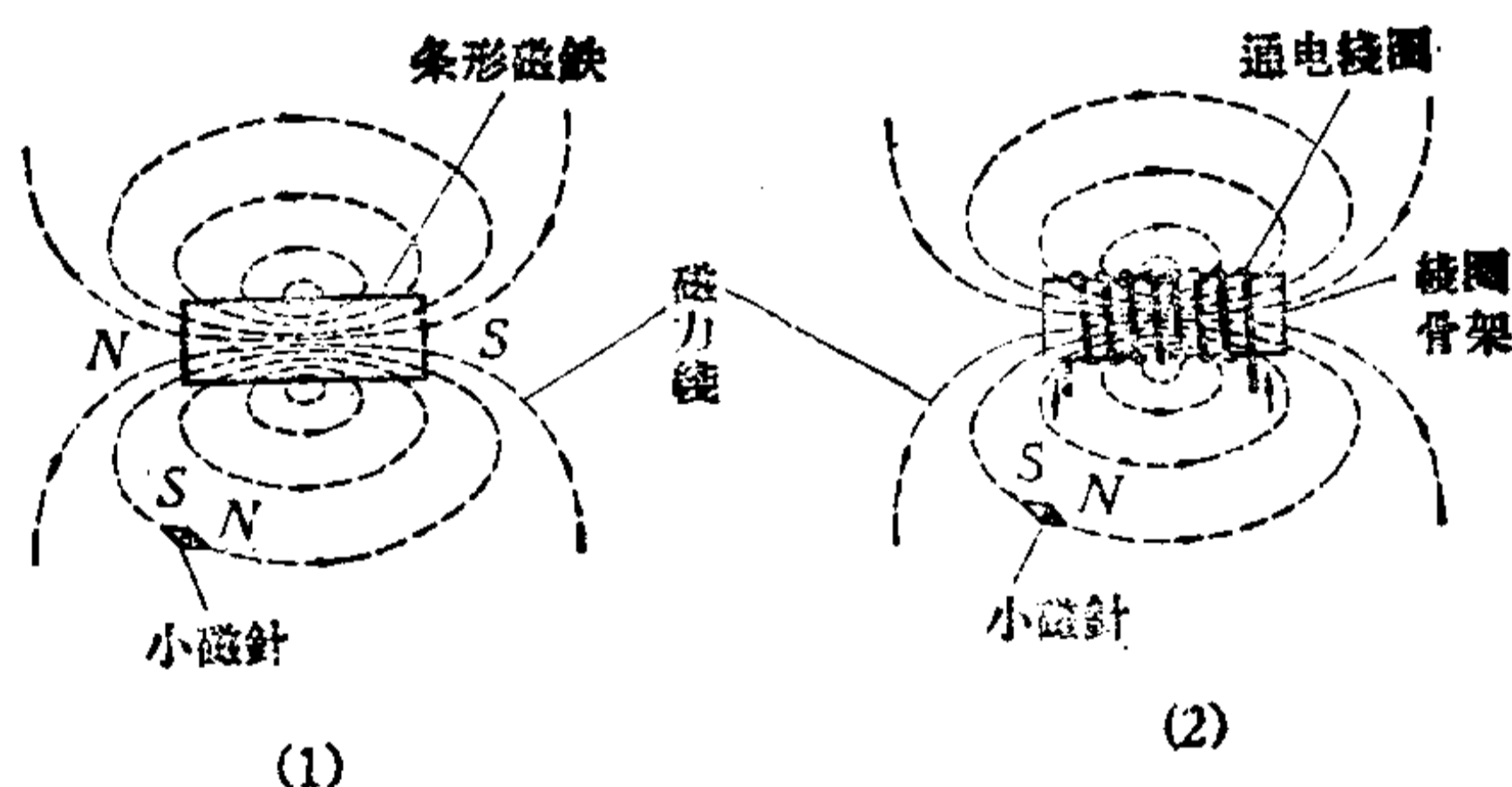


图 1-16

通过某一面积的磁力线的根数叫做通过这一面积的“磁通”，常用 Φ (读作费) 表示，当该面积与磁力线方向垂直时 Φ 最大(见图1-17). 为了用磁力线的疏密程度表示磁场的强弱，我们在磁场中某点放置一个与磁力线方向垂直的小面积 S ，通

过 S 的磁通为 Φ_s , 则 $\frac{\Phi_s}{S}$ 表示了磁场中该点磁力线的稠密程度, 叫“磁通密度”, 也叫“磁感应强度”, 用 B 表示, 只要 S 足够

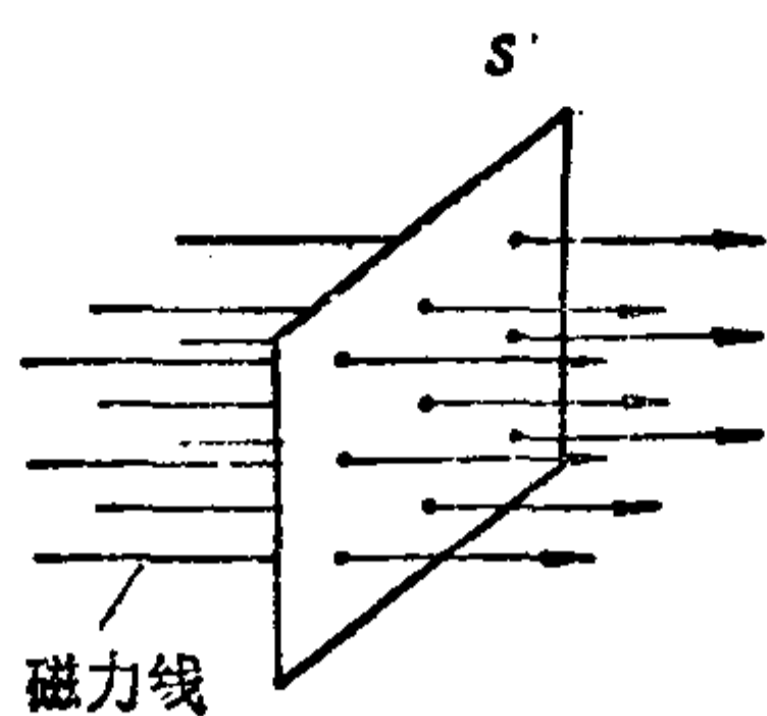


图 1-17

小, 它可以相当精确地反映该点磁场的强弱程度. B 的单位是“高斯”, 1 高斯表示每平方厘米有 1 根磁力线穿过, 若每平方厘米有 8000 根磁力线穿过, 则 B 为 8000 高斯. 永久磁铁的磁场的 B 约为 4000—7000 高斯, 发电机或变压器工作时磁通

密度达 8000—10000 高斯.

通电导线周围的磁场的磁力线方向可以用如下方法帮助记忆, 假想用右手握住导线, 使姆指符合电流方向, 那末, 其余四指所指方向即磁力线方向 (见图 1-18), 这叫单导线的“右手定则”. 如果知道了导线周围磁场的磁力线方向, 也可以用这个定则来确定导线中电流的方向. 至于磁场的强弱则与电流的大小成正比, 与距离导线的垂直距离成反比.

对于通电线圈的磁场, 虽然也可应用单导线的右手定则来确定磁力线方向与线圈中电流方向的关系, 但应用关于线圈的右手定则更方便, 用右手握住线圈, 使四指符合电流方向, 则姆指所指方向就是磁力线方向 (见图 1-19).

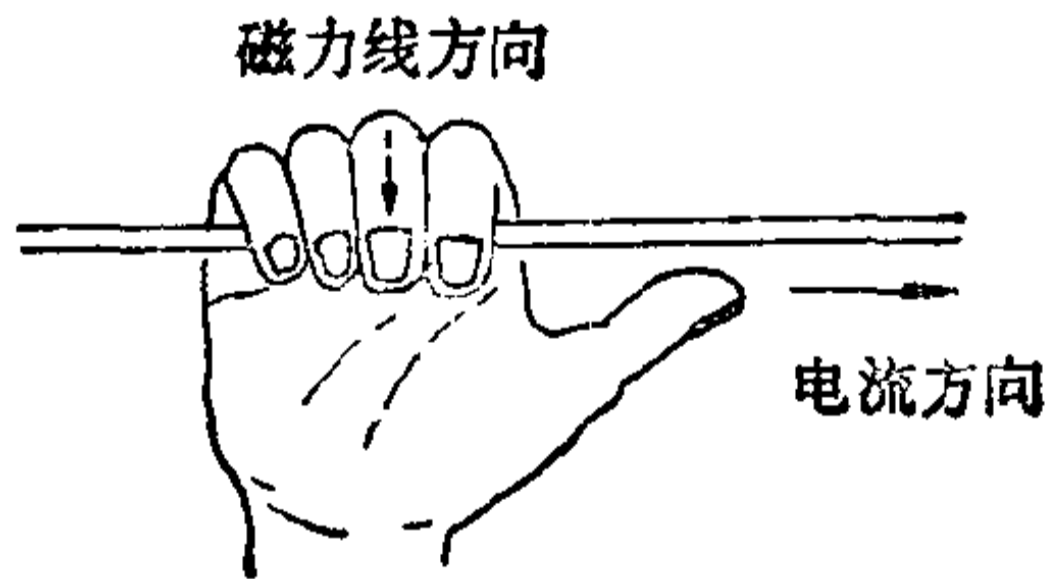


图 1-18

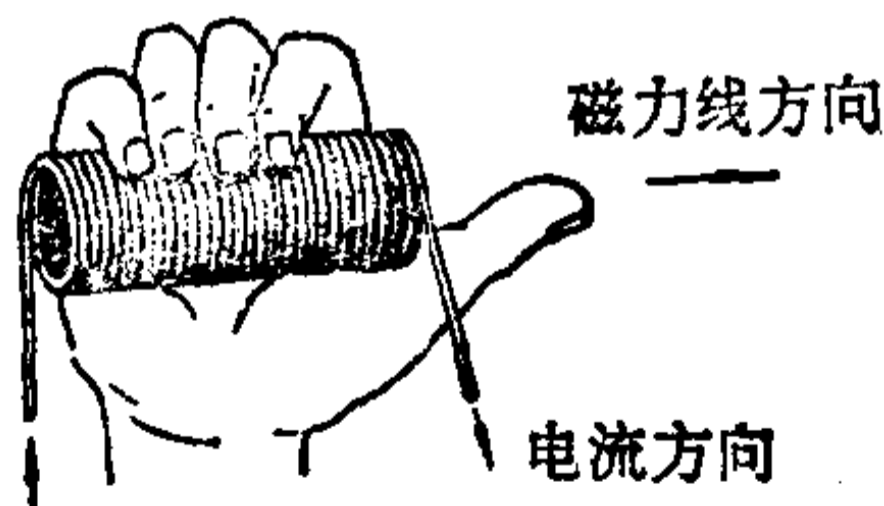


图 1-19

要使导体内通过电流, 必须有一定的电动势, 同样要产生

磁力线，也必须有一定的磁动势（简称“磁势”）。在通电线圈中，总的磁力线的根数（即通过线圈横截面的磁通 ϕ ）正比于线圈的匝数和电流，因此，线圈的磁势取决于匝数(N)和电流(I)的乘积 NI ，常用“安培匝数”（简称“安匝”）为单位。例如：线圈匝数为 150 匝，电流为 0.5 安培，则磁势为 75 安匝。

如果在通电的线圈内插入铁芯，则磁通大大增加，这是因为在电流所产生的磁场的作用下，铁芯被磁化也成为磁铁，总的磁场是电流的磁场和铁芯的磁场的叠加，因而大大增强了。

铁芯由于能被磁化，所以在同样安匝数的磁势下，产生的磁力线较多（即 ϕ 较大），我们就说铁芯的“磁阻”较小。因此磁阻相当于电阻，在同样磁势下，磁阻越大，所产生的磁力线越少；磁阻越小，所产生的磁力线越多。对同样材料来说，越细、越长，磁阻越大；越粗、越短，磁阻越小。当然，磁阻还与材料本身有关，空气和其它非磁性材料磁阻较大，铁、钴、镍等磁性材料磁阻较小，也可以说，空气等非磁性材料导磁性能不好，磁性材料导磁性能好。磁通所经过的路径叫做“磁路”，在电机、电器中，常常是用导磁性能很好的磁性材料做成磁路。在变压器中，把铁芯做成封闭形，使磁通基本上不通过空气而形成回路；在马达中，尽量减小转子与定子间气隙都是为了减小磁路的磁阻。

在变压器中，绝大部分磁力线都集中在导磁性很好的铁芯中，形成磁路，它们既通过初级绕组又通过次级绕组，叫“主磁通”。另有一小部分磁力线，经过铁芯外面的空间只环链着绕组本身，叫“漏磁通”，如图 1-20 所示。忽略很小的漏磁通，可以认为铁芯内各处的磁通密度是均匀的，因此铁芯内磁通密度 $B = \frac{\Phi}{S}$ ， S 为铁芯截面。

一个具有闭合铁芯的线圈，如果不断增加安匝数 NI ，磁

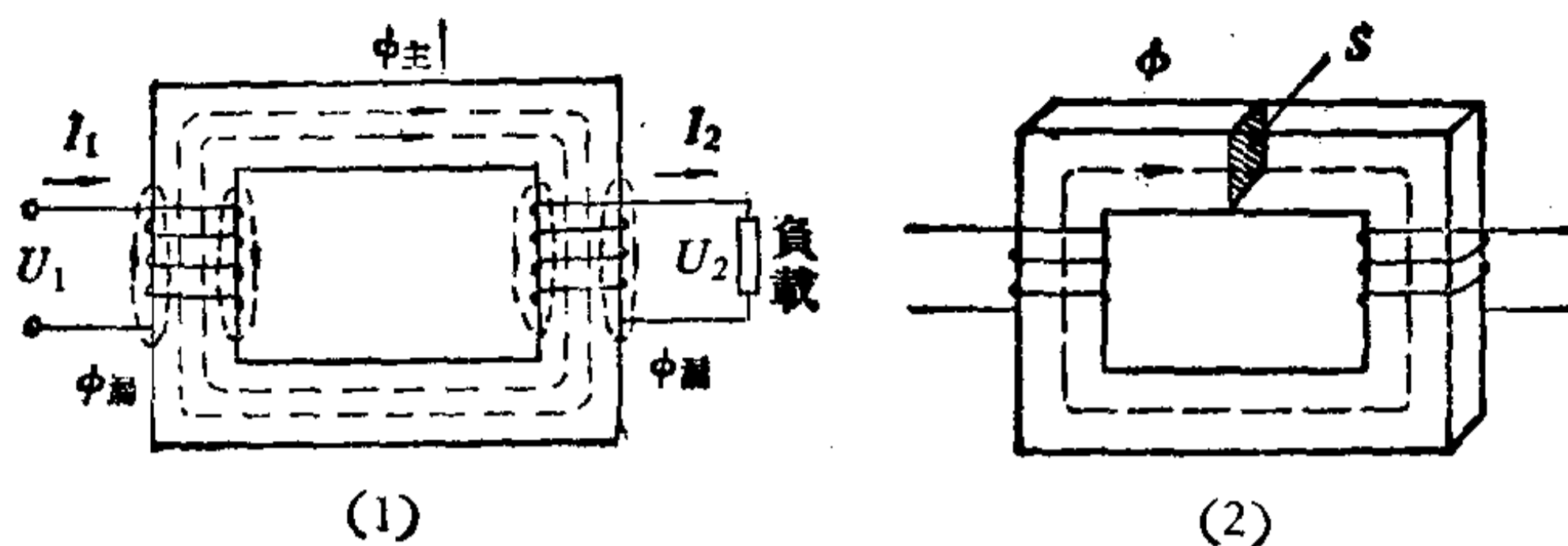


图 1-20

通是否会随着无限制地增加呢？不会，实践表明，当铁芯内的磁通密度 B 达到一定值时， B 的增加变得越来越慢，直至基本上不变了，这叫“磁饱和”。用硅钢片叠成的变压器铁芯，磁通密度 B 一般限制在 8000—10000 高斯以内，以免铁芯饱和。至于整流器中滤波用的电抗器，为了避免铁芯饱和影响滤波效果，有意在铁芯中留有一定气隙，见图 1-21。

应用电磁原理而工作的电磁铁、继电器、交直流接触器等，它们的主要部分都是具有铁芯的线圈，一块活动的衔铁成为磁路的一部分（见图 1-22），当线圈被接通而有电流通过时，吸动衔铁，带动触头动作。

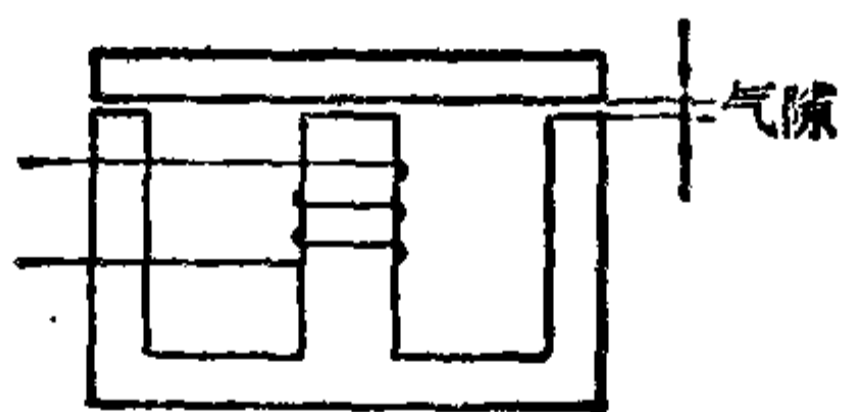


图 1-21

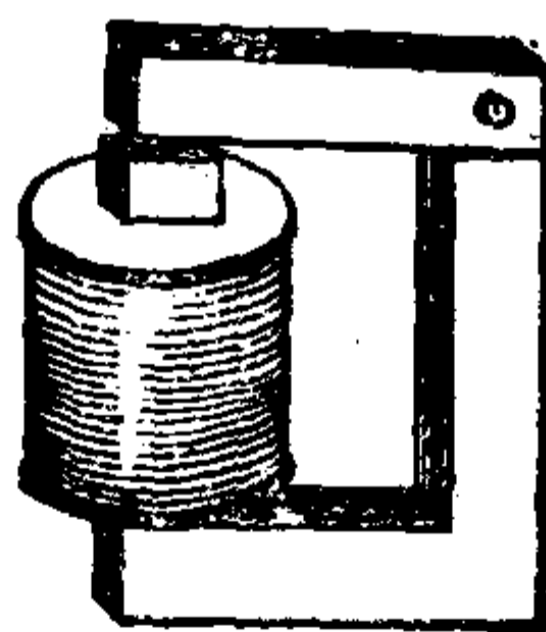


图 1-22

2. 电磁感应

当通过线圈的磁通发生变化时，线圈中就会产生电势，这种现象叫“电磁感应”，所产生的电势叫“感应电势”。

实践表明：线圈中感应电势的大小正比于磁通变化的速度和线圈的匝数。感应电势的方向则由下面的法则决定：由这个感应电势企图引起的电流所产生的磁通，必须是阻止引起感应电势的那个磁通的变化。

当通电线圈中的电流发生变化时，通过线圈本身的磁通也要发生变化，因此线圈中要出现感应电势这叫“自感应”，简称“自感”，根据上面的法则，自感电势的方向总是阻止电流变化的，仿佛线圈有一定的惯性，这种电磁惯性的大小用“电感” L 来衡量。正由于线圈有一定电感量，因此交流电通过时就受到一定的阻碍，这就是线圈具有感抗的原因，这一点后面再详细说明。

放在一起的两个线圈，当一个线圈中电流变化时，引起穿过另一线圈的磁通变化，另一线圈中也会出现感应电势，这种现象叫“互感应”，简称“互感”。变压器就是根据互感的原理工作的。

日光灯的镇流器(俗称“日光灯方棚”)是一个带铁芯的线圈，它是利用自感的原理工作的，主要作用是镇定电路中电流，使灯管工作时流过灯管电流不至过大；另一作用是利用其较高的感应电势使灯管击穿起跳。其具体工作过程大致如下：电源接通后，启动器两触点间引起放电，双金属片受热弯曲使触点接通，灯丝经镇流器通电加热。双金属片冷却后，触点又突然脱开，镇流器中电流突然被切断，电流的这一快速变化在镇流器中引起很高的感应电势，它与电源电压迭加，加在灯管两端，使灯管击穿点亮。



工作于交流电路中的线圈的铁芯，都用硅钢片叠成，而不用整块铁芯，这是因为铁芯本身也是导体，当线圈中电流变化时，铁芯内磁通发生变化，铁芯内也要引起感应电势，如果铁芯是整块的，势必引起很大的感应电流，这种感应电流在铁芯

内部流通,叫“涡电流”,简称“涡流”。涡流引起损耗,使铁芯发热,同时使磁场削弱,应设法避免,铁芯采用涂有绝缘漆的薄的硅钢片叠成,可使涡流只能局限在薄片之中,由于电阻增加,这就使涡流大大减小了。此外,采用磁阻小、电阻率大的材料作铁芯(如铁淦氧磁体)也可减小涡流。

3. 正弦交流电路中的电感线圈

上面讲过,当线圈中磁通变化时,线圈中就要产生感应电势,并且,感应电势的大小正比于磁通变化的速度。磁通的变化是由电流的变化引起的,在铁芯未饱和的条件下,可以认为磁通是与电流成正比的,因此感应电势的大小也就正比于电流变化的速度,若比例系数以 L 表示,则

$$\text{感应电势 } e_L = L \times \text{电流变化速度}$$

显然, L 是与线圈的形状、尺寸、匝数、有无铁芯及铁芯材料等有关的,它就是前面提到的衡量线圈电磁惯性大小的量——“电感”,单位是亨利(以 H 表示),简称亨,此外还有毫亨(mH),微亨(μH)。当线圈中的电流变化速度为每秒 1 安,若线圈两端产生 1 伏的感应电势,则这个线圈的电感量为 1 亨。电感线圈在电路中的符号用  表示,有铁芯时用  表示。

假设线圈内通入的是频率为 f 的正弦交流电,可以证明,电流的变化速度也是按正弦规律变化的,其有效值为电流有效值 I 的 $2\pi f$ (即 ω) 倍,所以感应电势 e_L 也是按频率为 f 的正弦规律变化的,有效值为

$$E_L = L \cdot I \cdot 2\pi f = \omega L I$$

忽略线圈电阻,外加电压 U 的大小就等于感应电势,所以

$$U = \omega L I, \quad I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{X_L}$$

其中 X_L 叫感抗, 其单位也是欧姆, 它反映了电感 L 对频率为 f 的交流电的阻碍作用的大小. 引入 X_L 后, 对于电感电路电流定律也可表示为 $I = \frac{U}{X_L}$, 这与电阻电路 $(I = \frac{U}{R})$ 、电容电路 $(I = \frac{U}{X_C})$ 具有同一形式.

感抗与频率成正比, 因此电感线圈在低频时感抗小, 在直流电路中, $f = 0$, 感抗 $X_L = 0$, 好象短路, 不起作用. 高频时, 感抗大, 频率很高时, X_L 很大, 接近开路. 这种情况恰恰和电容相反. 利用电感、电容的这些特性可以组成各种滤波电路及其它电路.

1-6 RL 电 路

在图 1-23(1) 所示的 RL 电路中, 如果把开关 K 突然合向 1, 电路中电流从 0 逐渐增大, 最后达到稳定值 $I = \frac{E}{R}$.

电流 i 随时间 t 的变化规律如图 1-23(2) 所示. 为什么电流在电路接通以后不是立即达到稳定值 I 呢? 这是因为随着电流的上升, 磁通也增大, 在电感中产生的感应电势阻碍着电流的增长, 使电流不能突变. 这一重要特性是和电容上电压不能突变相对应的. 从图 1-23(2) 可见它的变化规律也和电容相同. 其特点是: 在电路刚接通时电流增长最快, 之后越来越慢. 用时间常数 τ 表示时, 即从接通时 $t = 0$ 的 $i = 0$ 起, 经过 τ 秒, 电流就增长到稳定值的 0.63 倍, 即 $t = \tau$ 时 $i = 0.63I$; 而在 $t = 5\tau$ 时电流才基本上可以认为达到了稳定值 I . 这就是说 RL 电路与 RC 电路一样, 从一个稳定状态 $i = 0$ 过渡到新的稳定状态 $i = I$ 所需时间为 5τ . 不过 RL 电路的时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$ (这与 RC 电路中 $\tau = RC$ 相

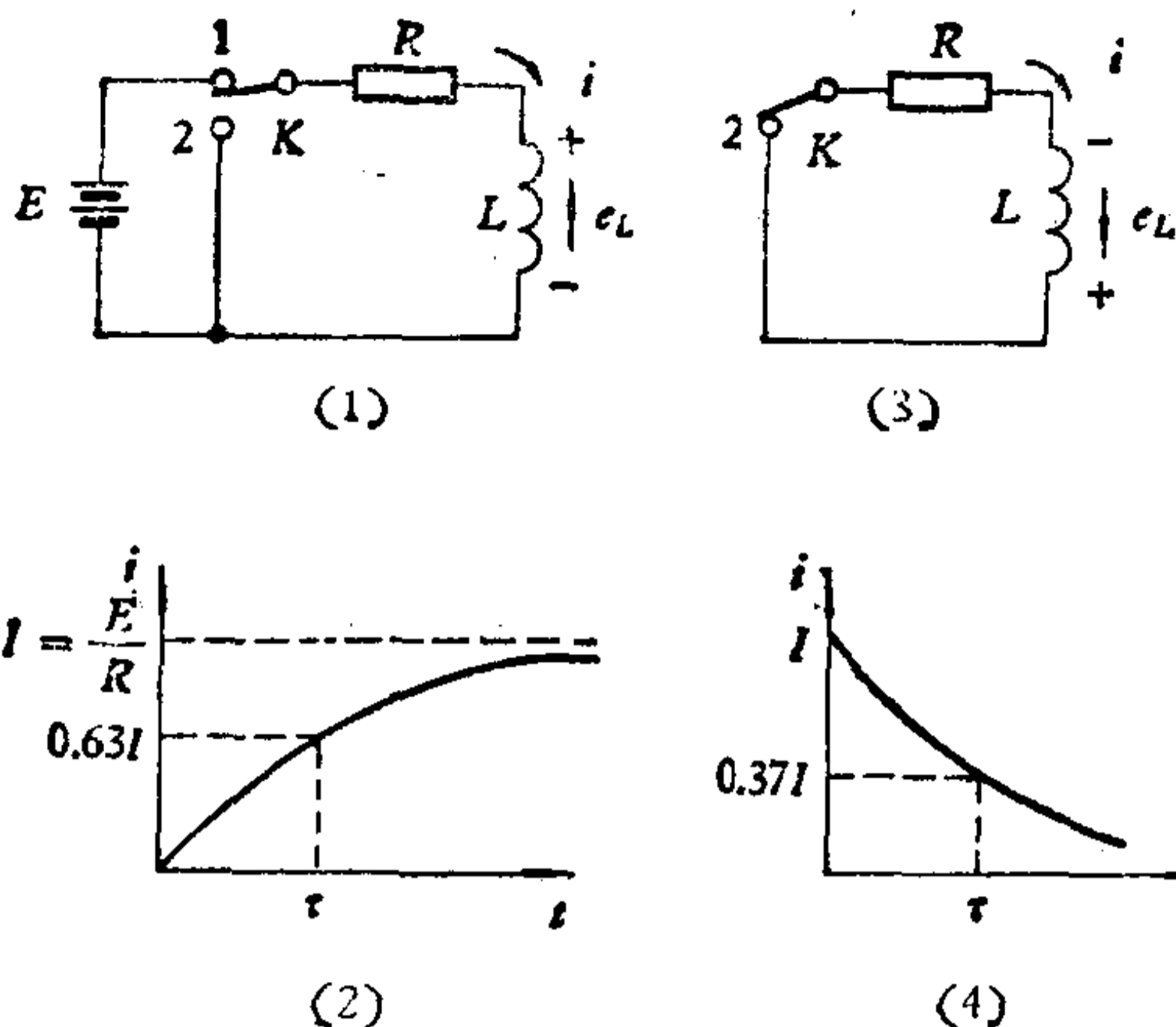


图 1-23

对应)。

为什么电流的增长愈来愈慢呢？从图 1-23(1) 中可以看到电流 i 的方向和阻碍电流增加的感应电势 e_L 的方向相反，因此任一瞬间，电感中的感应电势必须等于电源电压 E 和电阻 R 上压降之差即 $e_L = E - Ri$ 。在电路刚接通即 $t = 0$ 瞬间， $i = 0$ ，电阻上电压降也等于 0，所以 $e_L = E$ ，这当然是 e_L 的最大值；随着 i 的增长， Ri 相应增大，于是 e_L 逐渐减小。但是感应电势在数值上与电流变化速度成正比（感应电势 $e_L = L \times$ 电流变化速度），所以感应电势的减小就表示电流变化速度的减小。这就说明了为什么电流的增长愈来愈慢。

时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$ ， τ 与 L 成正比，是因为 L 愈大，阻碍电流变化的作用愈大，电流的增长就愈慢，达到稳定值所需时间也就愈长。 τ 与 R 成反比，是因为 R 大，电流稳定值小，故到达稳定值所需时间短。

现在再讨论一下电路短接后的情况，如果在电流达到稳

定值 I 以后,突然把开关合向 2,如图 1-23(3)所示. 由于 L 中电流不能突变,电路中电流将从刚短接时 ($t = 0$) 瞬间的 $i = I$ 起,逐渐减小到 0. 变化规律如图 1-23(4)所示,这又与电容的放电规律相对应. 其时间常数仍为 $\tau = \frac{L}{R}$. 从图

1-23(3)可见, L 中感应电势的方向与图 1-23(1)中接通时正好相反,因为现在感应电势方向是在阻碍电流减小,所以是顺着电流的方向以助长电流使它减小得慢些.

下面讨论两种极限情况:

(1) 当 R 很小以至可以忽略掉的情况下, $\tau = \frac{L}{R}$ 很大,以

至趋向无穷大,这就是说一个通有电流的纯电感 L 在短接后,电流减小到零所需的时间为无限长,换句话说纯电感中的电流永远不会减小,这说明: 1) 磁场内有能量的储存(称为磁场能量); 2) 纯电感不消耗能量. 实际上纯电感是不存在的. 只要电路中有点电阻,电流就会逐渐减小,磁能也就消耗转变为热能. 从能量角度来讲电感线圈常称为储能元件.

(2) 当 R 很大以至可以认为电路断开的情况下, τ 很小,接近于 0,这就是说串有极大电阻的 RL 电路,短接后电流很快降到 0,于是电感中势必产生很大的感应电势,以便把原来储存在 L 中的能量,得以在短时间内全部放掉,从图 1-23(3)中也可看出,由于电流不能突变,所以在刚短接瞬间, L 中的感应电势 e_L 在数值上等于 R 上电压降,即 $e_L = RI$, 当 R 很大时 e_L 也就很大. 由此可见,一个通有大电流的电感性元件例如运转中的电动机,如果突然拉开闸刀(相当用一个无穷大的电阻把电机短接),那末电机绕组中就会产生极大的感应电势足以把绝缘击穿而使整个设备遭到破坏. 所以在停车时必须采取适当措施如串入一定电阻,以减小电流的下降速度,使

感应电势不致超过安全的限度。

1-7 变 压 器

图 1-24 表示一个铁芯变压器，设初、次级线圈的匝数分别为 N_1 和 N_2 ，下面分两种情况来说明其工作原理。

1. 次级空载

在电源电压 u_1 的作用下，初级线圈中就有电流 i_1 通过，这就产生了磁通 ϕ 。由于铁芯是闭合的，漏磁通一般很小， ϕ 几乎全部集中在铁芯内，因此，可以认为两个线圈的磁通完全相同（见图 24）。当 ϕ 随着 i 变化而变化时，两个线圈的每一

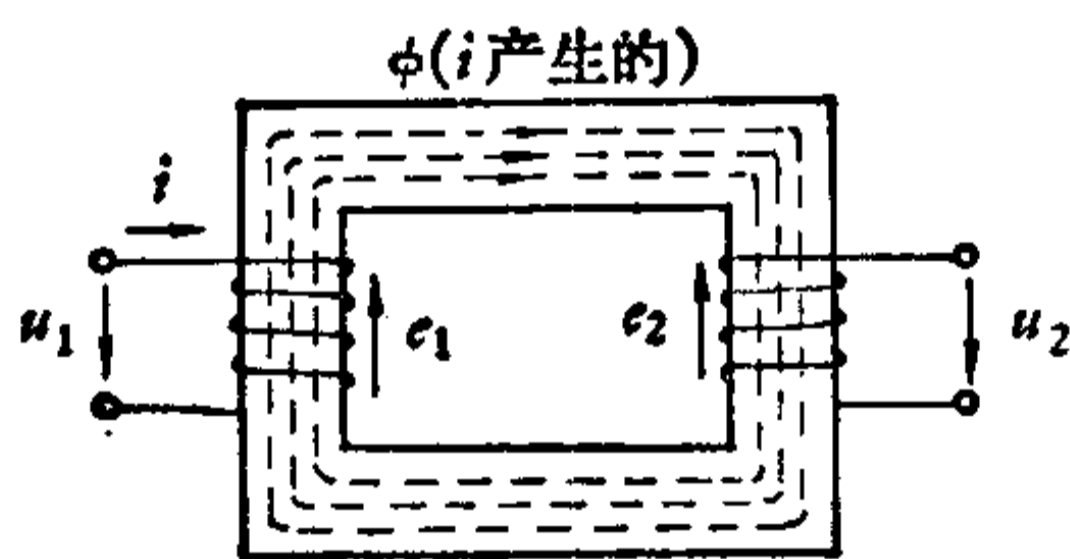


图 1-24

匝所产生的感应电势就完全相等。因此初、次级线圈中的感应电势之比等于匝数之比。在另一方面，如果忽略线圈导线的电阻，则初级线圈中的感应电势 e_1 在数值

上等于外加电压 u_1 。次级是开路的，所以次级线圈两端间的电压 u_2 就等于其中的感应电势 e_2 。这样初、次级电压之比就近似地等于匝数之比。在正弦情况下，用 U_1 、 U_2 分别代表初、次级电压的有效值，则

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

这是变压器的重要关系式之一，在本书的第六章里从另一个角度也将提到这个关系式。

在空载条件下，初级线圈中通过的电流称为激磁电流 I_0 （有效值），通常比变压器正常工作时的初级电流小得多。

穿过初级线圈各匝的磁通都等于 ϕ , 所以具有 N_1 匝的初级线圈中感应电势应等于磁通变化速度的 N_1 倍, 即 $e_1 = N_1 \times \phi$ 的变化速度. 可以证明, 在正弦交流电的条件下, ϕ 的变化速度的有效值等于磁通有效值 Φ 的 ω 倍 ($\omega = 2\pi f$), 因此上式用有效值表示为 $E_1 = N_1 \omega \Phi$.

在第五节中已讲过 $B = \frac{\Phi}{S}$, 所以 $\Phi = SB = S \frac{B_M}{\sqrt{2}}$, 式中 B_M 为 B 的峰值. 代入上式后即得

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 S B_M = 4.44 f N_1 S B_M$$

如果 B 用高斯作单位, S 用平方厘米作单位, 则可写成

$$E_1 = 4.44 f N_1 S B_M \times 10^{-8}$$

式中 E_1 的单位为伏. E_1 近似等于外加电压 U_1 , f 是变压器工作频率, 例如对于市电则 f 为 50 赫, 本书第三章中计算变压器每伏绕多少匝数的公式就是从这里来的.

2. 次级接负载 R_L

由图 1-25 可见, 当次级线圈接了负载 R_L 后, 在感应电势 e_2 作用下, 次级电路中就有电流 i_2 流过. i_2 通过次级线圈也要在铁芯中产生磁通. 如此看来, 接负载后, 铁芯中磁通似乎应该有所改变, 不再等于空载时 ($i_2 = 0$) 的磁通了. 其实不然, 尽管次级电路中有 i_2 , 铁芯中磁通基本与空载时一样. 这是因为对于一个给定的变压器, 铁芯中的

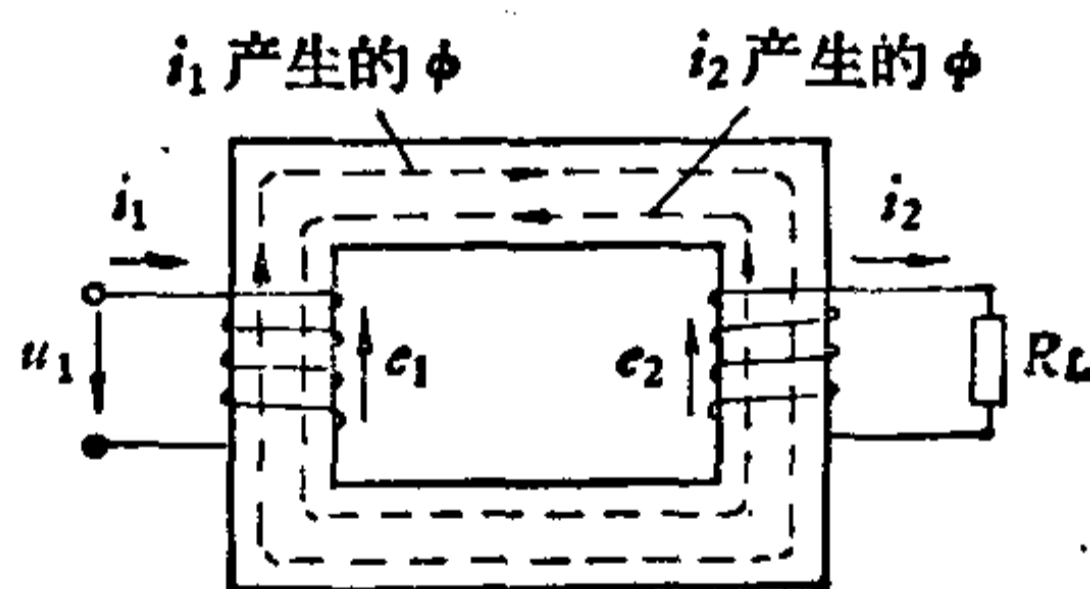


图 1-25

磁通基本上由外加电压 U_1 决定的 (前面已讲过 $U_1 \approx E_1 = N_1 \omega \Phi$, 可见 U_1 为定值时, Φ 也就定了), 不因 i_2 的有无而使

Φ 改变.由此可见,当次级有 i_2 时,外加电源就必须供给激磁电流以外的初级电流 i_1 ,使它在通过初级线圈时所产生的磁通抵销掉次级线圈中 i_2 所生的磁通.在这种条件下,铁芯中的磁通仍保持原值不变. i_2 和 i_1 两者间应有的关系,就是由它们分别通过次级和初级线圈所生的磁通应该大小相等、方向相反这一条件决定的.而磁通又由安匝数所决定,第六章关系式(6-2)就是这样来的,只是忽略了数值很小的激磁电流.

现代化的电子设备都是以半导体器件和集成电路为基础的,那么半导体究竟是什么呢?

2-1 半 导 体

1. 导体、绝缘体和半导体

大家知道,电线大都是用铜或铝做成的,因为电能通过铜线或铝线传导到需要的地方去;而在铜线或铝线外面常常包着一层橡皮或塑料,与外界隔绝起绝缘作用。

容易导电的物体,我们通称为导体,象银、铜、铝等金属都是良好的导体。反之,不容易导电的物体,我们称它们为绝缘体(又叫非导体),如橡皮、塑料、石英、玻璃等都是绝缘体。

在我们周围的世界中,除了上面说的导体和绝缘体外,还存在着一大类其他的物质,它们既不象导体那样容易导电,也不象绝缘体那样不容易导电,它们的导电性能介于导体和绝缘体之间。我们把这类物质叫做半导体。半导体的种类非常多,象锗、硅、硒等,以及大多数金属的氧化物和硫化物(例如氧化亚铜)和许多金属间的化合物(例如二锑化三镁、锑化铟等)都属半导体。

由上可知,世界上的物体按照导电的性能,可以分成三类:导体、绝缘体和半导体。

2 半导体的独特性能

半导体既不能作导体,又不能作绝缘体,为什么会引起人们很大的兴趣呢?原因并不在于它的导电能力介于导体与绝缘体之间,而在于半导体具有一种独特的性能,即同一块半导体,它的导电能力在不同情况下会有非常大的差别,一会儿它象地地道道的导体,但一会儿又象典型的绝缘体。人们正是利用半导体的这种独特的性能,做成各式各样的电子器件。

当外界温度升高时,半导体的导电能力就显著增加,温度下降,它的导电能力也显著下降,这就是说半导体的导电能力与温度有着密切的关系。人们利用半导体这种特性将它做成自动控制用的热敏元件(如热敏电阻等)。

当有光线照射在某些半导体上时,它们表现出导体的性质,导电能力很强;但在没有光照时,它们又象绝缘体一样不导电。于是人们就巧妙地利用半导体的这种独特性能,做出各种各样的自动化控制用的光电元件和器件(如光电二极管、光电三极管和光敏电阻等)。

如果在纯净的半导体中适当地掺入极微量的杂质如硼、磷等,那么半导体的导电能力就会有上百万倍的增加。这是半导体最显著、最突出的性质。正因为半导体具有这样的特性,人们利用掺杂质的方法,制造出不同性质、不同用途的半导体器件,这样才使本来不受人们注意的半导体一跃而成为今天无线电电子技术的主要器材。

2-2 p-n 结

1. p 型半导体、n 型半导体

前面我们已经知道在纯净的半导体中加入极微量的杂

质,能使半导体的导电能力增加许多倍,我们称加有杂质的半导体为杂质半导体。

但并不是在半导体中随便加些杂质就能使它具有我们需要的性能。这也就是说,杂质是有选择的,不是随便加的。而且所加杂质的数量也是有严格要求的。只有加入一定种类和一定数量的杂质,才能使半导体符合我们需要的性能。

加到半导体中的杂质可以分成两种类型。一种杂质加到半导体中去后,在半导体中会产生许多带负电的电子,这种半导体叫做电子型半导体(也叫 n 型半导体)。另一种杂质加到半导体中会产生许多缺少电子的空位,我们把这些缺少电子的空位叫做空穴,这种半导体叫做空穴型半导体(也叫 p 型半导体)。

对于锗和硅半导体来说,最常用的一类杂质是锑、磷和砷等元素。这些元素加入后,半导体变成 n 型半导体了。常用的另一类杂质有镉、铝、镓和硼等元素,加入这些杂质后,半导体就变成 p 型的了。因此,加入两种不同类型的杂质能制成两种不同类型的半导体。

2. p-n 结

如果设法使一块完整的半导体的一部分是 n 型的,另一部分是 p 型的,象图 2-1 中所画的那样。这时在 p 型同 n 型半导体相结合的地方,会形成一个叫做 p-n 结的薄层。这个

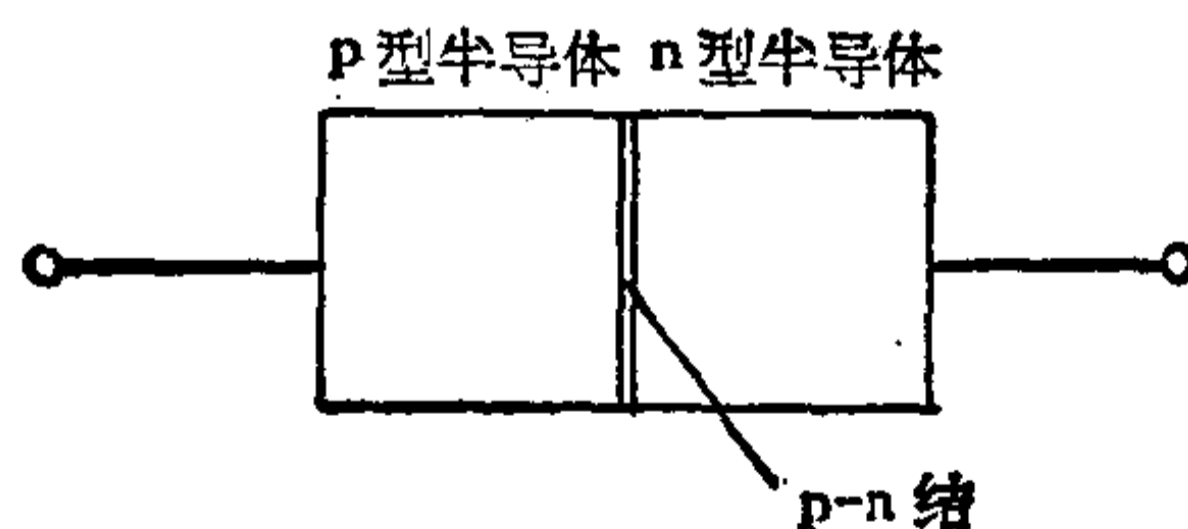


图 2-1

薄层有一个很特别的性能，就是对于电流有单方向导通的能力。

如果我们将 P 型半导体部分连接至电池的正电极，n 型半导体部分连接至电池的负电极，这时电流能通过 p-n 结，如图 2-2 所示。如果换一个方向连接，也就是说把 P 型部分接到电池的负电极，n 型部分与电池的正电极连接，这时电流不能通过 p-n 结，如图 2-3 所示。

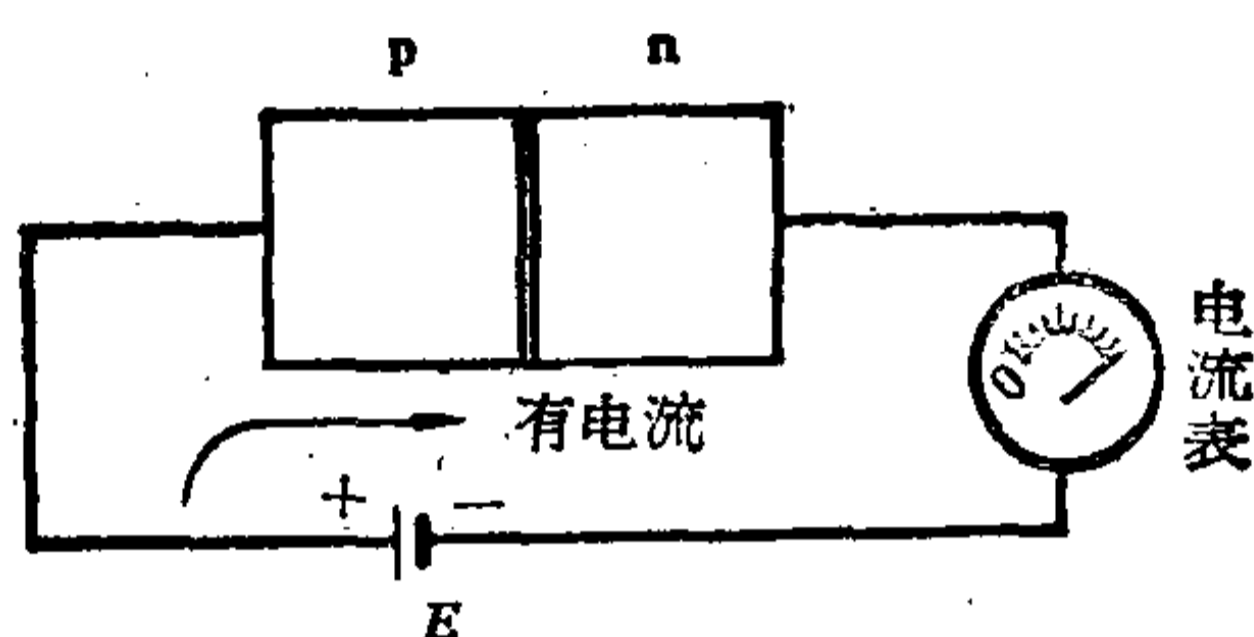


图 2-2

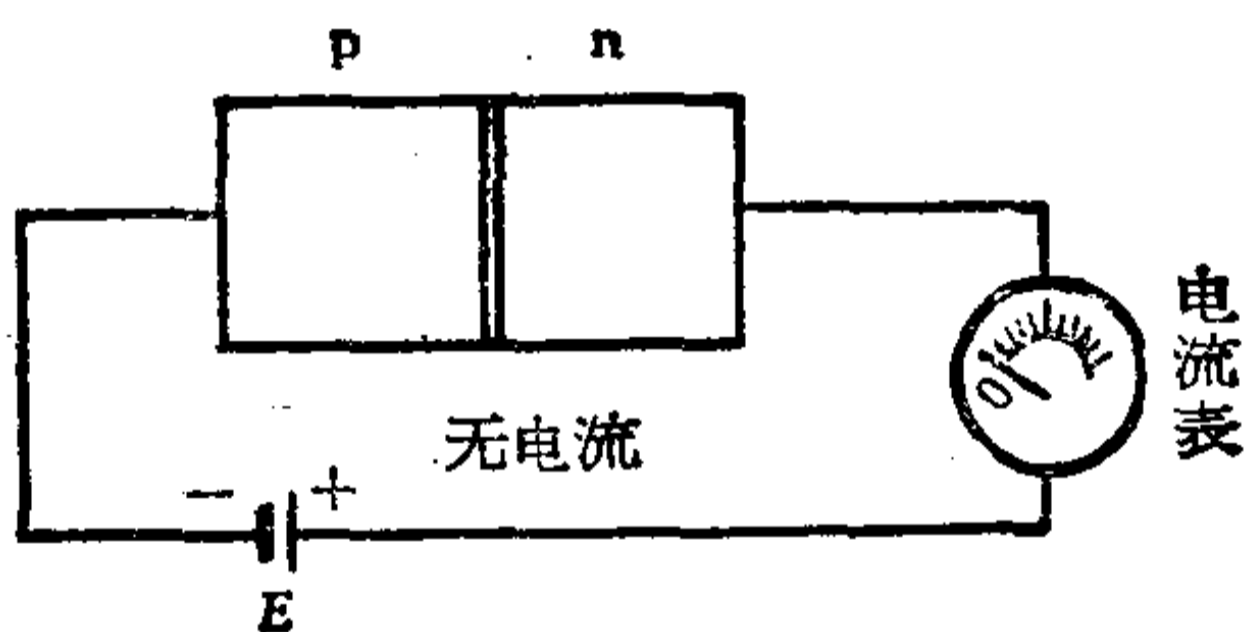
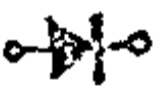


图 2-3

这说明 p-n 结具有一个单向导电的特性，我们常用这样的符号  表示电流只能从左向右流而不能从右往左流，这就是晶体二极管的符号。P 型半导体的一端叫正极（也叫阳极），n 型半导体一端叫负极（也叫阴极），电流只能从正极向负极流，而不能反过来流。晶体二极管、晶体三极管以及其他许多半导体器件基本作用原理，都是以 p-n 结的单向导电特性为基础的。

3. p-n 结的伏安特性

为了进一步弄清 p 型半导体及 n 型半导体合在一起形成的 p-n 结的单方向导电性能，常常把加在 p-n 结两端电压的数值同流过 p-n 结的电流间的关系画成曲线。由于电压用伏特表示，电流用安培、毫安或微安表示，所以电压与电流的关系又常称伏安特性。

p-n 结伏安特性可用如图 2-4 的方法测量，它测得的典型曲线如图 2-5 那种形状，横坐标表示所加电压的大小，纵坐标表示流过 p-n 结的电流的大小。

当 p-n 结两端不加电压时，流经 p-n 结的电流也为零，在图 2-5 上即是横坐标和纵坐标的交点 O 点。

当 p-n 结正向连接时(p 型区域接电源正端，n 型区域接电源负端)，流经 p-n 结的电流随着 p-n 结两端电压的逐渐增加而缓缓上升，如

图 2-5 上的 OA 段，当电压从零增加到 0.2 伏时，电流也从零上升到 1 毫安。当正向电压超过一定值(如 0.2 伏)时，正向电流随着正向电压的增加就非常显著了，如图 2-5 上的 AB 段。

当 p-n 结反向连接时(p 型区域接电压负端，n 型区域接电压正端)，反向电流随着加在 p-n 结上的反向电压的增加而略有增加，如图 2-5 上的 OC 段，电压从零增加到 1 伏，电流从零增加到 2 微安(为了明显起见，图中反向电流的单位取微

