

# 目 录

<b>第一章 小功率电源变压器的基础知识</b> .....	1
第一节 小功率电源变压器的结构形式.....	1
第二节 变压器的工作原理.....	3
第三节 电源变压器的损耗和效率.....	7
一、铁心中的损耗.....	7
二、线圈铜线中的损耗.....	8
三、电源变压器的效率.....	8
第四节 电源变压器初次级的相位关系.....	9
第五节 有关电源变压器材料的知识.....	10
一、铁心材料.....	10
二、导线材料.....	13
三、绝缘材料.....	14
<b>第二章 小功率电源变压器的简便设计计算</b> .....	17
第一节 对设计工作的要求.....	17
一、降低空载电流.....	17
二、电源变压器的温升.....	19
三、几个重要参数的选择.....	20
第二节 设计计算的步骤.....	28
一、确定功率.....	28
二、确定铁心截面尺寸.....	33
三、确定线圈用线的线径.....	34
四、确定绕组圈数.....	35

五、验算	36
六、设计计算举例	37
<b>第三章 电源变压器的绕制</b>	<b>45</b>
第一节 绕线要求	45
第二节 绕线的准备	47
一、手绕和使用绕线机	47
二、制作木心	47
三、线框的制备	48
四、层间绝缘纸	49
五、漆包线	50
第三节 绕制	52
一、线圈头尾的固定法	52
二、绕线	54
三、计数	55
四、垫绝缘纸	56
五、静电屏蔽层	56
六、经常遇到的几个特殊问题	58
七、使用绕线机绕线	58
八、检验	59
第四节 变压器的装配与浸渍处理	61
一、装铁心	61
1. 插片式铁心	62
2. C型铁心	63
二、装紧固架	65
三、浸渍处理	66
1. 浸渍溶液的准备	67
2. 烘干	67

3. 浸渍 .....	68
<b>第四章 几种特殊电源变压器的设计</b> .....	<b>70</b>
<b>第一节 自耦变压器</b> .....	<b>70</b>
一、自耦变压器的设计 .....	71
二、设计举例 .....	72
三、调压变压器 .....	74
四、调压变压器的非正规使用 .....	77
<b>第二节 适应多种供电电压的变压器</b> .....	<b>79</b>
<b>第三节 次级线圈复合使用的变压器</b> .....	<b>80</b>
<b>第四节 超小型电源变压器</b> .....	<b>83</b>
<b>第五章 电源变压器损耗的校核</b> .....	<b>85</b>
<b>第一节 变压器的铁损和磁化电流</b> .....	<b>86</b>
一、片状铁心的损耗 .....	86
二、片状铁心的磁化电流 .....	87
三、C型铁心的损耗 .....	89
<b>第二节 变压器的铜损和效率</b> .....	<b>91</b>
<b>第三节 空载电流</b> .....	<b>93</b>
<b>第六章 小功率电源变压器的测试和常见故障</b> .....	<b>95</b>
<b>第一节 小功率电源变压器的测试</b> .....	<b>95</b>
一、绝缘电阻 .....	95
二、空载电流 .....	96
三、输出电压 .....	96
四、温升 .....	97
<b>第二节 常见的故障</b> .....	<b>99</b>
一、温度过高 .....	99
二、摸触变压器铁心有麻电感觉 .....	100
三、漏磁 .....	100

四、噪声 .....	102
<b>第七章 旧变压器的翻修和利用 .....</b>	<b>103</b>
第一节 旧变压器的拆卸 .....	103
第二节 旧硅钢片的利用 .....	104
第三节 旧漆包线的利用 .....	106
<b>附录 .....</b>	<b>108</b>
附录表格的说明 .....	108
附表（1）EI型硅钢片规格 .....	111
附表（2）C型硅钢片规格 .....	118
附表（3）漆包线规格 .....	122

# 第一章 小功率电源变压器的 基础知识

在交流供电系统中，大多数的电子设备、测量仪器以及各种家用电器都离不开电源变压器。随着电子工业的发展和电工产品的增多，电源变压器的应用范围也势必更加广泛。

我们使用的电气设备常常需要多种不同电压值的供电电源，为此，最简便的方法就是通过电源变压器从标准电网上获得。电源变压器可以把电能从某一个交流电路传送到另一个相隔离的电路中去。更重要的是在传递过程中可以保持原来交流电的频率不变，而任意地选择所需要的电压和功率。这一章将简要介绍一些必要的电源变压器的基础知识。

## 第一节 小功率电源变压器的 结构形式

在各种电气设备中，电源变压器的种类随着各种不同的使用目的或不同的设计意图而各异。一般常用的电源变压器结构形式按铁心的形状分为：心式、壳式和C型。

心式变压器的两个线包分别绕在“□”字形铁心两侧的心柱上（图1·1）。这种变压器由于绕线分成两个线包，每个线包比壳式变压器的线包薄，每圈线圈的平均长度短，因而节约铜线。并且由于它的线包薄又分别安置，所以散热面积大，相同条件下温升比壳式变压器低。但是它要绕两个线包，加工绕

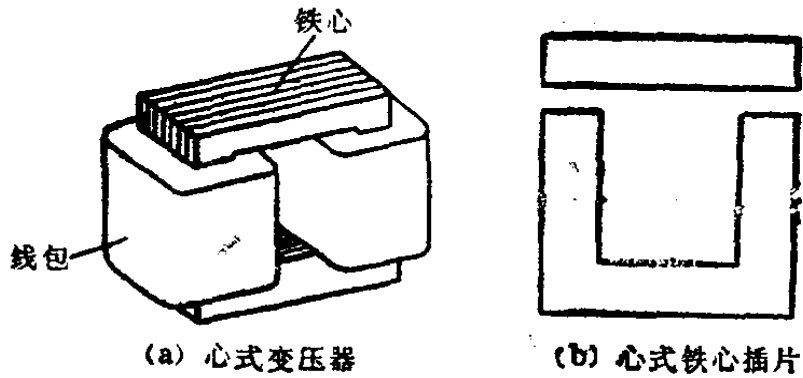


图 1·1

制较麻烦。主要的缺点还是体积比壳式变压器大，漏磁大，使用时也容易碰伤线包。目前除了工作电压很高或有特殊要求外，都不大使用这种形式。

壳式变压器是当前使用得最多的一种变压器。它使用“E”形和“I”形铁心插片，把线包绕在铁心的中心柱上(图1·2)。整个变压器只用一个线包，因而容易绕制。并且线包有一半的面积包在铁心里，不容易被碰伤漏磁较少。在现代的电子设备中，各部件之间往往都安排得很紧凑，为了减小体积，同时要求电源变压器不产生过多的漏磁去干扰相邻的器件工作，壳式变压器的使用优于心式变压器。

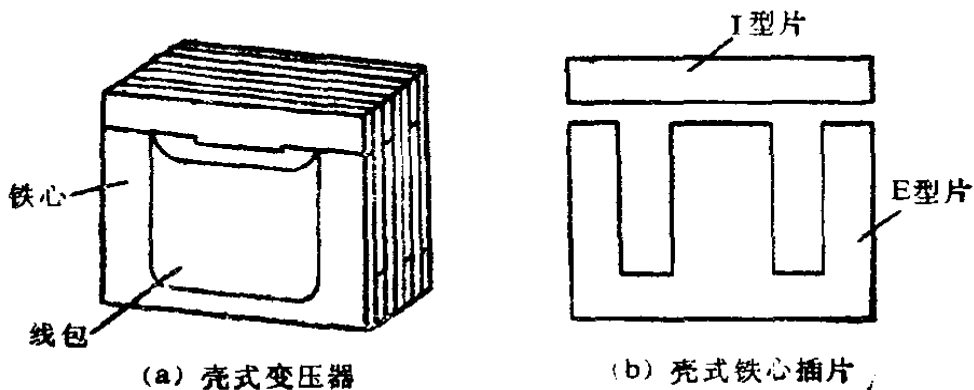


图 1·2

C型变压器的铁心是由硅钢带卷绕而成的。它在同样功率条件下，体积能比壳式变压器小1/3，因而重量轻，节约材料，并且效率高、性能好，是当前比较好的一种变压器形式。它分CD型和ED型，实际上也就是心式的C型和壳式的C型（图1·3）。

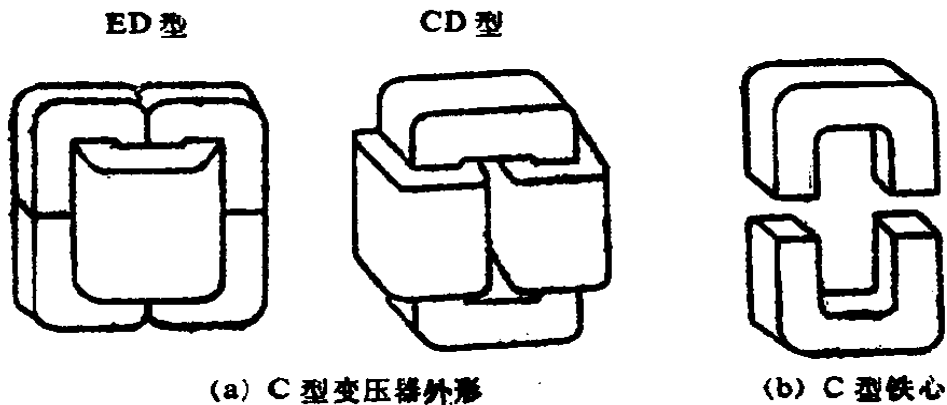


图 1·3

C型变压器的优越性很多，在大批生产时能充分地体现出来。但对个别问题（如维修、重绕甚至设计新变压器等等）处理时却比较麻烦些。

## 第二节 变压器的工作原理

分析电源变压器工作原理的基础是电磁感应现象。在物理试验中，将一个线圈通入电流，线圈周围就产生了磁场。这一现象称为电流的磁效应。相反地，把磁铁放进一个接有电流计的线圈里并不断作进出运动，电流计指针就会同步地往返摆动，这说明在线圈回路中产生了感应电流。即变化的磁场使闭合回路产生感应电流。这一现象称为磁电感应。

磁体上有N和S两个磁极，而一个通入电流的线圈，在其两端也会产生N和S的极性(极性的方向由电流的方向决定)。有很多磁力线从磁体或线圈的N极通过导磁物质或空气通向S极，再从磁体内部或线圈中由S极回到N极形成闭合的磁路。通常我们就用磁力线的多少和方向来描述磁场的强度和方向。一根导线垂直磁力线运动，即切割了磁力线，在导线两端就会产生感应电压，导线闭合就会产生感应电流。感应电流的大小，随着切割磁力线数量的不同而不同。但是若把闭合导线静止地放在没有变化的磁场里，是不能产生感应电流的。就像把磁铁放进线圈保持不动，电流计上也不会有电流指示。这说明线圈若置于固定不变的磁场中，不管磁场强度多少，线圈里都不会有电流产生。变压器的工作原理就可以由这一物理现象来解释。图1·4是一个变压器的原理图。它是由一个铁心和两个绕在铁心上各自独立的初、次级线圈组成的。假设我们在次级线圈3、4两端接上电流计，而在初级线圈1、2两端接上一个固定的直流电压，当开始接通电压的那一瞬间，电流计指针会出现或正或负的摆动，待接通后电流计上反而没有电流指

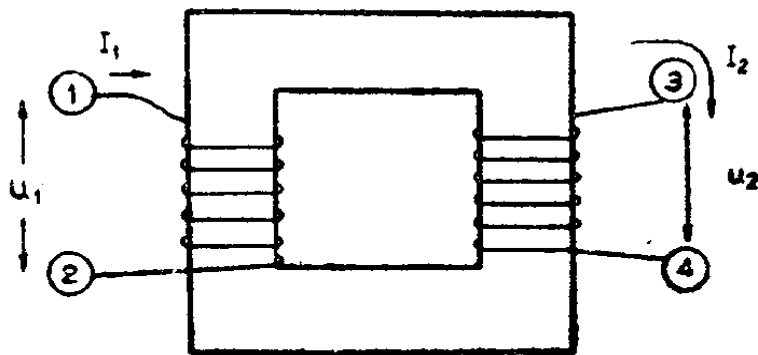


图 1·4

示。但在外加电压断开的瞬间，电流计指针又出现相反方向的摆动。当然完全断开后又没有电流指示了。对应前述的物理实



验过程，就可以解释变压器上的这些现象了。当1、2端接上固定（直流）电压时，初级线圈里有电流由零增大到某一固定数值，它所产生的磁力线也由零增加到某一数值，并通过铁心交连到了次级线圈，于是次级线圈里的磁力线也由零增加到某一数值。这相当于把磁铁插入空心线圈的动作，次级线圈感应出了电动势，产生了感应电流，电流计有指示。当初级线圈接上固定电压经过一小段时间后，初级线圈里的电流增至最大值，不再变化，次级线圈里的磁场强度也不再变。这相当于把磁铁插入空心线圈不动，次级线圈也就没有感应电动势和电流产生。当断开初级线圈的电压时，在初级线圈中磁力线由某一数值降为零，相当于把磁铁由空心线圈里取出，这一瞬间次级线圈中又感应出一个相反的电势来。

现在，假若初级线圈的1、2端加上交流电压，虽然初级和次级之间在电的通路上仍相互隔离，但通过磁力线的耦合在次级线圈上将会感应出一个同样频率的交流电动势来。这时在次级线圈3、4端接上一个适当的小电灯，就会有感应电流流过而发光。用前面的道理是不难解释电灯能发光的原因的。这种作用就称为线圈的互感，变压器正是根据这一原理工作的。

如果更进一步观察，会发现流过初级线圈的电流的大小和次级所接电灯的电压和功率的大小有关。并且当把小电灯断开，使次级处于开路状态时，初级线圈中电流剧减，但仍有很小的电流流动，并不等于零。这些现象就需要进一步来解释了。

当一个正弦交流电压 $u_1$ 加在初级线圈两端时，导线中就有交变电流 $I_1$ 流动。此电流在铁心中便产生了很多条方向大小都交变的磁力线。通过铁心某一截面的磁力线总数称为通过该截面的“磁通”，通常用 $\phi$ 来表示。电流 $I_1$ 流过初级线圈，铁心里就有了磁通 $\phi_1$ ，它沿着铁心穿过初级线圈也穿过次级线圈形

