

高等学校教材

# 电路分析 基础

陈娟 主编

Fundamentals of Circuits Analysis

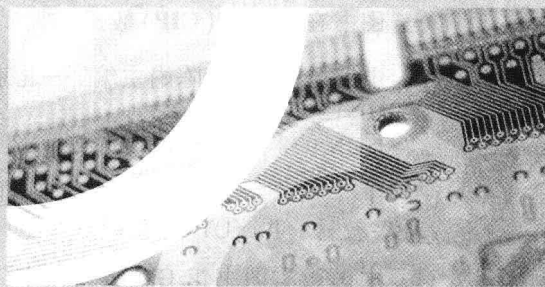


高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

# 电路分析基础

陈娟 主编



Dianlu Fenxi Jichu



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书是为电气信息类专业本科生编写的教材。内容既符合教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的《电路分析基础课程教学基本要求(修订稿)》,又适应培养应用型人才的需要。全书共9章,内容包括:电路的基本概念与定律、电阻电路的方程分析法、线性叠加与等效变换、动态电路的时域分析、正弦稳态电路分析、三相电路、电路的频率特性、耦合电感和理想变压器、双口网络。

本书以知识应用为重点,结构合理,内容精简实用,叙述详尽透彻,并配有大量的例题和习题,便于自学。本书可作为普通高等学校电气信息类专业电路课程教材或教学参考书,也可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/陈娟主编. —北京:高等教育出版社,  
2010.12

ISBN 978-7-04-030906-5

I. ①电… II. ①陈… III. ①电路分析-高等学校-教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第208706号

策划编辑	杜 炜	责任编辑	王丹丹	封面设计	于 涛
责任绘图	尹 莉	版式设计	张 岚	责任校对	王效珍
责任印制	朱学忠				

---

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京明月印务有限责任公司

开 本 787×960 1/16  
印 张 20.5  
字 数 380 000

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010年12月第1版  
印 次 2010年12月第1次印刷  
定 价 30.00元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30906-00

# 前 言

电路分析基础课程是高等学校电气信息类专业的一门重要专业基础课程,其教学质量的好坏将直接影响到后续课程的顺利进展。但是,随着教学体系的不断改革,电路分析基础课程的教学时数却比过去明显减少。对大部分学生来说,要在有限的学习时间里把握课程的要点是相当困难的。

本书编写的初衷就是充分考虑学生的能力差异,尽力编写一本既通俗易懂又符合教学基本要求的教材,使学生比较轻松地掌握电路的基本理论知识和分析方法,为学习后续课程打下应有的基础。

本书依照教育部高等学校电子信息科学与工程类专业基础课程教学指导分委员会制定的《电路分析基础课程教学基本要求(修订稿)》,按理论教学72学时进行编写,力求思路清晰、重点突出。编写过程中着重突出以下几点。

第一,教材在编排上力求凸现课程的总思路、总方法,便于学生把握课程的重点。比如第2章“电阻电路的方程分析法”、第3章“线性叠加与等效变换”等标题就是努力体现电路分析中的思路与方法。

第二,对教学基本内容尽量讲透讲深,努力保证教学质量。对可选内容大量删减,例如图论、特勒根定理、卷积等内容都没有编入教材,以保证教材“简明、实用”的特点。

第三,在分析方法上追求简单实用,以培养学生的灵活应用能力。例如引用“超网孔”、“超节点”而摒弃“自电阻”、“互电阻”,使电路方程不拘于形式,而更注重物理实质,便于后续课程中的不断应用。

第四,将大量理论叙述的内容转移到配套的例题中,寓教于“练”,在知识的应用过程中学习新的知识,努力使复杂的问题简单化。

第五,在例题的配备上不计篇幅,尽量涵盖各种典型题型与工程应用实例,以便于学生参考借鉴、举一反三。

在本书编写过程中,编者参阅了已出版的大量优秀教材,在此对这些教材的编者表示感谢。

本书由陈娟任主编并负责统稿,施晓虹参编。其中第1、2、3、4、5、7、8、9章由陈娟编写,第6章由施晓虹编写。陆明达与燕庆明两位教授对本书进行了认真审阅,提出了许多宝贵意见,使编者受益匪浅,在此深表感谢!

本书的出版得到“同济大学继续与网络教育研究与奖励基金”的立项资助,

编写过程中得到了同济大学电子与信息工程学院、继续教育学院、浙江学院以及浙江师范大学数理与信息工程学院有关师生的大力支持,在此一并表示衷心的感谢!同时也特别感谢高等教育出版社对本书出版所给予的全力支持与帮助!

