
目 录

第一部分 电工部分 1

任务一 学习安全用电基本知识 3

- 1.1 安全用电基本知识 3
- 1.2 触电急救知识 8
- 1.3 电气火灾 10
- 技能任务 1 触电急救技能训练 12

任务二 电工仪表的测量与使用 15

- 2.1 电路的基本知识 15
- 技能任务 2 基本物理量的测量 25
- 2.2 简单直流电路的分析与测试 27
- 技能任务 3 认识电阻元件及电阻值的测量 41
- 技能任务 4 无源二端网络伏安特性的测试 44
- 2.3 复杂直流电路的分析与测试 48
- 技能任务 5 基尔霍夫定律的验证测试 52
- 技能任务 6 叠加原理的验证测试 55
- 技能任务 7 戴维南定理和诺顿定理的验证测试 59

任务三 室内照明线路的安装与检修 64

- 3.1 正弦交流电路 64
- 技能任务 8 单相交流电路的测试 68
- 3.2 单一参数的正弦交流电路 70
- 技能任务 9 单相交流电路的测量分析 84
- 技能任务 10 交流电路相量的研究及功率因数的提高 91
- 3.3 三相正弦交流电路 93
- 技能任务 11 三相交流电路电压、电流的测量（负载为星形连接） 99
- 技能任务 12 三相交流电路电压、电流的测量（负载为三角形连接） 101
- 技能任务 13 三相电路功率的测量 103

3.4	照明线路的安装与检修	107
	技能任务 14 室内照明电路的接线与安装	120
任务四	变压器和电动机的分析测试	123
4.1	变压器	123
4.2	变压器的测试	129
	技能任务 15 单相铁芯变压器特性的测试	132
4.3	三相异步电动机	134
4.4	三相异步电动机的测试	141
任务五	三相异步电动机控制电路的安装与设计	144
5.1	常用低压电器	144
5.2	三相异步电动机控制电路	162
	技能任务 16 三相异步电动机控制电路的设计	166
第二部分	电子部分	169
任务六	常用的电子器件的测试与判断	171
6.1	半导体的基础知识	171
6.2	半导体二极管	175
6.3	晶体管	184
6.4	场效应晶体管	192
	技能任务 17 语音放大电路中所用器件的测试与判断	203
任务七	语音输入放大电路的设计与制作	208
7.1	放大电路主要性能指标与分类	209
7.2	基本放大电路	214
7.3	电流源电路	236
7.4	场效应晶体管放大电路	239
7.5	多级放大电路	245
7.6	放大电路中的反馈	250
	技能任务 18 放大电路的制作	265
任务八	音调调整电路的制作	274
8.1	差动放大电路	275
8.2	集成运算放大器	283

8.3 集成运算放大器的应用	289
技能任务 19 音调调整电路的制作	302
任务九 功率放大电路的制作	310
9.1 功率放大电路的特点和分类	311
9.2 常用功率放大电路	312
9.3 集成功率放大器	323
技能任务 20 功率放大电路的制作	328
任务十 三人表决器电路的设计与调试	333
10.1 元器件的插装方法及元件插件工艺	333
10.2 数制与编码	336
10.3 基本逻辑关系	340
10.4 逻辑函数的运算	343
10.5 门电路	349
实训任务 1 三人表决器电路的设计与调试	353
任务十一 抢答器电路的设计与调试	359
11.1 触发器	359
11.2 时序逻辑电路的分析方法	363
11.3 计数器	365
11.4 数码寄存器与移位寄存器	369
实训任务 2 抢答器电路的设计与调试	371
任务十二 触摸式防盗报警电路的设计与调试	377
12.1 555 电路简介	378
12.2 555 电路结构及工作原理	378
12.3 555 电路的典型应用	380
实训任务 3 触摸式防盗报警电路的设计与调试	383
参考文献	388

任务四 变压器和电动机的分析测试

📖 教学目标

1. 掌握变压器的结构、工作原理及功能，理解变压器的外特性。
2. 了解几种常用变压器的特点与用途。
3. 掌握变压器的常规项目测试。
4. 掌握三相异步电动机的结构、工作原理及机械特性。

🔍 相关知识

4.1 变压器

4.1.1 变压器的结构、工作原理

变压器是利用互感原理工作的电磁装置，它的符号如图 4-1 所示，T 是它的文字符号。

1. 变压器的基本构造

变压器主要由铁芯和线圈两部分构成。

铁芯是变压器的磁路通道，为了减少铁损，提高磁路导磁性，一般由 0.35~0.55 mm 的相互绝缘的硅钢片叠压制成。按其构造形式可分为芯式和壳式两种，如图 4-2 a, b 所示。

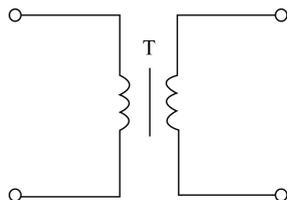


图 4-1 变压器的符号

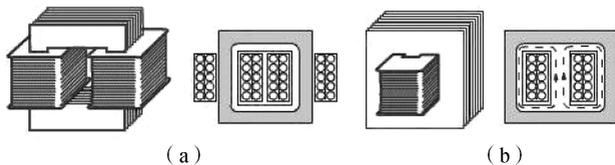


图 4-2 芯式和壳式变压器

线圈是变压器的电路部分，是用漆色线、沙包线或丝包线绕成的。其中，和电源相连的线圈叫作原线圈（初级绕组），和负载相连的线圈叫作副线圈（次级绕组）。

由于铁损会使铁芯发热，因此变压器要有冷却系统。小容量变压器采用自冷式冷却方式，而中、大容量的变压器采用油冷式冷却方式。

2. 变压器的工作原理

变压器是按电磁感应原理工作的，在原线圈上接入交流电压 U_1 时，原线圈中便有电流 I_1 通过。原线圈的磁动势 $I_1 N_1$ (N_1 为原线圈的匝数) 产生的磁通绝大部分通过铁芯而闭合，从而在副线圈中感应出电动势。如果副线圈接有负载，那么副线圈中就有电流 I_2 通过。副线圈的磁动势 $I_2 N_2$ (N_2 为副线圈的匝数) 也产生磁通，其绝大部分也通过铁芯而闭合。因此，铁芯中的磁通是由原、副线圈的磁动势共同产生的合成磁通，称为主磁通。用 Φ 表示。主磁通穿过原、副线圈，并在其中感应出电动势 E_1, E_2 ，其大小分别为

$$E_1 = \frac{N_1 \Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$E_2 = \frac{N_2 \Delta \Phi}{\Delta t}$$

