

```
**** CIRCUIT DESCRIPTION
```

```
*****
```

```
.OP
```

```
R1      1 2 1k
```

```
R2      2 0 1k
```

```
V1      1 0 DC 5
```

```
* End of input deck.
```

```
_
```

```
**** 12/10/100 12:14:40 **** NT Evaluation PSpice( July 1997) ****
```

```
* Example input deck for a simple voltage divider.
```

```
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
```

```
*****
```

```
NODE    VOLTAGE    NODE    VOLTAGE    NODE    VOLTAGE    NODE    VOLTAGE
```

```
( 1) 5.0000 ( 2) 2.5000
```

```
VOLTAGE SOURCE CURRENTS
```

```
NAME    CURRENT
```

```
V1      -2.500E-03
```

可以看到, 5V电压源位于节点1和节点2之间, 电阻R2(连接在节点2和节点0之间)两端的电压为2.5V。还需要指出的是SPICE的一个怪规定: 由电流源提供的电流遵循无源符号规则(例如, -2.5mA)。

```
TOTAL POWER DISSIPATION 1.25E-02 WATTS
```

正如前面所看到的, 基于文本的电路描述与原理图绘制工具相比没有那么直观。特别是, 在仿真时, 它在给节点编号时容易引入一些简单的(但是致命的)错误, 因为在纸上写出的东西不够直观。不过, 它输出的解释却是非常直接的, 因此很值得读一些这种文件。

4.8 小结与复习

- 在开始分析之前, 画出整洁和简单的电路图, 并标出所有元件和电源的值。每个电源应该有一个参考符号。
- 如果采用节点分析:
 - 选取其中一个节点作为参考节点。然后标出节点电压 v_1, v_2, \dots, v_{N-1} , 并记住它们都是相对于参考节点而言的。
 - 如果电路只包含电流源, 对各个非参考节点应用 KCL。
 - 如果电路包含电压源, 分别对各个电压源构造一个超节点, 然后对所有非参考节点和超节点应用 KCL。
- 如果采用网孔分析, 首先确定该网络是否为平面网络。
 - 对每个网孔, 指定一个顺时针方向的网孔电流: i_1, i_2, \dots, i_M 。

- 如果电路只包含电压源,沿每个网孔应用 KVL。
- 如果电路包含电流源,对位于两个网孔之间的每个电流源建立一个超网孔,然后沿每个网孔和超网孔应用 KVL。
- 对于一个平面网络,在决定采用节点分析还是网孔分析时,要记住,一个电路的节点或超节点数越少,应用节点分析得到的方程数目越少。
- 计算机辅助分析在检验结果和分析具有大数目元件的电路时是有用的。然而,通常还需要根据常识来检验仿真得到的结果。

习题

1. (a) 如果 $0.1v_1 - 0.3v_2 - 0.4v_3 = 0$, $-0.5v_1 + 0.1v_2 = 4$ 和 $-0.2v_1 - 0.3v_2 + 0.4v_3 = 6$,
(b) 求行列式:

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 1 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & -2 & 3 & 0 \end{vmatrix}$$

2. (a) 如果 $v_A + v_B + v_C = 27$, $2v_B + 16 = v_A - 3v_C$ 和 $4v_C + 2v_A + 6 = 0$, 求 v_A , v_B 和 v_C ; (b) 求行列式:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \end{vmatrix}$$

3. 用节点分析法,求图 4.25 所示电路中的 v_p 。

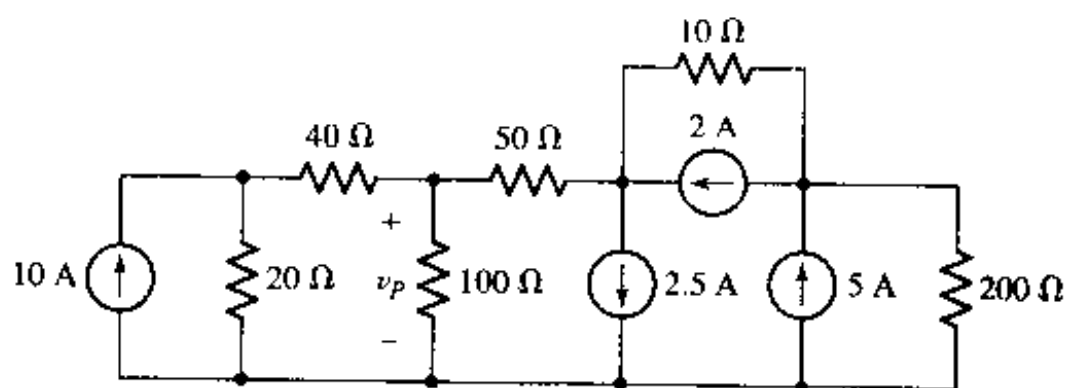


图 4.25

- 用节点分析法,求图 4.26 所示电路中的 v_x 。
- 对图 4.27 所示电路, (a) 用节点分析求出 v_1 和 v_2 ; (b) 计算 6Ω 电阻所吸收的功率。
- 运用节点分析方法,求图 4.28 所示电路中的 v_1 和 v_2 。
- 参看图 4.29 所示电路,用节点分析法求出使 $v_1 = 0$ 的 V_2 的值。
- 对于图 4.30 中的电路,应用节点分析求电流 i_5 。
- 应用节点分析,求图 4.31 所示的 v_x 值。

