

高等学校教材

电工学及电气设备

浙江大学 华北水利水电学院 主编

水利出版社

TM
18
3

高等学校教材

电工学及电气设备

浙江大学 华北水利水电学院 主编



水利出版社

A743209

内 容 提 要

本书讲述水电工程和农田水利工程中所需电气方面的基本知识。全书共分两篇，第一篇着重叙述交、直流电路的基本概念、基本理论和分析方法，以及电机、变压器、电动机、晶体管电路等的基础知识。第二篇主要介绍大中型水电站、电力排灌站的常用电气设备、一二次接线、继电保护装置等的作用原理、简明结构和布置方式，以及新产品的简介。

本书为高等学校水利水电工程建筑专业、水利水电工程施工专业、农田水利工程专业的通用教材，也可作为其它专业教学用书。

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

浙江大学 华北水利水电学院 主编

*

水利出版社出版发行

(北京德胜门外六铺炕)

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 24 $\frac{1}{2}$ 印张 558千字

1980年7月第一版 1980年7月北京第一次印刷

印数 00001—12150册 定价 2.55元

书号 15047·4048

前 言

本书是根据1978年1月原水利电力部的教学计划和教材规划的要求,按照同年5月《电工学及电气设备》教材编写大纲讨论会拟定的大纲编写的。作为高等院校水利水电工程建筑专业、水利水电工程施工专业和农田水利工程专业的通用教材,也可作为其它有关专业的教学用书。

全书分为两篇,共十三章。第一篇为电工学部分,包括第一至第八章;第二篇为电气设备部分,包括第九至第十三章。在编写中,努力贯彻“少而精”原则,大力精选内容。电工学部分突出强调其物理概念,着重讲清基本理论和分析问题的基本方法,并辅以例题和习题,为进一步学习电专业知识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、二次接线的要求、接线形式、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。对近年来国内、外出现的新型电气设备也作了简单介绍。对于某些章节可供不同专业的实际需要参考选用。

本书第一篇由浙江大学吴官熙同志编写,第二篇中第十二章及第十三章的第三节由西北农学院袁清阁同志编写,其余由华北水利水电学院周喜农同志编写,并由吴官熙、周喜农同志担任主编。全书由武汉水利电力学院李宇贤、谭乐嵩、李琼华同志主审,华东水利学院、福州大学及编写院校参加了审稿会。

本书第二篇在编写过程中,曾得到湖南省水利电力勘测设计院、长江流域规划办公室及有关厂、校的大力协助,提供了宝贵的资料和意见,在此,我们表示衷心地感谢。

对于书中不妥或错误之处,恳切希望同志们批评指正。

编 者

1979年6月

目 录

前 言

第一篇 电 工 学

第一章 直流电路	1
1-1 电流、电压和电动势的正方向	1
1-2 电路元件的伏安特性	4
1-3 电功率和电能	11
1-4 基尔霍夫定律	14
1-5 简单电路的计算	17
1-6 支路电流法	24
1-7 迭加原理	26
1-8 等效电源定理	29
小结	34
习题	34
第二章 正弦交流电路	39
2-1 交流电	39
2-2 相位、初相和相位差	43
2-3 交流电的有效值和平均值	45
2-4 正弦量的向量表示法	46
2-5 电阻电路	50
2-6 电感电路	51
2-7 电容电路	53
2-8 串联电路	55
2-9 并联电路	60
2-10 复数运算法	62
2-11 简单非正弦电流电路	70
小结	74
习题	75
第三章 三相电路	79
3-1 三相电动势的产生	79
3-2 三相发电机绕组的连接法	80
3-3 三相负载的星形联接	83
3-4 三相负载的三角形联接	89
3-5 三相电路的功率	92
小结	94
习题	95

第四章 变压器	97
4-1 变压器的结构	97
4-2 变压器的额定值	98
4-3 变压器的空载运行	99
4-4 变压器的负载运行	102
4-5 三相变压器	104
4-6 变压器的运行性能	107
4-7 自耦变压器和三绕组变压器	109
小结	111
习题	112
第五章 异步电动机	113
5-1 异步电动机的结构	113
5-2 旋转磁场	115
5-3 异步电动机的工作原理	118
5-4 异步电动机的机械特性	122
5-5 异步电动机的名牌数据	124
5-6 异步电动机的起动	126
5-7 电动机的选择	131
小结	133
习题	134
第六章 同步电机	135
6-1 同步电机的结构	135
6-2 同步发电机的空载运行	137
6-3 对称负载时的电枢反应	139
6-4 同步发电机的运行特性	141
6-5 同步发电机并网的条件和方法	142
6-6 同步发电机与无穷大电网并联运行时的功率调节	146
6-7 同步电动机	152
6-8 励磁机	155
小结	160
习题	163
第七章 整流电路	164
7-1 晶体二极管	164
7-2 单相整流电路	168
7-3 滤波电路	172
7-4 三相桥式整流电路	177
7-5 硅稳压管稳压电路	180
小结	184
习题	185

