

光源电器

原理和应用技术

刘跃群 王强 刘卓炯 编著



化学工业出版社

光源电器原理和应用技术

刘跃群 王强 刘卓炯 编著

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

光源电器原理和应用技术/刘跃群,王强,刘卓炯编著.
—北京:化学工业出版社,2003.9
ISBN 7-5025-4755-X

I. 光… II. ①刘…②王…③刘… III. 照明装置-设计
IV. TM923.402

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 078974 号

光源电器原理和应用技术

刘跃群 王强 刘卓炯 编著

责任编辑:孙绥中

文字编辑:张燕文

责任校对:蒋 宇

封面设计:关 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 19½ 字数 484 千字

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4755-X/TM·31

定 价:42.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

—前言—

近年来，电光源照明技术发展很快，但我国出版的这方面书籍却为数不多，显然跟不上工业、农业、科技、军事和人民生活对电光源照明的迫切需要。本书是为适应这个需要而编写的。本书与众不同之处是从电光源原理出发，系统地叙述了光源电器原理。

光源电器作为照明技术的重要内容之一，起着直接影响照明的作用。无论是浩大的照明工程或局部的灯光照明，都需考虑光源电器的合理应用。照明设计的客观及主观效果，一次性投资的大小、节能情况、运行性能等，均与光源电器有关。研制和开发新光源，也需考虑光源电器的合理性和可行性。另一方面，作为光源电器的直接生产单位，更需对其应用原理、设计、测量有详细了解。本书从电光源原理出发，详细叙述了光源与电器附件的关系，光源电器设计制作中应遵循的原则和方法，并介绍了其电参数的测量方法。

本书力求在实用性、系统性和理论性各方面予以兼顾，既使读者能了解本专题的全面情况，又能在实际工作中作为参考。但需说明的是，本书的意图不在于也不可能给读者提供解决问题的特效良方，而是使读者在参考的基础上能触类旁通，结合自己的具体情况进行分析、比较和创造性地加以应用。

本书是为在光源照明领域工作的中级研究人员、工程技术人员和大专师生编写的，其他有关人员也能作为参考。

刘跃群

2003年1月

内 容 提 要

本书从电光源原理出发,详细叙述了光源与电器附件的关系,光源电器设计制作中应遵循的原则和方法,并介绍了其电参数的测量方法。本书力求在实用性、系统性和理论性各方面予以兼顾,既使读者能了解本专题的全面情况,又能在实际工作中作为参考,可以触类旁通,结合自身的具体情况进行分析、比较和创造性地加以利用。

本书适用于在光源照明领域工作的中级研究人员、工程技术人员和大专院校师生,其他有关人员也可将其作为参考。

—目 录—

第一章 电路时域分析	1
第一节 电路分析的基本目的和方法	1
第二节 理想元件的约束方程	3
第三节 网络的基本定律和定理	7
第四节 交流电路的基本概念	11
第五节 网络分析	16
第二章 电感镇流器磁路分析基础	22
第一节 线性磁路的计算	22
第二节 铁磁性物质的磁特性	25
第三节 直流磁路	32
第四节 交流磁路	39
第三章 光源电源	49
第一节 电光源原理简述	49
第二节 光源对电源的要求	50
第三节 光源电源的分类	51
第四章 铁芯线圈镇流器	79
第一节 铁芯线圈的电路	79
第二节 气体放电灯的稳定工作	85
第三节 镇流器的功能和运用指标	93
第五章 电感镇流器的结构材料 and 设计	99
第一节 镇流器的结构和材料	99
第二节 镇流器的设计	101
第三节 镇流器的制作工艺	112
第六章 电感镇流器的节能设计	121
第一节 概述	121
第二节 节能电感镇流器的材料	128
第三节 节能电感镇流器的设计原理	141
第四节 环型镇流器的节能设计	151
第七章 电子镇流器原理	157
第一节 电子镇流器的发展	157
第二节 电子镇流器的基本电路类型	162
第三节 电子镇流器的分析和设计	172
第八章 漏磁变压器和其他镇流电路	185
第一节 漏磁变压器物理原理和电路模型	185
第二节 漏磁变压器的设计	192

