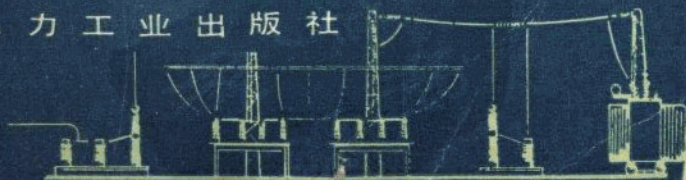


电力变压器的运行与检修

电力工业出版社



前 言

为了适应四个现代化和我国电力工业迅速发展的需要，在总结实践经验的基础上，编写了《电力变压器的运行与检修》这本书，以供发电厂和变电所内从事电力变压器方面工作的同志参考。

本书第一章“变压器的基本知识”，着重介绍变压器的工作原理以及我国生产的电力变压器的基本结构，使自学者对变压器的原理及实际构造有一个轮廓概念，为后两章——运行和检修打下基础。

第二章“变压器的运行”，先介绍变压器在运行中所表现的一些物理现象，并从理论上进行详细分析，以加深理解各种运行情况下的物理性能，然后介绍运行中应该注意的一些事项。

第三章“变压器的检修”，先介绍吊芯检修，其内容为各个单元部件的构造、用途、性能等，然后介绍一般检修的方法。对于某些部件，为了保证其检修质量，在书中还特别指明其关键的工艺方法和注意事项。其次介绍变压器经过检修以后，必须试验的项目及其方法。最后介绍遇到变压器绕组受潮要进行烘潮时，在检修现场一般可行的几种干燥方法。

由于各单位现场条件不同，所以本书中所述各种数据仅供参考。

关于变压器绕组烧毁后的恢复性检修，因系属于变压器的制造性检修，所以不作详述。

由于本人业务水平有限，加之写作时间比较短促，书中错误之处，恳切地希望广大读者给予批评指正。

徐名通 一九七九年十一月

目 录

前 言

第一章 变压器的基本知识	1
第一节 变压器的基本原理	1
第二节 变压器的基本构造	4
第三节 变压器的定额数据	31
第二章 变压器的运行	35
第一节 变压器的空载运行	35
第二节 变压器的负载运行	45
第三节 变压器的短路试验	58
第四节 变压器的并列运行	60
第五节 变压器的过负荷	78
第六节 变压器投入运行前的检查	87
第七节 变压器的投入运行	95
第八节 变压器运行中的检查	99
第九节 变压器油的运行	101
第三章 变压器的检修	113
第一节 检修的目的	113
第二节 变压器吊芯检修的期限和项目	114
第三节 变压器吊芯检修的方法	116
第四节 变压器不吊芯检修的期限和项目	170
第五节 变压器检修时的试验项目、标准和方法	172
第六节 变压器的干燥(烘潮)	203
附录一 正弦交流量的基本知识	218
附录二 外壳涡流加热磁化线圈计算方法	226

第一章 变压器的基本知识

在电力系统中，变压器已占着极其重要的地位，无论是在发电厂或变电所(站)，都可以看到各种型式和不同容量的电力变压器在运行着。为了使工业的布局更加合理，常需将电站建造在靠近动力资源的地方，这时就需要用巨大的升压变压器，通过远距离输电到工业区和城市网络；当电能输送到工业区和城市网络后，又要由数量众多的各种容量的大、中、小型变压器，来完成各种电压等级的电能分配，而多个电站联合起来组成一个电力系统时，除需要输电线路等设备外，也要依靠变压器把各种电压不相等的线路联接起来，形成一个系统。所以变压器在电力系统中，已成为不可缺少的重要设备。下面将变压器的基本知识作一概括介绍。

第一节 变压器的基本原理

1. 变压器 变压器是一种静止的电器。它由绕在同一个闭合的铁芯上的两个或两个以上的绕组组成，通过交变磁场的联系，把一种交流电的电压和电流转变为频率相同的另一种或几种数值不相等的电压和电流。

