

[美] A·E·菲茨杰拉德 戴维·E·希金博特姆 阿尔文·格拉贝尔 著

# 基本电工学

上册(电路)

南京航空学院电工教研室 译  
孙希鲁 主译

人民教育出版社

本书是根据美国 McGraw-Hill 图书公司 1975 年出版的 A·E·Fitzgerald 教授等著 Basic Electrical Engineering 第四版翻译的。该书自 1945 年第一版出版后,一直为美国大学电工学课程较为流行的教材之一。全书共十七章,其中一至六章为电路基础理论,七至十二章为电子学,十三至十七章为电机和控制系统。中译本按此三大部分分上、中、下三册出版。

上册为电路部分,包括:电气元件和电路,电阻网络,网络响应介绍,指数激励和变换网络,稳态交流电路,复杂激励下的电路响应。

本书系统新颖,内容丰富,叙述简明,注重物理解释,内容安排灵活,便于读者根据不同需要选用。

本书可供大学电工学教师、非电专业学生以及有关科技人员参考。

## 基本电工学

上册  
(电路)

A·E·菲茨杰拉德

〔美〕戴维·E·希金博特姆 著

阿尔文·格拉贝尔

南京航空学院电工教研室 译

孙希鲁 主译

\*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

山东新华印刷厂德州厂印装

\*

开本850×1168 1/32 印张7.875 字数189,000

1980年12月第1版 1981年10月第1次印刷

印数00,001—18,500

书号 15012·0294 定价 0.80 元

## 译 序

《基本电工学》为美国东北大学菲茨杰拉德教授等三人所著，是该校的教学用书。该书系统新颖，内容丰富，几乎涉及电工学中各个领域，并具有一定的深度。全书内容以电子电路为主，对电路基础部分亦有所加强，而且讲解方法有其独到之处，着重物理解释，而不过分强调数学导证，能以小篇幅及简要的语言阐明问题，便于启发思考，有利于培养分析问题的能力。在内容安排上也有较好的灵活性，读者可根据需要适当选学。每章后面均附有大量习题，供选作学习之用。

鉴于以上特点，此书对我国高等学校电工学课程教学工作有一定的参考价值，我们将此书翻译出来，供电工教学人员、非电工技术人员以及非电专业大学生、研究生学习参考。但由于我们水平所限，译文中会有许多错误及不妥之处，恳请读者批评指正。

本书由孙希鲁主译，参加翻译工作的还有：罗赤（一、二章），许锡光（三、四章），张声鸿（五、六章），卢振球（九、十章），张志练（十一、十二章），程邦和（十三章），欧阳璘（十四、十七章），曲珍（十五、十六章）。欧阳璘、曲珍两位同志还参加了全书校阅工作。另外王俊雄、张明一 etc 同志对翻译工作给予很多帮助，在此表示感谢。

译 者

1980.11.

## 序 言

本书和前三版一样，以一卷本的形式出版，论述电工学的基本内容，它适合于工科大学二、三年级或四年级学生用。为了适应当前和今后科技发展的需要，我们对书中的许多方面作了重新组织和改写，并增添了很多新的内容。

认真选择内容对本书的作者和采用本书的教师显然都是同样重要的。我们的指导思想有这样四点：

1. 介绍电路理论、固体电子学、机电能量转换以及模拟和数字控制等的基本物理概念和定律，并作充分地叙述与分析，这对应用是有意义的。

2. 对本书各部分内容均作了足够的论述，而不是一般粗浅的介绍。因此，读者在此基础上过渡到学习专业书籍时不致感到太大的困难。

3. 至少要从概念上给读者介绍飞速发展的现代技术，这些技术包括逻辑门与运算放大器的集成电路、电力半导体和数字控制等。

4. 在教材内容安排方面，提供了极大的灵活性，因而当缺少时间或认为不必要讲授时，可以大量删节而不致失去连续性。

这样，在电路分析中，本书的一些使用者如果想把研究重点放在稳态直流和交流理论上，他们可以完全省略第三章，只学习第四章中的4-1节到4-4节，然后学习第五章的那些对他们来说是重要的内容。如果他们不准备在电子学的一些章节中进行详细的分析，那么，他们还可以省略第二章中的一些细节（例如某些网络简化的概念）。

