

第 1 章 运算放大器及其线性应用

1.1 知识要点总结

一、放大的基本概念及性能指标

1. 放大的基本概念

模拟电子电路是指包含电子管、晶体管、场效应管、运算放大器等有源器件，并完成一定功能的电路。放大是指在有源器件的控制下实现能量的转换。放大电路的功能是将微弱的电信号不失真地放大到所需的值。

2. 放大的模型和性能指标

放大电路可视为双口网络。根据输入和输出量的不同，可将放大电路分为电压放大、电流放大、互阻放大和互导放大 4 种电路形式。

放大电路的性能指标主要包括增益、输入电阻、输出电阻、通频带、非线性失真、功率和效率等。

二、模拟集成运算放大器的组成及特点

1. 模拟集成运算放大器组成

模拟集成运算放大器是高性能的直接耦合集成电压放大电路，通常由输入级、中间级、输出级和偏置电路 4 部分电路组成。

2. 集成运算放大电路的电压传输特性

集成运算放大电路的电压传输特性是指输出电压与输入电压的关系曲线，即 $u_o = f(u_{id})$ ，如图 1.1.1 所示。

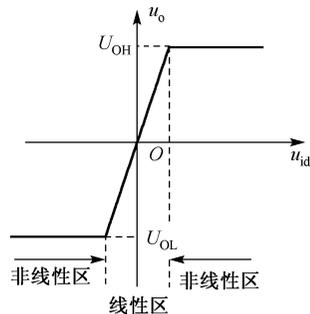


图 1.1.1 集成运放的电压传输特性

三、理想集成运算放大电路

1. 理想集成运算放大电路的特点

所谓理想运放，就是将集成运放的性能指标理想化，即

- (1) 开环电压增益 $A_{od} = \infty$
- (2) 开环输入电阻 $r_{id} = \infty$
- (3) 开环输出电阻 $r_o = 0$
- (4) 转换速率 $S_R = \infty$

一个理想运放可看成是一个电压 u_{id} 控制的受控电压源。

2. 理想集成运算放大电路工作在线性区的特点

当运放工作在线性区，即输出电压与输入电压呈线性关系时，具有两个主要特点。

(1) $u_+ = u_-$ (“虚短”)

(2) $i_- = i_+ = \frac{u_{id}}{r_{id}} \approx 0$ (“虚断”)

“虚短”和“虚断”是两个非常重要的概念，是分析工作在线性区的理想运放应用电路中输入与输出函数关系的基本关系式。集成运放必须引入深度负反馈，才能保证其工作在线性区。工作在线性区的应用电路主要包括运算电路、有源滤波电路等。

3. 理想集成运算放大电路工作在线性区的特点

当运放工作在线性区时，具有如下两个主要特点。

(1) $u_o = \begin{cases} U_{OH}, & u_+ > u_- \\ U_{OL}, & u_+ < u_- \end{cases}$

(2) $i_- = i_+ = 0$

四、基本运算电路

理想运放组成的基本运算电路如表 1.1.1 所示。

1.2 本章重点与难点

1. 放大的基本概念和放大电路的性能指标。
2. 集成运放的组成和理想化集成运放的特性。
3. 利用虚短、虚断的概念分析由集成运放组成的各种运算电路。

1.3 重点分析方法与步骤

下面介绍运算电路的分析方法。

1. 利用“虚短”和“虚断”进行分析

(1) 根据电路结构判断运放是否工作在线性区，若除运放外还

有其他的元器件连接输出和反相输入端，则判断运放工作在线性区，可应用“虚短”和“虚断”。

(2) 利用 KCL 列写节点电流方程 $\sum i = 0$ 。注意，不要列写运放输出端所接的节点方程，因为输出电流未知。

(3) 将“虚断” $i_- = i_+ = 0$ 和“虚短” $u_+ = u_-$ 的关系式代入节点电流方程，求运算电压的运算关系式。

2. 利用叠加定理进行分析

由于许多运算电路都是在反比例电路、同比例电路或积分电路的基础上发展起来的，所以在分析方法上，除可以采用“虚短”和“虚断”进行分析外，还可以采用叠加定理进行分析，具体分析步骤如下：

