

目 录

第一章 小功率电源变压器的基础知识	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
第二章 小功率电源变压器的简便设计计算	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
第三章 电源变压器的绕制	45
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
第四章 几种特殊电源变压器的设计	70
第一节 自耦变压器	70
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
第二节 适应多种供电电压的变压器	79
第三节 次级线圈复合使用的变压器	80
第四节 超小型电源变压器	83
第五章 电源变压器损耗的校核	85
第一节 变压器的铁损和磁化电流	86
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
第二节 变压器的铜损和效率	91
第三节 空载电流	93
第六章 小功率电源变压器的测试和常见故障	95
第一节 小功率电源变压器的测试	95
一、绝缘电阻	95
二、空载电流	96
三、输出电压	96
四、温升	97
第二节 常见的故障	99
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
第七章 旧变压器的翻修和利用	103
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
附录	108
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

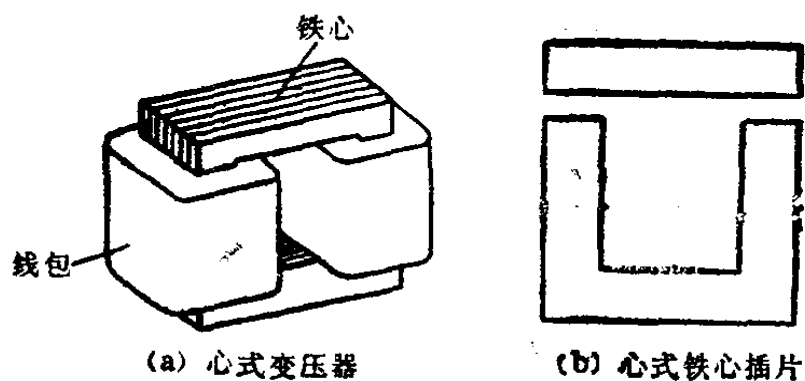


图 1.1

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。

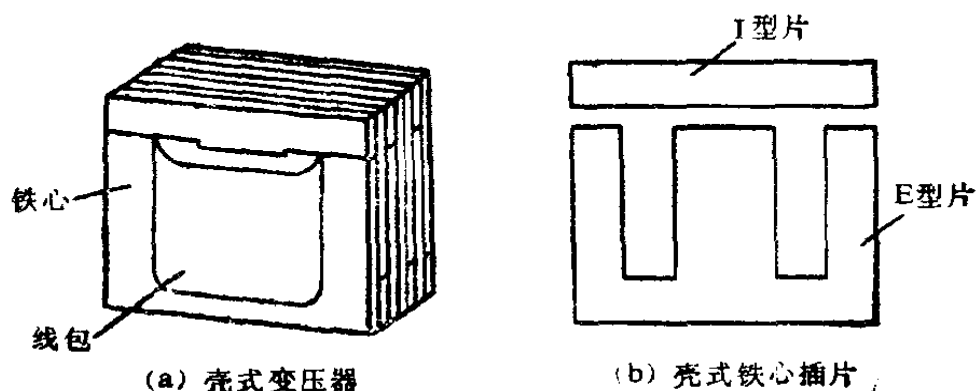


图 1.2

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）。

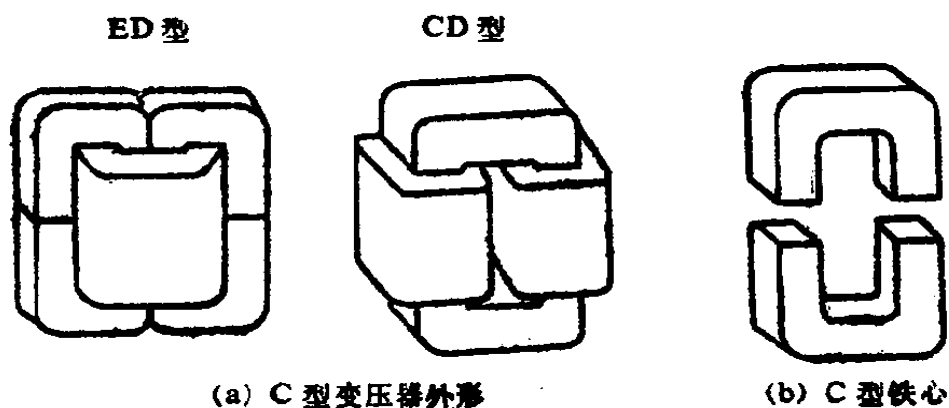


图 1·3

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

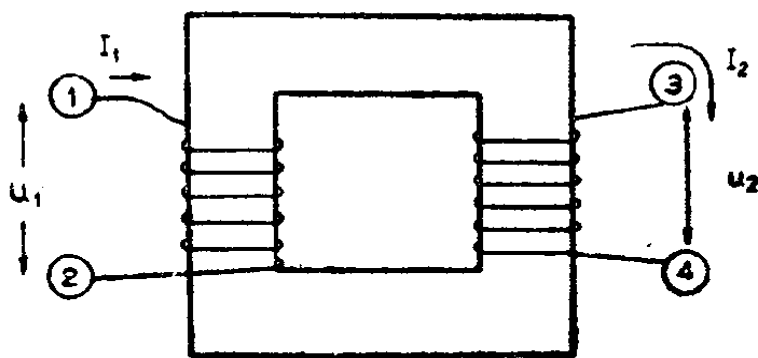


图 1·4

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 ϕ 来表示。电流 I_1 流过初级线圈，铁心里就有了磁通 ϕ_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 ϕ_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 ϕ_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 ϕ_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 ϕ_2 ， ϕ_2 的方向和 ϕ_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， ϕ_1 也增加，并且 ϕ_1 增加的部分正好补充了被 ϕ_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

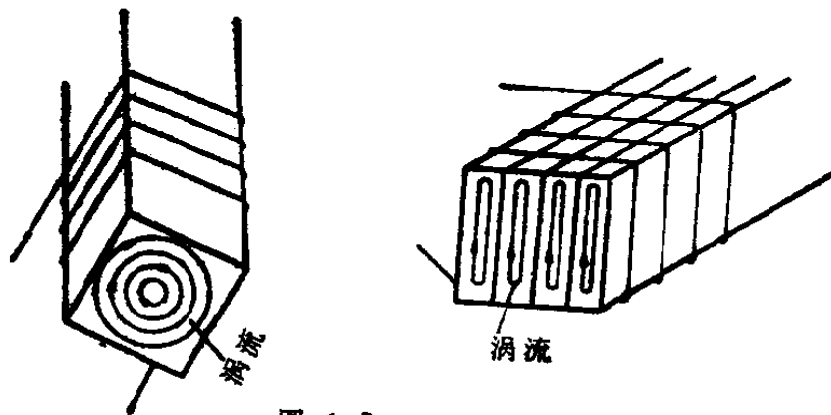


图 1·5

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 η 表示它的效率

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

η 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° 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

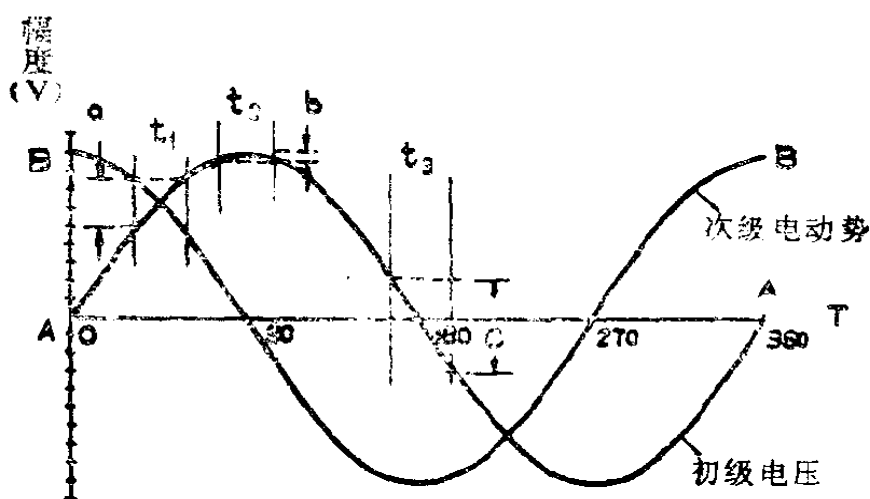


图 1.6

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像时，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连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° 。

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（ 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。

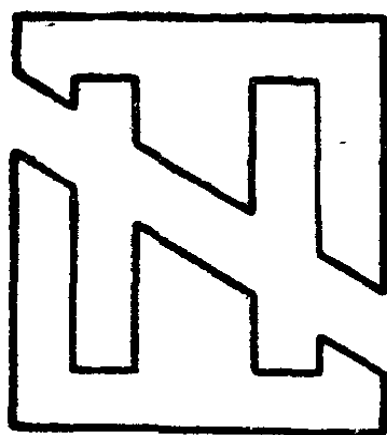


图 1·7

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°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表示型号的油性漆包线；其二是用字母Q_z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 (ϕ 0.5~12)	105	5kV
	玻璃丝管	0.2~0.75 (ϕ 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，

$$P_I \propto B^2 G_I$$

$$P_C \propto j^2 G_C$$

式中 P_I ——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_I ——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°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°C 时，允许的变压器温升是 65°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。

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

式中 ΔT ——变压器温升 ($^{\circ}\text{C}$)

P_I ——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)
(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 D₃₁₀ 等）B 值取 12000~14000 特斯拉

热轧钢片（如 D₄₁，D₄₂ 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 (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 (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² 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²，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²。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 η

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 η	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（ 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 (cm^2)

S_0 ——铁心窗口面积 (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 (A/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

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

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

输出功率 (W) 铜线占空系数k_m 形式		<50	50—150	150—300	300—1000
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 。

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

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

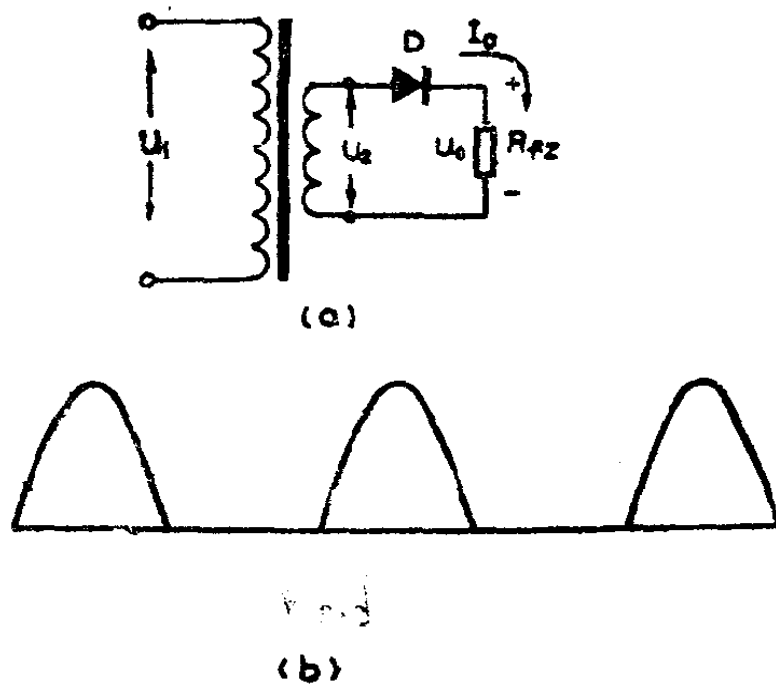


图 2.1

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。

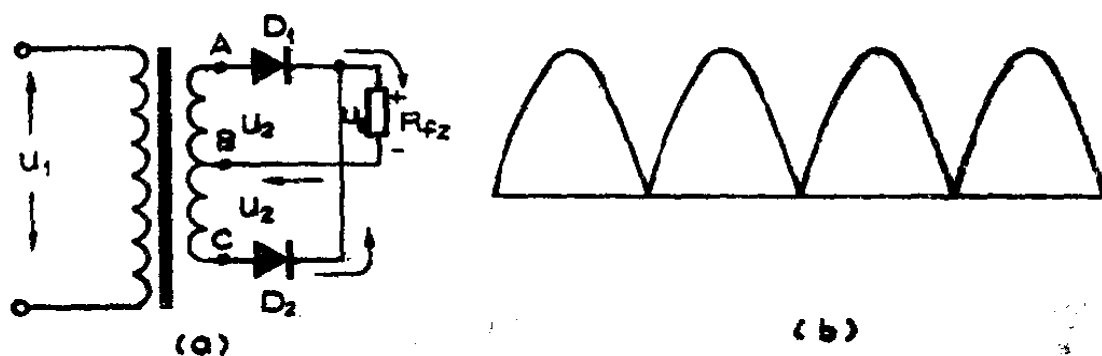


图 2·2

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

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

也就是

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

I_2 和 I_0 的关系是

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

3. 桥式整流电路。电路图和波形图见图2·3。

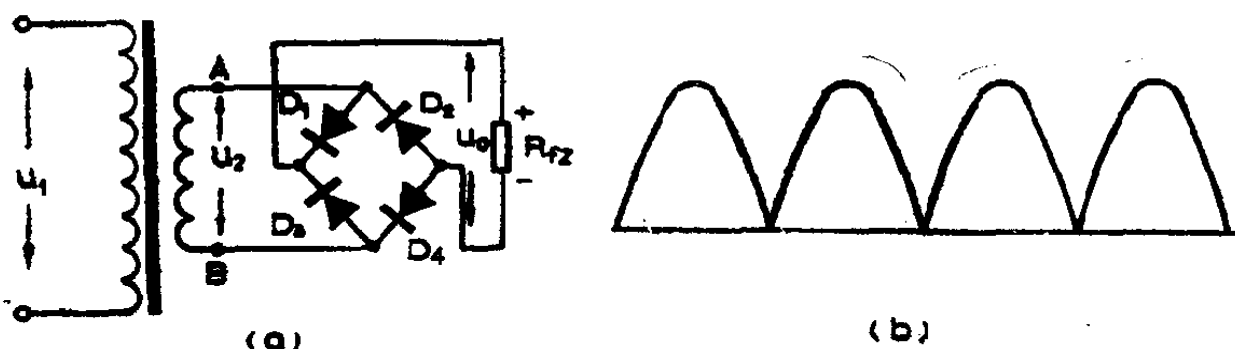


图 2·3

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

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

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

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

优缺点得失。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	$2.22u_0$	$1.57I_0$	$3.49 u_0 I_0$
全波整流	$2 \times 1.11u_0$	$0.79I_0$	$1.75 u_0 I_0$
桥式整流	$1.11u_0$	$1.11I_0$	$1.23 u_0 I_0$

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波纹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。

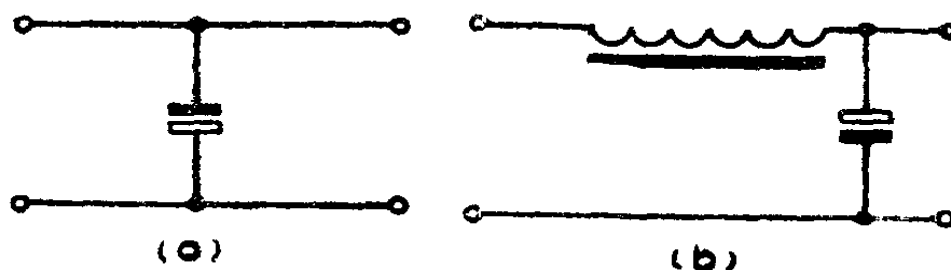


图 2·4

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/mm²)

设计一个变压器，特别是次级绕组多的变压器，要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）

β ——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 $14 \times 39\text{mm}$ ，取 $B = 10000\text{T}$ ， $j = 3\text{A/mm}^2$ 。

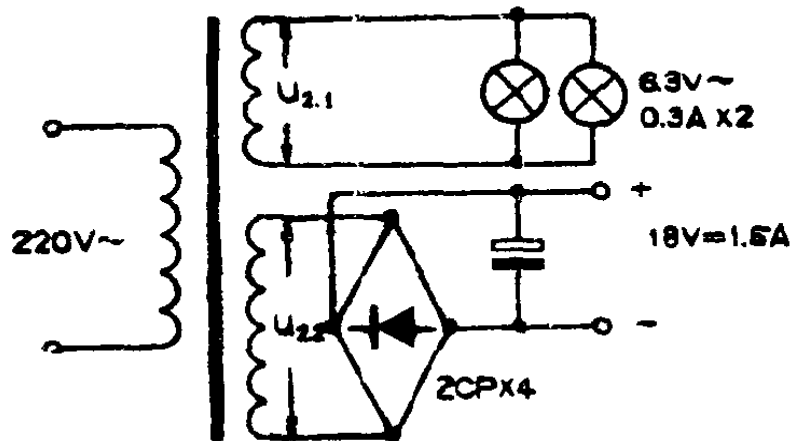


图 2·5

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

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

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

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

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

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 $\times$ 43mm $\times$ 39mm。

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

$$\begin{aligned} M_T &= M_1 + M_{2.1} + M_{2.2} + M_0 + M_S \\ &= 4.5 + 1 + 3.5 + 1.5 + 1 = 11.5 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

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。

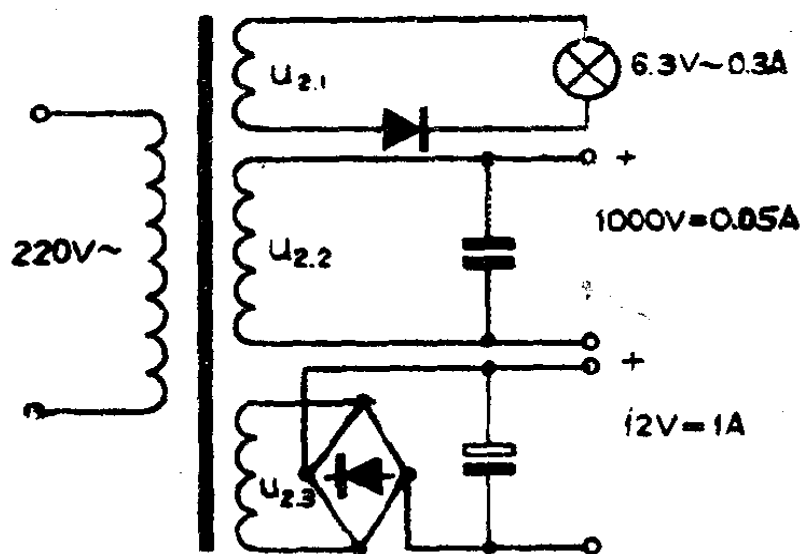


图 2·6

$$P_{2.1} = 6.3 \times 0.3 = 1.89(W)$$

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 $P_1 = \frac{118}{0.9} = 131(\text{W})$

②按公式 (2-4) 和表2.2计算 $S_o \cdot S$

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

要变压器制成后体积小、重量轻, S的尺寸必须小于 S_o , 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 4.71cm^2 , 窗口面积 16.25cm^2 。也从表中查出, 线圈框架的内径a、b、h应为16×32×65mm。

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 ω_1 和 ω_2 是需要串接的初级绕组，线圈 ω_3 和 ω_4 是需要并接的次级绕组。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

