

电工及工业电子学

(上 册)

北京航空学院 李郁分 主编



国防工业出版社

说 明

本书系根据78年召开的三机部教材规划会议决定编写的非电专业电工及工业电子学教材。全书分上、下册，上册包括电路理论和电机电器控制，下册为电子技术。

根据加强理论基础和反映新技术的原则，在传统内容的基础上，电路理论部分增添了电流源、诺顿定理和 RC 网络的频率特性；电子技术部分增加了集成运算放大器、集成数字电路、逻辑代数和数——模转换、模——数转换等。同时也删去了过去教材中的一些内容。在编写体系上，上册除了增加“电路的基本知识”（第一章）之外，与过去教材相比变更不大。下册中，将分立元件的交流放大器和直流放大器的基本内容并为一章，而将集成运算放大器独立为一章；在脉冲数字电路一章中，以集成电路为主而删去了大部分分立元件的单元电路。另外，半导体器件和电源也分列两章，便于在教学中灵活处理和选用。电机电器控制部分作了较多的删减，只保留了变压器、异步电动机和继电器接触控制的基本知识。直流电机完全删去，教学中需要这方面知识时可列入实验内容结合实验课进行教学。每章后有习题和思考题，书后附有部分习题答案。

由于我们的水平以及时间仓促，书中不妥和错误之处恐不在少数，恳请读者批评指正。

本书由北京航空学院电工教研室李郁芬同志主编。杨宗煦、王邦柱、程志昌、杨念梅同志参加编写。南京航空学院电工教研室孙希鲁、曲珍同志和西北工业大学电工教研室朱宝帆、林溶同志参加了初稿的审查讨论。

编 者

一九七九年八月

711
56
31

目 录

第一章 电路的基本知识

第一节 电路的基本性质	(1)
第二节 电路中的基本元件	(3)
第三节 克希荷夫定律	(11)
第四节 电源	(12)
习 题	(19)

第二章 直流电路

第一节 电阻串联和并联电路	(22)
第二节 电路中各点电位的计算	(26)
第三节 复杂电路的计算	(29)
习 题	(39)

第三章 单相交流电路

第一节 交流电的基本概念	(44)
第二节 正弦交流电的旋转矢量表示法和复数表示法	(48)
第三节 单一参数的正弦交流电路	(54)
第四节 串联交流电路	(59)
第五节 并联交流电路	(66)
第六节 交流电路的频率响应	(70)
第七节 非正弦周期讯号的电路	(82)
习 题	(86)

第四章 三相电路

第一节 三相电源	(91)
第二节 三相电源与负载的连接	(94)
第三节 负载为星形连接的三相电路	(95)
第四节 负载为三角形连接的三相电路	(101)
第五节 三相电路的功率	(103)
习 题	(104)



A644073

第五章 电路的过渡过程

第一节 概 述	(106)
第二节 RC 电路的过渡过程	(108)
第三节 RL 电路的过渡过程	(116)
*第四节 RLC 电路的过渡过程	(120)
习 题	(126)

第六章 交流铁心线圈电路和变压器

第一节 交流铁心线圈电路	(130)
第二节 变压器的作用和基本构造	(133)
第三节 变压器的工作原理	(134)
*第四节 三相电压的变换	(137)
第五节 自耦变压器	(138)
思考题和习题	(139)

第七章 三相异步电动机及其控制

第一节 三相异步电动机的构造	(141)
第二节 异步电动机的工作原理	(142)
第三节 旋转磁场	(143)
第四节 异步电动机的机械特性	(147)
第五节 异步电动机的使用	(149)
第六节 异步电动机的铭牌数据	(152)
第七节 控制电器	(155)
第八节 控制线路的构成和原理图	(160)
第九节 异步电动机的控制线路	(162)
思考题和习题	(164)
附 部分习题答案	(165)

第一章 电路的基本知识

第一节 电路的基本性质

电路主要是由电源、负载和联接导线所组成,如图1-1所示。当电路接通时,电路中就有电流流通,同时电路中发生了能量的转换。

电源(如电池、发电机等)是将非电能转换成电能。负载(如电灯、电炉、电动机等)是将电能转换成非电能。导线是将电源和负载联接起来。

在电路中,负载和联接导线总称为外电路,电源内部则称为内电路。

电源两端具有正极和负极,正端 a 是高电位,负端 b 是低电位,因此 a 、 b 之间产生电场,其方向是由 a 向 b 。电源内部具有移动电荷的力,称为电源力,其方向是从电源负端指向正端,即由 b 向 a 。