本书的电子学部分和电机部分的顺序可以互换，这两部分的入门章节(电子学的第七、八章和电机的第十三、十四章)分别介绍了各自领域内综合的和共同的物理概念。这些章节可以由后面的、从技术目的看来是适当的一些更为详细分析的章节来补充。最后，集中到控制方面，由第十七章把前面各章所研究的许多内容综合起来了。

因此，我们希望使随便浏览本书一、二小时的教师能够提出一个不同学时、内容和顺序的课程纲要。作为教师，我们尊重那些能够承担任何任务的人，可以按他们自己的特点在某些范围内进行加深和加宽。

自从本书第一版出版以来的三十年中，我们参加了许多正式和非正式的关于电工学教学的讨论和会议，所有这些讨论和会议在各方面都对本版有所帮助。我们特别要感谢用过前几版的许多教师，他们提出了宝贵意见和建议。

A. E. 菲茨杰拉德

戴维·E·希金博特姆

阿尔文·格拉贝尔

# 上册目录

译序 .....	1
序言 .....	3
<b>第一章 电气元件和电路</b> .....	<b>1</b>
1-1 能量和能量转换 .....	1
1-2 电荷 .....	3
1-3 电流 .....	5
1-4 电位差和电压 .....	7
1-5 电功率和电能 .....	10
1-6 电路的电源和元件 .....	12
1-7 电阻; 欧姆定律 .....	14
1-8 电感 .....	16
1-9 电容 .....	20
1-10 基本电路定律; 克希荷夫定律 .....	23
习题 .....	26
<b>第二章 电阻网络</b> .....	<b>32</b>
2-1 基本定律的直接应用法 .....	32
2-2 电源的表示法及其变换 .....	40
2-3 节点电压法 .....	43
2-4 回路电流法 .....	46
2-5 有受控源的回路方程和节点方程 .....	50
2-6 网络简化 .....	52
2-7 叠加原理 .....	62
2-8 戴维南定理 .....	64
习题 .....	72
<b>第三章 网络响应介绍</b> .....	<b>80</b>
3-1 网络响应的性质 .....	80
3-2 自然响应 .....	82
3-3 较复杂系统的自然响应 .....	87

3-4	强制响应	94
3-5	初始条件	98
3-6	全响应	101
	习题	106
<b>第四章</b>	<b>指数激励和变换网络</b>	<b>113</b>
4-1	激励的指数函数表示法	113
4-2	单一元件的响应	117
4-3	指数激励的强制响应	120
4-4	正弦激励的强制响应	122
4-5	变换网络	129
4-6	驱动点阻抗和导纳	133
4-7	应用变换网络的分析法	135
4-8	再论网络函数	140
	习题	144
<b>第五章</b>	<b>稳态交流电路</b>	<b>150</b>
5-1	周期函数简介	150
5-2	电流与电压的均方根值或有效值	154
5-3	相量法	156
5-4	网络简化	161
5-5	回路法与节点法	163
5-6	戴维南定理	167
5-7	功率与无功功率	171
5-8	最大功率条件	174
5-9	伏安法	176
	习题	181
<b>第六章</b>	<b>复杂激励下的电路响应</b>	<b>190</b>
6-1	简单网络的频率响应	190
6-2	谐振现象	193
6-3	傅里叶级数	200
6-4	网络对周期函数的响应	203
6-5	阶跃函数	207

---

6-6 脉冲激励·····	212
6-7 冲击函数·····	218
6-8 斜坡函数·····	223
习题·····	225
<b>附录 A 复数代数</b> ·····	<b>231</b>
<b>附录 B 单位及一些术语的缩写</b> ·····	<b>236</b>
<b>部分习题答案</b> ·····	<b>239</b>



