

高等学校教材

电 路

上 册

主 编 彭正未

副主编 李裕能

中国水利水电出版社

M13
P52
1

高等学校教材

////////////////////////////////////

电 路

(上册)

主 编 彭正未
副主编 李裕能

· 1 ·

中国水利水电出版社

内 容 提 要

《电路》是所有电类专业以及计算机、自动化、通信等专业必备的技术基础课。本教材分上、下两册。上册内容包括电路的基本定律和定理，基本分析计算方法，交、直流电路，非正弦周期电流电路，即主要是集总参数线性电路中的稳态过程，并且以交、直流电路对比的方式进行讲述。下册则主要讲述集总参数线性电路中的暂态过程，二端口网络，运算放大器电路，均匀传输线，信号传输网络等，包括拉普拉斯变换和傅里叶变换。本书可作为大学本科教材，且适合函授生学习，也可供有关专业技术人员参考，每章除有习题外，还备有复习提问，以促进学习者深入阅读和思考。

图书在版编目(CIP)数据

电路 上册/彭正未主编. —北京：中国水利水电出版社，1998
ISBN 7-80124-051-0

I. 电… II. 彭… III. 电路理论 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 05062 号

书 名	电路 (上册)
作 者	主编 彭正未 副主编 李裕能
出版、发行 经 售	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 全国各地新华书店
排 版	北京金剑照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 273 千字
版 次	1998 年 6 月第一版 1998 年 6 月北京第一次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	18.00 元

前 言

时至今日,在我国,电路原理这门课程内容不只是增加了一些新的东西,以适应科学技术的发展变化,也相应删除或调整了一些内容,以适应教学计划时数要求。总的趋势是:较少强调基础理论性,而较多地向实用型转化。对于理工院校来说,这无疑是个好现象。因为不单是课程间教学内容要严格分工,以保证教学质量和减轻学生学习负担,同时也是本门课程在专业人才培养中应如何更好地发挥作用的需要。

本着促进人才培养,让学生经过本门课程学习,既有比较扎实的基础理论知识,又有较强的运用技能,编者以为,只有强调“三基”(即基本概念、基本原理、基本方法),在学生在学习过相关的高等数学、工程数学和物理学内容的条件下,尽可能在教材中和各个教学环节中体现“理论如何从实践中来,又如何到实践中去”,才是解决问题的根本途径。因为只当学生理解和掌握这一套思想方法,才谈得上真正学到手,实现独立思考、独立分析和独立工作能力的培养。当然,尽可能多的实践性环节,就学生而言,主要是指实验和习题练习,也是十分重要的。因为只有这样,才能获得理论思维和理论应用的灵活性锻炼,从而全面认识和透彻理解电路理论。

电路理论中最基本的物理概念主要是建立在物理学中电学和磁学基础上的,也与物理学中的其它部分相关。这是因为客观事物并不是孤立存在的,加上许多事物的运动变化规律是相通的。所以,各方面的基本物理知识均必须具备。数学是电路理论中的重要工具,不论是高等数学还是初等数学,尤其是基本运算概念和逻辑推理方法最为常用。加之电路理论结合着各式各样的实际应用,因此,本门课程是综合性很强,专业上亦十分重要的专业入门基础技术课,它尤其离不开辩证思维方法,单纯依靠形式逻辑思维是不行的。比如:任何定律和定理都有其成立条件和相应的应用条件。那么,随着具体条件的变化,这些定律和定理适用与否也可能会发生变化。又如:任何事物都不是孤立存在,客观条件的变化,有可能改变看似同一事物的基本属性。此外,看似不同性质或不同特点的事物,但其分析方法却又是相通的。因此,紧密联系实际去学会辩证分析,以及尽可能运用对比或类比的途径,去认识未知事物或尚不熟悉的事物,都是行之有效的办法。所以,分类、对比和归纳,均有助于把理论知识概括,使之比较容易学习和达到系统掌握的目的。编者将尽力为着读者做到这一点。与此同时,本书除每章开初有内容提要 and 末尾有习题外,还附有以提问形式的复习提问,目的在于提示读者怎样去深入思考和阅读该章内容。

全书以课内讲授 130 学时进行编写,由武汉水利电力大学电工原理教研室彭正未(负责第一章至第五章及十二章至十四章并担任主编)、李裕能(负责第六章至第九章并担任副主编)、夏长征(负责第十、十一章)共同合作编写。并承武汉水利电力大学电工原理教研室全体同仁们的支持,和高电压专家陈维贤教授的仔细审阅和提出宝贵意见,谨借此致以衷心感谢。鉴于编者的水平和能力有限,缺点和错误在所难免,恳请读者给予批评指正。

