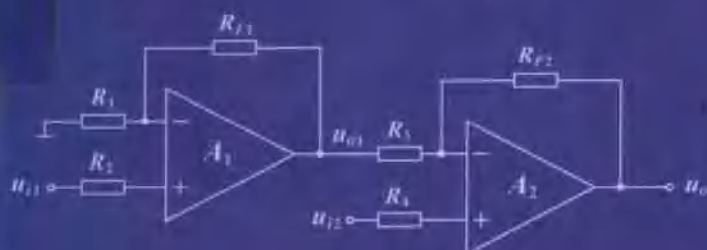
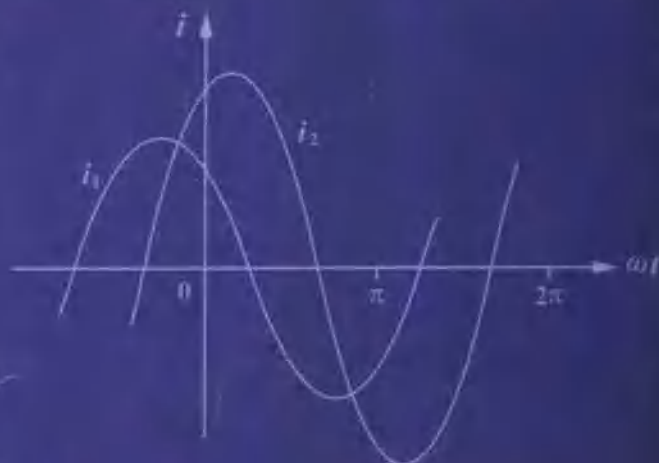
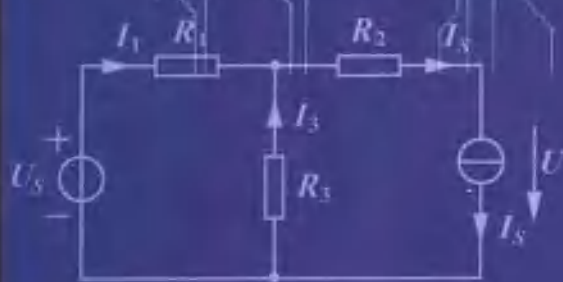


电路

与

模拟电子电路

冯广泓 编著



兰州大学出版社

DIANLUYUMONIDIANZIDIANLU

电路与模拟电子电路

冯广泓 编著

兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子电路/冯广泓编著. —兰州:兰州大学出版社,2003.7
ISBN 7-311-02199-5

I. 电... II. 冯... III. ①电路理论②模拟电路 IV. TM13
TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 064813 号

电路与模拟电子电路

冯广泓 编著

兰州大学出版社出版发行

兰州市天水路 308 号 电话:8617156 邮编:730000

E-mail: press@onbook.com.cn

<http://www.onbook.com.cn>

兰州大学出版社激光照排中心照排

兰州铁路局印务所印刷

开本: 787×1092 1/16

印张:19.75

2003 年 7 月第 1 版

2003 年 7 月第 1 次印刷

字数:478 千字

印数:1~1000 册

ISBN7-311-02199-5

定价:24.80 元

前 言

高等院校理工科专业开设电子类课程已有数十年。随着电子技术的快速发展,尤其是集成电路应用的日益普遍,使得模拟电子电路的教学改革十分紧迫。这本教材是根据教育部 99 年 11 月组织专家讨论的关于“理科非电类专业电子类课程体系设计”的精神,在总结本人及诸位同行的多年教学实践基础上,参阅了各种版本的电子技术方面的教材,并结合当前电子技术的发展,针对理工科非电类专业的本科学学生而编写。

对于非电类专业学生来说,一般没有系统学习过《电工原理》或《电路分析》。考虑到学习的连续性,这本教材首先讲述电路知识,以便为学好电子电路打下基础。教材的前三章是电路原理方面的内容,主要包括电路基础与直流电路的分析方法,单相正弦交流电路,线性电路的过渡过程。要求学生掌握电路的基本概念及计算方法,为学好电子电路课程打下良好的基础。第四章至第八章是模拟电子电路知识,主要内容有常用半导体器件,放大电路,集成运算放大器及其应用,波形的产生与变换,功率放大器与直流稳压电源等。这部分内容强调器件的外部特性与功能,器件内部导电物理过程大大简化。放大电路着重讨论放大原理,基本放大电路的必要计算以及几种放大电路的特点,摒弃繁杂的各种放大电路的设计与计算。运算放大器是重点,结合运算放大器讨论反馈的实质与对放大器性能的影响。分析典型运放电路,强调运放的线性与非线性应用,讲解各种运放的应用电路。电源部分讲述交流电变换成直流电的各部分电路,介绍集成稳压片的应用,讲解开关型直流稳压电源。第九章是现代通信技术基础,讲述无线电的发射与接收,在此基础上结合无线电广播信号的传播过程,讲解超外差式收音机的工作原理,最后简单介绍现代通信技术概况。

本教材的教学时数为 72 学时。书中标有*号的部分不在教学时数内,可作为学生参考内容。如果教学时数是 54 学时,第一章和第三章可不作为课堂讲授内容,其它章节根据具体教学要求适当调整。

这本教材的编写本着语言简洁清晰、内容深入浅出、突出重点、强调应用的原则,尽力精选内容,保持教材的先进性,并便于自学。学生通过本教材的学习,能够拓宽知识面,开阔思路,增强创新能力,以适应社会发展的需要,并可为跨专业考研打好基础。

