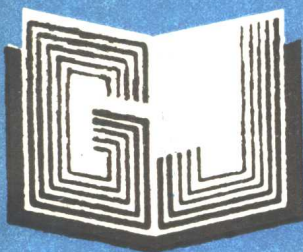


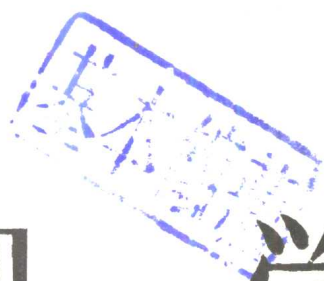
916897



高等学校教材

专科适用

电 机 学



北京电力专科学校 杨传箭

13
28



高等学校教材

===== 专 科 适 用 =====

电机学

北京电力专科学校 杨传箭

水利电力出版社

1

高等学校教材
(专科适用)

电机学

北京电力专科学校 杨传箭

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12.5印张 280千字

1990年4月第一版 1990年4月北京第一次印刷

印数0001—5880册

ISBN 7-120-01035-2/TM·296

定价2.55元

1
4

内 容 提 要

本书主要介绍电力变压器、异步电动机、同步发电机的结构、基本原理和运行性能。在内容选择上，特别注意大型机组、电机的运行等问题且紧密联系生产实际。

全书共十四章。每章后有小结和思考题，思路连贯，重点突出。

本书系高等学校火电厂集中控制专业专科教材，但也可作为少时数的其他电力类有关专业的教材和职大有关专业的教材，并可供从事电力生产的技术人员参考。

前 言

本书是根据高等学校火电厂集中控制专业的专科“电机学课程基本要求”编写的，在1988年11月高等专科电力工程类专业教学组会上被定为上述专业的电机课程教材，适用学时数约为70，也可作为大专层次电力类其他专业学时数少的电机课程的教材。

按培养目标的需要，本书主要论述变压器、异步电动机、同步发电机的结构、基本原理和运行性能，在结构方面，突出大型机组的内容，在基本原理方面，选择了有针对性的内容，在运行性能方面，强调联系生产实际的内容。在全书选材上，注意到了先进性。