第八章 晶体管放大电路	188
8-1 晶体三极管	188
8-2 晶体管放大电路的基本原理	197
8-3 放大电路的计算分析方法	201
8-4 放大电路的图解分析方法	206
8-5 静态工作点的稳定	211
8-6 晶体管的等效电路	217
8-7 放大器中的反馈	226
8-8 多级放大器	235
8-9 功率放大器	241
8-10 直流放大器	248
8-11 串联型晶体管稳压电源	256
小结	260
习题	263

第二篇 电 气 设 备

第九章 电力系统的基本概念	267
9-1 电力系统的组成及其优越性	267
9-2 电力网的额定电压	269
9-3 水电站的特点和在系统中的运行方式	271
9-4 短路的基本概念	274
第十章 电气设备	275
10-1 水电站电气设备概述	275
10-2 水轮发电机	276
10-3 电力变压器	282
10-4 开关设备和熔断器	286
10-5 电压互感器和电流互感器	303
10-6 载流导体和绝缘子	309
10-7 防雷保护与接地装置	310
第十一章 电气主接线和自用电接线	313
11-1 电气主接线	313
11-2 水电站的自用电	320
第十二章 继电保护及控制、信号回路	324
12-1 二次接线的基本知识	324
12-2 继电保护	328
12-3 控制、信号回路	347
第十三章 电气设备的布置	355
13-1 配电装置	355
13-2 水电站电气设备的布置	366
13-3 电力排灌站电气设备的布置	382

第一篇 电 工 学

第一章 直 流 电 路

1-1 电流、电压和电动势的正方向

电流通过的闭合路径（回路），称为电路。图 1-1-1 示明最简单的电路。电路的基本组成部分（元件）是电源、负载和连接导线。

电源是将非电能转换成电能的设备，例如电池或发电机。负载（又名负荷）则是用电设备的统称，是将电能转换成其它能量的设备，例如电灯或电动机。

描述电路的基本物理量有：
电流、电压和电动势等。在直流电路中，它们都是与时间无关的量，分别用英文大写字母 I 、 U 和 E 表示。

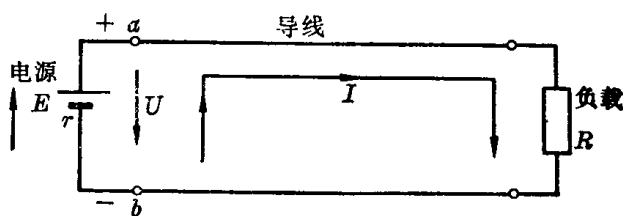


图 1-1-1 最简单的电路

一、电流的正方向

电荷的定向运动，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 i ，习惯上简称为电流。设在极短时间 dt 内通过导体的电量为 dq ，则电流强度

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

大小和方向都不随时间变化的电流，称为直流电流，简称直流。对于直流， $dq/dt =$ 常数，故上式可写成

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

式中 Q ——时间 t 内通过的电量；

I ——直流电流。

在国际单位制中，电流的单位是安培，简称安（A）。它的倍单位有千安（kA），分单位有毫安（mA）和微安（ μA ）。 $1kA=10^3A$ ， $1A=10^3mA$ ， $1mA=10^3\mu A$ 。

习惯上规定正电荷运动的方向作为电流的实际方向。正电荷在导体 ab 中的运动方向可能由 a 流向 b ，也可能由 b 流向 a ，也就是说，电流是一代数量。因此，同规定坐标轴的正方向的道理一样，必须选取某一方向作为电流的正方向（又名参考方向）。当电流的实际方向和电流的正方向一致时，则电流为正值；反之，电流为负值。在未选取电流正方向

之前，电流的正负就没有意义了。

电流的正方向除用箭头表示外，也可用双下标表示，例如 I_{ab} 表示正方向由 a 向 b 的电流[图1-1-2 (a)]，而 I_{ba} 表示正方向由 b 向 a 的电流[图1-1-2 (b)]。显然， $I_{ab} = -I_{ba}$ 。



图 1-1-2 电流的正方向

电流正方向可任意选取。不过在直流电路中，如果电流实际方向能确定时，通常选取正方向与实际方向一致。如果不能确定实际方向时，正方向只好任意假定了。当计算所得电流为正值，则电流实际方向与正方向一致；若电流为负值，则实际方向与正方向相反。

二、电压和电动势的正方向

直流电源有两个极，电位较高的称为正极，如图1-1-1中的 a 点，其电位以 U_a 表示；电位较低的称为负极，如图1-1-1中的 b 点，其电位以 U_b 表示。 a 、 b 两点间的电位差 $U_a - U_b$ 常称为该 a 、 b 两点间的电压 U_{ab} ，即

