

电 工 学

下 册

北京工业学院 沈世锐 主编

*

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷二厂印 装

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.75 千字 353

1985年3月第1版 1985年7月第1次印刷

印数 1—153,000

书号: 13300,30 定价: 2.30 元

目 录

第七章 异步电动机	(1)
§ 7-1 异步电动机的构造	(1)
§ 7-2 异步电动机的转动原理和转差率	(3)
§ 7-3 旋转磁场	(5)
§ 7-4 三相异步电动机定子接线端的联接	(10)
§ 7-5 异步电动机的转矩和特性	(11)
§ 7-6 异步电动机的使用问题	(20)
§ 7-7 单相异步电动机	(29)
学习指导	(33)
习题七	(35)
第八章 异步电动机的继电-接触控制	(37)
§ 8-1 常用低压控制电器	(37)
§ 8-2 异步电动机继电-接触控制电路的基本环节	(44)
§ 8-3 异步电动机继电-接触控制的常用基本线路	(50)
§ 8-4 阅读继电-接触控制线路图的要点	(53)
学习指导	(56)
习题八	(57)
第九章 直流电动机	(60)
§ 9-1 直流电动机的转动原理	(60)
§ 9-2 直流电动机的构造	(62)
§ 9-3 电磁转矩和电动势公式及电压平衡方程式	(64)
§ 9-4 直流电动机按励磁方式分类	(67)
§ 9-5 并励电动机的机械特性	(69)
§ 9-6 并励电动机的调速	(72)
§ 9-7 并励直流电动机的使用	(78)
学习指导	(81)
习题九	(83)
第十章 半导体二极管和整流电路	(85)
§ 10-1 半导体的特殊性能	(85)
§ 10-2 本征半导体和杂质半导体	(85)
§ 10-3 PN 结及其单向导电性	(88)
§ 10-4 半导体二极管	(91)
§ 10-5 单相整流电路	(94)
§ 10-6 滤波电路	(99)
§ 10-7 稳压二极管和稳压电路	(103)

学习指导	(107)
习题十	(109)
第十一章 半导体三极管及其交流放大电路	(112)
§ 11-1 半导体三极管	(112)
§ 11-2 交流放大电路的组成和基本原理	(121)
§ 11-3 放大电路的图解分析法	(127)
§ 11-4 放大电路的微变等效电路法	(134)
§ 11-5 静态工作点的稳定	(138)
§ 11-6 阻容耦合多级放大电路	(141)
§ 11-7 放大电路中的负反馈	(149)
§ 11-8 射极输出器	(158)
§ 11-9 功率放大电路	(163)
学习指导	(172)
习题十一	(181)
第十二章 正弦波振荡器	(187)
§ 12-1 自激振荡的条件及正弦波振荡器的组成	(187)
§ 12-2 LC 正弦波振荡器	(189)
§ 12-3 RC 正弦波振荡器	(191)
学习指导	(194)
习题十二	(196)
第十三章 直流放大器	(198)
§ 13-1 直流放大器级间耦合方式及零点飘移	(198)
§ 13-2 差动式放大电路	(202)
§ 13-3 不同输入、输出方式的差放电路	(207)
§ 13-4 具有恒流源的差放电路	(210)
§ 13-5 运算放大器与线性集成电路	(211)
§ 13-6 运算放大器的基本分析方法	(214)
§ 13-7 运算放大器的应用举例	(216)
学习指导	(222)
习题十三	(226)
附录一	(229)
附录二	(230)
部分习题参考答案	(242)

第七章 异步电动机

实现电能与机械能相互转换的设备,称为电机,把机械能转换成电能的电机称作发电机,把电能转换为机械能的电机称为电动机。

本课程重点讲动力用电动机。根据电流的种类,电动机可分为交流的和直流的两大类。交流电动机根据转速的特点又分为异步的和同步的两类,异步电动机按其转子结构的不同又分为绕线式和鼠笼式两种。

由于异步电动机具有结构简单、制造容易、工作可靠、维护方便、价格低廉等优点,所以成为工农业生产中应用最广泛的一种电动机。例如在工业方面,它被广泛用于拖动各种机床、水泵、压缩机、搅拌机、起重机械等。在农业方面,它被广泛用于拖动排灌机械、脱粒机及各种农副产品的加工机械。在家用电器和医疗器械中也得到十分广泛的应用。

异步电动机的缺点是调节速度比较困难,不易实现范围较宽的平滑调速。因此在调速要求较高的场所还要用直流电动机。除此之外,绝大多数场合均采用异步电动机。据初步统计,在全国电动机容量中 85% 以上是异步电动机。

异步电动机的种类很多,根据电源相数的不同,可分为三相异步电动机、单相异步电动机及两相异步电动机。但是从基本运转原理来看,它们是相同的,都是依靠定子磁场和转子之间的相互作用来工作的。正常工作时,转子的转速与定子磁场的转速必须保持一定的差异,故统称为异步电动机,又称感应电动机。

本章以鼠笼式异步电动机为重点,讨论它的工作原理、特性和应用诸方面的问题。至于绕线式异步电动机和单相异步电动机只作简要说明。

§7-1 异步电动机的结构简介

为了阐明异步电动机的工作原理。首先简要介绍异步电动机的结构。图 7-1 是鼠笼式异步电动机的外形结构,打开电机两侧的端盖,可以看出,它是由固定部分和转动部分两个基本部分组成的。

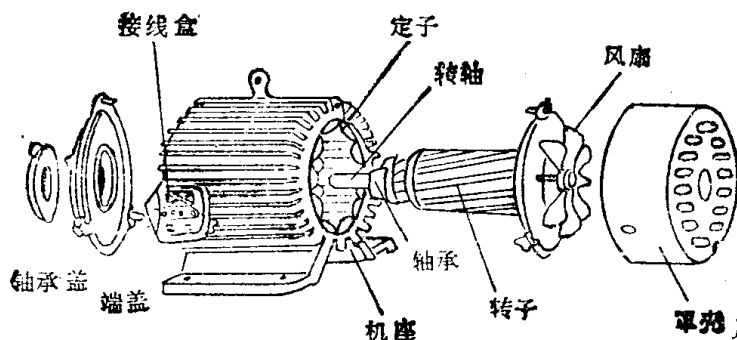


图 7-1 鼠笼式异步电动机的结构

固定部分又叫定子,如图 7-1 和 7-2 所示,定子主要由机座、铁芯和三相绕组组成。机座是电机的支撑部分,通常由铸铁或铸钢制成。定子铁芯由硅钢片叠集成圆筒状压入机座里构成。硅钢片形成的齿槽均匀分布在铁芯内圆表面,并与轴平行。齿槽内放置三相定子绕组,根据供电电压不同,三相定子绕组可以接成星形,也可接成三角形。

