

电路分析

DIANLU FENXI

王贻月 © 主编 邵春亮 © 主审



大连理工大学出版社 Dalian University of Technology Press

电 路 分 析

主 编	王贻月		
主 审	邵春亮		
副主编	董维杰	解永平	秦 伟
编 委	王贻月	孙丽贤	司媛春
	厉鸿鸣	陈宝庄	邵春亮
	秦 伟	董维杰	解永平

大连理工大学出版社

内容摘要

本书是工科高等院校教材,适用于电子信息工程、计算机科学与技术 and 工业企业自动化等电类专业的本科生做教材。

全书共分为十五章和两个附录。第一章至第四章是直流电路分析;第五章至第九章是交流电路分析;第十章是网络图论;第十一章是双口网络;第十二章是动态电路的时域分析;第十三章是拉普拉斯变换;第十四章是网络的状态方程;第十五章是非线性电路;附录 A 是磁路;附录 B 是均匀传输线。每章的最后一节是本章的典型题分析,章后都配有习题,以及相应地在书末附有部分习题参考答案,编书和学习用的主要参考书目附在最后。

本书也可以作为有关的科技人员学习和使用的参考书。

策划:刘 杰

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/王贻月主编. —大连:大连理工大学出版社,2000.7
ISBN 7-5611-1028-6

1. 电… I. 王… II. 电路分析-高等学校-教材 N. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 14729 号

大连理工大学出版社出版发行

大连市凌水河 邮政编码 116024

电话:0411-4708842 传真:0411-4708898

E-mail: dulp@sohu.com, dlptt.ln.cn

URL: <http://www.dulp.com.cn>

大连业鑫印刷有限公司印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 字数: 565 千字 印张: 24

印数: 1—6000 册

2000 年 7 月第 1 版

2000 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑:解 红

校对:伊 人

封面设计:孙宝福

定价:25.00 元

前 言

根据教育部颁布的高等工程教育教学内容和课程体系面向 21 世纪教学改革计划的精神,按照 1995 年国家教育委员会颁布的“电路课程基本要求”所规定内容,总结多年的教学经验,在 1995 年已出版的《电路分析》基础上,吸取同类教材的精华,于世纪之交编写了本书。

本书仍然坚持在基本内容齐全的前提下,坚持讲述方法和语言表达精练的原则,以适应不同层次的学生使用,同时又给教师在课堂上发挥留有余地。为了体现对学生的素质培养和能力培养,把分析问题的技巧和某些扩展内容用典型题分析的办法加以拓宽,使用本教材时,这部分内容可以讲授,也可以让学生自学。同时在典型题分析中还收集了部分近几年各高等院校考研的题目,对考研的学生有一定的指导性。

在内容安排上,我们是先讲直流电路和正弦稳态电路,然后再讲动态电路,把网络图论和双口网络紧接在正弦稳态电路之后。在动态电路部分,把一阶电路和二阶电路的时域分析合并为一章,而二阶电路的计算着重放在频域分析部分。