成闭合的磁路。由于磁通 $\phi_1$ 随时间不断地变化，在次级线圈中就感应出互感电动势 $E_2$ 。这就是次级线圈的开路电压。同时磁通 $\phi_1$ 穿过初级线圈本身时，也会在其中感应出一个自感电动势 $E_1$ 。 $E_1$ 的方向和所加交流电压 $u_1$ 的方向相反，而幅度相似，限制了 $I_1$ 的流动。为了保持磁通 $\phi_1$ 的存在，就需要有一定的电能消耗，并且变压器本身也有一定损耗，所以尽管次级线圈上没有负载，初级线圈中仍有一定数量的电流流通，这些电流称为“空载电流 $I_0$ ”。

如果在次级两端接上一个负载，在负载上就有感应电流 $I_2$ 流动。负载两端便会出现电压。这一电压就是变压器次级（有载）电压 $u_2$ 。 $I_2$ 通过负载和次级线圈形成回路。当电流流过次级线圈时，这个电流也会使铁心产生一个磁通 $\phi_2$ ， $\phi_2$ 的方向和 $\phi_1$ 相反，起了互相抵消的作用，使铁心中总的磁通量有所减少，也就导致初级线圈中的感应电压 $E_1$ 减小，结果使 $I_1$ 增加。可见，初级电流与负载电流有密切的关系。

$I_2$ 的大小和变压器次级所接负载的阻值大小有关，而次级线圈所感应出的电动势 $E_2$ 是由次级线圈圈数决定，不会变动。但有载时的，次级输出电压 $u_2$ 则是随负载电流（次级电流）的大小而变的。这是因为 $u_2$ 等于 $E_2$ 减去电流 $I_2$ 在次级线圈内阻上的压降。随着负载的变化，一系列的影响促使 $I_1$ 也在变化。每当次级负载电流（或功率）加大时， $I_1$ 增加， $\phi_1$ 也增加，并且 $\phi_1$ 增加的部分正好补充了被 $\phi_2$ 所抵消的那一部分磁通量，以保持铁心里总磁通量不变。此时变压器初级的功率也要发生变化。根据这个道理，如果不考虑变压器在传递能量时的功率损失，可以认为一个理想的变压器次级负载消耗的功率也就是初级从电源取得的电功率。变压器能根据需要改变次级线圈的绕数而改变次级的电压，但是不能改变允许负载消耗的功率。这就是

说变压器可以改变电压、电流，但不能改变功率。

### 第三节 电源变压器的损耗和效率

前面讲的是理想的变压器，实际上一个变压器由于存在各种损耗，输入功率永远是超过输出功率的。百分之百转换效率的变压器是没有的。

造成变压器损耗的因素很多，主要有涡流、漏磁、磁滞及线圈电阻等原因，而影响损耗大小的因素有：使用材料的质量、加工的工艺，以至装配质量等等。在一般情况下，变压器的损耗主要体现在铁心的损耗和铜线电阻的损耗上。

#### 一、铁心中的损耗

当磁通在铁心中流动时，因为铁心本身也是导体，在垂直于磁力线的平面上就会产生感应电势。这个电势在铁心的断面上形成闭合回路形成电流，好象一个漩涡，所以称为“涡流”。铁心的截面愈大，产生的涡流也愈大。为了减少涡流损耗，电源变压器铁心都用一片片互相绝缘的薄硅钢片叠累而成。图 1·5 是整块铁心和片状铁心中涡流的示意图。由图中可以看出，片状铁心的涡流都被限制在每一薄片里，涡流回路的电阻明显

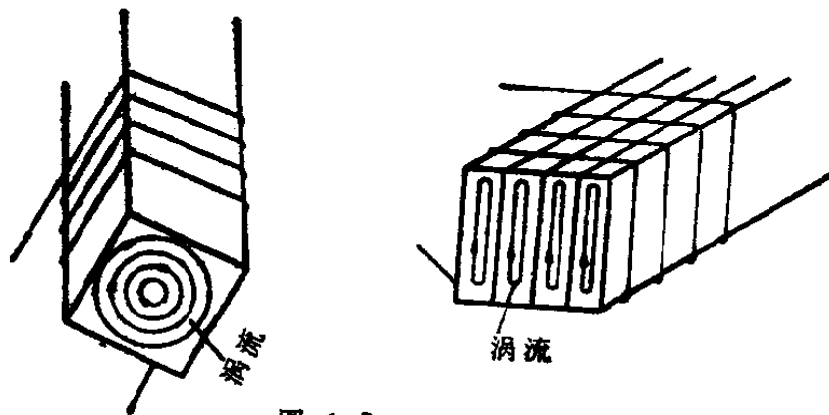


图 1·5

增加，涡流减小，因此减少了变压器的损耗。

另外，当变压器线圈通入电流使铁心磁化时，磁通的产生往往随不同的铁心材料而延迟一个短时间。特别是在线圈中加上交变电流后，铁心中的磁通也要不断地随电流流向而变化方向，但它的变化往往跟不上电流变化的速度，这叫“磁滞现象”。在反复磁化过程中，要克服磁滞的影响，也需消耗一部分能量，这部分能量消耗在铁心里，也会转变为热能使铁心发热。这种能量的损失称为磁滞损失。

以上两种在铁心中产生的能量损耗，通常称为电源变压器的“铁损”，严重铁损的结果是变压器效率低，温升大。

## 二、线圈铜线中的损耗

绕制变压器线包要使用大量的铜导线，这些铜导线存在着电阻。电流流过时，这电阻会消耗一定的功率，这部分损耗的电功率转换为热量而消散，通常称为电源变压器的“铜损”。减少铜损的方法是加大导线的直径。但过分加大导线直径会使变压器体积加大，又带来一系列的问题。所以要适当地选择线径。

## 三、电源变压器的效率

由于变压器存在铁损和铜损，所以它的输出功率永远小于输入功率。习惯上用希腊字母 $\eta$ 表示它的效率

$$\eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}}$$

$\eta$ 的高低是由变压器的损耗决定的。理论推导说明，变压器的铁损和铜损相等时，效率最高。由此可以想到铁心的截面有一个最佳值，设计时不要偏离此值太大。

从实际使用电源变压器的角度来考虑，我们总希望在允许的温升情况下，获得最大的输出功率，因此又引出了变压器的温升这一条件。要减少温升，除降低损耗外，另一个途径是加大散热面积。较小功率的电源变压器的体积比较大功率电源变压器的体积小，但是相对于体积来看，小功率电源变压器的相对散热面积比大功率电源变压器大。在设计小功率变压器时，有些参数可以选得紧一些，使其体积减小。但这往往又造成损耗加大，使小功率电源变压器的效率比大功率电源变压器低。可是总体来看，即使降低了效率也比选取宽裕的参数而绕成功率小体积大的变压器来得合算。

#### 第四节 电源变压器初次级的相位关系

交流电压是随时间按正弦规律在不断变化的，所以也叫“正弦波”电压。给变压器初级加上交流电压后，在次级线圈中也能感应出一个交流电动势来。但是这一电动势和加在初级的交流电压的相位有四分之一周的相位差，也就是相差 $90^\circ$ 的相位角。

图 1.6 中 A 曲线是交流电压的波形，仔细观察一下会发现，在每一小单位时间里电压的增长或减弱的速度是不一样的，图中横轴代表时间 T 和相位。在横轴上我们任意取了三个小等分时间  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$ 。在时间  $t_1$  里，电压变化幅度是 a，而在时间  $t_2$  里幅度变化是 b。更进一步地设想，在时间  $t_2$  的某一短暂时间里，电压由上升转为下降，我们可以认为在转换的那一瞬间电压幅度的变化是零。这正和荡秋千的动作相似，当秋千向前或向后荡至最高点时，上升的动作要转变为下降的动作，秋千在这过程中总有一个很短的时间是静止不动的。在电

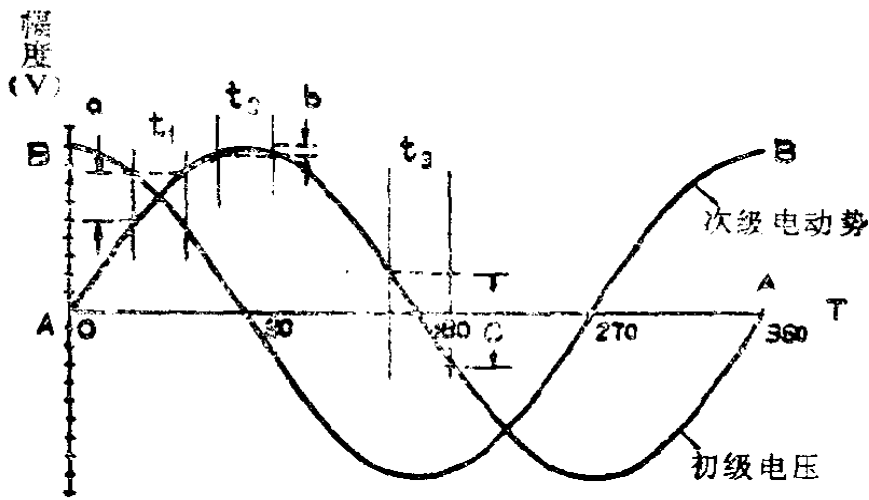


图 1.6

源变压器里如果初级线圈的电流出现了不增不减静止不动的现象时，铁心磁通也要停留在某一强度而不变，在次级线圈里感应电动势也将为零（因为感应电势是与交变的磁通变化速度成比例的）。由图 1.6 中也可以发现，当电压变化由正到负或由负到正时，也就是在零值附近时，幅度变化最大（图中  $t_3$  段时间）。或者说这时的变化速度最快。这时，在次级线圈里感应出的电动势也就最大。图 1.6 的 B 曲线绘出了次级感应电动势的波形，它和输入电压 A 曲线相比相差为  $90^\circ$ 。

## 第五节 有关电源变压器材料的知识

绕制电源变压器使用的材料种类不多，主要的是铁心材料、铜线和绝缘材料。在小功率电源变压器的绕制中，紧固结构没有什么特殊要求，但有时需要配备一些焊片等引线用的端接材料。

### 一、铁心材料

在电源变压器里使用的铁心材料主要是硅钢片。所谓硅钢

片是指在钢中加入了一定数量的硅，再把它延压成片。硅加入钢里，和钢中所含的氧化合成为二氧化硅（ $\text{SiO}_2$ ）而使钢脱氧。这种材料的磁性能比较稳定。由于加入了硅，钢的导电性能降低了，也就是电阻率加大了，在用作电源变压器铁心时，这是很有利的。它可以减小涡流使其损耗减少。钢里加入了硅后，它的机械性能变得发脆。我们识别变压器铁心是黑铁片还是硅钢片往往就是把铁心往返拆几次，看它发脆而折断的情况来判断含硅的多少。

绕制电源变压器时，变压器的质量和所用硅钢片的质量有很大关系。硅钢片质量的好坏，通常用“磁通密度”来表示。磁通密度是指与磁场方向垂直的单位面积上的磁通，单位是“特斯拉”T，代表符号是“B”。B值越高，表明硅钢片质量越好。目前常用的“E”型硅钢片，B值约在10000~15000特斯拉。过去的一些旧设备里，有些电源变压器铁心的质量较差，估计它的B值在6000特斯拉左右。这种旧变压器可能在翻修或重绕时还会遇到。质量好的硅钢片从断面看，可看见很多闪烁的晶粒，质脆易断，用剪刀剪断断面也不平整；质量较差的硅钢片则相反，呈黑褐色，性韧，能多次弯曲而不断，用剪刀可以和剪一般铁片一样的剪开，边沿平整。

用于电源变压器的硅钢片厚度自0.28至0.5毫米不等，一般用0.35毫米的比较普遍。用热轧工艺制造的硅钢片含硅量比较高，而用冷轧工艺制造的硅钢片含硅量比较低。

国产的硅钢片根据含硅量的多少及铁心损耗的大小分成很多型号，以供各种用途选择，例如：D 310，D 41，D 42等等。

型号中第一位字母“D”表示电工用钢。

型号中第二位是数字，表示含硅等级。其中：

- 1—含硅量0.8%~1.8%
- 2—含硅量1.81%~2.8%
- 3—含硅量2.81%~3.8%
- 4—含硅量3.81%~4.8%

型号中第三位也是数字，表示硅钢片的电磁性能等级。

如果第四位有“0”，则表示材料为晶粒取向的冷轧钢板。

冷轧硅钢片在性能上比起热轧硅钢片有很多优越的地方，所以日益取代了热轧硅钢片。目前很多进口设备里的电源变压器和近些年来国产的电源变压器都使用了冷轧硅钢片作为铁心材料。

为了使用方便，我们国家制定了很多种变压器用硅钢片的尺寸标准。“E”型铁心主要有两种：“GEI”型和“KEI”型。它们的区别在于硅钢片的窗口面积不同。“GEI”型窗口较小，在相同条件下比用“KEI”型使用铜线少，因此成本低，但体积较大。“KEI”型正好相反。可是它的平均磁路比较长。节末附表（1）列出了各种E型铁心的有关数据和使用说明。

C型变压器的铁心是把硅钢片顺着延压方向也就是晶格的排列方向剪切成条，再按尺寸要求卷成一定形状和一定的厚度，然后从中间切开。在C型变压器里磁通的流向和硅钢片的晶格排列方向一致，因而具有很多其它类型铁心所不能具备的优越性。

从材料加工条件上考虑，C型铁心的加工很复杂。首先要将钢带卷压成形，就需要一定的专用机械设备。在铁心切断以前还要把它一层层用粘合剂粘牢，以防切断后松散。制作的工序也很多，包括卷制、退火、浸层间胶合剂、硬化干燥处理、



切断、低温畸变处理，以及研磨切口以减少气隙，再用酸液腐蚀掉加工后可能出现的毛刺等等。由于在胶合前先加热硬化，冷却后再低温处理，铁心的磁性就有显著改善。C型铁心的数据和使用说明见节末附表（2）。

除了以上的标准变压器铁心以外，在一些旧的电子设备里，我们可能还会遇到一些其他形状的铁心，例如三角形（斜E形）铁心（图1·7）和各种形式的拼凑式铁心等等。不过在新的设备里已不多见，并且一般这类的铁心质量都不高。

