

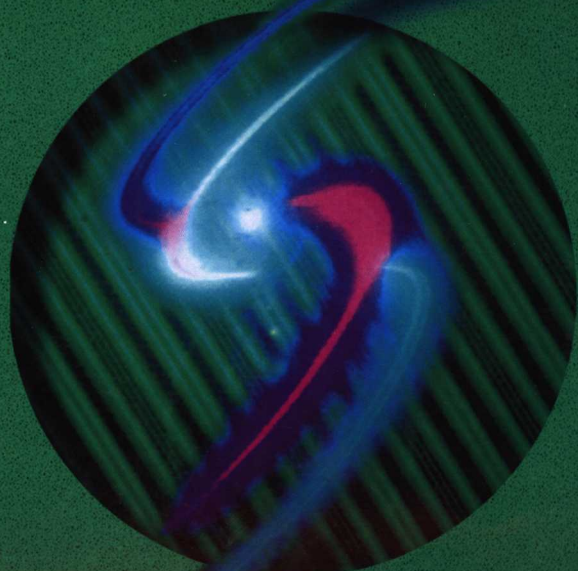


国家工科教学基地
21世纪电工电子系列教材

电路与磁路

(第二版)

主编 艾 武 李 承
编者 艾 武 李 承
周茂华 周鑫霞



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

国家工科教学基地
21 世纪电工电子系列教材

电路与磁路

(第二版)

主	编	艾	武	李	承
编	者	艾	武	李	承
		周	茂	周	鑫
		华		霞	

华中科技大学出版社

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

电路与磁路(第二版)/艾武 李承 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2002 年 9 月

ISBN 978-7-5609-1909-6

I. 电… II. ①艾… ②李… ③周… ④周… III. ①电路-教材 ②磁路-教材 IV. TM1

电路与磁路(第二版)

艾武 李承 主编

责任编辑:李 德

封面设计:潘 群

责任校对:蔡晓璐

责任监印:张正林

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:华中科技大学出版社照排室

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787mm×960mm 1/16

印张:18.5

字数:340 000

版次:2002 年 9 月第 2 版

印次:2007 年 10 月第 6 次印刷

定价:22.00 元

ISBN 978-7-5609-1909-6/TM·76

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书的主要内容有:电路的基本概念和定律、电路中等效的概念及其应用、线性网络的分析方法、线性网络定理、动态电路的分析、正弦稳态电路分析、三相电路、耦合电路、非正弦周期电流电路的谐波分析、双口网络、磁路与变压器。

每章附有例题、习题和小结。

本书可作为高等工业学校机电、机械、计算机等类专业的电路与磁路课程教材,也可供有关专业工程技术人员参考。

修订版前言

根据电工学科发展的需要以及在本书使用过程中应广大教师和同学的要求,我们对本书中部分章节的内容做了相应的叙述和补充;对全书的单位做了统一的规范;对有关例题和习题做了一些必要的调整。

此次修订使得本书的内容更加完善并且更加贴近于工程技术的要求,以使本书符合 21 世纪教学发展的需要。参加本次修订版工作的人员有艾武、李承、周鑫霞。

由于作者水平有限,时间仓促,修订后仍难免有错误,敬请广大读者批评指正。

本书出版以来得到了广大读者的厚爱,在此书修订之际,作者向广大读者表示衷心的感谢。

作 者

2002 年 4 月于华工园

前 言

《电路与磁路》是为非电类专业的学生编写的教材。

本书具有以下几个特点:

1. 加深了电路理论方面的论述和电路分析方法的研究,使教学内容从机械类向电类靠近了一大步。
2. 保留了原《电工技术》中有关磁路部分的叙述,为学生学习电机、电器及控制等后续课程打下坚实的基础。
3. 力求叙述清晰,使内容更加精炼,可使学生在较少的学时内完成教学要求。

