

第 4 章 交流电动机的工作原理及特性

电机，是利用电磁感应原理实现电能与机械能相互转换设备的总称。电机按能量转换方式分为发电机和电动机，前者将机械能转换为电能，后者实现将电能转换为机械能。

电动机分为直流电动机和交流电动机。交流电动机具有结构简单、运行可靠、价格低廉等优点，且因采用工业交流电源，受到工业生产应用的青睐。随着交流电机控制和调速技术的提高与完善，交流电机越来越被广泛地用到生产生活的各个领域。

4.1 三相异步电动机的结构和工作原理

4.1.1 三相异步电动机的基本结构

三相异步电动机的两个基本组成部分为定子(固定部分)和转子(旋转部分)，此外还有端盖、风扇等附属部分。三相交流电动机结构示意图如图 4.1 所示。

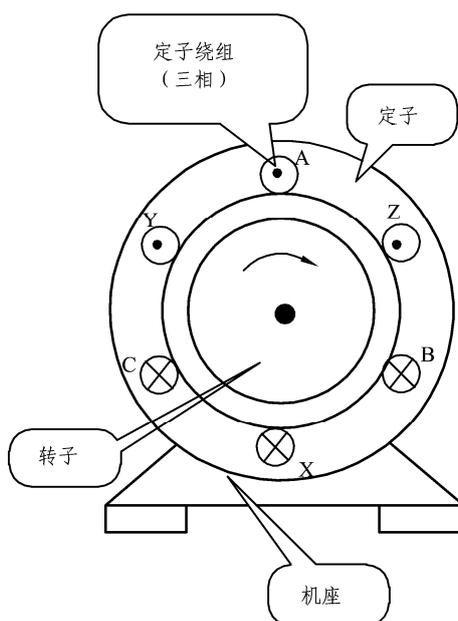


图 4.1 三相交流电动机的结构示意图

1. 定 子

三相异步电动机的定子由定子铁心、定子绕组和机座三部分组成。定子铁心由相互绝缘的导磁硅钢片叠成，硅钢片内圆上有均匀分布的槽，其作用是嵌放定子三相绕组 AX、BY、CZ。定子绕组是用漆包线绕制好的，对称地嵌入定子铁心槽内的相同的线圈。这三相绕组可接成星形或三角形。机座用于固定定子铁心及端盖，具有较强的机械强度和刚度。

2. 转 子

三相异步电动机的转子由转子铁心、转子绕组和转轴组成。转子铁心也是磁路的一部分，由相互绝缘的硅钢片叠成，硅钢片外圆上有均匀分布的槽，其作用是嵌放转子三相绕组。根据绕组结构的不同，转子绕组有笼式与绕线之分，笼式转子铁心的每个槽内插入一根裸导条，形成一个多相对称短路绕组。绕线转子绕组为三相对称绕组，嵌放在转子铁心槽内。

3. 气 隙

异步电动机的气隙是均匀的，大小为机械条件所能允许达到的最小值。

4.1.2 三相异步电动机的旋转磁场

三相异步电动机旋转的先决条件是具有一个旋转磁场，而旋转磁场则是在电动机定子绕组线圈里通以三相交流电产生的总磁场。

1. 旋转磁场的产生

三相定子的连接方式分为星形和三角形。不失一般性，以星形连接方式为例，最简单三相定子绕组 AX、BY、CZ 连接如图 4.2 所示，它们与三相电源 U、V、W 相连，定子绕组在空间按互差 120° 的规律对称排列（相序为 A—B—C）。则三相定子绕组便通过三相对称电流。随着电流在定子绕组中通过，在三相定子绕组中会产生旋转磁场（见图 4.3）。

$$\begin{cases} i_U = I_m \sin \omega t \\ i_V = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_W = I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

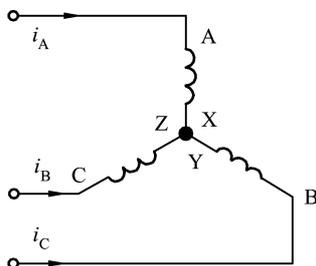


图 4.2 三相异步电动机定子接线

当 $\omega t = 0$ 时, $i_A = 0$, AX 绕组中无电流; i_B 为负, BY 绕组中的电流从 Y 流入 B 流出; i_C 为正, CZ 绕组中的电流从 C 流入 Z 流出; 由右手螺旋定则可得合成磁场的方向如图 4.3 (a) 所示。

