

新世纪高职高专教改项目成果教材

电机与电气控制技术

赵承荻 黄旭 主编



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

新世纪高职高专教改项目成果教材

电机与电气控制技术

主 编 赵承荻 黄 旭

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是新世纪高职高专教改项目成果系列教材之一,是面向 21 世纪课程教材。本书在编写时考虑了我国高职高专的现状和发展趋势,结合当前实际教学的需要。全书共分七章,主要内容有变压器、交流电动机、直流电机、特种电机、低压电器、继电器-接触器控制电路、实验与实训。

本书理论分析适度,重视实际应用及学生能力的培养,并在更新教材内容、拓宽知识面方面作了较大的努力。全书的图形符号、文字符号、量和单位及相关的标准、型号均采用国家最新标准。

本书可作为高职高专学校及其他各类相关的学校机电技术应用、数控技术应用、电气运行与控制、电气技术等专业的教学用书,也可供从事电工技术的教学人员及相关人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术/赵承获、黄旭主编. —北京:高等教育出版社,2003.7

ISBN 7-04-012022-4

I. 电... II. ①赵... ②黄... III. ①电机学—高等学校:技术学校—教材②电气控制—高等学校:技术学校—教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 047644 号

责任编辑 李宇峰 封面设计 吴 昊 责任印制 潘文瑞

书 名 电机与电气控制技术
主 编 赵承获 黄旭

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899
传 真 021-56965341

购书热线 010-64054588
021-56964871
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
<http://www.hepsh.com>

排 版 南京理工排版校对公司
印 刷 江苏省宜兴市德胜印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 15
字 数 367 000

版 次 2003 年 6 月第 1 版
印 次 2003 年 6 月第 1 次
定 价 20.50 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

为认真贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》，研究高职高专教育跨世纪发展战略和改革措施，整体推进高职高专教学改革，教育部决定组织实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》（教高〔2000〕3 号，以下简称《计划》）。《计划》的目标是：“经过五年的努力，初步形成适应社会主义现代化建设需要的具有中国特色的高职高专教育人才培养模式和教学内容体系。”《计划》的研究项目涉及高职高专教育的地位、作用、性质、培养目标、培养模式、教学内容与课程体系、教学方法与手段、教学管理等诸多方面，重点是人才培养模式的改革和教学内容体系的改革，先导是教育思想的改革和教育观念的转变。与此同时，为了贯彻落实《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》（教高〔2000〕2 号）的精神，教育部高等教育司决定从 2000 年起，在全国各省市的高等职业学校、高等专科学校、成人高等学校以及本科院校的职业技术学院（以下简称高职高专院校）中广泛开展专业教学改革试点工作，目标是：在全国高职高专院校中，遴选若干专业点，进行以提高人才培养质量为目的、人才培养模式改革与创新为主题的专业教学改革试点，经过几年的努力，力争在全国建成一批特色鲜明、在国内同类教育中具有带头作用的示范专业，推动高职高专教育的改革与发展。

教育部《计划》和专业试点等新世纪高职高专教改项目工作开展以来，各有关高职高专院校投入了大量的人力、物力和财力，在高职高专教育培养目标、人才培养模式以及专业设置、课程改革等方面做了大量的研究、探索和实践，取得了不少成果。为使这些教改项目成果能够得以固化并更好地推广，从而总体上提高高职高专教育人才培养的质量，我们组织了有关高职高专院校进行了多次研讨，并从中遴选出了一批较为成熟的成果，组织编写了一批“新世纪高职高专教改项目成果”教材。这些教材结合教改项目成果，反映了最新的教学改革方向，很值得广大高职高专院校借鉴。

新世纪高职高专教改项目成果教材适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

高等教育出版社

2003 年 5 月

前 言

本书是根据教育部颁发的《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》，并参照有关行业的职业技能鉴定规范及高、中级技术工人等级考核标准编写的，可作为全国高等职业学校机电技术应用、数控技术专业及其他相关专业的教学用书。

