



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
技能型紧缺人才培养培训建筑设备类专业教学用书

电工基本知识与技能

肖华中 主 编
周湘萍 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
技能型紧缺人才培养培训建筑设备类专业教学用书

电工基本知识与技能

主 编 肖华中
副主编 周湘萍
编 写 秦 雯
主 审 王 浩 李雪红



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。全书共分九章,主要包括电路的基本概念与基本定律、电阻电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、动态电路的暂态分析、磁路与铁芯线圈电路、电气测量技术、安全用电、电路仿真 PSPICE8.0 软件及应用等。每章后附有小结和习题,便于学生自学。本书内容选取是以工程实践中所需的电工技术的基本知识、基本技能、基本理论为主,兼顾最新的电工应用成果,遵循“适度,必须和够用”的原则,精选内容,突出概念,注重应用。

本书可作为高职高专院校楼宇智能化、建筑电气、自动控制、智能仪表、机电一体化和电气工程(少学时)等专业的教材,也可作为继续教育和短训班的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电工基本知识及技能/肖华中主编. —北京:中国电力出版社, 2008

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 978-7-5083-7294-5

I. 电… II. 肖… III. 电工学—职业教育—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086925 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 265 千字

定价 16.30 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是根据教育部审定的建筑设备类专业主干课程的教学大纲编写而成的,并列人教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书主要内容包括电路基础、磁路与铁芯线圈电路基础、安全用电、电工测量和PSPICE电路仿真软件分析五部分,取材以工程实践中所需的电工技术的基本知识、基本技能、基本理论为主,同时反应最新的电工应用成果。本书遵循“适度,必需和够用”的原则,精选内容,强调概念,注重应用,而不着力于公式的推导和理论的论证。为使本书能适应高职高专不同专业的实际教学需求,在保证满足课程基本要求的前提下,内容编写兼顾了二年学制和三年学制的教学特点,按系统编写和按项目编写,并适当增加一些拓宽选学的内容。

本书由广西水利电力职业技术学院肖华中任主编,由广西水利电力职业技术学院周湘萍任副主编。书中第3、6、7、8、9章由肖华中编写,第1、2章由甘肃兰州市工业高等技术学院秦雯编写,第4、5章由周湘萍编写。由保定电力职业技术学院王浩和广西水利电力职业技术学院李雪红审阅了全书。

由于时间仓促,加之编者水平和经验有限,书中的缺点和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正并提出宝贵意见。

编者

2008年4月

目 录

前言

第1章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路与电路模型	1
1.2 电路的主要物理量	2
1.3 电路的三种状态	5
1.4 电压源与电流源的等效变换	7
1.5 基尔霍夫定律	12
1.6 电路中电位的概念及计算	15
本章小结	16
习题	17
第2章 电阻电路的分析方法	20
2.1 简单电阻电路的分析	20
2.2 支路电流法	25
2.3 叠加原理	27
2.4 戴维南定律	29
本章小结	33
习题	33
第3章 正弦交流电路	37
3.1 正弦量的基本特征	37
3.2 正弦量的相量表示法	42
3.3 单一参数电路元器件的交流电路	46
3.4 RLC 串联电路	54
3.5 正弦交流电路的分析方法	60
3.6 电路的谐振	64
3.7 功率因数的提高	68
本章小结	70
习题	72
第4章 三相交流电路	75
4.1 三相交流电源	75
4.2 三相负载的星形连接	77
4.3 三相负载的三角形连接	81
4.4 三相电路的电功率	83
本章小结	84

习题	85
第5章 动态电路的暂态分析	87
5.1 暂态过程的产生与换路定律	87
5.2 一阶电路的零输入响应	89
5.3 一阶电路的零状态响应	93
5.4 一阶电路的全响应	95
本章小结	97
习题	97
第6章 磁路与铁芯线圈电路	101
6.1 磁路的基本知识	101
6.2 交流铁芯线圈电路	104
6.3 变压器	106
6.4 电磁铁	119
本章小结	122
习题	123
第7章 电气测量技术	125
7.1 电工仪表的一般知识	125
7.2 常用指示仪表的基本结构和工作原理	127
7.3 电流、电压和电功率的测量	131
7.4 万用表	136
7.5 兆欧表	140
本章小结	142
习题	142
第8章 安全用电	144
8.1 触电	144
8.2 防止触电的保护措施	146
8.3 电气防火和防爆	149
8.4 静电防护	151
8.5 安全用电注意事项和触电急救常识	154
本章小结	155
第9章 电路仿真 PSPICE8.0 软件及应用	156
9.1 PSPICE 软件的功能与构成	156
9.2 PSPICE 电路分析功能的使用方法	157
9.3 应用 PSPICE 分析电路实例	162
本章小结	166
习题	166
参考文献	169

