

高等学校试用教材

电工学基础知识

(道路与桥隧专业用)

北京建筑工程学院

唐定曾 甄秀华 张淑雯 编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分十章。一至七章为电工学基础知识，只介绍强电部分。第八章配合专业需要，介绍了土建工程施工供电的设计方法，为作供电设计打下初步基础。第九章是路灯照明设计常识，广而浅地介绍了一些应用知识。第十章是安全用电知识。

本书为高等工科院校道路与桥隧专业试用教材，也可供其它土建类工程技术人员和电工参考。

高等学校试用教材

电 工 学 基 础 知 识

(道路与桥隧专业用)

北 京 建 筑 工 程 学 院

唐定曾 甄秀华 张淑雯 编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第006号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：12.75 字数：309 千

1980年12月 第1版

1980年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—15,000册 定价：1.35元

前 言

本书是根据交通部一九七八年三月在西安公路学院主持召开的道路与桥隧专业教材编审会议制定的大纲编写的。教学参考时数为40至60学时。

本书的任务主要是向高等工科院校道路与桥隧专业学生介绍常用的电工基本知识和电气设备，为这类专业的学生在电的知识方面进一步提高打下必要的基础，以便他们利用这些知识去解释工程中有关电的现象，并能初步掌握工程供电设计的原则。因为学时数有限，所以大部分内容属于常识性的基础知识。书中有些章节，如第六、第十章可以自学，或少安排学时。

本书由北京建筑工程学院唐定曾主编，经西安公路学院、福州大学、北京工业大学、南京工学院和东北林学院的电工教师进行了初审，并提出了不少宝贵意见，谨在此表示谢忱。根据初审会议提出的意见，北京建筑工程学院唐定曾、甄秀华、张淑雯进行了修改和改写。其中第一章、第四章由甄秀华改写，第六章由张淑雯改写，唐定曾进行统改。全书由西安公路学院唐敦峰审定。由于编者水平所限，编审时间仓促，书中缺点和错误在所难免，请读者多提宝贵意见。

编 者

1980年2月

目 录

第一章 直流电路	1
第一节 电路的基本物理量	1
第二节 电路的工作状态	6
第三节 欧姆定律	8
第四节 基尔霍夫定律	9
第五节 支路电流法	11
第六节 迭加原理	14
第七节 等效电源定理	16
思考题	19
习 题	20
第二章 交流电的基本概念	21
第一节 正弦交变电势的产生	21
第二节 正弦交流电的三要素	22
第三节 正弦交流电的有效值	24
第四节 交流电的矢量表示法	25
第五节 交流电的复数表示法	26
思考题	28
习 题	28
第三章 单相交流电路	30
第一节 纯电阻电路	30
第二节 纯电感电路	31
第三节 纯电容电路	34
第四节 电阻、电感串联电路	36
第五节 功率因数及其提高的方法	39
思考题	40
习 题	41
第四章 三相交流电路	42
第一节 三相交流电源	42
第二节 三相负载的星形联接	45
第三节 三相负载的三角形联接	49
第四节 三相电功率	50
思考题	51
习 题	53
第五章 电工测量	54

第一节	概述.....	54
第二节	直读式仪表的测量机构.....	56
第三节	电流的测量.....	60
第四节	电压的测量.....	62
第五节	电功率的测量.....	63
第六节	电能的测量.....	65
第七节	绝缘电阻的测量.....	68
第八节	万用表.....	69
思考题		73
习 题		73
第六章	磁路及变压器.....	74
第一节	磁场的基本物理量.....	74
第二节	铁磁性材料的性质.....	75
第三节	磁路的欧姆定律.....	78
第四节	变压器的工作原理.....	79
第五节	变压器的构造与铭牌.....	83
思考题		85
习 题		85
第七章	异步电动机及其控制.....	87
第一节	异步电动机的构造.....	87
第二节	异步电动机的工作原理.....	88
第三节	异步电动机转子电路的物理量.....	90
第四节	电磁转矩及机械特性.....	93
第五节	异步电动机的起动.....	97
第六节	异步电动机的调速、反转和制动.....	100
第七节	单相异步电动机.....	102
第八节	异步电动机的选择.....	104
第九节	低压电器.....	109
第十节	异步电动机常用的控制线路.....	117
第十一节	简单自动控制举例.....	120
思考题		122
习 题		124
第八章	土建工程供电.....	126
第一节	电力系统的基本概念.....	126
第二节	配电所的电气设备.....	128
第三节	变压器的运行.....	130
第四节	移动式发电机.....	131
第五节	施工照明.....	134
第六节	道桥施工工程供电设计.....	139
思考题		147

