

DIAWQI
高职高专电气系列教材

电路分析

Dianlu Fenxi ■■■

主 编 胡汉辉 秦培林

副主编 李德尧 李燕林

主 审 邱丽芳



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

电 路 分 析

主 编 胡汉辉 秦培林
副主编 李德尧 李燕林
主 审 邱丽芳

重庆大学出版社

内 容 提 要

全书以现代电工技术的基本知识、基本理论为主线,以培养应用能力为目的,介绍了电路的基本概念和基本定律、直流电阻电路的分析与计算、正弦交流电路、互感电路、三相正弦交流电路、线性电路过渡过程的时域分析、非正弦周期电流电路、二端口网络、磁路和铁芯线圈电路、电路的计算机辅助设计等。本教材在内容组织和编写安排上,有难有易,深入浅出,通俗易懂。为兼顾教学和自学,每章后附有小结和习题,书后附有习题参考答案。

本书适合作高等职业学校、高等专科学校、成人高等学校、本科院校举办的二级职业技术学院以及民办高等学校电类各专业“电路分析”、“电工基础”等课程教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/胡汉辉,秦培林主编. —重庆:重庆大学出版社,2007.8

(高职高专电气系列教材)

ISBN 978-7-5624-4218-9

I. 电… II. ①胡…②秦… III. 电路分析—高等学校:技术学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 103449 号

电路分析

主 编 胡汉辉 秦培林

副主编 李德尧 李燕林

主 审 邱丽芳

责任编辑:曾显跃 版式设计:曾显跃

责任校对:刘雯娜 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆市北碚西师教材印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:418 千

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—4 000

ISBN 978-7-5624-4218-9 定价:25.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

本书是编者在多年从事《电路分析》教学改革的基础上编写而成的,吸取了各高职院校教学改革、教材建设等方面取得的经验。作者在编写本教材时,充分研究了高职高专学生的特点、知识结构、教学规律和培养目标等内容。本教材可作为高职高专院校、职工大学、业余大学电类专业的教材,也可供其他相关专业选用,或供工程技术人员参考。

本教材具有以下几个特点:

①始终以高职高专培养目标和要求为指导思想,根据现代科学技术发展的需要,在内容取舍上以《电路分析》的基本知识、基本理论为主线,使《电路分析》的基本理论与各种新技术有机结合起来,更好地激发学生的学习兴趣和创新意识。

②注重体现高职高专的特色,淡化理论,重视实用。为此,在保持科学性的前提下,从工程观点考虑,删繁就简。对于重要公式和结论,重点放在讲清它们的物理意义或应用上,使理论分析难点降低,重点突出,概念清楚,实用性强。这样真正能使教材有助于学生自学及兴趣培养,提高课程教学效果。例如:第6章线性电路过渡过程的时域分析,重点介绍一阶电路的“三要素”法及应用,淡化了烦琐的微分方程法。

③注意学生的实践能力的培养。例如:第4章中同名端的测量,第5章中三相电路功率的测量和三相电路故障分析,第6章的微分电路与积分电路,第9章的工程手册图表查法和变压器,第10章中介绍的计算机辅助方法等。

④注重引导学生掌握《电路分析》课程的学习方法。理论讲授、练习等做到少而精,而且具有启发性、实用性、新颖性。使学生在探索中学习,学习中获益。

⑤内容及安排方式在兼顾知识相关性和连贯性的基础上灵活多样。教材有开放性和弹性,在合理安排《电路分析》基本内容的基础上,留有选择和拓展的空间,以满足不同专业、不同学生学习和发展的需要。

⑥注意了电类专业趋向于强弱不分的特点,本教材既适用于强电专业,又适用于弱电专业。

本书由胡汉辉(编写第1、10章)和秦培林(编写第4、6章和第9章第1、2、3节)担任主编,李德尧(编写第3、5章)和李燕林(编写第2、7章)担任副主编,何忠胜参编第8章,刘德玉参编第9章第5、6、7节。

本书由邱丽芳主审,她认真仔细地审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,错误和不恰当之处在所难免,恳切希望使用该书的师生批评指正。

