

高等学校教材

电工学 ①

DIANGONG
JISHU 1988 年修订本

电工技术

肖广润 周惠领 主编

华中理工大学出版社



高等学校教材

电 工 技 术

电 工 学 I

(1988年修订本)

肖广润 周惠领 主编

华中理工大学出版社

内 容 简 介

本书是在《电工技术基础》(电工学 I) 第一版的试用基础上, 并按照一九八七年国家教委批准的高等工业学校《电工技术(电工学 I) 课程教学基本要求》进行修订的。

本书共十二章, 包括: 电路与系统的概念、分析方法、线性网络的暂态响应、电路正弦稳态响应、电路的频率响应、三相电路、磁路与变压器、常用交流电动机、三相异步电动机的继电器接触器控制、直流电机、变换器与控制电机、电工测量与安全用电技术等。每章附有小结、习题及答案。电气器件及电路图形文字符号采用国家统一的技术标准。

本书与电子技术(电工学 II) 配套作为高等工业学校相应的课程(原电工学)的教材, 也可供工程技术人员参考。

高等学校教材

电 工 技 术

电 工 学 I

(1988年修订本)

肖广润 周惠领 主编

责任编辑 叶翠华

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 17 字数: 388 000

1985年10月第1版 1988年7月第2版 1988年7月第3次印刷

印数: 16 001-26 000

ISBN 7-5609-0187-5/TM·14

定价: 3.60 元

序 言

本书是在《电工技术基础》(电工学 I) 第一版的试用基础上, 并按照一九八七年国家教育委员会批准的高等工业学校《电工技术(电工学 I) 课程教学基本要求》进行修订的。同时, 根据国家标准局关于在图书刊物、技术文件中采用《国标》的规定, 我们对本书所涉及到的电机电器、电子器件及电路图形文字符号均采用了国家统一的技术标准。

本书与电子技术(电工学 II) 配套作为高等工业学校电工技术(电工学 I) 和电子技术(电工学 II) 课程的教材。教学时数(包括实验), 前者为 60~70 学时; 后者亦为 60~70 学时。

电子技术(电工学 II) 的内容包括: 二极管整流电路、晶体三极管放大电路、反馈放大电路与功率放大电路、集成运算放大器的电路基础、集成运算放大器的应用、晶闸管电路、实用电子线路的分析、数字电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、电子测量等十一章。每章附有小结、习题及答案。

本书是在多年试用的基础上总结提高的, 它有以下几个方面的特点: ①提高了起点, 加强了系统的分析方法; ②精选了传统的内容, 增加了新知识结构; ③教材体系更为严谨, 教材内容符合本课程的教学要求, 且便于读者自学; ④理论联系实际, 有利于实际技能的提高; ⑤图形文字符号采用国家标准。

本书由肖广润(副教授)、周惠领(副教授)担任主编。参加编写的还有钟声沅(教授)、刘明亮(副教授)、翁良科(高级工程师)、周鑫霞(讲师)、徐士毅(讲师)等同志。本书在编写和试用的过程中得到邹锐(电工理论教授)、黄铁侠(无线电技术教授)、胡伟轩(电工学及微机应用教授)及本教研室其他同志的支持和帮助, 在此表示感谢。

本书的内容虽有所提高, 但由于编者水平所限, 必然存在缺点, 恳请使用本书的师生和其他读者予以批评指正, 以便不断提高。

编 者

1988年元月于华中理工大学

目 录

第一章 电路与系统的概念、分析方法

1-1 电路	(1)
1-1-1 电路的组成与功能	(1)
1-1-2 电路变量——电流、电压	(1)
1-1-3 电路元件——电阻、电容、电感	(4)
1-1-4 电路的工作状态	(8)
1-2 系统的定义·等效网络	(10)
1-3 电压源与电流源	(12)
1-3-1 电压源	(12)
1-3-2 电流源	(13)
1-3-3 电压源与电流源的等效变换	(14)
1-4 线性系统的基本性质——比例性与叠加性	(16)
1-5 克希荷夫定律	(18)
1-5-1 克希荷夫电流定律	(19)
1-5-2 克希荷夫电压定律	(19)
1-6 支路电流法	(21)
*1-7 节点电压法	(22)
1-8 有源二端网络的等效变换	(24)
1-8-1 戴维宁定理	(25)
1-8-2 诺顿定理	(26)
1-9 电压、电流和功率的传递	(28)
1-10 受控电源	(31)
小结	(34)
习题	(37)

第二章 线性网络的暂态响应

2-1 线性网络的暂态过程与换路定则	(42)
2-2 线性网络的暂态响应(经典法)	(43)
2-2-1 零输入响应	(44)
2-2-2 零状态响应	(47)
2-2-3 电路的全响应	(49)
2-3 求一阶电路全响应的简捷法(三要素法)	(50)
2-4 电路的时间常数对信号波形的影响	(52)
2-4-1 微分电路	(52)
2-4-2 积分电路	(53)
小结	(54)

