

职业院校新能源汽车专业(方向)通用精品教材

新能源汽车电工电子技术



新能源汽车

电工电子技术

XINNENGYUAN QICHE
DIANGONG DIANZI JISHU

主 编◎陈亚娟 李向林 王 东

主 编◎陈亚娟 李向林 王东

电子科技大学出版社

电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology Press



目 录

模块一 基础篇

1 直流电路	3
1.1 电路的基本概念与基本定律	3
1.1.1 电路的基本物理量	3
1.1.2 电路的基本元件	7
1.2 电路的基本定律	17
1.2.1 欧姆定律	17
1.2.2 基尔霍夫定律	20
1.3 电路的三种状态	25
1.3.1 空载状态	25
1.3.2 短路状态	26
1.3.3 有载工作状态	26
1.4 电路的基本分析方法	28
1.4.1 串并联	28
1.4.2 电压源和电流源及其等效变换	32
习题 1	36
2 交流电路	41
2.1 正弦交流电的基础知识	41
2.1.1 正弦交流电的基本概念	41
2.1.2 正弦交流电的基本要素	43
2.2 单相交流电路	46
2.2.1 单一参数电路	46
2.2.2 RLC 串联电路	50
2.3 三相交流电路	52

2.3.1	三相交流电源	53
2.3.2	三相负载的联结	55
2.3.3	三相电功率	58
习题 2	59
3	电磁感应及应用基础	61
3.1	磁路的基本知识	61
3.1.1	磁场的基本物理量	61
3.1.2	基本磁路定律	62
3.1.3	铁磁材料	66
3.2	铁芯线圈	68
3.2.1	直流铁芯线圈	68
3.2.2	交流铁芯线圈	69
3.3	汽车常用电磁器件	71
3.3.1	变压器	71
3.3.2	自耦变压器	77
3.3.3	互感器	77
3.3.4	电磁继电器	78
习题 3	80
4	电动机与发电机	81
4.1	直流电动机	81
4.1.1	直流电动机的结构	81
4.1.2	直流电动机的工作原理	84
4.1.3	直流电动机的铭牌	86
4.1.4	直流电动机的机械特性	89
4.1.5	直流电动机的起动与调速	89
4.1.6	直流电动机在汽车上的应用	90
4.2	交流电动机	91
4.2.1	三相交流异步电动机的结构	91
4.2.2	三相异步电动机的转动原理	93
4.2.3	三相异步电动机的铭牌	96
4.2.4	三相异步电动机在汽车上的应用	98

4.3 伺服电动机	99
4.3.1 伺服电动机的结构	99
4.3.2 伺服电动机的工作原理	100
4.3.3 伺服电动机的工作特性	101
4.4 步进电动机	102
4.4.1 步进电动机的结构	102
4.4.2 三相反应式步进电动机的工作原理	103
4.5 交流发电机	104
4.5.1 车用交流发电机的特点	104
4.5.2 交流发电机的结构	105
4.5.3 发电机的工作原理	108
4.5.4 交流发电机的分类和型号	110
习题 4	111
5 模拟电子技术基础及其应用	112
5.1 半导体基础知识	112
5.1.1 本征半导体	112
5.1.2 N型半导体和P型半导体	113
5.1.3 PN结及其单向导电性	113
5.2 二极管及其应用	114
5.2.1 基本结构	114
5.2.2 伏安特性	115
5.2.3 理想伏安特性	116
5.2.4 主要参数	116
5.2.5 二极管在汽车电子电路中的应用	116
5.2.6 特殊二极管	124
5.3 晶体管	125
5.3.1 晶体管的结构和分类	126
5.3.2 晶体管的电流放大原理	127
5.3.3 晶体管的特性	128
5.3.4 晶体管的主要参数	130
5.4 晶体管基本放大电路	132
5.4.1 共发射极放大电路	132
5.4.2 共集电极放大电路	137

5.4.3	共基极放大电路	137
5.5	场效应晶体管放大电路	138
5.5.1	场效应晶体管结构	138
5.5.2	场效应晶体管的应用	139
5.6	集成运算放大器	140
5.6.1	集成运算放大器的结构和特点	140
5.6.2	差动放大器	143
5.6.3	集成运算放大器的技术指标	144
5.6.4	集成运算放大器的应用	146
习题 5	157
6	数字电子电路	159
6.1	数字电路的基本概念	159
6.1.1	数字信号和数字电路	159
6.1.2	数字电路的分类	160
6.1.3	数制和码制	160
6.2	门电路	163
6.2.1	逻辑门电路	163
6.2.2	集成门电路	168
6.2.3	门电路在汽车电路中的应用	170
6.3	触发器	172
6.3.1	RS 触发器	172
6.3.2	JK 触发器	174
6.3.3	D 触发器	175
6.3.4	时序逻辑电路	176
6.4	555 时基电路	177
6.4.1	555 时基电路结构和原理	178
6.4.2	555 定时器的典型应用	179
习题 6	180

模块二 进阶篇

7	动力电池及管理系统基础	185
7.1	动力电池概述	185

7.1.1 动力电池作用	185
7.1.2 动力电池分类	185
7.1.3 动力电池性能指标	189
7.1.4 动力电池使用要求	193
7.1.5 动力电池使用组合类型	195
7.2 电池管理系统基础	196
7.2.1 动力电池使用中存在的问题	196
7.2.2 电池管理系统的功能	197
7.2.3 电池管理系统组成	202
7.3 电池管理系统架构设计	203
7.3.1 功能需求分析	204
7.3.2 硬件系统架构设计	205
7.3.3 软件系统架构设计	209
7.4 实例	214
7.4.1 模拟前端采样常用芯片选择	214
7.4.2 动力电池组管理系统电路原理图	228
习题 7	230
8 动力电机驱动控制系统基础	231
8.1 动力电机驱动控制系统概述	231
8.1.1 动力电机驱动控制系统作用	231
8.1.2 动力电机驱动控制系统组成	231
8.1.3 常用动力电机驱动控制系统特点	233
8.2 动力电机驱动控制器架构设计	236
8.2.1 功能需求分析	236
8.2.2 硬件架构设计	238
8.2.3 软件架构设计	239
8.3 实例	240
习题 8	242
9 新能源汽车整车控制系统基础	243
9.1 控制系统分类	243
9.2 控制单元功能	245

9.2.1 车身控制单元 (BCM)	245
9.2.2 电子助力转向系统 (EPS)	247
9.2.3 方向盘转角传感器 (SAS)	247
9.2.4 电子驻车制动系统 (EPB)	247
9.2.5 电子稳定性系统 (ESP)	248
9.2.6 整车控制器 (VCU)	248
习题 9	250
参考文献	251

