



全国高等职业教育“十三五”规划教材

电机与电气控制技术项目教程

主编 卓书芳

- 项目引领、任务驱动组织内容，突出“边学边做”教学理念
- 深度融合课程理论知识与实践技能，强化学生实践能力培养
- 每个任务设有学习知识与能力目标，注重学习针对性与有效性
- 内容淡化原理、注重实用，注重电气控制电路分析与训练



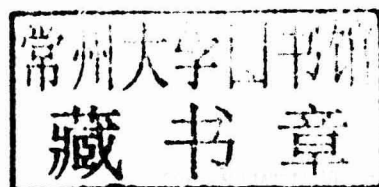
电子课件下载网址 www.mechchina.com

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育“十三五”规划教材

电机与电气控制技术项目教程

主 编	卓书芳		
参 编	何用辉	林伦标	曾思通
	方凤玲	杨成菊	林 福
	马孝荣	曾喜娟	林少玲
主 审	黄锡泉	郑 昕	



机械工业出版社

本书按照项目引领、任务驱动的编写模式,将电机与电气控制技术课程必须掌握的理论知识与实践技能分解到不同项目和任务中由浅入深、循序渐进地讲述,实现电机与拖动、低压电器、电气控制电路以及常用机床控制电路等内容的理论知识与实践技能的深度融合,突出边学边做的教学理念,重视实践应用,强化学生技能培养。本书结构紧凑、讲解透彻、图文并茂,配有教学课件等教学资源,具有较强的可读性、实用性和先进性。

本书既可作为高职高专电机与电气控制、电机与拖动、电气控制技术以及机床电气等课程的教材,也可供从事电气工程工作的技术人员学习和参考,还适合初学者自学时使用。

本书配有授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 1239258369, 电话: 010-88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术项目教程/卓书芳主编. —北京:机械工业出版社, 2016. 7

全国高等职业教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-55275-8

I. ①电… II. ①卓… III. ①电机学-高等职业教育-教材 ②电气控制-高等职业教育-教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第257583号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王颖 责任编辑:王颖

责任校对:佟瑞鑫 责任印制:李飞

北京富生印刷厂印刷

2016年12月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.75印张·346千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-55275-8

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书是依据《国家中长期教育改革和发展规划纲要》关于“大力发展职业教育”的要求，贯彻基于工作过程导向的课程开发与教学设计思想，加大课程建设与改革力度，创新教材模式，由多所高职院校合作开发、编写的闽台合作、工学结合的特色改革教材。本书结构紧凑、讲解透彻、图文并茂，紧扣高职院校的办学理念，以强化学生职业素养、培养学生职业能力为首要目标，具有较强的可读性、实用性和先进性。

本书具有以下几个突出的特点：

1) 本书作为按照项目引领、任务驱动模式编写的特色改革教材，将电机与电气控制技术课程必须掌握的理论知识与实践技能分解到不同项目和任务中由浅入深、循序渐进地讲述，注重学生职业能力的培养。

2) 本书将电机与拖动、低压电器、电气控制电路等理论知识学习与实践技能训练进行了深度融合，实现了电机拖动和电气控制内容的融合、理论分析与实践训练教学的融合，突出学以致用用的教学理念。

3) 本书按照“边学边做”的教学理念组织教学任务，将理论学习与实践训练融入具体任务，进一步提高学生的学习兴趣和效率；每个任务都设有学习知识与能力目标，注重学习与训练的针对性与有效性。

4) 本书注重现实社会发展和就业需求，以培养职业岗位群的综合能力为目标，充实课程训练任务的内容，突出实际应用，强化学生职业技能的培养。

5) 本书在内容选取上淡化原理、注重实用，以具体项目、任务实施为主导，注重电气控制电路分析与训练，有利于培养学生分析和解决实际问题能力，强化学生项目组织与实施能力的培养，重点突出学生实践动手能力的提升。

6) 编者参照最新的“维修电工”国家职业技能标准中的工作内容、相关知识、技能要求等来编写相关教材内容，以利于学生参加维修电工职业技能鉴定和考核。

本书为福建省教育厅高等职业教育教材建设计划支持的闽台合作、工学结合的特色改革教材，以福建省先进制造业软件公共服务平台和福建省高职机电一体化技术示范专业建设项目为资助，由多所高职院校合作开发编写。本书由福建信息职业技术学院卓书芳担任主编，负责全书内容的组织、统稿，并编写项目1、2、3和5。福建船政交通职业学院曾思通，宁德职业技术学院林伦标，黎明职业大学曾喜娟，闽西职业技术学院林福，闽北职业技术学院杨成菊以及福建信息职业技术学院何用辉、马孝荣、方凤玲和林少玲共同编写项目4和6。本书由建国科技大学黄锡泉博士和福州大学郑昕博士共同主审，并对本书提出了宝贵意见，在此对他们致以衷心感谢。在本书的编写过程中，编者参考了有关书籍及论文，并引用了其中的一些资料，在此一并向这些作者表示感谢。

