



普通高等教育高职高专“十二五”规划教材 电气类

电机技术与应用

主 编 马爱芳 谭振宇
主 审 丁官元



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育高职高专“十二五”规划教材 电气类

电机技术与应用

主 编 马爱芳 谭振宇

副主编 王志勇 向 变 陈小梅

主 审 丁官元



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

《电机技术与应用》共分5章,主要内容有:变压器,交流旋转电机的绕组、电动势和磁动势,同步电机,异步电机和直流电机。介绍使用较多的电机的基本理论、基本分析方法及应用。

为方便教学,在本教材各节前面提出了知识和技能要求,各节后面附有小结、习题和实训项目,突出实践动手操作应用。

本教材可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高等教育的发电厂及电力系统、水电站设备管理、小型水电站及电力系统、新能源技术等专业教材用书,也可作为电气类工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机技术与应用 / 马爱芳, 谭振宇主编. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2015. 6
普通高等教育高职高专“十二五”规划教材. 电气类
ISBN 978-7-5170-3183-3

I. ①电… II. ①马… ②谭… 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(2015)第105729号

书 名	普通高等教育高职高专“十二五”规划教材 电气类 电机技术与应用
作 者	主 编 马爱芳 谭振宇 副主编 王志勇 向雯 陈小梅 主 审 丁官元
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字
版 次	2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言



《电机技术与应用》是高等职业技术学院发电厂及电力系统、水电站设备管理、小型水电站及电力系统、新能源技术等专业学生必修的一门主干课程。本教材在编写过程中根据高职教育的特点和要求,结合当前学生的文化基础,正确处理知识传授和能力的培养之间的关系。在保留课程体系的同时,注意吸收新的科技成果,在内容叙述上,力求通俗易懂,由浅入深地阐明问题。对于一些理论性较强的内容,以定性分析为主,使教材易教易学。

本教材特点为:

(1) 在内容的叙述上,强调电机的结构、工作原理、主要性能和实际应用,体现应用性。

(2) 对理论的分析采用淡化的手段,采用图解、图示方法,并强调基本理论的实际应用,体现应用性。

(3) 直流电机在内容上进行了较大的改动,删除了直流发电机的分析内容,努力反映新技术、新元件,体现应用性。

(4) 书中有典型例题,各节后面附有小结和习题,供学生复习和练习。题目具有典型性、规范性、启发性,能引导学生掌握主要内容,并培养学生解决工程实际问题的能力,体现应用性。

(5) 各节附有综合实训包括实训目标和实训要求,突出实践动手操作应用,加强职业能力培养。

本教材将编写的重点放在使用较多的电机上,共分5章。第1章变压器由湖北水利水电职业技术学院马爱芳编写,第2章交流旋转电机的绕组、电动势和磁动势由广西水利电力职业技术学院谭振宇编写,第3章同步电机由湖北水利水电职业技术学院向变编写,第4章异步电机由湖北水利水电职业技术学院

陈小梅编写，第5章直流电机由河北工程技术高等专科学校王志勇编写。全书由马爱芳和谭振宇任主编，王志勇、向雯、陈小梅任副主编，由马爱芳统稿，湖北水利水电职业技术学院丁官元任主审，在此表示感谢！

本教材在编写时，参阅了许多同行专家编著的教材和资料，得到了不少启发和教益，在此向编著者致以诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，敬请读者指正。

编者

2015年3月

目录



前言

绪论	1
0.1 电机的定义和分类	1
0.2 电机在国民经济中的作用	1
0.3 电机的发展概况	2
0.4 我国电机工业发展概况	2
0.5 本课程的性质和内容	2
0.6 本课程的特点及学习方法	3
0.7 本课程常用的基本定律	3
第1章 变压器	6
1.1 变压器的基本知识和结构	6
1.2 变压器的空载运行	14
1.3 变压器的负载运行	21
1.4 变压器的参数测定	28
1.5 变压器的运行特性	35
1.6 三相变压器	40
1.7 变压器的并联运行	50
1.8 其他用途的变压器	54
第2章 交流旋转电机的绕组、电动势和磁动势	63
2.1 交流旋转电机的绕组	63
2.2 交流旋转电机绕组的感应电动势	72
2.3 交流旋转电机绕组的磁动势	78
第3章 同步电机	86
3.1 同步发电机的基本工作原理和结构	86
3.2 同步发电机的空载运行	93
3.3 同步发电机的负载运行	95
3.4 同步发电机的电动势方程式和相量图	99
3.5 同步发电机的运行特性	104

