

高等学校函授教材 (兼作高等教育自学用书)

《电路》

学习指导书

黄东泉 主编

高等教育出版社

高等学校函授教材
(兼作高等教育自学用书)

《电 路》 学 习 指 导 书

黄 东 泉 主 编

高 等 教 育 出 版 社

内 容 简 介

本书系根据1980年6月审订的《高等工业学校电路教学大纲》(草案)和1981年12月审订的《高等工业学校电工原理函授教学大纲》(草案),为了对选用邱关源主编的《电路》(修订本)为教材的函授学生和自学读者进行学习指导而编写的。全书内容分为十三章和一个附录,次序安排上与《电路》(修订本)一致。每章均包含内容重点和前后联系,学习顺序指导,学习方法指导,自我检查题。侧重于对某些重点、难点和疑点的学习加以必要的指导。指导方式灵活多样,根据各章内容特点,有的从不同角度加以阐述,有的作些归纳性的叙述,有的提出一些应注意的问题和疑难点,有的通过例题具体引导,从而帮助读者理清头绪,加深理解,扩大思路,巩固概念。此外,还有九段阶段测验题。

高等学校函授教材
(兼作高等教育自学用书)

《电 路》

学 习 指 导 书

黄 东 泉 主 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 8.875 字数 210,000

1983年4月第1版 1983年9月第1次印刷

印数 00,001—25,000

书号 15010·0490 定价 1.05 元

序 言

本书系根据 1980 年 6 月审订的《高等工业学校电路教学大纲》(草案)和 1981 年 12 月审订的《高等工业学校电工原理函授教学大纲》(草案),为了对选用邱关源主编的《电路》(1982 年修订本,人民教育出版社)为教材的函授学生和自学读者进行学习指导而编写的。本书中所提到的章节和习题均指该教材而言。

根据这两个教学大纲精神,在内容上大致这样考虑:该教材中不打 * 号的内容,读者均要学习;该教材中打 * 号而函授教学大纲又无要求的内容,读者可暂不学习,本书也未编入;该教材中打 * 号而函授教学大纲有要求的内容,本书也用 * 号表示;至于该教材中没有叙述而函授教学大纲却有要求的内容,本书均作适当的补充,例如状态方程复频域解、铁磁谐振等,这些也用 * 号表示,以供读者选学。另外,在各章自我检查题和阶段测验题中,也有部分题目打有 * 号,以作为附加题供读者选做。

由于本书篇幅有限,不可能对该教材中每一节内容均加指导;因此,本书本着这样精神进行编写:对教材中已说得很清楚的内容,就不说或少说;教材中说得较简要,而读者又可能有困难的地方,就多说一些;同时还根据实际教学中的体会,对某些重点、难点、疑点的学习加以必要的指导。至于指导方式,则根据各章节的不同内容特点,适当运用不同的方式:有的从不同角度加以阐述,使读者易于接受或加深理解;有的作些归纳性的叙述,帮助读者理清头绪;有的提出一些应注意的问题和疑难地方,让读者深入思考和正确理解;有的通过例题,具体引导和扩大解题思路及巩固概念。

该教材各章的自学时数大致分配如下,供读者参考;其中包括

阅读和做习题的时间。至于自学总学时数,读者可根据自己的情况适当拟定。函授教学大纲大约规定为 300 学时,不包括做自我检查题和阶段测验题的时间。

第一章	电路模型和电路定律	4%
第二章	电阻电路	11%
第三章	一阶电路和二阶电路	13%
第四章	正弦电流电路和相量法	12%
第五章	具有互感的电路	5%
第六章	电路中的谐振	5%
第七章	三相电路	5%
第八章	非正弦周期电流电路和信号的频谱	5%
第九章	拉普拉斯变换	12%
第十章	网络图论和网络方程	9%
第十一章	二端口网络	4%
第十二章	多端元件	3%
第十三章	非线性电路	4%
第十四章	网络的计算机辅助分析简介	可暂不学
附录	均匀传输线	8%

