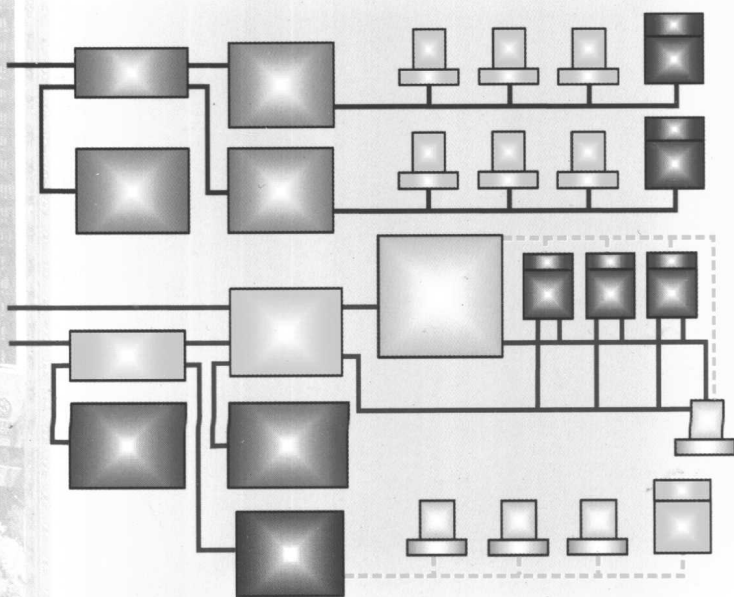


JIANZHU DIANQI JISHU
YU YINGYONG ■

建筑电气

技术与应用

张 建 主编
张志荣 主审



人民交通出版社

建筑电气技术与应用

Jianzhu Dianqi Jishu Yu Yingyong

张 建 主 编

原 野 副 主 编
忻 龙 彪

张志荣 主 审

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书比较系统地介绍了电路基本理论、三相正弦交流电路的分析和应用、低压电器的应用、电力变压器、电动机的构造和基本原理、低压供配电系统、电气照明技术、建筑防雷与安全用电、电气工程识图基本知识、智能建筑基本概念、建筑弱电工程技术基础、建筑设备自动化系统和楼宇计算机经营管理系统等内容。

本书主要是为了满足建筑类工科院校非电专业学生学习电工基本理论,以及适应智能建筑对建筑类人才的要求编写而成,可作为建筑类院校各非电专业原电工学教材的改进本,亦可作为有关技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

建筑电气技术与应用/张建主编. —北京:人民交通出版社, 2001. 9
ISBN 7-114-04073-3

I. 建... II. 张... III. 房屋建筑设备:电气设备
IV. TU85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 067177 号

建筑电气技术与应用

张 建 主编

张志荣 主审

正文设计:孙立宁 责任校对:戴瑞萍 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京明十三陵印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:17.75 字数:442 千

2001 年 10 月 第 1 版

2001 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—3000 册 定价:34.00 元

ISBN 7-114-04073-3
TU·00085

前 言

进入 21 世纪, 信息时代已经向我们走来, 其支撑技术主要包括电子计算机技术、自动控制技术和通信技术。电气技术作为这些支撑技术的基础并与之有机地结合和渗透, 已成为现代科学技术的重要组成部分, 并广泛应用于工农业生产、科学研究、国防建设、医疗卫生和人们的日常生活中。

电气技术及其应用作为建筑类高等工科院校的一门技术基础课程, 必须与工程实践相结合。智能建筑——为人们提供良好的信息环境和办公支持系统, 创造舒适、温馨、安全和节能的办公和生活环境, 已成为 21 世纪建筑业的发展方向。智能建筑是涉及建筑、结构、暖通、空调、给排水、变配电和弱电诸多专业的大系统工程, 各有关专业的建设者必须通力合作才能建起真正意义上的智能建筑。本书正是为建筑类院校各非电专业学生学习电工基本理论和解决工程实践中遇到的问题而编写。

全书分为“电工基础理论及应用”和“智能建筑基础”上、下两篇, 共 11 章。上篇包括电路基本理论、低压电器与电机、低压供配电系统、电气照明、电气工程识图; 下篇包括智能建筑概论、建筑电气弱电工程技术、建筑设备自动化系统、楼宇计算机经营管理系统等。

本书由张建主编, 忻龙彪、原野副主编。参加执笔的人员有: 柯博林 (第 1 章)、张建 (第 2 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章)、原野 (第 3 章、第 4 章)、忻龙彪 (第 5 章、第 7 章、附录)、王踪泽 (第 6 章)、杨晓晴 (第 11 章)。全书由张志荣副教授主审, 并做了大量工作, 在此表示感谢。同时, 衷心感谢本书所有参考文献的作者。