习题	(55)
第三章 电路的正弦稳态响应	
3-1 正弦电量的表示方法	(58)
3-1-1 正弦交流电的基本概念	(58)
3-1-2 正弦电量的矢量表示法	(60)
3-1-3 正弦电量的相量表示法	(61)
3-2 理想元件的正弦稳态电路	(64)
3-2-1 电阻电路	(64)
3-2-2 电容电路	(65)
3-2-3 电感电路	(67)
3-3 RLC 串联电路与并联电路	(70)
3-3-1 RLC 串联电路·复阻抗	(70)
3-3-2 RLC 并联电路·复导纳	(74)
3-4 复阻抗混联电路	(78)
3-5 正弦稳态电路的功率	(82)
3-5-1 瞬时功率	(82)
3-5-2 有功功率、无功功率和视在功率	(82)
3-5-3 功率因数的提高	(84)
小结	(86)
习题	(88)
第四章 电路的频率响应	
4-1 非正弦周期信号的谐波分解	(91)
4-2 低通电路	(95)
4-3 高通电路	(98)
4-4 谐振与带通电路	(99)
4-4-1 RLC 串联电路的频率响应	(99)
4-4-2 RLC 并联电路的频率响应	(103)
小结	(105)
习题	(106)
第五章 三相电路	
5-1 三相电源	(108)
5-2 三相负载的联接	(109)
5-2-1 星形联接 (Y)	(109)
5-2-2 三角形联接 (Δ)	(113)
5-3 三相电路的功率	(114)
5-4 不对称三相电路的概念	(115)
小结	(118)
习题	(118)
第六章 磁路与变压器	
6-1 磁路的基本概念和基本定律	(120)

6-2	直流电磁铁.....	(123)
6-3	交流铁芯线圈电路与交流磁路.....	(125)
6-4	变压器.....	(130)
小结		(137)
习题		(138)

第七章 常用交流电动机

7-1	三相异步电动机的基本结构与铭牌数据.....	(140)
7-2	三相异步电动机的工作原理.....	(143)
7-3	三相异步电动机的负载运行.....	(146)
7-4	三相异步电动机的起动.....	(151)
7-5	三相异步电动机的调速.....	(155)
7-6	三相异步电动机的制动.....	(157)
7-7	三相异步电动机的选择.....	(159)
*7-8	单相异步电动机.....	(160)
*7-9	同步电机.....	(163)
小结		(165)
习题		(167)

第八章 三相异步电动机的继电器接触器控制

8-1	常用控制电器与保护电器.....	(168)
8-1-1	手动控制电器与行程开关.....	(168)
8-1-2	交流接触器.....	(170)
8-1-3	继电器.....	(171)
8-2	三相鼠笼式电动机直接起动的控制.....	(175)
8-2-1	单方向旋转的控制.....	(175)
8-2-2	鼠笼式电动机的正反转控制.....	(178)
8-2-3	点动控制.....	(178)
8-2-4	自动往复.....	(179)
8-3	三相鼠笼式电动机降压起动的控制.....	(180)
8-3-1	Y- Δ 降压起动的控制.....	(180)
8-3-2	自耦变压器降压起动的控制.....	(180)
8-4	线绕转子异步电动机起动的控制.....	(181)
8-4-1	转子电路中串接起动电阻的控制.....	(181)
8-4-2	应用频敏变阻器起动线绕转子异步电动机的控制.....	(182)
8-5	三相鼠笼式电动机制动的控制.....	(183)
8-5-1	能耗制动的控制.....	(183)
8-5-2	反接制动的控制.....	(183)
小结		(184)
习题		(186)

*第九章 直流电机

9-1	直流电机的基本结构.....	(188)
-----	----------------	-------

9-2 直流电机的工作原理.....	(189)
9-2-1 直流发电机的工作原理.....	(189)
9-2-2 直流电动机的工作原理.....	(190)
9-3 直流电机的电枢电势与电磁转矩.....	(191)
9-4 直流发电机.....	(192)
9-4-1 他励发电机.....	(192)
9-4-2 并励发电机.....	(194)
9-5 并励直流电动机的运行.....	(196)
小结	(202)
习题	(202)
*第十章 变换器与控制电机	
10-1 自动控制的基本概念.....	(204)
10-2 变换器.....	(205)
10-2-1 无源变换器.....	(205)
10-2-2 有源变换器.....	(208)
10-3 控制电机.....	(210)
10-3-1 直流测速发电机.....	(211)
10-3-2 伺服电动机.....	(211)
10-3-3 步进电动机.....	(213)
10-4 自动调节系统的基本原理.....	(214)
第十一章 电工测量	
11-1 测量方法与测量误差.....	(216)
11-2 测量仪表的功能和性能.....	(219)
11-3 测量数据的处理.....	(222)
11-4 模拟式直读仪表.....	(225)
11-5 电流、电压和功率的测量.....	(236)
*11-6 电桥测量电路.....	(239)
11-7 测量仪表的选择.....	(244)
第十二章 安全用电技术	
12-1 电流对人体的伤害.....	(248)
12-2 保护接地与保护接零.....	(250)
12-3 防雷.....	(253)
12-4 静电的防护.....	(257)
12-5 电气防火与防爆.....	(258)
习题答案	(260)
文字符号和下标符号意义	(262)

