

# 情境一 电工基础与三相异步电动机的认识



## 情境描述

三相异步电动机是中小电动机的主导产品，其作为最重要的动力设备之一，将电能转换为机械能，驱动各类机械设备，广泛应用于机械、化工、纺织、冶金、建筑、农机、矿山、轻工等行业，大量地作为机床、风机、水泵、压缩机、印刷机、造纸机、纺织机、轧钢机、空调机、城市地铁、轻轨交通及矿山电动车辆等主要机械驱动的动力源，是一种产量大且配套面广的机电产品，对国民经济、节能环保及人民生活的各个领域有着极其密切的关系和重要的影响，发挥着不可或缺及不可替代的作用，所以掌握三相异步电动机的基本知识是机床电气控制技术的基础。

通过本情境的学习和实际操作训练，使学生了解三相异步电动机的基本常识并掌握其结构、工作原理和使用与维护技能。



## 学习与训练要求

### 技能点：

1. 正确使用常见的电工工具、电工仪表；
2. 正确选用单相变压器；
3. 正确选择和使用三相异步电动机；
4. 会对电动机进行日常保养维护。

### 知识点：

1. 常用电工工具、仪表的基本知识及电工量的测量；
2. 变压器及三相异步电动机的结构和工作原理；
3. 三相异步电动机的运动分析和机械特性；
4. 三相异步电动机的其他相关知识；
5. 三相异步电动机的维护与保养。



## 相关知识点

# 1.1 电工仪表与测量

在电气线路、用电设备的安装调试与维修过程中，电工仪表起着极为重要的作用。

## 1.1.1 常用电工仪表的基本知识

### 1. 电工仪表的分类

电工仪表按不同的方式可以分为许多种，下面介绍几种常见电工仪表的分类方式。

#### 1) 按工作原理分类

按工作原理，电工仪表分为磁电式、电磁式、电动式、感应式等。

#### 2) 按精确度等级分类

按精确度等级，电工仪表可以分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5和5.0七个等级。这些数字表示仪表引用误差的百分数，如下式所示。

$$K\% = \frac{|\Delta m|}{A_m} \times 100\%$$

式中， $\Delta m$ 和 $A_m$ 分别为最大示值误差和仪表量程。2.5级仪表的引用相对误差为2.5%。

例如，有一个精确度为2.5级的伏特表，其量程为50V，则可能产生的最大引用误差为

$$\Delta V = K\% \times U_m = \pm 2.5\% \times 50 = \pm 1.25V$$

精确度等级较高（0.1、0.2、0.5）的仪表常用来进行精密测量或校正其他仪表。

#### 3) 按测量方法分类

按测量方法，电工仪表主要分为直读式仪表和比较式仪表。直读式仪表所指位置从刻度盘上直接读数，如电流表、万用表、兆欧表等。比较式仪表是将被测量与已知的标准量进行比较来测量，如电桥、接地电阻测量仪等。

#### 4) 按电流种类分类

按电流种类，电工仪表可以分为直流表、交流表和交直流表。

#### 5) 按使用条件分类

按使用条件，根据周围的气温和温度可分为A、B、C三组，A、B组用于室内，C组用于室外。

### 2. 电工仪表符号的意义

在电工仪表上，通常都标有仪表的类型、准确度等级、电流种类及仪表的绝缘耐压强度和放置位置等，符号说明见表1-1。

表 1-1 电工测量仪表上的几种符号

符 号	意 义
—	直流
~	交流
≈	交直流
3~或≅	三相交流
$\sphericalangle$ 2kV	仪表绝缘试验电压 2000V
↑	仪表直立放置
→	仪表水平放置
$\sphericalangle$ 60°	仪表倾斜 60° 放置

### 3. 电工仪表的型号

电工仪表的产品型号可以反映出仪表的用途、作用原理。仪表型号一般由形状代号、系列代号、设计序号和用途代号组成，如图 1-1 所示。

形状代号有两位：第一位代号按仪表的面板形状最大尺寸编制，第二位代号按仪表的外壳尺寸编制。系列代号按仪表工作原理的系列编制：如磁电系代号为“C”、电磁系代号为“T”、电动系代号为“D”、感应系代号为“G”、整流系代号为“L”、静电系代号为“Q”、电子系代号为“Z”等。

例如，40C2-A 型电流表，其中“44”为形状代号，“C”表示是磁电系仪表，“2”为设计序号，“A”表示用于测量电流。可携式指示仪表不用形状代号，其他部分则与安装式指示仪表完全相同。例如，T62-V 型电压表，其中“T”表示是电磁系仪表，“62”为设计序号，“V”表示用于测量电压。

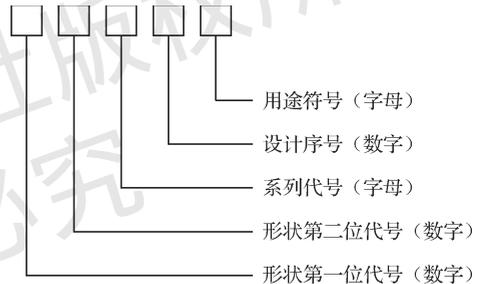


图 1-1 电工仪表型号的含义

另外，电度表的型号编制规则基本上与可携式指示仪表相同，只是在组别前再加上一个“D”表示电度表，如“DD”表示单相，“DS”表示有功、“DT”表示三相四线、“DX”表示无功等，例如，DD28 型电度表，其中“DD”表示单相，“28”表示设计序号。

### 4. 常用的电工测量方法

电工测量是通过物理实验的方法，将被测的量与其同类的量（单位）进行比较的过程。比较结果一般用两个部分来表示，即一部分是数字，另一部分是单位。

为了对同一个量，在不同的时间和地点进行测量时能够得到相同的测量结果，必须采用一种公认的且固定不变的单位。只有在测量单位确定和统一的条件下所进行的测量才具有实际意义。为此，每个国家都有专门的计量机构，对各种单位进行规定。

测量单位的复制体称为度量器，如标准电池、标准电感、标准电阻等，分别是电动势、电感和电阻的复制实体。度量器根据其精度和用途的不同，分为基准度量器、标准度量器和工作度量器。

在测量过程中，由于采用的测量仪器仪表不同，形成了不同的测量方法，常用方法有以下几种。

#### 1) 直接测量法

直接测量法就是指测量结果可以从一次测量的实验数据中得到。它可以使用度量器直接参与比较被测量数值的大小，也可以使用具有相应单位刻度的仪表直接测得被测量的数值。直接测量法具有简便、读数迅速等优点，但是它的准确度除受到仪表的基本误差的限制以外，还由于仪表接入测量电路后，仪表的内阻被引入测量电路中，使电路的工作状态发生了改变。因此，直接测量法的准确度比较低。

#### 2) 比较测量法

比较测量法是将测量与度量器在比较仪器中进行比较，从而测得被测量数值的一种方法。比较测量法可以分为零值法、较差法和代替法。比较测量法的优点是准确度和灵敏度比较高，测量准确度最低可以达到 $\pm 0.001\%$ ；其缺点是操作烦琐，设备负载，适用于精密测量。

#### 3) 间接测量法

间接测量法是指测量时只能测出与被测量有关的电量，然后经过计算求得被测量结果。例如，用伏安法测量电阻，先测得电阻两端的电压及电阻中的电流，然后根据欧姆定律算出被测的电阻值。间接测量法的误差比直接测量法还大，但在工程中的某些场合，如对准确度要求不高时，进行估算是一种可取的测量方法。

### 1.1.2 电流与电压的测量

测量电流和电压是电工测量中最基本的测量，其测量方法在工程技术中广泛应用。在测量中主要使用电流表和电压表。

#### 1. 电流的测量

##### 1) 电流表类型和量程的选择

测量直流电流时，可使用磁电系、电磁系和电动系电流表。由于磁电系电流表的灵敏度和准确度最高，所以使用最普遍。测量交流电流时，可使用电磁系或电动系电流表，其中电磁系电流表最常用。

关于对电流表量程的选择，要根据被测量电流大小来选择适当的电流表，如安培表、毫安表或微安表。不论是哪一种表，使被测量的电流处于该电流表的量程范围之内，如被测量的电流大于所选用电流表的量程，电流表就有过载而烧坏的危险。因此，在测量之前，要对被测量电流的大小有个估算，做到心中有数，要先使用较大量程的电流表试测，然后再换一个适当量程的电流表。

##### 2) 测量电流的接法

在测量电流时，需要将电流表串接在被测的电路中，如图 1-2 (a) 所示。为了使电路的工作不因接入安培表（电流表）而受到影响，安培表的内阻很小。因此，如果不慎将安培表并联在电路的两端，安培表将被烧毁，在使用时需要特别注意。

##### 3) 磁电系电流表的分流器

采用磁电系安培表测量直流电流时，因测量表头所允许通过的电流很小，所以不能直接测量较大的电流。为了扩大其量程，应该在测量表头上并联一个称为分流器的低电阻  $R_A$ ，如

图 1-2 (b) 所示。这样，通过磁电系安培表的测量表头的电流  $I_0$  只是被测电流  $I$  的一部分，两者的关系如下：

$$I_0 = I \frac{R_A}{R_0 + R_A}$$

$$R_A = \frac{R_0}{\frac{I}{I_0} - 1}$$

$$I = I_0 \left( 1 + \frac{R_0}{R_A} \right) = I_0 K$$

$$K = \left( 1 + \frac{R_0}{R_A} \right)$$

式中， $R_0$  为电流表表头的电阻； $K$  为扩程倍数。

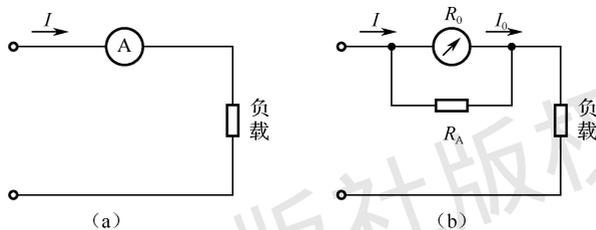


图 1-2 安培表与分流器

**【例 1-1】** 设有一磁电式电流表，它的量程原为 5A，其表头的内阻为  $0.228\Omega$ ，现并联一只分流器，其  $R_A=0.012\Omega$ ，求扩大后的量程。

解：设扩大后的容量为  $I$ ，由公式  $I = I_0 \left( 1 + \frac{R_0}{R_A} \right)$  可得

$$I = I_0 \left( 1 + \frac{R_0}{R_A} \right) = 5 \times \left( 1 + \frac{0.228}{0.012} \right) \text{A} = 100\text{A}$$

#### 4) 交流电流的测量

测量交流电流时，电流表不标极性，只要在测量量程范围内将它串入被测量电路即可，如图 1-3 所示。因交流电流表的线圈和游丝截面很小，不能测量较大电流，所以如果需扩大量程，可加接电流互感器，电流互感器是变压器的一种，其接线原理如图 1-4 所示。

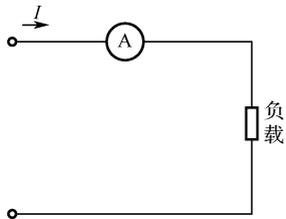


图 1-3 交流电流的测量图

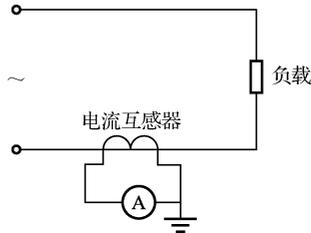


图 1-4 交流电流表用互感器扩大量程

通常电气工程上配的电感互感器都将比率（变比）标出，可直接读出被测量的电流值。使用电流互感器时，二次侧不允许断开，铁芯及二次侧线圈的一端应接地。电流表的内阻越小，测出的结果越准确，但电流表的读数乘以电流互感器的比率，才是实际电流的数值。

## 2. 电压的测量

用电压表测量电压必须将仪表与被测量电路并联。为了在并入仪表时不影响被测量电路的工作状态，电压表内阻一般都很大。电压表量程越大，则内阻越大。

### 1) 电压表类型和量程的选择

电压表和电流表在结构上基本是一样的，只是仪表的附加装置和电路接法不同（电流为串接，电压为并联），因此电压表和电流表的选择方法相同。测量直流电压常用磁电系伏特表（计），测量交流电压时常用电磁系伏特表。伏特表是用来测量电源、负载和某段电路两端电压的。要根据被测量电压的大小，选用伏特表和毫伏表。工厂内低压配电装置的电压一般为380V/220V，所以进行测量时，应使用量程大于450V的电压表，如不当心选用的量程低于被测量电压的仪表，则可能使仪表损坏。

### 2) 直流电压的测量

测量电路两端直流电压的线路如图1-5（a）所示。电压表的“+”端必须接被测电路高电位点，“-”端必须接低电位点。如果需要扩大量程，则可在电压表外串联分压电阻（也称为附加电阻），如图1-5（b）所示。所串分压电阻越大，量程越大，其分压电阻阻值计算如下：

$$R_{\text{分}} = (K - 1)r_{\text{g}}$$

式中， $R_{\text{分}}$ —分压电阻值（ $\Omega$ ）；

$r_{\text{g}}$ —电压表表头内阻（ $\Omega$ ）；

$K$ —倍压系数。

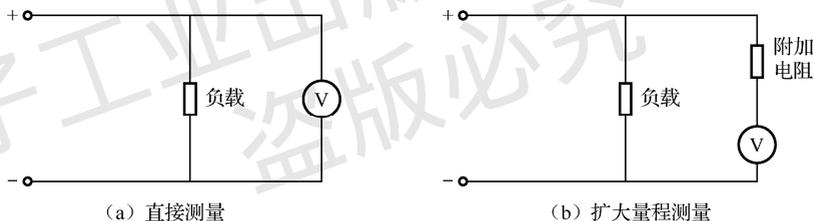


图 1-5 直流电压测量电路

### 3) 交流电压的测量

用交流电压表测量交流电压时，电压表不分极性，只需在测量量程范围内直接并入被测量电路即可，如图1-6（a）所示。如果需要扩大交流电压表量程，可加接电压互感器，如图1-6（b）所示。

