

21世纪电学科高等学校教材

简明 电工学教程

侯树文 主编

2E



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

21世纪电学科高等学校教材

简明电工学教程

侯树文 主编



第1章 绪论	1
第2章 电路的基本定律和定理	10
第3章 正弦交流电路	25
第4章 三相电路	45
第5章 非正弦周期电流电路	65
第6章 线性动态电路	85
第7章 线性动态电路的暂态分析	105
第8章 线性动态电路的稳态分析	125
第9章 线性动态电路的频域分析	145
第10章 线性动态电路的时域分析	165
第11章 线性动态电路的复频域分析	185
第12章 线性动态电路的时域分析	205
第13章 线性动态电路的频域分析	225
第14章 线性动态电路的复频域分析	245
第15章 线性动态电路的时域分析	265
第16章 线性动态电路的频域分析	285
第17章 线性动态电路的复频域分析	305
第18章 线性动态电路的时域分析	325
第19章 线性动态电路的频域分析	345
第20章 线性动态电路的复频域分析	365



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是在教育部新的专业目录指导下,编写的一本面向 32~48 学时的电工学(或电工电子技术)课程的高等学校教材。适用于土木工程、建筑环境与设备工程、环境工程、给排水工程、港口与航运工程等各类非电专业。

本书内容包括电路分析基础、正弦交流电路、基本电子器件、基本放大电路、运算放大器及应用电路、电源电路、基本数字电路、数字逻辑芯片及应用电路、变压器与异步电动机以及计算机仿真与设计简介等。

本书注重基本概念与基本理论的介绍,注重对学生分析能力与应用能力的培养。本书附录给出了书中绝大部分习题答案和重点习题的解题过程,这对于学好用好本课程内容具有很好的参考价值。此外,本书还可供有关技术专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

简明电工学教程/侯树文主编. —北京:中国水利水电出版社, 2002

21 世纪电学科高等学校教材

ISBN 7-5084-0971-X

I. 简… II. 侯… III. 电工学-高等学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 001494 号

书 名	21 世纪电学科高等学校教材 简明电工学教程
作 者	侯树文 主编
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 273 千字
版 次	2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	15.50 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

现代科学技术的发展，使高等教育的课程体系发生了许多深刻地变化。在教育部新的专业目录下，有些非电专业的电工学课程学时已减至 32~48 学时。在这种情况下，如何编写一本满足现代课程体系要求，适应当前人才培养需要的少学时电工学教材，是当前电工学课程建设必须面对和解决的重要问题。作者正是基于这一考虑，在中国水利水电出版社的大力支持下，编写了这本《简明电工学教程》，以适应当前教学的需要。

本书具有如下特点：

1. 本书对传统电工学内容，进行了必要地综合和整理，使学生能够在较少的学时内，掌握电工学课程的基本理论框架和对问题的基本分析方法。

2. 本书考虑到现代电子技术对电工学课程的影响，特别加强了数字电子技术分析与应用等内容。同时，对计算机仿真与设计也作了相应地介绍，使学生对这门课程的发展与应用能有进一步的了解。

3. 本书注重对学生的能力培养，书中给出了许多与工程应用设计紧密相关的例子。这对于学好课程内容是十分必要的。

4. 本书附录给出了书中绝大部分习题答案和重点习题的解题过程，这对于学好课程内容具有很好地参考价值。

本书第一、二章由王治昆同志编写，第三、四、五章由侯树文同志编写，第六、七章由孙贵根同志编写，全书由侯树文同志担任主编。侯树文同志在初稿的基础上，对其内容和论述方式以及文字表达进行了全面的修订，使本书的内容更全面，论述更深刻，表达更流畅。

由于本书是作者在新的课程体系下的一种探索，尽管作者有着多年的教学经历，但仍可能存在一些不妥以至错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2002 年 1 月

目 录

前 言	
第一章 电路分析基础	1
第一节 电路的基本概念	1
第二节 电压源、电流源及等效变换	5
第三节 基尔霍夫定律	8
第四节 电路的基本分析方法	10
第五节 电路的基本定理	14
第六节 一阶电路的时域响应	19
小结	25
习题一	25
第二章 正弦交流电路	31
第一节 正弦交流电的基本概念	31
第二节 正弦交流电的相量表示	36
第三节 单一元件的交流电路	39
第四节 单相交流电路分析	43
第五节 三相交流电路的基本概念	52
第六节 三相交流电路分析	55
小结	58
习题二	59
第三章 基本电子器件	63
第一节 半导体的类型及导电性	63
第二节 PN 结与半导体二极管	64
第三节 半导体三极管及特性	67
第四节 绝缘栅场效应管简介	70
小结	71
习题三	71
第四章 基本模拟电子电路	73
第一节 基本放大电路分析	73
第二节 微变等效电路分析法	78
第三节 差动放大电路	82
第四节 运算放大器及电路分析	84
第五节 电源电路	92
小结	103