本教材的编写得到了兰州大学教务处的的大力支持,并获“兰州大学教材建设基金资助”。在编写过程中,吕振肃教授给予了指导并提出了一些宝贵意见,张武、张文煜两位副教授和王颖、李哥青、李建红几位老师给予了热情帮助,在此一并对以上单位和同志深表谢意。

由于本人水平有限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2003 年 7 月于兰州大学

目 录

第一章	电路基础与直流电路的分析方法	(1)
§ 1.1	电路基础	(1)
1.1.1	欧姆定律及电阻电路各参数的计算	(1)
1.1.2	基尔霍夫定律	(4)
1.1.3	电压源与电流源	(6)
§ 1.2	直流电路的基本分析方法	(11)
1.2.1	支路电流法	(11)
1.2.2	节点电压法	(12)
1.2.3	叠加原理	(14)
1.2.4	戴维南定理	(15)
*1.2.5	诺顿定理	(16)
*1.2.6	Y形网络与 Δ 形网络的等效变换	(18)
小结		(20)
习题		(21)
第二章	单相正弦交流电路	(28)
§ 2.1	单相正弦交流电路	(28)
2.1.1	单相正弦交流电	(28)
2.1.2	单一参数的正弦交流电路	(33)
2.1.3	串联谐振	(39)
2.1.4	并联谐振	(42)
§ 2.2	非正弦交流电路	(45)
2.2.1	用傅立叶级数分析非正弦周期波形	(45)
*2.2.2	非正弦周期波形的有效值、平均值和平均功率	(48)
*2.2.3	非正弦周期电流电路的计算	(49)
小结		(51)
习题		(52)
第三章	线性电路的过渡过程	(56)
§ 3.1	电路的过渡过程	(56)
3.1.1	换路与换路定则	(56)
3.1.2	R、C电路的过渡过程	(58)
3.1.3	R、L电路的过渡过程	(66)
3.1.4	R、L、C电路的过渡过程	(69)
§ 3.2	微分电路与积分电路	(73)
小结		(76)
习题		(77)
第四章	常用半导体器件	(81)
§ 4.1	PN结及其导电特性	(81)
4.1.1	PN结的形成	(81)
4.1.2	PN结的单向导电性	(82)
§ 4.2	半导体二极管	(83)
4.2.1	半导体二极管的类型、特性与参数	(83)

4.2.2	半导体二极管的应用	(84)
§ 4.3	稳压二极管	(86)
4.3.1	稳压二极管的特性与参数	(86)
4.3.2	稳压二极管的应用	(87)
4.3.3	几种特殊二极管的介绍	(88)
§ 4.4	双极型晶体管	(89)
4.4.1	晶体管的结构与电流放大作用	(89)
4.4.2	晶体管的伏安特性	(91)
4.4.3	晶体管的主要参数	(92)
4.4.4	晶体管电路应用举例	(95)
§ 4.5	场效应管	(96)
4.5.1	结型场效应管	(96)
4.5.2	绝缘栅场效应管	(98)
4.5.3	场效应管的主要参数	(100)
4.5.4	晶体管与场效应管的比较	(101)
小结	.....	(101)
附录	半导体器件型号命名方法	(102)
习题	.....	(103)
第五章	放大电路	(108)
§ 5.1	放大电路的性能指标	(108)
§ 5.2	晶体管共发射极放大电路	(110)
5.2.1	晶体管共发射极放大电路的结构与工作原理	(111)
5.2.2	图解分析法	(111)
5.2.3	微变等效电路法	(115)
5.2.4	工作点稳定的共发射极放大电路	(118)
§ 5.3	射极输出器	(121)
§ 5.4	场效应管放大电路	(123)
5.4.1	共源极放大电路	(123)
5.4.2	源极输出器	(126)
§ 5.5	多级放大电路	(127)
5.5.1	多级放大电路的两种耦合方式	(127)
5.5.2	多级放大电路的电压放大倍数及频率特性	(128)
小结	.....	(130)
习题	.....	(131)
第六章	集成运算放大器及其应用	(136)
§ 6.1	集成运放的电路结构	(136)
6.1.1	输入级	(137)
6.1.2	中间级	(142)
6.1.3	输出级	(144)
6.1.4	偏置电路	(145)
§ 6.2	集成运放的主要参数与典型电路的分析	(146)
6.2.1	集成运放的主要参数	(146)
6.2.2	集成运放的典型电路分析	(147)
§ 6.3	运算放大器中的负反馈	(149)