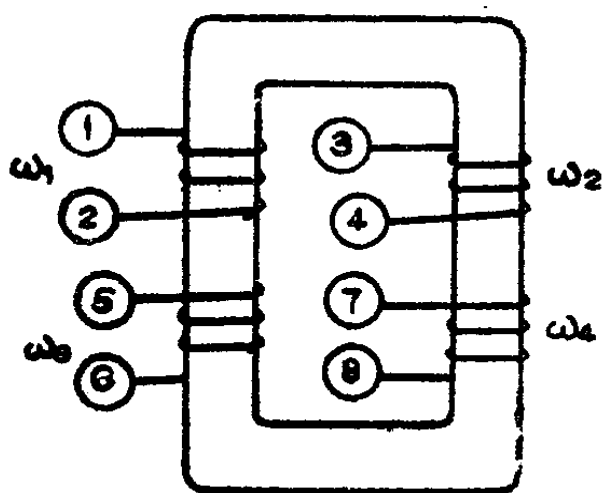


图 2·7

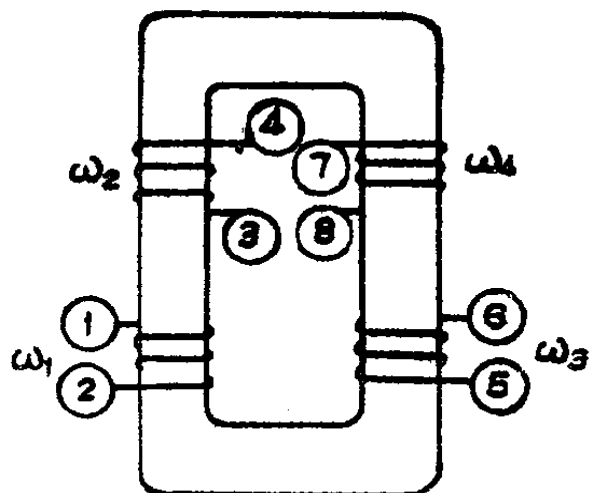


图 2·8

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。量不出电压时是并联，电压数高于所加电压时是串接（见图 2·9）。

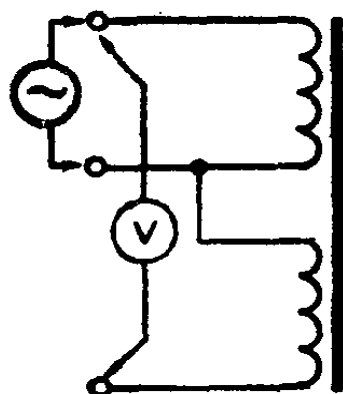


图 2·9

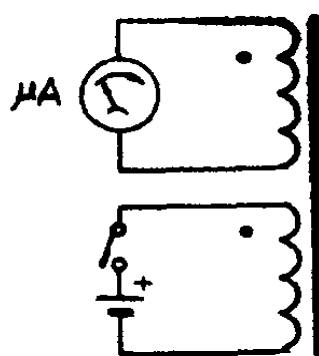


图 2·10

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的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 η ，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

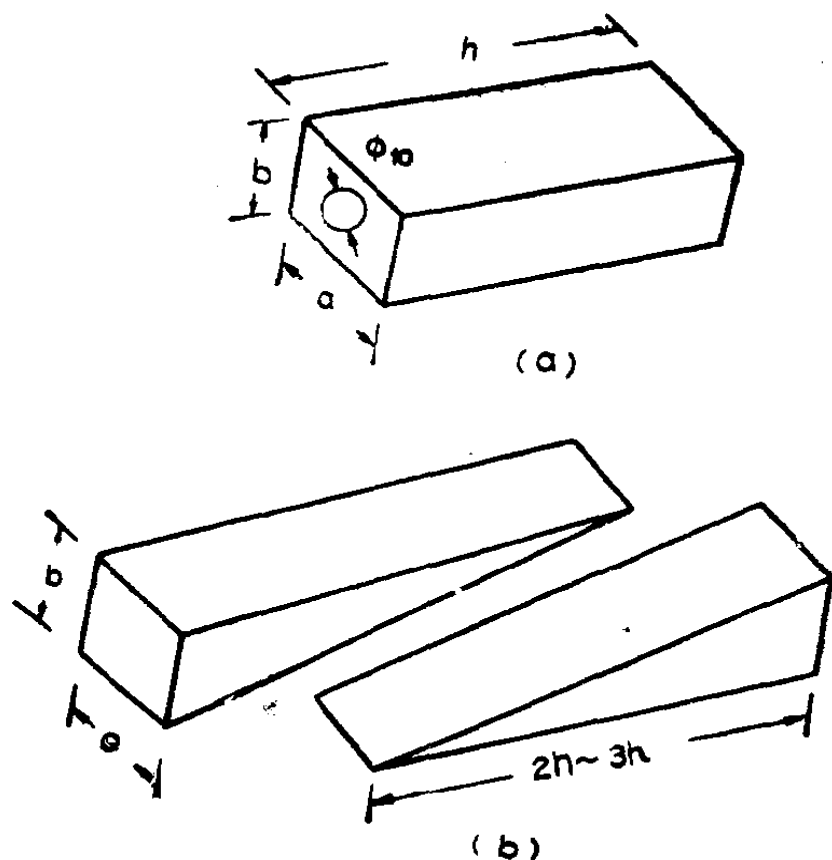


图 3·1

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）。

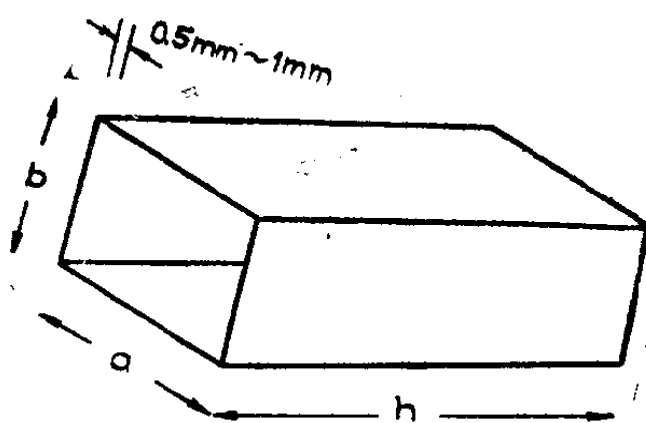


图 3·2

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。

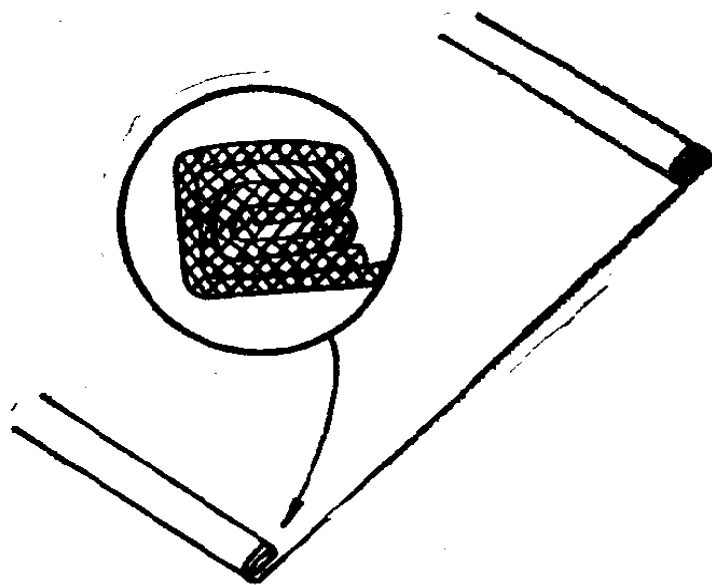


图 3·3

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

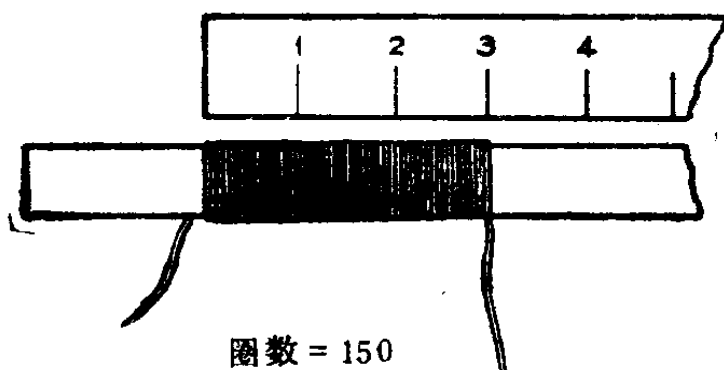
$$\left(\frac{0.35}{2}\right)^2 \times 3.14 \approx 0.096(\text{mm}^2)$$

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²，

0.72毫米铜线的截面积是 0.4072毫米^2 ，尚少 0.229毫米^2 。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。



圈数 = 150

线圈长 = 3cm

$$\text{线径} = \frac{3}{150} = 0.2\text{mm}$$

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。

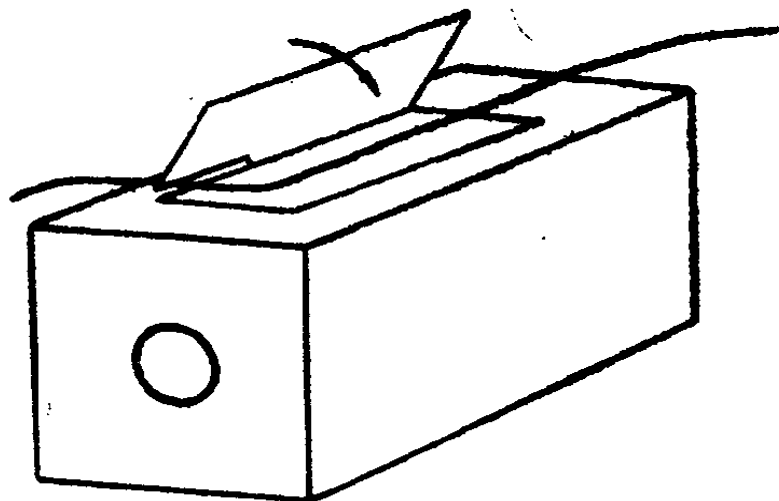


图 3·5

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

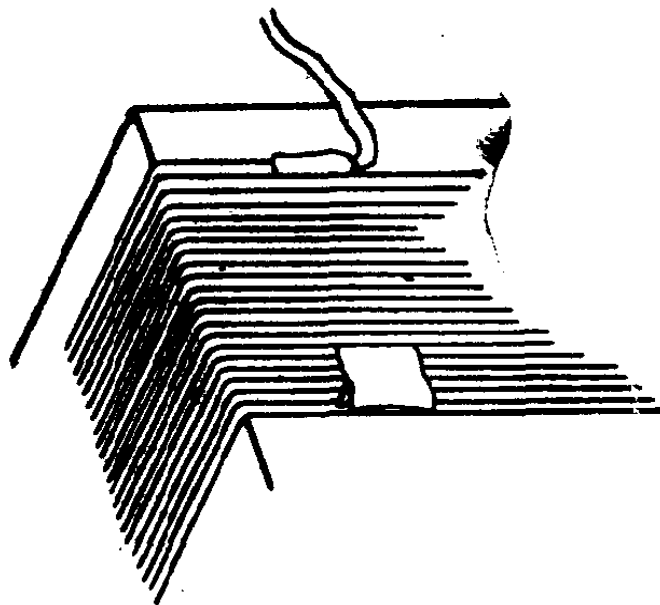


图 3.6

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。

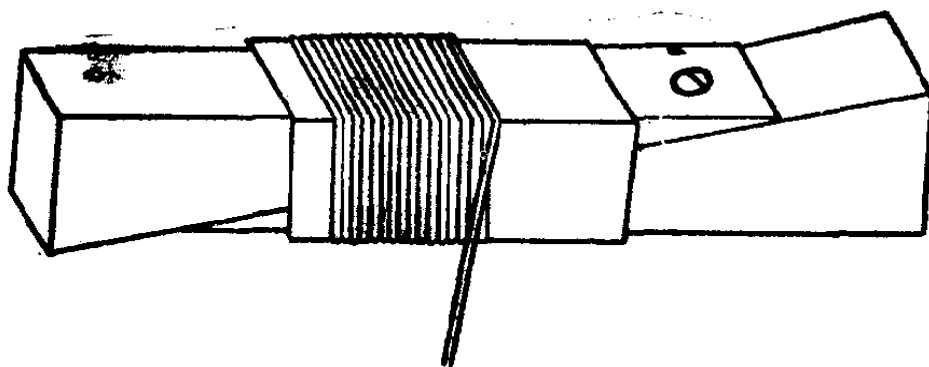


图 3.7

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。

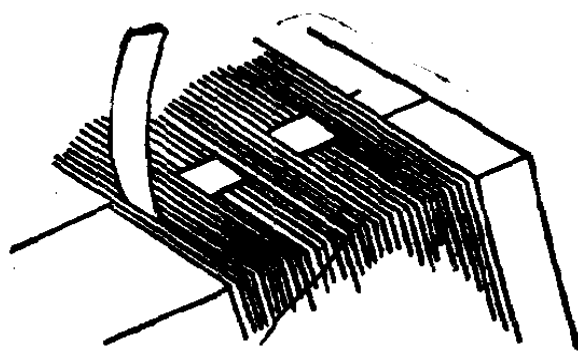


图 3·8

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，可是线圈最外一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。

屏蔽层一般都采用很薄的铜皮。在变压器初级绕组绕完之后，垫上一层绝缘纸，包上一层铜皮，铜皮外再包上一层绝缘纸，然后再把次级线圈绕上去。在铜皮上要事先焊上引线，和一般线圈引线一样引出来（见图3·9）。

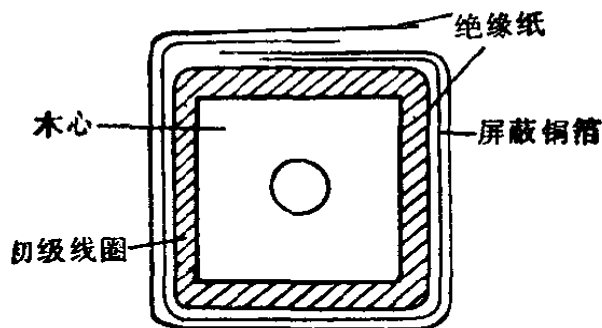


图 3·9

加屏蔽层要注意的是铜皮首尾不能接触。虽然铜皮很薄（例如0.02—0.03毫米），但是面积大，头尾相接将产生很大的短路电流，烧坏变压器。

如果一时搞不到铜皮，也可以用香烟盒里的锡纸，坏纸介电容中的锡箔等等代替。不过引线无法焊接，只能压在锡箔中用下一层线圈压紧。压在锡箔中的引线头要弯一个180°的弯，否则绕好变压器后引线很易抽掉。

假若手头上没有这些材料，也可以用细导线在初级线圈外边绕上一层线圈，一端引出来，另一端就空在层间不接。不过这种方法效果不如前者。

屏蔽层引出的导线一般都应接地，如果变压器是装在金属底盘上，很多是把引线就夹在铁心当中。

附带说明一点，在有些高精度或高增益的电子设备里，电源变压器有多层屏蔽，并且屏蔽层的引线按不同工艺要求，连接法也不同。如遇到重绕这些变压器时，要随拆随记它的结构特点，绕成后按原样连接，以保证原来的工作质量。

六、经常遇到的几个特殊问题

(1) 接线：绕细线时很容易断线，需要重接，绕粗线时也常有需要接线的时候。接线时要先仔细刮掉两线头的漆皮（10毫米左右），然后镀锡，再摆好相互搭焊。焊好后，把接线的焊头包上一段纸片就可以继续绕下去。最好把接头都掌握在有引出线的那一侧面。

假若搭焊掌握不好，可以绕接后再焊，但是接头部分必须放在有引出线的一侧面（或对面一侧），且占导线直径三倍的空间。

(2) 破皮：遇漆包线破皮要在破皮部位压上一层纸，使破皮处左右绝缘。绝缘要求只是线圈一圈的电压差，所以可以用很薄的纸，不影响排线整齐。

(3) 多线并绕：遇到没有合适线径的导线，可以计算一下用两根或多根并绕。双线并绕最好两线线径相同，至少要非常相近，除非铁心窗口有足够余量，否则要浪费很多的空间。在不得已的情况下，两股或多股不同线径的线可以各绕一个绕组，绕好后再并接使用。但要注意各绕组的位置应对称，数要保持一致，并把较粗的一组绕在里层。当然这种方法效果不很好。

七、使用绕线机绕线

使用绕线机绕线，要先把绕线机固定在工作台上，然后把线框和带有中心孔的木心套在绕线机转轴上，上好夹紧螺母，并注意个位计数盘和百位计数盘都要先调到零。一般绕线机手柄转一圈，线圈转四圈，在绕粗线时不易绕紧，可把手柄卸下来直接装在机轴上，转一圈绕一圈，虽然速度慢了但是绕线的拉力却强了。

绕线时要注意计数盘，百位计数盘每小格就是100圈，很容

易看错，特别是齿轮松动已经磨损的绕线机更要注意。

为了计数准确，夹紧螺母一定要旋紧，在整个绕制过程中不能松脱而使绕线机有空转现象。一旦遇有断线也不要急于接线而忽略了圈数，往往这时线圈松散，要根据情况估计好圈数后再处理断头。

八、检验

变压器线包绕好后要进行检验，以免装上铁心以后有问题再返工。要检验的内容有线圈的通断、圈数、绝缘和线间短路等等。

在没有专用仪器的情况下，检验圈数很困难，只有绕制时多注意计数，待装好变压器后再测量电压。检验通断比较容易，用万用表电阻档就能测量。对一些断头较多，或使用旧线的线圈最好一边测一边轻轻敲打，给它一些振动看是否可靠。各线圈之间要有很好的绝缘性能，如果没有专用仪器，可按图3·10所示的简单电路进行测量。测量时万能表置于500伏直流电压档，两测量端短路电表约指300多伏。用这两端去测量两线圈间的绝缘电阻表针应不摆动或稍有摆动。如果表针有指数，

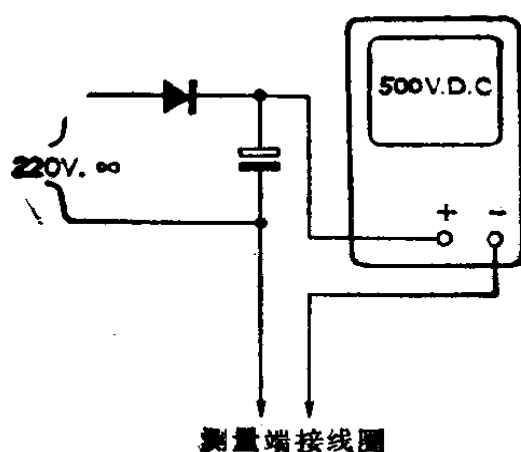


图 3·10

根据指出的电压数可以用下式计算一下大约的绝缘电阻值

$$R = \left(\frac{300}{V} - 1 \right) \times \frac{R_m}{2}$$

式中 R_m : 万能表内阻 (Ω/V)

V : 万能表电压读数 (V)

R : 绝缘电阻 ($k\Omega$)

由于线圈没有经过绝缘处理, 这时测出的线圈间绝缘电阻, 一般不会很高。但有两种情况要注意: 一种是表针读数逐渐上升, 甚至测量时间稍长就出现突然上摆, 这都是耐压不足的击穿现象。再一种情况是读数太大, 计算后绝缘电阻只有几兆欧或几百千欧, 这样差的绝缘, 经处理后也不可靠, 应该检查原因给予解决。