参加本书编写的同志有:艾武(第一、二、五章),李承(第四、六、七、八、九章),周茂华(第三、十章),周鑫霞(第十一章、全书审稿)。

由于编写时间仓促,加之编者水平有限,书中难免有欠妥之处,恳切希望读者批评指正。

编者
1998. 7

物理量及其主要单位

物理量	符号	单位	
电流	I	A	(kA, mA)
电压	U	V	(kV, mV)
电动势	E	V	
电功率	P	W	(kW, mW)
电阻	R	Ω	(k Ω , m Ω)
电阻率	ρ	$\Omega \cdot \text{m}$	
电导	G	S	
电荷量	Q	C	
电感	L	H	(mH, μH)
电容	C	F	(μF , nF, pF)
时间	t	s	(ms)
能量	W	J	(erg)
时间常数	τ	s	
角频率	ω	rad/s	(1/s)
相位	ψ	rad	($^{\circ}$)
相位差	φ	rad	($^{\circ}$)
有功功率	P	W	(kW)
无功功率	Q	var	(kvar)
视在功率	S	VA	(kV $\cdot$ A)
互感	M	H	(mH, μH)
阻尼系数	α	1/s	
磁动势	F	A	
磁场强度	H	A/m	(O $_e$)
磁导率	μ	H/m	
磁通	Φ	Wb	(M $_x$)
磁感应强度	B	T (1T=1Wb/m 2)	(G $_s$)
磁阻	R_m	A/Wb	
长度	l	m	(cm)
截面积	S	m 2	(cm 2 , mm 2)
电磁力	F	N	(dyn)

注：括号中是工程中常用到的非 SI 制单位。

目 录

第一章 电路的基本概念和定律	(1)
§ 1-1 电路模型	(1)
§ 1-2 电路的基本物理量	(3)
§ 1-3 理想电源	(8)
§ 1-4 电阻元件	(9)
§ 1-5 电容元件	(11)
§ 1-6 电感元件	(13)
§ 1-7 基尔霍夫定律	(16)
§ 1-8 受控源	(20)
小结	(22)
习题	(23)
第二章 电路中等效的概念及其应用	(27)
§ 2-1 电路中等效的概念	(27)
§ 2-2 电路元件的串联与并联	(29)
§ 2-3 实际电源模型及其等效互换	(38)
§ 2-4 电阻的 Y- Δ 等效变换	(43)
小结	(45)
习题	(46)
第三章 线性网络的分析方法	(49)
§ 3-1 支路电流法和支路电压法	(49)
§ 3-2 网孔分析法	(51)
§ 3-3 节点分析法	(54)
§ 3-4 网络拓扑的概念	(58)
§ 3-5 割集分析法	(59)
§ 3-6 电路的计算机辅助分析法	(63)
小结	(66)
习题	(67)
第四章 线性网络定理	(71)
§ 4-1 置换定理	(71)
§ 4-2 叠加定理	(73)

§ 4-3 戴维南定理与诺顿定理	(77)
§ 4-4 最大功率传输定理	(86)
§ 4-5 互易定理	(87)
§ 4-6 对偶原理与对偶关系	(91)
小结	(93)
习题	(94)
第五章 电路的动态分析	(99)
§ 5-1 电路动态响应的基本概念及换路定则	(99)
§ 5-2 一阶电路的零输入响应	(103)
§ 5-3 一阶电路的零状态响应	(108)
§ 5-4 一阶电路的全响应	(113)
§ 5-5 一阶电路分析的三要素法	(114)
§ 5-6 阶跃函数与一阶电路的阶跃响应	(120)
§ 5-7 RC 电路对矩形脉冲的响应	(122)
§ 5-8 冲激函数在电路分析中的应用	(127)
* § 5-9 电容电压及电感电流的跃变	(131)
§ 5-10 二阶电路的零输入响应	(135)
小结	(138)
习题	(139)
第六章 正弦稳态电路分析	(145)
§ 6-1 正弦量的概念	(145)
§ 6-2 正弦量的相量表示	(150)
§ 6-3 电阻、电感、电容元件上电压电流相量关系	(155)
§ 6-4 简单正弦稳态电路分析	(159)
§ 6-5 复杂正弦稳态电路分析	(167)
§ 6-6 正弦稳态电路的功率	(171)
§ 6-7 正弦稳态电路中的最大功率传输定理	(179)
§ 6-8 电路的频率特性	(180)
§ 6-9 正弦电路中的谐振	(183)
小结	(188)
习题	(189)
第七章 三相电路	(196)
§ 7-1 三相电源	(196)
§ 7-2 三相负载的星形联接	(199)
§ 7-3 三相负载的三角形联接	(202)

