

# 电 路 理 论 基 础

第 三 册

(試 用 教 材)

电 视 专 业 用

成 都 电 訊 工 程 学 院

一 九 七 一 年 十 一 月

#### 第四章 交流电路和电抗元件

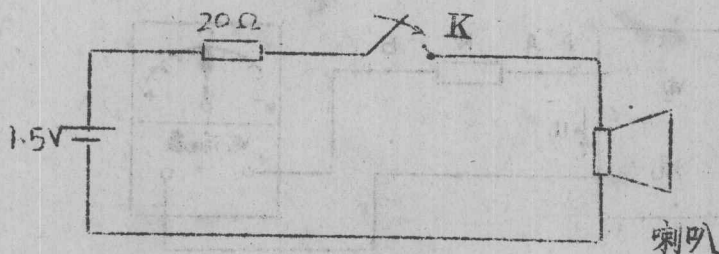
在我们参观和参加工厂劳动的时候大家看到的电视设备中，除了有电阻外，还有电容器，电感线圈和互感线圈等元件，（当然，也有大量的晶体管，电子管等），我们自然会问，这些元件起什么作用呢？它们上面的电压电流又是什么样子呢？与电阻上面的情况有何不同呢？

毛主席教导我们：“暴露事物发展过程的本质，就必须暴露过程中矛盾各方面的特性”因此，要懂得整个电视设备的工作情况，必须先要认识各元件上的特性，然后再了解元件联结起来的特性，最后，才能懂得元件在电视设备中的作用及电视设备工作情况。

正如直流电路中的电阻一样，元件上的特性主要表现为电压和电流的关系。就是说，我们要了解的是元件上通什么样的电源之后，将得到什么样的电压？或者加上什么样的电压又会得到什么样的电流？而且产生不同的电压电流关系的原因又是什么？

还得注意的是，客观存在的电压电流不仅有始终不变的直流电压、电流，还有变化的电压、电流。

例如：收音机和电视接收机中的喇叭，如果通过直流电流，喇叭就没有声音。举例来说，在图（4—1）中，设开关（以K表示）早已合上我们听不到响声，但是，如果不断搬动开关，喇叭就发出“呲



图（4—1）

“咔嚓”的响声。这时通过喇叭的不是直流电流，而是变化的电流（即电流是一会儿通一会儿不通的）。我们平时从收音机收到的广播，就是各种变化的电流通过喇叭形成的。

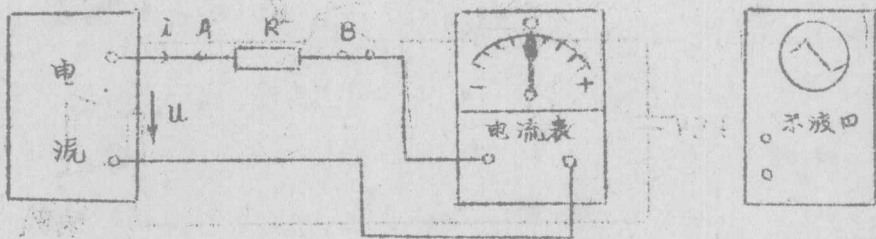
同世界上任何事物一样，变化的电流同不变化的电流相比，变化的电流是具“普遍性”的，不变的电流只是变化电流的特殊情况。因此，要了解元件上的特性，不仅需要了解特殊的直流电流通过元件时，在它上面会得到什么样的电压，而且更需要了解普遍性的变化的电流通过元件时，它上面会得到什么样的电压。

为此，让我们先来熟悉，在无线电技术中大量遇到的交变电流及其特点。

### 第一节 交变电流和直流电流

前面已经说过，实际的电流有不随时间变化的直流电流，还有随时间而交替变化的电流（简称交变电流）。产生交变电流的电源，在电力技术中有交流发电机（发电厂就是用交流发电机发电）；在无线电技术中有各种振荡器（如音频振荡器、高频振荡器）和其他的信号源。

