

一、例题精解

【例题 17.1】如图 17.1 所示运算放大器电路中，已知 $u_{i1} = 1\text{V}$ ， $u_{i2} = 2\text{V}$ ， $u_{i3} = 3\text{V}$ ， $u_{i4} = 4\text{V}$ ， $R_1 = R_2 = 2\text{k}\Omega$ ， $R_3 = R_4 = R_F = 1\text{k}\Omega$ ，求 u_o = ?

【解】如图所示，同相输入端电压 u_+ 可由节点电压法得出

$$u_+ = \frac{\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{u_{i3} + u_{i4}}{2} = \frac{3 + 4}{2} = 3.5\text{V}$$

所以根据叠加原理可得

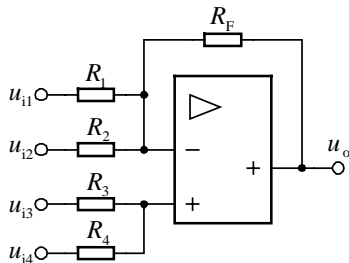


图 17.1 例题 17.1 的图

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1}u_{i1} - \frac{R_F}{R_2}u_{i2} + \left(1 + \frac{R_F}{R_1 // R_2}\right)u_+ = -\frac{1}{2} \times 1 - \frac{1}{2} \times 2 + \left(1 + \frac{1}{1}\right) \times 3.5 = 5.5\text{V}$$

【例题 17.2】如图 17.2 所示的运放电路，已知 $u_i = 0.5\text{V}$ ， $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$ ， $R_3 = 2\text{k}\Omega$ ，求 u_o = ?

【解】由理想运放虚短的特点可知 $u_{1+} = u_{1-}$ ， $u_{2+} = u_{2-}$ ，则 $u_{R3} = u_{1-} - u_{2-} = u_i$ ；又由理想运放虚断的特点可知 $i_{1+} = i_{1-} = 0$ ， $i_{2+} = i_{2-} = 0$ ，则 R_1 、 R_2 、 R_3 中流过同一电流，若设此电流为 i ，则

$$i = i_{R3} / R_3 = u_i / R_3$$

$$u_o = i(R_1 + R_2 + R_3) = \frac{u_i}{R_3}(R_1 + R_2 + R_3) = \frac{0.5}{2} \times (10 + 10 + 2) = 5.5\text{V}$$

【例题 17.3】如图 17.3 所示的运算放大器电路，已知 $u_i = 2\text{V}$ ， $R_1 = R_2 = 1\text{k}\Omega$ ， $R_3 = R_4 = 1\text{k}\Omega$ ，求 u_o = ?

【解】解法一：由理想运放虚断的特点可知， $i_{1+} = i_{1-} = 0$ ， $i_{2+} = i_{2-} = 0$ ，则 R_1 、 R_2 中流过同一电流 i_1 ， R_3 、 R_4 中流过同一电流 i_2 。又由理想运放虚短的特点可知， $u_{1+} = u_{1-}$ ， $u_{2+} = u_{2-}$ ，故 $u_{1-} - u_{2-} = u_i = i_1 R_2 + i_2 R_3$ 。

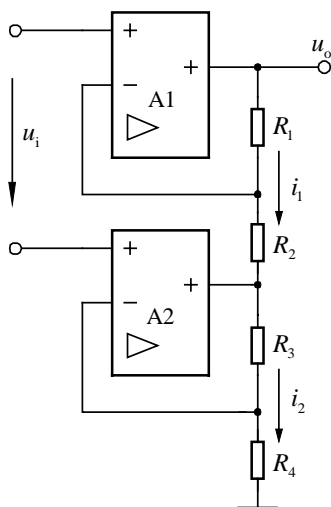
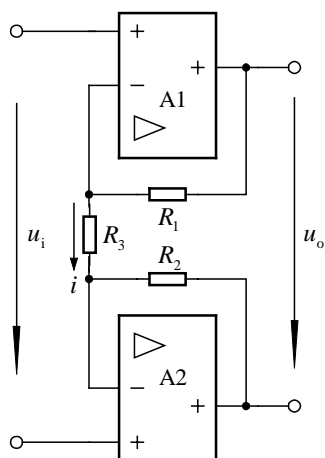
因而 $u_o = i_1(R_1 + R_2) + i_2(R_3 + R_4) = 2(i_1 R_1 + i_2 R_3) = 2u_i = 2 \times 2 = 4\text{V}$

解法二：假设 $u_{1+} = u_{i1}$ 、 $u_{2+} = u_{i2}$ ，则由图示电路可知 $u_i = u_{1+} - u_{2+} = u_{i1} - u_{i2}$ 。运放 A2 可视为以 $u_{2+} = u_{i2}$ 为输入信号的同相比例放大器，其输出电压

$$u_{o2} = (1 + R_3/R_4)u_{2+} = (1 + R_3/R_4)u_{i2}$$

运放 A1 的输出电压 $u_o = u_{o1}$ 为 u_{1+} 和 u_{o2} 共同作用的结果，由叠加原理可得

$$\begin{aligned} u_o = u_{o1} &= (1 + R_1/R_2)u_{1+} + (-R_1/R_2)u_{o2} = \\ &= (1 + R_1/R_2)u_{i1} + (-R_1/R_2)(1 + R_3/R_4)u_{i2} = \\ &= (1 + 1)u_{i1} + (-1)(1 + 1)u_{i2} = \\ &= 2(u_{i1} - u_{i2}) = 2u_i = 2 \times 2 = 4\text{V} \end{aligned}$$



【例题 17.4】如图 17.4 所示运放电路，求 $u_o = ?$

图 17.3 例题 17.3 的图

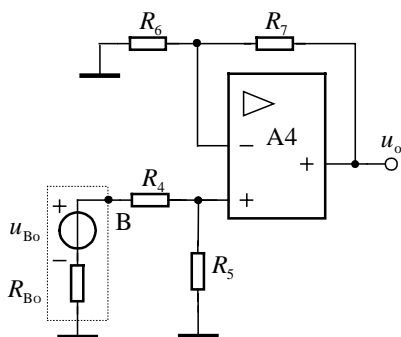
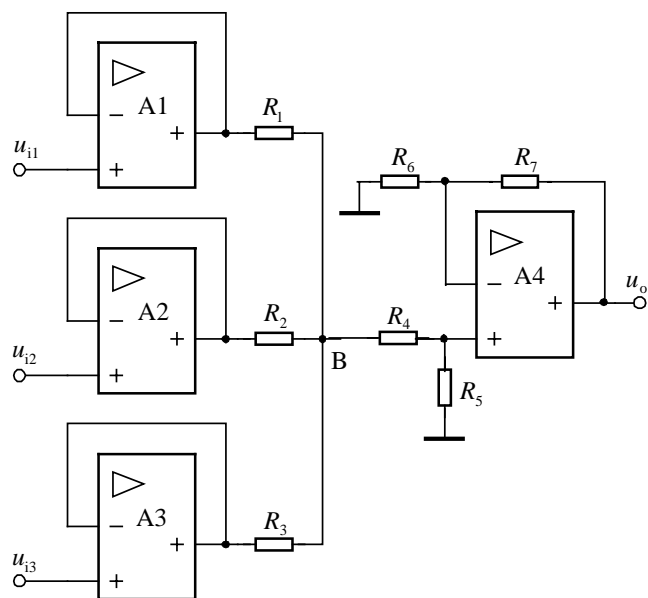