编 者

2007年5月

目 录

第1章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路中的基本物理量	2
1.3 电阻元件及电阻的连接	6
1.4 基尔霍夫定律	13
基本要求与本章小结	17
习题	19
第2章 直流电阻电路的分析与计算	23
2.1 电阻星形连接与三角形连接的等效变换	23
2.2 电压源和电流源及其等效变换	26
2.3 支路电流法	29
2.4 叠加原理	31
2.5 戴维南定理和诺顿定理	34
2.6 网孔电流法	38
2.7 节点电压法	42
2.8 受控源和含受控源的简单电路的分析计算	46
基本要求与本章小结	49
习题	51
第3章 正弦交流电路	59
3.1 正弦交流电的基本概念	59
3.2 正弦量的相量表示	64
3.3 正弦电流电路中的电阻	67
3.4 正弦电流电路中的电感	69
3.5 正弦电流电路中的电容	74
3.6 相量形式的基尔霍夫定律	80
3.7 电阻、电感、电容的串联电路	81
3.8 电阻、电感、电容的并联电路	84
3.9 阻抗的连接方式与混联电路	87

3.10	正弦交流电路中的功率	90
3.11	一般正弦交流电路的计算	96
3.12	交流电路中的实际器件	100
3.13	串联谐振	102
3.14	并联谐振	105
	基本要求与本章小结	107
	习题	111
第4章	互感电路	117
4.1	互感和互感电压	117
4.2	互感线圈的同名端	119
4.3	有耦合电感的正弦交流电路分析	121
	基本要求与本章小结	124
	习题	125
第5章	三相正弦交流电路	127
5.1	对称三相正弦量	127
5.2	三相电源和负载的连接	128
5.3	对称三相电路的特点和计算	133
5.4	不对称星形连接负载	136
5.5	三相电路的功率	139
	基本要求与本章小结	142
	习题	144
第6章	线性电路过渡过程的时域分析	147
6.1	换路定律和初始条件的计算	147
6.2	分析一阶电路的三要素	150
6.3	一阶电路的响应	155
6.4	一阶电路的全响应	161
6.5	阶跃函数和一阶电路的阶跃响应	163
	基本要求与本章小结	166
	习题	168
第7章	非正弦周期电流电路	172
7.1	周期函数分解为傅里叶级数	172
7.2	非正弦周期性电流电路的有效值和有功功率	178
7.3	非正弦周期性电流电路的计算	181

基本要求与本章小结	185
习题	187
第 8 章 二端口网络	189
8.1 二端口网络	189
8.2 二端口网络的导纳参数和阻抗参数	190
8.3 二端口网络的传输参数和混合参数	195
8.4 互易二端口网络的等效电路	199
基本要求与本章小结	201
习题	202
第 9 章 磁路和铁芯线圈电路	204
9.1 磁场的基本物理量和性质	204
9.2 铁磁性物质的磁化	207
9.3 磁路和磁路定律	210
9.4 恒定磁通磁路的计算	214
9.5 交流铁芯线圈	218
9.6 交流铁芯线圈的电路模型	221
9.7 理想变压器	224
基本要求与本章小结	227
习题	228
第 10 章 电路的计算机辅助设计	231
10.1 电路的计算机辅助分析与设计简介	231
10.2 输入并编辑电路	238
10.3 虚拟仪器及其使用	242
10.4 电路实例	245
基本要求与本章小结	249
习题	249
部分习题答案	251
参考文献	258

第 1 章

电路的基本概念和基本定律

电路理论分析的对象是电路模型,而不是实际电路。本章首先讨论电路及其模型的构成,然后介绍分析电路的一些物理量,引入电流、电压参考方向的概念,介绍电阻元件电压与电流关系,以及电阻串联、并联和串并联电路的化简,最后研究与电路连接方式有关的基本规律——基尔霍夫定律。这些都是分析电路的依据,贯穿全书。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的作用与组成