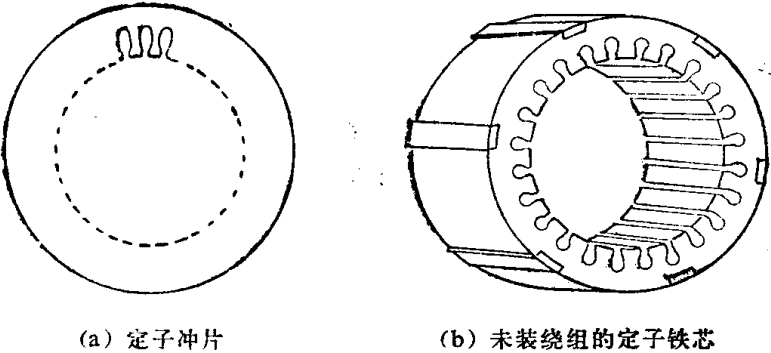


图 7-2 异步电动机的定子铁芯

转动部分又叫转子,如图 7-3(a)所示。转子由转轴和装在转轴上的圆柱形转子铁芯以及转子绕组组成。转轴由碳钢制成,两端支撑在轴承上,转子铁芯用已冲槽的硅钢片叠成,槽内放置转子绕组。转子绕组分为鼠笼式和绕线式两类。

鼠笼式转子绕组是由安放在转子槽内的裸导体和短路环连接而成。如果把转子铁芯去掉,可以看出,裸导体的形状好象一个“鼠笼”,故名鼠笼转子。小型鼠笼式转子的导体,一般采用铸铝与冷却用的风扇叶片一次浇铸成形。

绕线式转子的铁芯和鼠笼式转子铁芯相同,但它的绕组与鼠笼式转子不同,而与定子绕组一样,也是三相绕组,一般接成星形。它的三个出线端从转子轴中引出,固定在轴上的三个互相绝缘的滑环上,然后经过电刷的滑动接触与外加变阻器相接。改变变阻器手柄的位置,可使绕线式三相绕组串联接入变阻器或使之短路。如图 7-3(b)所示。

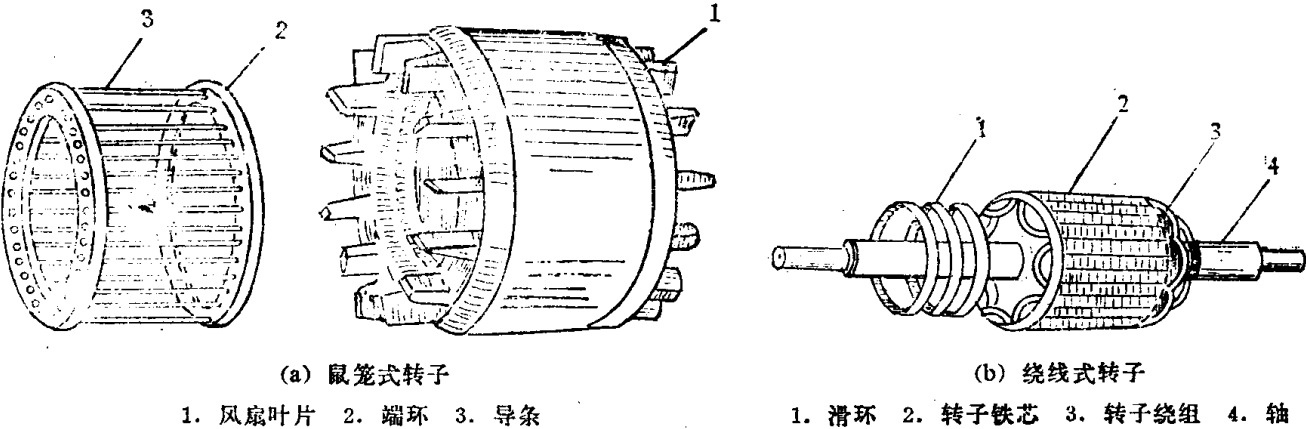


图 7-3 异步电动机的转子

绕线式异步电动机的转子结构较复杂,价格较贵,一般用于对起动和调速性能有较高要求的场所。

上述两类异步电动机, 尽管转子结构不同, 但它们的基本工作原理则是相同的。工作时定子绕组与交流电源相连接, 转子绕组自成闭合通路; 定子、转子之间虽然没有直接的电气连接, 但是它们通过三相定子绕组产生磁场的耦合作用, 相互影响而起作用。这与变压器相似。为了保证转子能够可靠的自由旋转, 定子铁芯和转子铁芯之间留有一定的空气隙。中小型电动机的空气隙约为 0.2—1.0 毫米。

下面来讨论它们的基本工作原理。

§7-2 异步电动机的转动原理和转差率

一、转动原理

异步电动机是怎样转动起来的? 为了说明它的转动原理, 让我们先作一个简单的实验。

图 7-4(a) 是异步电动机的模型, 它由一个装有摇柄的马蹄形磁铁和一个放在其中可以自由转动的闭合导体(即转子)组成。磁铁和转子之间没有电气和机械的直接联系。当我们转动摇柄时, 转子随之转动, 且旋转方向与磁铁的旋转方向一致。

为了分析方便起见, 我们把模型简画成 7-4(b) 所示的剖面图。当磁场 N 、 S 极受外力作用旋转时, 其中有效导体 aa' 和 bb' 因与磁场产生相对运动而切割磁力线, 根据物理学的电磁感应原理知道, 当磁场与导体之间存在相对运动时, 就会在导体中感应出电动势^{*}。如图 7-4(b) 所示, 先设转子不动, 磁极按顺时针方向旋转, 则转子导体相当于对磁场作逆时针方向转动。因而导体中产生电动势, 这个电动势的方向可以根据右手定则确定出来, 即图中转子上半部分导体 a 的电动势方向都是离开纸面的, 用符号 $\odot$ 表示, 导体 b 的电动势方向是指向纸面的, 用符号 $\otimes$ 表示。由于转子各导体两端已用金属环短路成闭合通路, 在导体中, 有电动势就会有电流通过。这里暂时先不考虑导体中电动势与电流之间的相位差, 那么就可认为电流的方向与电动势方向相同。

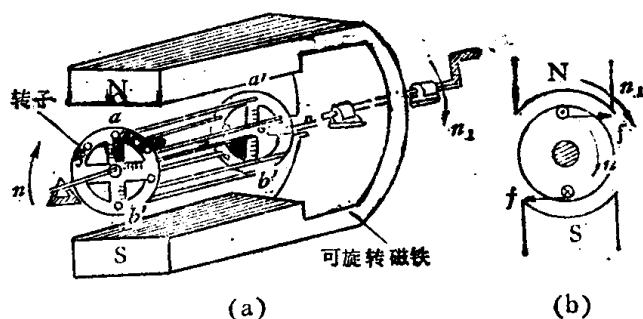


图 7-4 异步电动机转动原理示意图

此感应电流在磁场中又受到安培力作用, 受力方向由左手定则来确定, 因此图 7-4(b) 中 N 极下的导体 a 受力方向向右, S 极下的导体 b 受力方向向左, 这一对作用力形成顺时针方向转动的力矩, 所以转子就跟着磁铁顺时针方向转动起来。

我们把按一定转速在空间旋转的磁极统称为旋转磁场。如果旋转磁场逆时针方向转动, 同理可判断出转子也会随之逆时针转动。因此若要改变转子的旋转方向, 只需改变旋转磁场的转动方向就可以了。

* 参见普通物理学讲义第二册, 李椿等编 1984 年版 § 12-4。

通过上述实验可知, 转子之所以能转动, 是因为旋转磁场与导体之间有相对运动, 因而产生电动势, 这个电动势在构成闭合电路的导体里, 产生电流, 载流导体在磁场中受到电磁力的作用, 便转起来了, 这就是异步电动机的转动原理。

