

中等专业学校教材

电 工 学

哈尔滨电力学校 何续南 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书为水利电力类中等专业学校热动专业统一教材，由电工基础、电机学基本知识和发电厂厂用电的控制保护三部分内容组成，分十章两个附录。

本书除供中专热动专业教学用书外，还可供其它非电专业的工人、技术人员学习电工学基本知识时参考。

中等专业学校教材

电 工 学

哈尔滨电力学校 何续南 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京丰华印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16.25印张 387千字

1986年11月第一版 1986年11月北京第一次印刷

印数 00001—10110册 定价1.90元

书号 15143·6175

序 言

本书作为中专电工学教材旨在给非电专业的学生学习电工知识时打下扎实的基础。并在今后处理有关电工技术的日常事务中以及着手解决跨学科的有关课题上能和电专业技术人员有更多的共同语言和一定的独立工作的能力。本书内容包括电路原理、机电能量转换及发电厂厂用设备的控制与保护等三部分。本书在编写中注意加强和充实了基本的和传统的内容,并结合学科发展水平和专业发展的需要,对部分内容作了适当的调整,增添了一些新概念。教学中教师可根据学生的实际水平、教学计划所规定的时数以及专业培养目标的具体要求等情况对教材内容和讲授顺序作适当的增减。

本书编写大纲经1983年3月水电部中专电工学课程组会议讨论通过。编写过程中沈阳、长春、北京、郑州、湖北、江西、山东、合肥、山西、南京、杭州、广州、云南、贵州、西安、重庆等电力学校的有关任课教师多次对编写大纲及初稿提出宝贵意见。编者在此谨致以最诚挚的谢意。

本书第一、二、三、四、六、九章由哈尔滨电力学校何续南编写,第五、七、八、十章由山东电力学校宋雅贤编写。全书由何续南主编,重庆电力学校郭善君主审。

由于编者水平有限,书中一定存在很多错误和不当之处。希望读者随时批评指正。

何续南

1984年10月

目 录

序 言

绪 论	1
-----	---

第一章 电路的基本概念和基本定律	4
------------------	---

第一节 电路及电路的基本变量	4
----------------	---

第二节 电路元件	9
----------	---

第三节 电路的基本定律	18
-------------	----

第四节 电路中的电位	24
------------	----

习 题	25
-----	----

第二章 电路分析的基本方法	30
---------------	----

第一节 电阻的串、并联及等效电阻	30
------------------	----

第二节 电源模型及其等效变换	35
----------------	----

第三节 受控源	37
---------	----

第四节 叠加原理	40
----------	----

第五节 等效电源定理	41
------------	----

第六节 支路电流法	48
-----------	----

第七节 网孔电流法	50
-----------	----

第八节 非线性电阻电路	53
-------------	----

习 题	56
-----	----

第三章 一阶网络的分析	62
-------------	----

第一节 换路定则与电路的初始条件	62
------------------	----

第二节 零输入响应	66
-----------	----

第三节 零状态响应	72
-----------	----

第四节 全响应	77
---------	----

第五节 三要素法	82
----------	----

习 题	85
-----	----

第四章 稳态交流电路	89
------------	----

第一节 正弦量的基本概念	89
--------------	----

第二节 电阻、电感和电容中的正弦电流	98
--------------------	----

第三节 电阻、电感和电容串联的交流电路	103
---------------------	-----

第四节 复阻抗的串联和并联	109
---------------	-----

第五节 复功率	111
---------	-----

第六节 正弦电路的稳态计算	113
---------------	-----

第七节 功率因数的提高	118
-------------	-----

第八节 三相交流电路	120
------------	-----

第九节 非正弦周期电路	128
-------------	-----

习 题	136
-----	-----

第五章	电磁现象和磁路	142
第一节	电流的磁场	142
第二节	铁磁材料的磁化特性	144
第三节	磁路和磁路定律	148
第四节	电磁感应	152
第五节	机电能量转换	157
习 题		162
第六章	变压器	165
第一节	变压器的工作原理	165
第二节	三相变压器	172
第三节	特殊变压器	174
习 题		178
第七章	直流电机	179
第一节	直流电机的基本原理	179
第二节	直流电动机的运行和使用	183
习 题		188
第八章	异步电动机	190
第一节	异步电动机的结构	190
第二节	三相异步电动机的工作原理	191
第三节	三相异步电动机的运行	194
第四节	三相异步电动机的使用	201
第五节	单相异步电动机	208
习 题		212
第九章	同步发电机	214
第一节	同步发电机的工作原理	214
第二节	同步发电机的运行特性	223
第三节	同步发电机与电网并联运行时的功率调节	224
习 题		227
第十章	发电厂厂用机械的控制与保护	228
第一节	厂用电概述	228
第二节	常用控制电器	231
第三节	简单控制环节	237
第四节	自动信号联锁保护电路	241
习 题		246
附录一	几种常见信号的波形	250
附录二	二次回路常用设备文字符号表	251