2. 变压器的工作原理 变压器的工作原理是基于电磁感应定律。在电工学中可知，当导线处在变动着的磁场中时，导线的两端就会感应出电势，这种现象就是电磁感应。图1-1所示的是变压器的原理图。在一个成闭合回路的铁芯3上，绕有原绕组1和副绕组2，这两个绕组（也叫做线圈）的匝

数通常是不相等的，它们分别为 w_1 匝和 w_2 匝。如果副绕组不接上负载，而将原绕组接到电压为 U_1 的交流电源上，那末

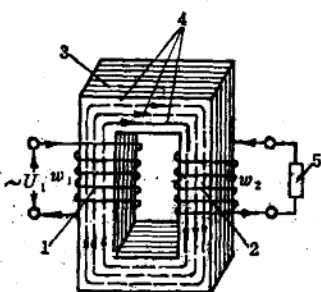


图1-1 变压器原理图

- 1—原绕组；2—副绕组；3—铁芯；
4—交变磁通 ϕ ；5—负载

就有交流电流流过原绕组，电流流过原绕组后，就产生了磁动势（简称磁势），在铁芯中就会建立起交变磁通 ϕ ，这个交变磁通 ϕ 与原、副绕组都同时相磁链。由于交变磁通 ϕ 是随时间而变化的，所以在两个绕组中就分别感应出瞬时电势 e_1 和 e_2 。

感应电势数值的大小，与绕组的匝数和磁通随时间变化的速率（即单位时间内磁通量的变化）成正比。假设在时间 t_1 时的磁通为 ϕ_1 ，到时间 t_2 时的磁通为 ϕ_2 ，那末在时间差 $t_2 - t_1 = \Delta t$ 的这一短暂的时间内，磁通量的变化是 $\phi_2 - \phi_1 = \Delta \phi$ ，所以磁通变化的平均速率可以表达为 $\frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ ，于是在该时间内感应电势的平均值 E_p 可用下式求得

$$E_p = w - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \text{ ①}$$

所以原绕组感应电势的平均值

$$E_{1p} = w_1 - \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

●这里只考虑感应电势数值的大小，而未考虑感应电势的方向，如考虑到方向，则表达式应为 $E_p = -w \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ 。

副绕组感应电势的平均值

$$E_{2p} = w_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

由于 $w_1 \neq w_2$, 所以 $E_{1p} \neq E_{2p}$ 。

如果将副绕组接上负载, 则在感应电势 E_{2p} 的作用下, 沿着副绕组和负载所组成的回路内就有电流流过, 这时原绕组便从电源中吸取电能, 并通过电磁感应将能量传递给副绕组, 再由副绕组供给负载, 这就是变压器的工作原理。

3. 常用术语及其含义 凡接到电源上吸取能量的绕组叫原边绕组, 也称原边、一次侧、初级; 而输出能量给负载的绕组叫副边绕组, 也称副边、二次侧、次级。

有关原绕组的各电量, 例如电势 E ●、电流 I 、电压 U 、阻抗 Z 等, 在它的代表符号的右下方均注以角码 1, 如 E_1 、 I_1 、 U_1 、 Z_1 等; 同样有关副绕组的各电量, 在它的代表符号的右下方均注以角码 2, 如 E_2 、 I_2 、 U_2 、 Z_2 等。

一般情况下, 变压器原、副两边的电压是不相等的, 如副边电压大于原边电压, 就叫做升压变压器; 如副边电压低于原边电压, 就叫做降压变压器。有时把电压高的这只绕组称为高压绕组, 而电压低的这只绕组就称为低压绕组 (本书常以高压绕组作为原边绕组来讨论)。

如果变压器只有两个绕组, 就叫做双绕组变压器, 或叫做双线圈变压器, 简称双圈变压器; 如果变压器有三个绕组, 就叫做三绕组变压器, 或叫做三线圈变压器, 简称三圈变压

●在交流电的各电量中, 例如电势、电压、电流等, 它们有瞬时值、有效值和最大值之分。用符号来表达时, 通常瞬时值用小写文字表示, 有效值用大写文字表示, 最大值用大写文字加角码 m 表示。例如电势用 e 、 E 、 E_m , 电压用 u 、 U 、 U_m , 电流用 i 、 I 、 I_m 表示等。

