

# 可控硅错位 无环流可逆系统的 原理和应用

冶金工业出版社

## 内 容 提 要

可控硅错位无环流可逆系统是利用错开脉冲位置 和 选择触发的原理来实现无环流控制的。具有结构简单、动态性能好、调整容易和安全可靠等优点，可用于频繁正反转的调速传动装置。

本书从理论和实践上阐明了可控硅错位无环流可逆系统的原理、设计和调整，并给出了该系统的数学模型和计算程序。

本书可供电气传动工程技术人员及有关大专院校师生参考。

## 可控硅错位无环流 可逆系统的原理和应用

顾旭庭 著

\*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 印张 4 7/8 字数 127 千字

1981年4月第一版 1981年4月第一次印刷

印数 0,001~4,300 册

统一书号: 15062·3693 定价 0.63 元

## 前 言

可控硅错位无环流可逆系统是利用错开脉冲位置 and 选择触发的原理来实现无环流控制的。具有结构简单、动态性能好、调整容易和安全可靠等优点，可用于频繁正反转的调速传动装置。

可控硅错位无环流可逆系统于1974年在北京钢铁设计研究总院试验成功，1975年3月正式用于差动调速装置上，运行情况正常。同年，又试验成功了可控硅错位选触无环流可逆系统，并用于大型门型吊车上。1977年3月在鞍山召开了全国鉴定会。会议认为该系统性能良好，各项指标均较原机组供电有显著提高，能满足生产要求。我们又曾编制了数学模型在电子计算机上对系统进行了分析研究，进一步论证了系统的可靠性。1976年夏天进行了励磁系统上的应用试验。1978年又完成了进一步提高快速性的试验。

目前，北京、上海、辽宁、陕西、湖北、福建等地区已有不少制造厂正式生产本系统的定型产品，冶金部北京钢铁设计研究总院试验厂亦生产并供应成套装置。该装置已用于可逆轧机的主副传动、大型门型吊车、龙门刨床、运行小车、钻机以及其他要求调速的传动装置上。

本系统及装置在试验、设计、调整过程中，有陆大雄、聂西、濮汝琳、吴训铤、潘传兴、徐步岩、班俊华、朴世云工程师等参加，使试验研究工作顺利地取得预期成果。

本书承濮汝琳工程师认真审阅，专此致谢。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作 者

1979年12月 于北京

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第一章 错位无环流可逆系统的工作原理 .....          | 1  |
| 第一节 三相桥式反并联及环流 .....              | 1  |
| 第二节 静态环流的遏制 .....                 | 3  |
| 第三节 动态环流的遏制 .....                 | 11 |
| 第四节 错位无环流可逆系统的结构 .....            | 12 |
| 第二章 错位选触无环流可逆系统的工作原理 .....        | 16 |
| 第一节 工作原理 .....                    | 16 |
| 第二节 运行方式 .....                    | 18 |
| 第三节 错位选触的一个特例 .....               | 23 |
| 第四节 错位选触无环流可逆系统的结构 .....          | 23 |
| 第三章 电压调节器、电流调节器和转速调节器 .....       | 24 |
| 第一节 调节对象的传递函数 .....               | 24 |
| 第二节 电压调节器 .....                   | 30 |
| 第三节 电流调节器 .....                   | 32 |
| 第四节 转速调节器 .....                   | 34 |
| 第四章 电压内环的作用和选触单元 .....            | 36 |
| 第一节 电压内环的作用 .....                 | 36 |
| 第二节 选触单元 .....                    | 44 |
| 第五章 错位无环流可逆系统的运行和可靠性 .....        | 47 |
| 第一节 问题的实质 .....                   | 47 |
| 第二节 电流反向过程 .....                  | 48 |
| 第三节 调节器的工作状态 .....                | 50 |
| 第四节 动态环流的遏制和可靠性分析 .....           | 53 |
| 第六章 提高错位无环流可逆系统快速性的措施 .....       | 59 |
| 第一节 恒 $\frac{di}{dt}$ 电流调节器 ..... | 59 |
| 第二节 变参量电压调节器 .....                | 69 |
| 第三节 无超调转速调节器 .....                | 72 |
| 第七章 错位无环流可逆系统的调整 .....            | 79 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第一节 单元电路调整 .....              | 79  |
| 第二节 系统调整 .....                | 96  |
| 第三节 抗干扰措施 .....               | 104 |
| 第八章 错位无环流可逆励磁系统 .....         | 105 |
| 第一节 系统结构 .....                | 105 |
| 第二节 调节器 .....                 | 105 |
| 第三节 励磁电流截止 .....              | 107 |
| 第四节 系统性能 .....                | 110 |
| 第九章 错位无环流可逆系统的数学模型和计算程序 ..... | 111 |
| 第一节 基本单元的数学模型 .....           | 111 |
| 第二节 电压环的数学模型 .....            | 114 |
| 第三节 电流环的数学模型 .....            | 118 |
| 第四节 转速环的数学模型 .....            | 119 |
| 第五节 计算程序 .....                | 127 |
| 附录一 几种限幅方式 .....              | 137 |
| 第一节 强制限幅 .....                | 137 |
| 第二节 反馈限幅 .....                | 138 |
| 附录二 两种PI调节器 .....             | 140 |
| 附录三 逆变角限制 .....               | 144 |
| 参考文献 .....                    | 150 |

# 第一章 错位无环流可逆系统 的工作原理

## 第一节 三相桥式反并联及环流

可控硅整流器具有单相导电性能，一组可控硅整流器不能使直流电流反向，因此对于可逆系统必须用两组可控硅组成。可控硅整流器通常采用三相桥式整流电路，两组三相桥反并联构成的可逆系统如图 1-1。由于两组整流器输出电压的瞬时值不相等，就会产生不流过负载的环流。为了限制环流，需要在主回路中设置电抗器。环流增加了可控硅变流器的损耗。为了减少设备，节省投资和损耗，可逆系统一般采用无环流控制。逻辑无环流可逆系统是当一组整流器工作时，封锁另一组整流器的触发脉冲，而错位无环流可逆系统是通过适当安排两组整流器的触发脉冲使之达到没有环流。

