



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GONGYONGDIAN SHEBEI

供用电设备

夏国明 主 编

刘国亭 李文才 王志勇 副主编



中国电力出版社

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

Electric Power Technology



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GONGYONGDIAN SHEBEI

供用电设备

主 编	夏国明	李文才	王志勇
副主编	刘国亭	宋瑞丛	唐 勇
编 写	高兰恩	刘 伟	张继芳
主 审	路文梅	马香普	



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

全书共分7章，比较详尽地介绍了各种电力变压器及电流、电压互感器等供电电源设备，断路器、隔离开关、熔断器、刀开关等各种高低压开关电器与成套配电装置，电力线路、无功补偿装置及防雷与接地装置，交流电动机、泵与风机以及电力牵引等电力拖动设备，各类电焊机、电加热设备、电气照明设备以及制冷空调与直流用电设备等。为便于学生复习和自学，每章末均附有思考练习题。

本书主要作为普通高等院校高职高专电力技术类和自动化类专业教材，也可作为广播电视大学、职工大学和函授大学等相关专业教材，还可作为本科和中等专业学生以及有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

供用电设备/夏国明主编. —北京：中国电力出版社，2010.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5123-0689-9

I. ①供… II. ①夏… III. ①供电-电气设备-高等学校：技术学校-教材 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 149042 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>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010年8月第一版 2010年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.75印张 480千字

定价 31.50 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

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

本书主要作为普通高等院校高职高专电力类、电气类及自动化类专业教材，也可作为广播电视大学、职工大学和函授大学等相关专业教材，还可作为本科和中等专业学生以及有关工程技术人员的参考用书。教材内容可根据具体的专业要求和教学时数取舍。

全书共分7章。第1章重点讲解各种电力变压器和电流、电压互感器等供电电源设备；第2章介绍断路器、隔离开关、熔断器、刀开关等各种开关电器与成套配电装置；第3章介绍电力线路、无功补偿装置及防雷与接地装置；第4章介绍交流电动机、泵与风机以及电力牵引等电力拖动设备；第5、6、7章比较详尽地介绍了各类电焊机、电加热设备、电气照明设备、制冷空调设备与直流用电设备。为便于学生复习和自学，每章末均附有思考练习题。

本书由夏国明编写第7章和第2、5章的部分内容，王志勇编写第1章和第4章，刘国亭编写第3章和第5章的部分内容，李文才编写第6章和第2章的部分内容。高兰恩、宋瑞丛、唐勇、刘伟、张继芳也参与了有些内容的编写工作。夏国明担任本书主编并负责全书的统稿工作。

本教材由路文梅、马香普两位教授担任主审。在本书的编写过程中，得到了有关方面专家教授及有关单位的大力支持和帮助，同时还参阅引用了大量的书刊资料和企业产品技术资料，在此一并表示感谢。

由于时间仓促及编者水平所限，加之目前我国尚有一些电器标准和技术规范还在进一步的修订和完善之中，因此书中纰漏在所难免，诚望使用本书的广大读者批评指正。

编 者

2010年5月

目 录

前言

第1章 供电电源设备	1
1.1 电力变压器的类型	1
1.2 油浸式变压器	3
1.3 干式变压器	9
1.4 自耦变压器.....	13
1.5 分裂变压器.....	16
1.6 变压器的运行与维护.....	19
1.7 电流互感器.....	30
1.8 电压互感器.....	39
1.9 发电机简介.....	47
思考练习题	55
第2章 开关电器与配电装置	56
2.1 开关电器的基本工作原理.....	56
2.2 高压断路器及其操动机构.....	62
2.3 高压隔离开关.....	76
2.4 高压负荷开关.....	80
2.5 自动重合器和自动分段器.....	81
2.6 高压熔断器.....	89
2.7 配电装置.....	93
2.8 箱式变电所	120
2.9 低压熔断器	122
2.10 低压刀开关.....	130
2.11 低压断路器.....	134
2.12 剩余电流保护装置.....	141
思考练习题.....	147
第3章 电力线路与其他设备	149
3.1 母线	149
3.2 架空线路	151
3.3 电力电缆	155
3.4 避雷器	156
3.5 避雷针与避雷线	159
3.6 接地装置	162
3.7 电力电容器	167

3.8	同步调相机	170
3.9	静止无功补偿装置	170
3.10	电抗器	172
	思考练习题	173
第4章	电机与拖动设备	175
4.1	三相异步电动机	175
4.2	单相异步电动机	192
4.3	泵	195
4.4	风机	197
4.5	泵与风机的节电途径	200
4.6	电力牵引	201
	思考练习题	208
第5章	电焊机与电加热设备	210
5.1	电焊机的组成与分类	210
5.2	弧焊电源	210
5.3	电弧焊机	220
5.4	电阻焊机	223
5.5	其他电焊机简介	227
5.6	电加热设备的组成与分类	228
5.7	电阻炉	229
5.8	电弧炉	236
5.9	感应炉	240
5.10	其他电加热设备简介	243
	思考练习题	247
第6章	制冷空调与直流用电设备	248
6.1	制冷原理及主要部件	248
6.2	空气调节系统及其节电途径	254
6.3	电解	259
6.4	电镀	262
6.5	直流电源	265
	思考练习题	270
第7章	电气照明	271
7.1	基础知识	271
7.2	电光源	277
7.3	照明器	290
7.4	电气照明技术	294
	思考练习题	305
	参考文献	307

第1章 供电电源设备

1.1 电力变压器的类型

1.1.1 变压器的类型

变压器的分类方法很多，可按其用途、绕组数目、结构、相数、调压方式和冷却方式等的不同来进行分类。

按用途分类，可分为电力变压器（主要用在输配电系统中，又分为升压变压器、降压变压器、联络变压器和配电变压器）、仪用互感器（电压互感器和电流互感器）和特种变压器（如调压变压器、试验变压器、电炉变压器、整流变压器和电焊变压器等）。

