

高等学校试用教材

电 工 学

下 册

浙江大学电工学教研室编

人 民 教 育 出 版 社

内 容 提 要

本书分上、中、下三册出版。上册为电路基础，中册为电子技术，下册为电动机与继电接触控制。全书以电子技术为重点，适合学时为120左右的课程选作教材使用。本册包括交流电动机、直流电动机和电动机的继电接触控制等内容。

高等学校试用教材

电 工 学

下 册

浙江大学电工学教研室编

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 4.75 字数 110,000

1979年10月第1版 1980年5月第1次印刷

印数 00,001—27,000

书号 15012·0209 定价 0.41元

本篇所用文字符号和下标符号意义

符 号	意 义	符 号	意 义
a	电枢	n	转速
B	变压器		额定值
	磁感应强度	P	功率
c	控制或调节	p	相值
cr	临界值		磁极对数
D	直径	R	电阻
d	直接	s	转差率
E	电动势		串励
e	电动势瞬时值	st	起动
f	励磁	t	时间
	交流电频率		变压器(下标)
F	电磁力	V	电压
g	发电机	v	线速度
I	电流	X	电抗
i	电流瞬时值	z	阻抗
L	电感	η	效率
l	长度	θ	角度
	负载	λ	过载能力
M	电磁转矩	Φ	每极磁通
m	最大值	φ	相位差
\min	最小值	ω	交流电角频率

目 录

第三篇 电动机和继电器控制

本篇所用文字符号和下标符号意义

第十三章 交流电动机	1
13-1 异步电动机的结构	2
13-2 旋转磁场	5
13-3 异步电动机的工作原理	10
13-4 异步电动机的电磁转矩	12
13-5 异步电动机的额定值	17
13-6 异步电动机的起动	19
13-7 异步电动机的反转	27
13-8 异步电动机的调速	28
13-9 单相异步电动机	31
13-10 交流执行电动机	37
*13-11 电磁调速异步电动机	42
*13-12 力矩异步电动机	46
*13-13 自整角机	48
*13-14 交流直线电动机简介	50
13-15 三相同步电动机	54
13-16 微型同步电动机	57
*13-17 步进电动机	59
习 题	61
第十四章 直流电动机	64
14-1 直流电动机的构造	64
14-2 直流电动机的工作原理	67
14-3 直流电动机按励磁方式的分类	69

14-4	并励电动机的机械特性	70
14-5	并(他)励电动机的调速	72
14-6	并励电动机的起动和反转	77
*14-7	串励电动机	80
*14-8	复励电动机	81
14-9	直流执行电动机	82
习 题	85
第十五章	电动机的继电接触控制	87
15-1	三相异步电动机开停的手动控制电路	87
15-2	三相异步电动机的直接起动控制电路	92
15-3	三相异步电动机的直接起动正反转控制电路	102
15-4	行程控制电路	107
15-5	两台鼠笼式电动机联锁起动控制电路	110
*15-6	直流电动机的自动控制电路	114
*15-7	介绍几种无触点控制元件及其应用	116
习 题	121
附录一	电气设备的接地和接零	123
附录二	电动机的选择	127
附录三	国产常用电动机的系列型号及其主要用途	130
本篇习题答案	143

第三篇 电动机和继电器控制

第十三章 交流电动机

凡实现电能与机械能互换的旋转机械，统称为电机。其中把电能转换成机械能的电机，称为电动机；而把机械能转换成电能的电机，称为发电机。

电动机按照它所耗用的电能种类不同，又可分为交流电动机和直流电动机。交流电动机还可分为异步电动机和同步电动机。

据统计，功率从数十瓦直到数千千瓦的异步电动机的总容量，约占全部电动机总容量的85%，可见它是在工农业生产中应用最广泛的一种电动机。例如：在轻、化、纺工业中用来作为一般的动力装备，如各类泵、鼓风机以及纺织机械的拖动等等。中小型轧钢设备和各种机床中也都采用异步电动机。在农业方面，异步电动机常被用来拖动水泵、脱粒机和其它农副产品的加工机械。此外在医疗器械和人民日常生活中异步电动机也越来越占重要地位。