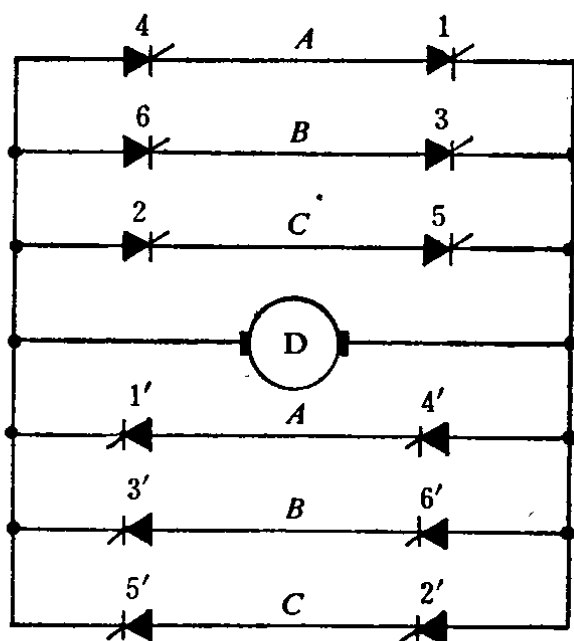


图 1-1 三相桥式反并联

在三相桥式反并联电路中，环流有两个并联通道。一条通过第一组整流桥的 1、3、5 号可控硅和第二组整流桥的 4'、6'、2' 号可控硅形成回路；另一条通过第二组整流桥的 1'、3'、5' 号可控硅和第一组整流桥的 4、6、2 号可控硅形成回路。这两条回路完全对称。

在分析环流以前，先研究一下三相桥式整流电路的特点。在三相桥式整流电路中，必须同时有两只可控硅导通才能输出直流

电流。三相整流桥中的六只可控硅是按照图1-1的顺序触发的，每只可控硅导通 $120^\circ$ 。换相的顺序是  $A-1-D-6-B$ ,  $A-1-D-2-C$ ,  $B-3-D-2-C$ ,  $B-3-D-4-A$ ,  $C-5-D-4-A$ ,  $C-5-D-6-B$ , 然后又 是  $A-1-D-6-B$ , 周而复始。为了保证三相桥式整流电路能够可靠地工作，也就是要保证在电流断续的情况下也能可靠地工作，当采用宽触发脉冲时，触发脉冲的宽度应该大于 $60^\circ$ 。若脉冲宽度不够 $60^\circ$ ，则在触发轮到的那只可控硅的同时，必须再给上一只可控硅补送一个脉冲。每只可控硅在导通的 $120^\circ$ 内接收两个脉冲，这两个脉冲相隔 $60^\circ$ 。即所谓双脉冲触发。例如3号脉冲不仅送3号可控硅，还要送2号可控硅，以此类推。当然脉冲宽度也不能大于 $120^\circ$ ，即不能大于可控硅的导通期间。触发脉冲的极限宽度是 $120^\circ$ 。在这 $120^\circ$ 内，不管可控硅中有没有电流通过，这只可控硅都是处于导通状态。在可控硅一旦导通后，即使脉冲消失也能保持继续导通，直到电流消失才会恢复阻断状态，所以不需要在整个导通时间内都有脉冲。因此，在宽脉冲触发系统中，脉冲宽度只要大于 $60^\circ$ 即可；在双脉冲触发系统中，脉冲宽度只要能保证可控硅可靠开通即可。在分析环流时，脉冲宽度按 $120^\circ$ 考虑，这样可以看得更清楚。

有相位控制的整流电压公式为

$$u_d = u_{d0} \cos \alpha \quad (1-1)$$

式中  $\alpha$ ——控制角（整流角）；

$u_{d0}$ ——全导通时的理想直流空载电压平均值；

$u_d$ ——有相位控制时的理想直流空载电压平均值。

在三相桥式整流电路中

$$u_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 1.35 U_2 \quad (1-2)$$

式中  $U_2$ ——整流变压器二次线电压有效值。

合并式1-1和式1-2得

$$u_d = 1.35 U_2 \cos \alpha \quad (1-3)$$

从公式1-3可以看出

当 $\alpha=90^\circ$ 时,  $u_d=0$

当 $0<\alpha<90^\circ$ 时,  $u_d>0$ , 整流工作。

当 $90^\circ<\alpha<180^\circ$ 时,  $u_d<0$ , 逆变工作。

在逆变工作区以逆变角 $\beta=180^\circ-\alpha$ 代替整流角 $\alpha$ , 则输出电压

$$u_d = -u_{d0} \cos \beta$$

若两组整流桥的零位都定在 $90^\circ$ , 即 $\alpha_{10}=\alpha_{20}=90^\circ$ , 加上控制讯号后, 两组整流桥的触发脉冲向相反方向移动, 移相特性是直线, 如图1-2。

两组整流桥控制角的关系是

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$$

$$\text{即 } \alpha_2 = 180^\circ - \alpha_1$$

第一组整流桥的输出电压为

$$u_{d1} = 1.35U_2 \cos \alpha_1 \quad (1-4)$$

第二组整流桥的输出电压为

$$\begin{aligned} u_{d2} &= 1.35U_2 \cos \alpha_2 \\ &= 1.35U_2 \cos (180^\circ - \alpha_1) \\ &= -1.35U_2 \cos \alpha_1 \end{aligned} \quad (1-5)$$