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请各位读者给予批评指正。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书的教师登录“中国高校电子电气课程网”下载(网址:<http://ee.cncourse.com>)。

编者  
2010年8月

# 目 录

## 第 1 章 电路的基本概念与定律 1

1.1 电路和电路模型 .....	1
1.1.1 实际电路 .....	1
1.1.2 电路模型 .....	2
1.1.3 集中参数电路 .....	4
1.2 电路变量 .....	4
1.2.1 电流及其参考方向 .....	4
1.2.2 电压及其参考方向 .....	6
1.2.3 电位的概念 .....	7
1.2.4 电功率 .....	8
1.3 基尔霍夫定律 .....	10
1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL) .....	11
1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL) .....	13
1.4 电阻元件 .....	14
1.4.1 二端电阻元件的定义 .....	15
1.4.2 线性电阻的伏安关系 .....	16
1.4.3 电阻元件的功率 .....	17
1.5 独立电源 .....	18
1.5.1 电压源 .....	18
1.5.2 电流源 .....	21
1.5.3 实际电源的两种模型及其等效变换 .....	22
1.6 受控电源 .....	26
1.6.1 受控源模型 .....	26
1.6.2 含受控源电路的分析 .....	27
习题 1 .....	29

## 第 2 章 电阻电路的方程分析法 35

2.1 两类约束与电路方程 .....	35
---------------------	----

2.2	支路电流法	37
2.3	网孔电流法	40
2.3.1	网孔 KVL 方程的列写	40
2.3.2	电路中含有电流源支路的处理方法	42
2.3.3	电路中含有受控源的处理方法	44
2.4	节点电压法	45
2.4.1	独立节点 KCL 方程的列写	46
2.4.2	电路中含有电压源支路的处理方法	49
2.4.3	电路中含有受控源的处理方法	51
2.5	含运算放大器电路的节点分析	52
2.6	电路的对偶性	57
	习题 2	58

### 第 3 章 线性叠加与等效变换

64

3.1	线性电路的比例性	64
3.2	叠加定理	66
3.3	单口网络等效的概念	69
3.3.1	单口网络等效的概念	70
3.3.2	单口网络的伏安关系	70
3.4	不含独立源单口网络的等效	72
3.4.1	电阻的串联与并联	72
3.4.2	电阻星形联结与三角形联结的等效变换	78
3.4.3	含受控源单口网络的等效电阻	81
3.5	含独立源单口网络的等效	82
3.5.1	理想电源的串联与并联	83
3.5.2	实际电源的串联与并联	85
3.6	替代定理	87
3.7	等效电源定理	89
3.7.1	戴维宁定理	90
3.7.2	诺顿定理	95
3.7.3	等效电阻的计算	98
3.8	最大功率传输定理	100
	习题 3	102



4.1 电容元件 .....	115
4.1.1 电容元件的定义 .....	115
4.1.2 电容元件的伏安关系 .....	116
4.1.3 电容的储能 .....	120
4.2 电感元件 .....	121
4.2.1 电感元件的定义 .....	121
4.2.2 电感元件的伏安关系 .....	122
4.2.3 电感的储能 .....	124
4.3 动态电路的过渡过程 .....	125
4.3.1 动态电路的过渡过程 .....	125
4.3.2 初始值的确定 .....	126
4.3.3 稳态值的确定 .....	129
4.4 一阶电路的零输入响应 .....	131
4.4.1 RC 电路的零输入响应 .....	131
4.4.2 GL 电路的零输入响应 .....	134
4.5 一阶电路的零状态响应 .....	138
4.5.1 RC 电路的零状态响应 .....	138
4.5.2 GL 电路的零状态响应 .....	140
4.5.3 阶跃函数与阶跃响应 .....	143
4.6 一阶电路的全响应和三要素法 .....	146
4.6.1 一阶电路的全响应 .....	146
4.6.2 三要素法求直流激励下的一阶电路 .....	148
4.7 二阶电路的暂态分析 .....	152
4.7.1 二阶电路方程的建立 .....	153
4.7.2 RLC 串联电路的零输入响应 .....	153
4.7.3 直流 RLC 串联电路的全响应 .....	156
4.8 应用举例 .....	159
4.8.1 积分电路 .....	159
4.8.2 微分电路 .....	160
习题 4 .....	161