§ 7-4 三相电路的功率	(205)
小结	(207)
习题	(208)
第八章 耦合电路	(211)
§ 8-1 耦合电感及其伏安关系	(211)
§ 8-2 耦合电路的计算	(216)
§ 8-3 理想变压器	(223)
小结	(227)
习题	(227)
第九章 非正弦周期电流电路的谐波分析	(230)
§ 9-1 非正弦周期量的分解	(230)
§ 9-2 非正弦周期量的有效值与平均功率	(234)
§ 9-3 非正弦周期电流电路的谐波分析	(236)
小结	(240)
习题	(241)
第十章 双口网络	(244)
§ 10-1 双口网络的参数方程	(244)
§ 10-2 双口网络的联接	(248)
§ 10-3 双口网络的等效变换和等效电路	(252)
小结	(253)
习题	(253)
第十一章 磁路与变压器	(256)
§ 11-1 磁路的基本概念	(256)
§ 11-2 磁性材料的磁性能	(258)
§ 11-3 磁路的基本定律	(261)
§ 11-4 直流铁心线圈电路	(263)
§ 11-5 交流铁心线圈电路	(266)
§ 11-6 变压器	(272)
小结	(275)
习题	(275)
部分习题答案	(278)
参考文献	(286)

第一章 电路的基本概念和定律

§ 1-1 电路模型

电路是由若干个电气器件或设备、按一定的方式和规律组成的总体,它构成了电流的通路。随着电流的流通,电路实现了电能的传输、分配和转换;或者实现各种电信号的传递、处理和测量。

电路的基本组成为四部分:电源、负载、联接导线和开关。图 1-1 为一个最简单的电路。其中干电池是一种电源,它给电路提供电能;灯泡是一种负载,它将电能转换成为其它能量形式;联接导线构成了电源与负载间的电流通路;开关控制电路的接通和断开。

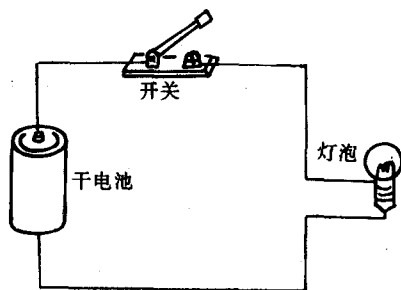


图 1-1 简单照明电路

实际的电气器件在应用时产生的电磁过程是比较复杂的,例如,一个实际电阻器除了消耗电能外,还会在电流流过时产生磁场,因而兼有电感的性质;而一个实际电容器或电感线圈除了分别具有储存电场能量或磁场能量的基本性质外,也有电能消耗。这样,讨论实际电气器件组成的电路会给分析电路带来困难,因此在对电路进行分析时,往往在一定条件下,对实际电气器件加以理想化,略去其次要性质,而用一足以表征实际器件主要性质的理想元件来表示,即先用理想元件建立在一定条件下反映实际电路基本特性的模型,使问题得到合理的简化,然后对该电路模型进行定量分析。

实际的电气器件虽然种类繁多,但可按它们所属的电磁性质和现象,用反映其主要性质的理想元件来表示它们,如电阻器、灯泡、电炉等,它们主要是消耗电能的,这样,可以用一个理想电阻元件来表示所有具有消耗电能特征的实际电气器件。同理,由于电容器主要是储存电场能量的,因此可用一个理想电容元件来表示具有储存电场能量的实际器件;而用一个理想电感元件来表示具有储存磁场能量的实际器件,如电感线圈等。因此,理想元件就是可精确定义并能表征实际器件的主要电磁性质的一种理想化元件。