器，有多个绕组的变压器称多绕组变压器，原边和副边有共同绕组的变压器称为自耦变压器。

第二节 变压器的基本构造

每台电力变压器(指较大容量变压器而言)总是由铁芯、绕组、油箱、绝缘套管和冷却系统等五个主要部分构成，现分别叙述如下。

一、铁 芯

变压器的铁芯有两种基本的结构型式，一种叫芯式铁芯，也叫内铁式铁芯，如图1-2和图1-3所示；另一种叫壳式铁芯，也叫外铁式铁芯，如图1-4和图1-5所示。

在单相芯式变压器中(见图1-2)，是将绕组分别放在两个铁芯柱上，这两个铁芯柱上的绕组可以接成串联，也可以

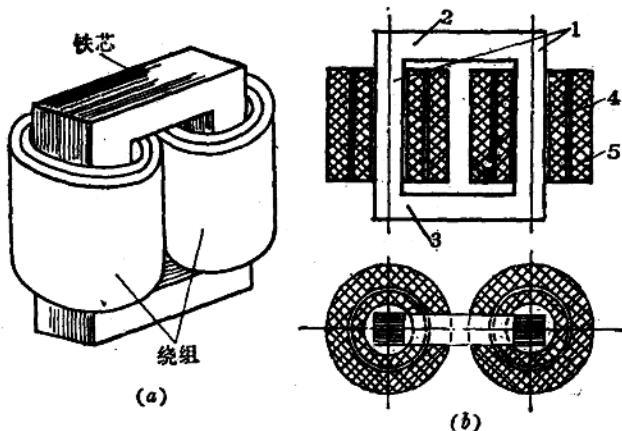


图1-2 单相芯式变压器的铁芯和绕组

(a) 外形，(b) 剖面图

1—铁芯柱；2—上铁轭；3—下铁轭；4—低压绕组；5—高压绕组

接成并联。在三相芯式变压器中（见图1-3），每相各有一个铁芯柱，因此共有三个铁芯柱，用上下两个铁轭把三个铁芯柱联接起来。

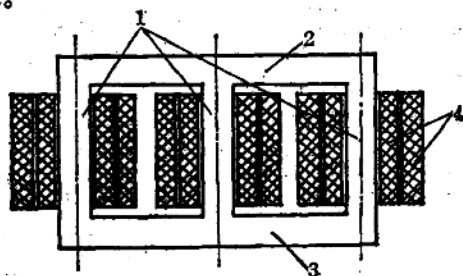
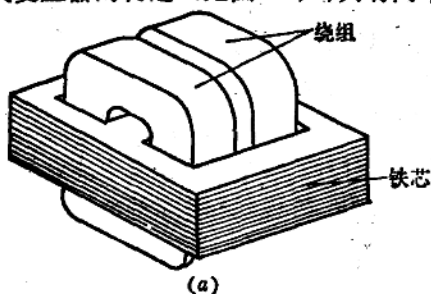


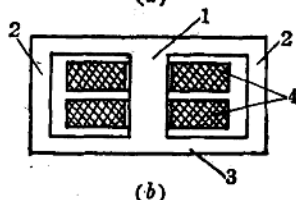
图1-3 三相芯式变压器的铁芯和绕组

1—铁芯柱；2—上铁轭；3—下铁轭；4—绕组

单相壳式变压器的构造（见图1-4），具有两个分支的磁



(a)



(b)

图1-4 单相壳式变压器的铁芯和绕组

(a) 外形；(b) 剖面图

1—铁芯柱；2—分支铁芯柱；3—铁轭；4—绕组

路系统，且中间一个铁芯柱的宽度等于两侧分支铁芯柱的宽

度之和。把绕组放在中间的铁芯柱上，两个分支铁芯柱分别围绕在绕组的外侧，好像是绕组的“外壳”似的，因而得名有壳式变压器之称。三相壳式变压器（见图1-5），可以看作是由三个独立的单相壳式变压器并排放在一起组成。

