

# 电路分析基础

99年12月16日

99年12月16日

99年12月16日

## 第一版 上册前言

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

## 第一版 下册前言

本教材下册部分于1978年11月经教材审稿会议通过。仍承西安交通大学(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、华南工学院和北京工业学院等。审稿同志提供了许多宝贵意见和建议,编者谨致以衷心的感谢。本教材初稿的全部习题承上海科技大学吴锡龙同志核算一遍,教材的全部插图承北京工业学院方霞辉同志绘制,特表谢意。

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。来函请寄北京工业学院自动控制系电路教研室。

编 者

1979年4月

# 目 录

## 第一部分：电阻电路分析

<b>第一章 电阻电路分析的基础</b> .....	3
§ 1-1 电路及电路模型 集总假设.....	3
§ 1-2 电路分析的基本变量.....	6
§ 1-3 基尔霍夫定律.....	16
§ 1-4 电阻元件.....	26
§ 1-5 电压源.....	34
§ 1-6 电路中的参考点——零电位点.....	42
§ 1-7 电流源.....	47
§ 1-8 受控源.....	51
§ 1-9 两类约束 电路 $KCL$ 、 $KVL$ 方程的独立性.....	57
§ 1-10 支路电流法和支路电压法.....	63
参考书目.....	68
习题一.....	69
<b>第二章 等效电路概念的运用</b> .....	79
§ 2-1 等效二端网络的定义.....	79
§ 2-2 分压公式及分流公式.....	85
§ 2-3 混联电路的计算.....	90
§ 2-4 实际电源的两种模型.....	94
§ 2-5 含源支路的串联、并联和混联.....	102
§ 2-6 运用等效概念分析含受控源的电路.....	107
§ 2-7 $T$ 形网络和 $\Pi$ 形网络的等效变换.....	112
§ 2-8 电路的对偶性.....	118
参考书目.....	119
习题二.....	120
<b>第三章 运用独立电流、电压变量的分析方法</b> .....	130

§ 3-1	网孔分析法	131
§ 3-2	节点分析法	139
§ 3-3	树的概念	153
§ 3-4	割集分析法	157
§ 3-5	回路分析法	165
*§ 3-6	线性电阻电路解答的存在性与唯一性定理	172
	参考书目	175
	习题三	176
<b>*第四章</b>	<b>大规模电路分析方法概要</b>	<b>183</b>
§ 4-1	关联矩阵	183
§ 4-2	基本回路矩阵	188
§ 4-3	支路方程的矩阵形式	191
§ 4-4	节点分析法	192
§ 4-5	回路分析法	201
§ 4-6	基本割集矩阵和割集分析法	206
	参考书目	210
	习题四	211
<b>第五章</b>	<b>线性网络的几个定理</b>	<b>213</b>
§ 5-1	叠加定理	213
§ 5-2	置换定理	222
§ 5-3	戴维南定理	224
§ 5-4	诺顿定理	237
§ 5-5	应用戴维南定理和诺顿定理分析含受控源的电路	239
§ 5-6	最大功率传递定理	244
§ 5-7	互易定理	247
	参考书目	252
	习题五	253
<b>第六章</b>	<b>简单非线性电阻电路的分析</b>	<b>263</b>
§ 6-1	含一个非线性元件的电阻电路的分析	263
§ 6-2	理想二极管	270
*§ 6-3	假定状态分析法	278

§ 6-4 非线性电阻的串联、并联和混联·····	280
§ 6-5 小信号分析·····	285
参考书目 ·····	290
习题六 ·····	291
<b>第一部分 部分习题答案</b> ·····	<b>296</b>

# 第一部分

## 电阻电路分析

卷一

長江源頭圖

# 第一章 电阻电路分析的基础

$i = i_1$  电压性

由分列的电阻、电容、电感等元件组成的电路，称为集总电路。本书讨论集总电路的分析。只含电阻元件和电源元件的电路，称为电阻电路，是集总电路的一类。本书第一部分讨论电阻电路分析，共有六章。这一章先讨论电阻电路分析的基础。所谓基础是指：1. 有关集总电路分析的一些基本概念和基本定律，它们是所有类型集总电路分析的基础，因而它们实际上也是全书的基础；2. 电阻电路分析的基本方法。以后的几章将以此为基础，进一步把分析方法加以发展。

