

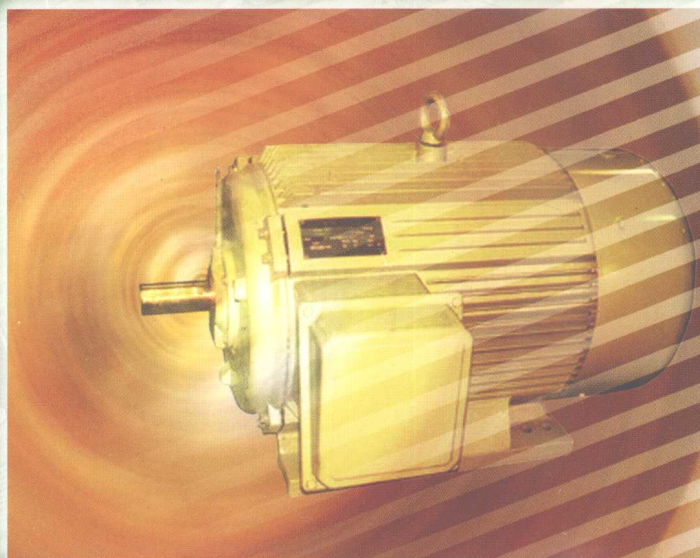
中等职业教育国家规划教材配套教学用书

# 电机与电气控制

第2版

(电子技术应用专业)

主编 程周



高等教育出版社

中等职业教育国家规划教材配套教学用书

# 电机与电气控制

第2版

(电子技术应用专业)

主 编 程 周

高等教育出版社

## 内容提要

本书是中等职业教育国家规划教材配套教学用书,根据教育部颁布的《中等职业学校电子技术应用专业教学指导方案》中“电机与电气控制教学基本要求”,并参照有关行业的职业技能鉴定及中级技术工人等级考核标准编写。

主要内容有:变压器,交流异步电动机,直流电机,控制电机,电气基本控制环节及低压电器,电气控制应用举例,常用机床电气控制,可编程序控制器的组成与工作原理,PLC的指令系统,PLC的应用技术。

本书采用出版物短信防伪系统,同时配套学习卡资源。用封底下方的防伪码,按照本书最后一页“郑重声明”下方的使用说明进行操作。

本书可作为中等职业学校电子技术应用专业、电子电器应用与维修专业及相关专业教学用书,也可作为岗位培训教材或自学用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制/程周主编.—2版.—北京:高等教育出版社,2009.3

电子技术应用专业

ISBN 978-7-04-025941-4

I. 电… II. 程… III. ①电机学-专业学校-教材②电气控制-专业学校-教材 IV. TM3 TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第012624号

策划编辑 王卫氏  
责任绘图 吴文信  
责任印制 毛斯璐

责任编辑 王莉莉  
版式设计 张岚

封面设计 李卫青  
责任校对 王雨

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 100120  
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印刷 北京未来科学技术研究所  
有限责任公司印刷厂

开本 787×1092 1/16  
印张 15  
字数 360 000

购书热线 010-58581118  
免费咨询 800-810-0598  
网址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landraco.com>  
<http://www.landraco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2003年7月第1版  
2009年3月第2版  
印次 2009年3月第1次印刷  
定价 19.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25941-00

## 第2版前言

本书根据教育部颁布的中等职业学校重点建设专业(电子技术应用)教学指导方案,同时参考了有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准,结合近几年中等职业教育的实际发展情况,贯彻落实“以服务为宗旨、以就业为导向、以能力为本位”的职业教育办学指导思想,在2003年出版的中等职业教育国家规划教材配套教学用书《电机与电气控制》(第1版)基础上修订而成。

修订后的教材保留了原教材模块结构,文笔流畅、通俗易懂,理论与实际紧密联系,切合中职学生在实际教学中的使用。教材修订的主要内容有:

1. 在第1版习题基础上,重新增加编排了全书的习题,使学生通过这些课后练习,能够对教材内容进一步理解。

2. 在第7章中增加了“摇臂钻床的电气控制”内容。

3. 删掉原来第8章“控制继电器及其应用”的内容,增加“可编程序控制器的组成与工作原理”、“PLC的指令系统”、“PLC应用技术”等内容。

本书教学总学时数建议为82学时,打“\*”的内容可根据学校专业的具体情况选用。建议学时分配方案见下表。

	内 容	理 论	实 训	合 计
1	变压器	6	2	8
2	交流异步电动机	8	2	10
3	* 直流电机	6		6
4	* 控制电机	6		6
5	电气基本控制环节及低压电器	6	6	12
6	电气控制应用举例	8		8
7	* 常用机床电气控制	8		8
8	可编程序控制器的组成与工作原理	4		4
9	PLC的指令系统	10	6	16
10	* PLC应用技术	6		6