按冷却介质和冷却方式分类，可分为油浸式变压器（包括油浸自冷式、油浸风冷式、强迫油循环风冷式、强迫油循环水冷式和强迫油循环导向风冷式）和干式变压器（包括空气绝缘、SF₆气体绝缘和浇注绝缘）。

电力变压器按容量大小分类，可分为小型变压器（630kVA 及以下）、中型变压器（800～6300kVA）、大型变压器（8000～63 000kVA）和特大型变压器（90 000kVA 及以上）。

1.1.2 电力变压器的型号

型号是基本代号，说明该变压器的结构和性能特点，且标明额定容量、额定电压等。我国国家标准规定，常见国产电力变压器型号含义列于表 1-1 中。一般是用汉语拼音字母按顺序组成基本代号，基本代号后面用短横线“-”隔开，再标注额定容量（kVA）和高压侧电压等级（kV），并用“/”隔开。

表 1-1 常见国产电力变压器型号含义汇总表格

序号	1		2		3						4		5		6		7		8		9			
分类	相数		箱壳外冷却介质		绕组外绝缘介质						循环方式		绕组数		绕组导线材质		绕组耦合方式		调压方式		防护代号			
代表符号	D	S		F	S		G	Q	C	CR	N		P		S	F		L		O		Z	TH	TA
含义	单相	三相	油浸自冷	风冷	水冷	变压器油	空气式干式	气体	干式浇注绝缘	封闭式干式	难燃液体	自然循环	强迫油循环	双绕组	三绕组	分裂绕组	铜	铝	自耦	无激磁调压	有载调压	湿热	干热	

例如：

(1) SL-1000/10 表示三相、双绕组、铝导线、1000kVA、10kV 电力变压器。

(2) SFPSZL-63000/110 表示三相、风冷、强迫油循环、三绕组、有载调压、铝导线、63 000kVA、110kV 电力变压器。

(3) OSSPSZL-120000/220 表示三相、水冷、强迫油循环、三绕组、有载调压、铝导线、120 000kVA、220kV 自耦电力变压器。

(4) SC-800/10 表示三相、铜绕组、固体成型绝缘、800kVA、10kV。

(5) SFFZ7-40000/220 表示是一台三相自然油循环风冷式有载调压分裂电力变压器，设计序号为 7，40 000kVA，高压侧额定电压为 220kV。

应注意，我国制造的电气设备表示高压侧额定电压等级时，通常是将 6kV 与 10kV 的各种设备均用 10kV 表示。

1.1.3 变压器的额定值

(1) 相数。电力变压器大多采用三相变压器来直接满足输配电的要求；小型变压器多制成单相；特大型变压器为满足运输的要求，可做成三相变压器组。

(2) 额定容量。铭牌上标注的额定容量是变压器的额定视在功率，一般用 kVA 表示，是在额定电压、额定电流下连续运行时所输出的容量。

(3) 额定电压。变压器的额定电压是指设计的加到一次侧绕组的电压，一般为变压器接入电源的额定电压值，单位为 V 或 kV。

变压器二次侧额定电压是指该变压器空载时，一次侧加上额定电压的情况下，二次侧的端电压。通常二次侧额定电压比电力系统额定电压高 5%，高出部分用来平衡变压器在额定负荷时的内部压降，即阻抗电压（或称短路电压），其目的是为了保证线路末端的电压不低于规定标准。

(4) 额定电流。变压器一次侧和二次侧额定电流，是在额定容量和允许温升条件下，变压器一、二次侧允许长期工作时通过的电流，单位为 A。

(5) 额定频率。变压器额定频率是所设计的运行频率，我国为 50Hz。

1.1.4 三相电力变压器铁心的两种结构形式

三相变压器广泛应用于交流电力系统中，三相负荷对称时，各相电流、电压对称。

三相变压器的铁心有独立磁路和相关磁路两种铁心结构。

(1) 独立磁路是由三台单相变压器组成的三相变压器，其特点是各相磁路相互独立，称为三相变压器组。当变压器容量很大，为了运输方便或减少备用容量，往往采用三相变压器组。

(2) 相关铁心磁路的变压器是将三个铁心柱和铁轭连接成一个三相磁路，组成的三相一体心式变压器，称为三相心式变压器。其特点是容易生产，消耗的铁磁材料少、价格便宜，多用在发电厂及电力系统中。

1.1.5 三相电力变压器的连接组别

三相电力变压器的绕组可以有两个或多个。其连接组别表示了高、低压侧绕组的连接形式和高、低压侧线电动势的相位差。

(1) 三相绕组的连接方式有星形、三角形和曲折形连接三种，最基本的连接方式是星形和三角形连接两种。

1) 星形连接。星形连接指将变压器三相绕组的末端连在一起，成为一个公共点（称为中性点，用 N 表示），三个首端分别引出，用符号“Y（或 y）”表示。

2) 三角形连接。三角形连接指将变压器三相绕组的首尾两端顺次连接形成闭合回路，三个连接点分别引出，用符号“D（或 d）”表示，旧国标中用符号“ Δ ”表示。高、中、低

压绕组均为三角形连接时,即为 D, d, d。

注意大写字母表示高压绕组的连接方式,小写字母表示低压绕组的连接方式。

(2) 变压器的连接组别。由于三绕组变压器高、低压侧绕组连接方法不同,两侧电压相位的关系也不相同,但不同连接组别其两侧电压之间的相位关系总是 30° 的倍数。可以用时钟表示法表示连接组别。