电路就是电流的路径,是各种电气器件按一定方式连接起来组成的总体。较复杂的电路称为网络。实际上,电路与网络这两个名词并无明显的区别,一般可以通用。

按工作任务划分,电路的主要功能有两类:

第一类功能是进行能量的转换、传输和分配。例如,供电系统、手电筒、电风扇等。这些电路中,将其他能量转变为电能的设备(如发电机、电池等),称为电源;将电能转变为其他能量的设备(如电动机、电炉、电灯等)称为负载。在电源与负载之间的输电线、变压器、控制电器等是执行传输和分配任务的器件,称为传输环节。图 1.1(a)是一个简单的实际电路,它是由干电池、开关、小灯泡和连接导线等电气器件组成。当开关闭合后,在这个闭合的通路中便有电流通过,于是小灯泡发光。干电池是电源,向电路提供电能;小灯泡是负载,开关及连接导线为传输环节。

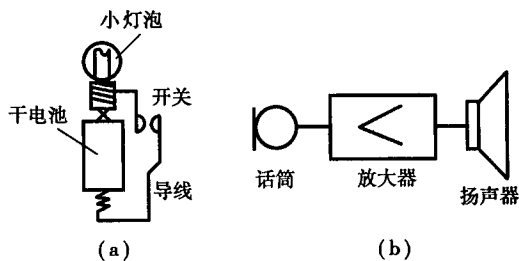


图 1.1

第二类功能是进行信号处理。这类电路的输入信号称为激励,输出信号称为响应。例如,图 1.1(b)所示的扩音机,传声器(话筒)将声音变成电信号,通过电路放大,由扬声器输出。传声器相当于电源,扬声器相当于负载。由于传声器施加的信号比较微弱,不足以推动扬声器

发音,需要采用传输环节对信号传递和放大。

由此可见,电路主要是由电源、负载和传输环节 3 部分组成。电源是提供电能或电信号的设备,负载是用电或输出信号的设备,传输环节用于传输电能和电信号。

1.1.2 理想电路元件及电路模型

为了便于对复杂的实际问题进行研究,在工程中常采用一种“理想化”的科学抽象方法,忽略一些次要因素,突出主要的矛盾,将实际的电气器件视为电源、电阻、电感与电容等几种理想的电路元件,理想电路元件就是突出单一电或磁性质的理想元件。例如,电阻元件具有消耗电能的特征,便将具有这一特征的电灯、电炉等实际元件用抽象的理想电阻元件来近似替代。当然,这与工程实际器件的性能会有差异,正如研究自由落体的质点模型,会与实际有空气阻力的落体有差异一样。这些差异不容忽视,但只有掌握了基本规律之后,才有可能去考虑这些差异。

在电路分析中,常见的理想元件有 4 类:电阻元件以消耗电能为主要特征;电容元件以储存电场能量为主要特征;电感元件以储存磁场能量为主要特征;电源(包括电压源和电流源)以供给电能为主要特征。具有两个端钮的理想元件通称为二端电路元件。它们的电路符号如图 1.2 所示。

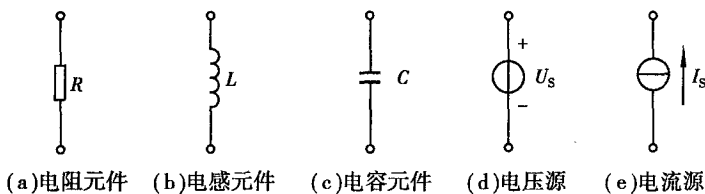


图 1.2

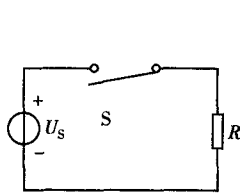


图 1.3

用特定的符号代表元件(如图 1.2)连接成的图形,称为电路图,用理想元件构成的电路称为电路模型,如图 1.3 所示。通过分析电路模型,能够预测实际电路的性能,可以改进并设计出更先进的电路。