任何一个实际电路都可抽象地由足以反映某电磁性能的理想元件所组成的电路来表征。这种由理想元件组成并反映实际电路主要性质的电路称为电路模型。图 1-1 中所示的实际电路的电路模型如图 1-2 所示。

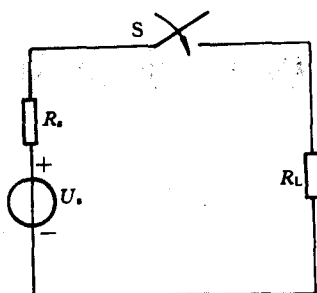


图 1-2 图 1-1 电路的模型图

电感器应用在频率较高的场合,它储存的电场能量也需要考虑,那么,这种情况下的实际电感器的模型用图 1-3 (d)来表示。

还要指出,实际电气器件的运用一般都和其电能的消耗现象及电磁能量的储存现象有关,它们交织在一起并发生在整个器件中。假定这些现象可以分别研究,并且这些电磁过程都分别可以集中在只表示一种基本电磁现象的元件内部进行,那么,这些元件称为集总参数元件,简称集总元件。每一种集总元件只表征一种基本电磁现象。如只表示消耗电能的理想电阻元件 R ,只表示储存电场能量的理想电容元件 C 和只表示储存磁场能量的理想电感元件 L ,它们都是集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路。

用集总电路来近似地描述实际电路是有条件的,它要求实际电路的尺寸(导线的长短)要远小于电路工作时电磁波的波长。如果不满足这个条件,实际电路便不能按集总参数电路来处理,而按分布参数电路处理。本书只讨论集总参数电路。

在本书中所涉及的元件一般均指理想元件,所讨论的电路均为集总电路模型。我们的主要任务是学习电路基本理论,探讨电路的基本定律和定理,并讨论电路的各种分析和计算方法。

需要说明的是,电路模型的建立与其实际电路的应用条件有关。同一个实际电气器件在不同的应用条件下,它对应的模型可以有不同的形式。一个实际电感器如图 1-3 (a)所示,如果频率较低,它所表现出主要物理特性是储存磁场能量,其模型可视为图 1-3 (b)所示的理想电感 L 。如果该实际电感器的线圈导线中所消耗的电能不容忽略,则其模型可用一个体现电能消耗的电阻 R 与储存磁场能量的电感 L 相串联来表示。如图 1-3 (c)所示。如果这个实际

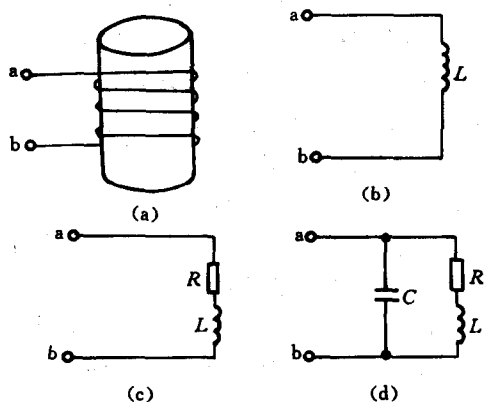


图 1-3 实际电感元件在不同应用条件下之模型

§ 1-2 电路的基本物理量

电路分析的基本任务在于弄清电路的基本物理量,使我们能够得出给定电路的性能。这些基本物理量中最常用的是电流、电压和功率。因此,首先弄懂并建立与这些物理量有关的基本概念是很重要的。

一、电流及其参考方向

电荷在电场力的作用下作定向运动形成电流,电流的大小用电流强度来衡量。电流强度的定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量,电流强度常简称为电流,用符号 i 表示。根据定义

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

如果电流的大小和方向不随时间变化,称为恒定电流,简称直流(DC),用大写字母 I 表示。如果电流的大小和方向随时间变化,称为交变电流,简称交流(AC),可用小写字母 i 表示。

在 SI 制中,电流的单位为“安培”(A),它是由电荷 q 的单位“库仑”(C)和时间单位“秒”(s)的导出单位。工程上,电流的单位除了“安培”以外,还经常用到“千安”(kA)、“毫安”(mA)、“微安”(μA)等。

