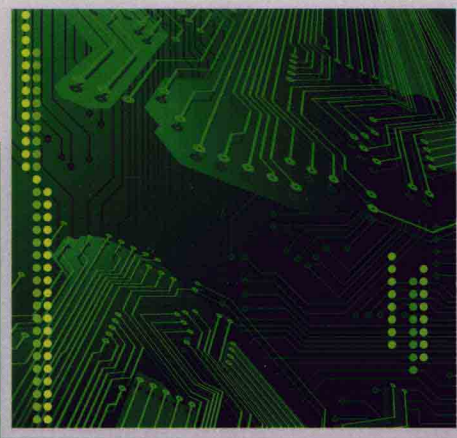


电气信息类专业学习与考研辅导丛书

Dianlu lilun Xuexi Yu Kaoyan Zhinan

电路理论学习与考研指南

黄冠斌 张霞



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

电气信息类专业学习与考研辅导丛书

电路理论学习与考研指南

黄冠斌 张 霞

华中科技大学出版社

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

电路理论学习与考研指南/黄冠斌 张 霞. —武汉: 华中科技大学出版社, 2009年6月

ISBN 978-7-5609-5375-5

I. 电… II. ①黄… ②张… III. 电路理论-高等学校-教学参考资料
IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 084128 号

电路理论学习与考研指南

黄冠斌 张 霞

策划编辑: 谢燕群

责任编辑: 谢燕群

责任校对: 周 娟

封面设计: 范翠璇

责任监印: 周治超

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027) 87557437

录 排: 武汉众心图文激光照排中心

印 刷: 武汉中远印务有限公司

开本: 710mm×1000mm 1/16

印张: 11.25

字数: 212 000

版次: 2009年6月第1版

印次: 2009年6月第1次印刷

定价: 18.80 元

ISBN 978-7-5609-5375-5/TM·110

(本书若有印装质量问题, 请向出版社发行部调换)

前 言

电路理论是高等院校电气与信息学科一门重要的学科基础课程,也是该学科许多专业硕士研究生入学考试专业课考试的考试科目之一。电路理论课程对于电气信息学科学生许多后续课程的学习至关重要,乃至对学生以后从事电专业方面的工作也影响深远。笔者从事电路理论教学数十年,多次主持和参加过各类研究生入学考试电路理论科目的命题与阅卷工作,多年讲授研究生入学考试电路理论课程的考前辅导课,对学生在电路理论课程学习中的情况有比较深入的了解。电路理论课程的内容概念性强,逻辑严密,题目变化多端,使不少学生在学习中感到困难多多,而一旦深入进去,又饶有兴趣。多年来笔者就有心愿:要把自己在电路理论教学中积累的体会、经验,尤其是将考研辅导课的讲稿加以整理、提高,以便给正在学习或将要学习电路理论课程的电气与信息学科的大学生,特别是那些准备报考研究生的大学生提供帮助。

本书正文每章都分两部分:内容提要 and 例题分析。在内容提要部分,笔者力图用较简短的篇幅叙述一章的主要内容,提纲挈领,同时结合学生在学习电路理论课程中易出现的一些典型问题和解题中要注意的问题进行阐述、归纳总结。例题分析部分所选题目极大多数选自国内一些著名重点高校历年硕士研究生入学考试电路理论科目的试题,选题具有典型性,每个题目的前面都有一段简短的提示,阐明该题目的核心知识点。例题的求解力求用最佳方法,有的例题求解还用了不同的方法,或给读者指出了另外的解题途径。

本书可作为学习电路理论课程和有关专业硕士研究生入学考试备考的复习参考书。为了使本书具有较宽的适用面,本书涉及的内容较多,其中有些内容近年来在有的学校已经没有列入教学大纲的要求,或未列入硕士研究生入学考试电路理论科目考试大纲的要求,如网络图论、非线性电路、动态网络的状态变量分析法及均匀传输线等,读者可根据自己学校对电路理论课程教学内容的要求,或所报考高校关于电路理论科目考试大纲的要求,选择学习。