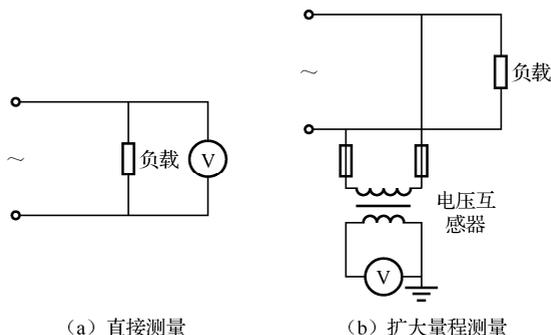


图 1-6 交流电压的测量电路

实际上电压互感器按测量电压等级的不同,有不同的标准电压比率,如 3000/100V、10000/100V 等,配用互感器的电压表量程一般为 100V,选择时根据被测量电路电压和电压表的量程合理配合使用。读值时,电压表表盘刻度已按互感器比率折算出,可直接读取。使用电压互感器时,二次侧不允许短路,铁芯及二次侧的一端要接地。

**【例 1-2】** 设有一电压表,其量程为 50V,内阻  $r_g = 2000\Omega$ 。要使电压表的量程扩大到 300V,求串联的分压电阻  $R_{分}$  的大小。

解:根据分压电阻阻值的计算式可得

$$R_{分} = (K - 1)r_g = \left(\frac{300}{50} - 1\right) \times 2000\Omega = 10000\Omega$$

### 1.1.3 万用表、钳形电流表、兆欧表的使用

#### 1. 万用表的使用

万用表是一种可以测量多种电量的多量程便携式仪表。由于万用表具有测量的种类多、量程范围宽、价格低,以及使用和携带方便等优点,所以被广泛应用于电器的维修和测试中。一般万用表都可以测量直流电流、直流电压、交流电压、直流电阻等,有的万用表还可以测量音频电平、交流电流、电容、电感,以及晶体管的  $\beta$  等。目前广泛使用的万用表有两大类,一类是指针式万用表,另一类是数字式万用表。

##### 1) 指针式万用表

###### (1) 指针式万用表的结构

指针式万用表主要由表头、测量线路和转换开关三部分组成。表头用于指示测量的数值,通常用磁电式微安表作为表头(保证有高灵敏度)。测量线路是用来把各种被测量转换到适合表头测量的直流的微小电流。其实际上由多量程的直流电流表、多量程的直流电压表、多量程的交流电压表和多量程的欧姆表等组成。

指针式万用表测量种类及量程的选择是通过转换开关来实现的。当转换开关处在不同位置时,其相应的固定触点与活动触点闭合,接通相应的测量线路。在万用表的面板上装有标尺、转换开关旋钮、调零旋钮及插孔等,如图 1-7 所示。

###### (2) 指针式万用表的使用方法及注意事项

① 正确使用转换开关和表笔插孔:万用表有红色与黑色两只表笔,表笔可插入万用表的“+、-”两个插孔,注意一定要严格将红表笔插入“+”极性孔内,黑表笔插入“-”极性孔内。测量直流电流、电压等物理量时,必须注意正负极性。根据测量对象,将转换开关旋至所需要的位置。在被测量大小不祥时,应先选用量程较大的高档位试测,如不合适再逐步改用较低的挡位,以表头指针移动到满刻度的 2/3 以上位置附近为宜。

② 正确读数:万用表有数条供测量不同物理量的标尺,读数前一定要根据被测量的种类、性质和所用量程认清所对应的读数标尺。

③ 正确测量电阻值:在使用万用表的欧姆挡测量电阻之前,应首先把红、黑表笔短接,调节指针到欧姆标尺的零位上,并正确选择电阻倍率挡。测量某电阻  $R_x$  时,一定要使被测电阻不与其他电路有任何接触,也不要用手接触表笔的导电部分,以免影响测量结果。当利用欧姆表内部电池作为测试电源时,要注意接到黑表笔的电源端为电源端的正极,红色则接到

电源端的负极。

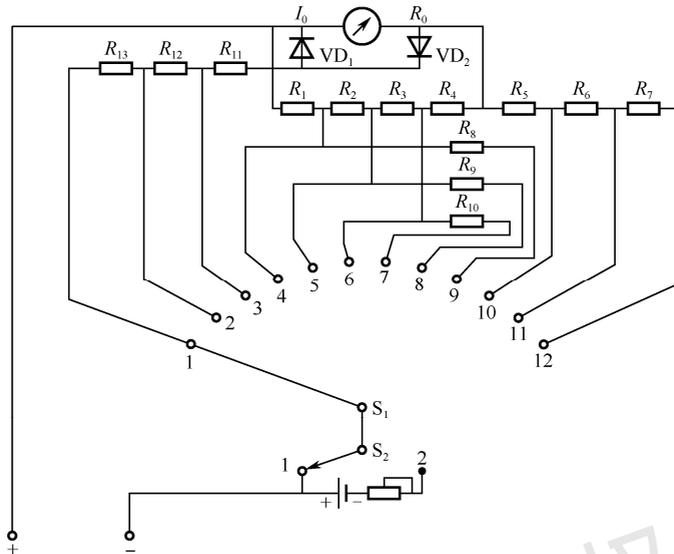


图 1-7 万用表的结构原理图

④ 测量高电压时必须注意的事项：在测量高电压时必须注意人身安全，应先将黑表笔固定接在被测量电路的低电位上，然后再用红表笔去接触被测点。操作者一定要站在绝缘良好的地方，并且应用单手操作，以防触电。在测量较高电压或较大电流时，不能在测量时带电转动转换开关旋钮改变量程或挡位。

⑤ 万用表的维护：万用表应水平放置使用，要防止受震动、受潮热。使用前首先看指针是否指在机械零位上，如果不在，则应调至零位。每次测量完毕，要将转换开关置于空挡或最高电压挡上。在测量电阻时，如果将两只表笔短接后指针仍调整不到欧姆标尺的零位，则说明应更换万用表内部的电池；长期不使用万用表时，应将电池取出，以防止电池腐蚀而影响表内其他元件。

## 2) 数字式万用表

数字式万用表以结构精密、性能稳定、可靠性高和使用方便等优点而普遍受到欢迎，其基本结构由测量线路及相关器件、液晶显示器、插孔和转换开关等组成。下面以 DT830 型数字万用表为例来分析数字万用表的使用。

DT830 型数字万用表是三位半液晶显示小型数字万用表，它可以测量交/直流电压和交/直流电流，电阻、电容、三极管 $\beta$ 值、二极管导通电压和电路短接等，由一个旋转波段开关改变测量的功能和量程，共有 30 挡。

本万用表的最大显示值为 $\pm 1999$ ，可自动显示“0”和极性，过载时显示“1”或“-1”，电池电压过低时，显示“←”标志，短路检查用蜂鸣器。DT830 型数字万用表面板如图 1-8 所示。

### (1) 技术特性

#### 测量范围：

① 交/直流电压（交流频率为 45~500Hz）：量程分别为 200mV、2000mV、20V、200V 和 1000V 五挡，直流精度为 $\pm$ （读数的 0.8%+2 个字）以下，交流精度为 $\pm$ （读数的 1%+5 个字）；

输入阻抗，直流挡为  $10\text{M}\Omega$ ，交流挡为  $10\text{M}\Omega$ 、 $100\text{pF}$ 。

② 交/直流电流：量程分别为  $2000\mu\text{A}$ 、 $200\mu\text{A}$ 、 $20\text{mA}$ 、 $200\text{mA}$  和  $10\text{A}$  五挡，直流精度为 $\pm$ （读数的  $1.2\%+2$  个字），交流精度为 $\pm$ （读数的  $2.0\%+5$  个字），最大电压负荷为  $250\text{mV}$ （交流有效值）。

③ 电阻：量程分别为  $200\Omega$ 、 $2\text{k}\Omega$ 、 $20\text{k}\Omega$ 、 $200\text{k}\Omega$  和  $2\text{M}\Omega$  五挡。精度为 $\pm$ （读数的  $2.0\%+3$  个字）。

### （2）面板及操作说明

① 显示器：三位半数字液晶显示屏。

② 电源开关：按下，则接通电源，不用时应随手关断。

③ 电容测量插座：测量电容时，将电容引脚插入插座中。

④ 功能量程开关：选择不同的测量功能和量程。

⑤  $10\text{A}$  电流插孔（不能测量大于  $10\text{A}$  的电流）：当测量大于  $200\text{mA}$ 、小于  $10\text{A}$  的交/直流电流时，红表笔应插入此  $10\text{A}$  的电流插孔。

⑥ 电流插孔：当测量小于  $200\text{mA}$  的交、直流电流时，红表笔应插入此电流插孔。

⑦  $\text{V}/\Omega$  插孔：当测量交/直流电压、电阻、二极管导通电压和短路检测时，红表笔应插入此  $\text{V}/\Omega$  插孔。

⑧ 接地公共端“COM”插孔：黑表笔始终插入此接地插孔中。

⑨  $\beta$  值测试插座：将被测三极管的集电极、基极和发射极分别插入“C”、“B”、“E”插孔内，注意区分三极管是 NPN 型还是 PNP 型。

### （3）使用方法

#### ① 准备

按下电源开关，观察液晶显示是否正常，是否有电池缺电标志出现，若有则要先更换电池。

#### ② 使用

##### a. 交/直流电流的测量

根据测量电流的大小选择适当的电流测量量程和红表笔的插入孔，测量直流时，红表笔接触电压高的一端，黑表笔接触电压低的一端，正向电流从红表笔流入万用表，再从黑表笔流出，当要测量的电流大小不清楚的时候，先用最大量程来测量，然后再逐渐减小量程来精确测量。

##### b. 交/直流电压的测量

红表笔插入“ $\text{V}/\Omega$ ”插孔中，根据电压的大小选择适当的电压测量量程，黑表笔接触电路的“地”端，红表笔接触电路中的待测点。特别要注意，数字万用表测量交流电压的频率很低（ $45\sim 500\text{Hz}$ ），中高频信号的电压幅度应采用交流毫伏表来测量。

##### c. 电阻的测量

红表笔插入“ $\text{V}/\Omega$ ”插孔中，根据电阻的大小选择适当的电阻测量量程，红、黑两表笔分别接触电阻两端，观察读数即可。特别是测量在路电阻时（在电路板上的电阻），应先把电路的电源关断，以免引起读数抖动。禁止用电阻挡测量电流或电压（特别是交流  $220\text{V}$  电压），否则容易损坏万用表。另外，利用电阻挡还可以定性判断电容的好坏。先将电容两极短路（用一支表笔同时接触两极，使电容放电），然后将万用表的两支表笔分别接触电容的两个极，观察显示的电阻读数。若一开始时显示的电阻读数很小（相当于短路），然后电容开始充电，显示的电阻读数逐渐增大，最后显示的电阻读数变为“1”（相当于开路），则说明该电容是好的。



图 1-8 DT830 型数字  
万用表面板

若按上述步骤操作，显示的电阻读数始终不变，则说明该电容已被损坏（开路或短路）。特别要注意的是，测量时要根据电容的大小选择合适的电阻量程，如  $47\mu\text{F}$  用  $200\text{k}$  挡，而  $4.7\mu\text{F}$  则要用  $2\text{M}$  挡等。

#### （4）注意事项

① 注意正确选择量程及红表笔插孔。对未知量进行测量时，应首先把量程调到最大，然后从大向小调，直到合适为此。若显示“1”，则表示过载，应加大量程。

② 不测量时，应随手关断电源。

③ 改变量程时，表笔应与被测点断开。

④ 测量电流时，切忌过载。

⑤ 不允许用电阻挡和电流挡测电压。

## 2. 钳形电流表的应用

钳形电流表按结构原理不同分为磁电式和电磁式两种，磁电式可测量交流电流和交流电压；电磁式可测量交流电流和直流电流。钳形电流表的外形如图 1-9 所示。

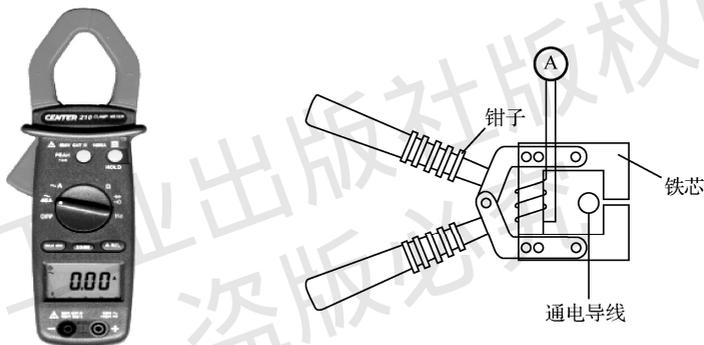


图 1-9 钳形电流表

### 1) 钳形电流表的使用方法和使用时的事项

（1）在进行测量时用手捏紧扳手即张开，被测载流导线的位置应放在钳口中间，防止产生测量误差，然后放开扳手，使铁芯闭合，表头就有指示。

（2）测量时应先估计被测电流或电压的大小，选择合适的量程或先选用较大的量程测量，然后再视被测电流、电压的大小减小量程，使读数超过刻度的  $1/2$ ，以便得到较准确的读数。

（3）为使读数准确，钳口两个面应保证很好的接合，如有杂声，可将钳口重新开合一次，如果声音依然存在，则可检查在接合面上是否有污垢存在，若有污垢，可用汽油擦干净。

（4）测量低压可熔熔断器或低压母线电流时，测量前应将邻近各相用绝缘板隔离，以防钳口张开时可能引起相间短路。

（5）有些型号的钳形电流表附有交流电压刻度，测量电流、电压时应分别进行，不能同时测量。

（6）不能用于高压带电测量。

（7）测量完毕后一定要把调节开关放在最大电流量程位置，以免下次使用时由于未经选择量程而造成仪表损坏。

（8）为了测量小于  $5\text{A}$  以下的电流时能得到较准确的读数，在条件许可时可把导线多绕几

圈放进钳口进行测量，但实际电流数值应为读数除以放进钳口内的导线根数。

## 2) 钳形电流表在几种特殊情况下的应用

(1) 测量绕线式异步电动机的转子电流：用钳形电流表测量绕线式异步电动机的转子电流时，必须选用电磁系表头的钳形电流表，如果采用一般常见的磁电系钳形表测量时，指示值与被测量的实际值会有很大出入，甚至没有指示，其原因是磁电系钳形表的表头与互感器二次线圈连接，表头电压是由二次线圈得到的。根据电磁感应原理可知，互感电动势为

$$E_2 = 4.44fW\Phi_m$$

由公式不难看出，互感电动势的大小与频率成正比。当采用此种钳形表测量转子电流时，由于转子上的频率较低，表头上得到的电压将比测量同样工频电流时的电压小得多（因为这种表头是按交流 50Hz 的工频设计的）。有时电流很小，甚至不能使表头中的整流元件导通，所以钳形表没有指示，或指示值与实际值有很大出入。