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-1-3)$$

如果用导线将 a 、 b 与负载连接起来（图1-1-1），则导线、负载内有电场存在，其方向由 a 向 b ，在此电场的作用下，正电荷将从正极 a 经连接导线和负载流向负极 b （其实是导线中的自由电子从 b 经导线和负载流向 a ）。正电荷从高电位点移向低电位点是电场力作功。为了衡量电场力作功的能力，引入电压这一物理量。电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所作的功，称为该两点间的电压 U_{ab} ，即

$$U_{ab} = \frac{A}{Q} \quad (1-1-4)$$

式中 A —— 电场力把电量为 Q 的正电荷从 a 点移到 b 点所作的功。

为了维持导线中有恒定的电流，在电源内部，正电荷必须由低电位的负极移向高电位的正极。但是电场力只能把正电荷从高电位点移向低电位点，不能把正电荷从低电位点移向高电位点，因此，电源内必有另外一种力量，这就是电源力。例如在发电机中，当导体在磁场中运动时，导体内出现的洛仑次力，就是一种电源力。把正电荷从低电位点移向高电位点是电源力作功。为了衡量电源力作功的能力，引入电动势这一物理量。电源力把单位正电荷从负极 b 经电源内部移到正极 a 所作的功，称为电源的电动势 E_{ba} ，即：

$$E_{ba} = \frac{A}{Q} \quad (1-1-5)$$

式中 A —— 电源力把电量为 Q 的正电荷从负极经电源内部移到正极所作的功。

在国际单位制中，电压和电动势的单位都是伏特，简称伏（V），倍单位是千伏（kV），分单位是毫伏（mV）。 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$ ， $1\text{V} = 10^3\text{mV}$ 。

习惯上规定：电压的实际方向是从高电位端指向低电位端，而电动势的实际方向则是从低电位端（电源负极）指向高电位端（电源正极）。

和电流一样，电压和电动势都是代数量，因此，也必须选取正方向。电压和电动势的正方向也可用双下标或箭头来表示，例如在图1-1-1中，正方向从 a 到 b 的电压就是 U_{ab} ，而正方向从 b 到 a 的电动势则是电动势 E_{ba} 。

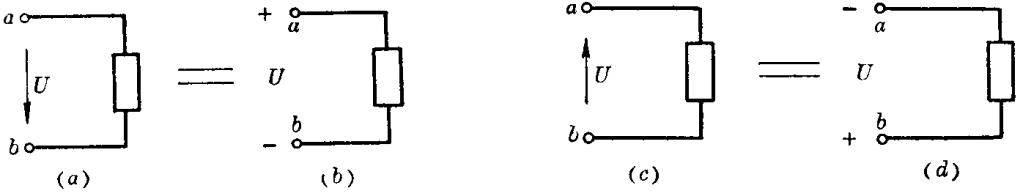


图 1-1-3 电压的正方向

电压（或电动势）的正方向还可以在元件的两个端点分别选注“+”“−”号的方法来表示（图1-1-3）。由于电压的方向是电位降的方向，而在图1-1-3（ a ）中，选取电压正方向由 a 指向 b ，这就意味着假定 a 端为正（+）极， b 端为（−）极，称为电压的参考极性，故图（ b ）和图（ a ）是一样的。同理，图1-1-3（ d ）和（ c ）也是一样的。为了方便，也可以只在一个端点选注“+”号就行了。

三、电位的参考点

在分析电子线路时，经常要用电位的概念。电路中一点与电位参考点之间的电压，称为该点的电位。也就是说，要确定电路中各点的电位值，首先要选取电位参考点，并令电位参考点的电位为零，作为计算电位的基准点。

电位参考点选定后，那么，各点的电位值就唯一地确定了，这就是所谓的“电位单值性”。

电位参考点（零电位点）可以任意选定。不过在电工技术中，通常选大地为电位参考点。在电子线路中，一般都把信号输入、输出和电源的公共端接在一起，如图1-1-4所示，并取该点（图中的 d 点）作为电位参考点，它的电位为零，通常称为“地”，并以符号 $\perp$ 表示。实际上是将该点与机壳相连，而有些设备的机壳不需要接地。有些设备的机壳需要接地，这时“地”端真正接地，用符号 $\perp$ 表示。

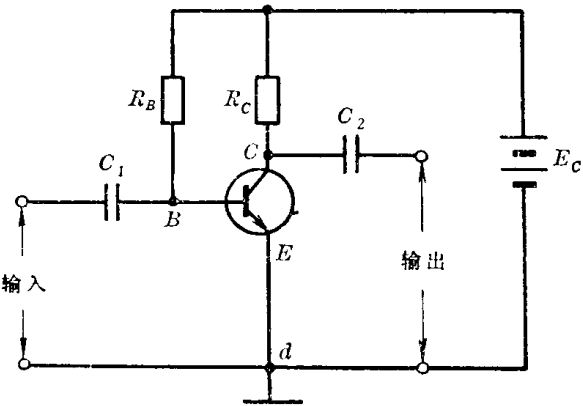


图 1-1-4 电位参考点

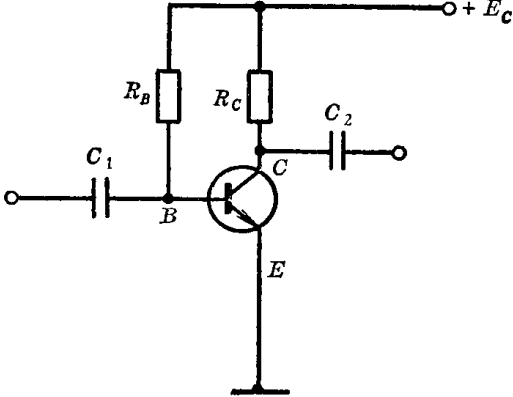


图 1-1-5 晶体管电路习惯表示法

选取不同的电位参考点，电路中同一点的电位值也就不同。但是，由于电压是两点的电位差，因此，无论电位参考点怎样选取，任意两点之间的电压都是不变的，电路的工作状态也不会改变。

