

青 年 电 工 必 读

电工识图辅导

吕庆荣 编

DIANGONG SHITU FUDAO

DIANGONG SHITU FUDAO

化 学 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书一至四章介绍了识电路图所必须具备的电工基础理论知识，第五章为识电气图的基础知识，六至十一章为低压异步电动机的起动、调速和制动控制线路，十二至十五章为变电所二次回路和工厂供电系统及高压用电设备继电保护方面的知识，十六章是同步电动机可控硅励磁和无刷励磁装置，十七章详细地介绍了安装接线图的绘制。

本书着重于帮助青年电工提高识图水平，对各种控制线路的工作原理进行了详细的分析，对常用的计算公式也作了适当的介绍。全书对线路的分析深入浅出。语言简洁流畅，可供具有初中文化程度的青年电工学习电工技术使用，对从事电气工作多年的技术工人及工程技术人员也有一定的参考价值。

青 年 电 工 必 读 电 工 识 图 辅 导

吕庆荣 编

责任编辑：李福雪

封面设计：许立

化学工业出版社 出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

开本787×1092 1/16 印张14 1/4 插页1 字数342千字

1989年1月第1版 1989年1月北京第1次印刷

印 数 1—14,400

ISBN 7-5025-0355-2/TM·1

定 价 4.45元

编 者 的 话

随着国民经济的发展,大批青年加入了电气工人的行列。尽快掌握电工技术,是四化建设的需要,也是广大青年电工的迫切愿望。

电气工人在日常工作中需要阅读大量的电气线路图,识图的能力如何,在很大程度上就决定了一个电气工人技术水平的高低,所以,提高识图水平是学习电工技术的关键所在。很多青年电工都希望有一本通俗易懂、比较详细地介绍各种电路原理的书籍,本书就是为适应这种要求而编写的。

由于近年来不少大中型厂矿相继建成,这些厂矿一般都建有规模较大的变、配电所,有高压异步电动机和同步电动机拖动的大型机械设备,所以本书除详细介绍低压电动机的各种控制电路以外,还介绍了变电所二次回路、高压电动机的控制、同步电动机可控硅励磁装置和工厂供电系统及高压用电设备的继电保护等方面的知识。本书所编的内容,本人曾在大连化学工业公司碱厂电力车间组织的“电工识图”学习班上给安装、修理、电试和运行等电气工种的工人讲授过,深受新、老电工的欢迎。为了让具有初中文化水平的电工自学能通,本书在第一至第四章中简明扼要地介绍了识电路图所必须具备的基础理论知识。在后面各章介绍电路原理时所遇到的基础理论方面的问题,在第一至第四章中都能找到较满意的答案。

电气线路图是比较复杂的,同样功能的电路可能有多种接线方式,本书所介绍的只是一些较典型的线路。熟悉了这些线路,掌握电路图的一般规律,读者即可举一反三,对更为复杂的电路进行一步一步的解剖分析。只有在长期的工作实践中阅读和分析大量的电路图,才能不断增强识图能力,提高电工技术水平。所以,本书在帮助青年电工提高技术素质方面只能起一个抛砖引玉的作用。

大连化学工业公司副总工程师顾立湖和机动处副处长方生酉审阅了本书全稿,并提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

由于本人水平有限,书中难免有缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

编者的话

第一章 电工学基础知识	(1)
第一节 电路的基本定律.....	(1)
一、欧姆定律.....	(1)
二、基尔霍夫定律.....	(1)
三、焦耳-楞次定律.....	(2)
第二节 单相正弦交流电.....	(3)
一、单相正弦交流电及其三要素.....	(3)
二、正弦交流电的有效值.....	(5)
三、正弦交流电的相量表示法.....	(5)
第三节 电阻、电容和电感在电路中的作用.....	(6)
一、电阻在电路中的作用.....	(7)
二、电容在电路中的作用.....	(7)
三、电感在电路中的作用.....	(9)
四、交流电路的功率和功率因素.....	(11)
第四节 三相正弦交流电.....	(11)
一、星形连接(也称Y形连接).....	(12)
二、三角形连接(也称 Δ 形连接).....	(13)
三、三相电路的功率.....	(13)
第二章 电机学基础知识	(15)
第一节 三相异步电动机.....	(15)
一、异步电动机的工作原理.....	(15)
二、异步电动机的机械特性.....	(17)
三、异步电动机的调速.....	(19)
四、异步电动机的制动.....	(19)
第二节 同步电动机.....	(22)
一、同步电动机的工作原理.....	(23)
二、同步电动机的起动.....	(24)
第三节 变压器.....	(25)
一、变压器的工作原理.....	(25)
二、三相变压器及其联接组别.....	(26)
第三章 继电保护基础知识	(28)
第一节 继电保护的任务和继电保护装置的要求.....	(28)
第二节 几种常用继电器.....	(29)
一、电磁式继电器.....	(29)

