

高等职业教育新形态系列教材

电机技术

主 编 李付亮 郭淑贞

副主编 李 靖 李 斌

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电机技术 / 李付亮, 郭淑贞主编. -- 北京 : 北京理工大学出版社, 2021.9(2021.10 重印)

ISBN 978 - 7 - 5763 - 0365 - 0

I. ①电… II. ①李… ②郭… III. ①电机学 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 188885 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 唐山富达印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 23

字 数 / 537 千字

版 次 / 2021 年 9 月第 1 版 2021 年 10 月第 2 次印刷

定 价 / 59.80 元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

本书从高职教育的实际情况出发，遵循“以能力为目标、以学生为主体、以教师为主导、任务驱动和项目导向”的编写理念，并紧扣高职办学新理念，注重学生能力培养，紧密结合工作实际，以常用电机为载体，突出学生在电机的选用、电机的运行管理、电机的控制和电机的维护方面的技能训练。

本书共4个模块、15个学习情境，除学习情境4、学习情境8、学习情境12和学习情境15以外，每个学习情境都设有大量习题并以二维码格式附参考答案以供读者参考。本书可以作为高职高专学校电力工程及制动化和小型水电站及电力网等专业的教材，也可以作为其他专业的参考用书。本书在内容选取及安排上具有以下特点：

(1) 通过校企合作，对相关职业岗位进行调研后，归纳出从事实际电机工作的不同岗位及不同类型电机，依据工作要求进行教学内容的选取。

(2) 课程体系以现代电机技术的基本知识、基本理论、基本技能为主线，突出电机的基本应用，做到基本知识和实用技术相结合，理论知识和技能培养相结合；在内容选取方面，以应用为目的，淡化理论分析，突出电机的基本应用，适度引入新技术；在文字叙述方面，做到简明扼要、深入浅出、层次分明、概念清晰。

(3) 为方便学生自行学习，每个学习情境都提出了相应的学习目标，每个知识点都提出了相应的学习任务，学生可以自行校核自己的学习目标和学习效果。

(4) 为进一步突出技能培训目标，每个学习情境的内容先安排理论基础，后安排技能培养，并给出了较为详细的技能培养评价指标。

(5) 各模块具有相对独立性，讲授内容和次序可以根据具体情况进行调整。

本书由湖南水利水电职业技术学院李付亮任第一主编，负责编写学习情境1、学习情境2、学习情境3、学习情境4、学习情境12；湖南水利水电职业技术学院郭淑贞任第二主编，负责编写学习情境5、学习情境6、学习情境7、学习情境8；湖南水利水电职业技术学院李靖任第一副主编，负责编写学习情境9、学习情境10、学习情境11；湖南信息职业技术学院李斌任第二副主编，负责编写学习情境13、学习情境14、学习情境15。全书由李付亮统稿。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中的错误及疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

模块一 变压器	1
学习情境 1 变压器的选用	3
1.1 学习目标	3
1.2 理论基础	3
1.3 技能培养	29
学习情境 2 变压器的运行管理	32
2.1 学习目标	32
2.2 理论基础	32
2.3 技能培养	74
学习情境 3 变压器的试验	77
3.1 学习目标	77
3.2 理论基础	77
3.3 技能培养	89
学习情境 4 变压器的维护	90
4.1 学习目标	90
4.2 理论基础	90
4.3 技能培养	94
模块二 异步电动机	95
学习情境 5 异步电动机的选用	97
5.1 学习目标	97
5.2 理论基础	97
5.3 技能培养	121
学习情境 6 异步电动机的运行管理	124
6.1 学习目标	124
6.2 理论基础	124
6.3 技能培养	147
学习情境 7 异步电动机的控制	149
7.1 学习目标	149
7.2 理论基础	149
7.3 技能培养	185