据上所述，图 1-1-4 中的输入、输出端都不必画出两端，而只画出一端就行了。电源 E_c 也不必画出电池符号，而只标出 E_c 的极性和数值，从而使电路图简化，如图 1-1-5 所示。这两个电路图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。

1-2 电路元件的伏安特性

一、电阻的伏安特性

导体两端的电压 U 与通过该导体的电流 I 成正比[图 1-2-1 (a)]，这个关系称为欧姆定律，即

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

式中的比例常数 R 称为该导体的电阻（电阻量值的简称，是一物理量）。

欧姆定律表达了电阻元件（是一实物，通常也简称为电阻）的电压与电流的关系，即电阻的伏安特性。

图 1-2-1 示明电阻的伏安特性曲线，它是通过坐标原点的一条直线，其斜率

$$\operatorname{tg} \alpha = R \quad (1-2-2)$$

由式 (1-2-1) 可知，当电阻量值 R 为常数，与通过电阻元件的电流 I 或与电阻元件两端的电压 U 无关时，电阻元件的伏安特性曲线才是一条直线，这种电阻称为线性电阻。

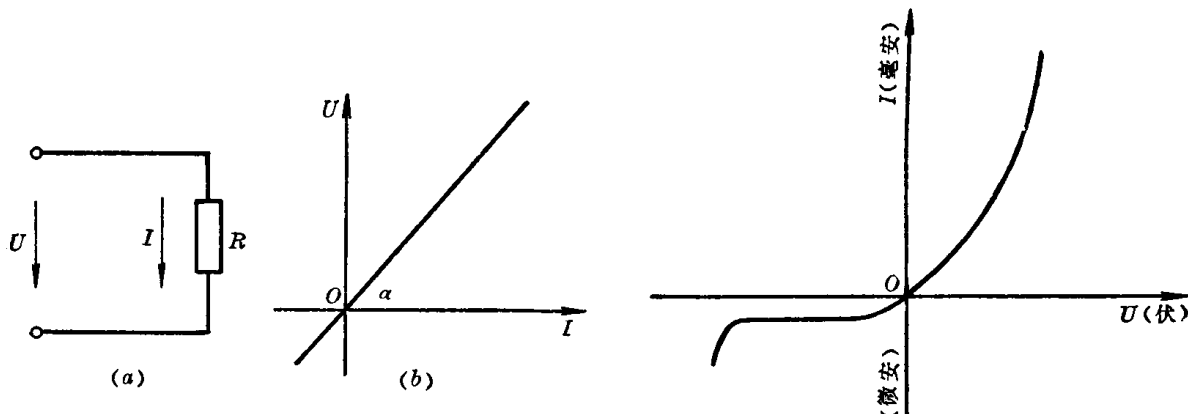


图 1-2-1 电阻的伏安特性曲线

图 1-2-2 半导体二极管的伏安特性曲线

如果电阻的阻值不是一个常数，而是随着电压或电流的变化而变化，它的伏安特性曲线不是一条直线，则这种电阻称为非线性电阻。非线性电阻的伏安特性一般不能用函数式表示，而用伏安特性曲线来表示，例如图 1-2-2 示明半导体二极管的伏安特性曲线。此外，也可用表格法列出电压与电流的关系。

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆，简称欧 (Ω)，倍单位有千欧 ($k\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$)。 $1k\Omega = 10^3\Omega$ ， $1M\Omega = 10^6\Omega$ 。

应该注意，在电流 I 的方向和电压 U 的方向一致的情况下，式 (1-2-1) 才是正确的；否则，式 (1-2-1) 应改写成 $U = -RI$ 。按惯例，对于电阻，选取电压正方向与电流正方向一致。这种惯例称为“无源”惯例或“负载”惯例。在这种情况下，在电路图中，只要标出电流的正方向（或电压的正方向）就够了。

二、电源的伏安特性

在图1-1-1所示的无分支的电路中， E 是电源的电动势， r 是电源的内电阻， R 是负载电阻。接通电路，在电动势作用下，回路中就有电流。电流的方向是从电源的正极流出，经负载电阻，再从电源负极流入电源，在电源内部，电流方向则是由负极经内阻流向正极。电流的强度 I 与电源的电动势 E 成正比，与回路中的总电阻 ($R + r$) 成反比，即

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (1-2-3)$$

这个规律称为全电路的欧姆定律。

考虑到负载电阻的电压 $U = IR$ ，在不计连接导线电阻情况下，电源的路端电压（简称为端电压）就是负载电压，故由式 (1-2-3) 可得电源的路端电压为

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

上式称为电源的伏安特性关系式或电源的电压平衡方程式。必须指出，只有当 I 方向与 E 方向一致，而 U 方向与 E 方向相反，如图1-2-3 (a) 所示情况（电源的正方向惯例）下，上式才是正确的。通常可以认为电源的参数 E 和 r 都是不变的常数，则上式是二元一次方