在结构上，芯式变压器比壳式变压器简单，而且绕组与铁芯之间的绝缘也比较容易处理，所以得到广泛的应用，在我国，只有小容量的单相变压器才采用壳式变压器，如无线电用的变压器等。

1. 铁芯的材料 为了降低铁芯中的发热损耗，变压器的铁芯是由厚度为0.35或0.5毫米的硅钢片迭装而成。这种硅钢片的含硅量达4~5%。为了减少涡流损失，在迭装之前，硅钢片的两面均涂以绝缘清漆，使片与片之间相互绝缘。在较老的产品中，亦有用0.04~0.06毫米厚的绝缘纸隔开作为片间绝缘的。

变压器的铁芯也有用一种叫做冷轧钢片做成的。这种钢片在沿着轧制的方向磁化时，有较小的铁中发热损耗和较高的导磁系数。当变压器铁芯的材料用了这种冷轧钢片时，它的体积和重量就会显著的减小、减轻。但冷轧钢片的价格要比普通的硅钢片贵些，在我国，目前生产的电力变压器都已普遍地使用冷轧钢片。

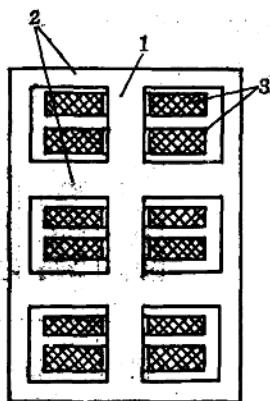


图1-5 三相壳式变压器的铁芯和绕组

1—铁芯柱；2—铁轭；
3—绕组

2. 铁芯的装配 铁芯用裁成长条的硅钢片迭装而成。迭装时每层在接缝处错开，如图1-6和图1-7所示。在每一层

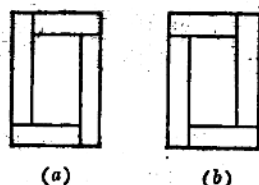


图1-6 单相变压器铁芯迭装法

(a) 第1、3、5……层；(b) 第2、4、6……层

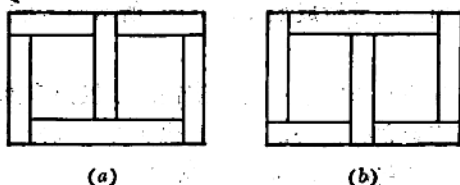


图1-7 三相变压器铁芯迭装法

(a) 第1、3、5……层；(b) 第2、4、6……层

铁芯的钢片接缝处，都被邻层的钢片盖上，用这种迭装法可使空气隙减小。当钢片迭装到所需要的厚度时，就用夹紧螺栓将钢片夹紧，使之成为一个坚固的铁芯整体。但夹紧螺栓与钢片之间应该绝缘，如果不绝缘，钢片就会被夹紧螺栓所短路，在此短路的地方就会引起过热，当过热严重时会导致烧坏附近的铁芯和绕组，所以是比较危险的。目前，在新的铁芯制造工艺中，铁芯柱已不再用螺栓来夹紧，而广泛地采用无纬环氧玻璃布带扎紧，但铁轭仍依靠型钢等夹件用螺栓夹紧。

3. 铁芯的截面 铁芯柱的截面，在容量较小的变压器中是做成方形的或长方形的，如图1-8(a)所示。当容量稍大些时，为了节省材料和充分利用空间，铁芯柱的截面做成一

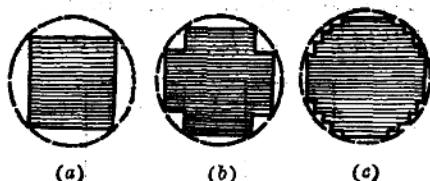


图1-8 铁芯柱的各种截面形状

(a) 方形; (b) 十字形; (c) 多级阶梯形

个外接圆的阶梯形, 如图1-8(b)所示的十字形截面; 随着变压器容量的不断增大, 铁芯柱的直径也随着增大, 阶梯的级数也随着增加, 则可做成如图1-8(c)所示的多级阶梯形截面。