绪 论

一、电能的应用及其优越性

电工学是一门研究电学现象在工程技术中应用的技术基础课程。电能的应用范围极其广泛。它深入人类生产和生活实践的各个领域，成为近代社会物质文明发展的显著标志。

电能具有其它能量所无可比拟的优越性。电能最便于转换，它可以方便地由热能、水位能、化学能、机械能、原子能等转换而来，也可以将电能转换为其它所需要的能量形态，如利用电动机可将电能转换为机械能，利用电炉可以获得热能，利用照明器件可以获得光能等。电能之间也可以有交流形式和直流形式的相互转换。

电能可以迅速而经济地输送和分配，我们可以在动力资源丰富的煤矿和江河附近兴建电厂，通过高压输电线路将电能输送到负荷中心，使能源生产地和消费地间布局上的矛盾得以解决。我们还可以根据用户的需要通过配电网将小自几十瓦的照明负载大到几千、几万千瓦的电热和动力负载进行灵活而合理的分配。

此外，电能还可以借助电磁波的形式不用导线向更广阔的空间传播。

电能又便于控制和检测。电路的基本变量电流和电压可以用作反映电能变化情况的信息，人们可以方便地通过有线、无线等方式对它们进行检测、控制和处理。

电能还可以通过某些装置实现巡回检测、分析数据、程序显示、处理故障等多方面的功能。特别是二十世纪五十年代以来，电子计算机技术的高度发展，使得电能的应用不仅减轻了人们繁重的体力劳动，而且还能按照人们预定的程序执行某些逻辑功能，对劳动生产率的提高和生产力的发展起着巨大的推动作用。今天已没有哪一门专业技术不与电能的应用发生一定的联系。

二、电路、器件和系统

电路或网络是若干电气元件为实现某种特定功能（如实现能量的输送转换或信息的传递和处理）的组合。当研究一般性的抽象规律时多用网络一词，而讨论某些确定的具体问题则用电路。电路可分两种类型，集总参数电路和分布参数电路。集总参数电路由集总参数元件连接而成，典型的集总参数元件是电阻器、电容器和变压器等，它们的特点是外形尺寸同工作频率所对应的波长相比可以略而不计；分布参数电路由分布参数元件连接而成，分布参数元件的特点是外形尺寸同工作频率所对应的波长是相近的。例如，微波电路的波长在1mm和10cm之间，这与构成电路的元件空腔谐振器的尺寸是同一数量级。再如计算机电路，其工作频率可达500MHz，波长即为0.6m，也可以和电路元件的尺寸相比拟。它们都属于分布参数电路。由于分布参数电路的分析方法是建立在集总参数电路理论基础上的，因而集总参数电路具有更普遍的意义，为了便于理解和分析，本书只讨论集总参数电路。

我们把实现能量的输送、转换或信息的传递和处理的装置称为器件。器件的种类很多，有机械的、热工的、光学的、电的等等。由于近代电子器件及其应用技术的飞跃发展，这部分内容已列入“电子技术基础”课程中讲授。本书作为先导部分，除专门论述电

路基础理论外, 还将研究机电能量转换的基本原理及其在实际器件中, 特别是在旋转电机中的应用。

系统是一个由若干相互有关联的单元组成的具有某些特定功能的有机整体。组成系统的单元可能是各种器件, 几个车间、部门或人们所关心的各种加工材料, 信息或能量。目标也许是控制一个机电能量转换过程、制导一个宇宙航行器或者提供一项有价值的社会服务。

近年来, 由于系统复杂性的不断增长以及预测系统性能的理论和技术的发展, 形成了一门活跃的新兴边缘学科即系统工程学, 在电工学领域内, 常常利用通信系统、控制系统、计算机系统和指挥系统进行信号的传输和处理。组成电系统的主要部件中包括大量多种类型的电路。严格的讲电路和系统之间既有密切的联系又互有区别, 它们虽然都是为实现某些功能而构成的组合, 但系统所关心的是外部特性方面的全局性问题, 而电路则注重局部性的问题即着重点在于为实现整体的功能和特性应具有怎样的结构和参数。确切地说, 二者的差异主要体现在观察和处理问题的角度不同。例如, 一个简单的 RC 电路, 对电路来说, 注意研究其各支路、回路的电流、电压规律。而从系统角度来看, 它就是一个初级的信号处理系统, 主要研究它在一定条件下所具有的微分或积分的运算功能。

电子技术的迅速发展, 特别是大规模集成电路及各种复杂系统部件的直接应用, 使电路、器件和系统等名词的划分发生了困难, 它们中的许多概念相互渗透, 难以严格区分各名词间的差异。一般, 对于简单的系统特别是在讨论系统的基本理论时, 所谓系统常常就是指电路本身。所以, 两者可以通用, 本书虽然不涉及系统工程方面的问题, 但在介绍电路分析的基本理论时, 试图建立系统和系统分析方法的初步概念, 以利于读者对后继课程如电子技术基础、热工仪表自动化等的学习。同时, 本书所讨论的有关电路分析的许多原理和方法, 对研究其它工程学科也都是重要的, 而且在各个工程学科的领域中都有所应用。

