

电 工 基 础

下 册



无錫市化学工业“七·二一”工人大学翻印

一 九 七 七 年 八 月



目

录

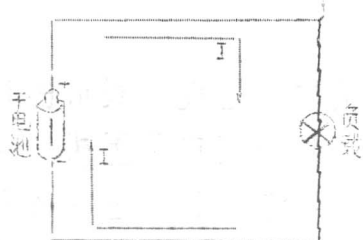
第三章	单相交流电路	1
3-1	什么是交流电	1
3-2	正弦电动势的产生	5
3-3	相位和相位差	10
3-4	正弦量的有效值	16
3-5	正弦量的矢量表示法	20
	阶段小结	26
3-6	电阻电路	28
3-7	电感电路	32
3-8	电容电路	43
	阶段小结	50
3-9	电阻与电感的串联电路	52
3-10	电阻、电感、电容串联电路	63
	阶段小结	72
3-11	电感线圈与电容器的并联电路	75
3-12	功率因数的提高	80
3-13	趋表效应	84
3-14	交流电压、电流、功率及电能的测量	85
	复习思考题	97

第四章	符号法	93
4—1	正弦量的复数表示法	98
4—2	复数阻抗 复数形式的欧姆定律	103
4—3	复数形式的瓦希荷夫定律	109
4—4	阻抗的联接	112
	小结	115
	第四章习题	117
第五章	三相交流	121
5—1	对称三相电势的产生	121
5—2	三相交流发电机绕组的联接	125
5—3	三相负载的星形联接	133
5—4	三相负载的三角形联接	145
5—5	三相交流电路的功率	150
5—6	三相功率与电能的测量	152
5—7	“两线一地”及“一线一地”制输电知识	158
	小结	160
	第五章习题	162

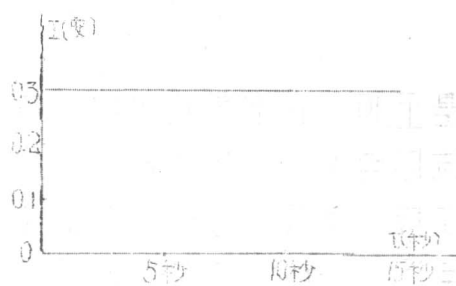
第三章 单相交流电路

3-1 什么是交流电

我们在第一章的直流电路中讲的是直流电路。直流电的特点是：电势、电压及电流的大小和方向总是不变的。例如，用干电池作电源，它的碳棒永远是正极，它的锌外皮永远是负极，如图3-1(a)所示。在电路中，电流总是从正极流出，经过负载（灯泡）然后流入负极；电路中的电流方向不变，大小也不变，这就是典型的直流电。



(a) 直流电路

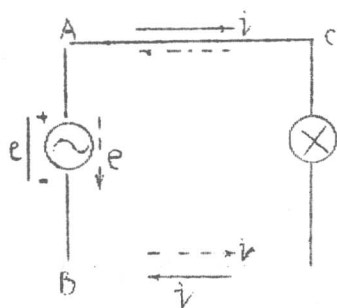


(b) 直流电流图象

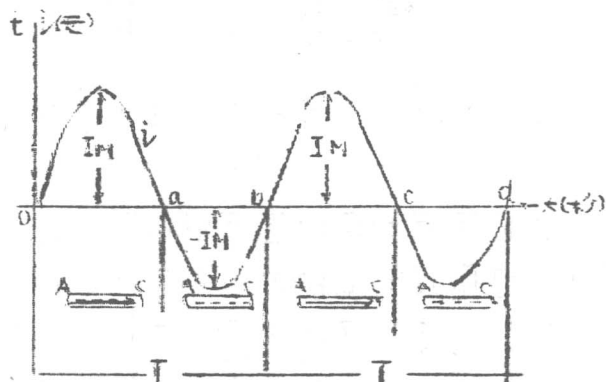
图3-1 直流电路及电流图象

如果用电流表量出电路中的电流 $I=500$ 毫安，在画它的图象时用横轴代表时间 t ，纵轴代表电流 I ，那么，它就是一条平行于横轴的直线，如图3-1(b)所示。它表示，无论哪一时刻，电流总是500毫安(0.5)，而且总是一个方向。