6.3.1	负反馈的基本概念	(149)
6.3.2	运算放大器的四种负反馈类型及其特点	(151)
6.3.3	负反馈对运算放大器性能的影响	(154)
§ 6.4	集成运放的信号运算电路	(158)
6.4.1	理想运放的特性	(158)
6.4.2	比例运算电路	(160)
6.4.3	加法与减法运算电路	(166)
6.4.4	积分与微分运算电路	(170)
6.4.5	对数与反对数运算电路	(172)
6.4.6	乘法与除法运算电路	(173)
§ 6.5	用集成运放构成有源滤波器	(175)
6.5.1	有源低通滤波器	(176)
*6.5.2	有源高通滤波器	(178)
*6.5.3	有源带通滤波器	(179)
*6.5.4	有源带阻滤波器	(180)
*6.5.5	开关电容滤波器与梳状滤波器介绍	(181)
小结	.....	(184)
习题	.....	(185)
第七章	波形的产生与变换	(194)
§ 7.1	正弦波振荡器	(194)
7.1.1	自激振荡的平衡条件、起振条件与振幅的稳定	(194)
7.1.2	RC 桥式正弦波振荡器	(196)
§ 7.2	LC 正弦波振荡器	(199)
7.2.1	变压器反馈式正弦波振荡器	(199)
7.2.2	三点式振荡器	(200)
§ 7.3	石英晶体振荡器	(203)
7.3.1	振荡器频率的稳定	(203)
7.3.2	石英晶体振荡器	(204)
§ 7.4	波形变换	(206)
7.4.1	电压比较器	(207)
7.4.2	几种常用的电压比较器	(207)
§ 7.5	非正弦波的产生	(211)
7.5.1	方波与矩形波发生器	(211)
7.5.2	三角波与锯齿波发生器	(213)
小结	.....	(216)
习题	.....	(218)
第八章	功率放大器与直流稳压电源	(223)
§ 8.1	功率放大器	(223)
8.1.1	功率放大器的特点	(223)
8.1.2	互补对称功率放大电路	(224)
§ 8.2	集成功率放大器	(227)
§ 8.3	单相整流电路与滤波电路	(229)
8.3.1	单相整流电路	(229)
8.3.2	滤波电路	(231)

§ 8.4	直流稳压电路	(234)
8.4.1	串联型稳压电路	(234)
8.4.2	稳压电路的性能指标与质量指标	(236)
§ 8.5	集成稳压器	(237)
8.5.1	三端固定输出集成稳压器	(237)
8.5.2	三端集成稳压器的应用	(239)
§ 8.6	开关型直流稳压电源	(241)
8.6.1	开关型稳压电源的整流滤波电路	(241)
8.6.2	开关型电源的稳压电路	(242)
8.6.3	开关型稳压电源的集成化电路	(244)
	小结	(245)
	习题	(246)
第九章	现代通信技术基础	(252)
§ 9.1	无线电信号的发射与接收	(252)
9.1.1	无线电信号的产生	(252)
9.1.2	无线电信号的传输过程	(253)
9.1.3	无线电信号波段的划分与空间传输方式	(254)
§ 9.2	调幅与调频	(256)
9.2.1	调幅波	(256)
9.2.2	调频波	(262)
§ 9.3	检波与鉴频	(266)
9.3.1	大信号调幅检波	(266)
9.3.2	鉴频	(267)
§ 9.4	变频与混频	(271)
9.4.1	变频	(271)
9.4.2	混频	(272)
§ 9.5	超外差式收音机	(273)
9.5.1	超外差式调幅收音机的电路结构与特点	(273)
9.5.2	集成电路收音机介绍	(276)
9.5.3	调频收音机介绍	(277)
§ 9.6	数字通信技术介绍	(278)
9.6.1	数字信号与数字通信系统	(278)
9.6.2	现代通信技术概况	(280)
	小结	(281)
	习题	(283)
	习题参考答案	(286)
	模拟试题	(294)
	模拟试题参考答案	(304)
	参考文献	(307)

第一章 电路基础与直流电路的分析方法

内容提要

本章首先介绍欧姆定律和基尔霍夫定律，并运用这两个定律进行一些电路参数的计算。然后讲述电压源与电流源的概念、特点以及它们之间的相互转换，讲述恒压源与恒流源的概念及特点，介绍直流电路的一些基本分析与计算方法，包括支路电流法、节点电压法，并运用叠加原理，戴维南定理等分析计算一些复杂电路。

§ 1.1 电路基础

学习模拟电子电路课程，需要有一定的电路基础知识。电路有简单电路和复杂电路，有直流电路和交流电路，有线性电路和非线性电路等等。各种电路都有分析计算的方法。本章主要介绍直流电路的一些基本概念、基本定律及分析方法，电路中各参数的计算以及支路电流法、节点电压法、叠加原理、戴维南定理等。

1.1.1 欧姆定律及电阻电路各参数的计算

分析计算电路各参数时，常用到欧姆定律和基尔霍夫定律，这两个定律是电路的基本定律。下面分别介绍这两个定律在电路分析中的应用。

一、欧姆定律

欧姆定律表明流过电阻的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比，它反映了电阻元件的特性。运用欧姆定律时，需要考虑流过电阻的电流 I 与电阻两端电压 U 的方向。有时候电路中电流与电压的实际方向难以判断，尤其是电路比较复杂时，无法确定电流与电压的方向。为了能够准确定出电流与电压的实际方向，可以先任意假设电流与电压的方向，这种任意假设的电路中的电流与电压的方向称之为参考方向。参考方向分为关联参考方向和非关联参考方向。所谓关联参考方向就是电流与电压的参考方向一致，如图 1.1.1(a)所示。如果电流与电压的参考方向不一致，就是非关联参考方向，如图 1.1.1(b)所示。

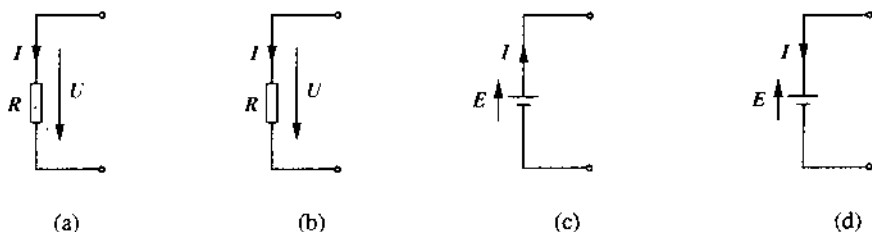


图 1.1.1 电压与电流、电动势与电流的参考方向

电源的电动势 E 与电流 I 的参考方向一致时，也是关联参考方向，如图 1.1.1(c)所示；反之， E 与 I 的参考方向不一致就是非关联参考方向，如图 1.1.1(d)所示。