二、转差率

转子的转速必然小于旋转磁场的转速, 因为两者的转速如果相同, 则无相对运动, 转子线圈就不会有感应电动势和电流, 因而也不会有电磁转矩。只有当转子线圈与磁场的转速有差异, 线圈中才有感应电动势和电流, 从而产生电磁转矩。可见转子线圈的转速必然小于旋转磁场的转速, 这就是“异步”电机名称的由来。

如转子的轴上带动机械负载, 当这个负载增大时, “异步”的程度必须增大, 才能产生更大的电动势、电流, 从而产生更大的转矩与机械负载相平衡。那么怎样反映“异步”的程度呢? 这里引入转差率的概念, 即用转差率的大小来反映“异步”的程度。

今设 n_1 为旋转磁场相对于静止空间的转速, 该转速又称同步转速, n 为转子相对静止空间的转子转速, 虽然转子与磁场转动方向一致, 但两者的转速并不相等, 于是可知旋转磁场对转子的相对转速差为 $\Delta n = n_1 - n$, 它与同步转速 n_1 的比值, 称为异步电动机的转差率(又称滑差), 用字母 s 表示。因此

$$s = \frac{\Delta n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad \text{或} \quad \Delta n = s n_1 \quad (7-1a)$$

转差率常用百分率表示, 即有

$$s \% = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100 \% \quad (7-1b)$$

转差率是异步电动机的重要参数之一, 在分析异步电动机运行状态时非常有用。例如, 当电动机处于尚未转动起来的静止状态时, 转子转速 $n = 0$, 故 $s = 1$ 。当转子转速等于同步转速时, 即 $n = n_1$, 故 $s = 0$ 。由此可见, 异步电动机的转速由 0 变到 n_1 , 也可用转差率描述为 s 由 1 变到 0。转子转速越接近于同步转速, 转差率 s 越小。通常异步电动机在额定状态运行时, 其转差率约在 0.02~0.06 之间。

公式(7-1a)可改写为

$$\left. \begin{aligned} n_1 - n &= s n_1 \\ n &= n_1 (1 - s) \end{aligned} \right\} \quad (7-1c)$$

以上式中: s ——转差率

n_1 ——同步转速, 单位是转/分

n ——电动机的转速, 单位是转/分

例题 7-1 已知一台异步电动机的磁场同步转速 $n_1 = 1500$ 转/分, 转子转速是 1430 转/分。试求它的转差率。

解 由已知条件知转速差

$$\Delta n = 1500 - 1430 = 70 \text{ 转/分}$$

所以转差率

$$s = \frac{\Delta n}{n_1} \times 100\% = \frac{70}{1500} \times 100\% = 4.67\%$$

例题 7-2 已知一台异步电动机的同步转速为 1000 转/分, 额定转差率 $s_n = 0.03$, 问其转速是多少?

解 将已知数据代入(7-1c)式, 知转子转速

$$n = n_1(1 - s) = 1000(1 - 0.03) = 970 \text{ 转/分}$$

§7-3 旋转磁场

由上节可知, 要使转子线圈转动, 首先就需要有旋转磁场存在。依靠外力转动永久磁铁取得旋转磁场的办法只有模型的意义, 并无实用价值。工程上是用多相交流电通入相对应的多相绕组来产生旋转磁场的。下面先分析最简单的三相绕组所产生的两极旋转磁场。

一、三相两极旋转磁场

若有三个尺寸、匝数完全相同, 空间相差 120° 的绕组, 它们的首端分别用字母 A、B、C 表示, 末端分别用字母 X、Y、Z 表示, 如图 7-5(a) 所示。现把它们对称地放置到定子铁心里, 图 7-5(b) 是铁芯的纵向剖面图, 三相绕组可以接成星形或三角形, 图 7-5(c) 表示它们接成星形的情况。由于各相绕组的结构相同, 它们是一个对称的三相交流电路, 如图 7-5(d) 所示。现对此三相绕组通入三相交流电流, 设它们分别是:

$$i_A = I_m \sin \omega t$$

$$i_B = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

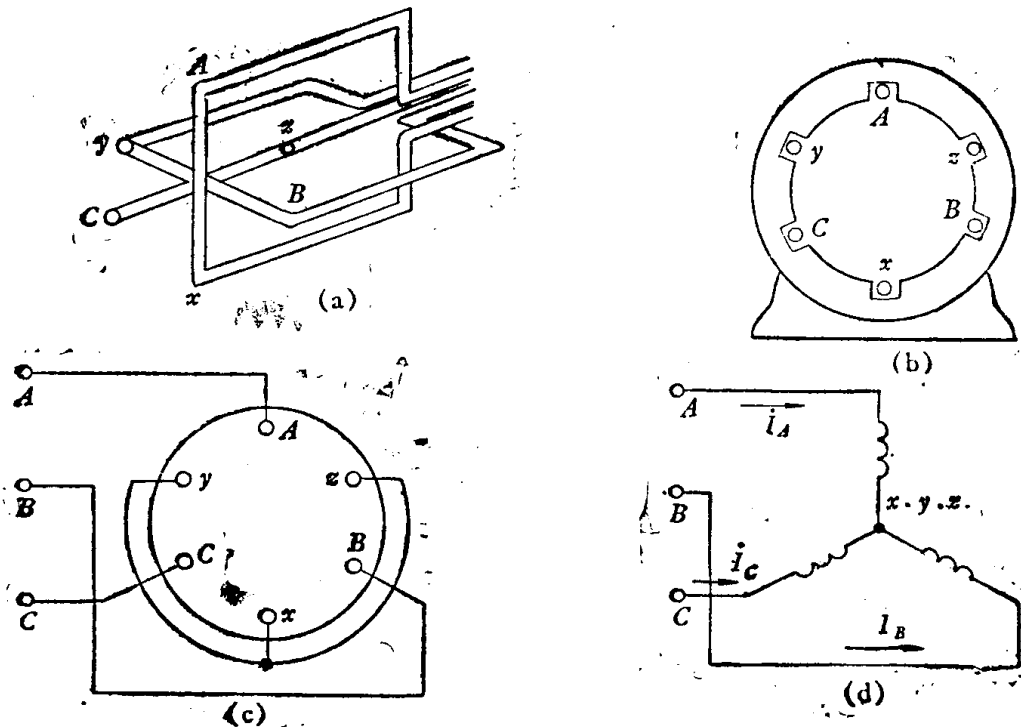


图 7-5 定子三相绕组

则电流随时间的变化过程如图 7-6 所示。

为了便于统一表达各瞬时电流的方向，取电流由绕组的首端流向绕组的末端为正方向，如图 7-5(d) 中箭头所示，电流流经导线所建立的磁场方向由右螺旋定则来确定。由图 7-6 可知，通过三相定子绕组的电流大小和方向都是随时间变化的，任一瞬间在空间的合成磁场，都等于各个电流分别产生磁场的总和。下面我们就来分析这一合成磁场是怎样产生的。分析时我们首先通过若干不同瞬时电流产生的磁场加以合成并进行比较，然后找出普遍的规律，这是分析电机磁场问题常用的方法。