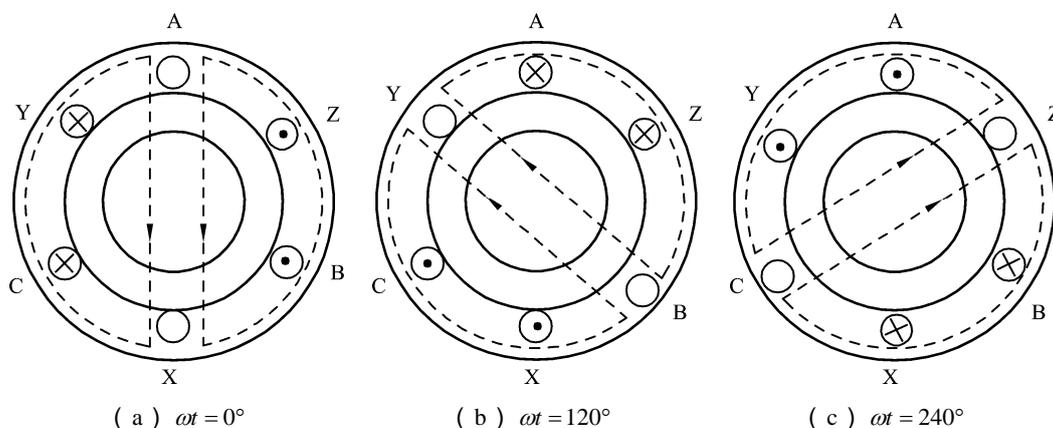


图 4.3 旋转磁场的产生

当 $\omega t = 120^\circ$ 时, $i_B = 0$, BY 绕组中无电流; i_A 为正, AX 绕组中的电流从 A 流入 X 流出; i_C 为负, CZ 绕组中的电流从 Z 流入 C 流出; 由右手螺旋定则可得合成磁场的方向如图 4.3 (b) 所示。

当 $\omega t = 240^\circ$ 时, $i_C = 0$, CZ 绕组中无电流; i_A 为负, AX 绕组中的电流从 X 流入 A 流出; i_B 为正, BY 绕组中的电流从 B 流入 Y 流出; 由右手螺旋定则可得合成磁场的方向如图 4.3 (c) 所示。

当定子绕组中的电流变化一个周期时, 合成磁场按电流的相序方向在空间旋转一周, 当定子绕组中的三相电流作周期性变化时, 产生的合成磁场构成旋转磁场。

2. 旋转磁场的方向

由上述分析可知, 当定子绕组相序由 A—B—C—A 周期变化时, 旋转磁场亦按照 AX—BY—CZ—AX 方向旋转变换, 即旋转磁场的方向与三相定子绕组中电流相序一致。

同理, 若改变转子旋转方向, 即改变旋转磁场的方向, 只需改变通入定子绕组的电流相序, 即将三相电源线中的任意两根对调。如将定子绕组电流相序改为 A—C—B—A (BC 对调或 AB 对调结果, CA 对调同理), 则旋转磁场方向亦改变为 AX—CZ—BY—AX, 此时, 转子的旋转方向也跟着改变, 三相异步电动机的旋转方向亦跟着改变。工业中三相交流电动机正反转控制即常采用此法, 这在后续章节将有更详细的介绍。

4.1.3 三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机的工作原理，是当电动机的三相定子绕组（各相差 120° 电角度），通入三相对称交流电后，将产生一个旋转磁场，该旋转磁场切割转子绕组，从而在转子绕组中产生感应电流（转子绕组是闭合通路），载流的转子导体在定子旋转磁场作用下将产生电磁力，从而在电机转轴上形成电磁转矩，驱动电动机旋转，并且电机旋转方向与旋转磁场方向相同。

将 4-3 图中磁场与转子简化，如图 4.4 所示，设转子绕组导体静止，三相定子绕组中旋转磁场的旋转方向为逆时针方向，则旋转磁场与转子导体产生相对运动，转子绕组切割磁力线而在其内部产生感应电动势与感应电流（如图 4.4 中小圆圈内所标方向）。转子绕组感生电流会受到磁场作用的磁场力，根据电磁感应楞次定律和左手定理，转子绕组会在磁场力作用下，跟随磁场方向逆时针旋转，从而相对转轴产生电磁转矩（磁力矩）。