本书是结合编者教学、科研和工程实践的经验编写而成。由于水平有限、时间仓促, 疏漏之处在所难免, 恳请各位读者指正。

张 建

2001 年 7 月 28 日

目 录

上篇 电工基础理论及应用

第 1 章 建筑电气基础知识	(1)
1.1 电路模型及欧姆定律	(1)
1.2 基尔霍夫定律	(4)
1.3 单相正弦交流电	(7)
1.4 理想元件上的正弦交流电路.....	(15)
1.5 电阻、电感与电容元件串联的交流电路.....	(21)
1.6 功率因数的提高.....	(24)
1.7 三相电路.....	(26)
第 2 章 低压电器与电机	(35)
2.1 常用低压电器.....	(35)
2.2 磁场与磁路.....	(40)
2.3 电力变压器.....	(49)
2.4 交流电动机.....	(57)
第 3 章 低压供配电系统	(79)
3.1 城市电网概述.....	(79)
3.2 供电质量与供配电系统的设计原则.....	(81)
3.3 计算负荷的确定.....	(87)
3.4 低压配电系统.....	(93)
第 4 章 低压配电线路	(96)
4.1 导线和电缆截面的选择.....	(96)
4.2 室内低压配电线路的敷设.....	(99)
4.3 室外低压架空线路的敷设	(110)
4.4 室外低压电缆线路的敷设	(112)
第 5 章 电气照明	(115)
5.1 照明基本知识	(115)
5.2 电光源	(118)
5.3 灯具	(120)
5.4 照度标准和照度计算	(124)
5.5 照明供电系统	(127)

5.6 室外照明基础	(133)
第6章 建筑物防雷与安全用电	(135)
6.1 雷电基础知识与防雷装置	(135)
6.2 建筑物的防雷分类及保护措施	(137)
6.3 安全电压及变压器中性点运行方式	(140)
6.4 保护接地与保护接零	(143)
6.5 共用接地	(145)
第7章 建筑电气工程识图	(148)
7.1 基本知识	(148)
7.2 识读电气工程图	(150)
7.3 照明工程图的识读	(150)
7.4 动力工程图的识读	(153)
7.5 电气系统图的识读	(155)
7.6 接地工程图的识读	(156)

下篇 智能建筑基础

第8章 智能建筑概论	(158)
8.1 智能建筑的定义	(158)
8.2 智能建筑的系统构成	(158)
8.3 智能建筑的主要功能及特点	(164)
8.4 智能建筑的系统集成	(165)
第9章 建筑电气弱电工程技术	(169)
9.1 概述	(169)
9.2 计算机控制技术	(169)
9.3 现代通信技术	(174)
9.4 中央管理计算机与 UPS	(180)
9.5 综合布线系统	(186)
第10章 建筑设备自动化系统	(195)
10.1 BAS 概述	(195)
10.2 建筑设备监控系统	(196)
10.3 建筑消防报警装置	(210)
10.4 安全防范系统	(221)
第11章 楼宇计算机经营管理系统	(241)
11.1 计算机系统	(241)
11.2 计算机网络	(245)
11.3 常用局域网	(250)
11.4 办公自动化系统	(252)
11.5 会议电视系统	(262)
附录	(266)
参考文献	(276)

上篇 电工基础理论及应用

第1章 建筑电气基础知识

1.1 电路模型及欧姆定律

电路是电流的通路，是为了完成某一任务、某种需要由某些电工设备或元件按一定方式组合起来的。

电路可以理解为电磁场理论的简化，电磁场理论问题是通过解微分方程（利用边界条件）来求解的，所以求解过程通常很复杂，为了使问题有一个简单的，基本正确的解，使问题简化，可以认为电磁场能量都集中在电路里。即由电磁场问题转化为电路问题。在本章的学习过程中我们认为电磁场能量都集中在电路中。

电路的结构和所能完成的任务是多种多样的，从结构上有简单与复杂之分，从电压值的大小上划分有强电和弱电之分，从电路工作频率划分有高频和低频之分，从电路信号是否连续来划分有模拟电路和数字电路之分，从电路的参数划分有集总参数与分布参数之分等。本章讲授的是电路的基本定律，典型的例子是电力系统，它的作用是实现电能的传输和转换，其中包括电源、负载和中间环节三个组成部分。其电路示意图如图 1.1a) 所示。

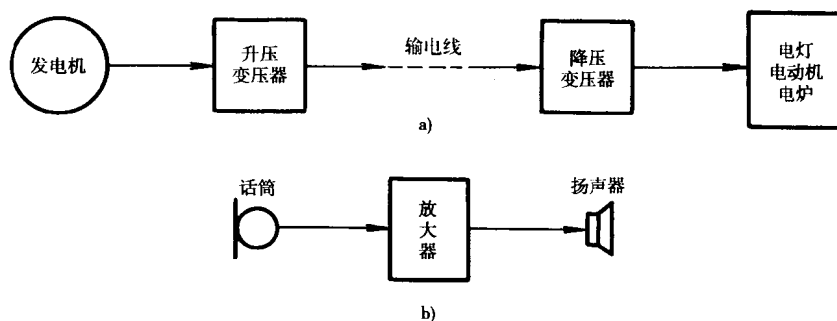


图 1.1 电路示意图

a) 电力系统; b) 扩音机

发电机是电源，是供应电能的设备，将其他形式的能量转换为电能。电灯、电动机、电炉等都是负载，是取用电能的设备，它们分别把电能转换为光能、机械能、热能等。变压器和输电线是中间环节，是连接电源和负载部分，它起连接和分配电能的作用。

电路的另一种作用是传递和处理信号，常见的例子如扩音机，其电路示意图如图 1.1b)