习题四	104
第五章 基本数字电子电路	110
第一节 基本门电路	110
第二节 逻辑关系表达及运算	113
第三节 组合逻辑电路	115
第四节 基本触发器	120
第五节 时序逻辑电路	122
第六节 数字逻辑芯片及应用	127
第七节 电子电路计算机仿真与设计简介	139
小结	142
习题五	143
第六章 变压器	146
第一节 变压器及其工作原理	146
第二节 变压器的运行	150
第三节 三相变压器的参数及意义	152
第四节 特殊变压器	154
小结	155
习题六	156
第七章 异步电动机	158
第一节 三相异步电动机及工作原理	158
第二节 三相异步电动机的电磁转矩	164
第三节 三相异步电动机的运行	167
小结	171
习题七	172
附录 习题参考答案	174
参考文献	177

第一章 电路分析基础

本章是电工学课程的理论基础，其中所介绍的基本概念，基本定律和基本定理以及电路的分析与计算方法，在今后的电路分析和设计中，具有普遍的适用性。因此，本章对学好整个电工学课程都是非常重要的。

第一节 电路的基本概念

一、电路的概念和属性

实际电路形式各异数量繁多，但概括起来电路是由电器元件，电工设备和电子模块为实现某种特定功能而构造的集合体。电路具有两个基本属性，即结构性和功能性。结构性表明了电路的连接关系和复杂程度，功能性表明了电路的传输行为以及对状态的变换与控制。

人们总是希望，电路所能实现的功能尽可能优秀，而结构尽可能简单。这就是电路设计的基本内涵，即用简单的结构去实现相对优秀的功能。

二、电路的功能

电路的功能有两个是最基本的，即电能的转换、传输与分配和信号的传递与处理，下面举例说明。

1. 电能的转换、传输和分配

最典型的例子是电力系统。发电厂的发电机组把水能或热能转换成电能，通过变压器、输电线路传送给各用户，用户又把电能转换成机械能、热能或光能等。发电机称为发电设备；变压器、输电线路称为输电设备；把电能转换成机械能的电动机、转换成光能的电灯、转换成热能的电炉等称为用电设备，也称为负载。发电设备、输电设备、用电设备统称为电工设备。它们都是电路元件。

2. 信号的传递和处理

常见的例子很多，如扩音机把较弱的声音信号变成较强的信号。电视机接收各发射台发出的不同信号并进行放大、处理，转换成声音和图像。计算机也是由电路组成，它能对键盘或其它输入设备输入的信号进行传递、处理，转换成图形或字符，输出在显示器或打印机上。所有这些都是通过电路把施加的输入信号变换成为所需要的输出信号。

三、电路模型

电工设备和器件都是构成电路的元件。但是，在分析、研究电路问题时，并不注重这些元件的结构和形状，而是把它们加以科学地抽象，用电路符号来表示。这些电路符号表示了不同类型元件电气性能的一般性和普遍性。通常，称这些电路符号为电路模型。

如图 1-1 (a) 所示，是由两个干电池、一个灯泡通过导线和一个开关所构成的手电筒电路，用电路符号表示后，电路如图 1-1 (b) 所示。图中 R 表示灯泡， E 表示电源电势。

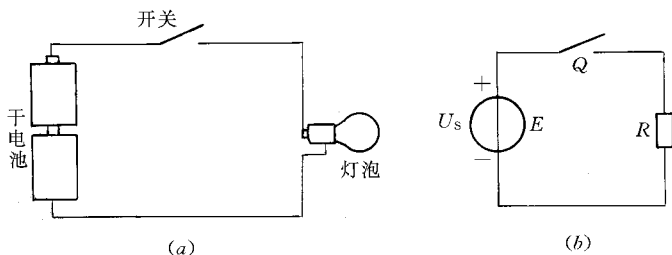


图 1-1 手电筒电路

显然，电路模型是实际电路的抽象形式或符号表达。在电路模型中，每个元件都是理想元件（即不考虑它的几何尺寸所带来的电磁影响，而只考虑它最主要的一种电气参数）。

必须指出，电路模型是为了研究电路方便而引入的一种数学描述，是一种简单形式。它与真实电路是有区别的，但这种区别实际工程中是可以接受的。

四、电路的分类

按照电路的几何尺寸和工作状态，可以分为集中参数电路和分布参数电路。集中参数电路是指电路的几何尺寸远小于电路最高工作效率所对应的波长。反之，称为分布参数电路。

例如，频率等于 50Hz 的交流电，其波长 λ 等于 6km。所以，我们平常见到的电路几乎都可以看作是集中参数的。但对于超远距离的输电线，就是分布参数电路了。

按照电路元件的特性，电路可以分为线性电路和非线性电路，或者定常电路和时变电路。按照电路的工作特性可以分为直流电路，交流电路、无源电路、有源电路、稳态电路、瞬变电路等。

在研究电路时，经常遇到“网络”这个名词。通常网络的涵义是从拓扑学观点考察电路。一般在研究复杂的电路问题时，常把电路称为网络。而在研究比较简单或某一具体电路时较多地使用电路这个名词。