电路的基本概念与基本定律

本章从电路模型入手,介绍了电路的组成、电路的主要物理量、电路的状态,电源的两种模型及其相互间的等效变换,阐述了电路的基本定律——基尔霍夫定律。这些内容都是分析与计算电路的基础。通过本章的学习,可以为以后分析复杂电路打下基础。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路的组成

电路是电流的通路。它是为了满足某种需要,将一些电气设备或元器件按照一定的方式连接而成的。

电路的结构、组成方式是多种多样的。但总的来说,一般由三个部分组成,即电源、负载和中间环节。图1-1所示的是一个最简单的实际电路。它由电池、开关、灯泡和连接导线组成。

电源是供应电能的设备,是将非电能转换成电能的装置。图1-1中的电池就是将化学能转化为电能,给灯泡提供电能。又如,发电厂内发电机可以把光能、水能、热能等转换为电能,是常用的电源。电源是电路中能量的来源,是推动电流的源泉。

负载是取用电能的设备,它将电能转换为非电能,如图1-1中的灯泡将电能转化成为光能和热能。负载是电路中的受电器。

连接电源和负载的部分是中间环节,包括导线、开关等一些装置和设备。其作用是传递和控制电能,以构成完整的电流通路。

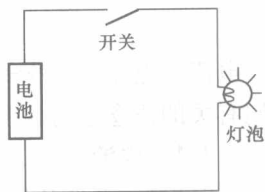


图1-1 最简单实际电路

1.1.2 电路的功能和分类

现代工程技术领域中的电路种类繁多,形式和结构各不相同。但就其功能而言,电路可分为电力电路和信号电路两大类。

实现能量的转换、传输和分配的电路称为输电电路。电力系统就是典型的例子。发电机将其他形式的能量转换为电能,经输电线路传输、分配到各个用户,用户把电能转换为光能、热能、机械能等形式加以利用。这类电路中电压高、电流大、功率高,俗称“强电”系统,该系统的要求是尽可能地减少能量损耗以提高效率。

以传递和处理信号为目的的电路称为信号电路。常见的如收音机或电视机等。收音机接收到微弱的电磁波信号后,经放大、混频、解调等处理电路,最终将信号传递给扬声器,还原为原始声音信号。与输电电路相比,信号电路中的功率和电流小、电压低,因此俗称“弱电”系统。该类系统要求信号传递的质量高,如不失真、灵敏、准确等。

1.1.3 电路模型

实际电路是由一些起不同作用的实际元器件组成。这些实际电气元器件品种多样,且工作过程中表现出的电磁性能往往比较复杂,这就给电路分析带来许多困难。为了使问题得以简

化,以便讨论电路的普遍规律,通常是将实际元器件理想化(或称模型化),即在一定条件下,只考虑其主要的电磁性质,忽略它的次要因素,把它看作理想电路元器件。如图1-1中,灯泡不但发热消耗电能具有电阻性,而且在其周围还会产生一定的磁场具有电感性。但是灯泡的电感很微小,可以忽略不计,因而可以用电阻元器件代替灯泡。再如,用内电阻 R_s 和电动势 E 的串联来代替电池等。图1-2是我们在电工学中经常用到的几种理想元器件的电路符号。

用一些理想电路元器件组成的电路,就是实际电路的电路模型(理想电路)。图1-1的电路模型如图1-3所示。无论是简单的,还是复杂的实际电路,都可以通过电路模型充分地描述。因此,电路模型的研究可以达到分析实际电路的目的。

本教材电路分析中所涉及的电路都是电路模型。

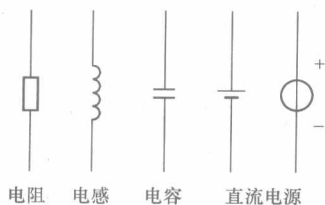


图1-2 理想元器件的电路符号

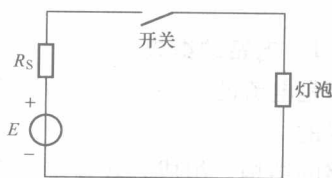


图1-3 图1-1的电路模型

1.2 电路的主要物理量

电流、电压、功率等物理量是电路分析中经常用到的物理量。本节将对这些物理量以及它们有关的概念进行说明。

1.2.1 电流

1.2.1.1 电流的概念

电流是由电荷有规律的定向运动形成的。电流是矢量。

习惯上规定电流的方向是正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向。

电流的数值(大小)等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量,用符号 i 表示。其定义式为

$$i = dq/dt \quad (1-1)$$

式中: dq 为在 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。

式(1-1)表示,电流是随时间而变的。数值和方向随着时间进行周期性变化的电流,称为交流电流,用英文小写字母 i 表示。

如果电流不随时间而变化,即 $dq/dt = \text{常数}$,则称这种电流为直流电流,简称直流。直流电流用英文大写字母 I 表示。于是,直流电流的定义式改写为

$$I = q/t \quad (1-2)$$

式中: q 为在 t 时间内通过导体横截面的电荷量。

在国际单位制(SI)中,电流的单位名称是安[培]、符号为A。电流的常用单位还有mA(毫安)和 μA (微安)。它们之间的换算关系是

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

1.2.1.2 电流的参考方向

电流的实际方向是客观存在的。但在直流电路分析中，特别是分析复杂电路时，电流的实际方向往往难以判断。特别是对于交流电流，其方向随时间而变，是无法标出它的实际方向的。为此，引入了“参考方向”这一概念。