本书承沈阳电力专科学校严震池审阅并提出了许多宝贵意见，特此致谢。

由于笔者水平所限，书中定有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

1989.3

目 录

前 言

绪 论..... 1

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的类别和结构..... 4

1-1 变压器的变压原理 4

1-2 变压器的类别 5

1-3 电力变压器的结 构 5

1-4 变压器的铭牌 9

小 结.....10

习 题.....10

第二章 变压器的基本原理.....11

2-1 变压器的空载运行11

2-2 变压器的负载运行18

2-3 参数的测定23

2-4 标么值25

2-5 变压器的运行特性28

小 结.....33

习 题34

第三章 三相变压器36

3-1 磁路系统36

3-2 连接组别37

3-3 磁路和绕组连接方式对电势波形的影响42

3-4 不对称运行44

3-5 并联运行51

小 结.....52

习 题.....52

第四章 变压器的暂态过程.....54

4-1 二次侧突然短路54

4-2 空载投入57

小 结.....59

习 题.....59

第五章 特种电力变压器60

5-1 三绕组变压器60

5-2 自耦变压器	63
5-3 分裂变压器	66
小结	68
习题	68

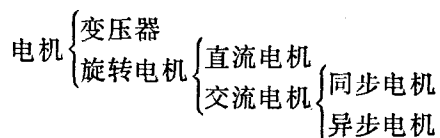
第二篇 交 流 电 机

第六章 交流电机的绕组及电势和磁势	69
6-1 交流电机的基本工作原理	69
6-2 交流电机的绕组	70
6-3 电势	75
6-4 单相脉动磁势	82
6-5 三相旋转磁势	89
6-6 磁势的谐波分量	91
6-7 空间向量和时间相量的联合应用	91
小结	92
习题	93
第七章 异步电动机的类别和结构	94
7-1 异步电机的三种运行状态	94
7-2 异步电动机的类别和结构	95
7-3 异步电动机的铭牌	99
小结	100
习题	100
第八章 异步电动机的基本原理	101
8-1 转子不转时的状况分析	101
8-2 转子旋转时的状况分析	105
8-3 异步电动机的等效电路	107
8-4 电磁转矩	111
8-5 运行特性	117
小结	118
习题	119
第九章 异步电动机的起动和调速	120
9-1 起动性能	120
9-2 鼠笼式电动机的起动	121
9-3 绕线式电动机的起动	122
9-4 深槽式和双鼠笼式电动机及其起动	123
9-5 异步电动机的调速方法简述	125
小结	126
习题	126
第十章 同步发电机的冷却方式和结构	127
10-1 同步发电机的种类和冷却方式	127

10-2	同步发电机的结构	128
10-3	同步发电机的铭牌	136
小结	.....	136
习题	.....	137
第十一章	同步发电机的基本原理	138
11-1	电枢反应	133
11-2	隐极同步发电机的电势方程式和等效电路及相量图	142
11-3	基本运行特性	146
11-4	损耗与效率	149
小结	.....	150
习题	.....	150
第十二章	同步发电机的运行	151
12-1	并列的条件与方法	151
12-2	功角特性及有功功率的调节	155
12-3	静态稳定的概念	157
12-4	无功功率的调节及U形曲线	159
12-5	调相运行	162
12-6	不对称运行	164
12-7	无励磁运行	169
12-8	同步发电机与系统间的振荡	171
小结	.....	173
习题	.....	174
第十三章	同步发电机的三相突然短路	175
13-1	磁链守恒原理	176
13-2	突然短路过渡过程的分析	177
13-3	次暂态电抗和暂态电抗	180
13-4	突然短路电流	183
小结	.....	185
习题	.....	186
第十四章	同步发电机的励磁系统	187
14-1	对励磁系统的要求	187
14-2	各种励磁方式简介	187
14-3	对各种励磁方式的评价	190
14-4	励磁系统中的感应子发电机	191
小结	.....	193
习题	.....	193

绪 论

电机，是一种能量转换的机器。它广泛地应用于工农业生产、科学实验和人们的生活中。电机的种类很多，就大的方面可列成以下各类：



它们的共同特点是，其工作原理都基于电磁感应定律和电磁力定律，且以能量转换和输出为目的。除变压器是静止的电气设备之外，其余的均为旋转电机。发电机和电动机属电机的两种不同运行方式，它们本身是可逆的。

在电力系统中，使用电机的数量和种类是很多的。电机是电力系统中极重要而又应用很普遍的设备。同步发电机是电力系统的电源；变压器是输、配电的关键设备；异步电动机（又称感应电动机）是电厂各种转动机械的原动机；直流电机也作为电厂中的直流电源或其他个别场合的特殊需要而存在，此外，还有各种控制用的小电机等。

根据专业的需要，本书主要阐述电力系统中主要的三类电机（变压器、异步电机、同步电机）的基本原理、结构和运行性能。

一、电机发展简史及趋势

随着生产力的发展，当人们发现蒸汽动力在输送和管理中已不能满足需要，要寻找新的能源和动力时，电能得到了兴起和发展。1821年法拉第表演了电流在磁场中受到力的作用的实验，不久就制成了电动机的模型。1831年法拉第发现了移动磁铁能在线圈中感应电流的现象，为人类制造发电机奠定了基础。在此同期，1824年，阿拉果发现了旋转磁场现象，从而产生了对于以后的交流电机来说非常重要的旋转磁场的概念。1933年，楞次证明了可逆原理。该原理说明一台电机既可作发电机运行，也可作电动机运行。1889年，多里沃一多勃罗沃尔斯基提出采用三相制的建议，又设计和制造了第一台三相变压器和三相异步电动机。三相的电动机结构简单，运行经济、可靠，很快得到应用和推广。至于发电机的原动机，19世纪90年代以来，已由往复式蒸汽机，发展为高速的汽轮机和低速的水轮机。

