

高等学校试用教材

电 工 学

华中师范学院 湖南师范学院 合编
天津师范学院 安徽教育学院

高等教育出版社

本书是根据1978年高等师范院校物理专业在济南会议上拟定的《电工学》教材编写大纲编写的,后又根据1980年6月在北京制定的教学大纲进行了修改,并在天津师院、安徽教育学院、湖南师院、华中师院四校试用后修改定稿。

全书共八章,讲授40学时,实验14学时。考虑到电工学知识面较广,而教学时数少的特点,内容上删去了大纲规定的三相异步电动机的定子绕组、直流电动机的电枢反应及同步发电机的三次谐波励磁等内容。另外根据电子线路基础课程的需要,增加了二端口网络部分。

本书可作为高等师范院校物理专业的试用教材,师专及有关中学教师亦可参考。

本书责任编辑:郭玉凤

高等学校试用教材

电 工 学

华中师范学院 湖南师范学院

天津师范学院 安徽教育学院

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 字数 310,000

1983年3月第1版 1983年9月第1次印刷

印数 1—00,001—19,500

书号 15010·0478 定价 1.55 元

前 言

本教材是根据1978年9月高等师范院校物理专业在济南会议上拟定的《电工学》教材编写大纲编写的。1979年12月由北京师大主持进行了初审。根据审稿单位及教材编委会的意见和要求，又按1980年6月制订的教学大纲进行了修改和调整，并在参加编写的四校试用，最后由北京师大复审，经编者再次修改定稿。

根据教学大纲的规定，《电工学》讲授40学时，实验14学时（做7次实验）。考虑到《电工学》涉及的知识面较广，而学时数较少的特点，在定稿时删去了大纲规定的三相异步电动机的定子绕组、直流电机的电枢反应和同步发电机的三次谐波励磁等内容；另外考虑到《电子线路基础》课程的需要，教材中增加了二端口网络一节作为选读。书中有*号的章节可根据各校的情况灵活选用。

本书第一章由天津师院熊安中同志编写；第三、四、八章由安徽教育学院张振华同志编写；第二、七章由湖南师院袁声恩同志编写；第五、六章由华中师院何建民同志编写。实验教材由华中师院、天津师院和湖南师院编写。华中师院杨约翰同志任主编。

参加本教材初审和复审的单位有：北京师大（主审）、东北师大、陕西师大、上海师院、山西师院、南京师院、广西师院和四川师院的有关教师。在审稿过程中，各校代表提出了许多宝贵意见。华中师院郑志贞、吴德扬、余汉香等同志协助绘制了大部分插图。对本书的出版和提高书稿质量有很大帮助。对此，编者深表感谢。但由于我们水平有限，书中缺点和错误仍在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1982年3月

本书文字符号说明

本书除采用国际通用文字符号外, 还采用汉语拼音文字符号, 试列举如下:

文字符号	说 明
$b_{1d}, b_{2d}(b_{1f}, b_{2f})$	直流电动机并励绕组(或同步发电机励磁绕组)接线端钮
c_1c_2	直流电机串励绕组接线端钮
D	电动机
d_1, d_2	直流电动机电枢接线端钮
E_d	电枢反应电动势
E_h	合电动势
E_{HW}	同步发电机定子副绕组电动势
$E_L(E_{1L}, E_{2L})$	(变压器原副边或异步电动机定、转子绕组)漏磁电动势
$e_w(e_{wI}, e_{wV})$	涡流电动势
F	发电机
F_d	电枢反应磁通势
I_d	电机电枢电流
I_{dq}	电动机起动电流
I_{dl}	短路电流
I_{de}	电机电枢额定电流
I_f	负荷电流
I_{df}	最大负荷电流
I_{jd}	通过接地电阻的电流