在电源内部,电源力反对电场力而使正电荷由低电位移向高电位,这就是电源力对电荷做功,因而使电荷的能量增加,这时非电能转变成电能。电源力把单位正电荷从低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所作的功,或者说单位正电荷从 b 点到 a 点所增加的能量称为电动势(简称电势) E_{ba} ,用公式表示为

$$E_{ba} = \frac{A_y}{q} = \int_b^a \frac{\vec{F}_y}{q} \cdot d\vec{l} \quad (1-1)$$

式中 A_y 为电源力所作的功, $\vec{F}_y$ 为作用于正电荷 q 上的电源力。所以,电动势是衡量电源力作功能力的一个物理量。

电动势的方向(实际方向)为由低电位向高电位,即电位升高的方向,故电动势也称为电位升。

在电源外部,电场力使正电荷由高电位经负载移向低电位,这样电场力对电荷做功,因而使电荷的能量减少,这时电能转变为非电能。电场力把单位正电荷从高电位端 a 移到低电位端 b 所作的功,或者说单位正电荷从 a 点到 b 点所减少的能量,称为该两点间的电压或电位差 U_{ab} ,用公式表示为

$$U_{ab} = \frac{A_d}{q} = \int_a^b \frac{\vec{F}_d}{q} \cdot d\vec{l} = \int_a^b \vec{e} \cdot d\vec{l} \quad (1-2)$$

式中 A_d 为电场力 $\vec{F}_d$ 移动正电荷 q 所作的功, $\vec{e}$ 为电场强度。所以,电压是衡量电场作功能力的一个物理量。

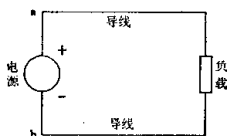


图 1-1

电压的方向(实际方向)为由高电位向低电位,即电位降落的方向,故电压也称为电位降。

电压和电势的单位均采用伏特(V),简称伏。较小的单位为毫伏(mV)、微伏(μV),较大的单位为千伏(KV)。

$$1KV=10^3V$$

$$1V=10^3mV=10^6\mu V$$

电压、电势随时间而变化时,一般用小写字母 u 、 e 表示。

电荷在电路中有秩序的运动时就形成了电流。电流的大小用单位时间内流过导体截面的电荷量来衡量,称为电流强度,用 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-3)$$

式中 dq 是在极短时间 dt 内通过导体截面的微小电荷量。

电流强度简称为电流。这样,电流这个名词不但表示一种物理现象,而且也代表一个物理量。

如果电流不随时间而变化,即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$,这种电流则称为恒定电流,简称直流,直流电流一般用大写字母 I 表示,则(1-3)式可改写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-4)$$

式中 q 是在时间 t 内通过导体截面的电荷量。

直流所通过的电路叫做直流电路。

电流的单位为安培(A),简称安。当电流比较小时采用毫安(mA)、微安(μA)。

$$1A=10^3mA=10^6\mu A$$

电流的方向(实际方向)为正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向。例如图1-2之导线中,带负电的自由电子从 B 端流向 A 端,则电流 i 的方向为从 A 到 B 。

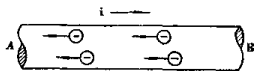


图 1-2

显然,电流通过电源时从负端流向正端,即与电势的方向一致;电流流过负载时为从正端流向负端,即与负载上的电压方向一致。

然而,在电路计算中,尤其在较复杂的电路计算中,往往难于预先判断电路中电流、电压的实际方向。这时为了列出电路的数学方程进行计算,可以人为地规定电流、电压的方向,这个方向称为电流、电压的正方向。当最后算出的结果为正值时,表示该电流或电压的实际方向与正方向一致;如果得出结果为负值,则表示实际方向与规定的正方向相反。

电流、电压的正方向原则上可任意规定,但是在实际电路分析中,应该尽量规定的和实际方向一致,这样可以使计算出的电流、电压值少带负号。

电路理论研究的问题主要有二:

1. 电压、电流关系;
2. 功率传输及分配。

第二节 电路中的基本元件

实际的电路是多种多样的,拿负载来说,就有电炉、变压器、电动机和晶体管等等。所以直接去研究这些实际器件就显得格外烦杂,而且不易看出它们的共性。通过科学的抽象,各种实际的电器元件可以概括为电阻 R 、电容 C 、电感 L 、互感 M 以及电源等几种基本元件。(在电工学中,互感 M 一般不予讨论,当涉及互感问题时,可以采用磁感应方式来解决。)以下分别介绍电阻、电容和电感元件。

一、电阻元件

1. 导体、绝缘体和半导体

各种物质按其结构和成分不同,可分为导体、绝缘体和半导体三种。导体内部具有大量的自由电子,它们在外电场的作用下,能从一处移到另一处,所以具有良好的导电性能。各种金属内部都在不同程度上存在着大量的自由电子,所以金属是导体。相反,绝缘体内部的自由电子极少,所以几乎不能导电。如玻璃、橡皮、云母、塑料、陶瓷、木材、纸张、油漆、干燥的空气等,都属于绝缘体。

导体和绝缘体并不是绝对的,在一定条件下也可以互相转化。例如在高温下金属的导电性能将变得很差;在高电压时,绝缘体会发生击穿现象而较好地导电。

半导体的导电能力则介于导体和绝缘体之间,例如硅、锗、氧化铜等。半导体是发展现代电子技术的重要材料,以后将在电子学中介绍。

2. 导体的电阻

当电流通过导体时,导体对电流会呈现出一定的阻力,这种阻力叫做电阻(R)。在电路中,电阻用图1-3所示的符号代表,其中(a)为固定电阻,(b)为可变电阻。

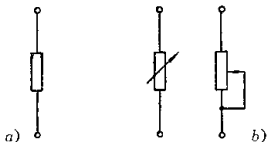


图 1-3

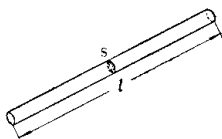


图 1-4

导体电阻的大小主要决定于导体本身的尺寸和材料。均匀导体在一定温度(一般是 20°C)下的电阻可由以下公式来计算

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-5)$$

式中 R 是导体的电阻,单位为欧姆(Ω); l 是导体的长度(图1-4),单位为米(m); S 是导体的截面积,单位为平方毫米(mm^2); ρ 是导体材料的电阻系数(又称电阻率),单位为欧·毫米 2 /米($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。各种材料不同,其电阻系数 ρ 也不同。表 1-1 中列出了

几种常用材料的电阻系数。

表 1—1

材 料 名 称	电阻系数 $\rho(\Omega \text{ mm}^2/\text{m})$	电阻温度系数 $\alpha(1/^\circ\text{C})$
	(20°C)	($0-100^\circ\text{C}$)
银	0.0165	0.0036
铜	0.0172	0.0040
铝	0.0262	0.0042
铂	0.055	0.0052
铂	0.106	0.00389
铁	0.13~0.3	0.0057
黄铜	0.07~0.08	0.002
青铜	0.021~0.4	0.004
锰铜	0.42	0.000006
康铜	0.44	0.000005
镍铬	1.1	0.00015
铝铬铁	1.4	0.0001
碳	10.0	-0.0005

由表中可见，银的电阻系数最小，导电性最好，但因其价贵，故只在关键的地方（如继电器的触点等）才使用，一般则用铜或铝作导电材料。

导体的电阻还与其温度有关。在 $0-100^\circ\text{C}$ 范围内，金属导体的阻值变化可近似地认为与温度变化成正比，其关系式为

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

或

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-6)$$

式中 R_1 和 R_2 分别是温度为 t_1 和 t_2 时的电阻； α 是电阻温度系数，它等于温度变化 1°C 时电阻变化的相对值，其单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。显然，当温度增加电阻随之增加时， α 为正值；当温度增加电阻反而减小时， α 为负值。表1—1中列出了一些常用材料的电阻温度系数。

例1—1：一根铜线，其线径为3毫米，长度为1000米，求它的电阻。

解：先根据线径求截面积

$$S = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} \times 3^2 = 7.06 \text{ mm}^2$$

查表得铜的电阻系数为 $0.0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，则

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0.0172 \times \frac{1000}{7.06} = 2.44 \Omega$$

例1—2：由表1—1中可见，康铜和锰铜的温度系数很小，所以电阻值受温度变化的影响

小,比较稳定,常用来制造标准电阻、可变电阻器以及电工仪表中的分流器和倍压器等。设装配某电表需要一个30欧的电阻器,欲用线径为0.12毫米的康铜线绕制,问需要多长?