图 17.5 例题 17.4 的图

图 17.4 例题 17.4 的图

【解】由图 17.4 可知，运放 A1、A2、A3 工作于线性工作状态，并分别构成三个电压跟随器电路，即 $u_{o1} = u_{i1}$ 、 $u_{o2} = u_{i2}$ 、 $u_{o3} = u_{i3}$ 。B 点左侧由运放 A1、A2、A3 和电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 所构成的电路可看成为一个线性有源二端网络，因而根据戴维南定理可将其等效为图 17.5 所示等效电源电路。

其中，由节点电压法可得

$$u_{Bo} = \frac{\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad R_{Bo} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3$$

由图 17.9 电路可知, A4 构成一个同相比例放大电路, 即

$$u_o = \left(1 + \frac{R_7}{R_6}\right) u_{4+} = \left(1 + \frac{R_7}{R_6}\right) \frac{R_5}{R_{Bo} + R_4 + R_5} u_{Bo}$$

把上述 u_{Bo} 、 R_{Bo} 式代入即得所求。

【例题 17.5】 如图 17.6 所示运放电路, 求 $u_o = ?$

【解】 由理想运放“虚断”的特点可知

$$i_+ = i_- = 0$$

故有
$$\frac{u_{i1} - u_-}{R} = C \frac{d(u_- - u_o)}{dt}$$

$$\frac{u_{i2} - u_+}{R} = C \frac{du_+}{dt}$$

又由理想运放“虚短”的特点可知

$$u_+ = u_-$$

$$\frac{u_{i2} - u_-}{R} = C \frac{du_-}{dt}$$

式 (2), 得
$$\frac{u_{i1} - u_{i2}}{R} = -C \frac{du_o}{dt}$$

所以
$$u_o = \frac{1}{RC} \int (u_{i2} - u_{i1}) dt$$

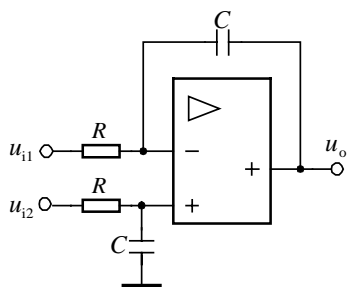


图 17.6 例题 17.5 的图

【例题 17.6】 如图 17.7 所示运放电路, 已知 $u_i = 0.6 \sin \omega t \text{ V}$, 求: (1) 试分别计算当开关 S 接通和断开两种情况下的输出电压 u_o 的表达式; (2) 当 S 按图 17.8 的时间通、断时, 试画出 u_o 的波形图。

【解】 (1) 当开关 S 接通时, 因运放的同相输入端接地, 所以电路为反相比例放大电路, 如图 17.9 所示。此时

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i = -\frac{20}{20} u_i = -u_i = -0.6 \sin \omega t \text{ V}$$

当开关 S 断开时, 运放的同相和反相输入端皆有信号输入, 如图 17.10 所示。此时, 由叠加定理可得

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i = -\frac{20}{20} u_i + \left(1 + \frac{20}{20}\right) u_i = u_i = 0.6 \sin \omega t \text{ V}$$

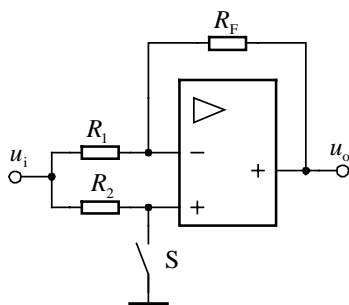


图 17.7 例题 17.6 的图

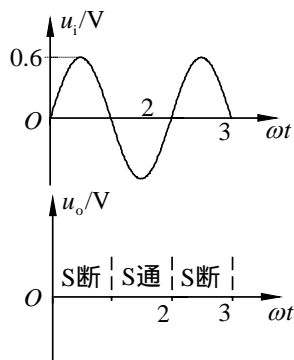


图 17.8 例题 17.6 的图

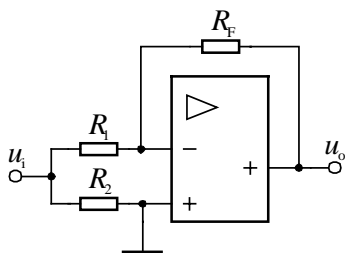


图 17.9 例题 17.6 的图

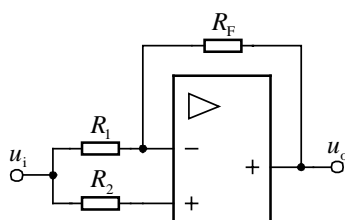


图 17.10 例题 17.6 的图

(2) 由(1)中结果可知,当 ωt 在 $0 \sim 1$ 、 $2 \sim 3$ 期间,因 S 断开,所以 $u_o = u_i$;当 ωt 在 $1 \sim 2$ 期间,因 S 闭合,所以 $u_o = -u_i$ 。输出电压 u_o 的波形如图 17.11 所示。

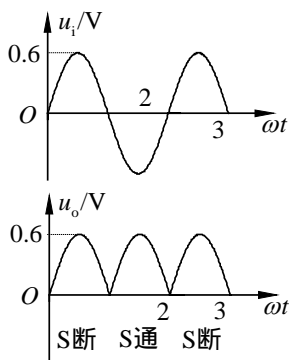


图 17.11 例题 17.6 的图

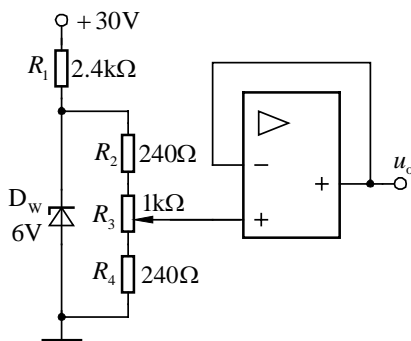


图 17.12 例题 17.7 的图

【例题 17.7】 如图 17.12 所示为一个电压基准电路,试计算输出电压 u_o 的可调范围。

【解】 图中运算放大器接成同相跟随器电路,故输出电压 u_o 的大小仅由可变电阻滑动端位置决定。

当滑动端处于最高位置时, u_o 为最大,即

$$u_{\text{omax}} = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} U_{\text{Dw}} = \frac{1 + 0.24}{0.24 + 1 + 0.24} \times 6 = 5.02 \text{ V}$$