异步电动机所以能得到如此广泛应用的原因，是由于它的结构简单、坚固耐用、维护方便、价格便宜和工作可靠等。

大型的空气压缩机、粉碎机和离心水泵等，既不经常起动，又不需要调速，而功率达数百甚至数千千瓦的生产机械，常采用同步电动机。这是因为同步电动机的功率因数可以方便地调节，不但可以调节得比较高，而且可以调节在电容性功率因数下运行。此外，在要求转速恒定的场合，例如造纸和纺织工业中，也经常采用同步电动机。

交流电动机除了作为动力应用外，随着各工业部门生产自动化的需要，生产了各种作为控制用的电机和特殊用途的电机。例

如交流执行电动机、自整角机、磁滞式同步电动机和步进电动机等等。

13-1 异步电动机的结构

异步电动机由两个基本部分组成：(1) 静止部分——定子；
(2) 旋转部分——转子。

异步电动机的定子是一个圆筒形铁芯，通常装在铸铁或铸钢的机座内壁上，铁芯由绝缘了的硅钢片迭成，它的内圆周上有均匀分布的槽，如图 13-1 所示。槽内安置着定子绕组，定子绕组由绝缘导线绕制而成。三相异步电动机具有三组对称的定子绕组，称为三相定子绕组。

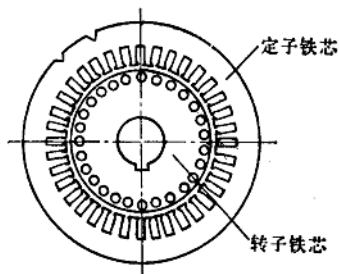


图 13-1 定子和转子的铁芯

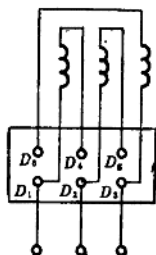
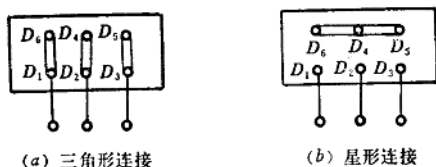


图 13-2 三相定子绕组与接线端子间的连接

三相定子绕组一般有六个出线端。为了能在机座外实现和三相电源的连接，以及三相定子绕组之间的连接，把它的六个出线端都引在机座外侧的接线盒中的接线板上，如图 13-2 所示。板上接线端子分为上下两排，其中一排 D_1 、 D_2 和 D_3 ，在机内分别与三相定子绕组的各首端连接；另一排 D_4 、 D_5 和 D_6 ，在机内分别与三相定子绕组的各末端连接，而每相的首端与邻相的末端依次上下对

应。这样，可以在接线板上方便地把三相定子绕组接成三角形或星形连接，使电动机能在两种不同线电压的电网上工作。如果电网电压等于电动机每相绕组的额定电压，那末三相定子绕组应接成三角形连接，如图 13-3(a)所示。如果电网电压等于电动机每相绕组额定电压的 $\sqrt{3}$ 倍，那末三相定子绕组应接成星形连接，如图 13-3(b)所示。