引入了参考方向的概念，欧姆定律就有两种表达形式。当电流与电压为关联参考方向时，欧姆定律表示为

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1.1.1)$$

当电流与电压为非关联参考方向时，欧姆定律表示为

$$R = -\frac{U}{I} \quad \text{或} \quad U = -IR \quad (1.1.2)$$

欧姆定律仅适用于线性电阻电路。线性电阻的阻值是一个常数，与加在它两端的电压或通过它的电流无关。线性电阻上的电压与通过的电流成正比，遵守欧姆定律。如果电阻的阻值随着其上的电压或电流的变化而变化，这样的电阻称为非线性电阻。非线性电阻上的电压与电流的关系是不遵守欧姆定律的。严格说来，绝对的线性电阻是不存在的，所有的实际电阻元件的阻值或多或少地随着其上的电压或电流的改变而改变。但是在一定的范围内电阻的阻值基本保持不变，可以将它看作线性电阻元件，这样处理，完全符合理论与实际的情况。

二、电路中元件参数的计算

通常，简单的电阻串、并联电路用欧姆定律计算电路的电流与电压，计算时要注意电流与电压的参考方向。在电子电路中，常常用到“电位”这一物理量。电位的单位与电压的单位都是伏特，但是二者之间有区别。电压是指电路中两点之间的“电位差”，而电位指的是电路中某点与参考点之间的电压。参考点是任意选定的，通常将参考点的电位设定为零伏，所以参考点又称为“零电位”。电压和电位都可以用字母 U 或 V 表示。本书电压用 U 表示，电位用 V 表示，以示区别。如 a 点的电位记为 V_a 。电位虽然是对电路中某点而言，但实际上是指该点到参考点之间的电压，所以计算电位的方法与计算电压的方法一样。

另一个需要说明的物理量是电源的电动势。电源的电动势是由于在电源内部外力将正电荷从电源的负极移到正极作功，使正电荷获得电能而电位升高，因此电动势的方向是由电源的负极指向正极，与电源电压的方向相反，如图 1.1.2 所示。图(a)和图(b)都是电源的画法，电源电动势用字母 E 表示，电源电压用 U_S 表示， E 与 U_S 在数值上是相等的，只是方向相反，因此在分析计算电路参数时用 E 和 U_S 都可以。本书电源或信号一般用图(b)所示画法。至于是直流电源还是交流电源，要看所标字母的大小写。大写字母表示直流，如 U 、 I 、 E 分别表示直流电压、直流电流和直流电源的电动势，而交流则用小写字母，如 u 、 i 、 e 等。

例 1.1.1 怎样计算电路中任意一点的电位？举例说明之。

解：先选定某点为参考点，并且设参考点电位为零，则任意一点与参考点之间的电压就是该点的电位。例如计算图 1.1.3 中电位 V_a 、 V_b 、 V_c 时，可先选 d 点为参考点，即

$$V_d = 0$$

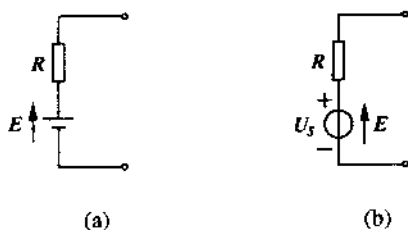


图 1.1.2 电源电压与电动势

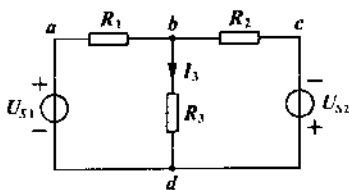


图 1.1.3 例 1.1.1 的图

则 $V_a = U_{S1}$, $V_b = I_3 R_3$, $V_c = -U_{S2}$

电路分析的另一个重要参数是元件的电功率。电功率是用来衡量电能转换速率的，也就是衡量单位时间内电能的大小。电功率简称功率。一只电阻，单位时间内吸收电能，也就是吸收的功率为

$$P = UI \quad (1.1.3)$$

或者
$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1.1.4)$$

电功率的单位是瓦(W)，或者千瓦(kW)

电路中的元件有的吸收功率，有的产生功率。吸收功率是消耗功率。电阻总是吸收功率，并以热的形式向四周散发。产生功率是发出功率。电源在电路中有的产生功率，有的是吸收功率。当电源产生功率时，电源为电路提供电能，而电源本身的电能是由其它形式的能转换而来，比如热能、水能、光能、化学能、原子能等都可以转换为电能。当电源在电路中吸收功率时，电源处于被充电状态。至于电路中某元件是吸收功率还是产生功率，就要看该元件两端的电压与流过其电流的参考方向。在计算元件功率时，应遵循以下两条原则：

1. 电路中某元件两端的电压 U 与流过其电流 I 为关联参考方向时，用式 $P = UI$ 计算；如果 U 与 I 为非关联参考方向，就用式 $P = -UI$ 计算。计算结果若 $P > 0$ ，该元件为负载；若 $P < 0$ ，该元件为电源。

2. 当电源的电动势 E 与流过其的电流 I 为关联参考方向时，电源的功率可用式 $P = EI$ 计算；如果 E 与 I 为非关联参考方向，就用式 $P = -EI$ 计算。计算结果若 $P > 0$ ，该电源产生功率；若 $P < 0$ ，该电源处于被充电状态，消耗功率。

