



# 第4章 弧焊变压器



**变压器**在电力系统、电力拖动系统、自动控制系统以及电弧焊接系统中起着电能传输、能量转换或信号传输的作用，得到了广泛地应用。

**弧焊变压器**是一种交流弧焊电源，具有结构简单，便于制造和维修，工作可靠性高，成本低廉等优点，主要应用于焊条电弧焊、钨极氩弧焊、埋弧焊等焊接工艺方法。**弧焊变压器是一种特殊的变压器(内部输出阻抗人为增大的变压器)**，变压器的基础理论仍适用于弧焊变压器。

本章将重点介绍变压器的基本原理、弧焊变压器的工作原理和特点，以及几种常用的弧焊变压器

## 4.1 变压器基础知识

### 1. 磁场的几个常用量

(1) **磁感应强度  $B$**  磁场是由电流产生的，表征磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 $B$ ，它是一个矢量。磁场中各点的磁感应可以用闭合的磁感应矢量线来表示，它与产生它的电流方向可以用右螺旋定则来确定。

国际单位制中， $B$ 的单位为T（特斯拉），即 $\text{Wb}\cdot\text{m}^{-2}$ （韦伯·米<sup>-2</sup>）。



(2) **磁通  $\Phi$**  在均匀磁场中，磁感应强度 $B$ 与垂直于磁场方向的面积 $S$ 的乘积，为通过该面积的通量，称为磁通量，简称磁通 $\Phi$ （一般情况，磁通则定义为 $\Phi = \int B \cdot dS$ ）。由于 $B = \Phi / S$ ， $B$ 也称为磁通密度，或简称磁密。若用磁感应线来描述磁场，通过单位面积的磁感应线疏密反映了磁感应强度（磁通密度）的大小以及磁通量的多少。国际单位制中， $\Phi$ 的单位为 $Wb$ （韦伯）。

(3) **磁场强度 $H$**  磁场强度 $H$ 是计算磁场时所引用的一个物理量，它也是一个矢量， $H$ 的单位为 $A \cdot m^{-1}$ 。用来表示物质导磁能力的物理量为**磁导率 $\mu$** ，它与磁场强度 $H$ 的乘积等于磁感应强度，即 $B = \mu H$ 。

真空的磁导率为 $\mu_0$ ，是个常数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H \cdot m^{-1}$ 。铁磁材料的磁导率 $\mu \gg \mu_0$ 。任何一种物质的磁导率 $\mu$ 和真空的磁导率 $\mu_0$ 的比值，称为该物质的相对磁导率 $\mu_r$ ，即：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

对于非磁材料，磁导率都是一个常数，而且 $\mu \approx \mu_0$ ， $\mu_r \approx 1$ ；而磁性材料的磁导率很高， $\mu_r \gg 1$ 。



## 2. 安培环路定律

磁场强度  $H$  沿任意闭合回线  $L$  (常取磁力线作为闭合回线) 的线积分, 等于穿过该闭合回线所围面积的电流的代数和。若沿着回线  $L$ , 磁场强度  $H$  处处相等 (均匀磁场), 且闭合回线所包围的总电流是由通有电流  $I$  的  $N$  匝线圈所提供, 则有:

$$HL = NI$$

## 3. 磁路的欧姆定律

令  $F = IN$  称为磁动势,  $R_m = l / \mu S$  称为磁路磁阻, 则有:

$$F = \Phi \cdot R_m$$

作用在磁路上的磁动势  $F$  等于磁路内的磁通量  $\Phi$  乘以磁阻  $R_m$ 。这与电路中的欧姆定律在形式上十分相似, 因此, 称之为磁路的欧姆定律。把磁路中的磁动势  $F$  类似于电路中的电动势  $E$ , 磁通量  $\Phi$  类似于电流  $I$ , 磁阻  $R_m$  类似于电阻  $R$ 。

磁动势-----电动势

磁阻 ( $R_m = l / \mu S$ ) ----- 电阻 ( $R = l / \mu S$ )

磁通量-----电通量(电流)



## 4. 电磁感应定律



穿过线圈的磁通发生变化，就会在线圈中产生感生电动势；如果线圈闭合，就会有感生电流。单个回路中产生的感生电动势 $e$ 和穿过此回路的磁通量 $\Phi$ 的变化率成正比，即：

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

这就是**法拉第电磁感应定律**，式中的负号表示感生电流的取向是：感生电流自身产生的磁场总是反抗原来磁通量的变化。若回路是 $N$ 匝密绕的线圈，可将每匝线圈看作是一个回路，匝与匝之间是串联关系。则有：

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} (N\Phi) = - \frac{d\Psi}{dt}$$



## 4.1.2 磁路及其计算



如同把电流流过的路径称为电路一样，磁通所通过的路径称为磁路。不同的是磁通的路径可以是铁磁物质，也可以是非磁体。  
与电路相比，磁路没有开路的问题，却存在着漏磁问题。

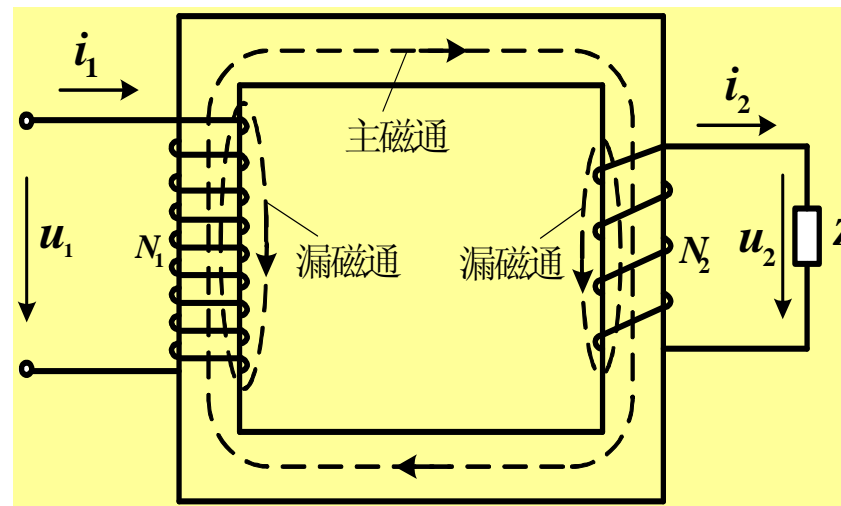
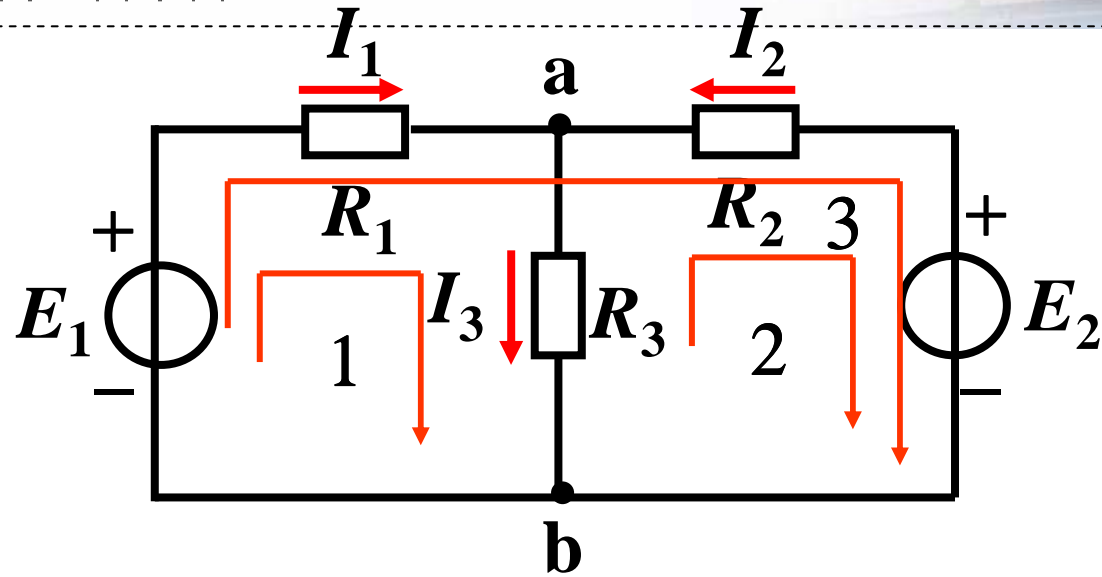


图4-3 磁路中的磁通



# 电路的基尔霍夫定律



- 支路：** 电路中的每一个分支。  
一条支路流过一个电流，称为支路电流。
- 结点：** 三条或三条以上支路的联接点。
- 回路：** 由支路组成的闭合路径。
- 网孔：** 内部不含支路的回路。



# 基尔霍夫电流定律 (KCL定律)

## 定律1

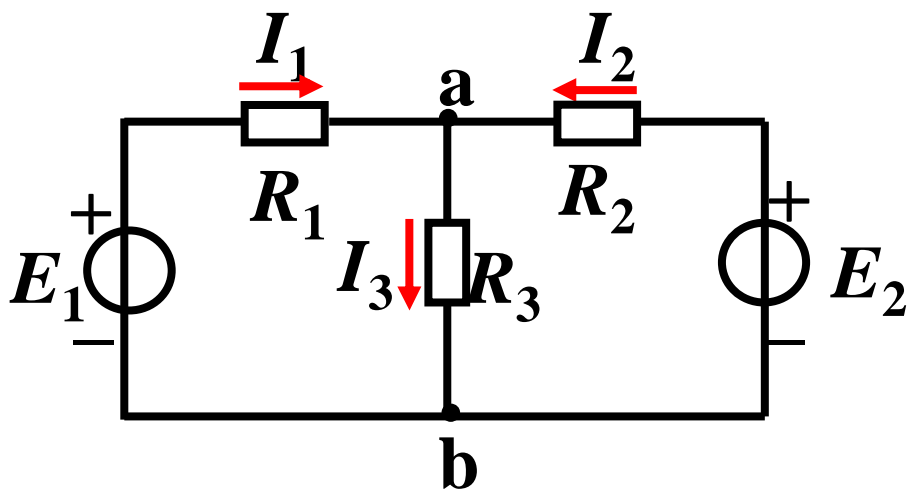
在任一瞬间，流向任一结点的电流等于流出该结点的电流。

$$\text{即: } \sum I_{\lambda} = \sum I_{\text{出}}$$

$$\text{或: } \sum I = 0$$

$$\text{对结点 a: } I_1 + I_2 = I_3$$

$$\text{或 } I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

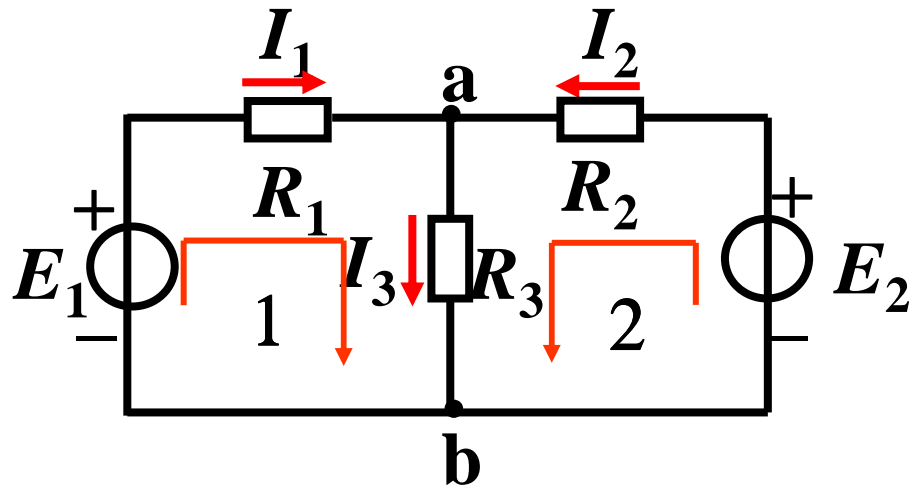


# 基尔霍夫电压定律 (KVL定律)

## 定律2

在任一瞬间，从回路中任一点出发，沿回路循行一周，则在这个方向上电位升之和等于电位降之和。

在任一瞬间，沿任一回路循行方向，回路中各段电压的代数和恒等于零。 即： $\Sigma U = 0$



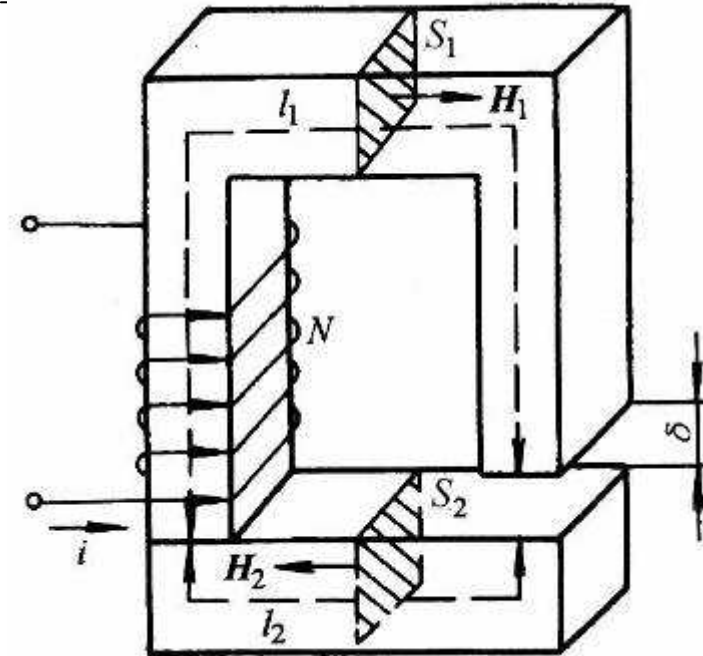
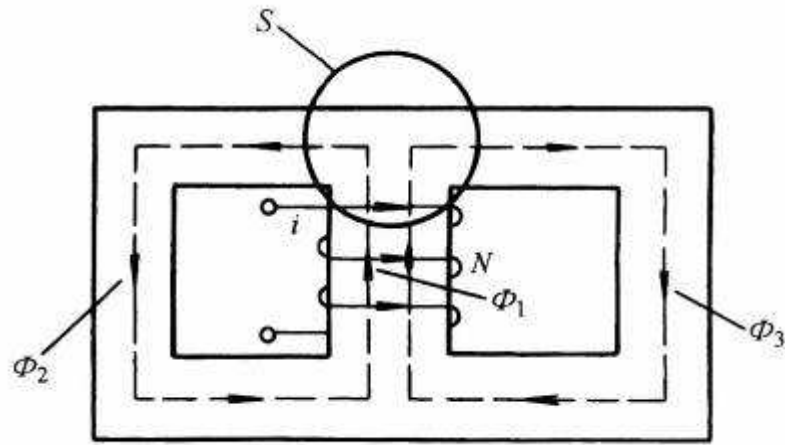
对回路1:  $E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3$

或  $I_1 R_1 + I_3 R_3 - E_1 = 0$

对回路2:  $I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2$

或  $I_2 R_2 + I_3 R_3 - E_2 = 0$





$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

$$\text{或 } \sum \Phi = 0$$

磁路的基尔霍夫第一定律

$$IN = \sum_{k=1}^3 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 \delta = \Phi_1 R_{m1} + \Phi_2 R_{m2} + \Phi_3 R_{m3}$$

磁路的基尔霍夫第二定律



### 4.1.3 铁心磁性材料的磁性能



为了在一定的励磁磁动势作用下能激励较强的磁场，以使变压器的尺寸缩小、重量减轻、性能改善，必须增加磁路的磁导率。所以变压器的铁心常用磁导率较高的铁磁材料制成。

由于磁畴产生的磁化磁场比非铁磁物质在同一磁场强度下所激励的磁场强得多，所以铁磁材料的磁导率  $\mu_{Fe}$  要比非铁磁材料大得多。非铁磁材料磁导率接近于真空的磁导率  $\mu_0$ ，变压器中常用的铁磁材料磁导率  $\mu_{Fe} = (6000 \sim 10000) \mu_0$ 。

#### 1. 磁化曲线

磁性材料外绕线圈，线圈中通以电流  $I$ ，根据  $I$  可以计算磁场强度  $H$ ；再通过测量磁性材料横截面的磁通量可以计算磁感应强度  $B$ ，绘出磁性材料的  $B-H$  曲线，这就是磁化曲线。

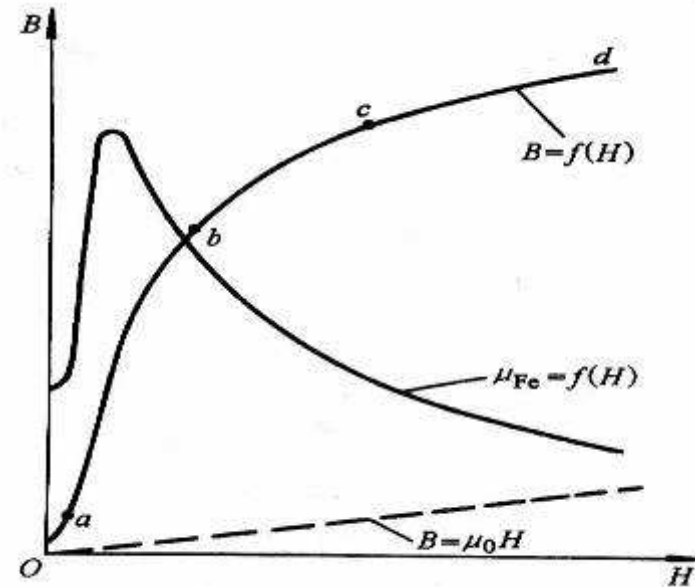



图4-6 磁性材料磁化曲线和磁导率曲线



铁磁材料的磁化曲线可分为四段：**初始阶段** (曲线的oa段)，随 $H$ 增加 $B$ 增加较快，是初始磁化部分；**第二阶段** (曲线的ab段)，随 $H$ 增加 $B$ 增加很快，是**急剧磁化阶段**；**第三阶段** (曲线的bc段)，随 $H$ 增加 $B$ 增加得越来越慢；c点以后，随 $H$ 增加 $B$ 增加得很少，这种现象称为饱和，c点为**饱和点**；达到饱和以后，磁化曲线基本上成为与非铁磁材料的 $B = \mu_0 H$ 特性相平行的直线，见图中曲线的cd段，c点的磁感应强度值称为**饱和磁感应强度 $B_s$**



由于铁磁材料的磁化曲线不是一条直线，所以磁导率 $\mu_{Fe} = B/H$ 也不是常数，将随着 $H$ 值的变化而变化。进入饱和区后， $\mu_{Fe}$ 急剧下降，若 $H$ 再增大， $\mu_{Fe}$ 将继续减小，直至逐渐趋近于 $\mu_0$ 。图4-6中同时还示出了曲线 $\mu_{Fe} = f(H)$ 。

当所用磁性材料工作于高频时，比较关注它的**初始磁导率**；当所用磁性材料工作于低频时，比较关注它的**最大磁导率**

磁性材料的磁导率与温度等因素也有密切关系。在高温或受到强烈振动时，磁畴会瓦解，铁磁性能被削弱；当温度超过某临界值时，磁性材料就会失去磁性，变得和弱磁材料一样，这一临界温度点称为居里点。铁的居里点为 $768^\circ\text{C}$ ，镍为 $358^\circ\text{C}$ ，钴为 $1120^\circ\text{C}$ 。



