

试用教材



电工基础

下册

一九七四年五月

电 工 基 础

下 册

X

列 宁 语 录

理论要由实践来鼓舞，由实践来修正，由实践来检验。

毛 主 席 语 录

这个辩证法的宇宙观，主要地就是教导人们要善于去观察和分析各种事物的矛盾的运动，并根据这种分析，指出解决矛盾的方法。

必须提倡思索，学会分析事物的方法，养成分析的习惯。

练兵方法，应开展官教兵、兵教官、兵教兵的群众练兵运动。

目 录

第四章 交流电路

第一节 正弦交流电的基本概念	2
一、正弦交流电	2
二、正弦电动势的产生	4
三、正弦交流电的三要素	7
四、交流电的有效值与平均值	12
五、正弦量的表示法	15
六、正弦交流电的加减	18
七、交流电路的参数	28
八、纯电阻电路	31
九、正弦交流电路中的电感	33
十、电容在正弦交流电路中的特性	41
十一、本节小结	50
复习思考题	55
习题	57
第二节 简单正弦交流电路	64
一、串联电路	64
二、理想元件的并联电路	85
三、正弦交流电路中的功率	89
四、阻抗并联电路	97
五、交流电路中的实际元件	103
六、本节小结	107
复习思考题	108
习题	111
第三节 应用复数计算简单交流电路	121
一、复数及其运算	121
二、正弦量的复数表示法	129
三、交流电路中克氏定律的复数形式	132
四、无源二端网络的特性——欧姆定律的复数形式	135
五、阻抗串联、并联电路	153

六、混联电路	164
七、谐振现象	175
八、本节小结	182
复习思考题	186
习题	190
第四节 复杂交流电路	202
一、支路电流法	202
二、重迭原理	203
三、回路电流法	206
四、节点电压法	209
五、有源二端网路的转换	212
六、最大功率输出	218
七、有互感的交流电路	221
八、交流电桥原理	226
九、本节小结	228
复习思考题	229
习题	230
第五节 正弦三相交流电路	234
一、三相交流的基本概念	234
二、三相发电机绕组的联接	236
三、负载星形联接的三相四线制电路	239
四、负载星形联接的三相三线制电路	242
五、负载的三角形联接	246
六、中点位移	249
七、交流发电机的并列运行	251
八、安全用电	253
九、本节小结	256
复习思考题	257
习题	260

第五章 电路中的过渡过程

第一节 电路中过渡过程的基本概念	263
一、什么是电路中的过渡过程	263

二、电路中产生过渡过程的原因	265
三、研究过渡过程的理论与计算方法	266
四、换路定律和初始条件	268
第二节 RC、RL电路中的过渡过程	273
一、RC电路中的过渡过程	273
二、RL电路中的过渡过程	282
三、RC、RL串联电路过渡过程小结	286
四、微分电路和积分电路	287
五、交流电源电路中的过渡过程	292
六、有分支电路中过渡过程的计算	294
第三节 计算 rL 、 rC 电路过渡过程的通用公式(要素法)	295
一、计算 rL 、 rC 电路过渡过程的通用公式	296
二、三要素的计算	298
三、要素法举例	302
四、关于不满足换路定律的特殊情况	306
第四节 电阻、电感、电容串联电路中的过渡过程	310
一、LC电路中的自由振荡	310
二、电容器向电阻和电感相串联的电路放电	315
三、电容器通过电阻与电感串联电路充电	323
四、正弦交流电势作用于 rLC 串联电路时的过渡过程	324
五、 rL 和 C 相并联的电路中的过渡过程	326
第五节 应用拉氏变换法解电路的过渡过程	327
一、拉氏变换的基本原理及性质	328
二、用部分分式法分解象函数	329
三、应用拉氏变换法计算过渡过程	332
本章小结	342
复习思考题	345
习题	346

第六章 铁芯变压器和交流电动机(小型的)

第一节 小型铁芯变压器	357
一、概述	357
二、变压器的基本构造和额定值	358

三、理想变压器	361
四、小功率电源变压器	374
五、电信变压器	379
六、本节小结	389
复习思考题	390
习题	391
第二节 小型交流电动机	392
一、三相异步电动机的构造	393
二、异步电动机的工作原理	395
三、异步电动机的工作特性	400
四、三相鼠笼式电动机的起动和调速	405
五、单相异步电动机	407
六、异步电动机的铭牌介绍与使用注意事项	414
七、单相同步电动机	417
八、串激普通电动机	418
九、交流伺服电动机	422
十、本节小结	425
复习思考题	426
习题	428

