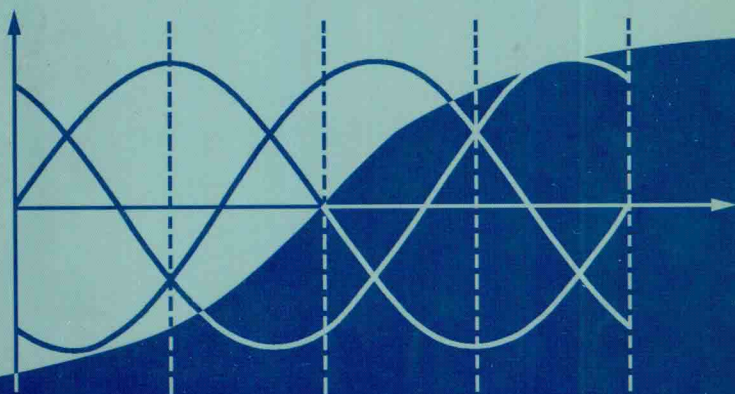


高等学校教材

# 电工学简明教程

主编 高广君 部德才 张春荣

主审 曲伟建



哈尔滨工业大学出版社

# 电工学简明教程

Diangongxue Jianming Jiaocheng

高广群 部德才 张春荣 主编

曲伟建 主审

\*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工大节能印刷厂印刷

\*

开本 850×1168 1/32 印张 11.625 字数 313 千字

1996年3月第1版 2001年7月第3次印刷

印数 3 001~4 000

ISBN 7-5603-1147-4/TM·14 定价 14.00 元

# 前 言

本书是为高等师范院校、教育学院物理专业本专科电工学课程编写的教材,也可供中学物理教师及工科非电类专业学习电工学课程参考。讲授 44 学时(去掉加 \* 号部分)或 52 学时。

该教材是根据国家教育部高等师范院校《电工学教学大纲》,采用传统学科体系编写的。主要内容有:线性网络分析方法、三相正弦交流电路、电工仪表、变压器、异步电动机、直流电机、同步发电机、低压配电与安全用电等。

本着简明扼要,突出重点,注重实用的原则,在编写过程中努力体现如下特点:

1. 尽可能地减少与电磁学内容的重复;
2. 从整体角度考虑电路的构成、功能和分析方法,为后续课程作准备;
3. 吸取工科教材简明、实用的优点,发扬理科教材重概念、重推理的长处,努力使两方面有机结合;
4. 反映科学技术的新成果。

与传统内容相比较,该教材把电路变量的瞬时值关系与相量关系同步研究。为了适应电子线路课程的需要,增加了网络函数、置换定理等内容。在电工仪表一章,增加了数字式仪表一节。本书文字符号尽可能采用新标准,常用基本文字符号新旧对照列于附录中。本书插图按国家标准 GB4728 - 84 ~ 85 规定绘制。

编写本书时参考了大量的编著及文献,从中仿制、选用了部分插图及习题,谨致谢意。

编者水平有限,书中缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者  
1995年12月

# 目 录

<b>第一章</b>	<b>线性网络分析方法</b>	
1.1	线性网络分析基础 .....	1
1.2	线性网络分析的基本方法 .....	22
1.3	线性网络的几个定理 .....	37
1.4	二端口网络基本参数 .....	46
1.5	网络函数 .....	53
1.6	受控源电路基本分析方法 .....	66
* 1.7	周期性非正弦电路的分析 .....	70
	思考题 .....	77
	习 题 .....	79
<b>第二章</b>	<b>三相正弦交流电路</b>	
2.1	三相正弦电流电动势的产生 .....	87
2.2	三相电源绕组的连接法 .....	89
2.3	三相负载的连接法 .....	93
2.4	三相负载的功率 .....	103
	思考题 .....	108
	习 题 .....	109
<b>第三章</b>	<b>电工仪表</b>	
3.1	概述 .....	112
3.2	磁电系仪表与电磁系仪表 .....	116
3.3	电动系仪表 .....	121

