

工科类电路基础解题分析

南京邮电学院
电工教研室 编

江苏科学技术出版社

工科类电路基础解题分析

南京邮电学院 编
电工教研室

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：江苏新华印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 12.375 字数 270,000
1986年5月第1版 1986年5月第1次印刷
印数 1—7,410 册

书号：13196·211 定价：2.12 元

责任编辑 沃国强

目 录

第一章 简单电路的分析 1

§ 1-1 内容简介 1

一、电路的基本变量 1

二、电路的基本规律 2

三、电源模型 3

四、电阻串联、并联的等效电阻 5

五、负载获得最大功率的条件 7

六、T形(星形)电路和 Π (三角形)电路的等效变换 7

§ 1-2 解题示例 8

习 题 26

第二章 复杂直流电路的分析 29

§ 2-1 一般分析方法内容简介 29

一、支路电流法 29

二、网孔分析法 30

三、节点分析法 31

四、弥尔曼定理 33

五、割集分析法 33

六、回路分析法 37

七、对偶网络 38

§ 2-2 一般分析方法解题示例 40

§ 2-3 线性网络定理内容简介 55

一、迭加定理 55

二、置换定理(替代定理) 56

三、代文宁定理 56

四、诺顿定理 57

五、互易定理	58
六、补偿定理	59
§ 2-4 线性网络定理解题示例	59
习 题	78
第三章 正弦电路的稳态分析	84
§ 3-1 内容简介	84
一、正弦电压和电流的基本概念	84
二、正弦电压和电流的相量表示法	86
三、电阻、电容和电感元件的相量关系式	87
四、基尔霍夫定律的相量形式	91
五、阻抗与导纳	92
六、正弦稳态功率	101
七、谐振电路	106
八、三相电路	110
§ 3-2 解题示例	113
习 题	167
第四章 非正弦电路的稳态分析	172
§ 4-1 内容简介	172
一、傅里叶级数	172
二、波形对称性与傅里叶系数的关系	174
三、非正弦周期电流电路的计算	176
四、非正弦波的有效值和平均功率	178
§ 4-2 解题示例	179
习 题	195
第五章 互感耦合电路的稳态分析	199
§ 5-1 内容简介	199
一、自感电压、互感电压与同名端	199
二、耦合电感的串联、并联与去耦等效变换	201

三、空芯变压器	204
四、全耦合变压器	207
五、理想变压器	208
§ 5-2 解题示例	209
习 题	240
第六章 动态电路分析	243
§ 6-1 动态元件和一阶电路分析内容简介	243
一、电容元件的 VCR 及其储能	243
二、电感元件的 VCR 及其储能	244
三、换路定律	245
四、一阶电路的响应	246
五、求解一阶电路响应的三要素法	252
六、一阶电路的阶跃响应	255
七、一阶电路对正弦激励的响应	256
§ 6-2 动态元件和一阶电路分析解题示例	258
§ 6-3 二阶电路分析内容简介	337
§ 6-4 二阶电路分析解题示例	343
习 题	361
附录 对称性在电路分析中的应用	375

第一章 简单电路的分析

§ 1-1 内容简介

一. 电路的基本变量

为了能对电路进行分析计算,我们必须把组成电路的实际器件和部件加以理想化,用一些能够表征其主要性能的理想元件来表示。这种由理想元件构成的电路称为电路模型。今后我们所分析的电路都是指实际电路的这种理想化模型。

电路分析的主要对象是电路的各支路电流和电压,一旦求出电路的各个支路电流和电压,也就完全确定了该电路的性能。因此,我们把电流和电压作为电路的基本变量。

1. 电流 i : 单位时间内通过导体横截面的电荷量称为电流。即

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

电流的方向规定为正电荷运动的方向。

大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流或直流电流,用符号 I 表示。

2. 电压 u : 电场中单位正电荷从 A 点移到 B 点时,电场力所作的功称为 A, B 两点间的电压,即

$$u_{AB} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-1-2)$$

电压的方向规定为从高电位(“+”极)指向低电位(“-”极),即电位降落的方向。

大小和方向都不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压,用符号 U 表示。

3. 参考方向: 给定电路结构、元件参数和激励源(电源)后,电路中的电流、电压的真实方向就客观地确定了。而分析电路时我们一时还不知道这些真实方向。但由于支路电流、电压的方向只有两种可能:不是与真实方向相同就是与真实方向相反。因此分析电路时,我们可以预先任意指定各支路电流、电压的方向,然后根据电流、电压所遵守的电路的基本约束关系进行计算。计算结果为“+”值时,表明指定方向与真实方向相同;为“-”值时,表明指定方向与真实方向相反。这种预先指定的支路电流、电压的方向称为参考方向。

