



21世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电 路

刘耀年 霍 龙 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



TM13
122

21世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电 路

主 编 刘耀年 霍 龙
编 写 郝 静
主 审 张 纯

PBR54/03

北方工业大学图书馆



00594649



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书是根据教育部新颁布的《电路课程教学基本要求》编写的。在编写的过程中,考虑了教学的适用性和便于自学的特点,突出教学重点和实用性,同时兼顾了与前期和后续课程之间的关系。

全书共分 15 章,主要内容是:基尔霍夫定律及其矩阵形式、简单电路的等效、网络分析的一般方法、网络定理、非线性电阻电路分析、正弦稳态分析、耦合元件和耦合电路、正弦稳态三相电路、非正弦周期电流电路的稳态分析、二端口网络、线性动态电路的时域分析、线性动态电路的复频域分析、网络的状态变量分析法、均匀传输线的正弦稳态分析、无损均匀传输线的暂态分析。另外有两个附录,附录 A 为 EWB 简介,附录 B 为 MATLAB 简介。书中每章后均有习题,并附有部分习题答案。

本书为普通高等学校电气信息类专业的教材,也可作为高职高专及函授教材,同时还可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电路/刘耀年,霍龙主编.—北京:中国电力出版社,
2005.7

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 7-5083-2086-7

I. 电... II. ①刘... ②霍... III. 电路-高等学校-教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 082930 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版 2005 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 31.5 印张 731 千字

印数 0001—3000 册 定价 47.20 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

电路是一门重要的技术基础课,是电气、电子、通信、控制以及机电一体化等学科必备的理论基础,对工科大学生总体课程的学习和今后的工作起着深远的影响。根据教育部最新颁布的《电路课程教学基本要求》和教育部面向 21 世纪课程改革的要求,按照模块化的方式组织编写了这本教材。

本教材编写的指导思想是,针对 21 世纪对电气工程类专业人才的要求,和当前高等教育改革中注重素质和能力培养的要求,以加强基础、拓宽专业为原则,适应教学内容和课程体系改革需求,处理好教材内容的体系、深度和广度,既要重视教材内容的先进性,又要特别注意教学的适用性。为此,在组织编写这本教材时,借鉴了不少同行们编写的优秀教材,并特别注意突出了以下几个方面的特色:

(1) 本教材在体系上有着鲜明的特点,它以电路状态为线索,采用直流稳态、正弦交流稳态、非正弦周期稳态和直流暂态、交流暂态的叙述体系,这一点与国内许多同类教材不同。

(2) 处理好与前序课程及后续课程的关系,考虑到目前的大学物理和高中物理课中的电磁学内容,在教材编写上强化了元件特性,以及电阻串联、并联、分压、分流等简单实用的内容。根据学生的数学基础,教材中比较早地提出了电路方程的矩阵形式,通过线性代数进一步阐明线性电路的性质,也使前序数学课内容得到很好的应用。

(3) 围绕教材模块化的方式,理顺内容之间的关系,突出教学适用性。将“网络的图和基尔霍夫定律的矩阵形式”等内容移到第一章中,突出了网络分析的“结构”特色。将“电路方程的矩阵形式”移至第三章,使算法分析中的观察法和系统法达到了和谐、统一。

(4) 突出教学重点和工程实用,对教材进行了适度的增删,删掉了运算放大器、回转器等内容;在“状态变量法”中加入了状态空间和状态轨迹的说明和例子,在“均匀传输线稳态分析”中增加了信号的无畸变传输内容,将拉普拉斯变换的有关暂态分析内容,推广到正弦稳态分析中,加强了“频率响应”,为将来从事滤波器的分析和设计做好准备。

(5) 例题和习题突出了基本理论和基本概念的训练,摒弃了那些步骤繁琐或技巧性很强的习题。习题内容覆盖了本书中要求理解和掌握的全部内容,便于学生选择和练习,以巩固基本概念及加强对实践能力的培养,其中许多题目是经多年教学实践而精选的。

参加本教材编写工作的有:刘耀年教授(第一、三、五、十三至十五章),霍龙教授(第四、七、九、十至十二章),郝静副教授(第二、六、八章及附录部分)。此外,刘耀年教授负责起草全书编写大纲、统稿、修改定稿等工作。

本教材承蒙张纯教授仔细审阅,并提出了许多宝贵意见,所提建议大部分已被采纳,这是使教材质量得以提高的重要保证。许多同行也对本教材的编写提出了不少宝贵建议,对上述同志的热情支持和帮助,在此一并致以衷心感谢!