参考方向是人为的任意选定的一个方向，即在分析电路时，可任意选定一个方向作为电流的参考方向，在电路图中用箭头表示。当然，参考方向并不一定与电流的实际方向一致。如果实际方向与参考方向一致，则电流为正值；反之，当电流的实际方向与参考方向相反时，电流为负值。电流的参考方向与实际方向如图1-4(a)、(b)所示。这样，电流就是一个代数量了，可以根据电流的正、负值来确定电流的实际方向。

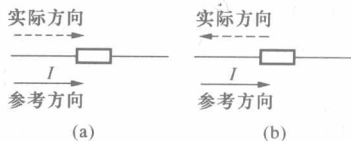


图1-4 电流的参考方向与实际方向
(a) $I > 0$; (b) $I < 0$

1.2.2 电压和电动势

1.2.2.1 电压的概念

图1-5中，A、B是电源的两个电极，A带正电叫正极，B带负电称负极，A、B间产生由A指向B的电场。若将A、B用导体连接起来，则在电场力的作用下，正电荷会沿导体从A移到B（实际是导体中的自由电子在电场作用下由B移到A，两者等效），形成电流，这就是电场力对电荷做了功。为了衡量电场力对电荷做功的能力，引入了“电压”这一物理量。A、B两点间的电压定义为：电场力把单位正电荷从A点移动到B点所做的功，用符号 u_{AB} 表示。其定义式为

$$u_{AB} = dW_{AB}/dq \quad (1-3)$$

式中： dW_{AB} 表示电场力将 dq 的正电荷从A点移动到B点所做的功。

随时间而变的电压称为交流电压，用英文小写字母 u 表示。不随时间而变的电压称为直流电压，用英文大写字母 U 表示。

在国际单位制中，电压的单位名称是伏[特]、符号为V。常用的电压单位还有kV（千伏），mV（毫伏）。它们之间的换算关系是

$$1V = 10^{-3}kV = 10^3mV$$

1.2.2.2 电动势的概念

图1-5中，在电场力的作用下，随着正电荷从A点移到了B点，会使电极A的正电荷逐渐减少，A、B间电场减弱，直至消失。这样，导体中电流也会减小到等于零。为了维持电流的流通，必须有另外一种力，能够克服电场力做功，使运动到电极B的正电荷流向电极A，以

保证A、B间电场恒定。这种力称为电源力。电动势是描述电源力对正电荷做功能力的物理量，定义为电源力把单位正电荷从电源负极移到正极所做的功，用符号 e 表示。其定义式为

$$e = dW_{BA}/dq \quad (1-4)$$

式中： dW_{BA} 为电源力将 dq 的正电荷从B点移动到A点所做的功。

电动势的单位与电压单位相同。

根据定义规定，电压的方向是从正极性（高电位端）指向负极性（低电位端），而电动势的方向是从负极性（低电位

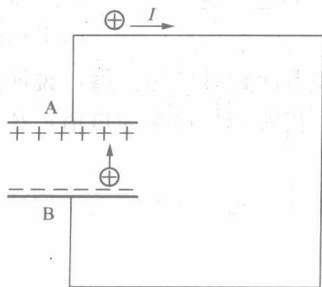


图1-5 电荷的移动回路

端)指向正极性(高电位端),两者方向相反。

若忽略电源内部的其他能量转换,根据能量守恒定律,电源的电压在数值上等于电动势。

1.2.2.3 电压、电动势的参考方向

与电流相似,在电路分析时,可以给电压、电动势规定参考方向。其参考方向有三种表示方式:

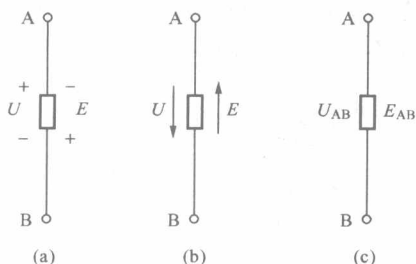


图 1-6 电压和电动势的参考方向

(a) 采用参考极性表示; (b) 采用箭头表示;
(c) 采用双下标表示

(1) 采用参考极性表示。如图 1-6 (a) 所示,在电路元器件上标出正 (+)、负 (-) 极性。

(2) 采用箭头表示。如图 1-6 (b) 所示,箭头方向为参考方向。

(3) 采用双下标表示。在图 1-6 (c) 中, U_{AB} 表示参考方向是由 A 指向 B, E_{AB} 表示参考方向是由 B 指向 A。

在规定了参考方向后,电压和电动势成为代数量。参考方向与实际方向一致则取为正,有 $U > 0$; 参考方向与实际方向相反则取负值,有 $U < 0$ 。

1.2.3 电能和电功率

1.2.3.1 功率

图 1-5 中,正电荷在电场力的作用下,从高电位移至低电位使电能减少;正电荷在电源力的作用下从低电位移回高电位。在这些电能转换中,电能的转换速率称为电功率,简称功率,用符号 p 表示。其定义式为

$$p = dw/dt \quad (1-5)$$

式中: dw 为 dt 时间内转换的电能量。

功率 p 也可以表示为

$$p = dw/dq \times dq/dt = ui \quad (1-6)$$

直流时有

$$P = UI \quad (1-7)$$

在国际单位制中,功率的单位名称是瓦 [特]、符号为 W。功率常用的单位还有 kW (千瓦), mW (毫瓦) 等。它们之间的换算关系是

$$1W = 10^{-3}kW = 10^3mW$$

在考虑电压、电流的参考方向时,功率也是代数量。式 (1-6)、式 (1-7) 是在电压与电流的参考方向一致时的表达式。当电压与电流的参考方向不一致时,表达式应加 ‘-’ 号,即

$$p = -ui \quad \text{或} \quad P = -UI \quad (1-8)$$

无论电压与电流的参考方向是否一致,代入相应的公式后:如果计算结果为正值,说明元器件实际消耗(吸收)功率,在电路中为负载或起负载的作用;若得到的功率为负值,说明元器件实际发出(产生)功率,在电路中为电源或起电源的作用。

当然,根据能量守恒定律,电路中元器件发出的功率之和应该等于元器件吸收的功率之和,即整个电路的功率是平衡的。

1.2.3.2 电能

在时间 t 内,电路转换的电能为

$$w = \int_0^t p dt \quad (1-9)$$

直流时有

$$W = Pt \quad (1-10)$$

在国际单位制中,电能的单位名称是焦[耳]、符号为J。另外,工程上常用“千瓦·时(度)”作为电能的单位。它等于功率为1kW的用电设备在1h(1小时)内消耗的电能,即

$$1 \text{ 千瓦} \cdot \text{时}(1 \text{ 度}) = 1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

例 1-1 图 1-7 所示是某电路中的一部分,已知 $U_1=5\text{V}$, $U_2=3\text{V}$, $I=-2\text{A}$ 。试求:

(1) 元器件 1、2 的功率。说明它们是消耗功率还是发出功率,起电源作用还是负载作用。

(2) U_3 。元器件 3 消耗功率为 14W。

(3) A、B 端的总功率及在 1h 内消耗多少电能。

解 (1) 元器件 1 的电压与电流参考方向不一致,故

$$P_1 = -U_1 I = -5 \times (-2) = 10 \text{ W}$$

$P_1 > 0$, 元器件 1 消耗功率,起负载作用。

元器件 2 的电压与电流参考方向一致,故

$$P_2 = U_2 I = 3 \times (-2) = -6 \text{ W}$$

$P_2 < 0$, 元器件 2 发出功率,起电源作用。

(2) 元器件 3 的电压与电流参考方向一致,且消耗功率 ($P > 0$),有

$$P_3 = U_3 I = 14 \text{ W}$$

$$U_3 = P/I = 14/(-2) = -7 \text{ V}$$

(3) 总功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 10 - 6 + 14 = 18 \text{ W}$$

$$W = Pt = 18 \times 10^{-3} \text{ kW} \times 1 \text{ h} = 0.018 \text{ kWh}$$

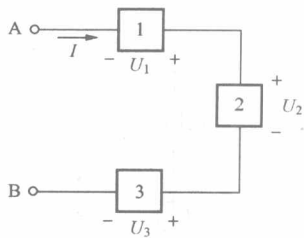
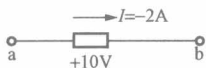


图 1-7 例 1-1 图

思考题:

1-2-1 图 1-8 中所示参量方向为参考方向,试指出电流、电压的实际方向。



1-2-2 计算图 1-8 中各元器件的功率,并说明功率的性质。

1-2-3 某一实验室有 100W、220V 的电烙铁 20 把,每天使用

图 1-8 题 1-2-1 图 4h。试问 1 个月(按 30 天算)用电多少千瓦·时?