编著者

1997.8

目 录

前 言

第一章 电路模型和基本定律	1
第一节 电路的基本概念	1
第二节 电流、电压、功率和能量	5
第三节 电阻元件	10
第四节 电容元件	12
第五节 电感元件	14
第六节 独立电源	17
第七节 受控源	19
第八节 基尔霍夫定律	21
第九节 运用基尔霍夫定律列写电路方程的最基本方法——支路法	23
第十节 电路中暂态过程与稳态过程的基本概念	26
复习提问一	28
习题一	29
第二章 稳态正弦电流电路的基本分析计算方法	34
第一节 稳态正弦电流电路的基本概念	34
第二节 正弦电流、电压的有效值	36
第三节 电阻、电容和电感元件上正弦电流与电压的相互关系	37
第四节 相量法	38
第五节 复阻抗和复导纳	43
第六节 正弦电流电路中的功率	46
第七节 直流电路与正弦电流电路在分析计算中的对应关系	49
第八节 最大功率传输	55
第九节 正弦电流电路中的串联谐振	55
第十节 正弦电流电路中的并联谐振	59
复习提问二	61
习题二	62
第三章 正弦电流电路的等效变换	66
第一节 阻抗(或导纳)的串联、并联和串并联	66
第二节 阻抗(或导纳)的 Y 形连接与 Δ 形连接的等效变换	72
第三节 非理想电压源与非理想电流源的等效互换和应用	75
第四节 非理想受控电压源和非理想受控电流源的等效变换	76
第五节 电压源和电流源的串联和并联	77

第六节 电压源和电流源的转移	78
第七节 二端网络与多端网络	79
第八节 单端口无源网络的等效阻抗和输入阻抗	80
第九节 含有受控源的单端口无源网络等效阻抗计算	81
复习提问三	82
习题三	83
第四章 电路方程的简写方法和电路定理	88
第一节 电路的图及其功用	88
第二节 简写电路方程的基本方法	91
第三节 含有受控源的电路方程的列写方法	97
第四节 叠加定理	102
第五节 替代定理	104
第六节 戴维南定理和诺顿定理	105
第七节 特勒根定理	109
第八节 有功功率和无功功率守恒定理	110
第九节 互易定理	110
第十节 对偶原理	113
复习提问四	114
习题四	115
第五章 具有耦合电感的电路	121
第一节 互感元件	121
第二节 耦合电感线圈的串、并联及等效转化为无磁耦合	125
第三节 具有复杂耦合电感的电路方程列写方法	129
第四节 空心变压器	132
第五节 理想变压器	134
第六节 实际变压器的等效电路	135
复习提问五	137
习题五	137
第六章 三相电路	140
第一节 三相电路的基本概念	140
第二节 对称三相电路的分析计算	145
第三节 不对称三相电路及其分析计算	148
第四节 三相电路的功率	151
第五节 对称制的推广	154
复习提问六	158
习题六	159
第七章 非正弦周期电流电路和信号的频谱	161
第一节 非正弦周期电流电路的基本概念	161

第二节	周期函数分解为傅里叶级数	162
第三节	非正弦周期电流、电压的有效值、平均值和平均功率	166
第四节	非正弦周期电流电路的分析计算	169
第五节	对称三相电路的高次谐波	172
第六节	傅里叶级数的指数形式及其相应的频谱	175
第七节	傅里叶积分及傅里叶变换	176
复习提问七		178
习题七		179

第一章 电路模型和基本定律

电路、电路模型以及相关的基本元件和种种概念是本章所要讲述和回答的问题。它既与先修课程物理学中学习的有关内容起着承前启后的作用，又为建立电路原理自己的体系讲述最基本的元件和有关概念，并提出将要研究的基本问题，所以必然会涉及到基本定律，是关系全局的最重要的入门内容。

第一节 电路的基本概念

一、何谓电路

构成电流的通路就是电路。就是说，电路是以其中有电流存在为特征，由构成电流通路的设备和元器件等组成。当电路中存在电流时，在电路导体的内部和外部都有电场和磁场，因此电路是电磁场的特殊形式。

构成电路的基本目的，主要是为了实现以下几点功能：

(1) 它可将非电形态能量转换后变成电形态能量，进行传输、分配，以至重新转换成所需要的其它形态的能量。

如图 1-1 所示，一个电池经过开关接通灯泡，便构成电流的通路，使灯泡发亮，这是一种最为简单的电路形式。再如，像电力系统，它由发电、输电、变电、配电和用电设备等连接成庞大的电能“产、供、销”系统，而大宗地提供电能。这时，提供电能的设备便称为电源，而吸收或消耗电能的设备则称为负载。

(2) 组成适当的电路，可以实现信号传送或将信号加工变换成所需要的形式。

如图 1-2 所示，一个晶体三极管，当输入端联通信号电流 i_b ，便会将它放大，在输出端输出电流信号 i_c 。又如，通信网络设备，它将完成通信方面的种种功能。这时，则将信号源称为激励，而经过电路输出的信号，则称为响应。

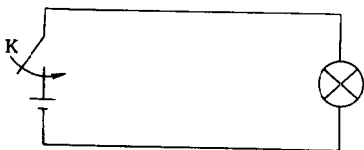


图 1-1 最简单的照明电路

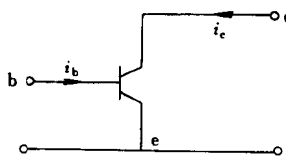


图 1-2 晶体三极管电路

(3) 构造适当的电路，还可以实现信息储存。像计算机的寄存器，便具有这种功能。

如果把电路进行分类，由于分类角度、目的、方法和用途等的不同，电路将会被划分成各种不同的属性。只是不论何种电路，其电路中的种种性态，都将是由共同的基本规律所支配。电路原理正是围绕这些基本规律来展开研究的，同时还将讨论一般电路中展现出来的种种性态，并且研究其基本分析计算方法。