三、电路的模型

任何自然科学的理论都是建立在模拟概念基础上的。要分析研究一个实际的、复杂的物理系统, 我们就必须选用一个合理的模型来描述它, 同时用一些理想化的元件来表达实际元件或某一种简单的物理现象的性质。理想化的元件本身就是一些简单的模型, 虽然它只是近似地描述实际的元件或物理现象, 但理想元件本身是由精确的定义来表征的, 如在牛顿力学中, 我们常用质点来表示物体的模型。按照定义, 质点具有一定的质量, 也有完全可以确定的位置, 速度和加速度, 但它没有实际的尺寸。在一定的条件下, 应用这种理想化的模型能够成功地描述实际物体的力学过程。

重要的是我们应该懂得一个实际系统的模型决不是唯一的, 具体选用哪一个模型完全取决于分析过程中所要求达到的精度。模型的近似性, 就是要求我们在工程上作出判断, 对一个给定的实际的物理系统或器件, 在许多可能的模型中, 选出一种对分析过程最为适宜的模型。例如, 将一个线圈加上频率可变的电压, 在电源频率为 $1\sim 20\text{Hz}$ 范围内, 如果线圈选用单一电阻参数来表示, 如图 0-1(a) 所示, 电路模型所得到的结果与实际线圈所产生的结果几乎是一样的。同样, 频率在 $20\sim 10^3\text{Hz}$ 的范围内, 线圈的性能可用图 0-1(b) 所示模型来表示, 除电阻参数 R 外, 其中还包含有另一个集总参数电感 L 。在 10^3Hz 以上的更宽广的频率范围内, 选用的电路模型还需加上电容参数 C , 如图 0-1(c) 所示。

用比较简单的电路模型近似地表示一个器件或一个完整的实际电路的方法, 是电工学

理论的重要部分。根据电路的物理特性，把一些理想化了的元件如电阻元件，电感元件、电容元件、电压源、电流源和理想的变压器等加以组合连接就可以构成电路图。这样的图就是用符号表示电路模型。由此我们可以写出描述电路特性的数学方程，它们就是电路的数学模型。根据数学模型，就可以运用数学分析方法去求解，如解出电路在一定的输入信号（激励）下的输出信号（响应）然后再对所得的解作出物理解释，赋予一定的物理意义。所以，电路分析的过程就是从物理实际中根据需去建立一个近似的、抽象的电路模型，经过数学处理后再回到物理实际的过程。这不仅是电路基础理论中广为应用的分析方法，而且也是一切自然科学和工程学科研究的基本方法。

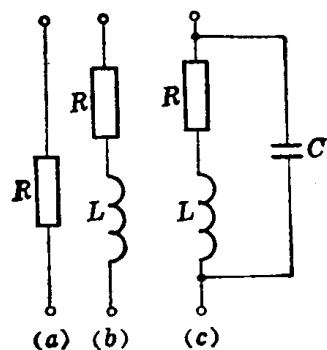


图 0-1 不同频域内线圈的几种电路模型

第一章 电路的基本概念和基本定律

第一节 电路及电路的基本变量

一、电路的组成和电路图

1. 电路的组成

电路是由电源、负载和连接导线等部件组成的，通常有发电机、电阻器、电容器、电感线圈、晶体管、开关等部件。人们利用电路来实施能量的传输、控制和转换。例如在电力系统中，发电机组把热能、水能或原子能转换成电能，通过变压器和输电线路输送到各用户。在那里又根据需把电能转换成机械能、光能和热能等。这样就组成了一个极为复杂的电路。我们把电路中由其它形式能量转换成电能的部件称为电源，而将电能转换成其它形式能量的部件称为负载。电路又一重要的作用是信号的传递和处理，通过电路部件将信号源施加的信号变换或加工成所需要的输出信号。例如，电子设备中的放大器的作用是把微弱的输入信号加以放大，成为能够满足工作要求的强信号输出。一个实际部件往往同时具有多种物理性能。例如，实际的电阻器具有对电流呈现阻力的性能，它的主要特性应该是变电能热能，同时当它通过电流时还会产生磁场。因此，任何一个电阻器通电后都要储存一些能量在磁场之中，因而又兼有电感的性质。在分析电路时，如果把各部件的全部物理性能都加以考虑，势必会大大增加分析的困难和复杂性。而且对工程实践来说，往往也没有这样的必要。因此，我们必须在一定的条件下对实际部件加以近似化，理想化，忽略它的次要性质，选用一个表征其主要性能的模式，即理想元件来表示。图1-1(a)表示一个最简单的实际电路，由电源（干电池），负载（灯泡）和两根连接导线所组成，其电路模型如图1-1(b)所示。上述电路也可用更一般的符号来表示，如图1-1(c)，电阻元件 R_s 表示灯泡，干电池用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 来表示，连接导线消耗电能很少，一般不计其电阻值。

