

自动控制系统

— 上 —

上海财经学院

1979.2.

第一章 概 述

在轻纺工厂中，广泛采用着各种自动控制系统，控制的对象虽是多种多样的，但却有一个共同点，例如电动机的速度，要求它不受负载和电网电压波动等干扰的影响；棉纺和毛纺工厂中的棉条自调匀奎口，要求棉条的均匀度保持一定；浆纱机等卷绕机构要求卷绕的纱或布的线速度和张力恒定，在化纤、造纸和印染工厂中要求溶剂或浆液的液面保持一定高度，在织物或合成纤维的生产中要求某些容口设备中的温度或压力恒定，在印染联合机中要求织物不能产生纬斜等等。这些自动控制系统的共同点是使被控制量保持为恒值。所以我们常称它为恒值自动控制系统。本教材讨论的系统主要是这种自动控制系统。

自动控制系统除了“恒值自动控制系统”外，尚有“程序控制系统”（使被控制量按一定事先确定了的规律变化）和“随动控制系统”（被控制量的主令信号可在广大范围内随意变化）。程序控制系统将结合在“数字与脉冲电路”一课中介绍，随动控制系统在国防和钢铁工业中有应用，但目前轻纺工业中应用不多，这里不再介绍了。

遵照毛主席关于认识过程中的“由特殊到一般以及由一般到特殊”的伟大教导，我们选用其中普遍应用的电动机速度的自动控制系统（以下称自动调速系统）进行分析。掌握其分析方法并得出恒值自动控制系统的一般规律，然后我们再按照学到的方法和规律来分析几个其他的恒值自动控制系统。

在自动调速系统中，我们又重点分析直流电动机采用可控硅控制的自动调速系统，KZSF—1 可控硅直流调速装置是其中一种类型的自动调速系统，我们在前一阶段对它进行了实践和学习，将有助于我们从这个典型调速系统出发来分析研究和认识一般的自动调速系统。

图1—1是KZSF—1可控硅直流调速装置的原理图，图1—2是表示这个装置各部分关系的结构图。

大家知道，如果能改变直流电动机的电枢电压，就能使直流电动机调速，在KZSF—1可控硅直流调速装置中（以下简称KZSF—1装置）直流电动机的电枢由三相桥式半控电路供电，触发回轨出脉冲给可控硅，如果改变加在触发回上的直流控制电压 U_K ，就能使触发回轨出脉冲移相，可控硅的导通角改变，使奎流电路轨出的奎流电压

U_{dc} 也改变，因而对直流电动机调速。这样，改变功率很小的直流电压 U_k 就能控制输出功率很大的直流电压，所以，触发器和可控硅电路并在一起，就可以看作一个功率控制口，用它就能对直流电动机进行调速了，而在 KZSF-1 装置中，为了提高调速的精度，克服负载和电网电压波动对电动机转速的影响，加了一套转速负反馈，也就是在电动机的轴上安装了测速发电机，测速发电机发出的电压大小完全反映电动机速度的高低，将这个测速发电机发出的电压 U_F 去和一个作为基准的主令电压 U_{ZL} 进行比较，也就是使 U_{ZL} 和 U_F 极性相反地连接，它们的差值 $\Delta U = U_{ZL} - U_F$ ，送到放大口的输入，这个差值电压 ΔU 经过放大口放大后，输出的电压就作为触发器的直流控制电压 U_k 。如果负载的增加或电网电压的降低引起电动机转速的降低，