二、感应式过电流继电器.....	(32)
第四章 晶体管电路基础知识.....	(36)
第一节 常用整流电路.....	(36)
一、PN结和二极管.....	(36)
二、单相半波整流电路.....	(36)
三、单相全波整流电路.....	(37)
四、单相桥式整流电路.....	(38)
五、电容滤波电路.....	(39)
六、三相桥式整流电路.....	(40)
第二节 晶体管交流放大电路.....	(41)
一、晶体管和它的放大作用.....	(41)
二、简单的交流放大电路.....	(42)
三、放大电路的基本分析方法.....	(44)
四、工作点稳定的放大电路.....	(46)
第三节 直流稳压电源.....	(46)
一、稳压管.....	(46)
二、串联电阻稳压电路.....	(47)
三、带有放大环节的可调串联稳压电路.....	(47)
第四节 可控整流电路.....	(48)
一、可控硅及其工作原理.....	(48)
二、单相半波可控整流电路.....	(50)
三、单相半控桥式整流电路.....	(51)
四、三相半控桥式整流电路.....	(51)
五、三相全控桥式整流电路.....	(54)
六、单结晶体管触发电路.....	(56)
第五章 识电气图基础知识.....	(60)
第一节 图形符号和文字符号.....	(60)
第二节 电气线路图的分类.....	(68)
一、原理图.....	(68)
二、安装接线图.....	(69)
三、展开图中的回路标号.....	(69)
第六章 鼠笼型异步电动机直接起动控制线路.....	(71)
第一节 点动控制线路.....	(71)
第二节 单向运行控制线路.....	(71)
一、一处控制单向运行控制线路.....	(71)
二、低压异步电动机控制线路中的保护环节.....	(72)
三、两处控制单向运行控制线路.....	(74)
四、具有点动和自锁的控制线路.....	(75)
五、两台电动机逐级起动的控制线路.....	(76)
六、同时起动多台电动机的控制线路.....	(76)

七、双手起动的控制线路.....	(76)
第三节 可逆运行控制线路.....	(77)
一、一处控制可逆运行控制线路.....	(77)
二、两处控制可逆运行控制线路.....	(79)
三、具有行程限制的可逆运行控制线路.....	(79)
四、可以点动的可逆运行控制线路.....	(80)
第四节 对控制线路的基本要求.....	(81)
第七章 鼠笼型异步电动机减压起动控制线路	(84)
第一节 定子串接电阻减压起动控制线路.....	(84)
一、控制线路.....	(84)
二、起动电阻的计算.....	(86)
第二节 自耦变压器减压起动控制线路.....	(86)
一、减压原理.....	(86)
二、控制线路.....	(86)
第三节 星-三角 ($Y-\Delta$) 切换减压起动控制线路.....	(88)
一、减压原理.....	(88)
二、控制线路.....	(89)
第八章 绕线式异步电动机的起动控制线路	(91)
第一节 转子串接电阻起动控制线路.....	(91)
一、控制线路.....	(91)
二、起动电阻的计算.....	(92)
第二节 转子串接频敏变阻器起动控制线路.....	(93)
一、频敏变阻器.....	(93)
二、控制线路.....	(94)
第九章 异步电动机的调速控制线路	(97)
第一节 变极调速控制线路.....	(97)
一、变极原理.....	(97)
二、控制线路.....	(98)
第二节 改变转子电阻调速控制线路.....	(99)
第三节 电磁调速异步电动机控制线路.....	(100)
一、电磁调速电动机的工作原理.....	(100)
二、控制装置的控制线路.....	(101)
第十章 异步电动机的制动控制线路	(105)
第一节 电源反接制动控制线路.....	(105)
一、反接制动继电器的工作原理.....	(106)
二、单向运行反接制动控制线路.....	(106)
三、可逆运行反接制动控制线路.....	(107)
四、限流电阻的计算.....	(109)
第二节 能耗制动控制线路.....	(110)
一、手动控制的能耗制动控制线路.....	(110)

二、自动控制的能耗制动控制线路.....	(110)
三、可逆运行能耗制动控制线路.....	(111)
第十一章 两个控制电路的分析.....	(113)
第一节 DW10-1500型自动空气断路器控制线路.....	(113)
一、交、直流两用单相串激电动机的工作原理.....	(113)
二、控制线路的工作原理.....	(114)
第二节 15/3吨桥式吊车控制线路.....	(115)
一、电气设备和电路布置.....	(115)
二、控制电路分析.....	(120)
第十二章 变电所二次回路.....	(123)
第一节 断路器的操作回路.....	(123)
一、断路器操作机构的工作原理.....	(123)
二、断路器的操作回路.....	(123)
三、信号灯附加电阻的选择.....	(129)
第二节 隔离开关的位置信号和闭锁回路.....	(131)
一、隔离开关的位置信号回路.....	(131)
二、隔离开关的闭锁回路.....	(132)
第三节 变电所信号回路.....	(133)
一、事故信号回路.....	(134)
二、预告信号回路.....	(140)
第四节 电压互感器回路.....	(142)
一、交流电网绝缘监察装置及接线图.....	(142)
二、电压互感器回路接线图.....	(144)
三、电压互感器二次电压切换回路.....	(144)
第五节 测量仪表的接线.....	(147)
一、互感器的极性及标志.....	(147)
二、功率表的接线.....	(148)
三、有功电度表的接线.....	(150)
第十三章 继电保护回路.....	(154)
第一节 工厂配电线路的保护回路.....	(154)
一、定时限过电流保护.....	(154)
二、单相接地保护.....	(160)
三、低电压保护.....	(164)
四、工厂配电线路二次接线全图举例.....	(166)
第二节 变压器的保护回路.....	(167)
一、熔断器保护.....	(168)
二、瓦斯保护.....	(169)
三、电流速断和带时限的过电流保护.....	(170)
四、变压器的差动保护.....	(171)
五、变压器二次接线全图举例.....	(176)