(1) 保留其中任一输入电压，令其他输入电压为零。

(2) 利用同比例电路、反比例电路或积分电路的基本关系式，求出任一输入电压作用时的输出电压。

(3) 根据电路的“叠加定理”，求出电路总的运算关系。

表 1.1.1 基本运算电路

电路名称	电路结构	基本运算关系
反相比例电路		$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1}$ $R_{if} = R_1, \quad R_{of} = 0$
同相比例电路		$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ $R_{if} = \infty, \quad R_{of} = 0$
反相加法电路		$u_o = -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right)$
同相加法电路		$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_4} \right) (K_1 u_{i1} + K_2 u_{i2} + K_3 u_{i3})$ <p>令 $R = R_1 // R_2 // R_3$, 式中</p> $K_1 = R / R_1$ $K_2 = R / R_2$ $K_3 = R / R_3$

(续表)

电路名称	电路结构	基本运算关系
减法电路		<p>当电阻满足条件 $R_f / R_1 = R_3 / R_2$ 时，</p> $u_o = -\frac{R_f}{R_1} (u_{i1} - u_{i2})$
反相积分电路		$u_o = -\frac{1}{R_1 C_f} \int u_i dt$
反相微分电路		$u_o = -R_f C \frac{du_i}{dt}$

1.4 填空题和选择题

一、填空题

- 1.4.1 放大电路有_____、_____、_____、_____4种电路形式。
- 1.4.2 某放大电路的上、下限截止频率分别为 100kHz 和 20Hz，则通频带 $f_{BW} \approx$ _____。
- 1.4.3 集成运算放大电路的输入级通常为差分电路，主要是为了_____。
- 1.4.4 理想集成运放的 $A_{od} =$ _____，输入电阻 $r_{id} =$ _____，输出电阻 $r_{od} =$ _____。
- 1.4.5 要实现电压放大倍数 $A_{uf} = 100$ 的放大电路，应选用_____运算电路，要将正弦波电压转换成余弦波电压，应选用_____运算电路。
- 1.4.6 电压跟随器的输出电压 u_o _____ 输入电压 u_i ，即电压增益 $A_{uf} =$ _____。
- 1.4.7 一个放大电路的中频增益为 60dB，则在截止频率处，实际的增益为_____dB。
- 1.4.8 _____比例运算电路中，运放的反相输入端为虚地，而_____比例运算电路中，运放的两个输入端对地电压基本等于输入电压。
- 1.4.9 _____比例运算电路的特例是电压跟随器，它具有输入电阻大和输出电阻小的特点，常用做缓冲器。
- 1.4.10 流过_____求和电路反馈电阻的电流等于各输入电流的代数和。

二、选择正确的答案填空

- 1.4.11 与工作在非线性工作状态的运放不同，运算电路中的运放通常工作在_____。
- A. 开环 B. 深度负反馈状态 C. 正反馈状态
- 1.4.12 将三角波电压转换为方波电压可选用_____。
- A. 反比例电路 B. 微分电路
C. 积分电路 D. 同比例电路
- 1.4.13 当集成运放工作在线性放大状态时，可运用_____两个重要的概念。
- A. 开环和闭环 B. 虚短和虚断
C. 虚短和虚地 D. 线性和非线性
- 1.4.14 某放大电路在负载开路时的输出电压为 4V，接入 12k Ω 的负载电阻后，输出电压降为 3V，则放大电路的输出电阻为_____。
- A. 10k Ω B. 4k Ω C. 3k Ω D. 2k Ω
- 1.4.15 某放大电路负载开路时，输出电压为 4V，负载短路时，输出电流为 10mA，则该电路的输出电阻为_____。
- A. 200 Ω B. 300 Ω C. 400 Ω D. 500 Ω
- 1.4.16 实现 $u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$ 的运算，应采用_____运算电路。
- A. 反比例 B. 反相积分 C. 减法 D. 反相加法
- 1.4.17 集成运算放大器实质上是一种_____。
- A. 高增益的直接耦合电压放大器
B. 高增益的阻容耦合电压放大器
C. 高增益的直接耦合电流放大器
D. 高增益的阻容耦合电流放大器

