

中等专业学校教材

电 机 学

北京电力学校 杨传箭 编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书共分二十三章，主要阐述同步电机、变压器、异步电机、直流电机的基本原理和运行性能，并对其结构也作了简要的介绍。书中各章均附有小结和习题。

本书结合中专教学的特点，分析问题侧重于物理概念，思路连贯并注意突出重点。

本书系中等专业学校发电厂及电力系统专业、电力系统继电保护专业的教材，也可作为电力类其他专业的教学用书，并可供有关技术人员参考。

中等专业学校教材

电 机 学

北京电力学校 杨传简编

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

北京市昌平沙河建华印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 17.5印张 400千字

1985年8月第一版 1985年8月北京第一次印刷

印数00001—40000册 定价3.15元

书号 15143·5874

前 言

本书是根据水利电力部关于编写第二轮教材的要求，按照1982年电机学课程组第一次会议通过的“编写提纲”，在总结第一轮《电机学》教材的基础上重新编写的，作为中等专业学校发电厂及电力系统专业、电力系统继电保护专业的教材，也可作为电力类职工中专的教学用书和电力专业人员的参考书。

本书按变压器、同步电机、异步电机、直流电机的顺序，论述其简单结构、基本原理和运行性能。根据中专教材应有的特点，特别注意阐述物理概念，努力做到突出重点，并考虑到学生自学本书的可能性；此外，在选材上，尽量联系电力生产的实际。

第一轮《电机学》的编写者是：赖松年（编写变压器部分）、万易（编写异步电机部分）、侯经枢（编写直流电机部分）、杨传箭（编写绪论及同步电机部分，并担任主编）。本书是由杨传箭重新编写的。

张泳同志认真、详细地审阅了本书稿，并提出很多宝贵意见；一些兄弟学校的电机教师提供了有关资料；杜庸同志绘制了本书的大部分插图。在此，对以上同志表示衷心的感谢。

由于水平所限，书中可能还有不少缺点，请使用本书的师生和读者指正。

编 者

1984.8.3.北京

目 录

前 言	
绪 论	1

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本知识及结构	4
第一节 基本原理和分类	4
第二节 结构简介	5
第三节 铭 牌	10
小 结	10
习 题	11
第二章 单相变压器的空载状态分析	11
第一节 空载时的物理状况	11
第二节 空载电流和空载损耗	17
第三节 空载时的等值电路和向量图	18
第四节 空载试验	20
小 结	21
习 题	21
第三章 单相变压器的负载状态分析	22
第一节 负载时的物理状况	22
第二节 负载运行时的基本方程式	24
第三节 负载时的等值电路和向量图	25
第四节 短路试验	28
第五节 标么值	30
第六节 运行特性	33
小 结	39
习 题	39
第四章 三相变压器	41
第一节 磁路系统	41
第二节 连接组别	42
第三节 磁路和绕组连接方式对电势波形的影响	49
第四节 不对称运行	52
小 结	57
习 题	57

第五章 其他变压器	58
第一节 三绕组变压器	58
第二节 自耦变压器	62
小 结	66
习 题	66
第六章 变压器的运行分析	66
第一节 并联运行	67
第二节 突然短路	71
第三节 空载投入	74
小 结	76
习 题	77

第二篇 同 步 电 机

第七章 同步发电机的基本知识及结构	79
第一节 基本原理	79
第二节 分类及发展概况	80
第三节 结构简介	80
第四节 铭 牌	89
小 结	90
习 题	90
第八章 交流绕组及其电势和磁势	91
第一节 交流绕组的基本知识	91
第二节 三相双层绕组	91
第三节 三相单层绕组	99
第四节 电 势	101
第五节 单相脉动磁势	110
第六节 三相旋转磁势	117
第七节 空间向量和时间向量	120
小 结	121
习 题	121
第九章 电枢反应	123
第一节 $\psi = 0^\circ$ 时的电枢反应	123
第二节 $\psi \neq 0^\circ$ 时的电枢反应	124
第三节 电枢反应与能量转换	126
小 结	127
习 题	128
第十章 参数、向量图、特性	128
第一节 漏抗和同步电抗	128
第二节 向量图	130