解:查表得 $\rho=0.44$, 线的截面可求出为

$$S = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.12^2 = 0.0113 \text{ 毫米}^2$$

则

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{30 \times 0.0113}{0.44} = 0.77 \text{ 米}$$

例1—3:在制造发电机时,可以在其内部放置一个铂电阻丝,以便在发电机运行过程中能测量出发电机内部的温度。设当温度为 20°C 时,铂丝的电阻为49.5欧,当发电机某一运行时刻测出铂丝的电阻为60.9欧。问此时发电机内部温度是多少?

解:已知 $R_1=49.5$ 欧, $R_2=60.9$ 欧, $t_1=20^\circ\text{C}$, 由表查出铂丝的 $\alpha=0.00389$, 由式(1—6)可得

$$t_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1} + t_1 = \frac{60.9 - 49.5}{0.00389 \times 49.5} + 20^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C}$$

3. 电阻上的电压电流关系

当电阻 R 两端加上电压 u , R 中就会有电流 i 通过(图1—5)。对于大多数电阻来讲,

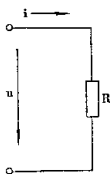


图 1—5

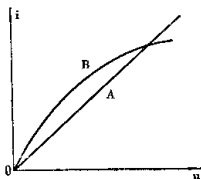


图 1—6

电阻中的电流与其两端的电压成正比,称为欧姆定律,即

$$u = Ri$$

或

$$i = \frac{u}{R} \quad (1-7)$$

式中比例常数 R 为电阻的阻值。

欧姆定律也可写成下式

$$i = Gu \quad (1-8)$$

式中 $G = \frac{1}{R}$, 称为电导, 单位为 $\frac{1}{\Omega}$ ($\frac{1}{\Omega}$)。

电阻上的电压电流关系也可用曲线描述,称为伏安特性。当电阻在不同的电压或电流下能保持常数时,其伏安特性为一过原点的直线,如图1—6中曲线A,这种电阻称为线性电阻。

另外还有一种电阻，其阻值随电压或电流的不同而不同，例如白炽灯中的灯丝电阻就是这样，画出其伏安特性为图1—6中曲线*B*，这种电阻称为非线性电阻。

欧姆定律只适合于线性电阻。对于非线性电阻虽然仍可写(1—7)式，但式中*R*已不是常数，在实用上没有多大意义。

在电路理论部分，我们只讨论线性电阻的电路。

4. 电阻上的电功率和电能

(1) 电功率

功率是指单位时间内所作的功。设在图 1—5 中，*R* 两端的电压为 *u*，*R* 中通过的电流为 *i*。根据电压和电流的定义可以写出 *R* 上的电功率为

$$p = ui \quad (1-9)$$

式中，电压的单位为伏，电流的单位为安，功率的单位为瓦(W)。

由 (1—7) 式，电功率式还可以写为

$$p = i^2 R \quad (1-9a)$$

或

$$p = \frac{u^2}{R} \quad (1-9b)$$

如果电阻上的电压、电流为恒定直流，则电阻上的电功率亦为恒定值，以上电功率公式遂可写为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-10)$$

例1—4：一个灯泡的额定值为220伏、100瓦，这是指灯泡允许施加的最大电压为220伏，此时灯泡的电功率为100瓦。求灯泡此时的电阻和通过的电流。

解：由 $P = UI$

$$\text{得} \quad I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} = 0.455 \text{ 安}$$

$$\text{又由} \quad P = \frac{U^2}{R}$$

$$\text{得} \quad R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484 \text{ 欧}$$

例1—5：一电阻的规格为100欧、1瓦，这是指电阻的阻值为100欧，使用时其电功率不允许超过1瓦。求此电阻允许施加的电压和允许通过的电流。

解：由 $P = \frac{U^2}{R}$

$$\text{得} \quad U = \sqrt{PR} = \sqrt{1 \times 100} = 10 \text{ 伏 (允许施加的最大电压)}。$$

$$\text{又由} \quad P = UI$$

得
$$I = \frac{P}{U} = \frac{1}{10} = 0.1 \text{ 安} = 100 \text{ 毫安 (允许通过的最大电流)}。$$