感应电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

此外，原、副线圈的磁动势还分别产生漏磁通，但通常很小，可忽略，如图 4-3 所示。

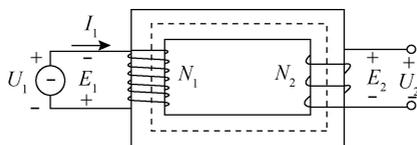


图 4-3 变压器原理图

3. 变压器的功能

(1) 变换电压

原线圈接上交流电压，铁芯中产生的交变磁通同时通过原、副线圈，且原、副线圈中交变的磁通可视为相同。

设原线圈匝数为 N_1 ，副线圈匝数为 N_2 ，磁通为 Φ ，感应电动势的大小为

$$E_1 = \frac{N_1 \Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$E_2 = \frac{N_2 \Delta \Phi}{\Delta t}$$

由此可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

忽略线圈内阻可得

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

式中, K 称为变压比。

由此可见, 变压器原、副线圈的端电压之比等于匝数比。如果 $N_1 < N_2$, $K < 1$, 电压上升, 称为升压变压器; 如果 $N_1 > N_2$, $K > 1$, 电压下降, 称为降压变压器。

(2) 变换电流

根据能量守恒定律, 变压器输出功率与从电网中获得的功率相等, 即 $P_1 = P_2$, 由交流电功率的公式可得

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

式中, $\cos \varphi_1$ 为原线圈电路的功率因数; $\cos \varphi_2$ 为副线圈电路的功率因数。

由于 φ_1 , φ_2 相差很小, 可认为相等, 因此得到

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

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

可见, 变压器工作时通过原、副线圈的电流跟线圈的匝数成反比。高压线圈通过的电流小, 用较细的导线绕制; 低压线圈通过的电流大, 用较粗的导线绕制。这是在外观上区别变压器高、低压绕组的方法。

(3) 变换交流阻抗

设变压器初级输入阻抗为 $|Z_1|$, 次级负载阻抗为 $|Z_2|$, 则

$$|Z_1| = \frac{U_1}{I_1}$$

将 $U_1 = \frac{N_1}{N_2} U_2$, $I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$ 代入, 得

$$|Z_1| = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{U_2}{I_2}$$

由于 $\frac{U_2}{I_2} = |Z_2|$, 可得

$$|Z_1| = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 |Z_2| = K^2 |Z_2|$$

可见, 当次级接上负载 $|Z_2|$ 时, 相当于电源接上阻抗为 $K^2 |Z_2|$ 的负载。变压器的这种阻抗变换特性, 在电子线路中常用来实现阻抗匹配和信号源内阻相等, 使负载上获得最大功率。

4.1.2 常用变压器

1. 自耦变压器

自耦变压器原、副线圈共用一部分绕组, 它们之间不仅有磁耦合, 还有电的关系, 如图 4-4 所示。

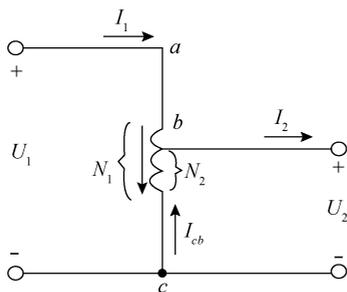


图 4-4 自耦变压器符号及原理图

原、副线圈电压之比和电流之比的关系为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{N_1}{N_2} = K$$

自耦变压器在使用时，一定要注意正确接线，否则易于发生触电事故。

实验室中用来连续改变电源电压的调压变压器，就是一种自耦变压器，如图 4-5 所示。

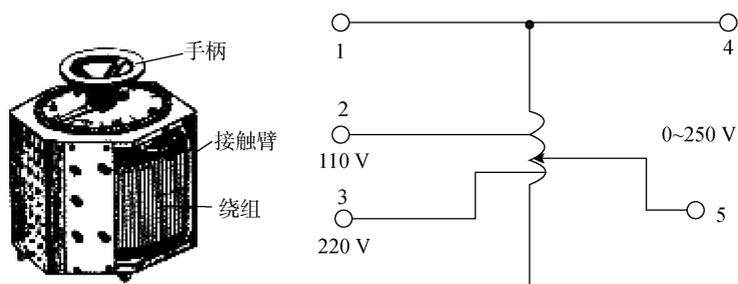


图 4-5 实验用调压变压器

2. 多绕组变压器

(1) 多绕组变压器

变压器的次级有两个以上的绕组或初、次级都有两个以上绕组的变压器叫多绕组变压器，如图 4-6 所示。

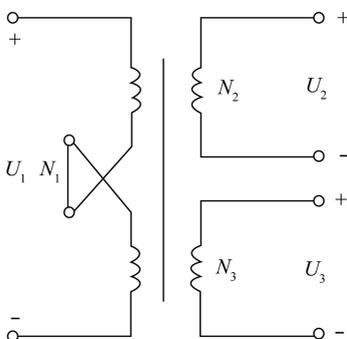


图 4-6 多绕组变压器

多绕组变压器原、副线圈的电压关系仍符合变压比的关系，即

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{U_1}{U_3} \approx \frac{N_1}{N_3}$$