电机的发展和完善，主要体现在两个方面，即发电机、变压器的单机容量的不断增大，和中、小型电动机的应用范围不断扩大。电机容量增大，相应的能量损耗也增加，电机的冷却问题就变得非常突出。目前，汽轮发电机的冷却介质已由空气冷却发展到氢气冷却、水冷却，冷却方式对氢冷、水冷电机来说已由外冷发展到内冷。单机容量的增大，与冷却技术的发展，绝缘、硅钢片、转子钢材等材料的改进和性能提高有密切关系。随着新材料、新技术、新工艺的不断出现，电机制造业也得到较快地发展。而超导技术和磁流体

技术的发展,将对电机工业的发展起突破性的作用。超导发电机和磁流体发电机已投入工业使用。

二、我国电机制造业简况

解放前,我国仅能生产200kW的发电机和2000kVA的变压器。解放后,电机制造业得到迅速发展。1953年进行了中、小型电机产品的全国统一设计,试制了大量新产品。1955年制成10000kW的水轮发电机。1956年制成12000kW的汽轮发电机。在第二个五年计划的头三年(1958~1960年),我国自行设计并制成了72500kW的水轮发电机和50000kW氢冷、100000kW氢内冷的汽轮发电机。1958年,我国制成了世界上第一台用于生产的双水内冷汽轮发电机(12000kW)。双水内冷发电机的制造成功,为电机制造工业的继续发展开辟了一条崭新的道路。1960年又制成了100000kW双水内冷汽轮发电机。1959年,还制造了220kV、120000kVA的三相变压器。在同一时期,直流电机和一般交流电机的制造也发展迅速,如当时已制成6300kW的大型异步电动机和4500kW的直流电动机等。1972年制成了300000kW的双水内冷汽轮发电机。目前,我国已能制造600000kW的汽轮发电机和容量为360000kVA的变压器。

三、电机学中用到的几个基本电磁定律

各类电机的作用原理均以电磁基本定律为出发点,复习并掌握以下几个电磁定律,对学习电机学非常有用。

(一) 电磁感应定律

如果一个线圈放在磁场中,不论是磁场变化还是线圈本身移动,造成和线圈交链的磁通随时间发生变化时,线圈内就会感应出电势,这种现象叫做电磁感应现象。电磁感应定律就是定量地描述这个现象,有两种表述方式:

(1) 线圈和磁场相对静止时,这时感应电势纯粹是由于和线圈交链的磁通本身随时间变化而产生,这种感应电势称为变压器电势。该电势的方向由楞次定律决定。如果把感应电势的正方向与磁通的正方向规定为符合右螺旋关系,则感应电势 e 可表示为

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (0-1)$$

式中 N —— 线圈匝数;

ϕ —— 磁通, Wb;

t —— 时间, s;

e —— 电势, V。

上式说明,感应电势的大小与线圈交链的磁链的变化率成正比。

(2) 磁场不变,但线圈和磁场间有相对运动,这样感应的电势称为速率电势。该电势方向用右手定则确定。描述这种电势的大小可以用另外一种形式。通常的说法是:当某一导体在磁场中切割磁力线时,则导体中感应的电势 e 为

$$e = Blv \quad (0-2)$$

式中 B 、 l 、 v 三个量互相垂直,其物理意义为

B —— 磁通密度, T;

l —— 导体有效长度, m;

v ——导体相对于磁场运动的线速度, m/s.

