

工学结合的特色教材（高职高专教育）

BIANYAQI JIEGOU YU GONGYI

变压器结构 与工艺

主 编 / 梁红梅



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

工学结合的特色教材（高职高专教育）

变压器结构与工艺

主 编 梁红梅

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书以特变电工的变压器制造工艺为基础,按照大型电力变压器制造工艺流程中的各项工作任务进行编写,汇集了制造变压器的大量实践经验。全书包括六个项目:变压器的结构、变压器铁心制造工艺、变压器绝缘零件及其制造工艺、变压器绕组制造工艺、变压器装配工艺、变压器试验。

本书可作为高职高专电气类和机电类专业的教材,也可供从事变压器制造、变压器维护的技术人员以及变压器专业技术工人培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

变压器结构与工艺 / 梁红梅主编. —天津:天津大学出版社, 2012. 1

工学结合的特色教材 高职高专教育

ISBN 978-7-5618-4235-5

I. ①变… II. ①梁… III. ①变压器—结构—高等职业教育—教材②变压器—生产工艺—高等职业教育—教材
IV. ①TM40

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 257967 号

出版发行 天津大学出版社

出 版 人 杨欢

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内 (邮编: 300072)

电 话 发行部: 022-27403647 邮购部: 022-27402742

网 址 publish.tju.edu.cn

印 刷 河北省昌黎县第一印刷厂

经 销 全国各地新华书店

开 本 148mm × 210mm

印 张 4.75

字 数 137 千

版 次 2012 年 1 月第 1 版

印 次 2012 年 1 月第 1 次

定 价 15.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与我社发行部联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据高职高专的培养目标，结合高职高专的教学改革和课程改革，按照“工作过程导向”的原则，同时满足变压器行业操作工人的专业培训和工程技术人员的业务学习要求，以特变电工的变压器制造工艺为基础，按照大型电力变压器制造工艺流程中的各项工作任务进行编写的，书中汇集了制造变压器的大量实践经验。

本书由特变电工新疆变压器厂和昌吉职业技术学院合作，参照“变压器制造技术丛书”和新疆变压器厂内部员工培训教材，结合目前国内外大型变压器发展的最新技术编写而成。

全书包括如下六个项目。

项目一变压器的结构：主要介绍变压器的基本知识、用途、分类和作用等。

项目二变压器铁心制造工艺：详细介绍铁心的结构、典型结构件、所用硅钢片和制造铁心的工艺流程。

项目三变压器绝缘零件及其制造工艺：介绍对变压器绝缘性能的要求以及常用的主要绝缘材料，详细阐述绝缘零件的制造工艺。

项目四变压器绕组制造工艺：详细阐述绕组的基本知识、绕组用的导线、制造工艺流程和主要设备，还有圆筒式绕组、连续式绕组、螺旋式绕组、纠结式绕组的绕制工艺。

项目五变压器装配工艺：介绍变压器装配的工艺流程、主要工序，如器身装配、引线装配、总装配的工艺要求和方法。

项目六变压器试验：简单介绍电压比试验和绕组电阻的测定方法、变压器绝缘电阻的测定、空载试验方法、外施耐压试验和

感应耐压试验方法。

本书由昌吉职业技术学院梁红梅担任主编和统筹，特变电工新疆变压器厂技术科工程师朱志勇和工艺科刘文山提供了大量资料，同时还参考了“变压器制造技术丛书”。此外，在编写过程中还得到许多同人的大力支持和帮助，在此一并致以衷心的感谢。