检查匝间短路需要有专用设备。绕制时使用旧线较多的线圈, 检验匝间短路更为必要, 没有条件时可以按图3·11所示电路自制简单设备。

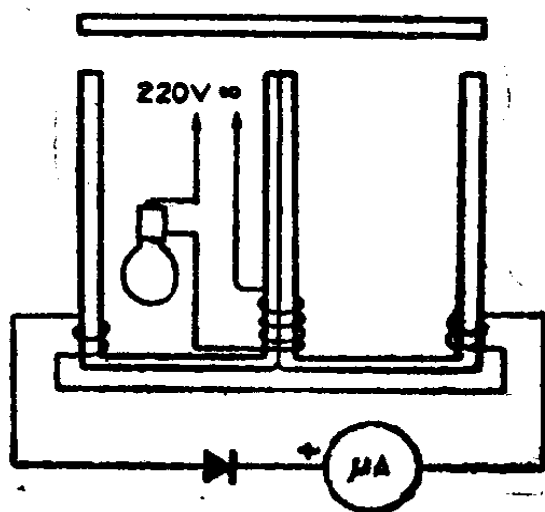


图 3·11

用两条扁铁条, 例如 $5 \times 20\text{cm}$ 的扁铁, 弯成两个U形, 并排成“山”字, 在中间的双层扁铁上绕200至300圈的线圈, 两

侧的扁铁上也各绕100至200圈，并反方向串接起来，再用一条扁铁平放在“山”字头上。把二极管和微安表（可用万能表弱电流档）按图接好，在中间线圈上加上6伏左右的交流电压，或串接一只220伏60至100瓦的灯泡接在220伏交流电源上，这时微安表应无读数。把变压器线包套在左右两侧的任一扁铁上，如微安表有读数或反转都说明有线圈短路。

这个简单设备的工作原理是利用中间线圈通电后使铁片产生的磁通通过两侧线圈产生电压，两线圈反接电压差等于零，微安表无指示。一旦在两侧任一柱上套一短路线圈，这线圈中的短路电流破坏了两侧磁通的平衡，也就使电压差不等于零，微安表就有了读数。

具体制作时往往出现不套线圈也有读数或套不套线圈读数都不变等现象。这是在制作上或材料上没有满足完全平衡的条件。可以适当增减某一侧的线圈使读数最小。再用一个短接的线圈套上，试验一下表针的变化。如果制作得合适不加上面的铁片就能测试。

铁片截面过小时要增加中间线圈圈数。若用220伏交流电，线圈发热，应换接小瓦数灯泡或换粗线绕中间线圈。

第四节 变压器的装配与浸渍处理

绕好了线包已经完成了变压器制作的大部分工作。而铁心的装配和处理也是不可轻视的工序，如果稍不小心将会影响变压器的质量，甚至功亏一篑，把绕好的线包搞坏。

一、装铁心

变压器的电磁感应作用主要是借助于磁力线回路，磁回路

是否畅通无阻，关系着变压器效率的高低。装铁心就是给变压器提供良好的闭合磁路。硅钢片或C型铁心都是事先早已加工成形的成品，装铁心时就要注意在拼接处不要有空隙。E型硅钢片和三角型硅钢片有三个磁路接口，心式铁心和CD型铁心有两个磁路接口，还有些用两种剪切尺寸的硅钢片拼凑的心式铁心（图3·12）和ED型铁心都有四个接缝处。装铁心时在这些地方不能有油漆、蜡屑或其他污物而使磁路闭合不严，增加

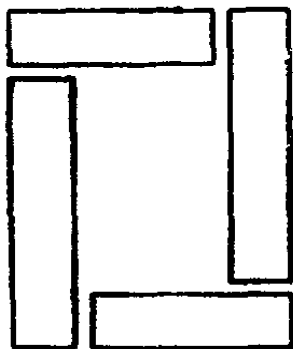


图 3·12

磁回路的磁阻，或造成漏磁现象。功率较小的电源变压器在浸渍处理时往往连同铁心一起浸渍，希望接缝处最好密合到不被浸渍溶液渗入的程度。

装铁心时还要注意的是不要划破线包绝缘层，包括最外层和铁心心柱部分的线包内侧。在线包绕得比较大，硅钢片窗口紧张，或者线包框架做得比较薄的情况下更要小心。

1. 插片式铁心

为了弥补接缝处可能有的漏磁现象，插片式铁心都方向交替地叠累，使接缝两侧紧靠的都是整片硅钢片。当装入E型铁心时，首先从线包一侧插入E型片，再从对侧插入I型片，下一次从对侧先插E型片而从这一侧插入I型片，这样反复地一直插到要求的叠厚尺寸。为了方便，插片时可以一次插二、三片。体积很小的变压器插入片数不多，最好一次只插一片。但

不论一次插几片，E型片和I型片都必须对应相等。

具体操作时往往是交替地由两侧先插进E型片，最后再在相反方向插入I型片。当插片至将近插满时，线框中空隙已很小，已插入的硅片又都是松散状态，很不容易再把应插的其余硅钢片插入并插得很紧。这时可以把已插好的任意两片相同方向的E型片，从片间撬开一点缝隙，将一片待插的E型片挤进缝隙，轻轻地以木棒敲进。可以用这种方法连续在不同部位插完全部应插的硅钢片。

为了使用这种中间夹片的插片法，开始插片时就可以有意识地在铁心中间位置安排好几组两片方向相同的E型硅钢片，以备最后插片使用。

应当注意的是在敲进夹片时，必须保持夹片的垂直以及两侧与已插好的硅钢片对齐。假若偏斜插入，硅钢片的舌片可能会划破线框内侧的绝缘层，严重时可能会割断线圈。

在翻修旧电源变压器时，可能还会遇到三角形的硅钢片。插这类铁心时要同时对插，不能先插某一侧，并注意斜口方向要每层交替变换。中心舌片上下层之间容易交替，插片时应注意。这类铁心也能用中间夹片的方法插紧。

如果线圈框架制作得过于宽裕，全部铁心片插完还有空隙或铁心还很松动，应该再设法插入一些充填用的胶木片等耐热的绝缘物质。

翻修或制作剪切硅钢片心式变压器时，装铁心前要把应装入线包的硅钢片上下错开一个硅钢片宽度叠至要求的尺寸，设法夹紧后捆上布条或厚纸条（如图3·13），这样制作两个，然后分别装入两个线包，再把上下的横片逐片或左或右地插进两个装好线包的铁心上。最后再用木棒敲打整齐。

2. C型铁心

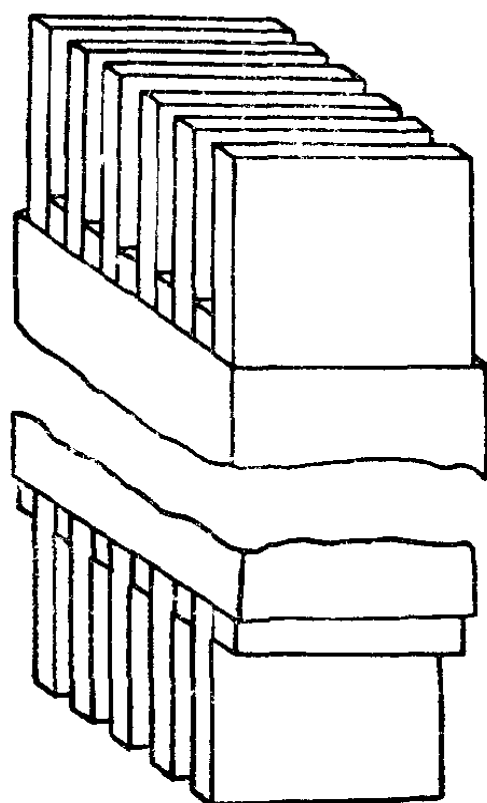


图 3·13

C型铁心的硅钢片都已粘合在一起，形成了两块(CD型)或四块(ED型)“C”字形的铁块，装配的关键是要求铁心的密合。C型铁心是用硅钢带卷起来再从中切断的，原则上要使用切开时成对的两块进行装配，以避免接缝处不能密合。组装时先要把接口处清理干净，检查一下对接后接缝处有没有空隙。组装后要用一片钢质的长带穿过线包把两块(CD型)或直接把四块(ED型)C型铁心紧紧的捆在一起。成批生产的变压器都用专用的工具捆紧钢带，再把钢带两端互相折叠扣紧。偶尔绕制一个或对成品修理重绕时，收紧钢带就成为不好解决的问题。在很多情况下，可以把钢带的长度适当截短少许，两端各打一孔，把打孔部分各向上折90°角，穿入长螺钉套上螺帽旋紧。虽然外表不如成品整齐，但应用效果却是一样的。

二、装紧固架

给变压器装上紧固架可以把插在线包里的硅钢片夹紧，使它在通电后不因磁场的变化而振动。硅钢片振动的变压器会发出嗡嗡的噪声，同时空载电流增大，使得变压器在满负荷使用时温度升高，甚至烧坏。紧固架的另一作用是便于把变压器装入使用的设备。

紧固变压器的方法很多，体积较小的小功率电源变压器最好不采用在硅钢片四角打孔再用螺钉夹紧的方法。因为在冲孔的部位磁力线被割断，其周围的磁通密度增加，会使铁心增加损耗。一般小功率变压器在浸渍处理时都连同铁心一起处理，烘干后铁心已粘为一体，不存在松动现象，紧固架只作为装机的支撑架，一般用护罩式或紧固架式。

护罩是用厚0.5~1.0毫米的铁片做成，如图3·14所示。铁片按虚线折转再包在变压器上，有关尺寸根据变压器大小决定。装好后要卡紧。

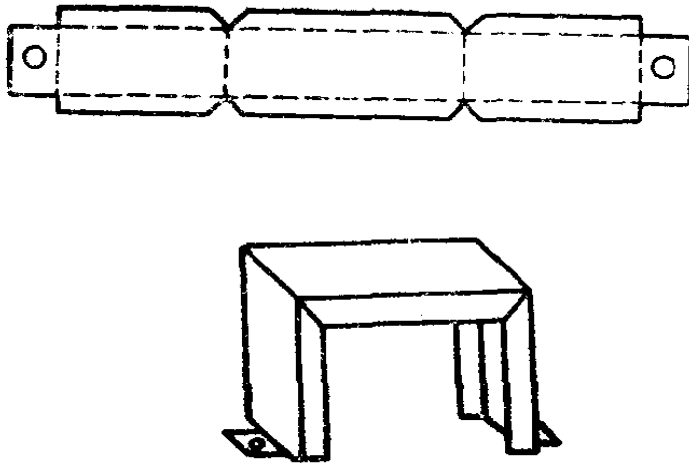


图 3·14

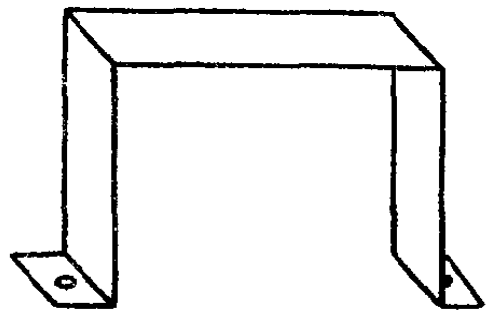


图 3·15

紧固架是以1.0厘米左右宽的铁片长条做成，用它在变压器两侧夹紧，以便能装在使用设备的底板上（如图3·15）。

较大功率（例如200瓦以上）的电源变压器，体积较大，可以用硅片四角冲孔的方法紧固。穿过四个孔的螺钉最好加上套管，两端加上绝缘垫片不使铁钉接触硅钢片。这样可以避免有不必要的涡流产生。

三、浸渍处理

变压器装好经过简单测试无误后，就可以进行浸渍处理了。

过去有些变压器包括工业生产的变压器都不做防潮处理。经过长时间的使用证明，不经浸渍处理的线包是不能耐久的。常见的故障是导线发霉，长绿绣，以至霉断。再有的现象是绝缘强度降低，漏电加剧。随着工业的发展，浸渍溶液的不断改进，浸渍后的变压器寿命可以大大提高。

浸渍的作用首先是增加防潮性能，提高绝缘强度。变压器中使用的绝缘材料大部分是纸张，纸张能吸收空气中的潮气，于是绝缘材料就有了漏电的可能。当变压器长时间地通电后，由于漏电流的存在，使铜导线和漏电层之间产生了近似电解的作用，逐渐地腐蚀铜线，这种现象恶性循环地发展下去，会把铜线腐蚀断。经过良好的浸渍处理后，浸渍溶液渗透到线圈间缝隙和纸张纤维里，避免外界环境中的潮气甚至更严重的沿海盐雾或其他带腐蚀性的气体侵入。在正常状态下使用这样的变压器，其寿命是很长的。

浸渍处理的另一个作用是加固线包的机械强度。经过良好的浸渍并烘干的变压器，其内部线圈都粘合在一起，不会因外加的各种震动冲击而移动脱落。如果有设备条件，或变压器体积不大，最好连同铁心一起浸渍，这不仅增加了线包和铁心间的绝缘效果，也使硅钢片之间互相粘合，在使用中不致产生噪

声。另外，由于经浸渍又烘干后的变压器已成为一个整体，其散热性能远超过不加处理的变压器。

1. 浸渍溶液的准备

第一章表1·2列出了几种常用的绝缘漆，而在实际应用中还有很多其他的种类，如果变压器的工作电压不高，也可考虑使用其他代用的材料。从一些老资料中可以发现，过去曾使用过凡立水、蜡克漆、松节油、虫胶酒精溶液（漆片）、石蜡、变压器油等等材料，现在看来都各有长短。如果当前找不到要求的绝缘漆，只要变压器工作时温升不高，不妨使用融化的石蜡，或者试用木工使用的酚醛清漆和醇酸清漆。

2. 烘干

偶尔绕制一个变压器时，往往容易忽略烘干这一个工序。通常在浸渍前要先烘干线包绝缘材料中的潮气，浸渍后再烘干绝缘漆。

如果一个线包潮气未干就浸进绝缘漆，它的效果反而不好。必须先把线包放在85℃左右的干燥空气中烘烤4—5小时，较大的线包还要时间长些。烘干需要烘箱，如果不具备条件，可以根据变压器大小，找一个适当的木箱把变压器挂在中央，四周装几个大瓦数灯泡，用白炽灯的温度去烘干线包。如能有小电炉当然更好，不过要注意不能把线包烤焦。

浸漆后的变压器应该再次烘干。正规的工艺要求是先用较低温度烘一段时间再用较高温度烘一定时间。这样可避免由于线包外皮先被高温烘成硬皮而影响线包内部的干燥。在条件不具备的情况下可以用同一种温度烘烤，时间加长些，一般5—6小时。具体的时间还要根据浸液的性质和变压器大小来决定。

浸漆后的变压器要滴漆后再烘烤，若使用电炉应注意安

全。

浸蜡后的变压器不需要再烘干，冷却后就能使用。

3. 浸渍

已烘干的变压器或线包最好还未冷却就浸入浸渍溶液里，以免潮气浸入，并且热的线包也容易被渗透。

(1) 浸漆

为了使绝缘漆稀一些，可以先对它稍稍地加一点温度，这样已加热烘干的变压器或线包浸入时也可不至骤然冷却。变压器要全部浸没在漆里，这时会看见有不少气泡从变压器中冒出，这是绝缘漆渗入线包挤出了其中的空气。使绝缘漆保持着一定温度，并不断摆动被浸没的变压器或线包，直到没有气泡再继续冒出，几十瓦的变压器至少需要半小时。不冒泡后再浸十几分钟才能取出滴干余漆去烘干。

大批生产的变压器都用真空浸漆，以求绝缘漆渗得更深更透。浸渍处理个别变压器只能靠加长浸泡时间和不断晃动来争取浸透。

曾有人把盛有浸泡着变压器的绝缘漆的小铁桶放进做饭的高压锅里，加盖后用不回气的自行车气筒从锅盖气孔向锅内打气，使锅内气压增高（实际上不会很高），打一阵后开锅一次，然后再打。每次开锅特别是开始几次开锅能看见很多气泡冒出。往复几次后效果比只简单浸泡好。

(2) 浸蜡

这是很简单的浸渍处理，如果所绕变压器使用一段时间还有重绕的可能，最好采用浸蜡处理，因为它不会损伤漆包线，也容易拆卸。

各种石蜡的熔点有所不同，硬度也不一样，使用时可以根据需要加入一些混合物。如果要求硬度强一些可以加入些松

香，例如用于浸渍线框。如果希望浓度稀可以加入一些凡士林。

把准备好的蜡先完全融化，再把烘干仍带有温度的变压器放入融蜡中，这时会有很多气泡冒出来，保持温度再不断翻动变压器，直到没有气泡逸出，再泡几分钟就可提出凉干冷却使用。

要注意的是不要把线包煎糊。

第四章 几种特殊电源变压器的设计

第一节 自耦变压器

自耦变压器和普通电源变压器比较起来有很多优点，可是由于它的次级不能和供电电网隔离，在很大程度上限制了其使用。长期以来它一般只用于电压调节或在实验室中使用。

与普通相同功率的电源变压器比较，自耦变压器使用的材料，包括铜线、铁心和绝缘材料等都比较少，因而成本低价格便宜。在采用相同的硅钢片和相同的磁通密度条件下，自耦变压器的磁化电流较小，损耗较低，因而效率高。特别在初级和次级电压相差不很大时这些优点越为明显。

普通电源变压器至少有初级和次级两个线圈，次级线圈通过电磁感应才有电压输出。而自耦变压器只有一个线圈，在输出和输入之间不仅有电磁感应的耦合还直接有电的联系。负载上的很大一部分功率直接取于电源，所以变压器的功率可以减少很多。

例如现在需要有242伏 1 安的交流电来供给某一设备，而供电电压只有220伏。如果使用普通电源变压器，并假设其效率为10%，则需要242瓦的功率。

现在绕制一个初级220伏次级22伏电流 1 安的22瓦普通电源变压器(见图4·1(a))。然后把初次级串接起来(图4·1(b))，这就等于把变压器的次级电压22伏又串联在供电电源220伏上，形成自耦变压器。可以认为供给负载的电压有220伏取自电源，有

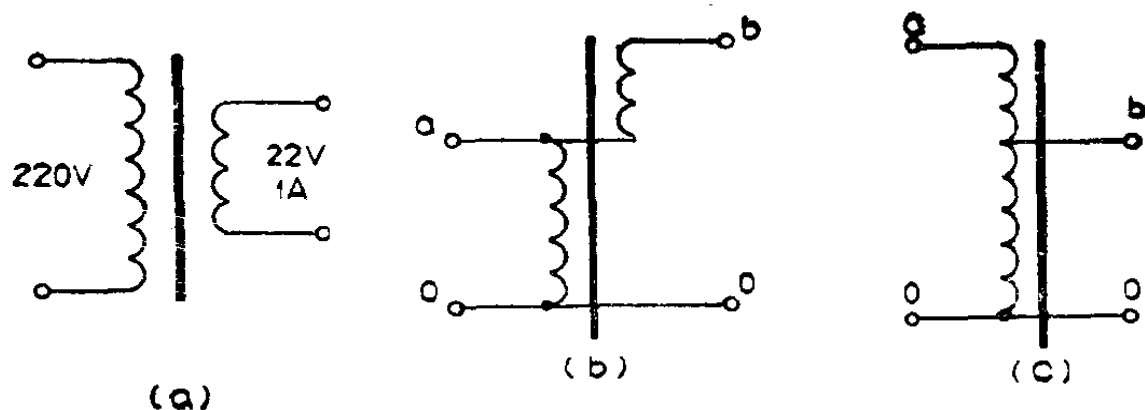


图 4-1

22伏取自变压器次级。串接后供电电流有1安供给负载，另有0.1安供变压器在次级感应出22瓦电功率。变压器的使用功率是 $242\text{V} \times 1\text{A} = 242\text{W}$ ，比不串接前增加了十倍。

应要注意的是变压器的使用功率增加了十倍，但不等于取自供电电源的功率有所节约。例中变压器初级线圈中只有0.1安的电流动，但是还有1安的电流动过次级线圈，由于供电电源与次级线圈和负载连接则全部供电电流共为1.1安，消耗的电源功率仍为 $220 \times 1.1 = 242$ （瓦）。