(2) 多绕组变压器的使用

多绕组变压器多使用于电子设备中，用于输出多种电压。多绕组可串联或并联使用，串联时应将线圈的异名端相接，并联时应将线圈的同名端相接。只有匝数相同的线圈才能并联。

3. 互感器

互感器是一种专供测量仪表、控制设备和保护设备中使用的变压器。其可分为电压互感器和电流互感器两种。

(1) 电压互感器

使用时，电压互感器的高压绕组跨接在需要测量的供电线路上，低压绕组则与电压表相连，如图 4-7 所示。

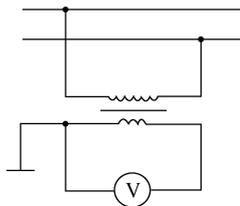


图 4-7 电压互感器

可见，高压线路的电压 U_1 等于所测量电压 U_2 和变压比 K 的乘积，即

$$U_1 = KU_2$$

使用时应注意：

- ① 次级绕组不能短路，以防止烧坏次级绕组。
- ② 铁芯和次级绕组一端必须可靠地接地，以防止高压绕组绝缘被破坏而造成设备损坏和人身伤亡。

(2) 电流互感器

使用时，电流互感器的初级绕组需与待测电流的负载相串联，次级绕组则与电流表串联成闭合回路，如图 4-8 所示。

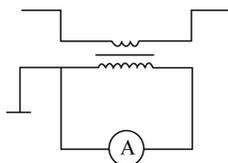


图 4-8 电流互感器

可见，通过负载的电流就等于所测电流和变压比倒数的乘积。

使用时应注意：

①绝对不能让电流互感器的次级开路，否则易造成危险。

②铁芯和次级绕组一端均应可靠接地。

常用的钳形电流表就是一种电流互感器。它是由一个与电流表接成闭合回路的次级绕组和一个铁芯构成，其铁芯可开、可合。测量时，把待测电流的一根导线放入钳口中，电流表上可直接读出被测电流的大小，如图 4-9 所示。

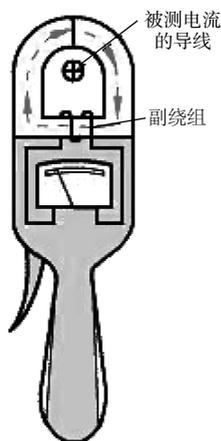


图 4-9 钳形电流表

4. 三相变压器

三相变压器就是 3 个相同的单相变压器的组合，如图 4-10 所示。三相变压器用于供电系统中。根据三相电源和负载的不同，三相变压器的初级和次级线圈可接成星形或三角形。

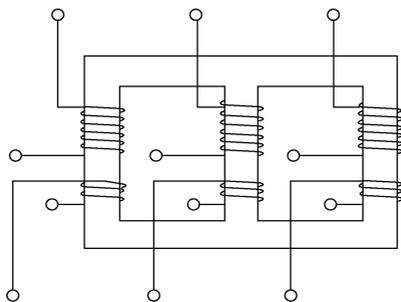


图 4-10 三相变压器

【例 4-1】 有一电压比为 220 V/110 V 的降压变压器，如果次级接上阻值为 55 Ω 的电阻，求变压器初级的输入阻抗。

解 方法一：次级电流为

$$I_2 = \frac{U_2}{|Z_2|} = \frac{110}{55} = 2 \text{ A}$$

变压比为

$$K = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{110} = 2$$

初级电流为

$$I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{2}{2} = 1 \text{ A}$$

则输入阻抗为

$$|Z_1| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{220}{1} = 220 \ \Omega$$

方法二：变压比为

$$K = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{110} = 2$$

则输入阻抗

$$|Z_1| \approx \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 |Z_2| = K^2 |Z_2| = 4 \times 55 = 220 \ \Omega$$

【例 4-2】有一信号源的电动势为 1 V，内阻为 600 Ω ，负载电阻为 150 Ω 。欲使负载获得最大功率，必须在信号源和负载之间接一匹配变压器，使变压器的输入电阻等于信号源的内阻，如图 4-11 所示。问：变压器变压比，初、次级电流各为多少？

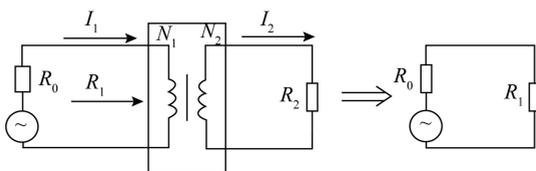


图 4-11 电路图

解 负载电阻 $R_2 = 150 \ \Omega$ ，变压器的输入电阻 $R_1 = R_0 = 600 \ \Omega$ ，则变压比为

$$K = \frac{N_1}{N_2} \approx \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = \sqrt{\frac{600}{150}} = 2$$

初、次级电流分别为

$$I_1 = \frac{E}{R_0 + R_1} = \frac{1}{600 + 600} \approx 0.83 \times 10^{-3} \text{ A} = 0.83 \text{ mA}$$

$$I_2 \approx \frac{N_1}{N_2} I_1 = 2 \times 0.83 = 1.66 \text{ mA}$$

4.2 变压器的测试

4.2.1 变压器的外特性和电压变化率

1. 变压器的外特性

变压器的外特性就是当变压器的初级电压 U_1 和负载的功率因数都一定时，次级电压 U_2 随次级电流 I_2 变化的关系，如图 4-12 所示。由变压器外特性曲线图可见：

① $I_2 = 0$ 时, $U_2 = U_{2N}$ (U_{2N} 为变压器空载时次级端电压)。

② 当负载为电阻性和电感性时, 随着 I_2 的增大, U_2 逐渐下降。在负载电流相同的情况下, U_2 的下降程度与功率因数 $\cos \varphi$ 有关。所以, 在供电系统中, 常常在电感性负载两端并联一定容量的电容器, 以提高负载的功率因数 $\cos \varphi$ 。