由于各企业工艺方法不同，在制造方法上也不完全相同，本书中所述的工艺方法、工艺参数及具体操作规定和要领仅供参考，望不要生搬硬套本书内容并替代各厂现行技术文件。

由于时间仓促和作者水平所限，书中难免有不妥和错误，衷心欢迎广大读者批评指正。

编者

2011年10月

目 录

项目一 变压器的结构 / 1

课题一 变压器的基本知识 / 2

课题二 大型油浸式电力变压器的结构 / 6

复习思考题 / 12

项目二 变压器铁心制造工艺 / 13

课题一 铁心的结构及典型结构件 / 13

课题二 变压器铁心所用硅钢片 / 21

课题三 变压器铁心的制造工艺流程 / 22

课题四 变压器铁心的叠积方式和叠片图 / 26

课题五 铁心的选片 / 29

课题六 铁心的叠装 / 30

课题七 铁心叠装的质量问题及故障清除 / 39

复习思考题 / 44

项目三 变压器绝缘零件及其制造工艺 / 45

课题一 变压器对绝缘性能的要求和绝缘分类 / 45

课题二 油浸式变压器常用的主要绝缘材料 / 48

课题三 变压器主要绝缘零件的制造 / 49

复习思考题 / 56

项目四 变压器绕组制造工艺 / 57

课题一 变压器绕组的基本知识 / 57

课题二 变压器绕组用的导线 / 66

课题三 绕组制造的工艺流程和主要设备 / 67

课题四 圆筒式绕组的绕制 / 69

课题五 连续式绕组的绕制 / 78

课题六 螺旋式绕组的绕制 / 92

课题七 纠结式绕组的绕制 / 101

课题八 导线的焊接和线圈的套装 / 108

复习思考题 / 110

项目五 变压器装配工艺 / 112

课题一 变压器装配的工艺流程图 / 112

课题二 变压器的器身装配 / 113

课题三 引线装配 / 115

课题四 器身干燥处理 / 118

课题五 变压器的总装配 / 121

复习思考题 / 123

项目六 变压器试验 / 124

课题一 变压器试验目的与试验项目 / 124

课题二 电压比试验和绕组电阻的测定 / 126

课题三 绝缘特性试验 / 129

课题四 空载试验 / 132

课题五 绝缘试验（外施耐压试验和感应耐压试验） / 135

复习思考题 / 142

参考文献 / 144

项目一 变压器的结构

【主要内容】

根据变压器制造的实际情况，本章首先介绍变压器的基本知识，然后介绍大型变压器的基本结构及各部分作用，使学生对变压器有一个整体的概念。

【总体目标】

通过对课题一的学习，掌握变压器的用途和分类。

通过对课题二的学习，掌握变压器的结构及各部分的作用。

近年来，国内大型电力变压器的制造已经取得了十分可喜的成就，现在已有较多厂家能够生产 110 kV 及以上电压等级的大型电力变压器。为适应电力工业高速发展的需要，国产大型电力变压器年总产量也在急剧增长，且单台容量和电压等级也不断增加。如 360 MVA、330 kV，300 MVA、220 kV 铝合金换位导线大型变压器，单相 25 万 kVA、500 kV 大型变压器等。目前大型电力变压器普遍采用低损耗、有载调压的结构形式，并一律采用强迫油循环冷却方式。由于容量的增大及电压等级的升高，大型电力变压器比中小型变压器的铁心、绕组和绝缘都要复杂得多，其各大部件都有不同于中小型变压器的结构特点，特别是大型变压器的绝缘结构，其差异是很大的。本书主要介绍大型电力变压器的主要结构及相关的制造工艺、生产中的主要工艺流程、影响性能的参数和影响产品质量的关键要素。

变压器结构与工艺两者之间有着密切的关系，在研究产品结构时，往往会涉及有关工艺问题；而研究工艺问题，也必然离不开产品结构。变压器的各种性能参数和各项要求能否按预期指标

制造出来，都要通过具体的结构来体现，一般可用结构的“先进性”、“适用性”和“工艺性”来衡量。所谓的“先进性”是指选用正确的结构和恰当的结构裕度，使产品既安全可靠，又经济合理；“适用性”是指产品能够充分满足使用 and 运行的要求；“工艺性”是指结构合理、制造成本低、易于保证制造质量、满足先进性和适用性的要求，三种性能是互相紧密联系的。