1.5 习题 1

1.5.1 当负载开路 ($R_L = \infty$) 时测得放大电路的输出电压 $u'_o = 2\text{V}$, 当输出端接入 $R_L = 5.1\text{k}\Omega$ 的负载时, 输出电压下降为 $u_o = 1.2\text{V}$, 求放大电路的输出电阻 R_o 。

解:

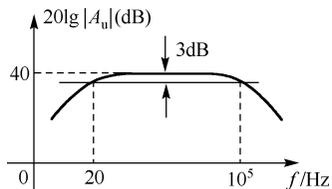
1.5.2 当在放大电路的输入端接入电压 $u_s = 15\text{mV}$, 内阻 $R_s = 1\text{k}\Omega$ 的信号源时, 测得电路的输入端的电压为 $u_i = 10\text{mV}$, 求放大电路的输入电阻 R_i 。

解:

1.5.3 当在电压放大电路的输入端接入电压 $u_s = 15\text{mV}$, 内阻 $R_s = 1\text{k}\Omega$ 的信号源时, 测得电路的输入端的电压为 $u_i = 10\text{mV}$; 放大电路输出端接 $R_L = 3\text{k}\Omega$ 的负载, 测得输出电压为 $u_o = 1.5\text{V}$, 试计算该放大电路的电压增益 A_u 和电流增益 A_i , 并分别用 dB (分贝) 表示。

解:

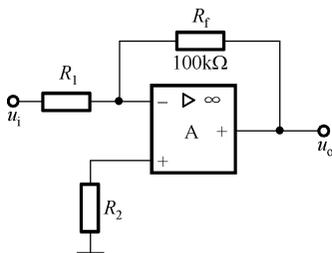
1.5.4 某放大电路的幅频响应特性曲线如图 1.5.1 所示, 试求电路的中频增益 A_{um} 、下限截止频率 f_L 、上限截止频率 f_H 和通频带 f_{BW} 。



解:

图 1.5.1 习题 1.5.4 电路图

1.5.5 电路如图 1.5.2 所示, 当输入电压为 0.4V 时, 要求输出电压为 4V , 试求解 R_1 和 R_2 的阻值。



解:

图 1.5.2 习题 1.5.5 电路图

1.5.6 集成运算放大器工作在线性区和非线性区各有什么特点。

解:

1.5.7 电路如图 1.5.3 所示, 集成运放输出电压的最大幅值为 $\pm 14V$, 求输入电压 u_i 分别为 $200mV$ 和 $2V$ 时输出电压 u_o 的值。

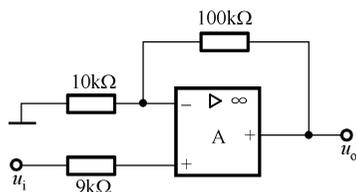
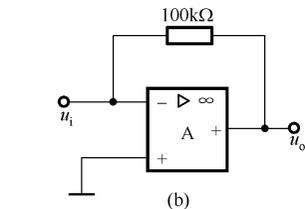
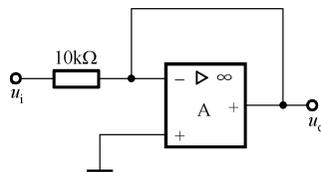


图 1.5.3 习题 1.5.7 电路图

解:



(b)

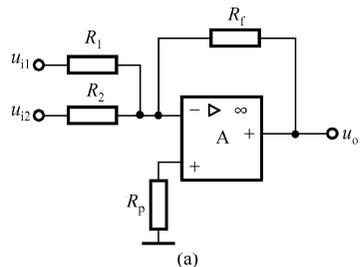


(c)