第三节	运行特性	133
第四节	损耗与效率	137
	小 结	137
	习 题	138
第十一章	并列运行	139
第一节	并列的条件与方法	139
第二节	功角特性及有功功率的调节	143
第三节	静稳定概念	147
第四节	无功功率调节及U形曲线	148
第五节	与相近容量电网的并列运行	152
第六节	调相运行及调相机	153
	小 结	157
	习 题	158
第十二章	突然短路	159
第一节	磁链守恒原理	160
第二节	突然短路的过渡过程分析	161
第三节	次暂态电抗和暂态电抗	164
第四节	暂态电势和次暂态电势	166
第五节	突然短路电流	170
	小 结	173
	习 题	174
第十三章	同步发电机的异常运行	174
第一节	不对称运行	175
第二节	无励磁运行	179
第三节	振 荡	181
	小 结	183
	习 题	184

第三篇 异 步 电 机

第十四章	异步电动机的基本知识及结构	185
第一节	基本原理	185
第二节	结构简介	187
第三节	铭 牌	190
	小 结	191
	习 题	192
第十五章	电磁关系、等值电路、力矩	192
第一节	转子静止时的异步电动机	193
第二节	转子旋转时的异步电动机	196
第三节	等值电路	199

第四节	电磁力矩	202
第五节	运行特性	207
	小 结	209
	习 题	210
第十六章	启动和调速	210
第一节	启动性能	211
第二节	鼠笼式电动机的启动	212
第三节	绕线式电动机的启动	214
第四节	深槽式和双鼠笼式电动机	215
第五节	调 速	217
	小 结	219
	习 题	219
第十七章	其他异步电机	220
第一节	单相异步电动机	221
第二节	移相器	224
第三节	感应调压器	225
	小 结	226
	习 题	226

第四篇 直 流 电 机

第十八章	直流电机的基本知识及结构	228
第一节	基本原理	228
第二节	结构简介	230
第三节	铭 牌	231
	小 结	232
	习 题	232
第十九章	电枢绕组和电势	233
第一节	直流绕组的一般知识	233
第二节	单迭绕组	234
第三节	单波绕组	237
第四节	电 势	239
	小 结	240
	习 题	240
第二十章	电枢反应	240
第一节	主磁场和电枢磁场	241
第二节	电枢反应	242
	小 结	244
	习 题	245
第二十一章	换 向	245

第一节 换向过程	245
第二节 改善换向的方法	250
小 结	252
习 题	252
第二十二章 直流发电机	253
第一节 激磁方式	253
第二节 并发电机的自激过程	254
第三节 基本方程式	255
第四节 运行特性	256
小 结	259
习 题	260
第二十三章 直流电动机	260
第一节 可逆原理	261
第二节 基本方程式	262
第三节 起 动	262
第四节 调 速	263
第五节 改变转向	265
小 结	265
习 题	266
主要符号表	267

绪 论

电机学是阐述电机基本理论的教科书。

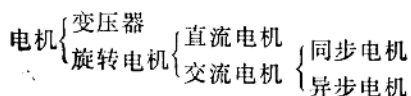
本书主要讨论电力系统常用的四类电机(变压器、同步电机、异步电机、直流电机)的基本结构、基本原理和运行性能。为初步认识电机和电机学这门课,这里对电机在电力系统中的作用、电机的发展以及电机学的特点,作简单的介绍。

一、电机在电力系统中的作用

电机是一种转换能量的机器。由于电能工农业生产、科学实验和人们生活中占有愈来愈重要的地位,因而电机的应用也愈来愈广。单就电力系统来说,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;异步电动机是电厂各种转动机械的原动机;直流电机也在电厂某种特殊场合起重要作用。所以,电机是电力系统中极重要又应用得极普遍的设备。

二、电机的发展简史

电机是一个总称,其种类很多。大体上可分下列各类:



各类电机都在发展,而且是在既独立又相互促进地发展着。自从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原理性的基础以来,随着生产和科学技术的发展,现在,电机已发展到愈来愈完善的地步。

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。1833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,这使得发电机和电动机的发展可合而为一。1889年,多利沃—多勃罗夫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。三相电动机结构简单、工作可靠,很快得到应用和推广。19世纪90年代,由于生产上的迫切需要,发电机的原动机,已由低速的往复式蒸汽机,发展为高速的汽轮机和低速的水轮机。

随着电力系统容量日趋增大,要求电机的单机容量也不断增大。电机容量增大就要解决冷却问题,因能量损耗也相应增大。目前,汽轮发电机的冷却方式已由外冷发展到内冷,而且已相继出现了空冷、氢冷、油冷和水冷等使用不同冷却介质的发电机。