文字符号	说明
$I_l(I_{lf}, I_{ld})$	(发电机、电动机)励磁电流
I_{le}	额定励磁电流
I_q	起动电流
I_e	额定电流
I_x	线电流
I_{xa}	相电流
I_{re}	熔丝额定电流
I_{zh}	直流电流
$i_w, I_w(i_{wI}, i_{wV}, I_{wI}, I_{wV})$	} 涡流
K_f	负荷系数
K_x	需要系数
M_f	反抗转矩
M_q	起动转矩
M_e	额定转矩
M_T	制动转矩
n_e	额定转速
P_d	短路损耗功率
P_j	机械损耗功率
P_n	电动机内功率(即总机械功率)
P_e	额定功率
R_B	直流电机并励绕组电路总电阻
R_{bl}	直流电机并励绕组电阻
R_{bt}	直流电机并联调节电阻
$R_b(R_{b1}, R_{b2})$	功率表并联线圈附加电阻

文字符号	说 明
R_{cl}	直流电机串励绕组电阻
R_{ct}	直流电机串联调速电阻
R_a	电机电枢电阻
r_D	变压器短路电阻
R_j	绝缘电阻
R_{jd}	接地电阻
$R_q(r_q)$	起动电阻
R_r	人体电阻
s_{lj}	异步电动机的临界转差率
s_e	异步电动机额定转差率
S_e	额定容量
V_e	额定电压
V_{jd}	接地电阻上的电压
V_x	线电压
V_{xa}	相电压
X_d	电枢反应电抗
X_D	短路电抗
Z_D	短路阻抗
Φ_f	非工作磁通(或辅助磁通)
$\Phi_l(\Phi_{1l}, \Phi_{2l})$	(变压器原、副边或异步电动机定、转子)漏磁通
Φ_{dl}	短路电流产生的磁通
Φ_a	电枢反应磁通
η_e	额定效率

目 录

第一章 复杂交流电路	1
§ 1 相量 基本定律的相量形式.....	1
§ 2 回路分析法(网孔法).....	14
§ 3 节点分析法.....	20
§ 4 阻抗的星形联接和三角形联接的等效变换.....	26
§ 5 叠加定理.....	31
§ 6 电源的等效电路.....	34
§ 7 有源二端网络定理.....	39
*§ 8 二端口网络.....	46
*§ 9 周期性非正弦交流电路.....	54
思考题.....	65
习题.....	67
第二章 三相交流电路	75
§ 1 三相电动势的产生.....	75
§ 2 三相电源的联接.....	79
§ 3 三相负载的联接.....	85
§ 4 三相交流电路的功率及其测量.....	101
思考题.....	110
习题.....	111
第三章 电工仪表	114
§ 1 直读仪表的一般问题.....	114
§ 2 电磁系仪表.....	119
§ 3 电动系仪表.....	124
§ 4 感应系仪表.....	133
§ 5 流比计.....	141
思考题.....	146
习题.....	147

第四章 变压器	148
§ 1 变压器的用途及分类.....	148
§ 2 变压器主要部件的结构.....	150
§ 3 单相变压器的空载运行.....	153
§ 4 单相变压器的负载运行.....	161
*§ 5 等值电路及其参数测量.....	168
§ 6 变压器的运行性能.....	174
§ 7 三相变压器.....	178
§ 8 其它变压器.....	184
思考题.....	190
习题.....	191
第五章 异步电动机	194
§ 1 三相异步电动机的结构.....	194
§ 2 三相异步电动机的工作原理.....	199
§ 3 异步电动机的运行分析.....	209
§ 4 异步电动机的转矩.....	218
§ 5 三相异步电动机的起动与调速.....	224
§ 6 单相异步电动机.....	230
§ 7 异步电动机的继电——接触控制.....	236
思考题.....	254
习题.....	255
第六章 直流电机	258
§ 1 直流电机的工作原理和构造.....	258
§ 2 直流发电机.....	264
§ 3 直流电动机.....	273
思考题.....	284
习题.....	285
第七章 同步电机	286
§ 1 同步发电机的构造.....	286
§ 2 同步发电机的运行.....	289
§ 3 同步发电机的励磁方式.....	298

