

技工学校教材

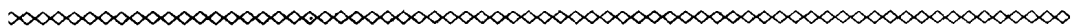
电机原理

四川省水利水电工程技工学校 何峰 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

技 工 学 校 教 材



电 机 原 理

四川省水利水电工程技工学校 何 峰 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书是根据水利部批发的、全国水利水电技工学校教育研究会 1997 年制定的“水电站机电运行与检修专业”的教学计划而编写的水电行业技工学校教材。

全书内容包括：水电站所使用的变压器、同步发电机中的水轮发电机、异步电动机和直流发电机的构造、工作原理、主要参数和运行性能。

本书通俗易懂，附有较多的插图，适于技工学校学生及同等水平的专业人员学习、使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机原理/何峰主编. —北京：中国水利水电出版社，2000

技工学校教材

ISBN 7-5084-0269-3

I. 电… II. 何… III. 电机-理论-技工学校-教材 IV. TM301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 02932 号

书 作 出	名 者 版	技工学校教材 电机原理 四川省水利水电工程技工学校 何 峰 主编 中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部) 新华书店北京发行所 全国各地新华书店
发 行 经 售	行 售	
排 印 规 版 印 定	版 刷 格 次 数 价	中国水利水电出版社微机排版中心 水利电力出版社印刷厂 787×1092 毫米 16 开本 13 印张 301 千字 2000 年 9 月第一版 2000 年 9 月北京第一次印刷 0001—3100 册 13.60 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书是根据水利部批发的、全国水利水电技工学校教育研究会制定的“水电站机电运行与检修专业”教学计划而编写的水电行业技工学校教材。由于专业的要求,本书着重介绍了水电站中常用的电机。其顺序是:变压器、同步发电机中的水轮发电机、异步电动机及直流发电机,全书介绍了这些电机的构造、工作原理及运行性能,结合技工教育和专业特点,偏重介绍了变压器及水轮发电机的构造、工作原理及水轮发电机的运行原理。使用此书时,可根据专业要求作适当取舍。本书适用于招收初中毕业生、学制为三年的技工学校“水电站机电运行与检修专业”的学生使用,也可供同等水平的水电站有关专业人员学习。

本书的变压器部分由黄河水利职业技术学院丛保银同志编写,异步电动机及直流发电机部分由广东水利电力职业技术学院吕军同志编写,同步发电机部分由四川省水利水电工程技工学校何锋同志编写并担任主编,黄河水利职业技术学院张学礼同志任主审。在本书的编写过程中得到黄河水利职业技术学院、广东水利电力职业技术学院等兄弟学校以及四川省水利水电工程技工学校唐涛同志、广东水利电力职业技术学院司徒海棋同志、黄河水利职业技术学院陈广义同志等的支持和帮助,在此,表示衷心感谢。

由于编者的理论、实践水平有限,书中的不足和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1999.12

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 变压器的基本知识	5
第一节 变压器的简单工作原理及分类	6
第二节 变压器的结构	8
第三节 变压器的铭牌	17
习题与思考题	20
第二章 单相变压器的空载运行	21
第一节 变压器空载运行时的电磁过程及电势平衡方程式	21
第二节 空载电流和空载损耗	25
第三节 变压器空载运行时的等值电路及向量图	27
第四节 变压器的空载试验	30
习题与思考题	32
第三章 单相变压器的负载运行	33
第一节 变压器负载运行时的基本电磁过程	33
第二节 变压器负载运行时的基本电磁方程式	33
第三节 变压器负载运行时的等值电路及向量图	36
第四节 变压器的短路试验	39
第五节 变压器的标么值	40
第六节 变压器的运行性能和特性	43
习题与思考题	45
第四章 三相变压器	47
第一节 三相变压器的磁路系统	47
第二节 三相变压器的联接组别	48
第三节 变压器各种联接组别的测定	56
第四节 三相变压器绕组的联接方法和铁芯磁路系统对相电势波形的影响	58
第五节 V, ∇ 联接的变压器	60
习题与思考题	61
第五章 变压器的运行	63
第一节 变压器的并联运行	63
第二节 过电流过电压简介	66
习题与思考题	69
第六章 其他变压器	70

