

第 1 章

三相异步电动机

异步电机是交流电机的一种。异步电动机是工业、农业、国防，乃至日常生活和医疗器械中应用最广泛的一种电动机，它的主要作用是驱动生产机械和生活用具。其单机容量可从几十瓦到几千千瓦。随着电气化和自动化程度的不断提高，异步电动机将占有越来越重要的地位。据统计，在供电系统的动力负载中，约有 70% 是异步电动机，可见它在工农业生产乃至我们日常生活中的重要性。异步电机是一种交流电机，其电机的转子转速总落后于电机的同步转速，故称异步电动机。异步电动机有许多突出的优点，和其它各种电动机相比，它的结构简单，制造、使用和维护方便，效率较高，价格低廉。因此，从应用的角度来讲，了解异步电机的工作原理，掌握它的运行性能，是十分必要的。本章将着重讨论三相异步电动机，并对单相异步电动机的工作原理作简要的介绍。

1.1 三相异步电动机的基本构造

一个三相异步电动机主要由两部分组成，固定不动的部分称为电动机定子；旋转并拖动机械负载的部分称为电动机转子。转子和定子之间有一个非常小的空气隙将转子和定子隔离开来，根据电动机的容量的大小不同，气隙一般在 $0.4\text{mm} \sim 4\text{mm}$ 的范围内。电动机转子和定子之间没有任何电气上的联系，能量的传递全靠电磁感应作用，所以这样的电动机也称感应式电动机。一个三相异步电动机的基本构造如图 1—1 所示。

电动机定子由支撑空心定子铁心的钢制机座、定子铁心和定子绕组线圈组成。定子铁心由 0.5mm 厚的硅钢片叠至而成。定子铁心上的插槽是用来嵌放对称三相定子绕组线圈的。一个三相异步电动机的定子构造见图 1—2。

电动机转子由转子铁心、转子绕组和转轴组成。转子铁心由表面冲槽的硅钢片叠至成一圆柱形。转子铁心装在转轴上，转轴拖动机械负载。转子、气隙和定子铁心构成了一个电动机的完整磁路。

异步电动机的转子有两种形式：鼠笼式转子和绕线式转子。

第 1 章 三相异步电动机

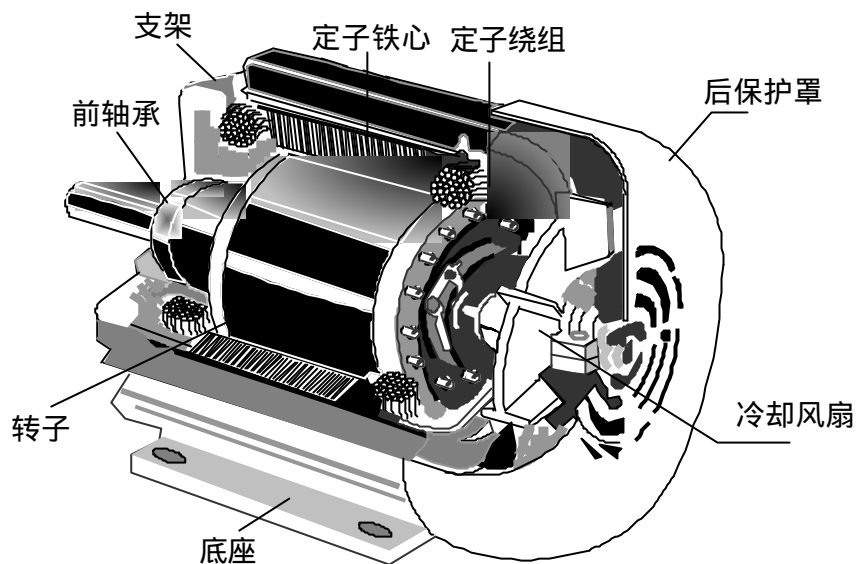


图 1—1 三相异步电动机的基本构造

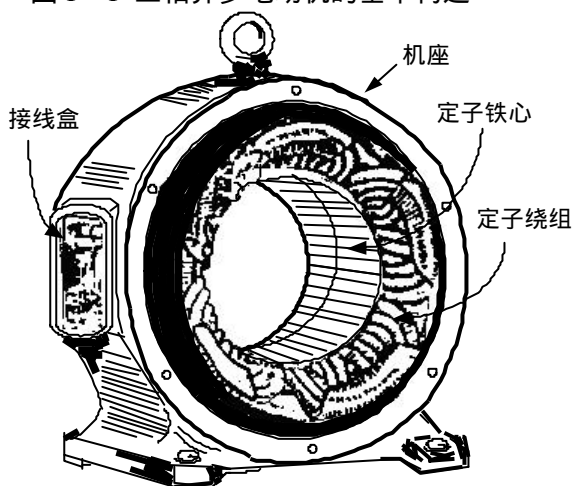


图 1—2 三相异步电动机的定子构造

鼠笼式转子是在转子铁心槽里插入铜条，再将全部铜条两端焊在两个铜端环上，以构成闭合回路。抽去转子铁心，剩下的铜条及其两边的端环，其形状像个鼠笼，故称之为鼠笼式电动机。为了节省铜材，现在中小容量的鼠笼式电

1.1 三相异步电动机的构造

电动机是在转子铁心的槽中浇注铝液铸成笼形导体，以代替铜制笼体。

绕线式转子同电动机的定子一样，都是在铁心的槽中嵌入三相绕组，三相绕组的一端连成Y形，三相绕组的另一端分别连接在三个铜制的集电环上，集电环固定在转轴上，三个环之间及环与转轴之间相互绝缘，在集电环上用弹簧压着炭刷与外电路连接，以便改善电动机的启动和调速特性。

一般我们把鼠笼式转子的异步电动机称为鼠笼式异步电动机；把绕线式转子的异步电动机称为绕线式异步电动机，虽然鼠笼式异步电动机同绕线式异步电动机在转子构造上有所不同，但它们的工作原理是一样的。

应当指出的是，鼠笼式异步电动机由于转子结构简单，价格低廉，工作可靠，如果对电机的启动和调速没有特殊的要求，一般在实际应用中，鼠笼式异步电动机应用得最为广泛。所以在本教材中以介绍鼠笼式异步电动机为主。鼠笼式电动机的转子见图1—3。

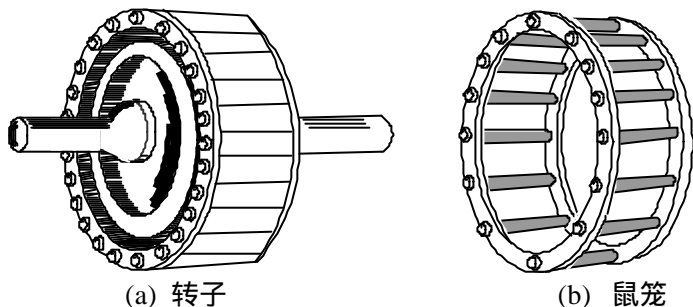


图1—3 鼠笼式电动机的转子

1.2 三相异步电动机的转动原理

1.2.1 异步电动机转动的一般原理

三相异步电动机转动的一般原理是基于法拉第电磁感应定律和载流导体在磁场中会受到电磁力的作用这两个基本因素。

图1—4中N和S是一对永久磁铁的磁极，这对磁极以 n_0 的转速按顺时针方向进行旋转，从而形成了一个转速为 n_0 的旋转磁场。

当磁场转动时，放置在磁场当中的铜制线框上下两根导条与旋转磁场就有了相对运动并切割旋转磁场的磁力线，于是在这两根导条上就产生了感应电动势，其方向符合发电机右手定则

$$E = Blv \quad (1-1)$$

第 1 章 三相异步电动机

这里

E ——感应电动势 [V]

B ——磁感应强度 [T]

l ——导条长度 [m]

v ——导条切割磁力线的相对速度 [m/s]

由于铜制线框形成一个闭合回路，因此在感应电动势的作用下，线框的上下两根导体中就出现了如图 1—4 所示方向的感应电流。

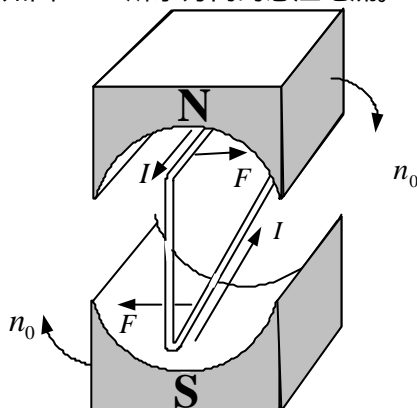


图 1—4 在旋转磁场作用下产生感应电流和转矩

在磁场中的载流导体将受到电磁力的作用，根据电动机左手定则，上下两根导条所受电磁力的方向如图 1—4 所示。在图中可以看出，N 极下的导条受力方向是朝向右，而 S 极下的导条受力方向是朝向左。这一对力形成一顺时针方向的转矩。如果我们把异步电动机的鼠笼式转子放置在旋转磁场中(如图 1—5)代替线框，不难想象，当磁场旋转时，在磁极经过下的每对导条都会产生这样的电磁转矩，在这些电磁转矩的作用下，转子就按顺时针的方向旋转起来了。

当然，如果磁场按逆时针方向旋转，转子也将按逆时针方向旋转。由此可见，转子的旋转方向同旋转磁场的旋转方向是相同的。

虽然转子同旋转磁场彼此隔离，但从上面的叙述可知，由于有了一个旋转的磁场，在转子的导条中产生了感应电流，而流过电流的导条又在磁场中受到电磁力的作用，产生电磁转矩，从而使转子转动起来。这就是感应式电动机转动的一般原理。

需要指出的是，转子的旋转速度 n (即电动机的旋转速度) 比旋转磁场的旋转速度 n_0 (一般称同步转速) 要低一些。这是因为如果这两种转速相等，转

1.1 三相异步电动机的构造

子和旋转磁场就没有了相对运动，转子导条将不切割磁力线便不能产生感应电动势，也就不能产生感应电流，这样就没有电磁转矩，转子将不会继续旋转。因此，若要转子旋转，旋转磁场和转子之间就一定存在转速差，即转子的旋转速度总要落后于旋转磁场的旋转速度。由于转子的旋转速度不同于，且低于旋转磁场的转速，所以我们称这种电动机为异步电动机。

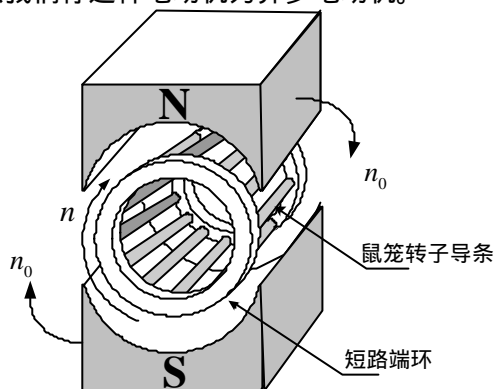


图 1—5 鼠笼式异步电动机转动原理

1.2.2 旋转磁场的产生

若要异步电动机能够转动，首先应当有一个旋转磁场，在实际应用的异步电动机中，是不可能使用一个旋转的永久磁铁来产生旋转磁场的。

通常我们在三相异步电动机的定子铁心中放置三相对称绕组 AX，BY 和 CZ，将三相绕组作星形连接，并接在三相正弦交流电源上，通入三相对称电流，这样，就能在电动机的定子空间里产生一个以固定速度旋转的磁场。

