

电 路 分 析

上 册

李 翰 荪 主 编

中央广播电视大学出版社

电 路 分 析

上 册

李瀚荪 主编

中央广播电视大学出版社

电 路 分 析

上 册

李瀚荪 主编

·

中央广播电视大学出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京印刷二厂印装

•

开本787×1092 1/16 印张21 千字485

1985年1月第1版 1985年7月 第1次印刷

印数 1—75,000

书号: 15300·13 定价: 3.00元

前 言

本教材是根据中央广播电视大学《电路分析》课程教材编写大纲编写的,供电气工程专业教学使用。授课时数为110学时。

本教材包含了有关电路分析的一些最基本的内容,涉及电阻电路、动态电路和正弦稳态电路的基本分析方法,以及傅立叶变换、拉普拉斯变换在电路分析中的应用。共分为十六章和两个附录,分为上、下两册出版。磁路基础将在电机与拖动课程中讲授,本教材不含此项内容。附录中包含均匀传输线的内容,以便能根据需要,在学完集中参数电路分析的基础上,进一步学习分布参数电路的一些基本概念和分析方法。

在编写时,力求做到叙述清楚、准确,编入较多的典型例题和一些联系实际例题,注意正文、例题、思考题、练习题和习题五者间的密切配合,并在每章结尾处列出该章的基本要求和内容提要,便于读者自学,使读者能较好地掌握基本内容,培养起分析问题和解决问题的能力。

本课程应以学习电路的基本原理为主,但在计算机使用日趋普及的今天,学习本课程时可考虑使用计算机作为解题的辅助工具。例如,在条件许可的情况下,可以让学生利用现成的程序,使用计算机来解决一些计算量较大和难度较大的绘制曲线的工作。本教材的附录二中介绍了一些求解电阻电路、动态电路以及正弦稳态电路的程序,可供参考。

参加本教材编写工作的有:罗杏雨同志(第一章至第四章),李立群同志(第五章至第八章),龚绍文同志(第九章至第十二章),李瀚荪同志(第十三章至十六章以及附录一)和吴翠兰同志(附录二)。李瀚荪同志主编。限于编者的水平,错误和不恰当之处在所难免,请广大读者提出宝贵意见。

编 者

一九八四年九月

目 录

第一章 电阻电路及其基本分析方法	(1)
§ 1-1 实际电路和电路模型.....	(1)
§ 1-2 电荷和电流.....	(3)
§ 1-3 能量和电压.....	(6)
§ 1-4 功率.....	(8)
§ 1-5 电阻元件.....	(11)
§ 1-6 电压源和电流源.....	(15)
§ 1-7 受控源.....	(18)
§ 1-8 基尔霍夫定律.....	(20)
§ 1-9 单回路电路和单节点偶电路的分析.....	(25)
§ 1-10 电位的计算.....	(31)
§ 1-11 分压、分流公式及应用实例.....	(35)
§ 1-12 非线性电阻电路工作点和负载线的概念.....	(43)
基本要求与内容提要.....	(47)
习题一.....	(48)
第二章 等效电路	(56)
§ 2-1 等效电阻和等效二端网络.....	(56)
§ 2-2 电压源、电流源的串联和并联.....	(61)
§ 2-3 实际电源的两种模型及其等效变换.....	(65)
§ 2-4 戴维南等效电路和诺顿等效电路.....	(70)
§ 2-5 应用等效概念分析含受控源的电路.....	(74)
§ 2-6 星形网络和三角形网络的等效变换.....	(79)
§ 2-7 运算放大器——电阻电路的分析.....	(82)
§ 2-8 非线性电阻的串联和并联.....	(88)
§ 2-9 简单非线性电阻电路的分析.....	(93)
基本要求与内容提要.....	(96)
习题二.....	(97)
第三章 电阻电路的一般分析方法	(104)
§ 3-1 网孔分析法.....	(104)
§ 3-2 节点分析法.....	(114)
§ 3-3 网络线图.....	(123)
§ 3-4 割集分析法.....	(127)
§ 3-5 回路分析法.....	(134)
基本要求与内容提要.....	(139)
习题三.....	(140)
第四章 电阻电路的一些性质	(145)
§ 4-1 迭加定理.....	(145)