3.6	同步发电机并列运行的方法和条件	109
3.7	并列运行时有功功率的调节和静态稳定	113
3.8	并列运行时无功功率的调节和 U 形曲线	120
3.9	同步发电机的异常运行与突然短路	125
第 4 章	异步电机	138
4.1	三相异步电动机的工作原理和基本结构	138
4.2	三相异步电动机的运行分析	147
4.3	三相异步电动机的机械特性	157
4.4	三相异步电动机的启动	163
4.5	三相异步电动机的调速和制动	173
4.6	三相异步电动机的异常运行	179
4.7	单相异步电动机	183
第 5 章	直流电机	188
5.1	直流电机的基本知识	188
5.2	直流电动机	198
5.3	直流电动机的启动调速和制动	205
参考文献		214

绪 论

0.1 电机的定义和分类

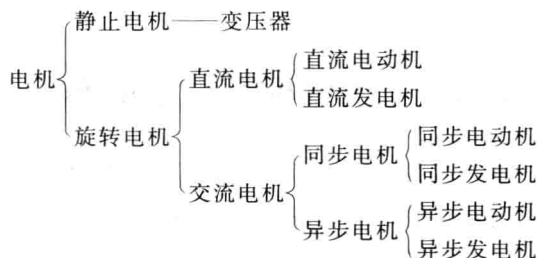
1. 电机的定义

电机是进行电能的传递或机电能量转换的设备。它以电磁感应和电磁力定律为基本工作原理，是工业、农业、交通运输业和家用电器等各个行业的重要设备，对国民经济发展起着重要作用。

电机只能转换或传递能量，它本身不是能源。所以，电机在能量转换过程中必须保持能量守恒原则，也就是说，电机要输出能量一定要先给电机输入能量，它不能自行产生能量。

2. 电机的分类

在实际生产应用中，有各种类型的电机。这些电机可以按不同的方法进行分类。如：按电流的种类来分，有交流电机和直流电机；按电机职能分，有变压器、发电机、电动机、控制电机。各种主要应用的电机归纳如下：



发电机把机械能转换成电能，即发电；变压器升高或降低电压，实现电能的传递；电动机把电能转换成机械能，拖动各种生产机械设备运转。

0.2 电机在国民经济中的作用

电能是现代生产和人们生活的主要能源，而电能的生产、输送、转换及使用过程中的核心设备就是电机，它不仅是工业、农业、交通运输业、国防工业、IT 技术产业的重要设备，而且在日常生活中的应用也越来越广泛。

人类早期使用的原动力是畜力、水力和风力，后来发明了蒸汽机、柴油机、汽油机，19 世纪发明了电动机，电动机有以下优点：

(1) 电机的效率高，运行经济。

(2) 电能的传输和分配比较方便。



(3) 电能容易控制。

所以电动机的应用越来越广泛，现在绝大部分生产机械都采用电动机进行拖动，即用电动机作为原动机。

让电机运转需要电能，电能主要来自发电机，为了经济的传输和分配电能需要变压器，可见，变压器和发电机是电力工业的主要设备。而各类电动机则是工业企业中，用以拖动各类机械设备的动力之源。另外随着自动化程度的不断提高，自动控制技术得到空前的发展，出现了各种各样的控制电机，各种微特电机广泛地应用在自动控制领域，作为检测、转换、执行等元件。此外在文教、医疗卫生、信息产业及日常生活中电机的应用将会愈加广泛。

0.3 电机的发展概况

蒸汽机启动了 18 世纪第一次产业革命以后，19 世纪末到 20 世纪上半叶电机又引发了第二次产业革命，使人类进入了电气化时代。1831 年法拉第 (Michael Faraday, 1791—1867) 发现了电磁感应现象，为电机的产生奠定了基础，1833 年楞次证明了可逆原理，1889 年多里沃-多勃罗沃尔斯基 (1862—1919) 提出三相制，设计和制造了第一台三相变压器和三相异步电动机。从此以后，电机技术不断发展和完善，如冷却技术、材料性能不断改进，电机的容量不断增大，性能不断提高，应用日益广泛。20 世纪下半叶的信息技术引发了第三次产业革命，使生产和消费从工业化向自动化、智能化时代转变；推动了新一代高性能电机驱动系统与伺服系统的研究与发展。