科学技术的发展是电机发展的基础。反过来,电机的发展也对生产和经济的发展起促进作用。

三、我国电机制造业发展简况

解放前,我国的电机制造业极其落后,制造能力极差,只能生产200kW的发电机

和2000kVA的变压器。

解放后，电机制造工业得到迅速发展。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。

四、电机学的特点

电机学是一门既带基础性又带专业性的课程，与它联系最紧密的基础课是电工基础和数学。电机学和电工基础又很不相同。在电工基础中，所研究的对象是理想化了的、并带有共性的，因此是单纯的。而在电机学中，所研究的对象是具体的、实际的，因此是复杂的。电机学中用到的电工基础理论是密切联系电机实际的。

分析电机学中的问题所用到的理论，既有单相的又有三相的；既有电的又有磁的；既有时间的又有空间的；既有正弦的又有非正弦的；既有对称的又有不对称的；既有不饱和的又有饱和的；既有静止的又有旋转的；既有稳态的又有暂态的……。因此，在叙述时，往往采用由简到繁，由特殊到一般的方法。有时，为了突出主要矛盾，以明确物理概念，又常采用忽略次要因素，作某些假定的方法。每类电机都有磁路和电路，而磁路和电路又是磁场和电场的简化，凡用路的方法能解决的问题，就尽量采用路的方法分析。过去的电机学理论就是在磁路和电路的基础上发展起来的。

概括地说，电机学的内容主要是结合电机的结构，介绍电机的工作原理、研究电机内部的电磁现象、找出该种电机的电磁规律，在定性分析的基础上，根据电磁定律导出电机各电、磁量的关系，对电机进行定量的分析。对于变压器、同步电机、异步电机，叙述的思路是：在简介其用途、结构、工作原理之后，重点分析其电磁现象及各电磁量的关系，导出电磁方程式及等值电路，并作出向量图。最后，应用基本理论，分析一些运行中遇到的问题。对于直流电机，除没有向量图外，其它的均与上述相似。顺便指出，对各类电机，以分析其稳态运行为主。

电机学中常用到谐波分析法、对称分量法，以及时一空向量等。另外，还常用到力矩平衡、功率平衡等概念。

五、学习电机学的方法

根据电机学的性质和特点，在学习这门课时应注意以下几点：

（1）要理论联系实际。一方面，在学理论时要联系电机的结构情况和所发生的电磁的或机械运动的现象，不能只满足于对定义和数学公式的表面理解；另一方面，要重视电机实验和下厂的实习，善于把学过的理论用来分析电机运行中遇到的实际问题。

（2）要建立空间观念。例如，交流电流通过旋转电机的三相绕组所建立的磁场，不

仅是时间的函数，也是空间的函数。因此，在理解电磁现象时，一定要有空间观念。

(3) 注意分析问题时的前提条件。正如前面所述的，在电机学中讨论某一问题时，有时先忽略次要因素，得出有条件的结论。但这些结论往往是有局限性的，要正确地理解和应用。

(4) 应掌握重点。所谓重点，即是基本概念和基本理论。尽管各类电机在结构上千差万别，在运行中遇到的问题多种多样，但只要掌握了基本理论，掌握各量的变化规律和它们的相互关系，就易于分析各种问题。

(5) 要学会综合分析。善于对各类电机的原理、结构、性能进行比较，辨别异同，进行综合分析。这样，就能对内容理解得更深刻。

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本知识及结构

变压器是一种静止的电器。它的功能是将一种等级的电压和电流，变为同频率的另一种等级的电压和电流。

用于电力系统中传输电能的变压器称为电力变压器。在电源端，用它升高电压减小电流，以降低输电线路上的电能损耗；在受电端，用它降低电压，可满足用户电气设备的用电要求。

本篇主要讲述电力变压器，但其基本原理也适用于其它变压器。

本章介绍变压器的基本原理、类别和结构。

第一节 基本原理和分类

一、基本原理

变压器是利用电磁感应规律工作的。最简单的变压器是由两个绕组(又称线圈)、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，或原绕组、一次侧；把后者叫做二次绕组，或副绕组、二次侧。

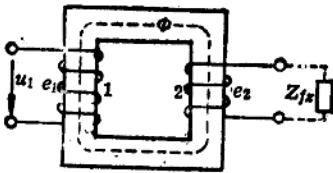


图 1-1 变压器的原理图
1—一次绕组；2—二次绕组

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， 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 $e_1 \neq e_2$ ，说明一、二次侧电势不等，也可以说电压不等，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_{fs} ，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，此类变压器一、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。

