

电
工
学
高 等 学 校 教 材

电 工 学

(1981 年修订本)

下 册

秦 曾 煌 主 编

3.1
69.03
高 等 教 育 出 版 社

高等学校教材

电 工 学

(1981年修订本)

下 册

秦曾煌 主编

高等教育出版社

本书(1981年修订本)是参考1980年修订的高等工业学校《电工学教学大纲(草案)》(150学时)修订的。全书分三册出版。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。

本书下册是由秦曾煌同志编写和修订的。

本书(1981年修订本)下册由大连工学院蒋德川、唐介、赵宗武同志审阅,并经高等学校工科电工学教材编审小组复审通过,可作为高等工业学校电工学课程(150学时)的教材,也可供工程技术人员参考。

本书责任编辑 王缉惠

高等学校教材

电 工 学

(1981年修订本)

下 册

秦曾煌 主编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 5.25 字数 120,000

1979年5月第1版 1982年11月第2版 1986年8月第12次印刷

印数 968,951—1,004,451

书号 15010·088 定价 0.90 元

目 录

(带“*”的章节为加深加宽内容)

第三部分 电机与控制

第十六章 异步电动机	1
16-1. 电动机概述	1
16-2. 三相异步电动机的转动原理	2
16-3. 三相异步电动机的极数与转速	5
16-4. 三相异步电动机的构造	8
16-5. 定子电路	10
16-6. 转子电路	12
16-7. 三相异步电动机的转矩与机械特性	15
一、转矩同哪些量有关系	15
二、机械特性曲线	17
16-8. 三相异步电动机的起动	21
一、起动性能	21
二、起动方法	22
16-9. 三相异步电动机的调速	28
一、鼠笼式电动机的调速(改变 p)	28
二、绕线式电动机的调速(改变 s)	30
16-10. 三相异步电动机的制动	30
一、能耗制动	30
二、反接制动	31
三、发电反馈制动	32
16-11. 三相异步电动机的名牌数据	32
16-12. 单相异步电动机	38
习题	43
第十七章 同步电机	46
17-1. 同步电机的构造	46

17-2. 同步发电机的工作原理	48
一、空载运行	48
二、电枢反应	49
三、外特性与调节特性	53
四、电压方程与相量图	54
五、转矩与功率	56
17-3. 同步发电机与电网并联运行时功率的调节	59
一、无功功率的调节	59
二、有功功率的调节	62
17-4. 同步发电机的励磁	63
17-5. 同步电动机的工作原理	64
17-6. 励磁电流对同步电动机运行情况的影响	67
习题	69
第十八章 直流电机	72
18-1. 直流电机的构造	72
18-2. 直流电机的基本工作原理	74
18-3. 直流发电机	77
一、他励发电机	78
二、并励发电机	80
三、复励发电机	83
18-4. 并励电动机的机械特性	83
18-5. 并励电动机的起动与反转	87
18-6. 并励(他励)电动机的调速	88
一、改变磁通 Φ (调磁)	89
二、改变电压 V (调压)	91
习题	92
第十九章 控制电机	95
19-1. 伺服电动机	96
一、交流伺服电动机	96
二、直流伺服电动机	100
19-2. 测速发电机	101
一、交流测速发电机	101
二、直流测速发电机	103

19-3. 自整角机	106
一、控制式自整角机	106
二、力矩式自整角机	109
19-4. 步进电动机	111
一、步进电动机的结构与工作原理	112
*二、步进电动机的驱动电源	115
习题	117
第二十章 控制电器与控制系统	120
20-1. 常用控制电器	121
20-2. 鼠笼式电动机直接起动的控制线路	126
20-3. 鼠笼式电动机正反转的控制线路	130
20-4. 行程控制	132
20-5. 时间控制	133
*20-6. 速度控制	137
20-7. 反馈控制系统	139
一、反馈控制系统的基本原理及其组成部分	140
二、可控硅直流调速系统	143
三、位置随动系统	150
习题	153
习题答案	156
中英名词对照	158

第三部分 电机与控制

第十六章 异步电动机

16-1. 电动机概述

电动机的作用是将电能转换为机械能。现代各种生产机械都广泛应用电动机来驱动。

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 and 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他励、并励、串励和复励四种。

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。

16-2. 三相异步电动机的转动原理

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 16-1 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。

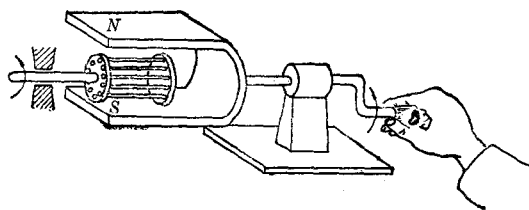


图 16-1 异步电动机转子转动的演示

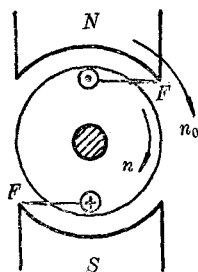


图 16-2 转子转动的原理图

异步电动机转子转动的原理与上述演示实验相似。当磁极向顺时针方向旋转，磁极的磁力线切割转子铜条（图 16-2，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，这与实际上磁极顺时针方向旋转时磁

