

高等学校试用教材

# 电 工 学

下 册

哈尔滨工业大学电工学教研室编

秦 曾 煌 主 编

人 民 教 育 出 版 社

1  
/3

TM1

11/3

高等学校试用教材

# 电 工 学

下 册

哈尔滨工业大学电工学教研室编

秦 曾 煌 主 编

人 民 教 育 出 版 社



本书是按照 1977 年 12 月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上讨论和修订的机械、动力类《电工学教材编写大纲》(150 学时)编写的,可作为该类专业电工学课程的试用教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书分三册出版。上册是电路与磁路部分;中册是电子技术部分;下册是电机与控制部分。每章均附有习题。

本书下册由秦曾煌同志编写,柳焯同志曾提出了 22-8 节的初稿。为了适应不同专业的需要,下册内容较全面,各专业可选讲其中部分章节。

高等学校试用教材

## 电 工 学

下 册

哈尔滨工业大学电工学教研室编

秦 曾 煌 主 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

\*

787×1092 1/32 印张 4.375 字数 106,000

1979 年 5 月第 1 版 1979 年 10 月第 1 次印刷

印数 00,001—130,000

书号 15012·088 定价 0.38 元

# 目 录

## 第三部分 电机与控制

<b>第十八章 异步电动机</b> .....	1
18-1. 电动机概述.....	1
18-2. 三相异步电动机的转动原理.....	2
18-3. 三相异步电动机的极数与转速.....	5
18-4. 三相异步电动机的构造.....	8
18-5. 定子电路.....	10
18-6. 转子电路.....	12
18-7. 三相异步电动机的转矩与机械特性.....	15
18-8. 三相异步电动机的起动.....	21
18-9. 三相异步电动机的调速.....	27
18-10. 三相异步电动机的制动.....	29
18-11. 三相异步电动机的名牌数据.....	31
18-12. 单相异步电动机.....	36
习题.....	41
<b>第十九章 同步电机</b> .....	43
19-1. 同步电机的构造.....	43
19-2. 同步发电机的工作原理.....	45
19-3. 同步发电机与电网并联运行时功率的调节.....	50
19-4. 同步发电机的励磁.....	52
19-5. 同步电动机的工作原理.....	54
19-6. 励磁电流对同步电动机运行情况的影响.....	57
习题.....	59
<b>第二十章 直流电机</b> .....	61
20-1. 直流电机的构造.....	61
20-2. 直流电机的基本工作原理.....	63

20-3.	直流发电机	66
20-4.	并励电动机的机械特性	72
20-5.	并励电动机的起动与反转	75
20-6.	并励电动机的调速	77
	习题	81
<b>第二十一章 控制电机</b>		<b>83</b>
21-1.	伺服电动机	83
21-2.	测速发电机	87
21-3.	自整角机	91
21-4.	步进电动机	94
21-5.	旋转变压器	100
<b>第二十二章 控制电器与控制系统</b>		<b>104</b>
22-1.	常用控制电器	105
22-2.	鼠笼式电动机直接起动的控制线路	110
22-3.	鼠笼式电动机正反转的控制线路	114
22-4.	行程控制	116
22-5.	时间控制	117
22-6.	速度控制	121
22-7.	电液控制	122
22-8.	自动调节系统	126
	习题	131
<b>中英名词对照</b>		<b>133</b>

## 第三部分 电机与控制

### 第十八章 异步电动机

#### 18-1. 电动机概述

由于生产过程的机械化，现代各种生产机械都广泛应用电动机来驱动。电动机的作用是将电能转换为机械能。

有的生产机械只装配着一台电动机，如单轴钻床；有的需要好几台电动机，如某些机床的主轴、刀架、横梁以及润滑油泵和冷却油泵等都是由单独的电动机来驱动的。常见的桥式起重机上就有三台电动机。

生产机械由电动机驱动有很多优点：简化生产机械的结构；提高生产率和产品质量；能实现自动控制和远距离操纵；减轻繁重的体力劳动。

电动机可分为交流电动机和直流电动机两大类。交流电动机又分为异步电动机（或称感应电动机）和同步电动机。直流电动机按照励磁方式的不同分为并励、串励和复励三种。

在生产上主要用的是交流电动机，特别是三相异步电动机。它被广泛地用来驱动各种金属切削机床、起重机、锻压机、传送带、铸造机械、功率不大的通风机及水泵等。仅在需要均匀调速的生产机械上，如龙门刨床、轧钢机及某些重型机床的主传动机构，以及在某些电力牵引和起重设备中才采用直流电动机。同步电动机主要应用于功率较大、不需调速、长期工作的各种生产机械，如压缩机、