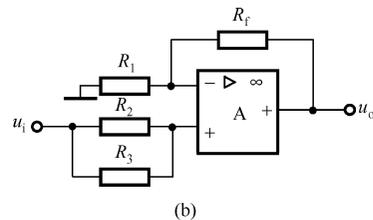
图 1.5.4 习题 1.5.8 电路图 (续)

1.5.9 电路如图 1.5.5 所示, 求输出电压 u_o 与各输入电压的运算关系式。

解:



(a)



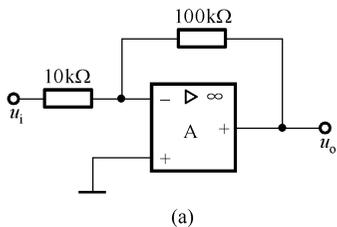
(b)

图 1.5.5 习题 1.5.9 电路图

1.5.8 电路如图 1.5.4 所示, 试求每个电路的电压增益 $A_{uf} = \frac{u_o}{u_i}$ 、

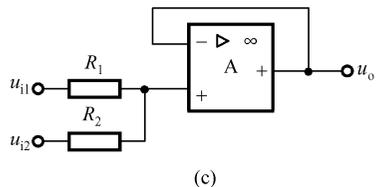
输入电阻 R_i 及输出电阻 R_o 。

解:

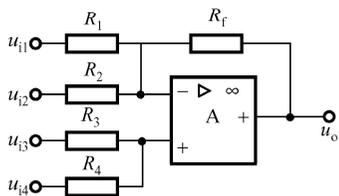


(a)

图 1.5.4 习题 1.5.8 电路图



(c)



(d)

图 1.5.5 习题 1.5.9 电路图 (续)

1.5.10 电路如图 1.5.6 所示, 假设运放是理想的: (1) 写出输出电压 u_o 的表达式, 并求出 u_o 的值; (2) 说明运放 A_1 和 A_2 各组成何种基本运算电路。

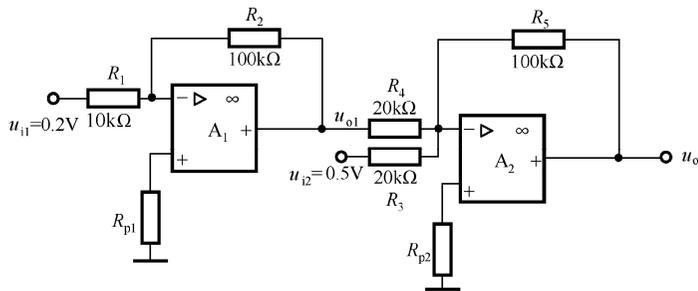


图 1.5.6 习题 1.5.10 电路图

解:

1.5.11 采用一片集成运放设计一个反相加法电路, 要求关系式为 $u_o = -5(u_{i1} + 5u_{i2} + 3u_{i3})$, 并且要求电路中最大的阻值不超过 $100k\Omega$, 试画出电路图, 并计算各阻值。

解:

1.5.12 采用一片集成运放设计一个运算电路, 要求关系式为 $u_o = -10(u_{i1} - u_{i2})$, 并且要求电路中最大的阻值不超过 $200k\Omega$, 试画出电路图, 计算各阻值。

解:

1.5.13 电路如图 1.5.7 所示，设运放是理想的，求输出电压 u_o 的表达式。

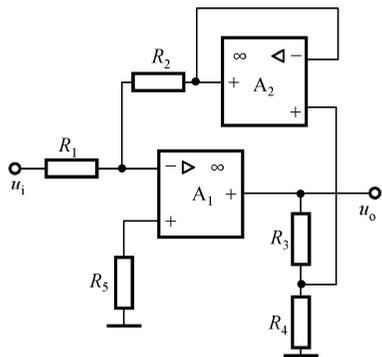
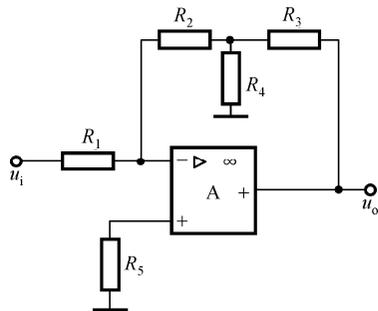