*§ 4 同步发电机与无穷大电网并联运行	301
§ 5 同步电动机简介	310
思考题	315
*第八章 低压配电与安全用电	317
§ 1 工业企业供电系统简介	317
§ 2 常用导线种类及配线	320
§ 3 导线截面和熔体额定电流的选择	321
§ 4 交流低压配电屏	332
§ 5 安全用电	340
思考题	347
习题	349
电工学实验	353
前言	353
实验一 功率因数的提高	355
实验二 三相负载实验	358
实验三 变压器试验	363
实验四 三相异步电动机的检测、直接起动和正、反转	374
实验五 三相异步电动机的降压起动	384
实验六 三相异步电动机的继电——接触控制	390
实验七 同步发电机	395
实验八 直流并励电动机	400

第一章 复杂交流电路

交流电路按其复杂程度来划分,可分为简单交流电路和复杂交流电路。简单交流电路在电磁学中已经学过。电工和电子技术领域内的交流电路,多是复杂电路。复杂电路也称为网络。在网络的分析计算中,除用到电磁学中介绍过的支路分析法之外,根据网络的结构特点和实际要求,还常用到回路分析法、节点分析法、叠加定理和有源二端网络定理等。这些方法和定理都是以克希荷夫定律作为基础,以相量和复数运算为分析工具。同时在分析过程中也涉及简单交流电路。因此为了掌握网络的分析 and 计算,首先结合简单交流电路来复习复数运算和电路定律。

§1 相量 基本定律的相量形式

一、相量

我们知道,一个随时间 t 变化的复指数函数 $A_m e^{j(\omega t + \psi)}$, 根据欧拉公式

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

可以写成

$$A_m e^{j(\omega t + \psi)} = A_m [\cos(\omega t + \psi) + j\sin(\omega t + \psi)] \quad (1.1)$$

1.1 式表明,一个随时间 t 变化的复指数函数,可等效成两个随时间 t 变化的简谐函数。此关系式表明可以用复数函数来表示简谐交流电^①。

通常在复数前面冠以 \Re 或 \Im 分别表示取该复数的实部或

① 本书中交流电一词作为交流电流、交流电压以及交变电动势等的统称。

虚部, 于是从 1.1 式可得:

$$A_m \cos(\omega t + \psi) = \mathcal{R}e[A_m e^{j(\omega t + \psi)}] \quad (1.2)$$

和

$$A_m \sin(\omega t + \psi) = \mathcal{I}m[A_m e^{j(\omega t + \psi)}] \quad (1.3)$$

由 1.3 式可知, 正弦交流电

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) \quad (1.4)$$

可写成

$$\begin{aligned} i &= \mathcal{I}m[I_m e^{j(\omega t + \psi)}] = \mathcal{I}m[I_m e^{j\psi} \cdot e^{j\omega t}] \\ &= \mathcal{I}m[\dot{I}_m e^{j\omega t}] \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_m &= I_m e^{j\psi} \\ \dot{I}_m &= I_m / \psi \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

或写成:

由 1.5 式可见, 交流电可用一复指数函数取其虚部来表示^① 正弦交流电。

1.6 式中, \dot{I}_m 是一个与时间 t 无关的复值常量, 其模 I_m 为正弦交流电的幅值(即最大值), 其幅角 ψ 为该正弦交流电的初相角。当频率 ω 已知时, 可以用 \dot{I}_m 表征该正弦交流电, 因为只要把它代入 1.5 式后, 该交流电就可完全确定。象这样一个能用模和幅角表征正弦交流电的复值常量, 称为交流电的幅值相量。本书用大写拉丁字母的上方加点表示相量, 例如 \dot{I}_m 表示正弦交流电流的幅值相量, \dot{V}_m 表示正弦交流电压的幅值相量等等。需要注意的是: 第一, 由 1.6 式所定义的幅值相量, 虽然是一个能表征随时间变化的正弦量的复数, 但它不等同于一个随时间变化的正弦量, 只有 1.5 式才能表示一个随时间变化的正弦量; 第二, 不是所有的复数都是表征正弦量的相量, 例如下面要讲到的复阻抗、复导纳等等。