当滑动端处于最低位置时, u_o 为最小, 即

$$u_{\text{omin}} = \frac{R_4}{R_2 + R_3 + R_4} U_{\text{Dw}} = \frac{0.24}{0.24 + 1 + 0.24} \times 6 = 0.97 \text{ V}$$

所以, 输出电压 u_o 的可调范围是: $(0.97 \sim 5.02) \text{ V}$ 。

【例题 17.8】 试证明图 17.13 所示运放电路的输出电压 u_o 可以表示为如下关系:

$$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R}\right) (u_{i2} - u_{i1})。$$

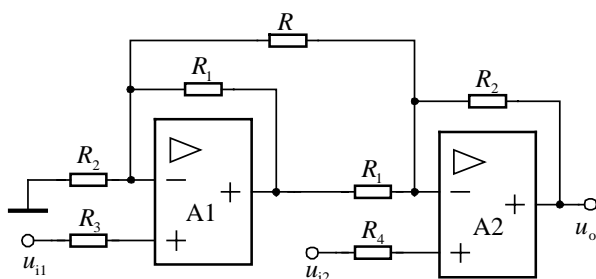


图 17.13 例题 17.8 的图

【解】 电路为非典型的两级运放电路, 不能直接应用现成公式, 而应根据运放工作的基本规则结合电路结构加以分析证明。

由前后两级运放在线性工作同时同相端与反相端的“虚短”和“虚断”可知

$$\begin{aligned} u_{1-} &= u_{1+} = u_{i1} & u_{2-} &= u_{2+} = u_{i2} \\ i_{1-} &= i_{1+} = 0 & i_{2-} &= i_{2+} = 0 \end{aligned}$$

根据图示电路的结构及各支路电流参考方向可知

$$I_1 = \frac{u_{1-} - 0}{R_2} = \frac{u_{i1}}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{u_{o1} - u_{1-}}{R_1} = \frac{u_{o1} - u_{i1}}{R_1}$$

$$I_3 = \frac{u_{2-} - u_{1-}}{R} = \frac{u_{i2} - u_{i1}}{R}$$

$$I_4 = \frac{u_{2-} - u_{o1}}{R_1} = \frac{u_{i2} - u_{o1}}{R_1}$$

$$I_5 = \frac{u_o - u_{2-}}{R_2} = \frac{u_o - u_{i2}}{R_2}$$

对第一级、第二级反相输入端分别列写节点电流方程

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad I_5 = I_3 + I_4$$

将上述各电流代入可得

$$\frac{u_{i1}}{R_2} = \frac{u_{o1} - u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2} - u_{i1}}{R}$$

$$\frac{u_o - u_{i2}}{R_2} = \frac{u_{i2} - u_{i1}}{R} + \frac{u_{i2} - u_{o1}}{R_1}$$

联立整理可得： $u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R}\right)(u_{i2} - u_{i1})$ ，证毕。

【例题 17.9】理想运放电路如图 17.14 所示。若输入信号为 u_i ，试推导出 $u_o = 0$ 时，有关电阻参数应满足的条件。

【解】由工作在线性工作状态的运放的“虚断”知： $i_- = i_+ = 0$ ，故

$$u_- = u_i - \frac{u_i - u_o}{R_1 + R_2} R_1$$

$$u_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_i$$

由工作在线性工作状态的运放的“虚短”知： $u_- = u_+$ ，即

$$u_i - \frac{u_i - u_o}{R_1 + R_2} R_1 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_i$$

整理得

$$u_o = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} + \frac{R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1} \right) u_i$$

若使 $u_o = 0$ ，则应使

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} + \frac{R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1} = 0$$

整理得

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

即当 $R_1 / R_2 = R_3 / R_4$ 时，差动电路对共模输入信号没有放大作用。

【例题 17.10】如图 17.15 所示运放电路采用桥式电路加入输入信号，已知电阻 $R_x = R(1 + \delta)$ ，试证明：当 $\delta \ll 1$ 时，输出电压 u_o 正比于 δ 。

【解】根据电路的结构和运放“虚断”($i_- = i_+ = 0$)的特点，对反相输入端和同相输入端分别列写节点电流方程：

反相输入端 $i_2 = i_1 + i_6$ (其中 $i_6 = i_7$)

即

$$\frac{u_-}{R} = \frac{U_R - u_-}{R} + \frac{u_o - u_-}{R_1}$$

化简得

$$u_- = \frac{\frac{U_R}{R} + \frac{u_o}{R_1}}{\frac{2}{R} + \frac{1}{R_1}}$$

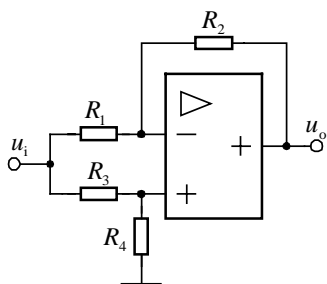


图 17.14 例题 17.9 的图

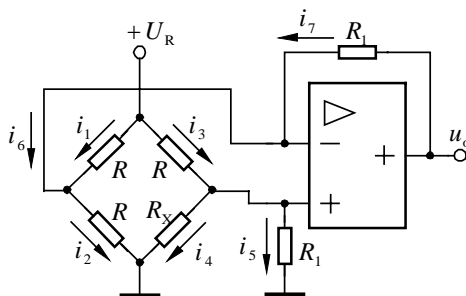


图 17.15 例题 17.10 的图

同相输入端

$$i_3 = i_4 + i_5$$

即

$$\frac{U_R - u_+}{R} = \frac{u_+}{R_x} + \frac{u_+}{R_1}$$

化简得

$$u_+ = \frac{\frac{U_R}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_x}}$$

又根据运放“虚短”的特点, $u_- = u_+$, 即

$$\frac{\frac{U_R}{R} + \frac{u_o}{R_1}}{\frac{2}{R} + \frac{1}{R_1}} = \frac{\frac{U_R}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_x}}$$

故

$$\frac{U_R R_1 + u_o R}{2R_1 + R} = \frac{U_R}{R \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_x} \right)}$$

将 $R_x = R(1 + \delta)$ 代入上式并化简得

$$u_o = \frac{R_1}{R} U_R \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{R}{R_1} \right) (1 + \delta)}$$

当 $\delta \ll 1$ 时, 则有

$$u_o = \frac{R_1}{R} U_R \frac{1}{2 + \frac{R}{R_1}}$$

即输出电压 u_o 正比于 δ 。

【例题 17.11】 如图 17.16 (a) 所示积分运算电路, 其中元件参数 $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$, $C = 1\mu\text{F}$, 且 $t = 0$ 时, $u_o = 0$ 。试求: (1) 当输入端所加信号 u_i 如图 17.16 (b) 所示时, 画出输出端 u_o 的波形。(2) 如果输入端所加电压为恒定电压 $u_i = +2\text{V}$, 且长时间持续下去, 那么输出电压 u_o 是否能始终保持线性积分关系?