图 1.5.7 习题 1.5.13 电路图

解：

1.5.14 图 1.5.8 所示为带 T 形网络高输入电阻的反相比例运算电路。(1) 试推导输出电压 u_o 的表达式；(2) 若选 $R_1 = 51\text{k}\Omega$, $R_2 = R_3 = 390\text{k}\Omega$, 当 $u_o = -100u_i$ 时, 计算电阻 R_4 的阻值；(3) 直接用 R_2 代替 T 形网络, 当 $R_1 = 51\text{k}\Omega$, $u_o = -100u_i$ 时, 求 R_2 的值；(4) 比较 (2)、(3) 说明该电路的特点。



解：

图 1.5.8 习题 1.5.14 电路图

1.5.15 电路如图 1.5.9 所示，设所有运放都是理想的，试求：
 (1) u_{o1} 、 u_{o2} 、 u_{o3} 及 u_o 的表达式；(2) 当 $R_1 = R_2 = R_3$ 时， u_o 的值。

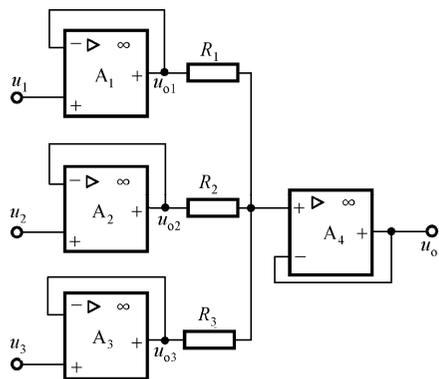


图 1.5.9 习题 1.5.15 电路图

解：

1.5.16 电路如图 1.5.10 所示，运放均为理想的，试求电压增益 $A = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}}$ 的表达式。

解：

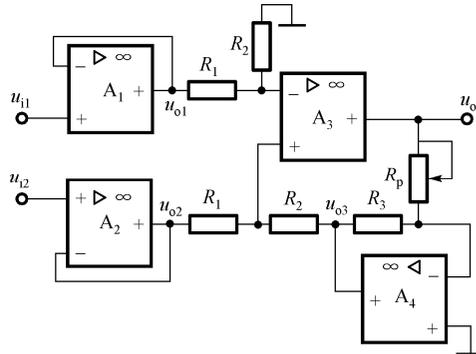


图 1.5.10 习题 1.5.16 电路图

1.5.17 电路如图 1.5.11 所示，运放均为理想的，试求输出电压 u_o 的表达式。

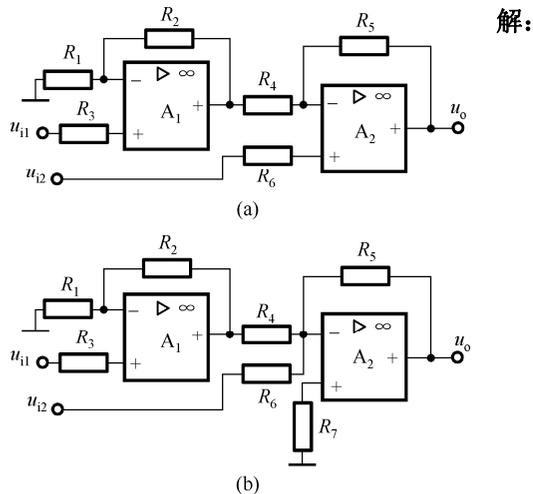


图 1.5.11 习题 1.5.17 电路图

1.5.18 积分电路如图 1.5.12 所示。设 $u_c(0) = 0$ ，在 $t = 0$ 时输入阶跃电压 $u_i = -1V$ ，当 $t = 1ms$ 时，输出电压达到 $10V$ ，求所需的时间常数。