习 题	149
第九章 道路照明设计简介	150
第一节 概述	150
第二节 光度学的几个基本概念	150
第三节 道路照明设计简介	156
第四节 隧道照明简介	164
第十章 安全用电	168
第一节 触电事故	168
第二节 安全电压	171
第三节 电气设备的接地与接零保护	172
第四节 防雷知识	174
第五节 触电急救	178
思考题	180
附表 1 J ₂ 、JO ₂ 系列小型异步电动机技术数据	181
附表 2 电气符号和编号	187
附表 3 土建施工用电设备的 $\cos\varphi$ 及需要系数 K_c 值	191
附表 4 变压器产品目录	191
附表 5 绝缘电线新、旧型号对照及导线特点一览表	193
附表 6 导线按机械强度所容许的最小截面	193
附表 7 导线容许电流值	194
附表 8 塑料绝缘电线空气中敷设长期负载下的载流量	194
附表 9 橡皮绝缘电线空气中敷设长期负载下的载流量	195
附表 10 不同环境温度时载流量修正系数	195
附表 11 按容许电压降计算导线截面公式中的系数 C 值	196

第一章 直流电路

本章主要介绍电路的基本物理量、电路的工作状态、电路的基本定律和复杂电路的计算方法。这些是学习交流电路、电器和电子线路的基础。

第一节 电路的基本物理量

一般电路是由电源、负载及中间环节三部分组成的闭合回路。电路对电能进行传输、分配、控制和转换。最简单的电路如图1-1所示。

电源 E 是供应电能的装置, r_0 为电源的内阻。电源可以是电池、发电机、整流器和各种信号源, 它们将其它能量转换为电能, 或将一种形式的电能转换为另一种形式的电能。负载 R 是取用电能的装置, 如电灯、电动机和电炉等。负载将电能转换为其它形式的能量。中间环节是传输、分配和控制电能的部分。最简单的中间环节是连接导线、开关 K 和熔断器 RD , 也可以是比较复杂的网络或系统, 电源接在它的输入端, 负载接在它的输出端。

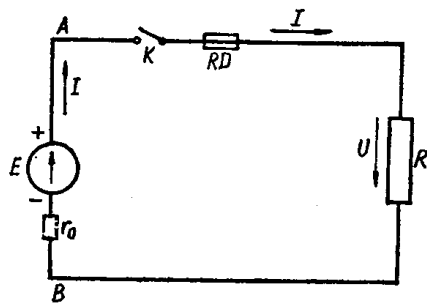


图1-1 电路和规定的基本电量正方向

电路中能量的转换、传送、分配和控制可由电流、电压和电动势反映出来, 它们的方向如图1-1所示。我们首先明确这几个物理量。

一、电 流

在正常情况下, 金属导体内部的自由电子处于不规则的运动状态, 当电场作用于闭合电路时, 导体中自由电子的运动速度就会在电场作用力的方向上有所增加, 自由电子产生了定向而有规则的运动, 导体的截面就有一定的电量通过, 这就是说导体内部产生了电流。

习惯上公认电流的正方向是正电荷移动的方向, 即电流的正方向与电子运动的方向相反。

电流的强弱是用电流强度来度量的。电流强度简称电流。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电量, 即

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

式中 dq 是在时间 dt 内通过导体横截面的电量。

如果电流的量值和方向在很长时间内都保持不变, 则这种电流称为直流电流, 用字母 I 表示。直流电流的表示式为

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

电流的单位是安培，简称安。

$$1\text{安} = \frac{1\text{库}}{1\text{秒}}$$

也就是说，如果一秒钟内通过导体横截面的电量等于1库，导体内的电流就等于1安。
电流的较小单位是毫安和微安。

$$1\text{安} = 10^3\text{毫安} = 10^6\text{微安}$$

电流与导体截面积之比称为电流密度*i*，即

$$i = \frac{I}{S} \quad (1-3)$$

电流密度通常用安/毫米²来衡量。

二、电位和电压

物体在不同位置上具有不同的重力位能。与此相似，电荷在电场中的不同位置上也具有不同的位能，这种位能称为电位能。

要确定电位能的大小，必须选择一个参考点作为比较标准。通常均选大地作为参考点，即认为电荷在大地上的电位能为零。因此，凡是机壳接地的电气设备，其机壳就是参考点。有些不接地的设备，在分析问题，常选择许多元件汇集的公共点作为参考点，并用符号“⊥”表示。那么，电荷在电场内某点上所具有的电位能就可以用该点到参考点时电场力所做的功来表示。在均匀电场内，电荷在某点*A*所具有的电位能为