① 在电磁学中, 习惯上用复指数函数的实部来表示正弦交流电, 即 $i = \mathcal{R}e[\dot{I}_m e^{j(\omega t + \psi)}]$ 。参见梁灿彬等编《电磁学》第 516—518 页。

交流电的幅值相量可用复平面上的有向线段（即矢量）来表示，线段的长度等于交流电的幅值，线段与实轴的夹角等于交流电的初相角，如图 1-1 所示。这种图称为幅值相量图。

大家知道，正弦量的微分、积分或同频率正弦量的相加减，其结果仍然是同频率的正弦量，只是幅值和初相角发生变化。因此在正弦量的微、积分运算中以及同频率正弦量的加、减运算中，我们所关心的是正弦量的幅值和初相角而不是它的频率。实际上，在频率 ω 已知的情况下，我们总是先将正弦交流电（如 1.4 式所示）表示为幅值相量，然后进行运算，可使运算大大简化。

在电工计算中多用有效值而较少用幅值。我们知道把幅值除以 $\sqrt{2}$ 就得到有效值。同样，把幅值相量 \dot{I}_m 除以 $\sqrt{2}$ 就得到有效值相量 \dot{I} ，即

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \angle \psi = I \angle \psi \quad (1.7)$$

其中 $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ 为交流电的有效值。

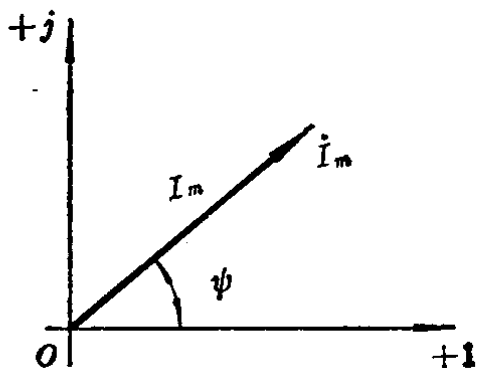


图 1-1 幅值相量

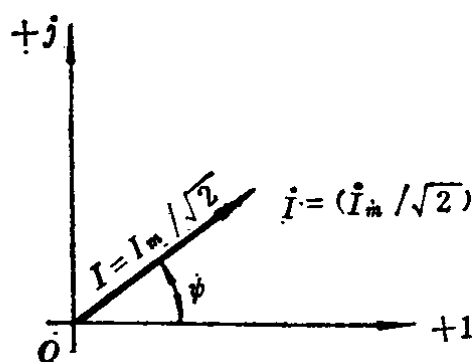


图 1-2 有效值相量

图 1-2 所示是有效值相量图。

幅值相量 \dot{I}_m 与 $e^{j\omega t}$ 的乘积 $\dot{I}_m e^{j\omega t}$ 是一个含时间 t 的复值函数，在复平面上可以用一个与幅值相等，以角速度 ω 沿逆时针方向旋转的有向线段来表示，如图 1-3 所示。 $\dot{I}_m e^{j\omega t}$ 称为旋转相量，

$e^{j\omega t}$ 称为旋转因子。图中旋转相量的幅角 φ 就是随时间 t 而变化的正弦量的相位 $\omega t + \psi$ 。旋转相量在复平面纵轴上的投影就是该正弦量的瞬时值 (图 1-3)。这与 1.4 式是相符合的。必须注意, 只有旋转相量在复平面纵轴上的投影才是正弦量的瞬时值, 而幅值相量和有效值相量都不具备这种性质。