学习情境 8 异步电动机的维护	189
8.1 学习目标	189
8.2 理论基础	189
8.3 技能培养	198
模块三 直流电机	199
学习情境 9 直流电机的选用	201
9.1 学习目标	201
9.2 理论基础	201
9.3 技能培养	219
学习情境 10 直流电机的运行管理	221
10.1 学习目标	221
10.2 理论基础	221
10.3 技能培养	236
学习情境 11 直流电动机的控制	240
11.1 学习目标	240
11.2 理论基础	240
11.3 技能培养	257
学习情境 12 直流电机的维护	260
12.1 学习目标	260
12.2 理论基础	260
12.3 技能培养	268
模块四 同步电机	269
学习情境 13 同步电机的选用	271
13.1 学习目标	271
13.2 基础理论	271
13.3 技能培养	310
学习情境 14 同步电机的运行管理	313
14.1 学习目标	313
14.2 理论基础	313
14.3 技能培养	346
学习情境 15 同步发电机的维护	349
15.1 学习目标	349
15.2 理论基础	349
15.3 技能培养	358

模块一
变压器

学习情境 1 变压器的选用

1.1 学习目标

【知识目标】 掌握变压器的基本工作原理；熟悉变压器的分类方法；熟练掌握变压器各组成部分的名称和作用；熟练掌握变压器铭牌上各技术参数的内涵；了解三绕组变压器、自耦变压器、仪用变压器的结构、工作原理；熟练掌握选择变压器的方法。

【能力目标】 培养学生电气设备规程规范的使用能力；培养学生根据生产实际需要选择变压器的能力。

【素质目标】 培养学生自主学习的能力、分析和解决问题的能力、组织实施的能力、自我管理和沉着应变的能力；培养学生安全用电意识、团队协作能力和协调沟通能力。

【总任务】 根据应用场合选择合适的变压器。

1.2 理论基础

1.2.1 变压器的原理及分类

- 【学习任务】**
- (1) 正确说出变压器的基本工作原理。
 - (2) 正确认识变压器的基本类别。
 - (3) 正确认识变压器的功能及应用场合。

变压器是一种静止的电气设备，它通过线圈间的电磁感应，将一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能。变压器是电力系统中的重要设备，用于电力系统中传输电能的变压器称为电力变压器。众所周知，输送一定的电能时，输电线路的电压越高，线路中的电流和电阻损耗就越小。为此，需要用升压变压器把交流发电机发出的电压升高到输电电压，然后通过高压输电线路将电能经济地输送到用电地区，再用降压变压器将电能逐步从输电电压降低到配电电压，供用户安全而方便地使用。

图 1-1 所示为一个简单的电力系统输配电示意图，是一个三相系统。发电机发出的电压，例如 10 kV，先经过升压变压器升高后，再经输电系统送到用电地区；到了用电地区



任务手册 1：
变压器的选用



微课 1.1：
变压器的原理

后，还需先把高压降到 35 kV 以下，再按用户需要的具体电压进行配电。用户需要的电压一般为 6 kV、3 kV、1 kV、380 V/220 V 等。

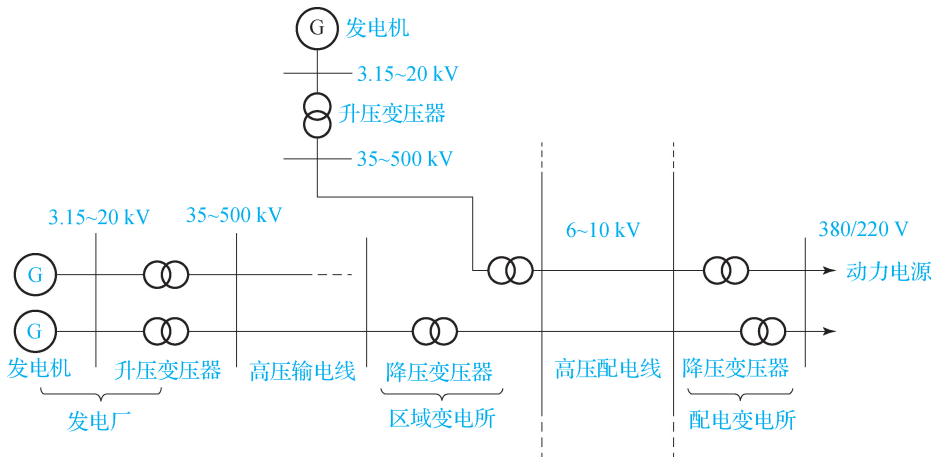


图 1-1 电力系统输配电示意图

除电力系统外，变压器还广泛应用于电子装置、焊接设备、电炉等场合以及测量和控制系统中，用以实现交流电源供给、电路隔离、阻抗变换、高电压和大电流的测量等功能。

1. 基本原理

变压器应用电磁感应规律工作，最简单的变压器是由两个绕组（又称线圈）、一个铁芯组成的，如图 1-2（a）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。我们把前者叫作一次绕组，或原绕组、一次侧；把后者叫作二次绕组，或副绕组、二次侧。