国产电力变压器常用的连接组别为 Yd11 和 Yy0 两种,又根据星形连接的中性点是否有引出,可在 Y 后加 N 表示中性点有引出的情况。如:YNd11 表示高压侧为中性点有引出的星形连接,低压侧为三角形连接,两侧电压相位差为 $11 \times 30^\circ = 330^\circ$ 的变压器。

为了消除发电机以及电力系统中的三次谐波,大部分的变压器均为 Yd11 连接。这是因为三个绕组中的三次谐波的大小相等、相位相同,在三角形绕组中形成环流,这样在线电压和电流中不会存在三次谐波,从而保证了电力系统的波形质量。

1.1.6 SF₆ 气体绝缘变压器简介

人们在 20 世纪 40 年代发现了 SF₆ 气体优异的绝缘性能,将其应用在电气产品上,并得以不断地发展。到 20 世纪 50 年代末,美国某公司首先生产了 SF₆ 气体绝缘变压器,其后日本的一些公司制造出 66~77kV、30~40MVA 的 SF₆ 电力变压器。SF₆ 气体绝缘变压器的技术已经逐步成熟,目前已实现商业性批量生产,已有数千台 SF₆ 气体绝缘变压器在世界各地运行。我国某变压器厂也在 20 世纪 80 年代中期研制出 500kVA/10kV 的 SF₆ 配电变压器,它完全防火、防化学侵蚀,性能优良,已系列生产供国内城市使用。由于 SF₆ 气体绝缘变压器的箱壁比较厚,虽然 SF₆ 在 20℃、0.3MPa 压力时的质量不到变压器油的 1/40,但由于箱体重量,所以总重大体相当;SF₆ 价格贵,所以 SF₆ 气体变压器价格是同容量油浸变压器的 3~4 倍。SF₆ 气体绝缘变压器与普通油浸式变压器的主要不同之处在于,其绝缘冷却介质和冷却机理不同。SF₆ 气体绝缘变压器整个器身置于充有 SF₆ 气体的箱体中。SF₆ 气体不燃、无毒、绝缘强度高、消弧性能好,是比较理想的绝缘介质。但是其传热能力和散热能力均较变压器油差一个数量级,因此,自冷式气体绝缘变压器不可能做得很大,一般最大不超过 5000kVA,容量大时就要采用强气循环,即采用气体循环风机来促进 SF₆ 气体的流动,增加其流速。为使其获得更好的散热效果,还可以采用风冷却器强迫风冷或采用水冷却器强迫水冷。

由于变压器的损耗很大,制造小容量 SF₆ 配电变压器(如 500~1000kVA),自冷问题不大,如果做大的电力变压器,则需用 SF₆ 强迫循环风冷或用内装封闭的冷却系统,使容量达到数万千伏安。美国某公司于 1989 年制造出了 45kV、50MVA 蒸发冷却 SF₆ 电力变压器;日本某公司 1992 年生产了 72.5kV、26MVA 的 SF₆ 三相电力变压器,现已开发电压最高达 275kV、容量最大达 300MVA 的 SF₆ 三相电力变压器,用于市区地下变电所。

1.2 油浸式变压器

油浸式变压器在电力系统使用最为广泛,本节将介绍其基本结构。

油浸式变压器的结构可分成几个部分:器身,主要包括铁心和绕组,另外还有绕组绝缘、引线、分接开关等;油箱,包括油箱本体(箱盖、箱壁、箱底)和附件(放油阀门、小车、接地螺栓、铭牌等);保护装置,包括油枕(储油柜)、油表、防爆管(又称安全气道)或压力

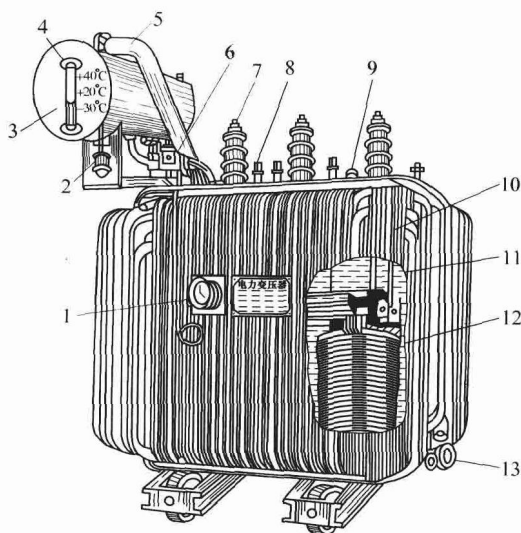


图 1-1 油浸式电力变压器结构示意图

- 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—铁心；12—绕组及绝缘；
13—放油阀门

释放阀、呼吸器（又称吸湿器）、净油器、测温元件、气体继电器等；冷却装置，散热器等；出线装置，高压套管、低压套管等。

图 1-1 所示为油浸式电力变压器结构示意图，下面对其主要部件逐一进行介绍。

1.2.1 铁心

(1) 铁心的作用：是变压器的主磁路，又是绕组的机械骨架。

(2) 铁心的组成：由铁心柱和铁轭两部分构成。铁心柱上套绕组，铁轭将铁心柱连接起来形成闭合磁路。

(3) 铁心材料：为了提高磁路的导磁性能，减少铁心中的磁滞、涡流损耗，铁心一般用高导磁率的磁性材料——硅钢片叠成。硅钢片厚度为 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ ，两面涂以厚 $0.01 \sim 0.13\text{mm}$ 的绝缘漆膜。硅钢片有热轧和冷轧两种，冷轧硅钢片又分为有取向和无取向两类，通常变压器铁心采用有取向的冷轧硅钢片，这种硅钢片沿轧制方向有较高的导磁性能和较小的损耗。