为了简化起见，设每相绕组只有一个线匝，三个绕组分别嵌放在定子铁心圆周上在空间位置上互差 120° 对称分布的 6 个凹槽之中。A 相绕组的始端用大写英文字母 A 来表示，A 相绕组的末端用大写英文字母 X 来表示。另两相绕组的始末端分别为 BY 和 CZ（见图 1—5）。

现在将三相绕组的末端连接在一起，每个绕组的始端分别接在三相对称的交流电源上，如图 1—6 所示。

在图 1—7 中给出了流入定子绕组的三相电流的波形。现在我们根据各个不同瞬时每相绕组电流及其方向来分析定子铁心磁场分布的情况。

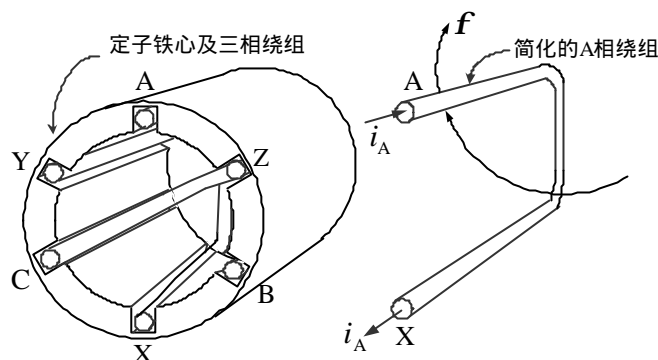


图 1—5 用以产生旋转磁场的定子铁心和绕组分布示意图

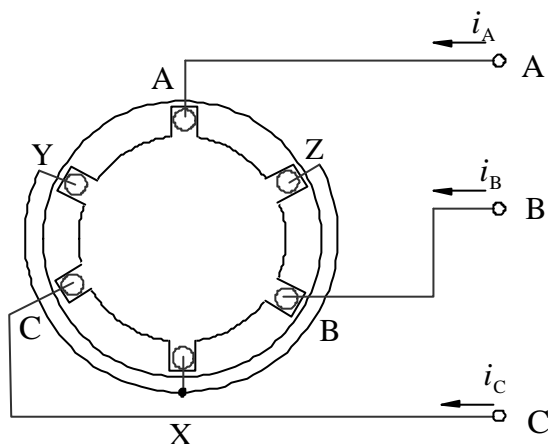


图 1—6 接成星形的三相定子绕组

为了分析方便，在这里作一规定，电流为正值时（在坐标横轴上方），从绕组的始端流入，从绕组的末端流出（见图 1—5）。下面将分析在不同时间（角度）由三相电流所产生的磁场将如何变化。

当 $t = 0^\circ$ 时，A 相电流 $i_A = 0$ 。C 相电流 i_C 为正值，即从 C 端流入，在 Z 端流出。B 相电流 i_B 为负值，即从 Y 端流入，在 B 端流出。根据电流的流向，应用右手螺旋定则，由 i_C 和 i_B 产生的合成磁场如图 1—7 (a) 所示。

当 $t = 60^\circ$ 时，C 相电流 $i_C = 0$ 。A 相电流 i_A 为正值，即从 A 端流入，在 X 端流出。B 相电流 i_B 为负值，即从 Y 端流入，在 B 端流出。由 i_A 和 i_B 产生的合成磁场如图 1—7 (b) 所示。可以看出，此时合成磁场同 $t = 0^\circ$ 时相比，按顺时针方向旋转了 60° 。

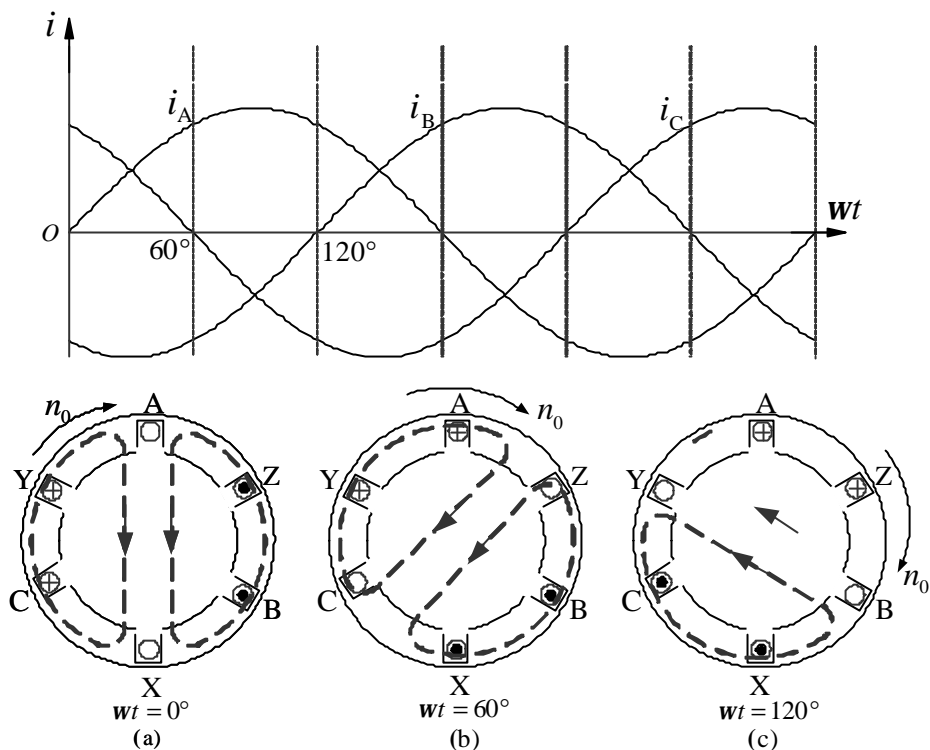


图 1—7 由三相对称电流产生的旋转磁场

当 $t = 120^\circ$ 时，B 相电流 $i_B = 0$ 。A 相电流 i_A 为正值，即从 A 端流入，在 X 端流出。C 相电流 i_C 为负值，即从 Z 端流入，在 C 端流出。由 i_A 和 i_C 产生的合成磁场如图 1—7 (c) 所示。可以看出，此时合成磁场同 $t = 60^\circ$ 时相比，又按顺时针方向旋转了 60° 。同 $t = 0^\circ$ 时相比，按顺时针方向旋转了 120° 。

不难理解当 $t = 180^\circ$ 时，此时的合成磁场同 $t = 0^\circ$ 时相比，按顺时针方向旋转了 180° 。根据这样的规律，当 $t = 360^\circ$ 时，合成磁场正好转了一周。

通过上面的分析可知，当定子绕组中的对称三相电流随时间不断周而复始地变化时，由它们在电动机定子空间所产生的合成磁场随电流的变化而在不断旋转着。这就是使异步电动机转子能够转动所需的旋转磁场。这个旋转磁场同我们前面讲述三相异步电动机转动的一般原理中所使用旋转着的永久磁铁产生的旋转磁场所起的作用是一样的。

第 1 章 三相异步电动机

接下来讨论一下旋转磁场的转向问题。电动机定子三相绕组 A - X、B - Y、C—Z 是按三相电流 A、B、C 的相序接到三相电源上的，这时定子三相绕组中的电流是按顺时针方向排列的（见图 1—7 的三相电流波形图），从前面的分析知道，此时旋转磁场也是按顺时针方向转动的。

如果将电源接到定子绕组上的三根引线中的任意两根对调一下，譬如将电源 B 相接到原来的 C 相绕组上，电源 C 相接至原来的 B 相绕组上，如图 1—8 所示。

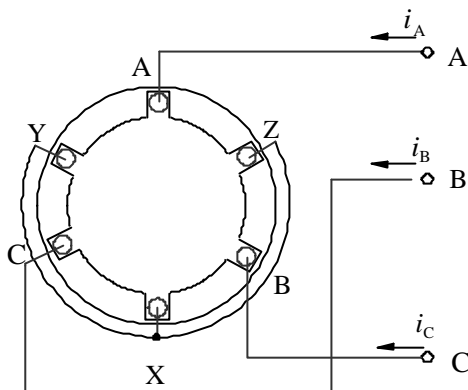


图 1—8 将 B 相和 C 相的电源线对调

这时定子三相绕组中的电流相序就按逆时针方向排列，在这种情况下产生的旋转磁场将按逆时针方向旋转。异步电动机的反转就是利用这一原理实现的。读者不妨自己画图分析来加以证明。

由此可见，磁场的转向与通入绕组的三相电流相序有关。任意对调两根三相电源接到定子绕组上的导线，就可以改变异步电动机的旋转方向。

1.2.3 旋转磁场的转速

从前面的分析可知，对于图 1—7，三相电流从 $t = 0^\circ$ 变到 $t = 60^\circ$ ，旋转磁场也转动了 60° 空间角。当电流变化一周时，磁场恰好在空间旋转了一圈。设电流的频率为 f_1 ，则每分钟变化 $60 f_1$ 次，旋转磁场的转速为

$$n_0 = 60 f_1$$

n_0 的单位为 r/min。若 f_1 为 50Hz 的工频交流电，则此时的旋转磁场的转速为 3000r/min。

上面所讨论的旋转磁场的转速是对应于一对磁极的情况（即 $p=1$ ）。也就

是分别只有一个N极和S极。若是多对磁极呢？

如果电动机绕组由原来的三个绕组增至为六个绕组（为了理解方便，仍使用单匝绕组），每个绕组的始端（或末端）之间在定子铁心的内圆周上按互差 60° 角的规律进行排列。并按相序编出绕组顺序编号如图1—9（a）所示。六个绕组的电气连线如图1—9（b）所示。

