

# 目 录

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| <b>第一章 变压器常识</b> .....   | (1)   |
| §1—1 变压器的基本原理.....       | (1)   |
| §1—2 变压器的构造.....         | (19)  |
| §1—3 变压器的外特性.....        | (30)  |
| §1—4 变压器的等值电路.....       | (32)  |
| §1—5 变压器的功率、效率及功率因数..... | (39)  |
| §1—6 变压器的空载试验和短路试验.....  | (41)  |
| §1—7 小型单相变压器设计.....      | (45)  |
| §1—8 小型单相变压器设计举例.....    | (51)  |
| <b>第二章 弧焊变压器设计</b> ..... | (56)  |
| §2—1 弧焊变压器简介.....        | (56)  |
| §2—2 动铁分磁式弧焊变压器设计.....   | (69)  |
| §2—3 动铁分磁式弧焊变压器设计举例..... | (83)  |
| §2—4 动圈式弧焊变压器设计.....     | (94)  |
| §2—5 动圈式弧焊变压器设计举例.....   | (101) |
| §2—6 抽头式弧焊变压器设计及举例.....  | (116) |
| §2—7 便携式弧焊变压器设计及举例.....  | (126) |
| §2—8 交流电抗器设计.....        | (132) |
| §2—9 交流电抗器设计举例.....      | (136) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| <b>第三章 弧焊整流器设计</b> .....  | (139) |
| §3—1 弧焊整流器简介.....         | (139) |
| §3—2 弧焊整流器变压器设计.....      | (142) |
| §3—3 弧焊整流器变压器设计举例.....    | (145) |
| §3—4 饱和电抗器设计.....         | (153) |
| §3—5 饱和电抗器设计举例.....       | (156) |
| §3—6 输出电抗器设计及举例.....      | (161) |
| <b>第四章 电阻焊变压器设计</b> ..... | (165) |
| §4—1 电阻焊变压器简介.....        | (165) |
| §4—2 电阻焊变压器设计.....        | (169) |
| §4—3 电阻焊变压器设计举例.....      | (180) |
| §4—4 电容储能焊变压器设计.....      | (183) |
| §4—5 电容储能焊变压器设计举例.....    | (203) |
| <b>第五章 电工材料</b> .....     | (207) |
| §5—1 硅钢片.....             | (207) |
| §5—2 铜导线.....             | (227) |
| §5—3 绝缘材料.....            | (246) |
| <b>附录 本书主要符号的意义</b> ..... | (246) |
| <b>主要参考文献</b> .....       | (247) |

# 第一章 变压器常识

## § 1-1 变压器的基本原理

### 一、电磁感应定律

变压器是一种常见的电气设备，种类很多。以电力变压器为例，它的功用是根据需要将交变电压升高或降低，而不改变其频率。

变压器由闭合铁心组成的磁路系统和由高压、低压绕组组成的电路系统及冷却系统构成。图1-1是变压器示意图。 $N_1$ 是初级绕组， $N_2$ 是次级绕组， $N_1$ 与 $N_2$ 绕在同一个铁心上。

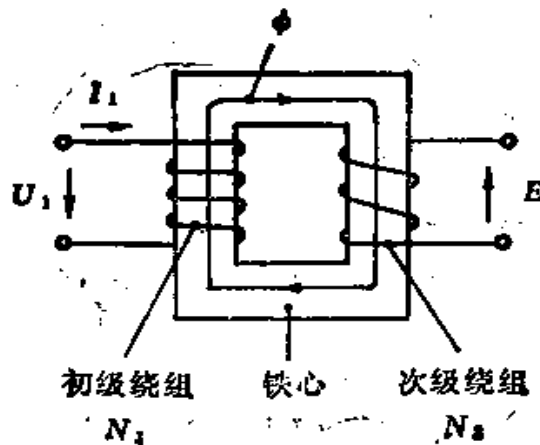


图1-1 变压器示意图

变压器的基本工作过程是：初级绕组接通外施交流电压后，在铁心内激励一交变磁通，这个磁通同时交链着次级绕

组，当磁通变化时就会在次级绕组中产生感应电势。用一句通俗的话来说，叫作“动电生磁，磁动生电”。

任何载流导体周围都有磁场，磁场可用磁力线来表示，磁力线总是环绕电流闭合的，它没有起点也没有终点。这些闭合磁力线都和闭合电路互相交链，它的方向由电流方向决定，它们之间的关系，可用右手螺旋法则决定。

电流产生磁场的关系可用全电流定律以及由全电流定律导出的磁路欧姆定律来表达。

全电流定律指出：在闭合回路上的合成磁场强度  $H$ ，沿整个回路  $l$  的线积分，等于穿过回路所界定面积中导体电流  $I$  的代数和。全电流定律的数学表达式为

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma I \quad (1-1)$$

如果线积分途径沿磁力线方向巡行，并且磁力线上各点磁场强度  $H$  大小相等，则线积分  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint H dl =$

$H \oint dl = Hl$ 。式中  $l$  是磁力线的长度。如果磁力线所包围的面积内有  $N$  根导线穿过，而且每根导线中的电流都等于  $I$ ，方向也相同，则电流  $I$  的代数和  $\Sigma I = NI$ 。此时全电流定律可以表示为

$$Hl = NI \quad (1-2)$$

磁路欧姆定律可以由上式导出。因为

$$H = B/\mu, \quad B = \phi/S$$

$$\text{所以 } NI = Hl = \frac{B}{\mu} l = \phi \frac{l}{\mu S} \quad (1-3)$$

$$\text{或 } F = NI = \phi R_m$$

式中  $F$ ——磁势，它是磁通  $\phi$  的来源，相当于电路中的电动

势  $E$ ， $F = NI$ ；

$\phi$ ——磁通，由磁势产生，并在磁路中闭合，相当于电路中的电流  $I$ ；

$R_m$ ——磁阻，表示磁路对磁通的阻力作用，相当于电路

中的电阻  $R$ ， $R_m = \frac{l}{\mu S}$ ；

$l$ ——磁路的平均长度；

$S$ ——磁路的截面积；

$\mu$ ——磁路材料的磁导率，相当于电路中的电导率  $\gamma$ 。

式  $F = \phi R_m$  与电路中的欧姆定律  $U = IR$  相似，所以称为磁路欧姆定律。

全电流定律及磁路欧姆定律既适用于直流磁路，也适用于交流磁路。

利用全电流定律及磁路欧姆定律，当已知绕组中电流大小时，就可以计算所产生磁通  $\phi$  的大小。反之，当已知磁通  $\phi$  或磁通密度（磁密） $B$  时，可以算出它们需用多大的电流来产生。因此，利用这两个定律，在变压器中可以计算空载电流的大小，在电机中可以计算激磁电流的大小，在各种焊机中还可以计算电抗器电感量的大小。

所谓“磁动生电”的原理，实质上是电磁感应现象。当穿过回路中的磁通发生变化（增加或减少）时，回路内会产生电势，这个电势是靠磁通的变化感应产生的，所以称为感应电势。磁通变化产生感应电势的现象称为电磁感应现象。

这里可能有两种情况：

1. 导体在磁场中运动，切割磁力线时，导体内产生感应电势，这是发电机的原理。

2. 与线圈交链的磁通发生变化时, 在线圈内产生感应电势, 这是变压器的原理。

可见, “电生磁” 只要一个条件, 就是要 有 电 流, 而 “磁变电” 必须具备两个条件, 就是第一, 要有导体, 第二, 导体上环链的磁力线需随时间而变化。

描述 “磁变电” 现象的是电磁感应定律。电磁感应定律认为: 对于含有  $N$  匝的线圈, 当穿链它的磁通  $\phi$  增加或减少时, 线圈两端有感应电动势  $e$  产生, 电动势  $e$  的大小和线圈磁通链  $\Psi$  ( $\Psi = N\phi$ ) 的变化率成正比, 电动势  $e$  的方向总是企图阻止磁通链的变化。电磁感应定律的数学表达式为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-4)$$

这里要注意感应电动势  $e$  的大小及方向两个问题。

感应电动势  $e$  的大小与磁通链的变化速度  $d\psi/dt$  (或  $N d\phi/dt$ ) 成正比, 而与磁通链  $\psi$  的大小无关。

感应电动势  $e$  的方向取决于磁通  $\phi$  是增加还是减少, 而不取决于  $\phi$  的原有方向。  $\phi$  增加时,  $e$  的方向将推动电流造成一个磁场与原有磁场  $\phi$  相反;  $\phi$  减少时,  $e$  的方向将推动电流造成一个磁场与原有磁场  $\phi$  相同。可见, 线圈中的磁场具有惯性, 不能突变。当磁场变化时, 线圈要产生感应电动势来反抗这种变化。

当铁心中的磁通  $\phi$  按正弦规律变化时, 即

$$\phi = \phi_m \sin \omega t$$

则按电磁感应定律式 (1-4), 在绕组  $N$  中产生的感应电势  $e$  为

$$\begin{aligned}
e &= -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \phi_m \sin \omega t \\
&= -N \phi_m \omega \cos \omega t \\
&= -N \phi_m \omega \sin \left( \frac{\pi}{2} - \omega t \right) \\
&= N \phi_m \omega \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)
\end{aligned}$$

可见感应电势  $e$  也是正弦波，但其相位比磁通  $\phi$  滞后  $\pi/2$ 。  
感应电势  $e$  既然是正弦波，就可以表示为

$$e = E_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

感应电势的最大值为

$$E_m = N \phi_m \omega$$

而  $\omega = 2\pi f$ ,  $\phi_m = B_m S$ , 代入得

$$E_m = 2\pi f N B_m S$$

正弦波的有效值  $E = E_m / \sqrt{2}$

所以 
$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N B_m S$$

或 
$$E = 4.44 f N B_m S \times 10^{-4} \quad \text{V} \quad (1-5)$$

式中  $E$ ——绕组感应电势有效值, V;

$f$ ——交流电频率, Hz;

$N$ ——绕组匝数, 匝;

$B_m$ ——磁通密度的最大值, T (特斯拉),

以前常用Gs (高斯),  $1T = 10^4 \text{Gs}$ ;

$S$ ——铁心截面积,  $\text{cm}^2$ ;

$10^{-4}$ ——是由公式 (1-4) 得来的, 在  $e = -N \frac{d\phi}{dt}$  中,

以韦伯(Wb)表示,  $e$  的单位为伏特(V)。

韦伯 = 特斯拉  $\times$  米<sup>2</sup>, 在变压器设计中, 铁心截面通常用厘米<sup>2</sup>表示, 故要乘一系数  $10^{-4}$ 。

式 (1-5) 反映了电磁感应的基本规律, 是电磁感应定律  $e = -N \frac{d\phi}{dt}$  在正弦磁通条件下的具体化。它是交流电感和变压器的基本公式。

## 二、交流磁路计算

在变压器设计中常常遇到交流磁路计算问题, 下面通过几个例题介绍交流磁路的计算方法。

### (一) 无分支的均匀磁路

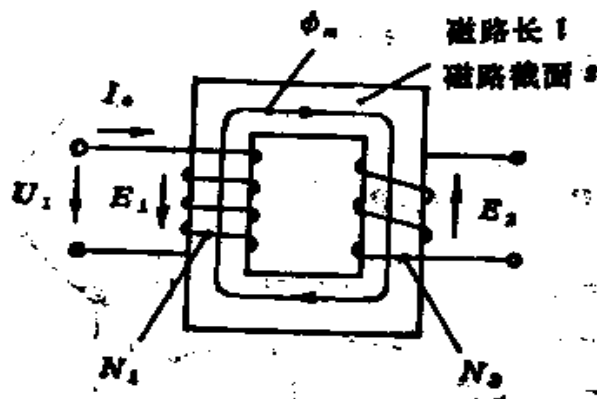


图1-2 无分支均匀磁路

图1-2为一无分支的均匀磁路。磁路中各处的磁通密度  $B$  相同, 磁路长度为  $l$ , 截面为  $S$ 。磁路上有两个绕组, 其



匝数分别为  $N_1$  及  $N_2$ 。

例题一 设已知铁心材料为 D41-0.5 硅钢片，铁心截面  $S = 5.6 \times 8.6 = 48 \text{ cm}^2$ ，磁路长度  $l = 2 \times (15.6 + 4.44) = 120 \text{ cm}$ ，绕组  $N_1 = 348$  匝，绕组  $N_2$  开路（先不考虑  $N_2$ ）。当在绕组  $N_1$  上施以  $U_1 = 380 \text{ V}$  的交流电压时，求：

- (1) 铁心中的磁通密度  $B_m$ ；
- (2) 绕组  $N_1$  中的电流，即激磁电流  $I_0$ ；
- (3) 绕组  $N_1$  的电感  $L$ 。

解法一：先求  $I_0$ ，后算  $L$ 。

步骤是  $U_1 \rightarrow B_m \rightarrow H_m \rightarrow I_0 \rightarrow L$

假设绕组电阻为零，同时绕组电流所产生的磁通  $\phi_m$  全部穿过铁心，并忽略磁滞及涡流，此时绕组中的电流只起激磁作用，称为激磁电流  $I_0$ ，它与磁通  $\phi_m$  同相。

由  $U_1 = 4.44 f N_1 B_m S \times 10^{-4} \text{ (V)}$  可得

$$B_m = \frac{U_1 \times 10^4}{4.44 f N_1 S} = \frac{380 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 348 \times 48} = 1.03 \text{ (T)}$$

查硅钢片的磁化曲线可知

当  $B_m = 1.03 \text{ T}$  时， $H_m \approx 4 \text{ (At/cm)}$

则  $H = H_m / \sqrt{2} = 4 / \sqrt{2} = 2.83 \text{ (At/cm)}$

按式 (1-2)， $I_0 = Hl / N_1 = 2.83 \times 120 / 348 = 0.98 \text{ (A)}$

绕组  $N_1$  的电感  $L$  则为

$$L = U_1 / \omega I_0 = 380 / 314 \times 0.98 = 1.23 \text{ (H)}$$

所以，当在  $N_1$  上加以  $380 \text{ V}$  电压时，铁心中的磁通密度最大值  $B_m = 1.03 \text{ T}$ ，绕组  $N_1$  的激磁电流  $I_0 = 0.98 \text{ A}$ ，此时绕组  $N_1$  的电感  $L = 1.23 \text{ H}$ 。

解法二：先求  $L$ ，后算  $I_0$ 。

步骤是  $U_1 \rightarrow B_m \rightarrow H_m \rightarrow \mu \rightarrow$

由式  $U_1 = 4.44fN_1B_mS \times 10^{-4}$  V 可得

$$B_m = \frac{U_1 \times 10^4}{4.44fN_1S} = \frac{380 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 348 \times 48} = 1.03 \text{ (T)}$$

查磁化曲线知, 当  $B_m = 1.03$  T 时,  $H_m = 4$  At/cm

则  $\mu = B_m/H_m = \frac{1.03 \times 10^{-4}}{4} = 2.6 \times 10^{-5} \text{ (H/cm)}$

绕组  $N_1$  的电感  $L$  为

$$L = \frac{\mu N_1^2 S}{l} = \frac{2.6 \times 348^2 \times 48 \times 10^{-6}}{120} = 1.23 \text{ (H)}$$

则  $I_0 = U_1/\omega L = 380/314 \times 1.23 = 0.98 \text{ (A)}$

由例题一可见:

(1) 对于有铁心的线圈  $N_1$ , 如果线圈本身电阻很小, 可以忽略, 当在  $N_1$  两端加上正弦交流电压  $U_1$  后, 在数值上可以认为  $E_1 \approx U_1$ , 有关系式  $U_1 = 4.44fN_1\phi_m \times 10^{-4}$  V。可见铁心线圈的磁通  $\phi_m$  只决定于电压  $U_1$  的大小, 而与铁心的材料、尺寸无关。

(2) 铁心线圈  $N_1$  两端加上正弦交流电压  $U_1$  后, 线圈中的电流  $I_0 = U_1/\omega L$ 。可见线圈中的电流  $I_0$  决定于铁心线圈的电感量  $L$ 。

(3) 铁心线圈  $N_1$  的电感量  $L = \mu N_1^2 S/l$ 。所以铁心线圈的电感量不仅取决于线圈的几何尺寸, 而且取决于磁导率  $\mu$ 。由于铁磁材料有磁饱和性, 对于不同的磁通密度  $B_m$ , 有不同的磁导率  $\mu$ , 所以铁心线圈  $N_1$  的电感量  $L$  不是一个常数。

(4) 铁心线圈  $N_1$  加上交流电压  $U_1$  后的工作过程为: 交流电压  $U_1$  产生电流  $I_0$ , 这个电流的大小必须满足下述条件, 即

(• 8 •)

电流 $I_1$ 。根据全电流定律或磁路欧姆定律产生交变磁通 $\phi_m$ ，交变磁通 $\phi_m$ 根据电磁感应定律产生感应电势 $E_2$ ，这个感应电势必须与外加电压 $U_1$ 相平衡，从而决定了电流 $I_1$ 及磁通 $\phi_m$ 的大小。

**例题二** 图1-2的无分支均匀磁路，已知条件同例题一。当在绕组 $N_1$ 上加以 $U_1 = 380\text{ V}$ 的交流电压时，铁心中将产生正弦交变磁通，由例题一知，其磁通密度最大值 $B_m = 1.03\text{ T}$ ，若在铁心上绕以另一绕组 $N_2$ ，其匝数 $N_2 = 60$ 匝，求绕组 $N_2$ 两端的感应电势 $E_2$ 。

**解：**铁心中的正弦交变磁通穿过绕组 $N_2$ ，由于磁通的不断变化，根据电磁感应定律，在绕组 $N_2$ 中将产生感应电势。由式(1-5)可知，感应电势的有效值 $E_2$ 为

$$\begin{aligned} E_2 &= 4.44 f N_2 B_m S \times 10^{-4} \text{ V} \\ &= 4.44 \times 50 \times 60 \times 1.03 \times 48 \times 10^{-4} \\ &= 65 \text{ V} \end{aligned}$$

由例题二及例题一可见：

(1) 感应电势 $E_2$ 是由磁通 $\phi_m$ 在绕组 $N_2$ 中不断变化所产生的，而磁通 $\phi_m$ 是由绕组 $N_1$ 中的电流 $I_1$ 产生的。可见，在绕组 $N_1$ 中流过的电流，通过电磁感应作用，把电能传递到 $N_2$ 中，而在 $N_2$ 中产生了感应电势 $E_2$ 。

(2) 感应电势 $E_2$ 的大小与绕组 $N_2$ 的匝数成正比。

(3) 在解题时曾假设：绕组 $N_1$ 及 $N_2$ 的电阻都等于零；绕组 $N_1$ 及 $N_2$ 之间没有漏磁通，即穿过绕组 $N_1$ 的磁通，全部穿过绕组 $N_2$ ；铁心中没有磁滞及涡流能量损耗。所以上述例题实际上说明了理想变压器的工作原理。

## (二) 无分支的不均匀磁路

图1-3为一无分支的不均匀磁路。磁路中有一空气隙，

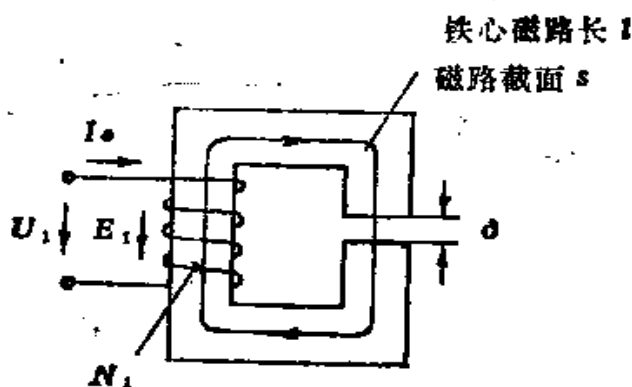


图1-3 无分支不均匀磁路

气隙长度为  $\delta$ ，铁心磁路长度为  $l$ 。设气隙磁场截面与铁心截面相等，均以  $S$  表示。磁路上有一个绕组，其匝数为  $N_1$ 。

例题三 设已知条件同例题一，即铁心材料为 D41-0.5， $S = 48\text{cm}^2$ ， $N_1 = 348$  匝，铁心磁路长度  $l = 120\text{cm}$ 。与例题一不同的是本题中有气隙，气隙长度  $\delta_0 = 0.2\text{cm}$ 。当在绕组  $N_1$  上加以  $U_1 = 380\text{V}$  的交流电压时，求：

- (1) 磁路中的磁通密度  $B_m$ ；
- (2) 绕组  $N_1$  中的电流  $I_0$ ；
- (3) 绕组  $N_1$  的电感  $L$ 。

解：解题步骤是  $U_1 \rightarrow B_m \begin{cases} H_{Fe} \\ H_{\delta} \end{cases} \rightarrow I_0 \rightarrow L$

同样，忽略绕组电阻、漏磁和铁损。与例题一同理，有

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1B_mS \times 10^{-4} \text{ (V)}$$

所以 
$$B_m = \frac{U_1 \times 10^4}{4.44fN_1S} = \frac{380 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 348 \times 48} = 1.03 \text{ T}$$

由例题一知，当铁心中的 $B_m = 1.03 \text{ T}$ 时， $H_{Fe} = 4 \text{ At/cm}$ ， $H_{Fe} = H_{mFe} / \sqrt{2} = 2.83 \text{ At/cm}$ 。

空气隙中的磁场强度 $H_0 = 8000 B_0 \text{ At/cm}$ ，所以 $H_{m0} = 8000 B_m = 8000 \times 1.03 = 8240 \text{ At/cm}$ 。则 $H_0 = H_{m0} / \sqrt{2} = 8240 / \sqrt{2} = 5830 \text{ At/cm}$ 。

由磁路欧姆定律可知，磁路中增加气隙后有

$$I_0 N_1 = H_{Fe} l + H_0 \delta_0$$

所以

$$I_0 = \frac{H_{Fe} l + H_0 \delta_0}{N_1}$$

$$= \frac{2.83 \times 120 + 5830 \times 0.2}{348}$$

$$= 0.98 + 3.35 = 4.33 \text{ (A)}$$

电感为 $L = U_1 / \omega I_0 = 380 / 314 \times 4.33 = 0.28 \text{ (H)}$

由例题三可见，当磁路中增加气隙后：

(1) 由于外加电压、绕组匝数及铁心截面未变，所以铁心中的磁通密度 $B_m$ 基本保持不变。

(2) 当磁路增加气隙后，激磁电流增加许多（由0.98 A增至4.33 A）。实际上可以将总磁势( $I_0 N_1$ )或总电流( $I_0$ )看成由两部分组成：一部分消耗在铁心磁路中(0.98 A)，一部分消耗在气隙中(3.35 A)。由于气隙磁阻很大，所以为在气隙中产生磁通 $\phi_m = B_m S$ ，需要有很大的磁势，很大的激磁电流。此外也应该看到，气隙的大小对激磁电流影响很大。

(3) 当磁路增加气隙后，绕组的电感 $L$ 大大减小（由1.23 H减至0.28 H）。可见气隙大小对绕组的电感影响很大，所以在调电感中，往往用气隙大小来调节电感的大小。这一

原理在电焊机中得到广泛的应用。

### 三、变压器的空载运行

变压器的初级绕组与电源相联，次级绕组开路的情况称为变压器的空载运行，如图 1-4 所示。次级绕组端点  $a-x$  是断开的，次级电流  $I_2 = 0$ 。

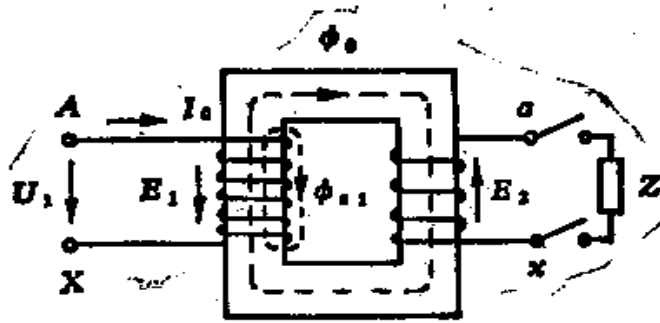


图1-4 变压器空载情况示意图

从图1-4中可以看出，初级绕组与次级绕组之间只有闭合的铁心，并没有直接的电联系。初级绕组接通电源 $U_1$ 后，就有交变的电流流过，用 $I_0$ 表示， $I_0$ 通常称为空载电流。 $I_0$ 流过初级绕组，产生磁动势 $F_0 = I_0 N_1$ ， $N_1$ 是初级绕组的匝数。磁动势 $F_0$ 在初级绕组中产生交变的磁通。由于在变压器里 $I_0$ 主要起激磁作用，因此 $I_0$ 也称作激磁电流。磁通绝大部分在铁心中闭合，它匝链着初、次级两个绕组，这部分磁通是变压器的工作磁通，或称主磁通，用 $\phi_0$ 表示。磁通的另一极小部分经空气或非铁磁性物质闭合，它只匝链着初级绕组本身，称为初级绕组的漏磁通，用 $\phi_{01}$ 表示。

交变的工作磁通 $\phi_0$ 通过初、次级绕组时，在初级绕组和次级绕组中分别产生感应电动势 $e_1$ 及 $e_2$ ，漏磁通 $\phi_{01}$ 只在初级

绕组中产生漏磁电动势  $e_{s1}$ 。

初级绕组中的感应电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi_0}{dt} \quad (1-6)$$

次级绕组中的感应电动势为

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi_0}{dt} \quad (1-7)$$

当电源电压  $u_1$  是正弦波形时, 铁心的磁通也是正弦波形, 即  $\phi_0 = \phi_m \sin \omega t$ , 其中  $\phi_m$  是工作磁通的最大值, 或称磁通的振幅。  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  是磁通交变的频率, 和电源的频率相同。将  $\phi_0 = \phi_m \sin \omega t$  代入式 (1-6)、(1-7), 则在变压器的两个绕组中各感应出电动势

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi_0}{dt} = -N_1 \frac{d}{dt} \phi_m \sin \omega t = -N_1 \phi_m \omega \cos \omega t \\ &= N_1 \phi_m \omega \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = E_{m1} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

和

(1-8)

$$\begin{aligned} e_2 &= -N_2 \frac{d\phi_0}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \phi_m \sin \omega t = -N_2 \phi_m \omega \cos \omega t \\ &= N_2 \phi_m \omega \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = E_{m2} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

(1-9)

从式(1-8)、(1-9)可以看出, 两个感应电势  $e_1$ 、 $e_2$  是同相位的, 都滞后于磁通  $\phi_0$   $\frac{\pi}{2}$ , 即  $\frac{1}{4}$  周期。

式中原边电动势的最大值  $E_{m1} = \omega \phi_m N_1 = 2\pi f \phi_m N_1$ ，则原边电动势  $e_1$  的有效值

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_m = 4.44 f N_1 \phi_m \quad (1-10)$$

同理可得副边电动势  $e_2$  的有效值

$$E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \phi_m = 4.44 f N_2 \phi_m \quad (1-11)$$

式 (1-10)、(1-11) 表明感应电动势的有效值  $E_1$ 、 $E_2$  和磁通最大值  $\phi_m$  之间的关系。

比较一下式 (1-10)、(1-11) 可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \phi_m}{4.44 f N_2 \phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-12)$$

由此可知，变压器初、次级绕组感应电动势之比，等于其匝数之比，此比值  $k$  称为变压器的变压比，简称变比。

电动势  $e_{s1}$  是由初级绕组的漏磁通  $\phi_{s1}$  产生的，它们之间的相位关系是  $e_{s1}$  滞后于  $\phi_{s1} \frac{\pi}{2}$ 。因为漏磁通  $\phi_{s1}$  经过空气及非铁磁物质闭合， $\phi_{s1}$  实际上不受磁滞及涡流的影响，所以  $\phi_{s1}$  与激磁电流  $I_0$  是同相位的，并且在数值上  $\phi_{s1}$  正比于  $I_0$ ，也就是说，漏感系数  $L_{s1}$  是常数。所以漏磁电动势  $e_{s1} = -L_{s1} \frac{di_0}{dt}$ ，其有效值可用复数来表示  $\dot{E}_{s1} = -j \dot{I}_0 x_1$ ，而  $x_1 = 2\pi f L_{s1}$ ，称为变压器原边漏磁感抗，简称漏抗。

根据基尔霍夫定律，外加在初级绕组的电压  $U$ ，必须平衡电动势  $E_1$ 、 $E_{s1}$ ，以及初级绕组电阻压降  $I_1 r_1$ 。因此可以列出



变压器空载时初级绕组的电动势平衡方程式

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{S1}) + \dot{I}_0 r_1 \\ &= (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1 \\ &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 z_1 \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中  $z_1$ ——初级绕组的复阻抗，它的模  $|z_1| = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ 。

由于初级绕组的电阻  $r_1$  和感抗  $x_1$  较小，而空载电流  $I_0$  的值亦很小，它小于初级绕组满载电流的 10% (即  $I_0 < 10\% I_{1N}$ )，故电压降  $\dot{I}_0 z_1$  很小，与主磁通电动势  $\dot{E}_1$  比较，可以忽略不计，因此在空载情况下，可以认为

$$U_1 \approx E_1$$

及 
$$U_1 \approx 4.44 f N_1 \phi_m \quad (1-14)$$

空载时，次级绕组开路，没有电流流过，所以次级绕组的空载电压  $U_2$  就等于铁心磁通在次级绕组中所感应的电动势  $E_2$ ，即

$$U_2 = E_2 \quad (1-15)$$

则 
$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (1-16)$$

#### 四、变压器的负载运行

当变压器的初级接通电源，次级接通负载时，在负载和次级绕组中就有电流  $I_2$  流过，此时变压器为负载运行，如图 1-5。

为了便于分析它的主要电磁过程，先忽略一些较为次要的因素，如绕组内的电阻和漏磁通，即忽略变压器内部的阻抗压降，变压器成了没有内阻抗的理想变压器。则

$$U_1 = E_1 = 4.44 f N_1 \phi_m \quad (1-17)$$

外加在初级绕组上的电压  $U_1$  及其频率  $f$  是不变的，理想

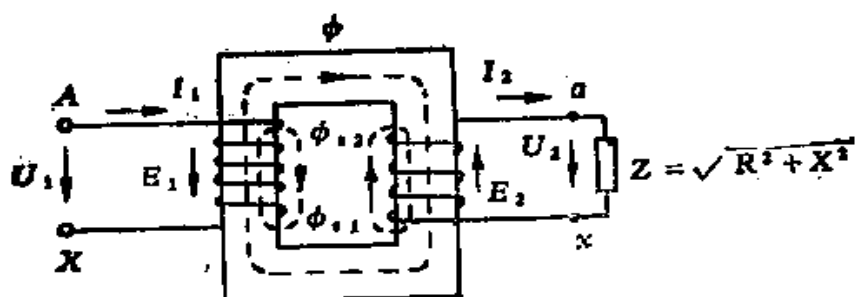


图1-5 变压器负载情况示意图

变压器 $E_1$ 的大小亦保持恒值而与次级负载无关，因此工作主磁通 $\phi_m$ 以及产生 $\phi_m$ 的激磁电流 $I_0$ 和磁动势 $F_0 = I_0 N_1$ 都不会随负载变动，而保持恒值。

次级接通负载后，在 $E_2$ 的作用下，有电流 $I_2$ 流过负载和次级绕组。在次级绕组中产生磁动势 $I_2 N_2$ ， $N_2$ 是次级绕组的匝数。根据电磁感应定律，磁动势 $I_2 N_2$ 将力图削弱工作主磁通 $\phi_m$ 。若主磁通 $\phi_m$ 被削弱，则 $E_1$ 下降，这样就破坏了原绕组的电势平衡关系，即 $U_1 \neq E_1$ 。前面讲过，理想变压器 $E_1$ 的大小与负载无关，要保持恒值。于是流过初级绕组的电流就要增加，增加值用 $I_1'$ 表示。它产生的磁动势 $I_1' N_1$ 正好抵消 $I_2 N_2$ ，即

$$\dot{I}_1' N_1 = -I_2 N_2 \quad (1-18)$$

两个磁动势大小相等，方向相反，确保主磁通 $\phi_m$ 不变，磁势和电势达到了新的平衡。

由此可见，当变压器负载运行时，随着次级电流 $I_2$ 的出现，通过变压器内的电磁作用，流过初级绕组的电流要增加即从电网中取得的电能增加，把电能从电网输送到负载。这就是变压器把电能从初级传递到次级的物理过程。

那么，初级电流 $I_1$ 和次级电流 $I_2$ 的关系究竟如何呢？

理想变压器的 $\phi_m$ 和 $I_0$ 及 $F_0 = I_0 N_1$ 是恒定不变的。铁心回路的磁动势是由初级的磁动势 $\dot{i}_1 N_1$ 和次级磁动势 $\dot{i}_2 N_2$ 共同产生,其合成后的磁动势和空载时的磁动势 $\dot{i}_0 N_1$ 相等,可用磁动势平衡方程式来表示

$$\dot{i}_1 N_1 + \dot{i}_2 N_2 = \dot{i}_0 N_1 \quad (1-19)$$

将上式各项除以 $N_1$ ,则磁动势之间的关系就转换为电流之间的关系

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_0 + \left( -\dot{i}_2 \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (1-20)$$

式中矢量 $\left( -\dot{i}_2 \frac{N_2}{N_1} \right)$ ,根据式(1-18),有 $-\dot{i}_2 \frac{N_2}{N_1} = \dot{i}'_1$ ,

是初级电流中用以补偿次级电流的去磁作用的分量,称作初级电流的负载分量,而分量 $\dot{i}_0$ 称为初级电流的激磁分量。因此初级电流为

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_0 + \dot{i}'_1 \quad (1-21)$$

也即初级电流等于激磁电流分量与负载电流分量的矢量和。

一般空载电流 $\dot{i}_0$ 只占额定初级电流 $I_{1N}$ 的10%,故可用以下公式粗略表示初级电流 $I_1$ 和次级电流 $I_2$ 之间的关系

$$I_1 \approx 1.1 I'_1 = 1.1 \frac{N_2}{N_1} I_2 = 1.1 \frac{I_2}{k} \quad (1-22)$$

若空载电流 $I_0$ 所占比例更小,则可以略去激磁电流分量 $I_0$ 认为

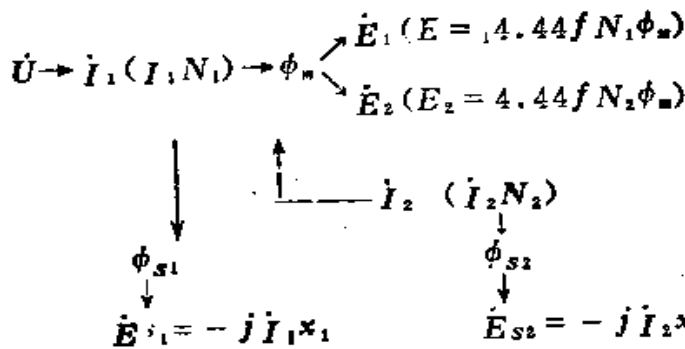
$$I_1 \approx I'_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{k} \quad (1-23)$$

或 
$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (1-24)$$

也就是说，初级电流 $I_1$ 和次级电流 $I_2$ 之比，近似等于变压比的倒数。

事实上，变压器不可能是没有内阻抗的理想变压器，因此当变压器负载运行时，初级电流 $I_1$ 及次级电流 $I_2$ 所产生的磁动势 $F_1$ 、 $F_2$ 除了在铁心内相互作用，产生同时匝链着两个绕组的工作主磁通 $\phi_m$ 外，磁动势 $F_1$ 还产生只匝链着初级绕组的漏磁通 $\phi_{s1}$ ，磁动势 $F_2$ 亦产生只匝链着次级绕组的漏磁通 $\phi_{s2}$ ，如图1-5所示。 $\phi_{s1}$ 和 $\phi_{s2}$ 分别在初、次级绕组感应出漏磁电势 $E_{s1}$ 和 $E_{s2}$ ，引起了漏抗压降 $j\dot{I}_1x_1$ 和 $j\dot{I}_2x_2$ 。除此之外，一个实际的变压器由于初、次级绕组都有电阻，当它有载运行时，还要产生电阻压降 $\dot{I}_1r_1$ 和 $\dot{I}_2r_2$ 。

上述电磁关系可表示如下：



基于以上分析，可以写出变压器负载时的初级绕组电势平衡方程式，即

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-25)$$

和次级绕组的电势平衡方程式

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 r_2 + (-\dot{E}_{s2}) + \dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j\dot{I}_2 x_2 + \dot{U}_2 \quad (1-26)$$

$$\text{或} \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-27)$$

式中 $\dot{I}_1 Z_1$ 和 $\dot{I}_2 Z_2$ 分别为初级绕组和次级绕组的内部阻抗电压降相量。 $\dot{U}_2$ 是次级绕组的端电压相量。

设以  $R$ 、 $X$  表示负载的电阻和感抗，则次级电流  $I_2$  为

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (1-28)$$

或

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2 + R)^2 + (x_2 + X)^2}} \quad (1-29)$$

电流  $I_2$  与电势  $E_2$  的相位差角用  $\psi_2$  表示，它的正切为

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2 + X}{r_2 + R} \quad (1-30)$$

## § 1-2 变压器的构造

### 一、变压器的分类

变压器按绕组与铁心安置的情形，可分为心式（又名内铁式）和壳式（又名外铁式）两种。

#### 1. 内铁式（心式）变压器

内铁式变压器是绕组包围着铁心柱，图1-6（a）是单

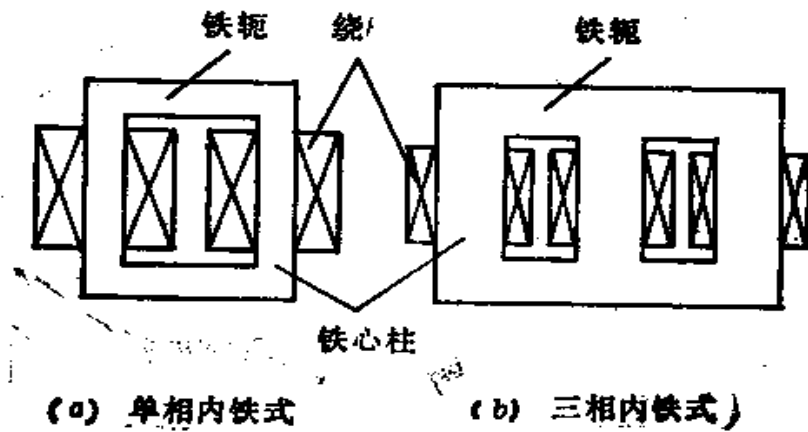


图1-6 内铁式变压器结构

相内铁式，(b) 是三相内铁式变压器结构。

内铁式的特点是：结构简单，绕组安装及绝缘处理比较容易。较大容量的变压器一般都选择这种结构型式。大部分弧焊变压器也都属于内铁式。三相变压器都是内铁式。

## 2. 外铁式（壳式）变压器

外铁式变压器是铁心柱部分地包围着绕组。图1-7 是外铁式变压器结构。

外铁式的特点是：铁心重量较轻，省硅钢片。由于铁心在绕组外面，所以铁心对绕组有机械保护作用。外铁式主要用于小容量变压器及特殊用途的变压器。电阻焊变压器主要为外铁式。

变压器都由铁心和绕组两部分构成。下面分别介绍铁心和绕组的构造。

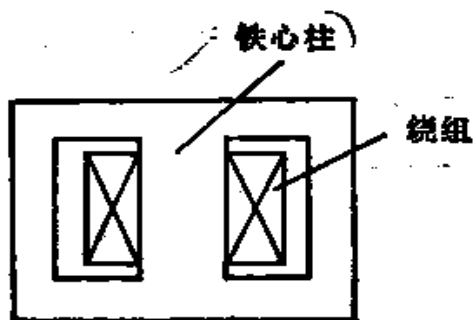


图1-7 外铁式变压器结构

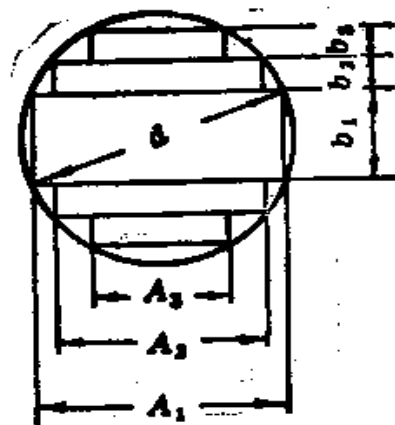


图1-8 阶梯形截面

## 二、变压器的铁心

变压器铁心由套有绕组的铁心柱和铁轭构成。

### 1. 铁心柱结构

铁心柱截面有矩形和阶梯形两种。图1-8是阶梯形截面示意图。

矩形截面的铁心柱制造简单，常用于容量较小的变压器。

阶梯形截面的铁心柱多用于容量较大的变压器。容量越大，分的级数越多。级数越多，圆面积填充系数（圆面积填充系数 = 阶梯形面积/外接圆面积）越大。圆面积填充系数越大，绕组平均匝长越小，材料利用率就越高。但是级数太多时，铁心制造装配工艺太繁杂，所以实际上采用的级数不大于10。阶梯形截面各级尺寸比例见表1-1。

表1-1 阶梯形铁心各级尺寸比例

| 级数 | 每级宽  |  | 圆面积填充系数 | 适用每柱容量 (KVA) |
|----|--|--|---------|--------------|
| 1  | $A_1 = 0.7d$                                       |  | 0.637   |              |
| 2  | $A_1 = 0.850d$                                     | $A_2 = 0.525d$                                     | 0.787   |              |
| 3  | $A_1 = 0.905d$<br>$A_3 = 0.424d$                   | $A_2 = 0.707d$                                     | 0.851   | 5以下          |
| 4  | $A_1 = 0.935d$<br>$A_3 = 0.600d$                   | $A_2 = 0.800d$<br>$A_4 = 0.355d$                   | 0.886   | 5~15         |
| 6  | $A_1 = 0.950d$<br>$A_3 = 0.707d$<br>$A_5 = 0.312d$ | $A_2 = 0.847d$<br>$A_4 = 0.532d$                   | 0.910   | 15~45        |
| 6  | $A_1 = 0.955d$<br>$A_3 = 0.770d$<br>$A_5 = 0.495d$ | $A_2 = 0.870d$<br>$A_4 = 0.640d$<br>$A_6 = 0.300d$ | 0.930   | 45以上         |

注：各级厚度根据外接圆直径和该级宽度求出

一般交流弧焊机和整流弧焊机变压器选用矩形截面铁心柱。变压器容量较大时,也可选用3~5级阶梯形截面铁心柱。

## 2. 铁轭结构

铁轭截面也有多种形状,最常用的是矩形截面。矩形截面铁轭的制造工艺简单,而且也便于支撑绕组。

当铁心柱为矩形截面时,铁轭也选矩形截面,两者截面积相等。

当铁心柱为阶梯形截面,铁轭选用截面积与铁心柱相等的矩形截面时,铁轭和铁心柱每段的截面积将不相等(见图1-9),铁轭边段的截面积比铁心柱边段的截面积大,而中段的截面积则较铁心柱为小。这样就使铁心柱和铁轭磁通密度分布不均匀,引起变压器空载电流和铁损的增加。所以在生产中常把铁轭截面积放大5~15%。

一般交流弧焊机和整流弧焊机变压器常用矩形截面的铁轭。

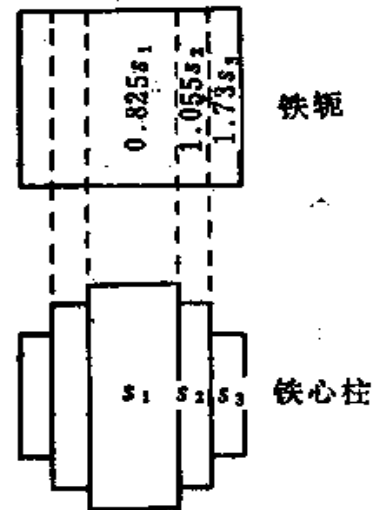


图1-9 矩形铁轭和阶梯形铁心柱截面的比较

## 3. 铁心尺寸比例

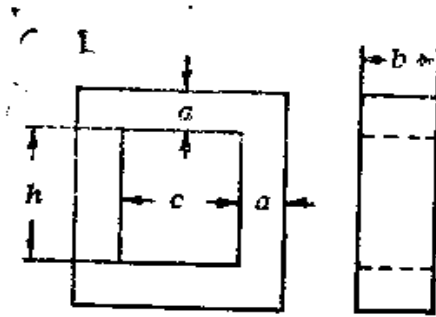
常见变压器铁心的尺寸比例推荐于图1-10至图1-13。

## 4. 铁心装配

一般变压器铁心采用叠片式。叠片式铁心有两种装配方法:(1)对接法;(2)重叠法。

对接法是把铁心柱和铁轭分别装好,然后对成铁心。在



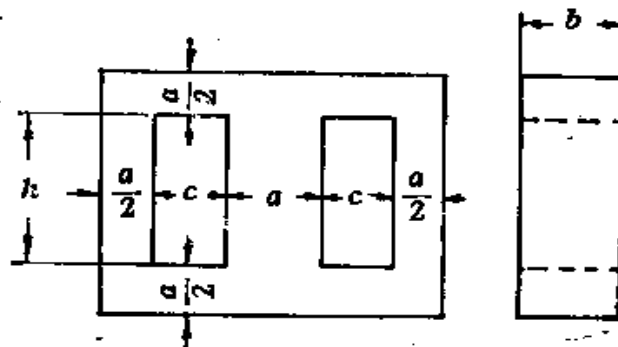


$$b = (1.5 \sim 2)a$$

$$c = 1.5a$$

$$h = (2.5 \sim 3.5)a$$

图1-10 单相内铁式，矩形截面 $a \times b$

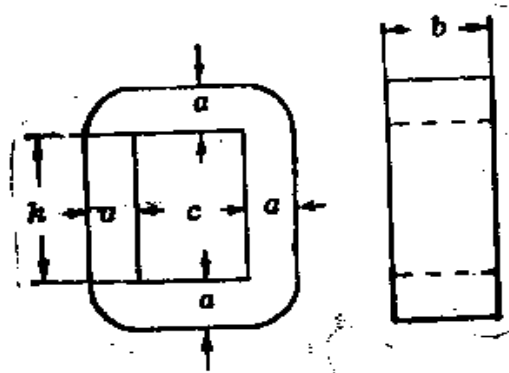


$$b = (1.5 \sim 2)a$$

$$c = (1 \sim 1.5)a$$

$$h = (2 \sim 3)a$$

图1-11 单相外铁式，矩形截面 $a \times b$

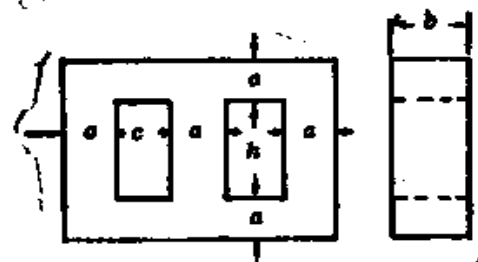


$$b = (2 \sim 3)a$$

$$c = (1 \sim 1.5)a$$

$$h = (2.5 \sim 3)a$$

图1-12 C形铁心，矩形截面 $a \times b$



小型

中、大型

$$b = (1.5 \sim 2)a$$

$$b = 2a$$

$$c = (0.5 \sim 1)a$$

$$c = (1 \sim 1.5)a$$

$$h = (1.5 \sim 2)a$$

$$h = (2.5 \sim 3.5)a$$

图1-13 三相内铁式，矩形截面 $a \times b$

铁心柱和铁轭之间涂一层耐热绝缘层，以减小涡流。对接法的优点是装配简单，检修拆卸方便，缺点是接缝处损耗比较大，空载电流稍大。

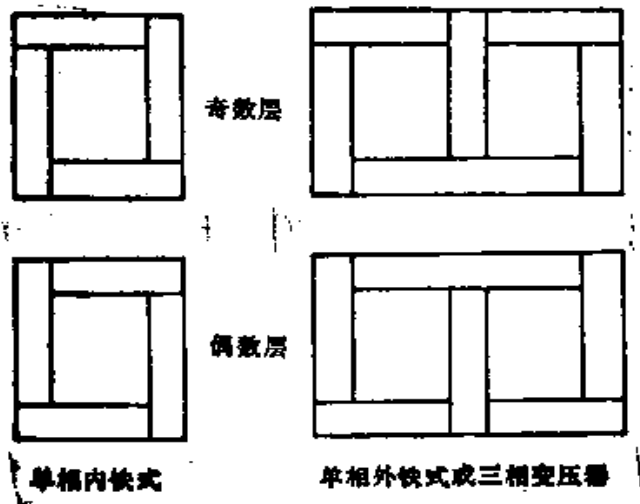


图1-14 常用的重叠装配叠片图

重叠装配法是将铁心硅钢片接缝按奇数层与偶数层交替错开，图1-14是一种常用的重叠装配形式。

重叠装配法的优点是接缝空隙小，因此接缝处的损耗和变压器空载电流比较小，装配铁心用的设备和工具也比较简单，缺点是费工。目前重叠装配法应用很广泛。

### 三、变压器的绕组

变压器的绕组按结构特点可分为筒形和盘形两种。

#### 1. 筒形绕组

筒形绕组外形如筒，它的线匝是像螺旋线那样沿轴向串联起来的。图1-15是变压器的筒形绕组示意图。筒形绕组的轴向尺寸比径向尺寸大。

按所绕层数的不同，筒形绕组分为单层、双层和多层数种

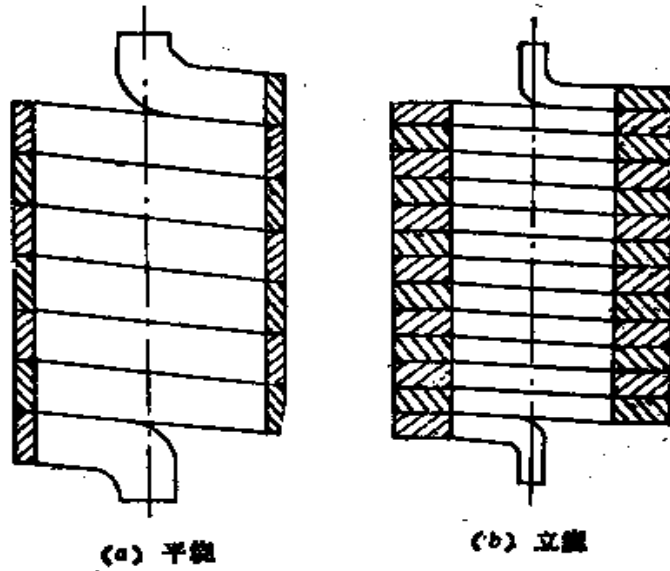


图1-15 变压器筒形绕组

按绕组的绕制方法，筒形绕组可以分成平绕（图1-15（a））和立绕（图1-15（b））两种。

平绕法是在绕制过程中使导线的宽边平行于轴线。平绕法比较好绕，所以在生产中应用较广。

立绕法是在绕制过程中使导线的窄边平行于轴线。这种绕法比较难绕，需要功率较大的绕线机。立绕法的优点是因杂散磁力线引起的附加铜损较小。如果采用裸铜扁线立绕，还可以进一步改善散热条件，减小温升。

筒形绕组在变压器中应用较广。

## 2. 盘形绕组

盘形绕组外形如盘，它的线匝是像钟表游丝那样卷绕串

接起来的。图1-16是变压器的盘形绕组。盘形绕组的轴向尺寸远较径向尺寸为小。

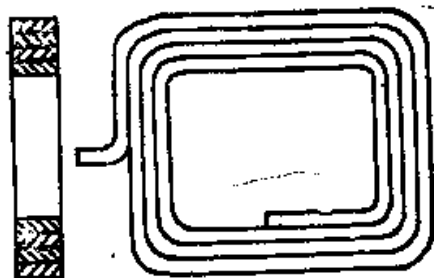


图1-16 变压器盘形绕组

盘形绕组的最大优点是较易绕制，也易于紧固，易于绝缘，易于维修。

盘形绕组过去主要用于电阻焊变压器，目前在交流弧焊机中也得到了广泛的应用。

#### 四、变压器的绝缘

##### 1. 变压器需要绝缘的主要部位

变压器需要绝缘的主要部位如下：

- (1) 初、次级绕组与铁心之间，可以用玻璃丝布板，红钢纸、牛皮纸及玻璃丝布等绝缘。
- (2) 初、次级绕组之间。可以用玻璃丝布、云母纸、胶木板等绝缘。
- (3) 绕组每层之间。可以用玻璃丝布等绝缘。
- (4) 硅钢片之间。可以用1611型（即T35-2型）硅钢片漆绝缘。
- (5) 铁心与夹紧铁心的角铁之间。可以用胶木板，云母绝缘垫等绝缘。

(6) 铁心与夹紧铁心的螺钉之间。可以用云母套管及红钢纸绝缘垫圈等绝缘。

(7) 绕组抽头，可以用玻璃丝布，云母纸等绝缘。

(8) 绕组浸漆。常用的绝缘清漆有（醇酸漆1030（即C30-11）、丁基酚醛醇酸漆1031、三聚氰胺醇酸漆1032（即A30-1）以及胺基酚醛醇酸漆（A30-2）等。

## 2. 变压器绝缘等级及所用绝缘材料

变压器用的绝缘材料按照耐热程度，分为七个等级。表1-2是电气绝缘材料的耐热分级。

表1-2 电气绝缘材料的耐热分级

| 等级 | 极限温度<br>℃ | 相应于该耐热等级的绝缘材料  |
|----|-----------|--|
| Y  | 90        | 未浸渍的棉纱、丝及纸等材料或其组合物组成的绝缘结构                                |
| A  | 105       | 浸渍过的或浸在液体电介质中的棉纱、丝及纸等材料或其组合物组成的绝缘结构                      |
| E  | 120       | 合成的有机薄膜、合成的有机磁漆等材料或其组合物组成的绝缘结构                           |
| B  | 130       | 以合适的树脂粘合或浸渍、涂复后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及其他无机材料，合适的有机材料或其组合物组成的绝缘结构 |
| F  | 155       | 以合适的树脂粘合或浸渍、涂复后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及其他无机材料，合适的有机材料或其组合物组成的绝缘结构 |

(续表)

| 等级 | 极限温度<br>°C | 相应于该耐热等级的绝缘材料  |
|----|------------|--|
| H  | 180        | 以合适的树脂(如硅有机树脂)粘合或浸渍、涂复后的云母、玻璃纤维、石棉等材料或其组合物组成的绝缘结构  |
| C  | >180       | 以合适的树脂(如热稳定性特别优良的硅有机树脂)粘合或浸渍、涂复后的云母、玻璃纤维等,以及未经浸渍处理的云母、陶瓷、石英等材料或其组合物组成的绝缘结构(C级绝缘材料的极限温度根据不同的物理、机械、化学和电气性能确定)。 |

各类绝缘材料的允许温升值应低于表中所列的极限温度,这是因为考虑了材料的原始温度(室温上限定为40°C左右)的缘故。

常用绝缘材料见 § 5-3。

### 五、变压器的冷却

变压器在工作时要发热,因为铁心有磁滞及涡流损耗,绕组的铜(或铝)导线有电阻损耗,这些能量损耗均以热能的形式表现出来。变压器的温升超过一定限度,铁心与绕组的绝缘就会破坏,变压器也就不能正常工作了。

变压器所允许的温升限度,由它采用的绝缘材料的耐热等级决定(见表1-2)。

变压器温升是在热平衡状态下的数值。我们知道,温升与时间的关系是一条指数曲线,随着变压器温度的升高,它与周围介质的温差加大,散热作用也逐渐强烈。经过一段时间以后,单位时间内的发热与散热相等,达到了平衡状态,变压器的温度就基本稳定下来。

要想降低变压器的温升，除了改进材料及装配工艺（减少发热）外，还应加强冷却（增加散热）。

变压器采用的冷却方式，有自然冷却、强迫风冷、水冷、油浸等几种。

容量较小的变压器通常采用自然冷却方式。设计时除了注意留出一定的通风间隙外，有时还设置为增强自然冷却的对流风道。容量稍大的变压器或者为了节省材料，也可安装风扇强迫风冷。风扇的安装又有吹风式与抽风式之分。弧焊变压器一般采用自然冷却或强迫风冷方式，整流弧焊机由于要兼顾硅管的冷却需要，多采用强迫风冷，次级电压很低而容量较大的变压器，可考虑采用水冷方式。冷却水管焊在或紧贴在低压绕组上，电阻焊变压器大都采用这种方式。油浸冷却方式是将整个变压器浸在不断循环的绝缘油中，容量较大、电压较高的电力变压器多采用这种冷却方式。

### § 1-3 变压器的外特性

当电源电压 $U_1$ 和负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 为常数时，变压器的输出电压 $U_2$ 和输出电流 $I_2$ 之间的变化关系，叫做变压器的外特性。记作 $U_2 = f(I_2)$ 。

前面曾说，忽略内阻和漏抗的影响， $E_1$ 是恒定不变的。若考虑内阻和漏抗，那么，随输出电流 $I_2$ 的增加， $E_1$ 也要变化，则对变压器的外特性有影响。