五、电路的基本物理量

1. 电流

电荷的定向运动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量，电流强度为单位时间内通过导体任一横截面的电量，工程上就简称电流。电流不仅表示一种物理现象，而且还是一个物理量，常以字母 i 或 I 表示。

若设在 Δt 时间内通过导体截面的电量为 Δq ，则电流表示为 $i = \Delta q / \Delta t$ 。

若电荷运动的速率是随时间而变化的，此时电流是时间的函数，这种随时间变化的电流叫变动电流，瞬时值表示成 $i = dq/dt$ 。

如果此电流随时间的变化是周期性的，则称其为周期电流，若周期电流满足 $i = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = 0$ ， T 为周期电流的周期，则称为交流电流，简称交流。

若电流不随时间变化，即在相同的时间间隔内通过的电量相等，则这种电流便称为恒定电流，简称直流。直流电流的表示式为

$$I = Q/t$$

式中 Q ——电量, C;

t ——时间, s;

I ——电流, A。

在国际单位制中电流的单位是安培 (A), 简称安。为了使用上的方便, 常用的单位还有毫安 (mA)、微安 (μA)、千安 (kA)。它们的关系是

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

2. 电位及电压

电位是相对于确定的参考点来说的。电路中某点 A 的电位是指单位正电荷在电场力作用下, 自该点沿任意路径移动到参考点所做的功。 A 点的电位用 V_A 表示。

对电位来说, 参考点是至关重要的。第一, 电位是相对的物理量, 不确定参考点, 讨论电位就没有意义。第二, 在同一电路中当选定不同的参考点时, 同一点的电位值是不同的。在分析电路时, 电位的参考点只能选取一个。参考点选定后, 各点的电位值就确定了, 这就是所谓的“电位单值性”。在电工学中, 如果所研究的电路里有接地点, 通常选择接地点作为电位的参考点, 用符号“ \perp ”表示。在电子线路中常取若干导线交汇点或机壳作为电位的参考点, 并用符号“ \perp ”表示。

电路中两点之间的电位差称为这两点间的电压, 用符号 u 或 U 表示。例如电路中 A 、 B 两点之间的电压

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

在国际单位制中电压的单位是伏特 (V), 简称伏。为了使用上的方便, 常用的单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV)。它们的关系是

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

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

3. 电动势

电动势是指单位正电荷在电源力作用下, 自低电位端经电源内部移到高电位端所做的功。其电源可以是化学作用而产生的, 也可以是电磁感应作用而产生的等。例如电池和发电机。

电动势用符号 e 或 E 表示, 其单位也是伏特 (V)。

4. 功率

在电路的分析与计算中, 还经常用到另外一个物理量——功率。

功率是指单位时间内电场力所做的功。用 p 或 P 表示。

由物理学的知识我们知道, 电场力使电荷 Δq 从 A 点移动到 B 点所做的功

$$\Delta w = (V_A - V_B)\Delta q$$

写成微分形式

$$dw = (V_A - V_B)dq$$

而 $i = dq/dt$, 即 $dq = idt$ 代入上式得

$$dw = (V_A - V_B)idt = U_{AB}idt$$

则电场力从 $t_0 \sim t$ 时段所作的功

$$w = \int_{t_0}^t U_{AB} i dt$$

那么单位时间内电力所作的功即功率为

$$p = d w / dt = U_{AB} i \quad (1-2)$$

当电压的单位是伏特，电流的单位是安培时，功率的单位是瓦特，简称瓦（W）。除瓦之外还有千瓦（kW）或毫瓦（mW），它们之间的关系是

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} = 10^6 \text{ mW}$$

六、电压、电流的关联参考方向

在分析和解决较为复杂的电路问题时，各元件上电压、电流的实际方向在分析计算之前很难确定。为此，先假定一个参考方向。

1. 电流的参考方向

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。

在电路中，某些元件电流的真实方向往往事先无法判明，特别是对于交流电路，由于电流的方向随时间交变，某一瞬时电流的真实方向更无法判明。为此，在分析计算电路问题时，必须先假定某一元件电流的方向作为参考方向（正方向）。

电流的参考方向一般用箭头表示，如图 1-2 所示。显然， $I_1 = -I_2$ 。

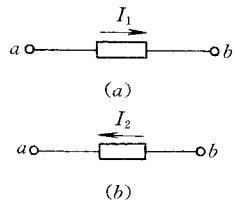


图 1-2 电流的参考方向

电流的参考方向实际上是研究电路的参照系，可以任意假定。当电

流的参考方向确定后，如果计算出的电流为正值，说明电流的实际方向与参考方向一致；若计算出的电流为负值，则说明电流的实际方向与参考方向相反。因而，电流是一个代数量，绝对值代表电流的大小，符号表示方向。在没有假定参考方向以前，分析电流的正负是毫无意义的。

2. 电压的参考方向

电路中两点之间电压的方向，是从高电位端指向低电位端的方向，即电位降的方向。

在分析电路问题时，我们也要假定电压的参考方向，和电流一样，电压的参考方向是任意假定的。一般电压的参考方向用正（+）、负（-）极性符号表示，有时还用双下标形式表示。如图 1-3 所示。

