




全国中等职业技术学校电工类专业通用教材

QUANGUO ZHONGDENG ZHIYE JISHU XUOXIAO DIANGONGLEI ZHUANYE TONGYONG JIAOCAI

电机与变压器

(第四版)

 中国劳动社会保障出版社

全国中等职业技术学校电工类专业通用教材

电机与变压器

(第四版)

劳动和社会保障部教材办公室组织编写

中国劳动社会保障出版社

中国全等职业类工学类职业技能鉴定教材

图书在版编目(CIP)数据

电机与变压器/徐政主编.—4版.—北京：中国劳动社会保障出版社，2008
全国中等职业技术学校电工类专业通用教材
ISBN 978-7-5045-6917-2

I. 电… II. 徐… III. ①电机-专业学校-教材②变压器-专业学校-教材 IV. TM
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 031058 号

北京新华印刷厂印刷 新华书店经销

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码：100029)

出版人：张梦欣

*

北京新华印刷厂印刷装订 新华书店经销

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 295 千字

2008 年 3 月第 4 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

定价：18.00 元

读者服务部电话：010-64929211

发行部电话：010-64927085

出版社网址：<http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

本书封面轧有我社社标和英文缩写的暗纹

否则即为盗版，请读者举报

举报电话：010-64954652

前 言

为了更好地适应全国中等职业技术学校电工类专业的教学要求，劳动和社会保障部教材办公室组织全国有关学校的教师 and 行业专家，对中等职业技术学校电工类专业教材进行了修订（新编）工作。

这次教材修订（新编）工作的重点主要在以下几个方面。

第一，坚持以能力为本位，重视实践能力的培养，突出职业技术教育特色。根据电工类专业毕业生所从事职业的实际需要，合理确定学生应具备的能力结构与知识结构，对教材内容的深度、难度作了较大程度的调整，同时，进一步加强实践性教学内容，以满足企业对技能型人才的需求。

第二，吸收和借鉴各地中等职业技术学校教学改革的成功经验，部分专业课教材的编写采用了理论知识与技能训练一体化的模式，使教材内容更加符合学生的认知规律，易于激发学生的学习兴趣。

第三，根据科学技术发展，合理更新教材内容，尽可能多地在教材中充实新知识、新技术、新设备和新材料等方面的内容，力求使教材具有较鲜明的时代特征。同时，在教材编写过程中，严格贯彻了国家有关技术标准的要求。

第四，努力贯彻国家关于职业资格证书与学生证书并重、职业资格证书制度与国家就业制度相衔接的政策精神，力求使教材内容涵盖有关国家职业标准（中级）的知识和技能要求。

第五，在教材编写模式方面，尽可能使用图片、实物照片或表格形式将各个知识点生动地展示出来，力求给学生营造一个更加直观的认知环境。同时，针对相关知识点，设计了很多贴近生活的导入和互动训练等，意在引导学生参与到实践中来。

第六，我们还特别注意了教辅资源的开发，除了有配套习题册和教学参考书外，还重点开发了多媒体教学光盘、电工专业考试题组卷系统，力求为教学工作的开展构建一个更加完善的辅助平台，为教学提供方便。

这次修订(新编)的教材包括:《电工基础(第四版)》《电子技术基础(第四版)》《机械与电气识图(第二版)》《机械知识(第四版)》《电工仪表与测量(第四版)》《电机与变压器(第四版)》《安全用电(第四版)》《电工材料(第四版)》《可编程序控制器及其应用(第二版)》《电力拖动控制线路与技能训练(第四版)》《企业供电系统及运行(第四版)》《维修电工技能训练(第四版)》《电工技能训练(第四版)》《电工EDA》。

本套教材可供中等职业技术学校电工类专业使用,也可作为职工培训教材。

本次教材的修订(新编)工作得到了北京、天津、辽宁、江苏、浙江、山东、四川、河南、广东等省、直辖市劳动和社会保障厅(局)及有关学校的大力支持,在此我们表示诚挚的谢意。

《电机与变压器(第四版)》的主要内容有:变压器的分类、结构和原理,变压器绕组的极性测定与连接,变压器并联运行、维护和检修,特殊用途的变压器,电动机的基础知识,三相异步电动机的运行,单相异步电动机,直流电动机,三相同步电动机,特种电机等。