5.1 正弦量的基本概念 .....	170
--------------------	-----



5.1.1	周期、频率和角频率 .....	170
5.1.2	瞬时值、振幅和有效值 .....	171
5.1.3	相位与相位差 .....	172
5.2	正弦量的相量表示 .....	174
5.2.1	复数的复习 .....	175
5.2.2	正弦量的复数表示法 .....	177
5.3	基尔霍夫定律的相量形式 .....	179
5.3.1	KCL 的相量形式 .....	179
5.3.2	KVL 的相量形式 .....	181
5.4	基本元件 VCR 的相量形式 .....	182
5.4.1	电阻元件 .....	182
5.4.2	电感元件 .....	183
5.4.3	电容元件 .....	185
5.5	阻抗与导纳 .....	188
5.5.1	基本元件 VCR 的统一形式——阻抗与导纳 .....	188
5.5.2	无源单口网络的等效阻抗与导纳 .....	190
5.6	正弦稳态电路的相量分析法 .....	196
5.6.1	简单正弦稳态电路的分析 .....	197
5.6.2	复杂正弦稳态电路的分析 .....	200
5.7	正弦稳态电路的功率 .....	204
5.7.1	瞬时功率和平均功率 .....	205
5.7.2	无功功率和视在功率 .....	207
5.7.3	功率因数的提高 .....	210
5.7.4	复功率 .....	212
5.8	最大功率传递定理 .....	213
5.9	应用举例 .....	215
5.9.1	RC 移相电路 .....	215
5.9.2	荧光灯电路分析 .....	217
	习题 5 .....	218

## 第 6 章 三相电路

227

6.1	对称三相电源及其联结 .....	227
6.1.1	对称三相电压的产生 .....	227
6.1.2	三相电源星形(Y形)联结 .....	229
6.1.3	三相电源三角形( $\Delta$ 形)联结 .....	230

6.2	三相负载星形联结 .....	231
6.3	三相负载三角形联结 .....	235
6.4	三相电路的功率及其测量 .....	237
6.4.1	三相电路的功率 .....	237
6.4.2	三相功率的测量 .....	238
6.5	应用举例:关于相序测定电路的分析和计算 .....	240
	习题 6 .....	241

## 第 7 章 电路的频率特性 244

7.1	正弦稳态电路的网络函数 .....	244
7.1.1	网络函数的定义 .....	244
7.1.2	网络函数的频率特性 .....	246
7.2	多频率激励的电路 .....	250
7.2.1	多频率正弦激励的电路响应 .....	250
7.2.2	非正弦周期信号激励的电路响应 .....	252
7.2.3	平均功率的叠加 .....	254
7.3	$RLC$ 串联谐振电路 .....	256
7.3.1	谐振条件 .....	256
7.3.2	谐振电路的特点 .....	257
7.3.3	选频特性 .....	259
7.4	$GCL$ 并联谐振电路 .....	262
7.4.1	谐振条件 .....	262
7.4.2	谐振电路的特点 .....	263
7.4.3	选频特性 .....	264
	习题 7 .....	266

## 第 8 章 耦合电感和理想变压器 269

8.1	耦合电感的伏安关系 .....	269
8.1.1	自感与互感、耦合系数 .....	269
8.1.2	耦合电感的同名端 .....	271
8.1.3	耦合电感的 VCR .....	273
8.2	耦合电感的去耦等效 .....	279
8.3	理想变压器 .....	282
8.3.1	理想变压器的 VCR .....	282
8.3.2	理想变压器的阻抗变换 .....	285

习题 8 .....	288
------------	-----

<b>第 9 章 双口网络</b>	<b>291</b>
-------------------	------------

9.1 双口网络的参数方程 .....	292
9.1.1 阻抗参数方程及 $Z$ 参数 .....	293
9.1.2 导纳参数方程及 $Y$ 参数 .....	296
9.1.3 混合参数方程及 $H$ 参数 .....	299
9.1.4 传输参数方程及 $A$ 参数 .....	300
9.2 互易双口的等效电路 .....	303
9.2.1 双口网络的 T 形等效电路 .....	304
9.2.2 双口网络的 $\Pi$ 形等效电路 .....	304
9.3 含双口网络电路的分析举例 .....	306
习题 9 .....	308
部分习题答案 .....	310
参考文献 .....	317

---

---

---

---

---

# 第 1 章

## 电路的基本概念与定律

本章首先建立电路模型概念,讨论电路分析中常用的物理量;接着讲述基本物理量电流和电压在集中参数电路中应遵循的结构约束,即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律;然后讨论电路中的几个基本元件电阻、独立电源和受控电源的定义及其电压-电流约束关系。

