

高等学校试用教材

电路分析基础

上册

李瀚荪 编

人民教育出版社

高等学校试用教材
电路分析基础
上册
李瀚荪编

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
山东新华印刷厂德州厂印刷

1978年7月第1版
1978年12月第1次印刷
书号 15012·048 定价 0.94 元

前 言

本教材是根据1977年12月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议线性电路小组讨论修改的“电路分析基础”教材编写大纲编写的,供自动控制、计算机、半导体、通讯等电子类型各专业使用。作为上述各专业共同的基础技术课,本教材只包括电路分析的一些最基本的内容,重点放在与电子电路有关的基本理论与基本方法上。有些专业可以在这个基础上再开设第二门有关电路的课程,以适应进一步的需要。

如把一些标有*号的内容除外,本教材大致可用100学时讲完。实验课可另行单独开设,本教材未涉及这方面的内容。使用本教材时,应已学完微积分,并开始学习微分方程,从第六章开始就要用到微分方程。物理课的力学与电学部分也应学完。

在本教材中编入了较多的例题和习题,以便读者能较好地掌握基本内容,培养分析问题和解决问题的能力。有些基本方法是通过例题来说明的,在正文中并不作介绍。每节之后一般都有练习题,这些题一般比较简单,用以巩固所讲的基本内容。每章之后另有总习题,可供选用,也可供期末复习时选用。

国务院于1977年5月27日颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》第三条规定:“我国的基本计量制度是米制(即“公制”),逐步采用国际单位制”。根据这一规定,本教材采用国际单位制(SI单位)。

在编写时参考了国内、外一些近年来出版的教材。各章之后的参考书目主要开列了与该章内容有关的国外教材,对于大家已比较熟悉的国内教材则未列入。

本教材中所用专门名词均在正文中首次出现时附有英文，以方便读者阅读英文资料。

本教材分上、下两册出版，上册为直流分析及暂态分析，下册为正弦稳态分析及磁路。

本教材经教材审稿会议通过，由西安交通大学(主审单位)范丽娟、刘国柱两同志初审，部分兄弟院校代表参加集体审阅。参加审稿的学校有西安交通大学、合肥工业大学、北京邮电学院、北京工业大学、上海科技大学、南京工学院、北方交通大学、北京航空学院、西北电讯工程学院、南京邮电学院、长春地质学院和北京工业学院。审稿同志提供了许多宝贵意见和建议。有的学院和教师对本教材还寄来了书面意见。编者谨致以衷心的感谢。

限于编者的水平，且编写时间十分仓促，错误和不妥之处一定不少，希望读者提出宝贵意见，以便今后修改时参考。

编者

1978年5月

目 录

第一章 欧姆定律和基尔霍夫定律	1
§ 1-1 电路及电路模型	2
§ 1-2 电路分析的基本变量	3
§ 1-3 欧姆定律 电阻元件	14
§ 1-4 线性电阻与非线性电阻	19
§ 1-5 电压源	21
§ 1-6 基尔霍夫定律	28
参考书目	38
习题一	38
第二章 简单电路的分析	42
§ 2-1 电阻串联电路	43
§ 2-2 电阻并联电路	47
§ 2-3 电阻混联电路	51
§ 2-4 负载获得最大功率的条件	58
§ 2-5 电路中各点电位的计算	60
§ 2-6 电流源	67
§ 2-7 电源模型的等效互换	70
§ 2-8 含源支路的串联、并联和混联	76
§ 2-9 受控源	82
§ 2-10 T形网络和 Π 形网络的等效变换	89
参考书目	95
习题二	95
第三章 线性网络分析的一般方法	103
§ 3-1 应用基尔霍夫定律计算线性网络	104
§ 3-2 网孔分析法	110
§ 3-3 节点分析法	120
§ 3-4 弥尔曼定理	131
*§ 3-5 树的概念	136