第四章 交流电路

毛主席说：“任何运动形式，其内部都包含着本身特殊的矛盾。这种特殊的矛盾，就构成一事物区别于他事物的特殊的本质。”在第二章中我们研究的直流电路，由于其中电源所产生的电势是恒定的，所以电流的也是恒定的，它的大小与方向都不随时间而变化。在现代技术中，电能的产生、分配和使用，更普遍的是采用交流电的形式。所谓交流电，是指大小与方向随着时间而交变的电压、电势和电流的总称。交流电路不同于直流电路，它内部包含着本身特殊的矛盾，就在于电源的电势、电路中的电流，它们的大小和方向都随时间不变地变化。

交流电的应用所以广泛的理由，是因为交流电能的生产、传输以及利用等各个方面，它比直流电有独特的优越性的缘故。在现代电力系统中，大多数发电站发出与输送的是交流电，这是因为在远距离输送电能时，必须使用高电压，这样就可减少输送时的能量损失，距离越远需要的电压越高，例如由小丰满输电到鞍山的电压是22万伏。在用电的地方，往往需要较低的电压才安全，如110伏、220伏、380伏、500伏、1000伏等。因此可知在输电与配电时都需要变换电压，交流电可以利用变压器来完成这一任务（在改变电压的过程中能量损失很小）。因此，在目前的电力系统中多采用交流电。在工业上交流电的应用也很广泛，动力方面大多数的电动机都是交流的，这是因为交流电机结构比直流电机简单，成本也较低。

在通讯工程上，交流电得到更广泛的应用。通讯时要将讯号变成交变电流，无线电波就是由天线中的交流电所产生的。

由于交流电的应用是如此的广泛，而无线电通讯就离不开交流电，所以我们要很好的进行学习，以熟悉与掌握交流电路的知识。

电流的方向一定，而它的大小随着时间变化的，这种电流叫做脉动电流。任何一种脉动电流都可以把它当作由交流和直流迭加而成（交流的最大值比直流小），如果在一个负载内同时送进上述的交流与直流，这个负载中就有脉动电流通过。下面就是交流、直流、脉动电流与时间的关系图解。

由于交流电的变化规律是多种多样的，我们把交流电的大小和方向每隔一定的时间又重复变化的，称为周期性交流电。持续的周期性交流电可能是交变量或脉动量。一般交流电是指持续的周期性变化量，它的平均值在一周期中为零。图4—1(a)为不对称的交流电，(b)为对称的交流电，它在半周期中为正，另半周期中为负；

(c) 为正弦交流电，它的数值与某角度的正弦或余弦成正比。脉动周期量在一周期中的平均值不为零，可能为正，也可能为负。脉动电流可以认为是在一直流基础上加一个交流，如图 (d) 及 (e)，其中图 (d) 的脉动量在某些时间是负的，而图 (e) 的脉动量在所有时间都是正的，这种电流是单向性的。

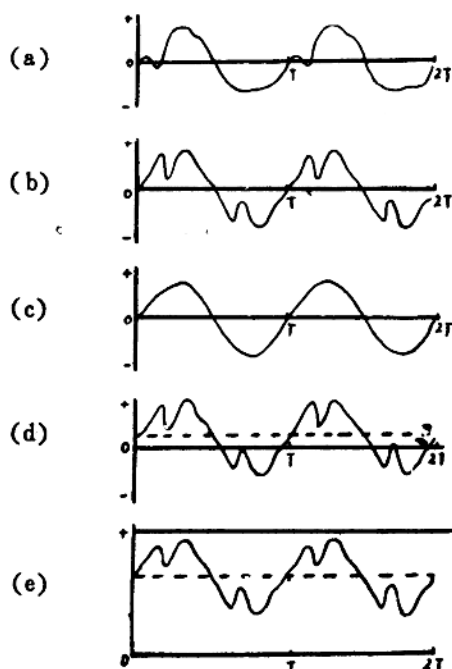


图 4—1

- | | |
|------------------|-----------------|
| (a) 不对称的交流电 | (b) 对称的交流电 |
| (c) 正弦交流电 | (d) 某些时间是负的脉动电流 |
| (e) 所有时间都是正的脉动电流 | |