所示。先由话筒把语言或音乐信号转换为相应的电信号，而后通过电路传递到扬声器，把电信号还原为语言或音乐。由于由话筒输出的电信号比较微弱，不足以推动扬声器发音，因此中间还要用放大器来放大。信号的这种转换和放大，称为信号处理。在图 1.1b) 中，话筒是输出信号的设备，称为信号源，相当于电源，信号源输出的电信号（电压和电流）的变化规律是取决于所加的信息的。扬声器是接受和转换信号的设备，称为负载。

信号传递和处理的例子是很多的，如收音机和电视机，它们的接收天线（信号源）把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号，而后通过电路把信号传递和处理（调谐、变频、检波、放大等），送到扬声器和显像管（负载），还原为原始信息。

不论电能的传输和转换，或者信号的传递和处理，其中电源或信号源的电压或电流称为激励，它推动电路工作；由于激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析，就是在已知电路的结构和元件参数的条件下，讨论电路的激励与响应之间的关系。

1.1.1 电路模型

为了便于对实际电路进行分析和用数学语言描述，应将实际元件理想化（或称模型化），即在一定条件下突出其主要的电磁性质，忽略其次要因素，把它近似地看作理想电路元件。由一些理想电路元件所组成的电路，就是实际电路的电路模型，它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。在理想电路元件（下面理想两字常省略）中主要有电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等。

这些元件分别由相应的参数来表征。例如常用的手电筒，它是由电池、灯泡、开关和筒体构成，电路模型如图 1.2 所示。灯泡是电阻元件，其参数为电阻 R ；电池是电源，其参数为电动势 E 和内电阻（简称内阻） R_0 ；筒体是连接电池与灯泡的中间环节（还包括开关），其电阻忽略不计，认为是一无电阻的理想导体。

下面所分析的都是指电路模型，简称电路。在电路图中，各种电路元件用规定的图形符号表示。

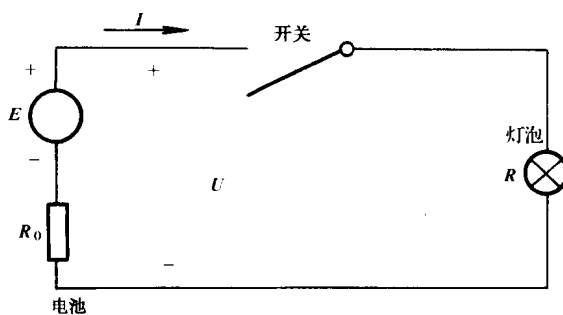


图 1.2 手电筒的电路模型

1.1.2 电压和电流的参考方向

电压和电流的方向，有实际方向和参考方向之分，要加以区别。

电流是由带电粒子有规律的定向运动而形成的，在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。电压是电场力将单位正电荷从一点移动到另外一点所作的功。

图 1.2 是简单的直流电阻电路，其中 E 、 U 和 R_0 分别为电源的电动势、端电压和内阻， R 为负载电阻，当开关闭合后电路中有电流 I 。电流 I 、电压 U 和电动势 E 是电路的基本物理量，在分析电路时必须要在电路图上用箭头或“+”、“-”来标出它们的方向或极性（如图中所示），才能正确列出电路方程。

电压和电动势都是标量，但在分析电路时，和电流一样，我们说它们具有方向。电压的方向规定为由高电位（“+”极性）端指向低电位（“-”极性）端，即为电位降低的方向。

电源电动势的方向规定为在电源内部由低电位（“-”极性）端指向高电位（“+”极性）端，即为电位升高的方向。

我们习惯上规定电流的方向（实际方向）为正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向。电流的方向是客观存在的，但在分析较为复杂的直流电路时，事先往往难于判断某支路中电流的实际方向；对交流而言，其方向随时间改变，在电路图上也无法用一个箭头来表示它的实际方向。为此，在分析与计算电路时，常可任意选定某一方向作为电流的参考方向，或称为正方向。所选的电流的参考方向并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与其参考方向一致时，则计算出的电流值为正值（图 1.3a）；反之，当电流的实际方向与其参考方向相反时，则计算出的电流值为负值（图 1.3b）。因此，在参考方向选定之后，电流之值才有正负之分。

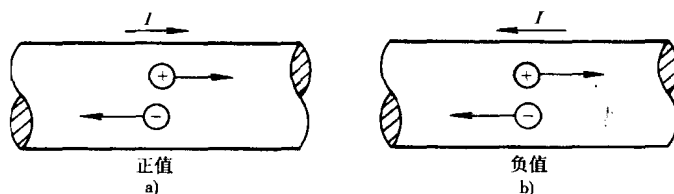


图 1.3 电流的参考方向

在电路图上所标的电流、电压和电动势的方向，一般都是参考方向，它们是正值还是负值，视选定的参考方向而定。例如在图 1.4 中，电压 U 的参考方向与实际方向一致，故为正值；而 U' 的参考方向与实际方向相反，故为负值。两者可写为 $U = -U'$ ，电流亦然， $I = -I'$ 。

电压的参考方向除用极性“+”、“-”表示外，也可用双下标表示。例如 a、b 两点间的电压 U_{ab} ，它的参考方向是由 a 指向 b，也就是说 a 点的参考极性为“+”，b 点参考极性为“-”。如果参考方向选为由 b 指向 a，则为 U_{ba} ， $U_{ab} = -U_{ba}$ 。电流的参考方向也可用双下标表示。

