

高等学校教材

# 电工学及电气设备

(第二版)

浙江大学 吴官熙 主编

水利电力出版社

高等学校教材

# 电工学及电气设备

(第二版)

浙江大学 吴官熙 主编

水利电力出版社

---

## 内 容 提 要

本书是《电工学及电气设备》第二版。本书内容符合水利电力部高等学校水利水电类专业电类教材编审委员会于1983年3月审订的《电工学及电气设备教学大纲》。

全书共分四篇：第一篇电路原理；第二篇电子技术；第三篇电机；第四篇电气设备。

本书是高等学校农田水利工程专业、水利水电工程建筑专业的通用教材，也可作其他专业的教学用书。

本书还可供中等专业学校师生及有关工程技术人员参考。

高等学校教材

电工学及电气设备

(第二版)

浙江大学 吴官熙 主编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 24印张 540千字

1980年7月第一版

1986年12月第二版 1986年12月北京第四次印刷

印数36041—52850册 定价3.95元

书号 15143·6186

## 前 言

《电工学及电气设备》第一版于1980年出版。1983年3月在武汉召开了高等学校水利水电类专业电类教材编审委员会会议，会上审订了《电工学及电气设备教学大纲》。《电工学及电气设备》第二版是根据该大纲修订而成的，作为高等院校农田水利工程专业、水利水电工程建筑专业的通用教材，也可作为其他有关专业的教学用书。

全书分为四篇，共十四章。前三篇为电工学，包括第一章至第九章；第四篇为电气设备，包括第十章至第十四章。在编写中，认真贯彻“少而精”原则，精选教学内容。电工学部分突出物理概念，着重讲清基本理论和分析问题的基本方法，并辅以较多的例题。每章均有小结及思考题与习题，以利于精讲多练，培养自学能力，为进一步学习电类课程打下必要的理论基础。电气设备部分则密切结合大、中型水电站和电力排灌站的实际情况，介绍其主要电气设备的作用、原理和结构，一次和二次接线的要求、接线形式，以及设备布置方式等，力求使读者对工程全貌有清晰概念，对设备、装置有明确了解。对于近年国内外出现的新型电气设备也作了简单介绍。

本书第一、三篇由浙江大学吴官熙同志编写；第二篇由武汉水利电力学院洪文秀同志编写；第四篇中的第十三章和第十四章的第三节由陕西机械学院袁清阁同志编写，其余由华北水利水电学院陈中川、周念祖和张葵兰同志编写。全书由吴官熙同志担任主编，由华东水利学院李学坚同志担任主审。华东水利学院季一峰同志参与了第四篇书稿的审稿工作，提了不少宝贵意见，谨致谢意。

华北水利水电学院周喜农同志在病故前为本书的编写做了许多准备工作。

对于书中不妥或错误之处，恳请同志们批评指正。

编 者

1986年3月

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 前 言                              |    |
| 绪 论 .....                        | 1  |
| 第一篇 电 路 原 理                      |    |
| 第一章 电路分析基础 .....                 | 2  |
| 1-1 电路 .....                     | 2  |
| 1-2 电流、电压和电动势的参考方向 .....         | 3  |
| 1-3 电阻元件的特性 .....                | 6  |
| 1-4 恒压源和恒流源 .....                | 7  |
| 1-5 电路的工作状态 .....                | 13 |
| 1-6 克希荷夫定律 .....                 | 15 |
| 1-7 支路电流法 .....                  | 18 |
| 1-8 节点电位法 .....                  | 20 |
| 1-9 叠加原理 .....                   | 22 |
| 1-10 无源二端网络 .....                | 24 |
| 1-11 等效电源定理 .....                | 26 |
| 1-12 电容元件的特性 .....               | 30 |
| 1-13 $RC$ 电路的时域响应 .....          | 32 |
| 1-14 电感元件的特性和 $RL$ 电路的时域响应 ..... | 36 |
| 本章小结 .....                       | 39 |
| 思考题与习题一 .....                    | 40 |
| 第二章 单相正弦交流电路 .....               | 47 |
| 2-1 正弦交流电的基本概念 .....             | 47 |
| 2-2 正弦交流电的相量表示法 .....            | 53 |
| 2-3 单一元件的交流电路 .....              | 60 |
| 2-4 串联交流电路 .....                 | 67 |
| 2-5 并联交流电路 .....                 | 74 |
| 2-6 一般交流电路的分析 .....              | 78 |
| 2-7 简单非正弦交流电路 .....              | 83 |
| 本章小结 .....                       | 87 |
| 思考题与习题二 .....                    | 88 |
| 第三章 三相正弦交流电路 .....               | 95 |
| 3-1 三相电动势 .....                  | 95 |
| 3-2 三相发电机绕组的连接方式 .....           | 96 |
| 3-3 三相交流电路的计算 .....              | 99 |

|     |                   |     |
|-----|-------------------|-----|
| 3-4 | 三相电路的功率及其测量 ..... | 106 |
|     | 本章小结 .....        | 108 |
|     | 思考题与习题三 .....     | 109 |