如果选用电磁系钳形表，由于测量机构没有二次线圈与整流元件，被测电流产生的磁通通过表头磁化表头的静、动铁片，使表头指针偏转，与被测电流的频率没有关系，所以能够正确指示出转子电流的数值。

(2) 用钳形电流表测量三相平衡负载时，钳口中放入两相导线时的电流指示值与放入一相时的电流指示值相同。用钳形电流表测量三相平衡负载时，会出现一种奇怪现象，即钳口中放入两相导线时的指示值与放入一相导线时的指示值相同，这是因为在三相平衡负载的电路中，每相的电流值相等，用下列公式表示：

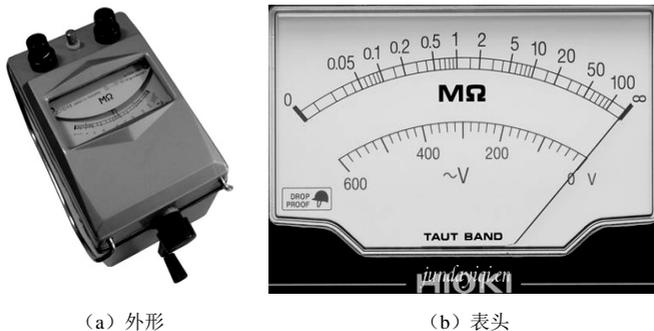
$$I_u = I_v = I_w$$

若钳口中放入一相导线，则钳形表指示的是该相的电流值，当钳口中放入两相导线时，该表所指示的数值实际上是两相电流的相量之和，按照相量相加的原理， $I_1 + I_3 = -I_2$ ，因此指示值与放入一相时相同。

如果三相同时放入钳口中，则当三相负载平衡时， $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ ，即钳形电流表的读数为零。

## 3. 兆欧表的使用

兆欧表俗称摇表或摇电箱，是一种简便的常用测量高电阻直接式携带型摇表，用来测量电路、电动机绕组、电缆及电气设备等的绝缘电阻。表盘的上标尺刻度以“MΩ”为单位。分为手摇发电机型、用交流电作电源型及用晶体管直流电源变换器作电源的晶体管兆欧表，目前常用的是手摇发电机型。兆欧表的外形如图 1-10 所示。



(a) 外形

(b) 表头

图 1-10 兆欧表的外形

兆欧表的常见用法如图 1-11 所示。

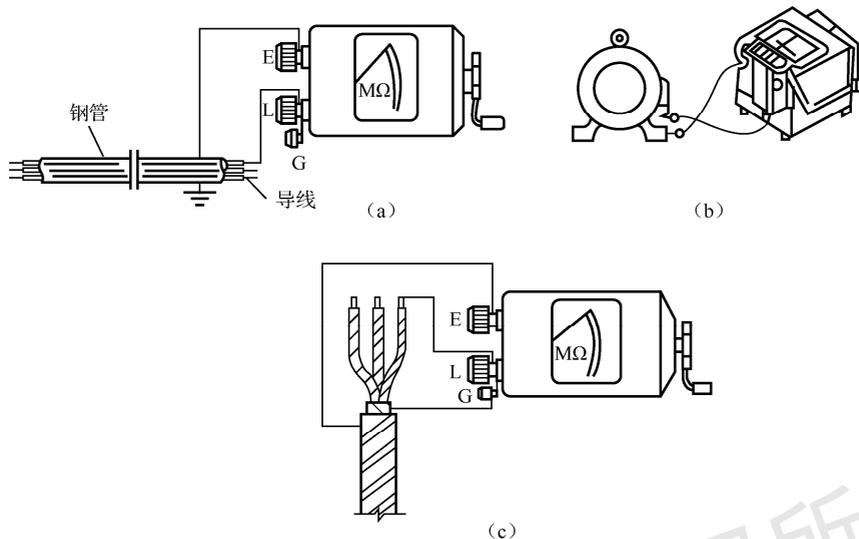


图 1-11 兆欧表的常见用法

(1) 线路对地间绝缘电阻的测量：被测线路接于“L”端钮上，“E”端钮与地线相接，用左手稳住摇表，右手摇动手柄，速度由慢逐渐加快，并保持在每分钟 120 转左右，持续 1 分钟，读出兆欧数。

(2) 电动定子绕组与机壳间绝缘电阻的测量：定子绕组接“L”端钮上，机壳与“E”端钮连接，测量方法同上。

(3) 电电缆缆心对缆壳间绝缘电阻的测量：将“L”端钮与缆心连接，“E”端钮与缆壳连接，将缆心与缆壳之间的内层绝缘物接于屏蔽端钮“G”上，以消除因表面漏电而引起的测量误差。测量方法同上。

#### 1) 兆欧表使用时的注意事项

(1) 在进行测量前先切断被测线路或设备电源，并进行充分放电（约需 2~3 分钟）以保障设备及人身安全。

(2) 兆欧表接线柱与被测设备间的连接导线不能用双股绝缘线或绞线，应用单股线分开单独连接，避免因绞线绝缘不良而引起测量误差。

(3) 测量前先将兆欧表进行一次开路 and 短路试验，检查兆欧表是否良好。若将两连接线开路，摇动手柄，则指针应指在“∞”（无穷大）处；把两连接线短接，指针应指在“0”处。这时说明兆欧表是良好的，否则兆欧表是有问题的。

(4) 测量时摇动手柄的速度由慢逐渐加快并保持每分钟 120 转左右的速度持续 1 分钟左右，这时才是准确读数。如果被测设备短路、指针指零，应立即停止摇动手柄，以防表内线圈发热损坏。

(5) 测量电容器及较长电缆等设备的绝缘电阻后，应立即将“L”端钮的连接线断开，以免被测设备向兆欧表倒充电而损坏仪表。

(6) 禁止在雷电时或在邻近有带高压电的导线或设备时用兆欧表进行测量。只有在设备不带电又不可能受其他电源感应而带电时才能进行测量。

(7) 兆欧表量程范围的选用一般应注意不要使其测量范围过多地超出所需测量的绝缘电

阻值,以免读数产生较大的误差。例如,一般测量低压电气设备的绝缘电阻时可选用  $0\sim 200\text{M}\Omega$  量程的表,测量高压电气设备或电缆时可选用  $0\sim 2000\text{M}\Omega$  量程的表。刻度不是从零开始的,而且从  $1\text{M}\Omega$  或  $2\text{M}\Omega$  起始的兆欧表一般不宜用来测量低压电气设备的绝缘电阻。

(8) 测量完毕后,在手柄未完全停止转动和被测对象没有放电之前,切不可用手触及被测对象的测量部分并拆线,以免触电。

### 2) 兆欧表的选用

(1) 目前常用国产兆欧表的型号与规格见表 1-2。表中所列为手摇发电机型,最高电压为  $2500\text{V}$ ,最大量程为  $10\ 000\text{M}\Omega$ 。若需要更高电压和更大量程的可选用上海生产的新型 ZC30 型晶体兆欧表,其额定电压可达  $5000\text{V}$ ,量程为  $100\ 000\text{M}\Omega$ 。

(2) 兆欧表的选择:兆欧表的选用主要是选择兆欧表的电压及其测量范围,表 1-3 列出了在不同情况下选择兆欧表的要求。

表 1-2 常用兆欧表的型号与规格

型 号	额定电压 (V)	级 别	量程范围 ( $\text{M}\Omega$ )
ZC 11-6	100	1.0	$0\sim 20$
ZC 11-7	250	1.0	$0\sim 50$
ZC 11-8	500	1.0	$0\sim 100$
ZC 11-9	50	1.0	$0\sim 200$
ZC 25-2	250	1.0	$0\sim 250$
ZC 25-3	500	1.0	$0\sim 500$
ZC 25-4	1000	1.0	$0\sim 1000$
ZC 11-3	500	1.0	$0\sim 2000$
ZC 11-10	2500	1.5	$0\sim 25\ 000$
ZC 11-4	1000	1.0	$0\sim 5000$
ZC 11-5	2500	1.5	$0\sim 10\ 000$

表 1-3 兆欧表的电压及测量范围的选择

被 测 对 象	被测设备的额定电压 (V)	所选兆欧表的电压 (V)
弱电设备、线路的绝缘电阻	100 以上	$50\sim 100$
线圈的绝缘电阻	500 以下	500
线圈的绝缘电阻	500 以上	1000
发电机线圈的绝缘电阻	380 以下	1000
电力变压器、发电机、电动机的绝缘电阻	500 以上	$1000\sim 2500$
电气设备的绝缘电阻	500 以下	$500\sim 1000$
电气设备的绝缘电阻	500 以上	2500
瓷瓶、母线、刀闸的绝缘电阻		$2500\sim 5000$

## 1.2 单相变压器

### 1.2.1 单相变压器的结构、原理与用途

#### 1. 变压器的分类

变压器的种类有很多，不同类型的变压器在性能、结构上有很大差别。一般变压器可按用途、结构和相数分类。

##### 1) 按用途分

变压器按用途可大致分为以下几种：

- (1) 用于输配电系统的电力变压器；
- (2) 用于工业动力系统中直流拖动的专用电源变压器；
- (3) 用于电力系统或实验室等场合的调压变压器；
- (4) 用于测量电压的电压互感器、测量电流的钳形电流表等测量变压器；
- (5) 用于潮湿环境或人体常常接触场合的隔离变压器。

##### 2) 按结构分

按变压器的绕组可将其分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器及自耦变压器。按变压器的铁芯结构形式可以分为壳式变压器和芯式变压器。

##### 3) 按相数分

变压器按相数可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

#### 2. 变压器的结构

变压器主要由铁芯和线圈（也称为绕组）两部分组成。铁芯是变压器的磁路通道，为了减小涡流损耗，同时又要尽可能地减小磁滞损耗，变压器铁芯采用导磁率较高而又相互绝缘的硅钢片叠装而成。每一钢片的厚度在频率为 50Hz 的变压器为 0.35~5mm。通信用的变压器近来也常用铁氧体或其他磁性材料作铁芯。

变压器按铁芯的结构形式，可分为芯式和壳式两种。芯式的绕组套在铁芯柱上，如图 1-12 (a) 所示；壳式的绕组部分被铁芯围绕，如图 1-12 (b) 所示。电力变压器多用芯式，而小型变压器多用壳式。

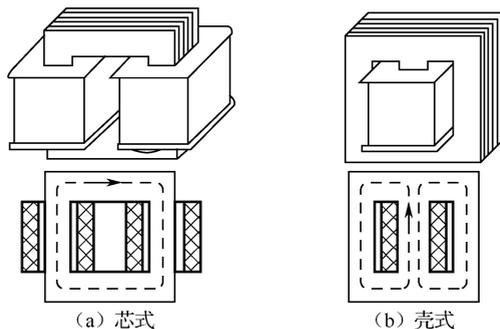


图 1-12 芯式和壳式变压器

变压器的绕组通常用其有良好绝缘的优质漆包线在线圈框架上绕成，大型变压器也有使用纱包线和丝包线的。在工作时，和电源相连的线圈叫做原线圈（也叫初级绕组、一次绕组或原边），而与负载相连的线圈叫做副线圈（也叫次级绕组、二次绕组或副边）。每个绕组都有几百匝到几千匝，在绕组的框架上往往需要绕很多层。一般电源变压器都是直接接到市电使用的，有些特殊变压器，如电视机的行输出变压器工作在上万伏的电压下，因此绝缘问题是变压器制造中的主要问题，所以变压器绕组和铁芯之间，绕组和绕组之间，以及每一绕组匝间和层间都要绝缘良好，绝缘材料既要薄又要耐高压，同时力学性能又要好，为了提高变压器的绝缘性能，在装配后往往还要进行去潮处理（烘烤、灌蜡、浸漆、密封等）。

### 3. 变压器的工作原理

图 1-13 (a) 所示是一个最简单的变压器，它由一个闭合铁芯和套在铁芯上的两个绕组组成。原边的匝数为  $N_1$ ，副边的匝数为  $N_2$ 。图 1-13 (b) 为变压器的符号，变压器一般用 T 表示。

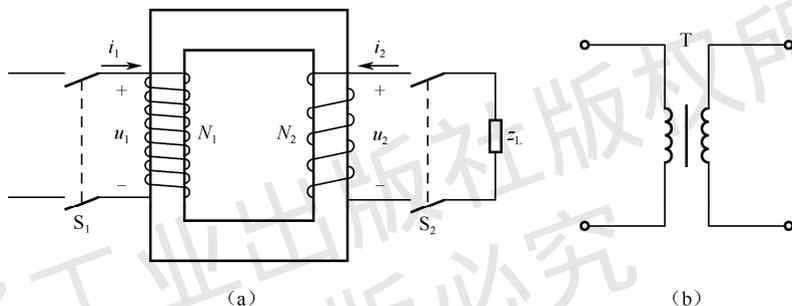


图 1-13 单相变压器

#### 1) 变压器的空载运行及变压比

当把图 1-13 (a) 电路中的开关  $S_1$  闭合、开关  $S_2$  断开时，变压器的原边就直接与电源接通，副边为开路。此时变压器工作在空载运行状态。在空载运行状态下副边的电流为零，原边中流过的交变电流  $i_0$  称为空载电流， $i_0$  为变压器额定电流的 3%~8%。

此时，原边的磁电动势为  $i_0 N_1$ ，它在铁芯磁路中产生交变磁通  $\Phi_m$ ， $\Phi_m$  穿过副边绕组而闭合，因此在原/副边中分别感应出电动势  $E_1$  与  $E_2$ 。由于变压器原线圈输入的正弦交流电，根据电磁感应定律，原边的感应电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

