



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电机与拖动

朱毅 徐木政 主编



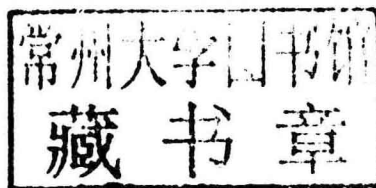
中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电机与拖动

朱毅 徐木政 主编



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书为高职高专电气类专业规划教材。全书共分 10 章, 主要内容包括变压器、交流电机绕组及其电动势和磁动势、异步电机、电力拖动基础知识、异步电动机的电力拖动、同步电机、直流电机、直流电动机的电力拖动、控制电机和电力拖动系统中电动机的选择等。每章末都配有小结和思考与习题。本书内容编排合理, 层次分明, 重点突出, 概念阐述清楚、准确, 内容深入浅出, 通俗易懂。

本书可作为高职高专院校电气自动化技术、供用电技术和机电一体化技术等专业的教材, 也可供有关电气工程技术人员学习参考或作为培训用书。

## 图书在版编目 (C I P) 数据

电机与拖动 / 朱毅, 徐木政主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 6  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5084-9849-2

I. ①电… II. ①朱… ②徐… III. ①电机—高等职业教育—教材②电力传动—高等职业教育—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第116708号

|      |                                                                                                                                                                                                                            |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 普通高等教育“十二五”规划教材<br><b>电机与拖动</b>                                                                                                                                                                                            |
| 作 者  | 朱毅 徐木政 主编                                                                                                                                                                                                                  |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www. waterpub. com. cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub. com. cn</a><br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心 (零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                              |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                                                                                                            |
| 印 刷  | 北京纪元彩艺印刷有限公司                                                                                                                                                                                                               |
| 规 格  | 184mm×260mm 16 开本 19.25 印张 456 千字                                                                                                                                                                                          |
| 版 次  | 2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷                                                                                                                                                                                          |
| 印 数  | 0001—3000 册                                                                                                                                                                                                                |
| 定 价  | <b>36.00 元</b>                                                                                                                                                                                                             |

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

本书是根据教育部《2010年工作要点》中关于“深化职业教育人才培养、专业设置、课程教材、教学方法和评价办法改革”内容,以及《国家中长期教育改革与发展规划纲要》等文件精神,并依照中国水利水电出版社关于“出版符合教学改革需要的高质量省部级‘十二五’规划教材”的要求编写而成的。

为适应高职高专人才培养目标要求和我国职业技术教育课程改革的基本思路,本教材力求明确层次与定位,博采众长。按照课程教学要求,在教材编写过程中努力贯彻相应的教学改革指导思想,做到“教师好教,学生好学”。同时,编写着重贯彻以能力为本的思想,在理论上以“适度、够用”为原则,淡化学科的系统性和完整性,着重物理概念的阐述与讨论,增加电机及拖动理论与工程实际联系的内容,力求做到内容精炼、重点突出、建立概念、掌握方法。

电机及电力拖动是工业电气自动化、供用电技术和机电一体化技术等专业的一门重要的专业基础课。本书包括电机和电力拖动两大部分内容,全书共分10章,每章由学习目标、课程内容、小结和思考与习题几个部分组成。

本书编写人员及编写内容分工为:福建水利电力职业技术学院朱毅老师负责编写绪论、第2章至第6章和第9章;福建水利电力职业技术学院徐木政老师负责编写第1章;福建水利电力职业技术学院茹反反老师负责编写第7章、第8章和第10章。本书由朱毅和徐木政担任主编,朱毅负责全书统稿,福建电力职业技术学院邱云兰老师担任主审。

本书在编写过程中参考了部分相关教材和技术文献,在此向相关作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2012年3月

## 前言

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 绪论                    | 1   |
| 第1章 变压器               | 4   |
| 1.1 变压器的基本工作原理与结构     | 4   |
| 1.2 变压器的空载运行          | 11  |
| 1.3 变压器的负载运行          | 19  |
| 1.4 变压器的参数测定及标么值      | 26  |
| 1.5 变压器的运行特性          | 32  |
| 1.6 三相变压器             | 36  |
| 1.7 变压器的并联运行          | 45  |
| 1.8 其他变压器             | 50  |
| 小结                    | 57  |
| 思考与习题                 | 59  |
| 第2章 交流电机绕组及其电动势和磁动势   | 62  |
| 2.1 交流电机绕组的构成         | 62  |
| 2.2 交流电机绕组的电动势        | 73  |
| 2.3 交流电机绕组的磁动势        | 80  |
| 小结                    | 87  |
| 思考与习题                 | 87  |
| 第3章 异步电机              | 89  |
| 3.1 三相异步电动机的基本工作原理与结构 | 89  |
| 3.2 三相异步电动机的空载运行      | 97  |
| 3.3 三相异步电动机的负载运行      | 101 |
| 3.4 异步电动机的功率和电磁转矩     | 108 |
| 3.5 三相异步电动机的工作特性和参数测定 | 112 |
| 3.6 单相异步电动机           | 115 |
| 小结                    | 119 |
| 思考与习题                 | 121 |