例 1.1.2 如图 1.1.4 所示电路，A、B、C 为三个元件，电压与电流的参考方向已设定。已知 $I_1 = 3A$, $I_2 = -3A$, $I_3 = -3A$, $U_1 = 120V$, $U_2 = 10V$, $U_3 = -110V$

(1) 指出各元件电流、电压的实际方向及极性；

(2) 计算各元件的功率，并从计算结果指出哪个是电源，哪个是负载。

解：(1) 电流 I_1 的实际方向就是图中 I_1 方向，电流 I_2 的实际方向与图中 I_2 方向相反，电流 I_3 的实际方向与图中 I_3 方向相反。电压 U_1 的实际方向与图中 U_1 方向相同，电压 U_2 的实际方向与图中 U_2 方向相同，电压 U_3 的实际方向与图中 U_3 方向相反。

$$(2) P_A = -U_1 I_1 = -120 \times 3 = -360W$$

$$P_B = -U_2 I_2 = -10 \times (-3) = 30W$$

$$P_C = U_3 I_3 = (-110) \times (-3) = 330W$$

元件 A 是电源，元件 B 和元件 C 是负载。

三、电导

电阻的倒数就是电导，即 $G = \frac{1}{R}$ 。在国际单位制中，电导的单位是西门子，用大写字母 S 表示。

在计算并联电阻电路时，有时用电导比较方便。比如有三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 并联的电

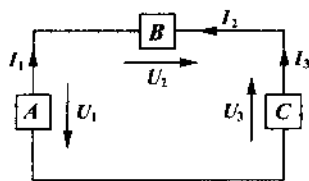


图 1.1.4 例 1.1.2 的图

路，它们的电导分别为 G_1 、 G_2 、 G_3 ，总电导为

$$G = G_1 + G_2 + G_3$$

即 n 个电导并联时，它们的总电导等于各个电导之和，而总电阻 $R = \frac{1}{G}$ 。

1.1.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是电路分析的基本定律之一，对比较复杂的电路分析与计算十分有帮助。基尔霍夫定律包括两个定律，一个是基尔霍夫电流定律(KCL)，另一个是基尔霍夫电压定律(KVL)。基尔霍夫定律既适用于线性直流电路、交流电路，也适用于非线性电路。

一、在讨论基尔霍夫定律之前，先介绍几个有关电路的名词。

1. 支路：电路中每个分支叫做支路，支路中的元件流过同一电流。含有电源的支路称为有源支路，不含任何电源的支路称为无源支路。图 1.1.5 电路中有三条支路，其中 adc 和 abc 是有源支路， ac 是无源支路。

2. 节点：三个和三个以上支路的连接点称为节点。图中的 a 和 c 是节点。

3. 回路：电路中任一闭合的路径叫做回路。如图中的 $abcda$ 、 $abca$ 、 $acda$ 都是回路。

二、基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律指出：任一时刻，流入一个节点的电流总和等于从这个节点流出的电流总和。其一般形式为

$$\sum I = 0 \quad (1.1.5)$$

基尔霍夫电流定律反映了电流的连续性。对于图 1.1.5 中的节点 a ，有

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

可见，电路中任一节点电流的代数和为零。显然，这一结论与各支路上接的什么元件无关，并且适用于线性电路与非线性电路。

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路中的任一节点，同样适用于电路中任意假设的封闭面。

例如图 1.1.6 所示电路：

对于节点 A 有 $I_A = I_{AB} - I_{CA}$

对于节点 B 有 $I_B = I_{BC} - I_{AB}$

对于节点 C 有 $I_C = I_{CA} - I_{BC}$

将上面三式相加，得到

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

可见，对于虚线框内的封闭面来说，同样有 $\sum I = 0$ 。这说明，通过任一封闭面的电流，其代数和为零。当然，如果将图中虚线框内的封闭面看作一个节点，那么三支电流的符号显然不能相同，三支电流中必然有流入和流出封闭面的支路，并且流入与流出的总量相等。

三、基尔霍夫电压定律(KVL)

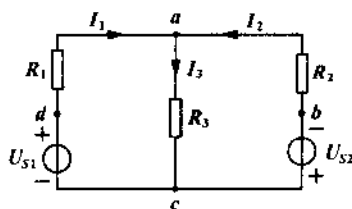


图 1.1.5 介绍电路名词的举例电路

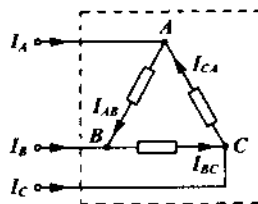


图 1.1.6 KCL 应用电路

基尔霍夫电压定律指出：任一时刻，电路中任一回路内各段电压的代数和为零。即

$$\sum U = 0 \quad (1.1.6)$$

显然，这一定律也是与沿闭合回路上有什么元件无关。同样，基尔霍夫电压定律适用于线性电路与非线性电路。

运用基尔霍夫电压定律时，需要在回路中假设一个绕行方向。凡是电压的参考方向与回路的绕行方向一致时，此电压前面取正号；电压的参考方向与回路的绕行方向相反时，该电压前面取负号。图 1.1.7 为某电路的一个回路，各电压、电流的参考方向及回路的绕行方向如图中所示。根据基尔霍夫电压定律可得

