

高等专科学校教材

计算机电路基础

傅成立 姚国依
庄瑞云 林天润

辽宁科学技术出版社

TP331
30

高等专科学校教材

计算机电路基础

傅成立 姚国依
庄瑞云 林天润

辽宁科学技术出版社

内 容 提 要

本书的主要内容为直流电路的基本概念和分析方法,一阶动态电路和正弦交流电路的分析与计算方法;几种有代表性的半导体器件的特性,基本放大电路的组成与分析方法,放大电路中的反馈,集成运算放大器的基本电路结构及主要应用方法;逻辑门电路及其应用,逻辑代数基础,组合逻辑电路及时序逻辑电路的分析方法和工程设计方法,A/D、D/A转换电路的基本原理和分析方法等。本课程的参考学时为95学时。

高等专科学校教材

计算机电路基础

Jisuanji Dianlu Jichu

傅成立 姚国依 庄瑞云 林天润

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行 朝阳新华印刷厂分厂印刷

开本: 787×1032 1/16 印张: 22³/₄ 字数: 540,000

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

责任编辑: 刘绍山 插图: 段文杰等

封面设计: 邹君文 责任校对: 李秀芝

印数: 1-1,804

ISBN 7-5381-0662-6/TN·19 定价: 6.45元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由大专计算机教材编审委员会专业基础编审组组织征稿、评选、推荐出版的。

本教材由上海第二工业大学傅成立副教授担任主编，苏州大学周光熊副教授担任主审。

本课程的参考学时为95学时。其主要内容为：直流电路的基本概念和分析方法，一阶动态电路和正弦交流电路的分析与计算方法；几种有代表性的半导体器件的外特性，基本放大电路的组成与分析方法，放大电路中的反馈，集成运算放大器的基本电路结构及主要应用方法；逻辑门电路及其应用，逻辑代数基础，组合逻辑电路及时序逻辑电路的分析方法和工程设计方法，A/D，D/A转换电路的基本原理和分析方法等。

使用本教材时应注意从学生实际出发，在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下注意贯彻少而精的理论联系实际的原则，根据各学校，各专业的实际需要适当处理教材的内容。为了加强学生对所学知识的进一步理解，除了选用书中所配置的例题、思考题和习题以外，还应结合具体情况，开设一定数量的实验。

本教材由南京七三四厂职工大学姚国依同志编写第一章，苏州电子局职工大学林天润同志编写第二、三章，上海科技专科学校庄瑞云同志编写第四、五章，上海第二工业大学傅成立同志编写第六、七、八、九章。由姚国依同志统编全稿。参加审阅工作的还有南京工学院熊德伟副教授和苏州电子局职工大学罗万钧同志，他们都为本书提出了许多宝贵意见，这里谨表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1988.4

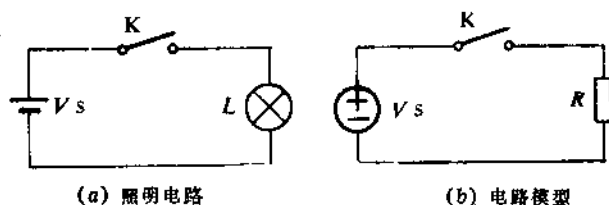
目 录

第一章 电路分析基础知识	1
第一节 电路元件.....	2
第二节 拓扑约束与元件约束.....	7
第三节 网络分析的一般方法.....	15
第四节 线性网络的重要定理.....	29
第五节 一阶网络的响应.....	37
第六节 三要素法.....	46
第七节 正弦量及其相量.....	50
第八节 正弦稳态电路计算.....	55
习题一	69
第二章 半导体器件及其特性	76
第一节 半导体二极管.....	76
第二节 半导体三极管.....	85
第三节 场效应管.....	92
习题二	97
第三章 基本放大电路	100
第一节 基本放大电路的组成和工作原理	100
第二节 共射放大电路的分析方法	102
第三节 共集电极电路	117
第四节 场效应管放大电路	119
第五节 多级放大电路	123
第六节 放大电路中的负反馈	130
习题三	142
第四章 模拟集成电路基础及其应用	147
第一节 直接耦合放大器的零点漂移	147
第二节 差动放大器	148
第三节 集成运算放大器的基本单元电路	155
第四节 集成运放F007型电路的分析	161
第五节 集成运放的四种基本电路	165
第六节 集成运算放大器在信号运算方面的应用	172
第七节 5G37 集成功率输出器的使用	179
第八节 5G14集成稳压电源的使用.....	184
习题四	183