在生产 and 生活中，广泛应用的是交流电。交流电的特点是：电势、电压及电流的方向和大小都不断地随时间而改变，并且按一定的规律而变化。因为交流电流的电势和电压的方向是不断改变的，也就是交流电流的正负极性随时间不断地交替变化（如图3-2(a)），所以电路中的电流也就不断地改变着流动方向，当交流电流的A端



a 交流电路



b. 交变电流图象

图 3-2 交流电路和交变电流图象

是正极、B端是负极时，电流 i 就从A端流出，经过负载后由B端流回电源，如实线箭头所示。过了一會兒，B端变成了正极，A端变成了负极，这时，电流 i 就从B端流出，经过负载，由A端流回电源，这时，电流 i 将按虚线箭头表示的路线流通。这种方向不断交替变化的电流就叫做交变电流，这样的电路就称为交流电路。

交变电流的图象是怎样的呢？我们在坐标中，用横轴代表时间 t ，用纵轴代表电流 i ， i 是正值时，取横轴上部， i 为负值时，取横轴下部。由于交变电流的方向不断地交替变化，我们需要它规定一个正方向，例如在图3-2(a)的电路中，如果选定了实线箭头为电流 i 的正方向，那么， i 从A经负载流向B时，它是正值，当 i 沿虚线箭头流动时，它就是负值了。按照上述办法，在图3-2(b)中画出了交变电流 i 的变化曲线。通过曲线可以把交流电在任一时刻的大小和方向清晰地表示出来。例如在 $0a$ 段时间内，电流 i （向正方向）从零开始逐渐增大，达到最大值（ I_m ）后又逐渐减小到零，在 ab 段时间内，电流 i 向反方向从零开始逐渐增加，达到负的最大值（ $-I_m$ ）后又逐渐减小到零，以后就重复上述过程，做周期

性的变化。象这种按照正弦规律变化的交流电，叫做正弦交流电，它的图象是一正弦波，故也叫波形图。交流电的图象可以通过示波器进行观察。

根据交流电的方向和大小都不断地随时间而改变的要点，应用了一些量（或术语）来说明它。我们先来介绍几个。

瞬时值：交流电每个时刻的数值叫做瞬时值。在图象中，从横轴引一垂线，它和曲线相交的线段，就对应着瞬时值，其值有正有负。电势、电压及电流的瞬时值分别用小写字母 e 、 u 及 i 表示。

最大值：瞬时值中的最大的数值，叫做最大值（或叫振幅值、幅值、峰值等）。在正弦交流电中，它是一个定值。用大写字母 E_m 、 U_m 及 I_m 分别表示电势、电压及电流的最大值。

周期：交流电每重复一个循环所需要的时间，叫做周期。符号用字母“ T ”表示，单位是秒。周期是用来表示交流电变化快慢的一个量。如果周期大，说明交流电经历一个循环所需要的时间长，反之，周期越小，说明交流电变化的速度越快，因为在很短的时间内就可以变化一周，但是更经常的是用频率来表示交流电变化的快慢。

频率：交流电在一秒钟内变化的周数（即循环数）叫做频率，符号是“ f ”。知道了周期 T ，很容易计算出频率 f 。例如 $T=0.02$ 秒时，在一秒内就可以变化 50 周，这时频率 $f=50$ 赫。很显然频率是周期的倒数，即

$$f = \frac{1}{T}$$

频率的单位是 1/秒 或叫做赫芝（简称赫），用符号“ Hz ”表示。

实际应用的交流电其频率的范围很广。我国和世界的多数国家，动力和照明用电的频率是 50 赫（通常称为“工频”，就是说每秒内变化 50 次，这个速度是很快的，因此，日光灯的闪烁我们的眼睛感觉不出来。高频电热和电冶炼中采用的频率高达几千赫；而无线电工