$$W_A = F \cdot l_{A0} = EQ l_{A0}$$

式中：*E*——电场强度；

Q——电荷电量；

l_{A0}——*A*点到参考点的距离。

为了比较电场各点电位能的大小，我们引用电位的概念，其物理意义是：电场中某点的电位是将单位正电荷自该点移至参考点处电场力所做的功。用字母*φ*表示。

由此可见，电场内某点的电位在数值上就等于单位电荷在该点所具有的电位能。上述*A*点的电位为

$$\varphi_A = \frac{W_A}{Q} \quad (1-4)$$

式中：*W_A*——功（电位能），焦耳；

Q——电量，库伦；

φ_A——*A*点电位，伏特。

电场内两点之间的电位差称为这两点间的电压，用*U*表示。例如*A*、*B*两点之间的电压为

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1-5)$$

根据电位的表达式(1-4)可得

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \frac{W_A}{Q} - \frac{W_B}{Q} = \frac{W_A - W_B}{Q} = \frac{W_{AB}}{Q}$$

可见, 电压的物理意义是, 电场中 A 、 B 两点之间的电压等于把单位正电荷从 A 点沿任一路径移到 B 点, 电场力所做的功。电压与电位的参考点的选择无关。

电压的单位也是伏特。规定电场力把 1 库仑电量从 A 点移到 B 点, 如果所做的功为 1 焦耳, 那么 A 、 B 两点间的电压就是 1 伏特。

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 库仑}}$$

电压的其它单位为

$$1 \text{ 千伏} = 10^3 \text{ 伏}$$

$$1 \text{ 伏} = 10^3 \text{ 毫伏}$$

电压的正方向规定为从高电位点指向低电位点, 即指向电位降的方向, 常用箭头表示电压的正方向。

例 1-1 如果图 1-2 中 B 点接地, 电源 E 为 12 伏, 电阻 $R_1 = R_2$, 问电场力使 0.5 库仑电荷从 A 点移到 B 点消耗多少能量? C 点电位是多少?

解 题意未考虑电源内阻, $R_1 = R_2$, 所以各电阻上电压相等, 即

$$U_{AB} = U_{BC} = \frac{12}{2} = 6 \text{ (伏)}$$

电荷从 A 点移到 B 点所消耗的能量

$$A = qU_{AB} = 0.5 \times 6 = 3 \text{ (焦耳)}$$

已知 B 点电位为零, 电流总是从高电位流向低电位, 即从 B 流向 C , 说明 C 点是负电位, 即 $\varphi_C = -6 \text{ 伏}$ 。

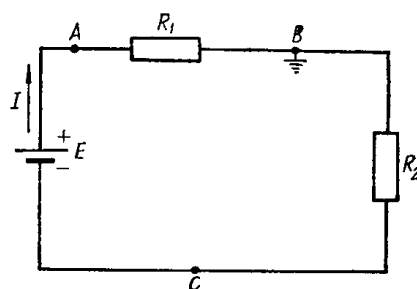


图1-2 具有接地点的电路

三、电 动 势

在电源两端分别聚集有正电荷和负电荷, 所以在电源两极间始终有电场存在。现以直流发电机为例, 说明电源两端分别聚集正电荷和负电荷的过程。当发电机中的导体切割磁力线时, 导体内的电荷受到电磁力 (称为局外力, 用 $F_{\text{外}}$ 表示) 的作用, 正电荷和负电荷分别向导体两端聚集而建立了电场, 如图 1-3 所示。这时导体内的自由电荷不但受外力作用, 而且

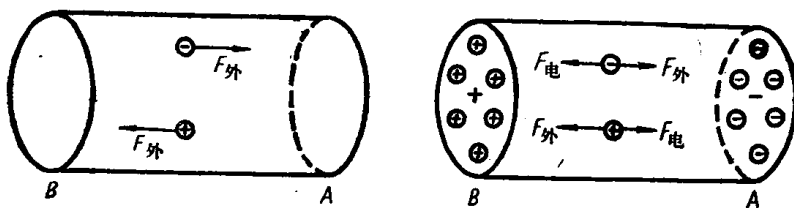


图1-3 电荷受局外力和电场力作用时的情况

受与外力相反的电场力 $F_{\text{电}}$ 的作用。由于 $F_{\text{电}}$ 阻碍电荷向两端聚集, 所以当 $F_{\text{电}}$ 增大到与 $F_{\text{外}}$ 相等时, 导体中的正、负电荷就停止向两端移动, 此时两极间建立了一定强度的电场, 局外力驱使正、负电荷分别向电源两端移动时所做的功就转换成了电能。

