

高等学校教材

专科适用

电工及电气设备

浙江水利水电专科学校 华孝敏 主编



内 容 简 介

本书在阐述电工及电子的基本理论、基本知识和基本分析方法的基础上,介绍中小型水电站及电力排灌站的电气设备及其布置。全书共分十章。主要内容有:直流电路,交流电路,变压器,整流电路,模拟放大电路,数字电路,异步电动机,同步电机,电气设备,电气接线和布置。

本书为水利类高等专科学校通用教材。可供水利工程建筑,农田水利等专业使用,也可供有关工程技术人员参考。

浙江水利水电专科学校 华孝敏 主编

中国水利水电出版社 出版

(北京市三里河路6号 100044)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市密云县印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 18.5印张 420千字

1995年9月第一版 2000年9月北京第三次印刷

印数 8691—13690册

ISBN 7-120-02237-7/TV·896

定价 19.00元

前 言

本教材是根据《1990~1995年高等学校水利水电类专业专科教材选题和编审出版规划》组织编写的，作为水利类高等专科学校通用教材，按80学时编写。主要供水利工程建筑、农田水利等专业使用。

根据高等专科学校培养应用型人才的目标，在编写过程中，努力贯彻“少而精”原则，大力精选教学内容。把教材的重点放在基本理论、基本知识、基本分析方法和电工及电子元器件的外部特性及其使用等方面，并联系工程实际例举较多例题，电气设备结合中小型水电站和电力排灌站的电气部分，介绍其主要电气设备的作用，原理和构造，以及电气接线和布置等有关问题。书中每章均有习题与思考题，以利巩固知识，培养分析问题和解决问题的能力。书后附录，选编了部分半导体器件和电气设备的型号、技术数据表格供查阅。

本书第一、二、九、十章由浙江水利水电专科学校华孝敏编写；第三、七、八章由河北水利专科学校郭福舜编写；第四、五、六章由浙江水利水电专科学校张惠民编写。华孝敏主编，江苏水利工程专科学校郭永年主审。

由于编者的水平有限，不妥和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1993年

目 录

前 言

第一章 直流电路	1
第一节 电路的基本概念	1
第二节 电路元件的特性	6
第三节 基尔霍夫定律	10
第四节 复杂电路的分析方法	15
第五节 RC 电路	23
习题与思考题	26
第二章 交流电路	30
第一节 正弦交流电的基本概念	30
第二节 正弦交流电的相量表示法	33
第三节 单一参数的单相交流电路	37
第四节 RLC 串联单相交流电路	44
第五节 单相并联交流电路	49
第六节 三相交流电路	54
习题与思考题	65
第三章 变压器	69
第一节 变压器的用途和结构	69
第二节 变压器的工作原理	72
第三节 变压器的运行性能	79
第四节 三相变压器和自耦变压器	82
习题与思考题	85
第四章 整流电路	87
第一节 晶体管整流电路	87
第二节 可控硅整流电路	93
第三节 滤波电路	100
第四节 硅稳压管和稳压电路	102
习题与思考题	104
第五章 模拟放大电路	106
第一节 晶体三极管及其放大电路	106
第二节 运算放大器和应用电路	115
第三节 功率放大器	126
习题与思考题	132
第六章 数字电路	134
第一节 基本逻辑运算和门电路	134
第二节 逻辑函数与组合逻辑电路	143
第三节 触发器和时序电路	153

习题与思考题.....	158
第七章 异步电动机.....	159
第一节 三相异步电动机的结构和工作原理.....	159
第二节 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性.....	163
第三节 三相异步电动机的起动.....	167
第四节 三相异步电动机的技术数据和选择.....	170
第五节 单相异步电动机.....	173
习题与思考题.....	174
第八章 同步电机.....	176
第一节 同步电机的基本结构和工作原理.....	176
第二节 发电机运行及其特性.....	179
第三节 同步发电机并联运行.....	183
第四节 同步发电机的励磁.....	192
习题与思考题.....	194
第九章 电气设备.....	196
第一节 发电厂、电力网及电力系统.....	196
第二节 电弧的概念.....	202
第三节 熔断器.....	204
第四节 高压开关.....	208
第五节 低压开关.....	213
第六节 电力线路、母线和绝缘子.....	222
第七节 互感器.....	226
第八节 电气设备的防雷和接地.....	228
第九节 电气设备选择的一般原则和举例.....	235
习题与思考题.....	238
第十章 电气接线和布置.....	240
第一节 电气主接线.....	240
第二节 厂用电.....	245
第三节 配电装置.....	246
第四节 二次回路的基本概念.....	255
第五节 电气设备的布置.....	266
习题与思考题.....	274
附录 1 半导体器件的型号与主要参数简介.....	276
附录 2 半导体集成电路的型号与主要参数简介.....	282
附录 3 常用变压器及异步电动机主要型号、参数.....	284
附录 4 常用电气设备主要技术参数.....	287

第一章 直 流 电 路

本章重点讨论直流电路的基本概念、基本定律和基本分析方法。它是电路的基础。这些电路理论的基本内容对交流电路同样适用。

第一节 电路的基本概念

一、电路的作用和组成

电在现代工农业生产、国防建设、科学技术以及日常生活中得到了愈来愈广泛的应用，而这种应用都是通过电气设备来实现的。电路就是由电气设备组成的总体，它提供了电流通过的途径，在电路中随着电流的通过进行能量的转换、传输和分配。如水电站中的水轮发电机组通过水能→机械能→电能的转换，并通过变压器、输电线等把电能输送给用户，在那里又把电能转换为机械能、光能、热能等其他能量。