	*§ 3-6 割集分析法	140
	*§ 3-7 回路分析法	148
	参考书目	154
	习题三	154
第四章	线性网络的几个定理	161
	§ 4-1 迭加定理	161
	§ 4-2 置换定理	171
	§ 4-3 代文宁定理	173
	§ 4-4 诺顿定理	189
	§ 4-5 应用代文宁定理分析受控源电路	191
	*§ 4-6 互易定理	197
	参考书目	202
	习题四	203
第五章	动态电路元件	209
	§ 5-1 电容元件	210
	§ 5-2 电容的电压——电流关系	212
	§ 5-3 电容的贮能	218
	§ 5-4 电感元件	221
	§ 5-5 电感的电压——电流关系	223
	§ 5-6 电感的贮能 电路的状态	225
	§ 5-7 实际电容器和电感器的模型	232
	参考书目	235
	习题五	235
第六章	一阶网络的分析	238
	§ 6-1 零输入响应	239
	§ 6-2 零状态响应	247
	§ 6-3 完全响应及其两种分解方式	256
	§ 6-4 电压、电流初始值的计算	266
	§ 6-5 三要素法	271
	§ 6-6 阶跃函数和阶跃响应	281
	§ 6-7 脉冲序列分析	290

参考书目	295
习题六	296
第七章 二阶网络的分析	304
§ 7-1 LC 电路中的自由振荡	304
§ 7-2 RLC 串联电路的零输入响应——非振荡情况	307
§ 7-3 RLC 串联电路的零输入响应——振荡情况	316
§ 7-4 RLC 串联电路恒定输入的完全响应	325
§ 7-5 RLC 串联电路的阶跃响应	327
§ 7-6 GCL 并联电路的分析	329
*§ 7-7 状态方程概述	333
*§ 7-8 状态方程的零输入解	342
参考书目	349
习题七	350
附录 § 7-8 的几点注释	354

第一章 欧姆定律和基尔霍夫定律

电在日常生活、工农业生产、科研以及国防等各个方面都有广泛的应用。在自动控制、计算机、通讯等各个电子技术领域中,使用许多电路来完成各种各样的任务,例如:扩音机的放大电路对语言等信号进行放大;计算机电路对输入的数据进行指定的数值计算;记忆电路存储信息留待以后处理;滤波电路把被噪音淹没了的信号提取出来,等等。各种实际电路都是由电阻器、电容器、半导体管、变压器、线圈等部件组成。为了能对电路进行计算、分析,我们必须把实际部件加以近似化、理想化,用一个足以表征其主要特性的“模型”来表示。模型由纯电阻、纯电容、纯电感等理想元件组成,这样,我们就可作出由这些理想元件构成的电路图,然后根据电路的基本规律进行研究。许多部件在一定的条件下可以用电阻性模型(即静态模型)来表示。最简单的如电阻器(碳膜电阻、线绕电阻)及灯泡、电烙铁等,可以看成是一个纯电阻元件。复杂的如半导体管以及许多数字集成电路、逻辑电路等也可以由纯电阻元件和理想电源等来表示。从另一方面说,我们要求电路完成的一些功能,如加法运算,可以用电阻性电路来实现。因此,电阻性电路是很重要的一类电路,而且就处理方法上说又是最简单的,我们首先学习这类电路的基本分析方法。

电阻性电路不一定是直流电路。作用于电路的电源也可以是随时间变化的信号源,但是,只要信号源的频率不太高,实际部件仍然可以用电阻性模型来表示,那末,在处理方法上和直流电路就没有什么不同。因此,我们以学习电阻性电路的直流分析为主。

在电阻性电路中,我们又以学习线性电阻性电路为主。电阻

值不随电压或电流而变的叫线性电阻。从计算机算法观点来看，线性电阻性电路的直流分析已成为其他类型电路分析的基础，例如，在使用计算机求解非线性电阻电路、含电容或电感电路时，都可以通过对一个直流线性电阻性电路* 进行一系列重复的计算得到解答。