在实际电路中,电流的真实方向往往难以在电路图中确定。比如在一个多元件的直流电路中就难以事先判断流过每个元件电流的真实方向。为了解决这个问题,我们引入了参考方向这一概念。所谓参考方向就是任意选定的一个方向,并在电路图中用箭头表示之。如图 1-4 所示。



图 1-4 电流的参考方向

我们规定:如果电流的真实方向与参考方向一致,则电流为正值;如果两者相反,则电流为负值。在图 1-4 中,若电流的真实方向从 a 到 b ,与参考方向一致,则电流为正值;若电流的真实方向是由 b 到 a ,则电流为负值。今后在电路图中所标的电流方向都是参考方向。在分析电路时,我们可事先任意选定假设的电流参考方向,并以此假定的参考方向为依据进行电路分析和计算。若最后所得结果为正值,则表明电流的真实方向与参考方向相同;若结果为负值,则表明电流的真实方向与参考方向相反。因此,参考方向又称假定正方向。

需要指出,实际中电流可分为传导电流、位移电流和运流电流。而在电路理论中我们不再作上述划分,把电路中流动的各种电流均统称为电流。

二、电压及其参考方向

将单位正电荷从电路中的这一点移至电路中另一点,电场力所作功的大小称为该两

点间的电压,用符号 u 表示。根据定义

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-2)$$

电压的方向规定为从高电位指向低电位,即电位降的方向。

在图 1-5 所示电路中,如果正电荷由 a 点移至 b 点而失去能量,则 a 点为高电位,用符号“+”表示;b 点为低电位,用符号“-”表示;或用 a 指向 b 的箭头表示,其 ab 两点间的电压可用带下脚的字母 u_{ab} 表示。

如果电压的大小和极性都不随时间变化,就称为恒定电压或直流电压(DV),用大写字母 U 表示;如果电压的大小和极性(方向)都随时间而变化,则称为交变电压或称交流电压(AV),可用小写字母 u 表示。

在 SI 制中,电压的单位是“伏特”,简称“伏”(V),它是由功的单位“焦耳”(J)和电荷的单位“库仑”(C)导出的。同样,工程上除了 V 以外,还常用到“千伏”(kV)、“毫伏”(mV)等单位。

电压的参考方向取为假定电位降低方向,即由高电位指向低电位。在电路图中,用箭头或“+”、“-”号标出,如图 1-5 (a),(b)所示。

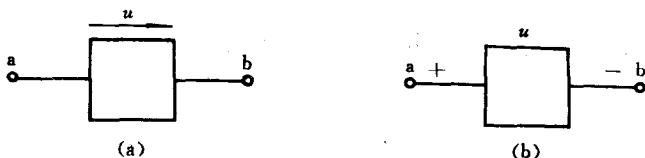


图 1-5 电压的参考方向

电压的参考方向是可以任意选定的,它不一定是电压的真实方向。当参考方向选定后,如果电压的实际方向与参考方向一致,则电压为正值;如果电压的实际方向与参考方向相反,则为负值。若对电路经计算得到电压 u_{ab} 为正值,说明 a 点电位实际比 b 点电位高;若 u_{ab} 为负值,则说明 a 点电位实际比 b 点低。因此,电压参考方向又称为假定电位降低方向。对于电路中相等电位的点,由于相互之间电压为零,故等电位点可以短接。

由于电流和电压均为代数量,因而都有参考方向的问题。电路中电流和电压数值上的正负与参考方向密切相关,参考方向设定的不同,计算结果将差一负号。显然,在电路图中未标示参考方向的情况下,讨论电流和电压的正负是毫无意义的。另一方面,由于电流和电压的参考方向均可以任意选取,所以,同一元件上电压和电流参考方向的选取有两种可能。当它们取向一致时,称为关联参考方向,如图 1-6(a)所示;而两者取向相反时,则称为非关联参考方向,如图 1-6(b)所示。