电路的另一作用是信息的传递和处理。如要测量水工建筑物某部位的变形或受力情况，可通过电阻应变片变形而引起电阻值的变化，经处理成为所需要的电信息，由测量仪表指示读数。

实际的电路尽管很复杂，但均可把它划分为电源、负载和中间环节三个基本部分。供给电能的设备称为电源，常用的电源有电池、发电机、整流电源等；用电设备称为负载，如电灯、电热器、电动机、扬声器等；为了把电能安全、可靠地送给负载，还必须有导线、开关、测量控制、保护设备等中间环节。

电气设备的种类繁多。在分析研究时，为简化，常把实际的具体电路抽象为一些理想电路元件和它们的组合来代替。常用的理想电路元件有电阻、电感、电容、恒压源和恒流源。理想电路元件是具有某种确定的电或磁性质的模型。如用电阻这一理想电路元件来反映消耗电能的特性，这样一来，所有的电阻器、电灯、电炉等实际元件都可以用电阻近似代替它们。理想的电路元件分别用规定的图形符号和文字来表示。用无损耗的理想导线连接各理想电路元件，就构成了电路图。通常人们将这种抽象的电路模型称为电路，图1-1所示即为简单电路， R 表示消耗电能的元件，蓄电池 GB 用电动势 E 和内阻 r_0 串联代替（电动势 E 表示恒压源，电阻 r_0 表示蓄电池内部消耗的电能元件）， S 代表各种闸刀开关。

二、电路的基本物理量

电路可用一些基本物理量来描述，现用

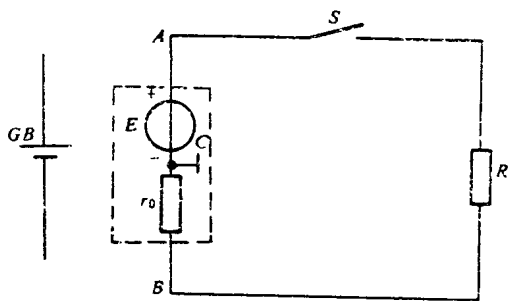


图 1-1 简单电路

图1-1简单电路加以讨论。

1. 电流

把开关 S 合上, 形成一个闭合电路, 电荷在电源的电场力作用下, 就会形成有规则的运动, 闭合电路里就有了电流。习惯上规定以正电荷运动的方向作为电流的方向。电流的大小以单位时间内通过某一导体截面的电荷量来计量, 称为电流强度, 简称电流。

设在极短的时间 dt 内通过导体截面的微小电量为 dq , 则电流为

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

上式表明电流是随时间变化的, 是时间函数。图1-1所示电路中, 电流的大小和方向不随时间变化, 即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$, 则这种电流称为恒定电流, 简称直流。直流常用大写字母 I 表示, 则上式可写为

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

在常用法定计量单位中, 电流的单位是安(A)。当每秒内通过导体截面的电量为1库(C)时, 则电流为1A。在工程实用中常用千安(kA)、毫安(mA)和微安(μA)作单位。 $1\text{kA} = 10^3\text{A}$, $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$, $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ 。

电流的方向定义为正电荷运动方向。但在分析和计算时, 有时电路的电流方向很难判断, 经常需对电路假定一个电流参考方向, 又称电流正方向。它可以用带箭头的实线符号标注在电路上, 也可以用带下标的文字符号来表示。如 I_{AB} 表示电流的参考方向由 A 流向 B , 如图1-2(a)所示。把正电荷运动方向称为电流实际方向时, $I_{AB} > 0$, 则表明该电流的参考方向与实际方向一致; 图1-2(b)中, $I_{BA} < 0$, 则表明该电流的参考方向与实际方向相反。电流是一个代数量, 其正负仅相对于参考方向而言, 只有假定电流参考方向后才有意义。以后讨论中所标的电流方向都是参考方向。一般来说, 参考方向的假定完全是任意的。但应注意: 一个具体电路假定了参考方向之后, 在电路的整个求解过程中就不允许再作改动。

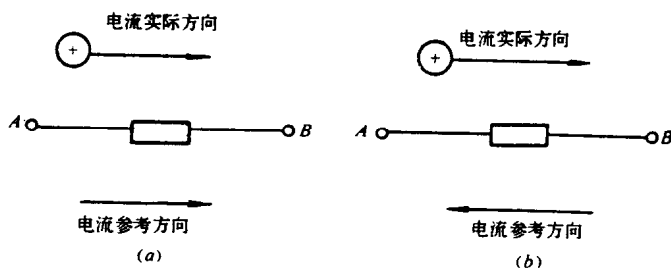


图 1-2 电流的参考方向
(a) $I_{AB} > 0$; (b) $I_{BA} < 0$

2. 电压和电位

图1-1所示电路中, 正电荷在电场力的作用下, 由 A 点经负载电阻 R 至 B 点, 为了衡

量电场力对电荷做功的能力,引入电压这个物理量。电路中 A 、 B 两点间的电压,其数值上等于电场力将单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功, AB 间的电压用 U_{AB} 表示,即

$$U_{AB} = \frac{W}{q} \quad (1-2)$$

式中 q 是电荷由 A 点移到 B 点的电量; W 是电场力移动电荷所做的功。

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任取一点,并设其电位为零,作为计算电路其他各点电位的基准点。电位参考点又称零电位点。选取不同的电位参考点,电路中各点电位的数值也就不同。当电位参考点选定后,各点电位也就唯一的确定了。在电工技术中,一般选大地作为电位参考点,在电子电路中,常把电源的公共接点或机壳作为电位参考点。

