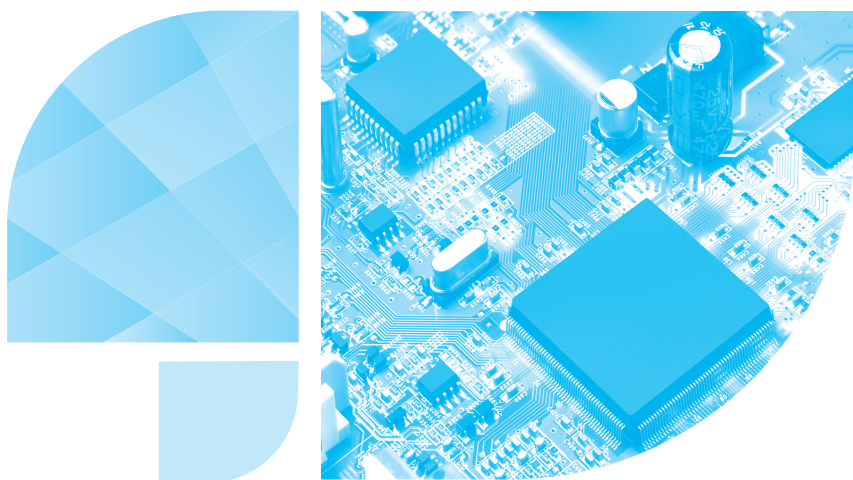


高等职业教育机电系列精品教材

电路分析

主 编 蔡 川 马岗强
副主编 亓 林 周 洋
徐定成



西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 本书共 6 个模块,主要包括电路的基本概念和定律、复杂直流电路的分析、单相正弦交流电路的分析、三相正弦交流电路的分析、一阶瞬态电路的分析和互感耦合电路的分析。
本书既可作为高等职业院校电子信息类、自动化类等专业的教材,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据
电路分析 / 蔡川, 马岗强主编. -- 西安: 西北工业大学出版社, 2025. 4. -- ISBN 978 - 7 - 5612 - 9770 - 4
I. TM133
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20253NT125 号

DIANLU FENXI

电 路 分 析

蔡川 马岗强 主编

责任编辑: 孙 倩

装帧设计: 黄燕美

责任校对: 朱辰浩

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号

邮编: 710072

电 话: (029)88491757, 88493844

网 址: www.nwpup.com

印 刷 者: 三河市龙大印装有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm

1/16

印 张: 12.25

字 数: 260 千字

版 次: 2025 年 4 月第 1 版

2025 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5612 - 9770 - 4

定 价: 45.00 元

如有印装问题请与出版社联系调换

PREFACE | 前言

党的二十大报告指出：“建设现代化产业体系。坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。实施产业基础再造工程和重大技术装备攻关工程，支持专精特新企业发展，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。巩固优势产业领先地位，在关系安全发展的领域加快补齐短板，提升战略性资源供应保障能力。推动战略性新兴产业融合集群发展，构建新一代信息技术、人工智能、生物技术、新能源、新材料、高端装备、绿色环保等一批新的增长引擎。”

“电路分析”是高等职业院校电子信息类、自动化类专业的一门重要的基础课程。它主要研究电路的基本理论、分析方法以及电路的基本性质，为后续的专业课程学习奠定坚实的基础。电路分析不仅关注电路中的电压、电流等物理量的计算，还深入探讨电路的工作原理、性能特点以及优化设计方案。通过学习这门课程，学生能够掌握电路分析的基本方法，理解电路的基本规律，为将来的工程实践打下坚实的理论基础。

本书立足实际，适应新情况，主要体现如下特点：

(1) 符合学生的认知特点，体现以素质为基础、以就业为导向、以能力为本位、以学生为主体的课程改革指导思想。本书淡化理论，强化应用，使理论内容为操作技能服务，突出高等职业教育的特色。

(2) 内容编排科学、合理。内容设计逻辑严谨，梯度明晰；名称、术语、图表表述规范、准确；形式新颖多样，生动活泼；语言通俗易懂，简洁明了。

(3) 在拓展阅读中引入电路分析的方法和应用，以培养学生科学的思维方式和分析能力。

(4) 在每个模块最后设置思考与练习栏目，以帮助学生巩固和强化电路分析课程的学习成果。

本书参考教学时长如下：

模 块	教学内容	教学时长/学时
一	电路的基本概念和定律	12
二	复杂直流电路的分析	12
三	单相正弦交流电路的分析	14
四	三相正弦交流电路的分析	10
五	一阶瞬态电路的分析	8
六	互感耦合电路的分析	8
合 计		64

本书由重庆城市管理职业学院蔡川、重庆电子科技职业大学马岗强任主编，中国电子科技集团公司第四十四研究所高级工程师亓林、重庆城市管理职业学院周洋、重庆建筑工程职业学院徐定成任副主编。本书具体编写分工如下：模块一由亓林编写，模块二由蔡川编写，模块三由马岗强编写，模块四由周洋编写，模块五由徐定成编写，模块六由周洋、徐定成共同编写。

由于笔者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请各位读者提出宝贵意见和建议。

编 者
2024 年 9 月

CONTENTS

目录

模块一 电路的基本概念和定律 1

单元一 电路的组成和基本物理量	1
单元二 电阻的连接	12
单元三 认识基尔霍夫定律	20
单元四 电源及其等效变换	25
思考与练习	35

模块二 复杂直流电路的分析 41

单元一 支路电流法	41
单元二 节点电压法	46
单元三 网孔电流法	51
单元四 叠加定理	57
单元五 戴维南定理	62
思考与练习	68

模块三 单相正弦交流电路的分析 73

单元一 认识正弦交流电路	73
单元二 单一参数单相正弦交流电路的分析	87

单元三 多参数单相正弦交流

电路的分析	97
-------------	----

单元四 功率因数与谐振电路

思考与练习	116
-------------	-----

模块四 三相正弦交流电路的分析 120

单元一 认识三相正弦交流

电源	120
----------	-----

单元二 三相负载的星形连接

分析	125
----------	-----

单元三 三相负载的三角形连接

分析	134
----------	-----

单元四 三相交流电路功率的

测量	139
----------	-----

思考与练习	143
-------------	-----

模块五 一阶瞬态电路的分析 147

单元一 电路的瞬态过程

单元二 电容充放电过程的分析 ...

单元三 电感充放电过程的分析 ...



单元四 一阶电路分析的

三要素法 159

单元五 阶跃函数与一阶电路的

阶跃响应 163

思考与练习 166

单元二 互感耦合电路的测试与

应用 176

思考与练习 186

参考文献 190

模块六 互感耦合电路的分析 170

单元一 耦合线圈同名端的认识与

测试 170

模块一

电路的基本概念和定律

电路在日常生活中随处可见,各类电子产品、电气设备都是由各种各样、各种规模的电路组成的。理解电路的基本概念、物理量、定律和分析方法对于学习电子技术至关重要,是学习电子技术的基础。了解串并联电路的特点和分析方法,能够帮助我们更好地理解电路的工作原理。同时,掌握欧姆定律、基尔霍夫定律等基本定律,能够帮助我们分析和设计各种电路。

单元一 电路的组成和基本物理量

学习目标

- (1)掌握电路的基本组成元件及其作用。
- (2)理解电路基本物理量的特性。
- (3)学会电路基本物理量的测量方法。
- (4)理解电路基本元件的区别。

知识链接

一、实际电路与电路模型

1. 实际电路

生活中各种用电设备都离不开电路。电路是电流流通的路径,它是由一些元器件和电气设备按一定方式连接而成,能够实现某些预期功能的电流通路。

电路的类型多种多样,不同电路的作用存在差异。从基本功能来看,电路可分为两大类:一类是电能的产生、传输和转换电路;另一类是电信号的产生、传递和处理电路。

从元件的功能上区分,电路由电源、负载和中间环节三部分组成,各部分的作用如下。



(1)电源。提供电能的设备简称电源(或激励源),电源把其他形式的能量转换成电能,如干电池、发电机、信号源。由直流电源供电的电路是直流电路,由交流电源供电的电路是交流电路。

(2)负载。用电设备简称负载,负载把电能转换为其他形式的能量,如电灯、电动机、扬声器等。

(3)中间环节。中间环节把电源和负载连接起来,通常是一些导线、开关、接触器、保护装置等设备。

2. 电路模型

在电路理论中,为了方便实际电路的分析和计算,通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理。我们将实际电路器件理想化而得到的只具有某种单一电磁性质的元件称为理想电路元件,简称电路元件。每种电路元件体现某种基本现象,具有某种确定的电磁性质和精确的数学定义。常用的电路元件有表示将电能转换为热能的电阻元件、表示电场性质的电容元件、表示磁场性质的电感元件,以及电压源元件和电流源元件等(本书中的电路图没有特别说明一般指模型图)。