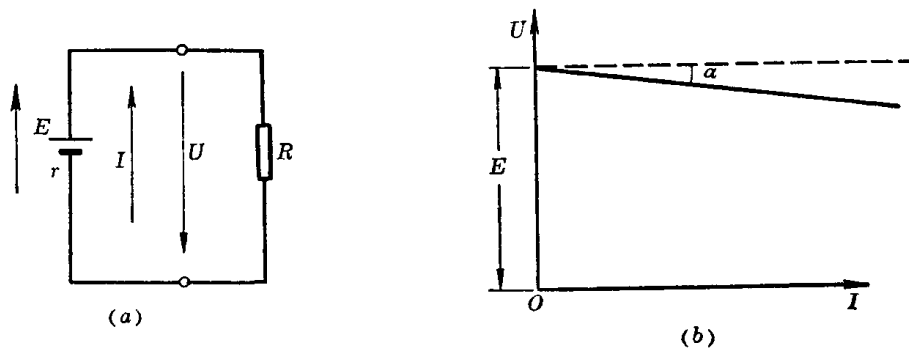


图 1-2-3 电源的伏安特性曲线

程式，而电源的伏安特性曲线（又名电源的外特性曲线）是一条直线，如图1-2-3 (b) 所示，因此，这种电源称为线性电源。

当电路未接通时，简称断路或开路，负载电阻 $R = \infty$ ，电路中的电流 $I = 0$ ，这时电源的端电压

$$U = E \quad (1-2-5)$$

上式表明：电源的电动势 E 在数值上等于开路时的端电压。电路接通后，若减小 R ，则 I 增大，内电阻电压降 Ir 增大，端电压 U 就下降。当负载电阻 $R = 0$ ，例如碰线，称为短路。由式 (1-2-4) 可得短路电流

$$I_s = \frac{E}{r} \quad (1-2-6)$$

一般 $r \ll R$, 故短路电流比正常电流大得多, 而短路时的端电压等于零。

例 1-2-1 在图1-2-4(a)所示的晶体管电路中, 已知电源电动势 $E_C = 20\text{V}$, 基极偏流电阻 $R_B = 500\text{k}\Omega$, 基极到发射极的电压 $U_{BE} = 0.7\text{V}$, 集电极负载电阻 $R_C = 5\text{k}\Omega$, 集电极电流 $I_C = 2\text{mA}$ 。

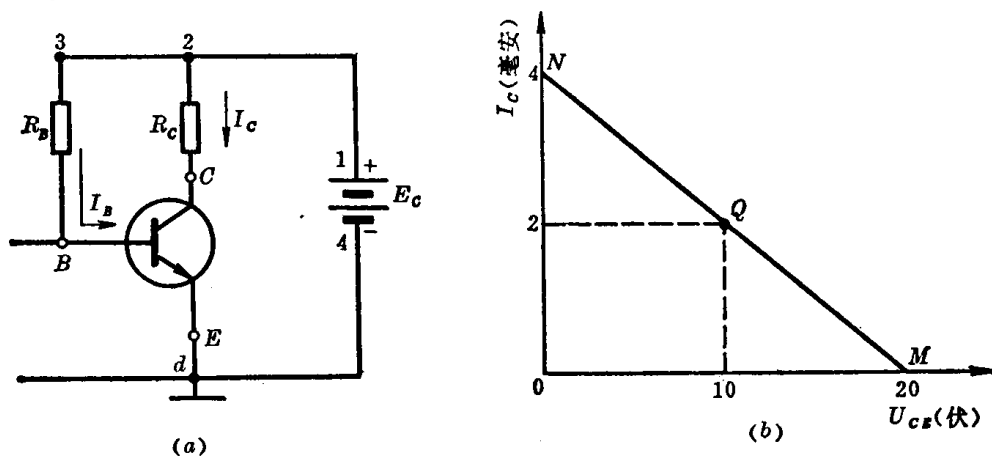


图 1-2-4 例1-2-1用图

试求: (1) 基极电流 I_B , (2) 集电极到发射极的电压 U_{CE} , 集电极电位 U_C 和发射极电位 U_E , (3) $I_C = f(U_{CE})$ 并画出图象。

解: (1) 见图, 对于回路123BED41, 可得

$$E_C = I_B R_B + U_{BE}$$

所以
$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_B} = \frac{20\text{V} - 0.7\text{V}}{500\text{k}\Omega} = 38.6\mu\text{A}$$

当 $U_{BE} \ll E_C$ 时,

$$I_B \approx \frac{E_C}{R_B} = \frac{20\text{V}}{500\text{k}\Omega} = 40\mu\text{A}$$

(2) 对于回路12CED41, 可得

$$E_C = I_C R_C + U_{CE} \quad (1-2-7)$$

所以
$$U_{CE} = E_C - I_C R_C = 20\text{V} - 2\text{mA} \times 5\text{k}\Omega = 10\text{V}$$