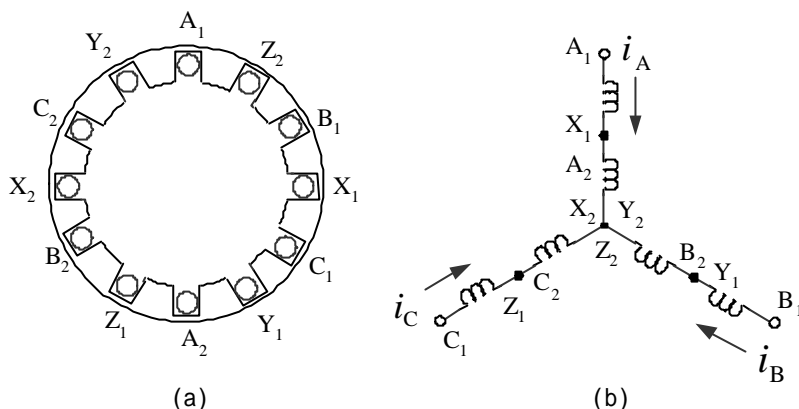


图1—9 产生两对磁极旋转磁场的定子绕组分布及其电气连线

参考图1—7，分析图1—10的定子绕组上磁场分布情况，不难发现，在定子铁心内圆周上具有两对磁极（即 $p=2$ ），如图1—10所示。当电流也从 $t=0^\circ$ 到 $t=60^\circ$ 经历了 60° 时，而磁场在空间仅旋转了 30° 。就是说，当电流经历了一个周期（ 360° ），磁场在空间仅仅能旋转半个周期（ 180° ），由此可知，两对磁极的磁场旋转速度比一对磁极的磁场转速慢了一半，即

$$n_0 = \frac{60f_1}{2}。$$

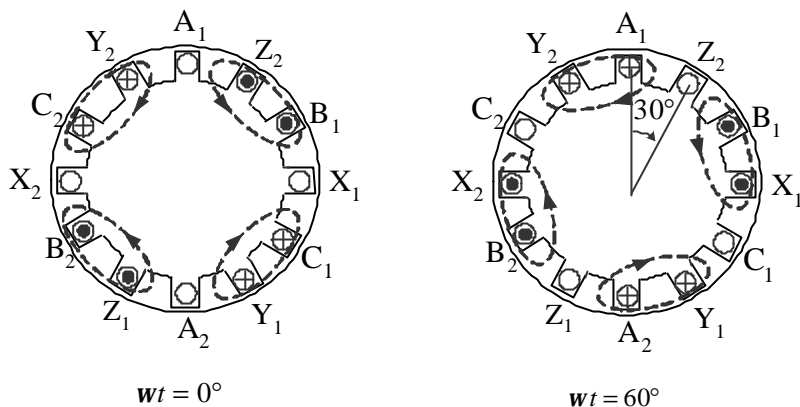


图 1—10 两对磁极旋转磁场

同理，在三对极的情况下 ($p=3$)，电流变化一个周期，磁场在空间仅旋转了 $1/3$ 转，只是 $p=1$ 情况下的转速的三分之一，即 $n_0 = \frac{60f_1}{3}$ 。

所以对于一般情况，当旋转磁场具有 p 对极时，磁场的旋转速度为

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-2)$$

n_0 ——旋转磁场旋转速度（又称同步转速）

f_1 ——三相交流电流频率

p ——磁极对数

由式 (1—2) 可知，旋转磁场的转速 n_0 的大小与电流频率 f_1 成正比，与磁极对数 p 成反比。其中 f_1 是由异步电动机的供电电源频率决定，而 p 由三相绕组的各相线圈串连多少决定。通常对于一台具体的异步电动机， f_1 和 p 都是确定的，所以磁场转速 n_0 为常数。

在我国，工频 $f_1 = 50\text{Hz}$ ，于是由式 (1—2) 可得出对应于不同极对数 p 的旋转磁场转速 n_0 （转/每分），见表 1—1。

表 1—1 旋转磁场的转速 n_0 与磁极对数 p 的关系

P_0	1	2	3	4	5	6
n_0 (r/min)	3 000	1 500	1 000	750	600	500

1.2.4 三相异步电动机的转差率

从三相异步电动机的工作原理可知，虽然电动机的转动方向同旋转磁场的

1.1 三相异步电动机的构造

转动方向相同，但旋转磁场的转速 n_0 同电机转速 n 是不同的。电机的转速 n 低于旋转磁场的转速 n_0 。

旋转磁场的转速 n_0 （又称同步转速）与电机转速 n 之差（ $n_0 - n$ ），用符号 Δn 表示，称为转速差（简称转差）。转差与同步转速的比值叫做转差率，用 s

例题 1—1

表示

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0} \quad (1-3)$$

转差率 s 表示电动机转子转速 n 与旋转磁场转速 n_0 相差的程度。转差率是

例题 1—2

异步电动机的一个重要的物理量，转子转速越接近磁场转速，则转差率越小。一般情况下，运行中的三相异步电动机的额定转速与同步转速相近，所以转差率很小。通常不同容量的异步电动机在额定负载时的转差率约为 1% ~ 9%。

当电动机起动初始瞬间，电动机转子转速 $n = 0$ ，此时三相电流已经流入，旋转磁场已经产生，这时的转差率最大， $s = 1$ ，为最大值。

式（1—3）也可写成

$$n = (1 - s)n_0 \quad (1-4)$$

有一台三相异步电动机的极对数 $p = 2$ ，转差率 $s = 4\%$ ，试求这台电动机的转速。

【解】由表 1.2.1， $p = 2$ 时， $n_0 = 1500$ r/min。根据式（1.2.4），可求出电动机的转速为

$$n = (1 - s)n_0 = (1 - 4\%) \times 1500 \text{ r/min} = 1440 \text{ r/min}$$

有一台三相异步电动机接在频率 $f_1 = 50\text{Hz}$ 的三相电源上，额定负载时的转速为 $n = 1462.5$ r/min。试求该电机的极对数和转差率。

【解】由于异步电动机额定转速接近而略小于同步转速，由表 1.2.1 可知，与 1462.5 r/min 最接近的同步转速为 $n_0 = 1500$ r/min，相对应的磁极对数 $p = 2$ 。因此，额定负载时的转差率为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% = \frac{1500 - 1462.5}{1500} \times 100\% = 2.5\%$$

练习与思考

1.2.1 图 1—6 中的定子三相绕组是星形连接，试画出若该绕组三角形连接，

第 1 章 三相异步电动机

对应于图 1—7 中给出的三相电流（设该电流为线电流）在 $t = 0^\circ$ 和 $t = 60^\circ$ 时定子旋转磁场的分布情况。

1.2.2 你认为异步电动机在旋转时转子导条的感应电流大，还是电动机刚起动瞬间转子还处于静止时转子导条的感应电流大？解释原因。

1.2.3 为什么异步电动机的转速比它的旋转磁场的转速低？

1.3 三相异步电动机的特性

1.3.1 三相异步电动机的电路特性

异步电动机通过电磁感应把定子边（原边）的电功率转换成转子边（副边）的机械功率。从电磁关系上来看，异步电动机同变压器的运行相似，即定子可看成原端绕组，转子则相当副端绕组。所不同的是在电动机定子绕组和转子绕组中的感应电动势都是由旋转磁场作用产生的，实际上，在电动机运行时，旋转磁场是由定子绕组和转子绕组产生的合成磁场。但它和变压器比较，工作原理和分析方法有很多相似之处。

三相异步电机的每相等效电路见图 1—11。

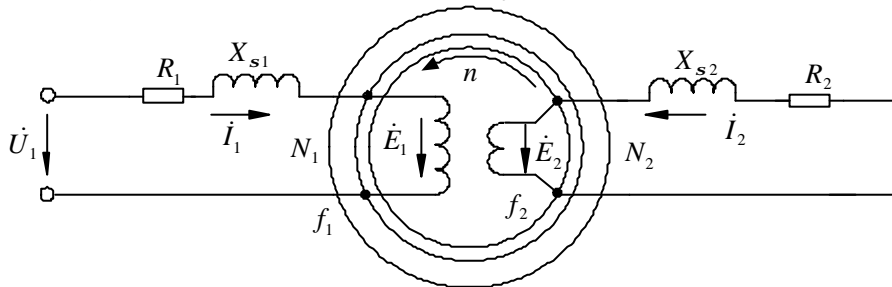


图 1—11 三相异步电动机的每相等效电路

图中的 E_1 和 E_2 分别为旋转磁场在定子绕组和转子绕组上产生的感应电动势； R_1 和 R_2 分别为定子绕组和转子绕组上的电阻； X_{s1} 和 X_{s2} 分别为定子磁路和转子磁路漏磁通产生的感抗； N_1 和 N_2 分别为定子和转子绕组的匝数。

一、 定子电路

异步电动机的定子绕组是静止的，所以旋转磁场产生的感应电动势的频率等于电源频率 f_1 ，根据三相异步电动机的每相等效电路，其电压方程见式（1—5）。

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + jX_{s1} \dot{I}_1 + (-\dot{E}_1) \quad (1-5)$$

仿照变压器的分析方法可得

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 F \quad (1-6)$$

F ——气隙主磁通量

二、转子电路

当电动机旋转时，旋转磁场切割转子绕组导体，并它的上面产生感应电动势。由于旋转磁场是旋转的，对于转子上的每相绕组的导体来讲，旋转磁场的N极和S极都能扫过它们，所以在绕组上产成的感应电动势应当是一交流电动势。感应电动势的频率取决于旋转磁场同转子的相对速度和磁极对数。旋转磁场切割转子绕组导体的速度为 $n_0 - n$ ，则转子感应电动势的频率同转差的关系见式（1—7）

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot \frac{pn_0}{60} = sf_1 \quad (1-7)$$

通常， $f_2 = 0.5 \sim 4.5\text{Hz}$ ($f_1 = 50\text{Hz}$)。

在电动机起动瞬间， $n = 0$ ， $s = 1$ ， $f_2 = f_1$ ，此时转子绕组中的感应电动势最大，为

$$E_{20} = 4.44 f_1 N_2 F \quad (1-8)$$

当电动机旋转时，在转子绕组上的感应电动势

$$E_2 = 4.44 f_2 N_2 F = 4.44 s f_1 N_2 F = s E_{20} \quad (1-9)$$

由此可见，转子感应电动势与转差率 s 有关。

在电动机起动瞬间， $n = 0$ ， $s = 1$ ， $f_2 = f_1$ ，此时转子感抗最大，为

$$X_{s20} = 2p f_1 L_{s2} \quad (1-10)$$

这里的 L_{s2} 是转子漏磁电感。当电动机旋转时，转子感抗

$$X_{s2} = 2p f_2 L_{s2} = 2p s f_1 L_{s2} = s X_{s20} \quad (1-11)$$

可见 X_{s2} 也同转差有关。

根据图 1—11 的等效电路，可写出转子绕组中的电流有效值

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{s2}^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{s20})^2}} \quad (1-12)$$

由于转子漏电感的存在， \dot{I}_2 要滞后 \dot{E}_2 一定角度，这个角度用 φ_2 来表示，因此转子电路的功率因数为

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{s2}^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{s20})^2}} \quad (1-13)$$

转子电流和转子功率因数同转差的关系曲线见图 1—12。

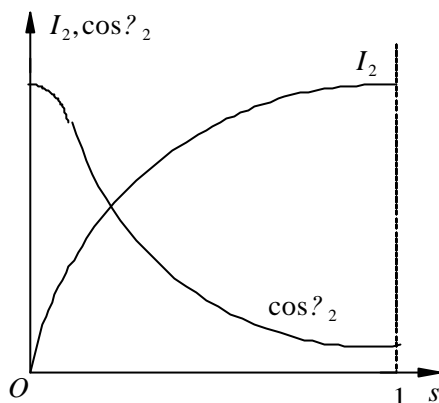


图 1—12 转子电流和转子功率因数同转差的关系曲线

由上述分析可见，由于转子电路是旋转的，转子转速不同时，转子绕组和旋转磁场之间的相对速度不同，所以转子电路中的各个量，如频率、电动势、感抗、电流和功率因数等都与转差率有关，实际上也就是同电动机的转速有关，这是我们学习和分析三相异步电动机时应当注意的一个重要特点。

