

中等职业学校电气运用与维修专业教学用书

电机与变压器

于 磊 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

中等职业学校电气运用与维修专业教学用书

电机与变压器

于磊 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是电气运用与维修专业教学用书,根据最新颁布《维修电工》及相关工种国家职业标准及职业技能鉴定规范编写的。

本书主要内容包括:变压器的结构与工作、变压器的连接与并联运行、专用变压器、直流电机、三相异步电动机、单相异步电动机、同步电机、微控电机。

本书采用理论与实训一体化形式,既对电机和变压器进行必要的理论分析,又讲解实训操作,以满足中级工考工需要。每一个单元分解为若干课题,每一个课题包括:学习目标、相关知识、技能训练,并尽可能采用图表形式,简明直观。

本书可作为电气运用与维修专业教学用书,也可作为维修电工及相关工种职业技能鉴定培训用书和职业院校电工类专业教材,还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与变压器/于磊主编. —北京:高等教育出版社, 2008.1

ISBN 978 - 7 - 04 - 022534 - 1

I. 电… II. 于… III. ①电机 - 专业学校 - 教材②变压器 - 专业学校 - 教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 205824 号

策划编辑 李宇峰 责任编辑 李宇峰 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 马敬茹 责任校对 金辉 责任印制 毛斯璐

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 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京机工印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 16.75
字 数 400 000

• 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.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 1 月第 1 版
印 次 2008 年 1 月第 1 次印刷
定 价 22.50 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 22534 - 00

前 言

为了贯彻全国职业教育工作会议精神，实践理论实践一体化教学，更好地适应全国中等职业技术学校电工类专业的教学要求，高等教育出版社组织编写了本教材。

本教材的编写遵循以下原则：

第一，根据学生实际就业的需要，合理选配知识内容和结构，对教材内容的深度、难度作了较大程度的调整，基础理论课的教学以“必须、够用”为度。较多地采用定性分析，弱化了定量分析计算。注重实际动手能力的培养。

第二，以模块化教学的方式实现理论知识与技能训练相结合，使教材内容更适合学生的认知规律，便于学生更快、更好的掌握教学内容。

第三，根据科学技术的不断发展，合理更新教材内容，尽可能多地在教材中充实新知识、新技术、新设备和新材料等方面的内容，力求使教材具有较鲜明的时代特征。

第四，教材内容涵盖有关国家职业标准(中级)的知识和技能要求。同时，在教材编写过程中，严格贯彻了国家有关技术标准的要求。

第五，教材编写采用模块化教学的特点，每个模块都有明确的教学目的，对相关知识及技能训练方法进行详细阐述。

第六，在编写风格上，力求图文并茂，尽可能使用图片或表格形式将各个知识点形象地展示出来，从而提高了教材的可读性和亲和力，使学生对教材内容有较为感性的认识。

本书第一、二、三单元和第四、五、六、七单元分别由天津市劳动和社会保障局高级技术学校顾祥、于磊编写。本书在编写过程中得到天津市教委职教教研室及天津市劳动和社会保障局高级技术学校领导的大力支持。高等教育出版社胡淑华编审审阅全书，提出了宝贵建议。在此一并表示感谢！

由于时间仓促，编者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2007年12月

目 录

第一单元 普通变压器	1
课题一 普通变压器原理和结构	1
课题二 普通小型变压器的制作	5
课题三 普通变压器的维修	11
习题	19
第二单元 电力变压器	22
课题一 电力变压器的基本知识及外形结构	22
课题二 电力变压器的并联运行及联结组别	29
课题三 电力变压器的维护	33
课题四 电力变压器的检修	34
课题五 变压器的干燥处理及装复	40
第三单元 专用变压器	42
课题一 仪用变压器	42
课题二 电焊变压器	45
课题三 自耦变压器	47
习题	49
第四单元 直流电机	51
课题一 直流电机的外形结构、分类及其拆卸安装	51
课题二 直流电机的工作原理及一般检查试验	62
课题三 直流电机的电枢绕组及其嵌线	75
课题四 直流电机的机械特性及使用	85
课题五 直流电机的基本控制方法	90
课题六 直流电机的常见故障及其检修	99
小知识 电机学发展史	107
第五单元 三相交流异步电动机	111
课题一 三相交流异步电动机的外形结构及其拆卸安装	111
课题二 三相交流异步电动机的工作原理及一般试验	126
课题三 三相交流异步电动机的定子绕组和嵌线	136
课题四 三相交流异步电动机的基本控制	154
课题五 三相交流异步电动机的常见故障分析及检修	166
小知识 交流电动机的产生与形成	183
第六单元 单相交流异步电动机	185