## § 1-1 电路及电路模型 集总假设

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。在通讯、自动控制、计算机、电力等各个电技术领域，使用许多电路来完成各种各样的任务。电路的作用大致可分为：1. 提供能量，例如供电电路；2. 传送和处理信号，例如电话线路、放大器电路；3. 测量电量，例如万用表电路（用来测量电压、电流和电阻等）；4. 存贮信息，例如计算机的存贮器电路，存放数据、程序。电路虽然多种多样，功能也各不相同，但它们是受共同的基本规律支配的。正是在这种共同的基础上，形成“电路理论”这一学科。“电路分析基础”属于“电路理论”学科，它是“电路理论”的入门课程。通过这门课的学习，使学者掌握电路的基本理论和基本分析方法，为学习电类专业及进一步学习电路理论打下基础。

各种实际电路都是由电阻器、电容器、线圈、变压器、半导体管、电源等部件(*component*)所组成。我们日常生活中用的手电筒电路就是一个最简单的电路,它是由于电池、灯泡、手电筒壳(联接导体)组成的。干电池是一种电源,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;联接导体可使电流构成通路。

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;制作联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一定的端电压;联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;在联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型,这个理想电压源就构成了干电池的模型,而理想导体则构成了联接导体的模型。电路理论分析的对象是模型而不是实际的电路。

各种实际部件都可以用模型来近似地表征它的性能。实际部件的运用一般都和电能的消耗现象和电磁能的存贮现象有关。电

能的消耗发生在部件的所有导体通路之中，电磁能则存贮在部件的电场、磁场之中。一般这些现象同时存在，且又发生在整个部件之中，交织在一起。所谓“理想化”，在这里指的就是：假定这些现象可以分别研究，从而可以用所谓的“集总”(lumped)元件来构成模型。每一种集总元件都只表示一种基本现象，且可用数学方法精确定义。前面提到的理想电阻元件便是一种只表示消耗电能(转换为热能或其他形式能量)的元件，因而是一种集总元件。此外，还有只表示存贮电场能量的理想电容元件和只表示存贮磁场能量的理想电感元件，它们也都是集总元件。三种现象分别集中在这三种元件之中。在构成电路模型时，我们还需要两种理想电源元件——电压源元件和电流源元件。上述的元件都具有两个端钮，称为二端元件(或称单口元件)。除二端元件外，往往还需要四端元件(耦合元件)，如受控源、理想变压器、耦合电感等。有些实际部件的模型较简单，只需用一种理想元件，例如，实际电阻器往往可用理想电阻元件来作为它的模型。有些部件的模型可能由几种理想元件构成。以后我们将陆续讨论这些理想元件的定义和性能。至于如何用理想元件构成模型的问题则不是本课程所要讨论的主要问题。

在求实际部件模型时，采用上述的集总假定是有条件的。集总意味着把部件的电场和磁场分隔开，电场只与电容元件相关联，磁场只与电感元件相关联，这样，两种场之间就不存在相互作用。而电场与磁场间的相互作用将产生电磁波，一部分能量将通过辐射损失掉。因此，只有在辐射能量可以忽略不计的情况下才能采用集总的概念，这就要求部件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长，这便是采用集总概念的条件。举例说，电力用电的频率为50 Hz，对应的波长为6000km，对实验室的设备来说，其尺寸与这一波长相比可以略而不计，因而用集总的概念是完全可以的，但对

远距离的电力输电线来说，就不能用集总的概念进行分析。所以说，在满足上述条件的前提下，就可得出由上述各种分列的(*separable*)理想元件互相联接而组成的电路模型，称为“集总电路”。各理想元件可以用规定的符号表示，且可绘出电路图供我们分析、计算。图 1-2 表示图 1-1 所示实际电路的电路图。为简便计，今后我们将省略理想二字，元件均系指理想元件而言。电路图并不反映实际电路的大小尺寸，在集总电路的分析问题中，部件及电路的尺寸是无关紧要的<sup>①</sup>。