第三节	漏磁变压器设计举例	194
第四节	其他镇流电路	195
第九章	气体放电光源启动器	203
第一节	气体放电光源的着火启动	203
第二节	气体放电光源启动器的工作原理和实际应用	204
第三节	低压气体放电光源的启动器	205
第四节	高压气体放电光源的启动器	209
第十章	光源电路的电气测量	227
第一节	电气测量的基础知识	227
第二节	常用电气测量指示仪表	230
第三节	常用电子测量仪器	237
第四节	光源电路中部分电参数测量	240
第十一章	智能照明控制系统	249
第一节	智能照明控制系统的基本概念	249
第二节	照明控制系统的基本类型	249
第三节	照明控制系统中采用的主要技术	251
第四节	几种常用的联网型照明控制系统	253
第十二章	电感镇流器的测试方法和测试设备	261
第一节	检测方法	261
第二节	产品认证	279
第三节	测试设备	281
第十三章	节能电感镇流器的能效标准	284
第一节	能效标准的发展和制定原则	284
第二节	镇流器能效标准的主要内容及其应用	286
第三节	镇流器能效标准的技术分析	287
第十四章	镇流器的经济分析	296
第一节	节能效果的经济评价方式	296
第二节	分析程序	297
第三节	电费对寿命周期成本的影响	301

第一章 电路时域分析

第一节 电路分析的基本目的和方法

一、基本目的和方法

光源在运行时，电器的作用是实现能量的传输和分配，有时也兼顾着信号的传输。因此常常需要利用理想电路模型对实际器件进行等效变换，组成电路网络系统，在此基础上进行电路分析。

一般地说，系统受到的外来作用，称为激励。在某个激励作用下系统发生的变化，称为对该激励的响应。结合系统的功能，激励也常常称为输入，而系统的一部分响应又可称为对应某个输入所引起的输出。

已知系统的组成，包括其内部结构和参数，要确定其对某种激励的响应，这样的问题称为分析。为了得到预期的激励与响应的关系，要确定系统的组成，这样的问题称为综合。分析问题的解答是惟一的，而综合问题常有多种可能的答案，必须参照其他条件，如经济条件等，才能确定一个相对合适的结果。显然，分析比综合简单得多，但分析是讨论综合的基础。具体应用光源电路时，常常会遇到这两方面的问题。

由于研究光源电路系统时重点在于掌握电能或电信号的传输和分配规律，所以电路问题中的激励和响应，或者说输入和输出，通常都是指电压和电流。向网络施加激励的基本方法，是在网络端口上外接一个有源元件。这种用作激励的有源元件称为激励源。在激励源的作用下，网络中各电压和电流的变化，即为对激励的响应，而网络各端口上的响应可视为输出。

需要注意，当从系统中划分出某个网络时，其中可能已包含有源元件，这种包含有源元件的网络称为有源网络。如果网络中不包含有源元件，则称为无源网络。有源网络的一个特点是，即使未受激励，在其内部有源元件的作用下，该网络中也会出现电压和电流。但是，这些电压和电流并不属于对某个激励的响应，而只有外施激励在有源网络中引起的各电压和电流的变化才是要讨论的响应。因此，在涉及含多个有源元件的电路时，必须区分哪一些有源元件是作用于网络的激励源，哪一些是属于网络本身的组成部分。

这一章主要讨论与光源电器相关的电路分析问题。

电路分析的基本方法是，先分别确定各理想元件上电压与电流的关系，以及不同元件的电压、电流间的相互关系。在将这些关系联立起来，构成一个方程组，然后再进行求解，便得到所需的激励与响应的关系。

这里，元件上电压与电流的关系，由元件本身的特性所决定，称为元件约束。不同元件的电压、电流间的关系，由互联的规律性所决定，称为平衡约束。两种约束联立构成的方程组，称为电路的数学模型。

下面将说明从确定元件约束和平衡约束，到建立数学模型的整个过程。

二、基本物理量

电路的基本物理量是作用在一个元件（或支路）两端的电压及通过其中的电流，即电

压、电流是电路的基本物理量。电位和电动势是这两个基本物理量延伸出来的，也可以列入电路基本物理量之中。

在重力场中，每一个物体在每一点都有一定的位能。同样在电场中，每一电荷都具有一定的电位能。把单位正电荷在电场中某一点具有的电位能称做电位。它的高低以单位正电荷在电场力的作用下移到电位为零处，电场力作功的大小来衡量。

两点电位不同，即存在电位差，也就是说它们之间有电压存在。电压和电位差是一个概念。 a 、 b 两点的电压恒等于将单位正电荷从 a 移到 b 时电场力所作的功。电位的高低与参考点的选取有关，某点和参考点之间的电压就是该点的电位，因而在电路中使用电位可以减少变量的数目。例如，某电路有五个节点，其间电压有十个，而如果选一个点为参考点，则只需要知道其他四个点的电位，所有十个节点对之间的电压就知道了。因此，在电子线路中常用电位来分析问题。