本书插图一律采用新的国标符号(GB312—4),计量单位采用国际单位制(SI)。

本教材可在 72~96 学时内讲授和使用。

本书的编写工作以大连理工大学教师为主,参编院校有大连轻工业学院、大连水产学院、大连工人大学和大连大学等。

全书的编写由大连理工大学的王贻月主编,各副主编和各编委在每章的编写中都参与了大量工作。

大连理工大学的邵春亮教授除参与部分编写外,对全书做了仔细审阅。

本书的出版得到了大连理工大学电信学院领导的大力支持。

由于水平所限,肯定有不足之处,望广大读者批评指正。

编 者

2000 年 3 月

目 录

第一章 电路和电路定律	1
§ 1-1 电路及电路模型	1
§ 1-2 电路分析中的基本物理量	2
§ 1-3 电阻元件及其含源支路的特性方程	6
§ 1-4 电容元件	9
§ 1-5 电感元件	12
§ 1-6 独立电源	14
§ 1-7 受控源	16
§ 1-8 基尔霍夫定律	17
§ 1-9 典型题分析	20
习题一	21
第二章 线性电阻网络的等效变换	27
§ 2-1 引言	27
§ 2-2 电阻串并联网络的等效变换	27
§ 2-3 电阻的星形和三角形网络的等效变换	31
§ 2-4 电源模型简化与等值变换	33
§ 2-5 典型题分析	36
习题二	39
第三章 线性电路的基本分析方法	44
§ 3-1 支路电流法	44
§ 3-2 网孔法和回路法	46
§ 3-3 节点分析法	50
§ 3-4 典型题分析	54
习题三	56
第四章 线性网络定理	60
§ 4-1 叠加定理	60
§ 4-2 互易定理	63
§ 4-3 替代定理	65
§ 4-4 戴维南定理与诺顿定理	66
§ 4-5 最大功率传递定理	74
§ 4-6 对偶原理	75

§ 4-7 典型题分析	76
习题四	84
第五章 正弦电流电路	90
§ 5-1 正弦量的三要素及有效值	90
§ 5-2 相量法的基本概念	92
§ 5-3 相量形式的电路定律	94
§ 5-4 阻抗、导纳、相量图	96
§ 5-5 正弦电流电路的功率、功率因数	98
§ 5-6 最大功率传输条件	101
§ 5-7 正弦交流电路的稳态计算	103
§ 5-8 典型题分析	104
习题五	112
第六章 电路的谐振	114
§ 6-1 正弦交流电路的串联谐振	114
§ 6-2 串联谐振电路的谐振曲线和选择性	115
§ 6-3 正弦交流电路的并联谐振	117
§ 6-4 串并联谐振电路	119
§ 6-5 典型题分析	120
习题六	121
第七章 耦合电感和理想变压器	123
§ 7-1 耦合电感的伏安关系	123
§ 7-2 耦合电感电路的分析计算	124
§ 7-3 耦合电感的去耦等效电路	125
§ 7-4 空心变压器电路分析	127
§ 7-5 理想变压器	129
§ 7-6 一般变压器的模型	132
§ 7-7 典型题分析	134
习题七	138
第八章 三相电路	141
§ 8-1 三相电路概述	141
§ 8-2 对称三相电路的分析与计算	145
§ 8-3 不对称三相电路	150
§ 8-4 三相电路的功率	153
§ 8-5 典型题分析	156
习题八	158
第九章 非正弦周期电流电路	160
§ 9-1 非正弦周期电流	
§ 9-2 周期函数分解为傅里叶级数	160
§ 9-3 有效值、平均值和平均功率	164

§ 9-4 非正弦周期电流电路的计算	165
§ 9-5 典型题分析	168
习题九	170
第十章 网络图论和网络方程的矩阵形式	172
§ 10-1 电网络的图	172
§ 10-2 树、回路、割集	173
§ 10-3 矩阵 A, B, Q	174
§ 10-4 矩阵 A, B, Q 之间的关系	180
§ 10-5 节点电压方程的矩阵形式	181
§ 10-6 回路电流方程的矩阵形式	187
§ 10-7 割集法及其方程的矩阵形式	189
§ 10-8 改进的节点电压法	191
§ 10-9 2b 表格法	192
§ 10-10 特勒根定理	194
§ 10-11 典型题分析	196
习题十	198
第十一章 双口网络	201
§ 11-1 双口网络	201
§ 11-2 双口网络的方程和参数矩阵	201
§ 11-3 有载双口网络	210
§ 11-4 双口网络的联接	213
§ 11-5 含运算放大器电路分析	215
§ 11-6 回转器	221
§ 11-7 典型题分析	223
习题十一	228
第十二章 动态电路分析	231
§ 12-1 动态电路及其方程	231
§ 12-2 电路的初始条件	233
§ 12-3 一阶电路的零输入响应	237
§ 12-4 一阶电路的零状态响应	240
§ 12-5 一阶电路动态分析的三要素法	244
§ 12-6 一阶电路的阶跃响应	247
§ 12-7 一阶电路的冲激响应	249
§ 12-8 二阶电路的零输入响应	255
§ 12-9 二阶电路的零状态响应、阶跃响应、冲激响应	261
§ 12-10 典型题分析	265
习题十二	279
第十三章 拉普拉斯变换	285
§ 13-1 拉普拉斯变换	285