本书由徐政、张毅刚、金晓东、吴兰娟、黄清锋、王宗成、周熠编写,徐政主编,张毅刚副主编;沈蓬、冷静燕审稿,沈蓬主审。

劳动和社会保障部教材办公室

2008年3月

目 录

绪论	(1)
第一单元 变压器的分类、结构和原理	(4)
课题一 变压器的分类和用途	(4)
课题二 变压器的结构与冷却方式	(6)
课题三 变压器的原理	(12)
课题四 变压器的空载试验与短路试验	(21)
第二单元 变压器绕组的极性测定与连接	(27)
课题一 单相变压器绕组的极性	(27)
课题二 三相变压器绕组的连接及连接组别	(34)
课题三 用交流法测定三相变压器绕组极性	(39)
课题四 电力变压器的铭牌参数	(43)
第三单元 变压器并联运行、维护和检修	(48)
课题一 三相变压器的并联运行	(48)
课题二 变压器的维护及检修	(49)
第四单元 特殊用途的变压器	(54)
课题一 自耦变压器	(54)
课题二 仪用变压器	(56)
课题三 电焊变压器	(60)
课题四 小型单相变压器的设计 (选学)	(63)
第五单元 电动机的基础知识	(75)
课题一 电动机的种类和用途	(75)
课题二 异步电动机的结构	(77)
课题三 三相异步电动机的拆装	(81)
课题四 异步电动机的工作原理	(92)
课题五 电动机的铭牌和型号	(98)

第六单元	三相异步电动机的运行	(101)
课题一	三相异步电动机的启动	(101)
课题二	三相异步电动机的调速	(104)
课题三	三相异步电动机的反转与制动	(109)
课题四	三相异步电动机的启动、反转和制动试验	(112)
课题五	三相绕线式异步电动机的调速	(116)
第七单元	单相异步电动机	(117)
课题一	单相异步电动机的原理、结构及分类	(117)
课题二	单相异步电动机的绕组和嵌线	(122)
课题三	单相异步电动机的运行	(125)
课题四	单相异步电动机的常见故障及处理	(127)
课题五	小功率三相电动机改为单相电动机运行	(128)
第八单元	直流电动机	(130)
课题一	直流电动机的原理、构造、分类及铭牌	(130)
课题二	直流电动机的基本性能分析	(140)
课题三	直流电动机运行	(149)
课题四	直流电动机的逆运行——直流发电机	(153)
课题五	直流他励电机试验	(156)
第九单元	三相同步电机	(160)
课题一	同步发电机的工作原理	(160)
课题二	同步发电机的基本结构及应用	(161)
课题三	同步发电机的励磁方式和并联运行	(163)
课题四	同步电动机的工作原理和启动方法	(165)
课题五	同步电动机功率因数的调整和同步补偿机	(168)
第十单元	特种电机	(171)
课题一	测速发电机	(171)
课题二	伺服电动机	(175)
课题三	步进电动机	(178)
课题四	永磁电机	(183)
课题五	直线电动机	(188)
课题六	超声波电动机	(191)

绪 论

随着科学技术进步, 电工电子新技术的不断发展, 新型电气设备不断涌现, 人们使用电的频率越来越高, 人与电的关系也日益紧密。对于电性能和电气产品的了解, 已成为人们必需的生活常识。

一、电机在电能产生、传输、转换中的作用

自然界有许多能源, 如水能、风能、热能、核能、光能、机械能等。人们选择了电能作为各种能源之间交换的媒介, 将各种能源有机地组合成一个能量传输网, 使各种能源为人类服务。电能产生、传输、使用上拥有诸多的优势, 这个过程中, 发电机起了关键性的作用。



关键提问

提问一 电能是怎样产生的?

分析: 一般情况下, 水能、热能、核能等其他自然能源使水轮机、汽轮机等原动机转动, 再由原动机带动三相同步发电机转动产生三相电能。三相同步发电机将机械能转化成电能, 是目前最常用的发电设备, 在发电装置中普遍使用。当电力系统频率一定时, 电机的转速为恒值, 输出电压一般有 400 V、3.15 kV、6.3 kV、10.5 kV 等数种。

提问二 变压器在电能的传输中有什么作用?