当我们将同一支路的电流参考方向与电压参考方向取得一致时,这种参考方向称为关联的参考方向。如图1-1-1所示。

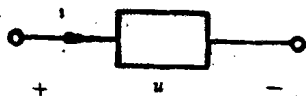


图 1-1-1 关联参考方向

二、电路的基本规律

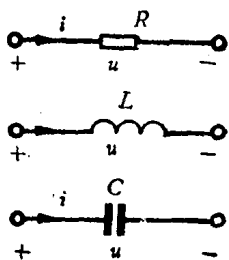


图 1-1-2 RLC元件

u, i 服从两种基本约束关系:

1. 元件性质约束

电阻 R : $u = Ri$

电感 L : $u = L \frac{di}{dt}$

电容 C : $i = C \frac{du}{dt}$

注意：以上各电压、电流关系是在元件上 u, i 参考方向为关联时得出的，如图 1-1-2。若 u, i 参考方向为非关联，则等式右边应冠以“-”号。

2. 电路结构约束

(1) 基尔霍夫电流定律(简称 KCL)

任一时刻流入同一节点的各支路电流的代数和为零。(设各支路电流的参考方向以流入节点为“+”，则流出节点为“-”)。即

$$\sum i = 0 \quad (1-1-3)$$

此结论与各支路元件性质无关。它确定了任一时刻流入同一节点的各支路电流之间的关系。

(2) 基尔霍夫电压定律(简称 KVL)

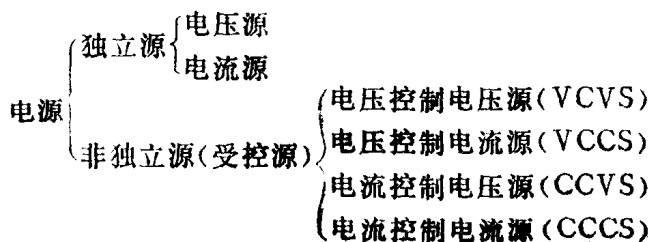
任一时刻沿任一回路绕行一周各支路电压的代数和为零(设各支路电压的参考方向与绕行方向一致时为“+”，相反为“-”)。即

$$\sum u = 0 \quad (1-1-4)$$

此结论也与各支路元件的性质无关，它确定了任一时刻同一回路中各支路电压之间的关系。

三、电源模型

电源包括独立源与非独立源，其分类如下：



独立源：将其它形式的能量转换为电能的元件，它向电路提供电能。

任何一个实际电源，在一定的工作范围内，总可以用它两个端钮上的开路电压 u_{oc} 或短路电流 i_{sc} 与内阻来描述。用理想电压源 $u_s = u_{oc}$ 与 R_s 串联的模型来表示实际电压源，用理想电流源 $i_s = i_{sc}$ 与 R_s 并联的模型来表示实际电流源。如图1-1-3所示。

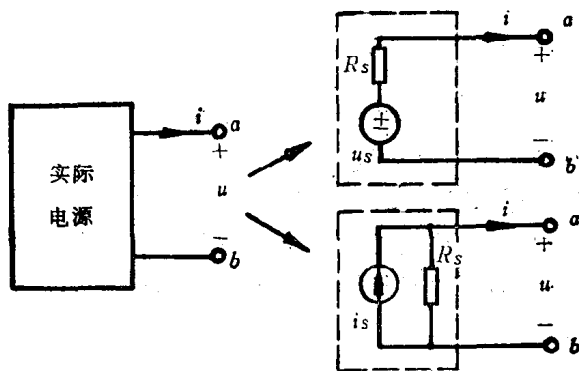


图 1-1-3 两种电源模型

这两种电源模型可以互相变换，变换的关系是：

$$i_s = \frac{u_s}{R_s} \quad \text{或} \quad u_s = R_s i_s$$

$$R_s = R_s$$

注意：

a) $R_s = 0$ 时，不能用电流源模型。因为此时理想电流源被短路，对外不提供电能，电源只能用电压源模型表示，如图 1-1-4 所示。理想电压源的端电压由本身的变化规律决定，

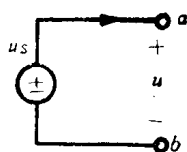


图 1-1-4 理想电压源

其电流值与外接电路有关。实际电源当内阻很小时($R_s \approx 0$) 可以作为理想电压源处理。

b) $R_s \rightarrow \infty$ 时不能用电压源模型。因为此时电压源相当于开路, 对外不提供电能。电源只能用电流源模型表示。如图 1-1-5 所示。理想电流源的电流值由本身的变化规律决定, 而端电压与外接电路有关。实际电源当内阻很大时($R_s \rightarrow \infty$) 可作为理想电流源处理。理想电压源与理想电流源是不能互相变换的。