由于  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，经过数学推导得

$$e_1 = N_1 \omega \Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

令  $E_{1m} = N_1 \Phi_m \omega$ ，它的有效值为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 \Phi_m 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 \Phi_m f$$

同理，副边中电动势的有效值为

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{N_2 \Phi_m 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4.44 N_2 \Phi_m f$$

由上式可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44N_1\Phi_m f}{4.44N_2\Phi_m f} = \frac{N_1}{N_2}$$

由于变压器的空载电流  $i_0$  很小，原边的电压降可略去不计，故原边的外加电压  $U_1 \approx E_1$ 。而在副边中，因为是开路，故其端电压  $U_2 \approx E_2$ ，那么有

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44N_1\Phi_m f}{4.44N_2\Phi_m f} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

$K$  称为变压器的变压比或变比（匝数比）。

当  $K > 1$  时， $N_1 > N_2$ ， $U_1 > U_2$ ，这种变压器叫做降压变压器；当  $K < 1$  时， $N_1 < N_2$ ， $U_1 < U_2$ ，这种变压器叫做升压变压器；当  $K = 1$  时， $N_1 = N_2$ ， $U_1 = U_2$ ，这种变压器既不升压，也不降压，只能作隔离变压器用，所以取不同的  $K$  值，可获得不同数值的输出电压，使变压器具有不同的用途。

### 2) 变压器的负载运行和变流比

当把图 1-13 (a) 中的开关  $S_1$ 、 $S_2$  闭合时，变压器在带负载的情况下运行。

变压器工作时，绕组电阻、铁芯的磁滞及涡流总会产生一定的能量损耗，但比负载上消耗的功率小得多，一般情况下可以忽略不计。可将变压器视为理想变压器，其内部不消耗功率，输入变压器的功率全部消耗在负载上，即

$$P_1 = P_2 \text{ 或 } U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

式中， $\cos \varphi_1$  为原边的功率因数； $\cos \varphi_2$  为副边的功率因数； $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  通常相差很小，在实际计算中可以认为它们相等，因而可以得到

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

即

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

这表明，变压器在带负载工作时，原、副边中的电流跟线圈的匝数成反比。也就是说，只要适当改变变压器的匝数比，就可改变电流。通常使用的电流互感器就是根据这一原理制成的。

### 3) 变压器的阻抗变换作用

变压器不仅可用于变换电压，而且还可用于变换电流，此外还具有阻抗变换的作用。

设变压器的初级输入阻抗为  $Z_1$ ，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  $Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$  可得

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

又由于  $\frac{U_2}{I_2} = Z_2$ ，所以有

$$Z_1 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{U_2}{I_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 = K^2 Z_2$$

这表明变压器的次级接上负载  $Z_2$  后, 对电源而言, 相当于接上阻抗  $Z'_2 = K^2 Z_2$  的负载。

**【例 1-3】** 有一台电压为 220/36V 的降压变压器, 次级接一个白炽灯 (36V, 40W)

求: ①若变压器的初级  $N_1 = 1100$  匝, 次级应为多少匝? ②白炽灯点亮后流过初级、次级侧的电流各是多少?

解: ① 由变压比的公式  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ , 可求出次级侧的匝数为

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} N_1 = \frac{36}{220} \times 1100 = 180 \text{ 匝}$$

② 白炽灯是纯电阻性负载, 所以  $\cos \varphi = 1$ , 由功率公式  $P = UI \cos \varphi$ , 求出流过次级侧的电流为

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{40}{36} \text{ A} = 1.11 \text{ A}$$

又由变流公式, 可求出流过初级的电流:

$$I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1} = 1.11 \times \frac{180}{1100} \text{ A} = 0.18 \text{ A}$$

**【例 1-4】** 变压器电路如图 1-14 所示, 把电阻  $R_L = 8\Omega$  的扬声器接到电压有效值  $U = 10\text{V}$ 、内阻  $r = 200\Omega$  的交流信号源上, 为使负载得到最大输出功率, 在信号源与负载之间接入的变压器的变压比应是多少?

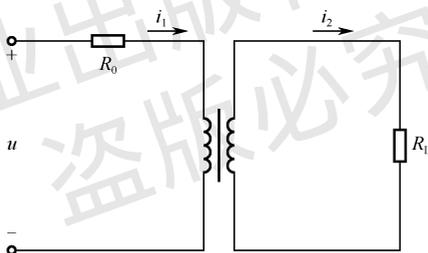


图 1-14 例 1-4 图

解: 由公式  $Z'_2 = K^2 Z_2$  得

$$R'_L = K^2 R_L$$

要使负载获得最大功率, 必须使  $R'_L = r$ , 即  $r = R'_L = K^2 R_L$

$$\text{所以, } K = \sqrt{\frac{r}{R_L}} = \sqrt{\frac{200}{8}} = 5$$

#### 4. 变压器的用途

在输电方面, 当输送功率  $P = UI \cos \varphi$ , 负载的功率因数  $\cos \varphi$  为定值时, 电压  $U$  越高,  $I$  就越小, 在实际输送电能时, 就采用高电压低电流输电, 这不仅可以减小输电线的截面积, 节省材料, 同时还可以减小线路的功率损耗。

用电设备所需的电压值是多种多样的, 例如, 机床上的三相交流电动机的额定电压为 380V, 而机床照明灯为了安全使用的是 36V 电压, 这就需要变压器把电网电压调至合适的工作电压。

在实际生产中，为了安全起见，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、电器测量等方面均有广泛应用。

## 1.2.2 变压器的外特性和电压变化率

如果变压器的初级电源电压不变，变压器的负载电流（设为  $I_2$ ）增大时，次级内部电压降也增大，次级端电压（设为  $U_2$ ）随负载电流的增加而下降，这种特性叫变压器的外特性，

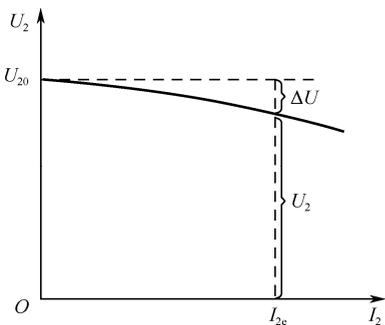


图 1-15 变压器的外特性

可用图 1-15 表示。

通常希望电压  $U_2$  的变化越小越好，从空载到额定负载，次级电压的变化程度用电压变化率（又称电压调整率） $\Delta U$  表示，即

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

式中， $U_2$  为变压器次级输出额定电流  $I_{2e}$  时的输出电压（V）； $U_{20}$  为空载时的额定电压（V）。

在一般变压器中，由于其电阻和漏磁感抗很小，电压变化率也是不大的，约为 5%。电压变化率是变压器的主要性能指标之一， $\Delta U$  越小，说明变压器输出电压越稳定，变压器带负载的能力也就越强。电力变压器在额定负载时的  $\Delta U$  为 4%~6%。通常  $\Delta U$  也与负载的功率因数  $\cos \varphi$  有关， $\cos \varphi$  越高， $\Delta U$  就越小，因此提高供电的功率因数也可以减小电压的波动。

## 1.2.3 变压器的同极性端

### 1. 同名端的概念

在使用变压器或者其他有磁耦合的互感线圈时要注意线圈的正确连接。如有一台单相变压器的原线圈有两个相同的绕组，若接到 220V 电源的两绕组串联与接到 110V 电源上的两绕组并联，如图 1-16 (b)、(c) 所示。如果随便连接，如串联时，2 和 4 端连在一起，将 1 和 3 端接电源，如图 1-16 (a) 所示。这样两绕组电流产生的磁通相互抵消，没有感应电动势产生，绕组中将流过很大的电流，把变压器烧坏。

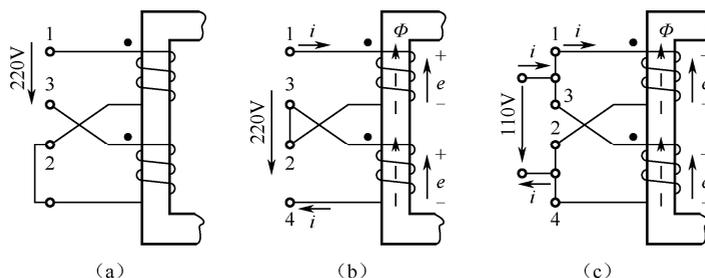


图 1-16 变压器原绕组的连接

为了正确连接两线圈，必须先找出两线圈同为高电位或同为低电位的端点，称为同极性端（或同名端）。但是，已经制成的变压器或电动机，由于浸漆或其他工艺的处理，从外观上已经无法辨认两线圈的具体绕向，同极性端也就无法看出，这就要用实验的方法来测定同极性端，并用“·”或“\*”标注对应的同极性端。

## 2. 同极性端的判断方法

### 1) 交流法

用交流法测定绕组同极性端的电路如图 1-17 所示。1-2 和 3-4 是两个线圈的接线端，现将 2 和 4 端连接在一起，在其中一个绕组 2 和 1 端加一个比较低的便于测量的电压。用电压表测量  $U_{13}$ ，如果  $U_{13}$  是两绕组电压  $U_{12}$  和  $U_{34}$  之差，则 1 和 3 是同极性端；如果  $U_{13}$  是  $U_{12}$  和  $U_{34}$  之和，则 1 和 4 是同极性端。

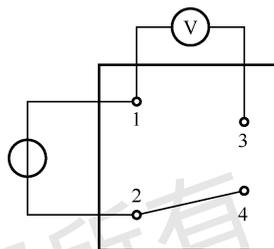


图 1-17 交流法

### 2) 直流法

用直流法测定绕组极性电路如图 1-18 所示。当开关 S 闭合瞬间，如果毫安表的指针正向偏转，则 1 和 3 是同极性端；反向偏转时，则 1 和 4 是同极性端。

### 3) 观察法

当已知两绕组的绕向时，可直接从绕组的绕向判断同极性端，即绕组均取上端为首端，下端为末端，两绕组绕向相同时，两首端为同极性端，两末端也为同极性端，如图 1-19 (a) 所示；两绕组绕向相反时，两首端为异极性端，即一绕组的首端与另一绕组的末端为同极性端，如图 1-19 (b) 所示。

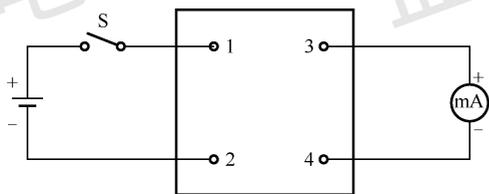


图 1-18 直流法

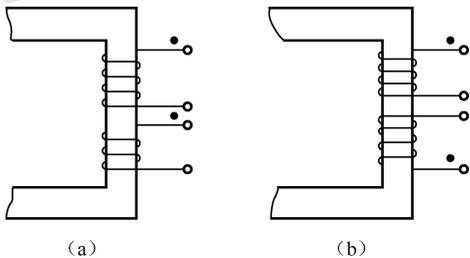


图 1-19 观察法

## 1.3 三相异步电动机的认识

### 1.3.1 三相异步电动机的结构和工作原理

#### 1. 三相异步电动机的结构

三相异步电动机分为两个基本部分：定子和转子。定子与转子之间有一个较小的气隙。图 1-20 表示绕线转子三相异步电动机的结构。

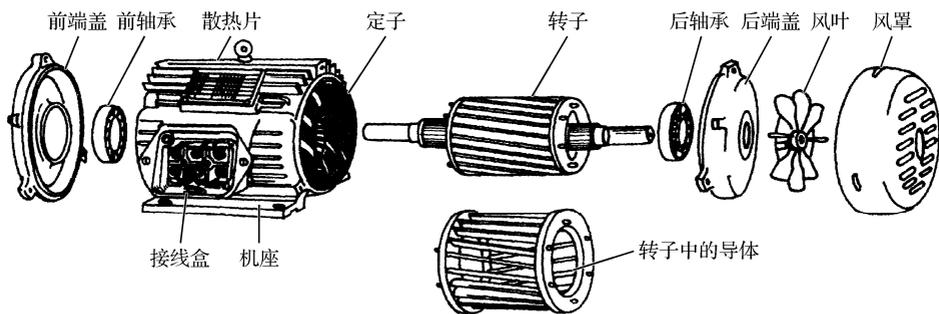


图 1-20 三相笼型异步电动机的结构

### 1) 定子

定子是电动机的静止部分，它由铁芯、定子绕组和机座三部分组成。定子铁芯是异步电动机主磁通磁路的一部分。为了使异步电动机能产生较大的电磁转矩，希望有一个较强的旋转磁场，同时由于旋转磁场对定子铁芯以同步转速旋转，定子铁芯中的磁通大小与方向都是变化的，必须设法减少由旋转磁场在定子铁芯中所引起的涡流损耗和磁滞损耗，因此定子铁芯由导磁性能较好的 $0.5\text{mm}$ 厚且冲有一定槽形的硅钢片叠压而成。中小型电动机的定子绕组大多采用漆包线绕制，按一定规则连接，有6个出线端，即 $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ 和 $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ ，并将其接至机座接线盒中，定子绕组可接成星形或三角形。机座的作用主要是固定和支撑定子铁芯。中小型异步电动机一般都采用铸铁机座，并根据不同的冷却方式而采用不同的机座形式。例如，小型封闭式电动机中损耗变成的热量全都要通过机座散出。为了加强散热能力，在机座的外表面有很多均匀分布的散热筋，以增大散热面积。对于大中型异步电动机，一般采用钢板焊接的机座。