虽然,电路中各点的电位和选取的电位参考点有关,但是电路中任两点之间的电位差值却是不变的,它代表两点间的电压,因此电压又叫电位差。如图 1-1 中, $U_{AB} = V_A - V_B$, V_A 、 V_B 分别表示 A 点和 B 点相对电位参考点 C 的电位。若 $V_A > V_B$,即 A 点电位高于 B 点的电位, $U_{AB} > 0$,则电压的方向与电场力推动正电荷运动的方向一致。习惯上规定电压的实际方向是从高电位指向低电位,即电位降落的方向。

同理,对电压也要假定参考方向(参考极性)。如图 1-3 所示,参考方向可用带箭头的实线符号标明或用带下标的文字符号表示。参考极性则在元件的两端用“+”、“-”符号表示。“+”极性表示参考的高电位端,“-”极性表示参考的低电位端。图 1-3(a) 表示电压的参考方向(极性)和电压的实际方向(极性)一致, $U_{AB} > 0$;图 1-3(b) 表示电压的参考方向(极性)和电压的实际方向(极性)相反, $U_{BA} < 0$ 。对于负载,其电压和电流的实际方向都是从高电位到低电位。习惯上总是把电压和电流的参考方向选得一致。

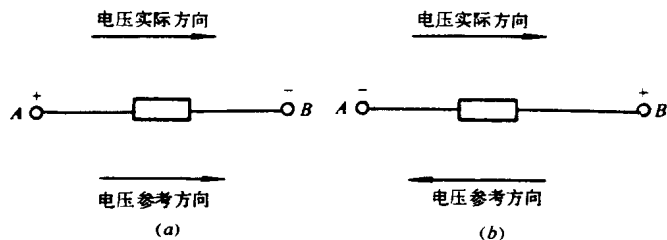


图 1-3 电压的参考方向(极性)

(a) $U_{AB} > 0$; (b) $U_{BA} < 0$

在法定计量单位中,电压的单位是伏(V)。当电场力把1库仑(C)的电量从一点移到另一点所做的功为1焦耳(J)时,则该两点间的电压为1V。在工程实用中常用kV和mV作单位。 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$, $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$ 。

3. 电动势

为了维持电路中的电流,在电源内部存在着一种动力,称为电源力。电源的电动势就是电源力把单位正电荷从“-”极(低电位端)经电源内部移动到“+”极(高电位端)所做的功。所以电动势的方向由低电位指向高电位,即电位升高的方向。直流电动势的大

小和极性都是不随时间变化的, 用字母 E 表示, 即

$$E = \frac{W}{q} \quad (1-3)$$

式中 q 是电源力作用下在电源内移动电荷的电量; W 是电源力所做的功, 即电量 q 所获得的能量。

对直流电动势的方向(极性), 一般是给定的, 选取的参考方向和电动势方向相同。

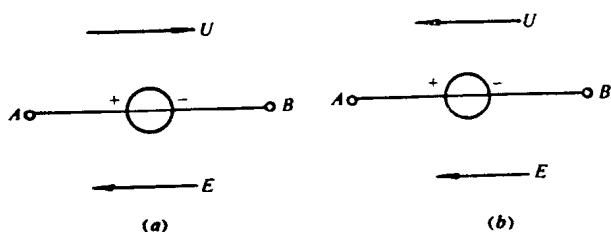


图 1-4 电动势与电压关系

(a) $U = E$; (b) $U = -E$

由于电压的方向是电位降落的方向, 而电动势的方向是电位升高的方向, 因此如果选取电压 U 的参考方向和电动势 E 的方向相反, 见图 1-4(a), 则 $U = E$, 即 $U_{AB} = E_{BA}$; 若选取电压 U 的参考方向和电动势 E 的方向相同, 见图 1-4(b), 则 $U = -E$, 即 $U_{BA} = -E_{BA}$ 。电动势与电压的单位相同。

4. 功率

电流通过电路的同时, 电路内发生了能量的转换。单位时间内电路中产生或接受的电能称为电功率, 简称功率, 用 P 表示。图 1-1 所示电路, 电源产生的功率为

$$P_G = EI \quad (1-4)$$

负载接受的功率为

$$P_L = UI \quad (1-5)$$

电源内阻 r_0 所消耗的功率为 $I^2 r_0$ 。一个电路中的功率是平衡的, 即电源产生的功率一部分被其内阻所消耗, 其余为负载接受, 有如下关系

$$EI = UI + I^2 r_0 \quad (1-6)$$

在一般情况下, 由于电流、电压和电动势假定了参考方向, 因此它们都是代数量。对于电源内部, 由于 E 和 I 的方向都是由低电位到高电压, 当 E 、 I 的参考方向选得相同时, 由式(1-4)计算时, 当 $P_G > 0$, 表明该电源产生功率; 当 $P_G < 0$, 表明该电源吸收功率, 通常这种电源称为反电动势负载。例如蓄电池充电时, 输入电能转换为化学能就是这种情况。对于负载, 电流和电压的方向都是从高电位到低电位, 习惯上总是把电流、电压的参考方向选得相同, 按式(1-5)计算, 当 $P_L > 0$, 表明接受功率; 当 $P_L < 0$, 表明产生功率。