第五章 集成逻辑门及其应用	195
第一节 基本逻辑关系与基本逻辑门	195
第二节 TTL与非门	200
第三节 其他TTL门电路	207
第四节 MOS集成门电路	214
第五节 集成逻辑门的应用	218
习题五	228
第六章 逻辑代数基础	235
第一节 数制及编码	235
第二节 逻辑代数的基本公式及基本定律	242
第三节 逻辑函数的标准表达式及表达式之间的转换	246
第四节 化简逻辑表达式的方法	255
习题六	263
第七章 组合逻辑电路的设计与分析	265
第一节 组合逻辑电路的设计	265
第二节 组合逻辑电路的分析	277
第三节 组合电路中的竞争和冒险	280
习题七	283
第八章 时序逻辑电路的分析与设计	286
第一节 时序逻辑电路的基本概念	286
第二节 触发器	287
第三节 同步时序逻辑电路的分析	298
第四节 同步时序逻辑电路设计	312
第五节 异步时序逻辑电路的基本概念	323
第六节 典型中规模时序逻辑电路举例	327
习题八	336
第九章 模/数与数/模转换器	342
第一节 数/模转换器(D/A转换器)	342
第二节 模/数转换器(A/D转换器)	348
习题九	355

第一章 电路分析基础知识

一般实际电路（如电视机、电子计算机）都是由电阻器、线圈、电容器、电源、半导体管、集成电路等部件组成的。最简单的电路见图1—1(a)。V_s是电池，K是开关，L是灯泡。当K闭合时，电流通过灯泡使其发光。L是用电的部件，称为负载。



(a) 照明电路

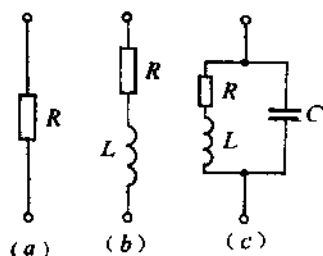
(b) 电路模型

图1—1 实际电路与电路模型

在分析电路时，人们往往将实际部件理想化，抓住其主要特性，忽略其他次要因素，这样就近似地表征了电路的性能。这种处理方法是必要的，它可使分析计算得以简化。对图1—1(a)照明电路，由于

电池的内阻比灯泡的电阻小得多，故可将其看成一个电压恒定的电压源；灯泡的电感是很小的，故可把它当作一个电阻元件。各种电路元件组合起来就构成电路模型。图1—1(b)就是图(a)的电路模型。电路理论的分析对象不是实际电路，而是模型。

需注意，一个实际部件或电路，根据计算精确度的不同要求，可以有不同的电路模型。例如，一个线绕电阻器就可能有图1—2(a)、(b)、(c)三种电路模型。(a)图是直流时的电路模型，仅由电阻元件R构成。(b)图是低频时的电路模型，它由电阻元件R和电感元件L串联构成，其中L反映线匝的电感效应。(c)图是高频下需要精确计算时的电路模型，它与(b)图相比多了一个并联的电容元件，它反映线匝间分布电容的效应。



(a) 直流时电路模型

(b) 低频时电路模型

(c) 高频时电路模型

图1—2 线绕电阻器不同的电路模型

本书涉及的物理量，其单位全部采用国际制(SI)。如电流的单位是安培(A)，电压的单位是伏特(V)，电阻的单位是欧姆(Ω)，电容的单位是法拉(F)，电感的单位是亨利(H)，功率的单位是瓦特(W)，功和能的单位是焦耳(J)，时间的单位是秒(s)，等等。

在实际计算中，由于国际制单位有时嫌其过大或太小，常引入辅助单位，即在国际制单位前加上表1—1所示的词头。例如

$$2 \text{ 微安}(\mu\text{A}) = 2 \times 10^{-6} \text{ 安(A)}$$

$$1 \text{ 千瓦(kW)} = 1 \times 10^3 \text{ 瓦(W)}$$

表1—1 部分国际制词头

词头中文名称	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	m	μ	n	p
因数	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

按此规定，就不允许用两个词头并列而组成组合词头。如“毫微”应作“纳”，“微微”应作“皮”等。

第一节 电路元件

电路元件共有八种，即：电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源、受控源、耦合电感、理想变压器。前五种因为只有两个端钮，故称为二端元件；后三种因有多个端钮，故称为多端元件。各种电路元件都有确切的定义。此处仅介绍五种二端元件。

我们通常约定，电压、电流、功率等符号的大写（ V 、 I 、 P ）表示直流情况*，它们的小写（ v 、 i 、 p ）表示任意变化情况的瞬时值。

在分析电路时，有时并不知道每个元件上实际电流的方向及电压的正负极性，这就需要假设。一般可在图上直接标出，叫做参考方向。若需定沿着电流的方向，电压的极性从正到负，即电流参考方向与电压参考方向一致，则称为关联参考方向。