二、电路图及电路模型

电路图是从实际电路中经过理想化以后抽象出来的图形。其中的各种图形符号，全都采用国家标准图形符号进行绘制。例如，电源电压、电源电流、开关、电阻、电容、电感等，它们分别如图 1-3(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)所示。其中，图 1-3(a)表示电压源，而符号“+”和“-”是用来表示电压源电压的参考极性。意思是：当 u_s 为正值时，“+”端为高电位，“-”端为低电位；图 1-3(b)表示电流源，“→”用于表示电流源电流的参考方向，是电流 i_s 为正值时的实际方向。

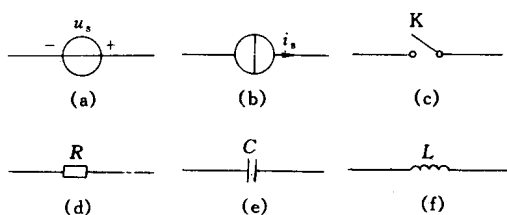


图 1-3 国家标准电路图形符号举例

以图 1-1 所示实际电路为例，依照国家标准图形符号，可将它等效示意如图 1-4(a)所示电路。图中 R 表示灯泡电阻， U_s 表示电池输出的电源电压。如果连接导线的电阻和电池内电阻与灯泡电阻相比较，在电路中还占有一定份量，则要以图 1-4(b)所示电路等效表示。这样，图中除 R 和 U_s 外， R_L 用于表示来回导线上的电阻， R_s 用于表示电池内电阻。这种等效表示方式，就是图 1-1 所示电路的电路模型。

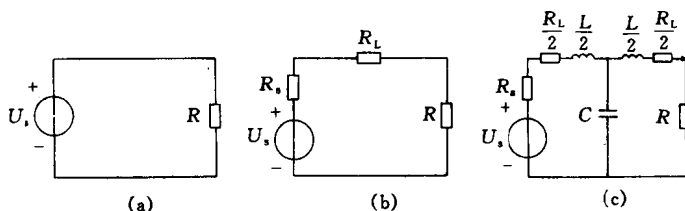


图 1-4 图 1-1 所示实际电路的等效电路

可见，电路模型的首要任务是必须如实地反映实际电路，但它又是从客观实际电路中经过理想化以后抽象出来的等效电路。在图 1-4(b)中，电池被理想化为一电压源 U_s 与内电阻 R_s 串联等效代替，连接导线被电阻 R_L 等效代替，灯泡被电阻 R 等效代替。经过理想化的电路图形，已经逐渐脱离了原本的实际电路，而只是与实际电路具有对应的等效关系。只要明确理想化电路与实际电路的这种对应关系，便可仅就理想化以后的电路模型去进行分析计算，这是针对实际电路去进行研究的极其重要的思想方法。

在此也必须强调：任何电路模型中的一个或多个图形符号，究竟对应于实际电路中哪一个元器件，使用者均必须十分清楚。因为只有这样，相应的分析计算结果，究竟是对应于实际电路中哪个地方的情形，才能有十分确切明白的了解。

在图 1-4(b)中，如果电阻 R_s 和 R_L 远小于电阻 R 时，因而可以将它们忽略不计，则进一步可将它简化为如图 1-4(a)所示电路模型去进行分析计算。所以，在理想化过程中，必须注意分析计算的**实际对象及具体要求而定。

如图 1-1 所示电路是直流电路，不但是由电池提供恒定电源电压 U_s ，而且整个电路已经是工作在稳定状态下，电路中各个元件上的电流、电压并不是处在随时间发生变化的动态情形，电路上流过的电流亦为恒定值。这时，虽然电路周围有电场和磁场，存在电感和电容，像图 1-4(c)中已绘出连接导线上的电感和电容，但是由于电路中电流和电压不随时

间发生变化,它们便不会起作用,所以也就无需计及。也有另外一种情况,就是由于这种线路的电感和电容实在太小而容许忽略不计,从而可将电路简化为如图 1-4(b)所示。可见,一个反映实际情况的电路模型,应当计及哪些因素,还与实际工作状态或工作条件有密切关系,这是决定采用何种电路模型的前提。

又如图 1-5(a)所示,它是个常见的电感线圈电路模型。其中, R 用于表示电感线圈的电阻, L 用于表示电感线圈的电感。如果将它接通输出恒定电压的电源,在开关闭合初期,由于电路中的电流将从零开始发生变化,电感将发生作用。一旦电路中的电流稳定下来而为恒定值以后,电感的作用便不存在。这时,只剩下电阻 R 的作用,其等效电路模型将可以如图 1-5(b)所示。如果是在另一种情况

下,比如,若将此线圈突然接通很高电压的电压源,且要分析研究这种突然变化的过程时,将不但要考虑线圈电阻和电感,甚至要考虑线圈各匝之间的电容。因而电阻也要连同电感一起分散在各匝线圈上,其等效电路模型将如图 1-5(c)所示。为简明