(a) 三角形连接

(b) 星形连接

图 13-3 三相定子绕组的两种连接法

异步电动机的转子是一个圆柱形铁芯，一般用硅钢片迭成，固定在转轴上。铁芯外圆周上有均匀分布的槽，如图 13-1 所示。槽内安置着转子绕组。

转子绕组按结构的不同可分为线绕式和鼠笼式两种。具有线绕式转子绕组的异步电动机，称为线绕式异步电动机。具有鼠笼式转子绕组的异步电动机，称为鼠笼式异步电动机。

线绕式转子绕组与定子绕组一样，也是由绝缘导线做成的三相绕组。三相转子绕组通常接成星形，它的三个引出线接到三个滑环上。这三个滑环也固定在转轴上，并彼此绝缘，如图 13-4 所示。滑环与安装在端盖上的电刷滑动接触。在起动或调速时，转子绕组可以通过滑环与电刷的滑动接触，跟外电路的阻抗连接，见第 13-6 和 13-8 节。在一般工作情况下，线绕式转子绕组是被短接的，它可以是在电刷引出线端被短接；也可用装在转轴上的短路装置和装在端盖上的举刷装置把三个滑环直接短接，同时把电刷举起，这样可避免电刷的磨损。图 13-5 所示为线绕式异步电动机的外形，以及它的短路装置和举刷装置(电刷罩已卸去)。

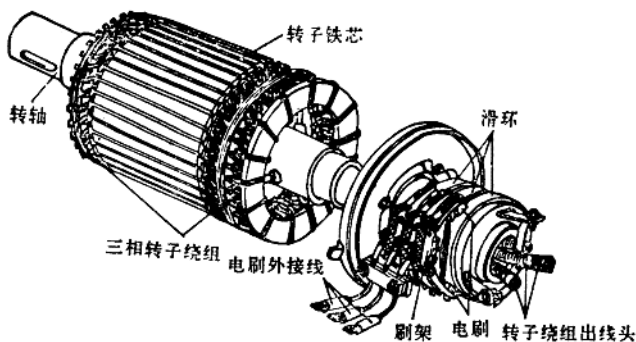


图 13-4 绕线式转子

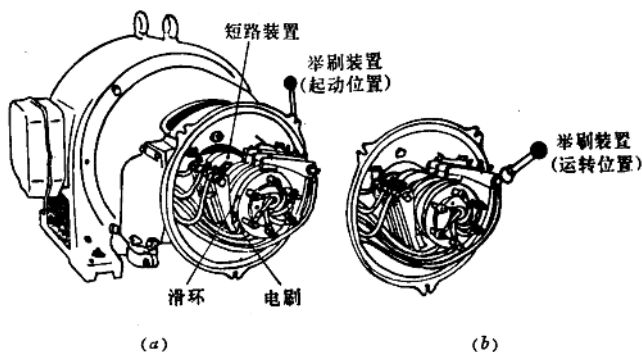
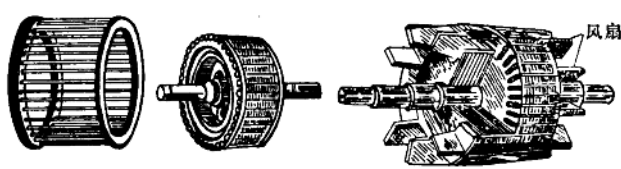


图 13-5 绕线式异步电动机的外形和举刷短路装置

鼠笼式转子绕组是由嵌放在转子铁芯槽内的铜导电条组成。在转子铁芯的两端各有一个铜端环，分别把所有铜导电条的两端都焊接起来，形成一个短接的回路。如果去掉转子铁芯，只剩下它的转子绕组(包括导电条和端环)，很象一个笼子，如图 13-6(a)所示，所以称为鼠笼式转子。