0.4 我国电机工业发展概况

新中国成立前电机工业极端落后，仅几个城市有电机制造厂。新中国成立后电机工业发展很快，第一个五年计划结束时，年产量和单机容量都较新中国成立前提高了几十倍。改革开放以来我国电机工业在引进、吸收和消化国外先进技术的基础上对原有电机进行了优化设计，使电机性能大大提高，并相继研制和开发了多种新系列电机，不仅满足了国内生产需要，而且向国外出口。目前我国已开发制成 125 个系列，900 多个品种，几千种规格的各种电机。

电机工业发展趋势是电子与电机工业结合，开展新原理、新结构、新材料电机的研制工作。

0.5 本课程的性质和内容

本课程是发电厂及电力系统、小型水电站及电力系统、水电站设备管理、新能源技术等专业的一门主干课程。它既是一门基础课，又是一门专业课。因为它既是后续专业课学习的基础，同时电机也是应用广泛的重要设备，是学生今后的工作对象。

本课程的内容主要是介绍直流电机、变压器、异步电机、同步电机的基本结构、工作



原理、电磁过程、基本方程式、等效电路及相量图等内容。学会利用基本方程式、等效电路及相量图对电机进行分析计算,解决电机实际运行中遇到的各种问题。了解电机的实验方法与发展方向。

0.6 本课程的特点及学习方法

本课程既是一门理论性很强的专业基础课,又具有专业课的性质。不仅有理论的分析推导,电磁的抽象描述,还有用理论知识去分析工程实际问题。

本课程的学习方法如下:

- (1) 注意对基本原理的掌握和基本概念的理解。
- (2) 本教材每一章的小结中均列出了重点和要点,注意对这些知识点的学习,建立较系统的知识体系。
- (3) 注意进行比较,比如对变压器、异步电机和同步电机的相关比较,可以使我们准确把握相关基本概念,明确各类电机的特点,有利于电机理论系统化。
- (4) 注意与实践的结合,运用相关的知识要点解释和解决具体的生活生产中的电机问题。

0.7 本课程常用的基本定律

1. 全电流定律

电流的周围存在着磁场,即磁场总是伴随着电流而存在,而电流则永远被磁场所包围。

$$\oint H dl = \sum I$$

电流磁场的方向由安培定则(右手螺旋定则)来判定。

- (1) 直线电流的磁场。用右手握直导体,拇指的方向指向电流方向,弯曲四指的指向即为磁场方向。
- (2) 环形电流的磁场。用右手握螺线管,弯曲四指表示电流方向,则拇指所指方向就是磁场方向。

2. 电磁感应定律

无论何种原因使与闭合线圈交链的磁链 ψ 随着时间 t 变化时,线圈中将会产生感应电动势 e ,即法拉第电磁感应定律。

(1) 变压器电动势。指线圈不动,穿过线圈的磁通 Φ 发生变化,这样在线圈内将产生感应电动势,其大小与线圈的匝数和磁通变化率成正比,方向由楞次定律决定。

对于 N 匝线圈,设通过线圈的磁通量为 Φ ,其感应电动势为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

线圈中感应电动势的大小,决定于线圈中磁通的变化率,而不决定线圈中磁通本身的

大小。

(2) 切割(运动)电动势。指磁通不变,线圈上的导体运动,使得穿过线圈的磁通随着时间的变化而变化。此时的感应电势称为切割电动势。

对于在磁场中切割磁力线的直导体来说,计算感应电势的具体公式为

$$e = Blv \sin \alpha$$

直导体中的感应电动势的方向,可用右手定则来判断,具体方法是:伸平右手,拇指与其余四指垂直,让磁力线穿过手心,当拇指指向表示导体运动方向时,四指的方向便是感生电动势的方向。

3. 电磁力定律

载流导体在磁场中要受到的作用力称为电磁力,实验证明,电磁力的大小与导体中通过的电流强度成正比,与导体的有效长度成正比,并与载流导体所在位置的磁感应强度成正比。即

$$F = BIL$$

在旋转电机中,作用在转子载流导体上的电磁力将使转子受到一个力矩,称为电磁转矩。电磁转矩是电机实现机电能量转换的重要物理量。

载流导体在磁场中所受到的作用力的方向与磁力线的方向及电流方向有关,可以用左手定则来判定:将左手伸平,拇指与四指垂直,让磁力线垂直穿过手心,四指指向电流方向,则拇指所指方向就是导体受力方向。