本教材在编写过程中借鉴了不少同行们编写的优秀教材，并从中受到了不少教益和启发，在此对各位作者表示衷心的感谢！

限于编者的水平，错误和欠妥之处在所难免，恳请读者和使用本教材的同行批评指正。最后，还要感谢为本书的出版付出了辛勤劳动的中国电力出版社的同志们。

编 者

目 录

前言

第一章 基尔霍夫定律及其矩阵形式	1
1-1 电路及电路模型	1
1-2 电流、电压及功率	3
1-3 电阻元件	6
1-4 电容元件	8
1-5 电感元件	14
1-6 独立电源	19
1-7 受控电源	23
1-8 基尔霍夫定律	25
1-9 网络图论的基本概念	27
1-10 有向图与 KCL、KVL 的矩阵表示	30
小结	36
习题一	38
参考答案	42
第二章 简单电路的等效	44
2-1 等效电路的概念	44
2-2 电阻元件的串联与并联	45
2-3 Δ 形和 Y 形电阻电路的等效变换	49
2-4 电源的等效变换	53
2-5 无伴电源的等效变换	57
2-6 线性电阻网络的输入电阻	61
小结	63
习题二	64
参考答案	67
第三章 网络分析的一般方法	69
3-1 电路分析中的方程	69
3-2 支路电流法	71
3-3 节点电压法	74

3-4 回路电流法	83
3-5 割集分析法	92
小结	99
习题三	100
参考答案	105
第四章 网络定理	107
4-1 电路的线性性质与叠加定理	107
4-2 替代定理	111
4-3 戴维南定理和诺顿定理	112
4-4 特勒根定理	117
4-5 互易定理	121
小结	124
习题四	125
参考答案	129
第五章 非线性电阻电路分析	130
5-1 非线性电阻元件特性	130
5-2 非线性电阻电路的图解法	132
5-3 非线性电阻电路的小信号分析法	135
5-4 非线性电阻电路的分段线性化分析法	139
5-5 非线性电阻电路的电路方程	141
5-6 非线性电阻电路的数值分析法	142
小结	147
习题五	148
参考答案	149
第六章 正弦稳态电路分析	150
6-1 正弦量的基本概念	150
6-2 正弦量的相量表示法	154
6-3 KCL、KVL 的相量形式	156
6-4 电阻、电感、电容元件特征方程的相量形式及其功率	159
6-5 复阻抗、复导纳及其关系	166
6-6 正弦稳态电路的功率	174
6-7 正弦稳态电路的分析计算	186
6-8 正弦稳态电路的频率特性	192
小结	202

习题六	205
参考答案	210
第七章 耦合元件和耦合电路	212
7-1 线性定常耦合电感元件	212
7-2 含有耦合电感元件电路的计算	215
7-3 空心变压器	219
7-4 理想变压器	221
小结	226
习题七	227
参考答案	231
第八章 正弦稳态三相电路	233
8-1 三相电路的基本概念	233
8-2 对称三相电路的稳态分析	237
8-3 不对称三相电路的稳态分析	241
8-4 三相电路的功率及其测量	243
小结	246
习题八	247
参考答案	248
第九章 非正弦周期电流电路的稳态分析	250
9-1 非正弦周期信号	250
9-2 周期函数的傅里叶级数	251
9-3 非正弦周期性电量的有效值、平均值和平均功率	256
9-4 非正弦周期电流电路的计算	259
9-5 对称三相非正弦周期电流电路	262
9-6 傅里叶级数的指数形式及其频谱分析	268
小结	272
习题九	274
参考答案	277
第十章 二端口网络	279
10-1 二端口网络与多端口网络	279
10-2 二端口网络的方程与参数	281
10-3 二端口网络的连接	292
10-4 二端口网络的等值电路	296