目前中小型鼠笼式电动机大都在转子槽中浇铸铝液铸成鼠笼，它的端环也用铝液同时铸成，并且在端环上铸出许多叶片作为

冷却用的风扇,如图 13-6(b)所示。这样,不但可简化制造工艺和以铝代铜,而且可以采用各种特殊形状的转子槽形和斜槽结构(即



(a) 铜的鼠笼式转子 (b) 铸铝的鼠笼式转子

图 13-6 鼠笼式转子

转子槽不与轴线平行而是歪扭一个角度),从而能改善电动机的起动性能和减少运行时的噪音等。图 13-7 所示为鼠笼式异步电动机的拆散形状。

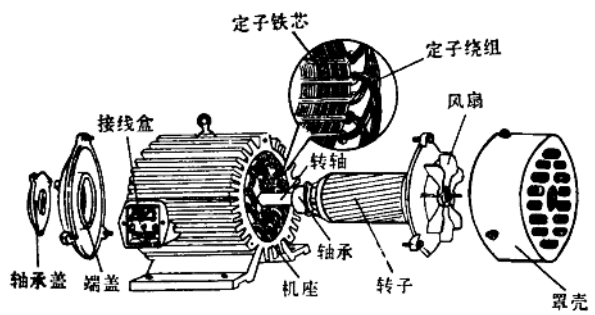


图 13-7 鼠笼式异步电动机的拆散形状

13-2 旋转磁场

所谓旋转磁场,就是在空间旋转的磁场。

在异步电动机的定子和转子中,以及在定子和转子之间的气隙中,都存在着旋转磁场。定子绕组和转子绕组之间,就是依靠这

个旋转磁场的联系而进行能量的传递，所以异步电动机就是利用旋转磁场作为它工作原理的基础。因此，在介绍异步电动机工作原理之前，必须首先介绍旋转磁场的产生和它的特性。

图 13-8 所示为 $p=1$ 的二极电动机最简单的三相定子绕组的布置图，(p 称为磁极对数)。三相绕组在空间彼此相隔 120° 嵌在定子铁芯内壁的槽中。它可以接成星形，也可以接成三角形，图

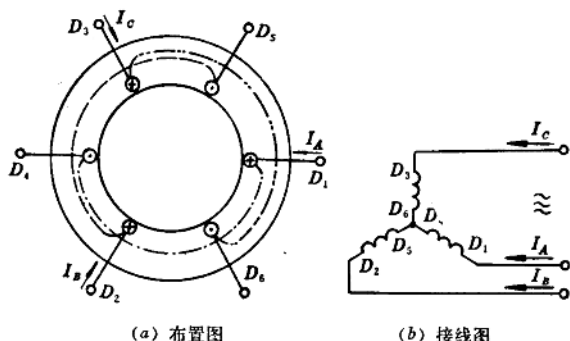


图 13-8 二极电动机三相定子绕组的布置图和接线图

13-8(b) 为星形连接。图中所示电流方向都是电流正方向；在图 (a) 中 \odot 表示导线中的电流从里面流出来， \otimes 表示电流流进去。

当三相定子绕组接上三相对称电源时，绕组中便有三相对称电流 i_A 、 i_B 和 i_C 通过。设三相对称电流的瞬时值方程式为

$$i_A = I_m \sin \omega t \quad (13-1)$$

$$i_B = I_m \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (13-2)$$

$$i_C = I_m \sin (\omega t - 240^\circ) \quad (13-3)$$

图 13-9 为三相电流的波形图。这三相电流通过绕组，将分别建立磁场，其合成磁场是这样的。

当 $\omega t = 0^\circ$ 时， $i_A = 0$ ， $i_B = -0.866 I_m$ ， $i_C = 0.866 I_m$ 。此时 D_1 、 D_4 绕组内没有电流通过； D_2 、 D_5 绕组内电流为负值，即电流

i_B 从 D_5 流到 D_2 ; D_3 、 D_6 绕组内电流为正值, 即电流 i_C 从 D_3 流到 D_6 。按右手螺旋定则把各个导体中电流产生的磁场合成, 便得到合成的磁场。图 13-

