

7. 在图 5.48 电路中, (a) 如果 $i_A = 10 \text{ A}$, $i_B = 0$, 那么 $v_3 = 80 \text{ V}$; 如果 $i_A = 25 \text{ A}$, $i_B = 0$, 求 v_3 ; (b) 如果 $i_A = 10 \text{ A}$, $i_B = 25 \text{ A}$, 那么 $v_4 = 100 \text{ V}$; 如果 $i_A = 25 \text{ A}$, $i_B = 10 \text{ A}$, 那么 $v_4 = -50 \text{ V}$; 如果 $i_A = 20 \text{ A}$, $i_B = -10 \text{ A}$, 求 v_4 .
8. 应用叠加原理求图 5.49 中电流源上的电压。

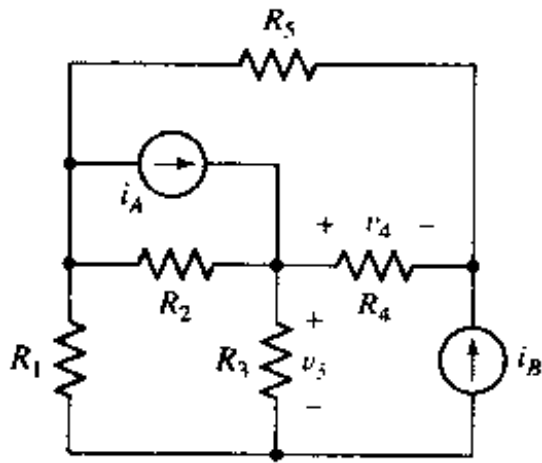


图 5.48

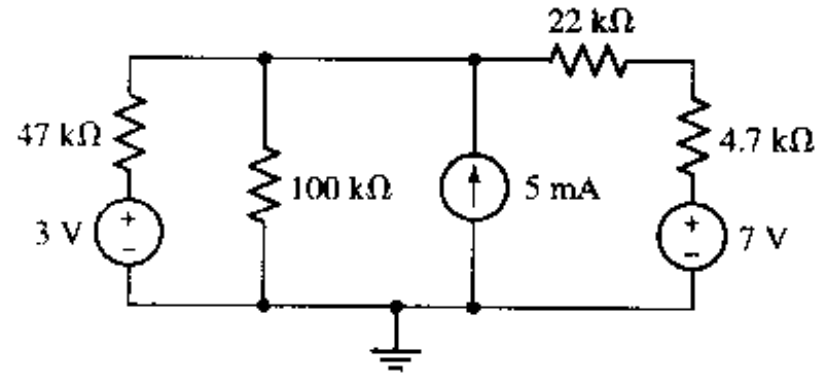


图 5.49

9. 应用叠加原理求图 5.50 中 $500 \text{ k}\Omega$ 电阻消耗的功率。
10. 应用叠加原理确定图 5.51 中 $17 \text{ k}\Omega$ 电阻上的电压。如果电阻的额定最大功率为 250 mW , 为避免电阻过热, 5 V 电源允许达到的最大正电压为多少?

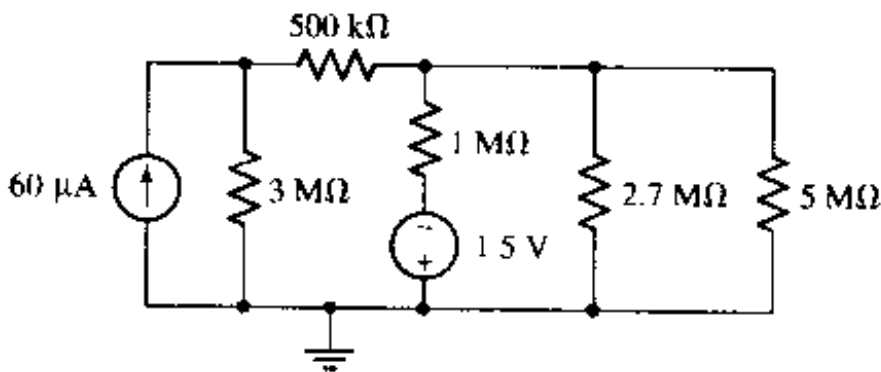


图 5.50

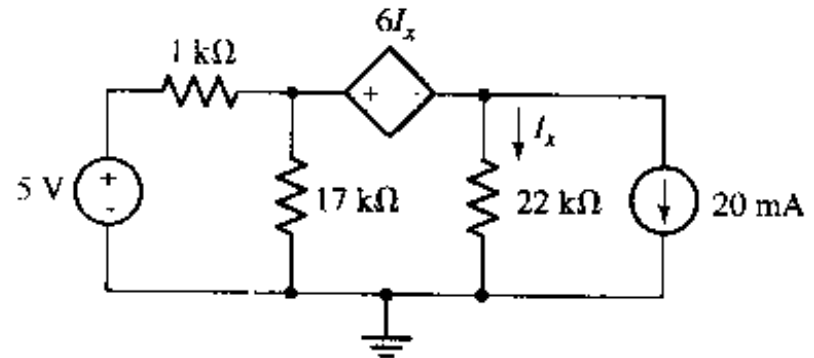


图 5.51

11. 图 5.52 中哪个电源提供给 2Ω 电阻的功率最大? 哪个最小? 2Ω 电阻上消耗的功率有多大?
12. 应用叠加原理求图 5.53 电路中 i_B , 这是双极型晶体管放大器的通用电路模型。

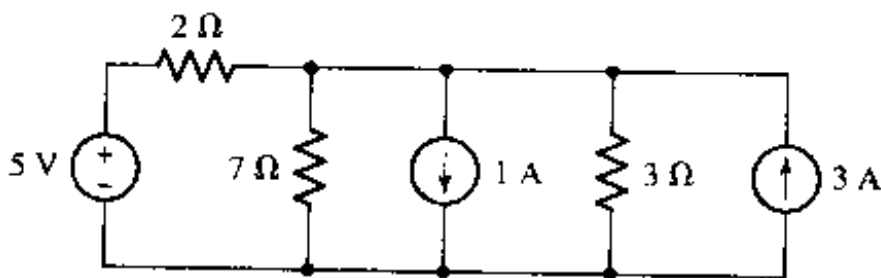


图 5.52

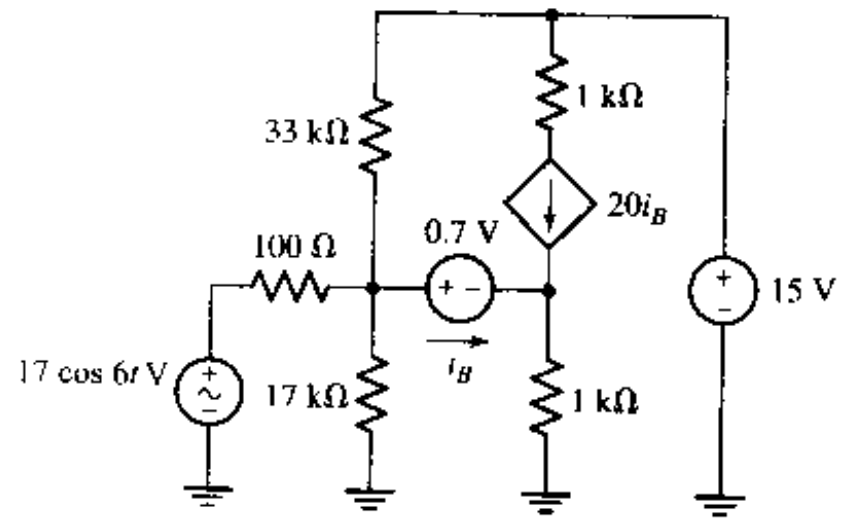


图 5.53

13. 对图 5.54 所示电路:

(a) 利用叠加原理计算 V_x ; (b) 利用 PSpice 直流扫描分析程序证实每个电源对 V_x 的贡献。递交一份标注好的电路图和有关的输出曲线, 并对结果做一小结。

14. 对图 5.55 所示电路:

(a) 应用叠加原理计算 V_x ; (b) 利用 PSpice 直流扫描分析程序证实每个电源对 V_x 的贡献。递交一份标注好的电路图和有关的输出曲线, 并对结果做一小结。

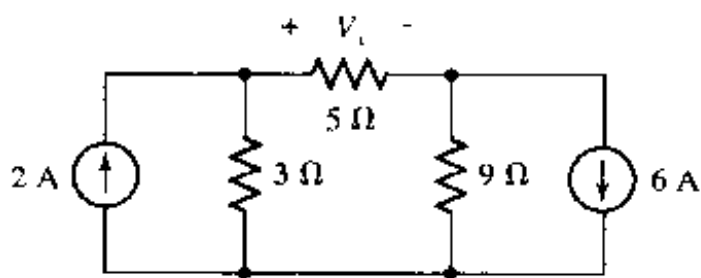


图 5.54

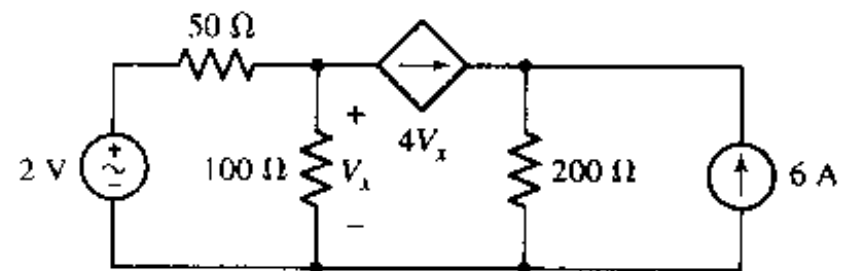


图 5.55

15. 考虑图 5.56 所示的三个电路。分析每个电路, 证明 $V_x = V_x' + V_x''$ (这说明, 尽管叠加原理大多用于将电源置零, 而事实上叠加原理具有更广泛的意义)。