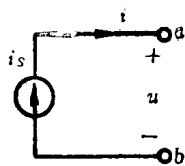


图 1-1-5 理想电流源

2. 非独立源(受控源)

受控源是构成电子器件模型必不可少的元件。受控电压源的电压值或受控电流源的电流值是受其他支路电压或电流控制的。对含受控源的电路进行化简时, 应该注意的是在化简过程中不要把受控源的控制量消除掉, 否则将失去受控的意义。

四、电阻串联、并联的等效电阻

1. 电阻串联

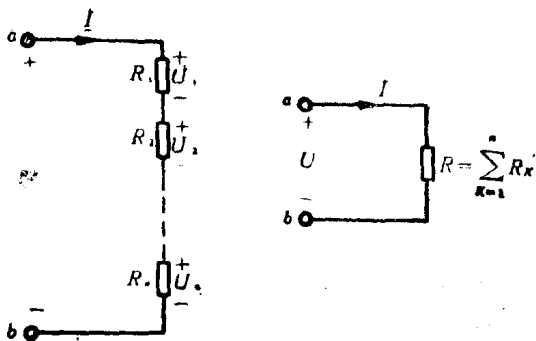
各电阻元件首尾相接连成一条支路, 称为串联。如图 1-1-6(a) 所示。

串联的电阻电路有如下特性:

$$(1) \text{ 等效电阻 } R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n = \sum_{K=1}^n R_K \quad (1-1-5)$$

(2) 流过各电阻的电流相同。

$$(3) \text{ 各电阻上的电压 } U_K = U \cdot \frac{R_K}{R} \quad (\text{分压公式}) \quad (1-1-6)$$



(a) n 个电阻串联; (b) n 个电阻串联的等效电阻

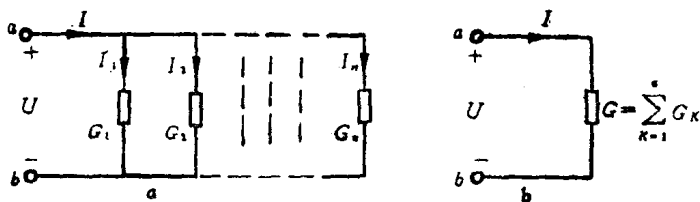
图 1-1-6

(4) 各电阻吸收的功率

$$P_K = P \frac{R_K}{R} \quad \left(P = \frac{U^2}{R} \right) \quad (1-1-7)$$

2. 电阻并联

各电阻元件跨接在同一对节点之间, 称为并联。如图 1-1-7(a) 所示。



(a) n 个电阻并联

(b) n 个电阻并联时的等效电阻

图 1-1-7

并联的电阻电路有如下特点:

$$(1) \text{ 等效电阻 } R = \frac{1}{G} \quad G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n = \sum_{K=1}^n G_K \quad (1-1-8)$$

(2) 各电阻上的电压相同。

(3) 流过各电阻上的电流

$$I_K = I \frac{G_K}{G} \quad (\text{分流公式}) \quad (1-1-9)$$

(4) 各电阻吸收的功率

$$P_K = P \frac{G_K}{G} \quad \left(P = \frac{I^2}{G} \right) \quad (1-1-10)$$

五、负载获得最大功率的条件

图 1-1-8 中当负载电阻 R_L 的阻值等于电源的内阻 R_s 时, 负载从电源获得最大的功率为

$$P_{\max} = \frac{U_s^2}{4R_s} \quad (1-1-11)$$

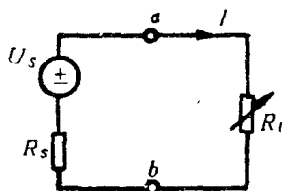
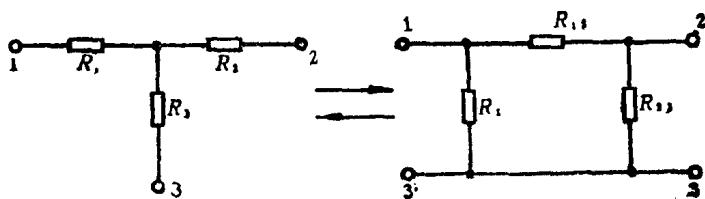


图 1-1-8

$R_L = R_s$ 称为最大功率匹配条件。

六、T形(星形)电路和Π形(三角形)电路的等效变换

图 1-1-9 所示 T 形和 Π 形电路, 在一定条件下可以等效互换, 并不影响电路未经变换部分的电压和电流。此时各电阻参数之间应有下列关系:



(a) T 形(星形)电路 (b) Π 形(三角形)电路

图 1-1-9

$$\begin{aligned}
 \text{T形} \rightarrow \text{II形} \quad R_{12} &= \frac{R_T}{R_3} \\
 R_{13} &= \frac{R_T}{R_2} \\
 R_{23} &= \frac{R_T}{R_1}
 \end{aligned} \quad (1-1-12)$$

式中 $R_T = R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3$

$$\begin{aligned}
 \text{II形} \rightarrow \text{T形} \quad R_1 &= \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_d} \\
 R_2 &= \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_d} \\
 R_3 &= \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_d}
 \end{aligned} \quad (1-1-13)$$

式中 $R_d = R_{12} + R_{23} + R_{13}$

§ 1-2 解 题 示 例

简单电路是指可以直接应用欧姆定律、基尔霍夫定律、分压分流公式进行计算，或者运用串并联电阻的等效电阻公式、电源等效变换 T-II 等效变换进行化简计算的一类电路。运用等效电路的概念，逐步化简电路计算简单电路的方法，也是分析复杂电路的基础，必须正确掌握和灵活应用。

下面通过一些例题说明简单电路的计算方法和解题技巧。

例 1-1 已知电路结构和元件参数如图 1-2-1 所示，试求电流 I_c 和电压 U_{ab} 。

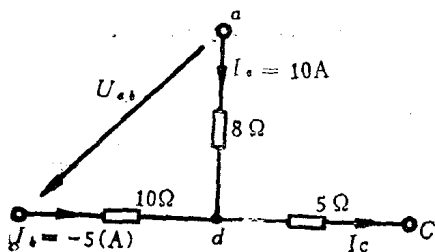


图 1-2-1

解 在普通物理中，对于电流的方向与电压的极性，一般采用它们的真实方向和极性。在电路分析中，由于需要分析的电路结构比较复杂，而这些电路中各支路电流电压的真实方向与极性，在没有经过计算以前，是不可能一眼看出的，因此提出了参考方向这个概念。不言而喻，参考方向是针对真实方向而言的。图 1-2-1 中标出的电流电压方向都是参考方向（可以认为所有电路图中标出的电流方向和电压极性都是参考方向）。图 1-2-1 中 $I_a = 10\text{A}$ ，表明电流的大小为 10A ，方向与箭头方向相同。 $I_b = -5\text{A}$ 表示电流的大小为 5A ，其真实方向与箭头方向相反。

1. 求 I_c

对节点 d 运用 KCL 可列出节点电流方程

$$I_a + I_b - I_c = 0$$

再将已知条件代入： $I_a = 10\text{A}$ ， $I_b = -5\text{A}$

可得 $(10\text{A}) + (-5\text{A}) - I_c = 0$

注意 (1) 括弧内数字前的 (+、-) 符号，表示该支路中电流的真实方向与参考方向之间的关系。

(2) 括弧外的 (+、-) 符号，表示在指定参考方向下，各电流必须遵守的 KCL 约束关系，解得 $I_c = 5\text{A}$ 即此支路中实际电流的大小为 5A ，方向与参考方向相同。

2. 求 U_{ab}

U_{ab} 是指从 a 点到 b 点的电压（电位降），其极性也是一个参考极性。

若将 KVL 用于图 1-2-1 电路 $adba$ 虚拟回路，则可列出如下回路电压方程。

$$U_{aa} + U_{ab} - U_{ab} = 0$$

或 $U_{ab} = U_{ab} + U_{ab} = 8I_a + 10(-I_b)$

这里: $U_{ab} = 10(-I_b) = -10I_b$, 负号是因为在 10Ω 电阻上电压的参考极性和电流的参考方向不关联引起的。

将已知条件代入, $I_a = 10\text{A}$, $I_b = -5\text{A}$

可得 $U_{ab} = 8 \times 10 + 10[-(-5)] = 130\text{V}$

即 ab 两点间电压的大小为 130V 真实极性与参考极性相同。

例 1-2 图 1-2-2 中 已知 $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 5\Omega$, $U_s = 20\text{V}$, $I_s = 1\text{A}$ 。试分析各元件的功率情况。

解 要计算各元件上的功率, 需先算出各元件上的电压和电流值, 元件上的功率可按下式计算:

$$P = UI$$

当 U, I 参考方向

关联时, 计算结果, 如 $P > 0$, 元件吸收功率, 如 $P < 0$, 元件发出功率;