第一章 电路与系统的概念、分析方法

电路分析是研究各种电信号作用于电路时的电磁现象以及电路的一般规律和分析计算方法。

本章首先在物理学的基础上介绍电路与系统的基本概念、线性系统的基本性质。接着重点讨论线性电阻网络的几种普遍的计算方法，以及有源网络的等效变换和功率传递问题。最后简单地介绍受控源电路。

本章以直流电阻网络为研究的主要对象，它所涉及到的基本理论和方法具有普遍意义。

1-1 电 路

本节内容是为读者自学提供方便而编写的。这些内容虽在物理学中讲过，但所叙述的重要概念和公式，将在今后的讨论中经常用到，因此有重温的必要。

1-1-1 电路的组成与功能

电路是由一些物理器件按一定方式连接的组合。它一般由电源、负载和中间环节三部分组成。电源是产生电能和电信号的装置；如各种发电机、稳压电源以及信号发生器等装置。负载是取用电能，并转换成其它能量形式的装置或器件，例如电灯、电动机等用电设备。电源与负载之间的中间环节是传送、控制电能或电信号的部分，它包括有连接导线、控制电器（如刀开关）和保护电器（如熔断器）等等。

在现代技术中，电路用来完成控制、计算、通讯、测量以及发配电等方面的任务。各种形式的组合电路，具有各式各样的功能。如最常见的照明电路和动力电路是把电能转换成光能、热能和机械能；计算机电路是将数字的输入信息加以运算，产生数据输出形式的新信息等等。总而言之，电路的功能就是实现能量的输送、转换和控制；或者实现信息的传递、处理和贮存。

电路分析的直接对象并不是那些实用的电磁器件所构成的具体电路，而是从大量实用电路中抽象出来的电路模型。模型是由表征一些简单的物理性质的理想元件所组成，并受一定条件约束的。例如理想电阻元件(R)是表示电能转换成热能的器件；理想电压源(U_S)是表示产生恒定电压的装置；实际电压源是理想电压源 U_S 和内电阻 R_S 串联的组合模型。图1-1-1是一个简单电路模型。对电路模型(简称电路)的分析就可以知道实际电路的功能。

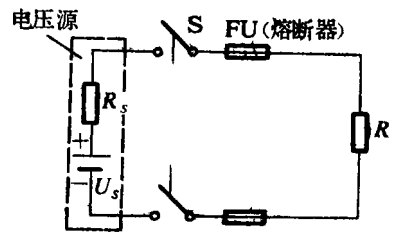


图1-1-1 电路图

1-1-2 电路变量——电流、电压

电流和电压是衡量电路性能的两个最基本的物理量，也是分析计算电路的两个基本变量。

在电场力或其它外力（电磁力、化学力等）作用下，带电质点（电子或离子）作有规则

的定向运动便形成电流。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。电流的大小是以单位时间内通过导体截面的电荷量来衡量的，即

$$i = \frac{dq}{dt}, \tag{1-1-1}$$

其中 dq 是在时间 dt 内通过导体横截面的电量。

如果电流的大小和方向都不随时间变化，则称为恒定电流，简称直流，用大写字母 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化，则称为交流电流，用小写字母 i 表示。电流的单位是安培，简称安(A)；还可用毫安(mA)、微安(μA)作单位，视计量大小而定。

在电场力作用下电荷移动形成电流的过程，也就是电场对电荷做功的过程。衡量电场做功的能力的物理量是电压，用字母 U 或 u 表示(一般用 U 表示直流电压， u 表示交流电压)。电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所作的功，定义为该两点间的电压 U_{ab} ，双下标字母的次序表示电压的方向，也常用箭头标在电路图中，如图 1-1-2 所示。

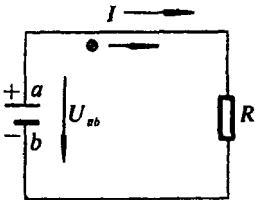


图1-1-2 电流与电压

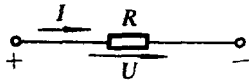


图1-1-3 电流和电压相关联的参考方向

电路中任意两点间的电压也就是此两点电位之差。若 a 点的电位用 U_a 表示， b 点的电位用 U_b 表示，则 a 、 b 两点间的电压可表示为：

$$U_{ab} = U_a - U_b. \tag{1-1-2}$$

如果 a 点为高电位端(用“+”号表示)， b 点为低电位端(用“-”号表示)，则电压 U_{ab} 为正值，即规定从高电位端到低电位端为电压的正方向。

我们分析和计算电路时，必须事先规定电流或电压的参考方向，用箭头标在电路图上(电压的参考方向常在元件或电路两端标出“+”、“-”极性)，以最后答案的正、负值来确定它们的实际方向(或极性)。若为正值，其实际方向(或极性)与参考方向(或极性)一致；若为负值，则其实际方向(或极性)与参考方向(或极性)相反。由于在直流电路中电流和电压的方向总是相同的，因此，采用所谓相关联的参考方向(即电流和电压的参考方向相同)，如图 1-1-3 所示。

