

中等专业学校教材

电工基础

张洪让 编

高等教育出版社

中等专业学校教材

电 工 基 础

张洪让 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是按照国家教育委员会1987年3月颁布的中等专业学校工科电工类专业《电工基础教学大纲》，兼顾中专电力类专业特点编写的教材。经国家教育委员会中等专业学校电工基础课程组审查，同意作为教材出版。

全书共九章：电路的基本概念和基本定律，电阻性电路的分析计算，电容和电感，正弦交流电路，三相正弦交流电路，非正弦周期性电流电路，动态电路的全响应，均匀传输线，磁路和铁心线圈。书末附部分习题答案。

本书从中专生培养目标和实际水平出发，正确处理教材内容的更新；注重理论联系实际，精选有助于建立概念、掌握方法、联系实际的例题、习题；各章、节目的要求明确，条理清晰，论述严谨，文字简明通顺，便于教学。

本书供招收初中毕业生、学制四年的中专电工类专业使用。也可供成人中专、职业高中有关专业选用，并可供有关工程技术人员参考。

(京)112号

中等专业学校教材

电 工 基 础

张洪让 编

*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

复旦大学印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 15 字数 360,000

1990年4月第1版 1993年2月第4次印刷

印数38,251—56,440

ISBN7-04 002896-4/TM·146

定价 5.00 元

前 言

1986年10月,国家教育委员会委托全国中等专业学校电工基础课程组在西安开会,审定了适用于中专电工类各专业的《电工基础教学大纲》,国家教委于1987年3月批准颁布。大纲规定该课程教学总时数为156学时,其中有10学时供不同专业机动使用。1987年5月,原水利电力部中专发电厂及电力系统专业教学研究会电工课程组在武汉审定了中专发电厂及电力系统专业《电工基础教学大纲》,这一大纲供中专电力类各专业参考使用。

本书是按照国家教委颁布的课程教学大纲为电工类各专业编写的通用教材,同时兼顾电力类专业的特点。全书共九章:电路的基本概念和基本定律,电阻性电路的分析计算,电容和电感,正弦交流电路,三相正弦交流电路,非正弦周期性电流电路,动态电路的全响应,均匀传输线,磁路和铁心线圈。书中,注有“*”号的对称三相电路中的高次谐波一节及均匀传输线全章,是按10学时编写,供电力类专业使用的。

学生学习本课程,需具备数学课中的行列式、复数、微积分、傅里叶级数、常系数线性常微分方程和物理课中的电磁学等基础知识。

1988年4月,全国中专电工基础课程组在北京开会,审定了本书的编写大纲。同年7月,在全国中专电工基础课程组于北京举行的电工基础研讨会上,编者介绍了本书的编写大纲,与会同志提出了很多宝贵建议。

本书承西安交通大学邱关源教授主审,提出了很多宝贵意见。

1989年4月,全国中专电工基础课程组在杭州电力学校开会

审定本书。参加审稿会的有：西安交通大学邱关源，南京无线电工业学校李树燕、李明章，西安航空工业技术专科学校曹彦芳，上海电机制造技术专科学校袁兆熊，广东省邮电学校区嘉雄，内蒙古电力学校丁道鹏，杭州电力学校薛一均，重庆电力学校吴涛。重庆电力学校张步滋审阅了全稿，提出了书面意见。对以上同志，编者谨致衷心的感谢。

1979年4月人民教育出版社出版了由编者主编的中专《电工基础》教材（电力类专业适用。1983年后改由高等教育出版社印行），已在国内使用多年。此次新编本书，注意保留该书的风格特点，并力求：（1）结合中专水平，处理好电路内容的更新问题；（2）加强理论与实际结合，精选有助于建立概念，掌握方法，联系实际的例题、习题；（3）各章节目的要求明确，主次分明，条理清晰，便于教学。但编者水平有限，书中不妥及错误之处难免，殷切希望使用本书的同志们批评指正。

张 洪 让

1989.5.13于南京

电力专科学校

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
§ 1-1 电路和电路模型	1
§ 1-2 电流、电压	3
§ 1-3 电功率	11
§ 1-4 基尔霍夫定律	14
§ 1-5 电阻元件	18
§ 1-6 电压源和电流源	24
内容提要	33
习题	34
第二章 电阻性电路的分析计算	37
§ 2-1 电阻的串联、并联	37
§ 2-2 两种电源模型的等效互换	51
§ 2-3 星形联接与三角形联接电阻的等效互换	54
§ 2-4 支路法	58
§ 2-5 网孔法	61
§ 2-6 节点法	65
§ 2-7 叠加定理	70
§ 2-8 戴维南定理和诺顿定理	74
§ 2-9 受控源	82
§ 2-10 非线性电阻电路的图解法	88
内容提要	91
习题	92
第三章 电容和电感	99
§ 3-1 绝缘介质对电容的影响	99
§ 3-2 高斯定理	105