10-5 有载二端口网络	299
小结	304
习题十	306
参考答案	311
第十一章 线性动态电路的时域分析	314
11-1 动态电路的动态过程及初始值的计算	314
11-2 一阶电路的零输入响应	318
11-3 一阶电路的零状态响应	324
11-4 一阶电路的全响应	328
11-5 求解一阶电路的三要素法	331
11-6 RL 串联电路对正弦电压激励的响应	334
11-7 一阶电路的阶跃响应	336
11-8 一阶电路的冲激响应	338
11-9 任意波形激励下的零状态响应——卷积积分	347
11-10 二阶电路的暂态过程	351
小结	367
习题十一	370
参考答案	379
第十二章 线性动态电路的复频域分析	382
12-1 拉普拉斯变换	382
12-2 拉普拉斯变换的基本性质	384
12-3 拉普拉斯反变换	387
12-4 电路基本规律的复频域形式	391
12-5 用拉普拉斯变换分析线性电路的动态过程	395
12-6 网络函数	398
12-7 卷积定理	405
小结	406
习题十二	408
参考答案	413
第十三章 网络的状态变量分析法	415
13-1 网络的状态与状态变量	415
13-2 状态方程与输出方程	417
13-3 状态方程的列写	420
小结	426

习题十三	426
参考答案	428
第十四章 均匀传输线的正弦稳态分析	430
14-1 均匀传输线及其微分方程	430
14-2 均匀传输线方程的正弦稳态解	432
14-3 行波及均匀传输线的传播特性	437
14-4 波的反射与终端匹配的均匀传输线	442
14-5 均匀传输线与二端口网络	445
14-6 无畸变线与无损耗线	449
小结	456
习题十四	458
参考答案	459
第十五章 无损耗均匀传输线的暂态分析	460
15-1 无损耗均匀传输线方程的通解	460
15-2 无损耗均匀传输线上的发出波	464
15-3 无损耗均匀传输线波的反射	467
小结	480
习题十五	481
参考答案	481
附录A EWB 简介	483
A-1 窗口功能简介	483
A-2 单元电路的建立	483
A-3 单元电路的测试	484
A-4 应用实例	486
附录B MATLAB 简介	488
B-1 MATLAB 的工作环境	488
B-2 常用的数学运算函数	489
B-3 仿真 (Simulink)	489
B-4 应用举例	489

第一章 基尔霍夫定律及其矩阵形式

许多人在高中和大学的物理课程中,都曾经接触过电路,但是,在那里对于电路的讨论往往是通过许多特殊的例子来加以说明,缺乏系统的论述。在本章中将对电路的基本理论进行系统地叙述,此外,在系统地阐明电路理论的过程中,能使读者了解电路理论一些重要的基本概念以及在许多相关工程领域中的应用。

电路理论是建立在模型概念的基础上。要分析任何一个复杂的物理系统,必须用理想化的模型来描述这个系统,而理想化的模型则是由一些理想化的元件组合而成的。所谓理想化的元件本身也是一些简单的模型,它用来表达或近似地表达一些简单的实际器件或简单的物理现象的性质。虽然理想化元件只是近似地描述实际的器件或物理现象,但是理想化元件本身是由定义来精确地加以表征的。

1-1 电路及电路模型

在电路理论中,研究的是由理想化元件所构成的电路模型,并且是研究它们的一般性质。在实际电路已经给定的情况下,就有可能不断地改造它的理想化模型,从而使理想化模型的特性和实际电路的特性越来越接近。通过分析电路模型,我们能够预测实际电路的状况,并设计出更好的电路。