三、电功率

在电流和电压采用关联的参考方向时,如图 1-6(a)所示,根据电流和电压的定义,有

$$dq = idt \quad \text{和} \quad dw = udq$$

于是得

$$dw = uidt \quad (1-3)$$

这就是此电路 dt 时间内从电源中所吸取的电能。

在单位时间内此电路所吸取的电能,即电功率为

$$p = dw/dt = ui \quad (1-4)$$

在 SI 制中功率的单位是“瓦特”,简称“瓦”(W)。此外,工程上还用到“千瓦”(kW),“毫瓦”(mW)等单位。

对直流而言,功率、电压和电流均用大写字母表示,即

$$P = UI \quad (1-5)$$

式(1-5)说明,当电流和电压为关联参考方向时,电路功率等于该电路的电压和电流的乘积。

必须注意,在计算电路功率时,若 U 、 I 为关联参考方向,则 $P = UI$ 。若 U 、 I 为非关联参考方向,则 $P = -UI$ 。当求得功率为正值时,表明此电路系吸取功率;倘若计算所得功率为负值,表明此电路系产生功率的,即

$$P > 0 \quad (\text{吸取})$$

$$P < 0 \quad (\text{产生})$$

例 1-1 计算图 1-7 所示各元件吸取或产生的功率。

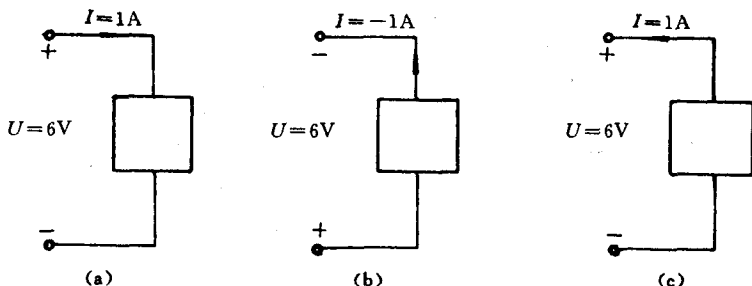


图 1-7 例 1-2 的电路

解: 图 1-7(a)、(b) 电路中 U 、 I 的参考方向取向一致,即 U 、 I 为关联参考方向,则

$$P = UI = 6V \times 1A = 6W \quad (\text{吸取})$$

$$P = UI = 6V \times (-1)A = -6W \quad (\text{产生})$$

由于图 1-7(c) 电路中 U 、 I 的参考方向取向相反,即 U 、 I 为非关联参考方向,则在表达式前冠一负号,即

$$P = -UI = -6 \times 1W = -6W \quad (\text{产生})$$

四、电位

在前面的讨论中,只讨论了电位的高低问题,实际上在电路分析中,有时还要求出某点电位的具体数值。这时,必须选定电路中某一点作为参考点,并用符号“ $\perp$ ”在电路图上标出,常称为接地,但是它并不一定真正与大地相连。通常设参考点电位为0。电路中某点的电位定义为电场力将单位正电荷从此点移到参考点所做的功,即等于该点与参考点之间的电压。因为电位就是电压,所以,电位与电压有相同的单位。电位也有正、负之分,当电路中某点的电位大于0时,说明此点电位比参考点电位高,当电位小于0时,说明此点电位比参考点电位低。参考点一经选定,电路各点电位的计算及测量均以该点为准。因此,当电路没有选定参考点时,讨论某点电位的正负是没有意义的。

例 1-2 电路如图 1-8 所示,已知 $E = 10V$, $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = 6\Omega$ 。分别选定 a、b、c 为参考点,试求电路中 a、b、c 点的电位 U_a 、 U_b 、 U_c 及电压 U_{ab} 和 U_{bc} 。