课题一	单相交流异步电动机的外形结构及其拆卸安装	185
课题二	单相交流异步电动机的工作原理及检验	195
课题三	单相交流异步电动机的定子绕组及绕组重绕	199
课题四	单相交流异步电动机的机械特性及基本使用	211
课题五	单相交流异步电动机的常见故障及处理方法	215
第七单元	控制电机	223
课题一	电磁调速异步电动机	223
课题二	步进电机	229
课题三	伺服电机	238
课题四	直线电机	244
小知识	直线电机的发展史	252
附录		253

分类形式	类别	特点	适用范围	适用场合
------	----	----	------	------

第一单元 普通变压器

课题一 普通变压器原理和结构

学习目标

掌握变压器原理及相关的计算。

了解普通变压器的基本结构、分类。

相关知识——普通变压器原理和结构

变压器是利用电磁感应原理制成的静止电气设备。它能将某一电压值的交流电转换成同频率的所需的交流电，以满足高压输电、低压配电及其他用途的需要。变压器分为普通变压器、电力变压器及特殊变压器等。普通变压器一般都为小型变压器其外形如图 1-1 所示。

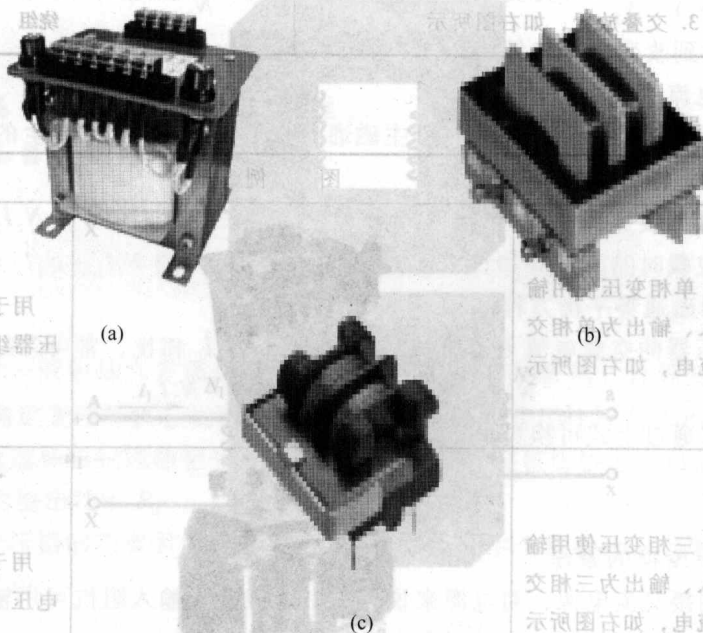
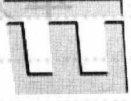
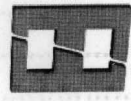
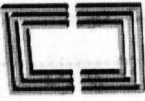
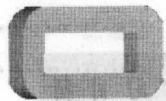
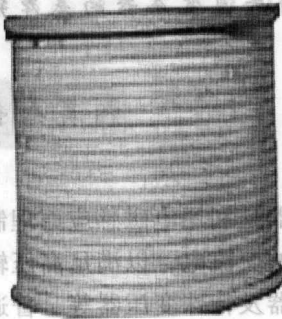


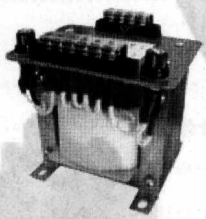
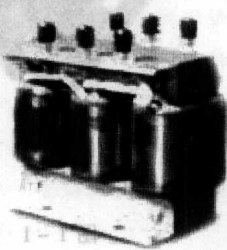
图 1-1