1-1-1 电路模型

电路理论中的模型,是同经典力学中所熟知的质点和刚体相类似的。质点是小物体的模型。按照定义,质点是没有实际尺寸的,但是它具有确定的质量,确定的位置、速度和加速度。同样,刚体被认为具有一定的形状、质量和惯量等,而且假定,不管刚体受到多大外力的作用,刚体中任何两点之间的距离是不变的。严格说来,在自然界中并不存在着质点和刚体这样的东西,然而,这些理想化的模型却能成功地用于设计机器、飞机、火箭等。

在以下各章中所讨论的电路元件,都是一些具有精确的表征特性的模型,这些特性是实际使用的器件物理特性的理想化。把这些电路元件相互连接起来,就成为电路模型,并且借助于这种理想化的模型来分析和设计实际的电路。

1-1-2 集中参数电路与分布参数电路

电路有两种类型:集中参数电路和分布参数电路。

集中参数电路是由集中参数元件连接而成。典型的集中参数元件是电阻器、电容器、电感器和变压器等。集中参数元件的电路参数(电阻、电感、电容)都是集中在元件上的,元件的电磁特性用端口的电磁量来描述。实际上导线的电阻和导线之间的电容都是分布在导线

的全长度上的,线圈的电感也是分布在线圈的每一匝上的。在应用集中参数的电路模型时,忽略了元件参数的分布特性,而用元件的一个或一组集中的参数来表征其作用。

集中参数元件的一个主要特点是:同正常工作频率所对应的波长相比较,外形尺寸很小可以忽略不计。从这一意义上来说,它们和质点相似。也就是说,对于由集中参数元件连接而成的电路,不管其连接方式如何,只要电路的尺寸远小于电路的最高频率所对应的波长,都称之为集中参数电路。

集中参数元件有二个端子的(二端元件如电阻器)和多个端子的(多端元件例如变压器或晶体管等)。对于二端集中参数元件,在任何时刻从元件的一端流入的电流恒等于从另一端流出的电流,而两端之间的电压可以用物理的方法准确地测量出来,就是说,在任何时刻流经元件的电流以及元件的端电压是完全确定量。对于多端集中参数元件来说,在任何时刻流入任一端的电流以及任意两端之间的电压是完全确定的。只要电路的尺寸符合上述的限制,基尔霍夫电流定律和电压定律就能够适用。

在研究施加时变电源的高压输电线或高频信号传输线时,既要考虑传输线的电阻压降和磁场变化所引起的感应电动势,也要考虑线间由于绝缘不理想引起的漏泄电流和电场变化所引起的位移电流,因此导线间的电压是沿线变化的,导线中的电流也是沿线不同的。在分析传输线的电压、电流沿线分布时,就要考虑到导线上每一单位长度具有的电阻和电感,以及导线之间的电导和电容。即传输线是具有分布参数特性的电路,要根据分布参数电路的概念来处理。

集中参数电路和分布参数电路的划分,是以电路的线性尺寸与在其中传输的电磁波的最短波长相比较为依据的。大体可以认为,与电路中的电压、电流变化的最高频率 f 相对应的波长 λ 和电路的最大线性尺寸 l 之间满足 $\lambda \geq 100l$ 关系时,电路可以作为集中参数电路来研究,否则就应作为分布参数电路来处理。

集中参数电路是由集中参数元件连接而成。在集中参数电路中,二端元件称为支路,元件的端点可以称为节点,节点还可以表示几个元件相互连接的端点。图1-1表示具有六个节点、八条支路的集中参数电路,节点记为①、②、③、④、⑤和⑥,支路记为1、2、3、4、5、6、7和8。

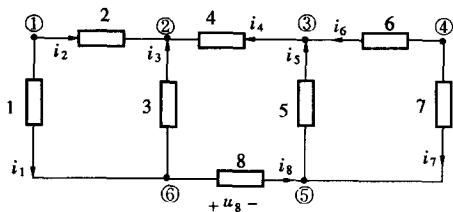


图1-1 具有6个节点、8条支路的集中参数电路

支路两端之间的电压(称为支路电压)和流经支路的电流(称为支路电流)是电路理论中所关心的基本变量。如: i_8 是支路8的支路电流, u_8 是支路8的支路电压。

在电路中由几个支路组成的一部分闭合路径叫做回路,没有被支路穿过的回路叫做网孔,它好像是一张网的网眼。图1-1电路有六个回路,三个网孔;六个回路是:①②⑥①、①②③④⑤⑥①、②③④⑤⑥②。三个网孔是:①②⑥①、②③⑤⑥②、③④⑤③。显然,网孔是回路的一种特例,上述六个回路中只有前面三个才能算作网孔,即这个网络只有三个