## 第二篇 电 子 技 术

|      |                      |     |
|------|----------------------|-----|
| 第四章  | 晶体二极管和整流电路 .....     | 112 |
| 4-1  | PN结 .....            | 112 |
| 4-2  | 半导体二极管 .....         | 116 |
| 4-3  | 单相桥式整流电路 .....       | 117 |
| 4-4  | 三相桥式整流电路 .....       | 120 |
| 4-5  | 滤波电路 .....           | 122 |
| 4-6  | 硅稳压管稳压电路 .....       | 123 |
|      | 本章小结 .....           | 125 |
|      | 思考题与习题四 .....        | 126 |
| 第五章  | 晶体三极管和放大电路 .....     | 129 |
| 5-1  | 概述 .....             | 129 |
| 5-2  | 晶体三极管 .....          | 129 |
| 5-3  | 交流放大电路的基本原理 .....    | 136 |
| 5-4  | 交流放大电路的图解分析法 .....   | 139 |
| 5-5  | 静态工作点的稳定 .....       | 144 |
| 5-6  | 放大电路的微变等效电路分析法 ..... | 147 |
| 5-7  | 多级放大电路 .....         | 154 |
| 5-8  | 放大电路中的负反馈 .....      | 157 |
| 5-9  | 功率放大电路 .....         | 165 |
| 5-10 | 直流放大电路 .....         | 169 |
| 5-11 | 运算放大器 .....          | 174 |
| 5-12 | 串联型晶体管稳压电路 .....     | 181 |
|      | 本章小结 .....           | 185 |
|      | 思考题与习题五 .....        | 187 |
| 第六章  | 正弦波振荡电路 .....        | 194 |
| 6-1  | 自激振荡的原理 .....        | 194 |
| 6-2  | LC振荡电路 .....         | 195 |
| 6-3  | RC振荡电路 .....         | 199 |
|      | 本章小结 .....           | 201 |
|      | 思考题与习题六 .....        | 201 |

## 第三篇 电 机

|     |                  |     |
|-----|------------------|-----|
| 第七章 | 变压器 .....        | 204 |
| 7-1 | 磁路 .....         | 204 |
| 7-2 | 变压器的结构和额定值 ..... | 206 |

|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 7-3 | 变压器的空载运行 .....          | 208 |
| 7-4 | 变压器的负载运行 .....          | 211 |
| 7-5 | 三相变压器 .....             | 213 |
| 7-6 | 变压器的运行性能 .....          | 216 |
| 7-7 | 三绕组变压器和自耦变压器 .....      | 218 |
|     | 本章小结 .....              | 220 |
|     | 思考题与习题七 .....           | 221 |
| 第八章 | 异步电动机 .....             | 223 |
| 8-1 | 三相异步电动机的基本结构 .....      | 223 |
| 8-2 | 三相异步电动机的工作原理 .....      | 225 |
| 8-3 | 三相异步电动机的定子、转子电路 .....   | 229 |
| 8-4 | 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性 ..... | 231 |
| 8-5 | 三相异步电动机的铭牌数据和运行特性 ..... | 234 |
| 8-6 | 三相异步电动机的起动、调速和反转 .....  | 236 |
| 8-7 | 单相异步电动机 .....           | 241 |
| 8-8 | 电动机的选择 .....            | 243 |
|     | 本章小结 .....              | 245 |
|     | 思考题与习题八 .....           | 246 |
| 第九章 | 同步电机 .....              | 248 |
| 9-1 | 同步电机的基本结构 .....         | 248 |
| 9-2 | 同步发电机的空载运行 .....        | 250 |
| 9-3 | 同步发电机的电枢反应 .....        | 252 |
| 9-4 | 同步发电机的负载运行和运行特性 .....   | 254 |
| 9-5 | 同步发电机与无穷大电网的并联运行 .....  | 257 |
| 9-6 | 同步电动机 .....             | 263 |
| 9-7 | 同步电机的励磁方式 .....         | 267 |
|     | 本章小结 .....              | 270 |
|     | 思考题与习题九 .....           | 272 |

## 第四篇 电 气 设 备

|      |                    |     |
|------|--------------------|-----|
| 第十章  | 电力系统的基本概念 .....    | 274 |
| 10-1 | 电力系统及其额定电压 .....   | 274 |
| 10-2 | 短路的基本概念 .....      | 277 |
| 10-3 | 电力系统中性点的运行方式 ..... | 279 |
| 第十一章 | 电气设备 .....         | 282 |
| 11-1 | 概述 .....           | 282 |
| 11-2 | 水轮发电机 .....        | 282 |
| 11-3 | 电力变压器 .....        | 286 |
| 11-4 | 开关设备和熔断器 .....     | 289 |
| 11-5 | 电压互感器和电流互感器 .....  | 306 |

