

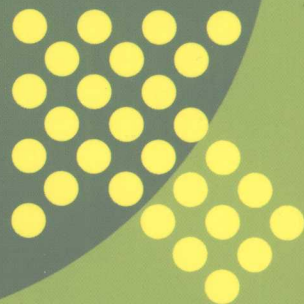
21世纪高等学校规划教材



DIANGONGXUE

电工学 (少学时)

房晔 徐健 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分为 9 章，主要内容包括直流电路、正弦交流电路、变压器、三相电动机、半导体二极管及其应用电路、双极型晶体管与基本放大电路、集成运算放大器及其应用、门电路和组合逻辑电路、触发器及时序逻辑电路。每章后有相关习题，且书后附有 TTL 门电路、触发器和计数器的部分品种型号等参考材料。

本书可作为高等院校非电专业电工学少学时课程的本科教材，也可作为高职高专相关专业和函授教材，同时可供工程技术人员自学或参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学：少学时/房晔，徐健主编. —北京：中国电力出版社，2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8970 - 7

I. 电… II. ①房…②徐… III. 电工学—高等学校—教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 097805 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 7 月第一版 2009 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 299 千字

定价 20.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书为21世纪高等学校规划教材。

本书是根据教育部颁发的“电工电子技术”教学基本要求而编写的,可作为高等工科院校及高等职业技术学院非电类专业电工电子技术课程的教材。

鉴于非电类专业数量剧增,尽管适合各类专业的《电工电子技术》教材层出不穷,但适用短学时教学的,尤其是内容深入浅出,语言通俗易懂、简明扼要的教材却较少。为此,编写了这本教材。在内容安排上,本书照顾到非电类专业(针对短学时)的特点,又考虑到学生今后在电工电子技术方面的进一步需求,遵照承上启下、循序渐进的原则,系统地介绍了电路的基本概念、基本理论及基本分析方法,电动机的基本原理、电机控制电路及安全用电的基本知识,半导体及半导体器件,各种放大电路的构成、负反馈放大器及其电路的基本分析方法,数字电路中的中规模集成器件的构成及原理分析等内容。

本书在内容体系上,具有自身的完整性和系统性;在叙述方法上,力求物理概念准确、分析过程简明,深入浅出,便于学生理解和记忆;在语言文字上,通俗易懂、简明扼要。本书采用最新国家标准规定的电气图用图形符号。

本书由房晔、徐健和王晓华负责统稿及定稿,参加编写工作的人员有房晔、徐健、王晓华、康涛、马丽萍、吴园、杨幸芳和袁洪琳。本书由北京交通大学李守成老师担任主审,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平和经验所限,教材中难免存在缺点和不足,希望使用本教材的教师、学生以及广大读者提出批评和建议,以便今后不断完善。

编 者

2009.5.15

目 录

前言	1
第1章 直流电路	1
1.1 电路的组成	1
1.2 电流、电压的参考方向	2
1.3 理想电路元件	2
1.4 实际电源两种模型的等效变换	6
1.5 基尔霍夫定律	8
1.6 支路电流法	10
1.7 叠加定理	12
1.8 戴维宁定理	13
1.9 电位	15
习题	16
第2章 正弦交流电路	20
2.1 正弦交流电的基本概念	20
2.2 正弦交流电的相量表示法	23
2.3 单一参数的正弦交流电路	27
2.4 串联交流电路	32
2.5 交流电路的功率	37
2.6 电路的功率因数	39
2.7 电路中的谐振	41
2.8 三相交流电路	42
习题	49
第3章 变压器	51
3.1 磁路的基本概念与基本定律	51
3.2 交流铁芯绕组电路	55
3.3 变压器	56
3.4 几种常用变压器	60
3.5 安全用电	63
习题	65
第4章 三相电动机	67
4.1 三相异步电动机的结构和工作原理	67
4.2 三相异步电动机的启动	76
4.3 三相异步电动机的制动	79
习题	83

第 5 章 半导体二极管及其应用电路	85
5.1 半导体基础知识	85
5.2 半导体二极管	88
5.3 半导体二极管的简单应用	90
5.4 整流滤波电路	92
5.5 稳压二极管及其稳压电路	96
习题	98
第 6 章 双极型晶体管与基本放大电路	101
6.1 双极型晶体管	101
6.2 共射极放大电路	107
6.3 共集电极放大电路	117
6.4 多级放大电路	119
6.5 差动放大电路	122
6.6 功率放大电路	124
6.7 场效应管及其放大电路	128
习题	131
第 7 章 集成运算放大器及其应用	137
7.1 集成运算放大器的基础知识	137
7.2 负反馈放大电路	139
7.3 基本运算电路	146
7.4 电压比较器	150
7.5 RC 正弦波振荡电路	152
习题	156
第 8 章 门电路和组合逻辑电路	160
8.1 逻辑代数与逻辑门电路	160
8.2 组合逻辑电路的分析与设计	168
8.3 常见组合逻辑电路	170
习题	172
第 9 章 触发器及时序逻辑电路	174
9.1 双稳态触发器	174
9.2 时序逻辑电路	177
9.3 由 555 定时器构成的单稳态触发器和无稳态触发器	180
习题	183
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	184
附录 B 常用半导体分立器件的参数	185
附录 C 半导体集成电路型号命名方法	188
附录 D 常用半导体集成电路的参数和符号	189
附录 E 数字集成电路各系列型号分类表	190
附录 F TTL 门电路、触发器和计数器的部分品种型号	190
参考文献	191