模块一 基础篇



1 直流电路

直流电路是指含有直流电源，并且电路各处的电压、电流、电动势等物理量的大小和方向都不随时间变化的电路。

1.1 电路的基本概念与基本定律

1.1.1 电路的基本物理量

▶▶▶ 电流

1. 电流的概念

电荷的有规则的定向移动形成电流。它是一种物理现象，金属导体内的电流是由带负电的自由电子，在电场力的作用下，逆电场方向作定向运动而形成的。在导体两端施加电压时，电子便从负极流向正极。

2. 电流的大小

电流的大小用电流强度 I （简称电流）表示。单位时间内通过导体某一横截面的电荷量称为电流。恒定不变的电流，用符号 I 表示。交变电流，用符号 i 表示。设在单位时间（单位：秒，s）内通过导体某一横截面的电荷量为 q （单位：库仑，C），则通过该截面积的电流为：

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

式中， dq 为时间 dt 内通过导线某一截面的电荷量。在国际单位制（SI）中，规定电流的单位为安培（A）。

如果电流的大小和方向均不随时间变化，这种电流称为恒定电流，简称直流电流，用大写字母 I 表示，则：

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

式（1-2）中， I ——电流（A）；

Q ——电荷量（C）；

t ——时间（s）。

一般情况下，随时间变化的物理量用小写字母表示，大写字母表示恒定物理量。

电流的标准单位是安培（A），计量微小电流时，可采用毫安（mA）或微安（ μA ）来表示，其换算关系如下： $1\text{ A}=10^3\text{ mA}=10^6\text{ }\mu\text{A}$ 。

3. 电流的方向

习惯上把正电荷的运动方向规定为电流的实际方向。但在复杂电路分析中，往往很难事先判断电流的实际方向（如图 1-1），因此需要引入参考方向（即正方向）的概念。其方法是：任意假设某一支路中的电流参考方向，把电流看作代数量，若计算结果为正，则表示电流的正方向与实际方向相同；若计算结果为负，则表示电流的正方向与实际方向相反。

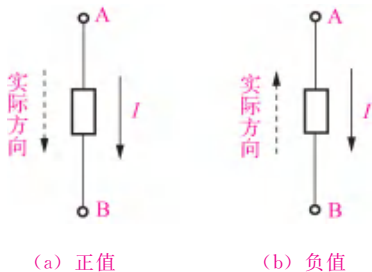


图 1-1 电流的参考方向与实际方向

▶▶▶ 电位

1. 电位的概念

电位又称电势，是指单位正电荷在静电场中的某一点所具有的电势能。在电路中任选一节点设其电位为零。其他各点到参考点的电压降，便是该点的电位。

如图 1-2 所示，把 b 点作为零参考点（用“ \perp ”符号来表示），那么正电荷在 a 点所具有的电位能 W_a 与正电荷所带电量 Q 的比值，称为电路中 a 点的电位，用 V_a 表示，即

$$V_a = \frac{W_a}{Q} \quad (1-3)$$

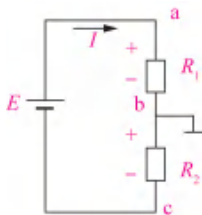


图 1-2 电位分析图

电位的单位是焦耳/库仑（J/C），称为伏特，简称伏（V）。电位的高低是相对的，与所设零参考点有关，在电路中电位比零参考点高的点，它们的电位为正值；电位比零参考点低的点，它们的电位为负值。

2. 电位的计算步骤

- ① 任选电路中某一点为参考点，设其电位为零；
- ② 标出各电流参考方向并计算；
- ③ 计算各点至参考点间的电压即为各点的电位。

在汽车电路中，通常用汽车车身和发动机等金属体作为公共线，并与电源负极相连接，视其为电路中的零参考点，也就是常说的“搭铁”，汽车电路符号用“⊥”表示。

电压

1. 电压的概念

在分析电子电路时，通常在电路中选取某一个固定点作为参考点，而把电路中其他各点与参考点之间的电位差称为该点的电压。电位用 V 表示，单位也是 V （伏特）表示。

电压与电位的的关系为：电场内两点之间的电压等于这两点之间的电位差，即

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-4)$$

式中， V_A 为 A 点的电位； V_B 为 B 点的电位。

电压的单位：用伏特（ V ）表示，计量较大的电压时用千伏（ kV ），计量较小的电压时用毫伏（ mV ）。

其换算关系如下：

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} = 10^6 \text{ mV}$$

如图 1-2，设 b 点为零电位点，则：

b 点的电位： $V_B = 0$ ；

a 点的电位： V_A 就是从 a 点到 b 点的电压 U_{ab} ；

c 点的电位： V_C 就是从 c 点到 b 点的电压 U_{cb} 。

2. 电压的方向

电压在分析电路时也有方向性，电压的方向规定为由高电位指向低电位，即电位降低的方向。电压参考方向和电流参考方向一样，也是任意指定，分析电路时，假定某一方向是电位降低的方向，如所假定的电压方向与实际方向一致时，则电压为正值；电压参考方向与实际方向不一致时，则电压为负值。因此，参考电压的值也是个标量，有正负之分；只有参考方向被假定后，电压的值才有正负之分。如图 1-3 所示。

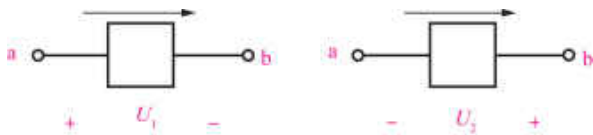


图 1-3 电压的正方向

电路中各点的电位随参考点的选择不同而不同，但是任意两点之间的电位差是不变的，它不随参考点的变化而变化。也就是说，电路中任意两点间的电压与参考点的选择无关。虽然在电路中，参考点可以任意选取，但工程上常选择大地、设备外壳或接地点作为

参考点，参考点电位为零。如汽车电路的负极搭铁。

▶▶▶ 电动势

电动势是一个表征电源特征的物理量。是电源将其他形式的能量转化为电能，在数值上，等于非静电力将单位正电荷从电源的负极通过电源内部移送到正极时所做的功。它是能够克服导体电阻对电流的阻力，使电荷在闭合的导体回路中流动的一种作用。