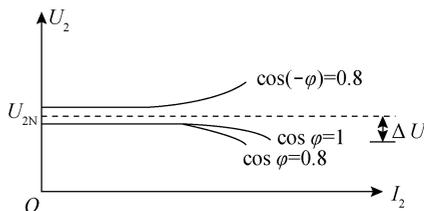


图 4-12 变压器的外特性曲线

③ 当负载为电容性时, 随着 I_2 的增大, 曲线上升。

2. 电压变化率

电压变化率 (也称调整率) 是指变压器空载时次级端电压 U_{2N} 和有载时次级端电压 U_2 之差与 U_{2N} 的百分比, 即

$$\Delta U = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\%$$

电压变化率越小, 为负载供电的电压越稳定。电力变压器的电压调整率为 5% 左右。

3. 变压器的效率

变压器在传输电能过程中, 不可避免地要产生损耗 (主要是铁损与铜损), 表现为变压器一次侧输入的有功功率和二次侧输出的有功功率之差, 即输入功率 $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ 和输出功率 $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ 之差, 即

$$P_L = P_1 - P_2$$

变压器的效率定义为变压器输出功率与输入功率的百分比, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

变压器效率的高低反映了变压器运行的经济性, 是其运行性能的重要指标。我国大容量变压器的效率可达 98%~99%, 小型电源变压器的效率约为 70%~80%。

4. 变压器的容量

单相变压器二次绕组的额定电压 U_2 与额定电流 I_2 的乘积是其容量, 即

$$S = U_2 I_2 = U_1 I_1$$

对三相变压器而言, 其容量为

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 = \sqrt{3} U_1 I_1$$

变压器容量的单位为 $V \cdot A$, $kV \cdot A$ 。

【例 4-3】 有一变压器初级电压为 2 200 V, 次级电压为 220 V, 在接纯电阻性负载时, 测得次级电流为 10 A, 变压器的效率为 95%。试求它的损耗功率、初级功率和初级电流。

解 次级负载功率为

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 220 \times 10 = 2\,200 \text{ W}$$

初级功率为

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{2\,200}{0.95} \approx 2\,316 \text{ W}$$

损耗功率为

$$P_L = P_1 - P_2 = 2\,316 - 2\,200 = 116 \text{ W}$$

初级电流为

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{2\,316}{2\,200} \approx 1.05 \text{ A}$$

4.2.2 变压器的额定值和检验

1. 变压器的额定值

变压器的满负荷运行情况叫额定运行，额定运行条件叫变压器的额定值。

额定容量指次级最大视在功率，单位是伏安（V·A）或千伏安（kV·A）。

额定初级电压指接到初级线圈的电压的规定值。

额定次级电压指变压器空载时，初级加上额定电压后，次级两端的电压。

额定电流指规定的满载电流值。

变压器的额定值取决于变压器的构造及使用的材料。使用时，变压器应在额定条件下运行，不能超过其额定值。

除此以外，还应注意：

- ①工作温度不能过高。
- ②初、次级绕组必须分清。
- ③防止变压器绕组短路，以免烧毁变压器。

2. 变压器的检验

变压器在使用前应进行检验，通常其检验内容有：

(1) 检测一、二次绕组的通断

对于小型变压器，可以测量各绕组的直流电阻值。如万用表置于 R×1 挡，将两表笔分别碰接一次绕组的两引出线，其阻值一般为几至几十欧（为降压变压器）；如二次绕组有多个时，输出标称电压值越小，其阻值越小；线圈断路时，无电压输出。

(2) 绝缘性能的检查

用绝缘电阻表测量各绕组之间、绕组与铁芯之间、绕组与屏蔽层之间的绝缘电阻。一般小型变压器应在几十到一百多兆欧以上。

(3) 空载电压与空载电流的测定

各绕组的空载电压允许误差：二次高压绕组为 ±5%；二次低压绕组为 ±5%；带中心抽头的两组对称绕组为 ±2%。

空载电流一般为额定电流的 5%~8%，当空载电流超过额定电流的 20% 时，它的温升将超过允许值，不能使用。

(4) 变压器绕组同极性端的测定

变压器 A 绕组（线圈）两端为 1, 2；B 绕组（线圈）两端为 3, 4，如图 4-13 所示。

①直流法。如图 4-13 a 所示，当开关 S 迅速闭合时，若此时电压表（或电流表）的指针正向偏转，则 1 端和 3 端为同极性端；若电压表反向偏转，则 1 端和 3 端为异极性端。

②交流法。如图 4-13 b 所示，如果测得 $U_{13}=U_{12}-U_{34}$ ，则 1 端和 3 端为同极性端；若测得 $U_{13}=U_{12}+U_{34}$ ，则 1 端和 3 端为异极性端。

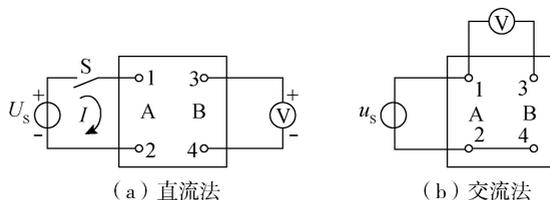


图 4-13 变压器极性测试图

各项检验都应符合设计标准，否则被检测的变压器不宜使用。

★ 任务实施

技能任务 15 单相铁芯变压器特性的测试

◎ 任务目标

- (1) 通过测量，计算变压器的各项参数。
- (2) 学会测绘变压器的空载特性与外特性曲线。

◎ 原理说明

为了满足 3 组灯泡负载额定电压为 220 V 的要求，以变压器的低压（36 V）绕组作为原边，高压（220 V）绕组作为副边，即当作一台升压变压器使用。

在保持原边电压 U_1 （36 V）不变时，逐次增加灯泡负载（每只灯泡的功率为 15 W），测定 U_1 ， U_2 ， I_1 和 I_2 ，即可绘出变压器的外特性曲线，即负载特性曲线 $U_2=f(I_2)$ 。

◎ 所用器材

本次任务所用器材如表 4-1 所示。

表 4-1 所用器材

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	交流电压表	0~450 V	2	
2	交流电流表	0~5 A	2	

续表

序号	名称	型号与规格	数量	备注
3	单相功率表		1	DGJ-07
4	试验变压器	220 V/36 V, 50 V · A	1	DGJ-04
5	自耦调压器		1	
6	白炽灯	220 V, 15 W	3	DGJ-04