随着我国社会、经济、科技的发展和教育结构的调整，全国高等职业学校的培养目标和业务规格定位在以3年制为主的“高素质劳动者和应用型专门人才”上。因此本书在与以前传统的同类教材相比，在减少变压器、交直流电机及拖动理论分析及叙述方面作了较大的努力，把重点放在电机及电器结构特点分析、应用及检修等方面，并十分注意教材内容的更新，以适应当前技术水平不断发展需要。通过本书的教学使学生掌握变压器、交直流电机、常用低压电器的基本结构、工作原理及实践应用，掌握常用电动机的控制电路，具有解决生产实际中电气控制一般问题的能力，并使学生了解电气控制技术的发展方向，使学生的素质得到全面提高。

本书配有实验实训内容，总教学时数为70~90学时，具体学时分配建议方案如表1及表2所示。

表1 90学时分配建议方案

章	内 容	学 时 数			
		合计	讲授	实验实训	机动
一	变压器	14	10	4	
二	交流电动机	28	22	6	
三	直流电机	10	8	2	
四	特种电机	10	10		
五	低压电器	8	8		
六	继电器-接触器控制电路	14	10	4	
七	实验与实训				
	机动	6			6
	总计	90	68	16	6

表2 70学时建议方案

章	内 容	学 时 数			
		合计	讲授	实验实训	机动
一	变压器	12	8	4	
二	交流电动机	22	16	6	

续表

章	内 容	学 时 数			
		合计	讲授	实验实训	机动
三	直流电机	6	6		
四	特种电机	10	10		
五	低压电器	6	6		
六	继电器-接触器控制电路	12	8	4	
七	实验与实训				
	机动	2			2
	总计	70	54	14	2

本书由湖南铁道职业技术学院赵承荻、黄旭主编,广州市轻工业学校李乃夫主审,安徽省轻工业学校程周、内蒙古轻工业学校张云龙参编。具体编写分工是赵承荻编写第一、二章,黄旭编写第三、四、七章,张云龙编写第五章,程周编写第六章。

由于编者学识和水平有限,书中必然存在不少缺点、疏漏及其他不足之处,恳请使用本书的教师、学生及读者批评指正。

编 者

2003年5月

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)82028899 转 6897 (010)82086060

传 真：(010)82086060

E - mail : dd@hep. com. cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

邮 编：100011

购书请拨打读者服务部电话：(010)64054588

目 录

第一章 变压器	1
第一节 变压器的工作原理、用途及分类	1
第二节 变压器的基本结构.....	4
第三节 单相变压器的运行原理	12
第四节 变压器的运行特性	16
第五节 变压器的极性判定	19
第六节 其他用途变压器	20
本章小结	30
思考题与习题	31
第二章 交流电动机	33
第一节 交流电机的分类及用途	33
第二节 三相异步电动机的工作原理	33
第三节 三相异步电动机的结构	38
第四节 三相异步电动机的运行原理与特性	51
第五节 三相异步电动机的起动	59
第六节 三相异步电动机的调速	65
第七节 三相异步电动机的制动	69
第八节 三相异步电动机的选用	72
第九节 单相异步电动机	74
本章小结	84
思考题与习题	85
第三章 直流电机	88
第一节 直流电机的工作原理	88
第二节 直流电动机的结构	89
第三节 直流电机的电动势、转矩和功率.....	96
第四节 直流电动机的工作特性	98
第五节 直流电动机的起动、调速、反转和制动.....	101
第六节 直流电动机的应用.....	106
本章小结.....	107
思考题与习题.....	108
第四章 特种电机	110
第一节 特种电机的分类、特点及用途	110

目 录

第二节 伺服电机	111
第三节 步进电机	117
第四节 直线电动机	122
第五节 测速发电机	127
第六节 微型同步电动机	130
第七节 单相串励电动机	133
本章小结	136
思考题与习题	136
第五章 低压电器	138
第一节 低压电器概述	138
第二节 开关	140
第三节 低压断路器	143
第四节 熔断器	147
第五节 主令电器	151
第六节 接触器	156
第七节 继电器	158
本章小结	165
思考题与习题	166
第六章 继电器-接触器控制电路	167
第一节 三相异步电动机直接起动控制	167
第二节 三相异步电动机降压起动控制	180
第三节 三相异步电动机制动控制	186
本章小结	190
思考题与习题	191
第七章 实验与实训	192
实验实训一 单相变压器及自耦变压器的使用	192
实验实训二 荧光灯镇流器(含小型控制变压器)的拆装及调试	197
实验实训三 三相异步电动机的试运行	203
实验实训四 三相异步电动机的起动、反转与制动	208
实验实训五 单相异步电动机的控制电路和检修	213
实验实训六 并励直流电动机的起动、调速和反转	218
实验实训七 三相异步电动机正、反转控制电路	222
实验实训八 三相异步电动机星-三角降压起动控制电路	226
参考文献	231

