

机械工人学习材料

JIEGONGREN XUEXI CAILIAO

电动机绕组改接与计算

姜孝定 编著

电工



03.1

机械工业出版社

18-7-104

一、三相感应电动机的基本原理

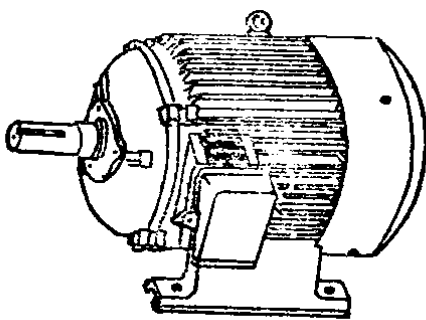
三相感应电动机由于结构简单、运行可靠、维护方便，而且效率高、重量轻、价格低，是现代生产中应用最广泛的一种动力机械。在工业方面，它被广泛应用于拖动各种机床、起重机、水泵等设备；在农业方面，它被应用于拖动排灌机械、脱粒机、粉碎机以及其它农副产品的加工机械等。

(一) 三相感应电动机的结构

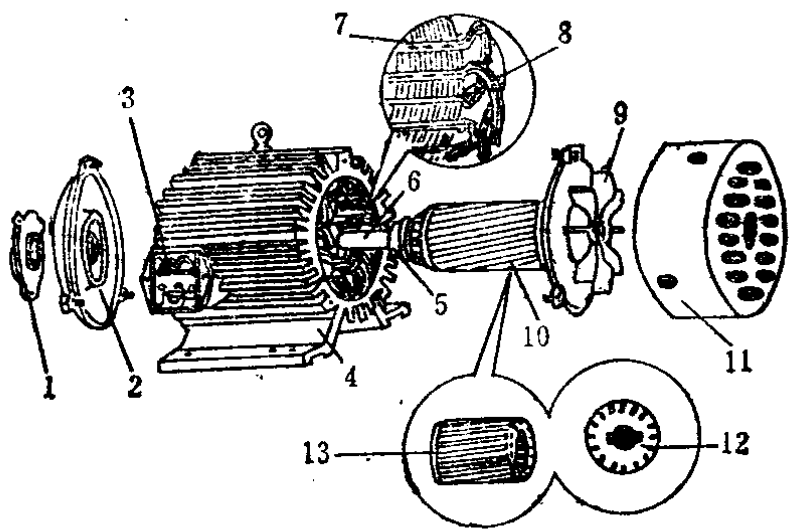
三相感应电动机主要由静止的定子和转子两大部分组成，外加端盖和风扇等附件。图1-1为常用的封闭式三相笼式转子感应电动机的结构。

1. 定子

定子由定子铁心、定子绕组和机座组成。



a)



b)

图1-1 三相感应电动机的结构

a) 外形图 b) 结构部件图

- 1—轴承盖 2—端盖 3—接线盒 4—机座 5—轴承
- 6—转轴 7—定子铁心 8—定子绕组 9—风扇
- 10—转子 11—罩壳 12—转子铁心 13—鼠笼绕组

北京图书馆藏

B 743944

机磁路的一部分，由 0.5mm 厚的硅钢片叠成，片间涂以绝缘漆，以减少涡流损耗。定子铁心内圆开有定子槽，槽内嵌放定子绕组。容量较大的感应电动机，定子铁心沿轴向分段，段与段之间设有径向通风沟，以利铁心的散热。

定子绕组是电机的电路部分，由许多线圈连接而成。线圈则由绝缘导线（高强度漆包铜线）绕制而成。每个线圈有两个有效边，分别嵌放在两个定子槽内，用竹签或胶布板做成的槽楔固定。线圈之间按一定规律连接，构成三相绕组。

中小型电动机的机座是整个电机的支承，承受运转过程中的各种作用力。为此，必须有足够的强度和刚度，一般用铸铁铸造。封闭式电动机的定子铁心紧贴在机座的内壁，电机在运转时由损耗产生的热量通过铁心传给机座，再由机座表面散发到空气中去。为了增加机座的散热面积，其表面铸有若干散热片。防护式电动机的机座上开有通风孔，外面的空气可以直接冷却电机内部。

2. 转子

三相感应电动机的转子分为笼式和绕线式两种类型，均由转子铁心、转子绕组和转轴三部分组成。

转子铁心也是电机磁路的一部分，同样由 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成。铁心压装在轴上，较大的电机，转子铁心压在支架上，支架再装于轴上。转子铁心外圆开有转子槽，槽中放置转子绕组。