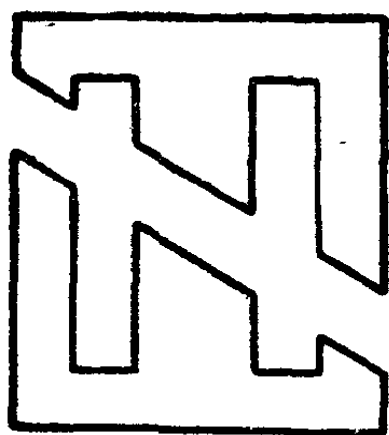


图 1·7

## 二、导线材料

在小功率电源变压器里使用最普遍的导线是漆包线，而纱包线、丝包线等都不常使用。漆包线是在裸铜线上涂覆了一层绝缘的漆层。用来绕变压器线包的漆包线要有几点要求：

1. 导线导电性能要好，电阻率要低，以减少变压器的铜损。为此，漆包线都用电阻率较小的紫铜拉制。

2. 绝缘漆层要有足够的耐热性能。变压器本身的各种损耗都以热的形式发散，所以对导线材料要求耐热，通常要求变压器工作在  $105^{\circ}\text{C}$  时导线的漆皮不应脱落损坏。

3. 要求漆包线的漆皮有一定耐腐蚀能力。成品变压器为了能达到防潮、防霉和防盐雾的要求，都要进行浸渍绝缘漆的处理，漆包线要有足够的强度不被各种浸渍溶剂腐蚀。

4. 要有韧性。漆包线在绕制线包过程中要折弯甚至扭转，经过几次折弯，漆皮不能脱落。

当前我们常用的漆包线有两种，其一是用字母Q表示型号的油基性漆包线；其二是用字母Q<sub>2</sub>表示型号的高强度聚脂漆包线。这两种漆包线又分几种等级，最低一等也能在-60℃到105℃的温度下工作。漆包线直径有很多种规格，涂覆在它表面的漆层厚度也随着它直径的不同而不同。例如直径0.05毫米的漆包线其漆层当然就很薄。不同线径的漆包线，其击穿电压差别很大，按照国家标准，最低的击穿电压也在350伏以上。书末附表（3）列出了国产漆包线的规格。

### 三、绝缘材料

#### 1. 绝缘纸

在电源变压器里，线包中相邻两层导线或相邻两层线圈之间都存在着高低不同的电位差，为了防止漆皮击穿，就必须用绝缘材料把每一层隔开。小功率电源变压器的电压不高，温升也不大，一般都用各种绝缘纸作绝缘。在成批生产电源变压器时，都用专用的绝缘材料。表1.1列出了一些绝缘材料的性能和用途，以作参考。

在偶尔处理个别电源变压器或只绕制几个小电源变压器时，往往一时找不到合适的绝缘材料，也可能有材料可购，但使用数量远低于出售的批量，这就不一定非采用表中所列的材料。只要质地均匀结实、吸水性差、纸质不脆、没有可见的杂质和针孔，并且纸面上没有加涂料或油污的纸张都能使用。在

表1.1

常用绝缘材料的性能和用途

用途	型号及名称	厚度(mm)	工作温度(℃)	20±5℃时最低击穿电压
框架材料	3020 酚醛纸板	0.2, 0.3, 0.4 ……, 10	105	5kV(厚0.2~1mm)
	3025 酚醛布板	0.5, 0.8, 1, … …, 10	120	
	DK50/50 绝缘纸板	1.0~3.0	105	1.3kV(厚0.1mm)
套管	2710 黄白棉漆管	0.4~0.9 ( $\phi$ 0.5~12)	105	5kV
	玻璃丝管	0.2~0.75 ( $\phi$ 1~16)		
	塑料管	0.4~1.2 (1.0~10)		
层间和组间绝缘	2412 玻璃漆布	0.11	130	4kV
	2212 黄漆布	0.08	105	3.6kV
	2017 黄漆布	0.15, 0.17, 0.2	105	6kV(厚0.17mm)
	2820 聚脂薄膜	0.04, 0.05, 0.075, 0.1	105	100~130℃厚0.04mm 5.2kV
	KOH-1 电容器纸	0.007~0.022	105	0.425kV(厚0.022mm)
	电话纸	0.01, 0.05, 0.075	105	
	电缆纸	0.08, 0.12, 0.17	105	

后面的章节里将介绍几种日常生活中常接触到的纸张用作绝缘材料。

## 2. 浸渍材料

电源变压器在工作中要经受各种环境条件，为了防止因潮湿发霉以及沿海的盐雾等等原因而造成的变压器绝缘程度降低，延长使用寿命，绕成的变压器要经过浸渍处理。

经过浸渍处理的变压器，浸渍溶液渗透到线包和铁心间的一切空隙，它能提高绝缘程度，当溶液干燥以后远能增强变压器的机械强度，改善散热性能，减小噪声。

工业生产的电源变压器都浸渍绝缘漆，并用各种工艺来保证能把绝缘漆浸透。绝缘漆的种类很多，常用的列入表 1.2。

表1.2 常用浸渍变压器的绝缘漆

牌 号	名 称	性 能	溶 剂
1012	耐油清漆	干燥快，耐油、耐潮	松节油、汽油
1014	甲酚清漆	同 上	同 上
1030	醇酸漆	漆膜坚韧、耐油	甲苯与酒精等混合剂
1031	丁基酚醛醇酸漆	同 上	同 上
1032	三聚氰胺醇酸漆	同 上	同 上

对浸渍材料，除要求有足够的绝缘性能外，还要有良好的渗透和粘附能力，以保证在变压器进行浸渍时能渗进线包和铁心的空隙。并且要求它不会腐蚀漆包线和破坏其他绝缘材料。

如果所绕电源变压器的电压不高，或者浸漆条件很难保证浸透浸好时，可以使用白蜡的混合物作为浸渍材料，虽然它的性能不如绝缘漆，但是在条件不具备的情况下也能保证电源变压器一定的质量。

## 第二章 小功率电源变压器的 简便设计计算

这一章将着重介绍1000伏安以下的小功率电源变压器的设计方法、设计计算和有关的设计参数。变压器工作的条件是50赫单相交流电，电压220伏。

### 第一节 对设计工作的要求

要制作一个小功率电源变压器，首先要求通过设计工作能提供出一些可靠的数据，用它来指导实际操作，制作出效率高、损耗小、在一定的温升条件下能承受较大的输出功率，并且体积小，各种材料使用合理的变压器。目前变压器的原理和理论计算等等已有很多论述，但是制作中由于材料性质，加工工艺等条件的不一致，有些设计计算的参数还需要根据具体情况临时选择。在设计中为了避免繁琐的计算，又往往使用近似的经验公式。如果用这些公式来设计变压器，虽都能保证所绕变压器可以使用，但是否为最佳性能，就需要再经过测试和校核调整等等工作。

为了顺利而简便地设计一个小功率电源变压器，有几个问题应该考虑。

#### 一、降低空载电流

变压器的空载电流就是在次级不接负载时，流过初级线圈

的电流。它包含了变压器的磁化电流和铁损电流，是一个衡量变压器质量的重要指标。在一个变压器中，影响空载电流的因素很多，并且相互牵制。例如使用同一种磁性材料做的铁心，由于设计时选择不同的参数，特别是磁通密度的高低，会造成铁心里磁场强度和磁化电流以及铁损电流都不相同，当然空载电流也就不一样。如果设计正确，按照不同的铁心材料，选择了适当的磁通密度，空载电流应能控制在要求的限度以内。但是由于制造工艺上的种种缺陷，例如硅钢片的加工处理不好，端面不齐，使得装配后气隙过大，绝缘层有漏电现象，甚至使得硅钢片之间绝缘层被破坏，片与片间短路导通，增加了涡流量等等，都会增加空载电流。

从道理上去分析，空载电流是磁化电流和铁损电流的向量和。而影响磁化电流的因素有铁芯的磁场强度，初级线圈圈数和磁路长度。在这三个条件中磁场强度和线圈圈数都由其他条件决定，不好轻易改变。所以在其它条件不变的情况下，选择平均磁路长度比较短的铁心对降低磁化电流是有益的。

从前章介绍的变压器铁损的概念考虑，铁心愈小，铁损应愈低。可是除了铁损之外，变压器里还有铜损存在，两者都要消耗能量，又在互相影响（例如铁心小了线包就小，线径就细，电阻大，铜耗增），因此必须通盘考虑。通常我们认为，

$$P_1 \propto B^2 G_1$$

$$P_c \propto j^2 G_c$$

式中  $P_1$ ——铁损功率 (W)

$P_c$ ——铜损功率 (W)

$B$ ——磁通密度 (T)

$j$ ——电流密度 (A/mm)

$G_1$ ——铁心重量 (kg)

$G_c$ ——铜线重量 (kg)

上式表明，铁损和所选择的磁通密度  $B$  的平方成正比，也和铁心的重量  $G_i$  成正比。铜损和所设计的铜线的单位截面上通过的电流  $j$  的平方成正比，也和铜线的总重量  $G_c$  成正比。设想有两个变压器，外加电压相同，所选用的铁心重量  $G_i$  和电流密度  $j$  也相同。为了减少铁损，试把其中一只变压器的铁心减小。因为变压器里每圈线圈所产生的电动势和铁芯截面的总磁通密度  $B$  成正比。在外加电压和线圈圈数不变的情况下，减小铁心势必要增加磁通密度  $B$  才能工作。但  $B$  的平方  $B^2$  和铁损功率成正比，这时变压器的铁损不但不能减少反而增加。另外要想减小铁心后不增加磁通密度  $B$ ，就要增加线圈圈数。要在同样的绕线面积里增加线圈圈数，就必须换用较细的导线才能容纳得下，于是将导致电流密度  $j$  增加，结果使铜损的增加超过了铁损的减少，仍然得不偿失。从以上分析可以看出，要变压器不因铁损大而使空载电流加大，在设计时选择最优的磁通密度是很重要的。

## 二、电源变压器的温升

变压器损耗的能量都由电能转换为热能，从而使变压器温度升高。在小功率电源变压器里一般温升都不大，往往不被人重视。可是实际上使用小功率电源变压器的设备里，有很多部件都安装得比较紧凑，不能容许变压器有较高的温度。一般的变压器都以绝缘材料不被破坏的温度作为允许温升的极限。绝缘材料有几个等级，我国标准中最低等级材料的允许工作温度是  $105^{\circ}\text{C}$ ，它是环境温度加上变压器的极限温升。例如当环境温度是  $40^{\circ}\text{C}$  时，允许的变压器温升是  $65^{\circ}\text{C}$ 。显然，在一般设备里能允许的变压器温度远低于这个极限。变压器的温升在铁心

和线包各点并不是均匀分布的。一般的经验，线包中离铁芯三分之一的地方温度最高。变压器外皮的温度是散热表面的温度，它是整个变压器温度最低的地方。因此我们习惯于以手摸触变压器外表试探变压器温度，这时就要有一个正确的估计。

变压器温升的高低取决于功率损耗和变压器散热表面面积以及热量传导的条件等等。在设计工作中，要事先计算出绕好变压器后的温升是很难准确的。在温升要求严格的场合，必须反复试验，才能取得允许温升的合理数据。因此在设计小功率电源变压器时一般都不去计算。

在目前常用的各种电子设备，包括各种家用电器中，电源变压器的温升都要求不能太高。当设计一个相对于功率来讲体积比较小的变压器时，温升就成了不可忽视的条件。由于温升的计算涉及到很多难以确定的参数，计算过程又十分复杂，所以都习用一些经验公式来进行计算。下面列出一式供参考。

$$\Delta T = \frac{P_1 + P_c}{a \times ST \times 10^3} \quad (2-1)$$

式中  $\Delta T$ ——变压器温升 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$P_1$ ——铁损功率 (W)

$P_c$ ——铜损功率 (W)

$ST$ ——变压器散热表面面积 (可查表或自行计算)  
( $\text{cm}^2$ )

$a$ ——散热系数，它与功率有关，一般在1.2—1.5之间，功率愈低  $a$  值愈大。

### 三、几个重要参数的选择

由前面的介绍可以想到，在设计变压器时有些参数的选择



很重要，而确定这些参数又和变压器的功率、工作状况和所用的材料有关。下面分别介绍一些参数确定的基本原则和经验数据。

### 1. 磁通密度 B

变压器磁通密度 B 的高低取决于铁芯材料性能的好坏，和对变压器性能的要求。我们平时所说的某一材料的 B 值，可以理解为这种材料允许的最大磁通密度，超过了它，铁心就要进入磁饱和状态。设计时 B 的取值不允许超过这个限度。不同的材料 B 值当然不同，同一材料制成不同形状的铁心，如 E 型和 C 型，B 值也不相同。甚至同一材料同一形状由于工作频率不同 B 值又有差异。B 的取值会直接影响变压器的体积。一般都尽可能地取得大些，以求在同样功率下制成较小体积的变压器。但过大又会使铁耗迅速增加，变压器发热甚至烧坏。下面列出了一些经验数据。

片状铁心：

冷轧钢片（如 D<sub>310</sub> 等）B 值取 12000~14000 特斯拉

热轧钢片（如 D<sub>41</sub>，D<sub>42</sub> 等）B 值取 11000~13000 特斯拉

C 型铁心：

冷轧钢片 B 值取 14000~17000 特斯拉

热轧钢片 B 值取 13000~15500 特斯拉

C 型铁心由于磁通走向与其晶格排列方向完全一致，使磁化电流与铁损都减至最小，则可以工作在较高的磁通密度。

在既定铁心截面积的变压器里，B 值的大小和每圈线圈感应出的电动势成正比。它们的关系是

$$E_0 = \frac{4.44f \cdot B \cdot S}{10^8} \quad (2-2)$$

式中  $E_0$  —— 每圈线圈的感应电动势 (V)

f——电源频率 (Hz)

S——铁心截面积 ( $\text{cm}^2$ )

上式表明，电源变压器里每圈线圈感应出的电压和B值成正比，也和铁心截面积成正比。B值取得大，就可以减少铁心截面积，也就减小了整个铁心的体积。假若不减小铁心截面，B值加大可导致每圈线圈的电压增高，那么在规定的总感应电压下总圈数就可以减少，铜线总的截面和长度都可减小。因此可以在铁心截面不变的条件下选用小窗口铁心。这不但缩小了体积，并因窗口小磁路长度也较小，还有利于减小磁化电流。并且铜线总长度减短也减小了铜损。