从公式 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1}\right)$ 可知，随着输出电流 $\dot{I}_2$ 的增加， $\dot{I}_1$ 亦要增加。根据公式 $\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$ ，当 $\dot{I}_1$ 增加时，初级的漏抗压降 $j\dot{I}_1 x_1$ 和内阻压降 $\dot{I}_1 r_1$ ，都随着增加。 $\dot{U}_1$ 是



不变的,要保持电势平衡,随输出电流  $I_2$  的增加,初级的感应电势  $E_1$  就要减小。根据公式  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$ , 随着  $E_1$  的减小,  $E_2$  也要减小。

再分析次级的情况。根据公式  $\dot{U}_2 = E_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2$ , 当  $I_2$  增加时, 变压器次级的漏抗压降  $j\dot{I}_2 x_2$  和次级的内阻压降  $\dot{I}_2 r_2$  都要增加, 加上  $E_2$  的减小, 则次级输出的电压  $U_2$  下降更多。

变压器的外特性曲线如图1-17所示。

对于电阻性和电感性负载而言, 电压  $U_2$  随电流  $I_2$  的增加而下降。它的下降程度随次级负载功率因数  $\cos\varphi_2$  的不同而有差异, 次级负载功率因数  $\cos\varphi_2$  越低, 变压器的外特性下降越严重 (图1-17)。

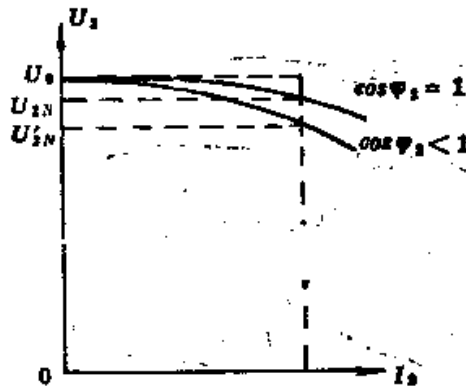


图1-17 变压器外特性曲线

通常情况下, 希望电压  $U_2$  的变动越小越好。变压器从空载到额定负载, 次级绕组电压的变动程度用电压变动率  $\Delta U\%$  表示, 即

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (1-31)$$

电压变动率  $\Delta U\%$  是变压器的一个重要性能指标。为了减小  $\Delta U\%$ , 在设计变压器时, 尽量使初级绕组和次级绕组耦合的好些, 减小漏抗。一般电力变压器的电压变动率是不大的, 约为5%左右, 外特性是很平的。

要求获得陡降外特性的焊接变压器，它的 $\Delta U\%$ 很大，约 $\Delta U\% = 50\%$ 左右，因此初级绕组和次级绕组耦合得很差，甚至要在它们之间附加铁心增加漏磁。

## § 1-4 变压器的等值电路

利用变压器的等值电路，把初、次级的内阻、漏感及负载阻抗都折合到同一电路上，便于分析和研究问题。当然，这个电路应该符合以下条件：第一，这个电路接到电源后，从电源中吸取的功率（包括有功功率和无功功率）应和实际的变压器从电源吸取的功率相同；第二，反映磁动势平衡关系的初、次级电流关系式 (1-20)  $\dot{i}_1 = \dot{i}_0 + \left(-\dot{i}_2 \frac{N_2}{N_1}\right)$  或式

(1-21)  $\dot{i}_1 = \dot{i}_0 + \dot{i}'_1$ ，应保持不变。

根据电势平衡式(1-25)  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$  和式(1-26)  $\dot{E}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j\dot{I}_2 x_2 + \dot{U}_2$ ，可画出变压器电路，如图1-18。

一般情况下，变压器初、次级绕组的匝数是不相等的，即 $N_1 \neq N_2$ ，因此 $E_1 \neq E_2$ ，并且它们在数值上可能相差悬殊。为了使图1-18中初、次级电路联系起来，应设法把变压器的初、

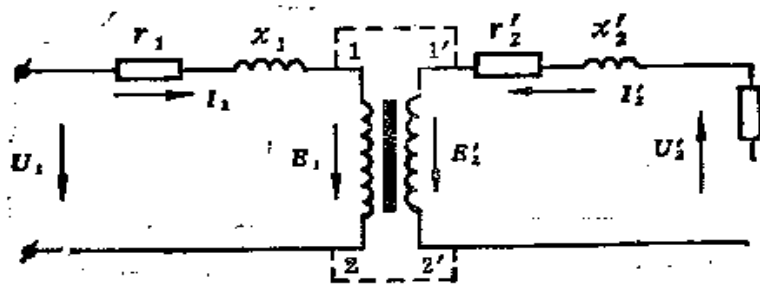


图1-18 变压器电路

次级绕组“折合”为同一匝数。在电力变压器中通常是把次级绕组折合到初级绕组,即匝数原为 $N_2$ 的次级绕组用匝数 $N_1$ 的等值次级绕组来代替。

在折合时,应该使初级绕组的工作情况不因折合而有任何改变,次级电路中的能量关系也保持不变,亦即在折合后,次级电路中的有功功率和无功功率不因折合而有任何变动。这是折合的原则,符合了这个原则,也就符合了变压器等值电路的第一个条件。下面讨论各个值如何折合。

### 1. 次级绕组电势的折合值 $E'_2$

折合后不改变变压器的主磁场和漏磁场,电势与绕组匝数成正比的关系也不变。所以次级绕组电势的折合值为

$$E'_2 = \frac{N_2}{N_1} E_2 = K E_2 = E_1 \quad (1-32)$$

### 2. 次级各电压降的折合值

次级绕组电势的折合关系可用于次级各电压降(次级输出电压、次级内阻压降、次级漏抗压降):

$$U'_2 = K U_2 = \frac{N_1}{N_2} U_2 \quad (1-33)$$

$$I'_2 r'_2 = K I_2 r_2 = \frac{N_1}{N_2} I_2 r_2 \quad (1-34)$$

$$I'_2 x'_2 = K I_2 x_2 = \frac{N_1}{N_2} I_2 x_2 \quad (1-35)$$

### 3. 次级电流的折合值 $I'_2$

由于次级绕组的视在功率在折合时应保持不变,即 $E'_2 I'_2 = E_2 I_2$ ,可以求得次级电流的折合值 $I'_2$ 为

$$I'_2 = \frac{E_2}{E'_2} I_2 = \frac{1}{K} I_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (1-36)$$

此式说明，次级绕组电流的折合值，等于次级电流 $I_2$ 除以变压比，也就是在数值上等于原边电流中的负载分量，但在相位上两者恰好相反。

#### 4. 次级内阻的折合值 $r'_2$

根据变压器内部损耗不变的条件，可得

$$I_2^2 r_2 = I_2'^2 r'_2 = \frac{1}{K^2} I_2^2 r_2 \quad (1-37)$$

则  $r'_2 = K^2 r_2 \quad (1-38)$

#### 5. 次级漏抗的折合值 $x'_2$

根据折合前后无功功率保持不变，因此

$$I_2^2 X = I_2'^2 X' = \frac{1}{K^2} I_2^2 X \quad (1-39)$$

则  $X'_2 = K^2 X \quad (1-40)$

#### 6. 次级负载折合值 $R'$ 、 $X'$ 、 $Z'$

根据折合前后消耗在负载中的有功功率保持不变的条件，可得

$$I_2^2 R = I_2'^2 R' = \frac{1}{K^2} I_2^2 R \quad (1-41)$$

则  $R' = K^2 R \quad (1-42)$

根据折合前后负载吸取的无功功率保持不变，因此

$$I_2^2 X = I_2'^2 X' = \frac{1}{K^2} I_2^2 X \quad (1-43)$$

则  $X' = K^2 X \quad (1-44)$

次级负载阻抗的折合 $Z'$ ，可归并式(1-42)和(1-44)得到

$$\begin{aligned} Z' &= \sqrt{R'^2 + X'^2} = \sqrt{(K^2 R)^2 + (K^2 X)^2} \\ K^2 &= \sqrt{R^2 + X^2} = K^2 Z \end{aligned} \quad (1-45)$$

这样就可以画出经过折合的变压器电路，如图 1-19 所示。

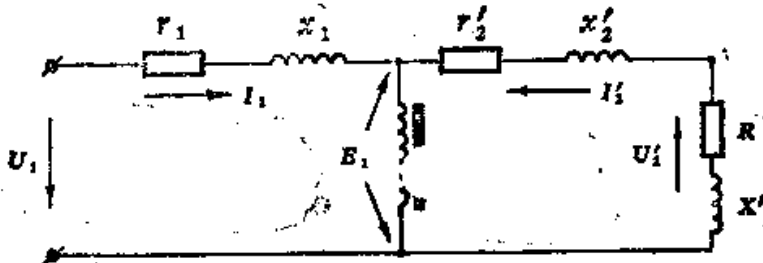


图1-19 折合后的变压器电路

折合之后， $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ ，则初级绕组和新的次级绕组之间有了等电位点，将图1-19中的等电位点1和1'、2和2'相连，这样对初、次级绕组不会产生任何影响。在这个基础上，可以将初、次级绕组合并，得到图1-20。

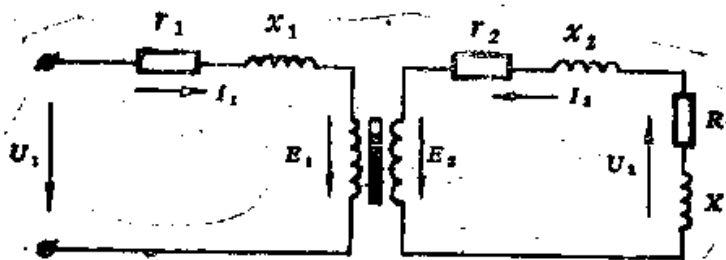


图1-20 初、次级绕组合并后的变压器电路

我们知道，变压器的空载电流 $I_0$ 是由两个分量组成的，一个是有功分量 $I_w$ ，它用于补偿交变磁通在铁心中产生的磁滞、涡流损耗；另一个分量是无功分量 $I_m$ ，它用于激磁。同时， $\dot{i}_0 = \dot{i}_w + \dot{i}_m$ ，其中 $\dot{i}'_m = -\dot{i}_m N_2 / N_1 = -\dot{i}'_2$ ，即 $\dot{i}_0 = \dot{i}_1 + \dot{i}'_2$ 。

图1-21反映了上述各电流之间的关系，这样，等值电路把变压器初、次级的复杂电磁联系变成了直接电路联系，分析和计算时就简便多了。

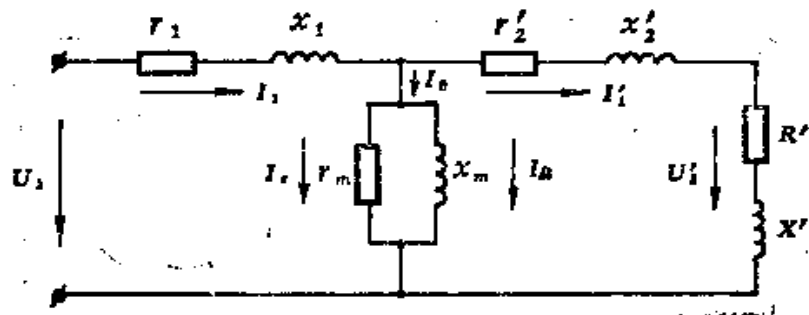


图1-21 变压器的等值电路

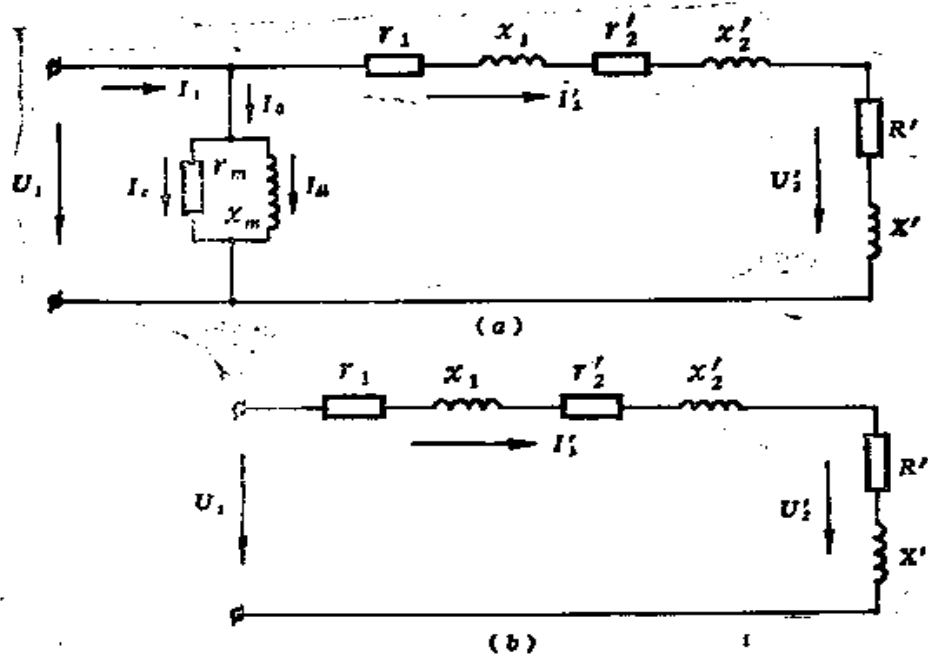


图1-22 变压器简化的等值电路

图1-21所示变压器的等值电路既有串联又有并联，是复联电路，实际计算起来仍不方便，另外初、次级的漏抗 $x_1$ 和 $x_2$ 实测时也很难分开，又考虑到空载电流 $I_0$ 很小，就可把图1-21等值电路简化成如图1-22(a)、(b)。

以上是把次级绕组折合到初级绕组，同样亦可将初级绕组折合到次级绕组，例如，在分析弧焊变压器的外特性时，常采用这种折合方法。图1-23是初级绕组折合到次级绕组简化后的等值电路。

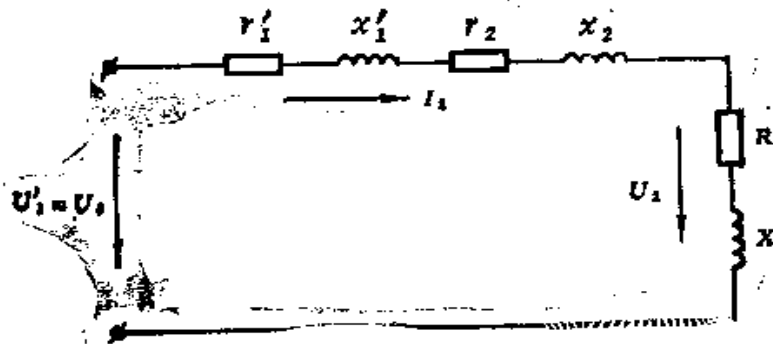


图1-23 初级绕组折合到次级绕组简化后的等值电路

图中  $U_2$ ——变压器空载时次级绕组的端电压，即次级空载

$$\text{电压, } U_2 = E_2 \approx \frac{N_2}{N_1} U_1 = \frac{1}{K} U_1 = U'_1 ;$$

$$r'_1 \text{——初级绕组内阻折合值 } r'_1 = \frac{1}{K^2} r_1 = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 r_1 ;$$

(1-46)

$$x'_1 \text{——初级绕组漏抗折合值 } x'_1 = \frac{1}{K^2} x_1 = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 x_1$$

(1-47)

从等值电路能很方便地看出各阻抗参数对各处电流、电压、功率因数的影响，它是分析变压器工作情况很有用的一个工具。下面简要介绍等值电路的几个用途。

1. 分析变压器外特性。根据图1-22(b)，可知

$$\dot{U}_1 = \dot{I}'_1 (r_1 + r'_2 + R') + I'_1 j (x_1 + x'_2 + X') \quad (1-48)$$

$$I'_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2 + R')^2 + (x_1 + x'_2 + X')^2}} \quad (1-49)$$

$(r_1 + r'_2) = r_{1K}$  和  $(x_1 + x'_2) = x_{1K}$  可用变压器短路试验测定，于是变压器的外特性曲线便可作出来。

同样，也可根据等值电路图1-23分析变压器的外特性，由图1-23可知

$$U_0 = \dot{I}_2 (r'_1 + r_2 + R) + \dot{I}_2 j (x'_1 + x_2 + X) \quad (1-50)$$

$$I_2 = U_0 \frac{1}{\sqrt{(r'_1 + r_2 + R)^2 + (x'_1 + x_2 + X)^2}} \quad (1-51)$$

$$r_{2K} = r'_1 + r_2 = \frac{1}{K^2} (r_1 + r'_2) = \frac{1}{K^2} r_1 K \quad \text{而 } x_{2K} = x'_1 + x_2 =$$

$$\frac{1}{K^2} (x_1 + x'_2) = \frac{1}{K^2} x_{1K} \text{。 同样，通过变压器的短路试验可算}$$

出  $r_{2K}$  和  $x_{2K}$ ，变压器的外特性曲线也可以画出来。

2. 可以方便地计算变压器效率  $\eta$  和初、次级功率因数  $\cos \varphi_1$ 、 $\cos \varphi_2$  随次级负载  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  改变的情况。从图



1-22可看出:

$$\cos\varphi_2 = \frac{R'}{Z'} = \frac{R'}{\sqrt{R'^2 + X'^2}} = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1 + r_2' + R'}{\sqrt{(r_1 + r_2' + R')^2 + (x_1 + x_2' + X')^2}}$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$$

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2}{U_1 I_1 \cos\varphi_1}$$

3. 等值电路不但适用于稳态运行, 而且对变压器的过渡过程也是适用的。

## § 1-5 变压器的功率、效率及功率因数

### 一、变压器的功率

变压器在运行时, 铁心中的损耗和绕组中的损耗, 都要在变压器内部转化为热量。其中一部分热量升高变压器的温度, 另一部分热量则散发到周围介质中去。当产生的热量等于散发的热量时, 变压器处于热平衡状态。为了使变压器能长期正常工作, 变压器各部分的温度都不应该达到使绝缘破坏的程度。我们知道, 额定电流的大小决定了导线截面和线圈的尺寸; 额定电压的大小决定了变压器铁心尺寸。因此额定电流和额定电压与变压器的发热有密切的关系。额定初级电压和额定初级电流的乘积, 是变压器的视在功率, 即  $S =$

$U_1 I_1 \times 10^{-3} \text{KVA}$ ，也就是变压器的容量。

变压器的输出功率  $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ 。它与负载的相位角  $\varphi_2$  有关，在变压器同样发热情况下，输出功率的大小还取决于负载的性质，因此不能用以决定变压器的尺寸。

变压器输入的有功功率  $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ 。其中  $\cos \varphi_1$  是变压器初级的功率因数， $\varphi_1$  是初级绕组电压和电流之间的相位角。

## 二、变压器的功率损耗

变压器的输入功率与输出功率之差，就是变压器内部的功率损耗。变压器的功率损耗主要包括两部分：（1）铁损  $P_{Fe}$ ，包含涡流损耗  $P_w$  和磁滞损耗  $P_z$  两部分；（2）铜损  $P_{Cu}$ 。

变压器的铁损  $P_{Fe} = P_w + P_z$ ，可用变压器空载试验测定；变压器的铜损  $P_{Cu}$  可用变压器的短路试验测定。

## 三、变压器的效率

变压器的输出有功功率  $P_2$  和输入有功功率  $P_1$  之比称为变压器的效率，用  $\eta$  表示，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1-52)$$

由于  $P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}$ ，变压器的效率可以写成

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \times 100\% \\ &= \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1 + P_{Fe} + P_{Cu}} \times 100\% \quad (1-53) \end{aligned}$$

变压器是静止不动的，没有机械损失，效率很高。大容量变压器的效率可达95%以上。

变压器的效率有时按能量来计算。通常以每日或每年计算它的能量效率。例如计算年效率时

$$\begin{aligned} \eta_{\text{年}} &= \frac{A_2}{A_1} \times 100\% \\ &= \frac{\text{一年内输出的有用能量}}{\text{一年内输入的有用能量}} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-54)$$

#### 四、变压器的功率因数

变压器的功率因数可用下面公式计算

$$\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{U_1 I_1} = \frac{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}{U_1 I_1} \\ &= \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}{U_1 I_1} \end{aligned} \quad (1-55)$$

$\cos\varphi_1$ 与负载的功率因数 $\cos\varphi_2$ 有关。为了测定变压器本身的功率因数，可用纯电阻作负载，即 $\cos\varphi_2 = 1$ 。这种方法在测试焊接变压器的性能时，用得较多。

### § 1-6 变压器的空载试验和短路试验

变压器的铁损 $P_{Fe}$ 和铜损 $P_{Cu}$ 以及初、次级和内阻及漏抗等，可以通过变压器的空载试验和短路试验确定。

#### 一、变压器空载试验确定铁损

变压器的空载试验是将变压器的次级开路，初级加上额定电压 $U_{1N}$ ，测量初级电流 $I_0$ 和初级有功功率 $P_0$ ，如图1-24所示。

由于次级开路， $P_2 = 0$ ，不消耗功率。变压器的空载电

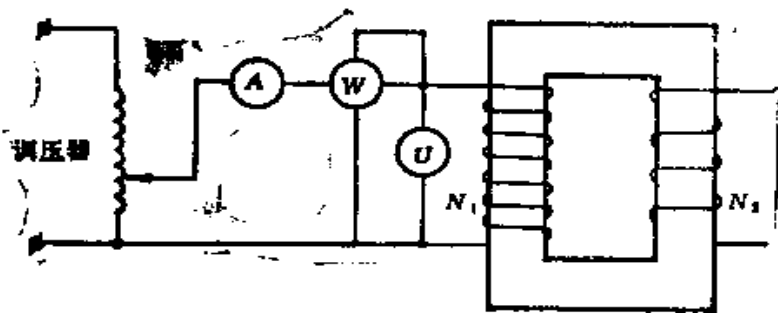


图1-24 变压器空载试验线路图

流  $I_0$  很小,  $I_0$  流过初级绕组的铜损可以忽略不计。因此在额定初级电压下, 所测的初级有功功率  $P_0$  可认为全都是铁心损耗  $P_{Fe}$ , 即

$$P_{Fe} = P_0 \quad (1-56)$$

如果电源的频率  $f$  不变, 变压器铁损仅与磁通密度的幅值  $B_m$  有关。在额定电压下, 变压器的磁通幅值  $\phi_m$ , 或磁通密度幅值  $B_m$  差不多与负载无关。所以不论空载或是满载, 变压器的铁损近似不变。

从图1-22 (a) 中可知,  $P_{Fe} = I_c^2 r_m = U_1 I_c = \frac{U_1^2}{r_m}$ , 故

$$I_c = \frac{P_{Fe}}{U_1} = \frac{P_0}{U_1} \quad (1-57)$$

$$r_m = \frac{U_1^2}{P_{Fe}} = \frac{U_1^2}{P_0} \quad (1-58)$$

而

$$I_0^2 = I_c^2 + I_m^2 \quad (1-59)$$

所以

$$I_0 = \sqrt{I_0^2 - I_c^2} = \sqrt{I_0^2 - \left(\frac{P_0}{U_1}\right)^2} \quad (1-60)$$

$$x_m = \frac{U_1}{I_0} = \frac{U_1}{\sqrt{I_0^2 - \left(\frac{P_0}{U_1}\right)^2}} \quad (1-61)$$

## 二、变压器短路试验确定铜损和漏阻抗

变压器的短路试验是将变压器的次级短路，初级接到调压器上，由调压器供电，调压器的电压从0缓慢上升，到 $I_1$ 达到变压器的额定电流 $I_{1N}$ 为止，测量初级电压 $U_{1K}$ 和初级有功功率 $P_K$ 。如图1-25所示。

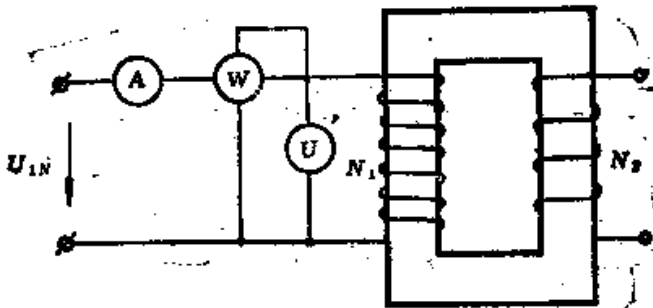


图1-25 变压器短路试验线路图

因为初级电压 $U_{1K}$ 很低，所以空载电流 $I_0$ 很小，铁损亦很小，都可以忽略不计，即 $P_{Fe} \approx 0$ 。从式(1-24)可知，当 $I_1 = I_{1N}$ 时， $I_2 = KI_{1N} = I_{2N}$ ，即次级电流亦达到额定值 $I_{2N}$ 。因为次级绕组已经短路，则 $P_2 = 0$ ，即没有次级有功功率输出，所得的初级有功功率 $P_K$ 可认为全部是初、次级绕组的铜损 $P_{Cu}$ ，即

$$P_K = P_{Cu} \quad (1-62)$$

从简化等值电路1-22(b)可得

$$P_{Cu} = I_{1N}^2 (r_1 + r_2') = I_{1N}^2 r_{1K}$$

故 
$$r_{1K} = r_1 + r_2 = \frac{P_K}{I_{1N}^2} \quad (1-63)$$

又有 
$$U_{1K}^2 = (I_{1N} r_{1K})^2 + (I_{1N} x_{1K})^2$$

所以 
$$x_{1K} = x_1 + x_2 = \sqrt{\left(\frac{U_{1K}}{I_{1N}}\right)^2 - r_{1K}^2}$$

$$= \frac{1}{I_{1N}} \sqrt{U_{1K}^2 - \left(\frac{P_K}{I_{1N}}\right)^2} \quad (1-64)$$

$r_{1K}$  和  $x_{1K}$  分别称为变压器的短路电阻和短路漏抗，它们合成变压器的短路阻抗  $z_{1K}$ ，则

$$z_{1K} = \sqrt{r_{1K}^2 + x_{1K}^2} = \frac{U_{1K}}{I_{1N}} \quad (1-65)$$

变压器的漏抗越大， $U_{1K}$  越高，因此  $U_{1K}$  的大小反映漏抗的大小。通常以  $U_{1K}$  与初级额定电压  $U_{1N}$  比率的百分数来表示，变压器漏抗的大小。

$$u_K \% = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \times 100\% \quad (1-66)$$

$u_K \%$  实际上是短路阻抗  $z_{1K}$  和额定负载阻抗  $Z_N$  之比。

$$u_K \% = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1N} z_{1K}}{I_{1N} Z_N} \times 100\%$$

$$= \frac{z_{1K}}{Z_N} \times 100\% \quad (1-67)$$

$u_K \%$  叫做变压器的短路比，一般变压器的短路比在 5% 左右。它是变压器的一个重要技术指标。

## § 1-7 小型单相变压器设计

在控制电路中广泛使用小型单相变压器。这种变压器有些是提供交流电源的电力变压器，有些是与整流器配合输出直流电的整流变压器。

其设计步骤一般为：

- (1) 根据生产需要决定变压器的原始数据；
- (2) 根据设计要求进行参数计算；
- (3) 初步决定变压器铁心主要尺寸；
- (4) 计算初级、次级绕组；
- (5) 进一步确定变压器尺寸。

### 一、根据生产需要决定变压器的原始数据

1. 电源电压  $U_1$ ；
2. 每一个次级绕组的交流输出电压有效值  $U_2$ 。  
如为整流变压器，则为次级绕组直流输出电压  $U_d$ ；
3. 每一个次级绕组的交流输出电流有效值  $I_2$ 。  
如为整流变压器，则为次级绕组直流输出电流  $I_d$ ；
4. 变压器效率  $\eta$ ，一般情况下  
 $\eta = 0.8 \sim 0.9$
5. 若为整流变压器，尚须决定整流器型式及负载性质。

### 二、根据设计要求进行参数计算

1. 将整流变压器或电力变压器的直流量换算为交流。

交流功率为  $P_1 = K_B U_d I_d$

交流电压为  $U_1 = K_U U_d$

交流电流为  $I_1 = K_I I_d$

式中  $K_B$ 、 $K_U$ 、 $K_I$  换算系数，其大小决定于整流器型式及

负载性质，如表1-3所示；

$U_d$ 及 $I_d$ ——分别为直流输出电压及直流输出电流。

表1-3 直流换成交流的换算系数

| 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 |
| $K_J$ | 电阻性  | 2.22 | 1.11 | 1.11 | 0.43 |
|       | 电感性  | 2.22 | 1.11 | 1.11 | 0.43 |
| $K_I$ | 电阻性  | 1.57 | 0.79 | 1.11 | 0.82 |
|       | 电感性  | 0.71 | 0.71 | 1    | 0.82 |

2. 求出变压器次级总功率 $P_2$ 。

电力变压器：

$$P_2 = \sum U_i I_i \quad (\text{VA})$$

$$= U_1 I_1 + U_2 I_2 + \dots + U_n I_n \quad (\text{VA})$$

式中  $U_i$ ——每个次级绕组电压有效值 (V)；

$I_i$ ——每个次级绕组电流有效值 (A)。

整流变压器：

$$P_2 = \sum P_i = \sum K_B U_i I_i \quad (\text{VA})$$

式中  $P_i$ ——每个次级绕组由直流换算成的交流功率 (VA)。

电力及整流混合的变压器：

$$P_2 = \sum U_i I_i + \sum P_i \quad (\text{VA})$$



3. 计算变压器初级功率 $P_1$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \text{ (VA)}$$

式中  $\eta$  —— 变压器效率。

4. 确定变压器的计算功率 $P_B$

$$P_B = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) \text{ (VA)}$$

5. 计算初级电流 $I_1$

$$I_1 = 1.1 \frac{P_1}{U_1} \text{ (A)}$$

式中 1.1 —— 考虑激磁电流影响的系数。

三、初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 计算变压器铁心截面积 $S_F$

$$S_F = K \sqrt{P_B} \text{ (cm}^2\text{)}$$

式中  $K$  —— 使变压器设计合理的系数，随变压器功率 $P_B$  (VA) 而变。见表1-4。

表1-4 不同功率的K值

| $P_B$ (VA) | $\leq 10$ | 10~20      | 20~60        | 50~<br>100  | 100~<br>500  | 500~<br>1000 | $\geq 1000$ |
|------------|-----------|------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| $K$        | 2         | 2~<br>1.75 | 1.75<br>~1.5 | 1.5~<br>1.3 | 1.3~<br>1.25 | 1.25<br>~1   | 1           |

2. 确定铁心中柱叠片宽度 $a$ 及厚度 $b$

$$S_F = a \cdot b \text{ (cm}^2\text{)}$$

式中  $a$  —— 铁心中柱叠片宽度 (cm);

$b$  ——铁心净叠厚(cm)。

一般  $b = (1.2 \sim 2.0) a$

铁心毛厚度  $b'$  为

$$b' = \frac{b}{K_c}$$

式中  $K_c$  ——考虑绝缘漆、缝隙等使厚度增加的系数，即叠片系数，见表1-5。

表1-5 硅钢片绝缘叠片系数  $K_c$

| 钢片厚度   | 无绝缘   | 漆绝缘  | 纸绝缘   |
|--------|-------|------|-------|
| 0.35mm | 0.91  | 0.90 | 0.83  |
| 0.5mm  | 0.935 | 0.93 | 0.875 |

#### 四、计算初级、次级绕组

1. 求每伏电压所需要的匝数  $N_0$

$$N_0 = \frac{N}{U} = \frac{10^4}{4.44 f B_m S_F} \quad (\text{匝/V})$$

$$N_0 = \frac{45}{B_m S_F} \quad (\text{匝/V})$$

式中  $B_m$  ——铁心中最大磁通密度(T)，可按表5-6选取。

2. 求各绕组的匝数  $N_i$

$$N_i = N_0 U_i \quad (\text{匝})$$

式中  $U_i$  ——每个绕组交流电压有效值(V)。

次级加上负载后，输出电压要降低一些，所以次级各绕组匝数要比计算值增加5~10%。

3. 各绕组导线截面积 $S_i$ 或直径 $d_i$ 的计算

$$S_i = \frac{I_i}{j} \quad (\text{mm}^2)$$

$$d_i = 1.13 \sqrt{\frac{I_i}{j}} \quad (\text{mm})$$

式中  $I_i$ ——每个绕组交流电流有效值(A)，前已指出，对

于初级绕组  $I_1 = 1.11 \frac{P_1}{U_1}$  (A)；

$j$ ——许用电流密度(A/mm<sup>2</sup>)，可按表5-10选用。

铜线一般取  $j = 2 \sim 2.5$  (A/mm<sup>2</sup>)。

4. 根据计算结果，参考表5-7或表5-8选取合适的线径。

五、进一步确定变压器尺寸

1. 确定变压器铁心窗口尺寸(面积 $Q$ ，窗口高 $h$ ，窗口宽 $C$ )窗口尺寸可以按下式进行计算

$$Q = \frac{1.6P_B}{S_{Fe}} \quad (\text{cm}^2)$$

$$Q = C \times h \quad (\text{cm}^2)$$

如果不是自己剪裁硅钢片，而是在市场上购买现成的变压器铁心冲片，则可按表1-6初步选定一种硅钢片尺寸，然后对照图1-26查出窗口尺寸。

$$Q = C \times h \quad (\text{cm}^2)$$

2. 求出各绕组每层可绕匝数 $n_i$  (匝)

$$n_i = \frac{0.9h}{d_i'} \quad (\text{匝/层})$$

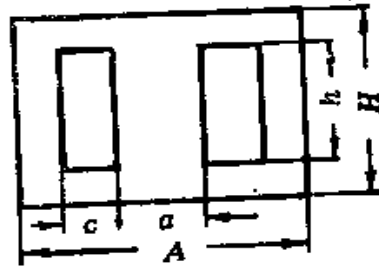
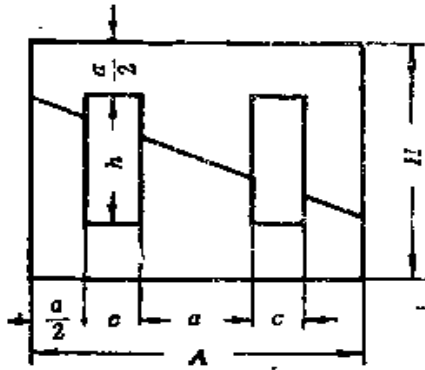


图1-26 硅钢片尺寸

表1-6 市面出售热轧硅钢片尺寸(mm)

| $a$ | $c$  | $h$  | $A$ | $H$  |
|-----|------|------|-----|------|
| 13  | 7.5  | 22   | 40  | 34   |
| 16  | 9    | 24   | 50  | 40   |
| 20  | 10   | 30   | 60  | 50   |
| 22  | 11   | 33   | 66  | 55   |
| 25  | 12.5 | 37.5 | 75  | 62.5 |
| 28  | 14   | 42   | 84  | 70   |
| 32  | 18   | 48   | 96  | 80   |
| 38  | 19   | 57   | 114 | 95   |
| 44  | 22   | 66   | 132 | 110  |
| 50  | 25   | 75   | 150 | 125  |
| 56  | 28   | 84   | 168 | 140  |
| 64  | 32   | 96   | 192 | 160  |



片厚0.35mm  
 大致规律  
 $C = 1/2 a$   
 $h = 1.5a$   
 $A = 3a$   
 $H = 2.5a$

式中  $d_1$ ——导线带绝缘后的外径 (mm);  
 $h$ ——初步选定的窗口高度 (mm);  
 0.9——为使导线与铁心间有良好的绝缘, 线圈两端约5% $h$ 不绕线。

3. 每一绕组需绕的层数  $D_i$

$$D_i = \frac{N_i}{n_i} \quad (\text{层})$$

4. 确定每个绕组的厚度  $F_i$

$$F_i = D_i (d_1 + \delta) + \nu \quad (\text{mm})$$

式中  $\delta$ ——层间绝缘的厚度 (mm)。导线较细时用透明纸绝缘 ( $\delta = 0.015 \sim 0.02 \text{mm}$ ), 线径较粗时用牛

皮纸绝缘 ( $\delta = 0.05\text{mm}$ ), 线径再粗时用青壳

纸绝缘 ( $\delta = 0.12\text{mm}$ );

$\nu$  —— 绕组间绝缘厚度 (mm), 当电压不超过 500V 时,

可用 2 ~ 3 层牛皮纸或用 0.12mm 青壳纸。

#### 5. 计算所有绕组的总厚度 $F$

$$F = (1.1 \sim 1.2) (\theta + \Sigma F_i) \text{ (mm)}$$

式中  $\theta$  —— 绕组框架厚度 (mm);

1.1 ~ 1.2 —— 径向尺寸裕度。

#### 6. 校核窗口宽度 $C$

上述计算所得所有绕组的总厚度  $F$  应小于但接近于铁心窗口宽度  $C$ , 若  $F$  值太大或太小, 则都应改变硅钢片尺寸, 重新进行第五步的窗口尺寸核算, 直到合适为止。

## § 1-8 小型单相变压器设计举例

### 一、根据生产需要决定变压器的原始数据

根据下列数据设计制造一个小型单相变压器:

1. 电源电压  $U_1 = 220\text{ (V)}$ ;

2. 次级绕组有四个, 其中绕组 3 及绕组 5 供单相桥式整流器用, 电感性质负载, 参数为

交流  $U_2 = 350\text{ (V)}$      $I_2 = 0.05\text{ (A)}$

直流  $U_{d3} = 18\text{ (V)}$      $I_{d3} = 0.5\text{ (A)}$

交流  $U_4 = 6.3\text{ (V)}$      $I_4 = 1\text{ (A)}$

直流  $U_{d5} = 4.5\text{ (V)}$      $I_{d5} = 1\text{ (A)}$

3. 变压器效率  $\eta = 0.8$ 。

### 二、根据设计要求进行参数计算

1. 将直流量换算成交流

绕组 3 有  $P_3 = 1.11 \times 18 \times 0.5 = 10 \text{ (VA)}$

$$U_3 = 1.11 \times 18 = 20 \text{ (V)}$$

$$I_3 = 1 \times 0.5 = 0.5 \text{ (A)}$$

绕组 5 有  $P_5 = 1.11 \times 4.5 \times 1 = 5 \text{ (VA)}$

$$U_5 = 1.11 \times 4.5 = 5 \text{ (V)}$$

$$I_5 = 1 \times 1 = 1 \text{ (A)}$$

2. 变压器次级总功率  $P_2$

$$\begin{aligned} P_2 &= 350 \times 0.05 + 6.3 \times 1 + 10 + 5 \\ &= 38.8 \text{ (VA)} \end{aligned}$$

3. 变压器初级功率  $P_1$

$$P_1 = \frac{38.8}{0.8} = 48.5 \text{ (VA)}$$

4. 变压器的计算功率  $P_B$

$$P_B = \frac{1}{2} (38.8 + 48.5) = 43.65 \text{ (VA)}$$

取  $P_B = 45 \text{ (VA)}$

5. 初级电流  $I_1$

$$I_1 = 1.1 \frac{48.5}{220} = 0.24 \text{ (A)}$$

### 三、初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 计算变压器铁心截面积  $S_F$

$$S_F = K \sqrt{P_B} = 1.5 \sqrt{45} = 10 \text{ (cm}^2\text{)}$$

式中取  $K = 1.5$ ,  $P_B = 45 \text{ VA}$ 。

2. 确定铁心中柱叠片宽度  $a$  及厚度  $b$

$$\text{取 } b = 1.6a$$

则 
$$a = \sqrt{\frac{10}{1.6}} = 2.5 \text{ (cm)}$$

$$b = 1.6 \times 2.5 = 4 \text{ (cm)}$$

$$b' = \frac{4}{0.9} = 4.45 \text{ (cm)}$$

选用厚0.35 mm的漆绝缘硅钢片。

#### 四、计算初级、次级绕组

1. 求每伏电压所需要的匝数  $N_0$

热轧硅钢片D42, 选  $B_m = 0.8 \text{ (T)}$

则 
$$N_0 = \frac{45}{0.8 \times 10} = 5.65 \text{ (匝/V)}$$

2. 求各绕组的匝数  $N_i$

$$N_1 = 5.65 \times 220 = 1240 \text{ (匝)}$$

$$N_2 = 1.1 \times (5.65 \times 350) = 2160 \text{ (匝)}$$

$$N_3 = 1.1 \times (5.65 \times 20) = 124 \text{ (匝)}$$

$$N_4 = 1.1 \times (5.65 \times 6.3) = 38 \text{ (匝)}$$

$$N_5 = 1.1 \times (5.65 \times 5) = 31 \text{ (匝)}$$

3. 求各绕组导线直径  $d_i$

取许用电流密度  $j = 2.5 \text{ (A/mm}^2\text{)}$

$$d_i = 1.13 \sqrt{\frac{i_i}{2.5}} = 0.715 \sqrt{I_i}$$

$$d_1 = 0.715 \sqrt{0.24} = 0.35 \text{ (mm)}$$

$$d_2 = 0.715 \sqrt{0.05} = 0.16 \text{ (mm)}$$

$$d_3 = 0.715 \sqrt{0.5} = 0.51 \text{ (mm)}$$

$$d_4 = 0.715 \sqrt{1} = 0.72 \text{ (mm)}$$

$d_5$  与  $d_4$  同

4. 从表5-8 选取直径相当的高强度漆包线, 查得 $d_i$ 为

$$d_1 = 0.41 \text{ (mm)} \quad d_2 = 0.80 \text{ (mm)}$$

$$d_2' = 0.20 \text{ (mm)} \quad d_3' = 0.80 \text{ (mm)}$$

$$d_3 = 0.58 \text{ (mm)}$$

### 五、进一步确定变压器尺寸

#### 1. 确定变压器铁心窗口尺寸

$$Q = \frac{1.6 \times 45}{10} = 7.2 \text{ (cm}^2\text{)}$$

令  $h = 2c$

则  $Q = 2c^2$

$$c = \sqrt{\frac{Q}{2}} = \sqrt{\frac{7.2}{2}} = 1.9 \text{ (cm)}$$

取  $c = 20 \text{ (mm)}$

则  $h = 40 \text{ (mm)}$

2~5. 核算各值列于表1-7中。

表1-7 核算窗口尺寸表

| 绕组编号                               | I   | II                              | III                            | IV                   | V                    |
|------------------------------------|---|---------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| $d_i$ (mm)                         | 0.41  | 0.20                            | 0.58                           | 0.80                 | 0.80                 |
| $n_i = \frac{0.9h}{d_i}$ (匝/层)     | 88  | 180                             | 62                             | 45                   | 45                   |
| $N_i$ (匝)                          | 1240  | 2160                            | 124                            | 33                   | 31                   |
| $C_i = \frac{N_i}{n_i}$ (层)        | 14.1  | 12                              | 2                              | 1                    | 1                    |
| $F_i = D_i(d_i + \delta) + v$ (mm) | $15(0.41 + 0.02) + 0.12 = 6.57$                       | $12(0.20 + 0.02) + 0.12 = 2.76$ | $2(0.58 + 0.02) + 0.12 = 1.32$ | $0.80 + 0.12 = 0.92$ | $0.80 + 0.12 = 0.92$ |
| $F = 1.15(0 + \Sigma F_i)$         | $1.15[2 + (6.57 + 2.76 + 1.32 + 0.92 + 0.92)] = 16.7$ |                                 |                                |                      |                      |



### 6. 校核窗口宽度 $C$

计算结果表明，全部绕组放入窗口后，还有  $20 - 16.7 = 3.3$  (mm) 的裕量。可见窗口尺寸的初步选择是合适的。因

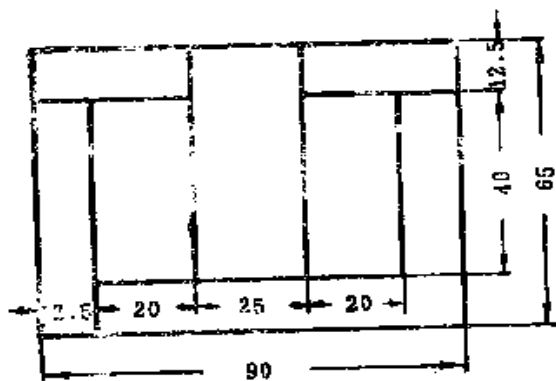


图1-27 变压器铁心尺寸

此，铁心的最后尺寸如图1-27所示。铁心厚为44.5 (mm)。

## 第二章 弧焊变压器设计

### § 2-1 弧焊变压器简介

弧焊变压器是一种特殊的降压变压器，其基本原理与电力变压器相同，但须满足焊接工艺的要求。它的特殊性主要表现为：

第一，根据多种电弧静特性的特点，要求它具有下降的外特性（如手弧焊、埋弧自动焊、钨极氩弧焊及等离子弧焊）。

第二，为了使电弧易于引燃并能连续稳定燃烧，同时也为获得下降的外特性，要求电源具有足够高的空载电压，并且在焊接回路内有足够大的感抗。

第三，为了能调节焊接电流，要求焊接回路的感抗是可以调节的。

#### 一、弧焊变压器陡降外特性的获得

先看电阻  $R$  和电感  $L$  串联的交流电路（图2-1）。

在交流电源电压  $U_0$  的作用下，交流电流  $I$  通过  $R-L$  电路。在电阻  $R$  上的电压降为  $U_R = IR$ ，称为电阻电压降。同时，电流在感抗  $X_L$  ( $X_L = \omega L$ ) 上也产生一个电压降  $U_x = IX_L$ ，称为感抗电压降。

电阻上的电压降  $U_R$ ，是与电路中的电流同相位的。感抗上的电压降  $U_x$ ，比电路中的电流超前  $90^\circ$ 。可以画出电阻和电感串联电路的向量图。

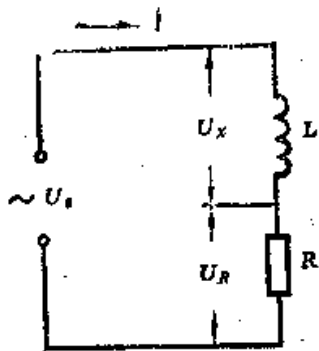


图 2-1 电阻与电感串联的电路

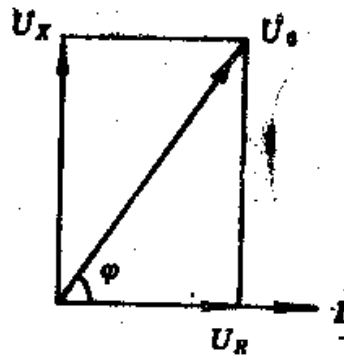


图2-2 电阻与电感串联电路的向量图

从图2-2可以看出，向量  $U_0$ 、 $U_x$ 和 $U_R$ 是直角三角形的关系， $U_0$ 为斜边， $U_R$ 和 $U_x$ 为直角的两边。将这三个电压组成的三角形，另画如图2-3所示，叫做电压三角形。

由电压三角形可以得到电源电压 $U_0$ 与电阻压降 $U_R$ 、电感压降 $U_x$ 之间的数量关系

$$U_0^2 = U_R^2 + U_x^2$$

现在再来看弧焊变压器的陡降外特性是怎么获得的。

图 2-4是弧焊变压器的电路图。它由焊接变压器和串联在次级回路中的电抗器组成。

把变压器初级绕组接到交流电源上，在焊接变压器的铁心中就要产生交变的磁通。磁通的大部分经过铁心闭合，这部分与初级绕组、次级绕组都相交链的磁通称为主磁通 $\phi_m$ 。另一部分经过初级绕组附近空间闭合，只与初级绕组相交链的磁通称为初级绕组的漏磁通 $\phi_{s_1}$ 。同理，只与次级绕组相交

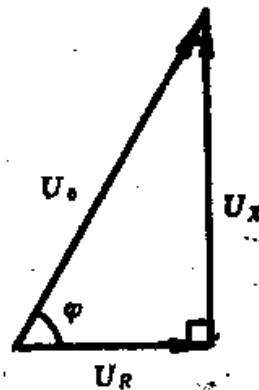


图2-3 电压三角形

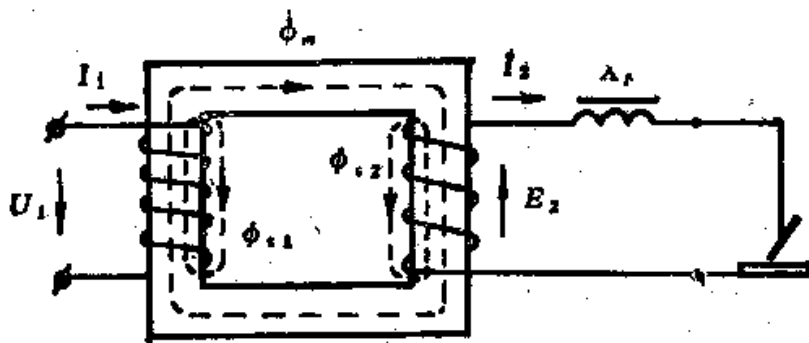


图2-4 弧焊变压器电路图

链的磁通称为次级绕组的漏磁通 $\phi_{s2}$ 。

主磁通 $\phi_m$ 在次级绕组中产生感应电势 $E_2$ 。在感应电势 $E_2$ 的作用下，次级回路内有电流 $I_2$ 通过。所以主磁通 $\phi_m$ 也叫做工作磁通。

初级绕组及次级绕组的漏磁通 $\phi_{s1}$ 及 $\phi_{s2}$ ，非但不能帮助建立感应电势 $E_2$ ，而且其感应出的电势还起抵消初级电压 $U_1$ 及次级电势 $E_2$ 的作用。所以它们是作为负载的一部分出现在焊接变压器内的。分别以 $x_{s1}$ 及 $x_{s2}$ 表示初级绕组及次级绕组的漏（感）抗。漏抗 $x_{s1}$ 及 $x_{s2}$ 组成焊接变压器的总漏抗，以 $x_B$ 表示。

除了焊接变压器的漏抗 $x_B$ 外，在焊接回路中还串接了一个电抗器，它的感抗以 $X_L$ 表示。

现在，用简化的电路（图2-5）代替图2-4的弧焊变压器原理图。 $x_B$ 表示焊接变压器的漏抗， $X_L$ 表示电抗器的感抗，可变电阻 $R$ 代表负载。

可以看出，这个简化电路与图2-1电阻电感串联电路相似。不同的只是简化电路的电感由 $x_B$ 及 $X_L$ 两部分组成。所以

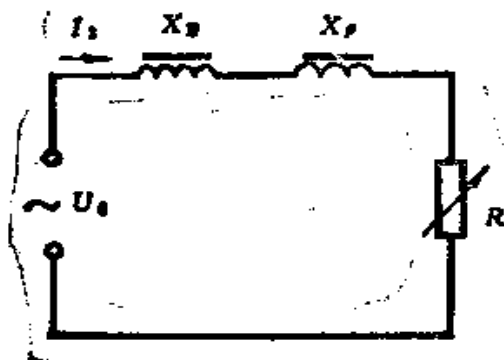


图2-5 弧焊变压器的简化电路图

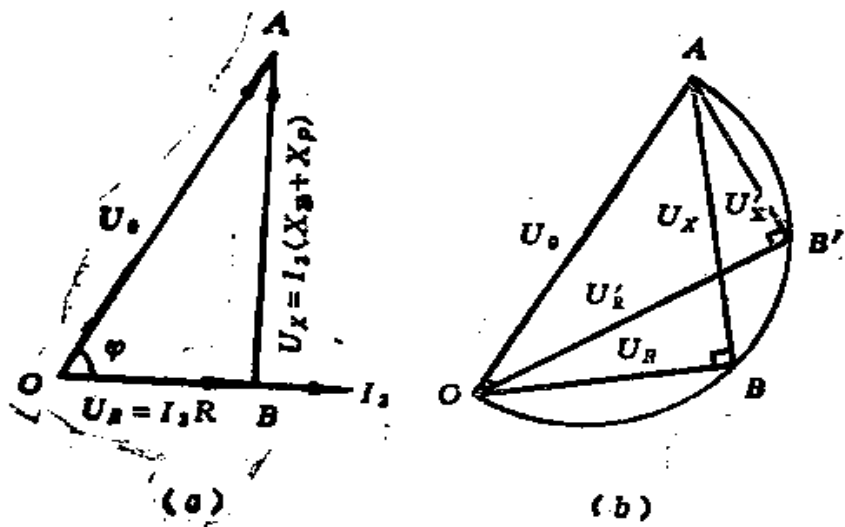


图2-6 焊机电压三角形

同样可以画出电压三角形（图 2-6(a)）。三角形的斜边 $OA$ 代表外加交流电压 $U_0$ ，直角边 $OB$ 代表负载（即可变电阻 $R$ ）压降 $U_R = I_1 R$ ，与电流 $I_1$ 同相位。直角边 $BA$ 代表变压器漏抗 $x_2$ 及感抗 $X_1$ 上的压降 $U_X = I_1(x_2 + X_1)$ ，比电流 $I_1$ 超前 $90^\circ$ 。

从电压三角形 $OAB$ 可以得到

$$U_0^2 = U_R^2 + U_X^2 \\ = U_R^2 + I_2^2 (x_B + X_p)^2$$

移项后  $U_R^2 = U_0^2 - I_2^2 (x_B + X_p)^2$

或  $U_R = \sqrt{U_0^2 - I_2^2 (x_B + X_p)^2}$  (2-1)

如果外加交流电压  $U_0$  不变，当可变电阻从  $R$  增大至  $R'$  时，电阻上的压降从  $U_R$  增大至  $U'_R$  (图2-6(b))，感抗  $x_B + X$  上的压降  $U_X$  减小至  $U'_X$ 。  $U'_R$  与  $U'_X$  仍保持

$$U_0^2 = U_R'^2 + U_X'^2$$

$U'_R$  仍垂直  $U'_X$ 。因此可以用  $U_0$  作直径画半圆 (图2-6(b))，当可变电阻  $R$  变化时，  $U_R$  与  $U_X$  的交点  $B$  在此半圆上移动。

现在可以作出关系曲线  $U_R = f(I_2)$ 。

当  $R = \infty$  即负载断开时，电流  $I_2 = 0$ ，感抗上的压降  $U_X = 0$ ，所以负载上的电压  $U_R = U_0$ ，相当于电压三角形上  $B$  点与  $A$  点重合。

当  $R = 0$  即负载短接时，负载  $R$  上的电压  $U_R = 0$ ，相当于  $B$  点与  $O$  点重合。这时电流完全由感抗  $x_B + X_p$  决定

$$I_2 = \frac{U_0}{x_B + X_p}$$

将  $R = \infty$  及  $R = 0$  时得到的  $(U_R, I_2)$  值标在图2-7上，再任意变动  $R$  值，可得到中间诸点。

$U_R = f(I_2)$  是一条陡降的曲线。随负载电流  $I_2$  的增大，负载上的电压  $U_R$  迅速下降。这就是所要求的陡降外特性曲线。

归纳起来：

第一，焊接电弧是一个纯电阻性负载，所以上述电路中的可变电阻  $R$  也可代之以电弧电阻  $R_A$ 。

第二，电弧 (电阻) 上的压降  $U_A (U_R)$  等于电源电压  $U_0$  与电感上压降  $U_X$  的向量差。由于电源电压  $U_0$  是一个大小、方

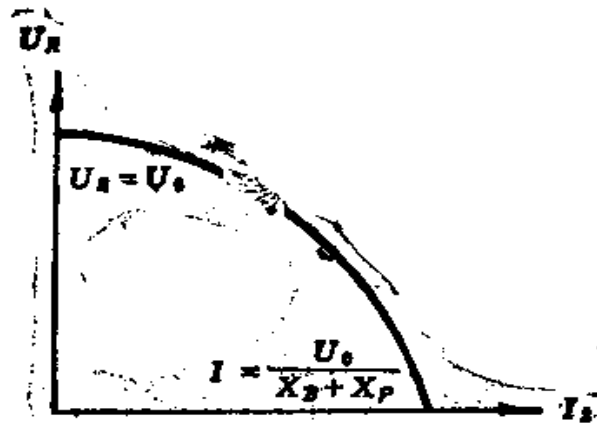


图2-7  $U_R$ 与 $I_2$ 的关系曲线

向不变的量，因此电弧上的压降 $U_A$ 之大小、方向便决定于电感上压降 $U_X$ 的大小和方向。

第三，空载时，电弧电阻等于无穷大，电流等于零，电感上的压降也等于零，电源电压全部加在电极两端（电阻）上。有负载时，电弧与电感上都有压降，随着负载加大（电阻 $R$ 减小），电流增大，电阻上的压降减小，电感上的压降增大，在电弧短路（负载短接）时，电弧上的压降为零，电源电压完全降落在电感上。所以主要由于感抗的作用，使弧焊变压器具有陡降的外特性。

第四，感抗由焊接变压器的本身漏抗 $x_B$ 及变压器外的感抗 $X$ 两部分组成。为了使弧焊变压器获得陡降外特性，可以采用不外加电抗器（ $X_p = 0$ ）而加大变压器的漏抗 $x_B$ ，或者用正常漏磁变压器（ $x_B$ 很小）而在变压器次级回路串接较大感抗 $X$ 的电抗器。