§ 13-2 拉普拉斯变换的基本性质	286
§ 13-3 拉普拉斯反变换	290
§ 13-4 线性定常网络的复频域模型及电路定律	295
§ 13-5 线性定常网络的复频域分析	298
§ 13-6 网络函数、零点与极点	301
§ 13-7 卷积和卷积定理	304
§ 13-8 典型题分析	307
习题十三	309
第十四章 网络分析的状态变量法	312
§ 14-1 状态方程与输出方程	312
§ 14-2 状态方程的直观编写法	314
§ 14-3 状态方程的解	316
§ 14-4 典型题分析	319
习题十四	321
第十五章 非线性网络	322
§ 15-1 非线性器件模型	322
§ 15-2 非线性网络方程的编写	329
§ 15-3 电阻性非线性电路图解法	333
§ 15-4 分段线性迭代法	335
§ 15-5 小信号分析法	338
§ 15-6 典型题分析	340
习题十五	343
附录 A 磁路和铁芯元件	346
§ A-1 磁场和磁路的基本定律	346
§ A-2 物质的磁性	347
§ A-3 磁路定律	349
§ A-4 磁路分析	350
§ A-5 铁芯元件	354
§ A-6 脉冲变压器	355
习题 A	356
附录 B 均匀传输线	358
§ B-1 电路参数的分布性与分布参数电路	358
§ B-2 均匀传输线方程及其解	358
§ B-3 终端匹配的均匀传输线	361
§ B-4 终端不匹配的传输线	363
习题 B	366
习题答案	367
参考文献	375

第一章 电路和电路定律

本章介绍电路模型和理想电路元件,包括电阻、独立电源和受控电源。引入了电源、电压的参考方向的概念。

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律,它包括电流定律(KCL)和电压定律(KVL),它与构成电路的元件的性质无关。

§ 1-1 电路及电路模型

一、电 路

电流流经路径叫电路。一个电池、一个灯泡、一个开关、三根连接导线,按照图 1-1 的方式连接起来,组成了一个简单的实际电路。由此可对电路定义如下:若干电气设备或器件,按照一定的方式连接起来,构成电流的通路,这个通路称为电路或称为网络。电路和网络两个词的意义相近,有时混用。

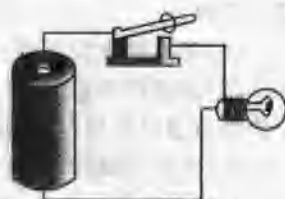


图 1-1 电路的组成

二、电路的形成与功能

电路在日常生活、工农业生产、科学研究以及国防等各个方面都有广泛的应用。在无线电技术、自动控制、计算机等各方面电子技术领域,采用长达数百里的通讯线路,或只集中在几平方毫米内的集成电路,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)传送或处理信号。例如,电话线路、放大器电路;
- (3)测量电路。例如,万用表电路;
- (4)存贮信息。例如,计算机的存储器电路,存放数据、程序。

上述电路中,电源或信号源的电压或电流是电路的输入,推动电路工作,故称为激励;终端的电压或电流是电路的输出,又称为响应。于是电路的功能也可用图 1-2 所示框图表示。



图 1-2 电路激励与响应

三、实际电路元件

构成电路的设备和器件,称为实际电路元件,其中提供电能的设备统称为电源。如电池、发电机、信号发生器;吸收电能的设备称为负载,如各种电阻器、电感线圈、电容器、晶体管等。

人们设计制做某种器件是要利用它的主要物理性质,譬如制造一个电阻器是要利用它的电阻,即对电流呈现阻力的性质;制做一个电源是要利用它正负极间能保持一定电压的性质;制做连接导线是利用它的优良导电性能,使电流顺利流过。但事实上,不可能制造只表现出主要性质的部件,也就是说,不可能制造出理想的器件。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;连接导线总有一点电阻甚至还有电感。这样就往往给电路分析带来困难。因此,我们必须在一定的条件下对实际器件加以理想化,忽略它的次要性质,用一个足以表征其主要性质模型(model)来表示。如图 1-1 中灯泡的电感是极其微小的,把它看做一个理想电阻元件是完全可以的;一个新的干电池,其内阻与灯泡电阻相比可以忽略不计,把它看成一个电压恒定的理想电压源也是完全可以的;连接导线短的情况下,它的电阻完全可以忽略不计,可作为理想导体。于是,理想电阻元件就构成了灯泡模型,理想电压源就构成了干电池的模型,而理想导体就构成了连接导线的模型。为此,我们要设法从实际电路元件中抽象出一些理想的电路元件来,并用这些理想元件去构成实际元件的模型,然后再分析模型中出现的电磁现象。