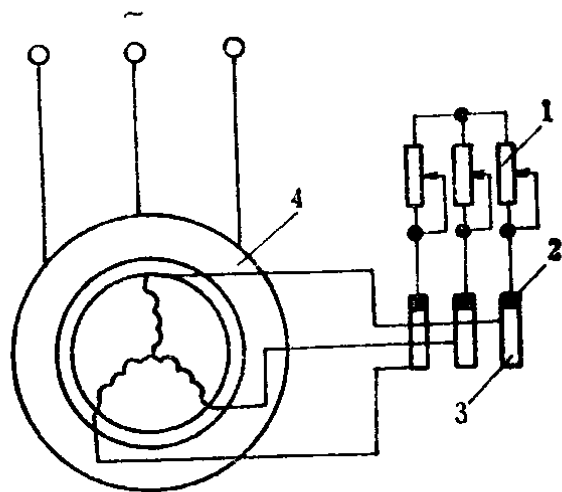


图1-2 绕线式感应电动机转子串接电阻

1—外接可变电阻 2—电刷
3—滑环 4—绕线式感应电动机

笼式转子的槽内放置裸导体，两端分别焊接在两个铜环（称为端环）上，这种转子绕组形似鼠笼，故称为鼠笼式转子，通称笼式转子。中小容量感应电动机的转子一般用熔化的铝铸满转子槽，同时铸出两端的端环和风扇叶片。绕线式转子的绕组和定子绕组一样也为三相绕组。转子绕组嵌放在转子槽内，接入形，三根引出线分别接到非轴伸端互相绝缘的三个滑环上，可以通过电刷将转子各相绕组与外接起动电阻或调速电阻连接，如图1-2所示。中等容量以上的电机装有提刷短路装置，在电动机起动完毕而不需要调速时，可扳动手柄，将电刷提起，并将三个滑环短路，这样可以减少摩擦损耗和电刷的磨损。

转轴由成型圆钢加工而成，其作用是支承转子铁心并传递转矩，需要有一定的强度和刚度。

3. 端盖及其它附件

中小型感应电动机有铸铁制成的端盖，内装滚珠或滚柱轴承，用以支承转子，保证定、转子之间有均匀的气隙。为了减小电机磁路的磁阻，从而减小励磁电流，提高功率因数，感应电动机定子与转子之间的气隙应尽可能做得小些，但考虑到机械加工的误差、轴承的磨损、单边磁拉力等因素，气隙也不能太小，一般中小型感应电动机的气隙为 $0.2\sim 2\text{mm}$ 左右。

为了使轴承中的润滑脂不受污染和外溢，前、后轴承均设有内、外轴承盖。

封闭式感应电动机后端盖外装有风扇和外风罩，风扇随转子旋转时，风由风罩上的进风孔进，由风扇扇向散热片，以加强冷却。

（二）旋转磁场的形成

三相感应电动机定子绕组接通三相电源后，即能在空间形成以一定转速旋转的旋转磁场。由于旋转磁场与转子导体之间有相

互切割作用，转子导体中便产生感应电势和电流。转子导体中的电流与磁场相互作用，产生电磁力和电磁转矩，使转子能按旋转磁场的方向转动起来，因此，旋转磁场是感应电动机工作的基础。

图 1-3 为一最简单的定子三相绕组，每相只有一个线圈，分别以 A-X、B-Y、C-Z 表示，它们在空间彼此相隔120°。若将三相绕组按人形连接后接到三相电源上，三相绕组内就会流过三相对称电

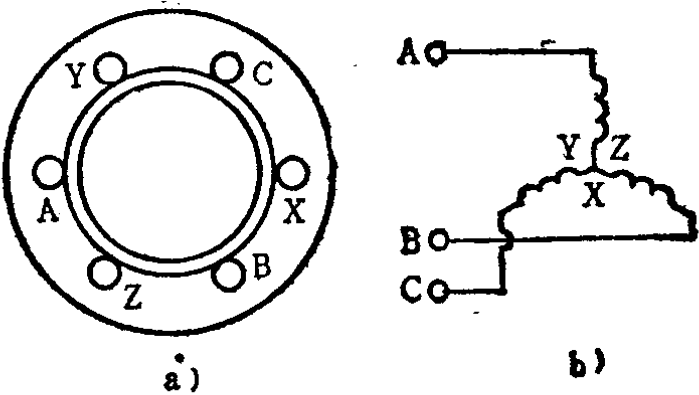


图1-3 三相定子绕组

流，其波形如图1-4所示。三相电流的数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_m \sin \omega t \\ i_b &= I_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_c &= I_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\}$$

(1-1)