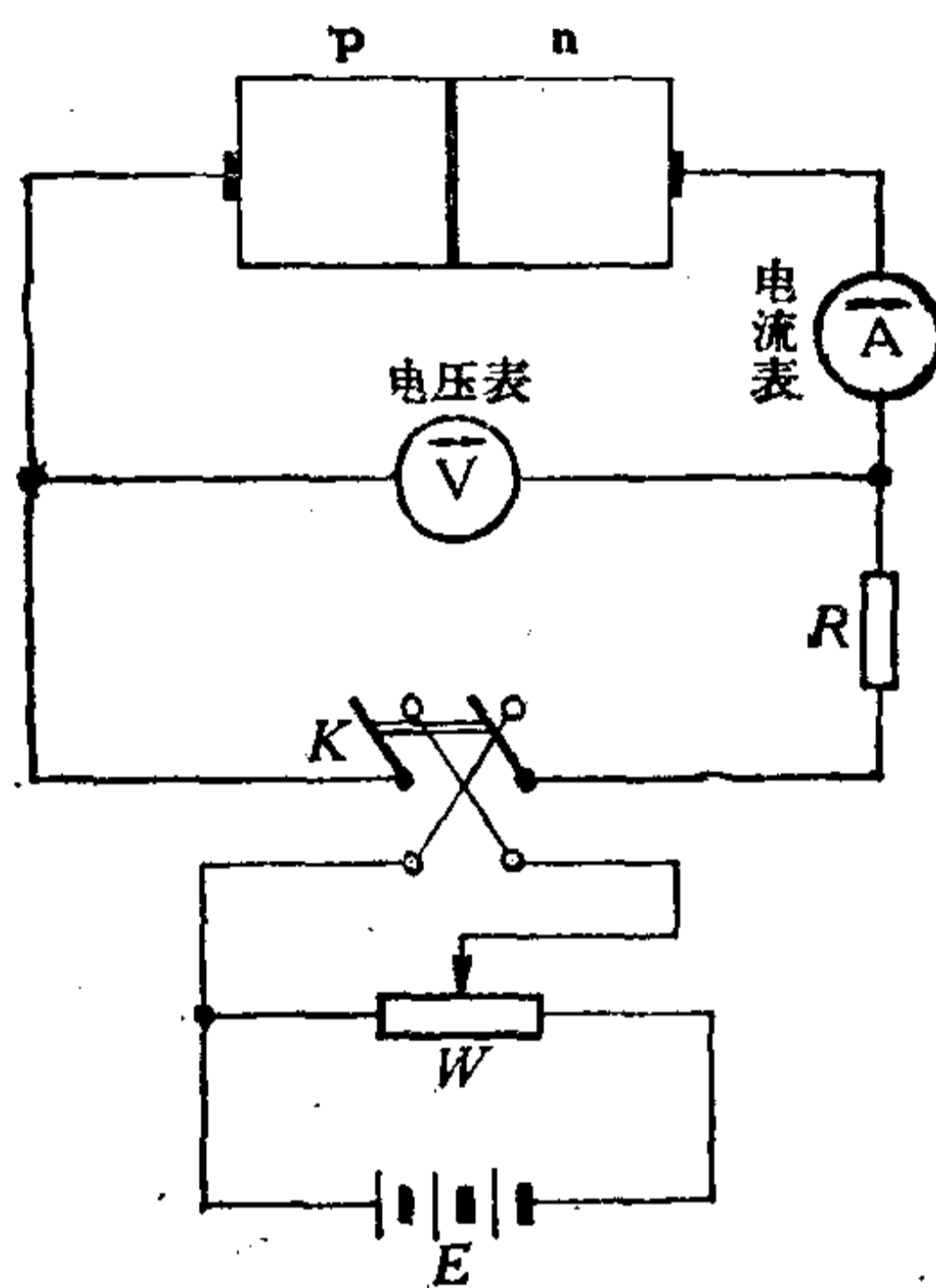


图 2-4

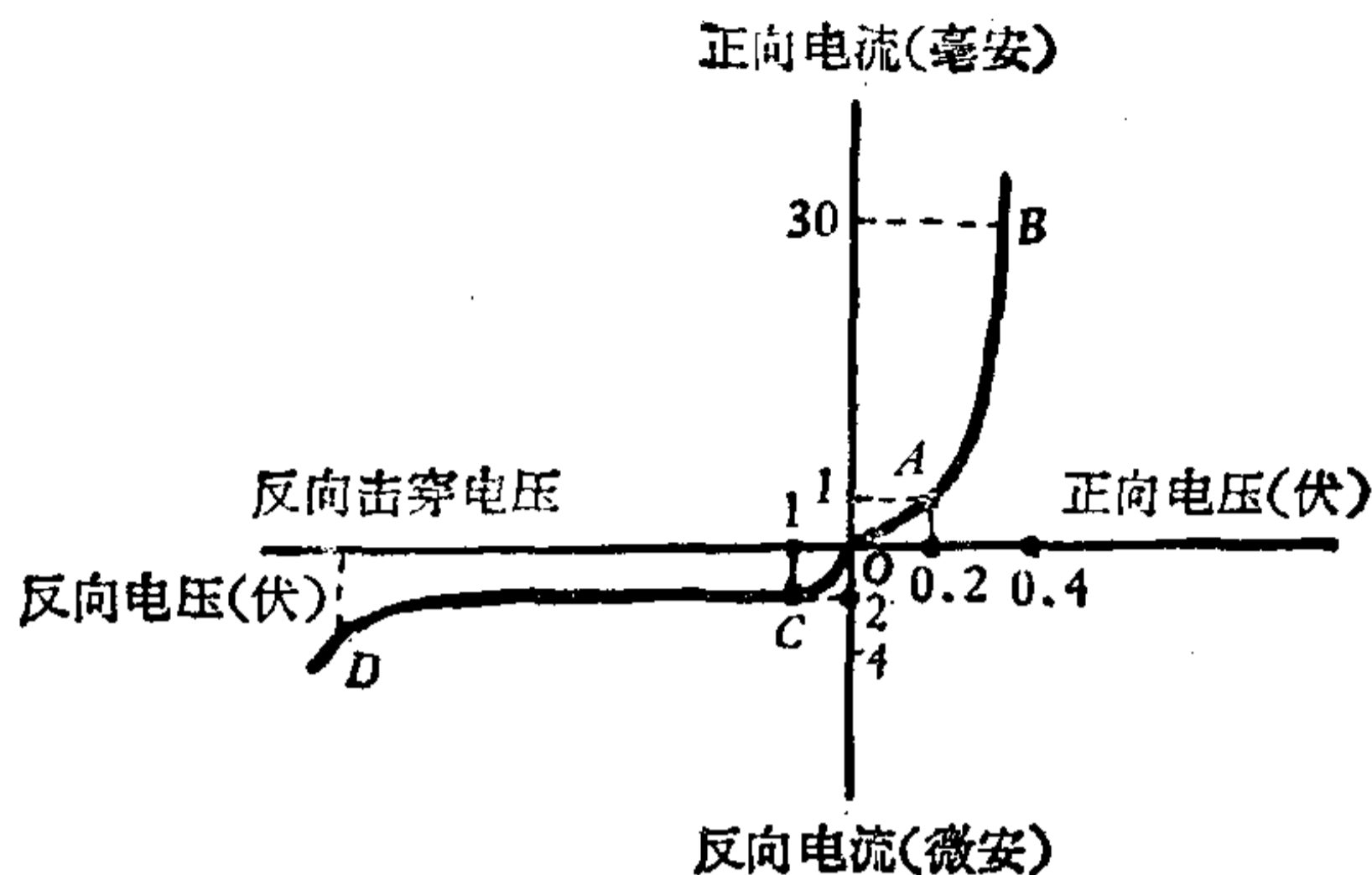


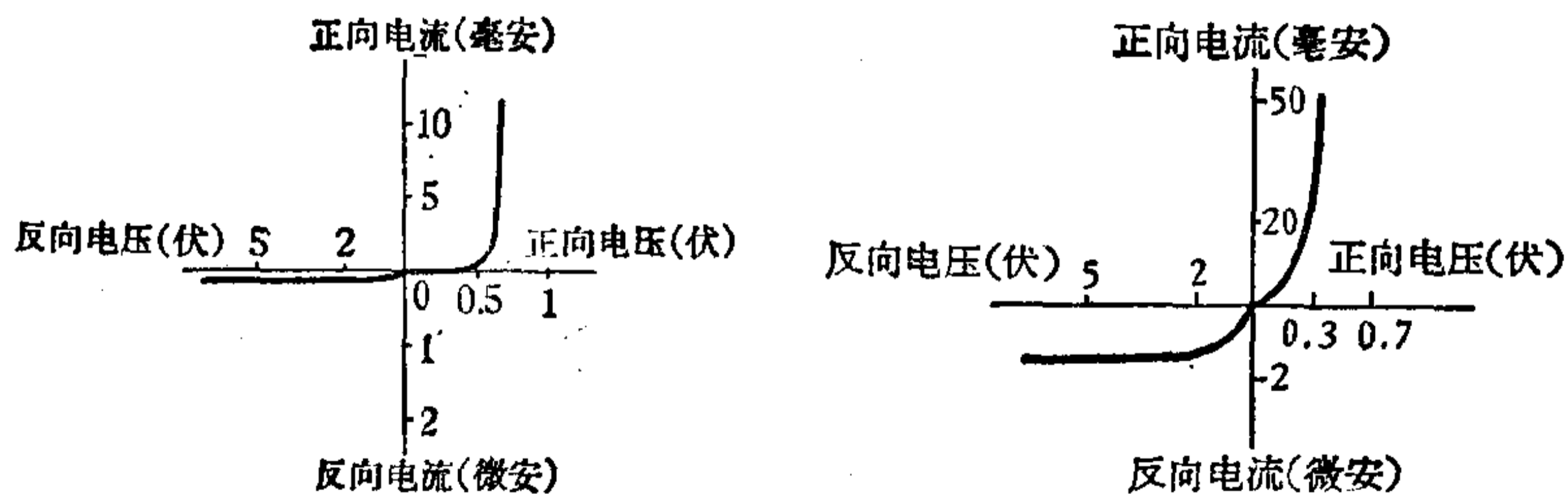
图 2-5

安)。但当反向电压继续增加时,反向电流几乎保持原来的值不变,这个电流称为反向饱和电流,如图 2-5 上的 CD 段。

从上面的讨论可知, p - n 结的单方向导电并不是绝对的,只是说明正向容易导电,反向则不容易导电。

当反向电压增加到一定的数值时, p - n 结从原来的不容易导电的状态急剧地向相反的方面转化,反向电流就会很快增加,这时 p - n 结已被击穿,这个电压通常叫反向击穿电压。

对于用不同的半导体材料和不同结构、不同工艺制作的晶体二极管,伏安特性也有差异。正向电流随正向电压上升



(1) 硅晶体二极管的伏安特性曲线

(2) 锗晶体二极管的伏安特性曲线

图 2-6

的快慢程度有时差别较大，反向电流的大小差别更大。但伏安特性曲线基本形状是相似的。

图 2-6 是某小功率硅和锗晶体二极管的伏安特性曲线。从曲线可以看出，锗晶体二极管正向电流上升很快，对应于曲线转折点(拐弯点)的正向电压要比硅晶体二极管来得小。但是锗晶体二极管的反向电流比硅晶体二极管要大得多(几百倍以至几千倍)。

2-3 晶体二极管

晶体二极管也叫半导体二极管，实际上就是由一个 $p-n$ 结所构成。一般具有单方向导电的性能。

1. 晶体二极管的分类

晶体二极管根据不同的情况，如按外形、结构、材料、功率及应用等等，可分成各种类型。

常见的晶体二极管的外形有如图 2-7 的几种，它们都有两个极：一个正极(即 P 型半导体引出线)、一个负极(即 n 型半导体引出线)。它的符号如图 2-8 所示。

根据结构不同，二极管可以分成点接触型和面接触型两

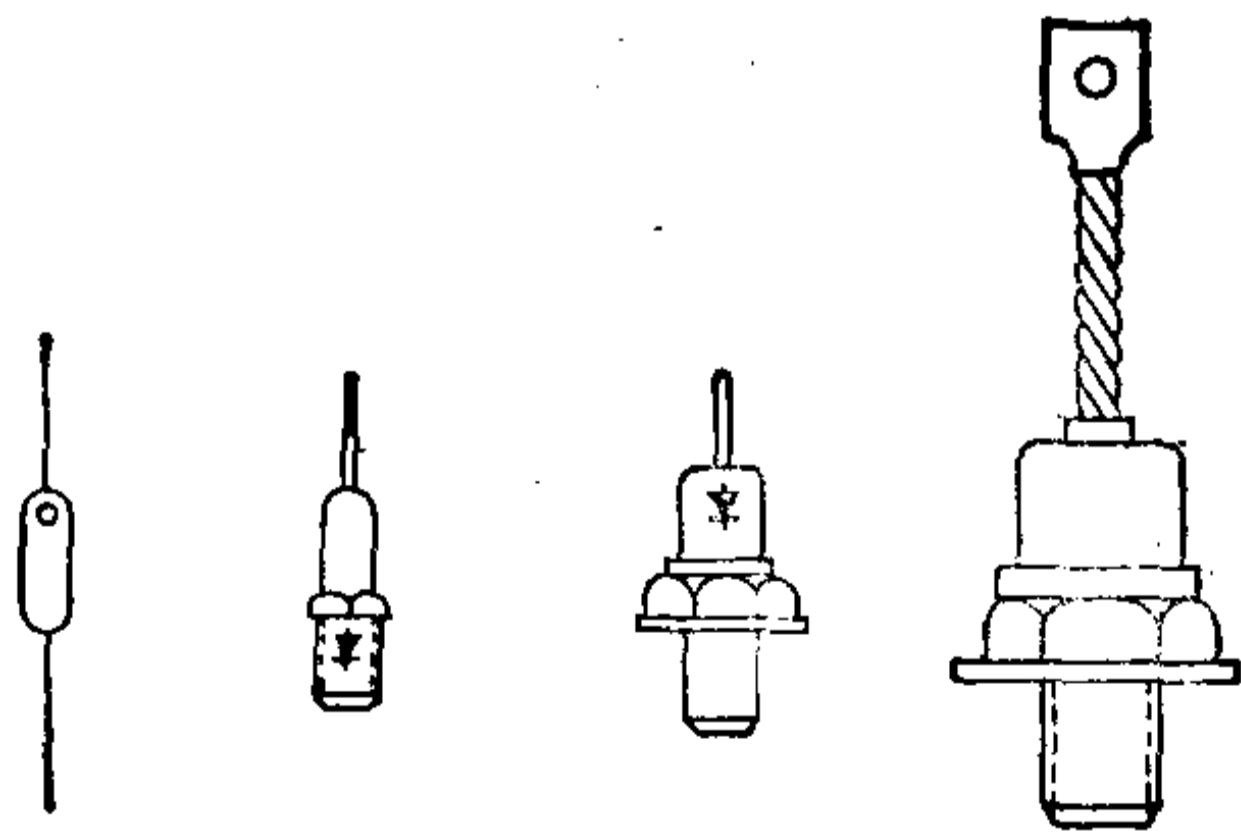


图 2-7



图 2-8

种,如图 2-9 所示.

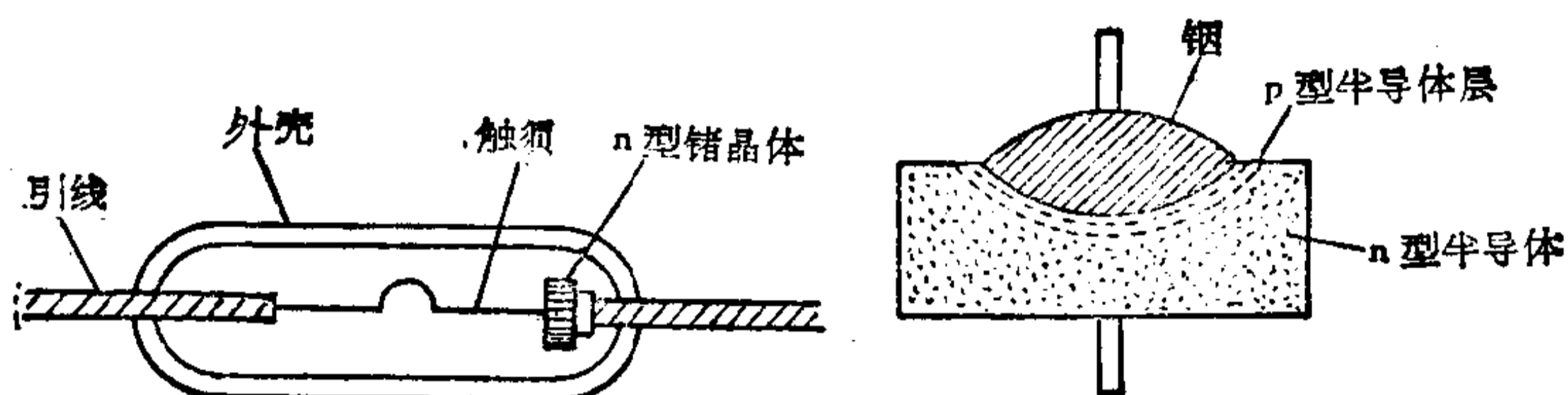


图 2-9

点接触型由于接触点小,不能通过大的电流,但正因为触点小,所以电容小,可用于高频信号的检波、脉冲技术或微小电流的整流中。面接触型则与点接触型相反,由于接触面大,可以通过较大的电流,但它的电容大,因此不能用于高频线路中。

根据半导体材料不同,二极管可分为锗二极管、硅二极管及硒整流元件、氧化铜等等。上面谈的都是锗、硅二极管,现在再介绍一下硒整流元件。

硒整流元件历史较早,效率比锗、硅二极管低,体积大,它显著的优点是过载能力强,因此,有些地方仍被应用。又由于在局部击穿后,它尚能恢复功能,在一些电子设备中可作过电压保护器件。

硒整流元件做成片状,称做硒片,光滑的一面是阳极(p型区),毛糙的一面是阴极(n型区)。硒片形状如图 2-10 所示,斜线所画表示毛糙面。

每一硒片所能承受反向电压有效值 C 级为 20 伏, D 级为 25 伏, F 级为 30 伏,硒片每平方厘米允许通过的电流 XLP 型

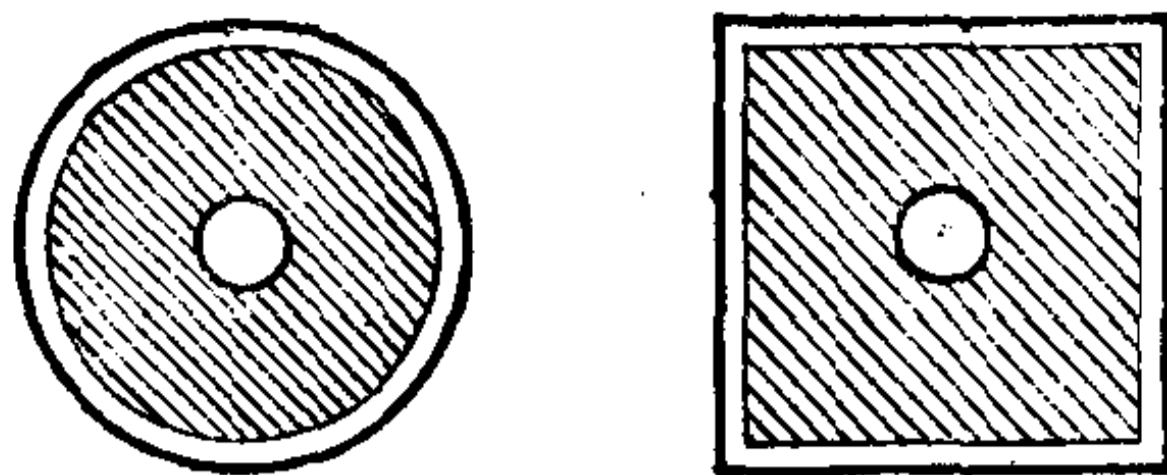


图 2-10

为 25 毫安，XTP 型为 40 毫安。在需要通过较大的电流与承受更大的电压时，就可将许多硒片并联或串联起来，象图 2-11 所示那样。这样的并联串联组合叫做硒堆。究竟要用几片进行并联和串联，应根据所要求的整流电流及电压的大小以及每片硒片所能承受的电流、电压来确定。



图 2-11

2. 晶体管的命名方法

目前我国晶体管名称由四部分组成，其命名方法如表 2-1 所示。

3. 晶体二极管的主要参数

晶体二极管的寿命很长，但是，如果我们使用不当，就可能使它损坏。为了正确使用，我们就必须首先了解晶体二极管的参数。

晶体二极管的主要参数有下面两个：

(1) 最大整流电流：是按照长期运行时晶体二极管允许通过的最大正向电流值。因为电流通过晶体二极管要发热，所以电流不能太大，否则会损坏。

表 2-1

第一部分 (数字)	第二部分	第三部分(拼音)	第四部分 (数字)
电极数目	材料和极性	晶体管类型	晶体管序号
2——二极管 3——三极管	<div>二极管 A——n 型锗 B——p 型锗 C——n 型硅 D——p 型硅</div> <div>三极管 A——pnp 锗 B——npn 锗 C——pnp 硅 D——npn 硅</div>	<div>P——普通管 V——微波管 W——稳压管 C——参量管 Z——整流管 L——整流堆 S——隧道管 U——光电管 K——开关管 X——低频小功率管</div> <div>(截止频率 $f_c < 3$ 兆赫, 耗散功率 $P_c < 1$ 瓦) G——高频小功率管 ($f_a \geq 3$ 兆赫, $P_c < 1$ 瓦) D——低频大功率管 ($f_a < 3$ 兆赫, $P_c \geq 1$ 瓦) A——高频大功率管 ($f_a \geq 3$ 兆赫, $P_c \geq 1$ 瓦) T——可控整流器</div>	第一、二、三部分相同, 仅第四部分不同, 则是在某些性能参数上有差别。

例如: 2AP1 2 表示二极管; A 表示由 n 型锗为基础组成; P 表示普通管; 1 则是编号。

2CZ11 表示由 n 型硅组成用作整流的二极管。

手册中规定的某些大功率晶体二极管的最大整流电流值, 是指在电极上装置一定尺寸散热器的条件而言的。此外, 还可采用风冷、水冷和油冷等散热措施, 以发挥二极管的载流潜力。

(2) 最大反向电压: 若加在二极管上的反向电压超过此管的最大反向电压值, 二极管就有反向击穿的危险。反向击

穿时,很可能导致管子的损坏。

还有一些其他参数,如最高工作频率、最大反向电流、最大瞬时电流、最高使用温度和最低工作温度等,对于不同的晶体二极管,也有不同的极限值,在有些场合也要适当给予注意。自由是被认识了必然。只有在认识晶体二极管特性的基础上,我们才能正确掌握和使用它。

常用晶体二极管的主要参数见附录一。

4. 利用万用表测量晶体二极管

利用普通的万用表可以粗略地测量一下晶体二极管,确定哪一端是它的正极,哪一端是负极,并约略地看出二极管的正反向电阻值(二极管正向容易导电,所以电阻小;反向不容易导电,所以电阻很大)。我们希望这两个阻值相差越大越

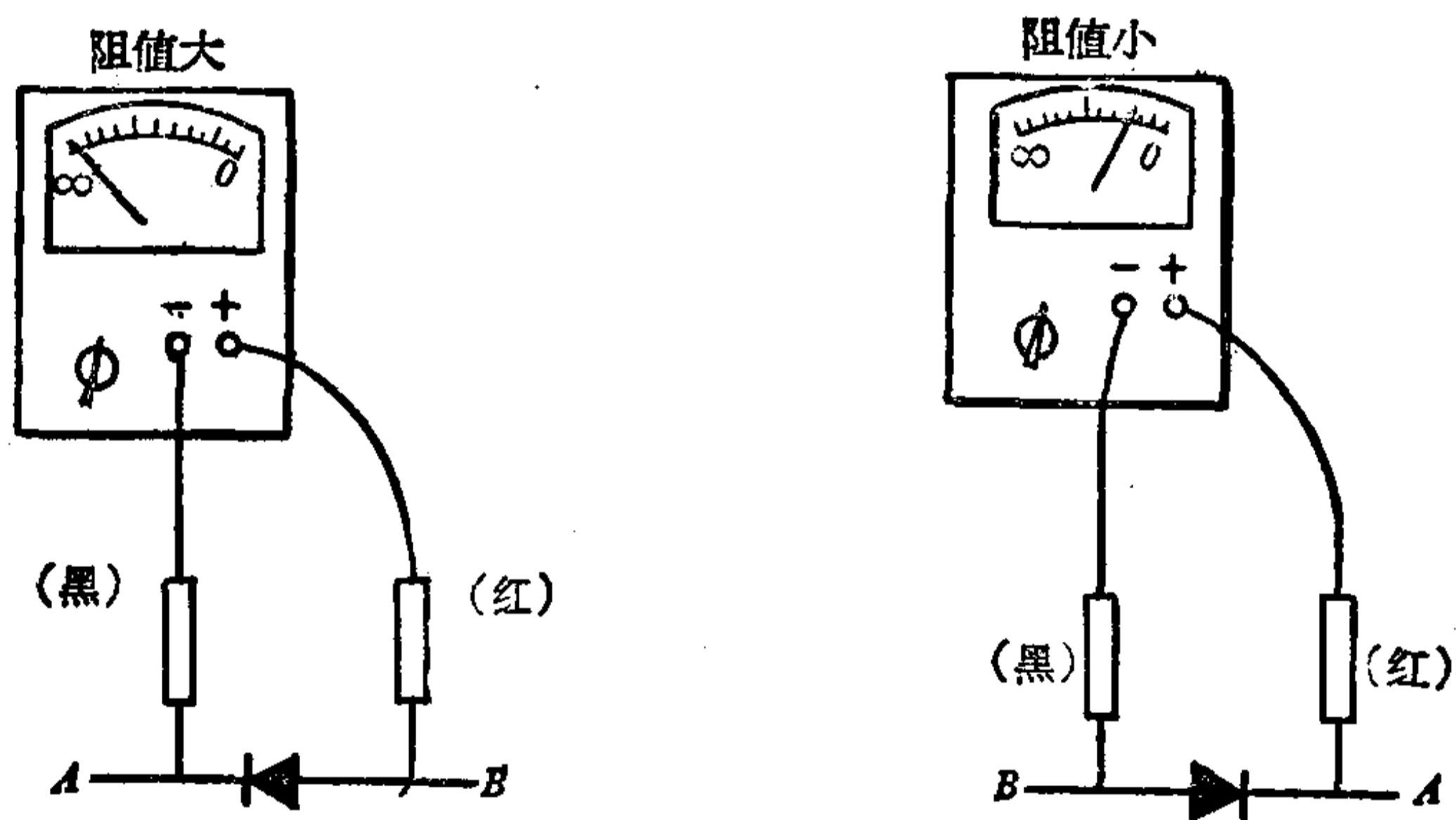


图 2-12

好。若两者相差不多,则表明这个二极管性能不好或完全坏了。

测量时,把万用表拨到“欧姆档”($R \times 100$ 或 $R \times 1000$),用表棒分别正反向测量二极管的两端,即可反映两个阻值,一

个大,一个小,小的即是晶体二极管正向电阻,大的是反向电阻,图 2-12 就是测量过程。

我们知道,普通万用表在电阻档时黑表棒带正电,红表棒带负电(在电阻档时,万用表内电路的电源极性,适与表棒插空所标的极性相反),所以由图 2-12 可以判断出二极管 A 端相当于负极, B 端相当于正极。

本 章 小 结

1. 世界上的物体按导电性能分,可以分成三类: 导体、绝缘体和半导体。半导体除了导电性能介于导体与绝缘体之间外,还有三个特点:

- (1) 随着温度的升高,导电性能显著增加;
- (2) 光照能使半导体的导电性能大大增加;
- (3) 极微量的外加杂质能使半导体的导电性能有上百万倍的增加。

2. 杂质半导体有 p 型半导体和 n 型半导体两种。在 p 型半导体和 n 型半导体相结合的地方,形成一个叫做 $p-n$ 结的薄层, $p-n$ 结具有单向导电性能,晶体二极管就是由 $p-n$ 结构成的, $p-n$ 结也是构成晶体三极管以及其它许多半导体器件的基础。

3. 晶体二极管有两个极: 正极(也叫阳极,即 p 型半导体引出线)和负极(也叫阴极,即 n 型半导体引出线)。晶体二极管的种类很多,根据各种不同用途应选用不同类型的管子。晶体二极管的主要参数有两个: 最大整流电流和最大反向电压,使用时不得超过此值,以免损坏管子。

利用二极管的单向导电特性能将交变电流转换成单向而脉动的直流电流,这个过程称为整流。整流电路可以用一个、二个或四个二极管组成,分别被称为半波整流、全波整流和桥式整流。它们整流的效果各不相同。经整流后的脉动成分是在叫做滤波器的电路中滤除掉,使脉动平滑而得到平稳的输出电流。

3-1 单相半波电阻负载整流电路

单相半波电阻负载的整流电路,是由电源 e_1 , 变压器 B , 整流元件 D 和负载 R_L 组成,如图 3-1 所示。电源 $e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$ 是一个按正弦规律变化的电压,其中 E_1 是电源电压的有效值, $\sqrt{2} E_1$ 是电源电压的最大值, $\sin \omega t$ 表示 e_1 按正弦规律变化。变压器 B 将电网的交流电压变换成负载要求的电压 e_2 。整流元件 D 将正负交变的电压变换成单方向的脉

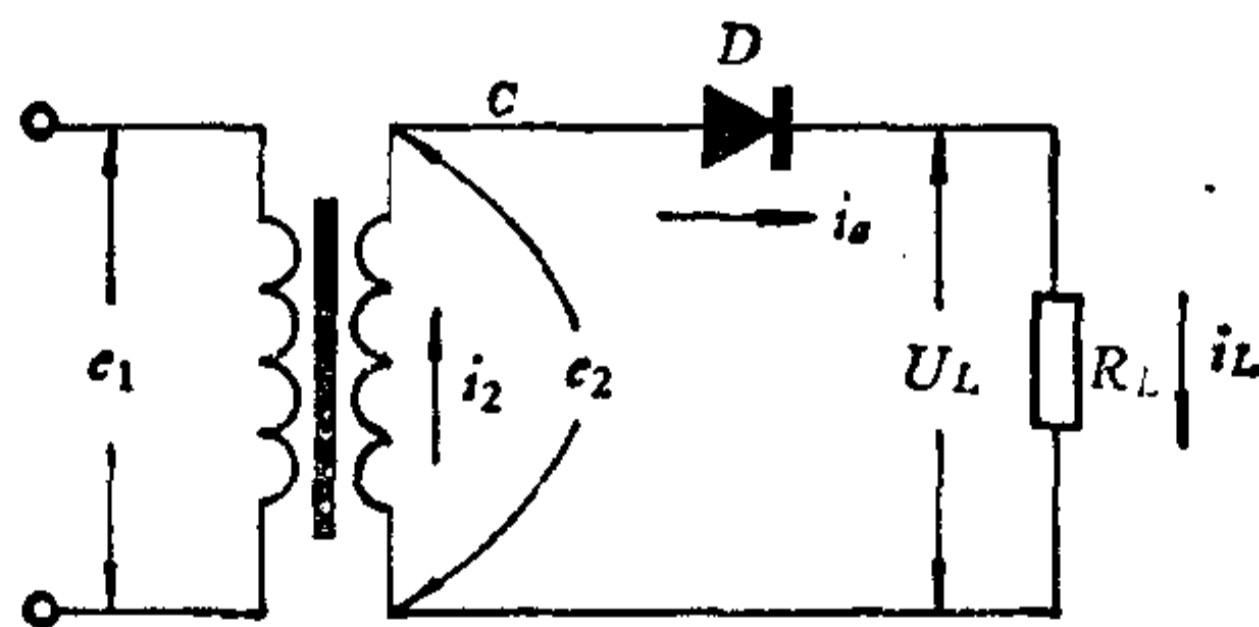


图 3-1

动电压，整流元件常采用晶体二极管。电阻 R_L 相当于需要用直流电源的负载。

1. 整流电路工作原理

如图 3-2 所示， e_2 是一个随时间变化的正弦波电压，其符号表示为： $e_2 = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t$ 。

0— π 时间内，变压器的次级电压使二极管 D 加正向电

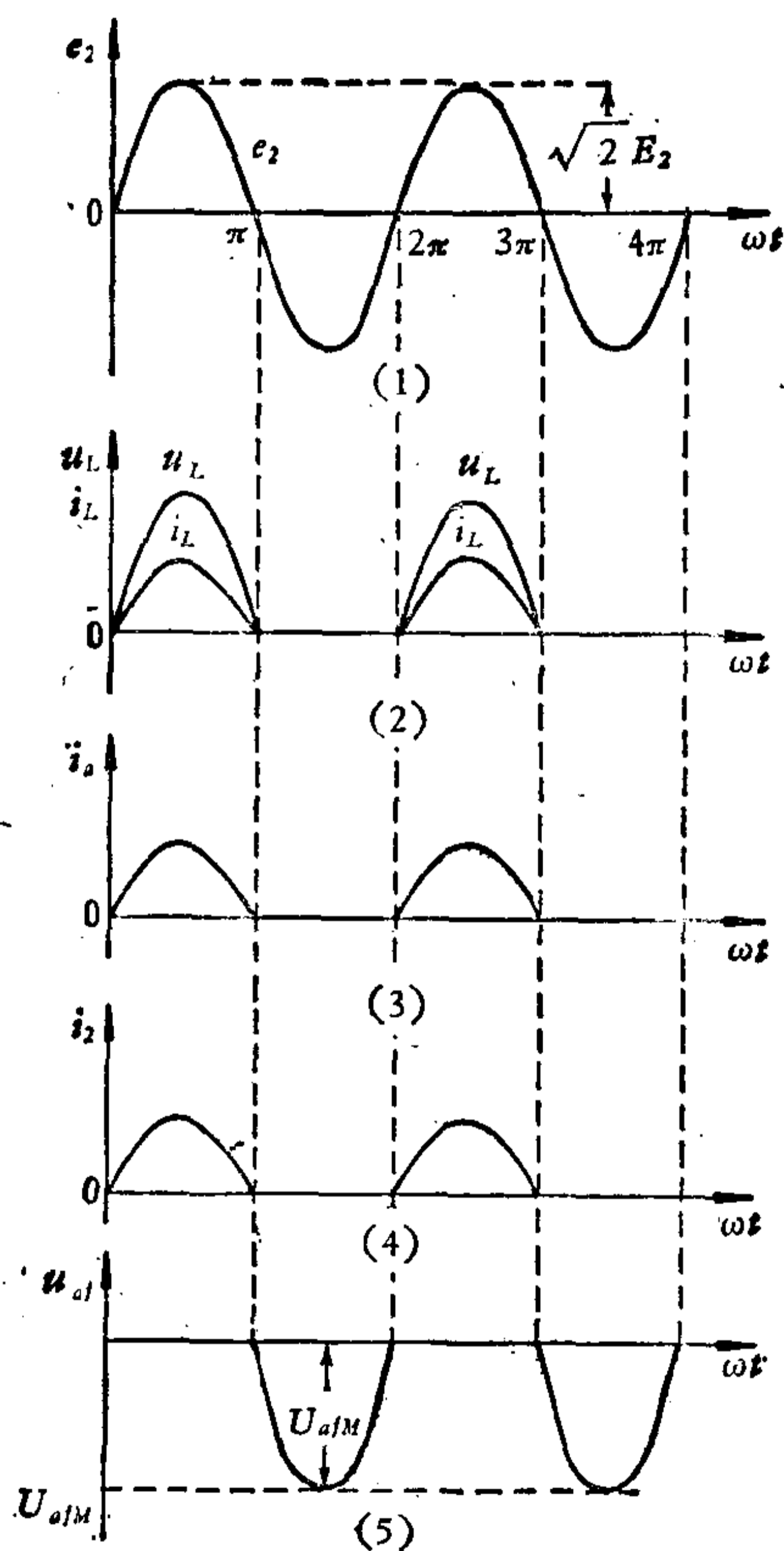


图 3-2

压,则 D 导通,负载电压 u_L 与电源电压 e_2 几乎一样。负载电流的大小由负载电阻 R_L 决定,波形如图 3-2。

$\pi-2\pi$ 时间内,二极管 D 加反向电压 (u_{af}), D 不导通,因此负载上没有电压,电源电压全部加在二极管上。见图 3-2(5)。

综合上述现象,我们可以看到,在变压器上的电压虽然交变的,但在负载 R_L 上却得到了单方向的半波电压,这就将交流电转换成直流电了。

2. 负载上直流电流和直流电压的数值

加在负载 R_L 上的电压只有电源电压的半个波,所以叫做半波整流。这样,在单向流动的半波电流中就有了直流的成分,此直流电压的数值(即半波电压在整个周期内的平均值):

$$U_L = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0.45 E_2 \quad (3-1)$$

图 3-3 中,虚线的高度表示直流电压 U_L 的大小,它是这样决定的,即使得一个周期内虚线以下的面积与半个波的面积相等。

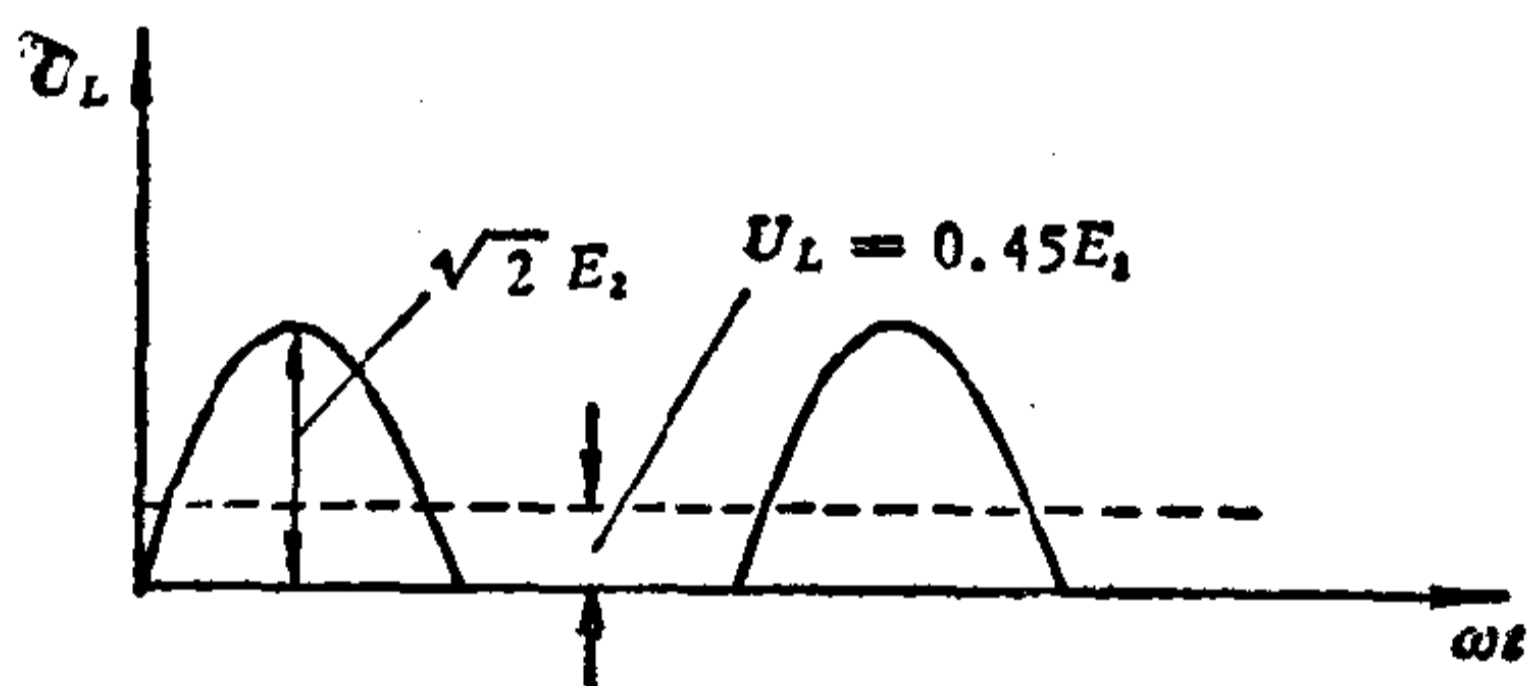


图 3-3

在工程实用上,往往是根据负载电压 U_L 的大小来求变压器的次级电压,那么可将上式改写成

$$E_2 = \frac{1}{0.45} U_L = 2.22 U_L \quad (3-2)$$

流过负载 R_L 的直流电流

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{0.45 E_2}{R_L} \quad (3-3)$$

3. 选择整流元件

流过整流元件的平均电流 I_a 与流过负载的直流电流 I_L 相等。

$$I_a = I_L = \frac{0.45 E_2}{R_L} \quad (3-4)$$

整流元件承受的最大反向电压 $U_{a/M}$ 就是 e_2 的最大值：

$$U_{a/M} = \sqrt{2} E_2 \quad (3-5)$$

根据 I_a , $U_{a/M}$ 即可选择整流元件。

注意：以上所述，是以电阻负载出发的，如遇到负载上并有电容器（容性负载）时，应按本书第四章叙述方法考虑。

对于单相半波整流电路而言，它的主要优点就是电路简单，它的明显缺点是电压波动比较大，变压器利用率比较低。有矛盾就有发展。人们在生产实践过程中，设法在线路上加以改进，采用了两个管子交替工作的电路——全波整流电路，这种全波整流电路能克服半波整流的上述缺点。

3-2 单相全波电阻负载整流电路

单相全波整流电路是由两个单相半波整流电路合起来组成的。整流变压器次级绕组有中心抽头，把绕组分成两半负载电阻 R_L 接在变压器绕组的中心抽头与两整流管负极的公共端之间。它的电路如图 3-4 所示。在变压器次级引出大小

相等、方向相反的两个电压 e_{2a} 和 e_{2b} 。

$$e_{2a} = -e_{2b} = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t$$

1. 工作原理

$0-\pi$ 时间内, e_{2a} 为正, e_{2a} 经过 D_1 、 R_L 、变压器中心抽头构成通电回路。 D_2 因加反向电压而不导电。

$\pi-2\pi$ 时间内, e_{2b} 为正, e_{2b} 经过 D_2 、 R_L 、变压器中心抽头构成通电回路。 D_1 因加反向电压而不导电。

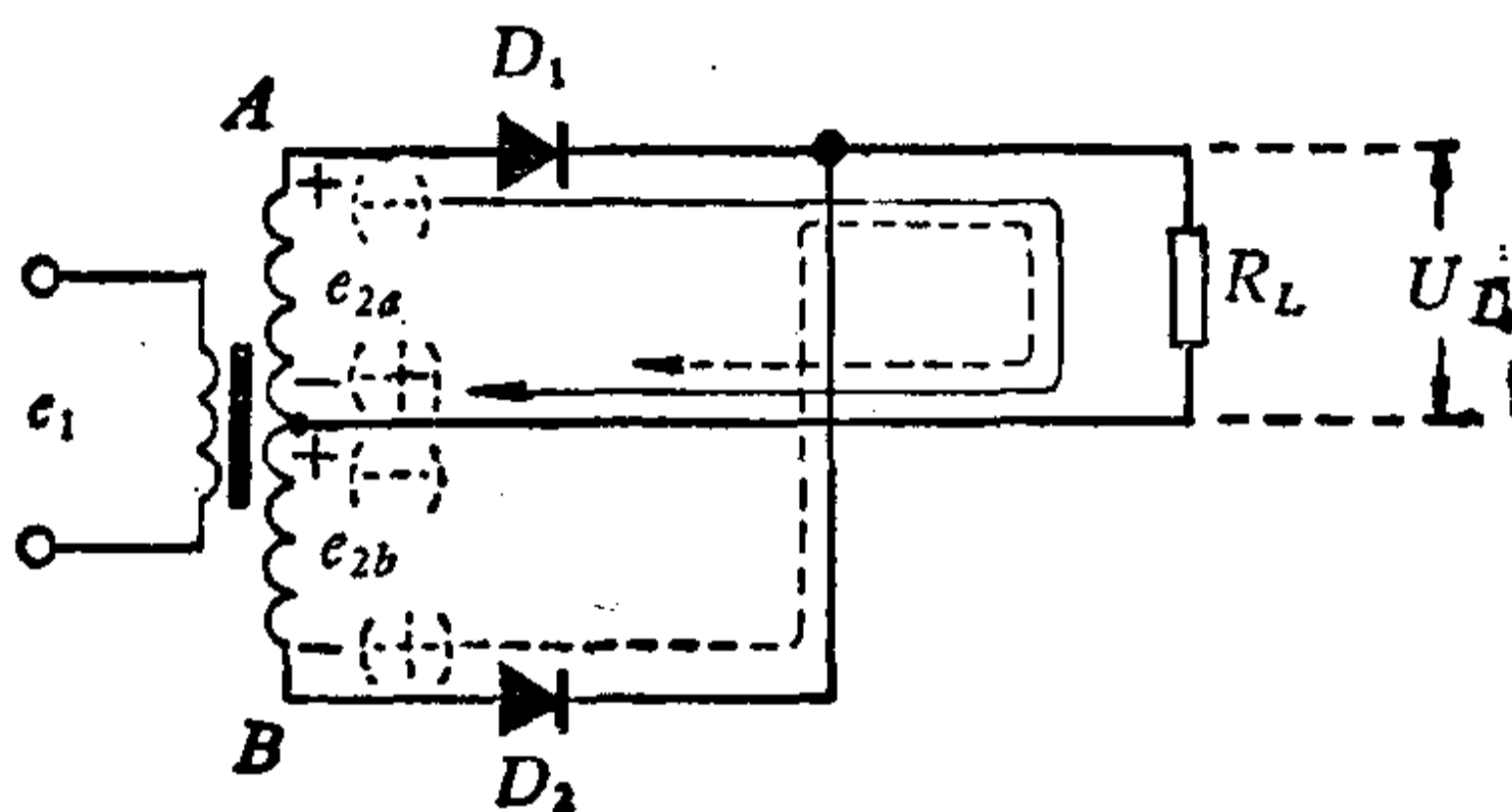


图 3-4

可见, 由两个整流元件构成的两个单相半波电路轮流导电, 从而使负载电阻 R_L 上每一个半周都具有单方向流动的电流。负载电阻 R_L 上的电压、电流, 整流元件的电压、电流波形如图 3-5 所示。

2. 负载直流电压和电流的计算

全波整流电路的直流输出电压比半波整流电路大一倍, 见图 3-6。

$$U_L = 0.9 E_2 \quad (3-6)$$

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{0.9 E_2}{R_L} \quad (3-7)$$

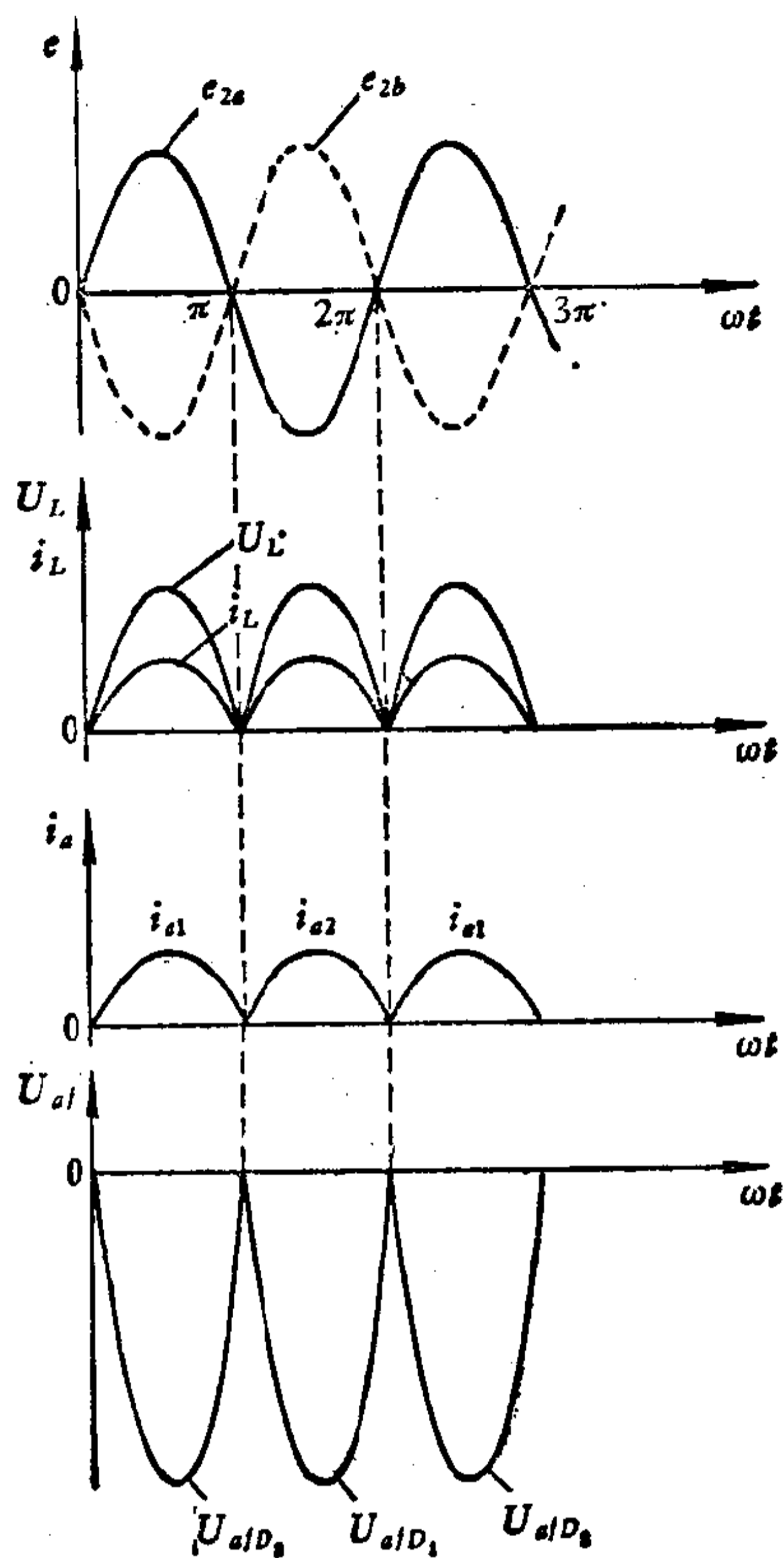


图 3-5

3. 整流元件参数的计算

在全波整流电路中,两个整流元件是轮流导电的,流过每个整流元件的平均电流就只有负载电流的一半。

$$I_D = \frac{1}{2} I_L = \frac{0.45 E_2}{R_L} \quad (3-8)$$

现在来看看全波整流电路中,每个整流元件所承受的最大反向电压有多大。

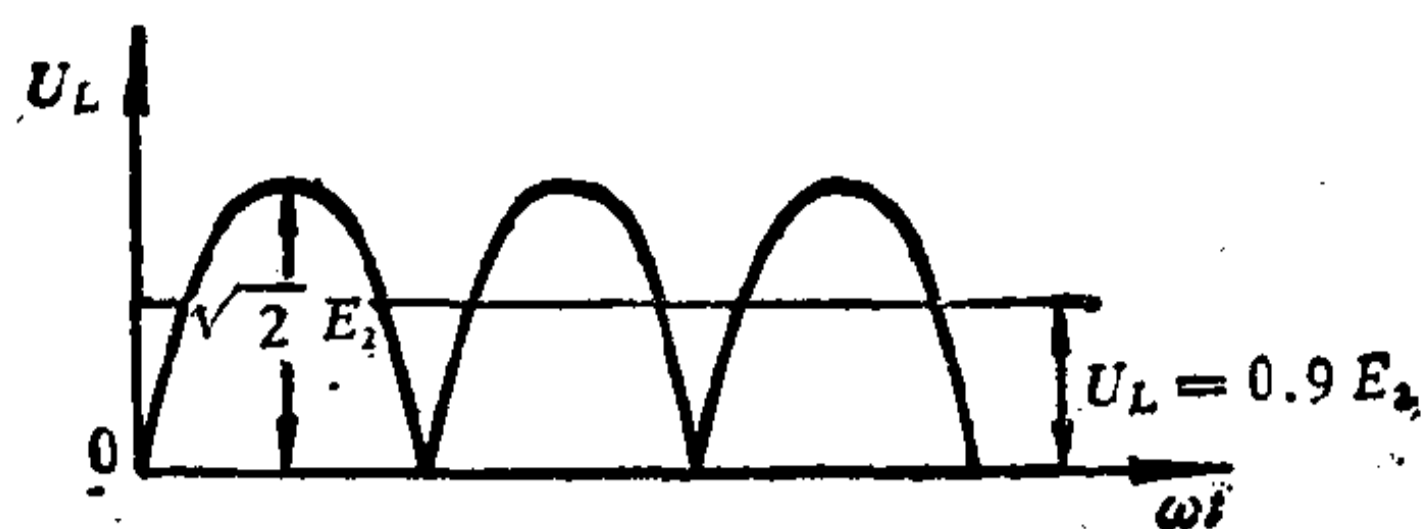


图 3-6

在 $0-\pi$ 时间内, e_{2a} 是正, e_{2b} 是负, 整流元件 D_1 是通的. D_1 上的压降极小, 我们就可把它看作是一根导线, 如图 3-7(1) 所示. 从图中可以看到, e_{2a} 正的一端 A , 实际上就是接到了整流元件 D_2 的阴极, 所以 AB 两端电压的最大值 $2\sqrt{2}E_2$ 即为 D_2 承受的最大反向电压.

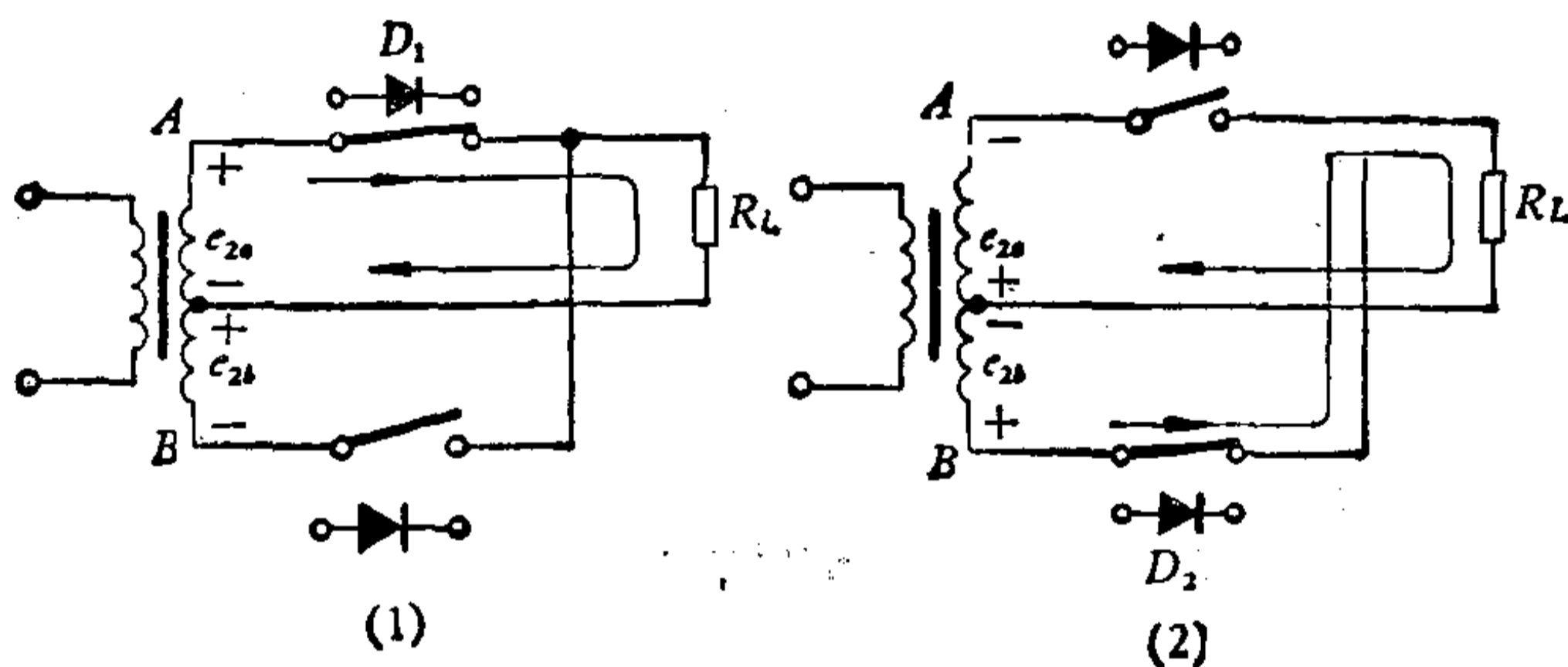


图 3-7

同样在 $\pi-2\pi$ 时间内, 整流元件 D_2 是通的, 因此可将电路画成图 3-7(2) 那样. 这时 e_{2b} 的一端就加到整流元件 D_1 的阴极了, 所以整流元件 D_1 所承受的最大反向电压也是 $2\sqrt{2}E_2$.