## 2. 磁滞回线

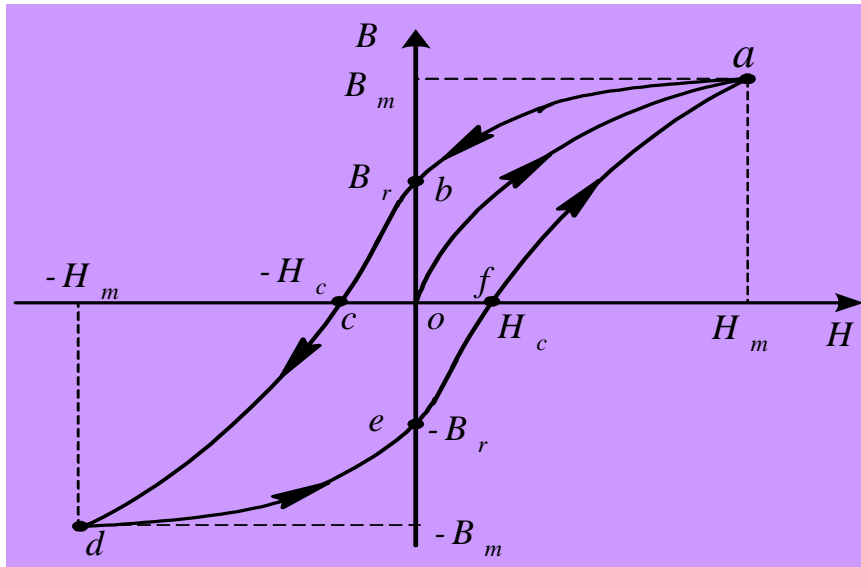


图4-7 磁滞回线

铁磁材料所具有的这种磁感应强度 $B$ 的变化滞后于磁场强度 $H$ 变化的现象，叫做磁滞。呈现磁滞现象的 $B-H$ 闭合回线，称为磁滞回线，磁滞回线是一具有方向性的闭合曲线，如图4-7中的曲线为： $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow a$ 。磁滞现象是铁磁材料的另一个特性。



#### 4.1.4 变压器常用磁性材料



磁性材料一般由铁、钴、镍等元素及其合金组成，根据磁性材料的磁性能，磁性材料可以分为两种类型：

(1) 软磁材料 矫顽力较小，磁滞回线较窄。一般用于制造电机、电器和变压器等的铁心。常用的有铸铁、硅钢、坡莫合金及铁氧体等。

(2) 硬磁材料 矫顽力较大，磁滞回线较宽。一般用于制造永久磁铁。常用的有碳钢、钴钢及铁镍铝钴合金等。

很显然，变压器铁心的磁性材料应使用软磁材料，其中又以硅钢和铁氧体最常见，前者用在工作频率较低の場合，后者用于工作频率较高的場合。近年来，随着以逆变技术为代表的新型弧焊电源的发展，开始使用一种新型变压器铁心磁性材料——**非晶态磁性材料或微晶磁性材料**，高频下的磁性能非常优良。

#### ☆变压器常用硅钢磁性材料

焊接用变压器一般使用热轧或冷轧无取向硅钢片。工业生产的硅钢片的表面都涂有一层绝缘漆，厚度一般在0.05~0.5mm之间；硅钢片越薄，涡流损耗越小，但生产成本提高，铁心制作的工作量增加，硅钢片叠装后的磁路的有效截面减小(亦即叠装系数下降)，变压器常用的硅钢片厚度主要有0.35mm和0.5mm两种规格。



## 4.1.5 铁心损耗



### 1. 磁滞损耗

铁磁材料置于交变磁场中，材料被反复交变磁化，磁畴相互不停地摩擦而消耗能量，并以产生热量的形式表现出来，造成的损耗称为磁滞损耗。

分析表明，磁滞损耗与磁场交变的频率 $f$ 、铁心的体积 $V$ 和磁滞回线的面积成正比。由于硅钢片磁滞回线的面积较小，故电机和变压器的铁心常用硅钢片叠片制成。

### 2. 涡流损耗

线圈中有铁心，并给线圈通交流电，根据安培环路定律铁心中产生的磁通量也将是变化的，在铁心内部会产生感生电动势，电动势在垂直于磁感应强度的平面上产生自成回路的电流 $i_w$ ，称为涡流，如图4-8。涡流会使铁心发热，引起能量损耗，称为涡流损耗。

分析表明，频率越高，磁通密度越大，感应电动势就越大，涡流损耗也越大；铁心的电阻率越大，涡流所流过的路径越长，涡流损耗就越小。



## 4.2 变压器的工作原理

### 1. 变压器工作的基本原理

变压器是利用电磁感应原理，将一种等级的交流电压和电流变换为频率相同的另一种或几种等级交流电压和电流的静止电气设备。

一般的变压器由闭合铁心和两个或两个以上匝数不同、相互绝缘的线圈（绕组）构成，如图4-9所示。

其中，接到交流电源的绕组称为一次绕组或原边绕组、初级绕组，用“ $N_1$ ”表示；连接负载的绕组称为二次绕组或副边绕组、次级绕组，用“ $N_2$ ”表示。

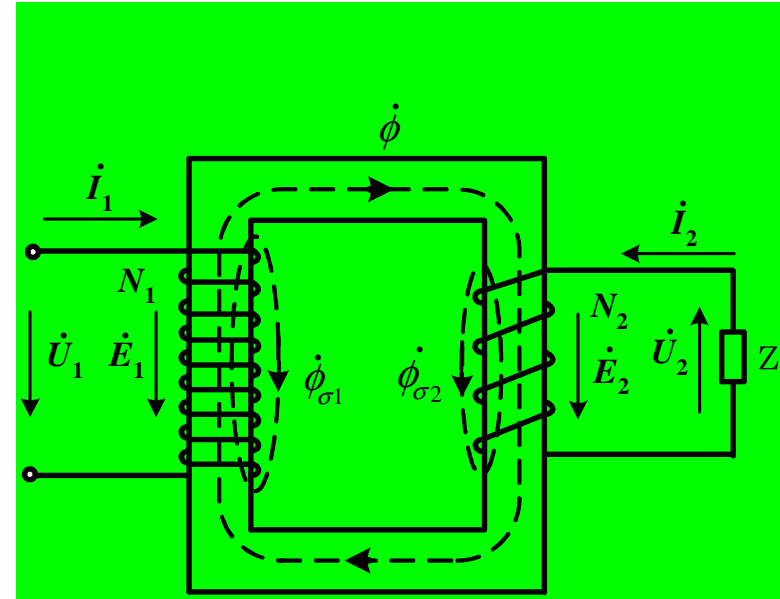


图4-9 单相变压器工作原理示意图

电生磁，磁生电  
动电生动磁，动磁生动电

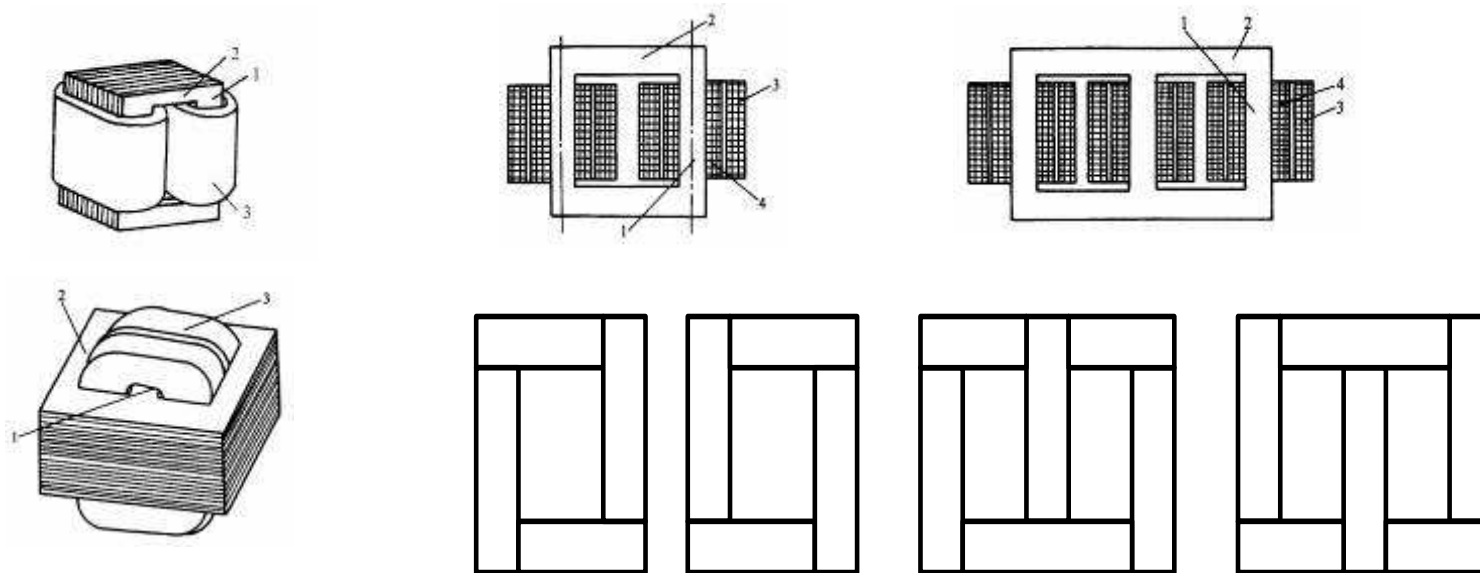


## 2. 变压器的基本结构



根据变压器的结构，可分为心式和壳式两类。心式变压器的特点是绕组包围铁心，如图4-10所示。壳式变压器的特点是铁心包围绕组，如图4-11所示。

心式变压器结构简单，绕组套装和绝缘较易处理，因此，在弧焊变压器中得到广泛采用。壳式变压器机械强度好，铁心易散热，在焊接领域主要用在电阻焊变压器中。







**绕组**是变压器的电路部分，  
它由铜线或铝线绕制而成。按结构特点可分筒形和盘形两种。

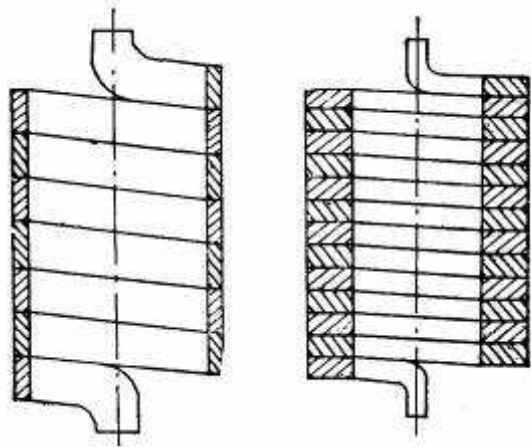


图4-14 筒形绕组

a)平绕绕组 b)立绕绕组

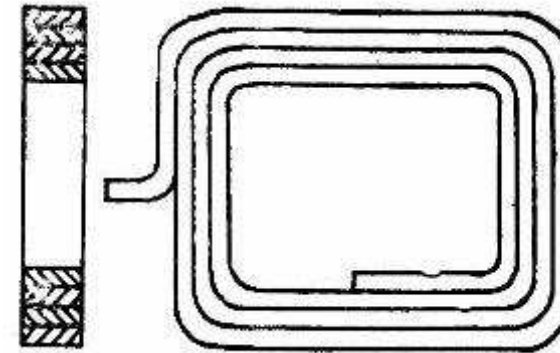


图4-15 盘形绕组

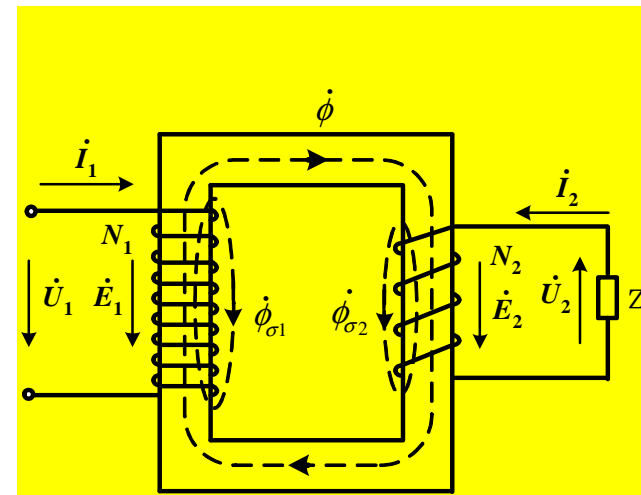


### 3. 变压器的正方向与同名端

在变压器中，电压、电流、磁通和电动势的大小和方向都是随时间变化的，为了正确地表明它们之间的相位关系，必须先规定它们的正方向。规则如下：

- 1) 在同一支路内，电压 $U$ 与电流 $I$ 的正方向一致；
- 2) 磁通 $\Phi$ 的正方向与电流 $I$ 的正方向之间符合右手螺旋定则；
- 3) 磁感应电动势 $E$ 的正方向与产生它的磁通 $\Phi$ 的正方向符合右手螺旋定则

根据以上规定，可得出变压器各物理量的正方向，如右图所示。 $U_1$ 与 $I_1$ 同时为正或同时为负时，功率都为正，表示一次绕组总是从电网吸收功率，即一次绕组看成是电网的负载，遵循电动机惯例。二次回路中的 $U_2$ 和 $I_2$ 正方向由 $E_2$ 决定，即 $U_2$ 、 $I_2$ 、 $E_2$ 同方向，即把二次绕组看做电源，遵循发电机惯例。





## 同名端

当主磁通交变时，高、低压绕组之间有一定的极性关系，在同一瞬间，高压绕组的某一端电位为正，低压绕组必有一端点电位也相对为正，这两个对应端点称为“同名端”，在同名端的对应端点旁用标注“·”表示。同名端取决于绕组的绕制方向。这时，高、低压绕组中电压相位关系有两种可能，一种是两者同相位，另一种是两者反相位（即相差  $\pi$  电角）。

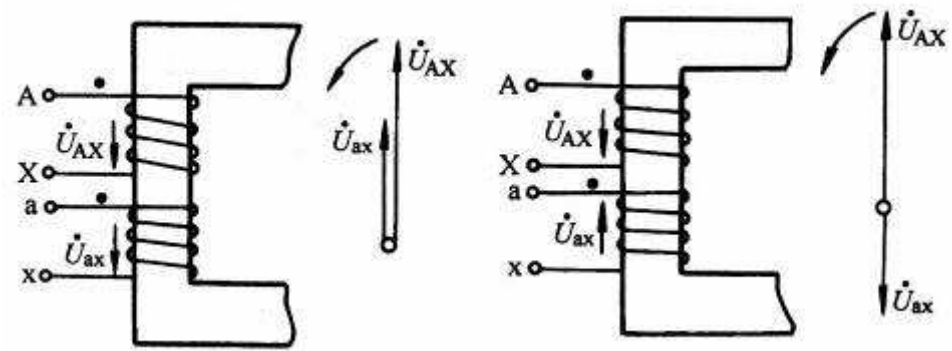


图4-17 单相变压器的同名端  
a) 同相位 b) 反相位



## 4.2.2 单相变压器的空载运行

### 1. 空载运行时的物理状况

变压器空载运行，是指变压器一次绕组接在额定电压的交流电源上，二次绕组开路时的工作状态，如图4-18所示

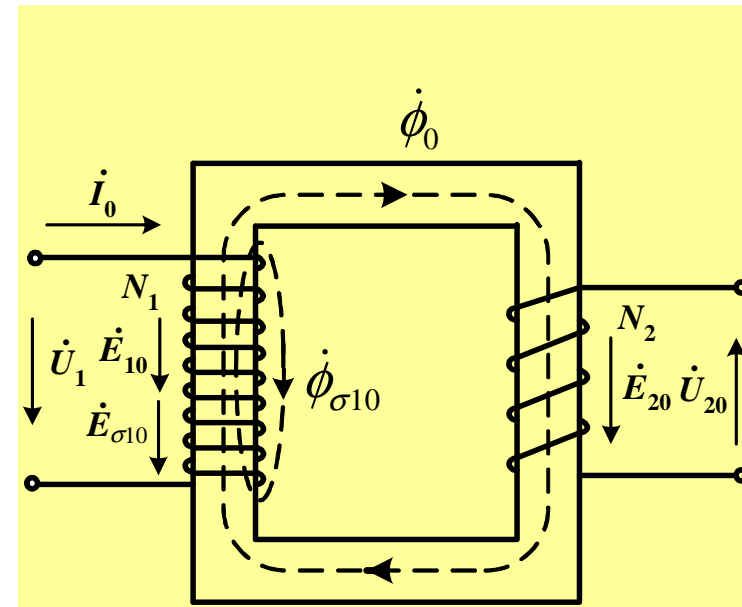
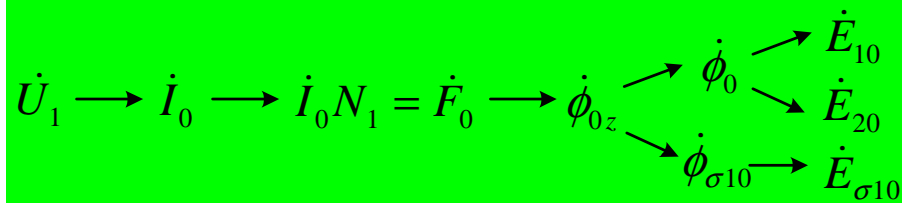


图4-18 变压器空载运行

### 工作过程的电磁关系分析



返回



## 2. 变压器的感应电动势与空载电流



### (1) 变压器的感应电动势

由于外加电源为正  
弦变化，所以产生  
的磁通也是正弦变  
化的，设：

$$\begin{cases} \phi_0 = \phi_{0m} \sin \omega t \\ \phi_{\sigma 10} = \phi_{\sigma 10m} \sin \omega t \end{cases} \quad (4-9)$$

若一、二次绕组产生的感应电动势、和的瞬时值分别是 $e_{10}$ 、 $e_{20}$ 和 $e_{\sigma 10}$ ，则有：

$$e_{10} = -N_1 \frac{d\phi_0}{dt} = -\omega N_1 \phi_{0m} \cos \omega t = \omega N_1 \phi_{0m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{10m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4-10)$$

$$e_{20} = -N_2 \frac{d\phi_0}{dt} = -\omega N_2 \phi_{0m} \cos \omega t = \omega N_2 \phi_{0m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{20m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4-11)$$

$$e_{\sigma 10} = -N_1 \frac{d\phi_{\sigma 10}}{dt} = -\omega N_1 \phi_{\sigma 10m} \cos \omega t = \omega N_1 \phi_{\sigma 10m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{\sigma 10m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4-12)$$



由于磁通是正弦变化的，所以由它们产生的感应电动势 $e_{10}$ 、 $e_{20}$ 和 $e_{\sigma 10}$ 也按正弦规律变化，但是在相位上滞后于磁通 $\pi/2$ 电角度，它们的有效值分别是：

$$E_{10} = \frac{E_{10m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \phi_{0m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \phi_{0m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \phi_{0m} \quad (4-13)$$

$$E_{20} = \frac{E_{20m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_2 \phi_{0m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_2 \phi_{0m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \phi_{0m} \quad (4-14)$$

$$E_{\sigma 10} = \frac{E_{\sigma 10m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \phi_{\sigma 10m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \phi_{\sigma 10m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \phi_{\sigma 10m} \quad (4-15)$$

由此可以得出感应电动势的矢量表达式如下：



$$\dot{E}_{10} = -j\omega N_1 \dot{\phi}_0 = -j \frac{2\pi f N_1 \dot{\phi}_{0m}}{\sqrt{2}} = -j4.44 f N_1 \dot{\phi}_{0m} \quad (4-16)$$

$$\dot{E}_{20} = -j\omega N_2 \dot{\phi}_0 = -j \frac{2\pi f N_2 \dot{\phi}_{0m}}{\sqrt{2}} = -j4.44 f N_2 \dot{\phi}_{0m} \quad (4-17)$$

$$\dot{E}_{\sigma 10} = -j\omega N_1 \dot{\phi}_{\sigma 10} = -j \frac{2\pi f N_1 \dot{\phi}_{\sigma 10m}}{\sqrt{2}} = -j4.44 f N_1 \dot{\phi}_{\sigma 10m} \quad (4-18)$$