本书由黄冠斌教授主编,并负责编写第1、2、4、6、7、8、9章,张霞负责编写第3、5章和附录。限于编者的水平,书中缺点错误难免,恳请读者批评指正。

编 者

2009年1月于华中科技大学

目 录

第 1 章 电路分析的基本依据	(1)
1-1 内容提要	(1)
1-1-1 电路的基本变量及其参考方向	(1)
1-1-2 电路定律与网络图论的基本知识	(2)
1-1-3 线性非时变电路元件的电压-电流基本关系	(5)
1-2 例题分析	(7)
第 2 章 简单电路的等效变换	(12)
2-1 内容提要	(12)
2-1-1 电阻元件的互相连接	(12)
2-1-2 电源的等效变换	(13)
2-1-3 输入电阻	(15)
2-1-4 电容的串联和并联	(17)
2-1-5 电感的串联和并联	(17)
2-1-6 耦合电感的去耦等效电路	(18)
2-2 例题分析	(19)
第 3 章 电路分析的一般方法	(23)
3-1 内容提要	(23)
3-1-1 节点电压分析法	(23)
3-1-2 回路电流分析法(含网孔电流分析法)	(25)
3-2 例题分析	(26)
第 4 章 电路定理	(34)
4-1 内容提要	(34)
4-1-1 叠加定理	(34)
4-1-2 替代定理	(35)
4-1-3 戴维宁定理和诺顿定理	(36)
4-1-4 最大功率传输定理	(37)

4-1-5 特勒根定理和互易定理	(38)
4-2 例题分析	(39)
第5章 正弦稳态分析及其扩展	(50)
5-1 内容提要	(50)
5-1-1 正弦稳态分析	(50)
5-1-2 三相电路	(61)
5-1-3 非正弦周期电流电路	(64)
5-2 例题分析	(67)
第6章 动态电路分析	(81)
6-1 内容提要	(81)
6-1-1 动态电路的时域分析	(81)
6-1-2 动态电路的复频域分析	(86)
6-1-3 动态电路的状态变量分析法	(88)
6-2 例题分析	(89)
第7章 二端口网络	(106)
7-1 内容提要	(106)
7-1-1 二端口网络的 Z 、 Y 、 H 、 T 参数方程	(106)
7-1-2 二端口网络的主要问题	(107)
7-1-3 二端口网络的其他问题	(108)
7-2 例题分析	(109)
第8章 简单非线性电路	(123)
8-1 内容提要	(123)
8-1-1 非线性电阻、非线性电感和非线性电容	(123)
8-1-2 非线性电路的图解法	(125)
8-1-3 非线性电路的假定状态分析法	(127)
8-1-4 非线性电路的小信号分析法	(128)
8-2 例题分析	(129)
第9章 无损耗均匀传输线	(135)
9-1 内容提要	(135)

9-1-1 均匀传输线的方程	(135)
9-1-2 无损耗线的正弦稳态分析	(136)
9-2 例题分析	(139)
附录	(143)

第 1 章 电路分析的基本依据

1-1 内 容 提 要

**核心提示：电压与电流的参考方向 电路定律与网络图论的基本知识
电路元件的电压 - 电流关系**

1-1-1 电路的基本变量及其参考方向

1. 电路的基本变量

电路分析中遇到的变量有电荷 q 、磁通链 ψ 、电流 i 、电压 u 、功率 p 、能量 w ，它们都是时间 t 的函数。电流和电压是电路的基本变量。

2. 电压与电流的参考方向

电压与电流的参考方向为分析、计算电路所必需。电路理论中大多数数学表达式、曲线及人们为电路建立的方程，无不与特定的参考方向对应。

一个二端元件或二端电路的电压、电流参考方向表示方法分别如图 1-1(a) 和 (b) 所示。这里所谓电压的参考方向是指由正极指向负极。若二端元件或二端电路两端带有字母，则电压、电流参考方向也可用 u 、 i 带两端字母为下角标表示，如 u_{ab} 、 i_{ab} 。至于电压、电流的实际方向，则要结合参考方向和电压、电流量值的正负加以确定。

