

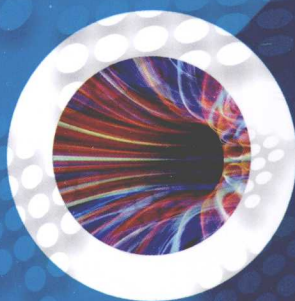


电子与通信工程学科精品教程

电工技术

主 编 伍爱莲 李皓瑜

DIANGONG



JISHU



电子与通信工程学科精品教程

电工技术

江苏工业学院图书馆
藏书章

主 编 伍爱莲 李殿瑜

副主编 李 欣 程德文 唐依明

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/伍爱莲 李皓瑜 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2009年9月
ISBN 978-7-5609-5552-0

I. 电… II. ①伍… ②李… III. 电工技术-高等学校-教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 124688 号

电工技术

伍爱莲 李皓瑜 主编

策划编辑:亢博剑 张 毅

责任编辑:亢博剑 张 毅

责任校对:李 琴

封面设计:潘 群

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:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787 mm×960mm 1/16

印张:13.25 插页:1

字数:285 000

版次:2009年9月第1版

印次:2009年9月第1次印刷

定价:23.00元

ISBN 978-7-5609-5552-0/TM·111

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

电工技术是非电专业的一门重要的技术基础课程。本书是根据国家教委颁发的《电工学(电工技术和电子技术)教学基本要求》,结合相关专业的实际需求而编写的。

全书共 9 章,主要包括电路的基本概念、直流电阻性电路分析、正弦交流电路、三相电路、电路的时域分析、磁路和变压器、三相异步电动机及其控制、常用电工仪表及其测量、工厂供电和安全用电等内容。

本书可作为应用型本科院校、高职高专机电一体化、通信、电子等相关专业课程的教材,也可作为工程技术人员的参考用书。

前 言

电工技术和电子技术的发展十分迅速,电工和电子产品几乎覆盖了从工农业生产到日常生活的所有领域。为此,本书取材以工程实践中所需的电工技术基础知识、基本理论、基本技能为主,遵循“够用、实用、管用为度”的原则,力求做到理论上讲清,不追求过深的理论分析和数学推导,注重内容结构的合理性,重点培养学生分析问题和解决问题的能力。使学生在电路电子技术、电气控制及安全用电等方面获得必备的知识和必要的技能,并为后续专业知识的学习和技能培训打下良好的基础。

为了便于学生理解和掌握所讲授的基本内容,本书每章正文前有知识要点和基本要求,每章正文结束有本章小结和习题,每节均配有思考与练习。习题供课后练习用,让学生巩固所学的基本概念,同时可以培养学生的自学能力。思考与练习结合各节的基本概念和基本内容,供学生在课堂上练习。

本书的总讲课时数为 80 学时。“常用电工仪表及其测量”一章,可结合实验进行教学;“工厂供电和安全用电”一章,可作为基本知识让学生自学。

参加本书编写工作的有:伍爱莲(第 1 章、第 7 章、第 9 章),李皓瑜(第 2 章、第 3 章),程德文(第 5 章、第 8 章),李欣(第 4 章),唐依明(第 6 章)。

感谢为本书出版付出了辛勤劳动的华中科技大学出版社的编辑及参编院校的领导及其他老师!

由于能力所限,本书存在不妥之处甚至错误,恳请读者提出宝贵意见,便于修改提高。

编 者
2009 年 5 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念	(1)
1.1 电路和电路模型	(1)
1.2 电流和电压及其参考方向	(3)
1.3 电压源和电流源	(6)
1.4 基尔霍夫定律	(9)
本章小结	(12)
习题	(13)
第 2 章 直流电阻性电路分析	(16)
2.1 电阻的串联、并联和混联电路	(16)
2.2 电阻的 Y 形连接与 Δ 形连接的等效变换	(21)
2.3 电压源与电流源及其等效变换	(23)
2.4 支路电流法	(27)
2.5 节点电位法	(29)
2.6 叠加定理	(33)
2.7 戴维宁定理与诺顿定理	(37)
本章小结	(44)
习题	(45)
第 3 章 正弦交流电路	(49)
3.1 正弦交流电的基本概念	(49)
3.2 正弦量的相量表示法	(54)
3.3 单一参数正弦交流电路	(57)
3.4 基尔霍夫定律的相量形式	(65)
3.5 RLC 串联电路	(67)
3.6 阻抗的串联与并联	(72)
3.7 串联谐振电路	(78)
3.8 并联谐振电路	(83)