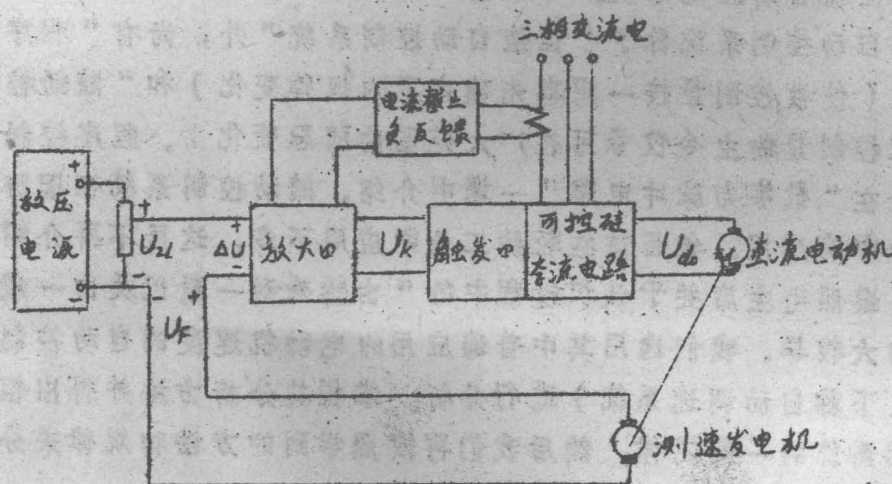
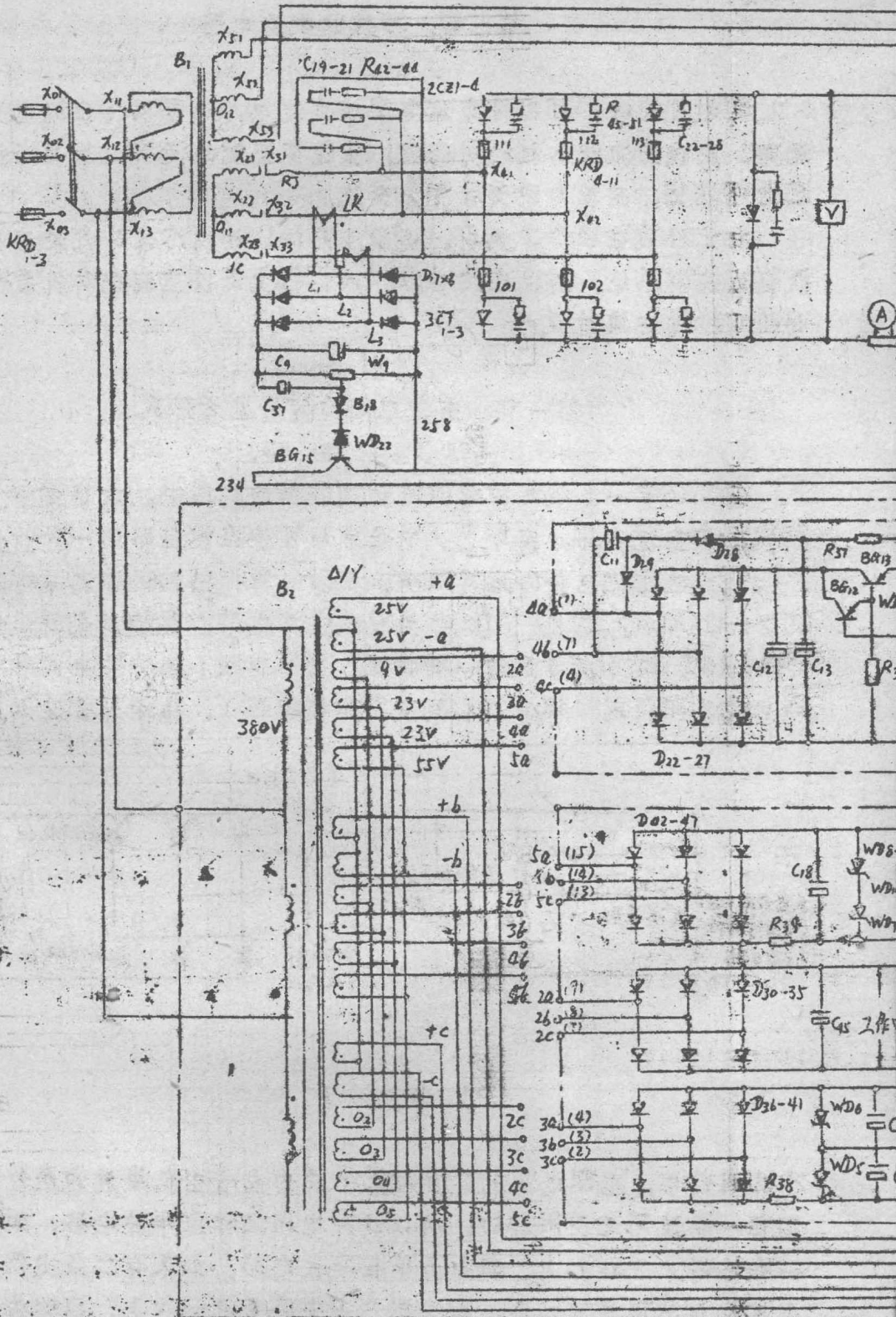
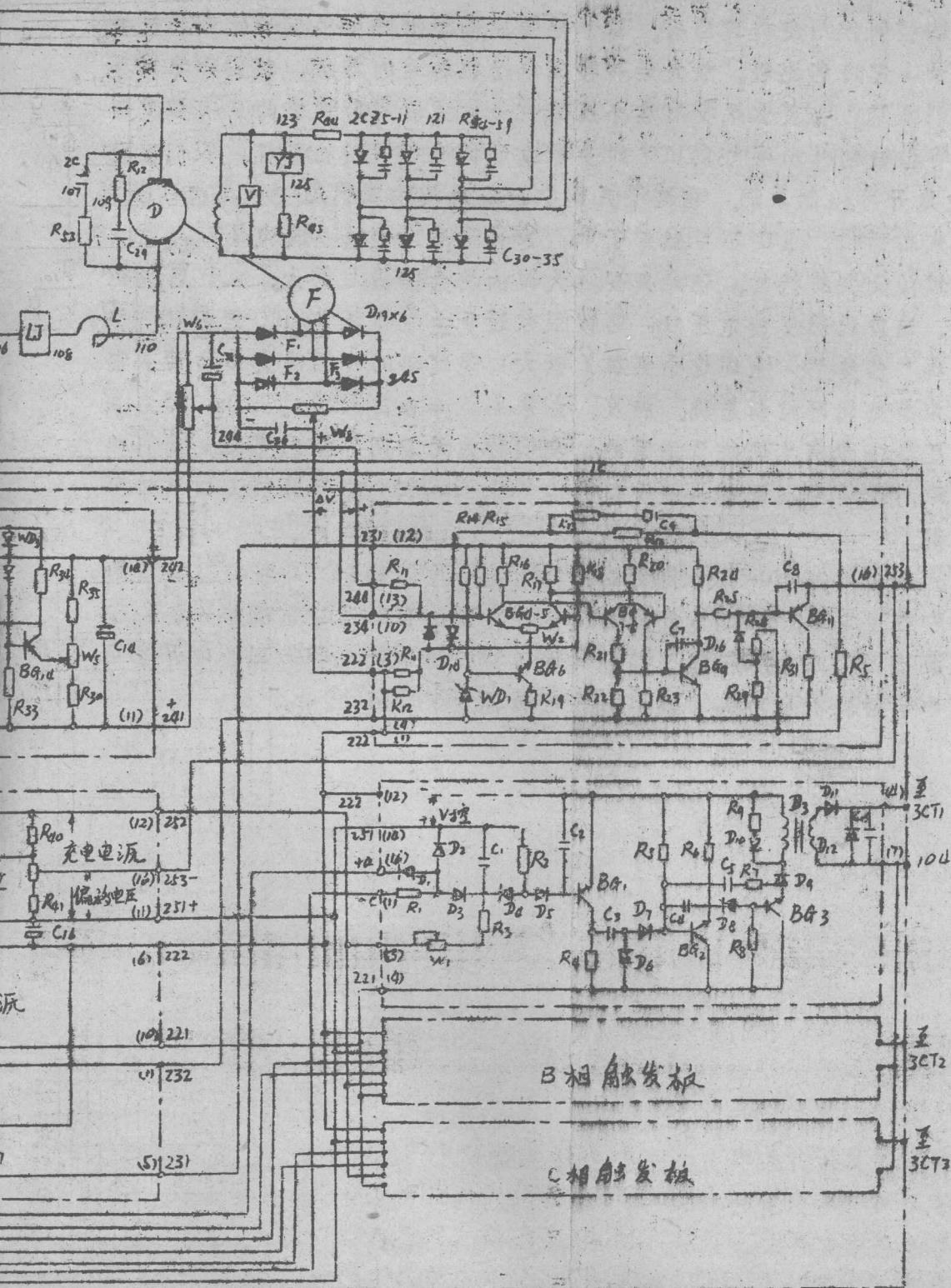


