



JIAO LIU
DIAN DU BIAO

交流电度表

3.4

苏科学技术出版社

内 容 简 介

本书简要地介绍一般感应式交流电度表的作用原理、结构特点、电度表产生误差的原因以及使用检修知识。涉及的类型主要有大量生产使用的单相电度表、三相三线有功电度表、三相四线有功电度表、标准表和最高需量电度表。

书中第一章为基础知识和电度表工作原理；二至六章为结构和误差分析；第七章为调整和校验；第八、九章为检修及接线等。

本书内容通俗实用，理论分析主要使用向量法，检修工艺切实可行。它可供一般电度表制造厂及供电部门的工人和工程技术人员学习参考。

交 流 电 度 表

陶汉铭 冷玉梅 编

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：镇江前进印刷厂

开本787×1092毫米 1/32 印张9,125 插页2 字数200,000

1983年5月第1版 1983年5月第1次印刷

印数 1—16,100册

书号 15196·109 定价：0.85元

责任编辑 沃国强

前 言

国家电力工业的迅速发展和家用电器的广泛应用，对电能的输送、计量提出了愈来愈高的要求。而要正确计量电能，就必须有大量高精度的电度表。从我国每年发电量增长需要来推测，每年应新增加电度表约为2000万只左右。我们电表行业的责任就是满足广大供电部门和用户不断增长的需要。

为了帮助电度表的生产、安装和检修人员更好地熟悉交流电度表的结构、误差、特性和检修知识，我们结合自己实际工作中的体会，写出这本小册子，供大家参考。

本书的第一至第七章及附录，由杭州仪表厂设计科陶汉铭同志编写；第八、九两章由南京供电局冷玉梅同志编写。在编写过程中，得到了哈尔滨电工仪表研究所、北京供电局、上海供电局表计工场、杭州仪表厂和南京供电局等单位有关同志的热情帮助，在此一并表示感谢。由于我们水平较低，经验不足，书中差错不妥之处一定不少，恳切地希望同志们批评指正。

编 者

1981年

目 录

第一章 感应式交流电度表原理及有关基础知识

第一节	单相正弦交流电路.....	1
第二节	三相正弦交流电路.....	19
第三节	铁磁物质与磁路欧姆定律.....	21
第四节	一般感应式测量机构作用原理的.....	23
第五节	感应式单相电度表的基本原理.....	26

第二章 单相电度表的结构

第一节	一般感应式单相电度表的构造.....	31
第二节	电磁铁芯的几种常见形式.....	39
第三节	电度表上轴销及下轴承结构形式.....	48
第四节	电度表的调整装置.....	53

第三章 感应式电度表的基本误差

第一节	仪表误差的一般概念及电度表误差的表示...	67
第二节	电流铁芯材料非线性误差.....	72
第三节	摩擦力矩及摩擦误差.....	74
第四节	摩擦补偿力矩引起的误差.....	75
第五节	转动部分圆盘位移而引起的误差.....	77
第六节	串联电路磁化角变化的误差.....	79
第七节	电压与电流工作磁通自制动误差.....	80
第八节	电度表总的基本误差.....	80

第四章 感应式电度表的附加误差

第一节	电压影响时的附加误差	86
第二节	温度影响时的附加误差及其补偿装置	90
第三节	频率影响时的附加误差	95
第四节	自热影响	100
第五节	电源非正弦波形的影响	101
第六节	倾斜影响	104

第五章 一般感应式三相电度表的作用原理及结构

第一节	三相电路里有功功率及有功电能的测量	105
第二节	三相电路里无功功率及无功电能的测量	108
第三节	三相三线及三相四线有功电度表	109
第四节	三相无功电度表	113
第五节	三相电度表逆相序影响	118
第六节	负荷不平衡影响	121

第六章 几种常见的特殊用途电度表

第一节	标准电度表	124
第二节	最高需量电度表	134
第三节	三相三线有功(无功)脉冲电度表	146
第四节	DSK1型电力定量器	148
第五节	损耗电度表	151