3.9 功率因数的提高	(85)
本章小结	(88)
习题	(89)
第4章 三相电路	(92)
4.1 对称三相交流电源	(92)
4.2 三相负载的星形连接	(94)
4.3 三相负载的三角形连接	(97)
4.4 三相电路的功率	(99)
本章小结	(100)
习题	(101)
第5章 电路的时域分析	(104)
5.1 过渡过程和换路定律	(104)
5.2 RC 电路的响应	(106)
5.3 RL 电路的响应	(111)
5.4 微分电路和积分电路	(116)
5.5 三要素法	(118)
本章小结	(119)
习题	(119)
第6章 磁路和变压器	(123)
6.1 磁路的基本概念	(123)
6.2 交流铁心线圈电路	(129)
6.3 变压器	(131)
6.4 电磁铁	(138)
本章小结	(139)
习题	(140)
第7章 三相异步电动机及其控制	(142)
7.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理	(142)
7.2 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	(147)
7.3 三相异步电动机的启动、调速与制动	(154)
7.4 三相异步电动机的铭牌	(158)
7.5 常用低压电器	(161)

7.6 基本控制电路	(166)
本章小结	(171)
习题	(173)
第8章 常用电工仪表及其测量	(175)
8.1 常用电工仪表的分类	(175)
8.2 电工仪表的误差及准确度	(176)
8.3 测量误差及数据的处理	(180)
8.4 磁电式仪表及直流电压和电流的测量	(183)
8.5 电磁式仪表及交流电压和电流的测量	(185)
8.6 电动式仪表及功率的测量	(187)
8.7 兆欧表	(189)
8.8 万用表	(191)
8.9 电工仪表的主要技术数据和正确使用	(193)
本章小结	(193)
习题	(194)
第9章 工厂供电和安全用电	(196)
9.1 发电、输电及工业企业配电	(196)
9.2 安全用电	(198)
本章小结	(203)
习题	(203)
参考文献	(204)

第1章 电路的基本概念

知识要点: 电路模型 参考方向 电路元件 基尔霍夫定律 等效电路

基本要求: 理解电路模型、电流和电压的参考方向、电功率及额定值的意义; 掌握电路元件性能及电路的基本定律; 了解等效电路的概念。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的组成及作用

电路, 简言之就是电流所经之路。电路一般是由电路器件和电工设备以一定的方式构成的。如图 1.1.1(a) 所示是一个简单的实际电路, 它由三部分组成: 干电池, 白炽灯泡, 连接导线及开关等。这三部分分别称为电源、负载和中间环节, 它们是电路的基本组成部分。一般电路可以用如图 1.1.1(b) 所示的框图表示。各组成部分及其作用简述如下。

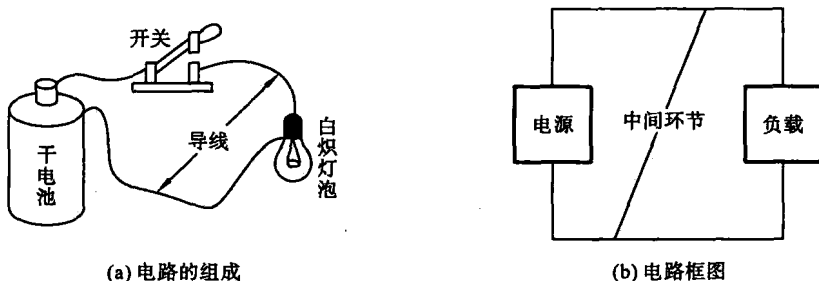


图 1.1.1 一个简单电路及其框图

电源是供电设备, 它是将其他形式的能量转换成电能, 或者把某种形式的电能转换成另一种形式的电能信号的装置。常见的电源设备有发电机、干电池和信号发生器等。

负载是用电设备, 它是将电能转换为其他形式能量, 或者吸收、传递电信号的装置。实际用电设备有电阻器、电感器、电容器、二极管、三极管、电子管等各种器件。

中间环节除了连接导线和开关以外, 还有变压器、电工仪表、熔断器(熔丝)等多种设备。

它们在电路中的作用为连接电源和负载,控制电能的传送和分配等。

电路的作用通常从下面两个方面来考虑。

一方面,在电力工程中,电路起输送和转换电能的作用。通常,发电机发电、输电线路输电、变电站变配电、电力拖动、电气照明、电热等都属于电力工程的范畴。

另一方面,电路还起着信号的变换和处理作用,就是对外加信号进行加工处理,使之成为需要的输出信号。由于对信号进行加工处理,必须经过电流和电压的变化才能实现,因此就其本质而言,信号变换的处理仍属于能量的转换。这方面的例子很多,例如,三极管放大,电能转换,信息处理和存储等电路。