本书由安徽职业技术学院程周任主编。由合肥职教中心谢文革审稿,审者以高度负责的态度审阅了全书,为本书质量的进一步提高提出了许多宝贵意见。本书在编写过程中,得到安徽职业技术学院周洪颖的帮助和支持,在此一并表示感谢。

本书采用出版物短信防伪系统,同时配套学习卡资源。用封底下方的防伪码,按照本书最后

一页“郑重声明”下方的使用说明进行操作。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和疏漏,恳请广大读者批评指正,联系电子邮箱:  
ahchzh@163.com。

编 者  
2008.11

# 第1版前言

本书是中等职业教育国家规划教材配套教学用书,根据2001年教育部颁布的《中等职业学校电子技术应用专业教学指导方案》中“电机与电气控制教学基本要求”,并参照有关行业的职业技能鉴定及中级技术工人等级考核标准编写。

为了便于对该门课程展开教学,编者建议:

(1) 认真阅读教材。本书在编写过程中,已经充分考虑到学生现有的自学能力及基础知识,学生在教师指导下自学是有可能的。要鼓励学生主动学习,勤于思考,学会学习,掌握分析问题的方法。

(2) 注重技术应用。本书重点是电气控制技术在生产中的应用,而对于构成电气控制电路的各种器件(包括电动机),应该注重它们的外部特性,淡化内部机理,对器件内部复杂的结构和工作原理,宜“浅”不宜“深”,以“了解”层次为主体,将重点放到电气控制电路中。

(3) 重视新技术的发展动向。由继电器构成的有触点系统,会在一段时间内逐步被无触点系统取代,积极引导学生对控制继电器(可编程控制器)的关注是十分必要的,这类器件以其强大的软件功能,灵活的控制方式会很快显示出其优越性。

本书教学时数为68学时,建议学时方案为:

	内 容	理 论	实 训	合 计
1	变压器	6		6
2	交流异步电动机	8	2	10
3	直流电机	6		6
4	控制电机	6		6
5	电气基本控制环节及低压电器	6	4	10
6	电气控制应用举例	8	2	10
7	常用机床电气控制	6		6
8	控制继电器及其应用	10	4	14
	总计	56	12	68

本教材由安徽省轻工业学校程周主编,河北化工学校汪红、长春市轻工业学校杜贵敏、安徽省第一轻工业学校王丽参编。具体分工为:汪红编写第1,2章,杜贵敏编写第3章,王丽编写第4,5章,程周编写第6,7,8章及各章习题。全书由程周统稿。本书由安徽省轻工业学校高级讲师孙忠献主审。主审以高度负责的态度审阅全书,提出许多宝贵意见,并指出书中编写错误及不妥之处,编者在此表示衷心感谢。本书编写过程中,得到安徽省轻工业学校李治国、常晖、杨林国老师的帮助和支持,编者在此也向他们表示感谢。

由于编者学识和水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请同行和使用本书的广大读者批评指正。编者联系电子邮箱:ahchzh@163.com。