第七章 单相及三相电度表的调整校验

第一节	电度表常用的两种校验方法	158
第二节	单相电度表的调整校验	160

第三节	三相电度表的调整校验	63
第四节	电度表装配校验中常见的一些质量问题 ...	167

第八章 电度表的检修

第一节	表壳的清洗及修理	172
第二节	轴承组合的清洗及修理	175
第三节	圆盘组合的清洗及修理	182
第四节	计度器的检查与修理	183
第五节	电磁元件的修理	187
第六节	永久磁钢的修理	191
第七节	常见的特殊用途电度表的修理	194
第八节	电度表的改制	198

第九章 电度表接线

第一节	单相电度表的接线	205
第二节	三相有功电度表的接线及向量图	213
第三节	三相无功电度表的接线	220
第四节	联合接线	230
第五节	电度表的接线检查	235
第六节	错误接线及熔丝爆断后的电量推算	247
附录一:	常用公式及常数	267
附录二:	国外电度表常数有关表示方式	273
附录三:	交流电度表部颁标准(JB793-78)主要技术 指标	274
附录四:	电度表型号表示方式	279
附录五:	DD 28 型单相电度表有关主要参数	280
附录六:	电度表分类体系表	283

第一章 感应式交流电度表原理及有关基础知识

第一节 单相正弦交流电路

电能由于输送方便,控制简单,因此是目前人们使用的主要能源。最早发现的电现象,是静电场对带电轻小物体的作用。接着用化学的方法获得了直流电源,并开始在生产上应用直流电。而在发现电磁感应现象后,交流发电机便告问世。随着生产的巨大发展,电力机械的普遍使用,电力输送的功率和距离也不断增大,交流电得到了日益广泛的应用。

交流发电设备比直流发电设备简单,可制造大容量的交流发电机与输配电设备,且造价较低。而交流感应电动机,比直流电动机结构简单,坚固耐用,便于维修。交流电还便于高压大功率远距离输电。

交流电的广泛应用,使交流电能的计量显得极为重要。在学习了解交流电度表的原理和结构之前,我们先简单介绍一下有关单相及三相正弦交流电路。

一、交流电路的基本特点

1. 什么叫交流电 交流电与直流电的区别,在于交流电的大小和方向都随时间作周期性变化。一般交流电源的变化是遵循正弦函数的变化规律的。凡电动势、电压、电流等物理量的大小随时间按正弦规律作周期变化的,就分别称它们为

交变电动势、交变电压、交变电流,简称交流,或统称交流电。
其数学表达式

$$i = f(t) = f(t + T)$$

i ——电流的瞬时值,它是时间的函数。

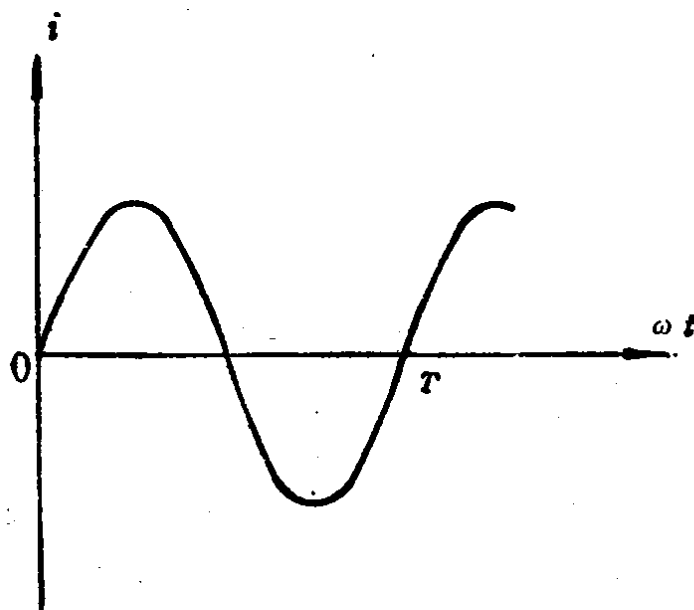


图 1 - 1 正弦电流波形

从图 1 - 1 中可见,当经过时间 T 后,电流的变化完成了一个循环,以后再重复原来的变化,而且在一个周期内,交流电流的平均值等于零。它完成一个循环所需的时间称为它的周期,用符号 T 表示。周期的单位一般用秒。而一秒钟内电流变化所完成的循环数称为频率,用符号 f 来表示。