第五，从式（2-1）可得

$$I_2 = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_R^2}}{x_B + X_p} \quad \text{或} \quad I_1 = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_A^2}}{x_B + X_p}$$

只要改变变压器本身的漏抗 $x_s$ 或外接电抗器的感抗 $X_s$ ,就可以得到一系列短路电流不同的外特性曲线(图2-8),达到调节焊接电流的目的。

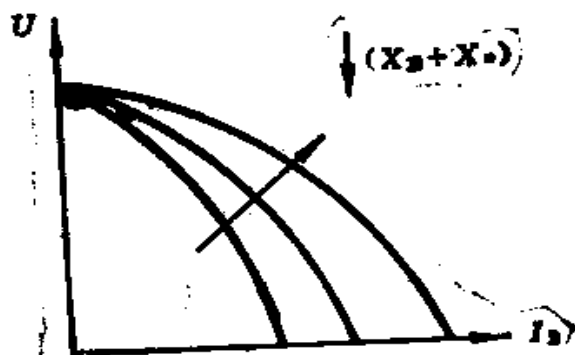


图2-8 改变感抗调节外特性

## 二、弧焊变压器的运行

### 1. 空载情况

仍以图2-4电路作为研究对象。图2-9是它的原理电路图。

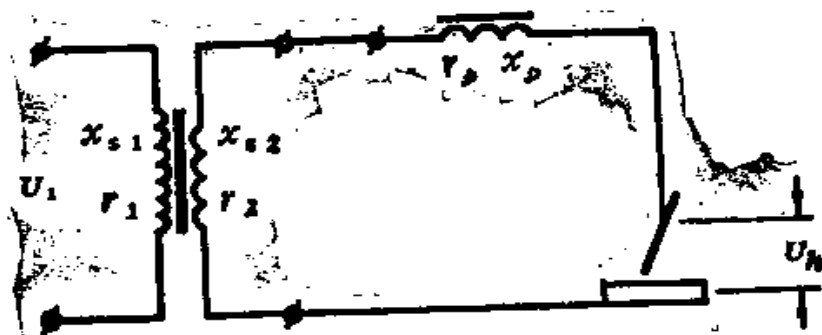


图2-9 焊接变压器原理电路图

初级绕组接入交流电源后,在电压 $U_1$ 作用下,产生空载电流 $I_0$ ,此时磁路中由于磁势 $I_0 N_1$ 的作用将产生主磁通 $\phi_0$ 和



漏磁通 $\phi_{s_1}$ 。

初级绕组端的外加电压 $U_1$ 由三部分电压平衡：

(1) 克服由主磁通 $\phi_m$ 所感应的电势 $E_1$ 所需的电压 $-E_1$ ；

(2) 克服由漏磁通 $\phi_{s_1}$ 所感应的电势 $E_{s_1}$ 所需的电压 $-E_{s_1} = I_0 x_{s_1}$ ；

(3) 在初级绕组电阻 $r_1$ 上的电压降 $I_0 r_1$ 。

可以看到：

(1) 由于次级绕组在空载时没有电流，所以次级电压 $U_2$ 就等于主磁通 $\phi_m$ 在次级绕组中感应的电势 $E_2$ ，即 $U_2 = E_2$ 。

根据电磁感应定律，有

$$E_2 = 4.44 f N_2 \phi_m$$

式中  $E_2$ ——次级绕组感应电势的有效值；

$f$ ——交流电的频率；

$N_2$ ——次级绕组的匝数；

$\phi_m$ ——与初级及次级绕组都相交链的磁通（主磁通）的极大值。

(2) 变压器空载时，它的内阻抗压降包括初级绕组电阻压降 $I_0 r_1$ ，及初级绕组漏抗压降 $I_0 x_{s_1}$ 。因为空载电流 $I_0$ 一般小于初级额定电流的10%，而初级绕组的电阻 $r_1$ 又很小。所以在计算时，可以忽略初级绕组的电阻压降 $I_0 r_1$ 。如果再忽略 $I_0$ 中的 $I_c$ 分量（用于补偿交流磁通在铁心中产生磁滞、涡流损耗的有功分量），这时电源电压 $U_1$ 的大小，可以近似地表达为

$$U_1 \approx E_1 + E_{s_1}$$

式中

$$E_1 = 4.44 f N_1 \phi_m$$

$$E_{s_1} = 4.44 f N_1 \phi_{s_1}$$

所以

$$U_1 \approx 4.44 f N_1 (\phi_m + \phi_{s_1})$$

(3) 焊接变压器的变压比 $k$ 为

$$k = \frac{U_1}{U_0} \approx \frac{E_1 + E_{S1}}{E_1}$$

所以

$$k = \frac{4.44f N_1 (\phi_m + \phi_{S1})}{4.44f N_2 \phi_m}$$

$$k = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{\phi_m + \phi_{S1}}{\phi_m}$$

令  $k_M = \frac{\phi_m}{\phi_m + \phi_{S1}}$ ,  $k_M$  表示通过次级绕组的磁通  $\phi_m$  与初级

绕组所产生的总磁通  $\phi_m + \phi_{S1}$  的比值, 称为耦合系数。因此

$$k = \frac{N_1}{N_2 k_M}$$

漏磁很小 (正常漏磁式) 的焊接变压器, 耦合系数  $k_M$  接近于 1, 其变压比  $k = \frac{N_1}{N_2}$ 。漏磁很大 (增强漏磁式) 的焊接

变压器, 耦合系数  $k_M < 1$ , 其变压比  $k = \frac{N_1}{N_2 k_M}$ 。

## 2. 负载情况

当焊接变压器初级绕组端加上额定电压, 次级绕组端与电弧相连接, 变压器就在负载情况下运行。这时, 在次级绕组电势  $E_2$  的作用下, 次级绕组和负载所组成的电路内有电流  $I_2$  通过。次级绕组的磁势  $I_2 N_2$  产生的磁通, 与主磁通方向相反, 起抵消主磁通的作用。但主磁通  $\phi_m$  的大小是由外加电压  $U_1$  决定的, 当外加电压  $U_1$  一定, 主磁通  $\phi_m$  也基本上保持不变。这就使初级绕组的磁势和电流相应地从空载时的  $I_0 N_1$  及  $I_0$  增大至  $I_1 N_1$  及  $I_1$ , 以补偿  $I_2 N_2$  的抵消作用。与初级绕组一样, 次级绕组产生的磁通也有一部分在次级绕组附近的空

闭合，形成次级绕组的漏磁通 $\phi_{s_2}$ 。

次级绕组端的电势 $E_2$ 由五部分电压所平衡：

- (1) 克服由次级绕组漏磁通 $\phi_{s_2}$ 所感应的电压 $-E_{s_2}$ ，  
     $= I_2 x_{s_2}$ ，即次级绕组漏抗电压降；
- (2) 在次级绕组电阻 $r_2$ 上的电压降 $I_2 r_2$ ；
- (3) 克服外接电抗器所感应的电势 $E_p$ 所需的电压  
     $-E_p = I_2 X_p$ ，即电抗器感抗压降；
- (4) 在电抗器绕组电阻 $r_p$ 上的电压降 $I_2 r_p$ ；
- (5) 在负载（电弧）上的电压降 $U_A$ 。

可以看到：

(1) 由于次级绕组在负载时有电流 $I_2$ 流过，次级绕组内部有次级漏抗压降 $I_2 x_{s_2}$ 及次级电阻压降 $I_2 r_2$ ，所以次级电压 $U_2$ 不等于主磁通 $\phi_m$ 在次级绕组中感应的电势 $E_2$ ，即 $U_2 \neq E_2$ 。只有当变压器次级内部阻抗压降很小时，例如一般电力变压器及正常漏磁类焊接变压器，才可以近似认为 $U_2 \approx E_2$ 。对于增强漏磁类焊接变压器， $U_2 \neq E_2$ 。

(2) 同理，在负载时，初级绕组内部有初级漏抗压降 $I_1 x_{s_1}$ 及初级电阻压降 $I_1 r_1$ ，所以 $U_1 \neq E_1$ 。对于一般电力变压器及正常漏磁类焊接变压器，可近似认为 $U_1 \approx E_1$ 。而增强漏磁类焊接变压器， $U_1 \neq E_1$ 。

(3) 由于有外加电抗器感抗压降 $I_2 X_p$ 及电阻压降 $I_2 r_p$ ，所以负载上得到的电压 $U_A$ 不等于焊接变压器次级输出电压 $U_2$ ，即 $U_A \neq U_2$ 。对于不外加电抗器的增强漏磁类焊接变压器，才有 $U_A = U_2$ 。

(4) 焊接变压器初级电流 $I_1$ 滞后于初级电压 $U_1$ 一个相角 $\varphi_1$ ，相角 $\varphi_1$ 的余弦 $\cos \varphi_1$ 即焊机的功率因数。

(5) 前面已经提到，空载电流 $I_0$ 一般小于初级绕组额

定电流 $I_{1N}$ 的10%，为了便于计算，可以假定 $I_0 = 0$ 。同时为了便于分析，可以将初级绕组的参数折合到次级回路。它们的折合关系是：

$$U'_1 = \frac{U_1}{k}, \quad I'_1 = kI_1 = I_2$$

$$r'_1 = \frac{r_1}{k^2}, \quad x'_{s1} = \frac{x_{s1}}{k^2}$$

将折合后的参数画到向量图上可得到

$$(I'_1 r'_1 + I_2 r_2 + I_2 r_p + U_k)^2 + (I'_1 x'_{s1} + I_2 x_{s2} + I_2 X_p)^2 = U'_1{}^2 \quad (2-2)$$

其中  $r'_1 + r_2 = r_B$  为焊接变压器内电阻；

$x'_{s1} + x_{s2} = x_B$  为焊接变压器内感抗。

实际上 $r_B$ 及 $r_p$ 都很小，可以略去不计，同时 $U'_1 = U_0$ ， $U_0$ 是变压器次级空载电压，于是式(2-2)便可简化为

$$U_k = \sqrt{U_0^2 - I_2^2 (x_B + X_p)^2} \quad (2-3)$$

或 
$$I_2 = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_k^2}}{x_B + X_p} \quad (2-4)$$

式(2-3)就是弧焊变压器外特性方程的数量关系式。将式(2-3)与(2-1)进行比较，可以发现，这两个式子是一样的。所以式(2-1)就是用简化法推导出的弧焊变压器外特性方程式。

### 三、弧焊变压器的几个基本技术数据

弧焊变压器的技术数据，除与一般变压器一样，有初级电压 $U_1$ 、初级额定电流 $I_{1N}$ 、额定视在功率 $S_N$ 、次级空载电压 $U_0$ 、次级额定电流 $I_{2N}$ 等外，还有焊接电流调节范围、焊机效率 $\eta$ 、功率因数 $\cos\varphi_1$ 及视在功率利用系数 $C$ 等。下面介绍

它们的基本方程式，通过这些基本方程式，可以分析影响焊机性能的因素。

1. 焊接电流  $I_A$

根据式 (2-4) 计算焊接电流

$$I_A = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_A^2}}{x_B + X_p}$$

2. 弧焊变压器的效率  $\eta$

弧焊变压器的效率，和一般变压器一样，为输出功率与输入功率之比，即

$$\eta = \frac{P_A}{P_s} \quad (2-5)$$

式中  $P_A$  为电弧功率，即弧焊变压器的输出功率

$$P_A = U_A I_A \lambda_A$$

其中  $\lambda_A$  为电弧功率因数，一般  $\lambda_A = 0.88 \sim 0.98$

$P_s$  为弧焊变压器从电源吸收的有功功率。

焊机从电源吸收的有功功率  $P_s$  等于向电弧输出的功率  $P_A$  加上初级绕组、次级绕组、电抗器绕组内的铜损，再加上变压器、电抗器的铁损。即  $P_s = P_A + I_A^2(r_B + r_p) + P_0 + P_f$

式中  $r_B$ ——变压器内电阻；

$r_p$ ——电抗器内电阻；

$P_0$ ——变压器铁损；

$P_f$ ——电抗器铁损。

所以式 (2-5) 又可写成

$$\eta = \frac{U_A I_A \lambda_A}{U_A I_A \lambda_A + I_A^2(r_B + r_p) + P_0 + P_f} \quad (2-6)$$

式中， $P_0$ 、 $P_f$  值一般都很小，可以略去不计，则

$$\eta = \frac{U_A \lambda_A}{U_A \lambda_A + I_A (r_B + r_p)} \quad (2-7)$$

### 3. 弧焊变压器的功率因数 $\cos\varphi_1$

它等于弧焊变压器从电源吸收的有功功率 $P_A$ 与视在功率 $S_N$ 之比，也等于焊机初级电流 $I_1$ 与初级电压 $U_1$ 之间相位差的余弦。

$$\begin{aligned} \text{即} \quad \cos\varphi_1 &= \frac{P_A}{S_N} = \frac{U_A I_A \lambda_A + I_A^2 (r_B + r_p)}{U_0 I_A} \\ &= \frac{U_A \lambda_A + I_A (r_B + r_p)}{U_0} \end{aligned} \quad (2-8)$$

### 4. 视在功率利用系数 $C$

它等于弧焊变压器输出的电弧功率与它的额定视在功率之比，也等于焊机效率 $\eta$ 与功率因数 $\cos\varphi_1$ 的乘积。

$$C = \frac{P_A}{S_N} = \frac{U_A I_A \lambda_A}{U_0 I_A} = \frac{U_A \lambda_A}{U_0} = \eta \cdot \cos\varphi_1 \quad (2-9)$$

从上面所列的焊机效率 $\eta$ 、功率因数 $\cos\varphi_1$ 及视在功率利用系数 $C$ 的计算公式中可以看出：

(1) 弧焊变压器的功率因数 $\cos\varphi_1$ 不仅和变压器及电抗器的感抗 $x_B$ 、 $X_p$ 及内阻 $r_B$ 、 $r_p$ 有关，而且也与电弧功率因数 $\lambda_A$ 有关。 $\lambda_A$ 小， $\cos\varphi_1$ 也小。

(2) 焊机的效率 $\eta$ 、功率因数 $\cos\varphi_1$ 及视在功率利用系数 $C$ 都与焊机空载电压 $U_0$ 有关。从引弧和稳弧角度考虑，空载电压 $U_0$ 高些较好，但随着 $U_0$ 的增高，焊机的 $\eta$ 、 $\cos\varphi_1$ 及 $C$ 都要降低，使焊机的经济性变差。

(3) 由于弧焊变压器的感抗值 $x_B$ 、 $X_p$ 较大，使初级电流 $I_1$ 落后于初级电压 $U_1$ 的相位角也大，所以与一般变压器相

比，弧焊变压器的 $\cos\varphi_1$ 和 $C$ 都比较低。

## §2-2 动铁分磁式弧焊变压器设计

动铁分磁式弧焊变压器是依靠增强变压器本身漏磁来获得感抗的。这种变压器，除了初、次级绕组耦合比较松散，以造成一定的空气漏磁外，主要是依靠动铁心的磁分路作用来增强漏抗。动铁心可相对于静铁心运动，改变磁分路的漏磁面积 $S$ 和空气隙大小 $\delta$ 。(图2-10)，从而改变漏磁分路的磁阻，达到调节焊接电流的目的。

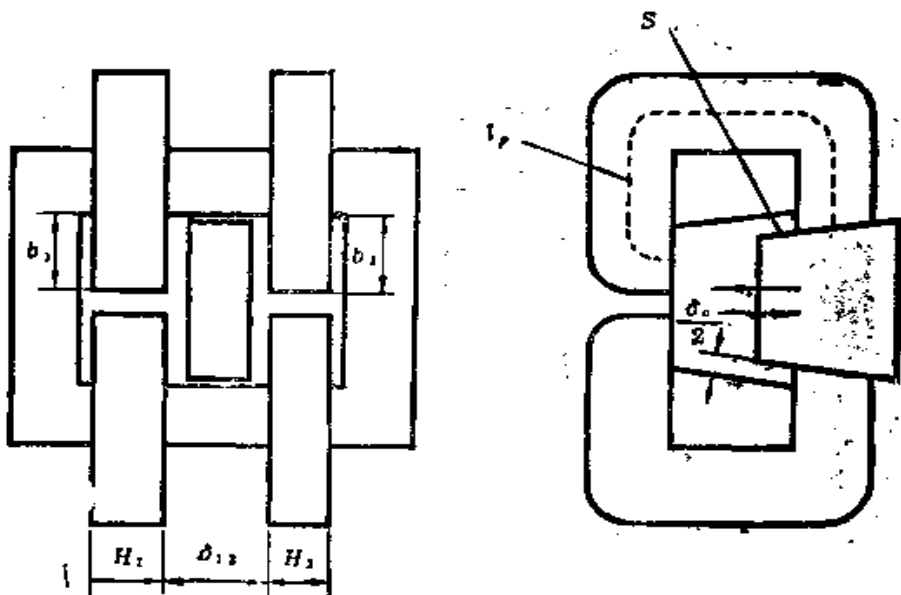


图2-10 动铁分磁式弧焊变压器示意图

这类变压器与一般单相变压器的设计步骤基本相同，所不同的只是焊接变压器的输出电流应能在较大范围内调节。焊接电流的大小取决于漏抗的数值，因此，在开始设计之前，先简单介绍漏抗的计算。

从电工学中，我们知道，漏抗  $X = \omega L$ ， $L$  是漏感系数，而  $L = N^2/R_m = \mu s N^2/l$ ，其中  $N$  为绕组匝数， $R_m$  为磁阻 ( $R_m = l/\mu s$ )， $\mu$  为磁路材料的磁导率， $l$  为磁路长度， $S$  为磁路面积。实际上，漏抗计算的准确度，主要取决于磁阻计算的准确度。

动铁式弧焊变压器的漏抗，包括动铁心磁分路漏抗和空气漏抗两部分。相应的，就要计算动铁心磁分路磁阻和空气磁阻。

动铁心磁分路的磁阻 它又包括空气隙磁阻和动铁心磁阻两部分。由于铁心材料的磁导率  $\mu$ ，大大高于空气的磁导率  $\mu_0$ ，所以，动铁心本身的磁阻远小于空气隙的磁阻，可以忽略动铁心磁阻，而以空气隙磁阻来近似代替整个磁分路的磁阻。这样，在公式  $R_m = l/\mu s$  中， $\mu$  即为空气的磁导率  $\mu_0$ ， $l$  就等于上下空气隙之和  $\delta_0$ ， $S$  即取伸入静铁心的那部分动铁心面积 (图2-10)。

空气磁阻 除了动铁心磁分路之外，初、次级绕组相距一段距离  $\delta_{12}$ ，它们之间的耦合比较松散，这部分空间漏磁是不能忽略的，但这部分磁阻的计算困难，误差也大。因为空间漏磁不象铁心中那样集中，它分布在一个很大的空间范围内， $S$ 、 $l$  的确切度量几乎是不可能的，只能用近似折合的办法替代。通常把漏磁面积  $S$  折合为一个底面周长为  $l_p$ ，高为  $\left(\delta_{12} + \frac{H_1 + H_2}{3}\right)$  的圆桶形面积，把磁路长度  $l$  定为绕组的径向高  $b$  (图2-10, 2-11)。这样的折合代替，必然会带来误差，因此，在漏抗计算式中又引入诸如  $K_L$ 、 $K_R$  等修正系数来加以弥补。通过设计—试制—修正设计，这样反复的深化过程，才能进一步丰富和改进设计方法，使理论更切合实际。



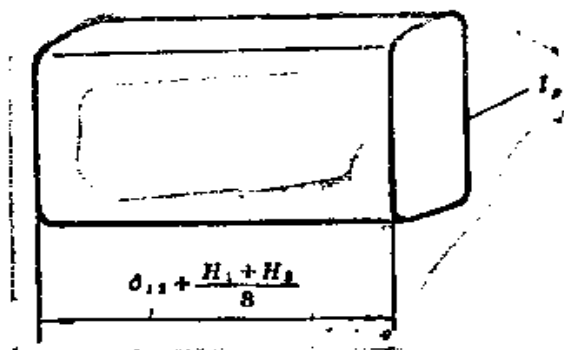


图 2-11 空间漏磁面积的折算

动铁分磁式弧焊变压器的设计步骤大体分为如下几步：

- (1) 根据生产需要决定变压器的原始数据；
- (2) 根据设计要求进行参数计算；
- (3) 初步决定变压器铁心主要尺寸；
- (4) 计算初、次级绕组；
- (5) 进一步确定变压器尺寸；
- (6) 核算焊接电流；
- (7) 验算变压器技术经济指标。

#### 一、根据生产需要决定变压器的原始数据

根据生产需要，一般提供如下原始数据：

1. 电源电压  $U_1$  (V)
2. 次级空载电压  $U_0$  (V)
3. 次级额定工作电压  $U_{2N}$  (V)
4. 额定焊接电流  $I_{2N}$  (A)
5. 焊接电流调节范围  $I_A$  (A)
6. 相数  $m$
7. 电源频率  $f$  (Hz)
8. 额定负载持续率  $FS_N$  (%)

9. 效率 $\eta$ (%)

10. 功率因数 $\cos \phi$

11. 冷却方式

12. 使用地点

## 二、根据设计要求进行参数计算

1. 次级额定输出功率 $P_2$

$$P_2 = U_{2N} I_{2N} \times 10^{-3} \text{ (kW)}$$

2. 功率因数 $\cos \phi$

$$\begin{aligned} \cos \phi &= (0.9 \sim 0.95) \left[ \frac{U_{2N} \lambda_A + I_{2N} r_B}{U_0} \right] \\ &= (0.9 \sim 0.95) \left[ \frac{U_{2N} \lambda_A + (0.9 \Sigma P) / I_{2N}}{U_0} \right] \end{aligned}$$

式中 0.9~0.95——修正系数,

$\lambda_A$ ——交流电弧的功率因数,

$\Sigma P$ ——变压器的全部功率损耗,

0.9—— $\Sigma P$ 的约90%为短路损耗,

$$\Sigma P = \frac{P_2}{\eta} - P_2 \quad \text{(kW)}$$

3. 初级输入容量 (即初级视在功率)  $P_1$

$$P_1 = \frac{P_2}{\cos \phi \cdot \eta} \quad \text{(kVA)}$$

4. 变压器的计算容量 (即长时容量)  $P_{sc}$

$$P_{sc} = P_1 \sqrt{FS_N} \quad \text{(kVA)}$$

5. 初级额定长时电流 $I_{1c}$

$$I_{1c} = I_{1N} \sqrt{FS_N} \quad \text{(A)}$$

式中  $I_{1N}$ ——初级额定电流(A)

$$I_{1N} = \frac{P_1}{U_1} \times 10^3 \quad (\text{A})$$

6. 次级额定长时电流  $I_{2c}$

$$I_{2c} = I_{2N} \sqrt{FS_N} \quad (\text{A})$$

### 三、初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 确定铁心结构形式, 选择铁心材料

动铁分磁式弧焊变压器铁心, 一般为单相内铁式。这种型式结构简单, 绕组包围铁心, 安装和绝缘处理比较容易。

铁心采用矩形截面, 以重叠装配法叠接而成。

选择铁心材料时, 应结合我国具体情况, 本着节约的原则。目前我国冷轧硅钢片的产量还不能满足需要, 所以弧焊变压器一般选用高硅热轧硅钢片 D41、D42。

2. 计算铁心净截面积  $S_{Fe}$

$$S_{Fe} = \frac{20 \sim 30}{B_m} \sqrt{P_{2c}} \quad (\text{cm}^2)$$

式中 20~30——系数, 根据铁铜用量比的要求酌情选取;

$B_m$ ——按铁心材料选取的最大磁密(T)

3. 确定铁心柱叠片宽度  $a$  及厚度  $b$

$$S_{Fe} = a \cdot b \quad (\text{cm}^2)$$

一般  $b = (1 \sim 2)a$

铁心毛厚度  $b'$  为

$$b' = \frac{b}{0.9}$$

式中 0.9——叠片系数(漆绝缘, 硅钢片厚0.35mm)。

4. 选取活动铁心有效净截面积  $S_e$

活动铁心有效净截面积的大小，对于焊接电流调节范围影响较大，特别是获得最大漏抗（最小电流）起决定性作用。一般取活动铁心有效净截面积  $S_d$  为静铁心净截面积  $S_p$  的 (0.8~0.9) 倍。最后可以通过实验予以调整。

$$S_d = (0.8 \sim 0.9) S_p$$

$S_d$  也可从获得最小电流  $I_{\min}$  来计算

$$S_d = \frac{45(U_1 - \frac{U_{\min}}{N_2})}{B_m N_1} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $N_1$ 、 $N_2$ ——为初、次级绕组匝数，

$U_{\min}$ ——最小焊接电流  $I_{\min}$  所对应的工作电压，

$$U_{\min} = 20 + 0.04 I_{\min} \text{ (V)}。$$

5. 选取活动铁心与静铁心间的最小气隙  $\delta_0$ 。

活动铁心与静铁心之间的最小气隙  $\delta_0$  对于获得最大漏抗影响很大。一般  $\delta_0$  (上、下气隙之和) 为 1~2 mm。活动铁心为梯形结构时，下底边与上底边之差一般在 14~22 mm 左右。

#### 四、计算初级、次级绕组

1. 求每伏电压所需要的匝数  $N_0$ 。

$$N_0 = \frac{45}{B_m S_p} \quad (\text{匝/V})$$

2. 求初级及次级绕组的匝数  $N_1$  及  $N_2$ 。

$$N_1 = N_0 U_1 \text{ (匝)}$$

$$N_2 = \frac{U_0 + \Delta U_0}{U_1} N_1 \text{ (匝)}$$

式中  $\Delta U_0$ ——最大空载电压  $U_0 + \Delta U_0$  (此时动铁心全部拉出)，比额定空载电压  $U_0$  (此时铁心没有完全

拉出)大 $4U$ 。(V)

3. 计算初、次级绕组导线截面积 $S_1$ 、 $S_2$

$$\text{初级绕组} \quad S_1 = \frac{I_{1c}}{j_1} \quad (\text{mm}^2)$$

$$\text{次级绕组} \quad S_2 = \frac{I_{2c}}{j_2} \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $j_1$ ——初级绕组导线许用电流密度(A/mm<sup>2</sup>);

$j_2$ ——次级绕组导线许用电流密度(A/mm<sup>2</sup>)。

经验介绍,对于动铁分磁式弧焊变压器,在B级绝缘和空气自冷情况下,许用电流密度可取为

$$j_1 = 2 \sim 3 \quad (\text{A/mm}^2)$$

$$j_2 = 2.5 \sim 3.5 \quad (\text{A/mm}^2)$$

4. 根据计算结果,参考表5-7及表5-8选取合适的导线规格。

5. 确定初、次级绕组尺寸

目前动铁分磁式弧焊变压器的初、次级绕组常采用盘形。先将初、次级绕组 $N_1$ 、 $N_2$ 分成若干串联(或并联)的盘,然后根据导线尺寸、导线绝缘尺寸及盘间绝缘隔块尺寸,计算出绕组尺寸(图2-12)

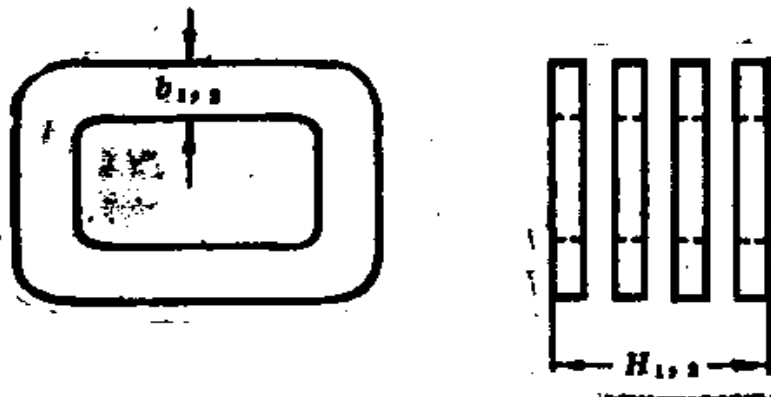


图2-12 初、次级盘形绕组

## 五、进一步确定变压器尺寸

1. 根据绕组尺寸、静铁心截面、动铁心尺寸等，确定变压器总体尺寸（图2-13）。

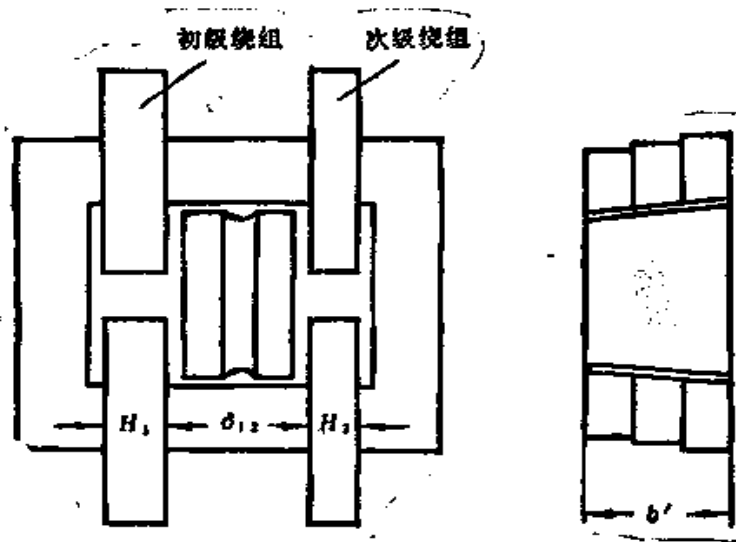


图 2-13 变压器总体尺寸

2. 计算铁心下料尺寸及片数。

每台叠片数 
$$n = \frac{b}{\delta} \text{ (片)}$$

式中  $b$ ——铁心柱净厚度 (mm)；

$\delta$ ——硅钢片厚度 (mm)。

由于动铁心为梯形，为了简化制造工艺，节约原材料，铁轭可以做成数种尺寸，阶梯形过渡。

最后算出铁心柱、铁轭、动铁心的下料尺寸及片数。

## 六、核算焊接电流

1. 计算焊机最小漏抗  $X_{0.1}$ 。

动铁分磁式弧焊变压器的最小漏抗 $X_{m12}$ ，相当于动铁心在最外位置，这时可忽略动铁心的磁分路作用，而只考虑空气漏磁。其计算式如下：

当上、下绕组串联接法时

$$X_{m12} = 2X'_{m12}$$

当上、下绕组并联接法时

$$X_{m12} = \frac{1}{2}X'_{m12}$$

式中  $X'_{m12}$ ——半个变压器的最小漏抗，可按下式计算

$$X_{m12} = K_g K_R 2\pi f \mu_0 \frac{l_{2p} N_2'^2}{b_2} \left( \delta_{12} + \frac{H_1 + H_2}{3} \right) \quad (\Omega)$$

式中  $K_g$ ——结构系数，常取1.5~2；

$K_R$ ——罗氏修正系数，可按下式近似计算

$$K_R = 1 - \sigma + 0.35\sigma^2$$

$$\sigma = \frac{\delta_{12} + H_1 + H_2}{\pi b_2}$$

$f$ ——交流电频率(Hz)；

$\mu_0$ ——空气的磁导率，

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9} \quad (\text{H/cm})；$$

$l_{2p}$ ——次级绕组平均匝长(cm)；

$N_2'$ ——半个变压器的次级绕组有效匝数；

$b_2$ ——次级绕组盘厚(cm) (见图2-12)；

$\delta_{12}$ ——初、次级绕组间距离(cm) (见图2-13)；

$H_1$ ——初级绕组数盘加绝缘块总宽度 (cm)

(见图 2-12及图 2-13)；

$H_1$ ——次级绕组数盘加绝缘块总宽度 (cm)。

2. 计算最大焊接电流  $I_{2max}$

根据焊机外特性方程式可知

$$I_{2max} = \frac{\sqrt{(U_0 + \Delta U_0)^2 - U_{2N}^2}}{X_{212}} \quad (A)$$

式中  $U_0 + \Delta U_0$ ——铁心在最外位置时的空载电压 (V),  $\Delta U_0$  可取  $2V$ 。

3. 计算焊机最大漏抗  $X_{212}$

动铁分磁式弧焊变压器的最大漏抗  $X_{212}$ , 相当于动铁心在最内位置, 这时焊机的漏抗为

$$X_{212} = X'_{212} + X_{212}$$

式中  $X'_{212}$ ——动铁心漏磁分路的感抗, 主要是上、下气隙的感抗。

$$X'_{212} = \frac{2\pi / \mu_0 S_0 N_1^2}{\delta_0} (\Omega)$$

式中  $\mu_0$ ——空气的磁导率 (H/cm),

$S_0$ ——活动铁心有效净截面积 (cm<sup>2</sup>),

$\delta_0$ ——活动铁心上、下气隙之和 (cm)

$N_1$ ——次级绕组匝数 (匝)。

4. 计算最小焊接电流  $I_{2min}$

$$I_{2min} = \frac{\sqrt{(U'_0)^2 - U_{2N}^2}}{X_{212}} \quad (A)$$

式中  $U'_0$ ——动铁心在最内位置时的空载电压 (V), 这时初次级绕组的耦合系数  $K_V = 0.9$ , 即  $U'_0 = 0.9U_0$ 。

5. 计算活动铁心在中间位置时的焊机漏抗  $X_0$

$$X_0 = X'_0 + X_{212}$$



式中  $X'_2$ ——动铁心在中间位置时，动铁心漏磁分路的感抗。

$$X'_2 = \frac{2\pi f \mu_0 S_{02} N_2^2}{\delta_{02}} \quad (\Omega)$$

式中  $S_{02}$ ——活动铁心在中间位置时的有效净截面积 ( $\text{cm}^2$ )

$$S_{02} = \frac{1}{2} S_0 \quad (\text{cm}^2);$$

$\delta_{02}$ ——活动铁心在中间位置时的上、下气隙之和 ( $\text{cm}$ )。

6. 计算活动铁心在中间位置的焊接电流  $I_{22}$

$$I_{22} = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_{2N}^2}}{X_2} \quad (\text{A})$$

7. 核算计算结果

(1) 核算最大焊接电流  $I_{2\text{max}}$  是否符合部颁标准，即

$$I_{2\text{max}} \geq 120\% I_{2N}$$

(2) 核算最小焊接电流  $I_{2\text{min}}$  是否符合部颁标准，即

$$I_{2\text{min}} \leq 25\% I_{2N}$$

(3) 核算动铁心移动距离是否与焊接电流接近线性关系，

$$\frac{I_{22} - I_{2\text{min}}}{I_{2\text{max}} - I_{2\text{min}}} \approx \frac{1}{2}$$

核算结果如符合设计要求，变压器的结构尺寸基本上就决定了。如不符合设计要求，则须调整参数，重作计算

### 七、验算变压器技术经济指标

为了验证变压器设计的合理性，还要验算焊机的铁损、

铜损、空载电流、效率及功率因数。

1. 计算变压器静铁心重量  $G_{Fe}$

$$G_{Fe} = V_{Fe} r_{Fe} \times 10^{-3} \text{ (kg)}$$

式中  $V_{Fe}$ ——静铁心硅钢片的净体积 ( $\text{cm}^3$ ),

$r_{Fe}$ ——硅钢片的比重 ( $\text{g/cm}^3$ ),

热轧者  $r_{Fe} = 7.6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ,

冷轧者  $r_{Fe} = 7.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 。

2. 计算变压器铁损  $P_{Fe}$

$$P_{Fe} = \Delta_{Fe} G_{Fe} \text{ (W)}$$

式中  $\Delta_{Fe}$ ——硅钢片的比损耗 ( $\text{W/kg}$ )，可从表5-2、5-3、5-4查得。

3. 验算空载电流  $I_0$

$$I_0 = \sqrt{I_C^2 + I_r^2} \text{ (A)}$$

式中  $I_C$ ——空载电流的有功分量 (A)，补偿铁心中因涡流、磁滞引起的损耗，

$$I_C = \frac{P_{Fe}}{U} \text{ (A)}$$

$I_r$ ——空载电流的无功分量 (A)，用以激磁，

$$I_r = \frac{q_1 G_1 + q_2 G_2 + n_g q_g S_{Fe}}{U_1} \text{ (A)}$$

式中  $q_1, q_2$ ——分别为铁心柱、铁轭的磁化容量 ( $\text{VA/kg}$ )，可查表5-3及5-4；

$G_1, G_2$ ——分别为铁心柱、铁轭的重量 (kg)；

$n_g$ ——叠接铁心时，铁心气隙的数目；

$q_g$ ——硅钢片接缝处空气隙的磁化容量 ( $\text{VA/cm}^2$ )，可查表5-5；

$S_{Fe}$ ——铁心净截面 ( $\text{cm}^2$ )。

按部颁标准应

$$I_0 \geq 10\% I_{1N}$$

4. 计算绕组铜导线重量  $G_{Cu}$

$$\begin{aligned} G_{Cu} &= G_{Cu1} + G_{Cu2} \text{ (kg)} \\ &= (l_1 s_1 + l_2 s_2) r_{Cu} \times 10^{-3} \text{ (kg)} \end{aligned}$$

式中  $l_1$ 、 $l_2$ ——分别为初级和次级绕组的长度 ( $\text{cm}$ )，

$s_1$ 、 $s_2$ ——分别为初级和次级绕组的截面积 ( $\text{cm}^2$ )

$r_{Cu}$ ——铜的比重 ( $\text{g/cm}^3$ )，

$$r_{Cu} = 8.9 \text{ (g/cm}^3\text{)}。$$

5. 计算变压器铜损  $P_{Cu}$

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} \quad (\text{W})$$

$$P_{Cu1} = I_{1N}^2 \left( m \rho_{Cu} \frac{l_1}{s_1} \right) \quad (\text{W})$$

$$P_{Cu2} = I_{2N}^2 \left( m \rho_{Cu} \frac{l_2}{s_2} \right) \quad (\text{W})$$

式中  $m$ ——趋表效应系数，当  $f = 50 \text{ (Hz)}$  时，

$$m = 1.5,$$

$\rho_{Cu}$ ——铜的电阻率 ( $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$ )，

$$\rho_{Cu} = 0.02$$

$l_1$ 、 $l_2$ ——绕组长度 ( $\text{m}$ )，

$s_1$ 、 $s_2$ ——绕组截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

6. 验算变压器效率  $\eta$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

计算出的效率应符合部颁标准，对于  $I_{1N} = 300 \text{ (A)}$  的焊

机

$$\eta < 83.5\%$$

### 7. 计算变压器的额定功率因数 $\cos \phi$

$$\cos \phi = \frac{P_1 + P_{Fe} + P_{Cu}}{U_1 I_{1N}}$$

## §2-3 动铁分磁式弧焊变压器设计举例

### 一、原始数据

|                |                         |
|----------------|-------------------------|
| 1. 初级额定电压      | $U_{1N} = 380 (V)$      |
| 2. 次级额定空载电压    | $U_0 = 70 (V)$          |
| 3. 次级额定工作电压    | $U_{2N} = 32 (V)$       |
| 4. 额定焊接电流      | $I_{2N} = 300 (A)$      |
| 5. 焊接电流调节范围    | $I_s = 50 \sim 400 (A)$ |
| 6. 相数          | $m = 1$                 |
| 7. 电源频率        | $f = 50 (Hz)$           |
| 8. 额定负载持续率     | $FS_N = 60\%$           |
| 9. 效率          | $\eta = 83.5\%$         |
| 10. 功率因数       | $\cos \phi = 0.48$      |
| 11. 绝缘等级       | B级                      |
| 12. 冷却方式, 使用地区 | 自然冷却, 平原温带地区            |

### 二、参数计算

#### 1. 次级额定输出功率 $P_2$

$$P_2 = U_{2N} I_{2N} = 32 \times 300 \times 10^{-3} = 9.6 (kW)$$

#### 2. 功率因数 $\cos \phi$

$$\cos \phi = (0.90 \sim 0.95) \left[ \frac{U_{2N} \lambda_1 + 0.9 \Sigma P / I_{2N}}{U_0} \right]$$

系数取 0.90  $\lambda_1 = 1$

$$\Delta P = \frac{P_2}{\eta} - P_2 = \frac{9.6}{0.835} - 9.6 = 2.0 \text{ (kW)}$$

$$\begin{aligned} \cos \phi &= 0.9 \frac{32 \times 1 + 0.9 \times 2.0 \times 10^3 / 300}{70} \\ &= 0.49 \end{aligned}$$

3. 初级输入容量  $P_1$

$$P_1 = \frac{P_2}{\cos \phi \cdot \eta} = \frac{9.6}{0.49 \times 0.835} = 23.5 \text{ (KVA)}$$

4. 变压器计算容量  $P_{BC}$

$$P_{BC} = P_1 \sqrt{FS_N} = 23.5 \sqrt{60\%} = 18.2 \text{ (KVA)}$$

5. 初级额定工作电流  $I_{1N}$

$$I_{1N} = \frac{P_1}{U_{1N}} = \frac{23.5 \times 10^3}{380} = 61.8 \text{ (A)}$$

6. 初级长时工作电流  $I_{1C}$

$$I_{1C} = \frac{P_{1C}}{U_{1N}} = \frac{18.2 \times 10^3}{380} = 47.9 \text{ (A)}$$

7. 次级长时工作电流  $I_{2C}$

$$I_{2C} = I_{1N} \sqrt{FS_N} = 300 \sqrt{60\%} = 232 \text{ (A)}$$

### 三、初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 结构形式、铁心材料

单相心式，活动铁心为梯形，上下底边差16mm

采用D42—0.5mm热轧硅钢片。

2. 计算铁心净截面积  $S_F$ 。

$$S_{Fe} = \frac{20 \sim 30}{B_m} \sqrt{P_{Sc}} \quad (\text{cm}^2)$$

系数取27.6

$B_m$ 取1.4(T)

$$S_{Fe} = \frac{27.6}{1.4} \sqrt{18.2} = 84 \quad (\text{cm}^2)$$

3. 铁心柱宽度 $a$ 及叠片厚度 $b$

$$S_{Fe} = a \cdot b \quad (\text{cm}^2)$$

一般  $b = (1 \sim 2)a$

取 $a = 7$  (cm)

则 
$$b = \frac{S_{Fe}}{a} = \frac{84}{7.0} = 12 \quad (\text{cm})$$

铁心毛厚度 $b'$ 为:  $b' = b/K_c$

$K_c$ ——叠片系数, 0.5mm硅钢片, 取 $K_c = 0.93$ ,

$$b' = \frac{b}{K_c} = \frac{12}{0.93} = 13 \quad (\text{cm})$$

4. 动铁心有效净截面积 $S_e$

从获得最小电流 $I_{A=1\%}$ 来设计计算动铁心的尺寸, 可应用下面的公式

$$S_e = \frac{45}{B_m} \left( \frac{U_{1N}}{N_1} - \frac{U_{2\min}}{N_2} \right)$$

式中  $U_{2\min}$ ——最小焊接电流 $I_{A=1\%}$ 所对应的工作电压, 本设计要求 $I_{A=1\%} = 50$  (A), 则 $U_{2\min} = 22$  (V),

$N_1$ 、 $N_2$ ——初级和次级绕组匝数, 参看后面计算。

$$S_e = \frac{45}{1.4} \left( \frac{380}{144} - \frac{22}{28} \right) = 60 \quad (\text{cm}^2)$$

则动铁心的叠宽净尺寸 $a_0$ 为

$$a_0 = \frac{S_0}{b'} = \frac{60}{13} = 4.6 \text{ (cm)}$$

毛尺寸 $a'_0$ 为

$$a'_0 = \frac{a_0}{K_c} = \frac{4.6}{0.93} = 5.0 \text{ (cm)}$$

用厚为1.5mm的铁板四块来夹紧动铁心，则其尺寸为

$$50 + 4 \times 1.5 = 56 \text{ (mm)}$$

动铁心形状如图 2-14所示，每边尺寸为28mm。

5. 动铁心与静铁心间的最小气隙 $\delta_0$ 。

选 $\delta_0 = 1.8 \text{ (mm)}$ ，即上、下气隙各0.9(mm)。

梯形动铁心上下底边相差16(mm)。

#### 四、计算初级、次级绕组

1. 每伏电压所需匝数 $N_0$ 。

$$N_0 = \frac{45}{B_m S_{Fe}} = \frac{45}{1.4 \times 84.5} = 0.38 \text{ (匝/V)}$$

2. 初、次级绕组匝数 $N_1$ 、 $N_2$

$$N_1 = N_0 U_{1N} = 0.38 \times 380 = 144 \text{ 匝}$$

取 $N_1 = 144$ 匝

$$N_2 = \frac{U_0 + \Delta U_0}{U_1} N_1 = \frac{70 + 2}{380} \times 144 = 27.3 \text{ 匝}$$

取  $N_2 = 28$ 匝

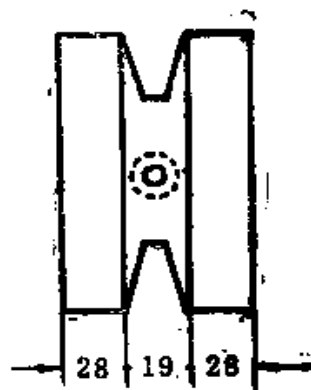


图2-14 动铁心尺寸

3. 初、次级绕组导线截面积  $S_1$ 、 $S_2$

$$S_1 = \frac{I_{1c}}{j_1} = \frac{47.9}{2.5} = 19.2 \text{ (mm}^2\text{)}$$

选用  $2.26 \times 9.3 \text{ mm}^2$  双玻璃丝包线,

$$S'_1 = 20.5 \text{ mm}^2$$

实际电流密度  $j'_1 = I_{1c}/S'_1 = \frac{47.9}{20.5} = 2.34 \text{ (A/mm}^2\text{)}$

$$S_2 = \frac{I_{2c}}{j_2} = \frac{232}{2.5} = 92.7 \text{ (mm}^2\text{)}$$

选用  $3.05 \times 10 \text{ mm}^2$  双玻璃丝包线三根并联,

$$S'_2 = 3 \times 30 \text{ (mm}^2\text{)}$$

实际电流密度  $j'_2 = \frac{I_{2c}}{S'_2} = \frac{232}{3 \times 30} = 2.58 \text{ (A/mm}^2\text{)}$

4. 确定初、次级绕组尺寸

初级绕组144匝, 分8盘, 上下铁心各4盘, 每盘18匝, 同柱各盘互相串联后, 上下铁心柱上的绕组再串联。所用导线带绝缘的尺寸为  $2.76 \times 9.8 \text{ mm}$ , 两盘之间用  $3 \text{ mm}$  的绝缘隔块隔开, 初级绕组尺寸如图2-15所示。

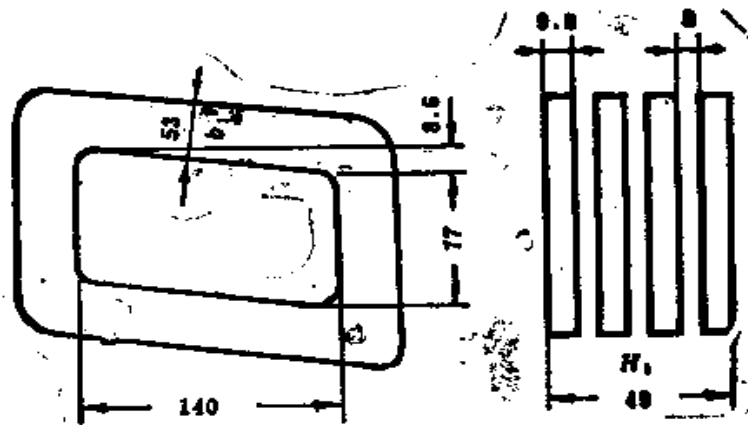


图2-15 初级绕组尺寸



$$b_1 = (18 + 1) \times 2.76 = 50 \text{ (mm)}$$

$$H_1 = 9.8 \times 4 + 3 \times 3 = 49 \text{ (mm)}$$

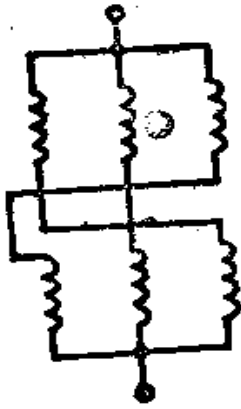


图2-16 各盘之  
间接线

次级绕组28匝，分6盘，上下铁心各3盘，每盘14匝，用单股 $3.05 \times 10$ 的双玻璃丝包线单股绕制。为了避免环流，各盘之间的接线如图2-16所示。即上铁心的第一盘与下铁心的第三盘串联，上二与下二串联，上三与下一串联。上下铁心3盘绕组的另外3个头各自并联后引出。

次级所用导线带绝缘层的尺寸为 $3.55 \times 10.5 \text{ mm}$ ，两盘之间用 $6 \text{ mm}$ 的绝缘隔板隔开。次级绕组的尺寸如图2-17所示。

$$b_2 = (14 + 1) \times 3.55 = 54 \text{ (mm)}$$

$$H_2 = 10.5 \times 3 + 6 \times 2 = 44 \text{ (mm)}$$

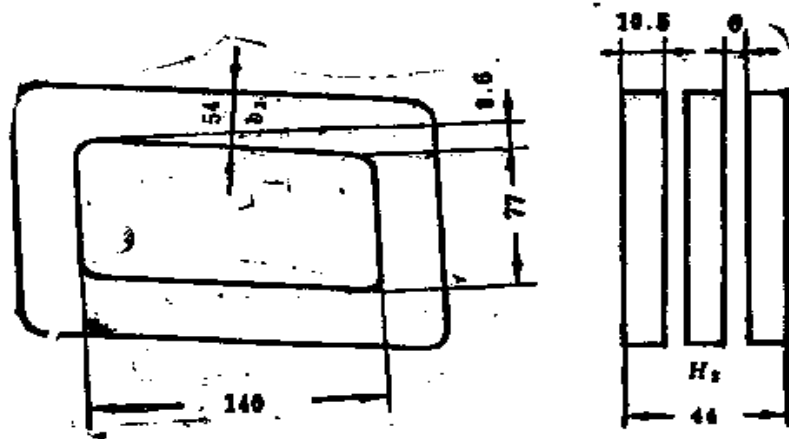


图2-17 次级绕组尺寸

## 五、进一步确定变压器尺寸

1. 根据绕组尺寸、静铁心截面、动铁心尺寸，确定变压器总体尺寸。变压器的总体尺寸如图2-18。

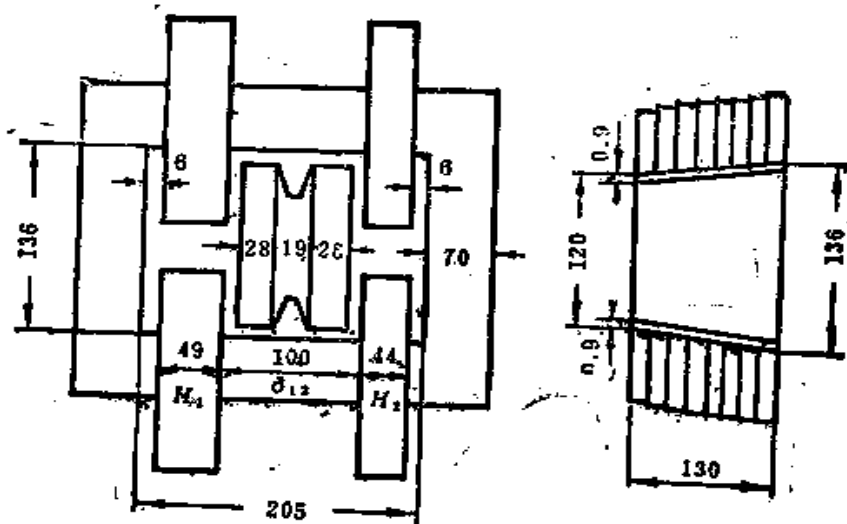


图2-18 变压器总体尺寸

### 2. 铁心下料尺寸及片数

每柱叠片数  $n = \frac{b}{\delta} = \frac{121}{0.5} = 242$  片

取  $n = 240$  片，外面用 1.5 mm 钢板二块夹紧。

心柱 冲片尺寸 275 × 70 mm

冲片数量  $n_s = 2n = 2 \times 240 = 480$  片

轭铁 以 8 种尺寸进行过渡，其尺寸及片数如下：

|          |          |
|----------|----------|
| 208 × 70 | 2 × 30 片 |
| 206 × 70 | 2 × 30 片 |
| 204 × 70 | 2 × 30 片 |

|          |         |
|----------|---------|
| 202 × 70 | 2 × 30片 |
| 200 × 70 | 2 × 30片 |
| 198 × 70 | 2 × 30片 |
| 196 × 70 | 2 × 30片 |
| 194 × 70 | 2 × 30片 |

动铁 动铁心为梯形，尺寸见图2-19。

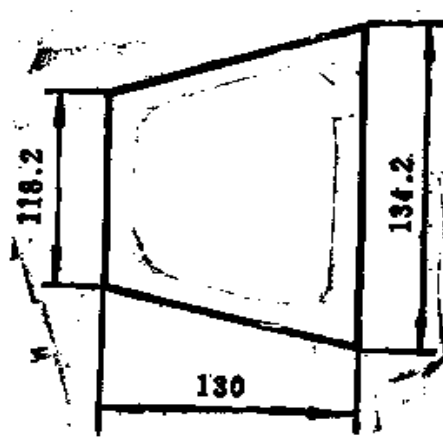


图2-19 动铁心尺寸

冲片数量

$$[n_s = \frac{a_s}{\delta} = \frac{46}{0.5} = 92 \text{ 片}]$$

## 六、核算焊接电流

### 1. 计算焊机最小漏抗 $X_{m12}$

先计算半个变压器的最小漏抗  $X'_{m12}$

$$X'_{m12} = K_s K_R 2 \pi f \mu_0 \frac{l_{2P} N_2'^2}{b_2} \left( \delta_{12} + \frac{H_1 + H_2}{3} \right) \quad (\Omega)$$

式中  $l_{2P} \approx 2(7.7 + 0.86 + 14) + 4 \times 5.4 = 67 \text{ (cm)}$

$$\begin{aligned}
 N_2' &= 14 \text{匝} & b_2 &= 5.4 \text{ (cm)} \\
 \delta_{12} &= 10 \text{ (cm)} & H_1 &= 4.9 \text{ (cm)} \\
 H_2 &= 4.4 \text{ (cm)} & \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-9} \text{ (H/cm)}
 \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{\delta_{12} + H_1 + H_2}{\pi b_2} = \frac{10 + 4.9 + 4.4}{\pi \times 5.4} = 1.14$$

$$\begin{aligned}
 K_x &= 1 - \sigma + 0.35\sigma^2 = 1 - 1.14 + 0.35 \times 1.14^2 \\
 &= 0.315
 \end{aligned}$$

$K_x$  取 2

$$\begin{aligned}
 X'_{m12} &= 2 \times 0.315 \times 2\pi f \times 4\pi \times 10^{-9} \frac{67 \times 14^2}{5.4} \left( 10 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{4.9 + 4.4}{3} \right) = 0.0795 \text{ (}\Omega\text{)}
 \end{aligned}$$

因为上、下绕组为串联接法，所以

$$X_{m12} = 2X'_{m12} = 2 \times 0.0795 = 0.159 \text{ (}\Omega\text{)}$$

2. 计算最大焊接电流  $I_{1max}$

$$\begin{aligned}
 I_{1max} &= \frac{\sqrt{(U_0 + \Delta U_0)^2 - U_{2N}^2}}{X_{m12}} = \frac{\sqrt{(70 + 2)^2 - 32^2}}{0.159} \\
 &= 400 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

3. 计算焊机最大漏抗  $X_{max}$

$$X_{max} = X'_{m22} + X_{m12}$$

$$\begin{aligned}
 X'_{m22} &= \frac{2\pi f \mu_0 S_2 N_2^2}{\delta_0} = \frac{2\pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-9} \times 60 \times 28^2}{0.18} \\
 &= 1.03 \text{ (}\Omega\text{)}
 \end{aligned}$$

$$X_{max} = X'_{m22} + X_{m12} = 1.03 + 0.159 = 1.19 \text{ (}\Omega\text{)}$$

4. 焊机最小电流  $I_{2min}$

$$I_{2min} = \frac{\sqrt{(U_0')^2 - U_{2N}^2}}{X_{max}} = \frac{\sqrt{(0.9 \times 70)^2 - 32^2}}{1.19} \\ = 46 \text{ (A)}$$

计算活动铁心在中间位置时的焊机漏抗  $X_z$

$$X_z = X'_z + X_{min}$$

$$X'_z = \frac{2\pi f \mu_0 S \delta_z N_2^2}{\delta_{0z}} = \frac{2\pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-9} \times 30 \times 28^2}{0.98} \\ = 0.095 \text{ (}\Omega\text{)}$$

其中  $\delta_{0z} = \delta_0 + \frac{13.5 - 11.9}{2} = 0.18 + 0.8 = 0.98 \text{ (cm)}$

$$X_z = X'_z + X_{min} = 0.095 + 0.159 = 0.254 \text{ (}\Omega\text{)}$$

6. 计算活动铁心在中间位置时的焊接电流  $I_{2z}$

$$I_{2z} = \frac{\sqrt{U_0'^2 - U_{2N}^2}}{X_z} = \frac{\sqrt{70^2 - 32^2}}{0.254} = 247 \text{ (A)}$$

