



全国高等师范专科学校教材

电工学与实验

主编 程定涛

北京师范大学出版社

全国高等师范专科学校教材

电工学与实验

程定涛 主编

程定涛 刘职全 汤骐良 编

责任编辑 李桂福

•

北京师范大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

北京德外印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32印张: 9.125 字数: 218千

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数: 1—5 000

ISBN7-303-00994-9/O·136

定价: 2.00元

内 容 提 要

本书是受国家教委师范司的委托，根据全国师专物理专业二、三年制《电工学及实验》教学大纲编写的。全书共八章，包括：复杂交流电路、三相交流电路、电工仪表、变压器、异步电动机及其控制、直流电机、同步电机、低压配电与安全用电，此外还有电工实验指导，含十个实验，各校根据条件可选做。

本书作为高等师范专科学校物理专业的电工学试用教材，并可作中学物理教师及其有关工程技术人员参考。

出版说明

党的十一届三中全会以来，师范专科教育有了很大的发展，但是，作为师专教学三大基本建设之一的师专教材建设，却始终没有得到很好的解决。近几年来，有的地区和学校为了改变这种状况，也零星地编写了一些师专教材，可是，不成套，有的学科甚至编写了几种，质量参差不齐。虽对师专无教材的局面有了部分改变，但终因没有一套全国统一的、高质量的教材而影响了师专的教学质量。

为了进一步发挥师专的办学效益，彻底改变师专没有适合自己特色的教材局面，国家教委师范司在1987年制订了《二年制师范专科学校八个专业教学计划》，继之又约请了全国有教学经验的专家、教授编写了这八个专业的《教学大纲》，1988年7月在长春又召开了全国二年制师专教材编写出版规划会议，会上研究制订了《1988~1990年二年制师专八个专业教材编写出版规划》。八个专业是：中文、历史、政治教育、数学、物理、化学、生物和地理。

在国家教委师范司的统一部署、各省市自治区教委、高教局的大力帮助和出版社的积极组织下，这套教材聘请了一些长期从事师专教学工作，具有丰富的教学实践经验和较高学术水平的教授或副教授担任各科主编。各科教材由学术造诣比较深、熟悉师专教学情况的专家负责主审。各位主编根据国家教委师范司拟定的《关于编写二年制师专教材的指导思想和基本原则》及各科《教学大纲》的精神，组织编者收集资料，综合研究，争取编出一套具有师专自身特色的教材，以适应师专教育的迫切需要。

现在，在各方面的大力支持下，经过主编、主审和各位编写人员的努力和辛勤劳动，这套教材将陆续问世。我们热忱地欢迎师专的广大师生使用它，并在使用过程中，多提宝贵意见，使之

不断完善，不断提高，以保持与当代科学和师专教育实践的同步发展。

1990年2月

前 言

本书是受国家教委的委托，根据全国师专物理专业二、三年制《电工学及实验》教学大纲，由北京师范大学出版社主持编写的，经高等师范院校教材编审委员会电工学编审小组审定，作为全国师专《电工学及实验》课程的试用教材。

本书在编写过程中，结合编者的多年教学实践，并吸取兄弟院校教学经验。考虑到师专特点，力图把内容重点放在讲清基本概念，基础知识，着重培养分析和解决问题的能力上。对问题的阐述，力求深入浅出，通俗易懂，尽量做到理论联系实际。为了加强基本技能的训练，本教材对实验有足够的重视，并在书后，按大纲要求，附有10个实验和电工实验指导书，各校可根据条件选做。为加强基本理论学习，书中注意到例题、思考题和习题的选配，并附有习题答案，便于读者自行检阅之用。