## (2) 空载电流

变压器空载运行时，二次侧无电流。在这种情况下，二次绕组的存在，不会影响变压器铁心和一次绕组中的电磁情况。这时，一次绕组中空载电流的主要作用是在变压器铁心中建立磁场，产生主磁通。



但是，**由于变压器中存在着铁损**，即存在着磁滞损耗与涡流损耗，因此，空载电流实际上是由两个分量组成，一个分量是建立主磁通所需要的磁化电流 $I_{0Q}$ ，它不消耗有功功率，故称无功的励磁电流，它与主磁通的相位相同；另一个分量是 $I_{0P}$ ，用来供给铁耗的有功电流，称为铁耗电流，它超前于主磁通 $\pi/2$ 电角度，与主磁通相位相反。因此，空载电流可以表示为：

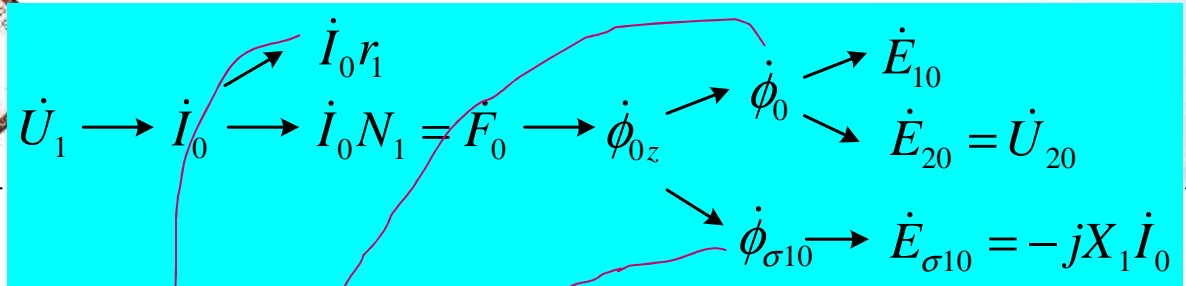
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0P} + \dot{I}_{0Q} \text{ 或 } I_0 = \sqrt{I_{0P}^2 + I_{0Q}^2}$$

一般 $I_{0P} < 10\% I_0$ ，故可以将 $I_0$ 认为就是励磁电流，即 $I_0 = I_{0Q}$ 。

### 3. 变压器空载时的电动势平衡方程式与等效电路

(1) 变压器空载时的电动势平衡方程 如果考虑变压器一次绕组的电阻 $r_1$ 及漏磁通的影响，根据图4-18，可以得出变压器空载运行时的电磁关系：





根据电路的基尔霍夫定律，可以列出变压器空载运行时的电磁平衡方程：

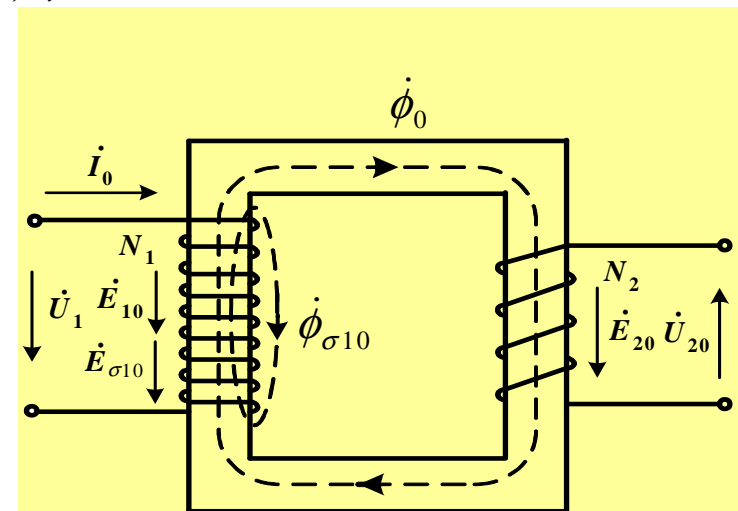
$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{i}_0 r_1 - \dot{E}_{10} - \dot{E}_{\sigma 10} = \dot{i}_0 r_1 - \dot{E}_{10} + j\dot{i}_0 X_1 = -\dot{E}_{10} + \dot{i}_0 (r_1 + jX_1) = -\dot{E}_{10} + \dot{i}_0 Z_1 \\ \dot{U}_{20} = \dot{E}_{20} \end{cases}$$

式中， $Z_1 = r_1 + jX_1$  为一次绕组的漏阻抗，单位为  $\Omega$ 。

对于一般的电力变压器，漏阻抗可以忽略，则：

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_{10}$$

$U_1$  与  $E_1$  在数值上相等，在方向上相反，在波形上相同。





(2) **变压器变比 $K$**  一次绕组与二次绕组的电动势之比称为变压器的变比，简称变比以 $K$ 表示：



$$K = \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{4.44 f N_1 \phi_{0m}}{4.44 f N_2 \phi_{0m}} = \frac{N_1}{N_2}$$

准确定义

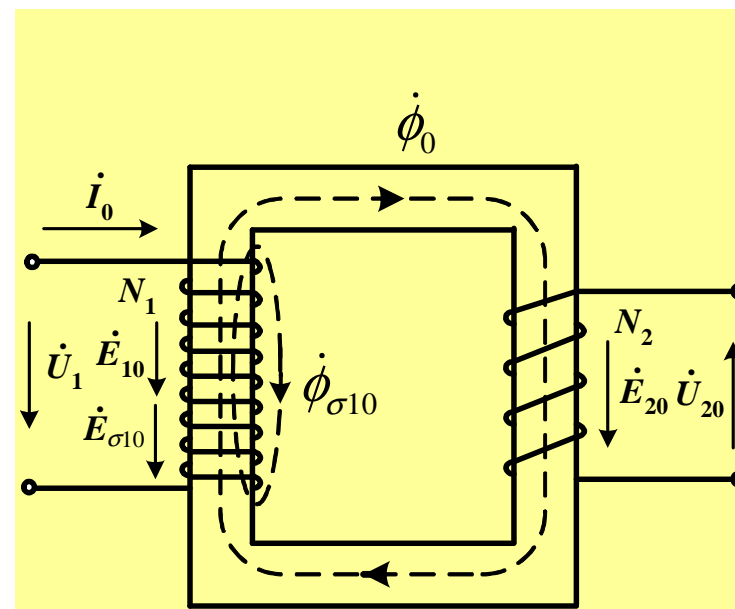
$K$ 是变压器一个重要参数。 $K > 1$ ，是降压变压器； $K < 1$ ，是升压变压器。

令：

$$k_M = \frac{\phi_0}{\phi_0 + \phi_{\sigma 10}} \quad (4-25)$$

称 $k_M$ 为**耦合系数**，它反映了一、二次绕组之间耦合的紧密程度，其值在0~1之间变化。 $k_M = 1$ 意味着无漏磁，耦合最好； $k_M = 0$ 意味着完全漏磁，耦合最差。由此可知：

$$k_M = \frac{\phi_0}{\phi_0 + \phi_{\sigma 10}} = \frac{E_{10}}{U_1}$$





只有在 $k_M = 1$ 时，即漏阻抗非常小，可以忽略的情况下， $U_1 = E_{10}$ ，这时有：

$$K = \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4-26)$$

常用公式

上式是一般电力变压器中常用的变比公式，它忽略了变压器漏阻抗的影响。而弧焊变压器中的漏阻抗很大，一般不能忽略，因此，不能直接应用式（4-26），而应用下面的公式：

$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{\frac{E_{10}}{k_M}}{E_{20}} = \frac{1}{k_M} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{K}{k_M} \quad (4-27)$$

据此可以计算二次绕组输出的空载电压：

$$U_{20} = E_{20} = \frac{N_2}{N_1} k_M U_1 \quad (4-28)$$

精确公式

$\dot{\phi}_{\sigma 10}$ 

#### (4) 变压器空载时的等值电路



变压器运行时既有电路，又有电和磁的相互联系，若能用纯电路的形式“等效”地表示出来，就可使变压器分析大为简化。

前面对  $\dot{\phi}_{\sigma 10}$  产生的电动势  $E_{\sigma 10}$  用电抗  $X_1$  上流过电流  $I_0$  引起的压降反映了出来，同理，对于主磁通  $\dot{\phi}_{10}$  产生的  $E_{10}$  也可类似的引用一个参数来处理，但不同的是： $\dot{\phi}_{10}$  是经铁心而闭合的，参数中除了电抗外，还应考虑铁耗，故应引入一个励磁阻抗  $Z_m = r_m + jX_m$ ，在流过空载电流  $I_0$  时，产生的压降来反映，即：

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 (r_m + jX_m)$$

式中， $Z_m$ — 变压器的励磁阻抗，单位： $\Omega$ ； $X_m$ — 变压器的励磁电抗，单位： $\Omega$ ；

$r_m$ — 变压器的励磁电阻，单位： $\Omega$ 。 $Z_m$ 、 $X_m$  和  $r_m$  之间存在着下列关系：

$$Z_m = E_1 / I_0$$

$$r_m = P_{Fe} / I_0^2$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}$$



## 变压器空载运行时的等值电路

如图4-18所示。它相当于两个阻抗值不等的线圈串联，一个是阻抗值为 $Z_1 = r_1 + jX_1$ 的空心线圈，另一个是阻抗值为 $Z_m = r_m + jX_m$ 的铁心线圈。 $r_1$ 、 $X_1$ 是常量；而 $r_m$ 、 $X_m$ 因铁心中存在发热和饱和现象，故都是变量。它们都是虚拟值，且 $X_m > r_m$ ，图4-18 变压器空载时的等值电路。

其物理意义是： $X_m$ 是表征铁心磁化性能的一个综合参数，主要反映了主磁通的作用， $X_m$ 随铁心饱和程度的增加而减小； $r_m$ 是表征铁心发热而消耗有功功率的一个参数，主要反映了铁耗的作用。不过，在实际情况中，要求电源电压的变化范围不大，所以对应铁心中磁通量的变化范围也不是很大， $Z_m$ 的值基本上可视为不变。

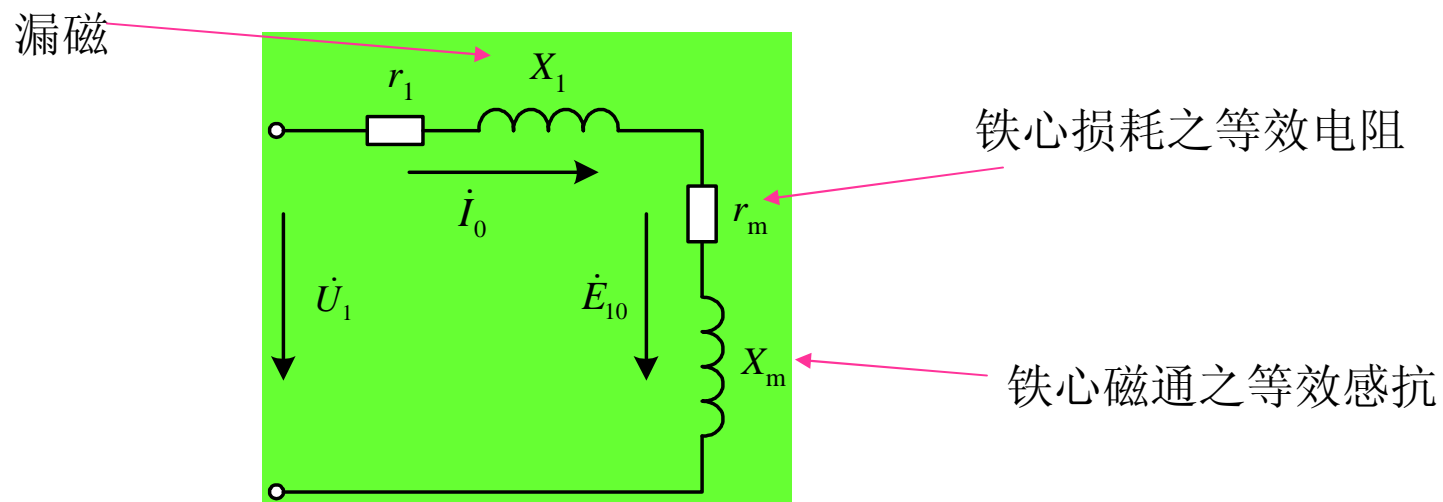


图4-18 变压器空载时的等值电路  
第4章 弧焊变压器

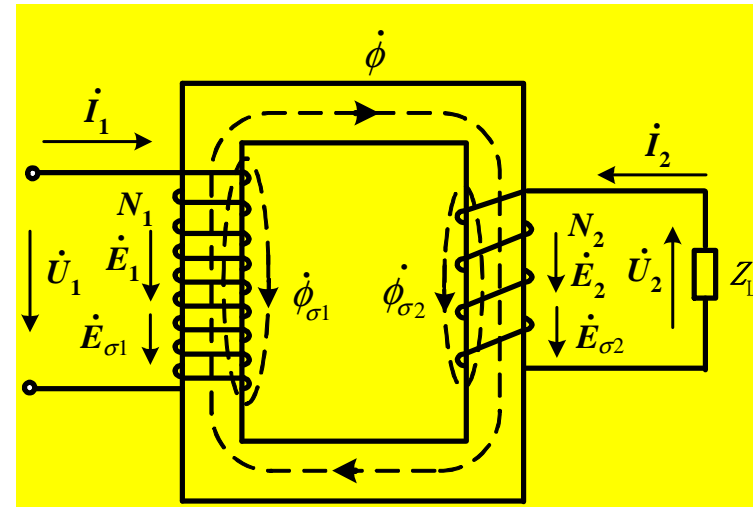


## 4.2.3 单相变压器的负载运行



### 1. 负载运行时的物理状况

当二次绕组的电流增加时，一次绕组的电流就相应地增加，这就表示通过电磁感应作用，变压器可以把电能从一次侧传递到二次侧。



$$U_1 \approx E_{10} = \frac{E_{10m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \phi_{0m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \phi_{0m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \phi_{0m}$$

意味着  $\phi_{0m}$  基本保持不变，也就是  $I_0 N_1$  保持不变



## 2. 负载运行时的基本方程式



### (1) 磁动势平衡方程式

$$\dot{I}_0 N_1 = \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 \quad (4-31) \quad \text{或} \quad \Delta \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0$$

上式可以改写为：

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left( -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \right)$$

一次绕组中的电流由两部分组成，一部分为维持主磁通的励磁分量；另一部分为用以补偿二次绕组磁动势作用的负载分量



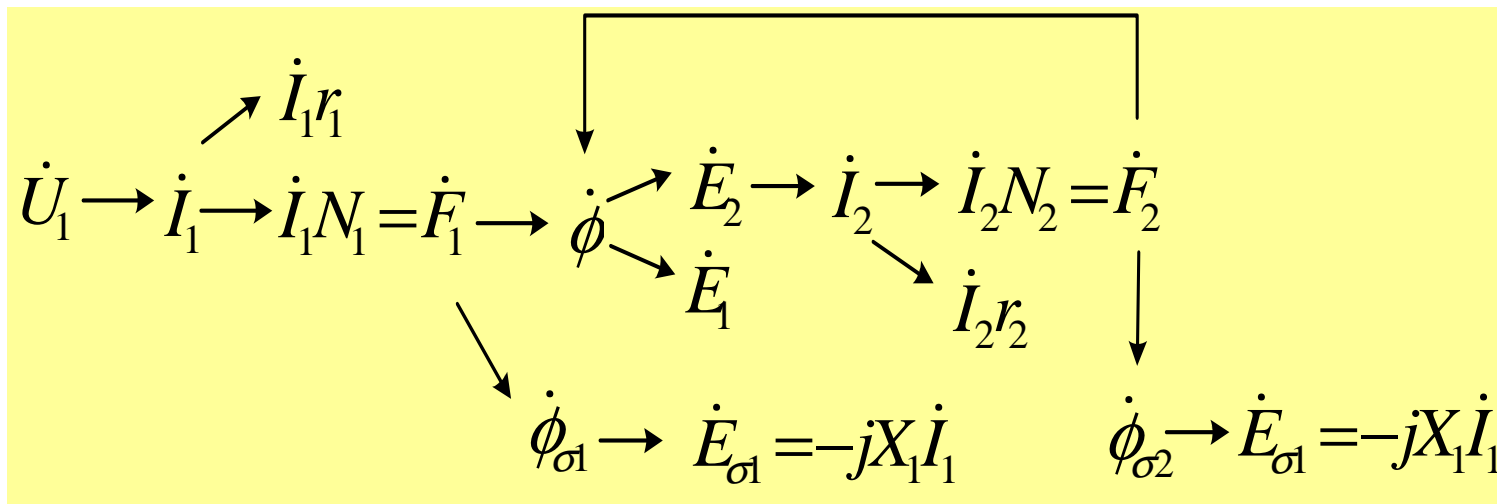
(2) 电动势平衡方程式

根据前面的分析，漏感电动势同样可用电抗压降的形式来表示如下：

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_1$$

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 X_2$$

变压器负载时各物理量电磁关系为







根据电路的基尔霍夫定律可得



$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 - \dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1 - \dot{E}_1 + j \dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + j X_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_{20} = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + j X_2) = \dot{E}_2 + \dot{I}_2 Z_2 \end{cases}$$

$Z_1$ 、 $Z_2$  — 一次、二次绕组的漏阻抗； $r_1$ 、 $r_2$  — 一次、二次绕组的电阻；  
 $X_1$ 、 $X_2$  — 一次、二次绕组的漏电抗。

综上所述，可得变压器基本方程式：

$$\begin{cases} \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \\ \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ -\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m \\ K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \end{cases}$$



### 3. 变压器的等效电路



#### (1) 变压器绕组折算

折算的原则是：折算前后磁动势、功率、损耗不变，即磁动势平衡关系、各种能量关系不变。

1) 二次绕组电流到一次绕组的折算：
$$I'_2 = \frac{N_2}{N'_2} I_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{K}$$

2) 二次绕组电动势、电压到一次绕组的折算：
$$E'_2 = KE_2$$

3) 二次绕组阻抗的折算：
$$r'_2 = \frac{I_2^2}{I'^2_2} r_2 = K^2 r_2$$

$$X'_2 = \frac{I_2^2}{I'^2_2} X_2 = K^2 X_2$$



折算后变压器负载运行时的基本方程式将变为如下形式：



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ -\dot{E}_1 = \dot{I}_0(r_m + jX_m) = \dot{I}_0 Z_m \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2(r'_2 + jX'_2) = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{E}'_2 = \dot{E}_1 \\ \dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2) \end{array} \right. \quad (4-42)$$