7. 核算计算结果

(1)  $I_{2max} = 400 \text{ A} > 120\% I_{2N} = 360 \text{ (A)}$

(2)  $I_{2min} = 46 \text{ A} < 25\% I_{2N} = 75 \text{ (A)}$

(3) 动铁心移动距离与焊接电流的线性关系:

$$\frac{I_{2z} - I_{2min}}{I_{2max} - I_{2min}} = \frac{247 - 46}{400 - 46} = 0.567 \approx \frac{1}{2}$$

## 七、验算变压器技术经济指标

1. 变压器静铁心重量  $G_{Fe}^*$

经计算  $G_{Fe}^* = 62 \text{ (kg)}$

2. 动铁心重量  $G_{Fe}^*$

经计算  $G_{Fe}^* = 6 \text{ (kg)}$

3. 总铁重  $G_{Fe}$

$$G_{Fe} = G'_{Fe} + G''_{Fe} = 62 + 6 = 68 \text{ (kg)}$$

4. 验算空载电流  $I_0$

$$I_0 = \sqrt{I_C^2 + I_\mu^2} \text{ (A)}$$

$$I_C = \frac{P_{Fe}}{U_{1N}} \text{ (A)}$$

$$P_{Fe} = \Delta_{Fe} \cdot G_{Fe} = 2.75 \times 62 = 170 \text{ (W)}$$

( $\Delta_{Fe}$  为硅钢片比损耗, D42-0.5mm, 当  $B_m = 1.4 \text{ (T)}$ )

时, 查表 5-3:  $\Delta_{Fe} = 2.75 \text{ (W/kg)}$ )

$$I_C = \frac{P_{Fe}}{U_{1N}} = \frac{170}{380} = 0.45 \text{ (A)}$$

$$I_\mu = \frac{q_1 G_1 + q_2 G_2 + n_s q_3 S_{Fe}}{U_{1N}} \text{ (A)}$$

查表 5-3  $q_1 = q_2 = 26 \text{ (VA/kg)}$

$$G_1 = 36 \text{ (kg)}$$

$$G_2 = 26 \text{ (kg)}$$

$$q_3 = 4$$

$$q_3 = 2.46 \text{ (VA/cm}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} I_\mu &= \frac{q_1 G_1 + q_2 G_2 + n_s q_3 S_{Fe}}{U_{1N}} \\ &= \frac{26 \times 36 + 26 \times 26 + 4 \times 2.46 \times 84.5}{380} \\ &= 6.4 \text{ (A)} \end{aligned}$$

$$I_0 = \sqrt{I_C^2 + I_\mu^2} = \sqrt{0.45^2 + 6.4^2} = 6.4 \text{ (A)}$$

$$\frac{I_0}{I_{1N}} = \frac{6.4}{61.8} = 0.103 = 10.3\% \text{ 略大于 } 10\%$$

### 5. 绕组铜导线重量 $G_{Cu}$

经计算  $G_{Cu} = 33 \text{ (kg)}$

### 6. 计算变压器铜损 $P_{Cu}$

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} \quad (\text{W})$$

$$P_{Cu1} = I_{1N}^2 \left( m \rho_{Cu} \frac{l_1}{s_1} \right) \quad (\text{W})$$

$$P_{Cu2} = I_{2N}^2 \left( m \rho_{Cu} \frac{l_2}{s_2} \right) \quad (\text{W})$$

式中  $m$ ——趋表效应系数，当  $f = 50 \text{ Hz}$  时， $m = 1.5$ ，

$\rho_{Cu}$ ——铜的电阻率， $\rho_{Cu} = 0.02 \text{ (}\Omega \text{mm}^2/\text{m)}$ ，

$l_1$ 、 $l_2$ ——初、次级绕组长度，经计算

$$l_1 = 96.5 \text{ (m)} \quad l_2 = 19 \text{ (m)}$$

$s_1$ 、 $s_2$ ——初、次级绕组截面积，

$$s_1 = 20.5 \text{ (mm}^2) \quad s_2 = 90 \text{ (mm}^2)$$

$$\begin{aligned} P_{Cu1} &= I_{1N}^2 \left( m \rho_{Cu} \frac{l_1}{s_1} \right) \\ &= 61.8^2 \left( 1.5 \times 0.02 \times \frac{96.5}{20.5} \right) \\ &= 540 \quad (\text{W}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{Cu2} &= I_{2N}^2 \left( m \rho_{Cu} \frac{l_2}{s_2} \right) \\ &= 300^2 \times \left( 1.5 \times 0.02 \times \frac{19}{90} \right) \\ &= 570 \quad (\text{W}) \end{aligned}$$

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = 540 + 570 = 1110 \quad (\text{W})$$

### 7. 变压器效率 $\eta$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{9600}{9600 + 170 + 1110}$$

$$= 0.88 = 88\%$$

$$\eta = 88\% > 83.5\%$$

8. 变压器额定功率因数  $\cos\phi$

$$\cos\phi = \frac{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}{U_{1N} I_{1N}} = \frac{9600 + 170 + 1110}{380 \times 61.8}$$

$$= 0.47$$

9. 铁铜比

$$\frac{G_{Fe}}{G_{Cu}} = \frac{68}{33} = 2.06$$

## § 2-4 动圈式弧焊变压器设计

动圈式弧焊变压器也属于增强漏磁式，但它没有动铁心磁分路，而是依靠初、次级绕组间的空隙漏磁。为了获得一定数值的可调漏抗，初、次级绕组之间的距离要足够大且可调。因此，变压器铁心做得窄而高，而且绕组之一（一般为次级绕组）能沿铁心上下活动，以改变初、次级绕组间的距离，达到调节漏抗的目的。但铁心做得太高会使材料消耗大大增加，所以这类变压器采用初、次级绕组对应串、并联的办法粗调，而用改变初、次级绕组间距的办法细调漏抗。

这类变压器漏抗的准确计算相当困难。因为绕组几何形状的不对称性，使漏磁场在空间的分布也不均衡。将漏磁面积折合为一个简单的桶体，误差过大。因此，需要在平面图形上分段加以讨论（参见图2-20），并考虑各种修正系数。



有些参数的计算比较麻烦，常采用查图表曲线的办法代替。

下面介绍两种设计计算的方法。

### 一、根据生产需要决定变压器的原始数据

1. 电源电压  $U_1$  (V)
2. 次级额定空载电压  $U_0$  (V)
3. 次级额定工作电压  $U_{2N}$  (V)
4. 额定焊接电流  $I_{2N}$  (A)
5. 焊接电流调节范围  $I_1$  (A)
6. 相数  $m$
7. 电源频率  $f$  (Hz)
8. 额定负载持续率  $FS_N$  (%)
9. 效率  $\eta$  (%)
10. 功率因数  $\cos\phi$
11. 冷却方式
12. 使用地点

### 二、根据设计要求进行参数计算

1. 次级额定输出功率  $P_2$

$$P_2 = U_{2N} I_{2N} \times 10^{-3} \text{ (kW)}$$

2. 功率因数  $\cos\phi$

$$\begin{aligned} \cos\phi &= (0.9 \sim 0.95) \left( \frac{U_{2N} \lambda_1 + I_{2N} \gamma_B}{U_1} \right) \\ &= (0.9 \sim 0.95) \left( \frac{(U_{2N} \lambda_1 - 0.9 \Sigma P / I_{2N})}{U_1} \right) \end{aligned}$$

式中  $\Sigma P = \frac{P_2}{\eta} - P_2$  (kW) ;

$\lambda_1$ ——电弧的功率因数，近似为1。

3. 初级输入容量 (即初级视在功率)  $P_1$

$$P_1 = \frac{P_2}{\cos\phi \cdot \eta} \quad (\text{kVA})$$

4. 变压器的长时容量 (即计算容量)  $P_{BC}$

$$P_{BC} = P_1 \sqrt{FS_N} \quad (\text{kVA})$$

5. 初级额定长时电流  $I_{1C}$

$$I_{1C} = I_{1N} \sqrt{FS_N} \quad (\text{A})$$

式中  $I_{1N}$ ——初级额定电流,

$$I_{1N} = \frac{P_1}{U_1} \times 10^3 \quad (\text{A})$$

6. 次级额定长时电流  $I_{2C}$

$$I_{2C} = I_{2N} \sqrt{FS_N} \quad (\text{A})$$

### 三、初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 确定铁心结构形式, 选择铁心材料, 决定  $B_m$ .

2. 计算铁心净截面积  $S_{Fe}$ .

$$S_{Fe} = \frac{20 \sim 30}{B_m} \sqrt{P_{BC}} \quad (\text{cm}^2)$$

3. 确定铁心柱叠片宽度  $a$  及厚度  $b$

$$S_{Fe} = a \cdot b \quad (\text{cm}^2)$$

一般  $b = (1 \sim 2) a$

铁心毛厚度  $b'$  为  $b' = \frac{b}{K_c}$

式中  $K_c$ ——叠片系数, 可查表1-5.

### 四、初、次级绕组的初步计算

动圈式焊机采用绕组串、并联接法, 作电流粗调。

大电流档 (II档): 两铁心柱上的绕组分别并联。其

初、次级绕组的总匝数为 $N_1$ 和 $N_2$ ，而截面积分别为 $S_1$ 和 $S_2$ 。

小电流档（I档）：两铁心柱上的绕组分别串联。为了使小电流时容易引弧，此时空载电压应适当提高。为此，在初级绕组上加抽头，串联时，初级绕组的总匝数为 $2N_1 - 2\Delta N$ （每边有 $\Delta N$ 匝未接入），次级绕组的总匝数为 $2N_2$ ，截面积则分别为 $S_1/2$ 和 $S_2/2$ 。

1. 求每伏电压所需要的匝数 $N_0$ 。

$$N_0 = \frac{10^4}{4.44fB_m S_F} \quad (\text{匝/V})$$

2. 求初级及次级绕组的匝数 $N_1$ 及 $N_2$ 。

$$N_1 = N_0 U_1 \quad (\text{匝}) \quad (\text{在}\Delta N\text{处抽头})$$

$$N_2 = \frac{U_0 + \Delta U_0}{U_1} N_1 \quad (\text{匝})$$

式中  $\Delta U_0$ ——最大空载电压 $U_0 + \Delta U_0$ （此时初、次级绕组距离最近）比额定空载电压 $U_0$ （此时初、次级绕组间有一定距离）大 $\Delta U_0$ （V）。

3. 计算初、次级绕组导线截面积 $S_1$ 、 $S_2$ 。

$$\text{初级绕组} \quad S_1 = \frac{I_{1c}}{j_1} \quad (\text{mm}^2)$$

$$\text{次级绕组} \quad S_2 = \frac{I_{2c}}{j_2} \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $j_1$ 、 $j_2$ ——分别为初、次级绕组导线的许用电流密度（A/mm<sup>2</sup>）

4. 根据计算结果选线规

通常都按 $S_1/2$ 和 $S_2/2$ 的截面积选线规，在每个铁心柱上配置初级绕组 $N_1$ 匝，次级绕组 $N_2$ 匝。

### 五、进一步确定变压器和绕组尺寸

根据绕组形式、导线及绝缘隔块尺寸等，画出绕组与铁心的配置图，并标注各项尺寸，如图2-20所示。

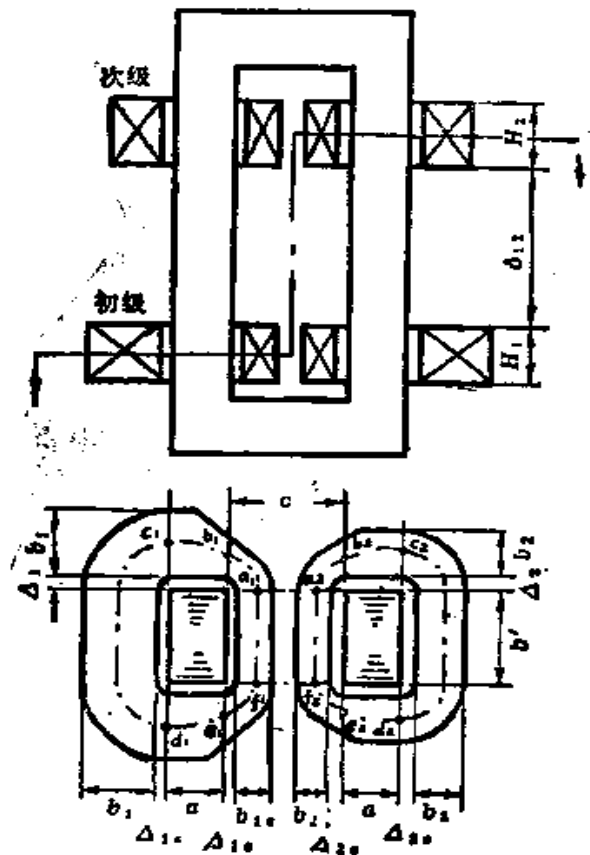


图2-20 绕组与铁心的配置图

### 六、核算焊接电流

#### 1. 漏抗的计算

每一铁心柱上的初级与次级绕组构成一磁平衡组，每一

磁平衡组折算到次级的漏抗  $X$  可按下式计算

$$X = 2\pi f \mu_0 N_2^2 a_p \left( \frac{l_I}{b_I} + \frac{l_{II}}{b_{II}} + \frac{l_{III}}{b_{III}} + \frac{l_{IV}}{b_{IV}} \right) (\Omega)$$

式中  $f$  —— 电源频率 (Hz);

$\mu_0$  —— 空气的磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$  (H/cm);

$N_2$  —— 每一磁平衡组中次级绕组的匝数;

$a_p$  —— 漏磁间隙折合宽度 (cm),

$$a_p = \delta_{12} + \frac{1}{3}(H_1 + H_2);$$

$\delta_{12}$  —— 初、次级绕组间轴向距离 (cm),

可取  $\delta_{12 \text{ min}} = 1 \sim 2 \text{ cm}$ ;

$H_1$ 、 $H_2$  —— 初级和次级绕组的轴向高度 (cm);

$l_I$ 、 $l_{II}$ 、 $l_{III}$ 、 $l_{IV}$  —— 考虑漏磁情况的不同, 将初、次级绕组的平均匝长分成四段 (cm),

$$l_I = \frac{1}{2}(a_1 f_1 + a_2 f_2) = b'$$

$$l_{II} = \frac{1}{2}(c_1 d_1 + c_2 d_2)$$

$$l_{III} = \frac{1}{2}(a_1 b_1 + e_1 f_1 + a_2 b_2 + e_2 f_2) \\ = a_1 b_1 + a_2 b_2$$

$$l_{IV} = \frac{1}{2}(b_1 c_1 + d_1 e_1 + b_2 c_2 + d_2 e_2) \approx 2a_2$$

$b_I$ 、 $b_{II}$ 、 $b_{III}$ 、 $b_{IV}$  —— 各段的漏磁磁路平均长度 (cm),

$$b_I = \frac{c}{2}$$

$$b_{\text{I}} = \frac{b_p}{\rho_n}$$

$$\text{式中 } b_p = \frac{1}{2}(b_1 + b_2)$$

$\rho_n$ ——横向漏磁系数。 $\rho_n$ 的计算比较复杂,可根据比值 $u$ 、 $V$ 查图2-21曲线。其中

$$u = \frac{b_p}{\lambda} \quad (\lambda = \delta_{12} + H_1 + H_2)$$

$$V = \frac{D}{\lambda} \quad \left[ D = \frac{1}{4}(\Delta_1 + \Delta_{1c} + \Delta_2 + \Delta_{2c}) \right]$$

$$b_{\text{I}} = 0.575C$$

$$b_{\text{II}} = K_{\text{F}} \frac{C}{2}$$

$K_{\text{F}}$ ——系数,可根据 $\rho_n$ 与 $a/(c/2)$ 查图2-22曲线。

焊机的漏抗随绕组接法(串联或并联)、绕组间距离( $\delta_{12}$ )的大小而异。下面分析四种极限情况:

(1) 大电流档(II档),初、次级绕组分别并联,当 $\delta_{12}$ 最小等于 $\delta_{12\text{min}}$ 时,焊机的漏抗(折算到次级)为

$$X_{\text{Bmin}}(\text{II}) = \frac{1}{2} X K_{\text{L}} \quad (\Omega)$$

式中  $K_{\text{L}}$ ——考虑铁质外壳对漏抗影响的系数,  $K_{\text{L}} \approx 1.04$ ;

$X$ ——每一磁平衡组折算到次级的漏抗。注意此时式

$$\text{中的 } a_p = a_{p\text{min}} = \delta_{12\text{min}} + \frac{1}{3}(H_1 + H_2)$$

可取 $\delta_{12\text{min}} = 1 \sim 2 \text{ cm}$ , 系数 $\lambda$ 、 $u$ 、 $V$ 、 $\rho_n$ 、 $b_{\text{I}}$ 、 $K_{\text{F}}$ 、 $b_{\text{II}}$ 等都是 $\delta_{12\text{min}}$ 对应的值。

(2) 大电流档(II档,并联接法),当 $\delta_{12}$ 最大等于

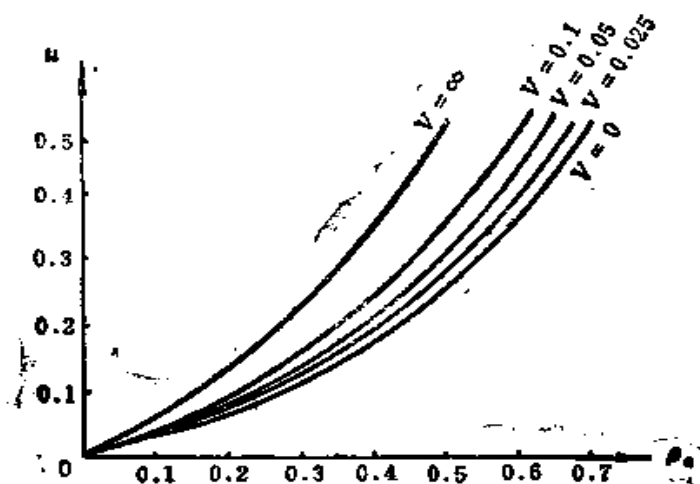


图2-21 横向漏磁系数计算曲线

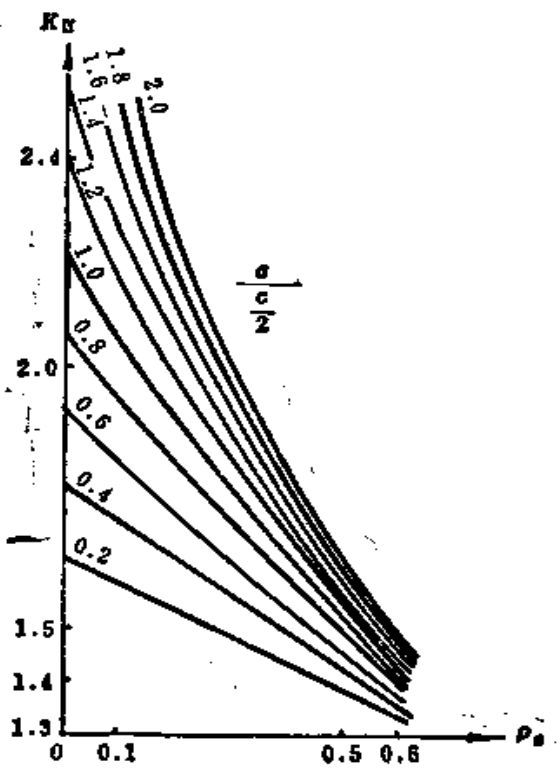


图2-22 系数 $K_T$ 与 $\rho$ 及 $a/(c/2)$ 的关系曲线

$\delta_{12\max}$ 时, 焊机的漏抗为

$$X_{B\max}(\text{II}) = \frac{1}{2} X K_K (\Omega)$$

式中  $X$ ——每一磁平衡组折算到次级的漏抗。此时式中的

$$a_p = a_{p\max} = \delta_{12\max} + \frac{1}{3} (H_1 + H_2)。系数 \lambda、u、$$

$V、\rho_n、b_I、K_F、b_F$ 等都是 $\delta_{12\max}$ 对应的值。 $a_{p\max}$ 可按下式初选

$$a_{p\max} = (3 \sim 5) a_{p\min}$$

(3) 小电流档 (I档, 串联接法), 当 $\delta_{12}$ 最小等于 $\delta_{12\min}$ 时, 焊机的漏抗为

$$X_{B\min}(\text{I}) = 2X K_K (\Omega)$$

由于在I档时, 初级绕组接入的总匝数为 $2N_1 - 2\Delta N$ , 每边有 $\Delta N$ 匝未接入, 因此 $H_1$ 的值将减小, 但为了讨论方便起见, 忽略其影响, 认为

$$X_{B\min}(\text{I}) = 4X_{B\min}(\text{II})$$

(4) 小电流档 (I档, 串联接法), 当 $\delta_{12}$ 最大等于 $\delta_{12\max}$ 时, 焊机的漏抗为

$$X_{B\max}(\text{I}) = 2X K_K (\Omega)$$

同样, 可以认为

$$X_{B\max}(\text{I}) = 4X_{B\max}(\text{II})$$

## 2. 焊接电流的计算

(1) 大电流档 (II档) 的最大电流

$$I_{\max}(\text{II}) = \frac{\sqrt{U_0^2 - (U_N + U_R)^2}}{X_{B\min}(\text{II})} \quad (\text{A})$$

式中  $U_0$ ——II档最大电流时的空载电压 (V)



$$U_0 = \frac{N_2}{N_1} U_1 k_{M \max}$$

$k_{M \max}$ ——最大耦合系数，取0.97，

$U_N$ ——II档最大电流时的工作电压（V），

$U_R$ ——焊机的内阻压降，可取下表数值。

|                  |     |     |     |
|------------------|-----|-----|-----|
| 焊机额定焊接电流 (A)     | 120 | 300 | 600 |
| 最大电流时，焊机内阻压降 (V) | 10  | 9   | 6   |

$I_{\max}(\text{II})$ 就是焊机的最大焊接电流， $I_{\max}(\text{II}) = I_{2 \max}$ ，按国家有关标准规定，应  $I_{2 \max} \geq 1.2 I_{2N0}$

若  $I_{2 \max}$  过小，应减少初、次级绕组的匝数；若  $I_{2 \max}$  过大，应增加初、次级绕组的匝数。

(2) 大电流档（II档）的最小电流

$$I_{\min}(\text{II}) = \frac{\sqrt{U_0^2 - (U_N + U'_R)^2}}{X_{B \max}(\text{II})} \text{ (A)}$$

式中  $U_0$ ——II档最小电流时的空载电压（V），

$$U_0 = \frac{N_2}{N_1} U_1 k_{M \min}$$

$k_{M \min}$ ——最小耦合系数，取0.92，

$U_N$ ——II档最小电流时的工作电压（V），

$U'_R$ ——最小电流时的电阻压降（V），可近似取

$$U'_R = \frac{U_R}{3.8}$$

### (3) 小电流档 (I 档) 的最大电流

$$I_{\max}(I) = \frac{\sqrt{U_0^2 - (U_N + U_R)^2}}{X_{B\min}(I)} \quad (A)$$

式中  $U_0$ ——I 档最大电流时的空载电压 (V) ;

$$U_0 = \frac{2N_2}{2N_1 - 2\Delta N} U_1 k_{M\max}$$

$U_N$ ——I 档最大电流时的工作电压 (V) ;

$U_R$ ——电阻压降, 同前, 应

$$I_{\max}(I) \geq I_{\min}(II)$$

这样, 焊机在整个电流调节范围内均可连续调节。

### (4) 小电流档 (I 档) 的最小电流

$$I_{\min}(I) = \frac{\sqrt{U_0^2 - (U_N + U_R)^2}}{X_{B\max}(I)} \quad (A)$$

式中  $U_0$ ——I 档最小电流时的空载电压 (V) ;

$$U_0 = \frac{2N_2}{2N_1 - 2\Delta N} U_1 k_{M\min}$$

$U_N$ ——I 档最小电流时的工作电压 (V) ;

$U_R$ ——电阻压降, 同前  $U_R' = U_R/3.8$

$I_{\min}(I)$  就是焊机的最小焊接电流,  $I_{\min}(I) = I_{2\min}$

按国家有关标准规定, 应  $I_{2\min} \leq 0.25 I_{2N0}$

若  $I_{2\min}$  过小, 应减小  $a_{p\max}$ ; 若  $I_{2\min}$  过大, 应加大  $a_{p\max}$ 。

## 七、铁心的最后计算

1. 根据选定的  $a_{p\max}$ , 决定窗口高度  $h$ , 窗口宽度  $c$  已在安排绕组时确定。

2. 计算铁心下料尺寸及片数

每台叠片数  $n = \frac{b}{\delta}$  (片)

式中  $b$  —— 铁心柱净厚度 (mm) ;  
 $\delta$  —— 硅钢片厚度 (mm) 。

### 八、验算变压器技术经济指标

1. 计算变压器铁心重量  $G_{Fe}$
2. 计算变压器铁损  $P_{Fe}$
3. 验算空载电流  $I_0$
4. 计算绕组铜导线重量  $G_{Cu}$  及电阻
5. 计算变压器铜损  $P_{Cu}$
6. 验算变压器效率  $\eta$
7. 计算变压器额定功率因数  $\cos\phi$

方法可参阅§2-2动铁分磁式弧焊变压器设计。

附：动圈式弧焊变压器漏抗的另一种计算方法

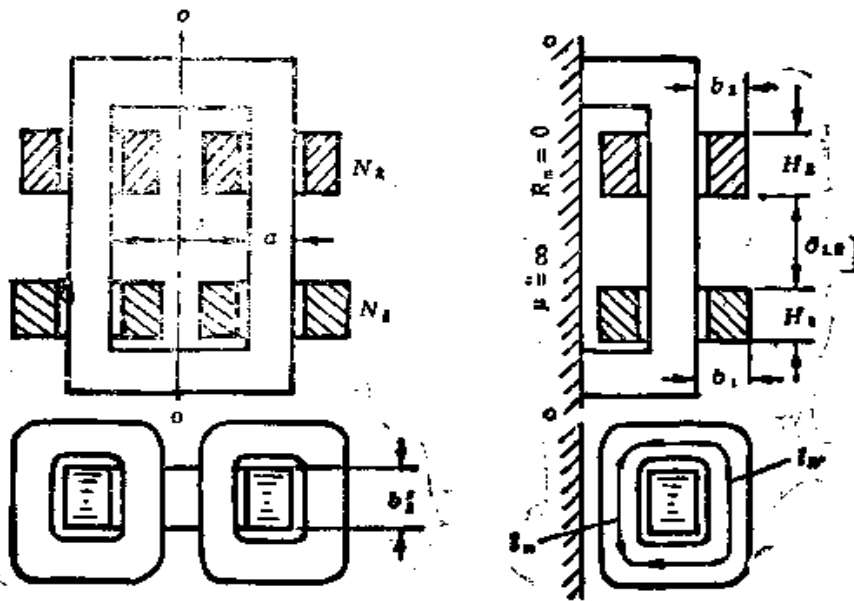


图2-23 动圈式弧焊变压器结构及计算简图

由于变压器磁路和绕组相对于“0—0”平面对称，在计算时，可计算其一半，而以无限大的铁磁物质代替其另一半（图2-23）。则半个变压器的短路漏抗 $X$ 为

$$X = X_0 + \omega \mu_0 N_2^2 g \delta_{12}$$

式中 $X_0$ 为初、次级绕组间距离 $\delta_{12}$ 最小时，半个变压器的短路漏抗。 $X_0$ 可用下述方法近似计算：

将绕组的平均匝长 $l_p$ 分为内圈长度 $l_w$ 和外圈长度 $l_m$ 两部分（图2-23），这两部分对应绕组的漏抗分别为 $X_{w0}$ 和 $X_{m0}$ ，则

$$X_0 = X_{w0} + X_{m0}$$

$$X_{m0} \approx \frac{2}{3} \omega \mu_0 N_2^2 g (H_1 + H_2)$$

$$X_{w0} \approx 4 \times 10^{-9} \times \omega N_2^2 l_w \ln \frac{g_{12}^{\frac{3}{2}}}{g_1 g_2}$$

上两式代入 $X_0$ 化简，即可得出半个变压器折算到次级的短路漏抗 $X$

$$X = f N_2^2 \left[ 15.8 g \left( \frac{H_1 + H_2}{3} + \delta_{12} \right) + 2.5 (l_p - gc) \ln \frac{g_{12}^{\frac{3}{2}}}{g_1 g_2} \right] \times 10^{-8} \text{ (}\Omega\text{)}$$

式中  $f$ ——电源频率 (Hz) ；

$N_2$ ——半个变压器中次级绕组的匝数；

$H_1$ 、 $H_2$ ——初、次级绕组的轴向高度 (cm) ；

$\delta_{12}$ ——初、次级绕组的轴向距离 (cm) ；

$l_p$ ——初、次级绕组的平均匝长 (cm) ；

$$\because l_m = gc \quad \therefore l_w = l_p - gc, \quad l_p = \frac{l_{1p} + l_{2p}}{2}$$

$c$ ——变压器铁心窗口宽度 (cm) ;

$g$ 、 $g_1$ 、 $g_2$ 、 $g_{12}$ ——磁导, 其计算的经验公式为:

$$g_1 = 0.223(2b_1 + H_1)$$

$$g_2 = 0.223(2b_2 + H_2)$$

$$g_{12} = 0.95H \quad (\text{当 } \frac{2b}{H} < 1 \text{ 时})$$

$$g_{12} = 2b(0.22 + 0.75\frac{H}{2b}) \quad (\text{当 } \frac{2b}{H} > 1 \text{ 时})$$

$$H = \frac{H_1 + H_2}{2}, \quad b = \frac{b_1 + b_2}{2} \quad (\text{见图2-23})$$

$$g = 0.828\frac{b'}{c} + 1.78\sqrt[4]{\frac{b'}{c}}$$

$b'$ ——铁心叠厚 (cm)

$g$  的数值也可从曲线图表得出, 这里从略。

整个变压器的短路漏抗  $X_B$  又取决于绕组的联接方式。

当初、次级绕组分别串联时 (I 档)

$$X_B = 2X$$

当初、次级绕组分别并联时 (II 档)

$$X_B = \frac{1}{2}X$$

## § 2-5 动圈式弧焊变压器设计举例

### 一、原始数据

1. 电源电压  $U_1 = 380 \text{ V}$

2. 次级额定空载电压  $U_0 = 62 \text{ V}$

3. 次级额定工作电压  $U_{2N} = 25\text{V}$
4. 额定焊接电流  $I_{1N} = 120\text{A}$
5. 焊接电流调节范围  $I_A = 25 \sim 160\text{A}$
6. 相数  $m = 1$
7. 电源频率  $f = 50\text{Hz}$
8. 额定负载持续率  $FS_N = 60\%$
9. 效率  $\eta = 83.5\%$
10. 功率因数  $\cos\phi = 0.46$
11. 自然冷却, 温带地区使用

## 二、参数计算

### 1. 次级额定输出功率 $P_2$

$$P_2 = U_{2N} I_{2N} \times 10^{-3}$$

$$= 25 \times 120 \times 10^{-3} = 3 \text{ (kW)}$$

### 2. 功率因数 $\cos\phi$

$$\Sigma P = \frac{3}{0.835} = 3.6 \text{ (kW)}$$

系数取0.95, 取  $\lambda_A = 1$

$$\cos\phi = 0.95 \times \left( \frac{25 \times 1 + 0.9 \times 0.6 \times 10^3 / 120}{62} \right)$$

$$= 0.452$$

### 3. 初级输入容量 $P_1$

$$P_1 = \frac{P_2}{\cos\phi \cdot \eta} = \frac{3}{0.452 \times 0.835} = 7.95 \text{ (kVA)}$$

### 4. 变压器的长时容量 $P_{sc}$

$$P_{sc} = P_1 \sqrt{FS_N} = 7.95 \sqrt{60\%} = 6.15 \text{ (kVA)}$$

### 5. 初级额定长时电流 $I_{1c}$

$$I_{1N} = \frac{P_1}{U_1} \times 10^3 = \frac{7.95}{380} \times 10^3 = 20.9 \text{ (A)}$$

$$I_{1c} = I_{1N} \sqrt{FS_N} = 20.9 \sqrt{60\%} = 16.2 \text{ (A)}$$

### 6. 次级额定长时电流 $I_{2c}$

$$I_{2c} = I_{2N} \sqrt{FS_N} = 120 \sqrt{60\%} = 93 \text{ (A)}$$

## 三、初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 单相内铁式, 采用D41-0.5硅钢片,  $B_m$ 取1.03T。
2. 铁心净截面积  $S_{Fe}$

$$S_{Fe} = \frac{20 \sim 30}{B_m} \sqrt{P_{BC}} = \frac{20}{1.03} \sqrt{6.15} = 48 \text{ (cm}^2\text{)}$$

### 3. 铁心柱叠片宽度 $a$ 及厚度 $b$

取  $a = 5.6 \text{ (cm)}$

$$\text{则 } b = \frac{S_{Fe}}{a} = \frac{48}{5.6} = 8.6 \text{ (cm)}$$

铁心毛厚度  $b'$  为

$$b' = \frac{b}{K_c} = \frac{8.6}{0.93} = 9.2 \text{ (cm)}$$

## 四、初、次级绕组的初步计算

1. 每伏电压所需要的匝数  $N_0$

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{10^4}{4.44fB_mS_{Fe}} = \frac{10^4}{4.44 \times 50 \times 1.03 \times 48} \\ &= 0.915 \text{ (匝/V)} \end{aligned}$$

2. 初级及次级绕组的匝数  $N_1$  及  $N_2$

$$N_1 = N_0 \cdot U_1 = 0.915 \times 380 = 348 \text{ (匝)}$$

(取  $\Delta N = 48$  (匝) 抽头)

$$N_1 = \frac{U_0 + \Delta U_0}{U_1} N_1 = \frac{62 + 2}{380} \times 348 = 58.5 \text{ (匝)}$$

取  $N_2 = 60$  (匝)

3. 初、次级绕组导线截面积  $S_1$ 、 $S_2$

$$S_1 = \frac{I_{1c}}{j_1} = \frac{16.2}{2.2} = 7.36 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$S_2 = \frac{I_{2c}}{j_2} = \frac{93}{2.5} = 37.2 \text{ (mm}^2\text{)}$$

4. 选线规

按  $S_1/2 = 3.68 \text{ (mm}^2\text{)}$  和  $S_2/2 = 18.6 \text{ (mm}^2\text{)}$  选线规。

初级用  $3.28 \times 1.16 = 3.60 \text{ (mm}^2\text{)}$  扁铜线;

次级用  $5.5 \times 3.53 = 18.9 \text{ (mm}^2\text{)}$  扁铜线。

### 五、进一步确定变压器和绕组尺寸

具体绕法及绝缘隔块等略。各项尺寸如下，单位均为 **cm**。

铁心:

$$a = 5.6$$

$$b' = 9.2$$

$$c = 10.0$$

间隙:

$$\Delta_1 = 1.0$$

$$\Delta_{1c} = 0.7$$

$$\Delta_2 = 1.4 \quad \Delta_{2c} = 1.0$$

绕组:

$$b_1 = 6.3$$

$$b_{1c} = 3.3$$

平均匝长:

$$a_1 b_1 = 4.1$$

$$a_2 b_2 = 3.9$$



|                        |                  |
|------------------------|------------------|
| $b_2 = 4.2$            | $b_1 c_1 = 5.9$  |
| $b_2 c = 2.8$          | $b_2 c_2 = 5.75$ |
| $H_1 = 7.8$            | $c_1 d_1 = 21.7$ |
| $H_2 = 7.5$            | $c_2 d_2 = 19.2$ |
| $\delta_{12=10} = 1.0$ |                  |

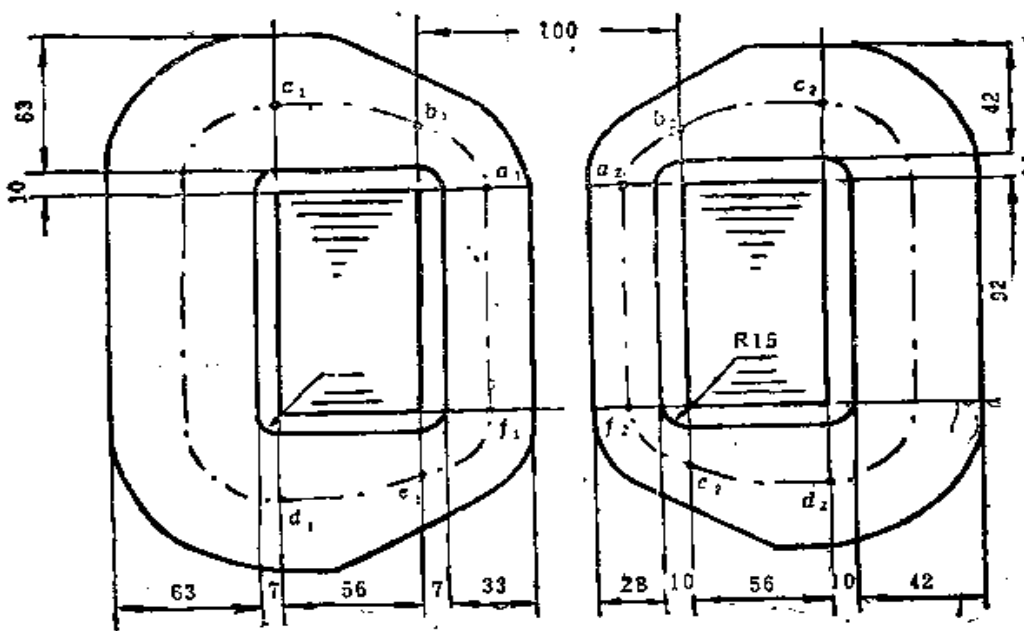


图2-24 铁心与绕组尺寸图

### 六、核算焊接电流

#### 1. 计算漏抗

(1) 大电流档 (II 档), 当  $\delta_{12} = \delta_{12=10}$  时

取  $\delta_{12=10} = 1$  (cm)

每一匝平衡绕组折算到次级的漏抗

$$X = 2\pi f \mu_1 N_2^2 a_{p=10} \left( \frac{l_1}{b_1} + \frac{l_I}{b_I} + \frac{l_{II}}{b_{II}} + \frac{l_{III}}{b_{III}} \right) (\Omega)$$

其中  $f = 50$  (Hz)

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9} \text{ (H/cm)}$$

$$\begin{aligned} a_{p_{m12}} &= \delta_{12m12} + \frac{1}{3} (H_1 + H_2) = 1 + \frac{1}{3} (7.8 + 7.5) \\ &= 6.1 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

$$N_s = 60 \text{ (匝)}$$

$$l_1 = 9.2 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} l_{\text{II}} &= \frac{1}{2} (c_1 d_1 + c_2 d_2) = \frac{1}{2} (21.7 + 19.2) \\ &= 20.45 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

$$l_{\text{II}} = a_1 b_1 + a_2 b_2 = 4.1 + 3.9 = 8 \text{ (cm)}$$

$$l_{\text{II}} = b_1 c_1 + b_2 c_2 = 5.9 + 5.75 = 11.65 \text{ (cm)}$$

$$b_1 = \frac{c}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} b_{\text{II}} &= \frac{b_f}{\rho_s} \quad b_f = \frac{1}{2} (b_1 + b_2) = \frac{1}{2} (6.3 + 4.2) \\ &= 5.25 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \delta_{12} + H_1 + H_2 = 1 + 7.8 + 7.5 \\ &= 16.3 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

$$u = \frac{b_f}{\lambda} = \frac{5.25}{16.3} = 0.322$$

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{1}{4} (\Delta_1 + \Delta_{1c} + \Delta_2 + \Delta_{2c}) \\ &= \frac{1}{4} (1 + 0.7 + 1.4 + 1) = 1.1 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

$$v = \frac{d}{\lambda} = \frac{1.1}{16.3} = 0.0675$$

查图2-21, 得  $\rho_n = 0.5$

$$\therefore b_I = \frac{b_p}{\rho_n} = \frac{5.25}{0.5} = 10.5 \text{ (cm)}$$

$$b_{II} = 0.575c = 0.575 \times 10 = 5.75 \text{ (cm)}$$

$$b_{II} = K_N \frac{c}{2} \quad \frac{a}{\left(\frac{c}{2}\right)} = \frac{5.6}{\left(\frac{10}{2}\right)} = 1.12$$

查图2-22, 得  $K_N = 1.54$

$$\therefore b_{II} = K_N \cdot \frac{c}{2} = 1.54 \times \frac{10}{2} = 7.7 \text{ (cm)}$$

焊机的漏抗为

$$\begin{aligned} X_{B\text{min}} (\text{II}) &= \frac{1}{2} K_K X \\ &= K_K \pi f \mu_c N_2^2 a_{p\text{min}} \left( \frac{l_I}{b_I} + \frac{l_{II}}{b_{II}} + \frac{l_{III}}{b_{III}} + \frac{l_{IV}}{b_{IV}} \right) \\ &= 1.04 \times 3.95 \times 50 \times 60^2 \times 6.1 \\ &\quad \times 10^{-9} \left( \frac{9.2}{5} + \frac{20.45}{10.5} + \frac{8}{5.75} + \frac{11.65}{7.7} \right) \\ &= 0.303 \text{ (}\Omega\text{)} \end{aligned}$$

(2) 大电流档 (II档), 当  $\delta_{12} = \delta_{12\text{max}}$  时

$a_{p\text{max}} = (3 \sim 5) a_{p\text{min}}$ , 系数取 4.35

则  $a_{p\text{max}} = 4.35 \times 6.1 = 26.6 \text{ (cm)}$

$$\begin{aligned}\delta_{12\max} &= \sigma_{p\max} - \frac{1}{3}(H_1 + H_2) \\ &= 26.6 - \frac{1}{3}(7.8 + 7.5) \\ &= 21.5 \text{ (cm)}\end{aligned}$$

此时  $\lambda = 21.5 + 7.8 + 7.5 = 36.8 \text{ (cm)}$

$$u = \frac{5.25}{36.8} = 0.143$$

$$v = \frac{1.1}{36.8} = 0.03$$

查图2-21 得  $\rho_u = 0.32$

查图2-22 得  $K_v = 1.78$

则  $b_I = \frac{5.25}{0.32} = 16.4 \text{ (cm)}$

$$b_{II} = 1.78 \times \frac{10}{2} = 8.9 \text{ (cm)}$$

其余参数同前，则焊机的漏抗为

$$\begin{aligned}X_{B\max}(\Omega) &= \frac{1}{2} K_K X \\ &= K_K \pi f \mu_0 N_1^2 \sigma_{p\max} \left( \frac{l_I}{b_I} + \frac{l_{II}}{b_{II}} + \frac{l_{III}}{b_{III}} + \frac{l_{IV}}{b_{IV}} \right) \\ &= 1.04 \times 3.95 \times 50 \times 60^2 \times 26.6 \\ &\quad \times 10^{-9} \left( \frac{9.2}{5} + \frac{20.45}{16.4} + \frac{8}{5.75} + \frac{11.65}{8.9} \right) \\ &= 1.14 \text{ (}\Omega\text{)}\end{aligned}$$

(3) 小电流档 (I 档)，当  $\delta_{12} = \delta_{12\max}$  时焊机的漏抗

七

$$\begin{aligned} X_{B_{min}}(I) &= 4X_{B_{min}}(II) \\ &= 4 \times 0.303 = 1.212 (\Omega) \end{aligned}$$

(4) 小电流档 (I 档) 当  $\delta_{12} = \delta_{12max}$  时焊机的漏抗为

$$\begin{aligned} X_{B_{max}}(I) &= 4X_{B_{max}}(II) \\ &= 4 \times 1.14 = 4.56 (\Omega) \end{aligned}$$

2. 计算焊接电流

$$I_2 = \frac{\sqrt{U_0^2 - (U_N + U_R)^2}}{X_B} \quad (A)$$

四种极情况的焊接电流列表如下

| 绕组距离<br>项目                      | 接法         |         | 大电流档 (II 档) |       |
|---------------------------------|------------|---------|-------------|-------|
|                                 | 小电流档 (I 档) |         | 最远          | 最近    |
|                                 | 最远         | 最近      | 最远          | 最近    |
| $\delta_{12}$ (cm)              | 21.5       | 1       | 21.5        | 1     |
| $N_1$ (匝)                       | 2 × 300    | 2 × 300 | 348         | 348   |
| $N_2$ (匝)                       | 2 × 60     | 2 × 60  | 60          | 60    |
| $U_0 = \frac{N_2}{N_1} U_1 k_M$ | 70         | 73.7    | 60.3        | 63.5  |
| $U_N = 20 + 0.04 I_2$           | 21         | 22      | 22          | 27    |
| $U_R$ (V)                       | 2.6        | 10      | 2.6         | 10    |
| $X_B$ (Ω)                       | 4.56       | 1.212   | 1.14        | 0.303 |
| 焊接电流 $I_2$ (A)                  | 14.4       | 54.7    | 48.2        | 170.5 |

由计算结果可知:

$$I_{2\min} = 14.4\text{A} < 0.25I_{2N} = 30\text{A}$$

$$I_{2\max} = 170.5\text{A} > 1.20I_{2N} = 144\text{A}$$

$$I_{\max}(\text{I}) = 54.7\text{A} > I_{\min}(\text{II}) = 48.2\text{A}$$

初步设计可用。

## 七、铁心的最后计算

### 1. 铁心尺寸

$$\text{片宽 } a = 56 \text{ (mm)}$$

$$\text{叠厚 } b' = 92 \text{ (mm)}$$

窗口尺寸

$$\text{窗宽 } c = 100 \text{ (mm)}$$

$$\begin{aligned} \text{窗高 } h &= \delta_{2\max} + H_1 + r_{r2} + \text{绝缘板厚} \\ &= 21.5 + 7.8 + 7.5 + 2 \\ &= 388 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

### 2. 铁心下料尺寸及片数

$$\text{每台叠片数 } n = \frac{b}{\delta} = \frac{86}{0.5} = 172 \text{ (片)}$$

$$A \text{ 片: } 56 \times 444 \text{ (mm)} \quad n_A = 2n = 344 \text{ (片)}$$

$$B \text{ 片: } 56 \times 156 \text{ (mm)} \quad n_B = 2n = 344 \text{ (片)}$$

## 八、验算变压器技术经济指标 (略)

## §2-6 抽头式弧焊变压器设计

### 及举例

抽头式弧焊变压器也是一种靠空气漏磁增强变压器漏抗的弧焊电源。它既没有动铁心,也没有在铁心上活动的绕

组，而是用改接绕组抽头的办法，使一部分不工作的绕组形成实际上的漏磁空间。具体的绕制方法是：将初级绕组分成两部分，一部分与次级绕组在同一铁心柱上，这部分初级绕组与次级绕组耦合比较紧密，称为“初级非漏磁绕组”( $N_{1I}$ )。另一部分初级绕组单独绕在另一铁心柱上，因为离次级绕组较远，耦合比较松散，漏磁也大，故称“初级漏磁绕组”( $N_{1L}$ )。两部分初级绕组都有一系列抽头，而次级绕组一般不抽头。(参看图2-26)。

根据次级空载电压及焊接电流的要求，计算出初、次绕组应有的总匝数 $N_1$ 及 $N_2$ 。在实际联接时，从漏磁绕组( $N_{1L}$ )与非漏磁绕组( $N_{1I}$ )中各取一部分，使这两部分匝数的串联总和等于 $N_1$ ，即 $N_1 = N'_{1I} + N'_{1L}$  (式中 $N'_{1I}$ 及 $N'_{1L}$ 表示实际接入的两种绕组匝数)。没有接入的初级绕组所占的空间就构成了漏磁空间。可以想见，改变 $N_1$ 中 $N'_{1I}$ 与 $N'_{1L}$ 的不同组合比例，变压器的漏抗数值将发生变化，从而达到调节焊接电流的目的。

这种变压器结构简单、紧凑，节省材料，没有活动部件，不会产生振动和噪音，适用于中小型弧焊电源。但电流不能连续调节，只能用改变抽头接法来分级转换。

### 一、设计的原始数据

1. 初级电压  $U_1 = 220$  (V)
2. 次级空载电压  $U_0 = 65$  (V)
3. 次级额定工作电压  $U_{1N} = 26$  (V)
4. 额定焊接电流  $I_{1N} = 140$  (A)
5. 焊接电流调节范围  $I_1 = 35 \sim 190$  (A)
6. 相数  $m = 1$
7. 电源频率  $f = 50$  (Hz)
8. 额定负载持续率  $FS_N = 10\%$

9. 冷却方式 自然冷却
10. 空载电流  $6\% I_{1N}$
11. 效率  $\eta = 0.80$
12. 预期获得的外特性曲线, 如图2-25所示。

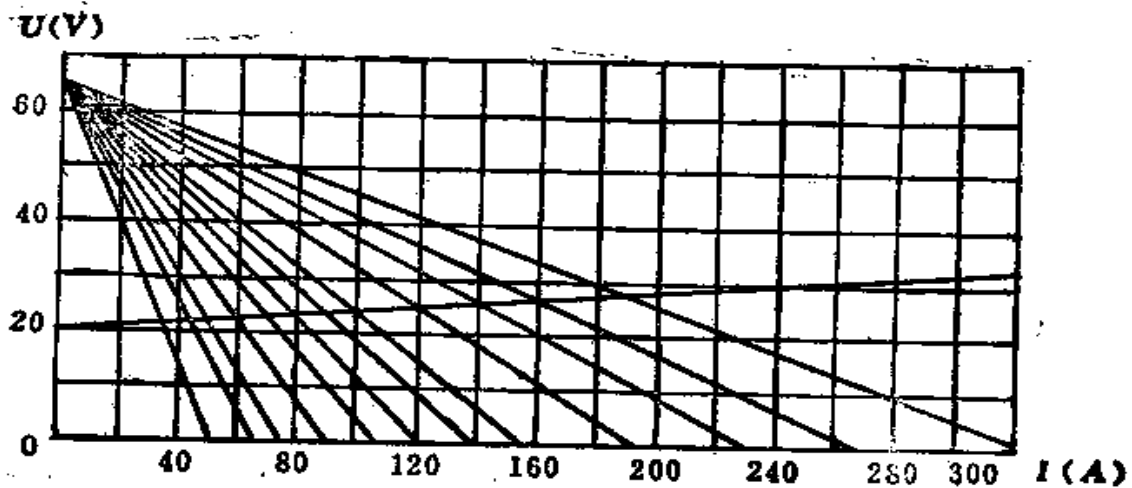


图2-25 预期获得的外特性曲线

共分12档, 各档电流分别为: 35A, 45A, 50A, 60A, 70A, 80A, 90A, 100A, 120A, 140A, 160A, 190A。

13. 绕组联接, 如图2-26所示。

## 二、参数计算

1. 次级额定输出功率  $P_2$

$$\begin{aligned}
 P_2 &= U_{2N} I_{2N} \times 10^{-3} \\
 &= 26 \times 140 \times 10^{-3} = 3.64 \text{ (kW)}
 \end{aligned}$$

2. 功率因数  $\cos \phi$



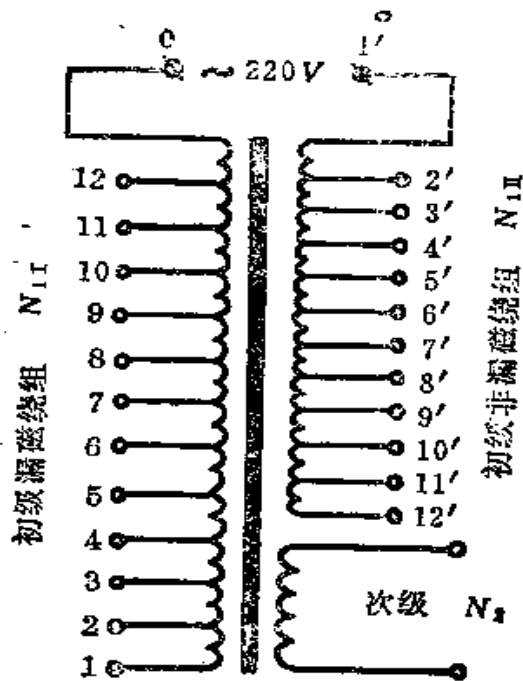


图2-26 绕组连接示意图

转换开关工作图

| 接点<br>闭合 | 档数 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|----------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
|          | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1-1'     | 0  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 2-2'     |    | 0 |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 3-3'     |    |   | 0 |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 4-4'     |    |   |   | 0 |   |   |   |   |   |    |    |    |
| 5-5'     |    |   |   |   | 0 |   |   |   |   |    |    |    |
| 6-6'     |    |   |   |   |   | 0 |   |   |   |    |    |    |
| 7-7'     |    |   |   |   |   |   | 0 |   |   |    |    |    |
| 8-8'     |    |   |   |   |   |   |   | 0 |   |    |    |    |
| 9-9'     |    |   |   |   |   |   |   |   | 0 |    |    |    |
| 10-10'   |    |   |   |   |   |   |   |   |   | 0  |    |    |
| 11-11'   |    |   |   |   |   |   |   |   |   |    | 0  |    |
| 12-12'   |    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | 0  |

$$\begin{aligned} \cos \phi &= 0.95 \times \left( \frac{U_{2N} \cdot \lambda_h + 0.9 \Sigma P / I_{2N}}{U_0} \right) \\ &= 0.95 \times \left( \frac{26 \times 1 + 0.9 \times 910 / 140}{65} \right) = 0.465 \end{aligned}$$

式中  $\lambda_h$ ——交流电弧功率因数,  $\lambda_h \approx 1$ ;

$$\Sigma P = \frac{P_2}{\eta} - P_2 = \frac{3.64}{0.8} - 3.64 = 0.91 \text{ (kW)} .$$

3. 初级输入容量 (视在功率)  $P_1$

$$P_1 = \frac{P_2}{\cos \phi \cdot \eta} = \frac{3.64}{0.80 \times 0.465} = 9.8 \text{ (kVA)}$$

4. 变压器的计算容量  $P_{BC}$

$$P_{BC} = P_1 \sqrt{FS_N} = 9.8 \sqrt{10\%} = 3.32 \text{ (kVA)}$$

5. 初级额定电流  $I_{1N}$

$$I_{1N} = \frac{P_1}{U_1} \times 10^3 = \frac{9.8}{220} \times 10^3 = 44.5 \text{ (A)}$$

6. 初级额定长时电流  $I_{1C}$

$$I_{1C} = I_{1N} \cdot \sqrt{FS_N} = 44.5 \sqrt{10\%} = 14.1 \text{ (A)}$$

7. 次级额定长时电流  $I_{2C}$

$$I_{2C} = I_{2N} \sqrt{FS_N} = 140 \sqrt{10\%} = 44.2 \text{ (A)}$$

### 三、决定变压器铁心主要尺寸

1. 确定铁心结构形式, 选择铁心材料

单相内铁式 材料用 D310-0.35 (mm)

取  $B_m = 1.3 \text{ (T)}$

2. 初步计算铁心截面积  $S_F$ .

$$S_{F_s} = \frac{1}{4.44fB_m 10^{-4}} \times \sqrt{\frac{7.9P_{BC}\beta\alpha_p K_R}{10U_p}} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $f$ ——电源频率， $f = 50$  (Hz)；

$B_m$ ——磁密， $B_m = 1.3$  (T)；

$P_{BC}$ ——变压器计算容量， $P_{BC} = 3.23$  (kVA)；

$\beta$ ——变压器宽度与高度之比，一般为1.3~2.5，取  
 $\beta = 1.3$ ；

$\alpha_p$ ——漏磁间隙折合长度， $\alpha_p = \delta_{12} + \frac{H_1 + H_2}{3}$ ，

初选 $\alpha_p = 10$  (cm)；

$K_R$ ——绕组的长宽比，在0.8~1.8之间，取 $K_R =$   
0.95；

$U_p$ ——漏抗电压降所占的比率，焊机在短路状态时  
 $U_p = 100\%$ ，焊接状态时也暂取 $U_p = 100\%$ 。

$$S_{F_s} = \frac{1}{4.44 \times 50 \times 1.3 \times 10^{-4}} \sqrt{\frac{7.9 \times 3.23 \times 1.3 \times 10 \times 0.95}{10 \times 100\%}}$$

$$= 21.5 \quad (\text{cm}^2)$$

则初级绕组匝数 $N_1$ 为

$$N_1 = \frac{U_1 \times 10^4}{4.44fB_m S_{F_s}} = \frac{220 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 21.5 \times 1.3}$$

$$= 360 \quad (\text{匝})$$

### 3. 确定最大漏磁匝数，复算铁心截面

最大漏磁匝数 $N_{11}$ 可按下列式计算

$$N_{11} = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_N^2}}{K_1 K_2 \frac{X_B}{N_{11}} I_2} \quad (\text{匝})$$

式中  $U_0$ ——次级空载电压 (V)

$U_N$ ——次级工作电压 (V) ;