(4) 铁心形式：变压器铁心的结构有心式和壳式两类。心式结构的特点是铁心柱被绕组包围，如图 1-2 所示。心式结构比较简单，绕组的装配及绝缘比较容易。因此，电力变压器的铁心主要采用心式结构。壳式结构的特点是铁心包围绕组的顶面、底面和侧面，如图 1-3 所示。壳式结构的机械强度较好，但制造复杂，铁心用材较多，只在一些特殊变压器（如电炉变压器）中采用。

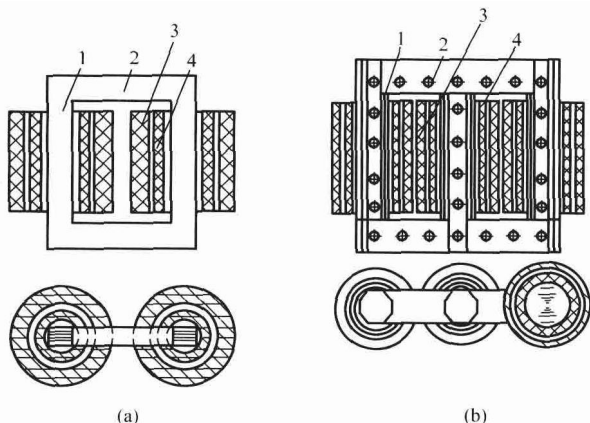


图 1-2 心式变压器结构示意图

(a) 单相；(b) 三相

1—铁心柱；2—铁轭；3—高压绕组；4—低压绕组

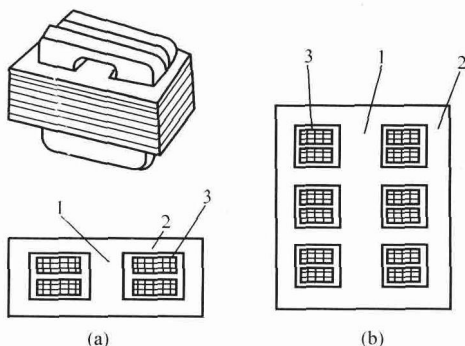


图 1-3 壳式变压器结构示意图

(a) 单相；(b) 三相

1—铁心柱；2—铁轭；3—绕组

(5) 铁心叠装形式：变压器的铁心一般是由剪成一定形状的硅钢片叠装而成。为了减小接缝间隙以减小励磁电流，一般采用交错式叠装，使相邻层的接缝错开。对热轧硅钢片，叠片次序如图 1-4 所示。当采用冷轧硅钢片时，由于在这种硅钢片中磁通方向与轧制方向不一致时，铁心损耗明显增大，故采用图 1-5 所示的斜接缝叠装法。

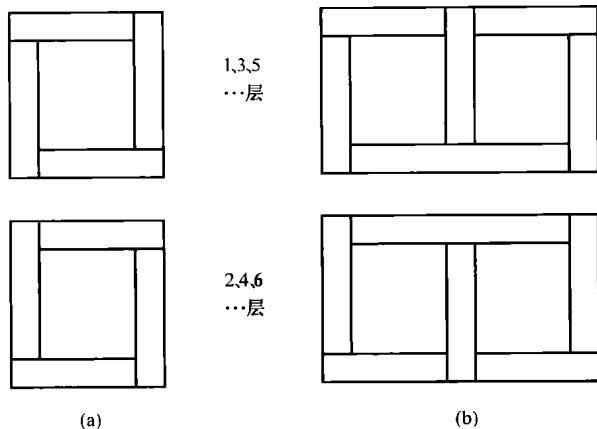


图 1-4 交错式叠装法
(a) 单相铁心；(b) 三相铁心

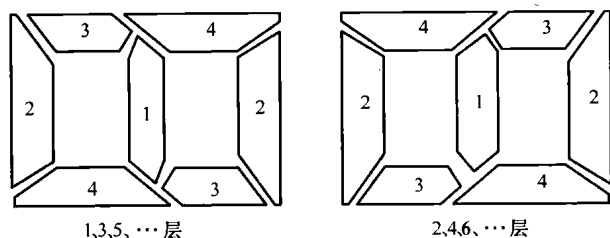


图 1-5 斜接缝叠装法

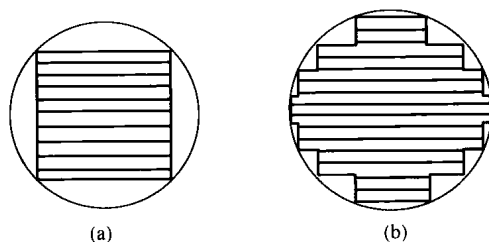


图 1-6 铁心柱截面

铁轭的截面有矩形、T形和阶梯形，如图 1-7 所示。铁轭的截面积一般比铁心柱截面积大 5%~10%，以减少空载电流和空载损耗。

近年来，出现了一种渐开线形铁心变压器。它的铁心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，铁心柱按三角形方式布置，三相磁路完全对称，如图 1-8 所示。渐开线形铁心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。