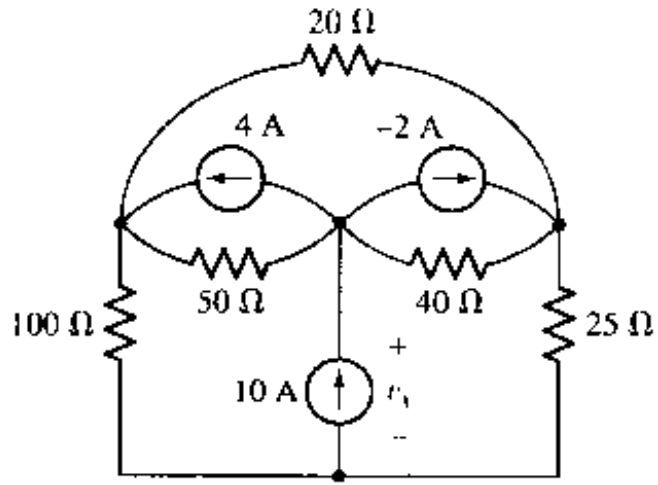


图 4.26

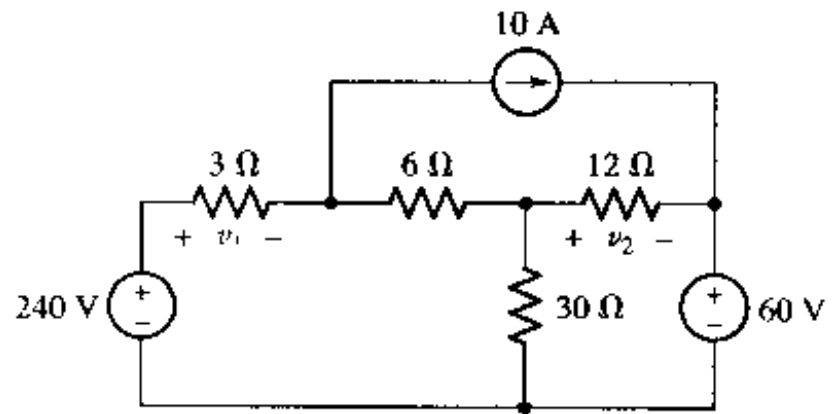


图 4.27

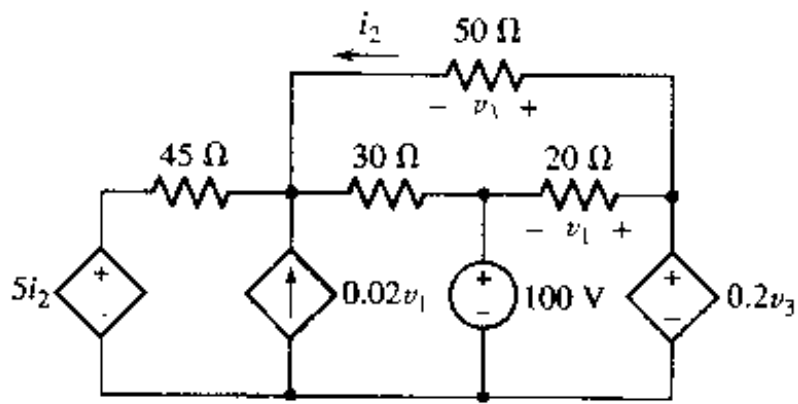


图 4.28

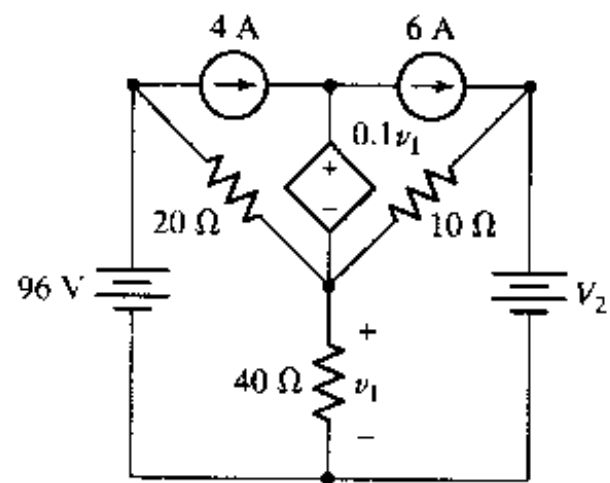


图 4.29

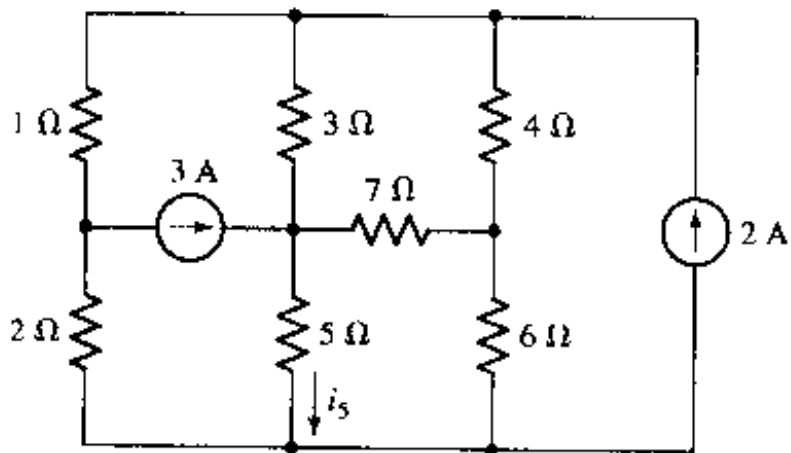


图 4.30

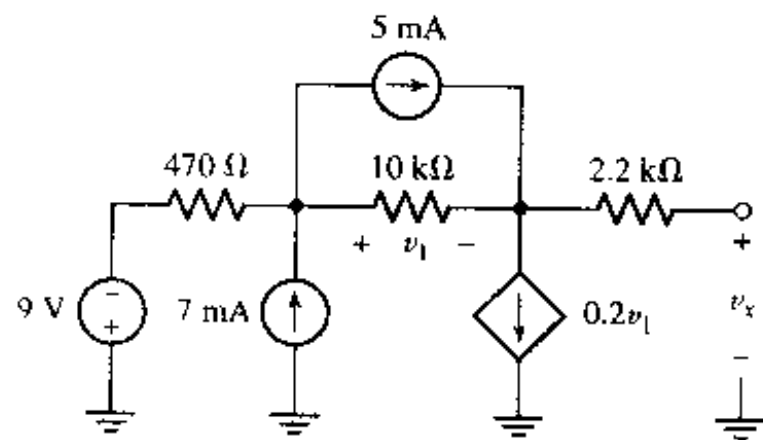


图 4.31

10. 应用节点分析法, 求图 4.32 所示电路中的电压 v_c

11. 用节点分析求图 4.33 所示电路中的 v_4

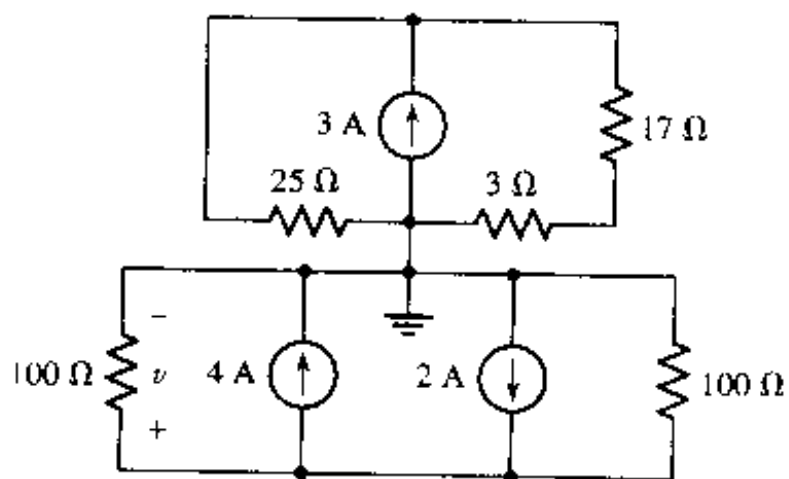


图 4.32

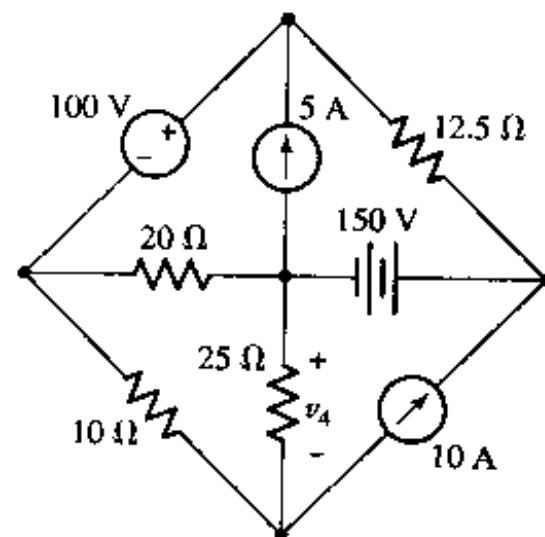


图 4.33

12. 利用节点分析法, 在图 4.34 中, 求 (a) v_A ; (b) 25Ω 电阻消耗的功率。

13. 如图 4.35 所示电路, 用节点分析法求 v_1 和受控电流源所提供的功率。

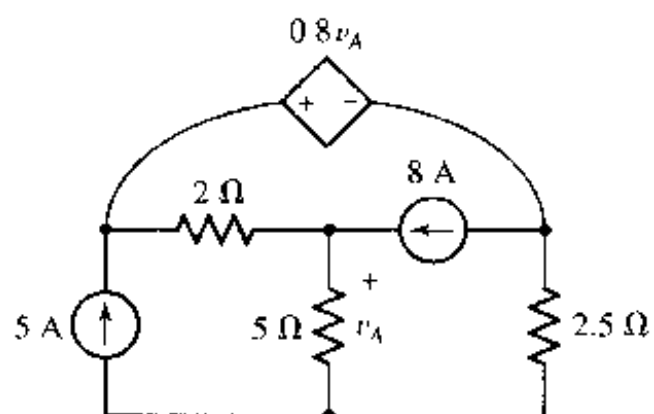


图 4.34

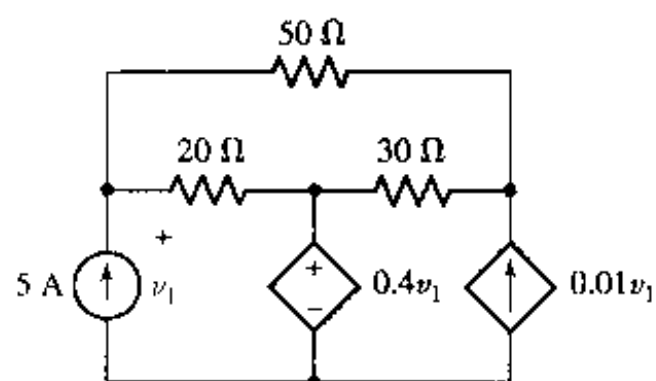


图 4.35

14. 在图 4.36 中, 应用节点分析求 k 的值使得 v_1 为 0。

15. 考虑图 4.37 所示电路, 求电流 i_1 。

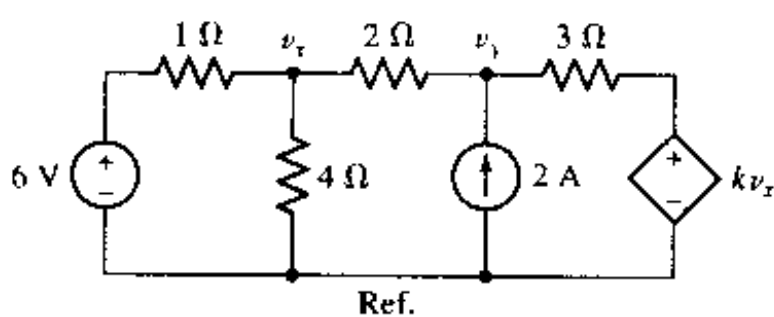


图 4.36

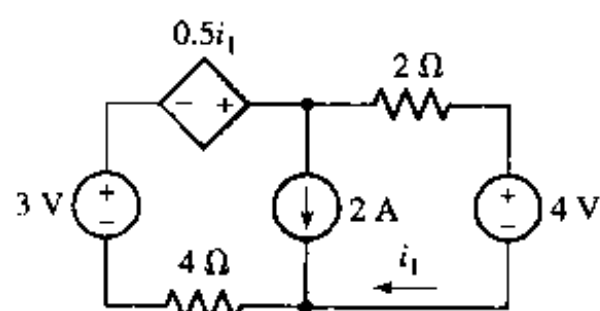


图 4.37

16. 利用超节点的概念, 求图 4.38 中标为 v_{20} 的电压。交叉的连线如果没有画实心点表示没有物理上的连接。

17. 对于图 4.39 所示电路, 求所有 4 个节点电压。

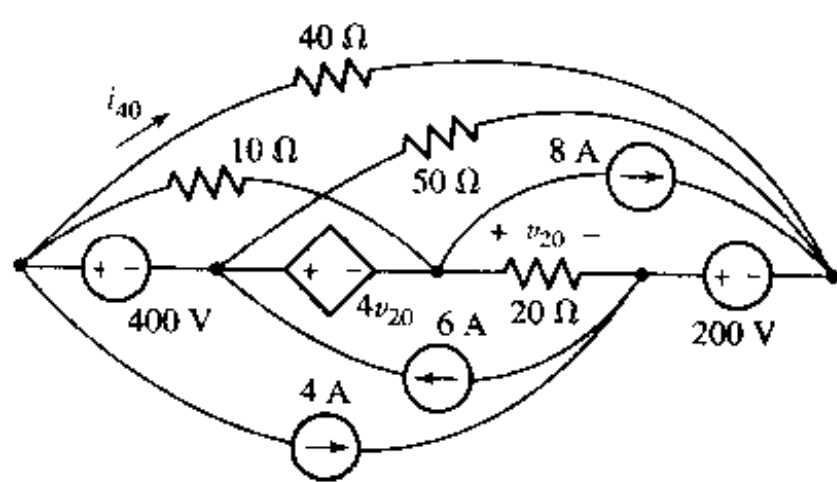


图 4.38

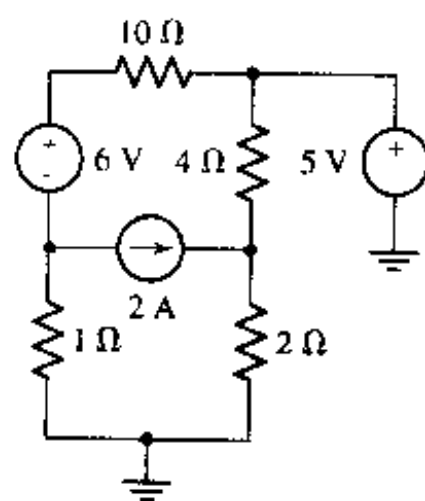


图 4.39