本书若无特殊说明,所说的电路均指这种抽象的电路模型,所说的元件均指理想元件。

1.2 电路中的基本物理量

为了定量地分析和研究自然界物理现象与规律,需要引进一些物理量,但基本的只有 7 个(长度、质量、时间、电流、温度、物质的量、发光强度)。在电工技术中,需要分析和研究的物理量也很多,其中电流、电压、磁通、电荷是电路中的 4 个基本物理量,能量、功率等为复合物理量。电路中主要是电流、电压以及电功率 3 个物理量。

我国规定统一使用国际基本单位制,简称 SI。在上述 7 个基本物理量中,长度单位为米(m),质量单位为千克(kg),时间单位为秒(s),电流单位为安(A)。

除了 SI 单位之外,根据实际情况,需要使用较大单位或较小单位时,则在 SI 单位前加 SI 词头。常用的词头见表 1.1。本书讨论电工中的单位时,只研究 SI 单位。如需要采用较大或

较小的单位时,可按表在 SI 单位前加上词头。

表 1.1

因 数	词 头		符 号	因 数	词 头		符 号
	英文	中文			英文	中文	
10^6	mega	兆	M	10^{-2}	centi	厘	c
10^3	kilo	千	k	10^{-3}	milli	毫	m
10^2	hecto	百	h	10^{-6}	micro	微	μ
10^1	deca	十	da	10^{-12}	pico	皮	p

下面分别介绍电流、电压、电功率等几个最重要的电路物理量。

1.2.1 电 流

电荷的定向移动形成电流。金属导体内的电流是由于带负电的自由电子在电场力的作用下逆电场方向做定向运动而形成的。在电解液或被电离后的气体中,正、负离子在电场力的作用下,分别向两个方向定向运动也形成电流。半导体中,有带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴,自由电子和空穴的相反方向的运动,形成半导体中的电流。

电流的大小称为电流强度,用 i 表示。电流强度简称为“电流”(这样,“电流”一词有时指物理现象,有时指物理量)。某处电流的大小等于单位时间内通过该处截面的电荷的代数和。如果在极短时间 dt 内通过某处的电荷量为 dq ,则此时该处的电流 i 为

$$i = \frac{dq}{dt}$$

其中,电量的单位为库[仑](C),时间单位为秒(s),则电流单位为安[培](A)。并规定正电荷运动的方向(即负电荷运动的相反方向)为电流的方向。

大小和方向不随时间变化的电流称为恒定电流或直流电流。用 I 表示。

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.1)$$

一般情况下,随时间变化的物理量用小写字母表示,恒定物理量用大写字母表示。用电流表串接在电路中,可以测量电流的大小。

1.2.2 电 压

在电路中,电荷受电场力作用运动形成电流。衡量电场力做功本领大小的物理量称为电压。用 u 表示。理论和试验表明:电荷在电场中从一点移动到另一点时,电场力做功只与这两点的位置有关,而与移动的路径无关。设电荷量为 dq 的电荷在电场力作用下从 a 点移动到 b 点电场力做功为 dW ,则此两点间的电压的大小为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.2)$$

因此, a 、 b 两点间的电压在数值上就是电场力把单位正电荷从 a 移至 b 时所做的功。并规定:如果正电荷由 a 移动到 b 点电场力做正功,则此两点间电压的方向从 a 到 b 。

在国际单位制(SI)中,电压的单位是伏[特](V)。电工技术中,常用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等表示更高和更低的电压,即

$$1 \text{ kV} = 1\,000 \text{ V} \quad 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V} \quad 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

大小和方向不随时间变化的电压称为恒定电压,也称为直流电压,用 U_{ab} 表示。大小和方向都随时间变化的电压称为交流电压,用 u_{ab} 表示。

电压有时也称为电位差。在电路中往往要选取一点 o 作为参考点,则由某点 a 到参考点 o 的电压 u_{ao} 称为 a 点的电位,用 φ_a 表示。

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1.3)$$

电位参考点可以任意选取,常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。但要注意,在一个网络系统中,只能选择一个参考点。