在电源内部, 局外力把单位正电荷从电源负极移到正极所做的功称为电动势, 用 $\mathcal{E}$ 或 E

表示。电动势简称电势。

电动势的单位是伏特。如果局外力把1库仑正电荷从负极移到正极所做的功是1焦耳，则电源两极间的电动势为1伏特。

电动势的正方向规定为在电源内部作用在正电荷上的局外力方向。或者说，电动势正方向在电源内是由负极指向正极，即在电动势的方向上电位是逐渐升高的。

电势的大小和方向都不随时间而变化的电源叫直流电源，如电池、直流发电机等。电势的大小和方向随时间而变化的电源叫交流电源，如交流发电机。

四、电 阻

电荷在导体内流动时必然要与导体分子相碰撞，所以导体对电流有一定的阻力，这种阻力叫做电阻。电阻用 R 表示，单位为欧姆，或记作 Ω 。在半导体技术中常用较大的单位千欧($K\Omega$)或兆欧($M\Omega$)表示。

$$1 \text{ 千欧}(K\Omega) = 10^3 \text{ 欧}(\Omega)$$

$$1 \text{ 兆欧}(M\Omega) = 10^6 \text{ 欧}(\Omega)$$

实验证明，在一定温度下，对于某一种材料，电阻值与其长度 L 成正比，与其横截面积 S 成反比，即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-6)$$

式中： ρ ——电阻系数。

据式(1-6)可知电阻系数为

$$\rho = \frac{RS}{L} = \frac{\text{欧} \cdot \text{毫米}^2}{\text{米}} \quad (1-7)$$

该式表示某种材料长1米、截面积为1毫米²、温度为20°C时的电阻值。表1-1列出常用材料的电阻系数和电阻温度系数值。一般金属导体的电阻随温度升高而增大。因为温度升高时，电子与分子碰撞的次数增多，所以导体的电阻就增大。在电解液导体内，当温度升高

表1-1

材 料 名 称	20°C时的电阻系数 $\left(\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$	电阻温度系数 $\left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)$
银	0.016	0.00361
铜	0.0172	0.0041
金	0.022	0.00365
铝	0.029	0.00423
钨	0.0477	0.00479
钨	0.049	0.0044
锌	0.059	0.0039
镍	0.073	0.00621
铁	0.0978	0.00625
铂	0.105	0.00398
锡	0.114	0.00438
铅	0.206	0.0041
汞	0.958	0.0009
康铜(54%铜,46%镍)	0.50	0.00004
锰铜(86%铜,12%锰,2%镍)	0.43	0.00002

时, 单位体积内的自由电子和离子数目增多, 电流增大, 因此电解液导体的电阻随温度升高而减小。有一些合金, 如锰铜和康铜, 当温度变化时, 它们的电阻变化很小, 所以常用来做标准电阻、电阻箱等。

当温度不太高, 而且变化不太大时, 导体的电阻基本上与温度成正比变化。若以 R_1 代表温度为 t_1 时导体的电阻, R_2 代表温度变化到 t_2 时导体的电阻, 则电阻的相对变化正比于温度的变化, 即

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} = \alpha(t_2 - t_1)$$

或

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-8)$$

式中 α 称为电阻的温度系数, 其意义是当温度每升高 1°C 时, 导体所增加的电阻与原电阻之比。

$$\alpha = \frac{\frac{R_2 - R_1}{R_1}}{t_2 - t_1} (1/^\circ\text{C}) \quad (1-9)$$

由上式可知, 当导体的电阻随温度的增加而增加时, α 为正值。当导体的电阻随温度的增加而减少时, α 为负值。

五、电能和电功率

电流通过电路时, 电路内将发生能量转换。在电源内部, 局外力不断地克服电场力驱使正、负电荷分别向电源两极移动而做功, 从而把其它能转换成电能。在外电路, 电荷不断地通过负载, 把电能转换成其它形式的能。