# 第一章 电气元件和电路

电工学主要研究电路理论,电子学与电子器件,能量转换与机电能量转换设备,以及控制设备与控制系统。本章通过阐明基本概念及定义基本术语为学习这些内容打下基础。具有一定基础的读者应该已经接触过许多这方面的内容,因此,对许多读者来说,它仅仅是反映本书其余部分基本知识的一个配合性的复习。

## 1-1 能量和能量转换

电工学主要关心的是向一定的地点,以恰当的方式,为各种用途提供足够的电力而输送能量做功的情况。上述句子的一般含意可以用通常说的功、能量和功率的意思来了解。但是,这些术语是工程上很基本的概念,因此必须研究它们的更确切的和定量的意义。

当克服阻力移动物体时就要做功。例如,当克服重力提起物体时,或当克服惯性力推动物体使之进入运动时,就做了功。定量地说,所做的功可用作用力乘上这个力移动物体经过的距离求得,即

$$\text{功} = \text{力} \times \text{距离} \quad (1-1)$$

在米-千克-秒(MKS)单位制中,功的单位是焦耳(简写为J)。一焦耳是一牛顿(0.225lb)的力作用通过一米的距离所做的功。功的英制单位是呎-磅。(1J = 1N-m = 0.738ft-lb.)<sup>①</sup>

能是做功的本领;换句话说,做功是能量的转换。机械能是用与功相同的单位来度量的。当升起重物时,人体或其它起重装置

---

<sup>①</sup> 本书中对数值后面的单位一般用简写字母表示,其它情况则将它全写出来。简写表列在附录B中。

要消耗能量；另一方面，重物则获得位能，即重物从地面被提高后，它能够做功。它可以借助于滑轮升起别的重物，或象在打桩机中那样，使它落下来，当它撞击地基上的桩时，就将其能量传送给桩。在这种情况下，落体具有的位能在向地基靠近时就转换成动能。也就是说，物体由于它的运动而具有做功的能力。打桩机的能量在撞击时传送给桩。

能量守恒定律是一个在质量既不被产生也不被消灭的所有物理系统中普遍适用的原理。它说明能量既不能被创造，也不能被消灭，只能改变其存在形式。能量可以转换成热、光或声；它可以是机械的位能或动能；也可以储存于电池或弹簧中；但是它不能被创造或是被消灭。在二十世纪明确了物质与能量的相互转换，但是它并不影响这个定律在非相对论性过程中的有效性。

在实际应用中，我们非常关心的是做功或以其它形式传递能量的速率，这种速率称为功率。在 MKS 单位制中，功率的单位是瓦特，一瓦特等于每秒一焦耳。在英制单位中，功率的单位是马力，一马力等于每秒 550 呎-磅 ( $1\text{hp} = 746\text{W}$ )。这样，根据功率的意义，若  $W$  是在时间  $t$  内完成的功或者是消耗或供给的能量，则在该时间内的平均功率为

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-2)$$

这就象我们在一段行程上用通过的距离除以所需的时间得到平均速度一样。但是，我们对瞬时功率同样感兴趣，正如我们对汽车速度表的瞬时的读数感兴趣一样。瞬时功率的表达式可以写为

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-3)$$

式中的小写字母  $p$  表示瞬时值，而  $dW/dt$  项是一段时间内所做的功与这段时间之比的常用数学表示法。

由于功率和能量之间的关系密切，我们经常见到能量用瓦特秒或千瓦小时（ $= 1000 \times 3600$  或  $3.6 \times 10^6$  瓦特秒）这种单位来表示。当然，1 瓦特秒和 1 焦耳是相同的；就是在一秒内以一瓦的恒定功率传输的总能量。