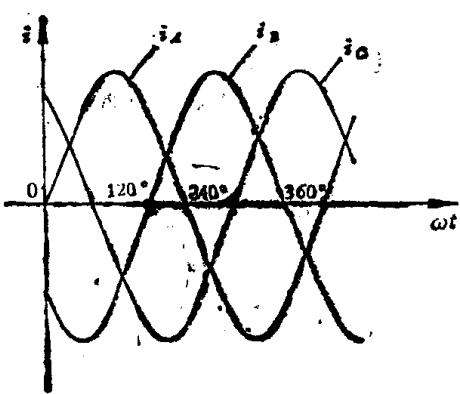


图 7-6 三相交流电

例如图 7-7 所示，就是由三相电流形成的两极旋转磁场的剖面图，其中三相绕组 AX 、 BY 、 CZ 在铁芯中占据的位置是任意的，只要它们是对称放置，在空间互差 120° 就可以了。

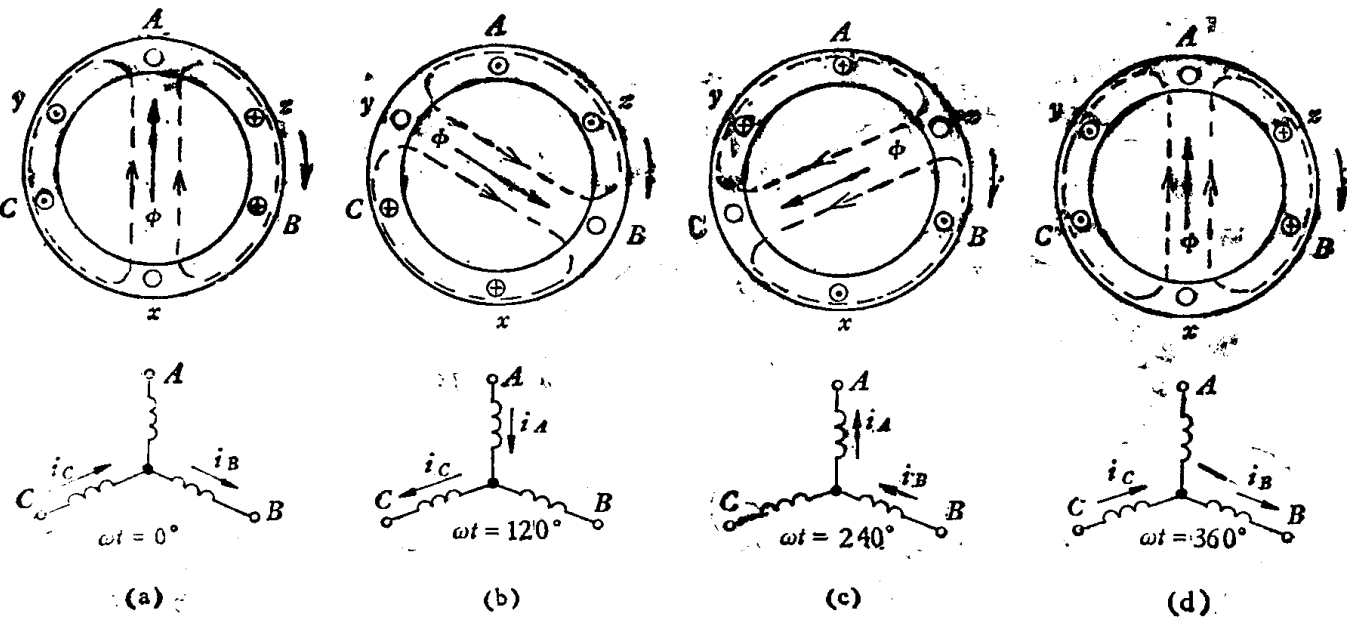


图 7-7 三相两极旋转磁场

现取 $\omega t = 0$ 这一瞬时来看，由图 7-6 知 A 相电流 $i_A = 0$ ， B 相电流 i_B 为负值， C 相电流 i_C 为正值， i_B 和 i_C 的大小相等。这时电流通过三相绕组的情况如图 7-7(a) 所示，在绕组 AX 中没有电流，绕组 BY 中的电流方向为负，即电流从 B 相绕组的末端 Y 流向首端 B 。 B 端以 $\otimes$ 表示， Y 端以 $\odot$ 表示。绕组 CZ 中的电流方向为正，即电流从 C 相绕组的首端 C 流向末端 Z ， C 端以 $\odot$ 表示， Z 端以 $\otimes$ 表示。绕组里有电流就要产生磁场，磁场的方向可用右螺旋法则确定。因右半部分导体的电流都是 $\otimes$ ，所以电流产生的磁场方向在定子里面是由下向上，左半部分导体的电流都是 $\odot$ ，因而磁场方向在定子里面也是由下向上。在定子铁芯内，磁力线穿出铁芯的部分空间为 N 极，穿入铁芯的部分空间即为 S 极。由此可知，三个绕组在这一瞬间所产生的合成磁场是一个两极的磁场，图中磁场的轴线方向正处于垂直的方位。

再看 $\omega t = 120^\circ$ 的瞬间, 由图 7-6 得知此时 A 相电流 i_A 为正值, B 相电流 $i_B = 0$, C 相电流 i_C 为负值, 这时电流通过三相绕组的情况如图 7-7(b) 所示, 在绕组 AX 中电流为正, 即电流从 A 相绕组的首端 A 流向末端 X, (A 端以 $\odot$ 表示, X 端以 $\otimes$ 表示), 绕组 BY 中没有电流, 绕组 CZ 中的电流方向为负, 即电流从 C 相绕组的末端 Z 流向首端 C (C 端以 $\otimes$ 表示, Z 端以 $\odot$ 表示)。由图可见三个绕组在这一瞬间所产生的合成磁场仍然是一个两极的磁场, 但是它的磁场极轴方向已沿顺时针方向转过 120° 。

用同样的方法, 继续分析 $\omega t = 240^\circ$ 和 $\omega t = 360^\circ$ 等瞬时的情况, 可得出由图 7-7(c) 和 (d) 所表示的合成磁场。如在 $\omega t = 240^\circ$ 时, 合成磁场的轴线方向比 $\omega t = 120^\circ$ 瞬时又沿顺时针方向向前转过 120° 。在 $\omega t = 360^\circ$ 时, 合成磁场的轴线方向比 $\omega t = 240^\circ$ 瞬时又继续向前转过 120° 。

以上虽然是取的几个特定瞬时经过分析得到的结果, 但是这些特定瞬时是任意选取的, 如取其它各点, 用同样的方法来分析, 也可得到类似的结果。

由上所述可得知以下几点:

(1) 在对称的三相绕组中, 通入在时间上互差 120° 的三相交流电, 可以产生在空间旋转的磁场。

(2) 磁场旋转方向与电流的相序一致。由图 7-6 和 7-7 可知, 定子绕组中电流的相序按顺相序 A-B-C 排列时, 旋转磁场也对应地按顺时针方向旋转。反之, 如果把三相电流中任意两相颠倒, 例如 B 和 C 两相接线互换, 这就是说把电源的 B 相接到 C 相绕组, 电源的 C 相接到 B 相绕组, 绕组中电流的相序为 A-C-B。应用同样的分析方法, 仍在三相电流波形图上取几个不同的瞬间, 例如 $\omega t = 0, \omega t = 120^\circ, \omega t = 240^\circ$ 来看, 如图 7-8 所示, 旋转磁场的方向就要对应地改为逆时针方向, 即电动机实现反转。