从其它能转换来的电能等于电源的电动势 E 与被移动的电荷 Q 的乘积, 即

$$A = EQ = EIt \quad (1-10)$$

该电能可分为两部分: 其一是外电路取用的电能 A_1 , 其二是内电路消耗掉的电能 A_0 , 根据能量守恒定律得

$$A = A_0 + A_1$$

外电路取用的电能等于外电路两端的电压 U (即电源端电压) 与电荷 Q 的乘积, 即

$$A_1 = UQ = UIt \quad (1-11)$$

电荷在内电路中移动时, 把一部分电能转换成热能, 这是无法利用的能量损失。根据以上公式得

$$A_0 = A - A_1 = (E - U)It$$

式中 $(E - U)$ 通常用 U_0 来表示, 称为电源内部电压降, 则

$$A_0 = U_0 It \quad (1-12)$$

由此可得电路的能量平衡方程式为

$$EIt = UIt + U_0 It \quad (1-13)$$

等式两边同除以 It 得

$$E = U + U_0 \quad (1-14)$$

该式称为电路的电压平衡方程式。其意义是, 电源电动势等于电源端电压与电源内部电压降之和。

能量变换的速率或做功的速率称作功率, 用 P 表示。因此, 功率就是功与做功所经历的

时间之比, 即

$$P = \frac{A}{t}$$

在电源内部, 由机械能或其它形式的能转换为电能的速率为电源产生的功率, 即

$$P = \frac{A}{t} = \frac{EI t}{t} = EI \quad (1-15)$$

在负载上, 电能转换成其它形式能的速率称为负载功率, 即

$$P_1 = \frac{A_1}{t} = \frac{UI t}{t} = UI \quad (1-16)$$

不能利用的功率, 如损失在电源内部的功率称作损耗功率, 即

$$P_0 = \frac{A_0}{t} = \frac{U_0 I t}{t} = U_0 I \quad (1-17)$$

根据能量守恒定律, 电源功率等于负载取用的功率和电源内损耗的功率之和, 即

$$P = P_1 + P_0 \quad (1-18)$$

如果电路中有多个电源和负载, 则电源产生电能的功率总和为 ΣP , 负载功率的总和为 ΣP_1 , 电源内损耗功率总和为 ΣP_0 , 则

$$\Sigma P = \Sigma P_1 + \Sigma P_0$$

功率的单位是瓦特, 简称瓦, 用字母 W 表示。电源每秒产生 1 焦耳的电能量称为 1 瓦, 即

$$1 \text{ 瓦} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 秒}}$$

因为 1 焦耳 = 1 伏 $\times$ 1 库, 故

$$1 \text{ 瓦} = \frac{1 \text{ 伏} \times 1 \text{ 库}}{1 \text{ 秒}} = 1 \text{ 伏安}$$

所以 1 瓦特就是电压为 1 伏通过 1 安培电流的功率。

较大的功率单位是千瓦, 1 千瓦 = 10^3 瓦。

电能的单位为瓦·秒或焦耳。1 焦耳 = 1 瓦 $\times$ 1 秒。较大的能量单位是瓦特·小时或千瓦·小时 (简称“度”) 分别用字母 Wh 和 kWh 表示。

例1-2 一个 40W 的电灯, 每天用 6 小时, 问 30 天消耗多少电能? 若每度电为 0.16 元, 问 30 天应交多少电费?

解 每月消耗电能 $A = 40 \times 6 \times 30 = 7200$ (瓦·时) = 7.2 (度)

电费 $0.16 \times 7.2 = 1.152$ (元)

第二节 电路的工作状态

当导体中有电流通过时, 导体就会发热。导体内的自由电子在电场力的作用下做加速运动, 它们与金属内的正离子碰撞时, 便把在电场中所获得的动能传递给离子, 加速了这些离子的热运动, 从而使导体的温度升高, 这就是电流的热效应。

如果导体的电阻是 R , 通过的电流是 I , 则在通电时间 t 内导体所消耗的电能为

$$A = IU t = I^2 R t$$

若电阻消耗掉的电能全部转换成热能, 根据热功当量 $1 \text{ 焦耳} = 0.24 \text{ 卡}$, 可求得导体在通电时间 t 内所产生的热量为

$$Q = 0.24 I^2 R t \quad (1-19)$$

工业上很多电气设备都是利用电流的热效应进行工作的。但热效应也有其有害的一面, 当电流通过电气设备的导体时, 导体发热, 从而使电气设备的温度升高。为了防止温升过高, 而影响设备的寿命, 对温度的升高就要加以限制, 例如橡皮绝缘铜线的最高工作温度不得超过 65°C , 一般电动机不得超过 105°C 。

为了使电气设备在正常工作温度下运行、使用经济合理、安全可靠和保证一定的使用寿命, 必须对电气设备的电压、电流及功率等电气参数规定正常使用数值, 这个数值称为额定值。各种电气设备的额定值都标在铭牌上, 也可从产品目录中查得。

在额定电压的作用下, 如果通过电气设备的电流达到额定值, 这种工作状态就称为满载; 如果电流超过额定值, 就称为过载。当电流超过额定值过多时, 就会因过热会使绝缘材料损坏; 当外加电压超过额定值过多时, 绝缘材料有可能被击穿。如果电流和电压远低于额定值, 设备就不能得到正常、合理和充分的利用。