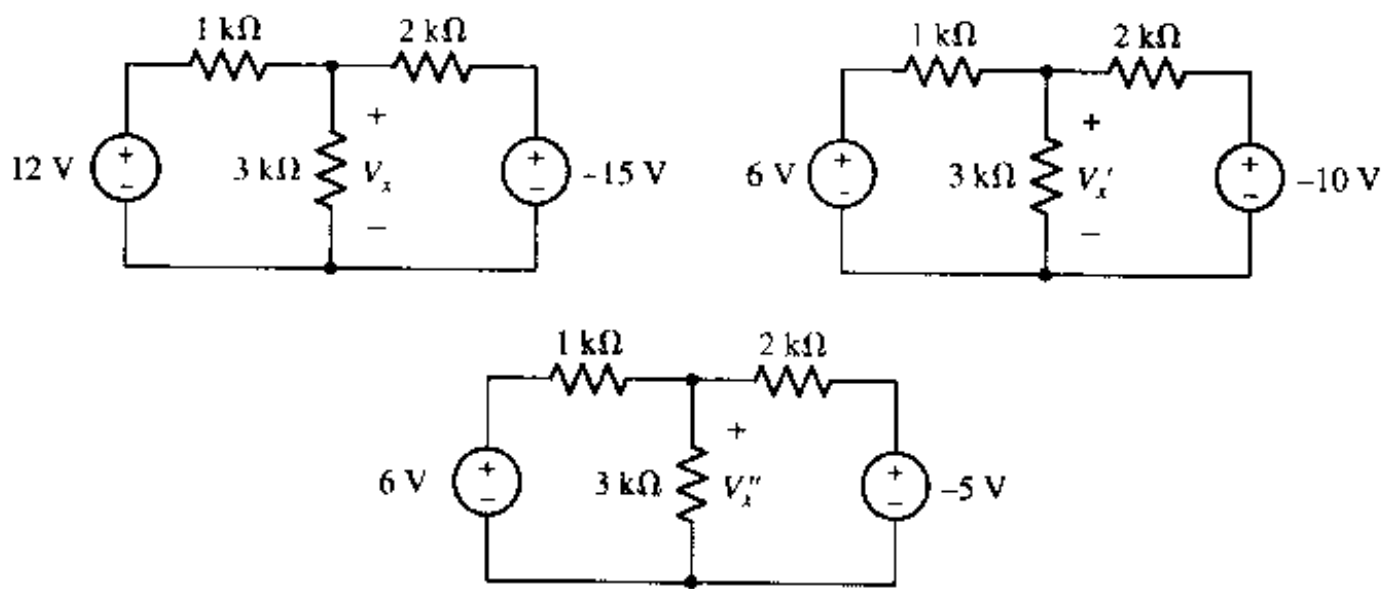


图 5.56

16. 用电源变换和电阻合并来简化图 5.57 的两个网络, 直到端点 a 和 b 的左边只剩下两个元件。

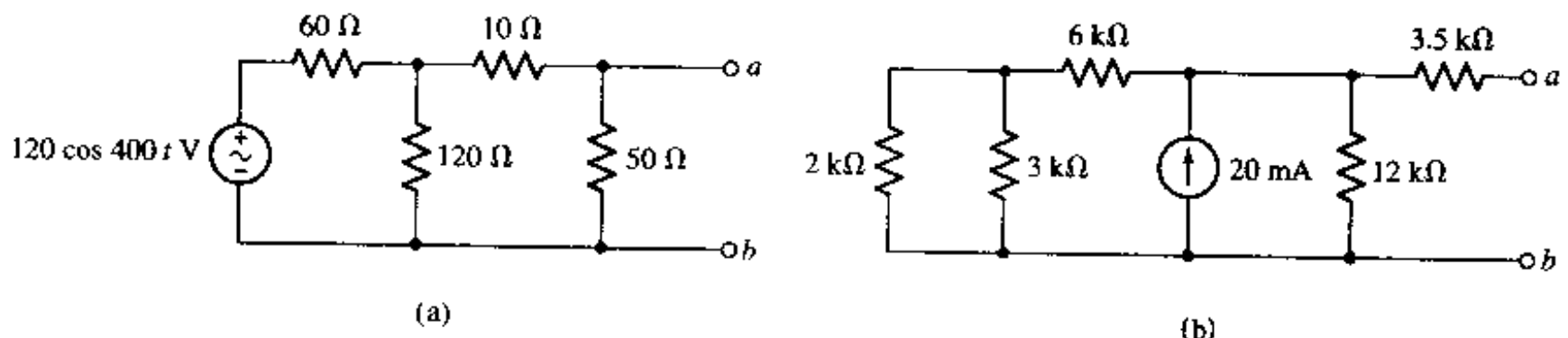


图 5.57

17. 利用电源变换确定图 5.58 中 $5.8 \text{ k}\Omega$ 电阻上消耗的功率。

18. 利用电源变换确定图 5.59 中 $5.8 \text{ k}\Omega$ 电阻上消耗的功率。

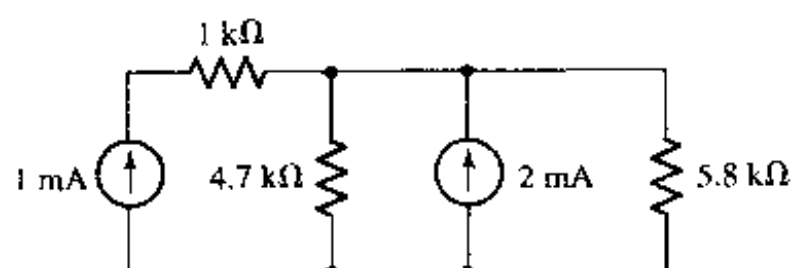


图 5.58

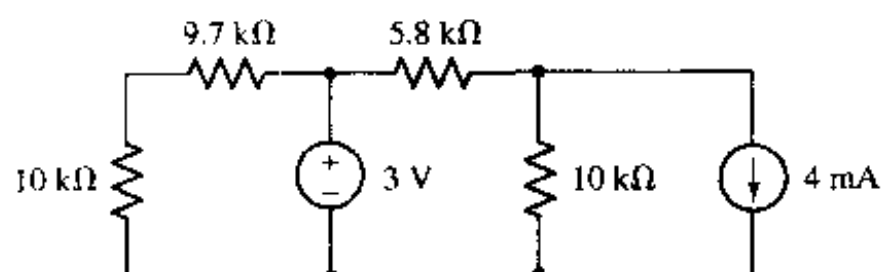


图 5.59

19. 利用电源变换先简化图 5.60 所示电路, 然后确定 $1 \text{ M}\Omega$ 电阻上消耗的功率。

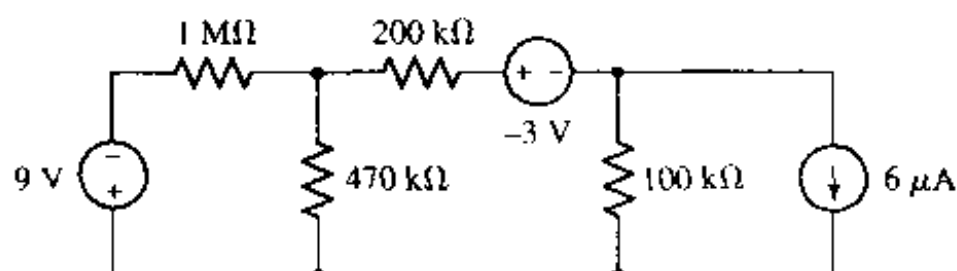


图 5.60

20. 利用电源变换先简化图 5.61 所示电路, 然后确定 I_1 。

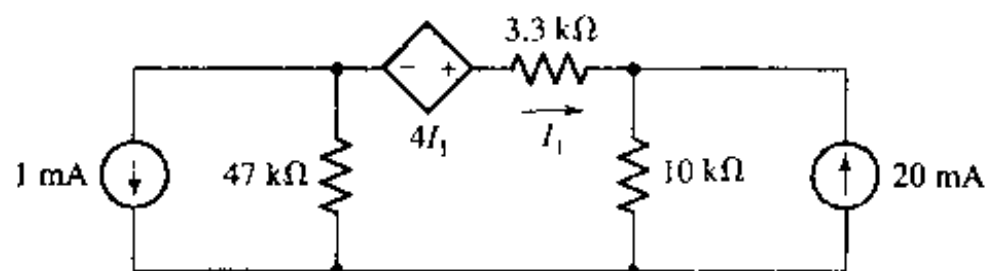


图 5.61

21. (a) 利用电源变换先得到图 5.62 所示电路的简化等效电路, 然后求 V_1 ; (b) 对图 5.62 电路做 PSpice 分析证实前面的分析。递交一份清楚标明 V_1 的电路图。

22. (a) 连续做电源变换确定图 5.63 中电流 I_x ; (b) 对图 5.63 电路做 PSpice 分析证实前面的分析。递交一份清楚标明 I_x 的电路图。

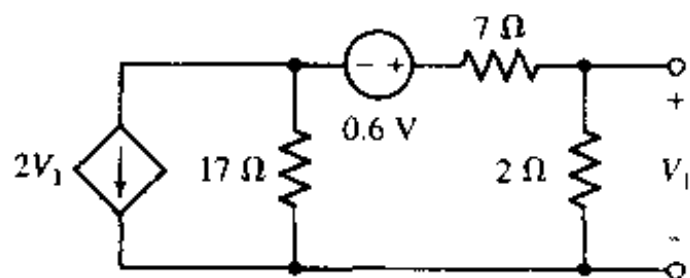


图 5.62

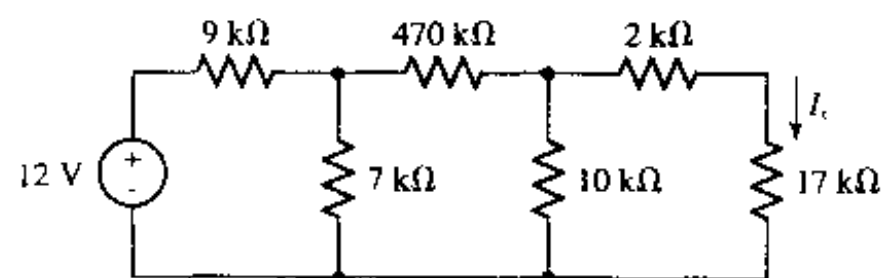


图 5.63

23. 连续做电源变换确定图 5.64 中电流 I_x 。

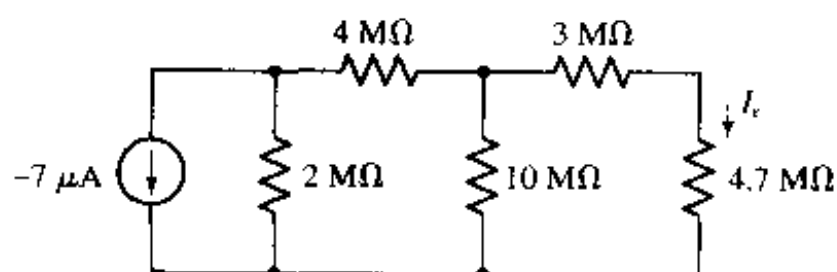


图 5.64

24. 将图 5.65 电路变换为单个电流源与单个电阻的并联。

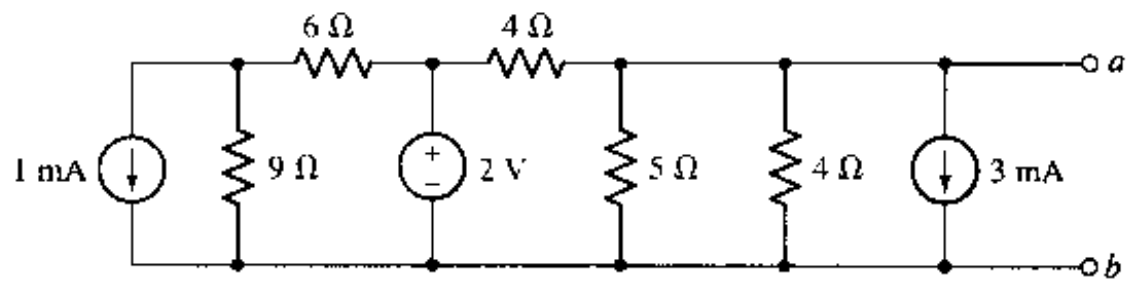


图 5.65

25. 利用电源变换将图 5.66 电路变换为单个电流源与单个电阻的并联。

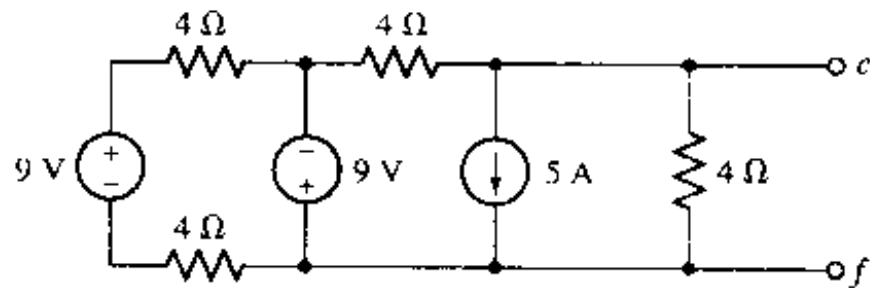


图 5.66

26. 确定图 5.67 电路中 $1\text{ M}\Omega$ 电阻消耗的功率。

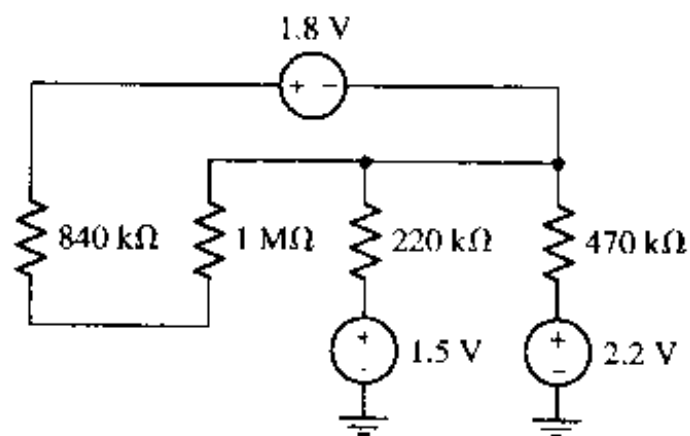


图 5.67

27. 表 5.1 列出对某个 1.5 V 碱性电池所做的测量。利用所给信息为电池建立一个两个元件的实际电压源模型,使模型在电流从 1 mA 到 20 mA 范围内比较精确。注意,除了明显的实验误差之外,在实验测量的电流范围内,电池“内阻”明显不同。