第三节 电动机的保护回路	(177)
一、电流速断和过负荷保护	(177)
二、电动机的差动保护	(178)
三、电动机的低电压保护	(179)
四、高压电动机二次接线全图举例	(180)
第十四章 变电所自动装置	(182)
第一节 备用电源自动投入装置 (BZT)	(182)
一、装置的作用和对装置的基本要求	(182)
二、BZT装置的原理接线图	(183)
第二节 自动按频率减负荷装置 (ZPJH)	(185)
一、自动按频率减负荷装置的作用和对装置的基本要求	(185)
二、ZPJH装置的接线图	(185)
第十五章 变电所直流系统接线图	(187)
第一节 蓄电池直流系统的运行方式和接线图	(187)
一、蓄电池直流系统的运行方式	(187)
二、蓄电池组直流系统的接线图	(188)
三、电压监察装置	(190)
第二节 直流系统绝缘监察装置	(191)
第三节 硅整流电容储能直流系统	(195)
一、硅整流电容储能直流系统接线图	(195)
二、电容器组检查装置	(197)
三、储能电容器组容量的选择	(198)
第十六章 同步电动机可控硅励磁装置	(199)
第一节 KGLF-10系列可控硅励磁装置	(199)
一、励磁主回路的工作原理	(200)
二、触发回路的工作原理	(201)
三、联锁信号及其它	(208)
第二节 同步电动机的无刷励磁装置	(208)
一、无刷励磁的工作原理	(208)
二、控制线路	(209)
第十七章 安装接线图	(212)
第一节 安装接线图的绘制原则	(212)
一、屏(盘)面布置图的绘制	(212)
二、端子排图	(212)
三、屏(盘)内元件之间连接的表示方法	(214)
第二节 绘制安装接线图举例	(216)

第一章 电工学基础知识

第一节 电路的基本定律

在阅读电气图纸时，常常需要用电路的基本定律对电路进行简单的分析和计算。电路的基本定律指的是：欧姆定律、基尔霍夫定律和焦耳-楞次定律。作为一个电工，牢固掌握这三个定律并能灵活运用是很有必要的。

一、欧姆定律

在图1-1电阻电路中，电流的大小与电阻两端电压的高低成正比，与电阻的阻值大小成反比，这就是欧姆定律，用公式表示为：

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-1)$$

式中 U ——电阻两端的电压，伏(V)；

R ——电阻，欧姆(Ω)；

I ——电阻中的电流，安(A)。

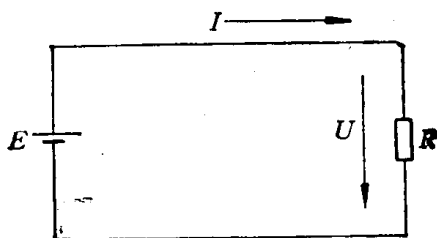


图 1-1 电阻电路

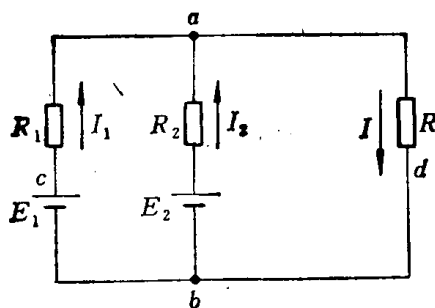


图 1-2 有节点和支路的电阻电路

(1-1) 式略加变换，可得到欧姆定律的另外两种表达式，即：

$$U = IR \quad (1-2)$$

或

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-3)$$

式中各字母所代表的意义与 (1-1) 式相同。

二、基尔霍夫定律

首先介绍一下电路中节点、支路和回路的概念。

节点：三个或三个以上电路元件的会交点叫节点，如图1-2中的 a 或 b 点。

支路：两节点间的电路叫支路，如图1-2中 ab 、 acb 和 adb 都是支路。

回路：任意一个闭合的电路都叫回路，图1-2中 $abcd$ 、 $adbca$ 和 $adbca$ 都是回路。

1. 基尔霍夫第一定律

在电路中的任意一个节点上，流向节点的各支路电流之和必定等于流出此节点的各支路电流之和，这就是基尔霍夫第一定律。用公式表示为：

$$\sum I_{\lambda} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-4)$$

式中 I_{λ} 为流入节点的电流, $I_{\text{出}}$ 为流出节点的电流, 字母“ Σ ”(希腊字母, 读西格马)是“和”的意思, ΣI_{λ} 即表示所有流入节点的电流之和。对图1-2电路中的节点a来说, 则有:

$$I_1 + I_2 = I \quad (1-5)$$

此定律的物理意义是很容易理解的。因为电流是电荷的移动, 如果 $\Sigma I_{\lambda} > \Sigma I_{\text{出}}$, 则电荷将在此节点上无限积聚; 如果 $\Sigma I_{\lambda} < \Sigma I_{\text{出}}$, 就意味着在此节点上将凭空产生很多电荷, 这两点都是显然不可能的, 所以只有一个可能, 即 $\Sigma I_{\lambda} = \Sigma I_{\text{出}}$ 。

2. 基尔霍夫第二定律

从电路中任意一个回路中的任意一点出发, 按一定方向沿回路循环一周, 回路中电位升的和等于电位降的和。这就是基尔霍夫第二定律。另一种叙述方法是: 回路中沿一定方向循环一周, 电动势的和等于电压降的和, 用公式表示为:

$$\Sigma E = \Sigma IR \quad (1-6)$$

或 $\Sigma E = \Sigma U \quad (1-7)$

应用此定律列方程式时, 首先必须对回路指定一个循环方向, 回路中各电动势和电压降的方向与此方向一致时取正值, 反之取负值。应该注意, 电压降的正方向是由高电位指向低电位, 而电动势的正方向是由低电位(电源负极)指向高电位(电源正极)。