每相绕组电流都将产生磁场，三相绕组电流将共同形成一个合成磁场。下面将以几个特殊的时刻为例子用作图的方法来证明此合成磁场是一旋转磁场。

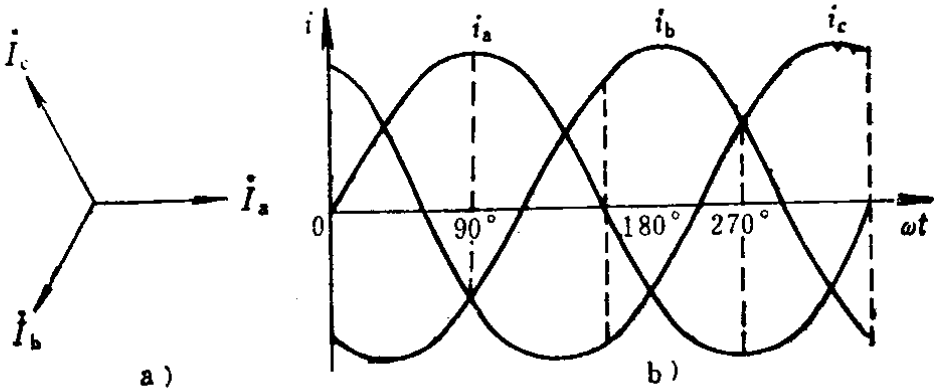


图1-4 三相正弦交流电流
a) 相量图 b) 波形图

为分析方便，假定每相绕组电流的正方向是从首端A、B、C流入（用⊗表示），从尾端X、Y、Z流出（用⊙表示）。当电流为正值时，表示电流的实际方向与假定的正方向相同；电流为负值时，表示电流的实际方向与假定的正方向相反。磁场的方向则根据电流的流向按右手螺旋定则来确定。

当 $\omega t = 0$ 时，由式(1-1)或图1-4可知： $i_a = 0, i_b = -\sqrt{\frac{3}{2}}I_m, i_c = \sqrt{\frac{3}{2}}I_m$ ，将各相电流方向表示在各相线圈的剖面图上，B相电流为负值，从Y流入，由B流出；C相电流为正值，从C流入，由Z流出，如图1-5 a 所示。按右手螺旋定则可以确定合成磁场的方向向右。用同样的方法可以作出 $\omega t = 90^\circ, \omega t = 180^\circ, \omega t = 270^\circ$ 这三个特定瞬间的电流和合成磁场的方向，分别如图1-5 b、c、d 所示。

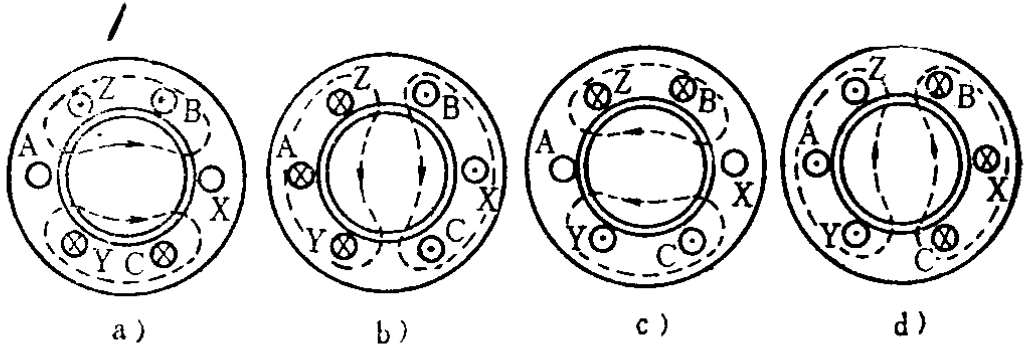


图1-5 三相感应电动机的旋转磁场

a) $\omega t = 0$	b) $\omega t = 90^\circ$	c) $\omega t = 180^\circ$	d) $\omega t = 270^\circ$
$i_a = 0$	$i_a = I_m$	$i_a = 0$	$i_a = -I_m$
$i_b = -0.866I_m$	$i_b = i_c = -0.5I_m$	$i_b = 0.866I_m$	$i_b = i_c = 0.5I_m$
$i_c = 0.866I_m$		$i_c = -0.866I_m$	

分析比较图1-5的 a、b、c、d 可以看出，三相绕组电流形成的合成磁场是随时间在空间旋转的磁场，故称之为旋转磁场。每当 ωt 变化了 90° ，磁场就按顺时针方向在空间转过 90° ；当 ωt 变

化了 360° 时，电流变化了一个周期，磁场也就重新回到原来的位置。这说明在两极电机中，电流变化一个周期，旋转磁场在空间也正好转过一圈，即 360° 。电流每秒钟变化 f 周（称为电流的频率），则旋转磁场每秒钟在空间也转过 f 圈。我国交流电的频率为 $f = 50\text{Hz}$ ，所以两极感应电动机旋转磁场的转速为

$$n_1 = f = 50 \quad \text{r / s}$$

或

$$n_1 = 60 f = 3000 \quad \text{r / min}$$

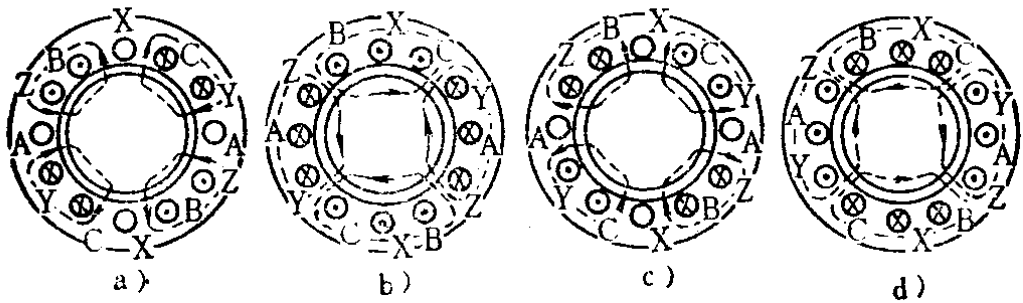


图1-6 四极电机的旋转磁场

a) $\omega t = 0$ b) $\omega t = 90^\circ$ c) $\omega t = 180^\circ$ d) $\omega t = 270^\circ$