由以上分析看来，似乎把铁心的B值取得愈高愈好，但实际并非如此。B取得较大时不但增大磁漏，极易干扰近旁电路及器件的工作，还会使铁损的增加大于铜损的减小，温升增大，空载电流增大，电压调整率变坏，是得不偿失的。对一些要求磁漏小的电子设备中变压器铁心的B值最好不取最高值。

假若需要重绕旧电源变压器或选用旧硅钢片绕制电源变压器，设计计算时，把B值取多少就要慎重考虑了。关于旧硅钢片的用法在后面章节里还要讨论。

## 2. 电流密度 $j$

电流密度  $j$  表示每平方毫米 ( $\text{mm}^2$ ) 铜截面通过的电流安培数。电源变压器  $j$  值的大小也要根据实际情况而定。一个线圈要通过的电流决定后，选择电流密度  $j$  的数值愈大，愈可以用细的漆包线； $j$  值愈小，愈需要粗线，使用粗铜线会导致变压器体积加大，但铜损可以减小。

在小功率电源变压器的设计中，选取  $j$  值的主要依据不只是需要通过的电流和损耗大小，也要考虑温升。小功率变压器虽然体积小，但是和大功率变压器的体积相对比较起来，它的

散热面积大。因此在设计小功率变压器时，电流密度  $j$  都选得比大功率变压器大。通常可以根据使用环境和连续使用的时间取电流密度  $j$  在  $2 \sim 3.5$  安培/毫米<sup>2</sup> 之间。在连续使用的小变压器里可以选电流密度为 2 安培/毫米<sup>2</sup>，间断使用并且使用时间较短的变压器可以取 3.5 安培/毫米<sup>2</sup>。较大功率（例如 500 瓦以上）的变压器就应该考虑适当减小些。

在功率很小的电源变压器里，例如 10 瓦或 20 瓦，甚至小于 10 瓦的小功率变压器，通过初次线圈的电流很小，按上述情况考虑散热问题很容易满足。可是因为通过导线的电流小又选取电流密度  $j$  较大，于是要求导线线径很细，以致电阻较大，造成电源变压器的空载和负载电压变化大，即电压调整率差，使用中，负载变化造成输出电压不稳。因此在设计很小功率的电源变压器时要根据工作要求，各方面兼顾地去选取电流密度  $j$ 。

### 3. 电源变压器效率 $\eta$

在设计小功率电源变压器时，一般都先不去详细计算变压器的各种损耗，也很难计算得准确。可是电功率的损耗又是客观存在而不可忽略的问题，因此一般就根据经验数据，把输入功率提高一定的百分比来补偿那部分损失了的能量。当然这种方法只是取近似值，也可能所选数值不是最佳。在实际工作中往往我们希望绕制一个在使用条件下小巧玲珑而耐用的电源变压器。由于条件和材料的各异，最佳数据只能在试验中去修正。输出功率和效率的关系可参考表 2·1。

表 2·1 输出功率和效率

输出功率 W	<10	10~30	30~50	50~100	>100
效率 $\eta$	60~70%	70~80%	80~85%	85~90%	90% 以上

#### 4. 铁心尺寸

绕制电源变压器时，选择适当尺寸的铁心特别是截面积是很关键的。铁心尺寸不合适，就很难达到预期的效果。在选择铁心时不论是C型或是E型都有两种可能，一种可能是铁心已定，只要窗口面积够大，并且又不大到很浪费材料的程度就能按要求使用既定尺寸的铁心来绕制；另一种可能是根据要求去选择适当尺寸的铁心。下面介绍的方法，第一种适用于铁心尺寸已定的情况。只需使用一些经验公式去求得铁心的截面积，方法简便易行。但由于选取的是经验数据，在材料使用上不可能最佳。第二种方法是根据要求的功率去计算、选择最接近于能充分利用的铁心型号，绕成体积小材料省的电源变压器。但是由于一切条件均按标准计算，在绕制时就必须注意不要由于工艺上的疏忽而达不到计算的要求。

①如果手头已有E型的硅钢片，准备利用它绕制电源变压器，可用以下公式求出需要的心柱截面积 $S$ ，再按舌宽叠厚到要求的面积。叠厚要增加10%，以补偿可能的片间空隙。

$$S = K \sqrt{P_0} \quad (2-3)$$

式中  $P_0$ ——变压器标称功率（W）。是初级功率和次级功率的平均值

$S$ ——铁心截面积（ $\text{cm}^2$ ）

$K$ ——修正系数

上式中的系数 $K$ 可取1.1~1.6，它的大小由硅钢片的导磁性能好坏来决定。好的硅钢片最大磁通密度高，易磁化易去磁，磁滞损耗小，变压器铁心截面积可以小些，则 $K$ 可取得小些。反之，就要取得大些。一般情况估计，磁通密度在10000特斯拉的硅钢片可取 $K$ 为1.25—1.3。只有7000左右特斯拉的硅钢片可取 $K$ 为1.6。

另外由上式可以看出铁心截面积  $S$  和变压器标称功率的平方根成正比。功率愈小所需的截面积也愈小，势必线圈圈数要增多。变压器铁心窗口面积都是有一定规格的，线圈圈数增多后铁心窗口就不一定能容纳得下，所以在输出功率要求较小时，上式中的  $K$  要适当增加一些。计算出铁心截面积后，用现有硅钢片的舌宽计算出来的厚度不能过厚或过薄，一般厚/宽要在  $0.9 \sim 3\text{cm}$  的范围以内，否则要另找铁心。也就是说不能用舌宽太大的硅钢片绕小功率电源变压器，也不要舌宽太小的硅钢片绕大功率电源变压器。

如果手头现有的是 C 型变压器铁心，则首先需要测量出它的截面积和窗口长度，然后从书末附表 (2) 的表格中查出略小于现有尺寸的最近似型号，按此型号的输出功率来设计计算。

②如果有条件选择铁心，可以用下式先求出窗口面积与铁心截面积的乘积

$$S \cdot S_0 = \frac{(P_1 + P_2) \times 10^6}{4.44f \cdot B \cdot j \cdot K_m} \quad (2-4)$$

式中  $S$ ——铁心截面积 ( $\text{cm}^2$ )

$S_0$ ——铁心窗口面积 ( $\text{cm}^2$ )

$P_1$ ——初级线圈功率 (W)

$P_2$ ——次级线圈功率 (W)

$f$ ——电源频率 (Hz)

$B$ ——磁通密度 (T)

$j$ ——电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )

$k_m$ ——窗口中铜线占空系数

如果读者把这个算式和式 (2-2) 联系起来考虑，就能很快理解式 (2-4) 的含义。在公式 (2-2) 中给出了每圈线圈的

感应电压 $E_0$ ，如果在既定的铁心截面 $S$ 和磁通密度 $j$ 下，估计出可能的最大电流 $I_m$ ，那么最大的功率就是 $P_M = E_0 \cdot I_M$ ，而最大电流 $I_M$ 又和导体截面与电流密度 $j$ 有直接关系。我们设想有一个导体，它的截面积和铁心窗口的面积 $S_0$ 一样，也就是在现有条件下的最大面积，则可能的最大电流为

$$I_M = S_0 \times j \times 100 \quad (S_0 \text{ 的单位是 } \text{cm}^2, j \text{ 的单位是 } \text{A}/\text{mm}^2)$$

于是

$$P_M = \frac{4.44f \cdot B \cdot S \cdot S_0 \cdot j}{10^6}$$

要计算最大功率下的 $S \cdot S_0$ 值，就得到式(2-4)。又由于窗口中流过的电流包括初级电流和次级电流，所以必须把 $P_1$ 和 $P_2$ 都计算在内。根据这个乘积就可以任意地选择窗口尺寸和截面，而使材料利用率最高，也就尽可能使变压器体积小。若铁心窗口面积 $S_0$ 取得小些，而增大铁心截面 $S$ ，则产生相同总电动势的线圈圈数就可以减少。这样的电源变压器用铁芯较多，用铜线较少，相对讲体积较大，但成本低。相反，如果把铁心截面 $S$ 取得小些，势必窗口面积 $S_0$ 要大些才能保持已定的 $S_0 \cdot S$ 值。这时线圈圈数要增加，用铜线多用铁心少，相对讲体积能小些而成本要高些。

铁心截面尺寸的厚宽比最好不要大于3:1。从节约铜线降低铜损的角度考虑，选择厚宽一样的正方形铁心最好，因为面积相等的四边形中只有正方形周边最短。

公式(2-4)中的占空系数 $k_m$ 是一个重要的参数。因为铜线是圆的，排线线间有空隙，导线愈粗空隙愈大，并且每层线圈两端都存在一定的空余位置，另外还有绝缘垫层所占的空间，使得铁心窗口里不能容纳相同面积的导线，所以计算中必须有一个修正的系数。这个系数 $k_m$ 一般是不大的，下表列出了

常用数据。

表2·2

窗口中铜线占空系数

铜线占空系数 $k_m$		输出功率 (W)			
		<50	50—150	150—300	300—1000
形式					
心 式		0.18—0.26	0.26—0.30	0.30—0.33	0.33—0.35
壳 式		0.22—0.28	0.28—0.34	0.34—0.36	0.36—0.38

以上两种选择铁心的方法，都经过了多次使用验证。第一种算法非常简单，设计E型变压器习用已久。其系数  $k$  的取值考虑了功率也顾及了铁心质量。在使用标准规格的硅钢片时，除非次级的绕组太多，一般不会出现窗口面积不够用的现象。由于它简单有效，容易记忆，配合着计算圈数和计算线径的简化算式，经过几次应用后，几乎只用心算就可以完成一个变压器的概括设计。但是另一方面，由于系数  $k$  是一个综合性参数，涉及了铁心质量和变压器输出功率，虽然给出了一个参数范围，但它只能在设计个别变压器时应用才方便，并且往往取值偏于宽裕。

使用第二种算法比较准确一些，初看起来需要事先选择决定的参数比第一种算法多，可是这些参数在以后的计算中大多还要用到，只有窗口中铜线占空系数是需要多考虑的参数。使用E型铁心时，决定了  $S \cdot S_0$  值后，选取  $S$ 、 $S_0$  两数的相互比值最好不大于3，这样不致于绕成的变压器体积比例失常。使用C型铁心由于几何尺寸已决定，一般  $S_0$  都大于  $S$  2至4倍。

## 第二节 设计计算的步骤

### 一、确定功率

在设计电源变压器时，首先要确定所设计变压器的功率。它取决于变压器次级的使用功率 $P_2$ 。很可能在次级有不只一组线圈，这时就需要把各组的功率加起来作为次级的使用功率 $P_2$

$$P_2 = P_{2,1} + P_{2,2} + P_{2,3} + \dots + P_{2,n}$$

考虑到变压器的工作效率，那么它的初级功率应该是

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad (2-5)$$

变压器的标称功率 $P_0$ 由下式计算

$$P_0 = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (2-6)$$

在这里如果我们假设变压器某个次级线圈的负载是电阻性负载，例如示波管灯丝，某些加热用电阻丝，照明灯等等，那么这一组线圈的功率可以简单地由它的电流、电压的乘积决定

$$P_{2x} = I_{2x} \cdot u_{2x}$$

实际上应用得更广的是各种整流用电源变压器。由于负载上需要的是平滑直流电流，电源变压器次级的交变输出电流就必须经过整流和滤波，这时变压器次级功率的计算就要随负载不同而各异了。

1. 半波整流电路。电路图和波形见图2·1。

变压器次级输出的交流电压 $u_2$ 经过二极管D后，由于二极管的单向导电作用，就只有半个周期输出到负载，其大小不断地由零到最大值往复变化。这种方向不变而大小不断在变的电



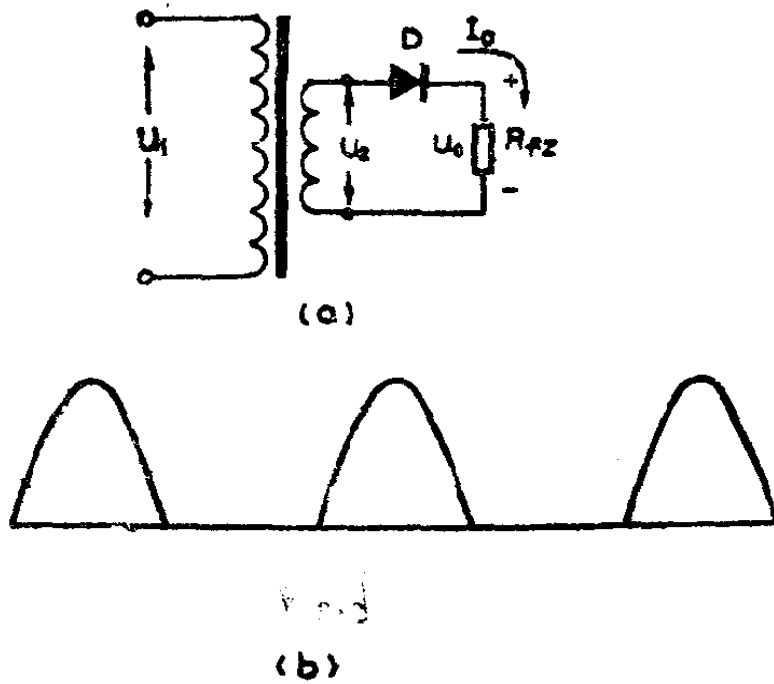


图 2.1

流（或电压）称为脉动直流。加在负载 $R_{fz}$ 上的脉动直流电压或电流波形如图2.1 (b) 所示。它随时间在变化并且有一半时间等于零，因此脉动直流电压或电流的大小就不能按某一段时间的数量来衡量，只能把整流后输出的电压或电流在整个周期内平均起来，才是加在负载 $R_{fz}$ 上的电压 $u_0$ 和通过负载的电流 $I_0$ 。