$K_1$ 、 $K_2$ ——修正系数, 根据空载电流  $I_0$  和漏磁间隙折合长度  $a_p$ , 查图2-29和图2-30实验曲线得出;

$\frac{X_B}{N_{1I}}$ ——每匝漏抗 ( $\Omega$ ), 查图2-28实验曲线得出;

$I_2$ ——次级电流 (A)。

最小焊接电流对应最大漏磁匝数, 此时:

$$U_0 = 65 \text{ V} \quad U_N = 22 \text{ V}$$

因为  $I_0 = 6\% I_{1N}$  查图2-29得  $K_1 = 1$

初选  $a_p = 10 \text{ cm}$  查图2-30得  $K_2 = 0.6$

因为  $I_{2\text{min}} = 35 \text{ A}$  查图2-28得  $\frac{X_B}{N_{1I}} = 0.005 \text{ } (\Omega)$

将以上数值代入公式, 得最大漏磁匝数

$$N_{1I} = 580 \text{ (匝)}$$

取  $N_1 = N_{1I} = 580 \text{ (匝)}$ 。如计算的初级绕组匝数  $N_1$  大于最大漏磁匝数  $N_{1I}$ , 则依  $N_1$  进行调整, 反之, 则依  $N_{1I}$  进行调整。

复算铁心截面积  $S_{Fe}$

$$S_{Fe} = \frac{U_1 \times 10^4}{4.44 f N_1 B_m} = \frac{220 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 580 \times 1.3} \\ = 13.2 \text{ (cm}^2\text{)}$$

取  $S_{Fe} = 15 \text{ (cm}^2\text{)}$

4. 确定铁心柱叠片宽度  $a$  及厚度  $b$  (矩形截面)

取  $a = 3 \text{ (cm)}$

则  $b = 5 \text{ (cm)}$

$$b' = \frac{b}{K_c} = \frac{5}{0.91} = 5.5 \text{ (cm)}$$

#### 四、绕组计算

1. 计算初级绕组各档实际接入的漏磁匝数  $N'_{1I}$  与非漏磁匝数  $N''_{1I}$

初级绕组匝数  $N_1 = 580$  (匝)。 $N'_{1I} + N''_{1I} = N_1$

每档  $N'_{1I}$  及  $N''_{1I}$  的计算方法同前，现将结果列于下表。

| 项目<br>数值<br>档数 | 次级电流<br>$I_2$ (A) | 次级工作<br>电 压<br>$U_2$ (V) | 实际接入的初<br>级漏磁匝数<br>$N'_{1I}$ | 实际接入的初<br>级非漏磁匝数<br>$N''_{1I}$ |
|----------------|-------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1              | 35                | 22                       | 580                          | 0                              |
| 2              | 45                | 22                       | 502                          | 78                             |
| 3              | 50                | 22                       | 478                          | 102                            |
| 4              | 60                | 23                       | 438                          | 144                            |
| 5              | 70                | 23                       | 398                          | 182                            |
| 6              | 80                | 24                       | 370                          | 210                            |
| 7              | 90                | 24                       | 350                          | 230                            |
| 8              | 100               | 24                       | 324                          | 256                            |
| 9              | 120               | 25                       | 298                          | 282                            |
| 10             | 140               | 26                       | 272                          | 308                            |
| 11             | 160               | 27                       | 250                          | 330                            |
| 12             | 190               | 28                       | 220                          | 350                            |

2. 次级绕组匝数  $N_2$

$$N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 580 \times \frac{65}{220} = 172 \text{ (匝)}$$

3. 绕组布置:

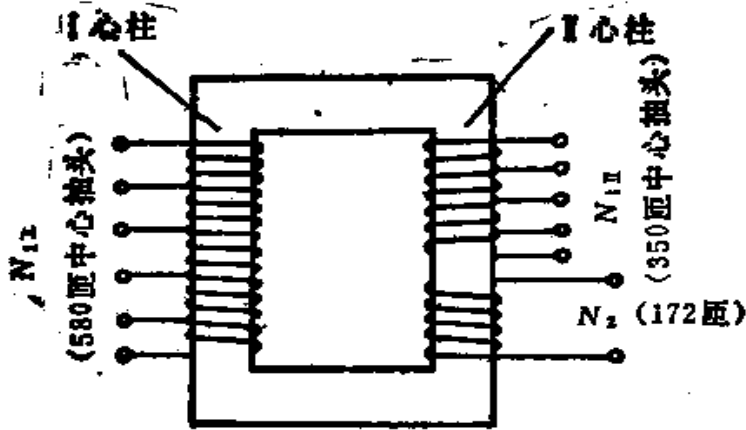


图2-27 绕组布置

其他如绕组导线截面选择、尺寸、磁路系统最后计算及各项指标的验算等均与前同，不再重述。

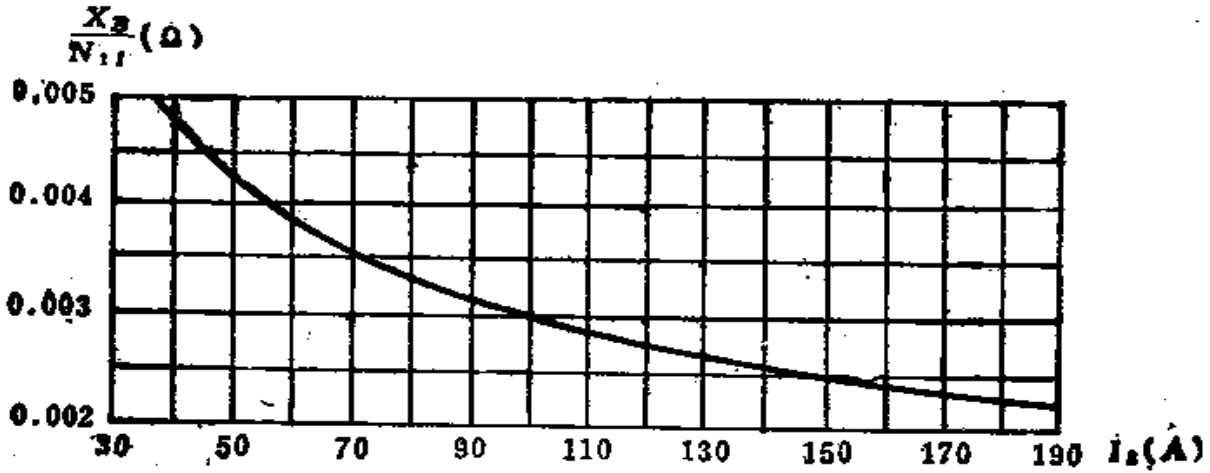


图2-28 每匝漏抗曲线

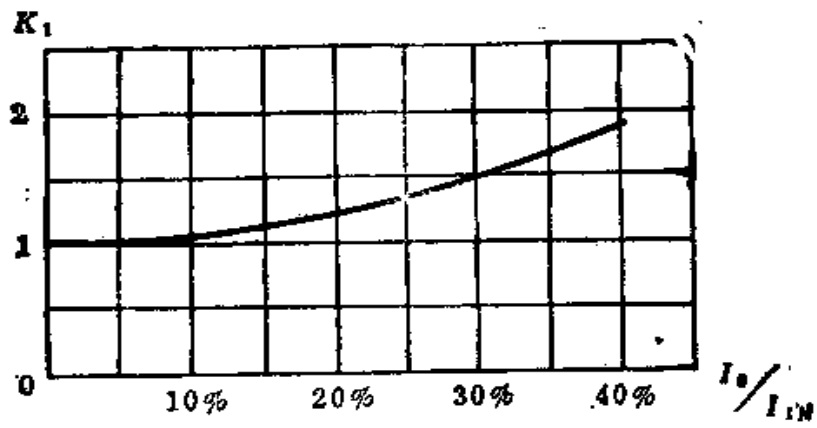


图2-29 空载电流对每匝漏抗的影响

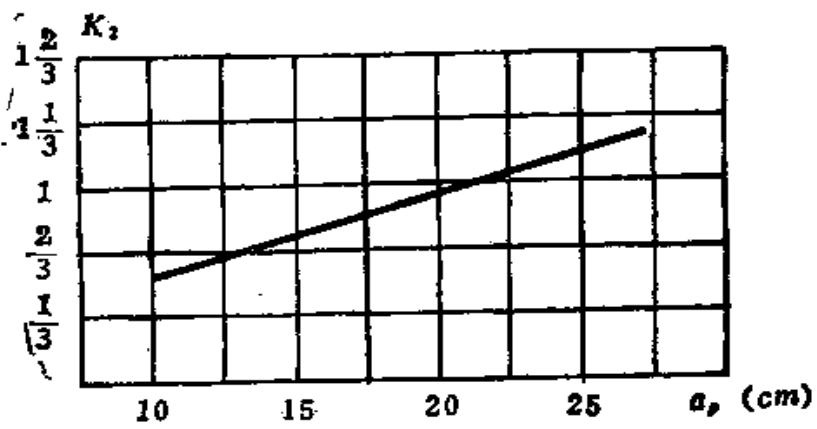


图2-30 漏磁间隙对每匝漏抗的影响

## § 2-7 便携式弧焊变压器设计及举例

便携式弧焊机主要用于工作量不大或经常流动的维修作业中。这类焊机的主要特点是：体积小，重量轻，移动方便，对网路的负荷比较小。

为了适应这些特点，这类焊机通常是：

- (1) 空载电压较低，约为45~55 V；
- (2) 输出电流不大，一般不超过250 A；
- (3) 负载持续率低，常为20%左右；
- (4) 选用优质材料和较高的绝缘等级；
- (5) 为了防止过载损坏，焊机往往装有自动过载断路装置。

便携式弧焊机最常见的型式有抽头式和动铁分磁式两类。

抽头式焊机如上节所述。其特点是结构相对简单，没有机械调节机构，因此也就没有磨损和由此引起的振动问题。但焊接电流的调节是分级的、不连续的，线圈抽头多，绕制比较麻烦。

动铁分磁式焊机在结构上与前面所述的略有不同。为了制造的方便和结构的紧凑，铁心常采用壳型(日字形)，初、次级绕组分别绕在两个线圈架上，易于组装。动铁心分上下两部分，由同一机构进行调节，如图2-31所示。

这类焊机的设计与§2-2节所述大同小异，区别仅在于：因为动铁心分成上下两部分，所以每一部分的截面只是



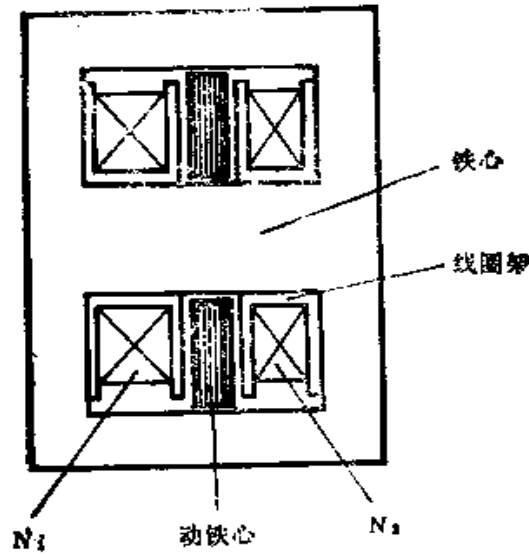


图2-31 便携式动铁分磁弧焊变压器示意图

动铁心截面的二分之一。

下面结合具体例子来简单介绍设计步骤。

### 一、原始数据

1. 初级电压  $U_1 = 380$  (V)
2. 次级空载电压  $U_0 = 48$  (V)
3. 额定焊接电流  $I_{2N} = 160$  (A)
4. 额定负载持续率  $FS_N = 20\%$

### 二、参数计算

1. 次级额定输出功率  $P_2$

$$P_2 = U_{2N} I_{2N} = 27 \times 160 \times 10^{-3} = 4.32 \text{ (kW)}$$

(式中,  $U_{2N}$  按  $20 + 0.04I_2$  (V) 算出)

2. 初级输入容量  $P_1$

$$P_1 = \frac{P_2}{\cos\varphi \cdot \eta} = \frac{4.32}{0.5 \times 0.835} = 10.35 \text{ (kVA)}$$

(式中,  $\cos\varphi$  及  $\eta$  都按标准值替代)

3. 变压器的长时容量  $P_{BC}$

$$P_{BC} = P_1 \sqrt{FS_N} = 10.35 \times \sqrt{20\%} = 4.63 \text{ (kVA)}$$

4. 初级额定电流  $I_{1N}$

$$I_{1N} = \frac{P_1}{U_1} = \frac{10.35}{380} = 27.24 \text{ (A)}$$

5. 初级额定长时电流  $I_{1C}$

$$I_{1C} = I_{1N} \sqrt{FS_N} = 27.24 \times \sqrt{20\%} = 12.18 \text{ (A)}$$

6. 次级额定长时电流  $I_{2C}$

$$I_{2C} = I_{2N} \sqrt{FS_N} = 160 \times \sqrt{20\%} = 71.55 \text{ (A)}$$

三、初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 结构选用单相壳型, 铁心包围绕组。铁心材料选用 D310 冷轧硅钢片,  $B_m$  取 1.6T。

2. 铁心截面积  $S_{Fe}$

$$\begin{aligned} S_{Fe} &= \frac{20 \sim 30}{B_m} \sqrt{P_{BC}} \\ &= \frac{30}{1.6} \sqrt{4.63} = 40 \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

3. 确定片宽及叠厚

取片宽  $a = 4\text{cm}$  (中间铁心柱)

$$\text{叠厚 } b: \frac{S_{Fe}}{a} = \frac{40}{4} = 10 \text{ (cm)}$$

$$\text{毛叠厚 } b' = \frac{b}{k_c} = \frac{10}{0.93} \approx 11 \text{ (cm)}$$

4. 活动铁心净截面积  $S_e$

$$S_d = (0.8 \sim 0.9) S_{Fe}$$

取  $S_d = 35 \text{ (cm}^2\text{)}$

已知  $a_d = b' = 11 \text{ (cm)}$

所以  $b_d = \frac{S_d}{a_d} = 3.18 \text{ (cm)}$

毛叠厚  $b'_d = \frac{b_d}{k_d} = 3.53 \text{ (cm)}$

动铁心上下分置各二分之一,  $\frac{b'_d}{2} = 17.6 \text{ (mm)}$

#### 四、计算初、次级绕组

1. 每伏匝数  $N_0$

$$N_0 = \frac{45}{B_m S_{Fe}} = \frac{45}{1.8 \times 40} = 0.7 \text{ 匝/V}$$

2. 初级绕组匝数  $N_1$

$$N_1 = N_0 U_1 = 0.7 \times 380 = 266 \text{ (匝)}$$

3. 次级绕组匝数  $N_2$

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{U_2}{U_1} N_1 \\ &= \frac{48}{380} \times 266 = 33.6 \text{ (匝)} \end{aligned}$$

取  $N_2 = 35 \text{ (匝)}$

4. 计算绕组导线截面积

根据计算出的长时电流, 考虑冷却情况及绝缘等级, 先选定许用电流密度, 再计算绕组导线截面积, 最后查线规, 确定所用导线的截面积 (连绝缘) 尺寸, 具体计算从略。

#### 五、进一步确定变压器尺寸

1. 根据绕组尺寸、静铁心截面积、动铁心尺寸等, 确定

的变压器总体尺寸如图2-32所示。

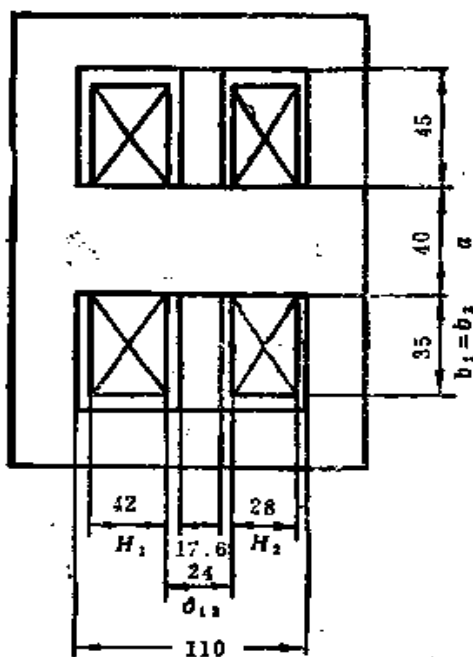


图2-32 变压器总体尺寸

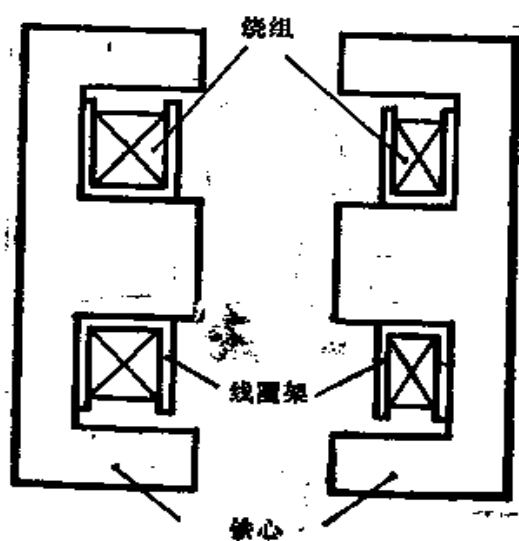


图2-33 铁心冲片形状及绕组安置

## 2. 计算铁心下料尺寸及片数

因为这类变压器尺寸小，铁心一般不采用条料叠片形式，而采用山字形冲片（图 2-33），由左右两半直接拼装而成。已经绕制在线圈架上的初、次级绕组，可预先套在每一半铁心上。这样，大大简化了装配工艺，减小了损耗。

## 六、核算焊接电流

### 1. 计算焊机最小漏抗 $X_{min}$

$$X_{min} = K_1 K_R 2\pi f \mu_0 \frac{l_{2p} N_1^2}{b_2} \left( \delta_{12} + \frac{H_1 + H_2}{3} \right) (\Omega)$$

由图 2-32 可知：

$$H_1 = 4.2 \text{ (cm)} \quad H_2 = 2.8 \text{ (cm)}$$

$$b_1 = b_2 = 3.5 \text{ (cm)} \quad N_1 = 35 \text{ (匝)}$$

$$l_{2p} = 39 \text{ (cm)}, \quad \text{取 } K_1 = 2$$

$$\text{经计算 } \sigma = \frac{\delta_{12} + H_1 + H_2}{\pi b_2} = \frac{2.4 + 4.2 + 2.8}{\pi \times 3.5} = 0.855$$

$$K_R = 1 - \sigma + 0.35\sigma^2 \\ = 1 - 0.855 + 0.35 \times 0.855^2 = 0.4$$

$$X_{min} = 2 \times 0.4 \times 395 \times 10^{-3} \frac{39 \times 35^2}{3.5} \left( 2.4 + \frac{4.2 + 2.8}{3} \right) \\ = 0.204 \text{ (}\Omega\text{)}$$

### 2. 计算最大焊接电流 $I_{1max}$

$$I_{1max} = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_k^2}}{X_{min}} = \frac{\sqrt{48^2 - 27^2}}{0.204} \\ = 195 \text{ (A)}$$

### 3. 计算焊机最大漏抗 $X_{max}$

$$X_{max} = X'_{max} + X_{min}$$

$$\text{其中 } X'_{max} = \frac{2\pi f \mu_0 S_2 N_2^2}{\delta_0} = \frac{395 \times 10^{-3} \times 35 \times 35^2}{0.1} \\ = 1.69 \text{ (}\Omega\text{)}$$

(动铁心上下气隙之和 $\delta_0$ 取0.1cm)

$$X_{max} = 1.69 + 0.204 = 1.894 (\Omega)$$

4. 计算最小焊接电流 $I_{2min}$

$$\begin{aligned} I_{2min} &= \frac{\sqrt{U_0^2 - U_A^2}}{X_{max}} = \frac{\sqrt{48^2 - 27^2}}{1.894} \\ &= 21 (\text{A}) \end{aligned}$$

说明:

1. 这类焊机因为结构尺寸小,按现行假设而计算出来的漏抗,误差较大。往往需要做样机实测加以修正。

2. 如电流数值偏小,或希望能在短时提供较大的焊接电流时,也可采用初、次级绕组交互配置的半开方式。

## § 2-8 交流电抗器设计

交流电抗器是分体式弧焊电源的组成部分,它是变压器的外接电抗。平特性变压器串接交流电抗器后,使外特性下降,才能满足电弧焊的要求。

交流电抗器实际上是一个开有可调气隙的铁心线圈,线圈的两端串接在焊接回路内,铁心开有气隙,一方面是为调节电抗器的电感值(从而调节焊接电流);另一方面是为了使电抗器铁心在大电流时不致于饱和。它们的具体关系是:

气隙减小,电感值增大,电抗值增大,焊接电流减小;

气隙增大,电感值减小,电抗值减小,焊接电流增大。

从弧焊变压器的外特性方程 $I_2 = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_A^2}}{X}$ 中也可以看

出这一点。式中, $I_2$ 为焊接电流, $U_0$ 为变压器次级空载电压,

$U_a$ 为电弧电压， $X$ 为电抗器电抗值。

交流电抗器的设计原则是：根据电抗器上的电压（电感压降）和电流，来确定电抗绕组的匝数和铁心尺寸，然后根据电流调节范围来计算气隙的大小。

交流电抗器的具体设计步骤如下：

### 一、设计所需的原始数据

1. 变压器次级空载电压  $U_0$  (V)
2. 额定工作电压  $U_{2N}$  (V)
3. 额定焊接电流  $I_{2N}$  (A)
4. 电流调节范围  $I_a$  (A)
5. 额定负载持续率  $FS_N$  (%)
6. 电抗器铁心材料

### 二、参数计算

1. 额定电感压降  $U_L$

$$U_L = \sqrt{U_0^2 - U_{2N}^2} \quad (\text{V})$$

2. 额定电感功率  $P_L$

$$P_L = U_L I_{2N} \quad (\text{VA})$$

3. 长时电感功率  $P_{LC}$

$$P_{LC} = P_L \sqrt{FS_N} \quad (\text{VA})$$

4. 电抗器铁心截面积  $S_L$

$$S_L = (0.7 \sim 0.8) \sqrt{P_{LC}} \quad (\text{cm}^2)$$

5. 电抗器绕组匝数  $N_L$

$$N_L = \frac{U_L \times 10^4}{4.44 f B_m S_L} \quad (\text{匝})$$

式中  $f$  —— 交流电频率 (Hz)；

$B_m$  —— 最大磁密 (T)。

### 三、初步确定电抗器铁心尺寸

1. 电抗器铁心型式一般为□形
2. 确定片宽  $a$ ，叠厚  $b$   
先选定片宽  $a$  (cm)

$$\text{则叠厚 } b = \frac{S_L}{a} \text{ (cm)}$$

$$\text{毛叠厚 } b' = \frac{b}{k_c} \text{ (cm)}$$

式中  $k_c$  为叠片系数。

3. 计算电抗器绕组截面积  $S_s$ 。

$$S_s = \frac{I_{2N} \sqrt{FS_N}}{j} \text{ (mm}^2\text{)}$$

式中  $j$  为许用电流密度 (A/mm<sup>2</sup>)。

根据  $S_s$  选线规 (见第五章表 5-7)

4. 计算铁心窗口尺寸  $Q$

$$Q = \frac{N_L S_s}{m} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$= \frac{N_L S_s}{100m} \text{ (cm}^2\text{)}$$

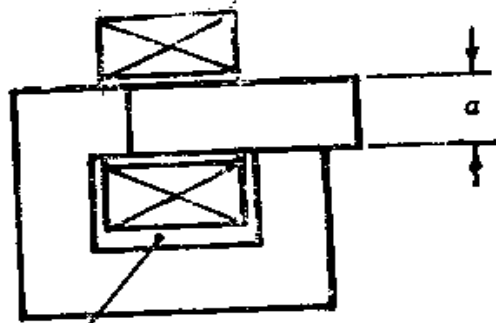
式中  $m$  为填充系数,  $m = 0.3 \sim 0.4$ 。

5. 画出电抗器草图, 计算磁路平均长度  $l$ 。如图2-34所示。

### 四、校核焊接电流

动铁心在最里 ( $\delta_{\min}$ ) 和最外 ( $\delta_{\max}$ ) 位置时, 应能满足最小焊接电流 ( $I_{\min}$ ) 和最大焊接电流 ( $I_{\max}$ ) 的要求。





窗口面积  $Q$

图2-34 电抗器尺寸草图

1. 计算最小焊接电流

$$I_{min} = \frac{H_m l_c + 8000 B_m \delta_{min}}{\sqrt{2} N_L} \quad (\text{A})$$

式中  $H_m$ ——磁场强度幅值  $\text{At/cm}$ ，由材料磁化曲线根据  $B_m$  查得；

$l_c$ ——磁路平均长度 (cm)；

$B_m$ ——最大磁密 (T)；

$\delta_{min}$ ——最小气隙 (cm)。由于电抗器有两个铁心活动面，故最小气隙一般不应小于  $2 \times 0.7 \text{ mm}$ ，即不小于  $0.14 \text{ (mm)}$ ；

$N_L$ ——电抗绕组匝数。

如计算出的  $I_{min}$  仍过大，可重新调整  $N_L$  与  $S_L$  的数值，即增加  $N_L$ ，相应减小  $S_L$ ，直至合适为止。

2. 估算在  $I_{max}$  时的气隙  $\delta_{max}$

$$\delta_{max} = \frac{\sqrt{2} I_{max} N_L - H_m l_c}{8000 B_m} \quad (\text{cm})$$

实际上，由于磁通杂散的影响，计算出的  $\delta_{max}$  往往偏小，可适当放大之。

### 五、铁心下料及绕组安置 (略)

## § 2-9 交流电抗器设计举例

### 一、设计所需的原始数据

1. 变压器次级空载电压  $U_0 = 70$  (V)
2. 额定工作电压  $U_{2N} = 32$  (V)
3. 额定焊接电流  $I_{2N} = 300$  (A)
4. 电流调节范围  $I_L = 75 \sim 360$  (A)
5. 额定负载持续率  $FS_N = 60\%$
6. 电抗器铁心材料 D42-0.5

### 二、参数计算

1. 额定电感压降  $U_L$

$$U_L = \sqrt{U_0^2 - U_{2N}^2} = \sqrt{70^2 - 32^2} = 62 \text{ (V)}$$

2. 额定电感功率  $P_L$

$$P_L = U_L I_{2N} = 62 \times 300 = 18600 \text{ (VA)}$$

3. 长时电感功率  $P_{LC}$

$$P_{LC} = P_L \sqrt{FS_N} = 18600 \times \sqrt{60\%} = 14407 \text{ (VA)}$$

4. 电抗器铁心截面积  $S_L$

$$\begin{aligned} S_L &= (0.7 \sim 0.8) \sqrt{P_{LC}} \\ &= 0.7 \times \sqrt{14407} = 84 \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

取  $S_L = 80$  (cm<sup>2</sup>)

5. 计算电抗器绕组匝数  $N_L$

$$N_L = \frac{U_L \times 10^4}{4.44 f B_m S_L}$$

$$= \frac{62 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.4 \times 80} = 25 \text{ (匝)}$$

(材料为D42-0.5硅钢片,  $B_m$ 取1.4T)

### 三、初步确定电抗器铁心尺寸

1. 电抗器铁心采用口形

2. 确定片宽  $a$ , 叠厚  $b$

取  $a = 8 \text{ (cm)}$

则  $b = S_L / a = 80 / 8 = 10 \text{ (cm)}$

毛叠重  $b' = b / k_c = 10 / 0.93 = 10.8 \text{ (cm)}$

3. 计算电抗器绕组截面  $S_s$

$$S_s = \frac{I_{LN} \sqrt{FS_N}}{j} = \frac{300 \times \sqrt{60\%}}{3.5}$$

$$= 66.3 \text{ (mm}^2\text{)}$$

查表 5-7, 选相应的线规。

4. 计算铁心窗口尺寸  $Q$

$$Q = \frac{N_L S_s}{100m} = \frac{25 \times 66.3}{100 \times 0.35}$$

$$= 47.4 \text{ (cm}^2\text{)}$$

( $m$ 为填充系数, 取  $m = 0.35$ )

5. 画电抗器草图, 计算磁路平均长度  $l$ 。

电抗器草图如图 2-35所示。

从草图上算得:  $l_s = 60 \text{ cm}$

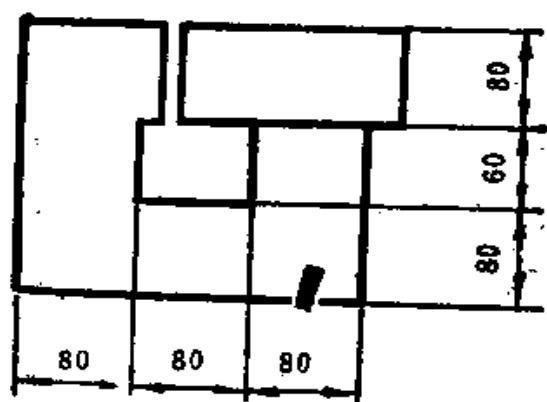


图2-35 电抗器草图

#### 四、校核焊接电流

##### 1. 计算最小焊接电流

$$\begin{aligned}
 I_{\min} &= \frac{H_m l_m + 8000 B_m \delta_{\min}}{\sqrt{2} N_L} \\
 &= \frac{20 \times 60 + 8000 \times 1.4 \times 0.14}{\sqrt{2} \times 25} = 78 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

基本符合设计要求。 $H_m$ 的值可由D42硅钢片的磁化曲线查得。

##### 2. 估算在 $I_{\max}$ 时的气隙 $\delta_{\max}$

$$\begin{aligned}
 \delta_{\max} &= \frac{\sqrt{2} I_{\max} N_L - H_m l_m}{8000 B_m} \\
 &= \frac{\sqrt{2} \times 360 \times 25 - 20 \times 60}{8000 \times 1.4} = 1.03 \text{ (cm)}
 \end{aligned}$$

考虑到计算的 $\delta_{\max}$ 往往偏小，可适当放大。

#### 五、铁心下料及绕组安置等 (略)

## 第三章 弧焊整流器设计

### § 3-1 弧焊整流器简介

弧焊整流器由两个基本部分组成，即：（1）具有适当调节装置的变压器；（2）整流器。为了稳定焊接过程，在焊机的直流输出回路中有时串联输出电抗器。

变压器的功能是：（1）将电网电压降至焊机所需的空载电压。（2）获得所需的外特性，原理与弧焊变压器相同。当变压器是增强漏磁式时，由变压器本身来完成，当变压器是正常漏磁式时，靠饱和电抗器或磁放大器来获得。（3）对外特性进行调节。

可见，弧焊整流器的变压器实质上就是交流弧焊变压器，主要区别在于弧焊整流器变压器绝大部分是三相变压器。

弧焊整流器将三相交流变成直流，多采用三相桥式整流电路。

弧焊整流器有以下型式：

- （1）磁放大器式；
- （2）饱和电抗器式；
- （3）动绕组增强漏磁式；
- （4）动铁分磁式；
- （5）高压引弧式；
- （6）抽头式；

(7) 交直流两用式。

其中磁放大器式弧焊整流器目前在国内生产和使用最  
广。

磁放大器式弧焊整流器利用磁放大器获得陡降外特性，  
图3-1是其原理电路图。由图可见，焊机由(1)变压器，(2)  
磁放大器，(3)控制电路，(4)整流器，(5)输出电抗器等  
组成。

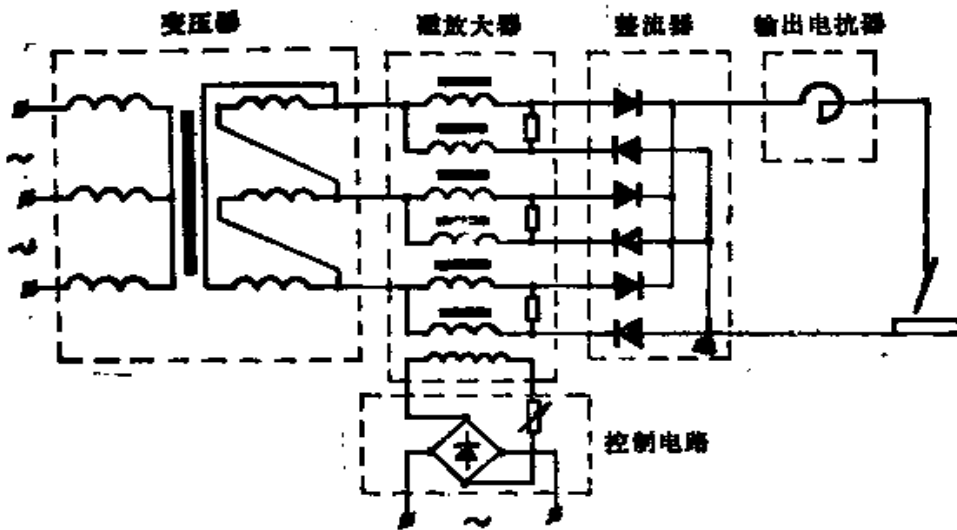


图3-1 磁放大器式弧焊整流器原理图

1. 变压器

变压器将交流电网的 380 V 电压降到焊机工作所需要的  
电压值，都采用三相变压器。这是因为焊机的输出功率较大  
(数十瓩)，三相电路可以使三相电网负荷均匀。

三相变压器的初、次级绕组一般采用 Y/△接法，即初级  
绕组接成星形，次级绕组接成三角形。初级绕组接成星形，

其相电压是线电压的 $1/\sqrt{3}$ ，每相绕组的匝数可以减少，绝缘要求可以降低。次级绕组电流比较大，采用三角形联接法，相电流只是线电流的 $1/\sqrt{3}$ ，可以减小绕组导线的截面积，节省铜材，绕制也比较容易。

## 2. 磁放大器

磁放大器在焊机中使焊机获得陡降外特性，并起调节焊接电流的作用；

磁放大器在控制绕组没有电流时电感值很大。焊机空载时，磁放大器中没有电流流过，焊机输出端可以获得高的空载电压。焊接时，磁放大器中流过交流电流，产生很大的电压降，电流越大电压下降越多。短路时，焊接变压器的次级电压绝大部分都降落在磁放大器上。这就使焊机得到了陡降的外特性。

改变磁放大器控制绕组中控制电流的大小，可以改变磁放大器的电感值，从而调节了焊接电流。

磁放大器往往采用内反馈（正反馈）来提高它的放大系数。没有反馈的简单磁放大器，虽然也有放大作用，但电流放大系数小，常利用它的电抗器作用，称为饱和电抗器（两个铁心在正负半周轮流达到饱和）。

## 3. 控制电路

控制电路向磁放大器提供直流控制电流。控制电流的大小可以调节，数值不大（约数安），一般采用单相桥式整流电路。整流输出端接有变阻器，调节变阻器，就可以改变控制电流的大小，进而改变焊接电流的大小。

控制电流不大，所以变阻器也不大，因此可以将变阻器接至焊工附近进行遥控，这是这类焊机的重大优点。

#### 4. 整流器

整流器将磁放大器输出的三相交流电变成直流，一般采用三相桥式整流电路。三相桥式整流电路的整流电压脉动小，整流元件承受的最大反向电压比较低，整流变压器（即前述焊接变压器）也比较简单。

#### 5. 输出电抗器

输出电抗器的作用是：（1）减小输出电流的脉动，起滤波作用；（2）降低短路电流增长速度，减小短路电流峰值，即改善弧焊整流器的动态品质，以减少焊条金属的飞溅。

输出电抗器是带铁心的线圈，其磁路在工作时不应饱和。从磁路欧姆定律  $\phi = NI / \Sigma R_m$  可知，当电抗器的绕组匝数  $N$  及电流  $I$  一定（即磁势  $NI$  一定）时，增大磁路总磁阻  $\Sigma R_m$ ，磁通  $\phi$  将减少。可见，在铁心中开一个空气隙，可以减小磁通  $\phi$ ，从而减小铁心截面积  $S = \phi / B$ ，即减小输出电抗器的尺寸。所以一般输出电抗器的铁心都有空气隙。

当磁放大器的动态品质合适时，也可以不用输出电抗器。

### § 3-2 弧焊整流器变压器设计

弧焊整流器中，目前用得最多的是磁放大器式。这类弧焊电源的变压器，差不多都是三相平特性降压变压器。考虑到负荷均衡与电流脉动问题，单相用得很少。它需要另加磁放大器或饱和电抗器作为外特性调节机构。

这种三相整流变压器的设计，有两个特点：第一，它可以看成是三台单相变压器的合成，每一相的设计原则都与单



相变压器一样，所不同的只是多了相与相之间的联接问题；第二，它的输出电流、电压，要受后面整流电路型式的影响。因为，整流变压器的设计依据是最终输出的直流电参数，不同的整流电路，电流、电压的交直流换算系数也不同，这在设计前要预先考虑。

下面介绍这种变压器的设计步骤。

### 一、决定变压器基本电量

#### 1. 根据生产需要提出的原始数据

- (1) 输出直流空载电压  $U_d$  (V)
- (2) 额定输出直流电流  $I_d$  (A)
- (3) 额定负载持续率  $FS_N$  (%)
- (4) 相数  $m$
- (5) 整流器型式
- (6) 初级线电压  $U_{1l}$  (V)
- (7) 绕组接法
- (8) 冷却方式

#### 2. 计算变压器的容量、相电压及相电流

##### (1) 直流输出功率 $P_d$

$$P_d = U_d I_d \times 10^{-3} \quad (\text{kVA})$$

##### (2) 直流输出长时功率 $P_{dc}$

$$P_{dc} = P_d \sqrt{FS_N} \quad (\text{kVA})$$

##### (3) 变压器输入长时功率 (计算容量) $P_{BC}$

$$P_{BC} = K_B P_{dc} \quad (\text{kVA})$$

式中  $K_B$ ——直流功率换算为交流功率的系数。Y/ $\Delta$  接法  
三相桥式整流电路  $K_B = 1.05$ 。

##### (4) 变压器初级相电压 $U_{1\phi}$

$$\text{Y}/\Delta \text{接法, } U_{1\phi} = U_{1l} / \sqrt{3} \quad (\text{V})$$

(5) 变压器初级长时相电流  $I_{1\phi c}$

$$I_{1\phi c} = 1.1 \frac{P_{BC}}{3U_{1\phi}} \quad (\text{A})$$

式中 1.1——考虑激磁电流影响的系数。

(6) 变压器次级线电流  $I_{2l}$

$$I_{2l} = K_I I_d \quad (\text{A})$$

式中  $K_I$ ——直流电流换算为交流电流的系数，对 Y/ $\Delta$  接法三相桥式整流电路， $K_I = 0.82$ 。

(7) 变压器次级长时线电流  $I_{2lc}$

$$I_{2lc} = I_{2l} \sqrt{FS_N} \quad (\text{A})$$

(8) 变压器次级长时相电流  $I_{2\phi c}$

对 Y/ $\Delta$  接法，

$$I_{2\phi c} = I_{2lc} / \sqrt{3} \quad (\text{A})$$

(9) 变压器次级线电压  $U_{2l}$

$$U_{2l} = K_U U_d \quad (\text{V})$$

式中  $K_U$ ——直流电压换算为交流电压的系数，对 Y/ $\Delta$  接法三相桥式整流电路， $K_U = 0.74$ 。

(10) 变压器次级相电压  $U_{2\phi}$

对 Y/ $\Delta$  接法， $U_{2\phi} = U_{2l}$  (V)

## 二、初步决定变压器主要尺寸

### 1. 变压器铁心结构

三相变压器的铁心结构见图3-2，当变压器容量较小时，铁心柱为矩形截面，当容量较大时，为阶梯形截面。

### 2. 选择铁心材料，确定磁密 $B_m$

铁心材料及磁密选择见§ 5-1。

### 3. 计算变压器铁心截面积 $S_F$

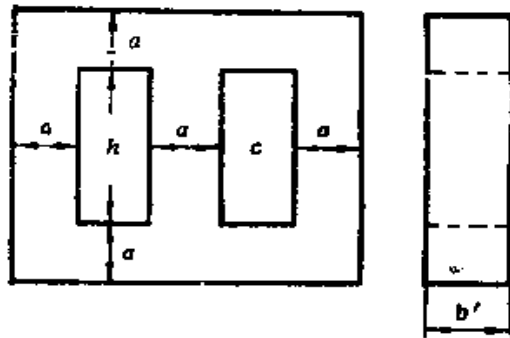


图3-2 变压器铁心

铁心截面积  $S_{Fe}$  可按经验公式选用如下:

$$S_{Fe} = \frac{20 \sim 30}{B_m} \sqrt{\frac{P_{BC}}{3}} \quad (\text{cm}^2)$$

4. 初步决定变压器主要尺寸

阶梯形铁心柱各级尺寸可按第一章表1-1确定。

### 三、计算初、次级绕组

1. 计算每伏电压匝数  $N_0$

$$N_0 = 45 / B_m S_{Fe} \quad (\text{匝/V})$$

2. 计算初、次级绕组匝数  $N_1$ 、 $N_2$

$$N_1 = U_1 \div N_0 \text{ 匝}$$

$$N_2 = U_2 \div N_0 \text{ 匝}$$

3. 确定导线截面积  $S_1$ 、 $S_2$

选取电流密度  $j$  (按第五章表5-10选取)

计算  $S_1$  及  $S_2$

$$S_1 = \frac{I_1 \div c}{j_1}$$

$$S_2 = \frac{I_2 \div c}{j_2}$$

按第五章表5-7选取导线截面尺寸。

再按实际截面积计算实际电流密度  $j_1$ 、 $j_2$

$$j_1 = \frac{I_1 + c}{S_1}$$

$$j_2 = \frac{I_2 + c}{S_2}$$

#### 四、铁心的最后计算

1. 排列导线，核算铁心窗口尺寸

(1) 计算初、次级绕组高度  $F_1$ 、 $F_2$

$$F_i = 1.05 [b'_i \times (n_i + 1)] \quad (\text{mm})$$

式中 1.05——考虑密绕不紧程度的系数；

$b'_i$ ——导线带绝缘层的轴向尺寸，(mm)，

绝缘厚度可查第五章表5-9；

$n_i$ ——每层匝数。

(2) 窗口高度  $h$  应

$$h \geq F_i + 10 \quad (\text{mm})$$

(3) 计算初、次级绕组径向总厚度  $E_i$

$$E_i = [Q_i (a'_i + \Delta_i)] \quad (\text{mm})$$

式中  $Q_i$ ——绕组层数；

$a'_i$ ——绕组带绝缘后的径向尺寸 (mm)，

$\Delta_i$ ——绕组层间绝缘厚度 (mm)，

例如， $\Delta_i = 0.2$  (mm)

(4) 窗口宽度  $c$

$$c \geq [2(\Delta_1 + \theta + \Delta_2 + \Sigma E_i)] + \Delta_2 \quad (\text{mm})$$

式中  $\Delta_1$ ——绕组与铁心间的装配间隙，

例如， $\Delta_1 = 2$  (mm)

$\theta$ ——绕组框架厚度，

例如,  $\theta = 5$  (mm)

$\Delta_2$ ——初、次级绕组间绝缘厚度,

例如,  $\Delta_2 = 12$  (mm)

$\Delta_3$ ——两绕组间通风间隙,

例如,  $\Delta_3 = 10$  (mm)

2. 计算铁心用切片尺寸及用量

(1) 切片尺寸

铁心采用条料叠装 (见图3-3)

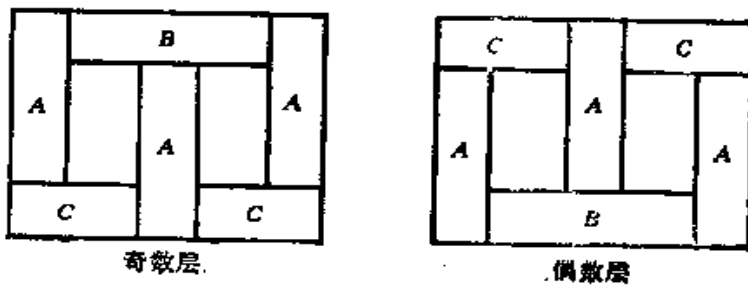


图3-3

铁心每一阶梯的切片有三种规格:

$$A_i \quad B_i \quad C_i$$

算出各阶梯的切片尺寸

(2) 切片数

每阶梯切片数 
$$n = \frac{b_i}{\delta}$$

式中  $\delta$ ——硅钢片厚度

$b_i$ ——每阶梯的厚度

每阶梯三种规格切片的总片数

$$n_A = 3n \quad n_B = n \quad n_C = 2n$$

3. 计算铁心重量  $G_{Fe}$

$$G_{Fe} = \gamma V \times 10^{-3} \text{ (kg)}$$

式中  $\gamma$ ——硅钢片比重 ( $\text{g/cm}^3$ )

热轧硅钢片  $\gamma = 7.6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  ;

冷轧硅钢片  $\gamma = 7.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  。

### § 3-3 弧焊整流器变压器设计举例

#### 一、决定变压器基本电量

1. 根据生产需要提出的原始数据

(1) 输出直流空载电压  $U_d = 120 \text{ (V)}$

(2) 额定输出直流电流  $I_d = 300 \text{ (A)}$

(3) 额定负载持续率  $FS_N = 80\%$

(4) 相数  $m = 3$

(5) 整流器型式: 三相桥式

(6) 初级线电压  $U_{1L} = 380 \text{ (V)}$

(7) 绕组接法: Y/ $\Delta$

(8) 冷却方式: 风冷

2. 计算变压器的容量、相电压及相电流

(1) 直流输出功率  $P_d$

$$\begin{aligned} P_d &= U_d I_d \times 10^{-3} \\ &= 120 \times 300 \times 10^{-3} = 36 \text{ (kVA)} \end{aligned}$$

(2) 直流输出长时功率  $P_{dL}$

$$P_{dL} = P_d \sqrt{FS_N} = 36 \times \sqrt{80\%} = 32.2 \text{ (kVA)}$$

(3) 变压器输入长时功率 (计算容量)  $P_{2C}$

$$\begin{aligned} P_{2C} &= K_B P_{dL} \\ &= 1.05 \times 32.2 \approx 34 \text{ (kVA)} \end{aligned}$$

(4) 变压器初级相电压  $U_{1\phi}$

$$\begin{aligned}
 U_{1\phi} &= U_{11}/\sqrt{3} \\
 &= 380/\sqrt{3} = 220 \text{ (V)}
 \end{aligned}$$

(5) 变压器初级长时相电流  $I_{1\phi a}$

$$\begin{aligned}
 I_{1\phi c} &= 1.1 \frac{P_{Sc}}{3U_{1\phi}} \\
 &= 1.1 \times \frac{34 \times 10^3}{3 \times 220} = 57 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

(6) 变压器次级线电流  $I_{2l}$

$$\begin{aligned}
 I_{2l} &= K_I I_d \\
 &= 0.82 \times 300 = 246 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

(7) 变压器次级长时线电流  $I_{2l\phi}$

$$\begin{aligned}
 I_{2l\phi} &= I_{2l} \sqrt{FS_N} \\
 &= 246 \times \sqrt{80\%} = 219 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

(8) 变压器次级长时相电流  $I_{2\phi\phi}$

$$\begin{aligned}
 I_{2\phi\phi} &= I_{2l\phi} / \sqrt{3} \\
 &= 219 / \sqrt{3} = 127 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

(9) 变压器次级线电压  $U_{2l}$

$$\begin{aligned}
 U_{2l} &= K_U U_d \\
 &= 0.74 \times 120 = 89 \approx 90 \text{ (V)}
 \end{aligned}$$

(10) 变压器次级相电压  $U_{2\phi}$

$$U_{2\phi} = U_{2l} = 90 \text{ (V)}$$

## 二、初步决定变压器主要尺寸

### 1. 变压器铁心结构

这是一合三相变压器，其铁心结构如图3-4所示。铁心柱为矩形截面。

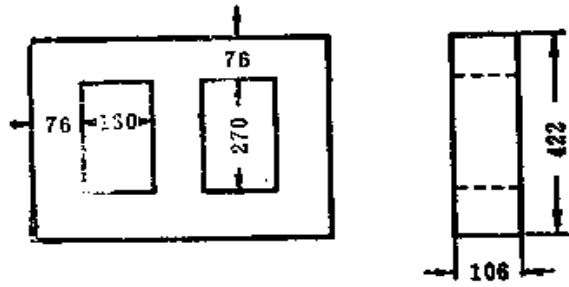


图3-4 变压器铁心主要尺寸

2. 选择铁心材料，确定磁密 $B_m$

铁心用D11—0.5热轧硅钢片，

取 $B_m = 1.3\text{T}$

3. 变压器铁心截面积 $S_{Fe}$

$$S_{Fe} = \frac{20 \sim 30}{B_m} \sqrt{\frac{P_{BC}}{3}}$$

$$= \frac{30}{1.3} \sqrt{\frac{34}{3}} = 77.5 \text{ (cm}^2\text{)}$$

毛面积  $S'_{Fe} = \frac{77.5}{0.96} = 80.6 \text{ (cm}^2\text{)}$

4. 初步决定变压器主要尺寸

见图3-4，铁心采用矩形截面

取 $a = 76 \text{ (mm)}$

则 $b' = \frac{80.6}{76} \times 10^2 = 106 \text{ (mm)}$

取窗口尺寸： $c = 130 \text{ (mm)}$   $h = 270 \text{ (mm)}$



### 三、计算初、次级绕组

#### 1. 每伏电压匝数 $N_0$

$$N_0 = \frac{45}{B_m S_{Fe}}$$
$$= \frac{45}{1.3 \times 77.5} \approx 0.45 \text{ (匝/V)}$$

#### 2. 初、次级绕组匝数 $N_1, N_2$

$$N_1 = U_{1\phi} N_0 = 220 \times 0.45 = 99 \text{ (匝)}$$

$$N_2 = U_{2\phi} N_0 = 90 \times 0.45 \approx 41 \text{ (匝)}$$

#### 3. 初、次级绕组导线截面积 $S_1, S_2$

初、次级均用纱包扁铜线

初级选用两根  $2.26 \times 6.4 \text{ mm}$  叠绕

次级选用两根  $2.83 \times 10.0 \text{ mm}$  叠绕

实际  $S_1 = 2 \times 14 = 28 \text{ (mm}^2\text{)}$

$$S_2 = 2 \times 27.8 = 55.6 \text{ (mm}^2\text{)}$$

则实际电流密度

$$j_1 = \frac{I_{1\phi}}{S_1} = \frac{57}{28} = 2.03 \text{ (A/mm}^2\text{)}$$

$$j_2 = \frac{I_{2\phi}}{S_2} = \frac{127}{55.6} = 2.28 \text{ (A/mm}^2\text{)}$$

#### 4. 直流激磁及控制变压器电源

在变压器中柱上，除初、次级绕组外，加绕组  $N_3$ ，作为磁饱和电抗器直流激磁电源（110V）及控制变压器电源（70V）。

$$N_3 = 70 \times 0.45 = 31.5 \text{ 取34匝 (抽头)}$$

$$110 \times 0.45 = 49.5 \text{ 取49匝 (抽头)}$$

$$120 \times 0.45 = 54 \quad \text{取54匝 (考虑裕量)}$$

选取  $\phi 2.02\text{mm}$  高强度漆包线, 其  $\phi' = 2.14\text{mm}$ ,  $S_s = 3.20\text{mm}^2$ 。

#### 四、铁心的最后计算

##### 1. 排列导线, 核算铁心窗口尺寸

###### (1) 初、次级绕组高度 $F_1$ 、 $F_2$

初级绕组绕三层, 第一、二层各38匝, 第三层23匝, 共99匝。

次级绕组绕两层, 每层25匝, 共50匝, 在41匝处抽头。

初、次级绕组加框架总高度:

$$F_1 = F_2 = 268\text{mm} < 270\text{mm}$$

###### (2) 初、次级绕组径向总厚度 $E_1$ 、 $E_2$

绕组层间以黄腊绸 ( $\delta = 0.12\text{mm}$ ) 及牛皮纸 ( $\delta = 0.15\text{mm}$ ) 各一张绝缘。

初、次级绕组间均以层压纸板条 ( $\delta = 5\text{mm}$ ) 绝缘。

初、次级绕组加框架、气隙等总厚度为:

$$E_1 + E_2 + \Delta_1 + \theta + \Delta_2 = 50 \text{ (mm)}$$

两绕组间通风间隙  $\Delta_2$  为:

$$\Delta_2 = 130 - 2 \times 50 = 30 \text{ (mm)}$$

##### 2. 铁心用切片尺寸及数量

###### (1) 切片尺寸

铁心以条料叠装 (参见图3-3)

切片共三种规格  $A$ 、 $B$ 、 $C$

$$A: (270 + 76) \times 76 = 346 \times 76 \text{ (mm)}$$

$$B: (260 + 76) \times 76 = 336 \times 76 \text{ (mm)}$$

$$C: (130 + 76) \times 76 = 206 \times 76 \text{ (mm)}$$

###### (2) 每台变压器 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 切片片数:

$b$  向总切片数  $n$

$$n = \frac{106 \times 0.96}{0.5} = 204 \text{ (片)}$$

$$n_A = 3 \times 204 = 612 \text{ (片)}$$

$$n_B = 204 \text{ (片)}$$

$$n_C = 2 \times 204 = 408 \text{ (片)}$$

3. 铁心重量  $G_{Fe}$

经计算  $G_{Fe} = 106 \text{ (kg)}$

4. 绕组重量  $G_{cu}$

经计算, 每台变压器绕组

$$G_{cu1} = 36 \text{ (kg)}$$

$$G_{cu2} = 46.5 \text{ (kg)}$$

则  $G_{cu} = 36 + 46.5 = 82.5 \text{ (kg)}$

5. 铁铜用量比

$$\frac{G_{Fe}}{G_{cu}} = \frac{106}{82.5} = 1.29$$

### § 3-4 饱和电抗器设计

饱和电抗器其实就是没有反馈的磁放大器。它在弧焊整流器中的作用, 相当于变压器的外接电抗, 是一个调节外特性的机构。

饱和电抗器和交流电抗器一样, 都是在交流电路中工作, 都起调节外特性的作用, 都用改变铁心磁阻的办法来改变本身的电抗值。

饱和电抗器与交流电抗器又有区别。交流电抗器一般为

单相，用改变铁心空气隙大小的办法来改变磁阻，所以有机械的或手工的调节机构，而饱和电抗器大多为三相，利用铁心在不同磁化情况下磁导率 $\mu$ 的不同来改变磁阻，因此铁心上多了一个直流控制绕组，用来改变铁心的磁化程度。

饱和电抗器的示意图见图3-5。

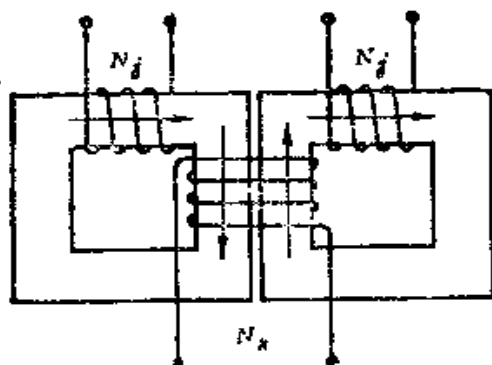


图3-5 饱和电抗器示意图(一相)

### 一、决定饱和电抗器基本电量

#### 1. 根据生产需要提出的原始数据

(1) 输出直流空载电压  $U_d$  (V)

(2) 额定输出直流电流  $I_d$  (A)

(3) 额定负载持续率  $FS_N$  (%)

(4) 相数  $m$

(5) 冷却方式

(6) 计算中所需的整流变压器部分数据:

a. 整流变压器次级线电压  $U_{2l}$  (V)

b. 整流变压器次级线电流  $I_{2l}$  (A)

c. 整流变压器次级长时线电流  $I_{2lc}$  (A)

d. 整流变压器计算容量  $P_{BC}$  (kVA)