分析: 为降低发电成本, 发电厂一般建在自然能源较丰富的地方, 离用电区较远。如何将电厂的电能传输给企业和居民生活区, 如何传输才能提高电能的传输效率? 电能通过导线进行三相电电能的传输, 在传输过程中与其他能源形式——如汽车运输一样要消耗一定的能量, 而电能传输时消耗的是电能本身, 不需要依托其他能源形式作为运输载体。根据人类对电的规律的不断研究和探索, 可以从以下几方面来提高电能的传输效率:

1. 减少输电线电阻: 增大导线截面积、采用电阻率小的导电材料和超导材料等。但是, 因为传输线路架设成本高, 有色金属消耗大, 安全系数低, 故远距离输电不采用减少输电线电阻的方法来提高电能的传输效率。

2. 提高输电电压: 用升压变压器提高传输电压, 当把高压的电能传输到用户前, 考虑用电安全等实际情况, 再应用变压器降低电压。传输线路架设成本较低, 有色金属消耗较小, 安全系数高, 是最经济的远距离输电办法, 故广泛用于远距离输电。

电能传输的简单电力系统示意图如图 0—1 所示。从图中可知, 电厂用三相同步发电机将其他自然能源转换产生传输电压为 10 kV 电能, 为提高电能的传输效率, 用升压变压器将传输电压提高到 110 kV, 当把 110 kV 超高压的电能传输到用户前, 考虑用电安全等实际情况, 再应用降压变压器降低电压。然后通过电动机或其他用电设备将电能转换成机械能、

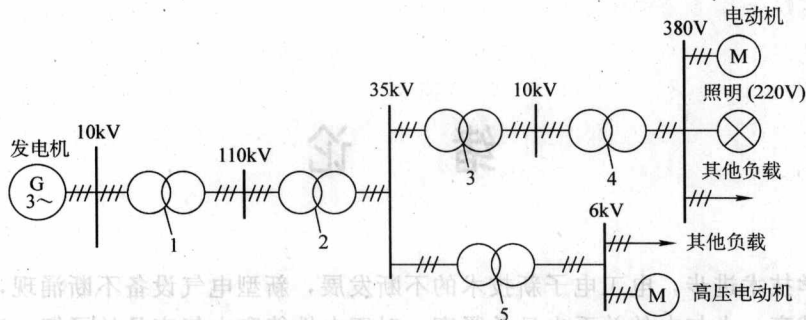


图 0—1 简单电力系统示意图

1—升压变压器 2、3—降压变压器 4、5—配电变压器

热能、光能等。

提问三 电动机在电能的使用上有什么优点？

分析：电动机是把电能转换成机械能的设备，在机械、冶金、石油、煤炭、化工、航空、交通、农业以及其他各行业中被广泛地应用着。随着工业自动化程度的不断提高，需要采用各种各样的控制电动机作为自动化系统的元件，人造卫星的自动控制系统中，电动机也是不可缺少的。此外，在国防、文教、医疗及日常生活中电动机也越来越广泛地被应用。例如：三相异步电动机具有高效、节能、性能好、振动小、噪声低、寿命长、可靠性高、维护方便、启动转矩大等优点；伺服电动机易于实现精确定位，随动跟踪，快速响应、复杂轮廓加工、角度和速度同步、收放卷控制等复杂的伺服控制任务。

可见，电机和变压器在电能利用的三个重要环节（产生、传输、转换）上的普遍应用，在国民经济和日常生活中发挥着十分重要的作用。

二、电机发展概况

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。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、智能化转变。电机的技术及经济指标不断提高，质量轻、体积小的电机不断研制成功。例如，汽车上的各种新一代高性能电机驱动系统与伺服系统。从 20 世纪 80 年代开关磁阻电机驱动系统问世后，打破了传统的电机设计理论和正弦波电压源供电方式；随着磁阻电机、永磁电机、电力电子技术和计算机技术的发展，交流电机驱动系统设计进入一个新的黄金时代；新的电机拓扑结构与控制方式层出不穷，新一代机电一体化电机驱动系统迅猛发展，高密度、高效率、轻量化、低成本、宽调速牵引电机驱动系统已成为各国研究和开发的主要热点之一。电机制造中不断应用新材料。如：（1）绝缘材料方面。应用聚酯、聚四氟乙烯薄膜和玻璃纤维绝缘材料等。（2）浸渍漆方面。应用醇酸树脂漆、硅有机漆、环氧硅有机混合漆等。（3）浸渍胶方面。应用不饱和聚酯胶、环氧树脂胶、热弹性胶等。（4）导电材料方面。应用损耗小、磁导率高、超薄（0.27 mm）并涂有耐热绝缘膜的冷轧硅钢片，一种新的非晶合金导磁材料也开始被采用。例如 TDY 系列低速永磁同步电机转子上磁钢所用永磁材料由铁氧体改为钕铁硼后，电机最大转矩提高 30% 以上。电机容量也不断提高。目前，世界上最大单机容量已突破 1 000 MW。