§ 4-2 戴维南定理	(153)
§ 4-3 诺顿定理	(165)
§ 4-4 应用戴维南定理和诺顿定理分析含受控源电路	(170)
§ 4-5 最大功率传输定理	(175)
§ 4-6 互易定理	(178)
§ 4-7 小信号分析	(182)
基本要求与内容提要	(186)
习题四	(187)
第五章 电容与电感	(194)
§ 5-1 电容	(194)
§ 5-2 线性电容的伏安关系	(196)
§ 5-3 电容的功率和储能	(200)
§ 5-4 电感	(202)
§ 5-5 电感的伏安关系	(203)
§ 5-6 电感的功率和储能	(207)
§ 5-7 电容与电感的对偶关系	(208)
§ 5-8 实际电容器和电感器的模型	(209)
基本要求与内容提要	(210)
习题五	(211)
第六章 无电源一阶电路和直流一阶电路	(214)
§ 6-1 零输入响应	(214)
§ 6-2 零状态响应	(223)
§ 6-3 直流一阶电路的完全响应	(230)
§ 6-4 电流、电压初始值的计算	(237)
§ 6-5 一阶电路分析的三要素法	(240)
§ 6-6 阶跃函数与阶跃响应	(244)
§ 6-7 微分电路与积分电路	(250)
基本要求与内容提要	(256)
习题六	(258)
第七章 无电源二阶电路和直流二阶电路	(264)
§ 7-1 RLC 串联电路的零输入响应——过阻尼情况	(264)
§ 7-2 RLC 串联电路的零输入响应——临界阻尼情况	(271)
§ 7-3 RLC 串联电路的零输入响应——欠阻尼情况	(273)
§ 7-4 LC 电路的零输入响应——无阻尼等幅振荡	(276)
§ 7-5 直流二阶电路的零状态响应与完全响应	(279)
§ 7-6 GLC 并联二阶电路的分析	(283)
• § 7-7 一般二阶电路	(287)
基本要求与内容提要	(290)
习题七	(291)

第八章 冲激响应与卷积	(294)
§ 8-1 冲激函数及其性质.....	(294)
§ 8-2 电容电压和电感电流的跃变.....	(297)
§ 8-3 冲激响应.....	(302)
§ 8-4 由阶跃响应求冲激响应.....	(312)
§ 8-5 线性、非时变电路任意输入的响应——卷积积分.....	(313)
基本要求与内容提要.....	(319)
习题八.....	(320)
部分习题答案	(323)

第一部分 电阻电路的分析

第一章 电阻电路及其基本分析方法

在现代化的生产、科研、国防和日常生活中，我们几乎天天都要和电打交道。电所以能获得广泛的应用，主要是因为有以下几个优点：（1）电能便于转换为其他形式的能量，如热能、光能、机械能等等；（2）电能传输方便、迅速、经济；（3）电能便于控制，电气设备易于操作，效率高，灵敏度也高。电不仅是现代化工农业生产和交通运输的主要动力来源，也是通讯、自动控制、计算机技术和尖端科学技术的基础。

在各个电技术领域内，人们可以通过各种电路来完成各种任务。不同的电路具有不同的功能，例如：供电电路用来传输电能；整流电路可将交流电变成直流电；滤波器电路可以“滤掉”附加在有用信号上的噪声，完成信息处理任务；计算机中的存储器电路能存储原始数据、中间结果和最终结果，具有存储功能等等。电路种类繁多，其功能的分类法也很多。然而，不论电路结构有多么不同，最复杂的和最简单的电路之间却有着最基本的共性，遵循着相同的运动规律。电路理论就是研究电路基本规律的学科，这是一门具有丰富内容的学科，它的理论和方法在很多技术领域内都获得了广泛的应用。

电路理论含有两大分支：（一）电路分析：主要内容是在给定电路结构、元件参数的条件下，求电路中各处电压电流的分配。（二）电路综合：就是在给定输入、输出（或激励、响应）的条件下，求电路结构。本课程的主要任务是研究线性、非时变电路的基本理论和基本分析方法，关于非线性电路，只涉及最简单的非线性电阻电路的分析方法。因此，本课程是电路理论的入门课程，这是电气工程各专业学员所必修的技术基础课。通过本课程的学习，使学者掌握电路的基本理论，基本分析方法和初步的实验技能，培养分析问题和解决问题的能力，为学习电类专业知识和进一步学习电路理论打下基础。