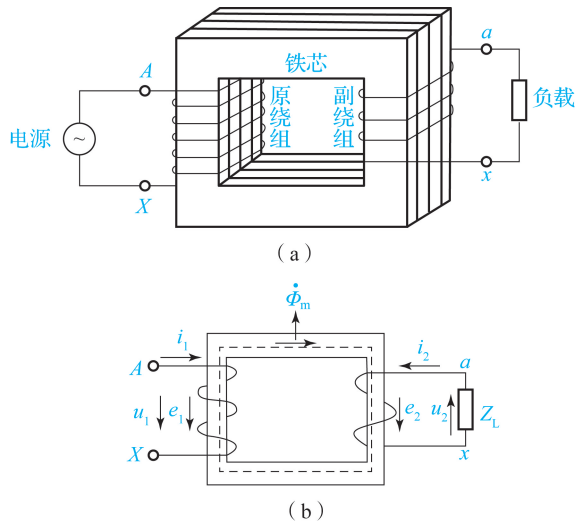


图 1-2 变压器结构、原理示意图

(a) 变压器基本结构示意图；(b) 变压器基本原理示意图

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 $\dot{\Phi}_m$ ，该磁通交链着一、二次绕组，如图 1-2（b）所示。根据电磁感应定律， $\dot{\Phi}_m$ 在

一、二次绕组中产生的感应电动势分别为

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

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

式中 N_1 ——一次绕组匝数；

N_2 ——二次绕组匝数。

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-1)$$

由上式可知，一、二次绕组的匝数不等，是变压的关键；另外，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，交链一、二次绕组的磁通起着联系一、二次侧的桥梁作用，而变压器原、副边频率还是一样的。

如果二次侧接上负载，则在 e_2 的作用下将产生二次电流，并输出功率，说明变压器起到了传递能量的作用。

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

2. 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）、试验用变压器和整流变压器等。

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等。

按相数可分为单相变压器、三相变压器及多相变压器等。

按调压方式可分为无极调压变压器、有载调压变压器等。

按冷却方式不同可分为干式变压器、油浸式变压器、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。

自测题

一、填空题

1. 变压器是一种既能改变_____、_____，又能保持_____不变的电气设备。
2. 变压器按相数分为_____和_____。
3. 变压器按绕组形式分为_____、_____、_____等。
4. 变压器按铁芯形式分为_____、_____。
5. 变压器一、二次绕组的匝数分别为 N_1 、 N_2 ，则变比为_____。

二、选择题

1. 变压器的额定容量是指（ ）。
 - A. 一、二次侧容量之和
 - B. 二次绕组的额定电压和额定电流的乘积所决定的有功功率
 - C. 二次绕组的额定电压和额定电流的乘积所决定的视在功率
 - D. 一、二次侧容量之和的平均值
2. 变压器是一种（ ）的电气设备，它利用电磁感应原理将一种电压等级的交流电

转变成同频率的另一种电压等级的交流电。

- A. 滚动 B. 运动 C. 旋转 D. 静止

3. 当交流电源电压加到变压器一次侧绕组后, 就有交流电流通过该绕组, 在铁芯中产生交变磁通, 这个交变磁通 (), 两个绕组分别产生感应电势。

- A. 只穿过一次侧绕组
B. 只穿过二次侧绕组
C. 有时穿过一次侧绕组, 有时穿过二次侧绕组
D. 不仅穿过一次侧绕组, 同时也穿过二次侧绕组

4. 变压器一、二次侧感应电势之比 () 一、二次侧绕组匝数之比。

- A. 大于 B. 小于 C. 等于 D. 无关

5. 变压器一、二次绕组的匝数分别为 N_1 、 N_2 , 则一、二次侧流过的电流之间的关系为 ()。

- A. N_1/N_2 B. N_2/N_1 C. $N_1 \cdot N_2$ D. N_1^2/N_2

三、判断题

1. 变压器是根据电磁感应原理工作的。 ()
2. 三相变压器额定电压是指变压器的线电压 (有效值)。 ()
3. 电力变压器按冷却介质可分为油浸式和干式两种。 ()
4. 干式变压器是指铁芯和绕组浸渍在绝缘液体中的变压器。 ()
5. 变压器一、二次绕组中产生的感应电动势与其匝数成反比。 ()

四、简答题

1. 按照用途来分类时, 都有哪些不同类型的变压器?
2. 变压器一次绕组接直流电源, 二次绕组有电压吗? 为什么?