四、理想电路元件

只显示单一电磁现象的电路元件,称为理想电路元件,或叫做集总参数元件。理想电路元件有:

(1)理想的电源元件:独立电压源与独立电流源。

(2)理想的负载元件:用以表征电磁能量转换为其他形式能量的电阻器、表征电场现象的电容器以及表征磁场现象的电感器。

(3)理想的耦合元件:受控电源、耦合电感器、理想变压器、回转器等。

上述理想的电路元件都有精确的数学定义,关于它们的定义、性质,后续各章将依次介绍。

五、电路模型

用一个或几个理想电路元件构成的模型去模拟一个实际电路,使得模型中出现的电磁现象与实际电路中反映出来的现象十分近似。这个由理想电路元件组成的电路称为电路模型。理想电路元件也叫集总参数元件,所以电路模型也叫做集总参数电路。又因为理想电路元件都有精确的数学定义,所以,电路模型也可叫做数学模型。

今后分析的电路都是电路模型,模型中的元件都是理想的,值得注意的是模型中所得结果只是实际电路的一种近似。

需指出,当实际电路尺寸远小于电路中电流的波长时,该电路可用集总参数模型模拟;当电路尺寸与波长有相同数量级时,该电路就要用分布参数模型模拟了。

本课程主要任务:学习电路分析。所谓电路分析,就是在已知电路结构、元件参数的情况下,计算电路激励与响应之间的定量关系;分析电路在实现其功能的过程中的各种现象、状态及性能。

§ 1-2 电路分析中的基本物理量

一、电 流

1. 定义和实际方向

单位时间内通过导体横截面的电荷量称为电流,以 $i(t)$ 表示,即

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

式中, $i(t)$ 表示电流为 t 的函数。人们规定正电荷运动的方向作为电流的实际方向。

2. 时变电流与时变电流电路

若电流的方向随时间 t 改变或大小是 t 的函数, 这样的电流称为时变电流, 以 $i(t)$ 表示。

通过时变电流的电路, 称为时变电流电路。

3. 直流电流与直流电路

若电流的大小恒值, 方向不变, 这样的电流称为直流电流 (direct current, 简称 dc 或 DC) 或恒定电流, 用字母 I 表示。

通有直流电流的电路, 称为直流电路, 或恒定电流电路。

4. 电流的单位

在国际单位制 (SI) 中, 电量的单位为库仑 (coulomb, 简写 C), 时间单位为秒 (second, 简写 s), 电流单位为安培 (ampere, 简写 A), 关系式为

$$1 \text{ 安培 (A)} = \frac{1 \text{ 库仑 (C)}}{1 \text{ 秒 (s)}}$$

此外, 电流常用的单位还有千安、毫安、微安及纳安等, 且有

$$1 \text{ 千安 (kA)} = 10^3 \text{ 安 (A)}$$

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

$$1 \text{ 微安 (}\mu\text{A)} = 10^{-6} \text{ 安 (A)}$$

$$1 \text{ 纳安 (nA)} = 10^{-9} \text{ 安 (A)}$$

5. 电流的参考方向

在电路分析中, 要知道电流的方向后才能着手分析电路。但是, 电路中的电流方向通常事先是不知道的, 对此, 可在每段电路中先任意地指定一个电流方向, 这个任意指定的电流方向, 称为电流的参考方向, 以箭头符号表示, 如同数学分析中坐标系的正方向。当电流的实际方向与参考方向相符时, 此电流为正值; 相反时, 定为负值, 如图 1-3(a) 中电流为正、图 1-3(b) 中电流为负。另一方面因参考方向不同, 同一电流有两种不同的表示法, 如实际由电阻左端流向右端、电流强度为 3A 的电流, 可用图 1-4 的两种表示法。在未选定参考方向之前, 讨论电流的正负是没有意义的, 只有电流的参考方向选定之后, 才能按照实际方向与参考方向是否相同而确定电流的正、负值或根据电流的正、负值确定电流的实际方向。