课题一 变压器的基本知识

一、变压器的用途和基本原理

1. 变压器的用途

变压器是根据电磁感应原理制造出来的能够输送电能、改变电压，但不改变频率的一种静止的装置。

电力作为能源，可以从能源产地将煤炭、石油、风能或核能转换成电力后，通过变压器由输电线路将电能输送到需要动力能源的地方。一般情况下，能源基地和需要能源的地方会有一定的距离，为了经济且远距离地输送电力，必须将发电机电压提高至输电电压，而到电力用户处，再将输电电压降低至用户使用电压，升高和降低电压的设备就是变压器。变压器在电力系统中的作用如图 1-1 所示。

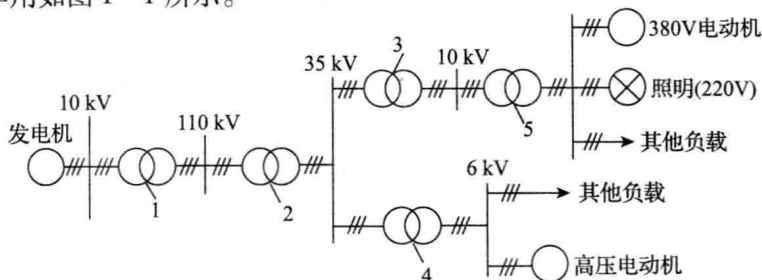


图 1-1 电力系统示意图

1—升压变压器；2, 3—降压变压器；4, 5—配电变压器

2. 变压器的基本原理

变压器是利用电磁感应原理工作的，图1-2为其工作原理示意图。变压器的主要部件是铁心和绕组。两个互相绝缘且匝数不同的绕组分别套装在两个铁心上，两绕组间只有磁的耦合而没有电的联系，其中接电源的绕组称为一次绕组，接负载的绕组称为二次绕组（也称为副绕组、次级绕组）。

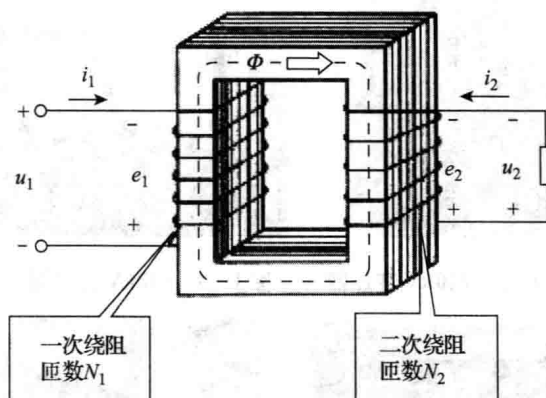


图1-2 变压器基本工作原理图

一次绕组加上交流电压后，绕组中便有电流通过，铁心中产生与交流电压同频率的交变磁通 Φ ，根据电磁感应原理，两个绕组中将分别感应出电动势 e_1 和 e_2 ，且有

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

式中，“-”号表示感应电动势总是阻碍磁通的变化。

若把负载接在二次绕组上，则在电动势 e_2 的作用下，有电流 i_2 流过负载，实现了电能的传递。由上式可知，一、二次绕组感应电动势的大小（近似于各自的电压 u_1 及 u_2 ）与绕组匝数成正比，故只要改变一、二次绕组的匝数，就可达到改变电压的目的，这就是变压器的基本工作原理。

二、变压器的分类

变压器按本身电压高低、容量大小、使用要求、使用地点和服务对象的不同,可分为 220 kV 变压器、330 kV 变压器、干式变压器、直流输电用换流变压器、220 kV 单相组合变压器、配电变压器、H 级干式变压器 (见图 1-3 至图 1-9)。