由上面的举例可以看到，同样标称功率的自耦变压器的体积、重量和功率损耗都要比普通电源变压器小得多。但是由于自耦变压器初次级电路直接连接，在使用中接地不便，因而影响了它的广泛使用。

一、自耦变压器的设计

设计普通电源变压器时，它的结构尺寸取决于标称功率，而自耦变压器的结构尺寸主要决定于它的传递功率 P_t 。在计算其它数据前先决定传递功率是很必要的。

对于降压自耦变压器（图4-1（c））

$$P_t = (1 - x) \cdot P_2 \quad (4-1)$$

式中 x ——自耦变压器转换系数, $x = \frac{u_2}{u_1}$ 。

升压自耦变压器 (图4·1 (b))

$$P_t = \left(1 - \frac{1}{x}\right) \cdot P_2 \quad (4-2)$$

由以上两式可以看出, 自耦变压器的转换系数 x 越接近于 1, 也就是输出电压越接近于输入电压, 自耦变压器的传递功率越小。

在设计自耦变压器时传递功率 P_t 相当于普通电源变压器的标称功率 P_0 。一般仍把输入端接连的那部分线圈作为初级线圈, 见图4·1 (b) 和 (c) 中的 ao 段线圈, 而输出接负载的那部分线圈作为次级线圈, 见图4·1 (b) 和 (c) 中的 bo 段。由图中可以发现, 不论升压变压器或降压变压器都有初次级共用的一段线圈, 如图4·1 (b) 中的 ao 段和图4·1 (c) 中的 bo 段, 和共用线圈接连的还有一段串接线圈, 如图4·1 (b) 中的 ba 段和图4·1 (c) 中的 ab 段。

设计计算时可以分别计算初级电流和次级电流, 初次级的共用部分线段中, 由于初级电流和次级电流方向相反, 可按两者的差来计算其电流。其余算法和普通电源变压器一样。

二、设计举例

有一设备需要250伏100瓦的供电, 而电网电压只有220伏, 设计一个自耦变压器。

(1) 先按 (4-2) 式计算传递功率

$$P_t = \left(1 - \frac{1}{\frac{250}{220}}\right) \times 100 = 12(\text{W})$$

设磁钢片磁通密度 $B = 12500\text{T}$, 电流密度 $j = 2.5\text{A/mm}^2$, 变压器效率忽略不计。

(2) 按 (2-4) 式计算铁心尺寸

$$S_0 S_c = \frac{(P_1 + P_2) \times 10^6}{4.44f \cdot B \cdot j \cdot k m}$$

考虑 $P_r = P_0$, 而 $P_0 = \frac{P_1 + P_2}{2}$ (式2-6)

$$\therefore S_0 S_c = \frac{12 \times 2 \times 10^6}{4.44 \times 50 \times 12500 \times 2.5 \times 0.25} \\ = 13.8(\text{cm}^4)$$

选用GE—16型铁心, 舌宽16mm, 窗口面积 2.8cm^2 。计算叠厚31mm, 取32mm。心柱截面 5.12cm^2 , 应做线框内径为 $16 \times 32 \times 28\text{mm}$ 。

(3) 按 (2-9) 式计算圈数

自耦变压器线圈的压降较小, 取3%, 并且升压变压器次级圈压降只算ab段 (图4.1 (b))。

$$\text{初级圈数 } N_1 = \frac{45 \times 220}{5.12 \times 1.25} \times 0.97 = 1500(\text{圈}) (\text{ao段})$$

$$\text{次级圈数 } N_2 = \frac{45 \times 250}{5.12 \times 1.25} = 1758(\text{圈}) (\text{bo段})$$

$$\text{ba段圈数为 } (1758 - 1500) \times 1.03 = 266(\text{圈})$$

(4) 按 (2-8) 式计算线径

$$\text{先计算次级电流 } I_2 = \frac{P_2}{u_2} = \frac{100}{250} = 0.4(\text{A})$$

$$\text{初级电流 } I_1 = \frac{P_1}{u_1} \times 1.05 = 0.48(\text{A})$$

初级线圈ao段为初级次级共用, 通过的电流是两者之差即 $I'_1 = I_1 - I_2 = 0.48 - 0.4 = 0.08(\text{A})$

∴ a_o段线径为 $0.7\sqrt{0.08} = 0.2$ (mm)

ba段线径为 $0.7\sqrt{0.4} = 0.45$ (mm)

(5) 验算

线框高度 $h = 28\text{mm}$, 取 $28 \times 0.9 = 25$ (mm)

a_o段每层圈数 $Q_{a_o} = \frac{25}{0.2} = 125$

需要层数 $Z_{a_o} = \frac{1500}{125} = 12$

层间用0.05mm厚绝缘纸

a_o段厚度 $M_{a_o} = 12 \times (0.2 + 0.05) = 3$ (mm)

ba段每层圈数 $Q_{ba} = \frac{25}{0.45} = 55.6 \approx 55$

需要层数 $Z_{ba} = \frac{266}{55} = 4.8 \approx 5$

ba段厚度 $M_{ba} = 5 \times (0.45 + 0.05) \approx 3$ (mm)

取框架厚度和与铁心的间隙 $M_0 = 2\text{mm}$, 则

总厚度 $M_t = M_{a_o} + M_{ba} + M_0$
 $= 3.0 + 3 + 2 = 8.0$ (mm)

铁心窗口厚度为10mm, 能容得下。

三、调压变压器

调压用自耦变压器是当前使用得比较广泛的设备, 由于它的输出电压连续可调, 所以在电压有变化或者需要不断变换电压的场合应用很广。

调压变压器的结构相当于一个有活动抽头的自耦变压器, 原理图见图4·2。它是使用一适当宽度的硅钢片卷成一定厚度的圆筒, 再把漆包线沿内外筒壁逐圈排在圆筒上而绕制成的。

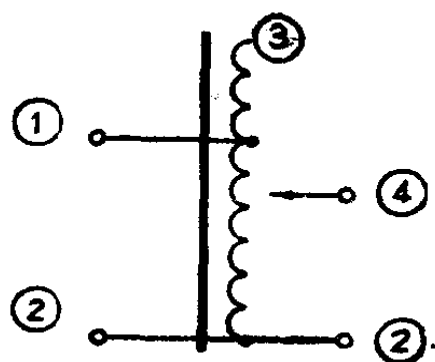


图 4·2

筒壁的厚和高由线圈所需铁心的截面积决定。在圆筒式铁心的一个端面上绕制前就先垫上一层平整的绝缘材料，以便线圈绕好后有一个端面表面很平。用粘合强度高的绝缘材料，如环氧树脂等等，把线圈粘牢后，再把这一端面的漆包线漆皮平整地磨去，露出铜线。这样，用一只碳刷在铜线上滑动就可以引出一个连续变化的输出电压。示意图见图4·3。

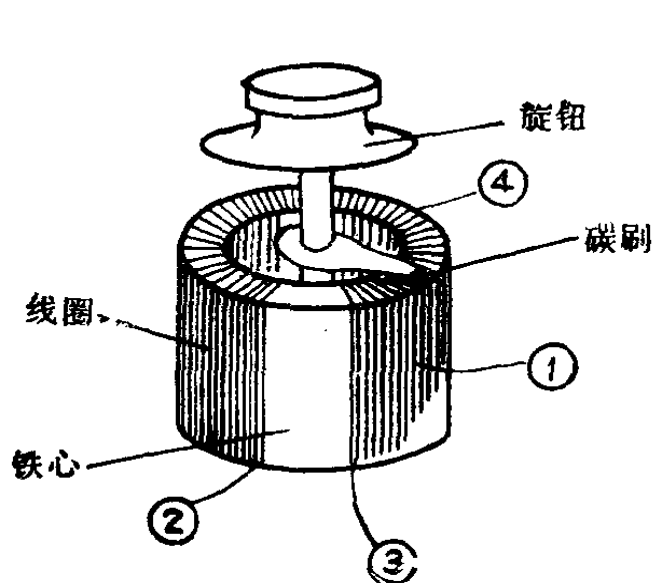


图 4·3

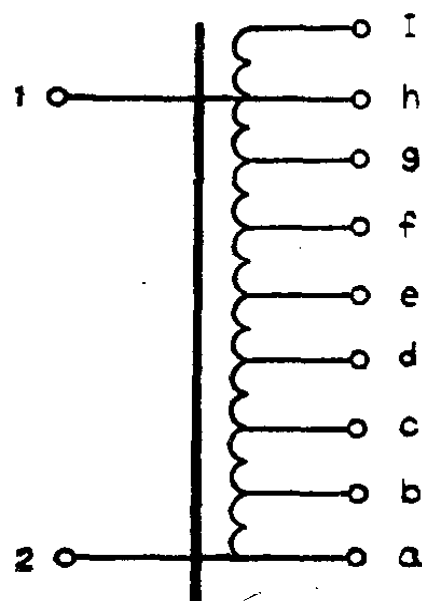


图 4·4

设计这种变压器时，因为它输出的电压连续可调，前面所讲的计算方法都不能使用了。可先假设连续可调电压有若干段，如图4·4所示，从1、2两端输入电压，由ad输出，形成

一个降压自耦变压器。不难看出1、2是初级线圈，ad段是次级线圈。在自耦变压器里总是有一段初次级共用的线段，如ad段；还有一段和共用线圈串接的线段，如dh线段。在降压式变压器里串接线圈接在初级里，因此串接线圈电流 I_s 等于初级电流 I_1 。在升压变压器里串接线圈接在次级线圈中，因此在串接线圈中的电流 I_s 等于次级电流 I_2 （参看图4·1(b)）。不论升压或降压的自耦变压器，其共用线圈里的电流 I_p 不管初次级电流谁大谁小，永远等于两者之差。归纳起来：

升压变压器：

$$I_s = I_2$$

降压变压器：

$$I_s = I_1$$

不论升压或降压：

$$|I_p| = I_1 - I_2$$

在图4·4中有很多线段可以选用，其中除1、2为初级线圈外，只有ab段永远是共用线圈，hI段永远是串接线圈，其余各段都有可能做串接线圈也可能做共用线圈。只要改变输出的接头，不但有的线段要改变串接或共用的性质，并且全部线段的电流都要引起变化。这种变压器是允许任意选用接点的，必须让变压器适应各种可能的情况，这就给设计工作带来了麻烦。

设计计算主要是先决定它的传递功率 P_t ，其它的数据可以按普通电源变压器的计算去进行。经过一些数学推算可以证明，当输出的最大电流决定以后，则可调变压器的传递功率可按每个线段可能的最大功率总和的一半来计算。对于滑动接点的变压器，可以认为是由无数个很短的线段组成。经推算后可得传递功率为

$$P_t = \frac{3}{8} I_m u_1$$

式中 I_m ——次级输出的最大电流 (A)

决定 P_t 以后其他参数都与普通电源变压器一样计算。因为滑动接点可以在任何位置，线径就必须按最大电流计算，线圈只用一种规格漆包线从头绕到尾。这种变压器的散热条件较好，电流密度尽可取得大一些，一般可取至 $j = 5 \text{ A/mm}^2$ 或 $j = 6 \text{ A/mm}^2$ 。

还应指出当用手工绕制或修复这类变压器时要相当地注意，因为在筒形铁心端面排线必须平整，而圆筒铁芯内径和外径周长不同，内径的排线会有重叠而外径每圈还稍有间隙。如果遇到一个调压变压器有部分线圈烧坏，可以小心的用相同线径的导线绕好，再把端面磨光，如果全部烧坏或重新设计制作，以手工绕制是非常困难的。

四、调压变压器的非正规使用

当前国内生产的调压变压器的规格一般为输入220伏/110伏，输出0—250伏。但是在某些地方有时供电电压很低，按正常方法使用调压变压器调至最高输出，电压还不足220伏，不能满足一般设备使用。此时就涉及到调压变压器的非正规使用。

(1) 输出输入反接

在供电电压很低时，可以先把旋钮顺时针拧至最大，然后在原来0—250伏的输出端接上输入电压，把原来220伏的输入端作为输出接上负载。这时负载上获得的电压是供电电压的0.88倍。逆时针旋转调节旋钮，就可在负载上获得所需的更高的电压。

之所以能够这样使用，其道理由图4·2中不难看出。从输出端送入电压，在输入端接负载仍然可构成升压式的自耦变压器。由于绕制调压变压器的铜线线径都是按最大允许电流计算得到的，且线圈是用这同一种线径的铜线绕成的，所以输出、输入对换也无影响。所不同的只是原来输出端接滑动接点，现改为输入端接滑动接点，原来滑动点向上滑输出电压增高，反之降低。现在向上滑负载电压降低，向下滑负载电压升高。但是过分向下滑动会造成严重事故。所以使用这种接法的调压变压器时有几个问题一定注意到。

首先必须有电压表等电压监视设备，防止由于不慎而把旋钮扭动过多，烧坏变压器，也损坏使用设备。

其次，调整电压时必须非常缓慢，因为正常使用时输出电压的增减和旋钮的角度成线性关系，而反接以后旋钮的角度不再和输出电压增减保持正比，滑动点越滑到线圈下部，电压变化越大。

还有，不能使用这种办法把电源电压提高过多。要注意所用调压变压器规定的最大电流，不论整个线圈中的任何部分在串接或初次级共用时都不要达到电流极限，应保持一定余量。并且要有安全保护装置，例如安培数恰当的熔丝（保险丝）等，以防一旦供电电源恢复正常时因电压过高烧坏设备。

（2）调压变压器串用

在条件许可的情况下，遇到供电很低时，可以把两台调压变压器串起来使用。就是把第一台的输出接在第二台的输入，再由第二台的输出接负载。这种作法比前一种安全得多，但是每台变压器升压不多，大约是14%，两台串用也只30%。若供电电压低于170伏时，两台调压变压器串接输出也达不到220伏。

第二节 适应多种供电电压的变压器

由于各种原因往往需要电源变压器能接用不同的电源供电电压，例如电压长时间地偏高偏低，使用设备的环境范围里供电电压不同于供电标准等等。另外在一些进口的设备里，厂家为了争取国际市场，给变压器输入端设置了多种电压接头，在维修或重绕这种变压器时就需要多做些计算。

这种变压器的复杂接头只设置在初级一侧，次级接负载的功率没有变化，因此既要变换变压器的输入电压又要保持变压器的输出功率不变，就必须满足在初级线圈中每种电压对应的那一线段的电流各不相同，其线径也要有差别。图 4·5 的变压器线圈各线段的电流和应使用的线径如下表：

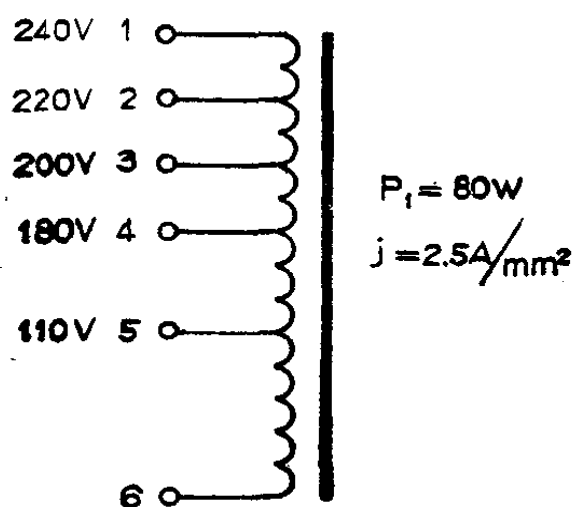


图 4·5

线 段	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	5 ~ 6
电 流 (A)	0.33	0.36	0.4	0.44	0.73
线 径 (mm)	0.4	0.42	0.44	0.46	0.6

绕线时可以用线径较粗的代替较细的，以求减少铜线的种类。甚至可用最粗线一直绕完，但要注意铁心窗口是否容纳得下。一些进口设备里的变压器多是使用为该产品而专门设计的铁心，余量很小，如果再加上重绕的绕制工艺问题，很可能造成线包过大。遇到这种情况时，如果可能，只须按使用变压器的环境电源电压绕制，而不必再设置多种电压接头。

在早期国产的电源变压器里有适合110伏和220伏电源的接头，它的初级线圈绕成两组，见图4.6。当使用220伏电源时把2、3端连接，电源接在1、4端上；当使用110伏时把1、2

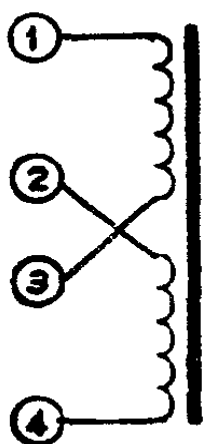


图 4.6

端连接，3、4端连接，然后分别接在电源上。这样安排既节约了铜线，也减少了线圈所占的空间。绕制这种线圈时应注意两组圈数应一样或相差很少，再有要注意绕线方向，不要弄错了接头。

第三节 次级线圈复合使用的变压器

有时为了简化电源变压器结构，可把电路中需要的各种不同电压绕组，复合起来绕成一个次级线圈，再用各种电路整流

出所需的不同电压，这样可以减少很多线圈绕组，简化绕制工艺。使用这种变压器的电路要有通盘的安排，不能因各种电压有公共端而影响电路的功能。不能使用公共端的电路部分仍需另绕线圈。

设计这种电源变压器要先把每个线段的电流电压分别计算，然后再把复合部分的电流叠加起来，以求出各线段的电流和圈数。绕制时按各线段的电流选用合适线径的漆包线。

例如，图4·7是一种小型示波器的电源变压器原理图，为了清楚，把它的整流部分也一并画了出来。

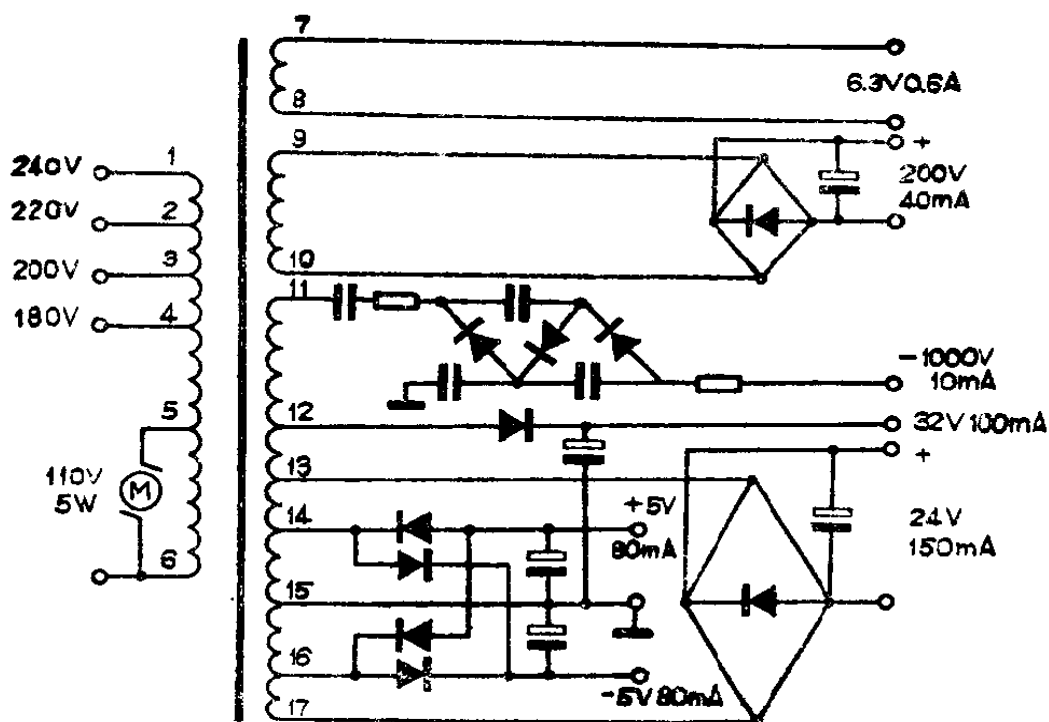


图 4·7

(1) 计算功率

线圈线段	工作性质	功率(W)	注
7、8	纯阻	$6.3 \times 0.6 = 3.78$	
9、10	桥式整流容性负载	$(200 + 1.4) \times 0.06 = 12.1$	$I_{\sim} = 1.5I_0$
11、17	三次倍压容性负载	$300 \times 0.06 = 18$	$I_{\sim} = 6I_0$
12、17	半波整流容性负载	$(32 + 0.7) \times 0.2 = 6.54$	$I_{\sim} = 2I_0$
13、17	桥式整流容性负载	$(24 + 1.4) \times 0.225 = 5.7$	$I_{\sim} = 1.5I_0$
14、15、16	正、负全波整流容性负载	$(10 + 0.7) \times 0.09 = 0.94$	$I_{\sim} = 1.1I_0$
5、6	降压自耦	$(1 - 0.5) \times 5 = 2.5$	
	总功率	49.5	