一、电阻元件

习惯上，我们把对电流呈现阻力的元件叫做电阻元件，简称电阻。严格地讲，能在电压 v 与电流 i 平面上用一条曲线表示的元件，叫电阻。这就意味着 v 、 i 之间（即伏安特性）

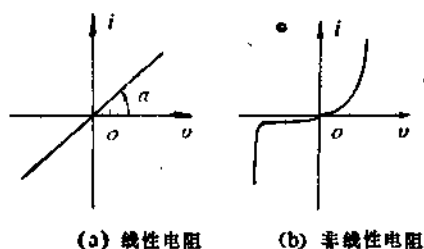


图1-3 线性电阻与非线性电阻

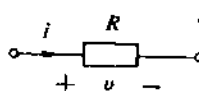


图1-4 线性电阻符号

是代数关系。

如果这条曲线是通过原点的直线，见图1-3(a)，则电阻值 R 就是常数，叫线性电阻。 $R = v/i = \cot \alpha$ 。显然， α 越小， R 就越大。图1-3(b)所示是半导体二极管的伏安特性，曲线各点的斜率均不同，说明电阻值随外加电压的大小在变化，这就是非线性电阻。

线性电阻的符号见图1-4，各种非线性电阻可以有不同的符号。

我们知道，电阻既有阻止电流通过的一面，又有允许电流通过的一面，这就是它的电导特性。电导用符号 G 表示，它与电阻 R 互为倒数关系，即

$$G = \frac{1}{R} \quad R = \frac{1}{G}$$

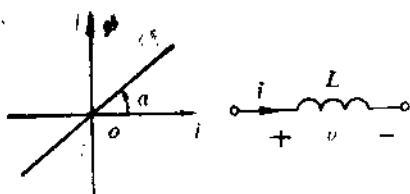
在国际单位制中，电导的单位是西门子（S）。

线性电阻的电压（或电流）是由同一时刻的电流（或电压）所决定的，说明它有即时性，而无记忆性；只能消耗能量（负电阻除外），不能贮存能量。所以，线性电阻（实际上也包括非线性电阻）是无记忆元件和非储能元件。

二、电感元件

能够贮存磁场能量的二端元件叫电感元件，习惯上简称电感。广义地讲，能在磁通 ϕ 与电流 i 平面上用一条曲线表示的元件，叫电感。

* 在交流情况下， V 、 I 、 P 常分别表示有效值电压、电流及平均功率。



(a) 磁链与电流关系 (b) 符号

图1-5 线性电感及其符号

如果这条曲线是通过原点的直线,见图1-5(a),则电感量 L 就是常数,叫线性电感, $L = \psi/i = \operatorname{tg} \alpha$ 。线性电感的符号见图1-5(b)。由于电感两端电压 $v = d\psi/dt$, 则

$$v = \frac{d(Li)}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-1)$$

从(1-1)式很容易发现,若 i 为直流电流,则 v 为零,说明电感上通过直流时它相当于短路线。又因 v 不可能无穷大, L 为常数,故 di/dt 是有限值,说明电感上电流不会产生跃变。这实质上是电感贮存的磁场能量不会突变的具体反映。

实用中的空芯线圈,在略去导线损耗电阻时,均可用线性电感作为它们的模型。铁磁性材料(主要指铁、镍、钴等物质和它们的合金)放入的铁芯线圈则是非线性电感,随着流过电流的大小不同,电感量也随之变化,此时 $\psi-i$ 平面上是一条曲线。

由(1-1)式,得 $di = 1/L v dt$, 两边同时积分

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (1-2)$$

上式中积分变量换成 τ , 主要是与积分上限加以区别。

如我们要研究初始时刻 t_0 以后的情况,就可将(1-2)式写成

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} v(\tau) d\tau + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \\ &= i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-3)$$

(1-2)式说明:任一时刻电感上的电流 $i(t)$, 并不取决于同一时刻的电压值,两是与电压过去的全部情况有关。所以电感是记忆元件。它能贮存磁场能量,又叫贮能元件。因 v 和 i 不是代数关系而是微分(或积分)关系,故称为动态元件。

【例1-1】 画出图1-6(a)电路 $v_R(t)$ 及 $v_L(t)$ 波形。

已知: $R=10\Omega$, $L=1\text{H}$, $i(t)$ 的波形见图1-6(b)。

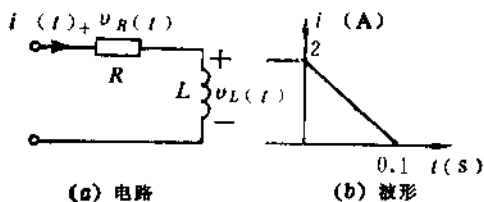


图1-6

【解】 写出 $i(t)$ 的表达式

$$i(t) = \begin{cases} 2 & t \leq 0 \\ 2-20t & 0 \leq t \leq 0.1 \\ 0 & t \geq 0.1 \end{cases}$$