电阻性电路共分为四章，在本章中将说明电路的基本定律，以后的三章即以此为基础，进一步阐述电阻性电路的分析和计算方法。本章还将对电路的一些基本概念进行复习，这些概念在物理课中已经学过，我们再次从电路分析的观点提出这些概念并加以必要的补充，以利今后的学习。本章学习的重点应放在基尔霍夫定律以及电阻元件的性能上。

§ 1-1. 电路及电路模型

我们日常生活中用的手电筒电路就是一个最简单的电路(*circuit*)。这个电路是由于电池、灯泡、连接导体(手电筒壳)组成的。干电池、灯泡、连接导体是组成这个电路的部件(*component*)，它们各有各的作用。干电池是一种电源(*source*)，在其正负极间能保持一定的电压，对电路提供电能；灯泡实际上是一个电阻器，由电阻丝制成，电流流过时能发热到白炽状态而发光，是用电的部件，称为负载(*load*)；连接导体可使电流构成通路。任何其他实际电路也都是由一些部件组成的。

人们设计制作某种部件是要利用它的主要物理性质，譬如说，制作一个电阻器是要利用它的电阻，即对电流呈现阻力的性质；制

* 这种电路称为“伴侣网络”(*companion network*)，非线性电阻电路的牛顿-拉夫森(*Newton-Raphson*)算法，一阶微分方程式的后向欧拉(*backward Euler*)积分算法，都属此类。

作一个电源是要利用它正负极间能保持有一定电压的性质；制作连接导体是要利用它的优良导电性能，使电流顺利流过。但是，事实上，不可能制造出只表现出其主要性质的部件，也就是说，不可能制造出理想的部件。譬如说一个实际的电阻器有电流流过时还会产生磁场，因而还兼有电感的性质；一个实际电源总有内阻，因而在使用时不可能总保持定值的端电压；连接导体总有一点电阻，甚至还有电感。这样就往往给分析电路带来困难。因此，我们必须一定的条件下对实际部件加以近似化，忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要性能的模式 (*model*) 来表示。譬如说，灯泡的电感是极其微小的，把它看作一个理想电阻元件是完全可以的；一个新的干电池，内阻和灯泡电阻相比可以忽略不计，把它看作一个电压恒定的理想电压源也是完全可以的；在连接导体很短的情况下，它的电阻完全可以忽略不计，可看作为理想导体。于是，这个理想电阻元件就构成了灯泡的模式，这个理想电压源就构成了干电池的模式，而理想导体则构成了连接导体的模式。

各种实际部件在一定条件下都可以求得它的模式，模式表征或近似地表征部件的性质和其中发生的物理现象。模式由一些理想元件构成。有些实际部件的模式较简单，只由一种理想元件构成，有些就复杂些，要由几种理想元件构成，如半导体管。那末，用来构成模式的有哪些理想元件呢？

实际部件的运用都和电磁现象有关，因此，有三种最基本的理想元件：只表示消耗电磁能、转换为其他形式能量的电阻元件；只表示电场现象的电容元件；只表示磁场现象的电感元件。此外，还有电压源、电流源等两种理想电源元件。这些元件都具有两个端钮，称为二端元件。理想二极管也是一种二端元件，用于电子器件的模式中。除二端元件外，还有四端元件(也叫耦合元件)，如受控源、理想变压器、互感器等。人们从客观实践中总结出这样少数几

种理想元件，用来构成实际部件的模型。以后我们将陆续讨论这些理想元件的性能，并将谈到如何用适当的模型来表示实际部件的问题。但半导体管的模型问题不在本课程的讨论范围之内，我们将直接使用半导体管的模型。

实际部件用模型表示后，就可绘出只由理想元件组成的电路图。各理想元件都用一定的符号来表示，例如，电阻元件用长条形符号表示，有的直流理想电压源可以用电池符号表示，理想导体（电阻为零的电阻元件）用线段表示。实际的手电筒电路可以画成如图 1-2 所示的电路图。今后我们研究的电路都是这种由理想元件构成的电路——电路模型，对电路模型加以分析就能予知实际电路的性能并能设计出更好的电路。为简便起见，今后我们将省略理想二字，元件都系指理想元件而言。