4. 电路定律

(1) 欧姆定律

$$U = IR$$

(2) 基尔霍夫第一定律(电流定律)

$$\sum I = 0$$

(3) 基尔霍夫第二定律(电压定律)。在电路中,对任一回路,沿回路环绕一周,回路内所有电动势的代数和等于所有电压降的代数和,即

$$\sum e = \sum u$$

5. 磁路及磁路定律

无论是静止的电机还是旋转的电机,磁场是电机必不可少的工作环境。电流在它周围的空间建立磁场,磁场的分布我们常用一些闭合的磁力线来描述。

(1) 电路:电流流过的路径称为电路。

(2) 磁路:磁力线所经过的路径称为磁路。

磁路欧姆定律

$$\Phi = \frac{Ni}{l/\mu S} = \frac{F}{R_m}$$

它与电路欧姆定律相似,磁通 Φ 相当于电流 i ,磁通势 Ni 相当电动势 E ,磁阻 R_m 相当电阻 R 。

$$R_m = l/\mu S$$

可见,当铁芯的几何尺寸一定时,磁导率越大,则磁阻越小。因此铁芯的磁阻很小。



如果要获得一定的磁通，为了减小磁通势，应尽量选用高磁导率的铁磁材料做铁芯，而且尽可能缩短磁路中不必要的气隙长度。原因是空气磁导率小，磁阻大。

6. 磁化与磁性材料

当把一根铁棒插入原来不能吸引铁屑的载流线圈中时，我们就会发现铁屑被吸引。这是由于铁棒被磁化的缘故。使原来没有磁性的物质具有磁性的过程称为磁化。凡是铁磁材料都能被磁化。铁磁材料有如下性质：

- (1) 能被磁体吸引。
- (2) 能被磁化并且有剩磁和磁滞损耗。
- (3) 磁导率不是常数，每种铁磁材料都有一个最大值。
- (4) 磁感应强度有一个饱和值。

铁磁材料有软磁材料、硬磁材料和矩磁材料三种。硅钢片、纯铁属软磁材料，常用来做电机的铁芯。钨钢、钴钢属硬磁材料，常用来做各式永久磁铁。矩磁材料主要用来做记忆元件。

第 1 章 变 压 器

变压器是一种静止的电器。它通过线圈间的电磁感应作用，可以把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。以满足高压输电、低压供电和其他用途的需要。

变压器种类很多，但各种变压器的基本工作原理是相同的，不同变压器只是加上某些约束条件而已。

1.1 变压器的基本知识和结构

【学习目标】

- (1) 了解变压器的种类和用途，掌握变压器的基本工作原理。
- (2) 掌握变压器各主要部件的结构及其作用，了解变压器的冷却方式。
- (3) 理解变压器铭牌数据的含义，熟悉额定值之间的换算。

章节名称	能力要素	知识和技能要求	考核标准
变压器的基本知识和结构	(1) 能说出变压器的基本工作原理。 (2) 能认识电力变压器各主要部件，并知道其主要作用。 (3) 能读懂变压器的铭牌	(1) 掌握变压器的基本工作原理。 (2) 了解变压器的铁芯、绕组和主要附件的材料、结构形式和主要作用，以及正常时的状态。 (3) 了解变压器的铭牌数据	(1) 重点考核内容： 1) 变压器的基本工作原理。 2) 变压器各主要部件的结构及其主要作用。 3) 额定值之间的换算。 (2) 考核方式：口试或笔试。 (3) 占总成绩的比例：5%~10%

1.1.1 变压器的基本知识

1. 变压器的基本工作原理

变压器是利用电磁感应原理工作的，图 1.1 所示为其工作原理示意图。在一个闭合的铁芯上套有两个绕组。这两个绕组具有不同的匝数且互相绝缘，两绕组间只有磁的耦合而没有电的联系。其中，接于电源侧的绕组称为原绕组或一次绕组，一次绕组各量用下标“1”表示；用于接负载的绕组称为副绕组或二次绕组，二次绕组各量用下标“2”表示。