在国际单位制中，电流的单位是安[培](A)。当 1s (秒) 内通过导体横截面的电荷量为 1 库[仑](C) 时，则电流为 1A。计量微小的电流时，以毫安 (mA) 或微安 (μA) 为单位。1mA 是千分之一安 ($10^{-3}A$)， $1\mu A$ 是百万分之一安 ($10^{-6}A$)。在国际单位制中，电压的单位是伏[特](V)。当电场力把 1C 的电荷[量]从一点移到另一点所做的功为 1J (焦耳) 时，则该两点间的电压为 1V。计量微小的电压时，则以 mV (毫伏) 或 μV (微伏) 为单位；计量高电压时，则以 kV (千伏) 为单位。电动势的单位也是 V (伏特)。

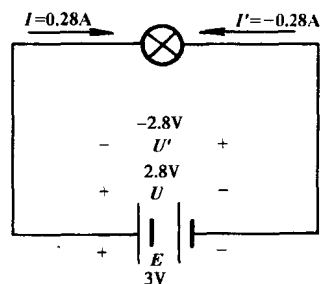


图 1.4 电压和电流的参考方向

1.1.3 欧姆定律

流过线性电阻的电流与线性电阻两端的电压成正比，这就是欧姆定律。欧姆定律是由德国物理学家欧姆 (1787~1854 年) 在实验中发现的，它是分析电路的基本定律之一。对图 1.5a) 的电路，欧姆定律可用下式表示：

$$R = \frac{U}{I}$$

式中 R 即为该段电路的电阻。由上式可见，当所加电压 U 一定时，电阻 R 愈大，则电流 I 愈小。所以，电阻具有对电流起阻碍作用的物理性质。

在国际单位制中，电阻的单位是欧[姆](Ω)。当电路两端的电压为 1V，通过的电流为 1A 时，则该段电路的电阻为 1Ω 。计量高电阻时，以千欧 ($k\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$) 为单位。

根据在电路图所选电压和电流的参考方向的不同，在欧姆定律的表示式中可带有正号或负号。当电压和电流的参考方向一致时 (图 1.5a)，则得：

$$U = RI \quad (1.1)$$

当两者的参考方向选得相反时 (图 1.5b) 和 (图 1.5c)，则得：

$$U = -RI \quad (1.2)$$

这里请注意，上两式中的正负号是根据电压和电流的参考方向得出的。此处，电压和电流本身还有正值和负值之分。

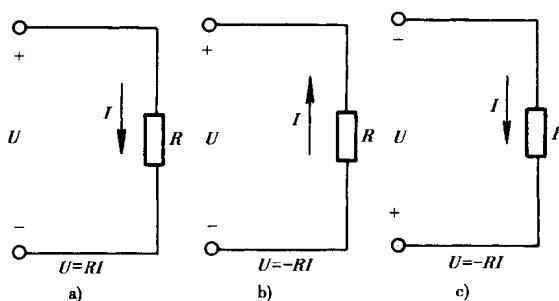


图 1.5 欧姆定律

1.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律与电压定律和欧姆定律一样，是电路分析中的重要定律。基尔霍夫电流定律应用于结点，电压定律应用于回路。

电路中的每一分支称为支路，一条支路流过同一个电流，称为支路电流。在图 1.6 中共有 3 条支路。

电路中 3 条或 3 条以上的支路相连接的点称为结点。电路中两结点间的电压相等。在图 1.6 所示的电路中共有两个结点：a 和 b。

回路是由一条或多条支路所组成的闭合电路。图 1.6 中共有 3 个回路：adbca, abca 和 ab-da。

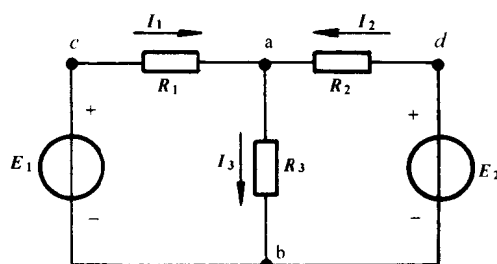


图 1.6 电路举例

1.2.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律是用来描述连接在同一结点上的各支路间的电流关系的。由于电流的连续性，电路中任何一点 (包括结点在内) 均不能发生堆积电荷的现象。因此，流入某一结点的电流之和应该等于由该结点流出的电流之和。

在图 1.6 所示的电路中，对结点 a (图 1.7) 可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.3)$$

也可将上式改写成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

即

$$\Sigma I = 0 \quad (1.4)$$

如果规定参考方向向着结点的电流取正号, 则背着结点的就取负号。则上式表示在任一瞬时, 一个结点上电流的代数和恒等于零。根据计算的结果, 有些支路的电流可能是负值, 这是由于所选定的电流的参考方向与实际方向相反所致。

基尔霍夫电流定律一般可应用于结点, 也可以把它推广应用于包围部分电路的任一假设的闭合面。如图 1.8 所示的闭合面包围的是一个三角形电路, 它有 3 个结点。应用电流定律可列出