在大容量的变压器中, 为了使铁芯中发出来的热量能被绝缘油在循环时充分地带走, 从而达到良好的冷却效果, 因此除将铁芯柱的截面做成阶梯形外, 还设有散热沟(油道), 如图1-9所示。散热沟的方向与钢片的平面可以做成平行的, 如图1-9(a)所示, 也可以做成垂直的, 如图1-9(b)所示, 垂直的效果比平行的好, 但铁芯的结构因而也复杂了。

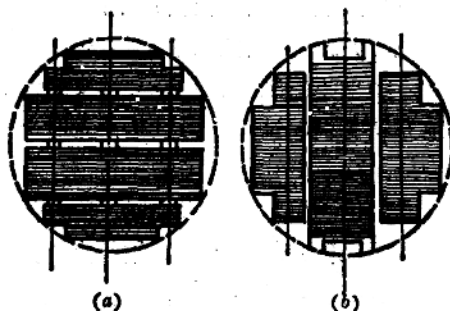


图1-9 有散热沟的铁芯柱截面

(a) 平行的; (b) 垂直的

铁轭的截面也有方形的和各种阶梯形的,如图1-10所示,为了减少变压器的空载电流和铁芯发热损失,铁轭的截面可以比铁芯柱的截面大5~10%。

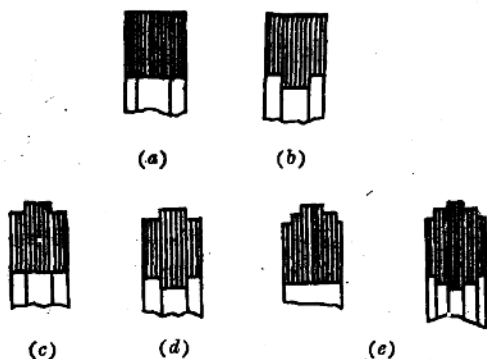


图1-10 铁轭截面的各种形状

(a) 方形; (b) 丁字形; (c) 倒丁字形; (d) 十字形;
(e) 多级阶梯形

4. 铁芯的接地 变压器在运行中,铁芯以及固定铁芯的金属结构是处在强电场之中,在电场的作用下,它具有较高的对地电位,如果铁芯不接地,它与接地的夹件(即夹紧上、下铁轭的型钢或金属构件)及油箱等之间就会有电位差存在,在电位差的作用下,会产生断续的放电现象,这是不允许的。因此必须将铁芯以及固定铁芯的金属结构接地,使之与油箱等同处于地电位。

铁芯通常是采用一点接地的方法以达到接地的目的,因为铁芯的硅钢片间是相互绝缘的,用以防止产生较大的涡流,因此不可以将所有的硅钢片都接地,否则即造成较大的涡流使铁芯发热,那么铁芯的接地又是怎样做到的呢?通常是将

铁芯的任意一片硅钢片接地来实现的，因为硅钢片间虽有绝缘，但其绝缘电阻值是很小的，它只足以防止涡流从一片流向另一片，而不能阻止感应的高压电荷，所以，我们若将铁芯的任一片硅钢片接地，那么整个铁芯也就都接地了。

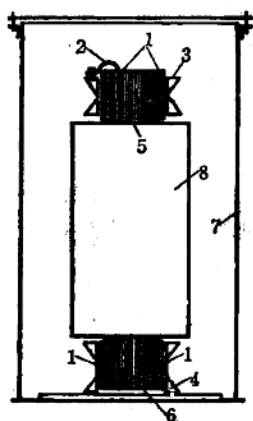


图1-11 变压器铁芯接地示意图

- 1—绝缘衬垫；2—接地铜片；3—上夹件；4—下夹件；5—铁芯上铁轭；6—铁芯下铁轭；7—箱壳；8—绕组

组成铁芯的硅钢片与上、下夹件之间是用绝缘物绝缘开来的，如图1-11中的1所示，我们用一片薄的接地铜片（如图中的2），一般厚度约为0.3毫米，将其一端插入上铁轭的任意两片硅钢片之间，它被铁轭的硅钢片所夹紧，而将其另一端与夹件相连接，由于夹件是直接接地的，于是铁芯就一点接地了。