18. 求图 4.40 所示电路中 2 A 电源提供的功率。

19. 求图 4.41 所示电路中 2 A 电源提供的功率。

20. 求图 4.42 中描述电路特性的节点电压。

21. 应用网孔分析法求图 4.43 所示电路中的 i_x 。

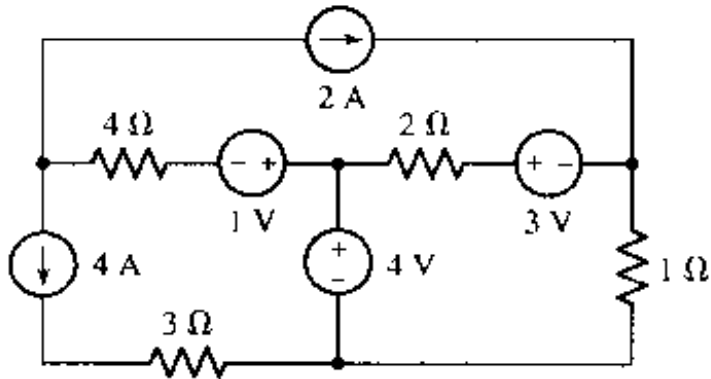


图 4.40

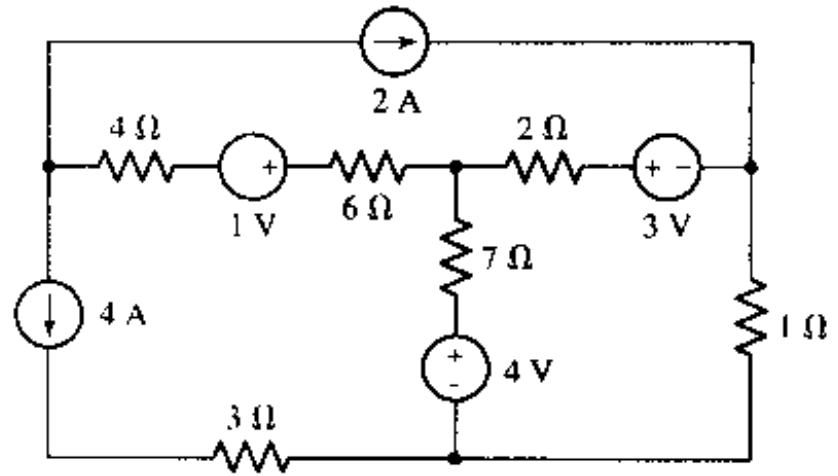


图 4.41

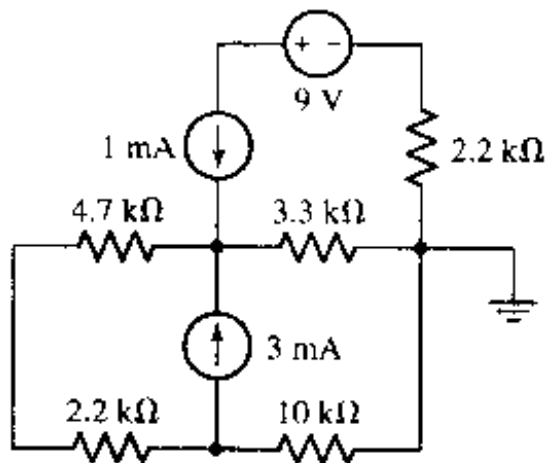


图 4.42

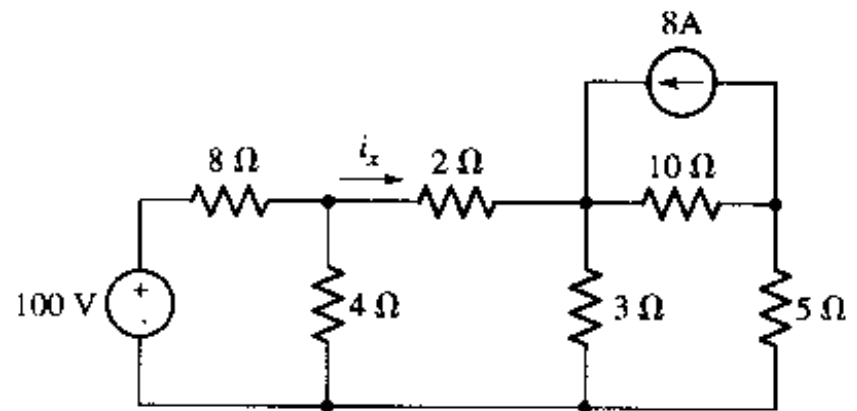


图 4.43

22. 如图 4.44 所示电路, 计算 2Ω 电阻消耗的功率。

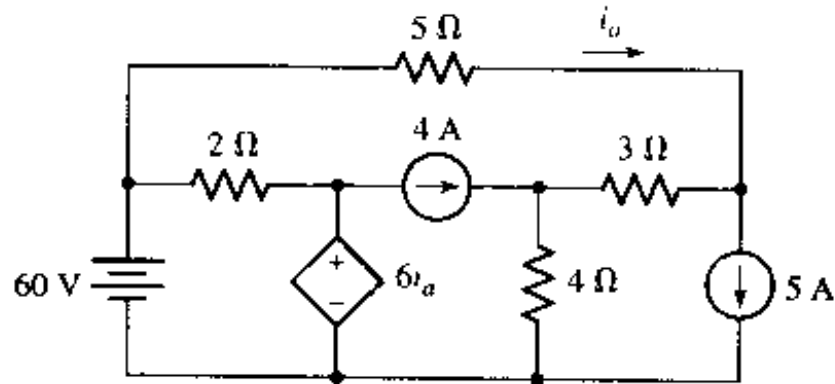


图 4.44

23. 将网孔分析法应用于图 4.35 所示电路, 求受控电压源提供的功率。

24. 应用网孔分析法求, 图 4.45 所示电路中的各网孔电流。

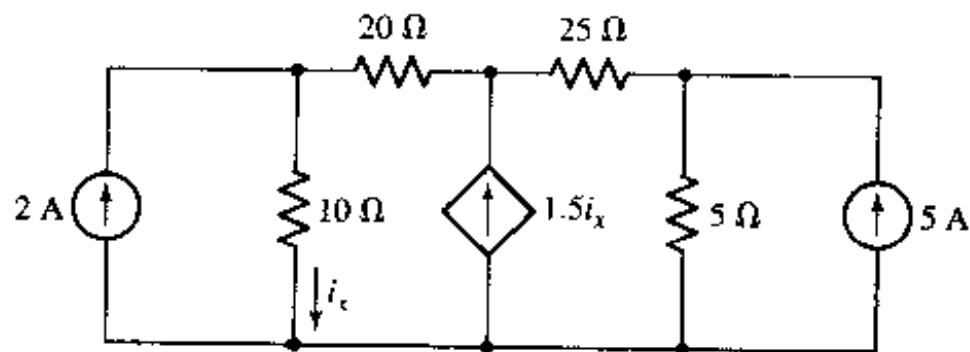


图 4.45

25. 求图 4.46 所示电路中顺时针方向的网孔电流。

26. 求图 4.47 所示电路中的各网孔电流。

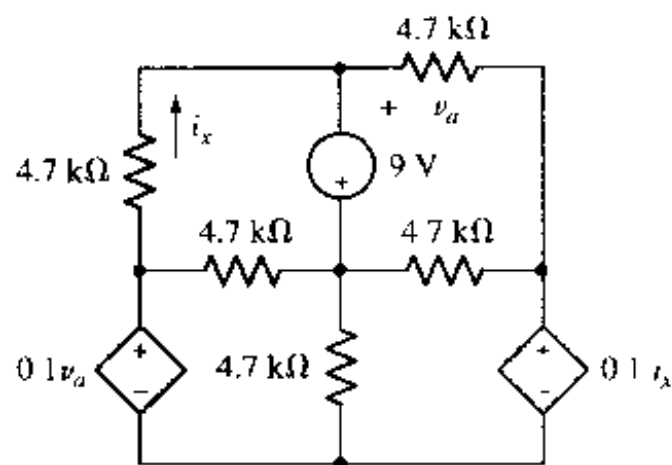


图 4.46

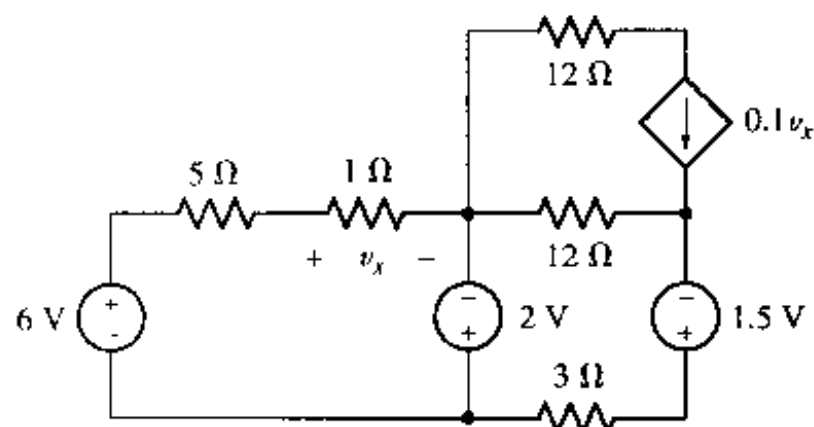


图 4.47

27. (a) 参看图 4.48 中的电路, 如果已知网孔电流 $i_1 = 1.5 \text{ mA}$, 求 R 的值。(b) R 的值必须是唯一的吗? 请解释

28. 对图 4.49 所示的电路, 采用网孔分析方法求各电阻吸收的功率。

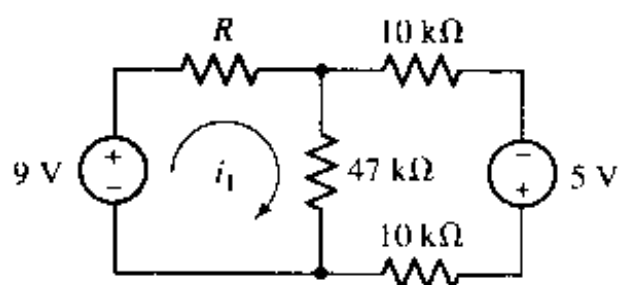


图 4.48

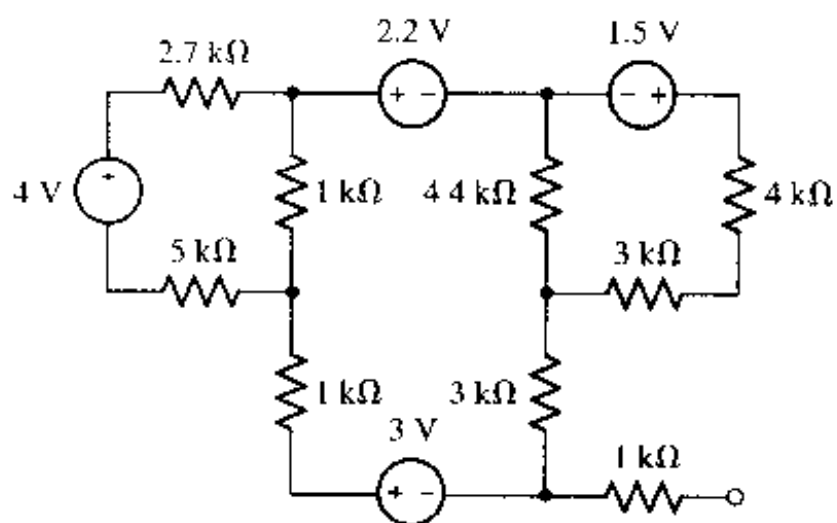


图 4.49

29. 图 4.50 所示的电路为是共基双极型晶体管放大器的等效电路。输入源已经被短路, 并且用一个 1 V 的电源代替了输出设备。(a) 用网孔分析法求 I_x ; (b) 用节点分析法验证在 (a) 中的解答; (c) 量 V_x/I_x 的物理含义是什么?