本书由太原师专程定涛同志任主编，并编写第一、二、六、七章。第三章、实验教材由黄冈师专刘职全同志编写。第四、五章由岳阳师专汤骥良同志编写。第八章由刘、汤合写。

本书的编写，得到山西省教委及三校领导大力支持与帮助。在修改过程中，北京师范大学出版社戴俊杰、李桂福二位同志提出不少宝贵意见，编者谨此一并表示深切谢意。

由于编者水平所限，书中错误和缺点在所难免，恳求读者批评指正。

编 者

1989·7

目 录

第一章 复杂交流电路	(1)
§ 1-1 相量及其基本定律的相量形式	(1)
§ 1-2 回路电流法	(12)
§ 1-3 节点电压法	(14)
§ 1-4 电压源与电流源的等效变换	(18)
§ 1-5 叠加原理	(22)
§ 1-6 等效电源定理	(25)
§ 1-7 星形三角形无源网络的等效变换	(29)
§ 1-8 非正弦周期性交流电路	(34)
本章小结	(44)
思考题	(48)
习题	(49)
第二章 三相交流电路	(55)
§ 2-1 三相电动势	(55)
§ 2-2 三相电源的联接	(57)
§ 2-3 三相负载的星形联接	(60)
§ 2-4 三相负载的三角形联接	(70)
§ 2-5 三相功率及其测量	(72)
本章小结	(76)
思考题	(77)
习题	(77)
第三章 电工仪表	(79)
§ 3-1 概述	(79)
§ 3-2 磁电系仪表	(83)
§ 3-3 电磁系仪表	(86)
§ 3-4 电动系仪表	(89)
§ 3-5 感应系电度表	(93)

§ 3-6 兆欧表	(97)
本章小结	(99)
思考题和习题	(99)
第四章 变压器	(101)
§ 4-1 变压器的用途及分类	(101)
§ 4-2 变压器的构造	(103)
§ 4-3 单相变压器的空载运行	(105)
§ 4-4 单相变压器的负载运行	(110)
§ 4-5 变压器的等效电路	(114)
§ 4-6 变压器的运行性能	(116)
§ 4-7 三相变压器	(119)
§ 4-8 其他变压器	(127)
本章小结	(132)
思考题	(133)
习题	(134)
第五章 异步电动机及其控制	(136)
§ 5-1 三相异步电动机的结构及工作原理	(136)
§ 5-2 异步电动机的电路分析	(145)
§ 5-3 异步电动机的转矩	(149)
§ 5-4 异步电动机的功率及效率	(155)
§ 5-5 异步电动机的起动、调速和反转	(156)
§ 5-6 异步电动机的继电—接触控制	(165)
§ 5-7 单相异步电动机	(176)
本章小结	(181)
思考题	(183)
习题	(184)
第六章 直流电机	(186)
§ 6-1 直流电机的构造	(186)
§ 6-2 直流电机的工作原理	(188)
§ 6-3 直流并励发电机	(192)
§ 6-4 直流并励电动机	(195)
本章小结	(200)

思考题	(200)
习题	(201)
第七章 同步电机	(202)
§ 7-1 同步电机的构造	(202)
§ 7-2 同步发电机	(203)
§ 7-3 同步发电机的励磁	(210)
§ 7-4 同步发电机的并网运行	(212)
§ 7-5 同步电动机	(216)
本章小结	(220)
思考题和习题	(220)
第八章 低压配电与安全用电	(222)
§ 8-1 供电系统简介	(222)
§ 8-2 交流低压配电屏	(223)
§ 8-3 常用导线种类及配线	(228)
§ 8-4 导线截面的选择	(229)
§ 8-5 安全用电	(237)
电工学试验指导	(243)
实验一 叠加原理和戴文宁定理	(245)
实验二 功率因数的提高	(248)
实验三 三相负载的联接及功率的测量	(251)
实验四 单相电度表的校验	(255)
实验五 单相变压器试验	(259)
实验六 三相变压器的极性和联接组别的测定	(262)
实验七 三相异步电动机的使用	(265)
实验八 三相异步电动机的继电——接触控制	(269)
实验九 直流并励电动机	(272)
实验十 同步发电机	(275)
习题答案	(278)

第一章 复杂交流电路

交流电路按其复杂程度，可分为简单交流电路和复杂交流电路（网络）。在电工和电子技术中的交流电路，多是复杂电路。对复杂电路的分析计算，除了电磁学中介绍过的支路电流法外，根据电路的结构特点和实际要求，还有回路电流法、节点电压法、叠加原理、戴文宁和诺顿定理，以及网络的等效变换等。这些方法和定理都是欧姆定律和基尔霍夫定律为基础，以相量法为分析工具。为了很好掌握复杂电路的分析计算，本章重点除介绍上述几种分析计算方法外，还复习相量，单一参数交流电路及基本定律的相量表示形式。