(2) 电能量

电能量是电功率与时间的乘积。设电阻上的电功率不随时间而变，则电能量可以写为

$$W = Pt = UI t \quad (1-11)$$

式中 P 的单位为瓦， t 的单位为秒，则电能量的单位为瓦·秒，或叫焦耳。实用上，电功率往往很大，用电时间也往往很长，故计算电能量时常采用较大单位。即电功率单位用千瓦，时间单位用小时，则电能量单位为千瓦·小时，或叫度。

例1—6：一台电动机每天运行六小时，平均电功率为2.8千瓦，问一个月（30天）共用多少电能？

解： $P = 2.8 \text{ 千瓦}$ ， $t = 30 \times 6 = 180 \text{ 小时}$ ，故一个月共用电能

$$W = Pt = 2.8 \times 180 = 504 \text{ 千瓦} \cdot \text{小时} = 504 \text{ 度}$$

(3) 电流的热效应

电流通过电阻时会产生热量，这种现象称为电流的热效应。电流热效应在工业上得到广泛的应用，例如电阻炉就是把电能转化为热能的热电设备。但电流热效应在一些场合也产生有害的作用，如电流通过导线时，导线电阻将电能转化为热能，使导线温度升高，这种热量希望尽量减少。

设电阻 R 中通过电流 I ，其功率为 $P = I^2 R$ ，根据能量守恒原理，产生热的功率必然也等于 P ，所以这个公式也是热功率的计算式。习惯上热能的单位用卡(Cal)来表示，1瓦功率约等于每秒0.24卡，所以热功率式也可以写成

$$P = 0.24 I^2 R \text{ (卡/秒)}$$

二、电容元件

1. 电容的概念

电容器是由两块互相绝缘的导电极板所构成。电容器的基本作用是存储电荷。在电工中，采用电容 C 来表征一个电容器存储电荷的能力。当电容器上电压为 u 时（图1—7），电容器储存的电荷量 q 与电压 u 具有一定的关系。对大多数电容器而言， q 与 u 成正比，其比例系数即为其电容 C ，用公式表示为

$$q = Cu \quad (1-12)$$

这种电容称为线性电容。如果 q 与 u 不成线性比例， C 就不是常数，这种电容称为非线性电容。在电工学中只讨论线性电容。

电容 C 的大小决定于它的几何参数和极板间绝缘体的性质。平板电容器的电容可由下式表示。

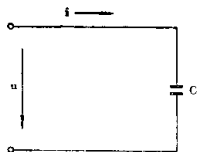


图 1—7

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1-13)$$

式中 ϵ 为表示绝缘体性质的介电常数, S 为极板有效面积, d 为极板间的距离。

这个式子我们并不一定用来进行计算,但是它表示出 C 的大小与极板面积成正比而与极板间距离成反比,这个概念是很有用的。

电容的单位为法拉 (F), 实用上太大, 通常采用微法 (μF)、微微法 (PF)。

$$1\mu F = 10^{-6} F$$

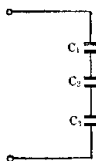
$$1PF = 10^{-6} \mu F$$

实用的电容器种类很多, 例如按其极板间填充的绝缘材料不同可分为云母电容器、聚氯乙稀电容器、纸介电容器、电解电容器等, 按其电容量大小是否可变可分为固定电容器、可调电容器、半可调 (微调) 电容器等等。

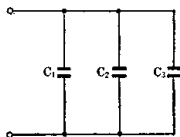
使用电容器时, 除了其电容 C 外, 还须注意其额定电压值。在使用过程中, 电容器上施加的电压不能超过此额定值, 否则电容器可能被击穿。此外, 电解电容器的两端有 “+”、“-” 极性 (标在外壳上), 使用时不能接错, 否则会损坏。

实用上, 常常将几个电容器串联或并联使用, 图1-8(a)和(b)分别为三个电容器 C_1 、 C_2 、 C_3 串联和并联。当 n 个电容串联时, 总电容的倒数等于各个电容倒数之和, 即

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \end{aligned} \quad (1-14)$$



(a)



(b)