30. 在图 4.51 中, 选取 3 个非零电压源的大小, 使得电路中的任何电阻都没有电流流过。

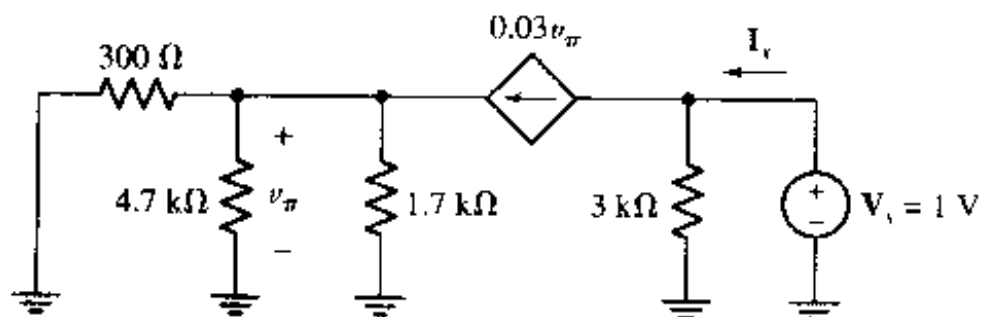


图 4.50

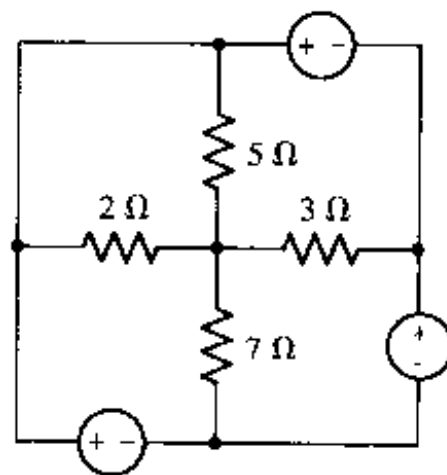


图 4.51

31. 采用网孔分析方法, 分别求图 4.52 中的 5 个电源所产生的功率。

32. 求图 4.53 所示电路中的 i_1 。

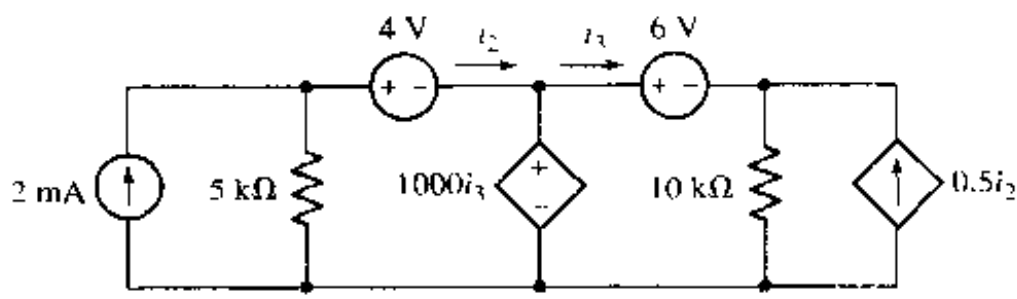


图 4.52

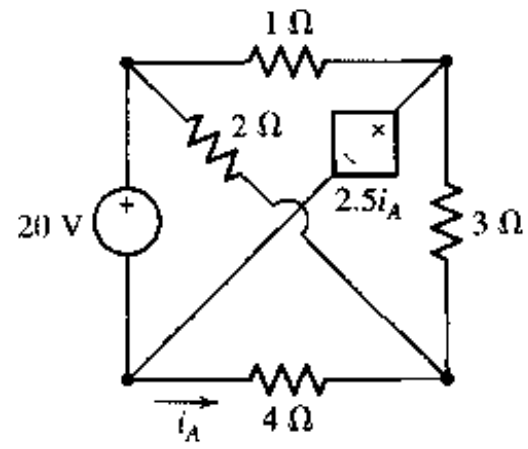


图 4.53

33. 利用超网孔的概念, 求图 4.54 所示电路中 2.2 V 电源所提供的功率。

34. 求图 4.55 中 2 mA 电源两端的电压, 假定底端的节点为地。

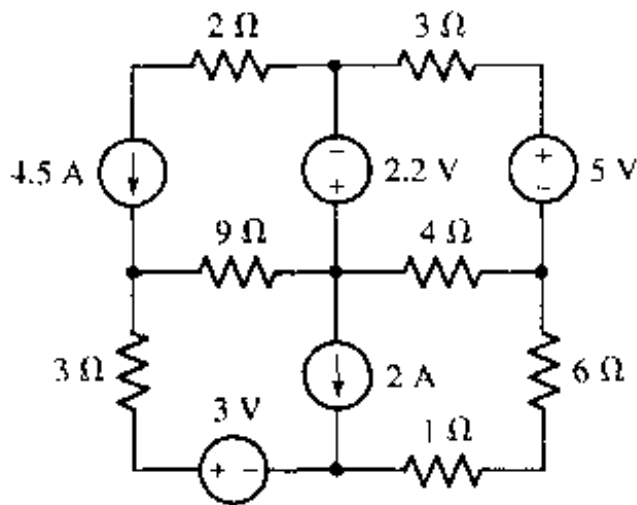


图 4.54

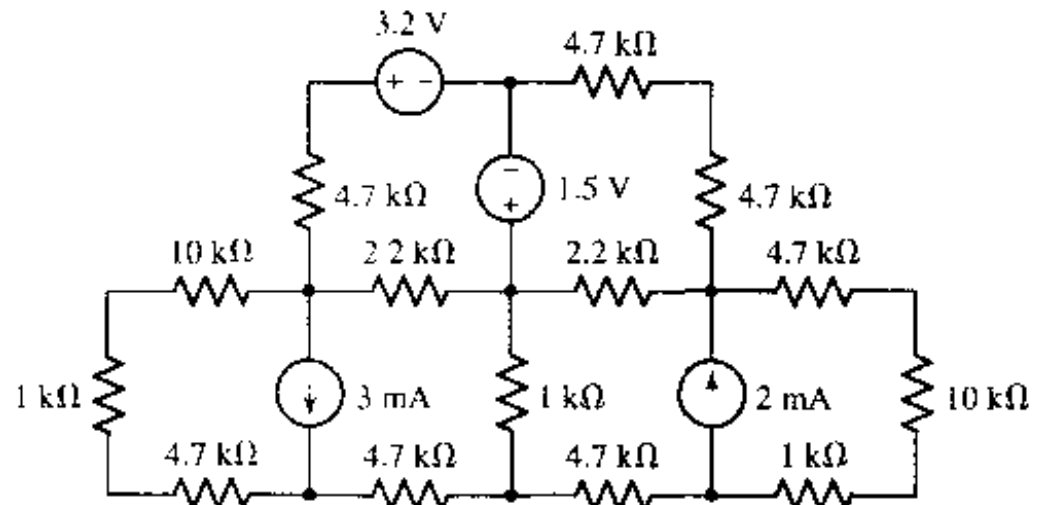


图 4.55

35. 使用网孔分析, 求图 4.56 中 2.5 Ω 电阻两端的电压。

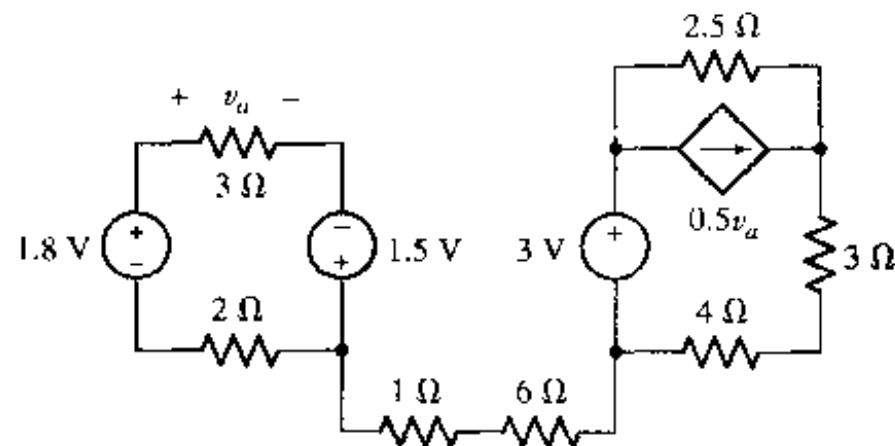


图 4.56

36. 求图 4.57 所示电路中的各网孔电流。

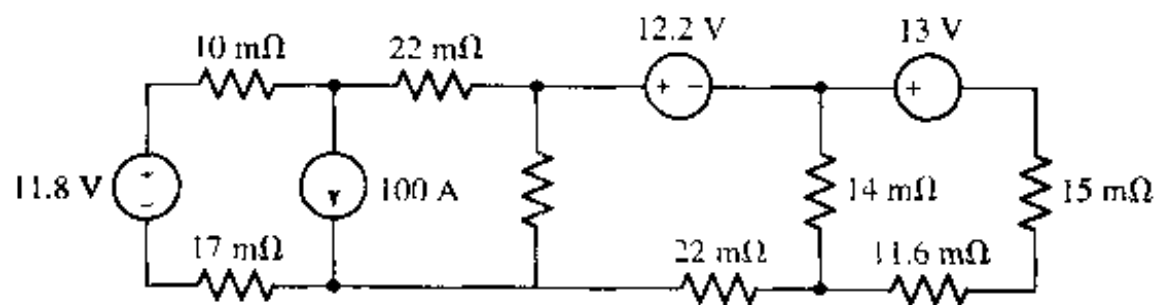


图 4.57

37. 对于图 4.58 的电路, 如果 $i_2 = 2.273 \text{ A}$, 求电阻 X 的值。

38. 在图 4.58 中, 以一个 3 A 的电源替换最右边的 7 V 的电源, 并且假定标为 X 的电阻的阻值为 0.3Ω , 求这个新电路的 3 个网孔电流。

39. 求图 4.59 中各电路中的电压 v_x 。

40. 求图 4.60 所示电路中的 v_3 , 如果元件 A 为 (a) 短路线; (b) 9 V 独立电压源, 参考正极端在左边; (c) 受控电流源, 箭头向左, 大小为 $5i_1$ 。

41. 求图 4.60 所示电路中的 i_1 和 i_2 , 如果元件 A 为一个 12Ω 电阻。解释选用节点分析法或者网孔分析法的合理性。

42. 如图 4.61 所示的电路, 求电流 i_{10} 的值。

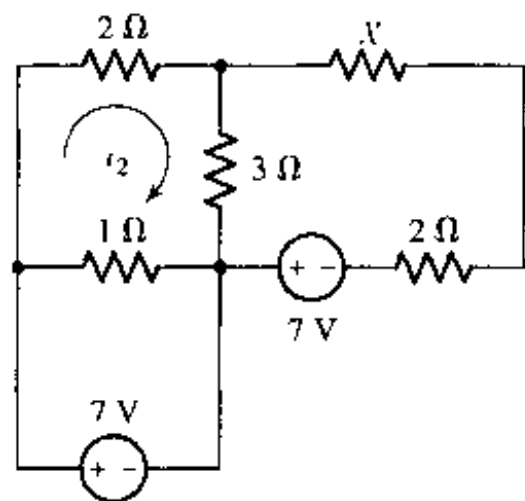
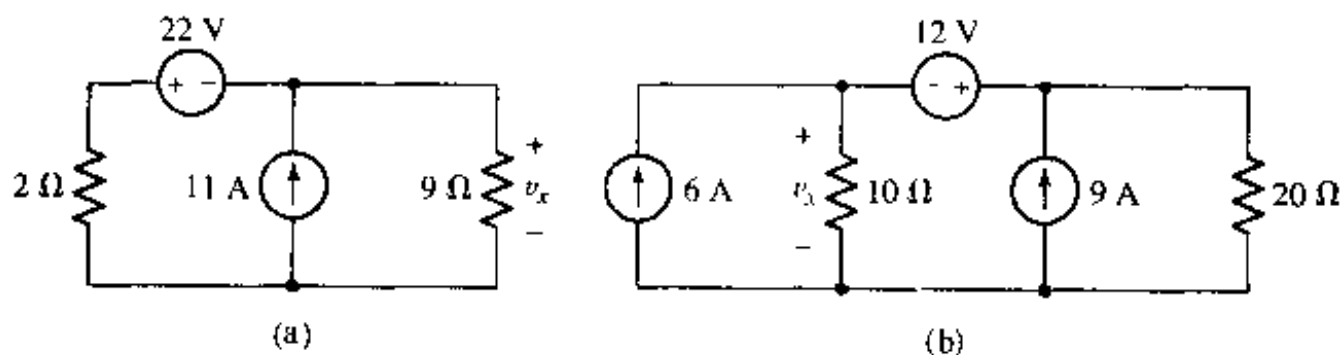
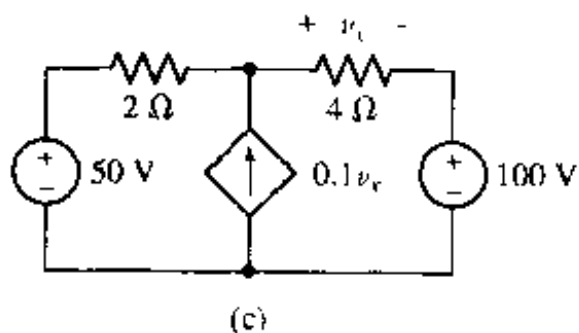


图 4.58



(a)

(b)



(c)