1.2.3 电流、电压的参考方向

电流、电压都有大小和方向。在电路中,电流、电压的实际方向是客观存在的,但在分析较为复杂的电路时,往往难于事先确定实际方向。对于交流量,其方向随时间而变,无法用一个固定方向表示它的实际方向。但是,对电路中的一条支路,其电流只可能有两个方向,如支路的两个端钮分别为 a 、 b ,电路电流的方向不是从 a 到 b ,就是从 b 到 a 。电压也是如此。为此,在分析电路时,可在其可能的两个方向中任意规定一个方向,作为决定电流(电压)数值为正的方向,称为参考方向。如果电流(电压)的实际方向与参考方向一致,则其数值为正;如果电流(电压)的方向与参考方向相反,则其数值为负。这样,电流(电压)的大小和方向便由一个有正负的数值同时表达出来了。

在电路中,电流、电压的参考方向除一般用实线箭头表示外,需要表示其实际方向时则用虚线箭头,也可以用双下标表示,例如, u_{ab} 表示为选择参考方向由 a 到 b 时 a 、 b 间的电压数值。另外,电压的参考方向还可以用“+”、“-”极性表示,并称为参考极性,参考方向由“+”到“-”,如图 1.4 所示。

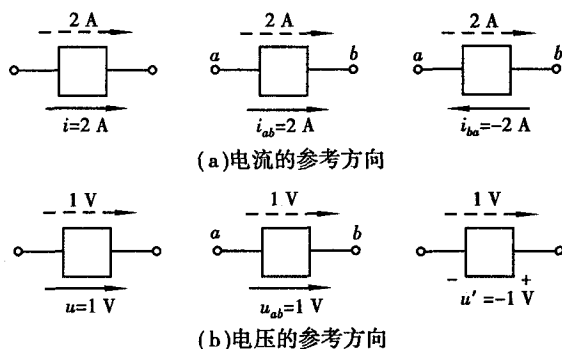


图 1.4

使用参考方向需要注意:

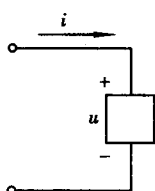
①电流、电压的实际方向是客观存在的,但往往难于事先判定。参考方向是人为规定的电流、电压数值为正的方向,在分析问题时需要先规定参考方向,然后根据规定的参考方向列写方程。

②参考方向一经规定,在整个分析计算过程中就必须以此为准,不能变动。

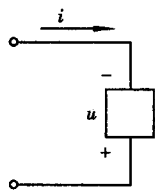
③不标明参考方向而说某电流或某电压的数值为正或负是没有意义的。

④参考方向可以任意规定而不影响计算结果,因为参考方向相反时,求出的电流、电压值也要改变正负号,最后得到的实际结果仍然相同。

⑤电流参考方向和电压参考方向可以分别独立设定。但为了分析方便,常使同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致,即电流从电压的正极性端流入该元件而从它的负极性端流出,如图1.5所示,这时,该元件的电流参考方向与电压参考方向是一致的,称为关联参考方向;反之,则称为非关联参考方向。



(a)电压和电流的关联参考方向



(b)电压和电流的非关联参考方向

图 1.5

1.2.4 电功率与电能

(1) 电功率

如前所述,带电粒子在电场力作用下作有规则运动,形成电流。根据电压的定义,电场力所做的功为 $dw = u dq$,单位时间内电场力所做的功称为电功率,即

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.4)$$

直流电路中

$$P = UI \quad (1.5)$$

上述情况中电压方向与电流方向一致。

功率的 SI 单位是瓦[特](W)。常用的还有千瓦(kW)、兆瓦(MW)、毫瓦(mW)或微瓦(μ W)。

进行功率计算时必须注意式(1.4)和式(1.5)可带正、负号。当电压和电流的参考方向相关联时,则上述两式带正号,即

$$p = ui \text{ 或 } P = UI \quad (1.6)$$

当两者的参考方向为非关联时,则上述两式带负号,即

$$p = -ui \text{ 或 } P = -UI \quad (1.7)$$

由式(1.6)和式(1.7)得到的功率为正值时,表示这部分电路吸收(消耗)功率;若为负值时,则表示这部分电路提供(产生)功率(电路将其他能量转换为电能)。

(2) 电功

当已知设备的功率为 p 时,则在 t 秒内消耗的电能

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1.8)$$

直流时

$$W = P(t - t_0) \quad (1.9)$$

电能就是电场力所做的功,单位是焦(J)。在工程上,直接用千瓦小时(kWh)作单位,俗称“度”。

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3600000 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$$