#### 2. 计算饱和电抗器一个交流绕组的电压和电流

(1) 电抗器每个交流绕组上的电压  $U_j$  (V)

$$U_j = U_{st}/2 \text{ (V)}$$

(2) 电抗器每个交流绕组上的电流  $I_j$  (A)

$$I_j = I_{st}/2 \text{ (A)}$$

(3) 电抗器每个交流绕组的长时电流  $I_{jc}$  (A)

$$I_{jc} = I_{stc}/2 \text{ (A)}$$

## 二、初步决定饱和电抗器铁心尺寸

### 1. 饱和电抗器铁心结构

构

饱和电抗器铁心有  $\square$  形及  $\square\square$  形，

$\square$  形铁心可用  $\square$  形冲片或条料叠装，铁心柱截面可为矩形或阶梯形。

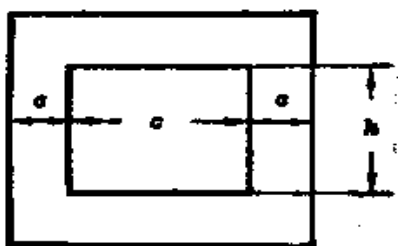


图3-6

### 2. 确定铁心柱截面积 $S_L$

$$S_L = (3 \sim 5) \times 10^{-4} \sqrt{P_{BC}} \text{ (cm}^2\text{)}$$

### 3. 确定铁心柱截面尺寸

### 4. 选定铁心材料，确定磁密 $B_m$

饱和电抗器铁心常用冷轧硅钢片。

磁密一般取  $B_m = 1.5\text{T}$ 。

(如有条件，应先制作一台试验用饱和电抗器，测出其交直流同时磁化曲线，然后，根据所要求的最小电流，由曲线查得磁密  $B_m$ ，看其数值是否与此接近)。

## 三、计算交流绕组

### 1. 交流绕组匝数 $N_j$

$$N_j = \frac{U_j \times 10^4}{4.44 f B_m S_L}$$

## 2. 交流绕组导线截面积 $S_j$

$$S_j = \frac{I_j}{j_j}$$

先选电流密度 $j_j$ ，再计算 $S_j$ ，按第五章表5-8选取导线截面尺寸，

再按实际截面积计算实际电流密度 $j_j$ 。

## 四、计算直流控制绕组

### 1. 确定 $I_K$

$I_K$ 可按控制电路要求选定，一般 $I_K \leq 10A$ 。

### 2. 计算控制绕组匝数 $N_K$

$$N_K = \frac{I_j N_j}{I_K} \quad (\text{匝})$$

### 3. 计算控制绕组导线截面积 $S_K$

$$S_K = \frac{I_K}{j_K}$$

## 五、铁心的最后计算

### 1. 排列导线、计算铁心窗口尺寸

窗口尺寸初步选定后，算出磁路长度 $l$ ，根据交直流同时磁化曲线，可以核算焊接电流的调节范围是否符合设计要求。

### 2. 计算铁心用切片尺寸及用量

### 3. 计算铁心重量 $G_F$ 。

## § 3-5 饱和电抗器设计举例

### 一、决定饱和电抗器基本电量

#### 1. 根据生产需要提出的原始数据

(1) 输出直流空载电压  $U_d = 120$  (V)

(2) 额定输出直流电流  $I_d = 300$  (A)

(要求  $I_K = 0$  时,  $I_d \approx 30$  A)

(3) 额定负载持续率  $FS_N = 80\%$

(4) 相数  $m = 3$

(5) 冷却方式: 风冷

(6) 计算中所需的整流变压器部分数据:

a. 次级线电压  $U_{2l} = 90$  (V)

b. 次级线电流  $I_{2l} = 246$  (A)

c. 次级长时线电流  $I_{2lc} = 219$  (A)

d. 计算容量  $P_{BC} = 34$  (kVA)

2. 计算饱和电抗器一个交流绕组的电压和电流

(1) 电抗器每个交流绕组上的电压  $U_j$

$$U_j = U_{2l}/2 = 90/2 = 45 \text{ (V)}$$

(2) 电抗器每个交流绕组上的电流  $I_j$

$$I_j = I_{2l}/2 = 246/2 = 123 \text{ (A)}$$

(3) 电抗器每个交流绕组的长时电流  $I_{jc}$

$$I_{jc} = I_{2lc}/2 = 219/2 \approx 110 \text{ (A)}$$

二、初步决定饱和电抗器铁心尺寸

1. 铁心选□形结构

(1) 铁心以条料叠装

(2) 铁心柱截面为矩形

2. 铁心柱截面积  $S_L$

$$S_L = 5 \times 1.1^2 \sqrt{P_{BC}}$$

$$= 5 \times 1.1^2 \sqrt{34} = 52.5 \text{ (cm}^2\text{)}$$

(系数取 5)

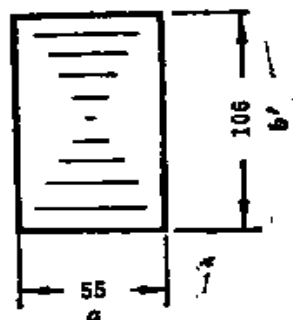


图3-7 铁心柱截面

硅钢片厚  $\delta = 0.35$  (mm)

铁心柱毛截面积  $S'_L$  为:

$$S'_L = 52.5 / 0.9 = 58.3 \text{ (cm}^2\text{)}$$

3. 确定铁心柱截面尺寸(图 3-7)

取  $a = 55$  (mm)

$$\text{则 } b' = \frac{5830}{55} = 106 \text{ (mm)}$$

4. 选用 D310—0.35 冷轧硅钢片。

根据设计要求, 当  $I_K = 0$  时,  $I_d = 30$  A, 查试验饱和电抗器的交直流同时磁化曲线, 得  $B_m = 1.5$  (T)

可见, 磁密选择是合理的。

### 三、计算交流绕组

1. 交流绕组匝数  $N_j$

$$N_j = \frac{45 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.5 \times 52.5} = 25.8 \text{ (匝)}$$

取  $N_j = 26$  匝, 为增大电流调节范围,  $N_j$  绕成 33 匝, 在 19, 26 匝处抽头。

2. 计算交流绕组导线截面积  $S_j$

选取三根  $2.1 \times 8.0$  mm 纱包线叠绕, 其  $S_j = 3 \times 16.3 = 48.9$  (mm<sup>2</sup>), 电流密度

$$j_j = \frac{110}{48.9} = 2.25 \text{ (A/mm}^2\text{)}。$$

### 四、计算直流控制绕组

1. 选定  $I_K \leq 5$  A

2. 控制绕组匝数  $N_K$



$$N_K = \frac{I_j N_j}{I_K} = \frac{123 \times 26}{5} = 640 \text{ (匝)}$$

由于样机带有试验性质， $N_K$ 可多取一些匝数，并在不同匝数处抽头

取 $N_K = 800、900、1000、1100$ 匝，其相应 $I_K = 3.6、3.2、2.88、2.62A$ 。

### 3. 控制绕组导线截面积 $S_K$

选取 $\phi 1.74\text{mm}$ 高强度漆包线，其 $\phi' = 1.85(\text{mm})$ ， $S_K = 2.38(\text{mm}^2)$ ，

其 $j_K$ 分别为1.51、1.34、1.21、1.1A/mm<sup>2</sup> ( $j_K = I_K/S_K$ )。

## 五、铁心的最后计算

### 1. 确定窗口尺寸，排列导线

(1)参考有关资料，选定窗口尺寸为

窗高  $h = 200\text{mm}$

窗宽  $c = 80\text{mm}$ ，则磁路长度  $l = 780\text{mm}$

查同时磁化曲线，当 $N_K = 1100$ 匝时， $I_K = 2.62A$ ，则有 $I_s = 246/0.82 = 300A$ ，可见电流调节范围能满足要求。

(2)交流绕组绕二层，第一层19匝，第二层14匝，共33匝，在19、26匝处抽头。

(3)控制绕组绕11层，第1~10层各105匝，第11层50匝，共1100匝，在800、900、1000匝处抽头。

### 2. 铁心用切片尺寸及用量

(1)切片尺寸

铁心以条料叠装，如图3-8所示。

切片有A、B两种规格。

A:  $(200 + 55) \times 55 = 255 \times 55 \text{ (mm)}$

B:  $(80 + 55) \times 55 = 135 \times 55 \text{ (mm)}$

(2) 每只铁心A、B切片数

$$b \text{ 向切片数 } n = 106 \times 0.9 / 0.35 = 272 \text{ 片}$$
$$n_A = 2 \times 272 = 544 \text{ 片} \quad n_B = 2 \times 272 = 544 \text{ 片}$$

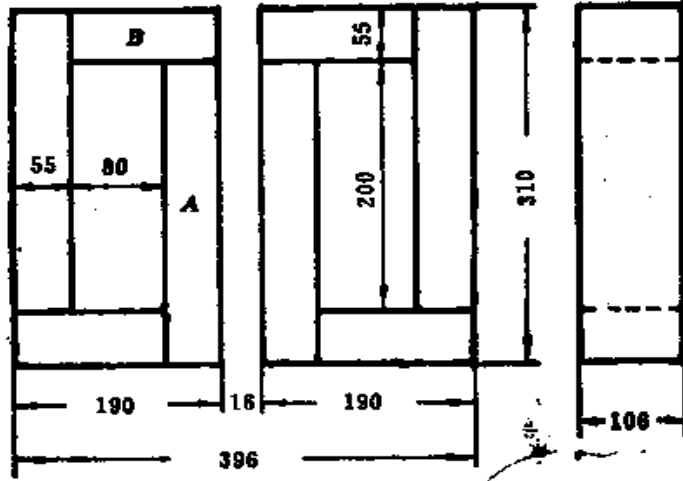


图3-8 铁心叠装

(3) 每台电源A、B切片总数

$$6n_A = 3264 \text{ 片} \quad 6n_B = 3264 \text{ 片}$$

3. 铁心重量

(1) 每只铁心重 $G_{Fe}$

经计算  $G_{Fe} = 31.3 \text{ (kg)}$

(2) 每台电源饱和电抗器铁心总重 $G_{Fe0}$

$$G_{Fe0} = 6 \times 31.3 = 187.8 \text{ (kg)}$$

4. 绕组重量

(1) 每只交流绕组重量 $G_{cu}$

经计算  $G_{cu} = 6.6 \text{ (kg)}$

(2) 每台电源交流绕组重量 $G_{cu0}$

$$G_{cu0} = 6 \times 6.6 = 39.6 \text{ (kg)}$$

(3) 每只控制绕组重量  $G_{cxk}$

经计算  $G_{cxk} = 14$  (kg)

(4) 每台电源控制绕组重量  $G_{cxk}$

$$G_{cxk} = 3 \times 14 = 42 \text{ (kg)}$$

(5) 每台电源饱和电抗器绕组总重量  $G_{\Sigma}$

$$G_{\Sigma} = 39.6 + 42 = 81.6 \text{ (kg)}$$

5. 铁铜比:

$$\frac{187.8}{81.6} = 2.3$$

### § 3-6 输出电抗器设计及举例

弧焊整流器的直流回路中, 通常接有输出电抗器 (直流电抗器), 它的作用是滤波和限制短路电流增长速度 (改善动特性)。

输出电抗器是一个带铁心的线圈, 为了避免在大电流时出现磁饱和, 铁心中也开有气隙 (一般不可调)。

输出电抗器的电感量  $L = N^2 / R_m$ , 其中  $N$  为电抗器绕组匝数,  $R_m$  为磁阻。当铁心在整个工作范围内不饱和时, 铁心材料的磁导率  $\mu$  大大高于空气隙的磁导率  $\mu_0$ 。因此, 可以忽略铁心的磁阻, 而近似地只计空气隙的磁阻。这样一来, 计算就大大简化了。

这种电抗器, 因为磁密取得较低 (常在 0.8T 以下), 电流和磁密始终保持线性关系, 所以也叫线性电感。

设计步骤

一、原始数据

1. 直流电流  $I_d$  (A)

2. 额定负载持续率  $FS_N$  (%)

3. 所要求的电感量  $L$  (H)

## 二、参数计算

1. 计算电感绕组匝数  $N$

电感绕组匝数  $N$ , 可用经验公式选取:

$$N \approx 1000 \sqrt{L}$$

式中  $L$  —— 所要求的电感量 (H)。

2. 计算气隙大小  $\delta_0$ 。

因为 
$$B \approx \mu_0 H = \mu_0 \frac{I_d N}{\delta_0}$$

所以 
$$\delta_0 = \mu_0 \frac{I_d N}{B}$$

式中  $\mu_0$  —— 空气的磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$  (H/cm);

$I_d$  —— 流过绕组的直流电流 (A);

$N$  —— 电感绕组匝数 (匝);

$B$  —— 铁心磁密 (T)。

将数值代入, 整理后得:

$$\delta_0 = \frac{1.25 I_d N}{B} \times 10^{-4} \text{ (cm)}$$

线性电感的  $B$  常取 0.8 T。

3. 计算铁心截面积  $S_L$

由电感公式 
$$L = \frac{\mu_0 N^2 S_L}{\delta_0}$$
, 代入数值可得

$$S_L = \frac{L \delta_0}{125 N^2} \times 10^8 \text{ (cm}^2\text{)}$$

4. 计算导线截面积  $S_w$ 。

$$S_{cu} = \frac{I_d \sqrt{FS_N}}{j} \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $FS_N$ ——额定负载持续率 (%)，  
 $j$ ——导线的许用电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )。

### 5. 计算铁心窗口尺寸 $Q$

$$Q = \frac{NS_{cu}}{m} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $S_{cu}$ ——导线截面积 ( $\text{cm}^2$ )，  
 $m$ ——填充系数，可取  $m = 0.3 \sim 0.4$ 。

### 设计举例

#### 一、原始数据

1. 直流电流  $I_d = 300\text{A}$
2. 额定负载持续率  $FS_N = 80\%$
3. 要求电感量  $L = 0.5\text{mH}$

#### 二、参数计算

1. 计算电感绕组匝数  $N$

$$N \approx 1000 \sqrt{L} = 1000 \sqrt{0.5 \times 10^{-3}} \\ = 22 \quad (\text{匝})$$

2. 计算气隙大小  $\delta_0$

$$\delta_0 = \frac{1.25 I_d N}{B} \times 10^{-4} \\ = \frac{1.25 \times 300 \times 22}{0.8} \times 10^{-4} \\ = 1.03 \quad (\text{cm})$$

这里  $B$  取  $0.8\text{T}$

3. 计算铁心截面积  $S_L$

$$S_L = \frac{L\theta_0}{1.25N^2} \times 10^8 = \frac{0.5 \times 10^{-3} \times 1.03}{1.25 \times 22^2} \times 10^8$$

$$= 85 \text{ (cm}^2\text{)}$$

4. 计算导线截面积  $S_{**}$

$$S_{**} = \frac{I_e \sqrt{FS_N}}{j} = \frac{300 \times \sqrt{80\%}}{3}$$

$$= 89 \text{ (mm}^2\text{)}$$

电流密度  $j$  取  $3\text{A/mm}^2$ 。

5. 计算铁心窗口尺寸  $Q$

$$Q = \frac{NS_{**}}{m} = \frac{22 \times 0.89}{0.3}$$

$$= 65 \text{ (cm}^2\text{)}$$

填充系数  $m$  取  $0.3$ 。

具体安排布置及校核从略。

## 第四章 电阻焊变压器设计

### § 4-1 电阻焊变压器简介

电阻焊有点焊、缝焊和对焊三种方式，是利用电流通过焊接区的电阻产生热量加热的，即所谓内部热源。焊接区所产生的热量，可以用焦耳定律确定

$$Q = \int_0^t i^2(t) R(t) dt \quad (\text{J})$$

式中  $i(t)$ ——通过焊接区的瞬时电流值 (A)；

$R(t)$ ——两电极间的总电阻，包括工件电阻与接触电阻 ( $\Omega$ )，是时间的函数；

$t$ ——焊接电流流通的时间 (S)。

以有效值表示，上式可简化为

$$Q = I^2 R t \quad (\text{J})$$

可见，电阻焊时焊接区获得的热量与焊接电流  $I$  的平方、焊接区的总电阻  $R$  以及通电时间  $t$  成正比。

为了有效地利用能量，防止过大的加热变形，电阻焊常常采用大电流短时间的加热方式。

#### 一、电阻焊变压器的特点

电阻焊变压器无论从结构、工作原理或设计方法看，都更接近于一般电力变压器而不同于弧焊变压器。它的特点主要有：

(1)次级电压低，电流大。为了短时间内在焊接区获得足够的热量，要求变压器能提供很大的次级电流。具体数值视工艺要求而定，一般在1000~100000 A之间。次级电压却很低，固定式焊机通常不超过10~12 V，特殊情况（例如悬挂式点焊机或某些要求焊接回路较长的场合）也有达到24 V左右的。

电流大，要求变压器次级导线截面及焊接回路导体尺寸都比较大，而且大多采用强迫冷却。

电压低，要求变压器漏抗要小，焊接回路的电阻、电感也要限制在一定的范围内（ $10^{-4}\Omega$ 数量级）。由于次级电压低，电阻焊变压器的次级绕组匝数很少，通常只有一匝，悬挂式点焊机才用到两匝。

(2)功率较大，且可调节。电阻焊变压器的视在功率一般几十到几百 kVA，大型的功率可达一千kVA以上。由于次级绕组只有一匝，只能用改变初级绕组匝数的办法来调节焊接电流，实际上也就调节了变压器的输出功率。根据功率的不同，焊接电流的调节常分成4级、8级或16级。倒数第二级定为额定级，最后一级留作网压不足时补偿之用。

电阻焊变压器大都为单相，功率较大时往往造成电网三相的不均衡。

(3)工作不连续，无空载运行。各种电阻焊方法，除闪光对焊外，都是先将工件夹紧在两电极之间，焊接回路已闭合。当设置在变压器初级的开关接通后，变压器便在负载状态下运行，一般没有空载运行。电阻焊变压器的负载持续率比一般弧焊变压器低，点焊、对焊用变压器为20%，缝焊用变压器为50%。整个焊接过程包括工件装卸，加压，焊接等几项程序，变压器的工作是断续的。



## 二、电阻焊变压器的结构

电阻焊变压器的结构形式大致有心型、壳型及环型三种。

### 1. 心型变压器

铁心为口字形，初、次级绕组可绕在同一铁心柱上或分别绕在两个铁心柱上。这类变压器结构简单，制造容易，但漏抗较大，多用于小功率焊机。

### 2. 壳型变压器

铁心为日字形，初、次级绕组一般制成盘形交错安装在中间铁心柱上。这类变压器结构紧凑，电气性能好，是目前生产中应用最广泛的一种。

### 3. 环型变压器

这类变压器漏抗最小，但制造比较麻烦，只在某些专用焊机中使用。

变压器所用材料，铁心用0.35或0.5mm硅钢片叠成，由于没有空载运行，磁密可以适当选得高些，以缩小体积，减轻重量。初级绕组一般用扁铜线绕制，心型变压器，常绕成筒形；壳型变压器常绕成盘型。次级绕组有几种形式。小型变压器可采用厚度为0.2~0.4mm的铜箔叠成，自然冷却；中型变压器多数采用厚度为10mm左右的铜板制成，周边焊有一圈冷却水管，当要求导线截面比较大时，则采用几片并联的办法；某些特殊焊机，也有用空心扁导线直接制成次级绕组的，这时因为有强烈的水冷，电流密度可以取得很高，变压器体积相应缩小，但制造和联接都比较麻烦。近年来，不少电阻焊变压器采用了环氧树脂浇注的办法，冷却效果更好，体积更小，机械寿命也大大提高。

## 三、电容储能焊变压器简介

电容储能焊变压器包括充电变压器和放电（焊接）变压

器两部分。充电电压合适时，充电变压器也可省略，直接放电式电容储能焊（例如螺柱冲击焊），放电变压器则可以省略。

### 1. 充电变压器

充电变压器的作用是将电网电压升高或降低到合适值，以便向整流器供电，整流后的直流电充入电容器组。

充电变压器其实就是一台三相（或单相）整流变压器，其基本原理、结构及设计方法与第三章所述的整流弧焊机变压器相同。只是在初、次级绕组导线截面的选择上，应根据设计要求的充电时间算出充电电流的大小，再依据计算的负载持续率来确定。

### 2. 放电（焊接）变压器

放电变压器的原边接电容器，副边接工件，它的功用是将电容器释放的能量传递到工件上。放电变压器是单相变压器，其结构和设计方法类似于电阻焊变压器。

设计放电变压器的困难在于设计所需的一些原始参数很难准确假定。因为电容储能焊时，焊接电流的波形取决于回路的 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 值，基本上是一个幅值衰减得很快的振荡过程，但振荡的频率及脉冲的幅值不是常数，这就需要在设计前加以分析和假定。因为振荡频率及脉冲幅值既影响变压器铁心的大小，又影响绕组导线的尺寸。到目前为止，电容储能焊放电变压器的设计计算仍然是经验的和近似的。

电容储能焊的特点是，放电时间短，脉冲幅值高，反映到变压器设计上就表现为：

(1) 为了防止变压器因磁饱和而影响能量的传递，放电变压器的铁心截面尺寸要相当大；

(2) 电容储能焊的负载持续率极低，绕组导线截面相

对来说就比较小，变压器铁心窗口也可相应缩小；

(3)因上述理由，这类变压器的发热并不是主要问题，一般不需要强迫冷却措施。

## § 4-2 电阻焊变压器设计

### 一、设计的原始资料

1. 网路电压  $U_1$  (V)
2. 电源频率  $f$  (Hz)
3. 额定负载持续率  $FS_N$  (%)

通用焊机可参考有关规定，专用焊机则根据焊接规范和生产率确定。

4. 焊件的截面(或厚度)、材料和外形尺寸
5. 次级额定电流  $I_{2N}$  (A)
6. 冷却方式

### 二、初步设计

1. 选定变压器构造类型

包括铁心型式、绕组型式、配置方式等。

2. 初步定出次级额定空载电压  $U_{2N}$

$$U_{2N} = I_{2N} Z_H''$$

式中  $I_{2N}$ ——次级额定电流，根据焊件选择；

$Z_H''$ ——折算到次级的焊机总阻抗 ( $\Omega$ )

$$Z_H'' = \sqrt{(R_{1B}'' + R_{2B} + R_A)^2 + (X_{1B}'' + X_{2B} + X_A)^2}$$

$Z_H''$ 由三部分组成：变压器初级绕组折合到次级的电阻 ( $R_{1B}''$ ) 和感抗 ( $X_{1B}''$ )；变压器次级绕组的电阻 ( $R_{2B}$ ) 和感抗 ( $X_{2B}$ )；焊接回路的电阻 ( $R_A$ ) 和感抗 ( $X_A$ )。

其中， $R_{1B}''$ 、 $R_{2B}$ 、 $X_{1B}''$ 、 $X_{2B}$ 的数值，由于变压器尚待设计

而无法计算，只能参考有关资料，根据同类型、功率相近变压器的数值来假定，待变压器初步设计完成之后，再计算绕组的电阻和感抗值，然后与假定值加以核对和修正。

$R_A$ 和 $X_A$ 的计算 首先要根据焊件尺寸，画出焊接回路的草图，并标注尺寸。然后逐段计算回路各构件的电阻及构件间的接触电阻，即 $R_A = \Sigma R_l + \Sigma R_c$ ；而回路的感抗 $X_A$ ，主要取决于焊接回路所包围的面积，可查图 4-1 得出。应当指出，焊接回路内不应有铁磁物质，否则，将使 $X_A$ 大大增加。

电阻和感抗的折算 初级绕组折算到次级绕组时，

$$R'_{12} = \frac{R_{12}}{k^2}$$

$$X'_{12} = \frac{X_{12}}{k^2}$$

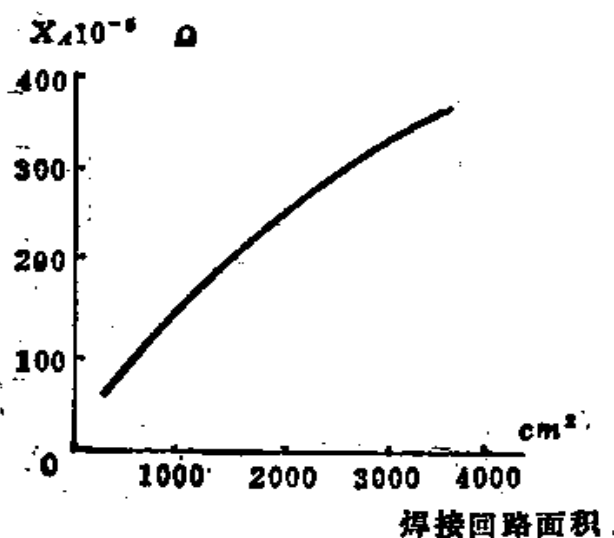


图4-1 回路感抗与回路面积的关系

式中  $k$ ——变压比。

3. 选择铁心材料，计算铁心截面积  $S_{Fe}$ 。

确定硅钢片牌号后，可查表5-6，选定其许用最大磁通密度  $B_m$ ，然后计算铁心净截面积

$$S_{Fe} = \frac{U_{2N} \times 10^4}{4.44 f N_2 B_m} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $U_{2N}$ ——次级额定空载电压 (V)；

$f$ ——电源频率，通常  $f = 50$  (Hz)

$N_2$ ——次级绕组匝数，通常  $N_2 = 1$  匝。

4. 确定铁心柱叠片宽度  $a$  及厚度  $b$

$$S_{Fe} = ab \quad (\text{cm}^2), \quad \text{截面为矩形,}$$

一般取  $b = 2a$

$$\text{毛厚 } b' = \frac{b}{K_c} \quad (K_c \text{ 为叠片系数})$$

5. 确定次级电压调节范围和级数

通用焊机  $\frac{U_{2max}}{U_{2min}} \leq 1.9$ ，由于  $U_{2max}$  未定，可近似地认为

$\frac{U_{2N}}{U_{2min}} \leq 1.9$  (一般  $U_{2N}$  都定在倒数第二级，使焊机有一定的

后备容量)，由此关系式定出  $U_{2min}$ 。

级数规定如下：

功率  $\leq 5$  kVA 的焊机  $\leq 4$  级

功率为  $10 \sim 75$  kVA 时  $\leq 6$  级

功率  $> 75$  kVA 时  $\leq 8$  级 (有细调)

$\leq 12$  级 (无细调)

专用焊机及单机设计不受上述限制，可根据需要自行决定。

### 6. 计算初级绕组各级匝数

由于次级绕组匝数  $N_2 = 1$ ，所以初级绕组的总匝数为

$$N_1 = \frac{U_1}{U_{2min}}$$

各级匝数可按下法确定：若级数为  $n$ ，额定级定在倒数第二级，即  $n-1$  级上，则额定级的电压为  $U_{2(n-1)}$ 。若使电压按几何级数而随级别提高，其比率为  $q$ ，则：

$$U_{2(n-1)} = U_{2(1)} q^{n-2}$$

式中  $U_{2(1)}$  为第一级的电压。取对数后可得

$$\lg q = \frac{\lg \frac{U_{2(n-1)}}{U_{2(1)}}}{n-2}$$

求得  $q$  后，很容易算出焊机各级的电压：

$$U_{2(1)} = U_{2min}$$

$$U_{2(2)} = U_{2(1)} q$$

$$U_{2(3)} = U_{2(1)} q^2$$

.....

求得各级电压后，可由各级的变压比，算出初级绕组的匝数；取整数值，再反过来修正各级电压。得：

$$U_{2(1)}, U_{2(2)}, U_{2(3)}, \dots, U_{2(n)}$$

$$N_{1(1)}, N_{1(2)}, N_{1(3)}, \dots, N_{1(n)}$$

### 7. 计算初、次级绕组导线截面积 $S_1$ 、 $S_2$

初级绕组  $S_1 = \frac{I_{1c}}{j_1} \quad (\text{mm}^2)$

而  $I_{1c} = I_1 N \sqrt{FS_N}$

$$I_{1N} = (1.03 \sim 1.07) \frac{I_{2N}}{k}$$

式中 1.03~1.07——考虑变压器的损耗和磁化电流的系数

$k$ ——变压比;

$j_1$ ——初级绕组许用电流密度 ( $A/mm^2$ )。

有时为节省铜料, 在低于额定级才接入之绕组, 其截面积可选得小些。

$$\text{次级绕组} \quad S_2 = \frac{I_{2c}}{j_2} \quad (mm^2)$$

而  $I_{2c} = I_{2N} \sqrt{FS_N}$

如次级绕组由  $n$  圈并联, 则每圈的截面积为:

$$S_2' = S_2/n$$

$j_2$ ——次级绕组的许用电流密度 ( $A/mm^2$ ), 当有水冷却时, 其值可取得大些。

#### 8. 配置绕组, 确定铁心窗口尺寸

画出绕组和铁心的配置图, 标注各项尺寸 (包括绝缘隔板和间隙的尺寸)

#### 9. 计算铁心下料尺寸及片数

### 三、校核计算

#### 1 计算变压器绕组的电阻

(1) 次级绕组的电阻  $R_{2B}$

$$R_{2B} = \frac{m \rho_s l_{2p} N_2}{S_2} \quad (\Omega)$$

式中  $m$ ——趋表效应系数;

$\rho_s$ ——绕组材料的电阻系数 ( $\Omega \cdot mm^2/m$ ), 次级绕组有水冷时, 计算温度取  $50^\circ C$ ;

$l_{2p}$ ——次级绕组每圈的平均长度 (m);

$N_2$ ——次级绕组串联匝数，通常为1匝；

$S_2$ ——次级绕组的截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

(2) 初级绕组的电阻  $R_{1B}$

$$R_{1B} = \frac{m p_1 l_{1p} N_1}{S_1} \quad (\Omega)$$

折算到次级  $R'_{1B} = \frac{R_{1B}}{k^2}$

2. 计算变压器绕组的感抗

变压器绕阻的感抗  $X_B$ ，可按下式计算（折合到初级计算）

$$X_B = \frac{2\pi f \mu_0 N_1^2 l_p a_p}{b_s} \quad (\Omega)$$

式中  $f$ ——电源频率 (Hz)；

$N_1$ ——初级绕组匝数；

$\mu_0$ ——空气的导磁系数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$  (H/cm)；

$l_p$ ——初、次级绕组的平均长度 (cm)；

$a_p$ ——初、次级绕组间的折合距离 (cm)；

$b_s$ ——漏磁通磁力线的计算长度 (cm)。

初、次级绕组间的折合距离  $a_p$ ，以下法确定：

当初级绕组为园筒形时 (图4-2)

$$a_p = \Delta_1 + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3}$$

式中  $\Delta_1$ ——初级绕组线圈的厚度；

$\Delta_2$ ——次级绕组线圈的厚度；



$\Delta_{12}$ ——初、次级绕组线圈间距离。

当初级绕组为盘形时（图4-3），各盘感抗是不同的。因此，须先计算各盘的感抗，然后相加得变压器绕组的总感抗。对于边缘的盘（图4-3中以A表示者）

$$a_p = \Delta_{12} + \frac{\Delta_1 + \frac{\Delta_2}{2}}{3}$$

对于中间的盘（图4-3中以B表示者）

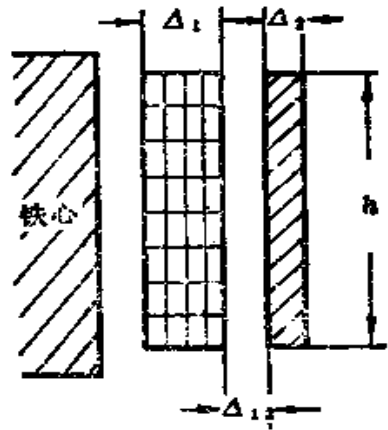


图4-2 供计算漏感用的筒形绕组剖面图

$$a_p = \Delta_{12} + \frac{\Delta_1 + \frac{\Delta_2}{2}}{3} + \frac{\Delta_{11}}{4}$$

漏磁通磁力线的计算长度 $b_s$ ，可按下式计算：  
当初级绕组为圆筒形时

$$b_s = \frac{h}{1 - \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{12}}{\pi h}}$$

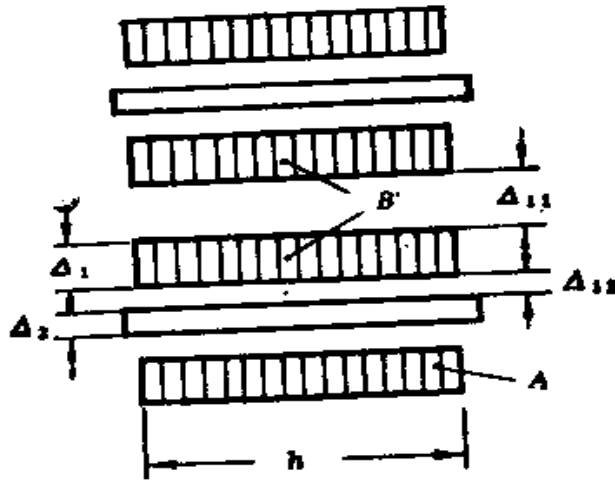


图4-3 供计算漏感用的盘形绕组剖面图

当初级绕组为盘形时，对于边缘的盘

$$b_s = \frac{h}{1 - \frac{\Delta_{11} + \Delta_1 + \frac{\Delta_2}{2}}{\pi h}}$$

对于中间的盘

$$b_s = \frac{h}{1 - \frac{\Delta_{11} + \Delta_1 + \frac{\Delta_2}{2} + \frac{\Delta_{11}}{2}}{\pi h}}$$

当盘形绕组变压器的各盘串联时，变压器总感抗为各盘感抗之和。

变压器的总感抗  $X_B$  大致可以认为是平均地分布在初级绕组和次级绕组上，即各负担一半。

于是次级绕组的感抗为

$$X_{1B} = \frac{X_B}{2} \frac{1}{k^2}$$

初级绕组的感抗折算至次级后，

$$X''_{1B} = \frac{X_B}{2} \frac{1}{k^2}$$

焊机总阻抗还有一个重要性质，就是当变压器级别改变时，尽管会引起变压器绕组有效电阻  $R_{1B}$  和感抗  $X_{1B}$  的变化，但它们换算到次级后，实际上都可认为不变。

### 3. 次级额定空载电压 $U_{2N}$ 的校核

根据初步设计出来的变压器，计算其  $R''_B$  及  $X''_B$ ，重新计算  $Z''_H$ 。将此时算出之  $U_{2N} = I_{2N} Z''_H$  与初步设计中预定的  $U_{2N}$  比较，看它们是否一致。

如结果一致，或相差  $< 10\%$ ，则不必重新计算。

$U_{2N}$  之差超过一级的范围，则可以不取倒数第二级作额定级，而可以用低一级。

如  $U_{2N}$  之差超出上述范围，则须重新拟订  $U_{2N}$ ，进行二次设计。

### 4. 空载电流 $I_0$ 的核算

$$I_0 = \sqrt{I_C^2 + I_p^2} \quad (\text{A})$$

式中  $I_C$ ——空载电流中的有功部分，

$$I_C = \frac{\Delta_{Fe} G_{Fe} k_C}{U_1}$$

$\Delta_{Fe}$ ——硅钢片的比损耗 ( $\text{w/kg}$ ) 可从表 5-2、表 5-3、表 5-4 查得；

$G_{Fe}$ ——变压器铁心重量 ( $\text{kg}$ )；

$k_c$ ——考虑硅钢片制造质量的系数，一般取1.1~1.2，

$I_p$ ——空载电流中的无功部分，

$$I_p = \frac{I_s a N + 8000 n_g \Delta B_m}{N_1 \sqrt{2}}$$

$l_s$ ——变压器磁路的平均长度(cm)，

$aN$ ——铁心的At/cm数，根据硅钢片牌号和所取的 $B_m$ 查表5-3，表5-4得出，

$n_g$ ——磁路中空气隙的数目，

$\Delta$ ——空气隙的大小(cm)。

算出 $I_c$ 及 $I_p$ 后，即可求得 $I_0$ 。

一般规定  $\frac{I_0}{I_{1N}} \geq 10\%$

式中  $I_0$ ——额定级的空载电流。

#### 5. 铁心及绕组的发热计算(略)

### 附：电阻焊变压器的简化设计法

电阻焊变压器的常规计算比较繁复，初步设计中所用的一些数据，如 $R_{1B}$ ， $R_{2B}$ ， $X_{1B}$ ， $X_{2B}$ 等都是假定的， $R_A$ ， $X_A$ 的估算也相当粗略，用这些数据计算出来的焊机总阻抗 $Z_B$ ，以及由 $Z_B$ 而得出的变压器次级额定空载电压 $U_{1N}$ ，只具有近似参考的价值。既然如此，我们不妨用一些统计数据和经验公式来直接选定 $U_{1N}$ ，却可省去一套复杂的计算。

简化后的设计步骤如下：

## 一、设计的原始数据

1. 网路电压  $U_1$  (V)
2. 电源频率  $f$  (Hz)
3. 额定负载持续率  $FS_N$  (%)
4. 次级额定电流  $I_{2N}$  (A) 或变压器额定视在功率  $P$  (kVA)
5. 冷却方式

## 二、初步设计

1. 根据  $I_{2N}$  或  $P$  选定  $U_{2N}$  (查表4-1)

表4-1 通用型电阻焊机的  $P$ 、 $I_{2N}$ 、 $U_{2N}$  值 (经验数据)

| 视在功率 $P$<br>(kVA) | 次级额定电流 $I_{2N}$ 的<br>大致值 (A) | 次级额定空载电压 $U_{2N}$<br>的大致值 (V) |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 5                 | 2500                         | 2.03                          |
| 10                | 4000                         | 2.64                          |
| 25                | 7000                         | 3.75                          |
| 50                | 11000                        | 4.88                          |
| 75                | 14000                        | 5.70                          |
| 100               | 16000                        | 6.34                          |
| 150               | 21000                        | 7.40                          |
| 200               | 25000                        | 8.25                          |

(注: 表中的数据是我们查阅了一些电阻焊机的资料, 根据曲线拟合的经验公式  $U_{2N} = 1.1P^{0.22}$  (V) 计算出来的, 仅供参考。)

## 2. 计算铁心截面积

$$S_{Fe} = \frac{U_{2N} \times 10^4}{4.44 f N_2 B_m} \quad (\text{cm}^2)$$

3. 确定铁心柱叠片宽度  $a$  及厚度  $b$
4. 确定次级电压调节范围和级数
5. 计算初级绕组各级匝数
6. 计算初、次级绕组导线截面积等

以上计算与前述相同。第三步校核计算是否进行，应根据需要而定。

专用焊机或对次级回路有特殊要求者（例如长臂点焊机），不能直接套用表4-1的数据，因为此时的次级阻抗值与通用型的相差较大。

### § 4-3 电阻焊变压器设计举例

#### 一、原始数据

1. 网路电压  $U_1 = 380$  (V)
2. 电源频率  $f = 50$  (Hz)
3. 额定负载持续率  $FS_N = 20\%$
4. 通用型点焊机，典型焊件为  $1.5 + 1.5$  (mm) 低碳钢板，次级额定电流  $I_{2N} = 7000$  (A) 左右，变压器功率约为 25 (KVA)
5. 次级水冷

#### 二、初步设计

按常规设计应首先画出焊机次级回路标有尺寸的草图，参考功率相近的变压器参数，并假定一个变压比  $k$ ，算出变压器的次级额定空载电压  $U_{2N}$ ，再进行其他参数的设计。

现按简化的设计法进行设计：

1. 根据已知的  $I_{2N}$  或  $P$  值查表4-1，得

$$U_{2N} = 3.75 \text{ (V)}$$

2. 计算铁心截面积

$B_m$  取为 1.5 (T) (根据铁心材料)

电阻焊变压器的次级匝数  $N_2 = 1$  匝

$$\begin{aligned} \text{则 } S_{Fe} &= \frac{U_{2N} \times 10^4}{4.44 f N_2 B_m} \\ &= \frac{3.75 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1 \times 1.5} = 112 \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

3. 确定铁心柱叠片宽度  $a$  及厚度  $b$

取  $a = 8 \text{ (cm)}$

则  $b = 14 \text{ (cm)}$

$$\text{毛厚 } b' = \frac{b}{K_c} = \frac{14}{0.93} = 15 \text{ (cm)}$$

4. 确定次级电压调节范围和级数

$$\text{取 } \frac{U_{2N}}{U_{2min}} = 1.75$$

$$\text{则 } U_{2min} = \frac{U_{2N}}{1.75} = \frac{3.75}{1.75} = 2.14 \text{ (V)}$$

分 6 级调节，额定级定为第 5 级。

5. 计算初级绕组各级匝数

次级绕组匝数  $N_2 = 1$  匝

初级绕组总匝数

$$N_1 = \frac{U_1}{U_{2min}} = \frac{380}{2.14} = 178 \text{ (匝)}$$

若电压按几何级数提高，则比率  $q$  为：

$$\lg q = \frac{\lg \frac{U_{2(n-1)}}{U_{2(1)}}}{n-2}$$

已知  $n = 6$ ,  $U_{2(n-1)} = U_{2N} = 3.75$  (V)

$$U_{2(1)} = U_{2m} = 2.14$$
 (V)

可算出比率  $q = 1.15$

焊机各级电压及初级绕组各级匝数为:

第1级  $U_2 = 2.14$  (V)  $N_1 = 178$  (匝)

第2级  $U_2 = 2.46$  (V)  $N_1 = 154$  (匝)

第3级  $U_2 = 2.83$  (V)  $N_1 = 134$  (匝)

第4级  $U_2 = 3.25$  (V)  $N_1 = 117$  (匝)

第5级  $U_2 = 3.74$  (V)  $N_1 = 102$  (匝)

第6级  $U_2 = 4.30$  (V)  $N_1 = 89$  (匝)

各级匝数取整数值, 修正后的次级电压稍有些差异。

#### 6. 计算初、次级绕组导线截面积

初级绕组  $S_1 = \frac{I_{1c}}{j_1}$  (mm<sup>2</sup>)

$$I_{1N} = (1.03 \sim 1.07) \frac{I_{2N}}{k}$$

$$= 1.07 \times \frac{7000}{102} = 73.4$$
 (A)

$$I_{1c} = I_{1N} \sqrt{FS_N}$$

$$= 73.4 \times \sqrt{20\%} = 32.8$$
 (A)

$j_1$ 取2.5A/mm<sup>2</sup>

$$S_1 = \frac{I_{1c}}{j_1} = \frac{32.8}{2.5} = 13.1$$
 (mm<sup>2</sup>)

次级绕组  $S_2 = \frac{I_{2c}}{j_2}$  (mm<sup>2</sup>)

$$I_{2c} = I_{2N} \sqrt{FS_N}$$



$$= 7000 \times \sqrt{20\%} = 3130 \quad (\text{A})$$

$$j_2 \text{ 取 } 4.5 \text{ A/mm}^2$$

$$\text{则 } S_2 = \frac{I_2 c}{j_2} = \frac{3130}{4.5} = 696 \quad (\text{mm}^2)$$

7. 其它绕组配置，铁心窗口安排及校核计算等从略。

## § 4-4 电容储能焊变压器设计

电容储能焊机的原理如图4-4所示。这种焊机通常有两个变压器：充电变压器（整流变压器）和放电变压器（焊接变压器），分述如下。

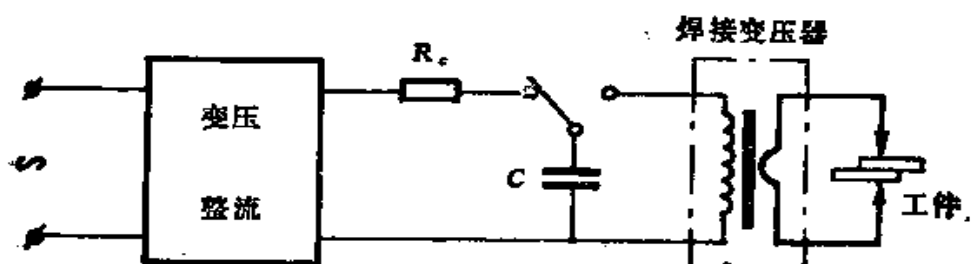


图4-4 电容储能焊原理图

### 一、充电变压器

充电变压器（整流变压器）可做成单相（小功率时）或三相（大功率时），各种整流电路的交、直流换算系数参见第一章表1-3。

整流器的直流输出电压和直流输出电流分别用 $U_d$ 和 $I_d$ 表示。

电容器在充电过程中，充电电流 $i_c$ 和电容两端的电压 $u_c$ 。

按下式变化

$$i_c = \frac{U_d}{R_c} e^{-\frac{t}{R_c C}} = \frac{U_d}{R_c} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{A})$$

$$u_c = U_d - i_c R_c = U_d (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (\text{V})$$

式中  $U_d$ ——电源电压，即整流器输出电压 (V)；

$R_c$ ——充电回路的总电阻 ( $\Omega$ )；

$C$ ——电容器的总电容量 (F)；

$e$ ——自然对数的底；

$t$ ——充电时间 (s)；

$\tau$ ——时间常数， $\tau = R_c C$ 。

$i_c$  和  $u_c$  都是按指数规律变化的，

在充电开始的瞬间  $i_c = I_{c\max} = \frac{U_d}{R_c}$ ， $u_c = 0$

当  $t = \tau$  时  $i_c = 37\% I_{c\max}$ ， $u_c = 63\% U_d$

当  $t = 2\tau$  时  $i_c = 14\% I_{c\max}$ ， $u_c = 86\% U_d$

当  $t = 3\tau$  时  $i_c = 5\% I_{c\max}$ ， $u_c = 95\% U_d$

当  $t = 4\tau$  时  $i_c = 2\% I_{c\max}$ ， $u_c = 98\% U_d$

当  $t = 5\tau$  时  $i_c \approx 0$ ， $u_c \approx U_d$

充电时间  $t$  根据焊机的生产率选择，然后根据预定的充电程度来选择充电电阻  $R_c$  的大小。

通过积分运算，可求得充电的平均电流  $I_p$

$$I_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_d}{R_c} e^{-\frac{t}{\tau}} dt \quad (\text{A})$$

式中  $T$ ——选定的充电时间 (s)；

$I_p$ ——就是整流变压器输出的电流  $I_s$ 。

这些参数确定后，就可以进行充电变压器的设计计算了。

充电变压器设计步骤：

(一)原始数据

1. 电源电压  $U_1$  (V)
2. 整流器输出电压  $U_d$  (V)
3. 电容器的总电容量  $C$  (F)
4. 充电时间  $T$  (s)
5. 时间常数  $\tau$  (s)
6. 额定负载持续率  $FS_N$  (%)
7. 整流器型式

(二)参数计算

1. 变压器次级电压  $U_2$

$$U_2 = K_U U_d \quad (\text{V})$$

式中  $K_U$ ——交直流电压换算系数，根据整流器型式，查表1-3。

2. 充电电阻  $R_c$

因为时间常数  $\tau = R_c C$

所以  $R_c = \tau / C \quad (\Omega)$

3. 变压器次级电流  $I_s$

充电的平均电流

$$I_p = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{U_d}{R_c} e^{-\frac{t}{\tau}} \right] dt \quad (\text{A})$$

根据已知参数，先算出 $I_2$ 。而  $I_2 = K_I I_P$ ，  
式中 $K_I$ 为交直流电流换算系数，可查表1-3。

4. 变压器次级功率 $P_2$

$$P_2 = U_2 I_2 \quad (\text{VA})$$

5. 变压器初级功率 $P_1$

$$P_1 = P_2 / \eta \quad (\text{VA})$$

式中  $\eta$  为变压器效率，可取0.8~0.9。

6. 确定变压器计算功率(长时容量)  $P_{sc}$

$$P_{sc} = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) \sqrt{FS_N} \quad (\text{VA})$$

7. 变压器初级电流 $I_1$

$$I_1 = 1.1 \frac{P_1}{U_1} \quad (\text{A})$$

式中 1.1为考虑激磁电流影响的系数。

8. 变压器初、次级电流的长时值 $I_{1s}$ 、 $I_{2s}$

$$I_{1s} = I_1 \sqrt{FS_N} \quad (\text{A})$$

$$I_{2s} = I_2 \sqrt{FS_N} \quad (\text{A})$$

(三)初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 确定变压器结构型式、铁心材料、磁密 $B_m$ 等

2. 计算变压器铁心截面积 $S_{Fe}$

$$S_{Fe} = K \sqrt{P_{sc}} \quad (\text{cm}^2)$$

式中 $K$ 为系数，可查表1-4。

3. 确定铁心片宽度 $a$ 及叠厚 $b$

$$S_{Fe} = a \cdot b \quad (\text{cm}^2)$$

$$\text{一般 } b = (1.2 \sim 2.0) a$$

铁心毛厚度  $b' = b/K_c$

式中  $K_c$  为叠片系数，可查表 1-5。

(四) 计算初、次级绕组

1. 求每伏电压所需要的匝数  $N_v$

$$N_v = \frac{45}{B_m S_{Fe}} \quad (\text{匝/V})$$

式中  $B_m$  为铁心的最大磁密 (T)

2. 求初、次级绕组匝数  $N_1$ 、 $N_2$

$$N_1 = N_v U_1 \quad (\text{匝})$$

$$N_2 = N_v U_2 \quad (\text{匝})$$

考虑到次级加上负载后，输出电压要下降一些，所以次级绕组匝数可比计算值增加 5~10%。

3. 计算初、次级绕组导线截面积  $S_1$ 、 $S_2$

$$S_1 = I_{1r} / j_1 \quad (\text{mm}^2)$$

$$S_2 = I_{2r} / j_2 \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $j_1$ 、 $j_2$  都是许用电流密度 (A/mm<sup>2</sup>)，可根据具体情况查表 5-10。

4. 根据计算结果，查导线规格。然后计算铁心窗口，进一步确定变压器尺寸等。(略)

充电变压器设计举例

(一) 原始数据

1. 电源电压  $U_1 = 380$  (V)

2. 整流器输出电压  $U_2 = 400$  (V)

3. 电容器的总电容量  $C = 0.04$  (F)

4. 充电时间  $T = 3$  (s)

5. 时间常数  $\tau = 1$  (s) (按  $T = 3\tau$  计，实际充电电压可

达 $U_d$ 的95%)

6. 额定负载持续率  $FS_N = 60\%$

7. 整流器型式: 单相桥式整流

(二) 参数计算

1. 变压器次级电压 $U_2$

查表1-3, 单相桥式 $K_U = 1.11$

$$U_2 = K_U U_d = 1.11 \times 400 = 444 \text{ (V)}$$

2. 充电电阻 $R_c$

$$R_c = \tau / C = 1 / 0.04 = 25 \text{ (\Omega)}$$

3. 变压器次级电流 $I_2$

先计算充电的平均电流 $I_p$

$$I_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_d}{R_c} e^{-\frac{t}{\tau}} dt$$

$$= \frac{1}{3} \int_0^3 \frac{400}{25} e^{-t} dt$$

$$= 5.07 \text{ (A)} \quad (\text{只取数值, 不论方向})$$

查表1-3, 单相桥式 $K_I = 1.11$

所以  $I_2 = K_I I_p = 1.11 \times 5.07 = 5.63 \text{ (A)}$

4. 变压器次级功率 $P_2$

$$P_2 = U_2 I_2 = 444 \times 5.63 = 2500 \text{ (VA)}$$

5. 变压器初级功率 $P_1$

$$P_1 = P_2 / \eta = 2500 / 0.8 = 3125 \text{ (VA)}$$

6. 确定变压器计算功率 $P_{BC}$

$$P_{BC} = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) \sqrt{FS_N}$$
$$= \frac{1}{2} (3125 + 2500) \times \sqrt{60\%} = 2178 \text{ (VA)}$$

7. 变压器初级电流 $I_1$

$$I_1 = 1.1 \frac{P_1}{U_1} = 1.1 \times \frac{3125}{380} = 9.05 \text{ (A)}$$

8. 变压器初、次级电流的长时值 $I_{1L}$ 、 $I_{2L}$

$$I_{1L} = I_1 \sqrt{FS_N} = 9.05 \times \sqrt{60\%} = 7.01 \text{ (A)}$$

$$I_{2L} = I_2 \sqrt{FS_N} = 5.63 \times \sqrt{60\%} = 4.36 \text{ (A)}$$

(三) 初步决定变压器铁心主要尺寸

1. 采用壳型变压器结构, 铁心材料用D 42-0.5硅钢片, 磁密 $B_m$ 取1.2T

2. 计算变压器铁心截面积 $S_{Fe}$

$$S_{Fe} = K \sqrt{P_{BC}} = 1 \times \sqrt{2178} = 46.7 \text{ (cm}^2\text{)}$$

3. 确定铁心片宽度 $a$ 及叠厚 $b$

取 $a = 6 \text{ cm}$

则 $b = 7.78 \text{ cm}$

毛厚度 $b' = b/K_c = 7.78/0.93 = 8.37 \text{ (cm)}$

(四) 计算初、次级绕组

1. 求每伏电压所需要的匝数 $N_v$

$$N_v = \frac{45}{B_m S_{Fe}} = \frac{45}{1.2 \times 46.7} = 0.803 \text{ (匝/V)}$$

2. 求初、次级绕组匝数 $N_1$ 、 $N_2$

$$N_1 = N_0 U_1 = 0.803 \times 380 = 305 \text{ (匝)}$$

$$N_2 = N_0 U_2 = 0.803 \times 444 = 357 \text{ (匝)}$$

$N_2$ 再加5%，取 $N_2 = 374$ 匝。

3. 计算初、次级绕组导线截面积 $S_1$ 、 $S_2$

电流密度 $j_1$ 、 $j_2$ 均取  $2\text{A}/\text{mm}^2$

$$S_1 = I_{10}/j_1 = 7.01/2 = 3.51 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$S_2 = I_{20}/j_2 = 4.36/2 = 2.18 \text{ (mm}^2\text{)}$$

其他步骤略。

## 二、焊接变压器

电容储能焊机的焊接变压器（放电变压器），到目前为止，还没有一个成熟的设计计算方法，现有的几种方法都是近似的。下面介绍三种。

### （一）第一种方法

这种方法是将放电波形近似看作正弦波，套用常规变压器的计算公式。而频率 $f$ 是通过数学分析解得的。这种近似法比较粗略，因而误差也比较大。

#### 1. 焊机（电容器）积存的能量 $A$

$$A = \frac{1}{2} C U_0^2 \text{ (J)}$$

式中  $C$ ——电容器的总电容量（F）；

$U_0$ ——充电电压（V）。

#### 2. 变压器的结构型式

变压器的结构型式与一般的电阻焊变压器相同。次级绕组的匝数 $N_2 = 1$ 。初级绕组的匝数，参考有关资料确定。对于充电电压为 $500\text{V}$ 以下的焊机， $N_1$ 通常为80匝左右（最高不超过200匝），对于充电电压为 $2000\sim 3000\text{V}$ 的焊机， $N_1$ 一般在 $100\sim 160$ 匝左右，有时为了取得合适的焊接电压，



$N_1$ 也有高达400匝以上者。

3. 确定变压器次级的电阻 $R_2$ 和电感 $L_2$ 值  
根据模拟试验或对同类焊机的实测得出。

4. 数学分析与参数计算

电容储能焊的简化电路和放电波形（电流、电压）示于  
图4-5及图4-6。

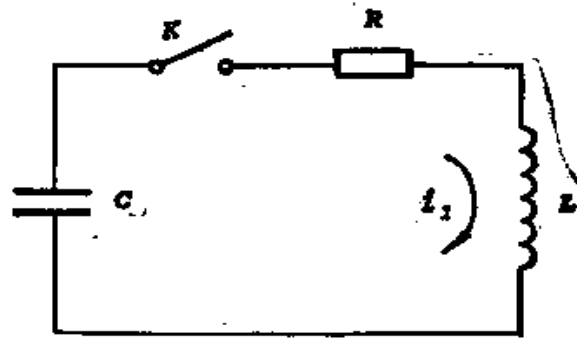


图4-5 电容储能焊机简化电路图

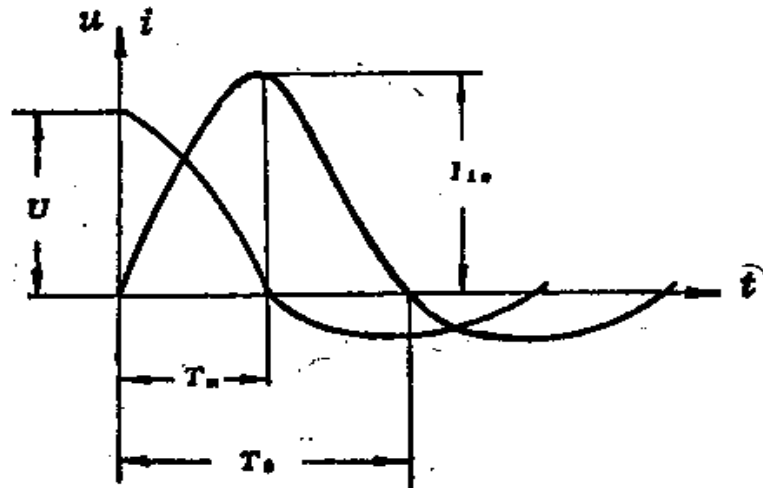


图4-6 变压器初级电流、电压示波图

在进行数学分析之前，先将有关符号介绍如下：

$u_c$ ——电容器两端的瞬时电压（V）；

$U_c$ —— $u_c$ 的最大值或起始值（V）；

$C$ ——电容器的总电容量（F）；

$R$ 、 $L$ ——折算到初级的总电阻（ $\Omega$ ）和总电感（H）；

$i_1$ ——初级电流的瞬时值（A）；

$I_{10}$ ——初级电流的第一个峰值（A）；

$I_{20}$ ——次级电流的第一个峰值（A）；

$T_1$ ——到第一个电流峰值的时间（s）；

$T_2$ —— $i_1$ 和 $i_2$ 半周的时间（s）。

根据基尔霍夫第二定律，可以列出方程：

$$u_L + u_R + u_C = 0$$

或 
$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + u_c = 0$$

因为 
$$i_1 = C \frac{du_c}{dt}$$

所以 
$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0$$

这是二阶常系数齐次微分方程，其特征方程为：

$$LCP^2 + RCP + 1 = 0$$

特征方程的根有三种情况：

当  $R/2 > \sqrt{L/C}$  时，有二个实根——过程为非振荡放电；

当  $R/2 = \sqrt{L/C}$  时，有一对重根——过程为临界情况；

当  $R/2 < \sqrt{L/C}$  时，有共轭复根——过程为振荡放电。

非振荡放电能量不集中，不适宜于焊接，临界状态又不易得到，所以，我们主要讨论振荡放电情况。

$R/2 < \sqrt{L/C}$  时，振荡放电，此时特征方程的共轭复根为：

$$\begin{aligned} P_{1,2} &= -\frac{R}{2L} \pm j \sqrt{1/LC - R^2/4L^2} \\ &= -\beta \pm j \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \end{aligned}$$