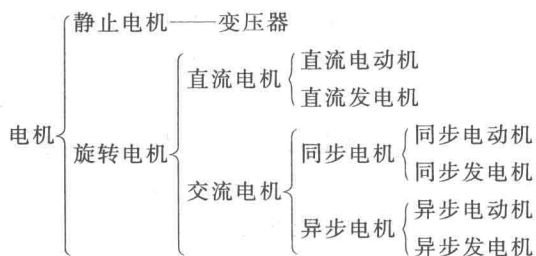
|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第4章 电力拖动基础知识</b> .....     | 123 |
| 4.1 拖动系统运动方程和多轴系统转矩的折算 .....  | 123 |
| 4.2 生产机械的负载特性 .....           | 128 |
| 4.3 电力拖动系统的稳定运行 .....         | 130 |
| 小结 .....                      | 132 |
| 思考与习题 .....                   | 132 |
| <b>第5章 异步电动机的电力拖动</b> .....   | 134 |
| 5.1 三相异步电动机的机械特性与实用转矩公式 ..... | 134 |
| 5.2 三相异步电动机的启动概述 .....        | 140 |
| 5.3 三相笼式转子异步电动机的启动 .....      | 141 |
| 5.4 三相绕线式异步电动机的启动 .....       | 146 |
| 5.5 深槽式和双笼式异步电动机 .....        | 149 |
| 5.6 三相异步电动机的反转与制动 .....       | 151 |
| 5.7 三相异步电动机的调速 .....          | 156 |
| 5.8 三相异步电动机的异常运行和常见故障 .....   | 165 |
| 小结 .....                      | 173 |
| 思考与习题 .....                   | 174 |
| <b>第6章 同步电机</b> .....         | 177 |
| 6.1 同步电机的基本工作原理和结构 .....      | 177 |
| 6.2 同步发电机 .....               | 181 |
| 6.3 同步电动机 .....               | 190 |
| 6.4 同步电动机调相运行及同步调相机 .....     | 194 |
| 小结 .....                      | 196 |
| 思考与习题 .....                   | 197 |
| <b>第7章 直流电机</b> .....         | 199 |
| 7.1 直流电机的基本原理与结构 .....        | 199 |
| 7.2 直流电机的电枢绕组 .....           | 204 |
| 7.3 直流电机的电枢反应 .....           | 211 |
| 7.4 直流电机的换向 .....             | 215 |
| 7.5 直流电机的电枢电势与电磁转矩 .....      | 220 |
| 7.6 直流发电机 .....               | 222 |
| 7.7 直流电动机 .....               | 227 |
| 小结 .....                      | 229 |
| 思考与习题 .....                   | 230 |
| <b>第8章 直流电动机的电力拖动</b> .....   | 231 |
| 8.1 直流电动机的机械特性 .....          | 231 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 8.2 直流电动机的启动 .....                 | 237 |
| 8.3 直流电动机的调速 .....                 | 241 |
| 8.4 直流电动机的反转与制动 .....              | 250 |
| 小结 .....                           | 258 |
| 思考与习题 .....                        | 259 |
| <b>第 9 章 控制电机</b> .....            | 262 |
| 9.1 伺服电动机 .....                    | 263 |
| 9.2 测速发电机 .....                    | 268 |
| 9.3 步进电动机 .....                    | 270 |
| 9.4 微型同步电动机 .....                  | 272 |
| 9.5 自整角机 .....                     | 274 |
| 9.6 旋转变压器 .....                    | 279 |
| 小结 .....                           | 283 |
| 思考与习题 .....                        | 285 |
| <b>第 10 章 电力拖动系统中电动机的选择</b> .....  | 286 |
| 10.1 概述 .....                      | 286 |
| 10.2 电动机的发热与冷却 .....               | 287 |
| 10.3 电动机的绝缘材料及允许温升 .....           | 289 |
| 10.4 电动机的工作制 .....                 | 290 |
| 10.5 电动机容量的选择 .....                | 291 |
| 10.6 电动机种类、额定电压、额定转速和结构型式的选择 ..... | 298 |
| 小结 .....                           | 300 |
| 思考与习题 .....                        | 300 |
| <b>参考文献</b> .....                  | 302 |

# 绪 论

## 1. 电机的分类与电力拖动

当今世界最主要的能源是电能。电机是指利用电磁感应原理，实现机电能量转换的机械装置，是生产、传输、分配及应用电能的主要设备。在实际生产应用中，有许许多多的各种类型的电机。这些电机可以按不同的方法进行分类。如按电流的种类来分，有交流电机和直流电机；按电机职能分，有变压器、发电机、电动机、控制电机（主要应用在自动控制 and 测量领域中）。现将主要用作机电能量转化的各种电机归纳如下：