上式说明, 有一定长度的导体, 在均匀的磁场中切割磁力线时, 其感应电势大小与切割速度成正比。

(二) 全电流定律 (安培环路定律)

环绕载流导体, 取任一磁通的闭合回路 l , 设 $\vec{H}$ 表示沿着该回路上各点切线方向上的磁场强度, 按全电流定律有如下关系

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \Sigma I \quad (0-3)$$

式中 ΣI 为回路 l 所包围的全电流。若导体电流的方向与积分路径的方向符合右螺旋关系, 该电流取正号, 反之取负号。

上式说明, 在环绕载流导体的任一磁通闭合回路中, 磁场强度沿着闭合回路的线积分, 等于该积分回路所包围电流的总和。

在实际电机的对称磁路中, 常将磁路分成若干段, 而把每一段磁路的磁场强度 $\vec{H}$ 取作常数 H , 于是积分式 $\oint_l \vec{H} d\vec{l}$ 便可用代数式 ΣHl 代替, 式 (0-3) 可变为

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = NI \quad (0-4)$$

或

$$\sum_i^n H_i l_i = NI \quad (0-5)$$

式中 H_i ——第 i 段磁路的磁场强度, A/m;

l_i ——第 i 段磁路的平均长度, m;

N ——磁通回路包围的导体总数, 即线圈匝数;

I ——每一导体中的电流, A。

(三) 比奥-沙伐电磁力定律

若磁场与载流导体互相垂直, 则作用在导体上的电磁力与磁场应有如下关系:

$$f = Bli \quad (0-6)$$

式中 B ——磁通密度, T;

l ——导体的有效长度, m;

i ——导体中的电流, A;

f ——作用在导体上的电磁力, N。

电磁力的方向由左手定则确定。

(四) 基尔霍夫定律

基尔霍夫第二定律指出: 对于电路内的任一闭合回路, 若沿回路循行一周, 回路内所有电势之和等于所有电压降之和, 即

$$\Sigma e = \Sigma u \quad (0-7)$$

列方程式时, 注意电势 e 和电压 u 的方向与回路的循行方向一致者取正号, 反之取负号。

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的类别和结构

电力系统中，用有各类变压器。如将发电机发出的电能向远方输送时，为减少输电线路上的电能损耗，需要升高电压；为满足用户用电的要求，又需要降低电压，这就需要变压器，它是电力系统中重要设备。

变压器是一种静止的电器。它的作用是将一种等级的电压与电流变成同频率的另一种等级的电压与电流。变压器在电能的测试、控制和特殊用电设备上应用也很广。用于不同目的的变压器，基本原理虽相同，但结构上却有很大差别。电力系统中供输配电用的变压器，称为电力变压器。本书研究的变压器即电力变压器。

1-1 变压器的变压原理

变压器是利用电磁感应原理工作的。最简单的变压器是由两个绕组、一个铁芯组成，如图1-1所示。两个绕组套在同一铁芯上。通常，一个绕组接电源，另一个绕组接负载。我们把前者叫做一次绕组，属一次侧。把后者叫做二次绕组，属二次侧。

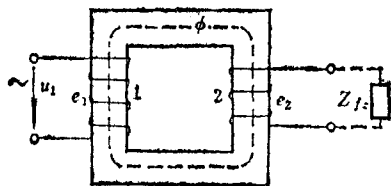


图 1-1 变压器的原理图
1—一次绕组；2—二次绕组

当一次侧接上电压为 u_1 的交流电源时，一次绕组将流过交流电流，并在铁芯中产生交变磁通 ϕ 。该磁通穿链着一、二次绕组。根据电磁感应定律，磁通 ϕ 在一、二次绕组中产生的感应电势分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

式中 N_1 ——一次绕组匝数；

N_2 ——二次绕组匝数。

由于一般的变压器 $N_1 \neq N_2$ ，因此 $e_1 \neq e_2$ ，这就说明一、二次侧电势不等，也可以说一、二次电压不等，起了变压的作用。但其频率还是一样的。