程中采用几十万赫甚至高达几十兆，几百兆赫以上的频率。例如，我国第一颗人造地球卫星发回来的《东方红》乐曲声：其信号频率是20009兆赫，也就是说它每秒钟变化20009百万次（ $=20009 \times 10^6 \text{Hz}$ ）。

$$1 \text{ 兆赫 (MHz)} = 10^3 \text{ 千赫 (KHz)} = 10^6 \text{ 赫 (Hz)}$$

对于这样高的频率，还用“秒”来表示周期显然是不相适应的。在现代电子工程上已把时间单位扩展到，毫秒，微秒或毫微秒。它们和“秒”的关系是：

$$1 \text{ 秒} = 10^3 \text{ 毫秒} = 10^6 \text{ 微秒} = 10^9 \text{ 毫微秒}$$

目前，直流电和交流电在实际中都有应用，由于交流电机比直流电机在构造上简单可靠，价格低廉。

并且交流电又可以通过变压器变换电压，既便于远距离高压输电，又可降低电压以保证用电安全；另外，在必须使用直流电的地方，还可以用整流装置变交流电为直流电。所以，在工农业生产及日常生活方面，应用交流电就更为普遍。因此，学习和掌握交流电的知识是很重要的。

交流电路和直流电路的基本规律是一样的，但交流电有着随时间交变的特点，这就引出许多和直流电不同的现象。学习时，大家可以经常把交流电和直流电进行对比，想一想它们有哪些地方相同，有哪些地方不同。毛主席教导说：“有比较才能鉴别”。应用对比的思考方法，会有助于掌握交流电的基本知识。

复 习 思 考 题

1. 直流电和交流电各具有什么特点？交变电流在电路中是怎样流通的？

2. 交流电的周期和频率是用来表示什么的？二者有什么关系？

5-2 正弦电动势的产生

要得到不断交变的电流、首先得有电势不断交变的电源。交流发电机就是这种电源。下面就来介绍它的工作原理。

在电磁感应里讲过：当导体作切割磁力线运动时，它产生感应电势，其大小是： $e = Blv$ ，方向用右手定则确定。根据这一原理，在交流发电机中可以使磁极固定不动（做为“定子”），电枢转动

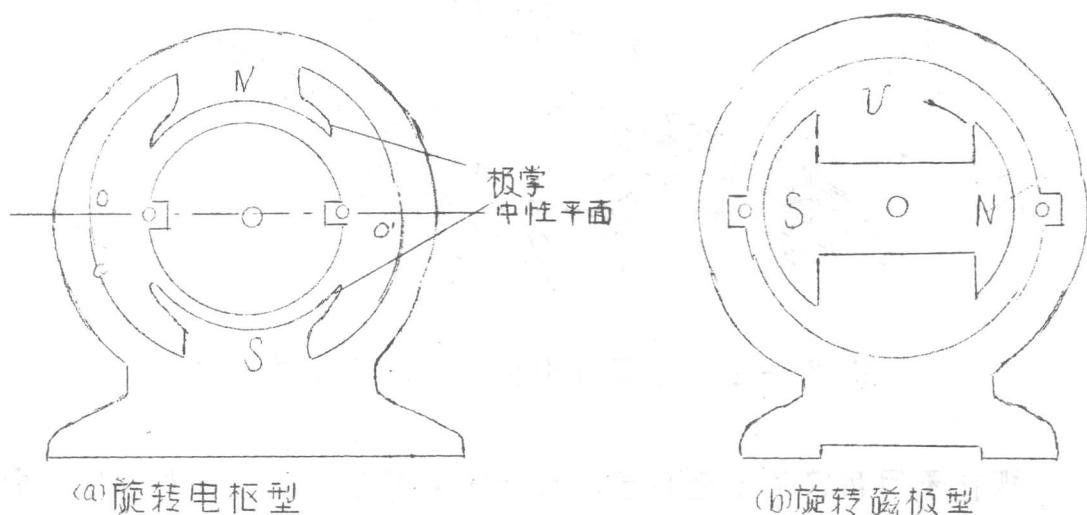


图 3-3 最简单的交流发电机构造图

（做为“转子”），如图 3-3(a)，也可以使电枢固定（做为“定子”），而使磁极转动（做为“转子”）。如图 3-3(b)。电枢不论是做为转子或作为定子，只要它和磁坊有相对运动，就能够产生感应电势。