第 1 章 直 流 电 路

本章是电工电子技术课程的重要理论基础,着重讨论电路的基本知识、基本定律以及电路的分析和计算方法。这些知识对直流电路和交流电路、电机电路和电子电路都具有实用意义。

1.1 电路的组成

电路是电流流通的路径。它是由一些电气设备和元器件按一定方式连接而成的。复杂的电路呈网状,又称网络。电路和网络是两个通用的术语。电路的组成方式不同,功能也不同,它的一种作用是实现能量的输送和转换。

常见的各种照明电路和动力电路就是用来输送和转换能量的。例如在图 1-1 所示的简单照明电路中,电池把化学能转换成电能供给照明灯,照明灯再把电能转换成光能作照明之用。对于这一类电路来说,一般要求它具有较小的能量损耗和较高的效率。

电路的另一种作用是传递和处理信号。常见的例子如收音机和电视机电路。收音机和电视机中的调谐电路是用来选择所需要的信号。由于收到的信号很弱,需要放大电路对信号进行放大。调谐电路和放大电路的作用就是完成对信号的处理。

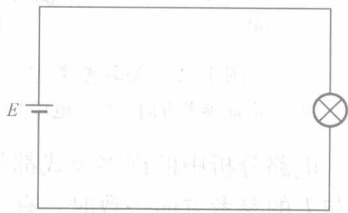


图 1-1 简单照明电路

组成电路的元器件及其连接方式虽然多种多样,但都包含有电源、负载和连接导线等三个基本组成部分。电源是将非电形态的能量转换为电能的供电设备。例如蓄电池、发电机和信号源等。其中蓄电池将化学能转换成电能,发电机将机械能转换成电能,而信号源则将非电量转换成电信号。负载是将电能转换成非电形态能量的用电设备,例如电动机、照明灯和电炉等。其中电动机将电能转换成机械能,照明灯将电能转换成光能,而电炉则将电能转换成热能。导线起着沟通电路和输送电能的作用。

实际的电路除以上三个基本部分以外,还常常根据实际工作的需要增添一些辅助设备。例如接通和断开电路用的控制电器(如刀开关)和保障安全用电的保护装置(如熔断器)等。

从电源来看,电源本身的电流通路称为内电路,电源以外的电流通路称为外电路。当电路中的电流是不随时间变化的直流电流时,这种电路称为直流电路,简称 DC。当电路中的电流是随时间按正弦规律变化的交流电流时,这种电路称为交流电路,简称 AC。我国国家标准规定不随时间变化的物理量用大写字母表示,随时间变化的物理量用小写字母表示,因此在本书中用 I 、 U 、 E 表示直流电路物理量(电流、电压、电动势),用 i 、 u 、 e 表示交流电路物理量。

1.2 电流、电压的参考方向

在进行电路的分析和计算时,需要知道电压和电流的方向。在简单直流电路中,可以根据电源的极性判别出电压和电流的实际方向;但在复杂的直流电路中,电压和电流的实际方向往往是无法预知的,而且可能是待求的。在交流电路中,电压和电流的实际方向是随时间不断变化的。因此,在这些情况下,只能给它们假定一个方向作为电路分析和计算时的参考。这些假定的方向称为参考方向或正方向。如果根据假定的参考方向解得的电压或电流为正值,则说明假定的参考方向与其实际方向一致;如果解得的电压或电流为负值,则说明所假定的参考方向与实际方向相反。因而在选定的参考方向下,电压和电流都是代数量。今后在电路图中所画的电压和电流的方向都是参考方向。

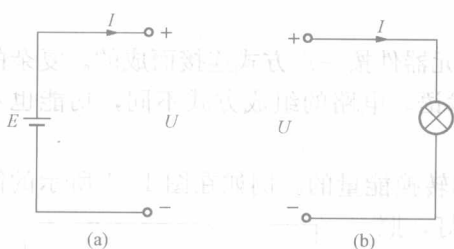


图 1-2 关联参考方向

(a) 电流参考方向; (b) 电压参考方向

原则上参考方向是可以任意选择的,但是在分析某一个电路元件的电压与电流的关系时,需要将它们联系起来选择,这样设定的参考方向称为关联参考方向。今后在单独分析电源或负载的电压与电流的关系时选用如图 1-2 所示的关联参考方向。其中电源电流的参考方向是由电压参考方向所假定的低电位经电源流向高电位;负载电流的参考方向是由电压参考方向所假定的高电位经负载流向低电位。符合这种规定的参考方向称为参考方向一致。

电路分析中的许多公式都是在规定的参考方向下得到的,例如大家熟悉的欧姆定律,在 U 与 I 的参考方向一致时,有

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

当 U 与 I 的参考方向非关联时,为了使所得结果与实际符合,式 (1-1) 应改写为

$$R = -\frac{U}{I} \quad (1-2)$$

1.3 理想电路元件

由实际电路元件组成的电路称为电路实体。由于电路实体的形式和种类多种多样、不胜枚举,为了找出电路实体分析和计算的共同规律,研究具体电路建立分析和计算的方法,把电路实体中各个实际的电路元件都用表征其物理性质的理想电路元件来代替。这种用理想电路元件组成的电路称为电路实体的电路模型。电路理论就是以电路模型而不是以电路实体为研究对象的。器小实际电路元件的物理性质,从能量转换的角度来看,有电能的产生、电能的消耗以及电场能量和磁场能量的储存。理想电路元件就是用来表征上述这些单一物理性质的元件,它有以下两类。