3.4	感应系仪表 .....	129
3.5	流比计 .....	134
* 3.6	数字式万用表简介 .....	138
	思考题 .....	142
	习    题 .....	143
<b>第四章</b>	<b>变压器</b>	
4.1	变压器的结构、用途及分类 .....	145
4.2	单相变压器的空载运行 .....	150
4.3	单相变压器的负载运行 .....	158
4.4	等效电路及参数测量 .....	164
4.5	变压器的运行性能 .....	168
4.6	三相变压器 .....	172
4.7	其他变压器 .....	180
	思考题 .....	185
	习    题 .....	187
<b>第五章</b>	<b>异步电动机</b>	
5.1	三相异步电动机的结构 .....	190
5.2	三相异步电动机的工作原理 .....	194
5.3	三相异步电动机的运行分析 .....	201
5.4	异步电动机的转矩 .....	211
5.5	三相异步电动机的使用 .....	218
5.6	单相异步电动机 .....	228
5.7	异步电动机的控制电路 .....	233
	思考题 .....	250
	习    题 .....	252
<b>第六章</b>	<b>直流电机</b>	
6.1	直流电机的工作原理和构造 .....	254

6.2	并励直流发电机	267
6.3	并励直流电动机	276
	思考题	285
	习 题	286
<b>第七章</b>	<b>同步发电机</b>	
7.1	同步发电机的构造和原理	287
7.2	同步发电机的单机运行分析	290
*7.3	同步发电机的励磁	299
*7.4	同步发电机的并网运行	302
	思考题	312
	习 题	312
<b>第八章</b>	<b>低压配电与安全用电</b>	
8.1	低压配电	314
8.2	安全用电	318
8.3	照明供电	322
<b>第九章</b>	<b>电工实验指导</b>	
实验一	戴维南定理 —— 有源二端网络等效参数的测定	330
实验二	日光灯电路	333
实验三	三相负载的连接	339
实验四	单相铁心变压器特征的测试	342
实验五	低压控制电器的使用	346
实验六	同步发电机的使用	351
附录		357
部分习题答案		358

# 第一章 线性网络分析方法

线性网络分析是网络分析的重要组成部分。本章讨论线性网络分析的基本概念、基本方法、常用定理及典型网络分析的基本结论。

## 1.1 线性网络分析基础

### 一、线性网络分析的基本概念

#### 1. 网络、网络信号及网络分析

结构简单、应用欧姆定律就可以求解的电路称为简单电路。结构复杂,只应用欧姆定律无法求解的电路称为复杂电路。复杂电路从结构形式上看,就像一张渔网,因此,人们习惯上又称之为网络。网络又称为电系统。在本教程中,电路、网络和电系统具有相同的含义,可以通用。

这里讨论的网络都是科学研究、工程技术以及人们日常生活中所使用的与电有关的装置、设备、仪器、工具等实物的抽象。比如,一个输电网我们可以用一个电路图表示出来,一台电视机或计算机我们可以通过分析它们的电路图了解它们工作的情况。

网络的功能可分两个方面,一是用来分析能量储存、传输和转换的过程。二是用来分析信号的产生、变换和传递的过程。二者不能截然分开,能量的储存、传输和转换一定要以某种信号的形式体现出来,而信号的产生、变换和传递又必须以能量的传输作为基础。

反映网络电性能的参数称网络参数。网络参数主要有电阻、电感



和电容。电阻反映网络对电荷的阻碍作用，电感反映网络进行电磁转换的功能，而电容则反映网络对电荷的积累作用。如果网络的参数主要集中在构成网络的元件模型（电阻器、电感器和电容器）上，这种网络称为集中（或集总）参数网络。如果网络的参数分布在构成网络的各部分（包括导线、元件等），这种网络称分布参数网络。如果网络只由具有线性参数的元件（称线性元件）构成，这种网络称为线性网络，反之，由具有非线性参数的元件构成的网络称非线性网络。本教程主要讨论集中参数线性网络的分析问题。