第一节 正弦交流电的基本概念

一、正弦交变电流

如果电路中电荷的运动速度不断地变化，电流的数值就不断地变化。大小和方向都随时间变化的电流叫做交变电流，简称交流。交变电流在某一瞬时的数值叫作

瞬时值，用小写的字母 i 表示。取很短的一个瞬间 Δt ，在这段时间内穿过导线截面的电量为 Δq ，则瞬时电流

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}。$$

电流可表示为通过导线截面的电量对时间的变化率。

图 4—2 画出了交变电流随时间而变化的 一种 情形。在 t_1 的 瞬 时，电 流 是 +5 安，在 t_3 的 瞬 时 电 流 却 是 -2 安。电 流 的 数 值 有 时 为 正，有 时 为 负，这 说 明 电 流 的 方 向 是 在 变 化 的。从 0 到 t_2 的 期 间，电 流 的 实 际 方 向 是 从 导 线 的 A 端 指 向 B 端，如 图 中 虚 线 箭 头 所 示，但 从 t_2 到 t_4 的 期 间，电 流 的 实 际 方 向 却 是 从 B 端 指 向 A 端。如 选 取 从 A 端 向 B 端 的 电 流 方 向 作 为 电 流 的 正 方 向，用 实 线 箭 头 表 示 如 图，则 从 0 到 t_2 期 间 的 电 流 都 是 正 向 的，其 值 为 正；从 t_2 到 t_4 期 间 的 电 流 反 向，其 值 为 负。

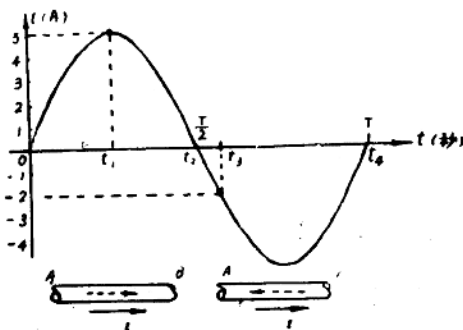


图 4—2 正弦交变电流

从 0 开始到 t_4 时电流已完成一次变化， t_4 之后就一再重复这个循环。这样的电流是周期性变化的，叫做周期性交变电流，简称为周期性电流。一次循环所需的时间叫做周期，用 T 表示，单位是秒。每秒钟完成的循环次数叫做频率，又叫做周率，用 f 表示，单位是周/秒（又叫赫芝）。频率等于周期的倒数，即

$$f = \frac{1}{T}。 \quad (4-1)$$

周期性电流的最大瞬时值叫做最大值，又叫振幅。用大写的字母 I_m 来表示（m——大）。图 4—2 中 $I_m = 5$ 安。

图 4—2 中所示曲线是正弦曲线，它所表示的电流是按正弦规律变化的，叫做正弦交变电流，简称正弦交流。正弦交流的实际应用最为广泛，这是因为它在应用和计算等方面具有许多优点。工业用电的电源大都是正弦交流。

工业用正弦交流的频率简称“工频”，我国的工频规定为50周/秒。
常用交流的频率见表4—1。

表4—1 常用交流的频率

用 途	频率 (周/秒)
我国工业用交流	50
飞机用交流	400
船舶用交流	50, 400
有线电信用交流	300~5000
无线电用交流	$10^5 \sim 10^{10}$

电信中常用KC、MC、GC等作为频率的单位。

1 KC (千周) = 10^3 C (周/秒),

1 MC (兆周) = 10^6 C (周/秒),

1 GC (千兆周) = 10^9 C (周/秒)。

〔例4—1〕飞机用交流的周期是多少?