1.1.2 电路模型

为了用数学方法来描述和分析电路,需要将实际电路和电路器件模型化,也就是建立电路模型。电路模型是在一定的条件下,由实际电路及其器件抽象出来的数学模型,它是由反映单一电磁性质的理想电路元件构成的。

实际电路元件的种类虽然繁多,但它们有着共同特点:所有电路,伴随电流的流动,存在着能量转换的电磁现象。一般而论,导体总具有电阻的,当电流通过时,会发热消耗电能;有电流通过就会有磁场,磁场会储存磁场能量;有电压建立就会有电场,电场会储存电场能量。这三种电磁现象可以用下面三个电路参数来反映:电阻反映电能的消耗,电感反映磁场能量的储存,电容反映电场能量的储存。并且,电能消耗集中在电阻元件中进行,磁场储能集中在电感元件中进行,电场储能集中在电容元件中进行。

电阻元件、电感元件和电容元件是理想的电路元件,它们在电路模型中分别用如图 1.1.2(a)、(b)、(c)所示的符号表示。

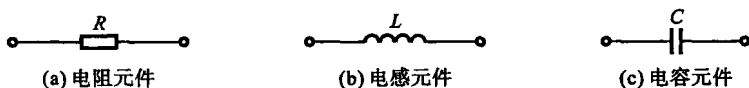


图 1.1.2 理想电路元件

实际电源的理想化模型,有理想电压源元件和理想电流源元件,它们的电压和电流分别用 u_s 和 i_s 表示,其方向分别用正、负号及箭头表示,在电路图中的符号分别如图 1.1.3(a)、(b)所示。



图 1.1.3 理想电源元件

实际中,电压源元件有时用电动势 E (直流)和 e (交流)表示。

电路模型均由一定的理想元件组成。有些实际器件的模型可以只用一种元件组成。例

如,电阻器、电灯和电炉可以只用电阻元件表示;空载变压器可以认为是一个电感元件;电容器可以认为是一个电容元件。同一电路器件,在不同的条件下,有不同的模型。

以后所讨论的电路,是指由理想电路元件和电源元件构成的模型,也称为原理电路图。例如,与图 1.1.1(a)所示电路相对应的电路模型如图 1.1.4 所示,图中, E 和 R_0 串联电路是干电池的模型; R_L 是灯泡的模型; S 是开关的模型;连接导线的电阻远小于负载电阻,将其忽略可视为理想导体(电阻为零)。

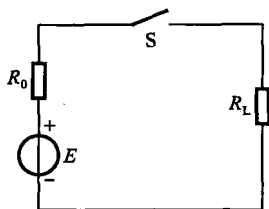


图 1.1.4 图 1.1.1(a) 电路的模型

思考与练习

1.1.1 电路由哪几个部分组成? 试简述各部分的作用。

1.1.2 何谓电路模型? 试绘出三种理想电路元件模型和两种理想电源元件模型。

1.2 电流和电压及其参考方向

电流和电压是电路的基本物理量。

电荷的定向运动形成电流。电流的大小用电流强度表示,单位时间内通过导体某一截面的电荷量,定义为电流。习惯上,将电流强度简称为电流,用字母 I 表示,即

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

式中: Q 表示通过导体横截面的电荷量。为了分析的方便,常用大写字母 I 表示直流电流(大小和方向均不随时间改变的电流),用小写字母 i 表示随时间变化的交变电流,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

习惯上,将电流的实际方向规定为正电荷移动的方向。要判别电流的实际方向,只有在简单的直流电路中才有可能。当电路比较复杂(见图 1.2.1),或者电源的极性随时间改变时,要确定电流的实际方向就不容易了。因此,研究电路时,总是预先选定某一个方向作为电流的方向。这个选定的方向,称为电流的参考方向。参考方向是任意选定的,不必考虑其实际方向。在一定参考方向下,电流有正、负之分。当电流的参考方向与它的实际方向相同时,则电流值记为正;反之,其值记为负,如图 1.2.2 所示。电流的参考方向也称为电流的正方向。