今后在电路图中, 用实线箭头注出的电流方向都是指参考方向。参考方向一经选定, 在计算过程中不能随意更改。

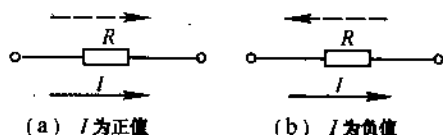


图 1-3 电流的参考方向

(实线箭头为参考方向, 虚线箭头为实际方向)

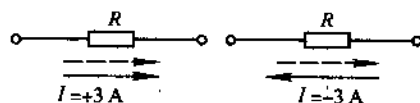


图 1-4 同一电流两种表示法

参考方向又称假定正方向,简称正方向。

二、电 位

在电路中选择一点作为参考点(参考点电位一般定为零),则其余各点对参考点来讲都有电位,在直流电路中,库仑电场力移动单位正电荷从 a 点到参考点 0 所做功的大小,定义为 a 点的电位值,以 U_a 表示。

电位的单位为伏特(Volt,简写 V)。常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等。

在电路分析中,按习惯,指定参考点为“-”极性(在电子线路中,有时指定参考点为“+”极性),其余各点均为“+”极性,这种指定的极性为电位的参考极性。

“+”极性表示高电位端。根据电位的参考极性及其计算值的正负,就能确定各点电位的高与低。

电位是一个相对物理量,即各点电位的极性和大小与所选取的参考点有关。参考点不同各点电位相应不同,但参考点一经选定,则该电路中各点电位就惟一确定了,即电位具有单值性。不指定参考点,讨论电位是没有意义的。

参考点电位常规定为零,所以参考点又叫零电位点。原则上零电位点可任意选定,但习惯上取大地为零电位点。这是因为大地容纳电荷的能力很大,它的电位很稳定,不会因为局部电荷量的变化而影响大地电位的高低。电子线路中常取公共点或机壳作为电位的参考点。对于某些设备,虽然不需接地,但在分析时,为了方便起见,可以把它们之中元件汇集的公共端点规定为零电位点。

电位虽然是对某一点而言,但实质上还是指两点间的电位之差,只是其中一个参考点电位预先指定为零而已。

三、电 压

1. 定义与参考极性

在直流电路中,若 a 点电位为 U_a , b 点电位为 U_b ,则定义 $U_{ab} = U_a - U_b$ 为 a, b 两点间电压,或称做 ab 间的电位差、电位降、电压降。

在直流电路中, U_a, U_b 值恒定,所以 U_{ab} 也为恒定值。这样, U_{ab} 亦称恒定电压,或直流电压(以下称电压),其下标 ab 表示电位自 a 点到 b 点是降低的。

若 $U_a = 3\text{V}, U_b = 1\text{V}$,则有 $U_{ab} = U_a - U_b = 3 - 1 = 2(\text{V})$,表明从 a 点到 b 点电位降低了 2V ,即从 b 点到 a 点电位降低了 -2V 。

电压单位与电位单位相同,即伏特(V)。

在分析电路中两点间的电压时,先要假定这两点电压的极性,可以任意假定,这个假定极性称为电压的参考极性。我们采用“+”表示极性高电位,“-”表示极性低电位。有了电压的参考极性及其计算值的正负,两点间电位的高低就能确定了。

电路分析中,离开了电压的参考极性谈论电压的正与负也是没有意义的。电压的“参考极性”与“参考方向”这两个术语涵义是等同的,可以混用。

2. 电压 U_{ab} 的物理涵义

在恒定电流电路中,库仑电场力移动单位正电荷从一点到另一点所做的功,只与两点的位置有关,而与移动电荷的路径无关。这样,在图 1-5 中,从 $a \rightarrow 0$ (零电位点)电场力移

动单位正电荷所做的功为

$$U_a = U_{ab}(\text{从 } a \rightarrow b \text{ 所做的功}) + U_b(\text{从 } b \rightarrow 0 \text{ 所做的功})$$

由此得 $U_a - U_b = U_{ab}(\text{由 } a \rightarrow b \text{ 所做的功})$

表明库仑电场力移动单位正电荷从 $a \rightarrow b$ 所做功的大小, 就是 ab 间电压 U_{ab} 的值。

3. 关联方向

电流、电压的参考方向都是可以任意指定的, 今后为了分析上的方便, 我们经常选取一致的参考方向, 即所谓关联参考方向, 如图 1-6 所示。这样一来, 在关联方向下, 当画出电流的参考方向后, 就不用再画出电压参考方向。