现在我们用旋转电枢式发电机为例来讨论交变电势的产生过程。图 3-4 是这种交流发电机的构造示意图。磁极 (N.S) 是固定不动的，其铁心是用硅钢片叠制的，用直流电来激磁。转子铁心也是由硅钢片叠成，其上有槽，槽内嵌入电枢线圈（在图 3-4 中仅画

面丁丁丁) ABCD，线圈两端分别接到两个滑环上，滑环通过电刷而和负载联接。

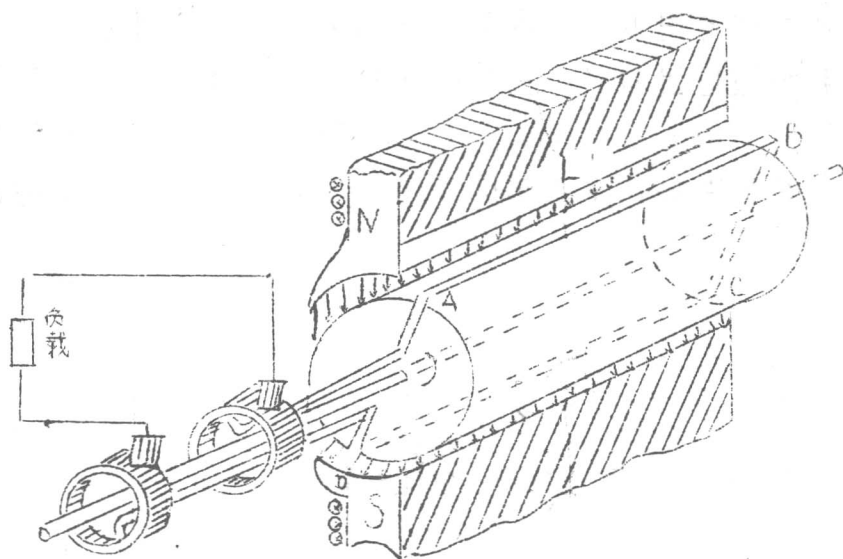
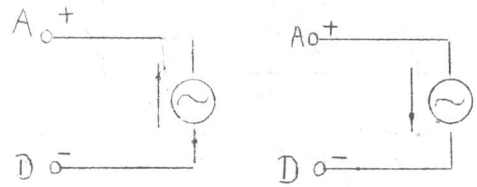


图 5-4 交流发电机构造的简单示意图

现在来分析这个发电机是怎样产生交变电势的。发电机要发电，先得有原动机（如汽轮机或水轮机等）来带动发电机的转子旋转，假设旋转方向是逆时针的，这时线圈的两个有效边 AB 和 CD 就要切割磁力线而产生感应电势，由于导体 AB 和 CD 是串联的，并且处于对称位置，所以其电势总是相加的，而且大小是相等的。为简单起见，只要分析导体 AB 中的感应电势，就可以知道整个线圈中感应电势的大小和方向了。当导体 AB 在 N 极下边运动时，由于磁场方向是向下的，导体运动方向是自右向左的，应用右手定则判断这时感应电势的方向是从 B 指向 A，这时和 A 端相连的电刷就是电流的正极(+)。过了一会儿，当导体 AB 在 S 极下运动时，磁场方向仍然是向下，但是导体运动方向是从左往右了，应用右手定则可知，这时感应电势的方向是从 A 到 B，A 端又变成负极(-)。所以随着转

子的不断旋转，导体AB经过N板时A端是电流的(+)极，经过S板时A端又变成电流的(-)极(如图3-5所示)。这样，就使发电机输出电压的极性不断地交替变化。

光是明白了线圈中的感应电势的方向是不断交变的还不够，另外还必须明白线圈中感应电势的大小又是怎样变化的。因为 $e = \ell v B$ ，所以，当 ℓv 不变时， e 就和 B 成正比。实际正是这样，当转子在旋转过程中，导体长度 ℓ 是不会变化的，只要转子的转速不变，导