电压和电位的单位都是伏特，简称伏(V)。还可用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)作单位，也视计量大小而定。

因为电路中某一点的电位是相对于参考点而言的，因此，计算电位时要事先在电路中任选一点作为参考点，并规定参考点的电位为零，在电路图中用接地符号“⊥”表示。在工程上，有些机器的机壳接地，就是把机壳作为电位的参考点。但有些电子设备并不与大地相接，而是将许多元件接到一个公共线上，把这个公共线作为参考点，称之为“地线”。

在图 1-1-4 所示的电路中，如果我们选 d 为参考点(即 $U_d = 0$)，则 a 、 b 点的电位为：

$$\begin{aligned} U_a &= U_a - U_d = U_{ad} = U_{S1}, \\ U_b &= U_b - U_d = U_{bd} = -R_1 I + U_{S1} \end{aligned}$$

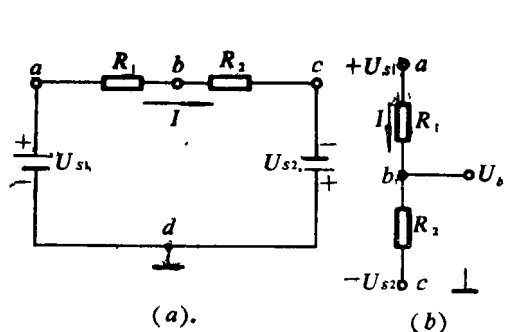


图1-1-4 电位与电路的简化画法

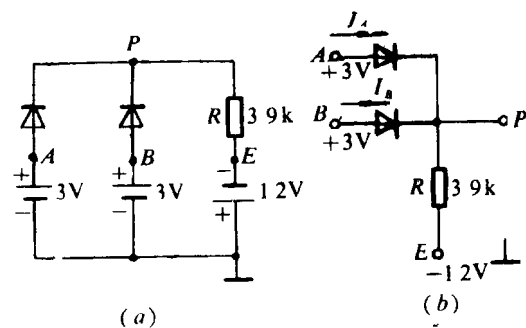


图1-1-5 电路的简化画法
(a)原电路图; (b)简化图

而电压 $U_{ab} = U_a - U_b = U_{S1} - (-R_1 I + U_{S1}) = R_1 I$ 。

如果选 a 为参考点 (即 $U_a = 0$)，则 b 点的电位为

$$U_b = U_b - U_a = -R_1 I,$$

而电压 $U_{ab} = U_a - U_b = 0 - (-R_1 I) = R_1 I$ 。

由上面分析可知，电路中某一点的电位等于该点与参考点之间的电压。电路中任意两点间的电压是一定的，它与参考点的选择无关。但是各点的电位则是相对的，视参考点而定。只有在参考点选定之后，电路中各点的电位才有确定的数值。

考虑到电子电路中一般都把电源、信号输入和输出的公共端联在一起接地，而且电源也不再用电池的符号来表示，而改为标出其电位的极性与数值，且与“地”相联的电源的一极不再标出，如图 1-1-5 (b) 所示。按这种画法，图面更清晰，作图更简便，是电子电路中一种常用的绘图方法。

若电路中的电压和电流为已知，则功率可以计算出来。功率用字母 P 表示，有

$$P = UI. \quad (1-1-3)$$

功率是一个标量。但是，考虑到电流和电压相关联的参考方向，功率可能出现正值或负值。如电路图 1-1-6，其中方框代表电路元件，电路中电流和各元件端电压的参考方向 (或极性) 如图示。若计算结果，当 I 、 U_2 和 U_3 为正值 (即实际方向与参考方向相同)，而 U_1 为负值 (即实际方向与参考方向相反) 时，则对元件 2 和元件 3 算出的功率为正值 (因电流与电压为相关联的方向)，说明是电场力对电荷做功，它们是消耗电功率的负载；对元件 1 算出的功率为负值 (因电流与电压为非关联的方向)，说明是外力对电荷做功，则元件 1 是产生电功率的电源。

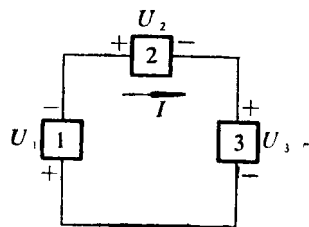


图1-1-6

若电压的单位为伏，电流的单位为安，则功率的单位为瓦特，简称瓦 (W)。还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 单位。

功率 P 是能量的平均转换率。对发电设备来说，功率是单位时间内所产生的电能；对用电设备来说，功率是单位时间内所消耗的电能。如果用电设备的功率为 P ，使用的时间为 t ，则该用电设备消耗的电能为

$$W = Pt = UIt.$$

(1-1-4)