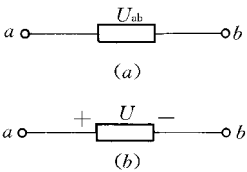


图 1-3 (a)、(b) 中两种表示方法都是指：由假定的高电位端（a 端）指向低电位端（b 端）。当电压的参考方向确定后，分析或计算出的电压若为正值，说明电压的实际方向与参考方向相同；若为负值，说明电压的实际方向和参考方向相反。因此，电压也是代数量。

图 1-3 电压的参考方向

3. 电动势的参考方向

电动势的方向是指电位升高的方向，即从低电位指向高电位的方向，刚好与电压的方向相反。也就是说对于同一电源，如果按其真实方向表示出电压、电动势的方向，则此时的电压、电动势均为正值。因此将有 $E = U_S$ ，它们反应的是同一客观事实：电源正极电位高于电源负极电位。

作为分析与计算电路的一种方法，同样也可以为电动势假定一个参考方向。因此，它和电压、电流一样也是代数量，参考方向的表示方法也相同。如果选取电压 U_S 的参考方向

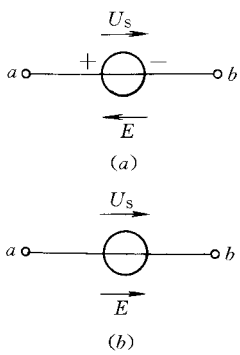


图 1-4 电压与电势的关系

与电动势 E 的参考方向相反, 则 $U_s = E$; 若两者的参考方向相同, 则 $U_s = -E$, 如图 1-4 所示。

4. 电压、电流的关联参考方向

从原则上讲, 电压、电流的参考方向都是可以任意假定的。但对于电阻元件来说, 电压和电流的实际方向总有一固定关系。即电压是从高电位端指向低电位端; 电流是从高电位端流入, 从低电位端流出。因此, 为了分析、计算的方便, 一般情况下, 负载元件选取电压的参考方向与电流的参考方向一致, 这就是电压、电流的关联参考方向。而电源的电流、电压参考方向常选取不关联的。

元件只有在关联参考方向时, 欧姆定律才能表示为 $I = U/R$ 或 $U = IR$; 一段电路上的功率才能表示为 $P = UI$ 。当用上述公式计算的功率为正值时, 表明该电路是吸收 (消耗) 电功率的, 即将电功率转换为非电功率; 反之, 该电路是发出 (产生) 电功率的, 即将非电功率转换为电功率。

第二节 电压源、电流源及等效变换

实际电路中使用的电源种类很多, 但按照它们的特点及其共性, 可将电源归纳为两大类: 电压源及电流源。电压源与电流源是二端有源元件, 是组成电路的重要元件之一, 是电路中电能的来源。

一、电压源及伏安特性

1. 理想电压源

电源的端电压与输出的电流无关, 即

$\frac{\partial u_s}{\partial i} = 0$, 端电压是给定的时间函数, 即 $u = u_s(t) = e(t)$, 称其为理想电压源。理想电压源的电流取决于外电路中负载的大小。其电路符号如图 1-5 (a)。如果理想电压源的电压为常数, 即 $u_s = U_s$, 这种电源称为直流电压源 (又名恒压源)。直流电压源还可以用图 1-5 (b) 的符号表示, 而图 1-5 (b) 也是电池的图形符号, 短线段表示电源的低电位端, 长线段表示电源的高电位端。理想电压源的伏安特性如图 1-5 (c) 所示。

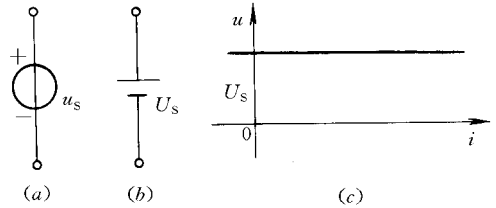


图 1-5 理想电压源及伏安特性

直流电压源还可以用图 1-5 (b) 的符号表示, 而图 1-5 (b) 也是电池的图形符号, 短线段表示电源的低电位端, 长线段表示电源的高电位端。理想电压源的伏安特性如图 1-5 (c) 所示。

2. 实际电压源特性

实际电路中, 理想电压源是不存在的。因为实际电压源内部总是存在着一定的内电阻。因此, 电源端电压将随着输出电流的增加而略有下降。这种实际的电压源可以用一个理想电压源与内阻 R_0 的串联来表示。其电路模型如图 1-6 (a) 所示。