参加本书编写工作的有:宁超、潘经慧、王爱英、景存斌、陈燕、黄东泉、过静娴、王瑞禹和田一涵同志,由黄东泉主编。

邱关源教授和江慰德副教授看了本书的初稿,并提了宝贵意见,谨致深切的谢意。书稿写成后,又承阜新矿业学院函授部认真审阅,提出了宝贵的修改意见,在此特致衷心的感谢。

限于我们的水平,并缺乏编写学习指导书这方面的经验,书中不妥和错误之处恐还不少,衷心欢迎大家批评指正。

编 者

1983 年 1 月于西安交大

目 录

第 一 章	电路模型和电路定律·····	1
第 二 章	电阻电路·····	17
第 三 章	一阶电路和二阶电路·····	46
第 四 章	正弦电流电路和相量法·····	79
第 五 章	具有互感的电路·····	105
第 六 章	电路中的谐振·····	123
第 七 章	三相电路·····	141
第 八 章	非正弦周期电流电路和信号的频谱·····	155
第 九 章	拉普拉斯变换·····	166
第 十 章	网络图论和网络方程·····	195
第十一章	二端口网络·····	222
第十二章	多端元件·····	236
第十三章	非线性电路·····	248
附 录	均匀传输线·····	260

第一章 电路模型和电路定律

一、内容重点和前后联系

1. 本章介绍电压、电流的参考方向,这是一个新概念。学习时不要和物理学中电压、电流的实际方向混淆,而应弄清它们之间的关系。

2. 本章介绍的电阻、电感、电容、独立电源和受控电源等理想电路元件,有些元件读者在物理学中已接触过,但在这里,我们从电路角度给予比较严格的定义和系统的阐述。读者除了深入理解其含义外,还应熟练地掌握理想电路元件的电压和电流参考方向的习惯标示方法,以及在此标示下的理想电路元件的伏安方程和功率计算。这些都是电路分析的基础。

3. 基尔霍夫两个定律是电路理论的基础,很重要。定律内容虽然简单,过去也学过,但要灵活准确地掌握,还应进一步从物理概念上加深理解,并从解题中积累处理问题的实际经验。

4. 这一章所介绍的内容同全书均有密切的联系,读者应给以必要的重视;但有些概念如互感、受控源等需在学过后续章节后,才能深入理解,因此,在此不要深钻。

二、学习顺序指导

先读 § 1-1、§ 1-2、§ 1-3, 再读学习方法指导 1、2、3, 做习题 1-1。

先读 § 1-4、§ 1-5、§ 1-6、§ 1-7, 再读学习方法指导 4、5, 做习题 1-2a、b、c、1-5、1-6。

先读 § 1-8、§ 1-9、§ 1-10, 再读学习方法指导 6、7、8, 做习题

1-2d、e、1-3、1-4、1-7、1-8、1-10、1-11、1-12。

做自我检查题。

三、学习方法指导

1. 理想电路元件是一种科学的抽象。发生在各种实际电路器件中的电磁现象,按性质可分为:消耗电能,供给电能,储存磁场能量,储存电场能量等等。我们将每一种性质的电磁现象用一理想电路元件来表征。例如,消耗电能的现象,就用“理想电阻元件”来表征;储存电场能量的现象,就用“理想电容元件”来表征,等等。但是,发生在每个实际电路器件中的电磁现象是很复杂的,要把它所有的电磁特性都表征出来,既有困难也没必要。例如,电阻器、电灯、电炉等器件,它们除了具有消耗电能的特性外,还有磁场和电场方面的特性,不过,这方面的特性同消耗电能的特性相比是很微弱的,可以忽略,故对电阻器、电灯、电炉等实际器件来说,它们的主要电磁特性是消耗电能,因此,我们可以用“理想电阻元件”来作为它们的数学模型。显然,严格来说,这只是一种近似。

理想电路元件虽然是从实际电路器件中科学抽象出来的假想元件,但反过来,又能用它们和它们的组合来相当精确地表征出实际电路器件的主要电磁特性。例如,在频率不太高的条件下,一个线圈的数学模型就是电阻元件和电感元件的串联;一个实际干电池的数学模型就是电阻元件和电压源元件的串联,等等。

学习时要注意搞清楚实际电路器件与理想电路元件之间的联系和差别;还要注意理解各种理想电路元件的严格定义。此外,除特别说明外,电阻、电感、电容元件都是指线性元件。

2. 电压和电流的实际方向是怎样规定的?有了实际方向,为什么还要引入电压和电流的参考方向(有时也称为正方向)?参考方向的含义是什么?对于任何一个具体电路,我们是否可以随便