限于编者的经验、水平，书中难免有不足与缺漏之处，恳请专家、读者批评指正。

编 者

目 录

前言

项目 1 变压器认知与分析	1
任务 1.1 单相变压器认知与分析	1
1.1.1 单相变压器的结构与原理分析	1
1.1.2 单相变压器的运行分析	3
1.1.3 任务训练 单相变压器的参数和运行特性测定	7
任务 1.2 三相变压器认知与分析	12
1.2.1 三相变压器的结构与原理分析	12
1.2.2 三相变压器的运行分析	13
1.2.3 任务训练 三相变压器的极性判别和联结组别测定	18
任务 1.3 特殊变压器认知及应用	21
1.3.1 自耦变压器认知及应用	21
1.3.2 电压互感器认知及应用	23
1.3.3 电流互感器认知及应用	24
边学边做	25
项目 2 三相异步电动机分析与控制	28
任务 2.1 三相异步电动机结构与原理分析	28
2.1.1 三相异步电动机结构认知	28
2.1.2 三相异步电动机工作原理分析	31
2.1.3 任务训练 三相异步电动机的工作特性测取	38
任务 2.2 三相异步电动机运行分析	41
2.2.1 三相异步电动机起动分析	41
2.2.2 任务训练 三相异步电动机的起动方法测定	45
2.2.3 三相异步电动机调速分析	47
2.2.4 三相异步电动机制动分析	53
任务 2.3 电气控制电路基本控制规律分析	56
2.3.1 部分低压电器认知及应用	56
2.3.2 电气控制系统图认知	68
2.3.3 异步电动机典型控制电路分析	74
2.3.4 任务训练 异步电动机典型控制电路安装与调试	85
任务 2.4 异步电动机减压起动控制电路分析	92
2.4.1 部分低压电器认知及应用	92
2.4.2 定子绕组串电阻减压起动控制电路分析	96
2.4.3 任务训练 定子绕组串电阻减压起动控制电路安装与调试	98
2.4.4 星-三角减压起动控制电路分析	98
2.4.5 任务训练 星-三角减压起动控制电路安装与调试	99
2.4.6 延边三角形减压起动控制电路分析	102
2.4.7 自耦变压器减压起动控制电路分析	103

2.4.8	三相绕线转子异步电动机起动控制电路分析	103
任务 2.5	异步电动机调速控制电路分析	106
2.5.1	三相笼型异步电动机有极调速原理分析	107
2.5.2	按钮控制的双速电动机变极调速控制电路分析	108
2.5.3	时间继电器控制的双速电动机变极调速控制电路分析	108
2.5.4	任务训练 按钮控制的双速电动机变极调速控制电路安装与调试	109
任务 2.6	异步电动机制动控制电路分析	110
2.6.1	机械制动控制电路分析	110
2.6.2	部分低压电器认知及应用	112
2.6.3	电动机单向运行能耗制动控制电路分析	112
2.6.4	任务训练 电动机单向运行能耗制动控制电路安装与调试	113
2.6.5	电动机可逆运行能耗制动控制电路分析	115
2.6.6	单管能耗制动控制电路分析	115
2.6.7	反接制动控制电路分析	115
2.6.8	任务训练 反接制动控制电路安装与调试	117
	边学边做	119
项目 3	直流电机分析与控制	126
任务 3.1	直流电动机结构与原理分析	126
3.1.1	直流电动机结构认知	126
3.1.2	直流电动机工作原理分析	129
3.1.3	任务训练 并励直流电动机机械特性测取	138
任务 3.2	直流电动机运行分析	141
3.2.1	直流电动机起动和反转分析	141
3.2.2	直流电动机调速分析	143
3.2.3	直流电动机制动分析	146
3.2.4	任务训练 直流电动机起动、调速及改变电动机转向	149
任务 3.3	直流电动机控制电路分析	150
3.3.1	直流电动机起动控制电路分析	150
3.3.2	直流电动机调速控制电路分析	151
3.3.3	直流电动机制动控制电路分析	152
	边学边做	153
项目 4	特种电机认知及应用	156
任务 4.1	步进电动机认知与分析	156
4.1.1	步进电动机结构认知	156
4.1.2	步进电动机工作原理分析及应用	157
任务 4.2	伺服电动机认知及分析	159
4.2.1	直流伺服电动机认知及分析	160
4.2.2	交流伺服电动机认知及分析	161
任务 4.3	测速发电机认知及分析	163
4.3.1	直流测速发电机认知及分析	164
4.3.2	交流测速发电机认知及分析	164
任务 4.4	微型同步电动机认知及分析	165
4.4.1	永磁式微型同步电动机认知及分析	166
4.4.2	反应式微型同步电动机认知及分析	166