解：查表4—1，飞机用交流的频率是400周/秒，其周期是

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{400} = 0.0025 \text{秒} = 2.5 \text{毫秒}。$$

二、正弦电动势的产生

为了在线性电路内通过正弦交变电流，必须有产生正弦交变电动势的电源，即交流电源。常用的交流电源是根据电磁感应原理制成的交流发电机。

交流发电机的结构可以用图4—3来说明。电机中的磁场是由固定于机座内的直流电磁铁所产生的。南北磁极之间有一个装在轴上的圆柱形的钢心，它可以在磁极之间转动，叫做转子。钢心的表面

缠有很多匝导线，现在只画出其中的一匝以简化图画。

制造时，有意使磁极与钢心之间的空隙分布不均匀，以取得空隙的磁感应强度与角度 α 成正弦函数的关系，即

$$B = B_m \sin \alpha,$$

式中 B_m 表示磁极正中处的磁感应强度，即磁感应强度最大值，如图4—

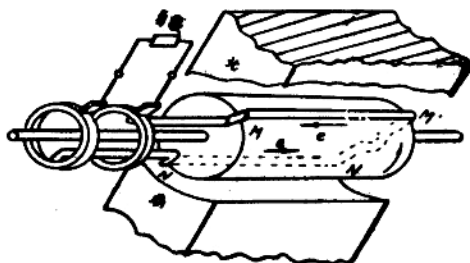


图4—3 交流发电机的结构

4(a)所示。

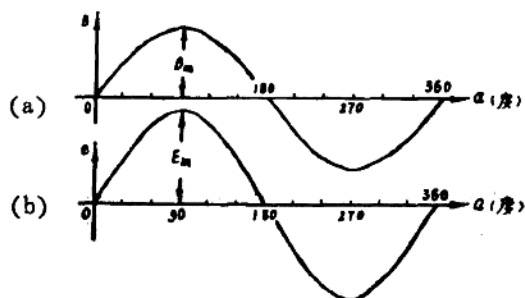


图 4—4 气隙磁感应强度的分布及导线的感应电动势曲线

在外加机械转矩的作用下，电机的转子逆时针方向匀速旋转。导线 MM' 和 NN' 就在上述气隙的磁场中运动而产生感应电动势。由于结构上的对称，如图 4—5 所示，这两根导线所在处的气隙磁感应强度大小总是相等的，因此它们所产生的感应电动势大小也相等。电动势的方向如图 4—3 所示。在通路内这两个电动势的方向是相同的，因此这一匝导线产生的电动势应是两者之和。

为了简便起见，下面可以只讨论一根导线的电动势，如图 4—6 所示。因为从气隙进出钢心的磁力线总是和钢心表面相垂直，也就是和导线运动的方向相垂直，故长度为 l 、速度为 v 的导线 M 产生的感应电动势是

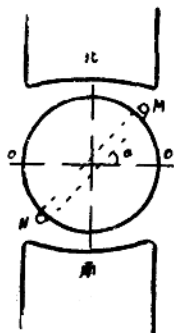


图 4—5 发电机剖面图

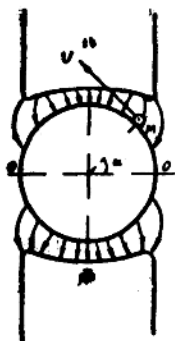


图 4—6 导线感应电动势

$$e = Blv.$$

因为气隙中磁感应强度 B 和角度 α 成正弦函数关系，所以，这个电动势将随导线 M 运动时所达到的角度 α 而变化，即

$$e = B_m l v \sin \alpha.$$

当导线M位于O'点, $\alpha = 0$, $B = 0$, 此处没有磁场, 导线运动时不切割磁力线, 所以就不能产生电动势; 当导线在北极的正下方, $\alpha = \pi/2$, $B = B_m$, 此处的磁场最强, 导线的感应电动势就具有最大值, 即

$$E_m = B_m l v_0$$

将最大值代入前面的关系式, 得到

$$e = E_m \sin \alpha$$

导线的感应电动势是和角度 α 成正弦函数关系的, 如图 4—4 (b) 所示。

在图 4—6 中, 当导线在北极区域内旋转, 它的感应电动势的方向总是从图面垂直向外, 当导线转到南极区域内, 它的感应电动势的方向变为垂直图面向里。如果以导线在北极区域内运动时所产生的感应电动势为参考, 其数值为正, 则导线在南极区域的感应电动势数值为负, 如图 4—4 (b) 所示。