网孔。

所谓网络分析,简单地说是指在已知网络结构(即给定电路图)及元件参数,比如电阻的阻值和电源的数值以及极性的条件下,确定各节点电位或各支路电流的大小和流动方向。对图1-1网络而言,就是要确定六个支路电流或五个节点电位。这种分析是比较典型的,另外还有已知部分元件的参数及支路电流,求解其余未知部分元件的参数及支路电流。从分析方法的原则上看,其实质是一致的。如果掌握了分析前一问题的方法及其所需的基本概念及基本定律,就能够解决后一类型的问题。

顺便指出,网络分析的反面问题,即确定电路结构及其参数使其满足预先给定的要求,叫做网络综合。本书只介绍有关网络分析的基本理论和方法。

1-2 电流、电压及功率

对电路的描述是通过一些物理量,如电压、电流、电荷、磁链、功率和能量等来表示的,这些物理量统称为电路变量和网络变量。由于电压和电流在电路中比较容易通过仪器观察到,因此电压和电流是描述电路特性的两个基本变量,一个电路一旦电压和电流被确定,这个电路的特性也就确定了。

1-2-1 电流

电荷的有规则的运动形成电流。导体内的电流是由于金属内部自由电子在电场力作用下运动而形成的,而在电解液或被电离后气体的导电过程中,电流是由正、负离子在电场力作用下沿着相反方向运动而形成的。负电荷的运动其效果与等量正电荷作反方向运动相同。上述导体、液体或气体中的电流都叫做传导电流,电路中一般只涉及到导体的传导电流。

电流的大小取决于一定时间内通过导体截面 S 的电荷量的多少。设 dt 时间内通过 S 的电量为 dq ,则

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

式中: $i(t)$ 称为电流强度,简称电流。因此,电流一词不仅表示一种物理现象,而且也代表一个物理量。不随时间变化的电流叫做恒定电流或直流电流,规定用大写字母 I 表示,小写字母 i 则表示随时间变化的交变电流。直流电流 I 与电量 q 的关系可表示为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中:电流强度 I 的单位是安[培],A。电路中,不仅电流的大小而且其方向都对电路的工作状态有很大影响,因此,在测定或计算电路的电流时,既要考虑电流的大小,也要考虑电流的方向。

电流的方向习惯上采用正电荷的流动方向,该习惯最初是由本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin)提出来的。实际上,在金属中流动的是带负电的电子,但习惯上假设为正电荷的流动。

图 1-2 表示电路中的某一个支路, 电流从节点 A 流向节点 B 时, 假定电流数值等于 -5A , 数值前的负号表示电流的实际方向与电路图中标记的方向相反, 电流的真实方向是从节点 B 流向节点 A。由此可见, 电路图中标记的电流方向, 并不需要一定与实际方向一致; 因此, 把图上箭头标记的方向, 叫做电流的参考方向 (任意人为假定的方向)。

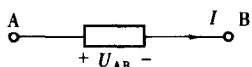


图 1-2 电流的方向

参考方向的假定是任意的, 一旦选定后, 在电路分析过程中就不能改变。在选取一定的参考方向的前提下, 电流是个代数量。电流的实际方向在参考方向选定后由电流数值的正负来决定。当数值为正时, 实际方向便与参考方向一致, 若数值为负, 实际方向与参考方向是相反的。离开参考方向讲电流的大小是不完整的, 离开参考方向谈电流的正负也是没有意义的。