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

一般实用工频电源之 $f = 50\text{Hz}$ (赫),周期为 0.02 秒。而在国外,有些国家工频电源也有采用 60Hz (赫)的。在电工技术中常用的交流电均按正弦规律变化。正弦量的和与差,微分与积分后仍为正弦量,而且由于正弦波形的交流电损耗最小,效

率最高,因此它得到了极为广泛的应用。

2. 正弦交流电路三要素 我们用数学式来描述正弦交流

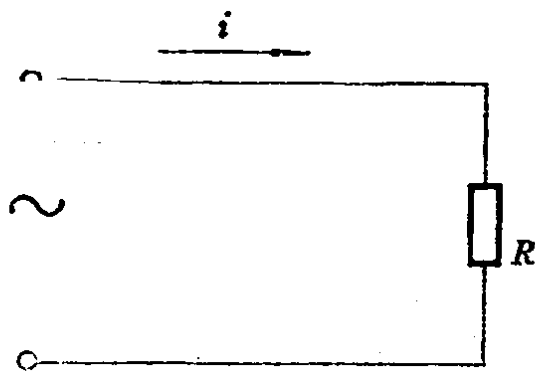


图 1 - 2 交变电流的正方向

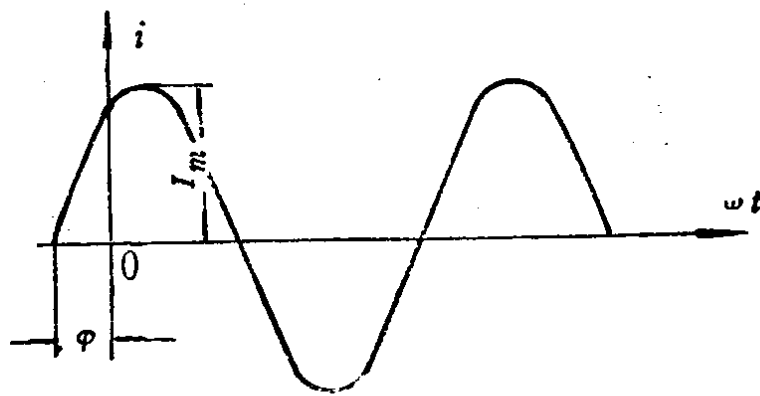


图 1 - 3 正弦交流电波形

电的变化规律。现在以电流为例,在图 1 - 2 中用箭头表示了它的正方向,对应图 1 - 3 中的正弦交变电流可用数学式表示为:

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

式中 i 是电流的瞬时值,当 $t = 0$ 时

$$i_{tK} = I_m \sin(\omega t_K + \varphi)$$

当 $i_{tK} > 0$ 时,表示图 1 - 2 中电流的实际方向与正方向一致。

当 $i_{tK} < 0$ 时,实际方向与正方向相反,在波形图中分别处在 ωt 横轴的上、下方。

最大的瞬时值,称为该电流的最大值,也叫振幅或峰值。一般瞬时值用小写字母表示(如: i, u, e 等),最大值用附下标 m 的大写字母(如: I_m, U_m, E_m 等)表示,最大值反映了正弦量变化的大小。

上式中的系数 ω 反映正弦量变化的快慢, ω 称为角频率,它由正弦交流电的周期或频率决定。因为正弦交流电完成一次循环相应的角度改变了 2π 弧度,如每秒完成 f 次循环,则相应的角度每秒改变了 $2\pi f$ 弧度,即

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

即角频率是频率 f 的 2π 倍。当 $f = 50\text{Hz}$ 时,对应的角频率 $\omega = 2\pi f \approx 314$ 弧度/秒。

上述电流瞬时值公式中的 $(\omega t + \varphi)$ 称为正弦量的相位。它是用角度表示的,故又称为相位角。 $t = 0$ 时的相位角为 φ ,称为初相角,简称初相。它反映正弦量的起始值,为了简便起见,常使初相角 $\varphi = 0$,则有 $i = I_m \sin \omega t$

因此,若已知正弦量的最大值、频率(角频率)和初相角,则可将一个已选定了正方向的正弦量用数学式或波形图予以确定,所以交流电中所表示的最大值、频率和初相角是交流电的三个要素。