由理想电路元件相互连接组成的电路称为电路模型。例如,图 1-1 所示电路,电源对外提供电压的同时,内部也有电阻消耗能量,所以电源 U_s 可以用其电动势 E 和内阻 R_0 的串联表示。灯泡除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,通电时还会产生磁场,具有电感性;但电感微弱,可忽略不计,于是可认为灯泡是一个电阻元件,用 R_L 表示。图 1-2 是图 1-1 所示电路短路的电路模型。

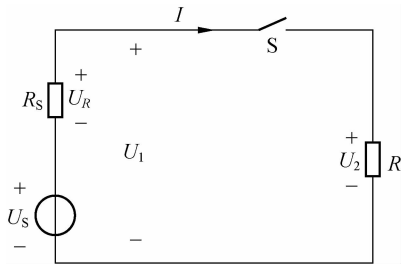


图 1-1 简单直流电路

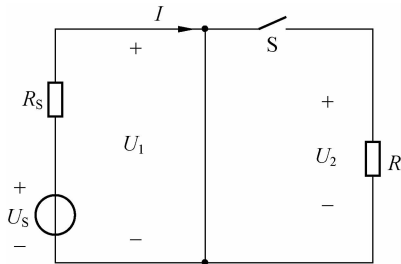


图 1-2 短路的电路模型



3. 电路的工作状态

一个电路正常工作时,需要将电源与负载连接起来。电源与负载连接时,根据所接负载的情况,电路有三种工作状态:空载状态、短路状态和有载状态。为了说明这三种工作状态,现以图 1-1 所示的简单直流电路为例来进行分析。

1) 空载状态

空载状态又称断路或开路状态,如图 1-1 所示。当开关 S 断开或连接导线折断时,电路就处于空载状态,此时电源和负载未构成通路,外电路所呈现的电阻可视为无穷大,电路具有下列特征。

(1) 电路中电流为零。

(2) 电源的端电压等于电源电压。此电压称为空载电压或开路电压,用 U_{OC} 表示。因此,要想测量电源电压,只要用电压表测量电源的开路电压即可。

(3) 电源的输出功率和负载所吸收的功率均为零。

2) 短路状态

当电源两端的导线由于某种事故而直接相连时,电源输出的电流不经过负载,只经连接导线直接流回电源,这种状态称为短路状态,简称短路,如图 1-2 所示。

短路时外电路所呈现的电阻可视为零,电路具有下列特征。

$$U_1 = 0, \quad I = \frac{U_s}{R_s} = I_s$$

在一般供电系统中,电源的内电阻很小,故短路电流很大。电源所发出的功率全部消耗在内电阻上,因而会使电源发热以致损坏。因此在实际工作中,应经常检查电气设备和线路的绝缘情况,以防止电源被短路事故的发生。此外,通常在电路中接入熔断器等保护装置,以便在发生短路时能迅速切断电路,达到保护电源及电路器件的目的。

3) 有载状态

当开关闭合时,电路中有电流流过,电源输出功率,负载吸收功率,这称为电路的有载状态。此时电路具有下列特征:电路中有电流流过负载,负载消耗能量,电源两端的电压大小是电路中其他元件两端电压之和。

有些电气设备应尽量工作在额定状态,这种状态又称为满载状态。电流和功率低于额定值的工作状态称为轻载,高于额定值的工作状态称为过载。在一般情况下,设备不应过载运行。在电路中常装设自动开关、热继电器等,用来在过载时自动切断电源,确保设备安全。

二、电路的基本物理量

电路的基本物理量有电流、电压、电位、电动势、电功、电功率等。





1. 电流

电荷的定向运动形成电流。它是电路中的一个重要物理量,其大小用电流强度表示。电流强度是单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度简称电流,用字母 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

当电流 $i = \text{常数}$ (也就是任何时刻通过导体横截面的电荷量是恒定的) 时,称为恒定电流,简称直流电流(DC 或 dc),用字母 I 表示。即

$$I = \frac{q}{t}$$

在国际单位制中,电流的单位为安培,简称安,用字母 A 表示,常用的单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)。

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} = 10^6 \text{ mA} = 10^9 \mu\text{A}$$

电流不但有大小,而且有方向。规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。在一些简单电路中,电流的实际方向是显而易见的,即从电源正极流出,流向电源负极。但在一些稍复杂的电路中,电流的实际方向不是一看便知的。

在电路的分析计算中,如果事先不能判定电流的实际方向,可以先任意假定一个电流的方向,这个假定的电流方向称为电流的参考方向,用箭头标在电路图上。按参考方向分析计算出的电流,当结果为正值时,说明电流的实际方向与参考方向相同;当结果为负值时,说明电流的实际方向与参考方向相反。根据计算结果的正负和参考方向就能确定电流的实际方向,如图 1-3 所示。

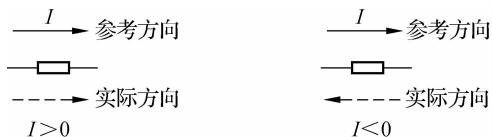


图 1-3 电流参考方向与实际方向的关系

2. 电压

电场力将单位正电荷从电场中的 a 点移到 b 点所做的功,称为 a、b 两点间的电压。电压用字母 u 表示。电压的大小反映了电场力做功的本领,即

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq}$$

在国际单位制中,电压的单位是伏特,简称伏,用字母 V 表示,常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)。

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} = 10^6 \text{ mV} = 10^9 \mu\text{V}$$

电压的实际方向规定为正电荷在电场中受电场力作用的方向。与电流一样,由于电压



的实际方向往往事先不能判定,因此可指定任意方向作为电压的参考方向。电压的参考方向可以用箭头表示,也可用带双下标的字母(如 U_{ab})表示,还可用极性“+”“-”表示,如图 1-4 所示。

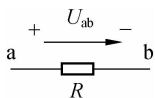


图 1-4 电压参考方向的表示

按照所假设的参考方向分析计算时,电压值为正,表示电压的实际方向与参考方向相同;电压值为负,表示电压的实际方向与参考方向相反。电压的实际方向与参考方向的关系如图 1-5 所示。

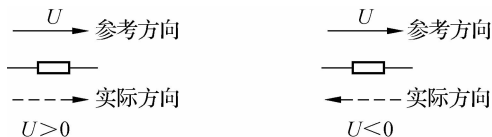


图 1-5 电压的实际方向与参考方向的关系

在电路的分析和计算中,电压和电流参考方向的选择,原则上是任意的,但参考方向一旦选定,在计算过程中不得任意改变。在分析计算电路时,都是先假定参考方向,再进行分析计算。为了分析方便,常假定同一元件的电压参考方向和电流参考方向相同,即电流从电压正极流入,负极流出,这称为关联参考方向,反之则称为非关联参考方向,如图 1-6 所示。

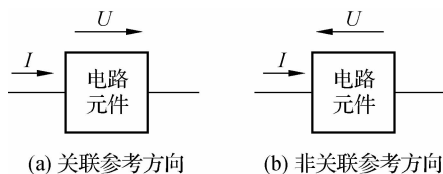


图 1-6 电流与电压参考方向示意图

3. 电位

在电子技术中还常用到电位的概念。若选取电路中某一点为参考点,则电路中的其余任意点到参考点的电压称为电位。电位用字母 V 表示。

参考点理论上可以任意选取,但在实际工程技术中常选择大地作为零电位参考点,设备外壳接地的,与外壳相连的点都是零电位点;电子线路中一般选取导线的公共点(往往是电源的一个极)为参考点,用符号“ $\perp$ ”表示,如图 1-7 所示。参考点的电位为 0。



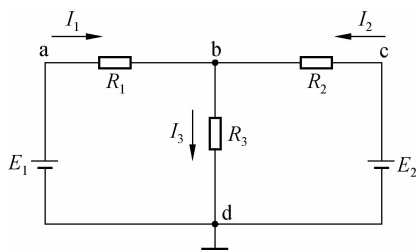


图 1-7 电位参考点表示

电压与电位的关系:电路中任意两点之间的电压等于这两点的电位差,即

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

例 1-1 在电场中有 a、b、c 三点,某电荷电荷量 $q = 5 \times 10^{-2} \text{ C}$,电荷由 a 移动到 b 电场力做功 2 J,由 b 移动到 c 电场力做功 3 J,以 b 点为参考点,求 a 点和 c 点电位。

解 以 b 点为参考点,则 $V_b = 0 \text{ V}$,有

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{2 \text{ J}}{5 \times 10^{-2} \text{ C}} = 40 \text{ V}$$