从以上分析可以知道, 在全波整流电路中, 每个整流元件所承受的最大反向电压是变压器次级电压最大值的两倍.

$$U_{afM} = 2\sqrt{2}E_2 \quad (3-9)$$

4. 计算举例

生产中需要一个单相全波整流电路，要求输出 110 伏的直流电压和 3 安的直流电流，如何选择整流元件？

解：先求变压器次级电压，由 $U_L = 0.9E_2$ 得到

$$E_2 = \frac{U_L}{0.9} = 1.11U_L = 122 \text{ 伏}$$

加在整流元件上的最大反向电压 $U_{a/M}$

$$U_{a/M} = 2\sqrt{2}E_2 = 2.82 \times 122 = 344 \text{ 伏}$$

通过整流元件的平均电流 I_a

$$I_a = \frac{1}{2} I_L = 0.5 \times 3 = 1.5 \text{ 安}$$

考虑到电网电压波动等因素，所以选晶体管 2CZ12F，额定电流 3 安，最大反向电压 500 伏。

单相全波整流电路，虽然克服了单相半波电路的缺点，能够使整流出来的电压波动减小一些，但其本身也存在着一定的缺点，如变压器次级绕组增加了，并需有对称的中心抽头等，整流元件所承受到的最大反向电压也较高，这样如果要求输出较高电压的话，势必要选择耐压很高的晶体管。

为了克服这些缺点，往往采用下面要讨论的单相桥式整流电路。

3-3 单相桥式电阻负载整流电路

单相桥式整流电路是由四个晶体管所组成，其电路接成一个电桥形式，变压器次级绕组、负载 R_L 分别接在电桥的两端对角线上，每一对角线上的两只晶体管形成串联组合，故称为桥式整流电路。电路如图 3-8 所示，图 3-8(1)和(2)是

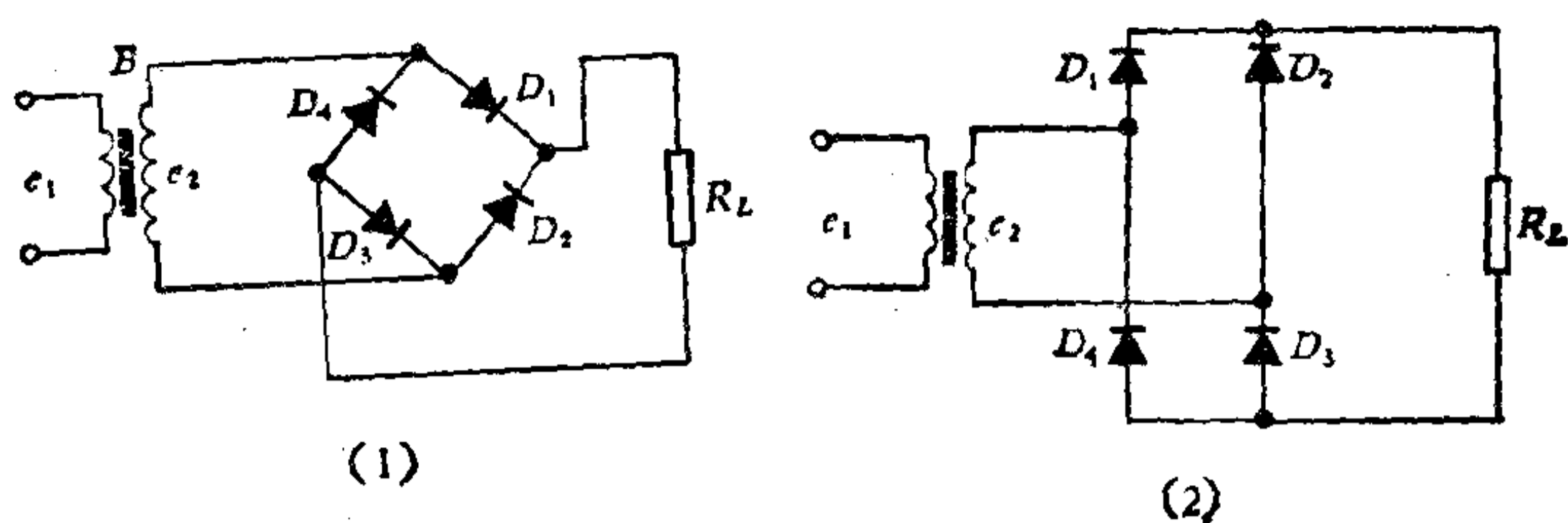


图 3-8

桥式整流电路的两种画法。

1. 整流原理

桥式整流电路也是以全波整流方式工作的。工作时两组串联二极管交替导电。

当电源的极性上面为正下面为负时，整流元件 D_1 、 D_3 导通。这时 D_1 和 D_3 上的压降极小，我们可以将 D_1 、 D_3 画成两根导线，如图 3-9(1)所示。电流从变压器次级线圈上端经 D_1 、 R_L 、 D_3 回到变压器次级线圈下端，在负载 R_L 上得到一个半波整流电压。

当电源极性反一反时，整流元件 D_2 、 D_4 导通。电路可画成图 3-9(2)。电流通过 D_2 、 R_L 、 D_4 成一回路，同样在 R_L 上

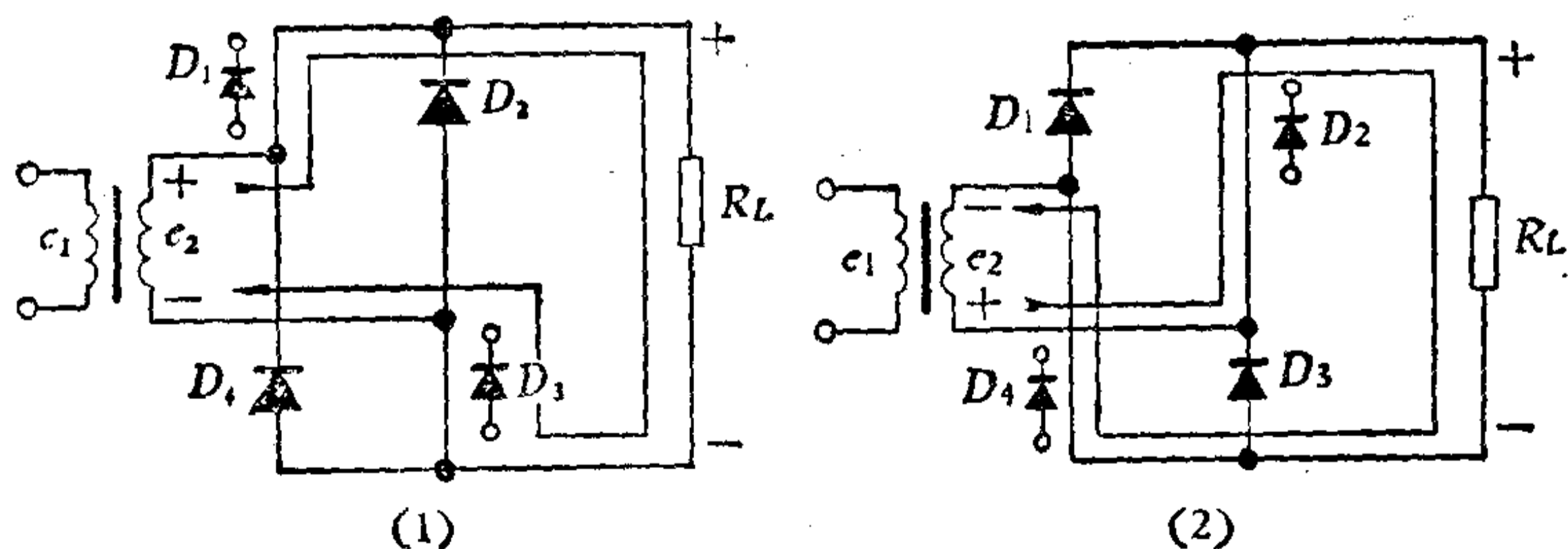


图 3-9

得到一个半波整流电压。

如此重复，在负载上就能得到一个同单相全波一样的电压波形，波形如图 3-10。

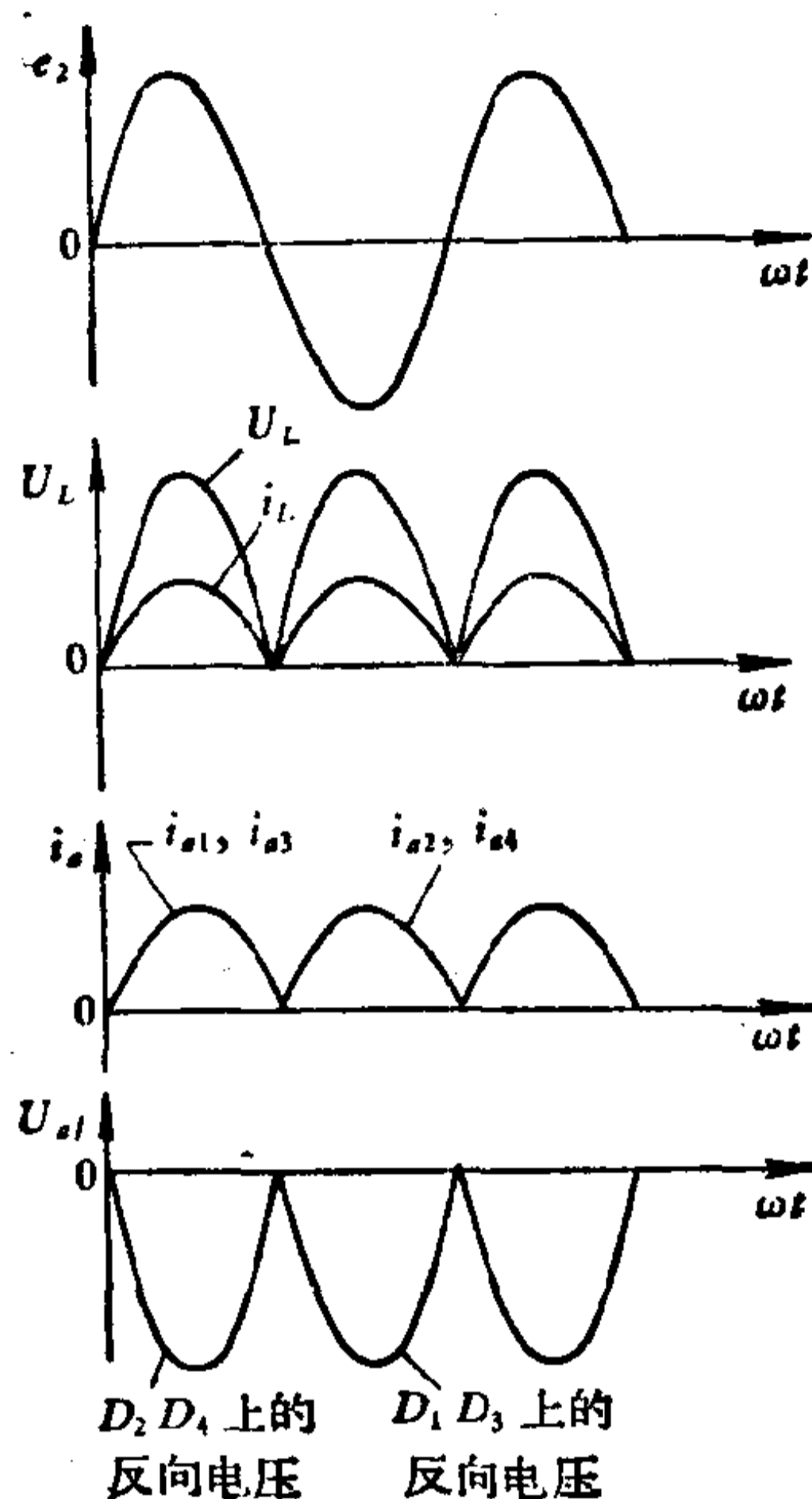


图 3-10

2. 负载上直流电压和电流的计算

负载 R_L 上电压电流波形同全波整流一样，所以直流电压和直流电流的计算式也同全波整流一样。

$$U_L = 0.9 E_2 \quad (3-10)$$

$$I_L = \frac{0.9 E_2}{R_L} \quad (3-11)$$

3. 整流元件参数的计算

通过整流元件的平均电流与全波整流电路一样。

$$I_a = \frac{1}{2} I_L = \frac{0.45 E_2}{R_L} \quad (3-12)$$

整流元件所承受反向电压最大值与全波整流电路不同，它等于

$$U_{a/M} = \sqrt{2} E_2 \quad (3-13)$$

这个我们很容易从线路上看出，例如在 $0-\pi$ 内 [参见图 3-9(1)]，变压器次级 e_2 的正端就分别接到整流元件 D_1 、 D_4 的阴极，因此，这两个整流元件所受到的最大反向电压就是 $\sqrt{2} E_2$ 。在 $\pi-2\pi$ 内 [参见图 3-9(2)]，同样可以看出整流元件 D_1 、 D_3 所承受的最大反向电压也为 $\sqrt{2} E_2$ 。

桥式线路与全波线路相比，桥式整流线路中元件数比全

波线路多一倍,但元件耐压可以低一半,且变压器次级线圈无需中心抽头,利用率高,体积可以小些,节省铜、钢等材料。

4. 计算举例

同前例(全波整流举例),若用桥式电路,整流元件如何选择?

由式(3-12)和(3-13),

$$I_a = \frac{1}{2} I_L = 1.5 \text{ 安}, U_{a/m} = \sqrt{2} E_2 = 172 \text{ 伏}$$

选 2CZ12D 即可,它的额定整流电流 3 安,最大反向电压 300 伏。

前面我们讨论的都是单相整流电路,它们的输出功率一般不大(小于几千瓦)。当整流器输出功率很大时,就不宜采用单相整流电路了,因为这样会使三相电网负荷不均匀,影响供电质量。因此当输出功率较大时,往往采用三相整流电路。可见,事物都是一分为二的,各种整流电路都有优点的一面,又有其不足的一面,需要加以克服,这样就不断地推动了整流电路的发展。

3-4 三相桥式电阻负载整流电路

三相桥式整流的变压器,原边接成三角形,副边接成星形,如图 3-11。

1. 整流原理

变压器次级的相电压 u_{a0} 、 u_{b0} 、 u_{c0} 是按正弦规律变化的,在相位上各差 120° ,如图 3-12 所示。

在 t_1-t_2 时间内, a 点的电位最高,而 b 点的电位最低,

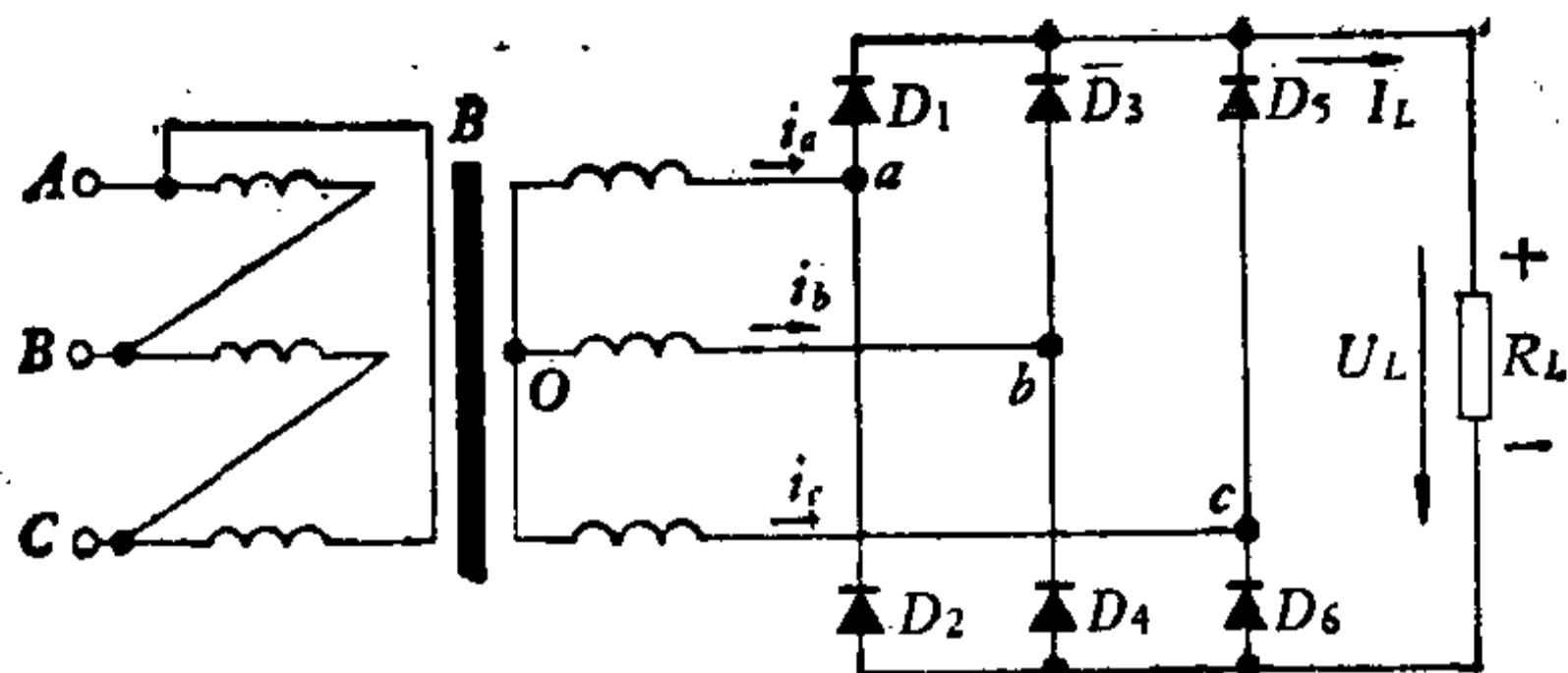


图 3-11

这样就从 a 点出发，经过整流元件 D_1 、负载电阻 R_L 、整流元件 D_4 ，和对应的变压器绕组回到 b 点构成了一个导电的回路，由于整流元件内阻很小，变压器的次级电阻也很小，所以此时 ab 之间的线电压，可以认为都加在负载 R_L 上。

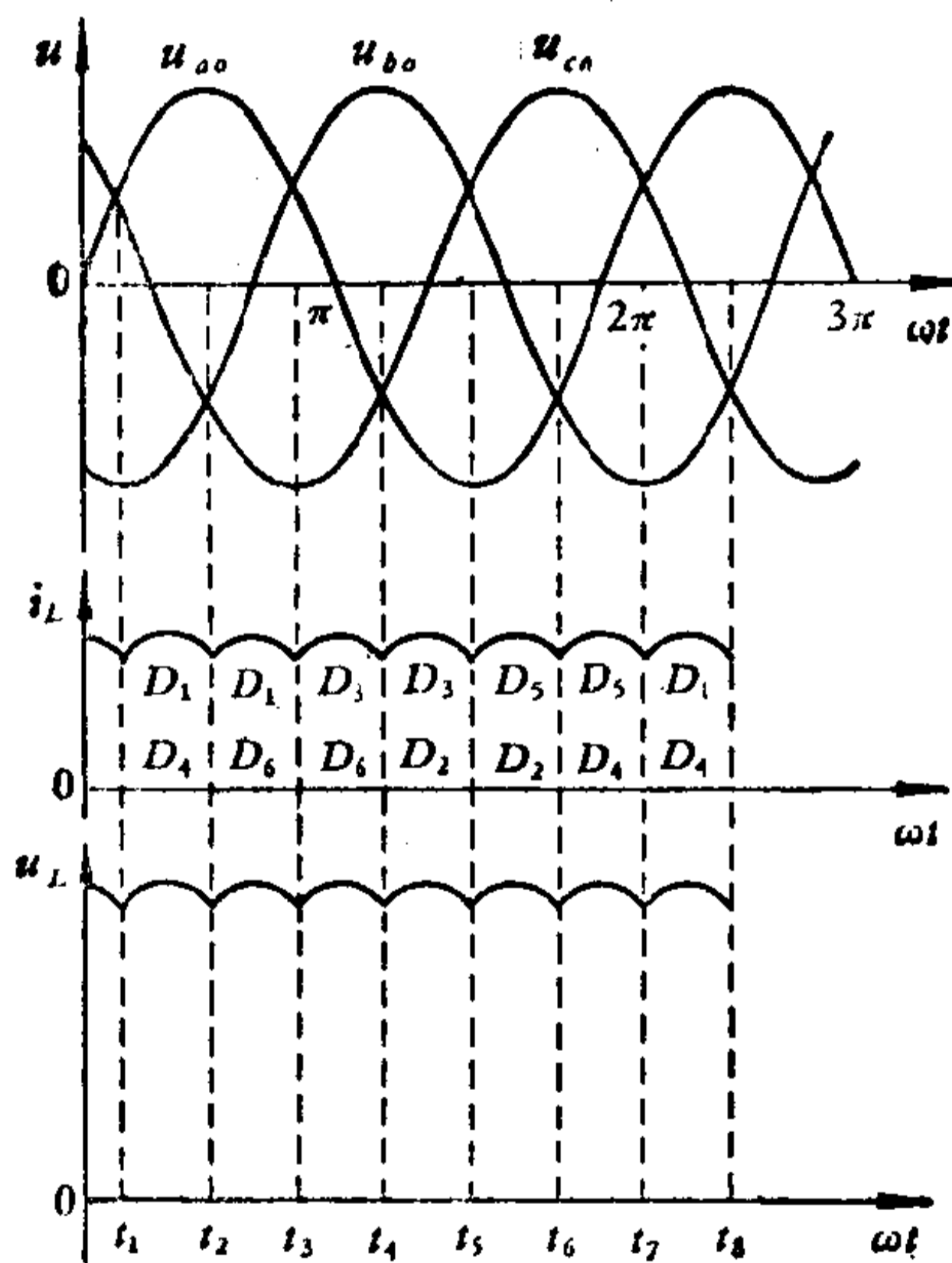


图 3-12

在 t_2-t_3 时间内， a 点电位仍旧最高，而 c 点的电位变得最低了，所以电流就从 a 点出发，经过整流元件 D_1 、负载电阻

R_L 、整流元件 D_6 ，和对应的变压器绕组，回到 c 点构成通路。此时， ac 之间的线电压，加在负载 R_L 上。

在 t_3-t_4 时间内， b 点电位变得最高，而 c 点电位仍旧最低，所以电流就从 b 相出发，经过整流元件 D_3 、负载电阻 R_L 、整流元件 D_6 ，和对应的变压器绕组，回到 c 相构成通路。此时， bc 之间的线电压，加在负载 R_L 上。

t_4-t_5 时间内，整流元件 D_3 、 D_2 导通。

t_5-t_6 时间内，整流元件 D_5 、 D_2 导通。

t_6-t_7 时间内，整流元件 D_5 、 D_4 导通。

这样，在负载 R_L 上就得到了一个比较平直的直流电压，如图 3-12。

2. 负载直流电压和直流电流的计算

负载两端的直流电压 U_L ：

$$U_L = \frac{3 \times \sqrt{2} \times \sqrt{3}}{\pi} E_2 = 2.34 E_2 \quad (3-14)$$

其中 E_2 为变压器次级相电压的有效值。

负载中流过的直流电流数值用电流定律就可求得：

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = 2.34 \frac{E_2}{R_L} \quad (3-15)$$

3. 整流二极管上平均直流电流和最大反向电压的计算

因为在一个周期中，每只管子只有 $1/3$ 时间内导通，所以每只管子的平均电流只为负载电流的三分之一，即

$$I_d = \frac{1}{3} I_L = \frac{2.34 E_2}{3 R_L} = 0.78 \frac{E_2}{R_L} \quad (3-16)$$

每只管子承受的最大反向电压应是变压器次级线电压的最大值，即

$$U_{afM} = \sqrt{2} \times \sqrt{3} E_2 = 2.45 E_2 = 1.05 U_L \quad (3-17)$$

上面介绍的几种电路，其中单相桥式整流电路是小功率整流电路中应用较广泛的一种，其他几种整流电路都各自有特点，使用时要从各种具体情况出发，去分析、去比较，从而确定经济的、合理的整流电路方案。

3-5 整流元件的串联和并联

在整流电路中，往往会遇到电压很高或电流很大的情况，例如静电喷漆需要高压，电镀需要大电流，如果采用整流元件的耐压或承受电流的能力不能满足要求，可以把整流元件串联或并联起来使用。

1. 元件的串联

假若整流元件不能承受很高的反向电压，可以把两个或两个以上的元件串联使用，这样可使各个元件分担承受反向电压。下面讨论串联的方法：

假如我们将三个整流元件按图 3-13 所示联接，并在电路两端加有 300 伏的电压。是不是每个管子平均分担到 100 伏

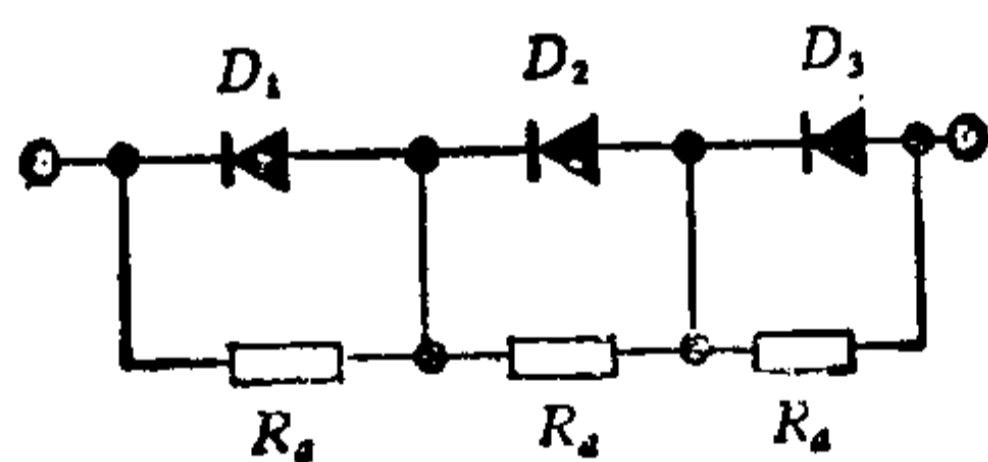


图 3-13

反向电压呢？往往不是这样。各个整流元件的反向特性（即反向电阻）不一致，它们所分配到的电压也不会均匀。假定整流元件 \$D_1\$ 的反向电阻比 \$D_2\$、\$D_3\$ 都大，这时降在 \$D_1\$ 的压降就

大,就有可能被击穿, D_1 一旦击穿,全部电压加在其余两个管子上,此时,每个管子承受的电压比原来更高,又有相继被击穿的可能。为使所串联的每个整流元件平均分担反向电压,可以采用并联均压电阻 R_a 的方法,如图 3-14 所示。如果均压电阻阻值比整流元件反向电阻小得多,那么电压就按均压电阻阻值来分配了。均压电阻的数值一般取得等于整流元件反向电阻的三分之一到十分之一的范围之内。若电阻数值越小,则均压效果越好,但分流损耗越大,整流效果相对要差些。反之电阻数值越大,均压效果就差一点,但损耗可以减小。

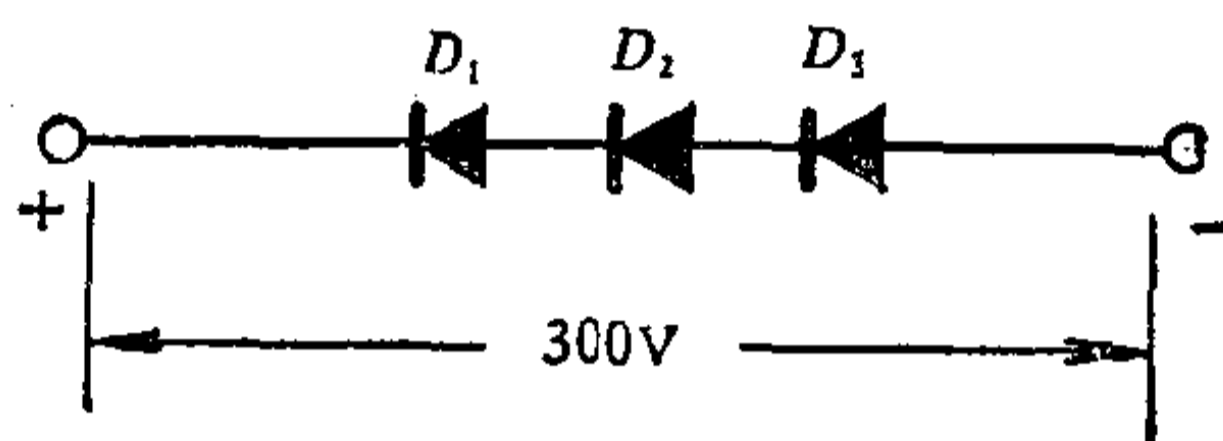


图 3-14

均压电阻可按下式计算:

$$R_a = \frac{U_M \times 10^3}{K_1 I_M} \text{ (欧)}$$

式中, K_1 取 3—10; U_M 为整流二极管的反向峰值电压(伏); I_M 为整流二极管反向漏电流(毫安)。

均压电阻功率

$$P_a = \frac{K_2}{R_a} \left(\frac{U}{n} \right)^2$$

式中, K_2 取 1—2; U 为线路上反向峰值电压; n 为整流元件串联支数。

整流二极管串联使用必须降低电压,反向峰值应为

$$U_M \geq 1.1 \frac{U}{n}$$

采用均压电阻的目的是为了使所加电压平均地分配给串

联的各个管子，因此要求每个二极管的反向电压都应大于此平均电压值。但是，如果有条件选择反向漏电流大致相同的二极管，即使它们的反向击穿电压各不相同，也可不用均压电阻把它们串联起来，如图 3-13 所示。此时被串联的各个二极管所分摊到的电压不是平均的，而是按其反向特性合理分担。这里的条件，除了各个管子的反向漏电流大体一致外，还要求选用的各二极管反向电压的总和大于外加最大反向电压一倍左右，作为安全系数。目前国产 2DL 型高压硅堆就是采用此方法制成的。例如，要求串成一个 10000 伏、1 安的整流元件，假使挑选反向击穿电压 1500 伏 10 只、3000 伏和 300 伏各一只，反向漏电流均小于 5 微安的二极管串联而成，那末其安全系数为 1.83 倍。

2. 元件的并联

如果遇到负载要求的电流很大，而手头整流元件的正向平均电流不能满足要求时，就可以将两个或两个以上元件并联使用，见图 3-15。为了使每个整流元件流过的电流相等，往往要串联均流电阻。均流电阻的数值常取得等于单个元件正向电阻数值的 3—4 倍。例如同型号的两只二极管 2CZ14 并联时，在每只二极管上串联了 0.1 欧姆的均流电阻，如图

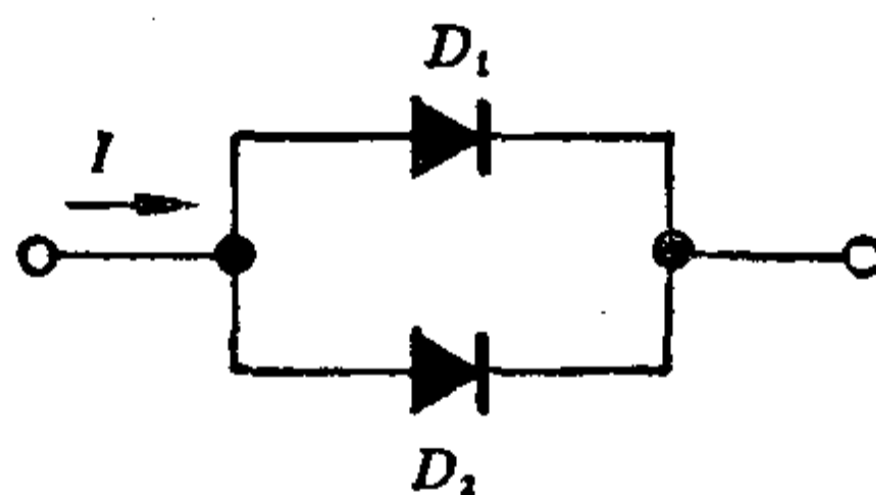


图 3-15

3-16 所示。串联了均流电阻后，电阻要消耗功率，这样既浪费电能、体积又大。因此在大电流的情况下，为了避免均流电

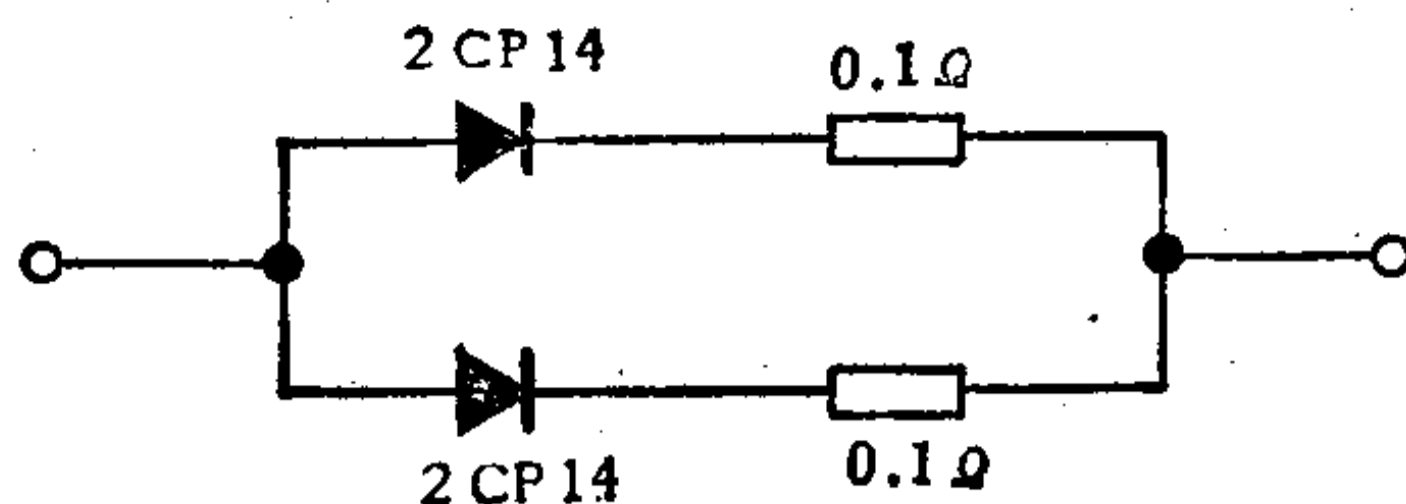


图 3-16

阻消耗大量功率，也常用均流电感（例如空心线圈）。但当整流元件正向电压降相近时，可不用均流电阻，直接把同容量的整流元件并联起来用。

均流电阻可按下列式计算：

$$R_a = K_1 \frac{nU}{I} \text{ (欧)}$$

式中， K_1 取 3—4； U 为整流二极管正向压降； I 为线路总电流； n 为整流元件并联支数。

均流电阻功率

$$P_a = K_2 R_a \left(\frac{I}{n} \right)^2$$

式中， K_2 取 1.5—2.5。

3-6 整流元件的过电流、过电压保护

当整流电路中发生过负载、负载侧短路或某一元件击穿短路时，流过其它整流元件的电流往往超过允许值。由于晶体管整流元件的热容量很小，承受过电流的能力差，元件温度的急剧上升可能导致元件的损坏。为了防止这种情况发生，在安装、使用和维护时应采用适当的保护措施，一般用保险丝作短路保护，例如用 40 安的快速熔断器与 50 安的硅整流元件串联。熔断器还可装在交流回路或直流回路中，此外，通常

用过电流继电器进行过载保护,当电路中电流超过一定值时,过电流继电器动作,切断控制电路,于是把主电路从电网中切断,见图 3-17(3).

在整流电路中,往往不可避免的有电感存在,所以从一个元件导通转换到另一个元件导通的时候,切断或接通整流电路的时候,以及熔断器熔断、电源侧侵入的浪涌电压等等情况,电路中的电压往往超过正常值,这种现象叫做过电压. 如果不采取措施来防止这种过电压,那么整流元件就会有击穿的可能. 采用阻容吸收电路来保护整流元件.

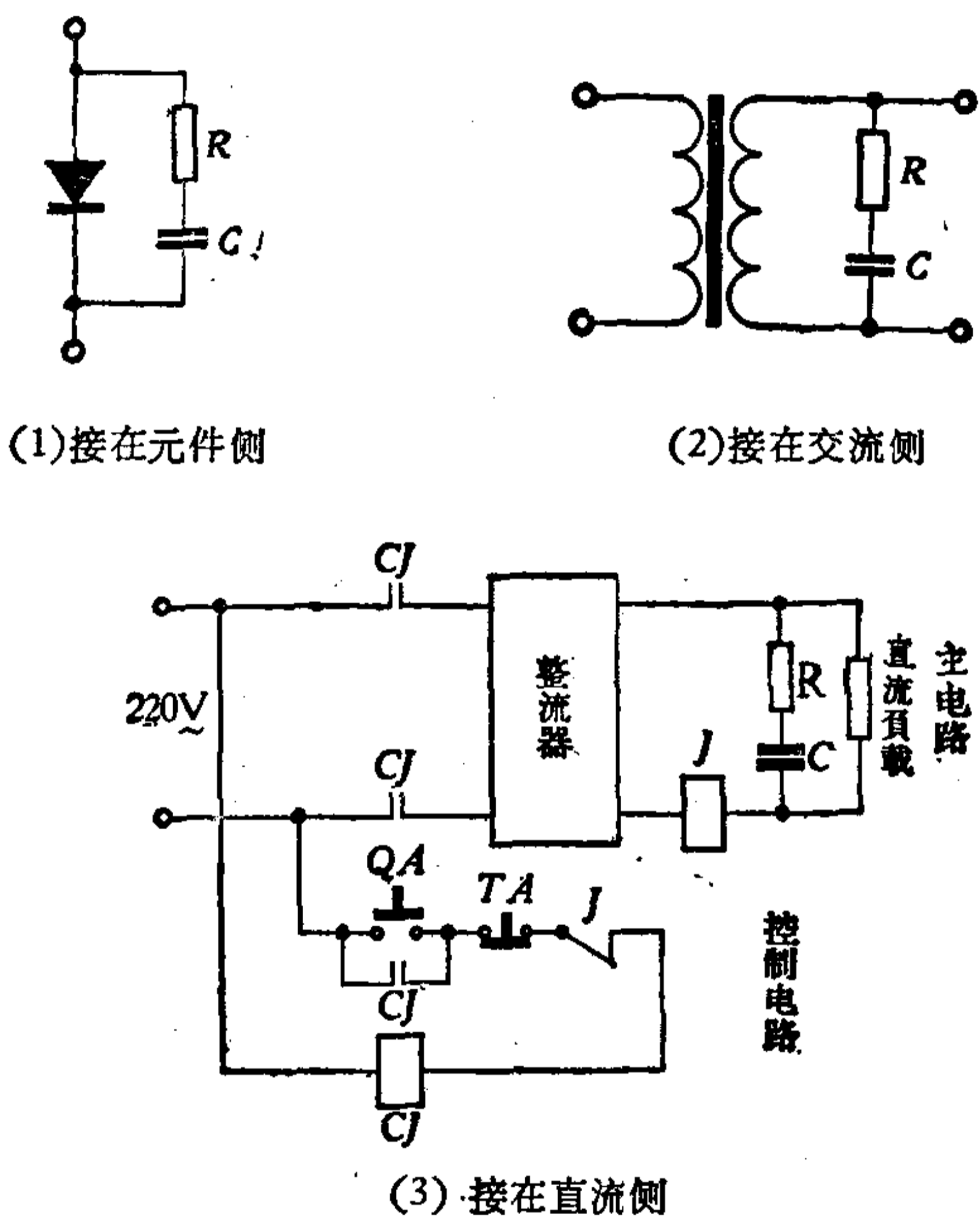


图 3-17

我们知道,电容器两端的电压不能突变,如果在整流元件两端或交流电源进线处或直流负载两端并联了一只电容,那

末当产生过电压时,就能起到缓冲的作用了.这与大水库(“水容”)可以保护农田免受洪水侵害的作用相似.但仅仅只并联一只电容,它可能会与线路中的电感产生振荡,并且电容器充放电电流太大,为此在电容器上串联一只电阻.这就是阻容吸收回路,阻容吸收回路有如图 3-17 所示的几种接法.

阻容吸收回路的 R 、 C 数值可根据经验选定,现将一般使用数据介绍如下,供参考.

对于接在元件侧的 RC 回路: R 取 10—40 欧,功率取 1—2 瓦, C 取 0.05 — 0.5 微法. 例如:

30 安硅整流元件 $C = 0.1$ 微法,

100 安硅整流元件 $C = 0.25$ 微法,

200 安硅整流元件 $C = 0.5$ 微法.

接在元件侧 RC 回路中的电容值 C 及其耐压等级也可由下式决定:

$$C = (2.5-5)10^{-3}I_a \text{ (微法)} \quad (3-18)$$

$$U_c = (1.1-1.5)U_{d/M} \quad (3-19)$$

其中 I_a 为每个元件的正向平均电流, $U_{d/M}$ 为每个元件反向工作电压峰值.

对于接在交流侧的 RC 回路: R 取几十欧, C 取几个微法到 40 微法.

对于接在直流侧的 RC 回路: R 取几十欧, C 取 10 微法到几十微法.

电阻瓦数视设备容量而定,一般以不过热为要求.

3-7 应用举例

本章列举了整流电路在工业生产方面应用的几个例子,目的在于让读者通过联系生产中的实际问题,开阔思路,了解

整流电路的实际应用,加深对整流电路的理解,并能举一反三地灵活应用。

1. 直流能耗制动

直流制动的原理：当切断交流电动机的交流电源时，电动机转子因惯性继续旋转，此时把直流电通入定子，产生一个恒定磁场，转动的转子切割此磁场，产生感生电流，这个电流又与恒定磁场相互作用，产生制动转矩，使转子迅速停止旋转。

这种制动实质上是能耗制动。在制动过程中,转子因流过感生电流而发热,把转子的动能转化为热能,从而达到迅速

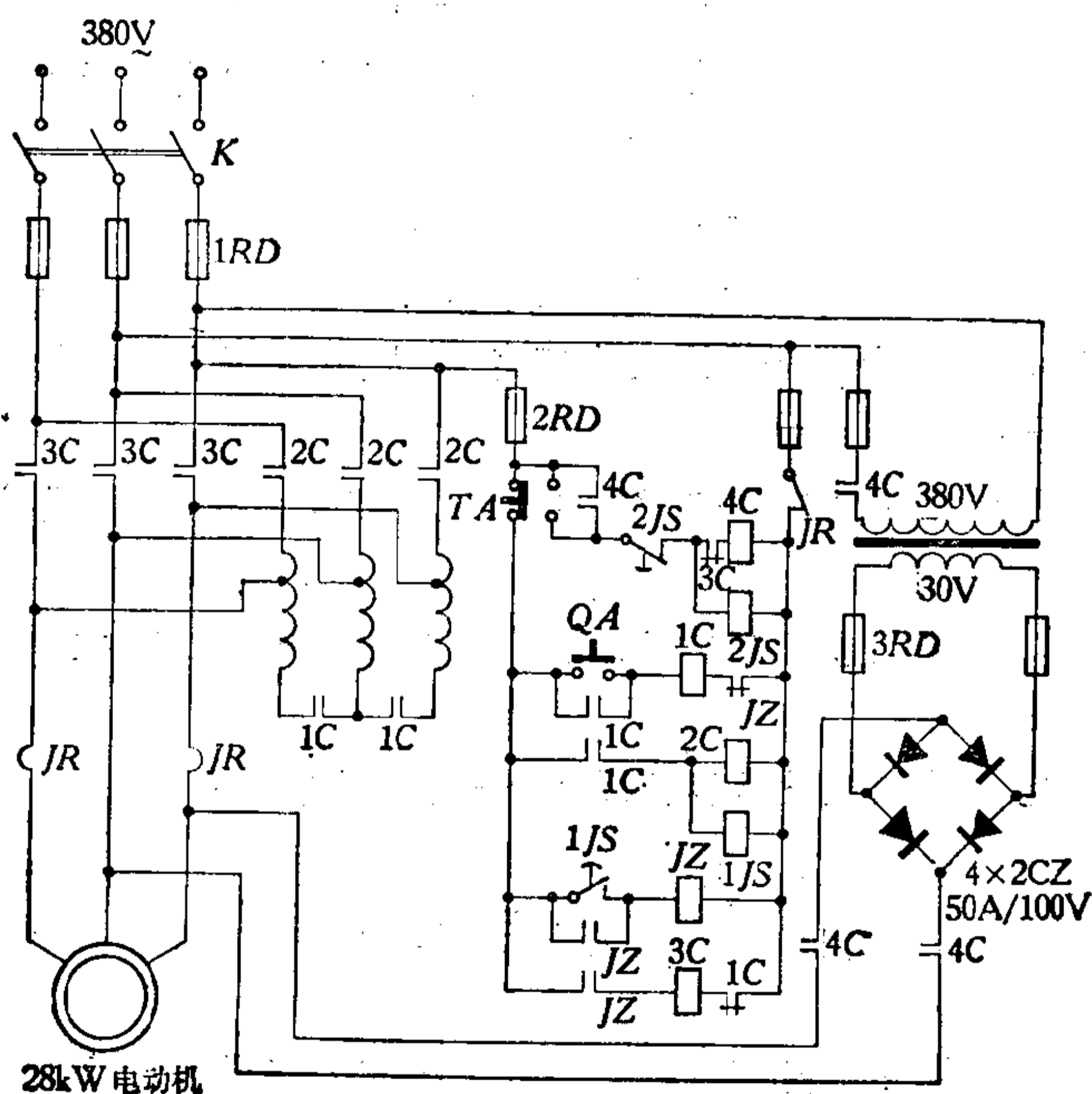


图 3-18

制动的目的。它一般用于中小型交流电动机的快速制动中。

炼胶机的直流制动电路图见图 3-18。

合上闸刀开关 K ，按下启动按钮 QA ，交流接触器 $1C$ 接通，并自保。这时交流接触器 $2C$ 和时间继电器 $1JS$ 线圈同时接通， $2C$ 常开触头闭合，这样电动机经过补偿器降压启动。经过一段短时间，电动机转速接近额定值，时间继电器 $1JS$ 的延时闭合的常开触头闭合，中间继电器 JZ 接通，并自保。 JZ 常闭触头断开，使接触器 $1C$ 断电，从而 $2C$ 、 $1JS$ 也断电释放。接触器 $3C$ 被接通闭合，电动机从补偿器脱开，由已经闭合的 $3C$ 常开触头直接接入电网运行。

制动时，按下停止按钮 TA ，接触器 $3C$ 失电，电动机脱离交流电源，同时交流接触器 $4C$ 接通并自保，电动机接通直流电源。这时时间继电器 $2JS$ 接通，经过一定时间， $2JS$ 的延时释放的常闭触头断开，使接触器 $4C$ 失电，电动机也就脱离了直流电源，制动完毕。

直流制动部分的参数计算：已知电动机绕组直流电阻 $R_{\Sigma} = 0.3$ 欧（ AB 二相间电阻，由测量得出）；电动机空载电流 $I_0 = 18$ 安（由测量得出）。

因为要求迅速可靠的制动，通入的直流制动电流取 4—5 倍的空载电流，这里取 5 倍，所以制动电流 $I_{制} = 18 \text{ 安} \times 5 = 90 \text{ 安}$ （根据实践，小功率电机的 $I_{制}$ 只需 $1-2I_{空}$ ）。

我们选用单相桥式整流线路。

制动电压

$$U_{制} = I_{制} \times R_{\Sigma} = 90 \text{ 安} \times 0.3 \text{ 欧} = 27 \text{ 伏}$$

变压器次级电压

$$E_2 = 1.11U_{制} + 2N_c = 29.7 \text{ 伏} + 1.3 \text{ 伏} = 31 \text{ 伏}$$

这里选用 30 伏，式中的 N_c 为一只管子的压降。

变压器次级电流

$$I_2 = 1.11 I_{制} = 99 \text{ 安}$$

整流管平均电流

$$I_a = \frac{1}{2} I_{制} = 0.5 \times 90 = 45 \text{ 安}$$

最大反向电压

$$U_{a/M} = \sqrt{2} E_2 = 1.41 \times 30 = 42.3 \text{ 伏}$$

所以可选管子 2CZ50 安/100 伏。

本线路在动作次数不频繁时效果良好。

利用硒片的特点,以硒片作为整流元件的能耗制动设备,省去了变压器和复杂的控制设备,电路如图 3-19 所示。

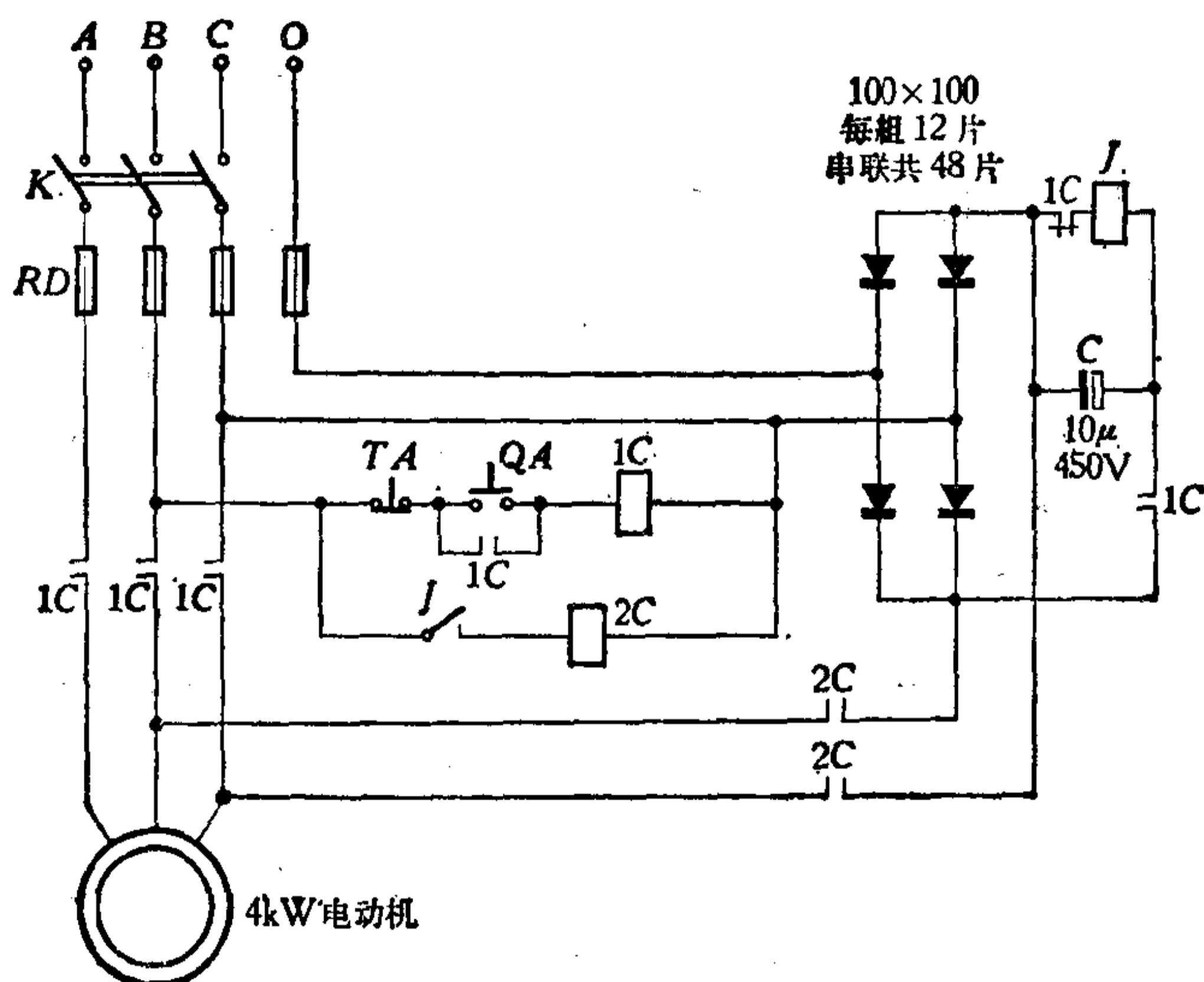


图 3-19

线路工作原理如下:

合上闸刀 K,按下启动按钮 QA,接触器 1C 线圈有电,电动机转动,同时电容器 C 被充电。按下停止按钮 TA 时,接触

器 1C 失电，电容器 C 对线圈阻值为 3 千欧的高灵敏继电器 J 放电，使 J 吸动，2C 接触器线圈有电，从而进行制动。电容器 C 对继电器的线圈放电，经一定时间后，延时释放，制动结束。制动时间长短，决定于高灵敏继电器的阻值、电容器 C 的容量和继电器的释放电流，一般我们可调整 C 的电容量值。

这个线路，制动电流很大，制动时间很短，硒片过载能力强，线路简单可靠，能满足要求。但因硒整流元件有体积大等缺点，一般用于较小功率。

2. 交流弧焊机改制成交直流两用弧焊机

在交流弧焊机上加上一套硅整流装置，可使其成为交直流两用弧焊机，做到一物多用。这种改制的弧焊机已在工厂推广使用。

改制的方法，就是在交流弧焊机输出端加装全波桥式整流电路及硅整流元件的保护电路。图 3-20 所示电路是 BS-330 交流弧焊机电路，图 3-21 所示电路就是将图 3-20 电路改制的交直流两用弧焊机的电路图。

电路中， D_1-D_4 为四只硅整流二极管， $R_1C_1-R_4C_4$ 分别

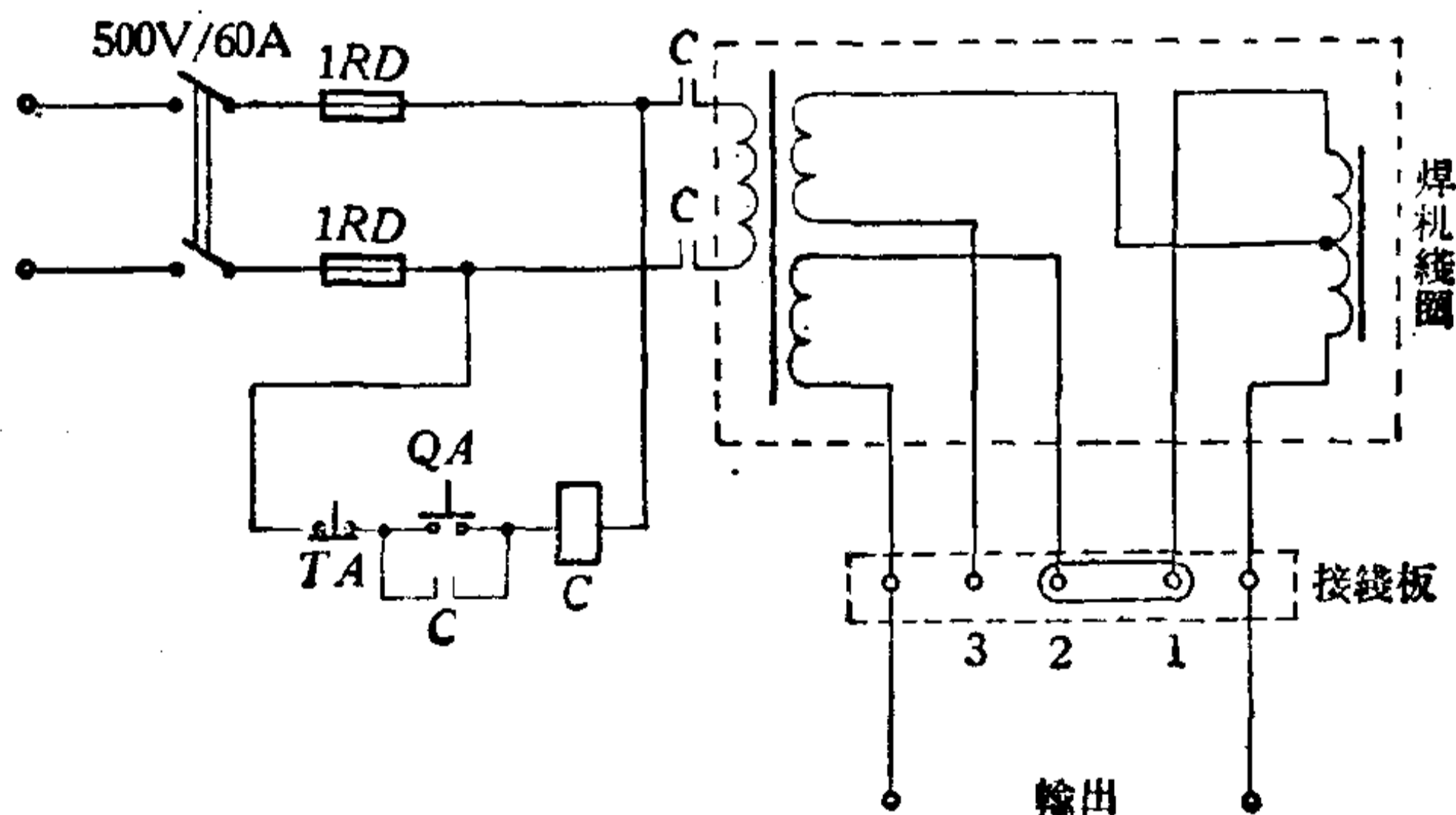


图 3-20

为硅整流元件的过电压保护而使用的 RC 吸收回路（在实际使用中，也有只用一只电阻和一只电容接在整流电路的交流侧或直流侧，作过电压保护）。 J 为过电流继电器，保护硅整流元件，当负载电流超过额定值时，电流互感器次级电流也相应增加，带动继电器 J 动作， J 常闭触头打开，接触器 C 释放，触头打开切断电焊机电源。硅整流元件以 0.25 千瓦风扇为风冷设备。 C 为滤波电容， R 为泄放电阻。

整流管选择：原交流弧焊机按负载电流的大小有两种接法。如图接法时（1，2 接通），在电流调节范围 50—180 安、空

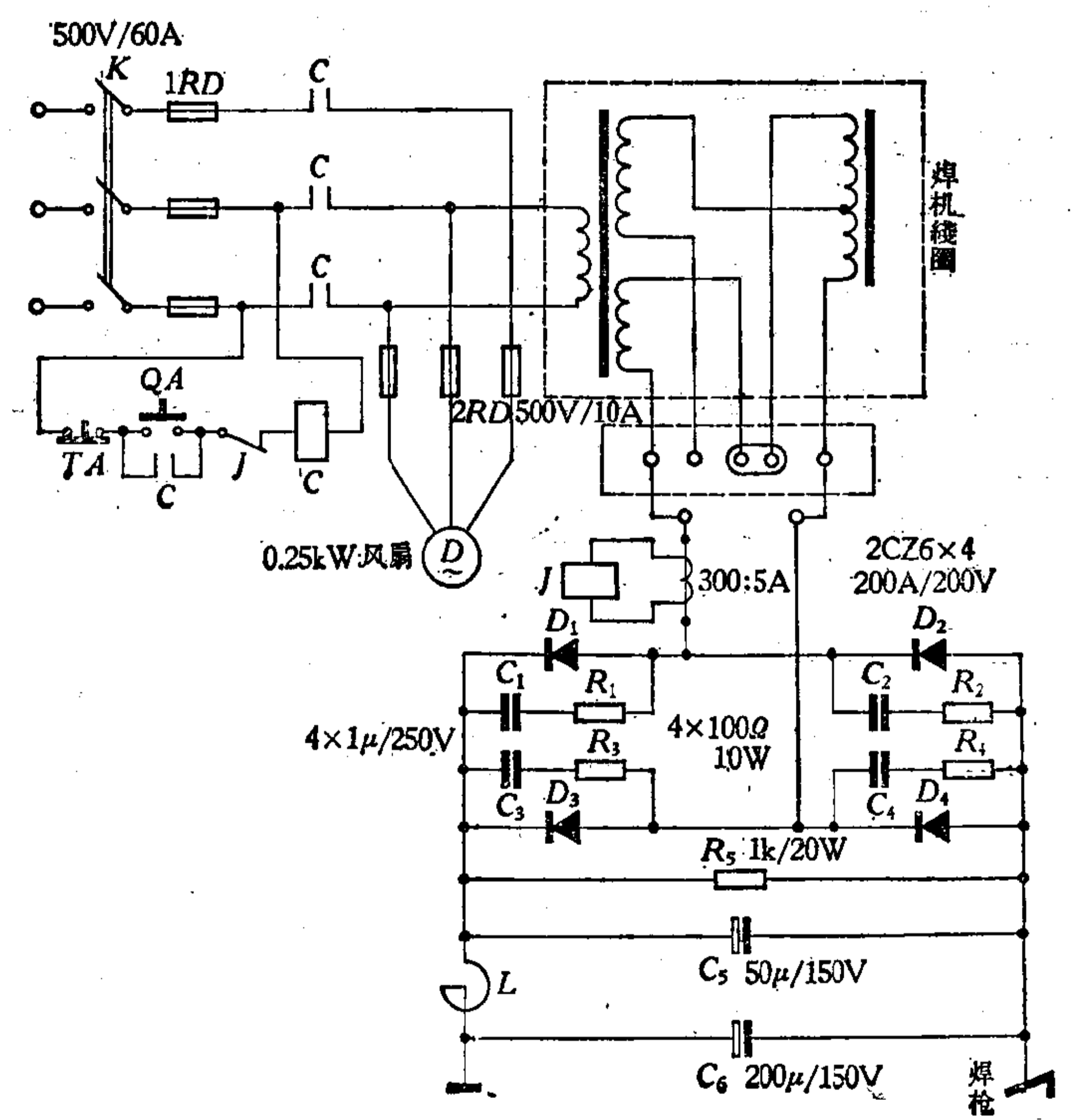


图 3-21

载电压 70 伏这一档测得短路电流为 260 安, 计算得

$$U_{afM} = 1.41 \times 70 \text{ 伏} \approx 100 \text{ 伏}$$

$$I_a = \frac{1}{2} \times 260 \text{ 安} = 130 \text{ 安}$$

所以选用了 200 安/200 伏的 2CZ6*。

过电流保护线路: 过电流保护除在初级方面采用熔断器 1RD 外, 在次级还采用了过电流继电器 J, J 可以采用电流或电压继电器改制。本例是用 522 型电压继电器改制的, 拆出其中线圈架子, 用 15 号漆包线或丝包线绕 30—60 圈。当需要负载电流更大时, 可调整继电器的圈数和调节继电器弹簧松紧程度。