第一单元 变压器的分类、结构和原理

课题一 变压器的分类和用途

变压器是用来改变交流电压大小的供电设备。它是根据电磁感应原理，把某一等级的交流电压变换成频率相同的另一等级的交流电压，以满足不同负载的需要。变压器的应用使人们能够方便地解决输电和用电这一矛盾。因此，变压器在电力系统中占有很重要的地位。

为提高电能的传输效率，将同步发电机输出的 400 V、3.15 kV、6.3 kV、10.5 kV 电压，通过变压器升压为 110 kV、220 kV、330 kV、500 kV、765 kV 高压输电线路的电压。而电能被送到用电区后，又要根据用户的要求，通过降压变压器来降压，这种电压升降往往要通过多次才能达到要求。如大型动力设备用电电压为 10 kV、6 kV、3 kV，小型动力设备和照明用电电压为 380 V、220 V，潮湿和不安全处用电电压为 36 V、24 V、12 V、6 V。所以变压器在电力系统中的用量是很大的，据统计，在电力系统中每 1 kW 发电机功率需配备 5~8 kV·A 容量的变压器。另外还有可用作阻抗变换及其他用途的变压器，如自耦变压器和仪用互感器等。

为了适用不同的使用目的和工作条件，变压器的种类很多，其常用的分类方法和主要用途见表 1—1。

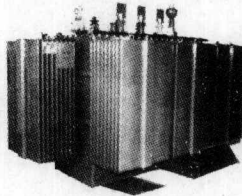
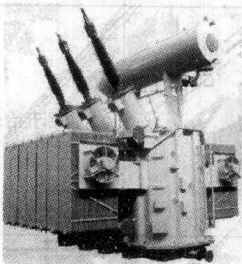
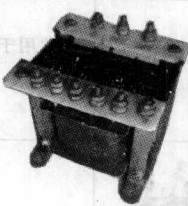
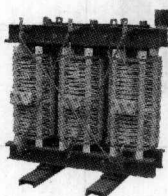
表 1—1

变压器常用的分类方法和主要用途

分类	名称	外形图	主要用途
按相数分类	单相变压器		常用于单相交流电路中隔离、电压等级的变换、阻抗变换、相位变换或三相变压器组
	三相变压器		常用于输配电系统中变换电压和传输电能
按用途分类	电力变压器		常用于输配电系统中变换电压和传输电能

分类	名称	外形图	主要用途
按用途分类	仪用互感器		常用于电工测量与自动保护装置
	电炉变压器		常用于冶炼、加热及热处理设备电源
	自耦变压器		常用于实验室或工业上调节电压
	电焊变压器		常用于焊接各类钢铁材料的交流电焊机
	壳式铁心		常用于小型变压器、大电流的特殊变压器，如电炉变压器、电焊变压器；或用于电子仪器及电视、收音机等电源变压器
按铁心结构形式分	心式铁心		常用于大、中型变压器、高压的电力变压器
	C形铁心		常用于电子技术中的变压器

续表

分类	名称	外形图	主要用途
按冷却方式分	油浸式变压器		常用于大、中型变压器
	风冷式变压器		强迫油循环风冷，用于大型变压器
	自冷式变压器		空气冷却，用于中、小型变压器
	干式变压器		用于安全防火要求较高的场合，如地铁、机场及高层建筑等

变压器的分类方式还有很多。如电力变压器可分为升压、降压和配电变压器；根据工作特性可分为变压器、变流三绕组变压器、感应式移相器、变换阻抗器；按绕组可分为单绕组变压器、双绕组变压器、多绕组变压器。