4.4.3 磁滞式微型同步电动机认知及分析	166
边学边做	168
项目5 典型机床电气控制系统分析	169
任务5.1 CA6140型普通车床电气控制系统分析	169
5.1.1 CA6140型普通车床认知	169
5.1.2 CA6140型普通车床电气控制要求分析	170
5.1.3 CA6140型普通车床电气控制电路识读	170
5.1.4 CA6140型普通车床常见故障检修	172
任务5.2 Z3040型摇臂钻床电气控制系统分析	172
5.2.1 Z3040型摇臂钻床认知	173
5.2.2 Z3040型摇臂钻床电气控制要求分析	173
5.2.3 Z3040型摇臂钻床电气控制电路识读	174
5.2.4 Z3040型摇臂钻床常见故障检修	176
任务5.3 X62W型铣床电气控制系统分析	177
5.3.1 X62W型铣床认知	177
5.3.2 X62W型铣床电气控制要求分析	177
5.3.3 X62W型铣床电气控制电路识读	178
5.3.4 X62W型铣床常见故障检修	182
任务5.4 M7130型磨床电气控制系统分析	183
5.4.1 M7130型磨床认知	183
5.4.2 M7130型磨床电气控制要求分析	184
5.4.3 M7130型磨床电气控制电路识读	185
5.4.4 M7130型磨床常见故障检修	186
边学边做	187
项目6 电气控制系统设计	190
任务6.1 电气控制设计原则与内容	190
任务6.2 电气控制电路设计	192
6.2.1 电气控制电路设计要求	192
6.2.2 电气控制电路设计方法与步骤	194
任务6.3 电气控制电路常用电器选择	195
6.3.1 电动机选择	195
6.3.2 常用控制电器选择	198
任务6.4 项目训练 简易冷库继电器—接触器控制电路设计	200
边学边做	204
附录	206
附录A 低压电器产品型号编制方法	206
附录B 常用电气元器件图形符号与文字符号	208
参考文献	211

项目 1 变压器认知与分析

变压器是一种静止的电气设备。它是根据电磁感应原理，将某一等级的交流电压和电流转换成同频率的另一等级电压和电流的设备。具有变换电压、变换电流和变换阻抗的作用，因此，无论在电力系统、电气测量、电子线路还是自动控制系统中都具有广泛的应用。

任务 1.1 单相变压器认知与分析

知识与能力目标

- 1) 了解单相变压器的用途、分类、铭牌数据和结构。
- 2) 理解单相变压器的工作原理。
- 3) 熟悉单相变压器的运行特性。
- 4) 掌握单相变压器的参数和运行特性测定方法。

1.1.1 单相变压器的结构与原理分析

电力变压器的主要结构部件为由铁心和绕组两个基本部分组成的器身，以及放置器身且盛满变压器油的油箱。此外，还有一些为确保变压器运行安全的辅助器件。油浸式电力变压器外形图如图 1-1 所示。

1. 铁心

铁心是变压器的磁路部分。为了减小交变磁通在铁心中引起的损耗，铁心通常用厚度为 0.35mm、表面涂有绝缘漆的热轧硅钢片或冷轧硅钢片叠装而成，铁心由铁心柱和铁轭两部分组成。变压器从外面看，绕组包围铁心柱，称为芯式结构，芯式结构变压器图如图 1-2 所示；有的变压器，从外面看，铁心柱包围绕组，则称为壳式结构，壳式结构变压器图如图 1-3 所示。小容量变压器多采用壳式结构。交变磁通在铁心中引起涡流损耗和磁滞损耗，为使铁心的温度不致太高，在大容量变压器的铁心中往往设置油道，而铁心则浸在变压器油中，当油从油道中流过时，可将铁心中产生的热量带走。变压器的电路符号如图 1-4 所示。

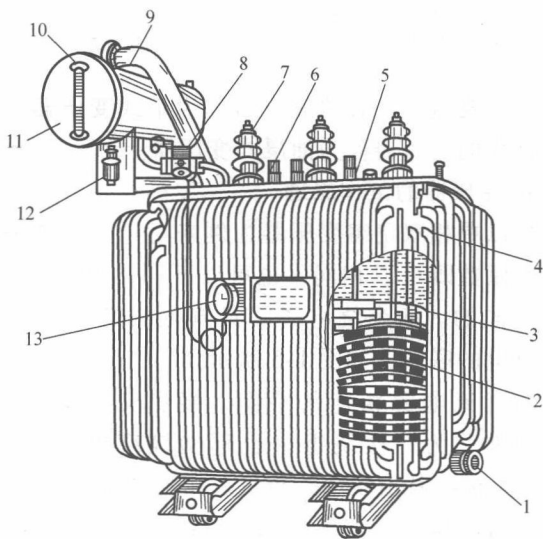


图 1-1 油浸式电力变压器外形图

- 1—放油阀门 2—绕组 3—铁心 4—油箱 5—分接开关
6—低压套管 7—高压套管 8—气体继电器 9—安全气道
10—油表 11—储油柜 12—吸湿器 13—湿度计

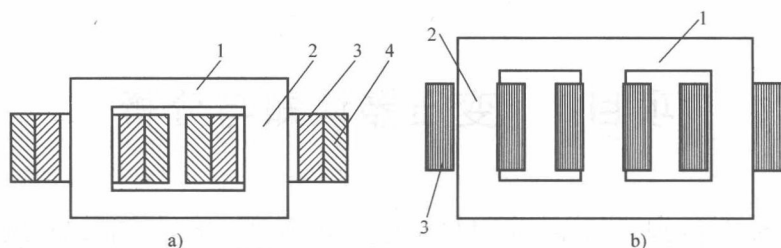


图 1-2 芯式结构变压器图

a) 单相芯式变压器 b) 三相芯式变压器

1—铁轭 2—铁心柱 3、4—绕组

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分。一、二次绕组一般用铜或铝的绝缘导线缠绕在铁心柱上。在变压器中，工作电压高的绕组称为高压绕组，工作电压低的绕组称为低压绕组，一般高、低压绕组装在同一铁心柱上。高压绕组电压高，绝缘要求高，如果高压绕组在里层，离变压器铁心近，则应加强绝缘，增加了变压器的成本造价。因此，为了绝缘方便，低压绕组应紧靠着铁心，高压绕组则套装在低压绕组的外面。两个绕组之间留有油道，既可以起绝缘作用，又可以使油把热量带走。在单相变压器中，高、低压绕组分别缠绕在两个铁心柱上。

