

# 电学

下 册

华中师范学院物理系  
电学教研室编

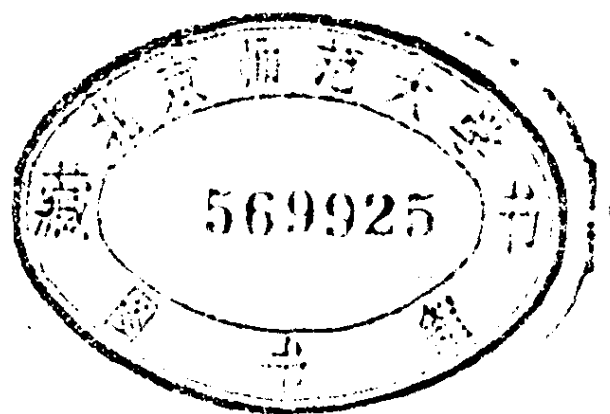
人民教育出版社

# 电 学

下 册

华中师范学院物理系  
电学教研室编

321/60/07



人 民 教 育 出 版 社

1977年·北京

# 电 学

下 册

华中师范学院物理系电学教研室编

\*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

\*

1977年8月第1版 1978年2月第1次印刷

书号 13012·049 定价 1.20 元

## 关于本书所用文字符号的说明

本书所用文字符号,除国际通用者外,均根据1964年颁布的中华人民共和国国家标准 GB315-64《电工设备文字符号编制通则》所规定的原则,采用了我国汉语拼音字母。为了便于识别起见,凡是采用汉语拼音字母的下标符号,均以小写斜体字表示。兹将本书所用汉语拼音字母下标的意义列表说明如下(上、中册已经出现过的符号,这里就不重复了):

符 号	意 义	符 号	意 义
$B_{pj}$	平均磁感应强度	$M_e$	电机额定转矩
$B_g$	气隙磁密	$M_f$	电机反抗转矩
$D_n$	定子铁心内径	$M_q$	电机起动转矩
$D_w$	定子铁心外径	$P_{sh}$	水流功率
$H_d$	定子轭高	$r_d$	电气设备接地电阻
$I_{bph}$	通过低压保安器的不平衡电流	$R_l$	励磁电阻
$I_e$	额定电流	$r_r$	人体电阻
$I_{fs}$	电气设备发生碰壳的故障电流	$S_e$	电机线槽截面积
$I_l$	励磁电流	$U_e$	额定电压
$I_q$	起动电流	$U_f$	反馈讯号电压
$I_r$	通过人体的电流	$U_{fj}$	可控硅反向击穿电压
$I_s$	电枢电流	$U_{sh}$	可控硅正向转折电压
$I_w$	可控硅的维持电流	$X_s$	电机转子电抗
$k_d$	电机绕组短距系数	$\eta_e$	传动装置效率
$k_f$	电机绕组分布系数	$\eta_f$	发电机效率
$k_{ks}$	低压保安器电流回收系数	$\eta_s$	水轮机效率

# 目 录

第四章 电力电器	1
§ 4-1 三相异步电动机的结构与工作原理	1
(一) 三相异步电动机的结构	1
(二) 三相异步电动机的工作原理	6
(三) 三相异步电动机的铭牌	14
§ 4-2 三相异步电动机的定子绕组及其修理	16
(一) 定子绕组的分布	17
(二) 电动机的修理	28
§ 4-3 三相异步电动机的运行和起动	44
(一) 定子电路和转子电路	45
(二) 异步电动机的转矩	52
(三) 三相异步电动机的起动	56
实验一 三相异步电动机的测试	61
§ 4-4 三相异步电动机的控制与调速	64
(一) 三相异步电动机的控制和保护	64
(二) 电动机的调速	69
§ 4-5 直流电机	74
(一) 直流电机的构造和工作原理	74
(二) 直流电机的电枢绕组和电枢反应	77
(三) 直流电机的电动势与转矩	82
(四) 直流电机的运行	86
(五) 直流电动机的运行	94
§ 4-6 其他几种电动机	101
(一) 单相异步电动机	102
(二) 交直流(串励)两用电动机	109