结构约束和元件约束是分析集中参数电路的基本依据,本章内容是贯穿全书的重要理论基础。

### 1.1 电路和电路模型

#### 1.1.1 实际电路

电路(electric circuit)是由若干电气设备或器件按一定方式组合起来的、构成电流通路的整体。一般由电源、负载及中间环节三部分组成。

电源(source)是将其他形式的能量转换成电能的装置,例如,发电机将机械能转换成电能,电池将化学能转换成电能,此外,水力资源、原子能、太阳能、地热、潮汐、风能等都已成为电能的来源。

负载(load)是用电设备的统称,是将电能转换成其他形式能量的装置,例如荧光灯、电动机、电炉、扬声器等。

中间环节指连接电源和负载的部分,它起着传输、控制和分配电能的作用,例如输电线、变压器、配电装置、开关、熔断器及各种保护和测量装置、放大器、数码分配器等。

实际电路种类繁多,但就其功能来说可分为两类。电路的第一类功能是实现电能的输送和转换,例如,在电力系统中,发电厂的发电机将热能、水能或核能等其他形式的能量转换成电能,再通过输电线和各级变电所中的升压或降压变压器将电能输送到各用电设备,再根据需要将电能转换成机械能、热能和光能等其他形式的能量。在这类电路中,一般要求在输送和转换过程中尽可能地减少能量损耗以提高效率。

电路的第二类功能是实现信号的传递和处理,例如,电视机电路通过接收装置把载有语言、文字、音乐、图像的电磁波接收后转换为相应的电信号,然后通过多种中间环节将电信号进行传递和处理,送到显示器和扬声器后还原为原始信息。对于这一类电路,虽然也有电能的输送和转换问题,但人们更关心的是信号传递的质量。

无论具体电路的功能如何,随着电磁波的传播(表现为电路中的电压、电流),电路中都进行着从其他形式的能量转换成电能、电能的传输和分配以及又把电能转换成所需要的其他形式能量的过程。其中,电源是电路中产生电压、电流的动力,通常称电源的电压、电流为激励(excitation),它推动了电路工作。由激励产生的电压或电流称为电路的响应(response)。已知激励求给定电路的响应,称为电路分析(circuit analysis);已知响应与激励,求符合要求的电路,称为电路综合或电路设计(circuit synthesis)。

### 1.1.2 电路模型

实际电路器件在工作中表现出较为复杂的电磁性质。例如白炽灯在通电工作时,能把电能转换成光能和热能,具有消耗电能的电阻特性,但其空间还有电场能量和磁场能量,具有一定的电容性和电感性。电池工作时除将化学能转换为电能产生电动势外,在它的内阻上也消耗一部分电能,因而又具有一定的电阻特性。

为了便于对实际电路进行数学描述和分析,我们需将实际元件理想化,即在一定条件下突出其主要的电磁性质,忽略其次要因素,把它近似地看做理想电路元件(ideal circuit element)。例如,理想电阻元件只表征消耗电能的特性,理想电感元件只表征储存和释放磁场能量的特性,理想电容元件只表征储存和释放电场能量的特性。

因此，理想电路元件是具有某种确定的电磁性质的假想元件，它有精确的数学定义。由理想电路元件组成的电路，就称为电路模型(circuit model)。

例如如图 1-1 所示的手电筒电路中，干电池是把化学能转换为电能的元件，可理想化为电压源  $U_S$  和内阻  $R_S$  串联的组合模型，灯是电路中的负载，可理想化为电阻元件  $R_L$ ，而筒体和开关是连接干电池和灯的中间环节，其电阻可忽略不计，认为是理想的导线和开关。