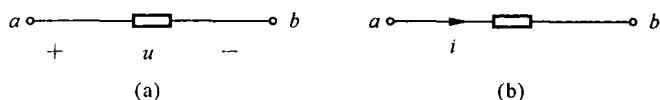


图 1-1 电压、电流参考方向的表示方法

3. 电压与电流的关联参考方向

一个二端元件或二端电路的电压、电流参考方向本是可以互相独立指定的。如果在指定它们的参考方向时，电流参考方向由电压参考方向的正极指向负极，如图 1-2 所示，那么这种电压与电流参考方向的关系称为关联参考方向。人们常常习惯采用关联参考方向，一些无源元件的电压 - 电流关系也习惯在关联参考方向下给出。

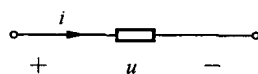


图 1-2 电压与电流的关联参考方向

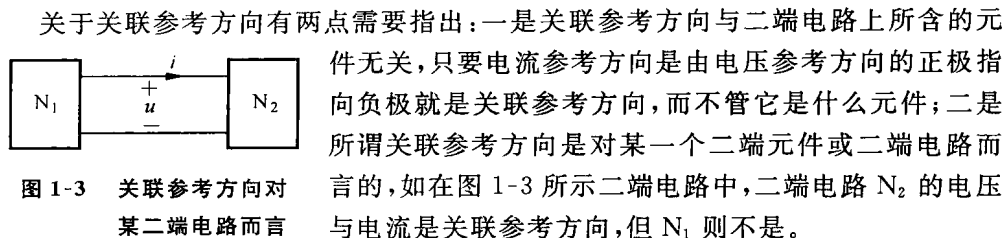


图 1-3 关联参考方向对某二端电路而言

关于关联参考方向有两点需要指出：一是关联参考方向与二端电路上所含的元件无关，只要电流参考方向是由电压参考方向的正极指向负极就是关联参考方向，而不管它是什么元件；二是所谓关联参考方向是对某一个二端元件或二端电路而言的，如在图 1-3 所示二端电路中，二端电路 N_2 的电压与电流是关联参考方向，但 N_1 则不是。

4. (电) 功率

当二端元件或二端电路的电压和电流取关联参考方向时， t 时刻电压与电流的乘积 $p = ui$ 表示 t 时刻该二端元件或二端电路吸收的功率。这里说“表示”，是因为计算结果 p 有正负，仅当 $p > 0$ 时才真正是吸收功率。在非关联参考方向下，同样的计算公式 $p = ui$ 则表示二端元件或二端电路发出的功率。

1-1-2 电路定律与网络图论的基本知识

1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

对任一集中参数电路中的任一节点，在任一时间，离开节点各支路电流的代数和为零，即

$$\sum i_k(t) = 0$$

这一关系式也适用于包围部分电路的任一闭合曲面。

设一个电路有 b 条支路， n 个节点，则按 KCL 只可以列出 $n-1$ 个独立方程。

在对一个电路列写 KCL 方程时，必须首先指定各支路电流的参考方向，这样才能正确确定方程中各电流文字符号前的正负号。

2. 基尔霍夫电压定律(KVL)

对任一集中参数电路中的任一回路，在任一时间，沿回路各支路电压的代数和为零，即

$$\sum u_k(t) = 0$$

对一个具有 b 条支路 n 个节点的电路，只可以列出 $b-n+1$ 个独立的 KVL 方程。

在对一个电路列写 KVL 方程时，必须首先指定各支路电压的参考方向及回路的参考方向（也称为绕行方向），这样才能正确确定方程中各电压文字符号前的正负号。

KCL、KVL 都与电路元件性质无关，KCL、KVL 方程仅取决于电路的几何结构。

3. 网络图论的基本知识

从 KCL、KVL 与电路元件性质无关出发，可以将一个电路抽象为一个只反映该电路的节点与支路连接关系及回路组成的几何图形（拓扑图）。

1) 网络图的几个重要概念

【连通图】若一个图的任意两个节点之间至少存在一条由支路构成的路径,则称此图为连通图。

【树】树是连通图的连通子图,它连通原图的所有节点但不含任何回路。

对所选取的任一个树,在此树中的那些支路称为树支,不在此树中的那些支路称为连支。

一个连通图可能有很多个树,但它的任何一个树的树支数目是相同的,都等于此连通图的节点数减1,即 $b_t = n - 1$,于是连支数 $b_l = b - n + 1$ 。