经过计算， $u_2$ 和 $u_0$ 的关系是：

$$u_0 = \frac{\sqrt{2} u_2}{\pi} = 0.45 u_2$$

这也就是

$$u_2 = \frac{u_0}{0.45} = 2.22 u_0$$

$I_2$ 和 $I_0$ 的关系是

$$I_2 = \frac{\pi}{2} I_0 = 1.57 I_0$$

就是说负载上通过的电流 $I_0$ 如有1安，那么变压器次级绕组电流 $I_2$ 应有1.57安。

2. 全波整流电路。电路图和波形见图2·2。

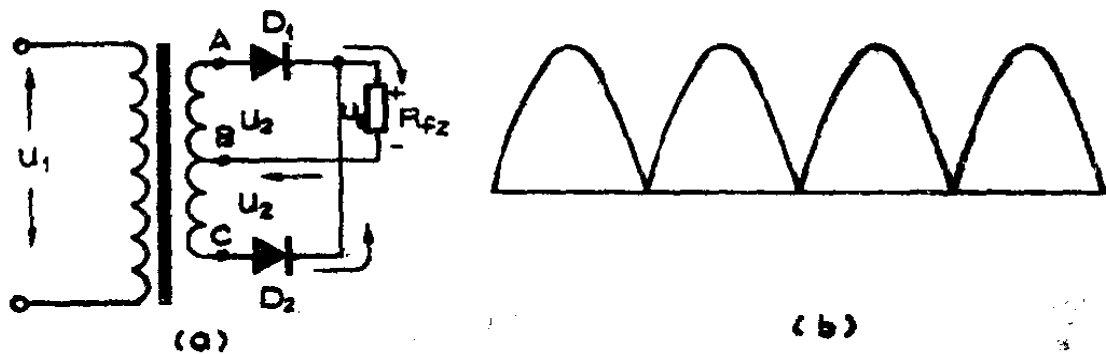


图 2·2

由图2·2(a)可以看出，变压器次级线圈加有一个中心抽头。设三个引出线是A，B，C，当A点电压高于B点，或者说A点电位较B点为正时，C点电位必定较B点为负，或者说C点电压低于B点，这时二极管 $D_1$ 导电，电流由A点经 $D_1$ 通过负载 $R_{fz}$ 再流回B点。待交流电进入另一个半周时，C点电压高于B点，而A点又必会低于B点，二极管 $D_2$ 导通，电流又由B点经 $D_2$ 通过负载 $R_{fz}$ 流回B点。可以看出不论正半周或负半周都有电流流过负载，而且方向不变，只是大小在变，波形图见图2·2(b)。全波整流电路输出的脉动直流电压平均值比半波整流高出了一倍， $u_2$ 和 $u_0$ 的关系是

$$u_0 = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot u_2}{\pi} = 0.9u_2$$

也就是

$$u_2 = \frac{u_0}{0.9} = 1.11u_0$$

$I_2$ 和 $I_0$ 的关系是

$$I_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{2} I_0 = 0.79I_0$$

3. 桥式整流电路。电路图和波形图见图2·3。

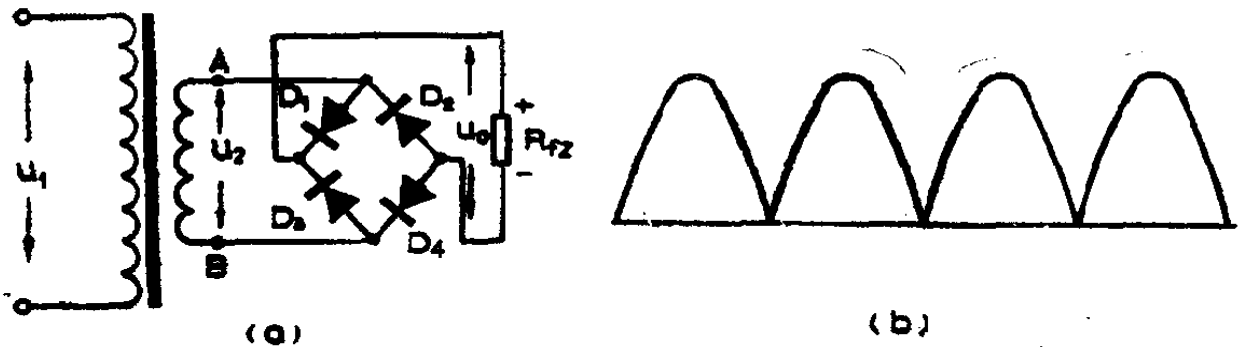


图 2·3

由图中可以看到，桥式整流能得到和全波整流相同的电压（或电流）波形。它的工作原理是当次级线圈A点为正时，电流由A点经 $D_1$ 流过负载 $R_{fz}$ ，再经 $D_4$ 流回B点。当下半周时B点为正，电流自B点经 $D_3$ 流过负载 $R_{fz}$ ，再经 $D_4$ 流回B点。正、负半周内负载上都得到了方向不变而大小在变的脉动直流。 $u_2$ 和 $u_0$ 、 $I_2$ 和 $I_0$ 的关系分别是

$$u_2 = \frac{u_0}{0.9} = 1.11u_0$$

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2} I_0 = 1.11I_0$$

采用桥式整流可比全波整流少用一组变压器次级线圈，节约了铜线。从以上给出的数据看桥式整流也比全波整流输出功率大。只是次级绕组的电流容量大了一些，要换用稍粗的漆包线绕制。

过去的电子设备中不大使用桥式整流，因为它需要四个整流器件。如果用电子管不但成本加大而且还要多安排几个灯丝的供电。开始使用半导体器件时价格较贵设计者又在估算它的

优缺得失。现在半导体整流器件已很普遍，价格日趋下降，所以桥式整流器的应用已很广泛。

表2·3 整流变压器次级功率

电路型式	次级电压 $u_2$	次级电流 $I_2$	次级功率 $P_2$
半波整流	$2.22u_0$	$1.57I_0$	$3.49 u_0I_0$
全波整流	$2 \times 1.11u_0$	$0.79I_0$	$1.75 u_0I_0$
桥式整流	$1.11u_0$	$1.11I_0$	$1.23 u_0I_0$

#### 4. 不同性质负载的影响

表2·3所列数据是根据负载为纯电阻的情况得到的。各种整流电路都是输出脉动直流电，而往往实际需要的是纹波率尽可能小的平滑直流电，这就需要在整流电路后面再加滤波电路。滤波电路有电容滤波和电感滤波两种（图2·4ab）。由于滤波电路的形式不同，也将影响到变压器次级的设计功率。

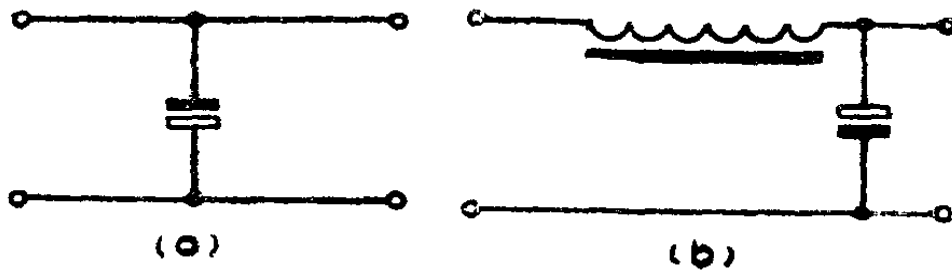


图 2·4

当前各种电子设备中大多使用电容式滤波电路。当脉动直流电压处于由零升至最大值的阶段，电流给电容充电。待电压由最大值向零值变化时，电容电压高于供电电压，这时电容放电，向负载提供电流。如此反复使负载上的电流能得到一定的均衡。由于要不断地给电容充电，所以变压器次级的供电电流

就要比纯电阻式负载的供电电流大些。

接了电容式滤波电路以后，输出直流电的电压要随使用的电容容量和负载电阻的大小而变化。表2·4列出了容性负载和感性负载的参考数据。使用容性负载时，如果电容大，负载电流小，数据可取小些，反之则取得大些。

表2·4 负载对功率的影响

整流形式 \ 负载性质	容性负载		感性负载	
	$u_2/u_0$	$I_2/I_0$	$u_2/u_0$	$I_2/I_0$
半 波	0.71~1.4	1.8~2.2		
全 波	0.8~1.2	1.1~1.2	1.11	0.71
桥 式	0.8~1.2	1.4~1.7	1.11	—

## 二、确定铁心截面尺寸

(1) 如果铁心已定，就可以直接用(2-3)式计算截面积。假若没有严格的使用要求，系数K可以选得稍大些，这样的结果是多用了硅钢片，体积可能稍大，但少用了铜线。

(2) 如果有条件选择铁心，就用(2-4)式，再由表2·2选择合适的 $k_m$ 来计算 $S \cdot S_0$ 值。根据不同的需要去查对附表(1)或附表(2)所列的硅钢片规格，选择最接近要求的型号。

铁心截面选定后，就可以根据舌宽去决定心柱的叠厚。但要注意铁心叠起来片与片间不可能完全密合，所以铁心的测量厚度应超过设计的厚度。硅钢片愈厚，不密合的程度愈严重。如能知道硅片的厚度，最好算出应叠多少片，按片数叠成铁心。在不能掌握硅钢片厚度时，可以把计算得到的厚度除以0.9

左右的系数作为实际厚度。

### 三、确定线圈用线的线径

线圈用漆包线的线径是根据各线圈所要求通过的电流和电流密度 $j$ 来决定的，因此首先要计算出通过线圈的电流。流过初级线圈的电流 $I_1$ 可由下式求得

$$I_1 = \frac{P_1}{u_1} (1.05 \sim 1.15) \quad (2-7)$$

上式中 $u_1$ 是初级的供电电压。因为变压器初级线圈里除了要流过因次级加了负载而产生的反射电流外，还有空载电流流过。在这里就不去详细计算而只把 $I_1$ 增加5%到15%来补偿。

流过次级绕组的电流要根据使用的方式从表2·3和表2·4中查出。

初、次级线圈的电流决定后，就可按选定的电流容量 $j$ 来计算线径

$$d = \sqrt{\frac{4I}{\pi j}} = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}} \quad (2-8)$$

式中  $d$ ——导线直径 (mm)

$I$ ——电流 (A)

$j$ ——电流密度 (A/mm<sup>2</sup>)

设计一个变压器，特别是次级绕组多的变压器，要不不止一次地计算线径。为了简化，我们可以把(2-8)式简化成

$$j = 2 \text{ 时, } \quad d = 0.8 \sqrt{I};$$

$$j = 2.5 \text{ 时, } \quad d = 0.7 \sqrt{I};$$

$$j = 3 \text{ 时, } \quad d = 0.65 \sqrt{I};$$

$$j = 3.5 \text{ 时, } \quad d = 0.53 \sqrt{I}。$$

#### 四、确定绕组圈数

线圈绕组圈数取决于各线圈的设计电压。电压的数值除了参照表2·3和2·4中所列数值外，还要考虑各线圈有电阻存在，电阻上的电压降会使输出电压不符合设计要求。变压器功率愈小，电压降也愈严重。一般功率不很大（例如30—100瓦）的变压器电压降大约在5%到10%。计算时初级电压要按此比例减少，而次级电压要按此比例增加。

考虑线圈工作电压的另一个因素是整流电路中整流器件的压降。半波、全波整流要增加一个管压降而桥式整流则需要增加两个管压降。

计算圈数的公式是（2-2）式的倒数

$$N = \frac{u \cdot 10^8}{4.44f \cdot \beta \cdot S} \quad (2-9)$$

式中  $N$ ——线圈圈数（圈）

$f$ ——交流电频率（Hz）

$\beta$ ——磁通密度（T）

我国电网的频率是50赫，如果把磁通密度  $B$  选为10000特斯拉，那么上式就可以简化成

$$N = \frac{45 \cdot u}{S};$$

磁通密度选8000特斯拉时

$$N = \frac{45 \cdot u}{S \times 0.8};$$

磁通密度选12000特斯拉时

$$N = \frac{45 \cdot u}{S \times 1.2}。$$

## 五、验算

除非对绕制变压器已有一定的经验，最好在设计计算之后，再进行一次验算。验算的目的是验证一下选用的铁心窗口能不能容纳下绕好的线包，以免以后再返工。当然验算是很粗略的，并不很准确，可是足以给绕制工作提供必要的参考。

验算时要事先估计或测量出线圈层与层之间和各线圈之间绝缘垫纸的厚度，线框的厚度以及线框与铁心的间隙等等。漆包线的直径已经掌握，计算较粗的漆包线时（例如0.3毫米以上），要考虑漆膜厚度。

由于在绕线圈时线圈框架两端要留出一定的空隙，能绕线的宽度最多是框架长度的90%。如果是较小的框架，每端最少也要留出1.5毫米左右的空隙。铁心窗口的高度为 $h$ ，每层线圈能绕圈数 $Q$

$$Q = \frac{0.9h}{d} \quad (\text{注意：任何小数都舍去})$$

如果层间绝缘垫纸的厚度为 $Y$ ，线圈绕组与绕组间绝缘层为 $G$ ，那么每组线圈需要层数 $Z$ 和厚度 $M$ 是

$$Z = \frac{N}{Q} \quad (\text{注意：任何小数都进位})$$

$$M = Z(d + Y) + G \quad (\text{严格说应为 } Zd + (Z - 1)Y + G)$$

假若被验算的变压器有两个次级绕组，各组线圈的厚度为

$$M_1 = Z_1(d_1 + Y_1) + G_1$$

$$M_{2,1} = Z_{2,1}(d_{2,1} + Y_{2,1}) + G_{2,1}$$

$$M_{2,2} = Z_{2,2}(d_{2,2} + Y_{2,2}) + G_{2,2}$$

线包的总厚度 $M_t$ 应为

$$M_t = M_1 + M_{2,1} + M_{2,2} + M_0 + M_s$$



式中： $M_0$ ——框架厚度和与铁心的间隙

$M_s$ ——屏蔽层（见第三章）和线包外皮的厚度。

经过计算所得的线包总厚度应小于铁心窗口的宽度，以保证绕好的线圈容纳得下。假若线圈过大就应该另选铁心，再行验算直到满足要求为止。

## 六、设计计算举例

例一按图2·5的电路设计计算电源变压器。使用现有的硅钢片，舌宽22mm，窗口 $14 \times 39$ mm，取  $B = 10000$ T， $j = 3$  A/mm<sup>2</sup>。

