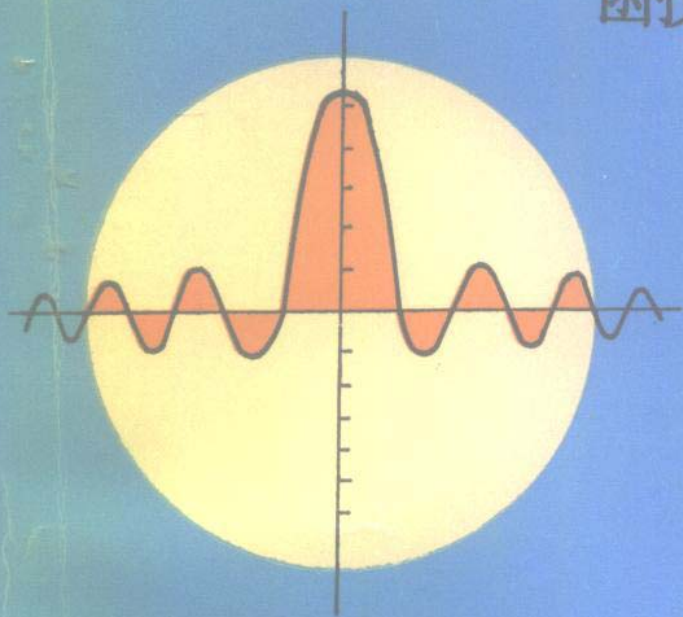


函授教材



电工原理 (上册)

● 张金龙 编著

同济大学出版社

(沪)204号

内 容 提 要

本书是根据1981年12月审订的《高等工业学校电工原理函授教学大纲(草案)》编写的电力、自动化专业函授教材。

全书共14章,分上、下两册出版。上册包括电路的基本概念、基本定理和分析方法,电路的等效变换及网络定理,网络的一般分析法和矩阵分析法,正弦交流电路和相量法,互感与谐振,三相电路,非正弦周期电流电路和信号的频谱;下册包括双口网络,线性电路的时域分析,线性电路的复频域分析,网络分析的状态变量法,分布参数电路,磁路和交流铁心线圈。

本书可作为全日制高等学校、电视大学和职工大学等同类专业的教学参考用书。

2765/20
责任编辑 张平官
封面设计 王永生

电工原理(上册)
(函授教材)

张金龙 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

发行所上海发行所发行

常熟市印刷二厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 18.25 字数 430千字

1994年3月第1版 1994年3月第1次印刷

印数 1—3500 定价 8.60元

ISBN7-5608--1283-X/TM·24

前 言

本书是根据 1981 年 12 月教育部在石家庄召开的高等工业学校函授教育工作会议审订的,供电力、自动化类专业试用的《高等工业学校电工原理函授教学大纲(草案)》编写的,并增加了后续课程需要而又难以安排在有关课程中的内容:磁路和交流铁心线圈。全书分上、下两册出版。

本书上册的编写在符合大纲要求的基础上,自成系统,尽量把一些问题和概念串接和归纳起来考虑,力求在不增加篇幅前提下,编得更明了易懂。例如在第一章中介绍了电路基本定律后一气呵成地引出了支路电流分析法(1b法);又如把线性电路中的重要概念之一——等效变换方法,列为专门一章(第二章)介绍;同样将网络的一般分析方法和矩阵分析法作为一章的前、后两部分编写,这样既对前一部分作了归纳提高,又容易让学生对两者作比较。另一与传统的电路编写不同点是,对同一问题的提出和介绍,力求拓宽读者的视野,例如在讨论了电路中谐振之后,作为归纳和引伸,恰当地提出了滤波函数的概念,又如第八章中,从信号变换的角度,来介绍非正弦周期电流,说明傅里叶级数只是完备正交函数集的一种。这样的编写既不妨碍读者对传统的电路内容的理解,又可增加其对学习内容的兴趣和追求。所有这些编写的考虑,目的是在传统的电路内容中,使读者得到更为完整的了解。

本书每章前都有内容提要、学习要求、重点和难点的说明,在每章末都有小结,可帮助读者整理总结已学的内容。读

者还可以通过每章、每节后所附有的练习、思考题和习题,对所理解和掌握各章内容的广度和深度作自我检查。在书中还设置了阶段测验题,以供函授生和自学读者检查学习效果。

编者衷心感谢同济大学函授与继续教育学院给予的出版机会,使多年来的教学讲义能汇编成书,同济大学熊炳焜教授严格而细致地审阅了原稿,提出了许多极其宝贵的修改意见,在此,一并致以谢意。