◎任务内容

根据图 4-14 连接电路图。将调压器手柄置于输出电压为零的位置（逆时针旋到底），合上电源开关，并调节调压器，使其输出电压为 36 V。当空载时测定 U_1 、 U_2 、 I_1 和 I_2 。当逐次增加负载时，测定 U_1 、 U_2 、 I_1 和 I_2 ，分别记下仪表的读数，记入表格 4-2，然后绘制变压器的外特性曲线。实验完毕，将调压器调回零位，断开电源。

测得的 U_1 、 U_{20} 和 I_{10} 数据记入自拟的数据表格，用 U_1 和 I_{10} 绘制变压器的空载特性曲线。

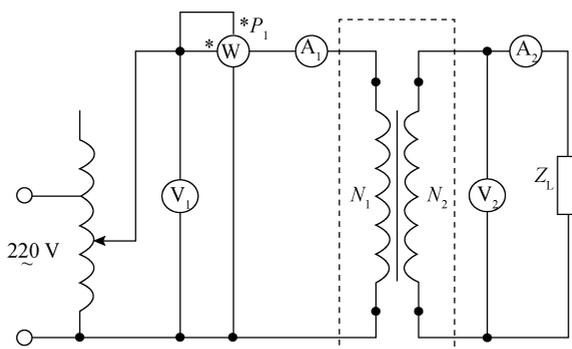


图 4-14 变压器的测试

表 4-2 测量数据

负载情况	P/W	$\cos \varphi$	U_1/V	U_2/V	I_1/A	I_2/A
空载						
1 只灯泡						
2 只灯泡						
3 只灯泡						

◎注意事项

(1) 本实验是将变压器作为升压变压器使用，并通过调节调压器提供原边电压 U_1 ，故使用调压器时应首先调至零位，然后才可合上电源。此外，必须用电压表监视调压器的输出电压，以防止被测变压器输出过高电压而损坏实验设备，且要注意安全，以防高压触电。

- (2) 由负载实验转到空载实验时，要注意及时变更仪表量程。
- (3) 遇异常情况，应立即断开电源，待处理好故障后，再继续实验。



思考题

为什么本实验将低压绕组作为原边进行通电实验？此时，在实验过程中应注意什么问题？

4.3 三相异步电动机

4.3.1 三相异步电动机的结构

三相异步电动机由定子和转子两个基本部分组成，如图 4-15 所示。

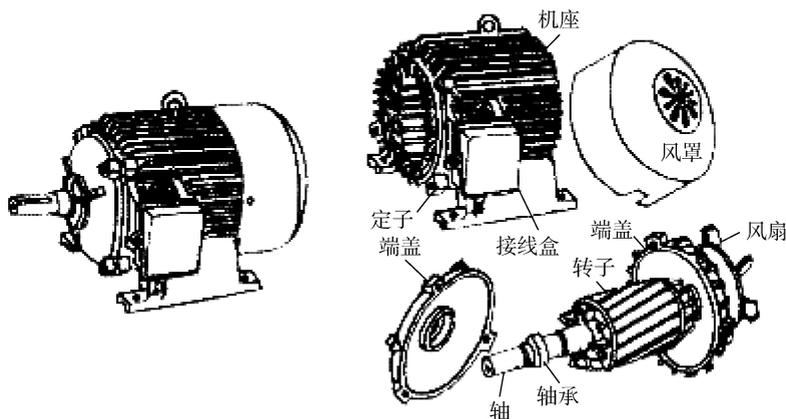


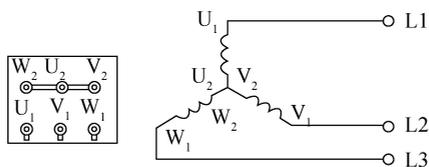
图 4-15 三相异步电动机的构造

1. 定子

三相异步电动机的定子由机座、铁芯和定子绕组组成。

定子绕组是电动机的电路部分，由三相对称绕组组成，按一定规则连接，有 6 个出线端，即 U_1 和 U_2 、 V_1 和 V_2 、 W_1 和 W_2 接到机座的接线盒中，定子绕组接成星形或三角形。

图 4-16 a 是定子绕组的星形连接图，图 4-16 b 是定子绕组的三角形连接图。



(a)

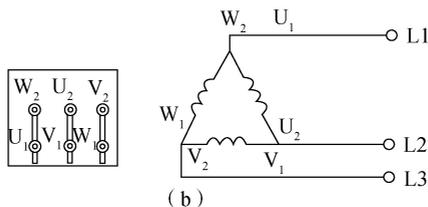


图 4-16 定子绕组的星形和三角形连接图

2. 转子

转子是三相异步电动机的旋转部分，由转轴、转子铁芯和转子绕组 3 部分组成，其作用是输出机械转矩。根据构造的不同，转子绕组分为绕线式和笼型两种，图 4-17 a 所示为绕线式绕组，图 4-17 b 为铸铝的笼型转子。

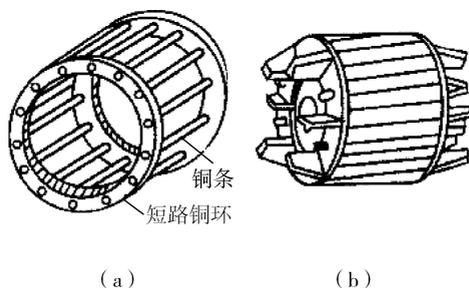


图 4-17 笼型绕组及转子

4.3.2 旋转磁场

1. 旋转磁场的产生

将对称三相电流通入在空间彼此相差 120° 的做星形连接的 3 个线圈。设三相电流分别为

$$\begin{aligned} i_1 &= I_m \sin \omega t \\ i_2 &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_3 &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}$$