式中  $\beta = R/2L$  (衰减系数)

$\omega_0 = \sqrt{1/LC}$  (谐振角频率)

$\omega' = \sqrt{1/LC - R^2/4L^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  (振荡角频率)

微分方程的通解为：

$$\begin{aligned} u_s &= e^{-\beta t} (A_1 \cos \omega' t + A_2 \sin \omega' t) \\ &= A e^{-\beta t} \sin (\omega' t + \theta) \end{aligned}$$

由初始条件定常数：当  $t = 0$  时， $u_s = U_0$ ， $du_s/dt = 0$ ，得：

$$A_1 = U_0 \quad A_2 = U_0 \frac{\beta}{\omega'} \quad A = U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} \quad \theta = \text{tg}^{-1} \frac{\omega'}{\omega_0 \beta}$$

解得：

$$u_s = U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\beta t} \sin (\omega' t + \theta)$$

$$i_1 = -\frac{U_0}{\omega' L} e^{-\beta t} \sin \omega' t$$

$$u_L = L \frac{di_1}{dt} = U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\beta t} \sin (\omega' t - \theta)$$

为了求得峰值 $I_{1.0}$ 和时间 $T_m$ ，可将 $i_1$ 微分，并令 $di_1/dt = 0$ ，得出 $T_m$ 并计算 $I_{1.0}$ 。然后根据 $i_2 = ki_1 = N_1 i_1$ ， $L = k^2 L_1$ ， $R = k^2 R_1$ ，可求出 $I_{2.0}$ 。

$$T_m = \frac{\theta}{\omega'}$$

$$I_{1.0} = -\frac{U_0}{\omega_0 L} e^{-\beta T_m} = -U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\beta T_m}$$

$$I_{2.0} = U_0 \sqrt{\frac{C}{L_1}} e^{-\beta T_m}$$

令  $i_1 = 0$ ，即可得

$$T_0 = \frac{\pi}{\omega'}$$

根据已知的 $R_1$ 、 $L_1$ 、 $C$ 、 $U_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ ，由上述诸关系式可以计算出焊机各级的 $I_{1.0}$ 、 $I_{2.0}$ 、 $T_m$ 、 $T_0$ 等。

### 6 变压器铁心计算

如果把放电波形近似看作为正弦波，铁心截面积 $S_{Fe}$ 可按下列式计算：

$$S_{Fe} = \frac{U \times 10^4}{4.44 f B_m N_1} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $U$ ——充电电压的有效值 (V)；

$f$ ——频率，取放电周期的倒数，有两种算法：

$$f = \frac{1}{4T_m} \quad (\text{Hz})$$

或 
$$f = \frac{1}{2T_0} \quad (\text{Hz})$$

$B_m$ ——磁密 (T)。

频率  $f$  的两种算法, 有时使计算出来的  $S_{Fe}$  差别甚大, 需要根据经验和资料决定取舍。

6. 电容储能焊机的负载持续率很低, 在计算导线截面或选取电流密度时要考虑到。

## (二) 第二种方法

这种方法是从分析电容储能焊变压器的磁通入手, 推导出一个计算变压器铁心截面积的公式。由于放电波形的不同, 铁心中磁通的大小出入很大, 这给分析带来了困难, 也使计算产生一定的误差。

### 1. 等值电路

电容储能焊的放电回路, 可按  $\Gamma$  形等值法等值为如下的电路 (图4-7)。

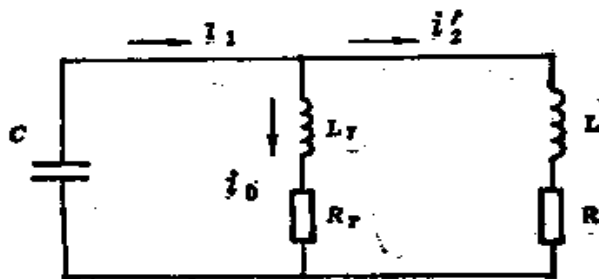


图4-7 电容储能焊的  $\Gamma$  形等值电路

$C$ ——电容

$L$ ——折合到变压器初级的总电感,

$R$ ——折合到变压器初级的总电阻,

$L_r$ 、 $R_r$ ——变压器的分路阻抗, 即代表激磁电流和铁心损耗的电感和电阻。

### 2. 电容器两端电压 $u_c$ 的变化规律

流过  $L_r$ 、 $R_r$  支路的电流为空载电流  $i_0$ , 一般说来,  $i_0$  甚

小（初级电流的10%以下），可近似认为  $i_2 = i_1$ 。这样，我们就可以把Γ形等值电路转化为近似等值电路，如图4-8所示。

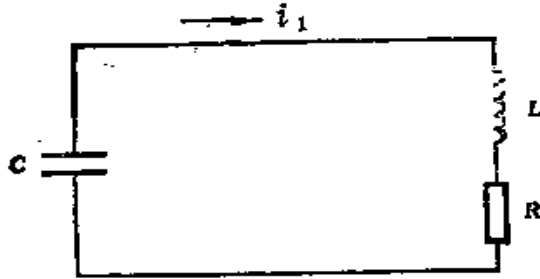


图4-8 电容储能焊的近似等值电路

这种电路的放电波形，前面已经作了数学分析。在  $R/2 < \sqrt{L/C}$  的情况下，解得振荡放电时电压、电流的变化规律为：

$$u_c = U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\beta t} \sin(\omega' t + \theta)$$

$$i_1 = -\frac{U_0}{\omega' L} e^{-\beta t} \sin \omega' t$$

$$u_L = U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\beta t} \sin(\omega' t - \theta)$$

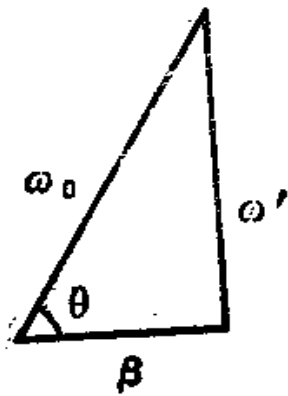


图4-9  $\beta$ 、 $\omega_0$ 、 $\omega'$ 的三角形关系

式中  $\beta$ 、 $\omega_0$ 、 $\omega'$  分别表示振荡放电的衰减系数、谐振角频率和振荡角频率，它们的数值取决于电路的原始参数  $R$ 、 $L$ 、 $C$ 。从数量关系上看， $\beta$ 、 $\omega_0$ 、 $\omega'$  组成三角形关系（图4-9）。

从式中还可以看出， $u_c$ 、 $i_1$  和  $u_L$  都是幅值衰减的正弦波，如图4-10所示。

### 3. 变压器中的磁通分析

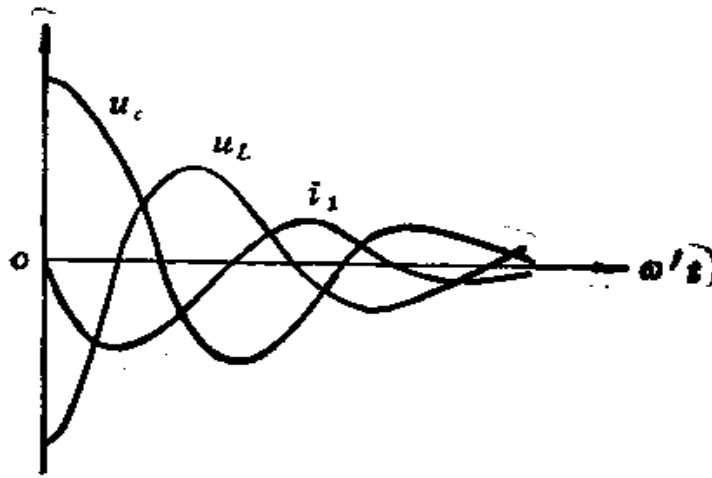


图4-10  $u_c$ 、 $i_1$ 、 $u_L$ 的波形图

在解得  $u_c$  的变化规律后，便可着手分析  $\Gamma$  形等值电路中  $L_T - R_T$  支路的情况。

同样，根据基尔霍夫第二定律，列出方程：

$$u_{LT} + u_{RT} + u_c = 0$$

或 
$$L_T \frac{di_1}{dt} + R_T i_1 + u_c = 0$$

磁通链  $\psi = L_T i_1$ ，代入上式：

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{R_T}{L_T} \psi + u_c = 0$$

将  $u_c$  的关系式代入上式

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{R_T}{L_T} \psi + U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\beta t} \sin(\omega' t + \theta) = 0$$

变压器因磁饱和，电感不是常数，增加了解方程的困

难。在近似计算中，常采用“有条件的直线化法”，即把工作点看作是在磁化曲线饱和段以下，或者用一个平均电感来代替，而将非线性电感转化为线性电感。由此，若把  $L_T$  视为常数，则上式为一阶常系数非齐次微分方程，它的通解为：

$$\psi = -U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\frac{R_T}{L_T} t} \int e^{\left(\frac{R_T}{L_T} - \beta\right) t} \sin(\omega' t + \theta) dt + A e^{-\frac{R_T}{L_T} t}$$

$$= -\frac{U_0 \omega_0}{\omega' \sqrt{\omega'^2 + \left(\frac{R_T}{L_T} - \beta\right)^2}} e^{-\beta t} \sin\left(\omega' t + \theta\right)$$

$$- \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega'}{\frac{R_T}{L_T} - \beta} \Bigg) + A e^{-\frac{R_T}{L_T} t}$$

$$\text{令 } \frac{R_T}{L_T} = \gamma, \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega'}{\frac{R_T}{L_T} - \beta} = \alpha$$

由初始条件  $t = 0, \psi = 0$ ，确定积分常数  $A$ 。

$$\text{得 } A = \frac{U_0 \omega_0}{\omega' \sqrt{\omega'^2 + (\gamma - \beta)^2}} \sin(\theta - \alpha)$$



$$\text{于是 } \psi = - \frac{U_0 \omega_0}{\omega' \sqrt{\omega'^2 + (\gamma - \beta)^2}} [e^{-\beta t} \sin(\omega' t + \theta - \alpha) - e^{-\gamma t} \sin(\theta - \alpha)]$$

而磁通  $\phi = \frac{\psi}{N_1}$ ，因此得

$$\phi = - \frac{U_0 \omega_0}{N_1 \omega' \sqrt{\omega'^2 + (\gamma - \beta)^2}} [e^{-\beta t} \sin(\omega' t + \theta - \alpha) - e^{-\gamma t} \sin(\theta - \alpha)]$$

这是在没有剩磁情况下得出的关系式，采用振荡放电时，变压器被交替磁化，由于放电是衰减的，可以认为变压器中没有剩磁。

这个式子比较复杂，需要进一步化简，以便于分析。

#### 4. 磁通表达式的简化

通过对类似变压器的考察，发现  $\gamma$  与  $\beta$  的值处于同一个数量级（约为 30~50 左右）。为了分析方便起见，我们将  $\gamma$  与  $2\beta$  分三种情况加以讨论，来简化磁通表达式。

(1) 当  $\gamma = 2\beta$  时， $\alpha = \theta$ ，磁通与电流同相，“自由分量”为 0，立即建立“稳态”过程（图 4-11），此时磁通为：

$$\phi = - \frac{U_0}{N_1 \omega'} e^{-\beta t} \sin \omega' t$$

(2) 当  $\gamma > 2\beta$  时， $\alpha < \theta$ ，磁通的“稳态分量”超前电流  $i_1$  一个  $(\theta - \alpha)$  角。合成磁通等于“稳态分量”减去“自由分量”，其幅值比“稳态分量”的幅值要小。所以，用“稳态分量”来代替合成磁通作为设计变压器的依据，不会产生饱和问题。

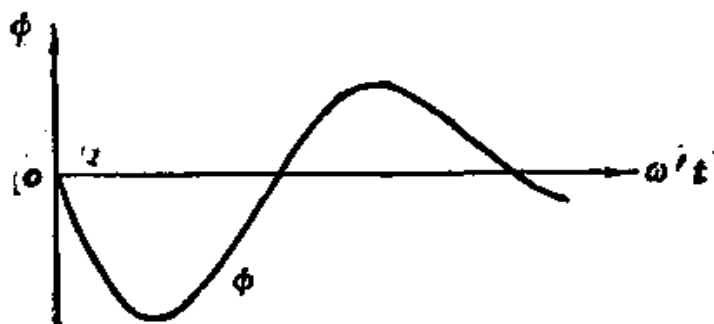


图4-11  $\gamma = 2\beta$ 时磁通的波形

(3) 当  $\gamma < 2\beta$  时,  $\alpha > \theta$ , 磁通的“稳态分量”滞后电流  $i_1$  一个  $(\alpha - \theta)$  角, 合成磁通等于“稳态分量”加上“自由分量”。但是, 在一个衰减过程中, 滞后意味着幅值的下降。所以, 虽然叠加了“自由分量”, 合成磁通的幅值却增加得很有限。

综合以上三种情况, 从考虑磁通最大变化量的角度出发, 完全可以采用第一种情况的最简单形式来表达磁通, 即认为  $\gamma = 2\beta$ , 此时磁通表达式简化为:

$$\phi = -\frac{U_0}{N_1 \omega'} e^{-\beta t} \sin \omega' t$$

### 5. 磁通的最大值

从上面的分析可知, 磁通  $\phi$  可以看作是一个与电流  $i_1$  同相, 幅值衰减的正弦波。

对  $\phi$  求导, 确定磁通出现最大值的时刻:

$$\begin{aligned} [\phi]' &= -\frac{U_0}{N_1 \omega'} [e^{-\beta t} \sin \omega' t]' \\ &= -\frac{U_0}{N_1 \omega'} e^{-\beta t} (\omega' \cos \omega' t - \beta \sin \omega' t) \end{aligned}$$

令  $[\phi]' = 0$ ，即  $\omega' \cos \omega' t - \beta \sin \omega' t = 0$

得  $\operatorname{tg} \omega' t = \frac{\omega'}{\beta}$ ，即  $\omega' t = \theta$  时有最大值。

将  $\omega' t = \theta$  代入磁通式中，就可以得到磁通第一个半波的最大值。

$$\phi_m = -\frac{U_0}{N_1 \omega'} e^{-\beta \frac{\theta}{\omega'}} \sin \theta$$

$$= -\frac{U_0}{N_1 \omega_0} e^{-\frac{\theta}{\operatorname{tg} \theta}}$$

令  $K_0 = e^{-\frac{\theta}{\operatorname{tg} \theta}}$ ，则  $\phi_m$  可写作：

$$\phi_m = -\frac{K_0 U_0}{N_1 \omega_0}$$

### 6. 电容储能焊变压器铁心截面积的计算式

知道了  $\phi_m$ ，即可依据它来计算变压器铁心截面积：

$$S_{Fe} = \frac{\phi_m}{B_m} = \frac{K_0 U_0}{N_1 \omega_0 B_m} \times 10^4 \text{ (cm}^2\text{)}$$

式中  $U_0$ ——电容器充电电压 (V)；

$N_1$ ——变压器初级绕组匝数；

$B_m$ ——最大磁密 (T)；

$\omega_0$ ——谐振角频率， $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ ；

$K_0$ ——取决于放电波形的系数。其值在  $\frac{1}{e} \sim 1$  之间。

可根据电路参数计算的  $\theta$  角确定,

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega'}{\beta}, \quad K_s = e^{-\frac{\theta}{\operatorname{tg} \theta}}$$

## 7. 设计的具体步骤

### (1) 原始数据

充电电压  $U_0$  (V)

电容器的总电容量  $C$  (F)

变压器初级绕组匝数  $N_1$

折合到初级的变压器总电阻  $R$  ( $\Omega$ )

折合到初级的变压器总电感  $L$  (H)

最大磁密  $B_m$  (T)

需要说明的是,原始数据中的初级绕组匝数  $N_1$ ,应根据所需的次级电压并参考有关资料选取;总电阻  $R$  与总电感  $L$ ,在变压器设计出来以前,只能用类似的变压器数据假定,待设计完成后,再计算实际的  $R$  与  $L$  值,并与假定值进行对照比较,若相差较多,还需重新假定后再设计。

### (2) 参数计算

谐振角频率  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$

衰减系数  $\beta = \frac{R}{2L}$

振荡角频率  $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$

相位角  $\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega'}{\beta}$

$$\text{系数 } K_e = e^{-\frac{\theta}{\lg \theta}}$$

(3) 计算铁心截面积

$$S_{Fe} = \frac{K_e U_e}{N_1 \omega_0 B_m} \times 10^4 \quad (\text{cm}^2)$$

(4) 其他如窗口尺寸、绕组截面积及安排等略。

(三) 第三种方法

这是一个非常简单的经验公式，用来估算电容储能焊变压器铁心。它是由第二种方法通过数学变换并代入一些变压器参数的统计值而得出的。因为简单，误差当然也大一些。

估算电容储能焊变压器铁心截面积的经验公式为：

$$S_{Fe} = (6.5 \sim 8) \sqrt{A} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $A$ ——电容器储存的能量 (J)

(6.5~8)——系数。大能量变压器取小值，小能量变压器取大值。

这一经验公式主要适用于中小容量的电容储能焊机。

## § 4-5 电容储能焊变压器设计举例

### 一、原始数据

1. 充电电压  $U_e = 400$  (V)
2. 电容量  $C = 40000 \mu F = 0.04$  (F)
3. 初级绕组匝数  $N_1 = 40$  (匝)
4. 折合到初级的变压器总电阻  $R = 9.6 \times 10^{-2}$  ( $\Omega$ )
5. 折合到初级的变压器总电感  $L = 1.92 \times 10^{-2}$  (H)

6. 最大磁密  $B_m = 1.4(\text{T})$

## 二、参数计算

1. 电容器储存的总能量

$$A = \frac{1}{2} C U_0^2 = \frac{1}{2} \times 0.04 \times 400^2 = 3200 \text{ (J)}$$

2. 谐振角频率

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{1.92 \times 10^{-2} \times 0.04}} = 114 \text{ (1/s)}$$

3. 衰减系数

$$\beta = \frac{R}{2L} = \frac{9.6 \times 10^{-2}}{2 \times 1.92 \times 10^{-2}} = 25$$

4. 振荡角频率

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{114^2 - 25^2} = 112 \text{ (1/s)}$$

5. 相位角

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{\omega'}{\beta} = \text{tg}^{-1} \frac{112}{25} = 1.35$$

6. 系数

$$K_0 = e^{-\frac{\theta}{\text{tg} \theta}} = 0.75$$

## 三、计算铁心截面积

1. 用第一种方法

$$S_{Fe} = \frac{U_0 \times 10^4}{4.44 f N_1 B_m} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $U_0$  —— 充电电压有效值,  $U_0 = \frac{400}{\sqrt{2}} = 283 \text{ (V)}$

$f$  —— 频率有两种算法,  $f_1 = \frac{1}{4T_m}$      $f_2 = \frac{1}{2T_0}$

$$T_m = \frac{\theta}{\omega'} = \frac{1.35}{112} = 0.012 \text{ (s)}$$

$$T_0 = \frac{\pi}{\omega'} = \frac{3.14}{112} = 0.028 \text{ (s)}$$

所以  $f_1 = \frac{1}{4T_m} = 20.8 \text{ 1/s}$

$$f_2 = \frac{1}{2T_0} = 17.9 \text{ 1/s}$$

用  $f_1$  及  $f_2$  算出的铁心截面积范围为:

$$S_{Fe} = 547 \sim 637 \text{ (cm}^2\text{)}$$

2. 用第二种方法

$$\begin{aligned} S_{Fe} &= \frac{K_0 U_0}{N_1 \omega_c B_m} \times 10^4 \\ &= \frac{0.75 \times 400 \times 10^4}{40 \times 114 \times 1.4} = 468 \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

3. 用第三种方法

$$S_{Fe} = 8\sqrt{A} = 8\sqrt{3200} = 452 \text{ (cm}^2\text{)}$$

式中，系数取 8

#### 四、比较

这是北京某厂设计的一台电容储能焊变压器实例。其中  $N_1$ 、 $R$ 、 $L$  等数据是他们参考有关资料选定的。

我们以它为例用三种方法计算了铁心截面积。第一种方法算出铁心截面为  $547 \sim 637 \text{cm}^2$ ，范围较大，上下相差近  $100 \text{cm}^2$ ；第二种方法与第三种方法计算的结果相近，都在  $460 \text{cm}^2$  左右，而该厂最后选用的铁心截面正好是  $460 \text{cm}^2$ ，可见后两种方法比较切合实际。该厂在资料中介绍，变压器制成后经过使用和测试，认为效果满意，这说明后两种方法具有较高的可靠性。

其他计算从略。



## 第五章 电工材料

### § 5-1 硅钢片

铁、钴、镍及其合金在外磁场的作用下，具有强烈磁化的特性称为铁磁物质。铁磁物质有高导磁性、磁化饱和现象和磁滞现象。磁滞回线比较窄的铁磁物质磁滞损失较小，称为软磁材料。常用的软磁材料有铸铁、铸钢、硅钢、坡莫合金和铁氧体等。

硅钢片是软磁材料中应用最广的一种，用于变压器铁心、电抗器铁心、磁饱和电抗器铁心、电机的主要磁路部分等。

#### 一、硅对硅钢片性能的影响

硅钢片是在工程纯铁中加入硅而制得的。

硅的加入可以使硅钢片的磁导率增大，磁滞损失减小。当硅钢片中含硅量超过2.5%时，采用高温退火能得到较大的晶粒。硅钢片的晶粒大时，磁导率也大，磁滞损耗则小。当含硅量为6.5%时，损耗最小，但硅钢片变得太脆，因此一般用的硅钢片含硅量没有这么高。

硅的加入可以使硅钢片的电阻系数升高，涡流损耗降低。

硅的加入可以使硅钢片的老化现象减小。含3~4%硅的硅钢片在120°C保温120小时，磁性几乎没有变化。

硅的加入带来了许多优点，也带来了一些缺点，硅的加入使硅钢片硬度提高，而延伸性、韧性降低，这就使硅钢片的加工比较困难。

## 二、其他因素对硅钢片性能的影响

### 1. 内应力

硅钢片在承受辗压、冲剪等加工或弯曲、拉伸等外应力时，会产生内应力。内应力妨碍材料的磁化和退磁，使磁导率降低，磁滞损耗增加。为减小这方面的影响，经过加工的硅钢片要进行退火处理，消除内应力，恢复磁性能。此外，在叠装变压器铁心时应避免弯曲硅钢片。

### 2. 晶粒大小

前面已经提到，硅钢片晶粒大小对内应力也有影响。晶粒大，则内应力小，磁导率大，磁滞损耗小，所以希望硅钢片的晶粒大一些。大晶粒可以用高温退火获得。但硅钢片的晶粒也不能过大。因为随着硅钢片晶粒的增大，硅钢片的电阻系数减小，涡流损耗增大。

## 三、硅钢片的分类

硅钢片分电机用硅钢片和变压器用硅钢片两种。电机用硅钢片要有较高的塑性，所以含硅量较低，约为1.0~2.5%。变压器用硅钢片要求铁损小，所以含硅量较高，约为3.0~4.5%。

硅钢片按制造工艺又分为热轧硅钢片和冷轧硅钢片两种。冷轧硅钢片的磁导率比热轧硅钢片大，单位铁损比热轧硅钢片小。采用冷轧硅钢片，可以使变压器的重量和体积大为减小。但目前生产中广泛应用的冷轧硅钢片在顺轧制方向和垂直轧制方向的导磁性能差别比较大。使用冷轧硅钢片时，剪切必须顺轧制方向，剪切后最好进行退火处理。

硅钢片厚度越大，涡流损耗也越大。从减小涡流损耗出发，希望薄些。但硅钢片过薄，一方面轧制困难，成本高，另一方面又增大了磁滞损耗。工频（50Hz）下工作的变压器，硅钢片厚度为0.35mm及0.5mm较合适。

我国生产的电工硅钢片，按硅含量多少及电磁性能分类，以代号表示，称为硅钢片的钢号。它是由字母和数字配合组成。

(1) 第一个字母表示用途

**D**——电工用硅钢片。

(2) 第二个字母表示检验时硅钢片的磁化条件

**G**——高频（ $f = 400\text{Hz}$ ）用；

**H**——中磁场下使用；

**R**——弱磁场下使用；

没有第二个字母是在频率  $f = 50\text{Hz}$  和强磁场下使用的硅钢片。

(3) 第一位数字(1、2、3、4)表示硅钢片含硅量等级(见表5-1)。

表5-1 硅钢片的含硅量

| 数 字 | 含硅量%    | 名 称         |
|-----|---------|-------------|
| "1" | 0.8~1.8 | 低 硅 合 金 钢   |
| "2" | 1.8~2.8 | 中 硅 合 金 钢   |
| "3" | 2.8~3.8 | 较 高 硅 合 金 钢 |
| "4" | 3.8~4.8 | 高 硅 合 金 钢   |

(4) 第二位数字 (1、2、3、4) 表示硅钢片的电磁性能。在同一含硅等级，同一检验磁场条件下，数字越大，电磁性能越好。

(5) 第三位和第四位数字 (0、00) 表示冷轧硅钢片。

0——晶粒取向的冷轧硅钢片，即只在轧制方向有良好的磁性能，垂直轧制方向的磁性能大为降低。

00——晶粒取向程度小的冷轧硅钢片，在轧制方向和垂直轧制方向均有较好的磁性能。

变压器铁心经常使用的硅钢片是：D41~D44；D310~D340。

#### 四、硅钢片的性能

设计变压器时，需要知道所选用硅钢片的性能数据。表5-2至表5-5列出了各号硅钢片的性能数据。

表5-2《50Hz交变磁化及在强磁场下试验钢号及其磁性》给出了各号硅钢片磁化曲线在较大范围的变化情况，及磁化曲线上主要点的单位铁损。

表5-3《热轧硅钢片性能数据》及表5-4《冷轧硅钢片性能数据》给出了各号硅钢片磁化曲线重要区段内的细微变化情况，及相应的磁化容量和单位铁损。

表5-5是硅钢片接缝处磁化容量。

验算变压器技术经济指标时，根据表中所列硅钢片性能及其他数据，可以计算变压器的空载电流及铁损。

#### 五、铁心最大磁通密度 $B_m$ 的选择

##### 1. 硅钢片的磁化曲线

硅钢片的磁通密度 $B$ 与磁场强度 $H$ 的关系曲线称为磁化曲线。硅钢片的磁化曲线是非线性的，如图5-1所示。

从图5-1的磁化曲线可见，硅钢片有磁饱和现象。当磁场

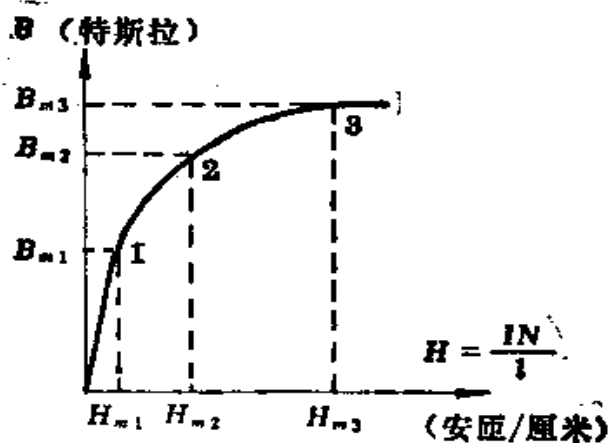


图5-1 硅钢片的磁化曲线

强度  $H$  超过一定值 (如  $H_{m1}$ ) 后, 磁场强度进一步增大, 硅钢片的磁通密度  $B$  增大很少。

## 2. $B_m$ 的大小对变压器的影响

对于一定牌号的硅钢片, 在多大的磁通密度  $B_m$  下工作好呢?

学习变压器原理时已经知道, 加于变压器初级绕组的端电压  $U_1$  近似等于

$$U_1 = 4.44 f N_1 B_m S_{Fe} \times 10^{-4} (V)$$

式中  $f$  —— 交流电频率 (Hz),

$N_1$  —— 初级绕组匝数 (匝),

$B_m$  —— 铁心中最大磁通密度 (T),

$S_{Fe}$  —— 铁心截面积 ( $cm^2$ )。

硅钢片的磁通密度  $B_m$  选得过小, 例如磁化曲线 (图5-1) 的  $B_{m1}$ , 变压器的绕组匝数  $N_1$  或铁芯截面  $S_{Fe}$  将比较大。显然这时铁心的潜力未能充分发挥。因为如果再增大一些激磁电流  $I$  以增大磁场强度  $H = \frac{IN}{l}$ , 磁通密度的最大值  $B_m$  还会显著增大, 所以, 磁通密度  $B_m$  选得过小时, 虽然减小了激磁

电流  $I$ ，省了电，却过多地浪费了铜和铁。

如果按最大磁通密度  $B_{m1}$  进行设计，由图5-1可见  $B_{m1}$  稍大于  $B_{m2}$ ，而  $H_{m1}$  却远大于  $H_{m2}$ 。这时虽然铁心截面  $S_F$  或绕组匝数  $N_1$  较小，铜、铁用量减少，但变压器的激磁电流却大大增加，造成电能浪费。这说明磁通密度  $B_{m1}$  选得太大了。

### 3. $B_m$ 大小的选择

设计变压器时，铁心最大磁通密度  $B_m$  的选择一般要根据：

(1) 硅钢片牌号 不同牌号的硅钢片有不同的磁化曲线。根据表5-2、5-3及5-4可以做出硅钢片的磁化曲线。设计变压器时，铁心最大磁通密度  $B_m$  一般选择在磁化曲线的拐点附近，即铁心将饱和而未饱和的点，如图5-1的  $B_{m2}$ 。

(2) 变压器功率 为了变压器设计更经济合理，变压器功率较小时，铁心磁通密度设大值  $B_m$  应选得稍小些，变压器功率较大时， $B_m$  应选得稍大些。

铁心磁通密度  $B_m$  与硅钢片型号及变压器功率的关系列于表5-6。

表5-6 铁心  $B_m$  (T) 的选取与硅钢片型号及变压器功率的关系

| 硅钢片型号 \ 变压器功率 | 100VA 以下 | 100VA~1KVA | 1~10 KVA | 10~100 KVA | 100KVA 以上 |
|---------------|----------|------------|----------|------------|-----------|
| 热轧硅钢片         | 0.80~    | 1.00~      | 1.20~    | 1.30~      | 1.40~     |
| D41、D42       | 1.00     | 1.20       | 1.30     | 1.45       | 1.45      |
| 冷轧硅钢片         | 1.00~    | 1.20~      | 1.40~    | 1.50~      | 1.60~     |
| D310、D340     | 1.20     | 1.50       | 1.70     | 1.75       | 1.80      |

表5-2 50Hz交变磁化及在强磁场下试验钢号及其磁性

| 钢号                | 公称厚度<br>(mm) | 在下列各磁场强度(At/cm)下的磁通密度(T), 不小于 |      |      |      |      | 单位铁心损失<br>(W/kg), 不大于 |            |            |
|-------------------|--------------|-------------------------------|------|------|------|------|-----------------------|------------|------------|
|                   |              | B10                           | B25  | B50  | B100 | B300 | P10<br>/50*           | P15<br>/50 | P17<br>/50 |
| <b>热 轧 钢 片</b>    |              |                               |      |      |      |      |                       |            |            |
| D11               | 1.0          |                               | 1.53 | 1.63 | 1.76 | 1.98 | 5.3                   | 12.0       |            |
| D11               | 0.50         |                               | 1.53 | 1.63 | 1.76 | 1.97 | 3.2                   | 7.4        |            |
| D12               | 0.50         |                               | 1.50 | 1.62 | 1.75 | 2.00 | 2.8                   | 6.5        |            |
| D13               | 0.50         |                               | 1.54 | 1.66 | 1.78 | 2.00 | 2.6                   | 6.2        |            |
| D21               | 0.50         |                               | 1.58 | 1.59 | 1.73 | 1.94 | 2.5                   | 6.1        |            |
| D22               | 0.50         |                               | 1.50 | 1.60 | 1.74 | 1.95 | 2.3                   | 5.8        |            |
| D23               | 0.50         |                               | 1.52 | 1.62 | 1.75 | 1.97 | 2.0                   | 4.6        |            |
| D31               | 0.50         |                               | 1.46 | 1.57 | 1.70 | 1.90 | 2.0                   | 4.5        |            |
| D32               | 0.50         |                               | 1.46 | 1.57 | 1.71 | 1.92 | 1.7                   | 3.8        |            |
| D31               | 0.35         |                               | 1.46 | 1.57 | 1.70 | 1.90 | 1.6                   | 3.6        |            |
| D32               | 0.35         |                               | 1.46 | 1.57 | 1.71 | 1.92 | 1.4                   | 3.2        |            |
| D41               | 0.50         | 1.30                          | 1.45 | 1.56 | 1.68 | 1.88 | 1.6                   | 3.6        |            |
| D42               | 0.50         | 1.29                          | 1.44 | 1.55 | 1.67 | 1.87 | 1.4                   | 3.2        |            |
| D43               | 0.50         | 1.28                          | 1.43 | 1.54 | 1.66 | 1.87 | 1.25                  | 2.9        |            |
| D44               | 0.50         | 1.28                          | 1.43 | 1.54 | 1.66 | 1.87 | 1.15                  | 2.7        |            |
| D41               | 0.35         | 1.30                          | 1.45 | 1.56 | 1.68 | 1.88 | 1.35                  | 3.2        |            |
| D42               | 0.35         | 1.29                          | 1.44 | 1.55 | 1.67 | 1.87 | 1.2                   | 2.8        |            |
| D43               | 0.35         | 1.28                          | 1.43 | 1.54 | 1.66 | 1.87 | 1.05                  | 2.5        |            |
| D44               | 0.35         | 1.28                          | 1.43 | 1.54 | 1.66 | 1.87 | 0.9                   | 2.2        |            |
| <b>晶粒取向小的冷轧钢片</b> |              |                               |      |      |      |      |                       |            |            |
| D1100             | 0.50         |                               | 1.53 | 1.64 | 1.76 | 2.00 | 3.3                   | 7.5        |            |
| D1200             | 0.50         |                               | 1.53 | 1.64 | 1.76 | 2.00 | 2.8                   | 6.5        |            |
| D1300             | 0.50         |                               | 1.55 | 1.64 | 1.76 | 2.00 | 2.5                   | 6.8        |            |
| D3100             | 0.50         |                               | 1.55 | 1.60 | 1.73 | 1.96 | 1.7                   | 3.7        |            |
| D3200             | 0.50         |                               | 1.48 | 1.58 | 1.72 | 1.95 | 1.5                   | 3.4        |            |
| <b>晶粒取向的冷轧钢片</b>  |              |                               |      |      |      |      |                       |            |            |
| D310              | 0.50         | 1.57                          | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 1.98 | 1.15                  | 2.55       | 3.5        |
| D320              | 0.50         | 1.65                          | 1.80 | 1.87 | 1.92 | 2.00 | 1.05                  | 2.3        | 3.2        |
| D330              | 0.50         | 1.70                          | 1.85 | 1.90 | 1.95 | 2.00 | 0.95                  | 2.1        | 2.9        |
| D340              | 0.50         | 1.70                          | 1.85 | 1.90 | 1.95 | 2.00 | 0.85                  | 1.9        | 2.6        |
| D310              | 0.35         | 1.57                          | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 1.98 | 0.9                   | 2.0        | 2.9        |
| D320              | 0.35         | 1.65                          | 1.80 | 1.87 | 1.92 | 2.00 | 0.8                   | 1.8        | 2.6        |
| D330              | 0.35         | 1.70                          | 1.85 | 1.90 | 1.95 | 2.00 | 0.7                   | 1.6        | 2.3        |
| D340              | 0.35         | 1.70                          | 1.85 | 1.90 | 1.95 | 2.00 | 0.6                   | 1.4        | 2.0        |

注: P10/50, P15/50等, 表示当用50Hz反复磁化和按正弦形变化的磁通密度最大值为1.0和1.5T时的总单位铁损(W/kg).  
B10, B25等, 表示磁场强度为10At/cm, 25At/cm时的最低B值(T).

表5-3 热轧硅钢

| 磁通<br>密度<br>T | D41~D42 性能数据               |         |          |         |         |         |
|---------------|----------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|
|               | 换 损 ( $\omega/\text{kg}$ ) |         |          |         | 磁化容量    |         |
|               | D41-0.35                   | D41-0.6 | D42-0.35 | D42-0.6 | (At/cm) | (VA/kg) |
| 1.00          | 1.35                       | 1.60    | 1.20     | 1.40    | 1.61    | 4.71    |
| 1.01          | 1.38                       | 1.63    | 1.23     | 1.43    | 1.65    | 4.87    |
| 1.02          | 1.41                       | 1.66    | 1.25     | 1.45    | 1.69    | 5.03    |
| 1.03          | 1.44                       | 1.70    | 1.27     | 1.48    | 1.72    | 5.19    |
| 1.04          | 1.47                       | 1.74    | 1.30     | 1.51    | 1.76    | 5.36    |
| 1.05          | 1.5                        | 1.78    | 1.32     | 1.54    | 1.80    | 5.51    |
| 1.06          | 1.53                       | 1.82    | 1.35     | 1.57    | 1.84    | 5.71    |
| 1.07          | 1.55                       | 1.86    | 1.38     | 1.60    | 1.89    | 5.81    |
| 1.08          | 1.58                       | 1.89    | 1.40     | 1.62    | 1.94    | 6.11    |
| 1.09          | 1.61                       | 1.92    | 1.43     | 1.65    | 1.99    | 6.31    |
| 1.10          | 1.64                       | 1.95    | 1.45     | 1.68    | 2.03    | 6.51    |
| 1.11          | 1.68                       | 1.98    | 1.48     | 1.72    | 2.09    | 6.78    |
| 1.12          | 1.71                       | 2.02    | 1.50     | 1.75    | 2.15    | 7.06    |
| 1.13          | 1.74                       | 2.05    | 1.53     | 1.78    | 2.23    | 7.37    |
| 1.14          | 1.77                       | 2.08    | 1.55     | 1.81    | 2.31    | 7.71    |
| 1.15          | 1.80                       | 2.10    | 1.58     | 1.84    | 2.40    | 8.05    |
| 1.16          | 1.84                       | 2.14    | 1.61     | 1.87    | 2.49    | 8.41    |
| 1.17          | 1.88                       | 2.18    | 1.64     | 1.90    | 2.57    | 8.77    |
| 1.18          | 1.92                       | 2.22    | 1.67     | 1.93    | 2.66    | 9.16    |
| 1.19          | 1.96                       | 2.26    | 1.71     | 1.96    | 2.75    | 9.58    |
| 1.20          | 2.00                       | 2.30    | 1.75     | 2.00    | 2.85    | 10.00   |
| 1.21          | 2.04                       | 2.34    | 1.78     | 2.03    | 2.96    | 10.46   |
| 1.22          | 2.08                       | 2.38    | 1.81     | 2.06    | 3.07    | 10.92   |
| 1.23          | 2.12                       | 2.42    | 1.84     | 2.10    | 3.17    | 11.39   |
| 1.24          | 2.15                       | 2.46    | 1.87     | 2.13    | 3.28    | 11.87   |
| 1.25          | 2.18                       | 2.5     | 1.90     | 2.16    | 3.38    | 12.35   |



## 片性能数据

| D43~D44 性能数据 |         |          |         |         |         |
|--------------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 铁 损 (w/kg)   |         |          |         | 磁化容量    |         |
| D43-0.35     | D43-0.5 | D44-0.35 | D44-0.5 | (At/cm) | (VA/kg) |
| 1.05         | 1.25    | 0.90     | 1.15    | 1.61    | 4.71    |
| 1.07         | 1.27    | 0.91     | 1.17    | 1.65    | 4.87    |
| 1.09         | 1.30    | 0.93     | 1.19    | 1.69    | 5.03    |
| 1.11         | 1.33    | 0.95     | 1.20    | 1.72    | 5.19    |
| 1.13         | 1.35    | 0.96     | 1.22    | 1.76    | 5.35    |
| 1.15         | 1.38    | 0.98     | 1.24    | 1.80    | 5.51    |
| 1.17         | 1.40    | 1.00     | 1.27    | 1.84    | 5.71    |
| 1.20         | 1.43    | 1.03     | 1.30    | 1.89    | 5.91    |
| 1.22         | 1.45    | 1.06     | 1.33    | 1.94    | 6.11    |
| 1.25         | 1.47    | 1.09     | 1.35    | 1.99    | 6.31    |
| 1.28         | 1.50    | 1.10     | 1.38    | 2.03    | 6.51    |
| 1.31         | 1.53    | 1.13     | 1.40    | 2.09    | 6.78    |
| 1.33         | 1.56    | 1.15     | 1.43    | 2.15    | 7.06    |
| 1.25         | 1.59    | 1.18     | 1.45    | 2.23    | 7.37    |
| 1.37         | 1.62    | 1.20     | 1.47    | 2.31    | 7.71    |
| 1.40         | 1.65    | 1.22     | 1.50    | 2.40    | 8.05    |
| 1.43         | 1.68    | 1.25     | 1.53    | 2.49    | 8.41    |
| 1.45         | 1.70    | 1.27     | 1.56    | 2.57    | 8.77    |
| 1.48         | 1.73    | 1.30     | 1.59    | 2.66    | 9.16    |
| 1.51         | 1.76    | 1.32     | 1.62    | 2.75    | 9.58    |
| 1.54         | 1.79    | 1.35     | 1.65    | 2.85    | 10.00   |
| 1.57         | 1.82    | 1.37     | 1.68    | 2.96    | 10.46   |
| 1.60         | 1.85    | 1.39     | 1.71    | 3.07    | 10.92   |
| 1.62         | 1.88    | 1.41     | 1.74    | 3.17    | 11.39   |
| 1.65         | 1.91    | 1.43     | 1.77    | 3.28    | 11.87   |
| 1.68         | 1.94    | 1.45     | 1.80    | 3.38    | 12.35   |

| 磁通<br>密度 | D41~D42 性能数据 |             |          |         |         |         |
|----------|--------------|-------------|----------|---------|---------|---------|
|          | 铁 损 (w/kg)   |             |          |         | 磁 化 容 量 |         |
|          | 41<br>-0.35  | D41<br>-0.5 | D42-0.35 | D42-0.5 | (At/cm) | (VA/kg) |
| 1.26     | 2.21         | 2.54        | 1.94     | 2.20    | 3.51    | 12.91   |
| 1.27     | 2.25         | 2.58        | 1.98     | 2.25    | 3.63    | 13.47   |
| 1.28     | 2.28         | 2.62        | 2.02     | 2.30    | 3.77    | 14.1    |
| 1.29     | 2.32         | 2.66        | 2.05     | 2.34    | 3.93    | 14.8    |
| 1.30     | 2.36         | 2.7         | 2.08     | 2.38    | 4.09    | 15.5    |
| 1.31     | 2.40         | 2.74        | 2.11     | 2.42    | 4.26    | 16.3    |
| 1.32     | 2.45         | 2.78        | 2.13     | 2.45    | 4.44    | 17.1    |
| 1.33     | 2.49         | 2.82        | 2.16     | 2.49    | 4.63    | 18.0    |
| 1.34     | 2.54         | 2.86        | 2.19     | 2.52    | 4.85    | 19.0    |
| 1.35     | 2.58         | 2.90        | 2.22     | 2.56    | 5.07    | 20.0    |
| 1.36     | 2.62         | 2.94        | 2.25     | 2.60    | 5.33    | 21.2    |
| 1.37     | 2.66         | 2.98        | 2.28     | 2.64    | 5.60    | 22.4    |
| 1.38     | 2.70         | 3.02        | 2.32     | 2.68    | 5.85    | 23.6    |
| 1.39     | 2.74         | 3.06        | 2.36     | 2.72    | 6.12    | 24.8    |
| 1.40     | 2.78         | 3.10        | 2.40     | 2.75    | 6.38    | 26.0    |
| 1.41     | 2.82         | 3.15        | 2.44     | 2.80    | 6.65    | 27.4    |
| 1.42     | 2.86         | 3.20        | 2.48     | 2.84    | 6.95    | 28.8    |
| 1.43     | 2.90         | 3.25        | 2.52     | 2.88    | 7.25    | 30.3    |
| 1.44     | 2.94         | 3.30        | 2.56     | 2.93    | 7.60    | 31.9    |
| 1.45     | 2.98         | 3.34        | 2.60     | 2.98    | 7.92    | 33.5    |
| 1.46     | 3.02         | 3.40        | 2.64     | 3.03    | 8.28    | 35.3    |
| 1.47     | 3.07         | 3.45        | 2.68     | 3.07    | 8.65    | 37.1    |
| 1.48     | 3.12         | 3.50        | 2.72     | 3.12    | 9.03    | 39.0    |
| 1.49     | 3.17         | 3.55        | 2.76     | 3.17    | 9.46    | 41.2    |
| 1.50     | 3.20         | 3.60        | 2.80     | 3.20    | 9.96    | 43.8    |

(续表)

| D43~44 性能数据 |         |          |         |         |         |
|-------------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 铁 损 (w/kg)  |         |          |         | 磁 化 容 量 |         |
| D43-0.35    | D43-0.5 | D44-0.35 | D44-0.5 | (At/cm) | (VA/kg) |
| 1.70        | 1.98    | 1.48     | 1.84    | 3.51    | 12.91   |
| 1.73        | 2.01    | 1.51     | 1.87    | 3.63    | 13.47   |
| 1.75        | 2.04    | 1.54     | 1.90    | 3.77    | 14.1    |
| 1.78        | 2.07    | 1.57     | 1.93    | 3.93    | 14.8    |
| 1.80        | 2.10    | 1.60     | 1.96    | 4.09    | 15.5    |
| 1.84        | 2.14    | 1.63     | 1.99    | 4.26    | 16.3    |
| 1.88        | 2.17    | 1.65     | 2.02    | 4.44    | 17.1    |
| 1.92        | 2.20    | 1.68     | 2.05    | 4.63    | 18.0    |
| 1.95        | 2.24    | 1.70     | 2.08    | 4.85    | 19.0    |
| 1.98        | 2.28    | 1.72     | 2.10    | 5.08    | 20.0    |
| 2.02        | 2.31    | 1.72     | 2.14    | 5.33    | 21.2    |
| 2.05        | 2.35    | 1.75     | 2.13    | 5.59    | 22.4    |
| 2.08        | 2.38    | 1.82     | 2.22    | 5.85    | 23.6    |
| 2.12        | 2.41    | 1.86     | 2.26    | 6.12    | 24.8    |
| 2.15        | 2.45    | 1.90     | 2.30    | 6.36    | 26.0    |
| 2.19        | 2.50    | 1.92     | 2.34    | 6.65    | 27.4    |
| 2.22        | 2.54    | 1.95     | 2.38    | 6.95    | 28.8    |
| 2.25        | 2.58    | 1.98     | 2.42    | 7.25    | 30.3    |
| 2.28        | 2.62    | 2.00     | 2.46    | 7.50    | 31.9    |
| 2.32        | 2.67    | 2.02     | 2.50    | 7.81    | 33.6    |
| 2.35        | 2.72    | 2.06     | 2.54    | 8.08    | 35.3    |
| 2.38        | 2.77    | 2.10     | 2.58    | 8.65    | 37.1    |
| 2.42        | 2.82    | 2.14     | 2.62    | 9.03    | 39.0    |
| 2.46        | 2.86    | 2.18     | 2.66    | 9.46    | 41.2    |
| 2.50        | 2.90    | 2.20     | 2.70    | 9.96    | 43.6    |

表5-4 冷轧硅钢

| 磁通<br>密度<br>T | D310-0.35    |         |         | D320-0.35    |         |         | D330-0.35    |
|---------------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|
|               | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) |
|               |              | (At/cm) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg) |              |
| 1.00          | 0.90         |         | 2.50    | 0.800        | 0.720   | 2.090   | 0.7          |
| 1.01          | 0.92         |         | 2.60    | 0.815        | 0.744   | 2.187   | 0.7125       |
| 1.02          | 0.94         |         | 2.70    | 0.830        | 0.768   | 2.284   | 0.725        |
| 1.03          | 0.957        |         | 2.80    | 0.845        | 0.792   | 2.381   | 0.7375       |
| 1.04          | 0.975        |         | 2.90    | 0.860        | 0.816   | 2.478   | 0.75         |
| 1.05          | 0.995        |         | 3.00    | 0.875        | 0.840   | 2.575   | 0.7625       |
| 1.06          | 1.010        |         | 3.14    | 0.890        | 0.864   | 2.672   | 0.775        |
| 1.07          | 1.028        |         | 3.28    | 0.905        | 0.888   | 2.769   | 0.7875       |
| 1.08          | 1.045        |         | 3.42    | 0.920        | 0.912   | 2.866   | 0.8          |
| 1.09          | 1.065        |         | 3.56    | 0.935        | 0.936   | 2.963   | 0.8125       |
| 1.10          | 1.085        |         | 3.70    | 0.950        | 0.960   | 3.060   | 0.825        |
| 1.11          | 1.102        |         | 3.80    | 0.967        | 0.984   | 3.208   | 0.8395       |
| 1.12          | 1.120        |         | 3.90    | 0.984        | 1.008   | 3.356   | 0.854        |
| 1.13          | 1.140        |         | 4.02    | 1.001        | 1.032   | 3.504   | 0.8685       |
| 1.14          | 1.160        |         | 4.16    | 1.018        | 1.056   | 3.652   | 0.883        |
| 1.15          | 1.175        |         | 4.30    | 1.035        | 1.130   | 3.800   | 0.8975       |
| 1.16          | 1.195        |         | 4.50    | 1.052        | 1.184   | 3.948   | 0.912        |
| 1.17          | 1.215        |         | 4.70    | 1.069        | 1.198   | 4.096   | 0.9265       |
| 1.18          | 1.235        |         | 4.88    | 1.088        | 1.232   | 4.244   | 0.941        |

片性能数据

|         |         | D340-0.35    |         |         | Z11-0.35     |         |                   |
|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|-------------------|
| 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |                   |
| (At/cm) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg)           |
| 0.6     | 1.74    | 0.6          | 0.512   | 1.49    | 0.455        | 0.21    | 0.79              |
| 0.6203  | 1.822   | 0.611        | 0.5278  | 1.555   | 0.465        | 0.211   | 0.806             |
| 0.6409  | 1.904   | 0.622        | 0.5436  | 1.62    | 0.475        | 0.212   | 0.82              |
| 0.6609  | 1.986   | 0.633        | 0.5594  | 1.685   | 0.485        | 0.213   | 0.835             |
| 0.6812  | 2.068   | 0.644        | 0.5752  | 1.75    | 0.495        | 0.214   | 0.85              |
| 0.7015  | 2.15    | 0.655        | 0.591   | 1.815   | 0.5          | 0.215   | 0.87              |
| 0.7218  | 2.232   | 0.666        | 0.6068  | 1.88    | 0.51         | 0.216   | 0.88              |
| 0.7421  | 2.314   | 0.677        | 0.6226  | 1.945   | 0.52         | 0.218   | 0.9               |
| 0.7624  | 2.396   | 0.688        | 0.6384  | 2.01    | 0.53         | 0.22    | 0.92              |
| 0.7827  | 2.478   | 0.699        | 0.6542  | 2.075   | 0.54         | 0.222   | 0.94              |
| 0.803   | 2.56    | 0.71         | 0.67    | 2.14    | 0.55         | 0.224   | 0.96              |
| 0.8317  | 2.684   | 0.722        | 0.6915  | 2.234   | 0.56         | 0.226   | 0.97              |
| 0.8604  | 2.808   | 0.734        | 0.713   | 2.328   | 0.57         | 0.228   | 0.99 <sup>5</sup> |
| 0.8891  | 2.932   | 0.746        | 0.7345  | 2.422   | 0.58         | 0.23    | 1.01 <sup>5</sup> |
| 0.9178  | 3.056   | 0.758        | 0.756   | 2.516   | 0.595        | 0.232   | 1.03 <sup>5</sup> |
| 0.9465  | 3.18    | 0.77         | 0.7775  | 2.61    | 0.61         | 0.234   | 1.04              |
| 0.9752  | 3.304   | 0.782        | 0.799   | 2.704   | 0.625        | 0.237   | 1.06              |
| 1.0039  | 3.428   | 0.794        | 0.8205  | 2.798   | 0.63         | 0.24    | 1.08              |
| 1.0326  | 3.552   | 0.806        | 0.842   | 2.892   | 0.645        | 0.243   | 1.1               |

| 磁通<br>密度<br>(T) | D310-0.35    |         |         | D320-0.35    |         |         | D330-0.35    |
|-----------------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|
|                 | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) |
|                 |              | (At/cm) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg) |              |
| 1.10            | 1.255        |         | 5.04    | 1.103        | 1.266   | 4.392   | 0.9555       |
| 1.20            | 1.28         |         | 5.2     | 1.12         | 1.3     | 4.54    | 0.97         |
| 1.21            | 1.3          |         | 5.48    | 1.139        | 1.354   | 4.781   | 0.9855       |
| 1.22            | 1.325        |         | 5.76    | 1.158        | 1.408   | 5.022   | 1.001        |
| 1.23            | 1.35         |         | 6.06    | 1.177        | 1.462   | 5.263   | 1.0165       |
| 1.24            | 1.375        |         | 6.38    | 1.196        | 1.516   | 5.504   | 1.032        |
| 1.25            | 1.4          |         | 6.7     | 1.215        | 1.57    | 6.745   | 1.0475       |
| 1.26            | 1.425        |         | 7.02    | 1.234        | 1.624   | 5.986   | 1.063        |
| 1.27            | 1.45         |         | 7.34    | 1.253        | 1.688   | 6.227   | 1.0785       |
| 1.28            | 1.475        |         | 7.7     | 1.272        | 1.732   | 6.468   | 1.094        |
| 1.29            | 1.5          |         | 8.1     | 1.291        | 1.786   | 6.709   | 1.1095       |
| 1.30            | 1.52         |         | 8.5     | 1.31         | 1.84    | 6.95    | 1.125        |
| 1.31            | 1.55         |         | 8.82    | 1.331        | 1.904   | 7.265   | 1.1415       |
| 1.32            | 1.585        |         | 9.14    | 1.352        | 1.968   | 7.58    | 1.158        |
| 1.33            | 1.61         |         | 9.5     | 1.373        | 2.032   | 7.895   | 1.1745       |
| 1.34            | 1.635        |         | 9.9     | 1.394        | 2.096   | 8.21    | 1.191        |
| 1.35            | 1.66         |         | 10.3    | 1.415        | 2.16    | 8.525   | 1.2075       |
| 1.36            | 1.69         |         | 10.74   | 1.436        | 2.224   | 8.84    | 1.224        |
| 1.37            | 1.71         |         | 11.18   | 1.457        | 2.288   | 9.155   | 1.2405       |
| 1.38            | 1.74         |         | 11.62   | 1.478        | 2.352   | 9.47    | 1.257        |