当一次绕组接交流电压后，就产生一个交变的电流，该电流是一个交变的电流故在铁心中可产生一个交变的主磁通，如图 1-2a 所示。

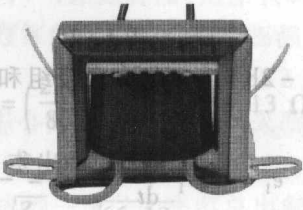
一、普通变压器结构组成

部件名称	部件作用及类型	图 例
铁心	铁心的作用一是提高磁导率减小漏磁的产生，二是起到变压器的支撑骨架作用。铁心一般分为铁心柱和铁轭两部分，由 0.35 ~ 0.5 mm 的硅钢片叠装而成。接缝要相互错开，以减少接缝所产生的气隙对磁路的影响。变压器按铁心的结构不同可分为壳式和心式两种(其中“R”型铁心为硅钢片卷制而成)，如右图所示	 (a) E 字形  (b) F 字形  (c) C 字形  (d) R 字形
绕组	绕组的作用是建立磁通势，在磁通势的作用下铁心中产生交变主磁通。绕组是变压器的电路部分，常用绝缘铜线或铝线绕制而成，接电源的绕组称为一次绕组，与负载相接的绕组称为二次绕组。对于普通心式变压器一次绕组和二次绕组分别套装在两个不同的铁心柱上。而对于普通壳式变压器一次绕组和二次绕组套装在中间同一根铁心柱上，放置的方式有三种：1. 上下放置。2. 同心放置。3. 交叠放置，如右图所示	 绕组

二、普通变压器的分类

分类形式	类别	特 点	图 例	适 用 场 合
相数	单相	单相变压使用输入、输出为单相交流电，如右图所示		用于单相负荷和三相变压器组
	三相	三相变压使用输入、输出为三相交流电，如右图所示		用于三相系统的升、降电压

续表

分类形式	类别	特 点	图 例	适 用 场 合
心式	铁心形式	一般采用“C”字形铁心，铁心无支路，磁通成单一闭合回路，如右图所示		用于高压的电力变压器
壳式	铁心形式	一般采用“E”、“F”形铁心，为铁轭包围绕组结构，如右图所示		用于电子仪器及电视、收音机等电源变压器