规定电压、电流的参考方向？

注意，在关联参考方向的规定下，有时只要标一个符号“ $\rightarrow$ ”或“+”，就可以同时表示了电压、电流的参考方向。

思考题 1 在图 1-1 所示的电路中，我们是否可以假定 a 、 b 两端电压的参考方向为从 b 指向 a (如图所示)？如果允许这样做，则 $U_{ba} = ?$

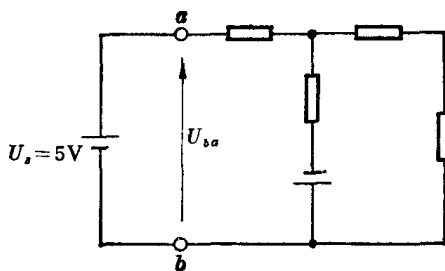


图 1-1

思考题 2 (1) 已知通过某一元件的电流 $i(t)$ 的变化曲线如图 1-2 所示。试问这句话是否明确？应怎样正确地表述？

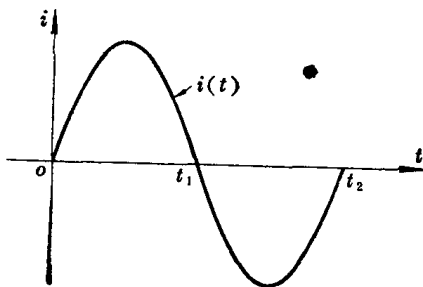


图 1-2

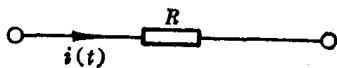


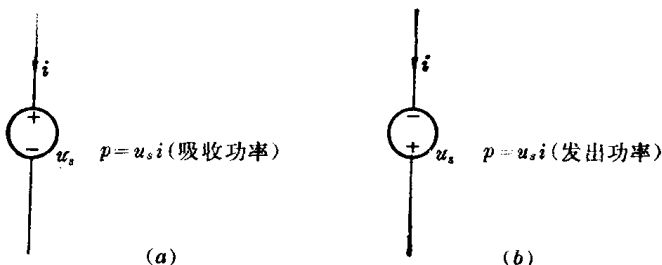
图 1-3

(2) 假定通过电阻元件的电流 $i(t)$ 的参考方向如图 1-3 所示， $i(t)$ 的变化曲线如图 1-2 所示。试讨论不同时刻电流的实际方向如何确定？对于这一客观上已经存在的电流，如果把 R 中 $i(t)$ 的参考方向标成与图 1-3 所示的方向相反，试问 $i(t)$ 的变化曲线该怎样画？

3. 功率的定义是什么? 元件在什么情况下是吸收功率的, 又在什么情况下是发出功率的? 它与电压、电流的参考方向有何关系?

思考题 3 下列功率的算式对吗?

电压源的功率:



电流源的功率:

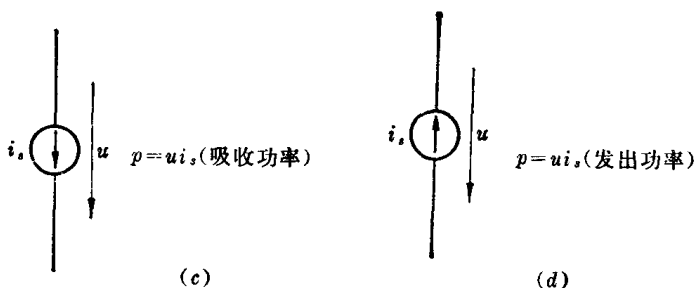


图 1-4

4. 在学习电感元件和电容元件这两节之前, 抽些时间把物理学中有关电磁感应定律、楞次定律以及电容上的电压与电流, 电荷与电场之间的关系等有关内容复习一下, 然后再来学习教材 § 1-5、§ 1-6。

例 1 线圈 W_1 与 W_2 的绕法如图 1-5a 所示, 假设在线圈 W_1 中通以电流 $i(t)$, 它的参考方向及变化曲线如图 1-5 所示。(1) 试确定在 $0 \leq t \leq 4$ 秒区间中, 线圈 W_1 与 W_2 里感应电压的实际方向。(2) 假定线圈 W_1 两端感应电压的参考方向为从 a 到 b , 试画