【基本回路】对所选取的一个树,只含一个连支的回路称为基本回路或单连支回路,如图1-4所示。显然,一个图的基本回路数目就等于连支数目。基本回路组是一组独立回路。

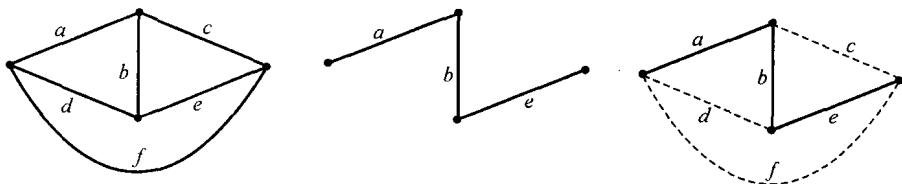


图1-4 与树 $T\{a, b, e\}$ 对应的3个基本回路 (c, b, e) 、 (d, a, b) 、 (f, a, b, e)

【割集和基本割集】割集是连通图中的一些支路集合,它们必须满足两个条件:移去集合中的所有支路,剩下的图成为两个分离部分;少移去集合中的任一支路,剩下的图仍是连通的。在大多数情况下,割集可理解为连通图与任一闭合曲面相交支路的集合。

对所选取的一个树,只含一个树支的割集称为基本割集或单树支割集,如在图1-4所示中,与树 $T\{a, b, e\}$ 对应的基本割集为 (a, d, f) 、 (b, c, d, f) 、 (e, c, f) 。显然,一个图的基本割集数目就等于树支数目。基本割集组是一组独立割集。

2) 有向图的矩阵表示

一个有向图中支路与节点的关系、支路与基本回路的关系、支路与基本割集的关系都可以用按一定规则编写的矩阵表示,分别称为关联矩阵、基本回路矩阵和基本割集矩阵,这些矩阵的列都和与有向图的支路对应。

【关联矩阵 A 】其行对应于有向图的 $n-1$ 个节点,其元素为 a_{ik} ,若支路 k 连接在节点 i 上且离开节点,则 $a_{ik} = 1$,指向节点则 $a_{ik} = -1$;若支路 k 不连接在节点 i 上,则 $a_{ik} = 0$ 。图1-5所示有向图的关联矩阵为

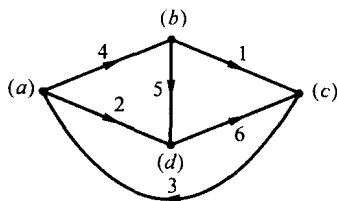


图1-5 有向图的关联矩阵

$$A = b \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} \left(\begin{matrix} 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{matrix} \right) \end{matrix}$$

【基本回路矩阵 B_f 】其行对应于有向图的 $b-n+1$ 个基本回路,且为了直观显示 B_f 的某些性质,约定其列按先连支后树支排列,基本回路的编号顺序与确定该基本回路的连支编号顺序一致,基本回路的绕行方向与确定该基本回路的连支参考方向相同。其元素为 b_{ik} ,若支路 k 属于回路 i 且参考方向与回路 i 的绕行方向相同,则 $b_{ik} = 1$,与回路 i 的绕行方向相反,则 $b_{ik} = -1$;若支路 k 不属于回路 i ,则 $b_{ik} = 0$ 。图 1-6 所示有向图与树 $T\{4,5,6\}$ 对应的

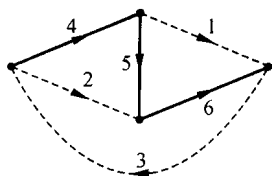


图 1-6 有向图的基本回路矩阵

$$B_f = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

连支 树支

由此可见,在上面的有关约定下,矩阵 B_f 中与连支对应的 $b-n+1$ 阶方阵是一个单位矩阵,因此一般地可将 B_f 写为

$$B_f = [1, B_t]$$

【基本割集矩阵 Q_f 】其行对应于有向图的 $n-1$ 个基本割集,且为了直观显示 Q_f 的某些性质,约定其列按先连支后树支排列,基本割集的编号顺序与确定该基本割集的树支编号顺序一致,基本割集的参考方向与确定该基本割集的树支参考方向相同。其元素为 q_{ik} ,若支路 k 属于割集 i 且参考方向与割集 i 的参考方向相同,则 $q_{ik} = 1$,与割集 i 的参考方向相反,则 $q_{ik} = -1$;若支路 k 不属于割集 i ,则 $q_{ik} = 0$ 。图 1-6 所示有向图与树 $T\{4,5,6\}$ 对应的基本割集矩阵为