1.3.1 理想无源元件

理想无源元件包括电阻元件、电容元件和电感元件三种。表征上述三种元件电压与电流关系的物理量为电阻、电容和电感,它们又称为元件的参数。一提起这三个名词,人们往往

会立即联想起实际电路元件,如电阻器、电容器和电感器。它们都是人们为得到一定数值的电阻、电容或电感而特意制成的元件。严格地说这些实际电路元件都不是理想的,但在大多数情况下,可将它们近似看成理想电路元件。正是这个缘故,人们习惯上也以这三种参数的名字来称呼它们。这样,电阻、电容和电感这三个名词既代表了三种理想电路元件,又是表征它们量值大小的参数。

1. 电阻

电阻是表征电路中消耗电能的理想元件;电容是表征电路中储存电场能的理想元件;电感是表征电路中储存磁场能的理想元件。电阻又称耗能元件,电容和电感又称储能元件。

欧姆定律是用来说明电阻中电压与电流关系的基本定律。电流流过电阻时要消耗电能,所以电阻是一种耗能元件。若电路的某一部分只存在电能的消耗而没有电场能和磁场能的储存,这一部分电路便可用图 1-3 所示的电阻元件来代替。图 1-3 中电压和电流都用小写字母表示,以示它们可以是任意波形的电压和电流。电压 u 与电流 i 的比值 R 为

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 R 称为电阻,单位是 Ω (欧姆)。在图 1-3 所示的关联参考方向下,若 R 为一大于零的常数,这种电阻称为线性电阻。(虽然大于零,但不是常数,则这种电阻称为非线性电阻)本章主要讨论由线性电阻和理想有源元件组成的线性电路。

在直流电路中,电阻的电压与电流的关系可用式 (1-3) 表示,它们的乘积即为电阻上消耗的功率,即

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{I} \quad (1-4)$$

2. 电感

电感是用来表征电路中磁场能存储这一物理性质的理想元件。如图 1-4 (a) 所示为用导线绕制的实际电感线圈,通入电流 i 会产生磁通 Φ ,若磁通 Φ 与线圈 N 匝相交链,则磁通链 $\psi = N\Phi$ 。根据法拉第电磁感应定律,电感元件两端电压和通过电感元件的电流为关联参考方向时,有

$$u = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-5)$$

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1-6)$$

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-7)$$

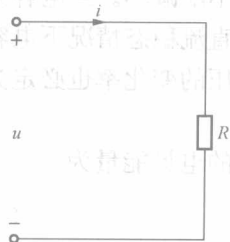


图 1-3 电阻

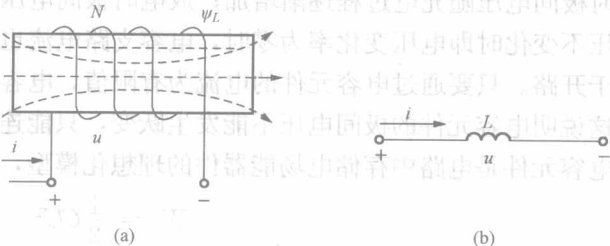


图 1-4 电感

(a) 电感器; (b) 理想电感元件

式(1-5)~式(1-7)中,当电压单位为V、电流单位为A,磁通链单位为Wb,时间单位为s(秒)时,电感的单位为H(亨利)。

式(1-7)表明:对L值一定的线性电感线圈而言,任意时刻元件两端产生的自感电压与通过该元件的电流变化率成正比。电感线圈上的这种微分(或积分)的伏安关系说明,当通入电感元件中的电流是稳恒值电流时,由于电流变化率为零,电感元件两端的自感电压 u_L 也为零,即直流下电感元件相当于短路;当电感电压 u_L 为有限值时,通入元件的电流的变化率也为有限值,此时电感中的电流不能跃变,只能连续变化,即电流变化时伴随着自感电压的存在,因此又把电感线圈称为动态元件。

本书只讨论线性电感元件。线性电感元件的理想化电路模型符号如图1-4(b)所示,当电感元件不消耗电能时,可认为它是电路中存储磁场能器件的理想化电路元件,储存的磁场能为

$$W_L = \frac{1}{2}LI^2 \quad (1-8)$$

式(1-8)中,当电感单位为H(亨利),电流单位为A(安培)时,磁场能的单位为J(焦耳)。式(1-8)说明:电感中所存储的能量与电感中流过的电流平方成正比。

3. 电容

电容是用来表征电路中电场能储存这一物理性质的理想元件。图1-5所示为电容元件的图形符号,电容元件的参数用电容量C表示。当电容元件两端的电压与电容充、放电电流为关联参考方向时,则电容器极板上的电荷与电容器两端的电压关系为

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-9)$$

式(1-9)中电容C的大小反映了电容元件储存电场能的能力,同电感元件L相似。当电压的单位为V(伏),电量的单位为C(库仑)时,电容的单位为F(法拉)。当电容元件两端电压和其支路电流参考方向关联时,有