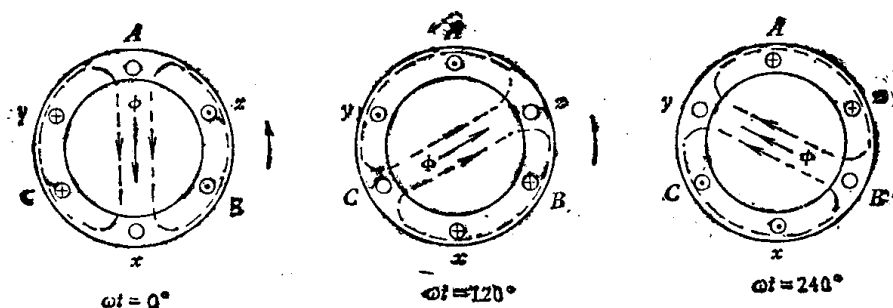


图 7-8 旋转方向的改变

(3) 旋转磁场的转速(即同步转速), 与电流频率有关, 对两极磁场而言, 电流经过一个周期的变化, 则磁场如图 7-7 所示, 按顺时针方向旋转一周。随着三相交流电流不断地随时间变化, 这个磁场在空间就不断地旋转, 若三相交流电的频率为 50 赫, 则磁场的同步转速为每秒钟旋转 50 转, 每分钟转 $50 \times 60 = 3000$ 转/分。

二、三相四极旋转磁场

如果在定子铁芯内对称放置两副三相绕组, 它们分别用符号 A-X', B-Y', C-Z' 及 A'-X, B'-Y 和 C'-Z 表示, 每副三相绕组的各个首端之间在空间互相差 60° 排列, 两副绕组串联成三

相星形绕组,如图 7-9(a)和 7-9(b)所示。图 7-9(c)是定子中一相绕组的示意图。

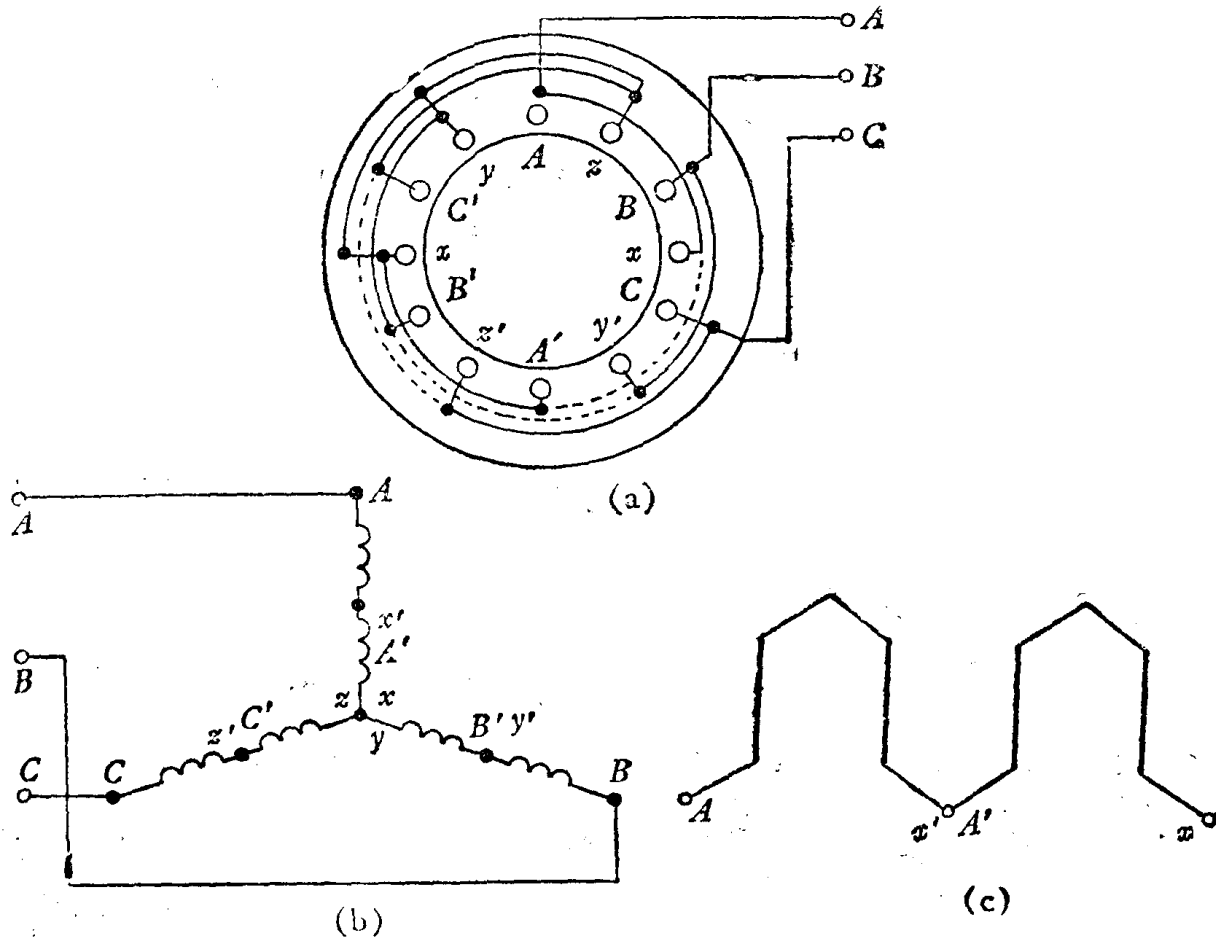


图 7-9 三相四极定子

下面仍从图 7-6 所示电流波形图中取若干不同瞬时,运用前述方法来分析。

当 $\omega t = 0$ 时, A 相电流 $i_A = 0$, B 相电流 i_B 为负值, C 相电流 i_C 为正值,这时电流通过三相绕组的情况如图 7-10(a)所示。在 A 相绕组中 没有电流。 B 相绕组中电流为负,即电流从 B 相绕组的末端 Y 流向首端 B , (图中 B 端以 $\otimes$ 表示, Y' 端以 $\odot$ 表示, B' 端以 $\otimes$ 表示, Y 端以 $\odot$ 表示)。 C 相绕组中电流为正,即电流从 C 相绕组的首端 C 流向末端 Z , (图中 C 端以 $\odot$ 表示, Z' 端以 $\otimes$ 表示, C' 端以 $\odot$ 表示, Z 端以 $\otimes$ 表示)。每相绕组各个导体产生的磁场,其方向仍用右螺旋法则确定,这时 12 根导体中相邻两导体电流方向相同,其磁场方向也一样,由此可知,在这瞬间产生的合成磁场是一个四极的磁场。

再看 $\omega t = 120^\circ$ 时的瞬间,由图 7-6 可知:此时 A 相电流 i_A 为正值, B 相电流 $i_B = 0$, C 相电流 i_C 为负值。这时,电流通过三相绕组的情况如图 7-10(b)所示。在 A 相绕组中电流为正,即电流从 A 相绕组的首端 A 流向末端 X (图中 A 端以 $\odot$ 表示, X' 端以 $\otimes$ 表示; A' 端以 $\odot$ 表示, X 端以 $\otimes$ 表示)。 B 相绕组中没有电流。 C 相绕组中电流方向为负,即电流从 C 相绕组的末端 Z 流向首端 C (图中 C 端以 $\otimes$ 表示, Z' 端以 $\odot$ 表示, C' 端以 $\otimes$ 表示, Z 端以 $\odot$ 表示)。由图可见三相绕组在这一瞬间所产生的合成磁场仍然是一个四极的磁场,但是它的轴线方向已经顺时针方向转过