水泵、通风机等。此外，在自动控制系统和计算装置中还用到各种控制电动机。

对于各种电动机我们应该了解下列几个方面的问题：(1)基本构造；(2)工作原理；(3)表示转速与转矩之间关系的机械特性；(4)起动、反转、调速及制动的基本原理和基本方法；(5)应用场合和如何正确接用。

### 18-2. 三相异步电动机的转动原理

将三相异步电动机接上电源，就会转动。这是什么道理呢？为了说明这个转动原理，我们先来做个演示。

图 18-1 所示的是一个装有手柄的蹄形磁铁，磁极间放有一个可以自由转动的、由铜条组成的转子。铜条两端分别用铜环联接起来，形似鼠笼，可称为鼠笼式转子。磁极和转子之间没有机械联系。当我们摇动磁极时，发现转子跟着磁极一起转动。摇得快，转子转得也快；摇得慢，转得也慢；反摇，转子马上反转。下面来解释转子转动的原理。

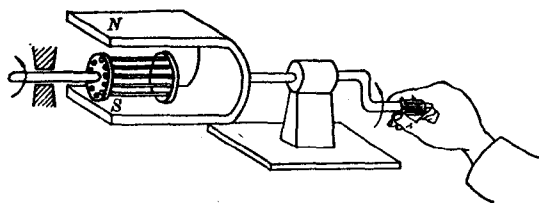


图 18-1 异步电动机转子转动的演示

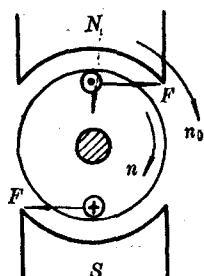


图 18-2 转子转动的原理图

如果我们摇动磁极让它向顺时针方向旋转，磁极的磁力线切割转子铜条(图 18-2，图中只示出两根铜条)，铜条中就感应出电动势。电动势的方向由右手定则确定。在这里应用右手定则时，

可假设磁极不动，而转子铜条向逆时针方向旋转切割磁力线，这与实际上磁极向顺时针方向旋转磁力线切割转子铜条是相当的。

在电动势的作用下，闭合的铜条中就有电流。这电流与旋转磁极的磁场相互作用，而使转子铜条受到电磁力  $F$ 。电磁力的方向可应用左手定则来确定。由电磁力产生电磁转矩，转子就转动起来。由图 18-2 可见，转子转动的方向和磁极旋转的方向相同。

在实际的异步电动机中，它的转子为什么会转动，必然也由于旋转磁场的作用。但在异步电动机中，看不到有永久磁极在旋转，那么磁场从何而来，又怎么还会旋转呢？下面就来讨论这个问题。

三相异步电动机的定子铁心中放有三相对称绕组  $AX$ 、 $BY$  和  $CZ$ ，如上册 5-1 节中所讲的那样。设将三相绕组联接成星形，接在三相电源上，绕组中便通入三相对称电流

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

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

$$i_C = I_m \sin (\omega t + 120^\circ)$$

其波形如图 18-3 所示。取绕组始端到末端的方向作为电流的正方向。在电流的正半周时，其值为正，其实际方向即为正方向；在负半周时，其值为负，其实际方向与正方向相反。

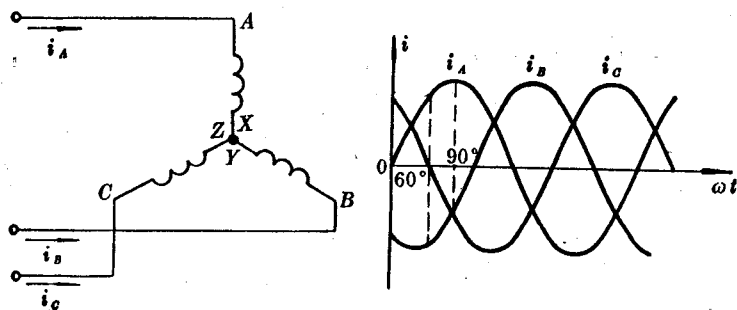


图 18-3 三相对称电流



在  $\omega t = 0$  的瞬时，定子绕组中的电流方向如图 18-4, a 所示。这时  $i_A = 0$ ,  $i_B$  是负的，其方向与正方向相反，即自 Y 到 B;  $i_C$  是正的，其方向与正方向相同，即自 C 到 Z。将每相电流所产生的磁场相加，便得出三相电流的合成磁场。在图 18-4, a 中，合成磁场的方向是自上而下。