(三) 锥形电动机和傍磁电动机·····	110
(四) 直线感应电动机·····	111
§ 4-7 同步电机·····	113
(一) 同步发电机的结构原理·····	114
(二) 同步发电机的运行性能·····	125
(三) 同步电动机·····	137
<b>实验二 同步发电机的运行和并网</b> ·····	142
§ 4-8 农村小型水电站·····	145
(一) 水力发电站的水源和水轮机·····	145
(二) 水轮机和发电机的出力、配套与调速·····	148
(三) 农村水电站的电气设备和电气主结线·····	152
(四) 水电站的继电保护装置·····	166
(五) 异步发电机·····	170
<b>实验三 异步电动机发电</b> ·····	178
§ 4-9 农村输配电·····	180
(一) 输配电简介·····	181
(二) 农村小型配电网的设计·····	185
§ 4-10 农村安全用电·····	206
(一) 触电对人体的危害及几种触电情况·····	206
(二) 保护接地和保护接中线·····	210
(三) 低压保安器·····	213
(四) 防雷·····	217
§ 4-11 可控硅整流器及其应用·····	224
(一) 可控硅元件的性能及其主要参数·····	225
(二) 小型同步发电机可控励磁装置·····	233
(三) 直流电动机可控硅无级调速·····	260
<b>第五章 电磁波</b> ·····	275
§ 5-1 电磁运动的基本规律·····	275
(一) 电磁场的物质性 电磁场的能量密度·····	276

(二) 电场、磁场的相互转化·····	280
(三) 电磁运动基本方程组·····	285
§ 5-2 电磁波的发生——电磁振荡·····	295
(一) 自由电磁振荡·····	296
(二) 等幅振荡的产生·····	302
实验一 单管音频振荡器的安装与使用·····	305
§ 5-3 电磁波的传播及其性质·····	306
(一) 电磁波的基本性质·····	307
(二) 电磁波在绝缘介质中的传播·····	312
(三) 电磁波在导电媒质中的传播 趋肤效应和高频淬火·····	322
§ 5-4 无线电波·····	330
(一) 无线电波的发射·····	330
(二) 无线电波的传播·····	340
§ 5-5 电磁波谱·····	348
(一) 无线电波·····	350
(二) 光波·····	354
(三) 光的粒子性 激光·····	356
(四) X射线和 $\gamma$ 射线·····	364
第四章习题·····	370
第五章习题·····	372

## 第四章 电力电器

解放前,我国电机制造工业十分落后,当时仅有的所谓电机厂规模很小,只能生产一些最普通的小功率电动机,而且大部分材料依靠进口,产品质量低,产量少,规格型号十分混乱。

建国以后,特别是无产阶级文化大革命以来,在毛主席无产阶级革命路线指引下,我国电机制造工业得到了迅速的发展。现在能大量生产各种型号的大、中、小型交直流电机,产品质量不断提高,规格型号统一,电机生产系列化,而且微型电机和其他特殊电机的产量也不断迅速增长,为工农业生产电气化、自动化提供了日益丰富的动力设备。

电动机的种类很多,本章前几节着重介绍工农业生产和日常生活中用得最多的异步电动机。

### § 4-1 三相异步电动机的结构与工作原理

#### (一) 三相异步电动机的结构

三相异步电动机有各种不同的外部结构,最常见的有防护式和封闭式两种。防护式的机座两侧和下部有若干个通风孔道,通

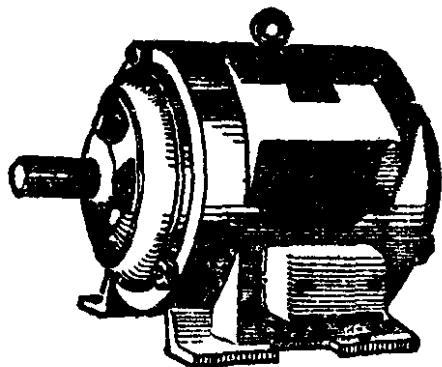


图 4-1-1

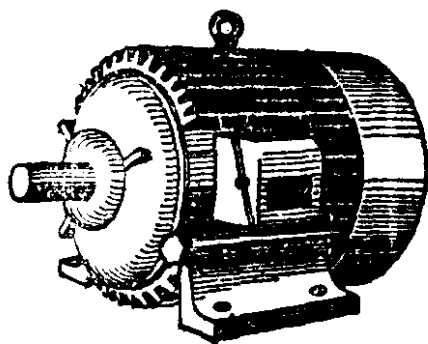


图 4-1-2



风孔上有突出边缘,可防止雨滴和其它异物落入电机内部,它的外形如图 4-1-1 所示。封闭式的机壳是封闭的,能防止飞溅的异物和灰尘进入机体内部,但并不完全密封,机座底部两端各有一小孔,用以流出冷凝水,它的外形如图 4-1-2 所示。除了防护式和封闭式以外,其他还有防爆式,潜水泵式,开启式等等。

尽管三相异步电动机在外形上有多种形式,但它们的基本结构相同,都是由两部分构成:一部分是固定部分,称为定子;另一部分是旋转部分,称为转子。根据转子绕组的构造不同,可把电动机分为鼠笼式和线绕式两类。由于生产上最常用的是鼠笼式电动机,所以我们重点讨论这类电动机,其构造如图 4-1-3 所示。下面分别介绍它的各部分结构及其作用。

