

GAODENGXUEXIAO
HANSHOUSHIYONGJIAOCAI

高等学校函授试用教材

电 工 学

牟孝君 主编



湖北教育出版社

高等学校函授试用教材

电 工 学

牟孝君 主编

于家熙 赵志翔 郭陶三 编
刘淮尘 张文奎

※

湖北教育出版社出版、发行

宜昌市新华印刷厂印刷

850×1168毫米32开本 12.25印张 300 000字

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数：1—6 300

ISBN—7—5351—0276—X/G·238

定价：4.00元

内 容 提 要

本书是根据1984年原教育部颁发试行的《中学教师进修高等师范本科物理专业教学大纲》编写的。内容包括线性网络的计算方法、三相交流电路、电工仪表、变压器、异步电动机、直流电机、同步电机和小型发电、输配电简介等章。每章有内容提要，并附有小结、思考题和习题，书末附有各章习题答案。全书内容约需面授35学时。

本书可作为高等师范院校物理专业函授和中学物理教师进修的教材，也可作为夜大学等其他形式成人教育和自学用书。



前 言

随着函授等成人教育事业的蓬勃发展，迫切需要有能保证教育质量，体现函授等成人教育特点，适合于自学的教材。华中师范大学、华南师范大学、陕西师范大学、广西师范大学、湖南师范大学、湖北大学、河南大学、河南师范大学、陕西教育学院和湖北教育学院十所高等院校，根据原教育部颁发试行的《中学教师进修高等师范本科物理专业教学大纲》，结合各校多年来举办函授和中学教师进修的实践，合编了物理专业函授教材十七门。本书是该系列教材之一。

电工学是一门技术基础课。在编写过程中，我们力图使教材符合教学大纲的要求，达到全日制高师本科物理专业的学科水平，着重于基本概念和基本规律的阐述，力求作到深入浅出。为了使教材体现函授等成人教育的特点，适合于自学，除每章有提要、小结、思考题、习题和书末附有答案外，选择的例题较典型而全面，公式的推导较详细，注意突破难点和适当联系中学物理教学实际。

本书由广西师范大学牟孝君副教授担任主编。参加编写的有广西师大牟孝君(第一章)和于家熙(第二章)、湖北教育学院赵志翔(第三、六章)、河南师大郭陶三(第四章)、河南大学刘淮尘(第五章)、湖北大学张文奎(第七、八章)。在本书编写过程中，得到编者所在校、系的帮助和支持。广西师大和河南大学为本书的编写和审定提供了不少帮助，为此，我们表示衷心的感谢。

由于我们编写函授教材的经验不足，水平有限，加之时间仓

促，书中难免有不少缺点和错误，诚恳希望使用本书的教师和读者批评指正。

十校物理专业函授教材编写组

一九八七年六月

目 录

第一章 线性网路的计算方法	1
§ 1.1 相量	1
§ 1.2 基尔霍夫定律和欧姆定律的相量形式	8
§ 1.3 阻抗的星形联接和三角形联接的等效变换	34
§ 1.4 电源的等效变换	38
§ 1.5 支路法	47
§ 1.6 回路法	49
§ 1.7 节点法	56
§ 1.8 叠加定理	63
§ 1.9 替代定理	71
§ 1.10 戴维南定理和诺顿定理	73
§ 1.11 受控源电路的基本分析	86
小结	93
思考题	96
习题一	97
第二章 三相交流电路	110
§ 2.1 三相正弦电压的产生	110
§ 2.2 三相电源的联接	113
§ 2.3 三相负载的联接	117
§ 2.4 对称三相电路的计算	120
§ 2.5 不对称三相电路的概念	130
§ 2.6 三相电路的功率及其测量	137
小结	148
思考题	149
习题二	150

第三章 电工仪表	152
§ 3.1 概述	152
§ 3.2 磁电系仪表	156
§ 3.3 电磁系仪表	159
§ 3.4 电动系仪表	164
§ 3.5 感应系仪表	170
§ 3.6 兆欧表	175
小结	178
思考题	180
习题三	181
第四章 变压器	182
§ 4.1 概述	182
§ 4.2 变压器的构造	184
§ 4.3 单相变压器的空载运行	189
§ 4.4 单相变压器的负载运行	198
§ 4.5 变压器的运行性能	204
§ 4.6 三相变压器	209
§ 4.7 自耦变压器 互感器	217
§ 4.8 小功率电源变压器的设计计算	225
小结	231
思考题	233
习题四	234
第五章 异步电动机	237
§ 5.1 三相异步电动机的构造	237
§ 5.2 三相异步电动机的工作原理	242
§ 5.3 三相异步电动机的运行分析	252
§ 5.4 异步电动机的转矩	262
§ 5.5 异步电动机的起动与调速	269
§ 5.6 异步电动机的继电——接触控制	275
§ 5.7 三相异步电动机的铭牌数据与选用	287
§ 5.8 单相异步电动机	293