电流 $i(t)$ 的单位是 A, 时间 t 的单位是 s, 为简明起见,略去 A 和 s. 因 $v_R(t) = Ri(t)$, 故很容易写出 $v_R(t)$ 的表达式

$$v_R(t) = \begin{cases} 20 & t \leq 0 \\ 20-200t & 0 \leq t \leq 0.1 \\ 0 & t \geq 0.1 \end{cases}$$

* 分段写函数表达式时,若为连续波形,则两段表达式的交接处可同时写等号;在间断处,一般两段表达式均不写等号。

根据 (1-2) 式, 可写出 $v_L(t)$ 表达式

$$v_L(t) = L \frac{di}{dt} = \begin{cases} -20 & 0 < t < 0.1 \\ 0 & \text{其余} \end{cases}$$

上面 $v_R(t)$ 、 $v_L(t)$ 的单位均是 V。

这样, 就可画出 $v_R(t)$ 与 $v_L(t)$ 的波形, 见图 1-7。

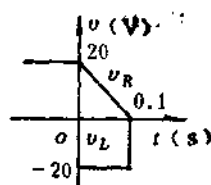


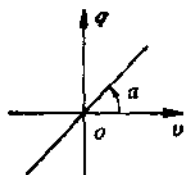
图 1-7 (t) $v_R(t)$ 与 $v_L(t)$ 的波形

三、电容元件

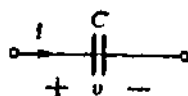
能够贮存电场能量的二端元件叫电容元件, 习惯上简称电容。广义地讲, 能在电荷 q 与电压 v 平面上用一条曲线表示其特性的元件, 叫电容。

如果这条曲线是通过原点的直线, 见图 1-8(a), 则电容量 C 就是常数, 叫线性电容。 $C = q/v = \tan \alpha$ 。线性电容的符号见图 1-8(b)。由于电容上流过的电流 $i = dq/dt$, 故

$$i = \frac{d(qv)}{dt} = C \frac{dv}{dt} \quad (1-4)$$



(a) 电荷与电压关系



(b) 符号

图 1-8 线性电容及其符号

从 (1-4) 式不难看出, 若 v 为直流电压, i 就为零, 即电容具有隔断直流的作用。又因 i 不可能是无穷大, C 为常数, 故 dv/dt 是有限值, 说明电容上电压不会产生跃变。这实质上也是电容贮存的电场能量不会突变的具体反映。

实用中的大部分电容器, 在略去金属极板之间漏电产生的损耗时, 均可用线性电容作为它们的模型。变容二极管却是非线性电容, 随着二极管两端电压大小的不同, 电容量也随之变化, 此时 $q-v$ 平面上是一条曲线。

由 (1-4) 式, 得 $dv = \frac{1}{C} i dt$, 两边同时积分

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1-5)$$

如我们要研究初始时刻 t_0 以后的情况, 就可将 (1-5) 式写成

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \\ &= v(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-6)$$

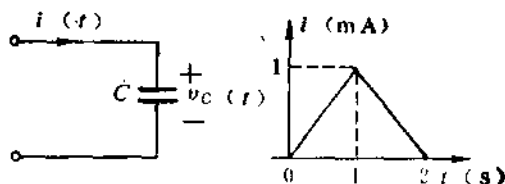
(1-5)式说明,任一时刻电容两端的电压 $v(t)$,并不取决于同一时刻的电流值,而是与电流过去的全部情况有关。所以电容是记忆元件。它能聚集电荷或称贮存电场能量,又叫储能元件。它与电感一样, v 和 i 不是代数关系而是微分(或积分)关系,也称动态元件。

【例1-2】 画出图1-9(a)电路 $u_c(t)$ 的波形。已知: $C=1000\mu\text{F}$, $v_c(0)=-1/2\text{V}$, $i(t)$ 的波形见图1-9(b)。

【解】 写出 $i(t)$ 的表达式

$$i(t) = \begin{cases} t & 0 \leq t \leq 1 \\ -t+2 & 1 \leq t \leq 2 \\ 0 & \text{其余} \end{cases}$$