在国际单位制中,电荷(量)的单位为库[仑],简称库,用符号 C 表示;时间的单位为秒,用符号 s 表示;电流的单位为安[培],简称安,用符号 A 表示。

同理,电压也有参考方向或参考极性。电路中两点之间的电压在数值上等于电场力把

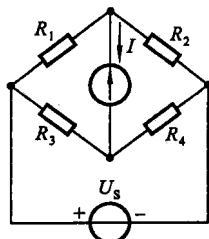


图 1.2.1 直流电桥电路

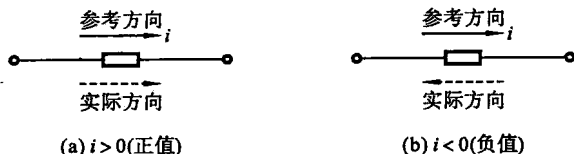


图 1.2.2 电流的参考方向和实际方向

单位正电荷从电路一点移到另一点所作的功。电压用字母 U 和 u 表示。其中，大写字母 U 表示直流电压，小写字母 u 表示交流电压， W 表示电场力所作的功。它们的表达式分别为

$$U = \frac{W}{Q} \quad (\text{直流})$$

和

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (\text{交流})$$

电压的实际方向规定为高电位点指向低电位点。电压的参考方向也是任意选定的。当电压的参考方向与它的实际方向一致时，其电压值记为正；反之，其值记为负。和电流一样，电压也可以用一个箭头表示其参考方向，如图 1.2.3(a)所示。同时，电压也可采用“+”、“-”极性表示，如图 1.2.3(b)所示。



图 1.2.3 电压的参考方向与参考极性

当电压源元件用电动势 E 或 e 表示时，它的实际方向与电压的实际方向相反，即规定在电源内部由低电位点指向高电位点。

此外，电流和电压的参考方向还可以用双下标表示。例如，若某段电路中， $i_{ab} = 5 \text{ A}$ ， $u_{ab} = 10 \text{ V}$ ，则

$$i_{ba} = -i_{ab} = -5 \text{ A}$$

$$u_{ba} = -u_{ab} = -10 \text{ V}$$

在电路分析中，参考方向是很重要的，分析和计算电路时，应该事先确定电路各处电流和电压的参考方向。一般取电压的参考方向与电流的参考方向相同，如图 1.2.4 所示。这种参考方向称为关联参考方向。采用关联参考方向的优点是，两个参考方向只需标出其中的一个就可以了。

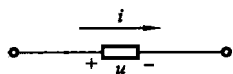


图 1.2.4 关联参考方向

电动势的极性常为已知，如果它的极性也待确定时，同样可用上述方法，任意假定它的参考方向或参考极性。

在进行电路特别是电子线路分析和计算时，经常要研究电路中各点电位的高低。电位

是度量电路中各点所具有的电位能大小的物理量,是一个相对的概念,它必须是相对于某个特定的参考点而言的。电位在数值上等于电场力将单位正电荷从该点移到参考点所作的功,用符号 V 表示,参考点的电位值一般设为零,因此也称为零电位点。

电路中任意一点的电位,就是该点与参考点之间的电压,而电路中任意两点之间的电压,则等于这两点的电位之差,即

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1.2.2)$$

式中: V_A 为 A 点电位; V_B 为 B 点电位。

在国际单位制中,电压、电动势和电位的单位都是伏[特],简称伏,用符号 V 表示。

根据电压和电流的定义,可以得到下述关系

$$\frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.2.3)$$

式(1.2.3)表示电能对时间的变化率,称为功率,用符号 P 或 p 表示。当电流和电压取关联参考方向时,电路中吸收的功率表达式为

$$\left. \begin{aligned} p &= ui & (\text{交流}) \\ P &= UI & (\text{直流}) \end{aligned} \right\} \quad (1.2.4)$$

若 u 、 i 的实际方向相同,则 $p > 0$,表明电路吸收功率;反之, $p < 0$,则表明电路实为发出功率。这就是说,当电压和电流取关联参考方向时,功率的正号表示电路吸收功率,负号表示电路发出功率。一个电路的功率应该是平衡的,即吸收的功率应该等于发出的功率。