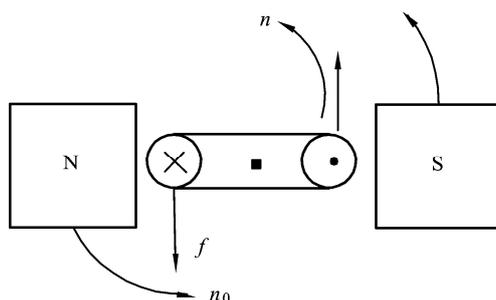


图 4.4 交流电动机工作原理示意图

转子受旋转磁场拖动而旋转，转子旋转速度 (n) 恒小于定子磁场旋转速度（即同步转速 n_0 ），若两种速度相等，则不存在相对运动，转子绕组不切割磁力线，导体内不会产生感应电动势与感生电流，即不会产生电磁转矩的动力。此时，转子受阻力（摩擦或负载）作用，逐渐减速，使得 $n < n_0$ 。当电磁力矩与阻力矩平衡时，转子匀速转动，故转子与旋转磁场之间存在的转速差是保证转子旋转的主要因素。由于三相异步电动机正常运转时，存在 $n < n_0$ ，所以把这类电动机称为异步电动机。

旋转磁场的同步转速与转子转速的差 ($n_0 - n$) 与同步转速 n_0 的比值，称为异步电动机的转差率，即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (4.1)$$

式中， s 为转差率。异步电动机正常使用时，电动机转速略小于但接近同步转速，额定转差率一般小于 5%。

4.2 异步电动机的额定参数

4.2.1 定子绕组的连接方式

1. 两种接法

定子绕组的首端和末端通常都接在电动机接线盒的接线柱上，一般按图 4.5 所示的方法排列。

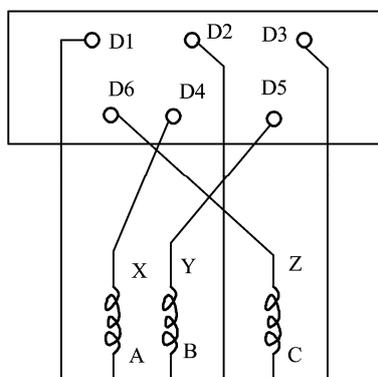


图 4.5 出线端的排列

按照我国电工专业标准规定：定子绕组出线端的首端为 D1、D2、D3，末端为 D4、D5、D6。

三相电动机的定子绕组有星形（Y形）和三角形（ Δ 形）两种不同的接法，如图 4.6、图 4.7 所示。

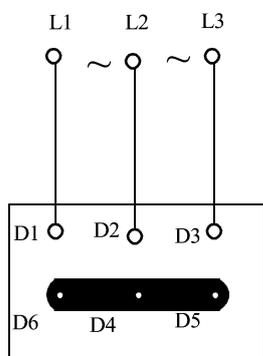


图 4.6 星形接法

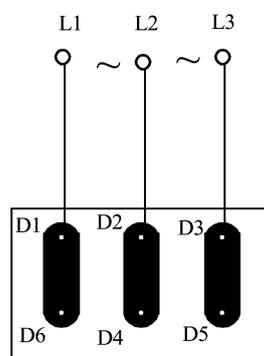
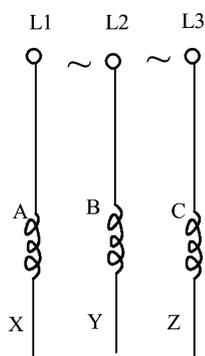
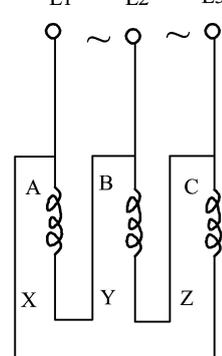


图 4.7 三角形接法



2. 线电压与相电压

线电压：两相绕组首端之间的电压，用 $U_{\text{线}}$ 表示；

相电压：每相绕组首、尾之间的电压，用 $U_{\text{相}}$ 表示。

对于星形接法： $U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}}$

对于三角形接法： $U_{\text{线}} = U_{\text{相}}$

3. 线电流与相电流

线电流：电网的供电电流，用 $I_{\text{线}}$ 表示；

相电流：每相绕组的电流，用 $I_{\text{相}}$ 表示。

对于星形接法： $I_{\text{线}} = I_{\text{相}}$ ；

对于三角形接法： $I_{\text{线}} = \sqrt{3}I_{\text{相}}$ 。

4. 电动机的输入功率

$$P_{\text{线}} = \sqrt{3}I_{\text{线}}U_{\text{线}}\cos\varphi$$

5. 定子绕组连线方法的选用

定子三相绕组的连接方式（Y 形或 Δ 形）的选择，和普通三相负载一样，须视电源的线电压而定。

如果电源的线电压等于电动机的额定相电压，那么，电动机的绕组应该接成三角形；如果电源的线电压是电动机额定相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，那么，电动机的绕组就应该接成星形。