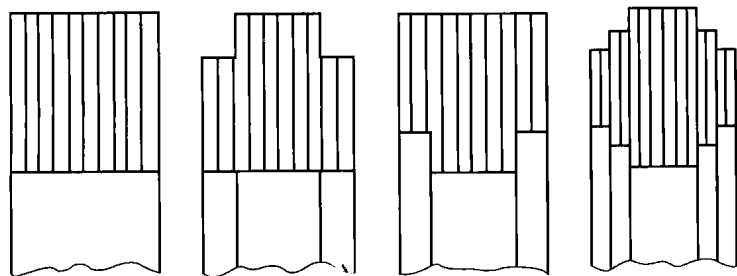


图 1-7 铁轭截面

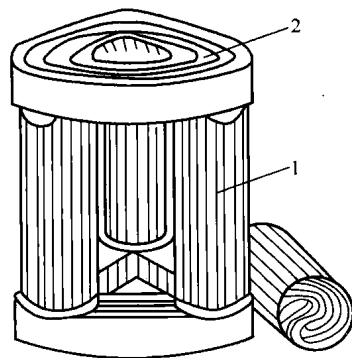


图 1-8 渐开线形铁心变压器
1—铁心柱；2—铁轭

1.2.2 绕组

(1) 绕组的作用：绕组是变压器的电路部分，起导通电流、产生感应电动势的作用。

(2) 绕组的组成：它由铜或铝绝缘导线绕制而成。

(3) 绕组的类型：按照高、低压绕组在铁心上的排列方式，变压器的绕组可分为同心式和交叠式两类。

同心式绕组的高、低压绕组同心地套在铁心柱上，如图 1-3 所示。为便于绝缘，低压绕组靠近铁心柱，高压绕组套在低压绕组外面，两个绕组之间留有油道。同心式绕组的绕制形式有圆筒式、螺旋式和连续式，如图 1-9 所示。

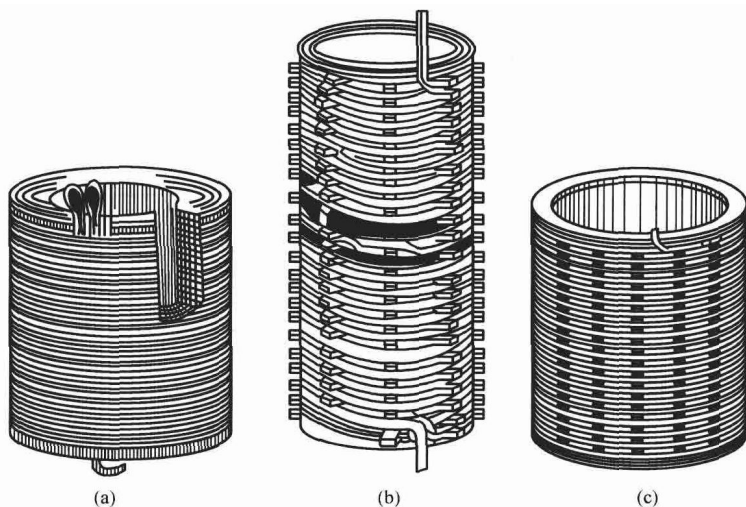


图 1-9 同心式绕组的基本形式
(a) 圆筒式；(b) 螺旋式；(c) 连续式

1) 圆筒式绕组。圆筒式绕组主要用于每柱容量 200kVA 以下的变压器。各个绕组紧挨着绕成一个螺旋形的圆筒。低压绕组用单根或多根扁铜线绕成单层或两层，高压绕组因匝数多、电流小，用圆铜线绕制成多层。层间用绝缘撑条隔开，形成冷却油道。

2) 螺旋式绕组。螺旋式绕组主要用作 800~10 000kVA 变压器的低压绕组。其特点是匝数较少、电流很大，由多根扁铜线绕制，每一线饼只有一匝，匝间隔着绝缘块，构成辐向油道。整个绕组像螺旋线一样绕制下去，故称作螺旋式。

这种绕组由于并联股数较多，里外层导线所交链的磁通就不一样，长度也不一样，这样就会造成各股线之间的电流分布不均，所以在绕到一定位置时应当换位，即把里面的导线换到外面，外面的导线换到里面。

3) 连续式绕组。连续式绕组主要用作 800~10 000kVA 以下变压器中的高压绕组和 10 000kVA 以上的低压绕组。连续式绕组由单根或多根（不超过 4 根）扁线绕制成若干个盘式线饼，从一个线饼到另一个线饼的连线不用焊接，而是采用特殊的翻线方法连续绕成，故叫连续式。为了冷却，各个线饼之间均用绝缘块隔开，形成辐向油道。为了固定线圈并横向夹紧线圈，在绕组内径圆周上均匀设置纸撑条，形成轴向油道。

交叠式绕组的高、低压绕组交替放置在铁心柱上，如图 1-10 所示。为减小绝缘距离，通常低压绕组靠近铁轭。

同心式绕组结构简单，制造方便，故电力变压器多采用这种形式。交叠式绕组机械强度好，引出线布置方便，多用于低电压大电流的电焊、电炉变压器及

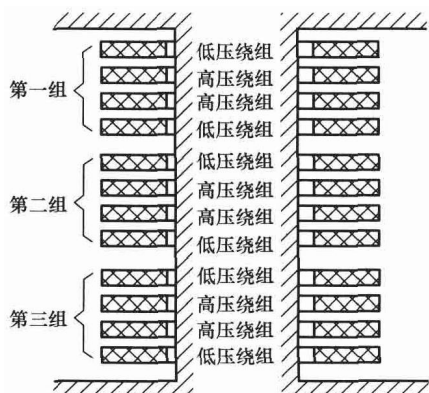


图 1-10 交叠式绕组

壳式变压器中。

1.2.3 分接开关

变压器常用改变绕组匝数的方法来调压。一般从变压器的高压绕组引出若干抽头，称它们为分接头。用以切换分接头的装置叫分接开关。分接开关又分为无励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，后者可以在变压器带负载情况下进行切换。

电网中各点电压有高有低，为使处于不同地点的变压器输出电压符合电压质量标准，需要使用分接头切换装置来切换高压绕组的分接头进行调压。停电后才能切换的，称为无载（无激磁）调压；可以带电切换的，称为有载调压。分接头切换装置的种类很多，有三相（主要用于中、小型变压器）和单相（用于大容量变压器）两种。

(1) 无载调压变压器分接开关。无载调压变压器高压侧绕组一般设置 5 组分接头，通过分接开关来连接及切换分接头的位置，分接开关如图 1-11 所示。110kV 升压变压器无励磁调压范围见表 1-2。