为了认识交变电流和它的特点，我们来做一个实验。在图（4—2）中，电流表可以指示正负方向的电流。若电流从A点至B点，电流表



图（4—2）

指针向右偏转；若电流从 B 至 A，则电流表指针向左偏转。

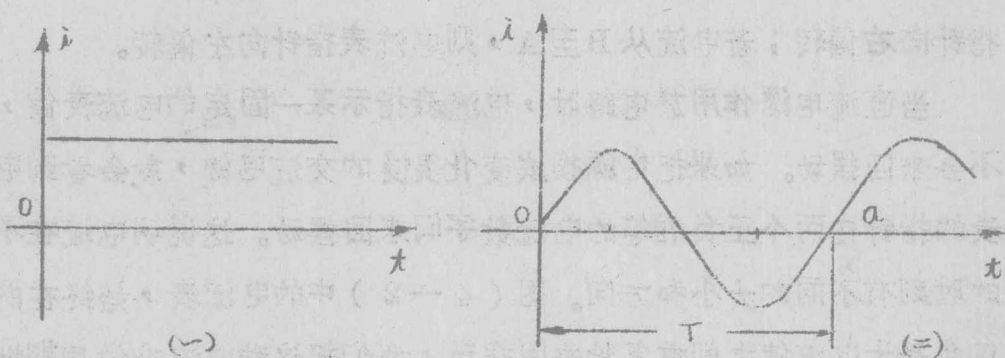
当直流电源作用于电路时，电流表指示某一固定的电流表值，而不会来回摆动。如果把电源换成变化很慢的交流电源，就会看到电流表的指针在两个正负相等的电流数字间来回摆动。这说明电流在不同的时刻有不同的大小和方向。图（4—2）中的电流表，始终在两个正负最大电流值之间重复地来回摆动，我们把这种电流叫做周期性的电流。如果指针的摆动不是重复的而是任意摆动的，这种电流叫做非周期性电流。

如果调节电源的有关旋钮，可以使电<sup>表</sup>流指针来回摆动加快，也可以减慢。就是说周期性电流的变化有快有慢。为了比较变化的快慢，我们用“周期”（记为  $T$ ）这个量来比较。它表示电流表指针来回摆动一次所需要的时间。 $T$  愈大指针摆动愈慢， $T$  愈小指针摆动愈快。但是，我们嫌“周期”还不够直接地表示出电流变化的快慢，而常用“频率”（记为  $f$ ）这个量来直接说明。它表示在一秒钟内电流表指针来回摆动的次数。 $f$  愈高指针摆动愈快， $f$  愈低指针摆动愈慢。显然，周期和频率之间有如下的关系。

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

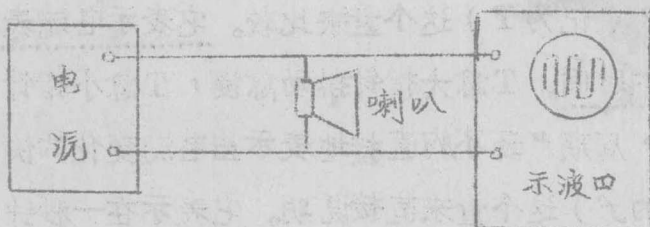
如果又把上面所用的交、直流电流通到示波器上，就会看到不同时刻的电流大小而联结起来的图形，这种图形叫做波形图。如图（4—3）所示。横轴  $t$  表示时间，纵轴表示电流。

第二图是周期性交变电流的波形图。时间从 0 点至  $a$  点为一个周期， $a$  点以后电流重复 0 点至  $a$  点的变化。当电流的频率的变时，波形图会变密或变疏。



图(4-3)

如在图(4-4)中,改变电源的频率,一面听喇叭的声音的变化,一面看示波器上波形的变化。当 $f$ 升高时喇叭的声音变得尖锐,波形变密; $f$ 降低时喇叭声音变得低沉,波形变疏。



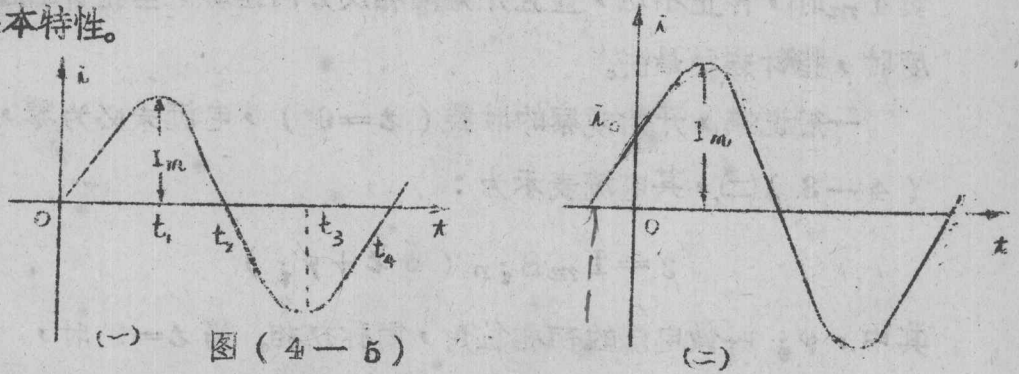
图(4-4)