如果二次侧接上负载 Z_L ，则在 e_2 的作用下将产生二次电流，并输出功率，说明变压器起了传递电能的作用。

由上述可知，一、二次绕组的匝数不等，是变压的关键。另外，可以看出，此类变

器一、二次侧之间没有电的直接联系，只有磁的耦合；而穿链一、二次绕组的磁通，起着联系一、二次侧的桥梁作用。

1-2 变压器的类别

为达到不同的使用目的并适应不同的工作条件，变压器有很多类型。可按其用途、绕组构成情况、相数、调压方式、冷却方式来进行分类。

按用途不同，电力变压器可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、厂用变压器等。

按绕组构成情况不同，可分为双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器、分裂变压器等。

按相数不同，可分为单相变压器、三相变压器。

按调压方式不同，可分为无激磁调压变压器、有载调压变压器。

按冷却方式不同，可分为干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环变压器、强迫油循环导向冷却变压器等。

1-3 电力变压器的结构

各类变压器结构很不相同。这里以中型油浸风冷电力变压器为例，扼要地介绍其主要部件。

变压器主要由以下几部分组成：

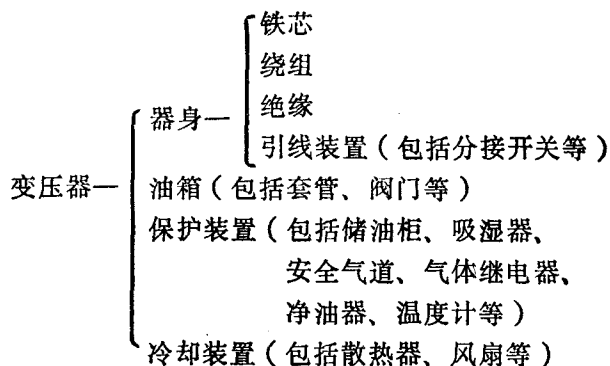


图1-2是油浸风冷变压器的外形图。图1-3是变压器器身结构示意图。

下面对各部分逐一介绍。

一、铁芯

铁芯用以构成耦合磁通的磁路，通常用0.35mm或0.5mm厚的硅钢片叠成。套绕组的部分叫芯柱，连接芯柱的部分称为铁轭。

采用硅钢片制成铁芯是为了提高磁路的导磁性能和减小涡流、磁滞损耗。硅钢片有热轧和冷轧两种。冷轧硅钢片比热轧硅钢片导磁系数高、损耗小。一般，当磁通密度达到

1.45T时，热轧硅钢片开始饱和，而冷轧硅钢片在1.7T时才开始饱和。冷轧硅钢片还具有方向性，即沿轧碾方向有较小的铁耗和较高的导磁系数。热轧硅钢片的两面都涂有绝缘漆，以防止因片间短路而增大涡流损耗。