当电源与外电路断开时, 电源不向外输出电能, 称为电源的空载状态。在电源空载状态下, 外电路电流 I 等于零, 电源端电压 (称为空载电压 U_0) 等于电源电动势, 电源输出功率也为零。因此电源空载时的特征为

$$\left. \begin{aligned} I &= 0 \\ U_0 &= E \\ P &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

当电源两端被电阻接近于零的导体接通时, 电路电流不再流过负载, 而只在电源造成环流, 称为短路电流 I_s , 这种状态叫做电源被短路。

短路的发生并不一定都是由于绝缘损坏而引起的, 线路接错等等原因都可能造成短路。

由于电源内阻很小, 短路时电流必然很大, 其值为 $I_s = \frac{E}{r_0}$, 电源两端电压为零, 电源的电动势全部降在内电阻上, 电源所产生的电能全部被内电阻消耗。因此, 电源短路时特征为

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{E}{r_0} \\ U &= 0 \\ P &= I^2 r_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

短路时, 电源中有极大的电流通过, 会使电源过热而损坏。为了迅速切断短路电流, 通常在电路中接入熔断器或自动断路器。熔丝串联在线路中, 一旦发生短路, 因电流产生高温而熔断熔丝, 迅速切除故障电路。

例 1-3 如图1-4所示, 已知 $E = 100 \text{ 伏}$, $r_0 = 0.2 \text{ 欧}$, $r_{\text{线}} = 0.4 \text{ 欧}$, 负载电阻 $R = 9 \text{ 欧}$ 。求:

- (1) 电路在正常情况下的电流 I ;
- (2) 当负载两端发生短路时, 电源中通过的电流 I' ;
- (3) 当电源两端发生短路时, 电源中通过的电流 I'' 。

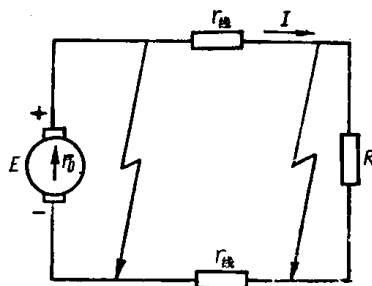


图 1-4

解 (1) 正常工作时的电流为

$$I = \frac{E}{r_0 + 2r_{\text{线}} + R} = \frac{100}{10} = 10(\text{安})$$

(2) 当负载两端发生短路时, 通过电源的电流为

$$I' = \frac{E}{r_0 + 2r_{\text{线}}} = \frac{100}{1} = 100(\text{安})$$

此时负载两端的电压近似为零。

(3) 当电源两端发生短路时, 通过电源的电流为

$$I'' = \frac{E}{r} = \frac{100}{0.2} = 500(\text{安})$$

此例说明当负载短路时, 线路中总电阻很小, 仅是电源内阻和线路电阻之和, 所以电流很大。而当电源两端短路时, 总电阻仅是电源内阻, 通常都很小, 所以短路电流极大。

第三节 欧姆定律

1827年欧姆由实验发现, 导体中的电流 I 的大小与加在导体两端的电压 U 成正比, 而与导体的电阻 R 成反比。这个关系称为欧姆定律。

欧姆定律是计算电路的最基本定律, 应用时常分为以下几种形式:

闭合回路中的一段电路, 如果不含电势, 仅有电阻, 那么这段电路被称为一段电阻电路或一段无源电路, 如图1-5所示。

一段无源电路的欧姆定律为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-22)$$

一段含有电源的电路称为一段有源电路, 见图1-6。各电量的正方向如图所示。根据电位的概念, 由a)图可得

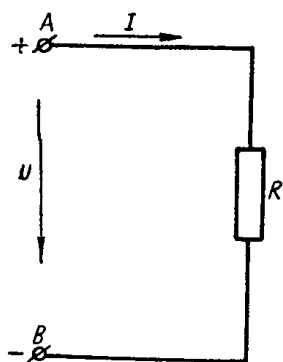


图1-5 一段无源电路的欧姆定律

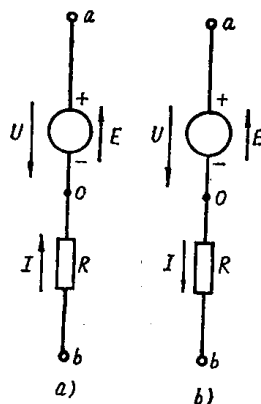


图1-6 一段有源电路

$$E = \varphi_a - \varphi_o$$

$$IR = \varphi_b - \varphi_o$$

以上二式相减得

$$E - IR = \varphi_a - \varphi_b = U$$

或

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

同理由b)图可得

$$I = \frac{-E + U}{R}$$

根据这两种情况, 可将一段有源电路的欧姆定律写成下列一般形式:

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R} \quad (1-23)$$

式中 U 是一段有源电路的端电压; E 是电路内的电动势; R 是电路内的电阻 (包括电源内阻)。电动势 E 和电压 U 前面的正、负号是这样确定的: 当电动势和电压的正方向与电流的正方向一致时取正号, 相反则取负号。

图 1-7 是最简单的闭合回路, R 是负载电阻, r_0 是电源内阻。根据一段电路欧姆定律和电压平衡方程式(1-14)可知, 电源端电压 $U = IR$, 电源内阻上的压降 $U_0 = Ir_0$, 所以

$$E = U + U_0 = IR + Ir_0$$

或

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1-24)$$

这就是全电路的欧姆定律。通常电势 E 及其内阻 r_0 可视为常数, 因此电阻 R 是影响电流大小的唯一因素。因为电源有内阻, 所以当电流较大时, 电源端电压 ($U = E - Ir_0$) 有所降低。

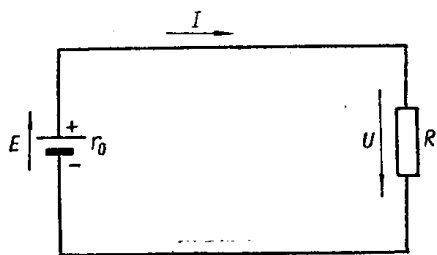


图1-7 全电路的欧姆定律

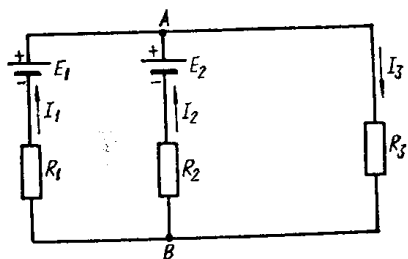


图1-8 两个电源的电路

第四节 基尔霍夫定律

分析与计算电路的基本定律, 除欧姆定律外, 还有基尔霍夫第一定律和第二定律。

在电路中如果有三个或三个以上支路的联接点叫做节点。如图1-8中的 A 点及 B 点都是节点。

基尔霍夫第一定律是确定节点处电流关系的定律。这个定律指出: 在电路中, 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。如图 1-8 中流入节点 A 的电流之和是 $I_1 + I_2$; 流出节点 A 的电流是 I_3 , 根据基尔霍夫第一定律:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

如果我们规定流入节点的电流为正, 流出为负, 则可写成一般式为

$$\sum I = 0 \quad (1-25)$$

即对于电路中的任一节点，电流的代数和恒等于零。

基尔霍夫第一定律一般应用于节点，所以也叫做节点电流定律。但也可以将它推广到任意封闭面，即对于电路中任意一个封闭面来说，流入封闭面的电流之和应等于流出封闭面的电流之和。图1-9是一个晶体管电路，其发射极电流为 i_e ，基极电流为 i_b ，集电极电流为 i_c 。对于封闭曲面 S 来说，流入的电流 i_c 必然等于流出的电流 i_b 和 i_e 之和，即 $i_c = i_b + i_e$ 。

在解复杂电路时常用该定律列方程式。

例1-4 如图1-10所示，某电桥电路中，已知： $I_1 = 25\text{mA}$ ， $I_3 = 16\text{mA}$ ， $I_4 = 10\text{mA}$ ，求其余各电阻中的电流。

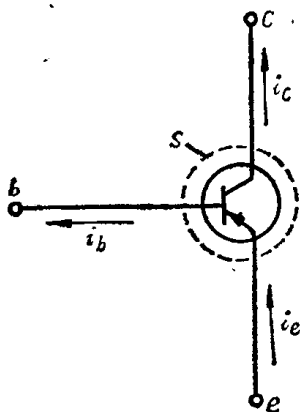


图 1-9

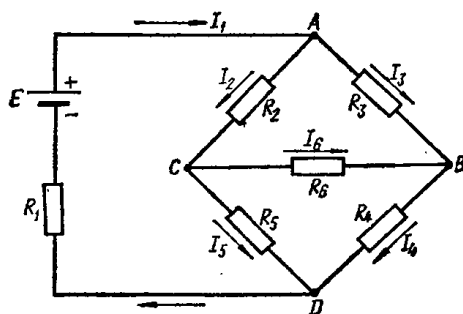


图 1-10

解 未知电流 I_2 、 I_5 、 I_6 的方向可以任意假定。最后求出电流为正表明假定的方向正确，电流为负值则表明电流实际方向与假定方向相反。

应用节点电流定律，列出各节点的电流方程：

节点 A

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$I_2 = I_1 - I_3 = 25 - 16 = 9(\text{mA})$$