1-2-2 电压和电位

电荷在电场力作用下运动形成电流, 在此过程中电场力推动电荷移动而作功, 电场力做功的能力用电压表示。在一段电路中, 假设正电荷 dq 从 A 点到 B 点时电场力做功为 dW , 则 A、B 间的电压为

$$U_{ab} = \frac{dW}{dq} = \int_a^b E dl \quad (1-3)$$

从数值上看, 电压也就是电场力把单位正电荷从 A 移至 B 时所做的功。如果功的单位为焦耳, 电量单位为库仑, 则电压单位为伏特。不随时间变化的电压称为直流电压, 用大写字母 U 表示, 而小写字母 u 则表示交变电压。

与静电场分析相似, 把正电荷在某点所具有的能量叫做正电荷在该点的电位能。电位能与电量的比值称为电位, 用 V 表示。如 V_A 、 V_B 分别表示 A 点与 B 点的电位, 电位的单位也是伏特。电路中两点之间的电压应等于两点电位之差, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

所以电压也称为电位差。

在物理中曾指出, 无限远处或大地的电位为零, 因此电路中若有接地点, 则认为该点电位为零, 称作“参考点”。电位比此点高者为正, 低者为负。如电路没有接地点, 为了说明各点电位的高低, 可以指定电路中任一点 (只能一点) 的电位为零。一般的仪器设备都有一个公共端连到设备的外壳上, 这个公共端点习惯上就叫做“地”, 通常就选这一点为电位参考点。

参考点选定后, 电路中各点的电位都具有一定的数值。在图 1-3 所示电路中, 已知: $U_1 = 10\text{V}$, $U_2 = 5\text{V}$, 电路中 a、b、c 点电位分别用 V_a 、 V_b 、 V_c 表示。即: $U_1 = V_a - V_b$, $U_2 = V_b - V_c$ 。如选 c 点为参考点, 即 $V_c = 0$, 如图 1-3 (a) 所示, 则由上

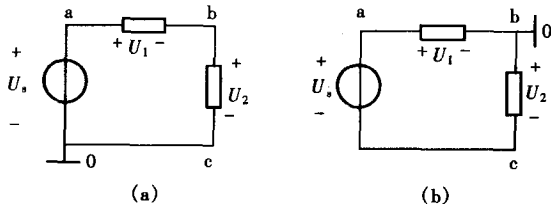


图 1-3 不同参考点时的电位、电压分析的例子
(a) c 点为参考点的电路; (b) b 点当作参考点的电路

面关系式及已知条件, 可得 $V_b = U_2 = 5\text{V}$, 而 $V_a = U_1 + U_2 = 15\text{V}$ 。各点电位都有惟一的数值, 此特点称为电位的单值性。若将 b 点当作参考点, 即 $V_b = 0$, 如图 1-3 (b) 所示, 则可得 $V_a = U_1 = 10\text{V}$, $V_c = -U_2 = -5\text{V}$, c 点电位比参考点电位低。这时各点电位的数值也是一定的, 但与选 c 点作为参考点时不同。说明电路中各点电位的数值是单值的, 而具体数值与参考点的选取有关。

综上所述可知, 电压或电位差是与参考点的选取无关的, 在图 1-3 所示的电路中, 无论选 c 点还是 b 点为参考点, a、b 之间的电位差都是 10V, b、c 之间的电位差都是 5V。应用电位概念时, 必须指明它的参考点。在生产实践中, 通常把电路作为一个完整的系统考虑时, 它具有公共端, 所以应用电位概念还是较为方便的。

电路的工作状态, 也可以通过电路中各点的电位数值反映出来。电气设备安装后要进行调试, 出了故障要检查, 其中一个主要方法就是测量各点电位值, 看其是否符合设计中的电位数值。由于用伏特表测量电压时不必切断电路, 所以这种方法是比较方便的。例如图 1-4 中开关 S 的工作状态就可以用电位表示。假定 c 点为参考点, 即 $V_c = 0$, 用伏特表测量 b 点电位, 若读数为零, 即 $V_b = 0$, 可以知道开关是闭合的, 因为开关闭合后 b、c 是等电位的。若伏特表读数为 10V, 可以判别为开关 S 是打开的, 此时电路不通, 无电流时电阻 R 上没有电压, 故 $V_a = V_b = 10\text{V}$ 。