a, 导体AB经过N板 b, 导体AB经过S板

图 3-5

体切割磁力线的速度 v 也是不变的。因此，要想使 e 的大小不断变化，就须使磁力线的分布不断变化才行。人们在制造现代发电机时，总是设法控制磁感应 B 沿电枢表面按正弦规律变化，以保证感应电势 e 随时间按正弦规律变化。那么，怎样才能使磁感应 B 按正弦规律分布呢？人们采用把磁极做成特殊形状——极掌(参看图3-3)，利用极掌到电枢表面的气隙不同(形成不同的磁阻)，以便 B 在两板中心处具有最大值(B_m)，越远离中心处 B 越小，在中性面上(两板交界处) $B=0$ ，如图3-6(a)所示。这样，电枢上的一点到中性面的夹角为 α ，那么，这一点的磁通密度 B 应为：

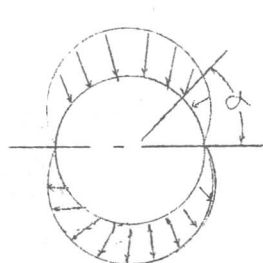
$$B = B_m \sin \alpha$$

在磁极中心 $B = B_m$ ，所以 $\alpha = 90^\circ$ ；经过一个磁板(即从0到0) $\alpha = 180^\circ$ ，经过一对磁板 $\alpha = 360^\circ$ ，这样计算的夹角 α 叫极电角。

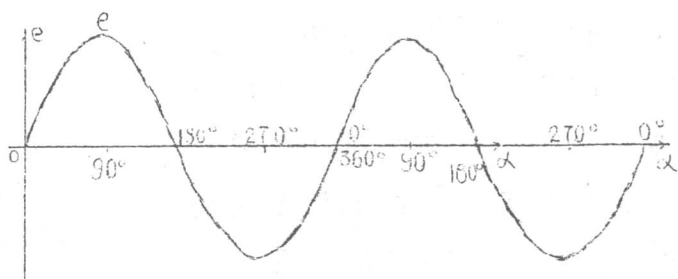
当线圈在上述磁场中运动时，在ABCD中产生的感应电势两个有效边 $e = 2\ell v B = 2\ell v B_m \sin \alpha$ ，设线圈只有一匝，而是匝数时，则

$$e = 2w\ell v B_m \sin \alpha = E_m \sin \alpha \quad (1)$$

式中感应电势的最大值 $E_M = 2WlVB_M$ 。在图3-6(b)中画出了感应电势 e 随电角 α 而变化的正弦曲线。



(a) 磁势分佈图



(b) 正弦电势波形图

图 3-6

就是这样，发电机的感应电势的变化规律为：由零逐渐按正弦规律增大到极大值，然后又逐渐减小到零；这以后，改变其方向，又是从零增加到反方向的极大值，然后又逐渐减小到零。随着发电机转子的不断旋转，这种过程就不断重复进行。总之，由于线圈导体交替地切割N、S极磁势，使得线圈导体中的感应电势不断改变方向，由于磁极的磁势按正弦规律分佈，就使电势的大小也随时间按正弦规律而变化。这就是发电机产生正弦交变电势的原理。

由于正弦电势的方向不断改变，因此，在用数学式来表示正弦电势时，首先就须选定一个正方向，如在式(1)中，实际上就是选定导体AB通过N极磁场的电势方向（即D—A）作为正方向写出来的，离开了正方向，公式就没有意义，这一点必须始终注意。

式(1)中的正弦电势 e 是角 α 的函数，有时需要进一步改写成对时间 t 的正弦函数，才更便于分析和计算问题。但把 $\sin \alpha$ 简单地改写成 $\sin t$ ，显然是没有意义的，因为 $\sin$ 后面必须是角度。因此，需要找出 α 和 t 的关系来。把导体AB通过 $B=0$ 的瞬间，做为起始瞬间（ $t=0$ 的瞬间），那么导体AB每经过一对(N-S)磁极（ $\alpha=360^\circ$ 或 2π 弧度），电势将完成一个循环。而电势变化一个