三、变压器原理

不管哪一种变压器，它们的基本原理都是相同的，都是根据电磁感应原理制成的。

1. 变压器电压变换原理

图 1-2 所示为单相变压器工作原理图。铁心是提供磁通的闭合路径。两个绕组分别是一次绕组（俗称原边） N_1 和二次绕组（俗称副边） N_2 。

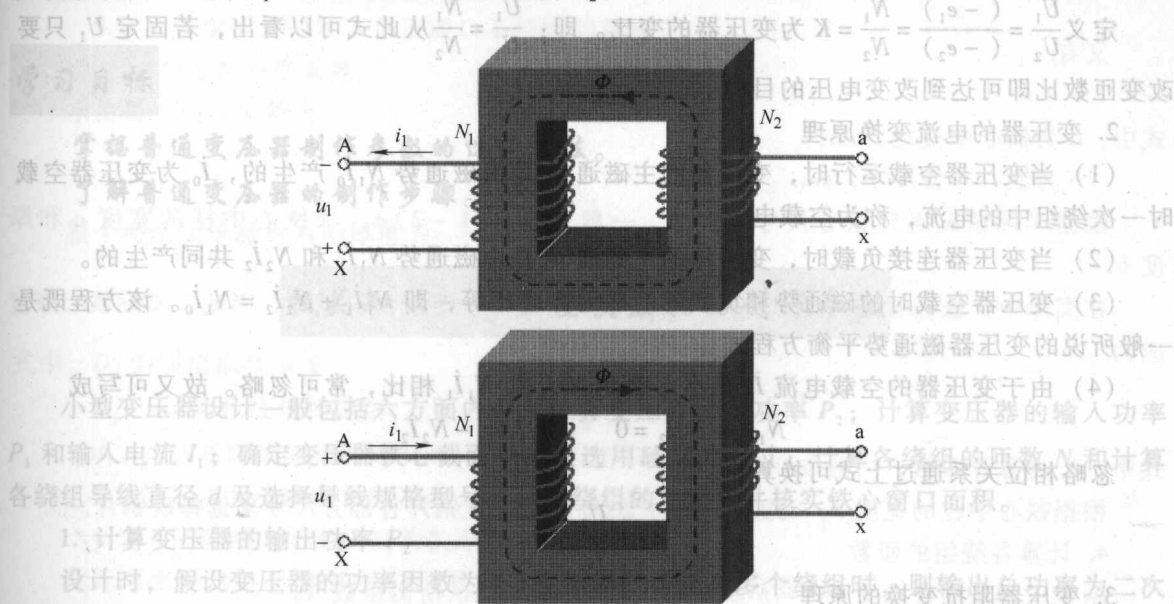


图 1-2a

当一次绕组接交流电压后，就有励磁电流 i_1 存在，该电流是一个交变的电流故在铁心中可产生一个交变的主磁通 Φ ，如图 1-2a 所示。

普通变压器结构组成

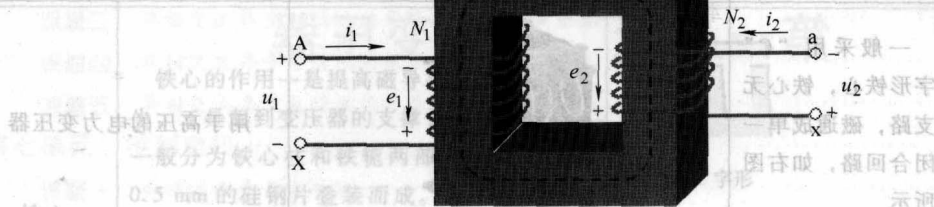
部件名称 作用

部件作用及类型

点图 符号

图例

类型 类别



变压器的工作原理图

图 1-2b

根据电磁感应定律(见图 1-2b), Φ 在一次绕组和二次绕组中分别产生感应电动势 e_1 和 e_2 , 即

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

式中, f 为电源频率;

Φ_m 为主磁通 Φ 的幅值。

其有效值分别为 $E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$, $E_2 = 4.44fN_2\Phi_m$ 。

若略去绕组电阻和漏抗压降, 则以上两式之比为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{(-e_1)}{(-e_2)} = \frac{N_1}{N_2}$$

定义 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{(-e_1)}{(-e_2)} = \frac{N_1}{N_2} = K$ 为变压器的变比。即: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 从此式可以看出, 若固定 U_1 只要

改变匝数比即可达到改变电压的目的。

2. 变压器的电流变换原理

(1) 当变压器空载运行时, 变压器的主磁通 Φ 是由磁通势 $N_1 i_0$ 产生的, i_0 为变压器空载时一次绕组中的电流, 称为空载电流。

(2) 当变压器连接负载时, 变压器的主磁通 Φ 是由磁通势 $N_1 i_1$ 和 $N_2 i_2$ 共同产生的。

(3) 变压器空载时的磁通势和负载时的磁通势应相等, 即 $N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_0$ 。该方程既是一般所说的变压器磁通势平衡方程式。

(4) 由于变压器的空载电流 i_0 很小。因此 $N_1 i_0$ 与 $N_1 i_1$ 相比, 常可忽略。故又可写成

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0 \quad N_1 i_1 = -N_2 i_2$$

忽略相位关系通过上式可换算出:

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = Z_{fx}$$

3. 变压器阻抗变换的原理

变压器一次侧接交流电源, 对电源来说是一个负载。其输入阻抗可用输入电压、输入电流来计算, 即变压器的输入阻抗为 $Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$, 而变压器的二次侧输出又接了负载, 电流负载之间存在关系, 根据

为铁心窗口高， $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$ 和 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$ 则 $Z = \frac{U_1}{I_1} = \frac{KU_2}{I_2/K} = \frac{K^2 U_2}{I_2} = K^2 Z_L$

这说明在变压器二次绕组的负载 Z_L 经过变压器接入电源后相当于阻抗扩大为 K^2 倍。

在电子线路中，这种阻抗变换很常用，如扩音设备中扬声器的阻值就要和功放电路输出阻抗匹配（即：输出阻抗等于扬声器阻值），这时就要用变压器的阻抗变换原理使其匹配。

例 1-1 某晶体管收音机的输出变压器一次侧匝数为 230 匝，二次侧匝数为 80 匝。原来配接 $8\ \Omega$ 的扬声器，现在要改用 $4\ \Omega$ 的扬声器，问变压器的二次侧匝数应改为多少匝？