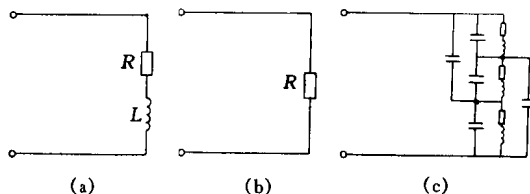


图 1-5 电感线圈的等效电路

起见,图中只绘出三匝线圈的情形。如果线圈匝数更多,其等效电路将更为复杂。这是因为即使线圈各匝之间的电容量不大,但由于电源电压很高,且又是研究电感线圈的电流、电压从无到有的动态过程,电容的作用就不容忽视。可见,即便是同一个实际电路元件,由于工作状态或工作条件的不同,其相应的等效电路模型也可能不一样。再如,若将电感线圈连接在频率很高的信号源上,由于信号随时间变化很快,线圈的匝间电容亦同样不容忽略。其等效电路模型亦将与图 1-5(c)相仿或相同。

所以,针对实际电路的工作状态和条件,结合相关因素,才能准确地选择与实际情况相符的等效电路。

电路原理的主要研究对象,正是像这些理想化以后的电阻、电感、电容等电路元件所组成的电路模型。尽管它们与实际电路有所脱离,但是,只要掌握上述关于如何从实际电路中抽象出来的理想化方法,便不难回到实际电路中去运用。

三、集总参数电路与分布参数电路

像前述图 1-5(c)所示电路,电阻、电感均分散在每一匝线圈上,且各匝线圈之间还有电容,就已经属于分布参数电路了。其实,任何一个实际电路的导体内部和外部均有电场和磁场,因此,其中每一个线段上,必然有电阻、电感和电容存在。所以,准确地讲,任何实际电路,都是分布参数电路。这是因为导体中只要有电流,就必然会有电阻(即便是超导体,其电阻也不绝对为零,这是分子热运动的必然结果);而电流周围总会有磁场,因而有电感;况且,任意两段导体间,均可构成电容,因为这两段导体如同一对极板,只要它们两者之间有电位差,就有电场存在。所以,参数的分布性是客观存在。

以通信线路或电力线路为例,如图 1-6(a)所示,它的每个线段上均有电阻和电感,以及在来回线路间还有电容和电导。若以 dl 作为线路长度的微分量,而 R_0 、 L_0 、 C_0 、 G_0 分别是线路单位长度的电阻、电感、电容和电导,则图中 $dR=R_0dl$ 、 $dL=L_0dl$ 、 $dC=C_0dl$ 、 $dG=G_0dl$ 。不过,如果只研究分布参数电路中电流、电压在稳定正弦交变状态下输入端与输出

端两侧间的关系时,则可将它等效简化成如图 1-6(c)所示,这就成为集总参数电路。图中 R 、 L 、 C 、 G 都是在此特定条件下经过适当简化后的等效参数。

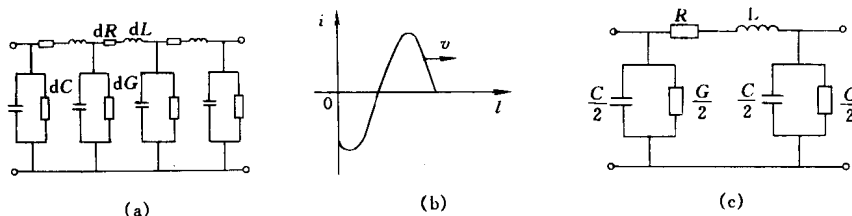


图 1-6 均匀传输线及其线路上波的传播、以及线路的近似化简

集总参数电路的特点在于认定电阻、电感、电容等是完全分离的。在此电路的某一段只有电阻,另一段只有电感或电容等。这些电路元件分别就是所谓纯电阻、纯电感、纯电容元件。在这里“纯”的涵义是:当电流通过时,在电阻或电导元件周围没有电场和磁场存在,甚至连同其内部也没有磁场;在电容元件内部只有电场存在,也没有漏电,即没有电导,其周围也没有磁场和电场;在电感元件上没有电阻,只是周围有磁场,但不影响其它元件。各种元件互不干扰。像这种绝对理想化的元件还具有下述重要特点:即从元件一端流入的电流与另一端流出的电流在同一瞬间完全相等。这是分布参数电路所没有的。所以说,集总参数电路完全是从客观实际中在特定条件下抽象出来的。

在分布参数电路中,像前述电力线路或通信线路,一般地说,输入端输入的电流和电压与输出端输出的电流和电压,在同一瞬间是不可能对应相等的。由于电的传播速度就是电磁波的传播速度,因而是有限的,它等于光速。这时沿线电压和电流将是以波的形式从输入端向输出端传播,始端发出的电压和电流要经过一段时间才能到达终端。即便在传播过程中,沿线没有衰减,输出端的电压和电流与输入端的电压和电流也不可能在同一瞬间相同。如图 1-6(b)所示,它是随时间作正弦交变的电流从始端出发,经过时间 t 而又尚未到达终端时沿线路传播的情形。在它已波及的线段上,沿线各点的电流取决于电流波的分布;而电流波尚未到达的后一段线路,电流依然为零。可见,集总参数电路与分布参数电路之间,还有这样一个本质上的差别:集总参数电路是在假定电的传播速度为无限大条件下才能成立,而分布参数电路则要计及沿电路是以有限速度传播。