与电流分析相同, 电压也要选定参考方向, 电压也是一个代数量, 电压参考方向的选定也是任意的, 电压的实际方向也是由参考方向及数值的正负两方面确定的。同一元件上的电压和电流参考方向的选取原则上是任意的, 没有制约关系, 但是对于电阻、电感、电容等元件习惯上总是将电压和电流的方向选为一致方向 (关联方向)。

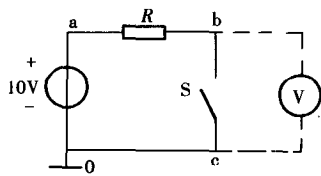


图 1-4 电路的开路与短路

在图 1-2 的支路中, 选定参考方向后, 由电压定义可知, 若 $U_{AB} > 0$, 表示正电荷从 A 点到 B 点, 通过这段电路时电场力是作功的, 即这段电路是吸收电能的。也就是说, 正电荷在 A 点时具有的能量要比移到 B 点时大, 其差额等于这段电路吸收的能量。由此可以看出所谓电压的方向是指电位降落的方向 (正电荷电位能减少的方向)。

参考方向是电路分析的一个重要概念; 在计算电路时, 首先要假定各元件的电流 (电压) 的参考方向, 否则就无法建立电路方程。一旦参考方向假定后, 就不能随意更改。

1-2-3 电功率与电能

对于电气设备, 所需要的不仅是电流本身, 而且是伴随电压、电流的电能。电功率是用来衡量电能转换或传输速率的物理量。根据电流的定义, 在 dt 时间内通过的电荷量为 $dq = idt$ 。在集中参数电路中, 电荷通过电路时, 电能所作的功即电路吸收的电能等于该电荷量与端电压的乘积, 即: $dw = udq = uidt$, 因此, 电路“吸收”的功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-5)$$

式中：功率 p 的 SI 单位为瓦 [特]，W。

当电能通过元件转换成其他形式的能量时，电能对外做功，此时称该元件为消耗电能或吸收功率；当其他形式的能量通过元件转换成电能时，此时称该元件为发出电能或发出功率。

电路中的元件是吸收还是发出功率，要同时依据计算时所选择的电压、电流参考方向和计算结果的符号来判定。当元件的电压和电流的参考方向一致时，而且它们的乘积为正时，表明该元件消耗功率，此时的电流由高电位点流向低电位点。凡是电流的真实方向是从元件的高电位点流向低电位点，元件总是消耗功率的。相反，当元件的电压和电流的参考方向相同，而它们的乘积为负时，则表明该元件发出功率。电路中的元件究竟是吸收还是发出功率，不会因为计算时所选择的参考方向不同而得出不同的结论。

对于电源元件如果选定的电压 U 与电流 I 的参考方向相反，即电流方向由电源电压的正极流出时，此时电流是从低电位端流向高电位端，电压与电流的乘积为负，表明功率是发出的。反之，电压与电流的乘积为正，表明电源元件是吸收功率的。

在实际的电气设备、元器件的工作中，对其功率都有限制，即额定功率。在使用时要注意其实际功率不能超过额定功率的限制，否则，设备或器件就可能缩短使用期甚至毁坏。因此，电路中功率和能量的计算也是电路分析的重要内容。

1-3 电 阻 元 件

在物理课程中，研究了服从于欧姆定律的电阻器，即电阻器的端电压和流过电阻器的电流成正比。在工程中有很多电子器件，它们并不服从于欧姆定律，但是却具有类似的特性。这些器件在计算机、控制系统和通信系统中的应用正在不断发展。所以，从更广泛的观点来研究基本的电阻元件是十分必要的。