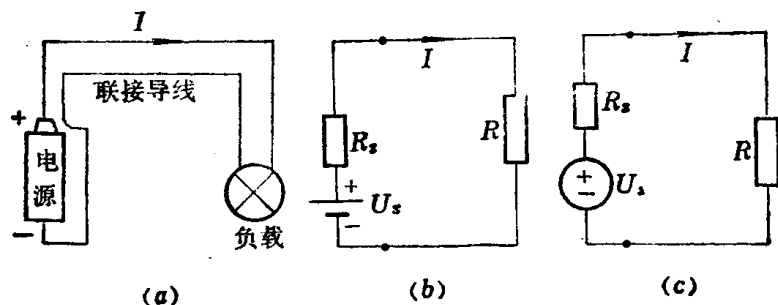


图 1-1 简单电路及其模型

在分析和设计电路中，采用近似模拟的方法，就要求我们引用理想元件也称之为电路元件（简称元件）来表示电路中的实际部件。电路元件是一种概念化的模型，我们借助于它来组成电路图，并以此解释实际电路的性能和分析及处理实验的结果。

2. 支路、节点和回路

电路结构可分为无分支电路和分支电路两类。无分支电路也称为简单电路，图1-1就是无分支电路。分支电路又称复杂电路，它有若干分支。我们把电路中通过同一电流的每个分支叫做支路。如图1-2所示，其中 aeb ， acb 和 adb 都是支路。支路 acb 和 adb 中都有电源，称为有源支路，其余为无源支路。

电路中三个或三个以上支路的连接点称为节点。

图 1-2 电路中有 a 、 b 两个节点。

电路中任一闭合路径称为回路，图1-2电路中共有 $aebda$ 、 $adbca$ 和 $aebca$ 三个回路。通常把内部不包含支路的回路叫网孔，图1-2中 $aebda$ 和 $adbca$ 都是网孔。图1-2所示的这种各支路处于同一平面上且不使任意两条支路交叉的电路叫平面电路。通常，我们遇到的都是平面电路。

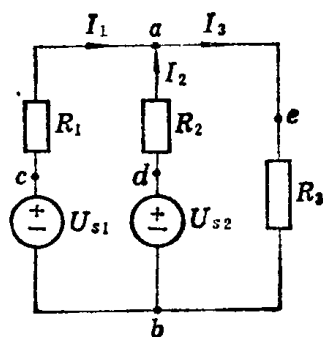


图 1-2 分支电路

端口是从电路或网络中向外引出的一对端钮。端口可作测量用，也可以作为与外部的电源或其它网络连接用。如果网络只具有两个引出端钮与外电路相联，则不管其内部结构如何复杂，都叫做二端网络或单端口网络。

3. 激励和响应

电路中电源或信号源供给的电流或电压称为激励信号，简称激励，它们将在电路各部分产生电流和电压。在激励作用下，电路中某一元件上的电压或通过元件的电流称为响应信号，简称响应。激励表示电源供给电路的能量，响应表示在电路某一元件上能量的应用。

在我们所讨论的大部分电路中，激励和响应之间都是成线性关系的。假定有一个以变量 x 表示的函数 $f(x)$ ，在电路中 x 为输入或激励，而函数 $f(x)$ 则为输出或响应。就电路元件的特性来说， x 可以代表电压而 $f(x)$ 可以代表电流，或者反之。总之利用函数符号可以反映出两个物理量之间的相互依赖关系。如果，函数 $f(x)$ 对其定义域中的每一个 x 式 $f(ax) = af(x)$ 成立，其中 a 为任一标量，则我们称函数 $f(x)$ 具有齐次性（也称比例性）。如果，函数 $f(x)$ 对其定义域中每一对元素 x_1, x_2 ，式 $f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$ 成立，则我们称函数 $f(x)$ 具有可加性（也称叠加性）。具有这两种特性的函数称为线性函数。同样具有这两种特性的元件和电路，就称为线性元件和线性电路。

二、电路的基本变量及其参考方向

在电路中，表征电磁基本现象的变量有电荷(q)、电流(i)、电压(u)、功率(p)、功(A)、能量(w)、磁通(ϕ)。电路理论的主题就是研究这些变量间的相互关系以及制约性状的基本定律。这些定律可以分为两类。第一类定律与电路元件的特性和连接无关，它们反映上述变量间的普遍关系，如

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

$$u = \frac{d\phi}{dt} \quad (1-2)$$

$$p = \frac{dw}{dt} = u \cdot i \quad (1-3)$$

$$w = \int_{t_0}^t u(\tau) \cdot i(\tau) d\tau \quad (1-4)$$

上述关系对任何电路和元件都是成立的，不论它们是集总参数的还是分布参数的，是线性的还是非线性的，是有源的还是无源的等等。第二类定律与电路元件的特性和连接有关。它们反映了各类元件的特性对上述变量的制约作用，以及由于元件的连接给各支路电流和电压带来的约束关系，如欧姆定律和基尔霍夫定律等。

物理学告诉我们，原子可以看成是由电子、质子和中子组成的，这些基本的粒子各自具有某些确定的性质。质量是描述粒子惯性大小性质的物理量。描写这些粒子的另一个内在特性的物理量就是它们的电荷，单位是库仑(C)，简称库。电荷是通过对其它粒子施加电力作用体现的。电荷和质量不同，它可以是正的，也可以是负的。表 1-1 列出了常见的有关粒子的电荷量和质量的数据。