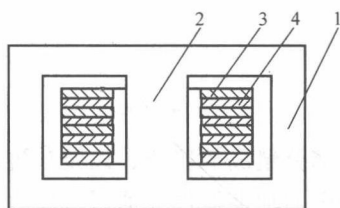


图 1-3 壳式结构变压器

1—铁轭 2—铁心柱 3—低压绕组 4—高压绕组

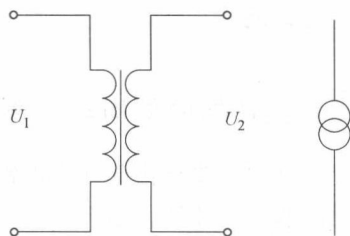


图 1-4 变压器电路符号

只有绕组和铁心的变压器称为干式变压器。大容量变压器的器身放在盛有绝缘油的油箱中，这样的变压器称为油浸式变压器。

3. 变压器的工作原理

现以单相双绕组变压器为例来讨论变压器的工作原理。在一个闭合的铁心上缠绕两个绕组，其匝数既可以相同，也可以不同，但一般是不同的。两个绕组之间只有磁的耦合，而没有电的联系，如图 1-5 所示。

与交流电源相连的绕组，接受交流电压，通常称为一次绕组（也称初级绕组），以 A、X 标注其出线端；与负载相连的绕组，送出交流电压，通常称为二次绕组（也称次级绕组），以 a、x 标注其出线端。与一次绕组相关的物理量均以下角标 1 来表示，与二次绕组相关的物理量均以下角标 2 来表示。例如，一次的匝数、电压、电动势、电流分别以 N_1 、 u_1 、 e_1 、 i_1 来表示；二次的匝数、电压、电动势、电流分别以 N_2 、 u_2 、 e_2 、 i_2 来表示。

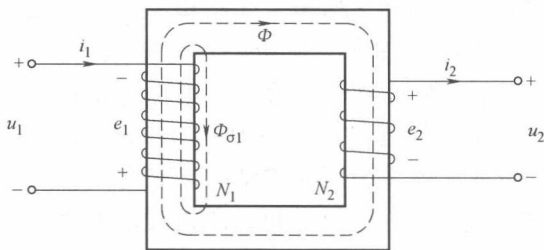


图 1-5 单相双绕组变压器原理图

当一次绕组接通电源，便会在铁心中产生与电源电压同频率的交变磁通，忽略漏磁，该磁通便同时与一次、二次绕组相交链，耦合系数 $k = 1$ ，这样的变压器称为理想变压器。理想变压器的一、二次侧电压比等于匝数比，即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{1-1}$$

当 $N_1 > N_2$ 时为降压变压器；当 $N_1 < N_2$ 时为升压变压器。

根据能量守恒定律有

$$P_1 = P_2 \tag{1-2}$$

P_1 为一次侧功率， P_2 为二次侧功率。

根据式 (1-1) 与式 (1-2) 可得电流比与匝数比互为倒数，即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \tag{1-3}$$

注意：上式只在理想变压器只有一个二次线圈时成立。当有两个二次线圈时， $P_1 = P_2 + P_3$ ， $U_1/N_1 = U_2/N_2 = U_3/N_3$ ，电流则须利用电功率的关系式去求，有多个时依此类推。

4. 变压器绕组的极性和判断

在变压器的使用过程中，有时需要将绕组进行适当的串联，或将匝数相同的绕组进行并联；有时变压器的输出与输入需要同相位或反相位，此时需要注意各绕组的极性，才能按要求正确地使用。

同名端即同极性端，是指每一瞬间两个绕组中电位极性相同的接线端。通常用 “·” 或 “*” 表示。A、a 端为同名端，如图 1-6a 所示；A、a 端为异名端，如图 1-6b 所示。

由于变压器制成后，其绕组是封闭的，难以看出其绕向，对同名端的测定必须通过实验的方法（直流法和交流法）来完成。本文中只介绍同名端的交流测定法，如图 1-7 所示。将电路接上一交流电源，用交流电压表分别测出 U_{AX} 、 U_{Aa} 、 U_{ax} 。如果有 $U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax}$ ，表明 A、a 端为同名端；如果 $U_{Aa} = U_{AX} + U_{ax}$ ，则 A、a 端为异名端。