外力（即非电场力，如化学力或电磁力）将单位电荷由一点移到另一点所作的功，称做电动势。它的作用方向由低电位到高电位，和电压作用方向恰好相反。就电路中形成电流来说，电动势和电压是没有区别的，它们都是产生电流的原因。对使用者来说，常常关心的是一条支路或一个元件两端的电压，而对电荷流动的原因是电场力还是非电场力作用的结果，并不感兴趣。因此，在近代电路理论中，并不对电动势加以明确的定义。

从因果关系看，电压和电动势是没有区别的，但从电场力和非电场力对单位电荷的作功来看，两者是有区别的。另外从数值上看，两者也有异同之处。例如，一个电动势为 E ，内部电阻为 r_0 的电池，正负极之间的电压为 U 。当电池未接负载时， $U=E$ ，但当接有负载，有电流 I 流过时，在数值上电压就比电动势小（ $U=E-Ir_0$ ）。

在电路中，在电场力的作用下，正电荷或负电荷的运动都可以形成电流，但习惯上规定正电荷的运动方向为电流的方向。

电流的几种常见类型如下。

直流（DC） 大小和方向不随时间变化的电流。

正弦交流（AC） 大小和方向随时间按正弦规律变化的电流。

指数衰减电流 方向不变，大小随时间增加而减小的电流。

指数增加电流 方向不变，大小随时间增加而增加的电流。

正弦衰减电流 方向随时间按正弦规律变化，但振幅随时间增加而减小的电流。

脉动电流 方向不变，但大小随时间作规律性变化的电流。

脉冲电流 方向不变，但存在时间很短的电流。

三、电流和电压的参考方向

电压和电流都是代数量，习惯上以正电荷的流动方向为电流的方向，高电位到低电位为电压的作用方向。但在电路的计算中，这两个量往往是待求量，为了对计算作出正确的判断，必须在电路中先标定电压和电流的参考方向，也即正方向，以此对计算结果的正负判断出电压和电流的正确方向。也只有有了电压和电流的正方向，才能应用电路的基本定律分析计算问题。

在电路中，电流的参考方向用箭头表示。正电荷沿着箭头方向流动形成的电流为正值。如果沿相反的方向，则认为是负值。必须注意，参考方向可以任意选取，而实际方向可正可负。

在电路中，往往取电压和电流方向一致。所谓一致，指表示电流方向的箭尾为电压的正

极, 箭头指向电压的负极。电流经集中参数元件的正端流入, 负端流出, 这时电流电压的参考方向就称为一致。这是两个相关的参考方向。

由于功率是单位时间内所作的功, 即 $p = dw/dt$, 所以, $dw = p dt = u dQ = u i dt$, 由此可知, 电功率 $p = ui$ 只有对电压电流取一致的参考方向时, 功率的代数符号才有意义。电流的方向通常可以任意选取, 而电压则采用和电流一致的方向。如果遵循这个原则, 功率的正号则表示装置是消耗功率的。

第二节 理想元件的约束方程

一、电阻元件

电阻是单纯耗能元件, 因而它的电路特性具有以下几个特点。

① 流过电阻元件的电流与电阻上的电压, 它们的实际方向始终保持一致, 或者说 i 与 u 总是同号。

② 当 $i=0$ 时必有 $u=0$ 。

③ 在任何瞬间, 只要知道了当时的 i , 就可以确定对应的 u , 而不必顾及该瞬间前的情况, 反之亦然。这称为电阻元件的即时性。

因此, 用 $u-i$ 坐标平面上通过原点的一条曲线, 便可以完全表示出电阻元件的特性, 称为伏安特性。元件伏安特性曲线的形状可能有所不同, 如果伏安特性是一条直线, 具有这类特性的电阻元件, 称为线性电阻。伏安特性呈弯曲形状的电阻元件, 称为非线性电阻。

实际很难找到伏安特性严格保持直线的电阻器, 因此线性特性是一种理想特性。只有用电阻温度系数极小的康铜丝制作的精密电阻, 在小电流下工作时, 才能有很接近理想的线性特性。不过, 在工程应用中, 常允许忽略比较微弱的非线性。以后如不加说明, 所有电阻都视为线性的。