表 1-1 常见基本粒子的电荷和质量

基本粒子	电 荷 (e)	质 量 (kg)
电 子	-e	9.11×10^{-31}
质 子	e	1.67×10^{-27}
中 子	0	1.67×10^{-27}
α (氦核)	2e	6.68×10^{-27}

注 e = 1.67×10^{-19} C

表1-1中 e 称为基本电荷。值得注意的是，电子的电荷是 -e，而不是 e。

在分析电路时，常常是给定电路及元件值，要求我们标出电路中各个电流和电压值。虽然，有时还必须求出电路各部分的功率和能量转换情况，但是，只要求得电路的电流和电压值，就可以确定该电路的性状，从而获得电路的其它变量。因此，我们把电流和电压称为电路分析的基本变量。

导体中的电流是由导体内大量自由电子在电场作用下有规律的定向移动所形成的。电流是一种客观的物理现象，通过它的热效应，磁效应和化学效应，就可以觉察到它的存在。

导体中通过电流的大小以电流强度来量度。它的定义是单位时间内通过导体横截面的电量。电流强度简称电流，所以，电流一词不仅表示物理现象，而且也代表一个物理量。通常，电荷可以是正的也可以是负的，在同一电场的作用下通过导体截面时移动方向不同。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。电流的符号用 i 表示。

一般用小写字母表示的物理量是时间的函数，用大写字母表示不随时间变化的物理量。如 i 即 i(t) 表示电流的大小和方向都随时间变化，称为交变电流，简称交流（可写作 ac）。若电流的大小方向不随时间变化，叫做恒定电流，简称直流（写作 dc），用 I 表示。

电流的单位名称是安培，简称安(A)。在工程实际中，往往需在基本单位上加十进记数的

标准词冠，如毫安(mA)即 10^{-3} A、微安(μ A)即 10^{-6} A、千安(KA)即 10^3 A等。

电路的另一个基本变量是电压。电压也称为电位差，它表示电场力做功的本领。图 1-3 的电路中， ab 点之间的电压，等于单位正电荷从 a 点移动到 b 点时电场力所作的功。设 w_a 、 w_b 分别表示电荷 q 在 a 、 b 点所具有的电位能， φ 为电位，则 a 、 b 点的电位分别为

$$\begin{aligned}\varphi_a &= \frac{w_a}{q} \\ \varphi_b &= \frac{w_b}{q}\end{aligned}\quad (1-5)$$

若 A_{ab} 表示电荷 q 从 a 点移到 b 点时电场力所作功，则

$$\begin{aligned}U_{ab} &= \varphi_a - \varphi_b \\ &= \frac{w_a}{q} - \frac{w_b}{q} \\ &= \frac{A_{ab}}{q}\end{aligned}\quad (1-6)$$

式中 U_{ab} 表示 a 、 b 两点间的电位差即电压，采用双下标记法，前一个下标 a 表示起点，后一个 b 表示终点。在电路分析中把电压看成代数量。若把单位正电荷从 a 点移到 b 点，电场力作了正功即正电荷所具有的电位能有所减少，则表明 a 点为高电位即电压的正极， b 点为低电位即电压的负极，电压的实际方向规定为电位降低的方向，即从高电位指向低电位。如果电压的大小和方向不随时间变化，则称为恒定电压或直流电压，用 U 表示，如果电压的大小和方向随时间变化，则称为交变电压，用 u 即 $u(t)$ 表示。此时，电路中 a 、 b 两点间电压可用下式表示

$$u = \frac{dw}{dq}\quad (1-7)$$

式中 dq ——从 a 点移动到 b 点的电荷量，单位 C；

dw ——移动过程中电荷得失的电位能，单位 J。

电压的单位是伏特，简称伏(V)。同样，在工程实践中加上十进位的标准词冠用来计量高电压和微量电压，如千伏、毫伏和微伏等。

在电路分析中，往往难以事先判断电流和电压的实际方向，因而也无法确定电路中各基本变量间的解析关系。为此，我们引用了参考方向（也称参考正方向）的概念。参考方向可以任意选定，并用相应的符号标明在电路图中。根据标明参考方向的电路图，我们可以确定电路中各基本变量间的关系，即建立电路的数学模型，由此解得的基本变量是一个代数量，它可以是正值，也可以是负值，在选定参考方向的前提下，代数量的正负是具有明确的物理意义的。电路中电流或电压的实际方向和所选的参考方向一致，则表现为正值；电流或电压的实际方向和选的参考方向相反，则表现为负值。由此可见，参考方向的选定对代数量正负的解释具有重要意义。