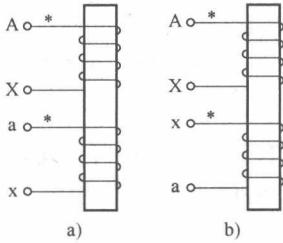


图 1-6 变压器同名端示意图
a) A、a 端为同名端 b) A、a 端为异名端

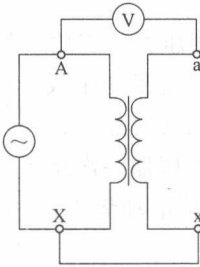


图 1-7 绕组同名端的测定

1.1.2 单相变压器的运行分析

1. 变压器的空载运行

(1) 理想变压器

变压器一次绕组接额定交流电压，而二次绕组开路，即 $i_2 = 0$ 的工作方式，称为变压器的空载运行。空载时在外加交流电压 u_1 的作用下，一次绕组中通过的电流称为空载电流 i_0 ，在电流 i_0 的作用下，铁心中产生交变磁通。一部分通过铁心磁路闭合，形成主磁通 Φ ，一部分通

过空气等非磁性物质构成漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$, Φ 和 $\Phi_{\sigma 1}$ 形成总磁通, 其中 $\Phi_{\sigma 1}$ 只是总磁通中很小的一部分, 即 $\Phi \gg \Phi_{\sigma 1}$, 为了分析问题方便, 不计漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$, 也不计一次绕组的电阻 r_1 及铁心的损耗。这种变压器为理想变压器, 主磁通 Φ 同时穿过一、二次绕组, 分别在其中产生感应电动势 e_1 和 e_2 。由电磁感应定律得

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-4)$$

假设 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 则感应电动势为

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t \\ &= 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{m1} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-5)$$

可见在相位上, e_1 滞后于 $\Phi 90^\circ$ 。

$$\text{同理} \quad e_2 = 2\pi f N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{m2} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-6)$$

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi N_1 f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 f \Phi_m \quad (1-7)$$

$$E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi N_2 f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 N_2 f \Phi_m \quad (1-8)$$

由式 (1-7) 和式 (1-8) 可知

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-9)$$

由于空载电流 i_0 很小, 且不计一次绕组中的电阻 r_1 及铁心损耗, 故

$$U_1 \approx E_1$$

空载时, 二次绕组开路, 故

$$U_2 = E_2$$

$$\text{则得} \quad \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-10)$$

K 称为变压器的变比, 是变压器中最重要的参数之一。从式 (1-10) 可见, 变压器的变比等于一、二次绕组的匝数之比。当 $K > 1$ 时, 是降压变压器; 当 $K < 1$ 时, 是升压变压器。

(2) 实际变压器

实际的变压器一次绕组有很小的电阻 r_1 , 空载电流流过它要产生电压降 $r_1 I_0$, 它和感应电动势 E_1 、漏抗电动势 $E_{\sigma 1}$ 一起为电源电压 U_1 所平衡。故电动势的平衡方程为

$$\begin{aligned} U_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + r_1 \dot{I}_0 \\ &= -\dot{E}_1 + jX_{\sigma 1} \dot{I}_0 + r_1 \dot{I}_0 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{Z}_{\sigma 1} \dot{I}_0 \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_0 = -jX_{\sigma 1} \dot{I}_0$$

$\dot{Z}_{\sigma 1} = r_1 + jX_{\sigma 1}$ 称为变压器的漏阻抗。由于 r_1 、 $X_{\sigma 1}$ 的值均很小, 因此对于电力变压器, 空载时一次绕组的漏阻抗压降很小, 其数值不超过 U_1 的 0.2%, 将其忽略, 则式 (1-11) 变成

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \text{ 或 } U_1 = E_1 \quad (1-12)$$

在二次绕组中，由于 $I_2 = 0$ ，则感应电动势 E_2 等于空载电压 U_2 ，即

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 \text{ 或 } U_2 = E_2 \quad (1-13)$$

2. 变压器的负载运行

变压器一次绕组接入额定交流电源，二次绕组上接入负载的运行方式称为变压器的负载运行，单相双绕组变压器负载运行原理图如图 1-8 所示。

(1) 负载运行时的情况

当二次绕组接上负载以后，二次绕组便通过负载形成闭合回路，产生电流 I_2 ，并产生磁通势 $N_2 I_2$ ，它也作用在变压器的主磁路上，从而改变原来的磁通势平衡。这时一次绕组中的电流由 I_0 增加为 I_1 ，以抵消二次绕组电流产生的磁通势的影响。由此可知磁通势平衡方程为

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0 \quad (1-14)$$

式中 I_0 为空载时一次绕组中的电流。

将上式化简后为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{K} \right) \quad (1-15)$$

通常变压器空载运行时 I_0 很小，因此由上式可以得到

$$\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2 \quad (1-16)$$

上式表明 I_1 和 I_2 在相位上相差 180° ，其大小为

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} \quad (1-17)$$

可以得到

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-18)$$

它是变压器的最基本公式，由式 (1-18) 可见，变压器的高压绕组匝数多，而通过的电流小，因此绕组所用的导线细；低压绕组匝数少，通过的电流大，所用的导线较粗。

(2) 电动势平衡方程

变压器负载运行时，一次绕组的电动势平衡方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jX_{\sigma 1} \dot{I}_1 + r_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + Z_{\sigma 1} \dot{I}_1 \quad (1-19)$$

式中， $Z_{\sigma 1} = r_1 + jX_{\sigma 1}$ 为一次绕组中的漏阻抗， r_1 、 $X_{\sigma 1}$ 分别为一次绕组中的电阻和漏电抗。