$$Q_f = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

连支 树支

可见,在上面的有关约定下,矩阵 Q_f 中与树支对应的 $n-1$ 阶方阵是一个单位矩阵,因此一般地可将 Q_f 写为

$$Q_f = [Q_t, 1_{n-1}]$$

【 A, B_f, Q_f 的关系】一个有向图的这 3 个矩阵,只要各矩阵中相应的列都对应同一支路,则存在如下关系:

$$\mathbf{A}\mathbf{B}_f^T = 0$$

$$\mathbf{B}_f\mathbf{Q}_f^T = 0$$

若 $\mathbf{B}_f$ 、 $\mathbf{Q}_f$ 是按上面所述规则编写的, 则有 $\mathbf{B}_f = -\mathbf{Q}_f^T$

3) KCL、KVL 方程的矩阵形式

KCL、KVL 方程都是线性代数方程, 当然就可以写成矩阵形式。以 $\mathbf{I}_b$ 表示支路电流列向量, 以 $\mathbf{U}_b$ 表示支路电压列向量, 以 $\mathbf{E}$ 表示 $n-1$ 个节点到参考节点的电压列向量, 以 $\mathbf{I}_l$ 表示连支电流列向量, 以 $\mathbf{U}_l$ 表示树支电压列向量, 则 KCL、KVL 方程的矩阵形式分别为

$$\text{KCL} \quad \mathbf{A}\mathbf{I}_b = \mathbf{0}, \quad \mathbf{I}_b = \mathbf{B}_f^T \mathbf{I}_l, \quad \mathbf{Q}_f \mathbf{I}_b = \mathbf{0}$$

$$\text{KVL} \quad \mathbf{U}_b = \mathbf{A}^T \mathbf{E}, \quad \mathbf{B}_f \mathbf{U}_b = \mathbf{0}, \quad \mathbf{U}_b = \mathbf{Q}_f^T \mathbf{U}_l$$

1-1-3 线性非时变电路元件的电压 - 电流基本关系

1. 电阻

在电压、电流取关联参考方向的前提下, $u = Ri$ 或 $i = Gu$ 。

电阻吸收的功率, 除用 $p = ui$ 计算外, 还可用 $p = Ri^2$ 、 $p = Gu^2$ 两式计算。这两个计算公式与电流或电压的参考方向无关。

2. 独立电源

1) 电压源

电压源的电路符号如图 1-7 所示。电压源的电压 u_s 是给定的时间函数, 与所连接的电路无关, 它的电流(包括大小和实际方向)取决于连接的外部电路。要求电压源的电流时, 应先求出连接在电压源两个端点之一的其他支路电流, 再将 KCL 用于此节点求电压源的电流。

2) 电流源

电流源的电路符号如图 1-8 所示。电流源的电流 i_s 是给定的时间函数, 与所连接的电路无关, 它的端电压(包括大小和实际方向)取决于连接的外部电路。要求电流源的电压时, 应先求出包含电流源的任一回路上其他支路电压, 再将 KVL 用于此回路求电流源的电压。

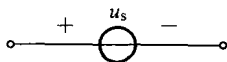


图 1-7 电压源

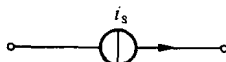


图 1-8 电流源

3. 四种形式的受控电源

受控电源分为电流控制电流源(CCCS)、电流控制电压源(CCVS)、电压控制电

流源(VCCS)、电压控制电压源(VCVS),这在电路图上会明确表示。在分析、计算电路时,要区分受控电源与独立电源在处理上的异同。

4. 运算放大器

运算放大器的电路符号如图 1-9 所示。在电路图中,公共端往往被省略不画。

运算放大器的特性如图 1-10 所示。① 两输入端间的电压为零,即 $u_+ = u_-$,称为“虚短路”特性。这是假定运算放大器的开环放大倍数为无穷大的结果。② 两输入端上电流均为零,即 $i_+ = i_- = 0$,称为“虚断路”特性。这是假定运算放大器的输入电阻为无穷大的结果。③ 由输出端与公共端观察,它相当于一电压控制电压源。这是假定运算放大器的输出电阻为零的结果。这表明, i_o 不能用 u_o 表示,若要求 i_o ,就应用前述求电压源电流的方法。