§ 1-1 相量及其基本定律的相量形式

一、正弦量的相量表示法

在复平面图中，有一复数 A ，如图1-1-1所示，可用复数的代数形式来表示

$$A = a + jb \quad (1.1.1)$$

由图可见

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

称为复数的模，图中的 φ 角

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}$$

称为复数的幅角。因为

$$a = r \cos \varphi$$

$$b = r \sin \varphi$$

所以式 (1.1.1) 可用复数的三角函数形式表示，即

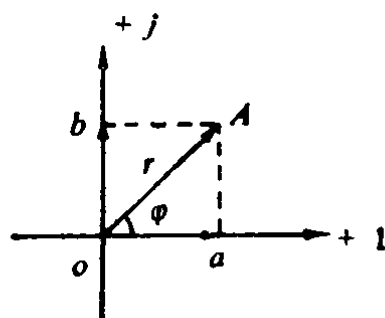


图 1-1-1 复平面图

$$A=a+jb=r(\cos\varphi+j\sin\varphi) \quad (1.1.2)$$

根据欧拉公式

$$e^{j\varphi}=\cos\varphi+j\sin\varphi$$

上式又可写成复数的指数表示式

$$A=re^{j\varphi}=r/\underline{\varphi} \quad (1.1.3)$$

综上所述复数 A 有三种表示方式, 即

$$A=a+jb=r(\cos\varphi+j\sin\varphi)=re^{j\varphi}=r/\underline{\varphi}.$$

我们知道, 一个正弦量有三个要素: 振幅(或有效值)、初相位、频率。而对于同频率正弦量的合成, 频率总是不变的, 即频率是不参与计算的, 可以暂时把它舍弃, 只用振幅(或有效值)与初相位两个量即可完整地把一个正弦量表示出来。而复数也具有两个量, 正好可用来表示上述的两个量。如果用电动势的有效值 E 作为复数的模, 初相位 φ 作为幅角, 则可构成一个复数, $\dot{E}=Ee^{j\varphi}$ 。这个复数就可以用来表示正弦电动势。这种表示正弦量的复数称为相量, 用大写字母上面加一点表示, 以区别于其他不代表正弦量的复数。因为复数有三种表示方式, 故相量也可以表示为三种形式。

例如正弦电流

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

它的幅值相量为

$$\dot{I}_m=I_me^{j\varphi_i}=I_m/\underline{\varphi_i}$$

有效值相量为

$$\dot{I}=Ie^{j\varphi_i}=I/\underline{\varphi_i} \quad (1.1.4)$$

在相量表示式中, 舍弃了正弦量的时间因子。如果给出相量表示式, 要求出正弦量的瞬时值, 则只需把式(1.1.4)乘以 $\sqrt{2}$ 和时间因子 $e^{j\omega t}$ 即得:

$$\sqrt{2}\dot{I}e^{j\omega t}=I_me^{j(\omega t+\varphi_i)}=I_m\cos(\omega t+\varphi_i)+j\sin(\omega t+\varphi_i)$$

然后取上式的虚部, 即为正弦量的瞬时值。

同理, 正弦电压

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

也可以用相量表示:

$$\dot{U} = U e^{-j\varphi_u} = U \angle -\varphi_u$$

相量在复平面上的几何表示称为相量图, 如图1-1-2所示。线段的长度等于交流电的幅值(或有效值), 线段与实轴的夹角等于交流电的初相位。相量图与旋转矢量图是不同的, 前者是在复平面上的几何表示, 没有旋转的概念; 而后者是在实平面上的几何表示, 并随时间沿逆时针方向旋转。但在表示同频率各正弦量之间的相互关系时, 相量图与旋转矢量图, 形式上是相似的。