电路分析中, 电阻还定义为伏安特性上某一点的两个坐标之比。即

$$R \equiv \frac{u}{i}$$

式中, 符号 $\equiv$ 为按定义等于。电阻的倒数即为电导, 故同时有

$$G \equiv \frac{i}{u}$$

线性条件下, 伏安特性上对应各点的两坐标之比处处相等, 因此线性电阻的电阻值不随 i 和 u 变化, 是一个常数。线性电阻的伏安特性, 或者说它的元件约束, 则可简单地写成

$$u = Ri$$

或

$$i = Gu$$

这就是欧姆定律。

如果是非线性电阻, 它的电阻值和电导值将随 i 和 u 变化, 而元件约束应写成

$$u = R(i)i$$

或

$$i = G(u)u$$

二、电感元件

对于匝数为 n 的螺管线圈, 当穿过线圈的磁通变化时, 整个线圈总的感应电动势为

$$e = \sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^n \left(-\frac{d\Phi_k}{dt} \right) = -\frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^n \Phi_k \right)$$

式中 n ——线圈匝数；

e_k ——第 k 匝线圈的感应电动势；

Φ_k ——穿过第 k 匝线圈的磁通。

若令

$$\varphi = \sum_{k=1}^n \Phi_k$$

称为线圈的磁链，则有

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (1-1)$$

若是穿过各匝的磁通都等于 $\Phi(t)$ ，则可直接写成

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt}$$

现在，再将电流的磁效应与电磁感应现象联系在一起考虑。如果通过一个线圈的电流 i 有所变化，则它所产生的磁通将随之增减，而磁通的这种增减，又必将在线圈自身中产生感应电动势，这种现象称为自感，所产生的电动势称为自感电动势，通常记作 e_L ，如果不计线圈的导线电阻，只考虑自感现象而得到的理想电路元件，就是要讨论的电感。

为了确定自感电动势的数值，应先求出自感磁链，即线圈电流 i 在其自身中形成的磁链 Ψ_L ，根据电流的磁效应， Ψ_L 是随 i 变化的，而两者的比值称为电感 L ，即

$$L \equiv \frac{\Psi_L}{i}$$

电感的国际制单位是亨利，简称亨（H）。

线圈处在真空中或周围是非铁磁性介质时，磁链 Ψ_L 与电流 i 的关系是线性的。这时，电感 L 独立于 i ，称为线性电感。在线圈中插入铁芯时，由于铁磁材料的特性，在同一电流下产生的磁链将增大许多倍，但两者不再保持比例关系，这时铁芯线圈有较大的电感，并且电感 L 是电流 i 的函数，即成为受电流控制的非线性电感。

在线性条件下，由式（1-1）可写出

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt} = -\frac{d}{dt}(Li) = -L \frac{di}{dt}$$

上式说明，自感电动势总是对电流的变化起阻滞作用。电感元件中的电动势是线圈电流变化时因感应而产生的，并不是由外力所引起，不能独立地输出电能，因此电感元件仍属于无源元件。

讨论电感的元件约束时，应同其他无源元件一样，设定线圈两端电压 u 的正方向与电流 i 的正方向一致，这时应有

$$u = -e_L$$

因而在线性条件下可得到

$$u = L \frac{di}{dt}$$

这就是线性电感的元件约束。同时，由此可写出

$$L \equiv \frac{u}{\frac{di}{dt}}$$

此即从电路分析的角度对电感的定义：元件两端的电压与元件中电流对时间的变化率之比。

三、电容元件

电容元件是电路中电能与电场能相互转换过程的集中表示。

从物理学中知道，两个互相绝缘的极板分别带有等量而异号的电荷时，极板间必有一定的电压，而极板所带电量 q 与极板间电压 u 之比，就是电容 C ，即

$$C \equiv \frac{q}{u}$$

电容的国际制单位是法拉，简称法（F）。法拉这个单位太大，工程实际中只用微法（ μF ）和皮法（ pF ）。

互相绝缘的一对极板所形成的电容，与极板间绝缘材料的介电常数 ϵ 有关。大多数绝缘材料的介电常数，不超过真空介电常数 ϵ_0 的 10 倍，并且不随极板间的电压而变化。这时，电荷 q 与电压 u 的关系是一条直线，而电容 C 是独立于 u 的常数。具有这一特点的电容称为线性电容。

有些物质如钛酸钡，其介电常数可高达 ϵ_0 的 100 倍以上，且明显地因极板间电压而异。因此，电容元件的电压与电荷也可能呈现曲线关系。相应地，这种情况下的电容 C 将是电压 u 的函数，即成为非线性电容。