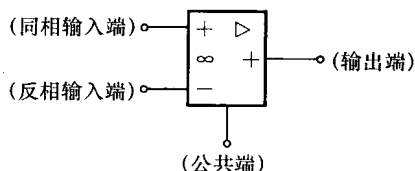


图 1-9 运算放大器的电路符号

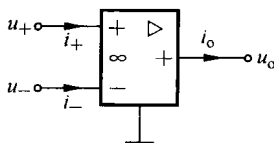


图 1-10 运算放大器的特性

5. 理想变压器

理想变压器的电路符号如图 1-11 所示。

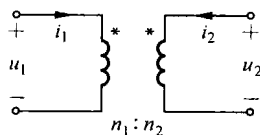


图 1-11 理想变压器

在如图 1-11 所示电压、电流的参考方向向下,理想变压器的特性方程为

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{i_1}{i_2} = -\frac{n_2}{n_1}$$

注意:以上两式中等号右边的正负号是与电压或电流的参考方向对同名端的关系有关的。对电压方程,当 u_1 与 u_2 的参考极性在同名端相同时,右边为正号;不相同则为负号。对电流方程,当 i_1 与 i_2 的参考方向都指向(或都离开)同名端时,右边为负号;当其中一个指向同名端,另一个离开同名端时,右边为正号。另外,式中的电压和电流都应是随时间变化而变化的。

6. 电容

在电压、电流取关联参考方向的前提下,有

$$i = C \frac{du}{dt}, \quad u = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i d\xi$$

【电容电压的连续性】若电容电流 $i(t)$ 在闭区间 $[t_a, t_b]$ 内有界(不含冲激函数),则电容电压 $u(t)$ 在开区间 (t_a, t_b) 是连续的,即对任何 $t_a < t < t_b$ 的时间 t ,有 $u(t_+) = u(t_-)$ 。

【电容的记忆性】 t 时刻的电容电压 $u(t)$ 不仅与 t 时刻的电流 $i(t)$ 有关,而且与 t 时刻以前电流的全部历史有关。

【储存的(电场)能量】在任一时间 t ,电容储存的能量为

$$w(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t) \quad (\text{与电压参考方向无关})$$

7. 电感

在电压、电流取关联参考方向的前提下,有

$$u = L \frac{di}{dt}, \quad i = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u d\xi$$

(1) 电感电流的连续性:若电感电压 $u(t)$ 在闭区间 $[t_a, t_b]$ 内有界(不含冲激函数),则电感电流 $i(t)$ 在开区间 (t_a, t_b) 是连续的,即对任何 $t_a < t < t_b$ 的时间 t , $i(t_+) = i(t_-)$ 。

(2) 电感的记忆性: t 时刻的电感电流 $i(t)$ 不仅与 t 时刻的电压 $u(t)$ 有关,而且与 t 时刻以前电压的全部历史有关。

(3) 储存的(磁场)能量:在任一时间 t ,电感储存的能量为

$$w(t) = \frac{1}{2}Li^2(t) \quad (\text{与电流参考方向无关})$$

8. 耦合电感

两线圈耦合电感的电路符号如图 1-12 所示。按图中电压、电流参考方向,电压 - 电流关系方程为

$$\begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \end{aligned}$$

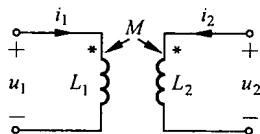


图 1-12 耦合电感

注意:方程中互感电压项前的正负号。当各电感的电压、电流取关联参考方向时,若电流都指向(或都离开)同名端,则取正号;而若一个电流指向同名端,另一个离开同名端,则取负号。

