



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电力变压器 应用技术

李丹娜 孙成普 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电力变压器 应用技术

编著 李丹娜 孙成普
主审 刘景峰



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书共分九章，主要内容包括电力变压器的基本结构、变压器的基本工作原理、单相变压器的运行性能及参数测定、三相电力变压器、变压器的并联运行、变压器的不对称运行、变压器的过渡过程、其他类型变压器、干式变压器。本书注重培养学生的职业技能，为使学生更好地掌握电力变压器的知识和技能，每章前都有内容提要，每章结束都有课程小结及复习思考题。

本书可作为高职高专院校自动化类、电力技术类等相关专业教材，同时也可供从事电气类工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力变压器应用技术/李丹娜, 孙成普编著. —北京: 中国电力出版社, 2009

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8678 - 2

I. 电… II. ①李…②孙… III. 电力变压器—职业教育—教材 IV. TM41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 049986 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 5 月第一版 2009 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 269 千字

定价 18.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书的选题，来自于企业需求和本专业的教学实践要求。根据国家对电力高等职业教育教学的相关规定，通过对电力变压器生产厂家及相关用人单位进行的大量社会调研，在确定了企业用人标准及对人才知识结构需求的前提下，结合本专业的实际教学情况而构思编写的。在编写过程中，听取了相关工程技术人员的意见和建议，按企业需求培养学生，从便于学生顶岗实习及应用的角度选择题材并定稿的。

本书内容新颖、视角独特、实践性和应用性很强，既有理论分析，又有例题及实验内容验证，有利于培养和训练学生分析问题和解决问题的能力。

编者结合长期的教学实践并总结多年来讲授本门课程的教学经验，编写中充分考虑现代电力变压器新技术的发展和新知识应用，深入浅出地讲述了电力变压器每个环节内容，注重内容精选，图文并茂，引入先进技术的新内容，突出实用技术和实际应用。

本书共分九章，主要内容包括电力变压器的基本结构，变压器的基本工作原理，单相变压器运行性能及参数测定，三相变压器结构原理、并联运行及不对称运行方式，变压器的过渡过程，三相变压器组的连接方式，自耦变压器的结构原理，干式变压器结构原理及其他类型的变压器等内容。

本书第一、三、五、六、七章，由沈阳职业技术学院李丹娜副教授编写；第二、四、八、九章，由沈阳职业技术学院孙成普教授编写。全书由孙成普教授统稿审核，由保定电力职业技术学院刘景峰副教授主审。

由于编者业务水平有限，书中难免有欠妥和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2008年10月

目 录

前言

第一章 电力变压器的基本结构	1
第一节 电力变压器的基本知识.....	1
第二节 变压器的基本结构.....	2
第三节 变压器的分类及主要系列	14
第四节 变压器的额定数据	18
本章小结	22
习题与思考题	22
第二章 变压器的基本原理	23
第一节 变压器的基本工作原理	23
第二节 单相变压器的空载运行	24
第三节 变压器的负载运行	38
本章小结	49
习题与思考题	49
第三章 单相变压器的运行性能及参数测定	51
第一节 变压器的运行性能	51
第二节 变压器二次侧电压的变化及电压调整率	51
第三节 变压器的损耗和效率	55
第四节 单相变压器参数的测定	61
本章小结	69
习题与思考题	69
第四章 三相电力变压器	71
第一节 三相变压器的基本知识	71
第二节 三相变压器的磁路	78
第三节 变压器的连接方式	81
第四节 三相变压器空载运行时的电动势波形	87
本章小结	92
习题与思考题	92
第五章 变压器的并联运行	94
第一节 变压器并联运行的基本知识	94
第二节 并联运行变压器的负载分配	96
本章小结	99
习题与思考题.....	100

第六章 变压器的不对称运行	101
第一节 概述.....	101
第二节 对称分量法.....	101
第三节 三相变压器的不对称运行.....	104
第四节 Vv 连接变压器的运行	110
本章小结.....	111
习题与思考题.....	111
第七章 变压器的过渡过程	113
第一节 概述.....	113
第二节 变压器空载合闸的过渡过程.....	113
第三节 变压器突然短路时的过渡过程.....	115
第四节 变压器过电流的影响.....	117
第五节 变压器的过电压现象.....	118
本章小结.....	120
习题与思考题.....	121
第八章 其他类型变压器	122
第一节 三绕组电力变压器.....	122
第二节 三相自耦变压器.....	130
第三节 互感器.....	136
本章小结.....	141
习题与思考题.....	141
第九章 干式变压器	143
第一节 干式变压器的结构与性能.....	143
第二节 干式变压器的维护、检修和试验.....	150
第三节 干式变压器绕组浸漆、烘干工艺.....	153
第四节 电力变压器的选择与校验.....	155
本章小结.....	158
习题与思考题.....	158
附录 变压器的技术参数	160
参考文献	172

电力变压器的基本结构

内 容 提 要

本章主要讲述电力变压器的作用及变换电能和输送电能的重要意义；变压器的主要结构组成及工作原理；变压器的分类及型号表示；变压器各项额定数据的分析等内容。

第一节 电力变压器的基本知识

我国于1922年开始制造电力变压器（或简称变压器），当时研制出了第一台电压为2kV、容量为22kV·A配电变压器。1943年以前，我国制造出的最大变压器电压为33kV、容量为600kV·A。总体来说，1949年以前，我国所制造的电力变压器，单台容量最大不超过2000kV·A，电压等级最高为33kV。当时工厂的设备比较简陋，规模狭小，技术水平较低，材料大部分依赖于国外进口，基本上是半殖民地性质的修配工厂，生产电能的能力是很低的。