图 1-2

测速发电机的电压 U_F 也降低，差值电压 $\Delta U = U_{ZL} - U_F$ 增加，经过放大口后 U_k 也增加，可控硅整流电压相应增加，电动机转速就回升而稳定运行。相反，如果负载降低或者电网电压增高欲使电动机转速升高，根据同样的控制过程，使电动机转速回降，而尽量维持原来的转速稳定运行。表示电动机在稳态时转速和负载变化的关系，我们称为系统的静态特性。相反，系统在调节过渡过程中的特性，我们称为系统的动态特性。在系统中，放大口是为了增强系统的控制作用，例如由于转速的降低，只要 $\Delta U = U_{ZL} - U_F$ 稍有变化，就能产生很





大的控制作用使转速回升。这个把转速测量出来作为反馈仪号和主令仪号一起进行比较，放大后再控制电动机转速的系统，我们称为闭环控制系统。相反如果没有这个反馈仪号，或者象前面讲的只有触发口和可控硅的“功率控制口”对直流电动机进行调速的系统，我们就称之为开环控制系统。在这个系统中，如果放大口就是一个单纯的直流放大口的话， ΔU 不可能等于零，这是因为可控硅整流电压 U_{d0} 靠 ΔU 经过放大来维持的，但是只要放大口的放大倍数足够大， ΔU 可以很小，这就说明反馈电压 U_F 可以很接近于主令电压 U_{ZL} ，但与 U_{ZL} 总有些“偏差”。上述这个系统（放大口是简单的比例放大口的话）常称为有差闭环控制系统。相反，如果 $\Delta U = 0$ ，反馈电压 U_F 和主令电压 U_{ZL} 没有“偏差”的系统，我们称为无差闭环控制系统，我们将在教材中看到，只要将放大口换成“比例—积分的运算放大口”即可达到。

本教材在第一部分将讨论系统的功率控制部分，即可控硅整流电路和触发电路。第二部分将讨论各种类型的自动调速系统并分析它们的静态和动态特性。第三部分讨论自动控制系统在轻纺工业中的应用，其中包括交流电动机调速系统在轻纺工业中的应用。

第二章 可控硅整流电路

通过可控硅，可以将交流电变成直流电，也可以将直流电变成交流电，交流变直流的过程叫整流。直流变交流的过程，因与整流相反，因此叫逆变。整流与逆变统称为变流。

由于目前在轻纺工业中，要求较高的、运用广泛的还是直流电动机自动控制系统，所以在这一章，我们将主要以直流电动机为典型来讨论可控硅整流过程。

第一节 整流电路的两种基本形式

在KZSF—1型可控硅直流调速装置的实践中，大家学习了三相桥式半控整流电路，实际上，它是常用可控整流电路的一种特殊情况。

可控硅整流电路的形式很多，常用的可归纳为两种基本形式，如图2—1所示。图2—1(a)称为另式整流电路，其特点是要求电源有中心另点，这另点与负载一端相连，电源相线（俗称“火线”）分别与可控硅阳极或阴极相连（图中与阳极相连），由于可控硅只能沿一

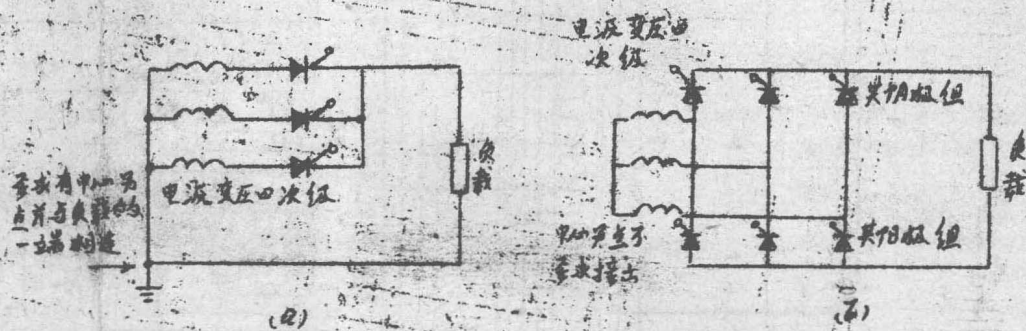


图 2—1

个方向导电，电源电压就只有在正半波内或者在负半波内是使用着的，而另一半波则是空闲着的，所以这种电路又称为半波电路，如果只有一条支路（ $P=1$ ），即称为单相半波电路，如果有二条支路（ $P=2$ ），则称为单相双半波电路，如果有三条支路（ $P=3$ ），则称为三相半波电路，常用的 $P=1, 2, 3, 6$ ，其中，我们将选择三相半波电路

路进行分析。

图 2—1 (b) 称为桥式整流电路，其特点是不要求电源有中心另点，可控硅接成桥式电路且分为两组，一组桥臂的可控硅阴极联在一起，称为共阴组，一组桥臂可控硅阳极联在一起，称为共阳组。对于一相电源来说，当它为正半波时，它可以通过阴组可控硅构成回路，当它为负半波时，它可以通过阳组可控硅构成回路，也就是它的正、负半波都是使用着的，因此，这种电路也称为全波电路，常用的 $P=2, 3$ ，其中，我们将选择三相桥式电路进行分析。

桥式整流电路与相应的半波另式整流电路比较，整流波形平滑；电源变压器利用率高，变压器铁心剩磁小；在输出相同整流电压时，要求可控硅的耐压低；因此获得了更为广泛的利用。