### 例 1-1

向一蓄电池供给电能，在电池中以 400W 的恒定速率将电能转换为化学能储存起来。此外，供给电池的功率的 20% 转换成热损失掉。

求蓄电池充电 10 小时（简写为 h）的电费。电价为 2 分/kWh。

解 令  $P_b$  为输入电池内转换为化学能及热能的总功率。因此

$$400 + 0.20P_b = P_b \quad \text{或} \quad P_b = 500 \text{ W}$$

10 小时内的总能量为

$$W_b = \left( \frac{500}{1,000} \right) (10) = 5 \text{ kWh}$$

而

$$\text{电费} = (5)(2.0) = 10.0 \text{ 分}$$

因为功率或能量的 20% 损失掉了，所以充电过程中的效率为 80%。

## 1-2 电 荷

最基本的电学量是电荷或电量。我们都听说过各种各样的带电粒子，如电子、质子、正电子等等，它们都是组成物质的基本单元。我们能够很容易地观察到金属球或金属导线带电；但是，我们发现，要想看到单独从一个粒子或一个物体中分离出来的电荷是困难的，甚至是不可能的。电荷和静电的详尽的知识通常只能通过研究它们的效应来获得。

从研究电荷的效应而发现的第一批事实之一是电荷分为两类。这两类电荷被人为地叫做正电和负电。例如，电子是带负电的粒子。事实上，不带电的物体包含正电和负电，即是由带正电及负电的粒子组成的，只是它包含的正、负电荷刚好平衡。一个物体

平常带正电是因为与正电荷比较负电子少了。带负电则意味着电子有多余。通常，电荷用字母  $Q$  表示，且以库仑(简称为  $C$ ) 度量。一个电子的电荷为  $-1.60 \times 10^{-19}$  库。即形成一库仑的电量约需  $6.3 \times 10^{18}$  (630 亿亿) 个电子。

电荷的一个重要效应是它能产生一个力。具体地说，一个电荷能够排斥另一个同号电荷，吸引另一个异号电荷。由于电子电荷是负的，因此，任何吸引电子(或被电子吸引)的电荷应是正的；质子带的电荷就是一个例子。注意，各个电荷或带电粒子的吸力或斥力是相等的。两带电体之间作用力的大小与电荷量的乘积成正比，而与它们之间的距离的平方成反比。即带有电荷  $Q_1$  及  $Q_2$  的两带电体间的作用力  $F$  由下式给出：

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{d^2} \quad (1-4)$$

式中  $d$  是电荷之间的距离，而  $k$  是与所用单位及电荷周围介质有关的常数。注意，这个式子与决定两质量之间的引力的关系式具有相同的类型。

式 (1-4) 通常称为库仑定律或平方反比定律。库仑定律可以这样解释：在电荷周围存在着一个作用区域，当另一电荷被引进该区域时，将受到力的作用。引进的电荷放置的位置愈远，则作用力愈弱。这样一个有作用力的区域称为场。由于电荷的存在而建立的场称为电场。因为此刻我们所讨论的电荷是静止的，可称之为静电场。还应注意，静电场和引力场普遍相似。例如，当宇宙飞船脱离了地球的重力场时，我们认为作用于飞船上的地心引力已小到可以忽略。显然，带电质点对电场而言，也可得到同样结论。

场的概念，作为描述由平方反比定律确定的力的一种方法，在工程上是十分有用的。在电场中，任一点的场强由作用在位于该点的单位正电荷上的力的大小及方向来确定。任一点的总的电场

强度是由靠近得足以对它产生影响的所有电荷产生的。

现在,我们考虑和电场力有关的功和能量转换。假定我们沿着反电场方向移动一个正电荷,即反抗别的电荷对它的作用力。例如,假若电场是由附近的负电荷产生的,我们要将正电荷移向离负电荷更远处。现在,在反抗作用于正电荷上的力而移动它时,就要做功,就象在地球引力场中提起一个重物要做功一样。此外,还应该应用能量守恒定律,即此时正电荷应处于一个更高电位的位置上,正如举起了的重物具有较高的位能一样。在重力场内,使重物向低位能位置移动而获得有用功的一些设备我们是熟悉的,水轮从流水的落差获得功也许是我们想到的最常用的一种。以多少有些相似的方法,我们可从在电场力作用下向低位能处移动的电荷流获得功。