答案 1.1

1.2.2 变压器的结构

【学习任务】 正确识别变压器的各主要部件及其功能。

各类变压器的结构是很不相同的, 这里以中型的油浸风冷变压器为例, 扼要地介绍一下其主要部件。图 1-3 所示为变压器器身结构图, 图 1-4 所示为变压器结构解剖图。

变压器主要由以下几部分组成:

变压器	器身	铁芯
		绕组
	绝缘套管	
	引线装置 (包括分接开关)	
	油箱 (包括套管、阀门等)	
	保护装置 (包括储油柜、吸湿器、安全气道、气体继电器、净油器、温度计等)	
冷却装置 (包括散热器、风扇等)		

下面对变压器各部分逐一进行介绍。

1. 铁芯

铁芯是变压器的磁路部分, 由铁芯柱 (套装绕组)、铁轭 (连接铁芯以形成闭合磁路) 组成, 采用 0.35 ~ 0.5 mm 厚的硅钢片涂绝缘漆后交错叠成。

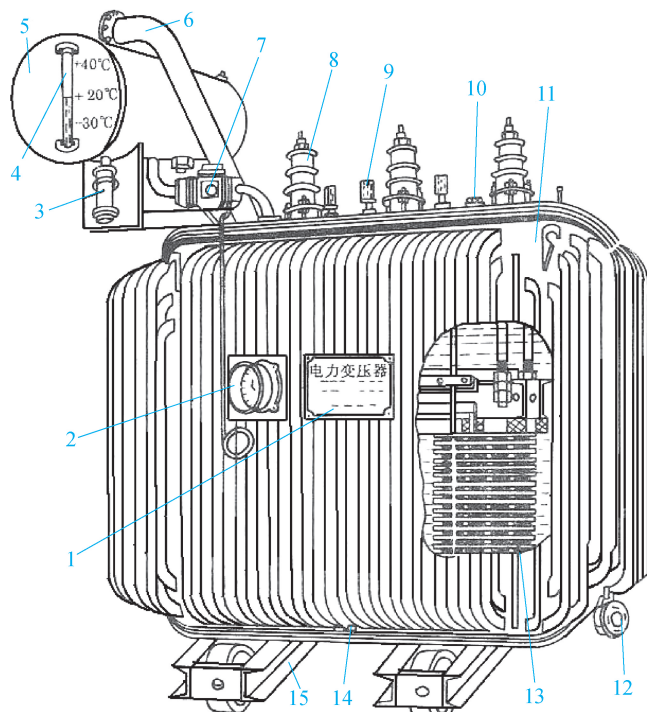


图 1-3 变压器器身结构

- 1—铭牌；2—信号式温度计；3—吸湿器；4—油表；5—储油柜；6—安全气道；
7—气体继电器；8—高压绝缘套管；9—低压绝缘套管；10—分接开关；
11—油箱；12—放油阀门；13—器身；14—接地；15—小车

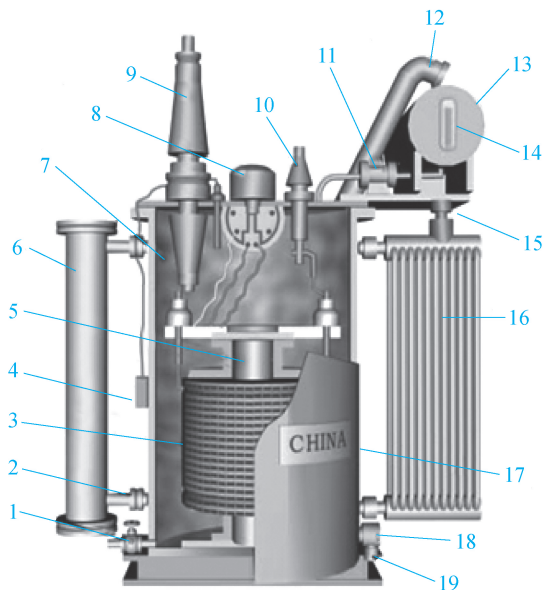


图 1-4 变压器结构解剖图

- 1—放油阀门；2—活门；3—绕组；4—信号温度计；5—铁芯；6—净油器；7—变压器油；
8—分接开关；9—高压套管；10—低压套管；11—气体继电器；12—防爆管；13—储油柜；
14—油表；15—吸湿器；16—散热器；17—铭牌；18—油样油门；19—接地螺栓