1949年以来，我们建立了自己的变压器专业制造厂，1953年就生产了大型电力变压器，容量达到13500kV·A；1957年，我国制出了电压等级为110/66/6.6kV、容量达到40000kV·A的三相三绕组电力变压器，同年还生产制造出了电压等级为220/66kV、容量为20000kV·A的单相电力变压器；1958年，已制出容量为60000kV·A、电压等级为110kV的三相三绕组电力变压器及容量为40000kV·A、电压等级为220kV的单相电力变压器。

随着我国电力变压器制造水平的不断提高、自主研发能力的不断增强，目前国产三相电力变压器的电压等级为500kV以上、容量在360000kV·A以上，并已普遍采用冷轧硅钢片、环氧树脂玻璃黏带绑扎铁心，拱顶钟罩式油箱，胶纸及油质电容式套管，高压采用纠结式绕组、油导向冷却等先进技术，从而使产品做到体积小、质量轻，达到了国际先进水平。

在国民经济建设及人们的日常生活中，常用的三相四线制交流电大都是采用380/220V的电压。例如农用的脱粒机、磨米机、粉碎机和水泵电动机等的电源、工业用各类机床电动机的电源、家用电器的电源以及照明设备用的电源等，都是采用380/220V的三相交流电。这种电压等级的交流三相制供电系统，已经能够满足一般小型动力设备和照明的需要，对人身和设备都是比较安全的。至于近代工业企业中的大型动力机械设备，则往往要求较高的3~10kV电压供电。

众所周知，电能的应用是相对分散的，然而电能的生产却总是相对集中的，这是由自然条件、技术能力及发电成本等综合因素决定的，集中的大功率发电厂比分散的小功率发电厂的经济性更高。考虑到利用天然水能资源和缩短燃料运输距离、火力发电厂冷却循环水取用方便等许多因素，现代的水电厂或火力发电厂不可能分散建设在使用电力的地区附近，而是集中在建设在技术经济指标都比较合理的地方。因此，就产生了需要把集中生产的大功率电能输送到分散使用电力的地区供给不同用电单位使用的问题，同时也产生了远距离输电的问题。

要将大功率的电能进行远距离输送,如果采用较低电压输送,则会遇到功率损耗的大问题。因为当输送的有功功率 P 一定时,即

$$P = UI \cos \varphi$$

如输电电压 U 越低,则线路电流 I 就越大,在线路上势必产生很大的电能损耗和很大的线路压降损耗,为减小这种损耗,最简单的办法就是在送电电源端用升压变压器将电压升高后(同时减小了线路的电流),再通过输电线路将电能远距离输送。

目前,输送电能距离为 200~400km,输送容量为 20 万~30 万 kW 的输电线路,一般都采用 220kV 及以上电压输电。

为了保证供电的安全,经过高压输电系统传输的电能到达使用地区后,必须用降压变压器将其降低为配电系统的 10kV 配电电压,或者先降到 35kV 送到用电地区,再经过配电变压器将电压降低到用户直接使用的电压,一般大型动力机械用电电压为 10kV 或 3kV、小型动力设备和照明混合负载用电电压为 380/220V。

实践证明,利用电力变压器输送电能,不管输送的电功率多大(可以达到几十万千瓦),输送的距离多远(可以达到数百公里),都能够经济、合理、安全、可靠地实现电能的输送和分配。通常在电力系统中,发电机的容量与变压器的容量比约为 1:6,因此,在电力系统中变压器的作用是十分重要的。

第二节 变压器的基本结构

电力变压器是电力系统变电所中的主要设备。变压器是一种静止的电气设备,它可以将高压电能转换为低压电能,也可以将低压电能转换为高压电能。变压器是根据电磁感应的原理,将绕在同一铁心上的两个或两个以上的绕组,借助铁心中交变磁场的作用,将某一等级的电压和电流的交流电能转变为同频率的另一等级的电压和电流的交流电能。以便电能的合理输送、分配和使用。变压器具有变换电压、电流和阻抗的功能。

变压器的结构是根据变压器的技术指标、性能参数、工作原理、工作条件和要求,随着制造技术和经济条件的发展而定型的。在电力系统中应用最广泛的是油浸式电力变压器。电力变压器的结构主要由铁心、绕组、绝缘套管、油箱及附件等组成。

变电所中的电力变压器,属于直接向用电设备供电的配电变压器,大多采用空载调压的普通三相油浸自冷式电力变压器。绕组的导体材料有铜绕组和铝绕组两种。三相油浸式电力变压器的结构示意图,如图 1-1 所示。

由于变压器绕组及铁心均有一定的损耗,

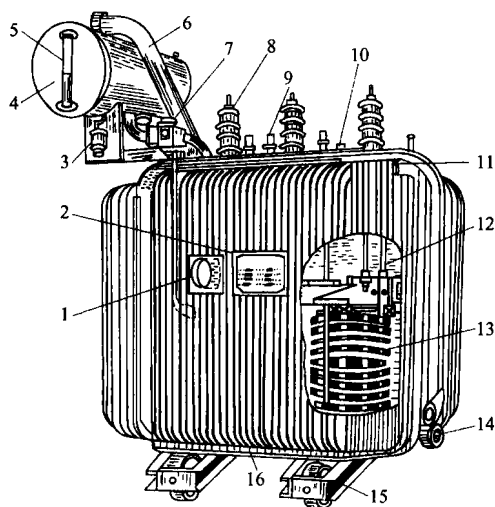


图 1-1 三相油浸式电力变压器的结构示意图

- 1—信号温度计; 2—铭牌; 3—吸湿器; 4—储油柜; 5—油标; 6—安全气道; 7—气体继电器; 8—高压套管; 9—低压套管; 10—分接开关; 11—油箱; 12—铁心; 13—绕组及绝缘; 14—放油阀门; 15—小车; 16—接地螺栓