理想电源其电动势与其两端的输出电压之间的关系是：

$$E_{BA} = -U_{AB} \quad (1-5)$$

电动势的单位与电压相同，也用伏特来表示。电动势的实际方向规定是从电路的低电位指向高电位，即与电压的方向是相反的，在直流电路中，电动势的实际方向是很容易通过直观确定的。

▶▶▶ 电功率

当一段导体中有电流通过时，正电荷从高电位移向低电位端，电场力对它做了功，这个功通常叫做电流的功，简称电功。其单位是焦耳（J）。

单位时间内所做的电功称为电功率，用 P 来表示。在图 1-4 中，假定电流、电压、电动势的方向均为实际方向。在电路中，电源电动势 E 发出电能，而负载电阻 R_L 和电源内阻 R_0 吸收电能。电源电动势 E 发出的电能用电源力所做的功表示，而电阻 R_L 和 R_0 吸收的电能可用电场力所做的功表示。根据电动势 E 的定义，电源电动势 E 发出的电能为

$$W_E = EQ = EIt \quad (1-6)$$

根据电压的定义，电阻 R_L 吸收的电能为

$$W_R = UQ = UI t \quad (1-7)$$

电阻 R_0 吸收的电能为

$$W_{R_0} = U_{R_0} Q = U_{R_0} It \quad (1-8)$$

根据能量守恒定律，电路中发出的电能必定等于电路吸收的电能，因此以下公式成立：

$$W_E = W_R + W_{R_0} \quad (1-9)$$

则

$$EIt = UI t + U_{R_0} It \quad (1-10)$$

将等式两边同时除以 t ，则得功率平衡方程为

$$P_E = P_{R_L} + \Delta P \quad (1-11)$$

式中， $P_E = EI$ ，称为电源发出的功率； $P_{R_L} = UI$ ，称为负载吸收的功率； $\Delta P = U_{R_0} I$ ，称为内电阻吸收的功率。

上式说明，一个电路电源发出的功率必定等于电路所吸收的功率，因此一个电路不但存在能量守恒，还存在功率守恒。

功率的标准单位是瓦特（W）。计量大功率时，W 太小，常用 kW（千瓦）为单位，计量小功率时 W 又太大，常用 mW（毫瓦）为单位。它们与 W 之间的换算关系是 $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} = 10^6 \text{ mW}$ 。

在图 1-4 所示电路中, 当电路中元件的电压与电流实际方向一致时, 元件吸收功率 (图中 R_L 和 R_0); 若两者实际方向相反, 则发出功率 (图中电源 E)。因此元件的性质可以通过电压与电流实际方向来判定。

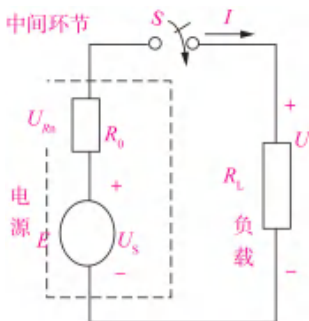


图 1-4 功率计算

1.1.2 电路的基本元件

电路元件是电路最基本的组成单元, 可分为无源元件和电源元件。

无源元件主要有电阻元件、电感元件、电容元件, 它们都是理想元件。所谓理想, 就是突出元件的主要电磁性质, 而忽略次要因素。

电阻元件具有消耗电能的性质 (电阻性), 其他电磁性质均可忽略不计; 电感元件突出其中通过电流产生磁场而储存磁场能量的性质 (电感性); 电容元件突出其加上电压要产生电场而储存电场能量的性质 (电容性)。电阻元件是耗能元件, 后两者是储能元件。

电阻元件

导体容易导电, 但对电流也有阻碍作用。在相同的电压作用下, 通过不同导体的电流大小不同, 说明不同导体对电流的阻碍作用也不同。电阻就是描述导体对电流阻碍作用的物理量, 在电路中用于控制电流、电压和控制放大的信号等, 在电路图中用字母“R”表示, 电路图中常用电阻器的符号如图 1-5 所示。

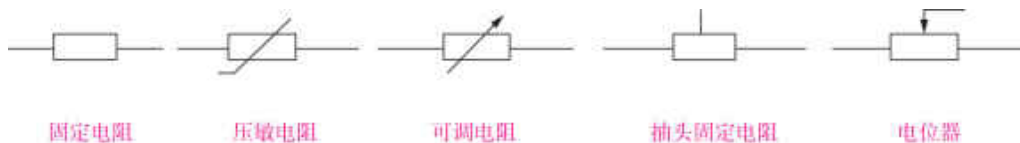


图 1-5 电阻的图形符号

电阻的国际单位是欧姆, 简称欧, 通常用符号“ Ω ”表示。此外, 常用的电阻的单位还有“ $K\Omega$ ”“ $M\Omega$ ”, 它们的换算关系如下:

$$1 \text{ M}\Omega = 10^3 \text{ K}\Omega = 10^6 \Omega$$

电阻实际上是导体的一种基本性质, 与导体的尺寸、材料和温度有关。通常在电子产品中所说的电阻是指电阻器这种电阻元件。电阻器是电子电路中使用最多的元件之一, 在

电路中常用来控制电流和调节电压。电阻元件中有电流流过时要消耗电能，因此，电阻元件是耗能元件。电阻元件是由实际电阻器抽象出来的理想化模型，是代表电路中消耗电能这一物理现象的理想二端元件。如电灯泡、电炉、电烙铁等这类实际电阻器，当忽略其电感等作用时，可将它们抽象为仅具有消耗电能的电阻元件。

电阻元件的倒数称为电导，用字母 G 表示，即

$$G=1/R \quad (1-12)$$

电导的国际制单位为西门子，简称西，通常用符号“S”表示。电导也是表征电阻元件特性的参数，它反映的是电阻元件的导电能力。

1. 电阻元件的分类

常用电阻器一般分为固定电阻器和可变电阻器两大类。固定电阻器是指电阻器的阻值固定不变，可变电阻器的阻值可根据需要在一定范围内进行调节。

①固定电阻器。固定电阻器简称电阻，根据材料和工艺不同，可分为碳膜电阻器（RT）、金属膜电阻器（RJ）、贴片电阻器（RX）、热敏电阻器（RR）、光敏电阻器（RG）等不同类型的。各类电阻器的外形如图 1-6 所示。