现代网络分析理论指出，网络的信号主要有如下几种：

(1) 正弦信号

正弦信号的一般形式为

$$f(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1 \cdot 1)$$

其中， $A$  称振幅， $\omega$  称角频率， $\varphi$  称初位相，这三者完全确定了一个正弦信号，称为正弦信号的三要素。

(2) 指数信号

指数信号的一般形式为

$$f(t) = A e^{\alpha t} \quad (1 \cdot 2)$$

其中， $A$  和  $\alpha$  为实数，是指数信号的两个要素。 $f(0) = A$  代表指数信号在时间原点处的取值（称初始值）。 $\alpha$  是决定信号随时间而增长或衰减的因子。 $\alpha > 0$ ，指数信号在正时间方向上增长，且  $\alpha$  越大，增长越快， $\alpha < 0$ ，指数信号在正时间方向上衰减， $\alpha$  越大，衰减越快。 $\alpha = 0$ ，信号为直流信号。

(3) 复指数信号

复指数信号的一般形式

$$f(t) = A e^{st} \quad s = \delta + j\omega \quad (1 \cdot 3)$$

其中， $A$  和  $s$  为复数， $\delta$  和  $\omega$  为实常数， $s$  称复指数信号的复频率。

复指数信号在客观上是不存在的，引入复指数信号是为了借助

于复数这一数学工具,方便地处理网络问题。

#### (4) 阶跃信号

阶跃信号的一般形式为

$$f(t) = \begin{cases} A & t > t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (1 \cdot 4)$$

其中,  $A$  为信号幅值,  $t_0$  为发生阶跃的时刻。

网络信号的来源是网络的信号源,网络的信号源又称为激励,在信号源作用之下网络的各部分将形成自己的信号,这些信号称为网络对激励的响应,简称为响应。

网络分析是指从给定网络(网络结构、参数一定)及激励,确定网络各部分响应的过程。网络分析主要有如下几类:

##### (1) 时域分析

网络的时域分析,就是通过适当的方法确定网络的时间特性。上述式(1·1)、式(1·2)和式(1·3)是网络信号的一般形式,可以是网络的激励,也可以是网络的响应,网络的时域分析就是要最终确定网络各部分响应的具体形式,这种形式以时间作为自变量,因此,反映网络中信号何时出现,何时结束,随时间如何变化。时域分析是网络分析中最基本、最重要的内容。

##### (2) 频域分析

网络的频域分析,是指通过适当的方法确定网络的频率特性。正弦信号是我们接触比较多的网络信号,式(1·1)中的  $\omega$  反映了正弦信号变化的快慢,  $\omega$  数值较大,信号变化的快,在单位时间里重复的次数多,我们称频率高,反之,  $\omega$  数值较小,我们称频率较低。网络参数对不同频率的信号会表现出不同的特性,这就是网络频域分析所要研究的问题。

##### (3) 复频域分析

网络的复频域分析,实际是一种变换,是为了处理问题的方便,

把实频域的信号按一定的严格的规则,变换到复频域,在复频域处理之后,再变换到实频域,从而确定网络的响应。本教程后面谈到的用相量来分析网络就是复频域分析的实例。

## 2. 电路过程、电路变量及参考方向

电路中进行的能量的转换、传递、信号的变换、加工处理过程称为电路过程。电路过程具有时间的连续性和空间的相对性。

电路过程的时间连续性表现为,从激励加入到激励撤除的全过程中,电路过程是连续的、完整的、不间断的。从过程进行的情况区分,一般可分为暂态过程和稳态过程两大类。前者指接通、切断激励或电路参数改变所引起的短暂的不稳定过程,后者指电路中进行的稳定过程。多数情况下,电路过程要由暂态过程和稳态过程组合而成,少数情况下,电路过程只由暂态过程或稳态过程组成。在实际网络分析中,由于现象不同、方法不同,往往把二者分开来,分别加以研究,这就出现了电路的稳态分析和暂态分析的概念。

电路过程的空间相对性表现为,电路中进行的物理过程是有方向的。例如,电流可沿导线向两个相反方向流动,两点间的电位差分别以这两点为参考可以得出相反的结论,一般称电路过程的这一特征为“双向性”。