并以热能的形式散发出来，所以引出了变压器的冷却问题。又由于许多变压器是在高电压条件下运行，因此，还有相应的绝缘措施；此外还涉及变压器各部件受力和支撑等问题。因此电力变压器的结构比较复杂。油浸式电力变压器的结构况图，如图 1-2 所示。

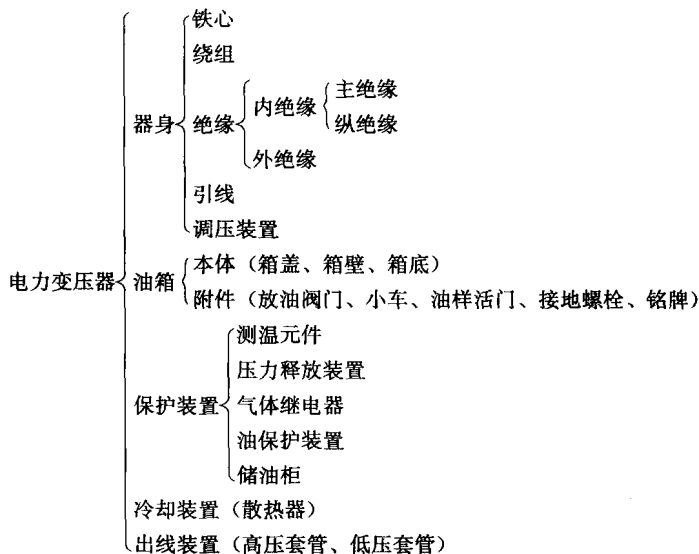


图 1-2 油浸式电力变压器的结构况图

（一）变压器的铁心

变压器主要由铁心和套在铁心上的绕组所组成。铁心和绕组是变压器的主体，它是决定电压、电流升高或降低的根本所在。变压器的铁心用于导磁，是磁路系统的本体，是磁通闭合的路径，又是绕组的支持骨架。铁心由心柱和铁轭两部分组成，套装有绕组的部分为心柱，连接心柱以构成闭合磁路的部分为铁轭。为提高铁心的导磁性能，减小磁滞损耗，铁心材料多数选择 0.23~0.35mm 厚的冷轧硅钢片，采用心柱和铁轭交错叠装而成，为了减少铁心的损耗，铁心表面涂有绝缘薄漆。

1. 铁心的基本结构

变压器铁心的基本结构形式有心式和壳式两种。在三相心式变压器中，每相各有一个铁心柱，用两个铁轭把所有的铁心柱连接起来，如图 1-3 所示。单相心式变压器，如图 1-4 所示。

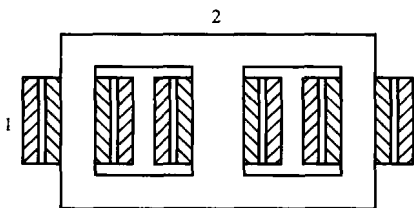


图 1-3 三相心式变压器

1—绕组；2—铁心

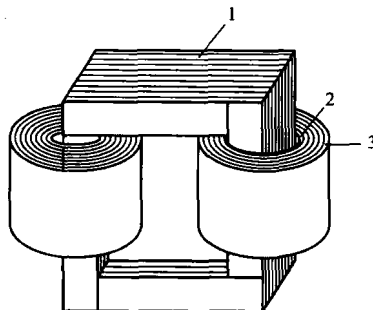


图 1-4 单相心式变压器

1—铁心；2—二次绕组；3—一次绕组

三相壳式变压器，具有分支的磁路系统围绕在绕组的外面，好像是个绕组的外壳，如图 1-5 所示。单相壳式变压器，如图 1-6 所示。我国制造的电力变压器大部分都是心式变压器，只有少数小容量的变压器采用壳式的。

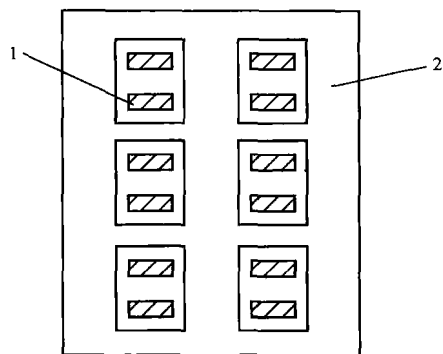


图 1-5 三相壳式变压器

1—绕组；2—铁轭

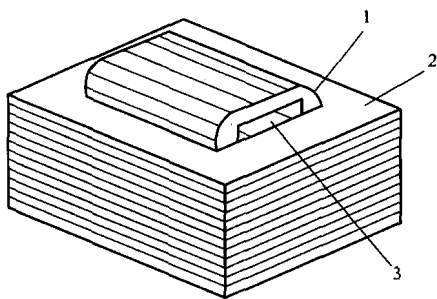


图 1-6 单相壳式变压器

1—绕组；2—铁轭；3—心柱

2. 铁心材料

变压器铁心内磁通是交变的，为了减少损耗，变压器铁心一般选用含硅量在 5% 左右、厚度为 0.35~0.5mm 的 D41—D44 型热轧硅钢片叠成，片间涂以 0.01~0.013mm 厚的漆膜，以避免片间短路。有时亦选用相同厚度的 D310—D340 型的冷轧硅钢片。