3. 交流电的相位差 当研究两个以上的同频率正弦交流电时,经常需要比较它们的大小和确定它们的相位关系;此外,在更多的情况下,是研究同一个交流电的电压与电流之间的相位关系。例如:已知一交流电的电压 u 和电流 i 的数学表达式分别为

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

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

它们的角频率 ω 相同,但初相角不同,其相位差为:

$$(\omega t + \varphi_u) - (\omega t + \varphi_i) = \varphi_u - \varphi_i$$

上式说明同频率的二正弦交流电的相位差,在任何瞬间都是一常数,且等于其初相角之差。

当其相位差 $\varphi_u - \varphi_i = 0$ 时,称二正弦交流电为同相。当 $180^\circ > \varphi_u - \varphi_i > 0$ 时,称电压 u 超前电流 i 或称电流 i 滞后于电压 u ,此时电压 u 比电流 i 先到达最大值和零值。

当 $\varphi_u - \varphi_i = 90^\circ$ 时,称它们为相位正交。

当 $\varphi_u - \varphi_i = 180^\circ$ 时,称它们为反相。

4. 交流电的有效值 交流电的大小是随时间而变化的,但不管是瞬时值还是最大值,都不能反映交流电在电路中的实际效果。因此,在电工技术中引入了有效值的概念。交流电的有效值应和同样大小的直流电具有相同的热效应和机械效应。

交流电的有效值用大写字母表示,如: I 、 U 、 E 等。

下面以电流为例,根据热效应求一个按正弦规律变化,最大值为 I_m 的交流电的有效值。由于交流电是周期性重复变化的,所以按有效值定义计算热量时,仅考虑一个周期。

设在时间 dt 内,交变电流 i 通过电阻 R 所产生的热量为 $dQ_1 = 0.24i^2 R dt$ (卡)则在一个周期内产生的总热量为

$$Q_1 = 0.24 \int_0^T i^2 R dt \text{ (卡)}$$

对直流电来说,在时间 T 内通过同一电阻 R 所产生的总热量为

$$Q_2 = 0.24 I^2 R T \text{ (卡)}$$

这时二者产生的热量应该相等

$$Q_1 = Q_2$$

$$0.24 \int_0^T i^2 R dt = 0.24 I^2 R T$$

所以交流电流有效值的表达式为：

$$\begin{aligned}
 I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi) dt} \\
 &= \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} \int_0^T 2 \sin^2(\omega t + \varphi) dt} \\
 &= I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T [1 - \cos(2\omega t + 2\varphi)] dt} \\
 &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m
 \end{aligned}$$

$$\therefore I_m = \sqrt{2} I$$

交流电的有效值又称它为均方根值。同理，正弦电压、电动势的有效值为：

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

例如：单相电压 $U = 220V$ ，而 $U_m = \sqrt{2} U = 311V$

二、正弦交流电的旋转矢量表示方法

1. 正弦量的旋转矢量表示方法 一般可以用旋转矢量来表示一个正弦量，其长度代表正弦量的最大值，矢量开始旋转时的位置（图 1-4 中 ωt_0 ）与 X 轴正向夹角 (φ) 代表正弦量的初相角，这矢量以角频率 ω 随时间 t 逆时针旋转。