表 5.1 接有可变负载电阻的 1.5 V 碱性电池电流 - 电压特性测量

电流输出 (mA)	端电压 (V)
0.000 058 9	1.584
0.318 3	1.582
1.439 8	1.567
7.010	1.563
12.58	1.558

28. 利用表 5.1 中的数据为电池建立一个简单双元件实际电流源模型,使模型在电流从 1 mA 到 20 mA 范围内比较精确。注意,除了明显的实验误差之外,在实验测量的电流范围内,电池“内阻”明显不同。

29. 将图 5.68 电路简化为单一电压源与单一电阻的串联。

30. 求图 5.69 中 $5\ \Omega$ 电阻吸收的功率。

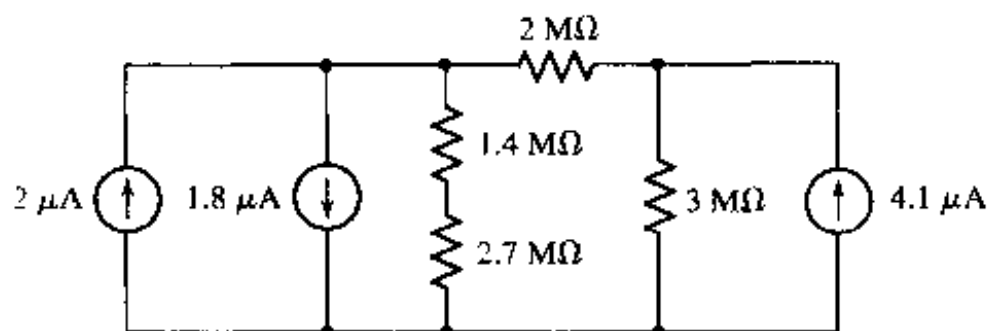


图 5.68

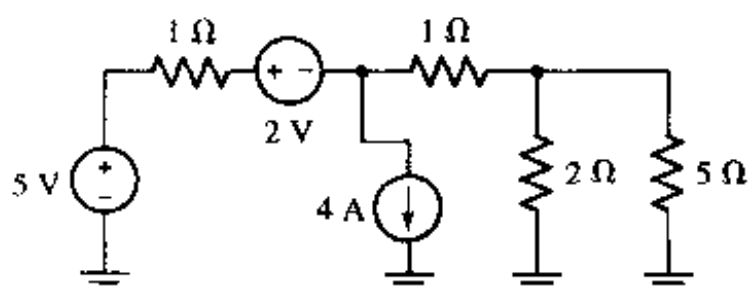


图 5.69

31. 求图 5.70 网络中端点 a 和 b 的戴维南等效电路。如果连接到端点 a 和 b 的电阻 R_{ab} 等于 (b) $50\ \Omega$; (c) $12.5\ \Omega$, 提供给该电阻的功率是多少?

32. 对于图 5.71 的网络: (a) 去除端点 c , 求在端点 a 和 b 看到的诺顿等效电路; (b) 去除端点 a , 对端点 b 和 c 重复以上计算。

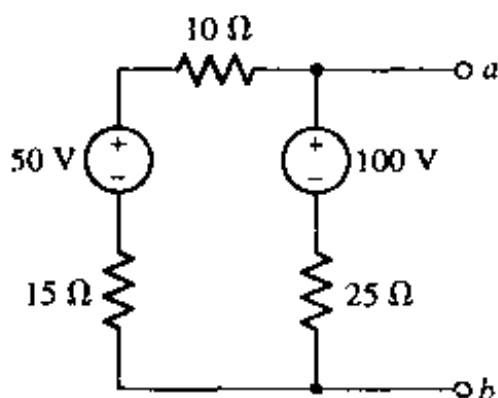


图 5.70

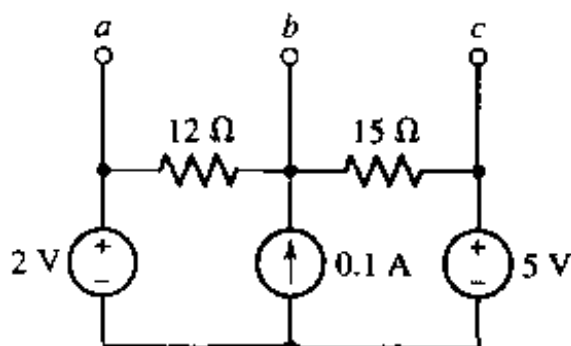


图 5.71

33. 求图 5.72 网络从 (a) x 和 x' ; (b) y 和 y' 看到的戴维南等效电路。

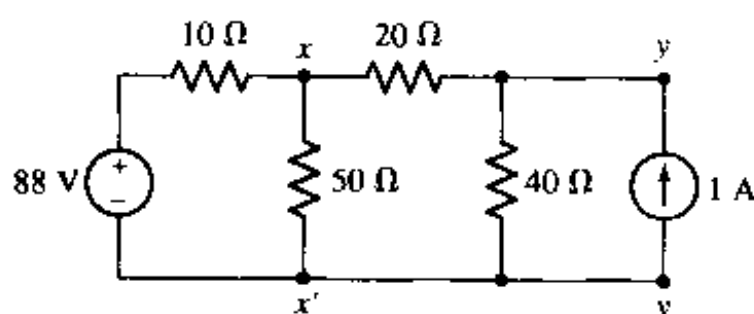


图 5.72

34. (a) 求图 5.73 所示网络的戴维南等效电路; (b) 若 a 和 b 接有 $100\ \Omega$ 负载电阻, 提供给它的功率是多少?

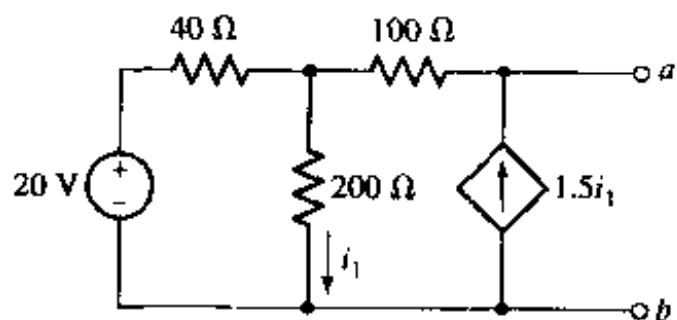


图 5.73

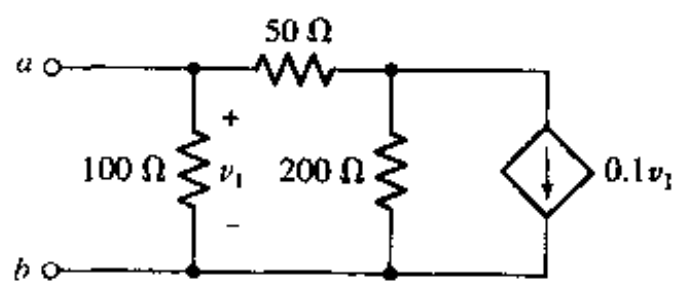


图 5.74

35. 求图 5.74 所示网络的诺顿等效电路。
 36. 求图 5.75 所示二端网络的戴维南等效电路。

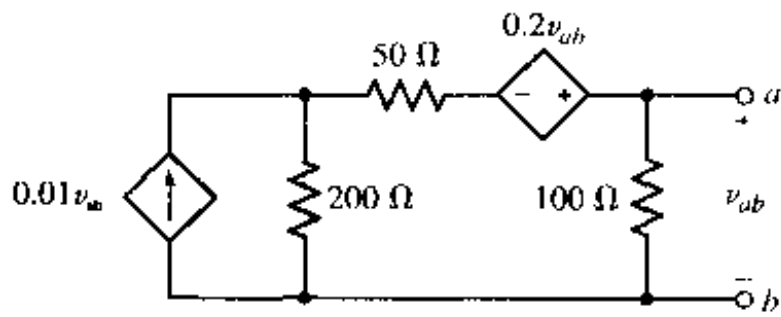


图 5.75

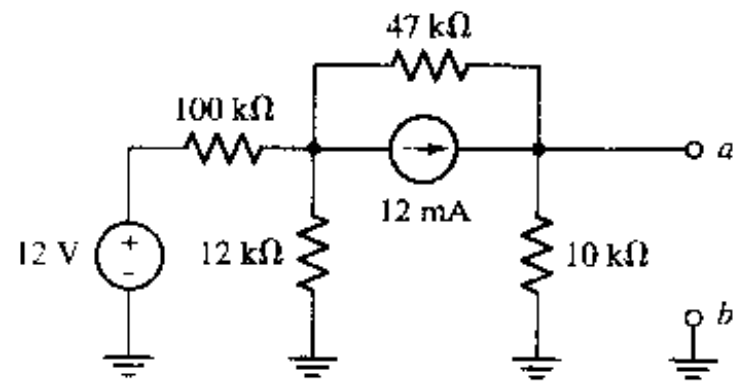


图 5.76

37. 求图 5.76 电路的戴维南等效电路。
 38. 对于图 5.77 的网络, 确定 (a) 戴维南等效电路; (b) 诺顿等效电路。

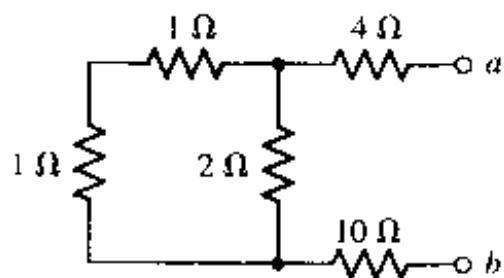


图 5.77

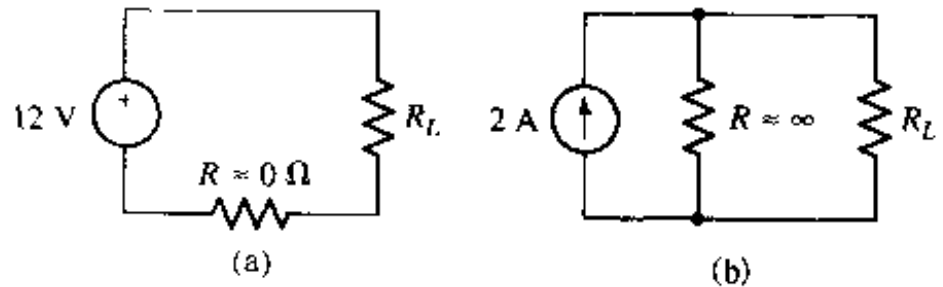


图 5.78

39. 对于图 5.78(a) 的电路, 确定连接 R_L 的网络的诺顿等效电路。对于图 5.78(b) 的电路, 确定连接 R_L 的网络的戴维南等效电路。
 40. 确定图 5.79 所示网络的戴维南和诺顿等效电路。
 41. 确定图 5.80 所示网络的戴维南和诺顿等效电路。