1.3.2 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性

异步电动机的作用是把电能转换为机械能，它输送给生产机械的是转矩和转速。因此电动机的转矩同那些因素有关？它的大小受那些因素的影响？转矩同转速之间的关系怎样？这都是这节我们将讨论的问题。

一、异步电动机的电磁转矩

三相异步电动机的电流与旋转磁场相互作用产生电磁力，电磁力对电机的转子产生了电磁转矩，由此可见电磁转矩是由转子电流和旋转磁场共同作用所产生的结果，因此电磁转矩的大小与转子电流以及旋转磁场每极磁通成正比。从前面对于转子电路的分析知道，转子电路不但有电阻，还有漏感阻抗存在，所以转子电流 \dot{I}_2 与转子感应电动势 \dot{E}_2 之间有一个相位差，用 φ_2 来表示，于是转子电流可以分为有功分量和无功分量两部分。只有转子电流的有功分量部分 $I_2 \cos \varphi_2$ 才能与旋转磁场相互作用而产生电磁转矩，这样，写出电磁转矩同磁场和转子电流的关系如下

$$T = K_T F I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-14)$$

T ——电磁转矩 [N.m]

K_T ——电动机结构常数

1.1 三相异步电动机的构造

将式(1—6)、(1—8)、(1—12)、(1—13)带入式(1—14)，可得到转矩的另一种表达方式

$$T = K \frac{sU_1^2 R_2}{R_2^2 + (sX_{s12})^2} \quad (1-15)$$

这里 K 是整理式(1—14)时得到的一个新的常数。

上式表明，三相异步电动机的转矩与每相电压的有效值平方成正比，也就是说，当电源电压变动时，对转矩产生较大的影响。此外，转矩与转子电阻也有关。当电压和转子电阻一定时，电磁转矩还同转差率有关， $T = f(s)$ 关系就称为异步电动机的机械特性了。

二、异步电动机的机械特性

在一定的电源电压 U_1 和转子电阻 R_2 之下，转矩与转差的关系曲线 $T = f(s)$ 或转速与转矩的关系曲线 $n = f(T)$ ，称为电动机的机械特性曲线。根据式(1—15)，以 T 为函数，以 s 为变量可做出如图 1—13 所示的 $T = f(s)$ 曲线；若将 $T = f(s)$ 曲线按顺时针方向旋转 90° ，再将横过来 T 轴下移，又得到 $n = f(T)$ 的关系曲线，见图 1—14。

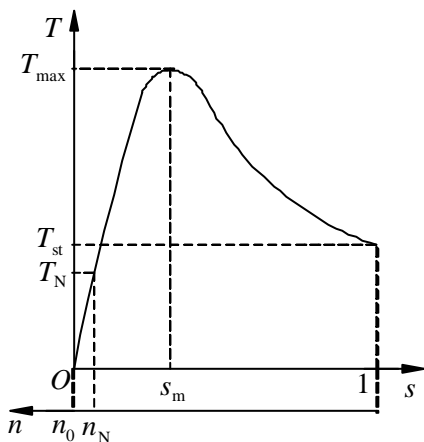


图 1—13 $T = f(s)$ 特性曲线图

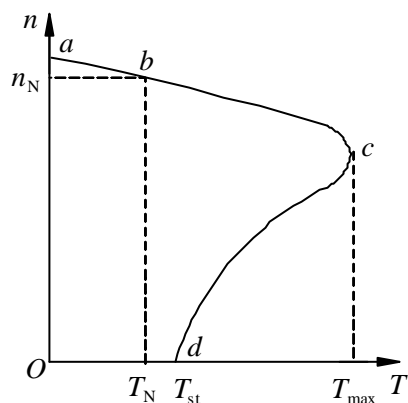


图 1—14 $n = f(T)$ 特性曲线

为了理解三相异步电动机机械特性的特点，下面着重讨论几个反映电动机工作的特殊运行点。

(1) 额定转矩 T_N

额定转矩对应于图 1—14 所示机械特性上的 b 点。额定转矩是电动机在额

第 1 章 三相异步电动机

定负载时的转矩。额定负载转矩可从电动机铭牌数据给出的额定功率 P_{2N} （注意：电动机铭牌数据给出的功率是输出到转轴上的机械功率，而不是电动机消耗的电功率）和额定转速 n_N 求得

$$T_N = P_{2N} / \frac{2\pi n_N}{60} = 9550 \frac{P_{2N}}{n_N} \quad (1-16)$$

式中，功率的单位是 kW，转速的单位是 r/min，转矩的单位是 N.m。

当电动机运行过程中，负载通常会变化，如电动机机械负载增加时，打破了电磁转矩和负载转矩间的平衡，此时负载转矩大于电磁转矩，电动机的速度将下降，此时旋转磁场对于转子的相对速度加大，旋转磁场切割转子导条的速度加快，这将导致转子电流 I_2 增大，从而电磁转矩增大，直到同负载转矩相等，这样电动机在一个略低于原来转速的速度下平稳运转。所以电动机有载运行一般工作在图 1.3.4 机械特性较为平坦的 $a c$ 段。

(2) 最大转矩 T_{\max}

最大转矩 T_{\max} 对应于图 1—14 所示机械特性上的 c 点，在这点上对应的转差率为 s_m （见图 1—13）。把式（1—15）对 s 进行求导，并令其导数等于零，解出

$$s = s_m = \frac{R_2}{X_{s20}} \quad (1-17)$$

再将 s_m 带回式（1.3.11）得到最大转矩 T_{\max} 的表达式

$$T_{\max} = K \frac{U_1^2}{2X_{s20}} \quad (1-18)$$

由式（1—17）、（1—18）可见， T_{\max} 与电源电压 U_1 的平方成正比，与 X_{s20} 成反比，而与 R_2 无关；而 s_m 与 R_2 成正比，与 X_{s20} 成反比。 T_{\max} 与 U_1 及 R_2 的关系曲线分别如图 1—15 和图 1—16 所示。

1.1 三相异步电动机的构造

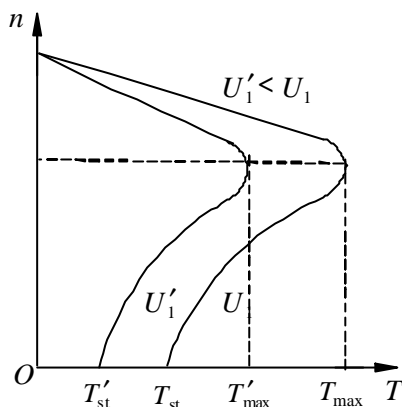


图 1—15 R_2 不变, U_1 变化

时的 $n = f(T)$ 特性曲线

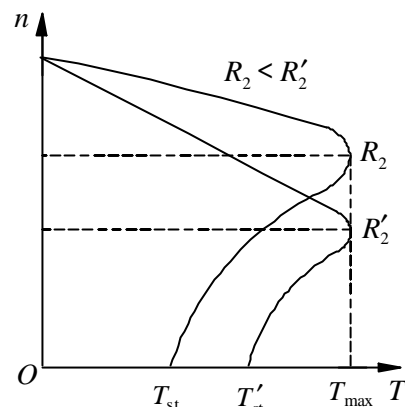


图 1—16 U_1 不变, R_2 变化

时的 $n = f(T)$ 特性曲线

当异步电动机的负载转矩超过最大转矩 T_{\max} 时, 电动机将发生“堵转”的现象, 此时电动机的电流是额定电流的数倍, 若时间过长, 电动机剧烈发热, 以致烧坏。电动机负载转矩超过 T_{\max} 称为过载, 常用过载系数 m 来标定异步电动机的过载能力, 即

$$I_m = \frac{T_{\max}}{T_N} \quad (1-19)$$

一般三相异步电动机的过载系数 $m = 1.6 \sim 2.5$ 。

(3) 起动转矩 T_{st}

起动转矩 T_{st} 对应于图 1—14 所示机械特性上的 d 点, 起动转矩 T_{st} 是电动机运行性能的重要指标。因为起动转矩的大小将直接影响到电机拖动系统的加速度的大小和加速时间的长短, 如果起动转矩小, 电机的起动变得十分困难, 有时甚至难以起动。

在电动机起动时, $n = 0$, $s = 1$, 将 $s = 1$ 代入式 (1—15) 可得

$$T_{st} = K \frac{R_2 U_1^2}{R_2^2 + X_{s20}^2} \quad (1-20)$$

由上式可以看出, 异步电动机的起动转矩同电源电压 U_1 的平方成正比, 再参看图 1—15, 当 U_1 降低时, 起动转矩 T_{st} 明显降低。结合刚才讨论过的最大转矩可以看出, 异步电动机对电源电压的波动十分敏感, 运行时, 如果电源电压降得太多, 会大大降低异步电动机的过载和起动能力, 这个问题在使用异

第1章 三相异步电动机

步电动机时要充分重视。

由式(1—20)，结合图1—16，当转子电阻 R_2 适当加大时，最大转矩 T_{\max} 没有变化（最大转矩同 R_2 无关），但起动转矩 T_{st} 会加大，这是因为转子电路电阻增加后，提高了转子回路的功率因数，转子电流的有功分量增大（此时 E_{20} 一定），因而起动转矩增大。通常将机械特性上的起动转矩与额定转矩之比称为起动系数

$$I_{\text{st}} = \frac{T_{\text{st}}}{T_{\text{N}}} \quad (1—21)$$

起动系数是衡量电动机起动能力的重要数据，一般 $I_{\text{st}} = 1 \sim 1.2$ 。

练习与思考

1.3.1 转子静止与转子转动时，转子边的电量和参数有何变化？

1.3.2 试解释为什么当转子的转速升高时，转子绕组的感应电动势和它的频率都下降？

1.3.3 在三相异步电动机起动瞬间，即 $s = 1$ 时，为什么转子电流 I_2 大，而转子电路的功率因数 $\cos \varphi_2$ 小？此时定子电路的电流和功率因数如何？

1.3.4 有一台 $p = 3$ 的三相异步电动机接在频率为50Hz的三相交流电源上，电机以额定速度运转时，转子绕组感应电动势的频率为2.5Hz，求该电动机的：（1）转差率；（2）转子的转速。

1.3.5 异步电动机所带机械负载增大时，电动机输出的电磁转矩就会跟着增大，试说明其原因和物理过程。

1.3.6 当电源电压与转子电阻改变时，异步电动机的机械特性曲线形状有什么变化？对最大转矩和起动转矩有什么影响？

1.3.7 异步电动机带额定负载时，如果电源电压下降过多会产生什么后果？

1.3.8 异步电动机在接入电源时，如果转子卡住不能转动，试问这对电动机产生什么影响，会有什么现象发生？

1.3.9 某异步电动机的额定转速 $n_{\text{N}} = 1460 \text{r/min}$ ，当负载转矩只为额定转矩的二分之一时，电动机的转速大概为多少？

1.4 三相异步电动机的起动、调速和制动

1.4.1 三相异步电动机的起动

异步电动机由静止状态过渡到稳定运行状态的过程称为异步电动机的起动。起动是异步电动机应用中重要的物理过程之一。异步电动机在使用过程中，总是需要起动和停机，虽然三相异步电动机具有可以产生一定的起动转矩，拖动负载直接起动的优点，但它的起动电流过大则是必须解决的问题。

