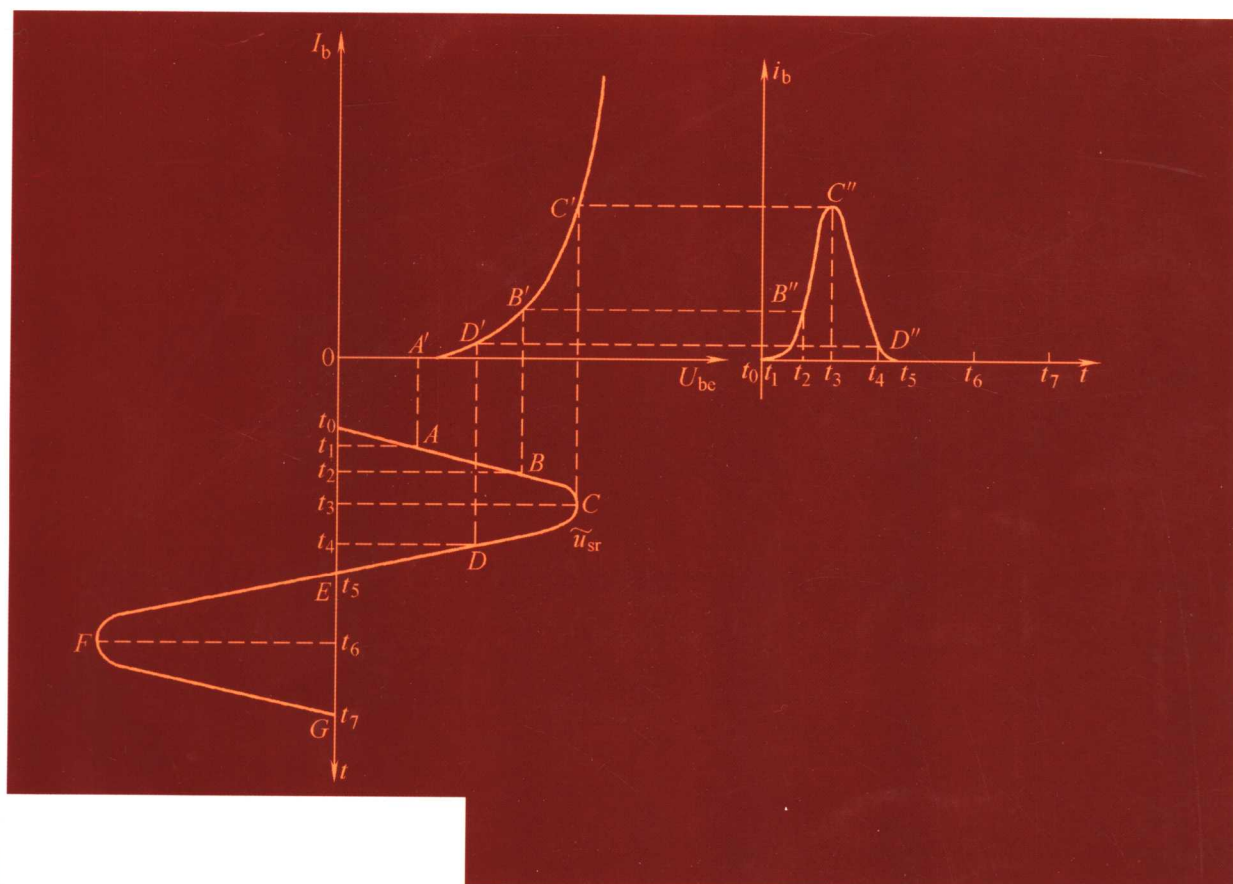


机电识图丛书

电气识图

● 吕庆荣 于晓明 王润卿 编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

机 电 识 图 丛 书

电 气 识 图

吕庆荣 于晓明 王润卿 编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电气识图/吕庆荣,于晓明,王润卿编. —北京:化学工业出版社, 2005.7

(机电识图丛书)

ISBN 7-5025-6817-4

I. 电… II. ①吕…②于…③王… III. 电路图-识图法 IV. TM02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 023414 号

机电识图丛书

电气识图

吕庆荣 于晓明 王润卿 编

责任编辑:刘哲

文字编辑:廉静

责任校对:陈静

封面设计:于兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 417 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6817-4/TM·38

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

图样是工程技术界技术交流的语言，在工程领域中起着其他语言不可替代的作用。工程技术人员要表达设计思想，理解设计思路，组织生产施工等，都先要学会绘制和阅读图样，尤其阅读图样更为基础。鉴于识图的重要，化学工业出版社组织出版《机电识图丛书》，包括《机械识图》、《电气识图》、《仪表识图》和《管道识图》，以期对读者有所帮助。