图 1-6 常用固定电阻器外形

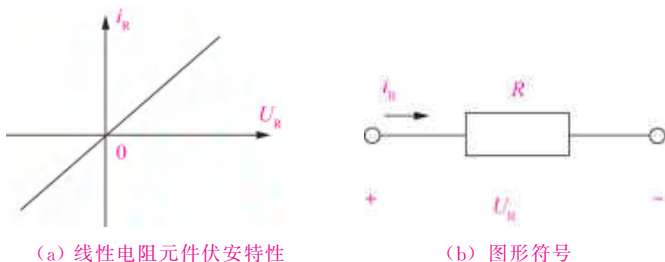
②可变电阻器。可变电阻器简称可变电阻，其阻值可在规定的范围内任意调节。可变电阻器可分为半可调电阻器和电位器两类。常用的可变电阻器外形如图 1-7 所示。



图 1-7 常用可变电阻器的外形

2. 电阻元件的特性

电阻元件的伏安特性，可以用电流为横坐标，电压为纵坐标的直角坐标平面上的曲线来表示，称为电阻元件的伏安特性曲线。如果伏安特性曲线是一条过原点的直线，如图 1-8 (a) 所示，这样的电阻元件称为线性电阻元件，线性电阻元件在电路图中用图 1-8 (b) 所示的图形符号表示。



(a) 线性电阻元件伏安特性

(b) 图形符号

图 1-8 线性电阻元件特性

在工程上，还有许多电阻元件，其伏安特性曲线是一条过原点的曲线，这样的电阻元件称为非线性电阻元件。如图 1-9 所示，曲线是二极管的伏安特性，所以二极管是一个非线性电阻元件。

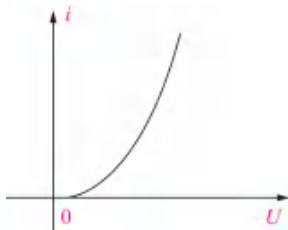


图 1-9 二极管的伏安特性

严格地说，实际电路器件的电阻都是非线性的。如常用的白炽灯，只有在一定的工作范围内，才能把白炽灯近似看成线性电阻，而超过此范围，就成了非线性电阻。

本书中以下所有的电阻元件，除非特别指明，都是指的线性电阻元件。

①线性电阻。常见的线性电阻有碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等。电阻元件的参数如阻值等可用阿拉伯数字和符号直接标注在电阻上，或使用色环标注法。色环标注就是在电阻器上用不同颜色的环来表示电阻的规格。用色环标注法时，紧靠电阻元件一端的色环为第一环，另一端则为最后一环。

色环电阻的色彩标识有两种：4环标注方式和5环标注方式。4环电阻一般是碳膜电阻，用3个色环来表示阻值，用1个色环表示误差，如图1-10(a)所示，第1、2环表示两位有效数字，第3环表示倍乘数，第4环表示允许偏差。5环电阻一般是金属膜电阻，用4个色环表示阻值，另一个色环表示误差，如图1-10(b)所示，第1、2、3环表示三位有效数字，第4环表示倍乘数，第5环表示允许偏差。色环电阻的具体读数方法如图1-10所示。

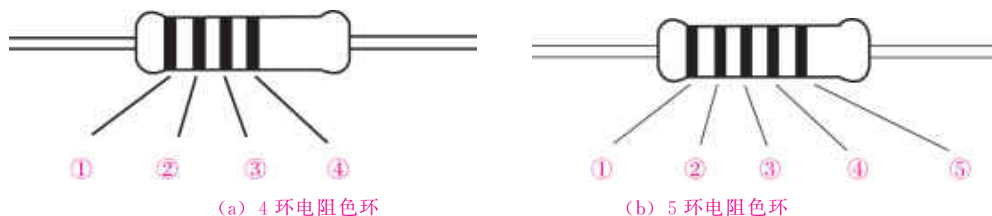


图 1-10 色环电阻表示

色环一般采用黑、棕、红、橙、黄、绿、蓝、紫、灰、白、金、银 12 种，它们的意义见表 1-1。

表 1-1 色标符号规定

颜色	有效数字	乘数	允许偏差/%	工作电压/V
银色	—	10^{-2}	± 10	—
金色	—	10^{-1}	± 5	—
黑色	0	10^0	—	—
棕色	1	10^1	± 1	4
红色	2	10^2	± 2	6.3
橙色	3	10^3	—	10
黄色	4	10^4	—	16
绿色	5	10^5	± 0.5	25
蓝色	6	10^6	± 0.2	32
紫色	7	10^7	± 0.1	40
灰色	8	10^8	—	50
白色	9	10^9	+50/—20	63
无色	—	—	± 20	—

②非线性电阻。热敏电阻和压敏电阻都属于非线性电阻。热敏电阻分为两类，一类称为负温度系数热敏电阻，简称 NTC 电阻，其电阻值随温度升高而急剧下降，多用于温度测量和温度调节，也用作补偿电阻，如汽车温度传感器中的热敏电阻就属于 NTC 电阻；另一类称为正温度系数热敏电阻，简称 PTC 电阻，其电阻值随温度升高而急剧增大，用做过热保护和延时开关。

压敏电阻在低电压时具有较大的电阻，当电压较大时，电阻变小。当电压过高时，压敏电阻可起分流作用，因而常被用来进行过压保护。汽车进气压力传感器中就用到了压敏电阻。

3. 电阻器的检测方法

①固定电阻器的检测

使用万用表电阻档将万用表两表笔（不分正负）分别与电阻的两端引脚相接即可测出实际电阻值。为了提高测量精度，应根据被测电阻标称值的大小来选择量程。

注意：测试时，特别是在测几十千欧以上电阻的阻值时，手不要触及表笔和电阻的导电部分；被检测的电阻应从电路中焊下来，至少要焊开一个头，以免电路中的其他元器件对测试产生影响，造成测量误差；色环电阻在使用前最好用万用表测量一下其实际阻值，避免读数错误；任何有标志的电阻在使用前都要进行测量。

②电位器的检测

检查电位器时，首先要转动旋柄，看看旋柄转动是否平滑，开关是否灵活，开关通断时“咔哒”声是否清脆，并听一听电位器内部接触点和电阻体摩擦的声音，如有“沙沙”声，说明质量不好。用万用表测试时，先根据被测电位器阻值的大小、选择好万用表的合适电阻档位，然后按照检测固定电阻器的方法进行检测。

如万用表的读数在电位器轴柄转动过程中有跳动现象，说明活动触点有接触不良的故障。

▶▶▶ 电容元件

实际电容器是由两片金属极板中间充满电介质（如空气、云母、绝缘纸、塑料薄膜、陶瓷等）构成的。在电路中多用来滤波、隔直、交流耦合、交流旁路及与电感元件组成振荡回路等。电容器又名储电器，在电路图中用字母“C”表示，电路图中常用电容器的符号如图 1-11 所示。