在图1-2的 $abca$ 回路中, 取回路方向为 $abca$, 根据基尔霍夫第二定律有:

$$-E_2 + E_1 = -I_2 R_2 + I_1 R_1 \quad (1-8)$$

(1-8)式中各项的正、负是按上述原则确定的。

必须说明的是, 对于正弦交流电路, 基尔霍夫第一、第二定律也是适用的, 只是此时电流、电压和电动势都用相量表示(关于正弦交流电的相量表示法详见本章第二节), 用公式表示为:

$$\Sigma I_{\lambda} = \Sigma I_{\text{出}} \quad (1-9)$$

$$\Sigma E = \Sigma U \quad (1-10)$$

三、焦耳-楞次定律

实验证明, 当电路中有电流通过时就一定会有能量损耗, 单位时间内的能量损耗(即功率)等于电路两端的电压与通过电路的电流的乘积, 这就是焦耳-楞次定律, 用公式表示为:

$$P = UI \quad (1-11)$$

式中 P ——电路中消耗的功率, 瓦(W);

U ——电路两端的电压, 伏;

I ——电路中通过的电流, 安。

利用欧姆定律的关系式, 可推导出功率表达式的另外两种表达形式, 即:

$$P = UI = U \left(\frac{U}{R} \right) = \frac{U^2}{R} \quad (1-12)$$

$$P = UI = (IR)I = I^2 R \quad (1-13)$$

计算电源部分的功率, 也可用同样的公式, 在忽略电源内阻的情况下, 如图1-1中电源的电动势为 E , 电流为 I , 则电源输出的功率为:

$$P = EI \quad (1-14)$$

第二节 单相正弦交流电

工农业生产中采用的电源绝大部分是正弦交流电源，有单相正弦交流电源和三相正弦交流电源。某些特殊场合需用直流电源时，一般也是由正弦电源经过整流而得到。因此，对于使用和维护各种电气线路的电气工人来说，对正弦交流电的性质和特点必须有一定的认识。

一、单相正弦交流电及其三要素

正弦是数学上的一个名词。如图1-3所示，在直角三角形中， AC 和 BC 两条边互相垂直，它们的夹角等于 90° ， α （希腊字母，读阿尔法）和 β （希腊字母，读贝塔）是直角三角形的两个内角。对 α 角来说， AC 边是邻边， BC 边为对边， AB 边为斜边。三角形的边和角之间有密切的关系。如果斜边 AB 的长度保持不变， α 角的大小改变时， AC 和 BC 两边的长

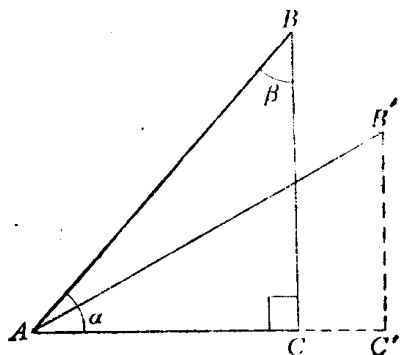


图 1-3 正弦函数的定义

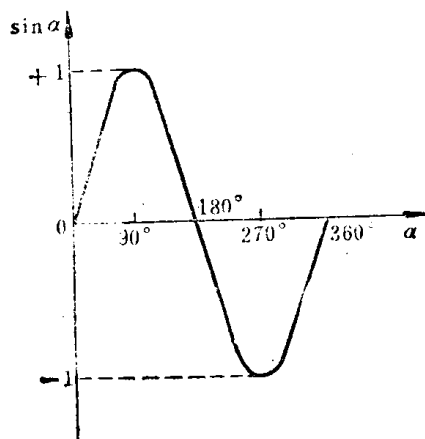


图 1-4 正弦曲线

度都随之改变。直角三角形 BC 边与 AB 边的比值称为 α 角的正弦函数，用符号 $\sin\alpha$ 表示。 $\sin\alpha$ 的值随着 α 角的大小而变化，表1-1列举的数值可以看出 $\sin\alpha$ 与 α 角的关系。从表中看到， α 从 0° 变到 360° 时， $\sin\alpha$ 的值先从0增加到+1，然后减小到零，又从负方向增加到-1，然后又回复到零。将 α 角和对应的 $\sin\alpha$ 画成一条连续曲线如图1-4所示，称为正弦曲线。

表 1-1 正 弦 值

α	0°	30°	45°	60°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
$\sin\alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	0	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	0

图1-3直角三角形邻边 AC 与斜边 AB 的比值称为 α 角的余弦函数，用符号 $\cos\alpha$ 代表。 $\cos\alpha$ 的值也在+1和-1之间变化， $\cos 0^\circ = 1$ ， $\cos 90^\circ = 0$ ， $\cos 180^\circ = -1$ ， $\cos 270^\circ = 0$ ， $\cos 360^\circ = 1$ 。

电动势、电压和电流的大小和方向随时间作正弦规律变化的电路称为正弦交流电路。理论和实践证明，正弦交流电无论在电力传输或使用方面都有明显的优点，所以日常的工农业用电都是正弦交流电。

在电气工程中，角度 α 常用弧度来表示，称为相角或相位。圆周一周为 360° ，也等于 2π 弧度，则1弧度 $=\frac{180^\circ}{\pi}$ 。用 ω （希腊字母，读奥米伽）表示相角变化的速度，称为角频率，