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

式(1-10)表明:对一定容量C的电容元件而言,任意时刻,元件中通过的电流与该时刻电压变化率成正比。电容也是动态元件。

由式(1-10)可知,只要电容元件电流不为零,它一定是在充电(或放电)状态下,充电时极间电压随充电过程逐渐增加;放电时极间电压随放电过程不断减小。当电容元件极间电压不变化时即电压变化率为零时,电容支路电流也为零,因此直流稳态情况下电容元件相当于开路。只要通过电容元件的电流为有限值,电容元件两端电压的变化率也必定为有限值,这说明电容元件的极间电压不能发生跃变,只能连续变化。

电容元件是电路中存储电场能器件的理想化模型,元件上存储的电场能量为

$$W_C = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1-11)$$

式(1-11)中,当电容C的单位为F(法拉),电压U的单位为V(伏特)时,磁场能的单位为J(焦耳)。式(1-11)说明:电容中所存储的能量与电容两端的电压平方成正比。

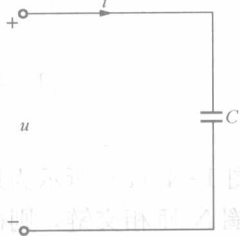


图1-5 电容元件的图形符号

1.3.2 理想有源元件

理想有源元件是从实际电源元件中抽象出来的。当实际电源本身的功率损耗可以忽略不计，而只起产生电能的作用，这种电源便可以用一个理想有源元件来表示。理想有源元件分为电压源和电流源两种。

1. 电压源

电压源又称恒压源，符号如图 1-6 (a) 所示。

它的输出电压与输出电流之间的关系称为伏安特性，如图 1-6 (b)

所示。电压源的特点是：输出电压 U 是由它本身所确定的定值，与输出电

流和外电路的情况无关，而输出电流 I 不是定值，与输出电压和外电路的情况有关。例如空载时，输出电流 $I=0$ ；短路时， $I \rightarrow \infty$ ；输出端接有电阻 R 时， $I = \frac{U}{R}$ ，而电压 U 却始终不变。因此，凡是与电压源并联的元件（包括下面即将叙述的电流源在内），其两端的电压都等于电压源的电压。

实际的电源，例如大家熟悉的干电池和蓄电池，在其内部功率损耗可以忽略不计时，即电池的内电阻可以忽略不计时，便可以用电压源来代替，其输出电压 U 就等于电池的电动势 E 。

2. 电流源

电流源又称恒流源，符号如图 1-7 (a) 所示。图 1-7 (b) 是它的伏安特性。电流源的特点是：输出电流 I 是由它本身所确定的定值，与输出电压和外电路的情况无关，而输出电压 U 不是定值，而与外电路的情况有关。例如短路时，输出电压 $U=0$ ；空载时， $U \rightarrow \infty$ ；输出端接有电阻 R 时， $U=IR$ ，而电流 I 却始终保持不变。因此，凡是与电流源串联的元件（包括电压源在内），其电流都等于电流源的电流。

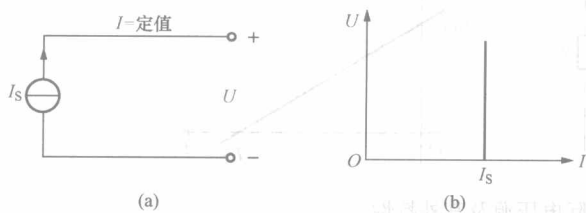


图 1-7 理想电流源

(a) 图形符号；(b) 伏安特性

实际的电流源，例如光电池在一定的光线照射下，能产生一定的电流。在其内部的功率损耗可以忽略不计时，便可以用电流源来代替，其输出电流就等于光电池产生的电流。实际电源元件，例如蓄电池，它既可以用作电源，将化学能转换成电能供给负载；而充电时，它又可看作负载，将电能转换为化学能。

1.3.3 电源与负载的判别

理想有源元件也有两种工作状态，电源状态和负载状态。可根据 U 、 I 的实际方向判别电源的工作状态，当它们的电压和电流的实际方向与图 1-2 (a) 中规定的电源关联参考方向相同，即电流从“+”端流出时，电源发出功率；当它们的电压和电流的实际方向与图 1-2 (b) 中规定的负载关联参考方向相同，即电流从“-”端流出时，电源吸收功率。

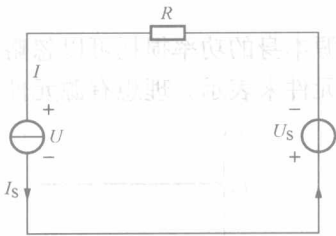


图 1-8 [例 1-1] 电路图

【例 1-1】 在图 1-8 所示直流电路中, 已知电压源的电压 $U_s=6\text{V}$, 电流源的电流 $I_s=6\text{A}$, 电阻 $R=2\Omega$ 。求:

- (1) 电压源的电流和电流源的电压;
- (2) 讨论电路的功率平衡关系。

解 (1) 电压源的电流和电流源的电压:
由于电压源与电流源串联, 故

$$I = I_s = 6(\text{A})$$

根据电流的方向可知

$$U = U_s + RI_s = 6 + 2 \times 6 = 18(\text{V})$$

(2) 电路中的功率平衡关系:

由电压和电流的方向可知, 电压源处于负载状态, 它取用的电功率为

$$P_L = U_s \times I = 6 \times 6 = 36(\text{W})$$

电流源处于电源状态, 它输出的电功率为

$$P_O = UI_s = 18 \times 6 = 108(\text{W})$$

电阻 R 消耗的电功率为

$$P_R = RI_s^2 = 2 \times 6^2 = 72(\text{W})$$

可见, $P_O = P_L + P_R$, 电路中的功率是平衡的。

1.4 实际电源两种模型的等效变换

实际电压源模型可以由电压源 U_s 和内阻 R_s 串联组成, 如图 1-9 所示, 其端口伏安特性可表示为

$$U = U_s - R_s I \quad (1-12)$$

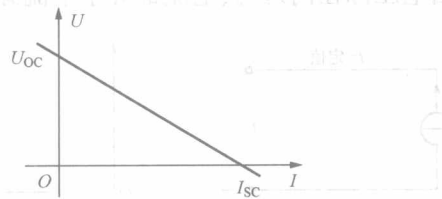
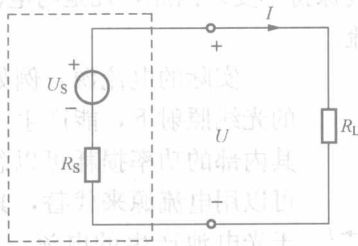


图 1-9 实际电压源及其外特性

若 $R_s=0$, 即为理想电压源, U_{oc} 称为开路电压, I_{sc} 称为短路电流。这里

$$U_{oc} = U_s$$

$$I_{sc} = \frac{U_s}{R_s}$$

实际电流源模型可以由电流源 I_s 和内阻 R_s 并联组成, 如图 1-10 所示, 其端口伏安特性可表示为

$$I = I_s - \frac{U}{R_s} \quad (1-13)$$

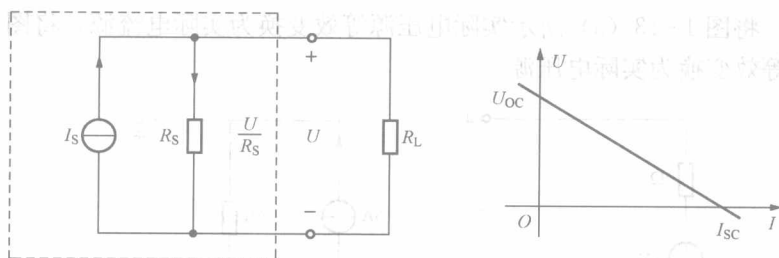


图 1-10 实际电流源及其外特性

若 $R_S = \infty$ ，则为理想电流源，其开路电压和短路电流分别为

$$U_{OC} = R_S I_S$$

$$I_{SC} = I_S$$

实际电压源模型与实际电流源的等效变换如图 1-11 所示。

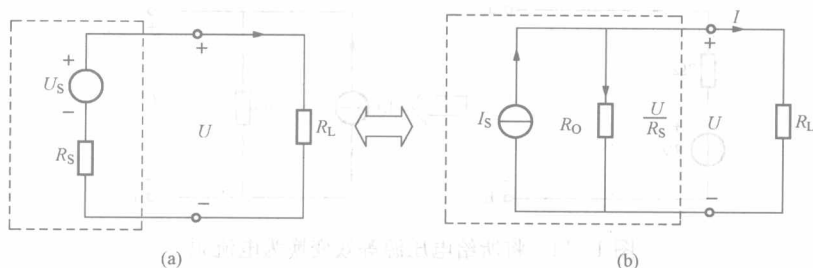


图 1-11 实际电压源模型与实际电流源模型的等效变换

(a) 电压源；(b) 电流源

由图 1-11 (a) 得

$$U = U_S - R_S I$$

由图 1-11 (b) 得

$$U = I_S R_O - I R_O$$

可见，等效变换条件为

$$\begin{cases} U_S = R_O I_S \\ R_O = R_S \end{cases} \quad (1-14)$$

在进行电源等效变换时，要注意以下几点。

(1) 实际电压源模型和实际电流源模型的等效关系只对外电路而言，对电源内部则是不等效的。例如当 $R_L = \infty$ 时，电压源模型内阻 R_S 中不损耗功率，而电流源模型的内阻 R_O 中则损耗功率。