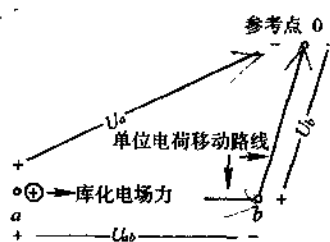


图 1-5 U_{ab} 涵义的示意图

须强调指出, 在今后的电路分析中, 谈到关联参考方向时, 一般都要讲清楚关于哪一部分电路关联。

四、直流电源电势的定义

在直流电源内部, 非库仑电场力移动单位正电荷从负极到正极所做功的大小, 定义为该电源的电势, 以 E 表示。

非库仑电场力做功, 使电位升高, 所以电势 E 表示自负极到正极的电位升。电势的单位也为伏特。

五、直流电能的计算

一段直流电路如图 1-6 所示, 图中 U, I 有关联方向。正电荷 Q 受库仑电场力 F 作用自 a 端移到 b 端, 根据电压涵义, 库仑电场力所做功为

$$W = QU$$

在直流电路中有

$$Q = It$$

由此得

$$W = UI t$$

式中, 时间 t 总是正的, 但 U 和 I 可以是正值, 也可以是负值, 因为它们都是根据参考方向计算出来的。这样算出的功就会出现两种情况, 即 $W > 0$ 或 $W < 0$ 。在 $W > 0$ 时, 表明库仑电场力做正功, 库仑电场做正功使电场能量减少, 这减少的能量被 ab 这段电路所吸收(或消耗); 反之, 在 $W < 0$ 时, 表明库仑电场力做负功, 实际上是非库仑电场力做正功, 它使电场能量增加, 亦即 ab 这段电路产生能量。综上所述, 可得下述结论: 一段电路的端电压为 U , 入端电流为 I , 在关联参考方向下, 在时间 t 内, 有

$$W = UI t \begin{cases} > 0 \text{ 该段电路吸收正电能(即产生负电能)} \\ < 0 \text{ 该段电路吸收负电能(即产生正电能)} \end{cases}$$

当 U, I 有非关联方向时, 能量吸收、产生判断规则与上述相反。在做功的计算式中电压单位为伏特(V), 电流单位为安培(A), 时间单位为秒(s), 做功即电能单位为焦耳(Joule, 简称为 J)。

工业上能量的单位用“度”。

$$1 \text{ 度电} = 1 \text{ 千瓦小时(kW} \cdot \text{h)}$$

六、电功率

1. 定义

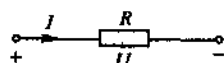


图 1-6 I, U 为关联参考方向

单位时间内吸收(或产生)的电能量,称为电功率,简称功率。

2. 直流电路功率的计算

直流功率以 P 为表示,按功率定义则有

$$P = UI$$

与上述电能量的计算相仿,可得下述结论:一段电路的端电压为 U ,端电流为 I ,在关联参考方向下,有

$$P = UI \begin{cases} > 0 \text{ 该段电路吸收正功率(即产生负功率)} \\ < 0 \text{ 该段电路吸收负功率(即产生正功率)} \end{cases}$$

在 UI 非关联方向时,功率吸收与产生的判断规则与上述相反。

电压单位为伏特(V),电流单位为安培(A),功率单位为瓦特(Watt,简写 W)。常用的单位还有毫瓦(mW)、千瓦(kW)与兆瓦(1MW = 10^6 W)。

顺便指出,以上各物理量,实际应用中有时感到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 所示的词头,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

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

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

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

显然写成 1mA 要比写成为 1×10^{-3} A 方便。这些词头是经常使用的,必须记住。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头并列而成的组合词头。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,应该分别用“纳”、“皮”、“吉”等代替,如表 1-1 所示。