发电机的作用是把机械能转变成电能，即发电；电动机的作用是把电能转变成机械能，作为拖动各种生产机械设备运转的动力，是工矿企业和社会各部门使用最多的动力机械，也是实现生产过程的机械化和自动化的最主要电气设备，各种电动机所消耗的电能占全国发电量的 55%~65%；变压器的作用是升高或降低电压，升高电压是为了减小输电线路的损耗，实现远距离、大容量经济地传输电能，降低电压是为了安全使用电能。可见，本课程研究的对象——变压器、电动机和发电机是电力能源应用的主要设备。

在现代工农业生产过程和交通运输中，为了实现各种生产工艺过程，需要使用各种各样的生产机械。而拖动这些生产机械运转的方法有三种：气动、液压拖动和电力拖动。由于电力拖动控制简单、方便、经济，能实现远距离控制，并能实现自动调节的功能，因此在大多数生产机械中都采用电力拖动。所谓电力拖动就是用电动机拖动各种生产机械运转，实现工农业生产过程的机械化和自动化。这其中，变压器和发电机是电力工业的主要设备。而各类电动机则是工业企业中用以拖动各类机械设备的动力之源。另外，各种微、特电机广泛地应用在自动控制领域，作为检测、转换、执行等元件。

## 2. 电机与电力拖动的发展概况

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。1831 年，法拉第发现了电磁感应现象，为电机的产生奠定了基础，1933 年，楞次证明了可逆原理，1889 年，多里·多勃罗沃尔斯基提出三相制，设计和制造了第一台三相变压器和三相异步电动机。从此以后，电机技



术不断发展和完善,由于冷却技术、材料性能不断改进,电机的容量不断增大,性能不断提高,应用日益广泛。20 世纪下半叶,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、智能化时代转变;推动了新一代高性能电机驱动系统与伺服系统的研究与发展。

电机的发展也伴随着电力拖动技术的发展。电力拖动是电动机在拖动系统中作为动力机械装置和元件拖动机械做功的运行方式。电力拖动又称电气拖动或电力转动。

电力拖动系统是主要由电动机、传递机构和工作机械等装置组成的机电一体化系统。电力拖动的任务就是使电动机实现由电能向机械能的转换,完成拖动机械装置进行启动、运行、调速、制动等工作,因此,电动机是电力拖动的关键。电动机出现后,电力拖动大量替代了蒸汽和水力拖动。最初为“组拖动系统”,一台电机拖动一组生产机械,通过大量的轴传动、皮带传动实现能量从电动机到机械装置的传递。20 世纪上半叶以来,大量采用“单电动拖动系统”,一台电机拖动一台生产机械,便于通过对电动机的控制,实现对机械装置的电气控制,从而实现生产自动化。但随着机械装置的要求日益提高,很多机械装置为完成复杂的工作,使用了大量的机械传动机构,由于机械零件加工技术和机械自身特性所限,使得系统难以达到所要求的传动控制和传动精度;因此,往往使用“多电动机拖动系统”,即在一个机械装置中,每个部件的每个传动工作或运动方式均由一台电机拖动,使得传动机构大大减少,从而简化机械系统,提高传动精度。

同时,随着自动化元件和控制技术发展,通过对每台电机的控制,可以对机械装置的每个工作动作进行电气控制,实现自动化电机拖动系统。

近年来,计算机技术、微电子技术、电力电子技术、现代控制技术以及网络通信等新技术的发展和广泛应用,采用微电子、计算机技术与控制技术的结合改造传统产业,从而实现高性能、电子化、小型化、智能化的电机拖动系统。

无论是哪一类电机,无论技术如何向前发展,电机都是通过电磁感应原理,实现能量的转换和控制的,本课程所研究的内容主要是各类电机的基本原理和特性,是电机及拖动技术的理论基础。

### 3. 本课程的性质、任务和内容

《电机与电力拖动》这门课程是电气自动化、供用电技术和机电一体化等专业的一门专业基础课程。由于电机大量在拖动系统中作为动力机械装置和元件使用,我们有必要研究其基本原理、电气特性、机械特性以及在系统中的匹配问题。

本课程主要讲述电机的基本理论及其在电力拖动系统中的应用,包括直流电机及拖动、变压器、交流电机及拖动、控制电机及电力拖动系统中电动机的选择等几部分内容。

通过学习本课程,应掌握直流电机、变压器、交流异步电机、同步电机的工作原理、电磁过程、基本方程式、等效电路等内容。电力拖动部分主要掌握直流电动机、异步电动机的各种机械特性、电动机的启动、调速、制动运行的特性分析及其相关计算等内容;掌握选择电机的原理与方法;了解电机与电力拖动系统的实验方法与发展方向。