小结	300
思考题	301
习题五	302
第六章 直流电机	304
§ 6.1 概述	304
§ 6.2 直流发电机	309
§ 6.3 直流电动机	314
小结	323
思考题	325
习题六	325
第七章 同步电机	327
§ 7.1 同步电机的基本构造	327
§ 7.2 同步发电机的工作原理	330
§ 7.3 同步发电机的励磁装置	342
§ 7.4 同步电动机的工作原理	344
§ 7.5 励磁电流对同步电动机运行情况的影响	347
小结	348
思考题	349
习题七	350
第八章 小型发电、输配电简介	351
§ 8.1 低压配电线路的选择	351
§ 8.2 导线截面积的选择	354
§ 8.3 熔断保险丝的选择	361
§ 8.4 交流低压配电屏	363
§ 8.5 安全用电	367
§ 8.6 建筑防雷	372
§ 8.7 农村小水电简介	375
小结	377
思考题	378
习题八	378
习题答案	379

第一章 线性网路的计算方法

内 容 提 要

本章先简要介绍正弦量的基本概念和相量表示法。然后，以基尔霍夫定律和欧姆定律的相量形式为基础，介绍线性复杂电路的主要分析方法，包括星形和三角形阻抗的等效变换，电压源和电流源的等效变换，支路法、回路法、节点法、叠加定理，有源一端口网路定理和含受控源电路的分析方法等。

本章虽然是以交流电路为分析对象，但这些分析方法同样适用于直流电路。因此，为便于理解和简化运算，有些例题和习题采用直流电路为分析对象。

§ 1.1 相 量

一、正弦电压和电流

随时间按正弦规律变化的电压和电流叫做正弦电压和正弦电流。若初始值为零，正弦电压的瞬时值可表达为

$$U = U_m \sin \omega t = \sqrt{2} U \sin \omega t \quad (1.1)$$

波形图如图1—1所示。

由式(1.1)可知，一个正弦电压可以由 U_m (或 U 和 ω 确定， U_m 称为电压的幅值或最大值， U 称为电压的有效值，它们都是表示正弦量大小的物理量； ω 称为角频率，它是表示正弦量变化快

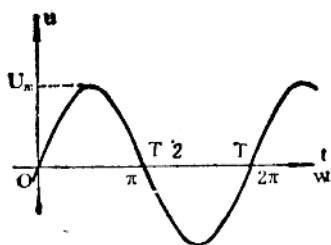


图 1—1 正弦电压波形

慢的物理量。

如何理解角频率 ω 的物理意义呢？我们知道，电压变化一个循环所需要的时间 T 叫周期，而正弦函数变化一个循环所变化的角度为 2π 弧度。由图 1-1 可见，正弦波形变化一个循环， ωt 的数值为 2π ，而 t 的数值为 T ，故 $\omega T = 2\pi$ ，

$$\text{即} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1.2)$$

式中 f 为频率。由上式可见， ω 是一个与频率 f 成正比的常数，表示每秒钟变化的弧度数，故称角频率，其单位为弧度/秒 (rad/s)。通常所使用的交流电压，频率为 50 赫兹 (Hz)，故角频率 $\omega = 2\pi \times 50 = 314$ 弧度/秒。

在一般情况下， $t = 0$ 时，电压不一定为零，其波形如图 1-2 所示。此时，正弦电压表示为

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_u) \quad (1.3)$$

即当 $\omega t = -\psi_u$ 时， $U = 0$ ， ψ_u 称为初相位，它反映了正弦电压初始值的大小，即

$$U_0 = U_m \sin \psi_u$$

而 $(\omega t + \psi_u)$ 叫相位角，简称相位。不同的相位对应不同的瞬时值。而初相位 ψ_u 是 $t = 0$ 时的相位。式 (1.1) 的初相位为零。