由题意,此处 $i(t)$ 的单位是mA。根据(1-5)式,可求出 $v_c(t)$ 。



(a) 电路 (b) 波形

图 1-9

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau, \text{ 现分段计算 } v_c(t);$$

$$\text{在 } t \leq 0 \text{ 期间, } v_c(t) = -\frac{1}{2}(\text{V})$$

$$\text{在 } 0 \leq t \leq 1 \text{ 期间, } i(t) = t(\text{mA}) = 10^{-3}t(\text{A})$$

$$v_c(t) = v_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$$

$$= -\frac{1}{2} + \frac{1}{1000 \times 10^{-6}} \int_0^t 10^{-3} \tau d\tau = -\frac{1}{2} + \frac{\tau^2}{2} \Big|_0^t = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}t^2 (\text{V})$$

$$v_c(1) = 0(\text{V})$$

$$\text{在 } 1 \leq t \leq 2 \text{ 期间, } i(t) = -t+2(\text{mA})$$

$$v_c(t) = v_c(1) + \frac{1}{C} \int_1^t i(\tau) d\tau$$

$$= 0 + \int_1^t -(\tau-2) d(\tau-2) = -\frac{1}{2}(\tau-2)^2 \Big|_1^t = -\frac{t^2}{2} + 2t - \frac{3}{2} (\text{V})$$

$$v_c(2) = \frac{1}{2}(\text{V})$$

$$\text{在 } t \geq 2 \text{ 期间, } i(t) = 0(\text{mA})$$

$$v_c(t) = v_c(2) = \frac{1}{2}(\text{V})$$

这样,即可画出 $v_c(t)$ 的波形,见图1-10。

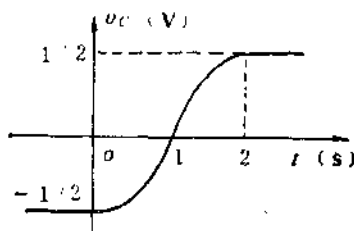


图 1-10 $v_c(t)$ 的波形

四、电压源

若元件两端的电压是定值或给定的时间函数，通过的电流随外接电路不同而改变，则它是电压源。它的符号见图1-11(a)。对于直流电压源、交流电压源，亦可分别用图(b)、(c)表示。

因一般电压源是对外提供能量的，所以常将电流的参考方向画成由“+”端流出。此时电压、电流之间就不是关联参考方向。

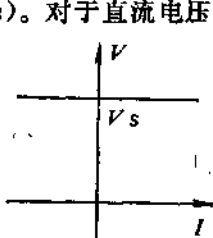
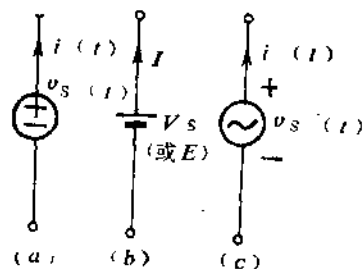


图1-12 直流电压源伏安特性



(a) 一般电压源；(b) 直流电压源；(c) 交流电压源

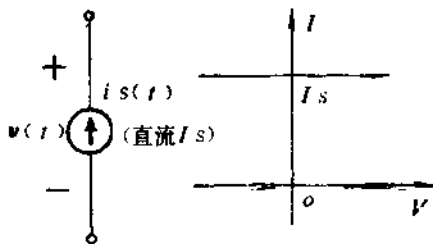
图1-11 电压源

由电压源的定义可知，虽然端电压不随外电路变化，但电流却受其约束。外电路断开时，电流为零；外电路电阻越小，电流越大。

直流电压源的伏安特性见图1-12，它是一条平行于横轴的直线。如 $I > 0$ ，表示此电压源对外提供功率； $I < 0$ ，表示其他电源对其提供功率，即它本身吸收功率。

五、电流源

若元件通过的电流是定值或给定的时间函数，其两端电压随外接电路不同而改变，则它是电流源。它的符号见图1-13(a)



(a) 符号 (b) 直流电流源伏安特性

图1-13 电流源及其伏安特性

与电压源类似，这里标出的电压、电流也不是关联参考方向。

直流电流源的伏安特性见图1-13(b)，它是一条平行于横轴的直线。同电压源伏安特性相比，只是横坐标与纵坐标互换了一下。如 $V > 0$ ，表示此电流源对外提供功率； $V < 0$ ，表示其他电源对其提供功率，即它本身吸收功率。

由于电压源、电流源能够独立存在，故统称为独立源。

介绍了上述几种电路元件以后，细心的读者一定会发现：电阻与电导、电感与电容、电压源与电流源之间，概念、伏安关系、伏安特性曲线等有着类似对应的关系，通常叫对偶。

例如电阻伏安关系 $v = Ri$ ，若将 v 换成 i ， i 换成 v ， R 换成 G ，就变为 $i = Gv$ ，它是电导伏安关系。再如电感伏安关系 $v = L di/dt$ ，即(1-1)式，若除了将 v 、 i 互换外，再将 L 换成 C ，就变为电容伏安关系 $i = C dv/dt$ ，即(1-4)式。这不是巧合，而是一种普遍规律。