1.1 三相异步电动机的构造

当异步电动机起动时，由于电动机转子处于静止状态，旋转磁场以最快速度扫过转子绕组，此时转子绕组感应电动势是最高的，因而产生的感应电流也是最大的，通过气隙磁场的作用，电动机定子绕组也出现非常大的电流。一般起动电流 I_{st} 是额定电流 I_N 的 5~7 倍。

对于这样大的起动电流，如果频繁起动，将引起电动机过热。对于大容量的电动机，在在起动这段时间内，甚至引起供电系统过负荷，电源线的线电压因此而产生波动，这可能严重影响其他用电设备的正常工作。

一、鼠笼式异步电动机的起动

鼠笼式异步电动机起动方法有两种：直接起动和降压起动。

(1) 直接起动

直接起动就是用闸刀开关和交流接触器将电机直接接到具有额定电压的电源上。此时 I_{st} 是额定电流 I_N 的 5~7 倍，而 $I_{st} = T_{st} / T_N = 1 \sim 2$ 。

直接起动法的优点是操作简单，无需很多的附属设备；主要缺点是起动电流较大。鼠笼式异步电动机能否直接起动，要视三相电源的容量而定。通常在一般情况下，10 千瓦以上的异步电动机，就不允许直接起动了，必须采用能够减小起动电流的其他的启动方法。

(2) 降压起动

这种方法是用降低异步电动机端电压的方法来减小起动电流。由于异步电动机的起动转矩与端电压的平方成正比，所以采用此方法时，起动转矩同时减小，所以该方法只适用于对起动转矩要求不高的场合，即空载或轻载的场合。

星三角起动法 星三角起动法适用于正常运行时绕组为三角形联接的电动机，电动机的三相绕组的六个出线端都要引出，并接到转换开关上。起动时，将正常运行时三角形接法的定子绕组改接为星形联接，起动结束后再换为三角形连接。这种方法只适用于中小型鼠笼式异步电动机。图 1—17 所示的是这种方法的原理接线图。

第 1 章 三相异步电动机

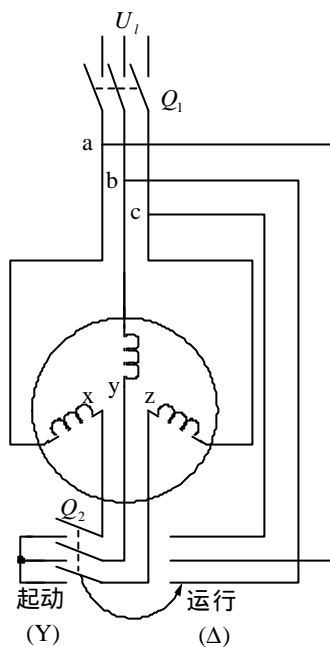


图 1—17 Y/Δ 起动电路图

起动时，电机定子绕组星形连接，电机每相定子绕组上的电压是电源线电压 U_l 的 $1/\sqrt{3}$ ，此时电路的线电流等于相电流，即流过每个绕组的电流（这里的 Z 是每相绕组的等效阻抗）。

$$I_N = \frac{\frac{U_L}{\sqrt{3}}}{Z}$$

当电机接近额定速度时，电机定子绕组改为三角形连接，这时电机每相绕组的电压为电源线电压 U_l 。此时电路的线电流为

$$I_l = \sqrt{3} \frac{U_l}{Z}$$

比较以上的两个电流

$$\frac{I_{NY}}{I_l} = \frac{\frac{U_L}{\sqrt{3}}}{Z} / \sqrt{3} \frac{U_l}{Z} = \frac{1}{3}$$

即定子绕组星形连接时，由电源提供的起动电流仅为定子绕组三角形连接时的 $1/3$ 。

由于起动转矩与每相绕组电压的平方成正比，星形接法时的绕组电压降低

了 $1/\sqrt{3}$ 倍，所以起动转矩将降到三角形接法的 $1/3$ ，即

$$T_{stY} = \frac{1}{3} T_{st\Delta}$$

自耦变压器起动法 利用自耦变压器降压起鼠笼异步电动机的原理如图 1—18。设自耦变压器的变比为 k_a ，经过自耦变压器降压后，加在电动机上的电压为 $\frac{U_l}{k_a}$ 。此时电动机的起动电流 I'_{st} 便与电压成相同比例地减小，是原来在

额定电压下直接起动电流 I_{stN} 的 $\frac{1}{k_a}$ 倍，即 $I'_{st} = \frac{1}{k_a} I_{stN}$ 。又由于电动机接在自耦变压器的副边，自耦变压器的原边接在三相电源侧，故电源所供给的起动电流为

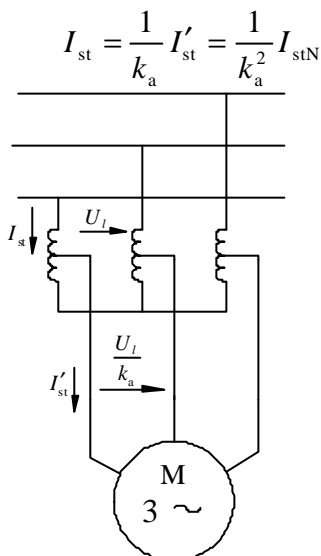


图 1—18 自耦变压器起动电路原理图

由此可见，利用自耦变压器降压起动鼠笼异步电动机，电网电流比直接起动减少了 $\frac{1}{k_a^2}$ 。由于加到电动机上的电压减小了 $\frac{1}{k_a}$ ，因此，同直接起动相比，起动转矩也同样减少了 $\frac{1}{k_a^2}$ 。

二、绕线式异步电动机的起动

到现在为止，我们一直把分析的重点放在鼠笼式异步电动机上。这是因为

第 1 章 三相异步电动机

这种类型的电动机的使用极为广泛。然而，绕线式异步电动机也具有鼠笼电动机所不具备的特殊性能。

鼠笼式异步电动机为了限制起动电流而采用降压起动的方法，虽然起动电流变小了，但起动转矩也随之变小。电动机理想的起动特性应当是起动电流小，起动转矩要大。而降压起动法只满足了其中的一个方面。因此对于不仅要求起动电流小，而且要求要有相当大的起动转矩的场合，往往不得不采用起动性能较好而价格昂贵、构造复杂的绕线式异步电动机了。

绕线式异步电动机的特点是在转子绕组电路中串入附加电阻，换句话说，就是可以人为的改变转子电阻 R_2 的阻值。从图 1—16 可以看出，当 R_2 的阻值增大时，电动机的起动转矩变大，从而改变了电动机的起动性能。因此在异步电动机转子回路接入适当的电阻，不仅可以使起动电流减小，而且可以使起动转矩增大，使电动机具有良好的起动性能。

我们从图 1—16 也可以看出，虽然在转子回路串入电阻后获得了比较大的起动转矩，但电动机的机械特性也变“软”了，所以当电机起动到接近额定转速后，就把串在转子绕组中的电阻短路掉，使电动机恢复到原来的机械特性上。

应当指出的是，随着电力电子技术和控制技术的发展，各种针对鼠笼式异步电动机发展起来的电子型降压起动器、变频调速器等装置的推广和使用，使得结构复杂，价格昂贵、维护困难的绕线式异步电动机的活动舞台变得越来越窄。

有一三相异步电动机，其额定技术参数为： $P_N = 45\text{kW}$ ， $n_N = 1480\text{r/min}$ ， $U_1 = 380\text{V}$ ， $h = 92.3\%$ ， $\cos \varphi = 0.88$ ， $I_{st}/I_N = 7$ ， $T_{st}/T_N = 1.9$ ， $T_{max}/T_N = 2.2$ 。该电动机采用自耦变压器降压起动，调整自耦变压器的抽头，使起动时电动机的端电压降到电源电压的 73%。试求线路的起动电流和电动机的起动转矩。

【解】电动机直接时的起动电流为

例题 1—3

$$I_{stN} = 7I_N = 7 \times \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3}hU_1 \cos \varphi} = 7 \times \frac{45 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88 \times 0.923} \text{ A} = 589 \text{ A}$$

1.1 三相异步电动机的构造

降压启动时电源侧的启动电流 I_{st}

$$I_{st} = \frac{1}{k_a^2} I_{stN} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0.73}\right)^2} \times 589 \text{ A} = 313.87 \text{ A}$$

降压时电动机的启动转矩

$$T'_{st} = \frac{T_{st}}{\left(\frac{1}{0.73}\right)^2} = (0.73)^2 \times 1.9 \times T_N = 0.73^2 \times 1.9 \times 9550 \times \frac{P_N}{n} =$$
$$0.73^2 \times 1.9 \times 9550 \times \frac{45}{1480} \text{ N.m} = 294 \text{ N.m}$$

1.4.2 三相异步电动机的调速

调速就是电动机在同一负载下得到不同的转速，以满足生产过程的需要。有些生产机械，为了加工精度的要求，例如一些机床，需要精确调整转速。另外，像鼓风机、水泵等流体机械，根据所需流量调节其速度，可以节省大量电能。所以三相异步电动机的速度调节是它的一个非常重要的应用方面。

从异步电动机的转速公式

$$n = (1 - s)n_0 = (1 - s) \frac{60f_1}{p}$$

可知，异步电动机可以通过三种方式进行调速：改变电动机旋转磁场的磁极对数 p 调速；改变供电电源的频率 f_1 调速；改变转差率 s 调速。下面分别介绍这几种调速方法。

一、变极调速

变极调速就是改变电动机旋转磁场的磁极对数 p ，从而使电动机的同步转速发生变化而实现电动机的调速，通常通过改变电机定子绕组的联结实现，这种方法的优点是操作设备简单（转换开关）。缺点是只能有极调速，因而调速的级数不可能多，因此只适用于不要求平滑调速的场合。

改变绕组的连接可以有多种形式，可以在定子上安装一套能变换为不同极对数的绕组，也可以在定子上安装两套不同极对数的单独绕组，还可以混合使用这两种方法以得到更多的转速。

第 1 章 三相异步电动机

应当指出的是，变极调速只适用于鼠笼式异步电动机，因为鼠笼转子的磁极对数能自动随定子绕组磁极对数变化而变化。

二、变频调速

异步电动机的变频调速是一种很好的调速方法。异步电动机的转速正比于电源的频率 f_1 ，若连续调节电动机供电电源的频率，即可连续改变电动机的转速。有关异步电动机变频调速的详细内容将在后面的章节中还要进行深入讨论。

三、变转差调速

分析电磁转矩公式（1—15）

$$T = K \frac{sU_1^2 R_2}{R_2^2 + (sX_{s12})^2}$$

可以看出，若保持转矩不变，当分别改变电源电压 U_1 和转子回路电阻 R_2 时，转差率 s 将改变，转差率的改变引起电动机转速的改变。所以通过改变转差率达到调速的目的。

调压调速 改变异步电动机定子电压的机械特性如图 1—19 所示。从图中可见 n_0 、 s_m 不变， T_{max} 随电压 U_1 的降低成平方的比例下降。对于负载转矩不变的情况（恒转矩负载）下，由负载线（图中平行纵坐标的直线）与不同电压下电动机机械特性的交点，可有以 a、b、c 点所决定的速度。不难看出，其调速范围很小，所以这种调速方法的调速范围是有限的，而且容易使电机过电流。