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 16-2 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，也是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 4-1 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 16-3 所示。取绕组始端到末端的方向作为电流的正

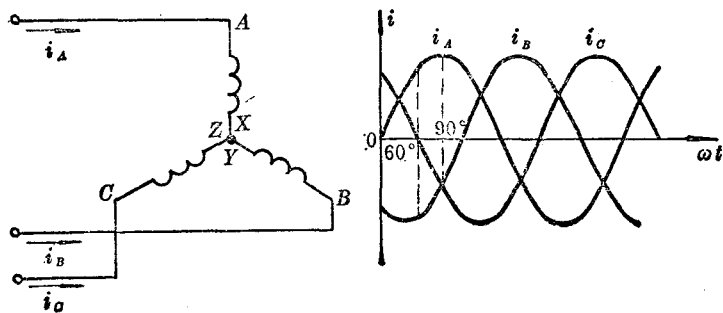


图 16-3 三相对称电流

方向。在电流的正半周时，其值为正，其实际方向与正方向一致；在负半周时，其值为负，其实际方向与正方向相反。

在 $\omega t = 0$ 的瞬间，定子绕组中的电流方向如图 16-4a 所示。

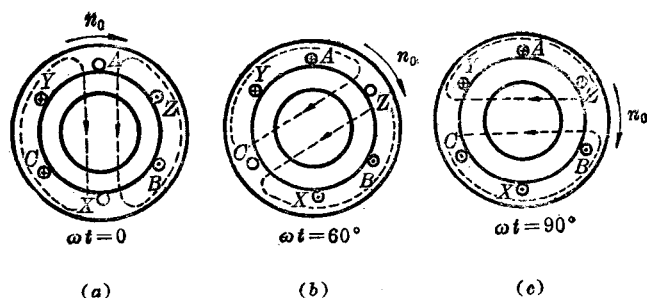


图 16-4 三相电流产生的旋转磁场($p=1$)

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 16-4a 中, 合成磁场轴线的方向是自上而下。

图 16-4b 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。这时的合成磁场已在空间转过了 60° 。

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° , 如图 16-4c 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 16-1)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转矩使电机转动起来。

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 16-4c 所示的情况是 A 相电流 $i_A=+I_m$, 这时旋转磁场轴线的方向恰好与 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。

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16-5),电动机也就跟着改变转动方向。

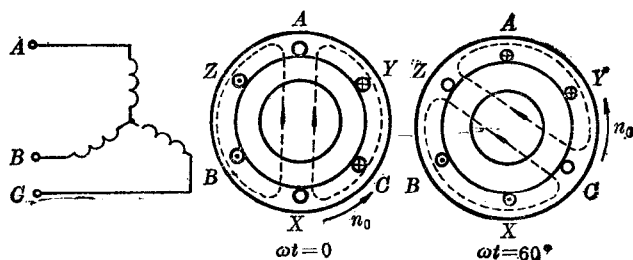


图 16-5 旋转磁场的反转

16-3. 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16-4的情况下,每相绕组只有一个线圈,绕组的始端之间相差 120° 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16-6那样,即每相绕组有两个线圈串联,绕组的始端之间相差

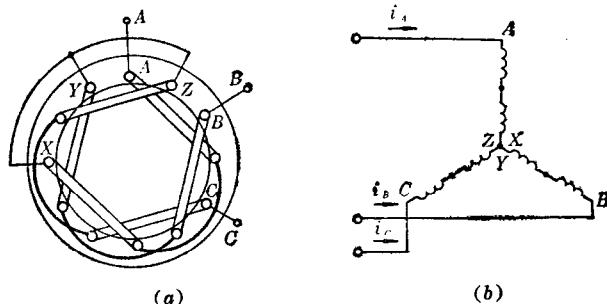


图 16-6 产生四极旋转磁场的定子绕组

60° 空间角, 则产生的旋转磁场具有两对极, 即 $p=2$, 如图 16-7 所示。

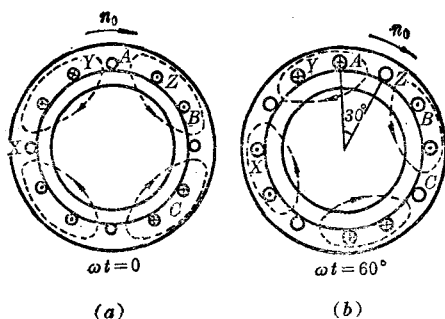


图 16-7 三相电流产生的旋转磁场($p=2$)