编 者  
2002年12月

# 目 录

<b>第 1 章 变压器</b> .....	1	<b>第 4 章 控制电机</b> .....	59
1.1 变压器的用途与分类 .....	1	4.1 测速发电机 .....	59
1.2 变压器的构造与工作过程 .....	3	4.2 伺服电机 .....	61
1.3 变压器的外特性与效率 .....	7	4.3 自整角机 .....	63
1.4 三相变压器 .....	8	4.4 步进电机 .....	67
1.5 变压器的铭牌数据 .....	13	4.5 旋转变压器 .....	70
1.6 自耦变压器 .....	14	习题 4 .....	71
1.7 互感器 .....	15	<b>第 5 章 电气基本控制环节及低压</b>	
习题 1 .....	17	<b>电器</b> .....	73
<b>第 2 章 交流异步电动机</b> .....	20	5.1 概述 .....	73
2.1 三相交流异步电动机的用途		5.2 手动控制起动 .....	77
与分类 .....	20	5.3 点动与长动控制 .....	85
2.2 三相交流异步电动机的构造		5.4 正、反转控制 .....	94
与工作过程 .....	21	5.5 顺序和多点控制 .....	97
2.3 三相交流异步电动机的工作		5.6 时间控制 .....	97
特性与机械特性 .....	26	5.7 行程控制 .....	100
2.4 三相交流异步电动机的铭牌		习题 5 .....	103
数据 .....	31	<b>第 6 章 电气控制应用举例</b> .....	106
2.5 单相异步电动机 .....	32	6.1 三相笼型异步电动机降压	
习题 2 .....	36	起动控制 .....	106
<b>第 3 章 直流电机</b> .....	39	6.2 三相笼型异步电动机制动	
3.1 直流电机的工作原理和基本		控制 .....	114
结构 .....	39	6.3 三相异步电动机调速控制 .....	117
3.2 直流电机的电枢电动势与		习题 6 .....	121
电磁转矩及基本方程 .....	46	<b>第 7 章 常用机床电气控制</b> .....	123
3.3 直流电动机的工作特性 .....	48	7.1 普通车床电气控制 .....	123
3.4 直流电动机的机械特性 .....	49	7.2 磨床的电气控制 .....	125
3.5 他励直流电动机的起动与		7.3 铣床的电气控制 .....	130
反转 .....	52	7.4 摇臂钻床的电气控制 .....	136
3.6 他励直流电动机的调速 .....	53	习题 7 .....	139
3.7 他励直流电动机的电气制动 .....	55	<b>第 8 章 可编程序控制器的组成与</b>	
习题 3 .....	57	<b>工作原理</b> .....	140



8.1 概述 .....	140	<b>第 10 章 PLC 应用技术 .....</b>	<b>211</b>
8.2 PLC 的组成 .....	143	10.1 梯形图编程格式与规则 .....	211
8.3 PLC 的工作原理 .....	149	10.2 基本电路的编程技术 .....	214
8.4 PLC 的结构与内部器件 .....	152	10.3 输入/输出(I/O)点数扩展 技术 .....	221
习题 8 .....	159	习题 10 .....	227
<b>第 9 章 PLC 的指令系统 .....</b>	<b>161</b>	<b>参考答案 .....</b>	<b>228</b>
9.1 基本指令 .....	161	<b>参考文献 .....</b>	<b>231</b>
9.2 专用(功能)指令 .....	175		
习题 9 .....	209		

# // 第1章 变 压 器 //

变压器是根据电磁感应原理制成的一种静止电器,它由绕在同一个铁心上的两个或两个以上的线圈组成,线圈之间通过交变磁通相互联系。它可把某一等级的电压与电流变换成同频率的另一等级的电压与电流,实现变换电压、变换电流和变换阻抗的作用,但通常主要用于变换电压,故称变压器。

## 1.1 变压器的用途与分类

### 1.1.1 变压器的用途

变压器是输配电系统中必不可少的重要设备之一。发电站发出的电能输送到用户的过程中,通常需用很长的输电线,如果输电线路电压  $U$  越高,则线路电流  $I$  越小。这不仅可以减少输电线上的功率损耗,同时还可以减小输电线的截面积,节约导体材料。因此目前世界上各国在电能的输送与分配方面都在向高电压、大功率的电力网系统方向发展,以便集中输送、统一调度和分配电能,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)方向发展。目前我国高压输电的电压等级有 110 kV、220 kV、330 kV、550 kV 等多种。在电厂或电站,发电机由于本身结构及所用绝缘材料的限制发出的电压不能太高,因此在将电能进行远距离输送之前,必须利用升压变压器把发电机输出的电压升高到所需的数值。

将高压电能输送到用电区后,为了保证用电安全并合乎用电设备的电压要求,还必须通过各级降压变电站(或变电所),利用变压器将电压降低。如工厂输电线路,高压为 35 kV、10 kV 等,低压为 380 V、220 V、110 V 或 36 V 等。图 1.1(a)是电力网输送电能的示意图,图 1.1(b)是电力网的接线图。

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%,这是相当可观的数字,因此变压器效率的高、低已经成为输配电系统中一个突出问题,应尽量采用低损耗系列变压器。

在生产实践中,为安全起见,常使用变压比为 1 的隔离变压器;在电子技术中大量利用变压器变换电压、电流和进行阻抗变换,实现阻抗匹配,使负载获得最大功率;在自动控制中,利用变压器可获得不同的控制电压;此外,变压器在通信、冶金、电气测量等方面均有广泛的应用。