如果导线匀速旋转, 在时间 t 内旋转了 α 角, 其角速度 ω 可由下式求得

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

导线在磁场中旋转一周, 它转动的角度 $\alpha = 2\pi$, 感应电动势完成一次循环, 相应的时间就是周期 T , 因此

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

而周期的倒数等于频率 f , 所以

$$\omega = 2\pi f \quad (4-2)$$

角速度和电动势的频率成正比。因此, 角速度又叫做角频率。它的单位是弧度/秒。

倘若在开始计时的时刻, 导线M位于O'点, 则在时间为 t 的时刻, 它所达到的位置应由

$$\alpha = \omega t$$

求得, 因此, 导线的感应电动势又可以写为

$$e = E_m \sin \omega t$$

或者

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

交流发电机产生的总电动势由每根导线的电动势决定, 因此, 它也是按正弦规律变化的。

〔例 4—2〕电动势 $e = 155 \sin \omega t$ 伏的频率是 50 周/秒, 计算 t 等于 0.005 秒、0.012 秒和 0.026 秒等几个瞬时的电动势。

解: 电动势的角频率是

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 314 \text{ 弧度/秒}$$

在 $t_1 = 0.005$ 秒的瞬时, 电动势是

$$e_1 = 155 \sin(314 \times 0.005 \times 57.3^\circ) = 155 \sin 90^\circ = 155 \text{ 伏}$$

为了便于查表, 角度用度为单位, 因此上式引入了换算因数 $180^\circ/\pi = 57.3^\circ$. 同理, 在 $t_2 = 0.012$ 秒和 $t_3 = 0.026$ 秒的瞬时, 相应的电动势分别为

$$\begin{aligned} e_2 &= 155 \sin(314 \times 0.012 \times 57.3^\circ) = 91.2 \text{ 伏}, \\ e_3 &= 155 \sin(314 \times 0.029 \times 57.3^\circ) = 147.5 \text{ 伏}. \end{aligned}$$

三、正弦交流电的三要素

上面把发电机的电动势写成

$$e = E_m \sin \omega t,$$

这只是在计时开始时, 导线 M 位于 O' 点的特殊情况得到的。如果计时开始时, 导线 M 已从中性面 OO' 转过 ψ 角, 如图 4—7 所示, 那么在 $t=0$ 时, 导线的电动势并不等于零, 而是等于

$$e_0 = E_m \sin \psi.$$

过了时间 t 之后, 导线 M 转到另一位置, 角度增加了 ωt , 相应的感应电动势应写为

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi) = E_m \sin \alpha. \quad (4-3)$$

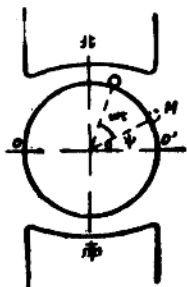


图 4—7 计时开始时导线不在 O' 点

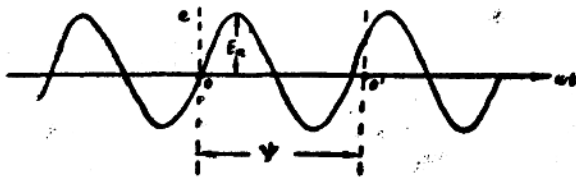


图 4—8 正弦交流电

这就是正弦电动势的一般函数式。式 (4—3) 中的 E_m 为正弦电势的最大值, 也就是图 (4—8) 中正弦曲线的振幅值。

式 (4—3) 中的 α 是正弦电势的相位角。所谓相位, 就是周期性交流电的变化进程; 正弦交流电的相位用角度表示时就是相位角。正弦交流电变化一周所经过的时间为一个周期, 也可以说该正弦函数的变化进程为 2π 弧度, 即相位角为 2π 弧度。当时间增加时, 正弦量的相位角也随之增加; 已知一周期的时间对应的相位角为 2π 弧度, 故相位角的增加速率为 $2\pi/T$ (弧度/秒)。