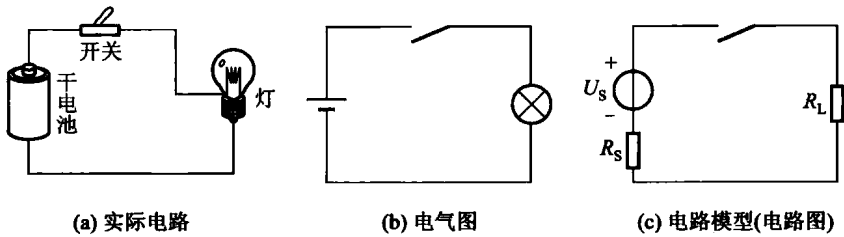


图 1-1 手电筒电路

应当指出，用理想电路元件的组合来模拟实际电路，只能在一定条件下近似地反映实际器件中所发生的电磁过程。根据工作条件及要求精确度的不同，同一实际器件可能用不同的理想电路元件组合来模拟。例如图 1-2(a) 所示的电感线圈，在低频交流工作条件下，其主要电磁性能是储存和释放磁场能量，可以用理想的电感元件来表征，如图 1-2(b) 所示；若考虑线圈损耗，则可以用理想电感元件和电阻元件的串联组合来表征，如图 1-2(c) 所示；但在高频交流工作条件下，线圈匝间的电容效应(空间电场效应)不能忽略，表征此线圈的较精确的电路模型除了理想电感元件及电阻元件外，还应包含理想电容元件，如图 1-2(d) 所示。

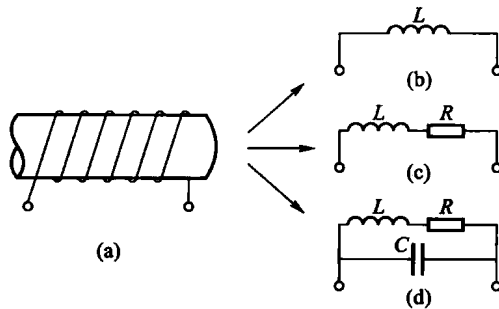


图 1-2 电感线圈的几种电路模型

本课程的任务不是研究如何建立实际器件的理想化模型,而是根据电路模型来探讨其基本定律、定理及分析方法。

### 1.1.3 集中参数电路

实际电路器件在工作时所发生的电磁现象是交织在一起的,在空间上无法将它们分离,而且这些电磁现象连续分布在电路器件中。为了便于分析,可根据实际电路的几何尺寸( $d$ )与其工作信号波长( $\lambda$ )的关系,将电路分为集中参数电路和分布参数电路。

集中参数电路(lumped parameter circuit)是指实际电路的几何尺寸( $d$ )远远小于电路工作信号波长( $\lambda$ ),以至在分析电路时可以忽略元件和电路本身几何尺寸的电路。满足集中化条件的电路中,某一电磁现象是集中在一个元件中发生的。例如电能损耗、磁场储能和电场储能是分别集中在电阻元件、电感元件和电容元件中进行的。其特点是电路中任意两个端点间的电压和流入任一元件端钮的电流是完全确定的,与元件的几何尺寸及空间位置无关。

不满足集中化条件的电路称为分布参数电路(distributed parameter circuit),其特点是电路中的电压和电流不仅是时间的函数,也与元件的几何尺寸及空间位置有关。

例如,一段 2 m 长的馈线,在工频 50 Hz 时,如果馈线周围介质是空气,电磁波的速度(光速)为  $3 \times 10^8$  m/s,电磁波波长  $\lambda = v/f = 6 \times 10^6$  m,可视为集中参数电路;若将此馈线作为电视机天线的引线,电视信号频率一般在 50 MHz 以上,若以  $f = 50$  MHz 计算,波长  $\lambda = 6$  m,信号的波长与馈线的长度可比拟,不能满足集中化条件。同理,长达千公里( $10^6$  m)左右的输电线也应视为分布参数电路。

本书只研究集中参数电路,为叙述方便,以下简称为电路。

## 1.2 电路变量

电路的特性是由电流、电压和电功率等物理量来描述的。电路分析的基本任务是计算电路中的电流、电压和电功率。

### 1.2.1 电流及其参考方向

电流(current)通常指电荷定向运动的物理现象。电流的大小指单位时间  $\Delta t$  内流过导体横截面的电荷量  $\Delta q$ ,习惯上也称为电流,用符号  $i$  表示,其瞬时值

$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$



一般情况下,电流的大小或方向是随时间变化的,称为时变(time varying)电流,用小写字母  $i$  表示。当电流的大小和方向作周期性变化且平均值为零时,称为交流电流(alternating current,简称为 ac 或 AC)。如果电流的大小和方向恒定不变,则称为恒定电流或直流电流(direct current,简称为 dc 或 DC),可用大写字母  $I$  表示。

在国际单位制(International System of Units,简称 SI)中,电流的单位是安培(ampere),简称安(A),它表示 1 秒(s)内通过导体横截面的电荷量为 1 库仑(C),即:1 安培 = 1 库仑/秒。有时也会用到千安(kA)、毫安(mA)或微安( $\mu\text{A}$ ),它们的换算关系为