### 1.1.2 变压器的分类

变压器的种类很多,可按用途、相数、绕组数目和冷却方式等进行分类。

#### 1. 根据用途分类

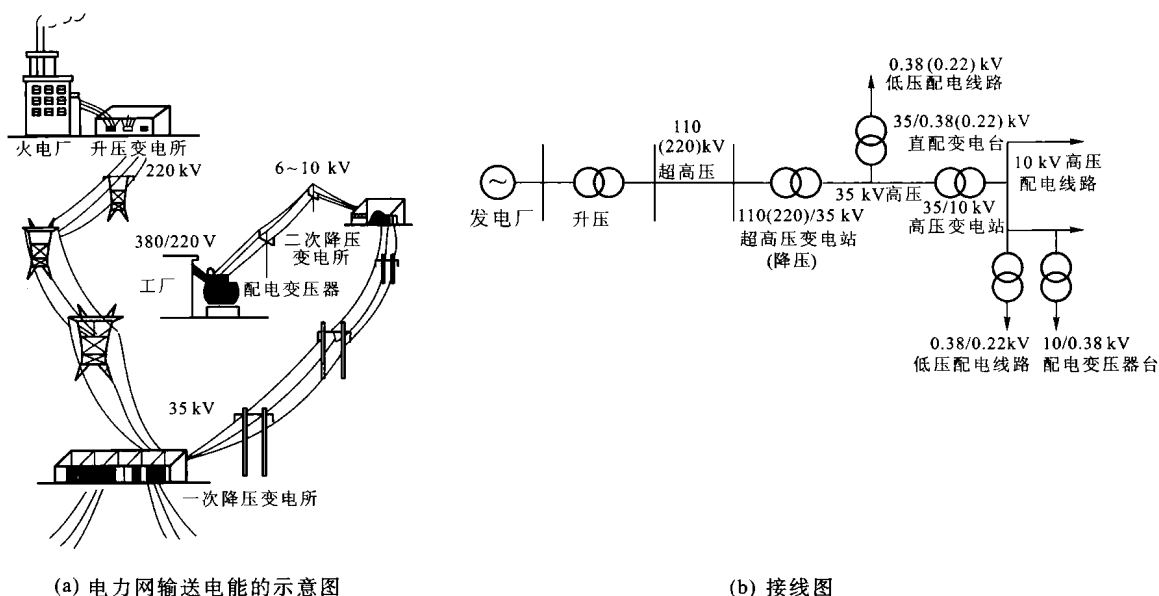


图 1.1 电力网

(1) 电力变压器 用于输变电系统。在电力系统中,用于远距离传送和分配电能的有升压变压器、降压变压器和配电变压器等。

(2) 仪用互感器 用于仪表测量和继电保护。如电压互感器、电流互感器。

(3) 调压器 能均匀调节输出电压。如自耦调压器、感应调压器。

(4) 实验变压器 专供电气设备作耐压实验用的变压器。

(5) 特殊电源用变压器 如电炉、电焊、整流变压器等。

(6) 控制变压器 用于自动控制系统的小功率变压器、脉冲变压器、变频变压器以及在电子设备中作为电源、隔离、阻抗匹配等小容量变压器。

## 2. 根据电源相数分类

(1) 单相变压器 单相变压器多为小容量。

(2) 三相变压器 三相变压器多为大容量。

(3) 多相变压器。

## 3. 按绕组数目分类

(1) 单绕组变压器 单绕组变压器高、低压共用一个绕组,又称为自耦变压器。

(2) 双绕组变压器 如电力变压器,每相有高、低压两个绕组,还有作等压变换的隔离变压器。

(3) 多绕组变压器 常用作电源变压器,不同的二次电压也可用绕组的不同抽头来实现。

## 4. 按冷却方式分类

(1) 干式变压器 干式变压器由空气直接冷却,分自冷和风冷两种。多用在低电压、小容量或防火防爆场合。随着新材料、新工艺的不断出现,干式变压器在变配电上的应用日益增多。

(2) 油浸式变压器 可分为油浸自冷式、油浸风冷式、强迫油循环式三种。小型变压器采用

油浸自冷式,将产生的热量经变压器油传给油箱,靠油箱壁辐射和空气对流,使热量散到空气中。中型变压器采用油浸风冷式,即在散热器上加风扇,吹风冷却。大型变压器制成强油风冷式和强油水冷式,用油泵强迫循环使油与冷却介质(空气或水)进行热交换。