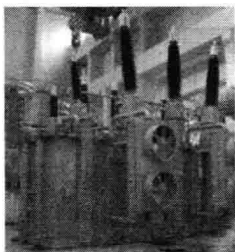


图 1-3 220kV 变压器



图 1-4 330kV 变压器

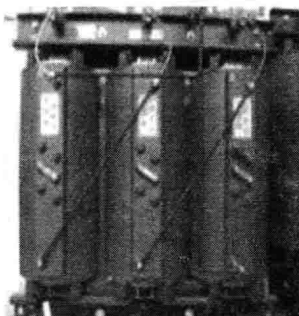


图 1-5 干式变压器

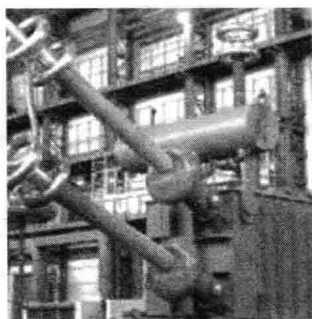


图 1-6 直流输电用换流变压器

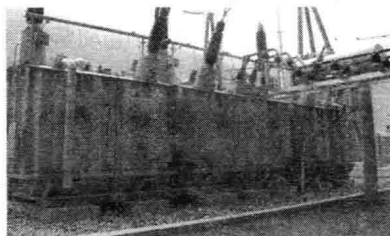


图 1-7 220kV 单相组合变压器

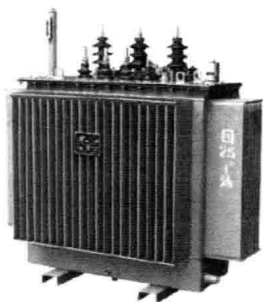


图 1-8 配电变压器

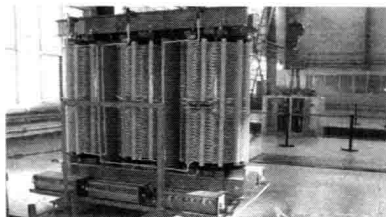


图 1-9 H 级干式变压器

1. 按变压器的使用对象来分

- (1) 电力变压器 用于电力系统借以输送电能的变压器。
- (2) 配电变压器 容量较小，由较高电压降到最后一级配电电压，直接作配电用的电力变压器。
- (3) 变流变压器 在直流输电系统中向变流器供电的电力变压器。

(4) 试验变压器 根据需要产生高电压或大电流，供各种电气设备和绝缘材料作电气绝缘性能试验用的变压器。

(5) 用于不同工业的专用变压器 如电炉变压器、整流变压器、牵引变压器、启动变压器、矿用变压器、防爆变压器等。

2. 按冷却介质和冷却方式来分

(1) 油浸式变压器 采用矿物油作为冷却和绝缘介质的变压器。

(2) 干式变压器 采用空气作为冷却和绝缘介质的变压器。

(3) 充气式变压器 采用人工合成的某种气体作为冷却和绝缘介质的变压器。

3. 按调压方式来分

(1) 无励磁调压变压器 装有无励磁分接开关，且只能在无励磁情况下进行调压的变压器。

(2) 有载调压变压器 装有有载调压分接开关，能在负载下

调压的变压器。

课题二 大型油浸式电力变压器的结构

油浸式电力变压器主要由铁心、绕组、绝缘介质、油箱、附件组成。

一、铁心

铁心是变压器的磁路，由电工硅钢片和夹紧装置组成，它有两个作用：一是铁心的磁导体构成了变压器的磁路，它能将一次电路的电能转变为磁能，又能将自己的磁能转变为二次电路的电能，因此它是能量转换的媒介；二是铁心外面套有绕组，支持着引线，铁心上几乎安装了变压器内部的所有部件。

1. 铁心的结构

大型变压器的铁心一律用导磁性能良好的冷轧硅钢片制造并使用全斜按键。冷轧硅钢片具有更高一级的晶粒取向，当磁感线的方向与碾轧方向一致时，导磁性能最好。冷轧硅钢片还具有较低的线性磁滞伸缩和较小的应力敏感度。硅钢片的厚度多采用 0.28 mm 和 0.3 mm 两种，采用冷轧硅钢片制造的铁心可以改善诸如铁损、励磁伏安以及噪声等性能。

铁心有两大基本结构形式。

(1) 壳式 线圈被铁心包围。

(2) 心式 铁心被线圈包围，分心式三相三柱铁心和三相五柱铁心两种。

为使磁通分布均匀，大型变压器铁心的铁轭一般都采用多级阶梯形截面，其级数完全与铁心心柱对应相等，即三相三柱式铁心的铁轭截面与铁心心柱截面完全相同，三相五柱式铁心的铁轭截面近似呈多级椭圆形。另外，大型变压器铁心的截面面积大、