从公式1-4和1-5可以看出两组变流器的输出电压平均值是大小相等方向相反的, 但两组变流器输出电压的瞬时值并不相等。因此就产生了不流过负载的环流。如前所述环流由电网经过两组整流桥的可控硅而直接短路。

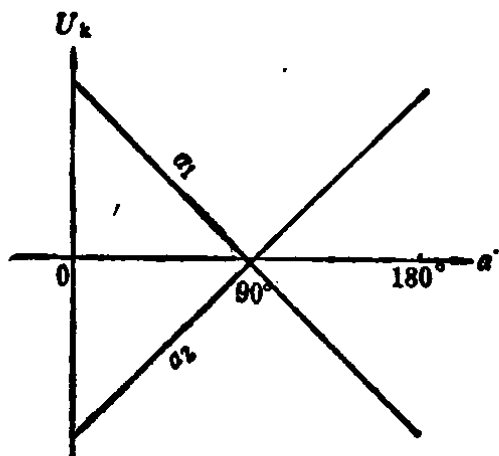


图 1-2 移相特性

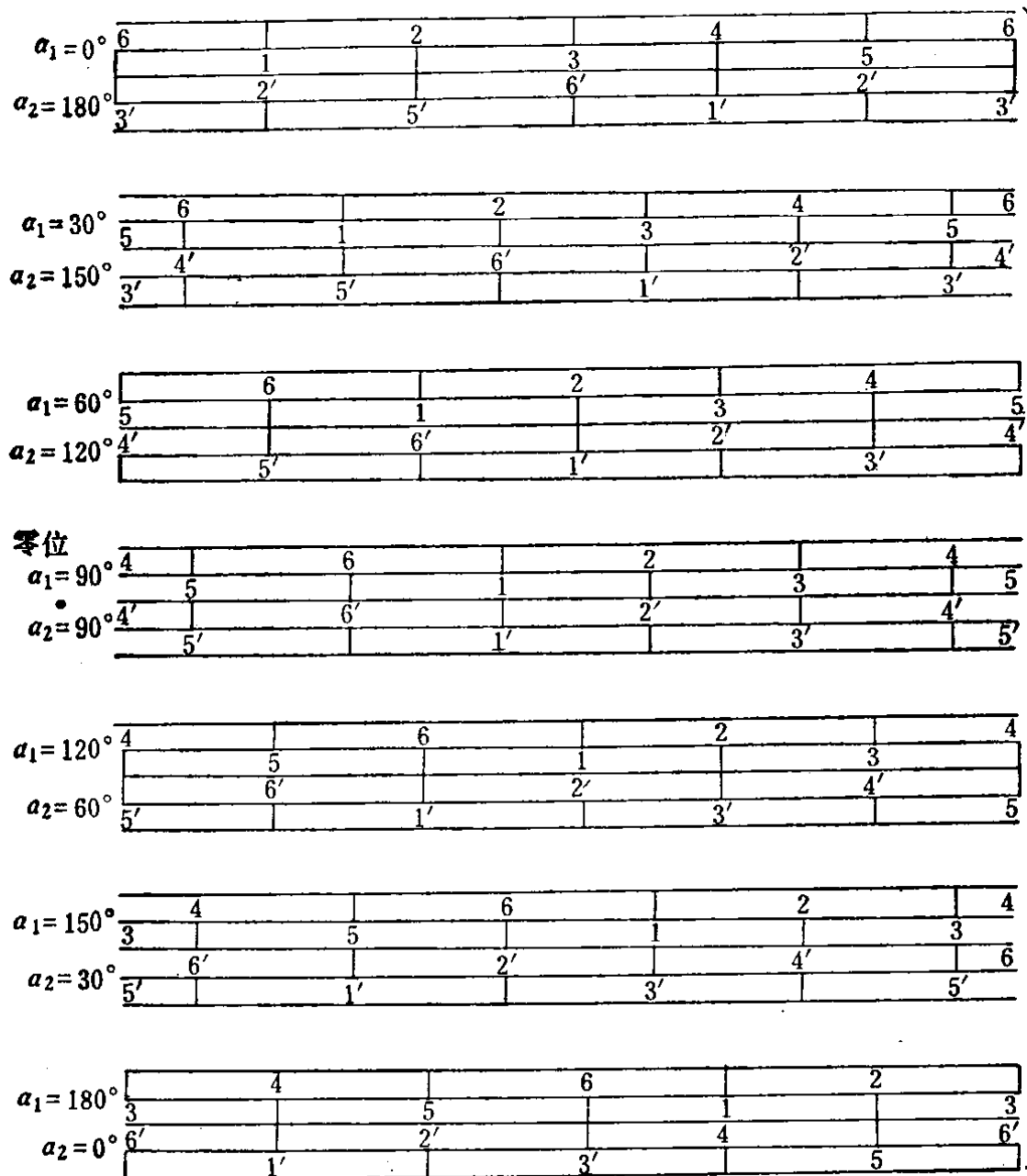
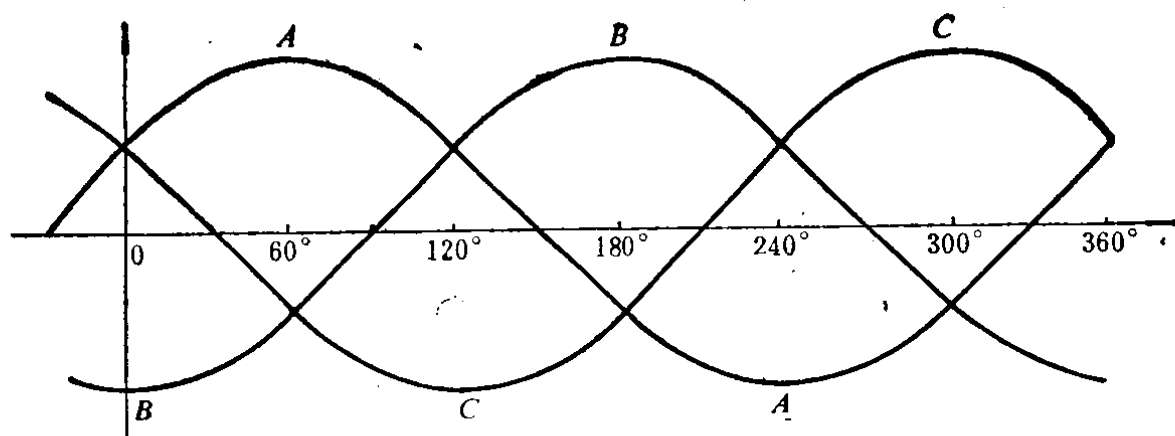
( $\alpha_{10}=\alpha_{20}=90^\circ$ )