出 $u_{ab}(t)$ 的曲线(设线圈 W_1 的自感 $L_1=1$ 亨, 电阻 $R_1=0$)。

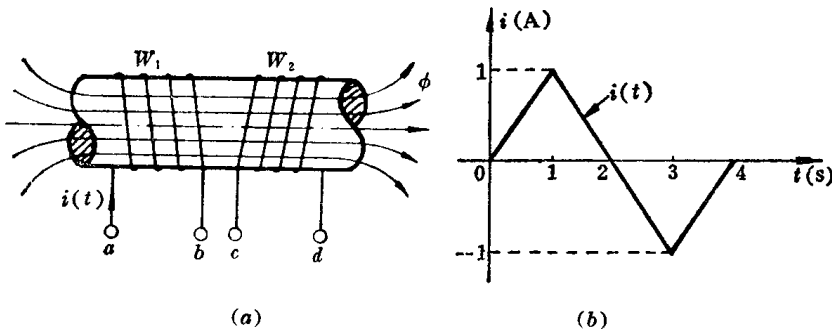


图 1-5

解 (1) 第一步: 根据右螺旋定则, 先确定由电流 i 产生的磁通 ϕ 的方向(ϕ 的方向已画在图 1-5a 上)。

第二步: 根据楞次定律, 两个线圈中感应电压的实际方向如表 1 中所示。

表 1

时 间 区 间	$0 \leq t \leq 1$	$1 \leq t \leq 2$	$2 \leq t \leq 3$	$3 \leq t \leq 4$
i 和 ϕ 绝对值的变化	增加	减少	增加	减少
i 和 ϕ 的实际方向	$a \rightarrow b$	$a \rightarrow b$	$b \rightarrow a$	$b \rightarrow a$
W_1 中感应电压的实际方向	$a \rightarrow b$	$b \rightarrow a$	$b \rightarrow a$	$a \rightarrow b$
W_2 中感应电压的实际方向	$d \rightarrow c$	$c \rightarrow d$	$c \rightarrow d$	$d \rightarrow c$

(2) 将线圈 W_1 用一个理想电感元件($L_1=1$ 亨) 来替代, 如图 1-6 所示, 在图示指定的参考方向下, u 与 i 的关系为

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

根据上式, 可求得 $u(t)$ 的变化曲线如图 1-7 中的虚线所示(为便于区分, 纵坐标上 u 和 i 的比例尺取得不同)。

最后, 读者应根据 $u(t)$ 曲线与 u 的参考方向验证一下, 是否

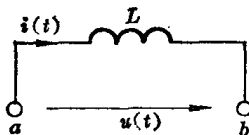


图 1-6

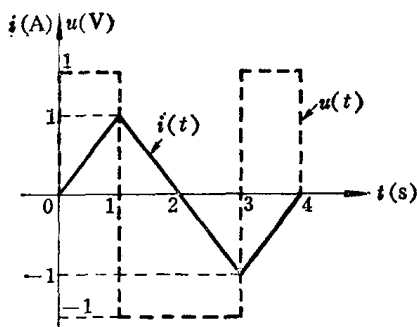


图 1-7

与表 1 中 W_1 线圈的感应电压的实际方向相符合。

5. 电感元件与电容元件在性质上有相似之处, 在学习时, 用互相对比的办法可能更便于理解和掌握。例如:

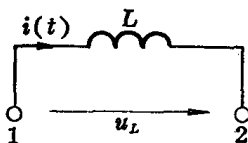


图 1-8

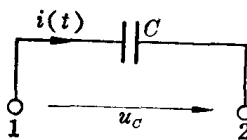


图 1-9

(1) L 与 C 都是储能元件。

当一个线圈通有电流时, 在线圈周围空间就要建立磁场, 而磁场本身就是一种能量。根据理想电感元件的定义

$$L = \frac{\psi}{i}$$

电感元件中所储存的能量为

$$w_L = \frac{1}{2} L i^2$$

当任意两个导体之间有电位差时, 在这两个导体之间就要建

立电场，而电场本身也是一种能量。根据理想电容元件的定义：

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

电容元件中所储存的能量为

$$w_C = \frac{1}{2} C u^2$$

式中， $u = \varphi_A - \varphi_B$ 。 φ_A 表示导体 A 的电位， φ_B 表示导体 B 的电位，而 u 为导体 A 与导体 B 之间的电位差，即电压。