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 $40^\circ = \frac{120^\circ}{p}$ 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 16-4 可见, 当电流从 $\omega t=0$ 到 $\omega t=60^\circ$ 经历了 60° 时, 磁场在空间也旋转了 60° 。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 $60f_1$ 次, 则旋转磁场的转速 (转/分) 为 $n_0=60f_1$ 。

在旋转磁场具有两对极的情况下, 由图 16-7 可见, 当电流也从 $\omega t=0$ 到 $\omega t=60^\circ$ 经历了 60° 时, 而磁场在空间仅旋转了 30° 。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 $n_0 = \frac{60f_1}{2}$ 。

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

$$n_0 = \frac{60f_1}{p}$$

由此推知,当旋转磁场具有 p 对极时,磁场的转速为

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (16-1)$$

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(16-1)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 16-1。

表 16-1

p	1	2	3	4	5	6
n_0 (转/分)	3000	1500	1000	750	600	500

由图 16-2 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

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (16-2)$$

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(起动初始瞬间), $s=1$, 这时转差率最大。

式(16-2)也可写为

$$n = (1-s)n_0 \quad (16-3)$$

例 16-1. 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 16-1)。显然, 与 975 转/分最相近的同步转速 $n_0=1000$ 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

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% = \frac{1000 - 975}{1000} \times 100\% = 2.5\%$$

16-4. 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 16-8 所示的是三相异步电动机的构造。

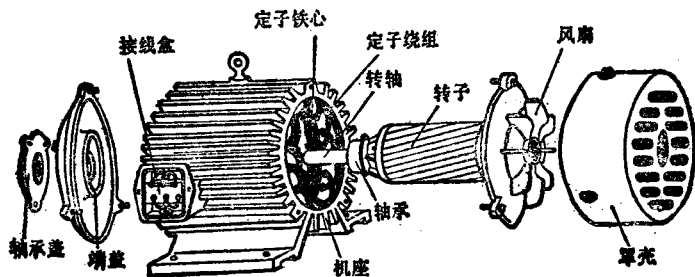


图 16-8 三相异步电动机的构造

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叠成的。铁心的内圆周表面冲有槽(图 16-9), 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。

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，也用硅钢片叠成，表面冲有槽（图 16-9）。铁心装在转轴上，轴上加机械负载。

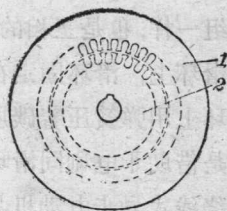


图 16-9 定子和转子的铁心片：
1—定子；2—转子

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 16-10）。或者在槽中浇铸铝液，铸成一

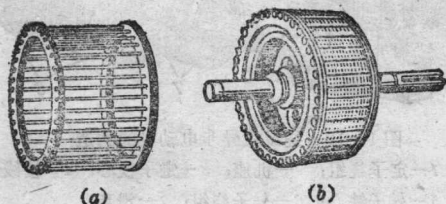


图 16-10 鼠笼式转子：

(a) 鼠笼式绕组；(b) 转子外形

鼠笼（图 16-11）。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的转子很多是铸铝的。鼠笼式异步电动机的“鼠笼”是它的构造特点，易于识别。

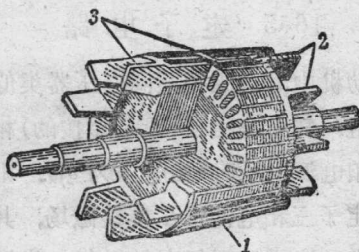


图 16-11 铸铝的鼠笼式转子：

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 16-12 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16-25)。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。

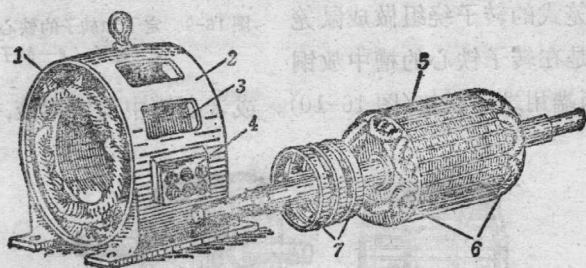


图 16-12 绕线式异步电动机的构造：

- 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。

16-5. 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 16-13 是三

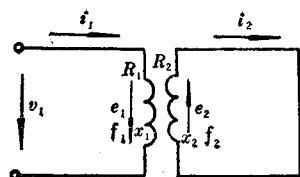


图 16-13 三相异步电动机的每相电路图

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 Φ_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 Φ ,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 16-4 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

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi \quad (16-4)$$

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 ,所以

① 对鼠笼式转子讲,在一般情况下,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。