思考与练习

变压器的分类方式有很多，按用途可分为哪几种？

课题二 变压器的结构与冷却方式

一、变压器的结构

根据用途的不同，变压器的结构也有所不同，大功率电力变压器的结构比较复杂，而多

数电力变压器是油浸式的。油浸式变压器由绕组和铁心组成器身，为了解决散热、绝缘、密封、安全等问题，还需要油箱、绝缘套管、储油柜、冷却装置、压力释放阀、安全气道、温度计和气体继电器等附件，其结构如图 1—1 所示。

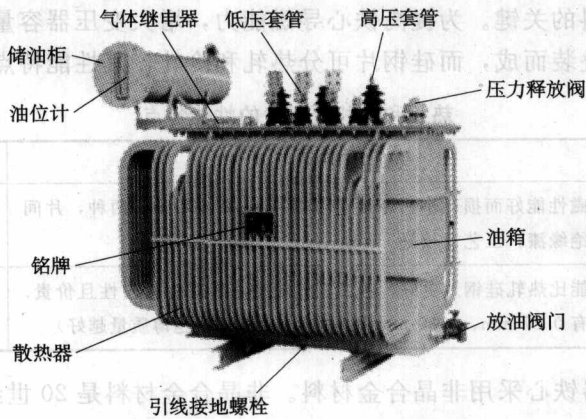


图 1—1 油浸式电力变压器

1. 变压器绕组

(1) 绕组材料选用。绕组是变压器的电路部分，常用绝缘铜线或铜箔绕制而成，也有用铝线或铝箔绕制的。

(2) 绕组命名。接电源的绕组称为一次绕组；接负载的绕组称为二次绕组。按绕组所接电压高、低分为高压绕组和低压绕组。

(3) 绕组类型。按绕组绕制的方式不同，绕组可分为同心绕组和交叠绕组两种类型，其特点见表 1—2。

表 1—2 绕组类型及特点

绕组类型	示意图	绕制特点	应用范围
同心绕组		<p>将一次、二次侧线圈套在同一铁心柱的内外层，一般低压绕组在内层，高压绕组在外层，当低压绕组电流较大时，绕组导线较粗，也可放到外层，绕组的层间留有油道，以利绝缘和散热。同心绕组结构简单，绕制方便</p>	<p>大多用于电力变压器中</p>
交叠绕组		<p>将高低压线圈绕成饼状，沿铁心轴向交叠放置，一般两端靠近铁轭处放置低压绕组，有利于绝缘</p>	<p>大多用于壳式、干式变压器及电炉变压器中</p>

2. 变压器铁心

铁心是主磁通的通道，也是安放绕组的骨架。

(1) 铁心材料选用。铁心材料的质量，直接影响到变压器的性能。高磁导率、低损耗和价格，是选择铁心材料的关键。为提高铁心导磁能力，增大变压器容量、减少体积、提高效率，铁心常用硅钢片叠装而成，而硅钢片可分热轧和冷轧，其性能特点见表 1—3。

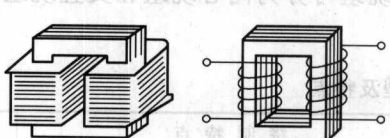
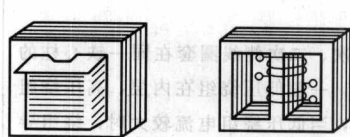
表 1—3 热扎和冷扎硅钢片的性能特点

导磁材料名称	性能和特点	应用范围
热轧硅钢片	导磁性能好而损耗小，厚度有 0.35 mm 和 0.5 mm 两种，片间涂覆绝缘漆，工艺性较好	多用于小型变压器中
冷轧硅钢片	性能比热轧硅钢片更好，但工艺性较差，导磁有方向性且价贵。厚度有 0.27 mm、0.30 mm 和 0.35 mm 多种（越薄质量越好）	多用于大中型变压器中，如电力变压器

目前，有的变压器铁心采用非晶合金材料。非晶合金材料是 20 世纪 70 年代问世的一种新型合金材料，该合金具有优异的导磁性、耐蚀性、耐磨性、高硬度、高强度等独特性能特点。利用非晶合金制作铁心而成的变压器，比利用硅钢片制作铁心变压器的空载损耗下降 75% 左右，空载电流下降约 80%，现在越来越多用于安全和防火要求较高场合的大、中型变压器中。