• 8 •

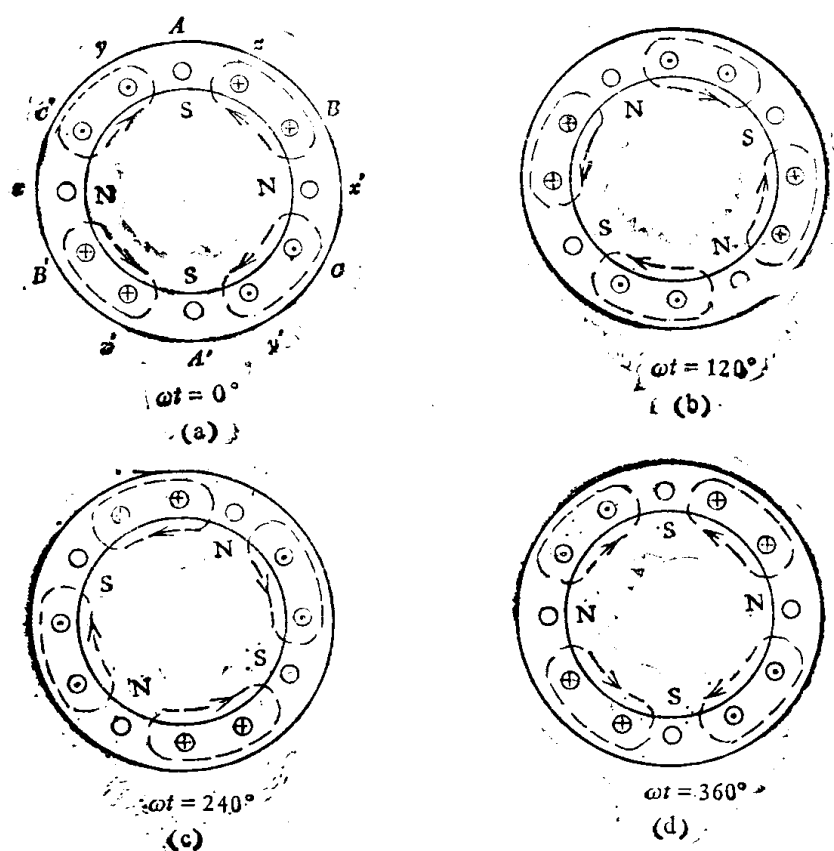


图 7-10 三相四极旋转磁场

60°。

用同样的方法,继续分析 $\omega t = 240^\circ$ 和 $\omega t = 360^\circ$ 等不同瞬时的情况,可以得出由图7-10(c)和7-10(d)所表示的合成磁场。它们的轴线方向分别沿顺时针方向向前转过60°。由上述分析可知,当定子三相绕组每相由两个线圈串联组成,且绕组在空间互差60°角时,通以三相对称交流电也可产生一个旋转磁场,但是这个磁场是四极的,如与前述两极的旋转磁场相比,其转速慢了一半,如电流频率为50赫,四极磁场的转速 n_1 为 $\frac{50 \times 60}{2} = 1500$ 转/分。

设以 p 代表磁极对数,即有两极磁场的 $p = 1$, $n_1 = 3000$ 转/分;四极磁场的 $p = 2$, $n_1 = 1500$ 转/分。

同理,若要产生三对极($p = 3$)的旋转磁场,只需每相绕组由三个线圈串联,且绕组在空间互差 $\frac{120^\circ}{p} = \frac{120^\circ}{3} = 40^\circ$,这时电流变化一周,旋转磁场在空间转过 $\frac{1}{3}$ 转。

依此类推,若要产生 p 对磁极的旋转磁场,则每相绕组由 p 个绕组串联,且绕组在空间互差 $\frac{120^\circ}{p}$ 角,电流变化一周,旋转磁场在空间转过 $\frac{1}{p}$ 转。

由此可以得出旋转磁场与电流频率及磁极对数之间的关系。设电流的频率为 f ,即每秒钟电流变化 f 周,每分钟变化 $60f$ 周,则每分钟旋转磁场转过 $60f/p$ 转,因而知同步转速

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad (7-2)$$

我国规定工业用电标准频率为 50 赫, 因此可知磁极对数确定后的同步转速 n_1 , 如表 7-1 所示。

表 7-1 同步转速与极对数的关系

p (极对数)	1	2	3	4	5	
n_1 (转/分)	3000	1500	1000	750	600	

旋转磁场的极对数愈多, 转速愈慢, 但极对数多, 则异步电机的线圈要增多, 铁芯要加大, 体积、重量都要随之增大, 所以极对数不能无限制增多, 转速也不能无限制减低。一般常用电机的极对数, 多数在 1 到 4 对极之间。

例题 7-3 一台三相异步电动机, 已知它的转子额定转速为 $n_n=1430$ 转/分, 电源频率 $f=50$ 赫, 问电动机的同步转速、磁极对数及额定转差率 s_n 各是多少?

解 异步电动机在额定情况下, 转差率很小, 只有百分之几, 因此转子额定转速略低于旋转磁场的同步转速, 从而可知额定转速为 1430 转/分的同步转速是 1500 转/分。同步转速为 1500 转/分的异步电机, 其磁极对数 $p=2$ 。额定转差率用百分数表示

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 4.67\%$$

§7-4 三相异步电动机定子接线端的联接

无论是两极或是四极的旋转磁场, 它们的三相绕组都有六个引出线端, 这些出线端都固定在电动机机座外壳的接线板上, 如图 7-11(a)所示。三相绕组各端与接线柱按图 7-11 所示线路联接。图中所注符号 D_1 、 D_2 和 D_3 表示绕组的首端, D_4 、 D_5 和 D_6 表示绕组的末端, 如有中线用字母 N 表示, 这是我国现有厂家的统一标记①, 此后我们就不另用 A 、 B 、 C 和 X 、 Y 、 Z 等字母来标记三相绕组的首、末端了。

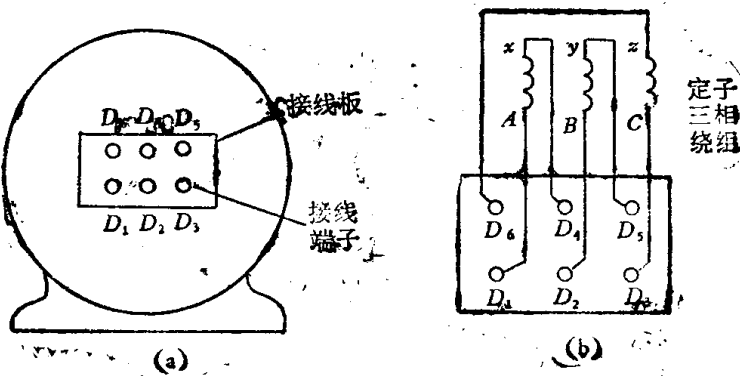


图 7-11 接线板

① 根据国家标准, 异步电动机的六个出线端今后应改用 u_1 、 u_2 、 v_1 、 v_2 , 及 w_1 、 w_2 表示, Y 系列异步电动机就是这样标记的。