同样，二次绕组中也有电阻 r_2 存在，同时二次绕组中也存在漏磁通 $\Phi_{\sigma 2}$ ，如图 1-8 所示。故二次绕组中的电动势平衡方程为

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - r_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_2 - (r_2 + jX_{\sigma 2}) \dot{I}_2 \\ &= \dot{E}_2 - Z_{\sigma 2} \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (1-20)$$

式中， $Z_{\sigma 2} = r_2 + jX_{\sigma 2}$ 为二次绕组中的漏阻抗， r_2 、 $X_{\sigma 2}$ 分别为二次绕组中的电阻和漏电抗。

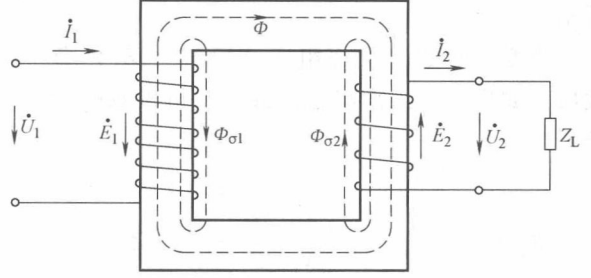


图 1-8 单相双绕组变压器负载运行原理图

(3) 变压器的阻抗变换

变压器除了以上介绍的变电压、变电流的作用外,还具有阻抗变换作用,如图 1-9 所示。

当变压器的二次绕组接有阻抗为 Z_L 的负载后,如果一、二次绕组的漏阻抗可以忽略不计,则

$$Z_L = \frac{U_2}{I_2} = \frac{\frac{N_2}{N_1} U_1}{\frac{N_1}{N_2} I_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{U_1}{I_1} = \frac{1}{K^2} \cdot Z'_L$$

(1-21)

式中, $Z'_L = U_1/I_1$ 相当于直接在一次绕组上的等效阻抗,故

$$Z'_L = K^2 Z_L \quad (1-22)$$

可见,负载通过变压器接电源时,相当于阻抗增加到 Z_L 的 K^2 倍。在电子技术中,经常利用变压器这一阻抗变换作用来实现“阻抗匹配”。

3. 变压器的损耗和效率

(1) 变压器的损耗

1) 铁损耗。

当铁心中的磁通交变时,在铁心中要产生磁滞损耗和涡流损耗,这两项统称为铁损耗,磁滞损耗是磁性物质被交变磁化时要损耗的能量。涡流损耗是在交变磁场的作用下,铁心中产生感应电动势,从而在垂直磁通方向的铁心平面内产生旋涡状的感应电流,由此产生的功率损耗。当电源的电压一定时,铁损耗基本上是恒定的,因此也可以将铁损耗称为不变损耗,它与负载电流的大小和性质无关。

2) 铜损耗。

变压器中一、二次绕组中都有一定的电阻,当电流流过绕组时,就要发热产生损耗,这种损耗就是铜损耗。变压器铜损耗取决于负载电流的大小和绕组的电阻值。

在一定的负载下,变压器的铜损耗为

$$P_{Cu} = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 = r_1 \left(\frac{N_2}{N_1} I_2 \right)^2 + r_2 I_2^2 = \left(\frac{r_1}{K^2} + r_2 \right) I_2^2 \quad (1-23)$$

(2) 变压器的效率

变压器在工作时存在两种基本损耗,即铜损耗和铁损耗,因此变压器的输入功率 P_1 大于输出功率 P_2 , 它们两者之差就是变压器的功率损耗。我们用输出功率 P_2 和输入功率 P_1 的比值定义变压器的效率。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{P_{Fe} + P_{Cu}}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \right) \times 100\% \quad (1-24)$$

对于单相变压器则 $U_2 \approx U_{2N}$, $I_2 = \beta I_{2N}$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx U_{2N} \cdot \beta I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2 \quad (1-25)$$

式中, $U_2 = U_{2N}$, $S_N = U_{2N} I_{2N}$ 。

S_N 是变压器的容量,将铜损耗及铁损耗和式 (1-25) 代入式 (1-24) 可得

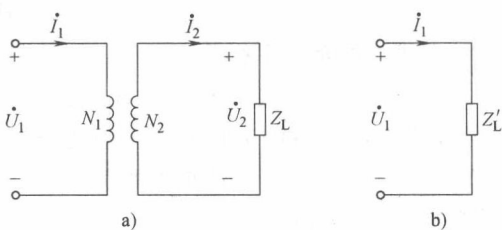


图 1-9 变压器的阻抗变换

a) 等效前电路 b) 等效后电路

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{Fe} + P_{Cu}}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{P_{Fe} + \beta^2 P_{CuN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_{Fe} + \beta^2 P_{CuN}} \right) \times 100\% \quad (1-26)$$

$$= \left(\frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_{Fe} + \beta^2 P_{CuN}} \right) \times 100\%$$

式中, P_{CuN} 是额定电流时的铜耗, 可通过短路试验求得。

这是一个很实用的公式, 一个实际的变压器 P_{Fe} 和 P_{Cu} 是一定的。由空载实验和短路实验可以测出来, 当负载的功率因数一定时, 效率 η 只与负载系数 β 有关, 即 $\eta = f(\beta)$, 这个曲线称为变压器的效率曲线, 如图 1-10 所示。