总铁损大、发热严重，因此必须设置铁心油道。

2. 夹件部分

大型变压器的铁心心柱通常采用玻璃纤维粘带绑扎，不再使用穿心螺杆夹紧。原因是用穿心螺杆夹紧需要在硅钢片上冲孔，这不仅需要大量的加工工时和冲模，而且硅钢片孔口边沿处的毛刺既影响叠片的平整度，又会使铁心损耗增大；冲孔还减小了铁心的有效截面，引起磁通局部畸变，增加了损耗。近年来，有的厂家用纸板筒来夹紧铁心心柱，纸板筒同时也是低压绕组对铁心的主绝缘，这样连玻璃纤维粘带也节省了，并减小了粘带所占据的空间（见图 1-10）。

上下铁轭的夹紧也逐步发展成用拉带来代替铁轭穿心螺杆。拉带可采用玻璃丝粘带，也可用不锈钢带。

现在的大型变压器的铁心夹件逐步趋向于结构简单化、标准化，其特点是必须注意改变尖角部位，尽量按接近等位面的要求改善电场分布，或尽量减少支板的布置，下夹件的托板用绝缘板来代替（见图 1-11）。

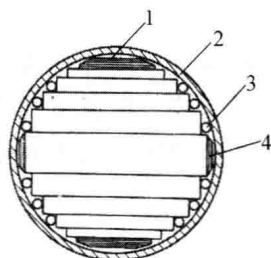


图 1-10 纸板筒夹紧铁心心柱

- 1—撑板；2—厚纸筒；
3—撑条；4—侧撑板

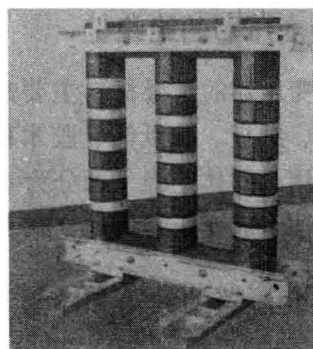


图 1-11 铁心

3. 铁心的绝缘和接地

铁心的绝缘主要指铁心的零部件与铁心片之间的绝缘，这些绝缘虽然电气强度要求不高，但是大部分绝缘都处于长期受挤压

状态，如夹件绝缘、拉板绝缘等就一直受夹紧力的挤压，底脚绝缘则一直受到器身质量的压力作用。因此，这些绝缘必须有可靠的机械强度，以保证变压器在运输过程中以及在长期运行中不被损坏。这是大型变压器铁心绝缘的特点。

二、绕组

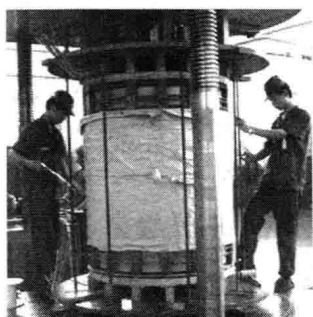


图 1-12 绕组

绕组是变压器输入和输出电能的电气回路，通常是按原理或按规定的联结方法连接起来。绕组的主要作用是：一次绕组将系统的电能引进变压器，由二次绕组将电能传输出去，因此绕组是传输和转换电能的主要部件（见图 1-12）。

大型变压器的绕组全部采用同心式，即几个绕组分内层、中间、外层

同心布置。

三、变压器的绝缘

变压器的绝缘材料主要是变压器油和一些固体绝缘，如电缆纸、纸板、胶纸筒、胶木板、绝缘布带等。根据不同的位置和作用，固体绝缘又可分为主绝缘和纵绝缘等。固体绝缘和变压器油组成变压器的内绝缘。

四、变压器的油箱和冷却装置

油浸式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，将铁心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。变压器的容量越大，发热问题就越严重。小容量变压器采用平板式油