上述改制的交直流弧焊机电路简单, 在使用交直流两用焊条焊接时, 焊接质量较交流弧焊机有显著改善, 引弧容易, 飞溅小, 焊缝均匀, 牢度高。但在用直流焊条焊接时, 有断弧现象。试验结果, 如果在整流以后的电路上串接输出电抗器 L, 改善单相桥式整流的滤波性能, 直流焊条就能进行顺利的焊接。而且 C, 电容可适当减小到 50 微法。在使用交直流两用焊条焊接时, 一般正接地, 负接焊枪, 但使用直流焊条时, 必须负端接地, 正端接焊枪。

输出电抗器的铁芯外形如图 3-22 所示。其中 δ 为气隙,

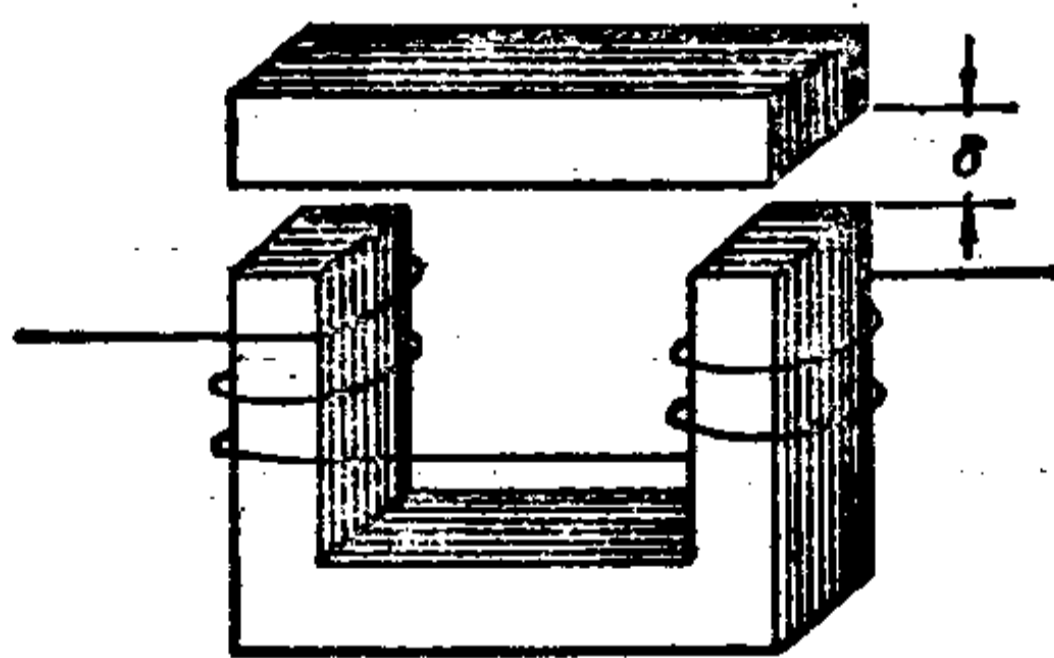


图 3-22

* 若两档均需使用时, 应以电流大的一档选管。

使用时可用纸板或木片隔开,以防止电抗器铁芯饱和。线圈总共绕 25—40 圈。导线截面与电焊变压器次级导线截面相同。铁芯尺寸为: 两柱间距 45 毫米,柱高 120 毫米,片宽 45 毫米,叠厚 80 毫米。

3. 硅整流设备代替交、直流发电机组

有些电镀设备,采用交流电动机拖动直流发电机供电,占地面积多,维修复杂,效率低,噪声大。用硅整流设备完全

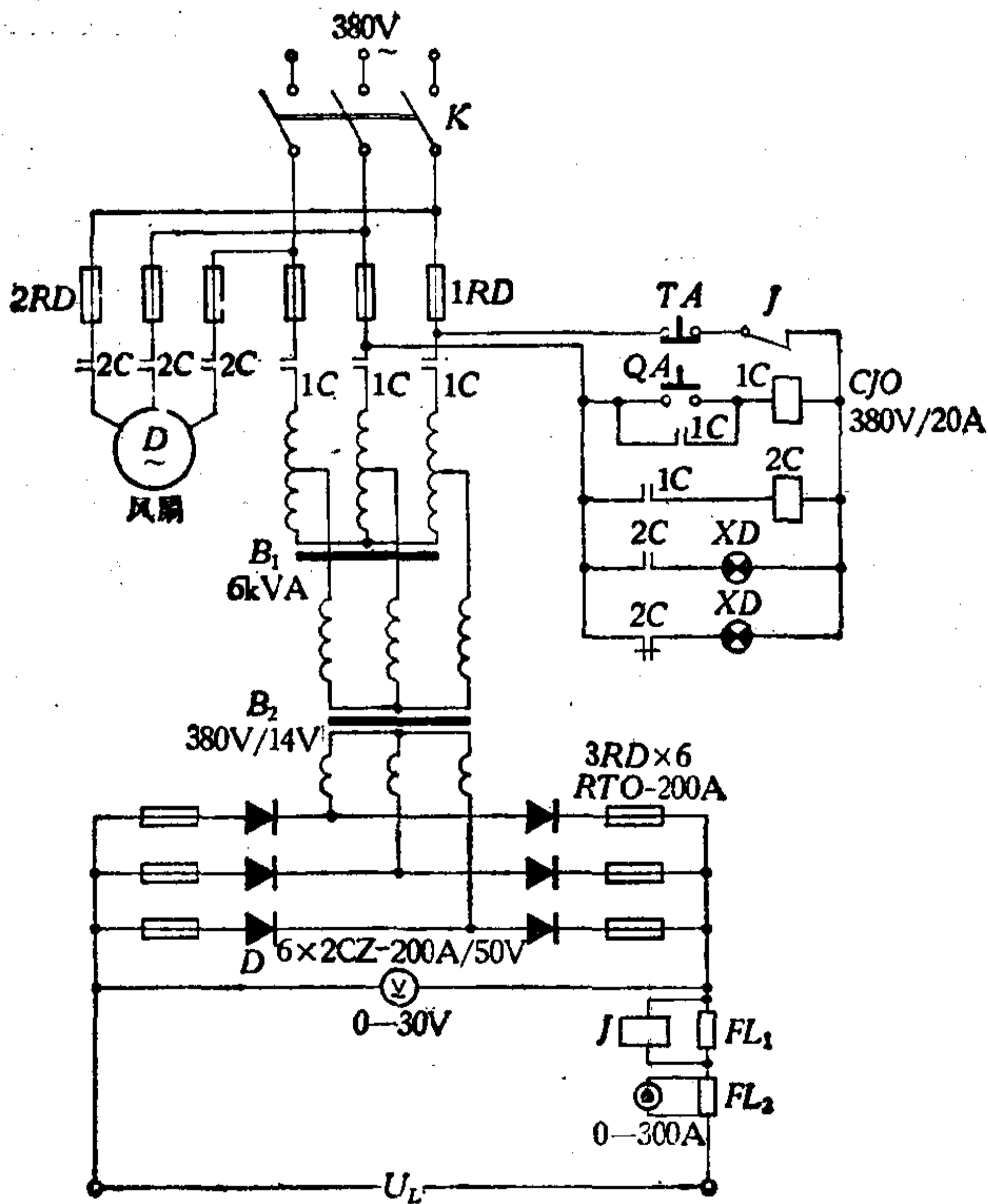


图 3-23

可以取代这种交、直流发电机组。图 3-23 所示电路就是一例。

动作过程如下：

按下起动按钮 QA ，接触器 $1C$ 线圈通电，主回路中其触头闭合，在线路输出端开始有直流电压。同时接触器 $2C$ 也动作，其主触头闭合，电扇开始对硅管进行风冷。

根据电镀用直流电源电压 $U_L = 14V$ （有时还需要调小一些），以及电流 $I_L = 500A$ 等要求，选择了三相桥式整流线路， B_1 为三相自耦变压器， B_2 为整流变压器。另外如图内所示，硅整流管要进行风冷并采取过电流保护和快速短路保护等。

简单计算如下（方法参考第六章）：

三相变压器 B_2 的次级相电流

$$I_2 = K_{21} I_L = 0.82 \times 500 \text{ 安} = 410 \text{ 安}$$

三相变压器 B_2 次级相电压

$$\begin{aligned} E_2 &= 0.427 U_L + 2N_c = 0.427 \times 14 \text{ 伏} + 1.5 \text{ 伏} \\ &= 6.0 \text{ 伏} + 1.5 \text{ 伏} = 7.5 \text{ 伏} \end{aligned}$$

式中 N_c 为一只管子的压降。

三相变压器 B_2 的容量

$$P_B = K_B P_L = 1.05 \times 14 \times 500 \approx 7 \text{ 千伏安}$$

三相自耦变压器 B_1 的容量也约为 7 千伏安。

管子承受的最大反向电压

$$U_{a/M} = 1.05 U_L = 14.7 \text{ 伏}$$

流过管子的平均电流

$$I_a = \frac{1}{3} \cdot I_L = \frac{1}{3} \times 500 \text{ 安} = 167 \text{ 安}$$

根据 $I_a = 167 \text{ 安}$ ， $U_{a/M} = 14.7 \text{ 伏}$ ，选用 2CZ-200A/50V。

4. GCA 系列硅整流设备

GCA 系列硅整流设备是一种变换交流电为直流电的整流设备,可以供拖拉机站、汽车修配站及蓄电池充电站作为蓄电池补充电能,亦可作为中、小型电解、电镀等直流电源之用。

下面介绍这个系列中的两个产品的电路原理图,一个是单相整流、一个是三相整流。

图 3-24 为单相整流设备,可以接入110伏或 220 伏电网。输出电压的大小,可以调节 K_1 、 K_2 开关通过变换变压器次级抽头来获得 6—60 伏之间直流输出。

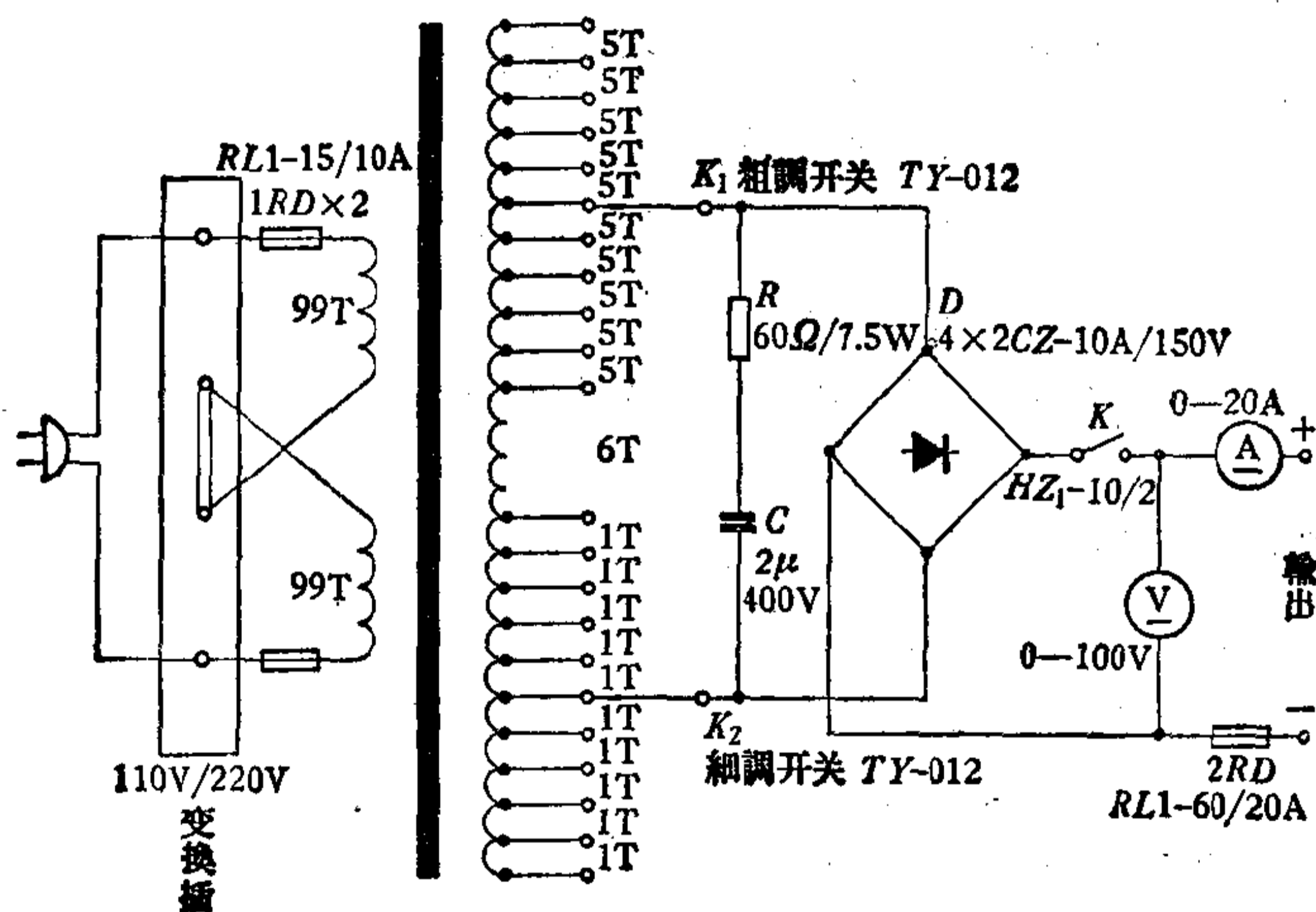


图 3-24

图 3-25 为三相整流设备。交流电源接入整流设备,交流电经熔断器 $1RD$ 、交流接触器触头 $1C$ 和调压变压器 B_1 至整流变压器 B_2 加到硅整流二极管组成的三相桥式整流电路变换为直流电,输出电压的大小,可以调整调压变压器 B_1 ,相应地变动了整流变压器 B_2 的初级电压来获得不同的直流输出。

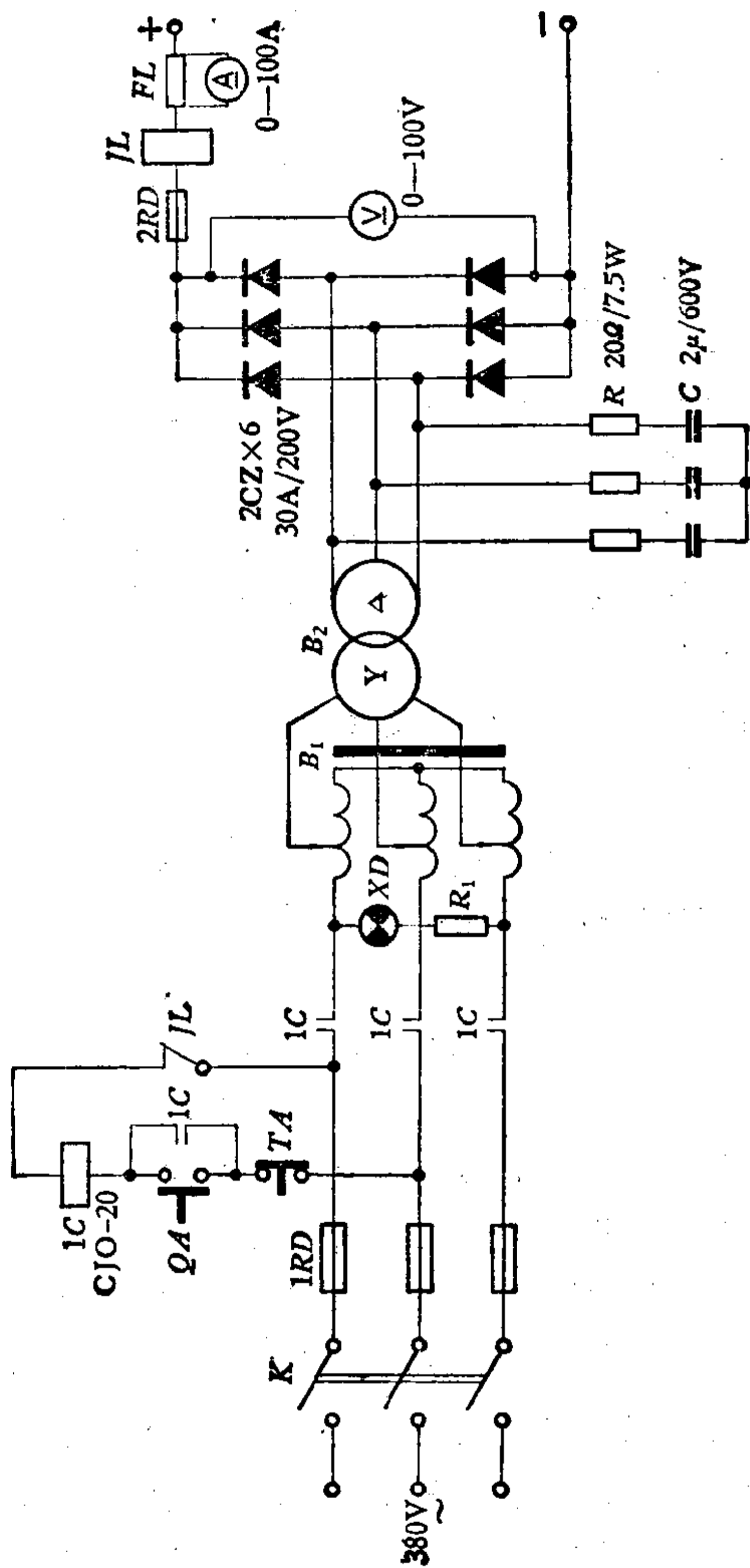


图 3-25

各元件作用如下:

熔断器 $1RD$ 、 $2RD$ 作短路保护或兼作过载保护,图 3-25 电路中过载保护采用了直流过电流继电器 JL ,当过负荷时,过电流继电器动作,其常闭触点断开,使交流接触器线圈断电,则主触头跳开,切断输入电源,便达到保护整流设备的目的。

整流变压器 B_2 的数据如下:

单相变压器铁芯截面毛 64 厘米^2 ,三级阶梯形,绕线木模 $\phi 90 \times 100$ 毫米,导线初次级都用双玻璃丝包线,初级圆线 $\phi 2.44$,次级扁线 1.68×5.1 。

三相变压器铁芯截面净 51 厘米^2 ,毛 56 厘米^2 ,四级阶梯形,铁芯材料 $D41$ 或 $D42$,厚 0.5 毫米, B 约 11300 高斯,绕线木模 $\phi 110 \times 185$ 毫米,导线初、次级都用双玻璃丝包线,初级圆线 $\phi 2.44$ 绕 168 圈,次级扁线 2.83×10 绕 45 圈,初级为 Y 接法次级 Δ 接法。

充电使用时特别注意输出极性不能接错,否则产生蓄电池倒流,相当于短路,烧毁硅整流二极管。

本章小结

1. 整流是把交流电能转变为直流电能的过程。在整流电路中应用具有单向导电性的二极管作整流元件。

2. 小功率整流电路一般选用单相交流电网供电。在结构上有半波整流、全波整流和桥式整流等多种。在需要采用千瓦以上的较大直流功率时,往往采用三相整流电路。

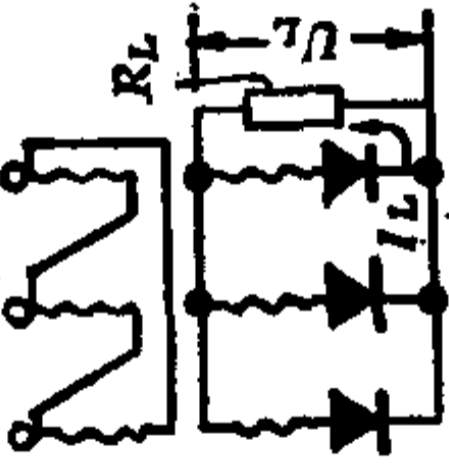
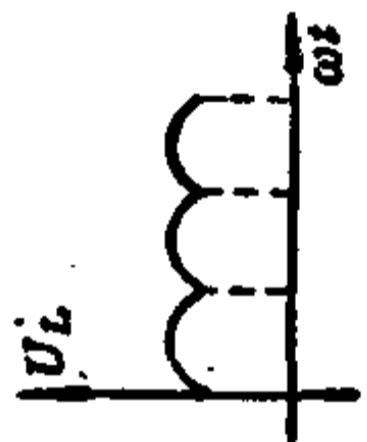
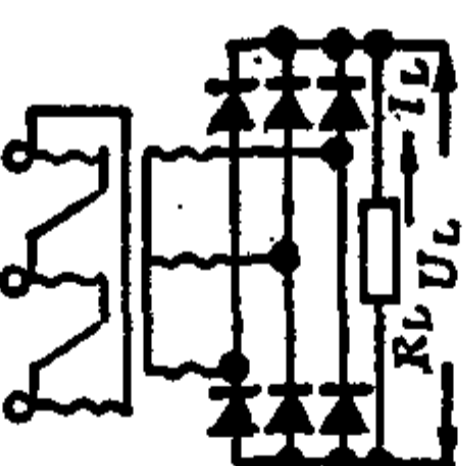
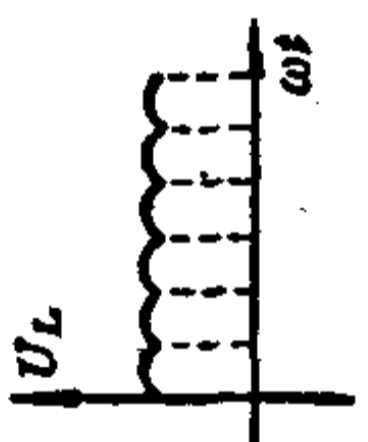
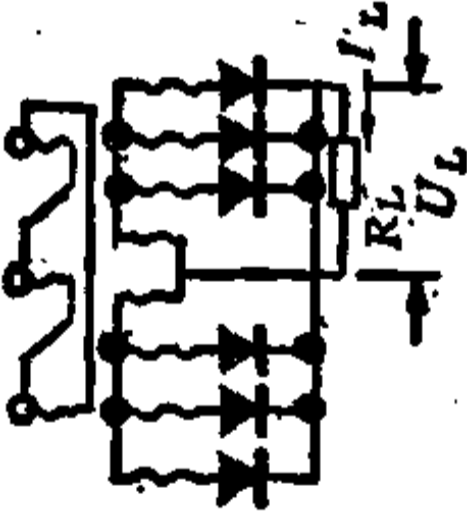
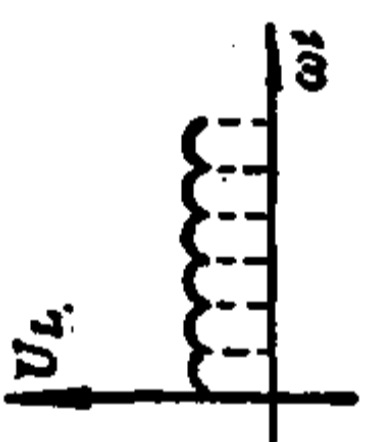
3. 整流二极管的工作频率不高,但要允许通过较大的整流电流,能承受较高的反峰电压,即能提供较大的直流功率。根据选定的整流电路和负载要求的电压 U_L 、电流 I_L 参照表

3-1选用适当的整流元件。在表 3-1 中列出的计算式,是在电阻负载条件下得出的。对于电感性负载的情况,选择整流元件时,其反向电压须留有足够的余量;对于电容性负载的情况,须在额定整流电流值上以及在取最大反向电压上留有足够的余量。

4. 由于半导体整流元件承受过电压、过电流的能力较差,在大功率整流电路中应当注意采取适当的过电压和过电流的保护措施。

表 3-1

电路名称	线路图	输出电压波形	每个元件承受的最大反向电压	单个元件的平均电流	变压器次级电压有效值	变压器次级相电流有效值
单相半波			$3.14U_L$	I_L	$2.22U_L + N_e$	$1.57I_L$
单相全波			$3.14U_L$	$0.5I_L$	$1.11U_L + N_e$	$0.79I_L$
单相桥式			$1.57U_L$	$0.5I_L$	$1.11U_L + 2N_e$	$1.11I_L$

三相半波			$2.09U_L$	$\frac{1}{3}I_L$	$0.855U_L + N_e$	$0.577I_L$
三相桥式			$1.05U_L$	$\frac{1}{3}I_L$	$0.43U_L + 2N_e$	$0.82I_L$
六相双反星形			$2.09U_L$	$\frac{1}{6}I_L$	$0.855U_L + N_e$	$0.29I_L$

注：(1) N_e 为管压降，可取 0.7 伏，2CZ 型取 1 伏；
 (2) 三相半波、六相双反星形这两种整流电路，文中未作介绍，上表列出仅供使用单位参考。

整流电路可以使交流电转换成直流电，但是经整流出来的电压还不是平稳的直流电，其中含有较大的交流分量。在某些设备中，如电镀等处运用是可以的。如果在要求直流电压比较平稳的仪表、自动控制设备中运用时，就远不能适应了，这就要求我们必须利用滤波电路滤去单方向脉动的电压中的交流分量。下面我们就在整流电路的基础上再运用滤波电路，以改善整流输出电压波形的平滑程度。

滤波电路一般都接在整流电路的后面。下面是滤波器与整流器连在一起工作的示意图。

由图 4-1 可见，在滤波器前，电压有波动，通过滤波器后就把这种波动部分滤掉了，最后到负载上就是一个平滑得多的直流电压了。

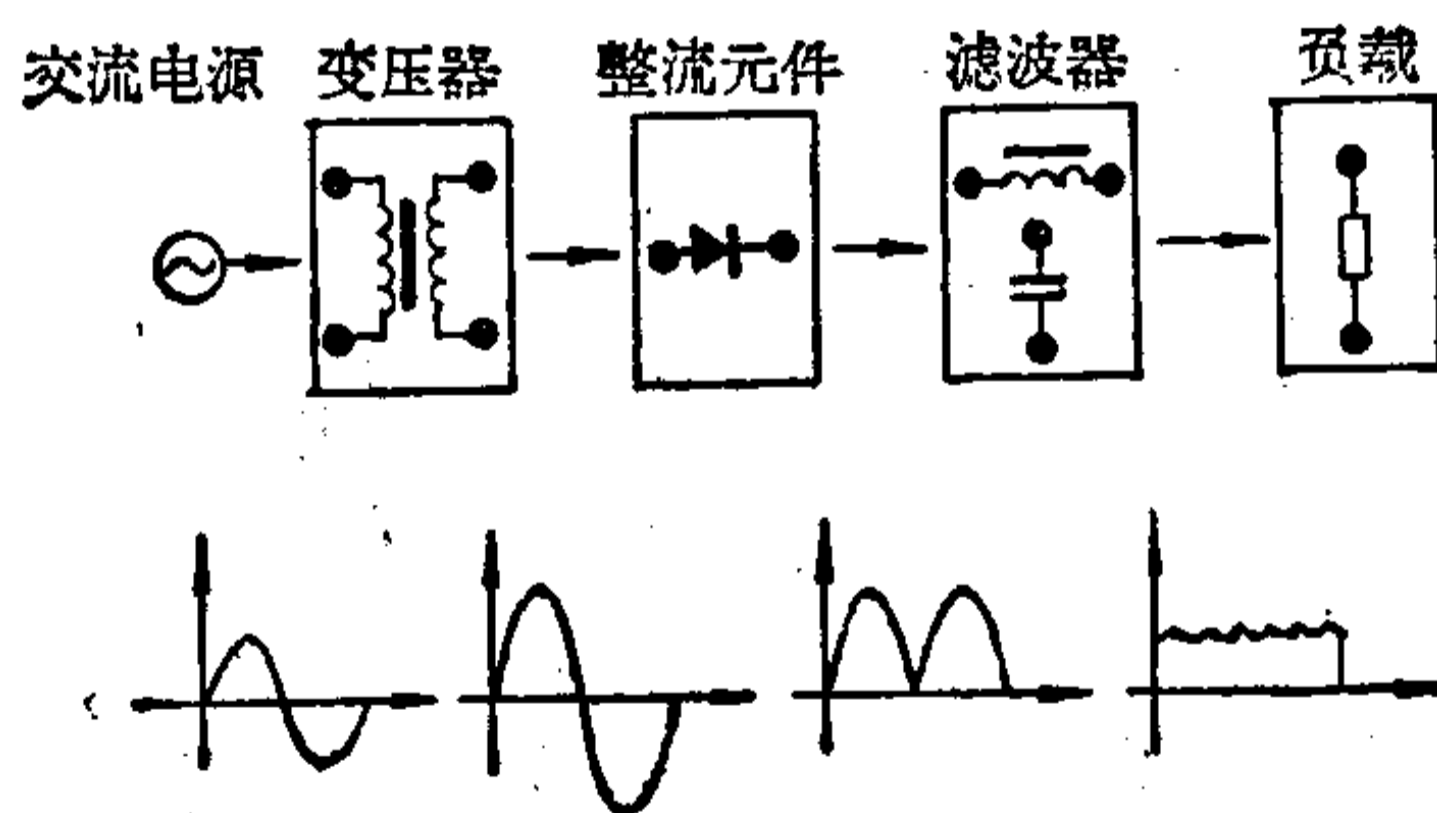


图 4-1

滤波器为什么能将波动成分滤掉，而得到平稳的直流呢？

为了达到滤波目的,总希望直流能顺利通过,而波动部分则不容易通过。滤波器是用电感、电容、电阻等元件组成。电感的直流电阻很小,而交流阻抗很大;直流不能通过电容器,而交流却能通过,把它们适当地组合起来,就能很好地完成滤波任务。常用的滤波器有图 4-2 所示的几种形式。

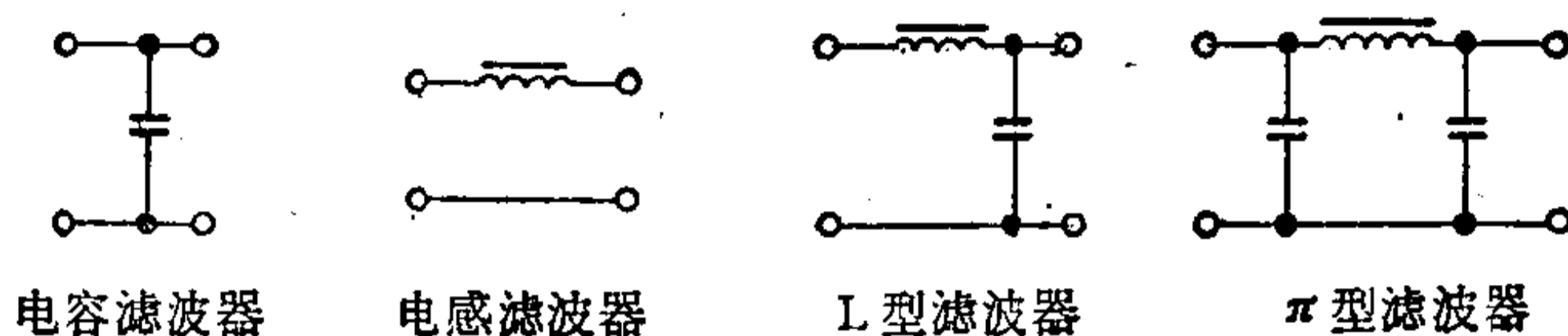


图 4-2

当然,我们不可能做到使通过滤波器以后的电压只有直流成分,丝毫不包含交流成分,而只能设法把交流成分减少到适合实际要求的程度。换句话说,各种滤波器所能达到的电压平稳的程度是不等的。那么怎样评定滤波器性能的好坏呢?这里需要引用“滤波系数”的概念。所谓滤波系数是指未加滤波器时输出电压的纹波因数与加滤波器后输出电压的纹波因数之比。它表明了滤波器滤除交流成分的能力,说明了经过滤波器后电压脉动减低的程度。滤波系数以字母 q 表示,即

$$\text{滤波系数}(q) = \frac{\text{未加滤波器时的纹波因数 } r'}{\text{加滤波器后的纹波因数 } r}$$

由滤波系数的定义可以知道 q 越大时,滤波性能越好。

应该看到,整流电路接入滤波器以后,电路中就有了电容器或电感器等电抗元件,作为整流元件的二极管在什么时候导电或不导电,将不再是仅仅由交流电源电压的极性来决定,这就将增加分析的复杂性。不过,只要掌握 pn 结二极管的单向导电性的实质,即只有在整流二极管 P 对 n 处于正电位时才能导电,以及掌握电容器两端电压是不能突变的和通

过电感的电流是不能突变的性质（对缺乏电工基础知识的读者，可先参阅有关电工知识的书籍或本书第一章第四节），就不难分析出它的物理过程来。

4-1 电 容 滤 波 器

电容滤波器是在整流电路的负载两端并联电容器。当整流管导电时，电容被充电，而当整流管截止时，利用已充电的电容器对负载的放电而使负载上的电压趋于平稳，完成滤波作用。

1. 单相半波整流电路

带有电容器的单相半波整流电路如图 4-3 所示。为便于了解，先分析负载电阻 R_L 开路时电路的工作原理，然后介绍有负载电阻的情况。

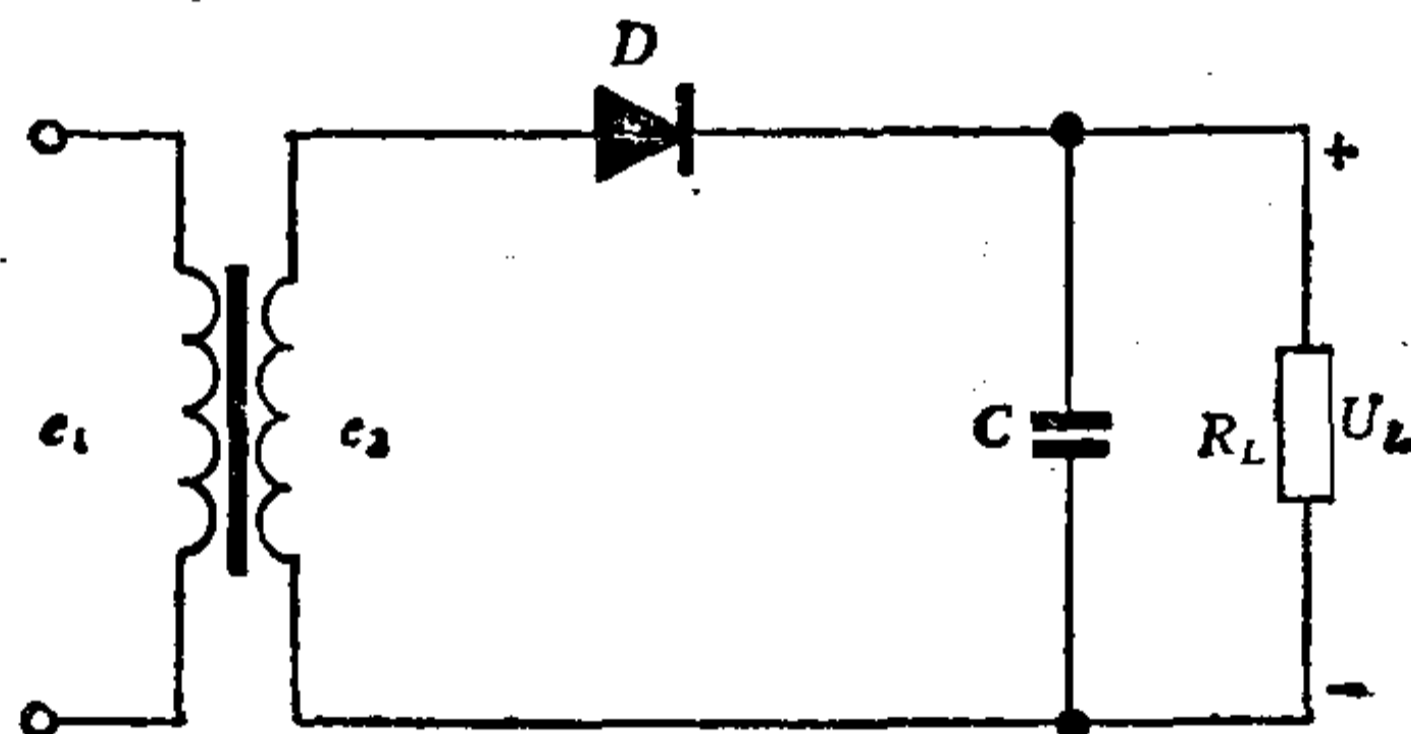


图 4-3

不接负载电阻时，由于负载电阻 R_L 断开，电容器 C 只有充电、没有放电的通路。假设在 t_0 时刻接通电源，在 t_0-t_1 时间内，整流变压器次级绕组电压 e_2 按正弦规律从负半周上升到零，二极管 D 因为反偏不导电，当 $t > t_1$ 时， e_2 由零开始第一个正半周，因电容器起始的电压和电荷为零， D 导通，流过二极管的电流对电容器充电，如果忽略二极管的正向压降，电

容器两端的电压（也即整流器的输出电压）将和 e_2 同样地上升，一直升到 $U_L = \sqrt{2} E_2$ 。当 e_2 下降时，假如二极管的反向电阻为无穷大，则电容 C 没有放电通路， C 两端压降依然维持在 $\sqrt{2} E_2$ 的数值上，见图 4-4(1) 所示。

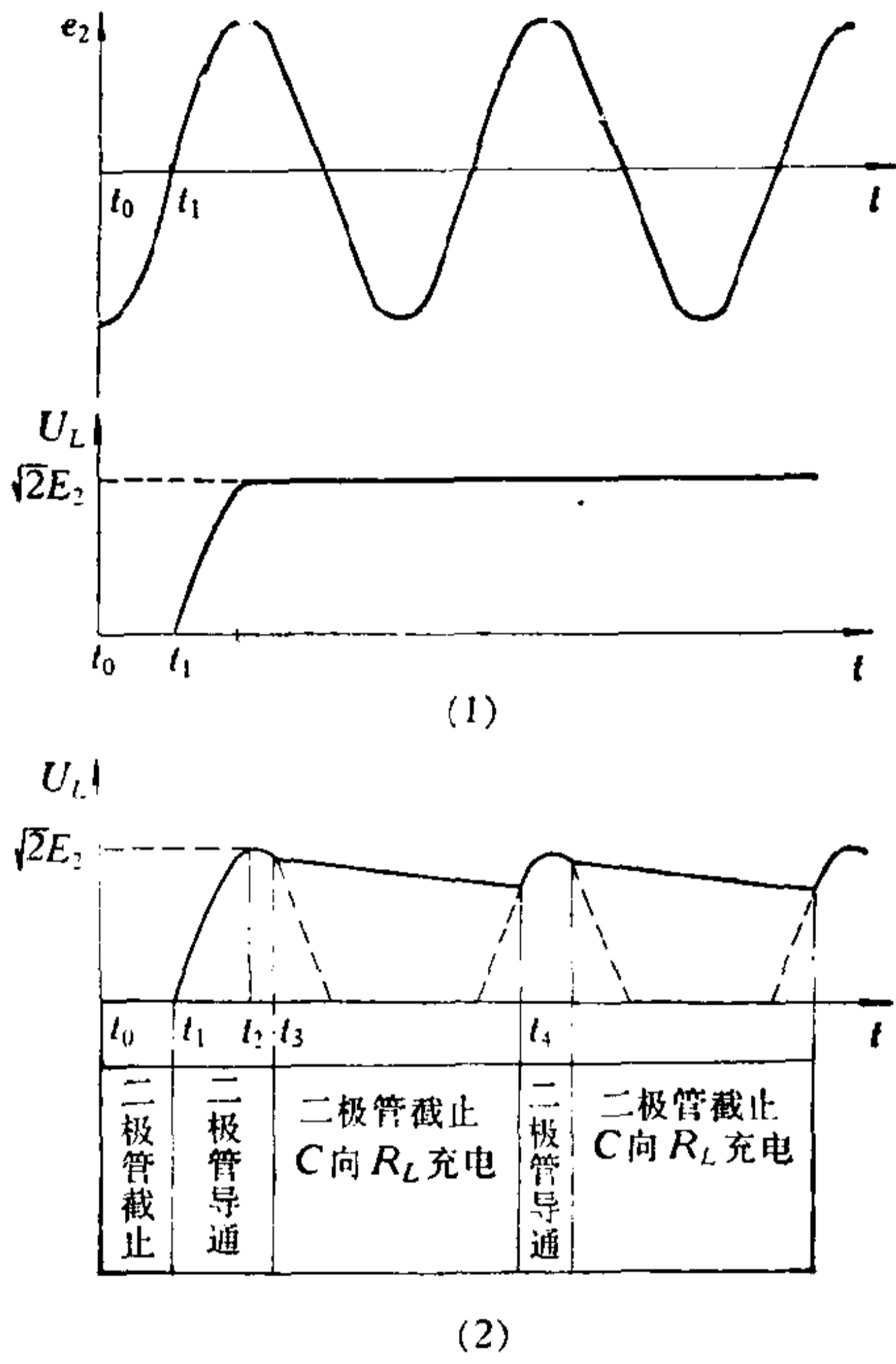


图 4-4

负载电阻接通的情况，见图 4-4(2)。在 t_0 接通至 t_1 这段时间内， e_2 处于负半周， D 不导电。在 $t > t_1$ 后，二极管导电，流过二极管的电流，一路电流 i_L 流过负载电阻 R_L ，另一路电流 i_C 流向电容器 C 充电， e_2 在 t_2 时刻达到最大值 $\sqrt{2} E_2$ 时，电容器两端的电压 U_L 同时也充电到最大值 $\sqrt{2} E_2$ 。此后， e_2 按正弦规律下降。由于负载电阻 R_L 与 C 是并联的，电容 C

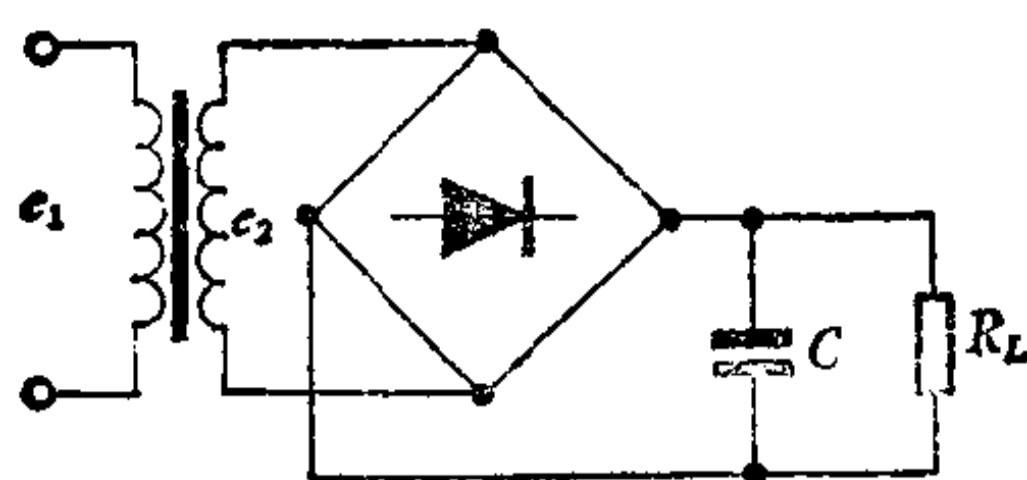
将向 R_L 按时间常数 $R_L C$ 的指数曲线放电，电压 U_L 也逐渐下降。出现了 e_2 与 U_L 同时下降的现象，只是在开始下降一段时间内，按正弦规律下降的 e_2 的下降速度比起按指数曲线下降的 U_L 要慢，这就有可能使得 e_2 的电位仍略高于电容器放电后的电压 U_L ，二极管 D 两端的电压仍是正向的，整流管仍处于导电状态，只不过流过二极管的电流在减小着。在这一段时间内， C 一方面继续充电，另一方面向 R_L 放电。直到 t_3 时刻，由于 e_2 下降的速度加快，而电容器放电的速度却在减慢，以致使 e_2 电压低于 U_L ，于是二极管受到反向电压而截止，电容器 C 将单独继续向 R_L 放电。放电电流在 R_L 上产生电压，由于放电进行得很慢，在二极管截止的整个这段时间内，仍有电流流过负载，因此电容器 C 上的电压降低得不多。然后 e_2 开始第二个周期，直至 t_4 时刻， $e_2 = U_L$ 时， C 的放电才终止。以后 D 将又重新导电， C 也再度充电而重复上述过程。

由于二极管的单向导电特性及电容的充放电，只有当电源电压 e_2 高于电容上的电压 U_L 时，二极管才处于正向而导电。虽然正弦波有半个周期的电压是正的，但在加有滤波电容的整流电路中因电容器 C 上有电压未完全放掉，只有在 $e_2 > U_L$ 的时间二极管才导通，所以二极管的导电角总是小于 π 的。

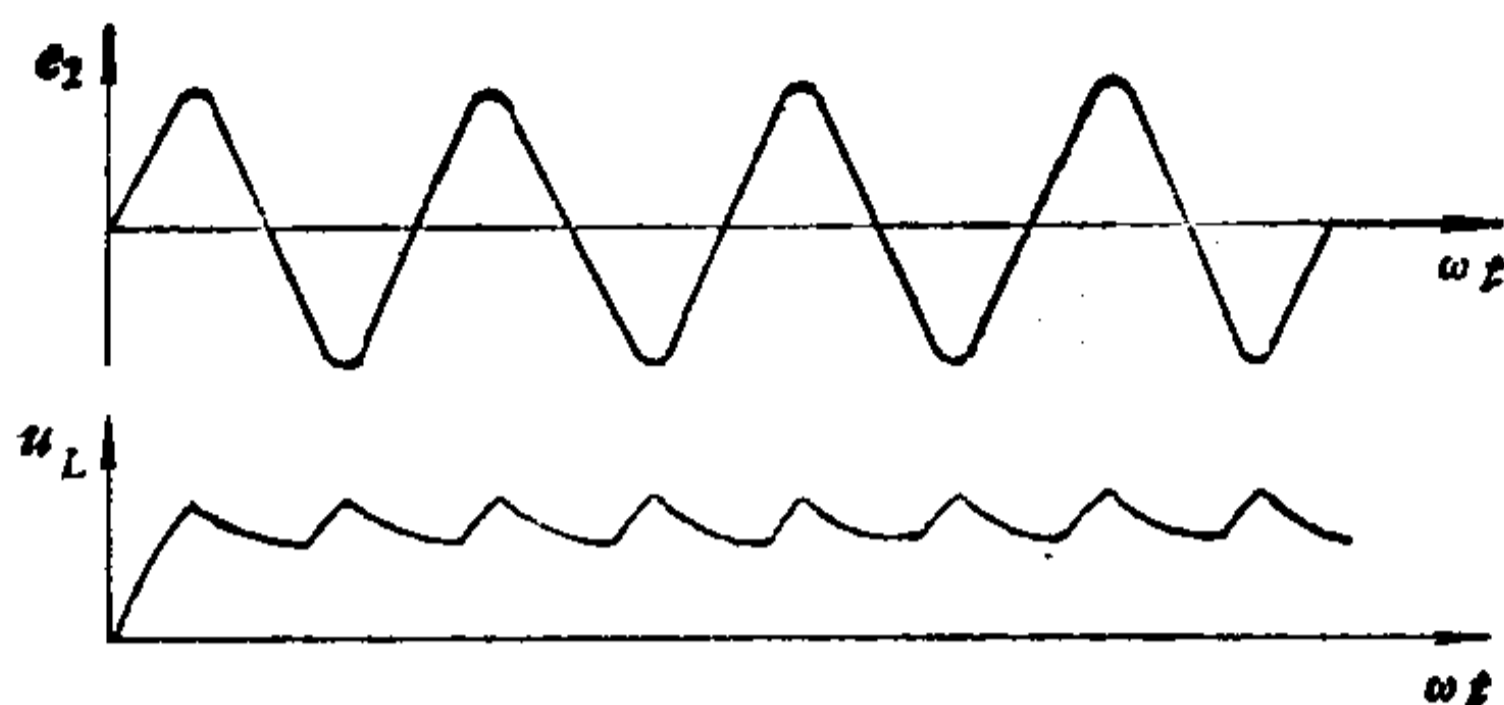
2. 单相全波、桥式整流电路

单相全波和桥式两种整流电路，从电容滤波的原理来讲，两者是相同的。因单相桥式在晶体管电路中应用最为普遍，这里就以图 4-5(1) 所示的桥式整流电路为例。

当桥式整流时，电容器的作用也和半波情况相类似，只是在交流一个周期内，由于两组二极管轮流导电，所以滤波电容



(1)



(2)

图 4-5

器在一个周期内有两次充电的机会。或者说,电容器单独向负载电阻放电的时间缩短了,如图 4-5(2) 所示。于是,负载两端电压较半波时平直,脉动情况也因此而进一步得到改善,直流输出电压显然比半波时要高,外特性也较半波时为好。

3. 电容滤波器的特点

由上可知,电容滤波器有下列特点:

(1) 输出脉动减小,直流成分增加。

由于有了滤波电容器,利用电容器的充电和放电作用,使流过负载 R_L 的电流连续了,因而负载上的脉动成分大为减小,而直流输出电压 U_L 也随之升高。时间常数 $R_L C$ 越大,放电速度越慢,脉动越小,直流输出越高。当 $R_L = \infty$ (负载开路)时, $U_L = \sqrt{2} E_2$ 。此时,输出电压为变压器次级绕组电压有效值的 1.41 倍。

(2) 输出直流电压随负载变化较大。

因为滤波电容器的放电速度是由 $R_L C$ 值决定的, 当 R_L 减小(即负载电流增大)时, 电容器的放电较快, U_L 较小, 可见电容滤波器的外特性较差, 见图 4-6 所示.

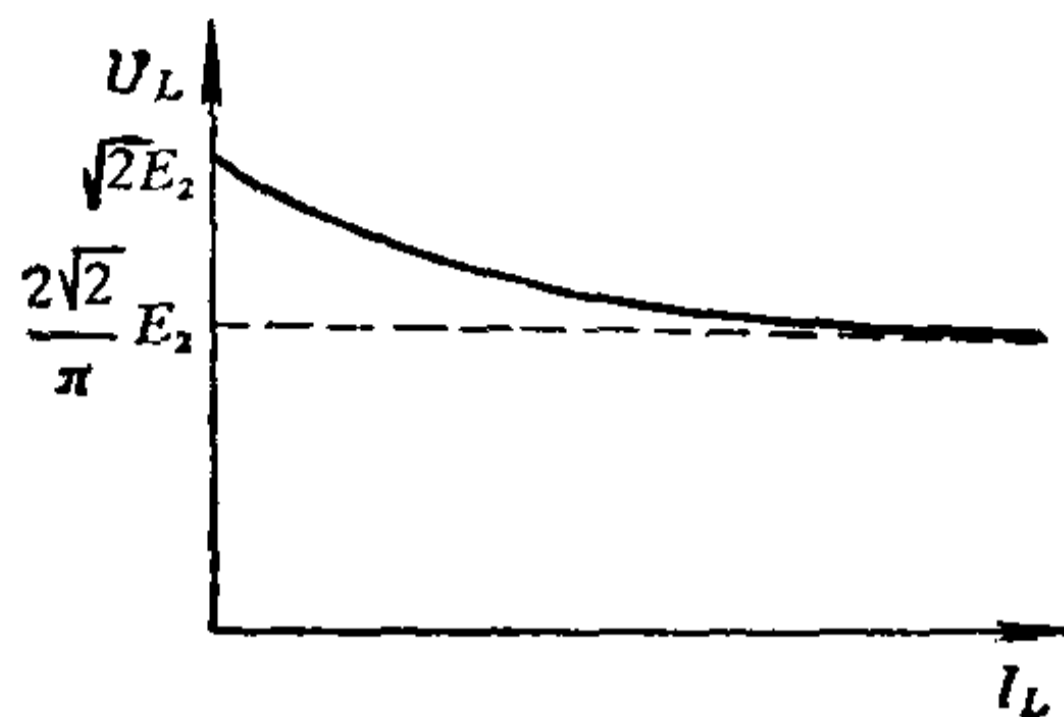


图 4-6

(3) 整流二极管的导电角小于 π , 流过二极管的瞬时电流很大.

如果从输出电压和滤波效果看, 滤波电容器的容量越大越好, 但是, 滤波电容器的容量大, 二极管瞬时电流也大, 这就增加了二极管瞬时工作的负担. 倘使电容器的容量过大, 而整流电路的内阻又很小的话, 那末, 在接通电源一瞬间, 将有很大的冲击电流通过二极管, 容易造成二极管的损坏.

4. 电容滤波器的设计计算

通常认为单相半波电容滤波器的放电时间常数 CR_L 比交流电流的周期 T 大3—5倍, 滤波效果已能满足一般要求, 即

$$CR_L \geq (3-5)T$$

式中, T 的单位为秒, R_L 的单位为欧, C 的单位为法. 对于单相全波或桥式电路, 由于电容放电时间比单相半波整流缩短一半, 即近似为 $T/2$, 所以对全波或桥式电路上式应改为

$$CR_L \geq (3-5) \frac{T}{2}$$

以电网频率每秒 50 赫计算,电容滤波器的容量可以按下列式子来估算.

$$\text{单相半波} \quad C(\text{法}) \geq \frac{(0.06-0.1)(\text{秒})}{R_L(\text{欧})}$$

$$\text{单相全波(桥式)} \quad C(\text{法}) \geq \frac{(0.03-0.05)(\text{秒})}{R_L(\text{欧})}$$

单相半波电容滤波器的纹波因数近似为

$$\gamma \approx \frac{0.288}{fCR_L}$$

单相全波电容滤波器的纹波因数近似为

$$\gamma \approx \frac{0.144}{fCR_L}$$

式中 f 为电网频率. 用上式计算纹波因数一般较实际偏大.

【例 4-1】 要求单相桥式整流电路的直流输出电压为 24 伏,直流电流为 500 毫安,电压波动能满足一般要求,估计电容 C 的值.