1.3 电路的三种状态

根据负载的不同情况,电路可分为空载、短路和负载三种工作状态。现以图 1-8 最简单的直流电路为例进行讨论。在图中, U_s 、 U 和 R_s 分别为电源的源电压、端电压和内阻, R_L 为负载, U_L 为负载的端电压。

1.3.1 空载状态

空载状态又称为开路状态。如图 1-9 所示,当开关 S_1 、 S_2 均断开时,电路就处于开路状态。这时,电源和负载不能构成通路,负载上电流为零。对电源来说,外电路(除电源以外的电路)的电阻等于无穷大。此时的电源端电压称为开路电压,用 U_∞ 表示。

电路处于开路状态时,有如下特点:

- (1) 电路中电流为零,即 $I=0$ 。
- (2) $I=0$, 内阻 R_S 上的电压降为零,因而开路电压等于电源的源电压,有关系式 $U_{\infty}=U_S$ 。
- (3) 开路时,负载与电源断开,负载两端电压为零, $U_o=0$ 。

1.3.2 短路状态

由于某种原因,电源两端直接连接在一起的情况称为短路状态。如图 1-9 中开关 S_1 、 S_2 闭合即为短路状态,如图 1-10 所示。此时外电路的电阻近似为零,这时电流不再流过负载,而是经过短路线回到电源负极。

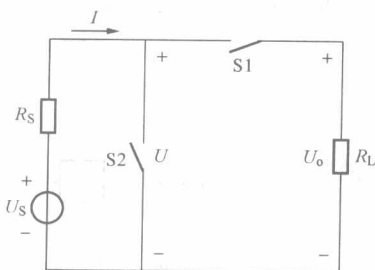


图 1-9 最简单的直流电路

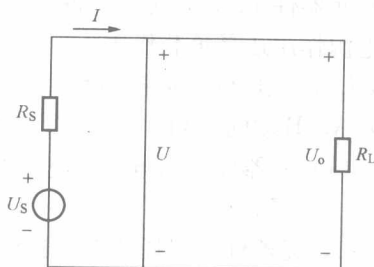


图 1-10 电路的短路状态

很显然,电路中电源和负载都被短路,端电压都为零,即 $U=U_o=0$ 。

短路时的电流称为短路电流 I_S ,由图 1-10 可知 $I=I_S=U_S/R_S$ 。

短路时外电路电阻为零,电源内阻一般又很小,因此短路电流很大。该电流流过电源,会造成发热使电源损坏,甚至发热严重引起火灾。因而在实际工作中,短路是一种严重事故。工作人员应该经常检查电气设备和线路的工作情况,尽量防止由于短路而引起的事故发生。此外,通常还在电路中接入熔断器等短路保护电器,以便在短路发生时能迅速切断故障电路,达到安全的目的。

例 1-2 图 1-9 电路中,进行开路实验时,测得 $U=9V$,进行短路实验时,测得 $I_S=10A$ 。求 U_S 及 R_S 的值。

解 电源开路时

$$U_S = U = 9V$$

短路状态时 $I_S=U_S/R_S$,故电源内阻

$$R_S = U_S/I_S = 0.9\Omega$$

本例是求电源电压和内阻的一种实验方法。

1.3.3 负载状态

将图 1-9 中开关 S_2 打开, S_1 闭合,就是电路的负载工作状态。如图 1-11 所示。此时电路中的电流为

$$I = U_S/(R_S + R) \quad (1-11)$$

一般,电源的电压 U_S 和内阻 R_S 是固定的,电流 I 的大小由负载 R_L 决定。

电源和负载两端的电压都为

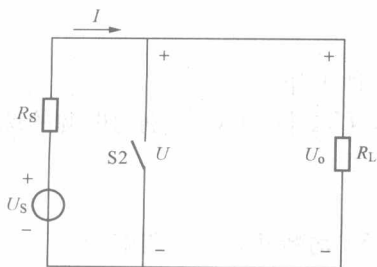


图 1-11 电路的负载工作状态

$$U = U_o = U_s - IR_s \quad (1-12)$$

电路在三种状态下的电流、电压及功率如表 1-1 所示。

表 1-1 电路三种状态下的电压、电流及功率

电路状态	电 流	电 压	电源消耗功率	负载功率
空 载	$I=0$	$U=U_s$	$P_E=0$	$P_R=0$
短 路	$I=I_s=U_s/R_s$	$U=0$	$P_E=I_s^2 R_s$	$P_R=0$
负 载	$I=U_s/(R_s+R)$	$U=U_s-IR_s$	$P_E=UI$	$P_R=UI$

1.3.4 额定值

在实际工作中,生产厂家给每一个产品都规定了电压、电流和功率等参数的最大使用限额,以保证产品可以可靠的、经济的长时间运行,这个使用限额称为额定值。通常标在产品的铭牌或说明书上。常用的三个额定值有额定电压 U_N 、额定电流 I_N 和额定功率 P_N 。如灯泡上标有额定值 220V/60W,告知使用者灯泡在 220V 电压下可以正常工作,其消耗的功率是 60W。