3. 冷轧硅钢片与热轧硅钢片的区别

(1) 冷轧硅钢片的磁饱和点较高，在 17 000T（特斯拉）左右的磁通密度时才开始饱和；而热轧硅钢片的饱和点较低，在 14 500T 左右时就开始饱和。所以，冷轧硅钢片更能发挥材料的导磁能力。

(2) 在相同的运行条件下，即相同的磁通密度、相同的频率时，冷轧硅钢片的单位损耗较小，这是因为冷轧硅钢片的磁偶极子排列比较合理，磁偶极子的易磁化方向与轧延方向接近于平行。

(3) 冷轧硅钢片与热轧硅钢片同样都有方向性，就是磁力线方向要与硅钢片轧延方向一致时损耗为最小、磁力线方向与硅钢片轧延方向成 90° 时损耗为最大，但冷轧硅钢片的方向性较热轧硅钢片的方向性显著得多。在一般铁心结构中，在铁心柱与铁轭间的转角处，考虑到方向性，用冷轧硅钢片的铁心可做成斜接缝的，这样可以减少磁通与轧延方向的角度，以降低损耗。

热轧硅钢片做成斜接缝时，空载特性改善不大，所以不必要做成斜接缝。

(4) 冷轧硅钢片的硬度要比热轧硅钢片大，所以剪刀和冲模的寿命就要短。

(5) 硅钢片加工过程中的剪冲、辗轧、敲打对冷轧硅钢片性能的影响特别明显，这就需要退火改善性能。而对热轧硅钢片的影响较小。

(6) 变压器常用硅钢片的性能，如表 1-1 所示。

由上述差别可见，若把冷轧硅钢片当作热轧硅钢片使用是优材劣用，没有充分发挥材料的作用；而热轧硅钢片根本不能当作冷轧硅钢片使用。

表 1-1 变压器常用硅钢片的性能参数

轧制工艺	牌号	厚度 (mm)	单位损耗 (W/kg)		不同磁场强度下的磁通密度 (T)			密度 (g/cm ³)
			$p_{10/15}$	$p_{15/50}$	B_{25}	B_{50}	B_{100}	
热轧	D42	0.5	1.4	3.1	1.45	1.56	1.69	7.55
	D42	0.35	1.2	2.8	1.45	1.56	1.69	
	D43	0.5	1.25	2.9	1.44	1.55	1.69	
	D43	0.35	1.05	2.5	1.44	1.55	1.69	
冷轧	D310	0.35	0.9	2.0	1.70	1.80	1.90	7.65
	D320	0.35	0.8	1.80	1.80	1.87	1.92	
	D330	0.35	0.7	1.85	1.85	1.90	1.95	

4. 铁心装配方法

铁心装配的方法一般采用交叠式（叠积法）。几种常用铁心叠装图如图 1-7 及图 1-8 所示，为三相变压器的铁心装配方法。其中每层用六片，按图 1-7 及图 1-8 的装配办法，将铁心一层一层错开叠装起来，这样叠装的好处是各层磁路的接缝不在同一地方，形成的气隙缝小，损耗就减少。这种装配办法的缺点是装配工艺较复杂，相比较还是直接接缝工艺简单。

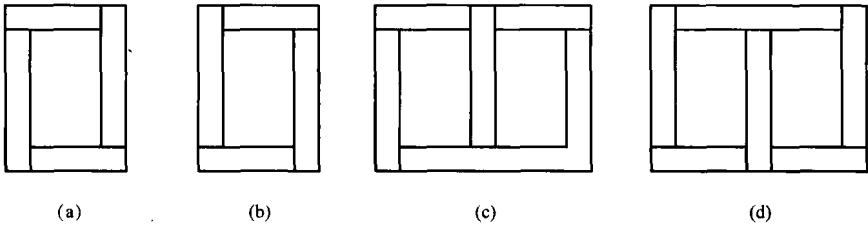


图 1-7 铁心叠装（一）

(a) 单相第一层；(b) 单相第二层；(c) 三相第一层，1、3、5…层；(d) 三相第二层，2、4、6…层

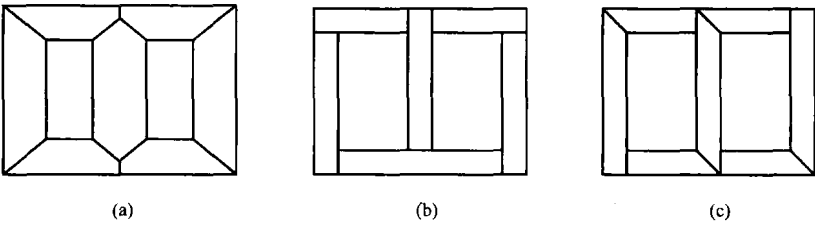


图 1-8 铁心叠装（二）

(a) 45°的斜接缝；(b) 全直接缝；(c) 半斜半直接缝

选择铁心叠装方式时，要考虑硅钢片的方向性特点，顺着材料轧延方向的导磁性能最佳、损耗也最小，垂直于碾轧方向时导磁性能显著变差。另外，冷轧硅钢片的方向性比热轧硅钢片明显，往往相差 3~4 倍。因此，对冷轧硅钢片接缝宜采取 45°的斜接缝，如图 1-8 (a) 所示。热轧硅钢片允许采取全直接缝，如图 1-8 (b) 所示；也允许采用半斜半直接缝，如图 1-8 (c) 所示。