如果将三相绕组按图1-6安排，图1-6 a 画出了 $\omega t = 0$ ， $i_a = 0$ 、 $i_b = -\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$ 、 $i_c = \frac{\sqrt{3}}{2}I_m$ 时的电流和磁场的分布情况，它为一四极磁场。当 ωt 每经过 90° ，从图1-6可以看出磁场相应地在空间按顺时针方向转过 45° 。电流变化了一个周期（即 ωt 经过 360° ），磁场在空间旋转了半圈。对于频率 $f = 50\text{Hz}$ 的电流，四极电机旋转磁场的转速 $n_1 = \frac{f}{2} = 25 \text{ r / s}$ 或 $n_1 = \frac{60 f}{2} = 1500 \text{ r / min}$ ，它是两极旋转磁场转速的一半。

只要适当地安排绕组，便可得到三对极、四对极或 p 对极的旋转磁场。按照前述的方法分析，同样可以求得它们的转速。三

对极时， $n_1 = \frac{60 f}{3} = 1000 \text{ r/min}$ ；四对极时， $n_1 = \frac{60 f}{4} = 750 \text{ r/min}$ ……。当电机为 p 对极时，其旋转磁场的转速为

$$n_1 = \frac{60 f}{p} \text{ r/min} \tag{1-2}$$

如果将接入定子绕组的三相电源任意两相对调一次，例如，将 B、C 两相对调，如图1-7所示，原来磁场按顺时针方向旋转图1-5，现在便按逆时针方向旋转了，即改变了磁场的旋转方向。

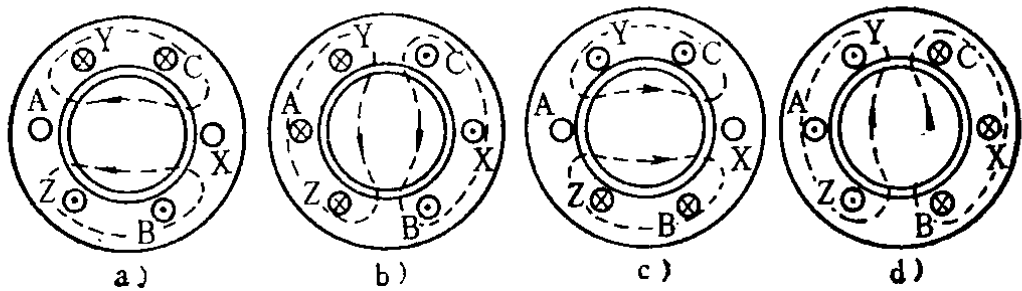


图1-7 改变磁场的旋转方向

a) $\omega t = 0$ b) $\omega t = 90^\circ$ c) $\omega t = 180^\circ$ d) $\omega t = 270^\circ$

(三) 三相感应电动机的工作原理

将三相感应电动机的定子三相绕组接通三相电源，流过三相电流，在电机中便形成转速为 n_1 的旋转磁场，如图1-8所示。

当磁场以 n_1 的转速逆时针方向旋转时，转子对磁场具有反方向的相对转速，使得转子导体切割磁力线产生电势，其方向按右手定则判断，在 N 极下转子导体电势方向为 $\otimes$ ，而在 S 极下为 $\odot$ ，如图 1-8 所示。由于转子绕组自成闭合回路，在转子导体中便有

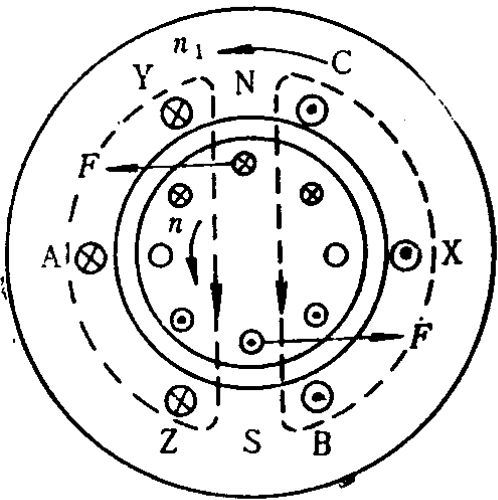


图1-8 三相感应电动机的工作原理

电流流过，其方向与电势方向相同。转子导体中的电流与气隙中的磁场作用，产生电磁力，形成电磁转矩，带动感应电动机的转子旋转。电磁力的方向按左手定则判断，在N极下，转子导体产生的电磁力向左，而在S极下则向右。此电磁力对转轴产生一逆时针方向的电磁转矩，转子则在电磁转矩的作用下，沿逆时针方向即沿着旋转磁场的方向转动起来。