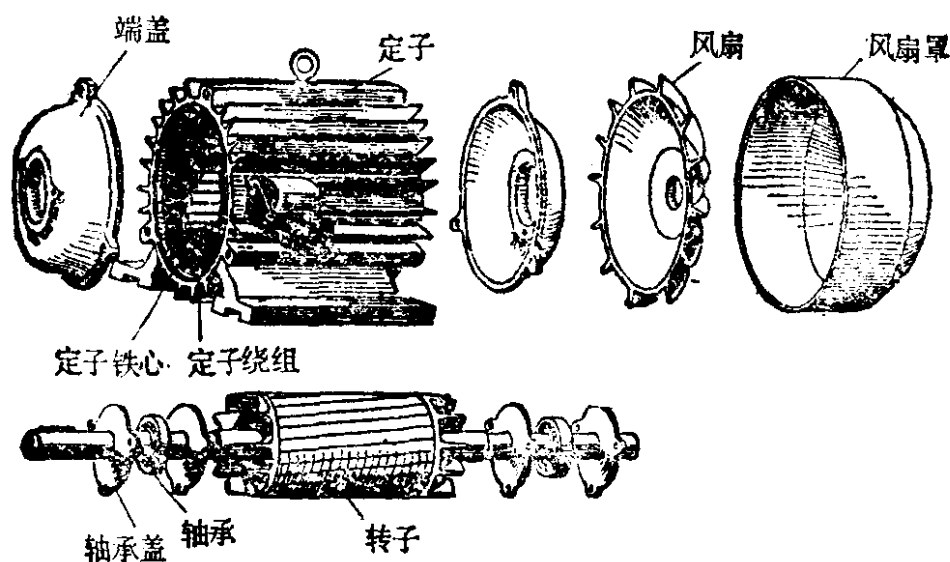


图 4-1-3

### (1) 定子

定子是由定子铁心、定子绕组和外壳(机座)三部分组成。

定子铁心构成电动机的导磁磁路的一部分,一般采用0.35~0.5毫米厚的导磁性能良好的圆环形硅钢片叠成,片与片之间相互绝缘,以减小铁心的涡流。硅钢片的内圆上冲有均匀分布的一个个槽口,用以嵌放绕组,如图 4-1-4 所示(图 a 为圆底槽,图 b 为平

底槽)。图中还标出了定子铁心的内径 $D_n$ ，外径 $D_w$ 和定子轭高 $H_d$ 。

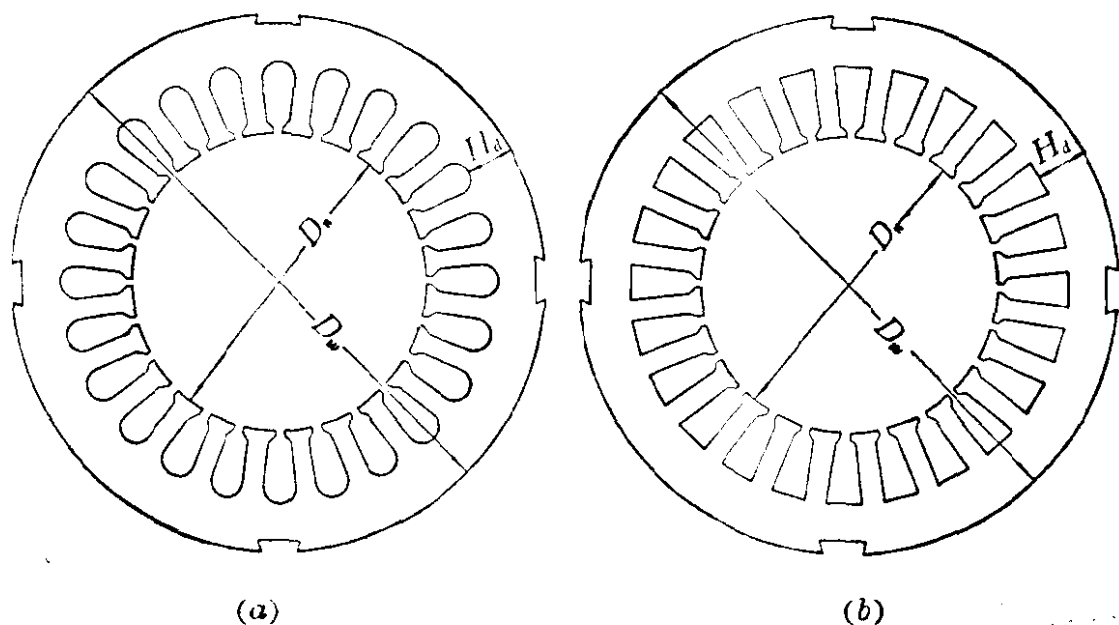


图 4-1-4

定子绕组构成定子电路，当接通三相交流电以后，可建立磁场。定子绕组由三组独立的对称线圈组成，这些线圈按一定规律嵌放于定子槽内，组成三相绕组。三相绕组有六个引出头，接在电动机接线盒的引出端子上( $D_1-D_4, D_2-D_5, D_3-D_6$ )，使用时将其联成Y形或 $\Delta$ 形，如图4-1-5所示。