显然，无论是充电或放电，必有电荷在连接于极板的导线中作定向流动，或者说有电流出现。而当导线中电流为 i 时，在 dt 时间内，极板上电荷的变化为

$$dq = idt$$

极板上电荷的变化将引起极板间电压的增减，而在线性条件下有

$$idt = dq = d(Cu) = Cdu$$

于是从电路分析的角度，还可以将电容定义为

$$C \equiv \frac{i}{\frac{du}{dt}}$$

通过元件的电流与元件上电压对时间的变化率之比称为电容。同时，还可写出线性电容的元件约束为

$$i = C \frac{du}{dt}$$

四、独立电源和受控电源

能够向电路供给能量（或提供信号）的元件称为电源。在电路中，电源一词系电能源与信号源的泛指。

理想的电源有两大类，一类是电流源，它不管外界所需要的能量如何，能在每秒内向电路供给一定的电荷；另一类是电压源（也称电势源），它供给的电荷数目是任意的，但每个电荷都具有一定数值的能量。电流源及电压源的表示符号分别如图 1-1、图 1-2 所示。

实际电源常常是有损耗的，例如，电压源向负载供电时，将在电源内部产生压降，对于这种电源可用一电动势 e_s 与线性定常电阻 r_0 串联的模型来模拟（见图 1-3）。这时端电压 u 等于电势 e_s 减去内部降落 ir_0 。图 1-3 所示也称为戴维宁等效电路。同样，当以实际的电流源向负载供电时，在电源中将有漏电流，对于这种电源用图 1-4 所示模型来代表。显然，其端电压与端电流的关系式为 $i = i_s - u/g_0$ ，这一电路也称为诺顿等效电路。

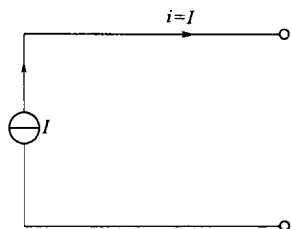


图 1-1 电流源符号

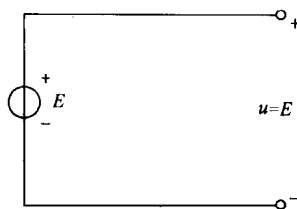


图 1-2 电压源符号

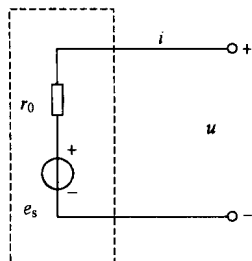


图 1-3 电压源模型

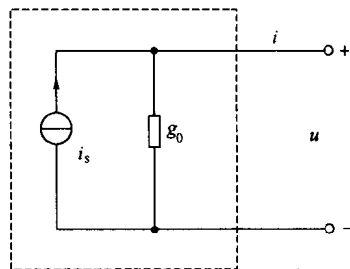


图 1-4 电流源模型

图 1-3 和图 1-4 中，在满足 $i_s = e_s / r_0$, $r_0 = 1 / g_0$ 的条件下对虚框外部，即对端电压 u 和电流 i 来讲，戴维宁电路和诺顿电路是等效的。这就是说，不论用其中的某一个代替另一个，都能保证端电压和电流不发生变化。显见，等效仅只对外部电路而言。

上面讲的电源，是电路中独立驱动电源，它不受其他电源的控制。但只用这种模型对某些特殊电源的功能还不能表示出来。例如，一个晶体三极管 [图 1-5 (a)] 从它的输出一侧看，它是一个电流源，但这个电流源受入端电流 i_b 的控制，这就不能用一个独立电流源来模拟，而必须用一个受控于电流 i_b 的电流源来模拟 [见图 1-5 (b)]。又如，一个低频的晶体管放大器可用一模型 (见图 1-6) 来表示，其中 μu_2 为受输出电压 u_2 控制的电压源，它表示输出的反馈作用，而 αi_1 为受输入电流 i_1 控制的电流源，它表示输入电流对输出电压的控制作用。由此可见，要分析晶体管电路，必须采用受控源模型才能模拟晶体管的全部功能。

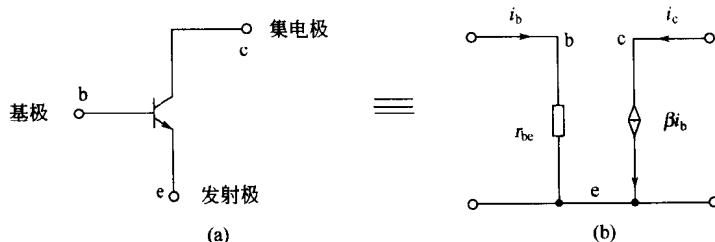


图 1-5 电流控制电流源电路

像这种受另一部分电压或电流控制 (即电源的大小正比于电路其他部分的电流或电压) 的等效电源，称为受控电源。因此受控源是一个具有两条支路的元件，一条支路中的电源是受另一条支路中的电流或电压控制的。一般规定，受控源是另一支路开路电压或短路电流的函数，这样就有四种可能性，如图 1-7 所示。