表 1-1 部分国际制词头

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

§ 1-3 电阻元件及其含源支路的特性方程

一、电阻元件

电阻元件是电路基本元件之一,它是从对电流呈现阻力的实际部件中抽象出来的模

型。

一个实际电阻器通以电流后,会同时显示出热效应、磁场效应与电场效应,其中最主要的是热效应。当将其他次要效应都忽略时,则实际电阻器就成为理想化电阻器。

1. 理想电阻器的定义

如果一个二端元件在任一瞬间 t 的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 两者之间关系由 $u-i$ 平面上一条曲线所决定,则此二端元件称为电阻元件。这条表示元件电压电流关系曲线称为元件的伏安特性曲线,简称伏安特性。不同的电阻元件有不同的伏安特性,但每一电阻元件只能由一条惟一的伏安特性来表征。

在电路模型中,电阻器的物理特性是用来表征电磁能量转化为其他形式能量的。电阻器上电压和电流同时存在,同时消失,即它是一个非记忆的元件。

2. 电阻器的电路符号与物理特性

按照伏安特性曲线形状的不同,近代电路理论中,将电阻分为四类,它们分别为:

(1) 线性定常电阻。如果特性曲线是通过原点的直线,并且,直线的斜率为常数,如图 1-7(a) 所示。其电路符号如图 1-8(a) 所示。称为线性定常电阻。

(2) 线性时变电阻。若特性曲线是通过原点的直线,但直线的斜率是时间 t 的函数,如图 1-7(b) 所示,此电阻器称为线性时变电阻器。

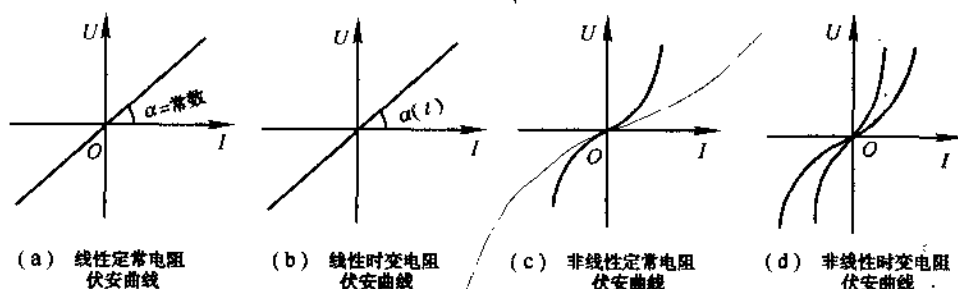


图 1-7

(3) 非线性定常电阻。若伏安特性曲线是通过原点的曲线,且曲线位置不随时间 t 改变,如图 1-7(c),此电阻器称为非线性定常电阻器。其电路符号如图 1-8(b)。

(4) 非线性时变电阻。若伏安特性曲线是过原点的曲线,且曲线位置随着时间 t 变动,如图 1-7(d) 所示,称非线性时变电阻。

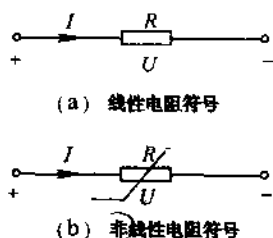


图 1-8

二、欧姆定律

1. 欧姆定律的两种形式

直流电路中的电阻器如图 1-8(a) 所示,在 UI 的关联参考方向下,欧姆用实验得出 U, I, R 三者的关系式为

$$U = IR \quad (1-1)$$

这个关系称为欧姆定律。若 U 与 I 非关联方向时,则有

$$U = -RI \quad (1-2)$$

电阻单位为欧姆(ohm, 简写为 Ω), 常用的单位还有千欧(k Ω)、兆欧(M Ω) 等。

电阻的倒数为电导, 以 G 表示。

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-3)$$

电导单位为西门子(Siemens, 简写 S)。引入电导之后, 欧姆定律又写为另一种形式, 即有

$$I = GU \quad (1-4)$$

2. 电阻器上功率的计算

在图 1-8(a) 中, 电阻器的端电压为 U , 入端电流为 I , 在关联参考方向下, 将欧姆定律中关系式代入功率计算式后有

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} = GU^2 \quad (1-5)$$

在正电阻上, 关联参考方向下, 当电压为正值时, 电流 I 亦为正值, 这时有 $P = UI > 0$, 即正电阻总是消耗功率的。在负电阻上(后面会涉及到), 在关联参考方向之下, 当电压为正值时, 电流为负值, 这时有 $P = UI < 0$, 即负电阻是产生功率的。近代电路理论中, 人们称正电阻为无源元件, 称负电阻为有源元件。