|                        |                       |     |
|------------------------|-----------------------|-----|
| 11-6                   | 载流导体和绝缘子 .....        | 312 |
| 11-7                   | 防雷保护和接地装置 .....       | 315 |
| 第十二章 电气主接线和自用电接线 ..... |                       | 321 |
| 12-1                   | 电气主接线 .....           | 321 |
| 12-2                   | 水电站的自用电及其接线 .....     | 329 |
| 第十三章 二次回路的基本知识 .....   |                       | 331 |
| 13-1                   | 二次回路概述 .....          | 331 |
| 13-2                   | 继电保护回路 .....          | 331 |
| 13-3                   | 断路器操作回路 .....         | 343 |
| 13-4                   | 信号回路 .....            | 346 |
| 第十四章 电气设备的布置 .....     |                       | 349 |
| 14-1                   | 配电装置 .....            | 349 |
| 14-2                   | 水电站电气设备的布置 .....      | 357 |
| 14-3                   | 电力排灌站电气设备的选择与布置 ..... | 367 |

# 绪 论

电工学是研究电磁规律及其在工程技术领域中应用的一门科学。因为电能具有容易转换、容易输送和容易控制等优点，所以在工农业生产、国防建设、科学技术以及日常生活中获得广泛的应用。

在现代生产中，电力是主要的动力。而电气化促进生产过程的自动化，对于提高劳动生产率和发展生产力起着巨大的作用。因此，电气化和自动化是我国四个现代化建设的必要条件。

电工学及电气设备是一门实践性较强的技术基础课程。它的任务是：通过对本课程的学习，获得电工学及电气设备的基本理论、基本知识和基本技能，为学习后续课程和专业知识以及从事工程技术工作和科学研究打下基础。

# 第一篇 电 路 原 理

## 第一章 电 路 分 析 基 础

### 1-1 电 路

#### 一、电路和电路的功能

若干个电路元件按照一定方式连接起来, 构成电流的通路, 称为电路, 又名网络。将化学能、机械能等非电能量转换成电能的电路元件, 称为电源, 例如电池和发电机。将电能转换成热能、光能、机械能等非电能量的电路元件, 称为负载(负荷), 例如电炉、电灯和电动机。

实际电路可以是延伸数百公里的电力网, 也可以是几平方毫米内部就包含很多元件的集成电路。电路有各式各样的功能。电力电路的主要作用是电能的输送、分配和转换。电子电路的主要作用是信号(带有信息的电压或电流)的传递和处理, 即把输入的信号(称为激励)加工成为其他所需要的输出信号(称为响应)。例如在收音机中, 整流电路能把交流电变成直流电, 放大电路能将微弱信号放大。

#### 二、理想电路元件

根据模型理论, 在经典力学中, 引入质点和刚体等模型。同样, 在电路理论中也引入一些理想化的电路元件, 以简化电路分析。常用的理想电路元件有电阻、电感、电容、恒压源和恒流源。前三种称为无源元件, 后两种称为有源元件。理想电路元件是具有某种确定的电或磁性能的理想化模型, 例如电阻具有消耗电能而不储存电能和磁能的特性; 电容(或电感)具有储存电场能量(或磁场能量)而不消耗电能的特性。实际电路元件种类繁多, 但是都可以近似地用理想电路元件或它们的组合来等效代替。例如在低频时, 白炽灯、电炉和各种实际电阻器均可用电阻来代替; 实际的电感线圈可用电感与电阻串联的组合来代替。

在电路理论中研究的电路, 都是由理想电路元件组成的。在电路图中, 各种理想电路元件分别用规定的图形符号和文字代号来表示。图1-1-1中, 图(a)是无分支的最简单电路, 图(b)则为复杂电路。

#### 三、支路、节点和回路

在电路中, 一个元件或若干个元件串联而成的一段电路, 称为支路。例如在图1-1-1(b)所示电路中, 共有六条支路, 其中支路 $BD$ 含恒流源 $i_s$ , 支路 $AC$ 含恒压源 $e_s$ , 均称为有源支路; 其他四条支路不含电源, 称为无源支路。

电路中, 三条或三条以上支路的连接点, 称为节点。例如在图1-1-1(b)中, 共有 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 和 $D$ 四个节点。