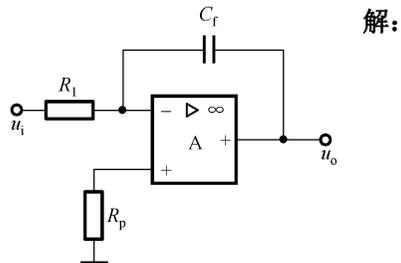


图 1.5.12 习题 1.5.18 电路图

1.5.19 电路如图 1.5.13(a)所示，已知运放的最大输出电压 $U_{om} = \pm 12V$ ，输入电压波形如图 1.5.13(b)所示，周期为 $0.1s$ 。试画出输出电压的波形，并求出输入电压的最大幅值 U_{im} 。

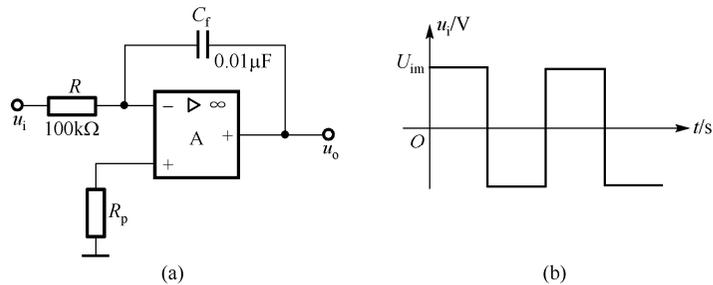


图 1.5.13 习题 1.5.19 电路图

解:

1.5.20 电路如图 1.5.14 所示，运放均为理想的，电容的初始电压为 $u_c(0) = 0$ 。(1) 写出输出电压 u_o 与各输入电压之间的关系式；(2) 当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$ 时，写出输出电压 u_o 的表达式。

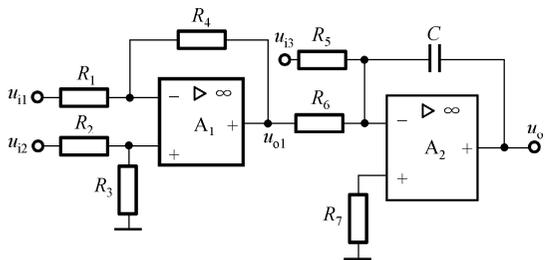


图 1.5.14 习题 1.5.20 电路图

解：

1.5.21 电路如图 1.5.15(a)所示，运放均为理想的。(1) A_1 、 A_2 、和 A_3 各组成何种基本电路；(2) 写出 u_o 的表达式；(3) $R_2 = 100\text{k}\Omega$ ， $C = 10\mu\text{F}$ ，电容的初始电压 $u_c(0) = 0$ ，已知 u_{o1} 的波形如图 1.5.15(b)所示，画出 u_o 的波形。

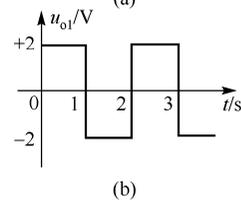
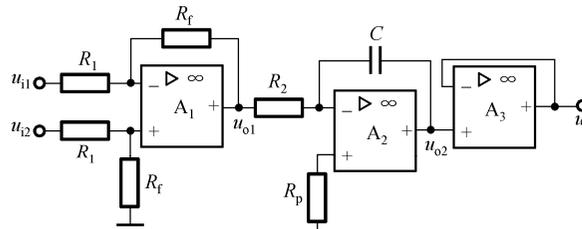


图 1.5.15 习题 1.5.21 电路图

解：

1.5.22 电路如图 1.5.16(a)所示,运放均为理想的,电容的初始值 $u_c(0) = 0$, 输入电压波形如图 1.5.16(b)所示。(1) 写出输出电压 u_o 的表达式; (2) 求 $t=0$ 时 u_{o1} 、 u_o 的值; (3) 画出与 u_i 相对应的 u_{o1} 和 u_o 的波形, 并标出相应的幅度。