在国际单位制中, 电流的单位是安培, 电压、电动势的单位是伏特, 功率的单位为瓦特(W), 简称瓦。在工程实用中常用兆瓦(MW)、千瓦(kW)、毫瓦(mW)作单位。 $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$, $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$, $1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$ 。电能的单位是千瓦时(kWh), 俗称度。

【例 1-1】 图 1-5 所示电路中, 电流、电压和电动势的参考方向如箭头所示。 $E = 12 \text{ V}$, $I = 2 \text{ A}$, A 元件消耗的功率为 30 W 。试问:

(1) $U_A = ?$

(2) $U_B = ?$

(3) B 元件是电源还是负载、输出还是接受功率? 为多少?

解 (1) A 元件消耗功率 30W , 即

$$P_A = 30\text{W} > 0$$

$$P_A = U_A I > 0$$

$$\because I = 2\text{A} > 0 \quad \therefore U_A > 0$$

$$U_A = \frac{P_A}{I} = \frac{30}{2} = 15\text{V}$$

U_A 为正值, 说明参考方向与实际方向一致。

$$(2) U = U_A + U_B \quad U = E = 12\text{V}$$

$$\therefore U_B = U - U_A = 12 - 15 = -3\text{V}$$

U_B 为负值, 说明参考方向与实际方向相反。

$$(3) P_B = U_B I = (-3) \times 2 = -6\text{W}$$

B 元件上电压和电流参考方向一致, 而 P_B 为负值, 说明 B 元件为电源, 输出功率 6W 。

三、电路的工作状态

电路下列三种状态, 如图 1-6 所示。

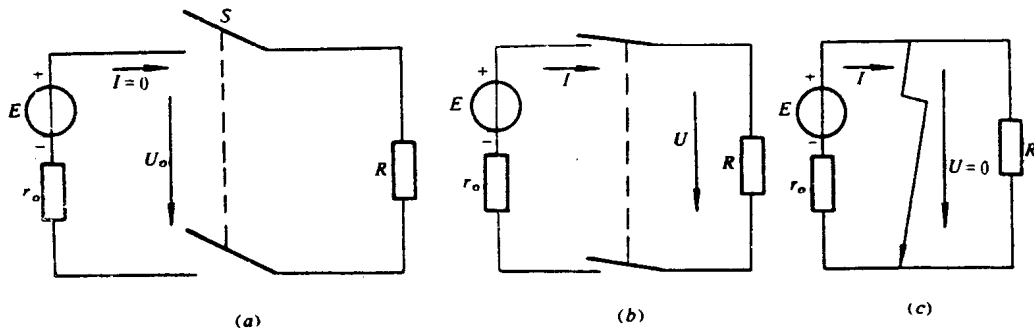


图 1-6 电路的工作状态

(a) 开路; (b) 有载; (c) 短路

1. 开路(空载)

当 S 打开, 电源和负载未构成闭合电路时, 电路处于开路状态, 电路中的电流 $I = 0$, 电源两端的电压 U_0 称为开路(空载)电压, 等于电源电动势 E , $U_0 = E$ 。电源输出的功率 $P = 0$, 所以又称空载。

电源开关未合上, 属正常的开路。有时电路中因某些接头接触不良、导线断裂、熔丝熔断等而造成的电路开路, 则属于不正常的。

2. 有载工作状态

把开关 S 合上, 电源和负载构成闭合电路时, 电路中有电流通过, 这时电源就输出功率, 负载吸收功率, 电路就处于有载工作状态。电路中电流 $I = E / (r_0 + R)$, 负载电阻两端

电压 $U=IR$ ，电源输出功率 $P=UI$ ，被负载吸收。

在一个电路中，任何一个设备，包括电源、用电器件，甚至导线，其工作能力、运行性能、使用条件等都有一定的范围。为了使设备能够长期、连续、安全地运行，制造厂对其生产的产品给出一组技术数据加以限制和规定，这组技术数据就称为设备的额定值。设备的额定值包括额定电压、额定电流、额定功率等。额定电压是指加在设备上的最大允许电压；额定电流是指通过设备的最大允许电流；额定功率则是设备在额定电压和额定电流作用下消耗或输出的功率。通常标明在该设备的铭牌上，也可从产品目录中查到。

当电气设备在额定值下工作，我们称该设备处于额定工作状态，也称满载。在这种状态下工作，是最为经济合理和安全可靠的，并能保持正常的使用寿命。超过额定值工作，会缩短使用寿命，严重时甚至损坏设备。如果低于额定工作，这时设备得不到充分、合理、正常的使用，效益低。如一只灯泡的额定值为60W、220V，它表明灯泡应在220V电压下使用，消耗功率是60W。当接错到380V电压上，灯泡就会烧坏；当电压不足220V时，灯泡不能正常发光。在实际工作中应使电气设备尽量接近额定工作状态运行。