由若干条支路所组成的闭合路径, 称为回路。在图1-1-1(b)中, 有 $ABDA$ 、 $BCDB$ 、

ABCA以及ABCD等回路。内部不含有支路的回路，称为网孔，上述的前三个回路都是网孔；而回路ABCD则不是网孔，因为它内部包含了支路BD。

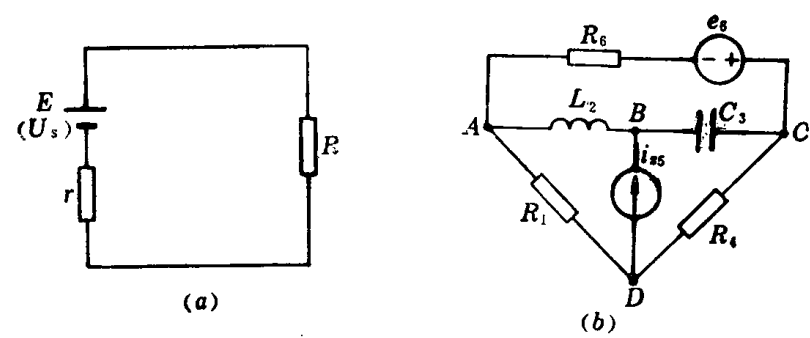


图 1-1-1 简单电路和复杂电路

## 1-2 电流、电压和电动势的参考方向

### 一、电流的参考方向

带电粒子（电子、空穴等）有规则的移动，形成电流。电流的大小以单位时间内通过导体横截面的电量来衡量，称为电流强度，简称电流。大小和方向都不随时间变化的电流，称为恒定电流，简称直流，它的强度用符号  $I$  表示。大小和方向都随时间变化的电流，称为交变电流，简称交流（详见第二章），用符号  $i(t)$  表示。

在我国法定计量单位中，电流的单位是安培(A)。常用的分数单位有毫安(mA)和微安( $\mu A$ )，倍数单位有千安(kA)。  $1mA=10^{-3}A$ ，  $1\mu A=10^{-6}A$ ，  $1kA=10^3A$ 。

习惯上将正电荷移动的方向定为电流的真实方向。在实际问题中，对于较复杂的直流电路，某些支路电流的真实方向往往无法事先判明，而对于交流电路，由于电流的方向随时间变化，某一瞬时电流的真实方向更无法判明。为此，在电路分析时，首先必须对每一支路假定某一方向作为该支路电流的参考方向（又名正方向）。当计算得出电流为正值（即  $I>0$ ）时，表明该支路电流的真实方向与参考方向相同；如果计算得出电流为负值（即  $I<0$ ），则表明该支路电流的真实方向与参考方向相反。因此，电流是一个代数数量，在未选取电流参考方向情况下，电流的正负是毫无意义的。

电流的参考方向可用箭头表示，箭头可画在元件旁边，也可直接画在连接导线上，如图1-2-1所示。电流的参考方向也可用电流符号加注双下标来表示，例如  $I_{ab}$  表示电流的参考方向由  $a$  端指向  $b$  端，见图1-2-1(a)；  $I_{ba}$  表示电流的参考方向由  $b$  端指向  $a$  端，见同图(b)。显然，  $I_{ab}=-I_{ba}$ 。

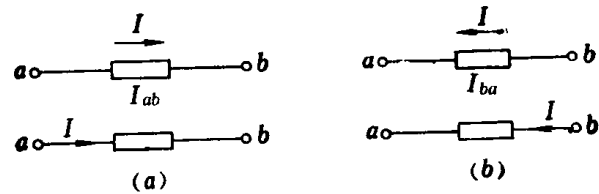


图 1-2-1 电流的参考方向

电流的参考方向并不是一个抽象的概念。当我们用直流电流表接入电路某一支路来测量电流时，就相当于假定该支路电流的参考方向是从电流表的“+”端钮指向“-”端钮。如果电流表指针正偏转，电流为正值，见图1-2-2(b)，则被测电流的真实方向与参考方向相同；如果指针反偏转，电流为负值，表示电流的真实方向与参考方向相反，见图(c)。

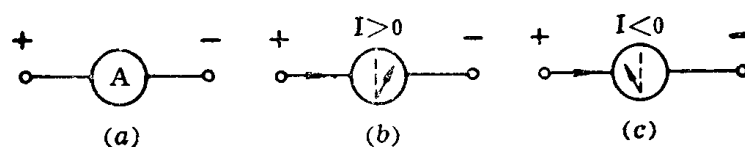


图 1-2-2 用直流电流表说明电流参考方向

电流的参考方向可任意选取。在直流电路中，如果电流的真实方向能够确定时，通常选取参考方向与真实方向相同。

## 二、电压和电动势的参考方向

电路中 $a$ 、 $b$ 两点之间的电压 $U_{ab}$ 表明，由于电场力作功，使单位正电荷由 $a$ 点移到 $b$ 点时失去或获得的能量。正电荷从 $a$ 点移到 $b$ 点，如果失去能量，则 $a$ 点的电位 $V_a$ 高， $b$ 点的电位 $V_b$ 低， $V_a > V_b$ ；如果获得能量，则 $a$ 点的电位低， $b$ 点的电位高， $V_a < V_b$ 。电压又名电位差，例如电压 $U_{ab}$ 就是 $V_a$ 与 $V_b$ 之差，即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-2-1)$$

电源的电动势 $E_{ba}$ 是电源力把单位正电荷从电源的低电位端（负极） $b$ 经电源内部移到高电位端（正极） $a$ 所做的功。

大小和极性都不随时间变化的电压（或电动势），称为恒定电压（或恒定电动势），又名直流电压（或直流电动势），用符号 $U$ （或 $E$ ）表示。大小和极性都随时间变化的电压（或电动势），称为交变电压（或交变电动势），用符号 $u(t)$ 〔或 $e(t)$ 〕表示。