由于编者水平所限,书中一定有不少错误,殷切期望得到读者的批评指正。

编者

1993年于同济大学

目 录

前 言	1
第一章 电路的基本概念、基本定律和分析方法	1
§1-1 实际电路及其模型	2
§1-2 电流、电压及其参考方向	4
§1-3 电路中的功率和能量	11
§1-4 元件上电压和电流的关系	14
§1-5 电压源和电流源	33
§1-6 受控电源	40
§1-7 基尔霍夫定律	45
§1-8 支路电流法	55
小结	65
习题	67
第二章 电路的等效变换和电路定理	71
§2-1 无源两端网络的等效变换	72
§2-2 星形联接和三角形联接的等效互换	86
§2-3 电源的等效变换	92
§2-4 叠加定理	113
§2-5 替代定理	122
§2-6 戴维南定理和诺顿定理	124
小结	142
习题	145
第一次测验作业	150

第三章 电路的一般分析法和矩阵分析法	152
§3-1 节点电压法.....	153
§3-2 回路电流法.....	169
§3-3 网络图论.....	178
§3-4 关联矩阵.....	183
§3-5 节点分析法.....	189
§3-6 具有受控电源电路的节点分析.....	198
§3-7 基本回路矩阵和回路分析法.....	207
§3-8 基本割集矩阵和割集分析法.....	215
§3-9 特勒根定理.....	222
小结.....	228
习题.....	232
第四章 非线性电阻电路	236
§4-1 非线性电阻元件.....	237
§4-2 非线性电阻电路方程的编写.....	239
§4-3 非线性电阻电路的图解法.....	242
§4-4 非线性电阻电路的分段线性法.....	247
§4-5 小信号分析法.....	252
小结.....	257
习题.....	258
第二次测验作业.....	260
第五章 正弦交流电路和相量法	262
§5-1 交流电的基本概念.....	263
§5-2 正弦量.....	265
§5-3 正弦量的相量表示法.....	275
§5-4 电阻、电感和电容中的正弦电流.....	283
§5-5 基尔霍夫定律的相量形式.....	300

§5-6	RLO 串联电路、复阻抗	305
§5-7	RLO 并联电路、复导纳	315
§5-8	二端无源网络的等效复阻抗、等效复导纳	321
§5-9	正弦交流电路中的功率	332
§5-10	功率因数提高	346
§5-11	正弦交流电路的稳态计算	350
§5-12	最大功率传输条件	360
§5-13	电路中的对偶性	365
	小结	368
	习题	373
第六章	互感与谐振	378
§6-1	互感	379
§6-2	具有互感电路的计算	388
§6-3	空心变压器	399
§6-4	理想变压器	408
§6-5	串联谐振电路	422
§6-6	并联谐振电路	446
	小结	454
	习题	457
	第三次测验作业	461
第七章	三相电路	463
§7-1	三相电路	464
§7-2	对称三相电路的计算	474
§7-3	不对称三相电路的计算	481
§7-4	三相电路中的功率	488
	小结	499
	习题	501

第八章 非正弦周期电流电路和信号的频谱	504
§8-1 非正弦周期电流和电压.....	505
§8-2 周期函数分解与傅里叶级数.....	508
§8-3 非正弦周期电流电路的计算.....	520
§8-4 非正弦周期量的有效值、平均值和功率.....	528
§8-5 对称三相电路中的高次谐波.....	537
§8-6 傅里叶级数的指数形式、周期信号的频谱.....	545
§8-7 傅里叶变换、非周期信号的频谱.....	554
小结.....	558
习题.....	560
第四次测验作业.....	564

第一章 电路的基本概念、基本定律 和分析方法

本章是全书的基础。它介绍的实际电路模型、构成模型电路的基本元件和基本定律,是电路分析的基础。本章中有些内容在物理学中虽已学过,但在这里,我们从电路角度以及结合应用的观点加以较为严格的定义和系统的阐述,因此要求读者通过本章的学习,具有清楚的物理概念,能正确运用理论分析电路。由于本章内容贯穿全书,读者须很好掌握。其内容共有8节,包括以下五个部分:1. 电路的基本概念,基本物理量以及电压、电流的参考方向;2. 电路元件:无源元件、有源元件以及元件上的电压、电流关系;3. 电功率计算;4. 电路基本定律:基尔霍夫定律;5. 电路基本分析方法:支路电流法。

学习本章基本要求:

1. 了解电路的作用及其主要组成部分的功能;
2. 理解和掌握电流、电压参考方向,注意与电流、电压的实际方向相区别;
3. 熟练掌握电阻、电感和电容三个基本无源元件的电压和电流关系;
4. 理解并建立电压源和电流源的概念;
5. 充分理解并掌握四种受控电源的电压、电流关系,掌握含有受控电源的电路计算;
6. 熟悉、掌握基尔霍夫定律;
7. 掌握和应用支路电流法求解电路。

学习本章应重点理解:

分析与计算实际电路的电路方程是在其电路模型及理想元件基础上由电路两类约束:(1)电路结构(连接形式)约束,

即基尔霍夫定律；(2)电路中的元件约束，即元件上电压、电流关系来建立的。前一类约束与电路元件性质无关，仅取决于电路结构。要注意的是，电压、电流的参考方向假设不同，则得到的电路方程是有差别的，可见电路中参考方向假设的重要性，因此要求读者一开始就要养成分析电路时先假设好参考方向的习惯。

§ 1-1 实际电路及其模型

在现代工农业生产和日常生活中，广泛地应用着电能。为了达到不同的用电目的，人们用所需的电气器件组合成不同的实际电路，例如动力照明电路、自动控制电路、通讯电路等。尽管各种实际电路千变万化，但它们有一个共同点，就是都要依赖于电流的流通来传递电能和信号。因此在各种实际电路中，不论是复杂的电路或者是简单的电路，它们中至少应包含有产生、传送和使用电能或者信息的一些电气器件。也就是说电源、导线和负载是电路必不可少的三个最基本部分。由它们组成的闭合电流的通路称为电路。其作用是用来传送或转换电能，或者是用来实现信息的传递和处理。最简单的实际电路例子就是图 1-1 所示的干电池供电电路。

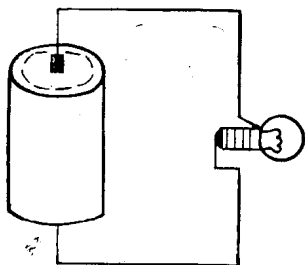


图 1-1 电池照明电路

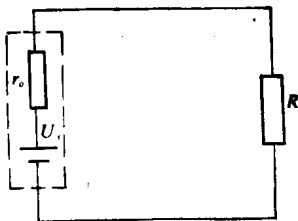


图 1-2 电池照明电路模型

实际电路中用到的电气器件种类繁多,性能各异,且随着科技发展,新器件不断涌现,要对这样大量器件进行逐个分析和研究,在一门基础课程中不仅是不可能的而且也是不适当的。为了得到适合分析各种实际器件中所发生的电磁现象,我们引用了一些基本的理想化电路元件。所谓理想化电路元件,是指把实际器件中所发生的电磁现象,用科学抽象和概括出来的一种假想元件来描述。在每一种理想化的元件中只集中(集总)表示了电和磁的一种基本现象和性质。例如我们用理想电阻元件来表示消耗电能的特征,它的电路参数叫做电阻 R ;用理想电感元件来表示储存磁场能量的特征,其参数叫做电感 L ;而用理想电容元件来表示储存电场能量的特征,参数叫做电容 C ,同样可以用理想的电压源和理想电流源来反映电源。因此理想化元件也就是集中(或集总)参数元件。本章中将陆续讨论这些理想元件的定义和性质。

实际电气器件,例如发电机、电动机、变压器、电感线圈以及二极管和晶体管等等,它们对外都有两个或两个以上的端子可供连接。故称为二端或多端电气器件。它们在不同运行条件下,所发生的电磁现象可以通过所谓黑箱法测得,即在实际器件端子上加以各种电压(或电流),测量其相应电流(或电压)从而得到黑箱内实际器件的外部特性,然后用理想电路元件的组合进行模型化,使得模型中出现的电磁现象与实际器件中反映出来的现象十分接近,这称为电气器件的建模。器件建模还有物理的方法,它是一门专门学科,由专门课程介绍。对于图 1-1 所示的简单实际电路,它的两个器件:一个灯泡和一个干电池,前者是把电能转换成光能,主要是耗能,可以用一集中参数元件 R 来表示,后者是供给电能的电源以及考虑其内部有发热的损耗,所以可用一个理想电压源 U_0 和

一个理想电阻元件 r 。串联来建模。如果忽略连接导线的电阻，用无阻连接线表示，这样用集中参数元件及其组合来模拟实际的电气器件，从而构成一个与实际电路相对应的电路称之为电路模型。图 1-2 所示的电路就是图 1-1 的电路模型。由集中参数元件构成的电路又称之为集中(集总)参数电路。