5. 变压器铁心叠片接缝间隙的要求

- (1) 对新裁剪的铁心，在叠装前应先去掉毛刺，剩余毛刺不得高于 0.1mm。
- (2) 在铁心叠装时，先将两个夹子放平，距离要适当，且应放好夹件绝缘。
- (3) 铁心每叠一级，用木锤打齐一级，严禁用铁锤捶打。
- (4) 叠片的接缝间隙不应大于表 1-2 中的规定，否则空载电流会增大。

表 1-2 变压器铁心叠片的接缝间隙要求

铁心直径	接缝间隙	铁心直径	接缝间隙
230mm 以下	1mm, 个别片不超过 2mm	230mm 以上	1~3mm, 个别片不超过 3mm

虽然冷轧硅钢片在顺着轧辗方向时损耗较小、导磁率较高，但用图 1-7 和图 1-8 的方法叠装，在 90°转弯处磁通方向和轧辗方向成 90°角，将会引起附加损耗。因此，为了使磁通方向和轧辗方向基本一致，目前，电力变压器制造厂一般都采用斜切硅钢片的铁心叠装方法，这样就减少了转弯处的附加损耗，如图 1-9 所示。

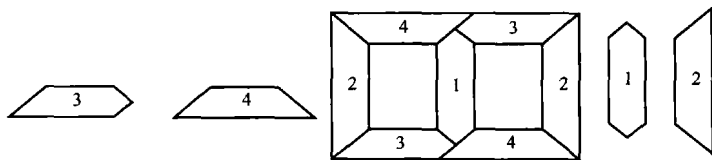


图 1-9 斜切硅钢片的铁心叠装

1、2、3、4—全斜接缝

叠装好的铁心，借助槽钢和玻璃布环氧树脂或螺杆固定，为了防止磁通过槽钢或螺杆而产生损耗，发生局部过热的问题，在硅钢片、槽钢和穿心螺杆之间，分别用绝缘纸板隔开。铁心截面只有当容量很小时才能选用正方形的，为了充分利用圆形空间，铁心截面大都做成内接于圆的梯形，随着容量的增大，铁心截面的增加，阶梯的级数也随之增多。铁心截面的类型，如图 1-10 所示。

近年来，国内开始采用一种新的渐开线式铁心结构，先将每张硅钢片卷成渐开线状，再叠成圆柱形心柱，如图 1-11 所示。

铁轭用长条卷料冷轧钢片卷成三角形，上轭与下轭均与心柱对接。这种结构使绕组内圆空间得到充分利用，轭部磁通减少，变压器高度降低，具有结构简单、质量轻、经济合理、技术先进等优点。

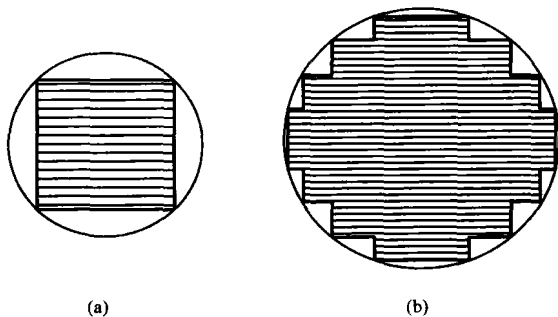


图 1-10 铁心截面

(a) 正方形铁心截面；(b) 阶梯形铁心截面

将一台 1000kV·A 渐开线变压器与同规格冷轧铝绕组变压器相比较，总质量减轻 14.7%，同时为机械生产提高劳动生产率提供了有利的条件。

近年来，我国电力工业迅猛发展，变压器的容量和电压等级不断提高，外廓尺寸也相应增大，受到运输条件的限制，设计时必须考虑体积结构。所以特大容量超高压的三相变压器，都采用具有分支磁路

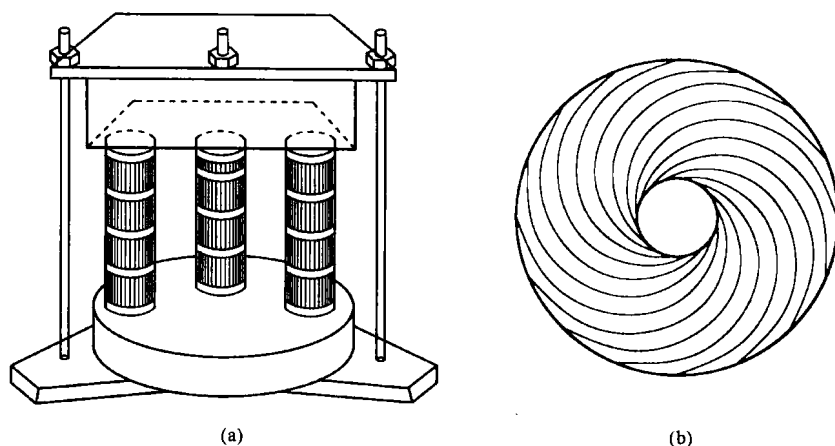


图 1-11 渐开线式铁心

(a) 渐开线式铁心结构；(b) 渐开线式铁心柱截面

的三心五柱式铁心结构，这样可以降低运输的高度，如图 1-12 所示。

(二) 变压器的绕组

绕组是变压器的电路部分，常用绝缘铜线或铝线绕制而成，一组串联的线匝叫线圈，它是组成绕组的单元。

习惯上，我们把接电源的绕组（工作电压高的绕组）称作变压器的一次绕组，亦称为高压绕组；接负载的绕组（工作电压低的绕组）称作变压器的二次绕组，亦称为低压绕组。

在绕组的层与层之间用撑条隔开，形成油道。目前，我国生产的变压器均采用此种结构。按照一次绕组和二次绕组放置相对位置的不同，变压器的绕组可以分为同心式绕组和交迭式绕组。