本书是《电气识图》。

电气工人在日常工作中需要阅读大量的电气线路图，识图能力如何，在很大程度上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。

大中型厂矿企业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、同步电动机晶闸管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。为了让具有初中文化水平的电工自学能通，本书第1~4章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1~4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。

随着计算机技术的发展，由微机保护和微机监控组成的变电站综合自动化系统近年来得到了广泛的应用。微机保护一般均具有保护、测量、控制及通讯“四合一”功能，微机监控具有数据采集处理、控制、事故预报及报警等功能。它们是用微机的强大软件功能来实现传统继电器的作用，电路接线变得相对简单。本书设有介绍变电站综合自动化系统的内容，但掌握继电器电路的工作原理，对变电站综合自动化系统的学习会起到水到渠成和触类旁通的作用。

大化集团大连设计研究院副总工程师杨正庄审阅了本书全稿，并提出了宝贵的修改意见，在此表示衷心感谢。

由于水平有限，书中难免有缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编 者

二〇〇四年十一月于大连

内 容 提 要

本书着重于帮助读者提高识图水平，除介绍识电气图的基础知识外，对低压异步电动机的启动、调速和制动控制线路，变电所二次回路、高压电气设备继电保护线路等进行了详细分析，对常用的计算公式也做了适当介绍。全书对线路的分析深入浅出，对基础知识的介绍简洁流畅。

本书可供具有初中文化及以上的技术工人学习电工技术使用，对从事电气工作的工程技术人员也有参考价值。

目 录

第 1 章 电工学基础知识	1
1.1 电路的基本定律	1
1.1.1 欧姆定律	1
1.1.2 基尔霍夫定律	1
1.1.3 焦耳-楞次定律	2
1.2 单相正弦交流电	2
1.2.1 单相正弦交流电及其三要素	3
1.2.2 正弦交流电的有效值	4
1.2.3 正弦交流电的相量表示法	5
1.3 电阻、电容和电感在电路中的作用	6
1.3.1 电阻在电路中的作用	6
1.3.2 电容在电路中的作用	6
1.3.3 电感在电路中的作用	8
1.3.4 交流电路的功率和功率因数	10
1.4 三相正弦交流电	11
1.4.1 星形连接	11
1.4.2 三角形连接	12
1.4.3 三相电路的功率	13
第 2 章 电机学基础知识	14
2.1 三相异步电动机	14
2.1.1 异步电动机的工作原理	14
2.1.2 异步电动机的机械特性	16
2.1.3 异步电动机的调速	17
2.1.4 异步电动机的制动	18
2.2 同步电动机	20
2.2.1 同步电动机的工作原理	20
2.2.2 同步电动机的启动	21
2.3 变压器	22
2.3.1 变压器的工作原理	22
2.3.2 三相变压器及其连接组别	23
第 3 章 继电保护基础知识	26

3.1	继电保护的任务和对继电保护装置的要求	26
3.2	常用继电器	27
3.2.1	电磁式继电器	27
3.2.2	感应式过电流继电器	31
3.2.3	电子式继电器	32
第4章	电子电路基础知识	33
4.1	常用整流电路	33
4.1.1	PN结和二极管	33
4.1.2	单相半波整流电路	33
4.1.3	单相全波整流电路	34
4.1.4	单相桥式整流电路	35
4.1.5	电容滤波电路	36
4.1.6	三相桥式整流电路	37
4.2	晶体管交流放大电路	38
4.2.1	晶体管和它的放大作用	38
4.2.2	简单的交流放大电路	39
4.2.3	放大电路的基本分析方法	42
4.2.4	工作点稳定的放大电路	43
4.3	直流稳压电源	44
4.3.1	稳压管	44
4.3.2	串联电阻稳压电路	44
4.3.3	带有放大环节的可调串联稳压电路	45
4.4	可控整流电路	45
4.4.1	晶闸管及其工作原理	46
4.4.2	单相半波可控整流电路	48
4.4.3	单相半控桥式整流电路	48
4.4.4	三相半控桥式整流电路	49
4.4.5	三相全控桥式整流电路	51
4.4.6	单结晶体管触发电路	53
4.5	运算放大器电路	57
4.5.1	多级放大器的一般问题	57
4.5.2	直接耦合放大器	57
4.5.3	运算放大器及其应用	58
4.6	脉冲数字电路	61
4.6.1	脉冲数字电路概述	61
4.6.2	计数体制	61
4.6.3	三极管的开关作用	62
4.6.4	逻辑门电路	62
4.6.5	逻辑代数及应用	65
4.6.6	触发器	67