第一节 三绕组变压器	70
第二节 电焊变压器	72
第三节 仪用互感器	73
习题与思考题	75
第七章 同步发电机的基本知识	76
第一节 同步发电机的简单工作原理及同步电机的主要类型	76
第二节 同步发电机的构造	78
第三节 同步发电机的冷却问题简述	87
第四节 同步发电机的励磁方式	89
第五节 同步发电机的铭牌	91
习题与思考题	93
第八章 同步发电机的电枢绕组	94
第一节 同步发电机的磁场	94
第二节 同步发电机电枢绕组的构成及其电势	95
第三节 分数槽绕组简介	106
习题与思考题	108
第九章 同步发电机的电势方程式、特性和参数	109
第一节 同步发电机的电枢反应	109
第二节 同步发电机各电磁量之间的基本关系	119
第三节 同步发电机的空载特性	121
第四节 短路特性和短路比	122
第五节 同步发电机的外特性和调整特性	124
第六节 同步发电机的损耗和效率	125
习题与思考题	126
第十章 同步发电机的运行	128
第一节 同步发电机并列运行的条件和投入法简介	128
第二节 与无穷大电网并列运行时有功功率的调节	133
第三节 与无穷大电网并列运行时无功功率的调节	136
第四节 与相近容量的电网并列运行	138
第五节 同步发电机的无励磁运行	140
第六节 同步发电机的不对称运行简介	142
第七节 突然短路及其对发电机本身和电力系统的影响	143
习题与思考题	148
第十一章 异步电动机的基本知识	150
第一节 三相异步电动机的工作原理	150
第二节 异步电动机的分类及结构	152
第三节 异步电动机常用的几种交流分布绕组	156
第四节 异步电动机的铭牌	159

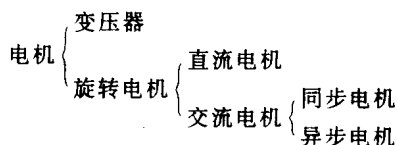
习题与思考题	161
第十二章 异步电动机的运行原理	162
第一节 转子静止时的异步电动机	162
第二节 转子旋转时的异步电动机	165
第三节 异步电动机的等值电路	167
第四节 异步电动机的电磁转矩	169
习题与思考题	174
第十三章 三相异步电动机的起动和调速	175
第一节 普通异步电动机的起动性能和起动方法	175
第二节 高起动转矩异步电动机	177
第三节 异步电动机的调速方法	179
习题与思考题	180
第十四章 单相异步电动机	181
第一节 单相异步电动机的基本知识	181
第二节 单相异步电动机的起动方法	182
习题与思考题	184
第十五章 直流发电机	185
第一节 直流发电机的基本知识	185
第二节 直流发电机的电枢绕组及电势	189
第三节 直流发电机的励磁方式	195
第四节 并励直流发电机电势的建立	196
第五节 直流电动机	197
习题与思考题	198
参考文献	199

绪 论

一、水电站中电机的作用

在现代，由于电能的生产、输送、使用、控制、管理等方面都很方便，所以电能被广泛地应用于工业、农业、交通运输、军事等各行各业及日常生活中，与此相适应，在各个领域广泛地使用着各种各样的电机。

电机的种类繁多，用途各异，分类方法也很多，一般说来，可分为下列各种类型：



应该注意的是：各种电机之间本来就具有密切的内在联系，这样分类仅仅是为了便于分析，千万不要机械地把它们割裂开。

在水电站中使用的电机主要有：变压器、同步电机中的水轮发电机、异步电机中的异步电动机和直流电机中的直流发电机。变压器是水电站中必不可少的重要设备，与旋转电机相比，变压器是一种静止的电气设备，它的作用之一是升高电压，把水轮发电机生产的电能经济地输送给距离水电站较远的用户；变压器的另一个作用是降低电压，使水电站及其附近的、以及通过高压输送获得高压电能的用户，能合理、安全地使用水轮发电机生产的电能。水轮发电机是水电站最重要的电气设备，是水电站的心脏。在水电站里，水轮机把水能转变为机械能，水轮发电机最后把水轮机获得的机械能转换为电能。水轮发电机的重要作用，就在于它是水电站里唯一的产生交流电能的电气设备。作为重要的动力设备，在水电站里广泛地使用着异步电动机，例如吊车、空气压缩机等。在水电站应用的直流发电机，主要是用作水轮发电机的励磁机，但由于换向器和电刷间经常出维修方面的问题，所以，凡是并网的水轮发电机绝大多数已改用静止半导体励磁，只有在未并网的、多数是小型的水轮发电机中，还有不少仍在继续使用直流发电机励磁。