(2) 等效变换时，两电源的参考方向要一一对应，如图 1-12 所示。

(3) 理想电压源与理想电流源之间不能等效互换。

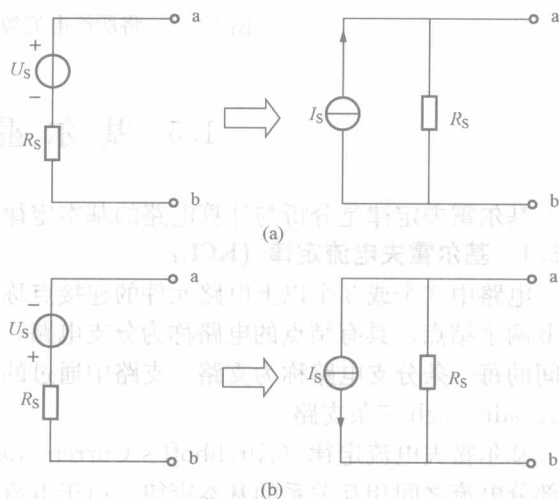


图 1-12 实际电压源与实际电流源等效互换

【例 1-2】 将图 1-13 (a) 所示实际电压源等效变换为实际电流源, 将图 1-13 (b) 所示实际电流源等效变换为实际电压源。

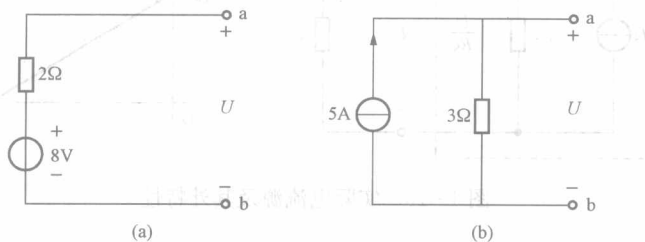


图 1-13 [例 1-2] 电路图

(a) 原电路; (b) 变换成电压源电路

解 转换过程如图 1-14 和图 1-15 所示。

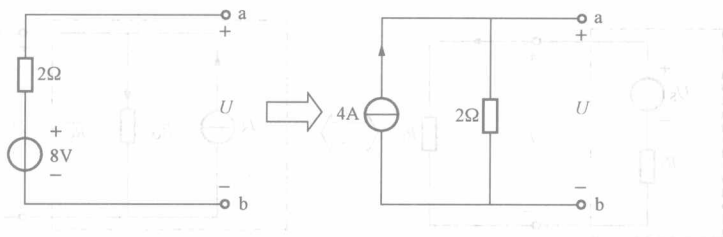


图 1-14 将所给电压源等效变换为电流源

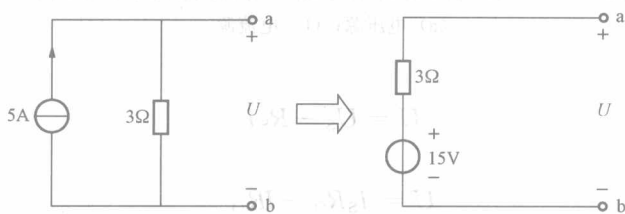


图 1-15 将所给电流源等效变换为电压源

1.5 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是分析与计算电路的基本定律, 又分为电流定律和电压定律。

1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

电路中 3 个或 3 个以上电路元件的连接点称为结点。例如在图 1-16 所示的电路中有 a 和 b 两个结点。具有结点的电路称为分支电路, 不具有结点的电路称为无分支电路。两结点之间的每一条分支电路称为支路。支路中通过的电流是同一电流。在图 1-16 所示电路中有 acb、adb、aeb 三条支路。

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL), 是说明电路中任何一个结点上各部分电流之间相互关系的基本定律。由于电流的连续性, 流入任何结点的电流之和必定等于流出该结点的电流之和。例如对图 1-16 所示电路的结点 a 来说, 有

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-15)$$

或写成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

这就是说,如果流入结点的电流前面取正号,流出结点的电流前面取负号,那么结点上电流的代数和就等于零。这一结论不仅适用于结点 a,显然也适用于任何电路的任何结点,而且不仅适用于直流电流,对任意波形的电流来说,上述结论在任一瞬间也是适用的。因此基尔霍夫电流定律可表述为:在电路的任何一个结点上,同一瞬间电流的代数和等于零。用公式表示,即

$$\sum i = 0 \quad (1-16)$$

在直流电路中为

$$\sum I = 0 \quad (1-17)$$

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路中任何结点,而且还可以推广应用于电路中任何一个假定的闭合面。例如对于图 1-17 所示的闭合面来说,电流的代数和应等于零,即

$$I_1 - I_3 - I_6 - I_7 = 0 \quad (1-18)$$

由于闭合面具有与结点相同的性质,因此称为广义结点。

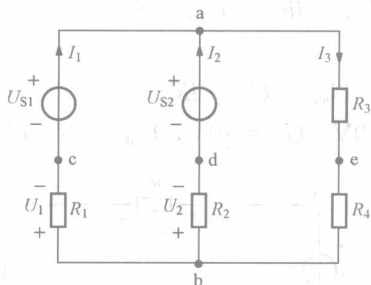


图 1-16 基尔霍夫定律

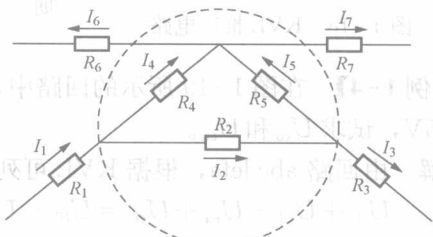


图 1-17 广义结点

【例 1-3】 如图 1-17 所示,已知 $I_1=3\text{A}$, $I_3=-2\text{A}$, $I_6=7\text{A}$, 求 I_7 。