由上可知，一个正弦电压应当由三个参数来表征，

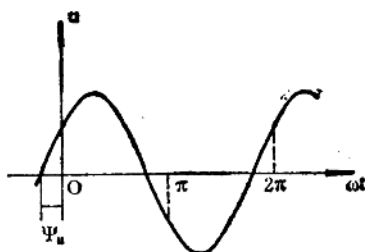


图 1—2 初相位

即最大值 U_m (或有效值 U)、频率 f (或角频率 ω) 和初相位 ψ_u ，这三个参数称为正弦交流电压的三要素。同理，正弦电流可以表示为

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \psi_i)$$

任意两个正弦量之间的相位之差称为相位差，用 ψ 表示，如上述电压和电流之间的相位差为

$$\psi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i \quad (1.4)$$

可见，相位差 ψ 是一个常数，它与时间 t 无关。相位差是区分两个同频率正弦量的重要标志之一，如果 $\psi = \psi_u - \psi_i > 0$ ，即 $\psi_u > \psi_i$ ，我们说电压的相位超前电流的相位一个角度 ψ ，或说电压超前电流的相位为 ψ ，也可以说电流滞后电压的相位为 ψ 。若 $\psi = \psi_u - \psi_i < 0$ ，则结论与上相反。若 $\psi = \psi_u - \psi_i = 0$ ，则电压和电流同相位。若 $\psi = \psi_u - \psi_i = \pi$ ，则电压和电流反相位。若 $\psi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2}$ ，则电压和电流的相位正交。

二、复数

一个正弦量是由有效值 (或最大值)、角频率和初相位三个要素决定的。在线性电路中，各支路的电压和电流都是同频率的正弦量，因而，要确定这些电压和电流，只要确定其有效值和初相位就可以了。相量法就是用复数来表示正弦量的有效值和初相位。为了便于介绍相量法，我们先复习一下复数。

一个复数 A 可以用几种形式来表示。用直角坐标表示时，其代数形式有

$$A = a_1 + ja_2 \quad (1.5)$$

其中 a_1, a_2 都是实数， a_1 是 A 的实部， a_2 是 A 的虚部，

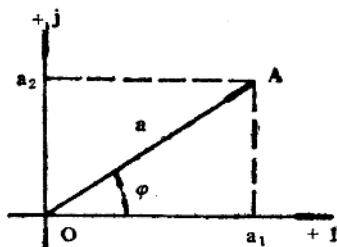


图 1—3 复数的向量表示

$j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位。复数 A 在复平面上可以用向量表示，如图1—3，图中向量 $\overline{OA}$ 的长度 a 是复数 A 的模， $\overline{OA}$ 在实轴上的投影是 A 的实部 a_1 ，在虚轴上的投影是 A 的虚部 a_2 ， $\overline{OA}$ 和实轴的夹角 φ 称为复数 A 的幅角。

如果用极坐标 a 和 φ 来表示一个复数，复数 A 可表示为三角函数形式

$$A = a \cos \varphi + j a \sin \varphi = a (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (1.6)$$

或根据欧拉公式

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

又可以把复数 A 变为指数形式，即

$$A = a e^{j\varphi} \quad (1.7)$$

在电工中，还经常把复数表示为

$$A = a \angle \varphi \quad (1.8)$$

它是复数的三角形式和指数形式的简写形式。 a 称为复数的模， φ 称为复数的幅角。

复数的加减运算一般用代数形式来进行，设 $A = a_1 + j a_2$ ， $B = b_1 + j b_2$ ，则

$$A \pm B = (a_1 \pm b_1) + j (a_2 \pm b_2)$$

两个复数相乘，用代数形式时，则

$$A \cdot B = (a_1 + j a_2) (b_1 + j b_2) = (a_1 b_1 - a_2 b_2) + j (a_1 b_2 + a_2 b_1)$$

用极坐标形式时，有

$$A \cdot B = a e^{j\varphi_a} \cdot b e^{j\varphi_b} = a b e^{j(\varphi_a + \varphi_b)}$$

$$A \cdot B = a \angle \varphi_a \cdot b \angle \varphi_b = a b \angle \varphi_a + \varphi_b$$

两个复数相除，用代数形式时，有

$$\begin{aligned} \frac{A}{B} &= \frac{a_1 + j a_2}{b_1 + j b_2} = \frac{(a_1 + j a_2) (b_1 - j b_2)}{(b_1 + j b_2) (b_1 - j b_2)} \\ &= \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2}{b_1^2 + b_2^2} + j \frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{b_1^2 + b_2^2} \end{aligned}$$

用极坐标形式时，有

$$\frac{A}{B} = \frac{ae^{j\varphi_a}}{be^{j\varphi_b}} = \frac{a}{b} e^{j(\varphi_a - \varphi_b)}$$

$$\frac{A}{B} = \frac{a \angle \varphi_a}{b \angle \varphi_b} = \frac{a}{b} \angle \varphi_a - \varphi_b$$