(2) 铁心类型。变压器的铁心因绕组放置的位置不同，可分为芯式和壳式，见表 1—4。

表 1—4 变压器铁心的特点

铁心类型	示意图	性能和特点	应用范围
芯式		线圈包着铁心，结构简单，装配容易，省导线	适用于大容量、高电压。电力变压器大多采用三相芯式铁心
壳式		铁心包着线圈，铁心易散热，但用线量多，工艺复杂	除小型干式变压器外很少采用

(3) 铁心柱与铁轭的装配工艺。铁心由铁心柱与铁轭构成，铁心柱是铁心安装绕组的部分，铁轭是连接铁心柱形成闭合磁路的铁心部分，如图 1—2 所示。

铁心柱与铁轭的装配工艺有对接式和叠接式两种，见表 1—5。

大、中型变压器中采用高导磁、低损耗的冷轧硅钢片。冷轧硅钢片顺碾压方向导磁性好、损耗小，所以冷轧硅钢片叠装时要求硅钢片在对接处按 45°角剪裁，以保证磁力线与碾压方向一致。现在铁心加工工艺一般不打穿心孔，改用新的夹紧工艺，可以提高铁心装配质量，减少铁耗。

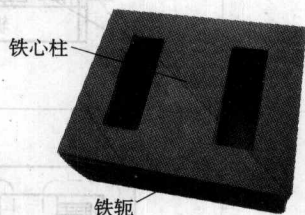

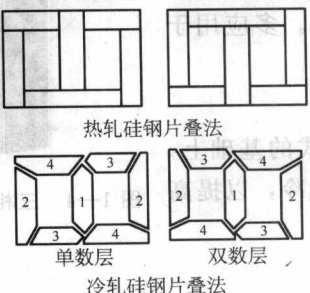
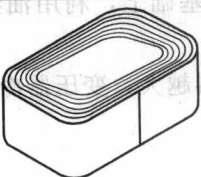


图 1—2 变压器的铁心柱与铁轭

表 1—5 铁心柱与铁轭的装配工艺

装配工艺类别	示意图	性能和特点	应用范围
对接式	 <p>山字形 F 字形 口字形</p>	<p>将铁心和铁轭分别叠装夹紧，然后把它们对接起来，再夹紧。因工艺气隙大，从而增加了磁阻和励磁电流</p>	<p>小型变压器</p>
叠接式	 <p>热轧硅钢片叠法</p> <p>单数层 双数层</p> <p>冷轧硅钢片叠法</p>	<p>将铁心柱和铁轭的钢片一层层相互交错、重叠（每层不能多于三片），接缝相互错开。因气隙较小，磁阻也相应减小，从而减少了励磁电流，改善了性能</p>	<p>大型变压器都采用这种方式。小型变压器一般也采用叠接工艺，结构简单，经济实用</p>
C 字形		<p>由冷轧钢带卷绕而成，铁心端面加工精确，大大减少了气隙，提高了效率，节省了材料，装配也方便</p>	<p>小功率的此类铁心变压器在电子线路中应用很广</p>

二、变压器冷却方式

变压器绕组和铁心在运行中，虽然效率可高达 99%，但还是有部分损耗的电能转化成热能，使变压器的铁心和绕组的温度升高。温度越高，绝缘老化越快。当绝缘老化到一定程度时，在运行振动和电动力作用下，绝缘容易破裂，易发生电气击穿而造成故障。运行温度直接影响到变压器的输出容量、安全和使用寿命。因此，必须有效地对运行中的变压器铁心和绕组进行冷却。我国生产的电力变压器多数采用油浸式冷却，根据容量不同，可分为下列 4 种。

1. 三相油浸自冷式 (ONAN)

主要有 SJ 系列和 SJL 系列 (铝线)。冷却方式为：当变压器运行、油温上升时，根据热油上升、冷油下降原理形成自然对流，流动的油将热量传给油箱体和外侧的散热器，然后依靠空气的对流传导将热量向周围散发，从而达到冷却效果。起冷却作用的散热器可分为管式、扁管式、片式和波纹油箱，其结构如图 1—3 所示。