U, I 参考方向不关联时, 计算结果, 如 $P > 0$, 元件发出功率。如 $P < 0$, 元件吸收功率。

电阻元件 R_1 的功率情况:

将 R_1 从电路中断开, 剩下的二端网络如图 1-2-3 (a) 所示。

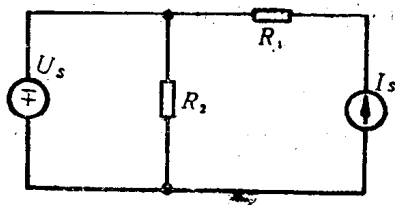


图 1-2-2

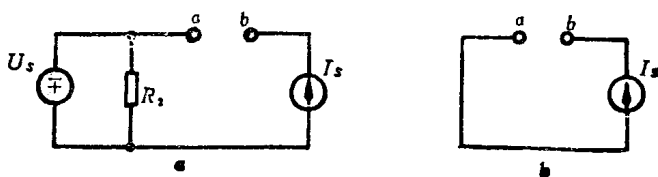


图 1-2-3

图 1-2-3 (b) 电路为 (a) 电路的等效电路, 利用它可将原电路化简为图 1-2-4 所示电路。

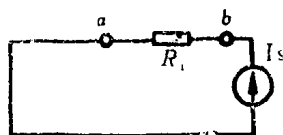


图 1-2-4

由图可知

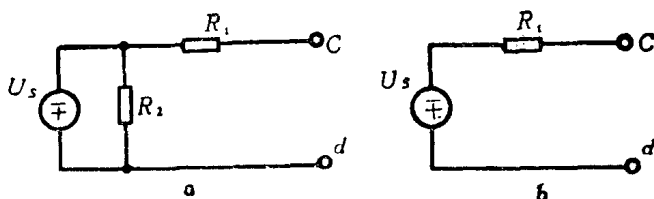
$$P_{R_1} = U_{ba} I_s = I_s^2 R_1 \\ = 1^2 \times 10 = 10 \text{ W}$$

所以电阻 R_1 吸收 10 瓦功率, 电阻元件总是吸收功率的。这 10 瓦功率是否就是图 1-2-2 电路中的恒流源

I_s 单独供给的呢? 不是的, 这个功率是由图 1-2-3 (a) 二端网络供给的。图 1-2-3 (b) 电路中 ab 端看入的恒流源 I_s 仅是图 1-2-3 (a) 二端网络的等效电路, 它不是图 1-2-2 电路中的恒流源 I_s 。由下面的计算可以知道, 实际上图 1-2-2 中的恒流源 I_s 不但不供出功率, 反而吸收功率。

恒流源 I_s 的功率情况:

将图 1-2-2 电路中恒流源 I_s 以外的电路部分作为一个二端网络处理, 如图 1-2-5 (a) 电路所示。



(a)

(b) 图(a)的等效电路

图 1-2-5

接入被讨论的电路部分 (即恒流源 I_s)。

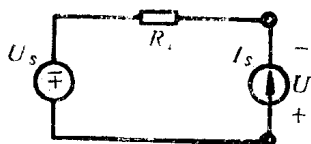


图 1-2-6

设图 1-2-6 电路中恒流源的端电压为 U 且与恒流源 I_s 的参考方向关联。

由 KVL 列出回路电压方程

$$U + I_s R_1 - U_s = 0$$

则 $U = U_s - I_s R_1 = 20 - 1 \times 10 = 10\text{V}$

$$P_{I_s} = UI_s = 10 \times 1 = 10\text{W} (> 0)$$

所以恒流源 I_s 吸收功率 10 瓦。

电阻元件 R_2 的功率情况：

将图 1-2-2 电路中 R_2 以外的电路部分作为：端网络处理，并经等效变换后，可得到计算 R_2 功率情况的等效电路，如图 1-2-7 所示

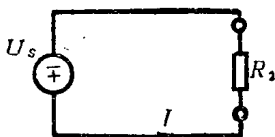


图 1-2-7

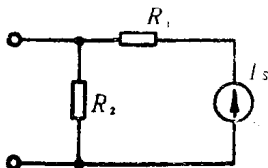
由图可知

$$P_{R_2} = U_s I = \frac{U_s^2}{R_2} = \frac{20^2}{5} = 80\text{W}$$

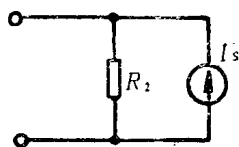
即 R_2 吸收功率 80 瓦。

电压源 U_s 的功率情况：

同理将 U_s 以外的电路部分作为二端电路处理，找出它的等效电路再进行计算。



(a)



(b) 图(a)的等效电路

图 1-2-8