单位是弧度/秒。用 t 代表时间，单位是秒，则相角 $\alpha = \omega t$ 。用小写字母 i 表示正弦交流电，则有：

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1-15)$$

通常称(1-15)式为正弦交流电流的瞬时表达式。

以时间或相角为横坐标，电流瞬时值为纵坐标，把电流随时间变化的规律绘成曲线，称为正弦交流电的波形图，图1-5中曲线1为(1-15)式所表示的正弦交流电流的波形图。

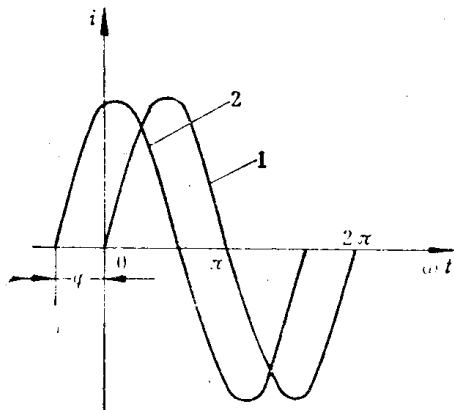


图 1-5 正弦电流波形图

从图1-5可以看到，相角 α 从 0° 到 360° ，电流的大小和方向经历了一次完整的变化，称为一周。每秒钟内正弦交流电变化的周数称为频率，用符号 f 表示。我国电力系统标准频率定为50周/秒。1周/秒称为赫兹(Hz)，简称赫。

正弦交流电完成一次变化所需的时间称为周期，用符号 T 表示。周期与频率成倒数关系，即 $T = 1/f$ 。

知道正弦交流电的频率 f ，就可以定出角频率 ω 。因为频率 f 表示1秒钟内的周数，每一

周为 2π 弧度，所以角频率 ω 与频率 f 有下列关系：

$$\omega = 2\pi f \quad \text{弧度/秒(rad/s)} \quad (1-16)$$

正弦函数值的变化范围是从-1到+1，所以(1-15)式所表示的正弦交流电流最大值只能是 I_m ，通常称 I_m 为正弦交流电的最大值。

(1-15)式所表示的正弦交流电流，当时间 $t=0$ 时， $\omega t=0$ ，所以电流 $i=0$ 。如果某正弦交流电流在 $t=0$ 时 i 不等于零，则电流的表达式为：

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-17)$$

式中 I_m 为正弦交流电的最大值， ω 为角频率，其值为 $\omega = 2\pi f$ ， φ (希腊字母，读斐)为初相角，又称初相位，是时间为零时正弦交流电的相角。(1-17)式是正弦交流电流的一般瞬时表达式，(1-15)式是(1-17)式的特殊情况，即 $\varphi=0$ 。图1-5中曲线2为(1-17)式所表示的正弦交流电流的波形图。正弦交流电压和正弦交流电动势的瞬时表达式分别为：

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-18)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-19)$$

正弦交流电瞬时表达式中的角度 $(\omega t + \varphi)$ 称为正弦交流电的相角，也称相位。 $t=0$ 时的相角 φ 称为初相角。初相角能从时间上反应出各正弦交流电之间的先后顺序。设有 i_1 和 i_2 两个正弦交流电流：

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (1-20)$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2) \quad (1-21)$$

其波形图如图1-6所示。由图可看出 i_1 和 i_2 在相位上有差别，通常称两个相同频率的正弦交流电的初相位之差为它们的相位差，图1-6中 i_1 和 i_2 的相位差为 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。因为 $\varphi_1 > \varphi_2$ ，我们就说 i_1 超前 i_2 以 φ 角，或者说 i_2 滞后 i_1 以 φ 角。如果两个正弦交流电的相角差为零，则称它们为同相。

通常称最大值、角频率和初相位为正弦交流电的三要素。

二、正弦交流电的有效值

用正弦函数的数学式来表示正弦交流电是一种严格的表示方法，但在日常应用中却需要一个简单的数来表示正弦交流电的大小，这就是正弦交流电的有效值。正弦交流电的有效值是从能量的观点来确定的。电流通过电阻时要产生热量，我们以正弦交流电流与直流电流来作比较。如果一个正弦交流电流和一个直流电流通过相同的电阻，在同样的时间内产生相同的热量，那么这两个电流从能量关系方面来看是相等的，所以可以用这个直流电流值来表示正弦交流电流的大小，称它为正弦交流电流的有效值。正弦交流电流的有效值和最大值之间有简单的比例关系，它们的关系是：

$$I = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m = 0.707 I_m \quad (1-22)$$

式中 I ——正弦交流电流的有效值；

I_m ——正弦交流电流的最大值。

根据相同的理由，我们可以得出正弦交流电动势和正弦交流电压的有效值为：

$$E = \frac{\sqrt{2}}{2} E_m = 0.707 E_m \quad (1-23)$$

$$U = \frac{\sqrt{2}}{2} U_m = 0.707 U_m \quad (1-24)$$

式中 E ——正弦交流电动势的有效值；

E_m ——正弦交流电动势的最大值；

U ——正弦交流电压的有效值；

U_m ——正弦交流电压的最大值。

如无特别说明，凡是讲交流电的大小都是指有效值。电气设备铭牌上所标注的值，以及交流仪表的刻度一般也都是指有效值。

三、正弦交流电的相量表示法

在交流电路中，经常要进行电压和电流之间的加、减运算，用三角函数和波形图进行运算是非常繁琐的。人们从实践中发现，正弦函数的各种特点可以用向量（或者叫矢量）表示，而向量的加、减运算是比较简单的。于是正弦函数的运算就可以简化为向量的运算。

只有大小没有方向的量叫标量，长度、温度等都是标量。既有大小又有方向的量叫做向量，机械力、物体的位移等都是向量。向量一般用带箭头的线段表示，线段的长短代表向量的大小，箭头的指向代表向量的方向。向量的符号表示法是在字母上加一短划，如 $\vec{A}$ 。如果两个向量 $\vec{A}$ 和 $\vec{B}$ 大小相等而方向相反，则它们互为负数，即 $\vec{A} = -\vec{B}$ 。