## 第二节 静态环流的遏制

零位定在 $90^\circ$ 的两组整流桥的电源电压波形和触发脉冲相位如图1-3。

分析有没有环流的方法是看1号脉冲和6'号脉冲的重合段, 即1号可控硅和6'号可控硅都导通的时候, A相电压是否高于B相电压, 以及1号脉冲和2'号脉冲的重合段, 即1号可控硅和2'号可控硅都导通的时候, A相电压是否高于C相电压。如果1





有环流

图 1-3 电源电压和触发脉冲 ( $\alpha_{10} = \alpha_{20} = 90^\circ$ )

号和6'号可控硅都导通时， $A$ 相电压高于 $B$ 相电压，就会产生 $AB$ 相环流；如果1号和2'号可控硅都导通时， $A$ 相电压高于 $C$ 相电压，就会产生 $AC$ 相环流。从图1-3中可以看出，在零位，即 $\alpha_1=90^\circ$ 和 $\alpha_2=90^\circ$ 时，1号脉冲与6'号脉冲和2'号脉冲都有重合段。在1号和6'号脉冲的重合段 $A$ 相电压高于 $B$ 相电压，所以有 $AB$ 相环流；在1号和2'号脉冲的重合段 $A$ 相电压高于 $C$ 相电压，所以有 $AC$ 相环流。第一组脉冲向前移动时第二组脉冲向后移。1号和6'号脉冲的重合段增加，1号和2'号脉冲的重合段减少。在这两个重合段中都有环流。到 $\alpha_1=60^\circ$ 和 $\alpha_2=120^\circ$ 时，1号和6'号脉冲完全重合，在重合段的前 $60^\circ$ ， $A$ 相电压高于 $B$ 相电压，所以有 $AB$ 相环流。在 $\alpha_1$ 从 $60^\circ$ 到 $0^\circ$ 和 $\alpha_2$ 从 $120^\circ$ 到 $180^\circ$ 的区间，1号和6'号脉冲都有重合段，在重合段的前半段 $A$ 相电压都高于 $B$ 相电压，所以都有环流。不难看出，若零位定在 $90^\circ$ ，从整个工作范围看， $\alpha_1$ 从 $0^\circ$ 到 $180^\circ$ 和 $\alpha_2$ 从 $180^\circ$ 到 $0^\circ$ ，都有环流。

若把两组整流桥的触发脉冲都向后移 $30^\circ$ ，即把零位定在 $120^\circ$ ，如图1-4和1-5。

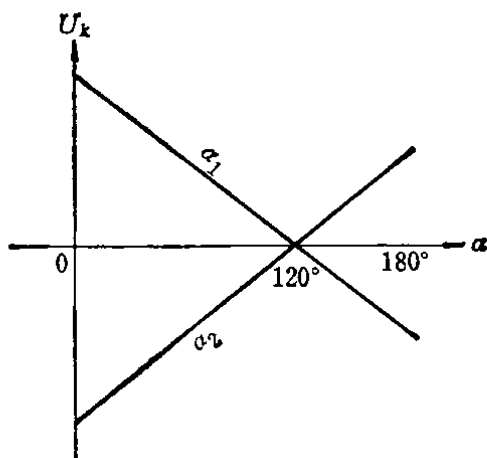


图 1-4 移相特性 ( $\alpha_{10} = \alpha_{20} = 120^\circ$ )

从图1-5看到，在零位，即 $\alpha_1=120^\circ$ 和 $\alpha_2=120^\circ$ 时，1号和6'号脉冲的重合段 $A$ 相电压低于 $B$ 相电压；1号和2'号脉冲的重合段 $A$ 相电压低于 $C$ 相电压，没有环流。但脉冲稍一移动就出现在1号和6'号脉冲的重合段中， $A$ 相电压高于 $B$ 相电压；在1号