取 $\eta = 85\%$, $P_1 = 58.2 \approx 60(W)$

(2) 计算各线段电流和线径

线圈线段	电流(A)	线径($j = 2.5A/mm^2$) (mm)
1、2	$60/240 = 0.25$	0.35
2、3	$60/220 \approx 0.27$	0.37
3、4	$60/200 = 0.3$	0.38
4、5	$60/180 \approx 0.33$	0.40
5、6	$0.33 - 5/110 \approx 0.28$	0.37
7、8	0.6	0.54
9、10	0.06	0.18
11、12	0.06	0.17
12、13	$0.06 + 0.2 = 0.26$	0.36
13、14	$0.06 + 0.2 + 0.225 = 0.485$	0.49

续表

14,15	$0.06 + 0.2 + 0.22 + 0.09 = 0.57$	0.53
15,16	$0.09 + 0.225 = 0.315$	0.39
16,17	0.225	0.33

(3) 各线段电压

线圈线段	1,2	2,3	3,4	4,5	5,6	7,8	9,10	11,12	12,13	13,14 16,17	14,15 15,16
电压(V)	20~	20~	20~	70~	110~	6.3~	201.4~	268~	7.3~	19~	5.7~

第四节 超小型电源变压器

在有些使用电池的电子设备中，有时希望接用一个由交流供电的接续器。这些设备一般耗电很少，功率很低，再加上要求接续器做得体积小美观，因而对电源变压器也提出了必须体积小的要求。另外，有些业余爱好者为了满足自己设计的需要，往往用音频变压器使用的小铁心来绕制电源变压器，这种小铁心的截面积小至一、二平方厘米，甚至更小。此时如果仍按前面有关章节介绍的方法来绕制就很方便了。

在制作超小型电源变压器时，首先要考虑的是绝缘性能一定要可靠，以保证使用的安全。其次要考虑的是线包绕成后是否小铁芯窗口能容纳得下。通常可按以下步骤设计制作：

(1) 按前面介绍的方法计算功率、铁芯截面和线径。

(2) 初级线圈导线很细，绕线时不用逐圈排线，但要尽量绕平。也不用每层都垫绝缘纸，可以每绕一阶段后垫一层薄纸。如果漆包线可靠，并且估计窗口面积余量不大也可不垫纸。

因为层间不垫纸又不排线，制作线框时必须在两端加上护板，见图4·8。护板还要坚硬一些，免得绕线绕得很厚时把护板挤弯。

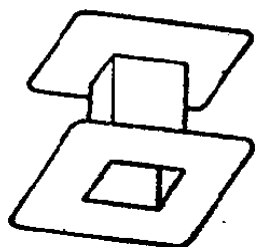


图 4·8

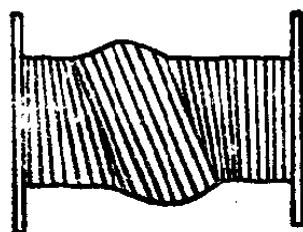


图 4·9

(3) 由于初级线圈圈数很多，线又很细，如果没有绕线机，用第三章的手绕方法要很耐心。最好不要像绕棉线球那样，缕着导线向线框里绕，那样每绕一圈铜线在轴向扭转一圈，并且也很容易绕成图4·9的形状，又难以绕平。这时最好想些其他代用的办法。例如把木心固定在手摇钻头上；固定在缝纫机头上；或者用方形带孔木心，把它穿在一个相当粗细的长棒上，再转动线框来绕线等等。

(4) 如遇断线，当然可以按前面介绍的搭焊方法焊接。因为线很细，也可以把应焊在一起的两线头擦干净，不必刮漆，扭在一起，用火柴烧热，使线头熔化成小圆珠而把两根线接在一起。操作时最好用钳子夹住，只留出少许要熔接部分，以免受热部分太长影响绝缘。初次熔接可能掌握不好，试两三次会成功的。

(5) 绕制小型电源变压器，计算圈数要考虑线圈电阻造成的电压降。特别是初级线圈，一般圈数都很多，铜线线径都很细，直流电阻也很大，所以比起正规计算所得的圈数可以少绕很多。表4-1列出了一些实验数据可供参考。表中所列数据

表4-1

铁心截面 cm ²	1 以下	1~1.5	1.5~2.5	2.5~3
电压降	>35%	35~25%	25~20%	20~17%

是供电电压220伏，按正规方法计算出线径，考虑电压降初级线圈可少绕的百分数。

(6) 由于使用铁心质量的不同，表4-1中所列数据是有余量的，绕制后可以根据试验再把圈数作些增减。试验的方法可以测量满负荷工作后的温升（参考第五章）。

(7) 最后要指出，这类变压器的电压调整能力很差，负载大小要影响电压变化。只能应用于负载变化不大或者在电路上有特殊安排的场合。

第五章 电源变压器损耗的校核

前面几章介绍了小功率电源变压器的一些基本设计和绕制方法。这一章将介绍有关变压器损耗的估算。为了避免繁杂的计算，将给出几组数据曲线。

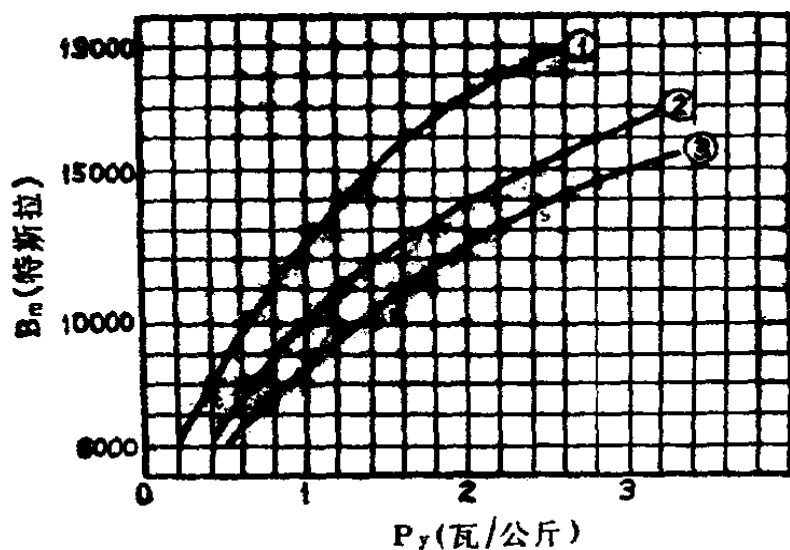
在设计过程中有关变压器损耗的参数数值都不是计算值而是经验数据，这些数据一般都有余量。特别是在已掌握了硅钢片的性能参数时，这些经验数据更不一定是最佳值。对变压器的损耗进行校核的目的就是印证一下所取的数据是否恰当，误差过大的还可以修正。这里介绍的方法是在已经完成了设计计算之后根据已得出的结果来核算的。如果在设计计算一开始就把校核中使用的各种条件都考虑进去当然也可以，但是这样会把简单的设计弄得繁杂得多。为使设计简便易行，一般常把这

步也可忽略不做的校核步骤单列出来。

第一节 变压器的铁损和磁化电流

一、片状铁心的损耗

变压器铁心的损耗，主要包括涡流损耗和磁滞损耗。计算方法可先从图5·1中按磁通密度查出每公斤铁心的损耗，再从



①—D310—0.35；

②—D42—0.35；

③—D41—0.35；

图 5·1

附录的标准铁心规格表中查出或估算出铁心重量，两数的乘积就是在负载状态下铁心的损耗功率。其计算公式为

$$P_I = G_I \cdot P_y \quad (5-1)$$

式中， P_I ——铁心损耗功率 (W)

G_I ——铁心重量 (kg)

P_y ——每公斤铁心的损耗功率 (W/kg)

在空载时，铁心的损耗还要高些，计算方法是先计算出空

载时的磁通密度，用 B_0 表示，公式为

$$B_0 = B(1 + m)$$

式中， B_0 ——空载时的磁通密度 (T)

m ——设计计算时因线圈内阻而增加的电压百分比 (如 5%~10%)

求出 B_0 后，再按 B_0 的数值查图5.1曲线，得出新的 P_{y0} ，计算空载时的铁心损耗功率 P_{I0} ，

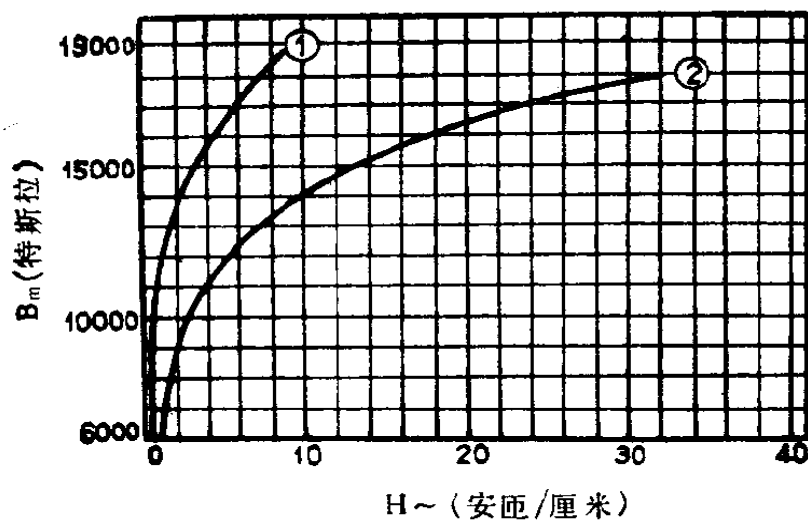
$$P_{I0} = G_I \cdot P_{y0}$$

二、片状铁心的磁化电流

变压器接通电源后，铁心的磁化电流在负载状态和空载状态也不一样。负载状态时的磁化电流用 I_u 表示，公式为

$$I_u = \frac{H \cdot l_c}{\omega_1}$$

式中， H ——磁场强度(A/cm)，在图5.2中按磁通密度对应



①—D310—0.35 (已热处理)

②—D41、D42—0.35(已热处理)

图 5.2

查得

l_c ——铁心平均磁路长度(cm)，在附录标准铁心表中查得

ω_1 ——变压器初级线圈圈数

空载时的 I_0 和计算铁损时的方法一样，用空载时的磁通密度 B_0 去查表，计算出

$$I_{u0} = \frac{H_0 \cdot l_c}{\omega_1}$$

式中， H_0 是用 B_0 在图5·2中查得的H值。

下面试校核第二章设计举例中例一的变压器铁心损耗。

例中所用硅钢片近似附表1中的GEB22型，估算铁心重量为1.1公斤。

空载时磁通密度 $B_0 = 10000 \times (1 + 0.05) = 10500(T)$

查图5·1可得：

在空载时， D_{310} 硅钢片 P_{r0} 为0.65（瓦/公斤），

D_{41} 硅钢片 P_{r0} 为1.44（瓦/公斤）

有负载时， D_{310} 硅钢片 P_r 为0.6（瓦/公斤）

D_{41} 硅钢片 P_r 为1.3（瓦/公斤）

使用 D_{310} 硅钢片的空载铁损和负载铁损分别为：

$$P_{I0} = 0.65 \times 1.1 = 0.715(W)$$

$$P_I = 0.6 \times 1.1 = 0.66(W)$$

而使用 D_{41} 硅钢片时，

$$P_{I0} = 1.44 \times 1.1 = 1.584(W)$$

$$P_I = 1.3 \times 1.1 = 1.43(W)$$

可见，选取磁通密度同为10000特斯拉时，由于硅钢片的质量不同铁损将有近一倍的差异。

查图5·2得到，

使用D₃₁₀硅钢片时, H₀约为0.6安匝/厘米

H约为0.55安匝/厘米

使用D₄₂硅钢片时, H₀约为2.8安匝/厘米

H约为2.6安匝/厘米

查附表1得到平均磁路长度为12.6厘米, 则使用D₃₁₀的磁化电流,

$$\text{空载时, } I_{u0} = \frac{0.6 \times 12.6}{1106} = 0.0068(\text{A})$$

$$\text{负载时, } I_u = \frac{0.55 \times 12.6}{1106} = 0.0063(\text{A})$$

使用D₄₁的磁化电流,

$$\text{空载时, } I_{u0} = \frac{2.8 \times 12.6}{1106} = 0.0319(\text{A})$$

$$\text{负载时, } I_u = \frac{2.6 \times 12.6}{1106} = 0.0296(\text{A})$$

在第二章的举例一中P₁为45.62瓦, 计算其初级电流时按经验增加了5%到15%作为损耗补偿。这里把所增加的补偿电流作为磁化电流折合为0.01至0.032安。而从校核看出按设计数据使用D₃₁₀和D₄₁硅钢片, 其磁化电流在0.007至0.0319安之间, 所以5%至15%的数据是可利用的。

三、C型铁心的损耗

C型铁心损耗的计算方法和片状铁心一样, 不过是查图5.3和图5.4两组曲线。

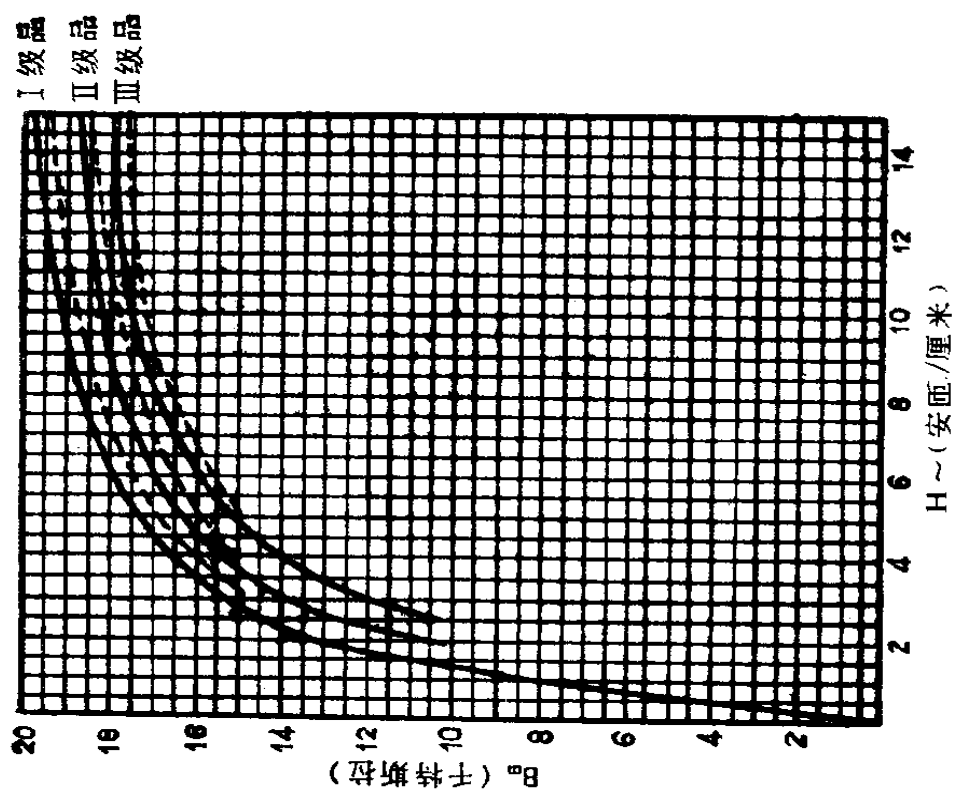


图 5.3

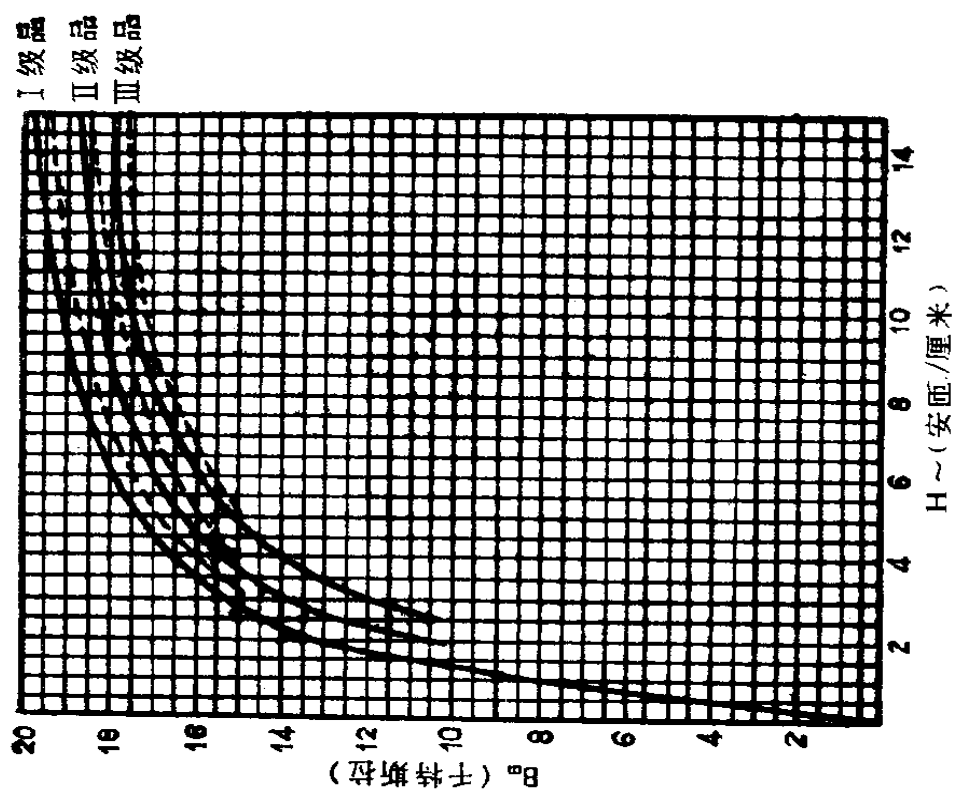


图 5.4

(D310至D340—0.35)
ED10、ED12、CD10、CD12.5×16;
 ——ED16至ED40、CD12.5×25至CD40。

图 5.3

图 5.4

第二节 变压器的铜损和效率

铜线的损耗功率为

$$P_c = I^2 \cdot R$$

铜线的电阻 R 又与它的线径、长度和温度有关，因此要计算铜损，首先要计算的是各线圈铜线的长度。线圈的厚度每层不同，因而线圈每圈的长度也每层不一样。要计算一组线圈的长度必须先计算出这一组线圈每圈的平均长度。