循环所需要的时间叫做一周期(T)，对应一个磁极的电角度 $\alpha = 180^\circ = \pi$ ，时间 $t = \frac{T}{2}$ ；如果 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ，则 $t = \frac{T}{4}$ ，……，为清晰起见可列表(3-1)如下：

α	$360^\circ = 2\pi$	$180^\circ = \pi$	$90^\circ = \frac{\pi}{2}$	$60^\circ = \frac{\pi}{3}$	$30^\circ = \frac{\pi}{6}$	……
t	T	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{6}$	$\frac{T}{12}$	……

这说明电角 α 和时间 t 是正比关系，即：

$$\alpha = \omega t$$

比例系数 ω 是容易求出来的，这只要从上表(3-1)中任意找出一个电角度 α ，再和它对应的时间 t 求比值即可；一般可写为

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

ω 表示每秒钟正弦是经历了多少电角度的变化，所以叫做电角速度，又由于它和频率 f 成正比，所以也有人干脆把 ω 叫做电角频率，它的单位是弧度/秒 或 1/秒。

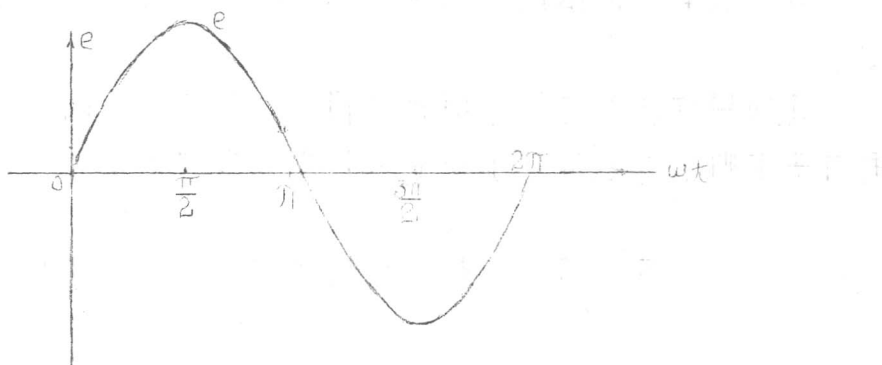


图 3-7 正弦电势的波形图

最后，可以把正弦电势改写成时间 t 的函数，只要把 $\alpha = \omega t$ 代入式(1)即可：

$$e = E_m \sin \omega t = E_m \sin 2\pi f t$$

式(2)，习惯上叫做正弦电势的瞬时值表示式。

图3-7 是以 ωt 为自变量的正弦曲线图，也叫波形图。

(例题) 求 $f_1 = 50\text{Hz}$ 及 $f_2 = 20000\text{Hz}$ 时的角频率。

(解)：

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \times 50 = 100\pi = 314 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi \times 20,000 = 40,000\pi = 125,000 \text{ rad/s}$$

复 习 思 考 题

1. 交流发电机的简单构造是怎样的？为什么可以使交流电流的极性不断改变？怎样才能使交变电势按正弦规律变化？

2. 什么叫电角频率 ω ？它和周期、频率各有什么关系？当 $f = 50\text{Hz}$ 时 $\omega = ?$

3. 正弦电势的函数表示式是什么？它的每个符号各表示什么意思？

4. 如果交流发电机是旋转磁极型的，在制定感应电势时怎样应用右手定则？又怎样才能使电势按正弦规律变化？

3-3 相位和相位差

实际的发电机，在转子上只会装一个线圈。如图3-10所示，设在原有的线圈1之外，另加一个线圈2，它与线圈1是完全相同的，但却与线圈1垂直安装。当转子按一定的转速旋转时，线圈1与2都切割磁力线而产生感应电势，各用 e_1 与 e_2 来表示。那么 e_1

和 e_2 有什么相同点？又有什么不同点呢？

相同点是：

1. e_1 和 e_2 都是随时间按正弦规律变化的。也就是 e_1 和 e_2 都是正弦波电势；

2. e_1 和 e_2 的变化周期是相同的。变化一周都是 2π 弧度，也就是说二者的频率是相等的；

3. 二者的极大值 (E_M) 相同。这是因为两个线圈是完全一样的运动在同一磁场当中，切割磁力线的速度也相同。

不同点是：

e_1 与 e_2 达到最大值的时间不一样，这是因为这两个线圈在空间位置上不在一起。例如，在图 3-8 的位置时， e_2 刚好等于 E_M ， e_1 却等于零值，而等到 e_1 变化到最大值 (E_M) 时，由于转子已经转过 π 角， e_2 已经变成零了。两个电势达到极大值的时间有先有后，正是 e_1 和 e_2 间唯一的区别。