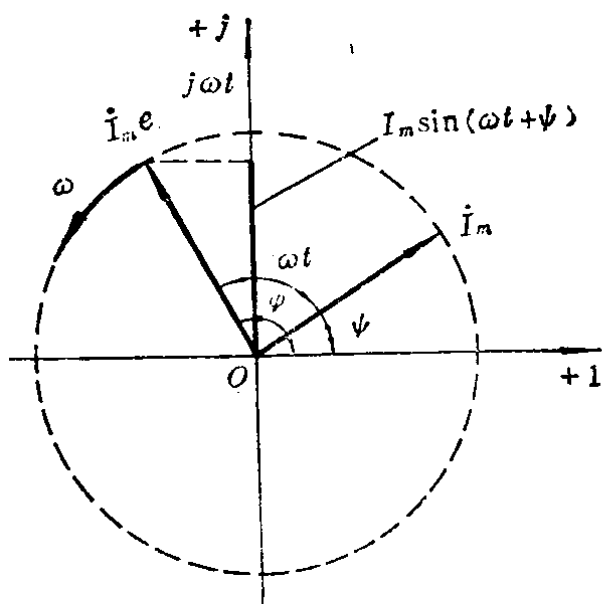


图 1-3 旋转相量

在交流电路的分析中, 往往把表征电路中电流、电压等等的幅值相量或有效值相量画在同一相量图中以便比较或计算。为了计算方便, 经常是选择一个相量为参考

相量并画在实轴上(即取它的初相角为零), 其余的相量则按其参考相量的相位差来作图, 而不按各相量原来的初相角作图。不难看出, 只有同频率的交流电的相量画在同一相量图中才有意义, 才能进行比较。这是因为相量图只能反映各相量间固定不变的关系(如幅值大小、相位差等等), 而只有同频率的交流电的相量才满足这种条件。

二、欧姆定律的相量形式 复阻抗 复导纳

下面我们对稳态正弦电流通过线性电路时, 电路中的电压相量与电流相量间的欧姆定律关系作一简要的复习。按照惯例, 元件(或阻抗)上电压的正方向和电流的正方向取一致的方向, 如图 1-4a 所示。

1. 单一参数电路欧姆定律的相量形式

如果电路中的电流为 $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$, 根据电磁学可知在纯电阻 R 、纯电感 L 和纯电容 C 的电路中, 瞬时值欧姆定律分别为

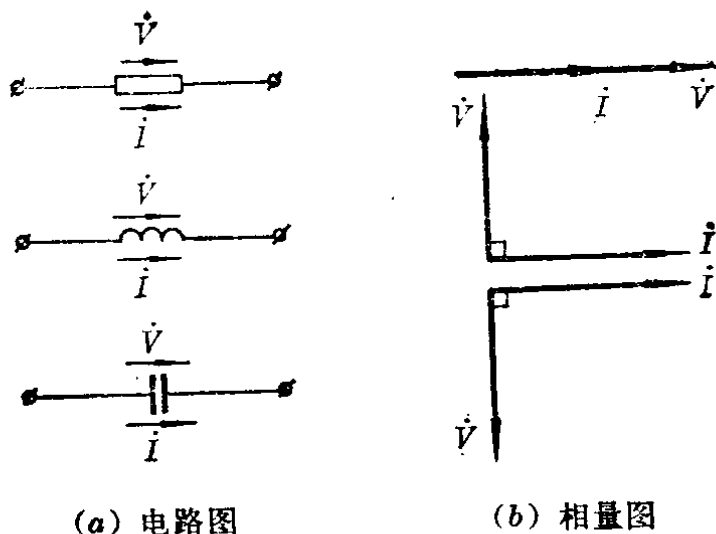


图 1-4 单一参数电路及其相量图

下列形式:

纯 R 电路 $U_R = iR = I_m R \sin(\omega t + \psi) = \mathcal{I}m(I_m e^{j\psi} e^{j\omega t}) R$

纯 L 电路 $U_L = L \frac{di}{dt} = I_m \omega L \sin(\omega t + \psi + 90^\circ)$
 $= \mathcal{I}m(I_m e^{j\psi} e^{j\omega t} e^{j90^\circ}) \omega L$