### 1-3 电 流

就工程用途而论,因为运动的电荷多半包含着能量转换,因此我们对运动的电荷比对静止的电荷更感兴趣。我们特别关心但不是唯一关心的是电荷在金属材料如铜和铝等构成的路径内的运动。经验表明,铜和铝是电的良导体。对比之下,另一些材料,象陶瓷、云母、玻璃以及在很多情况下的空气是电的不良导体,称为绝缘体。用绝缘材料构成防止电荷流离开路径的屏障,将电荷流限制在一定的导电通路内,这些通路叫做电路。通俗地说,电路好象一个电的管道系统。

电荷在电路中移动的速率称为电流。设想我们站在电路中某一点上观看电荷通过,假如我们看见每  $t$  秒钟有  $Q$  库仑电荷以均匀速率通过,则这个电流具有稳定值

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-5)$$

往往，电荷流过的速率随时间而变化，因而电流数值也变化。于是，在电路中的瞬时电流  $i$  可写为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{或} \quad q = \int i dt \quad (1-6)$$

在写式(1-5)和(1-6)时，我们采用了电工技术中通用的习惯，全书均将这样遵循之。我们将用大写字母（例如  $I$ 、 $Q$ ）表示不随时间变化的量；而以小写字母，如  $i$  和  $q$ ，表示变量，它们往往是时间的函数。

电流的单位是安培（简称为 A）。当电荷以每秒一库仑的速率流动时就是一安培。象规定电流的大小那样，我们还必须规定电流的方向。历史上曾把正电流想象为一束正电荷的流动。现在我们已知电流通常是由带负电的电子移动所形成的，但是习惯并未改变过来，正电流仍是根据正电荷流动的方向来定义的，它和电子流的方向相反。

在直流电流中，电荷的流动在所考虑的一段时间内始终是一个方向。

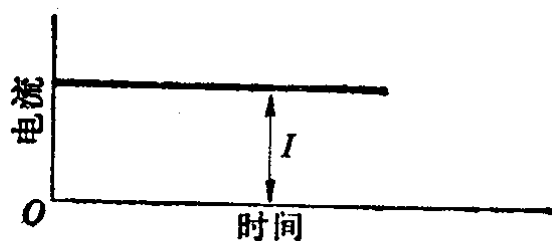


图 1-1 稳定直流的图形

例如如图 1-1 表示了作为时间函数的直流电流的图形；更具体地说，它表示了稳定直流电流，因为其大小是常量  $I$ 。

在交变电流中，电荷先是流向一个方向，然后则流向另一个方向，且以一定的频率重复这种循环。电流随时间的变化常如图 1-2 所示，实线波形表示了电流值的一个完整循环，而延伸的虚线表示按这一循环式样继续变化下去的电流。例如，在美国通常用的电流往往具有这种波形，并按每秒 60 周的频率交变。频率的单位是赫兹（简称为 Hz，且等于每秒一周）。