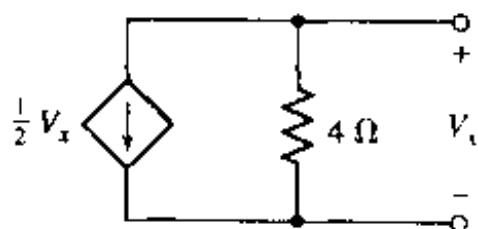


图 5.79

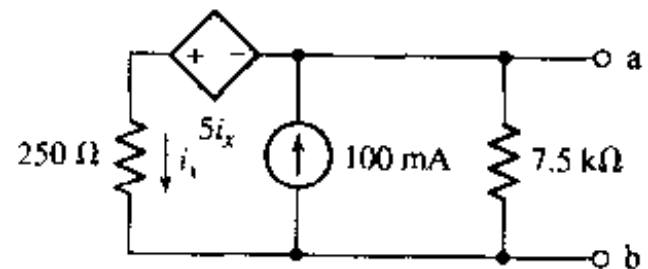


图 5.80

42. 确定图 5.81 所示网络的戴维南和诺顿等效电路。

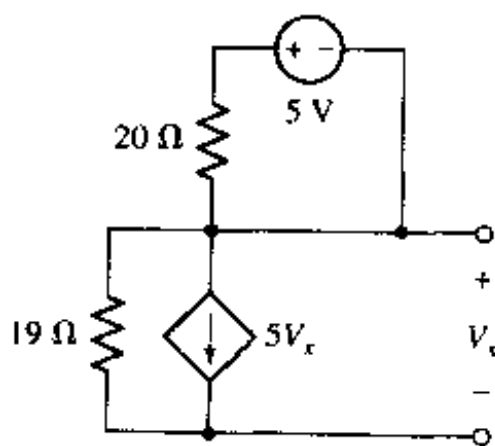


图 5.81

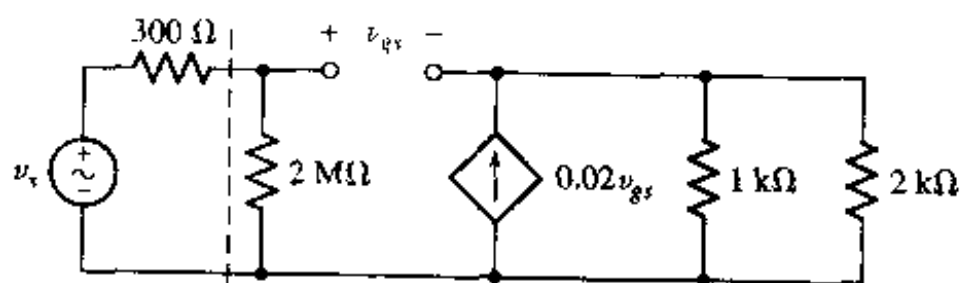


图 5.82

43. 求图 5.82 电路中 $2\text{ k}\Omega$ 电阻所看到的戴维南等效电阻。忽略图中虚线。
44. 参考图 5.82 电路, 确定虚线右边电路的戴维南等效电阻。这个电路是共源晶体管放大器, 所计算的是它的输入电阻。
45. 参考图 5.83 电路, 确定虚线右边电路的戴维南等效电阻。这个电路是共发射极晶体管放大器, 所计算的是它的输入电阻。

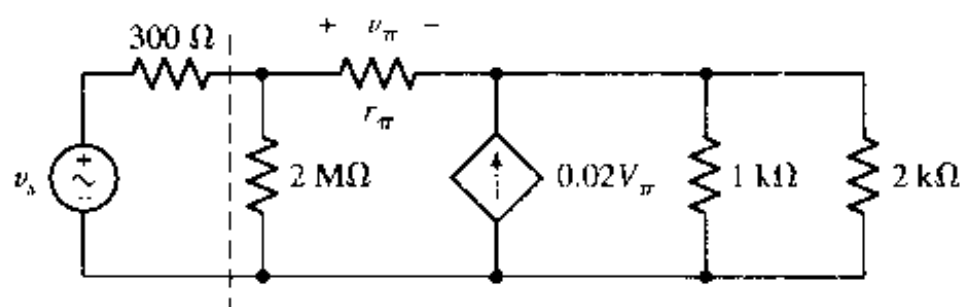


图 5.83

46. 假定可以确定家用交流电源的戴维南等效电阻, 为什么烤面包机、微波炉和电视机的生产商不将各种设备的戴维南等效电阻与电源戴维南等效电阻相匹配? 不允许从发电厂到家用电器的最大功率传输吗?
47. 如果在图 5.84 电路中 R_L 可取任意值, 那么 R_L 上消耗的最大功率是多少?

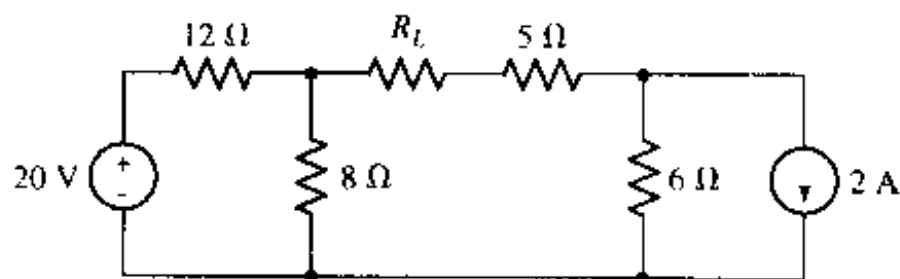


图 5.84

48. (a) 求图 5.85 所示网络在端点 a 和 b 的戴维南等效电路。如果连接到 a 和 b 的电阻 R_{ab} 等于 (b) $50\ \Omega$; (c) $12.5\ \Omega$, 提供给 R_{ab} 的功率是多少?
49. (a) 确定图 5.86 所示网络的戴维南等效电路; (b) 求从该网络所能取出的最大功率。

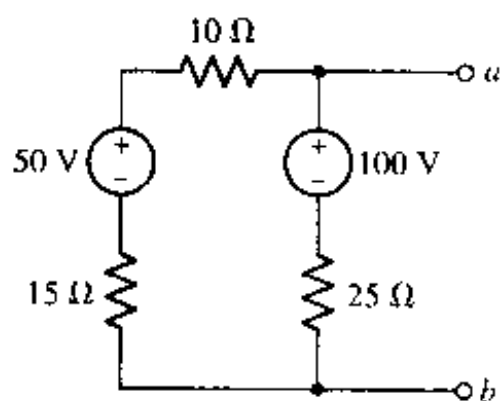


图 5.85

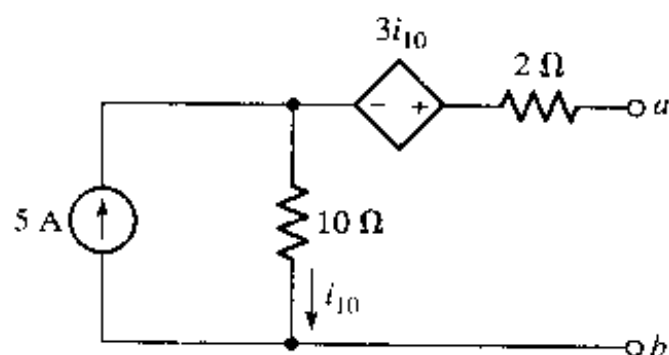


图 5.86

50. 参考图 5.87 电路, (a) 确定最大功率传输所对应的 R_L 值; (b) 然后计算 R_L 上的电压 (“+”号在上)。
51. 某一实际直流电压源在瞬时短路时可以提供 2.5 A 电流, 且可以向 $20\ \Omega$ 负载提供 80 W 功率。求 (a) 开路电压; (b) 对于最佳选择的 R_L 所能提供的最大功率; (c) 这时 R_L 的值为多少?

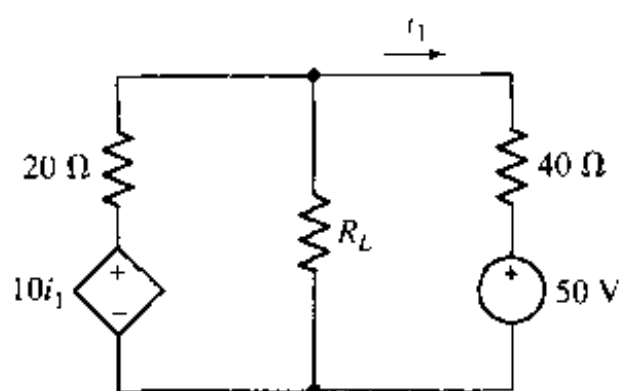


图 5.87

52. 一个实际电流源向 $250\ \Omega$ 负载提供 $10\ \text{W}$, 向 $80\ \Omega$ 负载提供 $20\ \text{W}$ 功率。如果连接负载电阻为 R_L , 则相应电压为 v_L , 电流为 i_L 。如果 (a) $v_L i_L$ 为最大值; (b) v_L 为最大值; (c) i_L 为最大值, 求 R_L , v_L 和 i_L 的值。
53. 某电池在感兴趣的电流范围内可以用 $9\ \text{V}$ 独立电源串联 $1.2\ \Omega$ 电阻精确模拟。当电池连接无穷大负载电阻时, 没有电流。还知道, 外接电阻为 $1.2\ \Omega$ 时, 传递给它的功率最大, 对于 $1.1\ \Omega$ 或 $1.3\ \Omega$ 电阻提供的功率都较小。可是如果短接电池两端(不推荐), 所得电流比 $1.2\ \Omega$ 电阻时大得多。这与前面导出的最大功率传输原理矛盾吗(不管怎么说, 功率应正比于 i^2)? 请解释。
54. 图 5.88 电路是音频放大器的一部分。如果想传输最大功率给 $8\ \Omega$ 扬声器, 所需 R_E 是多大? 用 PSpice 证实你的答案。