箱；容量稍大的变压器采用排管式油箱，油箱侧壁上焊接许多冷却用的管子，以增大油箱散热面积（见图 1-13）。当排管仍不能满足散热需要时，则需将排管做成散热器，再把散热器安装在油箱上，这种油箱称为散热器式油箱（见图 1-14）。此外，大型变压器还采用强迫油循环冷却等方式，以增强冷却效果。强迫油循环的冷却装置称为冷却器，不强迫油循环的冷却装置称为散热器。

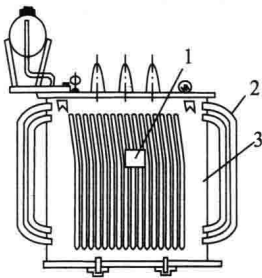


图 1-13 排管式油箱

1—铭牌；2—冷却管；3—油箱

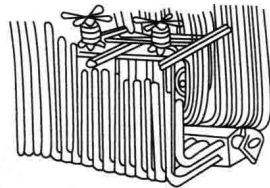


图 1-14 带风扇装置的散热器

为了检修方便，变压器器身质量大于 15 t 时，通常将变压器做成钟罩式油箱，检修时只需把上节油箱吊起，避免了必须使用重型起重设备的烦琐（见图 1-15）。

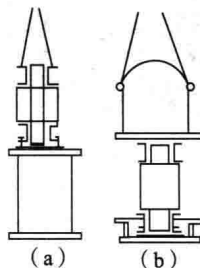


图 1-15 器身检修时的起吊

(a) 吊器身 (b) 吊上节油箱

五、附件

变压器附件主要包括冷却装置、保护装置、调压装置、出线装置和测量装置五个部分（见图 1-16）。① 冷却装置包括冷却器、散热器；② 保护装置包括储油柜、油位计、压力释放阀、净油器、吸湿器、气体继电器；③ 调压装置，即分接开关；④ 出线装置包括高、中、低压套管和电缆接线；⑤ 测量装置包括套管型电流互感器、油流计、温度计、色谱仪、油位检测计。

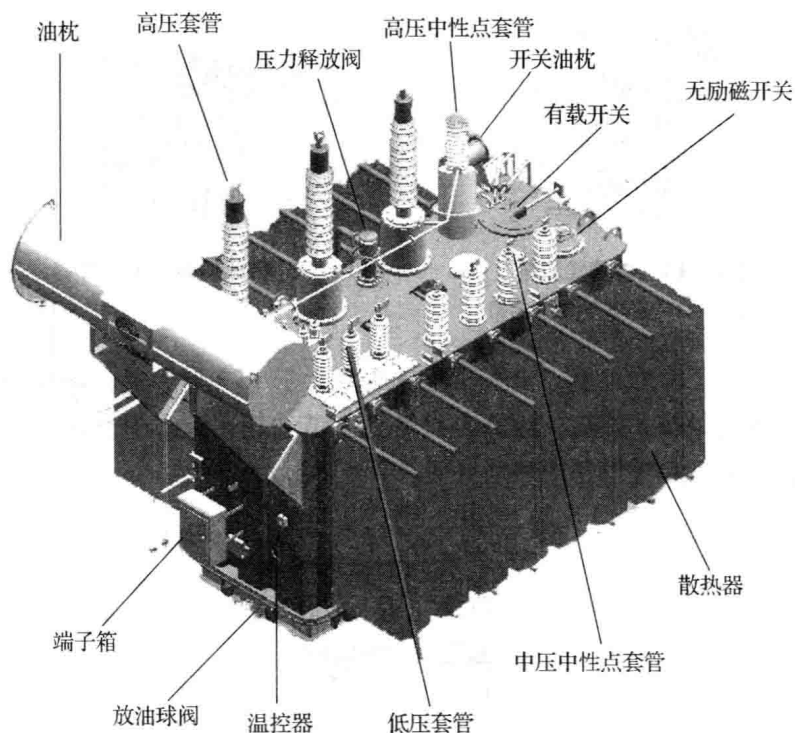


图 1-16 变压器附件三维图

(1) 储油柜 可分为普通式储油柜和密封式储油柜，密封式储油柜又分为隔膜式储油柜和胶囊式储油柜，其作用是