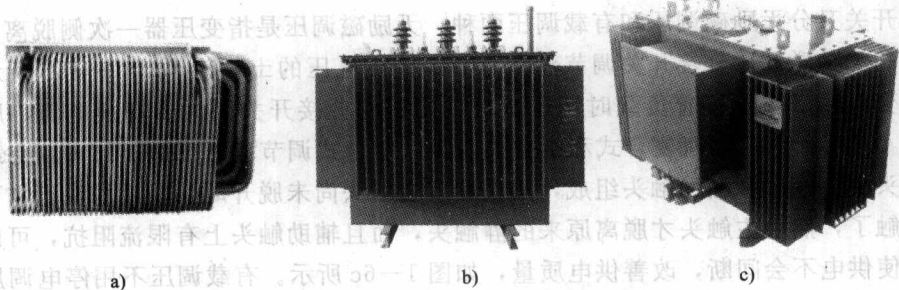


图 1—3 变压器散热器

a) 扁管式 b) 片式 c) 波纹油箱结构

为了防止因油温变化和空气进入油箱使油质变差等，三相油浸式变压器还在油箱顶上设计了一只储油柜（见图 1—1）。

2. 三相油浸风冷式 (ONAF)

主要有 SP 系列，其结构如图 1—4 所示。冷却方式：是在油浸自冷式的基础上，在油箱壁或散热管上加装风扇，利用吹风机帮助冷却。而且风力可调，以适用于短期过载。加装风冷后可使变压器的容量增加 30%~35%。多应用于容量在 10 000 kV·A 及以上的变压器。

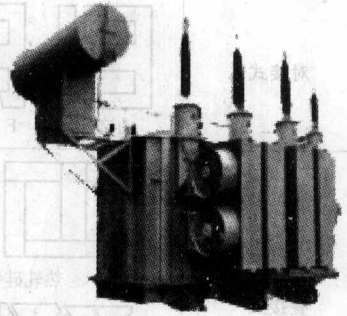


图 1—4 三相油浸风冷式变压器

3. 三相强迫油循环风冷式 (OFAF)

主要有 SFP 系列。冷却方式：在油浸自冷式的基础上，利用油泵强迫油循环，并且在散热器外加风扇风冷，以提高散热效果。

4. 三相强迫油循环水冷式 (OFWF)

主要有 SSP 系列。冷却原理：在油浸自冷式的基础上，利用油泵强迫油循环，并且利用循环水作冷却介质，以提高散热效果。

变压器冷却方式随容量增大而有所不同。变压器越大，变压器冷却方式要求越高。

三、变压器的主要附件

1. 气体继电器 (瓦斯继电器)

气体继电器装在油箱与储油柜之间的管道中，当变压器发生故障时，器身就会过热使油分解产生气体。气体进入继电器内，使其中一个水银开关接通（上浮筒动作），发出报警信号。此时应立即将继电器中气体放出检查，若系无色、不可燃的气体，变压器可继续运行；若系有色、有焦味、可燃气体，则应立即停电检查。当事故严重时，变压器油膨胀，冲击继电器内的挡板，使另一个水银开关接通跳闸回路（即下浮筒动作），切断电源，避免故障扩大。为了提高继电器的可靠性，现在多采用挡板式气体继电器，当继电器中气体达到一定容积后，开口杯下沉，上磁铁使上干簧闭合，接通信号；当油流冲击挡板后，下磁铁使下干簧闭合，接通跳闸回路（通常 630 kV·A 以上变压器采用）。气体继电器外形如图 1—5a 所示。

2. 分接开关

变压器的输出电压可能因负载和一次侧电压的变化而变化，想要控制输出电压在允许范围内变动，可通过分接开关。分接开关一般装在一次侧（高压边），通过改变一次侧线圈匝数来调节输出电压，如图 1—6a 所示。

分接开关又分无励磁调压和有载调压两种，无励磁调压是指变压器一次侧脱离电源后调压，常用的无励磁调压分接开关调节范围为额定输出电压的±5%，如图 1—5b 所示。有载调压是指变压器二次侧接着负载时调压，有载调压的分接开关因为要切换电流，所以较复杂，如图 1—5c 所示。它有复合式和组合式两类，组合式调节范围可达±15%。有载调压开关的动触头由主触头和辅助触头组成，每次调节主触头尚未脱开时，辅助触头已与下一挡的静触头接触了，然后主触头才脱离原来的静触头，而且辅助触头上有限流阻抗，可以大大减少电弧，使供电不会间断，改善供电质量，如图 1—6c 所示。有载调压不用停电调压，对变压器也有利，因为变压器每次拉闸和合闸都会对变压器造成不利的电压和电流冲击。因调节的方法不同，分接开关又有手动、电动两种，小型变压器多用手动调压，大型变压器多用电