1. 同心式绕组

变压器的一、二次绕组一般都绕成同心圆筒形套在同一铁心柱上，因为这种形状的绕组有较好的机械性能和受力性能，不易变形，同时还易于绕制。通常是低压绕组套在内侧，高压绕组套在外侧，因为高、低压侧绕组绕成同心圆结构，所以，这种绕组称为同心式绕组。

同心式绕组用于心式变压器，大部分同心式绕组都是低压绕组套在里边，高压绕组套在外边。高、低压绕组之间，低压绕组和铁心之间，都必须有一定的绝缘间隙，利用绝缘纸筒把它们隔开，绝缘纸筒的薄厚，可根据变压器的额定电压来确定。低压绕组放在里边，是因为低压绕组和铁心之间所需要的绝缘距离比较小一些，这样可以减少绕组的尺寸。

同心式绕组又可分为圆筒式绕组、线段式绕组、连续式绕组、螺旋式绕组、纠结式绕组等几种基本形式。心式变压器绕组形式分类况图，如图 1-13 所示。

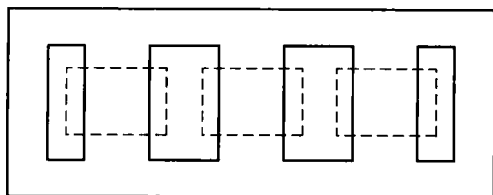


图 1-12 三心五柱式铁心结构图

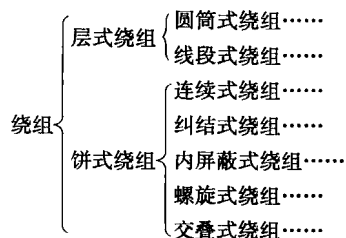


图 1-13 心式变压器绕组形式分类况图

(1) 圆筒式绕组。圆筒式绕组用于容量不大的变压器，一般用在每柱容量为 $200\text{kV} \cdot \text{A}$ 以下的变压器中。用作低压绕组时，常用多层或双层低压圆筒式绕组，如图 1-14 所示。

(2) 线段式绕组。线段式绕组，一般用于变压器容量不大而电压较高的情况下，作为一次绕组。为了避免多层圆筒式绕组的层间电压过高，将多层圆筒式绕组沿轴向分成若干段，每段每层的匝数不多，线段式绕组是成对绕制的，如图 1-15 所示。

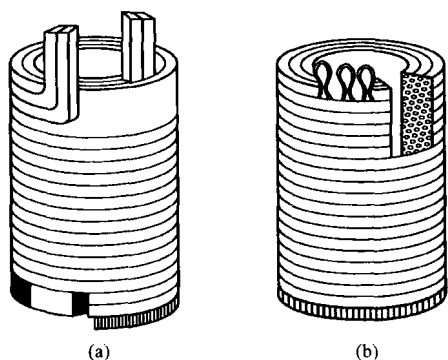


图 1-14 低压圆筒式绕组

(a) 双层圆筒式绕组；(b) 多层圆筒式绕组

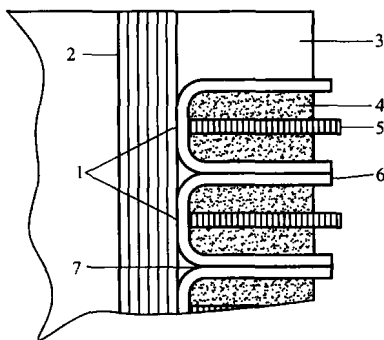


图 1-15 线段式绕组

1—线段的内部连接线；2—电木筒；3—支撑端面；4—绕组的首端；5—纸圈；6—线段的外部连接线；7—角环

(3) 连续式绕组。连续式绕组主要用于容量为 $500 \sim 10\,000\text{kV} \cdot \text{A}$ 及以上变压器的一次绕组，也用于 $10\,000\text{kV} \cdot \text{A}$ 及以上变压器的中压及二次绕组，相当于线段式绕组中每层只有一匝的情况，它是直接连续下去的，故称为连续式绕组，如图 1-16 所示。

(4) 螺旋式绕组。大容量变压器二次绕组匝数很少，绕组截面很大，因此，要用多根导线并联起来绕制，每段仅一匝，像螺纹一样连续下去，故称螺旋式绕组，如图 1-17 所示。