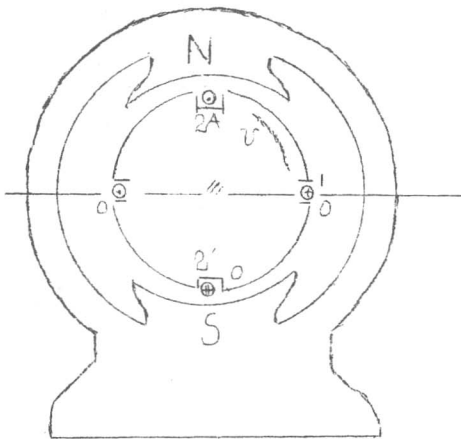


图 3-8

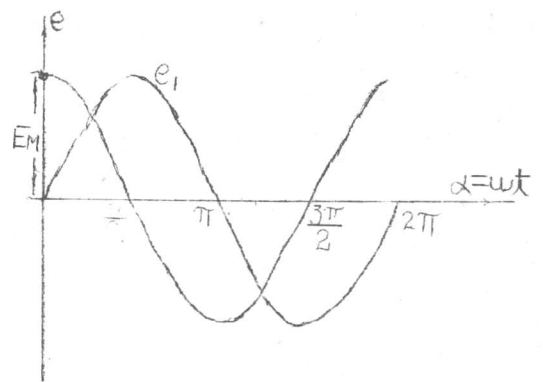


图 3-9

这个区别在瞬时值表示式上能够反映出来，从而在波形图中也能反映出来。

线圈 1 中的电势 e_1 ，是大家所熟悉的，即

$$e_1 = E_M \sin \omega t$$

e_1 的波形图是一条经过原点 0 的正弦曲线（如图 3-9）。

线圈 2 中的电势 e_2 ，当 $\omega t = 0$ 时 $e_2 = E_M$ 等到它转过了 90° ($\omega t = \frac{\pi}{2}$) 时， $e_2 = 0$ ；到再转过 90° (即 $\omega t = \pi$) 时， $e_2 = -E_M$ ……很明显， e_2 的瞬时值表示式是：

$$e_2 = E_M \cos \omega t$$

e_2 的波形图是一条余弦曲线， e_2 也画在图 3-9 中。

由于在交流电路中。习惯上只讨论正弦函数，所以可以把 e_2 改写成：

$$e_2 = E_M \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

前边所说的两个电势达到最大值有先有后，这在曲线图上，看得最为明显，在图 (3-9) 中 e_2 比 e_1 先达到极大值，而 e_1 必须等到再经过 $\frac{\pi}{2}$ 弧度，才能达到极大值。在电工技术中，习惯上把先到达极大值的正弦量，叫做“领先”（或叫“超前”“越步”，把后到达极大值的正弦量，叫做“滞后”（或叫“落后”）。例如在图 3-9 中的 e_1 和 e_2 ，就是“ e_2 领先于 e_1 ”或可以说是“ e_1 滞后于 e_2 ”。在判断谁领先谁滞后时，不一定非用（正的）极大值不可，用“零值”作判断也可以：在由负值向正值变化时，先到达零值的就是“领先”，后到达零值的就是“滞后”。

在瞬时值表示式中， $\sin$ 符号后边的总角度叫做正弦量的“相位”，由于是用角度表示的，所以，也叫“相位角”。通常，两个相同频率的正弦量，如果它们的相位角也相同，就叫做“同相位”或“同相”。如果它们的相位角不同，就表示二者一定有一个领先，一个滞后，叫做“不同相”。