在任一瞬间，旋转矢量在 Y 轴上的投影（图中 $e_0, e, \dots$ ）就等于该正弦量的瞬时值。

虽然交流电本身并不是矢量而是代数量，但因为它们是时间的正弦函数，所以可按一定的法则用时间矢量来表示。要注意的是，它与电场强度、力等空间矢量是有本质区别的。

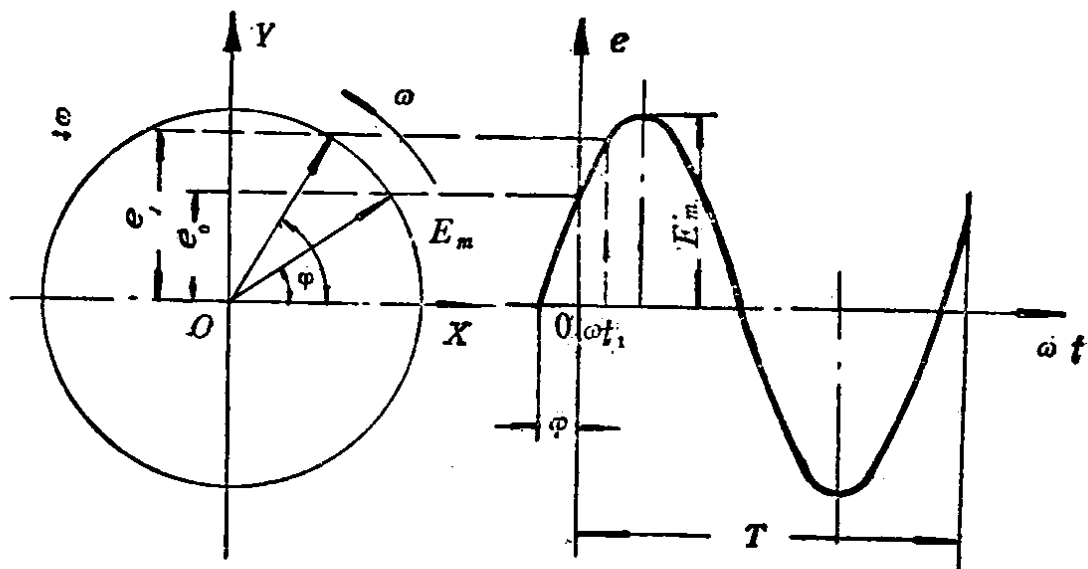


图 1-4 矢量图

(a) 旋转矢量图

(b) 波形图

2. 频率相同的旋转矢量加减及简化 例如：有两个频率相同的交流电动势相串联，如图 1-5 及图 1-6 所示。

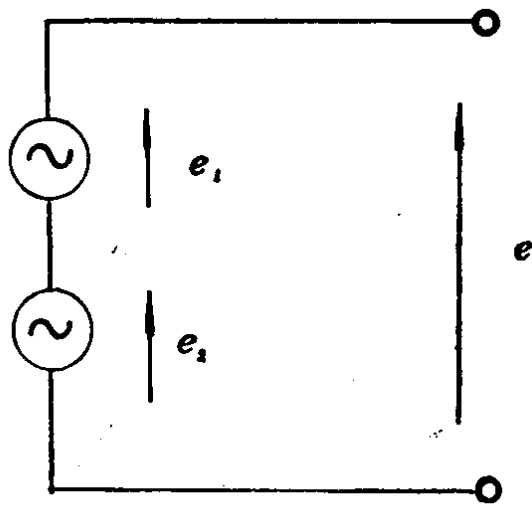


图 1-5 两个同频率电动势串联图

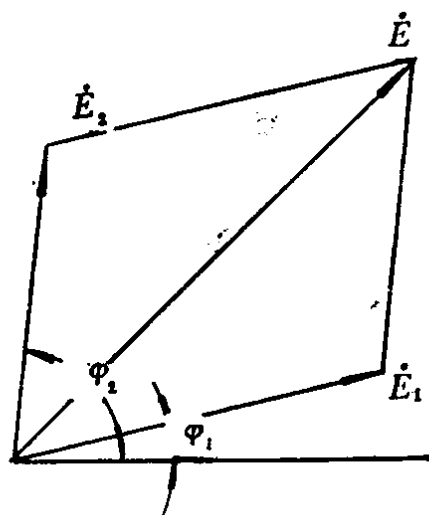


图 1-6 两个同频率电动势
矢量图

$$e_1 = E_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$e_2 = E_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

$$e = e_1 + e_2 = E_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) + E_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

$$\begin{aligned}
 &= (E_{m1} \cos \varphi_1 + E_{m2} \cos \varphi_2) \sin \omega t + (E_{m1} \sin \varphi_1 \\
 &\quad + E_{m2} \sin \varphi_2) \cos \omega t \\
 &= E_m \sin(\omega t + \varphi)
 \end{aligned}$$

$$\text{式中: } E_m = \sqrt{(E_{m1} \cos \varphi_1 + E_{m2} \cos \varphi_2)^2 + (E_{m1} \sin \varphi_1 + E_{m2} \sin \varphi_2)^2}$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{E_{m1} \sin \varphi_1 + E_{m2} \sin \varphi_2}{E_{m1} \cos \varphi_1 + E_{m2} \cos \varphi_2}$$