又因为

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

所以得

$$V_a = 40 \text{ V}$$

同理有

$$U_{bc} = \frac{W_{bc}}{q} = \frac{3 \text{ J}}{5 \times 10^{-2} \text{ C}} = 60 \text{ V}$$

$$V_c = V_b - U_{bc} = -60 \text{ V}$$

4. 电动势

电动势是对电源而言的。衡量电源力对电荷做功能力的物理量称为电动势。电动势在数值上等于电源力将单位正电荷由低电位移到高电位所做的功。电动势的方向规定为在电源内部由负极指向正极,即从低电位点指向高电位点。电动势用 E 表示,单位为伏特(V)。

电动势与电压是不同的两个概念,它们既有区别又有联系。

(1) 电压和电动势的国际单位都是伏特(V)。

(2) 电动势的实际方向从低电位点指向高电位点,即电位升;而电压的实际方向从高电位点指向低电位点,即电位降。

(3) 一个电源的电动势和电压是大小相等、实际方向相反的一对物理量,对外部电路而言,两者没有区别,在使用时常常用电压来等效表示电动势对外电路的作用。



5. 电功

电路中电场力对定向移动的电荷所做的功,简称电功,通常也说成电流的功。其实质是能量的转换与守恒定律在电路中的体现,电能通过电流做功转化为其他形式的能。电功的计算式为

$$W=UIt$$

电流的单位为安培(A);电压的单位为伏(V);时间的单位为秒(s);电功的单位为焦耳(J),简称焦。

说明:(1)表达式的物理意义:电流在一段电路上做的功,与这段电路两端电压、电路中电流和通电时间成正比。

(2)适用条件: I 、 U 不随时间 t 变化。

6. 电功率

电功率用来衡量电路做功的快慢,即单位时间内电流所做的功。一段电路上的功率,与这段电路两端电压和电路中的电流成正比,计算式为

$$P=UI$$

功的单位为焦耳(J),时间的单位为秒(s),功率的单位为瓦特(W),则 $1\text{ W}=1\text{ J/s}$ 。导体有电流流过时会发热,电能转换为内能,这就是电流的热效应,描述它的定量规律是焦耳定律。

一个电路最终的目的是电源将一定的电功率传送给负载,负载将电能转换成工作所需要的一定形式的能量,即电路中存在发出功率的元件(供能元件)和吸收功率的元件(耗能元件)。习惯上,通常把耗能元件吸收的功率写成正数,把供能元件吸收的功率写成负数,而储能元件(如理想电容、电感元件)既不吸收功率也不发出功率,即其功率 $P=0$ 。通常所说的功率 P 又称为有功功率或平均功率。

为了使用电器安全、正常地工作,用电器的额定电压和功率都有规定数值。

(1)额定功率。用电器正常工作时所需电压为额定电压,在这个电压下消耗的功率称为额定功率。一般来说,用电器电压不能超过额定电压,当电压低于额定电压时,用电器功率不是额定功率,而是实际功率。

(2)实际功率。实际功率 $P=UI$, U 、 I 分别为用电器两端的实际电压和通过用电器的实际电流。

例 1-2 元件如图 1-8 所示,求元件的功率,并判断元件的性质。

解 (1)图 1-8(a)所示为关联方向, $P=UI=3\text{ V}\times 2\text{ A}=6\text{ W}$,元件吸收功率,为电阻元件。



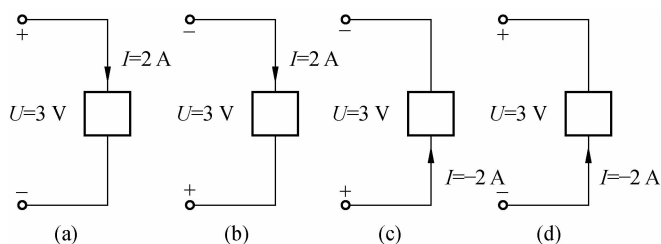


图 1-8 例 1-2 图

(2) 图 1-8(b) 所示为非关联方向, $P = -UI = -3 \text{ V} \times 2 \text{ A} = -6 \text{ W}$, 元件发出功率, 为电源。

(3) 图 1-8(c) 所示为关联方向, $P = UI = 3 \text{ V} \times (-2) \text{ A} = -6 \text{ W}$, 元件发出功率, 为电源。

(4) 图 1-8(d) 所示为非关联方向, $P = -UI = (-3) \text{ V} \times (-2) \text{ A} = 6 \text{ W}$, 元件吸收功率, 为电阻元件。

三、电路的基本元件

1. 电阻元件

电流通过导体时会受到一种阻碍作用, 这种阻碍作用最明显的特征是导体要消耗电能而发热。把物体对电流的阻碍作用称为电阻。电阻元件是较常见的电路元件之一, 它是从实际电阻器抽象出来的理想元件模型, 如灯泡、电阻炉、电烙铁等实际电阻器都可视为电阻元件。电阻用 R 表示, 其电路符号如图 1-9 所示, 常见的色环电阻元件如图 1-10 所示。电阻元件的伏安特性为通过坐标原点的直线, 如图 1-11 所示, 它表明电压与电流成比例, 这类电阻元件称为线性电阻元件, 其两端的电压与电流服从欧姆定律, 即

$$u = Ri \text{ 或 } i = \frac{u}{R}$$

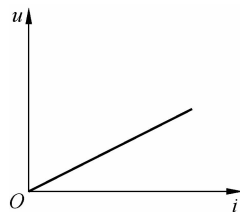
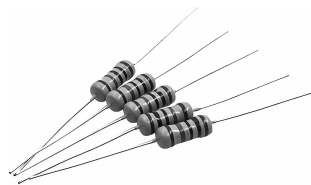
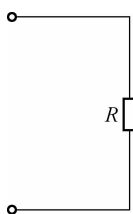


图 1-9 电阻的电路符号

图 1-10 常见的色环电阻元件

图 1-11 电阻的伏安特性曲线

在国际单位制中, 电阻的单位是欧姆(Ω), 当电路两端的电压为 1 V , 通过的电流为 1 A



时,该段电路的电阻就为 $1\ \Omega$ 。电阻较大的单位有千欧(k Ω)和兆欧(M Ω)。线性电阻元件吸收的功率为

$$P=ui=Ri^2=\frac{u^2}{R}$$

由上式可知,不论 u 、 i 是正值还是负值, P 总大于零,说明电阻元件总是消耗功率的,与电流、电压的实际方向没有关系。

2. 电感元件

理想电感元件简称电感元件,它是从实际电感线圈抽象出来的理想化模型。电感线圈中通入电流后将产生磁通,在其内部及周围建立磁场,储存能量。当忽略导线电阻及线圈匝间的电容时,可将其抽象为只具有储存磁场能性质的电感元件,简称电感。常见的铁芯电感元件如图 1-12 所示。



图 1-12 常见的铁芯电感元件

电感用 L 表示,其电路符号如图 1-13 所示。



图 1-13 电感的电路符号

根据电磁感应定律,当电感线圈中的电流 i 变化时,磁场也随之变化,并在线圈中产生自感电动势 e_L 。当电压、电流、电动势的参考方向一致时,有

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

上式表明,电感元件两端的电压与它的电流对时间的变化率成正比,比例系数 L 称为电感,是表征电感元件特性的参数。电流变化越快,电感元件产生的自感电动势越大,与其平衡的电压也越大。当电感元件中流过稳定的直流电流时,电流不随时间变化,故式中 $\frac{di}{dt}=0$,即 $u=0$,这时电感元件相当于短路。

在国际单位制中,电感的单位是亨利(H),当电感线圈中电流变化率为 1 A/s ,产生 1 V



的感应电动势时,该电感线圈的电感为 1 H。由于亨利单位太大,工程上一般采用毫亨(mH)或微亨(μH),它们的换算关系为

$$1 \text{ H} = 10^3 \text{ mH} = 10^6 \mu\text{H}$$

习惯上把电感元件称为电感,故电感这个名词既表示电路元件,又表示元件的参数,同样有双重含义。

将电感电压公式两边乘以 i 并积分,则得电感元件中储存的磁场能量为

$$W_L = \int_0^t ui \, dt = \int_0^i Li \, di = \frac{1}{2} Li^2$$

上式说明,电感元件在某时刻储存的磁场能量,与该时刻流过的电流的二次方成正比。电感元件不消耗能量,故为储能元件。 LC 滤波器、天线线圈、振荡线圈、扼流圈、偏转线圈等都是利用电感的“通直流阻交流”的性质应用于电子通信设备的。

3. 电容元件

理想电容元件简称电容元件,它是从实际电容器抽象出来的理想化模型。实际电容器通常由两块金属极板中间充满介质(如空气、云母、绝缘纸、塑料薄膜、陶瓷等)构成。容器加上电压后,两块极板上将出现等量异种电荷,并在两极板间形成电场,储存电场能量。当忽略电容器的漏电阻和电感时,可将其抽象为只具有储存电场能性质的电容元件。常见的铝电解电容元件如图 1-14 所示。