电路分析中，常见的对偶关系是很多的，如电阻与电导、电感与电容、电压源与电流源、电流与电压、磁链与电荷、串联电路与并联电路、分压与分流、短路与开路、阻抗与导纳，等等。现将这些对偶关系列于表1-2中。

表1-2 电路分析中的一些对偶关系

电阻 R	电感 L	电压源 V_s	磁链 ψ	电流 i	串联电路	分压	短路	阻抗 Z
电导 G	电容 C	电流源 i_s	电荷 q	电压 v	并联电路	分流	开路	导纳 Y

掌握对偶关系，对加深理解，巧妙记忆和融会贯通地学习，无疑是十分有益的。比如记住了(1-1)式，利用对偶关系，即可得到(1-4)式。

实际上，物理学中也广泛存在着对偶关系，如电场与磁场、电场强度与磁感强度、高斯定理与安培环路定律，等等。在本书后面的学习中，还有许多对偶关系，请读者注意。

第二节 拓扑约束与元件约束

电路分析的基本依据是两类约束，即拓扑约束与元件约束。所谓约束，就是电路和元件所具备的固有属性，也即必须遵循的规则。只要我们掌握了两类约束并能加以灵活应用，即使对较复杂的电路采用由此导出的各种分析方法，也可以进行求解。

一、网络拓扑初步

网络拓扑是一种处理某些实际问题的工具。一般而言，我们所指的网络就是电路。按其端钮个数，可分为二端（单口）网络和多端网络。在多端网络中，常见的是四端（双口）网络，按其内部是否含有电源，可分为有源网络和无源网络。所谓拓扑，系指结构（元件连接）关系。此处简要介绍网络拓扑的一些基本知识。

（一）节点、支路、回路、网孔

图1-14(a)和(b)是两个具体电路，它们有着自己的结构形式，现要研究的是共性的东西。

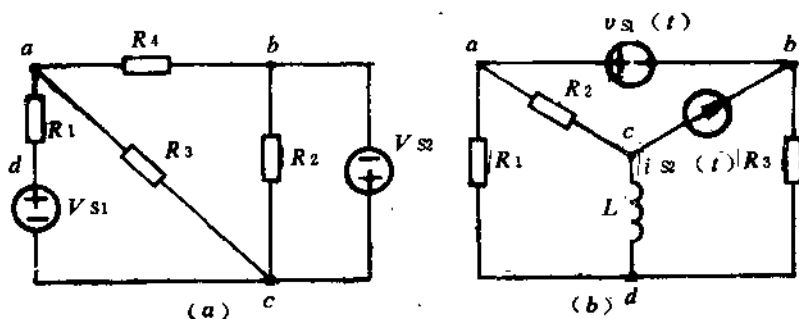


图 1-14 两个具体电路

两个或两个以上元件的交汇点叫节点。按此定义，(b)图中有 a 、 b 、 c 、 d 四个节点，(a)图中至少有 a 、 b 、 c 三个节点。此处讲“至少”，是因为图中 d 点也可以看作节点，它是电压源 V_{s1} 与电阻 R_1 的交汇点。当然，在大多数情况下，为分析简单起见，两个元件的交汇点不必作为节点。电路中的节点数常用 n 表示。(a)图中， $n=3$ ，(b)图中， $n=4$ 。

一个二端元件，或若干二端元件的串联组合，叫支路。前者的定义，为的是便于计算机进行电路分析；后者的定义，是考虑串联电路通过同一电流的特性。与刚才讲节点时类

似，也可将(a)图中 V_{S1} 及 R_1 两个元件当作两条支路；当然，通常是将它们的串联组合当成一条支路。电路中的支路数常用 b 表示。(a)图中， $b=5$ ，(b)图中， $b=6$ 。

电路中任何闭合的途径叫回路。由于较复杂的电路闭合途径很多，所以回路数是较多的。我们数一下，(a)图中可有六个不同的回路，(b)图中可有七个不同的回路。

在回路中，如内部不含有支路，就叫网孔。它的简易看法，就是望去的“空洞”。电路中的网孔数常用 l 表示，(a)、(b)两图均有三个网孔，即 $l=3$ 。

(二) 平面电路与非平面电路

能在一平面上表示而不使任两条支路交叉的电路叫平面电路，否则就为非平面电路。上面画的图1—14(a)、(b)两个电路，均是平面电路。须注意的是，由于画法上的原因，有时看起来的平面交叉，可通过电路的整理，转化为不交叉，故仍为平面电路。

图1—15(a)、(b)所示，均有平面交叉情况。在电路整理时，可抓住节点，逐条支路进行。这样，(a)图X形电路可变为(c)图桥T形电路，(b)图电路可变为(d)图电路。因(c)、(d)两图电路都是平面不交叉的，故(a)、(b)两图电路亦为平面电路。