## 1.2 变压器的构造与工作过程

### 1.2.1 变压器的基本构造

变压器的类型虽多,但基本构造相同,都由铁心和绕组两个部分组成。

#### 1. 铁心

铁心构成了变压器的磁路,又作为变压器的机械骨架。铁心由铁心柱(外面套绕组)和铁轭(连接两个铁心柱)组成。为了增强磁路的导磁性,降低铁心的磁滞损耗和涡流损耗,铁心通常用具有高磁导率、厚度为 $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$ 、两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成,为了尽量减小磁路的磁阻,铁心的磁回路不能有间隙,因而硅钢片采用分层交错叠装,如图 1.2 所示。为了使磁通方向和碾轧方向基本一致,减少损耗,通常采用图 1.3 所示的斜切硅钢片的叠装方法;铁心也可用冷轧硅钢片卷制后切割而成。通信用电变压器的铁心多用铁氧体、铝合金或其他磁性材料制成。

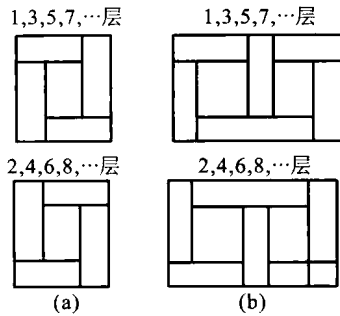


图 1.2 分层交错叠装的硅钢片

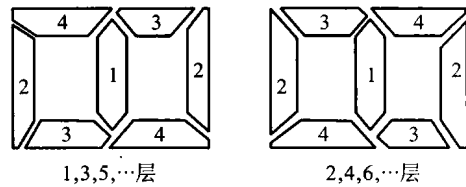


图 1.3 斜切硅钢片的叠装方法

铁心分为心式和壳式两种。心式铁心在两侧的铁心柱上放置线圈,形成线圈包住铁心的形状,呈“口”字形,如图 1.4(a)所示。这种结构比较简单,散热条件较好,且绕组的装配及绝缘比较容易,适用于容量大而电压高的变压器,国产变压器大部分采用心式结构。壳式铁心则在中间的铁心柱上放置线圈,形成铁心包住线圈的形状,呈“日”字形,如图 1.4(b)所示。这种结构的机械强度较好,但制造工艺复杂,且外层绕组需用的铜线较多,除一些特殊变压器(电炉变压器、小型干式变压器)外很少应用。

为了充分利用绕组内圆的空间,节省铜材,铁心柱的截面一般采用阶梯形,小型变压器的铁心柱截面一般采用十字形或矩形,如图 1.5 所示。

为防止静电感应和漏电,铁心及其构件都应妥善接地。

#### 2. 绕组

绕组是变压器的电路部分,常用绝缘良好(铜或铝)的漆包线、纱包线或丝包线绕制而成。

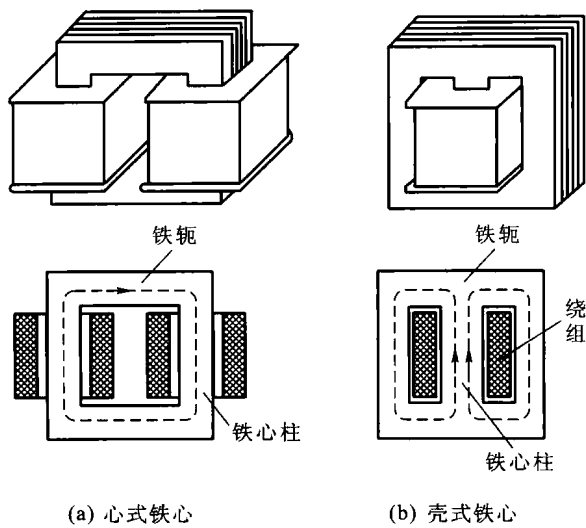


图 1.4 铁心结构

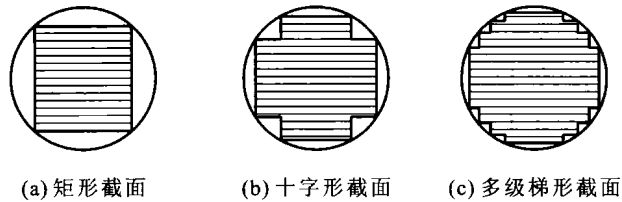


图 1.5 铁心柱的截面

实际变压器的高、低压绕组是套装在同一铁心柱上,并且紧靠在一起,尽量减少漏磁通。根据高、低压绕组之间的相对位置排列不同,变压器绕组可分为同心式和交叠式两种类型。

(1) 同心式绕组 同心式绕组的高、低压绕组同心地套在铁心柱上,低压绕组靠近铁心柱的内层,高压绕组绕在低压绕组的外边,如图 1.6(a)所示,其原因是低压绕组和铁心间所需绝缘较简单,这可使低压绕组和铁心之间的绝缘可靠性增加,同时可降低绝缘的耐压等级。这种绕组结构简单,制造方便,国产变压器多采用这种结构。