二、学习电机学常用的基本定律

电机是根据电磁感应原理而制成的电气设备，所以，在水电站使用的电机，不论是变压器、水轮发电机，还是异步电动机、直流发电机，其构造和工作原理、运行性能等，都离不开电磁感应原理。由于电磁感应原理牵涉到电与磁两个方面，在学习、理解电机构造、工作原理时，一些牵涉到电与磁的基本定律，必须事先熟悉、掌握，这样才更有利于去掌握所学的知识。这些基本定律包括电磁感应定律、全电流定律、基尔霍夫定律及电磁力定律等。

1. 电磁感应定律

(1) 当磁场与导体有相对运动、且运动方向与磁力线垂直时，使导体运动去切割磁场中的磁力线，或使磁场运动、运动的磁场中的磁力线被静止的导体切割，在导体中都会产

生感应电动势。感应电势的表达式为

$$e = Blv$$

式中 e ——导体内的感应电势；

B ——磁场的磁通密度；

l ——导体的有效长度；

v ——导体与磁场的相对运动速度。

(2) 当与线圈相交链的磁通发生变化，即随时间的变化增加或减少时，在线圈中也会感生出感应电动势，感应电势的大小为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

式中 e ——线圈内的感应电势；

N ——线圈的匝数；

Φ ——与线圈相交链的磁通。

2. 全电流定律

作用在封闭磁路上的磁势，等于它所包围的全电流。即

$$F = Ni$$

式中 F ——磁势；

i ——流过 N 匝线圈的电流。

若电流为直流，则磁势为恒值；若电流为交流电的瞬时值，磁势也为瞬时值；电流若为有效值，磁势也为有效值。磁势的单位为安培·匝数，简称安·匝 (IN)。

3. 基尔霍夫定律

(1) 基尔霍夫第一定律。基尔霍夫第一定律又称结点电流定律，其内容为：流入电路中某结点的电流之和恒等于流出该结点的电流之和，即电路中任一结点的电流的代数和为零。其表达式为

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}}$$

或

$$\sum I = 0$$

(2) 基尔霍夫第二定律。基尔霍夫第二定律又称回路电压定律、电势平衡定律。其内容为：在闭合回路中，电动势之和恒等于所有电压降之和。其表达式为

$$\sum e = \sum U$$

或

$$\sum U = 0$$

4. 磁路规律

由于磁与电有相似的规律，基尔霍夫第一和第二定律同样可以应用到磁路上。

设 Φ 为磁路中的磁通， μ 为磁路的磁导， R_m 为磁路的磁阻， F_0 为磁势，应用欧姆定律可得

$$\Phi = F_0 \mu = \frac{F_0}{R_m}$$

如果同一磁路上有几个线圈产生几个磁势，磁通则决定于磁势的总合，即磁通决定于合成磁势。若有两个磁势时，合成磁势为

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

在磁路中，电路上的串、并联规律也同样可以应用。

5. 电磁力定律

载流导体在磁场中，会受到电磁力的作用，电磁力的大小为

$$F = Bli$$

式中 B ——磁场的磁通密度；

l ——载流导体的有效长度；

i ——载流导体中的电流。

电磁力定律主要应用于电动机和发电机求机械力矩。电磁力定律和电磁感应定律是电功率和机械功率互相转换的基础。由于旋转电机上任意一根导体的电势为

$$e = Blv$$

所以

$$\text{电功率} = ei = Blvi \quad (\text{瞬时值})$$

$$\text{机械功率} = fu = Bliv \quad (\text{瞬时值})$$

上式说明：由切割电势形成的电磁功率等于电磁力 f 所产生的机械功率。不论是在电动机或发电机中，这两种功率都是同时存在的，不同之处在于方向，在发电机中 e 和 i 同相， f 和 v 反相；在电动机中 e 和 i 反相， f 和 v 同相。这就是电机中的能量转换规律。

三、电机学的任务和学习方法

电机学是“水电站运行与检修专业”的一门主要技术基础课，它担负的任务，是使学生掌握水电站的重要电气设备——变压器、水轮发电机、电动机、直流发电机的构造、工作原理和运行性能等。在学习电机知识的过程中，应该首先熟练掌握分析电机的基本定律，并学会运用这些定律对电机的构造、原理、性能及操作方面的问题进行分析。