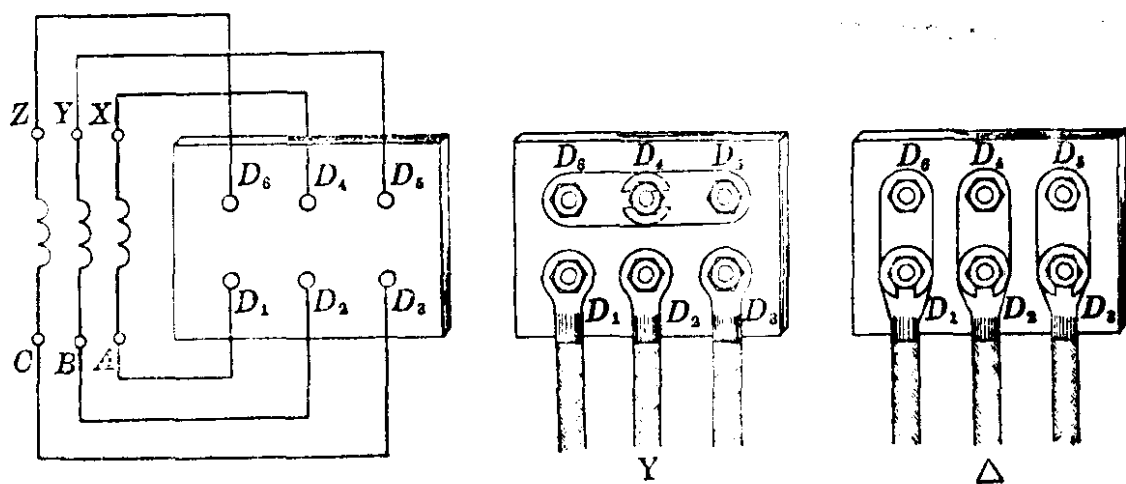


图 4-1-5

为了保证绕组对铁心的绝缘(又称对地绝缘)，必须在槽与线圈之间垫上绝缘胶纸或黄腊绸或涤纶薄膜青壳纸。最近我国工人

还试验成功了在槽内四周喷涂环氧粉末树脂新工艺。绕组导线用竹料槽楔固定在槽内。绕组线圈一般采用高强度漆包铜线。因铜是重要的战略物资,为了节省铜材,目前我国许多电机厂广泛采用以铝代铜的办法,取得了良好的效果。

机座固定定子铁心和支承端盖,并通过端盖支承转子铁心。一般机座都由铸铁或铸钢制成。电机在运行过程中,内部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。改善散热条件是电机制造中的一个重要问题。例如防护式电动机可通过通风孔道散热。封闭式电动机则通过机座表面的散热筋增加散热面积,以获得良好的散热效果。

为了减轻电机重量,节约材料,现正在逐渐试用一种箱式电动机。这种电动机省去了整体的铸铁外壳,把下半部改用仅仅用来支撑转子和定子的支架,而上半部是用薄铁皮做的如同箱盖一样的外罩,故称为箱式电动机。箱式电动机不但重量轻,而且使用和维修也比较方便。

## (2) 转子

转子由转子铁心、转子绕组和转轴三部分组成。转子是电动机的旋转部分,用以拖动其他机械。

转子铁心也是构成导磁磁路的一部分,它和定子铁心以及定子与转子间的气隙一起组成整个电动机的磁路。转子铁心由外圆冲有槽口的硅钢片叠压成圆柱体,直接紧套在转轴上,转轴与铁心之间用

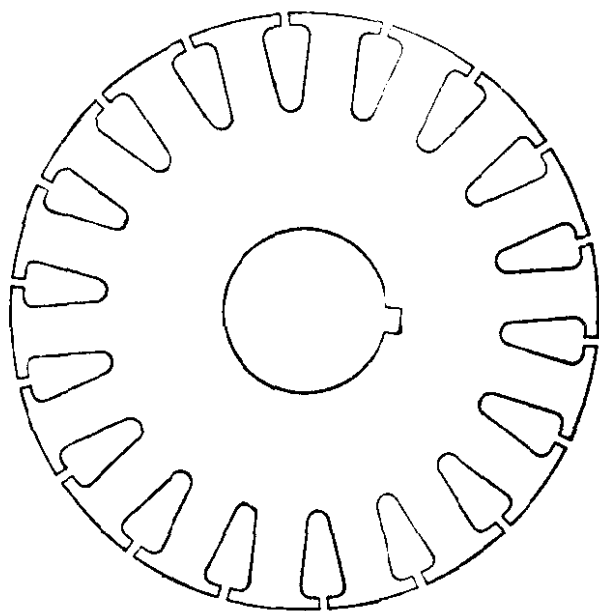


图 4-1-6

轴键固联。硅钢片的槽口对齐成槽，以便嵌放转子绕组。转子铁心硅钢片如图 4-1-6 所示。

转子绕组有两种类型。最常用的一种是在转子铁心槽内嵌入铜条，铜条的两端用短路环焊接形成转子绕组。这样的转子绕组如果去掉铁心就如同老鼠笼一样(见图 4-1-7a)，因此这种绕组的转子称为鼠笼式转子。为节省铜材，现在中小型电动机一般都采