由于大多数实际电路所占空间的几何尺寸较小,尤其是当实际电路的几何尺寸与电压或电流的波长相比均不大,在电的传播速度等于光速的条件下,所谓电的传播速度为无限大的假设条件,便容许成立。以我国电力工业供电频率 50Hz 为例,其波长 = 光速/频率 = 6000km。因此,一般大于 300~400km 长的高电压电力线路,才需考虑电路参数的分布性。如果是高频信号,像信号频率为 50MHz 的波长则只有 6m。频率越高,波长越短,实际电路所占空间的几何尺寸再小,也必须将它作为分布参数电路来考虑。因此,相对而言,在许多情况下,将实际电路理想化为集总参数电路还是可以的,只是不要忘记它原本也是分布参数电路,因为有些时候,看似集总参数的电路,其中所发生的实际现象,也可能还需要顾及实际参数的分布性,或是运用计及电的传播速度有限性去解释,甚至要用分布参数电路的计算分析方法去求得具体解答。

第二节 电流、电压、功率和能量

一、电流定义

从物理学中已知：以带正电质点的运动方向为准，在导线上单位时间内流过导体横断面的电荷量就是电流。运用数学中的导数来表示，则有

$$i = dq/dt \quad (1-1)$$

式中 i ——电流，A；

dq —— dt 时间内穿过导体横断面的电荷量，C；

dt ——时间 t 的微分，s。

如果是带负电质点(如电子)的运动，则将等效地看成是等电荷量的带正电质点沿其反方向运动，且以此等效带正电质点的运动方向作为电流的实际方向。

如图 1-7 所示，在导体中，穿过与带正电质点运动的正方向相垂直的单位面积上流过的电流，便称为电流密度，用 δ 来表示。运用数学中的导数来描述，则有

$$\delta = di/ds \quad (1-2)$$

式中 ds ——电流的微分 di 所穿过且与其正方向相垂直的面积元。

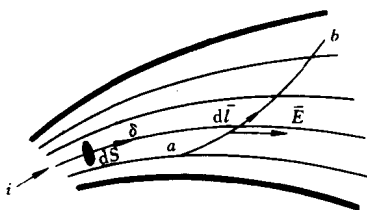


图 1-7 导体中的电流和电流密度

由于导体中各点的电流密度与该点的电场强度 E 成正比，且方向也相同，故有下式

$$\bar{\delta} = \gamma \bar{E} \quad (1-3)$$

式中 $\bar{\delta}$ ——电流密度矢量，A/m²；

$\bar{E}$ ——电场强度矢量，V/m；

γ ——导体的电导系数，1/Ω·m。

式(1-3)的涵义不仅表明电流密度与电场强度的关系，联系到电场强度矢量线的连续性，它同时也反映了电流的连续性。对于电路而言，后者具有极其深刻的涵义：电流在导体中是连续分布的。因而在任何电路中的电流，也都是连续分布的。

二、电压定义

从物理学中已知：单位正电荷，在电场力的作用下，从电场中某一点 a 运动到另一点 b 的过程中，电场力所作的功，就称为该两点之间的电压。结合图 1-7 中所示，运用数学中的矢量积分来描述，便有

$$u_{ab} = \int_{l_{ab}} \bar{E} \cdot d\bar{l} \quad (1-4)$$

式中 u_{ab} ——电场中点 a 到点 b 的电压，V；

l_{ab} ——从点 a 到点 b 的积分路径；

$d\bar{l}$ ——沿积分路径的路径微分矢量；

$\bar{E}$ ——沿积分路径上 $d\bar{l}$ 处的电场强度矢量。

由此可知，电压是一种反映功能概念的物理量，对此要特别注意。如果积分是顺着电

场方向，依照上式，积分结果将为“+”值；否则为“-”值。显然，实际电流总是沿着电场的正方向流动的。且在此电场中依照式(1-4)沿着任意闭合路径的电场强度矢量积分将为零。这是由能量守恒定律所确定的。

三、电位及其与电压的关系

从物理学中已知：电位是一个相对概念，是相对于电场中某个作为零电位的点而言的。以图 1-8 所示电阻电路为例，其中，除了由外来非电形态的能量转换而来的电源电压 u_{s1} 和 u_{s6} 以外，整个电路导体内部的每一个路段，将犹如图 1-7 中所示相仿的电场。如令点 D 作为整个电路的电位参考点，即令该点的电位为零。那么，依照上述电压的定义，以点 A 为例，则该点的电位可表述如下

$$u_A = u_{AD} = \int_{l_{AD}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-5)$$

并且，可以写出 $u_B = u_{BD}$ ， $u_C = u_{CD}$ 。

$$u_{AB} = u_A - u_B, \quad u_{AC} = u_A - u_C, \quad u_{BC} = u_B - u_C \quad (1-6)$$