第一章 变 压 器

第一节 变压器的工作原理、用途及分类

变压器是一种常见的静止电气设备,它利用电磁感应原理,用来将某一数值的交变电压变换为同频率的另一数值的交变电压。变压器不仅对电力系统中电能的传输、分配和安全使用上有重要意义,而且广泛用于电气控制领域、电子技术领域、测试技术领域、焊接技术领域,等等。

一、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 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 u_1 的绕组称一次绕组(曾称原绕组、初级绕组),用于接负载的绕组称二次绕组(曾称副绕组、次级绕组)。

一次绕组加上交流电压 u_1 后,绕组中便有电流 i_1 流过,在铁心中产生与 u_1 同频率的交变磁通 Φ ,根据电磁感应原理,将分别在两个绕组中感应出电动势 e_1 和 e_2 。

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

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

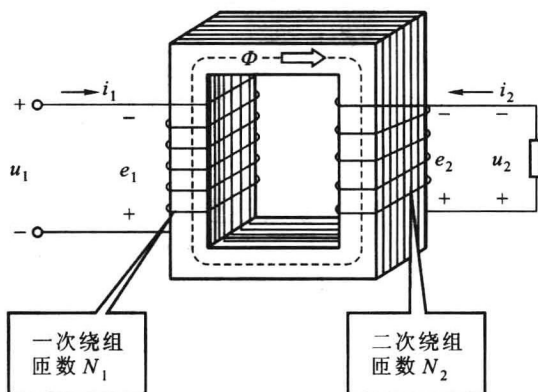


图 1-1 变压器工作原理示意图

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、变压器的用途

变压器最主要的用途是在输、配电技术领域,目前世界各国使用的电能基本上均是由各

类发电站(火力、水力、核能等)发出的三相交流电能。发电站一般均建在江、海边或远离城市的能源产地,因此,它所发出的电能向用户输送的过程中,通常需用很长的输电线,根据 $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$, 在输送功率 P 和负载的功率因数 $\cos \varphi$ 一定时,输电线路上的电压 U 越高,则流过输电线路中的电流 I 就越小。这不仅可以减小输电线的截面积,节约导体材料,同时还可减小输电线路的功率损耗。因此目前世界各国在电能的输送与分配方面都朝建立高电压、大功率的电力网系统方向发展,以便集中输送、统一调度与分配电能。这就促使输电线路的电压由高压(110~220 kV)向超高压(330~750 kV)和特高压(750 kV 以上)不断升级。目前我国高压输电的电压等级有 110 kV、220 kV、330 kV 及 500 kV 等多种。发电机本身由于其结构及所用绝缘材料的限制,不可能直接发出这样的高压,因此在输电时必须首先通过升压变电站,利用变压器将电压升高,其过程如图 1-2 上部所示。

高压电能输送到用电区后,为了保证用电安全和符合用电设备的电压等级要求,还必须通过各级降压变电站,利用变压器将电压降低。例如工厂输电线路,高压为 35 kV 及 10 kV 等,低压为 380 V、220 V 等。图 1-2 是三相电力系统输送电的示意图。