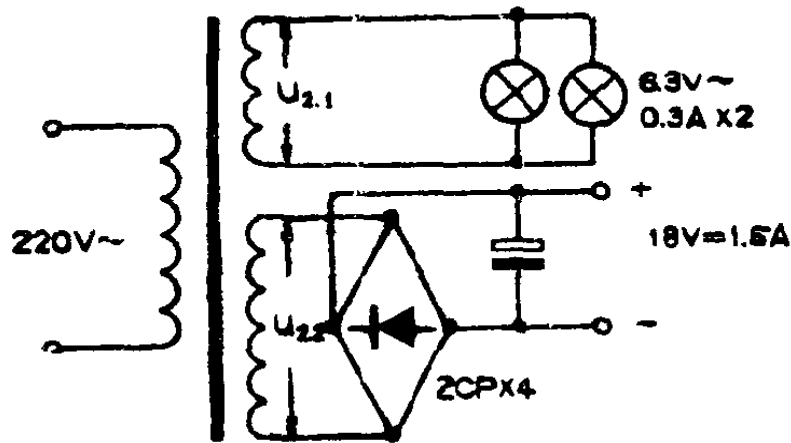


图 2·5

①先考虑变压器功率。

第一次级供电给两个指示灯，属电阻性负载。

$$P_{2,1} = 6.3 \times 0.3 \times 2 = 3.78(\text{W})$$

第二次级供电给电容负载的桥式整流电路。从表2·4中查得数据取

$$u_{2,2} = u_0 + u_{d \times 2} \quad (u_d \text{ 是硅整流管压降})$$

$$I_{2,2} = 1.2I_0$$

于是

$$P_{2,2} = (18 + 0.7 \times 2) \times 1.5 \times 1.2 = 34.92 \approx 35 (\text{W})$$

则

$$P_2 = 3.78 + 35 = 38.78 \text{ (W)}$$

取变压器效率 $\eta = 85\%$ ，变压器初级功率是

$$P_1 = \frac{38.78}{\eta} = 45.62 \text{ (W)}$$

按公式(2-6)计算变压器标称功率

$$P_0 = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{45.62 + 38.78}{2} = 42.2 \text{ (W)}$$

②按公式(2-3)计算铁心截面。取 $K = 1.3$ 则铁心截面为

$$S = 1.3\sqrt{42.2} = 8.44 \text{ (cm}^2\text{)} \approx 8.5 \text{ (cm}^2\text{)}$$

现有硅钢片舌宽22mm，则应叠厚3.9cm。考虑片间空隙

后应为 $\frac{3.9}{0.9} = 4.3 \text{ cm}$ 。制作线圈框架的 $a, b, h$ 尺寸应为22mm  
 $\times 43 \text{ mm} \times 39 \text{ mm}$ 。

③按公式(2-9)的简化式计算圈数

$$N_{2,1} = \frac{45 \times 6.3}{8.5} \times 1.05 = 35 \text{ (圈)}$$

$$N_{2,2} = \frac{45 \times 19.4}{8.5} \times 1.05 = 107.8 = 108 \text{ (圈)}$$

$$N_1 = \frac{45 \times 220}{8.5} \times 0.95 = 1106.4 \approx 1106 \text{ (圈)}$$

以上计算中的1.05和0.95是考虑了线圈电压降。

④最后计算线径。

先按公式(2-7)计算初级电流

$$I_1 = \frac{P_1}{u_1} \times 1.05 = \frac{45.62}{220} \times 1.05 = 0.22 \text{ (A)}$$

再按公式(2-8)的简化式计算各线圈线径

$$\phi_1 = 0.65\sqrt{0.22} = 0.3 \text{ (mm)}$$

$$\phi_{2.1} = 0.65\sqrt{0.6} = 0.5 \text{ (mm)}$$

$$\phi_{2.2} = 0.65\sqrt{1.5 \times 1.2} = 0.87 \text{ (mm)}$$

⑤ 验算。

根据变压器的线圈情况，绕线时先绕初级线圈组，其次绕18V组，最后再绕圈数少的6.3V组。

现有硅钢片的窗口尺寸是14×39mm，前面计算中初级绕线线径为0.3mm，包括绝缘层可考虑增加10%，层间绝缘纸厚0.03mm，则每层圈数

$$Q_1 = \frac{39 \times 0.9}{0.33} = 106 \text{ (圈)}$$

初级线圈层数是

$$Z = \frac{1106}{106} = 10.4 \approx 11$$

初级线圈厚度 $M_1$ （初次级间绝缘纸厚取0.2mm）

$$M_1 = 11 \times (0.33 + 0.03) + 0.2 = 4.16 \approx 4.5 \text{ (mm)}$$

同理计算各次级线圈厚度

$$Q_{2.2} = \frac{39 \times 0.9}{0.96} = 36.5 \approx 36 \text{ (圈)}, \quad Z = \frac{108}{36} = 3$$

$$M_{2.2} = 3 \times (0.96 + 0.03) + 0.2 = 3.17 \approx 3.5 \text{ (mm)}$$

$$Q_{2.1} = \frac{39 \times 0.9}{0.55} = 63.8 = 63 \text{ (圈)}, \quad Z = \frac{35}{63} \approx 1$$

$$M_{2.1} = 0.55 + 0.2 = 0.75 \approx 1 \text{ (mm)}$$

框架厚度及其与铁心间隙取1.5mm，屏蔽层厚取0.5mm，外层厚取0.5mm，则线圈总厚度

$$M_T = M_1 + M_{2.1} + M_{2.2} + M_0 + M_S$$

$$= 4.5 + 1 + 3.5 + 1.5 + 1 = 11.5 \text{ (mm)}$$

现有硅钢片窗口宽度 $c$ 为14mm，但考虑绕制技术是否熟

练，排线是否紧凑等等，都应该留出余量。本例约有余量20%，设计是可行的。

例二 设计如图2·6所示的电源变压器。可自选CD型铁心， $B=17000T$ ， $j=3A/mm^2$ 。

①计算功率

第一次级为纯阻性负载。

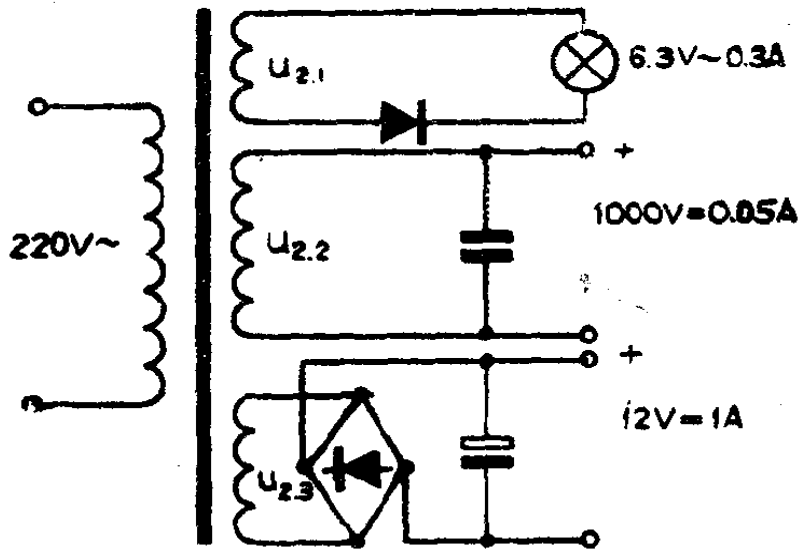


图 2·6

$$P_{2,1} = 6.3 \times 0.3 = 1.89(W)$$

第二次级为半波整流容性负载。由表2·4中查得

$$u_{2,2} = u_{02}, \text{ 因 } u_{02} \text{ 很高 } u_d \text{ 可忽略}$$

$$I_{2,2} = 2 \times I_{02}$$

则  $P_{2,2} = 1000 \times 0.05 \times 2 = 100(W)$

第三次级为桥式整流容性负载。取  $u_{2,3} = u_{03} + u_d \times 2$ ，

$$I_{2,3} = 1.2I_{03}$$

则  $P_{2,3} = (12 + 0.7 \times 2) \times 1.2 \times 1 = 16.08(W)$

于是  $P_2 = 1.89 + 100 + 16.08 = 117.97 \approx 118(W)$

取 $\eta = 99\%$  则  $P_1 = \frac{118}{0.9} = 131(W)$

②按公式 (2-4) 和表2·2计算 $S_0 \cdot S$

$$S \cdot S_0 = \frac{(131 + 118) \times 10^6}{4.44f \times 17000 \times 3 \times 0.3} = 73.31(\text{cm}^4)$$

要变压器制成后体积小、重量轻，S的尺寸必须小于 $S_0$ ，按CD型标准的C型铁心（附表(2)）选取CD16×32×65型，它的净截面积尺寸是 $4.71\text{cm}^2$ ，窗口面积 $16.25\text{cm}^2$ 。也从表中查出，线圈框架的内径a、b、h应为 $16 \times 32 \times 65\text{mm}$ 。

③计算圈数

$$N_{2,1} = \frac{45 \times 6.3}{4.71 \times 1.7} \times 1.03 = 36.4 \approx 36$$

$$N_{2,2} = \frac{1000 \times 45}{4.71 \times 1.7} \times 1.03 = 5788.6 = 5789$$

$$N_{2,3} = \frac{13.4 \times 45}{4.71 \times 1.7} \times 1.03 = 77.6 \approx 78$$

$$N_1 = \frac{220 \times 45}{4.71 \times 1.7} \times 0.97 = 1199.3 \approx 1199$$

④计算线径

$$\phi_1 = 0.65 \sqrt{\frac{131}{220}} \times 1.05 = 0.51 (\text{mm})$$

$$\phi_{2,1} = 0.65 \sqrt{0.3} = 0.36 (\text{mm})$$

$$\phi_{2,2} = 0.65 \sqrt{0.1} = 0.21 (\text{mm})$$

$$\phi_{2,3} = 0.65 \sqrt{1.2} = 0.71 (\text{mm})$$

⑤线圈的配置

CD型铁心和心式铁心相似，要绕两个线包，各组线圈在两个线包中有各种的分配方法。但最好要安排得两个线包功率接近均衡。还要考虑两个线包体积不要相差悬殊。

本例的初次级线圈安排为：

初级线圈和次级高压线圈都分两组分别绕在两个线包中，各绕一半圈数然后串联使用。

次级6.3V和12V两组圈数较少，可按原定圈数用较细导线分绕在两线包上，然后并联使用，每个绕组的线径应为

$$\phi_{2,1} = 0.65 \sqrt{\frac{0.3}{2}} = 0.25 \text{ (mm)}$$

$$\phi_{2,3} = 0.65 \sqrt{\frac{1.2}{2}} = 0.5 \text{ (mm)}$$

两个线包绕线的顺序都是先绕初级组，再绕高压组，圈数最少的6.3V组绕在最外面。分绕线包后由于用线较细，绕线也就容易绕紧绕齐。

一个重要的问题是心式和CD型电源变压器两线包间并接和串接要注意绕线方向，接错方向将会烧毁变压器。如图2·7，设线圈 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 是需要串接的初级绕组，线圈 $\omega_3$ 和 $\omega_4$ 是需要并联的次级绕组。这时就应把1·3相接，自2·4两端送入电压，再把5·8相接，7,6两端引出次级电压。初看起来好像有些迷惑，假若我们把图2·7画成图2·8，也就是把要并、串联的线圈顺铁

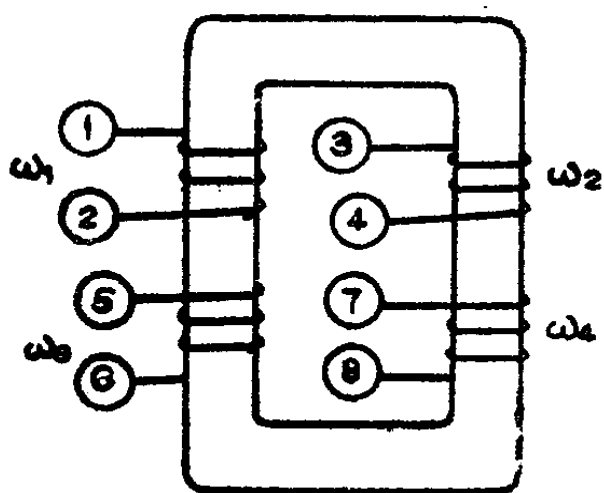


图 2·7

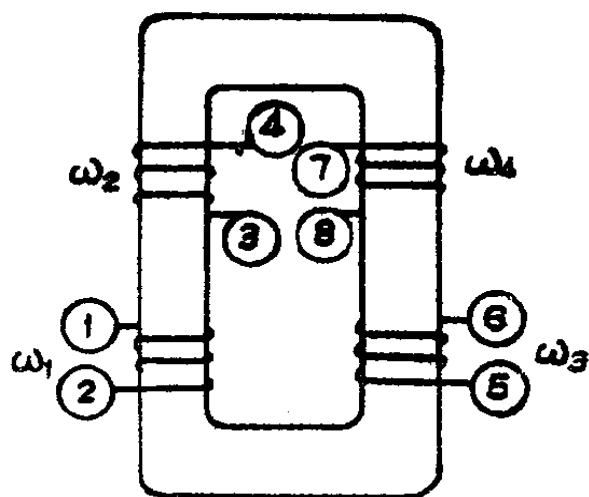


图 2·8

芯滑到相同一侧，应该怎样接线就很清楚了。

如果绕制时忽略了内层线圈的方向，或者还没有十分把握去连接，可以先用一个较低的交流电电压(例如6伏)加在一个线圈上，再把需要并或串的另一线圈的任一端连在已加电压的线圈任一端上，用电表测量其余没有连接的两端。量不出电压时是并接，电压数高于所加电压时是串接(见图2·9)。