在计算上,周期的单位用秒,频率的单位是周/秒,用符号 $H_z$ 记之( $H_z$ 读为“赫茨”)

图(4-3)(二)和(4-4)中所示的波形为正弦电流,是无线电技术中最常见,最基本的周期性交变电流,也是任意交变电流的一种特例。发电厂是产生正弦电流的电源之一,它是 $f$ 为 $50H_z$ 的正弦电源。今后我们会看到,在无线电技术中,常常遇到正弦电流电路,而且对正弦电流电路的分析方法,又是分析任意的交变电流电路的基础。因此,在这一章中,我们要着重分析元件通过正弦电流时的特性。

## 第二节 正弦电流的特点

只有充分认识正弦电流的特点，才能了解在正弦电流作用下元件上的基本特性。



假定图(4-5)(a)中所示的电流波形是正弦波形，它的表达式为

$$i = I_m \sin \omega t$$

$i$  表示在不同时刻电流的大小，称为正弦电流的瞬时值。 $I_m$  是电流的最大值又称为振幅值，如上图所示，当  $t = t_1$  时电流在正方向取得最大值； $t = t_3$  时电流在负方向取得最大值。上式中的  $\omega = 2\pi f$ ， $\omega$  称为角频率。

从图(4-5)(a)看到， $t = 0$  至  $t = t_1$  时间内，电流从零增加到最大值，开始变化很快，以后逐渐变缓；从  $t = t_1$  至  $t = t_2$  时，电流从最大值减小到零，变化由慢到快。 $t = t_1$  时是变化的转折点。从  $t = t_2$  至  $t = t_3$ ，电流由零向负方向增加至最大值，变化由快到慢。 $t = t_2$  时电流变化最快， $t = t_3$  时再次出现变化的转折。从  $t = t_3$  至  $t = t_4$ ，电流由负的最大值减少到零，变化由慢到快， $t = t_4$  变化最快。到此为止，第一个周期结束，以后重复上述变化。

我们重做图(4-2)的实验，因为电源电压是正弦电压，今后可以证明，该实验电路中电流也是正弦电流，仔细观察电流表指针的

摆动情况，将会看到，当指针接近正负  $I_m$  时摆动变缓，指针指示正负  $I_m$  时，停止不动，并且开始向相反方向摆动，当指针通过零刻度时，指针摆动最快。

一般说来，开始观察的时候 ( $t=0$ )，电流未必为零，如图 (4-3) (二)，其电流表示为：

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

其中， $\psi_i$  叫做电流的初相位角，简称初相。当  $t=0$  时，

$i_0 = I_m \sin \psi_i$ ，可见  $\psi_i$  是观察正弦电流的变化过程的开始时刻，正弦电流的相位角。

如果以  $(\omega t)$  来表示横轴，则可以在波形图的横轴上表征出  $\psi_i$  的大小。以图 (4-6) 中两个不同初相的电流为例，初相角等于正弦波的起点 (即正弦波由负值转变到正值经过零值时) 算起，至  $t=0$  (即坐标原点) 为止的相位角。