某些变压器，由于其内部结构的需要，其上、下夹件是相互绝缘的，这时就必须在上、下铁轭各插入一片接地铜片，但其上、下铁轭接地的位置必须对应，即接地铜片到铁轭边缘的距离应相等，否则会使部分硅钢片间形成局部短路，产生大电流而引起铁芯发热。

铁芯的穿芯螺栓、螺帽、垫板等是不接地的，但由于它们都处在铁芯之中，所以与铁芯一样是同属于地电位的。

二、绕 组

我国生产的电力变压器，基本上只有一种结构型式，即

芯式变压器，所以它的绕组也都是采用同心绕组。所谓同心绕组，就是像前面图1-2和图1-3所示的那样，在铁芯柱的任一横断面上，绕组都是以同一圆心的圆筒形线圈套在铁芯柱的外面。在一般的情况下总是将低压绕组放在里面靠近铁芯处，将高压绕组放在外面。高压绕组与低压绕组之间，以及低压绕组与铁芯柱之间都必须留有一定的绝缘间隙和散热通道（油道），并用绝缘纸柏筒隔开。绝缘距离的大小，决定于绕组的电压等级和散热通道所需要的间隙。当低压绕组放在里面靠近铁芯柱时，因它和铁芯柱之间所需的绝缘距离比较小，所以绕组的尺寸就可以减小，整个变压器的外形尺寸也就同时减小了。

同心绕组按其结构不同可以分为下列三种基本形式。

1. 圆筒形绕组 它是一个圆筒形螺旋，其线匝是用扁线彼此紧靠着绕成的，如图1-12所示。圆筒形绕组可以绕成单层，如图1-12(a)所示；也可以绕成双层，如图1-12(b)所示。通常总是尽量避免用单层圆筒，而是绕成双层圆筒，因为绕成单层时，导线受到弹性变形的影响，线圈容易松开，使端部线匝彼此靠得不够紧；而绕成双层后，松开的倾向就小得多了。当电流较大时，也采用每一线匝由数根导线沿轴向并联起来绕成，但并联导线数通常不多于4~5根。

圆筒形绕组，其两端的两匝作为螺旋的一部分，是处在一个与轴线成一定倾斜角的平面内，也就是说两端的两匝是斜的，为了使绕组能在平面上垂直竖立，在每层的起始一匝和最后一匝都放上一个用胶木或纸柏板条作成的端圈，如图1-12中的D所示。圆筒形绕组与冷却介质的接触面积最大，因此冷却条件较好，但这种绕组的机械强度较弱，一般适用于小容量变压器的低压绕组。

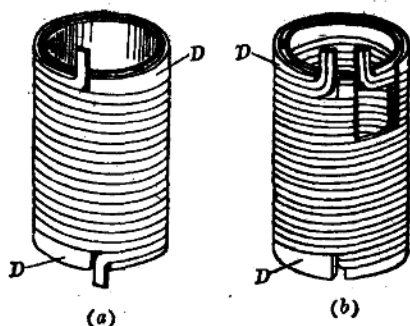


图1-12 圆筒形绕组

(a) 单层圆筒; (b) 双层圆筒

2. 螺旋形绕组 容量稍大些的变压器的低压绕组匝数很少(20~30匝以下),但电流却很大,所以要求线匝的横截面很大,因此要用很多根导线(6根或更多)并联起来绕。前面已经说过,在圆筒形绕组里是不能用很多根导线并联起来绕的,因为这些导线要在同一层里一根靠着一根排列着绕,结果使线匝的螺距太大,这样的线圈很不稳固,而且它的高度也没有很好地利用,所以在并联导线的数目较多时,仍采用圆筒