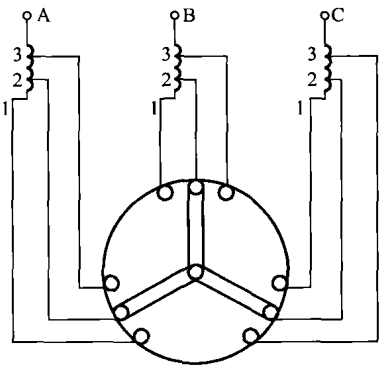


图 1-11 分接开关

表 1-2 110kV 升压变压器无励磁调压范围

高压绕组		
分接头 (%)	电压 (V)	分接位置
+5	120 750	1
+2.5	117 875	2
额定	115 000	3
-2.5	112 125	4
-5	109 250	5

低压绕组电压 (V) 6300

(2) 有载调压变压器分接开关。随着科技的发展，用户对供电质量的要求越来越高，因此有载调压变压器的需求量急剧上升，有载分接开关的生产迅速发展。

目前一般都采用电阻式有载分接开关，少数国家（如美国）采用电抗式有载分接开关。我国生产和采用的电阻式有载分接开关一般都安装在变压器油箱内部，为埋入式的，较小容量和较低电压（60kV 及以下）的变压器采用复合式开关，它的切换开关和分接选择器组合在一起，切换时两者都有电流通过，因此切换能力较小。用于高电压大容量变压器的开关，采用切换开关和分接选择器分开的结构，切换开关用来切断电流，而分接选择器在无电流下变换分接，因此切换能力很大，最大通过电流已达 4000~5000A，级电压最高达 5000V。有载分接开关能在带负载时操作，切换开关起关键作用。切换开关装在一个密封的油室内，包括触头系统、快速动作机构和传动系统。密封的油室可将被电弧污染的油与变压器本体内清洁的油隔离，使带电部分与油箱间绝缘。

分接选择器的触头与变压器绕组的分接头相连，分成单、双两组被驱动，交替导通电流。转换选择器是使变压器的调压绕组与主绕组可以正反连接，或粗调连接。转换选择器与分接选择器装在一个整体部件上，由一个机械传动系统根据位置号和接线图进行工作，以满足更多的调压级的需要。驱动装置，也就是操动机构，是整个开关系统工作的执行机构，它根据指令来驱动有载分接开关转动到指定的位置，可由自动信号控制，也可由人工操作。

下面以复合式滚动触头有载分接开关为例说明有载分接开关的动作原理,如图1-12所示。

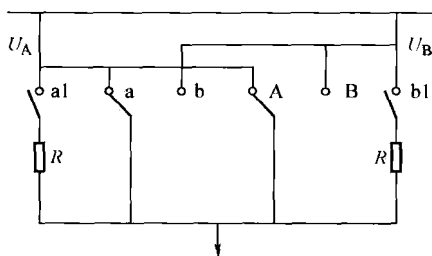


图 1-12 复合式滚动触头有载分接开关原理接线图

图示状态为 A 分接头位置。当需要调到 B 分接头位置时,动作顺序为:①触头 A 断开, a1 合上;②触头 a 断开, b1 接通,这是过桥位置;③a1 断开, b 接通;④B 接通, b1 断开。如此完成一级调压,由 A 分接头位置调到 B 分接头位置。

当有载分接开关与线性布置的绕组配用时,分接开关为 7, 9, 13 调压级数;当与正反调或粗细调布置的绕组配用时为 ± 7 、 ± 9 、 ± 13 级,即共为 15 级、19 级和 27 级;另外还有更多级数的分接开关。

1.2.4 油箱及变压器油

油箱是油浸式变压器的外壳,由铁心和绕组组成的变压器器身,全浸在油箱内的变压器油中,变压器油既作为绝缘介质,也是循环散热的冷却介质,还起到灭弧的作用。

电力变压器的油箱一般做成椭圆形,这样可使油箱有较高的机械强度,而且需油量较少。油箱用钢板焊成。油箱的结构与变压器的容量、发热情况密切相关。容量很小的变压器采用平板式油箱;中、小型变压器为增加散热表面采用管式油箱;大容量变压器采用散热器式油箱。油箱分为箱式和钟罩式,箱式即将箱壁与箱底制成一体,器身置于箱中;钟罩式即将箱盖和箱体制成一体,罩在铁心和绕组上。为了检修方便,变压器器身质量大于 15t 时,通常做成钟罩式油箱,检修时只需把上节油箱吊起,避免了必须使用起重设备。图 1-13 所示为变压器检修时的起吊状况。

1.2.5 绝缘套管

变压器的引出线从油箱内部引到箱外时必须经过绝缘套管,使引线与油箱绝缘。绝缘套管一般是瓷质的,其结构取决于电压等级。1kV 以下采用实心瓷套管;10~35kV 采用空心充气或充油式套管;110kV 及以上采用电容式套管。为了增大外表面放电距离,高压绝缘套管外形做成多级伞形,电压愈高,级数愈多。图 1-14 所示为 35kV 充油式绝缘套管的结构示意图。

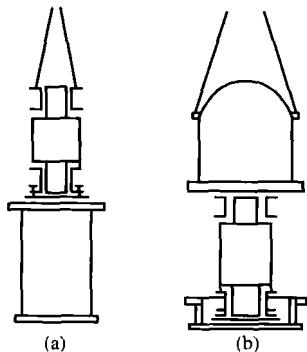


图 1-13 变压器检修时的起吊情况
(a) 吊器身; (b) 吊上节油箱

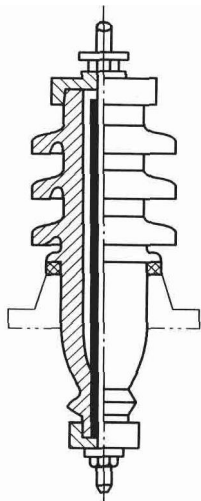


图 1-14 35kV 充油式
绝缘套管结构示意图

1.2.6 保护装置

(1) 储油柜。储油柜又叫油枕，它装在油箱上部，用联通管与油箱接通。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。储油柜内装有吸湿器，使储油柜上部的空气通过吸湿器与外界空气相通。吸湿器内装有硅胶，用以过滤储油柜内空气中的杂质和水分。