§ 1-1 实际电路和电路模型

完成特定任务的各种实际电路都是由电源、电阻器、电容器、电感器、变压器、电子管、半导体管等电路元、部件所组成的。图 1-1 所表示的是一个手电筒电路的示意图。小灯泡通过金属壳体（相当于金属导线）及开关与干电池相联接。当开关闭合时，电池、导线和灯泡构成电流通路，电流流过灯泡，电池供给电能，灯泡消耗电能而发热发光，实现了能量的转换。当开关打开时，切断了电流流通的路径，电路中没有电流流动，灯泡不亮，电路处于不工作状态，因而没有能量的转换。

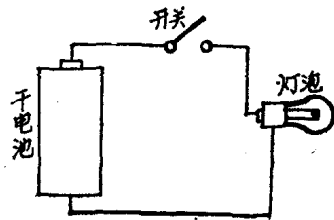


图 1-1 手电筒电路示意图

由图 1-1 可知，一个电路主要是由电源、负载和导线

(还有开关、保险丝等电器设备)所组成。电源是电路中提供能量的部件,干电池是电源中的一种,它把化学能转换成电能。还有其他类型的电源,如发电机、光电池等,它们分别将机械能和光能转换成电能;负载是消耗电能的部件,它把电能转换成其他形式的能量,达到用电的目的,是用电的部件。灯泡就是一种负载,它实际上是一个电阻器。还有其他类型的负载,如电炉、继电器、电动机等,它们分别把电能转换成热能和机械能;导线和其他电器部件是电源和负载之间的联接设备,用来传输、分配和控制电能。

组成电路的实际部件种类繁多,它们在工作过程中都和电磁现象有关。例如:各种电阻器、电炉、电灯等用电器,它们具有对电流呈现阻力、消耗电能的主要性质,由于有电流流过,其周围就要产生磁场,因而又兼有电感的性质;各种电感线圈有储存磁场能量的主要性质,由于电感线圈的导线多少总有一点电阻,因而也兼有电阻的性质,各种电容器均具有储存电场能量的主要性质。一个实际电压源总有一定的内阻,当有电流流过时,不可能总是保持一定的端电压。金属导线多少总有一点电阻,甚至还有电感等等。由于实际部件的电磁性质比较复杂,难以用数学式子来描述它们,用这些实际部件组成电路时,如果不分主次,把各种性质全部考虑在内,问题就非常复杂,给分析电路带来很大困难,甚至无法进行分析。因此,我们必须在一定的条件下对实际部件加以理想化,忽略它的次要性质,用一个足以表征其主要性质的模型(model)来表示,以便对电路进行分析、计算。模型由理想元件构成,有些实际部件的模型可只由一种理想元件构成。例如,电灯、电炉、电阻器等实际部件,可用电阻元件来作模型,这个电阻元件只有对电流呈现阻力,消耗电能的性质而无任何其它的性质;各种电感线圈可用电感元件来作模型,这种电感元件只有储存磁场能量的性质而无任何其它的性质;同样,我们可以用只有储存电场能量性质而无任何其它性质的电容元件来作各种实际电容器的模型。理想元件的性质单纯,都可以用数学式子来精确地加以定义。今后,电路分析中所涉及的各种元件都是指理想元件。

各种理想元件都用一定的符号图形来表示,图1-2所表示的是三种基本理想元件的符号图形。由理想元件组成的电路就是电路模型。

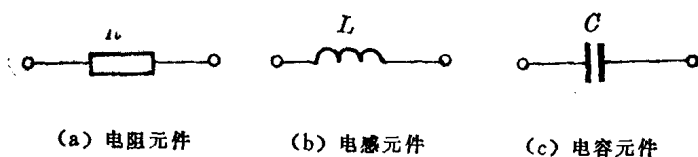


图1-2 三种基本理想元件的符号图形

由于每个理想元件都可用数学式子来精确地定义,因而可以方便地建立起描述电路模型的数学关系式,并用数学方法来分析、计算电路,从而掌握电路的特性。

有了理想元件和电路模型的概念以后,对图1-1的实际手电筒电路,我们用电阻元件 R 来表示灯泡,用直流理想电压源 U 表示干电池,用电阻为零的导线表示金属壳体,于是,一个实际手电筒电路可抽象成如图1-3所示的电路模型。

今后,我们所研究的电路都是指从实际电路中抽象出来的、理想化了的电路模型。更明确地说,电路分析的对象是电路模型而不是实际电路。

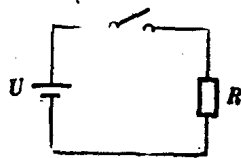


图1-3 手电筒电路的模型

电路模型和力学模型相类似。在力学系统中，质点是小物体的模型，它没有尺寸，但有确定的位置，有质量，有速度和加速度。刚体是实际物体的模型，它有一定的形状，有质量和转动惯量等等，不管刚体受力状况如何，刚体上任何两点之间的距离不会改变。显然，自然界并不存在这种质点和刚体，它们只是力学系统中抽象的、理想化了的模型，但是，这种理想化的模型在理论研究及工程实践中都获得了广泛的应用。