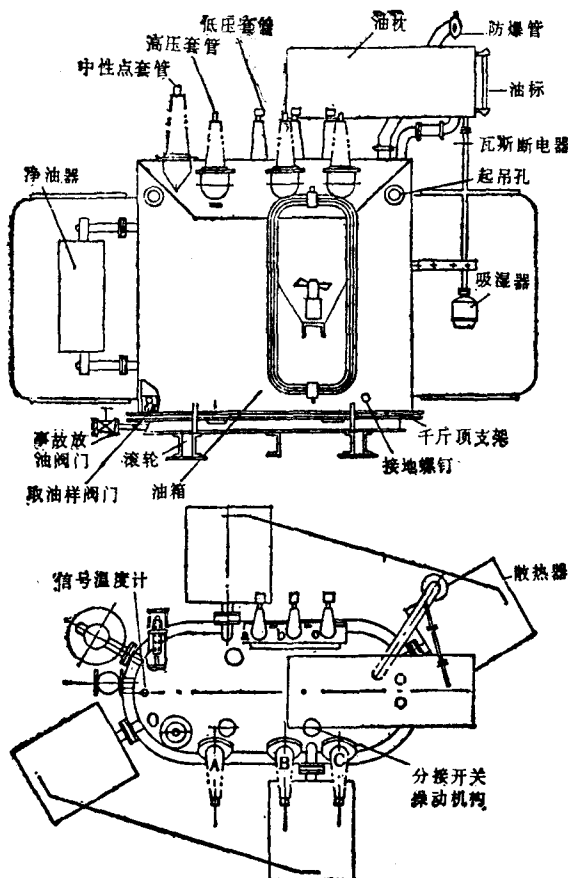


图 1-2 油浸风冷变压器外形图

在叠装硅钢片时，要把相邻层的接缝错开，如图1-4(a)、(b)所示，即每层的接缝都被邻层钢片盖掉。若第一层如图1-4(a)所示，第二层就应如图1-4(b)所示，以下依此类推。这种叠法的优点是接缝处气隙小，夹紧结构简单。