### 4. 分析电机常用的基本电磁定律

各种类型的电机都是利用电磁感应原理来实现机电能量转换的,都存在电路和磁路两大部分。因此,在分析电机原理时,经常需要用到电路和磁路的一些基本定律。最常用



的是：

- (1) 法拉第电磁感应定律。
- (2) 安培全电流定律。
- (3) 电磁力定律。
- (4) 基尔霍夫定律。
- (5) 能量守恒定律。

#### 5. 本课程的特点及学习方法

《电机与电力拖动》这门课既是一门理论性很强的技术基础课，又具有专业课的性质。在本课程的学习过程中，应在对本书进行充分阅读的基础上，注意对基本原理的掌握和基本概念的理解。在本书中，每一章节的小结中均列出了重点和要点，需注意对这些知识点的学习，在初始学习时，有些知识点的联系可能较为松散，只有对这些知识点进行及时消化和记忆，才能建立较系统的知识体系。在学习过程中，还要注意进行比较，比如对变压器、异步电机和同步电机的相关比较，可以使我们准确把握相关基本概念，明确各类电机特点，有利于电机理论系统化。同时还需注意与实践的结合，运用相关的知识要点解释和解决具体的生产生活中电机和拖动的问题。

# 第1章 变 压 器

## 学习目标：

熟悉变压器工作原理；了解电力变压器主要部件的名称及作用；了解变压器铭牌数据的意义；理解变压器运行的电磁过程和相互关系，掌握变压器运行特性；掌握三相变压器连接组别的意义；掌握变压器并联运行的条件；理解并联运行条件不满足的情况下对运行带来的影响；了解自耦变压器的用途、结构特点。

变压器是一种静止电气设备，它是利用电磁感应原理，将一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能。

变压器广泛应用于电力系统及各种需要变换电压的电器和系统中。电力系统中的变压器主要用作升、降电压，升压以适应远距离输电的需要，降压以满足用户用电的要求。用于电力系统中升、降电压的变压器叫做电力变压器，本章主要以讲述电力变压器为主。

## 1.1 变压器的基本工作原理与结构

### 1.1.1 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。如图 1.1 所示，普通变压器的主要部件是一个环形铁芯和套在铁芯上的两个相互绝缘的绕组。这两个绕组具有不同的匝数且互相绝缘，两绕组间只有磁的耦合而没有电的联系。其中绕组  $N_1$  接交流电源，为电能输入侧，称为原绕组或一次绕组；绕组  $N_2$  接负载，为电能输出侧，称为副绕组或二次绕组。

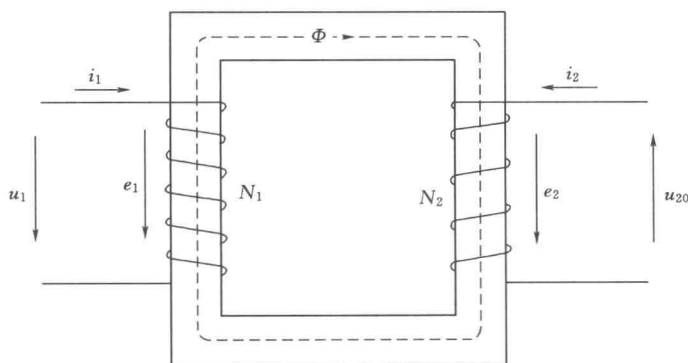


图 1.1 变压器工作原理图



当变压器一次侧施加电压为  $u_1$  的交流电源时，一次绕组将流过同频率的交流电流  $i_1$ ，并在铁芯中产生交变磁通  $\Phi$ ，这个磁通同时与一、二次绕组交链，根据电磁感应定律，交变磁通  $\Phi$  将分别在一、二次绕组中产生的感应电动势为

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

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.1)$$

式中  $N_1$ 、 $N_2$ ——一、二次绕组的匝数。

从式 (1.1) 可见，一、二次侧绕组电动势的大小正比于各自绕组的匝数，而绕组的感应电动势又近似等于各自侧的电压，已制造好的变压器如果  $N_1 \neq N_2$ ，则相应输入、输出的电压不相等，从而起到了改变电压的作用。

如果二次侧接上负载，则在二次侧输出电压的作用下产生输出电流，并输出功率，说明变压器起了传递电能的作用。

由上述可知，一、二次绕组的匝数不等是变压器变压的关键。其次，变压器的一、二次侧之间没有电的直接联系，只有磁的耦合，而交链一、二次绕组的磁通起联系一、二次侧的桥梁作用。另外，变压器只能对交流电压进行变压，若一次侧施加直流电压，一次绕组将流过直流电流，在铁芯中产生恒定磁通，这个磁通穿过一、二次绕组不会在绕组中产生感应电动势，二次侧不会有电压输出。

在后面章节的论述中，变压器一、二次侧电路的各物理量，如功率、电压、电流、绕组匝数等，分别在其代表符号的右下角注以下标 1 或 2，如  $U_1$ 、 $I_1$ 、 $N_1$  表示一次侧电路的物理量； $U_2$ 、 $I_2$ 、 $N_2$  则表示二次侧电路的物理量。