转子电路串电阻调速 这种方法只适用于绕线式异步电动机。对于恒转矩负载，当改变转子电阻时，可以调节电动机的转速（见图 1—20）。当转子电阻 R_2 增大时，电动机的转速降低。最大转矩 T_{max} 不变，特性变“软”，而且这种方法转子回路消耗功率较大，对节能不利。

由于变频器装置的广泛应用，以上两种调速方法将被逐渐淘汰。

1.1 三相异步电动机的构造

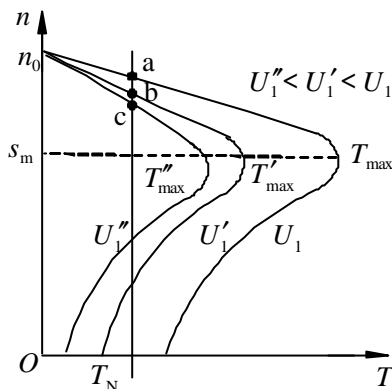


图 1—19 调压调速

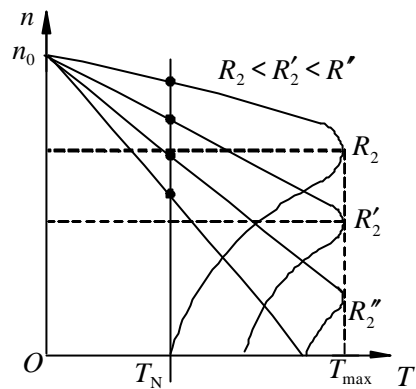


图 1—20 调节转子电阻 R_2 调速

1.4.3 三相异步电动机的制动

在一些工业应用中，要求电动机能够在很短的时间内停止运转，这就是电动机的制动工作状态。所谓制动是指电动机的转矩 T 与电动机转速 n 的方向相反时的情况，此时电动机的电磁转矩起制动作用，使电动机很快停下来。

一、 电源反接制动

若异步电动机正在稳定运行时，将其连至定子电源线中的任意两相反接，电动机三相电源的相序突改转变，旋转磁场也立即随之反向，转子由于惯性的原因仍在原来方向上旋转，此时旋转磁场转动的方向同转子转动的方向刚好相反。转子导条切割旋转磁场的方向也同原来相反，所以产生的感应电流的方向也相反，由感应电流产生的电磁转矩也同转子的转向相反，对转子产生强烈制动作用，电动机转速迅速下降为零，使被拖动的负载快速刹车（见图 1—21）。这时，需及时切断电源，否则电动机将反向起动旋转。

这种制动的特点是制动时在转子回路产生很大的冲击电流，从而也对电源产生冲击。为了限制电流，在制动时，常在鼠笼式电动机定子电路串接电阻限流。在电源反接制动下，电动机不仅从电源吸取能量，而且还从机械轴上吸收机械能（由机械系统降速时释放的动能转换而来）并转换为电能，这两部分能量都消耗在转子电阻上。

这种制动方法的优点是制动强度大，制动速度快。缺点是能量损耗大，对电机和电源产生的冲击大，也不易实现准确停车。

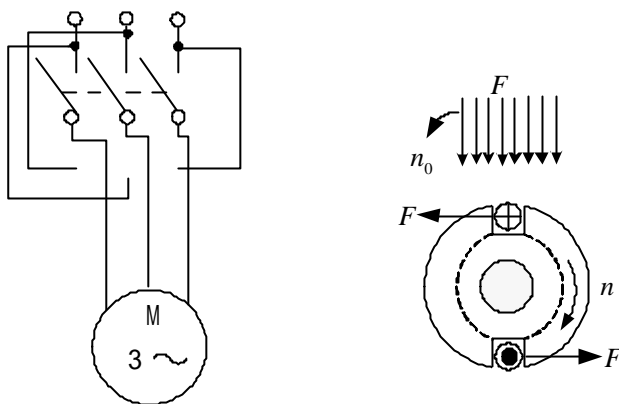


图 1—21 反接制动

二、能耗制动

使用异步电动机电源反接制动的方法来准确停车有一定困难，因为它容易造成反转，能耗制动则能较好地解决这个问题。

能耗制动方法就是在电动机切断三相电源同时，将一直流电源接到电动机三相绕组中的任意两相上（见图 1—22），使电动机内产生一恒定磁场。由于异步电动机及所带负载有一定的转动惯量，电动机仍在旋转，转子导条切割恒定磁场产生感应电动势和电流，与磁场作用产生电磁转矩，其方向与转子旋转方向相反，对转子起制动作用。在它的作用下，电动机转速迅速下降，此时机械系统存储的机械能被转换成电能后消耗在转子电路的电阻上，所以称能耗制动。

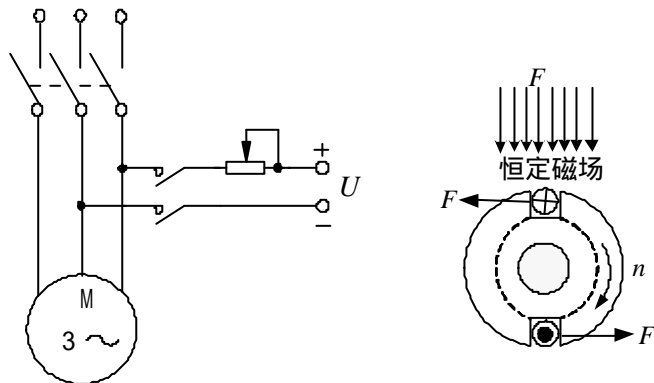


图 1—22 能耗制动

调节激磁直流电流的大小，可以调节制动转矩的大小。这种制动的特点是

可以实现准确停车，当转速等于零时，转子不再切割磁场，制动转矩也随之为零。

练习与思考

1.4.1 为什么异步电动机起动时，起动电流非常大，但起动转矩却不大？

1.4.2 异步电动机起动时，比较带载和空载两种情况下，起动电流和转矩是否一样大？

1.5 三相异步电动机的选用

1.5.1 三相异步电动机的类型

当我们根据工业应用的需要选用一台异步电动机时，常常发现有多种电机能够满足我们的要求。因此，我们必须做出选择。所以了解各种类型的三相异步电动机的构造和特性是十分有用的

我国异步电动机的制造现在已实现标准化，标准不仅仅体现在电机的外壳、支架尺寸、安装螺孔、轴系等，而且也涉及到电机的电气特性、机械特性和热特性。此外，还要满足一些最基本的要求，如：起动转矩、起动电流、过负载能力、以及温升等。

现在我国的异步电动机有五个主要系列，见表 1—2。

表 1—2 国产异步电动机主要系列

系 列 分 类	说 明	产 品 情 况
Y 系列	通用型异步电动机	全系列共 65 个规格，11 个机座号，19 个功率等级，0.55 ~ 90 千瓦
YX 系列	高效异步电动机	现已有两个机号 4 个规格。达到国际（美国西屋 MAC、法国 CEM、MZE）标准：起动转矩提高 20%
LZRYZ 系列	冶金起重异步电动机	共 11 个机座号，43 个规格
AQ ₂ 、BQ ₂ 、CQ ₂ 、DQ ₂ 系列	分马力异步电动机	四个系列共 8 个机组号，7 档中心高，64 个规格
YB 系列	防爆型异步电动机	11 个机座号，65 个规格

异步电动机种类繁多，除了上表给出的各种规格的异步电动机以外，还有一些特殊用途和性能的异步电动机。电动机的分类根据使用者的不同要求而各异，但是通常情况下按以下两个方面进行分类。

一、 根据运行环境分类

由于生产机械种类繁多，它们的工作环境也各不相同。所以设计和生产出了能运行在不同环境条件下的各种类型的异步电动机。

第 1 章 三相异步电动机

(1) 开启式电动机

这种类型的电动机在构造上无特殊防护装置,用于干燥无尘的场所。这种电动机散热效果良好。

(2) 全封闭式电动机

这种电动机具有全封闭式的外壳,既防水的滴溅又防粉尘等杂物。散热条件不如开启式电动机。

(3) 密闭式电动机

密闭式电动机的外壳严密封闭,有的密闭式电动机具有很好的防水性能(如潜水泵电机)。由于采用密闭结构,所以这种电动机的散热条件较差,所以多采用外部冷却的方式。

(4) 防爆电动机

这种电动机也采用密闭式结构。此外,电机骨架被设计成能够承受巨大的压力。能够将电机内部的火花、绕组电路短路,打火等完全与外界隔绝。这种电机用在一些高粉尘、有爆炸气体、燃烧气体环境的场合。

二、根据电气和机械特性分类

由于生产上的需要,设计和生产出了多种电气和机械性能不同的电动机,以适合不同的机械负载的工作要求。

(1) 普通起动转矩电动机

用于一般机械负载的起动。大部分的电动机都属于这个范畴。起动系数从 $0.7 \sim 1.3$ (从 $15\text{kW} \sim 150\text{kW}$)。一般情况下,起动电流不超过额定电流的 6.4 倍。这些电机用在一般的生产机械、驱动风扇、离心泵等等。

(2) 高起动转矩电动机

这种电动机用于起动条件非常差的场合,如水泵、活塞式压缩机等。这些负载要求电动机的起动转矩是负载额定转矩的二倍,但起动电流同样不超过额定电流的 6.4 倍。一般情况下,通常采用具有良好起动转矩特性的双鼠笼结构电动机。

(3) 高转差率电动机

运行速度通常为同步速度的 $85\% \sim 90\%$ 。这些电机适用加快大惯性负载的起动过程(像离心干燥机、大飞轮)。这种电动机的鼠笼条的电阻值较大,为

为了防止过热，这种电机常常在间歇工作状态下工作。这种随着负载的增加，速度下降较大的电动机也特别适合挤压和冲孔机械。

1.5.2 三相异步电动机的选择

在实际工作中，从技术的角度来考虑，选择一台异步电动机通常从以下几个方面进行。

一、 电机类型的选择

根据电动机工作的环境、工作性质和条件要求，合理地选择电动机的类型。

二、 功率的选择

功率的选择实际上也就是容量的选择，选择太大，容量没得到充分利用，既增加投资，也增加运行费用。如选得过小，电动机的温升过高，影响寿命，严重时，可能还会烧毁电动机。

对于长期运行（长时工作制）的电动机，可选其额定功率 P_N 等于或略大于生产机械所需的功率；对于短时工作制或重复短时制工作的电动机，可以选择专门为这类工作制设计的电动机，也可选择常时制电动机，但可根据间歇时间的长短，电动机功率的选择要比生产机械负载所要求的功率要小一些。

三、 转速的选择

异步电动机的速度由于受到电源频率和电动机旋转磁场极对数的限制，选择范围不大。一般电机的速度的选择依赖于所驱动的机械负载速度。对于速度较低的机械设备，宁可使用机械变速装置而选用速度较高的电动机，而不使用低速电动机进行直接驱动。使用变速箱有几个优点：对于给定的输出功率，高速电动机的价格和尺寸比低速电动机小的多，但其效率和功率因数却比较高；在相同的功率下，高速电动机的起动转矩要比低速电动机大得多。