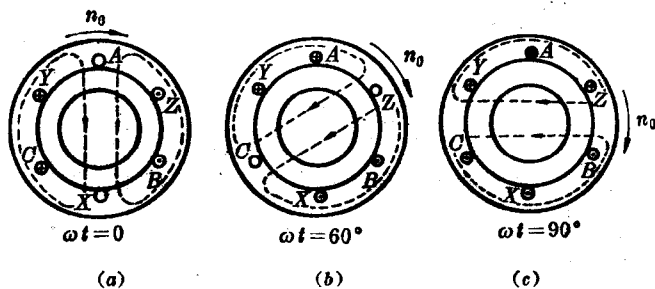


图 18-4 三相电流产生的旋转磁场 ( $p=1$ )

图 18-4, b 所示的是  $\omega t = 60^\circ$  时定子绕组中电流的方向和三相电流的合成磁场的方向。这时的合成磁场已比  $\omega t = 0$  时的在空间转过了  $60^\circ$ 。

同理可得在  $\omega t = 90^\circ$  时的三相电流的合成磁场，它比  $\omega t = 60^\circ$  时的合成磁场在空间又转过了  $30^\circ$ ，如图 18-4, c 所示。

由上可知，当定子绕组中通入三相电流后，它们共同产生的合成磁场是随电流的交变而在空间不断地旋转着，这就是旋转磁场。这旋转磁场同磁极在空间旋转(图 18-1)所起的作用是一样的。也就是，三相电流产生的旋转磁场切割转子导体(铜或铝)，便在其中感应出电动势和电流，转子电流同旋转磁场相互作用而产生的电磁力使电机转动起来。

电动机的转子转动的方向和磁场旋转的方向是相同的；如要电动机反转，必须改变磁场的旋转方向。图 18-4, c 所示的情况是 A 相电流  $i_A = +I_m$ ，这时旋转磁场的方向恰好与 A 相绕组的轴线

一致。在三相电流中，电流出现正幅值的顺序为  $A \rightarrow B \rightarrow C$ ，因此磁场的旋转方向是与这个顺序一致的，即磁场的转向与通入绕组的三相电流的相序有关。

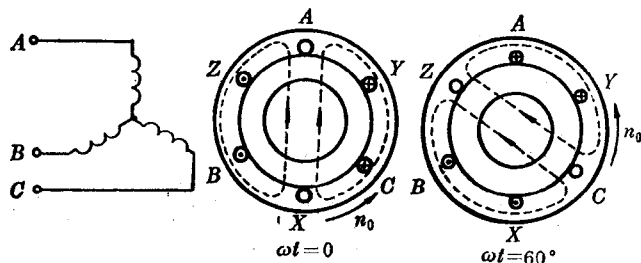


图 18-5 旋转磁场的反转

如果将同三相电源联接的三根导线中的任意两根的一端对调位置(例如对调了  $B$  与  $C$  两相),则电动机三相绕组的  $B$  相与  $C$  相对调(注意:电源三相端子的相序未变),旋转磁场因此反转(见图 18-5),电动机也就跟着改变转动方向。

### 18-3. 三相异步电动机的极数与转速

三相异步电动机的极数就是旋转磁场的极数。旋转磁场的极数和三相绕组的安排有关。在上述图 18-4 的情况下,每相绕组只有一个线圈,绕组的始端之间相差  $120^\circ$  空间角,则产生的旋转磁场具有一对极,即  $p=1$  ( $p$  是磁极对数)。如将定子绕组安排得如图 18-6 那样,即每相绕组有两个线圈串联,绕组的始端之间相差  $60^\circ$  空间角,则产生的旋转磁场具有两对极,即  $p=2$ ,如图 18-7 所示。