取 d 点为电位参考点, 如图所示, 由于发射极与 d 点直接相连, 故

$$U_E = 0$$

由于
$$U_{BE} = U_B - U_E$$

所以
$$U_B = U_{BE} + U_E = 0.7\text{V} + 0 = 0.7\text{V}$$

同理
$$U_C = U_{CE} + U_E = 10\text{V} + 0 = 10\text{V}$$

(3) 把已知的 $R_C = 5\text{k}\Omega$ 代入式 (1-2-4), 移项得 $U_{CE} = f(I_C)$ 的函数式

$$U_{CE} = 20 - 5 \times 10^3 I_C$$

它的图象是一条直线, 该直线与坐标轴相交的两点的坐标值分别为

M 点:
$$I_C = 0, U_{CE} = 20\text{V}$$

N 点:
$$U_{CE} = 0, I_C = \frac{20\text{V}}{5 \times 10^3 \Omega} = 4\text{mA}$$

如图1-2-4b所示，直线 NM 就是该函数式所代表的直线。把 $U_{CE}=10\text{V}$ 代入函数式，可求得对应的 $I_C=2\text{mA}$ ，这就是同图中直线 NM 上 Q 点的坐标值。

三、恒压源和恒流源

(一) 恒压源的伏安特性

如果电源只具有一定的电动势 E ，而内阻 r 为零[图1-2-5(a)]，则由式(1-2-4)可得它的端电压

$$U = E \quad (1-2-8)$$

上式表明，无论外电路的负载电阻 R 如何变化，由于内阻为零，内阻压降始终为零，因此，它的端电压始终等于它的电动势，与通过电源的电流无关。这种电源称为恒压源，它的伏安特性曲线是一条平行于电流轴的直线，如图1-2-5(b)所示。

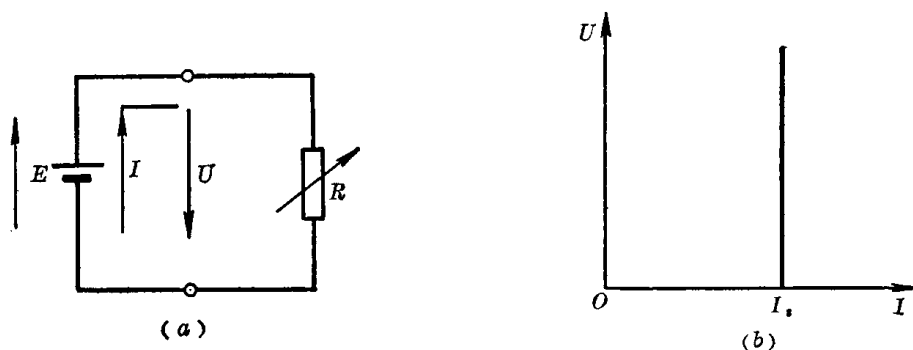


图 1-2-5 恒压源的伏安特性曲线

内阻为零的电源实际是不存在的，故恒压源是一种理想电源。然而，电源的内阻比负载电阻小得多时，在工程上就可把电源近似地看作是恒压源。例如，稳压电源、电力网电源以及内阻很小的干电池和蓄电池一般都可认为是恒压源。

具有内阻的实际的线性电源，见图1-2-6(a)，由于它的电动势是与电源电流无关的定量，故可称为电势源。根据电势源的电压平衡方程式(1-2-4)，可以把它看成恒压源和内阻串联的组合，如图1-2-6(b)所示。

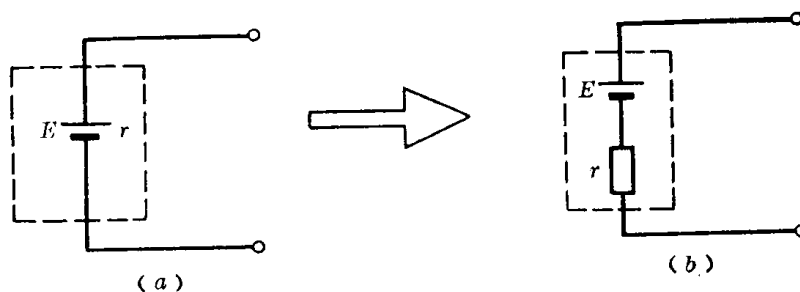


图 1-2-6 实际电源的一种等效电路

(二) 恒流源的伏安特性

由图1-2-7(a)，可得

$$E = Ir + U \quad (1-2-9)$$

方程两边都除以 r ，得

$$\frac{E}{r} = I + \frac{U}{r} \quad (1-2-10)$$

上式的左边就是电源的短路电流

$$I_s = \frac{E}{r} \quad (1-2-11)$$

于是式(1-2-10)可改写成

$$I_s = I + \frac{U}{r} \quad (1-2-12)$$

上式的意义是：电源在电源力的作用下产生电流 I_s ，由于电源两端存在电压 U ，在内阻中有电流 U/r ，其方向与 U 方向一致，而与 I_s 方向相反，故电源输出的负载电流是 I_s 与 U/r 之差，也就是说， I_s 是 I 与 U/r 之和。这种能产生一定电流 I_s 的电源，称为电流源，用一个内附空心箭头的圆和电阻 r 并联来代表，如图1-2-7(b)所示，箭头表示电流 I_s 的方向。