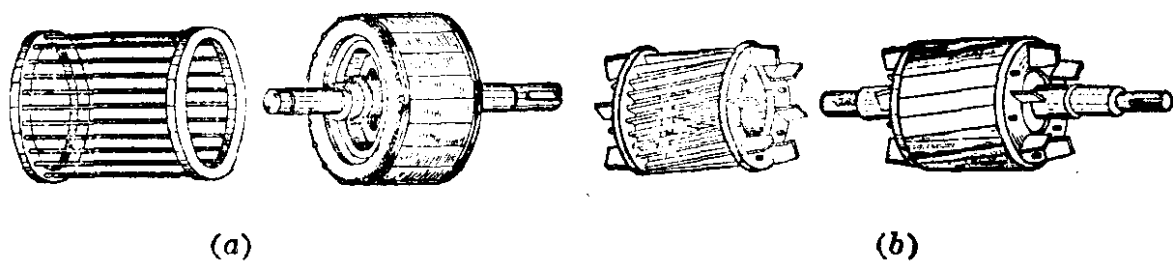


图 4-1-7

用铝铸鼠笼式转子，即把熔化了的铝浇铸在转子铁心的槽沟中，两端端环(连同风扇)也一起铸成整体，如图 4-1-7(b)所示。另一种类型的绕组是由导线绕制成的，嵌放在转子槽中，如图 4-1-8 所示。这种转子绕组也是三相绕组，它可以联成星形或三角形，实际中一般都联成星形，三相绕组的末端联在一起，三个始端焊接到轴上

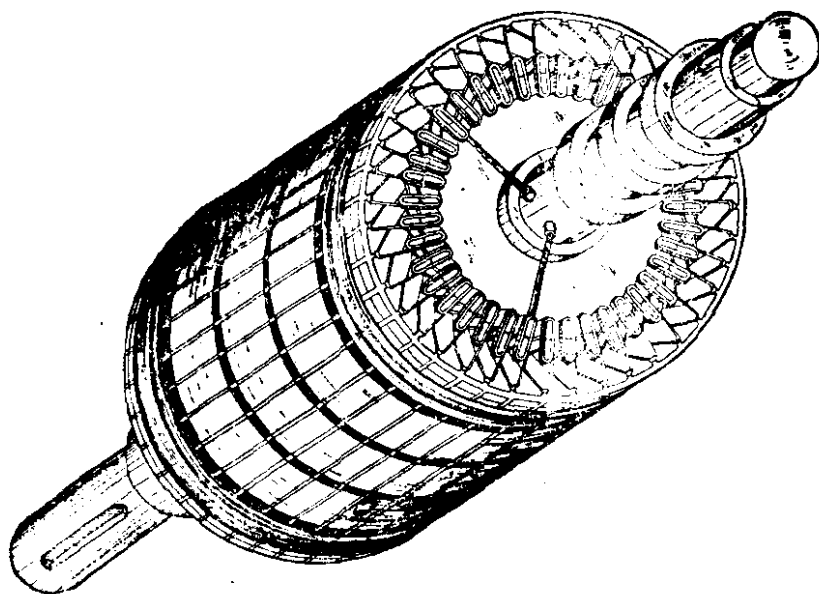


图 4-1-8

三个彼此绝缘的滑环上。这种绕组的转子称为线绕式转子。

转轴是由圆钢制成的，用以支承转子并拖动其他机械旋转。

异步电动机除定子和转子两大部分之外，还有端盖、风扇、风扇罩和滚珠轴承等部件，如图 4-1-3 所示。它们起着防护、支承或传动等作用。

## (二) 三相异步电动机的工作原理

### (1) 工作原理

当三相异步电动机的定子绕组接通三相交流电源以后，转子就会立刻旋转起来，并且可以输出一定的机械功，拖动其它机械。为什么定子绕组接通三相交流电以后，电动机的转子就会旋转呢？毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。任何事物内部都有这种矛盾性，因此引起了事物的运动和发展。”要了解三相异步电动机转动的道理，必须分析它的内部矛盾性。