若功率的单位为瓦，时间的单位为秒，则电能单位为焦耳(J)。若功率的单位为千瓦，时间的单位为小时，则电能单位为“千瓦·小时”(kW·h)，或称为“度”。一度电是一千瓦小时的电能。

电气设备的铭牌上都标出电流、电压和功率的限额，以表示其正常工作条件和工作能力，称为电气设备的额定值。额定值是制造厂对设备的使用规定，使用者务必注意。尤其重要的是额定电流的概念，它是指电气设备在一定的环境温度下长期连续工作时或在规定的时间内，所容许通过的最大电流。当电气设备在额定值运行时，称为额定运行状态，简称满载；若超额定值运行时，称为过载。电气设备在额定状态运行时，效率高、寿命长、安全可靠。否则，会降低设备的使用寿命，甚至会损坏设备。

【例1-1】电路如图1-1-7所示，设a点电位为零，试确定b点、c点的电位，并求电流 $I = ?$

解：因bc支路不构成回路，故 $I = 0$ 。设左边回路中电流为 I_1 ，可求得

$$I_1 = \frac{10}{2+3} = 2 \text{ A.}$$

因 $U_a = 0$ ，则

$$b \text{ 点的电位 } U_b = U_b - U_a = 2 \times 3 = 6 \text{ V,}$$

$$c \text{ 点的电位 } U_c = U_{cb} + U_b = 2 + 6 = 8 \text{ V.}$$

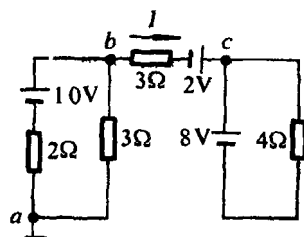


图1-1-7 例1-1

1-1-3 电路元件——电阻、电容、电感

一般而言，电路中除了产生电能的过程以外，还普遍存在着三种基本的能量转换过程，即电能的消耗，电场和磁场能量的储存过程。用来表征电路中上述三种物理特性的参数称为电路参数（或元件），并分别称为 R 、 C 及 L 参数（或元件）。电阻（ R ）是表征电路中消耗电能特性的电路参数；电容（ C ）是表征电路中储存电场能量特性的电路参数；电感（ L ）是表征电路中储存磁场能量特性的电路参数。因此，我们把电阻、电容和电感看成各代表一种参数的电路元件，即所谓单一参数元件（或理想元件）。若元件的值是恒定不变的常数，即不随电流、电压和频率变化而变化，则称为线性元件。

任何一个实际的电路都可以抽象成由理想元件组合的电路模型。为了深入研究电路的功能，必须对组成电路的基本元件作进一步的分析。

（一）电阻元件

如前所述，电阻（ R ）是一种将电能转换成热能的耗能元件。在图1-1-8所示的相关联参考方向下，电阻两端的电压和通过电阻的电流之间的关系：

$$i = \frac{u}{R}, \quad (1-1-5)$$

称为电阻元件的特性方程式，即欧姆定律。其中 R 为电阻元件的参数。电阻的倒数称为电导，用字母 G （或 g ）表示，即

$$G = \frac{1}{R}, \quad (1-1-6)$$

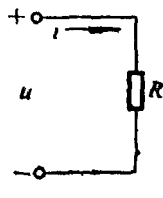


图1-1-8 电阻元件

电阻的单位是欧姆，简称欧（ Ω ）；电导的单位是西门子，简称西（S）。

有了电导这个概念后, 式(1-1-5)就可写成如下形式:

$$i = Gu, \quad (1-1-7)$$

若电阻值不随电压、电流和频率变化而变化, 则称此电阻为线性电阻。一般的电阻器可视为线性电阻元件, 它的伏安特性是通过坐标原点的一条直线, 如图1-1-9所示。由于电阻元件的特性方程是一个代数方程, 所以当电压 u 发生突然变化时, 电流 i 也会立即随之变化, 反之亦然。就是说, 某一时刻 t 电阻两端的电压 $u(t)$ 的值与同一时刻的电流 $i(t)$ 的值有关, 而与它过去的工作状态 (或初始条件) 无关, 因此电阻元件是一种瞬态元件。

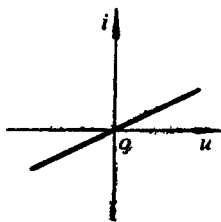


图1-1-9 线性电阻的伏安特性

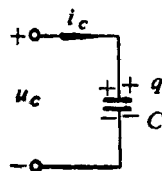


图1-1-10 电容器接通电源

如果加在电阻两端的电压和产生的电流是随时间变化的, 那么它们两者的乘积, 即功率也是随时间变化的, 称为瞬时功率, 用小写的字母 p 表示, 即

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}. \quad (1-1-8)$$

由于 p 与 i^2 或 u^2 成正比, 故总是大于零的。这说明电阻是消耗电能的, 是一种耗能元件。

(二) 电容元件

电容器是一种聚集电荷的元件, 其聚集的电荷量与所加的电压成正比, 即

$$q = CU, \quad (1-1-9)$$

式中的比例常数 C 称为电容量, 简称电容。单位是法拉, 简称法 (F)。还以微法 (μF) 或皮法 (pF) 作单位。 $1\mu F = 10^{-6}F$, $1pF = 10^{-12}F$ 。