在国际单位制中,当电压和电流的单位分别为伏和安时,功率的单位为瓦[特],简称瓦,用符号 W 表示。

各种电气设备在出厂时,制造厂家对其电压、功率和电流都规定了一个最合理的实用数据,也就是额定值,分别称为额定电压、额定功率和额定电流,用符号 U_N 、 P_N 和 I_N 表示。其中,额定电压是在规定时间内,设备的绝缘可靠工作时允许承受的电压限额;额定电流是在一定的环境温度下,设备的绝缘性能不会损坏时长期容许通过的电流限额;额定功率是在额定电压和额定电流下,设备正常工作时的功率。

电气设备的额定值由厂家标明在铭牌或外壳上。用户应按额定值使用。例如,200 V、40 W 的白炽灯泡,就应该在 200 V 电源电压下使用。

在时间 t 内,如果消耗的功率为 p ,则电路消耗(或储存)的总能量为

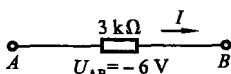
$$W = \int_0^t p dt = \int_0^t ui dt$$

在国际单位制中,当功率 p 的单位为 W 、时间 t 的单位为 s 时,能量 W 的单位为焦[耳],简称焦,用符号 J 表示。

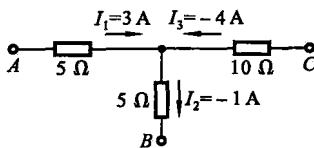
总之,电流和电压从数学上看是代数量,其值有正、负之分;它们的正、负取决于所选的参考方向;而参考方向是可以任意选定的;参考方向一经选定,在计算过程中不得随意更改;电路中所标电压、电流方向,不加声明均指参考方向。式(1.2.4)只在电流和电压取关联参考方向时才成立。

思考与练习

- 1.2.1 为什么要引入电压、电流的参考方向？参考方向与实际方向有何区别和联系？
- 1.2.2 何谓关联参考方向？
- 1.2.3 计算如图 1.2.5(a)所示电流 I 和图 1.2.5(b)所示电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 。



(a)



(b)

图 1.2.5 题 1.2.3 的图

- 1.2.4 计算如图 1.2.6 所示电路中,在开关 S 打开和闭合时 A 点的电位。
- 1.2.5 试判断如图 1.2.7(a)、(b)所示的元件是发出功率还是吸收功率。

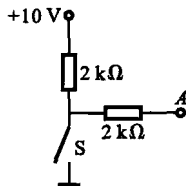
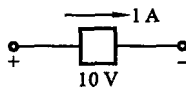
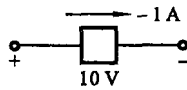


图 1.2.6 题 1.2.4 的图



(a)



(b)

图 1.2.7 题 1.2.5 的图

- 1.2.6 何谓额定值？一只 220 V、60 W 的白炽灯泡的 U_N 、 P_N 、 I_N 各为多少？

1.3 电压源和电流源

一个实际的电源,既可以表示为电压源模型,又可以表示为电流源模型。本节讨论两种电源模型及其特性。

1.3.1 电压源模型

电压源的模型如图 1.3.1(a)所示,即由电动势 E 与内阻 R_0 相串联。由于 R_0 的存在,当电压源与负载接通时,会使电压源的端电压 U 随负载电流的变化而改变。如果一个电压源的内阻等于 0,这样的电压源称为理想电压源。理想电压源的模型如图 1.3.1(b)所示。显然,实际电压源模型由理想电压源模型 E (或称电动势) 和内电阻 R_0 (简称内阻) 串联组成。