在有些电路中，为使负载获得最大功率，要求负载和电源匹配。从图1-6中可知，负载获得的功率为 $P_L = \left(\frac{E}{r_0 + R} \right)^2 \cdot R$ ，当 E 、 r_0 一定时， P_L 是负载电阻 R 的函数， P_L 最大的条件为 $\frac{dP_L}{dR} = 0$ ，计算得

$$r_0 = R \quad (1-7)$$

所以负载电阻 R 和电源内阻 r_0 相等时，负载可获得最大功率，这就是负载和电源匹配。

匹配时，电源内阻消耗的功率等于负载获得的功率，传输效率低。因此，一般由于电子电路的功率放大电路中传输功率小，为了使负载能获得最大功率才要求匹配。

3. 短路

在电路中，电位差较大的两点，由于某种原因，如绝缘损坏、线路接错等而直接相连时，称为短路。最为严重的是电源两端的短路。此时电流回路中仅有很小的电源内阻 r_0 ，电流 $I=E/r_0$ 很大，该电流称为短路电流。这时电源所产生的电能全部被内阻所消耗，可能使电源损坏。

为了防止设备受损，必须在电路中接入熔断器或断路器。一旦电路短路，熔断器熔丝烧断，或断路器自动跳闸，把电源切除。

第二节 电路元件的特性

一、电阻

电阻是一个消耗电能的理想电路元件。根据电阻元件两端的电压与其中电流的关系，可分为线性电阻和非线性电阻。

欧姆定律是电路的基本定律之一，它指出通过电阻的电流与电阻两端的电压成正比。

按惯例,负载上电流和电压参考方向假定相同,如图1-7(a)所示,这个正比的关系式写为

$$U = RI \quad (1-8)$$

当电流和电压的参考方向假定相反时,如图1-7(b)所示,则得

$$U = -RI \quad (1-9)$$

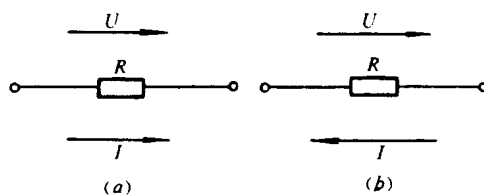


图 1-7 欧姆定律

式(1-8)中比例常数 R 即为该段电路的电阻。电阻是一种电路参数,它反映了对电流所起的阻碍作用。

如果一个电阻的电阻值是一个常数,加在电阻上的电压和通过电阻中的电流呈线性关系,则这种电阻称线性电阻。线性电阻遵循欧姆定律。实际上绝对的线性电阻是没有的,如果能基本上符合欧姆定律,就可以认为是线性的。常用的有碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等。

如果一个电阻的电阻值不是一个常数,而是随着电压和电流呈非线性关系变化,那么,这种电阻称非线性电阻。非线性电阻元件的电阻值必须指明它的工作电压或工作电流。如

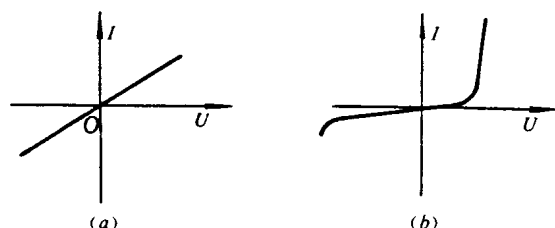


图 1-8 电阻的伏安特性

(a) 线性电阻; (b) 非线性电阻

白炽灯的钨丝电阻、半导体二极管等。非线性电阻两端的电压与其中的电流关系不遵循欧姆定律,一般不用数学式表示,而是用电流、电压的关系曲线 $U = f(I)$ 或 $I = f(U)$ 来表示,这种曲线称为伏安特性。图1-8(a)所示为线性电阻的伏安特性,它是一条通过原点的直线。图1-8(b)所示为半导体二极管非线性电阻的伏安特性,它是一条曲线。

电阻的单位是欧姆(Ω),简称欧。实用中常用的有千欧($k\Omega$)、兆欧($M\Omega$), $1k\Omega = 10^3\Omega$, $1M\Omega = 10^6\Omega$ 。

电阻 R 的倒数称为电导 G , 即 $G = 1/R$ 。电导的单位是西门子(S),简称西。

二、电源的等效电路

电源可以用两种不同的等效电路来表示,一种用电压的形式表示称为电压源;一种用电流的形式来表示称为电流源。

1. 电压源

实际的电源,如蓄电池、发电机等,可以用一个恒定的电动势 E 和一个内电阻 r_0 相串联的等效电路来表示,这种等效电路表示的电源称为电压源。当外接负载后,电路如图1-9(a)所示, I 、 U 和 E 的参考方向如图所示,负载的输出电压和输出电流的关系为

$$U = E - Ir_0 \quad (1-10)$$

当电压源开路时, $I = 0$, $U = E$ 。而接上负载后,在电压源内阻上产生一个电压降 $\Delta U = Ir_0$, 使电压源端电压下降。当 E 和 r_0 一定时,其电压和电流关系的伏安特性也称电压源的外特性,如图1-8(b)所示直线1。在相同的负载电流下, r_0 愈大,端电压下降愈大,