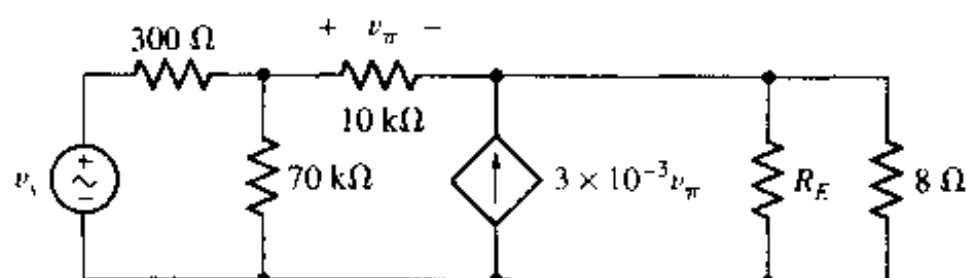


图 5.88

55. 图 5.89 所示电路是一个两级电路。选择 R_1 使第一级传给第二级的功率最大。

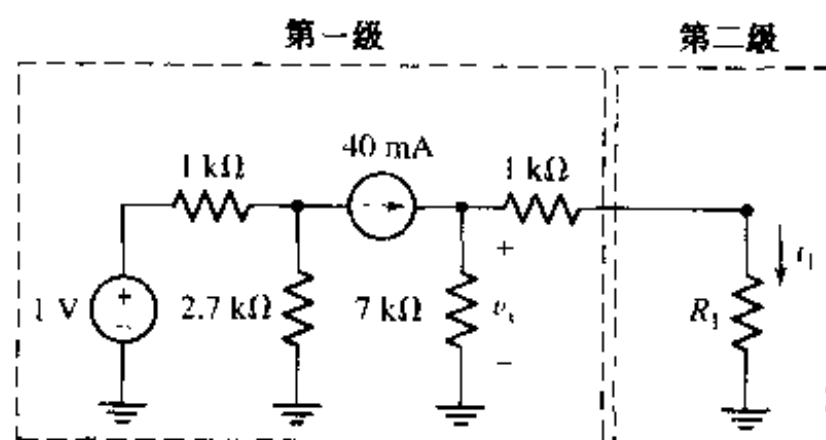


图 5.89

56. 转换图 5.90 的网络为 Y 形网络。
57. 转换图 5.91 的网络为 Δ 形网络。

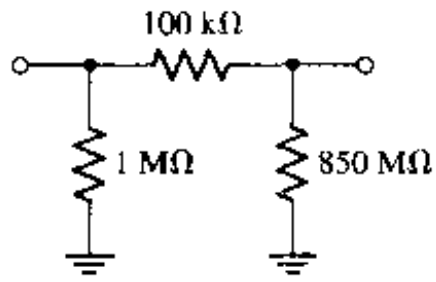


图 5.90

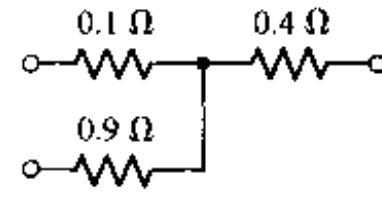


图 5.91

58. 求图 5.92 所示网络的 R_{in} 。

59. 利用 Y- Δ 和 Δ -Y 转换求图 5.93 所示网络的输入电阻。

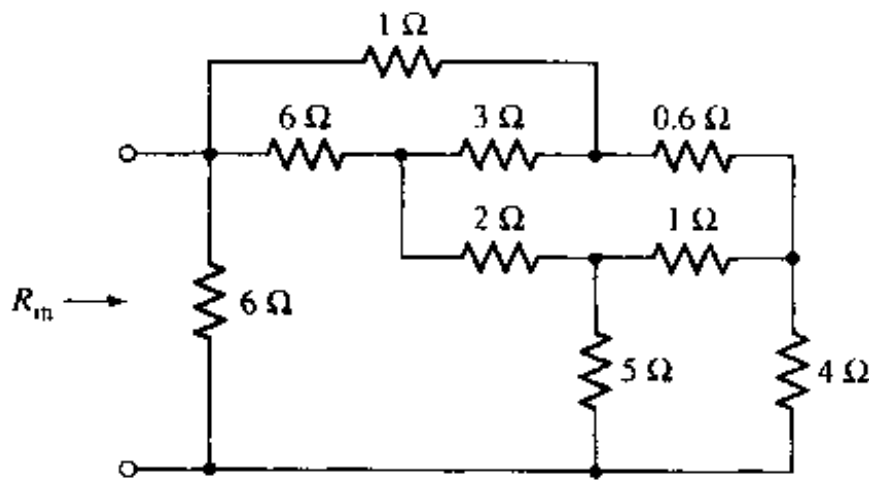


图 5.92

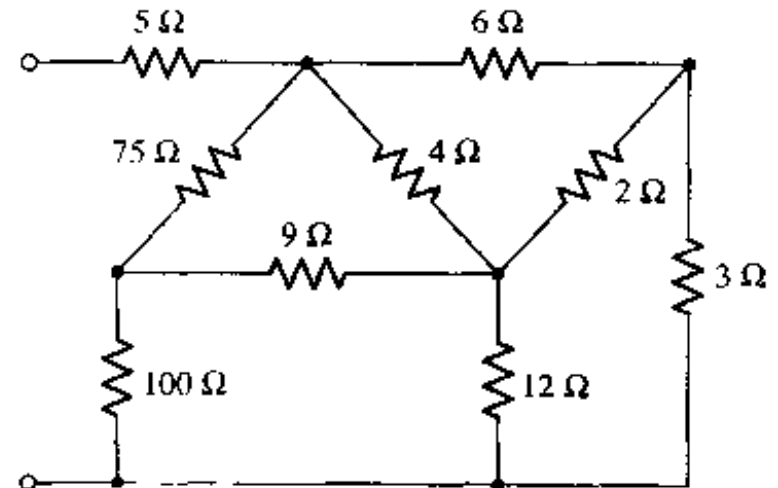


图 5.93

60. 求图 5.94 电路的 R_{in} 。

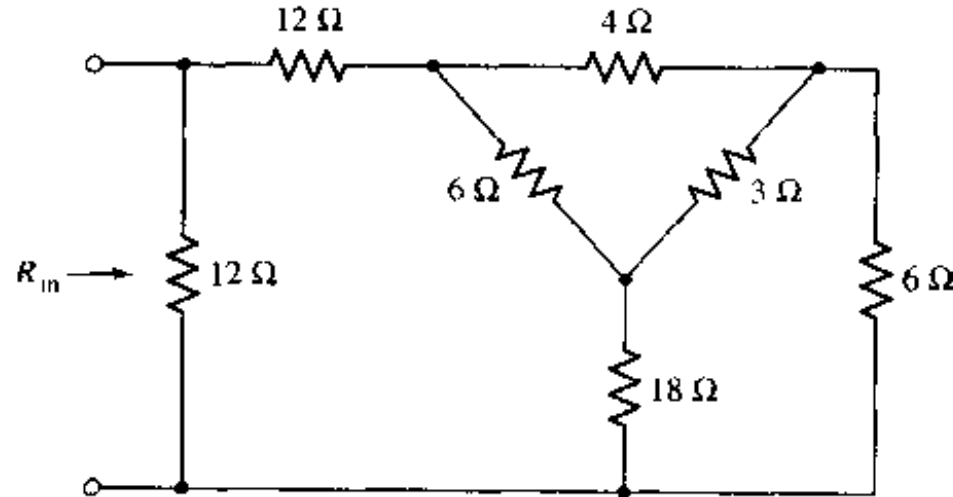


图 5.94

61. 求图 5.95 电路的戴维南等效电路。

62. 求图 5.96 电路的诺顿等效电路。

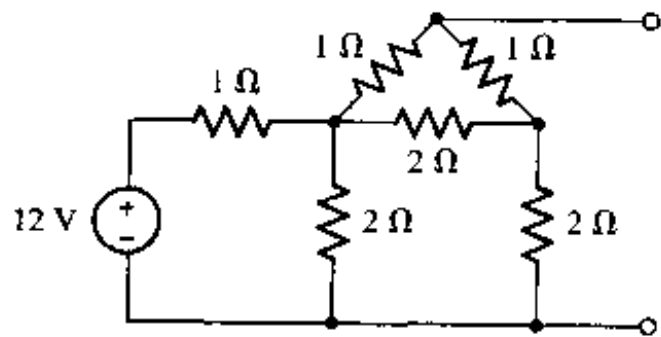


图 5.95

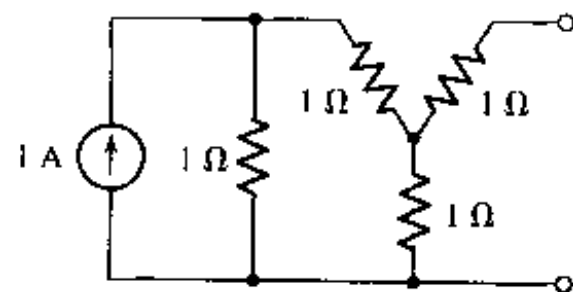


图 5.96

63. 如果图 5.97 中所有电阻均为 $10\ \Omega$, 确定电路的戴维南等效电路。

64. (a) 用等效三电阻 Y 型网络替换图 5.98 中的网络; (b) 进行 PSpice 分析, 证实你的答案真的是等效的(提示: 增加一个负载电阻)。

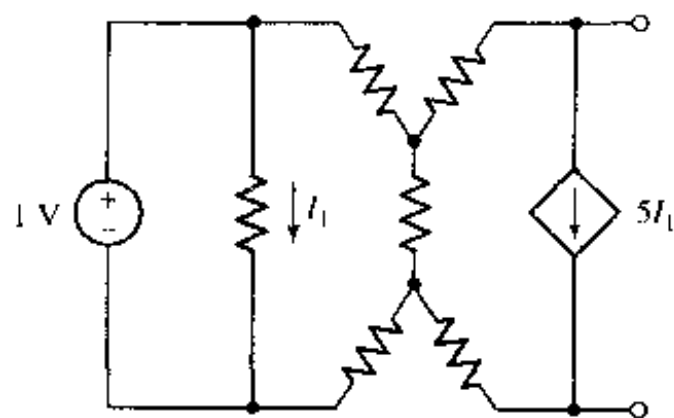


图 5.97

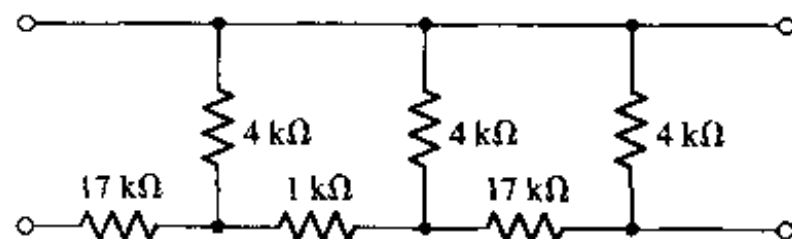


图 5.98

65. (a) 用等效三电阻 Δ 型网络替换图 5.99 中的网络; (b) 进行 PSpice 分析, 证实你的答案真的是等效的(提示: 增加一个负载电阻)。

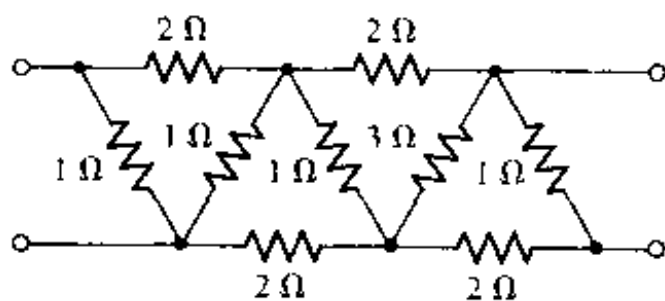


图 5.99

66. 图 5.100 所示电路是工作在正向有源区的双极型晶体管精确模型。确定集电极电流 I_C , 用 PSpice 证实你的答案。

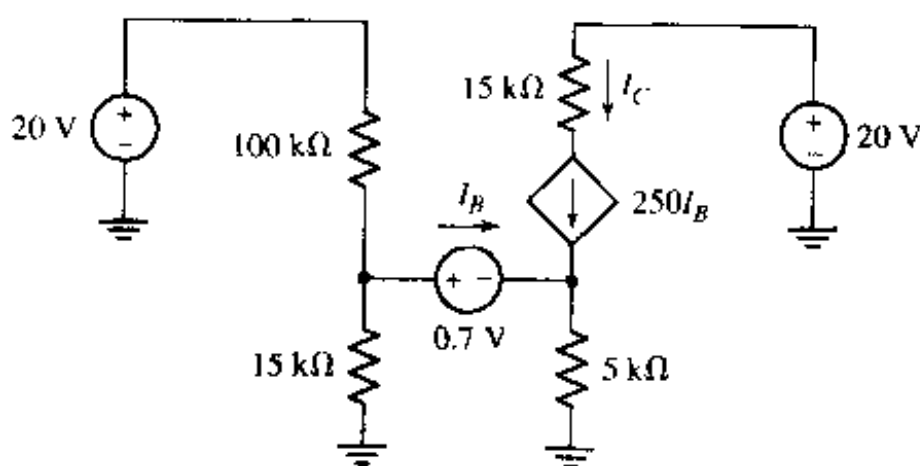


图 5.100

67. 图 5.101 中负载电阻能安全承受 $1\ \text{W}$ 功率而不致过热和烧坏。在电流小于 $1\ \text{A}$ 情况下指示灯可当做一个 $10.6\ \Omega$ 电阻对待; 电流大于 $1\ \text{A}$ 时可当做一个 $15\ \Omega$ 电阻对待。最大允许电流 I_s 是多少? 用 PSpice 证实你的结论。

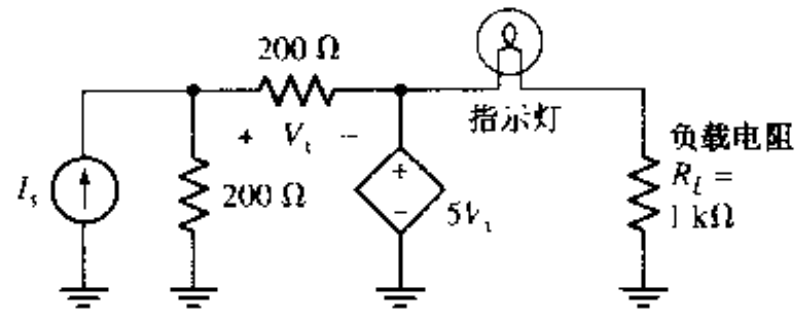


图 5.101 指示灯、负载电阻

68. 人耳可以探测的声波频率范围在 20 Hz 到 20 kHz。如果图 5.102 中每个 $8\ \Omega$ 电阻都是扬声器, 哪个信号发生器(用实际电压源表示)产生最大声音(假定“声响”与提供给扬声器的功率成正比)? 注意, 因为每个信号源工作于不同频率, 这时可以应用功率叠加。

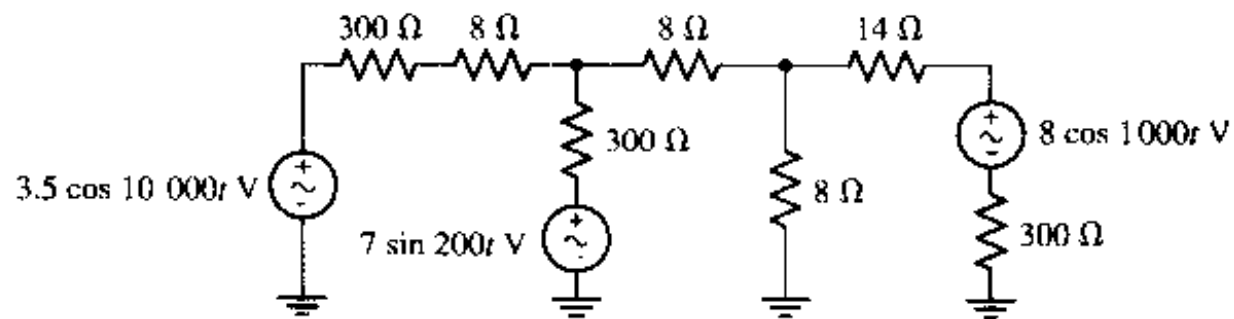


图 5.102

69. 如图 5.103 所示, 一个 DMM 接到电阻电路上, 如果 DMM 的输入阻抗为 $1\ \text{M}\Omega$, 且 DMM 接成电阻测量方式, 其显示值是多少?