(1) 计算负载电阻

$$R_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{24}{0.5} = 48 \text{ 欧}$$

(2) 计算 C 的值

$$C \geq \frac{0.05(\text{秒})}{R_L(\text{欧})} = 1.04 \times 10^{-3} \text{ 法} \approx 1000 \text{ 微法}$$

【例 4-2】 单相全波整流滤波器的负载电阻 R_L 为 48 欧,滤波电容器 C 为 1000 微法,求纹波因数.

$$\gamma \approx \frac{0.144}{50 \times 1000 \times 10^{-6} \times 48} = 0.06$$

5. 用图表直接计算电容滤波器

电容滤波器在小功率半导体整流电路中应用很广,要定

量计算这种电路的确实数值是很繁复的，若用上述公式近似估算，使用上的局限性较大。作者从工程实际出发，提出一些图表，用以直接计算半导体电路中单相全波、桥式整流器的各种数值，这些查图表计算的方法，使用起来简便、实用、准确，省去烦琐的计算，适用条件比较宽，同时可根据这些数据在设计中来选择电路元件及计算电路参数。

图 4-7 表示滤波电容器的容量与输出直流电压、直流电流的关系曲线。如果已知整流滤波后的直流电压和电流，就可通过图 4-7 直接确定电容值。由图 4-7 优选所取的电容值所构成的电容滤波器，纹波因数在 4% 左右，能满足一般要求。滤波电容器的容量与纹波因数之间大致有这样的关系，电容量增大十倍，纹波因数可减小到十分之一。根据这一关系，若以图 4-7 查得的数值为基准，滤波电容器取值比查图 4-7 所得之数值大一倍，我们就可知道纹波因数可减小到 2%。同样理由，对纹波系数允许大于 8% 的整流器，滤波电容器的容量可较图 4-7 查得的数值减半。

【例 4-3】 某具有电容滤波的桥式整流器，要求输出电压为 24 伏，输出电流为 1 安，试查图表 4-7 确定纹波因数分别为 4%、8% 和 1% 时所需的滤波电容值。

由图 4-7 查得在 24 伏和 1 安时的电容值应为 2000 微法，该电容值适用于纹波因数为 4% 的情况。

纹波因数为 8% 时，电容值应比查表数值减半。即

$$C = 2000 \text{ 微法} \times 4\% / 8\% = 1000 \text{ 微法}$$

纹波因数为 1% 时，电容值应为

$$C = 2000 \text{ 微法} \times 4\% / 1\% = 8000 \text{ 微法}$$

若已知电容器的容量和直流电源电压，也可通过图 4-7 查出适用负载电流的范围。

【例 4-4】 设滤波电容器为 200 微法，求电源电压分别

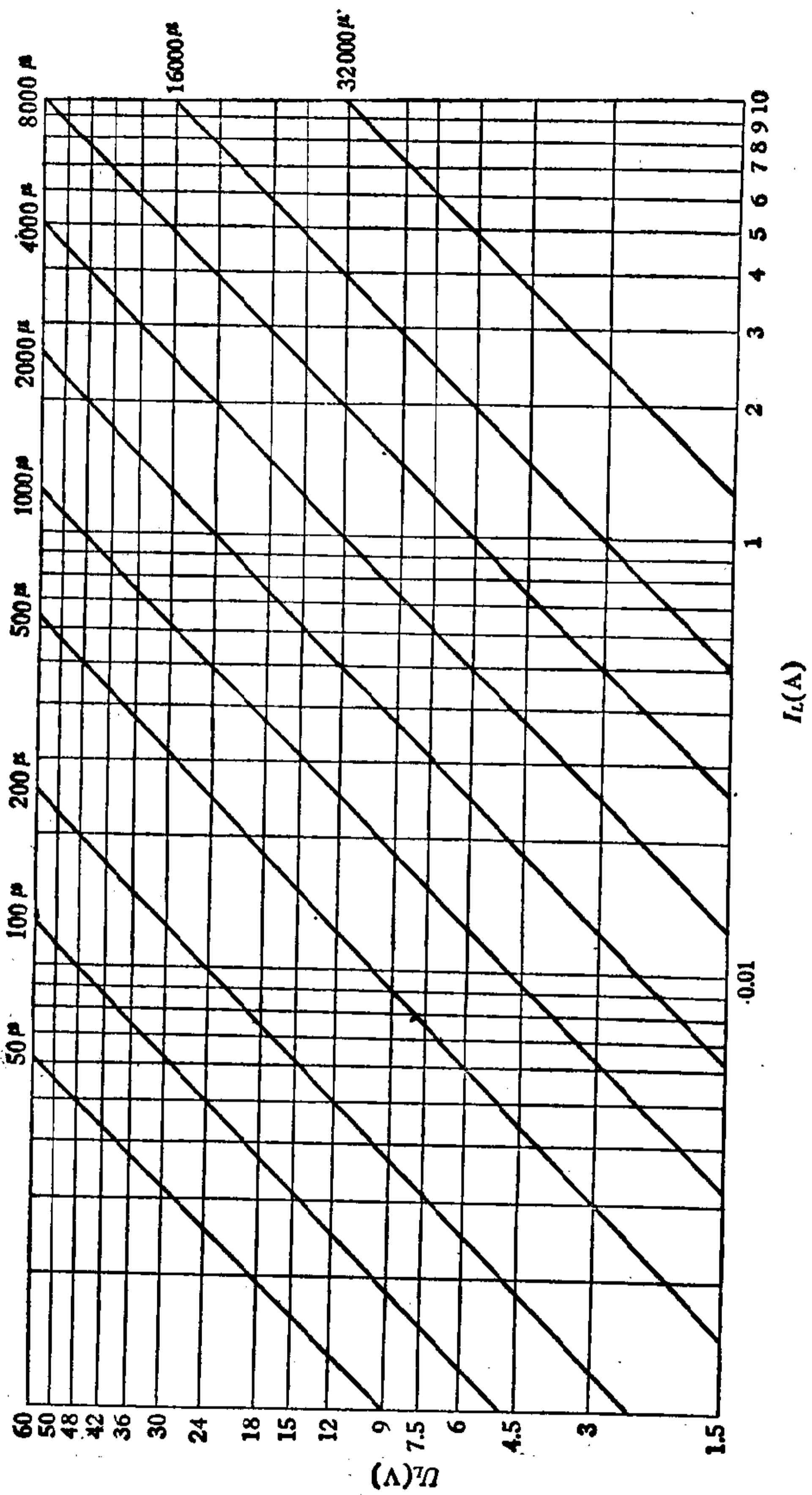


图 4-7

为 12 伏和 6 伏时所适用的负载电流。

由图 4-7 查 200 微法和 12 伏时的电流为 50 毫安，查 200 微法和 6 伏时的电流为 25 毫安。

上面讨论的情况是没有把整流器内阻 R_s 对纹波的影响考虑进去，如果把整流器内阻的影响考虑得细一些，那末，由图 4-7 确定的电容值，在不同的内阻 R_s 与负载电阻 R_L 之比值的条件下，其纹波因数也略有不同。其关系大致列于表 4-1 中。

表 4-1

R_s/R_L	0.001	0.01	0.1	0.3
纹波系数 r	4.8%	4.5%	3.5%	3%

由上表可见， R_s/R_L 值越大，纹波因数越小。利用图 4-7 时，如果同时能把表中的条件考虑进去，则计算结果将更为精确。

【例 4-5】 设直流电压 24 伏和负载电流 1 安，纹波因数为 1%，如果已知内阻 R_s 为 4.8 欧，求滤波电容的数值。

负载电阻 R_L 可通过下式求出，即

$$R_L = \frac{24\text{伏}}{1\text{安}} = 24\text{欧}$$

因为已知内阻为 4.8 欧，所以

$$\frac{R_s}{R_L} = \frac{4.8\text{欧}}{24\text{欧}} = 0.2$$

由表可知， $R_s/R_L = 0.2$ 时，纹波系数在 3—3.5% 之间。若取 3.2%，则纹波系数为 1% 时的电容值应为

$$C = 2000\text{微法} \times \frac{3.2\%}{1\%} = 2000\text{微法} \times 3.2 = 6400\text{微法}$$

用图 4-7 查单相半波整流滤波电容器的数值，实际值应大于查得之数值的一倍，这是因为半波整流时电容的放电时

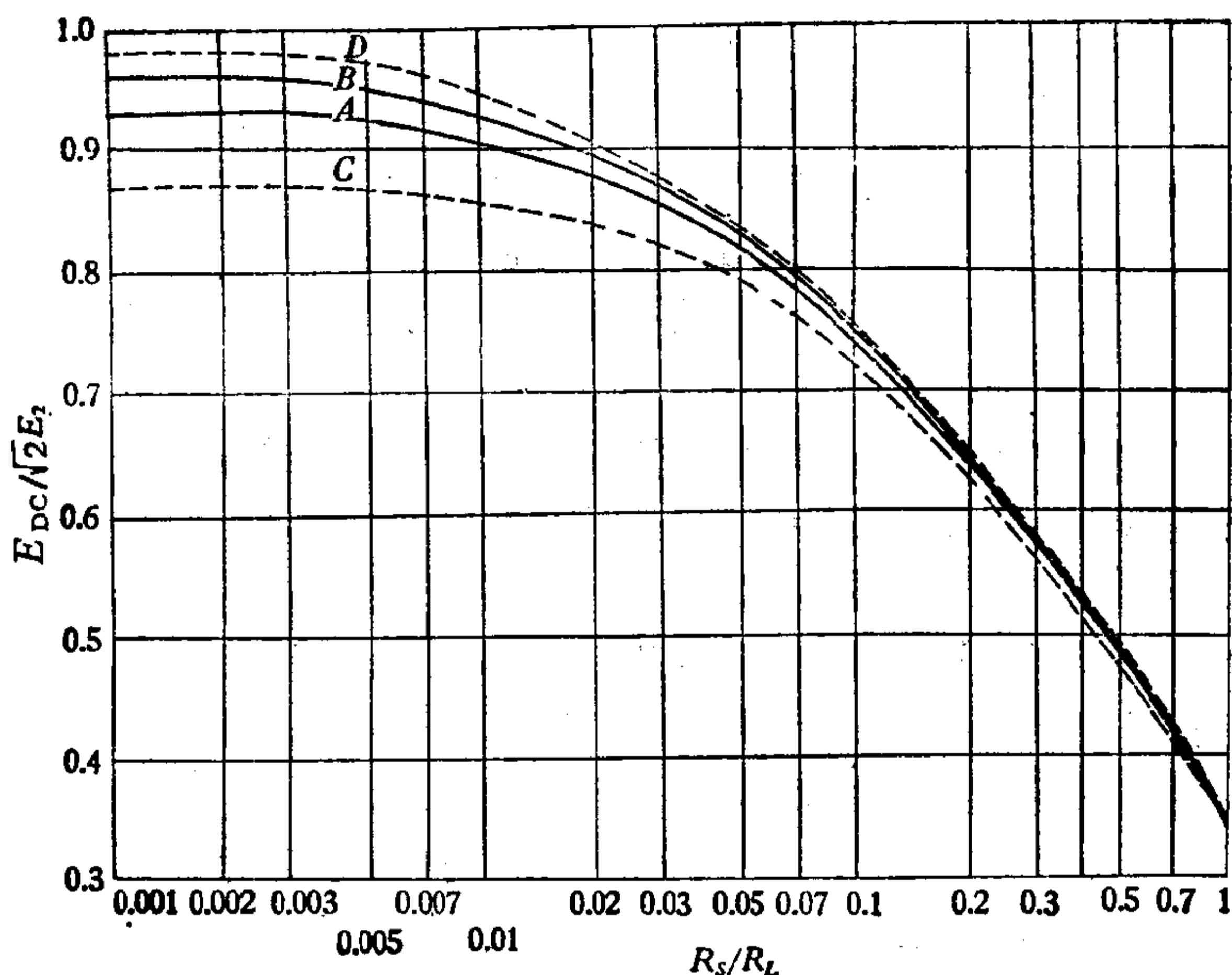


图 4-8

间比全波整流长一倍的缘故。

图 4-8 表示单相全波(或桥式)电路输出直流电压 E_{DC} 和交流峰值电压 $\sqrt{2} E_2$ 之比值与 R_s/R_L 之间的曲线关系, 图中列有 A、B、C、D 四条曲线。其中, 曲线 A 表示滤波电容取图 4-7 查得数值的情况; 曲线 B、C、D 分别表示电容取值比图 4-7 查得的数值大一倍、小一半、大十倍的情况。由图 4-8 可知:

(1) 整流滤波输出电压随 R_s/R_L 增大而下降, 这是由于内阻增大或负载电阻减小使得内阻 R_s 两端压降增加造成的。

(2) 在 R_s/R_L 较小时, 增大电容量对输出电压的提高作

用较为明显。这是因放电速度随电容量增大而减慢所致。而在 R_s/R_L 较大时，增大电容量虽然也减慢了放电速度，但充电速度减慢的影响也不能忽略，所以电容量增大的结果对直流输出电压的提高作用不大。因此曲线几乎重合在一起。

由此可见，在一定范围内增大滤波电容器的容量，对提高输出电压有利。但整流滤波器输出电压的提高，更大程度上取决于整流器内阻的减小。

使用图 4-8 可以在已知交流变压器次级电压的条件下查得负载电阻上的直流电压。同样可在已知直流电压的情况下，计算出变压器次级电压值。

【例 4-6】 设整流器的内阻与负载之比 R_s/R_L 为 0.1，且知交流变压器的次级电压 E_2 为 34 伏，忽略整流元件的正向压降，求负载上的直流电源电压 E_L 的值。

由图 4-8 可见，当 $R_s/R_L = 0.1$ 时，曲线 A 和曲线 B 几乎重合，并查出 $E_{DC}/\sqrt{2} E_2 = 0.75$ 。故

$$E_{DC} = 0.75 \times \sqrt{2} E_2 = 0.75 \times 1.41 \times 34 \text{ 伏} \approx 36 \text{ 伏}$$

由于整流元件的正向压降可忽略，所以

$$E_L = E_{DC} = 36 \text{ 伏}$$

上例题计算时假设 R_s/R_L 为已知数，其中负载电阻 R_L 可通过下式算得，即

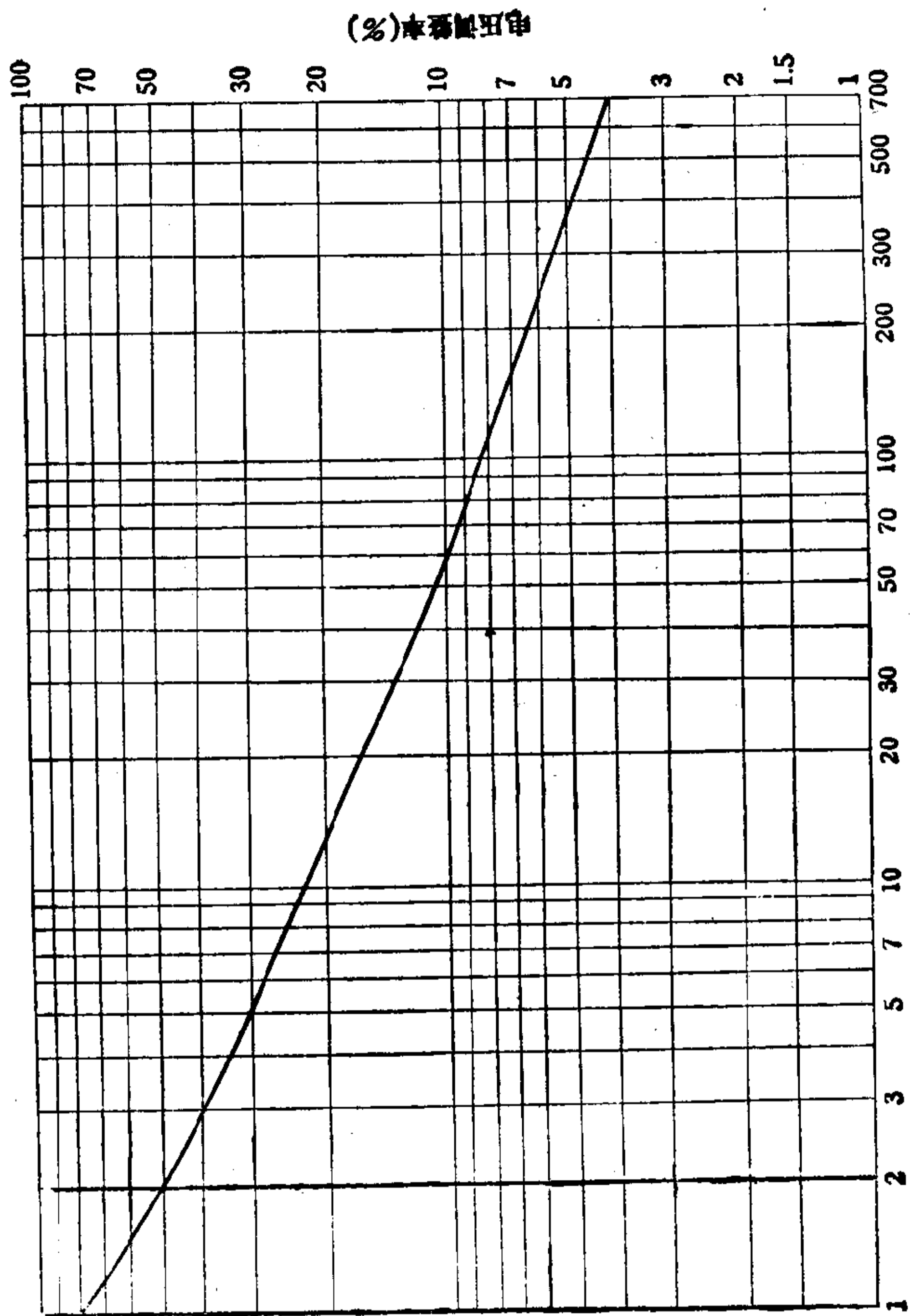
$$R_L = \frac{E_L}{I_L}$$

而整流器内阻 R_s 包括了变压器的内阻 R_t 和整流管的内阻 R_d

$$R_s = R_t + R_d$$

其中 R_d 可通过查半导体器件手册或通过测试特性获得，而 R_t 则可利用图 4-9 结合计算式计算得到。

图 4-9 是变压器的输出功率和电压调整率的关系曲线，



变压器的输出功率 (VA)

图 4-9

输出功率(伏安)越大,电压调整率越低,即变压器在内阻 R_s 上的损耗越少. 所以,由变压器输出功率通过图 4-9 查出电压调整率后,即可按下式算出 R_s :

$$R_s = \frac{R_L \rho}{1 - \rho}$$

式中 ρ 为电压调整率.

下面举一个设计的例子来说明图 4-7,4-8,4-9 这组关系曲线的用法.

【例 4-7】 设计一个具有电容滤波的单相桥式整流电路. 技术要求: 1) 直流电源电压 E_L 为 48 伏; 2) 直流负载电流 I_L 为 1 安; 3) 负载上允许的纹波因数小于 2%. 整流元件用 3 安的硅二极管,其正向压降为 0.7 伏,内阻 R_d 为 0.08 欧姆,试确定滤波电容器容量和变压器次级电压值.

(1) 确定滤波电容器的容量

由图 4-7 查得 48 伏,1 安时的电容值为 1000 微法,考虑纹波因数 2% 的要求,应取电容量为查得数值之一倍. 即 2000 微法.

(2) 计算 R_s/R_L

先设变压器输出功率为 50 伏安. 由图 4-9 查得电压调整率 ρ 约为 10%,再由输出电压和负载电流算出负载电阻

$$R_L = \frac{48 \text{ 伏}}{1 \text{ 安}} = 48 \text{ 欧姆}$$

然后,由电压调整率 ρ 和负载电阻的关系求出变压器内阻 R_s , 即

$$R_s = \frac{R_L \rho}{1 - \rho} = \frac{48 \times 0.1}{0.9} = 5.3 \text{ 欧}$$

在单相桥式整流时总有两个串联整流二极管同时导通的,计算负载两端看进整流器的内阻应为

$$R_s = R_i + 2R_d$$

但由于已知整流二极管的内阻为 0.08 欧, 这样, $2R_d \ll R_i$, 故可认为 $R_s \approx R_i$. 于是

$$\frac{R_s}{R_L} = \frac{5.3 \text{ 欧}}{48 \text{ 欧}} = 0.11$$

因 $R_s/R_L = 0.11$, 在图 4-7 曲线中 A、B 是重合的. 查得 $E_{DC}/\sqrt{2}E_2 = 0.73$.

(3) 计算变压器次级电压值

在低压且采用半导体硅二极管整流时, 计算变压器次级电压必须特别注意整流元件的正向压降. 这是由半导体二极管的特性所决定, 它包括正向压降 E_d 和内阻压降 $I_L R_d$ 两部分, 而 R_d 在 R_s 中已考虑. 由于半导体二极管的 R_d 很小, 可不计. 而二极管正向压降在低压输出时在负载上所产生的影响是不能忽视的. 在桥式整流电路中尤其是这样, 因为总是有两个串联的二极管导通着. 在 E_{DC} 中应该包括负载上的直流电源电压 E_L 和两个串联的整流管的正向压降, 即

$$E_{DC} = E_L + 2E_d$$

由于负载电压 $E_L = 48$ 伏, $E_d = 0.7$ 伏, 故

$$E_{DC} = 48 \text{ 伏} + 2 \times 0.7 \text{ 伏} = 49.4 \text{ 伏}$$

因查得 $E_{DC}/\sqrt{2}E_2 = 0.73$, 所以变压器次级电压的有效值为

$$E_2 = \frac{E_{DC}}{0.73 \sqrt{2}} = \frac{49.4 \text{ 伏}}{0.73 \times 1.41} = 47.85 \text{ 伏}$$

4-2 电感滤波器

电感滤波器中的滤波电感, 是串联在整流元件输出端与负载之间的(有时负载电阻中存在着电感, 也同样具有滤波的

作用)。滤波电感是怎样发挥其滤波作用的呢？当整流电路中有滤波电感，它的电流将与纯电阻负载时不同，当通过二极管供给负载的电流要增加时，由于通过电感的电流是不能突变的，所以，电感线圈产生反电势阻止电流的增加，同时，将一部分电能转变为磁场能量而储存起来。在通过二极管供给负载的电流要减小时，电感将其储存的能量释放出来，以补偿流过负载的电流的减小，使流过负载上的电流趋于平直。

上述电感滤波的作用原理，还可以这样来解释：即电感线圈的直流电阻是很小的（相对负载电阻而言），对交流却呈现一个很大的感抗，使得直流电流容易通过，而交变电流则不易通过。这样，交流成分大部分降落在电感线圈上面，而直流成分因顺利通过它到达负载 R_L 上，于是，在负载 R_L 所获得的输出电压中，交流成分大为减小，从而达到滤波的目的。

电感滤波在单相半波整流中几乎不用，而较多地用于单相全波整流，多相整流电路几乎全部使用电感滤波。多相整

流的电感滤波的工作原理与单相全波整流电路的原理相似，所以，在这里我们就直接用单相全波整流电路来讨论。电路如图 4-10(1)所示。该电路存在两个整流元件，在 ωt 由 $0 \sim \pi$ 时， e_{2a} 为正值， e_{2b} 为负值。 D_1 受正向电压而导电， D_2 受

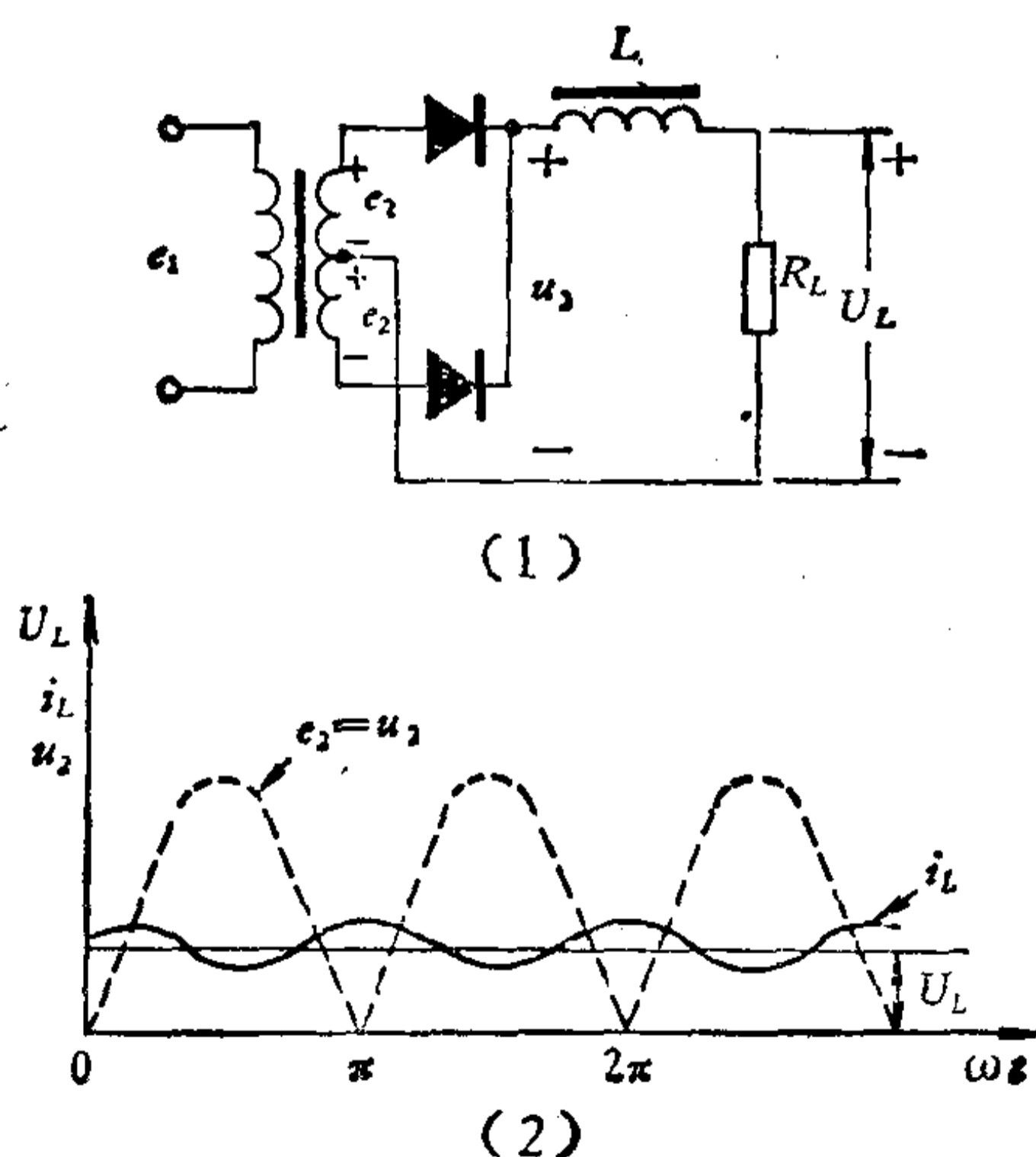


图 4-10

反向电压而不导电, 电流通过二极管 D_1 供给负载 R_L . 当 ωt 在 $\pi-2\pi$ 的时间内, 电流转移到由 D_2 供给. 输出电压是直接取自负载电阻 R_L 上, 所以, 输出电压的变化规律与负载电流 i_L 相同, 而负载电流 i_L 是由交替地流过两个整流管的电流 i_{D_1} 和 i_{D_2} 合成的, i_L 是连续不断的电流. 因此, 负载电流不再有零的时候. 滤波后的输出电压 U_L 、负载电流 i_L 及整流输出端的电压 u_d (即电感 L 与负载 R_L 上的总电压) 如图 4-10(2) 所示.

由图 4-10 可知, 整流电路输出端电压 u_d 的波形与无滤波电感时相同. 因为如果忽略二极管的正向压降, 相当于将变压器次级绕组的电压直接加于电感 L 与负载 R_L 串联的支路上面, 所以其电压 u_d 的变化规律自然与 e_2 的规律相同.

电感滤波器的特点:

(1) 对全波整流来讲, 电感滤波器的直流输出电压 U_L 仍为 $0.9E_2$, 与电感大小无关. 当输出电流增大时, 直流输出电压略有下降, 如图 4-11 所示.

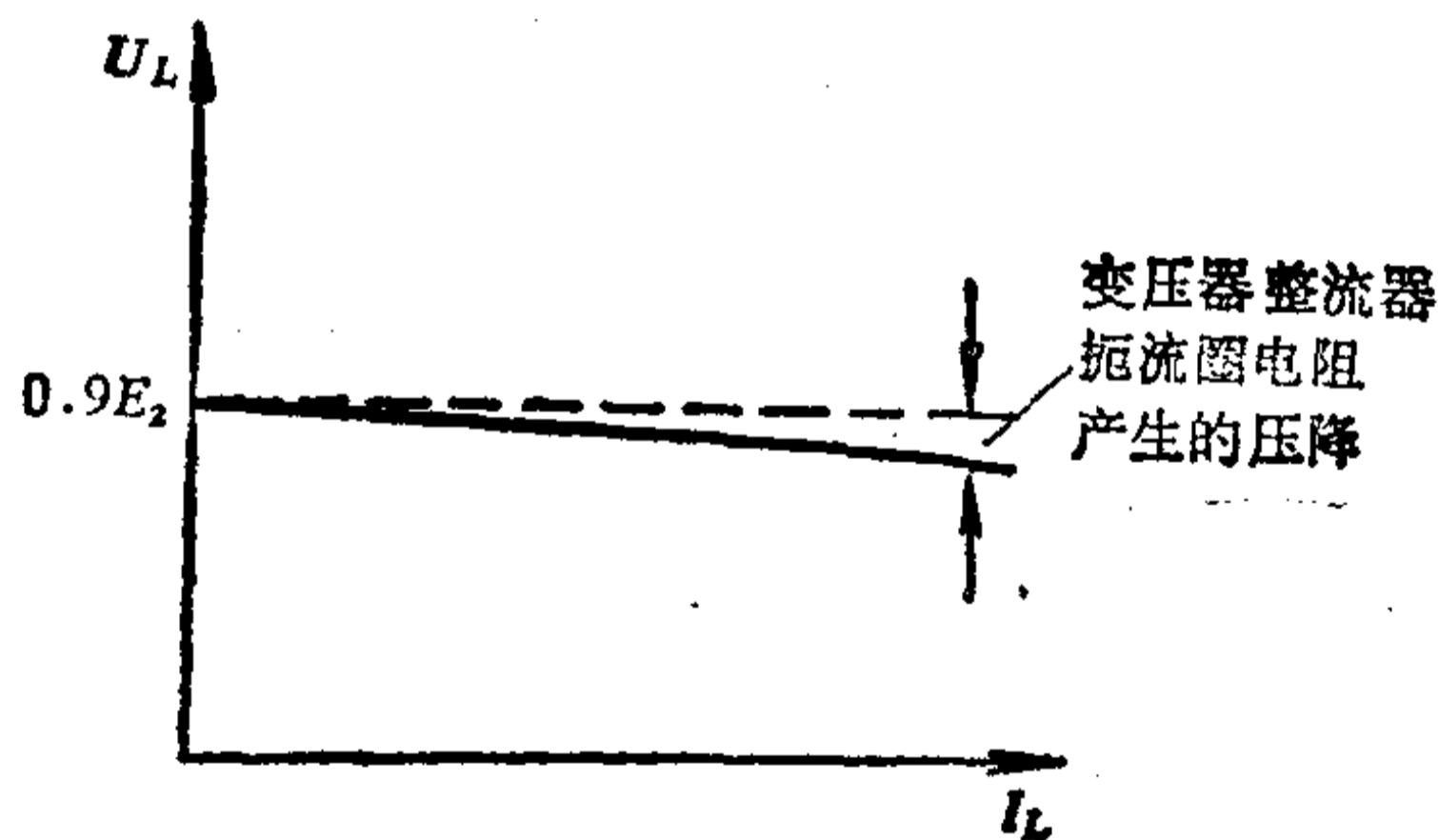


图 4-11

(2) 因电感的反电势, 使整流管导通电流较大, 峰值电流较小.

(3) 电感滤波器的滤波特性将随输出电流的加大而越来越平滑. 因此适用于负载电流大的情况.

(4) 由于铁芯的存在, 体积大, 易引起电磁干扰.

4-3 复式滤波器

复式滤波器是由电感、电容组合起来的,前面谈到的倒 L 型和 Π 型滤波器,就是这种比较复杂的滤波器。这种复式滤波器的滤波效果比较好,在简单的电感、电容滤波电路不能给负载提供高度平直的电流电压时,有时就需要用到它。

1. 倒 L 型滤波器

倒 L 型滤波器在与负载并联的滤波电容器前再串接一滤波电感所构成,具有倒 L 型滤波器的全波整流电路见图 4-12 所示,它是把电容滤波和电感滤波两者合并的结果。

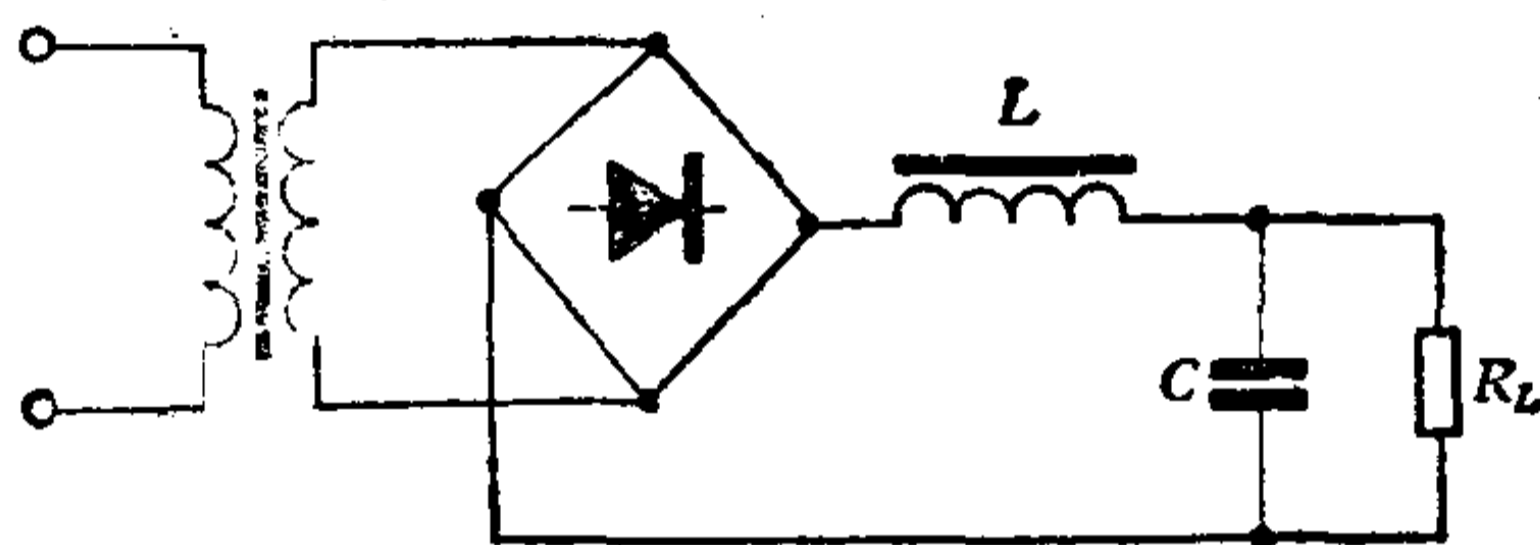


图 4-12

在图 4-12 所示的滤波器中,电感对交流成分有很大的电抗,使通过电感的交流成分在电感两端产生较大的电压降,因而减少了在负载端的交流成分,而与负载并联的滤波电容器具有旁路的作用,对交流成分的阻抗小。因此,在负载两端可以得到更为平滑的直流电压。

全波和桥式整流倒 L 型滤波器的纹波因数为

$$\gamma \approx \frac{0.67}{4\omega^2 L C}$$

对于电源频率为 50Hz 的全波(或桥式)整流来讲,其滤

波因数近似为

$$\gamma \approx \frac{1.7 \times 10^{-6}}{LC}$$

由此式,可求得 L, C 之值.

【例 4-8】 已知全波整流的输出电压为 12 伏, 负载电流 I_L 为 2 安, 对输出端纹波因数的要求是 $r \leq 0.005$, 求解倒 L 型滤波器应选用的电感和电容.

由于 $r \leq 0.005$, 所以由

$$\gamma = 0.005 = \frac{1.7 \times 10^{-6}}{LC}$$

可求得

$$LC = 3.4 \times 10^{-3}$$

上式确定了 LC 的乘积, 可先选取其中一个量便可确定另一量. 电感一般可取 1 至 20 亨, 电容器约在几微法至数千微法范围内选择, 若现有电感规格为 6.8 亨, 2A, 则电容器为

$$C = \frac{3.4 \times 10^{-3}}{6.8} = 50 \times 10^{-6} \text{ 法}$$

这种倒 L 型滤波器在负载电流足够大时, 其滤波情况与电感滤波器相类似. 在负载电流较小时, 其滤波情况类似于电容滤波器. 负载电流过小, 整流管导电不再连续, 情况完全改变, 以上公式不再适用, 这种情况较复杂, 这里不作讨论.

为了使整流器使用在较好的外特性范围内, 通常在输出端并联一固定的电阻, 称为泄流电阻. 该电阻使得在负载电流为零时, 整流器具有一定的输出电流. 泄流电阻可按下式选择:

$$R \leq 3\omega L$$

当电源频率为 50Hz 时,

$$R \leq 942L$$

有时按计算得到的 LC 很大，使用单级滤波器会很经济，遇到这种情形，可采用两节以上的倒 L 型滤波器串联起来，如图 4-13 所示，这样后一级滤波器是在前一节滤波器已经滤波过的基础上再加以滤波的。因此，对每一节的 LC 就相应可以取得比较小了。

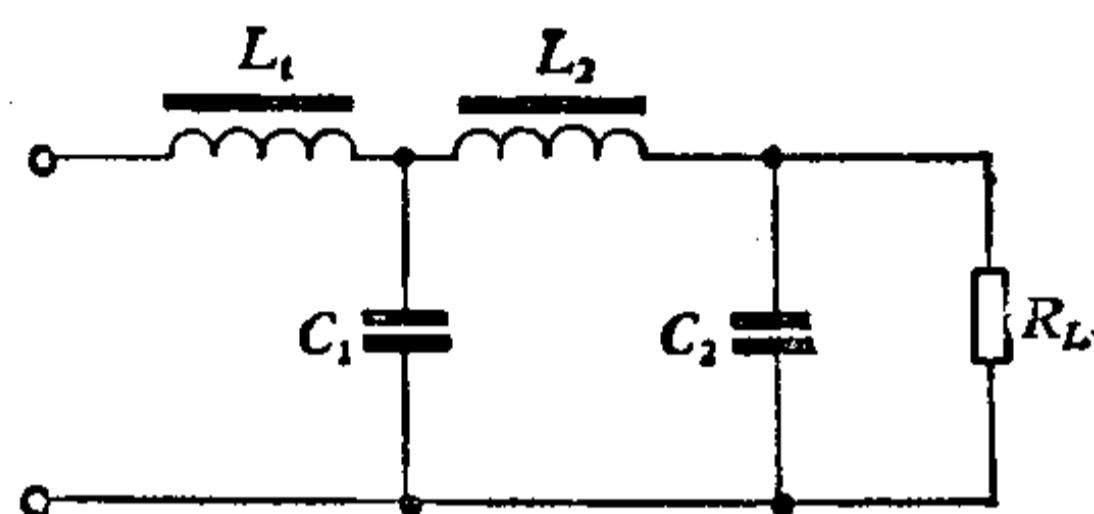


图 4-13

在负载要求的直流电流较小的整流电路中，可用一电阻来代替滤波电感，组成如图 4-14 所示的阻容式倒 L 型滤波器。其优点是成本降低、体积缩小和重量减轻。但对直流输出电压有损失，故限于小电流场合使用。

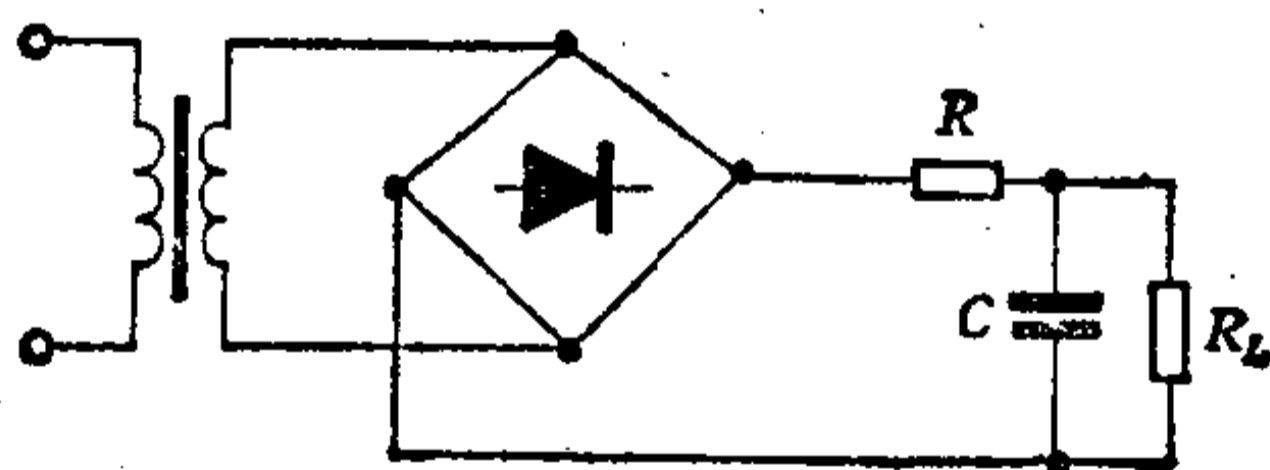


图 4-14

2. Π 型滤波器

在倒 L 型滤波器前面再并联一个滤波器，就构成如图 4-15 所示的 Π 型滤波器，所以， Π 型滤波器可看作是由电容型滤波器和倒 L 型滤波器两节滤波器组成的。这种 Π 型滤波器的滤波性能要比前面介绍的倒 L 型滤波器好，因为输出

端的交流成分,一部分先由电容滤波器滤除了,然后,再由倒L型滤波器滤除另外一部分交流成分,故使负载电流更加平直. 必须注意,由于整流元件的输出端首先是接到滤波电容 C_1 的一端的,因而元件导电的工作情况与电容滤波器时相同.

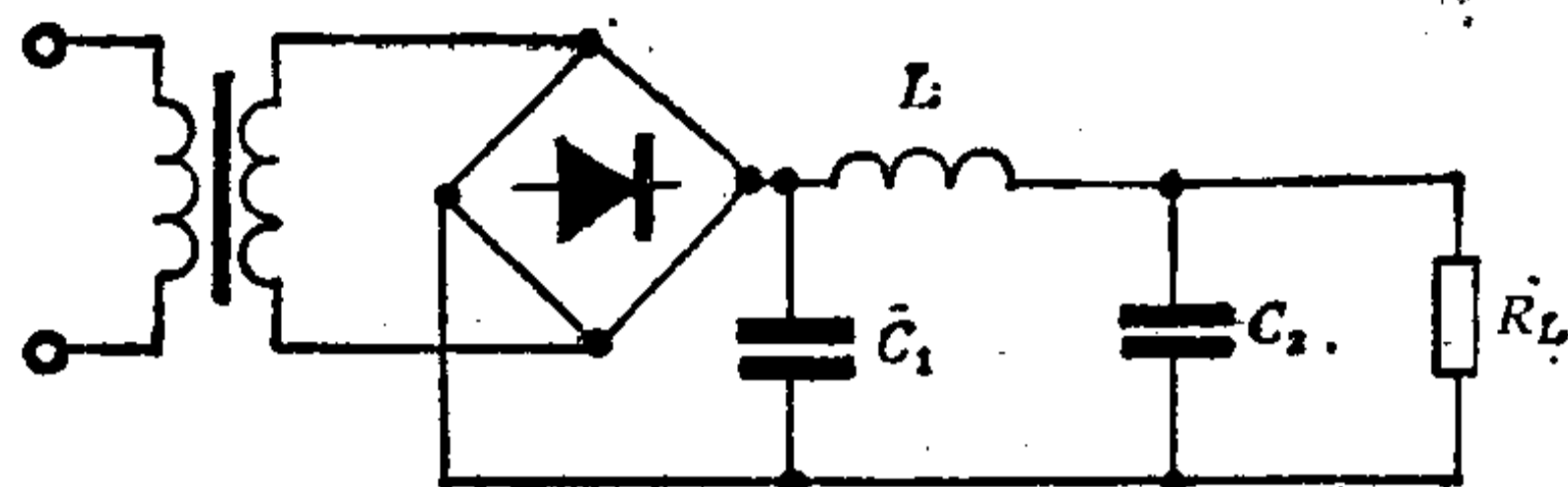


图 4-15

同样,为了获得平直的直流输出,在用单级 π 型滤波器需要很大的电感和电容而不经济时,可采用多节 π 型滤波器串联起来.

在电流较小时,滤波电感可用电阻来代替,以组成阻容式 π 型滤波器,见图 4-16. 这种滤波器在半导体电路的多级放大中常用作去耦合电路.

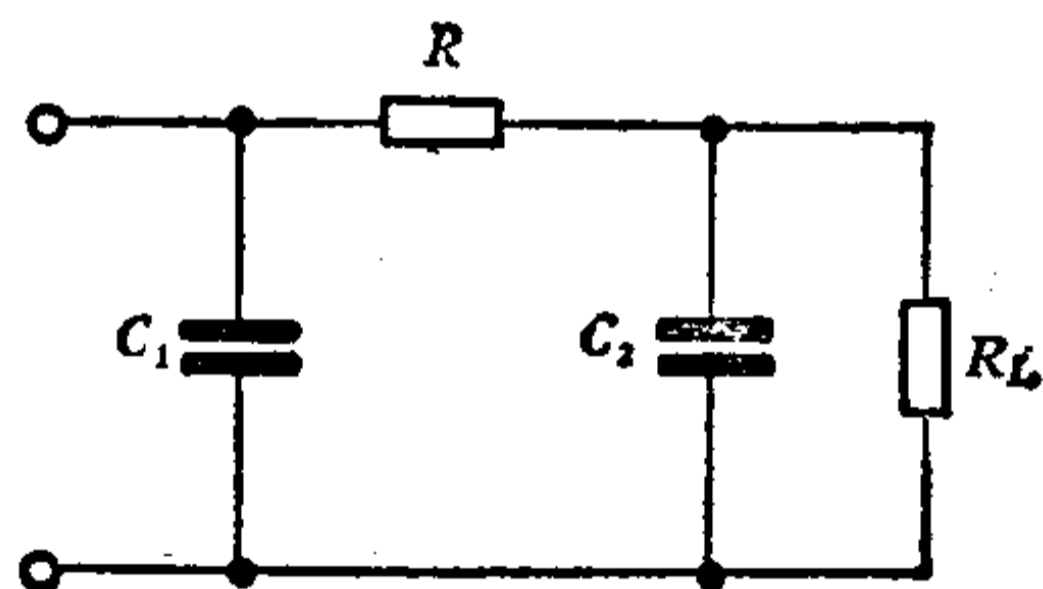


图 4-16

4-4 应用举例

1. 20 瓦扩音机直流电源

图 4-17 所示为单相桥式整流滤波电路. 初级绕组接市

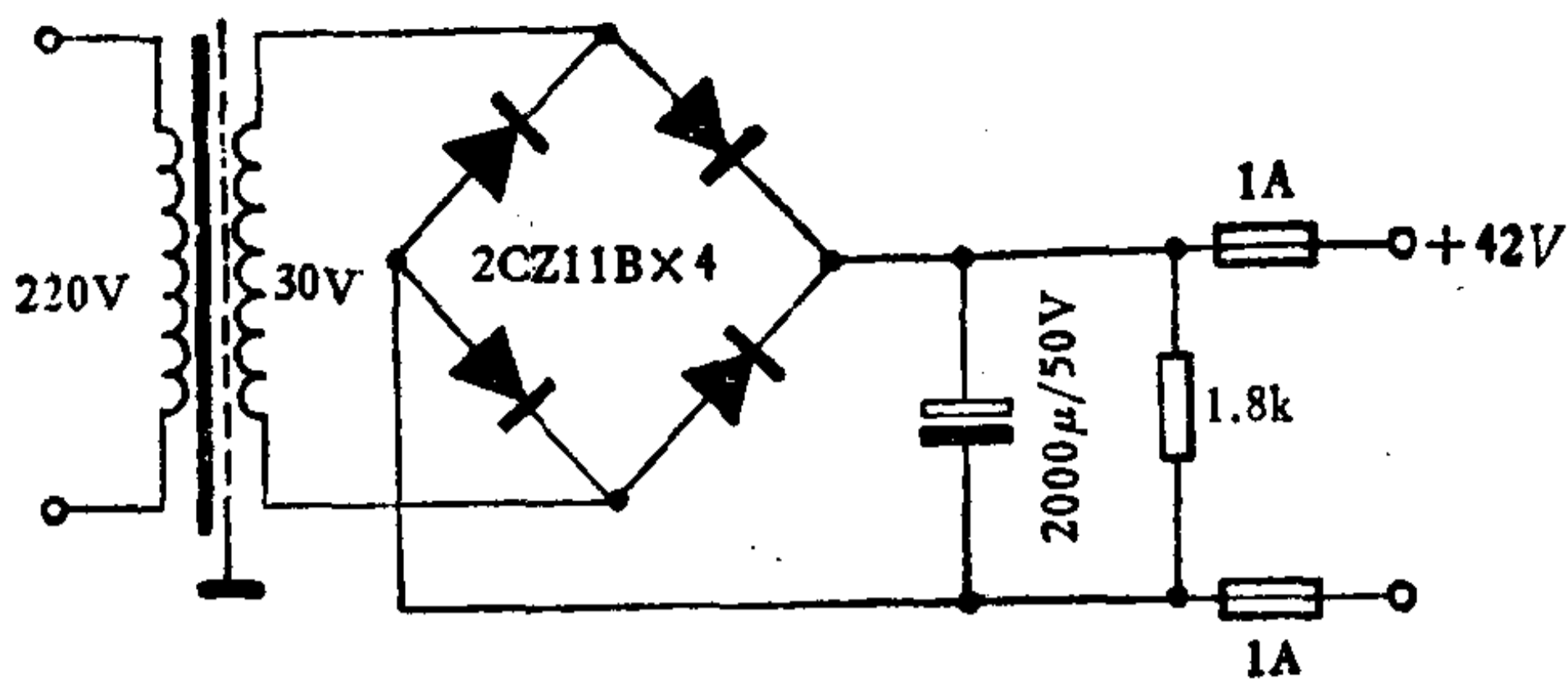


图 4-17

电 220 伏,次级绕组电压为 30 伏,直流输出电压为 42 伏,整流元件为 2CZ11B,它的最大整流电流为 1 安,最高反向峰值电压为 200 伏,最大整流下的正向压降约 1 伏. 并接输出端 1.8 千欧的电阻是泄放电阻. 该电路可作为输出功率 20 瓦的无输出变压器功放电路的电源.

2. 具有正负两组直流电源的全波整流电路

某些高传真晶体管扩音机,需用如图 4-18 所示的正、负

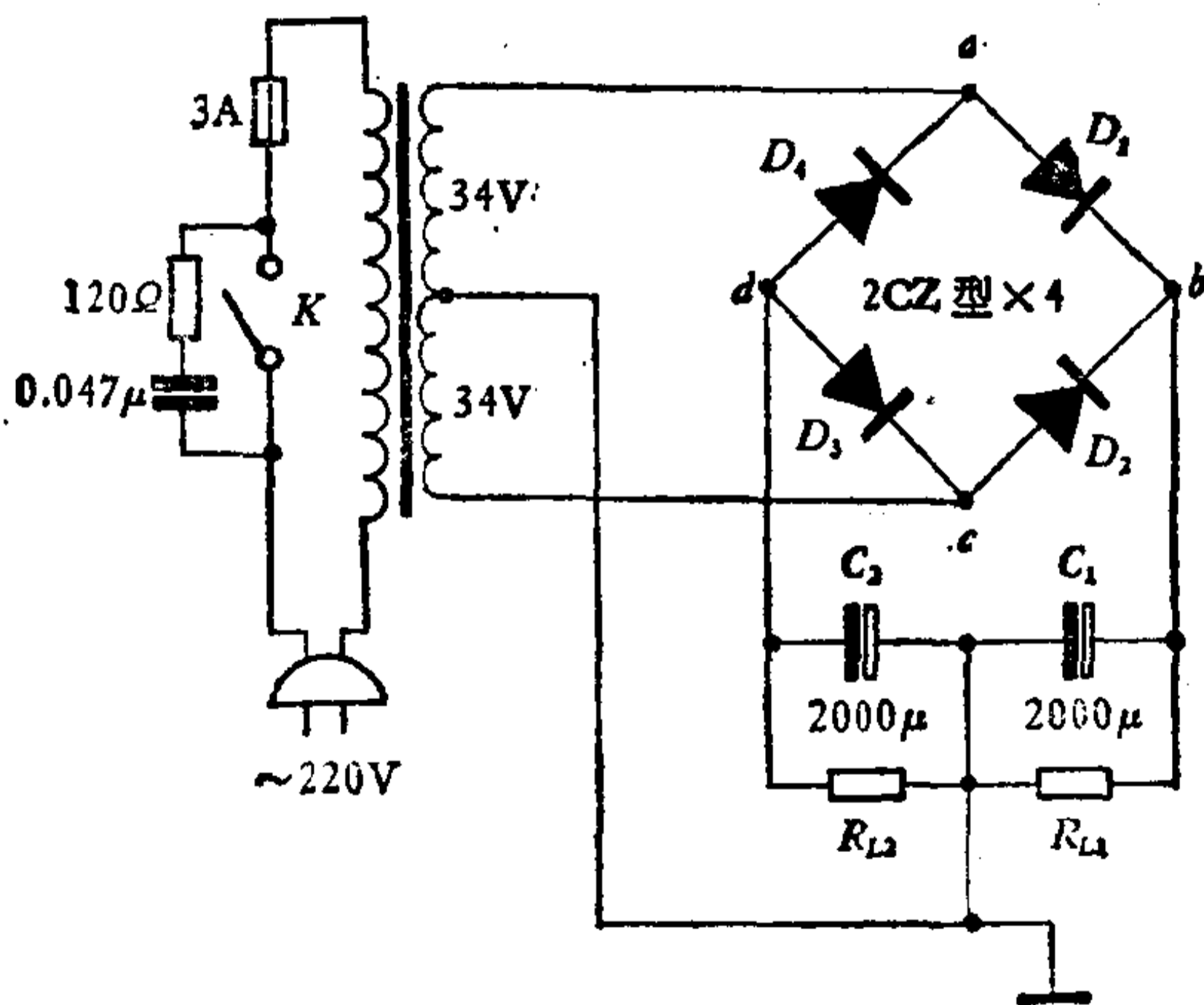


图 4-18

两组直流电源供电。乍看起来,图 4-18 的电路是“桥式”整流电路,因为四个整流元件的连接方式与桥式电路相同。但是,由于交流变压器次级绕组中心抽头作为负载 R_{L1} 和 R_{L2} 的公共端点,即整流后的零电位。这样,就其工作原理分析,在这四个整流元件中, D_1 、 D_2 成一组,专供负载 R_{L1} 的直流电流,而 D_3 、 D_4 为另一组,给负载 R_{L2} 提供电流。所以,它是两组整流元件合并在一起的全波整流电路。

工作原理如下: 当交流电半个周期出现如图 4-19(1) 所示的极性时, D_1 、 D_3 导通,流过 D_1 的电流 i_{D1} 和流过 D_3 的电流 i_{D3} 分别为 R_{L1} 和 R_{L2} 提供电流。 i_{D1} 由次级绕组 a 点流出,流向是:

$a \longrightarrow D_1 \longrightarrow b \begin{cases} \nearrow C_1 \\ \searrow R_{L1} \end{cases} \longrightarrow \text{中心抽头}$,此时,对公共端来说, R_{L1} 上获得正的输出电压。 i_{D3} 出自中心抽头,路径是: 中心抽头 $\begin{cases} \nearrow C_2 \\ \searrow R_{L2} \end{cases} \longrightarrow d \longrightarrow D_3 \longrightarrow c$, 这股电流使

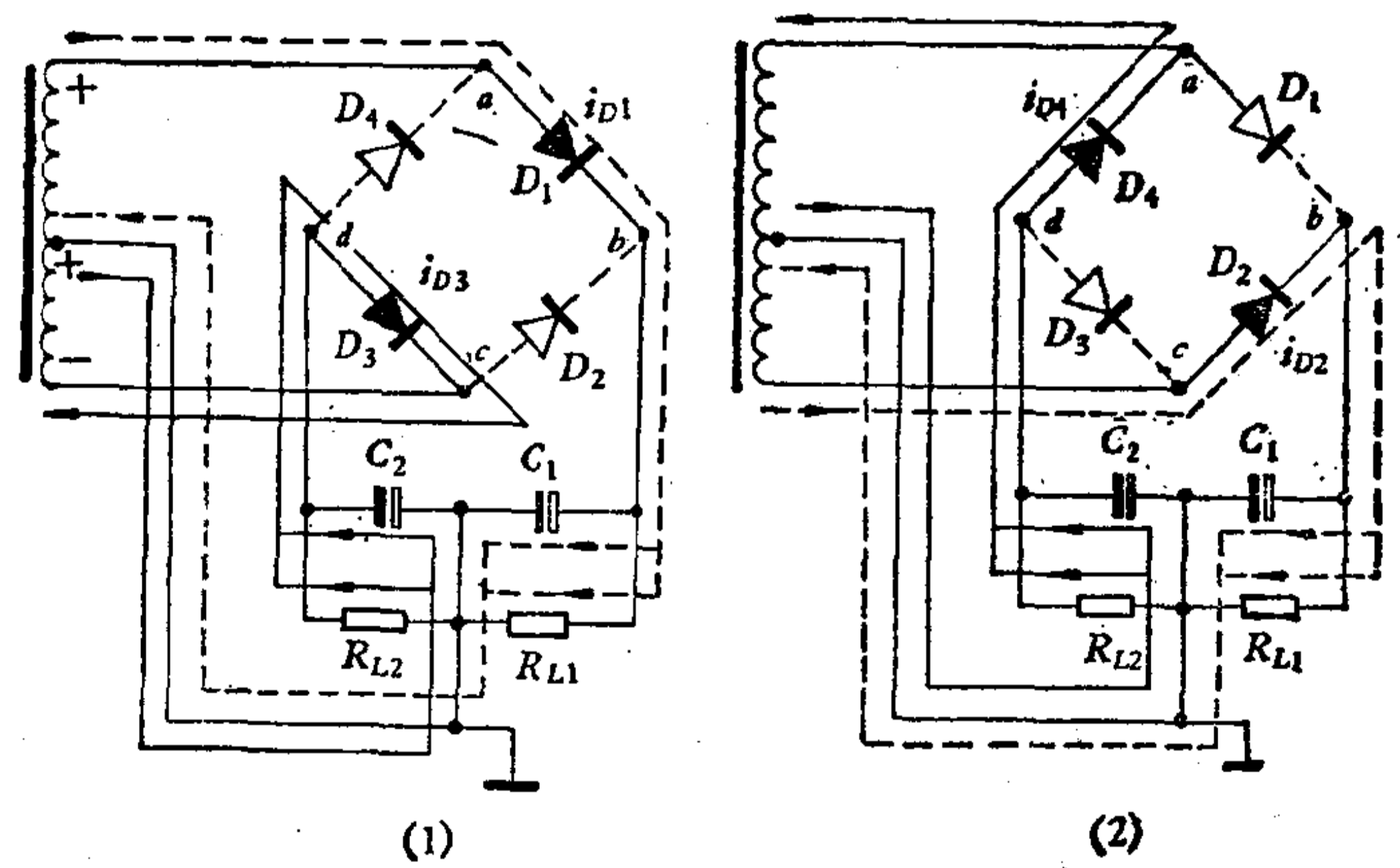
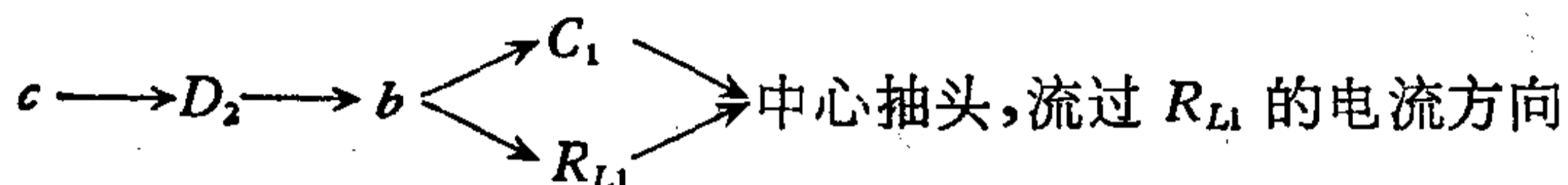