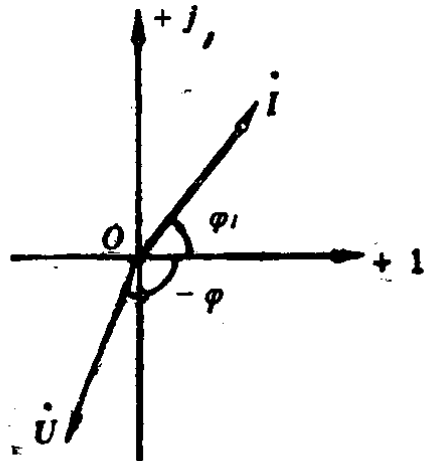


图 1-1-2 相量图

相量的运算方法和复数运算一样, 用相量来分析和计算交流电路的方法叫相量法, 或叫符号法。用相量法分析正弦电路时, 开始时要把正弦量变为复数, 最后又要把复数反过来, 变为正弦量的瞬时值。

下面举例来说明, 用相量进行运算比用三角函数运算简便。

例1 在图1-1-3所示的电路中, 设

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) = 100 \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ 安}$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2) = 60 \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ 安}$$

求 $i_1 + i_2$

解: (1) 用三角函数式求解

$$i = i_1 + i_2$$

$$= I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

$$= I_{1m} (\sin \omega t \cos \varphi_1 + \cos \omega t \sin \varphi_1) + I_{2m} (\sin \omega t \cos \varphi_2 + \cos \omega t \sin \varphi_2)$$

$$= (I_{1m} \cos \varphi_1 + I_{2m} \cos \varphi_2) \sin \omega t + (I_{1m} \sin \varphi_1 + I_{2m} \sin \varphi_2) \cos \omega t$$

同频率的两个正弦量相加, 得到的仍然是一个同频率的正弦量。设此正弦量为

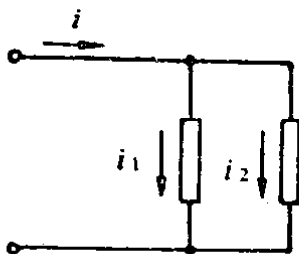


图 1-1-3 例 1 图

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

则

$$I_m \cos \varphi = I_{1m} \cos \varphi_1 + I_{2m} \cos \varphi_2$$

$$I_m \sin \varphi = I_{1m} \sin \varphi_1 + I_{2m} \sin \varphi_2$$

因此总电流 i 的幅值为

$$I_m = \sqrt{(I_{1m} \cos \varphi_1 + I_{2m} \cos \varphi_2)^2 + (I_{1m} \sin \varphi_1 + I_{2m} \sin \varphi_2)^2}$$

总电流 i 的初相角为

$$\varphi = \arctg \left(\frac{I_{1m} \sin \varphi_1 + I_{2m} \sin \varphi_2}{I_{1m} \cos \varphi_1 + I_{2m} \cos \varphi_2} \right)$$

将本题中的 $I_{1m} = 100$ 安、 $I_{2m} = 60$ 安、 $\varphi_1 = 45^\circ$ 和 $\varphi_2 = -30^\circ$ 代入，则得：

$$\begin{aligned} I_m &= \sqrt{(70.7 + 52)^2 + (70.7 - 30)^2} \\ &= \sqrt{122.7^2 + 40.7^2} = 129 \text{ (安)} \end{aligned}$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{70.7 - 30}{70.7 + 52} \right)$$

$$= \arctg \left(\frac{40.7}{122.7} \right) = 18^\circ 20'$$

故得：

$$i = 129 \sin(\omega t + 18^\circ 20') \text{ (安)}$$

(2) 用相量法求解

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m} = \dot{I}_{1m} e^{j\varphi_1} + \dot{I}_{2m} e^{j\varphi_2}$$

$$= 100 e^{j45^\circ} + 60 e^{-j30^\circ}$$

$$= (100 \cos 45^\circ + j 100 \sin 45^\circ) + (60 \cos 30^\circ - j 60 \sin 30^\circ)$$

$$= (70.7 + j 70.7) + (52 - j 30)$$

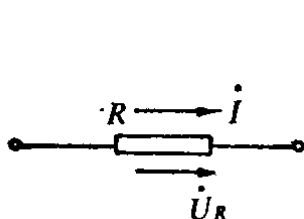
$$=122.7 + j40.7 = 129e^{j18^{\circ}20'} \quad (\text{安})$$