另式整流电路与相应的桥式整流电路比较，所用元件少，线路简单，在某些场合也有应用。

第二节 三相半波可控整流电路

一、纯电阻负载

1. 工作原理

先以最简单的电阻负载为例来说明三相半波整流电路的工作原理。

在生产实际中，电热丝和灯光照明就是一种电阻负载，有时，在调试整流电路时，也采用电阻负载来观察整流电路工作的正确性。

图 2—2 (a) 是三相半波可控整流电路，变压器次级是星形联结，有一个中心点 O ，也是整流电压的负极，与负载电阻一端相联。

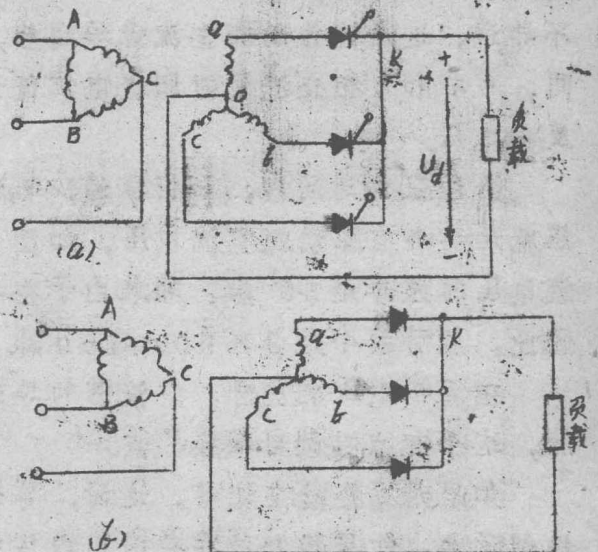


图 2—2

如果三个整流管是不可控的整流二极管(图2-2b)由于只有阳极电位高于阴极时,整流管才能导通,因此, a、b、c三相轮流导通的情况及整流电压的波形如图2-3所示。

图中 $e_a e_b e_c$, 表示三相电源的相电压, 每一相都是正弦交流电压, 它们的相角各依次相差 120° , 也就是相差 $\frac{T}{3}$, T 是交流电压的

周期, 相当于 360° 。所谓相电压, 是指变压器绕组 a, b, c 对中心另点“0”的电位。例如 a 相电压的瞬时值是正, 就是说变压器次级绕组 a 端对“0”点的电位是正。由于当阳极电位高于阴极电位时,

整流管才能导通, 因此

只有相电压的瞬时值为正时, 整流管才有可能

导通, 另外, 还要看那一相的正电压高, 那一

相的整流才导通, 例如在 t_1 时间内(图2-3)

a 相的正电压高于 b 相和 c 相的电压, 于是 a

相导通。而 b 相、c 相

不导通, 这是因为 a 相整流管导通后, K 点的电位几乎与 a 相电位相同, b 相和 c 相整流管的阳极电位低于阴极。b 相和 c 相的管子承受反向电压。

同理在 t_2 时间内, b 相导通; t_3 时间, c 相导通, 因此, 整流电压就是一个有脉动的直流电压, 如图2-3电压波形的粗线所示, 交流电压的频率是 50 赫, 那末由于在一个周期内整流电压脉动三次, 因此, 脉动频率是 $3 \times 50 = 150$ 赫。

在两相电压相交时, 整流管的导通由一相换到另一相, 这叫做换相, 这个交点叫做自然换相点。

如果是可控硅整流管, 这时, 导通条件还取决于可控硅控制极的控制脉冲。如果控制脉冲在两相电压相交时依次出现(图2-4a)那末整流电压就和图2-3一样。具体地说, 就是在 c, a 两相相交时, 对 a 相可控硅发出控制脉冲, 在 a、b 两相电压相交时, 对 b 相可控

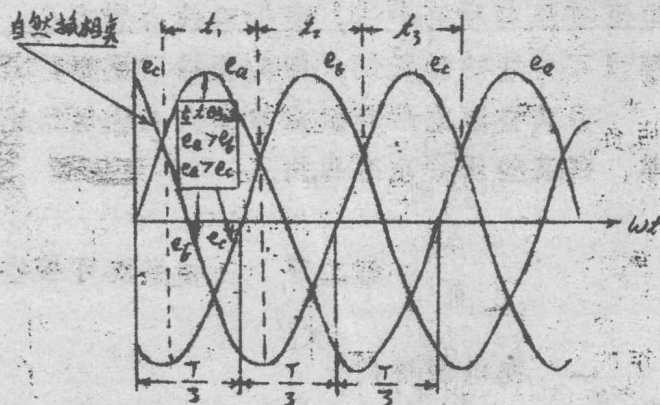


图 2-3

硅发出控制脉冲，在 b ， c 两相电压相交时，对 c 相可控硅发出控制脉冲，三相控制脉冲相差 120° ，在各自然换相点依次出现，如图 2—4 (a) 所示。

当三相控制脉冲后移时，各相可控硅开始导通的时刻也相应后移。如从自然换相点计算，常把后移的角度称为“控制角”或“起通角”以 α 表示。

图 2—4 (b) 就是控制脉冲后移 $\alpha = 30^\circ$ 时整流电压的波形。如果原来是 c 相导通，当经过自然换相点时由于 a 相还没有触发导通，所以 c 相继续导通，直到 α 角时， a 相触发导通，于是便由 c 相轮换到 a 相导通，就这样依次轮流导通，整流电压的波形如图 2—4 (b) 中的粗线所示。如果 $\alpha > 30^\circ$ 则电压波形如图 2—4 (c) 所示，这时 c 相通过自然换相点继续导电，但是继续导电 30° 后， c 相电压变负， c 相可控硅就自动关断，而 a 相的控制脉冲还未出现，因此在控制脉冲出现前，各相都不导通，此时，整流电压的瞬时值就等于另。所以整流电压波形才象图 2—4 (c) 那样。