(2) L 与 C 都具有动态的性质。

只有当通过电感元件的电流和加在电容元件两端的电压随时有变化时， L 与 C 的作用才显示出来，参看图 1-8 和图 1-9。换句话说，在直流情况下，电感 L 相当于短接。这是由于 $u_L = L \frac{di}{dt}$ ，当 $i = \text{恒量}$ 时， $u_L = 0$ ，元件两端的电压等于零，所以相当于短接。在直流的情况下，电容 C 相当于断路。这是由于 $i = C \frac{du_C}{dt}$ ，当 $u_C = \text{恒量}$ 时， $i = 0$ ，通过元件的电流等于零，所以相当于断路（或开路）。

(3) L 与 C 都具有记忆的性质。

所谓记忆性质，对电感元件来说， t 时刻电感中的磁通链 $\psi_L(t)$ 不仅仅决定于 t 时刻所加的电压，而且还和 t 时刻以前加在电感两端的电压有关。

ψ_L 与 u 的关系为

$$\psi_L(t) = \psi_L(t_0) + \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi$$

式中 t_0 为一个指定值， $\psi_L(t_0)$ 为 t_0 时刻电感中的磁通链，它与 t_0 以前的电压 u 有关。如果取 t_0 作为计算时间的起点且设它为零，则上式可写为

$$\psi_L(t) = \psi_L(0) + \int_0^t u(\xi) d\xi$$

式中 $\psi_L(0)$ 是磁通链在起始时刻的值, 或者说是电感元件原有的磁通链。

从上述公式可以看出, 通过自感磁通链 $\psi_L(t)$, 可以把加在电感元件两端电压的全部历史作用都记忆下来。所以说, 电感元件具有记忆性质。

电容元件具有类似的性质, 其 u 与 i 的关系为

$$u_C(t) = u_C(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$$

或者写为

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

例 2 设电容 C 两端电压和电流的参考方向如图 1-10a 所示, $i(t)$ 的波形如图 1-10b 所示, 并已知 $t=0$ 时, $u_C(0)=0$ 。求 $u_C(t)$ 并画出 $u_C(t)$ 波形。

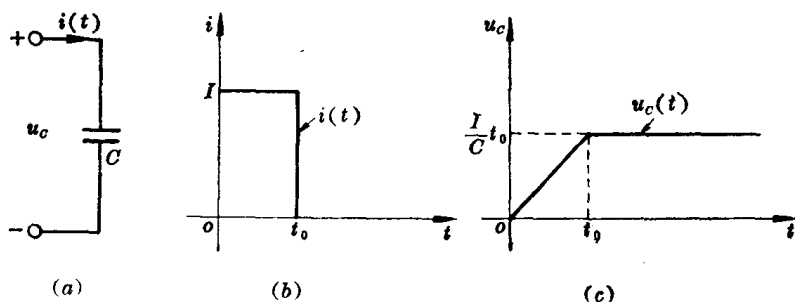


图 1-10

解 根据电容中电压和电流的基本关系:

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

首先必须把 $i(t)$ 的表达式写出来。根据 $i(t)$ 的波形图, 需将 t 分为两个区间来计算。

当 $0 < t \leq t_0$ 时

$$i(t) = I$$

$$\begin{aligned}
 u_c(t) &= u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \\
 &= \frac{I}{C} t
 \end{aligned}$$

当 $t \geq t_0$ 时

$$\begin{aligned}
 i(t) &= 0 \\
 u_c(t) &= u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \\
 &= \frac{1}{C} \int_0^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \\
 &= \frac{I}{C} t_0
 \end{aligned}$$

根据 $u_c(t)$ 的表达式, 可画出其波形图如图 1-10c 所示。

6. 电压源和电流源的基本性质是什么? 各有什么特点? 学习时, 先把直流电压源 U_s 和直流电流源 I_s 的概念搞清楚, 然后去理解一般表达式 $u_s(t)$ 和 $i_s(t)$ 的含义。在分析这两种电源时, 可借助伏安特性, 并将电压源与电流源进行对比来加深理解。