### 2) 转子

异步电动机的转子由转子铁芯、转子绕组和转轴组成，如图 1-21 所示。

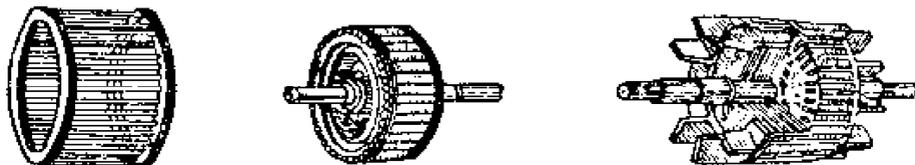


图 1-21 转子形状

转子铁芯也是电动机主磁通磁路的一部分，一般也由 $0.5\text{mm}$ 厚冲槽的硅钢片叠成，铁芯固定在转轴或转子支架上，整个转子铁芯的外表面成圆柱形。转子绕组由嵌放在转子铁芯槽内的铜条组成，铜条两端与铜环焊接起来（也可以用铸铝将铝条和铝环铸在一起）形成回路。中小型笼型电动机的转子大部分是在转子槽中用铝和转子铁芯浇铸成一体的笼型转子。转轴是传递功率的部件，电动机由电能转变为机械能主要靠转轴传出。转轴一般由中碳钢制成，小直径转子铁芯一般直接安装在转轴上，直径较大的转子铁芯一般通过固定支架固定在转轴上，也有转轴焊接幅向筋为支架的。

### 3) 气隙

异步电动机定、转子之间的气隙很小，中小型电动机一般为 $0.2\sim 2\text{mm}$ 。气隙的大小与异步电动机的性能关系极大。气隙越大，磁阻也越大。磁阻大时，产生同样大小的旋转磁场就

需要较大的励磁电流。励磁电流是无功电流（与变压器中的情况一样），该电流增大会使电动机的功率因数变坏。然而，磁阻大可以减少气隙磁场中的谐波含量，从而可减少附加损耗，且改善启动性能。气隙过小，会使装配困难和运转不安全。决定气隙的大小应权衡利弊，全面考虑。一般异步电动机的气隙以较小为宜。



### 思考并讨论

三相异步电动机的定子和转子各由哪些部件组成？

## 2. 三相异步电动机的工作原理

### 1) 旋转磁场的产生

异步电动机的转子之所以会旋转是由于定子旋转磁场的作用。下面就来讨论分析旋转磁场是如何产生的。

如图 1-22 所示，三相异步电动机的定子铁芯中放有三相对称绕组  $U_1-U_2$ 、 $V_1-V_2$  和  $W_1-W_2$ ，它们在空间上互差  $120^\circ$ 。三相绕组联结成星形，即把末端  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  连在一起，首端的  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  接在三相电源上，绕组中通入三相对称电流，即

$$i_U = I_m \sin \omega t \quad (\text{通入线圈 } U_1-U_2)$$

$$i_V = I_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{通入线圈 } V_1-V_2)$$

$$i_W = I_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{通入线圈 } W_1-W_2)$$

通入的三相对称电流的波形如图 1-23 所示，取电流为正值时从绕组的首端流入，末端流出。

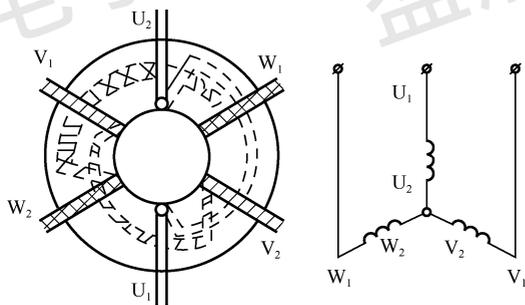


图 1-22 定子绕组示意图

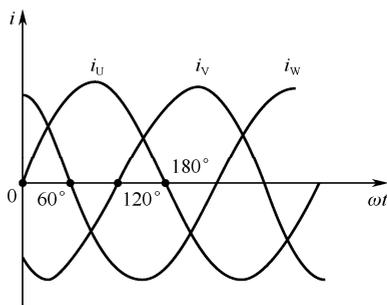


图 1-23 三相对称电流

电流为负值时从绕组的末端流入，首端流出。三相绕组通入三相电流后分别产生各自的交变磁场，而在空间产生的合成磁场是一个旋转磁场，具体过程如下。

当  $\omega t = 0$  时， $i_U$  为零，U 相绕组中没有电流流过； $i_V$  为负，电流从末端  $V_2$  流入，从首端  $V_1$  流出； $i_W$  为正，电流从末端  $W_1$  流入，从首端  $W_2$  流出，如图 1-24 (a) 所示。根据右手螺旋定则，画出合成磁场 N 和 S 极，绕组按图示分布，产生的磁极对数  $p=1$ 。

当  $\omega t = 60^\circ$  时，电流  $i_U$  为正， $i_V$  为负， $i_W$  为零，合成磁场如图 1-24 (b) 所示，由图 1-24 (a) 到 (b) 合成磁场在空间上顺时针旋转了  $60^\circ$ 。

同理可以画出  $\omega t = 120^\circ$  与  $\omega t = 180^\circ$  时的合成磁场，如图 1-24 (c) 和 (d) 所示。

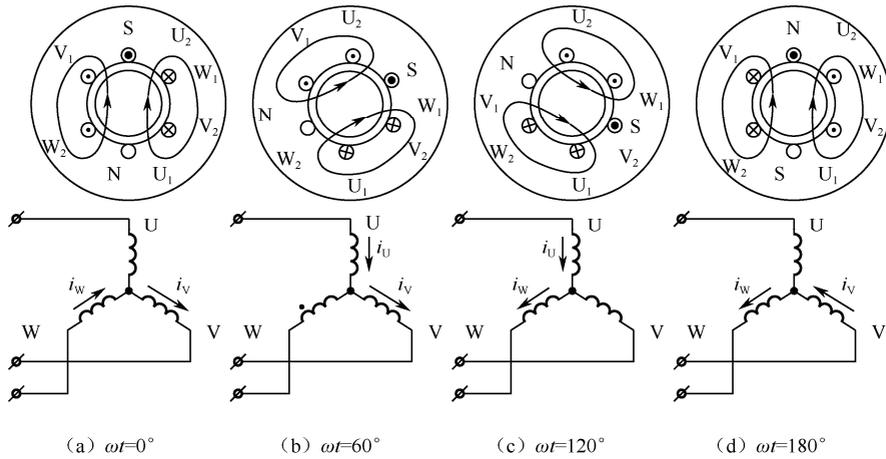


图 1-24 三相交变电流的旋转磁场

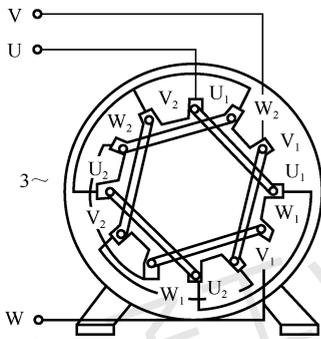


图 1-25 产生两对磁极的三相绕组的分布

通过分析,对于图 1-24 所示的定子绕组通入三相交变电流后,将产生磁极对数  $p=1$  的旋转磁场,电流变化半周,合成磁场在空间上旋转  $180^\circ$ 。

旋转磁场的磁极对数  $p$  与定子绕组的分布有关。如果每相绕组由两个串联的线圈组成,那么每相绕组有 4 个有效边,定子铁芯至少有 12 个槽,每相绕组(首端与首端间或末端与末端间)在空间上相差  $60^\circ$ ,如图 1-25 所示。

当定子绕组通过三相电流后产生两对磁极的旋转磁场,产生 4 个瞬时的合成磁场,如图 1-26 所示。

分析方法与两极相同,当电流变化  $1/6$  周时,旋转磁场在空间上顺时针转过  $30^\circ$ 。当电流变化  $1/2$  周时,旋转磁场在空间上顺时针转过  $90^\circ$ 。磁场的转速与磁极对数  $p$  成反比。

用同样的方法可以证明当极对数为  $p$  时,电流变化一周,合成磁场在空间上旋转  $1/p$  周。

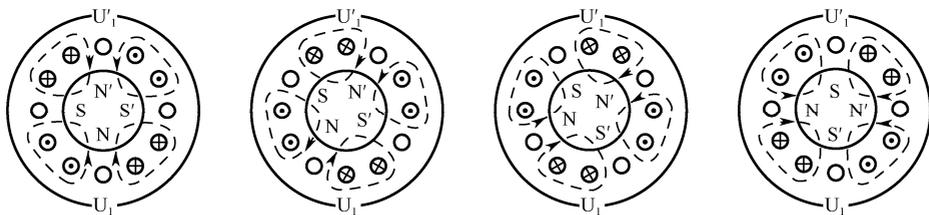


图 1-26 三相对称电流产生的 4 极旋转磁场

## 2) 旋转磁场的转速

旋转磁场的转速取决于磁场的极数。在一对磁极的情况下,交流电变化一周,旋转磁场在空间上转了一转。交流电的频率为  $f$ ,即每秒变化  $f$  个周期,那么旋转磁场的转速即为  $f$  (r/s)。转速的单位是转/分钟 (r/min),若以  $n_1$  表示旋转磁场的每分钟转数,则

$$n_1 = 60f \text{ (r/min)}$$

对于四极即  $p=2$  的旋转磁场,电流变化一个周期时,磁场只旋转了半转,比  $p=1$  情况下转速慢了一半,即

$$n_1 = \frac{60f}{2} \text{ (r/min)}$$

$n_1$  也叫做同步转速。由此可以推广到  $p$  对磁极的旋转磁场，它的每分钟转速为

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

$n_1 = \frac{60f}{2}$  (r/min) 说明旋转磁场的转速取决于交流电的频率  $f$  和旋转磁场的磁极对数  $p$ ，

而磁极对数又取决于三相绕组的安排情况。对某一电动机来说， $f$  和  $p$  都是一定的，所以磁场的转速  $n_1$  是一个常数。我国规定电源的频率是 50Hz，因此不同极对数的电动机所对应的旋转磁场转速见表 1-4。

表 1-4 不同极对数对应的同步转速

极对数 ( $p$ )	1	2	3	4	5	6
同步转速 (r/min)	3000	1500	1000	750	600	500

### 3) 三相异步电动机的转动原理

如果三相异步电动机的定子绕组通入对称的三相正弦交流电，则产生旋转磁场，设它以  $n_1$  的转速顺时针旋转，则由于旋转磁场与静止的转子有相对运动，转子导体以逆时针方向切割磁力线，所以在转子各导体中感应出电动势。这些电动势的方向可以用右手定则确定。在图 1-27 中，转子上半部分各导体电动势的方向朝向读者，而在转子下半部分各导体电动势的方向背向读者。

由于转子绕组是闭合的，所以在感应电动势作用下就产生电流，转子导体电流和旋转磁场相互作用，使转子导体产生电磁力，力的方向可由左手定则来确定。这个力对转子转轴产生一个电磁转矩，它的方向和旋转磁场的旋转方向是一致的，这样转子沿着磁场的旋转方向旋转起来。

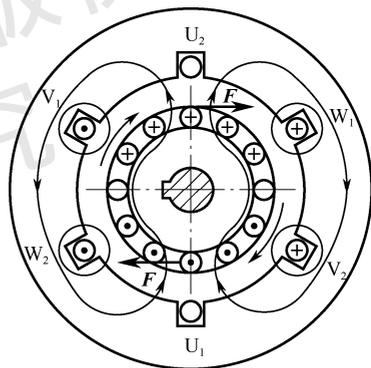


图 1-27 三相异步电动机的转动原理

异步电动机的转速  $n_2$  必须小于旋转磁场的转速  $n_1$ ，如果这两个转速相等，则两者之间就没有相对运动，磁力线不再切割转子导体，因而转子导体的电动势和电流都随之消失，旋转磁场对转子的作用力为零。此时即使转轴上没有机械负载，也会因为摩擦力的作用而使转子转速减慢，从而又使转子与磁场有了相对运动，转子重新受到电磁转矩的作用，所以转子的转速总是低于旋转磁场的转速，不能与旋转磁场同步，这就是“异步”的由来。

### 4) 改变三相异步电动机的转向

异步电动机的方向取决于旋转磁场的方向，如果旋转磁场的方向变了，异步电动机的转动方向也会随之改变。

旋转磁场的旋转方向取决于三相交流电流的相序，定子三相绕组  $U_1 - U_2$ 、 $V_1 - V_2$  和  $W_1 - W_2$  在铁芯槽内的空间位置是按顺时针排列的，电源是按  $i_u$ 、 $i_v$ 、 $i_w$  相序通入的，电流达到最大值的顺序先是  $U_1 - U_2$  绕组，其次是  $V_1 - V_2$  绕组，最后是  $W_1 - W_2$  绕组，所以磁场的旋转方向与通入电流的相序一致。如果把三根电源线中的任意两根对调，可以证明，旋转磁场逆时针方向旋转了。由于异步电动机转子的转向与旋转磁场的转向相同，异步电动机的转子

也就逆时针方向旋转了，所以改变异步电动机的转向，只要把三相绕组与电源接线中的任意两根对调，就可以使三相异步电动机反转。

### 5) 转差率

异步电动机的转速必须小于旋转磁场的转速，我们把电动机转速与旋转磁场转速相差的程度用转差率来表示，转差率用符号  $S$  表示，即

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\%$$

转差率  $S$  是分析电动机运行情况的一个重要参数，在异步电动机启动瞬间， $n_2 = 0$ ， $S = 1$ ；异步电动机在额定运行时， $S = 0.02 \sim 0.06$ ，即  $S = 2\% \sim 6\%$ 。



### 思考并讨论

1. 三相异步电动机为什么能旋转？
2. 三相异步电动机的转子转速能否等于定子转速？

## 1.3.2 三相异步电动机的输出功率、效率及电磁转矩

### 1. 输出功率与效率

电动机把电能转换为机械能，在电动机运行过程中，不可避免地存在能量损耗。也就是说，异步电动机轴上输出功率总是小于电源输入功率。设三相电源输入定子绕组的功率为

$$P_1 = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$$

现有一台三相异步电动机，它的额定功率为  $4\text{kW}$ 、额定电压  $U_L = 380\text{V}$ 、额定电流  $I_L = 8.6\text{A}$ 、功率因数  $\cos \varphi = 0.85$ ，那么电源输入电动机的功率为

$$P_1 = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 8.6 \times 0.85\text{W} = 4.8\text{kW}$$