图 4.59

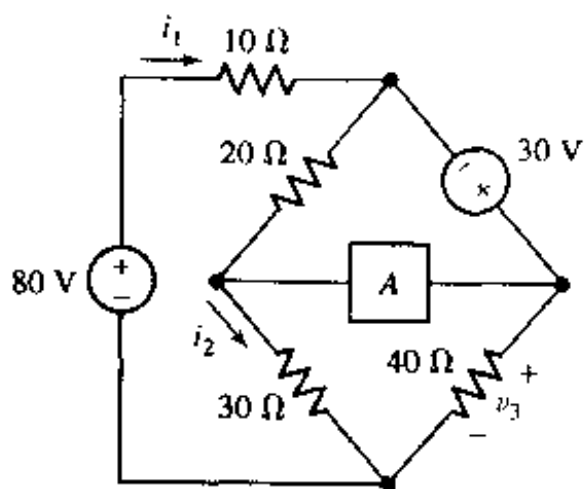


图 4.60

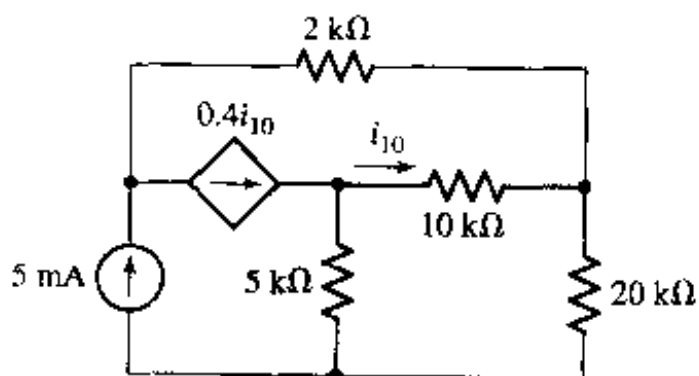


图 4.61

43. 如图 4.62 所示电路, 求标出的两个电流的值。

44. 对图 4.63 所示电路, 求中间节点的电压。

45. 求流过图 4.64 所示电路各个支路的电流。

46. 求图 4.65 中 2 mA 电流源两端的电压。

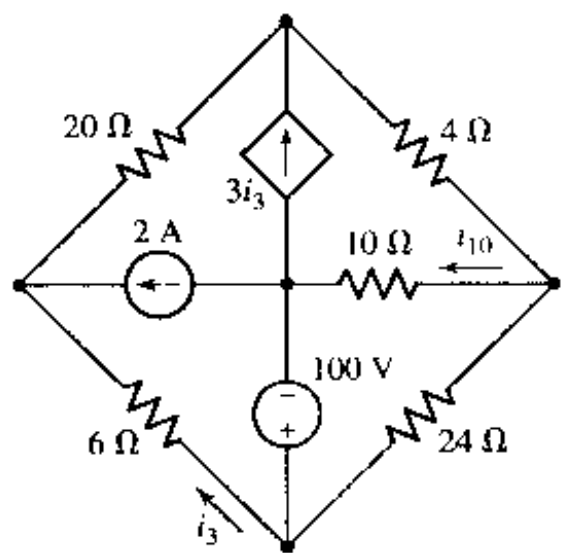


图 4.62

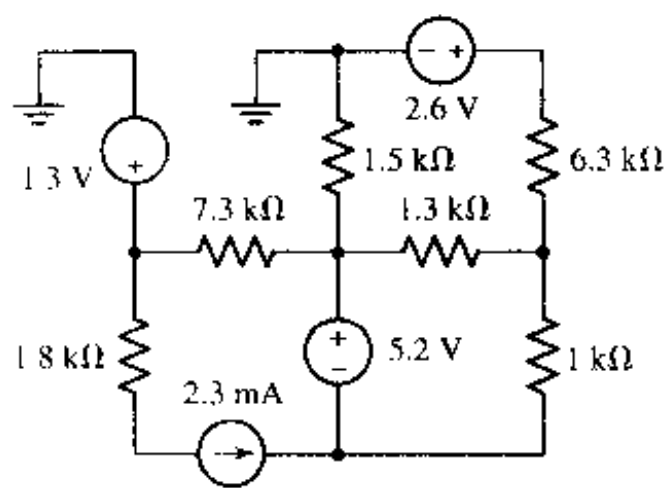


图 4.63

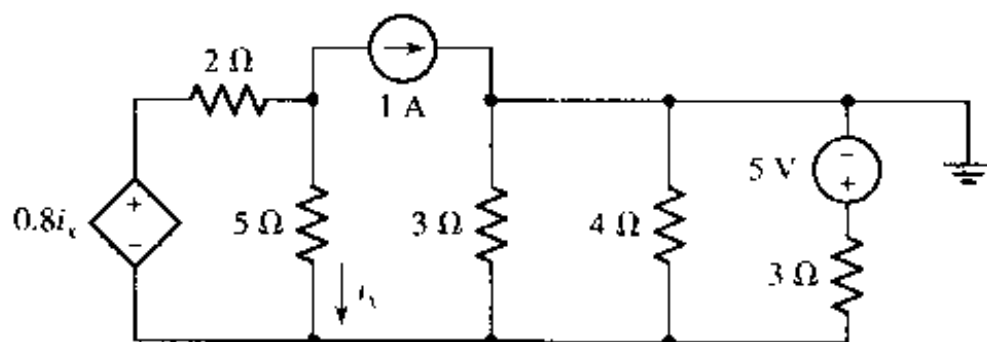


图 4.64

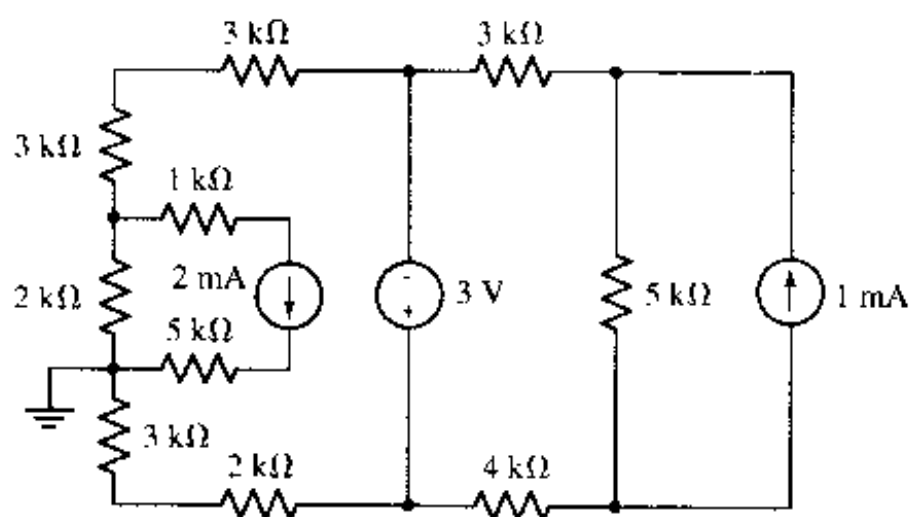


图 4.65

47. 对于图 4.66 中的电路, 设 A 为一个 5 V 电压源, 参考正极性在上端, 设 B 为一个 3 A 的电流源, 箭头指向地, 设 C 是为一个 $3\ \Omega$ 电阻, 设 D 为一个 2 A 电流源, 箭头指向地, 设 F 为一个 1 V 电压源, 参考负极性在右边, 以及 E 是为一个 $4\ \Omega$ 电阻。计算 i_1 。

48. 选取非零的 I_1 , I_2 和 V_1 的值, 使得图 4.67 所示电路中 $6\ \Omega$ 电阻消耗的功率为 6 W 。

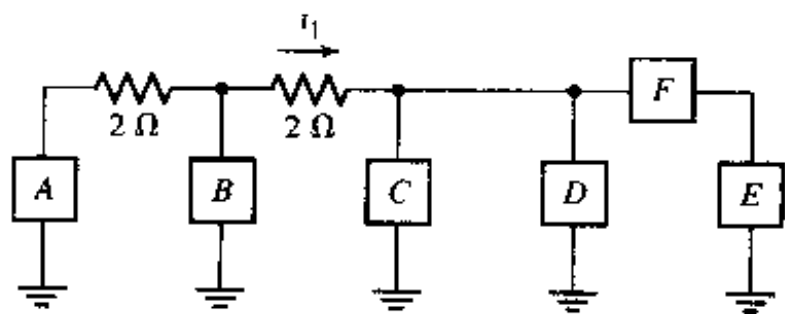


图 4.66

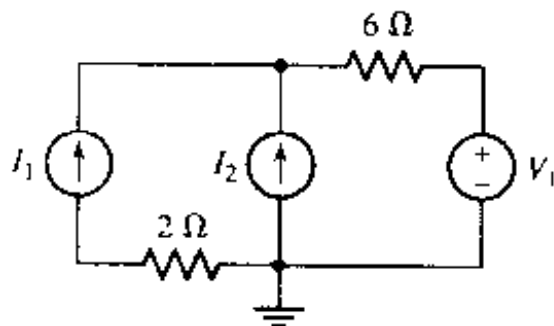


图 4.67

49. 参看图 4.65 的电路, 把 2 mA 电流源替换为 2 V 电压源, 3 V 电压源替换为 7 mA 电流源, 求新电路的各网孔电流。
50. 对于图 4.66 中的电路, A 为一个受控电流源, 箭头指向下, 标为 $5i_1$ 。设 B 和 E 为 $2\ \Omega$ 电阻, 设 C 为一个 2 A 电流源, 箭头指向地, F 为一个 2 V 电压源, 参考负极性和地相连, 设 D 为一个 3 A 电流源, 箭头指向上。求各节点电压和所有的网孔电流。
51. 使用 PSpice 来验证习题 4.42 的解答。提交一个打印的和正确标注的原理图, 并包括手算的结果。
52. 使用 PSpice 来验证习题 4.44 的解答。提交一个打印的和正确标注的原理图, 并包括手算的结果。
53. 使用 PSpice 来验证习题 4.46 的解答。提交一个打印的和正确标注的原理图, 并包括手算的结果。
54. 使用 PSpice 来验证习题 4.48 的解答。提交一个打印的和正确标注的原理图, 并包括手算的结果。
55. 使用 PSpice 来验证习题 4.50 的解答。提交一个打印的和正确标注的原理图, 并包括手算的结果。
56. 设计一个电路, 它包含一个串接了 $100\ \Omega$ 电阻的 5 V 电压源, 电压源连接到一个网络上, 该网络至少包含一个 3 A 电流源, 三个不同的电阻和一个压控电流源, 压控电流源受控于 $100\ \Omega$ 电阻两端的电压。(a) 求出所有的节点电压和所有的支路电流。(b) 使用 PSpice 来验证手算的答案。
57. 用一个 10 V 电池, 一个 3 A 电流源以及任意个 $1\ \Omega$ 电阻来构造一个电路, 使得 3 A 电流源两端的电压为 5 V, 并使用 PSpice 验证手算的结果。
58. 写出求解图 4.68 所示电路中 v_5 合适的 SPICE 输入面板。提交一个打印的输出文件, 并特别注明你的解答。

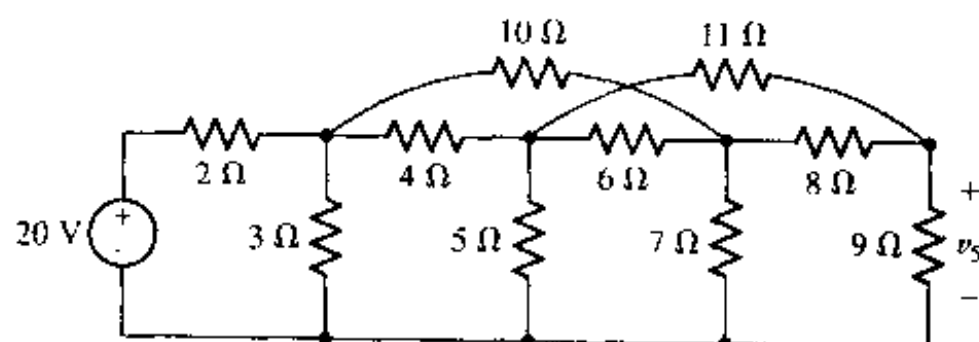


图 4.68

59. 只用一个 9 V 电池和若干个电阻构造一个电路, 使得该电路的各节点电压分别为 4 V, 3 V 和 2 V。写出一个合适的输入面板并用 SPICE 来仿真你的解答, 并提交特别注明了所求电压的打印文件。作为一个参考, 在打印出的图纸上画出标注好的原理图, 并标出节点编号。
60. 在一所房子中安装了一长串户外彩灯, 当加电的时候, 房屋主人发现两盏灯已烧坏。
(a) 这些灯是串联连接还是并联连接的? (b) 写出 SPICE 输入面板来仿真这些彩灯, 假定使用 20 AWG 的导线, 用 115 V 直流电源供电, 单个灯的额定功率为 1 W, 共有 400

盏灯。为简化起见,试用少于 25 个元件的等效电路来仿真它,提交一个打印的输出文件,并突出表示出插座电源提供的功率。(c)在替换了烧坏的灯后,房屋主人发现最靠近电源插座的那些灯比最远端的灯亮 10%。给出一个可能的解释,记住这一串彩灯中处处都是有电阻的。

