

模电第二次辅导课



自动化系 耿 华
二零一零年十二月二十四日

第六章 放大电路中的反馈

内容

- 重点节：6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5.5
- 次重点节：6.5.1-6.5.4, 6.6.1- 6.6.3
- 不要求节：6.7

应用/实践	理论
反馈	正、负反馈 交流、直流反馈 局部、级间反馈 反馈组态
负反馈放大电路 的稳定	自激振荡 幅值裕度，相位裕度

要求

- 掌握以下概念：反馈，正、负反馈，交流、直流反馈，局部、级间反馈，反馈组态，反馈深度，虚短、虚断，自激振荡，幅值裕度，相位裕度
- 会判：判断电路中是否引入了反馈；判断正负反馈；判断直流反馈/交流反馈；对于交流负反馈，判断反馈的组态
- 会算：求解深度负反馈条件下电压放大倍数。
- 会引：了解负反馈对放大电路性能的影响，根据需求对电路引入合适的交流负反馈
- 会判振消振：理解负反馈放大电路产生自激振荡的原因，能定性判断电路的稳定性，了解消除自激振荡的方法

电路总结

- 集成运放组成的四种组态负反馈电路

方法总结

- 瞬时极性法判断正负反馈；
- 电压、电流负反馈的判断方法；
- 串联、并联负反馈的判断方法；
- 虚短、虚断分析深度负反馈电路电压放大倍数的方法；
- 根据需求引入合适的负反馈的方法；
- 根据环路增益 AF 的频率特性来判断电路闭环后是否稳定及简单的消振方法。

常见题型

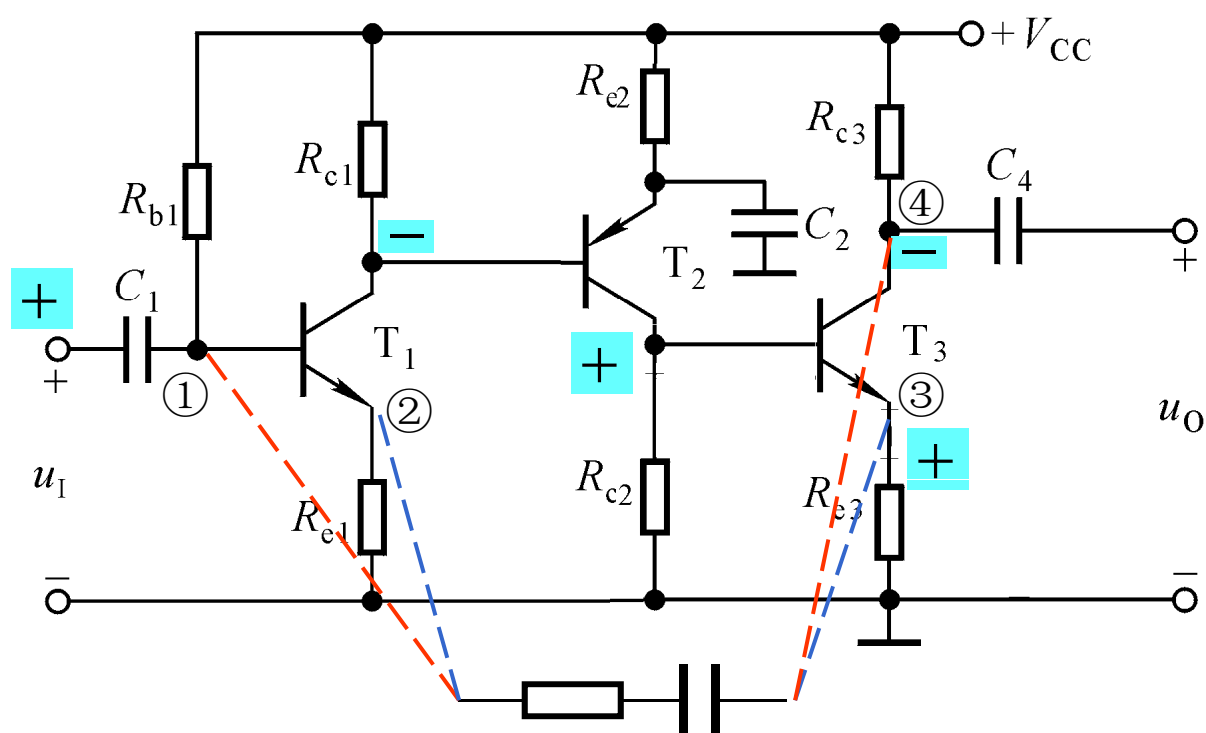
会判、会算、会引和会判振消振：

- 是否能够正确理解反馈的基本概念。
- 反馈性质的判断方法，有无反馈、直流反馈、交流反馈、正反馈负反馈、交流负反馈则是四种组态。
- 深度负反馈条件下放大倍数的估算。
- 根据需求引入合适的负反馈。
- 根据环路增益 AF 的频率特性来判断电路闭环后是否稳定及简单的消振。

1、问答

- 为减小放大电路从信号源索取的电流，增强带负载能力，应引入什么反馈？
- 为了得到稳定的电流放大倍数，应引入什么反馈？
- 为了稳定放大电路的静态工作点，应引入什么反馈？
- 为了使电流信号转换成与之成稳定关系的电压信号，应引入什么反馈？
- 为了使电压信号转换成与之成稳定关系的电流信号，应引入什么反馈？