图 1-8

当 n 个电容并联时, 总电容等于各个电容之和, 即

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i \quad (1-15)$$

2. 电容上的电压电流关系

图1-7中, 当极板上的电荷量 q 或电压 u 发生变化时, 电路中就会产生电流。

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-16)$$

此式称为电容的性能方程。它说明电容器通过的电流与电容器两端电压的变化率成正比。电容器两端电压变化愈快, 即 $\frac{du}{dt}$ 的值愈大, 电容器的电流 i 也愈大; 反之, 当电容器两端电压

为稳定直流时, $\frac{du}{dt} = 0$, 则电流为零, 电容器相当于开路。因此, 在分析直流电路的稳定状态时, 如果电路中有电容器, 只要把含有电容器的支路视为开路就可以了。

3. 电容器的电场能量

将式 (1-16) 两边乘以 $u dt$ ，并积分之，可得电容器极板间的电场能量为

$$W_C = \int_0^u u i dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-17)$$

这说明电容上电压增大时，其电场能量也增大，这时电源对电容进行充电；相反，电容上电压减小时电场能量也减小，电容则进行放电。所以，电容器是一个可以贮存能量的元件，称为储能元件。

三、电感元件

1. 电感的概念

当一个线圈中通过电流时，就要建立起一定的磁场，这时线圈内将穿过一定的磁通（图1-9）。设线圈的匝数为 N ，线圈内的磁通量为 φ ，则 N 与 φ 的乘积代表与线圈交链的全磁通，称为磁链，用 ψ 表示，即

$$\psi = N\varphi \quad (1-18)$$

为了描述一个线圈产生磁链的能力，我们引入电感 L 这个参数，它的定义是线圈中通过每单位电流所产生的磁链，用公式表示为

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\varphi}{i} \quad (1-19)$$

式中 i 为通过线圈中的电流，单位是安； ψ 和 φ 的单位是伏秒，称为韦伯 (Wb)，简称韦。则由式 (1-19) 可知

$$L \text{ 的单位} = \frac{\text{伏秒}}{\text{安}} = \text{欧} \cdot \text{秒}$$

这个单位称为亨利 (H)，简称亨。

电感 L 与线圈的尺寸、匝数以及附近的介质的磁性能有关。当线圈中没有铁磁物质时，电感 L 是一个常数，即磁通（或磁链）与电流成线性比例，这种电感称为线性电感。如果线圈中具有铁磁物质时，磁通与电流的关系则是非线性的，这时电感将随着线圈中的电流大小不同而不同。在电路理论中，我们主要分析线性电感。

实际的线圈除了有一定的电感外，还有一定的导线电阻，称为线圈的内电阻。当内电阻很小到可以相对忽略不计，这时线圈可认为只具有纯电感。电路理论中所说的电感元件，就是指这种纯电感。

2. 电感上的电压电流关系

图1-10(a)为一电感线圈，图(b)为其代表符号。假定它是一个纯电感。当电感线圈中通过的电流发生变化时，由式 (1-19) 可知，将引起线圈内磁通发生变化，则线圈中将产生自感电动势 e_L 。根据电磁感应定律，自感电动势为

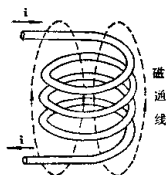


图 1-9

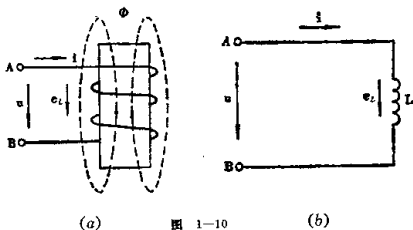


图 1-10

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} = - \frac{dLi}{dt}$$

对于线性电感而言, L 为常数, 故上式又可写为

$$e_L = - L \frac{di}{dt} \quad (1-20)$$

式中的负号是为了确定感应电动势的方向而加的, 它在一定的正方向下才有意义。图 1-10 中各个物理量的正方向是这样规定的: 电源电压 u 的正方向可以任意规定, 图 1-10 中规定为向下, 即 A 端电位高, B 端电位低; 电流 i 的正方向规定为与电压的正方向一致; 电流产生的磁通 Φ 的正方向与电流的正方向之间符合右螺旋定则; 感应电动势 e_L 的正方向与磁通的正方向也符合右螺旋定则。因此, e_L 和 i 的正方向应该一致。