第5章 常用电路分析方法

本章要点:

- 应用叠加原理确定总响应中单个电源的贡献
- 应用电源变换降低电路的复杂性
- 任意网络的戴维南等效电路
- 任意网络的诺顿等效电路
- 满足最大功率传输条件的负载电阻
- Δ 形网络与Y形网络的互换
- 选定分析策略以确定特定的响应
- 用 PSpice 程序进行直流扫描

5.1 引言

本章的基本目的是学习简化复杂电路的分析方法。人们常常只是对复杂电路中某一可分离部分的特性感兴趣。所以非常需要一种方法,能用大为简化的等效电路代替电路的其余部分。等效电路的概念还可以在分析开始之前进行多元件电路的简化。在学习了几种新的电路分析方法之后,将培养选择最方便分析方法的能力。

5.2 线性和叠加

本书要分析的所有电路都可归并为线性电路类型,因此现在应当给线性电路一个更确切的定义。这样,就可以考虑线性性质的最重要结果——叠加原理。叠加原理是一个非常基本的原理,它将在线性电路分析中多次出现。事实上正是由于在非线性电路中不能应用叠加原理,才使得非线性电路的分析变得如此困难。

叠加原理指出,含有多个独立源的电路中的响应(电流或电压)可以通过将各个独立源单独作用的结果相加而得到。

5.2.1 线性元件和线性电路

首先,线性元件定义为具有电压-电流线性关系的无源元件。“线性电压-电流关系”是指,若通过元件的电流乘以常数 K ,则元件两端的电压也将乘以常数 K 。迄今只定义了一种无源元件(电阻),其电压-电流关系为:

$$v(t) = Ri(t)$$

显然它是线性的。实际上,如果将 $v(t)$ 作为 $i(t)$ 的函数作图,结果将是一条直线。

还需要定义线性受控源,线性受控源是这样的电流源或电压源,它的输出电流或电压与电

路中某处的电流或电压(或这些量之和)的一次幂成正比。例如,受控电压源 $v_s = 0.6i_1 - 14v_2$ 是线性的,而 $v_s = 0.6i_1^2$ 和 $v_s = 0.6i_1 v_2$ 则不是。

线性电路定义为完全由独立源、线性受控源和线性元件所组成的电路。按照这一定义可以证明^①“响应正比于源”,或者说,将所有独立源的电流或电压增大为 K 倍,则所有电流或电压响应同样也增大为 K 倍(包括受控源的电流或电压输出)。

5.2.2 叠加原理

线性性质的最重要结果就是叠加性,为了导出叠加原理,首先考察图 5.1 的电路,它含有两个作用于电路的独立电流源 i_a 和 i_b 。为此常常把源称为激励函数,电流源产生的节点电压称为响应函数,或简称为响应。激励函数和响应都可能是时间的函数。这个电路的两个节点方程为:

$$0.7v_1 - 0.2v_2 = i_a \quad (5.1)$$

$$-0.2v_1 + 1.2v_2 = i_b \quad (5.2)$$

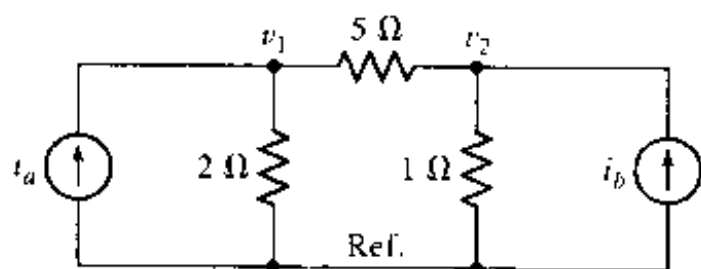


图 5.1 具有两个独立电流源的电路

现在来做实验,将两个激励函数改为 i_{ax} 和 i_{bx} ,两个未知电压也将随之改变,称之为 v_{1x} 和 v_{2x} 。因此:

$$0.7v_{1x} - 0.2v_{2x} = i_{ax} \quad (5.3)$$

$$-0.2v_{1x} + 1.2v_{2x} = i_{bx} \quad (5.4)$$

接着再做个实验,将源电流改为 i_{ay} 和 i_{by} ,然后测量响应 v_{1y} 和 v_{2y} :

$$0.7v_{1y} - 0.2v_{2y} = i_{ay} \quad (5.5)$$

$$-0.2v_{1y} + 1.2v_{2y} = i_{by} \quad (5.6)$$

这三组方程描写具有三套不同源电流的同一个电路。现在来“叠加”后两组方程。将式(5.3)和式(5.5)相加:

$$(0.7v_{1x} + 0.7v_{1y}) - (0.2v_{2x} + 0.2v_{2y}) = i_{ax} + i_{ay} \quad (5.7)$$

$$0.7v_1 - 0.2v_2 = i_a \quad (5.1)$$

再将式(5.4)和式(5.6)相加:

$$-(0.2v_{1x} + 0.2v_{1y}) + (1.2v_{2x} + 1.2v_{2y}) = i_{bx} + i_{by} \quad (5.8)$$

$$-0.2v_1 + 1.2v_2 = i_b \quad (5.2)$$

① 证明过程如下,首先对线性电路应用节点分析法得到如下形式的线性方程:

$$a_1v_1 + a_2v_2 + \dots + a_nv_n = b_1$$

其中 a_n 为常数(由电阻或电导值、出现在受控源的常数,以及 0 或 -1 组成), b_1 是独立源的值或其组合。给定一组这样的方程,如果将所有的 b 乘以 K ,显然这一组新方程的解就是节点电压。

为了方便对比,将公式(5.1)和公式(5.2)分别重写于公式(5.7)和公式(5.8)之后。

利用这些方程的线性性质可以比较公式(5.7)与公式(5.1),以及公式(5.8)与公式(5.2),进而得到一个有趣的结论。如果选择 i_{ax} 和 i_{ay} ,使它们之和等于 i_a ,同时选择 i_{bx} 和 i_{by} 使它们之和等于 i_b ,这样,所求的响应 v_1 和 v_2 可以分别通过 v_{1x} 和 v_{1y} 相加,以及 v_{2x} 和 v_{2y} 相加来得到。换句话说,可以做实验 x 并记下响应,再做实验 y 也记下响应,最后将两个响应相加。从这里得到叠加原理中的基本概念:可以将其他独立源“关闭”或“置零”以观察单个独立源以及它产生的响应。

如果将一个电压源的电压降低为 0 V ,它实际上就是一个短接的电路[图 5.2(a)]。如果将一个电流源的电流降低到 0 A ,它实际上就是一个断开的电路。所以,叠加原理可以叙述为:

在任何线性电阻性网络中,任何电阻或源两端的电压或流经的电流可由每一个独立源单独作用引起的电压或电流代数和得到,在某一独立源单独作用时,将所有其他独立电压源短路、独立电流源开路。

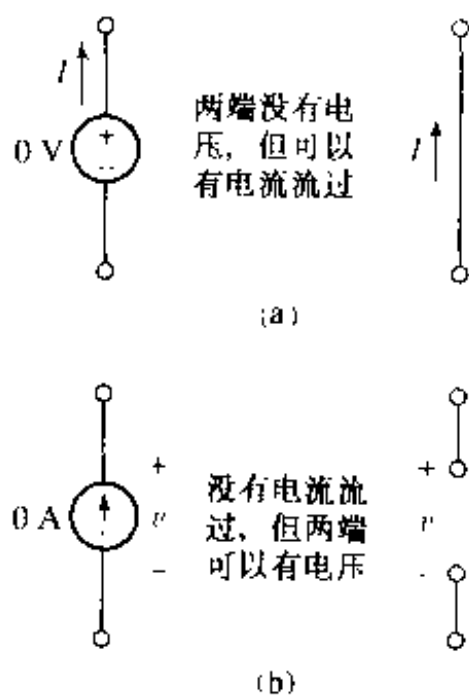


图 5.2 (a)一个置零的电压源的作用如同一个短接的电路;
(b)一个置零的电流源的作用如同一个断开的电路

这样,如果存在 N 个独立源,必须做 N 次实验,每次实验中只有一个独立源作用,其他都不作用,即关断或置零。注意,受控源在每次实验中一般都起作用。

刚才的例子指出了-一个很有用的定理。一组独立源可以选择性地设为活动和非活动。例如,假定有三个独立源。定理指出可以这样求得电路响应,将三个源单独作用的结果相加。或者让第一个和第二个源工作,而让第三个源不工作。然后将结果与第三个源单独工作的结果相加。这等于将这组电源看做一种特殊源,选择性地处理几个源的作用。

在上述几次实验中独立源并不一定只能取给定值或零,只要几次实验中源取值的和等于原来值就行。不过置零的源几乎总是使电路简化。下面通过两种独立源的例子,来说明叠加原理的应用。

例题 5.1 对于图 5.3(a)的电路,利用叠加原理写出未知支路电流 i_x 的表达式

首先将电流源设为零。重画电路如图 5.3(b) 由电压源产生的部分 i_x 用 i'_x 表示,容易得出 i'_x 为 0.2 A 。

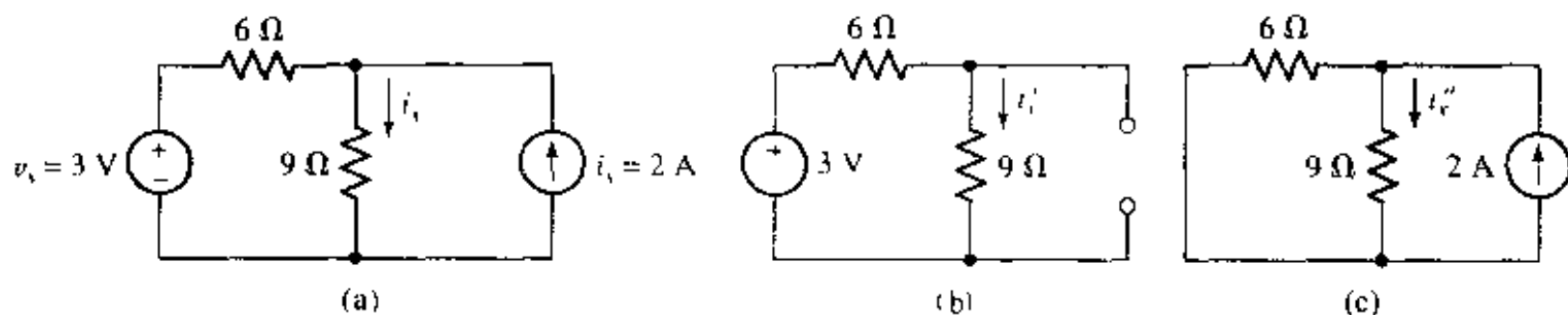


图 5.3 (a)具有两个独立源的电路例子,求支路电流 i_x ; (b)电流源开路后的同一电路; (c)电压源短路后的原电路

下一步设图 5.3(a)中的电压源为零,再重画电路如图 5.3(c)。按分流关系可以确定 i''_x (由 2 A 电流源产生的部分 i_x) 为 0.8 A。

现在求解完整的电流 i_x ,它是两个单个成分之和:

$$\begin{aligned} i_x &= i_x | 3\text{V} + i_x | 2\text{A} = i'_x + i''_x \\ &= \frac{3}{6+9} + 2\left(\frac{6}{6+9}\right) = 0.2 + 0.8 = 1.0\text{ A} \end{aligned}$$

对本例题的另一种考虑是,3 V 电源和 2 A 电源都作用于电路,产生总电流 i_x 流过 9 Ω 电阻。可是 3 V 电源对 i_x 的贡献并不取决于 2 A 电源的贡献,反之亦然。例如,如果将 2 A 电源加倍到 4 A,它对于流经 9 Ω 电阻的总电流 i_x 的贡献为 1.6 A。而 3 V 电源对于 i_x 的贡献仍然为 0.2 A,新的总电流为 $0.2 + 1.6 = 1.8\text{ A}$ 。