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} - U_{AD} = 0$$

上式又可以写成 $U_{AB} + U_{BC} = U_{AD} - U_{CD}$

可见，两节点间各支路的电压是相等的。基尔霍夫电压定律反映了电压与路径无关的性质。

如果各支路是由电阻元件与电源电动势组成，运用欧姆定律可将 KVL 改写成另一种表达式：

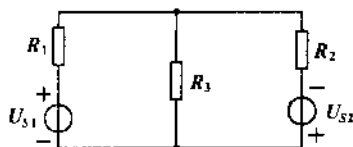
$$\sum (IR) = \sum E \quad (1.1.7)$$

式(1.1.7)说明：任一回路内，电阻上电压降的代数和等于电源电动势的代数和。需要注意的是，式(1.1.7)左边为全部负载电阻压降的

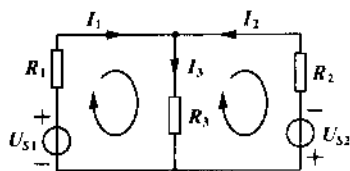
代数和，右边是全部电源电动势的代数和。当流过电阻的电流方向与回路绕行方向一致时，负载压降取正号，反之，取负号；当电源电动势的参考方向与回路绕行方向一致时，电动势取正号，反之，取负号。

式(1.1.7)是基尔霍夫电压定律的另一种形式，它只适用于电阻电路。

例 1.1.3 如图 1.1.8(a)所示是一复杂电路，已知 $R_1 = 6\Omega$ ， $R_2 = 3\Omega$ ， $R_3 = 1\Omega$ ， $U_{S1} = 30V$ ， $U_{S2} = 24V$ ，求流过 R_3 的电流 I_3 。



(a)



(b)

图 1.1.8 例 1.1.3 的图

解：设各支路的电流方向和回路的绕行方向如图 1.1.8(b)所示，运用 KCL 和 KVL 列出方程组：

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0 \\ I_1 R_1 + I_3 R_3 &= U_{S1} \\ -I_2 R_2 - I_3 R_3 &= U_{S2} \end{aligned} \right\}$$

$$\text{即 } \left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0 \\ 6I_1 + I_3 &= 30 \\ -3I_2 - I_3 &= 24 \end{aligned} \right\}$$

解此方程组得 $I_3 = -2\text{A}$

负号表示电流 I_3 的实际方向与图中的方向相反。

1.1.3 电压源与电流源

电路中的电源有两类，一类是独立源，另一类是受控源。所谓独立源就是电源能够独立地为电路提供能量或者信号，不受其它支路的电压或电流的控制，例如干电池、信号源等。受控源是非独立源，它的电压或电流是受电路中另一电压或电流的控制，它不能在电路中独立地存在。例如后面将提到的晶体管放大电路中的晶体管，它的集电极电流就受到基极电流的控制，在电路中晶体管的集电极电流相当于受控电流源。

一、独立源

独立源有两种：电压源和电流源。

1. 电压源

干电池、蓄电池、发电机都是电压源。在电路中电压源可以用电动势 E (或电源电压 U_S) 和内阻 R_0 相串联的电路模型来表示。图 1.1.9(a) 是电压源与负载的连接图， U_S 是电压源的恒值电压， R_0 是电压源内阻， R_L 是负载。图(b) 是电压源的外特性，也叫伏安特性。由图 1.1.9(a) 电路得

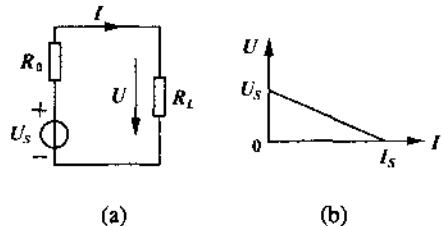


图 1.1.9 电压源及其外特性

$$U = U_S - IR_0 \quad (1.1.8)$$

U 是电压源两端的电压，也是输出电压。式(1.1.8)表示了电压源的端电压 U 与输出电流 I 之间的关系，通常称为电源的外特性或伏安特性。由式(1.1.8)作出如图 1.1.9(b) 所示的伏安特性。由此可以看到电压源有如下特点和性质：

(1) 当负载电阻 $R_L = \infty$ 时，即开路状态，那么 $I = 0$ ， $U = U_S$ 。当负载电阻 $R_L = 0$ 时，就是短路状态，短路电流 $I_S = \frac{U_S}{R_0}$ 。

(2) 若电流 I 为定值，则内阻 R_0 值愈小， U 值就愈大，伏安特性也愈好。

(3) 内阻 $R_0 = 0$ 时， $U = U_S$ ，这就是恒压源。恒压源两端能够保持恒定电压，其符号和外特性如图 1.1.10 所示。

恒压源具有以下特点和性质：

(1) 恒压源是内阻 $R_0 = 0$ 时的电压源，端电压 U 是定值，与流过的电流无关，其伏安特性是一条与横轴平行的直线， $U = U_S$ 。

(2) 恒压源的输出电流 I 由外电路和 U_S 本身决定，符合 KVL，图 1.1.10 所示电路中的电流 $I = \frac{U_S}{R_L}$ 。若 $R_L = 0$ ， $I = \infty$ ，这是不允许的。

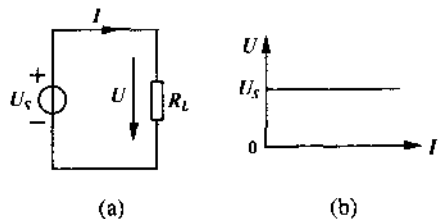


图 1.1.10 恒压源及其外特性

(3) 在恒压源输出电流允许范围内, 与恒压源并联的任何元件都不会影响其恒压值。

(4) 恒压源的内阻 $R_0 = 0$, 是理想电源, 实际并不存在, 但内阻 R_0 很小的电压源可近似视为恒压源。

(5) 恒压源 $U_S = 0$ 时, 其两端视为短路。

2. 电流源

在实际应用中, 多数电源是电压源, 用电流源的比较少。在电子电路中, 尤其是在集成电路中, 常用晶体管电流源为某些电路提供电流。电流源是能够向外电路提供电流的电源, 其符号和外特性如图 1.1.11 所示。