同理,如果要产生三对极,即  $p=3$  的旋转磁场,则每相绕组必须有均匀安排在空间的串联的三个线圈,绕组的始端之间相差

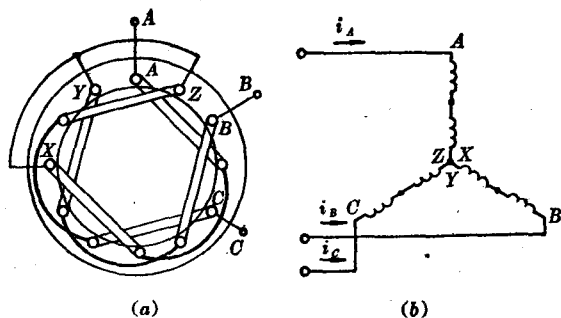


图 18-6 产生四极旋转磁场的定子绕组

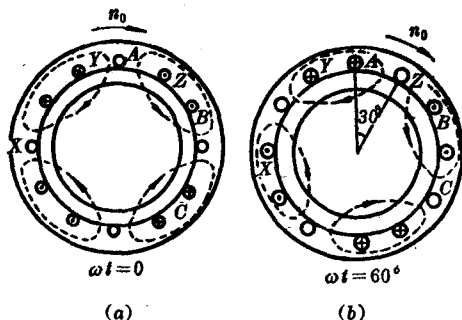


图 18-7 三相电流产生的旋转磁场( $p=2$ )

$40^\circ = \frac{120^\circ}{p}$  空间角。

至于三相异步电动机的转速，它与旋转磁场的转速有关，而旋转磁场的转速决定于磁场的极数。在一对极的情况下，由图 18-4 可见，当电流从  $\omega t=0$  到  $\omega t=60^\circ$  经历了  $60^\circ$  时，磁场在空间也旋转了  $60^\circ$ 。当电流交变了一次（一个周期）时，磁场恰好在空间旋转了一转。设电流的频率为  $f_1$ ，即电流每秒钟交变  $f_1$  次或每分钟交变  $60 f_1$  次，则旋转磁场的转速（转/分）为  $n_0 = 60 f_1$ 。

在旋转磁场具有两对极的情况下，由图 18-7 可见，当电流也从  $\omega t=0$  到  $\omega t=60^\circ$  经历了  $60^\circ$  时，而磁场在空间仅旋转了  $30^\circ$ 。

就是说,当电流交变了一次时,磁场仅旋转了半转,比  $p=1$  情况下的转速慢了一半,即  $n_0 = \frac{60 f_1}{2}$ 。

根据同理可知,在三对极的情况下,当电流交变了一次时,磁场在空间仅旋转了  $\frac{1}{3}$  转,只是  $p=1$  情况下的转速的三分之一,即  $n_0 = \frac{60 f_1}{3}$ 。

由此推知,当旋转磁场具有  $p$  对极时,磁场的转速为

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p} \quad (18-1)$$

因此,旋转磁场的转速  $n_0$  决定于电流频率  $f_1$  和磁场的极对数  $p$ ,而后者又决定于三相绕组的安排情况。对某一异步电动机讲, $f_1$  和  $p$  通常是一定的,所以磁场转速  $n_0$  是个常数。

在我国,工频  $f_1=50$  赫,于是由式(18-1)可得出对应于不同极对数  $p$  的旋转磁场转速  $n_0$ (转/分),见表 18-1。

表 18-1

$p$	1	2	3	4	5	6
$n_0$ (转/分)	3,000	1,500	1,000	750	600	500

由图 18-2 可见,电动机转子转动的方向与磁场旋转的方向相同,但转子的转速  $n$  不可能达到与旋转磁场的转速  $n_0$  相等,即  $n < n_0$ 。因为,如果两者相等,则转子与旋转磁场之间就没有相对运动,因而磁力线就不切割转子导体,转子电动势、转子电流以及转矩也就都不存在。这样,转子就不可能继续以  $n_0$  的转速转动。因此,转子转速与磁场转速之间必须要有差别。这就是异步电动机名称的由来。而旋转磁场的转速  $n_0$  常称为同步转速。

我们用转差率  $s$  来表示转子转速  $n$  与磁场转速  $n_0$  相差的程

度,即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (18-2)$$

转差率是异步电动机的一个重要的物理量。转子转速愈接近磁场转速,则转差率愈小。由于三相异步电动机的额定转速与同步转速相近,所以它的转差率很小。通常异步电动机在额定负载时的转差率约为 1.5~6%。

当  $n=0$  时(起动开始瞬间),  $s=1$ , 这时转差率最大。

式(18-2)也可写为

$$n = (1-s)n_0 \quad (18-3)$$

**例 18-1.** 有一台三相异步电动机,其额定转速  $n=975$  转/分。试求电动机的极数和额定负载时的转差率。电源频率  $f_1=50$  赫。

**解:** 由于电动机的额定转速接近而略小于同步转速,而同步转速对应于不同的极对数有一系列固定的数值(见表 18-1)。显然,与 975 转/分最相近的同步转速  $n_0=1,000$  转/分,与此相应的磁极对数  $p=3$ 。因此,额定负载时的转差率为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% = \frac{1,000 - 975}{1,000} \times 100\% = 2.5\%$$