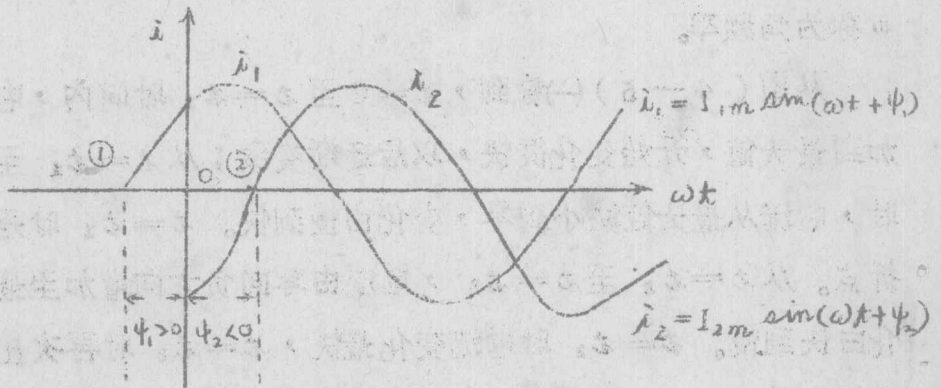
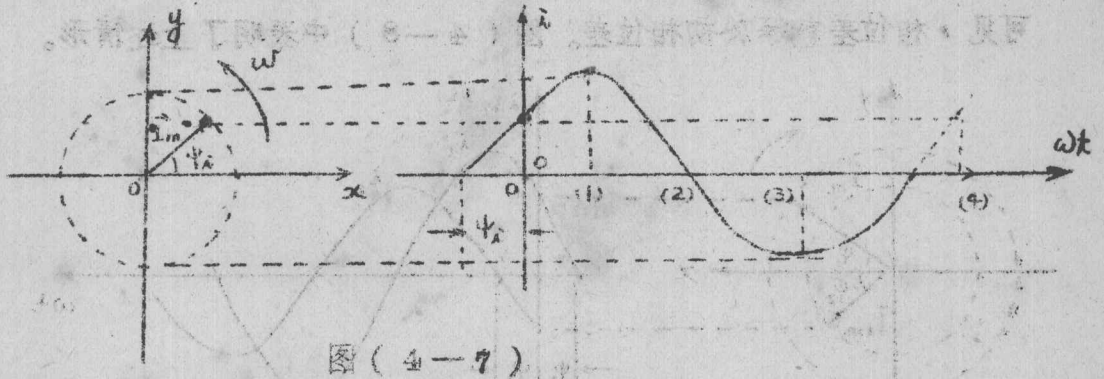


图 (4-6)

图中  $i_1$  的起点 ① 在坐标原点的左边， $i_1 = 0$ ，此时  $(\omega t)_1 + \psi_1 = 0$  故  $\psi_1 = -(\omega t)_1$ ，因  $(\omega t)_1$  为负值 (在原点之左)，故  $\psi_1$  为正值。 $i_2$  的起点 ② 在原点的右边，故  $\psi_2$  为负值。

总的说来，要确定一个正弦电流，必须抓住  $I_m$ 、 $\omega$  和  $\psi_i$  这三个要素。

正弦函数除了用函数式和波形图来表示外，还可以用旋转向量在纵轴上的投影来表示，如图(4-7)



图(4-7)

左图中的向量  $\bar{I}_m$  的模(即长度)为  $I_m$ ，初始幅角为  $\psi_i$ ， $\bar{I}_m$  按等角速度旋转，则它在  $y$  轴上的投影为

$$I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

向量  $\bar{I}_m$  在初始位置时，对应於正弦函数的0点； $\bar{I}_m$  转到  $y$  轴时对应於(1)点，转到负  $x$  轴时对应於(2)点；转到负  $y$  轴时对应於(3)点；回到原始位置时(即  $\omega$  转了  $2\pi$  角度)对应於(4)点。 $\bar{I}_m$  旋转一周，正弦函数经历一个周期。