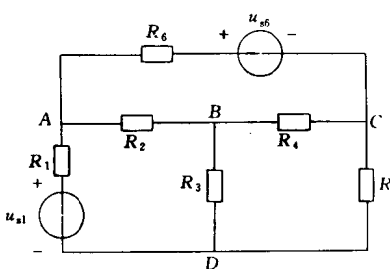


图 1-8 一般电阻电路图例

而在电源内部，如图 1-8 所示电源电压 u_{s1} 和 u_{s6} 处，由于外来的“非电”形态能量的作用，将使带正电质点从其“-”极性端到“+”极性端获得电位升高，从而使电源电压 u_{s1} 和 u_{s6} 为正值。在物理学中所说的电源电动势，正是起着这种作用。也正因为电源具有这种功能，才能在电路中建立电场和在导体中驱动带电质点运动而形成电流。正是这个缘故，在任何电路中的任意闭合回路上，电位升的总和等于电位降的总和，电位具有单值性。这同样是由能量守恒定律所确定的。

四、电流、电压的参考方向

为便于运用代数量说明电流和电压的实际方向，在电路分析计算中，就需要事先指定一个参考方向作为基准，这就是参考方向的实际意义。

如图 1-9(a)、(b)、(c)所示，电流的参考方向以标上“→”表示；电压则以“+”的极性端指向“-”的极性端作为参考方向。假定电路中电流和电压的实际方向皆为从左到右，那么，在图 1-9(a)中，当电流和电压的实际方向与参考方向一致时，电流和电压皆为正值；在图 1-9(b)中，由于电流和电压的实际方向与参考方向相反，则电流和电压皆为负值；而在图 1-9(c)中，电流的实际方向与参考方向相同，故为正值，而电压的实际方向与参考方向相反，故为负值。

在同一段电路上，电流和电压的参考方向可以各自独立指定。如果把电压的参考方向与电流的参考方向选取一致，即在电路图上，认定电流的参考方向是从标有电压“+”极性的一端朝向标有电压“-”极性的另一端。或者说，认定电流的参考正方向就是电压降落的参考正方向，如同图 1-9(a)和图 1-9(b)所示。像这种电流与电压的参考方向，称之为关联参考方向。这在使用上是一种较为方便的形式。

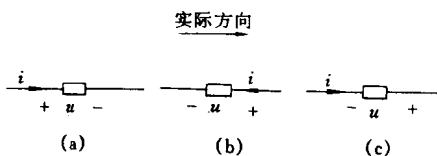


图 1-9 参考方向示意图

必须强调指出：任何电路理论中的任何一个分析计算表达式，都将是根据相应的参考方向并结合事物的客观规律去列写出来的。如果不注意参考方向，便将可能混淆诸种计算式的正确使用。为此，设定参考方向的意图虽然简单，但它确实是个重要概念。一旦将参考方向与实际方向混淆，或者使用时不注意这一点，电路的分析计算便将出错。

例 1-1 如图 1-10 所示电路，试运用电流的连续性和电位的单值性求：

(1) 图 1-10(a) 中各未知电流 i_1 、 i_2 、 i_5 、 i_7 、 i_8 ；

(2) 图 1-10(b) 中各未知电压 u_1 、 u_2 、 u_3 。

解：

(1) 依照电流的连续性，并结合图 1-10(a) 中所示各支路电流参考方向，可以看出：

因为 $i_3 = 2\text{A}$ ， $i_4 = 3\text{A}$ ，所以 $i_5 = i_4 - i_3 = 1\text{A}$ ；

因为 $i_5 = 1\text{A}$ ， $i_{10} = 5\text{A}$ ，所以 $i_7 = i_5 - i_{10} = -4\text{A}$ ；

因为 $i_6 = 4\text{A}$ ， $i_9 = 7\text{A}$ ， $i_7 = -4\text{A}$ ， $i_4 = 3\text{A}$ ，所以 $i_2 = i_6 + i_9 + i_7 - i_4 = 4\text{A}$ ；

因为 $i_2 = 4\text{A}$ ， $i_3 = 2\text{A}$ ，所以 $i_1 = i_2 + i_3 = 6\text{A}$ ；

因为 $i_1 = 6\text{A}$ ， $i_6 = 4\text{A}$ ，所以 $i_8 = i_1 - i_6 = 2\text{A}$ ；

校核： $i_8 + i_{10} = 2 + 5 = 7 = i_9$ ，正确。

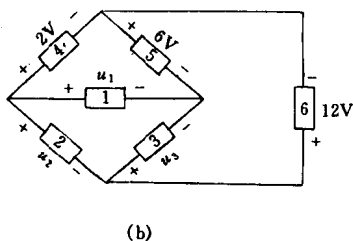
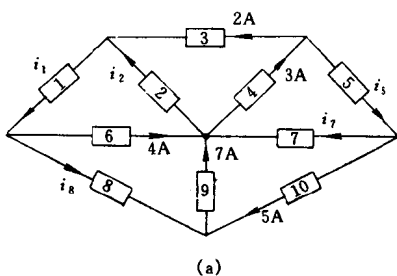