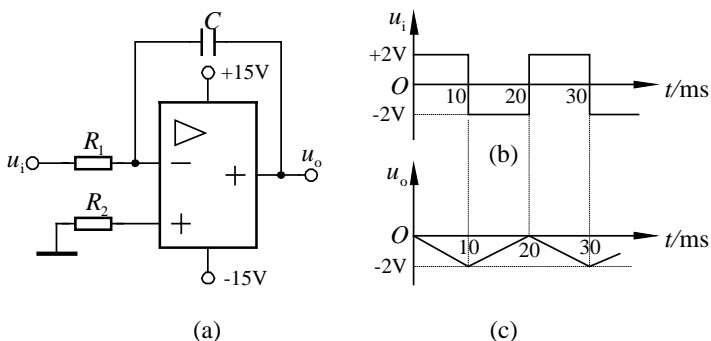


图 17.16 例题 17.11 的图

【解】 积分运算电路的输出电压

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt = -\frac{u_i}{R_1 C} t$$

式中, u_i 为分段电压信号。

在 $0 \sim 10\text{ms}$ 时段内, $u_i = +2\text{V}$, 故

$$u_o(t) = -\frac{u_i}{R_1 C} t = -\frac{2}{100 \times 10^3 \times 10^{-6}} t = -200t$$

当 $t = 10\text{ms}$ 时, $u_o = -2\text{V}$ 。

在 $10 \sim 20\text{ms}$ 时段内, $u_i = -2\text{V}$, 故

$$u_o(t) = -\frac{u_i}{R_1 C} (t - 10) - 2 = -\frac{-2}{100 \times 10^3 \times 10^{-6}} (t - 10) - 2 = 200(t - 10) - 2$$

当 $t = 20\text{ms}$ 时, $u_o = 0\text{V}$ 。

此后周期性重复, 输出波形如图 17.16 (c) 所示。

(2) 由 (1) 中结果可知, 当输入电压 $u_i = +2\text{V}$ 时, $u_o(t) = -200t$, 即 u_o 随时间 t 按线性规律增长。但是这种增长并不是无限的, 而是受到电源电压的限制。当 u_o 超出集成运放的线性工作范围之后, u_o 将不再继续增加, 最后保持在小于但接近于电源电压 (-15V) 的某一恒定数值 (饱和电压) 不变。

【例题 17.12】 求图 17.17 电路中的 u_o , 并画出其变化曲线。

【解】 先求 u_C , 再由反比例放大关系求 u_o 。

解法一 因为 $i_- = 0$, 故根据图 17.17 电路有 $i = i_C + i_F$, 即

$$\frac{u_i - u_C}{R} = C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R}$$

化简得

$$u_i = RC \frac{du_C}{dt} + 2u_C$$

由输入信号 u_i 曲线可知, $t < 0$ 时 $u_i = 0$, 故 $u_C(0) = 0$

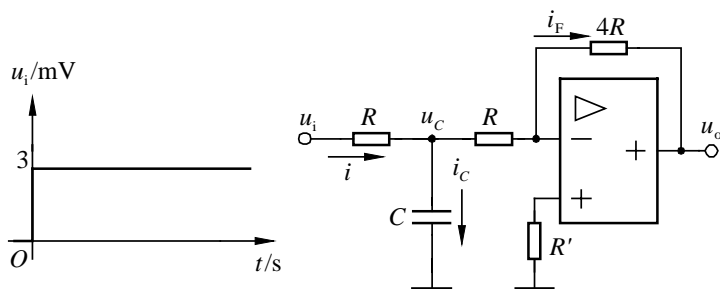


图 17.17 例题 17.12 的图

解此一阶线性微分方程并根据 u_C 的边界条件可得

$$u_C = \frac{3}{2} \left(1 - e^{-\frac{2}{RC}t} \right) \text{ mV} \quad (t \geq 0)$$

解法二 由 u_i 曲线可知, 输入信号为一阶跃电压, 即电路在 $t = 0$ 时发生“换路”, 随后出现暂态过程。

因为反相输入端为“虚地”, 即

$$u_- = 0$$

所以 $u_C(\infty) = \frac{R}{2R} u_i = \frac{u_i}{2} = \frac{3}{2} \text{ mV}$

又因 $t < 0$ 时 $u_i = 0$, 故 $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$

时间常数 $\tau = (R // R) C = RC/2 \text{ s}$

根据一阶线性电路三要素法

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{3}{2} + \left(0 - \frac{3}{2} \right) e^{-\frac{t}{RC/2}} = \frac{3}{2} \left(1 - e^{-\frac{2}{RC}t} \right) \text{ mV}$$

最后由反比例放大关系可得

$$u_o = -\frac{4R}{R} u_C = -4u_C = -6 \left(1 - e^{-\frac{2}{RC}t} \right) \text{ mV} \quad (t \geq 0)$$

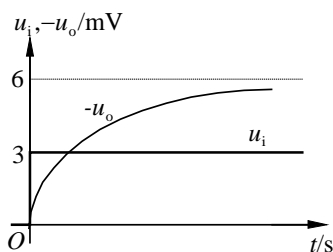


图 17.18 例题 17.12 的图

【例题 17.13】 图 17.19 (a) 所示电路中, 已知 D_1 、 D_2 为理想二极管, A 为理想运放, $R_F = 2R_1$, 且其最大输出电压为 $\pm 12\text{V}$ 。试分析此电路的功能, 并且要求:

画出其输入-输出特性曲线 $u_o = f(u_i)$; (2) 画出 $u_i = 5\sin\omega t \text{ V}$ 时 u_o 的波形; (3) 二极管 D_1 、 D_2 起什么作用? 若去掉 D_2 , 电路工作将产生什么变化?