若将绕组 1 接到交流电源上，绕组中便有交流电流 i_1 流过，在铁芯中产生交变磁通 Φ 与原、副绕组同时交链，分别在两个绕组

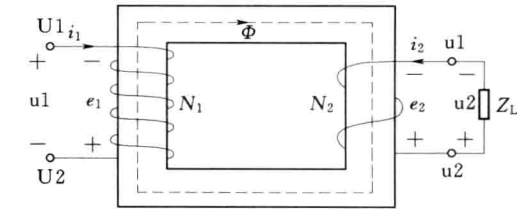


图 1.1 变压器工作原理示意图



中感应出同频率的电动势 e_1 和 e_2 。

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中： N_1 为原绕组匝数； N_2 为副绕组匝数。

若把负载接于绕组 2，在电动势 e_2 的作用下，电流 i_2 将流过负载，就能向负载输出电能，即实现了电能的传递。

由式 (1.1) 可知，原、副绕组感应电动势的大小正比于各自绕组的匝数，而绕组的感应电动势又近似等于各自的电压，因此，只要一次和二次绕组的匝数不相等，就能达到改变电压的目的，这就是变压器的变压原理。

2. 变压器的应用与分类

(1) 应用。在电力系统中，变压器是输配电能的主要电气设备。其应用如图 1.2 所示。

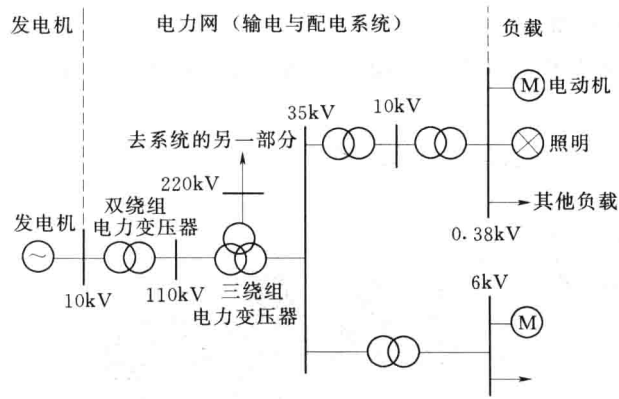


图 1.2 变压器在电力系统中的应用

发电机输出的电压，由于受发电机绝缘水平的限制，通常为 6.3kV、10.5kV，最高不超过 27kV。用这样低的电压进行远距离输电是有困难的。因为当输送一定功率的电能时，电压越低，则电流越大，电能有可能大部分消耗在输电线的电阻上。为此需要采用高压输电，即用升压变压器把电压升高到输电电压，例如 110kV、220kV 或 500kV 等，以降低输送电流，因而线路上的电压降和功率损耗明显减小，线路用铜量也可减少，以节省投资费用。一般来说，输电距离越远，输送功率越大，则要求的输电电压越高。输电线路将几万伏或几十万伏高电压的电能输送到负荷区后，由于受用电设备绝缘及安全的限制，通常大型动力设备采用 6kV 或 10kV，小型动力设备和照明则为 380/220V。所以在供用电系统中需要大量的降压变压器，将输电线路输送的高电压变换成各种不同等级的低电压，以满足各类负荷的需要。因此变压器在电力系统中得到了广泛应用，变压器的总安装容量可达发电机总装机容量的 6~8 倍，变压器对电力系统有着极其重要的意义。

用于电力系统升、降电压的变压器称为电力变压器。另外，变压器的用途还很多，如测量系统中用的仪用互感器，用于实验室调压的自耦调压器。在电力拖动系统或自动控制

系统中, 变压器作为能量传递或信号传递的元件, 也应用得十分广泛。

(2) 分类。为适应不同的使用目的和工作条件, 变压器种类很多, 因此变压器的分类方法有多种, 通常可按用途、绕组数目、相数、铁芯结构、调压方式和冷却方式等划分类别。

1) 按用途分有电力变压器和特种变压器。电力变压器又分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器等; 特种变压器又分为试验用变压器、仪用变压器、电炉变压器、电焊变压器和整流变压器等。