解 根据图中标出的电流参考方向,应用基尔霍夫电流定律,分别由结点对图中假想一封闭面(如图 1-17 中虚线所示),列出电流方程(称为结点电流方程)

$$I_1 - I_3 - I_6 - I_7 = 0$$

$$I_7 = I_1 - I_3 - I_6 = 3 + 2 - 7 = -2(\text{A})$$

I_7 为负值,说明实际方向与规定正方向相反。

1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

由电路元件组成的闭合路径称为回路。在图 1-16 所示电路中有 adbca、adbea、aebca 3 个未被其他支路分割的单孔回路,称为网孔。

基尔霍夫电压定律 (KVL),简称 KVL,是说明电路中任何一个回路中各部分电压之间相互关系的基本定律。例如对图 1-16 所示电路中的回路 adbca 来说,由于电位的单值性,若从 a 点出发,沿回路环行一周又回到 a 点,电位的变化应等于零。因而在该回路中与回路环行方向一致的电压(电位降)之和,必定等于与回路环行方向相反的电压(电位升)之和,即

$$U_{S2} + U_1 = U_{S1} + U_2$$

或改写成

$$U_{S2} + U_1 - U_{S1} - U_2 = 0 \quad (1-19)$$

这就是说, 如果与回路环行方向一致的电压前面取正号, 与回路环行方向相反的电压前面取负号, 那么该回路中电压的代数和应等于零。这一结论不仅适用于回路 adbca, 显然也适用于任何电路的任一回路。而且不仅适用于直流电压, 对任意波形的电压来说, 上述结论在任一瞬间也是适用的。因此基尔霍夫电压定律可表述为: 在电路的任何一个回路中, 沿同一方向循行, 同一瞬间电压的代数和等于零。用公式表示, 即

$$\sum u = 0 \quad (1-20)$$

在直流电路中为

$$\sum U = 0 \quad (1-21)$$

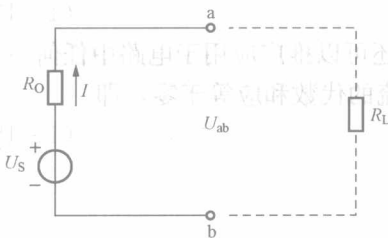


图 1-18 KVL 推广电路

基尔霍夫电压定律不仅适用于电路中任一闭合的回路, 而且还可以推广应用于任何假想闭合的一段电路, 例如在图 1-18 所示电路中, 只要将 a、b 两点间的电压作为电阻电压降一样考虑进去, 按照图中选取的回路方向, 由式 (1-21) 可列出

$$U_S - IR_O + U_{ab} = 0$$

则

$$U_{ab} = U_S - IR_O$$

【例 1-4】 在图 1-19 所示的回路中, 已知 $U_{S1} = 20\text{V}$, $U_{S2} = 10\text{V}$, $U_{ab} = 4\text{V}$, $U_{cd} = 6\text{V}$, $U_{ef} = 5\text{V}$, 试求 U_{ed} 和 U_{ad} 。

解 由回路 abcdefa, 根据 KVL 可列出

$$U_{ab} + U_{cd} - U_{ed} + U_{ef} = U_{S1} - U_{S2}$$

$$U_{ed} = U_{ab} + U_{cd} + U_{ef} - U_{S1} + U_{S2}$$

$$= 4 + (-6) + 5 - 20 + 10 = -7(\text{V})$$

由假想的回路 abcda, 根据 KVL 可列出

$$U_{ab} + U_{cd} - U_{ad} = -U_{S2}$$

求得

$$U_{ad} = U_{ab} + U_{cd} + U_{S2} = 4 + (-6) + 10 = 8(\text{V})$$

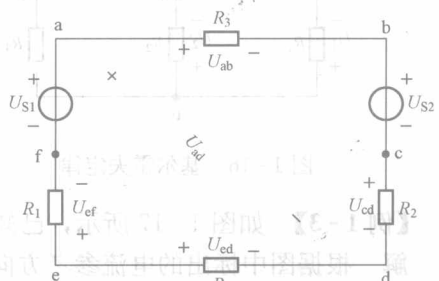


图 1-19 [例 1-4] 电路图

1.6 支路电流法

支路电流法是求解复杂电路最基本的方法, 它是以支路电流为求解对象, 直接应用基尔霍夫定律, 分别对结点和回路列出所需的方程组, 然后解出各支路电流。现以图 1-20 所示电路为例, 解题的一般步骤如下:

(1) 确定支路数, 选择各支路电流的参考方向。图 1-20 所示电路有 3 条支路, 即有 3 个待求支路电流。解题时, 需列出 3 个独立的方程式。选择各支路电流的参考方向如图 1-20 所示。

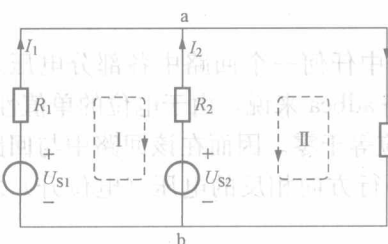


图 1-20 支路电流法

(2) 确定结点数, 列出独立的结点电流方程式。在图 1-20 所示电路中, 有两个结点 a、b, 利用 KCL 列出的结点方程式如下:

对结点 a

$$I_1 + I_2 = I_3$$

对结点 b

$$I_3 = I_1 + I_2$$

这是两个相同的方程, 所以对于两个结点只能有一个方程是独立的。一般来说, 如果电路有 n 个结点, 那么它只能列出 $n-1$ 个独立的结点方程式, 解题时可在 n 个结点中任选其中 $n-1$ 个结点列出方程式。

(3) 确定余下所需的方程式数, 列出独立的回路电压方程式。如前所述, 本题共有 3 条支路, 只能列出 1 个独立的结点方程式, 剩下的两个方程式可利用 KVL 列出。