转子的旋转速度 n 越快，转子导体与定子旋转磁场的相对转速 $(n_1 - n)$ 就越小，转子导体因切割旋转磁场的磁力线而产生的电势和电流也就越小。若转子转速 n 正好等于旋转磁场的同步转速 n_1 （旋转磁场的转速也称为同步转速），转子导体与旋转磁场之间便没有相对运动，于是转子导体上就不会产生电势和电流，也就不会产生电磁力和电磁转矩了。但是电动机即使在没有外加负载的情况下（空载运行时），它的风扇和轴承也有一定的摩擦阻力，转子铁心和转子绕组都要损耗一定功率，损耗的功率将产生阻力转矩，迫使转子转速 n 必须略低于同步转速 n_1 ，以便转子导体中产生一定的电势和电流，形成一定的转矩来克服阻力转矩。这种转速之差通常用同步转速 n_1 的百分率表示，称为转差率或滑差，以 s 表示。

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% \quad (1-3)$$

电动机空载时，由于空载阻力矩很小，转差率 s 一般只有 $0.4 \sim 0.7\%$ ，因此，转子转速非常接近同步转速。

当电动机拖动机床设备工作，即电动机有了外加机械负载时，阻力转矩增大，于是转子转速相应下降，转差率 s 增大，转子绕组中的电势和电流、电磁力和电磁转矩也增加，增加的旋转转矩刚好克服被带动的机械负载的阻力转矩，使电动机稳定运行。

从力学的基本知识可知，转速 $\times$ 转矩 = 功率，这时，电动机就对外加负载输出了机械功率；与此同时，由于转子绕组中的电

流增大，通过对气隙旋转磁场的相互作用，使定子绕组中的电流也相应增加，换句话说，电动机从电源线路中吸取的电功率也相应地增加了。感应电动机就是这样将电能转换为机械能的。

对于一般中小型感应电动机，在铭牌上所规定的额定电压和额定负载情况下，额定转差率约为 2 ~ 7 %。

由于这种电动机的转子转速一般都在低于同步转速的情况下运行，因此是一种异步电动机。感应电动机的转子绕组不直接与电源线路连接，而是靠旋转磁场的电磁感应作用来产生机械功率，因此称为感应电动机。

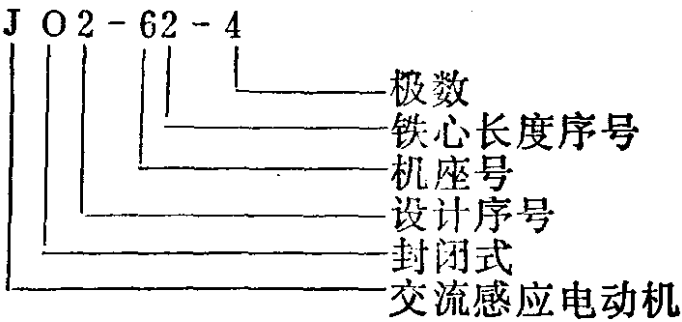
感应电动机的转子是顺着旋转磁场的方向旋转的，因此，如果需改变电动机的旋转方向，只需要改变旋转磁场的旋转方向，即将定子绕组的任意两相对调一下接入电源，便可达到改变转子转向的目的。

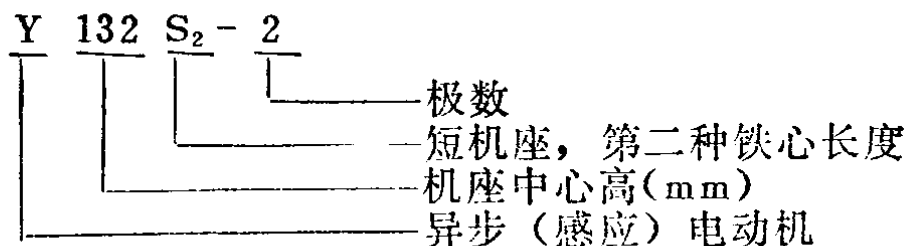
（四）电动机的铭牌数据

铭牌安装在电动机的外表面显著的地方，是电动机的主要标志元件。铭牌上载明电机的简要数据，以使用户正确选择和使用电机。在电机维修时，铭牌数据是绕组重绕计算的重要依据，所以，我们必须正确地了解铭牌。

铭牌上所列的一些主要项目说明如下：

型号 表示电机防护型式和转子类型等而引用的一种产品代号。例如





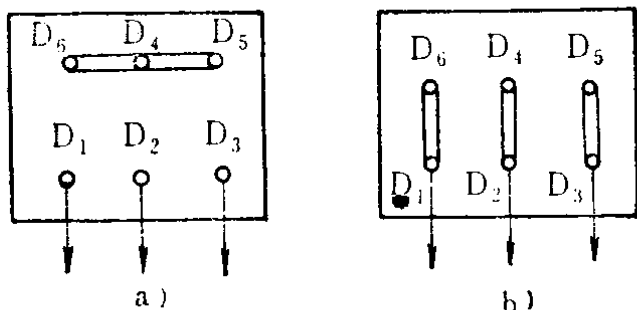
功率 表示在满载运行时电动机轴上所输出的机械功率，亦称额定功率或容量，以千瓦(kW)或瓦(W)为计算单位。