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损耗、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磁导率高、损耗小，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磁导系数。

在叠装硅钢片时，要把相邻层的接缝错开，如图 1-5 (a) 和图 1-5 (b) 所示，即每层的接缝都被邻层钢片盖掉，然后再用穿心螺杆夹紧或用环氧树脂玻璃布带扎紧。这种叠法的优点是接缝处气隙小、夹紧结构简单。

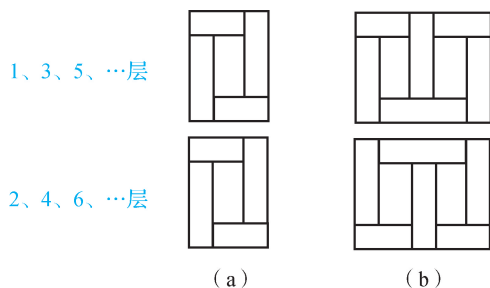


图 1-5 变压器铁芯的交替装配
(a) 单相变压器；(b) 三相变压器

铁芯柱截面形状有方形和阶梯形，一般为阶梯形，如图 1-6 所示。较大直径的铁芯，叠片间留有油道，以利于散热。铁轭截面有 T 形和多级梯形。

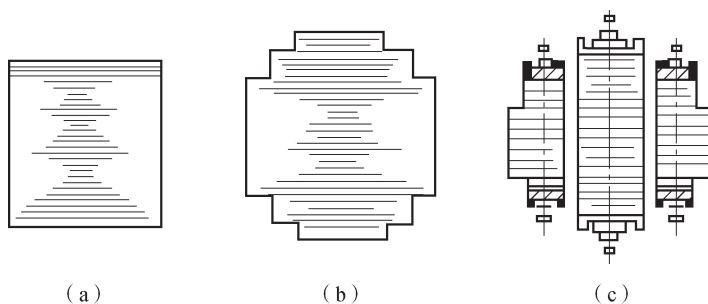


图 1-6 铁芯柱截面
(a) 方形截面；(b) 梯形截面；(c) 带油道

按照绕组套入铁芯柱的形式，铁芯又可以分为心式结构和壳式结构两种，如图 1-7 和图 1-8 所示。

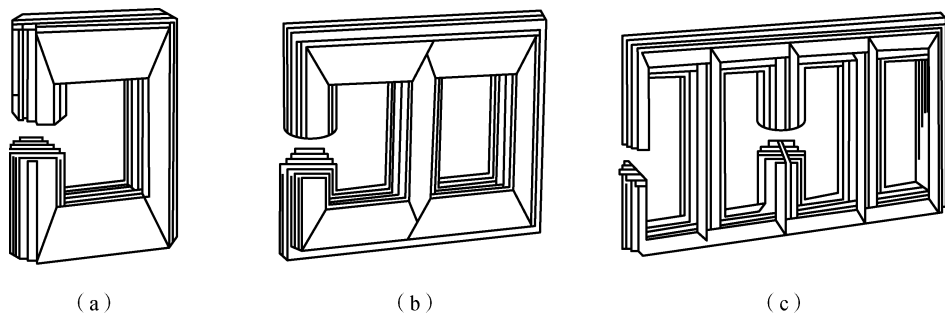


图 1-7 心式变压器的铁芯结构
(a) 单相双柱式；(b) 三相三柱式；(c) 三相五柱式

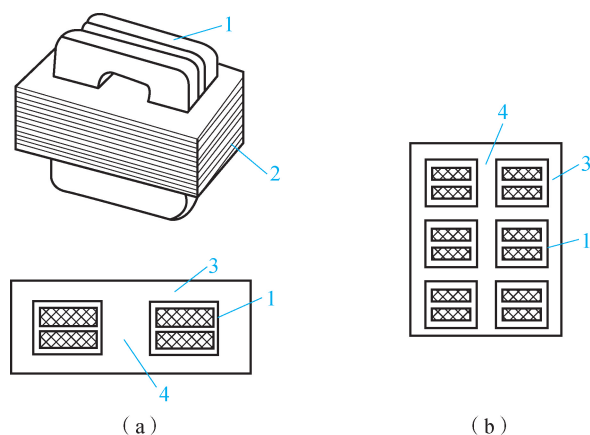


图 1-8 壳式变压器的铁芯和绕组

(a) 单相壳式变压器；(b) 三相壳式变压器

1—绕组；2—铁芯；3—铁轭；4—铁芯柱

三相心式变压器铁芯可以有二柱式和五柱式两种。近代大容量变压器，由于受到安装场所空间高度和铁路运输条件的限制，必须降低铁芯的高度，常采用五柱式铁芯结构，如图 1-7 (c) 所示，在中央三个铁芯柱上套有三相绕组，左右两侧铁芯柱为旁轭，旁轭上没有绕组，专门用来作导磁通路。