异步电动机的三相定子绕组可以接成星形或三角形, 实际工作中应按照各相绕组的额定电压和电源电压的要求选用。如需接成星形, 可按图 7-12 所示各图方式联接, 如需接成三角形, 可按图 7-13 所示各图方式联接。

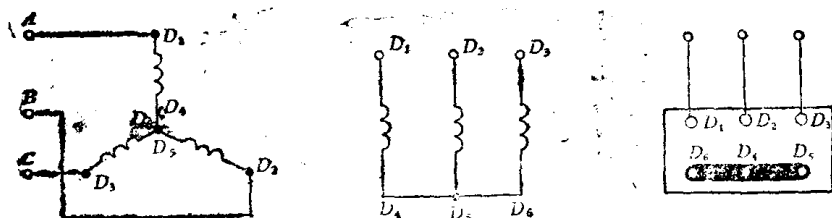


图 7-12 星形联接

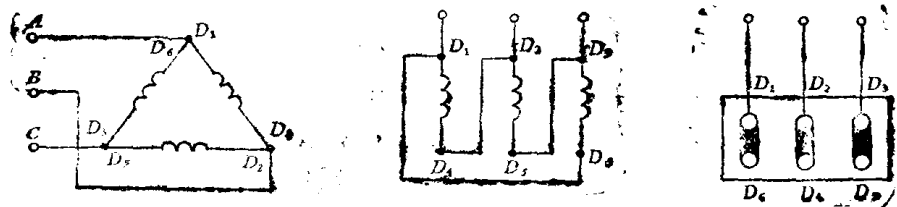


图 7-13 三角形联接

§7-5 异步电动机的转矩和特性

为了正确的使用异步电动机, 必须了解异步电动机的基本运行情况, 要想知道异步电动机的基本运行情况, 必须了解异步电动机的转矩及与转矩有关的特性。

一、转矩平衡关系

电动机之所以能转动, 是由于电动机本身的电磁力产生转矩驱动转子转动的结果。电动机为什么能稳定运行于某一转速之下, 这是由于电动机产生的电磁转矩与轴上的负载转矩相平衡的缘故。我们把由电动机本身的电磁力产生的转矩称为电磁转矩, 用字母 M 表示。轴上的反抗转矩称为负载转矩, 它包括电动机空载损耗转矩(如风损耗和机械损耗等) M_0 、轴上输出转矩 M_L , 一般因空载损耗较小, 常可忽略不计, 因此负载转矩就是 M_L , 它是指电机轴上的工作机械, 如各种机床、水泵、鼓风机等等。运行中, 它们加在电动机轴上的都是反抗电动机运转的阻力转矩。

根据刚体旋转运动定律(简称转动定律), 电磁转矩 M 与负载转矩 M_L 之间具有以下平衡关系:

$M > M_L$ 时, 电动机加速;

$M < M_L$ 时, 电动机减速;

$M = M_L$ 时, 电动机恒速运转。

这是各种旋转电动机都要遵循的规律。以异步电动机为例, 设电动机原先已在稳速下运行, 一旦轴上机械负载 M_L 增大, 就会出现因电磁转矩不能立即改变, 于是 $M < M_L$, 电动机转速 $n \downarrow$, 转差率 $s \uparrow$ 的变化过程。

转矩之间的平衡关系是分析电动机转矩首先要了解的一个重要问题。

二、电磁转矩

电磁转矩是转子中各个载流导体在旋转磁场作用下产生的电磁力对转子轴形成的转矩的总

和。就是说，电磁转矩是转子电流 I_2 与旋转磁场 ϕ 相互作用产生的结果。因此可得出电磁力 $F = k_1 \phi I_2$ 的关系式。式中 ϕ 是旋转磁场每个磁极的磁通量，它基本上与电源电压成正比，当电源电压一定时，它便是常数①。 I_2 是转子电流， k_1 是比例常数，当异步电动机的几何尺寸、绕组的制造参数一定时，其电磁转矩 M 与电磁力 F 成比例，因此可列出与它对应的电磁转矩方程式是

$$M \propto \phi I_2 = C_m \phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (7-3)$$

式中 C_m 是决定于异步电动机结构的常数， φ_2 是转子电路中相电压与相电流之间的相位差角，这里为什么多出一个 $\cos \varphi_2$ 呢？因异步电动机的转子电路是交流电路，这个电路里除有电阻外，还存在电感，所以转子电路中电流 I_2 滞后感应电动势 E_2 一个 φ_2 角。转子电路的功率因数 $\cos \varphi_2$ 小于 1。当电动机的电磁转矩对外做机械功时，它输出有功功率。由第二章有功功率 $P = VI \cos \varphi_2$ 已知，其中只有与电压同相的电流分量 $I_2 \cos \varphi_2$ 做功。根据同样的道理可知转子的有效转矩也和 $I_2 \cos \varphi_2$ 有关，即只有与电动势 E_2 同相的电流分量才能转换成机械能而产生转矩做功。因此 (7-3) 式的转矩公式里包含有 $\cos \varphi_2$ 项。转矩的单位是牛·米或用字母 $N \cdot m$ 表示。

(7-3) 式是分析异步电动机转矩特性的重要根据，这里我们未用数学推证，只用定性说明的方法直接引出，因为对使用电动机的用户来说，如何推导公式，不是主要问题，关键在于如何理解它、应用它，及如何用该式来解释异步电动机的各种工作过程和物理现象。

以上讨论的是有关转矩的第二个问题。

三、转矩特性

(7-3) 式没有直接反映出电磁转矩与它的外部条件，如电源、电压、转速等之间的关系，这对使用者来说，很不方便，因此有必要在 (7-3) 式的基础上作进一步推导，以导出转矩特性。所谓转矩特性，是指转矩 M 与转差率 s 之间的关系曲线。它专门用来描述异步电机工作时的外部性能。因为在 (7-3) 式里，当电源电压为定值时，磁通 ϕ 为常数，可见转矩 M 与电流 I_2 和功率因数 $\cos \varphi_2$ 两者都有关。所以转矩 M 与转差率 s 的关系可通过 I_2 与 s 以及 $\cos \varphi_2$ 与 s 的关系取得，为此我们先来讨论这两个关系。

1. 转子电流与转差率的关系

异步电动机的转子是由若干导体构成的闭合线圈，从电路看，它是一个电阻、电感电路，它的电流 I_2 决定于转子感应电动势 E_2 和转子阻抗 Z_2 。图 7-14 是它的简化等效电路，它的电流方程式：

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (7-4)$$

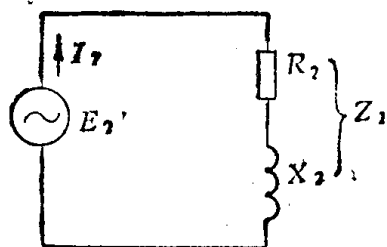


图 7-14 转子等效电路

注意式中 E_2 、 I_2 都是用有效值表示的转子电量，它们的频率不是电源频率 f ，而是与转子转速有

① 异步电动机的定子绕组是静止的，当磁场旋转时，因切割定子绕组产生感应电动势，它的有效值和变压器原边电动势相似，可用下式计算，即： $E_1 = 4.44 k_1 f N_1 \phi$ 。式中 k_1 是考虑到异步电动机定子绕组各匝线圈在空间位置不同，同一相绕组的各匝线圈的电动势之间存在相位差，因此它们相量和的数值将小于它们的算术和，因此引入的系数小于 1。除此之外，各量均与变压器相同，又因定子绕组的阻抗压降 $I_1 Z$ 比 V_1 小得多，故有：

$$V_1 \approx E_1 = 4.44 k_1 f_1 N_1 \phi \propto \phi \quad \text{或} \quad \phi = \frac{V_1}{4.44 k_1 f N_1}$$