在电动机铭牌上的额定功率是指电动机转轴输出的机械功率  $P_2$ ，它与  $P_1$  的差值，即

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 4.8 - 4 = 0.8\text{kW}$$

$\Delta P$  就是电动机在传输过程中的能量损耗。

把电动机输出功率与输入功率的比值定义为电动机的效率，用  $\eta$  表示，即

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

通常异步电动机负载越轻，其效率越低。随着负载的增加，效率将随之增高。一般在负载为电源输入功率  $P_1$  的  $75\% \sim 80\%$  时效率最高，可达  $75\% \sim 92\%$ 。容量越大的电动机效率越高。

### 2. 电磁转矩

电动机的电磁转矩  $T$  是电动机定子电流的旋转磁场作用在转子上所产生的电磁力  $F$  与转子半径  $r$  形成的。电磁转矩带动转子旋转所作的功定义为：在时间间隔  $\Delta t$  内，转子转过  $\Delta S$  的弧长，对应的角度为  $\Delta \varphi$ ，根据功的定义，有

$$W = FS = F\Delta S = Fr\Delta\varphi = T\Delta\varphi$$

在  $\Delta t$  内的平均功率为

$$P = \frac{W}{\Delta t} = T \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = T\omega$$

式中,  $\omega$ ——转子旋转的平均角速度 (rad/s);

$T$ ——转子输出的机械转矩 (N·m);

$P$ ——转子输出功率 (W)。

显然, 电动机转子输出的功率等于转矩与角速度的乘积, 这就是电动机电磁转矩与功率的关系, 这个结论也适用于其他旋转机械。

一般来说, 功率的单位多用千瓦表示, 转速的单位用转每分表示, 因此  $P = \frac{W}{\Delta t} = T \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = T\omega$

也可以表示为

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{1000P}{2\pi f} = \frac{1000P}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{1000P \times 60}{2\pi n} \approx 9.55 \frac{P}{n}$$

式中,  $T$ ——电动机转矩 (N·m);

$P$ ——电动机功率 (W);

$n$ ——电动机转速 (r/min)。

**【例 1-5】** 某普通机床主轴电动机的额定功率为 7.5kW, 额定转速为 1440r/min, 求该电动机的额定转矩。

解: 根据转矩公式有

$$T = 9.55 \frac{P}{n} = 9.55 \times \frac{7.5 \times 10^3}{1440} = 49.7 \text{N} \cdot \text{m}$$

### 1.3.3 三相异步电动机的机械特性

异步电动机的运行特性通常用转矩与转子转速的关系曲线  $n_2 = f(T)$  表示, 叫做电动机的机械特性曲线, 如图 1-28 所示。横坐标表示电动机的电磁转矩, 纵坐标表示转子的转速。

在电动机启动的瞬间, 即  $n_2 = 0$  时, 电磁转矩为  $T_{st}$ , 称为启动转矩。若启动转矩小于负载转矩, 电动机就不能启动; 若电动机的启动转矩大于负载转矩, 电动机的转速就不断提高, 随着转速的提高, 电动机的电磁转矩不断增大, 当转速升到  $n_m$  时, 电磁转矩达到最大值  $T_{max}$ , 把  $T_{max}$  叫做最大电磁转矩。因为最大转矩比负载转矩更大, 所以电动机转速继续上升, 但是随着转速的上升, 电磁转矩急剧下降。当电动机的转矩等于负载转矩时, 达到动态平衡, 电动机恒速运行在额定转速  $n_N$ , 此时的转矩叫做额定转矩  $T_N$ 。

当电动机额定运行在  $n_N$  时, 如果负载转矩增加, 电动机转速必然下降, 但随着转速下降, 电动机的电磁转矩也增加, 使负载转矩和电磁转矩达到新的平衡。反之, 如果负载转矩略有下降, 则电动机转速上升, 电磁转矩却下降, 使电磁转矩又达到平衡, 电动机略高于额定转速运转。但当负载转矩超过电动机的最大转矩时, 电动机就要停止旋转, 此时电动机的电流

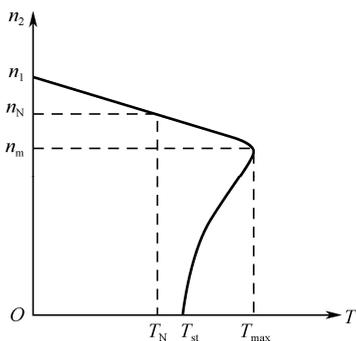


图 1-28 电动机的机械特性

会立刻升高到额定电流的5~7倍，如不及时切断电源，会使电动机严重过热而损坏。

电动机的过载也可以接近最大转矩，如果过载时间较短，电动机不至于过热是容许的。把最大转矩 $T_{\max}$ 与额定转矩 $T_N$ 之比称为过载系数，过载系数用“ $\lambda$ ”表示，即

$$\lambda = \frac{T_{\max}}{T_N}$$

一般三相异步电动机的过载系数为1.8~2.2。

把启动转矩 $T_{st}$ 与额定转矩 $T_N$ 之比称为启动转矩倍数，即

$$\text{启动转矩倍数} = \frac{T_{st}}{T_N}$$

启动转矩倍数是异步电动机启动性能的重要指标。启动转矩越大，启动过程越短，带重负载的能力就越大。反之，启动转矩太小，会使启动困难，甚至启动不起来，更不能重载启动。启动时间长还会引起电动机绕组过热。国家规定电动机的启动转矩不能太小，一般异步电动机的启动转矩倍数多在1.2~2之间。

**【例 1-6】** 有一台异步电动机，其额定功率为10kW，额定转速为1450r/min，过载系数 $\lambda = 2$ ，求该电动机的额定转矩 $T_N$ 和最大转矩 $T_{\max}$ 。

$$\text{解： } T = 9.55 \frac{P}{n} = 9.55 \times \frac{10 \times 10^3}{1450} \text{ N} \cdot \text{m} = 66 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{由 } \lambda = \frac{T_{\max}}{T_N} = 2, \text{ 推出}$$

$$T_{\max} = \lambda T_N = 2 \times 66 \text{ N} \cdot \text{m} = 132 \text{ N} \cdot \text{m}$$



#### 思考并讨论

如何理解三相异步电动机的机械特性？

### 1.3.4 三相异步电动机的使用与维护

#### 1. 三相异步电动机的选用

选用三相异步电动机的一般要求如下。

(1) 按现有的电源供电方式及容量选用电动机额定电压及功率。

① 目前，我国供电电网频率为50Hz，常用电压等级有110V、220V、380V、660V、1000(1140V)、3000V、6000V、10 000V。

② 电动机功率选用除了满足拖动机械负载要求外，还应考虑是否具备足够容量的供电网络。

(2) 电动机具体类型的选择与使用要求、运行地点环境污染情况和气候条件等有关。

(3) 外壳防护等级的选用直接涉及人身安全和设备的可靠运行。应根据电动机使用场合，防止人体接触到电动机内部危险部件，防止固体异物及水进入壳内对电动机造成有害影响。

(4) 按照配套设备的安装要求选用合适的电动机安装形式。

## 2. 三相异步电动机的铭牌

在选用三相异步电动机时，首先应该读懂该电动机的铭牌，了解相关信息。而铭牌的内容：第一应该确定电动机的型号；第二要明确额定功率、电压、转速、连接方法等常见参数；第三，要弄清楚防护等级、绝缘耐热等级等重要参数，并确保选用的电动机已取得相关产品认证。正确识读电动机的铭牌，是正确使用电动机的技能起点。

三相异步电动机的铭牌所标明的有关电量和机械量的数值，是电动机生产厂家依据国家相关标准制定的，称为额定值。

从图 1-29 (a) 所示的铭牌中，可以得到这些信息：

三相异步电动机			
型号: Y112M-4		编号	
4.0kW		8.8A	
380V	1440r/min	LW 82dB	
接法△	防护等级IP44	50Hz	45kg
标准编号	工作制S1	B级绝缘	2000年8月
××电机厂			

(a) 铭牌内容



(b) 铭牌实物

图 1-29 三相异步电动机的铭牌

该电动机的型号为 Y112 M-4，其中 Y 代表 Y 系列的三相异步电动机；112 代表机座中心高 112mm；机座长度代号 M 表明是中机座；4 为磁极数。

4.0kW 说明了电动机轴上输出功率的大小，8.8 A 为定子绕组线电流的额定值，380V 指绕组上所加线电压的额定值，1440r/min 为额定负载下的转速。LW82dB 说明最高运行噪声为 82dB，△说明绕组的接法为三角形连接，防护等级为电动机的防尘防水等级，IP44 表明防止直径大于 1mm 的固体进入电动机及水由任何方向溅到外壳没有有害影响。50Hz 为频率，45kg 为该电动机的质量。工作制 S1，说明在恒定负载下的运动时间足以使该电动机达到热稳定。B 级绝缘，说明电动机绕组所用的绝缘材料在使用时容许的极限温度为 130℃。该电动机于 2000 年 8 月出厂。

而从图 1-29 (b) 所示的铭牌中还可以知道：电动机型号 FW12-2，一般用于纺织机械。E 级绝缘，极限温度为 120℃。

三相异步电动机的铭牌所标明的有关电量和机械量的数值，通常包含下列几种。

### 1) 型号

为了适应不同用途和不同工作环境的需要，电动机可以制成不同的系列，每种系列用各种型号表示。电动机型号由产品代号、规格代号、特殊环境代号和补充代号四部分组成，并按下列顺序排列：[1]-[2]-[3]-[4]

(1) [1]为产品代号，包括类型代号、电动机特点代号、设计序号和励磁代号。

在类型代号中，如 Y{J}表示“交流”/“异”，A 表示“安”全，O 表示封闭型，C{M}表示采“煤”机用，I 表示装“岩”机用，Z 为回“柱”绞车用，T 为“通”风机用。

在电动机特点代号中，YB 为防爆型异步电动机，如图 1-30 (a) 所示；YQ 为高启动转矩式异步电动机，如图 1-30 (b) 所示；YR 为绕线式异步电动机，如图 1-30 (c) 所示；Y2 为

改进型三相异步电动机，如图 1-30 (d) 所示；YPT 为变频调速式三相异步电动机，如图 1-30 (e) 所示等。

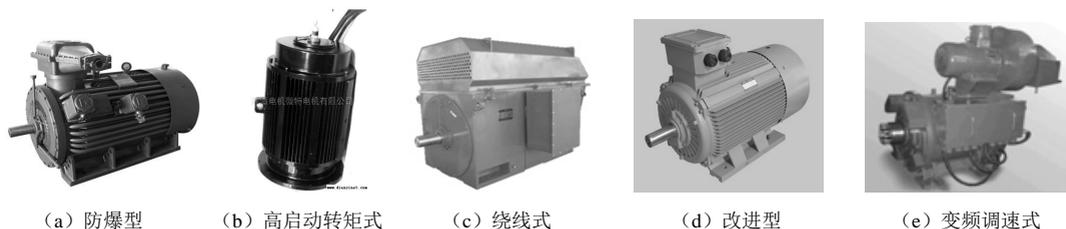


图 1-30 常见的不同型号的三相异步电动机

设计序号表示产品设计顺序，对第一次设计产品，不标设计序号。

产品代号的详细介绍见附录 A。

(2) [2]为规格代号，通常包括机座号或机座中心高尺寸、功率、转速或磁极数、电压等级等。例如，电动机型号 Y132S2-2，其中，数字 132 表示机座中心高 132mm；英文字母 S 为机座长度代号（其中机座长度采用国际通用字母表示，S 表示短机座，M 表示中机座，L 表示长机座）；字母 S 后的数字 2 为铁芯长度代号；最后面的 2 表示电动机磁极数为 2，即极对数为 1。

(3) [3]为特殊环境代号：“高”原用 G，“船”（海）用 H，户“外”用 W，化工防“腐”用 F，“热”带用 T，“湿热”带用 TH，“干热”带用 TA。如同时适用于一个以上的特殊环境，则按顺序排列。例如，电动机型号为 YB160M-4WF，其中，YB 表示防爆型异步电动机；160M-4 代表中心高 160mm、中机座 M、4 极磁极；W 表示户外用；F 表示化工防腐用。

(4) [4]为补充代号。

## 2) 额定数据与额定值

三相异步电动机铭牌上标注有一系列额定数据。在一般情况下，电动机都按其铭牌上标注的条件和额定数据运行，即所谓的额定运行。主要额定数据如下。

(1) 额定功率  $P$ ：在额定运行情况下，电动机轴上输出的机械功率称为额定功率，单位为 kW。

(2) 额定电压  $U$ ：在额定运行情况下，外加于定子绕组上的线电压称为额定电压。

三相输电线各线（火线）间的电压叫线电压，任一相线与中性线（零线）之间的电压称为相电压。

一般规定电动机的工作电压不应高于或低于额定值的 5%。当工作电压高于额定值时，绕组发热，定子铁芯过热；当工作电压低于额定值时，引起输出转矩减小，转速下降，电流增加，也使绕组过热，这对电动机的运行也是不利的。

(3) 绕组的接法：定子三相绕组的“Y— $\Delta$ ”接法，与额定电压相对应。

(4) 额定电流  $I$ ：电动机在额定电压下，轴端有额定功率输出时，定子绕组的线电流单位为 A。

(5) 额定转速  $n$ ：电动机在额定运行时的转速，单位为 r/min。

(6) 额定频率  $f$ ：我国电力网的频率为 50Hz，因此，除外销产品外，国内用的异步电动机的额定频率均为 50Hz。

### 3) 防护

外壳防护等级的选用直接涉及人身安全和设备的可靠运行，应防止人体接触到电动机内部危险部件，防止固体异物进入机壳内，防止水进入壳内对电动机造成有害影响。

IEC IP 防护等级是电气设备安全防护的重要指标。IP (Ingress Protection, 进入防护) 防护等级系统提供了一个以电气设备及其包装的防尘、防水和防碰撞程度来对产品进行分类的方法，这套系统由国际电工协会 IEC (International Electro Technical Commission) 起草，并在 IED529 (BS EN 60529: 1992) 外包装防护等级 (IP code) 中宣布，已得到了多数欧洲国家的认可。