§ 3-3 平板电容器、圆柱形电容器的电容	111
§ 3-4 电容元件	113
§ 3-5 电容的并联、串联	117
§ 3-6 磁介质对电感的影响	120
§ 3-7 安培环路定律	127
§ 3-8 环形线圈、螺管线圈的电感	131
§ 3-9 电磁感应	132
§ 3-10 电感元件	134
内容提要	138
习题	140

第四章 正弦交流电路

§ 4-1 正弦量	143
§ 4-2 有效值	151
§ 4-3 正弦量的相量表示法	154
§ 4-4 相量形式的基尔霍夫定律	169
§ 4-5 正弦交流电路中的电阻、电感、电容	170
§ 4-6 RLC 串联电路	182
§ 4-7 RLC 并联电路	191
§ 4-8 复阻抗、复导纳及其等效互换	196
§ 4-9 正弦交流电路中的功率	202
§ 4-10 用相量法计算正弦交流电路	211
§ 4-11 交流电路中的实际器件	223
§ 4-12 串联谐振	225
§ 4-13 并联谐振	230
§ 4-14 有耦合电感的正弦交流电路	234
内容提要	245
习题	248

第五章 三相正弦交流电路

§ 5-1 对称三相正弦量	260
§ 5-2 三相电源和负载的连接	263
§ 5-3 三相电路中的电压和电流	266

§ 5-4 对称三相电路的特点和计算	274
§ 5-5 不对称星形联接负载	279
§ 5-6 三相电路的功率	285
§ 5-7 三相电流和电压的对称分量	289
内容提要	295
习题	297
第六章 非正弦周期性电流电路	301
§ 6-1 周期函数分解为傅里叶级数	301
§ 6-2 周期量的有效值、平均值	307
§ 6-3 非正弦周期性电流电路的计算	310
§ 6-4 非正弦周期性电流电路的功率	317
§ 6-5 对称三相电路中的高次谐波	319
*内容提要	327
习题	327
第七章 动态电路的全响应	330
§ 7-1 换路定律	331
§ 7-2 RC 电路的响应	336
§ 7-3 全响应及其分解	344
§ 7-4 RL 电路的响应	346
§ 7-5 分析一阶电路的三要素法	357
§ 7-6 RLC 串联电路的零输入响应	362
§ 7-7 运算法	374
内容提要	391
习题	392
*第八章 均匀传输线	398
§ 8-1 正弦稳态下的均匀线方程	399
§ 8-2 正弦稳态下均匀线方程的解	401
§ 8-3 均匀线的行波和副参数	407
§ 8-4 终端接特性阻抗的均匀线	415
内容提要	417
习题	419

第九章 磁路和铁心线圈	421
§ 9-1 铁磁性物质的磁化.....	421
§ 9-2 磁路及磁路定律.....	426
§ 9-3 恒定磁通磁路的计算.....	431
§ 9-4 交流铁心线圈.....	438
§ 9-5 电磁铁.....	451
内容提要	455
习题	457
部分习题答案	461

第一章 电路的基本概念和基本定律

电工基础课程是电工类专业的一门重要的技术基础课，其任务是使学生掌握电工基础理论及分析计算的基本方法，为学习后续课程及从事实际工作准备必要的基础。

电路理论是电工基本理论的一个主要部分，也是本课程的主要部分。

电路理论分析的对象是电路模型，而不是实际电路，本章将首先阐明这一点。这以后的内容分三部分：分析电路的一些物理量，基尔霍夫定律，几个基本电路元件。基尔霍夫定律及基本电路元件的电压、电流关系，是分析电路的依据，是必须掌握的重要内容。

§ 1-1 电路和电路模型

一、电路和电路模型

一些电气器件按照一定的方式组合起来，所构成的电流的通路，叫做**电路**(circuit)，也叫**网络**(network)。有各种形式的电路，就其主要功能而言，可以分为两类。一类电路的功能是传输、分配和使用电能，例如由发电机、变压器、输电线、电动机等主要设备构成的电力网就是。另一类电路的功能是传输、变换、贮存和处理电信号，例如扩音机中，输入的是较微弱的信号，通过电子管或晶体管组成的放大器，输出的是放大的信号。随着电流的流通，电路中进行着电能和其他形式能量的相互转换。