图 1-10 例 1-1 图

(2) 依照电位的单值性，并结合图 1-10(b) 中所示各支路电压参考方向，可以看出：

因为 $u_4 = 2\text{V}$ ， $u_5 = 6\text{V}$ ，所以 $u_1 = u_4 + u_5 = 8\text{V}$ ；

因为 $u_4 = 2\text{V}$ ， $u_6 = 12\text{V}$ ，所以 $u_2 = u_4 - u_6 = -10\text{V}$ ；

因为 $u_5 = 6\text{V}$ ， $u_6 = 12\text{V}$ ，所以 $u_3 = u_6 + u_5 = 18\text{V}$ ；

校核： $u_2 + u_3 = -10 + 18 = 8 = u_1$ ，正确。

五、直流电流与电压

凡是电流值不随时间变化的电流便称为直流电流。如图 1-11 所示，其随时间变化的波形曲线是一条水平线。并可用数学表达式写成

$$i(t) = I \quad (1-7)$$

凡是电压值不随时间变化的电压，便称为直流电压。如图 1-12 所示，其随时间变化的波形曲线也是一条水平线。可用数学表达式写成

$$u(t) = U \quad (1-8)$$

所谓直流电路，它首先是泛指那些实际电流和电压都是单方向的电路，严格说来，则是指在那些电路中的电流和电压，不但在方向上，而且在数值上都是恒定地不随时间变化

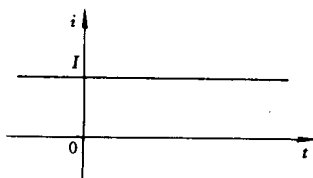


图 1-11 直流电流的波形曲线

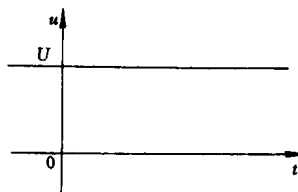


图 1-12 直流电压的波形曲线

的。所以，在这些电路中，即使有电感和电容存在，但由于电路中的电流和电压不随时间发生变化，它们也不会发生作用，只有电阻对电流和电压才会发生影响。这时，理想化的电感犹如数值为零的电阻，相当于短路；理想化的电容则犹如数值为无限大的电阻，相当于开路。

六、正弦交变电流与电压

当今世界各国，不论是工业、农业还是日常生活用电，大都采用正弦交流电。其电流和电压的瞬时值，将随时间作正弦交变。如图 1-13 和图 1-14 所示，与之相应可以写出

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \Psi_i) \quad (1-9)$$

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \Psi_u) \quad (1-10)$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (1-11)$$

式中 $\omega t + \Psi_i$ ——电流的相位(或相角)，rad；

$\omega t + \Psi_u$ ——电压的相位(或相角)，rad；

Ψ_i ——正弦交变电流的初相位(或初相角)，是 $t=0$ 时电流的相位；

Ψ_u ——正弦交变电压的初相位(或初相角)，是 $t=0$ 时电压的相位；

I_m ——正弦交变电流的幅值；

U_m ——正弦交变电压的幅值；

ω ——正弦交变电角频率，rad/s；

f ——频率，Hz；

T ——周期，s。

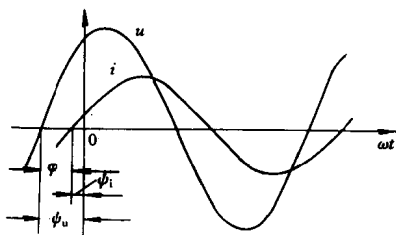


图 1-13 正弦交变电流、电压波形曲线及其相位差图例一

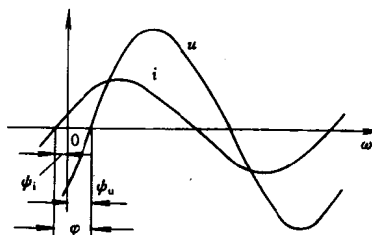


图 1-14 正弦交变电流、电压波形曲线及其相位差图例二

与此同时，为了说明以同一频率随时间作正弦交变的电压与电流在相位上的关系，针对下列等式，称它为电压与电流之间的相位差

$$\varphi = (\omega t + \Psi_u) - (\omega t + \Psi_i) = \Psi_u - \Psi_i \quad (1-12)$$

显然,相位差同时就是初相角之差。这是因为它们以同一频率随时间作正弦交变的缘故。若 $\varphi > 0$, 则称电压在相位上超前电流一个 φ 角, 或电流在相位上滞后电压一个 φ 角。如图 1-13 中所示; 反之, 若 $\varphi < 0$, 则称电压在相位上滞后电流一个 $|\varphi|$ 角, 或电流在相位上超前电压一个 $|\varphi|$ 角。如图 1-14 中所示。由此也表明: 超前和滞后是相对而言的。它只是说明两个正弦量随时间交变过程中, 在同一周期内谁先过零值, 谁后过零值, 或谁先达到最大值, 谁后达到最大值。

可见, 这时电路上的电流 i 和电压 u , 不但其数值大小会随时间发生变化, 而且其实际方向也会随时间发生变化。正是因为这种变化, 不但电路上的电阻对电流和电压会发生影响, 如果电路上同时还有电感和电容, 它们对电路上的电流和电压也会发生影响。换句话说, 电路中电流和电压的变化对于电容和电感在电路中是否会发生作用具有极其深刻的实际意义。在研究后述内容时, 必须特别注意到这一点。此外, 从上述电流和电压的函数表达式也可以看出: 电流和电压的参考方向是如此重要, 要说明电流和电压的实际方向, 就必须结合参考方向去采用代数量, 才能给予具体表达。在所有的电路分析计算中, 所给定的已知条件必须是这样, 对于待求量也必须预先指定参考方向。