图 1-11 电容器的图形符号

电容器的国际单位是法拉，简称法，通常用符号“F”表示。常用的单位还有“ μF ”“pF”，它们的换算关系如下：

$$1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF}$$

电容元件是从实际电容器抽象出来的理想化模型，是代表电路中储存电能这一物理现象的理想二端元件。当忽略实际电容器的漏电阻和引线电感时，可将它们抽象为仅具有储存电场能量的电容元件。

1. 电容元件的分类

电容器按结构可以分为固定电容器、可变电容器和半可变电容器。固定电容器的容量是固定的；可变电容器是容量在一定范围内可以调节的电容器；半可变电容器也称为微调电容器，在电路中用来补偿电容，图 1-12 为常用电容器的外形。



图 1-12 常用电容器的外形

在实际应用中，最常见的是固定电容器。电容器按绝缘介质不同可分为纸介电容器、有机薄膜电容器、瓷介电容器、云母电容器、电解电容器等。汽车中用量最多的是电解电容器，如汽车前窗的电子式雨刮器电路中应用的就是铝电解电容器，其他应用的电容器还有陶瓷电容器、聚酯膜电容器和聚丙烯膜电容器等。

2. 电容元件的特性

在电路分析中，电容元件的电压、电流关系是十分重要的。当电容元件两端的电压发

生变化时，极板上聚集的电荷也相应地发生变化，这时电容元件所在的电路中就存在电荷的定向移动，形成了电流。当电容元件两端的电压不变时，极板上的电荷也不变化，电路中便没有电流。

当电压、电流为关联参考方向时，线性电容元件的特性方程为

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-13)$$

它表明电容元件中的电流与两端电压对时间的变化率成正比。比例常数 C 称为电容，是表征电容元件特性的参数。电压的单位为伏特 (V)，电流的单位为安培 (A) 时，电容的单位为法拉，简称法 (F)。习惯上我们常把电容元件简称为电容，所以“电容”这个名词，既表示电路元件，又表示元件的参数。

本书主要讨论线性电容元件。线性电容元件在电路图中用图 1-13 所示的符号表示。

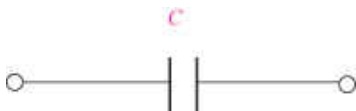


图 1-13 线性电容图形符号

若电压、电流为非关联参考方向，则电容元件的特性方程为

$$i = -C \frac{du}{dt} \quad (1-14)$$

从式 1-13、1-14 看出，只有当电容元件两端的电压发生变化时，才有电流通过。电压变化越快，电流越大。当电压不变（直流电压）时，电流为零。所以电容元件有隔直通交的作用。另外，电容元件两端的电压不能跃变，这是电容元件的一个重要性质。如果电压跃变，则会产生无穷大的电流，对实际电容器来说，这当然是不可能的。

在 u 、 i 关联参考方向下，线性电容元件吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-15)$$

在 t 时刻，电容元件储存的电场能量为

$$W_C(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-16)$$

式 1-16 表明，电容元件在某时刻储存的电场能量只与该时刻电容元件的端电压有关。当电压增加时，电容元件从电源吸收能量，储存在电场中的能量增加，这个过程称为电容的充电过程。当电压减小时，电容元件向外释放电场能量，这个过程称为电容的放电过程。电容在充放电过程中并不消耗能量。因此，电容元件是一种储能元件。

在选用电容器时，除了选择合适的电容量外，还需注意实际工作电压与电容器的额定电压是否相等。如果实际工作电压过高，介质就会被击穿，电容器就会损坏。

3. 电容元件的参数

电容器的主要参数有电容器的标称容量、允许误差、额定工作电压、绝缘电阻等。

①标称容量和允许误差

电容器具有储存电荷的能力。规定把电容器外加 1 V 直流电压时所储存的电荷量称为电容器的电容量。

②额定工作电压

标注在电容器外壳上的电容量的大小称为标称容量，标称容量是相应标准系列规定的。电容器长期连续可靠工作时，两极间能够承受的最高电压称为电容器的额定工作电压，简称电容器的耐压，固定电容器的直流工作电压等级为 6.3 V、10 V、16 V、25 V、32 V、50 V 等。

电容器的电容量常按一定规则标注在电容器外壳上。电解电容器常 μF 为单位直接标印在电容器外壳上，如 $10\ \mu\text{F}/6\text{V}$ 表示标称容量为 $10\ \mu\text{F}$ ，耐压为 16 V 的电容器。

③绝缘电阻

由于电容两极之间的介质不是绝对的绝缘体，它的电阻不是无限大，而是一个有限的数值，一般在 $1000\ \text{M}\Omega$ 以上，电容两极之间的电阻叫做绝缘电阻，或者叫做漏电阻，漏电阻越大越好。

4. 电容器的检测方法

测量电容容量：使用万用表电容档，测量前先将电容通过适当的电阻放电，然后将万用表置于电容档 (F)，选择适应的量程，然后将电容插入 C_x 测试插孔，进行电容容量测量，如 $100\ \mu\text{F}$ 的电容，测量出电容容量是 $98\ \mu\text{F}$ 或 $99\ \mu\text{F}$ 都为正常。对于电解电容，要注意极性不要接反。

测量电容好坏：可以用电阻档或二极管档通过测量电容两个电极之间的阻值来判断电容是否损坏，如果被测电容的两个电极之间阻值很小或为零，说明电容内部被击穿。

▶▶▶ 电感元件

实际电感线圈就是用漆包线或纱包线或裸导线一圈圈地绕在绝缘管上或铁芯上而又彼此绝缘的一种元件。在电路中多用来对交流信号进行隔离、滤波或组成谐振电路等。

具有储存磁场能特性的电路元件称为电感元件。在一个线圈中，通过一定数量的变化电流，线圈产生感应电动势大小的能力就称为线圈的电感量，简称电感。电感常用字母“L”表示，电路图中常用电感线圈的符号如图 1-14 所示。



图 1-14 电感线圈的图形符号

电感的国际单位是亨利，简称亨，通常用符号“H”表示。常用单位还有“ μH ”“ mH ”，它们的换算关系如下：

$$1\ \text{H} = 10^3\ \text{mH} = 10^6\ \mu\text{H}$$

电感元件是从实际线圈抽象出来的理想化模型，是代表电路中储存磁场能量这一物理现象的理想二端元件。当忽略实际线圈的导线电阻和线圈匝与匝之间的分布电容时，可将其抽象为仅具有储存磁场能量的电感元件。