耦合系数为

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

1-2 例题分析

简单电路中两点间电压的计算

例 1-1 求图 1-13 所示电路中 a 、 b 、 c 各点电压。

解 电阻 R_2 中无电流通过, 故有

$$U_a = R_1 I_s$$

$$U_b = U_{s1} + U_a = U_{s1} + R_1 I_s$$

$$U_c = U_{s2} + U_a = U_{s2} + R_1 I_s$$

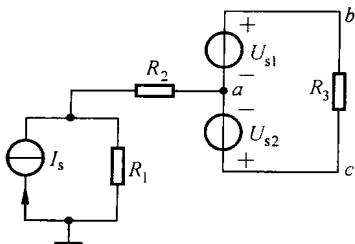


图 1-13 例 1-1 图

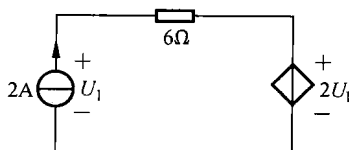


图 1-14 例 1-2 图

简单电路, 功率

例 1-2 求图 1-14 所示电路中各元件的功率, 并说明该元件是吸收功率还是提供功率。

解 $2U_1 - U_1 + 6 \times 2 = 0, \quad U_1 = -12 \text{ V}$

电流源功率 $P_1 = 2U_1 = 2 \times (-12) \text{ W} = -24 \text{ W}$ (实际为吸收功率)

电阻吸收功率 $P_2 = 6 \times 2^2 \text{ W} = 24 \text{ W}$

受控电源功率 $P_3 = 2 \times 2U_1 = 4 \times (-12) \text{ W} = -48 \text{ W}$ (实际为提供功率)

电压源的电流和电流源的电压

例 1-3 求图 1-15 所示电路中各电源提供的功率。

解 要求电压源的功率, 就需求其电流; 要求电流源的功率, 就需求其电压。要求电压源的电流, 应先求得与电压源端点相连接的其他支路的电流; 要求电流源的电压, 应先求得含电流源的任一回路中其他支路的电压。

各支路电流参考方向如图 1-15 所示。

$$I_3 = \frac{U_{ad}}{5} = \frac{4+6}{5} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

$$I_2 = -8 - I_3 = (-8 - 2) \text{ A} = -10 \text{ A}$$

$$U_{ac} = 2I_4 + I_5 = 2I_4 + I_4 - 8 = 4 \text{ V}, \quad I_4 = 4 \text{ A}$$

$$I_1 = -I_3 - I_4 = (-2 - 4) \text{ A} = -6 \text{ A}$$

$$U_{bd} = -2I_4 + 5I_3 = (-2 \times 4 + 5 \times 2) \text{ V} = 2 \text{ V}$$

4 V 电压源提供的功率

$$P_1 = -4I_1 = -4 \times (-6) \text{ W} = 24 \text{ W}$$

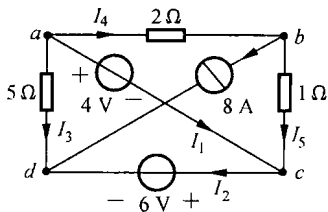


图 1-15 例 1-3 图

6 V 电压源提供的功率 $P_2 = -6I_2 = -6 \times (-10) \text{ W} = 60 \text{ W}$

电流源提供的功率 $P_3 = -8U_{ur} = -8 \times 2 \text{ W} = -16 \text{ W}$ (实为吸收)

割集的概念

例 1-4 图 1-16 所示各图是支路集合, 试确定它们是不是割集。

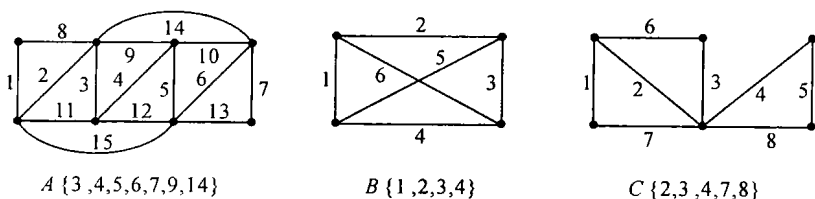


图 1-16 例 1-4 图

解 A 不是割集(移去集合中的支路, 但保留支路 3 时图仍不连通)。

B 是割集。

C 不是割集(移去集合中的所有支路时图成了 3 个分离部分)。

基本回路和基本割集

例 1-5 如图 1-17 所示的两个非平面线图, 分别选取树 $T_a \{4, 6, 9, 10\}$ 和 $T_b \{5, 6, 7, 8, 9\}$, 试分别指出与各树对应的基本回路组和基本割集组所含的支路。