其波形如图 4-18 所示。

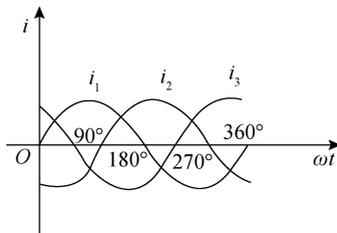


图 4-18 三相绕组电流的波形图

根据电流的磁效应，在三相绕组的空间上就会产生旋转磁场，如图 4-19 所示。为

方便分析,规定电流为正值时,电流从线圈的首端(即 U_1 , V_1 和 W_1) 流向末端(即 U_2 , V_2 和 W_2),反之电流由末端流向首端。取 ωt 分别为 0° , 90° , 180° , 270° 和 360° 的 5 个瞬间,依次标出电流的方向,由右手螺旋法则确定磁场的方向。 $\omega t=0^\circ$ 时,磁场的方向由右指向左; $\omega t=90^\circ$ 时,磁场的方向垂直向上; ωt 分别为 180° , 270° 和 360° 时,磁场的方向分别向右、向下和向左,即磁场的方向顺时针旋转一周,分别如图 4-17 a, b, c, d 和 e 所示。

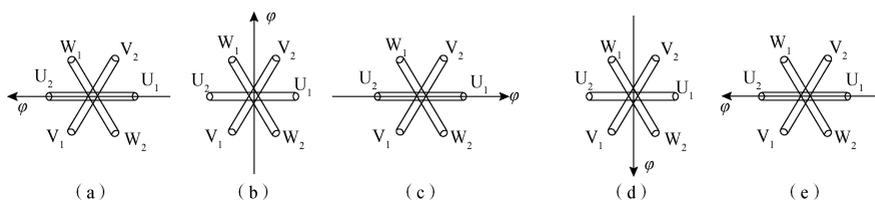


图 4-19 磁场的方向

由图可见,当空间彼此相差 120° 的 3 个相同线圈通入对称三相交流电时,就会产生与电流有相同角速度的旋转磁场(即交流电变化一周,旋转磁场在空间也旋转一周)。

当使 i_1 通入 V 相, i_2 通入 U 相时,分析可见,旋转磁场逆时针旋转。因此,只要把接到三相绕组上的两根电源线任意对调,即改变电源的相序,就可实现旋转磁场的反转。

2. 旋转磁场的转速

上述旋转磁场具有一对磁极,若用 p 表示磁极对数,则 $p=1$ 。磁极对数 $p=1$ 的旋转磁场,其转速与正弦电流同步。若交流电的频率为 f ,则旋转磁场的转速为

$$n_0 = 60f \text{ (r/min)}$$

当磁极对数 $p=2$ 时,交流电变化一周,旋转磁场转动 $\frac{1}{2}$ 周;依次类推,当旋转磁场具有 p 对磁极时,交流电变化一周,旋转磁场转动 $\frac{1}{p}$ 周。因此,当交流电频率为 f ,磁极对数为 p 时,旋转磁场的转速为

$$n_0 = \frac{60f}{p} \text{ (r/min)}$$

式中, n_0 又称为同步转速。

4.3.3 三相异步电动机的工作原理

旋转磁场以同步转速 n_0 顺时针旋转,相当于磁场不动,转子逆时针切割磁力线,产生感应电流,用右手定则判定,转子半部分的感应电流流入纸面。有电流的转子在磁场中受到电磁力的作用,用左手定则判定,上半部分所受磁场力向右,下半部分所受磁场力向左,如图 4-20 所示。这两个力对转子转轴形成电磁转矩,使转子沿旋转磁场的方向以转速 n 旋转。

4.3.4 三相异步电动机的转差率

电动机总是以低于旋转磁场的转速转动, 即 $n < n_0$ 。异步电动机的同步转速 n_0 与转子转速 n 之差, 即 $n_0 - n$, 称为转速差。转速差 $n_0 - n$ 与 n 之比称为异步电动机的转差率, 用 s 表示, 即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\%$$

也可写成

$$n = (1 - s) n_0$$

转差率是异步电动机的一个重要参数。

4.3.5 三相异步电动机的铭牌

在电动机的铭牌上标有其主要技术数据, 使用时应多加注意, 图 4-21 就是一台三相异步电动机的铭牌。

三相异步电动机					
型号	Y132M-4	功率	7.5 kW	频率	50 Hz
电压	380 V	电流	15.4 A	接法	Δ
转速	1 440 r/min	绝缘等级	B	工作方式	连续
年 月 日	编号	×× 电机厂			

图 4-21 三相异步电动机的铭牌

4.3.6 三相异步电动机的启动方式

三相异步电动机的启动方式可分为全压启动和降压启动两种。

1. 全压启动

加在定子绕组上的启动电压是电动机的额定电压, 这样的启动方式叫全压启动。

全压启动在刚接通电源的瞬间, 旋转磁场与转子间的相对转速较大, 在转子中产生的感应电流和变压器的原理一样, 定子电流必然很大, 一般为额定电流的 4~7 倍。

过大的启动电流会在线路上造成较大的电压降, 影响供电线路上其他设备的正常工作。此外, 当启动频繁时, 过大的启动电流会使电动机过热, 影响其使用寿命。只有二三十千瓦以下的异步电动机采用全压启动。

2. 降压启动

在启动时降低加在电动机定子绕组上的电压, 待启动结束时恢复到额定值运行, 这样的启动方式叫降压启动。笼型电动机的降压启动常用串电阻降压启动、星形-三角形换接启动和自耦降压启动等方法。

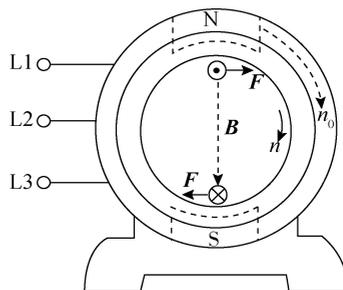


图 4-20 三相异步电动机的工作原理

(1) 串电阻降压启动

串电阻降压启动就是电动机启动时将电阻串联在定子绕组与电源之间的启动方法，如图 4-22 所示。

(2) 星形-三角形换接启动

星形-三角形换接启动就是电动机启动时把定子绕组连成星形，等到转速接近额定值时再换接成三角形的启动方法。图 4-23 是一种星-三角启动器的连接简图，启动时，将手柄指向右，定子绕组连成星形降压启动；等电动机接近额定转速时，将手柄指向左，定子绕组换接成三角形，电动机正常运行。