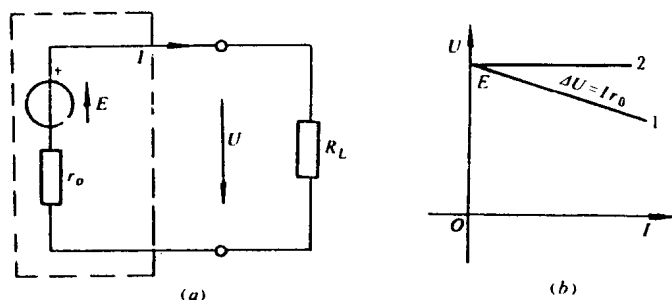


图 1-9 电压源及其外特性

(a) 电路图; (b) 外特性

因此对负载而言, 要得到一个比较稳定的电压, 电源的内阻 r_0 愈小愈好。若 $r_0 = 0$ 时, 电压源的端电压 $U = E$ 是一个恒定值, 与负载电流无关, 这种电压源称为恒压源, 或称理想电压源。它的外特性为一条 $U = E$ 平行于电流横轴的直线, 见图1-8(b)直线2。

应当指出, 恒压源实际是不存在的, 因为任何电源的内阻不可能为零。但是, 当 $r_0 \ll R_L$ 时, 内阻电压降 $\Delta U = Ir_0 \ll U$, 于是 $U \approx E$, 则可近似把它当作恒压源, 如稳压电源, 无穷大电网(电网的容量相对较大, 能保持电压和频率恒定不变)等。

2. 电流源

实际电源除用电压源表示外, 还可以用恒定电激流 I_s 和内阻 r_s 的并联等效电路来表示, 这种等效电路表示的电源称为电流源。当接上负载 R_L 后, 如图1-10(a)所示, 各电流、电压参考方向表示于图, 在电阻 r_s 分流的电流为 $\Delta I = \frac{U}{r_s}$, 则负载上的电流为

$$I = I_s - \frac{U}{r_s} \quad (1-11)$$

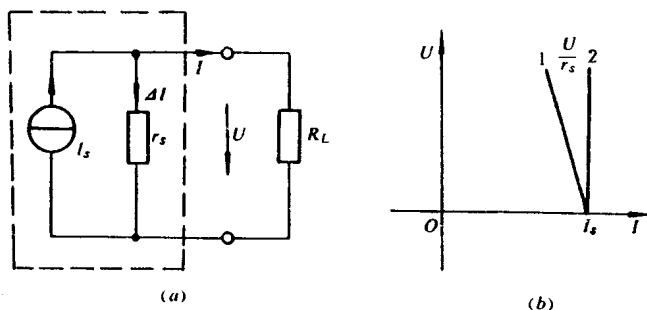


图 1-10 电流源及其外特性

(a) 电路图; (b) 外特性

当 I_s 和 r_s 不变时, 输出电压和输出电流伏安特性即为电流源的外特性。如图1-10(b)中的直线1。短接电流源, 则输出电压 $U = 0$, 而 $I = I_s$ 。当接上负载后, 由于并联内阻 r_s 的分流作用, $\Delta I = U/r_s$, 使输出电流随着输出电压的增大而减小。在相同的负载电压下, r_s 愈大, 分流作用愈小, 输出电流也就下降愈小。当 $r_s \rightarrow \infty$ 时, 即 r_s 断开, 这时电流源的

输出电流 $I = I_s$ ，而与端电压无关。这种电流源称为恒流源，也称理想电流源。它的外特性是一条 $I = I_s$ 平行于电压坐标的直线，如图 1-10(b) 所示的直线 2。

恒流源实际也是不存在的，是一种理想的电源。但当 $r_s \gg R_L$ 时，则 $I \approx I_s$ ，可近似看成恒流源。如晶体管放大电路中的输出特性，在一定的范围内可看作恒流源，详见第五章有关章节。

3. 电压源和电流源的等效变换

如上所述，实际电源既可以用电压源来表示，也可以用电流源表示，因此电压源和电流源之间可以进行等效变换。应注意的是电压源和电流源的等效关系是对外电路而言的，而对电源内部则是不等效的。例如在图 1-11(a) 中，当电压源开路时 $I = 0$ ，电源内阻 r_0 上不消耗功率，但在同图(b) 中，电流源开路时，电源内部仍有电流，内阻 r_s 上有功率损耗。