### 1.1.2 变压器的分类

为了适应不同的使用目的和工作条件，变压器的类型很多，可以从不同的角度予以分类。

(1) 按其用途的不同，变压器可分为电力变压器（又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器等）、仪用变压器（电流互感器、电压互感器等）、试验用变压器和整流变压器等。

(2) 按绕组数目的不同，变压器可分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器（一般用于特种用途）及自耦变压器。

(3) 按相数的不同，变压器可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

(4) 按冷却方式的不同，变压器可分为干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、油浸水冷变压器、强迫油循环风冷变压器和强迫油循环水冷变压器等。

(5) 按绕组导线使用的材质的不同，变压器分为铝线变压器、铜线变压器。

(6) 按调压方式的不同，变压器可分为无励磁调压变压器、有载调压变压器。

### 1.1.3 变压器的基本结构

从变压器的功能来看，铁芯和绕组是变压器的核心部件，为保证变压器正常、安全运



行,还必须有其他部件。下面以油浸式电力变压器为例对变压器的主要部件的功能、构造及原理进行说明。图 1.2 所示为油浸式变压器的实物图和结构示意图。

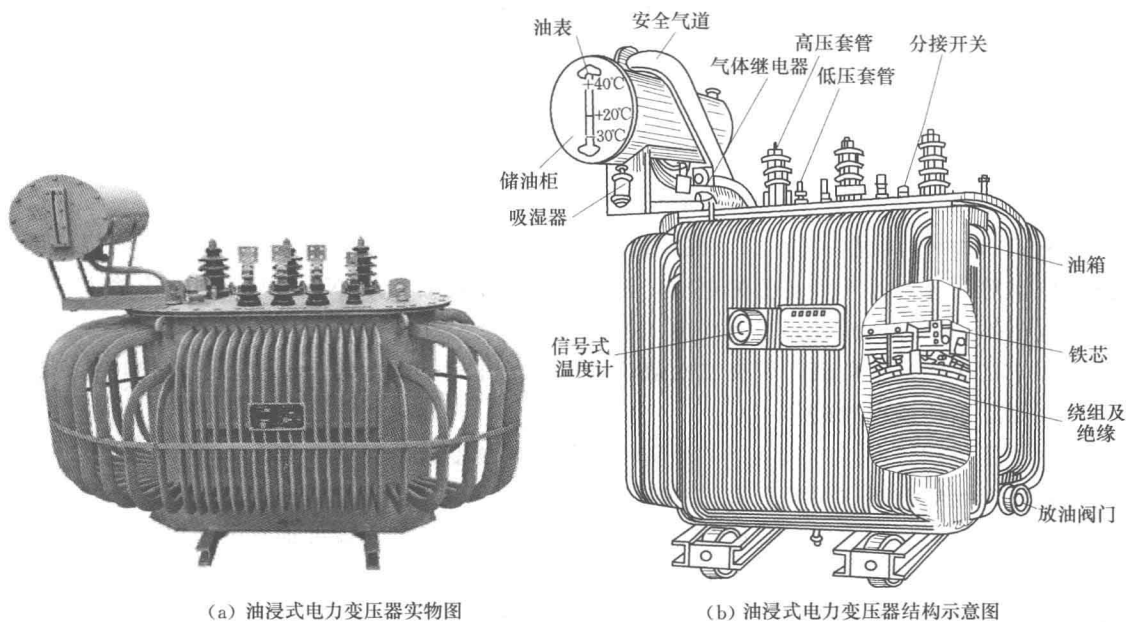


图 1.2 油浸式电力变压器

变压器的基本结构部件包含有铁芯、绕组、绝缘套管、油箱、分接开关和保护装置等,如图 1.2 所示。铁芯和绕组是变压器通过电磁感应进行能量传递的主要部件,称为变压器的器身,器身浸没在充满变压器油的油箱内。绝缘套管的作用是使变压器引线与油箱绝缘;油箱用于装油,同时起机械支撑、散热和保护器身的作用;分接开关用于改变输出电压;保护装置则起保护变压器的作用。下面分别加以介绍。

### 1. 铁芯

铁芯是变压器的主磁路,又作为变压器的机械骨架,其对变压器的性能有很大的影响。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分构成。铁芯柱外套绕组,铁轭将铁芯柱连接起来形成闭合磁路。

(1) 铁芯材料。为了提高磁路的导磁性能,减少铁芯中的磁滞、涡流损耗,铁芯一般用高导率的磁性材料——硅钢片叠成。硅钢片厚度为  $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$ ,两面涂以厚  $0.01 \sim 0.13 \text{ mm}$  的漆膜,使片与片之间绝缘。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,通常变压器铁芯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。

(2) 铁芯型式。变压器铁芯的结构有芯式和壳式两类。芯式结构的特点是铁芯柱被绕组包围,如图 1.3 所示。芯式结构比较简单,绕组的装配及绝缘比较容易。因此,电力变压器的铁芯主要采用芯式结构。壳式结构的特点是铁芯包围绕组的顶面、底面和侧面,如图 1.4 所示。壳式结构的机械强度较好,但制造复杂,铁芯用材较多,只在一些特殊变压器(如电炉变压器)中采用。