电压 亦称额定电压，指接到电动机定子绕组上的线电压，单位为伏(V)。电压变动一般不应超过铭牌规定的±5%。电压过高或过低都可能引起电动机过热。电压过低还会造成起动困难。

电流 亦称额定电流，指电动机在额定电压下达到额定功率时流入定子绕组的线电流，以安(A)为单位。

接法 表示在额定电压下，电动机三相绕组连接方式(星形或三角形)。

一般电动机三相绕组的首末端均引到出线板上，如图1-9所示。三相绕组可以接成星形(人)或三角



电源

电源

图1-9 出线板接法

a) 人形接法 b) △形接法

形(△)，但必须按铭牌上规定的接法连接，才能正常运行。如规定为星形连接而错接成三角形，则电动机绕组很快就会烧坏；反之，如规定为三角形连接，而误接成星形，则电动机输出功率就会降低很多，甚至不能带负载运行。

转速 指在额定电压、标准频率和输出额定功率情况下，电动机每分钟的转速。

频率 我国工业电源标准频率为50赫(Hz)。

绝缘等级 绝缘等级与电机元件温升有关。中小型电动机的绕组绝缘有 A 级、E 级、B 级和 F 级。有些电机铭牌上标明允许温升而不标明绝缘等级。绝缘等级与电机允许温升关系见表1-1。

表1-1 电机容许温升与绝缘等级关系

绝缘等级	A	E	B	F	H
绝缘材料容许温度 (°C)	105	120	130	155	180
电机容许温升(°C)	60	75	80	100	125

运行方式 连续运行是指电动机在铭牌规定的情况下可以连续不断地运行。一般电动机都是连续运行。但对特殊用途的电机，还有“断续运行”和“短时运行”等运行方式。

技术条件 指生产电机所必须遵循的技术规定。

一般说来，铭牌数据反映了电机的一定特征和工作能力。在铭牌规定的额定情况下，可以保证电机的正常运行和正常使用寿命。

二、三相绕组

从感应电动机的工作原理可知，不论从电能转换成机械能以供给机械负载，还是通过电磁感应产生电磁力和电磁转矩，以拖动机械负载，都离不开定子绕组。三相感应电动机的定子绕组是三相绕组。

(一) 绕组的基本概念

1. 线圈（绕组元件）

在制造和修理电机的绕组时，都是先用绕线模把导线绕成线圈，然后按照一定规律把线圈嵌入铁心槽内，再连接成绕组。由

于线圈是组成绕组的元件，所以又称为绕组元件。线圈可以是单匝或多匝的，如图2-1所示。

线圈放在槽内的直线部分是线圈的有效部分，称为有效边。能量转换主要通过该部分进行。在槽外的部分称为端部，它的作用仅是把线圈的两个有效边连接起来，不转换能量。为了节省材料，在不影响工艺操作的情况下，端部应尽可能缩短些。

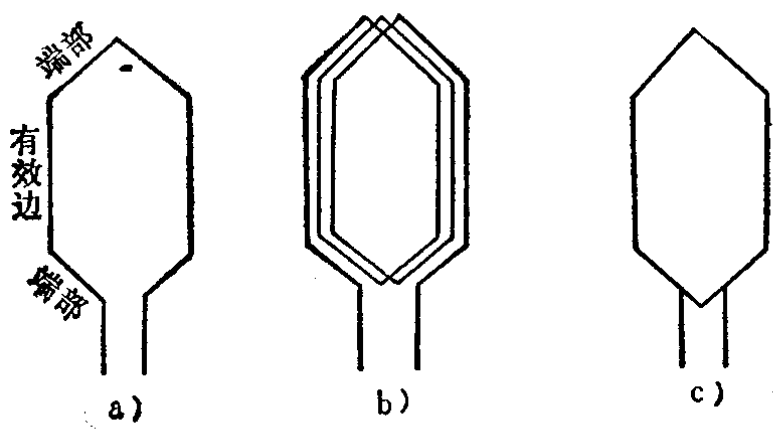


图2-1 线圈（绕组元件）
a) 单匝线圈 b) 多匝线圈
c) 多匝线圈简化图

2. 极距

极距是指沿定子铁心内圆每个磁极所占的范围，用长度表示为

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (\text{mm})$$

式中 D ——定子铁心的内径 (mm);
 $2p$ ——磁极数。

极距也可用每极所占的槽数表示

极距 $\tau = \frac{Z_1}{2p} \quad (\text{槽})$

式中 Z_1 ——定子铁心的总槽数。

3. 电角度

一台电机定子铁心的端面是一个圆，从几何的角度来说可分为 360° ，这样划分的角度称为机械角度。但从磁场来看，一对极

便是一个交变周期。我们把一对极（即一个N极，一个S极）而对应的机械角度定为 360° 电角度。如果电机有 p 对极，则

$$\text{电角度} = p \times \text{机械角度}$$

在图2-2中，我们将电机沿气隙展开，一个圆周用 360° 机械角度表示。不论电机的极数是多少（图中是四极），一个极对应 180° 电角度，一对极对应 360° 电角度，电机一个圆周对应 $p \times 360^\circ$ 电角度。