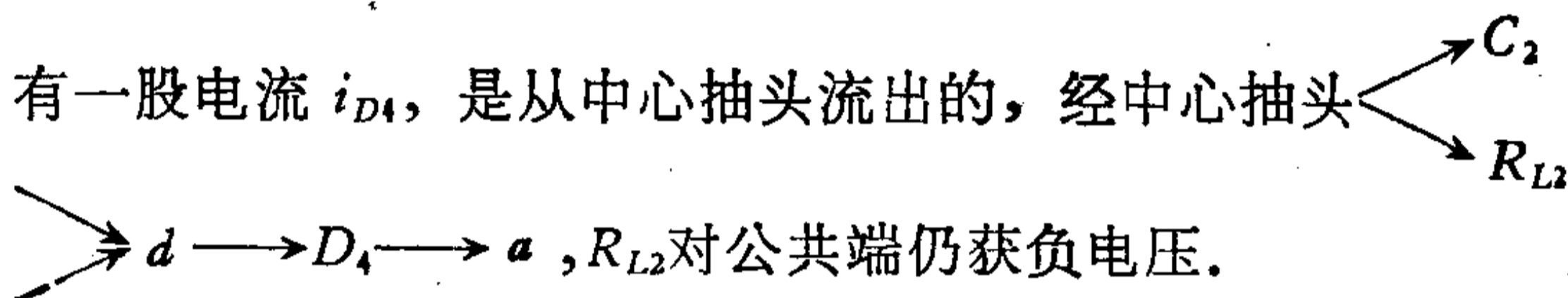
图 4-19

R_{L2} 上获得负的输出电压。

当交流电为另半个周期出现如图 4-19(2) 所示的极性时, D_1 、 D_4 导通, 同样以两股电流出现, 且分别提供给 R_{L1} , R_{L2} 。此时, 流过 D_2 的电流 i_{D2} 是以 b 点为出发点, 其流向是



仍同图 4-19(1) 所示, 并不因交流电源电压极性发生变化而改变, 故 R_{L1} 上的电压极性对公共点来说始终是正的。还



由上述原理可知, 两个负载 R_{L1} , R_{L2} 上得到的是极性相反的全波整流电压, 变压器次级绕组的电压为两组, 均为 34 伏, 所以空载时在 C_1 、 C_2 上得到的直流电压均为 $\sqrt{2} \times 34$ 伏 = 48 伏。额定功率输出时, 负载电流 1 安, 输出电压约 42 伏, 纹波因数 $< 2\%$ 。

由于是全波整流, 所用整流二极管承受的反向电压应是 $2 \times \sqrt{2} \times 34$ 伏 = 96 伏。整流元件用 2CZ 系列 3 安/200 伏的管子。图中 R_{L1} 、 R_{L2} 是泄放电阻, 电路中接有熔丝, 以防止功放组出现故障或扬声器负载短路时直流电流过大而损坏整流器。

本章小结

1. 在供应直流功率的电源中, 整流电路总是伴有滤波电路一起使用的。滤波电路可以减小整流输出直流电压中的纹波, 提高直流电压的平滑度, 故有平滑滤波器之称。

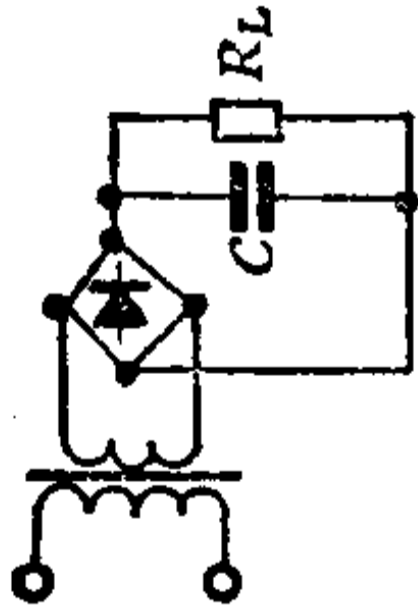
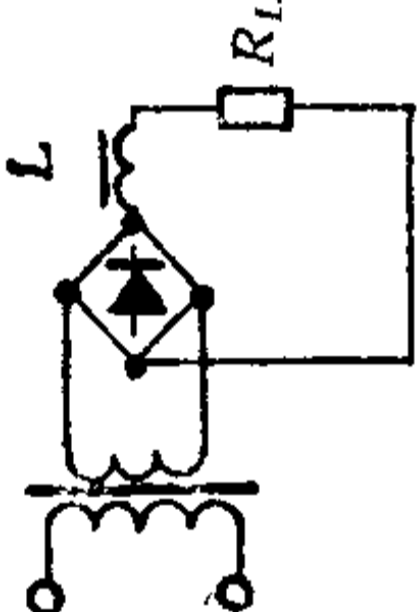
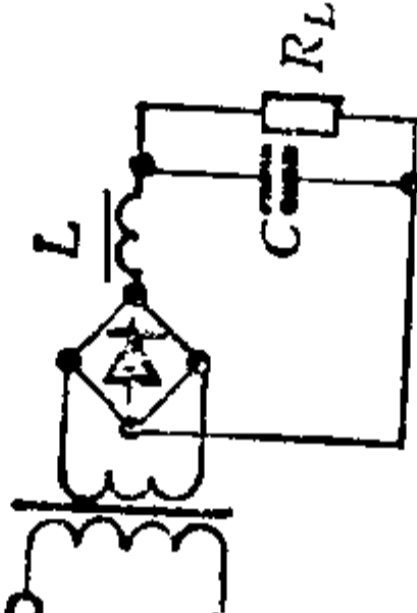
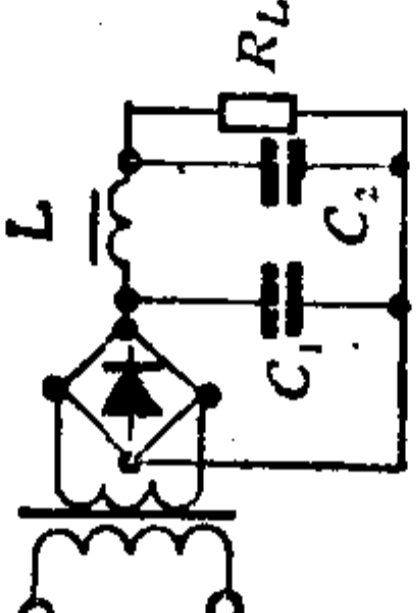
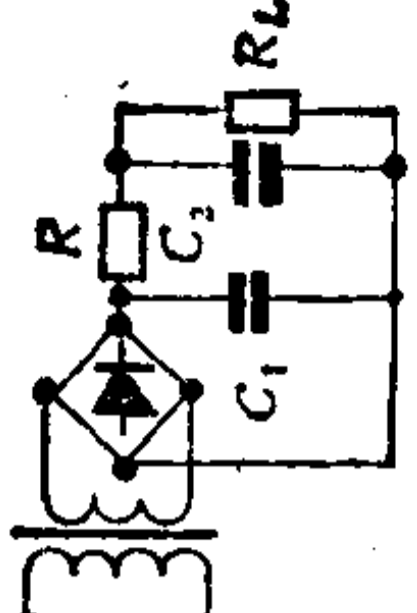
2. 滤波的基本方式,有以电容与负载相并联的电容滤波,有以电感与负载相串联的电感滤波,以及有用电容和电感组合或电容和电阻组合的复式滤波。

3. 电容滤波器的工作原理取决于:在整流管导通期间电容器存储能量,而在整流管截止期间又将这份能量释放给负载,于是,电流通过负载的时间拖长了,从而使纹波电压大为减小。

4. 纹波电压与负载电流成正比,并与滤波器的电容容量成反比。要求波纹小而且调压作用好,须采用大容量的电容器。

5. 几种滤波电路的特性列于表 4-1 中,以供选用参考。

表 4-1

滤波形式	电容滤波	电感滤波	L型滤波	π 型滤波	RC滤波
滤波形式					
滤波效果	较差	较差	较好	好	较好
输出电压	高	低	低	高	较高
输出电流	较小	大	大	较小	小
外特性	差	好	较好 (在电流较大时)	差	差

在某些电子设备中,需要高电压(几千伏甚至几万伏)、小电流的电源电路。一般都不采用前面讨论过的几种整流方式,因为那种整流电路的整流变压器的次级电压须升得很高,圈数势必很多,绕制困难。这里介绍的倍压整流电路,在较小电流的条件下,能提供高于变压器次级输入的交流电压幅值数倍的直流电压,可以避免使用变压比很高的升压变压器,整流元件的耐压相对也可较低,所以这类整流电路特别适用于需要高电压、小电流的场合。

倍压整流是利用电容的充放电效应工作的整流方式,它的基本电路是二倍压整流电路。多倍压整流电路是二倍压电路的推广。

5-1 二倍压整流电路

1. 桥式二倍压整流电路

图 5-1 所示电路是桥式倍压整流电路,图 5-1 中的(1)和(2)为同一电路的两种不同的画法。在这里,用两个电容器取代了全波桥式整流电路中的两只二极管。整流管 D_1 、 D_2 在交流电的两个半周分别进行半波整流,各自对电容 C_1 和 C_2 充电。由负载 R_L 与 C_1 、 C_2 回路看,两个电容是接成串联的。负载 R_L 上的直流电能是由 C_1 、 C_2 共同供给的。

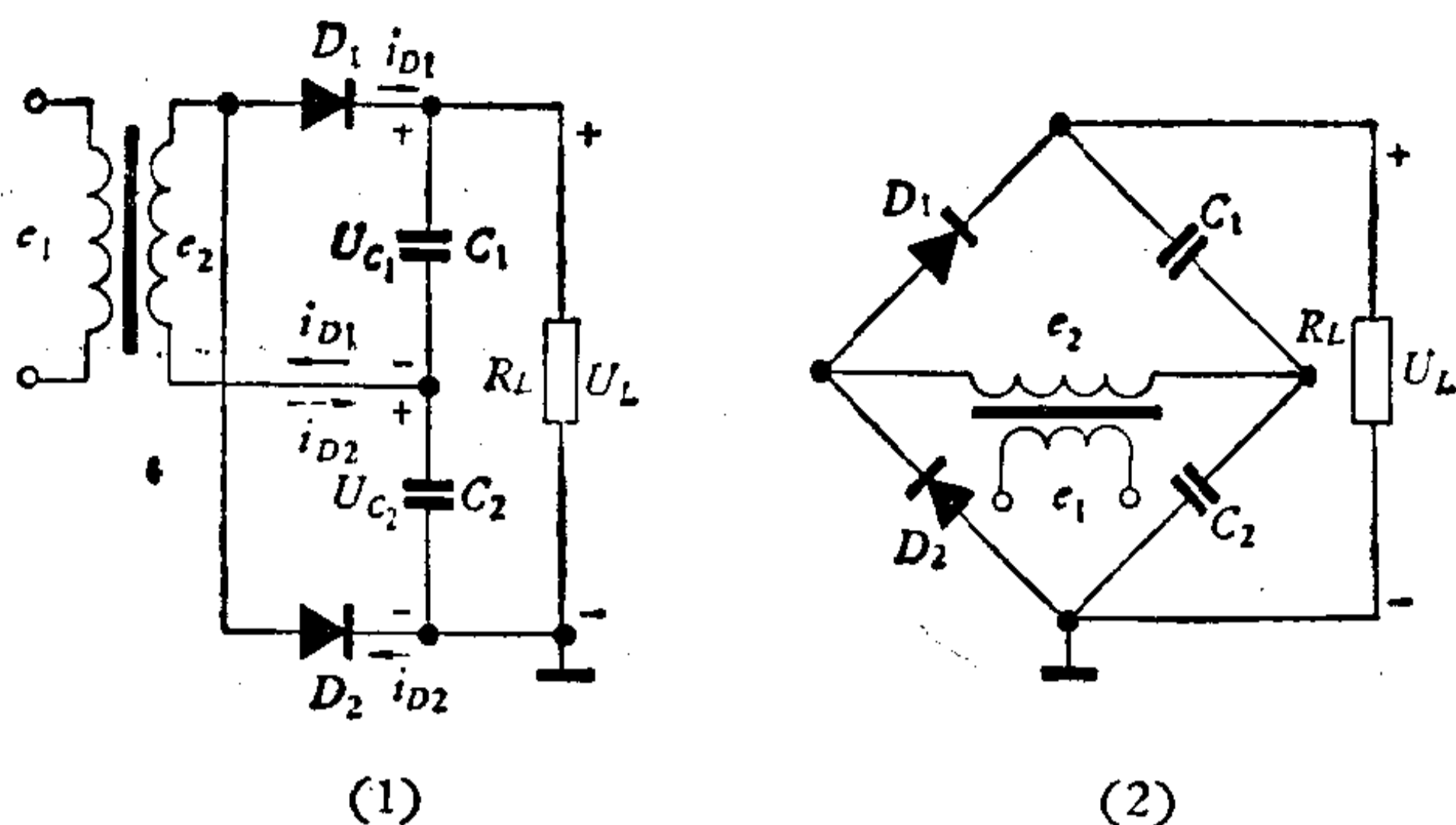


图 5-1

当 e_2 正半周时, D_1 导通, 如果负载电阻 R_L 很大, 即流过 R_L 的电流很小的话, 整流电流 i_{D1} 使 C_1 充电到 $\sqrt{2} E_2$ 的电压, 并基本保持不变, 极向如图中所示。同样, 当 e_2 负半周时, 经 D_2 对 C_2 也充上 $\sqrt{2} E_2$ 的电压, 极向如图中所示。跨接在两个串联电容两端的负载 R_L 上的电压 $U_L = U_{C1} + U_{C2}$, 接近于 e_2 幅值的两倍。所以称这种电路为二倍压整流电路。

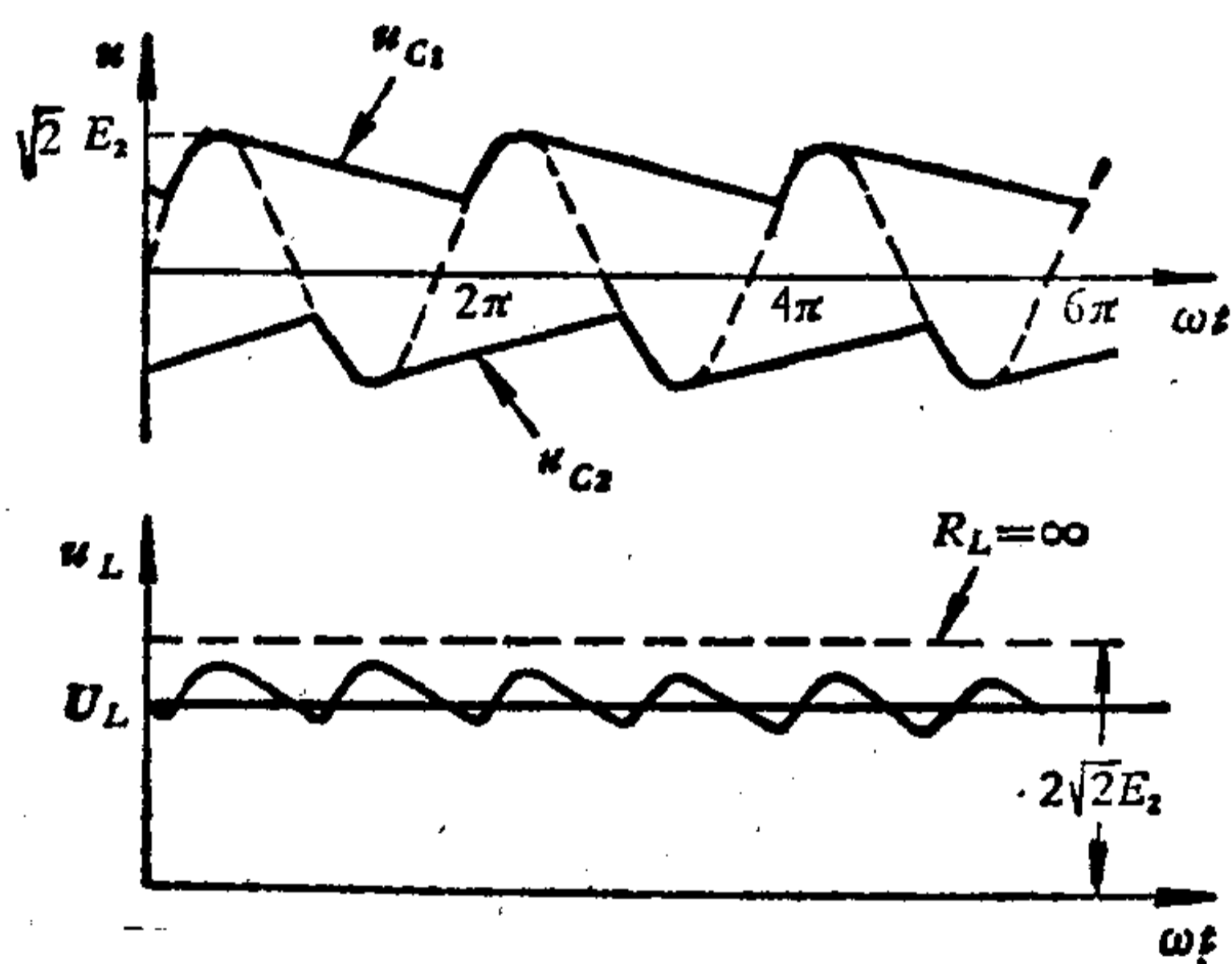


图 5-2

实际上, 在正半周 C_1 被充电到 $\sqrt{2} E_2$ 的幅值后, D_1 随即

截止, C_1 将经过 R_L 对 C_2 放电, U_{C_1} 将有所降低. 在负半周, 当 C_2 被充电到幅值 $\sqrt{2} E_2$ 后, D_2 截止, C_2 的放电回路是由 C_1 至 R_L , U_{C_2} 也应有所降低. 这样, U_{C_1} 和 U_{C_2} 的平均值都应略低于 $\sqrt{2} E_2$, 也即负载电压是不到次级绕组电压幅值的两倍的. 只有在负载 R_L 很大时, $U_L \approx 2\sqrt{2} E_2$. U_{C_1} , U_{C_2} 和 U_L 的变化规律如图 5-2 所示.

这种整流电路每个整流元件承受的最大反向电压是 $2\sqrt{2} E_2$, 电容器 C_1 、 C_2 上承受的电压为 $\sqrt{2} E_2$, 这里的电容器同时也起到滤波的作用. 电容值愈大, 输出电压中的纹波成分愈小. 可以看出, 这种电路的交流输入端和直流输出端是不能同时接地的.

2. 半波二倍压整流电路

半波二倍压整流电路如图 5-3 所示, 这种电路的两个半波整流充电环节前后串联, 交流输入和直流输出有一公共端点.

当交流电压 e_2 在正半周时, D_1 导通, C_1 通过 D_1 被充电到 e_2 的峰值 $\sqrt{2} E_2$, 极向如图 5-4(1) 中所示. 在交流电压 e_2 为负半周时, D_1 因受反向电压而截止, D_2 则受正向电压而导通. 在 D_2 导通期间, 电容 C_1 上的电压 $E_{2M} = \sqrt{2} E_2$ 因维持不变, 其作用类似于一个直流电源, 它与交流电源相串联, 所以, C_1 上的电压 U_{C_1} 与电源电压 e_2 相加, 经 D_2 向 C_2 充电, 充电电压是 $e_2 + U_{C_1}$. 在 C_2 因充电而获得电荷时, C_1 将因本身放电而失去同样数量的电荷, 但在这随后的正半周充电中就可得到补充. 经过几个周期以后, 从 C_1 转移到 C_2 上的电荷将减小到零. 于是 U_{C_1} 保持了最大的电压 $E_{2M} = \sqrt{2} E_2$, 在此后的负半周期中, C_2 上充电的电压 U_{C_2} 达到最大值, 即 $2E_{2M}$. 如图 5-3 所示, 负载是与 C_2 并联的, 所以负载上的电

压就是 $2E_{2M}$ 。

当 D_2 截止后, C_2 继续通过 R_L 放电, 输出的直流电压 U_{C_2} 将随之有所降低, 直到下一个负半周再度充电为止。所以输出直流电压是 U_{C_2} 在一个周期内起伏的平均值, 是低于 $2E_{2M}$ 的。 R_L 愈大, 输出直流电压愈接近于 $2E_{2M}$ 。

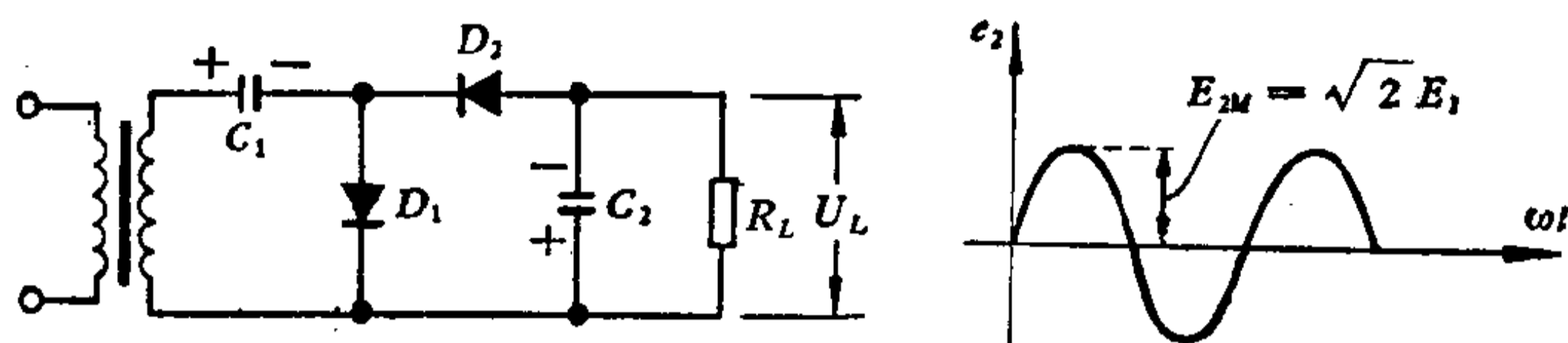


图 5-3

与桥式二倍压整流电路相比较, 这里交流电源一周期内只给 C_2 进行一次脉冲式的充电, 纹波分量的最低频率较前一种电路减小一半。在元件参量相同时, 因为这里 C_2 的放电时间较长, 纹波电压的幅度也相应较大。在桥式倍压电路中, C_1 和 C_2 承受的直流电压都是 E_{2M} (即 $\sqrt{2} E_2$), 而这里 C_2 承受的直流电压是 $2E_{2M}$ 。在两种电路中, 每一整流管承受的反峰电压都等于 $2E_{2M}$ 。

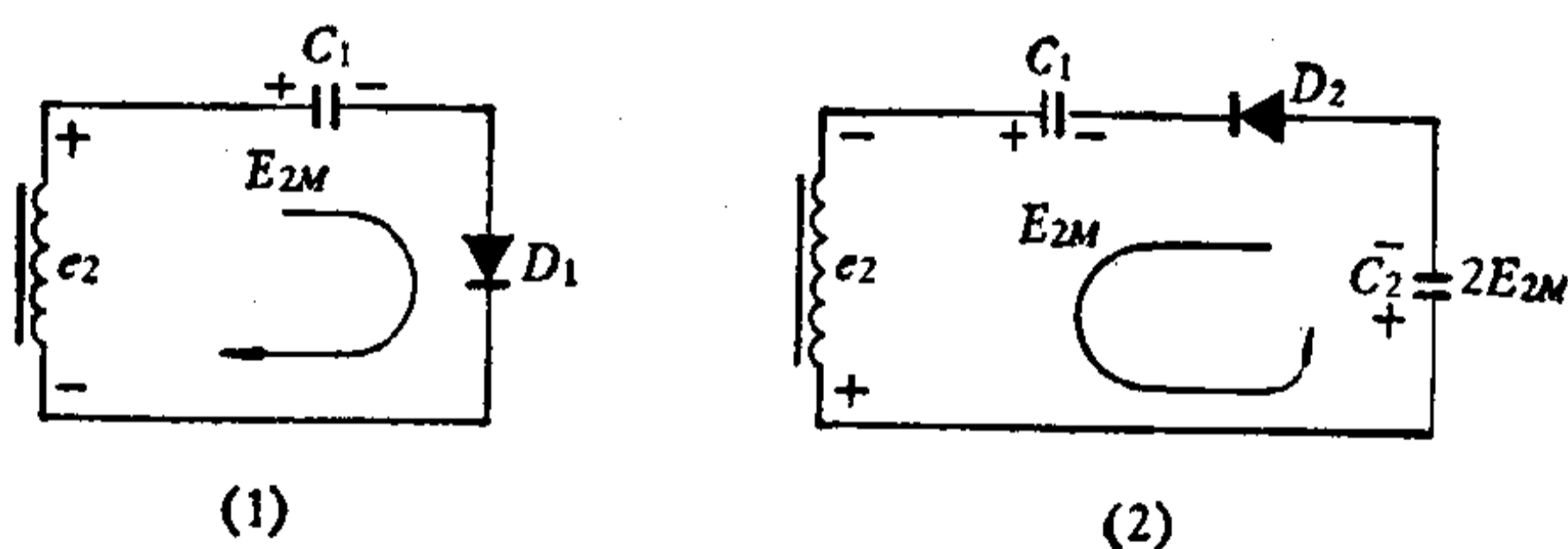


图 5-4

5-2 三倍压、多倍压整流电路

把二倍压整流电路推广, 可以构成三倍压或多倍压整流

电路。

1. 三倍压整流电路

图 5-5 电路是一种三倍压整流电路，它是在图 5-3 半波二倍压整流电路的基础上再串接一节半波整流电路构成的。该电路的整流管 D_1 、 D_2 和电容器 C_1 、 C_2 构成了半波二倍压整流电路，这一部分电路的工作情况与图 5-3 所示电路是完全一样的。在三倍压电路中，整流管 D_3 是在交流电源正半周时导通的。 D_3 导通时，电容器 C_2 与电源串联，通过 D_3 对 C_3 充电。因此， C_3 将被充电到 $3E_{2M}$ 。当负载接在 C_3 两端时，负载上所获得的直流电压 U_L 将接近于电源变压器次级交流电压幅值的三倍。

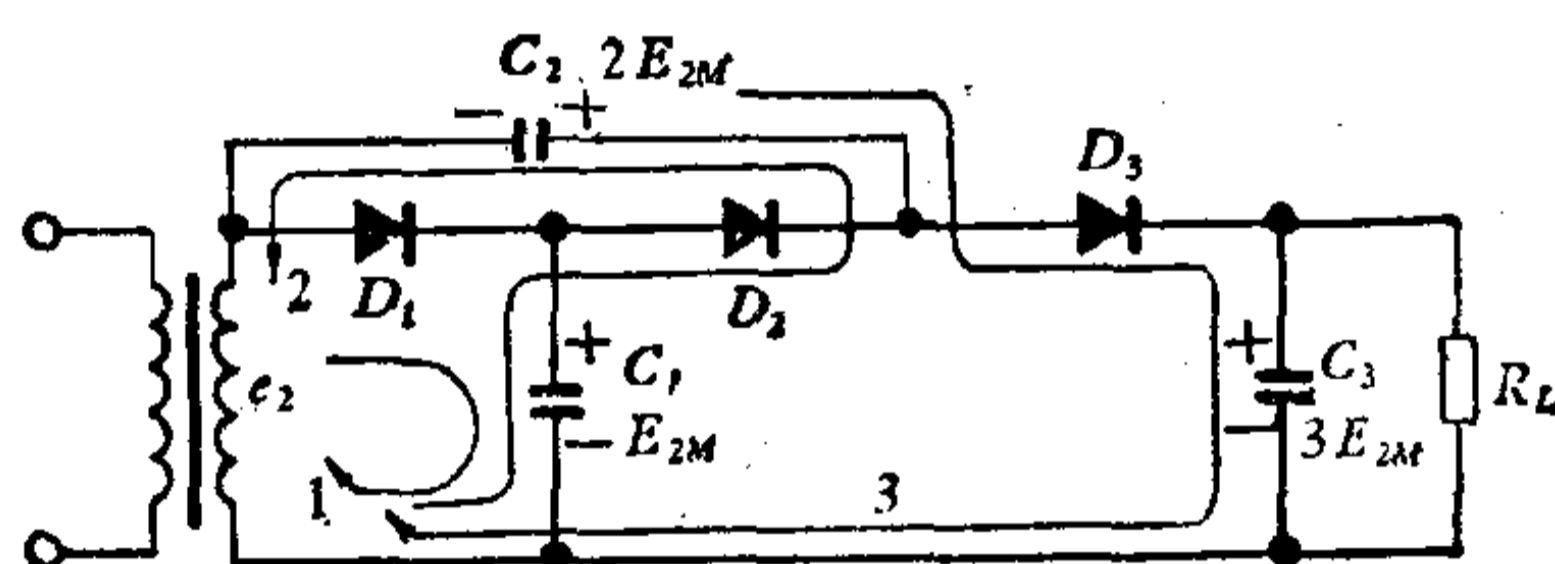


图 5-5

图 5-6 电路是另一种三倍压整流电路。它同样是以图 5-3 电路为基础的。这里与图 5-5 电路所不同的地方，就在于第三个整流充电环节中的电容器 C_3 ，不是象图 5-5 那样直接接地，而是通过电容器 C_1 接地的。因此，在 D_3 导通时是由电容器 C_2 、交流电源和电容器 C_3 三者串联通过 D_3 对 C_3 充电的。 C_3 上充电的最大电压值为上述三者最大电压的代数和。当交流电源为正的 E_{2M} 时，恰好与 C_1 上的直流电压大小相等、方向相反，对于电容器 C_3 来讲，这两者是相互抵销的，因此， C_3 上最大可能的充电电压与 C_2 一样，都是 $2E_{2M}$ 。如果负载跨接在电容器 C_1 和 C_3 两端，那末负载上的直流电压

应为: $U_L \approx U_{C_1} + U_{C_3} = E_{2M} + 2E_{2M} = 3E_{2M}$.

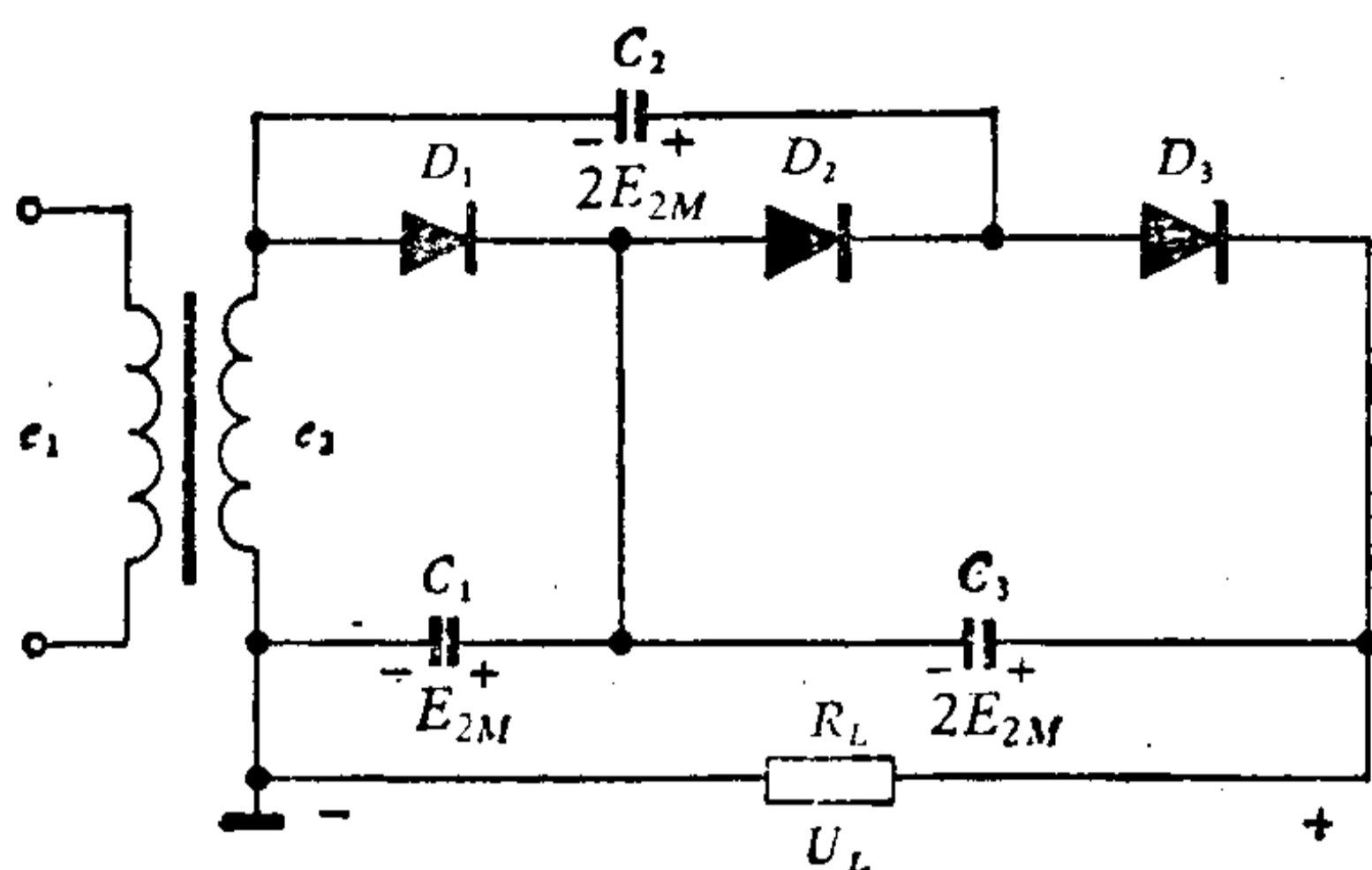


图 5-6

在图 5-5 和图 5-6 两种三倍压电路中, 每个二极管两端的反向电压都是变压器峰值电压的二倍, 电容器承受的最大直流电压: C_1 都是 E_{2M} , C_2 都是 $2E_{2M}$, 只是 C_3 所承受的电压不一样. 在图 5-5 中 C_3 的耐压应为 $3E_{2M}$, 而在图 5-6 中则为 $2E_{2M}$. 这两种电路的交流输入端和直流输出端之间都有公共端点.

2. 多倍压整流电压

二倍压整流电路采用了二个整流管和二个电容器, 三倍压整流电路采用三个整流管和三个电容器. 欲获得直流高压, 可采用由 n 个整流元件和 n 个电容器组成的 n 倍压整流电路. 图 5-7 为七倍压整流电路, 它是图 5-5 电路的推广.

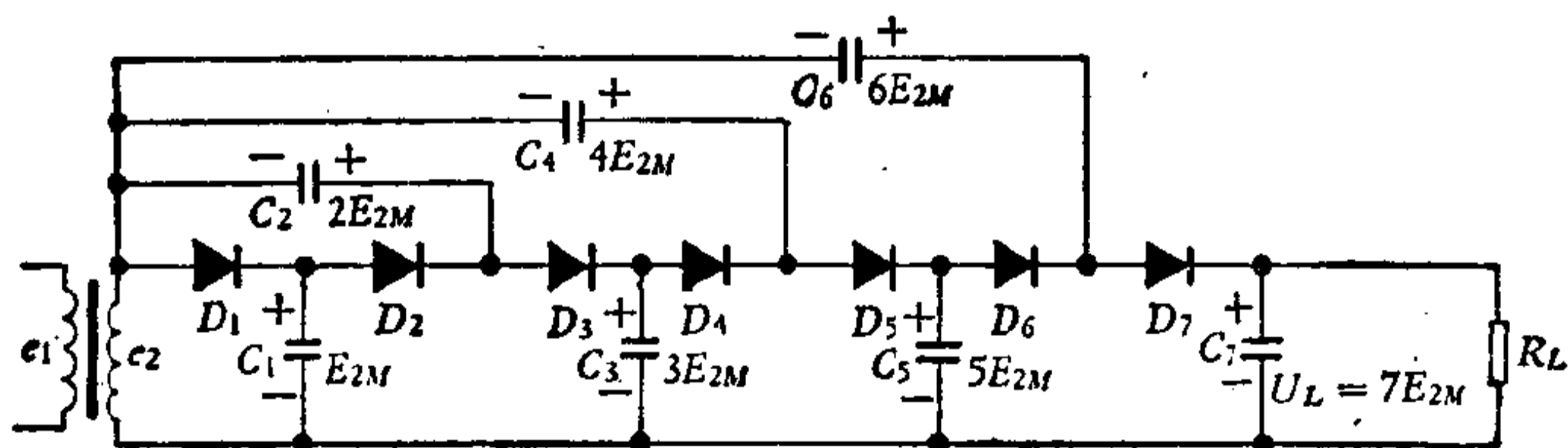


图 5-7

C_7 被充电至七倍电压。此电路中，电容器耐压须随级数增加而增高，对 n 倍压的电路，则须耐 nE_{2M} 的电压。

图 5-8 是另一种形式的七倍压整流电路，它是图 5-6 电路的推广。在此电路中，所有的整流元件都是串联连接的。电容器按每隔一接点的方式接入，分布在整流管两侧，呈叠层

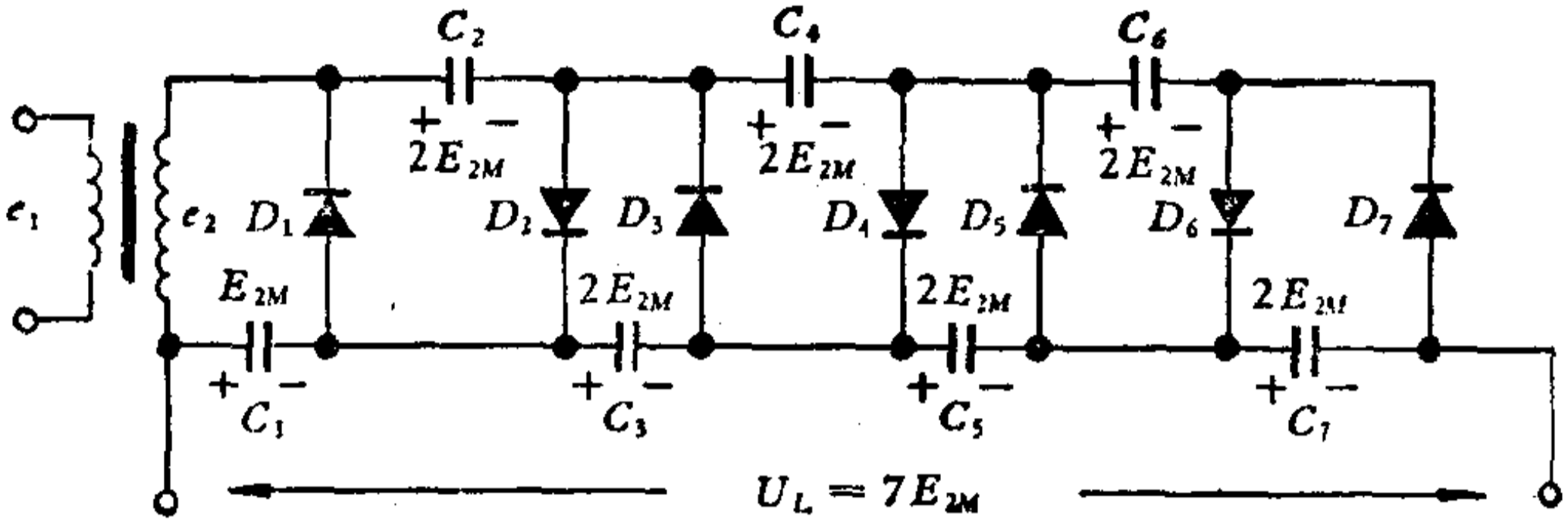


图 5-8

形。由于每一侧电容是叠层串联，其结果也可以产生 n 倍电压。图 5-8 所要求整流器的耐压与图 5-7 要求相同，都是 $2E_{2M}$ ，而电容器的耐压，除 C_1 为 E_{2M} 外，其余均为 $2E_{2M}$ 即可。从这个意义上讲，它是图 5-7 电路的一种改进。

5-3 应用举例

1. 静电喷漆高频高压发生器

图 5-9 是高频高压发生器的方框图。它是用于金属工件表面静电喷漆的一种设备，还可用于静电吸尘、静电植绒、静电分离等场合。工作原理如下：全波整流将单相 50 周的交流电变换成直流电，由振荡器把直流电能再转换成 20 千周左右

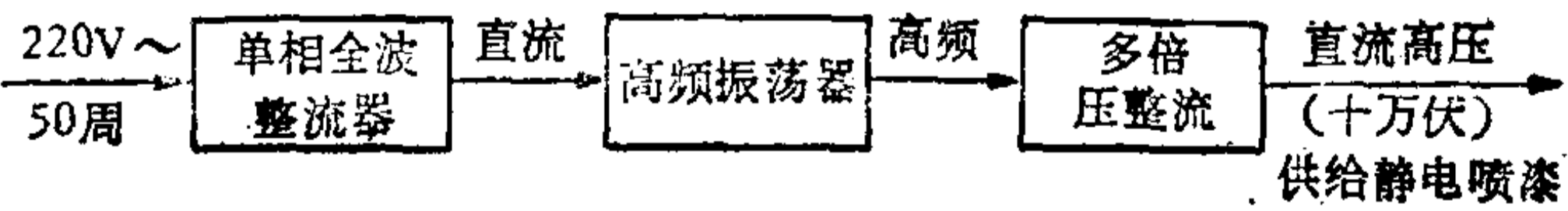


图 5-9

的高频电能,以便让变压器把电压升高到 1 万伏左右,然后再由多倍压整流器把它变成直流高压输出。作为多倍压整流的例子,我们仅对高频高压发生器中的九倍压整流部分感兴趣,将它示于图 5-10 中。由图可见,该九倍压整流器的电路结构

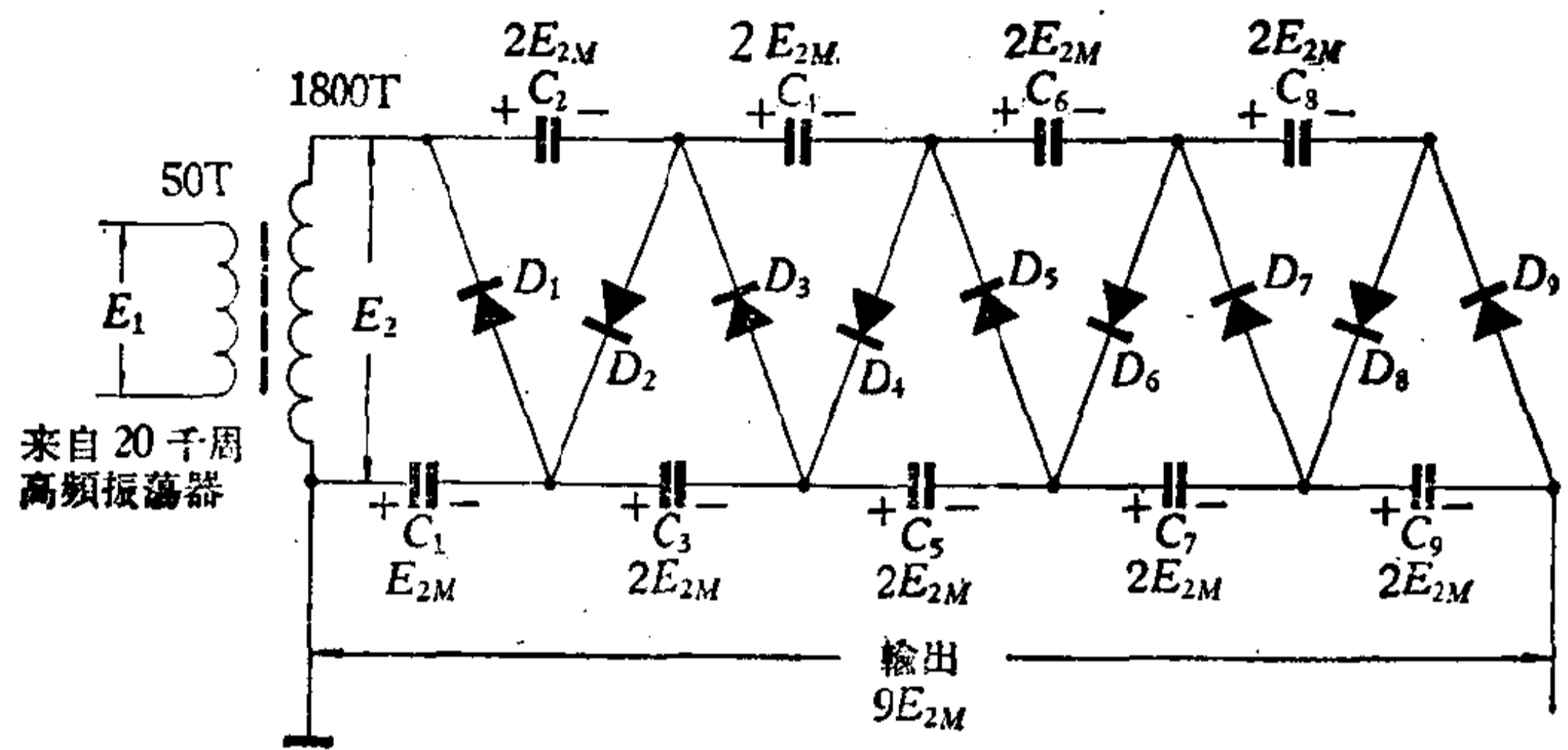


图 5-10

形式与图 5-8 电路是相似的。直流电压可从叠成串联的电容器 C_1 、 C_3 、 C_5 、 C_7 和 C_9 五个电容两端输出。调节振荡器的输出电压,输出的直流高压可在六万伏至十二万伏范围内变化。该设备可供六支喷枪同时使用。

升压变压器的制作和数据: 初级线圈用 3 股 $\phi 0.19$ 丝包线密绕 50 圈,在有机玻璃框架上绕一层,次级线圈是用 $\phi 0.21$ 丝漆包线,分绕在一个有六格的有机玻璃框架上(乱绕),每格绕 300 圈,共计 1800 圈。分格绕制可以提高高压线圈耐压强度。格间绕组头尾衔接的方法,可在每格的凸棱上开槽,将套有聚四氟乙烯套管的一个线尾嵌入,并和另一格绕组的头连接起来,这样,可以满足一定的绝缘要求。线圈绕成后,将截面积为 14×14 毫米的口字形铁氧体磁芯插入框架。变压器结构如图 5-11 所示。

整流元件可用耐压高的硅柱和硒柱。硅柱体积小,过载能力不及硒柱。一旦喷枪头碰撞造成负载短路,硒柱能够承

受,硅柱则需采取保护措施。鉴于这个原因,本例采用耐压大于 20 千伏、承受电流 1 毫安的硒柱作整流元件。所用电容器的规格是容量为 2000 微微法、耐压为 20 千伏。

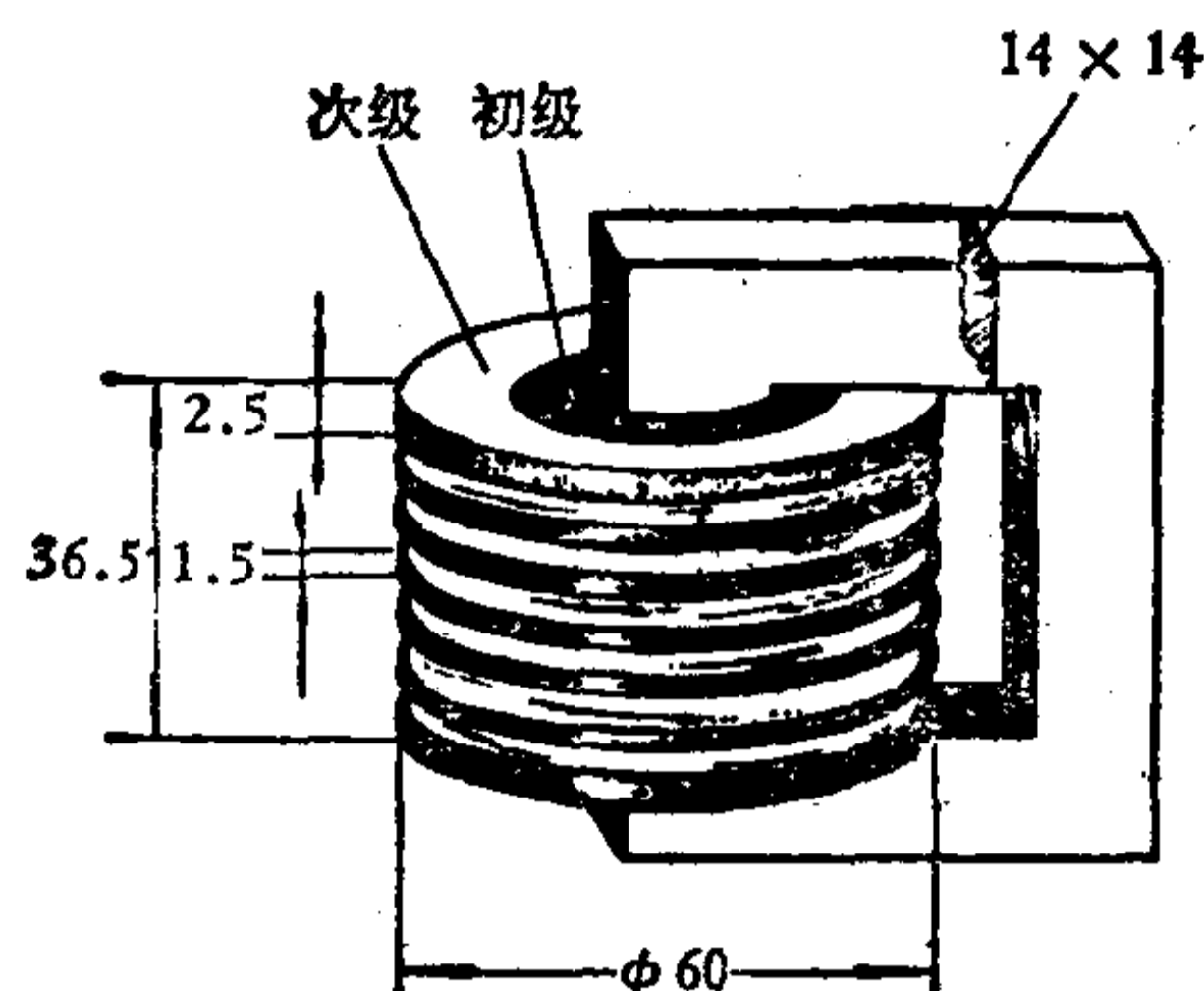


图 5-11

安装注意点: (1)联接时,整流元件的极性不要弄错;(2)整流元件和电容器之间安装相距不宜过近,以免跳火;(3)整流器的全部元件浸在纯净的变压器油槽内,如图 5-12 所示,以提高耐压强度。

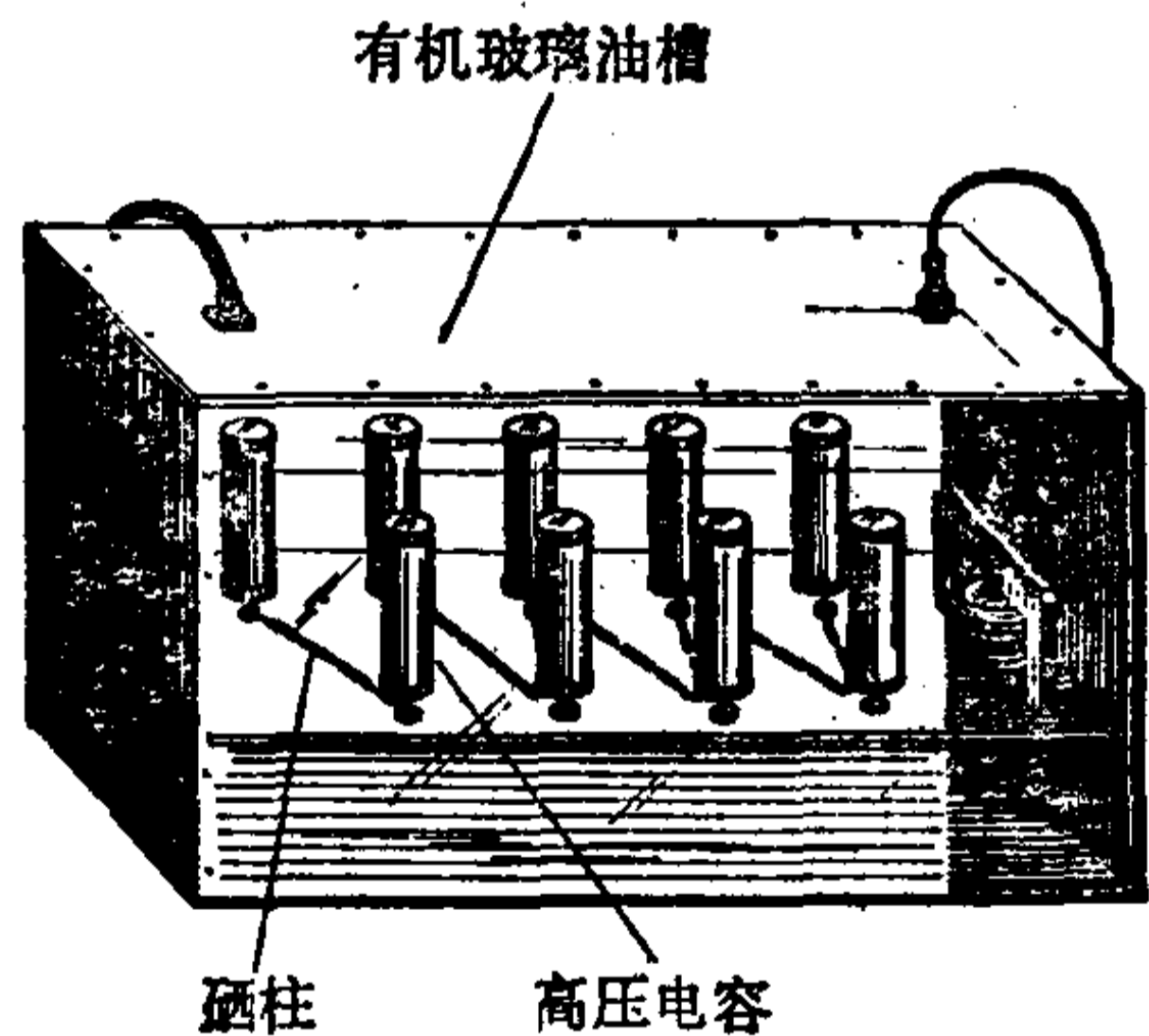


图 5-12

2. SBM10 多用示波器高频高压电路

图 5-13 所示为 SBM10 多用示波器高频高压电路。晶体

三极管组成的单管直流变换器振荡频率为 22 千赫,次级高压输有 3.4 千伏和 1.1 千伏两个绕组,经二极管 D_1 — D_5 五倍压整流和滤波后输出 10 千伏加到示波管第四阳极,作偏转加速电压。

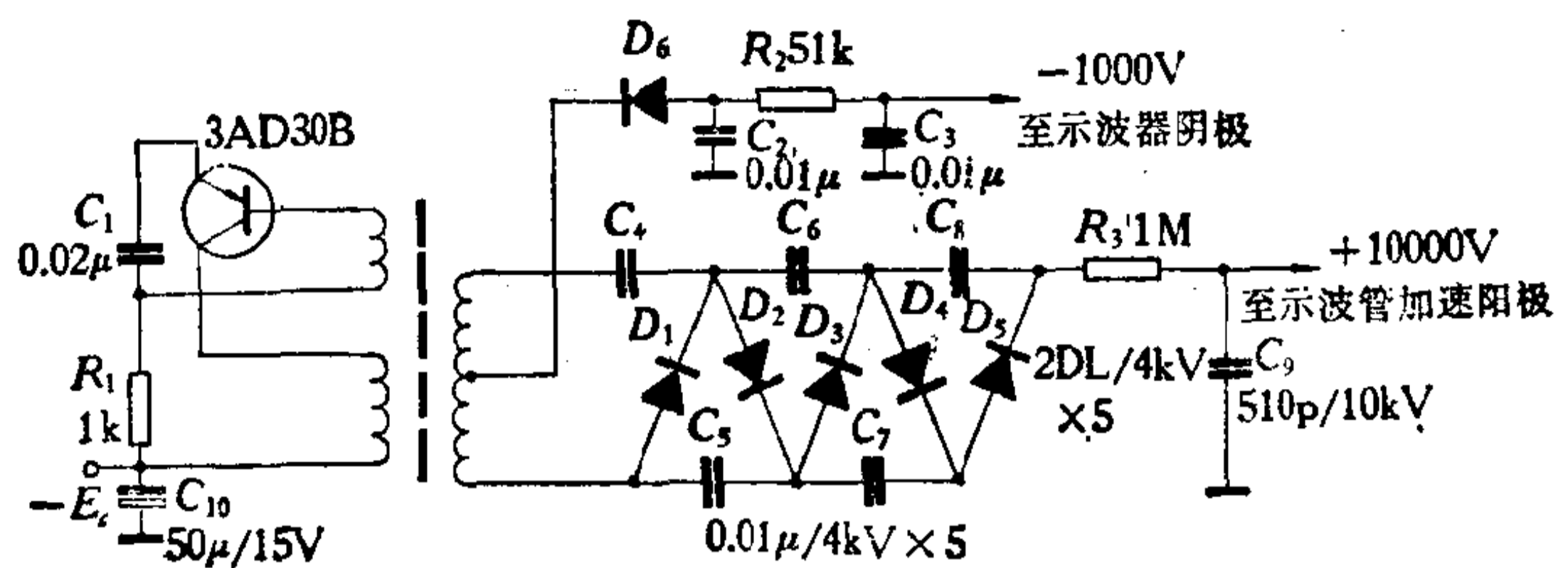


图 5-13

振荡变压器的铁芯采用铁氧体 E17,绕组采取分层平绕的方式,内层绕初级,外层绕次级. 1.1 千伏绕组采取双根导线平行线法并绕在 3.4 千伏绕组的始端。

该电路还带有直流反馈自动控制输出幅度电路以解决高压输出的稳定性问题. 这部分内容已超出本书的范围,故在图 5-13 电路中没有画出。

本章小结

1. 倍压整流是利用电容器的充放电效应工作的整流方式,它的特点是在较小电流的条件下,能获得高于输入交流电压幅值的直流电压. 可以避免使用变压比很高的升压变压器. 缺点是负载能力较差,负载电流较大时,输出电压显著下降。

2. 倍压整流的基本电路是二倍压整流电路. 倍压整流电路分为并联和串联两种电路形式. 并联倍压整流电路是由方

向相反的半波整流并联构成，串联倍压整流电路是由各个半波整流充电环节先后串联构成。前者电路的交流输入端和直流输出端是不能同时接地的，后者电路的交流输入端和直流输出端有一公共端。多倍压整流电路是上述二倍压整流电路的推广。

3. 在元件参数相同的条件下，串联倍压整流电路的滤波作用差于并联电路。

4. 应用多倍压整流，在较低的交流电压条件下，可望获得很高的直流电压，以避免使用变压比很高的升压变压器，使用条件是负载电流小，否则，输出电压将显著下降。

小功率整流变压器

由于供电电网的交流电压有一定的额定值(220 伏或 380 伏),要获得高低不同的直流电压,电路输入端需要用升压或降压变压器与交流电网联接。采用了整流变压器,还可以使整流电路输出端的负载与交流网络互相隔离。因此,在供应电直流功率的电源中,整流变压器常常是必备的。

6-1 变压器的工作原理

变压器是一种电磁能量转换装置。它是利用交流励磁磁路的性能来工作的。最简单的变压器,是在一闭合的铁芯上绕两个线圈,如图 6-1 所示。线圈和铁芯互相绝缘。交流电源输入的那个线圈叫初级线圈(原边线圈),接负载的那个线圈叫次级线圈(副边线圈)。

交变的电源电压 U_1 加在初级线圈上,产生了交变的电流,从而在铁芯中产生了交变的磁通。由于磁通是交变的,于是在次级线圈中感应出电压 U_2 。输入线圈和输出线圈之间既然没有电的联接,利用变压器却能使初级电路与次级电路隔离,而又允许它们之间交换能量。因为只有交变的电流才能变换,所以输入的直流分量便不会反映到输出电路中去。通过改变两个线圈的圈数比,就能使电压“升高”或“降低”,也可以用来增大或减小电流。如果初级为 N_1 圈,次级为 N_2 圈,

则存在以下的关系:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6-1)$$

上式表示初级电压 U_1 与次级电压 U_2 之比, 等于初级线圈圈数与次级线圈圈数之比, 这就是说电压与圈数成正比. 变压器初级电流 I_1 与次级电流 I_2 之比与初级圈数与次级圈数之比有以下关系:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (6-2)$$

这说明电流与圈数成反比.