构成电路的电气器件的电磁性能一般是比较复杂的。例如实际的电阻器，有对电流呈现“阻力”的电阻性质，通过电流要消耗

电能；但电流又产生磁场，又将电能转变为磁场能储存着。为了便于数学分析，人们根据实际器件的主要电磁性能，引用一些由数学定义的理想电路元件，简称**元件(element)**。有些实际器件，在一定条件下，可以由一个元件模拟其电磁性能，作为它的**模型(model)**。例如白炽灯可以用一个理想电阻元件来模拟。有些实际器件，则需由一些元件的组合构成它的模型。元件或元件的组合，就构成了实际器件和实际电路的模型。电路理论中所研究的电路实际是电路模型的简称。电路理论及其分析方法，就是从物理实际建立电路模型，用数学手段分析电路模型，再回到物理实际。其实，这样的方法不仅应用于电路的研究，而且应用于各个学科。

电路理论中，引用的元件主要有电阻、电容、电感、理想电压源、理想电流源，这些元件都具有两个端钮(terminal)，叫做**二端元件**。本章及第三章将陆续介绍这些元件。后面将介绍的受控源元件、耦合电感元件，有不止两个端钮，叫做**多端元件**。

元件都用规定的图形符号表示，再用连线表示元件之间的电的连接，这样画出的图形叫**电路图**。电路图乃是用图形表达的实际电路的模型。

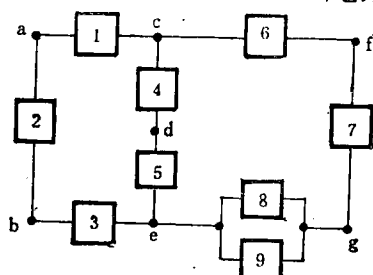


图 1-1

二、有关电路的一些名词

以图 1-1 所示电路为例，介绍一些有关电路的名词。图 1-1 中，方框符号表示没有说明具体性质的二端元件。

成串相连，中间没有分支的一些二端元件叫**串联(series connection)**的元件。两个端钮分别连在一起的一些二端元件叫**并联(parallel connection)**的元件。图 1-1 所示电路中，元件 1、2、3 串联，元件 4、5 串联，元件 6、

(串联, 元件 8、9 并联。

每一个二端元件叫做一个支路(branch), 两个及两个以上支路的连接点叫做节点(node)。图 1-1 电路共有九个支路, a、b、…g 七个节点。

支路还有其他引伸的定义。例如, 有时把几个二端元件串联成的组合作为一个支路。这样看来, 图 1-1 电路只有五个支路: 元件 1、2、3 组成一个支路, 元件 4、5 组成一个支路, 元件 6、7 组成一个支路; a、b、d、f 不再作为节点, 只有 c、e、g 三个节点。

由几个支路组成的闭合路径叫做回路(loop)。图 1-1 电路中, 元件 1、4、5、3、2 组成一个回路, 元件 8、9 组成一个回路, 元件 1、6、7、8、3、2 组成一个回路, 等等。

§ 1-2 电 流、电 压

一、电流

电流(current)和电压(voltage)是电路的基本物理量。

电子和质子都是带电的粒子, 电子带负电荷, 质子带正电荷。国际单位制(SI)中, 电荷量的单位为库仑(coulomb), 简称库, 符号为 C。每一个电子和每一个质子所带的电荷量相等, 约为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。1 C 约等于 6.28×10^{18} 个电子所带的电荷量。

带电粒子有秩序地运动, 就形成电流, 正电荷和负电荷的流动都形成电流。金属导体中的电流是自由电子在电场力作用下运动而形成的, 自由电子的运动方向与电场方向相反。电解液和电离了的气体中的正离子带正电, 负离子带负电, 在同一电场的作用下, 正离子顺电场方向运动, 负离子逆电场方向运动, 都形成电流。向相反方向运动的正、负电荷所生的效应是相同的。半导体中, 有带负电的自由电子和带正电的空穴, 自由电子和空穴的相反方向

的运动,形成半导体中的电流。

衡量电流强弱的量是**电流强度**,简称**电流**。某处电流的大小等于单位时间内通过某处的电荷量。用 i 表示电流,如果在极短时间 dt 内通过某处的电荷量为 dq ,则此时该处的

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

并规定正电荷运动的方向(即负电荷运动的相反方向)为电流的方向。

大小和方向不随时间变化的电流叫做**恒定电流**或**直流电流**,简称**直流**,其强度用 I 表示,并有

$$I = \frac{q}{t}$$

上式中的 q 是在时间 t 内通过的电荷量。

SI 中,电流的单位为安培(ampere),简称安,符号为 A。安培为 SI 的基本单位之一。 $1\text{C}=1\text{A}\cdot\text{s}$ (s 为秒的符号)。