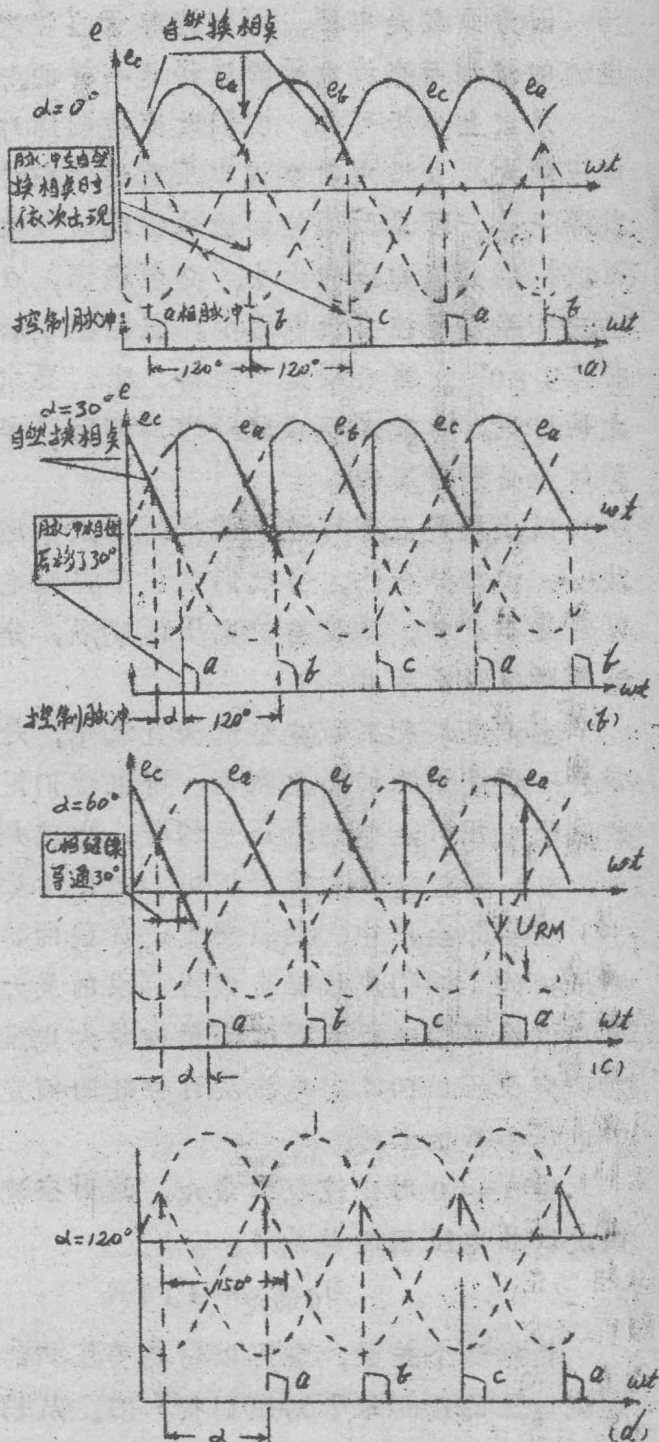


图 2—4

如果控制脉冲再后移， α 角继续增大，于是空流电压愈来愈小。

从图2—4(d)可知，当 $\alpha = 150^\circ$ 时空流电压就等于另。

因为负载是电阻，而电流等于空流电压除以负载电阻，所以空流电流的波形与空流电压的波形是一样的。

从以上分析可知，我们改变控制脉冲的相位，当 $\alpha = 0$ 时，空流电压最大， α 增大时空流电压就逐渐减小，当 $\alpha = 150^\circ$ 时空流电压就等于另，可见改变控制脉冲出现的相位，即改变可控硅的起通角 α ，可以控制空流电压的大小。必须强调， α 角是从自然换相点算起的。在三相半波可控空流电路中，三相控制脉冲依次出现，它们在相位上相差 120° 。当负载是电阻时，我们要求控制脉冲可以在 0° 到 150° 之间出现，也就是要求脉冲的移相范围是 150° ，这些在设计控制线路时是必须考虑的。

以上就是三相可控空流电路的工作原理和空流电路的基本分析方法——波形分析法，当我们认识了空流电压的正确波形后，我们就可以通过示波器，观测空流电压的波形，分析它是否正确，从而判别空流电路有没有毛病。

空流电路把交流电空流为直流电，是一个脉动的直流，有时脉动很大。但是这脉动变化很快，所以我们用直流电压表或万用表测出来的直流电压只是脉动电压平均值，也就是加于负载上的直流电压。

2. 可控硅及空流变压器的电压参数的确定

在实际生产中，是根据直流负载的要求，来正确地选择可控硅及变压器的。我们应根据负载所要求的最大空流电压来确定变压器的相电压以及可控硅所承受的正反向最大电压。根据所要求的直流电流，来确定变压器的额定电流及可控硅的额定平均电流。这里，先讨论一下电压参数的计算。

当 $\alpha = 0$ 时空流电压最大，这时空流电压的平均值 U_d 最大与变压器次级相电压 U_2 的关系是：

$$U_{d\text{最大}} = 1.17 U_2$$

根据这个关系，就可以确定变压器的相电压 U_2 。这个关系是根据空流电压的波形取平均值而得到的。从图2—5可知，一次脉动的平均值是

$$U_{d\text{最大}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \sin \omega t \, d\omega t = 1.17 E$$