按图中电压和电流的参考方向, 并由物理学中全电路欧姆定律

$$I = \frac{U_s}{R + R_0} \quad (1-3)$$

得

$$IR = U_s - IR_0$$

因

$$U = IR$$

故有

$$U = U_s - IR_0 \quad (1-4)$$

则其电压源的伏安特性如图 1-6 (b) 所示, 它是一条斜线。

在直流电路中, 电压、电流等都大写用字母表示。如果将式 (1-4) 两边同乘以电流 I , 就得到了直流电压源的功率平衡方程。

$$UI = U_s I - I^2 R_0$$

式中 $I^2 R_0$ 是内电阻上消耗的电功率, $UI = I^2 R$ 是负载上消耗的电功率, 这些都是由电压源提供的, 其大小为 $U_s I$ (由于 U_s 与 I 的方向相反, 所以电压源输出电功率)。

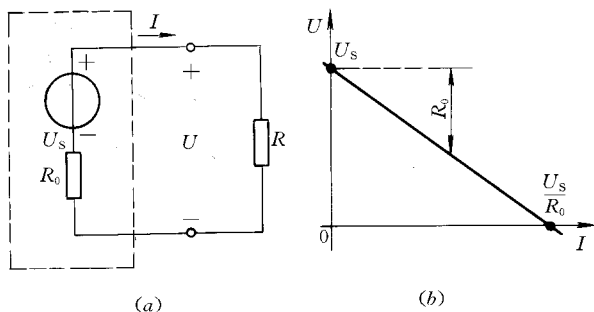


图 1-6 电压源及伏安特性

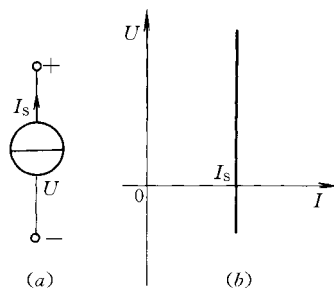


图 1-7 理想电流源及伏安特性

二、电流源及伏安特性

1. 理想电流源

电源输出的电流与端电压无关, 即 $\frac{\partial i_s}{\partial u} = 0$, 输出电流是给定的时间函数, 即 $i = i_s(t)$, 称其为理想电流源。理想电流源的电压取决于外电路中负载的大小。其电路符号如图 1-7 (a) 所示。如果理想电流源的电流为常数, 即 $i = I_s$, 这种电源称为直流电流源 (又名恒流源)。理想电流源的伏安特性如图 1-7 (b) 所示。这是一条平行于电压轴的直线, 说明它的输出电流 $i_s = I_s$, 与端电压及负载均无关。

2. 实际电流源特性

理想电流源在实际电路中是不存在的, 而实际电流源也是有内阻的, 其输出电流随端电压的增加而减小。实际的电流源可以用一个恒流源与内阻并联表示, 其电路模型如图 1-8 (a) 所示。