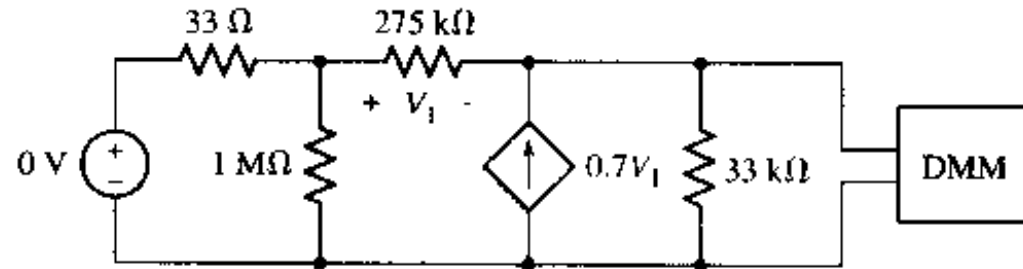


图 5.103

70. 从印第安纳州郊区发现的一颗陨星中提取出一种金属物质。这种物质的电阻率为 $50\ \Omega/\text{cm}$, 用它制成简单圆柱体。圆柱体连接到图 5.104 的电路, 发现它具有温度关系 $T = 200P^{0.25}\ \text{C}$, 其中 P 为提供给圆柱体的功率(单位: W)。有趣的是, 这种物质的电阻率似乎与温度无关。如果 $R = 10\ \Omega$, 并从所示电路吸收最大功率, 圆柱体的温度是多少?

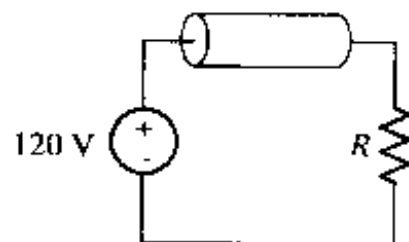


图 5.104

71. 作为保安系统的一部分, 一段非常细的 $100\ \Omega$ 导线用不导电环氧树脂接到窗户上。给定一个盒子, 内装 12 个可充电 $1.5\ \text{V}$ AAA 电池, 1 000 个 $1\ \Omega$ 电阻和一个 $2\ 900\ \text{Hz}$ 压电

蜂鸣器。蜂鸣器在 6 V 下取出 15 mA 电流,设计一个电路,当窗户打破(细电线当然也被弄断)时使蜂鸣器启动。注意,蜂鸣器工作至少需要 6 V(最大 28 V)直流电压。

72. 三个 45 W 灯泡原来接成 Y 形网络,每一端口接有 120 V 交流电压,现将它重新接成 Δ 形网络。未使用中线连接。如果每一灯泡的亮度正比于它得到的功率,设计一个新的 120 V 交流电源电路,使三个灯泡在 Δ 接法下,与 Y 形接法时具有相同的亮度。用 PSpice 将电路中每个灯泡得到的功率(用适当阻值的电阻模拟灯泡)与原来 Y 形接法时每个灯泡的功率相比较,以证实你的设计
73. 某一红色发光二极管额定最大电流为 35 mA,如果超过此值将会发生过热并导致严重损坏。发光管的电阻是其电流的非线性函数,但是制造者保证最小电阻为 47 Ω 和最大电阻为 117 Ω 。可用的驱动电源只有 9 V 电池。设计一个合适电路在不损坏发光管的条件下,为它提供最大功率。只允许使用标准电阻值的组合。

第 6 章 运算放大器

本章要点:

- 在电路分析中运用理想运放规定的的能力
- 掌握反相和同相运算放大电路
- 掌握运放主要的非理想特性
- 熟悉实际使用运放时要考虑的问题

6.1 引言

前面已经学习了足够的基本原理和分析方法,现在将它们运用到一些有趣的实际电路中去。本章将分析一种非常有用的电子器件,称为运算放大器(Operational Amplifier),或简称为运放(Op Amp)。

6.2 背景

最早的运算放大器出现于 20 世纪 40 年代[见图 6.1(a)],它使用真空管,用电子方式来完成加、减、乘、除、微分和积分的数学运算。它的出现使得可以使用早期的模拟计算机来完成微分方程的求解。现代运放的制造采用了集成电路技术,使得体积相当小,更加可靠和消耗功率更少。

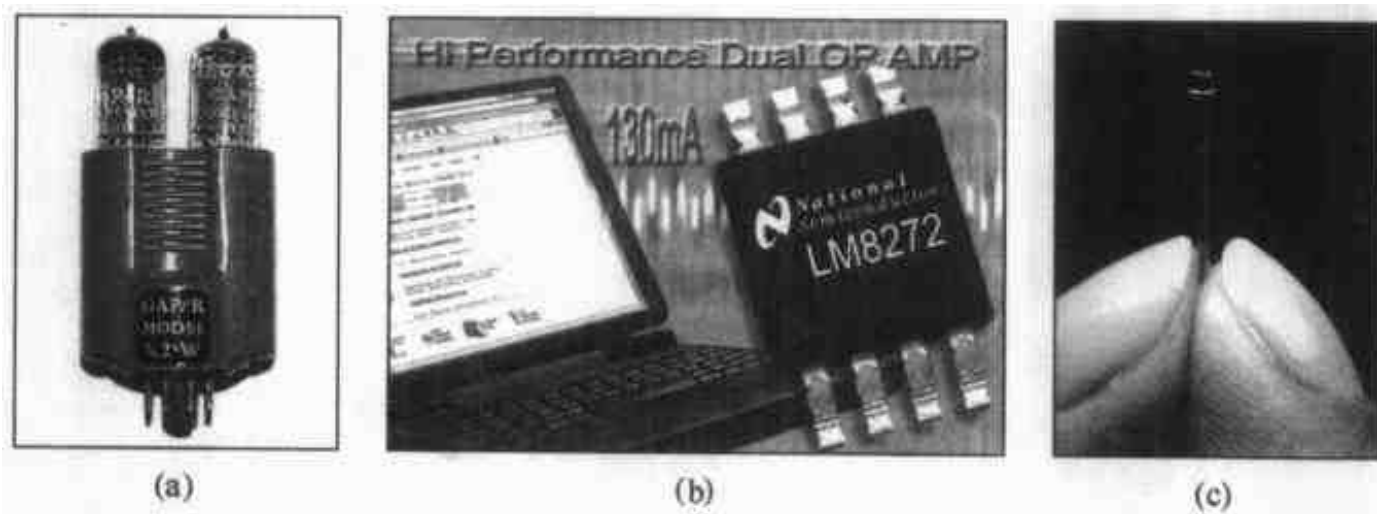


图 6.1 (a)大约在 20 世纪 40 年代的真空管运算放大器;(b)LM8272 双运算放大器;
(c)LMC6035 运算放大器,它在一个管壳中封装了 114 个晶体管,并且其封装非常小

买一个运放可能只需要 20 美分,这样的运放含有一块集成电路(IC)芯片,它包含大约 25 个晶体管和 12 个电阻,所有的这些元件都包含在一个小小的封装中,里面含有 5 个或更多个用于连接外部电路的管脚,如图 6.1(b)和图 6.1(c)所示;有些集成电路含有多个运放。除输出管脚和两个输入管脚以外,其他管脚用于给里面的晶体管提供电源,或用于外部调整以对运放进行平衡或者补偿。通常使用的运放符号如图 6.2(a)所示。这里并不关心运放的内部电路即集成电路,只关心存在于输入和输出端之间的电流和电压关系。因此,下面将暂时使用图

6.2(b)所示的简化的电气符号。左边是两个输入端,右边是单个的输出端。标有“+”的端称为同相输入端,标有“-”的端称为反相输入端。

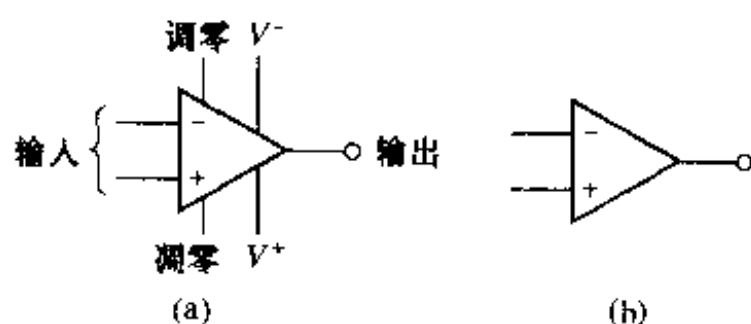


图 6.2 (a)运放的电气符号;(b)运放所需的最少连接

6.3 理想运放

在设计一个运放时,集成电路工程师通常很努力地要保证该器件具有接近理想的特性。在实际应用中,大多数运放的运行性能都很好,于是通常假定运放为理想的。理想运放的特性构成了以下两个基本规定的基础,这些规定看起来可能有些特别。

理想运放规定:

1. 没有任何电流流入两个输入端。
2. 两个输入端之间没有电压差。

在实际运放中,存在一个非常小的漏泄电流流入输入端(有时仅有 40 fA),同样地,在两个输入端之间也可能存在一个非常小的电压。只是,与大多数电路中的其他电压和电流相比,它们是如此的小,以至于如果不包括它们也不会显著地影响最后的计算结果。

分析运放电路时,还需要记住一点,运放的输出总是依赖于其输入方式,这和前面研究过的电路不同。因此,分析运放电路的目标是得到用输入量表示的输出表达式。通常从输入开始进行运放电路的分析,下面将看到这是分析运放电路的一种好方法。

图 6.3 所示电路为一个反相放大器,下面采用 KVL,从输入电压源开始分析这个电路。

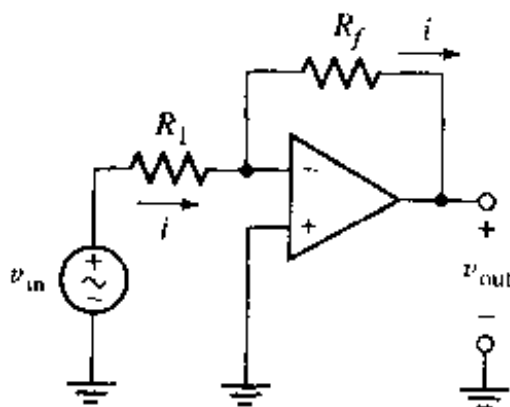


图 6.3 由运放构成的反相放大电路,其中 $v_m = 5 \sin 3t$ mV, $R_1 = 4.7$ k Ω , $R_f = 47$ k Ω

根据理想运放规定 1 可知,没有电流流入反相输入端,电流 i 只流过两个电阻 R_1 和 R_f ,于是可以写出:

$$-v_m + R_1 i + R_f i + v_{out} = 0$$

它可以整理成将输出和输入联系起来的方程:

$$v_{\text{out}} = v_{\text{in}} - (R_1 + R_f)i \quad (6.1)$$

但是,由于只已知 $v_{\text{in}} = 5 \sin 3t \text{ mV}$, $R_1 = 4.7 \text{ k}\Omega$ 和 $R_f = 47 \text{ k}\Omega$, 所以只得到了一个方程, 却含有两个未知量。因此, 为计算出输出电压, 还需要一个额外的方程, 它把 i 用 v_{out} , v_{in} , R_1 和 R_f 表示出来。