复数 $e^{j\varphi} = 1 \angle \varphi$ ，是一个模为 1 幅角为 φ 的复数，任意复数 $A = ae^{j\varphi_a}$ 乘以 $e^{j\varphi}$ ，有

$$ae^{j\varphi_a} \cdot e^{j\varphi} = ae^{j(\varphi_a + \varphi)}$$

等于把 A 在复平面上逆时针旋转 φ 角。因而， $e^{j\varphi}$ 称为旋转因子。由于， $e^{j\frac{\pi}{2}} = +j$ ， $e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j$ ， $e^{j\pi} = -1$ 。因此，一个复数乘以 $+j$ (或 $-j$) 等于该复数在复平面上逆时针 (或顺时针) 旋转 $\pi/2$ 角，一个复数乘以 -1 等于该复数旋转 π 角。

三、相量

根据欧拉公式

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

可以把一个复指数函数 $A_m e^{j(\omega t + \varphi)}$ 写成

$$A_m e^{j(\omega t + \varphi)} = A_m [\cos(\omega t + \varphi) + j\sin(\omega t + \varphi)] \quad (1.9)$$

即一个随时间 t 变化的复指数函数，可以用两个正弦时间函数来表示。通常在复数前面冠以 $\mathcal{R}_e$ 和 $\mathcal{I}_m$ 分别表示取该复数的实部和虚部。这样，由式 (1.9) 可得

$$A_m \cos(\omega t + \varphi) = \mathcal{R}_e [A_m e^{j(\omega t + \varphi)}] \quad (1.10)$$

$$A_m \sin(\omega t + \varphi) = \mathcal{I}_m [A_m e^{j(\omega t + \varphi)}] \quad (1.11)$$

设正弦电压为

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

就可以把它写为

$$\begin{aligned} u &= \mathcal{I}_m [U_m e^{j(\omega t + \psi_u)}] = \mathcal{I}_m [U_m e^{j\psi_u} e^{j\omega t}] \\ &= \mathcal{I}_m [U_m e^{j\omega t}] = \mathcal{I}_m [U_m \angle \omega t] \end{aligned} \quad (1.12)$$

式中

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = U_m \angle \psi_u \quad (1.13)$$

是一个与时间无关的复值常数，其模为该正弦电压的幅值，幅角为该正弦电压的初相位。在正弦交流电路中，由于电压和电流都是同频率的正弦量，且频率常是已知的， $\dot{U}_m$ 可以表征电压 U 的幅值和初相位，这样，就可以用 $\dot{U}_m$ 表征正弦电压，称为电压的幅值相量。同样，可以用 $\dot{I}_m$ 表征正弦电流，称为电流的幅值相量。需要注意的是，相量是一个复数，但反过来，不是所有的复数都是相量，只有表征正弦量的复数才是相量。另外，相量只能表征或代表正弦量，而不能等于正弦量，如电压相量 $\dot{U}_m$ 所代表的正弦电压应当由式(1.3)表示，但不能说 $\dot{U}_m$ 就等于式(1.3)表达的电压 u 。

相量和复数一样，可以在复平面上用向量来表示。图1—4所示为电压相量，相量的长度等于电压的幅值，它与实轴的夹角等于电压的初相位，该图称为电压相量图。

在电工技术中，通常采用的是正弦量的有效值。由 $U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m$ ，可以得到有效值相量

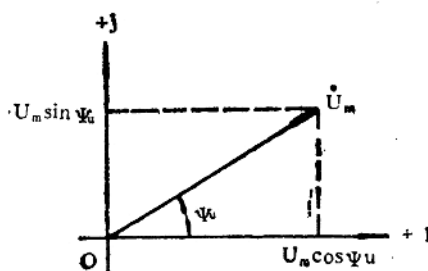


图 1—4 电压相量图

$$\dot{U} = \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{U}_m = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m \angle \psi_u = U \angle \psi_u \quad (1.14)$$

式(1.12)所代表的正弦电压,是由电压幅值相量和 $e^{j\omega t}$ 的乘积确定, $e^{j\omega t}$ 是一个旋转因子,随着时间的变化, $e^{j\omega t}$ 在复平面上是模为1,以原点为中心按角速度 ω 逆时针旋转的复数。这样, $\dot{U}_m e^{j\omega t}$ 在复平面上可以用一个长度为 U_m ,以角速度 ω 逆时针旋转的有向线段来表示,如图1—5所示, $\dot{U}_m e^{j\omega t}$ 称为旋转相量。

引入旋转相量后,由图1—5可知, t 时刻的相位角 $\psi = \omega t + \psi_u$,旋转相量在复平面纵轴上的投影就是该正弦量的瞬时值。

由上可见,正弦量和相量有非常简单的一一对应关系,知道了正弦量,可以直接写出它的相量。反之,知道了代表正弦量的相量,由于角频率 ω 一般是已知的,也可以直接写出它所代表的正弦量。