解：

$$Z_1 = K^2 Z_2 = \left(\frac{230}{80} \right)^2 \times 8\ \Omega = 66.13\ \Omega$$

再由 Z_1 和新扬声器阻抗 $Z_2 = 4\ \Omega$ ，求出新 K' 的和 N'_2 。

$$K' = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \sqrt{\frac{66.13}{4}} = 4.07$$

$$N'_2 = \frac{N'_1}{K'} = \frac{230}{4.07} = 57(\text{匝})$$

则二次侧匝数应改成 57 匝。

课题二 普通小型变压器的制作

学习目标

掌握普通变压器制作参数的选择方法。

了解普通变压器的制作步骤。

相关知识——小型变压器的制作参数

小型变压器设计一般包括六方面内容：计算变压器输出功率 P_2 ；计算变压器的输入功率 P_1 和输入电流 I_1 ；确定变压器铁心截面积 S 及选用硅钢片尺寸；计算各绕组的匝数 N 和计算各绕组导线直径 d 及选择导线规格型号；计算绕组的总尺寸并核实铁心窗口面积。

1. 计算变压器的输出功率 P_2

设计时，假设变压器的功率因数为 1。变压器二次侧为多个绕组时，则输出总功率为二次侧各绕组输出功率之和。

$$D = (1.1 \sim 1.2) D_0 \text{ (mm)}$$

如果 D 小于铁心窗口宽度， $P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + \cdots + U_n I_n$ 可以采取两种措施：一种是加大铁式中， U_2 、 U_3 、 $\cdots$ 、 U_n 分别为变压器二次侧各绕组电压有效值，V； I_2 、 I_3 、 $\cdots$ 、 I_n 分别为变压器二次侧各绕组电流有效值，A。

2. 计算变压器输入功率 P_1 和输出电流 I_1

由于变压器在运行时,存在着短路损耗(铜损)和空载损耗(铁损),因此,输入功率与输出功率之间的关系是

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

式中, η 为变压器的效率,总是小于1,小型变压器 η 一般为 0.8 ~ 0.9, 输入电流为

$$I_1 = (1.1 \sim 1.2) \frac{P_1}{U_1} (\text{A})$$

式中, U_1 为变压器一次电压(即外电压)的有效值, V;

1.1 ~ 1.2 为变压器因存在励磁电流分量的经验系数。

3. 确定变压器铁心截面积 S 及选用硅钢片尺寸

小型单相变压器铁心一般都采用壳式结构,铁心用 0.35 mm 厚的硅钢片叠成,中间心柱放置绕组。

中间柱心截面积与变压器输出总功率的关系一般为

$$S = K_0 \sqrt{P_2} (\text{cm}^2)$$

式中, K_0 为经验系数,大小与 P_2 的关系可参考表 1-1 选用。

表 1-1 系数 K_0 的参考值

P_2/W	0 ~ 10	10 ~ 15	50 ~ 500	500 ~ 1 000	1 000 以上
K_0	2	2 ~ 1.75	1.5 ~ 1.4	1.4 ~ 1.2	1

又有

$$S = ab (\text{cm}^2)$$

式中, a 为铁心中柱宽, cm;

b 为铁心净叠片厚, cm。

根据实际情况确定铁心尺寸 a 与 b , 一般取 $b = (1 \sim 2)a$, 求铁心中柱的宽度 a 和厚度 b 。

在实际中,铁心叠片间绝缘材料所占的空间引起铁心实际面积减小,因此,实际铁心厚度应为

$$k_e b' = \frac{b}{k_e} (\text{cm})$$

式中, k_e 为叠片系数,一般取 0.9。

根据铁心中柱的宽度 a , 对照国家生产的标准铁心硅钢片各部分尺寸来选择硅钢片。

4. 计算各绕组的匝数

从变压器基本公式 $E = 4.44fNB_m S \times 10^{-8}$, 可求出每伏所需匝数 N_v

$$N_v = \frac{N}{E} = \frac{1 \times 10^{-8}}{4.44fSB_m} (\text{匝/V})$$

式中, f 为电源频率, Hz;

S 为铁心截面积, cm^2 ;

B_m 为铁心磁通密度, T, 一般冷轧硅钢片取 $1.2 \sim 1.4$ T, 热轧硅钢片取 $1 \sim 1.2$ T。每个绕组匝数为 $N_n = U_n N_V$ (匝)