#### 18-4. 三相异步电动机的构造

三相异步电动机分成两个基本部分: 定子(固定部分)和转子(旋转部分)。图 18-8 所示的是三相异步电动机的构造。

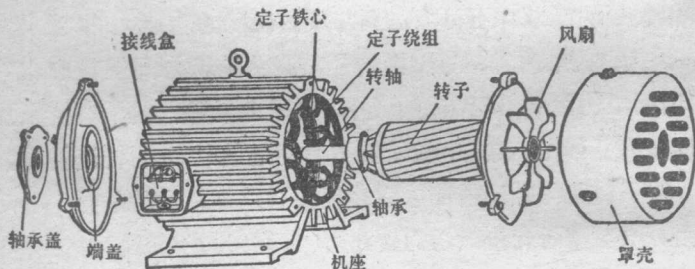


图 18-8 三相异步电动机的构造

三相异步电动机的定子由机座和装在机座内的圆筒形铁心组成。机座是用铸铁或铸钢制成的，铁心是由互相绝缘的硅钢片迭成的。铁心的内圆周表面冲有槽(图 18-9)，用以放置对称三相绕组  $AX$ 、 $BY$ 、 $CZ$ ，有的联接成星形，有的联接成三角形。

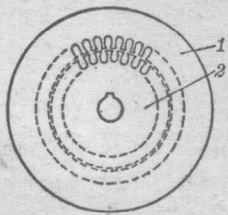


图 18-9 定子和转子的铁心片：

1—定子；2—转子

三相异步电动机的转子根据构造上的不同分为两种型式：鼠笼式和绕线式。转子铁心是圆柱状，也用硅钢片迭成，表面冲有槽(图 18-9)。铁心装在转轴上，轴上加机械负载。

鼠笼式的转子绕组做成鼠笼状，就是在转子铁心的槽中放铜条，其两端用端环联接(图 18-10)。或者在槽中浇铸铝液，铸成

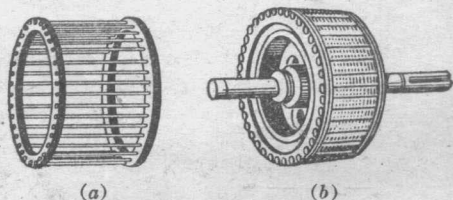


图 18-10 鼠笼式转子：

(a) 鼠笼式绕组；(b) 转子外形

一鼠笼(图 18-11)。这样便可以用比较便宜的铝来代替铜，同时制造也快。因此，目前中小型鼠笼式电动机差不多都采用铸铝转子。鼠笼式异步电动机的“鼠笼”是它的构造特点，易于识别。

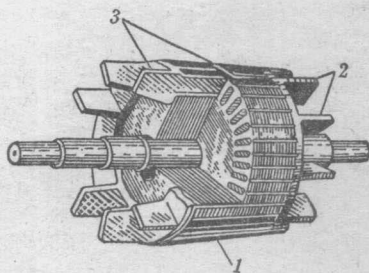


图 18-11 铸铝的鼠笼式转子：

1—转子铁心；2—风叶；3—铸铝条

绕线式异步电动机的构造

如图 18-12 所示，它的转子绕组同定子绕组一样，也是三相的；它联成星形。每相的始端联接在三个铜制的滑环上，滑环固定在转轴上。环与环，环与转轴都互相绝缘。在环上用弹簧压着碳质电刷。以后就会知道，起动电阻和调速电阻是借助于电刷同滑环和转子绕组联接的（图 18-25）。通常就是根据绕线式异步电动机具有三个滑环的构造特点来辨认它的。