为了能达到“熟悉、牢记电机较完整的构造；深刻理解、掌握电机的工作原理以及主要参数和运行性能；有重点地去认识、掌握一些电机运行中的问题”这一教学要求，学习电机学时，应注意下列几点：

(1) 有关电、磁的基本定律，特别是电磁感应定律等，对分析、认识电机十分有用，应认真学习、牢固掌握。

(2) 学习电机的构造，不能只满足于去掌握电机的基本组成或主要部件，因为水电站为了保证按质、按量、长期、低耗地供给用户电能，各种电机除了主要部件外，还必须有不少的“附件”或结构。例如，所有电机为了能长期运转，都面临一个解决“温升”的问题，这就要求在电机的构造上还必须配置一些附件或采用一些特殊的结构，以提高电机的额定温升。因此，在学习电机构造时，除了要重视主要部件外，还应根据不同专业重点学习相应的特殊结构或附件，对水电站中的电机有一个完整的概念及形象。

除此之外，学习电机的构造时，还应对各种电机进行比较，找出各种电机在结构上的共同点及不同点，以便深刻地了解电机的构造。

(3) 学习电机的工作原理或运行原理，应以弄清电磁过程为主。各种电机在运行过程中，或者进行着电生磁的过程，或者进行着磁生电的过程，或者进行着电生磁、磁生电同时发生的过程等等。以电磁过程本身发生的先后或时间等为顺序，随着电磁过程的一步一步的发展变化，电机的工作原理就自然清楚地显现出来了。

电磁过程是一个客观存在，以这个客观存在为依据去介绍工作原理，有利于初学者理解和记忆，更有利于初学者运用基本电磁原理去分析电机，提高他们独立分析、认识电机的能力。

(4) 学习电机学时，应特别注意理论与实践的结合。这既利于学生对理论知识的掌握，又为学生今后从事水电站的实际工作打下了一定的基础。解决这个问题的办法，除了理论教学时尽可能多的采用挂图、使用模型外，有条件的，应多进行小型变压器、小型水轮发电机、电动机等各种电机的拆装练习，还应该有计划地参观几个典型的水电站，熟悉水电站中各种电机的布置状况、构造、运行原理及其操作。

(5) 每章后附有“习题及思考题”，其目的在于巩固学生所学知识以及如何运用所学知识去分析、解决实际问题。结合技工教育的特点，有些章节的“习题及思考题”偏细偏多，任课教师可在巩固学生所学的前提下，结合学生具体情况选用或增减。希望学生能在教师指导下认真完成作业，愿学生及自学者在做习题中及学习本课程的思索摸索出一套认识电机的基本方法。

第一章 变 压 器 的 基 本 知 识

变压器是电力系统中十分重要的电气设备。变压器是一种通过电磁感应作用，把一种电压的交流电能变换成频率相同的另一种电压的交流电能的静止的电气设备。所以，变压器的主要作用是用来改变交流电压。

电力系统中需要改变电压的原因如下。因为发电机发出的电能要通过输电线路输送给用户，在输送过程中，输电线上的电阻要产生电压降和能量损耗，因为电压降与电流成正比，功率损耗与电流的平方成正比，为了减少电压降及降低损耗，最有效的方法是减小电流。电流减小，输电线的截面积即可减小，节约了有色金属。但当电流减小时，若要输送一定量的功率，则必须提高电压，而发电机输出电压要受到绝缘材料的限制，不可能提得太高，一般中型和大型发电机的输出电压等级有 6.3kV、10.5kV、15.75kV 等。为了提高