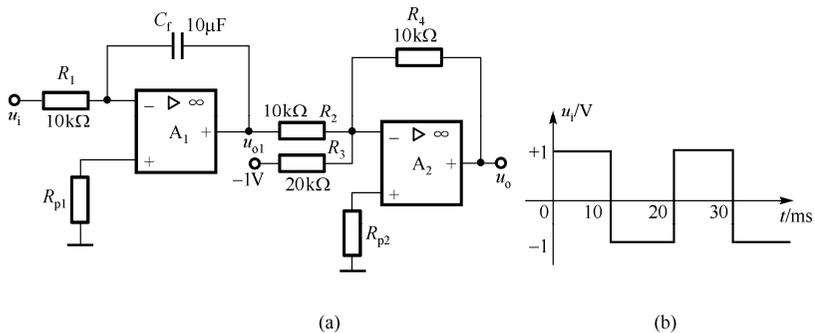


图 1.5.16 习题 1.5.22 电路图

解:

1.5.23 图 1.5.17(a)所示的反相微分电路中, 当输入信号 u_i 为对称的三角波时, 其波形如图 1.5.17 (b) 所示, 试画出输出信号 u_o 的波形。

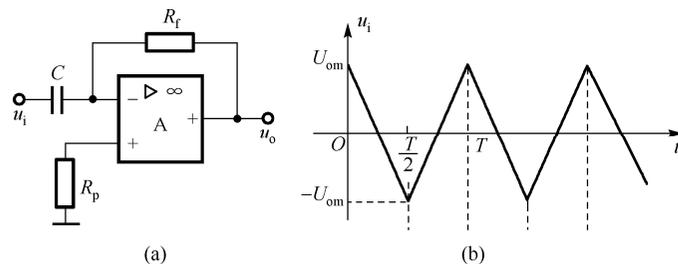


图 1.5.17 习题 1.5.23 电路图

解:

1.5.24 电路如图 1.5.18 所示，运放均为理想的，写出 u_o 与 u_i 的关系式，说明电路的功能。

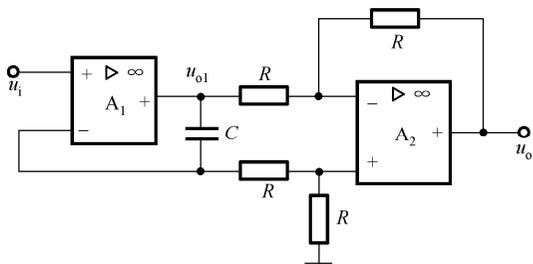


图 1.5.18 习题 1.5.24 电路图

解：

1.5.25 图 1.5.19 为实用的单电源供电的自举式同相交流电压放大电路，假设运算放大器是理想的。已知 $R_1 = R_3 = R_4 = 10\text{k}\Omega$ ， $R_2 = R_5 = 100\text{k}\Omega$ ， $C_1 = C_2 = C_3 = 10\mu\text{F}$ ， $V_{CC} = +15\text{V}$ 。问：（1）运算放大器的各信号端口的直流电位是多少？（2）交流放大倍数 u_o / u_i 是多少，输入阻抗 R_i 是多大？

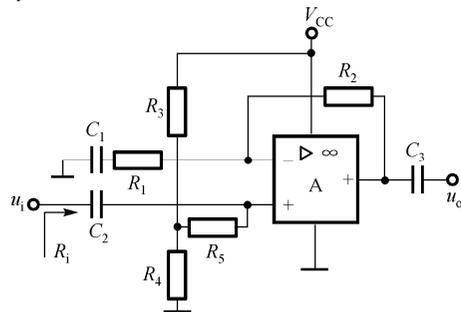


图 1.5.19 习题 1.5.25 电路图

解：