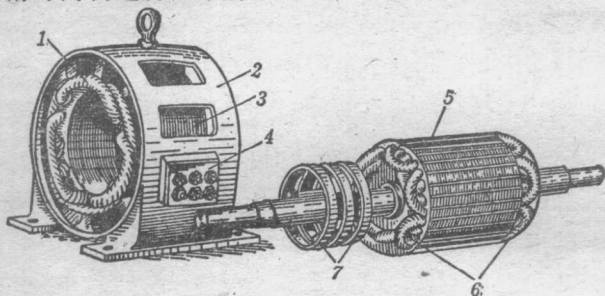


图 18-12 绕线式异步电动机的构造：

- 1—定子绕组；2—机座；3—定子铁心；4—接线盒；  
5—转子铁心；6—转子绕组；7—滑环

鼠笼式与绕线式只是在转子的构造上不同，它们的工作原理是一样的。

鼠笼式电动机由于构造简单，价格低廉，工作可靠，使用方便，就成为生产上应用得最广泛的一种电动机。

## 18-5. 定子电路

三相异步电动机中的电磁关系同变压器类似，定子绕组相当于变压器的原绕组，转子绕组（一般是短接的）相当于副绕组。当定子绕组接上三相电源电压时（相电压为  $v_1$ ），则有三相电流通过（相电流为  $i_1$ ）。定子三相电流产生旋转磁场，其磁力线通过定子和转子铁心而闭合。这磁场不仅在转子每相绕组中要感应出电动

势  $e_2$ ，而且在定子每相绕组中也要感应出电动势  $e_1$ （实际上三相异步电动机中的旋转磁场是由定子电流和转子电流共同产生的。）

定子和转子每相绕组的匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$ 。图 18-13 是三相异步电动机的每相电路图①。

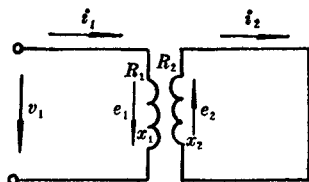


图 18-13 三相异步电动机的每相电路图

旋转磁场在空间旋转，其作用宛如一块永久磁铁在空间旋转。而旋转磁场的磁感应强度沿定子与转子间的空气隙是近于按正弦规律分布的，因此当其旋转时，通过定子每相绕组的磁通也是随时间按正弦规律变化的，即  $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ 。其中  $\Phi_m$  是通过每相绕组的磁通最大值，在数值上它等于旋转磁场的每极磁通  $\Phi$ ，即为空气隙中磁感应强度的平均值与每极面积的乘积。如在图 18-4 中，在  $\omega t = 0$  的瞬时，通过 A 相绕组的磁通为零；其后，通过的磁通值逐渐增加；到达  $\omega t = 90^\circ$  的瞬时，通过该绕组的磁通值最大，也就是旋转磁场的磁通全部通过它。此后，通过 A 相绕组的磁通逐渐减小到零，而后通过该绕组的磁通方向改变，再逐渐增加到反方向的最大值。

因此，定子每相绕组中产生的感应电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

它也是正弦量，其有效值为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi \text{ ② } \quad (18-4)$$

式中  $f_1$  是  $e_1$  的频率。因为旋转磁场和定子间的相对转速为  $n_0$ ，

① 对鼠笼式转子讲，在两个极的情况下，每根转子导体就是一相。

② 实际上，电机每相线匝分布在不同的槽中，其中感应的电动势并非同相，在式中应引入一绕组系数  $k$ 。但  $k$  值接近 1，故在本书中都略去。



所以

$$f_1 = \frac{pn_0}{60} \quad (18-5)$$

即等于定子电流的频率[见式(18-1)]。

定子电流除产生旋转磁通(主磁通)外,还产生漏磁通 $\phi_{o1}$ 。这漏磁通只围绕定子绕组的一相,而与其他相及转子绕组不相链。因此,在定子每相绕组中还要产生漏磁电动势

$$e_{o1} = -L_{o1} \frac{di_1}{dt}$$

和变压器原绕组的情况一样,加在定子每相绕组上的电压也分成三个分量,即

$$\begin{aligned} v_1 &= i_1 R_1 + (-e_{o1}) + (-e_1) \\ &= i_1 R_1 + L_{o1} \frac{di_1}{dt} + (-e_1) \end{aligned} \quad (18-6)$$

如用复数表示,则为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{I}_1 R_1 + (-\dot{E}_{o1}) + (-\dot{E}_1) \\ &= \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 x_1 + (-\dot{E}_1) \end{aligned} \quad (18-7)$$

式中, $R_1$ 和 $x_1 = 2\pi f_1 L_{o1}$ 分别为定子每相绕组的电阻和感抗(漏磁感抗,由漏磁通产生)。

由于 $R_1$ 和 $x_1$ (或漏磁通 $\phi_{o1}$ )较小,其上电压降与电动势 $E_1$ 比较起来,常可忽略,于是

$$\dot{V}_1 \approx -\dot{E}_1, \quad V_1 \approx E_1$$

## 18-6. 转子电路

如上所述,异步电动机之所以能转动,是因为转子绕组中产生感应电动势,从而产生转子电流,而这电流同旋转磁场的磁通作用产生电磁转矩之故。因此,我们在讨论电动机的转矩之前,必须先