为了描述电路过程,我们使用了电路变量这一概念。电路变量一般为英文字母,而且约定某些字母固定用来表示确定的一种物理量,比如,用  $I$ (或  $i$ ) 表示电流,用  $V$ (或  $v$ ) 表示电压,用  $E$ (或  $e$ ) 表示电动势等。又约定用大写字母表示不变的量,用小写字母表示变化的量。电路变量的取值表示电路过程的规模,作为代数量,其取值的符号(正号和负号)表示电路过程的两个相反方向。例如图 1-1 中,  $I$  表示电阻器中流过的电流,若  $I = +5\text{A}$  表示电流从 A 流向 B,那么  $I = -5\text{A}$  表示电流是从 B 流向 A 的。由于电路变量的方向并不是空间的指向,因此,我们称电路变量为双向标量。电路变量的双向性,刚

好与电路过程的双向性相适应。

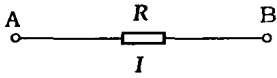


图 1-1 电路变量的双向性

在网络分析过程中,我们用实际方向这一概念表示电路过程的空间特性。为了确定电路过程的实际方向,我们引入了电路过程参考方向这一概念。

参考方向是电路过程实际方向的参考标记。例如,在图 1-1 中,我们取从 A 到 B 的方向为电阻 R 中电流流动的参考方向,如果通过某种方法,我们确定 R 中电流  $I > 0$ ,那么我们就说,R 中的电流实际就是从 A 流向 B,如果  $I < 0$ ,我们说 R 中的电流实际是从 B 流向 A。没有参考方向, $I$  的正负只有相对意义,没有实际意义。

参考方向的表示形式如下:

- (1) 带箭头的线段。如图 1-2 所示。
- (2) 带箭头的弧线。如图 1-3 所示。

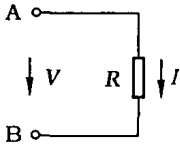


图 1-2 线段表示参考方向

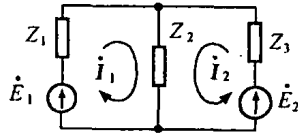


图 1-3 弧线表示参考方向

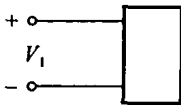


图 1-4 正负号表示参考极性

(3) 正(+ ) 负(-) 号。如图 1-4 所示,这种情况又称参考极性。

(4) 字母。在所考虑的电路中的两点分别标一字母,电路变量采用双下标,下标就是这两个字母,顺序就是电路变量的参考方向。在图 1-1 中,电阻 R 中

电流若表示为  $I_{AB}$ ,其参考方向就是从 A 到 B。

参考方向有如下特点:

- (1) 任意性。由于电路过程只依赖于电路参数及激励,参考方向

只是一个辅助标记,因此可以任选两种可能的情况之一。不同参考方向的选择将得出数值相同,符号不同的两个结果,但表示的实际过程是同一个。比如在图1-1中,假设电流实际从A流向B,数值5A,那么,如果选择参考方向就是从A到B,计算结果将是 $I = +5A$ ,若选择参考方向从B指向A计算结果,将是 $I = -5A$ ,这表明电流实际流向与参考方向相反,仍是从A到B。

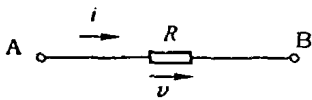


图1-5 参考方向的相关性

(2) 相关性。为了使网络分析的结果与习惯的表达形式相一致,我们给一些电路变量参考方向的选择规定了相互关系,这里

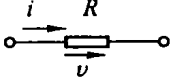
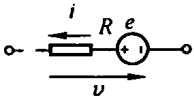
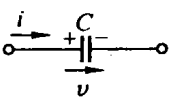
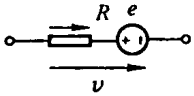
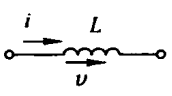
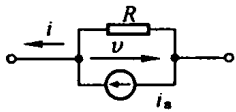
称这种相互关系为参考方向的相关性。例如,在图1-5中,电阻R中电流参考方向从A到B,那么,电压参考方向也应选择从A到B,这时,欧姆定律形式为 $i = v/R$ ,符合习惯。若电流电压参考方向选择不一致,欧姆定律将为 $i = -v/R$ ,表示电路过程的结果是正确的,但不符合习惯。