图 1-14 常见的铝电解电容元件

电容元件用 C 表示,其电路符号如图 1-15 所示。

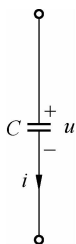


图 1-15 电容的电路符号



当电路中的电压、电流参考方向一致时,则有

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

由上式可知,电容上的电流与电容两端电压的变化率成正比,而与该时刻电压值的大小无关。电压变化率为零(即电压无变化,相当于直流的情况)时,电路中就无电流,相当于断路,所以电容元件有“隔直、通交”的作用。

在国际单位制中,电容的单位是法拉(F)。当电容器充上 1 V 的电压时,若极板上储存了 1 C 的电量,则该电容器的电容就是 1 F。由于法拉的单位太大,工程上一般采用微法(μF)或皮法(pF),它们之间的换算关系为

$$1 \text{ F}=10^6 \mu\text{F}=10^{12} \text{ pF}$$

将电容电流公式两边乘以 u 并积分,可得电容元件极板间储存的电场能量为

$$W_C=\int_0^t ui \, dt=\int_0^u Cu \, du=\frac{1}{2} Cu^2$$

上式说明,电容元件在某时刻储存的电场能量与元件在该时刻所承受电压的二次方成正比。电容元件也不消耗能量,是储能元件。电容在电子线路和控制电路中应用广泛,多用于电容滤波、隔直、交流耦合、交流旁路等,也可以与电感组成调谐电路、滤波电路和振荡电路。

拓展阅读

辅助电路分析的主要仪器仪表

实际电路中存在众多的物理参数,如电流、电压、电功率、电阻等。检测电路参数时,常用的仪器仪表根据不同的测量需求可以分为以下几类。

- (1)基本测量工具:万用表、示波器、信号发生器。
- (2)电源与功率分析:直流电源、功率分析仪、电子负载。
- (3)高频与射频测量:频谱分析仪、网络分析仪、矢量信号分析仪。
- (4)元器件参数测量:LCR 检测仪、晶体管特性图示仪、接地电阻测试仪。
- (5)环境与安全测试:绝缘电阻测试仪、耐压测试仪、温度记录仪/热成像仪。

选择电路分析的仪器仪表时,应注意精度选择、带宽匹配、校准维护等事项。



单元二 电阻的连接

学习目标

- (1) 掌握电阻串联、并联的连接方式和电路特点。
- (2) 了解混联电路的定义和特点。
- (3) 了解电阻的星形连接和三角形连接的转换。
- (4) 会根据电路连接特点与欧姆定律对电路进行分析。

知识链接

一、电阻的串联

1. 电阻串联电路的特点

图 1-16 所示为 n 个电阻的串联, 设电压、电流取关联参考方向, 由基尔霍夫定律得电路特点如下。

- (1) 各电阻顺序连接, 根据基尔霍夫电流定律(KCL)可知, 各电阻中流过的电流相同。
- (2) 根据基尔霍夫电压定律(KVL)可知, 电路的总电压等于各串联电阻的电压之和, 即

$$u = u_1 + \cdots + u_k + \cdots + u_n \quad (1-1)$$

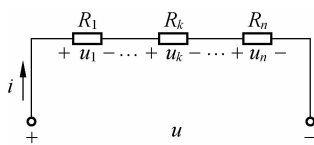


图 1-16 电阻的串联

2. 等效电阻

把欧姆定律代入式(1-1), 得

$$u = R_1 i + \cdots + R_k i + \cdots + R_n i = (R_1 + \cdots + R_n) i = R_{eq} i$$

上式说明: 图 1-17(a) 所示多个电阻的串联电路与图 1-17(b) 所示单个电阻的电路具有相同的伏安关系, 是互为等效的电路。

其中等效电阻为

$$R_{eq} = R_1 + \cdots + R_k + \cdots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k > R_k$$

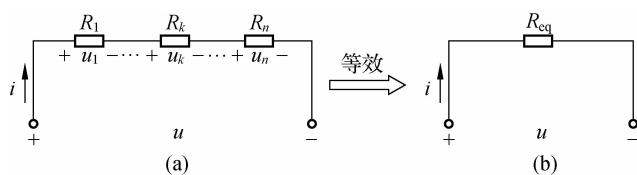


图 1-17 串联电阻的等效

结论: (1) 电阻串联, 其等效电阻等于各分电阻之和。

(2) 等效电阻大于任意一个串联的分电阻。

3. 串联电阻的分压

若已知串联电阻两端的总电压, 求各分电阻上的电压称分压。由图 1-17 知

$$u_k = R_k i = R_k \frac{u}{R_{\text{eq}}} = \frac{R_k}{R_{\text{eq}}} u < u$$

满足

$$u_1 : u_2 : \dots : u_k : \dots : u_n = R_1 : R_2 : \dots : R_k : \dots : R_n$$

结论: 电阻串联, 各分电阻上的电压与电阻值成正比, 电阻值大者分得的电压大。因此串联电阻电路可作为分压电路。

例 1-3 求图 1-18 所示两个串联电阻上的电压。

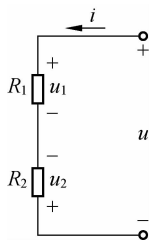


图 1-18 例 1-3 图

解 由串联电阻的分压公式得

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u, \quad u_2 = \frac{-R_2}{R_1 + R_2} u$$

(注意 u_2 的方向)

4. 功率

各电阻的功率为

$$P_1 = R_1 i^2, \quad P_2 = R_2 i^2, \quad \dots, \quad P_k = R_k i^2, \quad \dots, \quad P_n = R_n i^2$$

所以

$$P_1 : P_2 : \dots : P_k : \dots : P_n = R_1 : R_2 : \dots : R_k : \dots : R_n$$





总功率为

$$\begin{aligned} P &= R_{\text{eq}} i^2 = (R_1 + R_2 + \cdots + R_k + \cdots + R_n) i^2 \\ &= R_1 i^2 + R_2 i^2 + \cdots + R_k i^2 + \cdots + R_n i^2 = P_1 + P_2 + \cdots + P_k + \cdots + P_n \end{aligned}$$

结论:

- (1) 电阻串联时, 各电阻消耗的功率与电阻大小成正比, 即电阻值大者消耗的功率大。
- (2) 等效电阻消耗的功率等于各串联电阻消耗功率的总和。

二、电阻的并联

1. 电阻并联电路的特点

图 1-19 所示为 n 个电阻的并联, 设电压、电流取关联参考方向, 由基尔霍夫定律得电路特点如下。

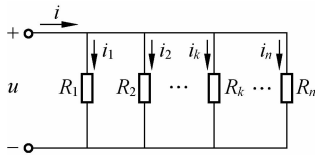


图 1-19 电阻的并联

(1) 各电阻两端分别接在一起, 根据基尔霍夫电压定律(KVL)可知, 各电阻两端为同一电压。

(2) 根据 KCL 可知, 电路的总电流等于流过各并联电阻的电流之和, 即

$$i = i_1 + i_2 + \cdots + i_n \quad (1-2)$$

2. 等效电阻

把欧姆定律代入式(1-2)中, 得

$$i = i_1 + i_2 + \cdots + i_n = \frac{u}{R_1} + \frac{u}{R_2} + \cdots + \frac{u}{R_n} = u \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right) = u \frac{1}{R_{\text{eq}}} \quad (1-3)$$

式(1-3)说明图 1-20(a)所示多个电阻的并联电路与图 1-20(b)所示单个电阻的电路具有相同的伏安关系, 是互为等效的电路。

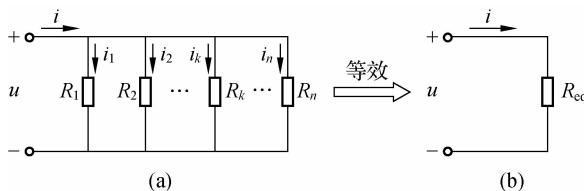


图 1-20 并联电阻的等效



其中等效电阻为

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

最常用的两个电阻并联时求等效电阻的公式为

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

结论: (1) 电阻并联, 其等效电阻等于各电阻之和且大于各分电阻。

(2) 等效电阻的倒数等于各分电阻倒数之和, 等效电阻小于任意一个并联的分电阻。

3. 并联电阻的分流

若已知并联电阻电路的总电流, 求各分电阻上的电流称分流。由图 1-20 知

$$\frac{i_k}{i} = \frac{u/R_k}{u/R_{\text{eq}}} = \frac{1/R_k}{1/R_{\text{eq}}}$$