纯 C 电路 $U_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t + \psi - 90^\circ)$
 (积分常数为零)
 $= \frac{\mathcal{I}m(I_m e^{j\psi} e^{j\omega t} e^{-j90^\circ})}{\omega C}$

由于 $e^{j90^\circ} = j$; $e^{-j90^\circ} = -j$, 当用有效值相量 $I \left(= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \angle \psi \right)$ 表示上列三式时, 则

纯 R 电路 $V_R = \frac{I_m}{\sqrt{2}} R = IR \quad \text{或} \quad \frac{V}{I} = R \quad (1.8)$

纯 L 电路 $V_L = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j90^\circ} \omega L = jI \omega L \quad \text{或} \quad \frac{V}{I} = jI \omega L = jIX_L \quad (1.9)$

纯 C 电路 $V_C = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{-j90^\circ} \cdot \frac{1}{\omega C} = \frac{-j}{\omega C} I \quad \text{或} \quad \frac{V}{I} = \frac{-j}{\omega C} I$
 $= -jIX_C \quad (1.10)$

其中

$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

1.8 至 1.10 式表明, 在相量形式的运算中, 电阻为实数; 感抗为正虚数 jX_L , 称为复感抗; 容抗为负虚数, 称为复容抗。根据复数运算法则可知电流相量 \dot{I} 乘以电阻 R (实数), 得到与电流同相位的电阻电压相量 \dot{V}_R ; 电流相量 \dot{I} 乘以复感抗 jX_L (正虚数), 得到超前于电流相量 \dot{I} 的电感电压相量 \dot{V}_L , 即电压相量 \dot{V}_L 相对于电流相量 \dot{I} 逆时针方向旋转了 90° ; 电流相量 \dot{I} 乘以复容抗 $-jX_C$ (负虚数), 得到滞后于电流相量 \dot{I} 的电容电压相量 \dot{V}_C , 即电压相量 \dot{V}_C 相对于电流相量 \dot{I} 顺时针方向旋转了 90° 。在后两种情况中, 电压 \dot{V} 相对于电流 \dot{I} 逆时针和顺时针旋转 90° , 是由于 1.9 和 1.10 式的等号右边, 包含有相乘因子 $+j$ 和 $-j$, 因此通常称 $\pm j$ 为转角乘子。

以 \dot{I} 为参考相量 (即设以上三式中 \dot{I} 的初相角 $\psi = 0$) 作出这三种电路的相量图, 如图 1-4b 所示。

2. R, L, C 串联电路中欧姆定律的相量形式 阻抗

图 1-5a 所示为一 R, L, C 串联电路。串联电路总电压的瞬时值等于各部分电路电压的瞬时值之和, 写成相量形式即为:

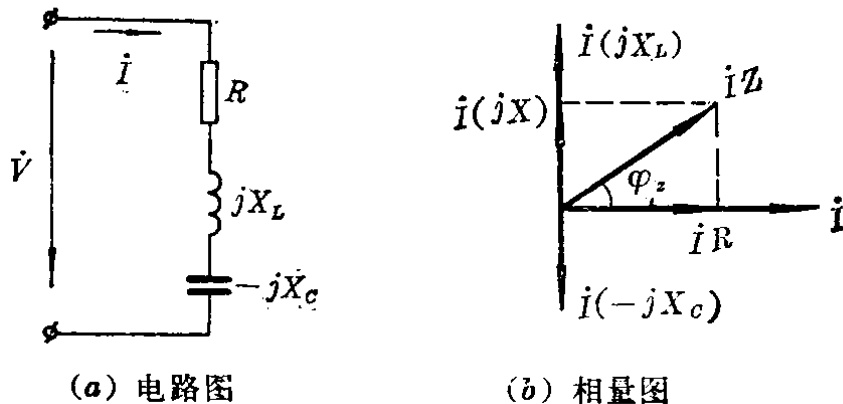


图 1-5 R, L, C 串联电路

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= \dot{V}_R + \dot{V}_L + \dot{V}_C \\
 &= \dot{I}R + \dot{I}(jX_L) + \dot{I}(-jX_C) \\
 &= \dot{I}[R + j(X_L - X_C)] \\
 &= \dot{I}(R + jX)
 \end{aligned} \tag{1.11a}$$