## (2) 等效电路

利用折算变压器的基本方程式（4-42）可导出变压器负载运行时的等效电路如图4-22所示。

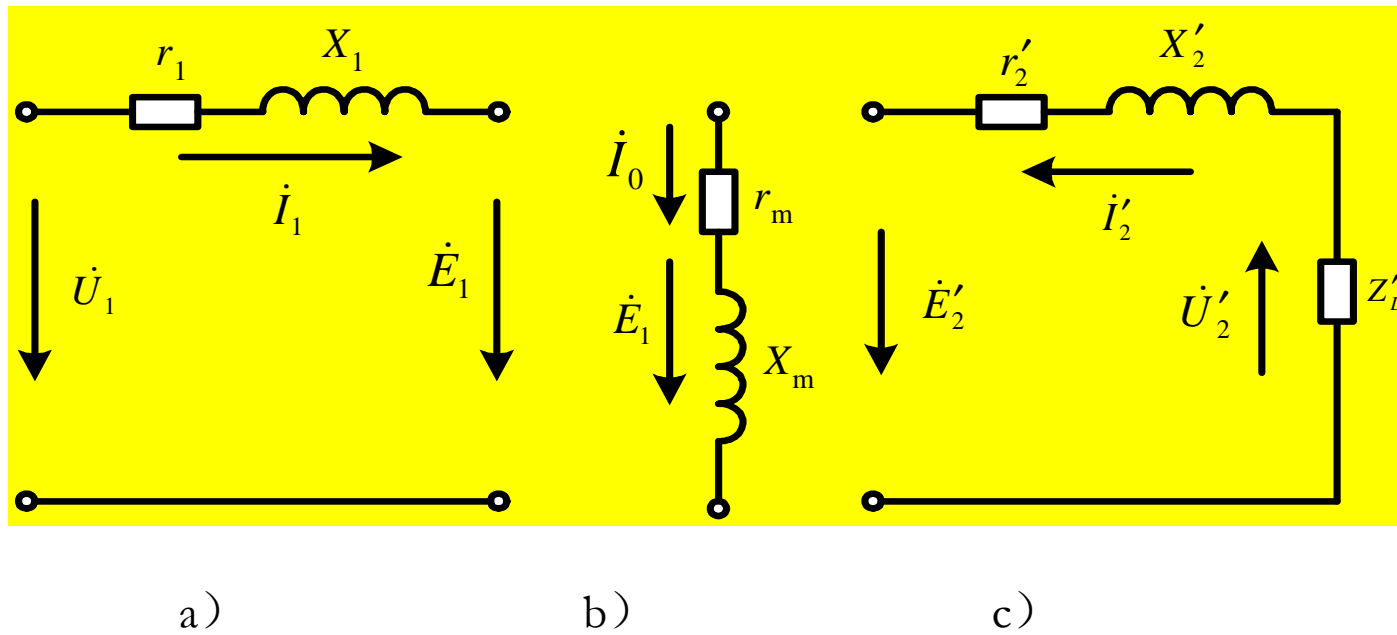


图4-20 变压器部分等效电路

a) 一次绕组部分 b) 励磁部分 c) 二次绕组部分

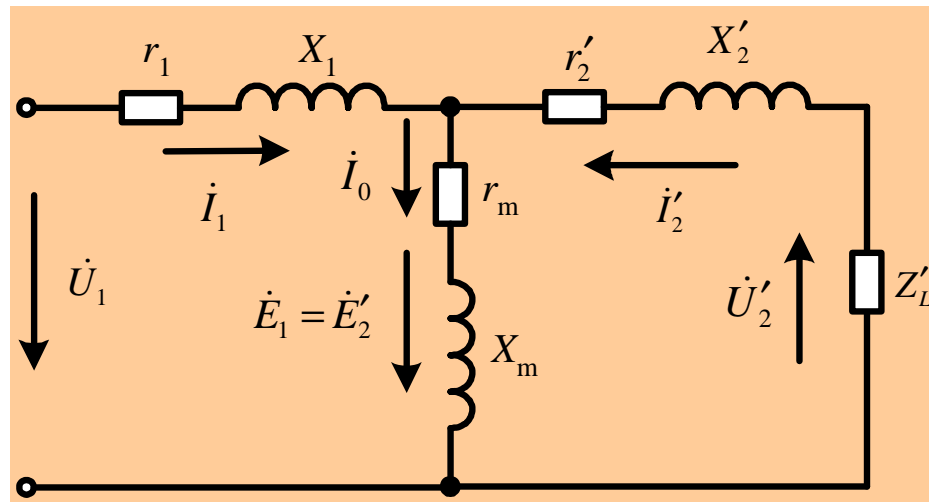


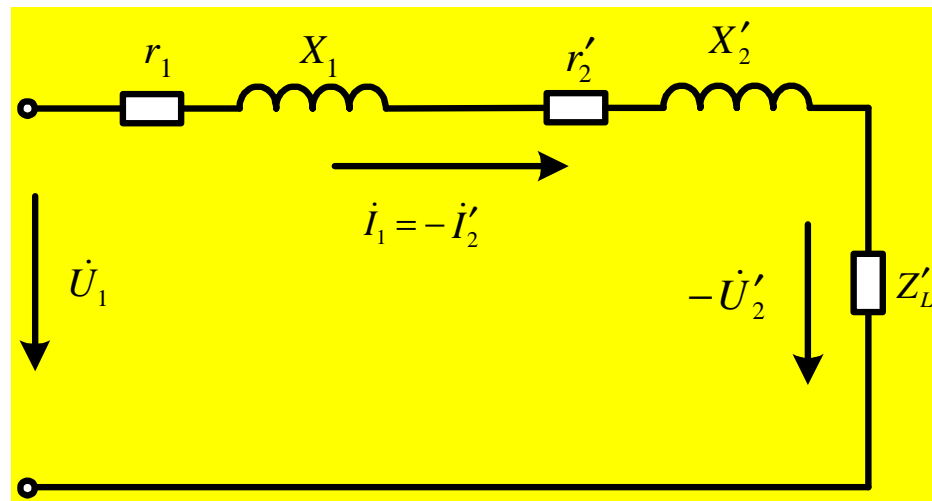
图4-21 变压器“T”型等效电路

“T”型等值电路虽然客观地反映了变压器内部的电磁关系，但它是一混联电路，进行复数运算较麻烦。在实际电力变压器中， $I_0 \approx 2\% \sim 8\% I_{1N}$ ，因此， $I_0$ 可忽略不计，即将励磁支路去掉，从而得到一个简化的串联电路，称为**简化等效电路**，如图4-22所示。



简化等效电路对应的电压平衡方程式为：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(r_k + jX_k) - \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 Z_k - \dot{U}'_2$$





更常用的简化等效电路:

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_2(r_k + jX_k) - \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_k - \dot{I}_2 Z_L$$

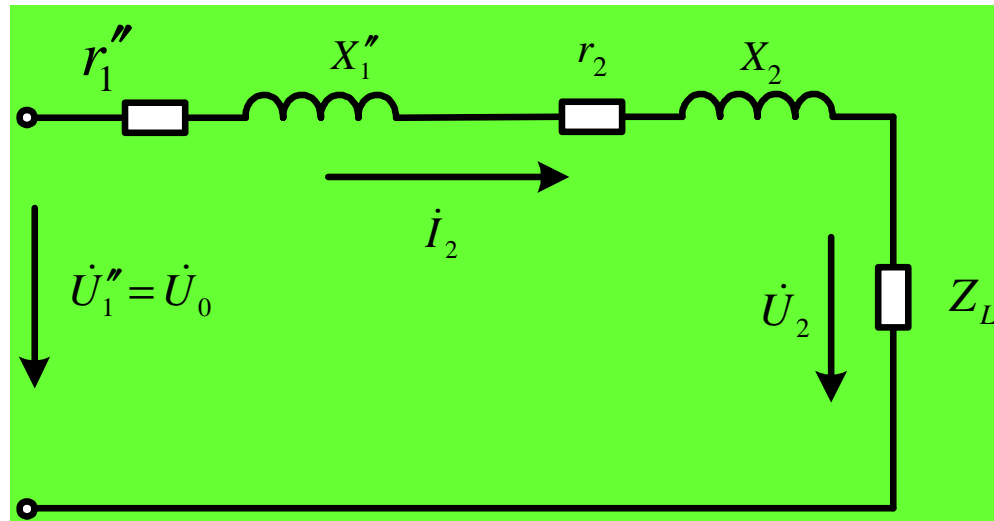


图4-23 一次折算到二次变压器简化等效电路



## 4.2.4 变压器的外特性



当输入电压 $U_1$ 和负载功率因数 $\cos\phi_2$ 为常数时，变压器输出电压 $U_2$ 随负载电流 $I_2$ 变化的关系曲线，称为变压器的外特性，亦即变压器的输出特性，记作 $U_2=f(I_2)$

对于电力变压器，希望 $U_2$ 的变化越小越好。从空载到额定负载，变压器二次侧端电压随负载变化的程度用电压调整率 $\Delta u$ 来表示，即

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\%$$

在电力变压器中，制造工艺可使一、二次绕组耦合得很好，漏磁很小，而且内阻也很小，因此，电压变化率 $\Delta u$ 并不大，约为5%左右；但在弧焊变压器中，因为弧焊工艺的要求，需要变压器有较大的漏磁，因此，弧焊变压器外特性曲线为下降特性， $\Delta u$ 可达50%。

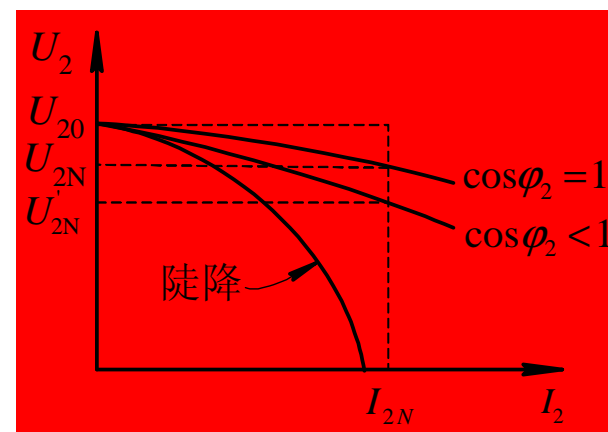


图4-25 变压器外特性曲线





## 4.3 弧焊变压器的下降外特性及其分类



(1) 弧焊变压器主要用于焊条电弧焊、埋弧焊和TIG焊等，根据电弧特性以及焊接工艺特性的要求，弧焊变压器应具有下降的外特性。

(2) 弧焊变压器的负载是交流电弧，为了使电弧易于引燃并能保证交流电弧的稳定燃烧，要求弧焊电源应具有足够高的空载电压，并且在焊接回路中有足够大的感抗；足够大的感抗也是弧焊变压器获得下降外特性的重要方法之一。

(3) 为了满足弧焊变压器的调节性能，要求焊接回路的感抗值能够调节。

### 4.3.1 弧焊变压器的外特性

弧焊变压器的负载是交流电弧，其电弧负载的压降为 $U_f$ ，根据变压器工作的基本原理及其等效电路的分析方法，可以得到图4-28所示的弧焊电源与电弧负载的简化等效电路。其中， $X_k$ 与 $R_k$ 为弧焊变压器与电弧之间的线间感抗与电阻，也包括外加的感抗或电阻。

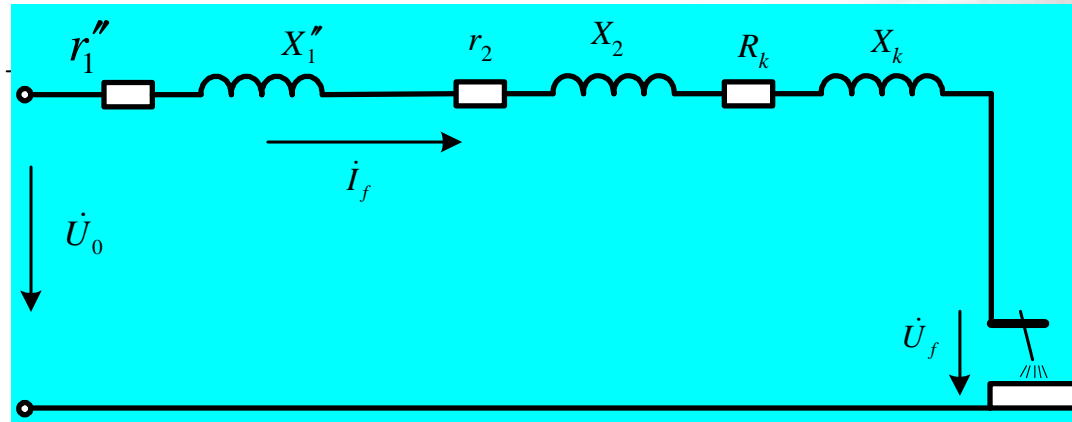


图4-31 弧焊变压器简化等效电路

列出电势平衡方程：

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_f + \dot{I}_f r_1'' + j\dot{I}_f X_1'' + \dot{I}_f r_2 + j\dot{I}_f X_2 + \dot{I}_f R_k + j\dot{I}_f X_k$$

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - \dot{I}_f (r_1'' + r_2 + R_k) - j\dot{I}_f (X_1'' + X_2 + X_k)$$

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - \dot{I}_f (R_L + R_k) - j\dot{I}_f (X_L + X_k) \quad (4-49)$$



式(4-49)就是变压器的外特性方程,当 $R_L+R_k$ 或 $X_L+X_k$ 较大时,随着电流 $I$ 的增大,电弧电压 $U_f$ 降低,即变压器的外特性为下降特性。

弧焊变压器获得下降外特性的方法:  
采用增大变压器自身的漏抗或外加串联电抗器

由于弧焊变压器的内阻和线间电阻很小,可以忽略,因此,图4-31为弧焊变压器的进一步简化等效电路,其外特性方程可以由式(4-50)表示:

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - jI_f(X_L + X_k) = \dot{U}_0 - jI_f X_Z \quad (4-50)$$

为变压器的等效感抗

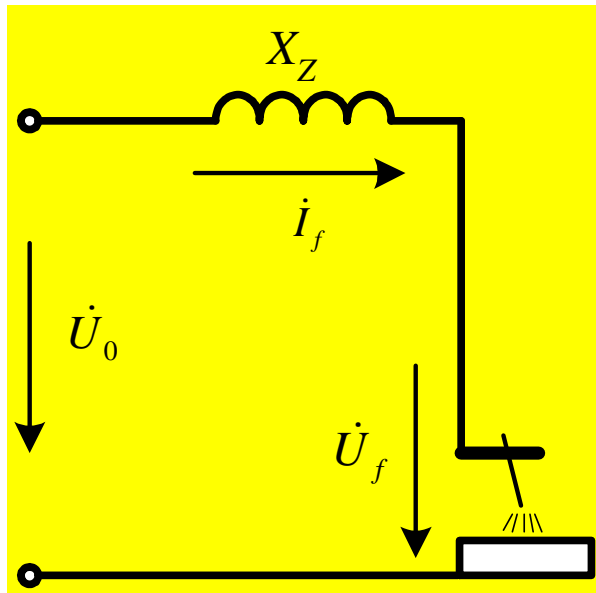


图4-31 弧焊变压器简化等效电路

弧焊变压器椭圆外特性的数学解释

$$\frac{I_f^2}{(U_0 / X_z)^2} + \frac{U_f^2}{U_0^2} = 1 \quad (4-52)$$

应当指出的是：实际的弧焊变压器外特性不是标准的椭圆，有所变异。原因是不能完全排除纯电阻的影响，感抗也可能随电流的变化而变化。



### 4.3.2 弧焊变压器的调节特性



调节自身漏抗

机械式调节

调节外加感抗

弧焊变压器的外特性又可以写成

$$I_f = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_f^2}}{X_Z} = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_f^2}}{X_L + X_K} \quad (4-53)$$

不同的调节方式  
也决定了弧焊变  
压器的分类

式(4-53)就是弧焊变压器调节特性方程式。因此,在弧焊变压器中,只要调节获得下降外特性的变压器自身的漏抗或者串联电抗器的感抗值,就可以得到一组外特性曲线,从而实现弧焊变压器输出电流的调节。因此,在弧焊变压器中,为获得下降特性的感抗必须能够调节。由于获得下降特性的感抗值大小与弧焊变压器的结构有关,因此,在弧焊变压器中一般采用机械的方法来实现外特性即输出电流的调节,即外特性调节需要一机械调节机构。



## 4.3.4 弧焊变压器的分类



### 1. 串联电抗器式弧焊变压器

#### (1) 分体式

变压器和电抗器相互独立，只有电路上的联系，无磁的联系，例如，BP-3×500型弧焊变压器属于此类。

#### (2) 同体式

变压器铁心和电抗器铁心联成一体，两者之间既有电路上的联系，又有磁的联系，BX2系列弧焊变压器属于此类。

### 2. 增强漏磁式弧焊变压器

(1) **抽头式**：一、二次绕组分开绕制而增大漏磁，通过绕组抽头的变化调节漏磁。BX6系列弧焊变压器属于此类。

(2) **动铁心式**：一、二次绕组分开绕制，并且在一、二次绕组之间增加一活动铁心，产生磁分路来增强变压器的漏磁，通过调节活动铁心的位置可以调节漏磁。BX1系列弧焊变压器属于此类。

(3) **动绕组式**：一、二次绕组分开绕制，并且增大的一、二次绕组之间的距离来增强漏磁，通过改变一、二次绕组间距来调节漏磁。BX3系列弧焊变压器属于此类。



## 4.4 增强漏磁式弧焊变压器

### 4.4.1 动铁心式弧焊变压器

#### 1. 变压器的结构

动铁心式弧焊变压器的结构如图4-35所示。变压器的一、二次绕组分绕在变压器口字型铁心 I 上，因此，其空气漏磁较大，磁耦合得不紧密；而且在口字型铁心的中间加入一个可以移动的铁心 II，称为动铁心，动铁心 II 形成磁分路，减小了漏磁磁路的磁阻，使变压器的漏磁显著增强。

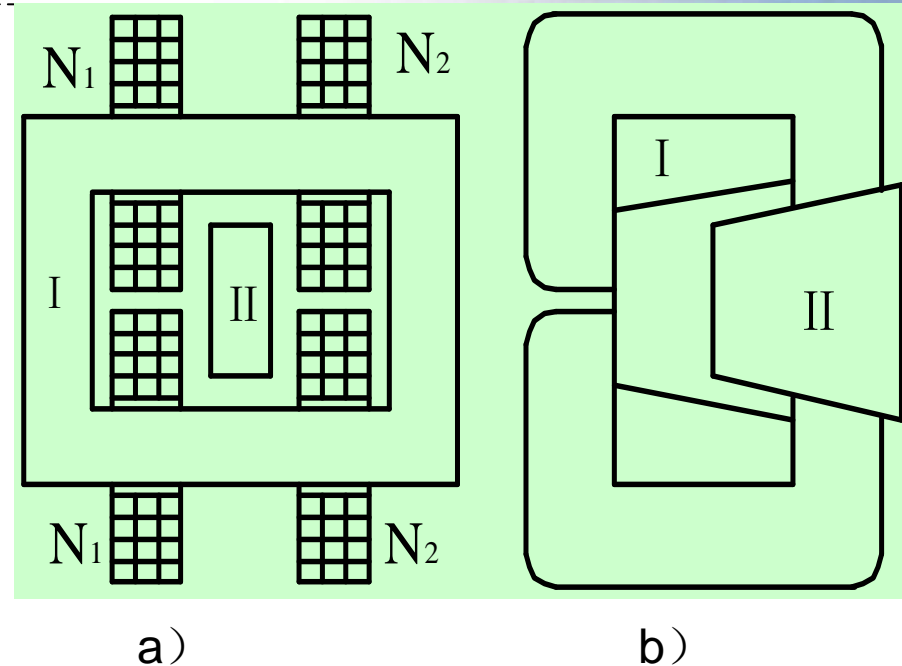


图4-35 动铁心式弧焊变压器结构示意图  
a) 主视图 b) 左视图



## 2. 工作原理

### (1) 空载

空载条件下，一次绕组  $N_1$  输入电压  $U_1$ ，变压器中的磁通分布如图4-33所示。变压器的磁通由三部分组成：经变压器静铁心 I 与一、二次绕组耦合的主磁通  $\phi_0$ ；通过空气闭合，只与一次绕组  $N_1$  本身耦合的漏磁通  $\phi_{\sigma 10}$ ；由于附设动铁心 II 而增加的，被称为一次附加漏磁通的  $\phi_{f\sigma 10}$ 。