(3) 安全气道。安全气道又叫防爆管，它装在油箱的顶盖上。它是一个长钢圆筒，上端口装有一定厚度的玻璃或酚醛纸膜片，下端口与油箱连接。当变压器内部严重故障而气体继电器又失灵时，油箱内压力剧增，当达到一定限度时，防爆管口膜片破碎，油及气体由此喷出，防止油箱爆炸或变形。

由于膜片厚薄可能不均匀，或有伤痕，其爆破压力大小随机性很大，所以，近年来在一些变压器中，往往用压力释放阀代替防爆管。压力释放阀是一种安全保护阀门，且可重复使用。

(4) 气体继电器。气体继电器又称为瓦斯继电器，是变压器的一种保护装置，安装在储油柜与油箱的连接管道中。当变压器发生故障时（如绝缘击穿、匝间短路、铁心事故、油箱漏油使油面下降较多等）产生的气体和油流，迫使气体继电器动作。轻者发出信号，以便运行人员及时处理，重者使断路器跳闸，来达到保护变压器的目的。

此外，油箱盖上还装有测温及温度监控装置等。

1.3 干式变压器

干式变压器与油浸式变压器的主要不同点在于，其铁心和绕组都不浸在变压器油中，它的冷却介质为空气，所用的绝缘材料（如环氧树脂等）不燃烧、不污染使用环境，运行维护工作量小等。由于空气的绝缘强度和散热性能都比变压器油差，以空气作绝缘的干式变压器的材料消耗比油浸式要多。相同容量条件下体积较大，其承受冲击电压的能力也较油浸式差，使用条件一般限于不和架空线路相连，不会受到大气过电压作用的情况（否则应加特殊防雷保护）。

目前，干式变压器的制造技术已比较成熟，适用于 35kV 及以下电压等级。由于干式变压器具有阻燃、防尘和防潮等良好的电气机械性能，现在已经作为普通油浸式变压器的更新换代产品，被越来越多地应用于配电系统和工矿企业的变电所，以及高层建筑、商业中心、石油、化工及采矿等对防火与安全有更高要求的部门，特别是应用于城市供电中。

1.3.1 干式变压器的类型

干式变压器可分为树脂干式变压器和浸渍绝缘干式变压器两类。

(1) 树脂干式变压器。树脂干式变压器有树脂浇注、树脂加填料浇注、树脂绕包和树脂真空压力浸渍四种类型。

1) 树脂浇注与树脂加填料浇注结构。这两种结构基本一样，其低压绕组用箔板（铝或铜）或扁线绕制（浸漆加端封），高压绕组用箔带（铝或铜）在环氧玻璃筒上绕成分段式（8~12 段），或用扁、圆线绕成分段圆筒式，然后装入浇注模。

纯树脂厚度为 3mm（内层玻璃纤维），树脂加石英粉的厚度过去曾为 6mm，现在为

3~5mm（在我国，前者称薄绝缘浇注，后者称厚绝缘浇注）。两种都需要浇注设备。薄绝缘树脂浇注变压器的绕组用铜导线绕制，并用玻璃纤维增强，然后用模具在真空下浇注树脂。线圈和树脂均经严格的去湿脱气处理，彻底地清除了水分和气体。与普通的树脂浇注变压器相比，绝缘层较薄、散热性能较好、机械强度较高，不会因温度骤然变化而导致线圈开裂。

由于加石英粉的浇注变压器，石英粉占 60H，树脂及颜料只占 40G、所以，整体树脂较少。由于树脂价高，树脂浇注变压器比加石英粉的浇注变压器要贵 10%~15%。

2) 树脂绕包结构。低压绕组结构与树脂浇注结构一样。高压绕组在绕线机上绕包，内模为环氧玻璃布筒。绕包时，边绕导线，边绕玻璃纤维（占 80%），经过一树脂槽将浸好树脂的纤维复绕在已绕好的导线上。待整个绕组绕完后，进旋转式非真空的固化炉内干燥固化，使其成为一整体，固化后的绕组表面相当光洁。采用这种工艺可省去真空处理设备，缩短制造周期，但在常规环境下使用树脂，难免会包裹空气，故电场强度要取小一些，体积会增大。这种结构的优点是制造时不需要复杂的浇注设备，也不需要浇注模具，成本比较低。

用此结构绕一个高压绕组需 8h，与绕制浇注式高压绕组的分段圆筒式结构所需时间大体相当，而绕一个高压箔式绕组仅需 2h。由于树脂绕包变压器工时较多，成本约为树脂加填料产品的 1.25 倍，即为油浸式产品的 3.5 倍左右。

3) 树脂真空压力浸渍结构。低压绕组结构与树脂浇注结构一样，高压绕组在绕线机上绕包并预压和预干燥后，放入浇注罐抽真空处理。在真空下注入树脂，使其渗入于导体中，整个绕组被树脂包裹，然后解除真空并施压，使树脂更好地渗入绕组之中，最后将绕组送入炉中处理。这种工艺的优点是无需浇注模，需真空压力浸渍。

4) 树脂干式变压器特点的比较。表 1-3 列出了几种树脂干式变压器的特点比较。对较大容量的各种树脂变压器在底部加装轴流风机，在应急负载情况下，其输出容量最大可提高 50%（过负荷）。