在我国法定计量单位中，电压和电动势的单位是伏特(V)，常用的倍数单位为千伏(kV)，分数单位有毫伏(mV)和微伏( $\mu V$ )。 $1kV = 10^3V$ ， $1mV = 10^{-3}V$ ， $1\mu V = 10^{-6}V$ 。

习惯上规定，电压的方向是从高电位端指向低电位端，即为电位降低的方向；而电动势的方向则是从低电位端指向高电位端，即为电位升高的方向。电压和电动势都是代数量，因此，和电流一样，在分析电路时，也必须假定电压和电动势的参考方向或参考极性。电压（或电动势）的参考方向可用箭头或双下标表示，分别如图1-2-3(a)、(b)所示；参考极性则在元件的两端分别用“+”、“-”符号来表示，“+”号表示高电位端（参考的），“-”号表示低电位端（也是参考的），见图(c)。从参考的“+”端指向“-”端就是电压的参考方向。也就是说，假定电压参考方向由 $a$ 点指向 $b$ 点，这就意味着假定 $a$ 点为高电位端（正极）， $b$ 点为低电位端（负极）。因此，图1-2-3(c)与(a)所表示的意义是一样的。当电压为正值时，例如图1-2-3中 $U > 0$ ，则电压的真实极性与参考极性相同，即图中的 $a$ 端为真实的高电位点， $b$ 端为真实的低电位点；当电压为负值，则电压的真实极性与参考极性相反，例如若图中 $U < 0$ ， $a$ 端为真实的低电位点， $b$ 端为真实的高电

位点。

电压的参考极性也可以用直流电压表端钮的标记“+”、“-”给以具体说明。

电压的参考方向，可以任意假定。在直流电路中，如果电压的真实方向能判明时，一般选取参考方向与真实方向一致。此外，对于一个元件来说，电流的参考方向与电压的参考方向彼此独立无关，都可任意假定。但为了方便，对于负载，一般选取电压的参考方向与电流的参考方向一致，这称为参考方向的“负载惯例”，又名关联的参考方向。直流电动势的真实极性一般是给定的，选取参考方向与真实方向相同。

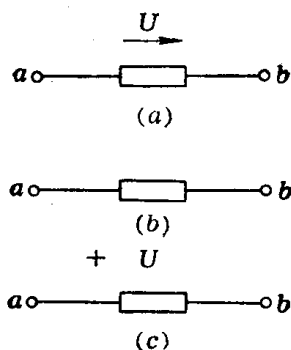


图 1-2-3 电压参考方向的表示方法

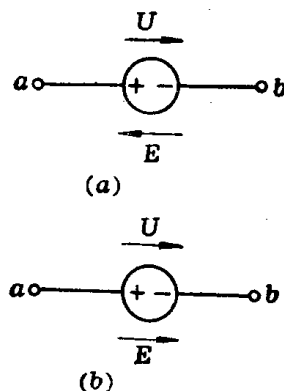


图 1-2-4 说明电动势和电压的关系用图

由于电压的方向是电位降的方向，而电动势的方向是电位升的方向，因此，如果选取电压 $U$ 的参考方向与电动势 $E$ 的参考方向相反，见图1-2-4(a)，则 $U=E$ ，即 $U_{ab}=E_{ba}$ ；若两者的参考方向相同，见图(b)，则 $U=-E$ ，即 $U_{ab}=-E_{ab}$ 。

### 三、电位的参考点

在分析电路时，常用电位的概念。电路中某点的电位，就是该点与电位参考点之间的电压。所谓电位参考点，就是在电路中选择一点，并令其电位为零，以它作为计算电路其他各点电位的基准点，所以电位参考点又名零电位点，简称零点。

电位参考点可以任意选定。选取不同的电位参考点，电路中同一点的电位值是不同的，但由于电压是两点之间的电位差，因此，任意两点的电压却是不变的。

在分析电路时，电位参考点只能选取一个。电位参考点选定后，各点的电位值就唯一地确定了，这就是所谓的“电位单值性”。在电工技术中，通常选大地为电位参考点，用符号“ $\perp$ ”表示。在电子电路中，一般把输入信号、输出信号和电源的连接点，如图1-2-5中的 $d$ 点，作为电位参考点，称为“地”，并以符号“ $\perp$ ”表示。实际中， $d$ 点与机壳相连，并不真与大地相连。

在选取 $d$ 点作为电位参考点时，图1-2-5中的输入或输出端钮只需画出一个端钮，与“地”点相连的端钮就不再标出；电源 $E_c$ 只要标出 $E_c$ 的极性和数值，其正极接在标有 $+E_c$ 的端钮，负极接“地”点不再标出，电池符号也不画出，从而可使电路简化，如图1-2-6所示。图1-2-5和图1-2-6的画法分别称为电工电路习惯表示法和晶体管电路习惯表示法。