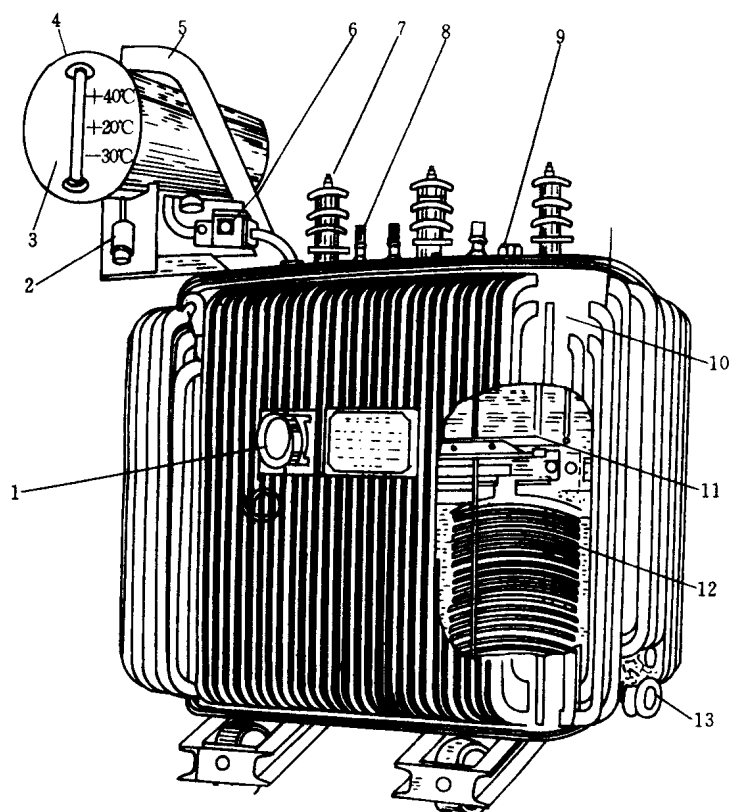


图 1-1 油浸式电力变压器

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—高压导管；8—低压导管；9—分接开关；
10—油箱；11—铁芯；12—绕组及绝缘；13—放油阀门

输电效率、减少输电线路上的损耗，通常将发电机发出的电压升高后，再进行远距离输送。目前，我国远距离交流输电电压有 110kV、220kV、500kV 几个等级，世界上正在实验的最高输电电压是 1000kV，如此高的电压是无法直接用于电气设备的。一方面，用电设备的绝缘材料不可能具备如此高的耐压等级，另一方面使用也不安全。所以，需要通过降压变压器将高电压降到用户所需用的电压后才能使用。通常，电能从发电厂（站）到用户的整个输送过程中，需要经过 3~5 次变换电压，由此可见，在电力系统中，变压器对电能的经济传输、合理分配和安全使用具有十分重要的意义。像这种用于电力系统中传输电能的变压器，称为电力变压器。图 1-1 为油浸式电力变压器的外形图。

电力变压器是本课程研究的重点之一。内容包括第一章至第六章，主要是介绍变压器的构造、工作原理以及主要参数和运行性能。除此之外，其它用途的变压器，本课程也作些简单介绍。

第一节 变压器的简单工作原理及分类

一、变压器的简单工作原理

1. 简单变压器的构造

变压器是应用电磁感应原理来进行能量转换的，所以变压器是由电路和磁路两部分组成。如图 1-2 所示。变压器的电路是指套装在铁芯上的两个或多个绕组，这两个或多个绕组的匝数不同，其中与电源相接的绕组称为原绕组、原边或一次绕组、一次侧，其首末两端分别以大写的 U_1 、 U_2 表示。与负载相接的绕组称为副绕组、副边或二次绕组、二次侧，其首末两端分别以小写的 u_1 、 u_2 表示。有关一次侧的各量均用下标“1”标注，如一次电压 U_1 、一次电流 I_1 、一次绕组的匝数 N_1 等。相应的二次侧的各量则用下标“2”标注。变压器的磁路是指变压器中闭合的铁芯。铁芯与绕组之间、绕组与绕组之间是互相绝缘的。

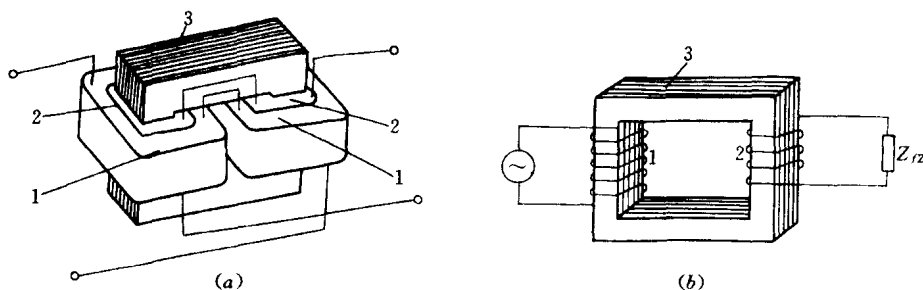


图 1-2 变压器原理

1—原绕组；2—副绕组；3—铁芯； Z_L —负载

2. 变压器的简单工作原理

当变压器的原绕组接通交流电源时，原绕组中就有交流电流流过，形成交变磁势，在铁芯中产生了交变磁通，磁通不仅穿过了原绕组，同时也穿过了副绕组。根据电磁感应原理可知，交变磁通在原绕组感应产生了电动势的同时，在副绕组中也感应产生了电势，此时，若副绕组接上负载形成闭合回路，在副边电动势作用下，副绕组就有交流电能对外输