练习

5.1 对于图 5.4 电路应用叠加原理计算电流 i_x 。

答案:660 mA

如前所见,在考虑某个具体电路时,应用叠加原理一般并不减少工作量,因为它必须对几个新电路做分析,从而求得所需的响应。可是它在区分复杂电路中不同部分的重要性时确实很有用。

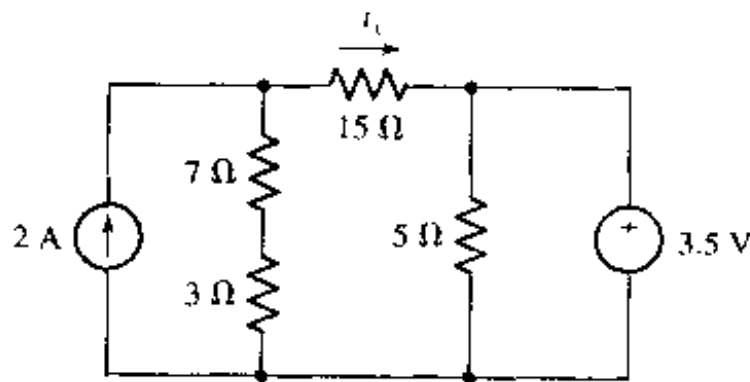


图 5.4

例题 5.2 参见图 5.5(a),确定电流源 I_x 的最大值,保证每个电阻上的功率不因超过额定值而过热

● 弄清问题的目标:

每个电阻额定的最大功耗为 250 mW。如果电路中实际功耗超过此值(过大电流流过两个电阻),将产生过热,很可能导致事故。6 V 电源不能改变,应该列出 I_x 的方程和每个电阻的最大电流的方程。

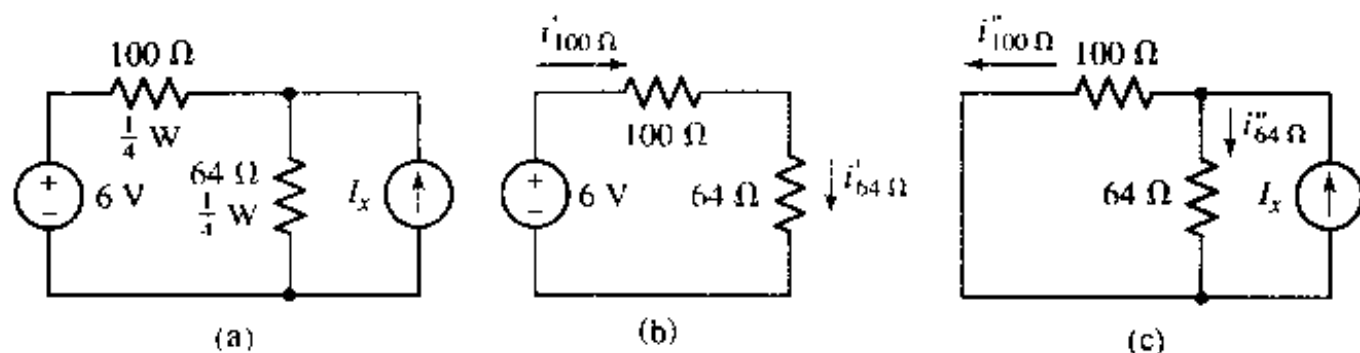


图 5.5 (a) 含有两个 $1/4 \text{ W}$ 电阻的电路; (b) 6 V 电源单独工作时的电路; (c) I_x 电源单独工作时的电路

● 收集已知信息:

根据 250 mW 额定功耗, 100Ω 电阻所能承受的最大电流为:

$$i_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{R}} = \sqrt{\frac{0.250}{100}} = 50 \text{ mA}$$

类似地, 流过 64Ω 电阻上的电流必须小于 62.5 mA 。

● 选择最适合习题的已有方法:

节点分析和网孔分析都可用来解决此问题, 但是叠加法更具优势, 因为主要感兴趣的是电流源的作用。

● 建立适当的方程组:

应用叠加法重画电路于图 5.5(b), 6 V 电源对 100Ω 电阻贡献的电流为:

$$i'_{100\Omega} = \frac{6}{100 + 64} = 36.59 \text{ mA}$$

因为 64Ω 电阻和 100Ω 电阻相串联, 6 V 电源对 64Ω 电阻贡献的电流 $i'_{64\Omega} = 36.59 \text{ mA}$ 。所以 6 V 电源单独作用时, 两个电阻都不会有过热问题。

图 5.5(c) 是个分流器电路, 注意到 $i''_{64\Omega}$ 应该与 $i'_{64\Omega}$ 相加, 但是 $i''_{100\Omega}$ 与 $i'_{100\Omega}$ 方向相反。这样 I_x 可以安全地贡献 $62.5 - 36.59 = 25.91 \text{ mA}$ 电流给 64Ω 电阻, 贡献 $50 - (-36.59) = 86.59 \text{ mA}$ 电流给 100Ω 电阻。

100Ω 电阻对 I_x 的限制如下:

$$I_x < (86.59 \times 10^{-3}) \times \left(\frac{100 + 64}{64} \right)$$

64Ω 电阻则要求:

$$I_x < (25.91 \times 10^{-3}) \times \left(\frac{100 + 64}{100} \right)$$

● 试解:

首先考虑 100Ω 电阻, 可以看到 I_x 必须满足 $I_x < 221.9 \text{ mA}$, 64Ω 电阻对 I_x 的限制为 $I_x < 42.49 \text{ mA}$ 。

● 证实所得解是否合理和满足要求:

为满足两个限制条件, I_x 必须小于 42.49 mA 。如果电流增大, 64Ω 电阻会远在 100Ω 电阻之前过热。考察这个解的特别有效的方法是应用下面第二个例题中介绍的 PSpice 中的直流扫描分析方法。可是一个有趣的问题是, 64Ω 电阻真的会首先过热吗?

开始觉得由于 100Ω 电阻的最大允许电流较小, 似乎它的电流应该超过电流限制 I_x 。

可是因为 I_1 与 6 V 电源在 $100\ \Omega$ 电阻上产生的电流相反, 而与 6 V 电源在 $64\ \Omega$ 电阻上产生的电流相同。因此, 结论是 $64\ \Omega$ 电阻限制了电流 I_1 。

例题 5.3 在图 5.6(a) 中, 用叠加原理确定 i_1 的值。

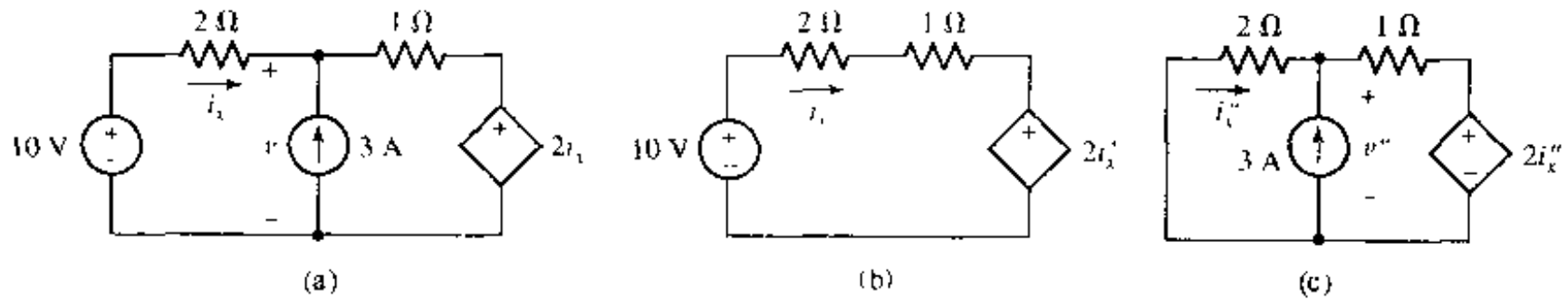


图 5.6 (a) 具有两个独立源和一个受控源的电路例子, 求其中的 i_1 ; (b) 3 A 电源开路时的电路; (c) 10 V 电源短路时的电路

首先将 3 A 电源开路 [见图 5.6(b)]。单一网孔的方程为:

$$-10 + 2i'_1 + 1i'_1 + 2i'_1 = 0$$

所以:

$$i'_1 = 2\text{ A}$$

接着将 10 V 电源短路 [见图 5.6(c)]。单一节点的方程为:

$$\frac{i''_1}{2} + \frac{v''}{1} - 2i''_1 = 3$$

将受控源控制量与 v'' 联系在一起:

$$v'' = 2(-i''_1)$$

求得:

$$i''_1 = -0.6\text{ A}$$

所以:

$$i_1 = i'_1 + i''_1 = 2 + (-0.6) = 1.4\text{ A}$$

值得说明的是, 总是使用某种下标以表示所引用变量不是原始变量, 这样是为防止对有关变量求和时出现可能的灾难性错误

练习

5.2 对图 5.7 所示电路, 利用叠加方法求每个电流源上的电压。

答案: $v_1|_{2\text{A}} = 9.180\text{ V}$, $v_2|_{2\text{A}} = -1.148\text{ V}$, $v_1|_{3\text{V}} = 1.967\text{ V}$, $v_2|_{3\text{V}} = -0.246\text{ V}$; $v_1 = 11.147\text{ V}$, $v_2 = -1.394\text{ V}$

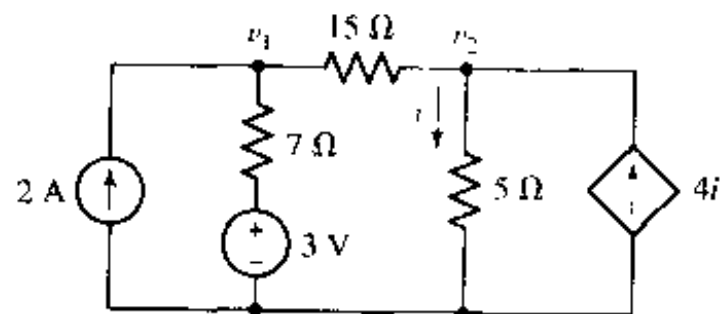


图 5.7

PSpice 简介

PSpice 不仅对验证电路分析的正确性非常有用,而且还能帮助确定每个电源对某个响应的贡献大小。为此,需要应用直流参数扫描(DC Parameter sweep)。

考虑例题 5.2 中的电路,要求在两个电阻上的功率不超过额定功率的条件下,确定电流源允许提供的最大正电流。用 PSpice 电路图抓取工具(Schematic capture tool)重画电路于图 5.8。注意未给电流源指定具体数值。