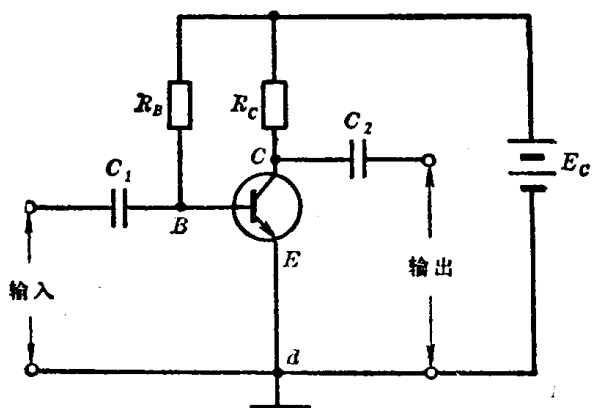


图 1-2-5 电位参考点

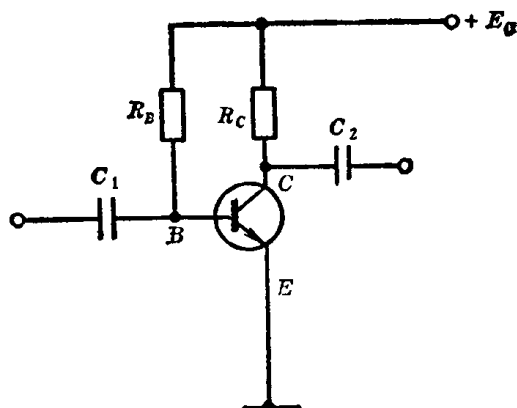


图 1-2-6 晶体管电路习惯表示法

### 1-3 电阻元件的特性

体现电能转换成热能或其他能量的电路元件，称为电阻元件，简称电阻。电阻的特性由伏安特性，即其电压与电流之间的函数关系来表征。

电阻元件按照伏安特性的不同，可分为线性电阻和非线性电阻。

#### 一、线性电阻

当电阻两端的电压 $u(t)$ 与通过的电流 $i(t)$ 成正比时，可得下式

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-3-1)$$

在直流电路中，上式可写成

$$U = RI \quad (1-3-2)$$

上二式中的比例常数 $R[u(t)/i(t) = U/I]$ 称为电阻的电阻值，与通过电阻的电流无关，是一种电路参数。在我国法定计量单位中，电阻值的单位为欧姆（ $\Omega$ ），简称欧，倍数单位有千欧（ $k\Omega$ ）和兆欧（ $M\Omega$ ）。 $1k\Omega = 10^3\Omega$ ， $1M\Omega = 10^6\Omega$ 。

电阻的伏安特性是一条通过原点的直线，见图1-3-1(b)。电阻值可由直线的斜率来确定。式（1-3-1）或式（1-3-2）即为欧姆定律。

应该注意，只有在电流与电压参考方向一致的情况下，即电流从电阻的高电位端（参考正极）流入电阻时，上列两式才是正确的。如果电流与电压的参考方向相反，则上列两式应改写成

$$u(t) = -Ri(t) \quad (1-3-3)$$

和

$$U = -RI \quad (1-3-4)$$

电阻 $R$ 的倒数称为电导 $G$ ，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-3-5)$$

电导的法定计量单位是西门子（ $S$ ），简称西。

由式（1-3-1）可知，任何时刻 $t_1$ ， $u(t_1)$ 与 $i(t_1)$ 必同号，这就是说，电流总是从高电位端流入电阻，电阻总是吸取电功率，转变成热能，故称为耗能元件，其输入的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-3-6)$$