出，实现了交流电能由原边向副边的传递。这时，原绕组感应电势的大小接近于外加电源电压，副绕组感应电势的大小则接近于负载的端电压。

假如构成绕组的导线截面积相等，原、副绕组的每匝导线长度相同（例如自耦变压器），则交变磁通在原、副绕组每匝中感应的电势相同，此时，只要改变原、副绕组的匝数，便可达到改变副绕组输出电压大小的目的。

由上述可知，一、二次绕组匝数不等，是变压器能够变压的关键；交链一、二次绕组的磁通，是传递电能的桥梁。

二、变压器的分类

变压器的种类很多，一般分为电力变压器和特种变压器两大类。

1. 电力变压器

(1) 按用途分：

- 1) 升压变压器；
- 2) 降压变压器；
- 3) 配电变压器；
- 4) 联络变压器；
- 5) 厂用电变压器（供发电厂本身用电）。

(2) 按冷却条件分：

- 1) 油浸自冷变压器；
- 2) 油浸风冷变压器；
- 3) 油浸水冷变压器；
- 4) 强迫油循环风冷变压器；
- 5) 强迫油循环水冷变压器；
- 6) 干式空气自冷变压器；
- 7) 干式浇铸绝缘变压器。

(3) 按调压方式分：

- 1) 有载调压变压器；
- 2) 无励磁调压变压器。

(4) 按绕组数量分：

- 1) 双绕组变压器；
- 2) 三绕组变压器；
- 3) 多绕组变压器；
- 4) 自耦变压器。

(5) 按相数分：

- 1) 单相变压器；
- 2) 三相变压器。

(6) 按铁芯结构分：

- 1) 芯式变压器；
- 2) 壳式变压器；

3) 渐开线式变压器;

4) 环形变压器。

2. 特种变压器

按用途分有: 电焊变压器、整流变压器及仪用互感器等。

变压器的用途广泛, 品种繁多, 容量从小到几伏安、大到几十万伏安, 以满足不同场合和各种用途的需要。但不论哪种变压器, 其工作原理都是基于电磁感应原理而工作的。

变压器除主要用于变换交流电压外, 还可以变换电流, 以及变换阻抗、改变相位等。

第二节 变 压 器 的 结 构

变压器的结构, 从理论上讲, 只要有不同匝数的绕组和一个能束缚磁通以形成闭合磁路的铁芯, 就可构成变压器。因此, 变压器的主要结构是铁芯和绕组。实际上, 为了使变压器能够安全和更有效地工作, 还装设了其它一些附件。

一、铁芯

铁芯是变压器的磁路部分, 又是套装绕组的骨架, 铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成。套装绕组的铁芯部分称为铁芯柱, 连接铁芯柱之间的部分称为铁轭, 铁轭使整个铁芯构成闭合磁路。

1. 铁芯材料

为了减少涡流和磁滞损耗, 铁芯一般用高磁导率的磁性材料——硅钢片叠成, 硅钢片因加工方式不同分热轧和冷轧两种。冷轧硅钢片比热轧硅钢片磁导率高、损耗小, 一般当磁通密度达到 1.45T (特斯拉) 时, 热轧硅钢片开始饱和, 而冷轧硅钢片在 1.7T 时才开始饱和。另外, 冷轧硅钢片一般还具有方向性, 热轧硅钢片没有明显的方向性。作为电力变压器所用的硅钢片, 对其要求是:

(1) 有高的导磁率 μ 。因为在一定的磁场强度 H 下, 导磁率越高, 要传递一定量的磁通所需要的硅钢片材料越少, 铁芯的体积就越小, 因此, 可以节约导线和降低导线电阻所引起的损耗。导磁率越高, 要产生一定量的磁通所需的励磁电流将相应的减少, 导线上的损耗也会随之降低。为此, 我国大容量电力变压器常采用高导磁率的单取向冷轧硅钢片材料。所谓“单取向”是指铁磁材料沿某一方向的磁性能最好, 在这一方向上, 材料极易磁化, 呈现出较高的导磁率。如果在硅钢片的制作过程中, 使易磁化方向与硅钢片的轧制方向一致, 就可以得到单取向冷轧硅钢片。