即

$$i_k = \frac{1/R_k}{1/R_{\text{eq}}} i$$

对于两电阻并联(见图 1-21), 有

$$i_1 = \frac{1/R_1}{1/R_1 + 1/R_2} i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i$$

$$i_2 = -\frac{1/R_2}{1/R_1 + 1/R_2} i = \frac{-R_1}{R_1 + R_2} i$$

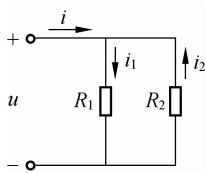


图 1-21 并联电阻的分流

结论: 电阻并联, 各分电阻上的电流与电阻值成反比, 电阻值大者分得的电流小。因此, 并联电阻电路可做分流电路。

4. 电阻的功率

各电阻的功率为

$$P_1 = \frac{u^2}{R_1}, \quad P_2 = \frac{u^2}{R_2}, \quad \cdots, \quad P_k = \frac{u^2}{R_k}, \quad \cdots, \quad P_n = \frac{u^2}{R_n}$$

所以

$$P_1 : P_2 : \cdots : P_k : \cdots : P_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \cdots : \frac{1}{R_k} : \cdots : \frac{1}{R_n}$$





总功率为

$$P = \frac{u^2}{R_{\text{eq}}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_k} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right) u^2$$

$$= \frac{u^2}{R_1} + \frac{u^2}{R_2} + \cdots + \frac{u^2}{R_k} + \cdots + \frac{u^2}{R_n} = P_1 + P_2 + \cdots + P_k + \cdots + P_n$$

结论:

- (1) 电阻并联时,各电阻消耗的功率与电阻大小成反比,即电阻值越大,消耗的功率越小。
- (2) 等效电阻消耗的功率等于各并联电阻消耗功率的总和。

三、电阻的混联

既有电阻串联又有电阻并联的电路称为电阻混联电路。对于电阻混联电路,可以应用等效的概念,逐次求出各串、并联部分的等效电路,从而最终将其简化成一个无分支的等效电路,通常称这类电路为简单电路;不能用串、并联的方法简化的电路称为复杂电路。

例 1-4 求图 1-22(a) 所示电路中的电流 I 和电压 U_{ab} 。

解 对此种电路的分析可归纳为三步:固定电位点;画直观图;利用串、并联方法求等效电阻。据此可将原电路改画成图 1-22(b) 所示电路,则

$$R_{\text{ed}} = \frac{(1\ \Omega + 3\ \Omega) \times 4\ \Omega}{1\ \Omega + 3\ \Omega + 4\ \Omega} = 2\ \Omega$$

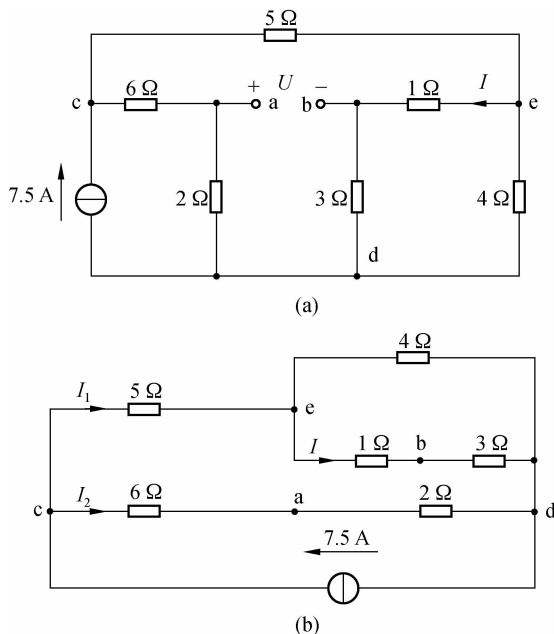


图 1-22 例 1-4 图



由分流关系,有

$$I_1 = 7.5 \text{ A} \times \frac{6 \Omega + 2 \Omega}{6 \Omega + 2 \Omega + 5 \Omega + 2 \Omega} = 4 \text{ A}$$

$$I_2 = 7.5 \text{ A} \times \frac{5 \Omega + 2 \Omega}{6 \Omega + 2 \Omega + 5 \Omega + 2 \Omega} = 3.5 \text{ A}$$

则有

$$I = I_1 \times \frac{4 \Omega}{1 \Omega + 3 \Omega + 4 \Omega} = 2 \text{ A}$$

故

$$U_{ab} = 2I_2 - 3I = 2 \Omega \times 3.5 \text{ A} - 3 \Omega \times 2 \text{ A} = 1 \text{ V}$$

例 1-5 求图 1-23(a)所示电路中 a、b 两端的等效电阻。

解 按三步处理法逐步化简,可得图 1-23(b)(c)(d),由此可得

$$R_{ab} = 2 \Omega + 3 \Omega = 5 \Omega$$

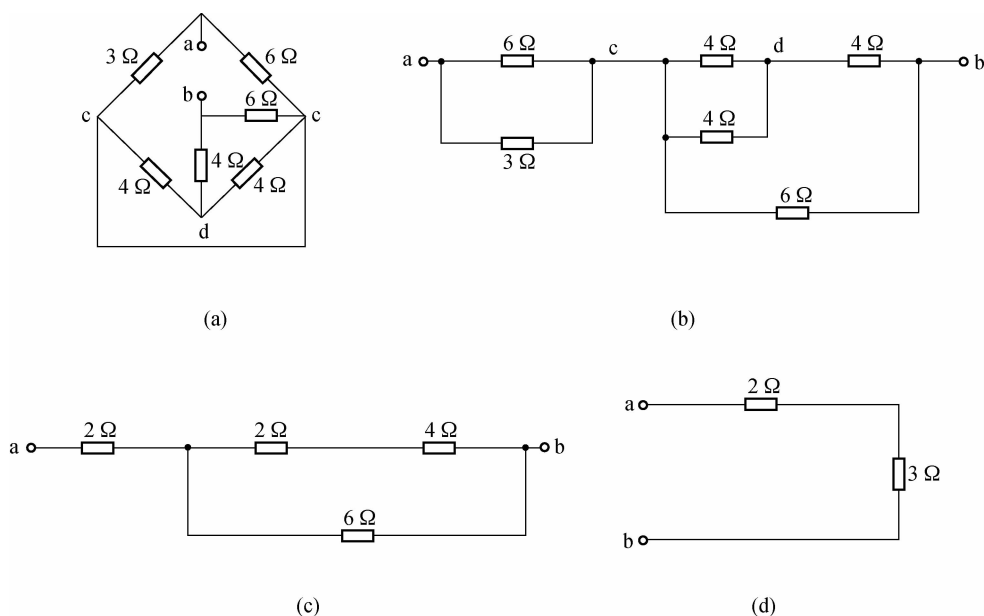


图 1-23 例 1-5 图

四、电阻的星形连接与三角形连接

在复杂电路中有一种无源三端电路,如图 1-24 所示,其中图 1-24(a)为三角形(Δ)连接,称为三角形电路,图 1-24(b)为星形(Y)连接,称为星形电路。



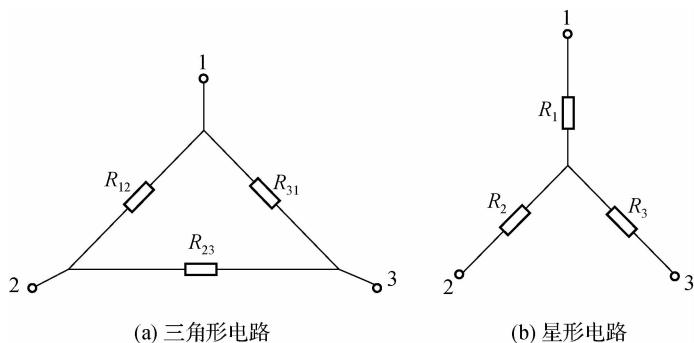


图 1-24 无源三端电路

三角形或星形电路通常是复杂电路中的一部分,例如,对角线上接有电阻的电桥电路,对这种电路直接进行求解是比较麻烦的。而在一定条件下,它们之间可以相互进行等效变换,经过变换之后,并不影响电路中未经变换部分的电压和电流,但可以用串、并联的方法求其等效电阻,从而大大简化了电路的计算。

将三角形电路变换成星形电路,就是已知三角形电路中的三个电阻 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{31} ,待求量为等效星形电路中的三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 ,有

$$\begin{cases} R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{cases}$$

以上就是将星形电路变换为等效三角形电路的公式。上式可概括为

$$R_Y = \frac{\text{三角形中相邻两电阻的乘积}}{\text{三角形中电阻之和}}$$

当三角形电路的三个电阻相等时,即

$$R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta}$$

则

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{1}{3}R_{\Delta}$$

将星形电路变换成三角形电路,就是已知星形电路中的三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 ,待求量为等效三角形电路中的三个电阻 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{31} ,有

$$\begin{cases} R_{12} = \frac{R_1R_3 + R_2R_3 + R_1R_2}{R_3} \\ R_{23} = \frac{R_1R_3 + R_2R_3 + R_1R_2}{R_1} \\ R_{31} = \frac{R_1R_3 + R_2R_3 + R_1R_2}{R_2} \end{cases}$$