现在我们来讨论一下自感电动势的实际方向。在图 1-10 中, 设电流的实际方向与规定的正方向一致, 当电流增加时, $\frac{di}{dt}$ 为正, 由式 (1-20) 可知, e_L 为负值, 表示自感电动势的实际方向与其正方向相反, 也就是与电流的实际方向相反, 反对电流增加; 反之, 当电流减小时, $\frac{di}{dt}$ 为负, 则 e_L 为正, 表示自感电动势的实际方向与正方向一致, 也就是与电流的实际方向一致, 反对电流减小。由此可见, 自感电动势总是企图阻碍线圈中电流的变化。

因为从 A 到 B 的电动势 e_L 与从 A 到 B 的电压 u 二者必然大小相等而方向相反, 即 $u = -e_L$, 故写出电感中电压电流的关系为

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-21)$$

(1-21) 式称为电感元件的性能方程。在电路理论中, 它和欧姆定律 (式 1-7) 以及电容的性能方程 (式 1-16) 并列三个基本方程, 分别描述了电路基本元件 R 、 C 、 L 的电压电流关系。

从电感的性能方程可以看出, 电感上的电压决定于电流的变化率。电流变化越快, 电感上的电压越大; 反之, 当电感中电流恒定, 则电感上电压为零。所以, 电感对于稳定直流来说, 相当于短路。

3. 电感中的磁场能量

当电感中电流增加时, 电感上产生的电动势是阻碍电流增长的。因此, 为了驱使电流在

电感中流动，电源就要克服此电动势作功，这部分功转变为磁场能储存起来；当 L 中电流减小时，感应电动势起阻止电流减小的作用，磁场能转换为电能放出来。由此可见，电感也是一个储能元件，不消耗电能。

将式 (1-21) 两边乘以 idt ，并积分之，可得电感中的磁场能为

$$W_L = \int_0^i u dt = \int_0^i L \cdot i di = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1-22)$$

第三节 克希荷夫定律

克希荷夫定律也叫基尔霍夫定律，它是分析电路问题的基本定律，适用于直流电路、交流电路以及含电子元件的非线性电路等所有电路。本节主要以直流电路为例来说明。

先介绍几个名词：

支路：在电路中，每一个没有分岔的部分称为一条支路。如果支路中没有电源，该支路称为无源支路；如果支路中含有电源，则称为含源支路。

图 1-11 电路中共有六条支路，其中 AD 、 CD 、 AC 三条支路是含源支路，其它 AB 、 BC 、 BD 是无源支路。

节点：三个或三个以上支路相联接的点称为节点。

图 1-11 中共有 A 、 B 、 C 、 D 四个节点。

回路：它是指由一个或几个支路所组成的闭合电路。图 1-11 中， $ABDA$ 是一个回路，它由 R_1 支路、 R_5 支路和 R_4E_4 支路（共三条支路）所组成。其它 $ABCD$ 、 $BCDB$ 等也都是回路。

克希荷夫定律分第一定律和第二定律。

一、第一定律

克希荷夫第一定律是说明电路中节点的电流关系。

根据电流的连续性，即回路中任何一点（包括节点在内）均不能发生电荷堆积，因此第一定律指出：流入一个节点的电流之和应等于流出该节点的电流之和，即

$$\sum I_{in} = \sum I_{out} \quad (1-23)$$

在运用第一定律列节点电流方程时，先要规定电流的正方向。对已知电流可按已知的实际方向规定，对未知电流其方向可任意规定。如果根据所列出的方程计算出电流是正的，表示电流的实际方向与规定的正方向相同；如算出电流是负的，则表示实际方向与正方向相反。

例 1-7：图 1-11 中，已知 $I_1=16$ 毫安， $I_2=12$ 毫安， $I_6=25$ 毫安，它们的方向如图中所示。求其余各支路中电流 I_3 、 I_4 、 I_5 。