(2) 要求在一定的频率和磁感应强度下具有较低的铁损耗。为此, 常在铁磁材料中掺入少量的硅, 从而形成硅钢片。但是, 随着含硅量的增加, 会使材料的其它性能变差。因此, 目前生产的硅钢片, 其含硅量一般不超过 4.5% 。为了降低涡流损耗, 硅钢片的厚度应减薄, 通常取 0.35mm 和 0.5mm 两种厚度。硅钢片的表面必须薄薄地涂覆一层绝缘漆, 使其片与片之间彼此绝缘, 真正起着薄层的作用。

2. 铁芯结构

根据结构形式和工艺特点, 变压器铁芯主要有叠片式和渐开线式两种。其中叠片式铁

芯又分为芯式和壳式两类。

(1) 芯式结构的特点是：绕组包围着铁芯柱，铁轭靠着绕组的上方和下方，如图 1-3 (a) 所示。由于芯式结构比较简单，绕组装配及绝缘处理工艺容易，因此为国产电力变压器普遍采用。

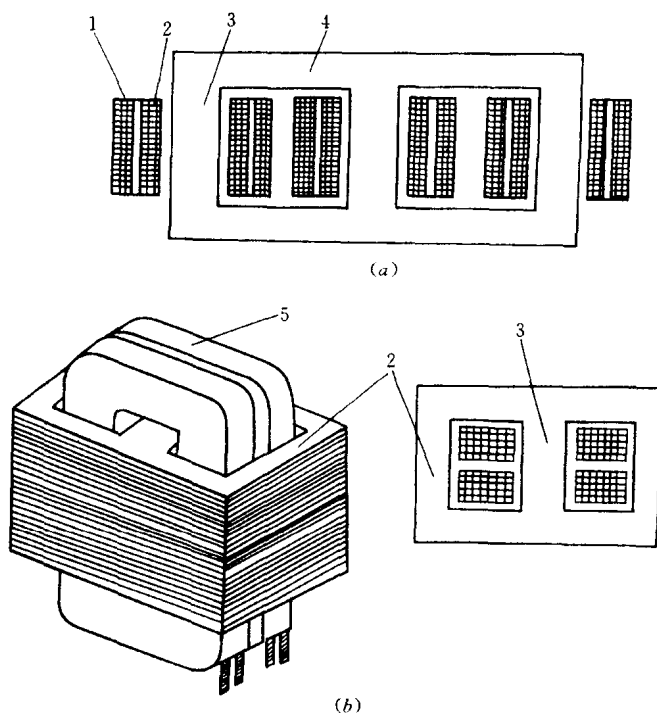


图 1-3 叠片式铁芯

(a) 芯式铁芯；(b) 壳式铁芯

1—高压绕组；2—低压绕组；3—铁芯柱；4—铁轭；5—绕组

(2) 图 1-3 (b) 为单相壳式变压器的示意图。壳式结构的特点是：铁芯包围着绕组，铁轭不仅包围了绕组的上、下方，而且还包围了绕组的侧面，故称壳式结构。壳式结构机械强度高，但制造工艺复杂，铁芯用材多，散热性能差，所以多用于小型变压器中。

(3) 渐开线式铁芯仍由铁芯柱和铁轭两部分组成，多用于三相变压器中。其结构特点是：铁芯柱是由卷压成渐开线形状的硅钢片叠成圆柱形，三个铁芯柱成等边三角形放置，铁轭是由同一宽度的硅钢带卷制成三角形，安放在铁芯柱的上方和下方。铁芯柱和铁轭采用对接方式装配，依靠螺栓紧固在一起，形成对称的三相磁路系统。如图 1-4 所示。

渐开线式铁芯的优点是：①铁芯柱及铁轭都是由同种尺寸规格的硅钢片叠成，故适合于机械化流水作业生产；②铁轭部分的磁通，仅为铁芯柱磁通的 $1/\sqrt{3}$ ，故可降低铁轭高度；③由于三铁芯柱组成等边三角形，相应地油箱为圆形，这可以节约钢材和变压器油。缺点是：空载电流及损耗较大。因此，只能用于大批量生产的中、小型变压器中。