以上就是将星形电路变换为等效三角形电路的公式。上式可概括为

$$R_{\Delta} = \frac{\text{星形中两两电阻的乘积之和}}{\text{星形中对面的电阻}}$$

当星形电路的三个电阻相等时,即

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$$

则

$$R_{12} = R_{23} = R_{31} = 3R_Y$$

注意:上述等效变换公式仅适用于无源三端电路。

例 1-6 求图 1-25(a) 所示电路中 a、b 两端的等效电阻。

解 将三个 $1\ \Omega$ 电阻组成的星形连接等效变换成三角形连接,如图 1-25(b) 所示,故可得

$$R_{ab} = \frac{3\ \Omega \times 1.5\ \Omega}{3\ \Omega + 1.5\ \Omega} = 1\ \Omega$$

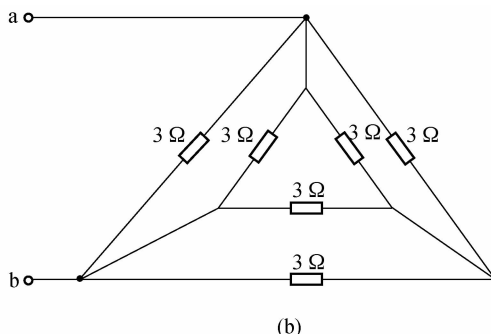
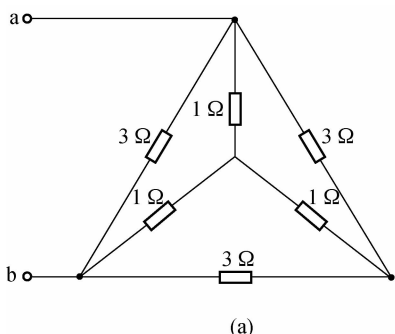


图 1-25 例 1-6 图

拓展阅读

电阻的主要应用场合

电阻是电子电路中不可或缺的基础元件,其核心作用是通过阻碍电流流动来实现多种功能。以下是电阻在不同领域的典型应用。

- (1) 基础电路功能: 限流保护、分压网络、阻抗匹配。
- (2) 传感器与检测应用: 物理量传感、电流检测。
- (3) 信号处理应用: 滤波器设计、运算放大器配置。





- (4) 电力系统应用: 接地电阻、缓冲电阻。
- (5) 特殊类型电阻应用: 可调电阻、功率电阻、精密电阻。
- (6) 高频与特殊场景: 终端电阻、高压电阻。

单元三 认识基尔霍夫定律



学习目标

- (1) 掌握电路中支路、节点、回路、网孔的定义。
- (2) 掌握基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律的概念。
- (3) 会利用基尔霍夫定律对电路进行分析。
- (4) 了解基尔霍夫定律的应用场合。



知识链接

一、常用电路术语

基尔霍夫定律是与电路结构有关的定律,在研究基尔霍夫定律之前,先介绍几个有关的常用电路术语。

(1) 支路。任意两个节点之间无分叉的分支电路称为支路,如图 1-26 中的 bafe 支路、be 支路、bcde 支路。

(2) 节点。电路中,三条或三条以上支路的交汇点称为节点,如图 1-26 中的 b 点、e 点。

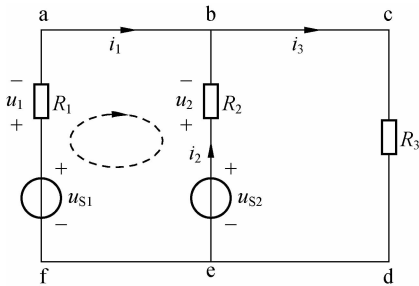


图 1-26 节点电路图示



(3)回路。电路中由若干条支路构成的任一闭合路径称为回路,如图 1-26 中的 abefa 回路、bcdeb 回路、abcdefa 回路。

(4)网孔。不包围任何支路的单孔回路称网孔,图 1-26 中 abefa 回路和 bcdeb 回路都是网孔,而 abcdefa 回路则不是网孔。网孔一定是回路,而回路不一定是网孔。

例 1-7 图 1-27 中有 _____ 条支路、_____ 个节点、_____ 个回路、_____ 个网孔。

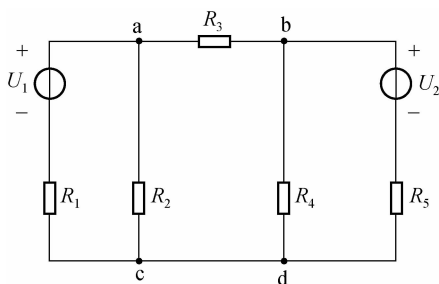


图 1-27 例 1-7 图

解 5、3、6、3。

二、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL)是反映电路中任意节点上各支路电流之间关系的定律。其内容为:对于任何电路中的任意节点,在任意时刻,流过该节点的电流之和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum i = 0$$

如果选定电流流出节点为正,流入节点为负,以图 1-26 中的 b 节点为例,有

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

变换得

$$i_1 + i_2 = i_3$$

因此,基尔霍夫电流定律还可以表述为:对于电路中的任意节点,在任意时刻,流入该节点的电流总和等于从该节点流出的电流总和。即

$$\sum i_{\text{I}} = \sum i_{\text{O}}$$

KCL 不仅适用于电路中的任意节点,还可推广应用于广义节点,即包围部分电路的任意闭合面。可以证明,流入或流出任意闭合面电流的代数和为零。在图 1-28 中,对于点画线所包围的闭合面,可以证明其关系为





$$I_a - (I_b + I_c) = 0$$

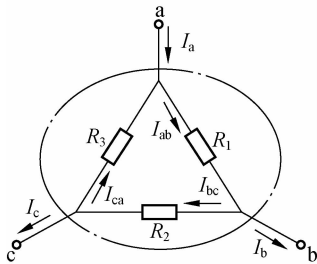


图 1-28 广义节点

基尔霍夫电流定律是电路中连接到任意节点的各支路电流必须遵循的约束关系,而与各支路上的元件性质无关。这一定律对于任何电路都普遍适用。

例 1-8 在图 1-29 所示电路中,已知 $R_1=2\ \Omega$, $R_2=5\ \Omega$, $U_S=10\ \text{V}$ 。求各支路电流。

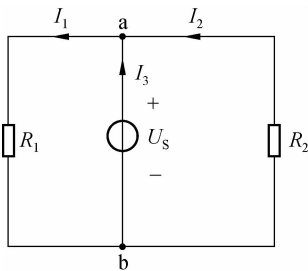


图 1-29 例 1-8 图

解 首先设定各支路电流的参考方向,如图 1-29 中箭头所示,由于 $U_S=U_{ab}=10\ \text{V}$,根据欧姆定律,有

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1} = \frac{10\ \text{V}}{2\ \Omega} = 5\ \text{A}$$

$$I_2 = -\frac{U_{ab}}{R_2} = -\frac{10\ \text{V}}{5\ \Omega} = -2\ \text{A}$$

对节点 a 列 KCL 方程,有

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

代入数值得

$$I_3 = I_1 - I_2 = 7\ \text{A}$$

三、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(KVL)是反映电路中各支路电压之间关系的定律,可表述为:对于任



何电路中的任意回路,在任意时刻,沿着一定的循行方向(顺时针方向或逆时针方向)绕行一周,各段电压的代数和恒为零。其数学表达式为

$$\sum u = 0$$

图 1-26 所示闭合回路,沿 abefa 顺序绕行一周,电压的方向与选定的回路方向一致,符号为正,反之为负,则有

$$-u_{S1} + u_1 - u_2 + u_{S2} = 0 \quad (1-4)$$

另外,各电压本身还存在数值的正负问题,这是需要注意的。

由于 $u_1 = R_1 i_1$, $u_2 = R_2 i_2$, 代入式(1-4)有

$$-u_{S1} + R_1 i_1 - R_2 i_2 + u_{S2} = 0 \text{ 或 } R_1 i_1 - R_2 i_2 = u_{S1} - u_{S2}$$

这时,基尔霍夫电压定律可表述为:对于电路中任意回路,在任意时刻,沿着一定的循行方向(顺时针方向或逆时针方向)绕行一周,电阻元件上电压降之和恒等于电源电压升之和。其表达式为

$$\sum Ri = \sum E_s \quad (1-5)$$

式中: E_s 表示电源电动势,方向为由负到正。按式(1-5)列回路电压平衡方程式时,当循行方向与电流方向一致时,则该电阻上的电压取“+”,否则取“-”;当从电源负极循行到正极时,该电源参数取“+”,否则取“-”。