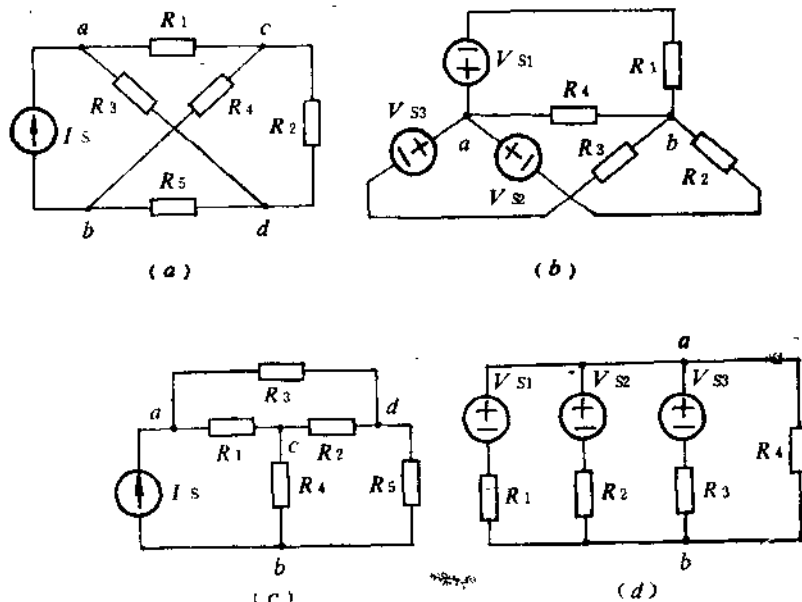


图 1—15 交叉电路的转化

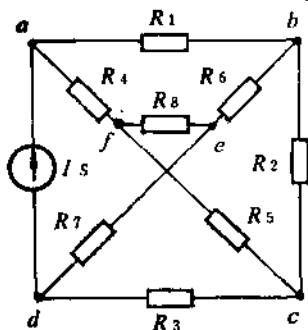


图 1—16 非平面电路

图1—16所示电路，不论如何整理，在平面中交叉仍然存在，所以是非平面电路。

(三) 线图和树

1. 线面。将具体电路抽象为几何结构图，叫线图(拓扑图)。此时，电路中的所有元件均不画出，只用线段的连结组成图形。前面所画面1—14(a)、(b)两电路的线图分别见图1—17(a)、(b)。

建立线图概念以后，支路、节点、回路、网孔可定义如下：在线图中，支路就是线段(或折线)，节点就是线段的端点，回路就是

任何闭合线，网孔就是内部不含线段的闭合线。因画法上的不同，支路不仅可表示为线段或折线，也可表示为弧线。如图1—17(a)、(b)两个线图可分别画成(c)、(d)两个线图。

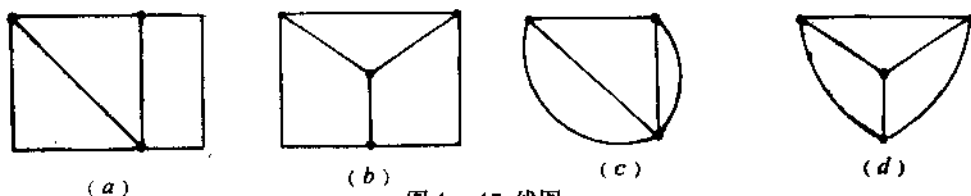


图1—17 线图

2. 何。对于一个连通的电路，其线图必然是连通的。我们在此所画的各种电路及它们的线图，均属此列。由于连通图具有闭合回路，电路中就有电流存在，若移去某些支路，则此性质可遭破坏。现将图1—17(c)重画成图1—18，并将其中一部分支路用粗线表示。显然，若将图1—18(a)、(b)、(c)中所有细线移去，则剩下的粗线所示图形就不存在任何闭合回路，但所有的节点仍是连通的。

这样，就得出何的定义：连结线图中所有节点，且不构成任何回路，就叫树。通常何用粗线表示。由此可知，线图确定后，要画出树必须同时具备两个条件：连结所有节点，不构成任何回路。在何确定后，组成树的所有支路叫树枝，其余支路叫连支。不难看出，同一线图常有多种不同的树。那末，一个线图究竟可以有多少种不同的何呢？经推导，对于任两个节点间只有一条支路的线图，树的总数为 n^{n-2} 种。图1—17(b)或(d)满足此条件，且 $n=4$ ，树的总数为16种。

可以证明，具有 n 个节点的线图，不论何种树，其树枝数恒等于 $n-1$ 。因支路数为 b ，则连支数等于 $b-(n-1)$ 。如图1—18， $n=3$ ， $b=5$ ，树枝数为2，连支数为3。