电容器的电容量是反映其容电能力的物理量, 它与电容器本身的几何尺寸及其极板间的电介质的性质有关。一个介质绝缘性能良好的电容器, 可以忽略漏电现象, 而把它看成理想的电容元件, 简称电容元件或电容。

当电容器 (见图1-1-10) 极板上的电荷 q 或两极板间的电压 u_c 发生变化时, 电路中就会产生电流 i_c , 在图中所规定的参考方向下, 其数学表达式为

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}, \quad (1-1-10)$$

即在某一时刻电容电路中的电流 i_c 与该时刻电容电压 u_c 的变化率成正比, 而与此时刻电容电压 u_c 的数值无关。这一特性称为电容的动态特性, 电容元件也称为动态元件。

式 (1-1-10) 还表明了电容元件的一个重要特性, 如果电容的电流为有限值, 则电容两端的电压只能连续变化而不能跃变, 否则, 就会导致 $du_c/dt \rightarrow \infty$, $i_c = C(du_c/dt) \rightarrow \infty$ 。这与保持电流为有限值相违背, 所以电容电压一般不可能发生跃变。

如果把电容电压 u_c 表示为电流 i_c 的函数时, 对式 (1-1-10) 积分可得:

$$u_c = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i_c dt + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt = u_c(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt. \quad (1-1-11)$$

式 (1-1-11) 表明: 在某一时刻 (t) 电容电压的数值取决于其初始值 $u_c(t_0)$ 以及从初始时刻 t_0 到 t 所有时刻的电流值。就是说, 某一时刻 (t) 电容电压的值并不取决于同一时刻的电流值, 而与电流的全部历史状态有关。所以, 电容是一种有“记忆”功能的元件。

若将式 (1-1-10) 两边乘以 $u_c dt$, 再积分, 便得

$$\int_0^t u_c i dt = \int_0^t C u_c du_c = \frac{1}{2} C u_c^2,$$

即

$$WC = \frac{1}{2} C u_c^2. \quad (1-1-12)$$

这说明电容器在时间由 0 到 t , 电压由 0 变到 u_c 的过程中, 从电源吸收能量储存于两极板间的电场中; 而电容器在某一时刻所储能量只与此时刻的电容电压的平方成正比。电容器是一种储能元件。式 (1-1-12) 是计算电容器极板间电场能量的公式。

(三) 电感元件

在电工技术中, 通常把导线绕成线圈的形状以增强线圈内部的磁场, 称为电感线圈或电感器。

当电感线圈通以电流时, 便产生磁场, 若穿过一匝线圈的磁通为 Φ , 则与匝数为 N 的线圈交链的总磁通为 $N\Phi$, 总磁通 $N\Phi$ 常称为磁链 Ψ , 即 $\Psi = N\Phi$, 磁链是电流 i 的函数, 因此, 电感器是一种使磁链 Ψ 与电流 i 相约束的元件。当元件周围的介质为非铁磁物质 (如空气、木料、铜等) 时磁链 Ψ 与电流 i 成正比关系, 这个约束关系为一常量。故对空心线圈来说, Ψ 与 i 呈线性关系:

$$\Psi = Li, \quad (1-1-13)$$

式中 L 是一个常数, 称为电感, 单位为亨利, 简称亨 (H)。还有用毫亨 (mH)、微亨 (μH) 作单位的, 视计量大小而定。

电感 L 的大小与线圈的尺寸、匝数以及附近介质的导磁性能有关。实际电感线圈除电感外还有一定的电阻, 但电阻值较小, 可以略去不计, 而把它看成理想电感元件 (或电感), 其表示符号如图 1-1-11 (b) 所示。

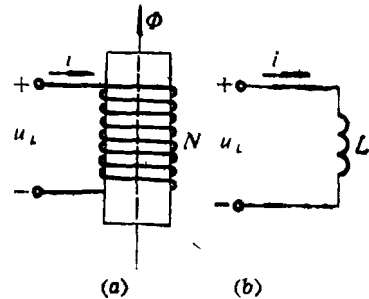


图1-1-11 电感元件及其表示符号

当通过线圈的电流发生变化时, 由于穿过线圈的磁通也相应地发生变化, 则在线圈两端产生感应电压, 以 u_L 表示, 根据电磁感应定律, 则有

$$u_L = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt}. \quad (1-1-14)$$

这就是电感元件的特性方程式。它表明: 在某一时刻电感两端的电压只取决于该时刻的电流变化率, 而与该时刻电流的大小无关。这一特性称为电感的动态特性。故电感元件也称为动态元件。