由图 1-8 可知, 内阻 R_0 上分得的电流为 U/R_0 , 所以输出电流

$$I = I_s - U/R_0 \quad (1-5)$$

其电源的伏安特性曲线如图 1-8 (b) 所示。它也是一条斜线。

在直流电路中, 如果将式 (1-5) 两边同乘以端电压 U , 就得到了

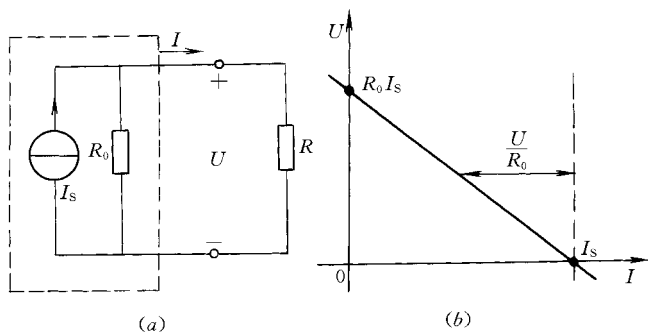


图 1-8 电流源及伏安特性

直流电流源电路的功率平衡方程，即

$$UI = UI_s - U^2/R_0$$

其中， UI_s 是电流源产生的功率， U^2/R_0 是内阻消耗的功率， UI 是实际电流源输出的功率，亦即负载上消耗的功率。

通常对电压源是比较熟悉的，也易于学习掌握，而对电流源则比较生疏。但是，电流源确实是一种客观存在，特别是在电子线路中有着广泛地应用。

三、电压源与电流源的等效变换

实际电源既有理想电压源与内阻串联而成的电压源，又有理想电流源与内阻并联的电流源。如图 1-9 所示。

由图 1-9 (a) 所示电路可写出电压源的伏安特性方程为 $U = U_s - IR_0$ ，等式两边同除以内阻 R_0 并移项得

$$I = U_s/R_0 - U/R_0$$

由图 1-9 (b) 所示电路可写出电流源的伏安特性方程为

$$I = I_s - U/R_0$$

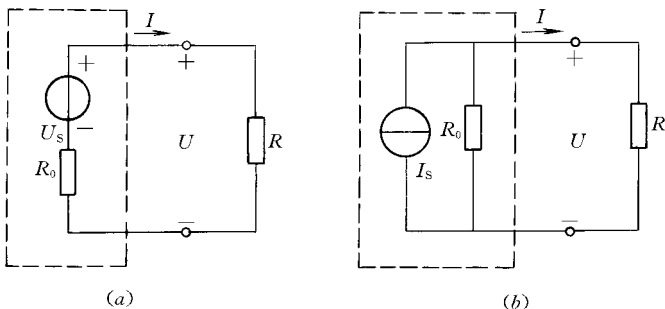


图 1-9 电压源与电流源

比较上列两个方程，若要求电压源与电流源具有相同的伏安特性，使外电路得到相同的端电压和电流，就必须符合下列条件：

- (1) 与理想电压源串联的内电阻必须等于与理想电流源并联的内电阻。
- (2) 理想电压源的电压 U_s (或电动势 E) 必须等于 $I_s R_0$ (电流源的开路电压)。或理想电流源的电流 I_s 必须等于 U_s/R_0 (电压源的短路电流)。
- (3) 理想电压源的电压 U_s (或电动势 E) 的方向与理想电流源的电流 I_s 的方向应相反 (或与电动势 E 的方向应相同)。

在满足上述条件的情况下，电压源与电流源之间就可以进行等效变换。

四、电路的工作状态

电路运行时，有各种不同的工作状态。其中有的状态并不是正常的工作状态，而是事故状态，应尽量避免和消除。因此，了解并掌握电路处于不同状态的条件及特点乃是安全、正确用电的前提。

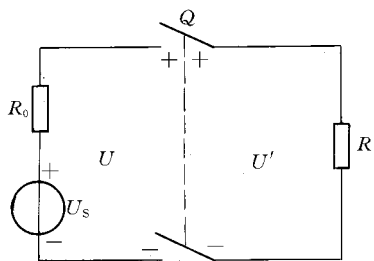


图 1-10 电路工作状态

1. 开路

开路又叫断路，其典型的开路状态如图 1-10 所示，电源与负载之间的开关 Q 打开。开路时，电路中的电流为零，相当于负载电阻无穷大，电源的端电压 $U_0 = U_s$ ，负载的端电压 $U' = 0$ ，电源输出的功率为零。所以开路又名空载。

2. 一般工作状态

在图 1-10 中，合上开关 Q 后，电源与负载接通，电路中产生电流，电路开始了正常的功率转换。此时，电路中的

电流、电源端电压及电源输出的功率分别为

$$I = \frac{U_s}{R + R_0}; U = IR = U_s - IR_0; P = UI$$

3. 额定工作状态

理论上讲，电源的电压越高输出的电流越大，则输出的功率越多。但实际上，电压要受电工设备中绝缘材料的耐压及其它条件的限制，电流要受电工设备温升问题的限制。电压过高和电流过大，都将导致电工设备的损坏。因此，为使电工设备能够长期、正常、安全地运行，必须规定一些必要的限额，这些限额即为额定值。如额定电压、额定电流、额定功率等。

如果电工设备刚好是在额定值下运行，则称为额定工作状态。制造厂家在设计电工设备时，充分考虑了设备运行的经济性、可靠性和使用寿命等诸多因素，经过精确计算得到各个额定值。因此，设备在额定状态下工作时，既充分发挥了设备的能力，又保证了设备的安全可靠性和正常使用寿命，是最经济合理的工作状态。

超过额定值工作时称为过载运行。严重过载将导致设备损坏。低于额定值工作称为欠载。欠载时，不仅设备未能充分利用，而且可能使设备不能正常工作。

4. 短路与短接

电路中任何一部分电路被电阻为零的导线直接接通，使两端电压降为零叫短接。电源在输出端被短接，称为短路，如图 1-11 (a) 所示。这时，电源端电压为零，负载电阻上的电流也为零，而电源的输出电流 $I_d = U_s / R_0$ ，叫短路电流。通常电源内阻很小，故短路电流很大，远大于电源的额定电流，可能会烧坏电源，是一种事故状态。因此，在使用时应注意避免电源短路。

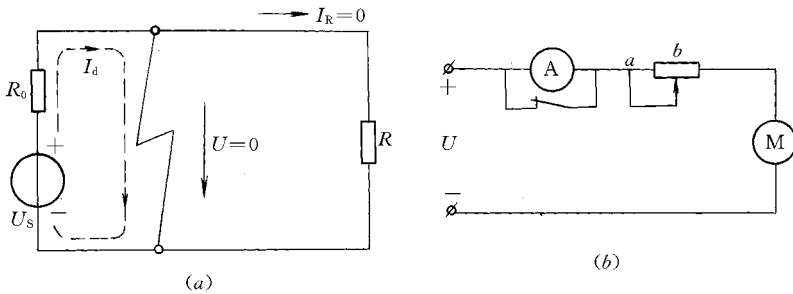


图 1-11 短路与短接

除上述电源短路即事故短路之外，有时由于某种工作需要，将电路的某一部分短接。例如异步电动机在起动时由于电流很大，为了避免过大的起动电流损坏电流表，在起动时将电流表用开关短接，如图 1-11 (b)。

第三节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律所阐明的是电路中电流和电压遵循的基本规律，是分析和计算电路问题的基础，具有十分重要的作用。在叙述基尔霍夫定律之前，首先介绍几个有关的名词术语。