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

上列三式相加, 便得

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

即

$$\Sigma I = 0$$

可见, 上述结果与把封闭面看成一个结点, 与应用基尔霍夫定律列方程的结果完全相同。在任一瞬时, 通过任一闭合面的电流的代数和也恒等于零。

例 1.1 在图 1.9 中, $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = -3\text{A}$, $I_3 = -2\text{A}$, 试求 I_4 。

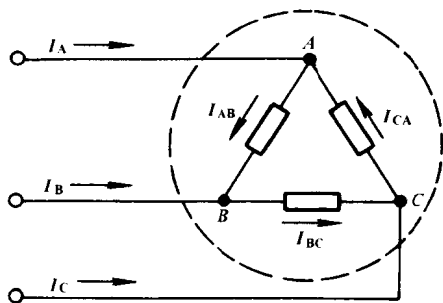


图 1.8 基尔霍夫电流定律的推广应用

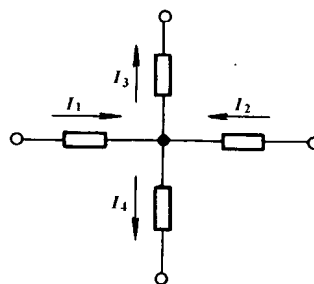


图 1.9 例 1.1 的电路

解 由基尔霍夫电流定律可列出

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

$$2 - (-3) + (-2) - I_4 = 0$$

得

$$I_4 = 3 \text{ (A)}$$

上列各式中, 电流前的正负号是由基尔霍夫电流定律根据电流的参考方向确定的, 括号内数字前的则表示电流本身数值的正负。

1.2.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律是用来确定回路中各段电压间关系的。将定量的正电荷以顺时针方向或逆时针方向沿回路循环一周，则其电位能变化为零。即在这个方向上的电位降之和应该等于电位升之和，回到原来的出发点时，该点的电位是不会发生变化的。此即电路中任意一点的瞬时电位具有单值性的结果。

以图 1.10 所示的回路（即为图 1.6 所示电路的一个回路）为例，图中电源电动势、电流和各段电压的参考方向均已标出。按照虚线所示方向循环一周，根据电压的参考方向可列出

$$U_1 + U_4 = U_2 + U_3$$

或将上式改写成

$$U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$$

$$\text{即} \quad \Sigma U = 0 \quad (1.5)$$

就是在任一瞬时，沿任一回路循环方向（顺时针方向或逆时针方向），回路中各段电压的代数和恒等于零。如果规定电位降取正号，则电位升就取负号。

图 1.10 所示的回路是由电源电动势和电阻构成的，上式可改写为

$$E_1 - E_2 - R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0$$

或

$$E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

即

$$\Sigma E = \Sigma(RI) \quad (1.6)$$

此为基尔霍夫电压定律在电阻电路中的另一种表达式，就是在任一回路循环方向上，回路中电动势的代数和等于电阻上电压降的代数和。在这里，凡是电动势的参考方向与所选回路循环方向相反者，则取正号，一致者则取负号。凡是电流的参考方向与回路循环方向相反者，则该电流在电阻上所产生的电压降取正号，一致者则取负号。

基尔霍夫电压定律不仅应用于闭合回路，也可以把它推广应用于回路的部分电路。现以图 1.11 所示的两个电路为例，根据基尔霍夫电压定律列出式子。

对图 1.11a) 所示电路（各支路的元件是任意的）可列出

$$\Sigma U = U_A - U_B - U_{AB} = 0$$

或

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

对图 1.11b) 所示电路可列出

$$E - U - RI = 0$$

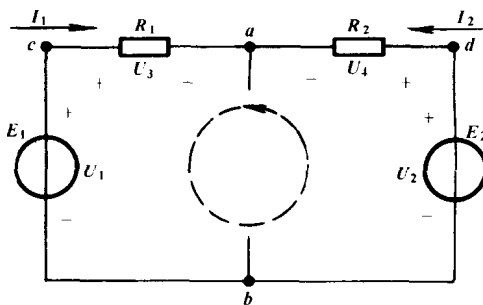


图 1.10 回路

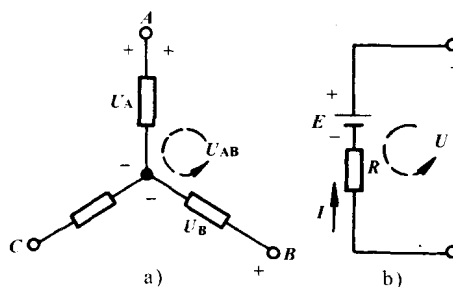


图 1.11 基尔霍夫电压定律的推广

或

$$U = E - RI$$

这也就是一段有源（有电源）电路的欧姆定律的表示式。

应该指出，图 1.6 所举的是直流电阻电路，但是基尔霍夫两个定律具有普遍性，它们适用于由各种不同元件所构成的电路，也适用于任一瞬时的电流和电压的变化规律。

1.3 单相正弦交流电

在现代工农业生产及日常生活中除了必须使用直流电的特殊情况外，绝大多数情况应用的都是交流电。所谓正弦交流电路，是指含有正弦电源（激励）且电路各部分所产生的电压和电流（响应）均按正弦规律变化的电路。交流发电机中所产生的电动势和正弦信号发生器所输出的信号电压，都是随时间按正弦规律变化的。在生产上和日常生活中所用的交流电，一般都是指正弦交流电。