通常电动机的铭牌上标有符号 Δ/Y 和数字 220/380，前者表示定子绕组的接法，后者表示对应于不同接法应加的线电压值。

例：电源线电压为 380 V，现有两台电动机，其铭牌数据如下，试选择定子绕组的连接方式。

（1）J32-4，功率 1.0 kW，连接方法 Δ/Y ，电压 220/380 V，电流 4.25/2.45 A，转速 1 420 r/min，功率因数 0.79。

（2）J02-21-4，功率 1.1 kW，连接方法 Δ ，电压 380 V，电流 6.27 A，转速 1 410 r/min，功率因数 0.79。

解：J32-4 电动机应接星形（Y），如图 4.8（a）所示；

J02-21-4 电动机应接成三角形（ Δ ），如图 4.8（b）所示。

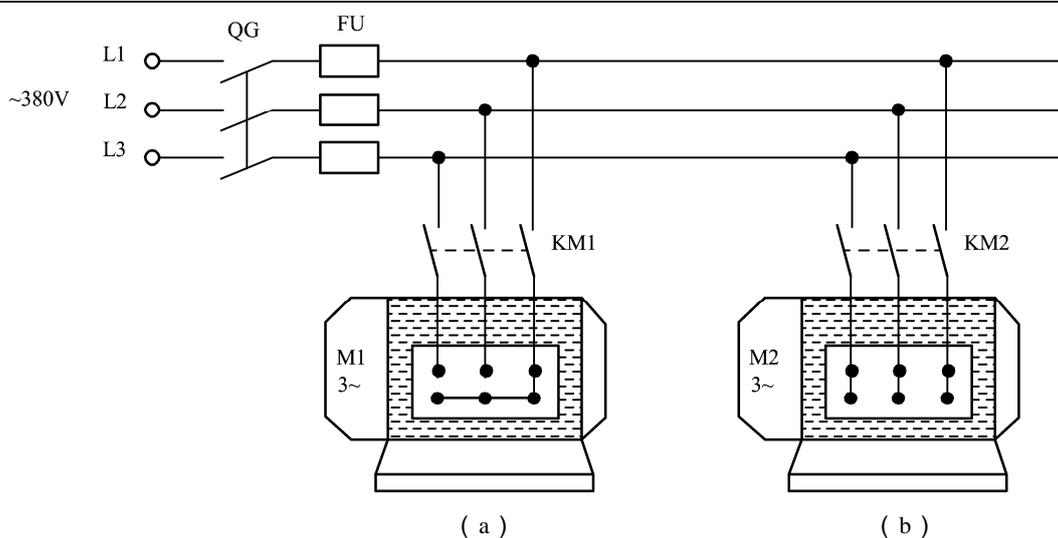


图 4.8 Y-Δ接法应用电路图

4.2.2 三相异步电动机的额定参数

电动机通常用额定值表示其额定运行条件,这些数据大部分都标明在电动机的铭牌上。

1. 额定功率 P_N

在额定运行情况下,电动机轴上输出的机械功率。

$$P_N = \eta_N P_{1N} \quad (4.2)$$

输出功率的一般表达式为

$$P_2 = \eta P_1 \quad (4.3)$$

式中 η ——机械效率;

P_1 ——输入功率;

P_2 ——输出功率。

输出功率和输出转矩的关系为

$$T_2 = 9.55 \frac{P_2}{n} = K_M \Phi I_2 \cos \varphi \quad (4.4)$$

其中, I_2 为转子电流。

2. 额定电压 U_N

在额定运行情况下,定子绕组端应加的线电压值。

亦有铭牌标注两种电压值(如 220/380 V),这表明定子绕组采用 Δ/Y 连接时应加的线电压值。

即:三角形接法时,定子绕组应接 220 V 交流电源;星形接法时,定子绕组应接 380 V 交流电源电压。

3. 额定频率 f

在额定运行情况下,定子外加电压的频率,即为额定频率。我国规定的交流电工频为

$$f = 50 \text{ Hz}$$

4. 额定电流 I_N

在额定频率、额定电压和轴上输出额定功率时,定子的线电流值。

亦有铭牌标注两种电流值(如 10.35/5.9 A),则对应于定子绕组为 Δ/Y 连接的线电流值。

即:三角形接法时,定子电流为 10.35 A;星形接法时,定子电流为 5.9 A。

5. 额定转速 n_N

在额定频率、额定电压和电动机轴上输出额定功率时,电动机的转速即为额定转速。

与额定转速相对应的转差率称为额定转差率 s_N 。

一般不在电动机铭牌上标注的几个额定值如下:

(1) 额定功率因数 $\cos \varphi_N$: 在额定频率、额定电压和电动机轴上输出额定功率时,定子相电流与相电压之间相位差的余弦。

(2) 额定效率 η_N : 在额定频率、额定电压和电动机轴上输出额定功率时,电动机输出机械功率与输入电功率之比,其表达式为

$$\eta_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N I_N \cos \varphi_N} \times 100\% \quad (4.5)$$

(3) 额定负载转矩 T_N : 电动机在额定转速下输出额定功率时轴上的负载转矩。

(4) 线绕式异步电动机转子静止时的滑环电压和转子的额定电流。

通常手册上给出的数据就是电动机的额定值。

4.2.3 三相异步电动机的能流图

三相异步电动机稳定运行时,从电源输入的电功率为 $P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1$,其中, U_1 、 I_1 、 $\cos \varphi_1$ 分别为定子绕组的线电压、线电流和功率因数。在三相异步电动机运行时,电源输入电功率等于定子绕组铜损耗、铁损耗和驱动转子旋转的电磁功率之和。其中,定子绕组铜损耗为 $P_{Cu1} = \sqrt{3}I_1^2 r_1$,定子铁心损耗为 $P_{Fe} = \sqrt{3}I_1^2 r_m$,转子铜损耗为 $P_{Cu2} = \sqrt{3}I_2^2 r_2$ 。铁损耗包括磁

滞损耗和涡流损耗，电动机正常运行时转子电势频率很低，铁耗主要集中在定子中，转子铁耗可以忽略。

则转子电磁功率为

$$P = P_1 - P_{\text{Cu}1} - P_{\text{Fe}} \quad (4.6)$$

总机械功率为

$$P_m = P - P_{\text{Cu}2} \quad (4.7)$$

转子铜损耗与电磁功率的关系为 $P_{\text{Cu}2} = sP$ 。转子铜损与转差率有关，转差率越大，铜耗越大，电动机正常运行时， s 不大，铜耗也不大。

轴承以及风机等摩擦阻转矩，也要损耗一部分功率，用 P_T 表示，定、转子开槽和定、转子磁动势中的谐波磁动势等产生的损耗用 P_s 表示，则异步电动机的能流图如图 4.9 所示。

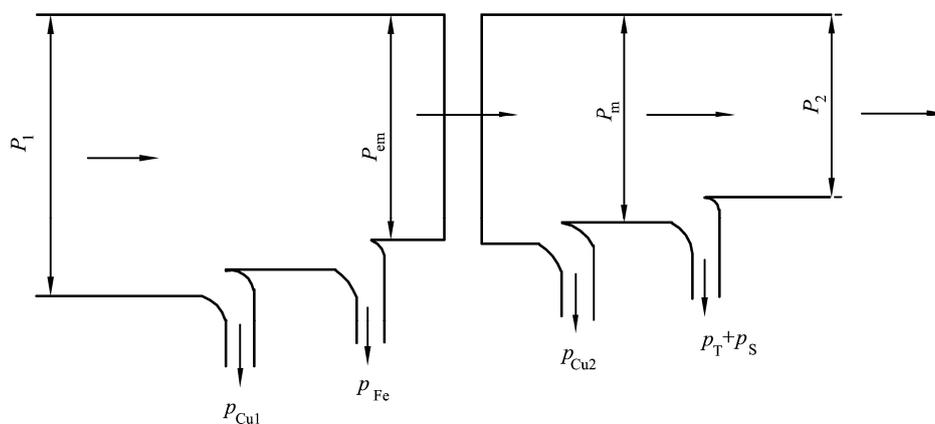


图 4.9 异步电动机能流图

电动机的输出（机械）功率为 $P_2 = P_m - P_T - P_s = P_m - \Delta P_m$ ，即是异步电动机铭牌上标注的功率额定值。若忽略转子铜耗、机械损耗 ΔP_m ，则有

$$P_2 = T_2 \omega \approx T \omega \quad (4.8)$$

其中， T 为电动机的电磁转矩， T_2 为电动机轴上的输出转矩。