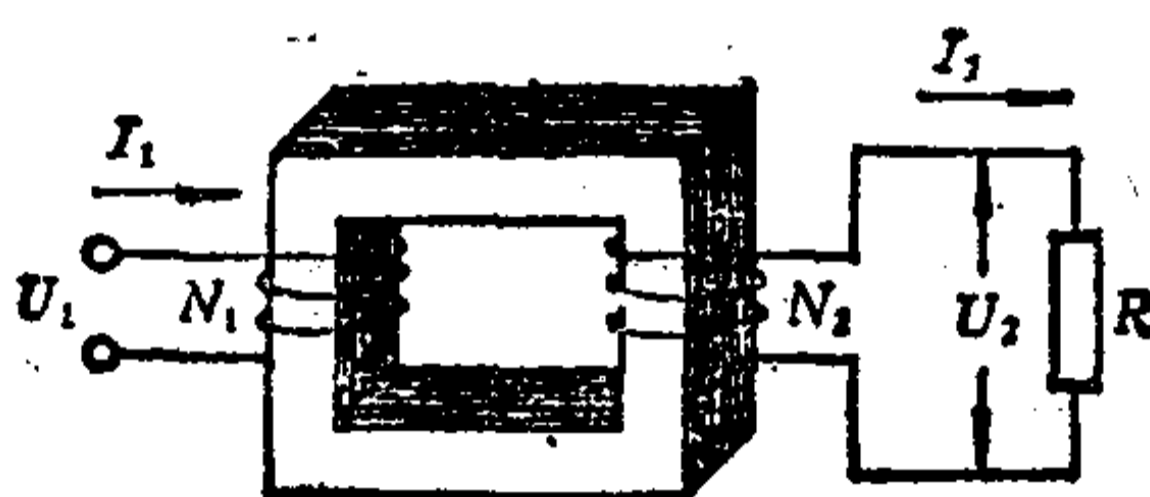


图 6-1

变压器的结构形式可分为芯式和壳式两种, 它们的截面积算法如图 6-2 和图 6-3 所示. 芯式变压器初级线圈与次级线圈绕在两柱上, 常用在高压变压器上, 如静电喷漆的整流变压器. 壳式变压器是最常用的, 它的优点是线圈绕在中心柱上, 不易碰伤线圈, 且容易散热.

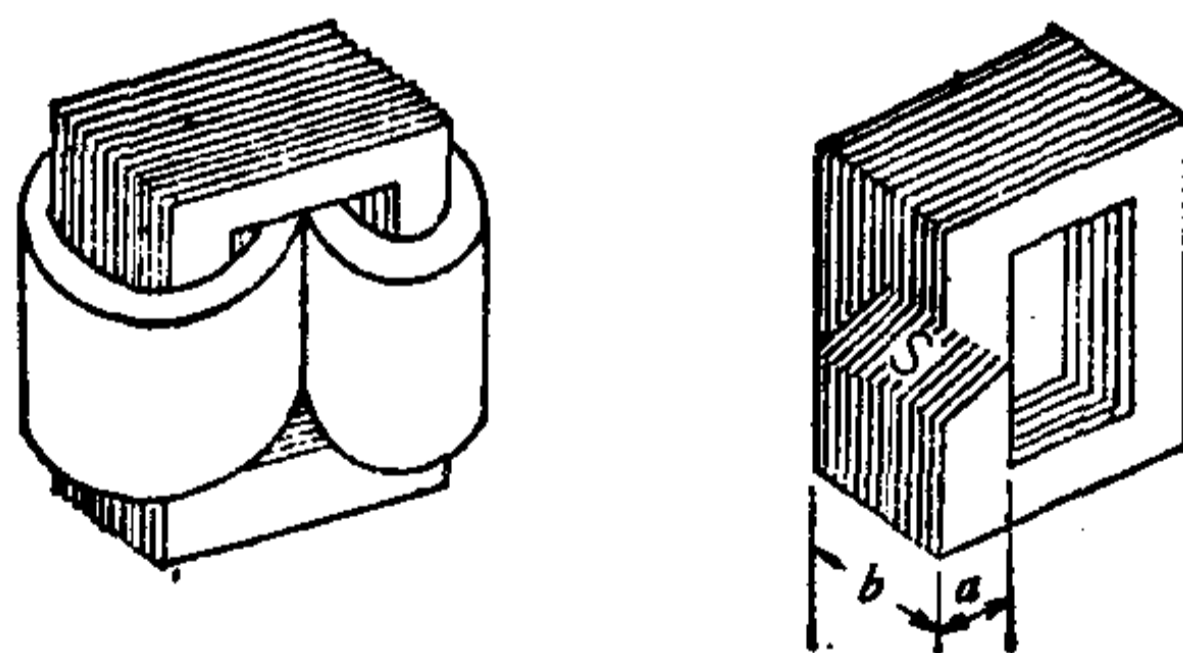


图 6-2

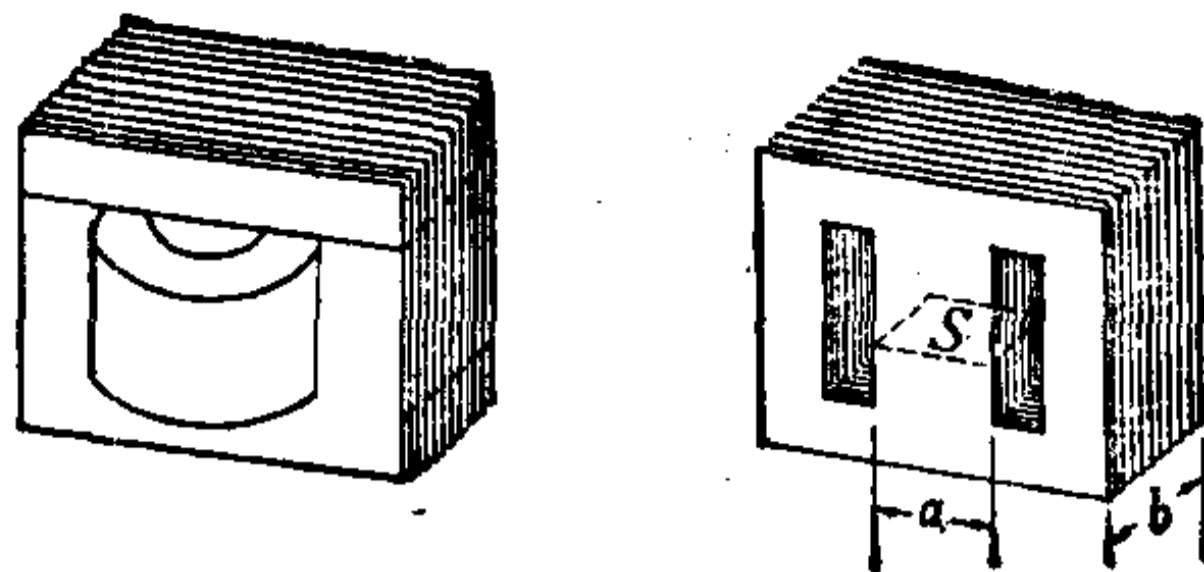


图 6-3

变压器的质量跟所用的硅钢片的质量有很大关系。硅钢片质量的好坏,通常用磁通密度 B 来表示,单位是高斯。好的硅钢片, B 可达 10000 高斯以上,看上去晶粒多,片子薄,且质脆,断面曲折;差的硅钢片, B 只有 6000 高斯,看上去带深黑色的,片子也厚,韧性,断面平直。表 6-1 列出我国常用两种

表 6-1 标准铁芯

硅钢片 型号	铁 芯 尺 寸 (毫米)										窗口 面积 (厘米 ²)
	<i>L</i>	<i>H</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>e</i>	标准化叠厚 <i>b</i>				
GEI-10	36	31	18	6.5	10	6.5	12.5	15	17.5	20	1.17
GEI-12	44	38	22	8	12	8	15	18	21	24	1.76
GEI-14	50	43	25	9	14	9	18	21	24	28	2.25
GEI-16	56	48	28	10	16	10	20	24	28	32	2.8
GEI-19	67	57.5	33.5	12	19	12	24	28	32	38	4.02
GEI-22	78	67	39	14	22	14	28	33	38	44	5.46
GEI-26	94	81	47	17	26	17	33	39	45	52	7.99
GEI-30	106	91	53	19	30	19	38	45	56	60	10.07
GEI-35	123	105.5	61.5	22	35	22	44	52	60	70	13.52
GEI-40	144	124	72	26	40	26	50	60	70	80	18.7
KEI-10	40	35	25	10	10	5	8	10	12	16 20 25	2.5
KEI-12	48	42	30	12	12	6	10	12	16	20 25 32	3.6
KEI-16	64	56	40	16	16	8	12	16	20	25 32 40	6.4
KEI-20	80	70	50	20	20	10	16	20	25	32 40 50	10
KEI-25	100	87.5	62.5	25	25	12.5	20	25	32	40 50 63	15.62
KEI-32	128	112	80	32	32	16	25	32	40	50 63 80	25.6
KEI-40	160	140	100	40	40	20	32	40	50	63 80 100	40

标准铁芯。GEI 型为小窗口（俗称小开档），KEI 型为大窗口（大开档）；GEI 型的特点是用铜少用铁多、价廉、但体积大，KEI 型正好相反。

6-2 整流变压器的设计步骤

整流变压器与一般电力变压器的差别在于：整流变压器的次级线圈常有直流电流流过，初级线圈也常有非正弦电流流过，这样就会使变压器的效率下降，所以在确定变压器功率时，必须在它的直流输出功率上再加上一定的余量，如果直流输出功率记为 P_L （ P_L 等于负载上直流电压与直流电流的乘积），变压器的功率记为 P_B ，则

$$P_B = K_B P_L \quad (6-3)$$

式中 K_B 是考虑功率余量的一个系数，它的大小与所用的整流线路的型式有关，也与负载的性质有关，现把常用的整流线路的 K_B 值列于表 6-2 中。

同时由前分析可知，整流出来的直流电压和电流与变压器次级所供给的交流电压和电流的数值是不一样的，但它们之间存在着一定的关系，如单相桥式整流电路中，直流电压 $U_L = 0.9 E_2$ 。在计算一只整流变压器时，总是先知道直流输出电压，由直流电压 U_L 再来求交流电压 E_2 ，那么我们可以用一个公式来表示：

$$E_2 = K_{2U} U_L \quad (6-4)$$

式中 K_{2U} 是直流电压与交流电压之间关系的一个系数，不同的电路，它有不同的值，我们也把它列于表 6-2 中。

同理，整流变压器次级线圈的电流等于直流输出电流乘上一个系数 K_{2I} 。

$$I_2 = K_{2I} I_L \quad (6-5)$$

表 6-2

系 数	负载性质	单相半波	单相全波	单相桥式	三相桥式
K_B	电 阻 性	3.09	1.48	1.23	1.05
	电 感 性	1.34	1.34	1.11	1.05
$K_{\Sigma U}$	电 阻 性	2.22	1.11	1.11	0.43
	电 感 性	2.22	1.11	1.11	0.43
$K_{\Sigma I}$	电 阻 性	1.57	0.79	1.11	0.82
	电 感 性	0.71	0.71	1	0.82

设计一个小型电源变压器，需根据负载要求的电压和电流，对变压器的主要参数进行计算。要精确计算一只变压器是比较复杂的，为了避免许多繁复的计算，下面我们就介绍一种简便方法。此法适合计算 1000 伏安以下的小型变压器(频率 50 周/秒)。虽然这种方法是近似的，但用这种方法已能满足一般需要。

要绕制一只普通的电源变压器，可通过以下四个步骤来进行：

第一步：先由变压器的功率 P 来确定铁芯截面积 S 的大小

$$S = 1.25 \sqrt{P} \quad (6-6)$$

其中 P 的单位为伏安， S 的单位为平方厘米。

式中的系数是根据硅钢片的好坏或者功率的大小而定的。上式中系数 1.25 是对一般质量的硅钢片而言的，即饱和磁通密度 B 在 10000 高斯范围内， B 为 10000 高斯以上的好的硅钢片，系数可取小些，差的铁片($B = 6000$ 高斯)，系数可取 2。或者根据功率大小而定，一般 50 伏安以下，系数取 1.5—2，500 伏安以下系数取 1.25，1000 伏安以下系数取 1—1.25。

第二步：截面积 S 求出后，再求每伏圈数 N_0 。

$$N_0 = \frac{4.5 \times 10^5}{B \times S} \quad (6-7)$$

式中 B 的单位是高斯。

第三步：由导线所流过电流的大小，查表 6-3，选用相应直径的漆包线。也可用下列公式来计算导线的直径 d

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{J}} \quad (6-8)$$

式中， d 的单位是毫米； I 为导线上流过电流大小，单位为安； J 为电流密度。它取的数值与变压器使用条件、功率大小有关。一般 100 伏安以下连续使用的变压器取 2.5 安/平方毫米，100 伏安以上取 2 安/平方毫米，高压油浸式变压器可取 4—5 安/平方毫米。

在选用漆包线线径大小时，也跟使用条件有关，长时间使用和散热条件差的，线径要选得大些，反之，短时间使用和散热条件好的，线径可选得小些，在表 6-3 中所列的是指通常条件下使用时的数据。长时间使用的，线径可增加 10% 左右，短时间使用的可减少 10% 左右。不过在铁芯窗口容纳得下的情况下，线可适当用得粗一点。

第四步：核算铁芯窗口是否能容纳所有绕组。核算时，要知道层间和组间的绝缘层厚度，带绝缘的导线的直径等。

一般层间绝缘用皮牛纸，其厚度约 0.05 毫米厚，如线径较粗的绕组，层间也可用 0.12 毫米厚的青壳纸或较厚的牛皮纸，如线径较细则可用白玻璃纸，其厚度约在 0.015—0.02 毫米，在电压不超过 500 伏时，绕组间可用 2—3 层牛皮纸或 0.12 毫米青壳纸，在电压更高时，可采用黄蜡布、聚脂薄膜、青壳薄膜等等绝缘性能更好的材料。带绝缘的导线的直径可查线规表。

表 6-3 标准线 规

铜线 ϕ (mm)	近似 SWG 线号	截面积 mm^2	20℃时 电阻 Ω/KM	Q 油性漆包线				QZ-2 高强度漆包线					载流量 (电流密度 $2.5\text{A}/\text{mm}^2$)
				外径 mm	每厘米 圈数	无纸 T/cm^2	加纸 T/cm^2	外径 mm	每厘米 圈数	无纸 T/cm^2	加纸 T/cm^2	每千米 重 kg	
0.05	47	0.001963	8949	0.065	153.8	23400		0.065	154	23700		0.022	0.005
0.06	46	0.002827	6198	0.075	133.3	18000	12000	0.09	112	12520	7350	0.029	0.007
0.07	45	0.003848	4556	0.085	117.6	13600	8100	0.10	100	10000	6400	0.039	0.010
0.08	44	0.005027	3487	0.095	105.3	11100	7300	0.11	90.9	8240	5330	0.05	0.013
0.09	43	0.006362	2758	0.105	95.2	9050	5700	0.12	83.4	6960	4570	0.063	0.016
0.10	42	0.007854	2237	0.12	83.3	6940	4550	0.13	77.9	6060	4350	0.076	0.020
0.11	41	0.009498	1846	0.13	76.9	5980	3900	0.14	71.4	5100	3400	0.092	0.024
0.12	40	0.01131	1551	0.14	71.4	5080	3750	0.15	66.6	4430	2980	0.108	0.030
0.13	39	0.01327	1322	0.15	66.7	4430	3200	0.16	62.5	3910	2410	0.126	0.033
0.14		0.01539	1139	0.16	62.5	3920	3000	0.17	58.6	3430	2080	0.145	0.039
0.15	38	0.01769	993	0.17	58.8	3470	2600	0.19	52.6	2762	1660	0.167	0.044
0.16		0.02011	872	0.18	55.6	3090	2320	0.20	50.0	2500	1550	0.189	0.050
0.17	37	0.02270	773	0.19	52.6	2780	2100	0.21	47.7	2278	1480	0.213	0.057
0.18		0.02545	689	0.20	50.0	2500	1920	0.22	46.4	2151	1350	0.237	0.064
0.19	36	0.02835	618	0.21	47.6	2270	1740	0.23	43.5	1892	1200	0.264	0.071
0.20		0.03142	558	0.225	44.4	1980	1530	0.24	41.7	1740	1100	0.292	0.079
0.21	35	0.03464	506	0.235	42.6	1810	1420	0.25	40.0	1600	1060	0.321	0.087
0.23	34	0.04155	422	0.255	39.2	1549	960	0.28	35.7	1275	840	0.386	0.105
0.25	33	0.04909	357	0.275	36.4	1325	825	0.30	33.3	1170	690	0.454	0.122
0.27	32	0.05726	306	0.31	32.3	1000	690	0.32	31.3	980	590	0.529	0.143

0.29	31	0.06605	265	0.33	30.3	910	585	0.34	29.4	864	530	0.608	0.165
0.31	30	0.07548	232	0.35	28.6	815	530	0.36	27.8	773	490	0.693	0.187
0.33		0.08553	205	0.37	27.0	730	465	0.38	26.2	750	475	0.784	0.212
0.35	29	0.09621	182	0.39	25.6	657	430	0.41	24.4	592	390	0.884	0.242
0.38	28	0.1134	155	0.42	23.8	570	370	0.44	22.7	515	345	1.04	0.284
0.41	27	0.1320	133	0.45	22.2	496	328	0.47	21.3	454	305	1.21	0.325
0.44		0.1521	115	0.49	20.4	420	286	0.50	20.0	400	270	1.39	0.375
0.47	26	0.1735	101	0.52	19.2	369	250	0.53	18.9	357	242	1.58	0.433
0.49		0.1886	93.0	0.54	18.5	350	237	0.55	18.2	331	230	1.72	0.47
0.51	25	0.2043	85.9	0.56	17.7	320	220	0.58	17.2	296	201	1.87	0.50
0.53		0.2206	79.5	0.58	17.2	295	205	0.60	16.7	279	186	2.02	0.55
0.55	24	0.2376	73.7	0.60	16.7	280	194	0.62	16.1	259	172	2.17	0.60
0.57		0.2552	68.7	0.62	16.1	263	183	0.64	15.6	244	164	2.34	0.637
0.59		0.2734	64.1	0.64	15.6	244	170	0.66	15.2	231	156	2.5	0.682
0.62	23	0.3019	58.0	0.67	14.9	225	156	0.69	14.5	210	140	2.76	0.753
0.64		0.3217	54.5	0.69	14.5	211	142	0.72	13.9	193	134	2.94	0.80
0.67		0.3526	49.7	0.72	13.9	194	132	0.75	13.3	177	120	3.21	0.883
0.69		0.3739	46.9	0.74	13.5	182	123	0.77	13.0	169	117	3.41	0.935
0.72	22	0.4072	43.0	0.78	12.8	164	108	0.80	12.5	156		3.70	1.05
0.80	21	0.5027	34.8	0.86	11.6	134	92	0.89	11.2	125.5		4.58	1.26
0.90	20	0.6362	27.5	0.96	10.4	110	76	0.99	10.1	102		5.78	1.59
1.04	19	0.8495	20.6	1.12	8.9	80	60	1.15	8.7	75.6		7.72	2.12
1.20	18	1.131	15.5	1.28	7.8	61	45	1.31	7.64	58.4		10.4	2.90
1.40	17	1.539	11.3	1.48	6.8			1.51	6.61	43.7		14.0	3.85
1.62	16	2.061	8.50	1.71	5.8			1.73	5.78	33.4		18.6	5.14

注：加纸厚度如层间绝缘导线 $\phi 0.06$ — $\phi 0.14$ 用纸厚 0.025 毫米， $\phi 0.15$ — $\phi 0.25$ 用纸厚 0.05 毫米， $\phi 0.27$ — $\phi 0.69$ 用纸厚 0.1 毫米。

绕制线圈的框架长度等于铁芯的窗口高度，因为在线圈框架两端约有 5% 不绕线，所以框架的有效长度是铁芯窗口高度的 0.9 倍。

根据框架的有效长度及每个线圈所用导线直径，线圈匝数及绝缘衬纸厚度，就可求出每个线圈厚度，再计算总的厚度，它必须小于铁芯窗口宽度。

表 6-4 列出了有关壳式变压器计算的经验数据，供读者参考。

6-3 整流变压器的计算举例

以下我们就举例说明整流变压器的计算。

【例 6-1】 在技术革新中要搞一个晶体管压力控制的开关线路，需绕制一只变压器，要求直流 15 伏、20 毫安的一档，供晶体管带动高灵敏继电器；交流 36 伏、0.14 安的一档，供 522 中间继电器；交流 6.3 伏、0.3 安的一档，供指示灯用。现采用桥式整流电路，电源电压为 380 伏，问具体数据是多少？

第一步：先把直流的一档也化为交流

$$E_2 = 15 \times 1.11 = 16.7 \text{ 伏}$$

$$I_2 = 0.02 \times 1 = 0.02 \text{ 安}$$

$$P_B = K_B \cdot P_L = 1.11 \times 0.02 \times 15 = 0.34 \text{ 伏安}$$

所以次级总功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= 0.34 + 36 \times 0.14 + 6.3 \times 0.3 \\ &= 0.34 + 5.04 + 1.89 \\ &= 7.3 \text{ 伏安} \end{aligned}$$

考虑到变压器的损耗，初级功率 $P_1 = \frac{P_2}{\eta}$ ，其中 η 为变压器的

效率，这里取 0.8。所以

表 6-4

输出 定额	铁 芯 截 面 积	每伏圈数		片数近似值		硅钢片型号	硅钢片 中间舌 宽	迭片 厚度
单 位 (伏 安)	单 位 (平 方 厘 米)	N ₀ (圈/伏)		硅钢片厚度 (毫米)			a (毫米)	b (毫米)
		10000 高斯	8000高斯	0.35	0.5			
1	1.25	36	45	33	24	GEI-10	10	12.5
1.5	1.5	30	37.5	42	30	GEI-10	10	15
1.8	1.75	25.7	32.2	44	32	GEI-10	10	17.5
2	1.8	25	31.2	39	28	GEI-12	12	15
3	2.16	20.8	26	47	34	GEI-12	12	18
4	2.52	17.8	22.3	55	40	GEI-12	12	21
5	2.8	16	20.1	52	38	GEI-14	14	20
6	3.2	14	17.6	52	38	GEIB-16	16	20
8	3.68	12.2	15.3	60	43	GEIB-16	16	23
10	3.95	11.1	14	73	53	GEIB-16	16	28
12	4.38	10.3	12.8	60	43	GEIB-19	19	23
16	5.13	8.8	11	70	51	GEIB-19	19	28
20	5.9	7.6	9.5	81	58	GEIB-19	19	31
25	6.65	6.8	8.5	91	66	GEIB-19	19	35
33	7.2	6.2	7.8	99	71	GEIB-19	19	38
38	7.7	5.9	7.3	91	66	GEIB-22	22	35
45	8.6	5.2	6.5	102	73	GEIB-22	22	39
50	9	5	6.2	107	77	GEIB-22	22	41
55	9.36	4.8	6	94	68	GEIB-26	26	36
60	9.9	4.6	5.7	99	72	GEIB-26	26	38
76	10.9	4.1	5.2	109	79	GEIB-26	26	42
90	12	3.8	4.7	104	75	GEIB-30	30	40
100	12.6	3.6	4.5	109	79	GEIB-30	30	42
120	13.8	3.3	4.1	120	87	GEIB-30	30	46
140	15	3	3.8	112	81	GEIB-35	35	43
160	16.1	2.8	3.5	119	87	GEIB-35	35	46
185	17.2	2.6	3.3	127	92	GEIB-35	35	49
200	17.9	2.5	3.1	132	96	GEIB-35	35	51
230	19.2	2.3	2.9	125	90	GEIB-40	40	48

续表 6-4

输出 定额	铁芯截 面积	每伏圈数		片数近似值		硅钢片型号	硅钢片 中间舌 宽	迭片 厚度
单位 (伏安)	单位 (平方 厘米)	No.(圈/伏)		硅钢片厚度 (毫米)			a (毫米)	b (毫米)
		10000 高斯	8000高斯	0.35	0.5			
250	19.8	2.3	2.8	130	94	GEIB-40	40	50
280	21	2.1	2.7	138	100	GEIB-40	40	53
320	22.4	2.2	2.7	146	105	GEIB-40	40	56
420	25.6	1.8	2.2	166	120	GEIB-40	40	64
450	27	1.7	2.1	156	113	GEIB-45	45	60
518	28.4	1.6	2	164	119	GEIB-45	45	63
575	30	1.5	1.9	174	126	GEIB-45	45	67
600	31	1.5	1.8	162	117	GEIB-50	50	62
700	33	1.4	1.7	172	125	GEIB-50	50	66
781	35	1.3	1.6	182	132	GEIB-50	50	70
1020	40	1.1	1.4	208	151	GEIB-50	50	80
0.9	1.2		46.9	32	22	KEI-10	10	12
1.6	1.6		35.2	42	29.0	KEI-10	10	16
2.6	2.0		28.2	52.0	37	KEI-10	10	20
3.7	2.4		23.4	52.0	37	KEI-12	12	20
5.7	3		18.8	65	46	KEI-12	12	25
6.6	3.2		17.6	52.0	37	KEI-16	16	20
10.2	4		14.1	65	46	KEI-16	16	25
16.8	5.12		11	83.0	59	KEI-16	16	32
26.1	6.4		8.8	83.0	59	KEIB-20	20	32
40.0	8		7	104.0	73	KEIB-20	20	40
41.0	8		7	83.0	59	KEIB-25	25	32
64.0	10		5.6	104.0	73	KEIB-25	25	40
100.0	12.5		4.5	130.0	91.0	KEIB-25	25	50
104	12.8		4.4	104.0	73	KEIB-32	32	40
164	16		3.5	130.0	91.0	KEIB-32	32	50
260	20.19		2.8	164.0	115	KEIB-32	32	63
406	25.20		2.2	164.0	115	KEIB-40	40	63
655	32		1.8	208.0	146	KEIB-40	40	80

$$P_1 = \frac{7.3}{0.8} = 9.12 \text{ 伏安}$$

所需铁芯的截面积为:

$$S = 1.5 \sqrt{9.12} = 4.53 \text{ 平方厘米}$$

现采用厂里现成的铁芯, 截面为 $2.2 \times 2.2 = 4.84 > 4.53$.

第二步: 求每伏圈数

$$N_0 = \frac{4.5 \times 10^5}{9000 \times 4.84} = 10.5 \text{ 圈/伏 (} B = 9000 \text{ 高斯)}$$

即每伏需绕 10 圈半.

初级: $380 \text{ 伏} \times 10.5 \text{ 圈/伏} = 3990 \text{ 圈}$

次级: $16.7 \times 10.5 \times 1.05 = 184 \text{ 圈}$

$$36 \times 10.5 \times 1.05 = 396 \text{ 圈}$$

$$6.3 \times 10.5 \times 1.05 = 69 \text{ 圈}$$

第三步: 由电流求线径

初级电流为 $\frac{9.12}{380} = 0.024 \text{ 安}$, 查表知, 须用线径为 0.11

毫米的漆包线, 但考虑到绕制的方便(太细, 强度不足), 采用线径为 0.15 毫米的漆包线. 为了提高绝缘性能, 采用 QZ-2 高强度漆包线.

次级 15 伏直流一档同样采用 $\phi 0.15$ 高强度漆包线, 考虑到铁芯窗口较大, 36 伏和 6.3 伏都用 $\phi 0.41$ 高强度漆包线绕制. 总结一下, 采用现成的 2.2×2.2 铁芯, 初级 380 伏一档用 $\phi 0.15$ 高强度漆包线绕 3990 圈; 次级 15 伏直流一档用 $\phi 0.15$ 高强度漆包线绕 184 圈, 36 伏一档用 $\phi 0.41$ 高强度漆包线绕 396 圈, 6.3 伏一档用 $\phi 0.41$ 高强度漆包线绕 69 圈 (注: 次级线圈中, 可采用抽头的绕法, 如 36 伏一档中绕到 69 圈处, 做一抽头, 供 6.3 伏指示灯用).

最后验算窗口面积是否合适:

380 伏一档用 $\phi 0.15$ 高强度漆包线, 查表 6-3, 每层加绝缘纸每平方厘米可绕 1660 圈, 这一档共绕 3990 圈, 应占面积为

$$3990 \text{ 圈} \div 1660 \text{ 圈/厘米}^2 = 2.45 \text{ 厘米}^2$$

同理

$$15 \text{ 伏一档} \quad 184 \text{ 圈} \div 1660 \text{ 圈/厘米}^2 = 0.111 \text{ 厘米}^2$$

$$36 \text{ 伏一档} \quad 396 \text{ 圈} \div 305 \text{ 圈/厘米}^2 = 1.3 \text{ 厘米}^2$$

$$6.3 \text{ 伏一档} \quad 69 \text{ 圈} \div 305 \text{ 圈/厘米}^2 = 0.226 \text{ 厘米}^2$$

共占面积

$$2.45 + 0.111 + 1.3 + 0.226 = 4.087 \text{ 厘米}^2$$

可选用窗口面积为 5.46 厘米^2 的 GE-22 铁芯 (硅钢片中心宽为 22 毫米), 多余面积由骨架和层间绝缘占用。

绕完初级线圈和衬好绝缘以后, 需加一层静电屏蔽, 以防干扰。屏蔽层可用宽度与线包相当的金属箔 (如铝箔、铜箔) 绕一层, 但注意金属箔头尾间不能相碰, 以免形成短路环。或者用细漆包线绕满一层。屏蔽层应有一根引出线接地。

绕制小功率变压器时, 也可不按上述方法计算, 而是根据导线的直径粗略估计。

下面举个例子来说明上述公式的运用。

【例 6-2】要绕制一只 36 伏安电源变压器, 初级 220 伏, 次级 110 伏, 求铁芯截面及圈数。

第一步: 由公式 (6-6), 求铁芯截面积 S

$$S = 1.25 \sqrt{36} = 7.5 \text{ 平方厘米}$$

第二步: 再由公式 (6-7), 求每伏圈数 N_0 ($B = 9000$ 高斯)

$$N_0 = \frac{4.5 \times 10^5}{9000 \times 7.5} = 6.7 \text{ 圈/伏}$$

初级 220 伏的圈数 $N_1 = 220 \times 6.7 = 1474$ 圈。

在计算次级圈数时，要考虑到变压器的漏感及线圈的铜阻，故须加 5% 的余量，即计算次级圈数时要乘上 1.05。

次级 110 伏的圈数 $N_2 = 110 \times 6.7 \times 1.05 = 774$ 圈。

第三步：由电流求线径

初级电流 $I_1 = \frac{36}{220} = 0.164$ 安培，查表知，须用线径为

0.29 毫米的漆包线。

次级电流 $I_2 = \frac{36}{110} = 0.327$ 安培，查表知，须用线径为

0.44 毫米的漆包线。

把以上计算的结果整理一下：所需的铁芯截面积为 7.5 平方厘米，初级 220 伏的用 $\phi 0.29$ 漆包线绕 1474 圈，次级 110 伏的用 $\phi 0.44$ 漆包线绕 774 圈。

本章小结

1. 变压器是一种电磁能量转换装置。在整流电源中，采用整流变压器，可以按整流电路的需要，将电网电压升压与降压，并使负载与电网隔离。

2. 变压器使次级电压“升高”或“降低”，次级电流“增大”或“减小”，是通过改变初级绕组和次级绕组两个线圈的圈数比来实现的。如果初次级电压比值为初级圈数 N_1 与次级圈数 N_2 之比，即

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

则初级电流与次级电流之比与圈数比的关系为

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

可控硅简介

可控硅是硅可控整流元件的简称。从前面的介绍知道，硅整流元件因为具有单向导电性，可构成各式各样的整流电路，当供给整流电路的交流电压一定时，就有相应的固定直流电压输出。可控硅与硅整流元件比较起来，就是多了“可控”这一性质。这样一来，在以往介绍过的整流电路中，如果把硅整流元件换成可控硅，当供给整流电路的交流电压一定时，就能均匀调节输出电压，这叫可控整流，正因为可控硅具有这个可控特点，加上它和硅整流元件一样具有体积小、重量轻、寿命长、效率高、耐震、防潮等一系列优点，正获得广泛的应用。

7-1 可控硅整流元件工作情况

由图 7-1 可见，可控硅是一个四层、三端器件，通常用符

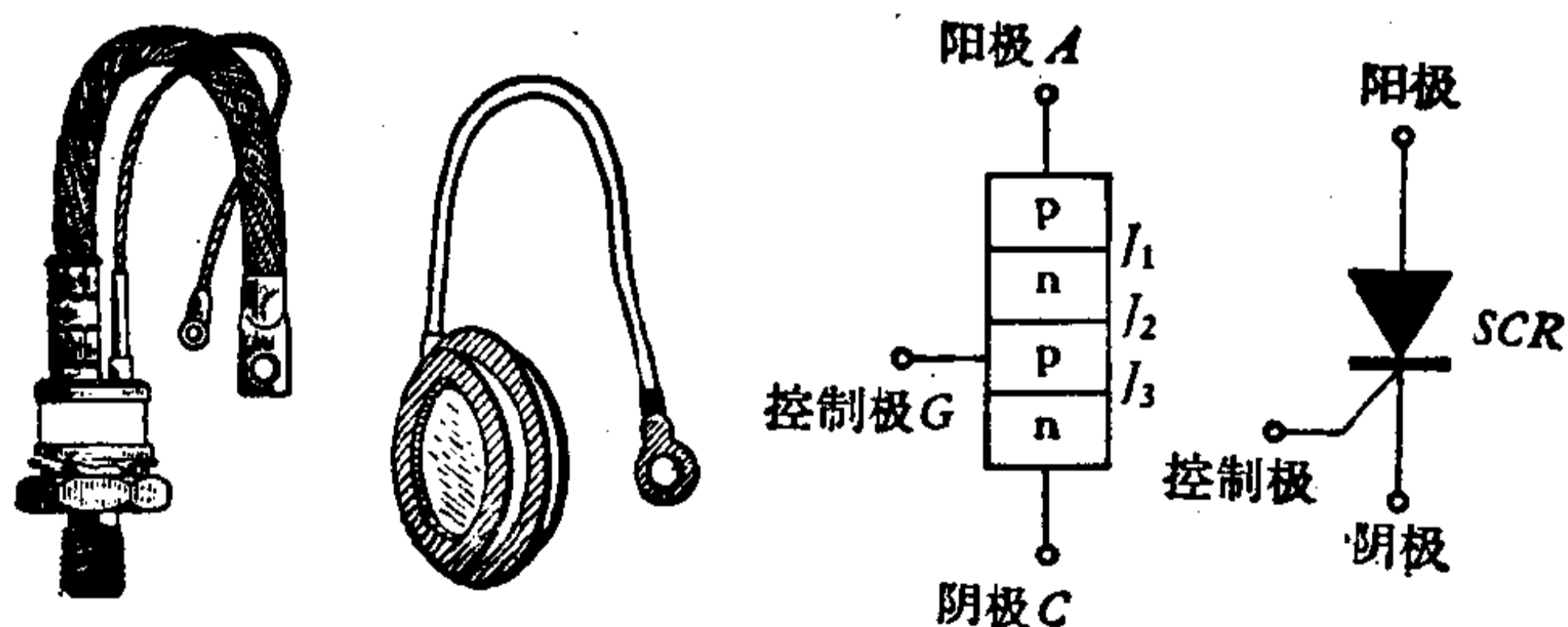


图 7-1

号 SCR 表示,其内部有三个 $p-n$ 结,用 J_1 、 J_2 和 J_3 表示. 可控硅到底是怎么工作的呢? 为了说明这个问题,先来看几个试验.

电路如图 7-2, 可控硅阳极接电源正极, 阴极接电源负极.

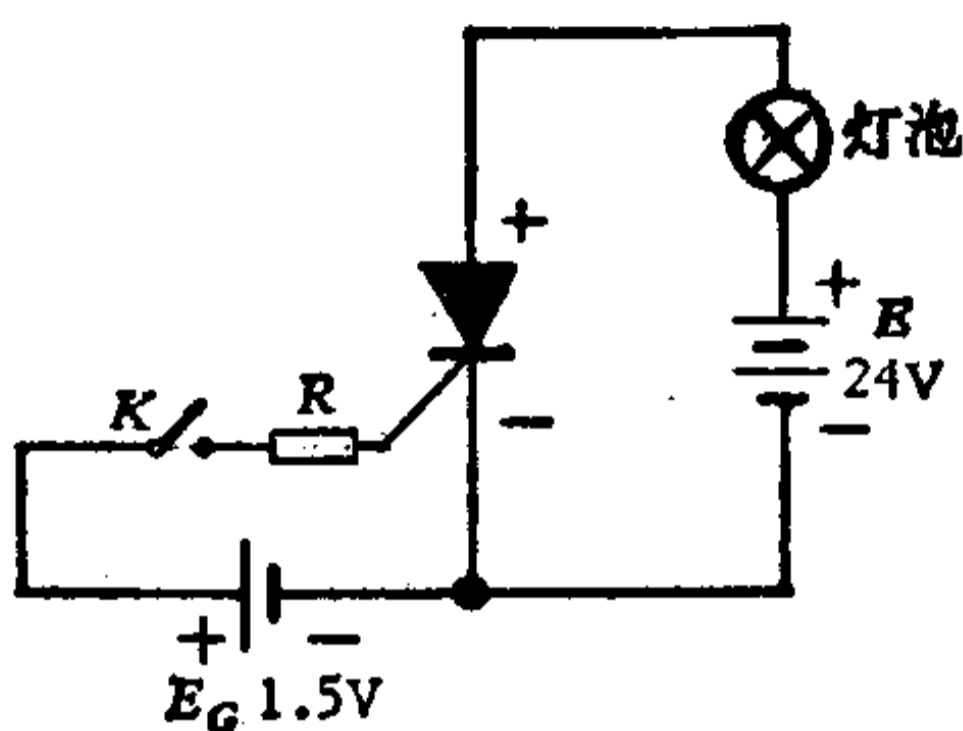


图 7-2

(1) 当开关 K 未合上时, 灯泡不亮, 表明可控硅不导通. 这一点与硅整流元件是不同的, 这就是说, 当控制极断开时, 可控硅正向是不通的, 即可控硅具有“正向阻断”的能力.

(2) 当开关 K 合上时, 往控制极里送进了适当的控制电流(通常叫触发), 灯泡就亮了, 这表示可控硅导通了. 此时和硅整流元件一样, 管压降只有一伏左右(阳极正、阴极负).

(3) 导通后, 如把开关 K 再拉开, 使得控制电流为零, 这时发现灯泡仍然亮, 换句话说, 可控硅一经触发导通以后, 就可以自己维持导通状态.

(4) 怎样使处于导通状态的可控硅关断呢? 从上述可知, 断开控制极是没有用的. 如果降低电源电压 E , 这时灯泡的亮度逐渐变暗, 当电流减小到一定值时, 灯泡突然熄灭, 这表明可控硅关断了. 这个最小电流值叫维持电流, 流过可控硅的电流小于维持电流, 可控硅就关断.

(5) 如果 E 仍保持为 24 伏, 但把 E_G 的极性反接, 这时

即使合上开关 K , 可控硅也不导通, 并且可控硅控制极与阴极间不允许加上过高的反向电压。

下面再看一种情况, 如果 E 仍保持为 24 伏, 但极性反接, 即可控硅两端加反向电压。 E_G 仍按图 7-2 接法, 控制极接正, 阴极接负, 这时, 即使合上开关 K , 可控硅也不导通, 这表明可控硅的反向特性与二极管一样, 具有反向阻断能力。

电路如图 7-3(1), 电源改用交流电源, 控制极与阴极之间加上触发信号, 这时情况又将如何呢? 其实这里发生的情况, 在前面的试验中都包括了, 不过这里是上述很多现象的综合表现罢了。

OA 段, 可控硅虽处于正向电压下, 但控制极未加触发信号, 故不导通。

到了 A , 控制极有触发信号加入, 阳极、阴极间又加有正向电压, 可控硅导通的两个条件都具备了, 于是可控硅这只“开关”就合上了, 这样, 电源电压几乎全部加到灯泡上。

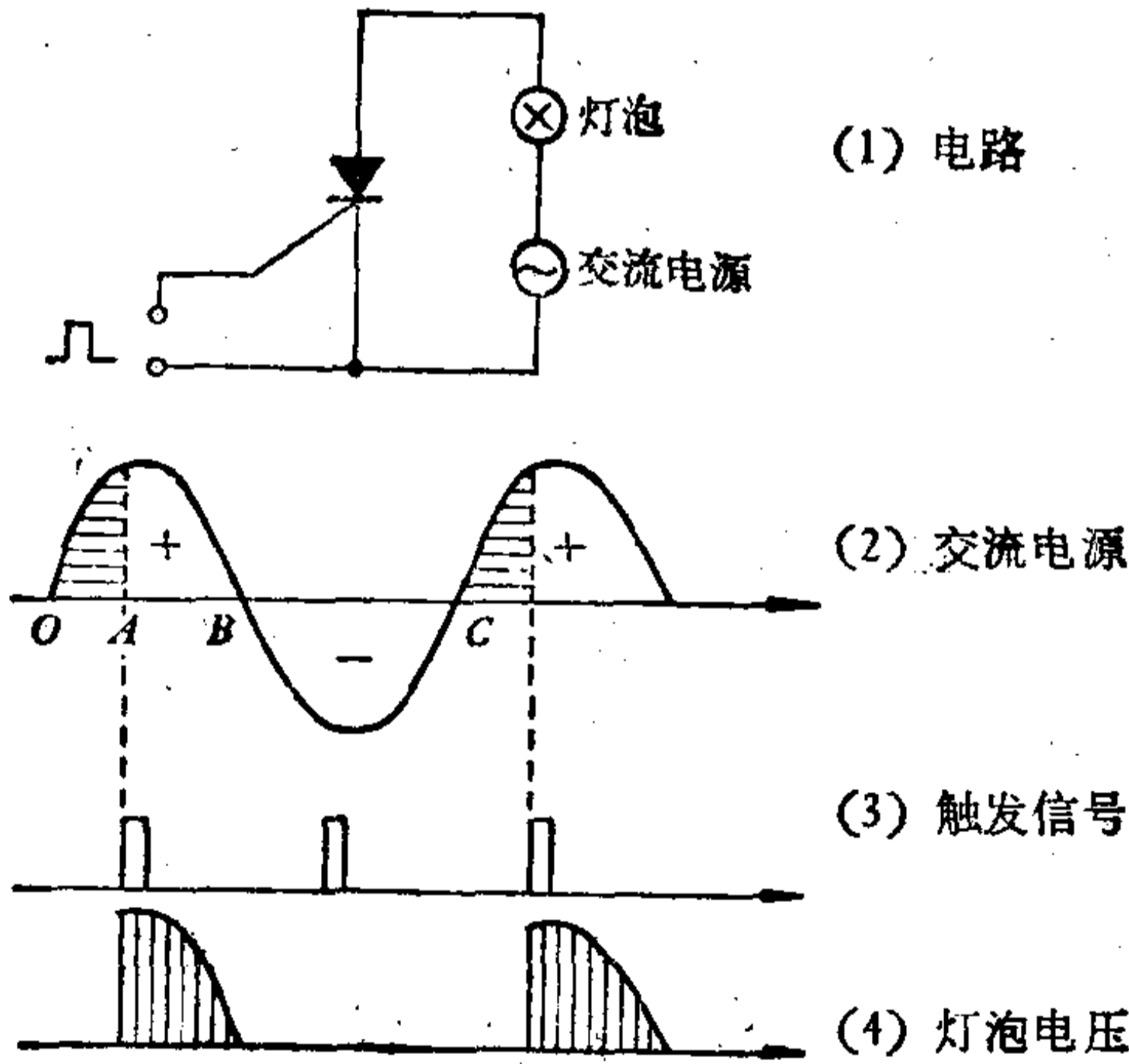


图 7-3

接近 B 时,电源电压很低,当流过可控硅的电流小于维持电流时,可控硅就关断了。

BC 段,可控硅处于反向电压作用下,虽有触发脉冲加入,但仍不导通。

如此重复,在灯泡上得到了图 7-3(4) 所示的电压波形。

综上所述,可见可控硅整流元件相当于一只无触点开关,它的特点为:

(1) 可控硅与硅二极管一样,具有反向阻断能力,但它与硅二极管不同,在控制极断开时,可控硅又具有正向阻断能力。

(2) 可控硅在阳极接正、阴极接负,同时往控制极里加入适当的正触发电流时就能导通。

(3) 可控硅触发导通以后,控制极就失去了作用,只有当阳极电流小于维持电流或加反向电压时才能关断。

7-2 可控硅整流元件应用举例

我国可控硅元件的型号定为 3CT。应用在一般电路中时,最主要的也是两个参数,一是额定正向平均电流,二是正向阻断峰值电压、反向阻断峰值电压。前者和硅整流元件的平均电流类似,超过以后,可能会烧坏管子。后者和硅整流元件的最大反向电压类似,超过以后,正向不能可靠地封锁,反向也容易造成击穿。

我国大、中功率可控硅整流元件的额定电流最常用的有 5 安、20 安、50 安、200 安、500 安、1000 安等几档,额定电压有 100 伏、200 伏……1500 伏等几档。可以根据电路中要求的电流和线路的最高电压来选择可控硅,其方法和选硅整流元件类似。

可控硅整流元件目前正在逐步取代大功率晶体管以及闸流管、水银整流器、磁放大器、电动机-发电机组等老设备，广泛地应用于可控整流、交流调压、无触点开关、逆变流等等设备中。可控硅应用电路分可控硅主电路和控制电路两大部分，下面举几个可控硅主电路的例子。

1. 可控整流电路

图 7-4 左面部分为单相桥式整流电路，后面加接一个可控硅，构成可控整流电路。图 7-5 为图 7-4 电路中各部分的波形图， U_{\sim} 经桥式整流后在 ab 两点可得到图 7-5(2) 所示的全波整流波形，由于可控硅具有正向封锁的能力，只有触发信号加入时，才能导通，而每当交流电压过零时，可控硅因流过电流小于维持电流而关断，故可得到图 7-5(5) 所示的负载电压波形。由图我们可以看到，当 α 角较小时，因为缺块较少，负载电阻两端直流电压平均值较高。当 α 角增大时，因为缺块较大，负载电阻两端直流电压平均值较低。联系到我们在单相桥式电路中学到的内容，可见，只要改变触发信号出现的迟早（即 α 角的大小），就能均匀连续地改变整流电压 U_L 了。当 $\alpha = 0$ 时，线路如同单相桥式硅整流电路一样 $U_L = 0.9E_2$ 。当 $\alpha = \pi$ 时，线路输出电压为零。也就是说，当 α 从 0 连续地变到 π 时， U_L 可以从 $0.9E_2$ 连续地变到零。

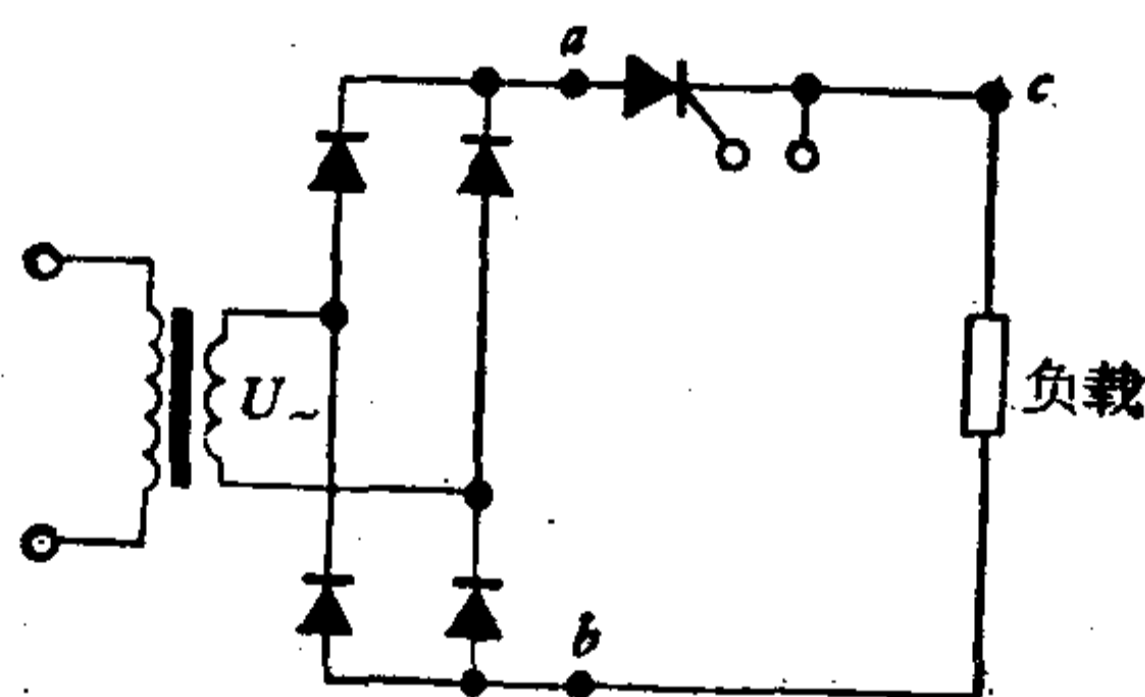
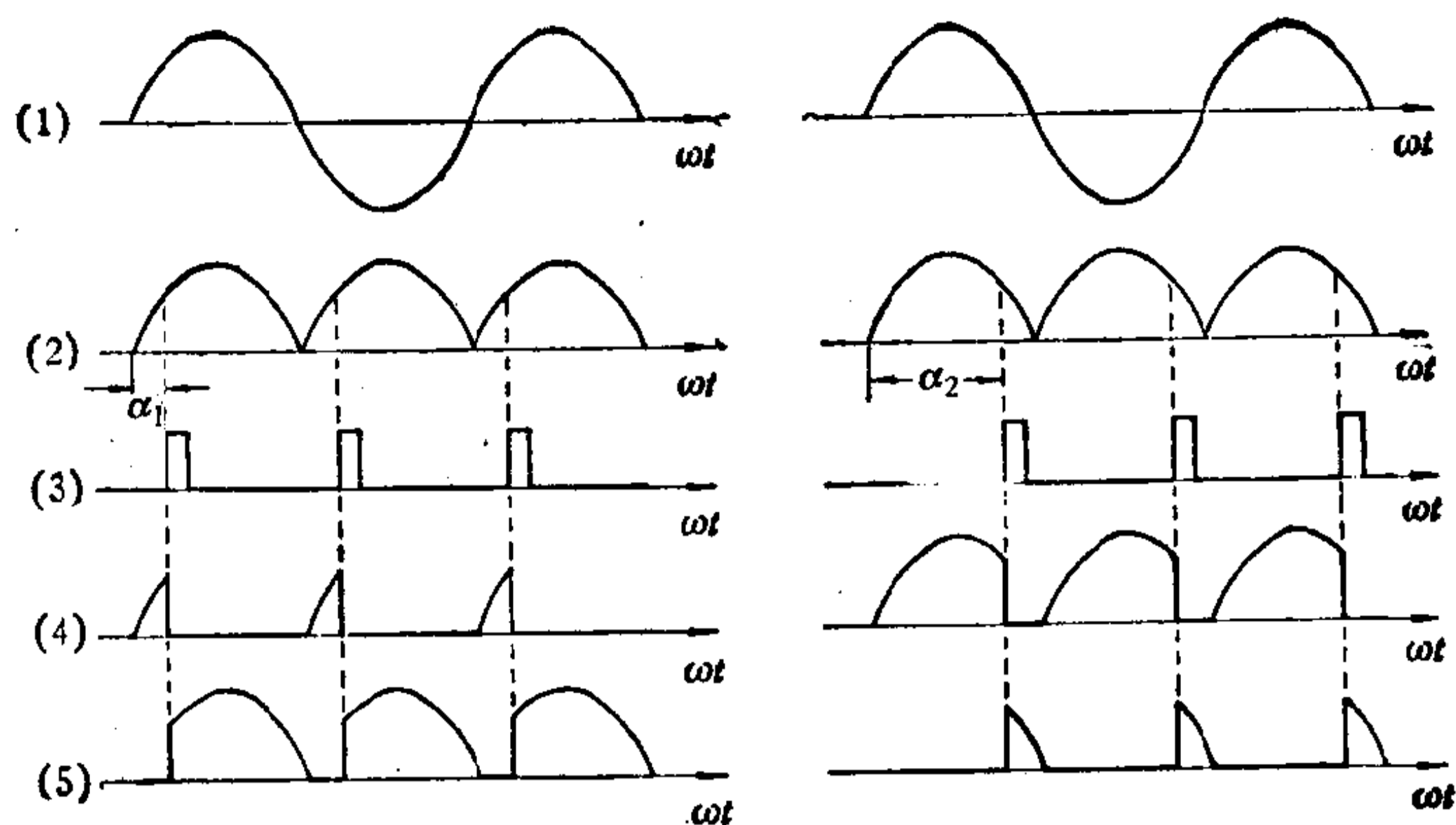