向量的加、减运算常用作图法。设有两个向量 $\vec{OA}$ 和 $\vec{OB}$ 如图1-7所示，用作图法求二者之和的方法是：把向量 $\vec{OB}$ 的起端接到向量 $\vec{OA}$ 的末端，然后从向量 $\vec{OA}$ 的起端到向量 $\vec{OB}$ 的末端作向量 $\vec{OC}$ ，则向量 $\vec{OC}$ 就是向量 $\vec{OA}$ 与向量 $\vec{OB}$ 之和，即 $\vec{OC} = \vec{OA} + \vec{OB}$ 。

因为 $\vec{OA} - \vec{OB} = \vec{OA} + (-\vec{OB})$ ，而 $\vec{OB}$ 与 $(-\vec{OB})$ 的关系是大小相等、方向相反，

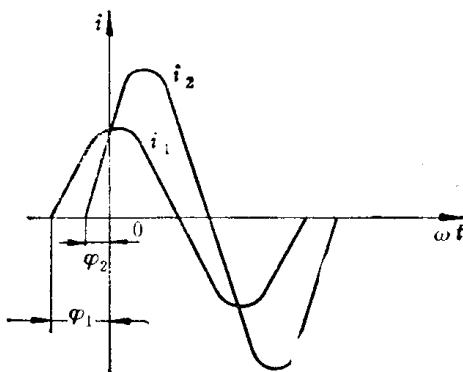


图 1-6 两个初相位不同的正弦电流

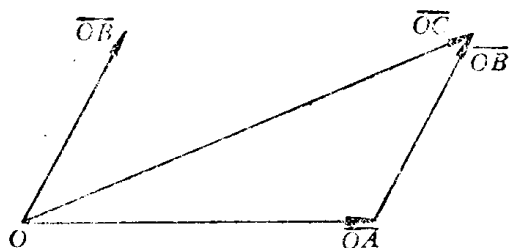


图 1-7 两个向量相加

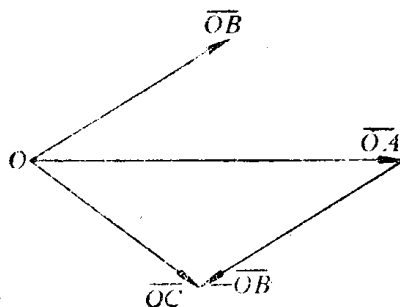


图 1-8 两个向量相减

所以可以用求和的方法求两向量之差,如图1-8所示,图中向量 $\overrightarrow{OC}$ 为向量 $\overrightarrow{OA}$ 与 $\overrightarrow{OB}$ 之差,即 $\overrightarrow{OC} = \overrightarrow{OA} - \overrightarrow{OB}$ 。

用向量表示正弦交流电时,向量的长度代表正弦交流电的最大值(E_m 、 U_m 、 I_m)或有效值(E 、 U 、 I),向量与水平方向的夹角代表正弦交流电的初相位 φ ,并认为此向量按逆时针方向旋转,旋转的角速度代表正弦交流电的角频率 ω ,称为旋转向量。为了和前述向量相区别,把代表正弦交流电的旋转向量称为相量,用加点的符号表示,如 $\dot{I}_m$ 、 $\dot{U}_m$ 等。在实际工作中,普遍采用相量来分析和计算正弦交流电路中的电压、电流和电动势。

相量的加、减运算与向量相同,正弦交流电用相量表示,就可以用向量的运算方法对正弦交流电进行运算。设有两个正弦交流电流:

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad (1-25)$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-26)$$

求两电流之和的方法如图1-9所示。先画出相量 $\dot{I}_{1m}$ 和 $\dot{I}_{2m}$,然后从相量 $\dot{I}_{1m}$ 的末端画出相量 $\dot{I}_{2m}$,最后由相量 $\dot{I}_{1m}$ 的始端至 $\dot{I}_{2m}$ 的末端作相量 $\dot{I}_m$,则 $\dot{I}_m$ 即为 $\dot{I}_{1m}$ 与 $\dot{I}_{2m}$ 之和,它所代表的正弦交流电的瞬时表达式为:

$$i = i_1 + i_2 = I_m \sin(\omega t + \varphi') \quad (1-27)$$

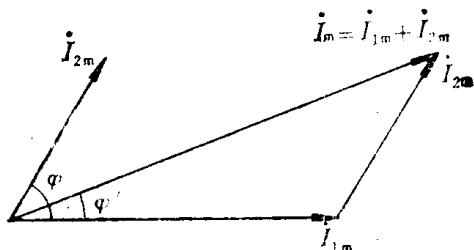


图 1-9 两个正弦交流电流相量相加

式中的最大值 I_m 和初相位 φ' 可由图中直接测量,也可用数学方法进行精确的计算。很明显,正弦交流电的相量表示法,给正弦交流电的加、减运算带来了很大的方便。

必须注意,用相量进行加、减运算的正弦交流电必须频率相同,否则不能用作图法进行运算。

用相量表示正弦交流电的图称为“相量图”,相量图是分析交流电路的简捷有效的方法,在电工技术中得到广泛的应用。

第三节 电阻、电容和电感在电路中的作用

电气线路中的电气设备和电气元件有多种多样,它们的作用也各不相同。但从分析电路中电压、电流和能量转换的角度来看,这些设备和元件都可以归纳为三大元件:电阻元件、电容元件和电感元件。有些设备可看成是由单一元件构成,例如电灯、电炉是电阻元件;电抗器是电感元件。大部分设备是由两种或三种元件组合而成,如变压器和电动机都可看作是由