常用的参考方向的配合情况见表1.1。

### 3. 相量和相量图

我们知道,在网络的稳态分析中,若激励为同频率正弦信号,那么,响应也是同频率正弦信号,这样的交流电路称为正弦交流电路。在对正弦交流电路进行稳态分析时,会遇到正弦信号的微分、积分,同频率正弦信号的相加、相减等运算,在这些运算过程中,信号的频率并不改变,也就是说,运算结果与原正弦信号频率相同,而且,仍是正弦信号(这里把余弦信号看成是相位差 $\pi/2$ 的正弦信号)。这启发我们,在对网络进行正弦稳态分析时,在分析的过程中,可以暂时不考虑信号的频率。引起思考的另一个问题是,进行三角函数的加、减、乘、除运算,过程过于繁琐,是否可以找到一种代替的、间接的办法,既可以简化运算,又可以得出正确结果?我们知道,在不考虑

表 1.1 常用的参考方向配合

器件名称	参考方向配合	器件名称	参考方向配合
电阻		电压源	
电容			
电感		电流源	

正弦信号频率时,幅值和初相位就可以完全确定一个正弦函数,而由模和幅角这两个量又可以完全确定一个复数,如果能建立三角函数和复数的某种联系,就可以用复数的运算代替三角函数的运算,而复数运算在很多情况下比起直接进行三角函数的运算要简单得多。下面就来研究这种联系。

由欧拉公式

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

复指数函数  $A_m e^{j(\omega t + \psi)}$  可以写成

$$A_m e^{j(\omega t + \psi)} = A_m [\cos(\omega t + \psi) + j\sin(\omega t + \psi)] \quad (1.5)$$

式(1.5)表明,一个随时间  $t$  变化的复指数函数可由两个随时间  $t$  变化的正弦函数组合而成。我们取符号  $\text{Re}$ 、 $\text{Im}$  分别表示对复数的取实部和取虚部系数的操作,那么有

$$A_m \cos(\omega t + \psi) = \text{Re}[A_m e^{j(\omega t + \psi)}] \quad (1.6)$$

$$A_m \sin(\omega t + \psi) = \text{Im}[A_m e^{j(\omega t + \psi)}] \quad (1 \cdot 7)$$

二式成立。(1·7)式可进一步写成

$$A_m \sin(\omega t + \psi) = \text{Im}[A_m e^{j\psi} \cdot e^{j\omega t}] = \text{Im}[\dot{A}_m e^{j\omega t}] \quad (1 \cdot 8)$$

式中 
$$\dot{A}_m = A_m e^{j\psi} \quad (1 \cdot 9)$$

$\dot{A}_m$  是一个与时间无关的复数(复值常量),写成极坐标形式为

$$\dot{A}_m = A_m \angle \psi$$

其中  $A_m$  为复数的模,  $\psi$  为复数的幅角。

至此,我们建立了正弦信号与复数的联系,或称对应关系:在不考虑正弦信号的角频率和复指数函数的时间因子  $e^{j\omega t}$  时,我们说幅值为  $A_m$ , 初位相为  $\psi$  的正弦信号,与模为  $A_m$ , 幅角为  $\psi$  的复数  $\dot{A}_m$  相对应。我们称这种与正弦信号相对应的复数为相量,本教程用大写字母上加圆点表示。由于复数的模与正弦信号的幅值相等,这种相量称为幅值相量。在实际电工计算中,人们关心的经常是电路变量的有效值,即电路变量幅值除以  $\sqrt{2}$ 。与此相对应,把幅值相量除以  $\sqrt{2}$  就得到有效值相量,本书中如无特别表明,相量均指有效值相量。

典型电路变量与相量对应关系如下

$$e = \sqrt{2} E \sin(\omega_1 t + \psi_1) \leftrightarrow \dot{E} = E e^{j\psi_1}$$

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega_2 t + \psi_2) \leftrightarrow \dot{I} = I e^{j\psi_2}$$

$$v = \sqrt{2} V \sin(\omega_3 t + \psi_3) \leftrightarrow \dot{V} = V e^{j\psi_3}$$