电气器件可以用理想元件建模，实际电路可以用电路模型近似，因此对理想元件和电路模型分析和研究也就为今后分析实际器件和电路奠定了基础。本书主要讨论理想元件及由其组成的电路模型。

§ 1-2 电流、电压及其参考方向

电流、电压、磁通和电荷是电路分析中四个基本变量，在物理学中已经学过，但用得较多的是电流和电压，为适应全书的需要，下面对它们加以复习和讨论。

一、电流

电荷的定向移动便形成了电流。导体中电流是自由电子的移动，但由于历史上的原因，习惯上把正电荷移动的方向定为电流的方向(实际上恰好与电子移动方向相反)，这一假设因对解决电工问题并无妨碍，故一直沿用至今。

电流的大小用电流强度来衡量。它的定义是：在单位时间内通过导体横截面的电量叫做电流强度，简称电流。用符号 i 表示，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

从物理意义上讲，电流强度 i 在数值上等于单位时间内通过该截面积电量的绝对值。

如果电流的大小和方向不随时间而改变，则这种电流称为直流电流。直流电流用大写字母 I 表示。对于直流电流来说，若以 Q 表示在时间 t 内通过导体横截面的总电量，则电流的大小为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

在国际单位制(SI制)中，电量 Q 的单位是库仑(C)，时间的单位用秒(s)，则电流的单位是安培，简称安(A)。导线横截面内每秒有1库仑的电量通过，就叫做1安。

$$1 \text{ 安} = \frac{1 \text{ 库仑}}{1 \text{ 秒}}$$

在电力工程中有时感到“安”的单位太小，可用千安(kA)表示，而在电子技术中，又嫌“安”的单位太大，则用毫安(mA)和微安(μ A)作单位。单位间的换算关系如下：

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}, 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}, 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

电流强度的定义没有给出电流的流向，但是在实际电路中电流是有确定流向的。而在电路分析计算时，往往事先并不知道它的流向，因此我们必须先假设电路中各元件中的电流流向，即假定参考正方向，如图1-3所示。当电流假定了参考方向后，它就成为代数量，有正、负之分。如果通过分析计算，求得电路中某一元件中的电流为正值，说明该元件中的实际电流方向与假设正方向一致，如图1-3a)所示；如果为负值，则实际电流方向与假设正方向相反，如图1-3b)所示。

要强调指出，假设参考正方向极为重要，不是可有可无的。因为对所有理想元件所建立的伏安性能方程(元件数学模型)

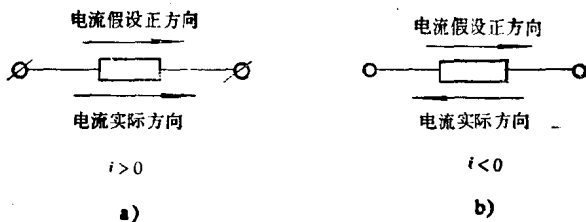


图 1-3 电流方向

以及根据电路拓扑结构(电路连接形式)所建立的电路方程(电路数学模型)都与假定参考正方向有关;脱离了假设正方向,就难以说明所得到的方程正确与否。所以在本课程学习开始之际,就应当养成在电路中每一元件上标好假设正方向的习惯。每一元件中的假设正方向可以任意选择,但一旦选好假设正方向后,就不再随意改动,并依据所设正方向来建立电路和元件的方程。

二、电压

它是描写电场对电荷做功大小的一个物理量。其定义是：单位正电荷从一点移动到另一点所作的功。用符号 u 表示,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

如果电荷 dq 由一点移动到另一点获得能量,说明电荷 dq 是由低电位点移到高电位点,电荷 dq 增加了电位能,电场力作负功,即由外来场(电源)做功;电荷失去能量,即电荷 dq 是由高电位点移到低电位点,电荷 dq 的位能减少,为该一段电路元件吸收了能量,电场力作了正功。

在大小和方向不变的恒定电场中,用直流电压来描,如果

移动正电荷 q 所作的功为 W ，则直流电压用大写字母表示为

$$U = \frac{W}{q}$$

在电路中可任选一个点作为参考点，假定参考点的电位能为零，即参考点为零电位点，例如以 o 点作为参考点，则电路中任一点，例如 a 点，到参考点的电压，定义为该点的电位，用符号 φ 表示，即

$$\varphi_a = U_{ao} = \frac{W_{ao}}{q} = \frac{W_a - W_o}{q} = \frac{W_a}{q} \quad (1-4)$$