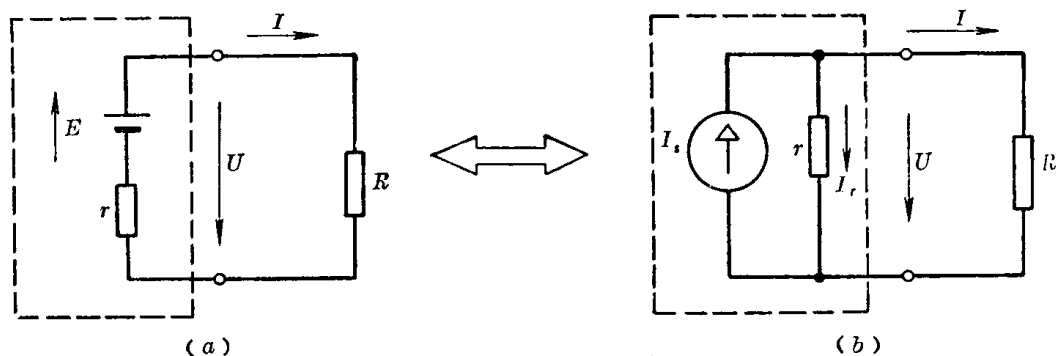


图 1-2-7 电势源和电流源

因此，实际电源也可以用图1-2-7(b)所示的电源来代替，也就是说，图1-2-7(a)、(b)所示的两个电源提供了相同的端电压 U 和端电流 I ，对外部来说具有相同的效果，故称为等效电源，而这种变换称为电源的等效变换。

综上所述，电势源与电流源进行等效变换，必须满足的条件是：(1) $I_s = E/r$ 或 $E = I_s r$ ；(2) 电势源串联的电阻等于电流源并联的电阻；(3) 电势源的正极与电流源电流 I_s 流出的一端相对应。

如果电源的内阻为无穷大，则由于 U/r 为零，电源输出的端电流 I 始终等于 I_s ，即

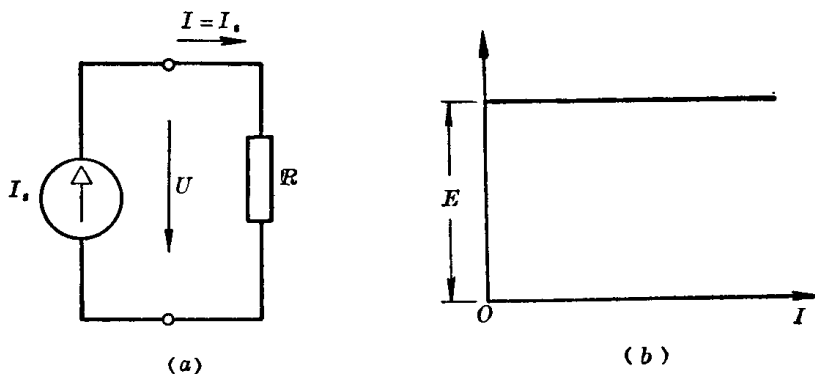


图 1-2-8 恒流源的伏安特性曲线

$$I = I_s \quad (1-2-13)$$

与外电路的负载电阻无关，也就是与电源的端电压 U 无关，而是由电源本身所决定的恒量，故称它为恒流源，如图1-2-8(a)所示，同图(b)为其伏安特性曲线。

恒流源也是理想电源。在工程上，经常把高内阻的电源，即输出的端电流与负载基本无关的电源，例如晶体管、五极电子管和电流互感器等，近似地看作恒流源。

内阻不是无穷大的实际电源，它的短路电流 I_s 虽恒定，但输出电流 I 则与负载有关。如图1-2-7(b)所示，实际电源可用恒流源和内阻并联的组合来代替。

显然，恒压源和恒流源都是线性元件。

由线性电源和线性电阻等线性元件组成的电路，称为线性电路。今后除另外指明外，只分析线性电路。综上所述，实际电源既可用恒压源串联内阻或恒流源并联内阻来代替，因此，线性直流电路是由恒压源、恒流源和线性电阻等三种元件所组成。前两者是有源元件，后者是无源元件。

例 1-2-2 在图1-2-9(a)所示的高内阻电源，已知 $E = 20\text{V}$ ， $r = 10\text{k}\Omega$ 。试把它等效变换成电流源；若负载电阻 R 的变化范围为 $0 \sim 10\Omega$ ，试求端电流和端电压的变化范围。

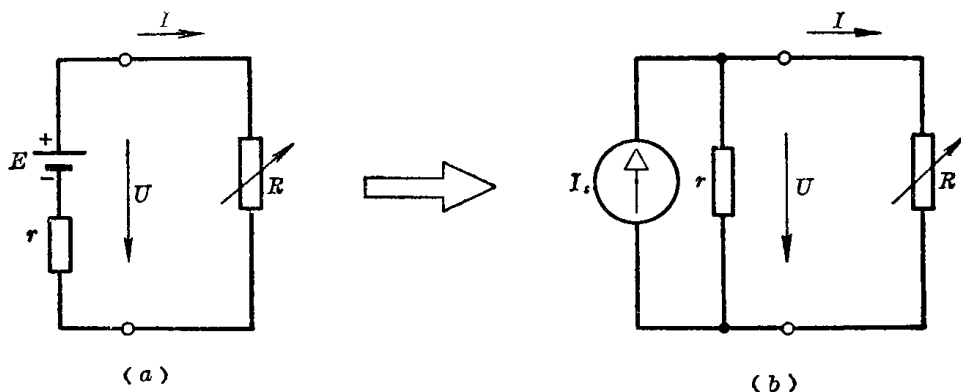


图 1-2-9 例1-2-2用图

解：所求的等效电流源如图1-2-9(b)所示，其中短路电流

$$I_s = \frac{E}{r} = \frac{20\text{V}}{10\text{k}\Omega} = 2\text{mA}$$

由图(a)可得端电流

$$I = \frac{E}{r + R} = \frac{20\text{V}}{10\text{k}\Omega + (1 \sim 10)\Omega} \approx 2\text{mA}$$