【解】 图 17.19 (a) 所示电路是反相输入式电路, 运放的反相输入端为虚地。当

输入信号 u_i 为正时, u_o 为负, 此时 D_2 因承受正向电压而导通, D_1 因承受反向电压而截止, 输出电压 $u_o = 0$; 当输入信号 u_i 为负时, u_o 为正, 此时 D_2 截止, D_1 导通, 输出电压 $u_o = -\frac{R_F}{R_1}u_i = -2u_i$ 。故电路的输入-输出特性如图 17.19 (b)所示。

(2) 由输入-输出特性可画出 $u_i = 5\sin\omega t$ V 时 u_o 的波形, 见图 17.19 (c)。

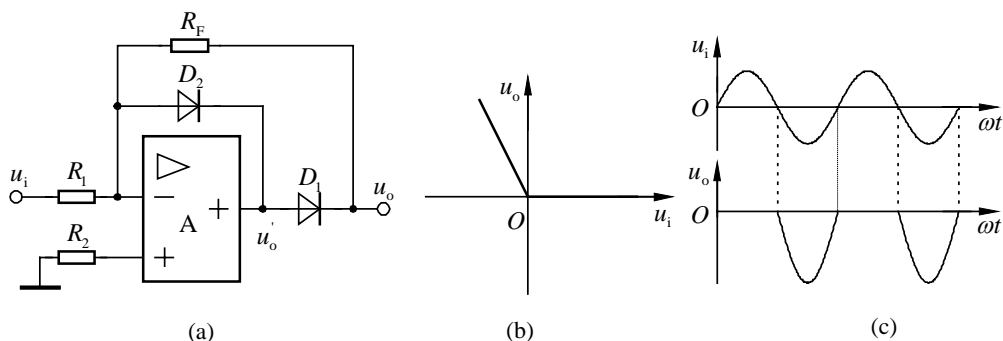


图 17.19 例题 17.13 的图

(3) 二极管 D_1 、 D_2 实现用运放对交变的 u_i 进行负半波整流。若去掉 D_2 , 则当 u_i 为正时, u_o 为负, D_1 因承受反压而截止, 运放处于开环状态, 其反相输入端不再是虚地, 因而不能使 $u_o = 0$, 无法实现半波整流。

【例题 17.14】 如图 17.20 所示, A1、A2 均为理想运算放大器。已知在 $t=0$ 时, 加入 $u_i = 1$ V 的电压, 此时电容 C 上的电压 $u_C(0) = 0$, A2 的 $u_o = -U_{o(sat)} = -12$ V, 问从 $t=0$ 开始, 经过多长时间 A2 的输出电压由 $-U_{o(sat)}$ 越变到 $+U_{o(sat)} = +12$ V?

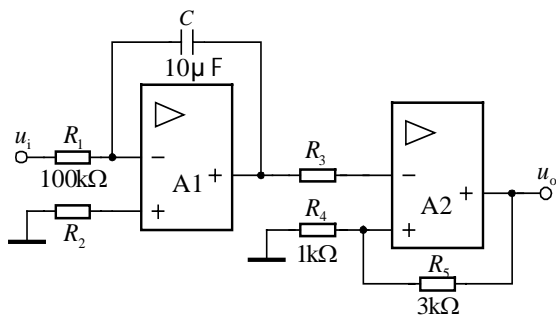


图 17.20 例题 17.14 的图

【解】 图示电路中运放 A1 工作于线性状态, 实现积分运算, 即

$$u_{o1}(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt = -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}} \int 1 \cdot dt = -10t$$

运放 A2 加有正反馈, 工作于非线性状态, 实现电压比较, 即

$$u_{2+} > u_{2-} \quad u_o = +U_{o(sat)}$$

$$u_{2+} < u_{2-} \quad u_o = -U_{o(\text{sat})}$$

$$\text{另由题意知} \quad u_{2+}(0) = \frac{R_4}{R_4 + R_5} u_o = \frac{1}{1+3}(-12) = -3\text{V}$$

设从 $t=0$ 开始, 经过时间 t_1 后 $u_{o1}(t_1) = -10t_1 = -3\text{V}$, 则 $t_1 = 0.3\text{s}$ 。故

$$t < t_1 \text{ 时, } u_{2-} = u_{o1} > u_{2+}, \quad u_o = -U_{o(\text{sat})} = -12\text{V}$$

$$\text{而} \quad t > t_1 \text{ 时, } u_{2-} = u_{o1} < u_{2+}, \quad u_o = +U_{o(\text{sat})} = +12\text{V}$$

即经过 0.3s 后输出电压 u_o 将由 $-U_{o(\text{sat})} = -12\text{V}$ 越变到 $+U_{o(\text{sat})} = +12\text{V}$ 。

【例题 17.15】 如图 17.21 (a) 所示电路中, $R_1 = R_2 = R_3 = R$, $R_4 = 0.5\text{k}\Omega$, D_1 、 D_2 为理想二极管, A1、A2 为理想运算放大器, 且其最大输出电压为 $\pm 12\text{V}$, 稳压管 D_Z 的稳压值 $U_Z = 6\text{V}$, 输入信号 $u_i = 6\sin\omega t \text{ V}$ 。试画出与 u_i 对应的 u_o' 和 u_o 的波形。

【解】 图示电路中运算放大器 A1、A2 用作比较器, 工作于开环状态。由已知可得

$$u_{2+} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} (+6) = \frac{1}{3} \times 6 = 2\text{V}$$

$$u_{1-} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} (+6) = \frac{2}{3} \times 6 = 4\text{V}$$

对于 A1: 当 $u_i > u_{1-}$ 时, $u_{o1} = +U_{o(\text{sat})} = +12\text{V}$, D_1 导通;

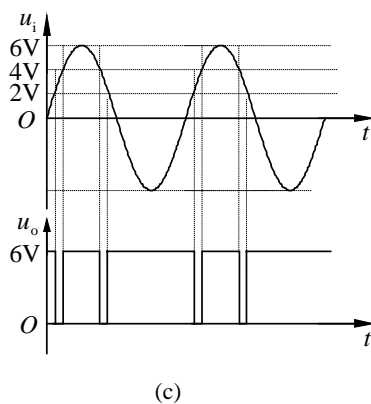
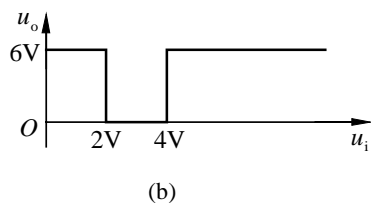
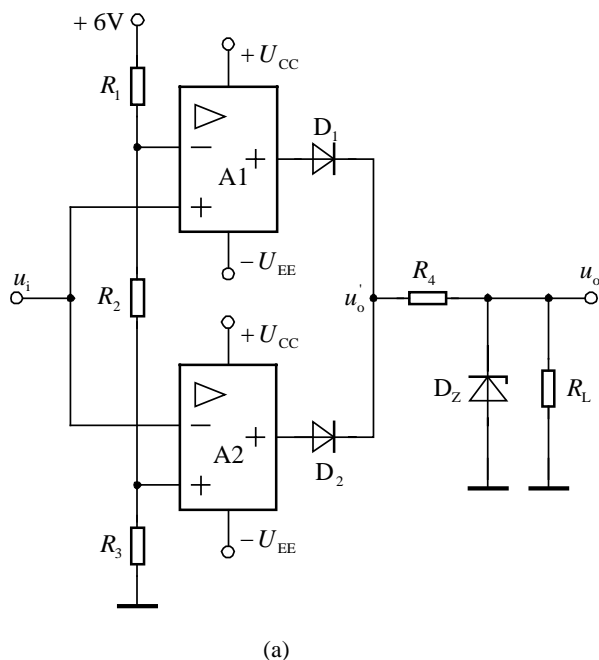