(3) 铁芯叠装。变压器的铁芯一般是由剪成一定形状的硅钢片叠装而成。为了减小接

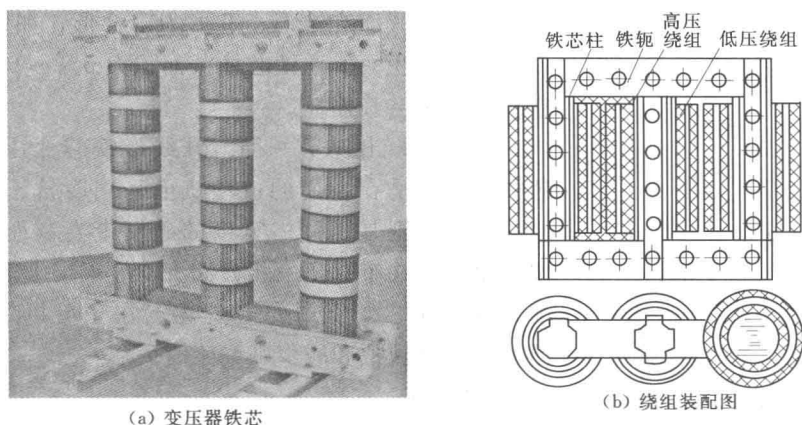


图 1.3 芯式变压器铁芯及与绕组装配图

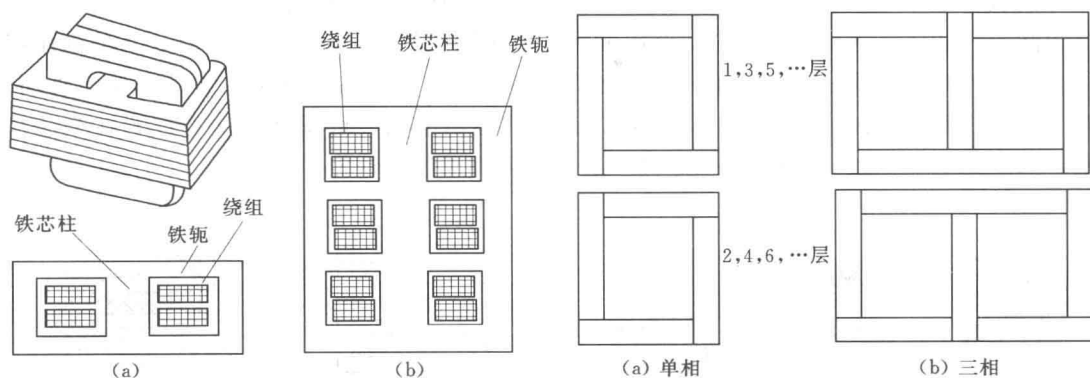


图 1.4 壳式变压器结构示意图

图 1.5 交错式叠装法

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 1.5 所示。当采用冷轧硅钢片时，由于这种钢片顺轧制方向磁导率高，损耗小，如果按直角切片法裁料，则在拐角处会引起附加损耗，故三相变压器铁芯采用图 1.6 所示的斜接缝叠装法。

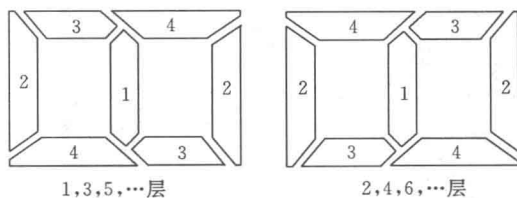


图 1.6 斜切冷轧硅钢片的叠法

(4) 铁芯截面。铁芯柱的截面一般做成阶梯形，以充分利用绕组内圆空间，如图 1.7 所示。当铁芯柱直径超过 380mm 时，还设有油道，以改善铁芯内部的散热条件。