在直流电路中，当采用关联参考方向时，电阻输入的功率为

$$P = UI \quad (1-3-7)$$

考虑到式(1-3-2)，计算电阻功率的公式还有

$$P = I^2 R \quad (1-3-8)$$

和 
$$P = \frac{U^2}{R} \quad (1-3-9)$$

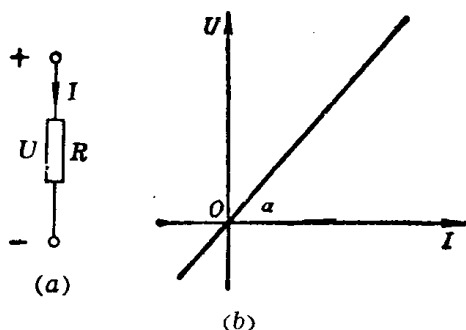


图 1-3-1 线性电阻和其伏安特性

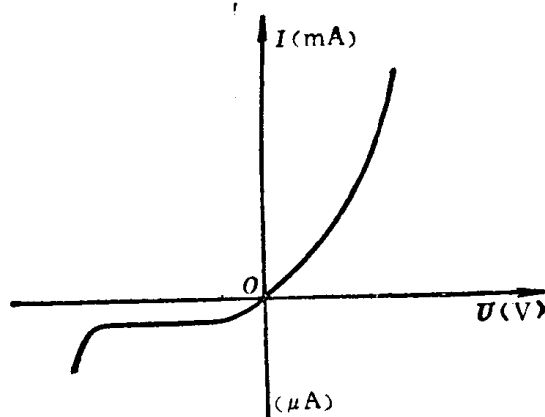


图 1-3-2 半导体二极管的伏安特性曲线

## 二、非线性电阻

许多电阻的阻值与通过它的电流有关，例如220V、40W白炽灯在正常发光时的阻值应为1936Ω，而常温时只有100Ω左右。电阻值不是常数，而与通过的电流(大小、方向)有关时，伏安特性就不是一条通过原点的直线，这种电阻称为非线性电阻。

非线性电阻的特性一般不能用函数式，而要用伏安特性曲线来表示。图1-3-2为半导体二极管的伏安特性曲线。显然，对于非线性电阻，不能笼统地说它的阻值为多少欧。

## 1-4 恒压源和恒流源

### 一、恒压源

端电压是恒定值 $E$ (或 $U_s$ ，电源电压)，或是给定的时间函数 $e(t)$ [或 $u_s(t)$ ]，而与通过的电流无关的电源，称为恒压源，又名理想电压源。图1-4-1表示恒压源的符号。在图中，端电压与电动势的参考方向相反，故有 $U = E$ ， $u(t) = e(t)$ 。直流恒压源的伏安特性如图1-4-2所示，它是一条与电流坐标轴平行的直线，表明其端电压与电流无关。

恒压源的端电压是由它本身确定的，至于流过它的电流要由与它相连接的外电路来决定，可以是任意值。如图1-4-3所示，当电动势为 $E$ 的恒压源与电阻为 $R$ 的外电路连接时，

其输出电流  $I = \frac{E}{R}$ ，是 $R$ 的函数。

如果恒压源的电动势恒等于零，就相当于短路。

恒压源是某些实际电源的近似模型，如稳压电源可认为是直流恒压源。实际的直流电源(如电池)总是有内阻的，电动势 $E$ 为恒定值，输出电流 $I$ 越大，端电压 $U$ 越低，其伏

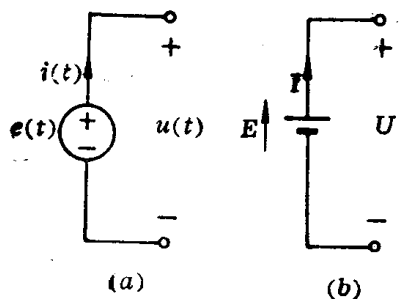


图 1-4-1 恒压源的符号  
(a)一般恒压源; (b)直流恒压源

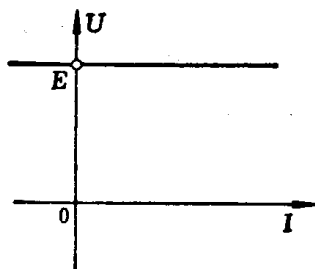


图 1-4-2 直流恒压源的  
伏安特性

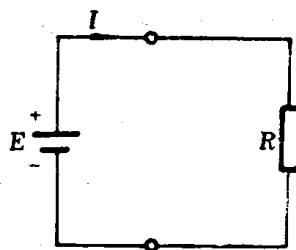


图 1-4-3 直流恒压源与  
电阻连接

安特性如图1-4-4(a)所示。因此, 它可以用直流恒压源 $E$ 与内阻 $r$ 串联的组合来等效代替, 如图1-4-4(b)所示。确实, 若选取端电压 $U$ 和电流 $I$ 参考方向<sup>①</sup>如图所示, 则根据 $U = U_{13} = U_{12} + U_{23}$ , 而 $U_{12} = E$ ,  $U_{23} = -rI$ , 可得到这个等效电路的伏安特性方程为

$$U = E - rI \quad (1-4-1)$$

上式与图1-4-4(a)所示的伏安特性曲线相符, 因此, 这种代替是等效的。

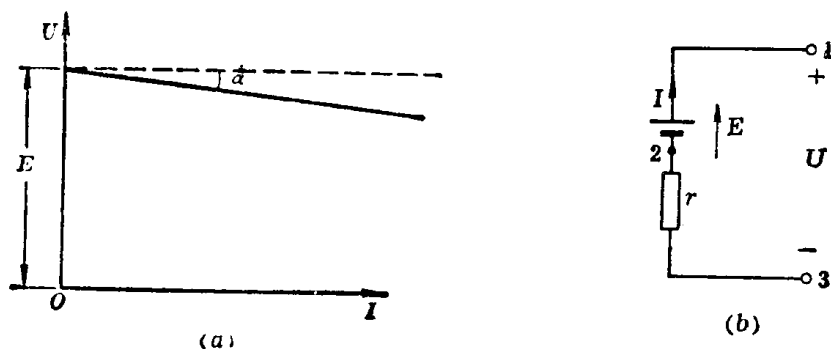


图 1-4-4 实际直流电源的伏安特性曲线和等效电路

将式(1-4-1)两边各乘以电流 $I$ , 就得到直流电源的功率平衡方程式

$$UI = EI - rI^2$$

由于 $I$ 与 $E$ 同向, 因此 $EI$ 是电源产生的功率, 即将非电能转换成电能的功率; 由于 $I$ 与 $U$ 反向, 因此 $UI$ 是电源输出的功率;  $rI^2$ 是电源内阻消耗的功率。