节点 B

$$I_4 = I_3 + I_6$$

$$I_6 = I_4 - I_3 = 10 - 16 = -6(\text{mA})$$

节点 C

$$I_2 = I_5 + I_6$$

$$I_5 = I_2 - I_6 = 9 - (-6) = 15(\text{mA})$$

求得 I_6 为负值，说明假定的正方向与实际正方向相反。

在电路中，任何一个闭合路径都可称作回路，任意两个节点之间的电路称作支路。图1-11中有三个回路，有三个支路。

基尔霍夫第二定律是确定回路电压之间关系的定律，所以又叫做回路电压定律。

基尔霍夫第二定律：沿任一闭合回路所升高的电位，必定等于沿此回路所降低的电位。

换句话说，就是电路中任一回路内各段电压的代数和为零，即

$$\sum U = 0 \quad (1-26)$$

在列方程式之前必须首先规定各支路电流的正方向，并任意规定一个绕行回路的方向。当电动势电位升的方向与绕行方向一致时，电动势前取正号，否则取负号。当电压降的方向与绕行方向一致时，电压降前取正号，否则取负号。电阻上电压极性规定为电流流进电阻的一端为正，流出电阻的一端为负，凡是从正到负的方向均为电压降的正方向。

例如图1-11在左边网眼回路中，选顺时针绕行方向，其电压方程式为

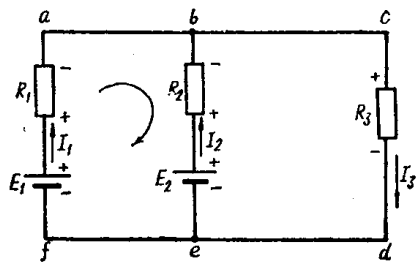


图 1-11

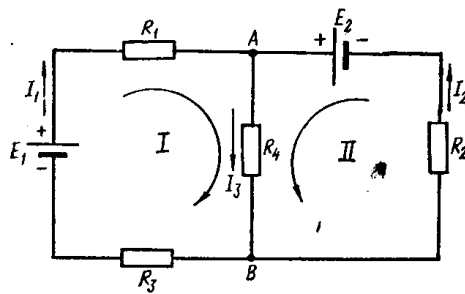


图 1-12

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

等号左边为电位升的代数和，等号右边为电压降的代数和。所以回路电压定律也可理解为：沿任一回路电动势的代数和等于各电阻上电压降的代数和，即

$$\sum E = \sum (IR) \quad (1-27)$$

可见第二定律是基于在任何一个回路中，由非电能转换成的电能必然等于由电能转换成的非电能，所以回路电压定律是符合能量守恒定律的。

例1-5 已知电路如图1-12所示。列出电路中的独立节点电流方程和独立回路电压方程。

解 设各支路电流方向如图所示。节点电流方程为

$$\text{A点} \quad I_1 + I_2 = I_3 \quad (1)$$

B点 与A点方程相同，所以只有一个独立节点电流方程式。

再设回路I的绕行方向为顺时针方向，回路II为反时针方向。

回路I

$$E_1 = I_1 R_1 + I_1 R_3 + I_3 R_4 \quad (2)$$

回路II

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_4 \quad (3)$$

注意：所谓独立回路电压方程，是这方程式中包含有其它方程式中所没有的新的支路，如同数学方程式中要求每个方程式中都要有新的未知数一样。

第五节 支路电流法

直接应用基尔霍夫定律解复杂电路各支路电流的方法叫支路电流法。设电路有 m 条支路， n 个节点，并且电路参数均为已知。因每条支路有一个未知电流，故共有 m 个未知电流。下面来说明基尔霍夫定律正好可以提供 m 个独立方程式。

首先应用基尔霍夫第一定律于每个节点。

每取一个节点写电流方程式时必有一个新的未知电流，但最后一个节点则不然，它的电流方程式可以由前面几个电流方程式推导而得，即该电流方程式不是独立的。因此独立的电流方程式只有 $n-1$ 个。

若对 m 条支路的两端分别求电位差，可得 m 个独立方程式。例如在图1-13的电路中，

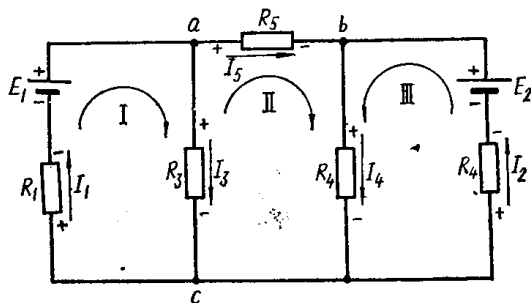


图1-13 支路电流法求解电路