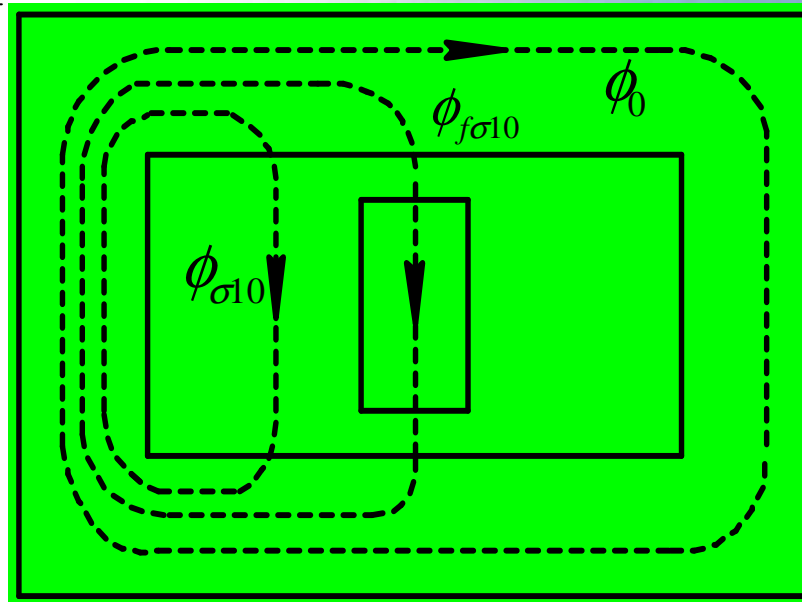


图4-36 空载磁通分布示意图

此时，变压器的耦合系数  $k_M$  为：

$$k_M = \phi_0 / (\phi_0 + \phi_{\sigma 10} + \phi_{f\sigma 10})$$





空载电压为:

$$U_0 = \frac{N_2}{N_1} k_M U_1$$



$U_1$ 是电网电压，在变压器工作时基本不变，因此弧焊变压器空载电压 $U_0$ 的大小主要与 $N_2/N_1$ 和 $k_M$ 有关。调节动铁心的位置，会影响 $k_M$ 进而影响 $U_0$ 的大小：当动铁心移出变压器铁心窗口时， $\phi_{f\sigma 10}$ 磁路的磁阻增大， $\phi_{f\sigma 10}$ 减小， $k_M$ 增大， $U_0$ 增大；反之， $U_0$ 减小。动铁心位置的不同会造成 $U_0$ 数伏的差别。

## (2) 负载

负载条件下，动铁心式弧焊变压器的磁通分布如图4-33b所示。此时，变压器工作的主磁通 $\phi$ 是由一、二次绕组的磁动势共同建立的。而一、二次绕组除各自产生漏磁通 $\phi_{\sigma 1}$ 和 $\phi_{\sigma 2}$ 外，还分别产生了附加漏磁通 $\phi_{f\sigma 1}$ 和 $\phi_{f\sigma 2}$ 。所以变压器除了空气漏磁产生的漏抗 $X_1$ 和 $X_2$ 外，还有附加漏磁通产生的附加漏抗 $X_{f1}$ 和 $X_{f2}$ 。

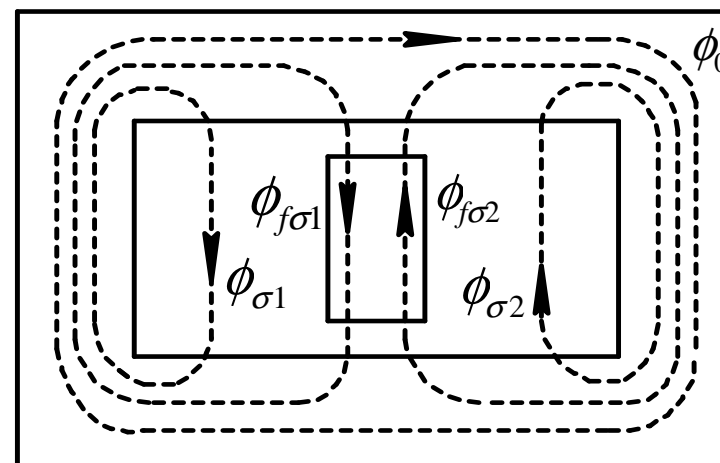


图4-37 负载磁通分布示意图

变压器总的等效漏抗为：

$$X_{ZL} = X_1'' + X_2 + X_{f1}'' + X_{f2} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 X_1 + X_2 + \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 X_{f1} + X_{f2} = X_L + X_{fL}$$

动铁心弧焊变压器外特性方程为：

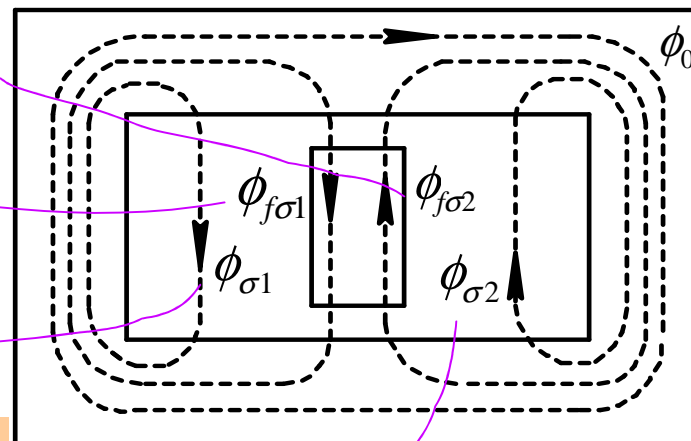
$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - j\dot{I}_f (X_L + X_{fL}) = \dot{U}_0 - j\dot{I}_f X_{ZL}$$

很显然，动铁心式弧焊变压器的外特性为下降的外特性。

### 3. 调节特性

根据式（4-59），动铁心式弧焊变压器的外特性方程又可以写成：

$$I_f = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_f^2}}{X_{ZL}} = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_f^2}}{X_L + X_{fL}}$$





在动铁心式弧焊变压器中，由于 $X_L$ 与动铁心无关，通过调节动铁心的位置只能改变 $X_{fL}$ ，从而改变 $X_{ZL}$ ，来实现对焊接电流的调节的。



根据有关的电磁理论可知，带铁心的绕组产生的感抗 $X$ 与绕组匝数 $N$ 的平方成正比，而与磁路中的磁阻 $R_m$ 成反比，即：

$$X \propto \frac{N^2}{R_m}$$

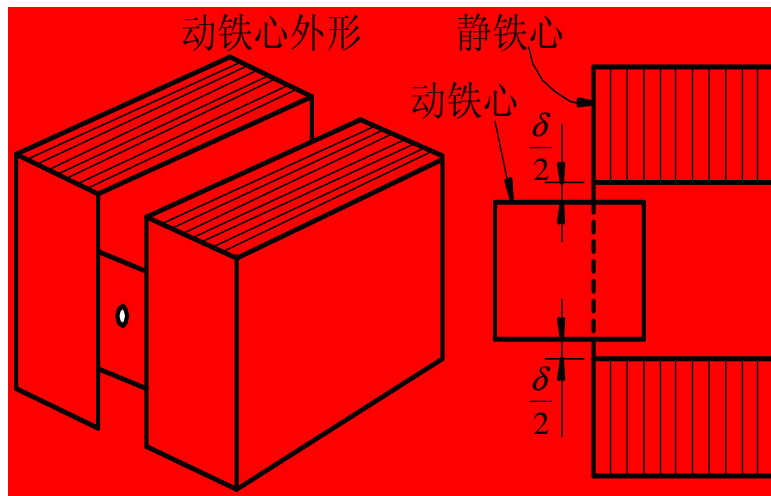
在动铁心式弧焊变压器的附加漏抗 $X_{fL}$ 中， $R_m$ 是指附加漏磁通 $\phi_{f\sigma}$ 所经过的磁路的磁阻，该磁阻包括两部分：一部分是空气隙部分的磁阻，另一部分是动铁心部分的磁阻，见图4-33。由于铁心材料的磁导率要远远大于空气隙，因而铁心部分的磁阻远小于空气隙，可以忽略。所以，附加漏磁通 $\phi_{f\sigma}$ 所经过的磁路的磁阻 $R_m = \delta / \mu_0 S_\delta$ ，则有：



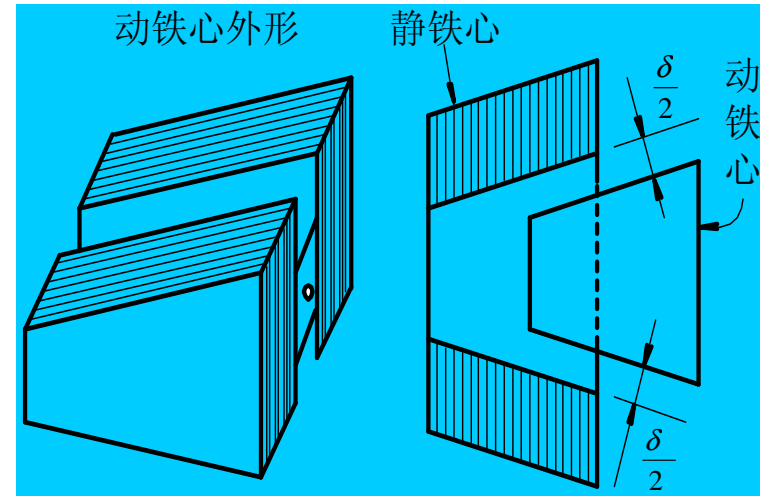
$$X_{f\sigma} \propto \frac{\mu_0 N^2 S_\delta}{\delta}$$

(4-61)

式(4-61)中,  $\mu_0$ 是空气磁导率,  $\delta$ 为变压器静铁心与动铁心之间空气隙的距离,  $S_\delta$ 是变压器静铁心与动铁心之间附加漏磁通所经过的空气隙的截面积(动铁心有效截面积, 在 $\delta$ 不大的情况下, 近似等于动铁心位于变压器铁心窗口内的那一部分截面积)。调节动铁心的位置, 即调节了 $\delta$ 和 $S_\delta$ , 从而调节了附加漏抗 $X_{fL}$



a) 矩形动铁心



b) 梯形动铁心

图4-38 动铁心形状及其与变压器静铁心的配合



在图4-38a中，当矩形动铁心移入时， $\delta$ 不变，但 $S_{\delta}$ 增大，使 $X_{fL}$ 增大， $X_{ZL}$ 增大， $k_M$ 减小， $U_0$ 降低，电流 $I_f$ 减小；当矩形动铁心移出时， $\delta$ 不变，但 $S_{\delta}$ 减小，使 $X_{fL}$ 减小， $X_{ZL}$ 减小， $k_M$ 增大， $U_0$ 增大，电流 $I_f$ 增大。图4-39为变压器动铁心极限位置和对外的特性曲线示意图。当变压器动铁心位置在两极限位置之间时，对应的特性也处于最小和最大的特性曲线之间，即特性的调节只能在最小和最大的特性曲线之间的范围内进行。

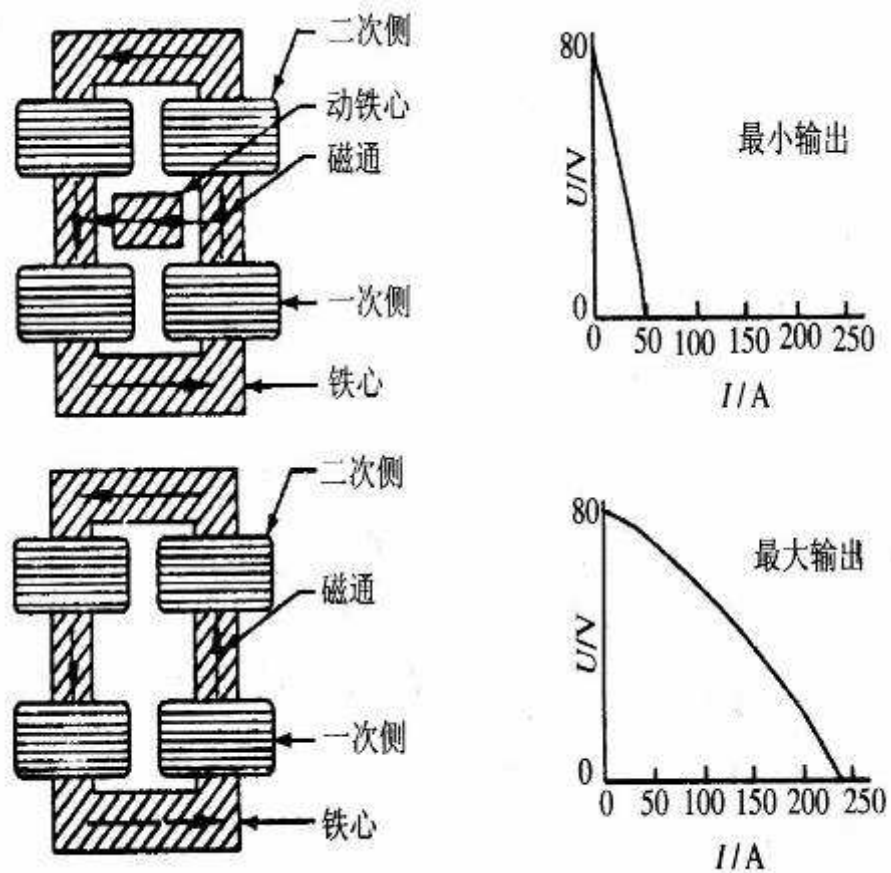


图4-39 动铁心位置与外特性



在图4-38b为梯形动铁心与静铁心配合的示意图。如图所示，梯形铁心位置变化时，不仅 $S_{\delta}$ 变化，而且 $\delta$ 也随之变化。梯形动铁心在最里位置时， $\delta$ 很小，接近于零，因而 $X_{fL}$ 最大值比条件相当的矩形动铁心的大，电流调节的下限较小；反之，当梯形动铁心在最外位置时， $\delta$ 比矩形动铁心的要大， $X_{fL}$ 最小值比条件相当的矩形动铁心的小，电流调节的上限较大。所以梯形动铁心弧焊变压器的电流调节范围更宽，因此，目前采用梯形动铁心的比较广泛。

#### 4. 特点

- 1、动铁心式弧焊变压器是目前常用的弧焊变压器之一，这类变压器的内部漏抗足够大，不必外加电抗器就可以获得下降的外特性。
- 2、动铁心式弧焊变压器结构简单、易造好用。
- 3、但是，由于有动铁心，存在着动铁心的轻微振动，但不至于影响焊接电流的稳定。
- 4、由于有两个空气隙，使附加损耗增大，故适于中、小容量的产品。



## 5. 实例



国产动铁心式弧焊变压器是BX1系列，有BX1-160、BX1-300、BX1-500等多种规格。图4-40为某厂生产的BX1-300弧焊变压器的外特性曲线，其电流调节范围为：75~400A

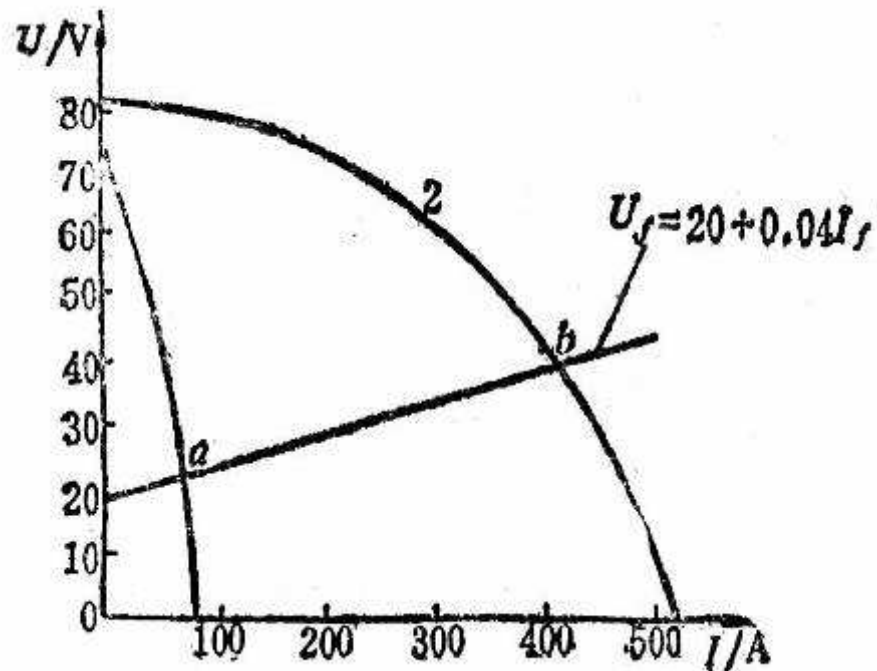


图4-40 BX1-300外特性曲线



## 4.4.2 动绕组式弧焊变压器

### 1. 变压器的结构

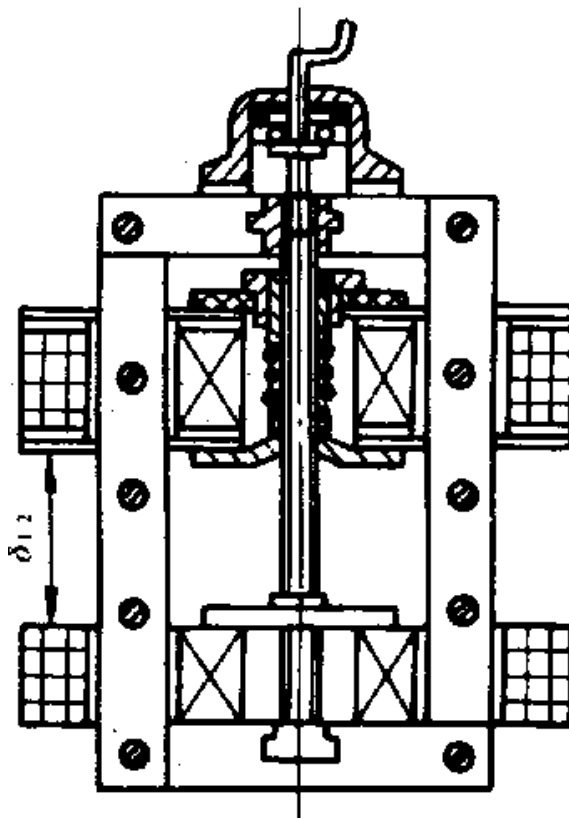


图4-41动绕组式弧焊变压器结构示意图

图4-41为动绕组式弧焊变压器的结构图。变压器的一、二次绕组N1、N2分绕在变压器铁心上，N1与N2之间有一定的距离 $\delta_{12}$ ，因此，变压器存在着较大的漏磁。使变压器一、二次之间的耦合不紧密。N2在变压器铁心的下方固定不动，N1在上方，转动手柄可以调节N1的上下位置，使N1与N2之间的距离 $\delta_{12}$ 发生变化，从而改变了变压器一、二次之间的耦合程度。当 $\delta_{12}$ 变化时，变压器的漏磁发生变化，变压器的漏抗随之变化。为了获得一定数值的可调漏抗，一、二次绕组间的距离必须足够大，因此，动绕组式弧焊变压器的铁心窄而高。





## 2. 工作原理



动绕组式弧焊变压器中没有活动铁心，它是依靠增大一、二次绕组之间的距离来增强变压器的漏磁，从而获得下降的外特性。

### (1) 空载

空载条件下的动绕组式弧焊变压器的磁通分布如图4-38所示。

输入电压 $U_1$ 加到变压器的一次绕组 $N_1$ 上，产生主磁通 $\phi_0$ 和空气漏磁通 $\phi_{\sigma 10}$ 。 $\phi_0$ 占有较大比例，与二次绕组匝链，在二次产生空载电压 $U_0$ 。此时，变压器的耦合系数 $k_M = \phi_0 / (\phi_0 + \phi_{\sigma 10})$ 。当 $N_1$ 与 $N_2$ 之间的距离 $\delta_{12}$ 较大时，空气漏磁通 $\phi_{\sigma 10}$ 较大， $k_M$ 较小，空载电压 $U_0$ 较小，反之，空载电压 $U_0$ 较大。