可控硅所承受的最大正向电压 U_{FM} 就是可控硅不导通时，阳极电位高于阴极电位的最大电位差，从图 2-4 (d) 可知，阴极的最低电位是另，同时阳极的最高电位是相电压 E_2 的峰值，所以最大正向电压

$$U_{FM} = \sqrt{2} E_2 = 1.414 E_2$$

当一个可控硅导通时，另外两个可控硅所承受的最大反向电压 U_{RM} 就等于线电压的峰值。例如 a 相

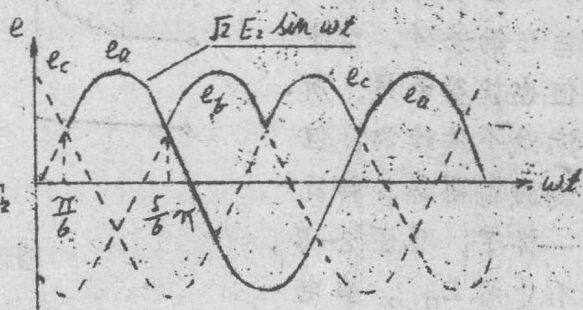


图 2-5

导通时，b 相及 c 相可控硅的阴极电位就是 a 端电位，而阳极分别是 b 端及 c 端的电位。因此可控硅所承受的反向电压就是线电压，而最大的反向电压就是线电压的峰值（图 2-4 c）由于线电压等于 $\sqrt{3} E_2$ ，所以线电压的峰值是 $\sqrt{2} \sqrt{3} E_2 = \sqrt{6} E_2$ ，于是所承受的最大反向电压 U_{RM} 等于

$$U_{RM} = \sqrt{6} E_2 = 2.45 E_2$$

变压口次级电流的有效值及可控硅额定平均电流应根据可控硅导通角的大小及电流波形来计算，这与具体情况有关，关于导通角为 120° 的情况将在下面进行分析。

二、感性电阻负载

上一节讨论了负载是电阻的情况，这时电流波形与电压波形是一致的。当 $\alpha > 30^\circ$ 时电流是断续的，而且脉动较大，为使输出电流平纹，需要采用滤波电志。有时，负载本身就是有电志及电阻的志性电阻负载，例如直流电机的磁场绕组。这一节所要讨论的就是志性电阻负载的情况。

1. 志性电阻负载时奎流电路的工作有什么特点？

采用滤波电感 L_d 的三相半波整流电路如图 2—6 所示。如果电感 L_d 很大，那末由于电感的滤波作用，直流电流 I_d 基本上是平稳的。流过每一个可控硅的电流也就接近于长方形波，见图 2—7 的波形图，实际上不是长方形波，而是有脉动的，只是脉动很小时可以近似地认为是长方形波，这个长方形波的高度是 I_d ，宽度是 120° 。当

$\alpha > 30^\circ$ 时，在纯电阻负载的情况下，当相电压的瞬时值过零为负时，可控硅自动关断，电流瞬时值也就等于零，所以电流是不连续的，但是有滤波电感时，情况就不一样了，见图 2—8，

由于有电感 L_d ，当电流 i 开始变小时，在电感 L_d 就产生感应电势 e_L ，这个感应电势是阻止电流变小的，所以 e_L 的极性如图 2—8 (a) 所示，以 a 相为例，

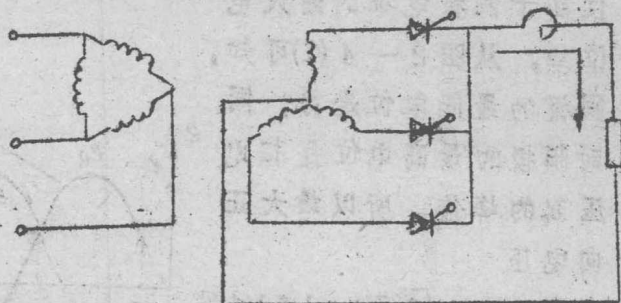


图 2—6

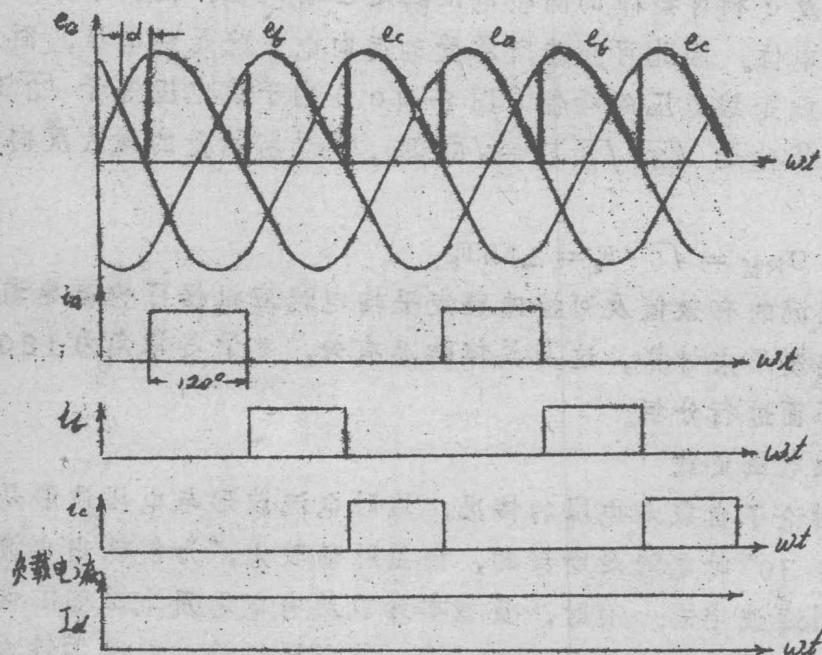


图 2—7

那么即使a相电压的瞬时值 e_a 等于另,并变负了,但是在图2-8(a)虚线回路中的电压 $e_a + e_L$ 仍可以为正,因此a相继续导通,直到b相导通为止。也就是说,当 $\alpha > 30^\circ$ 时仍然能使各相的导通角等于 120° 从而保证直流电流是连续的。当然这是有条件的,那就是滤波电感 L_d 必须足够大(如何计算,以后再讲)图2-8(b)电流波形中的阴影部分是完全靠电感电势 e_L 维持导通的。