在具体分析电动机内部的矛盾运动以前，我们先来做一个简单的演示实验，以利于了解电动机的转动原理。

在一个可以转动的马蹄形磁铁的磁极之间，用细线悬吊一个矩形闭合线圈，如图 4-1-9 所示。旋转马蹄形磁铁时，它所形成的磁场随之旋转。我们发现，在这旋转磁场的作用下，

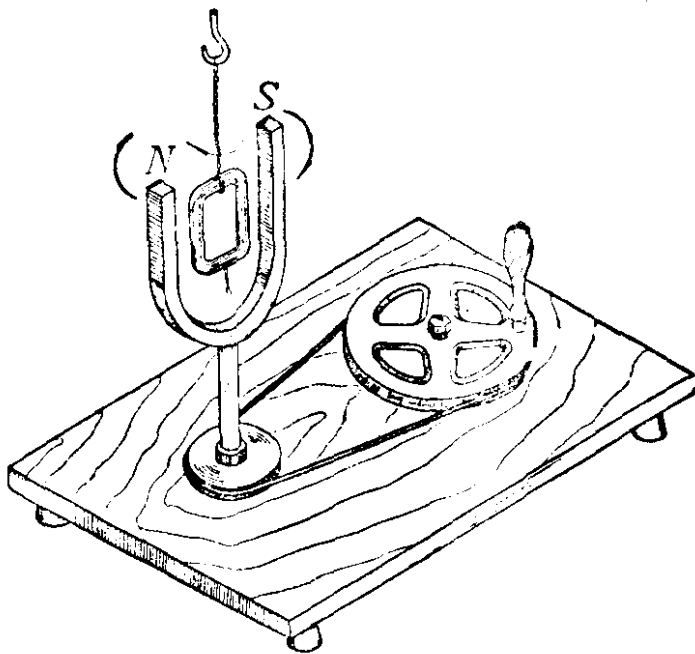


图 4-1-9

闭合的矩形线圈朝着和磁铁旋转相同的方向也旋转起来。这是为什么呢？根据电磁感应定律，在闭合线圈切割旋转磁场磁力线的时候，线圈中就会产生感应电流，这个感应电流，与磁场相互作用的结果，使线圈受到一个力矩而转动起来。因此，在这里使闭合线圈转动的基本条件是它受到了一个旋转磁场的作用。

下面我们将要说明，异步电动机转子转动的原因，也是由于转子线圈受到一个旋转磁场的作用，当然这一旋转磁场并不是像上述实验中依靠转动磁铁产生的，而是利用电流产生的。当电动机定子绕组接上三相交流电源后，也会产生旋转磁场，为了说明这个道理，我们首先分析一下定子绕组接通三相交流电以后的情况。

我们具体解剖一个最简单的六槽电动机绕组。这种绕组是由三个绕组线圈( $D_1-D_4$ ,  $D_2-D_5$ ,  $D_3-D_6$ )组成的，它们分别嵌放在六个定子槽中。每个绕组始端之间相隔  $120^\circ$ ，如图 4-1-10(a)所示。图中  $D_1, D_2, D_3$  表示线圈的始端， $D_4, D_5, D_6$  表示线圈的末端。把三个末端联接在一起，使三相绕组接成 Y 形，三个始端  $D_1, D_2, D_3$  分别接在三相电源的 A、B、C 三根火线上。于是定子绕组内便有电流  $i_A, i_B, i_C$  通过，如图 4-1-10(b)所示。由于三相定子绕组的匝数