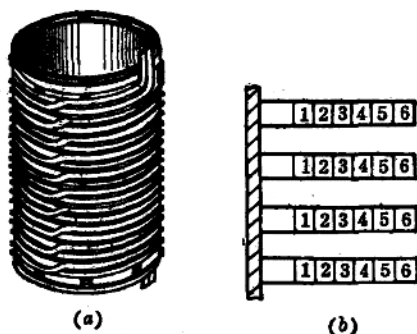


图1-13 螺旋形绕组

(a) 外形; (b) 绕组纵剖面导线的排列

形绕组是不适宜的，于是就有所谓螺旋形绕组出现，如图1-13所示。圆筒形绕组实际上也是螺旋形的，不过这里所讲的螺旋形绕组每匝并联导线的数量较多，而且是沿径向一根压着一根地迭起来绕。图1-13(b)所示的，是螺旋形绕组导线匝间排列的一部分（只拿出其中4匝），每匝有6根导线并联，把6根并联的导线绕成一个螺旋，各个螺旋不是像圆筒形绕组那样彼此紧靠着，而是中间隔着一个空的沟道。图1-13(a)为螺旋形绕组绕成后的外貌。

螺旋形绕组当并联导线更多时（例如12根），那末就把并联导线分成两组并排起来绕，这样就绕成了双层螺旋，图1-13(a)所示的即为双层螺旋。

由于导线会产生附加损耗，导线的截面积越大，附加损耗也就越迅速地增加，为了减少这些附加损耗，螺旋形绕组的并联导线要进行换位。换位的基本精神是要使并联的每根导线不像图1-13(b)所示的那样保持它在径向不变的位置，例

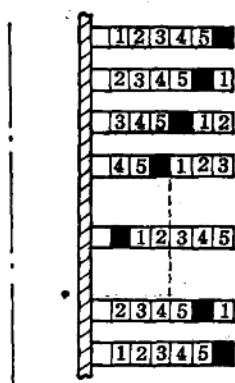


图1-14 螺旋形绕组换位时导线的位置

如在没有换位时，第6根导线在整个线圈高度里永远是在最外层，而利用换位就可以使外层导线依次序占据所有可能的径向位置，如图1-14中涂黑的导线所示。这样的换位叫做完全换位，实际上很少使用完全换位，因为每一根导线换位，都需要多余的地方，以致过份地增加了线圈的轴向尺寸，实用中多采用半数线匝换位，如图1-15所示。螺旋形绕组的内

径一般较大，都在 300 毫米以上，如内径小于 300 毫米左右，弯绕时就比较困难，所以对小容量变压器来讲，就不宜采用螺旋形绕组。

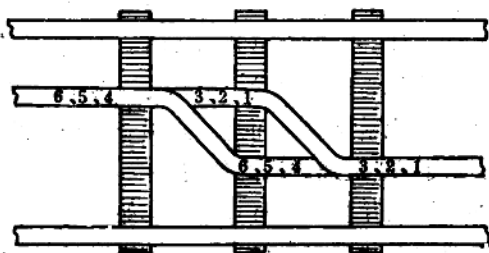


图1-15 螺旋形绕组的半数线匝换位

3. 连续式绕组 如图1-16所示。这种绕组是没有焊接头的，它只能用扁线绕制。这种绕组导线的匝间排列，如图1-16 (b) 所示，它是依靠特殊的绕制工艺绕成的。从一盘绕组（也称一个线段）到另一盘绕组，它们的接头是交替地处在线圈的内侧和外侧，这些接头都是用绕制线圈的导线自然连接

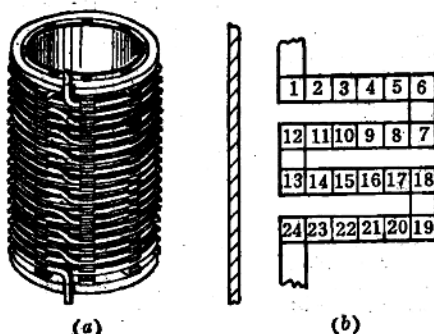


图1-16 连续式绕组

(a) 外形图；(b) 绕组纵剖面导线的匝间排列