由上可见，用三角函数式进行计算，非常繁琐。用相量法运算很简便，而且所得结果相同。

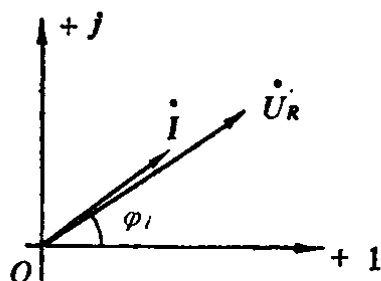
二、欧姆定律的相量形式

当正弦电流通过电阻、电感和电容等线性元件时，电路中电压相量与电流相量间的关系服从欧姆定律。下面分别讨论 R 、 L 、 C 各元件上的欧姆定律的相量形式。

1. 纯电阻交流电路。



(a) 电路图



(b) 电压与电流的相量图

图1-1-4 纯电阻交流电路

在图1-1-4 (a) 电阻元件 R 中通以正弦电流为

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

根据欧姆定律，则

$$u_R = Ri$$

用相量来表示，即

$$\dot{U}_R = \dot{I}R \quad (1.1.5)$$

上式一方面表示了电压和电流大小之比为 R ，另方面也表示了电压与电流同相位，如图1-1-4 (b) 所示。

2. 纯电感交流电路。

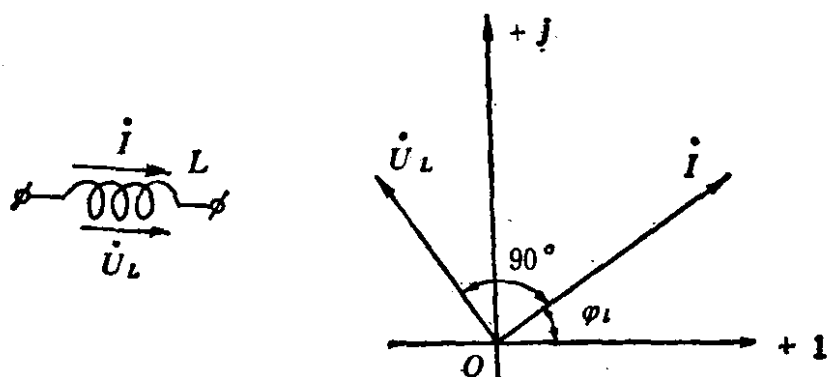
设图1-1-5 (a) 电感元件中的正弦电流为

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

根据电磁感应定律，元件的端电压为

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

即



(a) 电路图

(b) 电压与电流相量图

图 1-1-5 纯电感交流电路

$$\begin{aligned}\sqrt{2} \dot{U}_L e^{j\omega t} &= L \frac{d}{dt} \left[\sqrt{2} \dot{i} e^{j\omega t} \right] \\ &= \sqrt{2} \dot{i} j\omega L e^{j\omega t}\end{aligned}$$

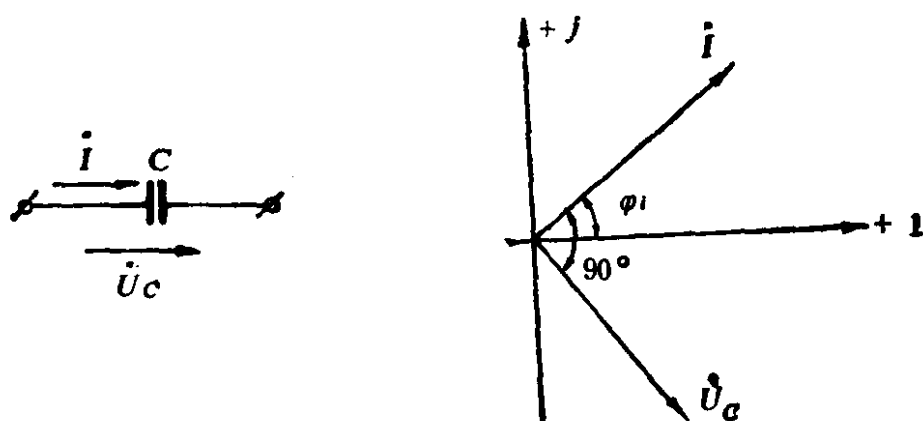
用相量来表示，则

$$\dot{U}_L = j\dot{i}\omega L = j\dot{i}X_L \quad (1.1.6)$$

式 (1.1.6) 就是电感元件电压相量与电流相量的关系。可以看出：电压有效值等于电流有效值与感抗 \$X_L\$ 的乘积，在相位上电压超前电流 \$90^\circ\$。如图 1-1-5(b) 所示。