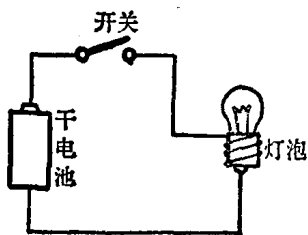


图 1-1 手电筒电路

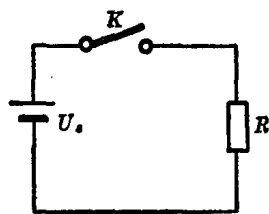


图 1-2 图 1-1 的电路图

§ 1-2. 电路分析的基本变量

在开始分析电路之前，我们先讨论一下用来描述电路的物理量。电子和质子都是带电的粒子，电子带负电荷，质子带正电荷。所带电荷的多少叫电量，在国际单位制(SI)中，电量的单位是库仑(国际代号 C)， 6.24×10^{18} 个电子所具有的电量等于 1 库仑。我们用符号 q 或 Q 表示电量。在分析电路时，我们更为关心的是带电

粒子有秩序的移动,即电流(*current*)。

我们把每单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,用以衡量电流的大小。电流强度常简称为电流,用符号 i 表示,即

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

如果在任一瞬间通过导体横截面的电量都是相等的,而且方向也不随时间变化,则这种电流叫做恒定电流,简称直流 (*direct current*, 简写作 *dc* 或 *DC*)。它的强度用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化,则称为交变电流,简称交流 (*alternating current*, 简写作 *ac* 或 *AC*)。

在国际单位制中,电流的单位是安培(中文代号为安,国际代号为 A)。安培是国际单位制的基本单位之一。这些基本单位是:米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(光强度)。其他物理量的单位均可由这些基本单位来表示,称为国际制导出单位,例如电量的国际制单位库仑可表示为 $1 \text{ 库} = 1 \text{ 安} \cdot \text{秒}$ 。

上面已经提到正电荷运动的方向就是电流的方向,但在实际问题中,电流的真实方向往往难以在电路图中标出。例如,交流电路中的电流,方向随时间变化,很难用一个固定的箭头来表示真实方向。即使在直流电路中,在求解较复杂电路时,也往往难以事先判断电流的真实方向。为了解决这样的困难,我们引用参考方向 (*reference direction*)这一概念。参考方向可以任意选定,在电路图中用箭头表示。我们规定:如果电流的真实方向与参考方向一致,电流为正值;如果两者相反,电流为负值。这样,我们就可利用电流的正负值结合着参考方向来表明电流的真实方向。例如,

-1A 表示正电荷以每秒一库仑的速率逆着参考方向箭头移动。在分析电路时,我们尽可先任意假设电流的参考方向,并以此为准去进行分析、计算,从最后答案的正、负值来确定电流的真实方向。显然,在未标示参考方向的情况下,电流的正负是毫无意义的。

参考方向并不是一个抽象的概念。当我们用磁电式电流表测量电路中的未知电流时,事实上首先就为未知电流选定了参考方向。我们都知道,电流表有两个端钮,一个标有“+”号,另一个标有“-”号,如图 1-3(a) 所示。当电流由“+”端流入电流表时,指针正向(顺时针方向)偏转,电流为正值;当电流由“-”端流入电流表时,指针反向偏转,电流为负值。这就是说,当我们把电表接入电路时,实际上就确定

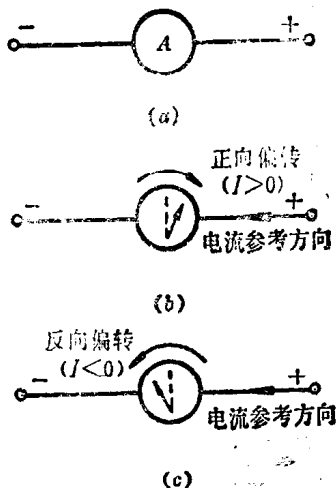


图 1-3 用电流表说明电流参考方向

了被测电流的参考方向是由电表的“+”端经过电表指向电表的“-”端的,如图 1-3(b)、(c) 所示。如把电表反接,就意味着为未知电流选定了另一个相反的参考方向。在测量时,如果电表指针正向偏转,电流为正值,说明电流的真实方向与参考方向一致,如图 1-3(b) 所示;如果指针反向偏转,电流为负值,说明电流的真实方向与参考方向相反,如图 1-3(c) 所示。