这时注意到, 还没有使用理想运放的规定 2。因为同相输入接地, 所以其电压为零, 因此, 根据理想运放规定 2, 反相输入电压也为零。但这并不意味着两个输入是短接的, 而且要注意不要试图做这样的假定。事实上, 更确切地说, 这两个输入电压仅仅是互相跟随的。于是可以写出另外一个 KVL 方程:

$$-v_{\text{in}} + R_1 i + 0 = 0$$

或

$$i = \frac{v_{\text{in}}}{R_1} \quad (6.2)$$

联立方程(6.2)和方程(6.1), 就可以得到以 v_{in} 表示的 v_{out} 的表达式:

$$v_{\text{out}} = -\frac{R_f}{R_1} v_{\text{in}} \quad (6.3)$$

代入 $v_{\text{in}} = 5 \sin 3t \text{ mV}$, $R_1 = 4.7 \text{ k}\Omega$ 和 $R_f = 47 \text{ k}\Omega$:

$$v_{\text{out}} = -50 \sin 3t \text{ mV}$$

事实上, 在这种类型的电路图中, 反相输入端的电压为零就是通常所说的“虚地”。但它并不意味着该管脚是地, 这有时会让学感到困惑。运放通过内部的一些必要的调整来消除两个输入端之间的电压差, 这两个输入端并不是物理上短接在一起。

因为给出 $R_f > R_1$, 所以该电路放大了输入电压信号 v_{in} 。如果选取 $R_f < R_1$, 那么输入信号反而将被削弱。还可以注意到, 输出电压和输入电压的符号相反^①, 因此该电路称为“反相放大器”。输出波形如图 6.4 所示, 作为比较, 同时画出了输入的波形。

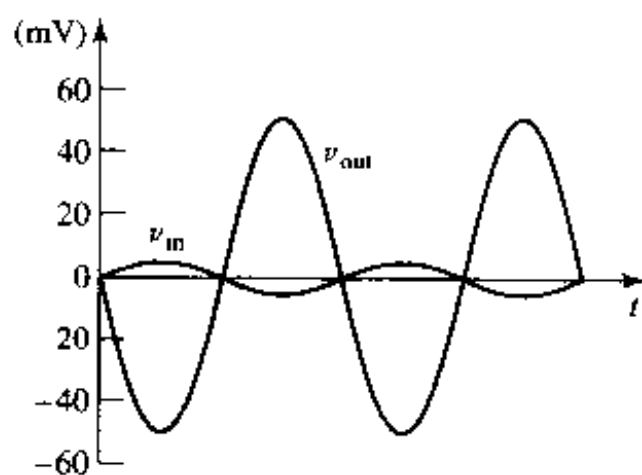


图 6.4 反相放大器电路的输入和输出波形

这里需要指出的是, 理想运放看起来是违背 KCL 的。具体地说, 对于上面的电路, 如果在两个输入端没有电流流入和流出, 那么电流如何能流到输出的管脚呢! 这将意味着运放可以以某种方式在某个地方产生电子, 或者是永久地储存它们(这取决于电流的流动方向)。很显

^① 或者说, 输出和输入相差 180° 的相位, 这样说更令人印象深刻。

然,这些都是不可能的,导致这样的矛盾是由于把运放与无源元件(例如电阻)同样对待。事实上,只有连到外部电源中运放才能工作,正是通过这些电源,才能够确定输出端上的电流方向。

例题 6.1 如图 6.5(a)所示的同相放大器,画出输出波形的草图,设 $v_{in} = 5 \sin 3t \text{ mV}$, $R_1 = 4.7 \text{ k}\Omega$ 和 $R_f = 47 \text{ k}\Omega$

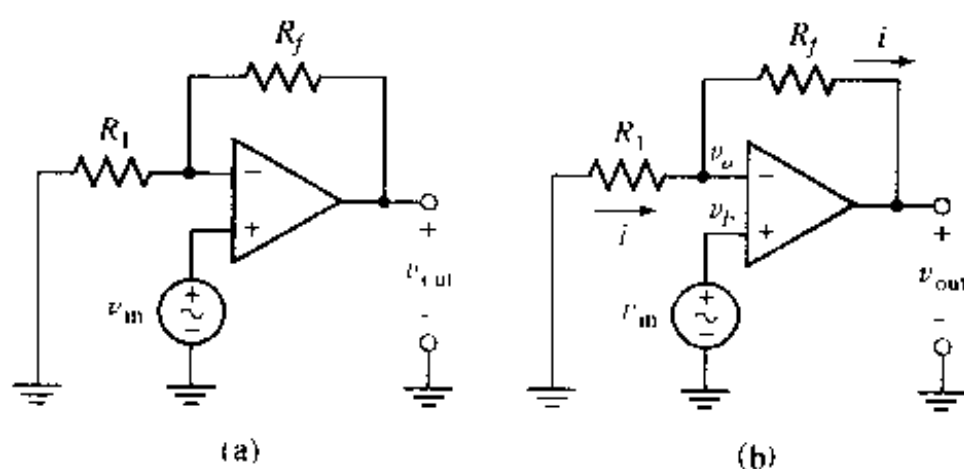


图 6.5 (a)使用同相放大器结构的运放电路;(b)标出了流过 R_1 和 R_f 的电流 i 以及输入电压 v_{in} 和输出电压 v_{out}

● 弄清问题的目标:

需要求出 v_{out} 的表达式,它只用已知量 v_{in} , R_1 和 R_f 表示出来。

● 收集已知信息:

因为已知各电阻的大小和输入信号波形,所以第一步标出电流 i 和两个输入电压,如图 6.5(b)所示,并假定运放为理想运放。

● 选择最适合问题的已有方法:

尽管学生们都喜欢用网孔分析,但后面将看到,对于大多数运放电路,采用节点分析更好一些,因为没有直接的方法来确定流出运放输出端的电流大小。

● 建立适当的方程组:

注意到,定义流过两个电阻的电流相同意味着使用了理想运放规定 1,因为没有电流流入反相输入端。然后利用节点分析方法来求以 v_{in} 表示的 v_{out} 的表达式,于是得到,

对节点 a :

$$0 = \frac{v_a}{R_1} + \frac{v_a - v_{out}}{R_f} \quad (6.4)$$

对节点 b :

$$v_b = v_{in} \quad (6.5)$$

● 确定是否还需其他信息:

例题的目标是得到一个将输入和输出电压联系起来的表达式,而方程(6.4)和方程(6.5)看起来都不是这样的表达式。不过,此时还没有用到理想运放规定 2,并且后面将看到,几乎在每个运放电路的分析中,为得到这样的表达式,两个规定都需要用到。

利用理想运放规定 2,注意到 $v_a = v_b = v_{in}$,这时方程(6.4)变为:

$$0 = \frac{v_{in}}{R_1} + \frac{v_{in} - v_{out}}{R_f}$$

● 试解:

重新整理上式,就得到用输入电压 v_{in} 表示的输出电压的表达式:

$$v_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) v_{in} = 11v_{in} = 55 \sin 3t \text{ mV}$$

● 证实所得解是否合理和满足要求:

输出波形如图 6.6 所示,为了便于比较,同时画出了输入波形。对照反相放大电路的输出波形,可以看到,同相放大电路中输入和输出是同相的。不应该完全没有意料到这点,因为从它的名称“同相放大器”就可以知道。要注意的是,该电路不改变波形的频率,只改变波形的幅度。

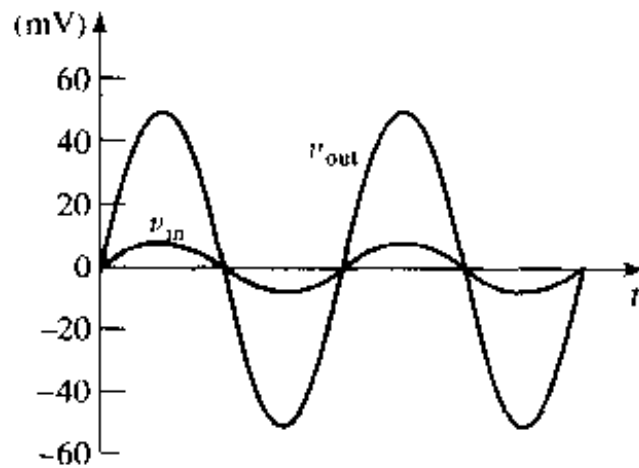


图 6.6 同相放大电路的输入波形和输出波形

练习

6.1 求出如图 6.7 所示电路中以 v_{in} 表示的 v_{out} 的表达式。

答案: $v_{out} = v_{in}$ 。这个电路称为电压跟随器,因为输出电压跟踪或者说跟随输出电压

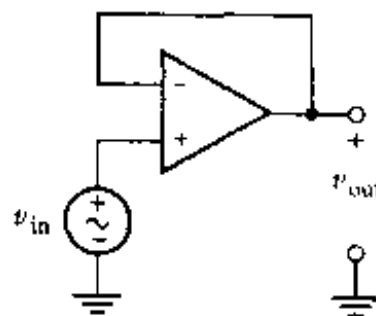


图 6.7

例题 6.2 如图 6.8 所示运放电路,它也称为求和放大器,求出以 v_1, v_2 和 v_3 表示的 v_{out} 的表达式

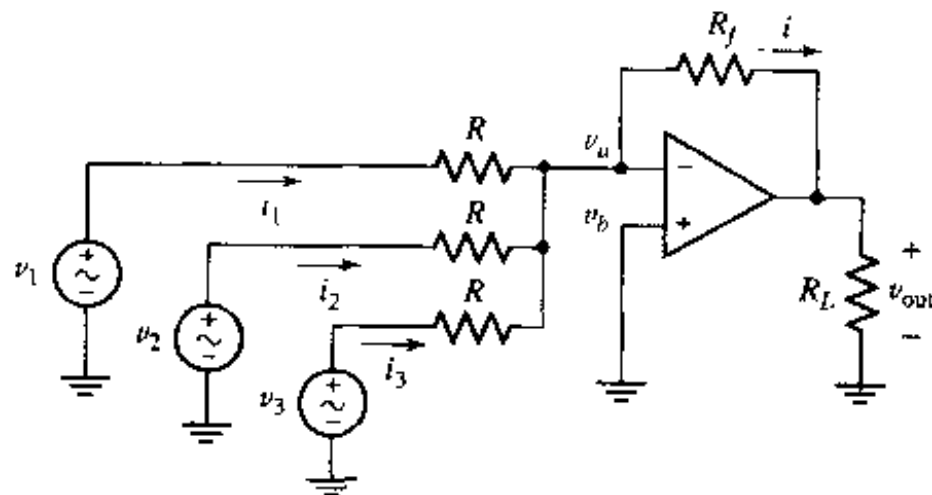


图 6.8 具有三个输入端的基本求和电路

再次注意到,该电路与图 6.3 所示的反相放大电路相似,目标都是求出 v_{out} (在这里该电压是接在负载电阻 R_L 两端)以输入(在这里是 v_1, v_2 和 v_3)表示的表达式。

既然没有电流从反相输入端流入,那么可以知道:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

由此可以对节点 v_a 写出以下的方程:

$$0 = \frac{v_a - v_{out}}{R_f} + \frac{v_a - v_1}{R} + \frac{v_a - v_2}{R} + \frac{v_a - v_3}{R}$$