式中 $W_o = 0$ ； W_a 表示 a 点相对于电路参考点所具有的电位能，而比值 $W_a/q = \varphi_a$ 为 a 点相对于参考点的电位。

引入电位后，电路中任两点间的电压可用该两点的电位差表示，例如 a 点到 b 点的电压为

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_{ao} - U_{bo} = \frac{W_a - W_o}{q} - \frac{W_b - W_o}{q} \\ &= \frac{W_a}{q} - \frac{W_b}{q} = \varphi_a - \varphi_b \end{aligned}$$

因此两点的电压也称之为该两点的电位差。

电路中的参考电位点可以任意选择，选择不同的参考点，电路中各点会有不同的电位值，但是任意两点间的电压（电位差）却不会因参考点选择不同而改变，这一性质称为电位的相对性和电压的绝对性。

在 SI 制中，能量 W 的单位是焦耳 (J)，电压的单位是伏特，简称伏 (V)，若 1 库仑电荷量在电路中从一点移动到另一点时，获得或者失去的能量为 1 焦耳，则该两点间就具有 1 伏的电压，即

$$1 \text{ 伏} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 库仑}}$$

在工程实际中有时嫌伏特单位太小或者太大时，同样可以采用千伏、或者毫伏、微伏表示。

单位间的换算关系如下：

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}, 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

前已说明，电压是描述电场力做功的一个物理量，它的实际方向应是由高电位指向低电位的，即电位降落的方向。但是在电路计算之前，各点实际电位值事先不能确定，同样要先假设电压的参考方向。电压参考方向可以用双下标表示，例如图 1-4 a) 中的 u_{ab} ，表示假设 a 点电位高于 b 点电位，或者用箭头表示，如图 1-4 b) 所示。如果由计算得到 $u_{ab} < 0$ 即负值，这表示实际电位高低与假设的恰好相反，即

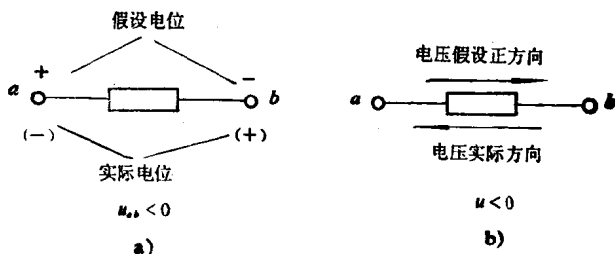


图 1-4 电压方向

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b < 0, \therefore \varphi_a < \varphi_b$$

因此实际电压方向为 u_{ba} 。

电压参考方向与电流参考方向假设一样，可以任意选择，因此电路中一个元件上的电压、电流假设参考方向有两种可能；一种是假设电压、电流参考正方向一致，即电压由假设高电位指向低电位，电流由假设高电位流向低电位，如图 1-5 a) 所示，称为关联参考方向；另一种是假设电压、电流参考方向

不一致,如图 1-5 b)所示。在关联参考方向时,只需标出电流或者电压的参考方向即可,如图 1-5 c)所示。在电路中通常在元件上采用关联参考方向,而在电源中电压、电流参考方向假设得相反。

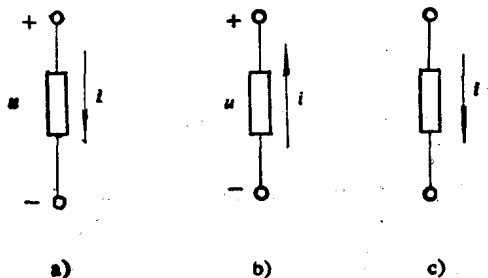


图 1-5 电压、电流参考方向

例 1-1 图 1-6 电路中 $U_{AF}=12\text{V}$, $U_{CF}=4\text{V}$, $U_{DF}=2\text{V}$, $U_{BC}=2\text{V}$, 参考点分别假设为 D 点和 B 点时, 求电位 φ_A 、 φ_B 、 φ_C 、 φ_D 、 φ_F 以及电压 U_{AB} 和 U_{AC} 。

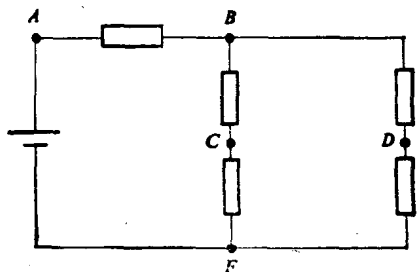


图 1-6 例 1-1 图

解 (1) D 点为参考点时: 根据电压等于电位差的概念以及参考点电位为零, 则有

$$\varphi_D = 0\text{V}$$

$$U_{DF} = \varphi_D - \varphi_F = 2\text{V}, \quad \therefore \varphi_F = -2\text{V}$$