1. 电感元件的分类

按电感值分类：固定电感、可变电感。

按导磁体性质分类：空心线圈、铁氧体线圈、铁心线圈、铜心线圈。

按工作性质分类：天线线圈、振荡线圈、扼流线圈、陷波线圈、偏转线圈。

按绕线结构分类：单层线圈、多层线圈、蜂房式线圈。

图 1-15 所示为常用电感器外形。



图 1-15 常用电感器的外形

2. 电感元件的特性

任何导体当有电流通过时，在导体周围就会产生磁场；如果电流发生变化，磁场也随着变化，而磁场的变化又引起感应电动势的产生。这种感应电动势是由于导体本身的电流变化引起的，称为自感。

自感电动势的方向，可由楞次定律确定。即当线圈中的电流增大时，自感电动势的方向和线圈中的电流方向相反，以阻止电流的增大；当线圈中的电流减小时，自感电动势的方向和线圈中的电流方向相同，以阻止电流的减小。总之当线圈中的电流发生变化时，自感电动势总是阻止电流的变化。

自感电动势的大小，一方面取决于导体中电流变化的快慢，另一方面还与线圈的形状、尺寸、线圈匝数以及线圈中介质情况有关。

当电压、电流为关联参考方向时，线性电感元件的特性方程为

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-17)$$

它表明电感元件的两端电压与它的电流对时间的变化率成正比。比例常数 L 称为电感，是表征电感元件特性的参数。当电压的单位为伏特 (V)，电流的单位为安培 (A) 时，电感的单位为亨利，简称亨 (H)。习惯上我们常把电感元件简称为电感，所以“电感”这个名词，既表示电路元件，又表示元件的参数。

本书主要讨论线性电感元件，线性电感元件在电路图中用图 1-16 所示的符号表示。



图 1-16 电感图形符号

若电压、电流为非关联参考方向，则电感元件的特性方程为

$$u = -L \frac{di}{dt} \quad (1-18)$$

从式 1-17、1-18 看到，只有当电感元件中的电流发生变化时，元件两端才有电压。电流变化越快，电压越高。当电流不变（直流电流）时，电压为零，这时电感元件相当于短路。另还可以看到，电感元件中的电流不能跃变，这是电感元件的一个重要性质。如果电流跃变，则要产生无穷大的电压，对实际电感线圈来说，这当然是不可能的。

在 u 、 i 关联参考方向下，线性电感元件吸收的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-19)$$

在 t 时刻，电感元件储存的磁场能量为

$$W_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-20)$$

式 1-20 表明，电感元件在某时刻储存的磁场能量只与该时刻电感元件的电流有关。当电流增加时，电感元件从电源吸收能量，储存在磁场中的能量增加；当电流减小时，电感元件向外释放磁场能量。电感元件并不消耗能量，因此，电感元件也是一种储能元件。

在选用电感线圈时，除了选择合适的电感量外，还需注意实际的工作电流不能超过其额定电流。否则，由于电流过大，线圈因发热会被烧毁。

3. 电感元件的主要性能指标

① 标称电感量

反映电感线圈自感应能力的物理量。电感量的大小与线圈的形状、结构和材料有关。电感量的大小主要取决于线圈的直径、匝数及有无铁磁心等。

电感量的标志方法有直标法和色标法，直标法是在电感线圈的外壳上直接用数字和文字标出电感线圈的电感量，一般单位为 μH 。色标法即用色环表示电感量，单位为 mH ，第 1、2 位表示有效数字，第 3 位表示倍率，第 4 位为允许偏差。

② 电感线圈直流电阻

电感线圈的直流电阻是指损耗电阻，其阻值很小。

③ 品质因数

品质因数用来表示线圈损耗的大小。电感线圈中，存储能量与消耗能量的比值称为品质因数，也称 g 值，具体表现为线圈的感抗与线圈损耗电阻的比值， $g = \omega L / R$ 。式中， ω 是通过线圈交流电的角频率， $\omega = 2\pi f$ ， f 是交流电效率。

④ 额定电流

额定电流是电感器正常工作时，允许通过的最大电流。若工作电流大于额定电流，则电感器会因发热而改变参数，严重时烧毁。

4. 电感元件的检测

电感量检测：大多数万用表不能直接测量电感量，需要用外接电路后再换算，只有少数型号可以直接测量电感量。

电感器好坏判断：用万用表欧姆档测量电感器的直流电阻，如电阻值远大于标称值，说明电感器内部断路；如果电阻值远小于标称值，说明电感器内部短路；对于贴片电感，此时的读数应为零。

1.2 电路的基本定律

1.2.1 欧姆定律

在一段电路或全电路中，各基本物理量之间存在着一定的制约关系，这种制约关系称为欧姆定律。欧姆定律是电路的基本定律之一，有部分电路和全电路两种形式。

1. 部分电路欧姆定律

不含电源的一段电路称为部分电路，如图 1-17 (a) 所示。实验证明，在一段电路中，通过电路的电流与这段电路两端的电压成正比，而与电阻成反比，这一关系称为部分电路欧姆定律。在 U 、 I 参考方向相同时，如图 1-17 (a) 所示，欧姆定律为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-21)$$

[例 1-1] 电路如图 1-17 所示，已知 $R = 10 \Omega$ ， $U = 10 \text{ V}$ ，分别求图 (a)、图 (b) 的电流 I 。

解：对图 (a) 而言：

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{10} = 1 \text{ A}$$

对图 (b) 而言：

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{10}{10} = -1 \text{ (A)}$$

电流为正值，说明电流的实际方向与参考方向相同；电流为负值，说明电流的实际方向与参考方向相反，因此只要知道参考方向和计算结果就可推定实际方向。参考方向的这种作用不仅电流有，电压、电动势也有，具有普遍性。

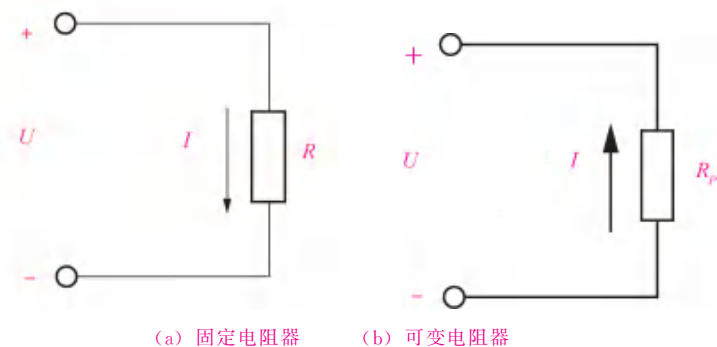


图 1-17 部分电路欧姆定律

2. 全电路欧姆定律

含有电源的闭合电路称为全电路，如图 1-18 所示。其中直流电源用理想电压源 E 和内阻 R_0 的串联电路表示， U 是电源的端电压（输出电压）， R_L 是负载的电阻，电路中各物理量的方向均为参考方向。全电路欧姆定律的内容是：在一个全电路中，电流 I 的大小与电源电动势 E 成正比，与电路的总电阻 $R_L + R_0$ 成反比。