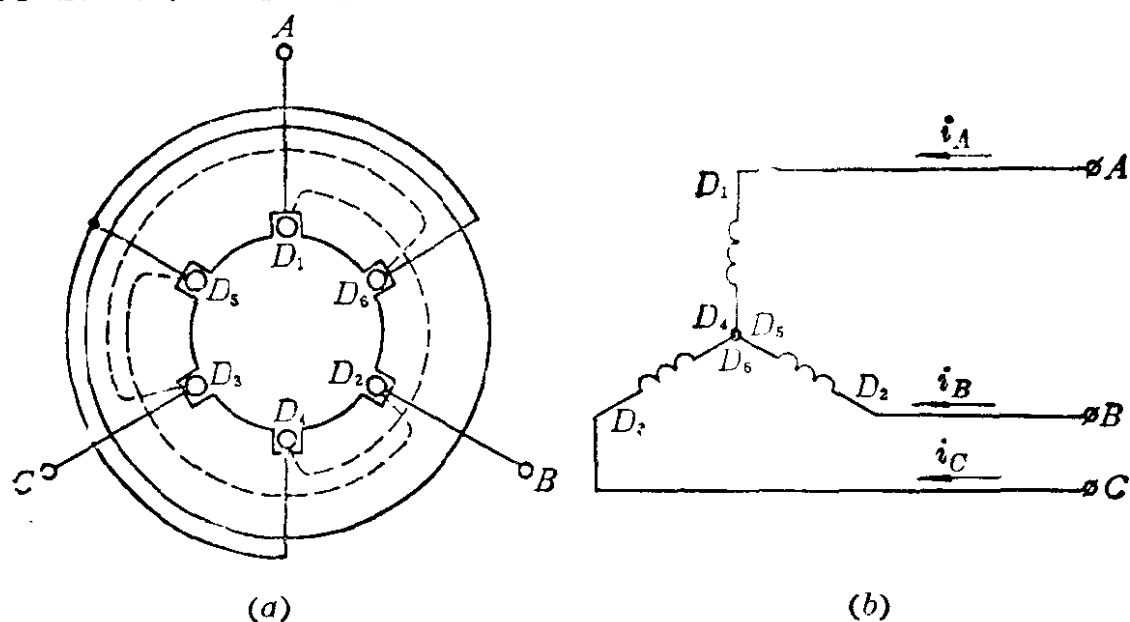


图 4-1-10

和几何形状相同，它们在定子铁心中的分布完全对称。所以， $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  是对称的三相电流，并可表示为

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t \\ i_B &= I_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_C &= I_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4-1-1)$$

由于电流是交变的，因此每个线圈中的电流所产生的磁场也是交变的磁场。但是，定子内腔中的磁场则是三个绕组产生的合磁场。这一合磁场是怎样变化的呢？

为了研究方便，规定电流的正方向是由绕组始端流进而从末端流出，与此相反的方向为电流的负方向。在图形上从定子槽的端部看，凡是线圈中电流流进的一端都以 $\otimes$ 表示，线圈中电流流出的一端都以 $\odot$ 表示。由于各相电流都是正弦交变电流，所以，我们只需分析在电流变化一个周期内合磁场变化的情况就可以了。

图 4-1-11(a)，表示在一个周期内，各相电流随时间变化的曲线。我们来具体分析图中所标明的几个典型时刻的合磁场方向。

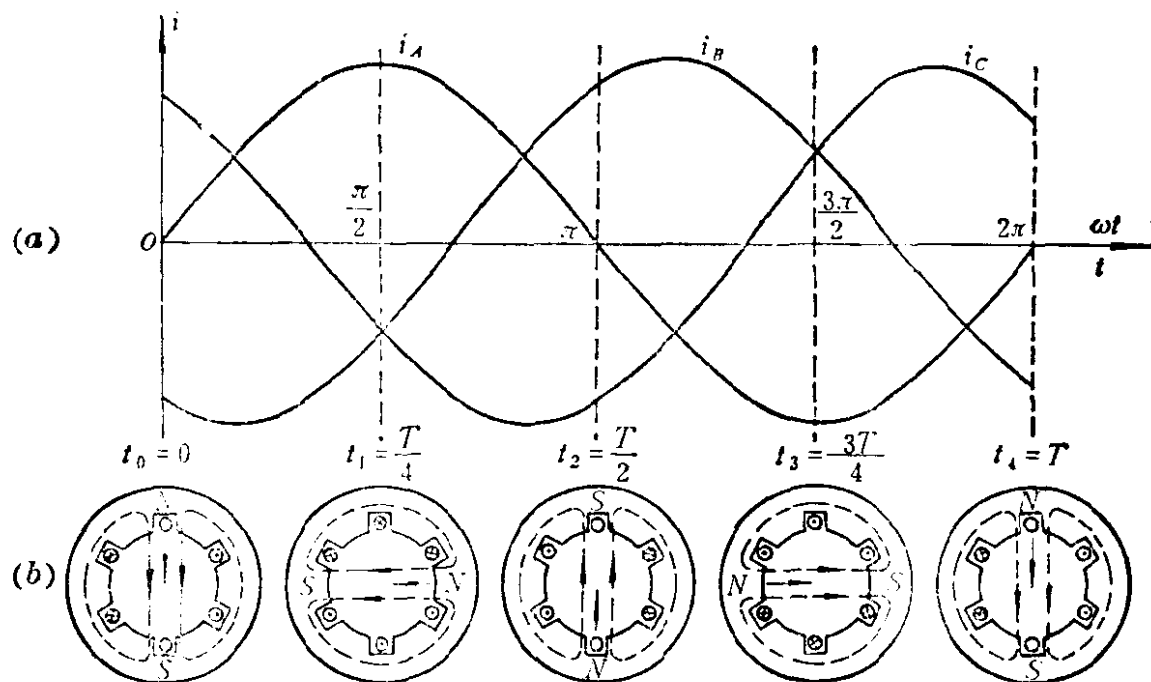


图 4-1-11

当 $t=0$ 时,从式(4-1-1)和图4-1-11(a)知, $A$ 相绕组( $D_1-D_4$ )中的电流 $i_A=0$ , $B$ 相绕组( $D_2-D_5$ )中的电流 $i_B$ 为负, $C$ 相绕组( $D_3-D_6$ )中的电流 $i_C$ 为正。这些电流在绕组中的方向绘于图4-1-11(b)中与 $t=0$ 相对应处。根据右手螺旋定则,此时三个绕组中的电流在定子腔中产生的合磁场是从上指向下,即上部是北极( $N$ 极),下部是南极( $S$ 极)。用同样的方法可以确定,其它时刻的合磁场的方向,如图4-1-11(b)所示。