七、电功率与电能量

仍以前述图 1-7 所示为例, 设导体两端的电压为 u , 若在电场力的作用下, 在 dt 时间内, 穿过导体横断面的电荷量为 dq 。则电场力在 dt 时间内于此段导体上所作的功为

$$dw = u dq \quad (1-13)$$

与此同时, 这个“功”已经转化为非电形态的能量。那么, 在单位时间内所作的功, 便称为功率。在电流和电压采用关联参考方向的条件下, 便如同下列

$$p = dw/dt = u dq/dt = ui \quad (1-14)$$

而在时间 $t_0 \sim t$ 的区间内, 电场力所作的功, 便有如下式

$$\int_{w(t_0)}^{w(t)} dw = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt$$

$$\text{即} \quad w(t) - w(t_0) = \int_{t_0}^t u i dt \quad \text{或} \quad w(t) = w(t_0) + \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-15)$$

$$\text{若 } t_0 = 0, \text{ 且 } w(t_0) = 0, \text{ 则 } w(t) = \int_0^t u i dt \quad (1-16)$$

式中 p ——功率, W;

w ——能量, J, $1J = 1W \cdot s$; 或采用 $1kW \cdot h = 3600kJ$, 作为能量单位。

而上列各式中的小写字符 $i = i(t)$ 和 $u = u(t)$, 分别表示电流和电压的瞬时值。为简写起见, 在后面叙述中, 有关电流、电压的瞬时值, 大都以这种简写的单一字符 i 、 u 来表示。即在此约定: 只要是小写字符 i 和 u , 都认定是电流和电压的瞬时值。同样的道理, 小写字符 p 为功率的瞬时值, 即 $p = p(t)$ 。

可以推知, 当电路中某一元件上的电压和电流采用关联参考方向时, 如图 1-9(a)、(b)所示, 依照式(1-14), 若电压和电流皆为正值或皆为负值, 此时该元件上的功率值 $p > 0$, 即该元件正在吸收电能。反之, 若电压和电流两者之中, 一为正值而另一为负值, 则此时该元件上的功率值 $p < 0$ 而为负值, 即该元件正在放出能量或输出电能。在电源中也采用关联参考方向时, 就有可能出现 $p < 0$ 这种情形。如果元件上的电流和电压不是采用关联参

考方向,如图 1-9(c)所示,这时如若依然采用式(1-14),则当 $p > 0$ 时,该元件为输出电能;当 $p < 0$ 时,该元件为吸收电能。因此,运用式(1-14)去计算功率,是以电压和电流采用关联参考方向为前提的,对于式(1-15)和式(1-16)的使用也是一样。

此外,为便于简洁表达数量,这里也介绍一些常用的数量级单位,如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的十进倍数和分数单位的词头

词头名称	太	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
词头符号	T	G	M	k	m	μ	n	p
数量级	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

例如 $1\text{mA}=1 \cdot 10^{-3}\text{A}$; $1\text{kV}=1 \cdot 10^3\text{V}$;
 $1\mu\text{s}=1 \cdot 10^{-6}\text{s}$; $1\text{MW}=1 \cdot 10^6\text{W}$ 。

第三节 电 阻 元 件

一、电阻定义与欧姆定律

如图 1-15(a)所示,在电阻元件上,其电流和电压为关联参考方向的条件下,依照欧姆定律,将有下列等式

$$u=Ri \quad \text{或} \quad i=Gu \quad (1-17)$$

式中 R ——电阻, Ω , $R=u/i$;

G ——电导, $\text{S}=1/\Omega$, $G=1/R=i/u$ 。

这种参数,如果是恒定不变的,便称之为线性时不变电阻或电导。简称为线性电阻或

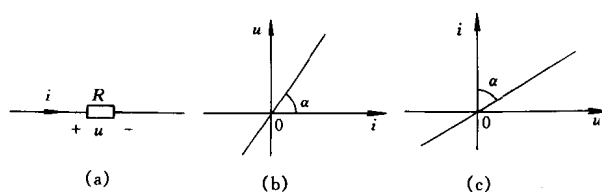


图 1-15 电阻元件及其伏安特性

线性电导。当然,联系到实际情况,这只能是个近似。不过,从工程观点看来,在大多数情况下,这是容许的,并不会带来多大的误差。必要时还可根据实际情况(如用温度系数等)给以适当修正。

那么,对于线性电阻来说,其元件的伏安特性有如图 1-15(b)所示。它是过原点的一根直线,它与横坐标的夹角 α 的正切便与电阻 R 成正比。即

$$R \propto \tan \alpha$$

有时为了方便,也有以电压为横坐标,电流为纵坐标,如图 1-15(c)所示。这时, α 为该元件特性曲线与纵坐标的夹角。

二、非线性电阻及时变电阻

如果电阻参数会随着电流或电压的大小甚至方向发生变化,这时,其伏安特性将不是一根过原点的直线,而是一根曲线,故称它为非线性电阻。依照国家标准,一般非线性电阻元件的图形符号如图 1-16 所示。它只能以函数形式来表达伏安特性

$$u=f(i) \quad \text{或} \quad i=g(u) \quad (1-18)$$