心式变压器的一次、二次绕组套装在铁芯的同一铁芯柱上，如图 1-9 所示，这种结构比较简单，有较多的空间装设绝缘，装配容易，用铁量较小，适用于容量大、电压高的变压器，一般电力变压器均采用心式结构。壳式结构的变压器结构复杂，一般用于小容量变压器。

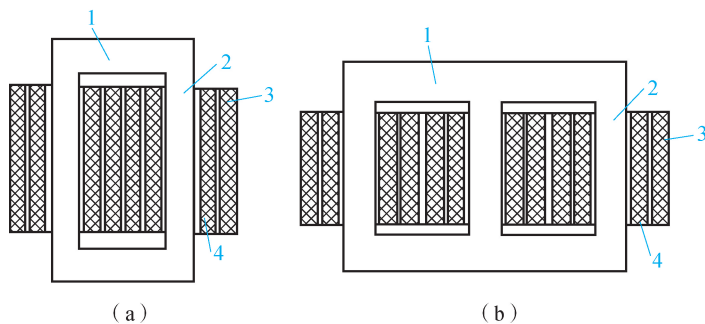


图 1-9 心式变压器的铁芯和绕组

(a) 单相；(b) 三相

1—铁轭；2—铁芯柱；3—高压绕组；4—低压绕组

变压器在运行试验时，为了防止由于静电感应在铁芯或其他金属构件上产生悬浮电位而造成对地放电，铁芯及其构件（除穿心螺杆外）都应接地。

2. 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有同心式和交叠式两种，如图 1-10 所示。电力变压器采用前一种，即圆筒形

的高、低压绕组同心地套在同一芯柱上，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。

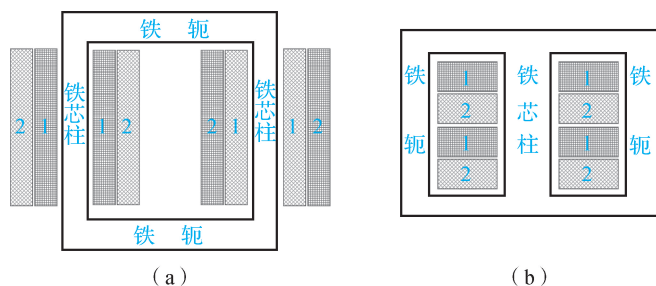


图 1-10 变压器的绕组
(a) 同心式结构；(b) 交叠式结构

交叠式绕组又称饼式绕组，它是高低压绕组分成若干线饼，沿着铁芯柱的高度方向交替排列。为了便于绕线和铁芯绝缘，一般最上层和最下层放置低压绕组。交叠式绕组的主要优点是漏抗小，机械强度好，引线方便。这种绕组仅用于壳式变压器中，如大型电炉变压器就采用这种结构。

3. 绝缘

导电部分间及对地均需绝缘。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出线间及其对地的绝缘。

绝缘套管：绝缘套管是由外部的瓷套和其中的导电杆组成的。其作用是使高、低压绕组的引出线与变压器箱体绝缘。它的结构取决于电压等级和使用条件。电压不大于 1 kV 时采用实心瓷套管；电压在 10 ~ 35 kV 之间时采用充气式或充油式套管；电压大于 110 kV 时采用电容式套管。为了增加表面放电距离，套管外形做成多级伞形。绝缘套管的结构如图 1-11 所示。