交流电的优点如下：

- ①交流电可以方便地进行升压和降压，便于输送、分配和使用，而且输电线路上的消耗小。
- ②交流电机在结构上比直流电机简单，成本较低，便于维护。

1.3.1 正弦电压与电流

前面两节我们分析的是直流电路，其中的电流和电压的大小与方向（或电压的极性）是不随时间而变化的，如图 1.12 所示。

正弦电压和电流是按照正弦规律周期性变化的，其波形如图 1.13 所示。由于正弦电压和电流的方向是周期性变化的，在电路图上所标的方向是指它们的参考方向（正方向），即代表正半周时的方向。在负半周时，由于所有的参考方向与实际方向相反，则其值为负。图中的虚线箭头代表电流的实际方向；“+”、“-”代表电压的实际方向（极性）。

正弦量的特征表现在变化的快慢、大小和初始值 3 个方面，它们分别由频率（或周期）、幅值（或有效值）和初相位来确定。所以频率、幅值和初相位就称为确定正弦量的三要素。

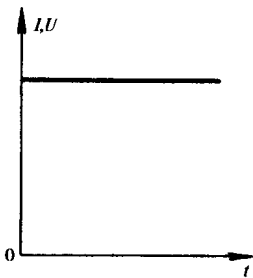


图 1.12 直流

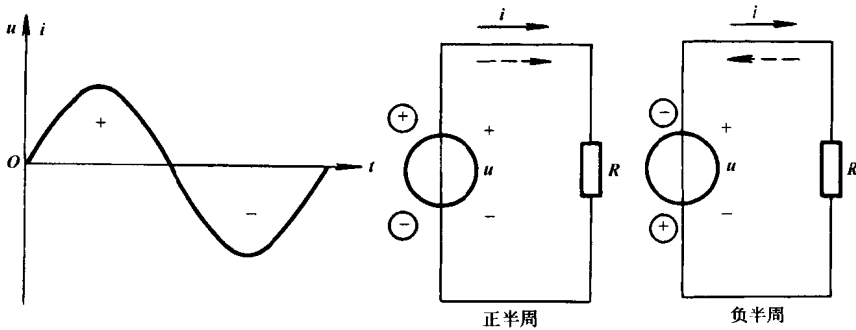


图 1.13 正弦电压和电流

1. 频率与周期

正弦量完成一次循环变化所需时间（秒）称为周期 T 。每秒内完成变化的次数称为频率 f ，它的单位是赫[兹](Hz)。

频率与周期互为倒数，即

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.7)$$

在我国和世界其他大多数国家都采用 50 Hz 作为电力标准频率，有些国家（如美国、日本等）采用 60Hz。这种频率在工业上应用广泛，习惯上也称为工频。

正弦量变化的快慢除用周期和频率表示外，还可用角频率 ω 来表示。因为一周内经历了 2π 弧度（图 1.14），所以角频率为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1.8)$$

它的单位是弧度每秒 (rad/s)。

上式表示 T 、 f 、 ω 三者之间的关系，只要知道其中之一，则其余均可求出。

2. 幅值与有效值

由于正弦量是随时间按正弦规律变化的，所以在每一时刻的值是不相同的。正弦量在任一瞬间的值称为瞬时值，用小写字母来表示，如 i 、 u 及 e 分别表示电流、电压及电动势的瞬时值。瞬时值中最大的值称为幅值或最大值，用带下标 m 的大写字母来表示，如 I_m 、 U_m 及 E_m 分别表示电流、电压及电动势的幅值。

图 1.14 是正弦电流的波形，它的数学表达式为

图 1.14 是正弦电流的波形，它的数学表达式为

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1.9)$$

有效值与电流的热效应有关，因为在电路中，电流常表现出其热效应。如果某一个周期电流 i 通过电阻 R （譬如电阻炉）在一个周期内产生的热量，和另一个直流 I 通过同样大小的电阻在相等的时间内产生的热量相等，那么这个周期性变化的电流 i 的有效值在数值上就等于这个直流 I 。

综上所述，有

$$\int_0^T Ri^2 dt = RI^2 T$$

由此可得有效值

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1.10)$$

式 (1.10) 适用于周期性变化的量，但不能用于非周期量。

当周期电流为正弦量时，即 $i = I_m \sin \omega t$ ，则

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}$$

因为

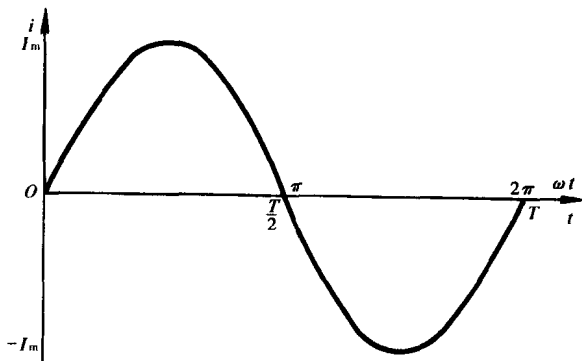


图 1.14 正弦波形

$$\begin{aligned}\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt &= I_m^2 \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{1}{2} I_m^2 \int_0^T dt - \frac{1}{2} I_m^2 \int_0^T \cos 2\omega t dt \\ &= \frac{T}{2} I_m^2 - 0 = \frac{T}{2} I_m^2\end{aligned}$$