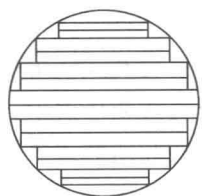


图 1.7 铁芯柱截面

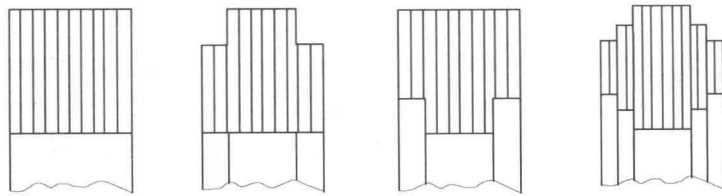


图 1.8 铁轭截面



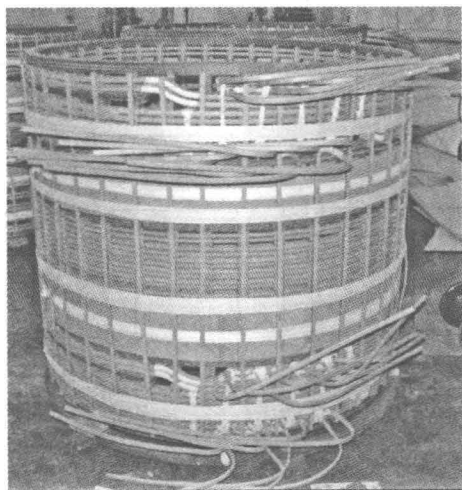
图 1.9 三相渐开线形铁芯

铁轭的截面有矩形、T形和阶梯形，如图 1.8 所示。铁轭的截面积一般比铁芯柱截面积大 5%~10%，以减少空载电流和空载损耗。

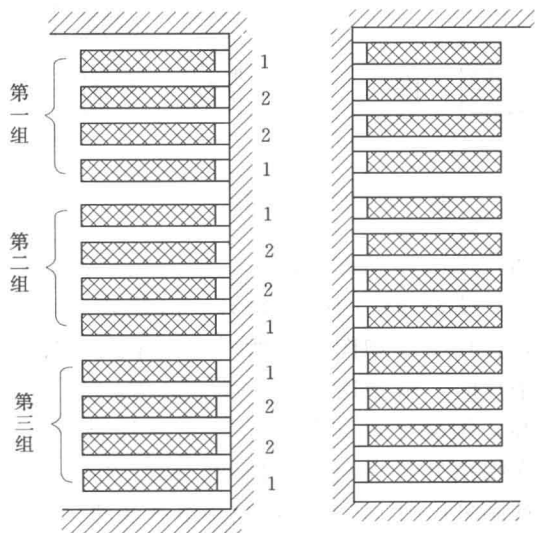
近年来，出现了一种渐开线形铁芯变压器。它的铁芯柱硅钢片是在专门的成型机上采用冷挤压成型方法轧制的，铁轭则是由同一宽度的硅钢带卷制而成，铁芯柱按三角形方式布置，三相磁路完全对称，如图 1.9 所示。渐开线形铁芯变压器的主要优点在于可以节省硅钢片、便于生产机械化和减少装配工时。

## 2. 绕组

绕组是变压器的电路部分，它由外部包裹着绝缘材料的铜或铝绝缘导线绕制而成。按照高、低压绕组在铁芯上的排列方式，变压器的绕组可分为同芯式和交叠式两类。同芯式绕组的高、低压绕组同芯地套在铁芯柱外，一般高压绕组套在最外圈，主要是为便于绝缘，低压绕组靠近铁芯柱，高压绕组套在低压绕组外面，两个绕组之间留有油道，如图 1.3 所示。交叠式绕组的高、低压绕组交替放置在铁芯柱上，如图 1.10 所示。为减小绝缘距离，通常低压绕组靠近铁轭。



(a) 同芯式绕组



(b) 交叠式绕组

图 1.10 变压器绕组

同芯式绕组结构简单，制造方便，故电力变压器多采用这种型式。交叠式绕组机械强度高，引出线布置方便，多用于低电压大电流的电焊、电炉变压器及壳式变压器中。

同芯式绕组尚有多种不同的结构形式，如圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式等。

## 3. 绝缘套管

为了将变压器绕组的引出线从油箱内引出到油箱外，则引线在穿过接地的油箱时，必



须将带电的引线与箱体可靠地绝缘，所用的绝缘装置便是绝缘套管，绝缘套管同时还起固定引线的作用。

绝缘套管一般是瓷质的，它的结构主要取决于电压等级。1kV 以下的采用实心瓷套管，10~35kV 采用空心充气式或充油式套管，如图 1.11 所示。电压 110kV 及以上时，采用电容式套管。为了增加表面放电距离，套管外形做成多级伞形，电压愈高，级数愈多。

#### 4. 油箱和保护装置

油浸变压器的器身浸没在充满变压器油的油箱里。变压器油起绝缘、冷却和灭弧作用。变压器的保护装置包括储油柜、气体继电器、净油器、呼吸器和安全气道等。

(1) 油箱。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。油箱分箱式和钟罩式，箱式即将箱壁与箱底制成一体，器身至于箱中；钟罩式即将箱盖和箱体制成一体，罩在铁芯和绕组上。为了检修方便，变压器器身重量大于 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 1.12 所示为器身检修时的起吊状况。

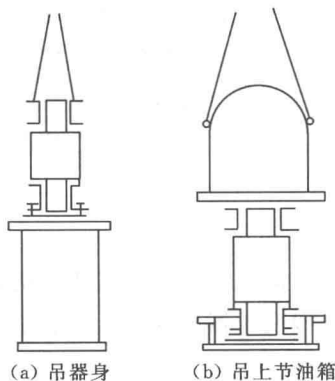


图 1.12 器身检修时的起吊

(2) 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：①调节油量，保证变压器油箱内经常充满油；②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。