对图 1-20 所示电路, 选择网孔的回路方向如图中虚线所示, 列出回路方程式如下:

回路 I

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

回路 II

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

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

然而式①、式②、式③不独立。

为了得到独立的 KVL 方程, 应该使每次所选的回路至少包含 1 条前面未曾用过的新支路, 通常选用网孔列出的回路方程式一定是独立的。一般来说, 电路所列出的独立回路方程式数加上独立的结点方程式数正好等于支路数。

(4) 联立方程式, 求出各支路电流的数值。

【例 1-5】 在图 1-21 所示电路中, 已知 $U_{S1} = 12V$, $U_{S2} = 12V$, $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 2\Omega$, $R_4 = 4\Omega$ 。求各支路电流。

解 (1) 设各电流的参考方向和回路方向如图 1-21 所示。对结点 a 列电流方程

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

(2) 选网孔回路为顺时针方向, 列写回路电压方程:

网孔 I

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 - U_{S1} = 0$$

网孔 II

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 - U_{S1} + U_{S2} = 0$$

网孔 III

$$R_2 I_2 + R_4 I_4 - U_{S2} = 0$$

(3) 将已知数据代入方程式, 整理后得

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

$$I_1 + 2I_3 - 12 = 0$$

$$I_1 - 2I_2 - 12 + 12 = 0$$

$$2I_2 + 4I_4 - 12 = 0$$

最后解得

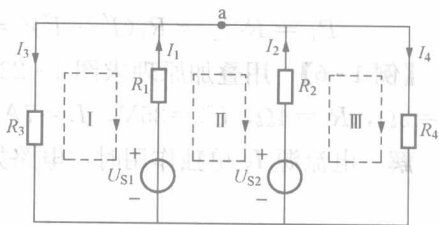


图 1-21 [例 1-5] 电路图

$$I_1 = 4\text{A}, I_2 = 2\text{A}, I_3 = 4\text{A}, I_4 = 2\text{A}$$

1.7 叠加定理

在有多电源作用的线性电路中,任意支路中的电流都可认为是各个电源单独作用时分别在该支路中产生的电流的代数和。对于各个元件上的电压也是一样,可认为是各个电源单独作用时分别在该支路中产生的电压的代数和。这就是叠加定理,如图 1-22 所示。

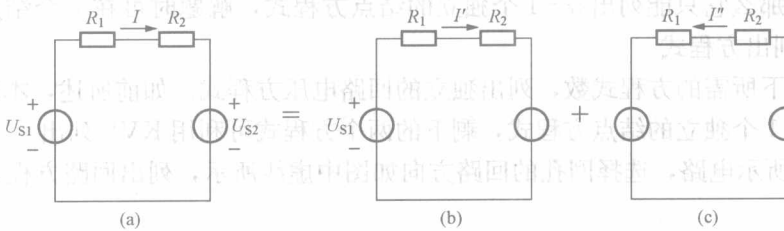


图 1-22 叠加定理

(a) 原电路; (b) U_{S1} 单独作用时; (c) U_{S2} 单独作用时

例如在图 1-22 (a) 所示电路中, R_1 、 R_2 、 U_{S1} 、 U_{S2} 已知, 求电路中的电流 I 。

$$I = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R_1 + R_2} = \frac{U_{S1}}{R_1 + R_2} - \frac{U_{S2}}{R_1 + R_2} = I' - I''$$

式中

$$I' = \frac{U_{S1}}{R_1 + R_2}, I'' = \frac{U_{S2}}{R_1 + R_2}$$

由此可以看出电流 I 可分为 I' 和 I'' 两部分。其中 I' 为 U_{S1} 单独作用时产生, I'' 为 U_{S2} 单独作用时产生, 与之相对应的电路如图 1-22 (b)、(c) 所示, 所以图 1-22 (a) 可看作是这两个图的叠加。应用叠加定理时, 要注意以下几点。

(1) 在考虑某一电源单独作用时, 应令其他电源中的 $U_S = 0$ 、 $I_S = 0$, 即应将其他电压源代之以短路, 将其他电流源代之以开路。

(2) 最后叠加时, 一定要注意各个电源单独作用时的电流和总电压分量的参考方向是否与总电流和总电压的参考方向一致, 一致时前面取正号, 不一致时前面取负号。

(3) 叠加定理只适用于线性电路, 不能用于非线性电路。

(4) 叠加定理只能用来分析和计算电流和电压, 不能用来计算功率。因为电功率与电流、电压的关系不是线性关系, 而是平方关系。例如图 1-22 中电阻 R_1 消耗的功率为

$$P_1 = R_1 I^2 = R_1 (I' - I'')^2 = R_1 I'^2 - 2R_1 I' I'' + R_1 I''^2 \neq R_1 I'^2 + R_1 I''^2$$

【例 1-6】 用叠加原理求图 1-23 (a) 所示电路中的电流 I 。已知 $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 3\Omega$, $R_4 = 4\Omega$, $U_S = 35\text{V}$, $I_S = 7\text{A}$ 。

解 电流源 I_S 单独作用时, 电路如图 1-23 (b) 所示, 求得

$$I' = \frac{R_3}{R_3 + R_4} I_S = 3(\text{A})$$

电压源 U_S 单独作用时, 电路如图 1-23 (c) 所示, 求得