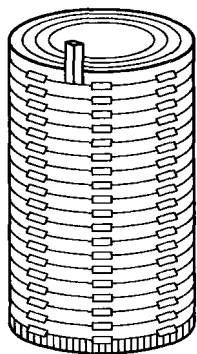


图 1-16 连续式绕组

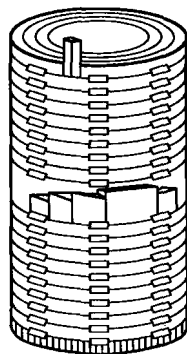


图 1-17 螺旋式绕组

(5) 交叠式绕组。交叠式绕组是指一次绕组和二次绕组各自分别作成若干个线饼，沿铁心柱高度依次交错放置的绕组，交叠式绕组应用不多，壳式变压器和电压低、电流大的电炉交流变压器等用此种绕组。由于绕组均为饼形，因此这种绕组也称为“饼式”绕组。为了便

于绝缘，二次绕组套装在靠近铁轭的地方。单相壳式变压器交叠式绕组接线，如图 1-18 所示。

(6) 纠结式绕组。为了改善在过电压作用下绕组上的电位分布，近年来，大容量变压器的一次绕组上采用了纠结连续式绕组，这种绕组的线匝数序是互相“纠结”排列的，如图 1-19 所示。

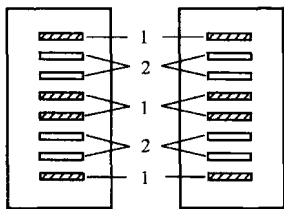


图 1-18 交叠式绕组

1—二次绕组；2—一次绕组

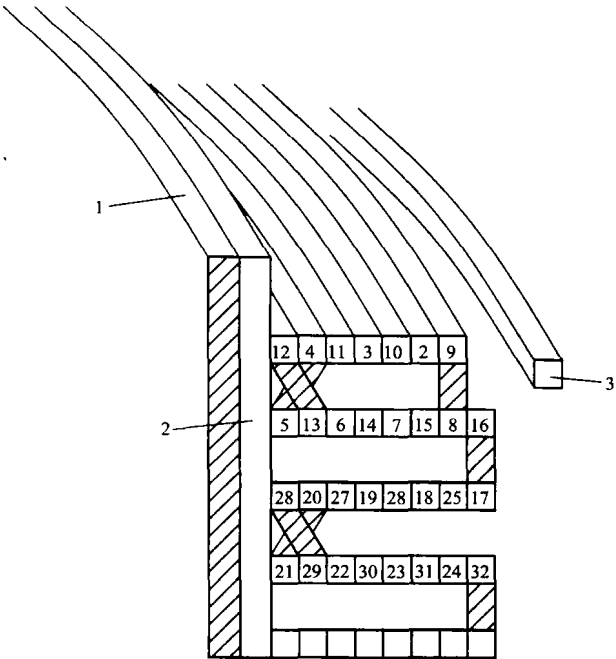


图 1-19 纠结式绕组的排列

1—绝缘纸筒；2—撑条；3—匝号

2. 绕组电流密度的选择

通常绕组的电流密度计算式为

$$j_{ec} = \frac{I_1}{A_1} = \frac{I_2}{A_2} \tag{1-1}$$

式中 j_{ec} ——电流密度 (A/mm^2)；
 A_1 ——一次侧导体截面 (mm^2)；
 A_2 ——二次侧导体截面 (mm^2)；
 I_1 ——一次侧电流 (A)；
 I_2 ——二次侧电流 (A)。

变压器容量较小的， j_{ec} 取较低值；容量较大的， j_{ec} 取较高值。中小型变压器铜绕组的电流密度参考值，如表 1-3 所示。铜绕组的电流密度不宜超过 $5A/mm^2$ ，铝绕组的电流密度不宜超过 $2.4A/mm^2$ 。

表 1-3 中小型变压器铜绕组的电流密度参考值

变压器容量 ($kV \cdot A$)	10 以下	10~20	20~30	50 以上
电流密度 (A/mm^2)	2~2.5	2~3.5	3~4	3.5~4.5

变压器绕组的形式与变压器的容量相关，不同容量变压器绕组的形式，如表 1-4 所示。

表 1-4 不同容量变压器绕组的形式

变压器容量 ($kV \cdot A$)	一次绕组	二次绕组
630 以下	圆筒式绕组	
800~1000	连续式绕组	圆筒式绕组
1350 以上	连续式绕组	螺旋式绕组

3. 绕组材料

变压器的绕组,一般采用高强度聚酯漆包圆铜导线 QZ 型、电缆纸包圆铜导线 Z 型、电缆纸包铜导线 ZB 型、高强度聚酯包圆铝导线 QZL 型、电缆纸包圆铝导线 ZL 型、电缆纸包扁铝导线 ZLB 型等。

导线型号的选择主要取决于导线截面积。当导线截面积大于 8.5mm^2 时,选用 ZB 等型号的纸包扁线;当导线截面积小于 8.5mm^2 、大于 4.67mm^2 时,选用纸包圆线;当导线截面积小于 4.67mm^2 时,选用纸漆包线。

铝导线和铜导线比较,优点是铝导线资源丰富、质量轻、价格便宜等,缺点是不易焊接、机械强度差、电阻系数大等。用铝导线绕制的变压器,在我国电力工业中已发挥了巨大的作用。

(三) 变压器油及油箱

为了加强变压器的绝缘和冷却,一般电力变压器的绕组和铁心均浸在变压器油箱中。在一些特殊场合,例如要求防火、易燃易爆危险场所、矿井等地方,则采用无油的干式变压器。因此,变压器有干式和油浸式之分。