今后,电路图中所标的电流方向箭头都是参考方向箭头,不一定就是电流的真实方向。电流的参考方向又叫电流的正方向。

电路分析中用到的另一个重要物理量是电压(voltage)。

电荷在电路中流动,就必然有能量的交换发生。电荷在电路的一些部分(电源处)获得电能,而在另一些部分(如电阻处)失去

电能。当然，这种电能的获得或失去是和其他形式能量相互转化的结果。为便于研究问题，在分析电路时引用“电压”这一物理量。电压有时也叫做“电位差”，用符号 u 表示。电路中 a 、 b 两点之间的电压表明了单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量，即

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

其中 dq 为由 a 点转移到 b 点的电量，单位为库仑(C)； dw 为转移过程中，电荷 dq 所获得或失去的能量，单位为焦耳(J)。电压的单位为伏特(V)。这些单位都是国际制单位。

如果正电荷由 a 转移到 b ，获得能量，则 a 点为低电位，即负极， b 点为高电位，即正极。如果正电荷由 a 转移到 b ，失去能量，则 a 点为高电位，即正极， b 点为低电位，即负极。正电荷在电路中转移时电能的得或失体现为电位的升高或降落，即电压升或电压降。

按电压随时间变化的情况，电压可分为恒定电压与交变电压。如果电压的大小和极性都不随时间而变动，这样的电压就叫做恒定电压或直流电压，用符号 U 表示。

如同需要为电流规定参考方向一样，我们也需要为电压规定参考极性。电流的参考方向用箭头表示，电压的参考极性则在元件或电路的两端用“+”“-”符号来表示。“+”号表示高电位端，“-”号表示低电位端，如图 1-4 所示。根据公认的规定，当电压 U 为正值时，该电压的真实极性与所标的极性相同；当电压 U 为负值时，该电压的真实极性与所标的极性相反。在未标示电压参考极性的情

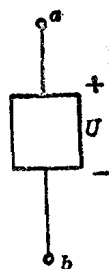


图 1-4 电压参考极性的表示方式，方框代表一个元件或一段电路

况下，电压的正负是毫无意义的。电压的参考极性也称为电压的参考方向或正方向。

和在电路图中为电流标示参考方向一样，在电路图中，对元件两端所标的电压参考极性也可以任意选定，不一定代表电压的真实极性，它们配合着电压的正值或负值，表明电压的真实极性。

综上所述，在分析电路时，我们既要为通过元件的电流假设参考方向，也要为元件两端的电压假设参考极性，彼此原是可以独立无关地任意假定的。但为了方便起见，我们常采用关联的(*associated*)参考方向：电流参考方向与电压参考“+”极到“-”极的方向一致，即电流与电压降参考方向一致，如图 1-5(a)所示。这样，在电路图上就只需标出电流的参考方向或电压的参考极性中任何一种，如图 1-5(b), (c)所示。

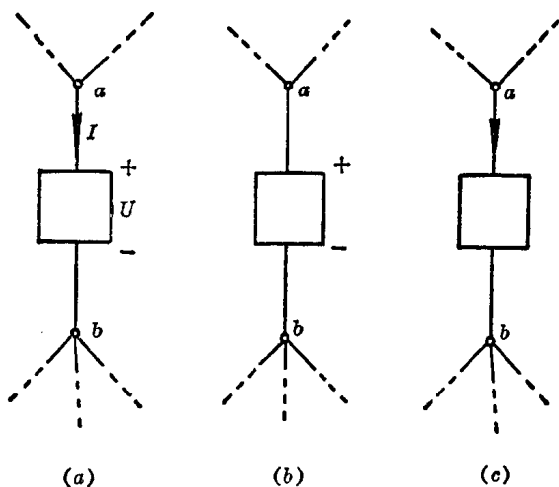


图 1-5 关联的参考方向

下面我们再谈一下电路分析中常用到的另一个物理量——功率(*power*)，它用符号 p 或 P 表示。设图 1-5(a) 所示方框为电路的一部分，它可能是电阻，也可能是电源，也可能是若干元件的组