产品的额定值是使用者使用该产品的依据。实际工作时,设备或元器件的实际电压、电流等值不一定等于额定值。这就要求使用者根据额定值合理地使用电气设备或元器件,这样才能安全、可靠的使用,并使设备最大限度地发挥作用。否则,如果设备在高于额定值的状态下工作,会由于发热,使设备损伤,影响寿命,甚至烧毁;而在低于额定值的状态下运行时,会使设备不能正常工作或不能充分发挥作用,甚至损坏设备。因此,应尽可能地使设备或元器件工作在额定状态下。

例 1-3 某直流电源的额定参数为 $P_N=100\text{W}$ 、 $U_N=25\text{V}$ 、内阻 $R_s=0.25\Omega$ 。试求

(1) 额定电流 I_N 及额定工作时的负载电阻 R_N 。

(2) 短路电流 I_s 。

解 (1) 根据 P_N 、 U_N 可求出其他额定值。

额定电流 $I_N = P_N/U_N = 100/25 = 4\text{A}$

负载电阻 $R_N = U_N/I_N = 25/4 = 6.25\Omega$

(2) 先求出该电源的源电压

$$U_s = I_N(R_s + R_N) = 4(0.25 + 6.25) = 26\text{V}$$

则短路电流 $I_s = U_s/R_s = 26/0.25 = 104\text{A}$

短路电流是额定电流的 26 倍,因此发生短路后,电源很容易被烧毁。因此应尽量避免短路发生。

思考题:

1-3-1 什么叫开路状态? 什么叫短路状态?

1-3-2 电气设备额定值的含义是什么?

1.4 电压源与电流源的等效变换

1.4.1 电压源

1.4.1.1 理想电压源

理想电压源是一个理想电路元器件,其端电压总保持恒定值或是一定的时间函数,而与

输出电流无关。如大家熟悉的电池，若它的内阻为零，那么不论流过的电流为何值，电池的电压恒等于电池的电动势，这时电池就是一个理想电压源。

理想电压源有两个特点：

(1) 电压是一个定值或为一定的时间函数，与流过的电流无关。

(2) 流过的电流由电压源和与之相连的外电路共同决定。如对一个 10V 的直流电压源：如果接 2Ω 的负载，则输出的电流为 $10/2=5\text{A}$ ；如果接 5Ω 的负载，则输出的电流为 $10/5=2\text{A}$ 。

理想直流电压源模型如图 1-12 (a) 所示。理想直流电压源的外特性曲线（表征端电压与输出电流之间的关系）如图 1-12 (b) 所示，是一条与横轴平行的直线，表明理想直流电压源的电压恒等于 U_s ，与电流大小无关。

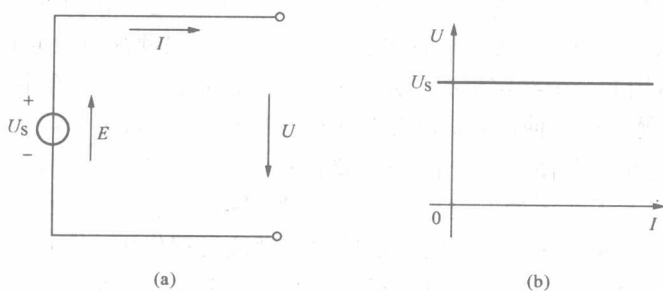


图 1-12 理想直流电压源

(a) 电路图；(b) 外特性曲线

1.4.1.2 实际电压源

理想电压源实际上是不存在的。任意一个实际的电压源，在能量转换过程中内部都存在功率损耗，即存在内阻。因此实际电压源可用理想电压源串联内阻的形式作为电路模型，如图 1-13 (a) 虚线框内所示， U_s 与 R_s 的串联为实际电压源，其端电压为 U ，输出电流为 I ， R_L 为负载电阻。