电阻器、电阻和电阻元件这三个术语经常是混用的。 R 既表示电阻元件, 又表示电阻元件的参数。

三、含源支路的欧姆定律

电动势与电阻相串联的支路, 是任意复杂直流电路中任意支路的典型组成方式, 因此研究它具有普遍意义。

现在来研究图 1-9 所示的含源支路, 这是局部含源直流电路。现在讨论其端电压 U 与电流 I 间应符合什么规律。据前节所述, ab 间电压 U 就是单位正电荷由 a 点移到 b 点时电场力所做的功, 它应该是一个确定的量, 与路径无关。因此, 单位正电荷由 a 点移到 b 点电场力所做的功, 应与它由 a 点移到 c 点、再由 c 点移到 b 点时电场力所做功的代数和相等。即

$$U_a - U_b = (U_a - U_c) + (U_c - U_b)$$

换句话说, 总电压等于分电压之和

$$U_{ab} = U_{ac} + U_{cb}$$

对于电阻 R 来说, 应服从上一节的欧姆定律。在图 1-9 中, 电流与电阻两端电压 U_{ac} 正方向一致, 据式(1-1)有

$$U_{ac} = IR$$

理想电动势 E 的正方向与电压 U_{cb} 正方向相反, 故

$$U_{cb} = E$$

因此有

$$U = RI + E \quad (1-6)$$

或

$$I = \frac{U - E}{R} \quad (1-7)$$

式(1-6)或(1-7)表达的电路端电压 U 与电路中电流 I 之间关系为含源支路欧姆定

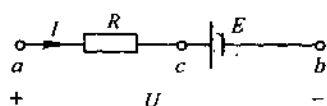


图 1-9 含源支路

律。

应当指出,含源支路欧姆定律的数学表达式中,各代数量前正负号与参考正方向有关,对应图 1-9,有式(1-6)与(1-7)。若正方向如图 1-10 所示,则

$$U_{ac} = -IR, \quad U_{cb} = E$$

而

$$U_{ab} = U_{ac} + U_{cb}$$

故有

$$U = -RI + E \quad (1-8)$$

$$I = \frac{-U + E}{R} \quad (1-9)$$

若正方向如图 1-11 与图 1-12 所示时,则有

$$U = RI - E \quad (1-10)$$

$$I = \frac{U + E}{R} \quad (1-11)$$

$$U = -RI - E \quad (1-12)$$

$$I = \frac{-U - E}{R} \quad (1-13)$$

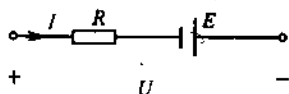


图 1-11 含源支路

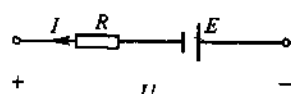


图 1-12 含源支路

当支路含有多个电动势或电阻时,可得出含源支路欧姆定律的一般表达式如下

$$I = \frac{\pm U + \sum E}{\sum R} \quad (1-14)$$

式中, $\sum E$ 为含源支路中所有电动势的代数和。凡 E 的正方向与 I 正方向一致者, E 前冠以正号, 否则冠以负号; U 为含源支路两端电压。 U 前正负号是这样规定的: 当 U 的正方向与 I 正方向一致时, U 前取正号, 否则取负号; $\sum R$ 为含源支路中所有电阻之和。读者可自行推导式(1-14)。

例 1-1 对图 1-13 所示局部电路, 试写出 U_{ac} 与 U_{cd} 的表达式。

解 按图中电流电动势正方向, 各电压分别为

$$U_{ac} = I_1 R_1 - E_1 + E_2 - R_2 I_2$$

$$U_{cd} = R_2 I_2 - E_2 - R_3 I_3 - E_3$$

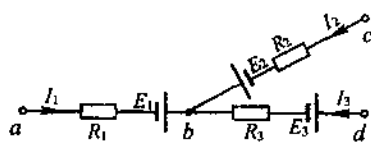


图 1-13 例 1-1 电路

§ 1-4 电容元件

电容器应用极为广泛。电容器虽然品种和规格很多, 但就其构成原理来说, 都是由两块金属极板间隔以不同的介质(如云母、绝缘纸、电解质等)所组成。通电后极板上分别聚