由图 1.1.11(a) 所示电路, 有

$$I = I_S - \frac{U}{R_S} \quad (1.1.9)$$

式中 I_S 是恒值电流, R_S 是电流源内阻, U 是电流源的端电压。式(1.1.9)表示了电流源的端电压 U 与输出电流 I 之间的关系。

电流源具有以下特点和性质:

(1) 外特性是一条下倾的直线。当 $R_L = \infty$ 时, 电流源开路, 那么 $I = 0$, $U = I_S R_S$ 。

(2) 当 $R_L = 0$ 时, 电流源短路, $I = I_S$, $U = 0$ 。

(3) 电流源内阻 R_S 愈大, 其伏安特性愈好。

(4) 电流源内阻 $R_S = \infty$ 时, 就是恒流源。

恒流源能够向外电路提供恒定电流, 其符号与外特性如图 1.1.12 所示。

恒流源具有以下特点和性质:

(1) 恒流源是内阻 $R_S = \infty$ 时的电流源, 其伏安特性是一条与横轴平行的直线。

(2) 恒流源的端电压 U 由外电路和 I_S 本身决定, 符合 KVL。图 1.1.12(a) 所示恒流源电路中的 $U = I_S R_L$, 若 $R_L = \infty$, 那么 $U = \infty$, 这是不允许的。

(3) 与恒流源串联的任何元件都不会影响其恒流值。

(4) 恒流源的内阻 $R_S = \infty$, 是理想电源, 实际并不存在, 但 R_S 很大的电流源可近似视为恒流源。

(5) 恒流源 $I_S = 0$ 时, 其两端视为开路。

例 1.1.4 如图 1.1.13 所示电路, 已知 $U_S = 2\text{V}$, $I_S = 2\text{A}$, $R = 2\Omega$, 计算通过恒压源的电流, 恒流源两端的电压, 以及两个电源的功率, 说明它们是产生功率还是吸收功率。

解: 流过 R 的电流 $I_R = \frac{U_S}{R} = \frac{2\text{V}}{2\Omega} = 1\text{A}$, 电流方向向下。

流过恒压源的电流 $I = I_S - I_R = 2 - 1 = 1\text{A}$, 电流方向向下。

恒压源功率 $P_U = U_S I = 2 \times 1 = 2\text{W}$

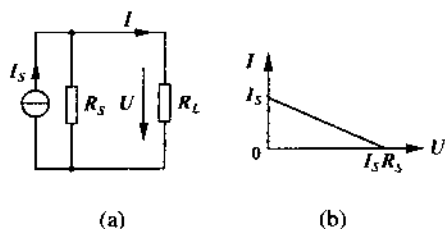


图 1.1.11 电流源及其外特性

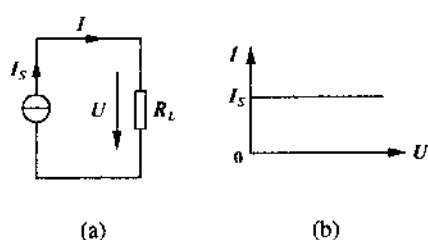


图 1.1.12 恒流源及其外特性

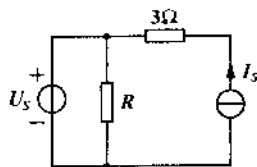


图 1.1.13 例 1.1.4 的图

恒压源吸收功率。

3 欧姆电阻两端的压降 $U = 3I_S = 3 \times 2 = 6\text{V}$ ，方向向左。

恒流源两端的电压 $U_I = U + U_S = 6 + 2 = 8\text{V}$ ，方向向下。

恒流源功率 $P_I = -U_I I_S = -8 \times 2 = -16\text{W}$

恒流源产生功率。

3. 电压源与电流源的等效变换

两个完全相同的负载，分别接在电压源与电流源两端。如果不管是电压源供电还是电流源供电，这两个负载两端的电压、流过的电流以及消耗的功率都相同，那么认为这个电压源与这个电流源是等值的。换句话说，这两个电源的外特性相同，对任何外电路是等效的。两个等效的电源可以互相变换，变换前后对外电路的工作状态没有影响。

怎样进行电压源与电流源的等效变换呢？变换时应注意什么问题？图 1.1.14 是电压源与电流源的等效变换示意图，由此可以推导出两电源等效变换的变换式。

先讨论电压源变换为电流源。

由电压源供电的电路得

$$U = U_S - IR_0$$

由电流源供电的电路得

$$I = I_S - \frac{U}{R_S}$$

即 $U = I_S R_S - IR_S$

两电路的 R_L 完全相同，两电源变换前后

对外电路的工作状态没有影响，也就是两个电路中的 R_L 两端的电压 U 与流过它的电流 I 相同，得到

$$U_S - IR_0 = I_S R_S - IR_S$$

若满足 $R_S = R_0$ ，有

$$I_S = \frac{U_S}{R_0}$$

所以电压源变换成电流源的变换式为

$$\left. \begin{aligned} R_S &= R_0 \\ I_S &= \frac{U_S}{R_0} \end{aligned} \right\} \quad (1.1.10)$$