后面将要讲到的各类变压器，尽管其用途和结构可能差异很大，但变压器的基本原理是一样的，且其核心部件都是绕组和铁芯。

二、分类

为了适应不同的使用目的和工作条件，变压器有很多类型。下面择其主要的进行介绍。

按其用途不同，变压器可分为电力变压器（又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器等）、仪用变压器（电压互感器等）、试验用变压器、整流变压器等。

按绕组数目可分为双绕组变压器、三绕组变压器及多绕组变压器。

按相数可分为单相变压器、三相变压器。

按调压方式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。

第二节 结 构 简 介

各类变压器的结构是很不相同的。这里以中型的油浸风冷电力变压器为例，扼要地介绍一下其主要部件。

变压器主要由以下几部分组成：

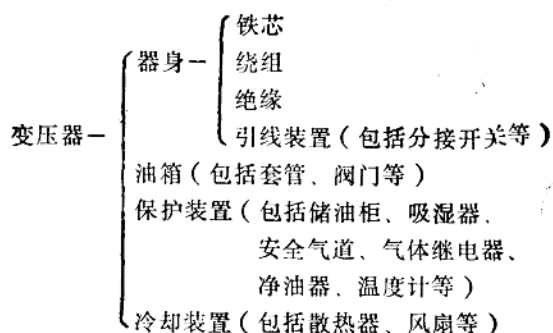


图1-2是油浸风冷变压器的外形图。图1-3是变压器器身结构示意图。

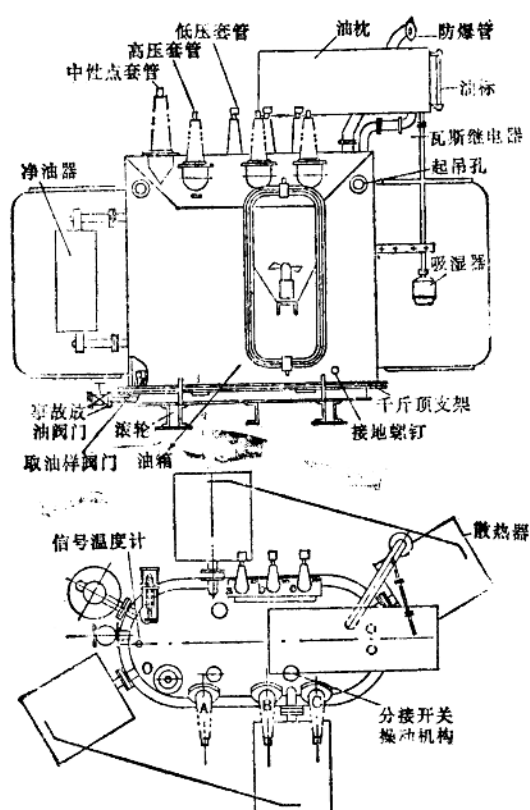


图 1-2 油浸风冷变压器外形图

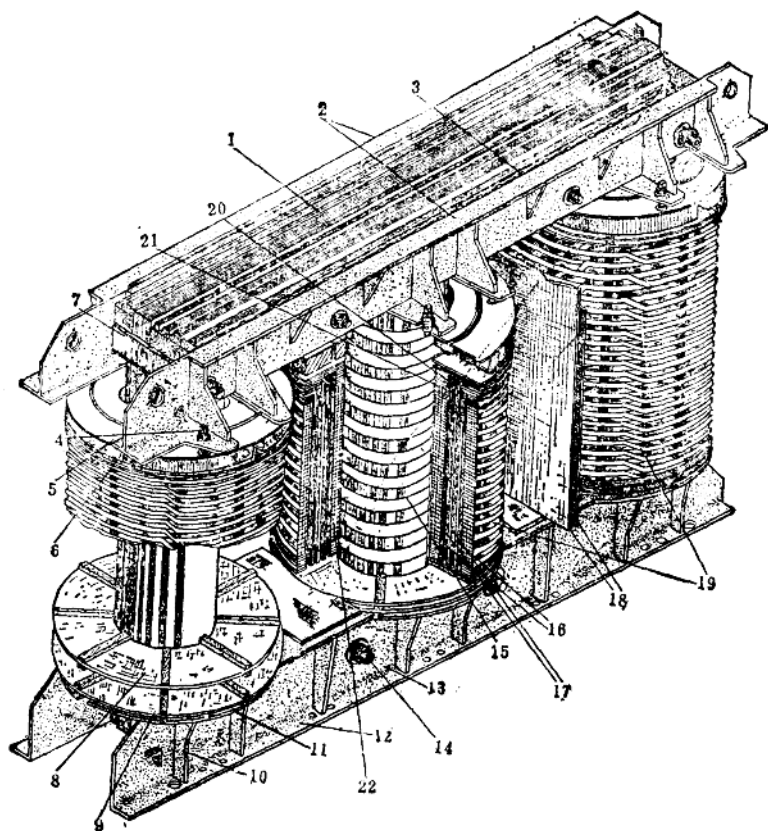


图 1-3 变压器器身结构示意图

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

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厚的硅钢片迭成。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率高、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，即沿轧辗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，以防止片间短路而增大涡流损耗。