应用 KVL 时,首先要标出电路各部分的电流、电压或电动势的参考方向。列电压方程式时,一般约定电阻的电流方向与电压方向一致。

KVL 不仅适用于闭合电路,还可推广到开口电路。图 1-30 所示电路中,有

$$U = 2I + 4$$

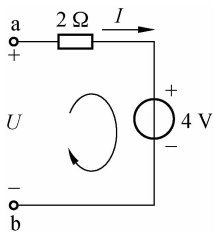


图 1-30 开口电路

例 1-9 在图 1-31 所示电路中, $I_1 = 3 \text{ mA}$, $I_2 = 1 \text{ mA}$ 。试确定电路元件 Z 中的电流 I_3 和其两端电压 U_Z , 并说明它是电源还是负载。

解 根据 KCL, 对于节点 a 有

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$



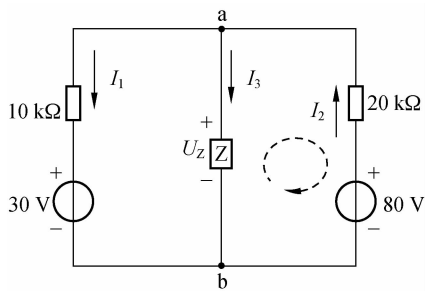


图 1-31 例 1-9 图

代入数值得

$$(3 \text{ mA} - 1 \text{ mA}) + I_3 = 0$$

$$I_3 = -2 \text{ mA}$$

I_3 为负值,故其实际方向为从 b 到 a,电压方向为从 a 到 b,实际电压方向与电流方向相反,是产生功率的元件,即元件 Z 为电源。

根据 KVL 和图 1-31 右侧网孔所示绕行方向,可列写回路的电压平衡方程式为

$$-U_Z - 20 \text{ k}\Omega \times I_2 + 80 \text{ V} = 0$$

代入数值,得

$$U_Z = 60 \text{ V}$$

显然,元件 Z 两端电压和流过它的电流实际方向相反,是产生功率的元件。

拓展阅读

基尔霍夫定律的发现

基尔霍夫定律是由德国物理学家古斯塔夫·基尔霍夫(Gustav Kirchhoff, 1824—1887)在 1845 年提出的,当时他年仅 21 岁,是柯尼斯堡大学的学生。他的研究建立在欧姆定律(1827 年)的基础上,并受到电磁学早期成果的启发,如安培的电流研究、法拉第的电磁感应定律等。能量守恒和电荷守恒原理的提出(如焦耳、亥姆霍兹的工作)也为他的理论提供了支撑。基尔霍夫提出网络的拓扑结构(节点、支路、回路)概念,并将物理原理与数学工具相结合,形成通用分析方法。他的严谨数学推导使其定律迅速被科学界所接受,成为电路理论的基石,推动电气工程和电报技术的进步。基尔霍夫定律的诞生是 19 世纪物理学与工程需求相结合的典范。通过整合前人成果、应用守恒原理及数学工具,基尔霍夫为现代电路分析奠定了基础,其影响延续至今,被广泛应用于电子工程和物理学领域。



单元四 电源及其等效变换



学习目标

- (1) 掌握电压源、电流源的基本概念和特点。
- (2) 了解受控源的基本概念和特点。
- (3) 掌握电压源与电流源的连接方式与等效变换。
- (4) 了解负载获得最大功率的条件。



知识链接

一、电源的主要类型

一个电源可以用两种不同的电路模型来表示：一种是用电压的形式来表示，称为电压源；另一种是用电流的形式来表示，称为电流源。

1. 电压源

电源电压 U 恒等于 U_s ，而其中的电流 I 是任意的，由负载电阻 R_L 及电压 U_s 本身确定，这样的电源称为理想电压源或恒压源。理想电压源的输出电压与输出电流的关系（外特性）如图 1-32 所示。

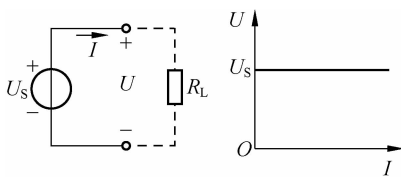


图 1-32 理想电压源的外特性

电压源的特点是端电压始终恒定，等于直流电压；输出电流是任意的，即随负载（外电路）的改变而改变。常见的实际电压源元件包括干电池、蓄电池、发电机、太阳能电池板、实验室中常用的基准电压源等，Aigtek 高精度基准电压源如图 1-33 所示。

2. 电流源

电源电流 I 恒等于 I_s ，而其两端的电压 U 则是任意的，由负载电阻 R_L 及电流 I_s 本身确定，这样的电源称为理想电流源或恒流源。理想电流源的外特性如图 1-34 所示。



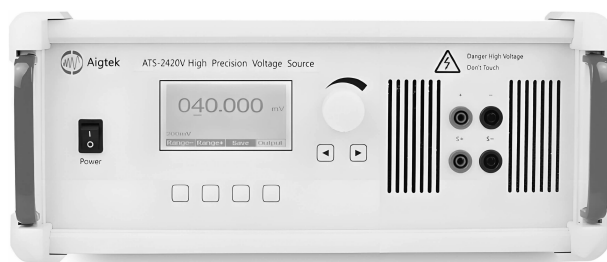


图 1-33 Aigtek 高精度基准电压源

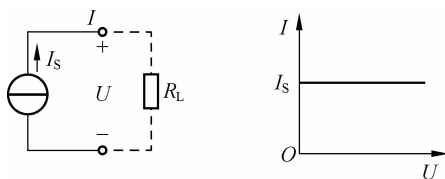


图 1-34 理想电流源的外特性

电流源的特点是输出电流恒定不变；端电压是任意的，即随负载不同而不同。
常见的实验室用电流源如图 1-35 所示。

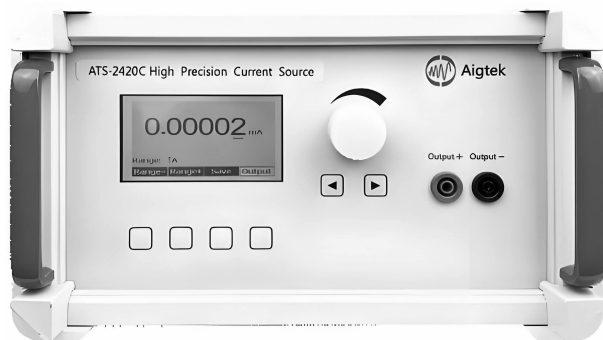


图 1-35 常见的实验室用电流源

3. 受控源

电压或电流受电路中其他部分的电压或电流控制的电压源或电流源，称为受控源。

受控源是一种四端元件，它含有两条支路，一条是控制支路，另一条是受控支路。受控支路为一个电压源或一个电流源，它的输出电压或输出电流（称为受控量）受另外一条支路的电压或电流（称为控制量）的控制，该电压源和电流源分别称为受控电压源和受控电流源，统称为受控源。

根据控制支路的控制量的不同，受控源分为四种：电压控制电压源（VCVS）、电流控制电压源（CCVS）、电压控制电流源（VCCS）和电流控制电流源（CCCS），如图 1-36 所示。为



了与独立源相区别,受控源采用了菱形符号表示,图中控制支路为开路或短路,分别对应于受控源的控制量是电压或电流。

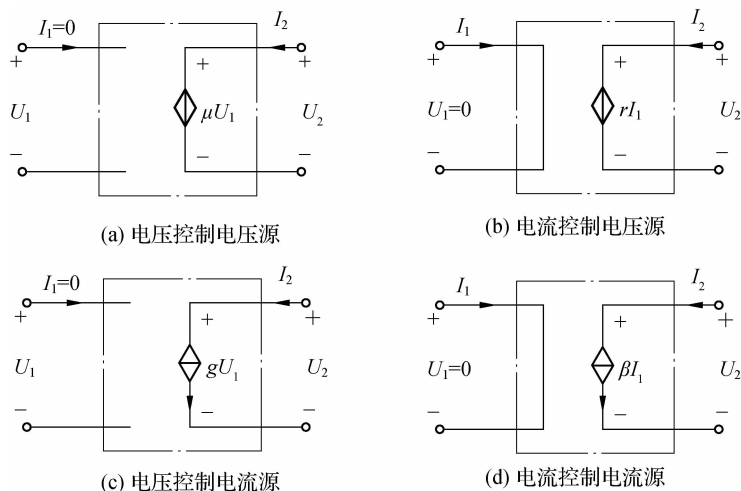


图 1-36 受控源的类型

二、电源的串联和并联

电压源、电流源的串联和并联问题的分析是以电压源和电流源的定义及外特性为基础,结合电路等效的概念进行的。

1. 理想电压源的串联和并联

(1) 理想电压源串联等效电路如图 1-37 所示。

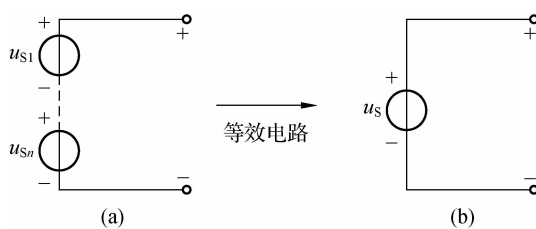


图 1-37 理想电压源串联等效电路

图 1-37 所示为 n 个电压源的串联,根据 KVL 得总电压为

$$u_S = u_{S1} + u_{S2} + \cdots + u_{Sn} = \sum_{k=1}^n u_{Sk}$$

注意: 式中,当 u_{Sk} 的参考方向与 u_S 的参考方向一致时, u_{Sk} 取“+”号;当 u_{Sk} 的参考方向与 u_S 的参考方向不一致时, u_{Sk} 取“-”号。根据电路等效的概念,可以用图 1-37(b)所示电压为 u_S 的单个电压源等效替代图 1-37(a)中的 n 个串联的电压源。通过电压源的串联我们可