[例 1-4-1] 恒压供电线向蓄电池组充电。已知蓄电池组的电动势 $E = 19\text{V}$ , 内阻 $r = 0.5\Omega$ 。若需要充电电流 $I = 10\text{A}$ , 试求供电线的电压, 并分析功率平衡。

解: 蓄电池组可用直流恒压源 $E$ 与内阻 $r$ 串联的组合来表示。充电时, 蓄电池组正、负极分别接供电线的正、负极, 充电电流从蓄电池正极流入, 如图1-4-5所示。由于这个电动势的方向与电流方向相反, 故称为反电动势。蓄电池充电时, 输入电能, 转变为化学能, 是一种负载, 因其含有反电动势, 故通常称为有反电动势的负载。

① 选取 $U$ 与 $E$ 的参考方向相反,  $I$ 与 $E$ 的参考方向相同, 称为参考方向的“发电机”惯例。在这种情况下, 电流从电源的高电位端流出, 体现电源输出电功率。

由图1-4-5可知,  $U=U_{13}=U_{12}+U_{23}$ , 而  $U_{12}=E$ ,  $U_{23}=rI$ , 于是可得蓄电池充电时的伏安特性方程

$$U=E+rI \quad (1-4-2)$$

将给定数据代入上式, 得到供电线电压为

$$U=19+0.5 \times 10=24\text{V}$$

将式(1-4-2)两边乘以电流  $I$ , 就得功率平衡方程

$$UI=EI+rI^2$$

由于  $I$  与  $E$  反向, 因此  $EI$  是蓄电池将电能转变成化学能的功率; 由于  $I$  与  $U$  同向, 因此  $UI$  是蓄电池输入的电功率, 其中大部分 ( $EI$ ) 转变成化学能, 小部分 ( $rI^2$ ) 变成热能。

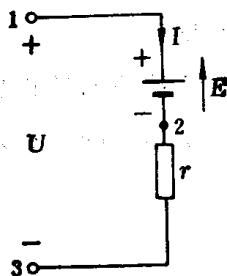


图 1-4-5 蓄电池充电时的电路图

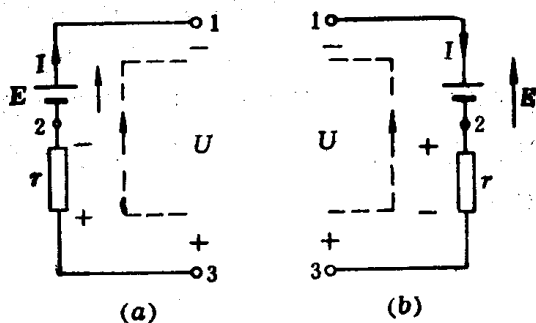


图 1-4-6 例1-4-2用图

[例 1-4-2] 见图 1-4-6, 根据图示各量的参考方向, 试分别列出两个分图所示的有源支路的伏安特性方程。

解: 电路中两点的电压与所选择路径无关, 电压应等于其起点到终点路径上各元件电压的代数和。式(1-4-1)和(1-4-2)都是根据这一规律得出的。同样, 对于图 1-4-6, 有  $U=U_{31}=U_{32}+U_{21}$ 。

在图(a)中,  $U_{32}=rI$ ,  $U_{21}=-E$ , 故得

$$U=-E+rI \quad (1-4-3)$$

在图(b)中,  $U_{32}=-rI$ ,  $U_{21}=-E$ , 故得

$$U=-E-rI \quad (1-4-4)$$

上列方程中,  $E$  和  $rI$  前面的正负号也可用下述方法确定: 从待求电压  $U(=U_{31})$  的起点 3 到终点 1 画出绕行方向, 如图中所示。根据电流的参考方向, 标出电阻电压的参考方向 (与电流参考方向相同), 电动势的参考方向一般是给定的。当电阻电压参考方向与绕行方向相同时, 电阻电压  $rI$  项前取正号, 见图(a); 相反时, 取负号, 见图(b)。当电动势参考方向与绕行方向相同时, 电动势  $E$  前为负号, 见图(a)和(b); 相反时, 取正号, 见图1-4-4(b)和图1-4-5。

式(1-4-1)~(1-4-4)都是有源支路的伏安特性方程。由于各量参考方向不同, 方程中各项的正负号也就不同了。

本例题所用的方法还可以推广, 用来计算复杂电路中的电压和电位。