2) 按绕组数目分有单绕组(自耦)变压器、双绕组变压器、三绕组变压器和多绕组变压器。

3) 按相数分有单相变压器、三相变压器和多相变压器。

4) 按铁芯结构分有芯式变压器和壳式变压器。

5) 按调压方式分有无励磁调压变压器和有载调压变压器。

6) 按冷却介质和冷却方式分有干式变压器、油浸变压器(包括油浸自冷式、油浸风冷式、油浸强迫油循环式和强迫油循环导向冷却式)和充气式冷却变压器。

1.1.2 变压器的基本结构

变压器的基本结构部件有铁芯、绕组、油箱、冷却装置、绝缘套管和保护装置等, 如图 1.3 所示。

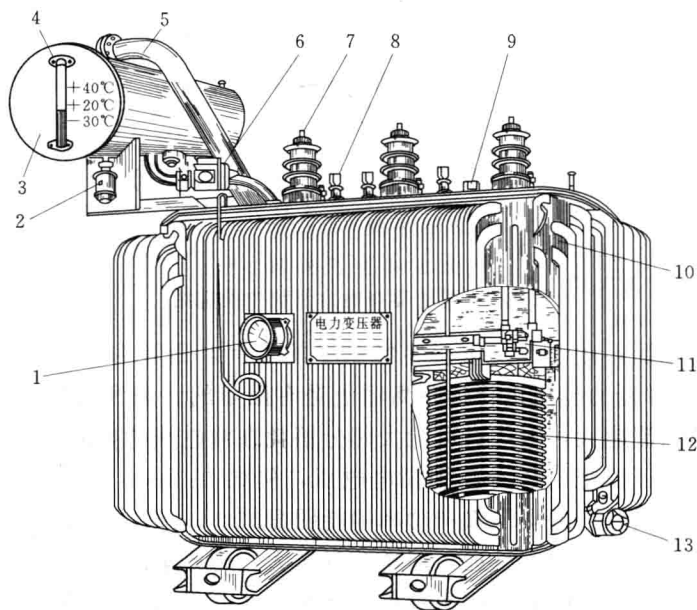


图 1.3 油浸式电力变压器结构示意图

- 1—信号式温度计；2—吸湿器；3—储油柜；4—油表；5—安全气道；
6—气体继电器；7—高压套管；8—低压套管；9—分接开关；
10—油箱；11—铁芯；12—线圈；13—放油阀门

1. 铁芯

铁芯是变压器的主磁路, 又是它的支撑骨架。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成, 铁芯



柱上套装绕组，铁轭的作用则是使整个磁路闭合。为了提高磁路的导磁性能和减少铁芯中的磁滞和涡流损耗，铁芯用 0.35mm 厚、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠成。

叠片式铁芯的结构型式有芯式和壳式两种。芯式铁芯结构的变压器，其铁芯被绕组包围着，如图 1.4 所示。芯式变压器结构简单，绕组的装配及绝缘设置也较容易，国产电力变压器铁芯主要用心式结构。壳式铁芯结构的变压器，它的特点是铁芯包围线圈。如图 1.5 所示，壳式变压器的机械强度好，但制造复杂、铁芯材料消耗多，只在一些特殊变压器（如电炉变压器）中采用。