综上所述可见,变压器是输、配电系统中不可缺少的重要电气设备,从发电厂发出的电

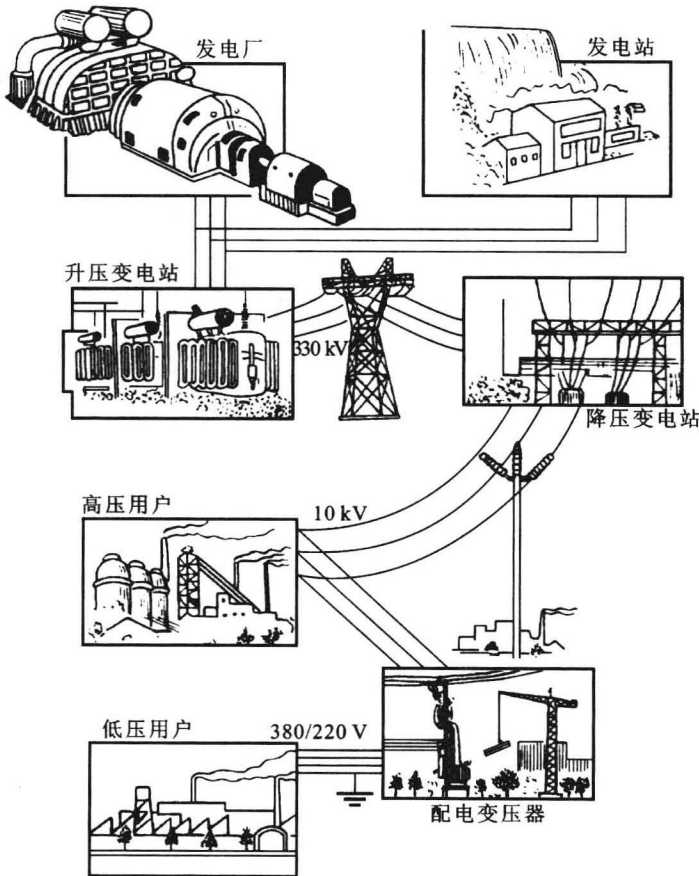


图 1-2 三相电力系统示意图

压经升压变压器升压,输送到用户区后,再经降压变压器降压供电给用户,中间最少要经过4~5次,一般是8~9次变压器的升降压。根据最近的资料显示,1 kW的发电设备需8~8.5 kV·A变压器容量与之配套,由此可见,在电力系统中变压器是容量最多的电气设备。电能传输过程中会有能量的损耗,主要是输电线路的损耗及变压器的损耗,它占整个供电容量的5%~9%,这是一个相当可观的数字。例如我国2002年发电设备的总装机容量约为3.54亿kW,则输电线路及变压器损耗的部分约为1800万kW~3200万kW,它相当于目前我国15到27个装机容量最大的火力发电厂的总和(我国三峡工程总装机容量为1820万kW)。在这个能量损耗中,变压器的损耗最大,约占60%左右,因此变压器效率的高低成为输配电系统中一个突出的问题,我国从20世纪70年代末期开始研制高效节能变压器,换代过程为SJ→S5→S7→S9→S10。目前大批量生产的是S9低损耗节能变压器,并要求逐步淘汰原来在使用中的旧型号变压器,据初步估算采用低损耗变压器所需的投资费用可在4~5年时间内从节约的电费中收回。

变压器除用于改变电压外,还可用来改变电流、变换阻抗以及产生脉冲等。

三、变压器的分类

变压器种类很多,通常可按其用途、绕组结构、铁心结构、相数、冷却方式等进行分类。

1. 按用途分类

(1) 电力变压器 用作电能的输送与分配,上面介绍的即属于电力变压器,这是生产量最多、使用最广泛的变压器。按其功能不同又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器等。

(2) 特种变压器 在特殊场合使用的变压器,如作为焊接电源的电焊变压器;专供大功率电炉使用的电炉变压器;将交流电整流成直流电时使用的整流变压器等。

(3) 仪用互感器 用于电工测量之用,如电流互感器、电压互感器等。

(4) 其他变压器 如试验用的高压变压器;输出电压可调的调压变压器;产生脉冲信号的脉冲变压器等。

2. 按绕组结构分类

有双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器等。

3. 按铁心结构分类

有叠片式铁心、卷制式铁心、非晶合金铁心变压器。

4. 按相数分类

有单相变压器、三相变压器、多相变压器。

5. 按冷却方式分类

有干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环变压器、充气式变压器等。

第二节 变压器的基本结构

一、单相变压器的基本结构

单相变压器是指接在单相交流电源上用来改变单相交流电压的变压器,其容量一般都比较小,主要用作控制及照明。它主要由铁心和绕组两部分组成。铁心和绕组也是三相电力变压器和其他变压器的主要组成部分。