只知道谁领先和谁滞后还不够，还需要进一步求出领先了（或滞后了）多少角度。这可用它们的相位角之差来求，即

$(e_2 \text{ 的相位角}) - (e_1 \text{ 的相位角}) = e_2 \text{ 与 } e_1 \text{ 的相位差(角)}。$

在电工中把起始瞬间 ($t=0$, 选为计算时间起点的瞬间) 的相位角，叫做“初相位”或叫“初相角”，一般用 ψ 代表，则任意的正弦量可以写成如下的数学表达式（即瞬时值表示式）：

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi)$$

在我们现在的例子中， e_1 和 e_2 可以分别写为

$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi_1) = E_m \sin(\omega t + 0^\circ)$ ，其初相角 $\psi_1 = 0^\circ$ ；

$e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi_2) = E_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ ，其初相角 $\psi_2 = \frac{\pi}{2}$ 。

因此， e_2 与 e_1 的相位差(角) $\psi_{21} = (\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2)$
 $= (\omega t - \omega t) + (\psi_2 - \psi_1) = \psi_2 - \psi_1$ ，就等于两个初相角之差。这是因为二者的频率相同，因而 $\omega (=2\pi f)$ 也相同的缘故。所以，今后，在求两个频率正弦量的相位差时，就不必再用它们的相位角来求其差值，可以直接求出它们初相角之差：

$$\psi_{21} = \psi_2 - \psi_1$$

就可以了。

上式说明： e_2 比 e_1 领先 ψ_{21} 角度先达到零值（或最大值）。若要进一步提出： e_1 比 e_2 在时间上领先了多少？这就需要求出它们的时间差（简称时差）来。这可通过：

$$t_{21} = \frac{\psi_{21}}{\omega}$$

在上述例子中， e_2 与 e_1 的相位差：

$$\psi_{21} = \psi_2 - \psi_1 = \frac{\pi}{2} - 0 = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{时差 } t_{21} = \frac{\psi_{21}}{\omega} = \frac{\frac{\pi}{2}}{2\pi f} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{4}$$

说明 e_2 比 e_1 在角度上领先 π ，在时间上领先了 $\frac{\pi}{\omega}$ 。这和它们的图象是完全一致的。

总之，在比较两个同频率的正弦量时，必须抓住它们的初相位来作比较，找出它们的相位差，就能够判断哪个领先，哪个滞后，把它们的不同点准确地揭露出来。求得了相位差，就易于求出时差了。

既然，在作比较时，重要的是两个初相位的差值，而和初相角本身的绝对大小无关，这就指明了另一个问题，就是在选定时间的起点上带有随意性。例如在图 3-10 中，一人选择 O 点为时间起点（用纵轴甲），另一人选择 O' 点为时间起点（用纵轴乙）。这两种选择方法都是可以的。改变时间起点后， e_1 与 e_2 的初相角都改变了，但是两个正弦量的相位差则是保持不变的。

由于初相角为零的正弦量最简单，所以，应尽可能的选定时间起点，使它的初相角是零度。不过，在电路中若有好几个正弦量，它们的相位都不同时，那就只能选择时间起点使其中某一个正弦量的初相角是零度，这个正弦量就叫做“参考正弦量”，这和分析电位时选择某一点作参考点有些类似。

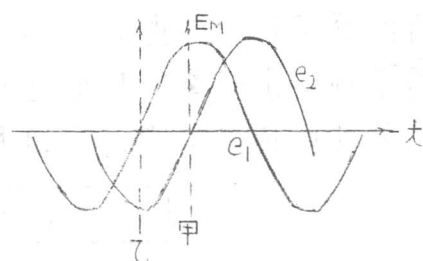


图 3-10 时间起点选定的任意性

已知频率、最大值和初相角之后，就完全可以把一个正弦量确定下来，所以把它们叫做“正弦量的三要素”。

〔例 1〕设变阻器两端加电压 $u = 310 \sin(100t + \frac{\pi}{3})$ 伏，通过的电流 $i = 14.1 \sin(314t + 60^\circ)$ 安，求它们的相位差。

〔解〕

$$\because \omega_u = 2\pi f_u = 100\pi \quad \therefore f_u = 50 \text{ 赫为 2 频电压}$$