或写成

$$\frac{\dot{V}}{\dot{I}} = R + jX \tag{1.11b}$$

令 $Z = R + j(X_L - X_C) = R + jX = z / \varphi_z$ (1.12)

而

$$\left. \begin{aligned}
 z &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \\
 \varphi_z &= \arctg \frac{X}{R}
 \end{aligned} \right\} \tag{1.13}$$

Z 是复数称为复阻抗, $X = (X_L - X_C)$ 称为电抗, z 是复阻抗 Z 的模, 称为阻抗, φ_z 是复阻抗的幅角。阻抗的单位是欧姆。

在引入了复阻抗的概念之后, 1.11b 式可简写为:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{Z} \quad \text{或} \quad \dot{V} = \dot{I}Z \tag{1.14a}$$

1.14a 式称为 R, L, C 串联电路欧姆定律的相量形式。

以 \dot{I} 为参考相量, 根据 1.11a 式作出 R, L, C 串联电路的相量图, 如图 1-5b 所示。当 $X_L > X_C$, 即 $X_L - X_C > 0$ 时, $\dot{I}(jX_L) > \dot{I}(-jX_C)$, $\varphi_z > 0$, 总电压超前于电路中的电流。这种情况下电感的作用比电容的作用大, 称为感性电路。当 $X_L < X_C$, 即 $X_L - X_C < 0$ 时, $\dot{I}(jX_L) < \dot{I}(-jX_C)$, $\varphi_z < 0$, 总电压滞后于电路中的电流。在这种情况下电容的作用比电感的作用大, 称为容性电路。当 $X_L = X_C$, 即 $X_L - X_C = 0$ 时, $\dot{I}(jX_L) = \dot{I}(-jX_C)$, $\varphi_z = 0$, 电路呈现纯电阻性, 电路内产生串联谐振, 在电磁学中对此已作过讨论, 这里不再赘述。

一般说来, 对于任何一个不包含电源的复杂电路(称为无源网

络), 如果它的路端电压相量为 \dot{V} , 经过路端的电流相量为 \dot{I} , 那么 \dot{V}/\dot{I} 就定义为该电路的复阻抗 Z , 即

$$Z = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} \quad (1.14b)$$

Z 的实部和虚部, 分别为该电路的串联等效总电阻和串联等效总电抗。显然 1.14a 式与复阻抗的定义是一致的。

3. 并联电路 导纳

在阻抗并联的无源交流电路中, 引入复导纳的概念将有利于电路的分析。一个电路的复导纳 Y 定义为该电路复阻抗 Z 的倒数, 即

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (1.15)$$

于是

$$Y = \frac{1}{z/\varphi_z} = \frac{1}{z} / -\varphi_z = y/\varphi_y \quad (1.16)$$

式中 y 和 φ_y 分别为复导纳 Y 的模和幅角, 其

$$y = \frac{1}{z} \quad \varphi_y = -\varphi_z \quad (1.17)$$

此式说明电路复导纳的模等于该电路复阻抗的模的倒数, 复导纳的幅角等于该电路复阻抗的阻抗角的负值。

对于一个由电阻 R 和电抗 X 所构成的简单串联电路, 复阻抗为 $Z = R + jX$ 。根据定义其复导纳应为

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2}$$

上式可写成

$$Y = g - jb \textcircled{1} \quad (1.18)$$

① 为了使 b 与 X 同号并代表同性质的电路, 本书采用式 1.18 来表示 Y , 而不用 $Y = g + jb$ 。