1. 铁心

铁心构成变压器磁路系统,并作为变压器的机械骨架。铁心由铁心柱和铁轭两部分组成,铁心柱上套装变压器绕组,铁轭起连接铁心柱使磁路闭合的作用。对铁心的要求是导磁性能要好,磁滞损耗及涡流损耗要尽量小,因此均采用 0.35 mm 厚的硅钢片制作。目前国产硅钢片有热轧硅钢片、冷轧无取向硅钢片、冷轧晶粒取向硅钢片。20 世纪 60~70 年代我国生产的电力变压器主要用热轧硅钢片,由于其铁损耗较大,导磁性能相应地比较差,且铁心叠装系数低(因硅钢片两面均涂有绝缘漆),现已不用。目前国产低损耗节能变压器均用冷轧晶粒取向硅钢片,其铁损耗低,且铁心叠装系数高(因硅钢片表面有氧化膜绝缘,不必再涂绝缘漆)。随着科学技术的进展,目前已开始采用铁基、铁镍基、钴基等非晶带材料来制作变压器的铁心,它们具有体积小、效率高、节能等优点,极有发展前途。

根据变压器铁心的结构形式可分为心式变压器和壳式变压器两大类。心式变压器是在两侧的铁心柱上放置绕组,形成绕组包围铁心的形式,如图 1-3(a)所示。壳式变压器则是在中间的铁心柱上放置绕组,形成铁心包围绕组的形状,如图 1-3(b)所示。

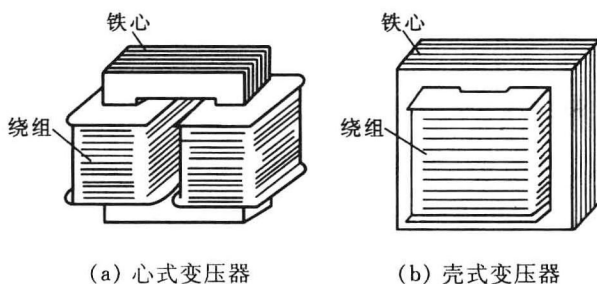


图 1-3 单相变压器结构

根据变压器铁心的制作工艺可分为叠片式铁心和卷制式铁心两种。

叠片式铁心的心式及壳式变压器的制作顺序是:先将硅钢片冲剪成如图 1-4 所示的形状,再将一片片硅钢片按其接口交错地插入事先绕好并经过绝缘处理的线圈中,如图 1-5 所示,最后用夹件将铁心夹紧。为了减小铁心磁路的磁阻以减小铁心损耗,要求铁心装配时,接缝处的空气隙应越小越好。

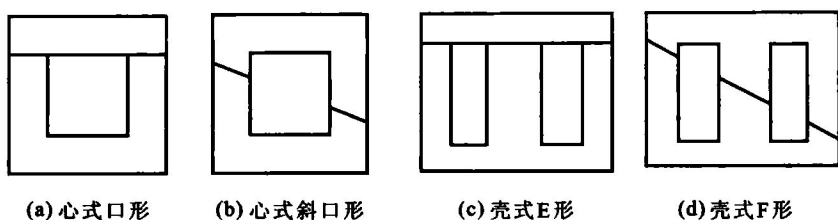


图 1-4 单相小容量变压器铁心形式

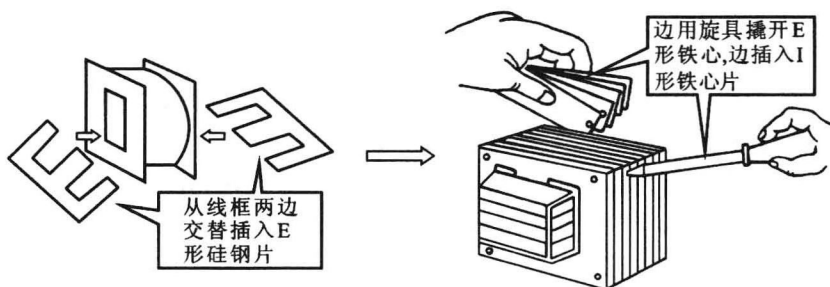


图 1-5 壳式变压器 E 形铁心的装配

卷制式铁心系用 0.35 mm 晶粒取向冷轧硅钢片剪裁成一定宽度的硅钢带后再卷制成环形,将铁心绑扎牢固后切割成两个“U”字形。如图 1-6(a)所示。而图 1-6(b)则为用卷制式铁心制成的 C 型变压器外形图。该类型变压器由于其制作工艺简单,正在小容量的单相变压器中逐渐普及。随着制造技术的不断成熟,用卷制铁心的三相电力变压器(500 kV·A 以下)将逐步代替传统的叠片式变压器,其主要优点是重量轻、体积小、空载损耗小、噪声低、生产效率高、质量稳定。