图 17.21 例题 17.15 的图

当 $u_i < u_{1-}$ 时, $u_{o1} = -U_{o(sat)} = -12\text{V}$, D_1 截止。

对于 A_2 : 当 $u_i > u_{2+}$ 时, $u_{o2} = -U_{o(sat)} = -12\text{V}$, D_2 截止;

当 $u_i < u_{2+}$ 时, $u_{o2} = +U_{o(sat)} = +12\text{V}$, D_2 导通。

综合上述分析可知:

当 $u_i < u_{2+}$ (即 $u_i < 2\text{V}$) 时, D_1 截止, D_2 导通, $u_o' = u_{o2} = +U_{o(sat)} = +12\text{V}$, $u_o = U_Z = +6\text{V}$;

当 $u_{2+} < u_i < u_{1-}$ (即 $2\text{V} < u_i < 4\text{V}$) 时, D_1 截止, D_2 截止, $u_o = u_o' = 0\text{V}$;

当 $u_i > u_{1-}$ (即 $u_i > 4\text{V}$) 时, D_1 导通, D_2 截止, $u_o' = u_{o1} = +U_{o(sat)} = +12\text{V}$, $u_o = U_Z = +6\text{V}$ 。

输入-输出传输特性和 u_o 的波形如图 17.21 (b)、(c) 所示。从传输特性和波形可看出, 此电路是一种双限窗口比较器。

【例题 17.16】 设图 17.22 中的集成运放为理想元件, 且其 $U_{o(sat)} = \pm 12\text{V}$ 。当输入为 $u_i = 10\sin 100\pi t$ V 的正弦波, $R_1 = 1\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 2\text{k}\Omega$ 时, 试画出输入和输出电压的传输特性及输出 u_o 的波形。

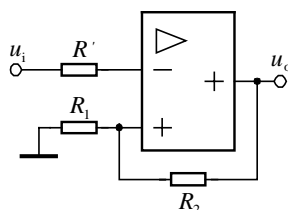


图 17.22 例题 17.16 的图

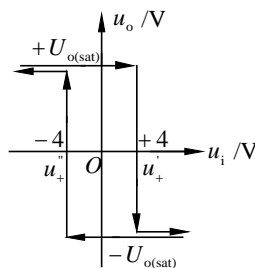


图 17.23 例题 17.16 的图

【解】 由图示电路可知: 输出 u_o 通过电阻 R_2 向同相输入端引入正反馈, 故运放工作在线性状态, 用来进行电压比较。 u_o 有两个极限状态值 $\pm U_{o(sat)}$ 。即

若 $u_i = u_- < u_+$, 则 $u_o = +U_{o(sat)}$;

若 $u_i = u_- > u_+$, 则 $u_o = -U_{o(sat)}$;

而当 $u_o = +U_{o(sat)}$ 时, $u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} [+U_{o(sat)}] = \frac{1}{3} \times 12 = 4\text{V}$;

而当 $u_o = -U_{o(sat)}$ 时, $u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} [-U_{o(sat)}] = \frac{1}{3} \times (-12) = -4\text{V}$ 。

上、下门限电压 u_+' 、 u_+'' 分别为两个翻转点, u_o 的状态取决于 u_i 和 u_+ 的比较结果。当 u_o 在翻转点跳变后, 相应的 u_+ 随之发生改变, 这是分析此类问题的关键所在。

输入和输出电压的传输特性见图 17.23。

当输入为 $u_i = 10\sin 100\pi t$ V 的正弦波时, 输出 u_o 的波形如下:

$t = 0$ 时, 初始 $u_o = +U_{o(sat)}$, 则 u_o 的变化波形见图 17.24 (a);

(2) $t = 0$ 时, 初始 $u_o = -U_{o(sat)}$, 则 u_o 的变化波形见图 17.24 (b)。

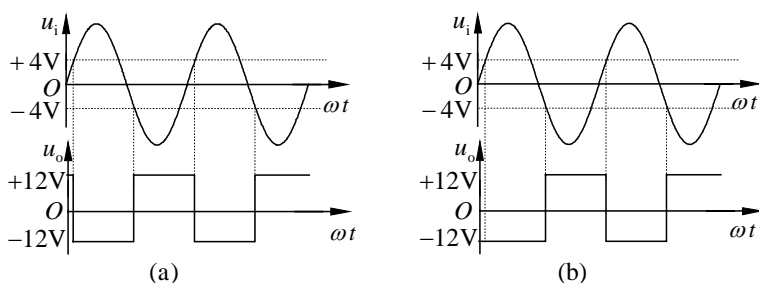


图 17.24 例题 17.16 的图

二、习题精选

【习题 17.1】在图 17.25 所示的电路中，已知 $R_F = 2R_1$ ， $u_i = -2\text{V}$ 。试求输出电压 u_o ，并说明放大器 A1 的作用。

【习题 17.2】如图 17.26 所示运算放大器电路，电阻 $R_1 = 4R$ 。当输入信号 $u_i = 8\sin\omega t \text{ mV}$ 时，试分别计算开关 K 断开和闭合时的输出电压 u_o 。

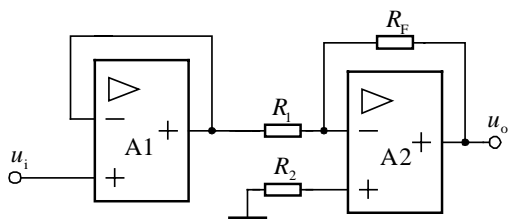


图 17.25 习题 17.1 的图

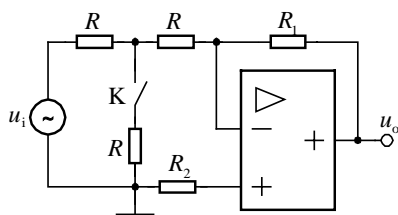


图 17.26 习题 17.2 的图

【习题 17.3】图 17.27 (a) 中为理想运放， $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ， $C = 1\mu\text{F}$ 。若 u_i 为图 17.27 (b) 所示波形，并已知在 $t = 0$ 时 $u_C = 0$ ，试对应画出 u_o 的波形。