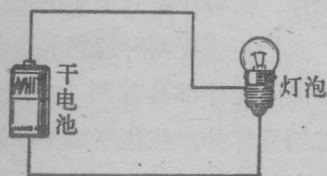


图 1-1 手电筒电路

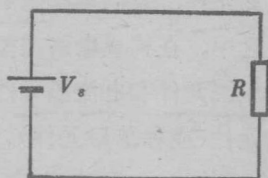


图 1-2 图 1-1 的电路图

本书只讨论集总电路的分析。集总假设是本书最主要的假设。以后所述的电路基本定律均是在这一假设的前提下才能使用的。

许多部件可以用电阻元件作为模型，如灯泡、电烙铁以及碳膜电阻、线绕电阻等电阻器。半导体管以及许多数字集成电路、逻辑电路等在一定条件下也可以用电阻元件和电源元件作为模型。我们把只含电阻元件和电源元件的电路称为电阻电路，图 1-2 所示即为电阻电路一例。它是很重要的一类电路，就处理方法上说又是最简单的，我们将首先学习这类电路的分析方法。

## § 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

<sup>①</sup> 部件的尺寸对构成模型的元件参数的数值有关，但形成模型，且算出或确定参数后，就毋需再考虑部件的尺寸。

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), $6.24 \times 10^{18}$ 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而形成的电流。

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。

如果电流的大小和方向不随时间变化,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<sup>①</sup>。

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

---

<sup>①</sup> 国际单位制(SI)的基本单位是: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  $1 \text{库} = 1 \text{安} \cdot \text{秒}$ 。

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， $-1\text{ A}$ 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一个参考方向。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，不一定就表示电流的真实方向。电流的参考方向又叫电流的正方向。

在集总电路中，电路的尺寸是无关紧要的。流过元件的电流

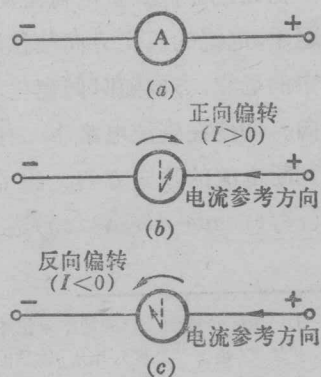
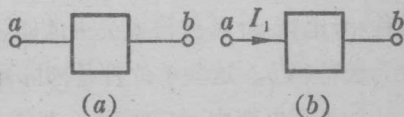


图1-3 用电流表说明电流参考方向

可以是时间  $t$  的函数, 却谈不上是空间位置  $x$  的函数, 因此, 在任一时刻从任一元件一端流入的电流一定等于从它另一端流出的电流, 流经元件的电流具有完全确定的数值, 这是集总假设的必然结果。

**例 1-1** 图 1-4(a) 中的方框用来泛指元件。设已知流过图中所示元件的直流电流为 1A, 方向为由  $a$  至  $b$ , 试问如何表明这一电流?

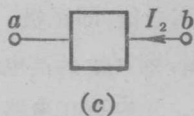
解 有两种表示方式:



(1) 用图 1-4(b) 所示的  $I_1$  表示, 而  $I_1$  应表为

$$I_1 = 1 \text{ A}$$

这是因为:  $I_1$  的参考方向与电流的真实方向一致。



(2) 用图 1-4(c) 所示的  $I_2$  表示, 而  $I_2$  应表为

$$I_2 = -1 \text{ A}$$

这是因为:  $I_2$  的参考方向与电流的真实方向相反。

显然, 这两种表示方式之间的关系为

$$I_1 = -I_2$$

电路分析中用到的另一个重要的物理量是电压。

电荷在电路中流动, 就必然有能量的交换发生。电荷在电路中的电源处获得电能, 而在另外一些部分(如电阻元件处)失去电能。电荷在电源处获得的电能是由电源的化学能、机械能或其他形式的能量转换而来的。电荷在电路某些部分所失去的电能, 或转换为热能(电阻元件处), 或转换为化学能(电池处)等等。失去的能量是由电源提供的, 因此, 在电路存在着能量的流动, 电源可以提供能量, 有能量流出; 电阻等元件吸收能量, 有能量流入。

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  $v$  表示。电路中  $a$ 、 $b$  两点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

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

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。

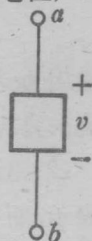


图 1-5 电压参考极性的表示方式，方框代表一个元件或一段电路

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①，用符号  $V$  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 1-5 所示。根据公认的规定，当电压为正值时，该电压的真实极性与所标的极性相同，也就是  $a$  点电位高

① 直流一词译自英文 *direct current*，原文中即含有电流的意义在内。在工程技术发展的早期，直流确系指恒定电流而言。在现代的用法中，直流(dc)一词用来指任何恒定的电量，如直流电流、直流电压、直流磁通等，此处直流的“流”字已失去原来的“电流”含意。