该方程同时包含了 v_{out} 和输入电压,但是遗憾的是它还包含了节点电压 v_a 。为了消去这个未知量,还需要写出另一个把 v_a 与 v_{out} 、输入电压、 R_f 及 R 联系起来的方程。在这时,想起还没有使用理想运放规定 2,而当分析运放电路的时候差不多都需要运用这两个规定。因此,既然 $v_a = v_b = 0$,那么可以得到:

$$0 = \frac{v_{out}}{R_f} + \frac{v_1}{R} + \frac{v_2}{R} + \frac{v_3}{R}$$

重新整理,就得到下面 v_{out} 的表达式:

$$v_{out} = -\frac{R_f}{R}(v_1 + v_2 + v_3)$$

从这个结果可以看到几种有趣的情况。首先,如果选取 $R_f = R$,那么输出是负的 v_1, v_2 和 v_3 的和;或者如果选取 $R_f > R$,就可以对它们的和进行放大。

而且,注意到 R_L 并没有出现在最后的表达式中。因此,在任何情况下,只要 R_L 不是短路,它就不会影响该电路的运行。该电阻表示接在放大器输出端的任何电路的戴维南等效电阻。如果输出端所接的设备为电压表,那么 R_L 表示往电压表两端看进去的戴维南等效(典型值为 $10 \text{ M}\Omega$ 或更大)。或者,输出端所接的设备可能是扬声器(通常为 8Ω),这种情况下可以听到三个声音的叠加,这时 v_1, v_2 和 v_3 可能分别代表三个麦克风。

需要注意的是,在图 6.8 中,通常会假定电流 i 不仅流过 R_f ,还流过 R_L 。这并不正确!因为它很可能还流入运放的输出端,所以流过两个电阻的电流是不同的。正是因为这个原因,分析电路时总是设法避免在运放的输出管脚处应用 KCL。因为运放输出端的输出电流未知,所以在大多数运放电流分析中节点分析优于网孔分析。

练习

6.2 如图 6.9 所示电路,它也称为差分放大器,求出以 v_1 和 v_2 表示的 v_{out} 的表达式。

答案: $v_{out} = v_2 - v_1$ (提示:用分压原理求出 v_b)

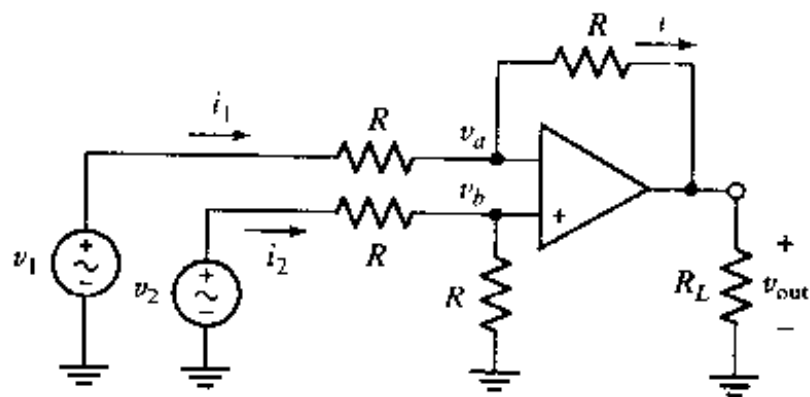


图 6.9

实际应用

光纤对讲机系统

点到点的对讲系统可以用几种不同的方法来实现,这取决于系统应用的环境。低功耗的射频(Radio Frequency, RF)系统虽然工作得非常好,但是容易受到其他射频信号的干扰,而且容易被窃听。简单地使用导线将麦克风与扬声器(通过适当的放大电路)连接起来可以消除许多 RF 干扰,并增强了保密性。但是,导线容易腐蚀,而且当导线外面的塑料绝缘层磨损的时候容易造成短路,并且对于飞机及其相关的应用,导线的重量是个需要考虑的问题。

另一种方法是先把从麦克风产生的电信号转为光信号,让光信号通过一根细小(直径约 $50\ \mu\text{m}$) 的光纤进行传输后,再将光信号转变回电信号,并经过放大后传送到扬声器中。图 6.10 给出了这个系统的原理框图,图中的两个系统要求双向通信。

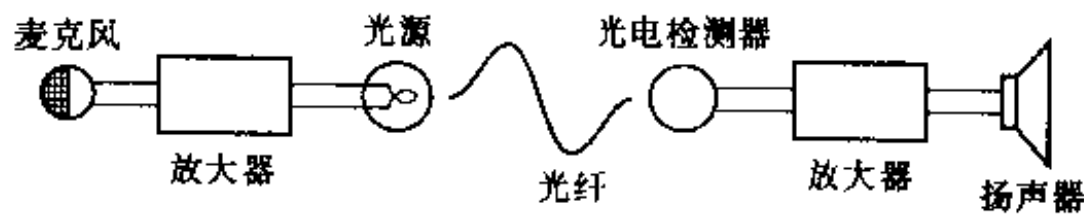


图 6.10 简单光纤对讲系统的单向原理框图

下面将分别讨论光信号的产生和检测,因为这两个电路实际上是电气独立的。图 6.11 显示了信号产生电路,包括一个麦克风,一个发光二极管(LED)和一个用来驱动 LED 的同相运放电路。从例题 6.1 可以知道,同相运放电路的电压增益与 LED 的电阻无关,给出为:

$$\frac{v_{\text{out}}}{v_{\text{in}}} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

通过简单的估算可知,当一个人采用正常语调说话时,该麦克风的最大输出电压为 $40\ \text{mV}$ 。根据 LED 的制造参数可知,LED 两端的额定电压为 $1.6\ \text{V}$ 。为了给更大的噪声和更高的麦克风输出留有裕度,选取增益为 $1.5/40 \times 10^{-3}$ 。选取 $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$,那么得到所需的 $R_f = 365\ \text{k}\Omega$ 。

在把 LED 输出耦合到光纤后,从光电探测器可以检测到一个最大幅度约为 $10\ \text{mV}$ 的信号。采用图 6.12 所示的电路来放大从光电探测器检测到的信号,使得有足够大的功率来驱动扬声器。

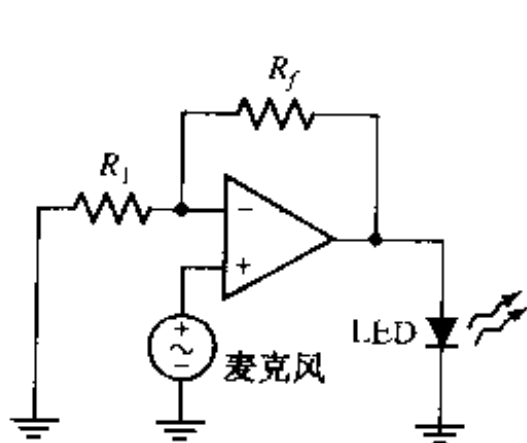


图 6.11 用于将从麦克风输出的电信号转换为光信号的电路(提示:可以用收音机或 CD 播放器的输出代替图中的麦克风来进行测试)

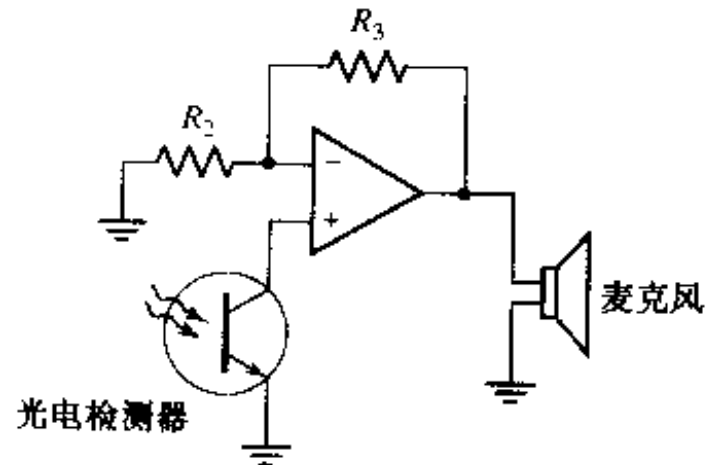


图 6.12 将光信号转换为音频信号的检测电路(提示:可以用收音机或 CD 播放器的输出代替图中的光电检测器来进行测试)

扬声器的额定功率为 100 mW, 等效电阻为 8Ω , 这样, 可以求得最大的电压为 894 mV, 所以放大器的增益应该设计为 $894/10 = 89.4$. 选取 $R_2 = 10\text{ k}\Omega$, 则需要取 $R_1 = 884\Omega$, 这样就完成了放大器的设计。尽管由于 LED 的非线性而使输出的声音有些失真, 但在实际中这个电路还是能工作的。这里将改进的设计留给后续的课程设计高级课程。

6.4 运放的级联

尽管运放的功能很多, 但在许多应用中, 只使用一个运放并不够。在这种情况下, 通常可以把单独的几个运放级联起来以满足应用的要求。图 6.13 给出了这样的一个例子, 它由一个图 6.13 所示的求和放大电路(只有两个输入端)和一个简单的反相放大器组成。

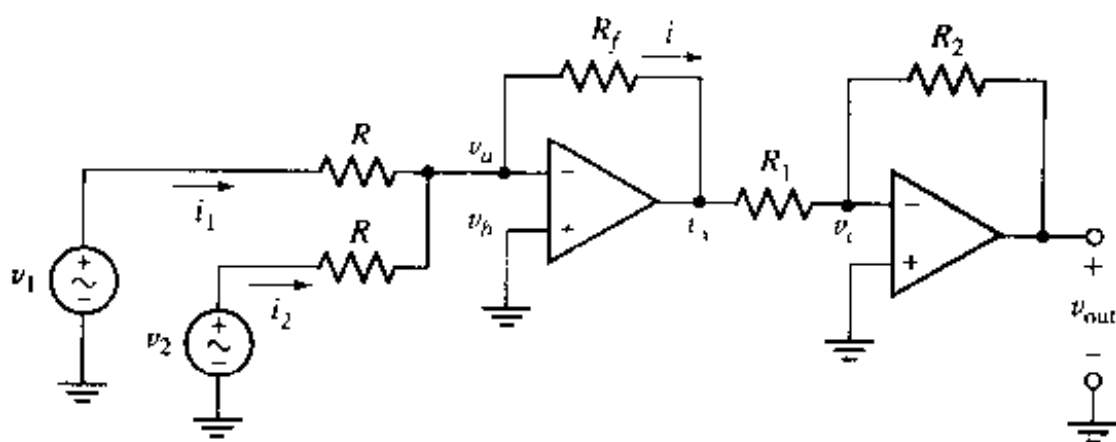


图 6.13 一个两级运放电路, 它由一个求和放大器级联一个反相放大器组成

前面已经分别分析过了这两种类型的运放电路, 根据以前的结果, 假如两个运放电路相互不连接, 那么:

$$v_x = -\frac{R_f}{R}(v_1 + v_2) \quad (6.6)$$

和

$$v_{\text{out}} = -\frac{R_2}{R_1}v_x \quad (6.7)$$

分析级联电路时, 从最后一级出发往回分析, 直到输入级有时要容易一些。根据理想运放规定 1, 流过 R_1 和 R_2 的电流相同。对节点 v_c 写出节点方程得:

$$0 = \frac{v_c - v_x}{R_1} + \frac{v_c - v_{\text{out}}}{R_2} \quad (6.8)$$

利用理想运放规定 2, 在方程(6.8)中, 令 $v_c = 0$, 可以得到:

$$0 = \frac{v_x}{R_1} + \frac{v_{\text{out}}}{R_2} \quad (6.9)$$

因为例题的目标是求出 v_{out} 以 v_1 和 v_2 表示的表达式, 于是回到第一个运放, 设法得到 v_x 以两个输入量表示的表达式。

对第一个运放的反相输入应用运放规定 1:

$$0 = \frac{v_a - v_x}{R_f} + \frac{v_a - v_1}{R} + \frac{v_a - v_2}{R} \quad (6.10)$$

因为 $v_a = v_b = 0$, 所以根据理想运放规定 2, 可以把方程(6.10)中的 v_a 替换为 0, 方程(6.10)成