4. 线圈的节距

一个线圈的两个有效边之间所跨的槽数为线圈的节距，用符号 y 表示。线圈的节距一般总是等于或稍小于极距。如果节距 y 与极距 τ 相等，称为整距线圈；如果节距 y 小于极距 τ ，则称为短距线圈。

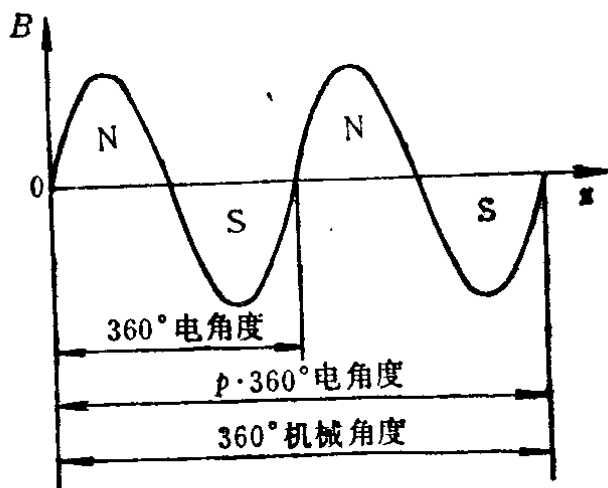


图2-2 电角度与机械角度的关系

5. 单层及双层绕组

感应电动机常用的绕组型式可分为单层绕组及双层绕组两大类。单层绕组在每槽中只安放一个线圈边，而

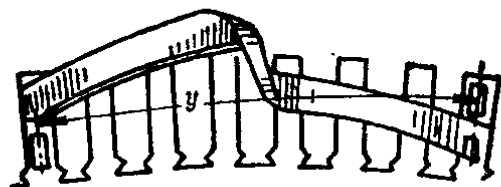


图2-3 双层绕组端部

一个线圈有两个线圈边，因此电机中总的线圈数等于总槽数的一半。双层绕组每个槽中安放两个线圈边，其间用绝缘隔开，故每个线圈的两个边总是一个在某一槽的上层，而另一个则在另一槽的下层，如图2-3所示。采用双层绕组时，电机的线圈数等于槽数。单层绕组及双层绕组又有多种型式。

（二）三相绕组的构造原则

三相绕组中通入的是三相对称电流，从图1-5及图1-6中可以看出，不论是两极电机还是四极电机，三相绕组的线圈A-X、B-Y、C-Z的始边（A、B、C）及末边（X、Y、Z）都是沿着圆周依次间隔地排列，它们的顺序都是A、Z、B、X、C、Y。各个线圈的始边A、B、C都间隔 120° 电角度。同时，由于三相对称电流的相位互差 120° ，从图1-4可以看出，在任何瞬间，三相电流或是两相为正、一相为负；或是两相为负、一相为正；或是一相为正、一相为负、一相为零。当规定电流为正时，从绕组的始边（A、B、C）流入，而从末边（X、Y、Z）流出；电流为负时，则方向相反。这样，不论在任何瞬间，按图1-5规律排列的定子绕组中通入三相电流时，电流的流向总是在半个圆周范围内流入，而在另半个圆周范围内流出，从而产生两极磁通。按图1-6规律排列的定子绕组通入三相电流时，电流的流向总是在四分之一圆周内流入，而在相邻的四分之一圆周内流出，从而产生四极磁通。

图1-5及图1-6所示的是最简单的三相绕组，两极电机仅有6个槽、3个线圈；四极电机仅有12个槽、6个线圈。每相在每极下都只占一个槽。实际上电机的槽数较多，例如较常见的有两极24槽以及四极24槽或36槽电机。这时三相绕组在铁心槽中的分布规律仍然不变，只是每相绕组在每极下所占的槽数有所增加。由此可得出三相绕组的构造原则和每相绕组的排列步骤：

（1）每相绕组所占的槽数应相等，并且在圆周上均匀分布。依照所要求的极数 $2p$ ，把定子槽数 Z_1 分为 $2p$ 等分，每一等分所包含的槽数 $\frac{Z_1}{2p}$ 便是以槽数表示的极距。然后再将每一极距下的槽数三等分，分别放置三相绕组的线圈边。因此，每相绕组

在每个极下所占据的槽数为

$$q = \frac{Z_1}{2p \times 3} = \frac{Z_1}{6p}$$

称为每极每相槽数。

每相绕组在每个极面下所占的宽度（用电角度或槽数表示），称为相带。因为一个极距占 180° 电角度，每个相带占 $1/3$ 极距，对应为 60° 电角度。因此，按上述规律安排的绕组称为 60° 相带绕组。

（2）各相绕组在空间应相互间隔 120° 电角度。为此，我们将按上述原则划分的相带依次标注A、Z、B、X、C、Y，这样，各相绕组线圈的始边A、B、C间都正好相互间隔 120° 电角度。