所以,同频率正弦量相加、减时仍是同频率正弦量,因而只需求出最大值和初相角,就能确定对应的瞬时值方程。而在实际表达式中,我们主要考虑各交流电有效值和它们的相位关系,对应的复数式如: $\dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2$

三、交流电阻电路

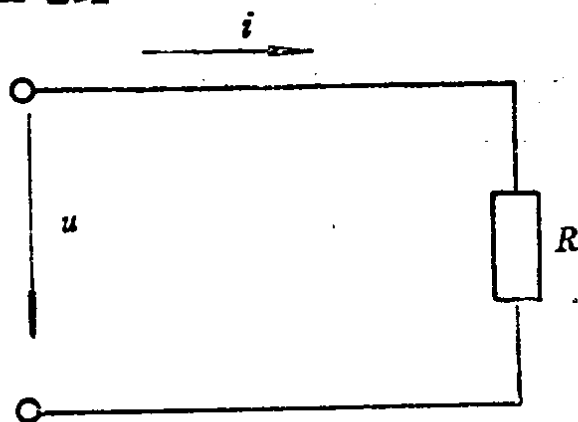


图 1 · 7 交流电阻电路

图 1 - 7 所示为交流电阻电路,图中箭头标明电压 u 与电流 i 的正方向,已知电阻 R 的阻值不随电流(电压)变化而保持恒定值(该电阻称为线性电阻)。

设以电压 u 为参考正弦量,则 $u = U_m \sin \omega t$, 据欧姆定律,通过电阻 R 的电流瞬时值为

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

$$\text{式中 } I_m = \frac{U_m}{R} \quad I = \frac{U}{R}$$

因此,在交流电阻中,电压与电流不论是瞬时值、最大值或有效值的关系均符合欧姆定律。图 1-8 所示为交流电阻电路中电压与电流的关系图。

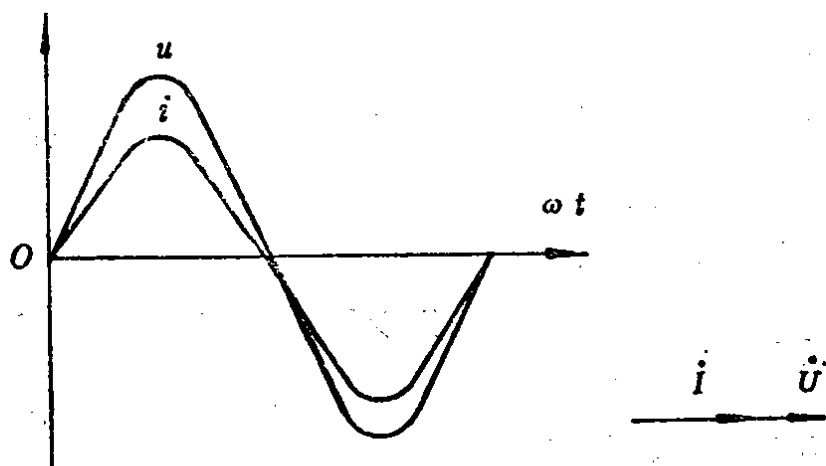


图 1-8 交流电阻电路中电压与电流的关系

(a) 波形图

(b) 矢量图

在电阻上每一瞬间消耗的功率称为瞬时功率,它是电压和电流瞬时值的乘积。

$$\begin{aligned} p &= p_R = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) \\ &= UI(1 - \cos 2\omega t) \end{aligned}$$

从上式可知,其功率由恒定值 UI 及交变量 $UI \cos 2\omega t$ 组成,由于电阻上的电压与通过电阻的电流两者同相,所以其瞬时功率均为正值即 $p \geq 0$,这意味着不论电流如何变化,电阻元件总是吸收能量,故电阻是消耗电能的元件,其一周内所消耗的电能为

$$A = \int_0^T p dt$$

由于瞬时功率是时刻在变化的,在工程技术上意义不大,

为便于计算能量，电工技术中以瞬时功率在一个周期内的平均值来衡量电阻元件上所消耗的功率，称为平均功率

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt \\ &= UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \end{aligned}$$