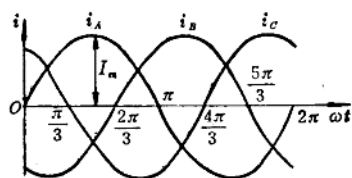


图 13-9 三相电流的波形图

10(a) 所示为一个 $p=1$ 的二极磁场, 其方向自右向左, 图中所注 N 和 S 极性是指定子铁芯内壁表面上的极性。

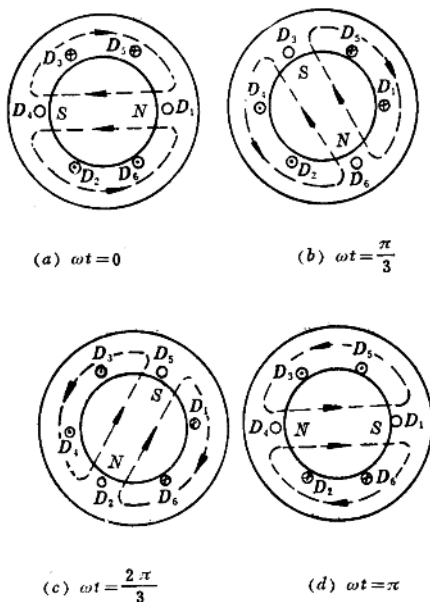


图 13-10 两极旋转磁场

当 $\omega t=60^\circ$ 时, $i_A=0.866 I_m$, $i_B=-0.866 I_m$, $i_C=0$ 。此时的合成磁场如图 13-10(b) 所示, 它在空间的位置和 $\omega t=0^\circ$ 时的位置相比, 已顺时针方向旋转了 60° 。

当 $\omega t = 120^\circ$ 时, $i_A = 0.866 I_m$, $i_B = 0$, $i_C = -0.866 I_m$ 。此时的合成磁场如图 13-10(c) 所示, 它在空间又顺时针方向旋转了 60° , 即和 $\omega t = 0^\circ$ 时的位置相比, 已旋转了 120° 。

当 $\omega t = 180^\circ$ 时, $i_A = 0$, $i_B = 0.866 I_m$, $i_C = -0.866 I_m$ 。此时的合成磁场如图 13-10(d) 所示, 它在空间又顺时针方向旋转了 60° , 即和 $\omega t = 0^\circ$ 时的位置相比, 已旋转了半周(π)。

按照上面的分析, 可以证明: 当三相电流随时间不断地变化时, 在三相绕组中建立的合成磁场也不断地在空间旋转。

综上所述, 可以得出结论: 三相电流在三相绕组中建立的合成磁场是一个旋转磁场。

从图 13-10 中可以看出, 旋转磁场的旋转方向是从 $D_1 \rightarrow D_2 \rightarrow D_3$, 即与通入三相绕组的三相电流的相序 $i_A \rightarrow i_B \rightarrow i_C$ 是一致的。

如果把三相绕组接到电源的三根引出线中的任意两根对调, 例如把 D_2 和 D_3 两根对调, 于是通入 D_2 、 D_5 和 D_3 、 D_6 二个绕组中的电流相序也就对调。此时, i_A 仍通入 D_1 、 D_4 绕组, 而 i_B 则通入 D_3 、 D_6 绕组, i_C 则通入 D_2 、 D_5 绕组。利用图 13-10 同样的分析方法, 可以看出, 此时旋转磁场的旋转方向将是 $D_1 \rightarrow D_3 \rightarrow D_2$, 即与图 13-10 的旋转方向相反, 成反时针方向旋转。

由此, 可以得出结论: 旋转磁场的旋转方向是与三相电流的相序一致的。

再从图 13-10 中进一步分析, 可以看出: 当电流随时间变化经过了 60° , 磁场在空间位置也旋转了 60° ; 电流随时间变化经过了 120° , 磁场在空间位置也旋转了 120° ; 电流随时间变化经过了 180° 磁场在空间位置也旋转了 180° , 即半周(π)。同样, 可以证明: 当电流随时间变化经过了一周期 (360°), 则旋转磁场在空间也将旋转一周 (360°)。换句话说, 旋转磁场每秒的旋转转数等于电流每秒变化的周期数, 即频率 f , 故旋转磁场每分钟的转速为