所以

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \frac{T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (1.11)$$

3. 初相位

正弦量可用下式表示为

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1.12)$$

其波形如图 1.14 所示。它的初始值为零。

正弦量也可用下式表示为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.13)$$

其波形如图 1.15 所示。在这种情况下，初始值 $i_0 = I_m \sin \varphi$ ，不等于零。

上两式中的角度 ωt 和 $(\omega t + \varphi)$ 称为正弦量的相位角或相位，它反映出正弦量变化的进程。当相位角随时间连续变化时，正弦量的瞬时值随之作连续变化。

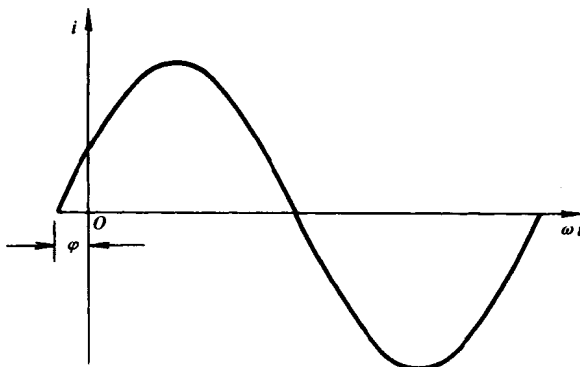


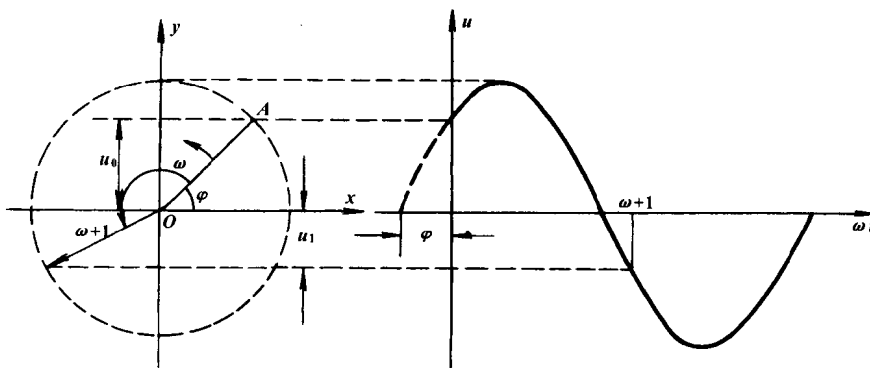
图 1.15 初相位不为零的正弦波形

1.3.2 正弦量的相量表示法

正弦量的各种表示方法是分析与计算正弦交流电路的工具。一个正弦量具有幅值、频率和初相位 3 个特征。这些特征可以用一些方法表示出来。一种方法是用三角函数式来表示，如 $i = I_m \sin \omega t$ ，这是正弦量的基本表示法；一种是用正弦波形来表示，如图 1.14 所示。

此外，正弦量还可以用相量来表示，从而使复杂的正弦三角函数的计算变成比较简单的复数计算。相量表示法的基础是复数，就是用复数来表示正弦量。

设有一正弦电压 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ ，其波形如图 1.16 右边所示，左边是一旋转有向线段 A，在直角坐标系中，有向线段的长度代表正弦量的幅值 U_m ，它的初始位置（ $t=0$ 时的位置）与横轴正方向之间的夹角等于正弦量的初相位 φ ，并以正弦量的角频率 ω 作逆时针



1.16 用正弦波形和旋转有向线段表示正弦量

方向旋转。可见，这一旋转有向线段具有相量的三个特征，故可用来表示正弦量。正弦量在某一时刻的瞬时值就可以由这个旋转有向线段于该瞬时时在纵轴上的投影表示出来。例如：在 $t=0$ 时， $u_0 = U_m \sin \varphi$ ；在 $t = t_1$ 时， $u_1 = U_m \sin(\omega t_1 + \varphi)$ 。

正弦量可用旋转有向线段表示，而有向线段可用复数表示，所以正弦量也可用复数来表示。论证如下。

令一直角坐标系的横轴表示复数和实部，称为实轴，以 $+1$ 为单位；纵轴表示虚部，称为虚轴，以 $+j$ 为单位。实轴与虚轴构成的平面称为复平面。复平面中有一有向线段 A ，其实部为 a ，其虚部为 b ，如图 1.17 所示，于是有向线段 A 可用的复数式表示为

$$A = a + jb \quad (1.14)$$

由图 1.17 可见，

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

是复数的大小，称为复数的模；

$$\varphi = \arctan \frac{b}{a}$$

是复数与实轴正方向间的夹角，称为复数的辐角。

因为

$$a = r \cos \varphi \text{ 和 } b = r \sin \varphi$$

所以

$$A = a + jb = r \cos \varphi + jr \sin \varphi = r(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (1.15)$$

根据欧拉公式

$$\cos \varphi = (e^{j\varphi} + e^{-j\varphi})/2 \text{ 和 } \sin \varphi = (e^{j\varphi} - e^{-j\varphi})/2j$$