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。

变压器设置储油柜的目的就是给油式变压器的油提供一个热胀冷缩的空间。而小容量箱式变压器一般不设置储油柜，主要是利用变压器油箱外的可伸缩散热片来为变压器油提供膨胀空间。

(3) 气体继电器。气体继电器俗称瓦斯继电器，是变压器的主要保护装置。它安装在变压器的油箱和油枕之间的管道上，内部有一个带有水银开关的浮筒和一块能带动另一水银开关的挡板。当变压器内部有故障时，变压器油分解产生的气体聚集在气体继电器的上部，使其内部油面降低，浮筒随油面下降，带动水银开关接通信号回路，发出信号。当变压器内部发生严重故障时，油流冲击气体继电器内部挡板，挡板偏转时带动一套机构，使另一个水银开关接通变压器跳闸回路，切断电源，避免故障扩大。

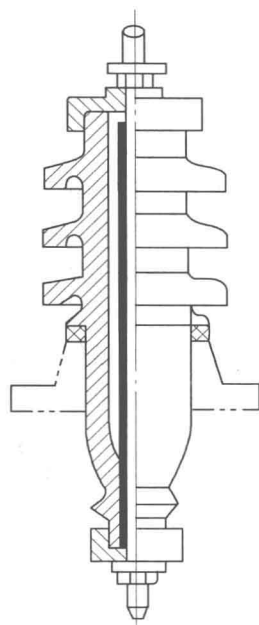


图 1.11 35kV 充油式  
绝缘套管的结构  
示意图



(4) 呼吸器。呼吸器又称吸湿器，油枕上部的空气通过呼吸器与外界空气相通，如图 1.2 所示。当变压器油热胀冷缩时，气体经过它进出油枕上部，以保持油箱内压力正常。呼吸器内部装有颗粒状硅胶，具有很强的吸潮能力，当空气经呼吸器进入油枕时，水分将被硅胶所吸收，同时滤掉空气中的杂质，延缓变压器油的老化时间。呼吸器内的硅胶正常是浅蓝色，当吸湿饱和后则变成粉红色。

(5) 净油器。它是利用油的自然或强迫循环，使油通过吸附剂进行过滤，以改善运行中的变压器油的品质。

(6) 安全气道。安全气道又叫防爆管，它装在油箱的顶盖上。当变压器内部发生严重故障而产生大量气体时，油箱内压力迅速增大，油流和气体将冲破气道上端的玻璃板向外喷出，以免油箱受到强大压力而破裂。

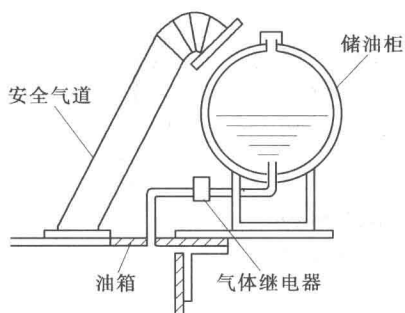


图 1.13 油箱及附件的连接

现在防爆管已逐渐被压力释放阀所取代。变压器正常工作时，油箱内部压力在压力释放阀的关闭压力以下，压力释放阀处于关闭状态；当变压器内部故障压力增高超过释放阀的开启压力时，压力释放阀能在 2ms 内迅速开启，将变压器箱体内气体排出，使油箱内的压力很快降低，避免变压器爆炸。

各保护装置的连接如图 1.13 所示。

#### 5. 分接开关

电压是电能质量的指标之一，变压器在运行的过程中，会因为多方面的原因引起输出电压发生改变。变压器可利用改变高压绕组匝数的方法来进行调压。为了改变高压绕组匝数，常把高压绕组引出若干个抽头，这些抽头叫分接头，用以切换分接头的装置称为分接开关，分接开关可在  $\pm 5\%$  范围内调整高压绕组的匝数。分接开关放置于变压器的箱盖上。分接开关又分为无励磁调压分接开关和有载调压分接开关。前者必须在变压器停电的情况下切换；后者可以在不切断负载电流的情况下切换。

#### 6. 散热器

由于变压器运行中因为有损耗，并且各种损耗都以热的形式散发出来，使变压器的温度升高。为了使运行中的变压器始终保持在规定温度之下，一般变压器外侧都装设有散热器，有的还安装有风扇组，以通过增加散热面积，改善散热条件。

#### 7. 温度计

变压器在运行的过程中，有铁芯损耗（简称铁耗）、绕组铜损耗（简称铜耗）等，这些损耗都转变成热量，使变压器相关部分温度升高，变压器运行时不允许温度超过规定值，否则会加快变压器绝缘材料的老化速度，缩短变压器的寿命。

温度计是用来测量油箱上层油温的，通过对油温的监视，可判断变压器的运行是否正常。常用的是信号温度计。信号温度计表盘的指针带有电接点，它可以适时的指示变压器的上层油温，也能在温度超过规定值时发出信号，及时提醒运行人员。