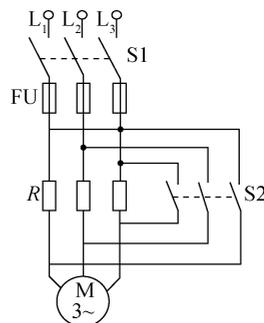


图 4-22 定子绕组串电阻降压启动

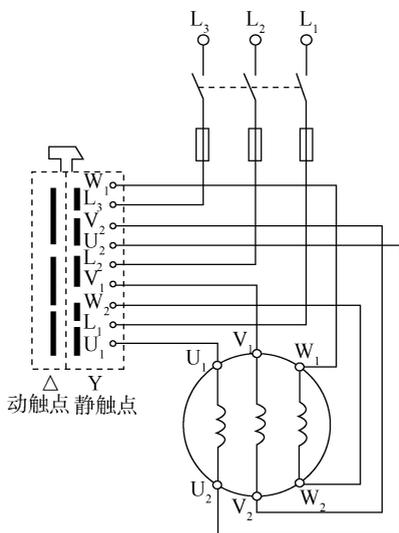


图 4-23 星-三角降压启动

(3) 自耦降压启动

自耦降压启动是利用三相自耦变压器将电动机在启动过程中的端电压降低的启动方法，如图 4-24 所示。

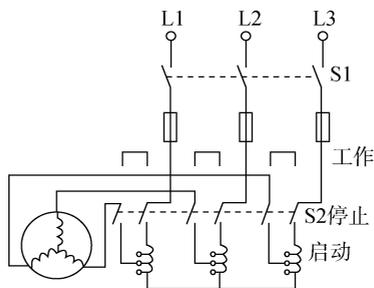


图 4-24 自耦变压器降压启动

4.3.7 三相异步电动机的调速

在负载不变的条件下改变三相异步电动机的转速 n 叫作调速。由转速公式

$$n = (1 - s)n_0 = (1 - s) \frac{60f}{p}$$

可知，调速有下面 3 种方法：

1. 变频调速

变频调速采用晶闸管整流器将交流电转换为直流电，再由逆变器变换为频率、电压有效值可调的三相交流电，为三相异步电动机供电，实现电动机无级调速。

2. 变转差率调速

此种调速方法只适用于绕线式电动机。通过改变接在转子电路中调速电阻的大小，就可平滑调速。

3. 变级调速

设计制造的电动机具有不同的磁极对数，根据需要改变定子绕组的连接方式，就能改变磁极对数，使电动机得到不同的转速。

4.3.8 三相异步电动机的反转

三相异步电动机的转向与旋转磁场的方向一致，而旋转磁场的方向取决于三相电源的相序。所以，只要将 3 根相线中任意两根对调即可使电动机反转。

图 4-25 是电动机正反转控制的原理图。

4.3.9 三相异步电动机的制动

为克服惯性，保证电动机在断电时迅速停车，需要对电动机进行制动。

三相异步电动机的制动常采用反接制动和能耗制动。

1. 反接制动

在电动机停车时，将 3 根电线中的任意两根对调，产生反转矩，起到制动作用。当转速接近零时，切断电源，否则电动机会反转。

2. 能耗制动

在断电的同时，接通直流电源，如图 4-26

所示。直流电源产生的磁场是固定的，而转子由于惯性转动产生的感应电流与直流电磁场相互作用产生的转矩的方向，恰好与电动机的转向相反，起到制动的作用。

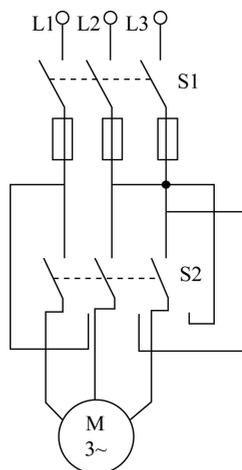


图 4-25 电动机正反转控制原理

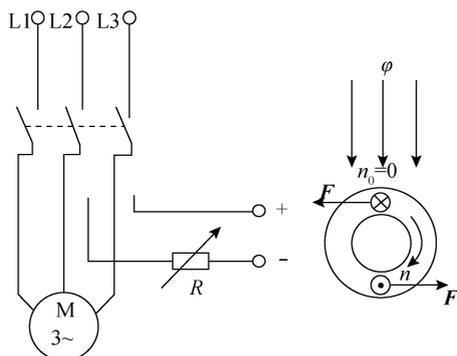


图 4-26 电动机的能耗制动

4.3.10 单相异步电动机

单相异步电动机的构造与三相异步电动机相似，也可由定子和笼型转子两个基本部分组成。

1. 单相异步电动机的工作原理

单相异步电动机的定子绕组通以单相电流后，电动机内就产生一交变磁场，但磁场的方向时而垂直向上，时而垂直向下，即单相定子绕组的磁场不是旋转磁场，所以转子不能自行启动。因此，单相异步电动机转动的关键是产生一个启动转矩。

2. 单相电容式异步电动机

单相电容式异步电动机在定子上有工作绕组和启动绕组两个绕组。两个绕组在定子铁芯上相差 90° 的空间角度，启动绕组中串联一个电容器。图 4-27 所示是单相电容式异步电动机的原理图。

由图可见，同一电源向两个绕组供电，则工作绕组的电流和启动绕组的电流就会产生一个相位差，适当选择电容，使 i_1 和 i_2 的相位差为 90° ，即

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$i_2 = I_{2m} \sin \omega t$$

根据三相异步电动机的分析方法可知，相位差为 90° 的 i_1 和 i_2 ，流过空间相差 90° 的两个绕组，会产生一个旋转磁场。在旋转磁场的作用下，单相异步电动机转子得到启动转矩而转动。