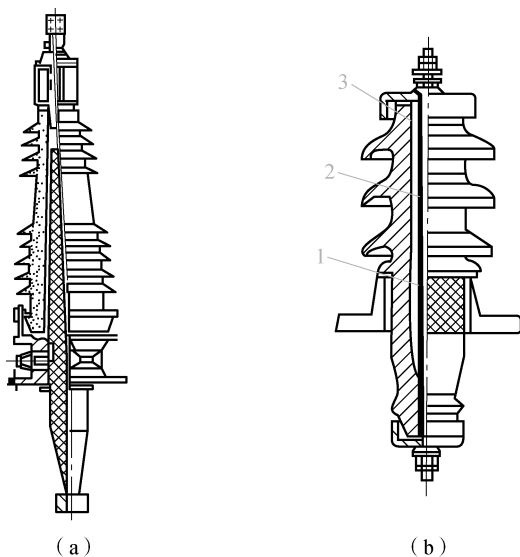


图 1-11 绝缘套管的结构
(a) 110 kV 胶纸电容式；(b) 35 kV 充油式
1—导体（导电杆或电缆）；2—绝缘管；3—变压器油

变压器油：变压器油箱里充满了变压器油。通常对变压器油的要求是：高的介质强度和低的黏度，高的发火点和低的凝固点，且不含酸、碱、硫、灰尘和水分等杂质。变压器油的作用有两个，即加强绝缘和加强散热。

4. 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，可以在切断负载电流的情况下切换。

5. 保护装置（见图 1-12）

1) 油箱

油浸式变压器的外壳就是油箱，箱中盛满了用来绝缘的变压器油。油箱可保护变压器铁芯与绕组不受外力作用和潮湿的侵蚀，并通过油的对流把铁芯与绕组产生的热量传递给箱壁和散热管，再把热量散发到周围的空气中。一般说来，对于 $20 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 以下的变压器，油箱本身表面能满足散热要求，故采用平板式油箱；对于 $20 \sim 30 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的变压器，采用排管式油箱；对于 $2.5 \sim 6.3 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的变压器，所需散热面积较大，则在油箱壁上装置若干只散热器，加强冷却；容量为 $8 \sim 40 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的变压器在散热器上还需另装风扇冷却；对于 $50 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 及以上的大容量变压器，采用强迫油循环冷却方式。

2) 储油柜

储油柜又叫油枕，它是一个圆筒形容器，装在油箱上，用管道与油箱连通，使油刚好充满到油枕的一半。油面的升降被限制在油枕中，并且从外部的玻璃管中可以看见油面的高低。它的作用有两个：调节油量，保证变压器油箱内经常充满变压器油；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。

3) 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，以保持油箱内的压力正常。吸湿器内装有硅胶，用以吸收进入油枕中空气的潮气及其他杂质。

4) 安全气道

安全气道又叫防爆管，装在油箱顶盖上，由一根长钢管构成。它的出口处装有一定厚度的玻璃或酚醛纸板（防爆膜），其作用是当变压器内部发生严重故障产生大量气体使压力骤增时，让油气流冲破玻璃，向外喷出，以降低箱内压力，防止油箱爆裂。

5) 气体继电器（见图 1-13）

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，其内部有一个带有水银开关的浮筒和一块能带动水银开关的挡板。当变压器内部发生故障时，产生的气体聚集在气体继电器上部，使油面下降、浮筒下沉，接通水银开关而发出预告信号；当变压

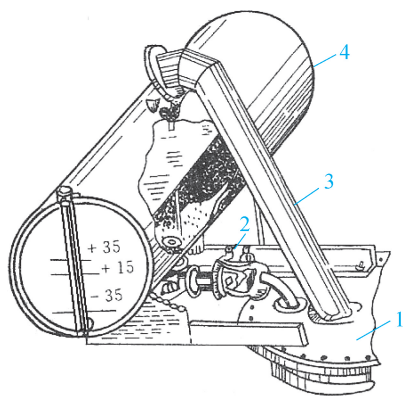


图 1-12 储油柜、安全气道、
气体继电器

1—油箱；2—气体继电器；
3—安全气道；4—油枕