通过分析电路模型，我们可以预测实际电路的特性，以期设计出更好的电路来。自然，电路模型只能近似地反映实际电路的特性，但是通过不断地修改模型，可以使模型的特性十分接近实际电路的特性。

本书主要讨论如何分析已经建立起来的电路模型，关于如何建立一个实际电路的模型问题，超出了本书讨论范围，故本书没有涉及这方面的内容。

§ 1-2 电荷和电流

随着电流在电路中的流动，进行着电能和其他形式能量之间的转换，电路中没有电流，也就没有能量转换发生。电流是电路分析中的一个基本变量。为了更好地理解电流这个物理量，我们先讨论和电流关系极为密切的电荷。

根据原子理论，我们知道物质是由原子组成的，而原子又是由原子核和环绕着原子核作高速运动的电子所组成的。原子核中有质子和中子。质子带正电荷，中子不带电，电子带负电荷。在正常情况下，电子的负电荷和质子的正电荷相平衡，原子呈现中性。

我们把带电粒子所带的电荷数叫做电量或电荷量。电荷的实用单位是库仑，国际代号C。库仑是国际单位制(SI)*中度量电荷的基本单位。1库仑的电量等于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量，或者说，一个电子所带的电量等于 1.602×10^{-19} 库仑。

电荷的符号用Q或q来表示。大写的Q表示恒定的电荷，小写的q表示随时间而变化的电荷，有时也写成 $q(t)$ 。这种大写字母表示常量，小写字母表示随时间而变的变量的表示方法，也用于电路中的其他各物理量。

不同的物质，其原子的结构和特性也不同。在铝、银、铜等金属原子中，其最外层的电子受原子核的吸引力较小，容易从原子中挣脱出来成为自由电子，在金属内部作不规则的自由运动。在外电场的作用下，这些自由电子就沿着电场力相反的方向运动，就形成了电流。由于金属中有大量的自由电子，所以金属是良导体。还有另一类导体，如酸、碱、盐等化合物的水溶液中，这些化合物分解成带正电和带负电的粒子，称为正离子和负离子。如果有外加电场的作用，正、负离子将分别沿着电场力和逆着电场力的方向运动，从而形成了电流。总之，电流是带电粒子在外电场的作用下做有秩序的移动而形成的。

为了从数量上来衡量电流的大小，引入电流强度一量。电流强度简称电流，用I或i表示。

单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度。或者说，电流强度就是电荷对

* System International d'Unite's (International System of Units) 的缩写。

时间的变化率，即

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

其中 电荷 q 的单位为库仑 (C)

时间 t 的单位为秒 (s)

电流 i 的单位为安培 (A)

安培是国际单位制中的基本单位之一*。1秒时间内通过导体横截面的电荷量为1库仑时，这电流的大小就是1安培。

例1-1 进入导体的总电荷为 $q(t) = 2t^2 - t$ (C)，问 $t = 1$ 秒时，电流 i 是多少？

解 由 $i = \frac{dq}{dt}$ 得

$$i = \frac{d(2t^2 - t)}{dt} = 4t - 1$$

当 $t = 1$ s, $i = 3$ A。

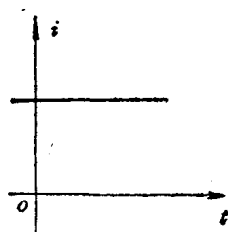
如果已知流入导体截面的电流 i ，则在 t_0 至 t 时间间隔内 进入导体截面的总电荷 q 可用在该时间间隔内对 i 的积分来求得，即