第 5 章 识电气图基础知识	70
5.1 图形符号和文字符号	70
5.2 电气线路图的分类	70
5.2.1 原理图	71
5.2.2 安装接线图	71
5.2.3 展开图中的回路标号	72
第 6 章 笼型异步电动机直接启动控制线路	73
6.1 点动控制线路	73
6.2 单向运行控制线路	73
6.2.1 一处控制单向运行控制线路	73
6.2.2 低压异步电动机控制线路中的保护环节	74
6.2.3 两处控制单向运行控制线路	76
6.2.4 具有点动和自锁的控制线路	77
6.2.5 两台电动机逐级启动的控制线路	78
6.2.6 同时启动多台电动机的控制线路	78
6.2.7 双手启动的控制线路	79
6.3 可逆运行控制线路	79
6.3.1 一处控制可逆运行控制线路	79
6.3.2 两处控制可逆运行控制线路	81
6.3.3 具有行程限制的可逆运行控制线路	82
6.3.4 可以点动的可逆运行控制线路	82
6.4 对控制线路的基本要求	83
第 7 章 笼型异步电动机降压启动控制线路	86
7.1 定子串接电阻降压启动控制线路	86
7.1.1 控制线路	86
7.1.2 启动电阻的计算	88
7.2 自耦变压器降压启动控制线路	88
7.2.1 降压原理	88
7.2.2 控制线路	89
7.3 星-三角换接降压启动控制线路	90
7.3.1 降压原理	90
7.3.2 控制线路	91
第 8 章 绕线式异步电动机的启动控制线路	93
8.1 转子串接电阻启动控制线路	93
8.1.1 控制线路	93
8.1.2 启动电阻的计算	94
8.2 转子串接频敏变阻器启动控制线路	96

8.2.1	频敏变阻器	96
8.2.2	控制线路	96
第9章	异步电动机的调速控制线路	99
9.1	变极调速控制线路	99
9.1.1	变极原理	99
9.1.2	控制线路	100
9.2	改变转子电阻调速控制线路	101
9.3	电磁调速异步电动机控制线路	102
9.3.1	电磁调速电动机的工作原理	102
9.3.2	控制装置的控制线路	103
第10章	异步电动机的制动控制线路	107
10.1	电源反接制动控制线路	107
10.1.1	反接制动继电器的工作原理	108
10.1.2	单向运行反接制动控制线路	108
10.1.3	可逆运行反接制动控制线路	109
10.1.4	限流电阻的计算	111
10.2	能耗制动控制线路	111
10.2.1	手动控制的能耗制动控制线路	111
10.2.2	自动控制的能耗制动控制线路	112
10.2.3	可逆运行能耗制动控制线路	113
第11章	自动空气断路器和桥式吊车控制线路	114
11.1	自动空气断路器控制线路	114
11.1.1	交、直流两用单相串激电动机的工作原理	114
11.1.2	控制线路的工作原理	115
11.2	15/3t桥式吊车控制线路	116
11.2.1	电气设备和电路布置	116
11.2.2	控制电路分析	117
第12章	变电所二次回路	122
12.1	断路器的操作回路	122
12.1.1	断路器操作机构的工作原理	122
12.1.2	断路器的操作回路	123
12.1.3	信号灯附加电阻的选择	128
12.2	隔离开关的位置信号和闭锁回路	129
12.2.1	隔离开关的位置信号回路	129
12.2.2	隔离开关的闭锁回路	129
12.3	变电所信号回路	131

12.3.1	事故信号回路	132
12.3.2	预告信号回路	138
12.4	电压互感器回路	140
12.4.1	交流电网绝缘监察装置及接线图	140
12.4.2	电压互感器回路接线图	141
12.4.3	电压互感器二次电压切换回路	142
12.5	测量仪表的接线	144
12.5.1	互感器的极性及标志	144
12.5.2	功率表的接线	145
12.5.3	有功电度表的接线	148
第 13 章	继电保护回路	152
13.1	工厂配电线路的保护回路	152
13.1.1	定时限过电流保护	152
13.1.2	单相接地保护	158
13.1.3	低电压保护	162
13.1.4	工厂配电线路二次接线全图举例	164
13.2	变压器的保护回路	165
13.2.1	熔断器保护	166
13.2.2	瓦斯保护	167
13.2.3	电流速断和带时限的过电流保护	168
13.2.4	变压器的差动保护	170
13.2.5	变压器二次接线全图举例	174
13.3	电动机的保护回路	175
13.3.1	电流速断和过负荷保护	176
13.3.2	电动机的差动保护	176
13.3.3	电动机的低电压保护	177
13.3.4	高压电动机二次接线全图举例	178
第 14 章	变电所自动装置	180
14.1	备用电源自动投入装置	180
14.1.1	装置的作用和对装置的基本要求	180
14.1.2	APD 装置的原理接线图	181
14.2	自动按频率减负荷装置	183
14.2.1	自动按频率减负荷装置的作用和对装置的基本要求	183
14.2.2	自动按频率减负荷装置的接线	184
第 15 章	变电所直流系统接线图	185
15.1	蓄电池直流系统的运行方式和接线图	185
15.1.1	蓄电池直流系统的运行方式	185
15.1.2	蓄电池组直流系统的接线图	186