以得到一个高的输出电压。

(2)理想电压源并联等效电路如图 1-38 所示。图 1-38(a)中为 n 个电压源的并联,根据 KVL 得

$$u_S = u_{S1} = u_{S2} = \cdots = u_{Sn}$$

上式说明只有电压相等且极性一致的电压源才能并联,此时并联电压源的对外特性与单个电压源一样。根据电路等效概念,可以用图 1-38(b)的单个电压源电路替代图 1-38(a)的电压源并联电路。

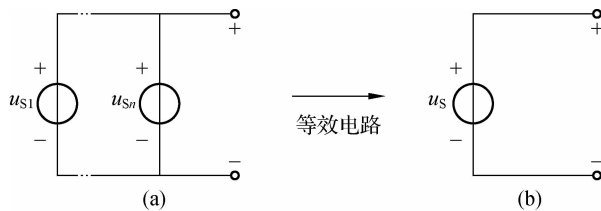


图 1-38 理想电压源并联等效电路

注意:不同值或不同极性的电压源是不允许并联的,否则违反 KVL;电压源并联时,每个电压源中的电流都是不确定的。

2. 电压源与支路的串、并联等效

(1)电压源与支路的串联等效电路如图 1-39 所示。图 1-39(a)所示为 n 个电压源和电阻支路的串联,根据 KVL 可知端口电压、电流关系为

$$u = u_{S1} + R_1 i + u_{S2} + R_2 i = (u_{S1} + u_{S2}) + (R_1 + R_2) i = u_S + R i$$

根据电路等效的概念,图 1-39(a)所示电路可以用图 1-39(b)所示电压为 u_S 的单个电压源和电阻为 R 的单个电阻的串联组合等效替代,其中

$$u_S = u_{S1} + u_{S2}, \quad R = R_1 + R_2$$

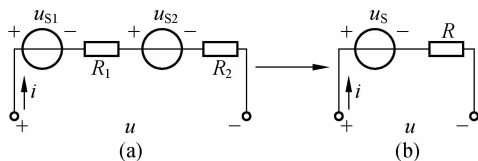


图 1-39 电压源与支路的串联等效电路

(2)电压源与支路的并联等效电路如图 1-40 所示。图 1-40(a)所示为电压源和任意元件的并联,设外电路接电阻 R ,根据 KVL 和欧姆定律得端口电压、电流为

$$u = u_S, \quad i = \frac{u}{R}$$

即端口电压、电流只由电压源和外电路决定,与并联的元件无关,对外特性与图 1-40(b)所



示电压为 u_s 的单个电压源一样。因此,电压源和任意元件并联就等效为电压源本身。

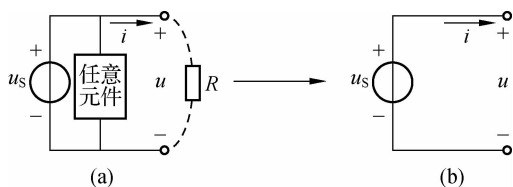


图 1-40 电压源与支路的并联等效电路

3. 理想电流源的串联和并联

(1) 理想电流源的串联等效电路如图 1-41 所示。图 1-41(a) 所示为两个电流源的串联,根据 KCL 得

$$i_s = i_{s1} = i_{s2}$$

上式说明只有电流相等且输出电流方向一致的电流源才能串联,此时串联电流源的对外特性与单个电流源一样。根据电路等效概念,可以用图 1-41(b) 所示的单个电流源替代图 1-41(a) 所示的电流源串联电路。

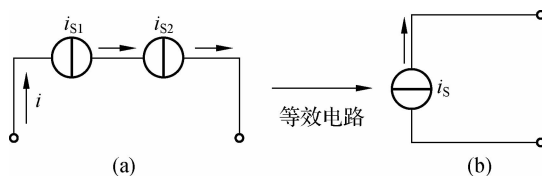


图 1-41 理想电流源的串联等效电路

注意: 不同值或不同流向的电流源是不允许串联的,否则违反 KCL; 电流源串联时,每个电流源上的电压是不确定的。

(2) 理想电流源的并联等效电路如图 1-42 所示。图 1-42(a) 所示为 n 个电流源的并联,根据 KCL 得总电流为

$$i_s = i_{s1} + i_{s2} + \cdots + i_{sn} = \sum_{k=1}^n i_{sk}$$

注意: 式中, i_{sk} 与 i_s 的参考方向一致时, i_{sk} 在式中取“+”号,不一致时取“-”号。根据电路等效的概念,可以用图 1-42(b) 所示电流为 i_s 的单个电流源等效替代图 1-42(a) 中的 n 个并联的电流源,通过电流源的并联可以得到一个大的输出电流。

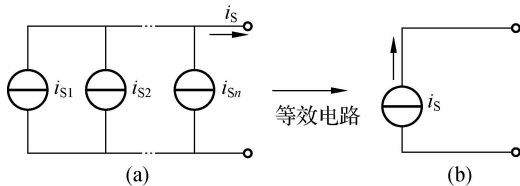


图 1-42 理想电流源的并联等效电路





4. 电流源与支路的串、并联等效

(1) 电流源与支路的串联等效电路如图 1-43 所示。图 1-43(a) 所示为电流源和任意元件的串联, 设外电路接电阻 R , 根据 KVL 和欧姆定律得端口电压、电流为

$$u = u_S, \quad i = \frac{u}{R}$$

即端口电压、电流只由电流源和外电路决定, 与串联的元件无关, 对外特性与图 1-43(b) 所示电流为 i_S 的单个电流源一样。因此, 电流源和任意元件串联就等效为电流源本身。

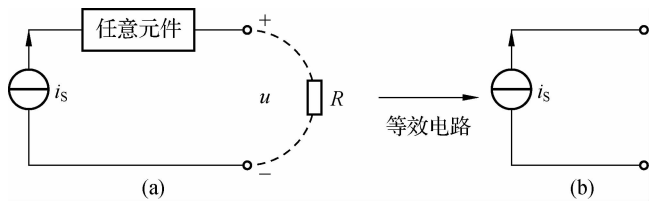


图 1-43 电流源与支路的串联等效电路

(2) 电流源与支路的并联等效电路如图 1-44 所示。图 1-44(a) 所示为两个电流源和电阻支路的并联, 根据 KCL 可知端口电压、电流关系为

$$i = i_{S1} + \frac{u}{R_1} + i_{S2} + \frac{u}{R_2} = i_{S1} + i_{S2} + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) u = i_S + \frac{u}{R}$$

上式说明图 1-44(a) 所示电路的对外特性与图 1-44(b) 所示电流为 i_S 的单个电流源和电阻为 R 的单个电阻的并联组合一样。因此, 图 1-44(a) 可以用图 1-44(b) 等效替代, 其中

$$i_S = i_{S1} + i_{S2}, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

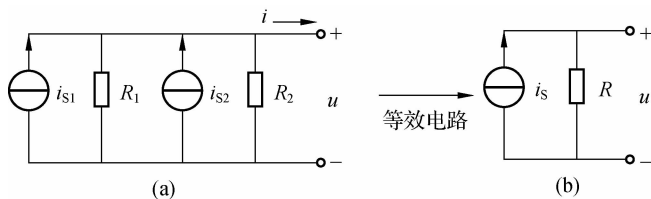


图 1-44 电流源与支路的并联等效电路

三、实际电压源和电流源的等效变换

图 1-45 所示为实际电压源、实际电流源的模型, 它们之间可以进行等效变换。