电流的实际用途在于它产生的效应，人们多年来在大量的实

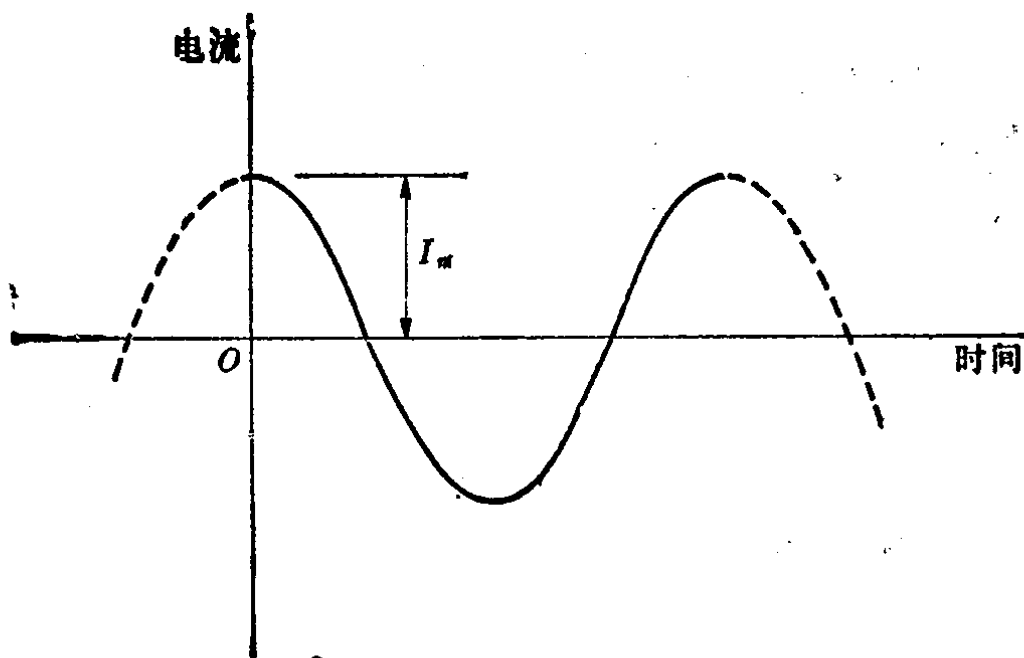


图 1-2 交变电流的图形

践中发现并研究了这些效应。具有重大实际意义和经济价值的效应有如下两个：

1 电流通过导体时产生热,这个效应将在 1-7 节中研究。

2 在载流导体周围存在着第二种类型的力场,这种场使另外的载流元件或铁制器件受到力的作用。这个场称为磁场,它与电荷产生的电场同时存在。这种磁场的效应和存在于永久磁铁附近的效应相同。这一效应将在 1-8 节中研究。

由于电流存在着上述的以及其它一些效应,而且这些效应极为重要,因此,我们很有兴趣研究电路中电流的性能。事实上,我们正是通过研究这样一些效应来学习电的知识的。例如,我们如果要测量一个电流,通常就要测量上述两种效应之一。所以许多电流测量仪器,即安培计,就是以上述第一类或第二类效应为基础的,而以第二类效应为基础的更为普遍。

#### 1-4 电位差和电压

图 1-3 所示的是一个简单电路,目的是把电能从电池输送到

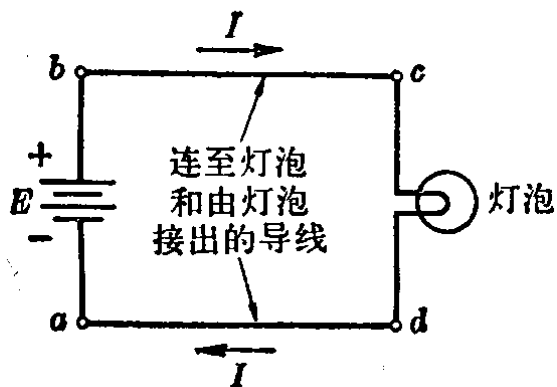


图1-3 简单电路

较远处的灯泡。它是这样来实现的：用两根导线从电池连到灯泡再接回电池，以传导电流。这样就构成一个完整的导电路径，而我们就得到一个完整电路即闭合电路。

与此相反，如果有一根导线不通，或接在某一导线中的开关被断开，就形成了开路，电流将为零，而且不会发生能量传输。也可碰到另一种相反的情形，如果在连接电路时，我们误用一根导线将靠近灯泡的  $c$  和  $d$  点、或在靠近电池处的  $a$  和  $b$  点接通，则将形成短路。在短路情况下，电池输出电流将很大（常常大到破坏程度），但是灯泡电流几乎为零，也就没有有效能量传输给灯泡。如果灯泡底部绝缘破坏而导电，也将产生同样结果。为了预防这种故障，往往接入保险丝或断路器，当发生故障时，电路自动断开。