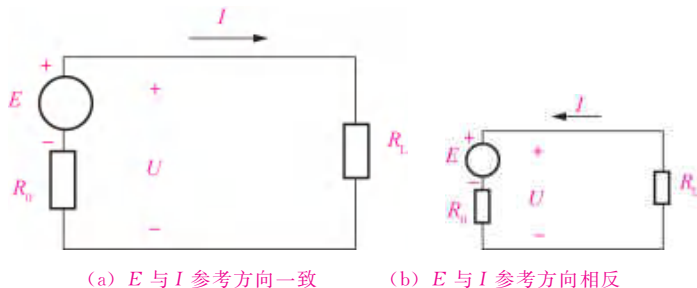


图 1-18 全电路欧姆定律

在 E 与 I 参考方向一致时，如图 1-18 (a)，欧姆定律的形式为

$$I = \frac{E}{R_L + R_0}$$

当 E 与 I 参考方向相反时，如图 1-18 (b)，则欧姆定律的形式为

$$I = -\frac{E}{R_L + R_0}$$

欧姆定律是电学中重要的基本规律，它是通过实验总结、归纳得到的规律，掌握这一规律要注意以下几点。

(1) 欧姆定律适用于从电源正极到负极之间的整个电路或其中某一部分电路，并且是纯电阻电路。

(2) 欧姆定律中“通过”的电流 I ，“两端”的电压 U 及“导体”的电阻 R 都是同一个导体或同一段电路上对应的物理量。不同导体的电流、电压、电阻间不存在上述关系。因此在运用公式 $I = U/R$ 时，必须将同一个导体或同一段电路的电流、电压、电阻代入计算，三者一一对应。

(3) 欧姆定律中三个物理量间有同时性, 在同一部分电路上, 由于开关的闭合或断开以及滑动变阻器滑片位置的移动, 都将引起电路的变化, 从而导致电路中的电流、电压、电阻的变化, 因而公式 $I=U/R$ 中的三个量是同一时间的值。

(4) $I=U/R$ 和 $R=U/I$ 的区别: 欧姆定律表达式 $I=U/R$ 表示导体中的电流与导体两端的电压和导体中的电阻有关。当电阻 R 一定时, 导体中的电流 I 跟导体两端的电压 U 成正比; 当导体两端电压 U 一定时, 导体中的电流 I 与导体的电阻 R 成反比。

$R=U/I$ 是由欧姆定律表达式变形得到的, 它表示某段导体的电阻数值上等于这段导体两端电压与其通过的电流的比值, 这个比值 R 是导体的本身属性, 不能理解为 R 与 U 成正比, 与 I 成反比, 这也是物理与数学的不同之处。

(5) 欧姆定律反映了在一定条件下, 电流强度与电压的因果关系, 电流强度与电阻的制约关系。即电阻一定时, 电流强度跟导体的两端电压成正比; 电压一定时, 电流强度跟导体的电阻成反比。建立比例关系时, 一定要注意它的条件。欧姆定律表明通过导体的电流强度由导体的两端电压和导体的电阻两个因素决定的。

[例 1-2] 电路如图 1-18 (a) 所示, 已知 $E=3\text{ V}$, $R_0=0.4\ \Omega$, $R_L=9.6\ \Omega$, 求电流 I 、内阻压降 IR_0 及电源端电压 U 。

解: 由全电路欧姆定律可得

$$I = \frac{E}{R_L + R_0} = \frac{3}{9.6 + 0.4} = 0.3\text{ A}$$

内阻电压降 $IR_0 = 0.3 \times 0.4 = 0.12\text{ V}$

电源端电压 $U = IR_L = 0.3 \times 9.6 = 2.88\text{ V}$

可见 $E = U + IR_0$

所以 $U = E - IR_0 = (3 - 0.12) = 2.88\text{ V}$

$E = U + IR_0$ 称为电压平衡方程, 当电源开路时, $E = U$, 因此只要测出 U 的大小即可确定 E 的大小, 这一点在实际应用中具有实际意义。

[例 1-3] 如图 1-19, 已知 $E=16\text{ V}$, $R_1=4\ \Omega$, $R_2=3\ \Omega$, $R_3=1\ \Omega$, $R_4=5\ \Omega$, 求各点电位及电压 U_{ab} 和电压 U_{af} 。

解: (1) 分析电路, R_4 中无电流通过 (没有构成通路), d 点与 f 点电压 $U_{df}=0$ 。电路由 $E-R_1-R_2-R_3-D$ 可看成无分支电路, 电流方向如图中所示, 则根据全电路欧姆定律有:

$$I = E / (R_1 + R_2 + R_3) = 16 / (4 + 3 + 1) = 2\text{ A}$$

(2) 图中已标出 c 点为参考点, 则 $V_c = 0$

(3) 求各点电位: $V_b = U_{bc} = IR_2 = 2 \times 3 = 6\text{ V}$

$$V_a = U_{ab} + U_{bc} = IR_1 + IR_2 = 2 \times 4 + 6 = 14\text{ V}$$

$$V_d = V_f = U_{dc} = -IR_3 = -2 \times 1 = -2\text{ V}$$

(4) 求电压: $U_{ab} = V_a - V_b = 14 - 6 = 8\text{ V}$

$$U_{af} = U_{ad} = V_a - V_d = 14 - (-2) = 16\text{ V}$$

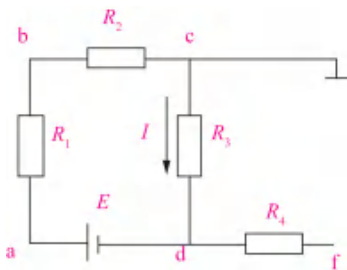


图 1-19 例 1-3 的图

1.2.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律 (Kirchhoff laws) 是电路中电压和电流所遵循的基本规律, 是分析和计算较为复杂电路的基础, 1845 年由德国物理学家 G. R. 基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff, 1824~1887) 提出。基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔霍夫电压定律 (KVL)。