2. 直流电压的计算

在电流连续的情况下,整流出来的直流电压 U_d 是比较容易计算的,直流电压 U_d 就是整流电压的平均值。对a相而言,相电压 $e_a = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t$ 从 $(30^\circ + \alpha)$ 开始导通,导电 120° , (见图2-9),这只是一相的情况。由于每一相都是一样的,是重复的, U_d 就等于一相波形的平均值,也就是在导通 120° 的范围内, e_a 的平均值。按弧度计算,

$$30^\circ \text{ 相当于 } \frac{\pi}{6}, \quad 30^\circ$$

$$+ 120^\circ = 150^\circ \text{ 相}$$

$$\text{当于 } \frac{5\pi}{6}, \quad 120^\circ \text{ 相}$$

$$\text{当于 } \frac{2\pi}{3}, \quad \text{所以}$$

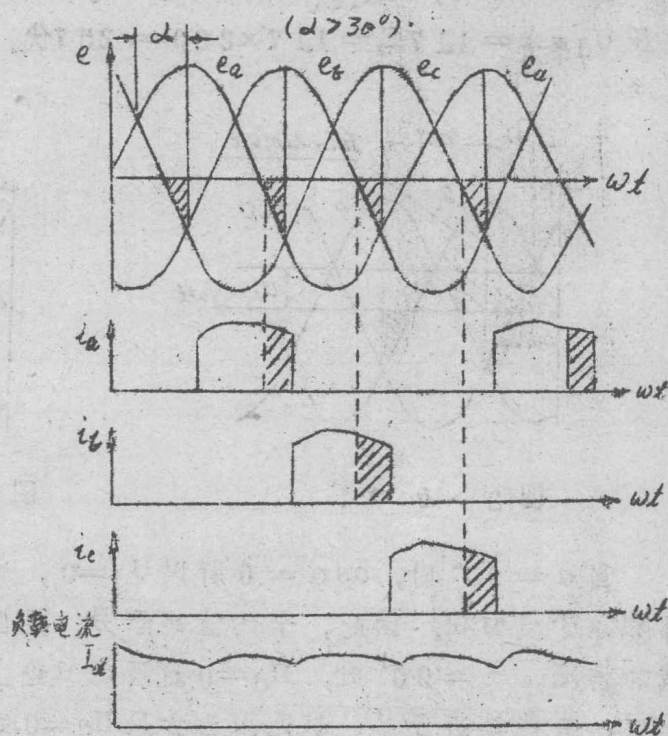
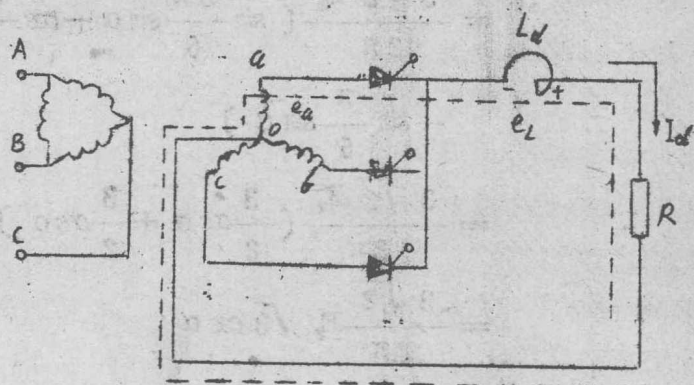


图2-8

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3} - \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2} E_2 \sin \omega t \, d\omega t \\
 &= \frac{3\sqrt{2} E_2}{2\pi} \left(-\cos \left(\frac{5\pi}{6} + \alpha \right) + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right) \\
 &= \frac{3\sqrt{2} E_2}{2\pi} \left(\sin \frac{5\pi}{6} \sin \alpha - \cos \frac{5\pi}{6} \cos \alpha + \cos \frac{\pi}{6} \cos \alpha - \sin \frac{\pi}{6} \sin \alpha \right) \\
 &= \frac{3\sqrt{2} E_2}{2\pi} \left(\frac{3}{2} \cos \alpha + \frac{3}{2} \cos \alpha \right) \\
 &= \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} E_2 \sqrt{3} \cos \alpha \\
 &= 1.17 E_2 \cos \alpha
 \end{aligned}$$

当 $\alpha = 0$ 时, U_d 最大, 等于 $1.17 E_2$, 例如 $E_2 = 220$ 伏, 最大直流电压 $U_{d\text{最大}} = 1.17 E_2 = 1.17 \times 220 = 257$ 伏。

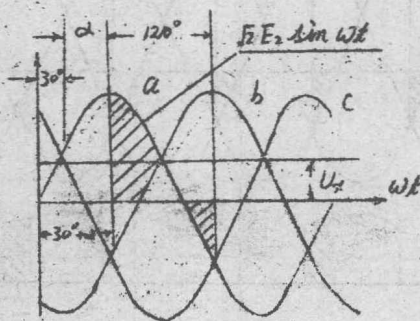


图 2-9

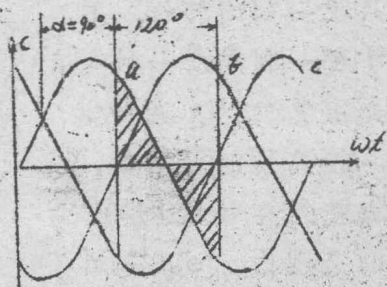


图 2-10 正面积等于负面积

当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $\cos \alpha = 0$ 所以 $U_d = 0$, 这时整流电压的波形是正面积等于负面积。因此, 平均值等于零, 见图 2-10。在感性电阻负载的情况, $\alpha = 90^\circ$ 时, $U_d = 0$ 这只是理论上的数值, 实际上 $\alpha = 90^\circ$ 时 U_d 只能接近于零, 这是因为如果 $U_d = 0$ 那么也就没有什么直流电流了, 也就谈不上 120° 的导通, 有电流就必然有 U_d , 所以实际情况

况必然是导通角小于 120° 。也就是电压波形的正面积总是大于负面积。电抗 L_d 愈大，导通角愈接近 120° ； U_d 也就愈小。因此说当 L_d 很大及 $\alpha = 90^\circ$ 时 U_d 接近于另；如果 L_d 不很大，那末 α 必须大于 90° ， U_d 才接近于另。