图 1-11 所示电路中，电压源和电流源分别向相同的负载 R_L 供电，若它们在 R_L 两端电压 U 和通过电流 I 大小和方向相同，则这两种电源就是等效的。

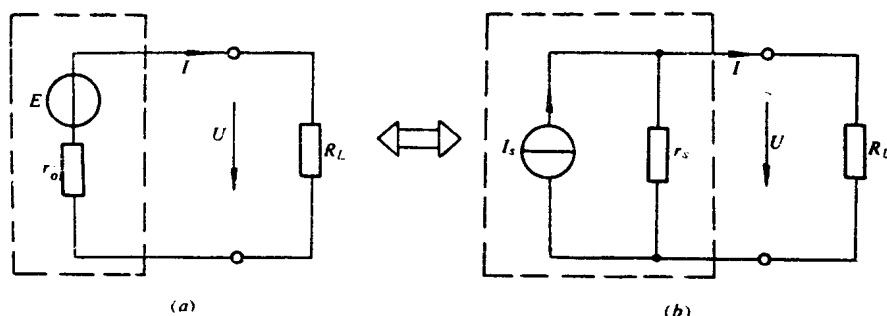


图 1-11 电压源和电流源等效变换

(a) 电压源；(b) 电流源

由电压源的外特性得 $U = E - Ir_0$ ，移项并两边同除以 r_0 ，可写成

$$I = \frac{E}{r_0} - \frac{U}{r_0}$$

由电流源的外特性得到

$$I = I_s - \frac{U}{r_s}$$

比较上述两式可知，如要在负载上得到相同的电压和电流，这时，必须满足

$$r_0 = r_s \quad (1-12)$$

$$I_s = \frac{E}{r_0} \quad (\text{电压源短路电流}) \quad (1-13)$$

或

$$E = I_s r_s \quad (\text{电流源开路电压}) \quad (1-14)$$

条件，如电流 I_s 的方向和电动势 E 的方向相同，则它们对外电路是等效的，可以互相等效变换。

但是理想的电压源与理想的电流源本身之间没有等效关系。因为对理想电压源来说，

其 $r_0 = 0$ ，其短路电流 I_s 为无限大；对理想电流源 $r_s = \infty$ ，其开路电压为无穷大，故两者之间不存在等效条件。

【例 1-2】把图 1-12 电压源和电流源进行等效互换。

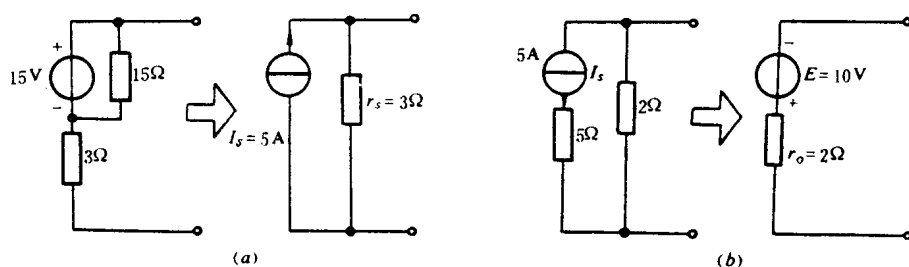


图 1-12 例 1-2

解 (1) 对图 1-12(a) 中的电路，把电压源变换为等效的电流源。

电动势 15V 和电阻 15Ω 并联，对外电路而言，除去 15Ω 的电阻并不影响电动势对外电路的供电，其电动势大小不变。因此与恒压源并联的电阻对外电路可不计。所以图中就构成了内阻 $r_0 = 3\Omega$ ， $E = 15V$ 的电压源，化为等效电流源时，则

$$I_s = \frac{E}{r_0} = \frac{15}{3} = 5A$$

$$r_s = r_0 = 3\Omega$$

其电激流 I_s 的方向和电动势 $E = 15V$ 方向一致。

(2) 把图 1-12(b) 电路中的电流源变换为等效电压源。

电激流 $I_s = 5A$ 与电阻 5Ω 串联不会影响 I_s 的大小。因此，对外电路而言，与恒流源串联的电阻可以不计。则等效电压源

$$E = I_s r_s = 5 \times 2 = 10V \text{ (方向和 } I_s \text{ 相同)}$$

$$r_0 = r_s = 2\Omega$$

从以上看出电源内部并不等效，除去了相应的电阻，内部的电压、电流和功率损耗都发生了变化。

第三节 基尔霍夫定律

欧姆定律只能解决简单电路的计算问题，对于比较复杂的电路就要用基尔霍夫定律来解决。欧姆定律和基尔霍夫定律都是电路的基本定律。基尔霍夫定律包括第一、第二定律，有关电路中节点电流之间的关系称为基尔霍夫第一(电流)定律；有关回路电压之间的关系称为基尔霍夫第二(电压)定律。

在说明基尔霍夫定律前，先介绍一下电路中常用的几个名词。

1. 支路

电路中由一个元件或若干个元件串联，并流过的是同一电流的分支叫支路。图 1-13 中有 AB、CD、BE、AF、HG 五条支路，其中 CD 和 HG 支路含电源，叫含源支路，其余无

电源的叫无源支路。

2. 节点

三条或三条以上支路的汇合点叫节点。如图1-13中, AB 、 AF 、 HG 三支路汇合于 A 点; BA 、 CD 、 BE 三支路汇合于 B 点; HG 、 AF 、 BE 、 CD 四支路汇合于 E 点, 因此共有三个节点。

3. 回路

电路中任一闭合路径叫回路。在图1-13中有 $HGFA$ 、 $ABEF$ 、 $BCDE$ 、 $ABCDEF$ 等回路。

一、基尔霍夫电流定律 (KCL)

根据电流连续性原理, 在任一时刻, 在电路的任一节点上均不可能发生电荷的堆积和减少, 所以, 流入任意一个节点的电流之和必定等于流出该节点的电流之和。或者说任一时刻任一节点电流的代数和为零。这就是基尔霍夫电流定律, 用数学式表示为

$$\sum I = 0 \quad (1-15)$$

式(1-15)称节点电流方程。

图1-13所示电路中, 对节点 E , 并假定各支路电流的参考方向(如图所示), 并规定流入节点的电流取“+”号, 流出节点的电流取“-”号(若反之也可), 则可列出节点电流方程

$$-I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0 \quad (1-16)$$

I_1 、 I_2 ...本身是代数量, 可正可负, 它决定参考方向和实际方向是否一致, 一致时, 计算结果为正值, 不一致时, 计算结果为负值。

基尔霍夫电流定律还可以推广应用到任意假想的封闭面, 或称广义节点, 对于任意封闭面上的电流代数和为零。图1-14(a)中封闭面 FB_1 里包括三个节点:

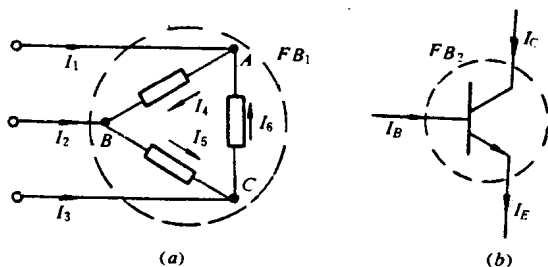


图 1-14 基尔霍夫电流定律的推广

节点 A	$I_1 + I_6 - I_4 = 0$	}	(1-17)
节点 B	$I_2 + I_4 - I_5 = 0$		
节点 C	$I_3 + I_5 - I_6 = 0$		

三式相加得

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1-18)$$

式(1-18)就是广义节点的电流方程。

在图1-14(b)中, 晶体管也可以看成一个广义的节点, 其电流方程如下

$$I_B + I_C - I_E = 0 \quad (1-19)$$

二、基尔霍夫电压定律(KVL)

根据电位的单值性原理,任一时刻,电路的任一闭合回路中,按任一绕向绕行一周(即由电路的任一点出发,再回到原来的出发点)时,各电动势的代数和等于电压降的代数和,这就是基尔霍夫电压定律,其数学表达式为

$$\sum E = \sum U \quad (1-20)$$

式(1-20)称为回路电压方程。

在列回路电压方程时,首先需要选定一个回路的绕行方向和支路电动势及电流参考方向。电动势的参考方向和绕行方向一致时,该电动势取“+”号,反之取“-”号;同理,凡电流参考方向与绕行方向一致,该电流在电阻上的电压降取“+”号,反之取“-”号。

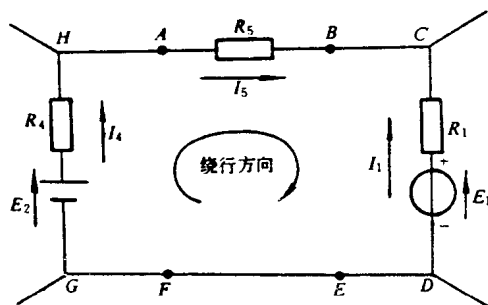


图 1-15 回路电压方程图例

图1-13所示电路中,我们取 $ABCDEFGH$ 回路(如图1-15所示),来列回路电压方程。现按顺时针方向绕行,电势和电流方向如图所示,方程如下

$$E_2 - E_1 = I_4 R_4 + I_5 R_5 - I_1 R_1 \quad (1-21)$$

其中 E_2 和绕行方向一致取“+”, E_1 和绕行方向相反取“-”。 I_4 和 I_5 和绕行方向一致取“+”, I_1 和绕行方向相反取“-”。

同理,基尔霍夫电压定律也可推广应用到某些假设的闭合回路中,例如求图1-15中 AE 间的电压 U_{AE} 时,可假设按 $ABCDEA$ 绕行一周,得回路电压方程

$$-E_1 = I_5 R_5 - I_1 R_1 - U_{AE}$$

$$\therefore U_{AE} = E_1 + I_5 R_5 - I_1 R_1 \quad (1-22)$$

或假设按 $AEFGHA$ 绕行一周,得另一回路电压方程

$$E_2 = I_4 R_4 + U_{AE}$$

$$\therefore U_{AE} = E_2 - I_4 R_4 \quad (1-23)$$

总之,基尔霍夫电流定律规定了电路中任一节点的电流关系,而基尔霍夫电压定律规定了电路中任一回路内电压的关系。

以上讨论的仅限于电阻和恒压源两种元件的直流电路,实际上对各种不同元件所构成的电路,或者交变的电流、电压电路同样适用。

【例 1-3】 如图1-16(a)所示电路,用电子电路的习惯改画成如图1-16(b)所示的形式。电源一般不用电池的符号表示,而改为标出其电位的极性和数值。在图1-16(a)中, D 作为电位参考点,则 B 点的电位 $V_B = -E_2$; C 点的电位 $V_C = +E_1$ 。

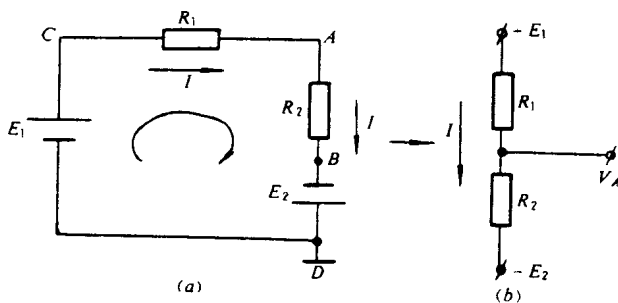


图 1-16 例1-3