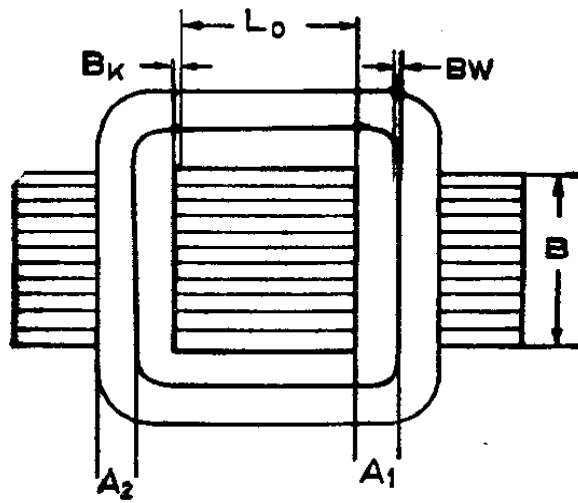


图 5.5

参照图5.5，最内一组线圈的平均长度 L_{m1} 应为

$$L_{m1} = 2(L_0 + B + 4B_k) + \pi A_1$$

式中， L_0 ——铁心舌宽 (mm)

B ——铁心叠厚 (mm)

B_k ——线框厚度和与铁心的间隙 (mm)

A ——线圈的厚度 (mm)

上式是把第一组线圈最内一层的周长和最外一层的周长相加再取平均值。当计算其他各组线圈时，也都是把它最外层的

周长和最内一层周长平均。但自第二组起，计算最内层周长时不能忽略各组线圈的组间绝缘纸厚度。例如，第二组线圈的平均匝长应为

$$L_{m2} = 2(L_0 + B + 4B_1) + \pi[2(A_1 + B\omega_1) + A_2]$$

式中， $B\omega$ ——组间绝缘层厚度 (mm)

第二章例一中有三组线圈，它们各自的平均匝长是

$$L_{m1} = 2 \times (22 + 39 + 4 \times 1.5) + 4.3\pi = 147.5 \text{ (mm)}$$

$$\begin{aligned} L_{m2} &= 2 \times (22 + 39 + 4 \times 1.5) + \pi[2 \times (4.3 + 0.2) + 3.3] \\ &= 172.6 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{m3} &= 2 \times (22 + 39 + 4 \times 1.5) + \pi[2 \times (4.5 + 3.3 + 0.2) + 1] \\ &= 187.4 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

导线长度

$$L_1 = L_{m1} \times 1106 = 147.5 \times 1106 = 163.135 \text{ (m)}$$

$$L_2 = L_{m2} \times 108 = 172.6 \times 108 = 18.641 \text{ (m)}$$

$$L_3 = L_{m3} \times 35 = 187.4 \times 35 = 6.559 \text{ (m)}$$

铜线的电阻随温度升高而增长。从20°C到75°C，电阻将增加22%，所以在校核计算时都取75°C，以求它更接近于变压器的工作状态。由附表3的铜线表中，可以查到不同线径的千米电阻，由此可算出

$$R_{L1} = 163.14 \times 322 = 52.53 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$R_{L2} = 18.64 \times 36 = 0.67 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$R_{L3} = 6.56 \times 104 = 0.68 \text{ (}\Omega\text{)}$$

各线圈损耗的功率为

$$P_{C1} = 0.22^2 \times 52.53 = 2.54 \text{ (W)}$$

$$P_{C2} = 1.8^2 \times 0.67 = 2.17 \text{ (W)}$$

$$P_{C3} = 0.6^2 \times 0.68 = 0.24 \text{ (W)}$$

变压器总的铜损为

$$P_{CH} = P_{C1} + P_{C2} + P_{C3}$$

$$= 2.54 + 2.17 + 0.24 = 4.95 \approx 5 \text{ (W)}$$

变压器的效率应为

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_C + P_1}$$

在本例中 P_2 为38.78瓦，则

$$\eta = \frac{38.78}{38.78 + 5 + 0.66} = 0.87$$

在第二章设计计算时取 η 为85%，接近于校核数据。

每个线圈的电压降为

$$u_{L1} = 0.22 \times 52.53 = 11.5 \text{ (V)}$$

$$u_{L2} = 1.8 \times 0.67 = 1.2 \text{ (V)}$$

$$u_{L3} = 0.6 \times 0.68 = 0.4 \text{ (V)}$$

在第二章设计时各组线圈按经验估计增加了5%的电压补偿量，三组线圈分别为11伏，0.97伏和0.3伏，与校核结果相差都在允许范围以内。

一般情况下按第二章设计的变压器是可以应用的。如果经过校核后有的数据相差很大，可以把选取的有关系数修正一下，再进行计算，直到符合要求为止。

关于温升的计算，涉及的条件很多，也难以准确，所以就不做校核计算了。

第三节 空载电流

变压器的空载电流是当变压器次级不接任何负载时的初级电流，它是铁心损耗电流和磁化电流的向量和。例中，

使用D₃₁₀硅钢片的空载电流为

$$\sqrt{\left(\frac{0.715}{220}\right)^2 + 0.0068^2} \simeq 0.0075 \text{ (A)}$$

使用D₄₂硅钢片的空载电流为

$$\sqrt{\left(\frac{1.584}{220}\right)^2 + 0.0319^2} \simeq 0.0327 \text{ (A)}$$

应该附带指出，以上数据只是计算值，很多属于工艺上的问题都没有考虑，所以当装好变压器测量空载电流时，只要超出不很多，应该是正常的。

第六章 小功率电源变压器的 测试和常见故障

第一节 小功率电源变压器的测试

自己绕制的小功率电源变压器完成后，必须进行一些必要的测试，才能放心地使用。工业生产变压器的测试项目很多，但是自己绕制个别变压器就很难有条件按正规要求去测试了。为了满足使用的要求，这里只介绍几项影响使用的性能的测试方法。

一、绝缘电阻

这是一项必须测量的项目，它影响到变压器的安全使用。一般要求各线圈之间和线圈与铁心之间的绝缘电阻要大于150兆欧。假若没有兆欧表等设备，仍可用第三章所介绍的自制设备测量，但最好能用一只内阻较高的万能表。测量时读数在电阻无穷大处。

如果出现最内一层线圈对铁心绝缘电阻低的现象，应检查线框的绝缘程度，是否仍有潮气，插入铁心时是否划破线框，以及这一层线圈有无线圈脱落，导线是否接触了铁心等现象。

假若有其它几层对铁心绝缘不好的现象，主要检查线包两端的导线是否接触了铁心。如果线包两端绝缘很好，而对铁心绝缘电阻不高，那么第一层线圈的绝缘和绕组之间的绝缘都要重新检查。

二、空载电流

当变压器次级不接负载时，接通电源，在初级线圈中流通的电流最大不应超过额定功率所要求电流的15%。通常可以参照前章变压器损耗校核中空载电流的计算。但是理论计算往往要求过高，其结果只要超出的数值不大，都应属正常。

小功率电源变压器在满负荷时功率就不大，电流也很小，空载的电流将要更小。要测量这微小的交流电流又要涉及到条件问题，除了一部分数字式万用表外，普通指针式万用表都不能测量交流的小电流。

简便的方法是在变压器初级电路里串进一个瓦数和变压器功率相似的电灯泡，接通电源后，变压器空载时，灯泡最多只能暗红，不应过亮。然后在变压器次级接上负载，或者把次级的低电压绕组做一次很短时间（例如半秒钟）的短路，这样串接在初级的电灯应有明显的亮暗变化。当然这只能作为条件不足情况下的定性测试。

三、输出电压

当规定的输入电压加到变压器初级后，在各次级线圈上的输出电压要求和设计计算时的要求相符。一般在规定负荷下，输出电压应在规定值的 $\pm 5\%$ 范围以内。空载输出电压要高一些，并随着变压器的功率不同而有差异。

如果有两组次级线圈需要串接或并接时，先要分辨绕组的极性。一般可把要串或并的两线圈任意串接起来，测量其余两个未相接的线端，电压高出任一次级线圈时，是串接状态。量不出电压时，可以把被测的两端接起来构成并接状态。

有时用这种方法去分辨极性而并接两线圈时，会测量出很

低的电压（例如 1 伏或更低），这是因两组线圈输出电压高低不同而造成的。输出电压不同的两线圈不能并接使用。但是在绕组电压较高时，或者由于变压器的结构以及线圈层次的分布等等原因，两组圈数一样的绕组也可能在输出电压上略有差异。这时并不影响并接。

四、温升

在业余条件下绕制的变压器，投入使用前检验一下温升是很有必要的。往往自己绕制的变压器只要有足够的绝缘性能来保证安全，再能在规定的负载和使用环境下不产生很高的温度，其他电气性能标准就都成次要条件了。

测变压器的温升要在全负荷下工作一段时间，然后再测量它的温度。通常我们都习惯于用手摸变压器的外皮来判断它是否发热。虽然变压器表面温度低于线包内部的温度，可是当手摸没有发热的感觉或只有微温时，也就无需再做进一步的测量了。

使用温度计来测变压器的温度比较直观，能看出温度逐步增长的过程，但是仍然不能测出线圈内部的温度。用电阻法来测算线圈温度是比较好的方法。

漆包线的电阻值随着温度的增加也逐渐增大，并且它的电阻温度系数相当稳定。在变压器接上电源和负载以前，线圈的电阻值对应于室内温度。当加负荷通电一段时间后，由于线圈的温度升高，线圈的电阻也要增加。测量出这两种电阻值就可以计算出温升。温度每增加 1°C ，电阻的变化是很小的，且又随铜线的质量而有差异。例如，书末附录中漆包线规格数据表里所列的漆包线，在 20°C 和 75°C 的每千米电阻，就是按每摄氏度增加 0.00392 米计算的。为了便于计算，我们不妨取电阻温

度系数为0.004，虽然误差大些，可是计算起来能方便许多。具体计算可按下式

$$\Delta t = 250 \times \frac{R_t - R_0}{R_0} \quad (6-1)$$

式中， Δt ——升高的温度（℃）

R_t ——温度升高后的电阻值（Ω）

R_0 ——未加电源以前的电阻值（Ω）

在测线圈电阻时有几个问题要注意。首先，变压器有了温升，停电测电阻要迅速一些，否则它会很快散热而测不准；其次，最好测线圈圈数比较多，也就是电阻比较大的线圈，它的电阻变化大，便于读数，也容易得出更接近于实际的结果。另外，测得的结果仍应视为线包中的平均温升，因为被测的这一组线圈不一定有最高温升。

如果有条件使用电阻电桥或其他高精度的测量设备，可以用以下方法测出精确的温升数据。

先测出使用的漆包线或变压器的某一线圈在室温下的电阻值。然后设法把环境温度提高，并用温度表测量提高的度数，这样持续一段时间使漆包线都升至环境温度，再测一下电阻，就可以用下式计算出所用漆包线的电阻温度系数K

$$K = \frac{R_t - R_0}{R_0 \times \Delta t} \quad (6-2)$$

用自己测出的系数K按前面介绍的方法，用下式代替（6-1）式，就可得出比较精确的结果。

$$\Delta t = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot K} \quad (6-3)$$

计算出的温升 Δt 是变压器工作后温度提高的数值，它的绝对温度还要加上环境温度。

第二节 常见的故障

一、温度过高

按照前几章设计方法绕成的变压器如果出现接通电源后发烫,可能有以下几种原因:

(1) 有短路线圈

如果变压器线圈里有短路现象,不论在初级线圈里或在次级线圈里,都会造成温升过高。线圈短路后在短路处电流很大,温度也将升高,持续时间稍长不但线圈的绝缘材料被烤焦,相邻的漆包线也将被破坏,恶性循环下去,不要多久这只变压器会因温度过高而烧毁。有这种故障的变压器不论是在负载状态还是在空载状态都会有发热的现象。解决的办法只有拆开线包检查,把产生高温而变色的漆包线截除,换上新的绝缘材料再重新绕好。

也可能在功率很小的变压器里,一组圈数很多的线圈,有相邻漆包线短路,但由于它匝间的电压较低,线又很细,温度一时传不到变压器外表来,可是这个变压器是不能耐久使用的。

有短路线圈的变压器,空载电流都大于正常值。

(2) 磁通密度 B 取得过高

当使用不知道最高磁通密度的硅钢片时,假若把 B 值取得过高,按正规计算后,每伏圈数就会有偏少的结果。初级线圈圈数过少,会使空载电流过大,增加了变压器的温度。即使次级不接负载变压器温度也会升高。

有这种故障的变压器假若把电源电压降低,当降低到某一限度,它会恢复正常工作不再产生过高的温度。当然此时次级各线圈的输出电压也都按比例降低。如果是因为短路线圈而造成

成的温度过高，降低电源电压也不能消除高温。

(3) 额定功率偏低或漆包线过细

额定功率偏低的变压器在空载时一切正常，当满负荷工作时就有温度迅速升高的现象。这主要是负载功率超过了设计计算的功率。

把导线的电流密度 j 取得太大，以致选用漆包线线径过细，也是温度升高的另一个原因。

以上现象在变压器空载时是不能发现的。

二、摸触变压器铁心有麻电感觉

当变压器绕好并投入使用后，用手轻轻摸触铁心有时会有麻电的感觉，这种现象使使用者很不安心。这时，用高内阻万用表的交流电压挡测量变压器铁心对地的电压也可能会有有一定的读数指示，当改变万用表的量程再分别测量时会发现各档的读数不一样，而表针偏转的角度却差不多。例如用500V AC档量得100伏，再用100V档量得20伏左右，再换10V档量得2伏左右。这种现象是由线圈和铁心间的寄生电容所造成。把变压器装在有接地线的底盘上或把铁心加一根地线就会消除麻电现象，不影响使用。

三、漏磁

变压器接通电源后，线圈产生的磁力线应该沿着铁心形成回路，并要求在这个磁路里阻力很小，变压器才能有较高的效率。但是往往由于各种原因，造成磁路不能畅通，使得一部分磁力线漏出铁心穿过空气形成回路，产生了漏磁。例如铁心的接缝处毛刺很多，有油漆或其它污物影响插片时的密合，以及线框或层间垫纸太宽，使铁心的E型片和I型片压不紧等等。

当这只变压器只单独作电压变换时，有少许漏磁现象也无妨害，并且也不易发现。但是当把它组装在元器件密集、装配很紧凑的电子设备里时，就要考虑漏磁的影响了。例如在电声设备里如果漏磁的电源变压器靠近了输出变压器、功放管等等，都会产生交流声，在示波器里会造成示波管的偏转失真甚至把显示的波形破坏。

检查所绕好的变压器有无严重的漏磁现象，可以用高内阻的耳机接上一个绕在粗铁螺钉上二三百圈的线圈，把这个线圈靠近已接电源又有漏磁的变压器，耳机里就会发出明显的交流声。

为避免变压器出现漏磁现象，首先要求硅钢片的接缝要密合，特别是使用用绝缘漆浸渍过的旧硅钢片时要注意接缝部位的整洁。在制作线框和裁层间垫纸时不要过宽，这不但对插片时铁心密合有利，而且对提高绝缘程度也有好处。再有设计计算时不要把磁通密度选得过于接近极限。

已经绕好的变压器为了减少漏磁对周围环境的影响，可以紧贴变压器外表再包上一层铜片，见图6·1。如果没有铜片也可以用较粗的漆包线并排绕好把头尾相接。在变压器有磁力线穿

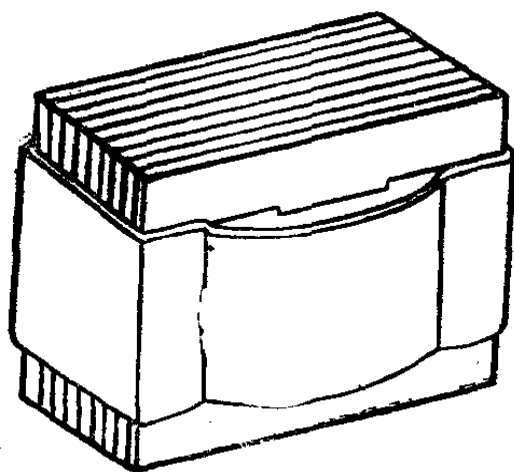


图 6·1

过空气形成回路时，这个短路的铜片或线圈切割磁力线，产生了短路电流形成磁场而抵消了由变压器外溢的磁力线。这种方法能把漏磁现象减小到相当程度。

电源变压器的漏磁是有方向性的。如果变压器装入电子设备里有干扰，只要条件允许，还可以一边转动一边试验，选择一个满意的位置。

四、噪声

变压器投入使用后有“嗡嗡”的噪声出现，这是硅钢片没有夹紧的缘故。经过良好浸渍的变压器一般不会出现这种现象。除非还有其他的故障原因。

当变压器有比较严重的短路现象发生时，线圈中有大电流流过，再加上原来硅钢片就不紧，于是强大电流造成的磁场能冲开浸渍的粘合作用而使硅钢片振动发声。并且随着短路电流的大小而音调不同。伴随而来的是变压器发热。

再有可能是插片时不小心造成了硅钢片中心舌片和邻片有交错现象（图6·2），这时很难再把它夹紧。用E型硅钢片插好铁心，可以仔细查对E型片端面的缝隙来发现有无交错，当用三角型硅钢片时，舌片有了交错，在插好后是不能发现的，只有在组装时注意。使用翘偏不平的旧硅钢片时，特别要注意。

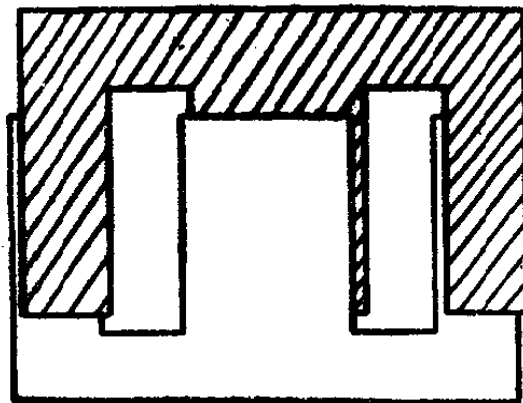


图 6·2

第七章 旧变压器的翻修和利用

翻修旧变压器或者利用旧变压器的材料重新设计绕制新的电源变压器是经常要遇到的事。对于能够正常工作只是输出电压不合要求而需要重绕的变压器，最好先测量好各组线圈的电压，然后再拆开。一般在新变压器要求的功率和原来变压器的功率相当时就不必重绕初级圈。它的功率可以在拆开以后根据线径粗细推算出来。这样可以省去很多事。对于利用一个不了解用途的旧变压器只好从头做起了。

第一节 旧变压器的拆卸

一个组装得很好的变压器要把它拆开，把硅钢片无损伤地抽出来也不是很简单的工作。用石蜡浸渍的变压器比浸渍绝缘漆的变压器易于处理一些，片与片间的粘合不像浸漆变压器那样牢固。浸漆的变压器在拆卸前最好先加一定的温度，只要不影响手工操作，温度多高没有关系。加温的目的是使绝缘漆能变软一些便于拆开铁心。拆硅钢片最好先把靠边上的几片I型片先撬下来，再仔细在最外一片E型片的相对方向用一片较硬的铁片，例如断锯条等顶住中心舌片用锤敲打，把它顶出线框。当最外这一片开始移动，硬铁片已不能再敲，否则线框将完全破坏。可用虎钳甚至台虎钳夹紧这一片，慢慢抽出来。第一片抽出后，线框里已较松，可以逐片撬开再抽出来。第一片可能要损坏，其他各片最好保持平整以备再次利用。

如果旧变压器线包已无再利用的价值，可直接用钢锯把线包锯开，把硅钢片取出来。如果需要查点原来变压器某一绕组的圈数，锯开的断线头不要弄零乱，断线的根数就是这一组的圈数。