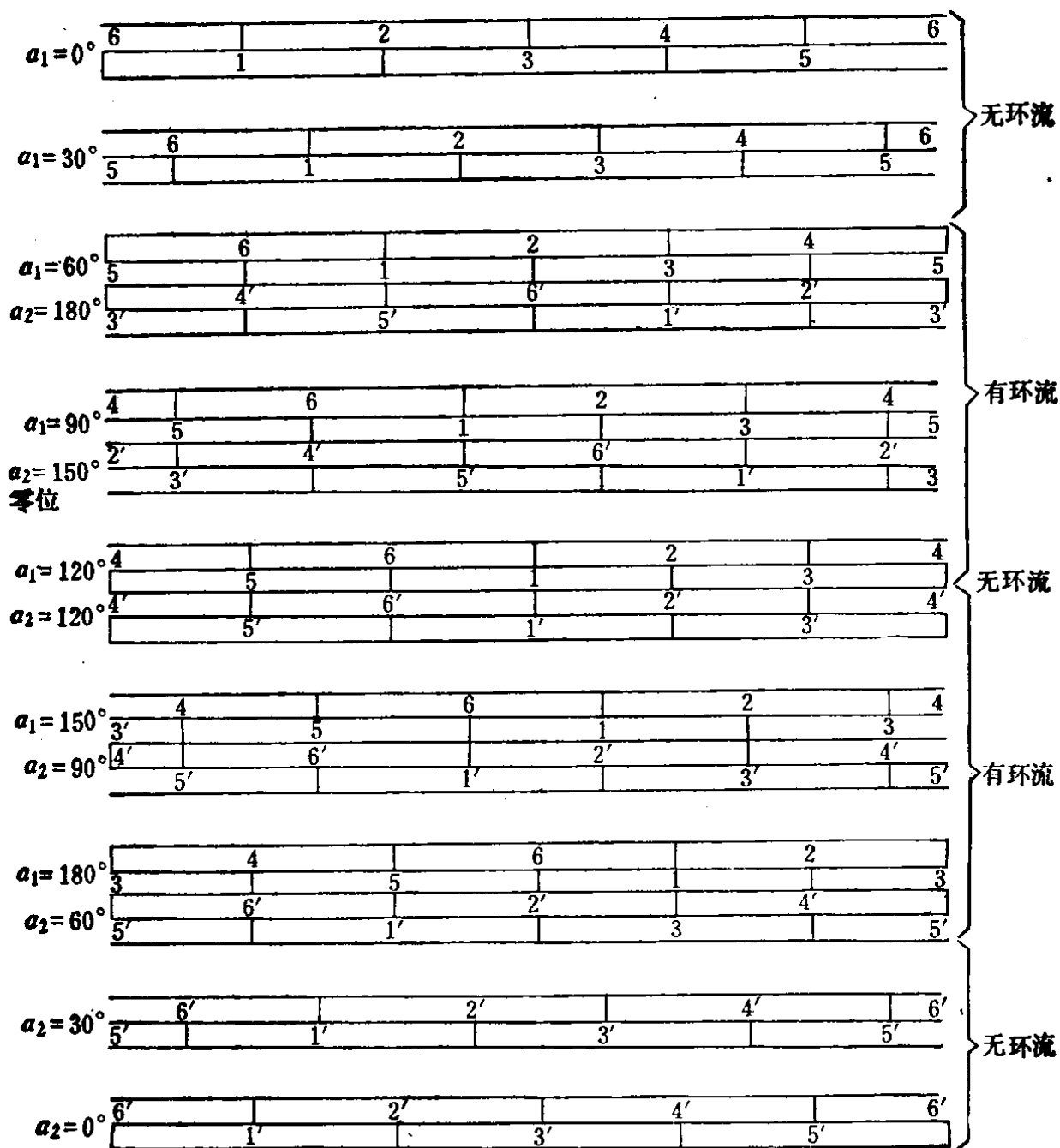
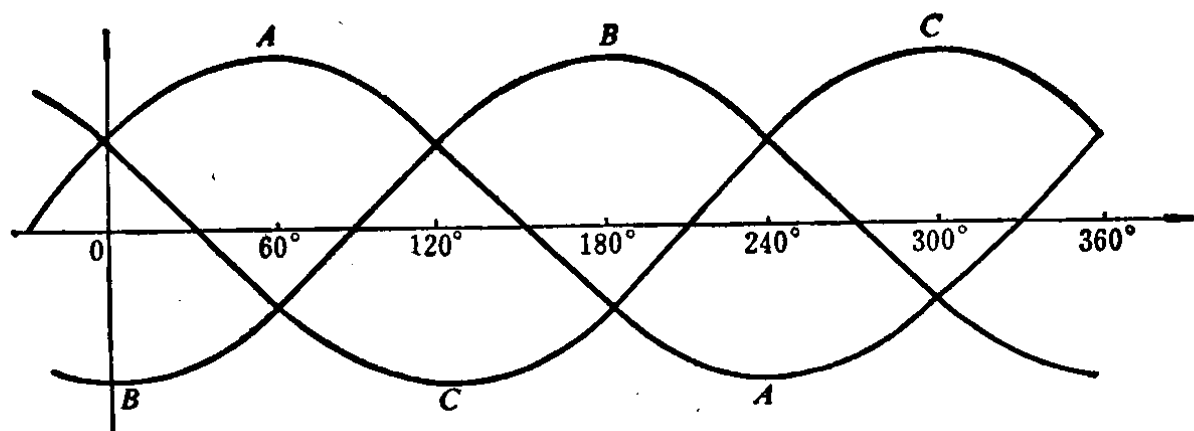


图 1-5 电源电压和触发脉冲 ( $\alpha_{10} = \alpha_{20} = 120^\circ$ )

和2'号脉冲重合段中，A相电压高于C相电压。所以就有环流。可以看到从零位到 $\alpha_1=60^\circ$ 和 $\alpha_2=180^\circ$ 及从零位到 $\alpha_1=180^\circ$ 和 $\alpha_2=60^\circ$ 这两个区间都有环流。由于三相桥式整流电路，触发脉冲的移相范围只需要 $180^\circ$ ，大于 $180^\circ$ 脉冲就可以使其消失。所以当 $\alpha_1$ 或 $\alpha_2$ 小于 $60^\circ$ 时，另一组触发脉冲没有了，环流也就无从产生。