$$q = \int_{t_0}^t i dt$$

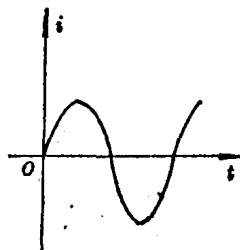
电流的大小可以用电流强度来衡量，那么电流的方向又如何规定呢？历史上把正电荷的运动方向规定为电流的方向。这与电子流动的方向正好相反。作出这种规定，是由于历史的原因，因为在人们发现电的现象时，电子的概念还没有形成，许多人错误地认为，一切电流都是由正电荷运动形成的，因而把正电荷运动的方向规定为电流的方向，可是后来发现，金属导体中，只有带负电荷的电子才能运动并形成电流，这时，似乎应当更改历史上对电流方向所作的规定才合乎逻辑，但是，如果这样做了立刻就会遇到新的困难。因为在有些情况下（如气体导电或在电解液中），同时存在两种异号的电荷，这两种带电粒子在电场的作用下，沿着相反的方向运动而形成电流。因此，不论将哪一方向规定为电流方向，总会有另一种符号的电荷，它的实际运动方向与规定的电流方向是相反的。因此，把电流方向理解为所有带电粒子真实的运动方向是不行的，这就是至今仍不改变历史上的规定，仍然把电流方向规定为正电荷运动方向的原因。

电路中经常遇到各种类型的电流，如图 1-4 所示。图 (a) 表示一个不随时间而变化的电流，称为直流电流 (direct current)；图 (b) 表示一个随时间按正弦规律变化的电流，称为正弦电流 (sinusoidal current)；图 (c) 和图 (d) 分别表示指数电流和锯齿电流。

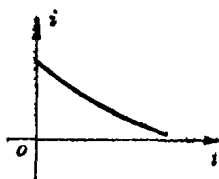
*国际单位制中有六个基本单位，即米（长度）、千克（质量）、秒（时间）、安培（电流）、开尔文（热力学）、摩尔（物质的量）和坎德拉（光强度）。其他物理量的单位均可由这些基本单位导出，称为导出单位。例如电荷的单位库仑就是导出单位，因为1库仑=1安培·秒。



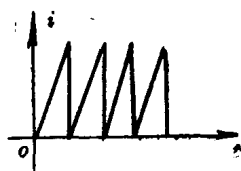
(a) 直流电流



(b) 正弦电流



(c) 指数电流



(d) 锯齿电流

图 1-4 各种类型的电流

虽然我们已经规定正电荷的运动方向为电流的方向，但是在一个比较复杂的电路中，常常难以判定电流的真实方向。又如图 1-4 (b) 所表示的电流，其大小、方向是随时间而变化的，难以用一个固定的箭头来表示它的方向。因此，我们引入一个十分重要的概念——参考方向 (reference direction) 的概念。

在电路图中，我们可以任意用箭头表示电流的方向，这一任意选定的方向称为电流的参考方向，如图 1-5 中所示。图中长方形表示一电路元件， a 、 b 表示该元件的二个端钮，箭头表示电流 i 的参考方向，这表明我们选定的电流方向是从 a 端流入元件，自 b 端流出元件。如果电流的真实方向与所标的参考方向一致，电流确实是从左至右流过元件，则规定 i 的数值为正；如果电流的真实方向和所标的参考方向相反，电流的真实方向是从右至左流过元件，则规定 i 的数值为负。这样，我们根据电流的参考方向，结合电流的正负值就可以来判定电流的真实方向。



图 1-5

这就是说，在求解电路中的电流时，我们可以首先任意假定一个参考方向，并在图上用箭头表示出来，然后再根据已经假定好的参考方向进行分析计算，根据计算结果的正负，连同假定的参考方向一起就可判定电流的真实方向。必须注意，不标出电流的参考方向，谈论电流的正负是没有意义的。必须养成在着手分析电路时先标出参考方向的习惯。电流的参考方向也称为正方向。

例 1-2 每秒 5 库仑的正电荷在导线中由 $a \rightarrow b$ 转移：

- (1) 若电流参考方向是由 $a \rightarrow b$ ，求 i 。
- (2) 若电流参考方向是由 $b \rightarrow a$ ，求 i 。
- (3) 若电荷是负电荷，结果如何？

解 (1) 因电流参考方向和正电荷运动方向 (电流的真实方向) 一致，都是由 $a \rightarrow b$ ，故电流为正值，即 $i = 5A$ 。

(2) 因电流参考方向是由 $b \rightarrow a$ ，而正电荷运动方向是由 $a \rightarrow b$ ，两者方向相反，

故 i 为负值, 即 $i = -5\text{ A}$ 。

(3) 当每秒 5 库仑的负电荷在导线中由 $a \rightarrow b$, 转移时:

若电流参考方向是由 $a \rightarrow b$, 则 $i = -5\text{ A}$ 。因为我们规定正电荷的运动方向为电流的真实方向, 负电荷由 $a \rightarrow b$ 转移相当于正电荷由 $b \rightarrow a$ 转移, 这与由 $a \rightarrow b$ 的参考方向相反, 故 i 为负值。