图 7-4



(1) 变压器次级电压波形 (2) ab 两点电压波形
 (3) 可控硅触发信号波形 (4) 可控硅两端电压波形
 (5) 负载电阻两端电压波形

图 7-5

这类可控整流电路广泛地应用于小型直流电动机无级调速系统和滑差电机无级调速系统中,不过,由于电机绕组是电感性负载,这使电压过零时电流不过零,可控硅难以关断,故在电机绕组两端必须并联一个续流二极管,而且直流输出端不可以接滤波电容。

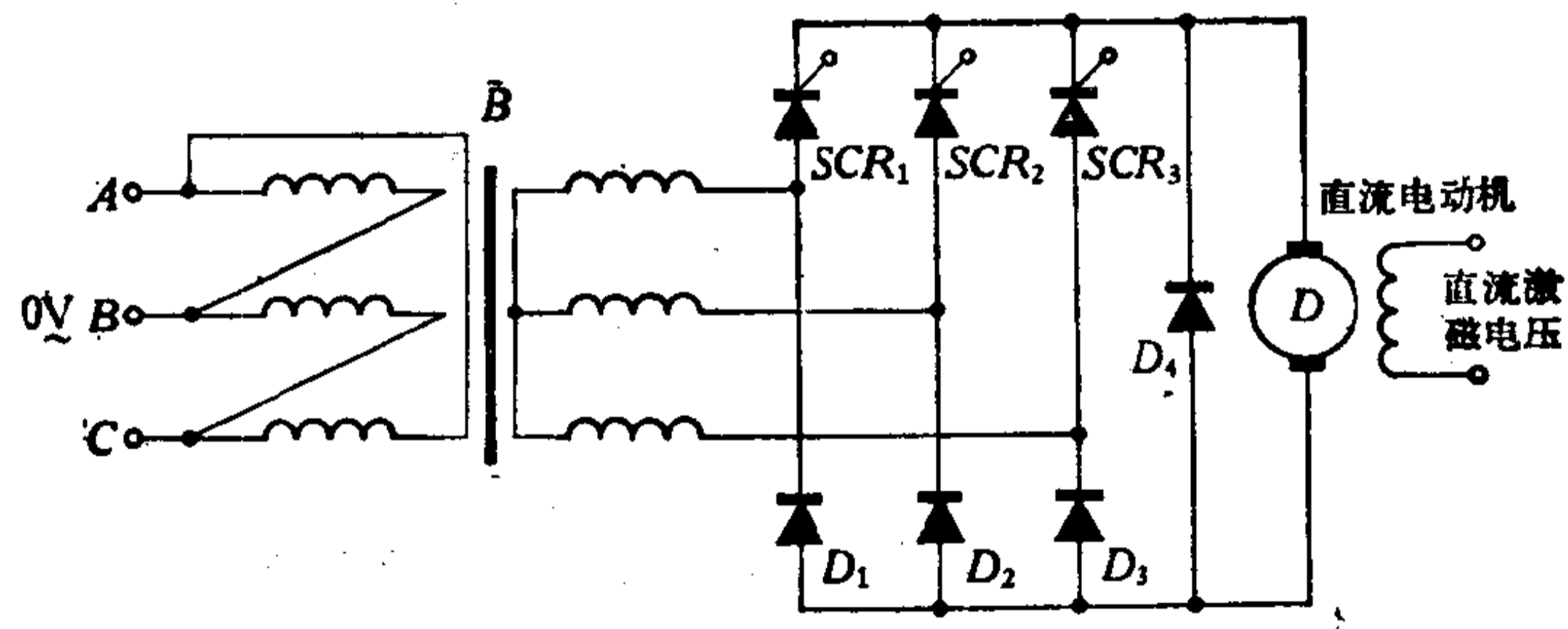


图 7-6

图 7-6 为三相半控桥式整流电路,它与三相桥式整流电

路的区别只在于一半桥臂上的三只硅二极管由可控硅取代了，因此叫“半控”。改变三只可控硅的触发脉冲出现的迟早（即图 4-5 中 α 角的大小，这叫触发脉冲的移相），即可改变每周内可控硅导通的时间，从而调节输出的直流电压平均值。图 7-6 的电路中，负载为直流电动机电枢绕组，当其端电压改变时，转速改变，因此三相半控桥式整流电路广泛用于功率较大的直流电机无级调速装置中，其中 D_4 为续流二极管。

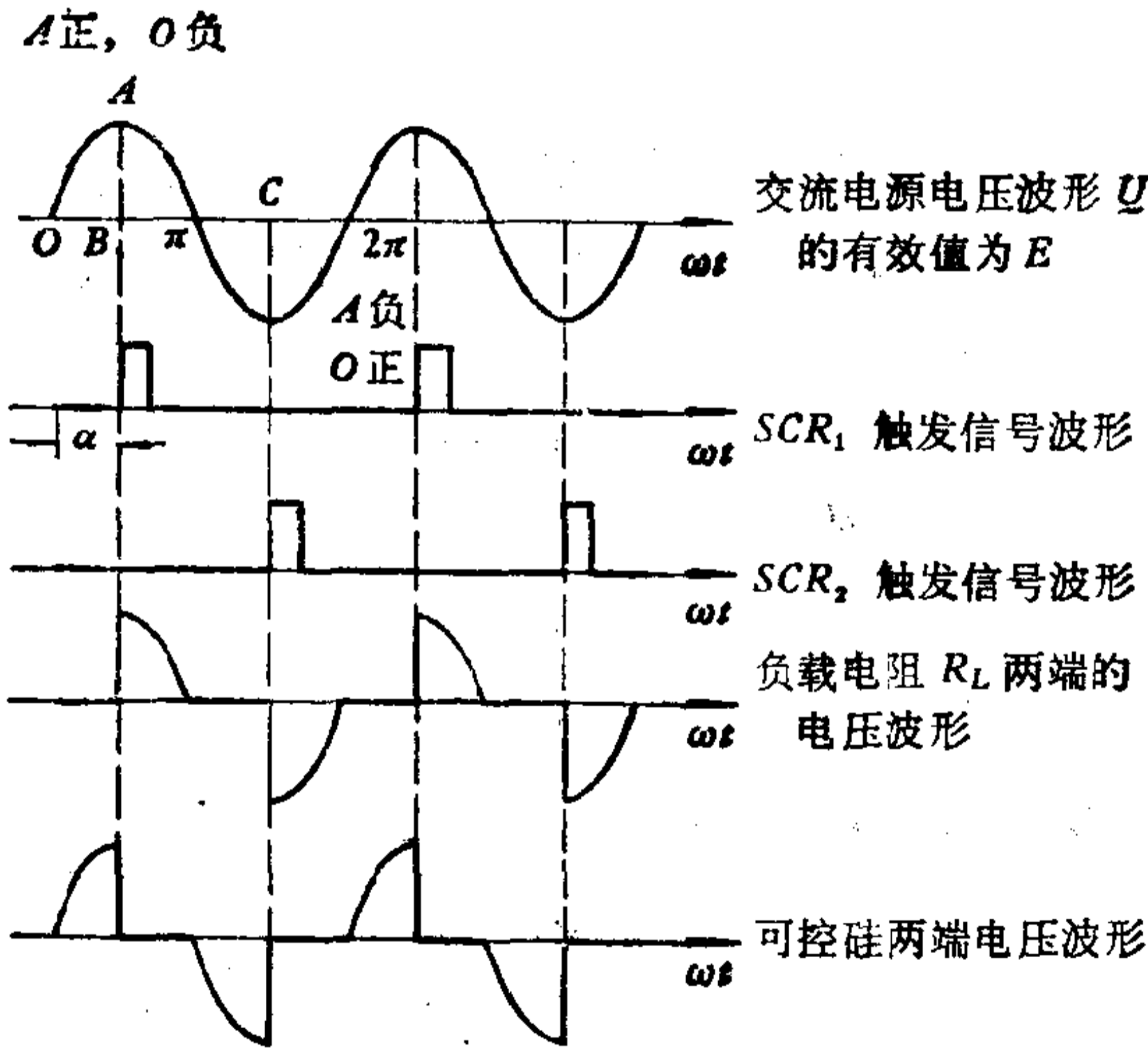
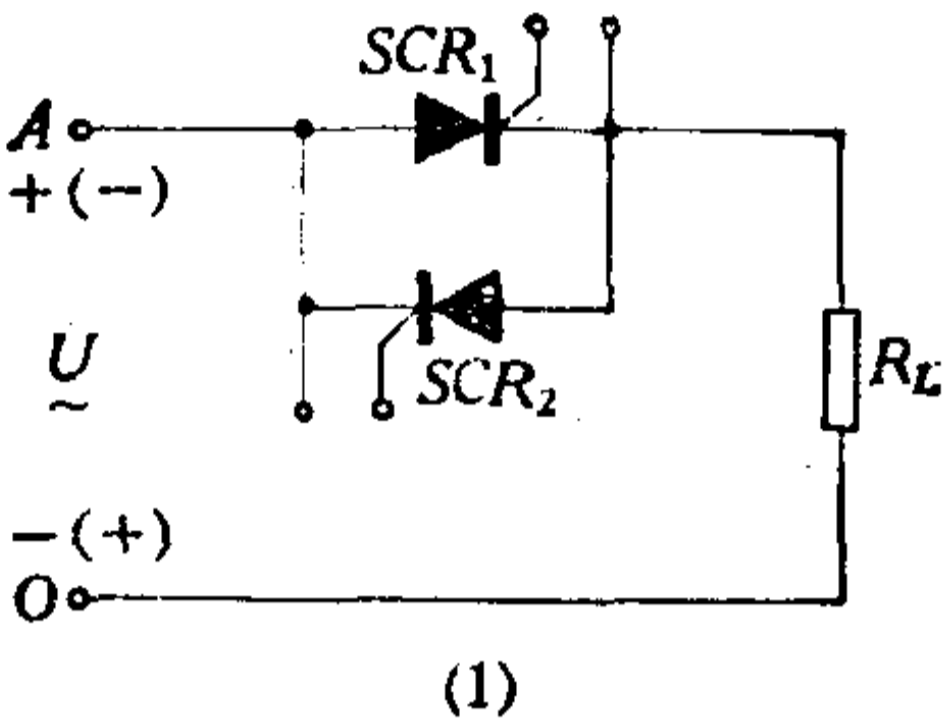


图 7-7

2. 可控硅交流调压器

图 7-7(1) 为可控硅交流调压器线路,两个可控硅反向并联在一起,轮流导通,在图 7-7(2) 中 OB 段, SCR_1 因正向阻断,不导通; SCR_2 因反向不导通. 在 $B\pi$ 段, SCR_1 被触发导通,至 π 点后,因受反向电压而关断. 在 πC 段, SCR_2 因正向阻断,不导通; SCR_1 因受反向电压早已关断. 于是在负载电阻 R_L 两端可得到“缺块”交流电. α 角越大,缺块越大,输出电压的有效值越低,当 α 从 0 连续变到 π 时,输出电压有效值从 E 连续变到零.

图 7-8 所示为另一种形式的单相交流调压电路,只用一

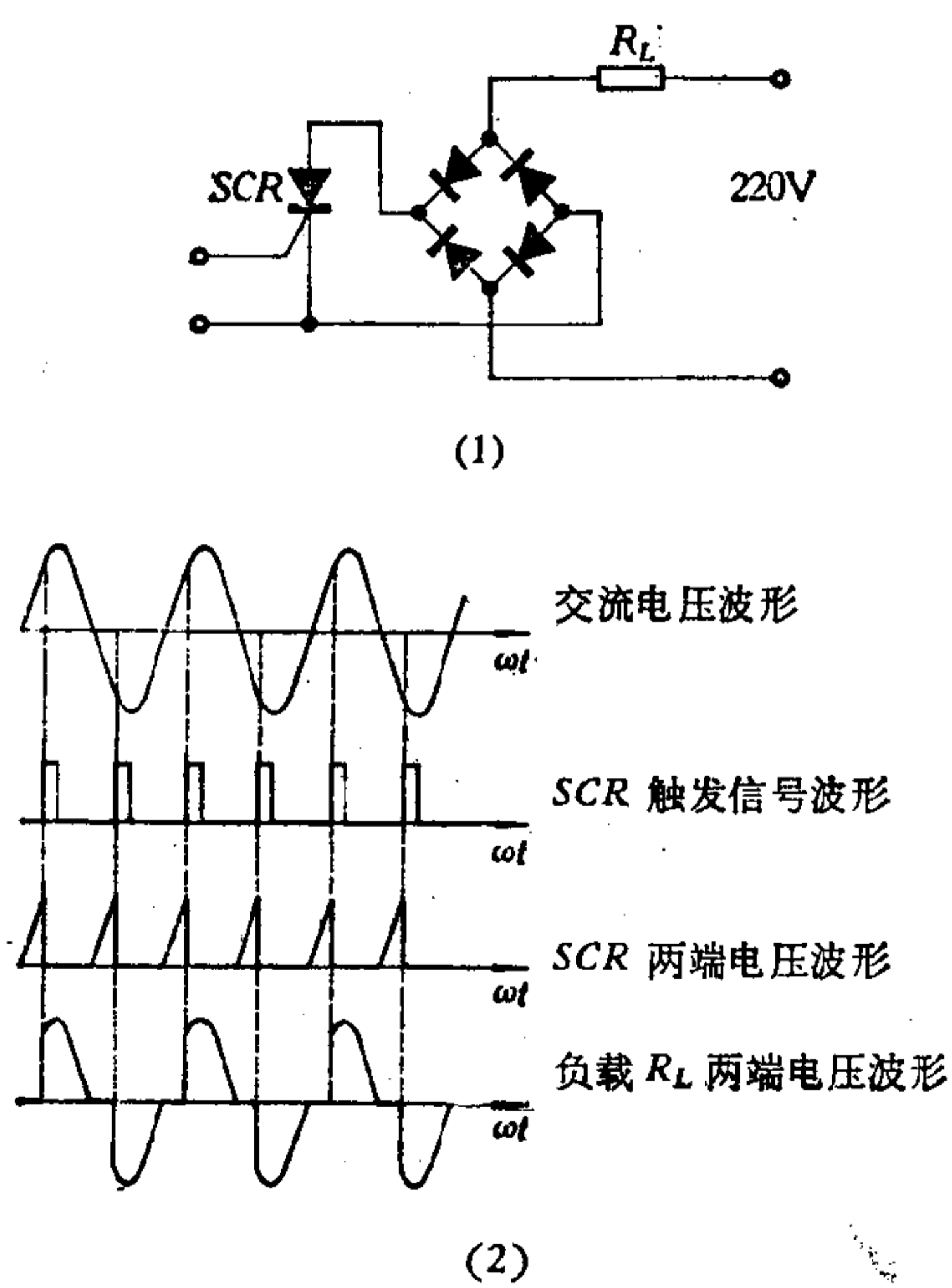


图 7-8

只可控硅，它不承受反向电压，可以使用反向耐压低的管子。可控硅是在交流电压过零时关断的，读者可根据上面讲过的原理自行分析。

可控硅交流调压线路可代替调压变压器，用于调光、控温等设备中，具有体积小、效率高、调节方便、省铜省铁、维修方便等优点。

另有一种双向可控硅，符号如图 7-9 所示，它工作于交流电路中，正反向均可以触发导通，其作用相当于两只反向并联的普通可控硅。在交流调压电路中，若采用双向可控硅，则主电路和控制电路均比采用普通可控硅要简单得多。

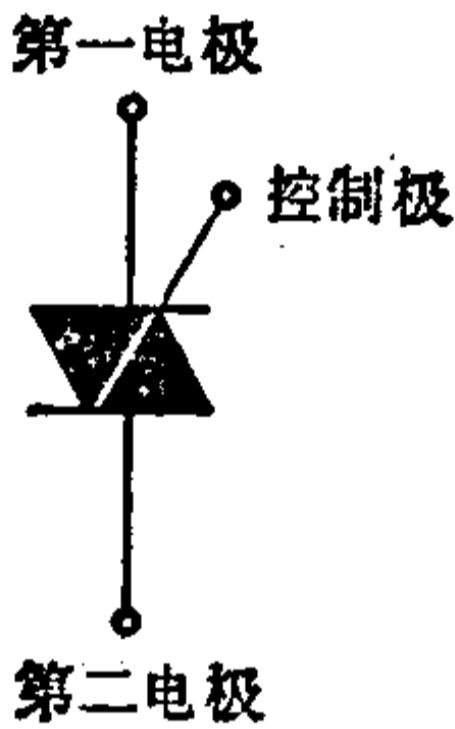


图 7-9

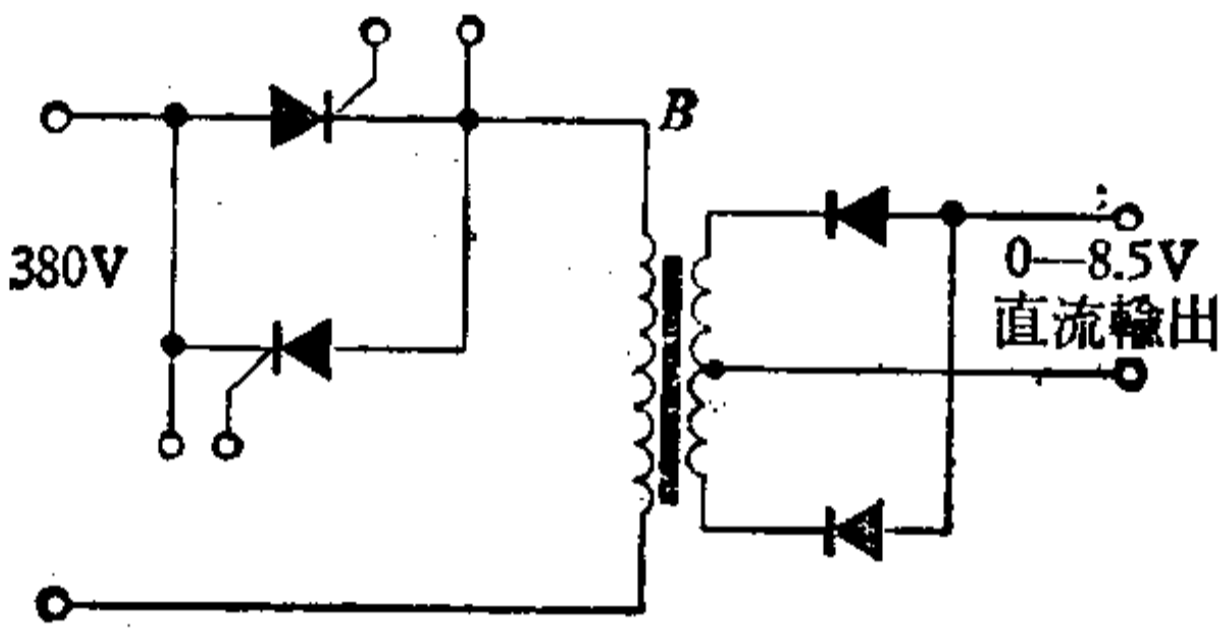


图 7-10

电镀、电解等工业部门需要低电压大电流的可调直流电源，而另一些工业部门则往往又需要高电压小电流的可调直流电源。通常的方法是用变压器将电网电压降低或升高，再用并联（在大电流场合，单个可控硅的电流容量可能不够）或串联（在高电压场合，单个可控硅的电压额定值可能不够）的可控硅作可控整流。采用这种方法时，由于可控硅的并联或串联，使触发电路较复杂，而且不经济（电流容量很大或电压额定值极高的可控硅价格均较贵）。在这种情况下，可将可控硅移至变压器初级进行交流调压，以使变压器次级电压可调，在次级则采用硅二极管并联或串联起来进行整流，即可得到

可调的直流电压输出，这种可控整流方法叫初级调压。图 7-10 为可控硅初级调压的电镀电源设备原理图。

3. 交流无触点开关

在图 7-7 及图 7-8 所示电路中，若使可控硅工作于全导通或全关断两种极限状态，则可控硅就相当于一只交流接触器，可以通过接通或切断加于可控硅控制极的直流电压来控制它的通断。这种无触点交流开关可以用很小的电流（如一、二百毫安）控制大功率电路（如几百安、上千伏），而且无火花，动作迅速，可在特殊场合使用，例如用它控制鼠笼式异步电动机，符合防火、防爆等要求（图 7-8 所示的交流无触点开关有关资料可参看《晶体管开关电路》第十章第三节）。

4. 直流无触点开关（直流断续器）

用可控硅控制直流电路的通断，这就是直流无触点开关。普通的可控硅用于控制直流电路时，导通是容易的，但为使其关断则必须在电路中采取一定措施。在图 7-11 所示电路中，如果触发 SCR_1 使其导通，负载 R_L 上有电流流过，电容 C 经 R 及 SCR_1 充电。欲要切断负载 R_L 中电流时，可触发 SCR_2 使其导通，此时 C 两端电压经 SCR_2 加在 SCR_1 两端，使其受反向电压而关断。

可控硅直流开关除可以用以控制大功率直流电路的通断外，还可作为大功率脉冲电源，把固定电压的直流电源变成电压可调的直流电源，如用作无轨电车、电瓶车的直流脉冲调速，可省去动作频繁的直流接触器和耗费电能的电阻器。也可作为电火花加工机床的脉动电源等。

直流脉冲调速的基本原理如下：

设直流电源电压为 E ， SCR_1 导通的时间为 t_1 ， SCR_2 导通

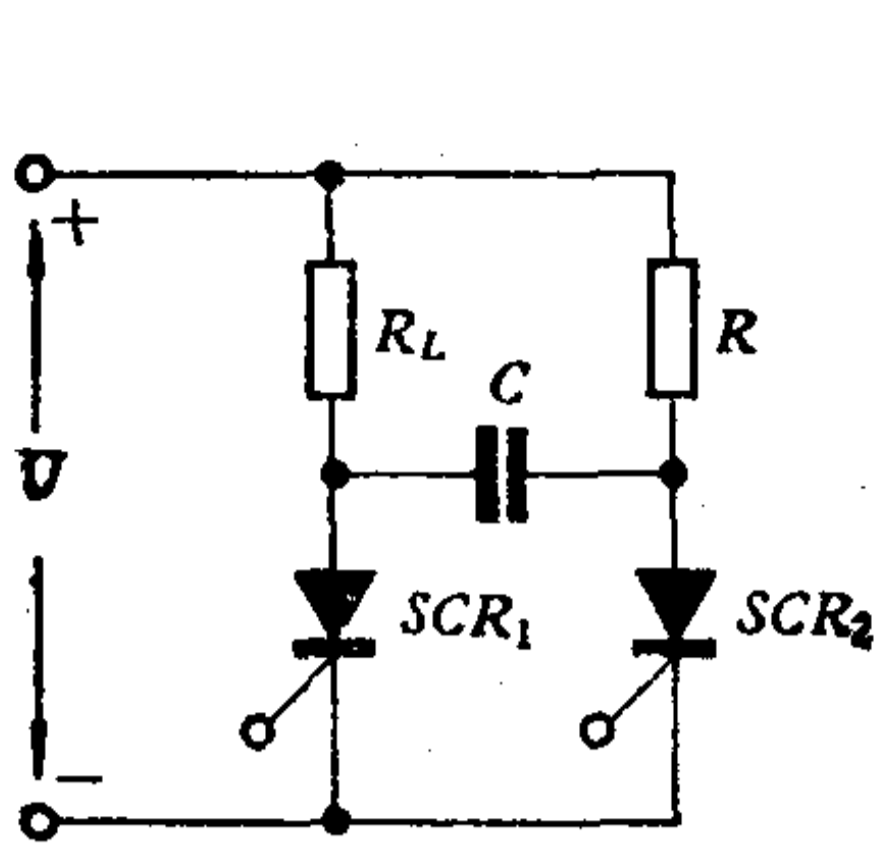


图 7-11

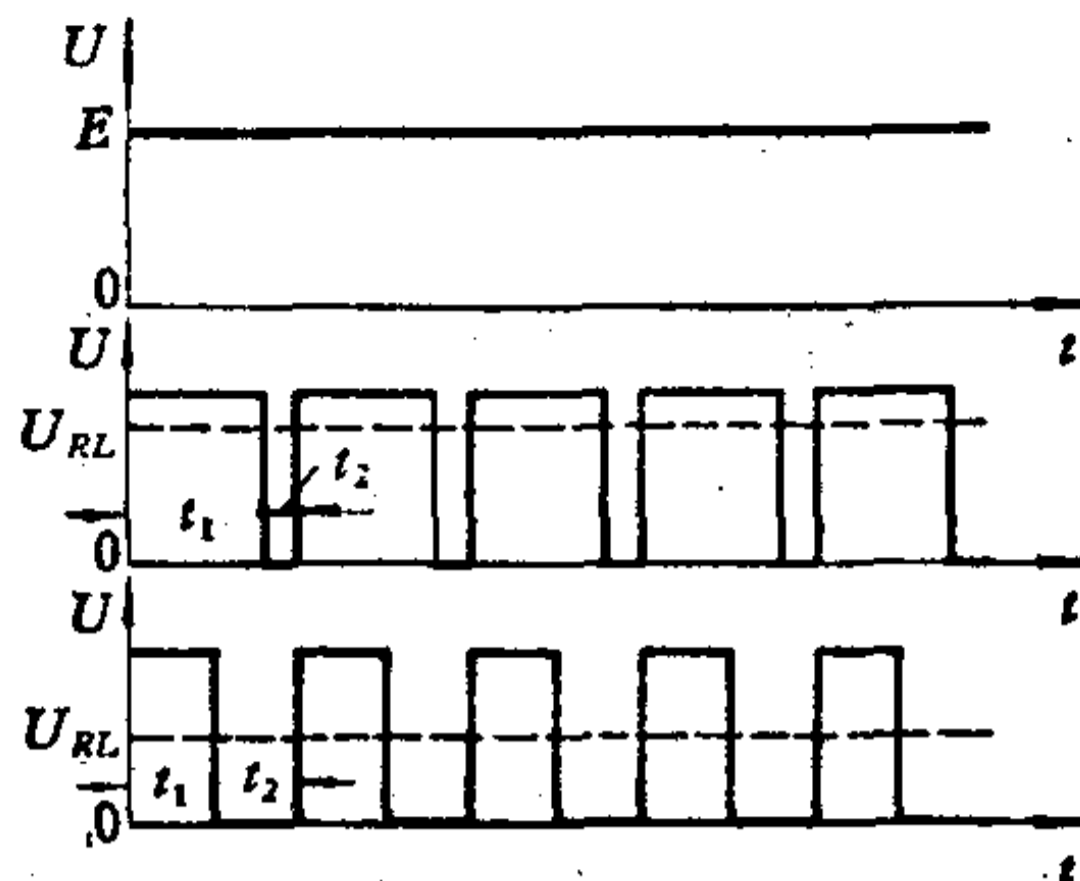


图 7-12

的时间为 t_2 ，则负载 R_L 上的电压波形如图 7-12 所示。改变比值 t_1/t_2 ，负载 R_L 上的直流电压平均值 U_{av} 也就改变， t_1/t_2 大，直流平均电压高。反之， t_1/t_2 小，直流平均电压低。直流电动机的转速是取决于端电压的，连续改变电动机端电压，就能达到无级变速的目的。

5. 逆变

这里只是通过图 7-13 所示的单相逆变器的原理电路简单说明一下可控硅在逆变器中的应用。当 SCR_1 被触发导通时，绕组 HO 中有电流流过，变压器次级感应出上正下负的电电压。此时 H 正、 F 负，电容 C 被充电至 $2E$ 。当 SCR_2 被触发导通时， C 上的电压经 SCR_2 加至 SCR_1 两端，使其受反向电压而关断。由于 SCR_2 导通，绕组 FO 中有电流流过，变压器

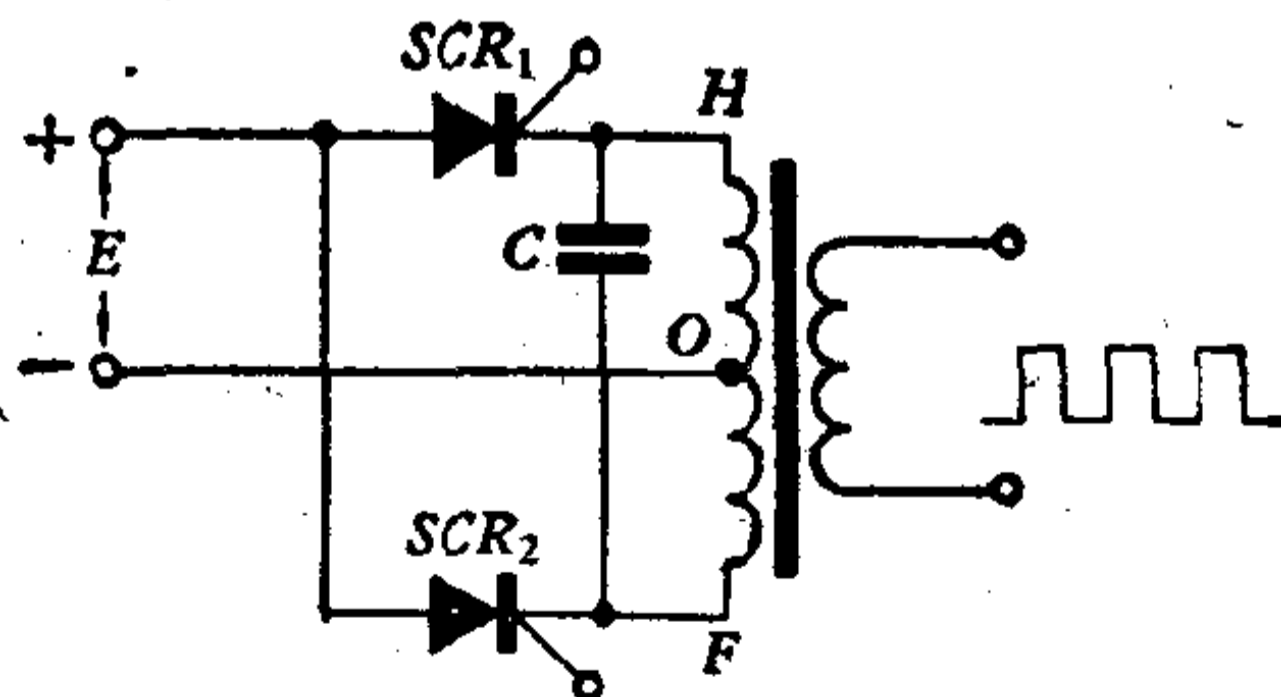


图 7-13

次级感应出下正上负的电压。因此 SCR_1 、 SCR_2 依次轮换导通，变压器次级就感应出交流电压。改变可控硅触发信号的频率，也就改变了逆变器输出的交流电压的频率，这方面的例子可参阅《晶体管开关电路》第十章第三节。

6. 变频

鼠笼式异步电动机的转速 n 可用下式表示：

$$n = \frac{60f}{P} (1 - S) \text{ 转/分}$$

式中， f 为供电电源频率， P 为电动机极对数， S 为电动机转差率。

电动机选定后， P 就定了， S 变化很小，所以转速 n 就由主要电源频率 f 来决定，改变 f ，也就改变了 n ，此即变频调速的原理。

图 7-14 为异步电动机变频调速电路原理框图。电动机在低于 50 周的交流电作用下运行时，应降低输入电压，否则，电动机将因磁饱和而不能工作。所以在逆变器输出的交流电

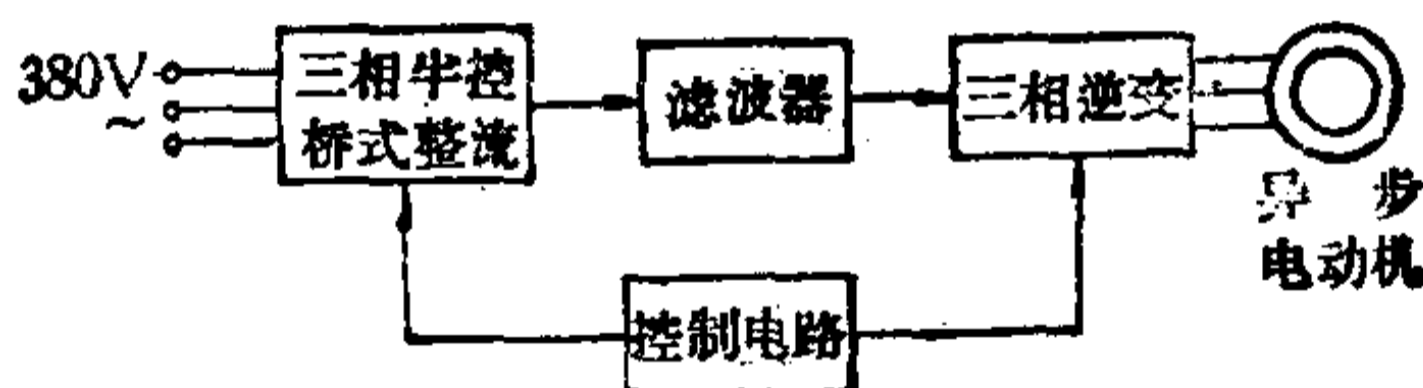


图 7-14

频率调低时，须同时降低逆变器输出电压，也即输入逆变器的直流电压应降低，因此采用三相半控桥式整流，以使整流器输出的直流电压可以随频率的改变而改变。

本章小结

1. 可控硅整流元件有如下特点：

(1) 可控硅可以看成是一个可以以小电流控制的单方向导电的大功率开关。

(2) 怎么使可控硅导通呢？只有当阳极相对于阴极的电压为正，同时在控制极与阴极间加以适当正触发信号，两个条件缺一不可。导通后，管压降约 1 伏左右。

(3) 可控硅怎样关断呢？导通后，控制极就失去了控制作用，它不能起到关断作用。如果使电源电压降低，使流过管子的电流小于维持电流，管子就不能维持导通状态而自己“关断”了。当然，若在阳极和阴极间加上反向电压，也能使处于导通状态的可控硅关断。

2. 利用可控硅元件“正向阻断”及触发导通的性能，可以构成可控整流电路、交直流无触点开关、逆变器等线路，在工业中得到了广泛的应用。

附录一 常用晶体二极管参数

型 号	电 性 能 参 数			用 途	外 形
	额定整流电 流(毫安)	最高反向工作电 压有效值(伏)	工作频率范围 (兆赫)		
2AP1	≤16	10	0~150	整 流 及 检 波	玻 璃 密 封 外 壳 (图1)
2AP2	≤16	25	0~150		
2AP3	≤25	25	0~150		
2AP4	≤16	50	0~150		
2AP5	≤16	75	0~150		
2AP6	≤12	100	0~150		
2AP7	≤12	100	0~150		

型 号	电 性 能 参 数				用 途	外 形
	整流 电流 (安)	最高反 向工作 电压峰 值(伏)	额定电 流下的正 向电压降 (伏)	最高反 向工作电 压下的反 向电流 (毫安)		
2CP1	0.5	100	1.0	<0.5	用于频率为3千赫 以下的整流电路 (高温使用时需加 40毫米 ² ×1毫米铝 板散热片)	金属密 封外壳 (图2)
2CP2	0.5	200	1.0	<0.5		
2CP3	0.5	300	1.0	<0.5		
2CP4	0.5	400	1.0	<0.5		
2CP10		25	≤1.0	≤0.005	用于频率为50千赫 以下的整流电路及 脉冲电路	玻璃密 封外壳 (图1)
2CP11		50	≤1.0	≤0.005		
2CP12		100	≤1.0	≤0.005		
2CP13		150	≤1.0	≤0.005		
2CP14		200	≤1.0	≤0.005		
2CP15	0.1	250	≤1.0	≤0.005		
2CP16		300	≤1.0	≤0.005		
2CP17		350	≤1.0	≤0.005		
2CP18		400	≤1.0	≤0.005		
2CP19		500	≤1.0	≤0.005		
2CP20		600	≤1.0	≤0.005		

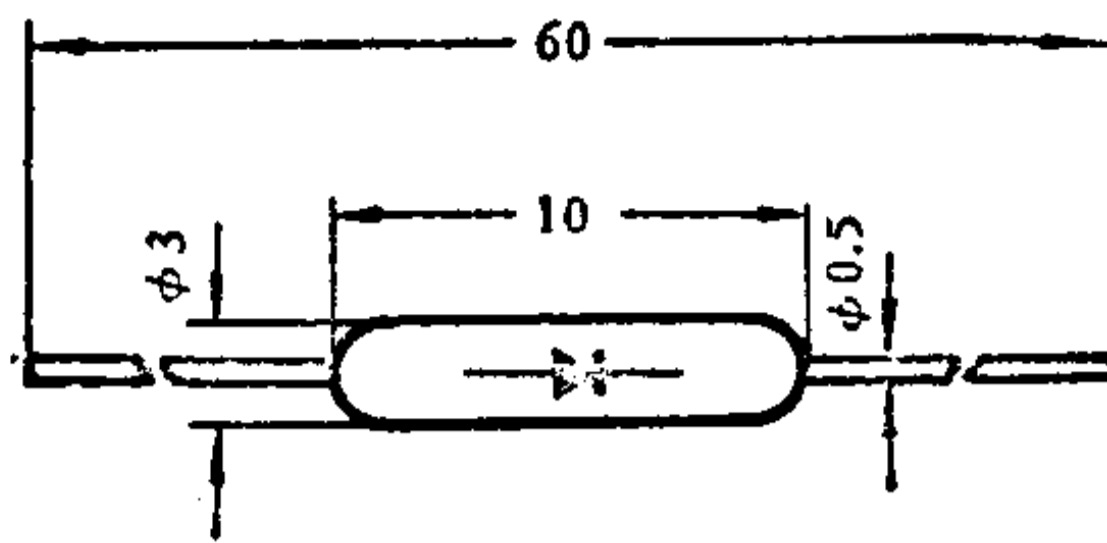
2CZ 系 列	额定电 流平均 值(安)	额定工作电压峰值等级 (伏)	散热器最小 散热面积 (参考值) (厘米 ²)	冷却方法
2CZ □ / □ ↗表示元件的反向工作电压峰值(伏) ↘表示元件的额定电流(安)	0.5—1	30 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 800 900 1000		自 冷 (无散热器)
	5	”	100	自 冷
	10	”	200	自 冷
	30	”	600	自 冷
	50	”	600	风 冷 注: 风冷 时散热器 出口风速 5 米/秒
	100	”	900	
	200	”	1200	

型 号	电 性 能 参 数				外形	用 途
	整流 电流 (安)	最大整流 电流时的 正向压降 (伏)	最高反向 工作电压 峰 值 (伏)	最高反向 电压下的 反向电流 (毫安)		
2CZ11A	1	<1	100	<0.5	金属密封外壳(图2)	整 流 额定使用需加 40厘米 ² ×1毫 米铝散热片
2CZ11B	1	<1	200	<0.5		
2CZ11C	1	<1	300	<0.5		
2CZ11D	1	<1	400	<0.5		
2CZ11E	1	<1	500	<0.5		
2CZ11F	1	<1	600	<0.5		
2CZ11G	1	<1	700	<0.5		
2CZ11H	1	<1	800	<0.5		
2CZ12A	3	≤0.8	50	≤1	金属密封外壳(图3)	整
2CZ12B	3	≤0.8	100	≤1		
2CZ12C	3	≤0.8	200	≤1		
2CZ12D	3	≤0.8	300	≤1		
2CZ12E	3	≤0.8	400	≤1		
2CZ12F	3	≤0.8	500	≤1		
2CZ12G	3	≤0.8	600	≤1		
2CZ13A	5	≤0.8	50	≤2		
2CZ13B	5	≤0.8	100	≤2		
2CZ13C	5	≤0.8	200	≤2		
2CZ13D	5	≤0.8	300	≤2		
2CZ13E	5	≤0.8	400	≤2		
2CZ14A	10	≤0.75	50	≤5	金属密封外壳(图4)	流
2CZ14B	10	≤0.75	100	≤5		
2CZ14C	10	≤0.75	200	≤5		
2CZ14D	10	≤0.75	300	≤5		
2CZ14E	10	≤0.75	400	≤5		
2CZ14F	10	≤0.75	500	≤5		
2CZ14G	10	≤0.75	600	≤5		
2CZ15	30	≤0.8	50	≤20		
2CZ15A	30	≤0.8	100	≤20		
2CZ15B	30	≤0.8	200	≤20		
2CZ15C	30	≤0.8	300	≤20		
2CZ15D	30	≤0.8	400	≤20		
2CZ15E	30	≤0.8	500	≤20		
2CZ15F	30	≤0.8	600	≤20		

型 号	电 性 能 参 数				用 途
	整流电流(安)	最高反向工作电压峰值(伏)	额定电流下的正向电压降(伏)	最高反向工作电压下的反向电流(毫安)	
2CP21 2CP22 2CP23 2CP24 2CP25 2CP26 2CP27	0.3	100 200 300 400 500 600 700	<1	≤0.1	用于3千赫以下整流电路
03Z10 03Z12 03Z14 03Z16 03Z18 03Z20	0.3	1,000 1,200 1,400 1,600 1,800	<1	≤0.1	用于3千赫以下整流电路
05Z6 05Z8 05Z10 05Z12 05Z14 05Z16 05Z18 05Z20	0.5	600 800 1,000 1,200 1,400 1,600 1,800 2,000	<1	≤0.5	用于5千赫以下整流电路

型 号	电 压 性 能 参 数				用 途
	整流电流(安)	最高反向工作电压峰值(伏)	额定电流下的正向电压降(伏)	最高反向工作电压下的反向电流(毫安)	
1Z2 1Z4 1Z6 1Z8 1Z10 1Z12 1Z14 1Z16 1Z18 1Z20	1	200 400 600 800 1,000 1,200 1,400 1,600 1,800 2,000	<1	≤0.5	用于3千赫以下整流电路
2DL02/0.5 2DL03/0.5 2DL04/0.5 2DL05/0.5 2DL07/0.5 2DL10/0.5 2DL15/0.5 2DL20/0.5 2DL25/0.5 2DL30/0.5	0.5	2,000 3,000 4,000 5,000 7,000 10,000 15,000 20,000 25,000 30,000	≤7 ≤7 ≤7 ≤7 ≤12 ≤12 ≤24 ≤24 ≤36 ≤36	≤0.01	用于3千赫以下高压整流电路
2DL02/1 2DL03/1 2DL04/1 2DL05/1 2DL07/1 2DL10/1 2DL15/1 2DL20/1 2DL25/1 2DL30/1	1	2,000 3,000 4,000 5,000 7,000 10,000 15,000 20,000 25,000 30,000	≤7 ≤7 ≤7 ≤7 ≤12 ≤12 ≤24 ≤24 ≤36 ≤36	≤0.01	用于3千赫以下高压整流电路

2CP 型



2AP 型

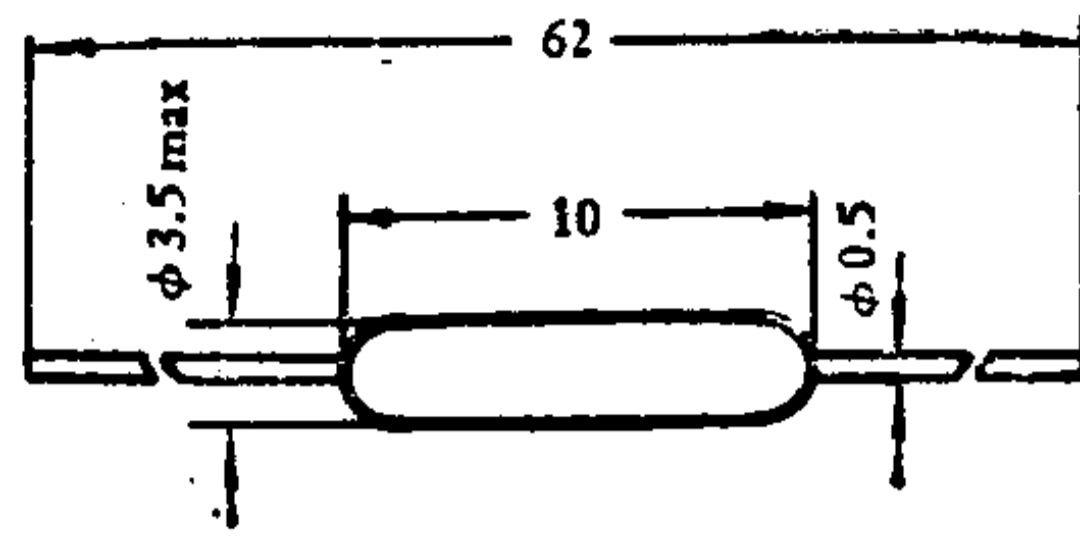


图 1

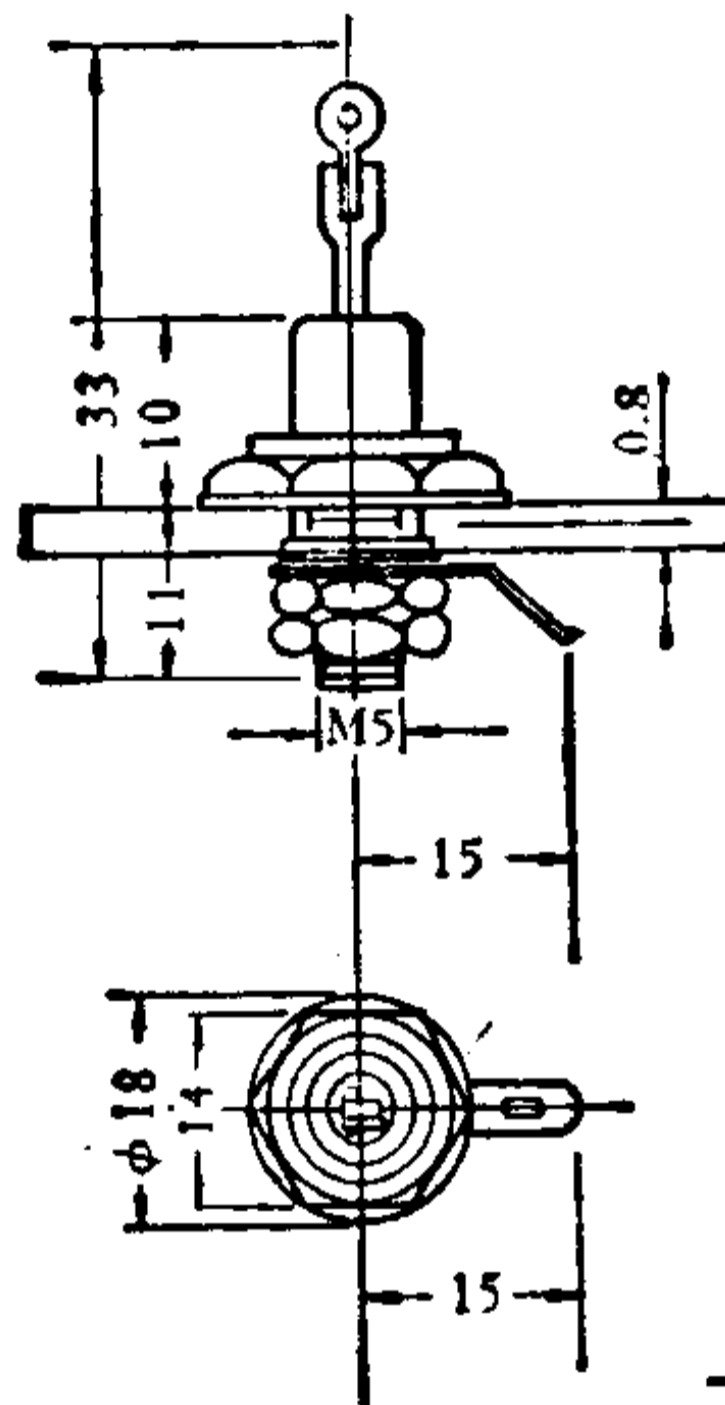


图 2

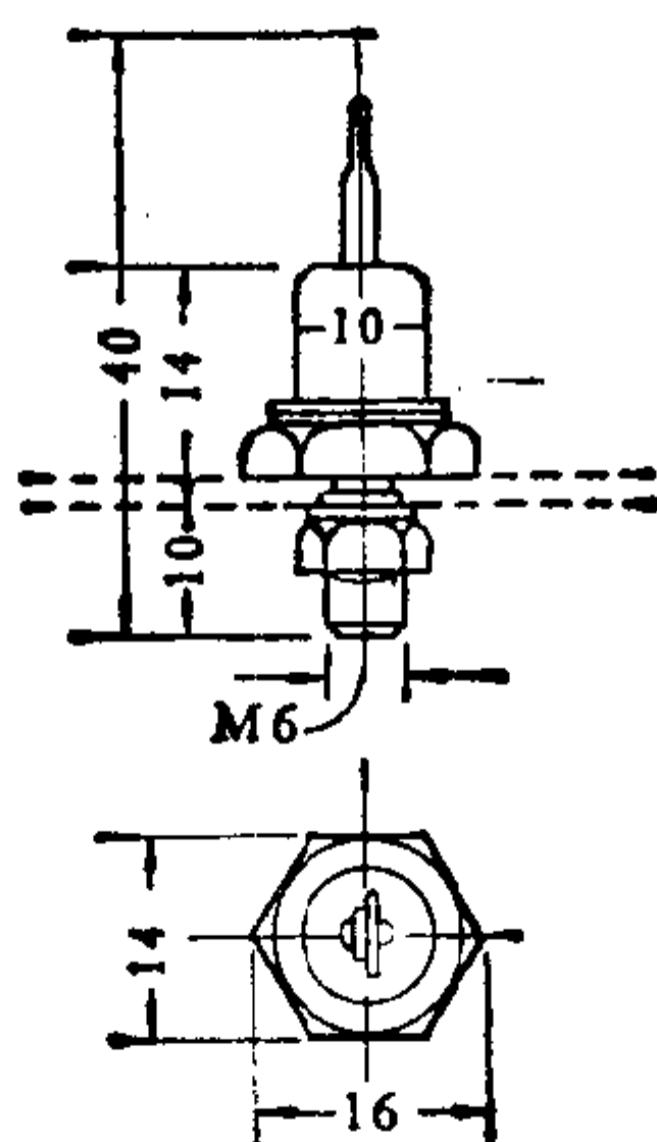


图 3

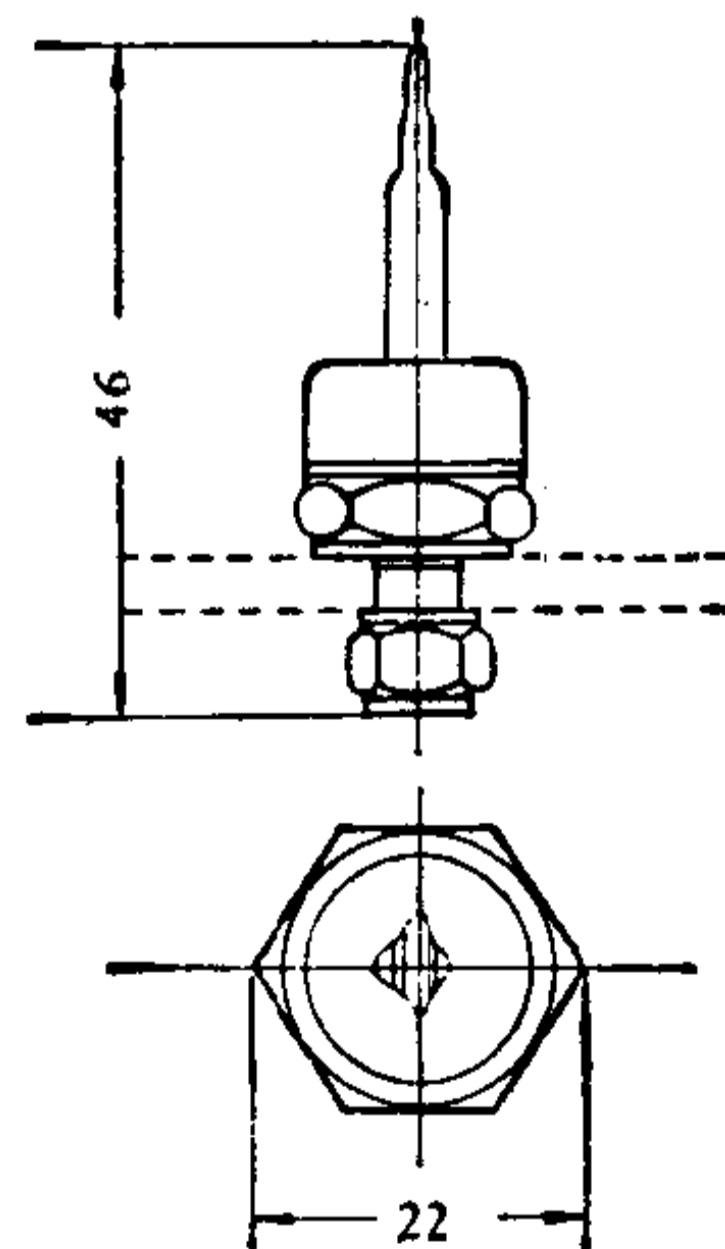


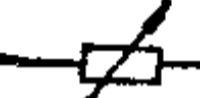


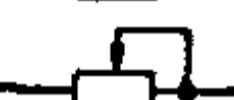






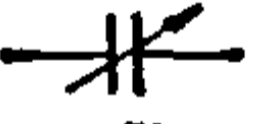





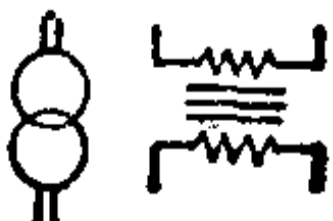




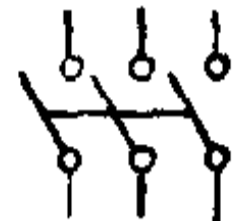
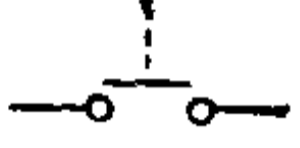

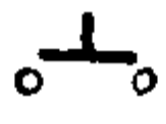




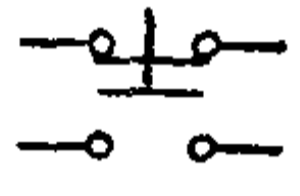
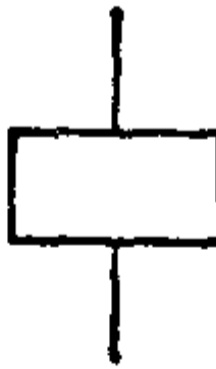



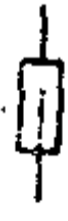


图 4

附录二 电气元件图形符号

在电气原理图里，用各种图形符号与文字符号来代表各个元件，用线条表示它们之间的电气联系。 现把本书中常用电气元件的新旧符号对照（GB312-64）列于下表（供使用参考）。

符 号 名 称	图 形 符 号	
	国家标准(1964年)	旧 符 号
电阻的一般符号(固定电阻)		
变阻器(可调电阻) (1) 一般符号 (2) 可断开电路的 (3) 不断开电路的	(1)  或  (2)  (3) 	  
电容器的一般符号		
可变电容器		
电感线圈		
有铁芯的电感线圈		
有铁芯的单相双线组变压器(多线)		

符 号 名 称	图 形 符 号	
	国家标准(1964年)	旧 符 号
有铁芯的三相双线组变压器(多线) 绕组连接: 星形-三角形		
单次级绕组电流互感器(多线)		
开关和转换开关触点 (1) 动合(常开)触点 (2) 动断(常闭)触点 (3) 切换触点	(1) (2) (3)	
继电器触点 (1) 动合(常开)触点 (2) 动断(常闭)触点 (3) 切换触点	(1) (2) (3)	
接触器, 起动器, 动力控制器的触点 (1) 动合(常开)触点 (2) 动断(常闭)触点 (3) 切换触点	(1) (2) (3)	
带时限的继电器和接触器的触点 (1) 延时闭合的动合(常开)触点 (2) 延时开启的动合(常开)触点 (3) 延时闭合与开启的动合(常开)触点 (4) 延时闭合的动断(常闭)触点 (5) 延时开启的动断(常闭)触点 (6) 延时闭合与开启的动断(常闭)触点	继电器 (1) (2) (3) (4) (5) (6)	接触器
带灭弧装置的触点 (1) 动合(常开)触点 (2) 动断(常闭)触点	(1) (2)	

符 号 名 称	图 形 符 号	
	国家标准(1964年)	旧 符 号
单极开关		
多极开关(例如三线)(多线)		
与工作机械联动的开关(如线路开关、极限开关、微动开关、连锁开关) (1) 动合(常开)触点 (2) 动断(常闭)触点	(1)  (2) 	
带动合(常开)触点,能自动返回的按钮		
带动断(常闭)触点,能自动返回的按钮		
带动合(常开)和动断(常闭)触点,能自动返回的按钮		
继电器,接触器和磁力起动器的线圈的一般符号		接触器线圈  继电器电压线圈  继电器电流线圈 
熔断器		 或 
信号灯的一般符号	