$$n_1 = 60 f \text{ 转/分} \quad (13-4)$$

以上讨论的是一对磁极 ($p=1$) 的旋转磁场。如果三相定子绕组布置如图 13-11 所示, 则为 $p=2$ 的四极电动机最简单的三相定子绕组布置图。图中每相绕组由二个线圈组成, 即由线圈 D_1 、 D_4 和线圈 D'_1 、 D'_4 串联组成第一相绕组; 线圈 D_2 、 D_5 和线圈 D'_2 、 D'_5 组成第二相绕组; 线圈 D_3 、 D_6 和线圈 D'_3 、 D'_6 组成第三相绕组。而三相绕组在空间彼此相隔 $120^\circ/p=60^\circ$ 嵌放在槽中, 即三个首端 D_1 、 D_2 和 D_3 彼此相隔 60° , 三个末端 D'_4 、 D'_5 和 D'_6 亦彼此相隔 60° 。图 13-11 中所示电流方向都是电流正方向。

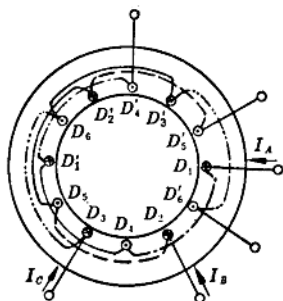


图 13-11 四极电动机三相定子绕组布置图和电流正方向

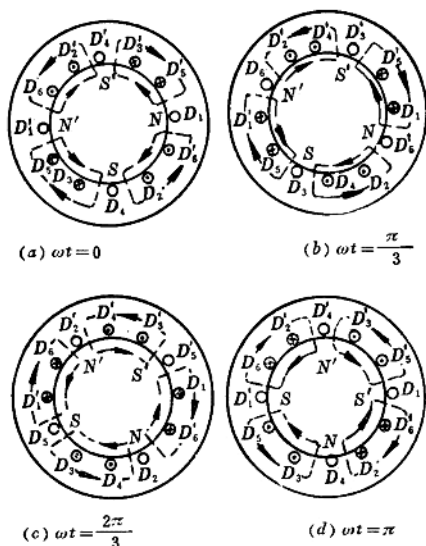


图 13-12 四极旋转磁场

按照图 13-10 同样的方法，可以画出 $p=2$ 的四极旋转磁场，如图 13-12 所示。从图中可以看出，当电流随时间变化经过了一周期，旋转磁场在空间只旋转了半周(π)，即 $1/2$ 转。

可以推论：当旋转磁场具有 p 对磁极时，电流随时间变化经过一周期，旋转磁场在空间只旋转了 $1/p$ 转。所以旋转磁场每分钟的转速 n_1 与电流的频率 f 成正比，而与磁极对数 p 成反比，它们之间的关系为

$$n_1 = \frac{60 f}{p} \text{ 转/分} \quad (13-5)$$

旋转磁场的转速 n_1 称为同步转速。

[例题 13-1] 设电流频率 $f=50$ 赫。问旋转磁场的磁极对数 p 分别为 1、2、3 和 4 时的同步转速 n_1 各为多少？

[解] 按式(13-5)得

$$\text{当 } p=1 \text{ 时, } n_1 = \frac{60 \times 50}{1} = 3000 \text{ 转/分,}$$

$$p=2 \text{ 时, } n_1 = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ 转/分,}$$

$$p=3 \text{ 时, } n_1 = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ 转/分,}$$

$$p=4 \text{ 时, } n_1 = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ 转/分。}$$

13-3 异步电动机的工作原理

图 13-13 所示为三相异步电动机的工作原理示意图。如上节所述，当三相定子绕组接上三相电源时，三相绕组内将通过三相电流，并在空间建立旋转磁场，图中用一对旋转磁铁 N 和 S 来表示，其转速为同步转速 n_1 ，转向为顺时针方向。