如果将实际电压源与负载电阻接通,其电路如图 1.3.2(a)所示。

调节 R_L 的值,便可测绘出端电压 U 与负载电流 I 的关系曲线,该曲线称为实际电压源

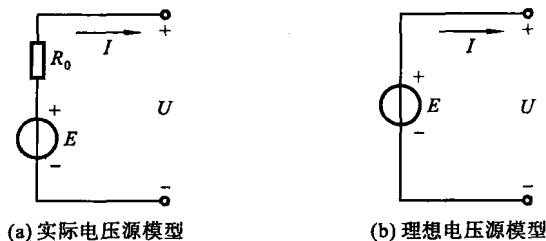


图 1.3.1 电压源模型

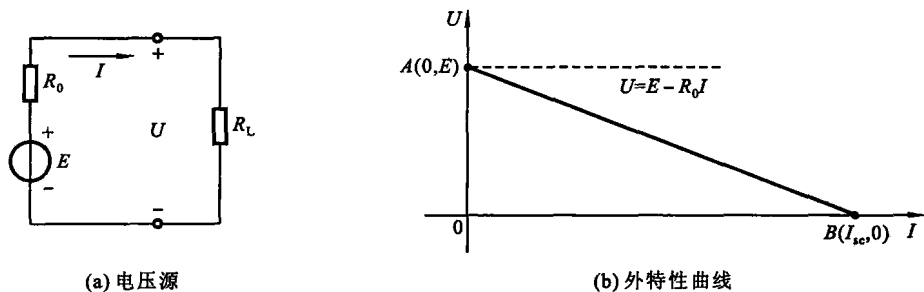


图 1.3.2 电压源及其外特性曲线

的外特性曲线,如图 1.3.2(b)的实线所示。图中的虚线为理想电压源的外特性,即 $U=E$ 。

【例 1.3.1】 实际电路在运行时,有可能出现三种状态,即开路、短路和负载状态。现以如图 1.3.3 所示电路为例,讨论三种状态下电路中有关物理量的特征。

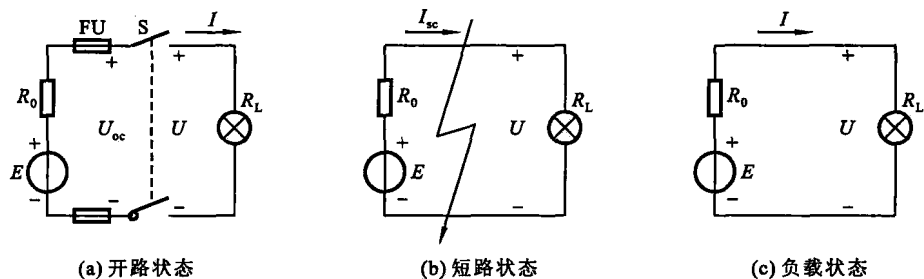


图 1.3.3 例 1.3.1 的图

【解】 (1) 开路状态。图 1.3.3(a)中,开关 S 断开时,称电路处于开路状态。由于此时电源未带负载,故又称空载状态。显而易见,开路时有关物理量的特征为

电路中的电流

$$I=0$$

电源端电压(开路电压)

$$U_{oc}=E$$

负载功率

$$P=UI=0$$

由图 1.3.2(b)可见,电压源处于开路状态时,电路中的电压和电流的值,为对应电源外特性曲线和纵轴交点 $A(0, E)$ 。

(2) 短路状态。当图 1.3.3(a) 中开关 S 合上, 且两根导线不经负载而直接接通时, 如图 1.3.3(b) 所示, 电压源电路处于短路状态。短路时有关物理量的特征为

电流	$I = I_{sc} = \frac{E}{R_0}$
端电压	$U = 0$
电源的电动势	$E = I_{sc} R_0$
电源的功率	$P_E = E I_{sc} = I_{sc}^2 R_0$
负载的功率	$P = 0$

I_{sc} 称为短路电流。由于内阻 R_0 很小, 因此短路电流 I_{sc} 很大, 电源内部功耗很大, 会损坏电源等电气设备。为了消除短路事故可能造成的危害, 一般电路中都应采取保护措施, 例如, 照明电路中接入熔丝(熔断器 FU)等。

由图 1.3.2(b) 可见, 电压源短路时, 电路中 U 、 I 的值, 对应于电源的外特性曲线与横轴的交点 $B(I_{sc}, 0)$ 。

(3) 负载状态。当图 1.3.3(a) 中的开关 S 闭合时, 电路就处于负载状态, 如图 1.3.3(c) 所示, 或称通路状态。此时, 电路中有关物理量的特征为

电流	$I = \frac{E}{R_0 + R_L}$
负载端电压	$U = E - I R_0$ 或 $U = I R_L$
电源输出功率(或负载吸收功率)	$P = UI$
电源内阻上功率	$\Delta P = I^2 R_0$
电源产生的功率	$P_E = EI = P + \Delta P$