支路：电路中一个或若干个元件串联而成的一段电路叫支路。如图 1-12 中有五条支路，其中有的支路有电源，则称其为有源支路，无电源的称为无源支路。

节点：电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。如图 1-12 中的 A 、 B 都是节点，而 1、2 两点是等电位点，从电的性质上看，它们就是一个点，故在图中用虚线标出，表示一个节点。因此，电路中共有三个节点。

回路：由若干条支路所组成的闭合路径称为回路。图 1-12 中有六个回路，如 $A-R_0-I_S-A$ ； $A-B-R_1-C-I_S-A$ ； $B-R_2-C-R_0-A-B$ 等都是回路。

网孔：内部不含有支路的回路称为网孔。如图 1-12 所示有三个网孔。

一、基尔霍夫电流定律 (KCL)

任一时刻，对电路中任一节点，所有支路电流的代数和恒等于零。这就是基尔霍夫电流定律，又名节点电流定律，简称 KCL (KCL 为“Kirchhoff's Current Law”的缩写)。其数学表达式为

$$\sum i(t) = 0 \quad (1-6)$$

若规定流入节点的电流取正值，则流出节点的电流即为负值，反之亦可。因此，在列写节点电流方程之前，必须首先假定各支路电流的参考方向，否则将无法列出方程。如图 1-13 所示的节点 A 中，在图示电流的参考方向下，可写出节点 A 的节点电流方程为

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

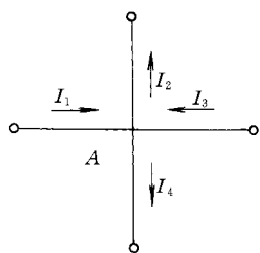


图 1-13 节点

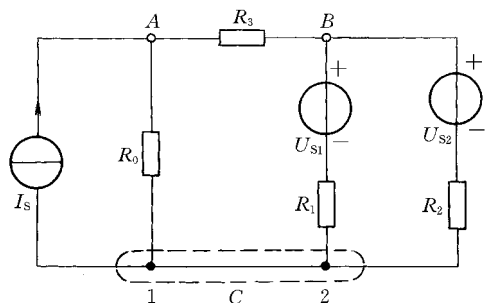


图 1-12 电路举例

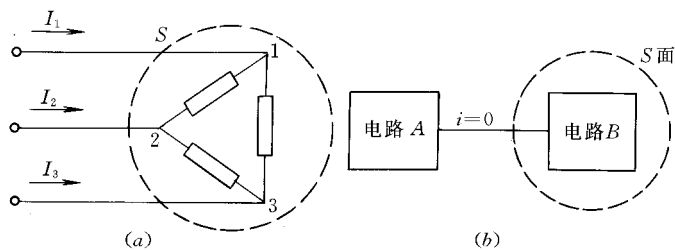


图 1-14 广义节点

基尔霍夫电流定律不仅适用于节点，也可以推广适用电路中任一假设的封闭面，即：在任一时刻，电路中任一封闭面上各支路电流的代数和恒等于零。这种假设的封闭面所包围的区域叫做电路的广义节点。如图 1-14 (a) 所示，流入封闭面 S 的三个支路电流将有

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

如图 1-14 (b) 所示，电路 A 和电路 B 之间有一条导线相连，作一封闭面 S 包围电路 B ，由上述定律得流过导线的电流必然为零。因此得出一个重要结论：电流只能在闭合的电路内流通。

基尔霍夫电流定律与各支路元件的性质无关。因此，不论是线性电路还是非线性电路，

它都有普遍的适用性。

二、基尔霍夫电压定律 (KVL)

任一时刻, 沿闭合回路绕行一周, 各支路元件电压的代数和恒等于零。这就是基尔霍夫电压定律, 又名回路电压定律, 简称 KVL (KVL 为 “Kirchhoff's Voltage Law” 的缩写)。其数学表达式为

$$\sum u(t) = 0 \quad (1-7)$$

在列写回路电压方程时, 必须首先假定各支路电流的参考方向和回路电压降的绕行方向。凡电流的参考方向与回路绕行方向相同的, 则其电流在电阻上所形成的电压取正号, 反之取负号; 凡电源电压的参考方向与回路的绕行方向相同的, 则其电压前取正号, 反之取负号。如图 1-15 所示的某一电路中的一个回路, 它由 4 条支路组成。选各支路电压分别为 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CF} 、 U_{FA} , 回路绕行方向为顺时针, 则有

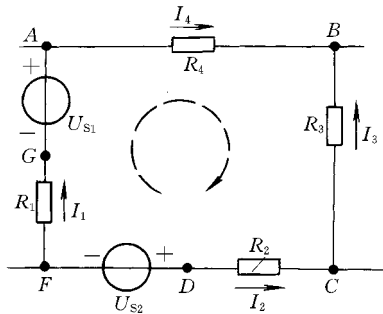


图 1-15 KVL 举例

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CF} + U_{FA} = 0 \quad (1-8)$$