图中菱形符号表示受控制的电源。在图 1-7 (a) 和 (b) 中，支路 2 中的电源是电流源，其电流分别由支路 1 的电流 (短路情况) 和支路 1 的电压 (开路情况) 所决定，这两种受控

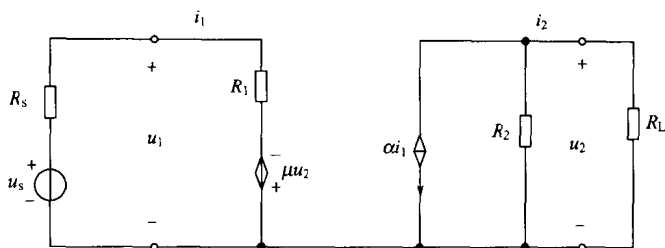


图 1-6 低频时晶体管放大器的等效电路

源分别称为电流控制电流源 (CCCS) 和电压控制电流源 (VCCS)。在图 1-7 (c) 和 (d) 中, 支路 2 中的电源是电压源, 其电压分别由支路 1 中的电压 (开路情况) 和支路 1 中的电流 (短路情况) 所决定, 这两种受控源分别称为电压控制电压源 (VCVS) 和电流控制电压源 (CCVS)。在小信号情况下, 图中 α 、 g_m 、

μ 、 r_m 均为常数, 且

$$\alpha = i_2 / i_1 \quad (\text{电流比})$$

$$g_m = i_2 / u_1 \quad (\text{转移电导})$$

$$\mu = u_2 / u_1 \quad (\text{电压比})$$

$$r_m = u_2 / i_1 \quad (\text{转移电阻})$$

不难看出, 在这种规定下, 受控电源是线性定常元件。

独立电源和受控电源采用不同的符号, 原因如下。

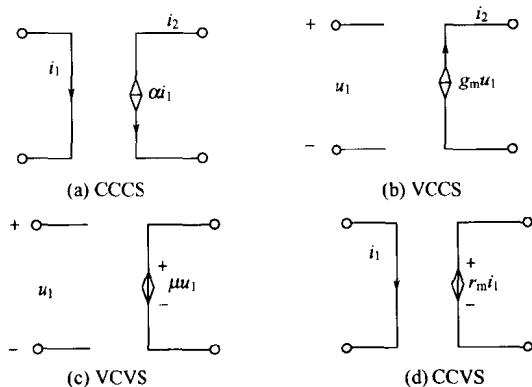


图 1-7 受控电源的类型

① 独立电源起着与受控电源完全不同的作用, 独立电源是输入, 它代表信号发生器, 是外界对电路的作用, 为非线性元件, 受控源常用来模拟电子器件中发生的现象。

② 线性电路中可以同时具有独立电源和受控电源, 但前者必须是非线性的, 后者是线性的。

③ 在戴维南与诺顿等效电路中它们起着完全不同的作用。

第三节 网络的基本定律和定理

较复杂的电路称为网络, 网络的基本定律和原理是分析计算网络的依据。

一、基尔霍夫定律

基尔霍夫定律反映了复杂电路中电流和电压各自所必须遵循的约束关系, 是分析复杂电路的依据。它不仅适用于线性电路, 也适用于非线性电路, 即只要是集中参数电路, 基尔霍夫定律的正确性与电路元件的性质无关。它包含下列两条定律。