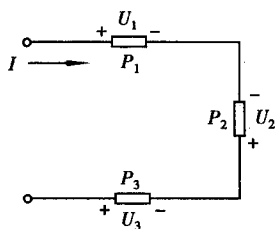


图 1.6

例 1.1 图 1.6 所示的直流电路, $U_1 = 4 \text{ V}$, $U_2 = -8 \text{ V}$, $U_3 = 6 \text{ V}$, $I = 4 \text{ A}$; 求各元件接受或发出的功率 P_1 、 P_2 和 P_3 , 并求整个电路的功率 P 。

解 P_1 的电压参考方向与电流参考方向相关联, 即

$$P_1 = IU_1 = 4 \times 4 \text{ W} = 16 \text{ W} (\text{吸收 } 16 \text{ W})$$

P_2 和 P_3 的电压参考方向与电流参考方向非关联, 即

$$P_2 = -IU_2 = -4 \times (-8) \text{ W} = 32 \text{ W} (\text{吸收 } 32 \text{ W})$$

$$P_3 = -IU_3 = -4 \times 6 \text{ W} = -24 \text{ W} (\text{产生 } 24 \text{ W})$$

整个电路的功率 P 为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (16 + 32 - 24) \text{ W} = 24 \text{ W} (\text{吸收 } 24 \text{ W})$$

1.3 电阻元件及电阻的连接

1.3.1 电阻元件

日常生活中的白炽灯、电炉、电烙铁等用电器, 它们的主要物理特征是通过电流时都要发热从而消耗电能, 这些实际电器元件称为电阻器件。若用一个只反映电阻器件能量消耗的理想元件来替代电阻器件, 则该理想元件称为电阻元件, 它是一种二端耗能元件。

1827 年德国科学家欧姆通过科学实验总结出: 对于线性电阻元件, 在任何时刻它两端的电压与其电流成正比例关系, 即

$$u = Ri \quad (1.10)$$

这一规律称为欧姆定律。其中比例系数 R 是表达电阻元件对电流阻碍程度的电路参数, 称为电阻。电阻的单位为欧[姆](Ω)。

欧姆定律表明, 当加在电阻上的电压为一定值时, 电阻越大, 则电流越小。如果电阻不变, 则外加电压越大, 电流也越大; 另一方面, 当一电流流过电阻时, 产生的电压降落, 称为电压降, 对于同样的电流, 电阻越大, 则电压降也越大。

电阻的倒数称为电导, 是表征元件导电能力的电路参数, 用 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.11)$$

电导的 SI 单位是西[门子](S)。因此, 欧姆定律也可以写成

$$i = Gu \quad (1.12)$$

以元件上的电压和电流作为直角坐标系的横坐标和纵坐标, 画出元件的 $U-I$ 函数关系曲线, 称为元件的伏安特性。电阻元件的伏安特性是一条通过原点的直线, 如图 1.7(a) 所示。说明该电阻是一常数, 这样的电阻称为线性电阻, 其电路符号如图 1.7(b) 所示。

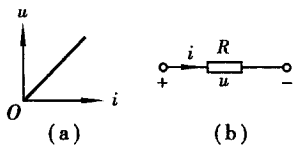


图 1.7

对于线性电阻, 当电压随时间变化时, 电流也是时间函数, 它们之间仍是线性关系。但是, 有一些元件的伏安特性不是线性关系, 例如, 二极管的伏安特性就是非线性的, 其电压与电流