合。我们采用关联的电压、电流参考方向如图中所示。设在 dt 时间内由 a 点转移到 b 点的正电量为 dq ，且由 a 到 b 为电压降，其值为 u ，则根据(1-2)式可知在转移过程中 dq 失去的电能为

$$dw = udq$$

失去电能，意味着电能转换为其他形式的能量，也就是说，这段电路消耗或吸收了电能。因此，单位时间内消耗的电能，即消耗的电功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt}$$

但
$$i = \frac{dq}{dt}$$

故得
$$p = ui \quad (1-3a)$$

在直流情况下，

$$P = UI \quad (1-3b)$$

根据(1-3)式，知道了某个元件或某段电路的电压和电流就可算得这个元件或这段电路的功率。如果采用关联的参考方向，则当算得的功率为正值时，表示这部分电路消耗功率；算得的功率为负值时，表示这部分电路产生功率，这功率供给电路的其余部分。

在国际单位制中，电压的单位为伏，电流的单位为安，则功率的单位为瓦特，简称瓦(W)。

以上我们复习了电路分析中要用到的几个物理量——电流、电压、电荷、能量和功率等，它们之间的关系分别如(1-1)、(1-2)和(1-3)等式所示。实际上，如果一个电路的各个电流和电压都已掌握，那末，这个电路的性能便完全确定。因此，我们把电流和电压作为电路的基本变量，是我们分析电路时主要的研究对象。电路图中所标电流的方向和电压的极性均为参考方向和参考极性，不一定是电流的真实方向和电压的真实极性。今后，在电路图中凡

未同时标电压、电流的参考方向时,均系采用关联的参考方向。

最后,谈一下辅助单位。我们已指出了一些物理量的国际制单位,如安、伏、秒等,但在实际应用中有时感到这些单位太大或太小,使用不便。我们便在这些单位前加上表 1-1 所示的词冠,用以表示这些单位被一个以 10 为底的正次幂或负次幂相乘后所得的辅助单位,例如:

$$1 \text{ 毫安(mA)} = 1 \times 10^{-3} \text{ 安(A)}$$

$$5 \text{ 微秒}(\mu\text{s}) = 5 \times 10^{-6} \text{ 秒(s)}$$

$$2 \text{ 千瓦(kW)} = 2 \times 10^3 \text{ 瓦(W)}$$

等等。显然,写成 1mA 要比写作 $1 \times 10^{-3}\text{A}$ 方便。这些词冠是经常使用的,必须记住。顺便指出,按照“国际标准化组织”推荐的使用方法,不允许用两个以上国际制词冠并列而成的组合词冠。我国常用的“毫微”、“微微”、“千兆”等分别是由“毫”和“微”、“微”和“微”、“千”和“兆”并列而成的,与国际上采用的规则不符,分别应用“纳”、“皮”、“吉”等代替,如表 1-1 所示。

部分国际制词冠

表 1-1

词冠	符号		因数
	中文	国际	
吉伽 (<i>giga</i>)	吉	G	10^9
兆 (<i>mega</i>)	兆	M	10^6
千 (<i>kilo</i>)	千	k	10^3
毫 (<i>milli</i>)	毫	m	10^{-3}
微 (<i>micro</i>)	微	μ	10^{-6}
纳诺 (<i>nano</i>)	纳	n	10^{-9}
皮可 (<i>pico</i>)	皮	p	10^{-12}