式 (1.15) 可写为

$$A = r e^{j\varphi} \quad (1.16)$$

或简写为

$$A = r \angle \varphi \quad (1.17)$$

因此，一个复数可用上述几种复数式来表示。式 (1.15) 称为复数的直角坐标式；式 (1.16) 称为指数式；式 (1.17) 则称为极坐标式。三者可以互相转换。复数的加减运算可用直角坐标式，复数的乘除运算可用指数式或极坐标式。

如上所述，一个有向线段可用复数表示。如果用它来表示正弦量的话，则复数的模为正弦量的幅值或有效值，复数的辐角为正弦量的初相位。

为了与一般的复数相区别，我们把表示正弦量的复数称为相量，并在大写字母上打“·”。于是表示正弦电压 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ 的相量为

$$\dot{U}_m = U_m \angle \varphi \quad (1.18)$$

或

$$\dot{U} = U(\cos \varphi + j \sin \varphi) = U e^{j\varphi} = U \angle \varphi \quad (1.19)$$

$\dot{U}$ 是电压的有效值相量； $\dot{U}_m$ 是电压的幅值相量。相量只是表示正弦量，而不是等于正弦量。另外，如果与图 1.16 中的旋转有向线段对照的话，图 1.17 中的有向线段应是初始位置 (t

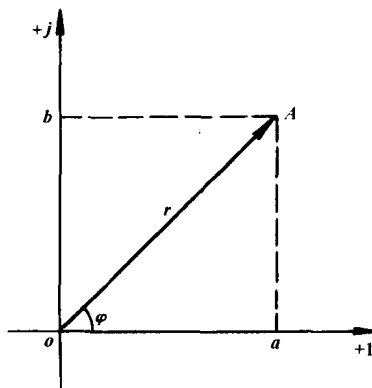


图 1.17 用复数来表示有向线段

$=0$ 时) 的有向线段, 表示它的复数只具有两个特征, 即模和辐角, 也就是正弦量的幅值 (或有效值) 和初相位, 如式 (1.18) 和 (1.19) 所表示的那样。由于在分析线性电路时, 正弦激励和响应均为同频率的正弦量, 频率是已知的或特定不变的, 可不必考虑, 只要求出正弦量的幅值或有效值和初相位即可。

按照各个正弦量的大小和相位关系用初始位置的有向线段画出的若干个的图形, 称为相量图。在相量图上能形象地看出各个正弦量的大小和相互间的相位关系。如用相量图表示则如图 1.18 所示。电压相量 $\dot{U}$ 比电流相量 $\dot{I}$ 超前 φ 角, 也就是正弦电压 u 比正弦电流 i 超前 φ 角。

只有正弦周期量才能用相量表示, 相量不能表示非正弦周期量。只有同频率的正弦量才能画在同一相量图上, 不同频率的正弦量不能画在一个相量图上, 否则就无法比较和计算。

由上可知, 表示正弦量的相量有两种形式: 相量图和复数式 (相量式)。

最后讨论一下复数式中 “ j ” 的数学意义和物理意义。

在图 1.19 中, 如以 $e^{j\alpha}$ 乘相量 $\dot{A} = r e^{j\varphi}$ 则得

$$r e^{j\varphi} e^{j\alpha} = r e^{j(\varphi+\alpha)} = \dot{B}$$

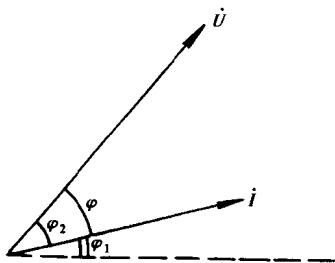


图 1.18 相量图

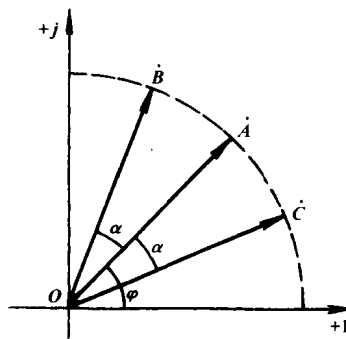


图 1.19 相量的超前与滞后

即相量 $\dot{B}$ 的大小仍为 r , 但与实轴正方向间的夹角为 $(\varphi + \alpha)$ 。可见一个相量乘上 $e^{j\alpha}$ 后, 即向前 (逆时针方向) 转了 α 角。就是相量 $\dot{B}$ 比相量 $\dot{A}$ 超前了 α 角。

同理, 如以 $e^{-j\alpha}$ 乘相量 $\dot{A}$, 则得

$$\dot{C} = r e^{j(\varphi - \alpha)}$$

即向后 (顺时针方向) 转了 α 角。就是相量 $\dot{C}$ 比相量 $\dot{A}$ 滞后了 α 角。

当 $\alpha = \pm 90^\circ$ 时, 则

$$e^{\pm j90^\circ} = \cos 90^\circ \pm j \sin 90^\circ = 0 \pm j = \pm j$$

因此任意一个相量乘上 $+j$ 后, 即向前旋转了 90° ; 乘上 $-j$ 后, 即向后旋转了 90° 。所以 j 称为旋转 90° 的算子。

可见, 如将实轴的单位相量 $+1$ 乘以算子 $+j$, 则该单位相量 $+1$ 就向前旋转 90° , 变为