(续表)

|         |         | D340-0.35    |         |         | Z11-0.35     |         |         |
|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         |
| (At/cm) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg) |
| 1.0613  | 3.676   | 0.819        | 0.8635  | 2.986   | 0.66         | 0.245   | 1.12    |
| 1.09    | 3.8     | 0.83         | 0.885   | 3.08    | 0.67         | 0.248   | 1.14    |
| 1.127   | 3.97    | 0.844        | 0.9175  | 3.228   | 0.68         | 0.251   | 1.16    |
| 1.164   | 4.14    | 0.858        | 0.95    | 3.376   | 0.695        | 0.254   | 1.18    |
| 1.201   | 4.31    | 0.872        | 0.9825  | 3.524   | 0.71         | 0.257   | 1.2     |
| 1.238   | 4.48    | 0.886        | 1.015   | 3.672   | 0.72         | 0.26    | 1.22    |
| 1.275   | 4.65    | 0.9          | 1.0475  | 3.82    | 0.73         | 0.262   | 1.25    |
| 1.312   | 4.82    | 0.914        | 1.08    | 3.968   | 0.745        | 0.265   | 1.27    |
| 1.349   | 4.99    | 0.928        | 1.1125  | 4.116   | 0.76         | 0.268   | 1.29    |
| 1.386   | 5.16    | 0.942        | 1.145   | 4.264   | 0.77         | 0.272   | 1.31    |
| 1.423   | 5.33    | 0.956        | 1.1775  | 4.412   | 0.78         | 0.276   | 1.34    |
| 1.46    | 5.5     | 0.97         | 1.21    | 4.56    | 0.79         | 0.28    | 1.37    |
| 1.516   | 5.77    | 0.986        | 1.257   | 4.786   | 0.8          | 0.284   | 1.4     |
| 1.572   | 6.04    | 1.002        | 1.304   | 5.012   | 0.815        | 0.288   | 1.43    |
| 1.628   | 6.31    | 1.018        | 1.351   | 5.238   | 0.83         | 0.292   | 1.46    |
| 1.684   | 6.58    | 1.034        | 1.398   | 5.464   | 0.845        | 0.296   | 1.49    |
| 1.74    | 6.85    | 1.05         | 1.445   | 5.69    | 0.86         | 0.3     | 1.51    |
| 1.798   | 7.12    | 1.066        | 1.492   | 5.916   | 0.87         | 0.304   | 1.55    |
| 1.852   | 7.39    | 1.082        | 1.539   | 6.142   | 0.885        | 0.308   | 1.59    |
| 1.908   | 7.66    | 1.098        | 1.586   | 6.368   | 0.9          | 0.312   | 1.63    |

| 磁通<br>密度<br>(T) | D310-0.35    |         |         | D320-0.35    |         |         | D330-0.35    |
|-----------------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|
|                 | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) |
|                 |              | (At/mm) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg) |              |
| 1.39            | 1.765        |         | 12.06   | 1.499        | 2.416   | 9.785   | 1.2735       |
| 1.40            | 1.79         |         | 12.6    | 1.52         | 2.48    | 10.1    | 1.29         |
| 1.41            | 1.81         |         | 12.98   | 1.543        | 2.589   | 10.64   | 1.311        |
| 1.42            | 1.835        |         | 13.46   | 1.566        | 2.698   | 11.18   | 1.332        |
| 1.43            | 1.86         |         | 13.96   | 1.589        | 2.807   | 11.72   | 1.353        |
| 1.44            | 1.885        |         | 14.48   | 1.612        | 2.916   | 12.26   | 1.374        |
| 1.45            | 1.91         |         | 15      | 1.635        | 3.025   | 12.8    | 1.395        |
| 1.46            | 1.94         |         | 15.56   | 1.658        | 3.134   | 13.34   | 1.416        |
| 1.47            | 1.97         |         | 16.12   | 1.681        | 3.243   | 13.83   | 1.437        |
| 1.48            | 2.0          |         | 16.62   | 1.704        | 3.352   | 14.42   | 1.458        |
| 1.49            | 2.03         |         | 17.06   | 1.727        | 3.461   | 14.96   | 1.479        |
| 1.50            | 2.055        |         | 17.5    | 1.75         | 3.57    | 15.5    | 1.5          |
| 1.51            | 2.085        |         | 18.1    | 1.782        | 3.703   | 16.22   | 1.529        |
| 1.52            | 2.115        |         | 18.7    | 1.814        | 3.836   | 16.94   | 1.558        |
| 1.53            | 2.145        |         | 19.34   | 1.846        | 3.969   | 17.68   | 1.587        |
| 1.54            | 2.175        |         | 20.02   | 1.878        | 4.102   | 18.38   | 1.616        |
| 1.55            | 2.215        |         | 20.7    | 1.91         | 4.235   | 19.1    | 1.645        |
| 1.56            | 2.25         |         | 21.42   | 1.942        | 4.368   | 19.82   | 1.674        |
| 1.57            | 2.29         |         | 22.14   | 1.974        | 4.501   | 20.54   | 1.703        |
| 1.58            | 2.325        |         | 22.9    | 2.006        | 4.634   | 21.26   | 1.732        |
| 1.59            | 2.365        |         | 23.7    | 2.038        | 4.767   | 21.98   | 1.761        |



(续表)

|         |         | D340-0.35 |         |         | Z11-0.35 |         |         |
|---------|---------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 磁化容量    |         | 铁损        | 磁化容量    |         | 铁损       | 磁化容量    |         |
| (At/cm) | (VA/kg) | (W/kg)    | (At/cm) | (VA/kg) | (W/kg)   | (At/cm) | (VA/kg) |
| 1.964   | 7.93    | 1.114     | 1.633   | 6.594   | 0.915    | 0.316   | 1.67    |
| 2.02    | 8.2     | 1.13      | 1.68    | 6.82    | 0.93     | 0.32    | 1.7     |
| 2.1     | 8.61    | 1.147     | 1.747   | 7.159   | 0.945    | 0.325   | 1.74    |
| 2.18    | 9.02    | 1.164     | 1.814   | 7.496   | 0.96     | 0.33    | 1.78    |
| 2.26    | 9.43    | 1.181     | 1.881   | 7.834   | 0.98     | 0.34    | 1.82    |
| 2.34    | 9.44    | 1.198     | 1.948   | 8.172   | 1.0      | 0.345   | 1.89    |
| 2.42    | 10.25   | 1.215     | 2.015   | 8.51    | 1.02     | 0.35    | 1.91    |
| 2.5     | 10.66   | 1.232     | 2.082   | 8.848   | 1.03     | 0.36    | 1.98    |
| 2.58    | 11.07   | 1.249     | 2.149   | 9.186   | 1.05     | 0.365   | 2.01    |
| 2.66    | 11.48   | 1.266     | 2.216   | 9.524   | 1.07     | 0.372   | 2.10    |
| 2.74    | 11.89   | 1.283     | 2.283   | 9.862   | 1.09     | 0.379   | 2.15    |
| 2.82    | 12.3    | 1.3       | 2.35    | 10.2    | 1.1      | 0.385   | 2.21    |
| 2.943   | 12.95   | 1.325     | 2.451   | 10.74   | 1.12     | 0.396   | 2.3     |
| 3.066   | 13.6    | 1.35      | 2.552   | 11.28   | 1.13     | 0.407   | 2.38    |
| 3.189   | 14.25   | 1.375     | 2.653   | 11.82   | 1.15     | 0.418   | 2.47    |
| 3.312   | 14.9    | 1.4       | 2.754   | 12.36   | 1.17     | 0.428   | 2.56    |
| 3.435   | 15.55   | 1.425     | 2.855   | 12.9    | 1.19     | 0.438   | 2.7     |
| 3.558   | 16.2    | 1.45      | 2.956   | 13.44   | 1.21     | 0.45    | 2.82    |
| 3.681   | 16.85   | 1.475     | 3.057   | 13.98   | 1.23     | 0.463   | 3.0     |
| 3.804   | 17.5    | 1.5       | 3.158   | 14.52   | 1.25     | 0.475   | 3.16    |
| 3.927   | 18.16   | 1.525     | 3.259   | 15.06   | 1.28     | 0.486   | 3.35    |

| 磁通<br>密度<br>(T) | D310-0.35    |         |         | D320-0.35    |        |         | D330-0.35    |
|-----------------|--------------|---------|---------|--------------|--------|---------|--------------|
|                 | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量   |         | 铁损<br>(W/kg) |
|                 |              | (At/cm) | (VA/kg) |              | (At/m) | (VA/kg) |              |
| 1.60            | 2.4          |         | 24.5    | 2.07         | 4.9    | 22.7    | 1.79         |
| 1.61            | 2.445        |         | 25.26   | 2.113        | 5.31   | 24.88   | 1.831        |
| 1.62            | 2.485        |         | 26.02   | 2.156        | 5.72   | 27.06   | 1.872        |
| 1.63            | 2.52         |         | 26.8    | 2.199        | 6.13   | 29.24   | 1.913        |
| 1.64            | 2.56         |         | 27.6    | 2.242        | 6.54   | 31.42   | 1.954        |
| 1.65            | 2.6          |         | 28.4    | 2.285        | 6.95   | 33.6    | 1.995        |
| 1.66            | 2.65         |         | 29.44   | 2.328        | 7.36   | 35.78   | 2.036        |
| 1.67            | 2.7          |         | 30.48   | 2.371        | 7.77   | 37.96   | 2.077        |
| 1.68            | 2.74         |         | 31.6    | 2.414        | 8.18   | 40.14   | 2.118        |
| 1.69            | 2.78         |         | 32.8    | 2.457        | 8.59   | 42.32   | 2.159        |
| 1.70            | 2.81         |         | 34      | 2.5          | 9.0    | 44.5    | 2.2          |
| 1.71            | 2.86         |         | 35.6    | 2.55         | 9.8    | 48.95   | 2.252        |
| 1.72            | 2.91         |         | 37.2    | 2.6          | 10.6   | 53.4    | 2.304        |
| 1.73            | 2.95         |         | 38.8    | 2.65         | 11.4   | 57.85   | 2.356        |
| 1.74            | 2.99         |         | 40.4    | 2.7          | 12.2   | 62.3    | 2.408        |
| 1.75            | 3.03         |         | 42      | 2.75         | 13     | 66.75   | 2.46         |
| 1.76            |              |         |         | 2.8          | 13.8   | 71.2    | 2.512        |
| 1.77            |              |         |         | 2.85         | 14.6   | 75.65   | 2.564        |
| 1.78            |              |         |         | 2.9          | 15.4   | 80.1    | 2.616        |
| 1.79            |              |         |         | 2.95         | 16.2   | 84.55   | 2.668        |
| 1.80            |              |         |         | 3.0          | 17     | 89      | 2.72         |

(续表)

|       |         | D340-0.35    |         |         | Z11-0.35     |         |         |
|-------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| 磁化容量  |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         | 铁损<br>(W/kg) | 磁化容量    |         |
| (A/m) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg) |              | (At/cm) | (VA/kg) |
| 4.05  | 18.8    | 1.55         | 3.36    | 15.6    | 1.3          | 0.502   | 3.55    |
| 4.295 | 20.12   | 1.585        | 3.504   | 16.41   | 1.32         | 0.52    | 3.8     |
| 4.54  | 21.44   | 1.62         | 3.648   | 17.22   | 1.34         | 0.54    | 4.05    |
| 4.785 | 22.76   | 1.655        | 3.792   | 18.03   | 1.37         | 0.56    | 4.4     |
| 5.03  | 24.08   | 1.69         | 3.936   | 18.84   | 1.39         | 0.68    | 4.7     |
| 5.275 | 25.4    | 1.725        | 4.08    | 19.65   | 1.42         | 0.61    | 5.0     |
| 5.52  | 26.72   | 1.76         | 4.224   | 20.46   | 1.44         | 0.644   | 5.4     |
| 5.765 | 28.04   | 1.795        | 4.368   | 21.27   | 1.46         | 0.686   | 5.8     |
| 6.01  | 29.36   | 1.83         | 4.512   | 22.08   | 1.49         | 0.736   | 6.4     |
| 6.255 | 30.68   | 1.865        | 4.656   | 22.89   | 1.52         | 0.79    | 7.0     |
| 6.5   | 32      | 1.9          | 4.8     | 23.7    | 1.54         | 0.85    | 7.6     |
| 6.95  | 34.55   | 1.948        | 5.205   | 25.94   | 1.57         | 0.91    | 8.2     |
| 7.4   | 37.1    | 1.996        | 5.61    | 28.18   | 1.6          | 1.0     | 9.0     |
| 7.85  | 39.65   | 2.044        | 6.015   | 30.42   | 1.63         | 1.1     | 10      |
| 8.3   | 42.2    | 2.092        | 6.42    | 32.66   | 1.66         | 1.2     | 11      |
| 8.75  | 44.75   | 2.14         | 6.825   | 34.9    | 1.69         | 1.3     | 12      |
| 9.2   | 47.3    | 2.188        | 7.23    | 37.14   | 1.72         | 1.46    | 13.2    |
| 9.65  | 49.85   | 2.236        | 7.635   | 39.38   | 1.75         | 1.63    | 14.6    |
| 10.1  | 52.4    | 2.284        | 8.04    | 41.62   | 1.79         | 1.8     | 16      |
| 10.66 | 54.95   | 2.332        | 8.445   | 43.86   | 1.83         | 2.0     | 18      |
| 11.   | 57.5    | 2.38         | 8.85    | 46.1    | 1.87         | 2.25    | 19.6    |

表5-5 硅钢片接缝处磁化容量

1. 热轧硅钢片 D41, D42, D43

| 磁通密度<br>(T) | 1.00<br>VA/cm <sup>2</sup> | 1.10<br>VA/cm <sup>2</sup> | 1.20<br>VA/cm <sup>2</sup> | 1.30<br>VA/cm <sup>2</sup> | 1.40<br>VA/cm <sup>2</sup> | 1.50<br>VA/cm <sup>2</sup> |
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0.00        | 0.498                      | 0.79                       | 1.18                       | 1.75                       | 2.46                       | 3.45                       |
| 0.01        | 0.522                      | 0.828                      | 1.22                       | 1.81                       | 2.55                       |                            |
| 0.02        | 0.546                      | 0.862                      | 1.27                       | 1.87                       | 2.65                       |                            |
| 0.03        | 0.571                      | 0.899                      | 1.33                       | 1.93                       | 2.75                       |                            |
| 0.04        | 0.597                      | 0.937                      | 1.39                       | 1.99                       | 2.85                       |                            |
| 0.05        | 0.625                      | 0.975                      | 1.45                       | 2.06                       | 2.95                       |                            |
| 0.06        | 0.657                      | 1.02                       | 1.51                       | 2.14                       | 3.05                       |                            |
| 0.07        | 0.689                      | 1.06                       | 1.57                       | 2.22                       | 3.15                       |                            |
| 0.08        | 0.722                      | 1.1                        | 1.63                       | 2.3                        | 3.25                       |                            |
| 0.09        | 0.756                      | 1.14                       | 1.69                       | 2.38                       | 3.35                       |                            |

2. 冷轧硅钢片 D310, D320, D330, D340 VA/cm<sup>2</sup>

| 磁通密度<br>(T) | 0.90  | 1.00  | 1.10  | 1.20  | 1.30  | 1.40              | 1.50  | 1.60 | 1.70 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|------|------|
| 0.00        | 0.06  | 0.122 | 0.22  | 0.466 | 0.853 | 1.37              | 1.98  | 2.74 | 3.72 |
| 0.01        | 0.066 | 0.13  | 0.233 | 0.497 | 0.902 | 1.41              | 2.046 | 2.83 | 3.83 |
| 0.02        | 0.072 | 0.14  | 0.248 | 0.528 | 0.938 | 1.46              | 2.13  | 2.92 | 3.97 |
| 0.03        | 0.078 | 0.15  | 0.266 | 0.56  | 0.99  | 1.54              | 2.19  | 3.01 | 4.09 |
| 0.04        | 0.084 | 0.16  | 0.286 | 0.605 | 1.04  | 1.6               | 2.26  | 3.1  | 4.23 |
| 0.05        | 0.09  | 0.17  | 0.308 | 0.639 | 1.095 | 1.66              | 2.34  | 3.19 | 4.37 |
| 0.06        | 0.096 | 0.18  | 0.335 | 0.671 | 1.15  | 1.72              | 2.42  | 3.28 |      |
| 0.07        | 0.102 | 0.19  | 0.367 | 0.720 | 1.2   | 1.79 <sup>5</sup> | 2.5   | 3.39 |      |
| 0.08        | 0.108 | 0.2   | 0.401 | 0.767 | 1.255 | 1.87              | 2.58  | 3.49 |      |
| 0.09        | 0.116 | 0.21  | 0.434 | 0.8   | 1.31  | 1.94              | 2.65  | 3.6  |      |

## § 5-2 铜 导 线

### 一、常用铜导线分类

变压器及电机绕组常用的绝缘电磁线，根据用途和绝缘强度的不同可分为如下几种：

(1) 纸包电磁线 是用多层高强度绝缘纸带包缠的铜线。扁铜线一般在纸层外表面再稀绕一层纱布，以保护绝缘层。圆铜线外表面则不再绕纱布。这种纸包电磁线在变压器线圈中用得较多，如油浸变压器。

(2) 双纱包线 是在铜线上包缠两层绕向相反的纱布。纱包线的绝缘强度不高，一般只能达到 A 级，所以常用于小功率的低压产品上。

(3) 玻璃丝包线 是在铜线上包缠玻璃丝。为防止玻璃丝松散，在包丝过程中浸一次清漆。这种铜线常用于绕制干式变压器的绕组，绝缘等级可以达到 B 级。

(4) 漆包线和高强度漆包线 是在铜线上包一层绝缘漆。大多是较细的圆铜线，常用做小型控制变压器和继电器的线圈。

### 二、常用铜导线的规格

表5-7是常用扁铜线尺寸及截面。

表5-8是常用漆、纸包铜电磁圆导线尺寸及截面。

扁导线上玻璃丝包绝缘厚度见表5-9。

### 三、铜导线电流密度的选择

绕组铜导线的截面积  $S$  是根据流过绕组的电流  $I$  及许用电流密度  $j$  来确定的，即  $S = I / j$ 。所以许用电流密度  $j$  的大小影响铜、铁材料的消耗，以及绕组的温升。

表5-7 扁铜线尺

| 厚 (mm) | 面积 (mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | 1.00                  | 1.08 | 1.16 | 1.25 | 1.35 | 1.45 | 1.56 | 1.68 |
| 宽 (mm) |                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 3.8    | 3.59                  | 3.89 | 4.20 | 4.54 | 4.92 | 5.30 | 5.72 | 6.17 |
| 4.1    | 3.89                  | 4.22 | 4.55 | 4.92 | 5.33 | 5.74 | 6.19 | 6.68 |
| 4.4    | 4.19                  | 4.54 | 4.89 | 5.29 | 5.78 | 6.17 | 6.65 | 7.18 |
| 4.7    | 4.49                  | 4.87 | 5.24 | 5.67 | 6.14 | 6.61 | 7.12 | 7.79 |
| 5.1    | 4.89                  | 5.30 | 5.71 | 6.17 | 6.68 | 7.19 | 7.75 | 8.36 |
| 5.5    | 5.29                  | 5.73 | 6.17 | 6.67 | 7.12 | 7.77 | 8.37 | 9.03 |
| 5.9    | 5.69                  | 6.16 | 6.63 | 7.17 | 7.76 | 8.35 | 8.99 | 9.70 |
| 6.4    | 6.19                  | 6.70 | 7.21 | 7.79 | 8.43 | 9.07 | 9.77 | 10.0 |
| 6.9    | 6.69                  | 7.24 | 7.79 | 8.42 | 9.11 | 9.79 | 10.6 | 11.4 |
| 7.4    | 7.19                  | 7.78 | 8.37 | 9.04 | 9.78 | 10.6 | 11.3 | 12.6 |
| 8.0    | 7.79                  | 8.43 | 9.07 | 9.79 | 10.6 | 11.4 | 12.3 | 13.2 |
| 8.6    | 8.39                  | 9.08 | 9.77 | 10.6 | 11.4 | 12.3 | 13.2 | 14.2 |
| 9.3    | —                     | —    | —    | —    | 12.4 | 13.3 | 14.3 | 15.4 |
| 10.0   | —                     | —    | —    | —    | —    | —    | 15.4 | 16.6 |
| 10.8   | —                     | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 11.6   | —                     | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 12.5   | —                     | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 13.5   | —                     | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 14.5   | —                     | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |

寸及載面表

|      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.8  | 2.0  | 2.2   | 2.4  | 2.6  | 2.8  | 3.0  | 3.2  | 3.5  | 3.8  | 4.1  | 4.4  | 4.7  | 5.1  | 5.5  |      |
| 6.67 | 7.26 | 7.50  | 8.11 | 8.79 | 9.51 | 10.3 | 11.1 | 12.0 | 13.9 |      |      |      |      |      |      |
| 7.21 | 7.79 | 8.13  | 8.79 | 9.52 | 10.3 | 11.1 | 12.0 | 13.0 | 14.0 | 15.1 | 15.9 |      |      |      |      |
| 7.75 | 8.37 | 8.76  | 9.46 | 10.2 | 11.1 | 12.0 | 12.9 | 13.9 | 15.0 | 16.2 | 17.1 | 18.5 |      |      |      |
| 8.30 | 8.96 | 9.39  | 10.1 | 11.0 | 11.9 | 12.8 | 13.8 | 14.9 | 16.1 | 17.4 | 18.4 |      |      |      |      |
| 9.02 | 9.74 | 10.02 | 11.0 | 11.9 | 12.9 | 13.9 | 15.1 | 16.2 | 17.5 | 18.9 | 20.0 | 21.5 | 25.1 |      |      |
| 9.75 | 10.5 | 11.1  | 11.9 | 12.9 | 14.6 | 15.1 | 16.8 | 17.5 | 18.9 | 20.4 | 21.7 | 23.3 | 25.0 | 27.2 |      |
| 10.5 | 11.3 | 11.9  | 12.8 | 13.9 | 15.0 | 16.2 | 17.5 | 18.9 | 20.3 | 21.9 | 23.3 | 25.1 | 26.8 | 29.2 |      |
| 11.4 | 12.3 | 12.9  | 14.0 | 15.1 | 16.3 | 17.6 | 19.0 | 20.5 | 22.1 | 23.8 | 25.3 | 27.3 | 29.2 | 31.7 | 34.3 |
| 12.3 | 13.3 | 14.0  | 15.1 | 16.3 | 17.3 | 19.0 | 20.6 | 22.5 | 23.9 | 25.7 | 27.4 | 30.5 | 31.5 | 34.3 | 37.1 |
| 13.3 | 14.3 | 15.0  | 16.2 | 17.6 | 19.0 | 20.4 | 22.1 | 23.6 | 25.6 | 27.6 | 29.4 | 31.7 | 33.9 | 36.8 | 39.8 |
| 14.4 | 15.4 | 16.2  | 17.6 | 19.0 | 20.5 | 22.1 | 23.9 | 25.7 | 27.7 | 29.9 | 31.9 | 34.3 | 36.7 | 39.9 | 43.1 |
| 15.5 | 16.6 | 17.6  | 18.9 | 20.5 | 22.1 | 23.8 | 25.7 | 27.7 | 29.9 | 32.2 | 34.4 | 36.9 | 39.5 | 43.0 | 46.4 |
| 16.6 | 17.9 | 19.0  | 20.5 | 22.2 | 24.0 | 25.8 | 27.9 | 30.0 | 32.3 | 34.8 | 37.2 | 40.0 | 42.8 | 46.5 | 50.3 |
| 17.9 | 19.3 | 20.5  | 22.1 | 23.9 | 25.8 | 27.8 | 30.0 | 32.3 | 34.8 | 37.9 | 40.1 | 43.1 | 46.1 | 50.1 | 54.1 |
| 19.3 | 20.9 | 22.2  | 23.9 | 25.9 | 27.9 | 30.1 | 32.3 | 34.8 | 37.6 | 40.5 | 43.4 | 46.6 | 49.9 | 54.2 | 58.5 |
|      |      | 23.9  | 25.7 | 27.8 | 30.0 | 32.3 | 34.0 | 37.5 | 40.5 | 43.6 | 46.7 | 50.1 | 53.6 | 58.3 | 62.9 |
|      |      | 25.8  | 27.8 | 30.0 | 32.4 | 34.9 | 37.6 | 40.5 | 43.6 | 47.0 | 50.4 | 54.1 | 57.9 | 62.9 | 67.9 |
|      |      |       | 32.4 | 35.0 | 37.4 | 40.7 | 43.8 | 47.2 | 50.8 | 54.5 | 58.5 | 62.6 | 68.0 | 73.4 |      |
|      |      |       | 34.9 | 37.6 | 40.5 | 43.7 | 47.1 | 50.6 | 54.6 | 58.6 | 62.9 | 67.3 | 74.1 | 78.9 |      |

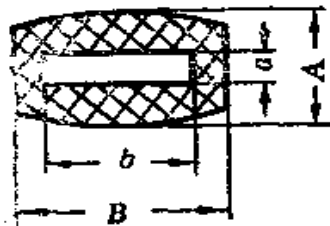
表5-8 漆、纸包铜电磁圆导线尺寸及截面表

| 直径<br>(mm) | 漆包<br>外径<br>(mm) | 截面<br>(mm <sup>2</sup> ) | 漆包增<br>重(%) | 纸包增<br>重(%) | 直径<br>(mm) | 漆包<br>外径<br>(mm) | 截面<br>(mm <sup>2</sup> ) | 漆包增<br>重(%) | 纸包增<br>重(%) |
|------------|------------------|--------------------------|-------------|-------------|------------|------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| 0.15       | 0.19             | 0.0177                   | 6.46        |             | 0.93       | 1.02             | 0.676                    | 2.29        |             |
| 0.16       | 0.20             | 0.0201                   | 6.01        |             | 0.98       | 1.05             | 0.724                    | 2.21        |             |
| 0.17       | 0.21             | 0.0227                   | 5.6         |             | 1.00       | 1.11             | 0.785                    | 2.63        |             |
| 0.18       | 0.22             | 0.0255                   | 5.29        |             | 1.04       | 1.15             | 0.849                    | 2.52        |             |
| 0.19       | 0.23             | 0.0284                   | 4.98        |             | 1.08       | 1.19             | 0.916                    | 2.44        |             |
| 0.20       | 0.24             | 0.0314                   | 4.71        |             | 1.12       | 1.23             | 0.985                    | 2.33        |             |
| 0.21       | 0.25             | 0.0346                   | 4.47        |             | 1.16       | 1.27             | 1.057                    | 2.24        |             |
| 0.23       | 0.28             | 0.0415                   | 5.22        |             | 1.20       | 1.31             | 1.131                    | 2.21        |             |
| 0.25       | 0.30             | 0.0491                   | 4.56        |             | 1.25       | 1.36             | 1.227                    | 2.08        | 5.82        |
| 0.27       | 0.32             | 0.0573                   | 4.41        |             | 1.30       | 1.41             | 1.327                    | 2.0         | 5.58        |
| 0.29       | 0.34             | 0.0661                   | 4.09        |             | 1.35       | 1.46             | 1.431                    | 1.93        | 5.35        |
| 0.31       | 0.36             | 0.0755                   | 3.8         |             | 1.40       | 1.51             | 1.539                    | 1.77        | 5.15        |
| 0.33       | 0.38             | 0.0855                   | 3.55        |             | 1.45       | 1.56             | 1.651                    | 1.83        | 4.85        |
| 0.35       | 0.41             | 0.0962                   | 4.01        |             | 1.50       | 1.61             | 1.767                    | 1.77        | 4.77        |
| 0.38       | 0.44             | 0.1134                   | 3.67        |             | 1.56       | 1.67             | 1.911                    | 1.7         | 4.56        |
| 0.41       | 0.47             | 0.1320                   | 3.38        |             | 1.62       | 1.73             | 2.06                     | 1.64        | 4.38        |
| 0.44       | 0.50             | 0.1521                   | 3.36        |             | 1.68       | 1.79             | 2.22                     | 1.51        | 4.20        |
| 0.47       | 0.53             | 0.1735                   | 2.93        |             | 1.74       | 1.85             | 2.38                     | 1.51        | 4.05        |
| 0.49       | 0.55             | 0.1886                   | 2.81        |             | 1.81       | 1.93             | 2.57                     | 1.51        | 3.89        |
| 0.51       | 0.58             | 0.204                    | 3.32        |             | 1.88       | 2.00             | 2.78                     | 1.47        | 3.72        |
| 0.53       | 0.60             | 0.221                    | 3.19        |             | 1.95       | 2.07             | 2.99                     | 1.48        | 3.58        |
| 0.55       | 0.62             | 0.238                    | 3.07        |             | 2.02       | 2.14             | 3.20                     | 1.44        | 3.46        |
| 0.57       | 0.64             | 0.255                    | 2.96        |             | 2.10       | 2.23             | 3.46                     | 1.43        | 3.32        |
| 0.59       | 0.66             | 0.273                    | 2.85        |             | 2.26       | 2.39             | 4.01                     | 1.32        | 3.07        |
| 0.62       | 0.69             | 0.302                    | 2.71        |             | 2.44       | 2.57             | 4.68                     | 1.23        | 2.82        |
| 0.64       | 0.72             | 0.322                    | 2.85        |             | 2.63       |                  | 5.43                     |             | 2.61        |
| 0.67       | 0.75             | 0.353                    | 2.75        |             | 2.83       |                  | 6.29                     |             | 2.42        |
| 0.69       | 0.77             | 0.374                    | 2.66        |             | 3.05       |                  | 7.31                     |             | 2.23        |
| 0.72       | 0.80             | 0.407                    | 2.78        |             | 3.28       |                  | 8.45                     |             | 2.07        |
| 0.74       | 0.83             | 0.430                    | 2.90        |             | 3.53       |                  | 9.79                     |             | 1.92        |
| 0.77       | 0.86             | 0.466                    | 2.78        |             | 3.80       |                  | 11.34                    |             |             |
| 0.80       | 0.89             | 0.503                    | 2.67        |             | 4.10       |                  | 13.2                     |             |             |
| 0.83       | 0.92             | 0.541                    | 2.59        |             | 4.50       |                  | 15.9                     |             |             |
| 0.86       | 0.95             | 0.581                    | 2.48        |             | 4.80       |                  | 18.1                     |             |             |
| 0.90       | 0.99             | 0.638                    | 2.36        |             | 5.20       |                  | 21.21                    |             |             |

纸包两边增厚0.3mm



表5-9 扁铜线标称尺寸与玻璃丝包线的绝缘厚度的关系

| 图 示   | 铜线标称尺寸(mm)    |                 | 绝缘厚度(mm)      |      |
|---|---------------|-----------------|---------------|------|
|   | a             | b               | A-a           | B-b  |
|  | 0.90~<br>1.95 | 2.10~<br>5.90   | 0.25~<br>0.35 | 0.27 |
|   | 0.90~<br>1.95 | 6.00~<br>8.00   | 0.33~<br>0.39 | 0.27 |
|   | 0.90~<br>1.95 | 8.60~<br>14.50  | 0.35~<br>0.45 | 0.27 |
|   | 2.10~<br>3.80 | 2.10~<br>10.00  | 0.35~<br>0.41 | 0.33 |
|   | 2.10~<br>3.80 | 10.80~<br>14.50 | 0.36~<br>0.44 | 0.33 |
|   | 4.10~<br>5.50 | 4.10~<br>10.00  | 0.40~<br>0.48 | 0.40 |
|   | 4.10~<br>5.50 | 10.80~<br>14.50 | 0.43~<br>0.53 | 0.40 |

选取许用电流密度  $j$  时, 要考虑变压器的绝缘等级、散热条件和容量等因素。表5-10是许用电流密度  $j$  与绝缘等级、冷却方式及容量的关系, 设计时可以参考选用。

表5-10 许用电流密度  $j$  与绝缘等级、冷却方式及变压器容量的关系

| 许用电流密度<br>( $A/mm^2$ ) | 变压器容量          |                  |               |                 |               |
|------------------------|----------------|------------------|---------------|-----------------|---------------|
|                        | 10~100<br>(VA) | 100~1000<br>(VA) | 1~10<br>(KVA) | 10~100<br>(KVA) | >100<br>(KVA) |
| 绝缘等级<br>冷却方式           |                |                  |               |                 |               |
| A级、自冷                  | 5~3.5          | 3.5~2            | 2.4~1.8       | 3~2             | 2~1.3         |
| A级、风冷                  | —              | 6~4              | 5~3           | 4~3             | 3~2.5         |
| A级、油冷                  | —              | —                | —             | 3~4.5           | 4.5~5.5       |
| B级、自冷                  | 6~4            | 4~2.5            | 2.8~2.0       | 2.6~1.8         | 2~1.6         |
| B级、风冷                  | —              | 7~5              | 5.5~3.5       | 4.5~3.5         | 3.5~3         |
| B级、油冷                  | —              | —                | —             | 3.5~5           | 5~6           |

注: 同等容量、同样的冷却方式, 散热情况仍有很大的差异。表中所列数据, 仅就一般情况而言。

按使用电流大小选择导线、电线、母线、螺钉及螺柱可见参表5-11。

表5-11 按电流选择导

| 电流(A)            | 绝缘导线的芯线<br>截面 (mm <sup>2</sup> ) |     | 母线截面(mm <sup>2</sup> ) |       |
|------------------|----------------------------------|-----|------------------------|-------|
|                  | 铜芯线                              | 铝芯线 | 铜 母 线                  | 铝 母 线 |
| 5~10             | 1.0                              | 1.5 |                        |       |
| 15               | 1.5                              | 2.5 |                        |       |
| 20               | 2.5                              | 4.0 |                        |       |
| 25               | 4.0                              | 6.0 |                        |       |
| 30、40、50         | 10                               |     | 3×20、2×30、2.5×25       | 3×20  |
| 60、75、80         | 16                               |     | 3×20、2×30、2.5×25       | 3×20  |
| 100              | 25                               |     | 3×20、2×30、2.5×25       | 3×20  |
| 120、150          | 35                               |     | 3×25、2.5×30            | 3×30  |
| 200              | 50                               |     | 3×25、2.5×30            | 3×30  |
| 250、300          |                                  |     | 3×30                   | 5×40  |
| 400              |                                  |     | 4×40                   | 5×40  |
| 500、600          |                                  |     | 5×50                   |       |
| 750、800、<br>1000 |                                  |     | 6×60<br>6×80           |       |
| 21200、1500       |                                  |     | 8×80                   |       |
| 2000~3000        |                                  |     | 2×(8×80)               |       |

注：表中绝缘导线及母线的环境温度为一40℃~+40℃；最高允许温度对地

**线、母线、螺钉及螺柱**

| 导电电路压紧用钢制<br>螺钉或螺栓 | 通过电流的螺柱 |     |
|--------------------|---------|-----|
|                    | 黄 铜     | 铜   |
| M5                 | M5      |     |
| M5                 | M5      |     |
| M5                 | M5      |     |
| M5                 | M6      |     |
| M6                 | M6      |     |
| M6                 | M8      |     |
| M8                 | M10     | M8  |
| M8                 | M12     | M10 |
| M10                |         | M12 |
| M10                |         | M12 |
| M12                |         | M16 |
| M16                |         | M20 |
| M20                |         |     |
| M20                |         |     |

绝缘导线的线芯为60°C，铜母线为80°C，铝母线为70°C，表中3000安仅指直流。



### § 5-3 绝缘材料

常用绝缘材料的规格、性能与用途见表 5-12、5-13 和 5-14。

表5-12 常用绝缘纤维

| 名 称                          | 型 号                     |       | 浸渍漆  | 规 格              |      |         |     |     |
|------------------------------|-------------------------|-------|------|------------------|------|---------|-----|-----|
|                              |                         |       |      | 厚 度<br>(mm)      |      | 宽 度(mm) |     |     |
| 漆<br>布<br>(带)<br>类           | 黄漆布 (即<br>黄蜡布、黄腊<br>布带) | 平纹    | 斜纹   | 油基漆              | 0.15 | 0.17    | (布) | (带) |
|                              |                         | 2010  | 2015 |                  | 0.20 | 0.24    | 700 | 15  |
|                              |                         | 2011  | 2016 |                  | 0.30 | ~       | 20  |     |
|                              |                         | 2012  | 2017 |                  |      | 1000    | 25  |     |
|                              | 黑漆布 (即黑<br>腊布、黑腊布<br>带) | 2111  |      | 沥青漆              |      |         |     |     |
|                              |                         | 2110  | 2114 |                  |      |         |     |     |
|                              | 黄漆绸 (即黄<br>腊绸及黄腊绸<br>带) | 2210  |      | 油基漆              | 0.04 | 0.06    |     |     |
|                              |                         |       |      |                  | 0.06 | 0.08    |     |     |
|                              |                         |       |      |                  | 0.10 | 0.12    |     |     |
|                              |                         |       | 2211 |                  | 0.15 |         |     |     |
|                              |                         | 2212  |      | 0.08             | 0.10 |         |     |     |
|                              |                         |       |      | 0.12             | 0.15 |         |     |     |
| 玻<br>璃<br>漆<br>布<br>(带)<br>类 | 油性玻璃漆布(带)               | 上2201 |      | 油性黄<br>玻璃漆<br>布漆 | 0.11 | 13      |     |     |
|                              | 油性玻璃漆布(带)               | 2412  |      |                  | 0.13 | 16      |     |     |
|                              |                         |       |      |                  | 0.15 | 20      |     |     |
|                              | 黑玻璃漆布(带)                | 2430  |      | 沥青<br>醇酸漆        | 0.17 | 25      |     |     |
|                              | 三聚氰胺醇酸玻璃<br>漆布(带)       | 2432  |      | 醇酸漆              | 0.20 | 30      |     |     |
|                              |                         |       |      | 0.24             |      |         |     |     |
|                              | 硅有机玻璃漆布<br>(带)          | 2450  |      | 有机硅漆             |      |         |     |     |

制品的规格与性能

| 耐热等级 | 主要用途  |
|------|---|
| A    | 适用于一般低压电机、电器的衬垫绝缘或线圈绝缘<br>耐油性，适用于油中工作的变压器、电机、电器的衬垫或线圈绝缘                                       |
| A    | 老化性比黄漆布好，不耐油，适用于低压电机、电器的衬垫或线圈绝缘   |
| A    | 适用于A~E级电机、电器中要求介电性能较高的薄层衬垫或线圈绝缘<br><br>同上用途，但耐油性高   |
| A    | 介电性能比2012好，广泛代替黄漆布、绸。适用于一般电机、电器设备衬垫或线圈绝缘及油中工作的变压器、电器的线圈绝缘                                     |
| E    | 广泛代替黑漆布，适用于大型电机、一般电机电器的衬垫或线圈绝缘，耐潮性好，但不耐汽油及变压器油<br>广泛代替一般绝缘漆布，适用于湿热带较高温度或油中工作的电机、电器、变压器衬垫或线圈绝缘 |
| H    | 具有较高耐热性，用于温度180℃的电机、电器中作衬垫或线圈绝缘   |

| 名称            | 型号                                 | 浸渍漆  | 规格                                       |                                |                              |          |  |
|---------------|------------------------------------|--|--|--------------------------------|------------------------------|----------|--|
|               |                                    |  | 厚度<br>(mm)                               |                                | 宽度<br>(mm)                   |          |  |
| 环氧玻璃<br>漆布(带) | 2433                               | 环氧树脂漆  | 0.11<br>0.15                             | 0.13<br>0.17                   | 同上                           | 同上       |  |
| 薄<br>膜<br>类   | 聚脂薄膜                               | 2820   | 由对苯二甲<br>酸、二甲脂乙二<br>醇经缩聚拉伸而<br>制成        | 0.016<br>0.025<br>0.04<br>0.07 | 0.02<br>0.03<br>0.05<br>0.10 | 1000     |  |
|               | 聚四氟<br>乙烯薄膜                        | SFM-1(定向)<br>SFM-2 { 定向<br>半定向<br>不定向<br>SFM-3 { 定向<br>不定向<br>SFM-4(不定向) | 由聚四氟乙烯<br>树脂模压熔烘<br>成毛坯, 经车削<br>, 再经辗压制成 | 0.005~0.5                      |                              | 40~260   |  |
|               | 聚脂薄膜<br>电工纸箔<br>(即聚脂<br>薄膜青壳<br>纸) | 2920   | 由聚脂薄膜与皂<br>工纸涂以粘合剂<br>复合而成               | 0.17<br>0.22<br>0.27           | 0.20<br>0.24<br>0.30         | 800~1000 |  |
|               | 聚脂薄膜<br>玻璃漆布<br>箔                  | 上2252  | 由聚脂薄膜与<br>三聚氰胺醇酸玻<br>璃漆布涂以粘合<br>剂复合而成    | 0.17<br>0.20<br>0.22<br>0.24   |                              | 800~1000 |  |



(续表)

| 耐热等级 | 主要用途   |
|------|--|
| E    | 适用于包扎环氧树脂浇注的特种电器线圈                                     |
| K    | 绝缘性、防潮性及机械性都较好，耐电晕性较差，适用于中小型低压电机槽绝缘，匝间及相间绝缘以及其他电气绝缘    |
| H    | SFM-1用于电容器制造，工作温度 $-60\sim+250^{\circ}\text{C}$        |
|      | SFM-2用于导线绝缘，工作温度 $-60\sim+250^{\circ}\text{C}$         |
|      | SFM-3用于电器仪表的中间绝缘，工作温度 $-60\sim+250^{\circ}\text{C}$    |
|      | SFM-4用于无线电和电器的绝缘和衬垫，工作温度 $-60\sim+250^{\circ}\text{C}$ |
| B    | 绝缘性较好，机械强度较高，适用于低压小型电机、电器中作衬垫绝缘                        |
| F    | 绝缘性较好，机械强度较高，适用于湿热带地区的电机、电器作衬垫绝缘和槽绝缘                   |

## 5-13 绝缘层压制

| 名 称        | 型 号     | 标 称 厚 度(mm)   |
|------------|---------|---|
| 酚醛层<br>压布板 | 3020    | 0.2~0.5 (相隔0.1)   |
|            | 3021    | 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0<br>2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.5, 6.0  |
|            | 3022    | 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 9.0, 10   |
|            | 3023    | 11~40 (相隔1mm)<br>42~50 (相隔2mm)  |
|            | 上6075   | 52~60 (相隔2mm)   |
|            | 上3022-2 |   |
| 酚醛层<br>压布板 | 3025    | 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8,<br>2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.5, 6.0<br>6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 9.0, 10<br>11~40 (相隔1mm)<br>42~50 (相隔2mm) |
|            | 3027    | 52~60 (相隔2mm)<br>65~80 (相隔5mm)  |
|            | 上3321-1 | 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8,<br>2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0   |
|            |         |   |

品的规格与性能

| 耐 热<br>等 级 | 主 要 用 途  |
|------------|--|
| A          | 介电性能和耐油性较好, 适用于电气设备中作绝缘结构零件, 可在变压器油中使用         |
|            | 机械性能较好, 适用于电气设备中作绝缘结构零部件, 可在变压器油中使用            |
|            | 耐潮性较好, 可用于高湿条件下工作的电气设备中作绝缘结构零件                 |
|            | 具有低的介质损耗, 适用于无线电、电信和高频设备中                      |
|            | 适用于电信、无线电的电位器中                                 |
| A          | 具有较好的机械冲剪性能及电性能, 适用于高频、无线电和电信等装置中              |
| E          | 具有高的机械性能和一定的介电性能, 适用于电气设备中作绝缘结构零部件, 并可在变压器油中使用 |
| E          | 具有高的介电性能、耐油性好, 用途同上                            |
| A          | 具有较高的介电性能和耐湿性, 适用于电信、仪表等电气设备中作绝缘配件             |

| 名 称          | 型 号             | 标 称 厚 度(mm)   |
|--------------|-----------------|---|
| 苯胺酚醛<br>玻璃布板 | 3231<br>(上3201) | 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8,<br>2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0,<br>5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 9.0, 10<br>11~40 (相隔1mm)<br>42~50 (相隔2mm) |
| 环氧酚醛<br>玻璃布板 | 3240            | 0.2, 0.3<br>0.5, 0.8<br>1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0, 2.5, 3.0,<br>3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5,<br>7.0, 8.0, 9.0, 10<br>11~30 (相隔1mm)              |
| 有机硅玻<br>璃布板  | 3250            | 32~40<br>42~50 } (相隔2mm)<br>52~60 }   |
|              | 3251            | 65~80 (相隔5mm)   |

(续表)

| 耐 热<br>等 级 | 主 要 用 途  |
|------------|--|
| B          | 机械性能及介电性能比酚醛层压布板高，耐潮湿，广泛代替酚醛层压布板作绝缘结构零部件，并适用于湿热带地区 |
| B~F        | 具有高的机械性能、介电性能和耐水性，适用于电气设备中作绝缘结构零部件，可在变压器油和潮湿条件下使用  |
|            | 具有较高的耐热性、机械性能和介电性能，适用于耐热180℃及热带电机、电器中作绝缘零部件使用      |
|            | 具有高的耐热性和介电性能，但机械强度较差，适用于耐热180℃及热带电机、电器中作绝缘零部件使用    |

表5-14 常用绝缘

| 名 称                   | 型号                | 颜色          | 主要成分  | 溶剂   | 干燥<br>类型 | 漆膜干燥条件     |           |     |
|-----------------------|-------------------|-------------|---|--|----------|------------|-----------|-----|
|                       |                   |             |   |  |          | 温度<br>(°C) | 时间<br>(h) |     |
| 沥青漆                   | 1010              | 黑<br>色      | 石油沥青、干性<br>植物油和松脂酸<br>盐经熬制而成  | 200号溶<br>剂油、二<br>甲苯                                      | 烘干       | 105±2      | 6         |     |
|                       | 1011              |             |   |  | 烘干       | 105±2      | 3         |     |
|                       | 1210              |             |   |  | 烘干       | 105±2      | 10        |     |
|                       | 1211              |             |   |  | 气干       | 20±2       | 3         |     |
| 绝<br>缘<br>浸<br>渍<br>漆 | 耐油清漆              | 黄<br>褐<br>色 | 甘油、松香脂、干<br>性植物油<br>甲酚甲醛树脂、干<br>油性、松香脂<br>植物油改性，季戊<br>四醇树脂、苯二甲<br>酸酐<br>甘油、苯二甲酸酐<br>干性植物油、松香<br>脂<br>油改性醇酸树脂漆<br>与丁醇改性酚醛树<br>脂漆复合而成<br>油改性醇酸树脂漆<br>与丁醇改性三聚氰<br>胺树脂漆复合而成 | 200号溶<br>剂油<br>有机溶剂<br>200号溶<br>剂油、二<br>甲苯<br>甲苯及二<br>甲苯 | 烘干       | 105±2      | 2         |     |
|                       | 甲酚清漆              |             |   |  | 1014     | 烘干         | 105±2     | 0.6 |
|                       | 醇干醇酸<br>清漆        |             |   |  | 1231     | 气干         | 20±2      | 20  |
|                       | 醇酸清漆              |             |   |  | 1030     | 烘干         | 105±2     | 2   |
|                       | 丁基酚醛<br>醇酸漆       |             |   |  | 1031     | 烘干         | 120±2     | 2   |
|                       | 三聚氰胺<br>醇酸树脂<br>漆 |             |   |  | 1032     | 烘干         | 105±2     | 2   |

## 漆的特性与用途

| 耐热等级 | 特 性 及 主 要 用 途  |
|------|--|
| A E  | 耐潮湿，耐温度变化，但不耐油，适用于浸渍电机转子和定子绕组等不要求耐油的电器零部件              |
| A E  | 同1010，但干燥较快  |
| A E  | 耐潮湿，耐温度变化，但不耐油，适于电机绕组复盖用                               |
| A E  | 系晾干漆，干燥快，不耐油，适用于电机绕组复盖用，在不需耐油处可以代替晾干灰瓷漆用               |
| A    | 干燥迅速，具有耐油性、耐潮湿性，漆膜平滑有光泽，适于浸渍电机绕组                       |
| A    | 干燥快，具有耐油性，适于浸渍电机绕组，但由漆包线制成的绕组不能使用                      |
| B    | 干燥快，硬度大，有较好的弹性，耐温，耐气候性好，具有较高的介电性能，适于不宜高温烘焙的电器或绝缘零件表面复盖 |
| B    | 性能较沥青漆及清烘漆好，具有较好的耐油性及耐电弧性，漆膜平滑有光泽，适于浸渍电机、电器线圈及作复盖用     |
| B    | 具有较好的流动性、干透性、耐热性和耐潮湿性，漆膜平滑有光泽，适于湿热带用电器线圈浸渍             |
| B    | 具有较好的干透性、耐热、耐油性、耐电弧性和附着力，漆膜平滑有光泽，适用于湿热带浸渍电机电器线圈用       |

| 名 称                   | 型号        | 颜 色   | 主要成分                            | 溶 剂           | 干燥<br>类型 | 漆膜干燥条件     |           |     |
|-----------------------|-----------|-------|---------------------------------|---------------|----------|------------|-----------|-----|
|                       |           |       |                                 |               |          | 温度<br>(°C) | 时间<br>(h) |     |
| 环氧脂漆                  | 1033      |       | 亚麻油脂肪酸和环氧树脂经酯化聚合后与部分三聚氰胺树脂漆复合而成 | 二甲苯和丁醇等       | 烘干       | 120±2      | 2         |     |
| 绝<br>缘<br>浸<br>渍<br>漆 | 气干环氧脂漆    | —     | 黄                               | 环氧树脂、胺基树脂、干性油 | 二甲苯      | 气干         | 25        |     |
|                       | 胺基酚醛醇酸树脂漆 | —     | 褐<br>色                          | 酚醛改性醇酸树脂、胺基树脂 | 二甲苯及溶剂油  | 烘干         | 105±2     | 1   |
|                       | 无溶剂漆      | 515-1 | 淡黄色                             | 环氧聚脂和苯乙烯共聚物   | —        | 烘干         | 130       | 1/6 |
|                       | 硅有机清漆     | 515-2 |                                 |               | —        | 烘干         |           | 1/2 |
|                       |           | 1050  | 黄褐色                             | 改性的聚硅氧烷树脂     | —        | 烘干         | 200       |     |
|                       |           | 1051  |                                 |               | 甲苯       | 气干         | 20        | 1/4 |
|                       |           | 1052  |                                 |               | 甲苯       | 烘干         |           | 1/2 |
| 复<br>盖<br>磁<br>漆      | 灰磁漆       | 1320  | 灰色                              | 醇酸清漆，颜料       | —        | 烘干         | 105±2     | 3   |
|                       | 红磁漆       | 1322  | 红色                              | 同上            | —        | 烘干         | 105±2     | 3   |
|                       | 气干红磁漆     | 1323  | 红色                              | 同上，另加干燥剂      | 二甲苯      | 气干         | 20        | 24  |
|                       | 硅有机磁漆     | 1350  | 红色                              | 硅有机清漆，颜料      | —        | 烘干         | 200       | 3   |



(续表)

| 耐热等级 | 特 性 及 主 要 用 途   |
|------|---|
| B    | 具有较好的耐油性、耐热性、耐潮湿性，漆膜平滑有光泽，有弹性<br>适于湿热带浸渍电机绕组或作电机电器零部件的表面复盖用               |
| B    | 低温下干燥迅速，其他性能和1033同，适用于不宜高温烘焙的湿热带电器绝缘零件表面复盖<br>固化性好，对油性漆包线溶解性小，适用于浸渍电机电器线圈 |
| B    | 固化快，耐潮性及介电性能好，不需用活性溶剂，适于浸渍电器线圈  |
| H    | 耐热性高，固化性良好，耐霉，耐油性及介电性能优良，适用于高温线圈浸渍及石棉水泥零件防潮处理                             |
| H    | 同1050，但耐热性稍低，干燥快  |
| H    | 性能与1050相似，但耐热性稍低，用于高温电器线圈浸渍及绝缘零件表面修补（低温干燥）                                |
| H    | 性能与1052相近   |
| E    | 漆膜强度高，能耐电弧和油的作用，但耐潮性及介电性能较差，适于电机、电器线圈复盖用<br>同1320                         |
| E    | 同1320，但可低温干燥，适于不宜高温烘焙的电机、电器线圈复盖及各种电器、仪器绝缘零件的表面修饰                          |
| H    | 耐热性高，耐潮性、耐冲击性和介电性能良好，适用于高温电器线圈复盖  |

## 附录 本书主要符号的意义

- $A$ ——能量  
 $a$ ——铁心片宽度  
 $a_p$ ——漏磁间隙折合长度  
 $B$ ——磁通密度 (磁密)  
 $B_m$ ——最大磁密  
 $B_0$ ——空气隙中的磁密  
 $b$ ——铁心净叠厚, 绕组厚度  
 $b'$ ——铁心毛叠厚  
 $b_m$ ——漏磁通磁力线计算长度  
 $C$ ——电容量, 铁心窗口宽, 作下标表示长时值  
 $E, e$ ——感应电势, 电动势  
 $E_m$ ——感应电势最大值  
 $e_s$ ——漏磁电动势  
 $F$ ——磁势  
 $f$ ——频率  
 $f_S$ ——负载持续率  
 $G, g$ ——重量  
 $g$ ——磁导  
 $H$ ——磁场强度, 绕组轴向高度, 盘形绕组宽度

$H_m$ ——磁场强度最大值  
 $H_a$ ——空气隙中的磁场强度  
 $h$ ——铁心窗口高  
 $I$ ——电流  
 $I_c$ ——空载电流的有功分量  
 $I_d$ ——直流电流  
 $I_e$ ——电弧电流, 焊接电流  
 $I_f$ ——交流电流  
 $I_k$ ——控制电流  
 $I_l$ ——线电流  
 $I_n$ ——空载电流  
 $I_u$ ——空载电流的无功分量  
 $I_\phi$ ——相电流  
 $j$ ——电流密度  
 $K, k$ ——系数, 变压比  
 $K_B$ ——功率换算系数  
 $K_c$ ——叠片系数  
 $K_f$ ——电流换算系数  
 $k_M$ ——耦合系数  
 $K_U$ ——电压换算系数  
 $L$ ——电感, 自感系数  
 $L_s$ ——漏感系数  
 $l$ ——长度, 磁路长度  
 $m$ ——趋表效应系数, 填充系数  
 $N$ ——匝数, 作为下标表示额定值  
 $N_j$ ——交流绕组 (匝数)  
 $N_k$ ——控制绕组 (匝数)

$N_0$ ——每伏匝数  
 $N_1$ ——初级绕组 (匝数)  
 $N_2$ ——次级绕组 (匝数)  
 $n_g$ ——气隙数目  
 $P$ ——功率, 作下标表示平均值  
 $P_B$ ——变压器计算功率  
 $P_A$ ——电弧功率  
 $P_J$ ——交流功率  
 $P_w$ ——涡流损耗  
 $P_h$ ——磁滞损耗  
 $P_0$ ——空载损耗  
 $P_{Cu}$ ——铜损  
 $P_{Fe}$ ——铁损  
 $Q$ ——铁心窗口面积  
 $q$ ——磁化容量, 几何级数的比率  
 $R, r$ ——电阻  
 $R_m$ ——磁阻  
 $r_s$ ——短路电阻  
 $r_F$ ——电抗器电阻  
 $r_B$ ——变压器电阻  
 $S$ ——面积, 视在功率  
 $S_{Fe}$ ——变压器铁心截面积  
 $S_e$ ——动铁心面积  
 $T$ ——周期, 时间  
 $T_m$ ——电容放电至第一个峰值的时间  
 $T_n$ ——电容放电第一个半波的时间  
 $t$ ——时间

$U$ ——电压  
 $U_d$ ——直流电压  
 $U_a$ ——电弧电压  
 $U_j$ ——交流电压  
 $U_l$ ——线电压  
 $U_R$ ——电阻压降  
 $U_X$ ——电抗压降  
 $U_\phi$ ——相电压  
 $U_o$ ——次级空载电压  
 $\Delta U\%$ ——电压变动率  
 $u_k\%$ ——变压器的短路比  
 $X, x$ ——电抗, 感抗  
 $X_k$ ——短路电抗  
 $X_L$ ——感抗  
 $X_p$ ——电抗器的感抗  
 $X_B$ ——变压器的总感(漏)抗  
 $Z, z$ ——阻抗  
 $Z_k$ ——短路阻抗  
 $\beta$ ——衰减系数  
 $\gamma$ ——比重, 电导率  
 $d, \delta$ ——厚度, 绕组厚度, 间隙宽度  
 $\delta_o$ ——气隙宽  
 $\Delta_{12}, \delta_{12}$ ——初次级绕组间距  
 $\Delta_{Fe}$ ——硅钢片的比损耗  
 $\eta$ ——效率  
 $\theta$ ——相位角  
 $\lambda_a$ ——电弧功率因数

- $\mu$  —— 磁导率
- $\mu_0$  —— 空气的磁导率
- $\rho_{Cu}$  —— 铜的电阻率
- $\phi$  —— 磁通
- $\phi_m$  —— 磁通最大值
- $\phi_s$  —— 漏磁通
- $\phi_0$  —— 主磁通
- $\phi$  —— 相位角, 功率因数角
- $\psi$  —— 磁通链, 相位角
- $\omega$  —— 角频率
- $\omega_0$  —— 谐振角频率
- $\omega'$  —— 振荡角频率

## 主要参考文献

1. 朱任中主编 《电焊设备——弧焊电源篇》 天津大学教材 1975
2. 黄石生主编 《弧焊电源》 机械工业出版社 1980
3. 蔡国余主编 《电焊设备——电焊机设计篇》 天津大学教材 1975
4. 吕祖沛 《BX3 型动圈式和 BX1 型动铁分磁式交流弧焊机焊接电流的计算》 《电焊机》 1974 No.12
5. 株州焊接器材厂 《动圈式弧焊变压器的基本原理及其计算》 1975
6. 北京电焊机厂、北京工业大学 《空气漏磁式交流弧焊机工作原理及设计方法》 1971.10
7. 何方殿主编 《弧焊整流电源及控制》 机械工业出版社 1983
8. 毕惠琴主编 《焊接方法及设备——第二分册 电阻焊》 机械工业出版社 1981
9. А.С.Гельман 《Технология И Оборудование Контактной Электросварки》 [苏] 1960
10. А.И.Ахун著 沈京等译 《接触电焊机》 1954
11. 蔡国余 《电容储能焊机焊接变压器铁心计算》 《电焊机》 1981 No.1
12. 北京人民轴承厂 《轴承凸焊工艺及贮能焊机》 机械工业出版社 1974
13. 电工手册编写组编 《电工手册》 上海科学技术出版社 1978