15.1.3	电压监察装置	188
15.2	直流系统绝缘监察装置	188
15.3	硅整流电容储能直流系统	192
15.3.1	硅整流电容储能直流系统接线图	193
15.3.2	电容器组检查装置	194
15.3.3	储能电容器组容量的选择	195
第 16 章	同步电动机晶闸管集成励磁装置和可编程序控制器	196
16.1	同步电动机晶闸管集成励磁装置	196
16.1.1	励磁主回路的工作原理	197
16.1.2	直流电源	197
16.1.3	自动投励控制电路	199
16.1.4	移相触发控制电路	202
16.1.5	给定信号	207
16.1.6	灭磁电路	207
16.1.7	失步保护	209
16.2	可编程序控制器控制线路	211
16.2.1	概述	211
16.2.2	可编程序控制器的基本结构和分类	211
16.2.3	可编程序控制器的编程语言	213
16.2.4	梯形图和基本指令	214
16.2.5	梯形图编程	219
第 17 章	安装接线图	225
17.1	安装接线图的绘制原则	225
17.1.1	屏面布置图的绘制	225
17.1.2	端子排图	225
17.1.3	屏内元件之间连接的表示方法	227
17.2	绘制安装接线图举例	229
附录 A	常用电气图形符号	231
附录 B	电气工程及电气设备常用基本文字符号	239
附录 C	电气工程常用辅助文字符号	246
附录 D	常用电气设备、元件文字符号新旧对照表	249
附录 E	发电厂与变电所电路图上小母线文字符号	251
附录 F	下标文字符号	252
参考文献		254

第 1 章 电工学基础知识

1.1 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。

1.1.1 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，V；

R ——电阻， Ω ；

I ——电阻中的电流，A。

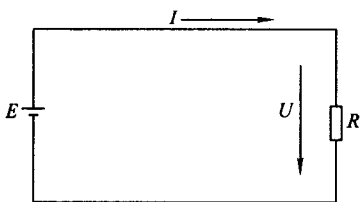


图 1-1 电阻电路

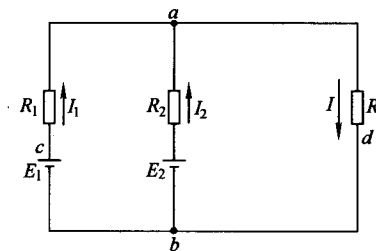


图 1-2 有节点和支路的电阻电路

式 (1-1) 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式 (1-1) 相同。

1.1.2 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交会点叫节点，如图 1-2 中的 a 点或 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 $abca$ 、 $adba$ 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

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

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 ”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

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

式(1-8)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 1.2 节), 用公式表示为

$$\Sigma \dot{I}_{\lambda} = \Sigma \dot{I}_{\text{出}} \quad (1-9)$$

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

1.1.3 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, W;

U ——电路两端的电压, V;

I ——电路中通过的电流, A。

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

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

1.2 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。

1.2.1 单相正弦交流电及其三要素

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 和 β 是直角三角形的两个内角。对 α 角来说， AC 边为邻边， 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 的大小改变时， AC 和 BC 两边的长度都随之改变。直角三角形 BC 边与 AB 边的比值称为 α 的正弦函数，用符号 $\sin\alpha$ 表示。 $\sin\alpha$ 的值随着 α 的大小而变化，表 1-1 列举的数值可以看出 $\sin\alpha$ 与 α 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。