可以证明, 当变压器的铜损耗等于铁损耗时, 变压器的效率最高。中、小型变压器效率在 95% 以上, 大型变压器效率可达 99% 以上, 通常变压器的最高效率介于 $\beta = 0.5 \sim 0.6$ 之间, 即

$$P_{Fe} = \beta^2 P_{CuN} = P_{Cu}, \beta_m = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{CuN}}} \quad (1-27)$$

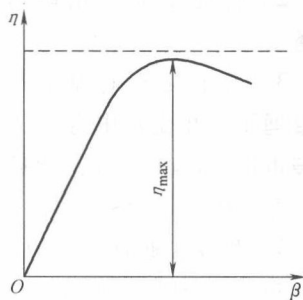


图 1-10 变压器的效率曲线

1.1.3 任务训练 单相变压器的参数和运行特性测定

1. 实训目的

- 1) 通过空载和短路实训测定变压器的变比和参数。
- 2) 通过负载实训测取变压器的运行特性。

2. 预习要点

- 1) 变压器的空载和短路实训有什么特点? 实训中电源电压一般加在哪一方比较合适?
- 2) 在空载和短路实训中各种仪表应怎样连接才能使测量误差最小?
- 3) 如何用实训方法测定变压器铁耗及铜耗?

3. 实训项目

(1) 空载实训

测取空载特性 $U_0 = f(I_0)$, $P_0 = f(U_0)$ 。

(2) 短路实训

测取短路特性 $U_K = f(I_K)$, $P_K = f(I_K)$ 。

(3) 负载实训

1) 纯电阻负载。

保持 $U_1 = U_N$, $\cos \varphi_2 = 1$ 的条件下, 测取 $U_2 = f(I_2)$ 。

2) 阻感性负载

保持 $U_1 = U_N$, $\cos \varphi_2 = 0.8$ 的条件下, 测取 $U_2 = f(I_2)$

4. 实训设备

- 1) XKDT02 变压器挂箱。
- 2) 三相可调电阻器 (900Ω)。
- 3) 功率因数表、交流电流表、交流电压表。

5. 实训方法

(1) 空载实训

1) 在 三相调压交流电源断电的条件下, 按照图 1-11 接线。被试变压器选用 XKDT02 变压器挂箱中的一只作为单相变压器, 其额定容量 $P_N = 77\text{W}$, $U_{1N}/U_{2N} = 220\text{V}/55\text{V}$, $I_{1N}/I_{2N} = 20.35\text{A}/1.4\text{A}$ 。变压器的低压线圈 a、x 接电源, 高压线圈 A、X 开路。

2) 将控制屏三相调压器调到输出电压为 0 的位置。

3) 合上交流电源总开关, 按下“起动”按钮, 便接通了三相交流电源。调节调压器旋钮, 使变压器空载电压 $U_0 = 1.2U_N$, 然后, 逐次降低电源电压, 在 $1.2 \sim 0.5U_N$ 的范围内, 测取变压器的 U_0 、 I_0 、 P_0 。

4) 测取数据时, $U = U_N$ 点必须测, 并在该点附近测的点较密, 共测取数据 6~7 组。

5) 为了计算变压器的变比, 在 U_N 以下测取一次侧电压的同时测出二次侧电压, 空载实训数据记录于表 1-1 中。

表 1-1 空载实训测量数据表

序号	实训数据				计算数据
	U_0/V	I_0/A	P_0/W	U_2/V	$\cos\varphi_0$

(2) 短路实训

1) 按下控制屏上的“停止”按钮, 切断三相调压交流电源, 按照图 1-12 接线 (以后每次改接线路, 都要关断电源)。将变压器的高压线圈接电源, 低压线圈直接短路。

2) 将三相交流调压器旋钮调到输出电压为 0 的位置。

3) 接通交流电源, 逐次缓慢增加输入电压, 直到短路电流等于 $1.1I_N$ 为止, 在 $(0.2 \sim 1.1) I_N$ 范围内测取变压器的 U_K 、 I_K 、 P_K 。

4) 测取数据时, $I_K = I_N$ 点必须测, 共测取短路实训数据 5~6 组记录于表 1-2 中。实训时记录下周围环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

表 1-2 短路实训测量数据表

序号	实训数据			计算数据
	U_k/V	I_k/A	P_k/W	$\cos\varphi_k$

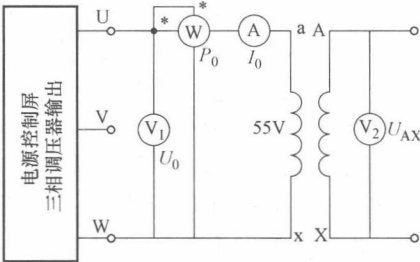


图 1-11 空载实训接线图

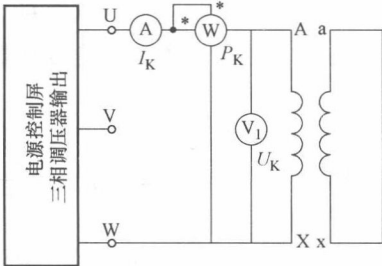


图 1-12 短路实训接线图

本实训应在尽量短时间内完成，因为变压器的绕组很快就发热，使绕组电阻增大，读数产生偏差。

(3) 负载实训

负载实训接线图电路如图 1-13 所示。变压器低压线圈接电源，高压线圈经过开关 S_1 和 S_2 ，接到负载电阻 R_L 上。 S_1 、 S_2 在 XKDT26 挂箱上。功率因数表在 XKDT01C 挂箱上。