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

对任一集中参数电路的任一节点来说, 在任一时刻, 自该点流出的电流必等于流入该节点的电流, 即

$$\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}}$$

将上式右端移到左端, 则有

$$\sum i = 0$$

也就是说,对任一节点来说,流出与流入该节点的电流的代数和为零。这时流出取“+”号,反之亦成立。

这是不难理解的,因为电荷是守恒的,即电荷既不能产生也不能消失,所以在任一时刻,进入一个节点的电荷等于由该节点流出去的电荷。

例如在图 1-8 中,对节点①②③来说,有

$$i_2 + i_3 - i_1 = 0$$

$$i_5 + i_6 - i_2 = 0$$

$$i_7 - i_3 - i_5 = 0$$

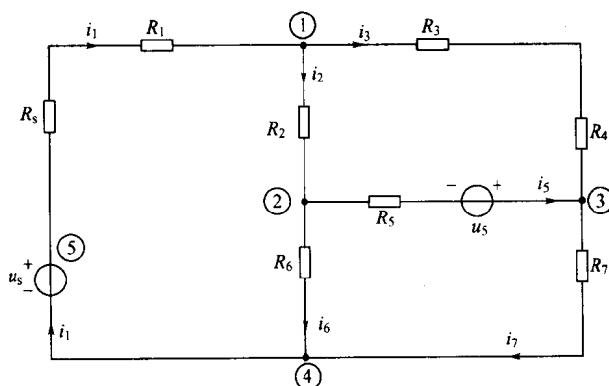


图 1-8 基尔霍夫定律例题电路

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

在任一集中参数电路中,任一时刻,对任一回路来说,各支路电压降 u 的代数和为零。即

$$\sum u = 0$$

或者这一回路中的电位升 e 的代数和等于电位降的代数和,对于线性电路可以表示为

$$\sum e = \sum iR$$

式中,凡电势方向与回路巡行方向(即从一点出发绕行回路一周的方向)一致时, e 前冠“+”,相反时冠“-”。凡 i 与巡行方向一致时,“ iR ”前冠“+”,相反时冠“-”。

例如在图 1-8 中,对回路①②④⑤①及①③②④⑤①来说,分别有

$$i_1(R_1 + R_5) + i_2R_2 + i_6R_6 = u_s$$

$$i_1(R_1 + R_5) + i_3(R_3 + R_4) - i_5R_5 + i_6R_6 = u_s - u_s$$

不难看出,这些式子说明了如果将单位正电荷沿着回路巡行方向绕行一周,电位升部分正是它获得的能量,而电位降部分正是它失去的能量。故基尔霍夫电压定律实为电路中能量守恒的表现。

二、特勒根定理

本定理和基尔霍夫定律一样,是网络定律中最普遍的定律。对于任何集中参数的网络,不管包含什么样的元件,线性的或非线性的,时变的或定常的,都是有效的。它之所以普遍,因为它仅是依据基尔霍夫定律导出来的,并未涉及到元件本身。

定理 对一个任意的集中参数网络,它的图具有 b 条支路和 n_i 个节点。假定对图中每一条支路任意地指定其支路电压 u_k 和支路电流为 i_k , $k=1, 2, \dots, b$; 同时假定 u_k 与 i_k 取一致的参考方向。如果支路电压 $u_1, u_2, \dots, u_b$, 满足由 KVL 所加的全部约束,支路电流

$i_1, i_2, \dots, i_b$ 满足由 KCL 所加的全部约束, 则

$$\sum_{k=1}^b u_k i_k = 0$$

如图 1-9 所示, 任意选定支路电流的方向, 并选定支路电压的方向和它一致, 分别满足 KCL 及 KVL, 则必有上述结果。若设 $i_2 = 2\text{A}$, $i_4 = 1\text{A}$, 则 $i_3 = i_2 - i_4 = 1\text{A}$, $i_1 = i_2 = 2\text{A}$, $i_5 = i_4 = 1\text{A}$; 又设 $u_s = 10\text{V}$, $u_1 = 2\text{V}$, $u_2 = 3\text{V}$, $u_4 = 1\text{V}$, 则 $u_3 = u_s - u_1 - u_2 = 5\text{V}$, $u_5 = u_3 - u_4 = 4\text{V}$ 。在这种情况下有

$$\begin{aligned} & i_1 u_1 + i_2 u_2 + i_3 u_3 + i_4 u_4 + i_5 u_5 - i_1 u_s \\ &= 2 \times 2 + 2 \times 3 + 1 \times 5 + 1 \times 1 + 1 \times 4 - 2 \times 10 = 0 \end{aligned}$$

(在 $i_1 u_s$ 前冠负号是因为 i_1 和 u_s 的方向相反)

如果再任意给出一组支路电流和支路电压值, 只要它们满足 KCL 和 KVL, 也必有相同的结果。

上例中, $u_s i_1$ 为电源给出的功率, 其他乘积均为消耗的功率, 根据功率守恒原理, 给出的功率等于消耗的功率, 故其代数和为零。

三、戴维宁定理和诺顿定理

这两个定理是分析计算或简化线性网络时很有用的定理。应该指出, 这两个定理的适用范围是, 有源二端网络必须是线性的, 但它所接的负载可为线性, 也可为非线性。

戴维宁定理 对任一含源线性二端网络都可以用一等效电压源来代替, 这个等效电源的电势等于原网络的开路电压, 而内阻等于原网络除源后的入端电阻。图 1-10 所示为这一原理的示意, (a) 为原网络, 其开路电压为 U_0 ; (b) 为将原网络记为一个电压为 U_0 的理想电压源与原网络除源后的入端电阻串联的电源支路。注意, 等效支路的极性应与原网络相同。