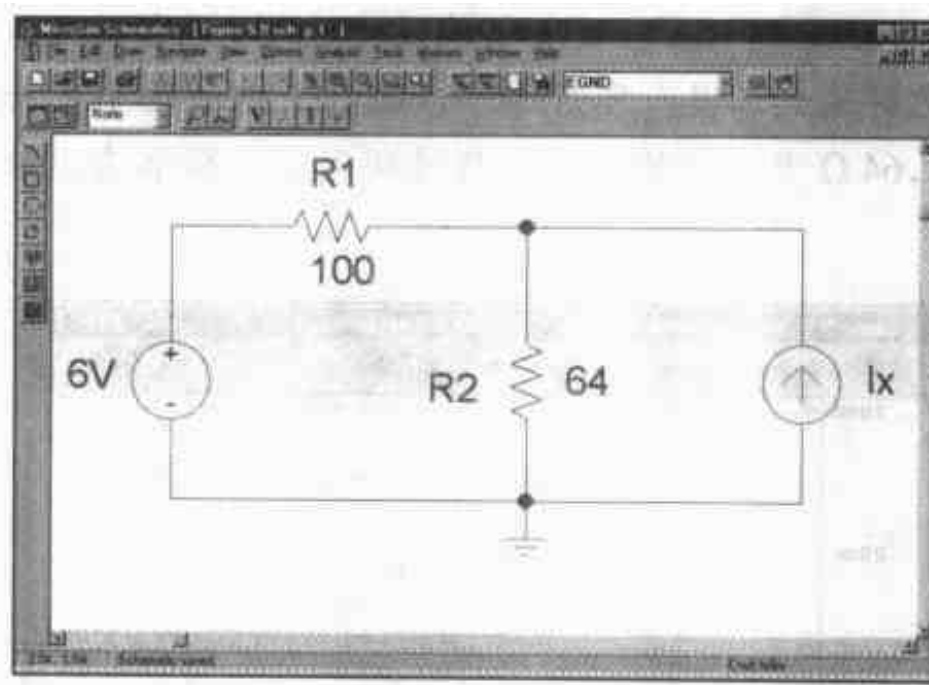


图 5.8 例题 5.2 的电路

将电路图输入并保存之后,下一步是确定扫描参数。这一选项允许为电压源或电流源(本例中为电流源 I_x)规定一个数值范围而不是一个确定值。在 Analysis 菜单下选择 Setup, 点击 DC Sweep 选项。这时出现一个像图 5.9 那样的对话框。

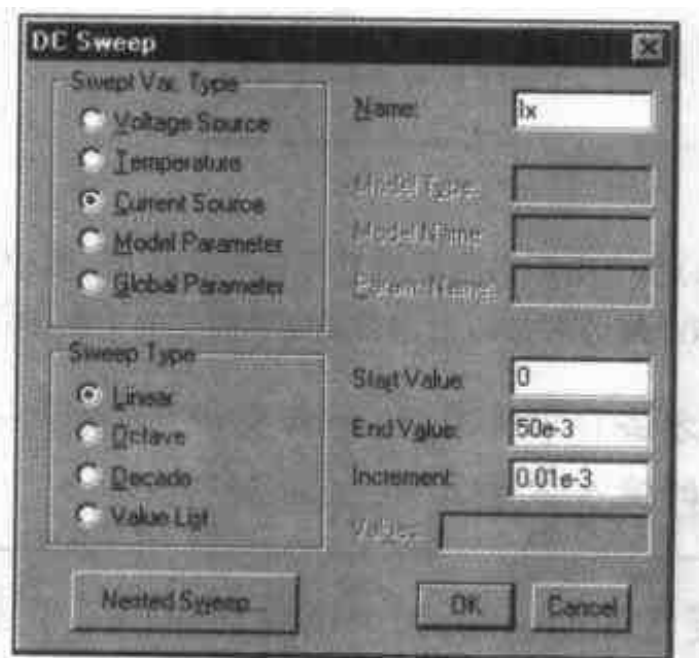


图 5.9 指定 I_x 为变量的直流扫描对话框

首先指定扫描变量类型为 Current Source,接着在 Name 一栏输入 I_x 。在扫描类型下还有几个选项:Linear, Octave, Decade 和 Value List。最后一个选项允许确定赋值给 I_x 的每个值。为了产生光滑的曲线,还是选择 Linear 扫描,起始值为 0 mA,终止值为 50 mA,步进为

0.01 mA。

执行模拟过程后,绘图程序会自动弹出。这时出现一个窗口,它的横轴为变量 I_x ,纵轴变量待选。从 Trace 菜单选择 Add Trace, 点击 I(R1), 然后在 Trace Expression 选框中输入一个星号, 再次点击 I(R1), 插入另一个星号, 最后输入 100。这是让绘图程序画出 $100\ \Omega$ 电阻所吸收的功率。类似地, 重复上述过程, 又可画出 $64\ \Omega$ 电阻所吸收的功率, 最后结果如同图 5.10(a) 所示。第三次在 Trace 菜单下选择 Add Trace, 在 Trace Expression 选框中输入 0.250, 就可在曲线图中加上一条位于 250 mW 的水平参考线。由图可见, 在 $I_x = 43\ \text{mA}$ 附近 $64\ \Omega$ 电阻上的功率的确超过额定值 250 mW。相反, 在规定的 $0 \sim 50\ \text{mA}$ 范围内, 无论电流源 I_x 怎样变化, $100\ \Omega$ 电阻上的功率始终未达到 250 mW。事实上, 随着电流源电流增加, 它的吸收功率下降。如果需要更为精确的结果, 只需选择光标工具。图 5.10(b) 显示了拖动两个光标到 42.56 mA 的结果。只是在这一电流水平上, $64\ \Omega$ 电阻上的功率才超过额定值。降低直流扫描所用步进大小可以提高曲线显示精度。

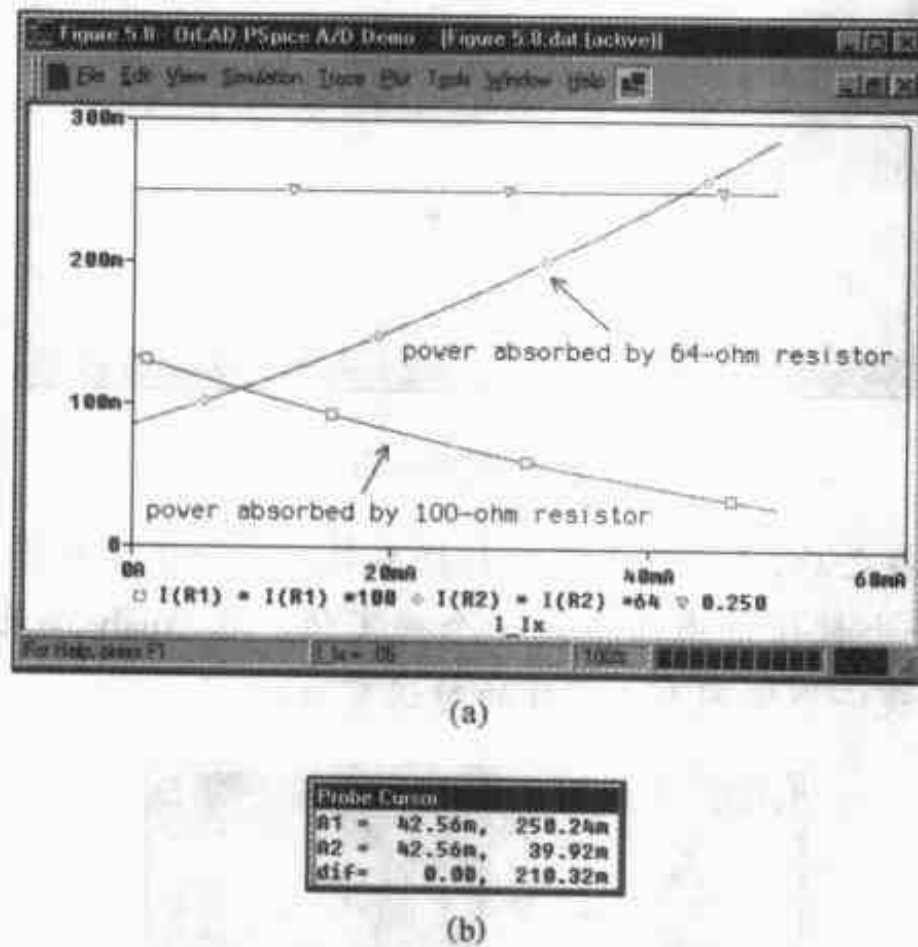


图 5.10 (a)两个电阻各自吸收功率的输出曲线,图中还包括一条 250 mW 水平线以及为帮助阅读所加的文字;(b)光标对话框

在分析电子电路时这一方法非常有用,比如需要确定,对于一个复杂的放大器电路,为获得零输出电压应该采用多大的输入信号。

遗憾的是,在分析含有受控源的电路时,应用叠加原理几乎不会少花时间,因为每次至少要分析含有两个电源的电路:一个独立源和所有的受控源。

必须时刻清楚叠加原理的限制。它仅适用于线性响应,所以最常见的非线性响应——功率不是叠加原理的应用范围。例如,考虑两个 $1\ \text{V}$ 电池与 $1\ \Omega$ 电阻的串联电路。显然,提供给电阻的功率是 $4\ \text{W}$,但是如果错误地应用叠加原理会得到,每个电池单独作用提供 $1\ \text{W}$,所以总功率为 $2\ \text{W}$ 。这是一个非常容易犯的错误。

5.3 电源变换

5.3.1 实际电压源

到此为止,考虑电源无一例外的是理想电压源和理想电流源。现在应该更接近实际一步,考虑实际电源。这些电源可以更贴切地表示实际电源。一旦定义了实际电源,就会看到实际电流源和实际电压源可以彼此替换而不影响电路的其余部分。这样的电源称为等效电源。这种方法既适用于独立源,也适用于受控源,尽管会发现对受控源不像对独立源那样有用。

理想电压源定义为端电压与流过它的电流无关的元件。1 V 直流源在 1 Ω 电阻上产生 1 A 电流,在 1 $\mu\Omega$ 电阻上产生 1 000 000 A 电流,它能提供无限的功率。当然实际上并不存在这样的元件,在这之前已经认识到,仅在较小的电流或功率下实际电压源才可以用理想电压源来表示。例如,汽车电池可以用

12 V 理想电压源近似,只要它的电流限制在几个安培之内[图 5.11(a)]。可是任何人,只要试在前灯点亮的条件下启动发动机,一定会观察到,让电池提供 100 A 或更大发动机启动电流,会使车灯变暗。在这种条件下,理想电压源不能很好地表示电池。

为了更好地近似实际元件的性能,必须修改理想电压源,考虑大电流下端电压降低效应。假定实验上发现,没有电流流过电池时,汽车电池端电压为 12 V;当电流为 100 A 时电压降为 11 V。怎样模拟这一实验结果呢?更精确的模型可能是一个 12 V 理想电压源与一个电阻串联,在 100 A 电流下电阻上的电压为 1 V。经过简单计算,这个电阻是 $1 \text{ V}/100 \text{ A} = 0.01 \Omega$,理想电压源与串联电阻组成了实际电压源[图 5.11(b)]。这里利用两个相串联的理想电路元件(独立电压源和电阻)构成了实际元件的模型。当然,不能指望在汽车电池内部找到这样的理想元件结构。任何理想元件是由其端点的一定的电流电压关系所确定的。需要构造出理想元件的某种组合,至少在一定的电流、电压和功率范围内,它能够具有类似的电流电压特性。

图 5.12(a)中,由两个元件组成的汽车电池实际模型连接到某一负载电阻 R_L 上。实际电源的端电压与电阻 R_L 上的端电压相同,记为 V_L ^①,图 5.12(b)显示这一实际电源的负载电流 I_L 和负载电压 V_L 的函数曲线。用 I_L 和 V_L 可以写出图 5.12(a)的 KVL 方程:

$$12 = 0.01 I_L + V_L$$

所以:

$$I_L = 1\,200 - 100 V_L$$

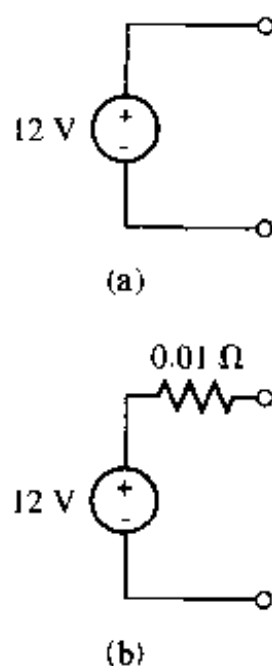


图 5.11 (a)用以表示汽车电池的12V理想电压源模型;(b)考虑到大电流下端电压降低效应的更为精确的模型

① 从这里开始将努力坚持参数标识规范,用大写字母标记严格的直流量,用小写字母标记含有时变成分的量。可是在描写那些既适用于直流,又适用于交流的一般定理时,将继续使用小写字母,以强调概念的一般性质。