式 (1-1-14) 是在 u_L 和 i 的参考方向一致的前提下建立的, 在这一前提下, 该式才能正确地反映感应电压 u_L 的实际极性, 才能符合楞次定律的要求。如图 1-1-11 所示, 当电流增大时, $\frac{di}{dt} > 0$, 根据式 (1-1-14) 得 $u_L > 0$, 它意味着电流的流入端为高电位, 电流的流出端为低电位, 这时感应电压的方向与参考方向一致。当电流减小时, $\frac{di}{dt} < 0$, $u_L < 0$, 这时感

应电压的方向（电流的流出端为高电位，电流的流入端为低电位）与参考方向相反。

式(1-1-14)还表明了电感元件的一个重要特性，如果电感两端的电压保持为有限值，则流过电感的电流只能连续变化而不能跃变，这和电容电压不能跃变的道理是类似的。

若把电感电流 i 表示为电压 u_L 的函数，可对式(1-1-14)积分，便得

$$i = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L dt, \quad (1-1-15)$$

即在某时刻 t 的电感电流值取决于初始值 $i(t_0)$ 以及从 t_0 到 t 时间内的电压值。所以电感也是一种有“记忆”功能的元件。

若将式(1-1-14)两边乘以 $i dt$ ，并积分，得：

$$\int_0^i u_L i di = \int_0^i L i di = \frac{1}{2} L i^2,$$

$$\text{即} \quad W_L = \frac{1}{2} L i^2. \quad (1-1-16)$$

这说明电感元件，在时间由 0 到 t ，电流由 0 变到 i 的过程中，从电源吸收的电能转换为磁场能量；而电感元件在某时刻的储能只与此时刻所载电流的平方成正比。电感也是一种储能元件。(式1-1-16)是计算磁场能量的公式。

(四) 非线性电阻元件

上面讨论的是线性电阻元件，其电阻值是一常数。如果电阻不是常数，而是随着电压或电流变动，那么，这种电阻就称为非线性电阻。非线性电阻两端的电压与其中电流的关系不遵循欧姆定律，一般不能用数学式准确地表达出来，而是根据实验结果用电压与电流的关系曲线 $u = f(i)$ 或 $i = f(u)$ 来表示，这种曲线称为伏安特性。非线性电阻的伏安特性是一条非线性的曲线。各种半导体器件的伏安特性都是非线性的。图 1-1-12 (a) 是半导体二极管的伏安特性；图 (b) 是非线性电阻的符号。

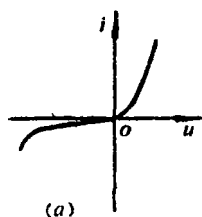


图1-1-12 非线性电阻的伏安特性及符号

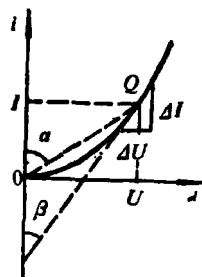


图1-1-13 静态电阻和动态电阻

由于非线性电阻的阻值是随着电压或电流而变化的，计算它的电阻时就必须指明它的工作电压或工作电流，例如在图 1-1-13 上就是工作点 Q 处的电阻。对非线性电阻元件来说，对应于任何个工作点 Q 都有两个表征其特性的电阻，即静态电阻（或直流电阻）和动态电阻（或交流电阻）。

静态电阻等于工作点 Q 的电压 U 与电流 I 之比，即

$$R = \frac{U}{I}.$$

由图 1-1-13 可见， Q 点的静态电阻正比于 $\tan \alpha$ 。

动态电阻等于工作点 Q 附近的电压微变量 ΔU 与电流的微变量 ΔI 之比，即

$$r = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI}.$$

由图 1-1-13 可见, Q 点的动态电阻正比于 $\tan \beta$, β 是 Q 点的切线与纵轴的夹角。

静态电阻和动态电阻各有其应用的范围: 静态电阻应用在电压和电流为直流的情况下; 动态电阻应用在电压和电流有微小变化的情况下。这两个电阻的数值都与工作状态有关, 即随工作点 Q 的不同而不同, 而且它们的数值一般也是不相等的。

由于非线性电阻的阻值不是常数, 在分析非线性电阻电路时一般都采用图解法。

1-1-4 电路的工作状态

在实际用电过程中, 根据不同的需要和不同的负载情况, 电路有不同的状态。一般说来, 电路有负载 (或有载)、开路和短路三种状态。

(一) 负载状态

一个完整的电路如图 1-1-14 所示, 其电源是经过开关、熔断器与负载联接。当电路中开关 S 闭合后, 电源与负载接通, 电源向负载输出电流和功率, 电路里开始了正常的功率转换, 这种工作状态称为负载 (或有载) 状态。此时, 电路中的电流和负载端的电压分别表示为

$$I = \frac{U_S}{R_S + R} \quad (1-1-17)$$

和

$$U = IR = U_S - IR_S. \quad (1-1-18)$$

式 (1-1-17) 称为全电路 (或闭合电路) 欧姆

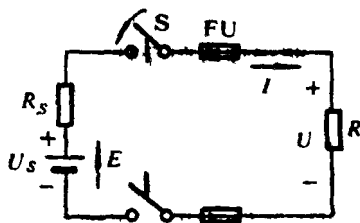


图1-1-14 有负载的工作状态

定律。

式 (1-1-18) 为电路的电压平衡方程式。它说明, 由于电源内电阻的存在, 负载端的电压总是小于电源的定值电压 U_S (即理想电压)。有些地方不用定值电压, 而是用电动势 E 来表示电源内部的性质。下面简单地介绍这两个物理量的相互关系。