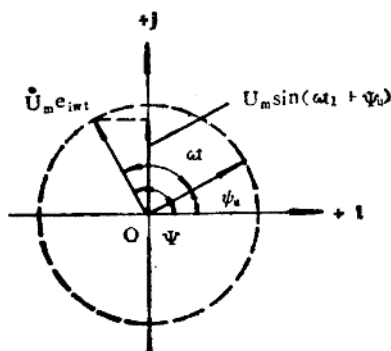


图 1—5 旋转相量

例1 已知正弦电压和正弦电流分别为 $u = -5\sin(314t + 60^\circ)$ 伏, $i = 4\sin(314t + 30^\circ)$ 安,求表示 u 和 i 的相量,并绘出相量图。

解 u 和 i 的相量可以直接写出,由于

$$\begin{aligned} u &= -5\sin(314t + 60^\circ) = 5\sin(314t + 60^\circ - 180^\circ) \\ &= 5\sin(314t - 120^\circ) \\ i &= 4\sin(314t + 30^\circ) \end{aligned}$$

故

$$\dot{V} = \frac{5}{\sqrt{2}} \angle -120^\circ \text{ 伏}$$

$$\dot{I} = \frac{4}{\sqrt{2}} \angle 30^\circ \text{ 安}$$

相量图如图1—6所示。

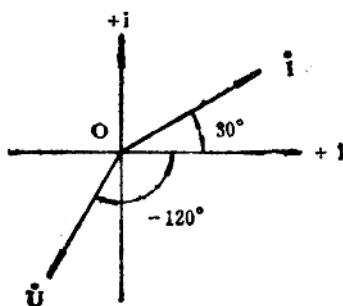


图 1—6 相量图

例 2 已知 $\dot{U} = \frac{50}{\sqrt{2}}$

$\angle -30^\circ$ 伏, $\dot{I} = \frac{5}{\sqrt{2}}$

$\angle 30^\circ$ 安, $f = 50$ 赫兹, 试写出它们所代表的正弦电压和正弦电流。

解 $\omega = 2\pi f = 2\pi \times$

$50 = 314$ 弧度/秒

由所给相量可以直接写出

$u = 50\sin(314t - 30^\circ)$ 伏

$i = 5\sin(314t + 30^\circ)$ 安

§ 1.2 基尔霍夫定律和欧姆定律的相量形式

一、电流和电压的参考方向

电流在电路中流动的方向是由正电荷移动的方向确定, 它实际流动的方向只存在两种可能, 如图1—7所示。当正电荷由A端移向B端时, 就认为电流自A端流向B端, 如图(a); 当正电荷由B端移向A端时, 就认为电流自B端流向A端, 如图(b)。但在分析电路时, 有时很难判断电流的实际方向, 而交流电流的实际方向随时间在不断的变化, 这就难以在电路中标明电

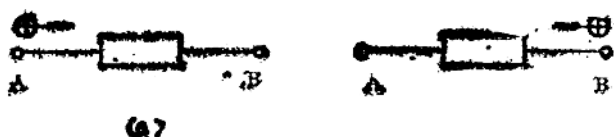


图 1—7 电流的实际方向

流的实际方向。为解决这个问题，我们有必要引入电流参考方向的概念。

电流的参考方向可以任意假定，在电路中一般用箭头表示。当电路中电流的参考方向假定后，把电流看作代数量，若电流的实际方向和参考方向相同，电流为正值(即 $i > 0$)，若电流的实际方向和参考方向相反，电流为负值(即 $i < 0$)，如图1—8所示。这样，在电路中，当假定了电流的参考方向后，就可以根据电流的

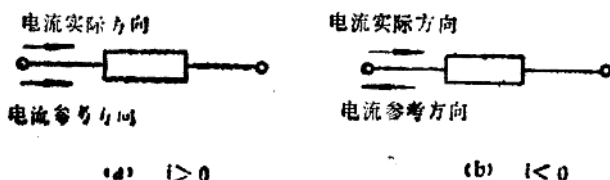


图 1—8 电流的实际方向和参考方向

正和负，确定电流的实际方向。在分析电路时，我们可以先任意假定电流的参考方向，以此为标准去进行计算，由最后计算结果的正、负值来确定电流的实际方向。如果不先假定电流的参考方向，电流的正、负值也就没有意义。

同样，电路中两点间电压的实际方向也有两种可能，和电流一样，也可以任意选择一个参考方向。当电压的参考方向选定后，把电压看作代数量，若电压的实际方向和参考方向相同时，