若把两组整流桥的触发脉冲再向后移 $30^\circ$ ，即把零位定在 $150^\circ$ ，如图1-6和1-7。

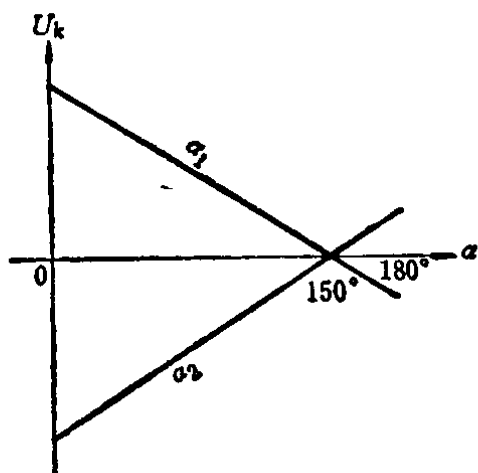


图 1-6 移相特性 ( $\alpha_{10} = \alpha_{20} = 150^\circ$ )

从图1-7可以看出，在整个工作范围内，不管脉冲移到什么位置，在1号和6'号脉冲的重合段A相电压都低于B相电压，不会产生AB相环流；在1号和2'号脉冲重合段A相电压都低于C相电压，不会产生AC相环流。静态环流完全被遏制了。

判断会不会产生静态环流的简易方法是：当两组整流桥的触发脉冲移动时，看1号脉冲的前沿和6'号脉冲的前沿在什么地方相遇。显而易见，当1号和6'号脉冲的前沿在 $120^\circ$ 线以左相遇，就会产生静态环流。当1号和6'号脉冲的前沿在 $120^\circ$ 线上及以右相遇，就不会产生静态环流。由于对称原理，有AB相环流，必然伴有BC相和CA相环流。没有AB相环流，也必然没有BC相及CA相环流。

若零位定在 $90^\circ$ ，则1号和6'号脉冲的前沿在 $60^\circ$ 相遇，在 $120^\circ$ 线以左，所以有环流。若零位定在 $120^\circ$ ，则1号和6'号脉冲

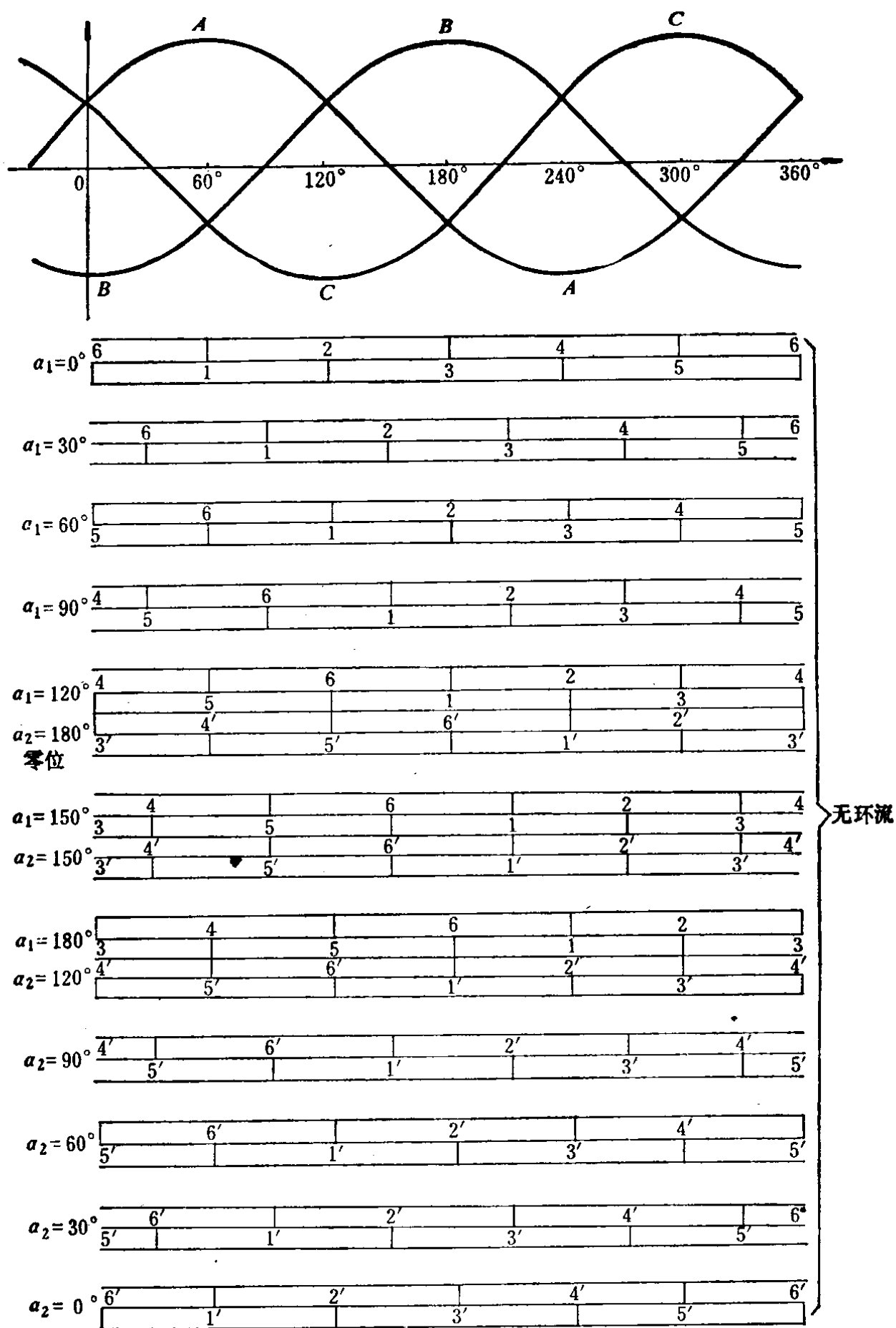


图 1-7 电源电压和触发脉冲 ( $\alpha_{10} = \alpha_{20} = 150^\circ$ )