关的 f_2 。为了使分析的问题条理清楚, 下面我们把上述转子各量分为转子静止不动和转子转动两种情况来讨论。

(1) 转子静止各量

这里所谓转子静止, 是指电动机已经接通电源, 转子尚未来及转动的瞬间, 或是因负载过重, 转子被迫停转的情况而言的, 因而有转子转速 $n=0$, 转差率 $s=1$ 。这时异步电动机的定子和转子的关系与变压器的原边和副边的关系十分相似。下面分别讨论转子不动时各物理量, 并用下标 20 表示, 于是有:

① 转子频率 f_{20} , 因转子不动, 旋转磁场以每秒 $n_1/60$ 转的相对转速切割转子, 所以转子频率是

$$f_{20} = \frac{p(\Delta n)}{60} = \frac{pn_1}{60} = f \quad (7-5a)$$

它等于电源频率 f 。

② 转子电动势 E_{20} , 是转子不动、旋转磁场以最大的相对转速 n_1 切割转子导体感应出来的电动势

$$E_{20} = 4.44k_2f_{20}N_2\phi = 4.44k_2fN_2\phi \quad (7-5b)$$

③ 转子阻抗 Z_{20} 。由转子电阻 R_2 和感抗 X_2 决定。 R_2 是转子绕组的每相电阻, 由转子结构和导条材料决定, 一般与电流频率或转子转速无关。 X_2 是转子绕组每相感抗, 它与转子电流频率 f_{20} 有关, 即

$$X_{20} = 2\pi f_{20}L_2 \quad (7-5c)$$

式中 L_2 是转子每相绕组的电感。

上述静止各量都是固定值。

(2) 转子转动时各量

设转子转速为 n (即 $0 < s < 1$), 旋转磁场切割转子导体的转速不再是同步转速 n_1 , 而是相对转速差 $\Delta n = n_1 - n$, 由(7-1a)式知 $\Delta n = sn_1$, 所以切割转子导体的转速 Δn , 只相当于转子不动时转速 n_1 的 s 倍。转子转动各量, 用下标 2 表示。

① 转子电量频率 f_2

$$f_2 = \frac{p(\Delta n)}{60} = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \left(\frac{n_1 - n}{n_1} \right) = f \cdot s \quad (7-6a)$$

此式说明转子电量的频率等于定子电量的频率与转差率的乘积, 例如转子不动时, $s=1$, $f_2=f$, 又如某电动机 $s=0.03$, 电源频率 $f=50$ 赫, 则 $f_2=0.03 \times 50=1.5$ 赫, 即转子电量每秒钟只变化 1.5 周。一般额定情况下 S_n 只有百分之几, 所以转子电量频率是很低的。

② 转子电动势 E_2

任意转差率下, 转子感应电动势为:

① 式中 k_2 是考虑到转子导体在空间位置不同而引入的系数, 它与 k_1 对定子电动势 E_1 的意义相同。

$$\begin{aligned} E_2 &= 4.44k_2f_2N_2\phi = 4.44k_2fsN_2\phi \\ &= 4.44k_2fN_2\phi \cdot s = E_{20} \cdot s \end{aligned} \quad (7-6b)$$

此式表示转子感应电动势 E_2 是静止时 E_{20} 的 s 倍。如转子静止不动 $E_2 = E_{20}$ ，转子转速愈高， s 愈低，则 E_2 愈小。

③ 转子阻抗 z_2

在任意转速下，转子电阻 R_2 ，基本不变，但转子感抗 X_2 与转速有关。

$$X_2 = 2\pi f_2 \cdot L = 2\pi fL \cdot s = X_{20} \cdot s \quad (7-6c)$$

它说明转子感抗是转子不动时感抗 X_{20} 的 s 倍。

因而有转子阻抗

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (7-6d)$$

④ 转子电流与转差率

现再回到(7-4)中来看，转子电流的式子可改写为

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (7-7)$$

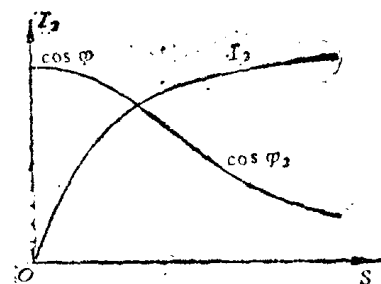


图 7-15 I_2 和 $\cos \varphi_2$ 跟转差率 s 的关系

式中 E_{20} 、 R_2 和 X_{20} 都是恒定值，因此转子电流 I_2 是 s 的函数，它随 s 的变化而变化。当 $s = 0$ 时，即理想空载下，相对转速为零， $I_2 = 0$ 。当 s 较小时， $R_2 \gg sX_{20}$ ， sX_{20} 项可忽略不计，电流 I_2 与 sE_{20} 近似成正比，所以 I_2 随 s 的增大成正比例地增长。当 s 很大，接近于 1 时， $sX_{20} \gg R_2$ ， R_2 项可忽略不计，电流 I_2 近似为一恒定值。上述关系如图 7-15 中的 $I_2 \sim s$ 曲线。

2. 转子电路功率因数与转差率的关系

转子电路功率因数

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (7-8)$$

上式说明转子电路功率因数 $\cos \varphi_2$ 是 s 的函数，它随 s 的变化而变化，当 s 很小时， $R_2 \gg sX_{20}$ ， sX_{20} 项可忽略不计， $\cos \varphi_2 \approx 1$ ，随着 s 的增大， sX_{20} 项增大， $\cos \varphi_2$ 减小，直到 s 接近于 1 时， $sX_{20} \gg R_2$ ， $\cos \varphi_2$ 近似与 s 成反比，即两量之间近似有双曲线关系。上述关系如图 7-15 中的 $\cos \varphi_2 \sim s$ 曲线。

3. 转矩特性曲线

(1) 曲线的取得

把(7-7)和(7-8)两式代入(7-3)式，于是有

$$\begin{aligned} M &= C_m \phi I_2 \cos \varphi_2 = C_m \phi \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \cdot \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \\ &= C_m \phi \frac{sE_{20} \cdot R_2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} = kV_1^2 \frac{sR_2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \end{aligned} \quad (7-9)$$

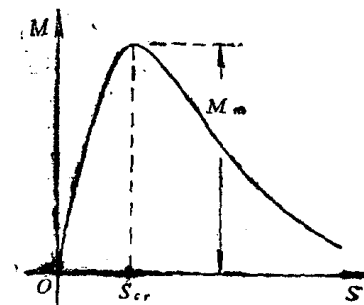


图 7-16 $M \sim s$ 曲线

式中 k 是比例常数，同时考虑到 $E_{20} \propto V_1 \propto \phi$ 。将(7-9)式与(7-3)式比较，可以看出它更为明确地表达了电动机的转矩与电源、电压、转差率等外部条件及与电路参数 R_2 和 X_{20} 之间的关系。