3. 铁芯叠装

变压器的铁芯，一般是先将硅钢片裁成条形，然后进行叠装。根据铁芯柱与铁轭在装

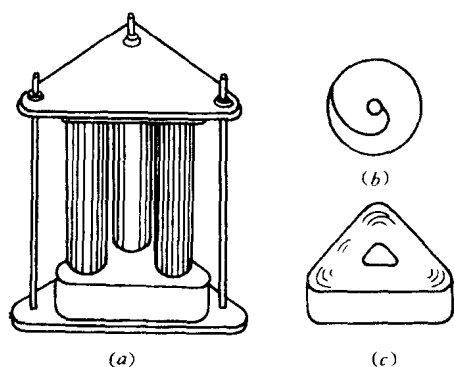


图 1-4 渐开线式铁芯
(a) 渐开线铁芯；
(b) 渐开线形状；(c) 磁轭

配方面的不同，叠片式变压器铁芯的叠装可分为对接式和叠接式两种。

(1) 对接式铁芯的叠装。其叠装的顺序是：先将铁芯柱和铁轭分别叠装，然后再组装在一起。铁芯柱和铁轭间放一层耐热的绝缘垫片，以避免铁芯柱和铁轭间的涡流。这种叠装方式的特点是：装配简单，拆卸方便，但接缝处气隙大，因而励磁电流较大，运行中噪音较大，铁芯柱与铁轭间易造成短路而引起变压器过热，甚至烧坏。所以，其应用尚有局限性。目前，一般变压器，尤其是较大容量的变压器，都采用叠接式铁芯。

(2) 叠接式铁芯的叠装。其叠装顺序是：将铁芯柱和铁轭的硅钢片分层交错叠置，使相邻两层叠片接缝错开，每一层的接缝都被邻层的硅钢片盖住。为了减少装配工时，一般用两三片作一层。用这种叠装方法叠成的铁芯，气隙小，导磁性能高。

叠接式铁芯，按接缝不同，可分为直接缝、斜接缝和半直半斜接缝。如图 1-5 所示。

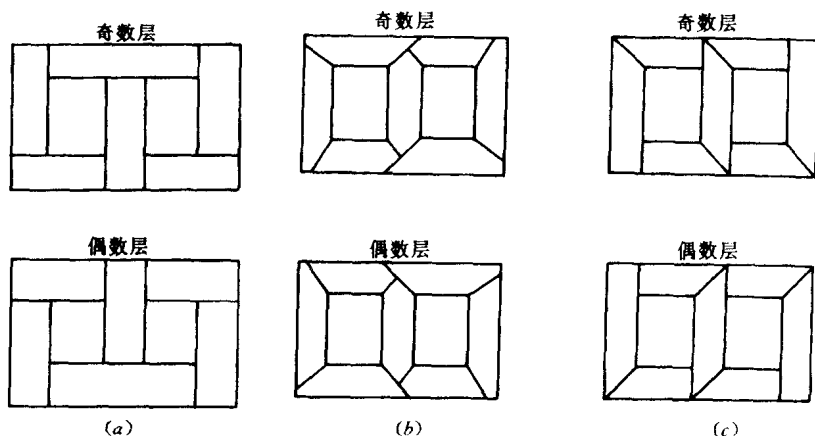


图 1-5 三相铁芯叠片叠积图
(a) 直接缝；(b) 斜接缝；(c) 半直半斜接缝

直接缝适用于热轧硅钢片，对于冷轧硅钢片，考虑其方向性，避免在直接缝处磁力线与硅钢片碾压方向垂直相交，常采用斜接缝，以降低转角处的铁损耗，但带来了叠装上的难度。为了简化叠装工艺，常采用半直半斜接缝。半直半斜接缝的铁损耗，介于直接缝和斜接缝之间。实践证明，采用冷轧单取向硅钢片的中型变压器，半直半斜接缝比直接缝空载损耗可降低 5%~7%，空载电流降低 10%~20%。若采用全斜接缝，各项指标会降低更多。

4. 铁芯油道

铁芯直径较大时，为使铁芯内部散热良好，在铁芯叠片间留有油道，如图 1-6 (a) 所示。一般铁芯直径在 430mm 以上时，就开始有油道。在直径更大的铁芯上，还有与硅钢片垂直的油道。垂直的油道比平行的油道散热好，但结构复杂，如图 1-6 (b) 所示。