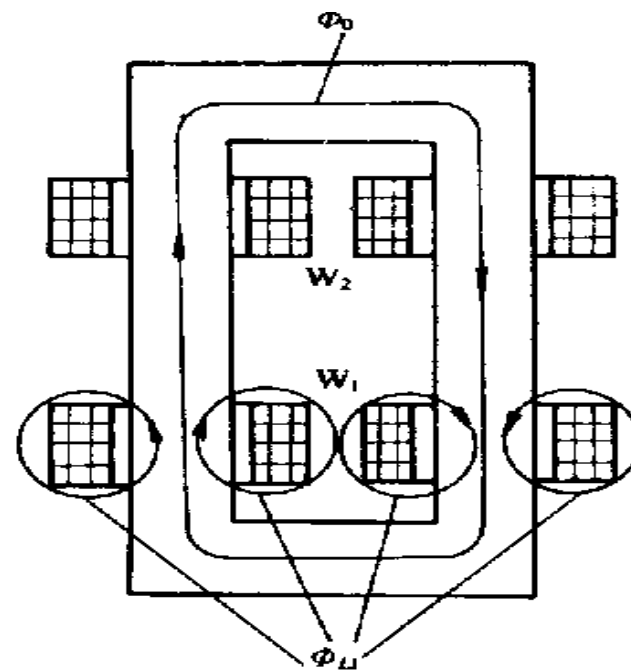


图4-42 空载磁通分布



## (2) 负载

负载条件下，变压器主磁通 $\phi$ 是由一、二次绕组在铁心中产生的磁通合成的。一、二次绕组也会产生空气漏磁通 $\phi_{\sigma 1}$ 和 $\phi_{\sigma 2}$ ，进而产生漏抗 $X_1$ 和 $X_2$ ，其磁通分布如图4-43所示。

根据变压器的工作原理和折算方法，将一次折算到二次后，变压器总的等效漏抗为：

$$X_{ZL} = X_1'' + X_2 = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 X_1 + X_2$$

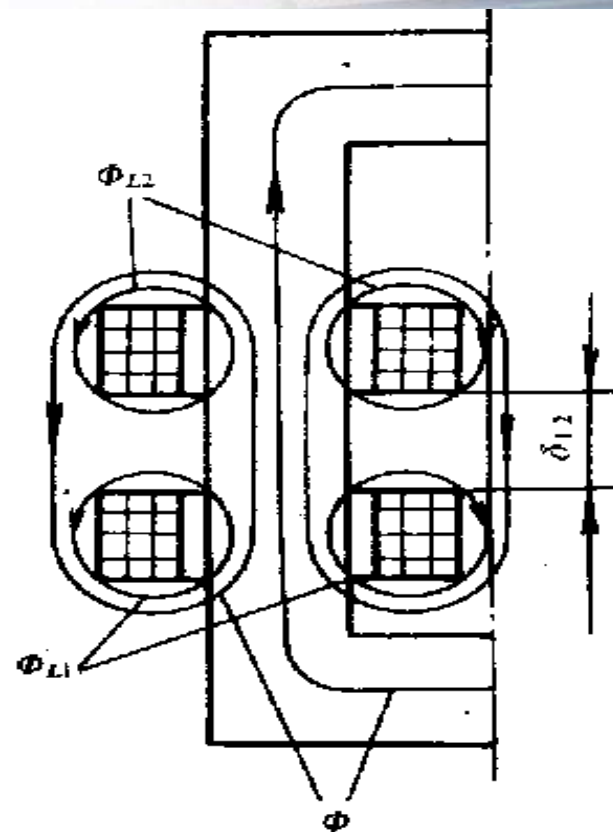


图4-43 负载磁通分布



动绕组弧焊变压器外特性方程为：

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - jI_f X_{ZL}$$

可见，动绕组式弧焊变压器的外特性方程也是类似于椭圆方程，是下降特性。

当  $I_f = 0$ ，即空载时， $U_f = U_0$ ；

当  $U_f = 0$ ，即短路时， $I_f = U_0 / X_{ZL}$ ； $X_{ZL}$  可以限制短路电流的大小。

**3. 调节特性** 动绕组式弧焊变压器的漏抗的近似计算公式如下：

$$X_{ZL} = KN_2^2 (\delta_{12} + A)$$

式中， $K$ 、 $A$ 是与变压器结构有关的常数。

可见，影响 $X_{ZL}$ 的参数主要是 $N_1$ 与 $N_2$ 之间的距离 $\delta_{12}$ 和二次绕组匝数 $N_2$ 。



## (1) $\delta_{12}$ 对外特性曲线的影响

如图4-44所示，当活动绕组 $N_1$ 位于最上端时， $N_1$ 与 $N_2$ 之间的距离 $\delta_{12}$ 为最大值，漏磁通 $\phi_\sigma$ 最大，耦合系数 $k_M$ 最小，空载电压 $U_0$ 为最小值，电流 $I_f$ 为最小值，对应输出下限的外特性；当 $N_1$ 位于最下端， $\delta_{12}$ 为最小值，漏磁通 $\phi_\sigma$ 最小，耦合系数 $k_M$ 最大，空载电压 $U_0$ 为最大值，电流 $I_f$ 为最大值，对应上限的外特性。在 $N_2$ 不变的条件下， $\delta_{12}$ 调节范围的上下限也就决定了此种条件下的外特性曲线的两个极限位置。由于变压器铁心高度的限制，单纯的调节 $\delta_{12}$ ，往往不能满足输出电流调节范围的要求。

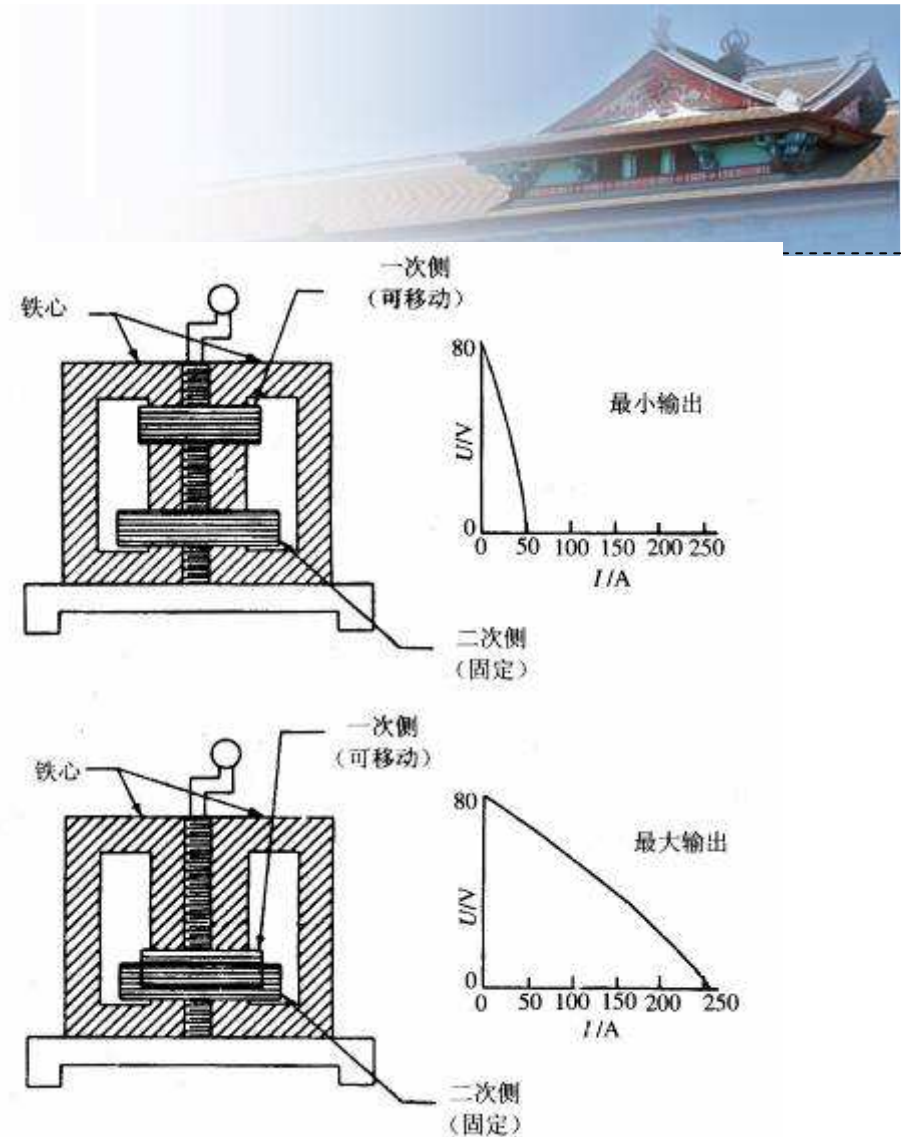


图4-44 动绕组位置与外特性



## (b) 绕组匝数对外特性曲线的影响

根据式(4-62)可知,  $X_{ZL}$  与  $N_2$  的平方成正比,  $N_2$  的变化对  $X_{ZL}$  的影响很大。

改变  $N_2$  可以调节  $X_{ZL}$ , 可以调节电源的外特性。而  $N_2$  的调节一般是有级的、非连续的, 因此, 在变压器输出电流粗调时可以采用调节  $N_2$  的方法。但为了保证空载电压基本不变, 调节  $N_2$  的同时还要对  $N_1$  进行适当的调节。

### 4. 特点

- 1、是目前常用的增强漏磁式弧焊变压器之一, 不必外加电抗器就可以获得下降的外特性。
- 2、没有活动铁心, 避免了由于铁心振动所引起的小电流时电弧不稳定等问题。
- 3、但是, 其电流调节的下限受铁心高度的限制, 因而主要适用于中等容量的电源。
- 4、由于要辅以改变绕组匝数的方法来有级调节电流, 因此使用不如动铁心式弧焊变压器方便。
- 5、另外, 消耗材料较多, 经济性较差。



## 5. 实例



我国的动绕组式弧焊变压器为BX3系列，如BX3-120、BX3-300、BX3-500等。图4-45是为某厂生产的BX3-500弧焊变压器的外特性曲线。图中曲线1、2为小电流档时的外特性曲线，曲线3、4为大电流档时的外特性曲线。

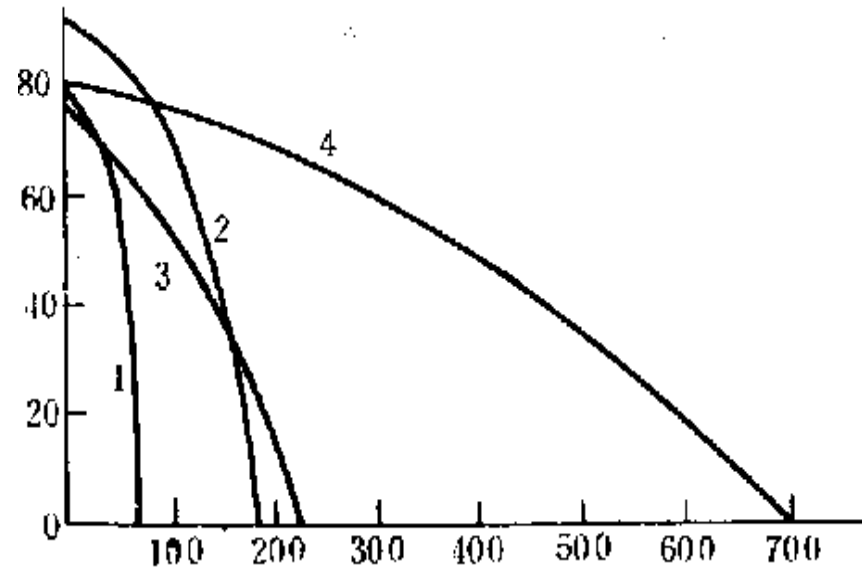


图4-45 动绕组式弧焊变压器的外特性



### 4.4.3 抽头式弧焊变压器



#### 1. 变压器的结构

如图4-46所示，变压器的一次绕组 $N1$ 分为 $N11$ 和 $N12$ 两部分， $N11$ 与二次绕组 $N2$ 绕在同一铁心柱上，二者耦合比较紧密，漏磁很少， $N12$ 可称为一次非漏磁绕组； $N11$ 单独绕在另一铁心柱上，与二次绕组 $N2$ 较远，耦合不紧密，漏磁较大， $N11$ 可称为一次漏磁绕组。 $N11$ 和 $N12$ 各有一部分抽头， $S1$ 、 $S2$ 是双刀同轴开关，通过此开关可以改变抽头位置。但是，改变抽头位置时，一次绕组匝数 $N1 = N11 + N12$ 应保持不变

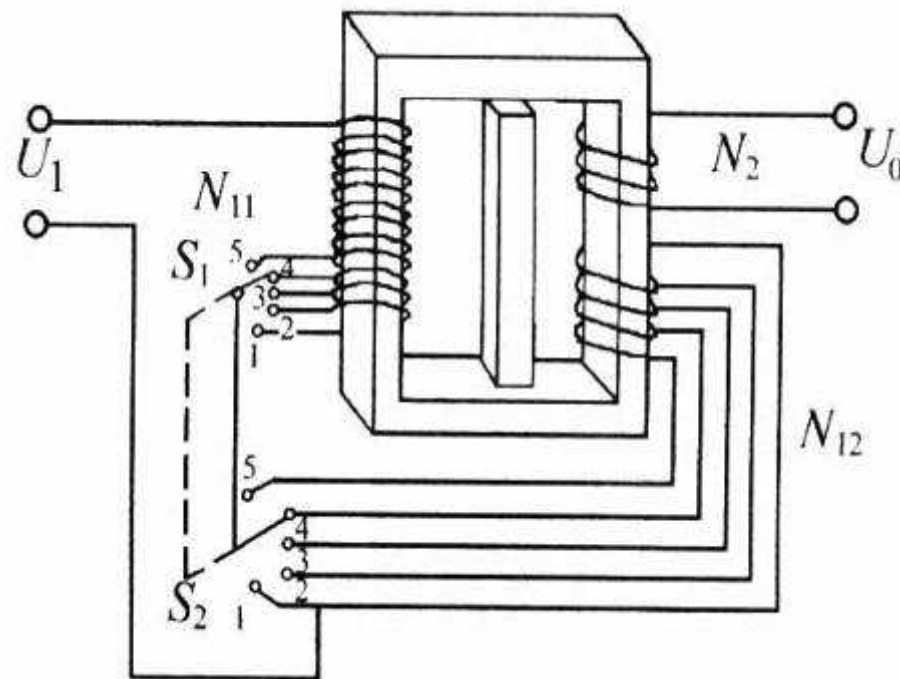


图4-46抽头式弧焊变压器结构



## 2. 工作原理

### (1) 空载

图4-47为空载时的抽头式弧焊变压器的磁通分布图。一次绕组产生主磁通 $\phi_0$ 与 $N_2$ 匝链， $N_{11}$ 产生漏磁通 $\phi_{\sigma 10}$ ， $N_{12}$ 产生的漏磁可忽略不计，则：

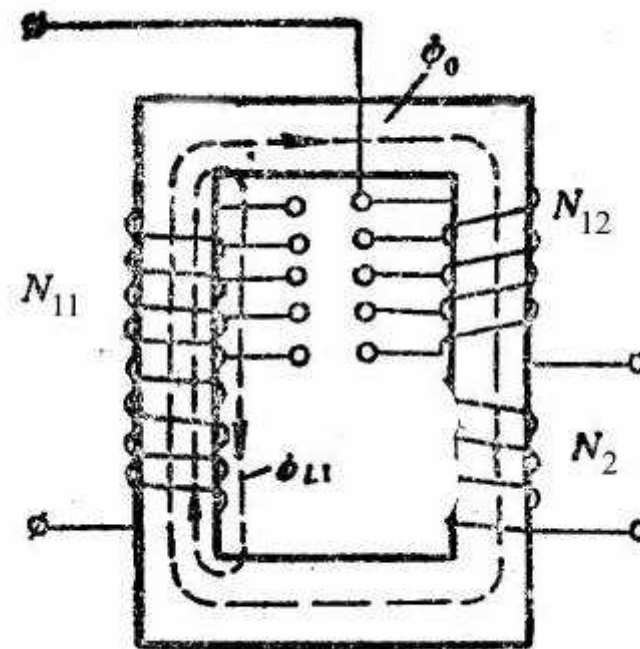


图4-47 抽头式弧焊变压器空载磁通

$$U_1 = 4.44 f N_{11} (\phi_{0m} + \phi_{\sigma 10m}) + 4.44 f N_{12} \phi_{0m}$$

$$U_0 = 4.44 f N_2 \phi_{0m}$$

$$\frac{U_0}{U_1} = \frac{N_2 \phi_{0m}}{N_{11} (\phi_{0m} + \phi_{\sigma 10m}) + N_{12} \phi_{0m}} = \frac{k_M N_2}{N_{11} + k_M N_{12}}$$





从而可得: 
$$U_0 = \frac{k_M N_2}{N_{11} + k_M N_{12}} U_1 \quad (4-64)$$

## (2) 负载

负载时的磁通分布如图4-48所示。主磁通 $\phi$ 在铁心内与一、二次绕组匝链，漏磁通由 $N_{11}$ 产生的 $\phi_{\sigma 1}$ 和 $N_{12}$ 产生的 $\phi_{\sigma 2}$ 两部分组成，相应产生漏抗 $X_1$ 和 $X_2$ 。这类弧焊变压器的总漏抗可用下述经验公式(4-65)计算:

$$X_L = K(1 - \lambda)N_2^2 \quad (4-65)$$

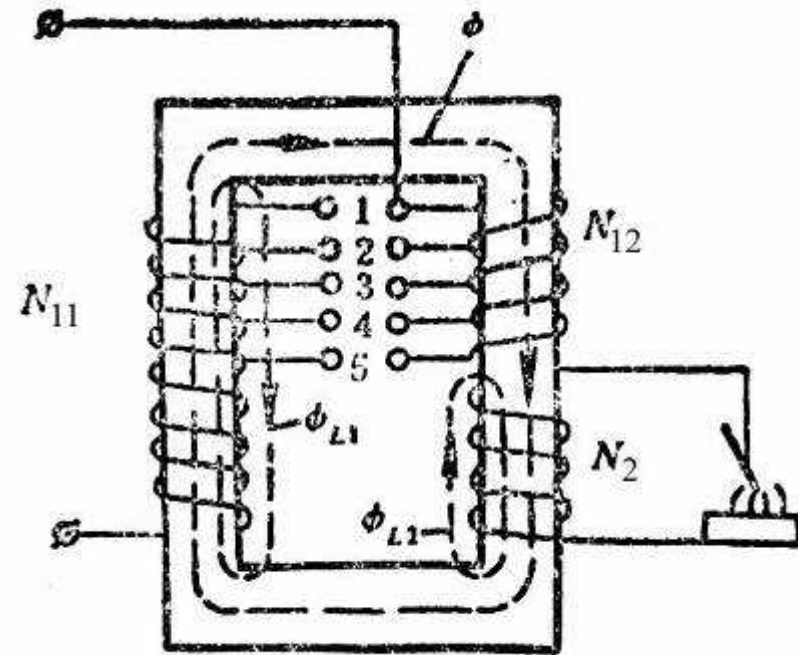


图4-48 抽头式弧焊变压器负载磁通



上式中， $K$ 是变压器结构决定的系数， $\lambda$ 为重合率。

其定义式为：
$$\lambda = \frac{N_{12}}{N_{11} + N_{12}}$$

该参数反映了初次级绕组的耦合紧密程度。

抽头式弧焊变压器的外特性方程为：

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - j\dot{I}_f X_L$$

抽头式弧焊变压器因 $X_L$ 的存在，其外特性为下降特性，而 $X_L$ 受到 $\lambda$ 很大影响。当与 $N_2$ 耦合较紧密的 $N_{12}$ 匝数减小，则 $\lambda$ 减小， $X_L$ 增大，外特性曲线变陡，反之亦然。