(2) 交叠式绕组 交叠式绕组又称为饼式绕组。它是将高、低压绕组分成若干个线饼,沿着铁心柱的高度方向交替排列。为了便于绝缘,一般靠近铁轭的最上层和最下层放置低压绕组,如图 1.6(b)所示。这种绕组漏抗较小,连接线方便,绕组机械强度牢固,但绝缘结构复杂,制造不便,主要用在壳式变压器中。

变压器的绕组与铁心之间、不同绕组之间及绕组的匝间和层间的绝缘要好,为此生产变压器时除选用规定的绝缘材料外,还要进行去潮(浸漆、烘烤、灌蜡、密封等)处理。

为了防止电网中高频电流对变压器负载产生干扰,常在小型电源变压器一次、二次绕组间,放置一薄层开口紫铜皮或绕上一层不连接的绝缘导线作为屏蔽层。

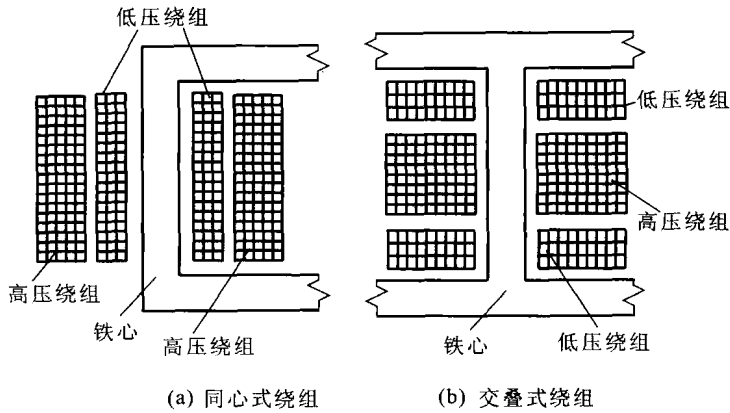


图 1.6 变压器绕组

(3) 变压器绕组的极性 对同一绕组,其首尾两端应相通,阻值为几欧,而互相绝缘的绕组之间,阻值为 $\infty$ 。

如图 1.7 所示,变压器的两个绕组匝数和绕向均相同。在交变磁通的作用下,假设在某一瞬间上面绕组中的感应电压为上“+”下“-”时,显然下面绕组中感应电压也是上“+”下“-”,这两个绕组的上端(或下端)称为同极性端,并标出符号“·”。

这两个绕组串联时,同极性端不能接在一起;并联时,同极性端必须接在一起,否则将造成短路。

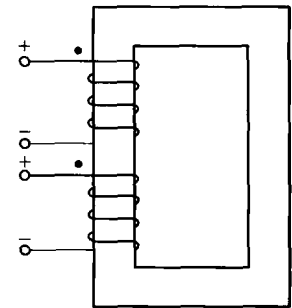


图 1.7 变压器绕组的极性

### 1.2.2 变压器的基本工作过程

图 1.8(a)所示是变压器的工作原理示意图。与电源连接的绕组称为一次绕组,匝数为 $N_1$ ,与负载连接的绕组称为二次绕组,匝数为 $N_2$ ;输入电压、电流为 $u_1$ 、 $i_1$ ,输出电压、电流为 $u_2$ 、 $i_2$ ,负载为 $Z_L$ 。变压器的图形符号如图 1.8(b)所示,文字符号为字母 T。

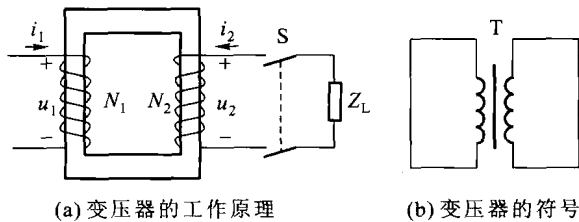


图 1.8 变压器的工作原理

#### 1. 变压器的空载运行和变压比

变压器的空载运行就是一次绕组加额定电压而二次绕组开路(不接负载)时的工作情况。在图 1.8(a)所示电路中,断开开关 S,则变压器在空载情况下运行。由于二次绕组开路,因此二