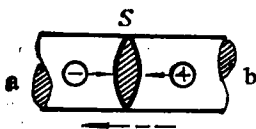


图 1-2

例 1-1 见图 1-2, 在 0.002s 内, 有负电荷 0.005C , 从 a 向 b 通过面 S , 同时

有正电荷 0.005C 从 b 向 a 通过 S 。试决定通过面 S 的电流的大小和方向。

解 向相反方向运动的正、负电荷的效应相同,这里相当于有 $0.0005+0.0005=0.001\text{C}$ 的正电荷由 b 向 a 通过 S , 所以通过面 S 的电流的大小为

$$\frac{0.001}{0.002} = 0.5\text{A}$$

方向如图中虚线箭头所示。

二、电压

随着带电粒子的运动,要发生能量的转换。例如正电荷在电

场力作用下运动, 电场力做了功, 使正电荷的电位能减少。从理论分析和试验都可以知道, 电荷在电场(库仑电场)中从一点移到另一点时, 它所具有的能量改变量只和这两点的位置有关, 而与移动的路径无关。 电压这个物理量就是据此定义, 用来衡量电场移动电荷而作功的能力的。电压用 u 表示, 两点间电压的大小等于单位电荷量从一点移到另一点时能量的改变量, 如电荷量为 dq 的电荷在电场中从一点移到另一点时能量的改变量为 dw , 则此两点间的电压的大小

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

并规定: 如果正电荷由 a 移到 b 时能量减少, 则此两点间电压的方向从 a 到 b。

SI 中, 能量的单位为焦耳(简称焦, 符号为 J), 电荷量的单位为库, 电压的单位为伏特(volt)。伏特简称伏, 符号为 V。

大小和方向都不随时间变化的电压叫恒定电压, 也叫直流电压, 用 U 表示。

SI 中的一些单位, 如安、伏、秒等, 在实用中有时太大或太小, 使用不便, 可用 SI 单位的十进制倍数单位和分数单位, 而在原单位上加词头表示之。例如:

$$2 \text{ 毫安(mA)} = 2 \times 10^{-3} \text{ 安(A)}$$

$$220 \text{ 千伏(kV)} = 220 \times 10^3 \text{ 伏(V)}$$

表 1-1 . 部分国际单位制词头

因数	词头名称		符号	因数	词头名称		符号
	原文(法)	中文			原文(法)	中文	
10^3	giga	吉	G	10^{-3}	milli	毫	m
10^6	mega	兆	M	10^{-6}	micro	微	μ
10^3	kilo	千	k	10^{-9}	nano	纳	n
10^{-2}	centi	厘	c	10^{-12}	pico	皮	p

等等。部分国际单位制词头如表 1-1 所示。

例 1-2 0.5C 的正电荷在电场中从 a 点移至 b 点, 能量增加 10J , 试决定 a 、 b 间电压的大小和方向。

解 a 、 b 间电压的大小为

$$\frac{10}{0.5} = 20\text{V}$$

正电荷沿电压方向移动时能量减少。这里, a 、 b 间电压的方向从 b 到 a 。

三、电流、电压的参考方向

电流、电压这两个物理量都有大小和方向两个方面。对电路中的一个支路, 其电流只可能有两个方向, 如支路的两个端钮分别为 a 、 b , 其电流的方向不是从 a 到 b , 就是从 b 到 a 。电压也是如此。为了分析计算的方便, 人们应用正负数的概念, 用一个数值同时表达电流(或电压)的大小和方向。以电压为例, 具体做法是, 在其可能的两个方向中任意选定一个方向, 作为决定其数值为正的标准, 叫做参考方向(reference direction), 如果该电压的方向与参考方向一致, 就在它的大小前面加正号, 即其数值为正; 如果该电压的方向与参考方向相反, 就在它的大小前面加负号, 即其数值为负。这样, 一个电压(或电流)的大小和方向便由一个有正负的数值同时表达出来了。例如, 见图 1-3, 客观存在的端钮 m 、 n 间电压的大小为 1V , 方向从 m 到 n , 如图中虚线所示。如果选择参考方向由 m 到 n , 如图 a 中实线箭头所示, 这个电压的数值 $u =$