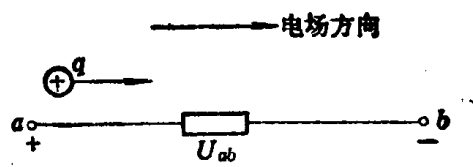
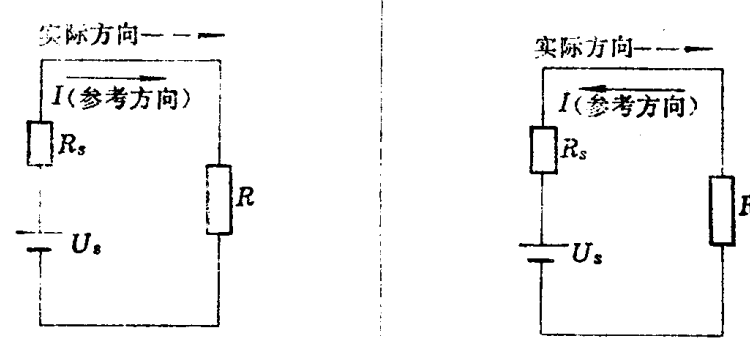


图 1-3 一段电路的电压

电流的参考方向用箭头来标明，表 1-2 表明由参考方向来判定电流代数量正负的物理意义。

表 1-2

参考方向与电流实际方向的关系

电 路 图		
	$U_s - I(R + R_s) = 0$	$U_s + I(R + R_s) = 0$
电流代数量的正、负	$I = \frac{U_s}{R + R_s} > 0$	$I = -\frac{U_s}{R + R_s} < 0$
物理意义	电流实际方向与参考方向相同	电流实际方向与参考方向相反

电压的参考方向可以用箭头来表示，也可以用正 (+)，负 (-) 极性表示，由正极指向负极的方向就是电压的参考方向，如图 1-4 所示，电压的参考方向还可以用双下标记表示，如 U_{AB} 表示参考方向是由 A 指向 B 的。

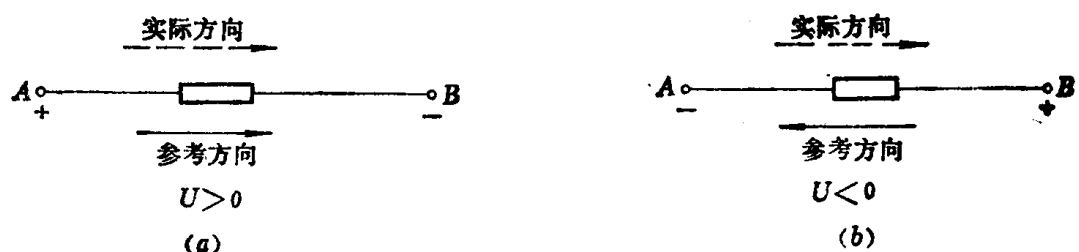


图 1-4 电压的参考方向和电压代数量正负的关系

图 1-5 给出支路的四种可能的标定 $u-i$ 参考方向的组合，若电流和电压的参考方向取一致，如图 1-5(a) 所示，则称关联参考方向。反之，电流、电压的参考方向取相反，如图 1-5(b)，则称非关联参考方向。

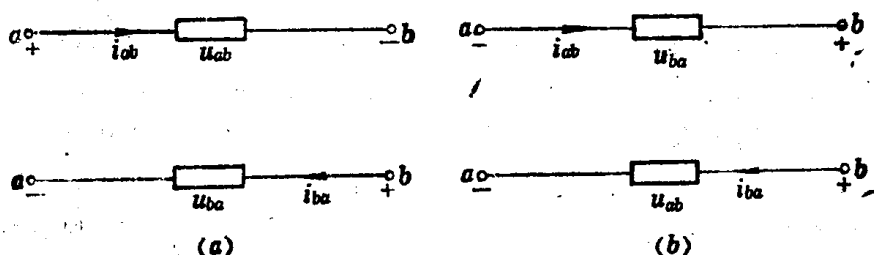


图 1-5 支路的关联参考方向和非关联参考方向

(a) 关联参考方向；(b) 非关联参考方向

三、功率和能量

根据电压的定义, 不难求得在时间区间 $[t_0, t]$ 内, 电路元件吸收或释放的总能量为

$$w = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq \quad (1-8)$$

因为 $i = \frac{dq}{dt}$, 所以可得式(1-4)即

$$w = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau$$

式中, 电能 w 是时间的函数, 也是代数量。

电能对时间的变化率就是功率, 见式(1-3)。式中电功率 P 简称功率, 它是时间的函数, 也是代数量。

电能的单位名称是焦耳(J), 简称焦, 功率的单位名称是瓦特(W), 简称瓦。

在电流, 电压取关联参考方向时, 式(1-3)表示为电路元件吸收功率。若代数量 $p > 0$, 电路元件确实吸收功率; 若 $p < 0$, 则元件实际释放功率。图1-6(a)表明在关联参考方向下元件所吸收、发出功率的情况。这时代数量 p 的正负具有明确的物理意义, 反映元件吸收或发出电能的实际状态。同样, 图1-6(b)表明在非关联参考方向下元件吸收、发出的功率的情况。