大型变压器中采用高导磁系数、低损耗、晶粒取向的冷轧硅钢片时，应用斜切钢片，如图1-5所示。这样的切装法能使磁通方向和钢片的轧碾方向基本上一致，可减少损耗。

芯柱的截面一般为阶梯形，这样可充分利用圆形绕组内的空间。铁轭截面有T形和多级梯形的。较大直径的铁芯，叠片间留有油道，以利散热。芯柱一般用环氧树脂玻璃布带扎紧。

三相变压器的铁芯有三柱式的和五柱式的，如图1-6所示。

为了防止变压器在运行时由于静电感应金属构件及铁芯上产生悬浮电位（此电位易造成对地放电），铁芯和金属构件均应接地。

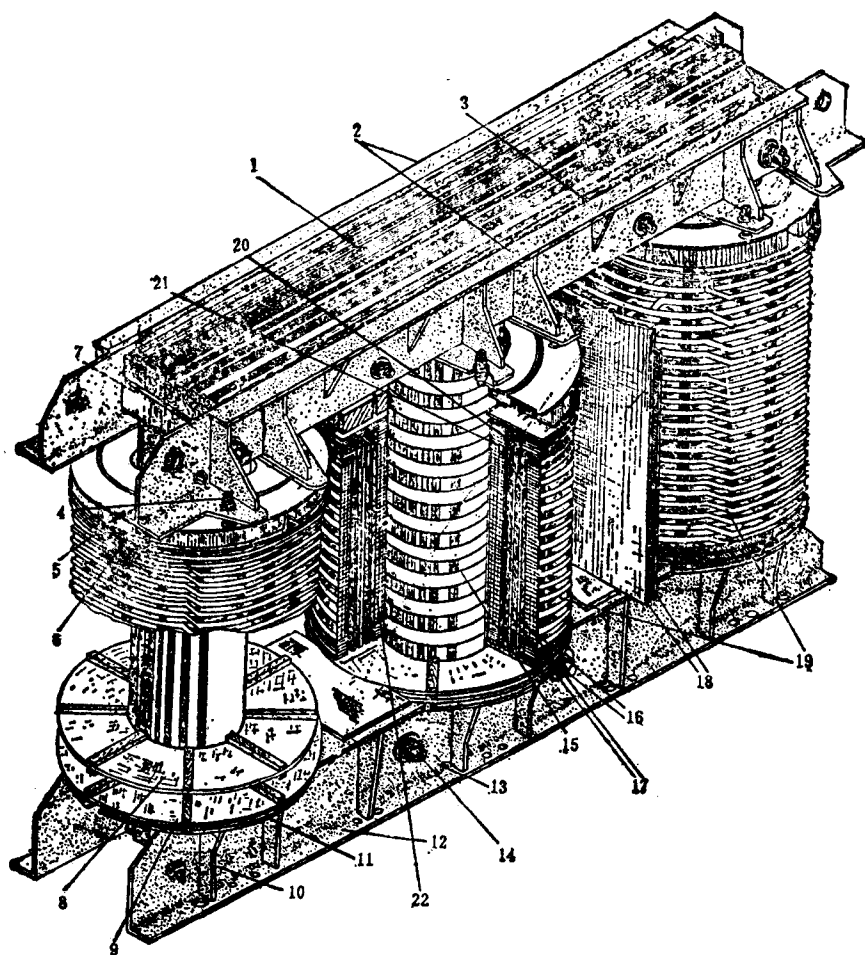


图 1-3 变压器器身结构示意图

1—铁轭；2—上夹件；3—上夹件绝缘；4—压钉；5—绝缘纸圈；6—压板；7—方铁；8—下铁轭绝缘；9—平衡绝缘；10—下夹件加强筋；11—下夹件上肢板；12—下夹件下肢板；13—下夹件腹板；14—穿芯螺杆；15—铁芯柱；16—绝缘纸筒；17—油道撑条；18—相间纸隔板；19—高压绕组；20—角环；21—静电环；22—低压绕组

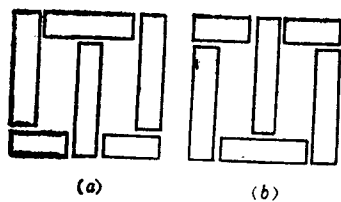


图 1-4 铁芯相邻层硅钢片的接缝
(a)奇数层；(b)偶数层

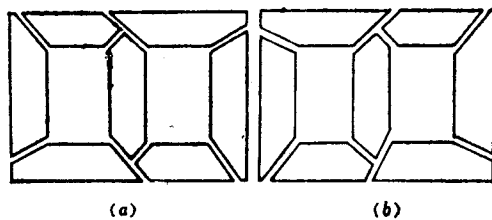


图 1-5 斜切钢片及其叠法
(a)奇数层的叠法；(b)偶数层的叠法

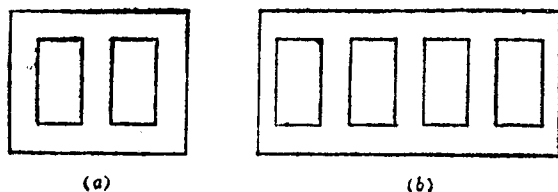


图 1-6 三相变压器的铁芯
(a)三柱式；(b)五柱式

二、绕组

绕组是变压器的电路部分。它一般用有电缆纸绝缘的铜线或铝线绕成。为了使绕组便于制造和在电磁力作用下受力均匀以及有良好的机械性能，一般将绕组制成圆形。它们在芯柱上的安排方法可有同芯式和交迭式两种。电力变压器采用前一种，即将

圆筒形的高、低压绕组同心地套在芯柱上，低压绕组在里，靠近铁芯，高压绕组在外。这样放置有利于绕组对铁芯的绝缘。

根据绕组绕制方法的不同，绕组可分为圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式等几种，如图1-7(a)、(b)、(c)、(d)所示。一般，容量在630kVA以下的变压器采用圆筒式绕组；容量在800kVA以上、电压在35kV以下的，采用螺旋式绕组；容量在630kVA以上、电压为35~110kV的，采用连续式绕组；容量在31500kVA以上、电压为220kV及以上的，采用纠结式绕组。