电阻元件和电感元件组合而成。所以，分析电阻、电容和电感在电路中的作用，是分析电路和电气设备在电路中作用的理论基础。

一、电阻在电路中的作用

1. 电阻在直流电路中的作用

电阻是导体对电流的一种阻力，当电流通过电阻时，在电阻两端会出现一个电压降，电阻、电流和电压之间的关系就是欧姆定律的内容，它们之间的关系式见(1-1)式。当电流通过电阻时，电阻要消耗功率，将电能转变成热能，电阻上消耗的功率与电阻、电流和电压之间的关系就是楞次-焦耳定律的内容，它们之间的关系式见(1-11)~(1-14)式。所以，掌握了欧姆定律和楞次-焦耳定律就明白了电阻在直流电路中的作用。

2. 电阻在交流电路中的作用

在电阻电路中，当加在电阻两端的电压是正弦交流电压时，通过电阻的电流也是正弦交流电流，电压和电流数值之间的关系符合欧姆定律，即：

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-28)$$

式中 U 、 I 为交流电压和交流电流的有效值，在相位上，电流和电压同相位。

楞次-焦耳定律的计算式对于交流电路仍然适用，即：

$$P = UI \quad (1-29)$$

式中电压 U 和电流 I 指的是交流电的有效值，功率 P 是指在正弦交流电一个周期内功率的平均值。

二、电容在电路中的作用

任何两块金属导体，中间用空气或其它绝缘材料隔开，就形成一个电容器。电容器是一种能够储存电荷的电气元件。电容一般用字母“ C ”表示，单位是“法拉(F)”。

实际上任何两个导体之间都有电容存在。例如导线与导线之间，导线与大地之间都有电容，这种电容常称为分布电容。第十三章介绍的3~10千伏中性点不接地供电系统单相接地时的接地电流，就是导线对地电容所引起的电容电流。在一般情况下，这种分布电容的影响很小，所以常忽略不计。

1. 电容在直流电路中的作用

电容器两极之间是用绝缘材料隔开的，所以直流电不能通过电容器，电容在电路中具有隔断直流电的作用。但由于电容能储存电荷，所以当电容刚与直流电路接通时有一个充电过程，充电以后的电容与电阻连成闭合回路时则有一个放电过程。充电和放电是电容在电路中工作时的基本运动形式，整流电路中的滤波电容，就可以用充电和放电作用来说明其工作原理，可控硅触发电路中也是利用电容的充电和放电作用来说明其工作原理。

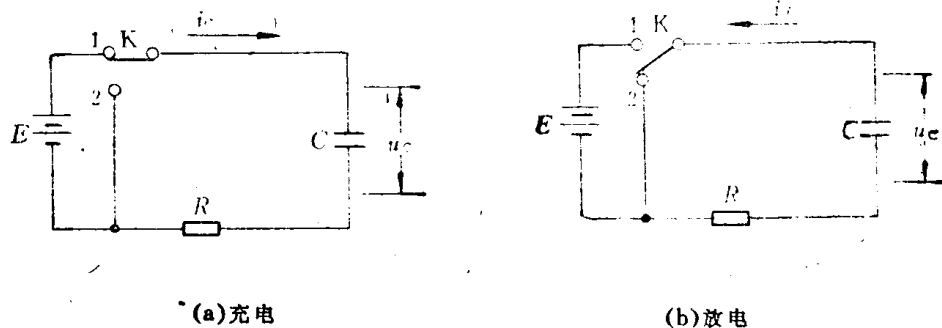


图 1-10 电容的充电和放电

图1-10是电容与电阻串联的直流电路，直流电源为 E 。如果合上开关 K 以前电容 C 中的电压 u_c 为零，将 K 置于“1”端时电源就对电容充电，电路中有充电电流 i_c 出现。充电开始时只有电阻 R 限制充电电流，所以充电开始时的电流为：

$$i_{c0} = \frac{E}{R} \quad (1-30)$$

随着充电过程的进行，电容两极积聚起电荷，电容两端出现电压 u_c ， u_c 值随电容储存电荷的增加而上升。电容电压 u_c 的极性与电源相反，它的作用是使充电电流逐渐减小，充电电流由(1-31)式决定， u_c 越大 i_c 越小。

$$i_c = \frac{E - u_c}{R} \quad (1-31)$$

电荷进入电容需要一定的时间，所以电容电压 u_c 是逐渐增加起来的，不可能突然变化。充电电流也是从开始的最大值逐渐减小。充电结束时电容电压 u_c 等于电源电动势 E ，充电电流 i_c 等于零。电容两端的电压不能突变，这是一个很重要的概念。

电容充电的快慢与电容量的大小有关，也与充电电流的大小有关。电容量大，储存的电荷多，充电时间就长；充电电流大，电容极板接收电荷的速度就快，充电时间就短。充电电流的大小与电阻有密切关系，所以电容量 C 和电阻 R 是决定充电速度的两个重要因素，而与电源电压无关。电容 C （单位法拉）与电阻 R （单位欧姆）的乘积称为电阻电容回路的时间常数，常用字母 τ （希腊字母，读陶，单位是秒(s)）表示，其关系式为：

$$\tau = RC \quad (1-32)$$

τ 大，充电就慢； τ 小，充电就快，一般认为经过 $4 \sim 5\tau$ 时间，充电过程就结束。

图1-11画出了电容充电时电容电压 u_c 及充电电流 i_c 与充电时间的关系曲线。电阻 R 不同，充电快慢也就不同，电阻越大充电电流越小，充电时间也就越长。

充电结束后，电容两端电压 $u_c = E$ ，电路中电流为零。此时将 K 置于图1-10中的“2”端，电容就进行放电，电路中出现放电电流 i_f 。电容的放电过程与充电过程相似，放电电流 $i_f = u_c/R$ 。开始时电容电压 $u_c = E$ ，放电电流最大，随着放电的进行，电容电压 u_c 逐渐降低，放电电流也逐渐减小。最后电容电压等于零，放电电流也等于零。放电的快慢由电容量 C 与电阻 R 的乘积决定，仍用 τ 表示。 τ 大放电慢， τ 小放电快，一般也认为经 $4 \sim 5\tau$ 时间放电过程就结束。利用电容的放电，我们可以得到一个尖顶的电流脉冲，用以触发可控硅。