第二节 旧硅钢片的利用

在大多数的情况下，拆卸旧变压器主要是为了利用硅钢片。浸蜡的变压器因为好拆，所以硅钢片一般不易受损伤，而浸漆的变压器硅钢片上已经粘附了干涸的绝缘漆，再利用起来往往出现夹不紧，接缝不严等等毛病，必须把它做些加工处理。

一、旧硅钢片的去污整平

旧硅钢片上干涸的绝缘漆残迹很难去掉，可以把它浸泡在香蕉水里，过一段时间绝缘漆泡软了，再逐片擦拭干净。不到不得已，不要用小刀等去刮。

浸蜡的变压器不存在以上问题，可是太旧的浸蜡变压器会出现硅钢片生锈的现象，重新利用时要把锈擦掉。这类硅钢片上原有的绝缘层已都不存在，最好在使用前涂上一层很稀的绝缘漆，至少把每片都浸一下熔点低些的蜡。

多次拆装的硅钢片不很平整，甚至弯曲，必须把它尽量整平。不平的硅钢片装成的变压器很难夹紧，也影响质量。

质量好的硅钢片，如果拆片时被弄弯，由于它质地较脆，整平很费时间，只能用手轻轻扳平，不要用锤敲打。有硬弯的硅钢片已没有使用的价值，除非质量很差的片子质地较韧可以再弯直它。

二、旧硅钢片磁通密度的估计

拆用旧变压器的硅钢片最好能知道旧变压器原来的输出电压。拆开以后数清它的圈数，再根据它的铁心截面按 (7-1) 式计算出它实际应用的磁通密度 B 来。如果不具备这个条件，就要按铁心情况重新估计了。

$$B = \frac{45 \times E}{S \cdot T} \times 10000 \quad (7-1)$$

式中 E —— 某线圈输出电压 (V)

T —— 某线圈圈数

S —— 铁心截面积 (cm^2)

硅钢片的质量可以由其韧性和颜色去粗略地分辨。当然要判断得比较准确，对初次进行辨认的人是有些困难的。在要求不太严格的应用条件下， B 值不要取得过高，一般的硅钢片可取 $B = 10000$ 特斯拉左右。如果硅钢片的质量很差，像黑褐色的断面，手弯几次不断不裂，剪刀能剪出整齐的边沿等等，应把 B 值取得低些，太差的甚至可低至 6000 特斯拉左右。

如果所绕变压器的工作条件要求较高，例如相对于功率来讲要求体积较小，所用硅钢片的窗口不大，不能绕很多线圈，或者硅钢片的质量很好，恐怕一般的估算不能充分利用它的优越性能等等，而又没有专用测量设备的情况下，可以用试验的方法取得近似的 B 值。

首先把所用硅钢片的 B 值作较低的估计，例如估计为 8000 特斯拉。再按此值根据铁心截面绕成初级线圈。因为是试验用，只要线圈不散，可以不必排线，也不用垫纸。线圈绕好插齐铁心，接通电源测量一下初级电流，如果它小于式 (7-2) 的计算值，可以抽掉几片铁心再测，再低再抽，直到所测电流

值和 (7-2) 式所得结果近似为止。

$$I = S^2 \times 0.00035 \quad (7-2)$$

式中 I —— 电流值 (mA)

S —— 铁心截面积 (cm^2)

达到上述要求后, 量出现有的铁心截面积, 再按公式 (7-1) 计算出近似的 B 值来。这时 (7-1) 式中的 E 为电源电压。

应注意的是每次试验都要把铁心夹紧, 如果铁心处于松动状态, 通电后要有噪声, 并且按前述方面测得的 B 值要偏低。

第三节 旧漆包线的利用

使用旧漆包线要注意检查漆膜有无破裂, 稍有几处破皮还能在绕制时补救, 如果破皮过多就不应使用。要想利用旧变压器的漆包线, 在拆开垫纸倒下铜线时, 最好让整个旧变压器线包一起旋转, 这样可避免铜线扭绞, 使漆皮扭破。如果旧线包不动, 从一端把旧线拉下来, 必然使铜线每拉一圈扭转一周。旧线漆皮已不坚固, 这样很容易扭坏, 特别是较粗的漆包线更不要这样做。

经过绝缘漆浸渍又烘干的变压器线包最好先加温到 60°C 左右, 使绝缘漆发软, 然后再慢慢拆线。即便这样较细的铜线也不易完整无损地拆下来。为了可靠, 较细的铜线, 例如线径在 0.15 毫米以下经过绝缘漆处理的旧线包, 一般就不再使用了。

拆下来的旧线上往往粘着一些残余的干绝缘漆和垫纸的碎片, 用这样的线是不能再绕出平整的线包的。可以趁旧线包还有一定温度的时候, 一边拆线一边用浸有汽油的纱布擦拭。

如果需要使用烧坏的变压器里的漆包线, 要观察漆膜是否已经变色, 除检查有无掉漆外, 还应折几次小弯看看漆皮是否

已经变脆。一般受高温变色的漆皮韧性很差不能再用了。

再有整理旧线时常出现导线搭扣现象（图 7·1a），此时要顺势弯直，不要强拉或缕直。强拉直的漆包线形成一个不再好复原的疙瘩（图 7·1b），影响排线。也有人用小木棒等把已结疙瘩的漆包线强行缕直，其实仔细观察，铜线形成了（图 7·1c）的形状，扭弯部分韧性很差，也常常会扭破漆皮。

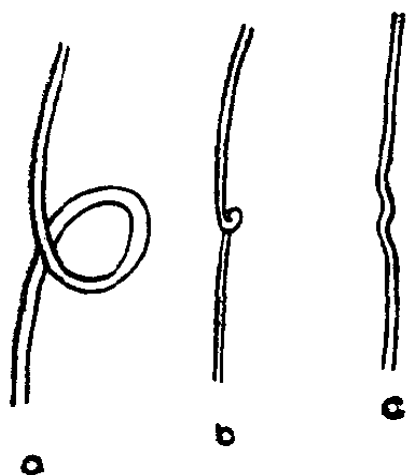


图 7·1

用旧漆包线再绕的新线包，排线不可能像使用新线那样紧凑，因此设计验算时每层圈数要少算一些。具体绕线时因为旧线上附着有绝缘漆，比新线发粘，绕细线时拉松了绕不紧，拉紧了又容易断，所以要格外多地注意。

附录

附录表格的说明

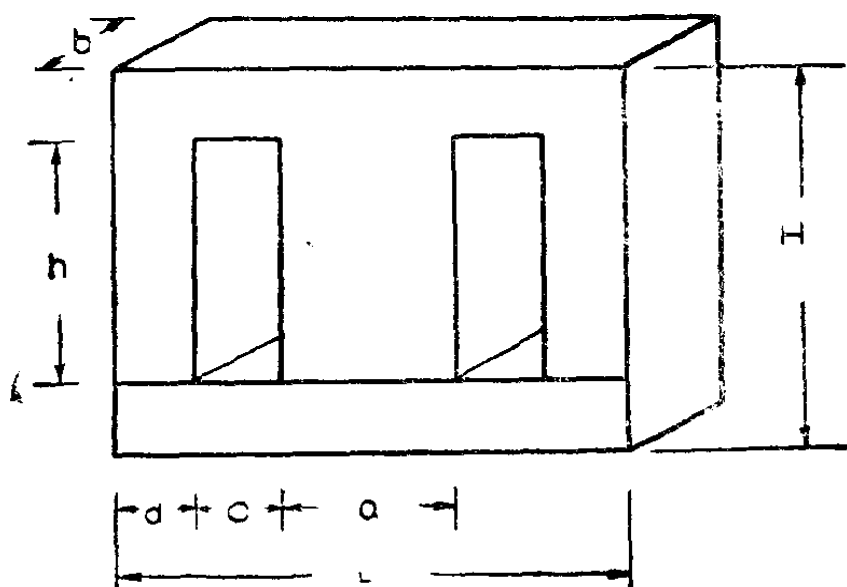
附表（1）：

附表（1）里列出了EI型硅钢片的标准规格。其中附表（1-a）列出了GEI型硅钢片标准规格，附表（1-b）列出了KEI型硅钢片标准规格。

在附表（1-a）和（1-b）里，第一栏“铁心尺寸”中每格列出了四行和六行数据。每行第一个数是铁心的舌宽 a ，第二个数是叠厚 b ，单位都是毫米。表里列出了相同舌宽的硅钢片的四种和六种建议使用的尺寸。后面的几栏里对应着这些尺寸列出了各种设计计算用的参考数据。

在表的第二栏“铁心片型号”中，每格列出了两种和四种型号。凡在同一格中的型号，硅钢片的尺寸都相同。

第三栏“尺寸”中各符号的含意见附图1。



附图1

第四栏“参考数据”中,第一项是“磁路平均长度”,这是硅钢片中磁力线回路的平均长度。由于硅钢片有一定宽度,外围的磁路和内圈的磁路长度不一样,为了计算的方便,表中给出了标准硅钢片的磁路平均长度。这个数据还考虑了磁力线在硅钢片中的分布不均匀,靠内圈和靠边沿的密度不同的影响,所以所列的数据不完全是由硅钢片几何尺寸所计算的平均值。

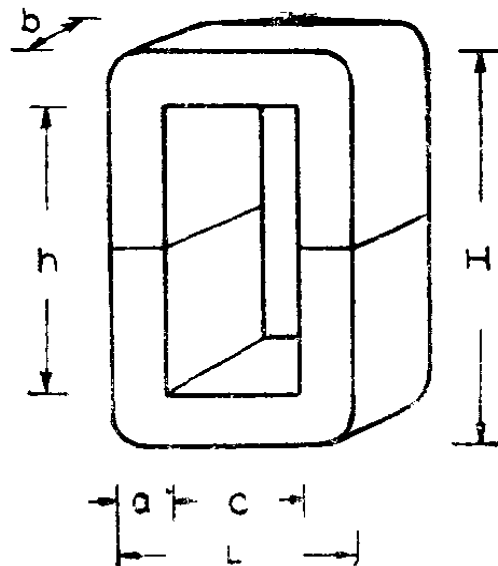
如果选用的硅钢片不属于标准尺寸,可以按(附-1)式计算平均磁路长度。不过计算是按几何尺寸求平均值,其值都略大于表中所列的数值。

$$l_c = 2(c + h) + d\pi \quad (\text{附-1})$$

参考数据第二项“铁心面积乘窗口面积”是按铁心舌片叠厚面积(不是净面积)计算的。

附表(2):

在附表(2-a)里列出了CD型变压器铁心标准尺寸和参数。第一栏“铁心型号”列举了九组,每组截面积相同的铁心分列四种高度。参阅第二栏“尺寸”中的符号并对照附图2,可以了解铁心型号的含意和它所代表铁心的具体尺寸。

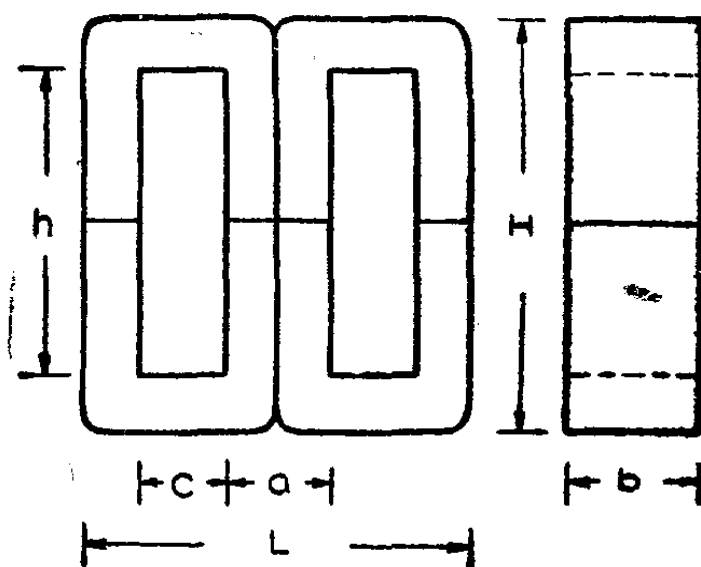


附图 2

参数栏里“铁心面积乘窗口面积项内的数据是按： $a \times b \times c \times h$ 计算出来的。不是按净截面积计算的。

“散热表面积”中FC是铁心散热面积，它是一定尺寸的铁心，除去被线圈包裹起来不能散热的部分以外，暴露在空气中的面积。 F_m 是线包的表面面积。

附表（2-b）和（2-a）相似，只是“铁心型号”比附表（2-a）简单，参阅附图3就不难了解它的含意了。



附图 3

附表（3）：

附表（3）列出了漆包线的规格数据。其中第一栏“铜心公称直径”是指不包括漆皮在内的直径。第五栏和第六栏中“漆包线最大直径”是指包括了漆皮在内的漆包线最大外径。如果精确计算线圈每层圈数或厚度，应按包括漆皮的最大外径计算。

附表 (1) EI型硅钢片规格

附表 (1-a) 最低价格铁心 (EI片交迭, 铁心片标准SJ99-65)

铁心尺寸 $a \times b$	铁心片 型 号	参 考 数 据														
		尺 寸 (毫米)						磁路平 均长度 (厘米)	铁心面 积乘窗 口面积 (厘米 ⁴)	中间舌片净截面积 (厘米 ²)		参考输 出功率 50(赫)	铁心净重 (公 斤)			
		a	c	d	L	H	h			b	0.2 (毫米)			0.35 (毫米)	铁心片厚	0.2 (毫米)
10×12.5	GE10							12.5	1.46	1.06	1.14	1	0.0706	0.0756		
10×15								15	1.76	1.28	1.37	1.5	0.0848	0.0908		
10×17.5	GI10	10	6.5	6.5	36	31	18	17.5	5.76	2.05	1.49	1.59	1.8	0.0990	0.106	
10×20								20		2.34	1.70	1.82		0.113	0.121	
12×15	GE12							15		3.17	1.53	1.64	2	0.127	0.136	
12×18								18		3.80	1.84	1.97	3	0.152	0.163	
12×21	GI12	12	8	8	44	38	22	21	6.94	4.44	2.14	2.28	4	0.178	0.190	
12×24								24		5.07	2.45	2.62		0.203	0.217	
14×18	GE14							18		5.67	2.14	2.29		0.197	0.211	
14×21								21		6.62	2.50	2.58	5	0.230	0.246	
14×24	GI14	14	9	9	50	43	25	24	8.04	7.56	2.86	3.06		0.263	0.281	
14×28								28		8.82	3.33	3.57		0.306	0.327	

续表

铁心尺寸 $a \times b$		铁心片 型 号	尺 寸 (毫米)								参 考 数 据																								
			<table><tr><th>a</th><th>c</th><th>d</th><th>L</th><th>H</th><th>h</th><th>b</th></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>								a	c	d	L	H	h	b															铁心面 积乘窗 口面积 (厘米 ⁴)	中间后片净截面积 (厘米 ²)	参考轴 输出功率 50(赫)	铁心净重 (公 斤)
											a	c	d	L	H	h	b																		
磁路平 均长度 (厘米)	铁心片厚	铁心片厚 (毫米)																																	
			0.2 (毫米)	0.35 (毫米)	0.2 (毫米)	0.35 (毫米)																													
16×20		GE16					20	8.96	2.72	2.91	6	0.273	0.293																						
16×24			16	10	10	56	48	24	10.75	3.26	3.49	8	0.340	0.364																					
16×28		GI16					23	12.54	3.81	4.08	10	0.396	0.424																						
16×32							32	14.34	4.35	4.66		0.453	0.485																						
19×24		GEC19					24	18.33	3.88	4.15	12	0.464	0.496																						
19×28		GIC19					28	21.39	4.52	4.84	16	0.538	0.576																						
19×32		GEB19	19	12	12	67	57.5	33.5	10.9	5.17	5.53	20	0.617	0.660																					
19×38		GIB19					38	29.02	6.14	6.57	33	0.732	0.783																						
22×28		GEC22					28	33.63	5.25	5.62		0.730	0.781																						
22×33		GIC22					33	39.64	6.17	6.61		0.860	0.920																						
22×38		GEB22	22	14	14	78	67	39	12.6	7.11	7.61	45	0.991	1.06																					
22×44		GIB22					44	52.85	8.23	8.81		1.15	1.23																						

续表

铁心尺寸 $a \times b$	铁心片 型 号	参 考 数 据													
		尺 寸 (毫米)						铁心面 积乘窗 口面积 (厘米 ⁴)	中间舌片净截面积 (厘米 ²)		参考输 出功率 50(赫) (瓦)	铁心净重 (公 斤)			
		a	c	d	L	H	h		b	铁心片厚					
										磁路平 均长度 (厘米)			铁心面 积乘窗 口面积 (厘米 ⁴)	0.2 (毫米)	0.35 (毫米)
26×32	GEC26							33				1.22	1.31		
26×39	GIC26	26	17	17	94	81	47	39				1.49	1.50		
26×45	GEB26							45	15.0	93.48		1.71	1.83		
26×52	GIB26							52		108.02		1.98	2.12		
30×38	GEC30							38				1.83	1.96		
30×45	GIC30	30	19	19	106	91	53	45	17.2	135.95		2.17	2.32		
30×52	GEB30							56		169.18	120	2.51	2.68		
30×60	GIB30							60		181.26		2.89	3.09		
35×44	GEC35							44				2.92	3.12		
35×52	GIC35	35	22	22	123	103	56	52	20.0	246.25	140	3.42	3.65		
35×60	GEB35							60		284.13	200	3.95	4.22		
35×70	GIB35							70		331.49		4.61	4.92		
40×50	GEC40							50				4.52	4.84		
40×60	GIC40	40	26	26	144	124	72	60	23.0	449.28	250	5.43	5.80		
40×70	GEB40							70		524.16		6.35	6.78		
40×80	GIB40							80		599.04		7.24	7.75		

附表 (1-b)

最轻重量铁心 (EI片交插, 铁心片标准SJ98-65)

铁心尺寸 a × b	铁心片 型 号	参 考 数 据														
		尺 寸 (毫米)								铁心面 积乘窗 口面积 (厘米 ⁴)	中间舌片净截面积 (厘米 ²)		参考输 出功率 50(赫) (瓦)	铁心净重 (公斤)		
		均长度 (厘米)									0.2 (毫米)	0.35 (毫米)		0.2 (毫米)	0.35 (毫米)	
10 × 8	KE10							8	2.00	0.680	0.728	0.0463	0.0490			
10 × 10								10	2.50	0.850	0.910	0.0577	0.0618			
10 × 12								12	3.00	1.02	1.09	0.9	0.0693			
10 × 16	KI10	10	10	5	40	35	25	16	4.00	1.36	1.46	1.6	0.0925			
10 × 20								20	5.00	1.7	1.82	2.6	0.116			
10 × 25								25	6.25	2.23	2.28		0.145			
12 × 10	KE12							10	4.32	1.02	1.09	0.0832	0.089			
12 × 12								12	5.18	1.22	1.31	0.100	0.107			
12 × 16								16	6.91	1.63	1.75	0.133	0.142			
12 × 20	KI12	12	12	6	48	42	30	20	8.64	2.04	2.18	3.7	0.166			
12 × 25								25	10.80	2.55	2.73	5.7	0.208			
12 × 32								32	13.82	3.26	3.49	0.266	0.285			