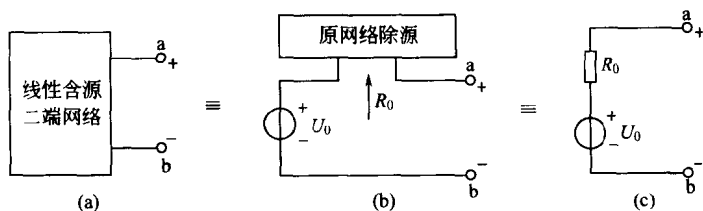


图 1-10 戴维宁定理示意

诺顿定理 任一含源线性二端网络可以用一等效电流源来代替, 这个等效电流源的电流等于原网络输出端短路后的电流 I_{∞} , 而与它并联的电阻为原网络除源后的输入电阻 R_0 , 如图 1-11 所示。

四、叠加定理

在线性网络中, 由几个电源共同作用所产生的电流或电压等于各个电源单独作用时所产生的电流或电压的代数和。在用这一定理计算网络时, 其参考方向可以分别单独考虑, 但最后必须以总电流的参考方向来定各分电流的正、负, 当分电流参考方向和总电流一致时为正, 相反时为负。

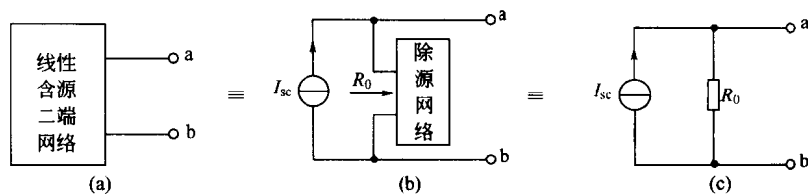


图 1-11 诺顿定理示意

举例说明如下，如图 1-12 (a) 所示电路，可以用 (b)、(c) 两个电路来代替。图 (b)、(c) 都只含一个电源，因而可以按单电源电路处理，直接根据欧姆定律和分流原理求出各支路电流。

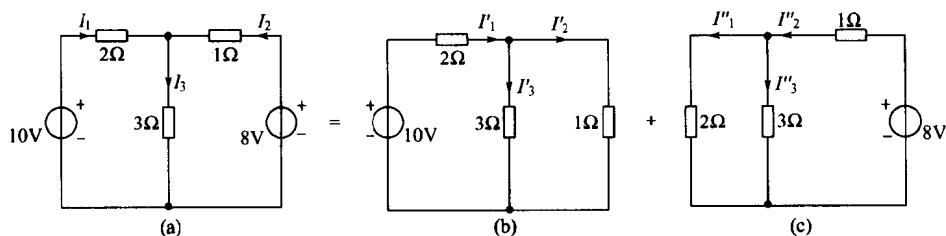


图 1-12 叠加定理

由图 1-12 (b) 得

$$I'_1 = \frac{10}{2 + \frac{3 \times 1}{3+1}} = \frac{10}{2 + \frac{3}{4}} = \frac{40}{11} \text{ A}$$

由分流原理

$$I'_3 = \frac{40}{11} \times \frac{1}{3+1} = \frac{10}{11} \text{ A}$$

$$I'_2 = \frac{40}{11} \times \frac{3}{3+1} = \frac{30}{11} \text{ A}$$

由图 1-12 (c) 得

$$I''_3 = \frac{8}{1 + \frac{2 \times 3}{2+3}} = \frac{40}{11} \text{ A}$$

由分流原理

$$I''_3 = \frac{40}{11} \times \frac{2}{3+2} = \frac{16}{11} \text{ A}$$

$$I''_1 = \frac{40}{11} \times \frac{3}{3+2} = \frac{24}{11} \text{ A}$$

故

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = \frac{40}{11} - \frac{24}{11} = \frac{16}{11} \text{ A}$$

$$I_2 = I''_2 - I'_2 = \frac{40}{11} - \frac{30}{11} = \frac{10}{11} \text{ A}$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = \frac{10}{11} + \frac{16}{11} = \frac{26}{11} \text{ A}$$

五、互易定理

设在图 1-13 中，N 为由线性元件构成的网络，其中既不包括独立电源、非独立电源，也不包括回转器，当电源在支路 1 中作用时，在支路 2 中产生的电流，等于电源移到支路 2 中 [图 1-13 (b)] 在支路 1 中产生的电流。即

$$I_1 = I_2$$