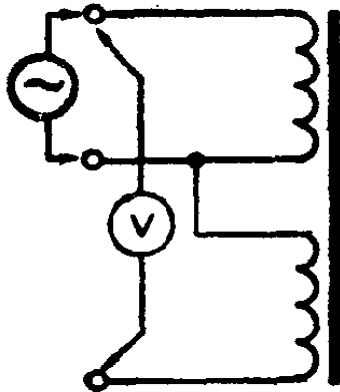


图 2·9

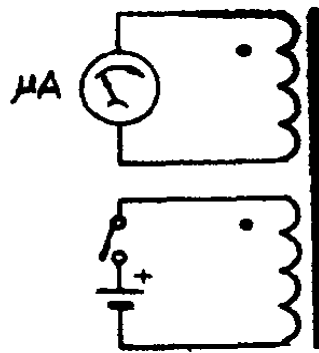


图 2·10

再一个方法是把微安表或万能表的微电流档接在需要并或串的一个线圈上，而在另一个需要并或串线圈上加一个直流电压，例如用一节电池提供1.5伏电压。接通的一瞬间，如果微安表表针向正的方向摆动一下，那么电池近端所接的线圈头和微安表正极所接的线圈头是同名端，也就是两组线圈绕向相同的起始端或末端(见图2·10)。

### ⑥ 验算

按以上安排，两线包圈数和线径都一样，因此只验算其中一个的厚度，最后再增加一倍。

初级线圈每层圈数(考虑绝缘层，线径增加10%)

$$Q_1 = \frac{65 \times 0.9}{0.56} = 104.5 = 104(\text{圈})$$

所需层数

$$z_1 = \frac{1199}{2 \times 104} = 5.8 = 6 \text{ (层)}$$

厚度 (层间绝缘纸厚0.05mm, 组间绝缘纸厚0.5mm)

$$M_1 = 6 \times (0.56 + 0.05) + 0.5 = 4.16 \approx 4.2 \text{ (mm)}$$

次级6.3伏线圈每层圈数

$$Q_{2,1} = \frac{65 \times 0.9}{0.28} = 208.9 = 208 \text{ (圈)}$$

只需层数一层, 厚度为 (组间绝缘纸厚0.2mm)

$$M_{2,1} = 0.28 + 0.2 = 0.48 \approx 0.5 \text{ (mm)}$$

次级高压线圈每层圈数

$$Q_{2,2} = \frac{65 \times 0.9}{0.23} = 254.3 \approx 254 \text{ (圈)}$$

所需层数

$$z = \frac{5789}{2 \times 254} = 11.4 = 12 \text{ (层)}$$

厚度 (层间绝缘厚0.05mm, 组间绝缘厚0.5mm)

$$M_{2,2} = 12 \times (0.23 + 0.05) + 0.5 = 3.86 \approx 3.9 \text{ (mm)}$$

次级12V线圈每层圈数

$$Q_{2,3} = \frac{65 \times 0.9}{0.55} = 106 \text{ (圈)}$$

需绕1层, 厚度为 (组间绝缘厚0.2mm)

$$M_{2,3} = 0.55 + 0.2 \approx 0.8 \text{ (mm)}$$

$$\text{则总厚度为 } M_T = M_1 + M_{2,1} + M_{2,2} + M_{2,3} + M_0 + M_5$$

$$= 4.2 + 0.5 + 3.9 + 0.8 + 1.5 + 1$$

$$= 11.9 \text{ (mm)}$$

铁芯窗口宽度为32mm, 计算需要线圈厚度为  $2 \times 11.9\text{mm}$   
 $= 23.8\text{mm}$ , 尚有足够的余量, 设计可行。



## 第三章 电源变压器的绕制

### 第一节 绕线要求

制作电源变压器，绕线是关键的一环。它不但直接影响到所制作的变压器能不能成功，也关系到变压器的电气性能能不能达到原设计的要求。

在绕制中最容易出现的问题是把线包绕得太大。因为既要考虑满足各种绝缘条件，又要绕得紧凑，对没有绕制经验的绕制者来说，往往就做不到设计验算的尺寸要求。特别是业余爱好者自己设计电源变压器时，经常遇到有些参数不能确切掌握的问题。例如计算变压器要知道硅钢片的磁通密度 $B$ ，要选定最合理的变压器效率 $\eta$ ，甚至铜线的直径也是用比较或估计而得来的近似值。在这种情况下，只好把各种参数选得宽裕些，安全系数取得大些来争取变压器有较好的质量。这样在变压器线包绕成后往往造成铁心窗口容纳不下。

在重绕烧坏的成品电源变压器时，经过绝缘处理的变压器不易拆卸，假若铁心损坏几片，再数不清原来圈数，同样存在着重新设计的问题。即使数清了圈数，原样再绕上去，由于绕制不熟练也会发生线包插不进铁心窗口的危险。

为了避免插不下铁心的情况发生，整个绕制过程要精打细算，争取不浪费铁心窗口里的每一个空隙，绕成一个在既定铁心尺寸下功率尽可能大的电源变压器。

在具体绕制时，通常绕线要注意到以下几个问题：

1.绕线圈排线要紧凑，不能在线与线间留有空隙。在绕第一层线圈时还比较容易控制，层数愈多就愈要注意。前一层有空隙，下一层就要有一圈铜线下陷，逐层积累下去，不但线圈绕不平，层间绝缘纸易被破坏，每层能绕的圈数也必然逐层减少。这种现象在绕制较粗导线的线圈时更容易出现。为了挽救已经发生的这类问题，要在层间垫两层或换用厚的绝缘纸，这样必然要增加整个线圈的厚度，甚至会造成最后铁心插不进去。

一般在绕好每一层线圈时，要求不能通过线与线间的隙缝看见垫在线下的绝缘纸。

2.绕线圈要把线拉得紧些，使铜线紧紧地缠在线框上，后一层紧紧地压在前一层上，每层都要这样。如果各层间松紧不一样，较松一层的线圈将被后一层较紧的绕线挤弯，造成绝缘程度降低，也由于挤弯的铜线松动，使变压器质量变坏。

要求变压器的形状在整个线包绕好后，如果用方形线框，绕完了还应该基本是方形。不要形成椭圆形，更不能成为圆形。也不能有线包内外层松动现象，更不能有哪一层第一圈或最末一圈出现脱落现象。

3.变压器各层间的圈数不要逐层减少，特别是较粗的铜线，绕制时要妥善安排每层的第一圈和最后一圈。不要把线包的截面形成下宽上窄的梯形。问题的关键就在于这层线圈头尾的那几圈要排好。

4.注意绕线不要相互叠压。叠压容易造成线间短路，也造成线圈不平，影响下一层的排线。绕线叠压现象，在绕细线时更易出现，特别是每层的开始和最后几圈。

## 第二节 绕线的准备

### 一、手绕和使用绕线机

绕线机是生产变压器工厂的主要工具。电机带动的自动排线绕线机，工作效率比手工绕制要高出很多倍。可是除了专业的生产单位，一般都没有这种设备，即便是结构简单的手动绕线机，也都不大购置。在这里除简略介绍使用手动绕线机绕变压器外，着重介绍一些手绕变压器的方法。

### 二、制作木心

按照铁心心柱的截面尺寸做一个木模，用它来把线框支撑起来，当线包绕好后，再把它从线框中取出。

木心形状有两种，一种长方形如图3·1(a)所示。如果用绕

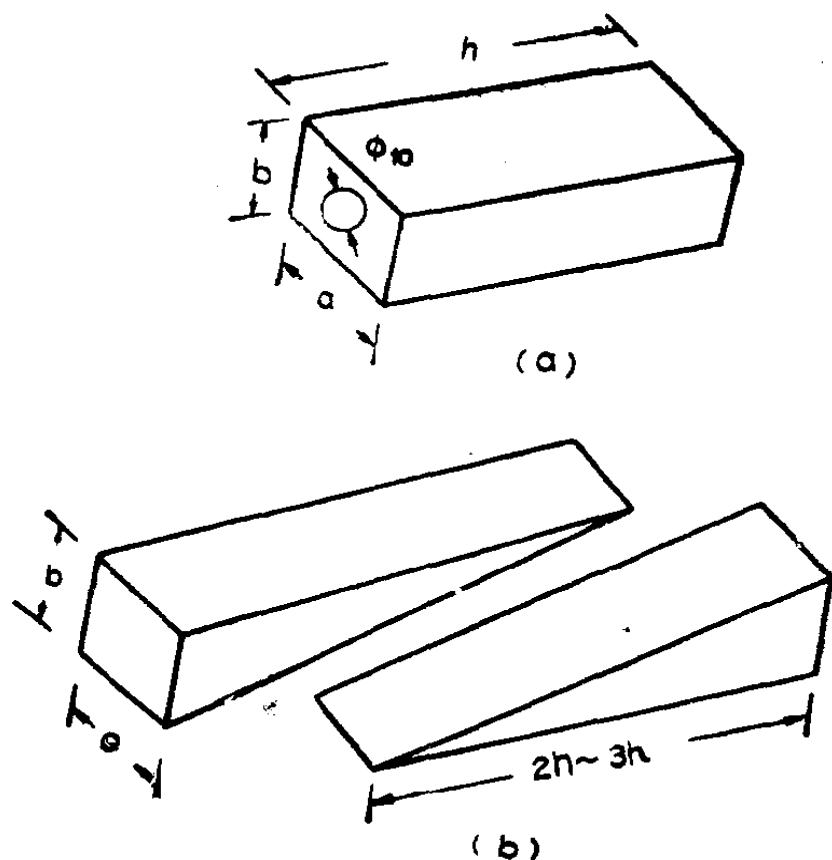


图 3·1

线机绕制，并且在设计验算时铁心窗口面积还稍有余量，就可以使用这种木心。木心上钻一个孔，以便套在绕线机转轴上。中心孔要打得正，否则转动转轴时要出现左右摇摆现象，影响绕线的平整。假若用手绕，木心不必打中心孔，并且为了用手拿着方便可把长度加长到 $2h$ 或 $3h$ 。

另一种双楔形木心（如图3·1(b)所示），只适用于手绕，特别是设计验算时窗口余量不大，绝缘纸厚度又掌握不准的情况下，用这种木心比较合适。

### 三、线框的制备

线圈框是用来绕制线圈的支撑架，也是变压器铁心和线圈之间的绝缘层。绕制变压器时把线框套在事先做好的木心上，再把线圈绕在线框上。为避免铜线把线框紧捆在木心上退不下来，线框不但要求有足够的绝缘强度和耐压性能，还要有一定的机械强度。

用方形木心时，线框要坚硬一些，一般采用青壳纸，多层牛皮纸或其他质地较硬的纸也可以。线框的厚薄根据变压器最里层铜线的粗细来决定，一般至少要在0.5毫米左右。大功率变压器的线框要加厚到1毫米来增加强度（图3·2）。

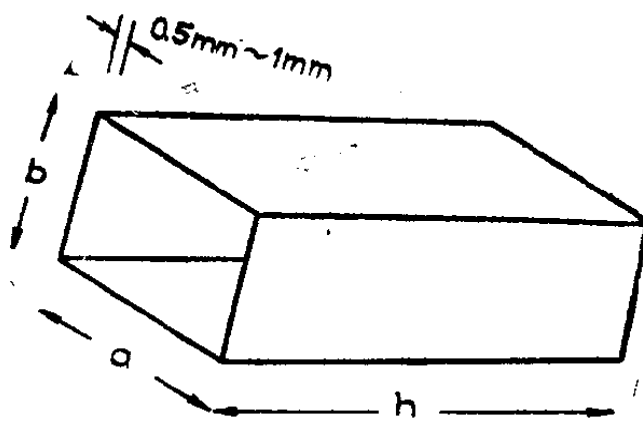


图 3·2

用双楔形木心不在线包绕好后抽不出木心的问题，线框可只考虑绝缘和耐压，实践证明0.3毫米的厚度已经够了。

线框制成后要先做浸渍处理。如果没有绝缘漆，也可用普通石蜡加20%松香加热融化后，把做好的线框放进去浸泡（同时要加温），直到没有很多气泡冒出为止。线框浸泡前一定要干透，否则会鼓泡变形。

#### 四、层间绝缘纸

绕线时每层线圈要夹垫一层绝缘纸，目的是加强层与层之间的绝缘强度，同时也依靠层间垫纸来使各层的线圈绕得平整，不致逐层减少。小功率电源变压器一般每伏圈数较多，每层能容纳的圈数又有限，层与层之间的电压差也不会很高，普通的干燥纸张都能满足绝缘的要求。可是往往为了每层线圈的开始第一圈和最后一圈不陷下去造成圈数逐层减少，又不得不选用稍厚一点的层间垫纸来托住下一层的线圈。愈是粗线线圈每层圈数愈少，层间电压差愈低，可是愈要厚一些的垫纸才能托得住。长期以来粗线线圈层间用厚绝缘纸，主要是为了垫平整线圈而不是考虑绝缘条件。

如果在设计验算时铁心窗口比较紧张，或者设计时就有意想多绕些线圈，或者用了比较粗的铜线，那么在垫绝缘纸时可以使用薄纸，而用折纸边的方法来保证线圈的第一圈和末一圈不下陷，不脱落，达到线圈平整的要求（见图3·3）。这时绝缘纸的宽度应为线框的高度 $h$ 加上两边折边用纸的长度。为了纸宽整齐一致，绕好线包形状方正，折叠纸边时，要先折出需要的宽度然后再把两边逐层叠起来。最好选用韧性强一些 的纸，以免绕制时破裂。至于折几层，折多宽都要根据绕线的粗细和线框的大小来决定。这种方法对粗线线圈很有效，对细线线圈间隔几层用一次就可以。