的比值是变化的。这种元件的电阻是电流或电压的函数,称为非线性电阻。本书主要介绍线性元件及含线性元件的电路,以后如果不加特殊说明,电阻元件均指线性电阻元件。

对于线性电阻选择关联参考方向时式(1.10)和式(1.12)才能成立。当电压、电流为非关联参考方向时,欧姆定律应写成

$$u = - Ri \text{ 或 } i = - Gu \quad (1.13)$$

电阻元件吸收(消耗)的功率可以用式(1.6)计算而得。由于通过电阻元件的电流和电压的实际方向总是一致的,由式(1.6)计算得的总是吸收功率,因此电阻元件是一种耗能元件。将式(1.10)或式(1.12)代入式(1.6)还可得到电阻元件吸收功率的另外两种形式,即

$$\begin{cases} p = Ri^2 = \frac{i^2}{G} \\ p = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \end{cases} \quad (1.14)$$

电阻元件接受能量而发热,在电器设备使用中,如果电流过大,就发热过多,影响设备的寿命和安全。为了保证设备正常工作,制造厂方对设备都规定有额定值,作为设备的使用依据。例如,白炽灯标明的是额定电压及额定功率,碳膜电阻标明的是电阻值和额定功率。

一般地,电阻元件有电流就有电压,有电压就有电流,但有两种特殊情况:电阻为零和无限大。

$R=0$ (即 $G \rightarrow \infty$)的电阻,通过有限的电流时,由式(1.10)可知,其电压为零,这时就将其称为“短路”。电路中两点间用理想导体(电阻为零)连接时,就形成短路。即短路的两点间存在电流,但没有电压。

$R \rightarrow \infty$ (即 $G=0$)的电阻,当其电压有限时,由式(1.10)可知,其电流为零,这时就将其称为“断路”或“开路”。即开路的两端有电压,但没有电流。

1.3.2 电阻元件的串联

在电路中,将几个电阻元件依次一个一个首尾连接起来,中间没有分支,在电源的作用下流过各电阻的是同一电流,这种连接方式称为电阻的串联。

图1.8(a)表示 n 个电阻串联后由一个直流电源供电的电路。以 U 表示总电压, I 表示电流, $R_1, R_2, \dots, R_n$ 表示各电阻, $U_1, U_2, \dots, U_n$ 表示各电阻上的电压,有

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = (R_1 + R_2 + \dots + R_n)I = RI \quad (1.15)$$

式中:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1.16)$$

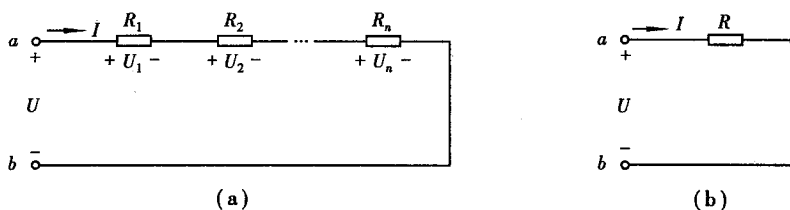


图 1.8

R 称为这些串联电阻的等效电阻。显然,等效电阻必大于任一个串联的电阻,即 $R > R_k$ 。串联电阻越多,电流越小,所以串联电阻可以“限流”。用等效电阻代替这些串联电阻以后,图 1.8(a)可简化为图 1.8(b)。

图 1.8(a)和(b)内部结构虽然不同,但是它们的端钮 a, b 处的 U, I 关系却完全相同,即它们的伏安特性(或称外特性)完全相同。如果在它们的端钮通以相同的任意值电流,则在它们的端钮间有相同的电压,即它们对外电路具有完全相同的影响,称图 1.8(b)为图 1.8(a)的等效电路,称这种替代为等效变换。

电阻串联时,各电阻上的电压为

$$U_k = R_k I = \frac{R_k}{R} U \quad (1.17)$$

由此可见,各个串联电阻的电压与电阻值成正比,或者说,总电压按各个串联电阻值进行分配,式(1.17)称为电压分配公式。

将式(1.15)两边各乘以电流 I ,得

$$P = UI = R_1 I^2 + R_2 I^2 + \cdots + R_n I^2 = R I^2 \quad (1.18)$$

此式表明: n 个串联电阻吸收的总功率等于它们的等效电阻所吸收的功率。且有

$$P : P_1 : P_2 : \cdots : P_n = R : R_1 : R_2 : \cdots : R_n \quad (1.19)$$

即串联电阻每个电阻消耗的功率与它们电阻成正比。

例 1.2 如图 1.9 所示,若用一个满刻度偏转电流为 $I_g = 50 \mu\text{A}$,电阻 $R_g = 2 \text{ k}\Omega$ 的表头制成 10 V 量程的直流电压表,应串联多大的附加电阻?