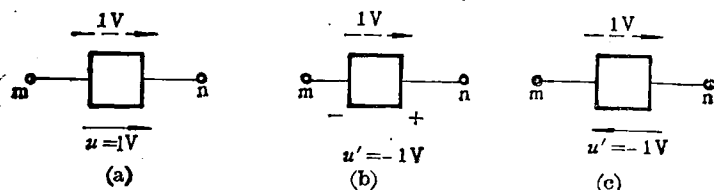


图 1-3

1V; 如果选择参考方向如图 b 所示, 则此电压 $u' = -1 \text{ V}$ 。

在电路图中, 电流、电压的参考方向都用实线箭头表示, 需要表示它们的方向时则用虚线箭头。电压的参考方向, 还可用 (+)、(-) 极性表示, 并叫做参考极性, 参考方向由“+”到“-”, 例如图 1-3c 中的 $u' = -1 \text{ V}$ 。

电压和支路的电流的参考方向也可用双下标表示, 例如 u_{ab} 表示的是选择参考方向由 a 到 b 时 a、b 间电压的数值。

此后, 如无声明, 电流、电压都是对应于所选参考方向而言的有正、负的数值。它们在各瞬间的值叫瞬时值, 符号用小写字母。表达瞬时值随时间变化规律的数学式叫解析式, 用 $i(t)$, $u(t)$ 等表示, 表达瞬时值随时间变化规律的图象叫波形。例如, 某电流的解析式

$$i_{ab}(t) = B e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0)$$

其中 e 为自然对数的底, B 、 τ 为常数, 它在 $t=0, \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau$ 时的瞬时值各为 $B, 0.3679B, 0.1353B, 0.04979B, 0.01832B$, 这是一个方向不变 (由 a 到 b), 大小随时间按指数规律衰减直至为零的电流, 其波形如图 1-4 所示。又如波形如图 1-5 所示的电压 $u_{cd}(t)$, 在 $t=1 \text{ ms}$ 时, $u_{cd}=5 \text{ V}$, 这时它的方向从 c 到 d; 在 $t=2.5 \text{ ms}$ 时, $u_{cd}=-2.5 \text{ V}$, 这时它的方向从 d 到 c。这是一个周期性变化的电压, 其周期 $T=4 \text{ ms}$, 其频率 $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 \times 10^{-3}} = 250 \text{ Hz}$ (赫)。

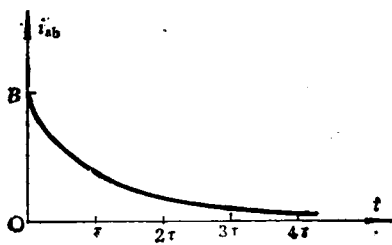


图 1-4

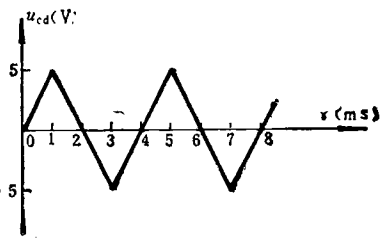


图 1-5

象图 1-5 那样的一个周期内平均值为零的周期性电压(或电流),叫交变电压(或电流)。

参考方向是电路理论中的一个基本概念,下面提出需要注意的几点:

(1) 电流、电压的方向是客观存在的,可能是随时间变化的。参考方向是人为选择的决定电流、电压数值为正的标准。参考方向一经选定,在整个分析计算过程中就必须以此为准,而不能变动。

(2) 由于电流、电压的正负值是对应于所选参考方向而言的,所以分析每一个电流、电压,都需要先选定它的参考方向,要逐步养成这一习惯。不说明参考方向,而说某电流的值为正或负,是没有意义的。

(3) 对同一电流(或电压),如果参考方向选择不同,结果是:瞬时值大小一样而异号即 $i_{ab} = -i_{ba}$, 解析式也是, 即 $i_{ab}(t) = -i_{ba}(t)$, 二个波形对 t 轴相反。

(4) 今后,一些结论是在一定的参考方向选择之下得出的,应用这些结论时必须遵照原先选择的参考方向。

支路的电流和端钮间的电压分别叫做支路电流和支路电压。一个支路的支路电流、支路电压可以选一致的参考方向,叫做**关联参考方向**(associated reference direction)。也可以选择不一致的参考方向,叫做**非关联参考方向**。本书中,如不加说明,都选择关联参考方向,这样,在电路图中,对一个支路,只需标出电流或电压的参考方向中的任一个就行了。

另外,参考方向的概念不仅应用于电流、电压。对电动势等,都可引用参考方向,用有正负的数值同时表达其大小和方向。

例 1-3 图 1-6 电路中, 已知 $u_2 = -4\text{ V}$ 、 $u_3 = -5\text{ V}$ 、 $u_5 = -7\text{ V}$ 、 $u_6 = 2\text{ V}$ 、 $u_7 = 4\text{ V}$, 试求 u_4 和 u_1 。