的前沿在 $90^\circ$ 相遇，也在 $120^\circ$ 线以左，所以也有环流。若零位定在 $150^\circ$ ，则1号和6'号脉冲的前沿正好在 $120^\circ$ 线上相遇，所以没有环流。若零位大于 $150^\circ$ ，这两个脉冲的前沿在 $120^\circ$ 线以右相遇，更没有环流。所以 $150^\circ$ 是无环流极限，要保证没有静态环流，零位不能定得小于 $150^\circ$ 。

以上讨论的是直线移相，即锯齿波移相，其移相特性为直线。一组脉冲向前移若干度，另一组脉冲向后移同样度数。如果采用正弦波移相，如图1-8，情况有所不同，两组脉冲移动的度

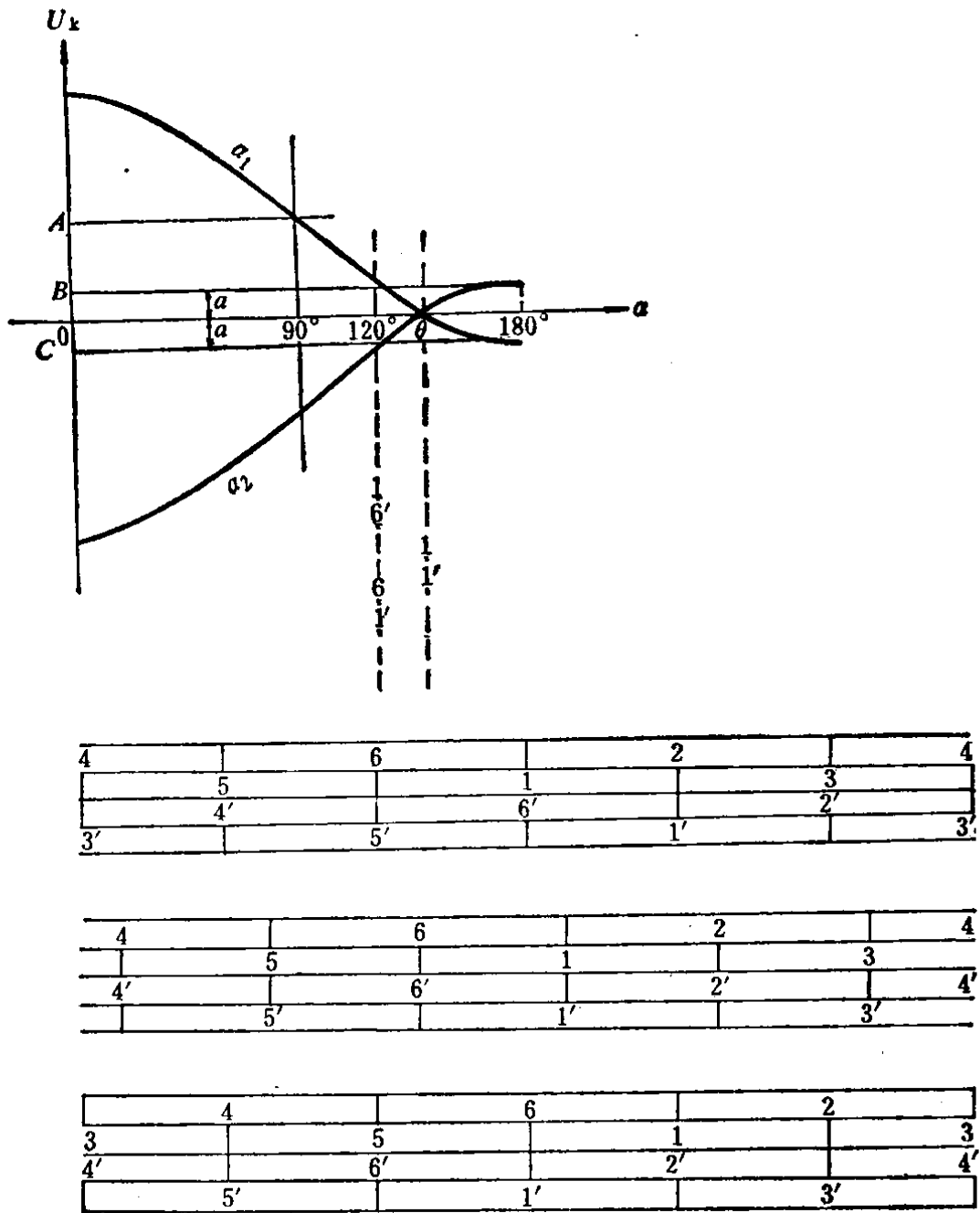


图 1-8 正弦波移相 ( $\alpha_{10} = \alpha_{20} = 138.6^\circ$ )

数不一样。设  $\theta$  为无环流极限，则根据 1 号和 6' 号脉冲的前沿在  $120^\circ$  线上相遇的原则，可以列出下面的联立方程：

$$\begin{cases} BA = \cos\theta - A = \cos 120^\circ & (1-6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} CA = \cos\theta + A = \cos 180^\circ & (1-7) \end{cases}$$

式 1-6 和式 1-7 两式相加得：

$$2\cos\theta = \cos 120^\circ + \cos 180^\circ = -\frac{3}{2}$$

$$\therefore \theta = \cos^{-1}\left(-\frac{3}{4}\right) = 138.6^\circ$$

因此，正弦波移相时，无环流极限条件为  $\theta = 138.6^\circ$ 。

在实际工作中，一般不能按无环流极限条件整定脉冲零位，需要留一些安全裕量，即把零位再向后移  $3^\circ \sim 5^\circ$ 。

若把零位定在  $180^\circ$ ，则移相特性如图 1-9。由于移相范围只有  $180^\circ$ ，所以在任何时候都只有一组整流桥有触发脉冲，另一组整流桥没有触发脉冲，无法产生静态环流。