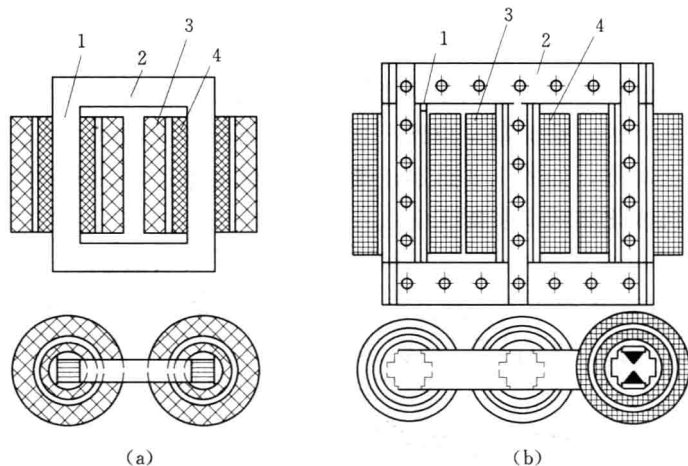


图 1.4 芯式变压器结构示意图

(a) 单相；(b) 三相

1—铁芯柱；2—铁轭；3—高压绕组；4—低压绕组

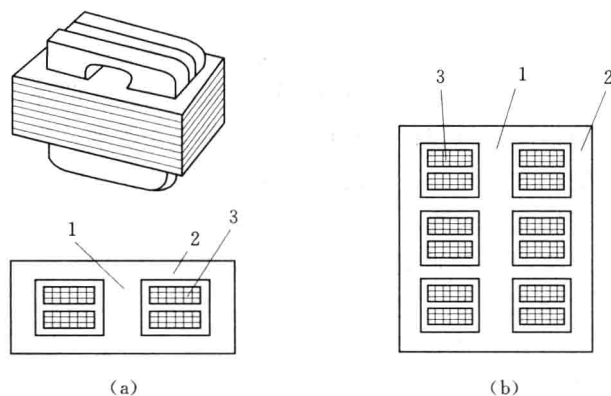


图 1.5 壳式变压器结构示意图

(a) 单相；(b) 三相

1—铁芯柱；2—铁轭；3—绕组

叠片式铁芯的装配，一般均采用交迭式叠装，使上、下层的接缝错开，减小接缝间隙以减小励磁电流。当采用冷轧硅钢片时，由于冷轧硅钢片顺碾压方向的导磁系数高，损耗

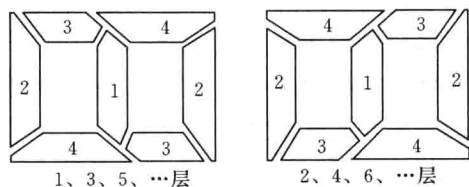


图 1.6 斜切钢片的叠装法

铁轭的截面有矩形及阶梯形的，铁轭的截面通常比铁芯柱大 5%~10%，以减少空载电流和损耗。

近年来，出现了一种渐开线形铁芯变压器。它的铁芯柱硅钢片是在专门的成型机上采用冷挤压成型方法轧制的，铁轭则是由同一宽度的硅钢带卷制而成，铁芯柱按三角形方式布置，三相磁路完全对称，如图 1.8 所示。渐开线形铁芯变压器的主要优点在于可以节省硅钢片、便于生产机械化和减少装配工时。

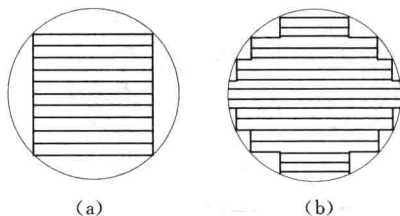


图 1.7 铁芯柱截面

(a) 矩形截面；(b) 多级阶梯形截面

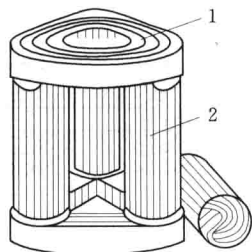


图 1.8 渐开线形铁芯

1—铁轭；2—铁芯柱

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分，它一般用绝缘铜线或铝线绕制而成。根据高、低压绕组在铁芯柱上排列方式的不同，变压器的绕组可分为同心式和交叠式两种。

同心式的高、低压绕组同心地套在铁芯柱上，如图 1.4 所示。为了便于绝缘，通常低压绕组靠近铁芯，高压绕组放在外面，中间用绝缘纸筒隔开。这种绕组结构简单，制造方便，国产电力变压器均采用此种线圈。

交叠式绕组的高低压绕组交替地套在铁芯柱上，如图 1.9 所示。这种绕组都做成饼式，高、低压绕组之间的间隙较多，绝缘比较复杂，但这种绕组漏电抗小，引线方便，机械强度好，主要用在电炉和电焊等特种变压器中。

3. 油箱和冷却装置

油浸变压器的器身浸在充满变压器油的油箱里。变压器油既是绝缘介质，又是冷却介质，它通过受热后的对流，将铁芯和绕组的热量带到箱壁及冷却装置，再散发到周围空气中。

油箱的结构与变压器的容量、发热情况密切相关。

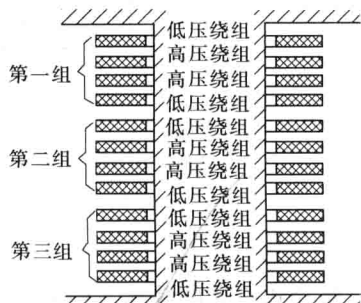


图 1.9 交叠式绕组