同样，一个正弦电流可以用一个旋转向量在纵轴上的投影来表示，向量的模等於电流的振幅，向量的幅角等於电流的初相。

用旋转向量表示正弦量时，通常只画出时间为零时向量的位置。

在实际应用中，经常遇到具有两个以上同频率的正弦量，我们也用向量来比较它们之间的振幅大小和相位的差别(称为相位差)，设

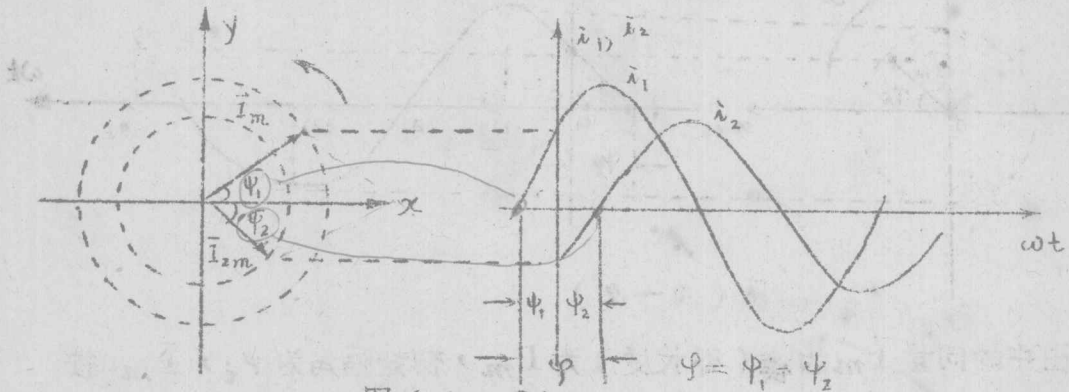
$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$$

### 相位差

$$\psi = (\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2$$

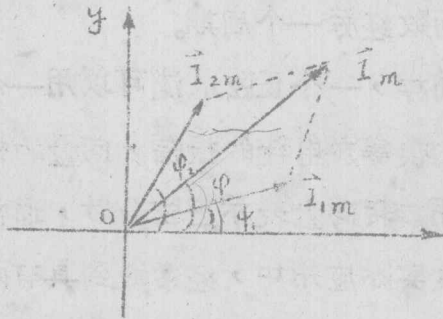
可见，相位差就等於初相位差。图(4-8)中表明了上述情形。



图(4-8)

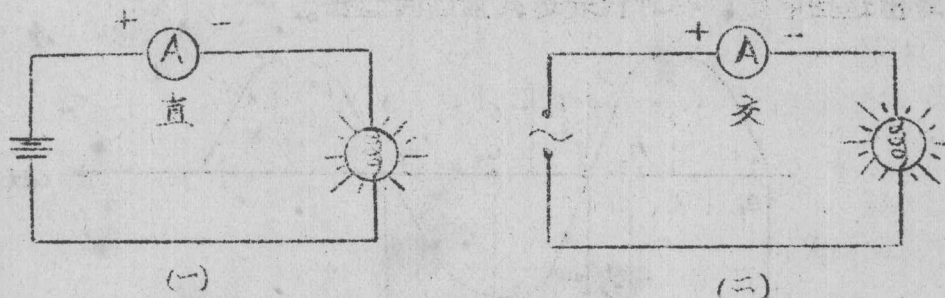
两个同频率正弦量相加，等於两个对应的向量以同一角速度旋转，它在y轴上的投影就是所求的正弦量。向量合成如图(4-9)所示。合成向量的模等於相加正弦量的振幅，合成向量的幅角等於正弦量相加后的初相。

对正弦电流除了要研究它的波形和瞬时值之外，在实践中常常还需要比较不同正弦电流在整个周期内的电流大小。由於正弦电流正、负半周内瞬时值的大小相等而方向相反，故整个周期内电流的平均值为零。所以，用平均值来比较正弦电流的大小就没有实际意义。



图(4-9)

那么究竟怎样比较正弦电流的大小呢？我们采用了“有效值”来比较。为了说明有效值的含意，先看看图（4—10）所表示的实验。



图（4—10）

图中，电灯泡分别接通直流和交流电源，两个灯泡都会因发热而发光。如果调节交、直流电源电压使得两个灯泡发光强度一样，就是说两个灯泡电阻的热效应一样，这时，如果直流电流为 $0.113\text{A}$ ，我们就把正弦电流也定作 $0.113\text{A}$ 。这种以对比热效应相等的直流电流表示的正弦电流，叫正弦电流的有效值。对任何周期性交、变电流，都是用有效值来比较大小，有效值的大小同样以对比热效应相等的直流电流来确定。在测量上专门制作了测量有效值的交流电表。值得注意的是，频率很低的交变电流，可以用直流电表观察瞬时值，但是用直流电表测市电和无线电技术中频率很高的交变电流时，针就不会动，更不能测量“有效值”。交流电压也用“有效值”比较大小。例如灯泡两端电压的有效值，它相当於热效应相等的直流电流在灯泡两端的电压降。为了一起见，交变电流和电压的有效值用大写字母 $I$ 和 $U$ 表示，随时间变化的瞬时值用小写字母 $i$ 和 $u$ 表示。