图 1-6 元件的功率和参考方向间的关系

(a) 关联方向; (b) 非关联方向

上述有关功率和能量的讨论不仅适用于一个无源理想电路元件, 同样也适用于任意一个有源理想元件或一段电路。

电力系统中, 电能的计量单位常常用千瓦小时, 它和 SI 制基本单位间的换算关系是

$$1\text{KW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6\text{J}$$

第二节 电路元件

电路是由若干相互连接的物理器件组成的。在电路理论中, 经过科学的抽象后, 用一些足以反映其主要电磁性能的理想元件来代替。根据这些理想元件与外部连接的端钮数可以分为二端, 三端和四端元件等。下面我们讨论的五种基本的二端理想元件中, 无源二端理想元件有线性电阻元件, 线性电容元件和线性电感元件; 有源二端理想元件有电压源和电流源。虽然, 完全线性的实际物理器件是没有的。但是在一定的条件下, 某些实际器件常常可以用这类线性模型中的一个来表示, 另外的实际器件则可以由两个或更多的线性模型的

组合较准确地表示出来。这样，我们就可以根据这些线性模型，适当地使用数学分析的方法来计算和分析复杂器件及其系统的性能，并由此得到很有价值的一般结果。

一、电阻元件

在任何时刻，一个理想元件两端的电压与通过它的电流符合欧姆定律，就称此元件为线性电阻元件。通常把主要特性是电阻性的实际器件称为电阻器。

电阻元件的特性可以在 $U-I$ 平面上作全面的描述。如果把元件的电压取为纵坐标，电流取为横坐标，画出电压和电流的关系曲线，便得到电阻元件的伏安特性。线性电阻元件的伏安特性是通过坐标原点的直线，元件上的电压和电流成正比，如图 1-7 所示。在关联参考方向下，元件的电压可表示为

$$u = Ri \quad (1-9)$$

式中 R 称为元件的电阻，它的单位是欧姆 (Ω)，简称欧。线性电阻元件的电阻 R 是一个与电压和电流无关的常数。

电阻的倒数称为电导，用 G 表示

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-10)$$

电导的单位为西门子(S)，简称西。

电阻与力学系统中的摩擦力类似，它具有阻碍电流通过物体的性质，克服这种阻碍所消耗的能量表现为热能。在电流和电压的关联方向下，任何时刻电阻元件吸取的电功率为

$$p = ui = i^2 R = Gu^2 \quad (1-11)$$

式中的功率 p 恒为正值。这说明，任何时刻电阻元件绝不可能发出电能，它所吸取的电能全部转换成其它非电能量而且是不可逆的。所以，线性电阻元件不仅是无源元件，而且还是耗能元件。

实际的电阻器如电灯，电炉等器件，其伏安特性曲线严格的说都是非线性的。但是，这些器件在一定的工作电流范围内，它们的伏安特性近似一直线，所以可以用线性电阻元件来模拟而得到满意的结果。

非线性电阻元件的伏安特性不是直线，元件的电阻也不是常数，元件上的电流和电压值之间也不服从欧姆定律。例如，图 1-8 是二极管的伏安特性。

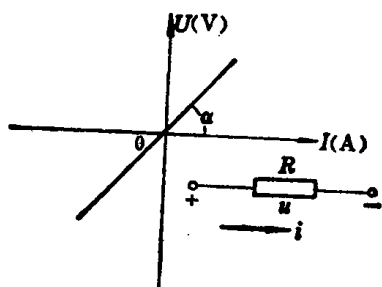


图 1-7 线性电阻元件及其伏安特性

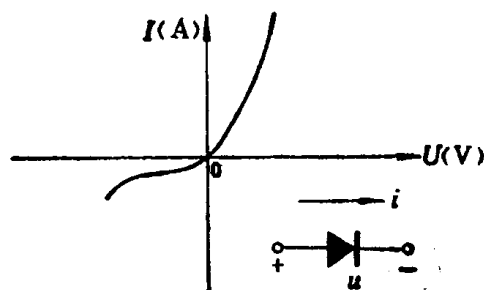


图 1-8 二极管的伏安特性

今后，为叙述方便，我们把线性电阻元件简称为电阻。这个术语一方面表示一个电阻元件，另一方面也表示这个元件的参数。

二、电容元件

电容元件是由两块导体构成的极板间隔以不同的介质（如空气，云母，电解质等）所组成的实际电路元件。加上电源后，电容器的极板上分别聚集起等量异号电荷，并且在介质中建立起电场，同时储存有电场能量。电源去除后，充电后的电容器极板上继续聚集有电荷，电场继续存在。所以电容器是一种能够储存电场能量的元件。此外，电容器上电压变化时，在介质中也往往会引起一定的介质损耗，并且介质不可能完全绝缘，多少还有一些漏电流。在一定条件下，电容器的介质损耗和漏电流可以略而不计。这样就可以用一个只计及储能的理想电容元件来作为它的模型。

线性电容元件是一个二端理想元件，它在电路中的符号见图 1-9。图中 q 是元件正负极板上聚集的等量异号电荷。若电容元件上电压的参考方向取由正极板指向负极板，则任何时刻正极板上的电荷 q 与电容两端的电压 u 符合下列关系

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

式中 C 即称为该元件的电容。电容的单位是法拉(F)简称法。实际电容器的电容往往很小，因此通常采用微法(μF)和波法(pF)。

如果把电荷 q 取作纵坐标，电压 U 取为横坐标画出 q - U 关系曲线就称为电容元件的库伏特性。线性电容元件的库伏特性是通过坐标原点的一条直线，如图 1-9 所示。所以，线性电容元件的电容 C 是一个与电荷 q 和电压 U 无关的常数。