在旋转磁场的作用下，转子导体将切割磁通而产生感应电动势。在图 13-13 中，旋转磁场为顺时针方向旋转，因此转子导体相

对于磁场作反时针方向旋转而切割磁通。根据右手定则可知，在 N 极下（右面一半）的转子导体中感应的电动势方向是向外的，而在 S 极下（左面一半）的转子导体中感应的电动势方向是向里的。

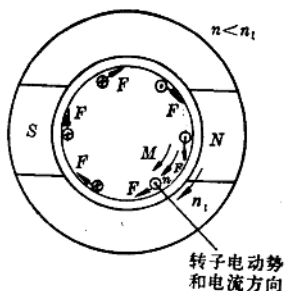


图 13-13 异步电动机的工作原理

电动机在正常运行时，不论是鼠笼式转子绕组还是线绕式转子绕组都是短路的。所以转子绕组在感应电动势的作用下，产生感应电流，即转子电流。也就是说，异步电动机的转子电流是由电磁感应而产生的。因此电磁感应现象是异步电动机工作原理的基础，所以异步电动机又称为感应电动机。

根据安培定律可知，转子电流与旋转磁场相互作用而产生电磁力 F ，其方向可按左手定则决定。从图 13-13 可见，各转子导体所受的电磁力，对于转子转轴形成电磁转矩 M ，其转矩方向与旋转磁场的转向一致。转子便在这电磁转矩的作用下旋转起来。显然，转子的旋转方向与旋转磁场的转向一致。

从上面的讨论中可以看出异步电动机的作用：就是从电源输入电能给定子，建立旋转磁场，并以旋转磁场为媒介，通过电磁感应的形式，把电能传递给转子；转子再把从旋转磁场取得的能量，通过电磁力的作用，变换成机械能，于是电动机便拖动生产机械（例如泵、鼓风机、机床等）旋转而做功，输出机械能。

但是，异步电动机转子的转速 n 必定低于同步转速 n_1 。这是因为如果转子转速达到同步转速，则转子与旋转磁场之间就没有相对运动，转子导体将不切割磁通，于是转子导体中不产生感应电动势，转子电流和电磁转矩都将不再存在，所以电动机转子不可能维持在同步转速运行。由此可见，异步电动机的转子转速只有在低于同步转速的情况下，才能产生电磁转矩来维持它的稳定运行。

这就是说，转子转速异于旋转磁场的同步转速是保证转子旋转的必要因素，故称为异步电动机。

既然异步电动机的转子转速 n 与旋转磁场的同步转速 n_1 之差是保证异步电动机工作的必要因素，所以掌握这两转速之差的概念，在分析异步电动机的运行情况时，有着很重要的意义。为此，将两转速之差称为转差，也称滑差

$$\Delta n = n_1 - n \quad (13-6)$$

而把转差与同步转速之比值称为转差率，也称滑差率

$$s = \frac{\Delta n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (13-7)$$

当转子不动时， $n=0$ ，则转差率 $s=1$ 。当理想空载时，即转子转速与同步转速相等 $n=n_1$ ，则转差率 $s=0$ 。所以异步电动机的转差率在 0 与 1 的范围内，即 $0 < s \leq 1$ 。转子转速越接近同步转速，转差率越小。对于一般常用的异步电动机，在额定负载时的额定转速 n_n 很接近同步转速，所以它的额定转差率 s_n 很小，约为 $0.01 \sim 0.06$ 。

【例题 13-2】 一台异步电动机的额定转速 $n_n = 730$ 转/分，电流的频率 $f = 50$ 赫。问其额定转差率 s_n 为多少？

【解】 因为异步电动机的额定转速必须低于和接近同步转速，而略高于 730 转/分的同步转速为 750 转/分，所以它的额定转差率为（用百分数表示）

$$s_n = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% = \frac{750 - 730}{750} \times 100\% = 2.67\%$$

13-4 异步电动机的电磁转矩

异步电动机的电磁转矩，是由转子中各个载流导体在旋转磁场的作用下受到的电磁力对于转子转轴所形成的转矩之总和。根