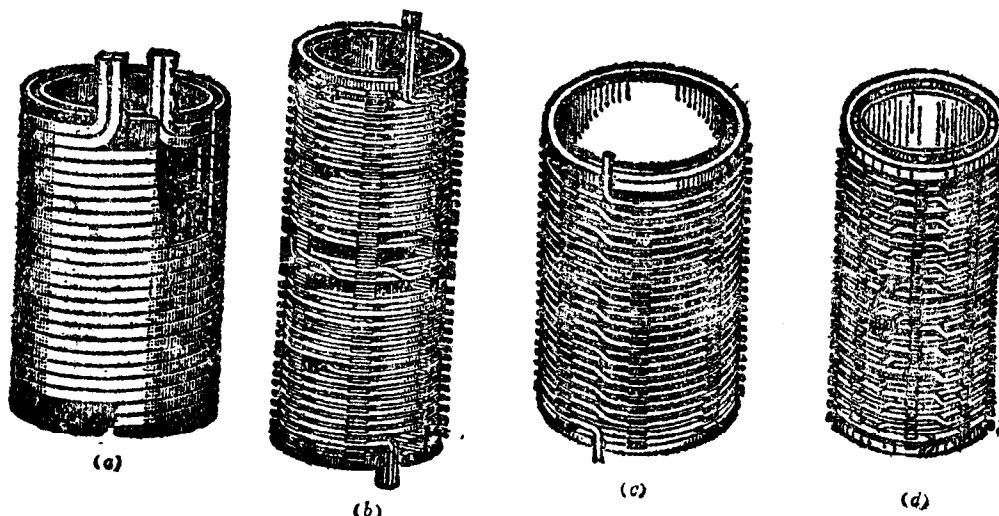


图 1-7 绕组的形式
(a)圆筒式；(b)螺旋式；
(c)连续式；(d)纠结式

几根导线并联起来绕制绕组时要换位。所谓换位，即让各导线在绕制时互换里、外层的位置，目的是为了使各股导线最终阻抗相等，运行时电流分配均匀，从而减少导线中的附加损耗。

三、绝缘

导电部分间及对地都需绝缘。变压器的绝缘包括内绝缘和外绝缘。所谓内绝缘指的是油箱内的绝缘，包括绕组、引线、分接开关的对地绝缘，相间绝缘（又称主绝缘）以及绕

组的层间、匝间绝缘（又称纵绝缘）；外绝缘指的是油箱外导线引出线间及其对地的绝缘。

变压器里的油，既起冷却作用，也起绝缘作用。

四、分接开关

变压器常利用改变绕组匝数的方法来进行调压。为此，把绕组引出若干抽头，这些抽头叫分接头。用以切换分接头的装置，称为分接开关。分接开关又分为无激磁分接开关和有载分接开关。前者，必须在变压器停电的情况下切换；后者，可以在不切断负载电流的情况下切换。

五、保护装置（参阅图1-2）

1. 储油柜

储油柜又叫油枕。它的作用有两个：调节油量，保证变压器油箱内经常充满油；减少油和空气的接触面，从而降低变压器油受潮和老化的速度。

2. 吸湿器

吸湿器又叫呼吸器。通过它使大气与油枕内连通。当变压器油热胀冷缩时，气体经过它出进，以保持油箱内压力正常。吸湿器内装有硅胶，用以吸收进入油枕中空气的潮气。

3. 安全气道

安全气道又叫防爆管。它的出口处装有玻璃或薄铁板。其作用是当变压器内部因发生严重故障而压力骤增时，让油气流冲破玻璃，向外喷出，以降低箱内压力，防止油箱爆破。

4. 气体继电器

气体继电器（瓦斯继电器）装在油箱和油枕的连管中间，作为变压器内部故障的保护设备。

5. 净油器

净油器又称热虹吸过滤器。它是利用油的自然循环，使油通过吸附剂进行过滤、净化，以改善运行中变压器油的性能，防止油的迅速老化。

6. 温度计

温度计用以测量油箱内的上层油温，监测变压器的运行温度，保证变压器的安全运行。

1-4 变 压 器 的 铭 牌

每台设备上都装有铭牌，用以标明该设备的额定数据和使用条件。这些额定数据和使用条件所表明的是：制造厂按照国家标准在设计及试验该类设备时，必须保证的额定运行情况。所谓额定值，是保证设备能正常工作，且能保证一定寿命而规定的某量的限额。变压器的铭牌上主要有以下几项：

额定容量 指的是额定视在功率，单位用千伏安（kVA）表示。双绕组变压器一、二次侧的额定容量是相等的。

额定电压 单位用千伏（kV）表示。一次绕组额定电压 U_{1n} 是指规定加到一次侧的