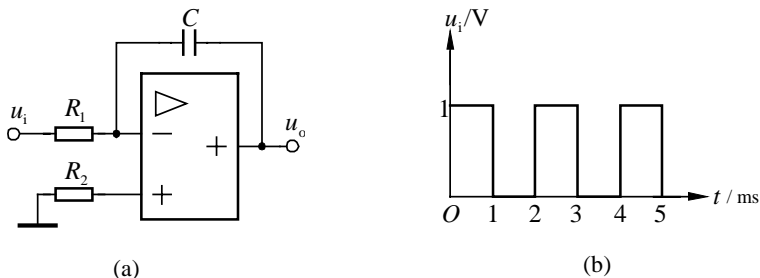


图 17.27 习题 17.3 的图

【习题 17.4】设图 17.28 的运放电路中，输入电压 u_i 的波形如图 17.28 所示，电容

器上的初始电压为零, 试画出输出电压 u_o 的波形。

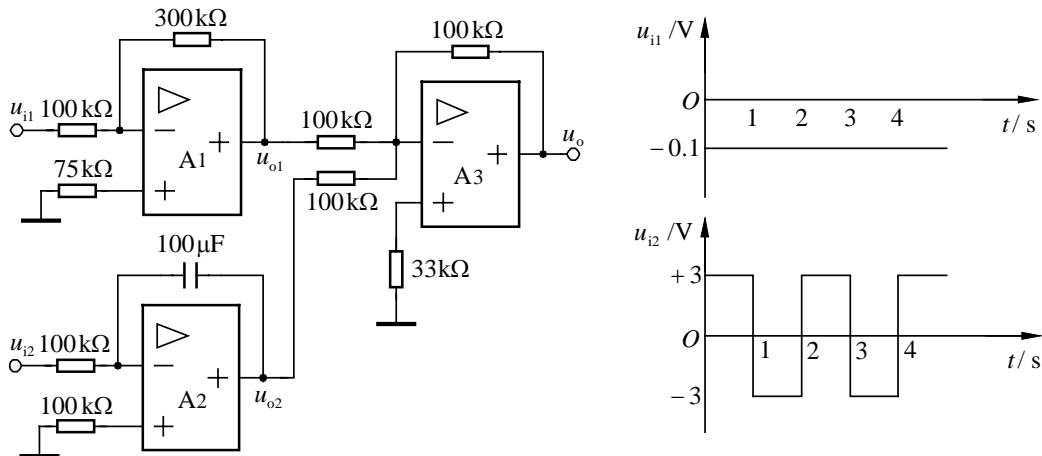


图 17.28 习题 17.4 的图

【习题 17.5】 试证明：图 17.29 所示电路中 $i_L = \frac{u_i}{R_L}$ 。

【习题 17.6】 为了既获得较高电压放大倍数, 又避免采用高阻值电阻, 反比例放大电路中的反馈回路常采用 T 型电阻网络, 如图 17.30 所示。试证明：

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_3 + R_4 + \frac{R_3 R_4}{R_5}}{R_1}$$

并说明怎样才能做到不用高阻值电阻也能得到较高的电压放大倍数 A_u 值。

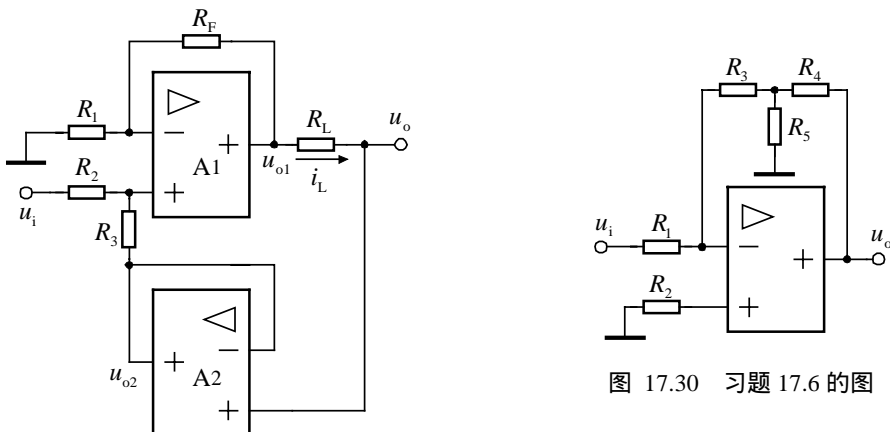


图 17.29 习题 17.5 的图

图 17.30 习题 17.6 的图

【习题 17.7】 图 17.31 中, A1、A2、A3 均为理想运放, 试计算 U_{o1} 、 U_{o2} 和 U_{o3} 的值。

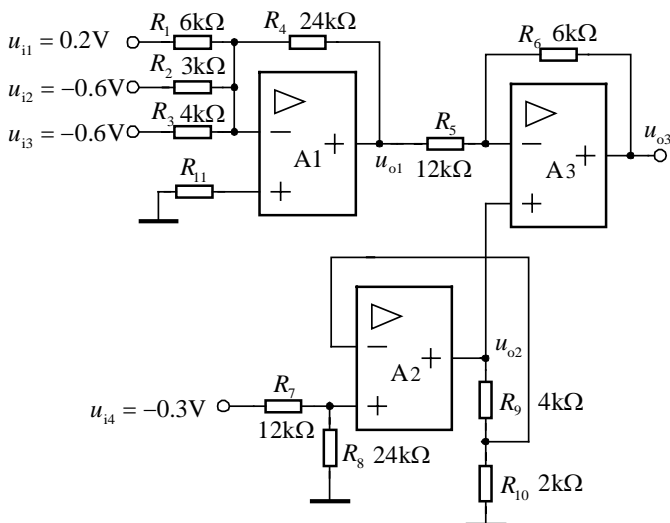


图 17.31 习题 17.7 的图

【习题 17.8】 设滞回比较器的传输特性和输入电压波形分别如图 17.32 和 17.33 所示，试画出它的输出电压波形。

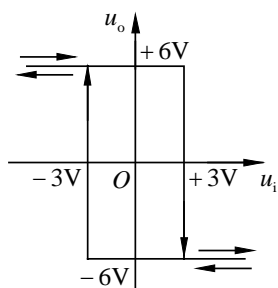


图 17.32 习题 17.8 的图

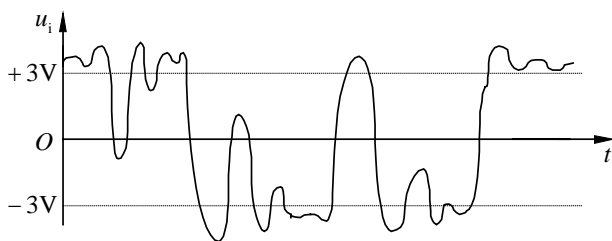


图 17.33 习题 17.8 的图

【习题 17.9】 如图 17.34 所示为一电压基准源电路。若稳压管 D_Z 的稳定电压值 $U_Z = 6V$ (2DW7)，其正向导通压降为 $0.7V$ ，其中各电阻 $R_2 = R_3 = R_W = 1.2k\Omega$ ， $R_1 = 600\Omega$ 。求：(1) u_o 的表达式；(2) 改变 R_W 的滑动端位置时，计算 u_o 的变化范围。