在图 4—8 中, 横坐标表示的是相位角, 如果以正弦电势由负值变为正值所经过的零值的时刻, 作为我们观察这正弦电势的开始, 则时间为 t 时的相位角为

$\frac{2\pi}{T}t$ 。图 4—8 中以 0 作为正弦电势的起点，则任意时刻的电势为

$$e = E_m \sin \frac{2\pi}{T}t. \quad (4-4)$$

对同一正弦交流电，若我们选择另一时间为观察的起点，例如图 4—8 中的 O' ，则任意时刻 t 时的相位角为 $(\frac{2\pi}{T}t + \psi)$ ，正弦电势的瞬时表达式为

$$e = E_m \sin \left(\frac{2\pi}{T}t + \psi \right). \quad (4-5)$$

式 (4—5) 中的 ψ 叫做初相位角或初相，在正弦曲线图 4—8 中，它表示正弦量的起点（即由负变正所经过的零点）到我们观察该正弦量开始的时刻，该正弦量变化的进程。如果我们观察的开始时刻与正弦量的起点一致，则初相为零，即 (4—4) 式所示；如果我们观察的开始时刻，正弦量已经由它的起点演变了 ψ 相位角，则初相为 ψ ，即 (4—5) 式所示。由此可知，同一个正弦量，仅仅由于我们观察的开始时刻不同，在它的瞬时表达式内，初相也就不同；而选择观察的开始时刻是由我们任意确定的。如果我们讨论的只有一个交流电，初相的意义不大，但在一个问题中，如果有很多正弦量，我们任选某一正弦量的初相为零作为参考的正弦量，其余的正弦量，它们的初相就不能任意确定了。

时间越长，正弦量的相位角是否就无限增大呢？从公式 $\alpha = \frac{2\pi}{T}t + \psi$ 来看，似乎是肯定的结果，但是当时间增加一个周期或一个周期的整数倍时，相位角也增加 2π 或 2π 的整数倍，电势重复的变化。所以在计算相位角时，通常总是把 2π 的整数倍抛去不算，这样，正弦量的相位角总是在 $\pm\pi$ 或 $0 \rightarrow 2\pi$ 的范围内。

用曲线图表示正弦交流电的横坐标，可以应用时间 t 、角度 φ 、或弧度 ωt 、以及周期，如图 4—9 所示，这只是形式不同，实质上都是反映正弦交流电随时间而变化的规律。

通常计算相位角是从正弦量的起点开始的，例如图 4—10 中的正弦电流 i_1 ，图中的 1、5 等点都可以作为正弦量的起点。若欲求 i_1 电流变化到横坐标为 6 时的相位角，应该等于 5、6 之间的相位角，即为 $\pi/2$ 弧度，不必要从坐标的 0 点算起。若欲

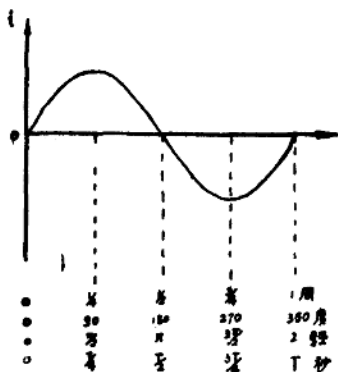


图 4—9

求 i_1 的初相角，则从 $t=0$ 的瞬间（即坐标原点 O ）至正弦量的起点 1 的相位角就是。当正弦量的起点在原点的左边时，初相角为正（ $\psi > 0$ ）；而当起点在原点的右边时，初相角为负（ $\psi < 0$ ），在图4—10中， i_1 的初相角为正， i_2 的初相角为负，它们的表示式为

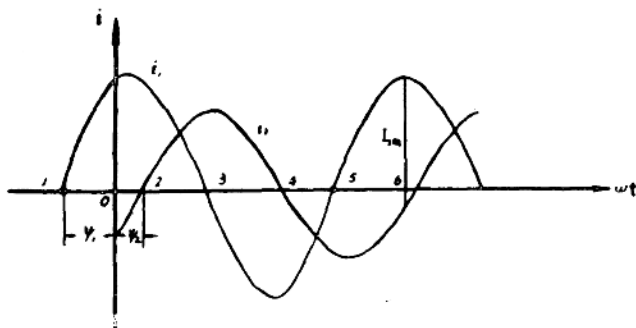


图 4—10

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= I_{m1} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \\ i_2 &= I_{m2} \sin(\omega_2 t - \psi_2) \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

在图4—10中的两个正弦交流电，频率是相同的，振幅与初相不同。当我们要比较两个正弦交流电是否完全一样时，应该看它们的振幅、频率、初相三者是否都一样，如果是完全一样，那么在图解时，两个交流电的曲线就重叠在一起，它们的变化情况每时每刻都一样，这就说明是完全相同的交流电。我们要完全了解某一正弦交流电的变化情况，必须知道振幅、频率、初相，三者缺一不可，因此，通常把这三者叫做正弦交流电的三要素。