式中, n 为变压器的第 n 个绕组。

其中, 系数 1.05 是为补偿负载时变压器内部阻抗降压, 使二次绕组在额定负载时也保持额定电压。

5. 计算绕组的导线直径 d 及选择导线规格

$$\text{导线截面积为 } S_d = \frac{I}{J} (\text{mm}^2)$$

$$\text{导线直径为 } d = \sqrt{\frac{4I}{\pi J}} = 1.13 \sqrt{\frac{I}{J}} (\text{mm})$$

式中, I 为绕组的电流, A;

J 为导线允许的电流密度, A/mm^2 , 一般取 $2 \sim 2.5 \text{ A/mm}^2$ 。

根据计算的导线直径 d , 参阅电工手册选取漆包线带漆膜后的线径 d' 。

6. 计算绕组的总尺寸和铁心窗口面积

绕组的层数、线径及选用绝缘材料决定的总厚度应小于铁心窗口宽度。按选定的铁心窗口高 h 计算每层绕组匝数 N_e :

$$N_e = \frac{0.9[h - (2 \sim 4 \text{ mm})]}{d'} (\text{匝/层})$$

式中, d' 为包括绝缘材料厚度的导线外径, mm;

h 为铁心窗口高, mm;

0.9 为绕组框架两端各空出窗口不绕线的系数;

2~4 为考虑裕度系数。

求出每个绕组层数为

$$m = \frac{N}{N_e} (\text{层})$$

整个绕组加绝缘材料的厚度为

$$D' = D_0 + [m_1(d'_1 + \delta) + \gamma] + [m_2(d'_2 + \delta) + \gamma] + \dots (\text{mm})$$

式中, D_0 为绕组框架厚度;

m_1, m_2 为各绕组的层数;

d'_1, d'_2 为各绕组包括绝缘材料厚度的导线外径, mm;

δ 为绕组之间绝缘材料的厚度, mm;

γ 为不同绕组之间绝缘材料的厚度, mm。

实际厚度 D 应在计算厚度 D' 的基础上增加 1.1~1.2 倍的裕度系数, 即为

$$D = (1.1 \sim 1.2) D' (\text{mm})$$

如果 D 小于铁心窗口宽度, 说明是可行的。反之这时可以采取两种措施: 一种是加大铁心叠厚, 以减小匝数, 但一般叠厚取比较合适; 另一种是重选硅钢片尺寸, 按上述步骤重新算和核算, 直到合适为止。

技能训练——普通小型变压器的制作

普通变压器制作所使用的工具及器件如图 1-3 所示。制作步骤见表 1-2。



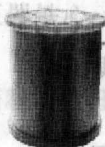
尖嘴钳



剪刀



硅钢片铁心



漆包线



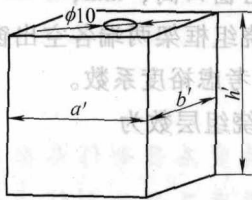
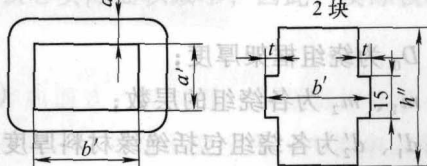
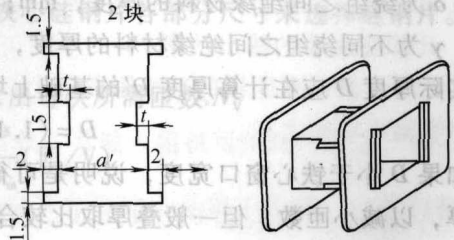
变压器骨架