按照上述规律分别画出两极24槽以及四极24槽与36槽时三相绕组的分布情况，如图2-4 a、b、c所示。图中，每个槽内画了一根导体代表线圈的一个边，并且把各个槽中的导体按顺序编了号。图2-4 a所示的两极电机，整个圆周共分为6个相带，每个相带占 60° 电角度。每个相带所占的槽数，即每极每相槽数 $q = \frac{24}{2 \times 3} = 4$ 。图2-4 b、c所示的四极电机，整个圆周共划分为12个相带，由于四极电机整个圆周为 $p \times 360^\circ = 2 \times 360^\circ = 720^\circ$ 电角度，所以每个相带仍是 60° 电角度。 $Z_1 = 24$ 时，每极每相槽数 $q = \frac{24}{4 \times 3} = 2$ ； $Z_1 = 36$ 时， $q = \frac{36}{4 \times 3} = 3$ 。在图中同时标出了代表每相绕组始边及末边所占相带的字母，并画出了当 i_a 为正， i_b 、 i_c 为负时的电流流向—— i_a 由相带A处各线圈的始边流入，从相带X处流出； i_b 及 i_c 分别由相带Y、Z处流入，而从B、C处流出。由图可见，槽数虽然增多了，但图2-4 a中的电流方向，在半个圆周内都是流入，而另半个圆周内则为流出，仍产生

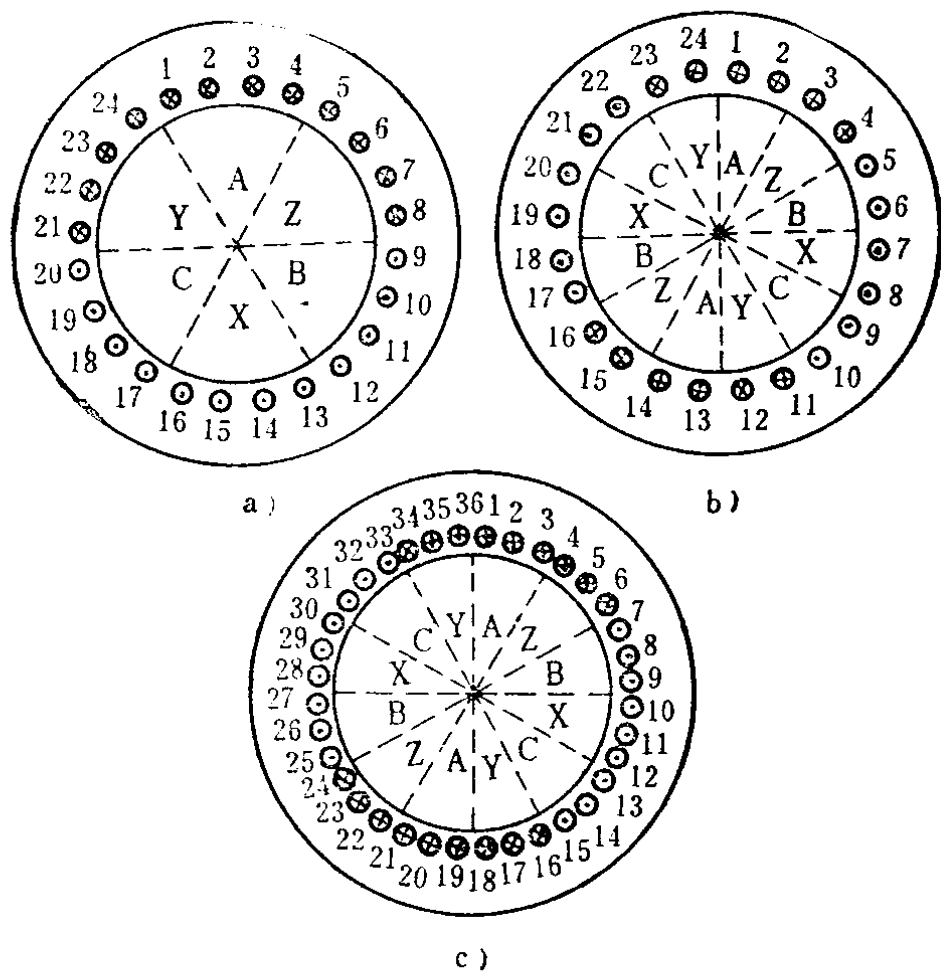


图2-4 三相绕组的排列

a) 两极24槽 b) 四极24槽 c) 四极36槽

两极磁通。在图2-4 b、c 中，1/4圆周范围内的电流方向一致，并与相邻的1/4圆周范围内电流方向相反，仍产生四极磁通。

上面分析了铁心圆周上的电流分布与所产生的磁通的关系。只要保持铁心圆周上电流分布的情况不变，它们产生的磁场情况也不会改变。我们顺着图中各槽导体的电流方向，分别把属于各相的导体连接起来，便可得到三相绕组。在保持电流分布不变的情况下，端部连接的方法可以不同，因而就构成了不同型式的单层绕组。