在图 1-3 中，灯泡用简图表示。电池用标准符号表示，平行线中较长的一条表示正端，即当电池向电路供给能量时，电流从电池流出的那一端就是正端。电路的其它表示形式示于图 1-4 中。在图 1-4a 中用直流发电机通用符号表示电源，同时用灯泡组的简图代

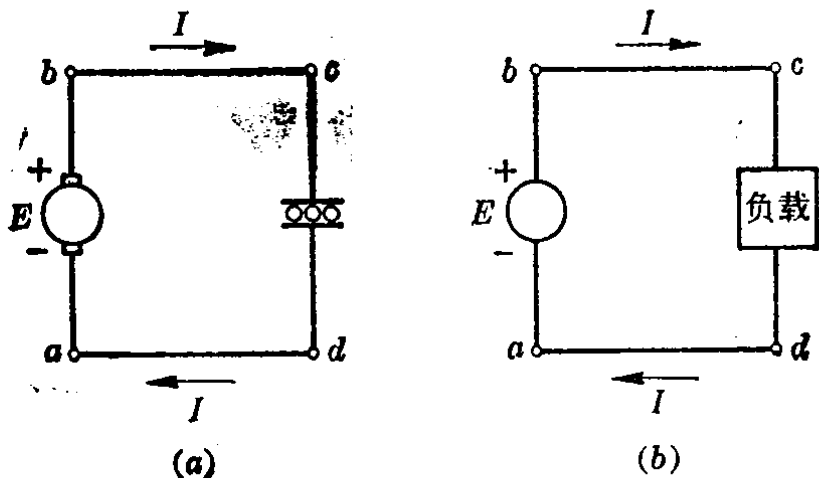


图1-4 图1-3电路的两种其它表示图形



替灯泡。在图 1-4b 中用圆圈表示电源，用方框表示负载或能量吸收装置（有时称为换能器）。电路的其它符号将在以后逐个介绍。

现在认为图 1-3 及 1-4 的各电路已经连接完善，不存在任何开路或短路故障。在电路中维持电流  $I$  需要消耗能量，就象在供水的管道系统中维持水流一样。因此必须对电荷做功给它们以能量，在电流流经导线及灯泡时，这些能量被释放出来。当然，这个功或能是从电源获得的。例如，由图 1-3 中的电池将化学能转换成电能，或由图 1-4a 中的直流发电机将机械能转换成电能。

在电路中的两点间移动单位正电荷所做的功称为这两点间的电位差或电压。换句话说，电压是移动单位电荷所做的功，因为功是电荷从一点移动到另一点做的，所以电路中的这两点必须明确规定。若移动一库仑电荷从一点到另一点所做的功是一焦耳，则这两点间的电位差就是一伏特（简称为  $V$ ）。当两点间电位差是  $E$  伏特时，在两点间移动  $Q$  库仑电荷所做的总功或总能量  $W$  为

$$W = EQ \quad (1-7)$$

电源的电位差通常称为电动势，简称为  $EMF$ 。因为电路既包括电源又包括用电器，因此我们必须注意，单位电荷从一点移到另一点是外力对电荷做功，还是电场力驱使电荷做功。对前一种情况，电荷的电位能是增加的；在后一种情况下，电位能是减少的。如果是对正电荷做功，在电路中电荷从  $a$  点移到  $b$  点时电位能增加，从  $a$  到  $b$  的方向上有一个电位升。相反，从  $b$  到  $a$  的方向上有一个电位降，因为电荷从  $b$  到  $a$  是失去能量的。从获得能量和失去能量的观点说，电位升与电位降是相反的两个量。

上述内容可参照图 1-3 的电路来说明。由于存在着电池，从  $a$  到  $b$  的电位升高（具体说为  $120V$ ）。从  $b$  到  $c$  为电位降落（约为  $2.5V$ ），这是因为按照电流的方向沿导线移动电荷需要一定的能