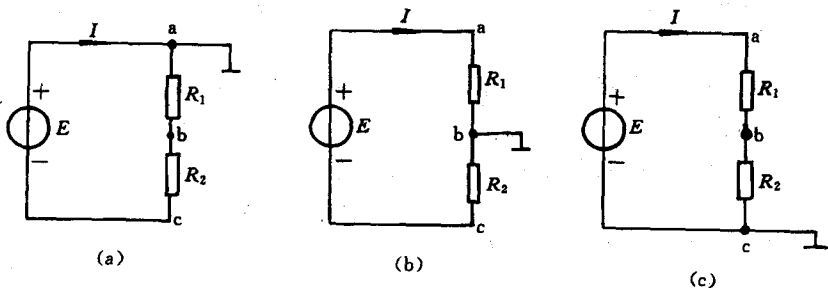


图 1-8 例 1-2 图

解:由欧姆定理知

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{10}{4 + 6} A = 1A$$

设 a 点为参考点,电路如图 1-8(a)所示,此时电位 $U_a = 0$ 。

$$U_b = U_{ba} = -U_{ab} = -IR_1 = -4V$$

$$U_c = U_{ca} = -I(R_1 + R_2) = -E = -10V$$

而电压

$$U_{ab} = IR_1 = 4V, \quad U_{bc} = IR_2 = 6V$$

设 b 点为参考点,电路如图 1-8(b)所示,此时电位 $U_b = 0$ 。

$$U_a = U_{ab} = IR_1 = 4V$$

$$U_c = U_{cb} = -U_{bc} = -IR_2 = -6V$$

$$U_{ab} = IR_1 = 4V, \quad U_{bc} = IR_2 = 6V$$

设 c 点为参考点,电路如图 1-8(c)所示,有

$$U_a = U_{ac} = 10V, \quad U_b = U_{bc} = IR_2 = 6V$$

$$U_{ab} = IR_1 = 4V, \quad U_{bc} = IR_2 = 6V$$

在画电路,尤其是画电子电路时,为了简便起见,习惯常不画电源,这时各端标以电位值,如图 1-9(a)的电路可画成 1-9(b)的形式。因此,在这种电路图中,凡是标有具体电位值的点,它与参考点之间存在着一个电压源,当此点电位值为正时,则表示它与电压源正极相联;为负时,则表示它与电压源的负极相联。

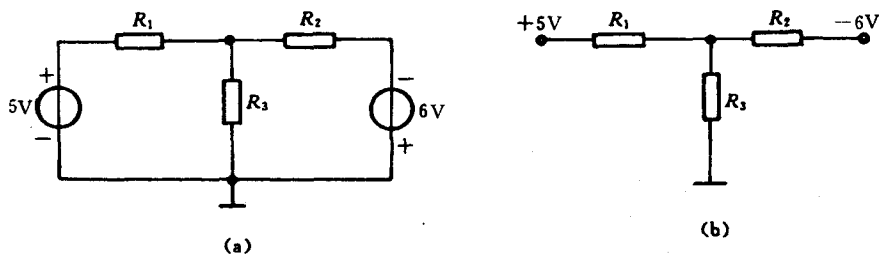


图 1-9 电路的简化画法

例 1-3 电路如图 1-10 所示,求开关 S 断开和合上时 b 点和 c 点的电位。

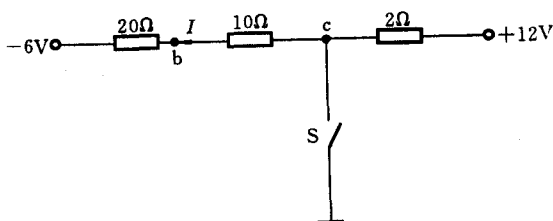


图 1-10 例 1-3 图

解:(1) 开关 S 断开时,两个电源与三个电阻构成一个回路,电流为

$$I = \frac{12 - (-6)}{2 + 10 + 20} \text{A} = \frac{18}{32} \text{A} = 0.56 \text{A}$$

b 点的电位为

$$U_b = (-6 + 0.56 \times 20) \text{V} = 5.2 \text{V}$$

也可以写成

$$U_b = [12 - 0.56 \times (2 + 10)] \text{V} = 5.2 \text{V}$$

c 点的电位为

$$U_c = (12 - 0.56 \times 2) \text{V} = 10.9 \text{V}$$

也可以写成

$$U_c = [(-6) + 0.56 \times (20 + 10)] \text{V} = 10.9 \text{V}$$

(2) 开关合上时,电路由两个独立回路组成。流过电阻值为 10 和 20 的串联支路的电流为