例1 设正弦电流  $i = \sqrt{2} \times 10 \sin(\omega t + 53^\circ) \text{A}$ , 确定对应的相量。

解: 设相量为

$$\dot{I} = I e^{j\psi}$$

则由已知条件得

$$I = 10 \text{A} \quad \psi = 53^\circ$$

所以对应相量为

$$\dot{I} = 10e^{j53^\circ} \text{ A}$$

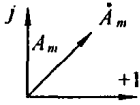


图 1-6  $\dot{A}_m$  相量图

相量可以用复平面上的有向线段(矢量)来表示,表示幅值相量时,线段的长度等于正弦信号的幅值,线段与实轴的夹角等于正弦信号的初相角。上述幅值相量  $\dot{A}_m$  的图示如图 1-6 所示。

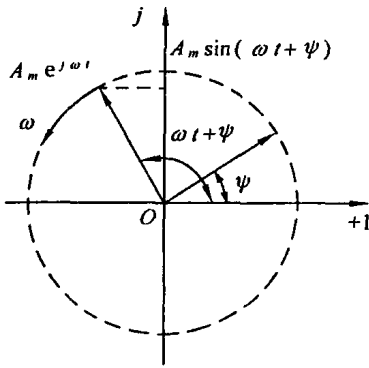


图 1-7 旋转相量

幅值相量  $\dot{A}_m$  与  $e^{j\omega t}$  的乘积是一个含时间  $t$  的复数(复值函数)。在复平面上,令表示  $\dot{A}_m$  的矢量以角速度  $\omega$  沿逆时针方向旋转,即为该复数的图示。这里称  $\dot{A}_m e^{j\omega t}$  为旋转相量,如图 1-7 所示。 $e^{j\omega t}$  称为旋转因子。图中旋转相量的幅角  $\psi$  与随时间  $t$  变化的正弦信号的相位  $\omega t + \psi$  相对应。旋转相量在复平面纵轴上的投影

就是该正弦信号的瞬时值。从这里我们看到含时间  $t$  的复指数函数与正弦信号的联系。这实际相当于数学中的一种变换。前面谈到网络的复频域分析指的就是这种情况。

在同一复平面上画出网络各有关相量的图示(不考虑相量的旋转),就得到了网络各电路变量的相量图。在画相量图时,通常选择一个相量为参考,称为参考相量。参考相量画在横轴上,方向与横轴相同,其余相量按其参与参考相量的相位差作图,而不按各相量原来的初相角作图。显然,只有同频率正弦量的相量画在同一相量图中才有意义。



相量图的功能主要有三项：一是比较各相量的大小及相位关系；二是按平行四边形法则进行矢量的加、减运算，从而获得对应正弦量的加、减运算结果；三是分析网络中进行的电路过程的变化趋势。

## 二、线性网络所遵循的基本定律

电磁学对网络的电路过程所遵循的基本定律进行了系统的研究，这里列出线性网络正弦稳态分析时所涉及的主要定律。

### 1. 欧姆定律

#### (1) 单一参数电路欧姆定律

##### ① 纯电阻电路

纯电阻电路欧姆定律的瞬时值数学表达式为

$$v_R = iR \quad (1 \cdot 10)$$

现设电压

$$v_R = \sqrt{2} V_R \sin(\omega t + \psi) \quad (1 \cdot 11)$$

式(1·11)代入式(1·10)得

$$i = \frac{v_R}{R} = \frac{\sqrt{2} V_R \sin(\omega t + \psi)}{R} = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \psi) \quad (1 \cdot 12)$$

式(1·12)中

$$I = \frac{V_R}{R} \quad (1 \cdot 13)$$

与式(1·11)和式(1·12)对应的相量分别为

$$\dot{V}_R = V_R e^{j\psi} \quad (1 \cdot 14)$$

$$\dot{I} = I e^{j\psi} \quad (1 \cdot 15)$$

把式(1·13)代入式(1·15)得

$$\dot{I} = \frac{V_R}{R} e^{j\psi} = \frac{\dot{V}_R}{R} \quad (1 \cdot 16)$$