次绕组中的电流为零,此时一次绕组中流过的交变电流  $i_0$  称为空载电流,空载电流比额定电流小得多(为额定电流的 3% ~ 8%)。

由于  $u_1, i_1$  是按正弦规律交变的,所以在铁心中产生的磁通  $\Phi$  也是正弦交变的。在交变磁通的作用下,一次、二次绕组将产生正弦交变感应电动势。可以计算出,一次、二次绕组感应电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad E_2 = 4.44fN_2\Phi_m$$

如果忽略漏磁通和绕组上的压降(空载电流小),则一次、二次绕组两边电压近似等于一次、二次绕组的电动势,即

$$U_1 \approx E_1, U_2 \approx E_2$$

则一次、二次电压之比等于匝数比

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

式中,  $k$  称为变压器的变压比,简称变比。

当  $k > 1$  时,  $N_1 > N_2, U_1 > U_2$ , 此类变压器称为降压变压器;当  $k < 1$  时,  $N_1 < N_2, U_1 < U_2$ , 此类变压器称为升压变压器;当  $k = 1$  时,  $N_1 = N_2, U_1 = U_2$ , 该变压器既不升压,也不降压,能作隔离变压器用。

实际应用时,变压器的二次输出电压可在小范围内调节,从二次绕组上抽头,可输出不同的电压,得到多输出变压器。

## 2. 变压器的负载运行和变流比

变压器的负载运行是指一次绕组加额定电压,二次绕组与负载接通时的运行状态。在图 1.8(a) 所示电路中,闭合开关 S,则变压器在带负载的情况下运行。

变压器工作时,一次、二次绕组的电阻、铁心都会损耗一定的能量,但是比负载上消耗的电能小得多,在分析计算时,可将这些损耗忽略。这样,可将变压器看成理想变压器,其内部不消耗功率,认为变压器输入功率等于负载消耗的功率,即

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

由上式可得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

上式表明,变压器带负载工作时,一次、二次电流有效值与它们的电压或匝数成反比。变压器在变换了电压的同时,也变换了电流。

## 3. 变压器的阻抗比

变压器除有变压和变流作用之外,还可用来实现阻抗变换,图 1.9 是表示这种变换作用的等效电路图。设在变压器的二次侧接入阻抗  $Z_L$ ,可设想一次侧存在一个等效阻抗  $Z'$ ,它的作用是将二次阻抗  $Z_L$  折合到一次电路中去。

根据欧姆定律,一次电压、电流的有效值关系可表示为

$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{kU_2}{k^{-1}I_2} = k^2 \frac{U_2}{I_2} = k^2 |Z_L|$$

上式表明变压器的二次侧接上负载  $Z_L$  后,对电源而言,相当于接上阻抗为  $k^2 Z_L$  的负载。当

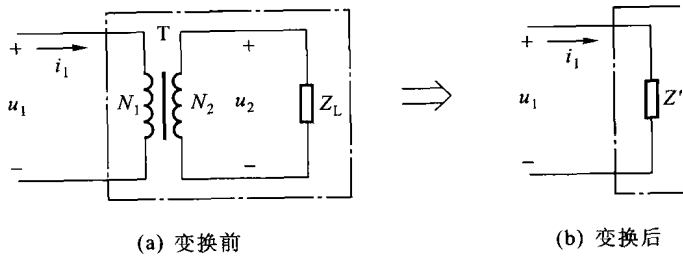


图 1.9 变压器的阻抗变换

$Z_L$  一定时, 只要改变  $k$ , 就可以得到不同的等效阻抗。

在电子电路中, 功率放大电路对负载的阻抗往往有一定要求。当功率放大电路的负载阻抗为某一数值时, 其输出功率为最大而波形失真又很小, 这时的负载阻抗称为最佳负载阻抗。一般情况下, 实际的负载阻抗并不等于所需的最佳负载阻抗。例如, 收音机扬声器(喇叭)的阻抗一般为  $8\ \Omega$  或  $16\ \Omega$ , 而功率放大器所需的最佳负载阻抗通常为几百欧, 为此需要用变压器来进行阻抗变换, 以获得最大的输出功率, 这称为阻抗匹配。

### 1.3 变压器的外特性与效率

#### 1.3.1 变压器的外特性

当电源电压和负载功率因数不变时, 变压器二次电压  $U_2$  与二次电流  $I_2$  之间的变化关系, 称为变压器的外特性。图 1.10 所示为变压器的外特性曲线, 当负载为阻性或感性时, 它是一条沿水平轴稍微向下倾斜的直线。这是因为对用户来说, 变压器二次绕组相当于电源, 在一次绕组外加电压不变的条件下, 变压器的负载电流  $I_2$  增大时, 二次绕组的内部电压降也增大, 二次绕组端电压  $U_2$  将随负载电流  $I_2$  的增大而减小。