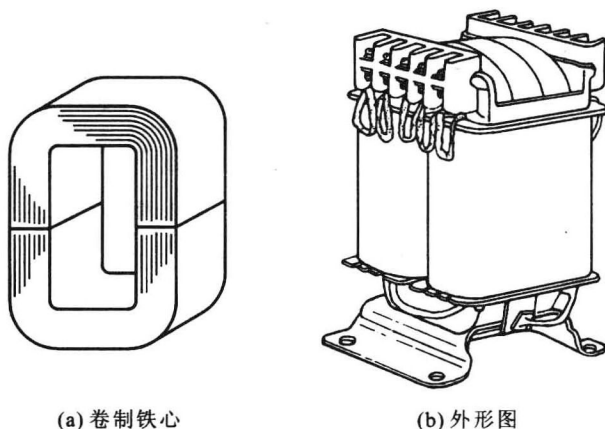


图 1-6 C 型变压器

此外,在 20 世纪 60~70 年代,还出现过渐开线式的铁心结构,由于铁心制作工艺较复杂,而未能广泛应用。

2. 绕组

变压器的线圈通常称为绕组,它是变压器中的电路部分,小型变压器一般用具有绝缘的漆包圆铜线绕制而成,对容量稍大的变压器则用扁铜线或扁铝线绕制。

在变压器中,接到高压电网的绕组称高压绕组,接到低压电网的绕组称低压绕组。按高压绕组和低压绕组的相互位置和形状不同,绕组可分为同心式和交叠式两种。

(1) 同心式绕组 同心式绕组是将高、低压绕组同心地套装在铁心柱上,如图 1-7(a)所示。小容量单相变压器一般用此种结构,通常是接电源的一次绕组绕在里层,绕完后包上绝缘材料再绕二次绕组,一、二次绕组呈同心式结构。对于电力变压器而言,为了便于与铁心绝缘,把低压绕组套装在里面,高压绕组套装在外面。对低压大电流大容量的变压器,由于低压绕组引出线很粗,也可以把它放在外面。高、低压绕组之间留有空隙,可作为油浸式变压器的油道,既利于绕组散热,又作为两绕组之间的绝缘。

同心式绕组按其绕制方法的不同又可分为圆筒式、螺旋式和连续式等多种。同心式绕组的结构简单、制造容易,小型的电源变压器、控制变压器、行灯变压器等均用这种结构。国产电力变压器基本上也采用这种结构。

(2) 交叠式绕组 交叠式绕组又称饼式绕组,它是将高压绕组及低压绕组分成若干个线饼,沿着铁心柱的高度交替排列。为了便于绝缘,一般最上层和最下层安放低压绕组,如图 1-7(b)所示。

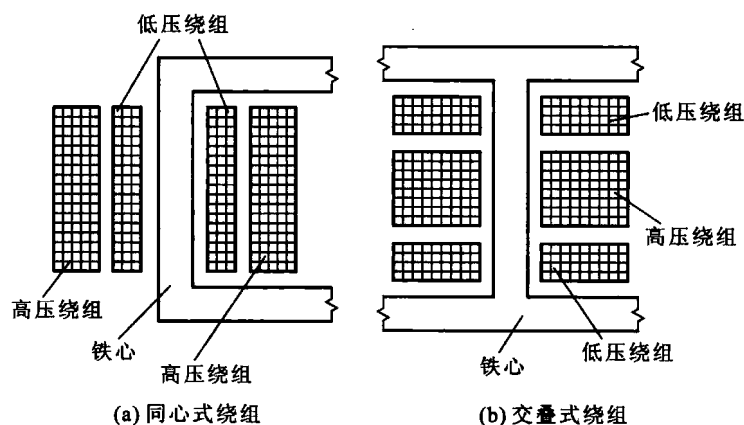


图 1-7 变压器绕组

交叠式绕组的主要优点是漏抗小、机械强度好、引线方便。这种绕组形式主要用在低电压、大电流的变压器上,如容量较大的电炉变压器、电阻电焊机(如点焊、滚焊、对焊电焊机)变压器等。