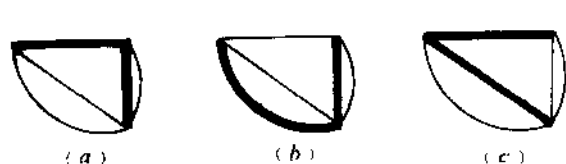


图1—18 线图三种可能的树(粗线)

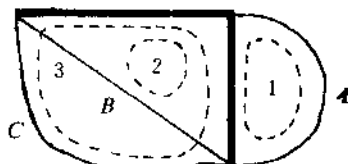


图1—19 基本回路

十分明显，线图的何确定后，只要连结任一条连支，就会构成一个回路。由此得出基本回路的定义：只含一条连支的回路叫基本回路。现将图1—18(a)重画成图1—19，如分别加上连支A、B、C，就可构成三个基本回路，在图上用虚线及号码1、2、3表示。

在许多情况下，平面电路的线图，往往可以选取一何，使得每连结一条连支所何的基本回路均为网孔。将图1—17(c)选取一树如图1—20所示，其三个基本回路就是三个网孔。

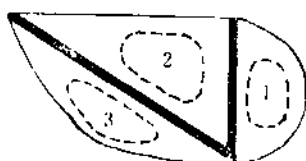


图1—20 基本回路选为网孔

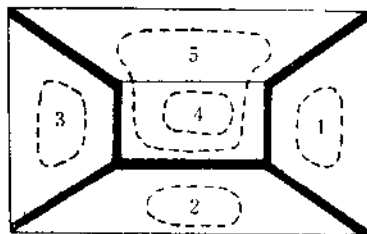


图1—21 基本回路无法全部选为网孔

当然，有时对一个线图不论取何种树，均无法满足上述要求。图1—21为大回路中套

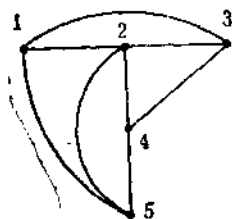


图 1—22

小回路情况，就是一例。图中所选的树是最佳情况之一，只能做到 1~4 四个基本回路是网孔，而基本回路 5 就不是网孔。

【例 1—3】 对图 1—22 选择一树，使之满足基本回路就是网孔的要求。

【分析】 此图 $n=5$, $b=8$, $l=4$ 。树支数为 $n-1=4$ ，连支数为 $b-(n-1)=4$ 。所以，对平面电路而言，可导出网孔数就等于连支数（即基本回路数）。

【解】 要满足题意，选树就必须如下连接：1—2，2—3，2—4，2—5。

二、拓扑约束

只与电路的互联形式（即结构）有关的约束，称为拓扑约束。显然，它与组成电路的具体元件无关，具体地讲，拓扑约束就是基尔霍夫的两个定律。

（一）基尔霍夫电流定律（简称 KCL）

对于任意电路中的任一节点，在任一时刻，流出（或流入）该节点的所有支路电流的代数和为零。这就是基尔霍夫电流定律。它的数学表达式为

$$\sum_{k=1}^m i_k = 0 \quad (1-7)$$

式中 i_k 是流出（或流入）节点第 k 条支路的电流， m 为节点处的支路数。（1—7）式的另一种形式是 $\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}}$ 。

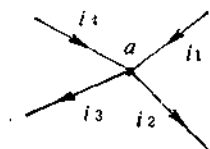


图 1—23 电路中的一个节点

图 1—23 是某电路的一个局部， a 是节点。根据 KCL，若将流出该节点的电流规定为“+”，流入节点的电流规定为“-”，则 $-i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0$ （或 $i_2 + i_3 = i_1 + i_4$ ）

基尔霍夫电流定律是电荷守恒定律的具体反映。对电路中任一节点， dq/dt 是电荷变化的速率，即电流的代数和。因节点只是交汇点，不可能积累电荷，电荷既不能创造，也不会消灭，故 dq/dt 必为零。这就得出（1—7）式。

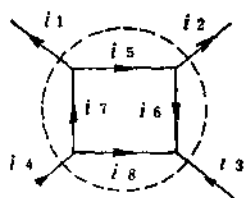


图 1—24 封闭面示意

KCL 不仅对电路中的任一节点适用，亦可将其扩展至任一封闭面。所谓封闭面，就是闭合曲面。电路中的任意闭合回路，如图 1—24 线图中中间虚线部分就可看成封闭面。实际上，也可将虚线部分看成电路中的一个节点。此处， $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$ 。

（二）基尔霍夫电压定律（简称 KVL）

对于任意电路中的任一回路，在任一时刻，沿着该回路的所有支路电压的代数和为零。这就是基尔霍夫电压定律。它的数学表达式为