电源带上负载以后, 电路中 U 、 I 的变化规律, 如图 1.3.2(b) 的外特性曲线所示。显然, 负载时负载端电压小于电源电动势。

1.3.2 电流源模型

可以向外电路输出电流的电源, 称为电流源。电流源的模型如图 1.3.4(a)、(b) 所示。

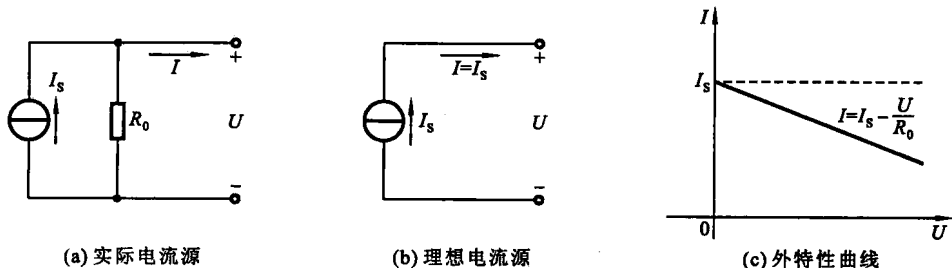


图 1.3.4 电流源模型及其外特性曲线

其中, 图(a)所示为实际电源的电流模型, 它由电流 I_s 与内阻 R_0 并联组成; 图(b)为理想电流源模型, 它的内阻 $R_0 \rightarrow \infty$ 。显然, 实际电源的电流源模型等于理想电流源(或称电激

流)与内阻 R_0 并联。

图 1.3.4(c) 所示为电流源的外特性曲线。其中,实线为实际电流源的外特性,虚线为理想电流源的外特性。本节只讨论了直流电源,即电动势 E 不随时间变化的直流电压源及电激流 I_S 不随时间变化的直流电流源。

思考与练习

1.3.1 什么是理想电压源? 若有一个 12 V 的理想电压源,假定它工作在开路、接 $3\ \Omega$ 负载电阻两种状态,试确定其输出电流及输出功率。

1.3.2 什么是理想电流源? 若有一个 20 A 的理想电流源,设它工作在短路、接 $5\ \Omega$ 负载电阻两种状态,试确定其端电压和输出功率。

1.3.3 在如图 1.3.5 所示各电路中的电压 U 和电流 I 各是多少? 根据计算结果能得出什么规律性的结论?

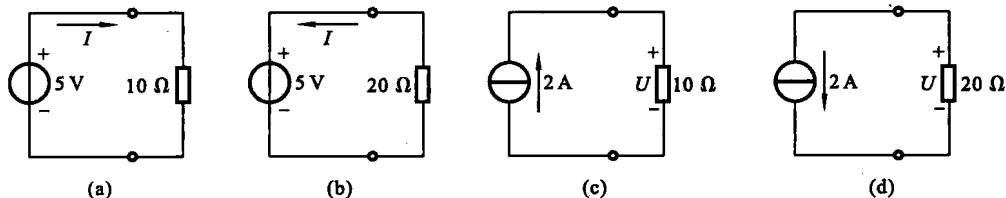


图 1.3.5 题 1.3.3 的图

1.4 基尔霍夫定律

电路按结构可分为分支电路和无分支电路。若分支电路可以通过串、并联方法简化为无分支电路,再应用欧姆定律便可得出计算结果。这类电路称为简单电路。凡不能用串、并联方法简化的分支电路称为复杂电路。复杂电路不能直接由欧姆定律求解。基尔霍夫于 1845 年创立了两条定律,称为分析电路的基本定律。

下面以如图 1.4.1 所示电路为例,先介绍电路的几个名词。

支路: 流经同一电流的电路分支称为支路。在图 1.4.1 中,共有三条支路,即支路数 $b=3$ 。

节点: 三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1.4.1 所示电路只有两个节点 b 和 e ,即节点数 $n=2$ 。其余各点 a 、 c 、 d 、 f 均不是节点。

回路: 电路中任一闭合路径称为回路。图 1.4.1 中有三个回路,它们是 $abef$ 、 $bcde$ 和 $acdf$,即回路数 $l=3$ 。

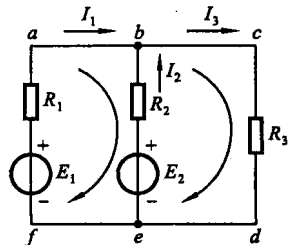


图 1.4.1 基尔霍夫定律例图