### 3. 调节特性

其外特性又可以写成如下形式：

$$I_f = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_f^2}}{X_L}$$

调节 $X_L$ ，可以调节外特性。调节 $\lambda$ 值可以调节 $X_L$ 。从图4-42可以看出，在一次绕组上有很多抽头，当改变抽头时，一般要保持 $N_1 = N_{11} + N_{12}$ 基本不变，亦即 $N_{11}$ 增加时， $N_{12}$ 减小，但是，此时 $\lambda$ 值会减小，反之亦然。这样 $U_0$ 基本保持不变（利于电弧稳定），而外特性曲线则会随 $\lambda$ 的增加、 $X_L$ 的减小向右移动，如图4-45所示。

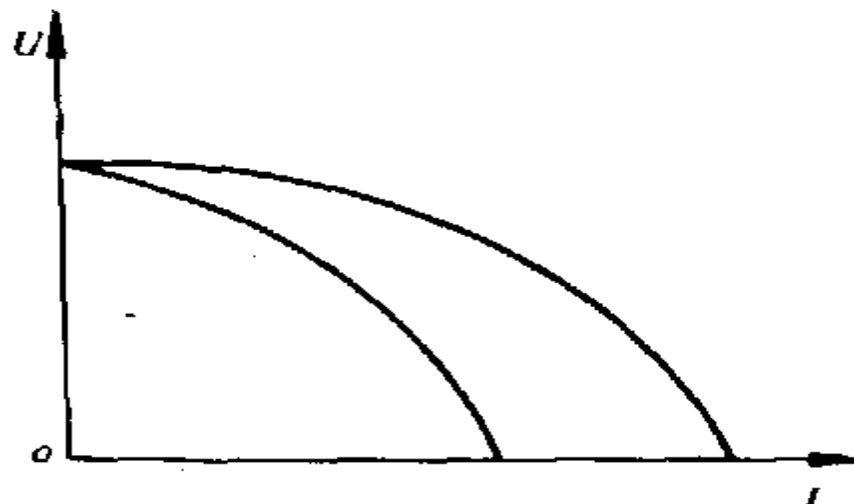


图4-49 抽头式弧焊变压器的外特性

在抽头式弧焊变压器中， $X_L$ 的调节范围有限，且只能有级调节，为了电流的加大调节范围，有时也将 $N_2$ 进行抽头调节。



## 4. 特点

- 1、抽头式弧焊变压器一般做成便携式，适用于小容量电源。
- 2、负载持续率低，结构较紧凑，体积小，成本低，
- 3、无活动部分，易于制造，可靠性较高，电弧较为稳定。
- 4、适用于维修、移动作业、登高作业等场合。
- 5、负载持续率较低，只适于短时间燃弧焊接的情况。

## 5. 实例

我国制造的这类弧焊变压器属于BX6系列，如某生产厂家生产的BX6-140抽头式弧焊变压器，电流调节范围为：35A~190A，额定负载持续率10%，重量约为20kg。



## 4.5 串联电抗器式弧焊变压器



这类弧焊变压器是由一个正常漏磁的变压器与串联的电抗器组成。变压器本身的漏磁很少，其输出外特性是平缓下降的，接近于平特性。变压器只负责将网路电压降至合适的电弧焊接的电压，而电抗器使弧焊变压器具有下降的外特性。根据电抗器与变压器的结构，这类电源可分为分体式和同体式两类。

### 4.5.1 电抗器

电抗器实际上是一个带铁心的线圈，线圈的两端串接在焊接回路中。当交流电流 $I$ 通过电抗器线圈 $N_k$ 时，有磁势 $IN_k$ 在铁心中产生 $\phi_k$ 。在 $\phi_k$ 作用下，在 $N_k$ 中产生感生电动势 $E_k$ 。 $E_k$ 在交流焊接回路中起电抗压降作用，故：

$$E_k = I_f X_k \quad \text{我们有:} \quad X_k = \omega L = \frac{\omega N_k^2}{R_m}$$



$X_k$ 是决定这类弧焊电源外特性的重要因素。在式(4-67)中,  $\omega=2\pi f$ 与电网频率有关, 一般不会发生变化, 因此, 电抗器线圈匝数 $N_k$ 及其磁阻 $R_m$ 将影响 $X_k$ 的大小。由此也可以推出调节电抗器感抗 $X_k$ 的方法, 进而产生以下几种电抗器的类型。

### 1. 调节气隙式电抗器

这是一类通过改变磁路中空气隙的大小来调节磁阻改变感抗的电抗器, 如图4-46所示是几种气隙式电抗器。其磁路都是由两部分组成: 一部分是电抗器的铁心, 一部分是空气隙。因此, 总磁阻 $R_m$ 也由两部分组成, 即铁心磁阻 $R_{mFe}$ 和空气隙磁阻 $R_{m\delta}$ :

$$R_m = R_{mFe} + R_{m\delta} = \frac{l}{\mu S_{Fe}} + \frac{\delta}{\mu_0 S_{\delta}}$$

其中,  $\mu$ 和 $\mu_0$ 分别是铁心和空气的磁导率,  $l$ 和 $\delta$ 分别是铁心中的磁路长度和空气隙的总长度,  $S_{Fe}$ 和 $S_{\delta}$ 分别为铁心截面和空气隙导磁截面。

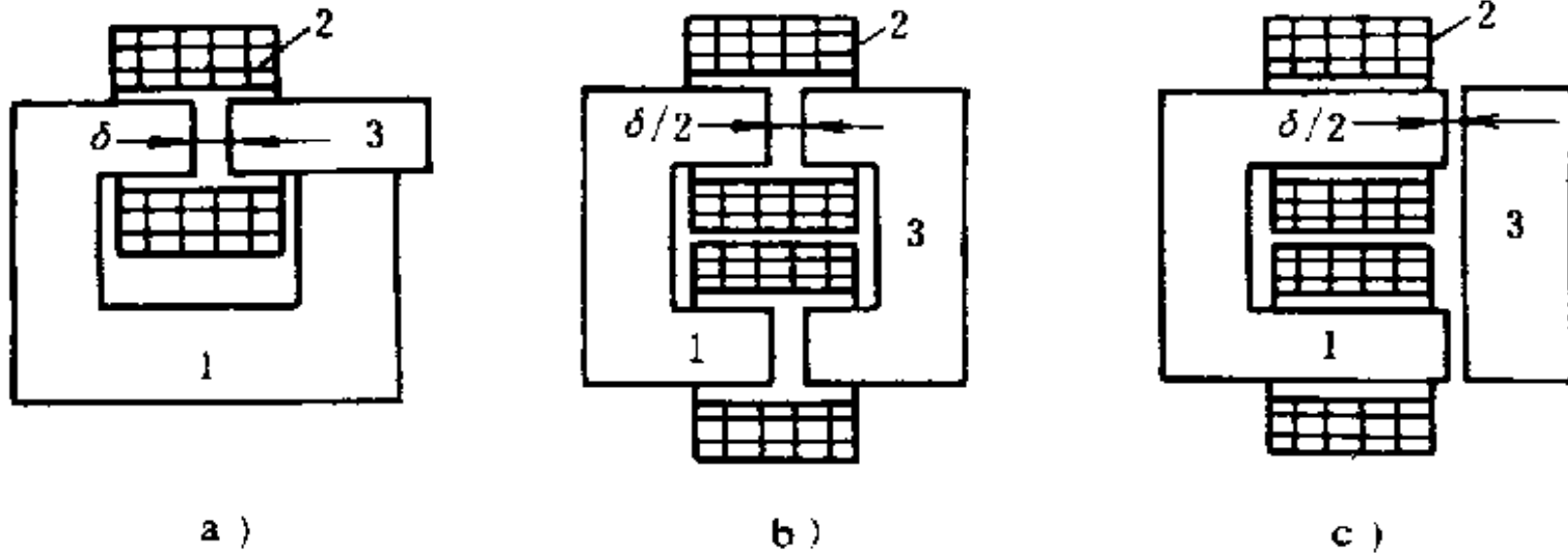


图4-46 气隙式电抗器示意图

铁心材料的磁导率要比空气隙大得多，即 $\mu \gg \mu_0$ ；而一般情况下空气隙不会很大，可以认为 $S_\delta \approx S_{Fe}$ ； $L$ 虽然比 $\delta$ 大，但远不如 $\mu$ 和 $\mu_0$ 之间的差距，因此， $R_{m\delta} \gg R_{mFe}$ ， $R_{mFe}$ 可以忽略不计，则有：

$$X_k \approx \omega \frac{N_k^2}{R_{m\delta}} = \omega \mu_0 \frac{N_k^2 S_\delta}{\delta} \approx \omega \mu_0 \frac{N_k^2 S_{Fe}}{\delta} \quad (4-68)$$



可以看出这类电抗器的调节原理，即增加气隙 $\delta$ ， $X_k$ 减小，反之， $X_k$ 增大。  
特点：

采用调节空气隙的方式调节电抗器的感抗，调节较为方便，有一定的调节范围，采用双气隙的电抗器，感抗的调节范围更大，因此，这类电抗器得到了广泛应用。

但可调气隙式电抗器必须设置动铁心，而铁心中交变磁通会产生电磁力使铁心产生振动，严重上时会影响电弧的稳定性。

## 2. 饱和电抗器

这仍是一类通过改变磁阻来调节感抗的电抗器，调节磁阻的方式是改变铁心的磁导率，其结构如图4-47所示，磁路的磁阻为

$$R_m = \frac{l}{\mu S_{Fe}}$$

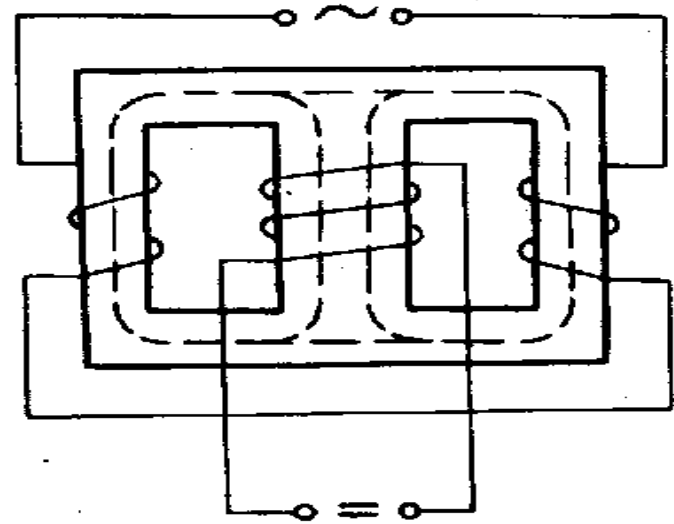


图4-47 饱和电抗器





在图4-47中除了在两侧铁心柱上绕有电抗器工作线圈外，在中间铁心柱上还绕有直流控制线圈。根据图4-6可知，铁心材料的磁导率 $\mu$ 是变化的，改变直流控制线圈中的电流，可以改变铁心在其磁导率曲线上的工作位置，从而改变了 $\mu$ 和 $R_m$ ，从而使 $X_k$ 发生变化。

### 特点

这种电抗器易于控制和调节，调节范围较大，调节也较均匀，可实现远距离调节，但耗用的线圈材料和铁心材料较多，体积和重量较大。



### 3. 调节线圈式电抗器

这类电抗器是在其绕组线圈上抽出几个头来，如图4-48所示，通过改变抽头来调节线圈匝数 $Nk$ ，从而调节其感抗。

这种电抗器结构简单，没有动铁心带来的振动问题，但只能做有级调节，应用范围不广。

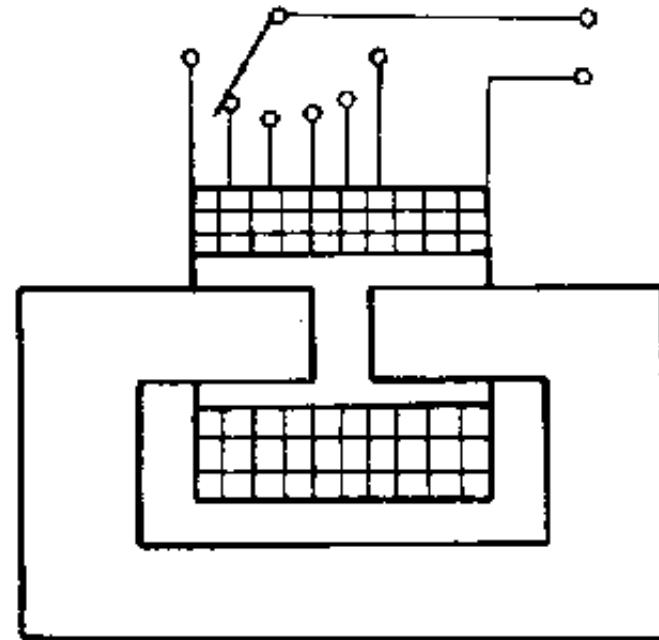


图4-48 调节线圈式电抗器



## 4.5.2 分体式弧焊变压器



由一个正常漏磁的变压器和一个或多个电抗器串联组成，变压器和电抗器除了电气连线的联系外是相互独立的。根据串联电抗器的数量又可分为单站式和多站式两种。

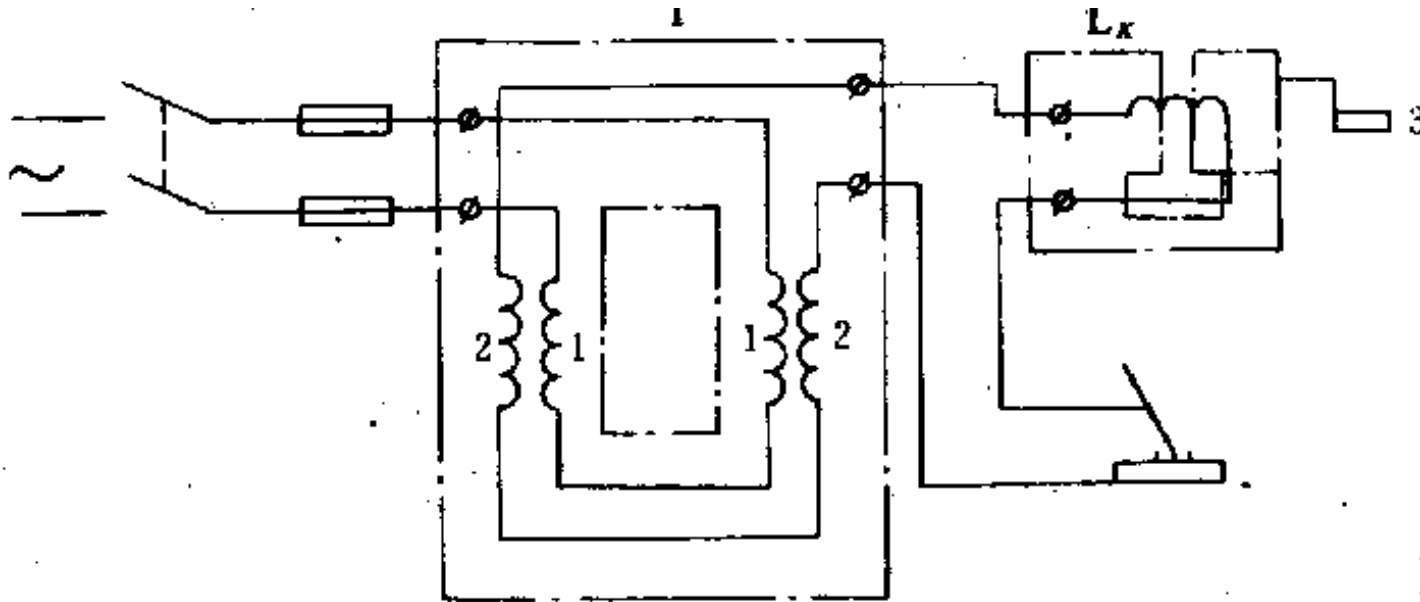


图4-49 单站分体式弧焊变压器电气原理图



## 1. 工作原理



由图4-49可知，该类弧焊变压器是由一个正常漏磁变压器和一个电抗器串联组成。

### (1) 空载

由于空载时电抗器上无电流，电抗器无压降，空载电压 $U_0$ 就是此时变压器二次绕组的输出电压，又因变压器漏磁很小，耦合系数 $kM \approx 1$ ，所以：

$$U_0 = E_{20} = \frac{N_2}{N_1} U_1$$

### (2) 负载

因变压器漏磁可忽略，焊接回路总感抗 $X_z = X_K$ ，其等效电路如图4-50所示，外特性方程为

$$\dot{U}_f = \dot{U}_0 - j\dot{I}_f X_K$$



仍可化为如下椭圆方程:

$$\frac{I_f^2}{(U_0 / X_K)^2} + \frac{U_f^2}{U_0^2} = 1$$



当  $I_f = 0$ , 即空载时,  $U_f = U_0$ ;

当  $U_f = 0$ , 即短路时,  $I_f = U_0 / X_k$ ;  $X_k$  可以限制短路电流的大小;

## 2. 调节特性

增大  $X_k$ , 外特性曲线左移, 反之向右移, 但其空载电压基本保持不变, 如图4-51所示。

调节  $X_k$  的方式因所采用的电抗器类型的不同而有所不同。这类弧焊变压器常采用调节气隙式电抗器, 通过改变电抗器铁心的气隙来改变  $X_k$ , 调节外特性。

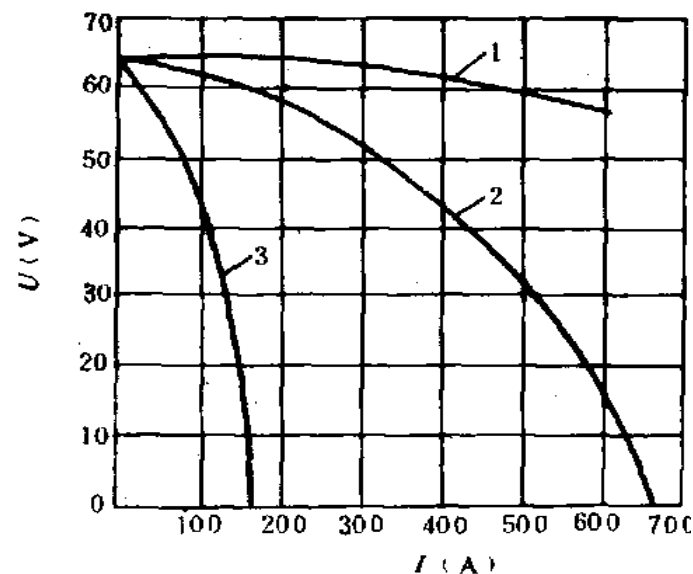


图4-51单站分体式弧焊变压器外特性调节



### 3. 多站分体式弧焊变压器

一般弧焊变压器都采用单相变压器，而多站式可采用三相变压器，如图4-52所示，多个电抗器与一台三相变压器构成整个系统，变压器的二次输出每一相上可串联一个或多个电抗器，每个电抗器都可输出焊接电流，可看作是一个焊接工作站。串联电抗器是为了获得下降外特性，为了使某一站的工作及负载变化不致影响其它各站，要求多站式弧焊变压器本身的外特性是平的或是缓慢下降的。