同样道理，电流源变换成电压源的变换式为

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= R_S \\ U_S &= I_S R_S \end{aligned} \right\} \quad (1.1.11)$$

进行电压源与电流源等效变换时需要注意下面几个问题：

1. 两电源在变换前后应保持对外电路等效，即对外电路而言，电压与电流的大小和方向在变换前后仍保持一致。

2. 电源的等效变换仅对外电路而言，对电源内部是不等效的。例如，两电源都为开路时，电压源内部不消耗功率，而电流源由于其内阻上有电流流过，所以有功率损耗。

3. 恒压源与恒流源不能等效变换。

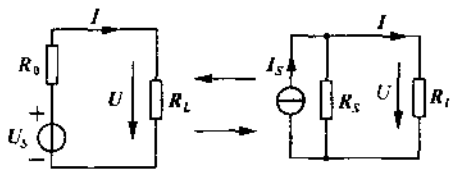


图 1.1.14 电压源与电流源的等效变换

4. 与恒压源并联的任何元件不影响其恒压值，作开路处理；与恒流源串联的任何元件不影响其恒流值，作短路处理。

例 1.1.5 将图 1.1.15(a)和(b)电路变换成电压源，将图(c)电路变换成电流源。

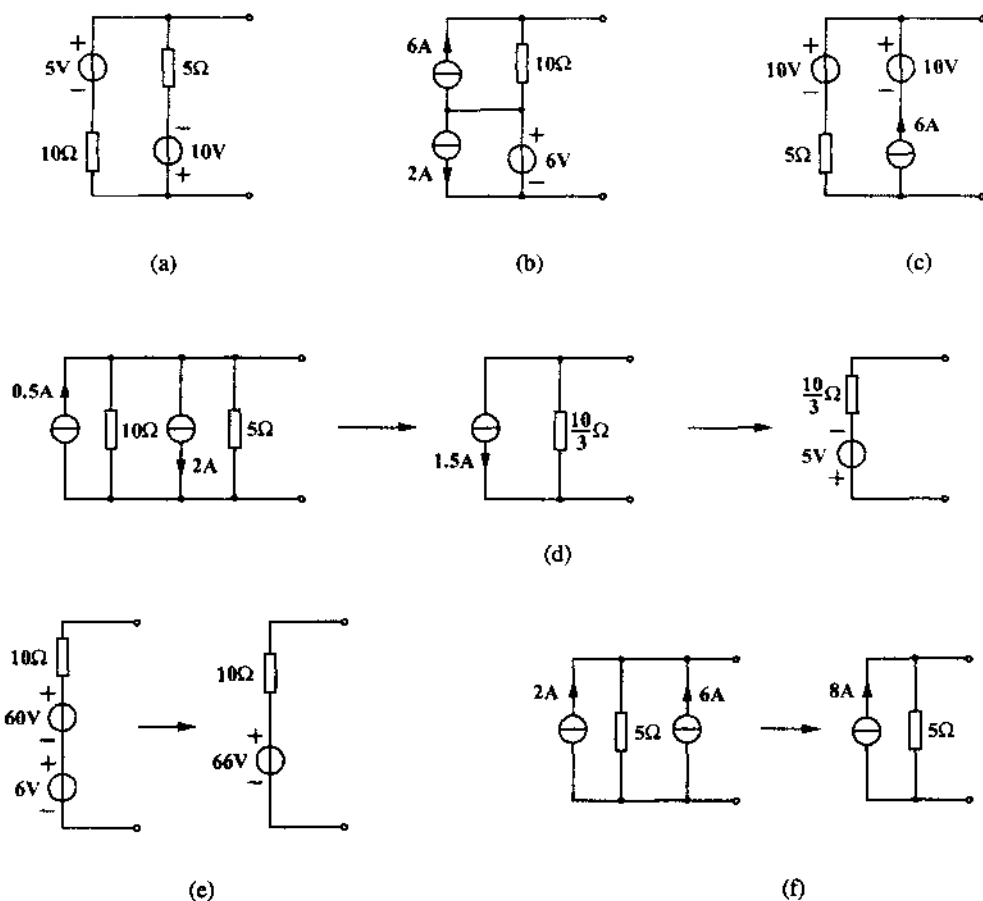


图 1.1.15 例 1.1.5 的电路图

解：对图 1.1.15(a)电路，可先变换成两电流源并联(0.5A 和 10Ω ， 2A 和 5Ω)，再合并为一个电流源($I_S = 1.5\text{A}$ ， $R_S = \frac{10 \times 5}{10 + 5} = \frac{10}{3}\Omega$)，然后再变换成一个电压源($U_S = I_S R_S = 1.5 \times \frac{10}{3} = 5\text{V}$ ， $R_0 = R_S = \frac{10}{3}\Omega$)，如图 1.1.15(d)所示。

对图 1.1.15(b)电路，先将 6A 和 10Ω 的电流源变换成电压源(60V 和 10Ω)， 2A 恒流源与 6V 恒压源并联， 2A 恒流源对电路不起作用，当作开路。再将这两个电压源合并成一个电压源($U_S = 60 + 6 = 66\text{V}$ ， $R_0 = 10\Omega$)，如图 1.1.15(e)所示。

对 1.1.15 图(c)电路，先将 10V 和 5Ω 的电压源变换为电流源(2A 和 5Ω)， 10V 的恒压源与 6A 的恒流源串联， 10V 恒压源对电路不起作用，当作短路。再将这两个电流源合并成一个电流源(8A 和 5Ω)，如图 1.1.15(f)所示。