在不要求速度平滑变化的场合，可以选用双速和多速电动机。鼠笼式电动机根据定子绕组连接上的变化使旋转磁场的极对数改变，可以得到多种速度。

同单速来比，双速电机的功率因数和效率都相对低一些。对于两种不同的速度，电机可以设计成具有相同的功率和转矩；也可设计成不同的功率和转矩。

双速电动机的速度比一般是 2:1。如果用这种速度比的电机用来驱动风扇，这个比值就太大了，原因是风扇的功率是随速度的平方而变化。一般情况下，速度下降一半，功率要下降 1/8。为了解决这个问题，一些三相异步电机的绕组

第 1 章 三相异步电动机

被设计成低速比的绕组，像 8/10，14/16，26/28，38/46 等。这样，当速度变化时，电机的功率变化的幅度就比较小了。

四、电压的选择

电动机电压等级的选择，要根据电动机的类型，功率以及使用地点的电源电压来决定。Y 系列鼠笼式电动机的额定电压只有 380V 一个等级。只有大功率的电动机才采用 3 000V 和 6 000V 的电压。

五、极端的工作条件的影响

上面是选用异步电动机的一般原则。但是在实际工程实践中，除了考虑电动机正常工作的一方面作为选择电动机的主要依据外，有时也要把电动机极端工作条件的因素考虑进去。对于异步电动机而言，极端的工作条件主要来自机械过载和电网电压波动：

标准的异步电动机可以在短时间承受两倍的机械过载，但过载时间过长会引起电机过热，过热会损坏电动机的绝缘并影响电动机的使用寿命。一些开启式电动机可以承受 15% 的过载，容许比额定负载时的温度高 10[°]。在特殊、紧急的情况下，在空气流通条件较好时，开启式电动机可过载 25%。但是并不鼓励这样做，虽然电机的外部温度不高，然而电机内部绕组的温度还是很高的。

由于异步电动机的转矩同电源电压的平方成正比，因此如果定子电压减少 10%，电磁转矩几乎近似下降 20%。异步电动机有非常大的起动电流，在电源线上产生较大的压降，所以定子电压下降往往发生在电动机起动的时候，由此所产生的结果是起动转矩小于负载转矩，电动机根本起动不起来。这样，持续流入定子绕组的大电流，会使定子绕组过热而烧毁电动机。另一方面，当电动机在额定负载情况下旋转运行时，如果电源电压过高，则每极下的磁通将增大，这将引起电动机的铁损和激磁电流加大，因而引起电动机的温度上升，功率因数降低。如果三相电压不平衡，将引起三相电流不平衡，最终导致定子铁心和转子铁心的铁损增加，使电动机的温度上升。如果三相电源的不平衡度为 3.5%，大约使电动机温度升高 15[°]。所以三相电源的线电压的不平衡度不能超过 2%。

这些问题，在选择电动机时，都应加以重视。只有这样全面考虑了各方面的因素，才能对电动机做出合理、正确的选择。

1.1 三相异步电动机的构造

以上的叙述，只是选择异步电动机的一般原则，更详细、具体的内容，请读者参考机电工程设计方面的书籍，这里就不再赘述了。

1.5.3 三相异步电动机的铭牌数据

正确地选择异步电动机，就要详细了解电动机的铭牌数据，电动机铭牌提供了许多有用的信息，因为根据铭牌数据我们可以了解到有关这个电动机的结构、电气、机械等性能参数，所以要正确地选择和使用电动机，就必须看懂电动机铭牌。下面以 Y180 - 4 型电动机为例，来说明铭牌上各个数据的意义。

三相异步电动机			
型号	Y180M - 4	功率	18.5kW
		频率	50Hz
电压	380V	电流	35.9A
		接法	
转速	1470r/min	绝缘等级	E
		功率因数	0.86
效率	0.91	温升	60
		工作方式	连续
出厂编号 × × × × × 出厂日期 × × × × × × × × × × × 电机厂			

一、 型号

关于型号每一项说明如下

Y——三相异步电动机；132——机座中心高（mm）；M——机座长度代号；4——磁极数（ $P = 2$ ）。

二、 功率与效率

铭牌上所标的功率值是指电动机在额定运行时轴上输出的额定机械功率 P_N 。一般总有人把它误认为电动机从电网输入的电功率。这两个功率并不相等，其差值等于电动机本身的损耗功率，包括铜损、铁损及电动机轴承等的机械损耗等。所谓效率就是电动机铭牌上给出的功率同电动机从电网输入电功率的比值。

三、 频率

这里指电网电压的频率，在我国是工频 50Hz。

四、 电压

铭牌上所标的电压是指电动机在额定运行时定子绕组上加的额定线电压

第 1 章 三相异步电动机

值。

五、 电流

铭牌所标的电流值是指电动机在额定运行时定子绕组的额定线电流值。当电动机空载或轻载时，都小于这个电流值。

六、 功率因数

因为电动机是电感性负载，定子相电流比定子相电压滞后一个 j 角， $\cos j$ 就是电动机的功率因数。

三相异步电动机功率因数较低，在额定负载时约为 0.7~0.9，而在轻载和空载时更低，空载时只有 0.2~0.3。因此，必须正确选择电动机的容量，使电动机能保持在满载下工作。

七、 转速

铭牌所给出的转速是指电动机在额定负载下的额定转速。

八、 接法

表示电动机在额定电压下定子三相绕组的连接方法。一般电动机定子三相绕组的首、尾端均引至接线板上，国家标准规定用符号 U_1 、 V_1 、 W_1 分别表示电动机三相绕组线圈的首端（旧标号是 D_1 、 D_2 、 D_3 ），用符号 U_2 、 V_2 、 W_2 分别表示电动机三相绕组线圈的尾端（旧标号是 D_4 、 D_5 、 D_6 ）。电动机的六个线头可以接成 Y 形和 Δ 形，如图 1—23 所示。但必须按铭牌所规定的接法连接，才能正常运行。

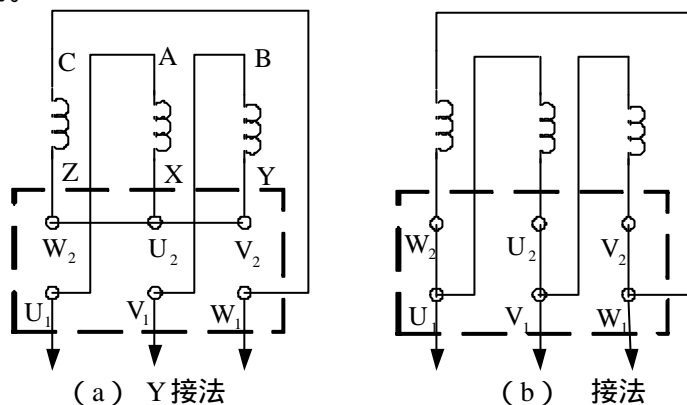


图 1—23 接线盒的接法

九、 工作方式

这一项是指电动机工作在连续工作制，还是短时或断续工作制。若标为

1.1 三相异步电动机的构造

连续表示电动机可在额定功率下连续运行，绕组不会过热；若标为短时表示电动机不能连续运行，而只能在规定的时间内依照额定功率短时运行，这样不会过热；若标为断续表示电动机的工作是短时的，但能多次重复运行。

十、 绝缘等级、温升

绝缘等级是指电动机所采用的绝缘材料的耐热等级。绝缘材料按其耐热的程度来划分，可分为 A、B、C、D、E、F、H 级。电动机的温度对绝缘影响很大。如电动机温度过高，则会使绝缘老化，缩短电机寿命。如果温度超过很多，甚至使绝缘全部破坏。绝缘等级越高，耐热能力就越强。

为使绝缘不致老化，对电动机绕组温度做了一定的限制。异步电动机的温升是指定子铁心和绕组温度高于环境温度的允许温差。

十一、 额定转速

额定转速是电动机在额定电压、额定容量、额定频率下运行时每分钟的转

例题 1—4

数。电动机所带负载不同转速略有变化。轻载时稍快，重载时稍慢些。如果是空载，接近同步转速。

有一三相异步电动机，其铭牌给出额定数据为： $P_N = 7.5\text{kW}$ ， $n_N = 1470\text{r/min}$ ， $U_1 = 380\text{V}$ ， $\eta = 86.2\%$ ， $\cos \varphi = 0.81$ 。试求：（1）额定电流；（2）额定转差率；（3）额定转矩；（4）若该电机的 $T_{\text{st}}/T_N = 2.0$ ，在额定负载下，电动机能否采用 Y/ 方法起动？

【解】（1）额定电流

$$I_N = \frac{P_N}{\eta \sqrt{3} U_1 \cos \varphi} = \frac{7.5 \times 10^3}{0.862 \times \sqrt{3} \times 380 \times 0.81} \text{ A} = 16.3 \text{ A}$$

（2）由 $n = 1470\text{r/min}$ 可知，其极对数 $P = 2$ ，同步转速 $n_0 = 1500\text{r/min}$ ，所以

$$s_N = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0.02$$

（3）额定转矩

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n} = 9550 \frac{7.5}{1470} \text{ N.m} = 107.2 \text{ N.m}$$

(4) 星形接法时的起动转矩是三角形接法时起动转矩的三分之一, 即

$$T_{stY} = \frac{T_{st\Delta}}{3} = 2.0T_N / 3 = \frac{2.0 \times 48.7}{3} \text{ N}\cdot\text{m} = 32.47 \text{ N}\cdot\text{m}$$

此时, 电动机星形接法时的起动转矩小于负载转矩 48.7N.m, 故不能采用星三角方法起动。

练习与思考

1.5.1 如何正确地选择一台异步电动机?

1.5.2 如果把星形连接的三相异步电动机误作三角形连接或把三角形连接的三相异步电动机误作星形连接, 其后果如何? 其电流、功率、转矩有何不同?

1.5.3 某三相异步电动机铭牌标出的电源电压为 380/220, Y/ 接法。试问当电源电压分别为 380V 和 220V 时, 各应采取什么接法? 在这两种情况下, 它们的额定电流是否相同? 输出功率是否相同?