根据元件电压、电流关系, 将有

$$U_{AB} = I_4 R_4$$

$$U_{BC} = -U_{CB} = -(I_3 R_3) = -I_3 R_3$$

$$U_{CF} = U_{CD} + U_{DF} = -I_2 R_2 + U_{S2}$$

$$U_{FA} = U_{FG} + U_{GA} = I_1 R_1 - U_{AG} = I_1 R_1 - U_{S1}$$

把此四式代入式 (1-8) 并整理得

$$I_4 R_4 - I_3 R_3 - I_2 R_2 + U_{S2} + I_1 R_1 - U_{S1} = 0$$

通过上面的例子我们可了解到, 在列写回路电压方程前, 若不假设各支路电流的参考方向及回路的绕行方向, 将无法列出回路电压方程。

将式 (1-8) 移项得

$$-U_{AB} = U_{BC} + U_{CF} + U_{FA}$$

即

$$U_{BA} = U_{BC} + U_{CF} + U_{FA}$$

上式表明, 电路中两点间的电压与选择的路径无关这一重要性质。回路电压定律与节点电流定律的适用性一样, 它也适用于线性电路和非线性电路。

在分析、计算电路问题时, 只要由节点电流定律或回路电压定律列写出方程, 其求解就是纯数学问题。故这里不再讨论方程中正、负号的问题。

第四节 电路的基本分析方法

在物理学中, 能够用电阻串、并联将电路化简, 并用欧姆定律直接求解的电路, 都是简单电路。从本节开始, 我们将介绍复杂电路的分析与计算。其主要内容是给定电路的结构及元件的参数, 要求计算出电路中各支路的电流或电压, 有时还要求计算元件的功

率等。

不论实际电路如何复杂，它都是由支路和节点组成。因此，各支路电流和各部分电压必定遵循基尔霍夫的两个定律及欧姆定律。所以它们是分析与计算电路的理论基础和基本工具。解决复杂电路问题的基本方法有支路电流法、回路电流法和节点电压法。这里只介绍支路电流法和节点电压法。

一、支路电流法

支路电流法是以支路电流为网络变量，根据 KCL 和 KVL 及欧姆定律，直接列出电路中的节点电流方程和回路电压方程，然后联立求解，求出各支路电流。

在电路中如果有 b 条支路，应用支路电流法计算各支路电流时，就必须列出 b 个独立的方程。网络拓扑学理论指出：若电路中有 b 条支路、 n 个节点和 m 个网孔时，将有 $(n-1)$ 个独立的节点电流方程和 m 个独立的回路电压方程，且 $b=m+n-1$ 。

对于图 1-16 所示发电机与蓄电池并联运行的汽车直流电路，它有三条支路、两个节点及两个网孔。若电路中的电阻与电压均已知，要求计算各支路电流。

首先应假设各支路电流的参考方向和回路的绕行方向，为了叙述方便对各节点标上字母，如图 1-16 所示，根据 KCL 应有

$$\text{节点 } a \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{节点 } b \quad -I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

比较上面两式可知，只有一个 $(n-1)$ 是独立的。

根据 KVL 有

$$\text{回路 } 1 \quad U_{S2} - I_2 R_2 + I_1 R_1 - U_{S1} = 0 \quad (1-9)$$

$$\text{回路 } 2 \quad I_3 R_3 + I_2 R_2 - U_{S2} = 0 \quad (1-10)$$

$$\text{回路 } 3 \quad I_3 R_3 + I_1 R_1 - U_{S1} = 0 \quad (1-11)$$

如果把式 (1-9)、式 (1-10) 两式相加，恰好得到式 (1-11)。因此，只有两个（即 $m=2$ ）独立的回路电压方程。对上述电路任选一个节点电流方程和两个独立的回路电压方程联立求解，即可求出三个未知电流。

综上所述，用支路电流法求解电路问题的步骤如下：

- 1) 在电路图中先假设各支路电流的参考方向和网孔（回路）的绕行方向，并对各节点标上符号。
- 2) 根据基尔霍夫电流定律列出 $n-1$ 个独立的节点电流方程。
- 3) 根据基尔霍夫电压定律列出 m 个独立的回路电压方程。
- 4) 所列上述方程联立求解，即可求出各支路电流。

为了保证列出的回路电压方程是独立的，每一个回路电压方程中必须有一条未被其它回路列写过的新支路。对平面电路一般用网孔作回路，所列的方程是独立的，是一种简便的方法。对于非平面电路，独立回路可用网络拓扑方法选择。当电路中有理想电流源时，电

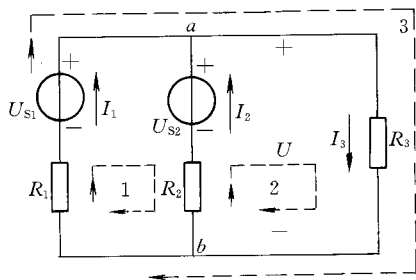


图 1-16 发电机与蓄电池并联