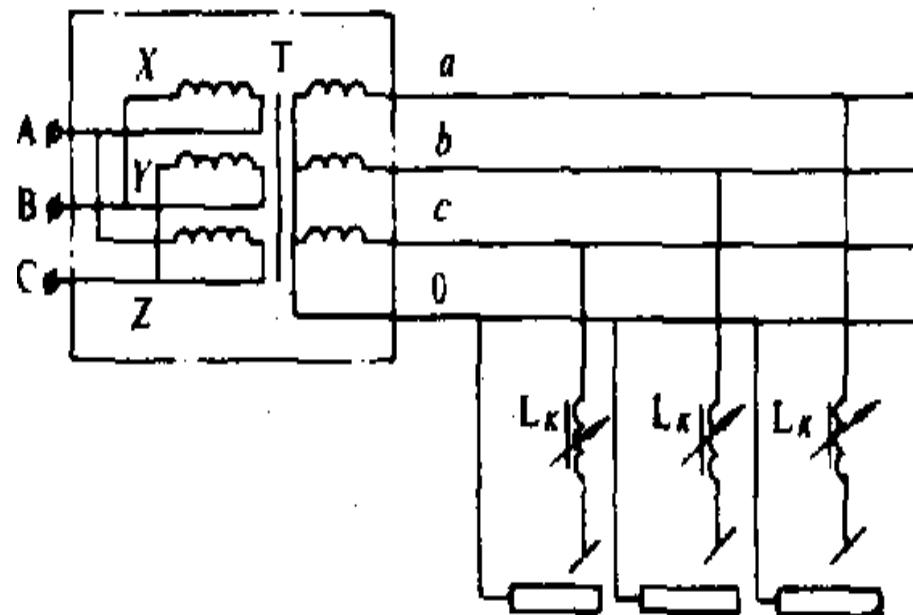


图4-52 多站分体式弧焊变压器



#### 4. 分体式弧焊变压器特点



单站分体式弧焊变压器的变压器和电抗器可分别移动和使用，但结构不够紧凑，消耗材料较多，目前已很少应用。

对于多站式弧焊变压器，由于是集中供电，这类电源设备利用率高，节省设备投资，维修、维护方便，但灵活性较差，工作可靠性不好，应用也不广。



### 4.5.3 同体式弧焊变压器

这种弧焊变压器是将变压器和电抗器做成一体，如图4-53所示。图中上部是电抗器，下面的部分为变压器。变压器和电抗器有一部分铁心，即磁轭，是共用的，这样可以节省铁心材料，使整体设备的结构更为紧凑。但由于共用磁轭的存在，变压器线圈与电抗器线圈之间不仅有电的联系，还有磁的联系，必须注意二次绕组与电抗器线圈不同极性串联时，对空载电压值和共用磁轭磁饱和程度的影响。

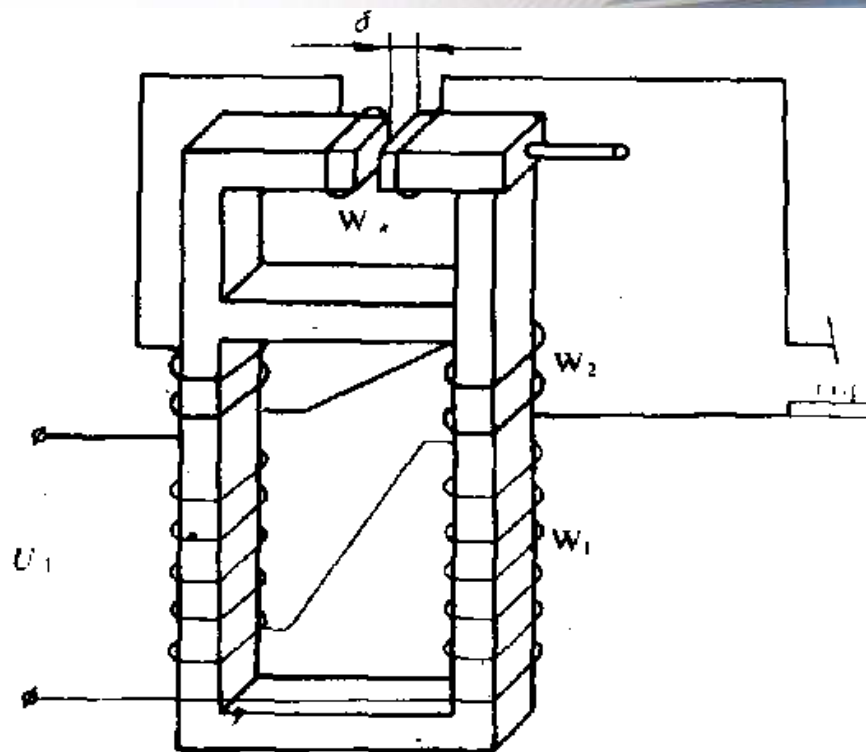


图4-53 同体式弧焊变压器





**空载时**，变压器产生的磁通会有一部分通过电抗器线圈闭合，因而在空载条件下，电抗器线圈也会感应出电压，它与二次绕组的同极性串联会使空载电压  $U_0$  在  $E_{20}$  的基础上有所增加，反之，会减小。但又由于电抗器铁心中空气隙的存在，使磁阻大大增加，由变压器产生的通过电抗器线圈的那部分磁通很少，它在电抗器线圈中感应出的电压也就很小，对  $U_0$  产生的影响也就有限，可以认为  $U_0 \approx E_{20}$ 。

**在负载条件下**，变压器产生的磁通通过电抗器气隙的量仍很小，可忽略；电抗器线圈所产生的磁通也主要通过共用磁轭闭合，穿过变压器其它铁心的量也很小，可以忽略。这样同体式弧焊变压器的工作原理与分体式的相同，在此不再赘述。

一般情况下，变压器的二次绕组与电抗器线圈反极性串联，共用磁轭不易饱和。

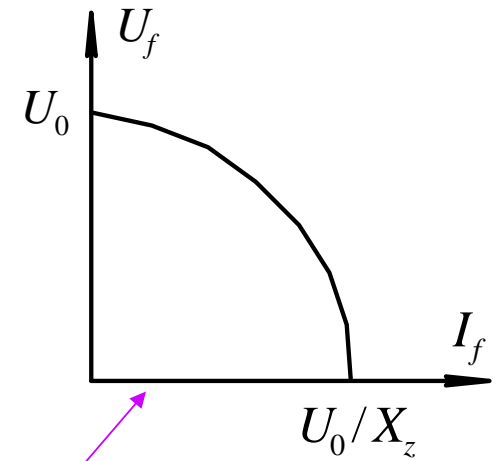
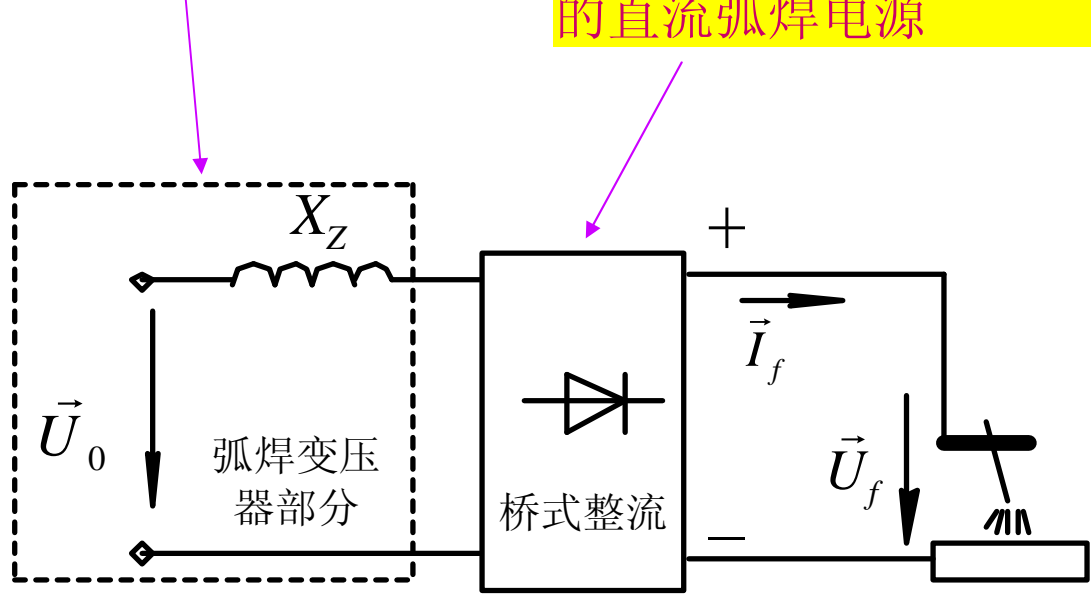
我国同体式弧焊变压器的编号为BX系列和BX2系列，小电流时的电弧稳定性较差，宜于做成大、中容量的弧焊电源，如BX-500、BX2-500、BX2-700、BX2-1000等，用于手工电弧焊、埋弧焊等。



# 4.6 弧焊变压器基础上的弧焊整流器

单相的弧焊变压器

在弧焊变压器的输出端加上整流装置，就可以构成简单的直流弧焊电源



外特性与不整流时相同

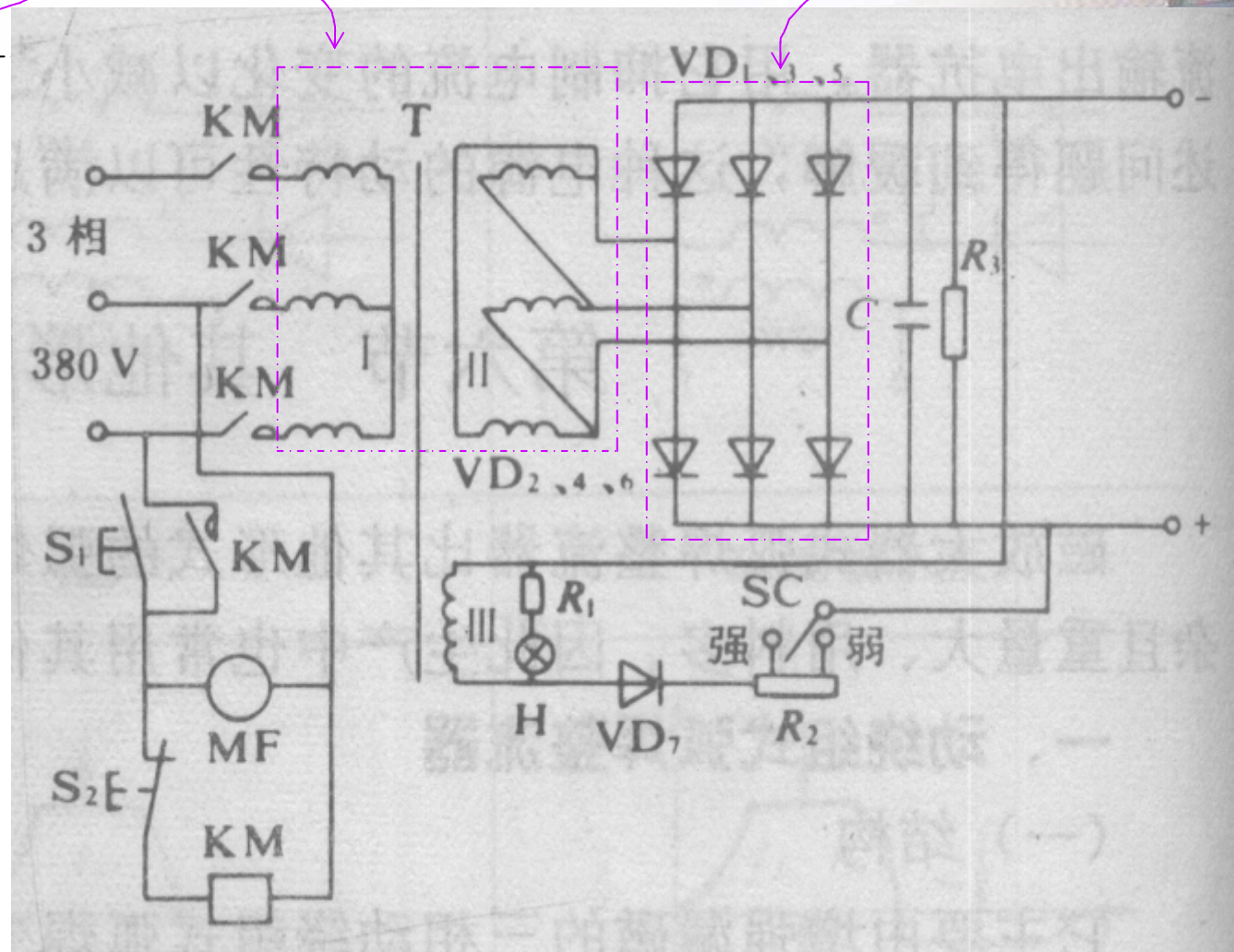
但这类整流器更具有技术意义的是



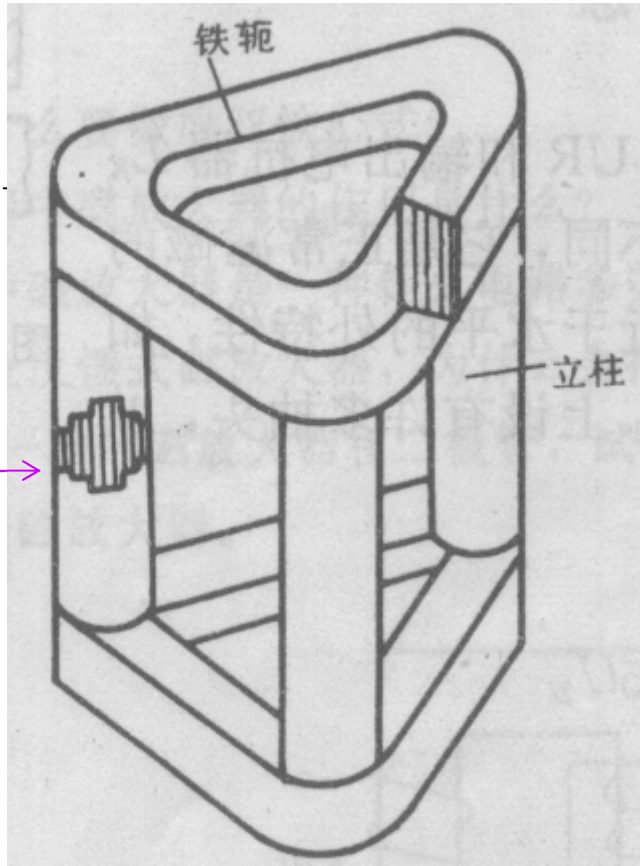
用于整流的弧焊变压器可以是三相变压器，进行三相整流



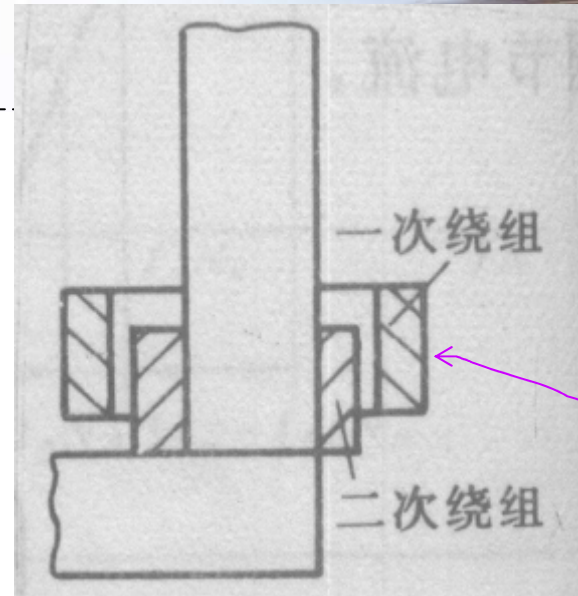
三相动圈式变压器



三相桥式整流

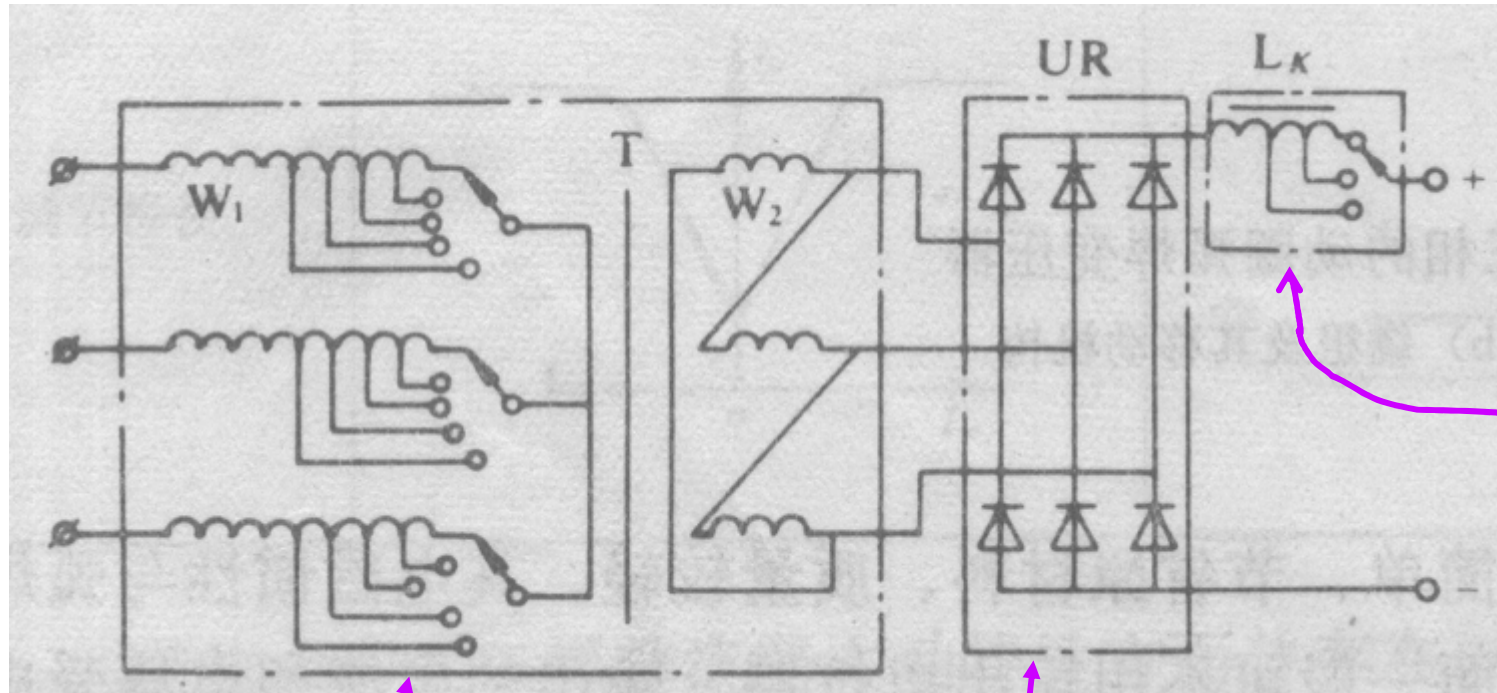


三相动圈式变压器铁心柱



绕组

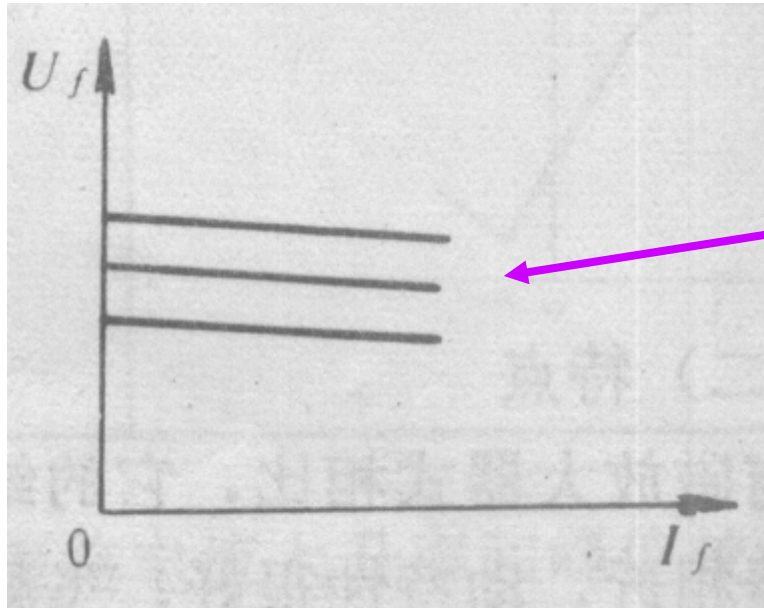
以上是下降特性的情况，平或缓降特性的整流更常见



带抽头的电抗器

漏磁极少的三相抽头式变压器

整流器



外特性

外特性表达式 
$$U_0 = 0.78U_{1l} \frac{N_2}{N_1}$$