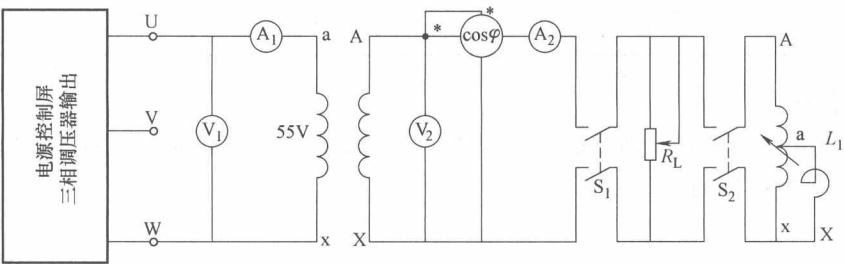


图 1-13 负载实训接线图

1) 纯电阻负载。

- ① 将三相交流调压器旋钮调到输出电压为 0 的位置， S_1 、 S_2 打开，负载电阻值调到最大。
- ② 接通交流电源，逐渐升高电源电压，使变压器输入电压 $U_1 = U_N$ 。
- ③ 在保持 $U_1 = U_N$ 的条件下，合上 S_1 ，逐渐增加负载电流，即减小负载电阻 R_L 的值，从空载到额定负载的范围内，测取变压器的输出电压 U_2 和电流 I_2 。
- ④ 测取数据时， $I_2 = 0$ 和 $I_2 = I_{2N} = 0.35A$ 必测，共取纯电阻负载数据 5 ~ 7 组，记录于表 1-3 中。

$\cos\varphi_2 = 1 \quad U_1 = U_{1N} = \text{_____} \text{ V}。$

表 1-3 纯电阻负载实训测量数据表

序号	U_2/V	I_2/A

2) 阻感性负载 ($\cos\varphi_2 = 0.8$)。

- ① 用电抗器 X_L 和电阻器 R_L 并联作为变压器负载， S_1 、 S_2 打开，电阻及电抗值调到最大。
 - ② 接通交流电源，升高电源电压至 $U_1 = U_{1N}$ 。
 - ③ 合上 S_1 、 S_2 ，在保持 $U_1 = U_{1N}$ 及 $\cos\varphi_2 = 0.8$ 条件下，逐渐增加负载电流，从空载到额定负载的范围内，测取 U_2 和 I_2 。
 - ④ 测取数据时， $I_2 = 0$ 和 $I_2 = I_{2N}$ 必测，共测取阻感性负载数据 5 ~ 6 组，记录于表 1-4 中。
- $\cos\varphi_2 = 0.8 \quad U_1 = U_{1N} = \text{_____} \text{ V}。$

6. 注意事项

- 1) 在变压器实训中，应注意电压表、电流表、功率因数表的合理布置及量程选择。
- 2) 短路实训操作要快，否则线圈发热引起电阻变化。

表 1-4 阻感性负载实训测量数据表

序号	U_2/V	I_2/A

7. 实训报告

1) 计算变比、由空载实训测取变压器的一、二次侧电压的数据，分别计算出变比，然后取其平均值作为变压器的变比 K 。

$$K = U_{AX}/U_{ax}$$

2) 绘出空载特性曲线和计算激磁参数。

① 绘出空载特性曲线 $U_0 = f(I_0)$ ， $P_0 = f(U_0)$ ， $\cos\varphi_0 = f(U)$ 。式中， $\cos\varphi_0 = P_0/U_0I_0$

② 计算激磁参数。

从空载特性曲线上查出对应于 $U_0 = U_N$ 时的 I_0 和 P_0 值，并由下式算出激磁参数。

$$r_m = P_0/I_0^2$$

$$Z_m = U_0/I_0$$

$$X_m = \sqrt{(Z_m^2 - r_m^2)}$$

3) 绘出短路特性曲线和计算短路参数。

① 绘出短路特性曲线 $U_K = f(I_K)$ ， $P_K = f(I_K)$ ， $\cos\varphi_K = f(I_K)$ 。

② 计算短路参数。

从短路特性曲线上查出对应于短路电流 $I_K = I_N$ 时的 U_K 和 P_K 值，由下式算出实训环境温度 $\theta(^{\circ}C)$ 时的短路参数。

$$\left. \begin{aligned} Z'_K &= U_K/I_K \\ r_K &= P_K/I_K^2 \\ X'_K &= \sqrt{(Z_K^2 - r_K^2)} \end{aligned} \right\}$$

折算到低压方

$$\left. \begin{aligned} Z_K &= Z'_K/K^2 \\ r_K &= r'_K/K^2 \\ X_K &= X'_K/K^2 \end{aligned} \right\}$$

由于短路电阻 r_K 随温度变化，因此，算出的电阻就按国家标准换算到基准工作温度 $75^{\circ}C$ 时的阻值。