电动机外壳防护等级由字母 IP 加二位特征数字组成：第一位特征数字表明设备抗微尘的范围，或者是人们在密封环境中免受危害的程度，即表示防固体，最高级别是 5；第二位特征数字表示防液体，表明设备防水的程度，最高级别是 8。以上特征数字越大，表示防护等级越高。在实际使用中，一般情况下室内使用的电动机采用 IP23 防护等级，在稍微严酷的环境中选择 IP44 或 IP54。室外使用的电动机最低的防护等级为 IP54，必须做户外处理。在特殊环境（如腐蚀环境）也必须提高电动机的防护等级，并且电动机的壳体要做特殊处理。防护等级的详细介绍见附录 B，也可查阅 GB/T 4942.1《电动机外壳防护分级》。

### 4) 绝缘与耐热等级

电工产品绝缘的使用期受到多种因素（如温度、电和机械的应力、振动、有害气体、化学物质、潮湿、灰尘和辐照等）的影响，而温度通常是对绝缘材料和绝缘结构老化起支配作用的因素。因此，已有一种实用的、被世界公认的耐热性分级方法，也就是将电气绝缘的耐热性划分为若干耐热等级，各耐热等级及所对应的温度值见表 1-5。

表 1-5 电动机耐热等级

耐热等级	温度/℃	耐热等级	温度/℃
Y	90	H	180
A	105	200	200
E	120	220	220
B	130	250	250
F	155		

温度超过 250℃，则按间隔 25℃ 设置耐热等级。

在电工产品上标明的耐热等级，通常表示该产品在额定负载和规定的其他条件下达到预期使用期时能承受的最高温度。因此，在电工产品中，温度最高处所用绝缘的温度应该低于该产品耐热等级所对应的温度。

由于行业习惯的原因，目前，无论对于绝缘材料、绝缘结构还是电工产品，均笼统地使用“耐热等级”这一术语。但今后的趋势是，对绝缘材料推荐采用“温度指数”和“相对温度指数”这两个术语；对绝缘结构则推荐采用“鉴别标志”这个术语，绝缘结构的“鉴别标志”只和所设计的特定产品发生联系；而对电工产品则保留采用“耐热等级”这个术语。

### 5) 电动机的工作制与电动机定额

#### (1) 电动机的工作制

电动机的工作制的分类是对电动机承受负载情况的说明，包括启动、电制动、空载、断

能停转及这些阶段的持续时间和先后顺序，工作制分以下 10 类。

① S1 连续工作制：在恒定负载下的运行时间足以达到热稳定。

② S2 短时工作制：在恒定负载下按给定的时间运行，该时间不足以达到热稳定，随之即断、停转的足够时间，使电动机再度冷却到与冷却介质温度之差在 2K 以内。

③ S3 断续周期工作制：按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段断能停转时间。这种工作制中的每一周期的启动电流不至对温升产生显著影响。

④ S4 包括启动的断续周期工作制：按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段对温升有显著影响的启动时间、一段恒定负载运行时间和一段断能停转时间。

⑤ S5 包括电制动的断续周期工作制：按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段启动时间、一段恒定负载运行时间、一段快速电制动时间和一段断能停转时间。

⑥ S6 连续周期工作制：按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段空载运行时间，但无断能停转时间。

⑦ S7 包括电制动的连续周期工作制：按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段启动时间、一段恒定负载运行时间和一段快速电制动时间，但无断能停转时间。

⑧ S8 包括变速变负载的连续周期工作制：按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段在预定转速下恒定负载运行时间和一段或几段在不同转速下的其他恒定负载运行时间，但无断能停转时间。

⑨ S9 负载和转速非周期性变化工作制：负载和转速在允许的范围内变化的非周期工作制。这种工作制包括经常过载，其值可远远超过满载。

⑩ S10 离散恒定负载工作制：包括不少于 4 种离散负载值（或等效负载）的工作制，每一种负载的运行时间应足以使电动机达到热稳定，在一个工作周期中的最小负载值可为零。

工作制类型除用 S1~S10 相应的代号作为标志外，还应符合下列规定：对于 S2 工作制，应在代号 S2 后加工作时限，例如，S2-60min；对于 S3 和 S6 工作制，应在代号后加负载持续率，例如，S3-25%、S6-40%；对于 S4 和 S5 工作制应在代号后加负载持续率、电动机的转动惯量和负载的转动惯量；对于 S7 工作制，应在代号后加电动机的转动惯量和负载的转动惯量；对于 S10 工作制，应在代号后标以相应负载及其持续时间的标称值等。

## （2）电动机定额

电动机定额是制造厂对符合规定条件的电动机，在其铭牌上所标定的全部电量和机械量的数值及其持续时间和顺序。定额分为 6 类：连续工作制定额、短时工作制定额、周期工作制定额、非周期工作制定额、离散恒定负载工作制定额和等效负载定额。一般用途的电动机，其定额应为连续工作制定额，并能按 S1 工作制运行。

### 6) 冷却方式

电动机的冷却方式分为风冷和自冷。用 IC416（全封闭，轴向风机冷却）、IC411（全封闭，自带风扇冷却）或 IC410（全封闭表面自冷）等表示。

IC411 是常用的泵，后面带一个风扇，自己吹走自己的热量，适用于一般场所；IC410 是自己冷却的，什么都不带，靠自己散热，所以一般怕过热不予选用；IC416 的风扇类型和 IC411 不同，如图 1-31 所示。

### 7) 电动机的产品认证

我国规定，功率在 1.1kW 以下的电动机属 3C 认证（China Compulsory Certification，中国强制认证），未取得 3C 认证不得擅自出厂、销售。3C 认证是我国强制规定各类产品进出口、

出厂、销售和使用必须取得的认证，只有通过认证的产品才能被认为在安全、EMC (Electro Magnetic Compatibility, 电磁兼容)、环保等方面符合强制要求。3C 认证和 EMC 认证标志如图 1-32 所示。

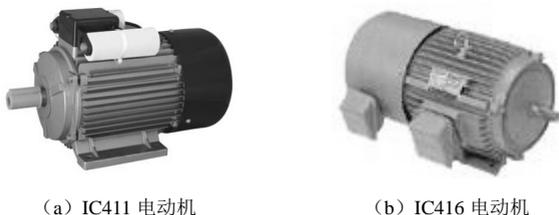


图 1-31 两种采用风冷方式的电动机



图 1-32 产品认证标志

我国 3C 认证标志后带 EMC 字母的才表示为电磁兼容认证。

### 3. 三相异步电动机绕组的连接

鼠笼式三相异步电动机的绕组一般有星形“Y”和三角形“ $\Delta$ ”两种连接形式。

#### 1) “Y”形—“ $\Delta$ ”形连接的接线方法

一般鼠笼式电动机的接线盒中有 6 根引出线，标有  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  ( $Z_1$ )、 $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  ( $Z_2$ )。其中： $U_1/U_2$ 是第一相绕组的两端； $V_1/V_2$ 是第二相绕组的两端； $W_1$  ( $Z_1$ )/ $W_2$  ( $Z_2$ )是第三相绕组的两端，如图 1-33 所示。

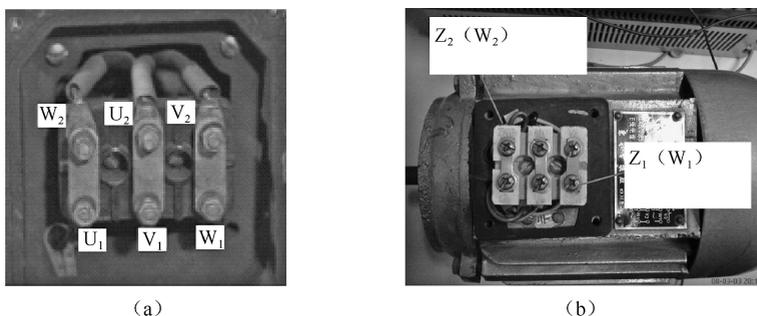


图 1-33 电动机的接线盒

这 6 个引出线端在接电源之前相互间必须正确连接。连接方法有“Y”连接和“ $\Delta$ ”连接两种，如图 1-34 所示。

在图 1-33 所示的接线盒中，两台电动机都是 $\Delta$ 连接法；若要转换成Y连接法，只需将 3 片垂直的连接片拨成水平连接即可。

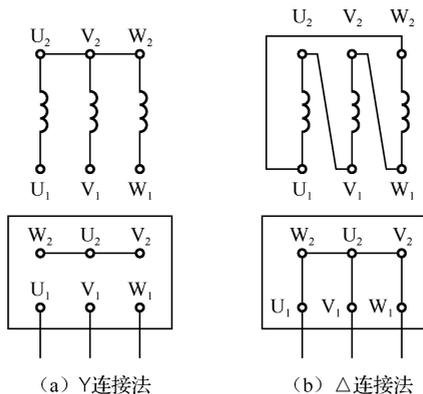


图 1-34 绕组的“Y—△”连接

## 2) “Y”形—“△”形连接的相关计算

## (1) “△”连接

我国生产的Y系列三相异步电动机，其额定功率在3kW以上的，额定电压为380V，绕组为△连接。△连接的线电流等于 $\sqrt{3}$ 倍的相电流，线电压等于相电压。

## (2) “Y—△”连接

额定功率在3kW及以下、额定电压为380/220V的，绕组为“Y—△”连接，即电源线电压为380V时，电动机绕组为Y连接；电源线电压为220V时，电动机绕组为△连接。

Y连接时，线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，线电流等于相电流。

**【例 1-7】** 三相异步电动机定子三相绕组的电阻均为 $40\Omega$ ，先按“Y”连接，后按“△”连接，分别接到线电压为380V的电源上，求流经外线的电流？

解：“Y”连接： $I_{\text{线}} = I_{\text{相}}$ ； $I_{\text{相}} = U_{\text{相}} / R$ ； $U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}} = 380\text{V}$

$$I_{\text{线}} = I_{\text{相}} = 380 \div (1.732 \times 40) = 5.5 \text{ (A)}$$

“△”连接： $I_{\text{线}} = \sqrt{3}I_{\text{相}}$ ； $I_{\text{相}} = U_{\text{相}} / R$ ； $U_{\text{相}} = U_{\text{线}}$

$$I_{\text{线}} = 1.732 \times I_{\text{相}} = 1.732 \times (380 \div 40) = 16.5 \text{ (A)}$$

从本例题可以看出，在相同电压的条件下，同一负载△连接电流是Y连接电流的3倍。这就是后续章节中讨论三相异步电动机“Y—△”启动的意义，即限制启动电流。



## 思考并讨论

1. 三相异步电动机的铭牌上有哪些常见参数？
2. 什么是IP防护等级？该等级是如何标定的？
3. 如何区分我国生产的Y系列电动机的连接方式？
4. 三相异步电动机什么时候采用Y连接，什么时候采用△连接？

## 4. 三相异步电动机的使用与维护

异步电动机是否能安全、可靠地运行并保证正常的使用寿命，关键在于能否正确合理地使用和维护。下面介绍其使用与维护的一般知识。

### 1) 电动机启动前应进行认真检查

电动机启动前检查的内容如下:

- (1) 新安装的电动机应认真核对铭牌上的电压和接法, 检查接线是否正确;
- (2) 检查启动设备接线是否正确、牢靠, 动作是否灵活, 触头接触是否良好;
- (3) 油浸启动设备有无缺油, 油质是否劣化;
- (4) 绕线型电动机的电刷与滑环是否良好, 电刷提升机构是否良好, 电刷压力是否正常;
- (5) 传动装置是否正常, 皮带松紧是否合适, 皮带连接是否牢固, 联轴器是否紧固;
- (6) 传动装置及电动机、生产机械周围有无杂物;
- (7) 用手转动电动机轴, 其转动是否灵活, 有无卡阻现象;
- (8) 电动机及启动装置的接地或接零是否可靠;
- (9) 新安装的电动机或停用三个月以上的电动机应摇测绝缘电阻。油浸启动设备有无缺油, 油质是否劣化。

### 2) 异步电动机运行中的监视和维护

异步电动机在运行中应监视的项目如下。

(1) 监视电动机各部分的发热情况: 电动机在运行中的温度不应超过其允许值, 否则将损坏其绝缘, 缩短电动机使用寿命, 甚至烧毁电动机, 产生重大事故, 因此对电动机运行中的发热情况应及时监视。一般绕组的温度可由温度计或电阻法测得, 而铁芯、轴承等的温度也可用温度计测量。测得的温度减去当时的环境温度就是温升。根据电动机的类型与绕组所用绝缘的等级, 制造厂对绕组和铁芯等规定了最大允许温度和最大允许温升。目前常用的 B 级绝缘的电动机在环境温度为  $40^{\circ}\text{C}$  时, 定子绕组的允许温升为  $65^{\circ}\text{C}$ , 允许温度为  $105^{\circ}\text{C}$ ; 铁芯的允许温升为  $75^{\circ}\text{C}$ , 允许温度为  $115^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 监视电动机的电流额定值和三相不平衡度: 电动机铭牌额定电流系数指室温为  $35^{\circ}\text{C}$  时的数值。运行中的电动机电流不允许超过额定值。三相电压不平衡度一般不应大于相间电压差的 5%; 三相电流不平衡度不应大于 10%。一般情况下, 三相电流不平衡而三相电压平衡时, 可以表明电动机故障或定子绕组存在层间短路现象。

(3) 监视电源电压的波动: 电源电压的波动常引起电动机发热。电源电压增高, 将使磁通增大、励磁电流增加、定子电流增大, 从而造成铁损和铜损的增大; 电源电压降低, 将使磁通减小, 当负载转矩一定时, 转子电流增大。可见, 电源电压的增高或降低, 均会使电动机的损耗加大, 造成电动机温升过高。

(4) 监视电动机的音响和气味: 如果运行中电动机发出较强的绝缘漆气味或焦糊味, 一般是由于电动机绕组的温升过高所致, 应立即查找原因。

### 3) 电动机的定期维修

运行中的电动机除应加强监视外, 还应进行定期维护和检查, 以保证电动机的安全运行并延长电动机的使用寿命。

电动机的检修周期应根据周围环境条件、电动机的类型及运行情况来确定。一般情况下, 每半年至 1 年小修一次; 每 1 年至 2 年大修一次。如果周围环境良好, 检修周期可以适当延长。