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} \quad 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A} \quad 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

习惯上把正电荷移动的方向规定为电流方向(实际方向)。在简单直流电路中,电流的实际方向可由电源的极性确定。在复杂电路中,往往事先难以确定电流的实际方向,而且时变电流的实际方向有可能随时间不断变动,难以在电路图上标出适合于任何时刻的电流实际方向。为了电路分析和计算的需要,我们引入了参考方向(reference direction)的概念。

所谓参考方向是指在分析电路前任意假定的一个电流方向,用箭头标在电路图上。我们规定,若电流实际方向与参考方向相同,电流取正值;若电流实际方向与参考方向相反,电流取负值。根据电流的参考方向以及电流值的正负,就能确定电流的实际方向。电流参考方向与实际方向的关系如图 1-3 所示。

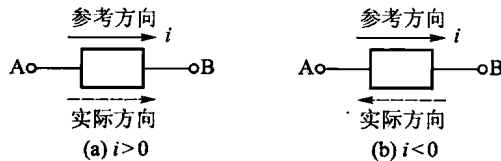


图 1-3 电流参考方向与实际方向的关系

电流的参考方向也可用双下标表示,例如  $i_{AB}$  表示其参考方向是由 A 流向 B。显然,当对同一电流规定相反的参考方向时,相应的电流表达式相差一个负号,即  $i_{AB} = -i_{BA}$ 。

需要强调的是:电流的实际方向是客观存在的,与参考方向的选择无关。参考方向是任意假定的,是电路计算的唯一依据。参考方向一经选定,整个分析过程中就不能随意更改,而电流的实际方向则由最终计算结果的正负来判断。

在本书以下的章节中,电路图中标明的均为参考方向,在未指定参考方向的情况下,电流值的正或负是没有任何意义的。

## 1.2.2 电压及其参考方向

在图 1-4 所示的电路中,两个极板 A、B 上分别带有正、负电荷,因而 A、B 两极板间形成了电场。当电荷在电路中运动时,必然受到电场力的作用,也就是说,电场力对电荷作了功。为了衡量电场做功的能力,物理学中引入了“电压”(voltage)这一变量,并定义:电场力把单位正电荷从 A 点移动至 B 点所作的功称为 A 点至 B 点间的电压,用  $u_{AB}$  表示。即

$$u_{AB}(t) = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中,  $dW$  表示电场力将正电荷  $dq$  从 A 点移动至 B 点所作的功。电压的国际单位是焦耳(J)/库仑(C) = 伏特(V),此外还常用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏( $\mu\text{V}$ )等单位,它们的换算关系为

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

如果电场力移动正电荷作正功,例如图 1-4 所示的电路中,从 A 点经白炽灯至 B 点,  $dW > 0$ , 表示电场力的方向与正电荷运动方向一致,正电荷的势能减少,正电荷失去的能量被该段电路(白炽灯)吸收, A 点为高电位点(正极), B 点为低电位点(负极)。

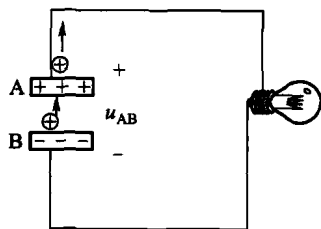


图 1-4 电压定义示意图

如果电场力移动正电荷作负功,例如图 1-4 所示的电路中,从 B 点经电源内部至 A 点,  $dW < 0$ , 表示电场力的方向与正电荷运动方向相反,正电荷的势能增加,正电荷得到的能量由该段电路(电源)提供, B 点为低电位点(负极), A 点为高电位点(正极)。

同样,我们把大小或方向随时间变化的电压称为时变电压,用小写字母  $u$  表示。如果电压的大小和方向作周期性变化且平均值为零,则称为交流电压(alternating voltage)。如果电压的大小和方向均不随时间变化,则称为恒定电压或直流电压(direct voltage),可用大写字母  $U$  表示。

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点,即电位下降(potential drop)的方向。和电流类似,复杂电路中两点间的电压事先很难预测,必须先选定一个参考方向,并由参考方向和电压值的正负来反映该电压的实际方向。当电压的参考方向与实际方向一致时,电压为正( $u > 0$ );当电压的参考方向与实际方向相反时,电压为负( $u < 0$ )。

电压的参考方向可用箭头表示,也可用正(+)、负(-)极性表示,或用双下标表示,如图 1-5 所示。

一个元件上的电压或电流的参考方向可以独立地任意选定,但为了方便,经