1. 变压器油

变压器油的作用:由于变压器油的绝缘性能好,可以增加变压器的绝缘;通过油在受热后的对流作用或用强迫循环的办法使变压器油把铁心和绕组中散发出来的热量传给箱壁或冷却器,可以防止变压器的温升过高。

(1) 变压器油使用注意事项。变压器油是从石油中分馏出来的矿物油,使用时应注意它的主要性能,如介质强度、黏度、着火点以及杂质含量是否符合国家标准。变压器油要求十分纯净,最好不含杂质,如酸、碱、硫、水分、灰尘、纤维等;若其中含有少量水分,也将使变压器油的绝缘性能大为降低,所以盛在油箱中的变压器油,最好不要和外面的空气接触。

(2) 变压器的储油柜。对于小型 $50\text{kV}\cdot\text{A}$ 以下变压器,由于油量少,只需要把油箱盖紧即可。对于 $50\text{kV}\cdot\text{A}$ 以上及大容量的电力变压器,油箱中油量很多,而油箱中的油在变压器运行过程中会热胀冷缩,体积将会发生变化,如果把油箱盖紧,那么,当变压器内部发生短路故障时,油受热膨胀,油箱中油面上升,油的体积变化更大,将使油箱受到过大的压力,严重时甚至可能将油箱胀坏。因此,为了给变压器油的胀缩留有余地,在变压器上装有起到缓冲作用的装置,称为储油柜,也称油枕或膨胀器,如图 1-20 所示。

储油柜的体积为变压器总油量的 $2\%\sim 10\%$,储油柜做成圆形,用连接管与油箱连接。

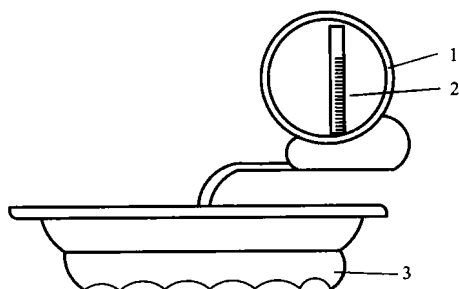


图 1-20 变压器的储油柜

1—油枕; 2—温度计; 3—油箱

为了观察油面,在储油柜的侧壁设有油面指示器。有了储油柜后,就可以使油完全充满油箱,这样油与空气的接触面就减小了,因而减轻了油的氧化和受潮。因为油一旦氧化或受潮后,油的绝缘性能就会降低或老化。为了保证变压器油的质量,在储油柜内充氮气,使空气与油隔离起来,避免了空气对油的氧化和油的受潮。

(3) 大型电力变压器的储油柜。大型电力变压器在储油柜上部装设一个呼吸器,当油受热膨胀

后,储油柜的油面上升,上半部的空气通过呼吸器排至外面大气中去。当温度下降后,油面也随着下降,外面空气通过呼吸器的管子又进入储油柜。呼吸器是一弯曲的管子,一端和储油柜上部相通,另一端朝下和外界空气相通。为了防止大气中的水分、杂质进入储油柜,在呼吸器的下端装有能够吸水分和杂质的硅胶。变压器的油箱盖和油箱之间用耐油的橡皮垫封闭。

(4) 变压器各部分的温升限度。温升是指变压器在额定电压、额定频率、额定使用条件、额定环境下,变压器的测量温度超出周围温度的允许值。温升取决于变压器所用绝缘材料的等级。根据国家标准 GB 1094.1—1996《电力变压器》的规定,油浸式电力变压器各部分的温升限度,如表 1-5 所示。

表 1-5 油浸式电力变压器各部位的温升限值

部 位		温升限值	测量方法
绕组	自然或强迫循环	65℃	电阻法测量
	导向强迫油循环	70℃	
铁心本体		使相邻绝缘材料不受损伤的温度	温度计法测量
顶层油		55℃	
油箱及结构件表面		80℃	

油浸式电力变压器顶层油温规定值,如表 1-6 所示。

表 1-6 油浸式电力变压器顶层油温规定值

冷却方式	冷却介质最高温度 (℃)	最高顶层油温 (℃)
自然循环风冷、自冷	40	95
强迫油循环风冷	40	85
强迫油循环水冷	30	70

2. 变压器油箱本体结构

变压器油箱的结构,在很大程度上由其冷却方式决定。油浸自冷式变压器是靠油受热后自然循环的作用,把热量传给油箱,又由油箱散到空气中去。小容量 20~30kV·A 变压器采用平板油箱,由钢板焊接而成。中等容量 50~2000kV·A 的变压器,为了增加油箱的冷却面积,采用管式油箱。过去管式油箱用许多直径 4~5cm 的油管焊接在油箱壁上而与箱内上下相通,变压器油受热膨胀上升,从油管流过,散热变冷却后又下降而进入油箱内,油箱的形状过去多为圆形,近年来由于制管技术的改进,改用扁管,扁管既增加了散热面积,又减少了用油。当油量继续增大,所需油管数目很多时,常把油管先做成散热器,再把散热器接到油箱上,这种油箱称为散热器式油箱。

大容量 5000kV·A 以上的电力变压器,在散热器上装有风扇。当油温上升到一定数值时,风扇自动开启吹风,以增加散热能力,这种变压器称为油浸风冷式变压器。

为了在不增加变压器体积的前提下提高其容量,有时也采用强迫油循环冷却方式,即先用油泵把变压器油箱内的油排到箱外冷却器中冷却,然后再打入变压器油箱内。为了节省用油和增加油箱的机械稳定性,国产变压器均采用椭圆形油箱。