解：任意规定 I_3 、 I_4 、 I_5 的正方向如图中所示。

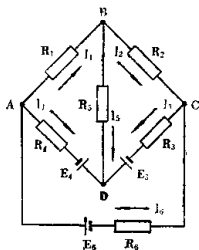


图 1-11

在节点 A ，由第一定律可写出

$$I_6 = I_1 + I_4$$

得出 $I_4 = I_6 - I_1 = 25 - 16 = 9$ 毫安

同样的，分别在节点 B 和 C 由第一定律写出

$$I_1 = I_2 + I_5$$

$$I_2 = I_3 + I_8$$

所以 $I_5 = I_1 - I_2 = 16 - 12 = 4$ 毫安

$$I_3 = I_2 - I_6 = 12 - 25 = -13 \text{ 毫安}$$

式中 I_3 的值为负，表示 I_3 的实际方向与规定的正方向相反。

二、第二定律

克希荷夫第二定律是描述电路中任一回路中的电压关系。它可以叙述为：对电路中任一回路，如果从回路中任意一点出发，按顺时针或反时针向循行一周，回路中各电动势的代数和等于各电阻上电压的代数和。用公式表达为

$$\sum E = \sum (IR) \quad (1-24)$$

式中规定：凡电动势的正方向与循行回路的方向一致时取正号，相反时则取负号；凡电流的正方向与循行回路的方向一致时，该电流在电阻上产生的电压取正号，相反时则取负号。

仍以图1-11的电路为例，取 $ABDA$ 回路，按顺时针向循行一周（也可按反时针向，列出的方程相同），则有

$$-E_4 = I_1 R_1 + I_6 R_6 - I_4 R_4$$

克希荷夫第二定律的正确性是显然的。因为电动势的方向是电位升高的方向，电压的方向是电位降低的方向。当从电路中一点出发循行一周又回到原来的出发点时，电位应该没有任何变化。这就意味着，在循行一周的过程中，若某些地方电位升高了，则另一些地方电位必然相应的降低，也就是说电位升必然等于电位降，只有这样，才能使回到出发点时电位不变。

第四节 电 源

电源的作用是供出电能，使电路中产生电流。电源有两种表示方法：一种用电压表示，称为电压源；一种用电流表示，称为电流源。

一、电压源

1. 理想电压源——恒电压源

一个电源，当不计它的内电阻时，电源供给外电路的电压与电源的电动势相等，即 $U = E$ (图1-12)。电动势总是常数（交流电动势总是时间的固定函数），与流过它的电流无

关, 所以当外电路状态改变从而使电流改变时, 电源供出的电压 U 总是恒定。在这种情况下, 对于外电路而言, 电源可以用一个恒定电压来描述, 称为恒压源或理想电压源。

恒压源具有以下性质:

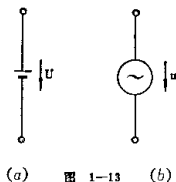
(1) 恒压源两端电压与外电路状态无关。外电路状态改变时, 只影响恒压源电路中电流改变, 而电源两端电压则保持恒定。

(2) 当电源电动势为零时, 电源两端电压亦为零, 这时恒压源相当于短路。

(3) 恒压源两端不能用导线短接。

(4) 恒压源可以串联, 但不同值的恒压源不能并联。

恒压源的符号如图1-13所示, 其中(a)为直流恒压源, (b)为交流恒压源。



(a) 图 1-13 (b)

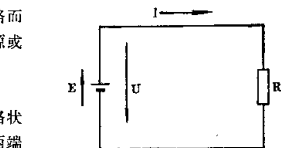


图 1-12

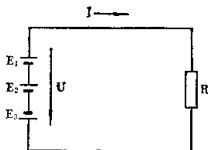


图 1-14

例1-8: 图 1-14 中为三个直流恒压源串联, $E_1 = 5$ 伏, $E_2 = 3$ 伏, $E_3 = 3$ 伏, $R = 1$ 千欧。求电流 I 。

解: 先由克希荷夫第二定律求串联等效电源电压 U

$$U = E_1 + E_2 + E_3 = 5 \text{ 伏}$$

则
$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{1 \times 10^3} = 5 \times 10^{-3} \text{ 安} = 5 \text{ 毫安}$$

2. 电压源

实际上, 电源内部总有一定的电阻, 因此电源供出的电压将随外电路状态改变而发生变动。所以, 实际的电源与理想电源并不同, 二者的差别是实际电源有内阻而理想电源则不考虑其内阻。

实际的电压源可以用一个恒定电动势 E 和内电阻 R_i 相串联来表示, 如图1-15的虚线框中所示。它和电阻 R 构成回路时, 供出的电压、电流设为 U 、 I ,

$$I = \frac{E}{R_i + R} \quad (1-25)$$

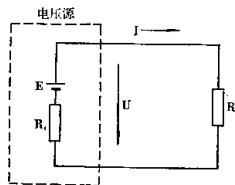


图 1-15