3. 纯电容交流电路。

图 1-1-6(a) 是一个线性电容元件电路，电路中的电流和电容



(a) 电路图

(b) 电压与电流相量图

图 1-1-6 纯电容交流电路

两端电压的正方向如图中所示。

设在图1-1-6(a)中的电流为

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

根据

$$i = C \frac{du_c}{dt}$$

则电容两端电压为

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt$$

即

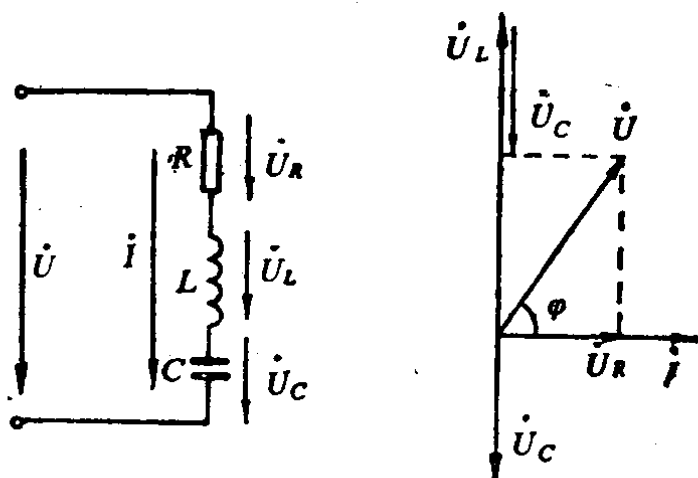
$$\begin{aligned} \sqrt{2} \dot{U}_c e^{j\omega t} &= \frac{1}{C} \int \left[\sqrt{2} \dot{I} e^{j\omega t} \right] dt \\ &= \frac{1}{j\omega C} \sqrt{2} \dot{I} e^{j\omega t} \end{aligned}$$

用相量来表示，则

$$\dot{U}_c = \frac{\dot{I}}{j\omega C} = -j\dot{I}X_c \quad (1.1.7)$$

上式是电容元件电压相量与电流相量关系。电压有效值等于电流有效值与容抗 X_c 的乘积，在相位上电压滞后电流 90° ，如图1-1-6(b)所示。

4. R 、 L 、 C 串联交流电路。



(a) 电路图

(b) 电压与电流相量图

图 1-1-7 电阻、电感与电容串联的交流电路

图1-1-7(a)是由 R 、 L 、 C 串联组成电路，通过各元件的电流相同。设电路中的电流相量为 $\dot{I}$ ，则 R 、 L 和 C 上的电压相量分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_R &= \dot{I}R \\ \dot{U}_L &= j\dot{I}X_L \\ \dot{U}_C &= -j\dot{I}X_C \end{aligned} \right\} \quad (1.1.8)$$

但 $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \quad (1.1.9)$

将式(1.1.8)代入上式得：

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{I}R + j\dot{I}X_L - j\dot{I}X_C \\ &= \dot{I}[R + j(X_L - X_C)] \end{aligned}$$

令 $Z = R + j(X_L - X_C)$ ，则上式可以写成

$$\dot{U} = \dot{I}Z \quad (1.1.10)$$

式(1.1.10)称为欧姆定律相量形式。

式中

$$Z = R + j(X_L - X_C) = R + jX$$

称为复阻抗。是复数表示的阻抗，不是正弦量，用大写字母 Z 表示，其上不加点，以便和相量区别，单位为欧姆。

$X = X_L - X_C$ ，是感抗与容抗之差叫电抗，单位为欧姆。

复阻抗也可写成指数形式

$$Z = R + jX = ze^{j\varphi} \quad (1.1.11)$$

式中

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}$$

其中复阻抗的模 z 叫阻抗；复阻抗的幅角 φ 叫阻抗角。

式(1.1.10)也可以写成下面的形式

$$\dot{I} = \dot{U}Y \quad (1.1.12)$$

上式是欧姆定律的相量形式的另一种表示式，式中 Y 是复阻抗的倒数称为复导纳，即

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} \quad (1.1.13)$$