在以后我们分析正弦电路中的现象时，要研究电流、电势、电压等正弦量的变化情况以及它们之间的关系，就需要确定这些正弦量的三个要素。一般在研究的问题中，正弦量的频率都是相同的；振幅是表示正弦量的变化范围，是固定的一个常数，只算它的绝对值大小，总是取它的正值。已知振幅与频率，要求某一时刻正弦量的瞬时值，必须知道它的相位才行。要研究几个同频率的正弦量的相互关系时，常常由于它们的初相不同，则任一瞬间它们的相位角也都不同。因此由相位角的不同，可以反映各正弦量的变化进程，这说明要比较两个同频率的正弦量，研究它们之间的关系时，必须知道相位差才行。

两个同频率的正弦量，它们的相位差在任何瞬间都是一个常数，即等于它们初相之差。

例如式（4—6）的两个同频率的正弦电流 i_1 和 i_2 ，它们的相位差

$$\varphi = (\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2. \quad (4-7)$$

由（4—7）式可以推知，两同频率正弦量的相位差，与我们开始观察交流电所选

的时刻迟早并无关系，我们选的时刻不同，只影响正弦量的初相，并不会改变它们的初相差。在式（4—7）中，若 $\varphi = \psi_1 - \psi_2 > 0$ ，这说明 i_1 比 i_2 在时间的先后次序上先达到零值或最大值，我们称这种情况为 i_1 领先于 i_2 一个相位角；反之，则叫 i_1 落后于 i_2 同样的相位角。如果两个同频率正弦量的初相相同，则它们的相位差为零，这种情况叫做同相位；两正弦量的相位差为 180° 时称为反相位；相位差为 90° 时为正交相位。图（4—11）表示同相、反相，正交的两个正弦量。

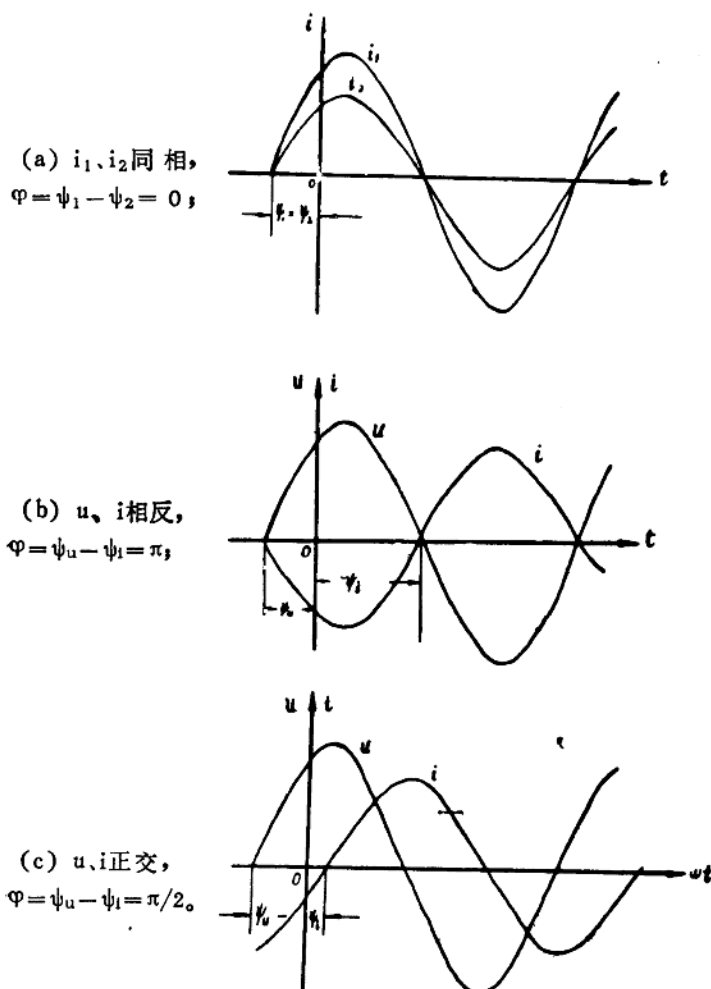


图 4—11 同相，反相，正交的交流电