【习题 17.10】 试写出图 17.35 所示电路中 u_o 的表达式，并说明该电路的特点。

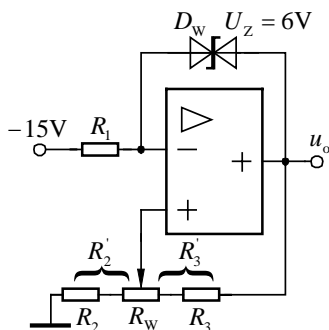


图 17.34 习题 17.9 的图

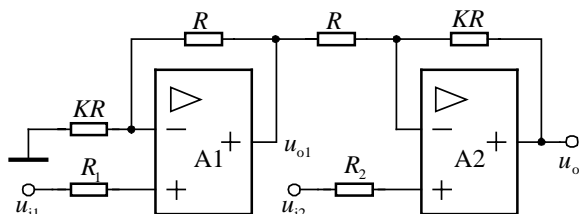


图 17.35 习题 17.10 的图

三、习题答案

【习题 17.1】 $u_o = \left(-\frac{R_F}{R_1}\right) u_{o1} = \left(-\frac{R_F}{R_1}\right) u_{i1} = 4\text{V}$ 。运放 A1 接成电压跟随器，使输入阻抗趋于无限大，以减轻信号源负担。

【习题 17.2】 开关 K 断开时， $u_o = -\frac{4R}{R+R}u_i = -16\sin\omega t \text{ mV}$ ；

开关 K 断开时， $u_o = -\frac{4R}{0.5R+R}(0.5u_i) = -\frac{32}{3}\sin\omega t \text{ mV}$ 。

【习题 17.3】 波形如图 17.36 所示。

【习题 17.4】 $u_{o1} = -3u_{i1} = 0.3\text{V}$ ， $u_{o2} = -0.1\int u_{i2}dt$ ， $u_o = -(u_{o1} + u_{o2})$ ，各波形如图 17.37 所示。

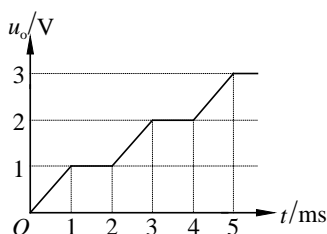


图 17.36 习题 17.3 的图

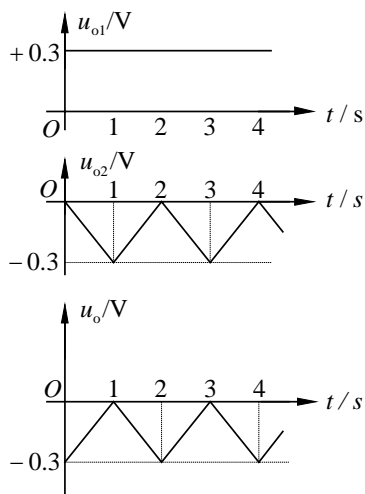


图 17.37 习题 17.4 的图

【习题 17.5】 由图可列方程 $u_{1+} = \frac{R_3}{R_2 + R_3}u_i + \frac{R_2}{R_2 + R_3}u_{o2}$

$$u_{o2} = u_o$$

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)u_{1+}$$

$$i_L = \frac{u_{o1} - u_o}{R_L}$$

联立化简即得 $i_L = \frac{u_i}{R_L}$ 。

【习题 17.6】 只需取 $R_3 \cdot R_4$ 的乘积远远大于 R_5 即可。

【习题 17.7】

$$u_{o1} = \left(-\frac{R_4}{R_1}\right)u_{i1} + \left(-\frac{R_4}{R_2}\right)u_{i2} + \left(-\frac{R_4}{R_3}\right)u_{i3} = 6.4\text{V}$$

$$u_{o2} = \left(1 + \frac{R_9}{R_{10}}\right)\left(\frac{R_8}{R_7 + R_8}\right)u_{i4} = -0.6\text{V}$$

$$u_{o3} = \left(-\frac{R_6}{R_5}\right)u_{o1} + \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right)u_{o2} = -4.1\text{V}$$

【习题 17.8】

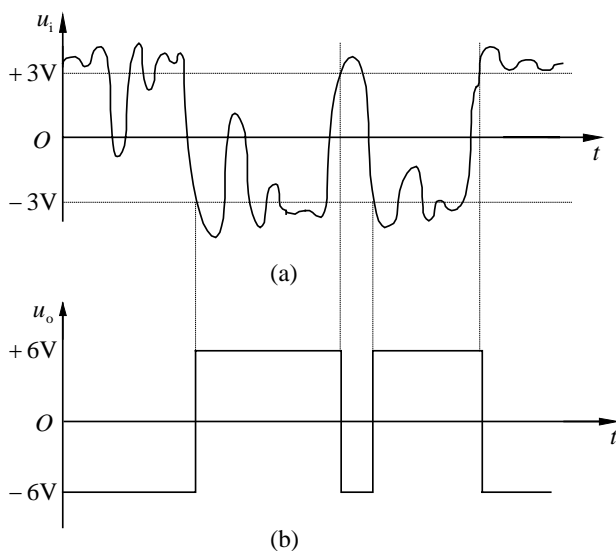


图 17.38 习题 17.8 的波形图

【习题 17.9】 因为通过稳压管构成负反馈电路，所以电路工作于线性工作状态。输出电压 u_o 的调节范围是 $9 \sim 18\text{V}$ 。

【习题 17.10】

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R}{KR}\right)u_{i1}$$

$$u_o = \left(-\frac{KR}{R}\right)u_{o1} + \left(1 + \frac{KR}{R}\right)u_{i2} = (1 + K)(u_{i2} - u_{i1})$$

(2) 此电路为同相输入，具有极高输入电阻的差动放大电路。电路中运算电阻种类少，容易匹配；前后级输入端皆存在共模电压，应选择共模抑制比 K_{CMRR} 较高的运放。