(1) 电动机小修的内容: 检查轴承润滑情况, 补换润滑油; 清除电动机油垢及外部灰尘; 检查出线盒引线的连接是否可靠, 绝缘处理是否得当; 检查并紧固各部螺栓; 检查电动机外壳接地或接零是否良好; 摇测电动机绝缘电阻; 清扫启动设备与控制电路; 检查冷却装置是否完好等。

(2) 电动机大修内容：电动机解体，清除内部污垢；检查定子绕组的绝缘情况，槽楔有无松动，匝间有无短路、烧伤痕迹；检查通风冷却装置是否完好；检查有无扫膛现象；检测转子鼠笼有无断裂；对电动机外壳进行补漆；测量电动机绕组和启动装置的直流电阻，并与上次测量的数据加以比较，其差值不大于2%。

### 5. 三相异步电动机维修需要的常用工具及配件

#### 1) 常用工具

三相异步电动机维修中常用的工具及材料有画线板、起拔器、压线板、扁铲、绕线轮、绕线器、绝缘纸、绝缘套管、烙铁、焊锡丝、钳子、螺丝刀、绝缘漆、刷子、烤箱或灯泡、兆欧表、万用表、润滑脂、各类扳手、螺丝刀、千分尺等（见图 1-35）。



图 1-35 三相异步电动机维修所需要的常用工具

#### 2) 常用配件

三相异步电动机维修中常用的配件有铜线、风叶、轴承和接线盒等。

## 1.3.5 三相异步电动机的常见故障及排除

### 1. 通电后电动机不能转动，但无异响，也无异味和冒烟

#### 1) 故障原因

- (1) 电源未通（至少两相未通）；
- (2) 熔丝熔断（至少两相熔断）；
- (3) 过流继电器调得过小；
- (4) 控制设备接线错误。

#### 2) 故障排除

- (1) 检查电源回路开关、熔丝、接线盒处是否有断点，修复；
- (2) 检查熔丝型号、熔断原因，换新熔丝；
- (3) 调节继电器整定值与电动机配合；
- (4) 改正接线。

### 2. 通电后电动机不转，然后熔丝烧断

#### 1) 故障原因

- (1) 缺一相电源，或定子线圈一相反接；
- (2) 定子绕组相间短路；
- (3) 定子绕组接地；

- (4) 定子绕组接线错误;
- (5) 熔丝截面过小;
- (6) 电源线短路或接地。

2) 故障排除

- (1) 检查闸刀是否有一相未合好, 使电源回路有一相断线; 消除反接故障;
- (2) 查出短路点, 予以修复;
- (3) 消除接地, 查出误接, 予以更正;
- (4) 更换熔丝, 消除接地点。

**3. 通电后电动机不转有“嗡嗡”声**

1) 故障原因

- (1) 定、转子绕组有断路(一相断线)或电源一相失电;
- (2) 绕组引出线始末端接错或绕组内部接反;
- (3) 电源回路接点松动, 接触电阻大;
- (4) 电动机负载过大或转子卡住;
- (5) 电源电压过低;
- (6) 小型电动机装配太紧或轴承内油脂过硬;
- (7) 轴承卡住。

2) 故障排除

- (1) 查明断点予以修复;
- (2) 检查绕组极性, 判断绕组末端是否正确;
- (3) 紧固松动的接线螺钉, 用万用表判断各接头是否假接, 予以修复;
- (4) 检查并消除机械故障;
- (5) 检查是否把 $\Delta$ 接法误接为Y接法, 是否由于电源导线过细使压降过大, 予以纠正;
- (6) 重新装配使之灵活, 更换合格油脂, 修复轴承。

**4. 电动机运行时响声不正常, 有异响**

1) 故障原因

- (1) 转子与定子绝缘纸或槽楔相擦;
- (2) 轴承磨损或油脂内有砂粒等异物;
- (3) 定子、转子铁芯松动;
- (4) 轴承缺油脂;
- (5) 风道填塞或风扇擦风罩;
- (6) 电源电压过高或不平衡。

2) 故障排除

- (1) 修剪绝缘部分, 削低槽楔;
- (2) 更换轴承或清洗轴承, 检修定子、转子铁芯, 加油脂;
- (3) 清理风道, 消除擦痕, 必要时车削内小转子;
- (4) 检查并调整电源电压, 消除定子绕组故障。



### 思考并讨论

1. 拆装三相异步电动机时应该注意哪些问题？
2. 三相异步电动机常见的故障和原因有哪些？一般采取什么办法排除？



### 技能训练

## 工作任务单

三相异步电动机的认识与安装。

### 1. 专业能力目标

- (1) 熟悉三相异步电动机的结构及原理；
- (2) 掌握三相异步电动机铭牌参数的意义；
- (3) 能正确选用三相异步电动机；
- (4) 能正确进行三相异步电动机的Y连接和 $\Delta$ 连接；
- (5) 熟悉三相异步电动机的维护与检修。

### 2. 方法能力目标

具备独立工作能力、自学能力、交流能力、观察能力与表达能力。

### 3. 社会能力目标

具备团结协作能力、计划组织能力、环境维护意识和安全文明生产等职业素养。

## 工作步骤（参考）

本任务工作流程如图 1-36 所示。

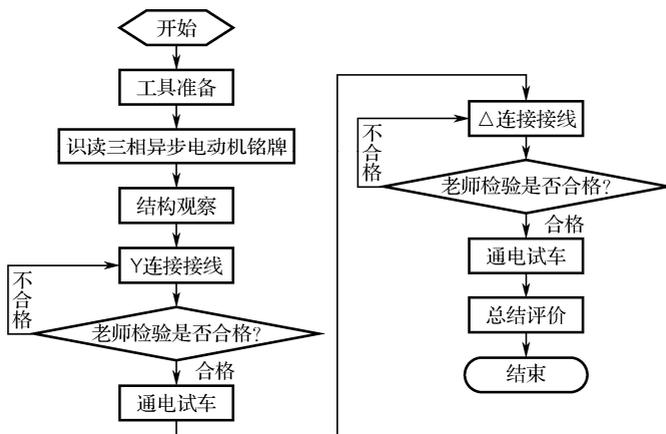


图 1-36 电动机认识与安装工作流程图

### 1. 工具与仪表的选用

工具与仪表清单见表 1-6。

表 1-6 工具与仪表清单

工 具	尖嘴钳、斜口钳、剥线钳、螺丝刀、试电笔、电工刀等
仪 表	万用表、兆欧表、钳形电流表等

常用的电工仪表外形如图 1-37 所示。



图 1-37 常用的电工仪表

## 2. 三相异步电动机的铭牌认识

根据实训提供的电动机实物（见图 1-38），写出其名称及各参数的意义，填入表 1-7 中。

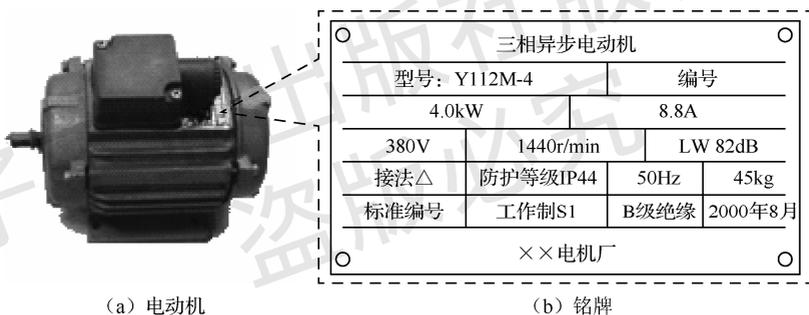


图 1-38 电动机铭牌

表 1-7 电动机铭牌的认识

参 数	参 数 意 义
Y	Y 系列（普通）的三相异步电动机
112	该电动机的机座中心高 112mm
M	表明是中型机座
4	磁极数为 4，极对数为 2
4.0kW	电动机轴上输出功率为 4.0kW
8.8A	定子绕组线电流的额定值为 8.8A
380V	绕组上所加线电压的额定值为 380V
1440r/min	额定负载下的转速为 1440r/min
LW 82dB	最高运行噪声为 82dB
△	定子绕组的接法为三角形连接

续表

参 数	参 数 意 义
IP 44	电动机的防尘防水等级为 IP44: 表明防止直径大于 1mm 的固体进入电动机, 以及水由任何方向泼到外壳没有伤害影响
50Hz	电压频率为 50Hz
工作制 S1	连续工作制 S1, 说明在恒定负载下的运动时间足以使该电动机达到热稳定
B 级绝缘	电动机绕组所用的绝缘材料在使用时允许的极限温度为 130℃
45kg	45kg 为该电动机的质量

注: 学生也可根据实际提供的电动机来填写。

### 3. 三相异步电动机的结构观察

打开电动机的外壳, 观察其结构, 写出其主要零部件的名称, 并测量各绕组的电阻值, 并填入表 1-8 中。

表 1-8 电动机的结构及绕组情况

电动机型号	主要零部件		绕组电阻值
	名 称	材 质	

### 4. 三相异步电动机绕组的连接

一般鼠笼式电动机的接线盒中有 6 根引出线, 标有  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  ( $Z_1$ )、 $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  ( $Z_2$ )。

其中,  $U_1/U_2$  是第一相绕组的两端;  $V_1/V_2$  是第二相绕组的两端;  $W_1$  ( $Z_1$ ) /  $W_2$  ( $Z_2$ ) 是第三相绕组的两端, 如图 1-39 所示。

根据要求分别进行 Y 连接和  $\Delta$  连接, 然后通电运行。

#### 1) Y 连接

(1) 准备好导线, 每根导线剥去绝缘层的两端要套上编码套管, 编号方法遵循从上到下, 从左到右, 逐列依次编号, 每经过一个电器接线端子编号递增并遵循等电位同编号的原则。

(2) 先用短接环将电动机接线端子按 Y 连接的要求连接好 (见图 1-40), 再将准备好的导线分别接在  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  端。导线与接线端子连接时, 不得压绝缘层、不反圈, 且露铜不宜过长 (一般露铜 2mm 为宜)。

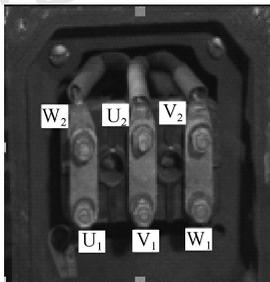


图 1-39 电动机的接线盒

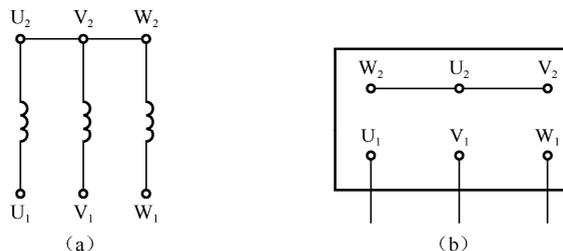


图 1-40 Y 连接原理图

(3) 导线连接完成后,用万用表电阻  $100\Omega$  挡测量电动机各绕组的电阻,一般应为  $40\Omega$  左右。

(4) 在老师的监护下,接入  $380\text{V}$  电源,观察电动机的运行是否正常。若正常,则进行  $\Delta$  连接;若不正常,则仔细检查问题所在,直至正常为止。

## 2) $\Delta$ 连接

(1) 先用短接环将电动机接线端子按  $\Delta$  连接的要求连接好(见图 1-41),再将准备好的导线分别接在  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  端。导线与接线端子连接时,不得压绝缘层、不反圈,且露铜不宜过长(一般露铜  $2\text{mm}$  为宜)。

(2) 导线连接完成后,仔细检查。然后在老师的监护下接入  $380\text{V}$  电源,观察电动机运行是否正常。若不正常,则仔细检查问题所在,直至正常为止。

(3) 整理好器材和工具。

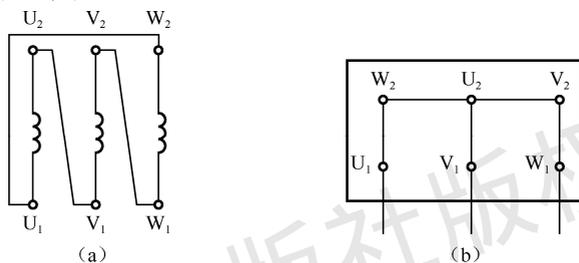


图 1-41  $\Delta$  连接原理图

## 5. 后续任务

整理完成工作单。

### 习题一

- 下列关于三相异步电动机型号“YR160L-4”的说明中,错误的是( )。
  - YR——绕线式异步电动机
  - 160——机座中心高度为  $160\text{mm}$
  - L——长机座
  - 4——磁极对数为 4
- 下列关于异步电动机额定数据的叙述中,错误的是( )。
  - 在额定运行情况下,电动机轴上输出的机械功率称为额定功率
  - 在额定运行情况下,外加于定子绕组上的线电压称为额定电压
  - 在额定电压下,定子绕组的线电流称为额定电流
  - 在额定运行情况下,电动机的转速称为额定转速
- 根据所给铭牌说明三相异步电动机的机型、规格等。

三相异步电动机			
型号	Y160L-4	功率	15kW
电压	380V	电流	30.3A
转速	1440r/min	温升	80/°C
工作方式	连续	绝缘等级	B
		质量	45kg
	年 月 日	编号	× × 电机厂

4. 三相电源的线电压为 380V，三相异步电动机为Y连接，定子绕组的电阻均为  $50\Omega$ ；如果运行过程中，U 相导线突然断掉，试计算其余两相的相电流是多少？

5. 三相异步电动机采用 $\Delta$ 接法接到线电压为 380V 的三相电源上，已知负载为 10A，则火线中的电流是多少？

6. 一台三相异步电动机，其产品目录中的技术数据如下：

$P_N/\text{kW}$	$U_N/\text{V}$	满载时				$I_s/I_N$	$T_s/T_N$	$T_{\max}/T_N$
		$n_N/(\text{r/min})$	$I_N/\text{A}$	$\eta/\times 100$	$\cos\phi_N$			
3	220/380	1430	11.18/6.47	83.5	0.84	7.0	1.8	2.0

求：（1）该电动机的同步转速？

（2）满载时的转差率？

（3）满载时的额定转矩？

（4）直接启动时的启动转矩和启动电流？

（5）满载时电动机的输入功率？

电子工业出版社版权所有  
盗版必究