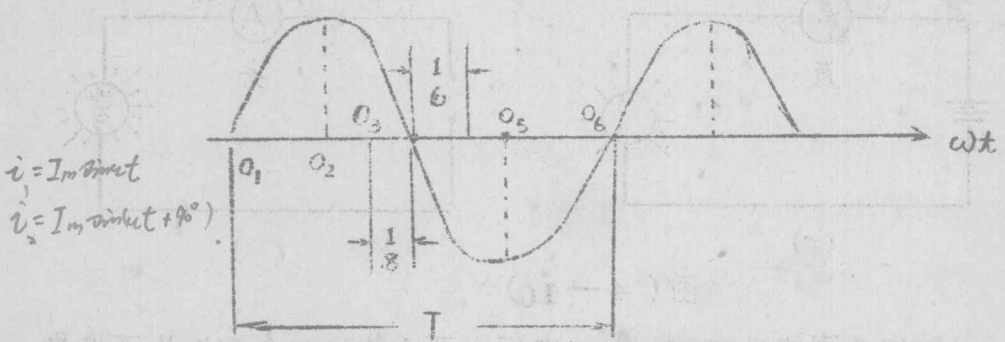
可以证明：正弦电流，电压的有效值等於最大值（即振幅值）的

$\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍或 $0.707$ 倍，即

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} ; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

有效值

(练习题) (1) 正弦电源波形如图所示  $I_m = 1 \text{ A}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ 。若时间读数的起点取在  $O_1$  点,  $O_2$  点,  $O_3$  点,  $O_4$  点,  $O_5$ ,  $O_6$  分别写出这些电流的瞬时值表达式并画向量图。



(2) 试作以下几个正弦电流的波形图和向量图。

$$i_1 = 0.3 \sin 10^3 t \text{ (A)}$$

$$i_2 = 0.5 \sin 10^3 t \text{ (A)}$$

$$i_3 = 0.4 \cos 10^3 t \text{ (A)}$$

并求它们的振幅, 频率, 和初相位以及互相间的相位差。

(3) 已知  $i_1 = 3 \sin 314 t \text{ (A)}$

$$i_2 = 4 \sin 10^3 t \text{ (A)}$$

用向量法求  $i = i_1 + i_2$

(4) 有两支 60 瓦的灯泡, 按图 (4-8) 接入电路, 设两路中灯泡一样亮; 直流电压为 220 V, 试求通过灯泡的正弦电流的有效值和最大值。

\* \* \* \* \*

本章的主要目的是讨论电阻, 电容, 电感, 互感等元件上的基本

定律，上面学习的交流电流，正弦电流的特点及其表示方法，都是为讨论元件上的特性作准备的。

怎样来认识元件的特性呢？“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，在於事物内部的矛盾性。”当元件分别通过交、直流电流时，或者通过变化规律不同的交变电流时，它上面虽然有不同的电压电流关系，但是，根本的原因不在於通过元件上的电源按什么规律变化，而在於元件本身固有的特性，即元件上的电压、电流有一个带普通性的基本定律。同时，元件上的基本定律又是直接与元件的物质结构相关的。所以我们要像直流电路中先熟悉实际的电阻元件一样，从了解各元件的实际结构开始来研究问题。

遵照毛主席的教导，人的认识有两个过程“一个是由特殊到一般，一个是由一般到特殊。”我们先认识元件通过正弦电流时的电压电流关系这一特殊情况开始，进一步认识通过一般的交变电流时的电压电流关系，并利用这一普遍性的关系，再回过头来分析元件通过正弦电流和直流电流时的特性。

毛主席教导我们：“认识开始於经验——这就是认识论的唯物论。”“认识有待於深化，认识的感性阶段有待於发展到理性阶段，这就是认识论的辩证法。”遵照毛主席这一教导，我们在研究一般特性之前，先让大家自己动手做实验，从实验中总结实践经验，再进行理论分析，然后又把理论分析的结论去研究一些实际应用的例子，並进一步进行实验。这样就有可能启发大家在实际中，更好地运用这些基础理论。