表 1-3 几种树脂干式变压器的特点比较

对比指标 类型	模具	真实工艺	浇注工艺	增强绝缘	高压绕组 气道	均匀绝 缘系数	光滑表面 固体树脂	表面状况
树脂加石英粉	有	有	有	有 ¹⁾	无	非	有	光滑
树脂	有	有	有	有	有	是	有	一般
绕包	无	无	无	有 ²⁾	有	非	有 ⁴⁾	欠光滑
真空压力浸渍	无	有	无	无	有 ³⁾	非	无	一般

注 1) 如低压用预浸渍材料。
2) 如低压也为绕包工艺，但有的也可不用绕包。
3) 仅为辐向气道。
4) 不完全光滑。

(2) 浸渍绝缘干式变压器。这是最早得到应用的干式变压器，其制造工艺比较简单，导线采用玻璃丝包，垫块用相应的绝缘等级材料热压成型。将绕制完工的线圈浸渍耐高温绝缘漆，并进行加热干燥处理即成。现代浸渍绝缘干式变压器使用 H 级绝缘的芳香聚酰胺纸，真空浸漆后进一步提高了绝缘性能。由于该变压器受外界环境的影响比树脂的大，在国内外产量均趋于减少。

国内浸渍绝缘干式变压器多用于水电站、地铁、高层建筑,因防火性能好,故仍然有专业工厂生产,并占有一定的市场。因为它以空气为绝缘介质,所以外形尺寸比树脂型产品大,质量也较重。以 SG3-1000/10 与 SCB8-1000/10 产品为例,它们的质量分别是 3340kg 和 2700kg,即浸渍式比树脂型产品重 23%。

由于散热条件好,浸渍式干式变压器绕组的最热点温度比平均温升高出不多,温度比较均匀,所以热寿命长。

1.3.2 环氧树脂浇注干式变压器结构特点

下面以 SC 系列变压器为例介绍环氧树脂浇注干式变压器的结构特点。SC 系列(S—三相铜绕组变压器,C—固体成型绝缘)环氧树脂浇注干式变压器的外形结构示意图如图 1-15 所示。

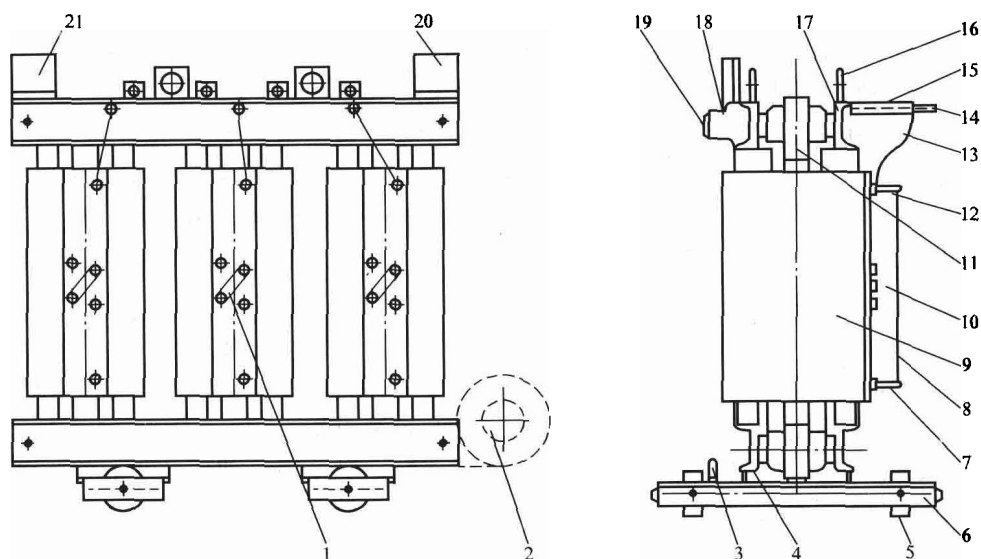


图 1-15 SC 系列环氧树脂浇注干式变压器的外形结构示意图

- 1—分接连片; 2—风机; 3—接地螺栓; 4—下夹件; 5—小车滚轮; 6—小车架; 7—高压尾头接线柱;
8—高压连线; 9—绕组; 10—高压分接区接线柱; 11—铁心; 12—高压首头接线柱; 13—高压引线;
14—高压接线柱; 15—高压绝缘子; 16—吊杆; 17—上夹件; 18—低压绝缘子;
19—低压母线(铜排); 20—XMTB 信号温度计; 21—铭牌

(1) 铁心。SC 系列变压器的铁心采用冷轧晶粒取向硅钢片叠制, 45°斜接缝铁轭穿螺杆夹紧, 环氧黏带绑扎结构, 铁心表面采用树脂涂覆密封, 耐潮湿, 铁心整体用拉螺杆(或拉板)拉紧, 固定在底座上。夹件绝缘、底座绝缘采用硅橡胶衬垫, 夹件和绕组之间采用弹性件可靠压紧, 既满足各部件热胀冷缩的要求, 又可以保证机械强度, 并减低噪声。

(2) 绕组。高、低压绕组均采用铜导体, 采用了全缠绕、玻璃纤维增强、薄绝缘、树脂不加填料在真空状态下浸渍式浇注, 固化成型。高压绕组为分段筒式结构, 降低了层间电压, 可以改善电压分布, 提高耐受大气过电压和操作过电压冲击的能力, 高压绕组首、末端及分接头均采用铜螺母预埋结构, 分接头的转换采用连接板调整。低压绕组为多层筒式结构。高、低压绕组均可设置轴向通风道。

(3) 自动温控保护系统。SC 系列变压器采用了自动温控保护系统, 在低压绕组第一匝