大家知道, 在电源以外的部分电路, 电场力推动正电荷从电源正极流向负载, 最后流回电源负极; 在电源内部, 电源力 (如电池内部的化学力或发电机内部的电磁力等非电场力) 又把正电荷自电源负极移动到正极, 这样才能保持电路中的电流持续不断。在这个过程中, 电源把其它形式的能量转换成为电能。为了表征电源内部非电场力对正电荷做功的能力, 因此, 人们引入了电动势的概念。电动势在数值上等于非电场力把单位正电荷从负极经电源内部移动到正极时所做的功。根据这个定义, 电动势的单位自然也是伏特。

电动势与电压是两个不同的概念, 但是都可以用来表示电源正、负极之间的电位差。且从电源对外部电路所表现的客观效果来看, 既可用正、负极间的电动势 E 来表示, 也可用其间的定值电压 U_S 来表示。就是说, 电动势与定值电压的大小是相等的, 即 $E = U_S$; 从电路图看, 它们的正、负极性是一致的。但用箭头表示其方向时, 则刚好相反。这是因为电动势的作用是使正电荷自低电位点移动到高电位点, 使正电荷的电位能增加, 所以规定电动势的真实方向是指向电位升高的方向; 而电压的作用恰好与此相反, 所以规定电压的真实方向是指向电位降落的方向。电动势也是一个代数量, 在规定的参考方向之下, 它的数值可正可负, 如 $E = -5V$, 这表明电动势的真实方向与参考方向相反。

综上所述，从电源两端点的电位来考察，完全可以用一个与电源的电动势大小相等、极性相同（但箭头方向相反）的定值电压来等效表示电动势对外电路的作用效果。因此，在本书的电路分析部分不用电动势的概念，而用电源的定值电压来等效代替。这样做，对于分析电路很有好处，如对克希荷夫定律的描述可以得到简明的、统一的形式；在写电路方程时，不会出现电位升和电位降这两个截然相反的概念，而造成混淆和错误。

下面继续讨论电路有负载状态的功率转换关系。

由式 (1-1-18) 得

$$U_S = IR_S + IR \text{ 或 } E = IR_S + IR,$$

两边乘以电流 I ，就可得到功率平衡方程式：

$$U_S I = I^2 R_S + I^2 R \text{ 或 } EI = I^2 R_S + I^2 R. \quad (1-1-19)$$

其中，电源产生的总电功率 $P_S = U_S I = EI$ ；电源内阻消耗的电功率 $P_0 = I^2 R_S$ ；电源输出的，也就是负载吸收的电功率 $P = I^2 R = UI$ 。

电气设备在实际运行时，应严格遵守有关额定值的规定。通常是根据负载的额定电压和功率选用适当的电源，或者根据电源的额定电压和额定容量接入适当的负载。总之，负载和电源联接时，必须保证负载与电源的额定电压相等，而电源的容量必须大于或等于负载所需的功率。

(二) 开路

当电源与负载之间的闸刀开关被拉开，或电路中某处已断开时，电路未构成闭合回路，故称为开路或断路。电路开路时，外电路的电阻可视为无限大，电路中没有电流。此时，电源端电压 U_{OC} 称为开路电压，它等于电源的定值电压，电源不输出电功率。因此，电源开路时的特征可用下列各式表示：

$$\left. \begin{aligned} I &= 0, \\ U_{OC} &= U_S, \\ P &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1-1-20)$$

(三) 短路

从广义上说，电路里不同电位的两点被导线直接相连，使该两点的电压降为零，这种现象称为短路。图 1-1-15 所表示的是电源被短路的情况，此时，外电路的电阻为零，负载端电压为零；在电源定值电压作用下产生很大的电流，该电流 $I_{SC} = U_S / R_S$ ，称为短路电流；电源产生的电功率全部被内阻所消耗。电源短路时的特征可用下列各式表示：

$$\left. \begin{aligned} U &= 0, \\ I_{SC} &= U_S / R_S, \\ P &= I_{SC}^2 R_S. \end{aligned} \right\} \quad (1-1-21)$$

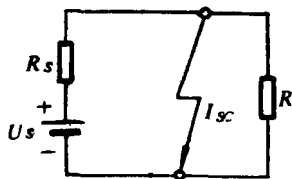


图1-1-15 电源短路

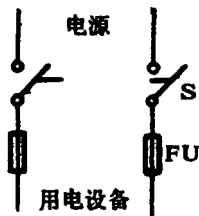


图1-1-16 熔断器在电路中的接法