续表

铁心尺寸 $a \times b$	铁心片 型 号	尺 寸 (毫米)							参 考 数 据					
		a	c	d	L	H	h	b	磁路平 均长度 (厘米)	铁心面 积乘窗 口面积 (厘米 ⁴)	中间舌片净截面积 (厘米 ²)		参考输 出功率 50(赫) (瓦)	铁心净重 (公斤)
											0.2 (毫米)	0.35 (毫米)		
16×12	KE16							12	12.29	1.63	1.75		0.174	0.186
16×16	KE16							16	16.38	2.18	2.33		0.232	0.248
16×20	KE16							20	20.48	2.72	2.91	6.6	0.290	0.310
16×25	KEB16	16	16	8	64	56	40	25	25.60	3.40	3.64	10.2	0.362	0.388
16×32	KIB16							32	32.77	4.35	4.66	16.8	0.462	0.496
16×40								40	40.96	5.44	5.82		0.579	0.620
20×16	KE20							16	32.00	2.72	2.90		0.362	0.387
20×20	KE20							20	40.00	3.40	3.64		0.452	0.484
20×25	KE20							25	50.00	4.25	4.55		0.565	0.604
20×32	KEB20	20	20	10	80	70	50	32	64.00	5.44	5.82	26	0.723	0.774
20×40	KIB20							40	80.00	6.80	7.28	40	0.904	0.968
20×50								50	100.00	8.50	9.10		1.13	1.21

铁心尺寸 $a \times b$	铁心片 型 号	参 考 数 据											
		尺 寸 (毫米)						铁心面 积乘窗 口面积 (厘米 ²)	中间舌片净截面积 (厘米 ²)	参考输 出功率 50(赫) (瓦)	铁心净重 (公斤)		
		a	c	d	L	H	h				b	铁心片厚	
												磁路平 均长度 (厘米)	铁心净重 (公斤)
25×20	KE25						20	78.125	4.25	4.55	0.713	0.764	
25×25	KI25						25	97.66	5.31	5.68	0.891	0.954	
25×32							32	125.00	6.80	7.28	41	1.22	
25×40	KEB25	25	25	12.5	100	87.5	62.5	21.4	8.50	9.10	64	1.53	
25×50	KIB25						50	195.31	10.6	11.4	100	1.92	
25×63							63	234.38	13.4	14.3		2.44	
32×25	KE32						25	204.80	6.80	7.28		1.6	
32×32	KI32						32	262.14	8.70	9.32		2.00	
32×40							40	327.68	10.9	11.7	104	2.50	
32×50	KEB32	32	32	16	128	112	80	27.4	13.6	14.6	164	3.12	
32×63	KIB32						63	516.10	17.1	18.3	260	3.94	
32×80							80	655.36	21.8	23.3		5.00	

续表

铁心尺寸 $a \times b$	铁心片 型 号	尺 寸 (毫米)								参 考 数 据					
										磁路平 均长度 (厘米)	铁心面 积乘窗 口面积 (厘米 ⁴)	中间舌片净截面积 (厘米 ²)		参考输 出功率 50(赫)	铁心净重 (公斤)
												0.2 (毫米)	0.35 (毫米)		
40×32															
40×40															
40×50	KE40														
40×65	KI40	40	40	20	160	140	100	34.3	1008.00	21.5	22.9	400	5.77	6.18	
40×80	KEB40								1280.00	27.2	29.1	650	7.33	7.85	
40×100	KIB40								1600.00	34.0	36.4		9.17	9.81	

附表 (2) C型硅钢片规格

附表 (2-a)

CD型、C形

铁心型号	尺 寸 (毫米)						铁心净截面积 (厘米 ²)		
	a	h	c	L	H	b	0.35 (毫米)	0.2 (毫米)	0.08 (毫米)
CD8 × 12.5 × 12.5	8	12.5	10	26	28.5	12.5	—	0.890	0.850
16	8	16	10	26	32	12.5	—	0.890	0.850
20	8	20	10	26	36	12.5	—	0.890	0.850
25	8	25	10	26	41	12.5	—	0.890	0.850
CD10 × 12.5 × 20	10	20	12.5	32.5	40	12.5	1.15	1.11	1.06
25	10	25	12.5	32.5	45	12.5	1.15	1.11	1.06
32	10	32	12.5	32.5	52	12.5	1.15	1.11	1.06
40	10	40	12.5	32.5	60	12.5	1.15	1.11	1.06
CD12.5 × 16 × 25	12.5	25	16	41	50	16	1.84	1.78	1.70
32	12.5	32	16	41	57	16	1.84	1.78	1.70
40	12.5	40	16	41	65	16	1.84	1.78	1.70
50	12.5	50	16	41	75	16	1.84	1.78	1.70
CD12.5 × 25 × 30	12.5	30	20	45	55	25	2.88	2.78	2.66
40	12.5	40	20	45	65	25	2.88	2.78	2.66
50	12.5	50	20	45	75	25	2.88	2.78	2.66
60	12.5	60	20	45	85	25	2.88	2.78	2.66
CD16 × 32 × 40	16	40	25	57	72	32	4.71	4.56	4.35
50	16	50	25	57	80	32	4.71	4.56	4.35
65	16	65	25	57	97	32	4.71	4.56	4.35
80	16	80	25	57	112	32	4.71	4.56	4.35
CD20 × 40 × 50	20	50	32	72	90	40	7.36	7.12	6.80
60	20	60	32	72	100	40	7.36	7.12	6.80
80	20	80	32	72	120	40	7.36	7.12	6.80
100	20	100	32	72	140	40	7.36	7.12	6.80
CD25 × 50 × 65	25	65	40	90	115	50	11.5	11.1	—
80	25	80	40	90	130	50	11.5	11.1	—
100	25	100	40	90	150	50	11.5	11.1	—
120	25	120	40	90	170	50	11.5	11.1	—
CD32 × 64 × 80	32	80	50	114	144	64	18.8	18.2	—
100	32	100	50	114	164	64	18.8	18.2	—
130	32	130	50	114	194	64	18.8	18.2	—
160	32	160	50	114	224	64	18.8	18.2	—
CD40 × 80 × 100	40	100	64	144	180	80	29.4	28.5	—
120	40	120	64	144	200	80	29.4	28.5	—
160	40	160	64	144	240	80	29.4	28.5	—
200	40	200	64	144	280	80	29.4	28.5	—

铁 心 系 列

平均磁 路长度 (厘米)	参 考 数 据							
	铁心重量 (公斤)			铁心面积 乘窗口面积 (厘米 ⁴)	散热表面积 (厘米 ²)		输出功率(瓦)	
	0.35 (毫米)	0.2 (毫米)	0.08 (毫米)		F _c	F _m	400(赫)	50 (赫)
6.84	—	0.047	0.044	1.25	16	22.7	24.9	
7.54	—	0.051	0.049	1.60	16	27	35.8	
8.34	—	0.057	0.054	2.00	16	31.8	41.9	
9.34	—	0.064	0.061	2.50	16	38	51.9	
9.47	0.0832	0.080	0.077	3.125	22.2	40.5	58.9	1.27
10.5	0.0925	0.089	0.085	3.90	22.2	47.8	71.9	1.68
11.9	0.105	0.101	0.096	5.00	22.2	58	92.2	2.4
13.5	0.119	0.114	0.109	6.25	22.2	69.7	113	3.15
11.9	0.168	0.162	0.155	8.00	35.5	62.7	119	5.67
13.3	0.188	0.181	0.173	10.24	35.5	75.4	148	7.6
14.9	0.210	0.202	0.193	12.80	35.5	90	180	10
16.9	0.238	0.230	0.219	16.00	35.5	108	221	13
13.7	0.302	0.291	0.279	18.75	49.4	95.4	218	17.8
15.7	0.346	0.334	0.319	25.00	49.4	118	279	25.8
17.7	0.390	0.376	0.360	31.25	49.4	140	342	33.5
19.7	0.434	0.418	0.400	37.50	49.4	163	388	40.3
17.8	0.641	0.620	0.592	51.20	80	161	464	71.5
19.8	0.713	0.690	0.659	64.00	80	190	566	94.6
22.8	0.821	0.795	0.759	83.20	80	233	706	129
25.8	0.930	0.900	0.858	102.40	80	276	818	161
22.4	1.26	1.22	1.17	128.0	126.6	258	714	192
24.4	1.37	1.33	1.27	153.6	126.6	295	839	225
28.4	1.60	1.55	1.48	204.8	126.6	367	1058	297
32.4	1.82	1.77	1.69	256.0	126.6	440	1287	364
28.5	2.51	2.43	—	325.0	198	416	1414	435
31.5	2.77	2.68	—	400.0	198	485	1683	514
35.5	3.12	3.02	—	500.0	198	576	2014	634
39.5	3.48	3.36	—	600.0	198	667	2362	743
35.7	5.15	4.98	—	819.2	321	655	2796	968
39.7	5.72	5.54	—	1024.0	321	770	3349	1157
45.7	6.57	6.37	—	1331.2	321	943	4090	1446
51.7	7.45	7.21	—	1638.4	321	1114	4820	1757
45.0	10.1	9.81	—	2048.0	506	1050	5453	2062
49.0	11.0	10.7	—	2457.6	506	1196	6295	2424
57.0	12.8	12.4	—	3276.8	506	1486	7831	3097
65.0	14.6	14.2	—	4096.0	506	1780	9493	3741

附表 (2-b)

ED型、C型

铁 心 型 号	尺 寸 (毫米)						铁心净截面积 (厘米 ²)			平均磁 路长度 (厘米)
	a	b	c	L	H	b	0.35 (毫米)	0.2 (毫米)	0.08 (毫米)	
ED 8 × 8	8	20	8	32	28	8	—	0.570	0.544	6.68
10	8	20	8	32	28	10	—	0.712	0.680	6.68
12.5	8	20	8	32	28	12.5	—	0.890	0.850	6.68
16	8	20	8	32	28	16	—	1.14	1.09	6.68
ED10 × 10	10	25	10	40	35	10	0.92	0.890	0.850	8.40
12.5	10	25	10	40	35	12.5	1.15	1.11	1.08	8.40
16	10	25	10	40	35	16	1.47	1.42	1.36	8.40
20	10	25	10	40	35	20	1.84	1.78	1.70	8.40
ED12 × 12.5	12	30	12	48	42	12.5	1.38	1.34	1.28	10.1
16	12	30	12	48	42	16	1.77	1.71	1.63	10.1
20	12	30	12	48	42	20	2.21	2.14	2.04	10.1
25	12	30	12	48	42	25	2.76	2.67	2.55	10.1
ED16 × 16	16	40	16	64	56	16	2.36	2.28	2.18	13.5
20	16	40	16	64	56	20	2.95	2.85	2.72	13.5
25	16	40	16	64	56	25	3.68	3.56	3.40	13.5
32	16	40	16	64	56	32	4.71	4.56	4.35	13.5
ED20 × 20	20	50	20	80	70	20	3.68	3.56	3.40	17.0
25	20	50	20	80	70	25	4.60	4.45	4.25	17.0
32	20	50	20	80	70	32	5.89	5.70	5.44	17.0
40	20	50	20	80	70	40	7.36	7.12	6.80	17.0
ED25 × 25	25	63	25	100	88	25	5.75	5.56	—	21.3
32	25	63	25	100	88	32	7.36	7.12	—	21.3
40	25	63	25	100	88	40	9.20	8.90	—	21.3
50	25	63	25	100	88	50	11.5	11.10	—	21.3
ED32 × 32	32	80	32	128	112	32	9.42	9.11	—	27.2
40	32	80	32	128	112	40	11.8	11.4	—	27.2
50	32	80	32	128	112	50	14.7	14.2	—	27.2
64	32	80	32	128	112	64	18.8	18.2	—	27.2
ED40 × 40	40	100	40	160	140	40	14.7	14.20	—	34.0
50	40	100	40	160	140	50	18.4	17.8	—	34.0
64	40	100	40	160	140	64	23.6	22.8	—	34.0
80	40	100	40	160	140	80	29.4	28.5	—	34.0

铁 心 系 列

参 考 数 据							
铁心重量公斤			铁心面积 乘窗口面积 (厘米 ⁴)	散热表面积 (厘米 ²)		输出功率(瓦)	
0.35 (毫米)	0.2 (毫米)	0.08 (毫米)		F _c	F _m	400(赫)	50(赫)
—	0.0292	0.0278	1.02	17.5	17.5	17.3	
—	0.0364	0.0348	1.28	20	17.5	25.6	
—	0.0455	0.0434	1.60	23	17.5	29	
—	0.0583	0.0557	2.05	27	17.5	36	
0.0591	0.0572	0.0547	2.50	27.4	28	41	0.8
0.0739	0.0714	0.0682	3.13	31.2	28	49	1.2
0.0945	0.0914	0.0874	4.00	36.5	28	60	1.87
0.118	0.115	0.109	5.00	42.7	28	71	2.67
0.107	0.104	0.099	5.40	40.3	41	70	2.69
0.137	0.132	0.126	6.91	46.9	41	80	4.17
0.171	0.165	0.158	8.64	54	41	94	6.16
0.214	0.206	0.197	10.80	63.3	41	106	8.78
0.244	0.236	0.226	16.38	70	80	178	13.3
0.305	0.295	0.281	20.48	82	80	208	19.6
0.380	0.368	0.351	25.60	92	80	242	28.7
0.487	0.472	0.450	32.77	109	80	286	43.1
0.479	0.462	0.442	40.00	110	121	288	41.6
0.598	0.578	0.552	50.00	125	121	333	61.3
0.765	0.740	0.708	64.00	146	121	394	92.9
0.957	0.925	0.884	80.00	171	121	454	134
0.937	0.905	—	98.44	172	191	542	128
1.20	1.16	—	126.00	199	191	636	172
1.50	1.45	—	157.50	229	191	740	215
1.87	1.81	—	196.90	268	191	853	270
1.96	1.90	—	262.14	281	309	1118	317
2.46	2.37	—	327.68	320	309	1282	390
3.06	2.96	—	409.60	368	309	1487	485
3.91	3.78	—	524.29	437	309	1759	607
3.82	3.70	—	640.00	439	488	2106	688
4.79	4.63	—	800.00	500	488	2452	840
6.14	5.94	—	1024.00	586	488	2895	1064
7.65	7.41	—	1280.00	684	488	3348	1268

附表 (3)

漆包线规格

铜心公称直径	铜心截面积 mm ²	直流电阻值		最大电流密度			油性漆包线			高强度漆包线		
		20℃	75℃	δ(A/mm ²)			漆包线最大直径 mm	每cm可绕圈数	漆包线重量 kg/km	漆包线最大直径 mm	每cm可绕圈数	漆包线重量 kg/km
		2.0	4.0	6.0								
mm	mm ²	Ω/km		A	A	A	mm		kg/km	mm		kg/km
2.44	4.676	3.75	4.56	9.36	18.7	28.08	2.54	3.9	42.1	2.57	3.89	42.2
2.02	3.205	5.47	6.65	6.42	12.84	19.26	2.120	4.7	28.9	2.14	4.67	29.0
1.88	2.776	6.31	7.67	5.56	11.12	16.68	1.97	5.1	25.0	2.00	5.00	25.2
1.74	2.378	7.37	8.96	4.76	9.52	14.28	1.83	5.5	21.4	1.85	5.41	21.4
1.62	2.061	8.50	10.30	4.12	8.24	12.36	1.71	5.8	18.5	1.73	5.78	18.6
1.45	1.651	10.6	12.88	3.30	6.60	9.9	1.53	6.5	14.9	1.56	6.41	15.0
1.30	1.327	13.2	16.05	2.66	5.32	7.98	1.38	7.2	12.0	1.41	7.09	12.1
1.20	1.131	15.5	18.80	2.23	4.52	6.78	1.28	7.8	10.2	1.31	7.63	10.4
1.08	0.9161	19.1	23.25	1.83	3.66	5.50	1.16	8.6	8.27	1.19	8.40	8.32
1.00	0.7854	22.4	27.10	1.57	3.14	4.71	1.07	9.4	7.10	1.11	9.01	7.14
0.90	0.6362	27.5	33.50	1.27	2.54	3.82	0.96	10.4	5.75	0.99	10.10	5.78
0.80	0.5027	34.8	42.40	1.01	2.01	3.02	0.86	11.6	4.55	0.89	11.24	4.58
0.72	0.4072	43.0	52.35	0.814	1.63	2.44	0.78	12.8	3.67	0.80	12.50	3.70
0.67	0.3526	49.7	60.40	0.704	1.408	2.11	0.72	13.9	3.19	0.75	13.33	3.21
0.62	0.3019	58.0	70.60	0.604	1.21	1.812	0.67	14.9	2.73	0.69	14.49	2.76
0.55	0.2376	73.7	89.70	0.476	0.95	1.43	0.60	16.7	2.16	0.62	16.13	2.17
0.51	0.2043	85.9	104.10	0.408	0.82	1.224	0.56	17.9	1.86	0.58	17.24	1.87
0.44	0.1521	115	140.09	0.304	0.61	0.912	0.49	20.4	1.38	0.50	20.00	1.39
0.41	0.1320	133	161.40	0.264	0.53	0.792	0.45	22.2	1.20	0.47	21.28	1.21
0.38	0.1134	155	187.80	0.226	0.45	0.678	0.42	23.8	1.03	0.44	22.73	1.04

续表

铜心公 称直径	铜 心 截面积 mm ²	电流电阻值		最大电流密度						油性漆包线			高强度漆包线				
				$\delta(A/mm^2)$						漆包线 最大直径 mm	每cm 可绕 圈数	漆包线 重量 kg/km	漆包线最 大直径 mm	每cm可 绕圈数	漆包线重量 kg/km		
		20℃		75℃		2.0		4.0								6.0	
		Ω/km						A								A	
		mm	mm ²														
0.35	0.09621	182	221.80	0.192	0.384	0.576	0.39	25.6	0.876	0.41	24.39	0.884					
0.31	0.07548	232	282.30	0.150	0.300	0.45	0.35	28.6	0.689	0.36	27.78	0.693					
0.29	0.06605	265	322.30	0.132	0.264	0.396	0.33	30.3	0.601	0.34	29.41	0.608					
0.27	0.05726	306	372.00	0.114	0.23	0.342	0.31	32.3	0.522	0.32	31.25	0.529					
0.25	0.04909	357	434.20	0.098	0.20	0.295	0.275	36.4	0.446	0.30	33.33	0.454					
0.23	0.04155	422	512.50	0.083	0.166	0.25	0.255	39.2	0.378	0.28	35.71	0.386					
0.21	0.03464	506	615.00	0.069	0.138	0.21	0.235	42.6	0.316	0.25	40.00	0.321					
0.19	0.02838	618	715.50	0.057	0.114	0.17	0.21	47.6	0.259	0.23	43.48	0.264					
0.17	0.02270	773	939.00	0.0454	0.091	0.136	0.19	52.6	0.208	0.21	47.62	0.213					
0.15	0.01767	993	1206	0.035	0.071	0.106	0.17	58.3	0.162	0.19	52.63	0.167					
0.13	0.01327	1322	1606	0.027	0.053	0.078	0.15	66.7	0.122	0.16	62.50	0.125					
0.12	0.01131	1551	1883	0.023	0.045	0.068	0.14	71.4	0.104	0.15	66.67	0.108					
0.11	0.009498	1846	2241	0.019	0.038	0.057	0.13	76.9	0.088	0.14	71.43	0.092					
0.10	0.007854	2237	2712	0.016	0.032	0.048	0.12	83.3	0.073	0.13	76.92	0.076					
0.09	0.006362	2758	3343	0.013	0.026	0.038	0.105	95.2	0.059	0.12	83.33	0.063					
0.08	0.005027	3487	4238	0.0101	0.020	0.030	0.095	105.3	0.047	0.11	90.91	0.050					
0.07	0.003848	4556	5535	0.0076	0.0152	0.023	0.085	117.6	0.036	0.10	100.00	0.039					
0.06	0.002827	6198	7533	0.0056	0.0112	0.017	0.075	133.3	0.027	0.09	111.10	0.029					
0.05	0.001963	8949	10848	0.0039	0.0078	0.0118	0.065	153.8	0.019	0.07	142.90	0.022					