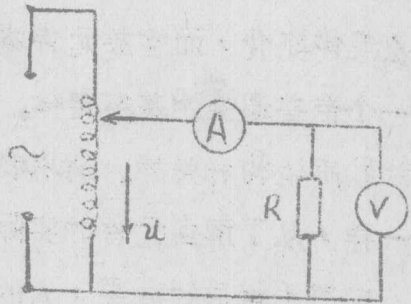
“理论的基础是实践，又反过来为实践服务。”这是理论和实践的辩证关系。

### 第三节 电阻上的基本定律

实际的电阻元件，已在直流电路中作了介绍，在直流电路中，电阻上的电压和电流满足欧姆定律。在正弦电流电路和任意的交流电路中，电阻上的电压电流关系又遵循什么定律呢？让我们先作一个简单的实验。

#### (一) 电阻上的正弦电流实验

按图(4-11)接线，图中电流用市电电源(即50HZ的正弦电源)，接入一个自耦变压器用以改变加在R上的电压。测量电阻上的电压及通过电阻上的电流的有效值。从实验的结果中可以



图(4-11)

以总结出一条规律：即电阻上的电压电流有效值满足欧姆定律：

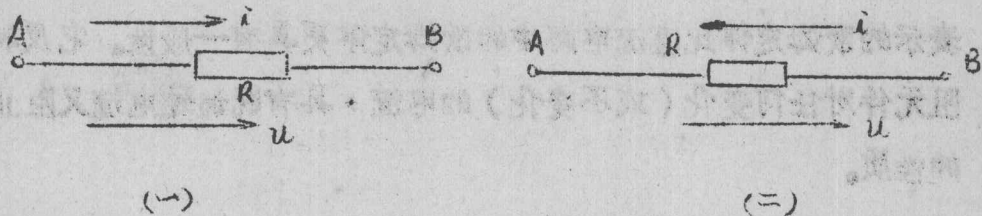
$$I = \frac{U}{R}$$

下面再作进一步的分析

#### (二) 欧姆定律

感性认识有待于发展到理性认识。下面让我们进行理论分析。事实上，理想的电阻元件，无论它上面的电压怎样变化，其阻值R始终是一个常数。因此，在任何时刻，电阻上的电流一定与电压成正比，而且比例常数就是R。说得确实些，就是当任意的交变电流通过电阻时，若电阻上面的正方向如图(4-12)(一)所示，就有

$$i = \frac{u}{R} \quad (4-1) *$$



图(4-12)

这里需要说明在交流电路中电压电流的正方向如何理解?为什么像直流电路一样也要假设正方向?以电阻上的电流为例,因为交变电流有两种可能的方向:如图(4-12)中,一时由A流向B,一时又由B流向A,为了研究上的方便,我们人为地规定某一流向为正方向(如A→B为正),这样一来,若在某一瞬时电流由A流向B,则电流为正,记 $i > 0$ ;在某一瞬时若电流由B到A,则电流为负,记 $i < 0$ 。只有这样才能写出电流的函数表示式 $i(t)$ 。反过来说,在规定了电流的正方向之后,就可以从 $i(t)$ 的正负来判断在不同时刻电流的真实方向。显然直流电路与交流电路不同,直流电流是不随时间变化的,从电流的正负便可确定电流真实方向与正方向相同或相反。而在交流电路中,只能说明某一瞬时的真实方向与<sup>正</sup>方向相同或相反,而不能表示任意瞬时的情况。

规定了电流电压的正方向之后,才能够正确地表示电阻上的电压电流关系。例如已知 $u$ 、 $i$ 的真实方向都是由A至B,但是我们把电流的正方向改设为由B至A〔表示在图(4-12(二))中〕,因而与电流真实方向相反,欧姆定律应写为:

$$i = -\frac{u}{R} \quad (4-1)'$$

反过来说，式中的负号，表明  $i$ 、 $u$  方向相反，而  $u$  的正方向又假设与真实方向一致，即都是由 A 至 B，则  $i$  的实际方向应为 A 由至 B。在这种情况下，负号反映了电压电流方向的实际情况。(4-1) 式表示的欧姆定律比直流电路中的欧姆定律更具有一般性。它反映了电阻元件对任何变化(或不变化)的电流，具有既通过电流又阻止电流的性质。

### (三) 电阻上的正弦电流

下面利用(4-1)式来分析电阻上通过正弦电流时的特性。设

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$$

其中  $u$  和  $i$  的方向如图(4-12)(一)所示。则

$$\begin{aligned} i &= \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi_u) \\ &= I_m \sin(\omega t + \psi_i) \end{aligned}$$

即

$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad \left( I = \frac{U}{R} \right)$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$$