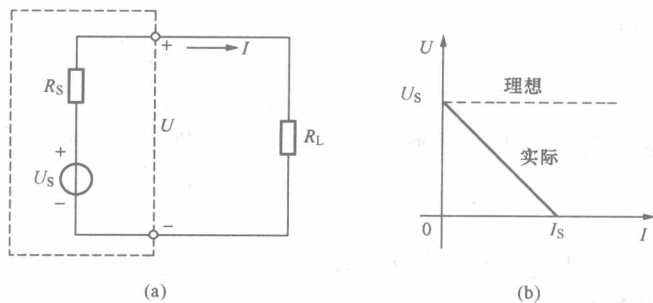


图 1-13 实际直流电压源

(a) 模型；(b) 外特性曲线

由图 1-13 (a) 可知，电压源有

$$U = U_s - R_s I \quad (1-13)$$

当电压源开路时， $I=0$ ， $U=U_s$ ；当电压源短路时， $U=0$ ， $I=I_s=U_s/R_s$ 。

由此,得到图 1-13 (b) 电压源外特性曲线。曲线表明,实际电压源的端电压不再恒定,而与输出电流有关。当输出电流增大时,内阻损耗增大,端电压会随之下降。我们希望电压源内阻越小越好。内阻越小,则直线越平,越接近于理想电压源。当一个电源的内阻远小于负载,即 $R_S \ll R_L$ 时,就认为该电源为理想电压源。常用的稳压电源在工作时输出电压基本不随外电路变化,可近似看作是理想电压源。

1.4.2 电流源

1.4.2.1 理想电流源

理想电流源也是一个理想电路元器件。它向外输出的电流为恒定值或为给定的时间函数,而与端电压无关。

理想电流源有两个基本特性:

(1) 理想电流源向外输出的电流为恒定值或为一定的时间函数,而与端电压无关。

(2) 它的电压由电流源和与之相连的外电路共同决定。

理想直流电流源模型和外特性曲线如图 1-14 (a)、(b) 所示。

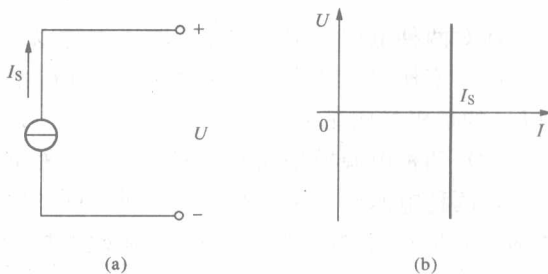


图 1-14 理想直流电流源

(a) 模型; (b) 外特性曲线

1.4.2.2 实际电流源

实际上理想电流源也是不存在的。实际电流源的电流总有一部分在电源内部流动而不会全部输出,可以用理想电流源与内阻并联组合作为实际电流源的电路模型,如图 1-15 (a) 所示, I_S 与 R_S 的并联是实际电流源模型,其端电压为 U , I 为输出到外电路的电流, R_L 为负载电阻。

由图 1-15 (a) 可知,电流源输出电流 I 为

$$I = I_S - U/R_S \quad (1-14)$$

当电流源开路时, $I=0$, $U=I_S R_S$; 当电流源短路时, $U=0$, $I=I_S$ 。

由式 (1-14) 可做出电流源的外特性曲线如图 1-15 (b) 所示。曲线表明内阻 R_S 越大,直线越陡,越接近理想电流源。如果一个电源的内阻远大于负载电阻即 $R_S \gg R_L$ 时,就有 $I=I_S$,可以认为该电源是理想电流源。通常恒流电源、光电池等都近似看作为理想电流源。

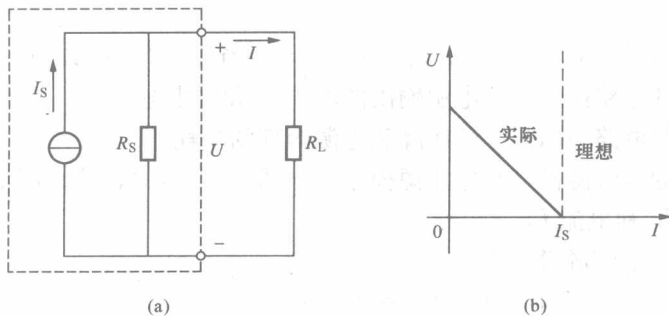


图 1-15 实际直流电流源

(a) 模型; (b) 外特性曲线

1.4.3 电压源与电流源的等效变换

电压源与电流源都是从实际电源中抽象出来的模型,即一个实际电源既可以用理想电压源与内阻串联的电压源模型表示,也可以用理想电流源并联内阻的电流源模型来表示。对外电路来说,这两种模型输出的电压和电流是相等的,是互等效的。当然,它们的等效必须满足一定的条件。

电压源模型中表达式 $U = U_s - R_s I$ 也可以转换为表达式 $I = U_s/R_s - U/R_s$,与电流源模型的输出电流 $I = I_s - U/R_s$ 相比较可知,电压源与电流源它们之间的等效变换条件是内阻 R_s 相等,且

$$I_s = U_s/R_s \quad (1-15)$$

在对两种电源模型等效变换时应注意以下几点:

(1) 变换时,两个电路模型中 U_s 和 I_s 的参考方向如图 1-16 所示,即 I_s 的参考方向是由 U_s 的负极指向正极。

(2) 两种电源模型间的互相变换,对外部是等效的,对电源内部是不等效的。对外电路而言,两种电源模型可以给负载提供相同的输出端电压 U 和输出电流 I ,而两个电源内部的功率一般是不同的。例如:当两电源模型均开路时 ($I=0$),电压源的内部电流为零,电源内阻不消耗功率;而电流源的内部仍有电流 I_s ,内阻上有功率消耗。