3. 再谈滤波电抗 L_d 的作用

上面我们根据电抗上的感应电势总是阻止电流变化的规律引入了滤波电抗使直流电流变得平秋。我们还可以从另外一种理论来说明电抗的作用。整流出来的脉动直流电压可以分成两部分，一部分是直流分量，也就是平均值；另一部分是交变分量，如图 2-11 所示，直流分量在电抗 L_d 上不会有电压降落，因此直流电流等于电压的直流分量除以负载回路电阻。对于交变分量，电抗是个很大的阻抗，因此，只要电抗足够大，电压的交变分量所产生的交变电流就可以很小。整流电流等于直流电流分量加交变电流分量，由于电抗的作用电流交变分量很小，因此，整流电流的脉动很小，见图 2-11。由此可见，有了滤波电抗后，整流电压脉动可以很大，但电流的脉动可以很小，所以这个附加的滤波电抗也常叫做平波电抗。如果负载是电机的磁场绕组，它本身就有很大电抗。因此就不必另外采用电抗了。

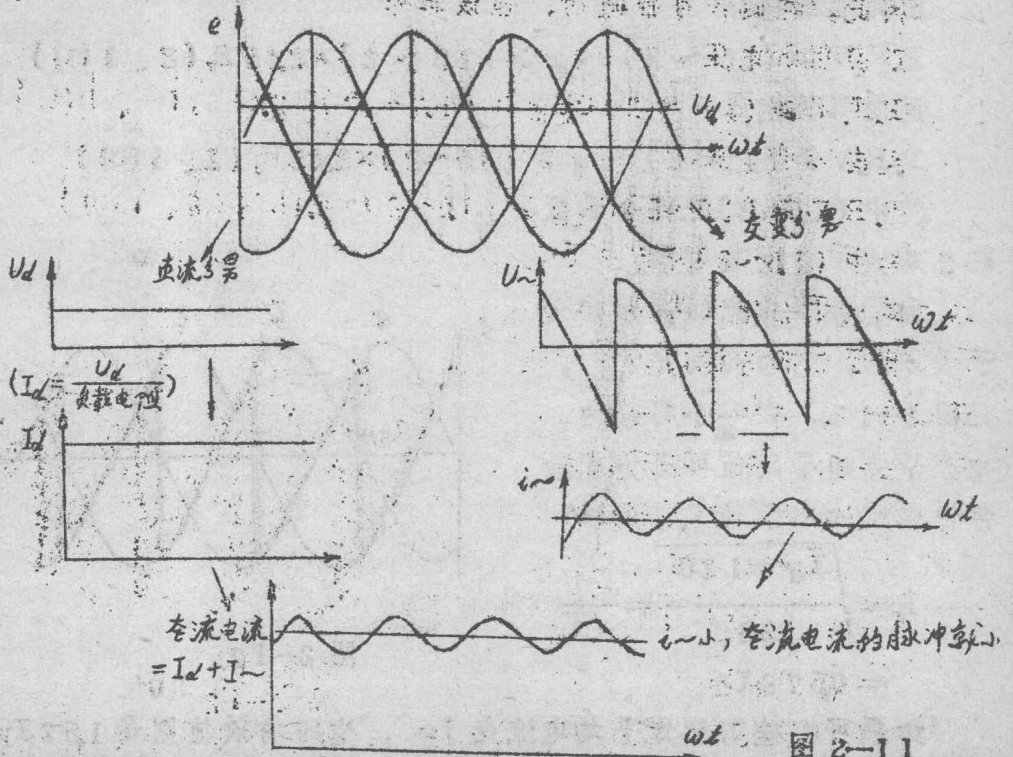


图 2-11

4. 可控硅及变压器参数的确定

上面讲了工作原理，根据工作原理就不难确定可控硅及变压器的定额，在感性电阻负载的情况下，可控硅全导通时最大直流电压 $U_{d_{\max}}$ 与相电压 E_2 的关系仍然是：

$$U_{d_{\max}} = 1.17 E_2$$

可控硅所承受的最大反向电压也与纯电阻负载情况一样，等于线电压的峰值，所以

$$U_{RM} = \sqrt{6} E_2 = 2.45 E_2 = 2.45 \frac{U_{d_{\max}}}{1.17} = 2.09 U_{d_{\max}}$$

在纯电阻负载的情况，由于电流是不连续的，可控硅阴极的最低电位是另。所以可控硅所承受的最大正向电压 U_{FM} 等于相电压的峰值。在感性电阻负载的情况，由于电流是连续的，可控硅的阴极的电位可以是负，如图 2-12 所示。因此，所承受的最大正向电压 U_{FM} 等于线电压的峰值，即

$$U_{FM} = \sqrt{6} E_2 = 2.45 E_2 = 2.09 U_{d_{\max}}$$

因此，在选择可控硅时，应该选择

正向阻断电压

$$P.F.V \geq (1.5 \sim 2) U_{FM} \geq (1.5 \sim 2) \times 2.45 E_2 \quad (2.1(a))$$

反向峰值电压

$$P.R.V \geq (1.5 \sim 2) U_{RM} \geq (1.5 \sim 2) \times 2.45 E_2 \quad (2.1(b))$$

其中 $(1.5 \sim 2)$ 是完全系数

取 2 或大于 2 比较可靠。

由于每相电流的波形接近于长方形，它的高度是 I_d ，见图 2-13，在一个周期内，电流平方的平均值再开方就是每相电流的有效值 I_2 ，所以

$$I_2 = \sqrt{\frac{I_d^2 \times 120^\circ}{360^\circ}} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \\ = 0.578 I_d$$

如果可控硅的额定平均电流是 I_F ，它的有效值则是 $1.57 I_F$ (产

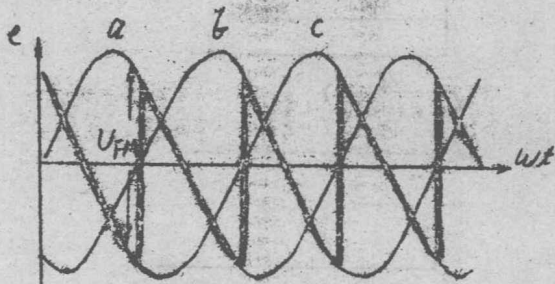


图 2-12