端电压

$$U = IR \approx 2\text{mA} \times (1 \sim 10)\Omega = 2 \sim 20\text{mV}$$

可见，对于高内阻电源，由于 $r \gg R$ ，具有恒流特性，就是说，负载变化，但电源输出电流基本恒定。至于端电压，则近似正比于负载电阻 R 。

U 和 I 也可从图(b)来计算：

$$I = \frac{r}{r + R} \times I_s = \frac{10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega + (1 \sim 10)\Omega} \times 2\text{mA} \approx 2\text{mA}$$

$$U = IR \approx 2\text{mA} \times (1 \sim 10)\Omega = 2 \sim 20\text{mV}$$

例 1-2-3 图1-2-10 (a) 示明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 $r = 0.5\Omega$ ，若要求充电电流 $I = 10\text{A}$ ，试求供电线的电压 U 。

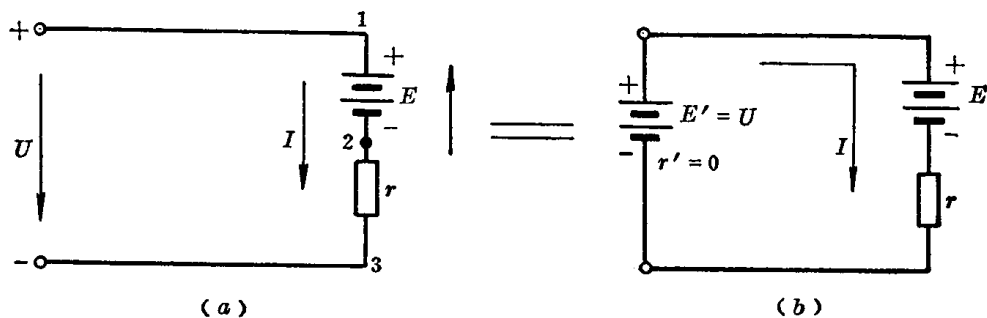


图 1-2-10 蓄电池充电时的电路图

解：蓄电池充电时，电流 I 由其正极流入电池，而由负极流出，如图所示， I 的方向与电动势 E 的方向相反，故称这个电动势 E 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，通常称为含反电动势的负载。蓄电池可用恒压源与电阻串联的组合来表示。由图 (a)， $U_{12} = E$ ， $U_{23} = Ir$ ，再考虑到 $U_{13} = U_{12} + U_{23}$ ，和 $U = U_{13}$ ，就可得到蓄电池充电时的电压平衡方程式为

$$U = E + rI \quad (1-2-14)$$

上式的意义是：对于含反电动势的一段电路，外加电压的一部分用来平衡反电动势，另一部分则为该段电路的电阻电压降。必须注意，此时 I 与 E 反向，而与外加电压 U 同向。

把给定的已知量代入上式，即得待求的供电线的电压为

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

这个电路还可引用恒压源的概念来分析。

如前述，恒压供电线路相当于内阻为零的恒压源，其电动势 $E = U$ ，故图 1-2-10 (b) 与图 (a) 实质上是一样的。在图 (b) 中，两个电源串联，它们的正极连在一起， E' 企图形成顺钟向的电流，而 E 则欲形成逆钟向的电流，这叫做电源的反向串联，与一个物体受到两个反向力的作用情况相似。在电源反向串联的回路中，电流的方向由电动势较大的电源所决定。今 $E' > E$ ，故电流方向是顺钟向的，其大小为

$$I = \frac{E' - E}{r}$$

把上式移项，并代入 $E' = U$ ，也可导出式 (1-2-14)。

例 1-2-4 见图1-2-11 (a) 和 (b)，根据已选定的电动势 E ，端电压 U 和电流 I 的正方向，试分别写出电压平衡方程式。

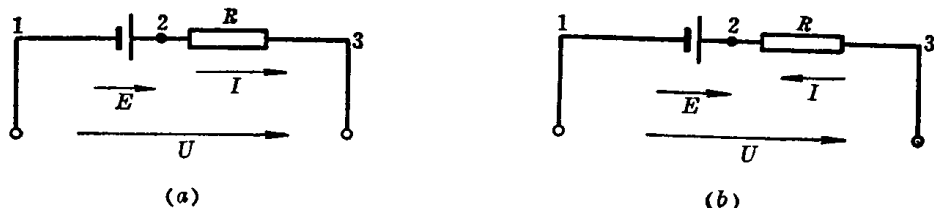


图 1-2-11 例1-2-4用图