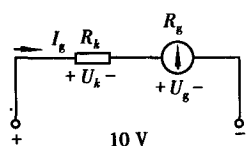


图 1.9

解 满刻度时表头电压为

$$U_g = R_g I_g = 2 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-6} \text{ V} = 0.1 \text{ V}$$

附加电阻电压为

$$U_k = (10 - 0.1) \text{ V} = 9.9 \text{ V}$$

由欧姆定律,得

$$R_k = \frac{U_k}{I} = \frac{9.9}{50 \times 10^{-6}} = 1.98 \times 10^5 \Omega = 198 \text{ k}\Omega$$

1.3.3 电阻元件的并联

在电路中,将几个电阻元件的首尾两端分别连接在两个节点上,在电源的作用下,它们两端的电压都相同,这种连接方式称为电阻并联。

图 1.10(a)表示 n 个电阻并联后由一个直流电源供电的电路。以 I 表示总电流, U 表示电压, $G_1, G_2, \cdots, G_n$ 表示各电阻的电导, $I_1, I_2, \cdots, I_n$ 表示各电阻上的电流,有

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n = (G_1 + G_2 + \cdots + G_n)U = GU \quad (1.20)$$

式中:

$$G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k \quad (1.21)$$

G 称为这些并联电阻的等效电导。用一个电导等于 G 的电阻来代替这些并联电阻后,图 1.10(a)可简化为图 1.10(b)。上式还可写成

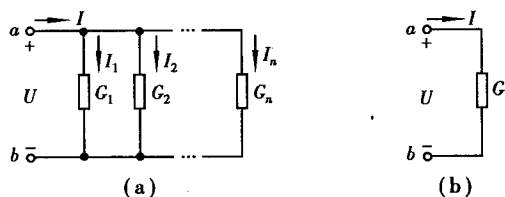


图 1.10

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$$

R 称为这些并联电阻的等效电阻。显然,等效电阻必小于任一个并联的电阻,即 $R < R_k$ 。

同样,图 1.10(a) 和 (b) 内部结构虽然不同,但是它们的伏安特性却完全相同,称图 1.8 (b) 为图 1.8(a) 的等效电路。

电阻并联时,各电阻上的电流为

$$I_k = G_k U = \frac{G_k}{G} I \quad (1.22)$$

由此可见,各个并联电阻的电流与电导值成正比,或者说,与电阻成反比。总电流按各个并联电阻值进行分配,式(1.21)称为电流分配公式。并联电阻可以“分流”。在总电流一定时,适当选择并联电阻,可使每个电阻得到所需的电流。

将式(1.20)两边各乘以电压 U , 得

$$P = UI = (G_1 + G_2 + \cdots + G_n) U^2 = GU^2 \quad (1.23)$$

此式表明: n 个并联电阻吸收的总功率等于它们的等效电阻所吸收的功率。且有

$$P : P_1 : P_2 : \cdots : P_n = G : G_1 : G_2 : \cdots : G_n \quad (1.24)$$

即并联电阻每个电阻消耗的功率与它们电导成正比(与电阻成反比)。

特别当两个电阻 R_1 、 R_2 并联时,有

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

如果总电流为 I , 则有

$$\begin{cases} I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{cases}$$

如果 $R_1 = R_2$, 则有

$$R = \frac{R_1}{2}$$

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2}$$

例 1.3 如图 1.11 所示,若用一个满刻度偏转电流为 $I_g = 50 \mu\text{A}$, 电阻 $R_g = 2 \text{ k}\Omega$ 的表头制成 10 mA 量程的直流电流表,应并联多大的附加电阻?

解 满刻度时表头电压为