二、三相变压器的基本结构

现代的电力系统都采用三相制供电,因而广泛采用三相变压器来实现电压的转换。

三相变压器可以由三台同容量的单相变压器组成,再按需要将一次绕组及二次绕组分别接成星形或三角形联结。图 1-8 所示为一、二次绕组均用星形联结的三相变压器组。三相变压器的另一种结构型式是把三个单相变压器合成一个三铁心柱的结构型式,称为三相心式变压器,如图 1-9 所示。由于三相绕组接入对称的三相交流电源时,三相绕组中产生的主磁通也是对称的,故有 $\Phi_U + \Phi_V + \Phi_W = 0$, 即中间铁心柱的磁通为零,因此中间铁心柱①可以省略,成为(b)图形式,实际上为了简化变压器铁心的剪裁及叠装工艺,均采用将 U、V、W 三个铁心柱置于同一个平面上的结构型式,如图 1-9 (c) 所示。

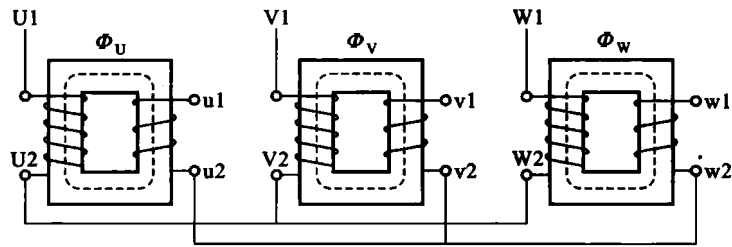


图 1-8 三相变压器组

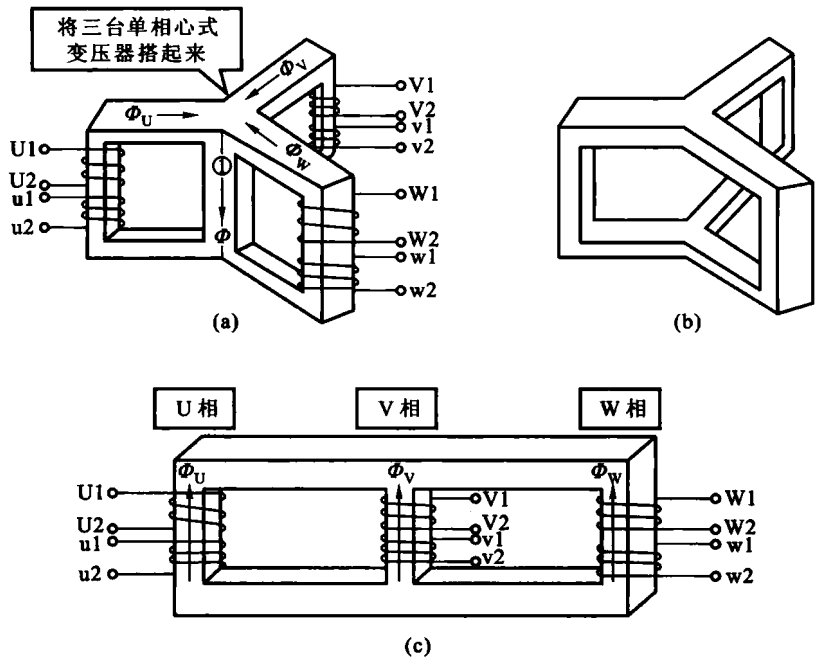


图 1-9 三相心式变压器

在三相电力变压器中,目前使用最广泛的是油浸式电力变压器,它主要由铁心、绕组、油箱和冷却装置、保护装置等部件组成,其外形如图 1-10 所示,现简介如下:

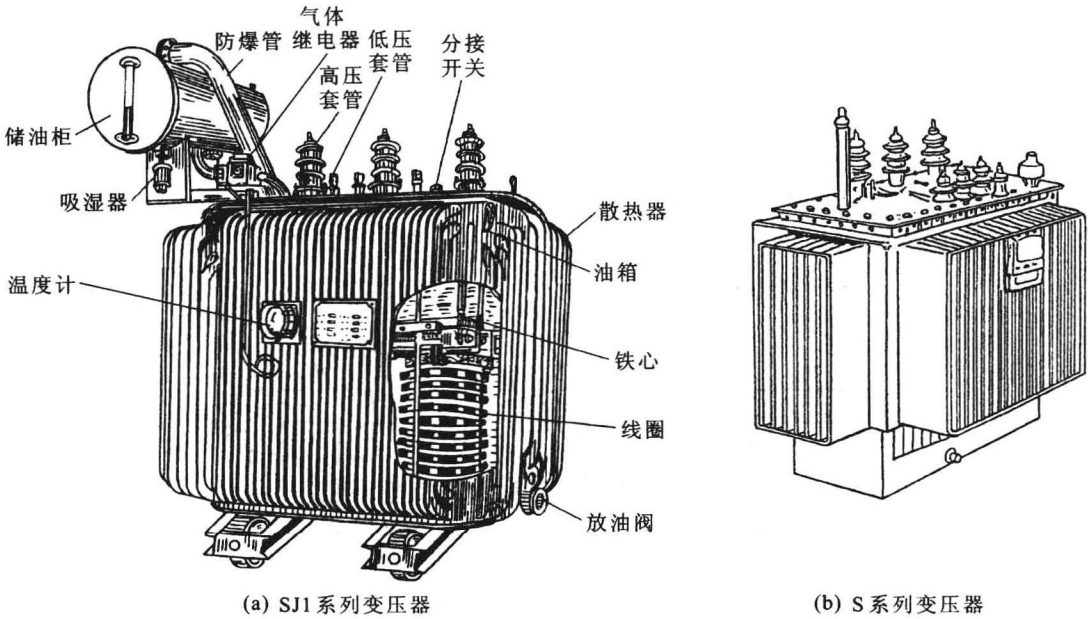


图 1-10 变压器的外形

1. 铁心

铁心是三相变压器的磁路部分,与单相变压器一样,它也是由 0.35 mm 厚的硅钢片叠压(或卷制)而成,20 世纪 70 年代以前生产的电力变压器铁心采用热轧硅钢片,其主要缺点是变压器体积大,损耗大,效率低。20 世纪 80 年代起生产的新型电力变压器铁心均用高磁导率、低损耗的冷轧晶粒取向硅钢片制作,以降低其损耗,提高变压器的效率,这类变压器称为低损耗变压器,以 S7(SL7)及 S9 为代表产品。国家电力部规定从 1985 年起,新生产及新上网的必须是低损耗电力变压器。三相电力变压器铁心均采用心式结构,如图 1-11 所示。通常心式结构的铁心采用交叠式的叠装工艺,即把剪成条状的硅钢片用两种不同的排列法交错叠放,每层将接缝错开叠装,如图 1-12 所示。交叠式铁心的优点是各层磁路的接缝相互错开,气隙小,故空载电流较小。另外交叠式铁心的夹紧装置简单经济,且可靠性高,因而在国产电力变压器中得到广泛采用。主要不足之处是铁心及绕组的装配工艺较复杂。

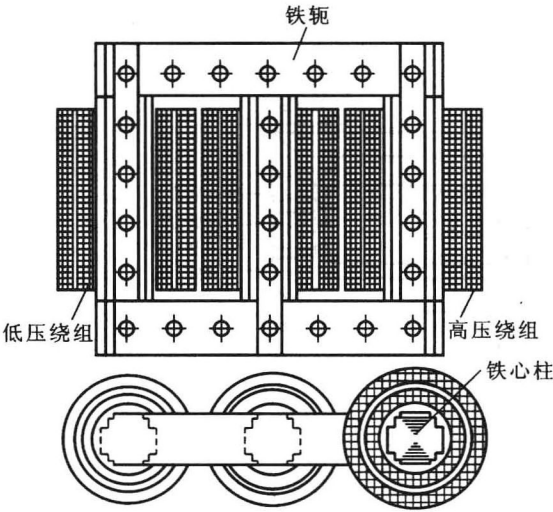


图 1-11 三相心式变压器