若电流参考方向是由 $b \rightarrow a$, 则 $i = 5\text{ A}$ 。因为负电荷由 $a \rightarrow b$ 转移相当于正电荷由 $b \rightarrow a$ 转移, 这和由 $b \rightarrow a$ 的参考方向相同, 故 i 为正值。

由此例 (1)、(2) 所得结果可见: 已知导体中电流大小、方向的情况下, 该电流有两种表示方法: 1) 用图 1-6 (a) 所示的 I_1 表示, 而 $I_1 = 5\text{ A}$, 这是因为 I_1 的参考方向和真实方向一致。2) 用图 1-6 (b) 所示的 I_2 表示, 而 $I_2 = -5\text{ A}$, 这是因为 I_2 的参考方向与真实方向相反。这两种表示方法之间的关系为:

$$I_1 = -I_2$$



(a) 电流的参考方向和真实方向相同 (b) 电流的参考方向和真实方向相反

图 1-6 电流的两种表示方法

思考题

1-1 电解质溶液中有数量相等的正负离子, 在电场作用下, 它们分别从相反的方向通过导体截面, 在计算电流强度时, 是只考虑正离子的移动, 还是正负离子都考虑? 为什么?

练习题

1-1 进入某元件的总电荷为 $q(t) = 2e^{-2t}\text{ C}$, 问当 $t = 0$ 时, 元件中的电流 i 是多少? (-4 A)

1-2 进入元件一端的电流为 $i(t) = 30t^2 - 4t\text{ (A)}$, 求在 $t = 1\text{ s}$ 到 3 s 之间进入该端点的全部电荷。(244 C)

§ 1-3 能量和电压

金属导体中虽有大量自由电子, 没有外电场的作用是不会形成电流的。要使自由电子作有规则的运动, 必须要有外加电场。电场力将迫使自由电子作定向运动而形成电流。电场力移动电荷就对电荷作了功。为了衡量电场力作功的大小, 引用电压这个物理量。电压是电路分析中的又一个基本变量。

电压的定义是: 电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功称为 a 、 b 两点之间的电压。电压用 U 和 u 表示, 即

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

其中, w 是电场力将正电荷由 a 点移到 b 点所做的功, 单位为焦耳 (J)。 q 是被移动的正电荷的电量, 单位为库仑。 u 是电路中 a 、 b 两点之间的电压, (有时加上角标, 用 u_{ab} 表示), 单位为伏特 (V)。

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

电压又称为电位差, 它总是和电路中的两个点有关。电压和能量的关系很密切, 在图 1-7 (a) 中, 如果正电荷由 a 端移动到 b 端时是失去能量, 则 a 点为高电位, b 点为低电位, 这时 a 端为正极, 用 “+” 号表示, b 端为负极, 用 “-” 号表示, u_{ab} 是电压降, 其值为正, 如果正电荷由 a 端移到 b 端时是得到能量, 则 a 端为低电位, 应标 “-” 号, b 端为高电位, 应标 “+” 号, 这时 u_{ab} 是电压升, 其值为负。如图 1-7 (b) 所示。因此, 正电荷在移动时, 能量的得失体现为电位的升高和降落。



图 1-7

例如, 2 库仑正电荷由 $a \rightarrow b$ 时失去 10 焦耳能量, 则 $a \rightarrow b$ 有一个电压降 u_{ab} , 由电压的定义, 得:

$$u_{ab} = \frac{10(\text{J})}{2(\text{C})} = 5 \text{ V}$$

如果 2 库仑正电荷由 $a \rightarrow b$ 时得到 10 焦耳能量, 则 $a \rightarrow b$ 为电压升, 故

$$u_{ab} = -5 \text{ V}$$

若正电荷通过元件时失去能量, 则该元件是吸收 (或消耗) 能量的元件。所谓吸收能量, 是指该元件把电能转换成其它形式的能量, 如热能或光能等。若正电荷通过元件时得到能量, 则该元件是产生 (或提供或释放) 能量的元件, 这是指该元件能将其其它形式的能量 (如化学能或机械能等) 转换成电能, 赋给电荷以能量。电源就是一种能够产生能量的元件。

在电路中有各种类型的电压, 我们把不随时间而变化的电压称为恒定电压或直流电压, 把大小, 极性都随时间而变化的电压称为交变电压, 它们可分别用 U 和 u 表示。