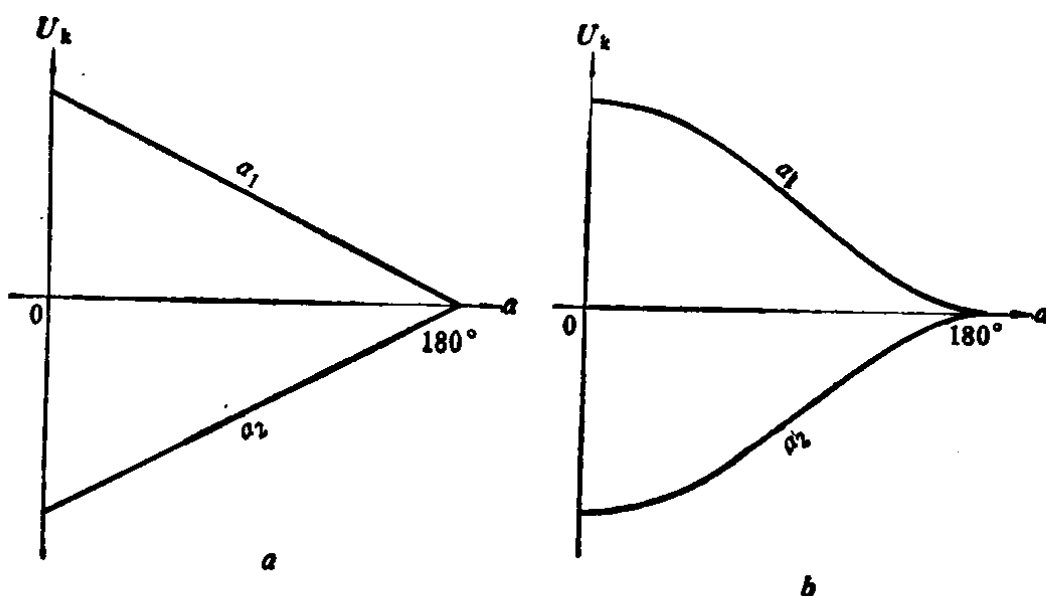


图 1-9 移相特性 ( $\alpha_{10} = \alpha_{20} = 180^\circ$ )

a—锯齿波移相；b—正弦波移相

### 第三节 动态环流的遏制

把两组整流桥的零位向后移一定角度，就可以遏制静态环流。也就是说，不工作的那一组整流桥虽然也有触发脉冲，但脉冲到来时可控硅两端的电压是反向的。所以可控硅不能导通，不会产生环流。但是仅仅这样还不能保证可逆系统正常工作。因为可控硅一旦触发后就不能控制，必须等电流消失，再经过一段时间，可控硅才能恢复阻断状态。由于直流回路中存在电感，所以电流的衰减需要时间。如果触发脉冲移动太快，正在工作的一组整流桥电流还未衰减到零，可控硅未恢复阻断状态，触发脉冲已经移到能使另一组整流桥可控硅导通的程度，仍然会产生环流。这种在触发脉冲移动过程中产生的环流叫做动态环流。在逻辑无环流系统中，遏制动态环流是通过零电流检测和一整套逻辑电路来实现的。完善的逻辑无环流系统必须满足以下四个条件：

1) 只允许一组整流桥有触发脉冲，而不允许两组整流桥同时有触发脉冲。

2) 只有当工作的那一组整流桥的电流断续后才能封锁其触发脉冲。不然，若工作的那一组整流桥处于逆变状态，电流没有断续就取消触发脉冲，会发生逆变颠覆。

3) 只有当原工作的那一组整流桥的电流完全消失，可控硅恢复阻断状态后，才能开放另一组变流器的触发脉冲。不然，仍会产生环流。

4) 为了避免电流冲击，任何一组整流桥的触发脉冲开放时，其相位要与电动机的电势相适应。

此外，还要考虑由于电流断续对整流桥外特性的影响，防止系统振荡，设置电流自适应调节。

错位无环流可逆系统只是设置一个电压内环，借助电压调节器和电流调节器的配合作用，使系统能准确地控制移相触发信号 $u_0$ 的变化，而达到遏制动态环流的目的，并且在电流断续时能遏制系统振荡。不仅在静态，触发脉冲不移动时没有环流；在动



态，由一组整流桥工作过渡到另一组整流工作时，也可以安全快速地转换，既没有环流，也没有电流冲击。这些都是由系统本身自动完成，不需要任何外界强制手段。关于动态环流的遏制，在第五章中还要详细讨论。

#### 第四节 错位无环流可逆系统的结构

错位无环流可逆系统是由一个电压调节器组成的电压内环。电压调节器是一个积分环节，参数的选择是使电压内环闭环后的等效传递函数仍是一个毫秒级的小惯性，与可控硅变流器自身一样。在电压环外面加上电流环和转速环就构成典型的可控硅错位无环流可逆系统，如图1-10。

从图1-10可以看到，错位无环流可逆系统结构简单，它不需要逻辑装置，也不需要检测断续电流和零电流，不加任何人为强制手段，系统就可以安全可靠地工作。并且可以很容易地得到每秒200倍额定电流的电流变化率和6毫秒的断流间歇。

错位无环流可逆系统也可以组成电压调节系统如图1-11。

图1-11没有测速机，用电压给定负反馈和电流正反馈来代替转速反馈。不仅可以调速，并有满意的动态性能。这种系统广泛地用在没有精调速要求的单机上，如龙门刨床，轧钢车间辅助传动等。可逆轧机也可以使用这种系统。

错位无环流可逆系统也可以组成电流调节系统如图1-12。

图1-12适用于张力调节系统，如卷取机等。