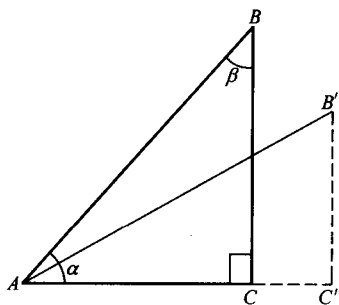


图 1-3 正弦函数的定义

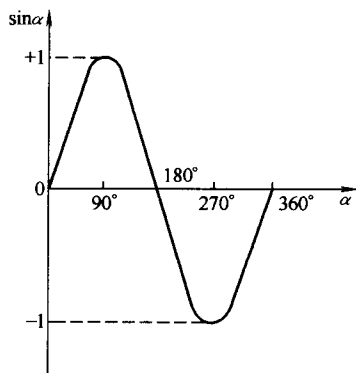


图 1-4 正弦曲线

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 的余弦函数，用符号 $\cos\alpha$ 表示。 $\cos\alpha$ 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 表示相角变化的速度，称为角频率，单位是弧度/秒 (rad/s)。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

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

通常称式 (1-15) 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

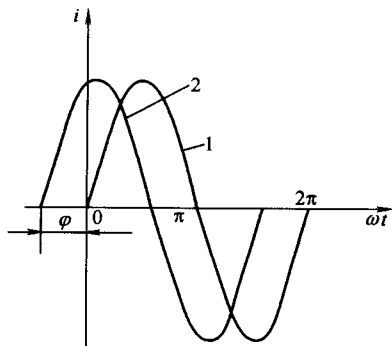


图 1-5 正弦电流波形图

图，图 1-5 中曲线 1 为式 (1-15) 所表示的正弦交流电流的波形图。

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。我国电力系统的标准频率定为 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 1s 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

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

正弦函数值的变化范围是从 -1 到 $+1$ ，所以式 (1-15) 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。

式 (1-15) 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 为初相角，又称初相位，是时间为零时正弦交流电的相角。式 (1-17) 是正弦交流电流的一般瞬时表达式，式 (1-15) 是式 (1-17) 的特殊情况，即 $\varphi=0$ 。图 1-5 中曲线 2 为式 (1-17) 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映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

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

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

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 $i_2 \varphi$ ，或者说 i_2 滞后 $i_1 \varphi$ 。如果两个正弦交流电的相角差为零，则称它们为同相。

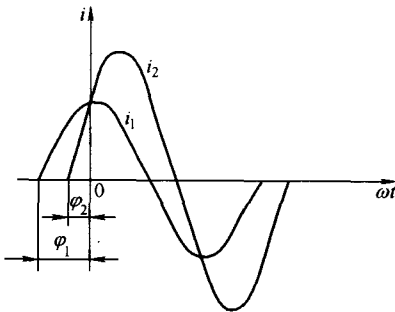


图 1-6 两个初相位不同的正弦电流

通常称最大值、角频率和初相位为正弦交流电的三要素。

1.2.2 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。

1.2.3 正弦交流电的相量表示法

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。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，用作图法求两者之和的方法是：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，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 \vec{OC} 为向量 \vec{OA} 与 \vec{OB} 之差，即 $\vec{OC} = \vec{OA} - \vec{OB}$ 。

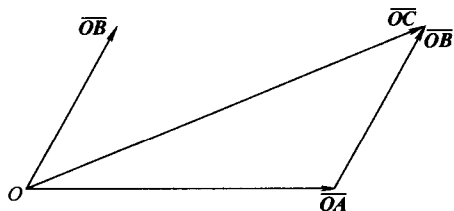


图 1-7 两个向量相加

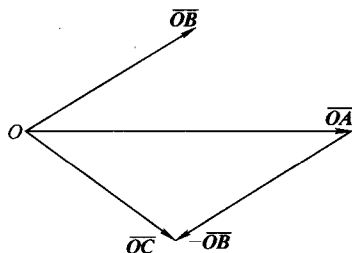


图 1-8 两个向量相减

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，正弦交流电用向量表示，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

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

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

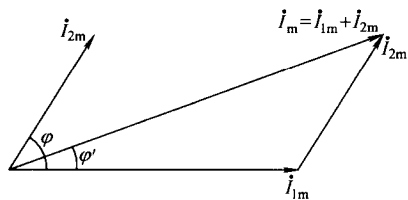


图 1-9 两个正弦交流电流相量相加

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

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

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简捷有效的方法，在电工技术中得到广泛的应用。

1.3 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。

1.3.1 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，见式 (1-1)。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焦耳-楞次定律的内容，见式 (1-11)~式(1-14)。所以，掌握了欧姆定律和焦耳-楞次定律，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 分别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。

焦耳-楞次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。

1.3.2 电容在电路中的作用

任何两块金属导体，中间用空气或其他绝缘材料隔开，就形成一个电容器。电容器是一