通过上述分析可以看出,合磁场的方向随着三相电流周期性地变化,作有规则的旋转。这就是说,当定子绕组接通三相交变电流以后,在定子腔内产生一个旋转磁场。

转子又是如何因为受到旋转磁场的作用而转动的呢?假设某一瞬时,定子绕组产生顺时针方向的旋转磁场,如图4-1-12所示,图中带箭头的闭合实线表示定子绕组电流所产生的磁场的磁力线。定子铁心上的小圆圈表示定子绕组线圈端点,转子铁心上的小圆圈表示鼠笼式转子导体的端点。当磁场沿顺时针方向旋转时,静止的转子就和磁场有相对运动。这相当于磁场不动,转子导体向逆时针方向旋转而切割磁力线。

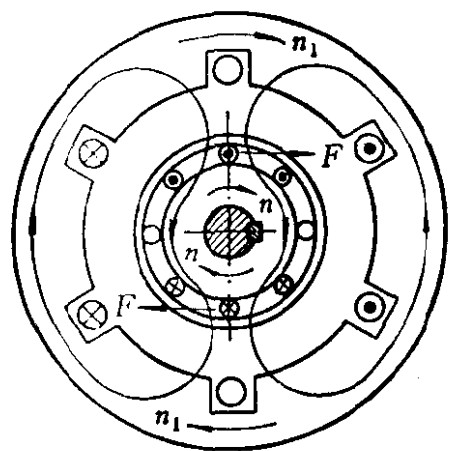


图 4-1-12

于是转子导体上就产生感应电动势。因为转子导体是鼠笼形的闭合导体,所以转子导体中便有感应电流。

根据右手定则,可以决定转子绕组中感应电流的方向。根据电流和磁场相互作用原理,转子绕组中的感应电流也要与旋转磁场相互作用,而使转子导体上受到电磁力的作用。电磁力的方向可用左手定则判定。图4-1-12中标出了转子上部和下部导体所受电磁力 $F$ 的方向。可见,在转子上受到一个使其沿顺时针方向(即



与磁场旋转同方向)旋转的力的作用,于是转子就旋转起来。

从上述分析中可以看出,电动机内部的电磁矛盾运动过程是:首先,当定子线圈接通三相交流电以后,在定子腔内产生旋转磁场,实现电转化为磁的矛盾运动;其次,由于旋转磁场的作用,在电动机的转子绕组中产生感应电流,而实现磁转化为电的矛盾运动;转子绕组中产生感应电流后,感应电流又与磁场相互作用而产生转动力矩,从而最终实现电能转化为机械能的过程。这就是三相异步电动机内部的矛盾运动,也就是它的工作原理。

## (2) 旋转磁场的特性

显然,异步电动机转动的关键是定子绕组接通三相交流电以后要产生旋转磁场。为此,我们再回过来研究旋转磁场的特性。

**旋转磁场的转速:**从图 4-1-10 的分析中可以看出,对于六槽电动机这种简单的定子绕组来说,定子绕组中的电流每变化一周时,旋转磁场在空间也旋转了一周。因此,若电流的频率为  $f$ ,则旋转磁场一分钟的转数(即转速)为  $n_1 = 60f$  转/分。

实际上,电机的定子绕组比上例复杂,线圈数目和定子槽数都比较多。在一般情况下,旋转磁场的转速如何确定呢?这里我们举一个十二槽的定子绕组为例来分析。

把六个线圈  $D_1-D_4$ ,  $D_2-D_5$ ,  $D_3-D_6$ , 与  $D'_1-D'_4$ ,  $D'_2-D'_5$ ,  $D'_3-D'_6$  分别嵌放在 12 个定子槽中,如图 4-1-13(a)那样安排,使每相绕组有两个线圈串联,绕组的始端之间在空间相隔  $60^\circ$  机械角(因为两槽之间为  $30^\circ$ ,相隔  $60^\circ$  就是相隔一个槽),并将三相绕组联成 Y 形,然后接上三相电源,如图 4-1-13(b) 所示。

当这样的绕组接通三相交流电以后,经过与前面分析六槽定子绕组电流磁场的方法类似的分析可以得知,和图 4-1-10(b)所示的情况不同,定子腔内不只有对磁极,而是有两处“发出”磁力线(北极),两处“收入”磁力线(南极),即产生了四个磁极。这样的