在迭装硅钢片时，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。这种迭法的优点是接缝处气隙小、夹紧结构简单。

芯柱的截面一般为阶梯形，这可以充分利用圆形线圈内的空间。铁轭截面有 T 形和多级梯形的。较大直径的铁芯，迭片间留有油道，以利散热。

铁芯用穿芯螺杆夹紧或用环氧树脂玻璃布带扎紧。

三相变压器的铁芯可有三柱式和五柱式的，如图 1-5 (a)、(b) 所示。

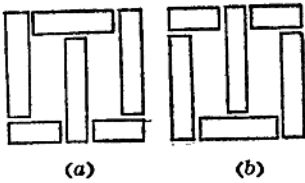


图 1-4 铁芯相邻层硅钢片的接缝
(a) 奇数层；(b) 偶数层

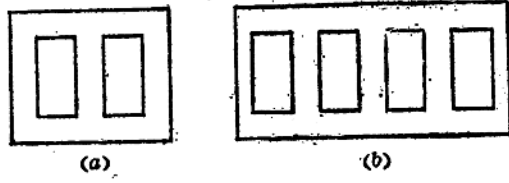


图 1-5 三相变压器的铁芯
(a) 三柱式；(b) 五柱式

变压器在运行或试验时，为了防止由于静电感应铁芯或其它金属构件上产生悬浮电位而造成对地放电，铁芯及其构件（除穿芯螺杆外）都应接地。

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、低压绕组同芯地套在芯柱上，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 1-6 (a)、(b)、(c)、(d) 所示。一般，容量在 630kVA 以下的变压器采用圆筒式

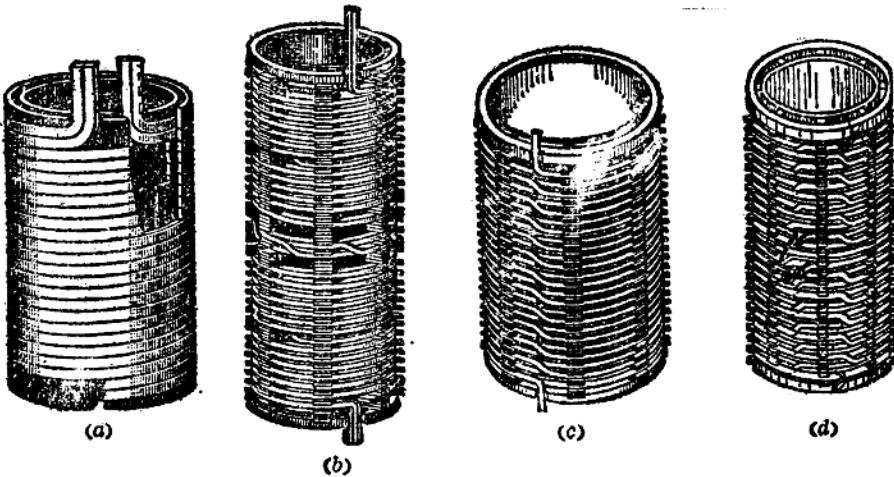


图 1-6 绕组的形式
(a) 圆筒式；(b) 螺旋式；(c) 连续式；(d) 纠结式

绕组；容量在800kVA以上、电压在35kV以下的绕组用螺旋式绕组；容量在630kVA以上、电压为35~110kV的绕组用连续式绕组；容量在31500kVA以上、电压为220kV及以上的绕组用纠结式绕组。

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，气体经过它进出，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发生严重故障压力骤增时，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。