变压器有负载时, 二次电压的变化程度用电压变化率(电压调整率)来表示。电压变化率是指变压器从空载到满载运行时, 二次电压变化量  $(U_{20} - U_2)$  与空载额定电压  $U_{20}$  的百分比, 即

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

电压变化率是变压器的主要性能指标之一, 人们总希望电压变化率越小越好。常用的电力变压器电压变化率为  $4\% \sim 6\%$ 。

#### 1.3.2 变压器的效率

变压器一次输入功率为  $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$ , 二次输出功率(负载获得的功率)为  $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ ,

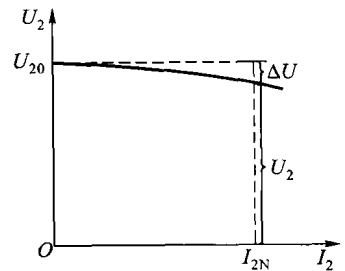


图 1.10 变压器的外特性曲线



$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为一次、二次绕组电压与电流的相位差。

输入功率与输出功率之差( $P_1 - P_2$ )就是变压器本身损耗的功率,包括铜损耗  $p_{Cu}$  和铁损耗  $p_{Fe}$ 。铜损耗  $p_{Cu}$  是一次、二次绕组导线电阻上的损耗,与一次、二次电流有关,随负载变化而变化,称为可变损耗。铁损耗  $p_{Fe}$  是铁心中的磁滞损耗和涡流损耗,与一次绕组电压  $U_1$  的平方成正比,与频率有关,而与变压器负载的大小无关,称为固定损耗。电流越大,铜损耗越大;频率越高,铁损耗越大。

变压器的效率是指输出功率  $P_2$  与输入功率  $P_1$  的百分比,即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + p_{Cu} + p_{Fe}} \times 100\%$$

变压器没有转动部分,也就没有机械摩擦损耗,因此它的效率很高,供电变压器效率都在 95% 以上,大型变压器可达到 99%。图 1.11 所示为变压器的效率曲线,由图可见,效率随输出功率而变,通常供电用的变压器在 40% ~ 60% 额定功率时效率最高,负载再增大,效率略有减小,若负载很轻,则效率下降很多。

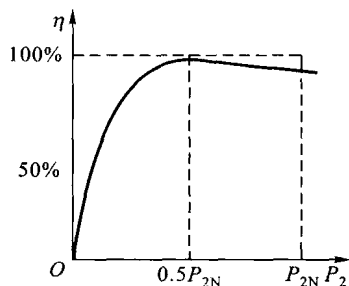


图 1.11 变压器的效率

## 1.4 三相变压器

三相变压器的用途是变换三相电压。它主要用于输电、配电系统中。对于三相电源进行电压变换,可用三台单相变压器组成的三相变压器组,也可把三台变压器连接在一起,成为三相变压器。三相变压器在对称负载运行时,其任意一相和单相变压器没什么区别,所以分析单相变压器的方法和结论同样适于对称负载运行时的三相变压器。

### 1.4.1 三相变压器构造

三相变压器中,应用最广泛的是三相心式变压器,它将三个单相变压器合成一个三铁心柱的结构,如图 1.12(a)所示。因为三相绕组接入对称三相交流电源时,三相绕组中产生的主磁通是对称的,所以有  $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$ ,即中间铁心柱的磁通为零,因而可以省略中间铁心柱,如图 1.12(b)所示,为了制造方便、节省硅钢片,常将三个铁心柱放置在同一平面内,如图 1.12(c)所示。三个铁心柱各为一相,上面绕有该相的一次、二次绕组,如图 1.13 所示,可按需要接成 Y 形或  $\Delta$  形。

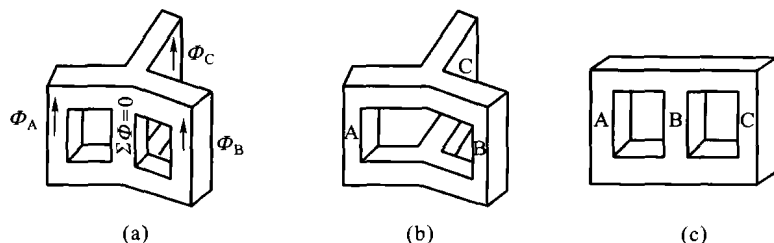


图 1.12 三相心式变压器