因此，交流电阻电路中的平均功率，等于电压与电流有效值的乘积，它与直流电路中功率表达式是一致的，这是由交流电的有效值定义所决定的。

四、交流电感电路

如果电感电路中之电感量 L ，不随电流(电压)变化，而是维持定值，则这种电感称为线性电感。现讨论该电路中的电压、电流的大小和相位关系。

设 i 为参考正弦量，则 $i = I_m \sin \omega t$

按所设 i ， e_L 的正方向，据电磁感应定律，求得自感电势 e_L 为

$$\begin{aligned} e_L &= -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt}(I_m \sin \omega t) \\ &= \omega L I_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

假如忽略电感线圈中的电阻，线圈中只有自感电动势 e_L ，所以按所设 u ， e_L 的正方向得到 u 与 e_L 的关系为

$$\begin{aligned} u &= -e_L \\ \therefore u &= L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned}$$

式中 $U_m = \omega L I_m$

$$\text{或 } \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \omega L = \chi_L \quad X_L = \omega L = 2\pi f L$$

X_L 的单位是欧,它等于电感上电压与电流两者最大值或有效值之比,具有阻碍电流通过的性质,称为感抗。感抗与电感 L 和频率 f 成正比,电感量越大,频率越高时对交流的阻碍作用越大,交流越难通过电感线圈。电压与电流的相位关系为 $\varphi_u - \varphi_i = 90^\circ$ 即电压超前电流 90° 。

电流 i 滞后电压 u 为 90° ,可理解为电感中电流不能跃变的原理在正弦交流电路中的具体体现,通常为微分关系

$$u = L \frac{di}{dt}$$

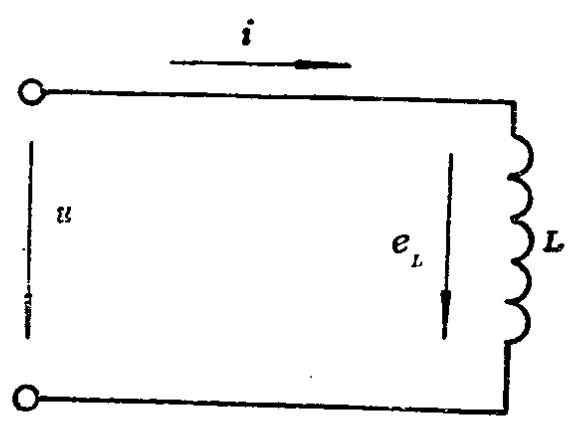


图 1 - 9 交流电感电路图

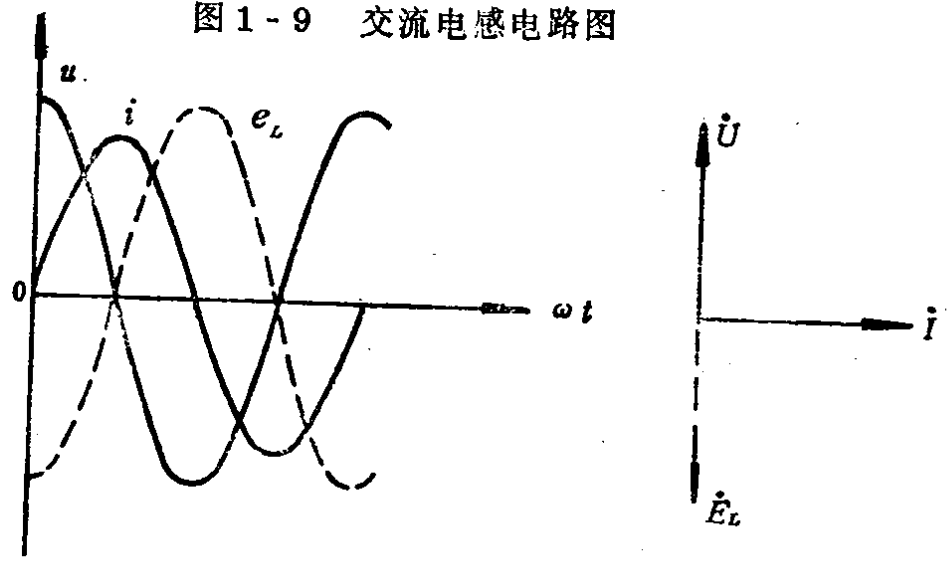


图 1 - 10 交流电感电路中 U 与 I 的关系

图 1 - 9 为交流电感电路图, 图 1 - 10 为交流电感电路的