在电路中, 常常难以事先判断元件两端电压的真实极性, 因此, 在分析电路时, 和电流一样, 也要先为电压假设参考极性。电压参考极性用一对 “+” “-” 号表示。如图 1-8 所示。

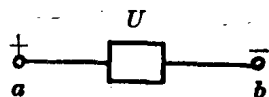


图 1-8

电压的参考极性也可任意假定, 一旦假定好以后, 就应根据假定的参考极性进行计算, 如果算得的电压为正值, 说明电压的真实极性与假定的参考极性相同; 如果算得的电压为负值, 则说明电压的真实极性与参考极性相反。同样, 不标出电压的参考极性, 谈论电压的正负是没有意义的。参考极性也称为参考方向, 也叫正方向。

根据前面所述, 分析电路时, 电压和电流都要假设参考方向, 而且可任意假定, 互

不相关。但是，为了分析方便，常常采用关联的 (associated)，参考方向，即把元件上的电压参考方向和电流参考方向取为一致，也就是电流从电压标“+”号的端钮流入。如图 1-9 (a) 所示。在采用关联参考方向下，电路图上只标出两个中任意一个的参考方向即可，另一个参考方向可省略不标。如图 1-9 (b)、(c) 所示。

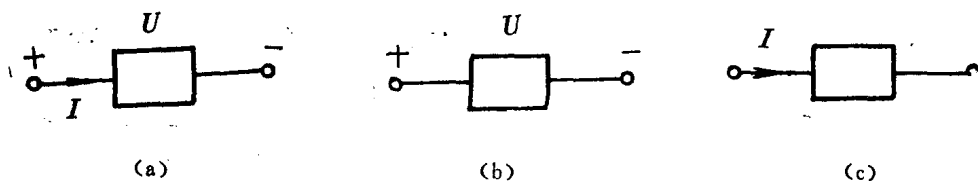


图 1-9 关联参考方向的各种表示方法

思考题

1-2 在图 1-8 所示的电压参考极性下，若算得该元件的电压 $U = -1 \text{ V}$ ，试指出该电压的真实极性。

练习题

1-3 30 库仑的正电荷，从负极到正极通过一个 12 V 的电池时得到多少能量？(360 J)

1-4 2 库仑的负电荷由 a 点转移到 b 点时，求 U_{ab} 。

若：(a) 电荷失去 10 J 能量，

(b) 电荷得到 10 J 能量

(-5 V, 5 V)

§ 1-4 功率

电路的基本作用之一是实现能量的传递。我们用功率 (Power) 来表示能量变化的速率，它是电路分析中经常遇到的一个重要物理量，用 p 或 P 表示。

在物理课中，功率定义为单位时间内能量的变化，也就是能量对时间的导数，即

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

其中 w 是能量，单位为焦耳 (J)

t 是时间，单位为秒 (s)

p 是功率，单位为瓦特 (W)

在电路中，功率可以用电压、电流来表示，即：

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-3a)$$

其中电压单位为伏特，电流单位为安培，功率单位为瓦特，即

$$1 \text{ W} = 1 \text{ VA}$$

在直流情况下，

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

前面已经谈到，当正电荷由元件(或一段电路)的 a 端移动到 b 端失去能量时，该元

件(或电路)就是吸收能量的元件,若正电荷由 a 端移动到 b 端得到能量,则该元件就是产生能量的元件。单位时间内所吸收或产生的能量就是该元件所吸收或产生的功率。因而,在电压、电流为关联的参考方向下,由(1-3)式算得的功率 $P > 0$ 时,元件为吸收功率; $P < 0$ 时,则为产生功率。

当电压、电流为非关联参考方向时,则计算功率的公式应为

$$p = -iu \quad (1-4a)$$

或

$$P = -UI \quad (1-4b)$$

按(1-4)式算得的功率仍然是:

$$p \text{ (或 } P) > 0 \text{ 为吸收功率}$$

$$p \text{ (或 } P) < 0 \text{ 为产生功率}$$

例1-3 计算图1-10中各元件的功率,指出是产生功率还是吸收功率。

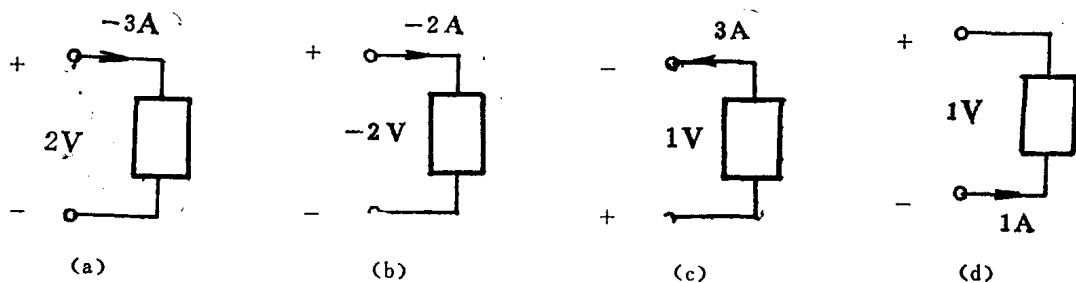


图 1-10

解 (a) 图: 电压、电流为关联参考方向, 由 $P = UI$ 得

$$P = 2 \times (-3) = -6 \text{ W} \quad P < 0 \text{ 为产生功率}$$

(b) 图: 因为是关联参考方向, 故

$$P = (-2) \times (-2) = 4 \text{ W}, \quad P > 0 \text{ 为吸收功率}$$

(c) 图: 因为是关联参考方向, 故

$$P = 1 \times 3 = 3 \text{ W} \quad P > 0 \text{ 为吸收功率}$$

(d) 图: 因为是非关联参考方向, 用 $P = -UI$ 计算, 故

$$P = -1 \times 1 = -1 \text{ W} \quad P < 0 \text{ 为产生功率}$$

元件的功率可用电压、电流的乘积来计算,那么,在某一时间间隔内,元件所吸收(或释放)的能量应如何计算呢?根据(1-3a)式可知,在 t_0 至 t 时间内,传递到某元件的能量可用在 t_0 — t 时间对该元件所吸收的功率进行积分而求得,即

$$w(t) - w(t_0) = \int_{t_0}^t p d\xi \quad (1-5a)$$

或

$$w(t) - w(t_0) = \int_{t_0}^t u \cdot i d\xi \quad (1-5b)$$

如果假设起始时刻 $t_0 = -\infty$,此时传递给元件的能量为 $w(-\infty) = 0$,于是,从起始时刻到 t 时刻之间传递给元件的能量为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u \cdot i d\xi \quad (1-6)$$

(1-6)式和(1-5)式是一致的,因为(1-6)式可写为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u \cdot i d\xi = \int_{-\infty}^{t_0} u \cdot i d\xi + \int_{t_0}^t u \cdot i d\xi$$

即

$$w(t) = w(t_0) + n \int_{t_0}^t u \cdot i d\xi$$

这就是 (1-5 b) 式。

例 1-4 某元件吸收的功率为 2 mW, 问在 1 秒到 4 秒之间该元件吸收的能量是多少?

解 由 (1-5 a) 得

$$w = \int_1^4 2 \times 10^{-3} d\xi = 2 \times 10^{-3} (4 - 1) = 6 \times 10^{-3} \text{ J}$$

即在 1 秒到 4 秒之间该元件吸收了 6 mJ 的能量。或直接由功率定义计算:

$$P = \frac{\Delta w}{\Delta t}$$

1 ~ 4 秒内历时 3 秒

故 $w = 3 \times P = 3 \times 2 = 6 \text{ mJ}$

前面我们复习了电荷、电流、电压、能量和功率这几个物理量, 在电路分析中是经常要遇到它们的, 应当深刻地理解这几个变量。表示它们之间关系的式子 (1-1)、(1-2)、(1-3)、(1-4)、和 (1-5) 等也应当熟练掌握。它们的单位——库仑、安培、伏特、焦耳和瓦特都是国际单位制中所采用的单位, 但在实际应用时, 这些单位有时嫌太小, 有时又嫌太大, 所以, 常在这些单位前面加上词头, 形成辅助单位, 例如

- 1 千伏 (kV) = 1×10^3 伏 (V)
- 2 毫安 (mA) = 2×10^{-3} 安 (A)
- 3 兆瓦 (MW) = 3×10^6 瓦 (W)
- 4 微库 (μC) = 4×10^{-6} 库 (C)

等等。

部分国际制词头如表 1-1 所示。

部分国际制词头 表 1-1

词 头 名 称		符 号	因 数
原 文	中 文		
pico	皮	p	10^{-12}
nano	纳	n	10^{-9}
micro	微	μ	10^{-6}
milli	毫	m	10^{-3}
kilo	千	k	10^3
mega	兆	M	10^6
giga	吉	G	10^9
tera	太	T	10^{12}