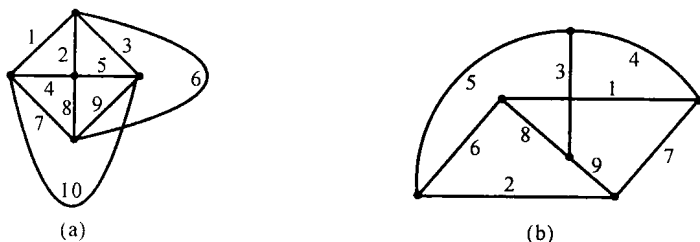


图 1-17 例 1-5 图

解 (a) 基本回路组: $l_1 \{1, 6, 9, 10\}$; $l_2 \{2, 4, 10, 9, 6\}$; $l_3 \{3, 6, 9\}$; $l_4 \{5, 4, 10\}$; $l_5 \{7, 9, 10\}$; $l_6 \{8, 9, 10, 4\}$ 。

基本割集组: $c_1 \{4, 2, 5, 8\}$; $c_2 \{6, 1, 2, 3\}$; $c_3 \{9, 1, 2, 3, 7, 8\}$; $c_4 \{10, 1, 2, 5, 7, 8\}$ 。

(b) 基本回路组: $l_1 \{1, 7, 9, 8\}$; $l_2 \{2, 6, 8, 9\}$; $l_3 \{3, 5, 6, 8\}$; $l_4 \{4, 5, 6, 8, 9, 7\}$ 。

基本割集组: $c_1 \{5, 3, 4\}$; $c_2 \{6, 2, 3, 4\}$; $c_3 \{7, 1, 4\}$; $c_4 \{8, 1, 2, 3, 4\}$; $c_5 \{9, 1, 2, 4\}$ 。

确定基本回路比较容易, 而确定非平面图的基本割集有时会遇到困难, 这时可以采取以下方法: 在确定某一树支对应的基本割集时, 先将该树支连同全部连支从图中移去, 然后考察补回哪些连支后图仍不连通, 则这些连支不是所要确定的基本割集中

的支路。

KCL、KVL 方程的矩阵形式, 独立变量

例 1-6 一电路有向图的基本回路矩阵为

$$\mathbf{B}_t = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

对应的连支电流列向量和树支电压列向量分别为

$$\mathbf{I}_t = \begin{bmatrix} 2 \\ -5 \\ 3 \end{bmatrix} \text{A}, \quad \mathbf{U}_t = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ -2 \end{bmatrix} \text{V}$$

试求支路电流列向量和支路电压列向量。

解 (解法一) 根据基本回路的概念, 由 $\mathbf{B}_t$ 可以看出, 支路 3、5、6 是指定树的连支, 树支为 1、2、4。按先连支, 后树支的排列顺序将 $\mathbf{B}_t$ 重新整理为

$$\mathbf{B}_t = \begin{matrix} & \begin{matrix} 3 & 5 & 6 & 1 & 2 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

根据 $\mathbf{I}_b = \mathbf{B}_t^T \mathbf{I}_t$ 和 $\mathbf{B}_t \mathbf{U}_b = \mathbf{0}$, 支路电流列向量和支路电压列向量分别为

$$\begin{bmatrix} I_3 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -5 \\ 3 \end{bmatrix} \text{A} = \begin{bmatrix} 2 \\ -5 \\ 3 \\ -1 \\ -3 \\ 2 \end{bmatrix} \text{A}$$

$$\begin{bmatrix} U_3 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ -2 \end{bmatrix} \text{V} = \begin{bmatrix} -4 \\ -5 \\ -1 \\ 1 \\ 3 \\ -2 \end{bmatrix} \text{V}$$