2. 电容在交流电路中的作用

在交流电路中，电源电压的大小和方向都在变化，因此电容器有的时候被充电，有时候则在放电，充电和放电作用在不断地交替进行，电路中就会有持续的交流电流流过。当电压

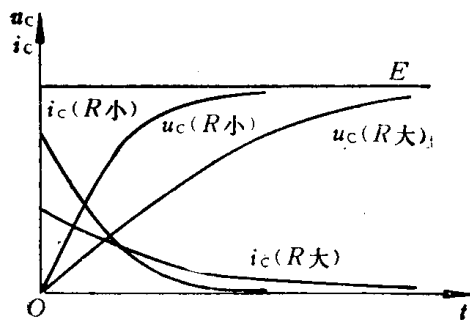


图 1-11 电容充电电流和电压的变化曲线

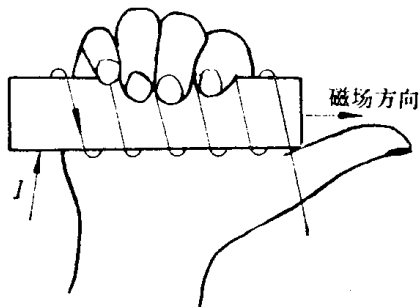


图 1-12 右螺旋法则

是正弦交流电压时, 通过电容的电流也是正弦交流电流, 但电流的相位比电压超前 90° 相位角。

电容在交流电路里对电流有一种阻力, 这个阻力称为容抗, 常用符号 X_c 表示, 单位也是欧姆。电容量越大, 电流越容易通过电容器; 电源的频率越高, 电流也越容易通过电容器, 所以电容的容抗与电容量 C (单位法拉) 及频率 f (单位赫兹) 成反比, 用公式表示为:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C} \quad (1-33)$$

电容电路可应用欧姆定律进行计算:

$$X_c = \frac{U}{I} \quad (1-34)$$

式中 U 、 I 为交流电压和交流电流的有效值。

三、电感在电路中的作用

把导线绕成线圈就成为一只空心电感, 如果在线圈中放置铁芯, 就可以大大增强电感作用。电感常用符号“ L ”表示, 单位是“亨利(H)”。

1. 电感在直流电路中的作用

线圈中有电流通过时就会产生磁场, 判断磁场方向用右螺旋法则。右手四指握住线圈, 四指指着线圈中的电流方向, 则大拇指就代表线圈内部磁场的方向, 如图1-12所示。

根据电磁感应现象可知, 穿过线圈的磁场发生变化时, 线圈中会产生一个感应电动势 e , 若线圈电路是一个闭合回路, 在感应电动势 e 的作用下就会产生感应电流, 这个感应电流所产生的磁场总是阻止原磁场的变化。

知道上述规律, 就可分析电感线圈在直流电路中的作用。图1-13为电阻 R 和电感 L 串联的电路, 将开关 K 置于“1”端, 直流电动势 E 将在电路中产生电流 i , 电流方向如图1-13(a)所示。这个电流 i 要产生自己的磁场。原来线圈内没有磁场, 现在有了磁场, 磁场从无到有, 线圈内磁场发生了变化, 所以在线圈中要产生感应电动势 e 。感应电动势 e 要产生一个电流, 这个电流所产生的磁场应阻止原来磁场的增强。由于原磁场是由电流 i 产生的, 所以感应电动势 e 的作用就在于阻止线圈电流 i 的变化。在纯电阻电路中, 电路接通后, 电流是从零突然跃增到稳定的数值。在含有电感的电路里, 由于感应电动势 e 的反抗作用, 电流只能逐渐地增加到最后的稳定值。图1-13(a)电路的最后稳定电流由 E 及 R 决定, 即 $I = E/R$ 。电流达到稳定值后不再变化, 感应电动势也就消失。

在电感电路的电流达到稳定值以后, 将开关 K 置于“2”端, 如图1-13(b)所示, 将电感及电阻接成闭合回路。电源断开后, 电流 i 要减小, 线圈就产生感应电动势 e , 企图阻止电流的

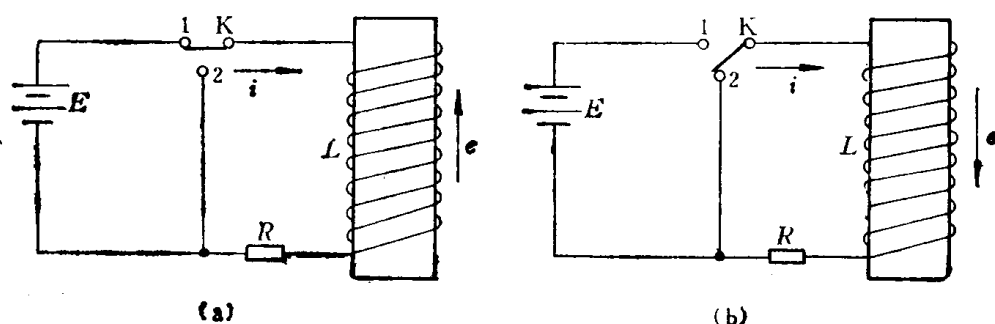


图 1-13 电感在直流电路中的作用