1-3-1 电阻元件的定义

如果一个二端元件，其端电压 $u(t)$ 和流过的电流 $i(t)$ 在所有时间 t 内反映出确切的瞬时关系，可用 $u-i$ 平面上一条曲线来描述，此二端元件称为电阻元件。曲线称为电阻元件在时间 t 的特性曲线。特性曲线确定了在时间 t 时变量 $u(t)$ 和 $i(t)$ 的全部可能的数值集合。

根据特性曲线的不同，可以把电阻元件分为四种类型，即线性时不变、线性时变、非线性时不变和非线性时变。本章讨论的重点是线性时不变元件。

1-3-2 线性时不变电阻元件

如果电阻元件的特性曲线是 $u-i$ 平面上一条不随时间变化且经过原点的直线，该电阻元件称为线性时不变电阻元件。线性时不变电阻元件的符号和特性曲线如图 1-5 所示。在电压、电流取关联参考方向的前提下，线性时不变电阻元件的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 之间的关系可用欧姆定律表示如下：

$$u(t) = Ri(t) \text{ 或 } i(t) = Gu(t) \quad (1-6)$$

该方程为线性电阻元件的特性方程。需要注意的是,电阻元件的特性方程与电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 的参考方向有关。若电阻元件的电压和电流采用非关联参考方向时,上式应加负号,其表达式为

$$u(t) = - Ri(t) \text{ 或 } i(t) = - Gu(t) \quad (1-7)$$

式中: R 和 G 是与 u 、 i 、 t 无关的常数。 R 称为电阻, G 称为电导,两者互为倒数。电阻的SI单位为欧姆(Ω),电导的SI单位为西门子(S)。

线性时不变电阻元件有两种特殊情况:开路和短路。无论元件的支路电压值是多少,只要支路电流值恒等于零,就称为开路。开路时的特性曲线与 u 轴重合,如图1-6所示。该特性曲线的斜率为无穷大,即 $R = \infty$ 或 $G = 0$ 。无论二端元件的支路电流值是多少,只要支路电压值恒等于零,就称为短路。短路的特性曲线与 i 轴重合,如图1-7所示。该特性曲线的斜率为零,即 $R = 0$ 或 $G = \infty$ 。

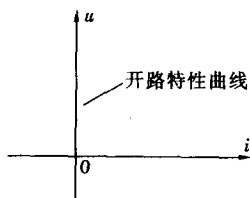


图1-6 开路特性曲线
与 u 轴重合

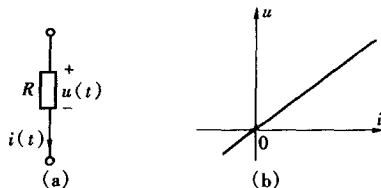


图1-5 线性时不变电阻元件
(a) 线性时不变电阻元件符号;
(b) 线性时不变电阻元件的特性曲线

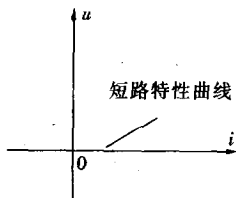


图1-7 短路特性曲线
与 i 轴重合

线性时不变电阻元件的输入功率为

$$p = ui = i^2 R = u^2 G \text{ 或 } P = - ui = i^2 R = u^2 G \quad (1-8)$$

式(1-8)表明无论电压和电流的参考方向是否关联,功率 $p \geq 0$,也就是说只要电阻有电流流过,线性时不变电阻元件总是吸收功率的,因此它是耗能元件。从能量的角度看,从零时刻到 t 时刻输入电阻的全部能量为

$$w = \int_0^t p(t') dt' = \int_0^t u(t') i(t') dt' = R \int_0^t i^2(t') dt' = G \int_0^t u^2(t') dt'$$

该式就是焦耳定律,电阻将吸收的电能转化为热能。

1-3-3 线性时变电阻元件

如果电阻元件的特性曲线在所有时间内都是过 $u-i$ 平面上原点的直线,并且直线的斜率是随时间变化的,则称此电阻元件为线性时变电阻元件,如图1-8所示。

线性时变电阻元件的特征方程为

$$u(t) = R(t)i(t) \text{ 或 } i(t) = G(t)u(t) \quad (1-9)$$