当电容元件上的电压 U 变化时，极板上的电荷也随之变化，于是电路中出现电流。若取电流的参考方向与电压参考方向一致，即采用关联方向，如图 1-9 所示，则电流为

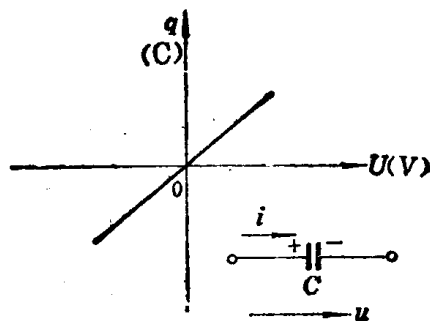


图 1-9 线性电容元件及其库伏特性

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

上式表明线性电容元件中的电流，在任何时刻都与该时刻电压的变化率成正比，而与电容电压 u 本身及其过去的状态无关。因此，只有电容元件上电压变化时，才有电流存在。电压变化越快（即 $\frac{du}{dt}$ 越大），电流就越大；电压不随时间变化时（ $\frac{du}{dt} = 0$ ），电流就

为零，也就是说，对直流电压来说，电容元件相当于开路，即电容元件有通交流隔断直流（简称隔直）的作用。这一特性称为电容的动态特性，所以电容元件也称为动态元件。

式 (1-13) 还表明了电容元件的另一个重要特性，如果电容的电流保持为有限值，则电容电压不能发生跃变。假如电压发生跃变，即不需要时间从一个数值突然变化到另一个数值，此时 $\frac{du}{dt} \rightarrow \infty$ ，从而导致 $i \frac{du}{dt} \rightarrow \infty$ 。这与保持电流为有限值的条件相违背，所以电容两端的电压只能连续变化，不可能发生跃变。正如力学系统中，弹簧的弹性系数阻碍其形变量发生突然变化一样，电容就类似于弹簧的弹性系数。电容的这一特性称为惯性，因此电容元件也称为惯性元件。上述特性对分析电路的暂态过程是极为重要的。

将式 (1-13) 两边积分，把电压 u 表示为电流 i 的函数，则得

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau = \frac{1}{C} q(t) \quad (1-14)$$

式中把积分号内的时间变量 t 用 τ 表示, 以便和积分上限 t 相区别。由此看出, 式中的积分恰好就是在时刻 t 时电容所聚集的全部电荷。显然, 一般讨论问题, 总有一个计时起点, 即初始时刻 t_0 , 这样, 上式也可写成

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \\ &= \frac{1}{C} q(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \\ &= u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-15)$$

上式表明, 电容上的电压在某一时刻 t 的数值并不仅取决于同一时刻的电流值, 而是取决于从 $-\infty$ 到 t 的所有时间内的电流值, 即是电容上的电压与电流的全部过去历史有关。因此, 可以认为电容电压具有“记忆”电流的作用, 电容元件又是一种记忆元件。此外, 式 (1-15) 还表明, 电流在初始时刻 t_0 以前的全部历史情况, 对 $t > t_0$ 以后的影响可以用电压初始值 $u(t_0)$ 来反映。对线性电容元件来说, 只有当电容值 C 及初始电压 $u(t_0)$ 给定时, 它才是一个完全确定的电路元件。

根据式 (1-3), 可知任何时刻输入到电容中的功率为 $p = \frac{dw}{dt} = ui$, 设在 t_0 到 t 期间对电容充电, 则充电期间供给电容电场的能量如式 (1-4) 所示。若将式 (1-13) 中的电流 i 代入式 (1-4), 可得

$$\begin{aligned} w &= \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t C u(\tau) \frac{du(\tau)}{d\tau} d\tau = C \int_{u(t_0)}^{u(t)} u du = \frac{1}{2} C u^2 \Big|_{u(t_0)}^{u(t)} \\ &= \frac{1}{2} C [u^2(t) - u^2(t_0)] \end{aligned}$$

这就是在 t_0 到 t 期间, 电容电场新储存的能量。如果初始电压 $u(t_0) = 0$, 即电容原有电场能量 $w = (t_0) = 0$, 这时电容充电到任意电压 u , 输入到电容电场的总能量应为

$$w = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-16)$$

由此也可以用来定义电容; 电容是用来衡量一个器件以建立电场的形式储存能量的能力。主要电特性是电容性的实际器件; 即称为电容器。

式 (1-16) 表明电容电场能量的储存情况与电容电压变化的对应关系。充电时, 电容电压增加, 即 $|u(t_2)| > |u(t_1)|$ 此时电容电场增强, 电容吸收能量, 并且全部转换成电场能量储存; 电容放电时, 电容电压降低, 即电容电场减弱, 电容释放能量, 送回电路。因此, 电容的充、放电过程, 也就是电路和电容电场间能量的可逆转换过程, 所以, 电容是一种储能元件。显然, 电容元件不会释放出多于它们所储存的总的能量, 因此又是一种无源元件。