(3) 理想电压源和理想电流源之间不能进行等效变换。

(4) 两种电源模型的等效变换,不仅仅局限于内阻 R_s ,可推广至任意电阻。即一个理想电压源与一个电阻串联的电路组合,都可以变换为一个理想电流源与该电阻并联的电路组合,反之亦然。该电阻不一定是电源内阻。互相变换的条件是电阻不变,且

$$I_s = U_s/R \quad \text{或} \quad U_s = I_s R \quad (1-16)$$

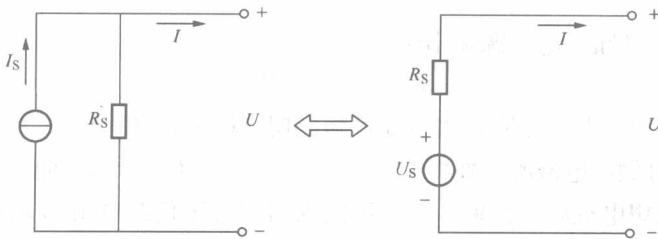


图 1-16 两种电源模型的等效变换

例 1-4 有一电源,其 $U_s=9\text{V}$ 、内阻 $R_s=1\Omega$ 。当负载 $R_L=8\Omega$ 时:

(1) 分别用两种电路模型计算电源输出的电压 U 和输出电流 I 。

(2) 分别计算两电路中内阻上的压降和电源内部的损耗。

解 画出电源的电流源模型和电压源模型,如图 1-17 (a)、(b) 所示。

(1) 计算电压 U 和电流 I 。

在图 1-17 (a) 电流源模型中

$$I_s = U_s/R_s = 9/1 = 9\text{A}$$

$$I = \frac{R_s}{R_s + R_L} I_s = \frac{1}{1+8} \times 9 = 1\text{A}$$

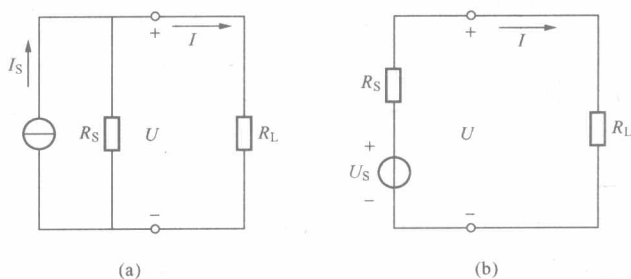


图 1-17 例 1-4 图

(a) 电流源模型; (b) 电压源模型

$$U = IR_L = 1 \times 8 = 8\text{V}$$

在图 1-17 (b) 电压源模型中

$$U = U_S \frac{R_L}{R_L + R_S} = 9 \frac{8}{9} = 8\text{V}$$

$$I = U/R_L = 1\text{A}$$

(2) 计算内阻上压降和电源内部的损耗。

在图 1-17 (a) 电流源模型中: 内阻压降就等于电流源输出电压 8V, 则

$$P = U^2/R = 8^2/1 = 64\text{W}$$

在图 1-17 (b) 电压源模型中

$$IR_S = 1 \times 1 = 1\text{V}$$

$$P = I^2 R_S = 1^2 \times 1 = 1\text{W}$$

由第 (1) 步计算可见, 两种电路模型输出的电压和电流是相等的, 因此对外电路来说, 两种模型互相之间是可以等效的; 比较第 (2) 步的计算值, 显然两种电源模型内部是不等效的。

例 1-5 求图 1-18 (a) 中的电流 I 。已知 $U_{S1} = U_{S2} = 6\text{V}$, $I_{S1} = 6\text{A}$, $R_1 = R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 1\Omega$, $R_4 = 13\Omega$ 。

解 利用电源的等效变换, 将图 1-18 (a) 中的电压源 U_{S1} 变换为电流源, 如图 1-18 (b) 所示。

图 1-18 (b) 中:

$$I_{S2} = U_{S1}/R_1 = 3\text{A}$$

将两个电流源合并成一个电流源, 如图 1-18 (c) 所示。则有

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} = 3 + 6 = 9\text{A}$$

$$R_S = R_1 // R_2 = 1\Omega$$

再将电流源 I_S 等效变换为电压源, 如图 1-18 (d) 所示, 则有

$$U_{S3} = I_S R_S = 9 \times 1 = 9\text{V}$$

$$I = (U_{S2} + U_{S3}) / (R_S + R_3 + R_4)$$

$$= (9 + 6) / (1 + 1 + 13) = 1\text{A}$$