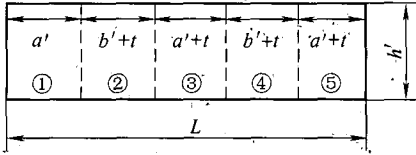
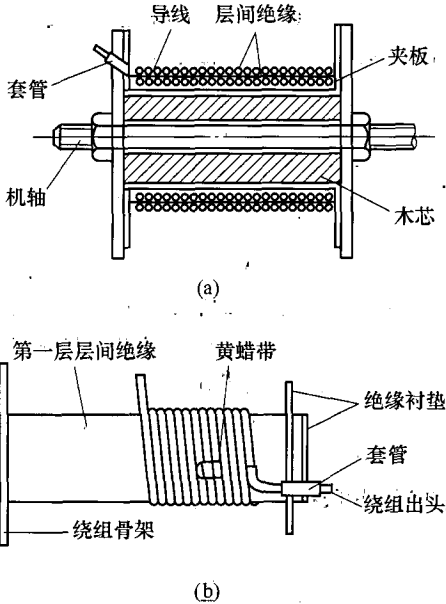
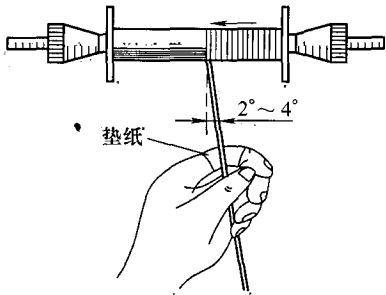
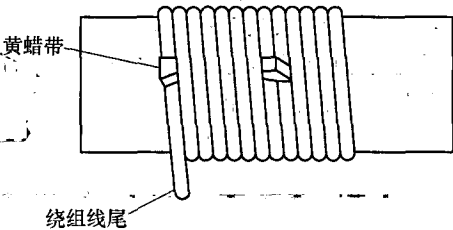
手动绕线机

图 1-3

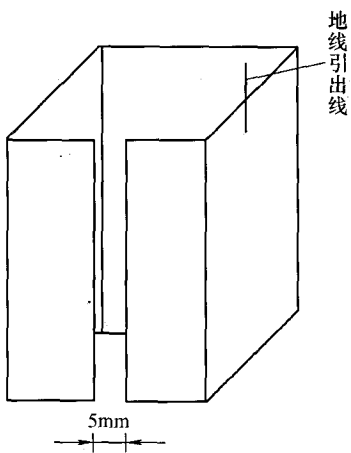
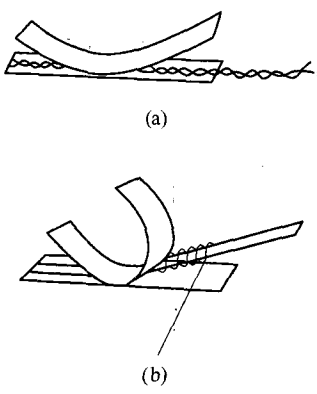
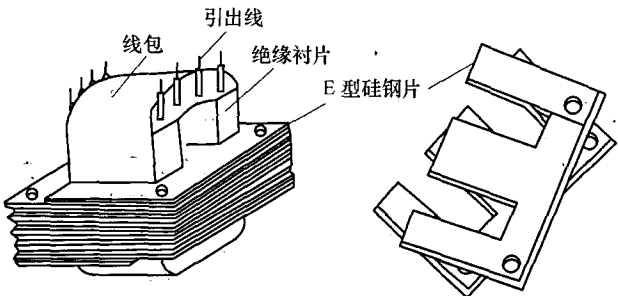
表 1-2 变压器的制作步骤

绕制前的准备工作	制作木芯。如图所示, $a' \times b'$ 应比铁心柱截面积 $a \times b$ 稍大, h' 应比铁心窗口高度长约 2 mm。如右图所示 b 为铁心净叠片厚, cm。 根据实际情况确定铁心尺寸 a 与 b, 一般取 $b = (1 \sim 2) \sqrt{\frac{P}{K_0}}$	
绕制前的准备工作	制作骨架。框架应为钢纸或玻璃纤维纸制成。如右图所示	2 块  2 块 

续表

绕制前的准备工作	裁剪好各种绝缘纸(布),绝缘纸的宽度应稍长于骨架的长度,而长度应稍大于骨架的周长,还应考虑到绕组绕制多层后所需的裕量。如右图所示	
绕制线包	绕线前,利用木芯将骨架固定在绕线机轴上,如右图 a 所示。若采用无框骨架,起绕时在导线引线头压入一条绝缘带的折条,以便抽紧起始线头,如右图 b 所示。导线起绕点不可过于靠近骨架边缘,以免绕线时导线滑出。若采用有框骨架,线要紧靠边框,不必留出空间。	
	绕线方法 导线要求绕得紧密、整齐,不允许有叠线现象。绕线的要领是:按右图所示拉线,拉线的手顺绕线的前进方向移动。拉力大小要适当。导线较粗时,每绕完一层要垫层间绝缘	
	线包的层次 绕线的顺序按一次绕组、静电屏蔽、二次高压绕组、低压绕组依次叠绕。每绕完一组绕组后,要衬垫绕组间绝缘材料。线尾的紧固当一组绕组的绕制接近结束时,要垫上一条绝缘带的折条,继续绕线至结束;将线尾插入绝缘带的折缝中;抽紧绝缘带,线尾便固定了。如右图所示	