基尔霍夫定律既可以用于直流电路的分析, 也可以用于交流电路的分析, 还可以用于含有电子元件的非线性电路的分析。

1. 电路的几个名词

以图 1-20 所示电路为例说明常用电路名词。

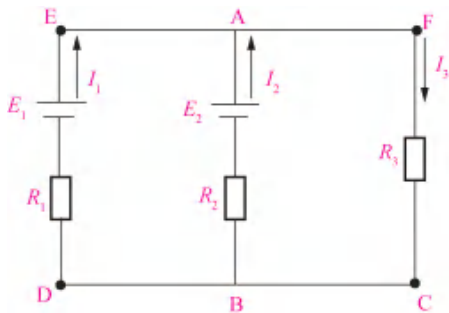


图 1-20 常用电路名词的说明

(1) 支路: 电路中相邻的两个端点且通过同一电流的无分支电路。如图 1-20 电路中的 ED、AB、FC 均为支路, 该电路的支路数目为 $b=3$ 。

(2) 节点: 电路中三条或三条以上支路的连结点。如图 1-20 电路的节点为 A、B 两点, 该电路的节点数目为 $n=2$ 。

(3) 回路: 电路中任一闭合的路径。如图 1-20 电路中的 CDEFC、AFCBA、EABDE 路径均为回路, 该电路的回路数目为 $l=3$ 。

(4) 网孔: 不含有分支的闭合回路。如图 1-20 电路中的 AFCBA、EABDE 回路均为网孔, 该电路的网孔数目为 $m=2$ 。

(5) 网络：在电路分析范围内网络是指包含较多元件的电路。

2. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律亦称为节点电流定律，应用于节点，用来确定连在同一节点上的各支路电流间的关系。电流定律的第一种表述：在任何时刻，电路中流入任一节点中的电流之和，恒等于从该节点流出的电流之和，即

$$\sum I_{\text{流入}} = \sum I_{\text{流出}} \quad (1-22)$$

如图 1-21 中，在节点 A 上： $I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$

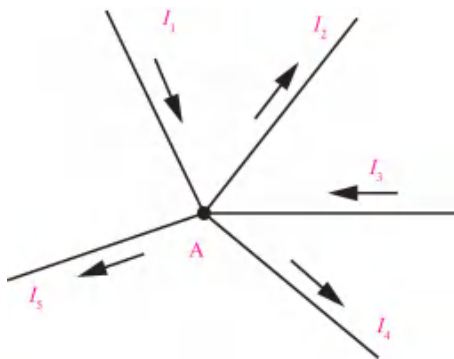


图 1-21 电流定律的举例说明

电流定律的第二种表述：在任何时刻，电路中任一节点上的各支路电流代数和恒等于零，即 $\sum I = 0$ 。

一般可在流入节点的电流前面取“+”号，在流出节点的电流前面取“-”号，反之亦可。例如图 1-21 中，在节点 A 上： $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$ 。

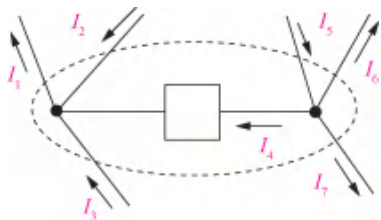


图 1-22 某电路

在使用电流定律时，必须注意：

- ①对于含有 n 个节点的电路，只能列出 $(n-1)$ 个独立的电流方程。
- ②列节点电流方程时，只需考虑电流的参考方向，然后再带入电流的数值。

为分析电路的方便，通常需要在所研究的一段电路中事先选定（即假定）电流流动的方向，叫做电流的参考方向，通常用“→”号表示。

电流的实际方向可根据数值的正、负来判断，当 $I > 0$ 时，表明电流的实际方向与所标定的参考方向一致；当 $I < 0$ 时，则表明电流的实际方向与所标定的参考方向相反。

KCL 定律不仅适用于电路中的节点，还可以推广应用于电路中的任一假设的封闭面。

即在任一瞬间，通过电路中的任一假设的封闭面的电流的代数和为零。

例如，图 1-22 所示为某电路中的一部分，选择封闭面，如图中虚线所示，在所选定的参考方向下有：

$$-I_1 + I_2 + I_3 + I_5 - I_6 - I_7 = 0$$

[例 1-4] 已知 $I_1 = 3 \text{ A}$ 、 $I_2 = 5 \text{ A}$ 、 $I_3 = -18 \text{ A}$ 、 $I_5 = 9 \text{ A}$ ，计算图 1-23 所示电路中的电流 I_6 及 I_4 。

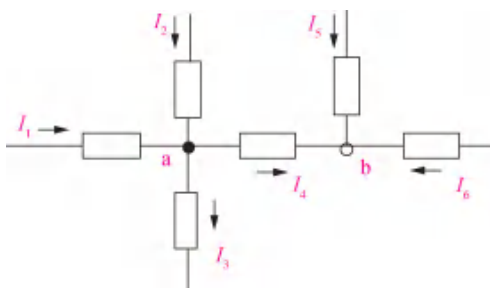


图 1-23 例 1-4 电路图

解：对节点 a，根据 KCL 定律可知：

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

则： $I_4 = I_3 - I_1 - I_2 = -18 - 3 - 5 = -26 \text{ A}$

对节点 b，根据 KCL 定律可知：

$$I_4 + I_5 + I_6 = 0$$

则： $I_6 = -I_4 - I_5 = (-26 - 9) \text{ A} = -35 \text{ A}$

[例 1-5] 求图 1-24 所示电路中未知电流。已知 $I_1 = 25 \text{ mA}$ ， $I_3 = 16 \text{ mA}$ ， $I_4 = 12 \text{ mA}$ 。

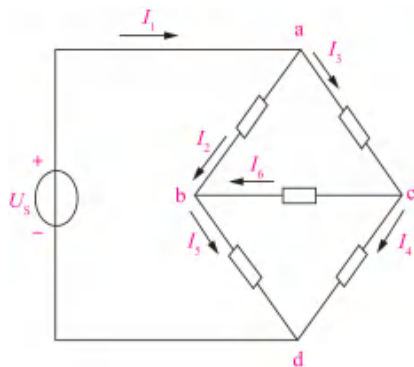


图 1-24 例 1-5 电路图

解：该电路有 4 个节点、6 条支路。根据基尔霍夫电流定律：

节点 a： $I_1 = I_3 + I_2$ ，

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

节点 c： $I_3 = I_4 + I_6$