7. 受控源是一种具有两对端钮, 也就是具有两条支路的元件, 其中一条支路的端电压(或电流)受另一条支路的端电压(或电流)控制。根据控制量和被控制量的性质可将受控源分为四类。在学习受控电压源和受控电流源时, 可将它与独立电压源和独立电流源进行比较, 通过比较来抓住受控源的本质。其中的关键在于“受控”二字, 即受控源的存在是受电路中其它支路的电压或电流所支配的, 它们之间有依存关系, 所以受控源本身不是激励源。

8. 基尔霍夫定律是电路的基本定律, 它具有普遍意义, 即不论电路是由什么性质的(线性、非线性、时变、非时变等)集总元件所组成, KCL 和 KVL 总是成立的。所以它们是分析计算电路的

主要依据。在学习时,要经常有意识地应用基尔霍夫定律去分析问题,以便在运用中达到熟练掌握的程度。

例 3 电路如图 1-11 所示,求电路中的电流 I 。

解 应用 KVL, 得到

$$-U_1 + 3U_1 + U_2 = U_s \quad (1)$$

再根据欧姆定律, 得到

$$U_1 = -2I \quad (2)$$

$$U_2 = 6I \quad (3)$$

将式(2)与式(3)代入式(1), 其结果为

$$-(-2I) + 3(-2I) + 6I = U_s \quad (4)$$

将 $U_s = 6$ 伏代入, 得

$$I = 3 \text{ A}$$

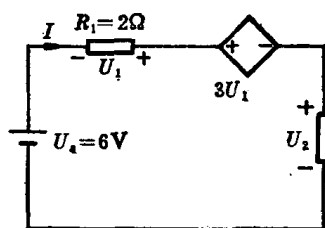


图 1-11

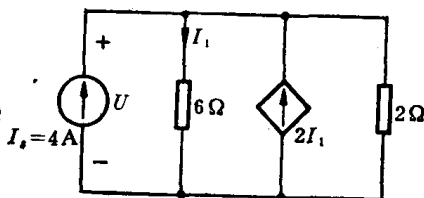


图 1-12

例 4 电路如图 1-12 所示, 求电路中电压 U 。

解 根据 KCL, 则有

$$-I_s + I_1 - 2I_1 + \frac{U}{2} = 0 \quad (1)$$

同样, 由欧姆定律可得

$$I_1 = \frac{U}{6} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 得到

$$-I_s - \frac{U}{6} + \frac{U}{2} = 0 \quad (3)$$

将 $I_s = 4$ 安代入, 得

$$U = 12\text{V}$$

由上面两个例子可以看出, 电路中有响应, 是由于独立电源的存在。如果没有独立电源, 则例 3 中的式(3)将为 $2I = 0$, 例 4 中的式(3) 将为 $U/3 = 0$ 。也就是说, 在这两个电路中均没有响应。

例 5 图 1-13 为某电路中的一部分, 试确定其中的 i_x , u_{ab} 。

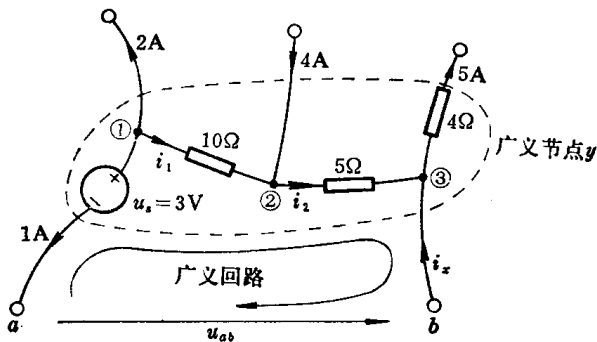


图 1-13

解 (1) 求 i_x 。根据 KCL, 可按下列步骤求得:

对节点① $i_1 = -(1 + 2) = -3\text{ A}$

对节点② $i_2 = i_1 + 4 = 1\text{ A}$

对节点③ $i_x = 5 - i_2 = 4\text{ A}$

如果取广义节点 y , 则根据 KCL 可直接求得

$$i_x = 1 + 2 - 4 + 5 = 4\text{ A}$$

(2) 求 u_{ab} 。可以将 a, b 两端点之间设想有一条虚拟的支路, 该支路两端的电压为 u_{ab} 。这样, 由节点 a 经过节点①、②、③到节点 b 就构成一个闭合回路, 这个回路有时称为广义回路; 对广义回路应用 KVL, 可得

$$-u_s + 10i_1 + 5i_2 - u_{ab} = 0$$