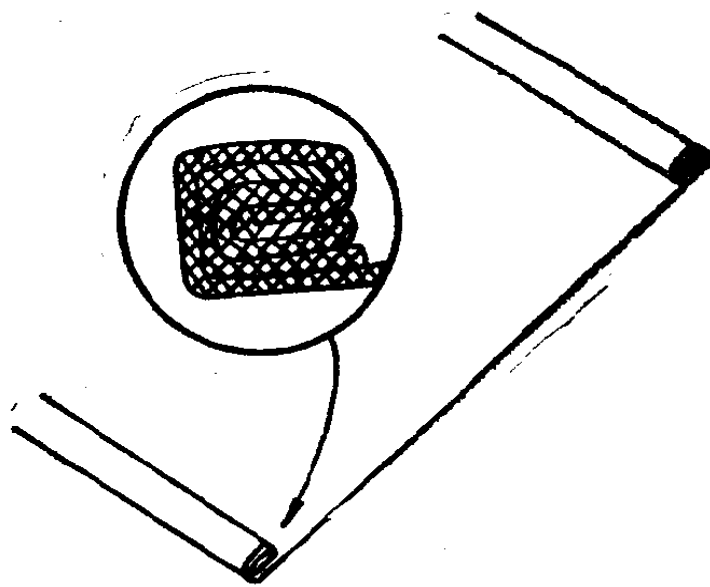


图 3·3

不论是单层的层间绝缘纸还是两面折边的层间绝缘纸，剪裁时都要长一些，在绕制时按每层的需要再剪断。因为线包愈绕愈厚，需要绝缘纸一层比一层长，不能事先剪得一样长短。

绝缘纸的种类很多，一些工业产品已在前章中列出，它们都有规定的耐压范围。但是往往在绕制个别变压器或对业余爱好者来说找到这些纸张很不方便。下面表3·1列出了几种日常使用的纸张，所列的击穿电压，是用现有的纸张样品实测的数据，不是生产纸张的工业指标，所以不同的纸样就很可能有差异，只能作为参考。但是从这些实测数据也可以估计到用这些纸张作变压器的绝缘纸是可以的。

### 五、漆包线

小功率电源变压器一般都用漆包线绕制线包。通常一个变压器要由两种，甚至多种直径不同的漆包线绕成。对于不经常绕制变压器的单位或业余爱好者来说，配齐所需线径的漆包线往往很费事。在绕制时以粗线代细线当然可以，但要估计铁心

表3.1

几种常用纸张的耐压\*

纸 张	厚 度	击 穿 电 压
考贝纸	0.03mm	400V
道林纸	0.1mm	700V
凸版纸	0.13mm	600V
牛皮纸	0.15mm	620V
有光纸	0.05mm	550V
描图纸	0.05mm	650V
书写纸	0.09mm	750V

\*注：表列数据是在室温27℃，相对湿度66%的条件下测得的。稍加烘烤耐压都有提高。

窗口的面积是否容纳得下。当缺少粗线的时候，可以用两股细线并绕甚至用三根细线合并绕制（绕法见下节）。但是使用多股并绕要计算好各股铜线截面积的总和要相当于设计所需铜线的截面积。例如设计计算需要直径0.5毫米的漆包线，求它的截面积S

$$S = \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \pi = \left(\frac{0.5}{2}\right)^2 \times 3.14 \approx 0.2(\text{mm}^2)$$

如果手头上只有  $\phi = 0.35$  毫米的漆包线，它的截面积

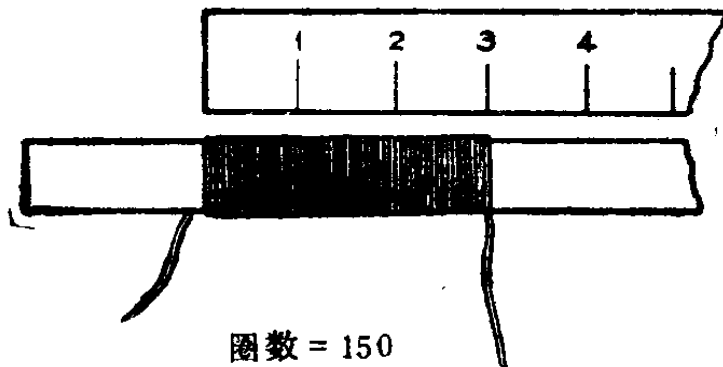
$$\left(\frac{0.35}{2}\right)^2 \times 3.14 \approx 0.096(\text{mm}^2)$$

那么用两根并绕正合要求。

为了避免计算，书末附表3的铜线表可以加以利用。例如设计计算需要直径0.9毫米的漆包线，而手头只有0.72毫米的线，那么由表中可以查到0.9毫米铜线的截面积是0.6362毫米<sup>2</sup>，

0.72毫米铜线的截面积是0.4072毫米<sup>2</sup>，尚少0.229毫米<sup>2</sup>。查表截面积栏，可以知道还要一根直径0.55毫米的铜线或者两根直径0.38毫米的铜线。

分辨漆包线线径对没有专用工具的业余爱好者也是很困难的。习用的方法是把漆包线紧紧绕在铅笔或其它圆棍上（如图3·4），绕一些圈后，用直尺去量得线圈的长度，再数清圈数，就可算出铜线的直径。这种方法，绕线绕得愈多，线圈愈长，算出铜线的直径尺寸愈准确。用这种方法估算线径关键是要绕得紧，线与线间不要留空隙。粗一些的铜线要用粗的圆筒或圆棍绕，避免回转半径太小要破坏漆包线的绝缘漆膜。



$$\begin{aligned} \text{圈数} &= 150 \\ \text{线圈长} &= 3\text{cm} \\ \text{线径} &= \frac{3}{150} = 0.2\text{mm} \end{aligned}$$

图 3·4

### 第三节 绕 制

#### 一、线圈头尾的固定法

一般变压器，为了减小漏磁现象，都把高压线圈绕在里层，低压线圈绕在外层。小功率电源变压器都把接市电220伏的一组绕在最里层。高压线圈常常通过电流较小，用线很细，



在绕制中开始的线头要处理好，避免以后不小心而被折断。如果使用的线很细（例如直径小于0.15毫米），可以另焊上一段较粗的导线或多股线作引线，绕线时剪一纸片折叠夹住引线，折缝处开一口把细线穿出来（如图3·5）。把夹引线的纸片平放在线框一侧面上，就可以开始绕线。要注意线框的这一侧面必须是绕成线包后不嵌在铁心窗口里的那两个侧面之一。

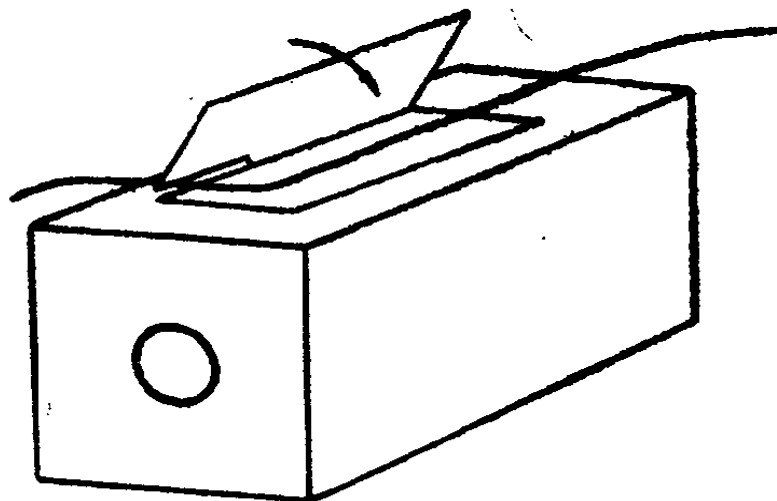


图 3·5

按所绕线圈的圈数，估计绕到最后一层时，在这一层一开始就垫上同样夹有引线的纸片，用线圈把它压紧，最后一圈绕完后把线头焊在引线上。

绕制较粗铜线的线圈，起头可以就用导线本身作引线，用黄蜡绸或坚实的纸条套在导线上用后绕的几圈压住再拉紧（图3·6）。线圈绕完前十几圈也垫上纸条套，用线圈压住，待最后一圈绕完，把线头穿过纸套再拉紧固定。

变压器引出线都从哪个方向引出，要事先计划好，要考虑使用变压器的设备在装上变压器后接线的方便。不同电压的线圈也可以不都从一个方向引出。需要装用焊接片的变压器在绕完最后一个线圈后包上绝缘纸，另外再包上一层事先装好焊片

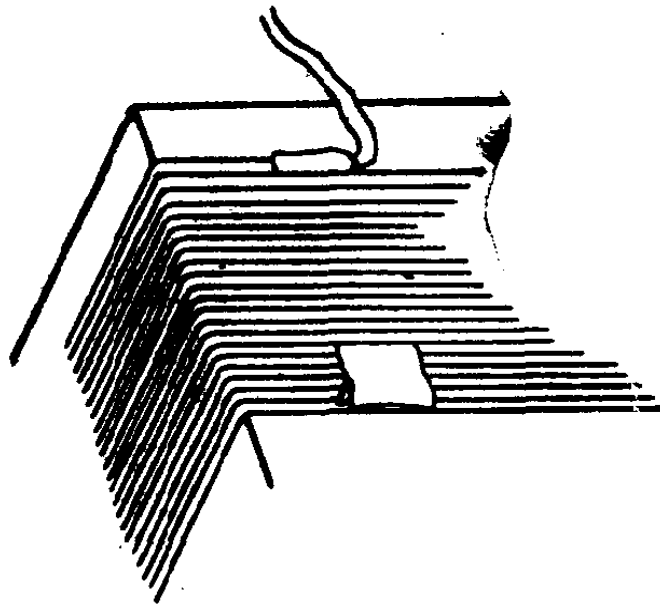


图 3·6

的厚绝缘纸。引出线都要按焊片的顺序排列整齐，最好待铁心装好并测试无误以后，再把引线焊上去。

## 二、绕线

把线框套在木心上，如用双楔形木心，就先把线框从一个楔形的尖端套进，再把另一楔形的尖端对插进来，在定好尺寸后用钉销把两块楔形固定住（图3·7）。在线框上垫一层绝缘纸就可以开始绕线。

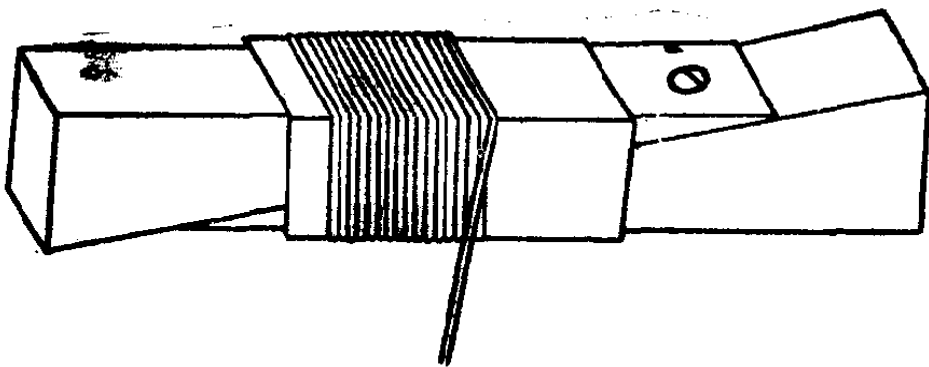


图 3·7

起头时导线不要太靠边，要留出一些空隙防止导线脱落或

在插铁心时碰破漆皮。留出多大空隙要看变压器的大小，一般小功率电源变压器1—3毫米就可以了。

用手工绕线时，一手拿住带有木心的线框，另一手拉紧导线，每次只能转动线框的一个侧面，即 $\frac{1}{4}$ 圈，绕粗线时要随绕随用手按住以防松脱。

为了线圈排线紧凑，在绕线的时候，拉线的方向不要与线框垂直，而要向里倾斜一点，一般倾斜一、二股线的直径就可以（图3·7），这样每匝都能自己挤得很紧不留空隙。排线另一个关键是注意线框的四个棱角部位，一定要排紧排平。如果在棱角部位就出现空隙，就很难再绕紧了，并且要严重地影响下一层。

手工绕较粗的漆包线比较吃力，不易绕紧绕平，可以把导线的另一端绕在家具圆腿上，双手持木心拉紧绕制。绕粗线一定要先把线缕直，弯曲不直的导线是绕不平的。当然以上各种操作过程都要细心，注意不伤漆皮。

有手汗的人，手工绕线要带手套。

### 三、计数

手工绕制变压器不能像用绕线机那样自动计圈数，如果随绕随数是很靠不住的。比较粗的线圈可以每绕完一层数一次。数圈数的方法可以用削尖了的火柴棒或其他类似的东西横划线圈，慢慢地边划边数。较宽的线圈单凭眼睛去看着数已不可能，可以凭火柴棒或其他工具移动时的振动次数计数。初次数圈数的人可以试数几次，体会振动的感觉。

较细的导线用这种方法计数就不行了。通常绕线时每十圈或每二十圈把一纸条分别压在线圈下或放在线圈上（如图3·8）。因为线细，垫纸也很薄，夹在线间对排紧线圈没有多大影响。

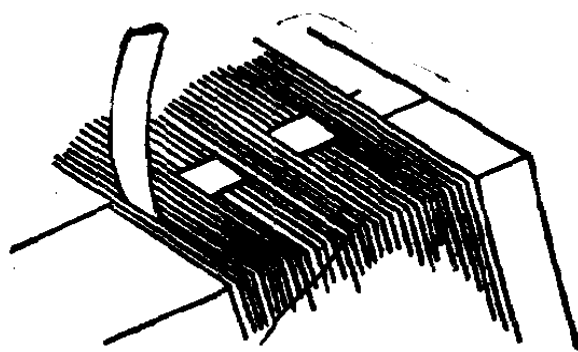


图 3·8

这样一旦忘了所数的圈数，最多也不过重数十圈或二十圈。

注意线圈绕一周，头尾相对才算一圈，计数时不可忽略。细线圈圈数多，差些圈数问题不大。粗线圈数少，特别是有的线圈要求中心抽头，有的两组或多组并联使用，最好一圈也不差。

#### 四、垫绝缘纸

绕完每层线圈要垫上一层绝缘纸再绕下一层，垫纸时要有线圈引线头的那一侧开始，垫一圈后头尾重叠少许，再把纸剪断。以后每层都保持在这一侧有绝缘纸重叠，并且重叠的部位最好每层交错开，这样可以使这一侧面还能保持方整。使用折边的垫纸，重叠部分要把折边剪掉。不很粗的导线不用每层都用折边垫纸，间隔几层用一次就可以。折边的垫纸反用（折纸部分向下）比正用更便于绕线，可是线圈最外层有脱落危险时正用效果比较可靠。

每绕完一组线圈，要垫一层绝缘强度较高的组间绝缘纸，绝缘强度要和相邻两绕组的电压差相适应。

#### 五、静电屏蔽层

在电源变压器初次级之间，一般都加入一层静电屏蔽层，目的是消除掉某些干扰。例如，在各种电声设备电源变压器的初次级间加入了屏蔽层，可以显著地减弱调制交流声。