续表

绕组线包	电子设备中的电源变压器,需在一次、二次绕组间放置静电屏蔽层。屏蔽层可用厚约 0.1 mm 的铜箔或其他金属箔制成,其宽度比骨架长度稍短 1~3 mm,长度比一次绕组的周长短 5 mm 左右,如右图所示。屏蔽层夹在一次、二次绕组的绝缘垫层间,不能碰到导线或自行短路,铜箔上焊接一根多股软线作为引出接地线。如无铜箔,可用 0.12~0.15 mm 的漆包线密绕一层,一端埋在绝缘层内,另一端引出作为接地线	
	引线线径大于 0.2 mm 时,绕组的引线可利用原线,如右图 a 所示的方法绞合后引出即可。线径小于 0.2 mm 时应采用多股软线焊接后引出,如右图 b 所示。焊剂应采用松香焊剂。引出线的套管应按耐压等级选用。外层绝缘线包绕好后,外层用青壳纸绕 2~3 层,用胶粘牢。	
浸漆、绝缘处理	线包绕好后,为防潮和增加绝缘强度,应作绝缘处理。处理方法是:将线包放在烘箱内预热,加温到 70~80℃,3~5 h 后取出,立即浸入 1260 漆或绝缘清漆中约 0.5 h,取出后在通风处滴干,然后放到烘箱内加温到 80℃,烘干 8 h 即可	
铁心安装	铁心要求紧密、整齐,铁心片一片一片地交叉对镶,最后要将铁心用螺栓或夹板紧固。装硅钢片时要防止切断绕组和切坏变压器骨架。如右图所示	

制作一台小型变压器，要求功率 15 W、一次电压为 220 V、二次电压为 12 V。

课题三 普通变压器的维修

学习目标

掌握普通变压器的空载试验和短路试验的试验目的及试验方法。
了解普通变压器的维修方法。

相关知识——变压器的极性判别、外特性及电压调整率

1. 变压器绕组的极性判别

变压器绕组的一次和二次之间存在着极性关系，若有几个绕组或几个变压器进行组合，都需要知道其极性，才可以正确运用。对于两绕组的变压器来说，若在任意瞬间在其内感应的电动势都具有同方向，则称它为同名端，反之则称为异名端，如图 1-4 所示。

2. 直流法确定变压器的极性

测量变压器绕组极性的方法有直流法和交流法，这里介绍简单适用的直流法：用一节干电池接在变压器的高压端子上，在变压器的二次侧接上一毫安表或微安表，实验时观察当电池开关闭合时表针的摆动方向，即可确定极性。

如图 1-5 所示，将干电池的正极接在变压器一次侧 A 端子上，负极接到 X 上，电流表的正端接在二次侧 a 端子上，负极接到 x 上，当合上电源的瞬间，若电流表的指针向零刻度的右方摆动，而拉开的瞬间指针向左方摆动，说明 A 端和 a 端互为异名端。

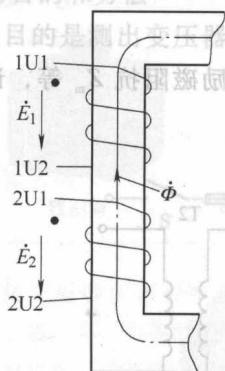


图 1-4

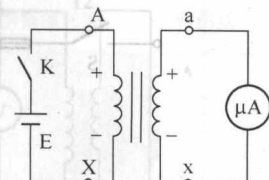


图 1-5

若同样按照上面接线，但当电源合上或拉开的瞬间，电流表的指针的摆动方向与上面相反，说明 A 端和 a 端互为同名端。

3. 变压器外特性