图 4-28 所示为 i_1 和 i_2 的波形图和旋转磁场图。

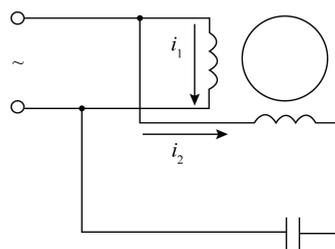


图 4-27 单相电容式异步电动机原理图

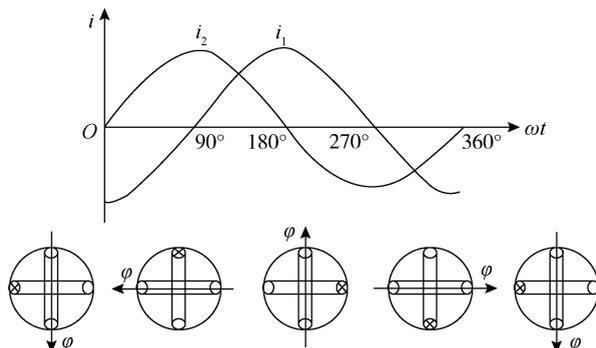


图 4-28 两相绕组中的电流波形图与旋转磁场图

改变电动机定子绕组接线的顺序，可以改变旋转磁场的方向，也就改变了电动机的转向。

4.4 三相异步电动机的测试

4.4.1 三相异步电动机的拆卸

为了确保维修质量，在拆卸前应在电动机接线头、端盖等处做好标记和记录，以便装配后使电动机能恢复到原状态。不正确的拆卸，很可能损坏零件或绕组，甚至扩大故障，增加修理的难度，造成不必要的损失。

1. 三相异步电动机的拆卸顺序

- ①切断电源，拆下电动机与电源的连接线，并将电源连接线线头做好绝缘处理。
- ②脱开带轮或联轴器与负载的连接，松开地脚螺栓和接地螺栓。
- ③拆卸带轮或联轴器。
- ④拆卸风罩、风扇。
- ⑤拆卸轴承盖和端盖。
- ⑥抽出或吊出转子。

2. 三相异步电动机的装配

三相异步电动机修理后的装配顺序，大致与拆卸时相反。装配时要注意拆卸时的一些标记，尽量按原记号复位。装配的顺序如下：滚动轴承的安装；后端盖的安装；转子的安装；前端盖的安装；风扇和皮带轮的安装。

3. 装配后的检验

①一般检查。检查所有紧固件是否拧紧；转子转动是否灵活，轴伸端有无径向偏摆。

②测量绝缘电阻。测量电动机定子绕组每相之间的绝缘电阻和绕组对机壳的绝缘

电阻，其绝缘电阻值不能小于 $0.5\text{ M}\Omega$ 。

③测量电流。经上述检查合格后，根据铭牌规定的电流、电压，正确接通电源，安装好接地线，用钳形电流表分别测量三相电流，检查电流是否在规定的电流范围（空载电流约为额定电流的 $1/3$ ）之内；三相电流是否平衡。

④通电观察。上述检查合格后可通电观察，用转速表测量转速是否均匀及符合规定要求；检查机壳是否过热；检查轴承有无异常声音。

4.4.2 三相异步电动机定子绕组首末端判别

1. 万用测定法

图 4-29 所示为用万用表区分绕组首末端的方法。

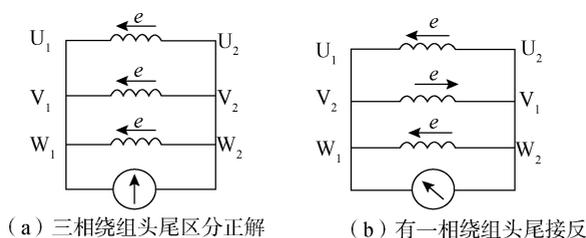


图 4-29 用万用表区分绕组首末端的方法

2. 绕组串接测定法

图 4-30 所示为用绕组串接区分首末端的方法。

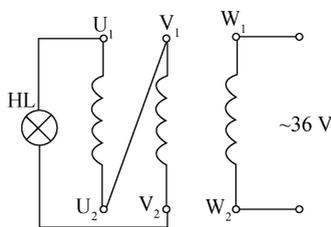


图 4-30 用绕组串接区分首末端的方法

3. 极相组接错的检查方法

将定子绕组 3 个首端（头）连接，3 个末端（尾）也相互连接，再将低压直流电源（一般用蓄电池）通入定子三相绕组，用指南针沿着定子铁芯内圆移动。如果指南针经过各极相组时方向交替变化，表示接线正确；如经过相邻的极相组时指针方向不变，表示极相组接错。如果指针的方向变化不明显，则应提高电源电压后，重新检查。



练习题

一、填空题

1. 变压器是既能改变（ ）、电流和（ ），又能保持（ ）基本不变的电气设备。

2. 自耦变压器的构造特点是铁芯上只有一个（ ），副边绕组的功能是可以输出可调的交流电压。
3. 变压器与电源连接的绕组称为（ ）绕组，与负载连接的绕组称为（ ）绕组。
4. 变压器是根据电磁感应原理制成的，它主要由（ ）和（ ）组成。
5. 变压器绕组间必须要有良好的（ ），防止绕组（ ）。
6. 在变压器的图形符号中 Y 表示三相线圈（ ）。
7. 电流互感器在运行中，副方绕组不允许开路；绕组不允许（ ）。而电压互感器在运行中，副方绕组不允许（ ）；绕组不允许（ ）。从安全的角度出发，二者在运行中，其（ ）绕组都应可靠地接地。
8. 电动机是由（ ）和（ ）两个基本部分组成的。
9. 电动机的定子是由（ ）、（ ）和（ ）组成。
10. 电动机的转子是由转轴和风叶、（ ）、（ ）3部分组成。
11. 旋转磁场的旋转方向与通入定子绕组中三相电流的（ ）有关。异步电动机的转动方向与旋转磁场的方向（ ）。旋转磁场的转速取决于旋转磁场的（ ）。
12. 异步电动机的调速可以用改变（ ）、（ ）和（ ）3种方法来实现。

二、简答题

1. 为什么变压器的低压绕组在里边，而高压绕组在外边？
2. 变压器能否改变直流电压？为什么？
3. 使用电压互感器和电流互感器时应注意什么？
4. 三相异步电动机定子绕组的连接方式有哪两种？画出连接图。
5. 如何实现三相异步电动机的正反转？