1.6 单相电动机

单相电动机是由单相交流电源供电的一种感应式电动机。由于使用方便, 故在家用电器和医疗器械中得到广泛应用。但与同容量的三相感应电动机相比, 单相电动机的体积较大, 运行性能差, 因此只做成几十到几百瓦的小容量电机。

1.6.1 单相电动机的转动原理

从构造上来看, 单相电动机和鼠笼式异步电动机差不多。转子也是鼠笼结构, 定子也是嵌放在定子槽内。所不同的是三相电动机有三相绕组, 而单相电动机只有一相绕组。

三相电动机的定子绕组通过对称三相电流时, 会在定子空间产生一个旋转磁场, 旋转磁场切割转子的鼠笼导条, 在导条中产生感应电流, 感应电流同磁场作用而产生电磁转矩使电动机旋转起来。

由于单相电动机只有一相绕组, 当绕组通过正弦交流电时, 在交流电的正半周期间, 产生的磁场从零到最大值, 又从最大值到零按正弦规律进行变化。在交流电的负半周期间, 磁场的方向与正半周时相反, 同样, 产生的磁场从零到负的最大值, 又从负最大值到零按正弦规律进行变化, 这样的磁场称为脉动磁场。也就是说脉动磁场的空间轴线不变化, 只是磁场随交流电流的变化在方向上和强弱按正弦规律进行变化, 并不旋转。既然磁场不旋转, 在转子上不能

产生感应电流，也就不能产生电磁转矩，所以电动机也就不能够旋转了。

下面换个方式再来说明这个问题。当单相感应电动机的定子绕组接入电源时，绕组就会产生一个脉动磁势。我们可以把这个不旋转的脉动磁势分解成两个大小相等，旋转方向相反、旋转速度相同的磁势 F_F 和 F_b ，这就是双旋转磁场理论，如图 1—24 所示。

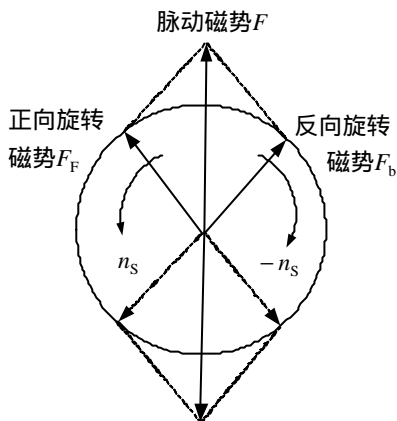


图 1—24 分解脉动磁势

这两个旋转磁场分别切割转子鼠笼导条，在导条上分别产生各自的感应电流，由此又产生各自的电磁转矩。由于两个旋转磁势大小相同，转速相同，但转动方向相反。所以产生的两个感应电流也大小相同，方向相反。由此分别产生的电磁转矩也大小相同，方向相反。所以作用在电动机转子上的合成转矩为零，电动机静止不动。也就是说，单相电动机的起动转矩等于零，这是它的特点，也是一个缺点。

如果借助一个外力（机械力），把转子沿不论哪个方向转动一下，那么电动机就会沿这哪个方向起动，继续旋转下去。这是因为转子不论在哪个方向转起来，这时两个旋转磁场对转子的相对转速就发生了变化，其中的一个旋转磁场相对转子的转速变小了（不难想象，这是指和转子旋转方向相同的那个旋转磁场），另一个旋转磁场相对转子的转速变大了，这样，转子上的感应电流的平衡被打破，在两个方向上产生的电磁转矩也就不相等了，因此电动机就沿着起动的方向旋转起来了。

1.6.2 单相电动机的起动方法

从前面的分析可知，单相电动机无起动转矩。为了产生一个旋转磁场，在

定子上另装一个空间位置不同于主绕组的起动绕组，而且起动绕组的电流在时间相位上也不同于主绕组。常用的方法分裂相法和罩极法。

一、裂相法（电容分相法）

图 1—25 所示的为裂相法式异步电动机的接线原理图；图 1—26 为主绕组和起动绕组电流波形。

定子绕组由空间上相差 90° 的主绕组 AX 和起动绕组 BY 构成。为了使起动绕组的电流相位与主绕组电流相位相差 90° ，通常在起动绕组回路中串联一个电容器 C。其目的是在定子空间产生一个旋转磁场，使电动机起动旋转。

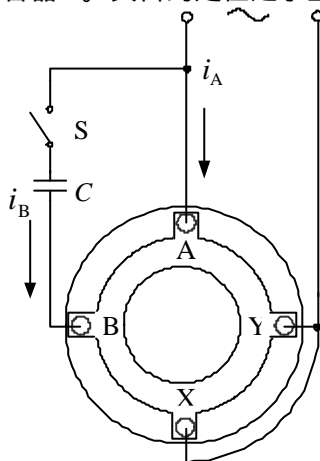
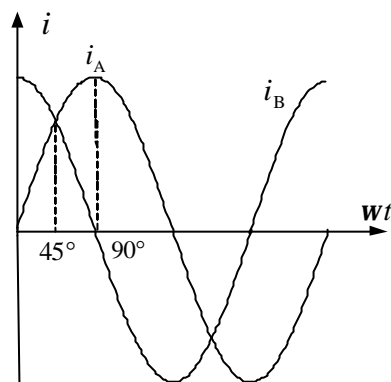


图 1—25 裂相式单相电动机图



1—26 主绕组和起动绕组电流波形

形

和分析三相旋转磁场的方法一样，在空间位置相差 90° ，流过电流相位差 90° 的两个绕组，也同样能产生旋转磁场（见图 1—27）。

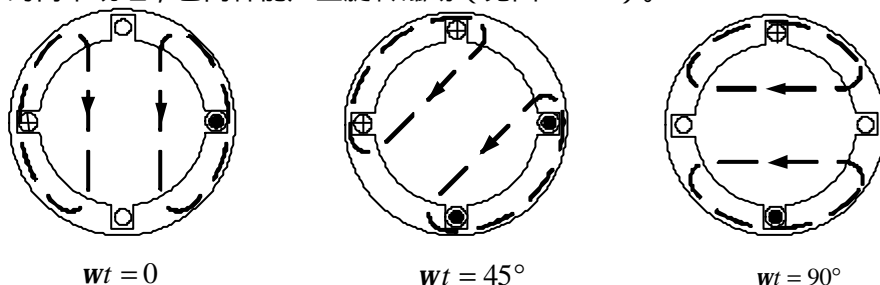


图 1—27 起动时的单相电动机旋转磁场

在此旋转磁场的作用下，鼠笼式转子将跟着一起转动。电动机启动后，当转速达到额定值时，串在起动绕组 BY 支路的离心开关 S 断开，电动机就处于单相运行了。

欲使电动机反转，不能像三相异步电动机那样掉换两根电源线来实现，需把起动电容串入主绕组支路，电动机将在与原来相反方向上旋转。

二、罩极式单相电动机

罩极式单相电动机的定子多做成凸极式。结构如图 1—28 所示。在磁极一侧开一小槽，用短路铜环套在磁极的窄条一边上。每个磁极的定子绕组串联后接单相电源。当将电源接通时，磁极下的磁通分为两部分：即 F_1 与 F_2 。由于短路铜环的作用，罩极下的 F_1 与在短路环下的 F_2 之间产生了相位差，于是气隙内形成的合成磁场将是一个有一定推移速度的移行磁场，使电动机产生一定的起动转矩。

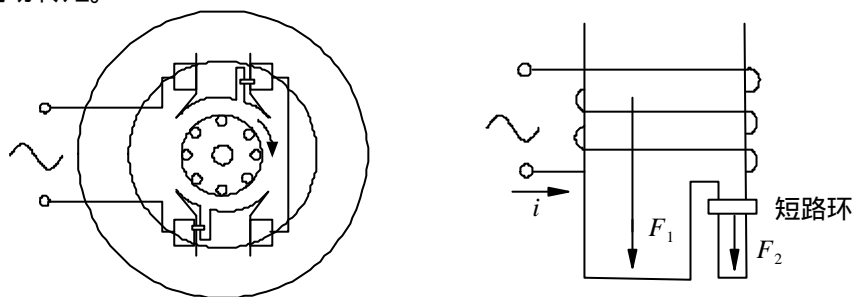


图 1—28 罩极式感应电动机

罩极法得到的起动转矩较小，但因结构简单，故多用于小型家用电器中。

单相电动机运行时，气隙中始终存在着反转的旋转磁场，使得推动电机旋转的电磁转矩减少，过载能力降低。同时反转磁场还会引起转子铜耗和铁损的增加，因此，单相电动机的效率和功率因数都比三相异步电动机低。

下面讨论一下三相电动机缺相运转的问题。三相电动机接到电源的三根导线中，若由于某种原因断开一根，此时的三相电动机即为缺相运行状态。同单相电动机运行的原理一样，电动机还会继续旋转。如果在启动时就少了一相，则电动机不能启动。

电动机处于缺相运行状态时，如果电动机满负荷运行，这时其余两根线的电流将成倍增加，从而引起电动机过热，长时间运行使电动机烧毁。异步电动

第 1 章 三相异步电动机

机缺相运行对机械特性也产生了严重影响，最大转矩 T_{\max} 下降了大约 40%，起动转矩 T_{st} 等于零。如果电动机满负荷运行，此时电机有可能停车，这时电流将进一步加大，若没有过流继电器和过热继电器的保护，将加快电机的损毁。

本章习题

【习题 1.1】有一台三相异步电动机，其额定转速 $n = 975\text{r/min}$ ，试求电动机的磁极对数和在额定负载下的转差率（电源频率 $f_1 = 50\text{Hz}$ ）。

【习题 1.2】异步电动机转子不动或旋转时，转子绕组中的电动势和阻抗有何变化？转子不动时，定子绕组长期加额定电压将有什么现象？

【习题 1.3】有 Y112M - 2 型和 Y160M1 - B 型异步电动机各一台，其额定功率都是 4kW，但前者额定转速为 2890r/min，后者为 720r/min，试比较它们的额定转矩，并由此来说明电动机的极对数、转速和转矩之间的关系。

【习题 1.4】三相异步的数据铭牌如下：电压：220V/380V、接法：/Y、功率：3kW、转速：2960r/min、功率因数：0.88、效率：0.86。回答下列问题：

(1) 若电源的线电压为 220V 时，定子绕组应如何连接？ I_N 、 T_N 应为多少？

(2) 若电源的线电压为 380V 时，定子绕组应如何连接？ I_N 、 T_N 应为多少？

【习题 1.5】某异步电动机的额定功率为 15kW，额定转速为 970r/min，频率为 50Hz，最大转矩 $T_{\max} = 295.36\text{N}\cdot\text{m}$ ，试求电动机的过载系数。

【习题 1.6】有一 Y225M - 4 型三相异步电动机，其额定数据如下表所示。试求：(1) 额定电流 I_N ；(2) 额定转差率 s_N ；(3) 额定转矩 T_N 、最大转矩 T_{\max} 、起动转矩 T_{st} 。

功率	转速	电压	频率	功率因数	I_{st}/I_N	T_{st}/T_N	T_{\max}/T_N
45 kW	1 480r/min	380V	50Hz	0.88	7.0	1.9	2.2

【习题 1.7】在上题中：(1) 如果负载转矩为 510.2N·m，试问在 $U = U_N$ 和 $U' = 0.9U_N$ 两种情况下电动机能否起动？(2) 采用 Y - 变换起动时，求起动电流和起动转矩。又当负载转矩为额定转矩 T_N 的 80% 和 50% 时，电动机能否起动？

【习题 1.8】对上题的电动机采用自耦降压起动，设起动时的端电压降到电源电压的 64%，求线路的启动电流和起动转矩。

【习题 1.9】异步电动机有几种调速方法？各种调速方法有何优缺点？

【习题 1.10】异步电动机有那几种制动方法？各有何特点？

【习题 1.11】三相异步电动机断了一根电源线后，为什么不能起动？而在运行中断了一根线，为什么仍能转动？这两种情况对电机有什么影响？

1.1 三相异步电动机的构造

【习题 1.12】如何改变单相电容电动机的转向？罩极式电动机的转向能否改变？