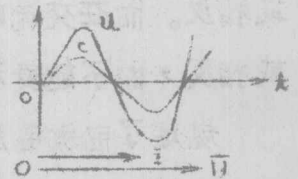
(4-2)\*

(4-2) 式可以归结为四句话：在电阻元件上，

正弦电压和电流，有效值关系像直流；

两者频率都一样，两个相位都相同。

其波形图，何量图如图(4-12)(三)所示。



图(4-12)(三)

在无线电技术中，我们不仅要分析电路中的电压电流关系，而且还需要关心“电功率”。例如有25瓦、45瓦、75瓦和100瓦各种不同功率的电烙铁，电灯泡也算有25瓦、40瓦、60瓦和100瓦等电功率的数字。这些数值表示电烙铁和电灯泡通过正弦电

流(市电)时的电功率。电功率愈大,电烙铁愈热,电灯泡愈亮。此外,收音机和电视接收机的喇叭的声音强弱也直接与电功率有关。电视台发射机的电功率愈大,能够接收到电视的范围愈广。又如在电阻元件上,当它上面通过交变电流时与通过直流一样,不仅需要考虑电阻值的大小和误差,而且也需要考虑因能量损耗而产生的热量。

分析电功率问题,只要首先知道了电压电流关系,电功率问题就迎刃而解了。

电阻是消耗电能的元件,它将电能转化为热能,在直流电路中,电阻上的功率为

$$P = UI = \text{常数}$$

但在交流电路中,电压、电流是随时间变化的,因此,电阻上的功率也是随时间变化的。

$$P = ui$$

称为电阻上的瞬时功率。它表示了不同时刻电阻上消耗的电功率。例如在电阻上通过正弦电流时,它上面的瞬时功率为

$$P = I_m U_m \sin^2(\omega t + \psi)$$

$$= \frac{1}{2} I_m U_m [1 - \cos(2\omega t + 2\psi)]$$

为了便于比较整个周期内功率的大小,我们用周期内电功率的平均值(叫平均功率,用大写的P表示)来进行比较。

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} I_m U_m \right) \left[ \int_0^T dt - \int_0^T \cos(2\omega t + 2\psi) dt \right] \\ &= \frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} I_m U_m \right) T = \frac{1}{2} I_m U_m = I U = I^2 R \end{aligned}$$

\* 15 \*

故  $P = IU = I^2 R$

因此，电阻通过正弦电流时，它上面的平均功率与电流的有效值的平方成正比，同电阻的阻值也成正比。如果和电阻通过直流电流时的电功率相比，形式上完全一样，只要把直流电流换成正弦电流的有效值就行了。

【例题】有一只100瓦的灯泡，接通市电后灯泡发亮，求通过灯泡的电流，以及这时灯泡的电阻值。如果  $\psi_u = 120^\circ$ ，再求  $i$ 。

【解】因为灯泡是一电阻元件，而  $P = UI$ ，

则  $100 = 220 \times I$

$$I = \frac{100}{220} = 0.459 \text{ (A)}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.459} \approx 480 \Omega$$

又因为  $\psi_i = \psi_u = 120^\circ$

故  $i = \sqrt{2} 0.459 \sin(2\pi \times 50 t + 120^\circ) \text{ (A)}$

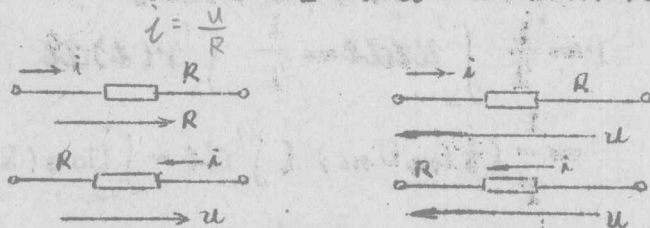
【练习】(1) 已知  $R = 100 \Omega$  的电阻元件上的电流瞬时值

$$i = 0.1 \sin(10^4 t + 45^\circ) \text{ (A)}$$

求： $u$  及  $P$  并画  $u$ 、 $i$  波形图、向量图

(2) 在下图中所设正方向下，若已知  $u$ 、 $R$  试分别写出四种情况

下  $i$  的表达式。



$$i = -\frac{u}{R} \quad \text{或} \quad i = \frac{u}{R}$$