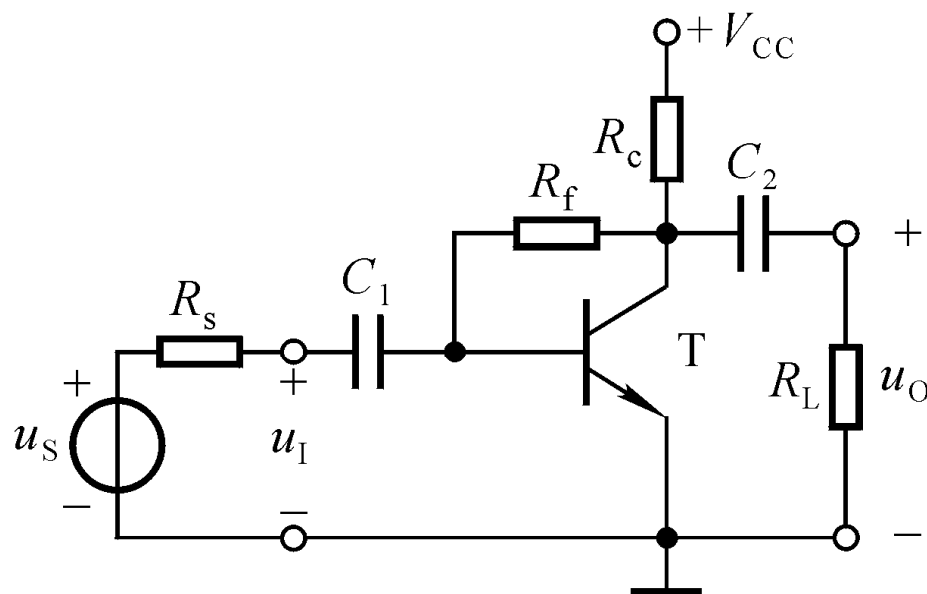
2、在图示电路中能够引入哪些组态的交流负反馈？



只可能引入电压并联或电流串联两种组态的交流负反馈

3、判断图中各电路中是否引入了反馈，是直流/交流反馈？正/负反馈？反馈组态？深度负反馈条件下，求电压放大倍数？

设图中所有电容对交流信号均可视为短路

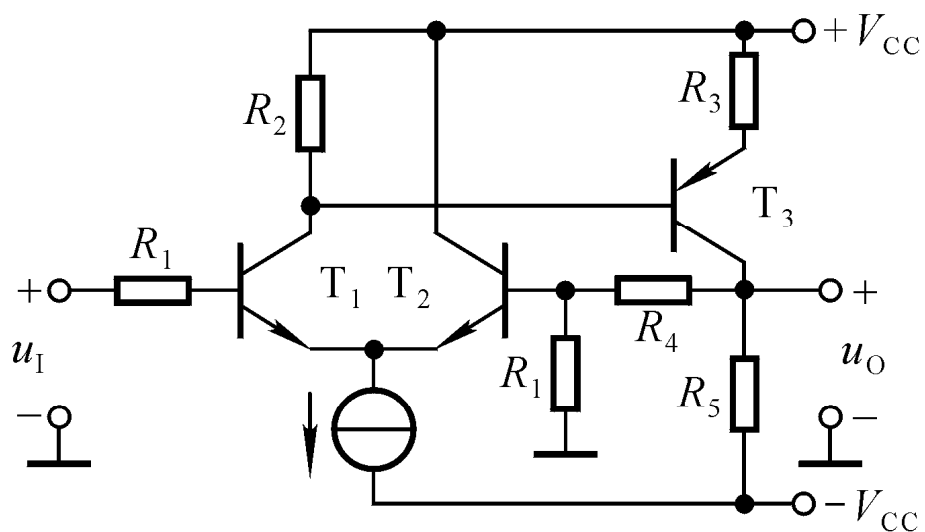


反馈系数：

$$\dot{F} = \dot{I}_f / \dot{U}_o = -1/R_f$$

电压放大倍数：

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_f R_s} = \frac{1}{\dot{F}} \cdot \frac{1}{R_s} = -\frac{R_f}{R_s}$$

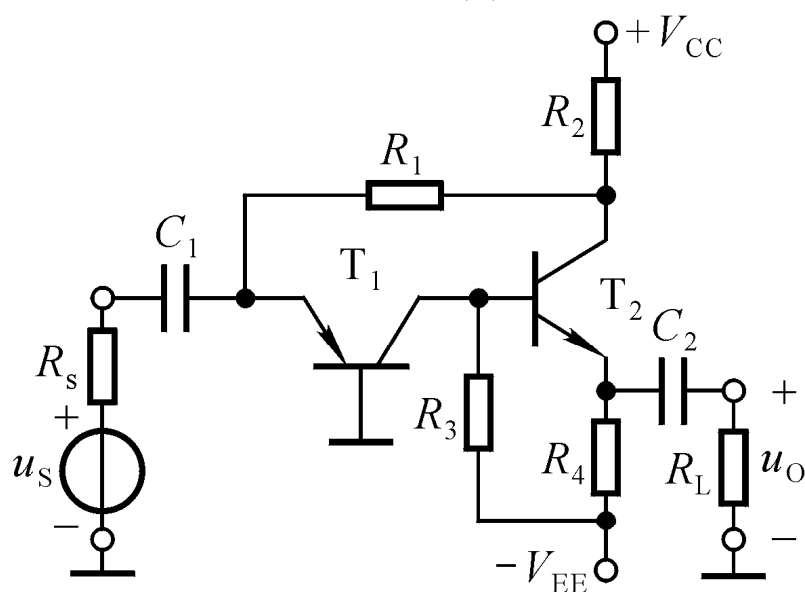


反馈系数:

$$\dot{F} = \dot{U}_f / \dot{U}_o = R_1 / (R_1 + R_4)$$

电压放大倍数:

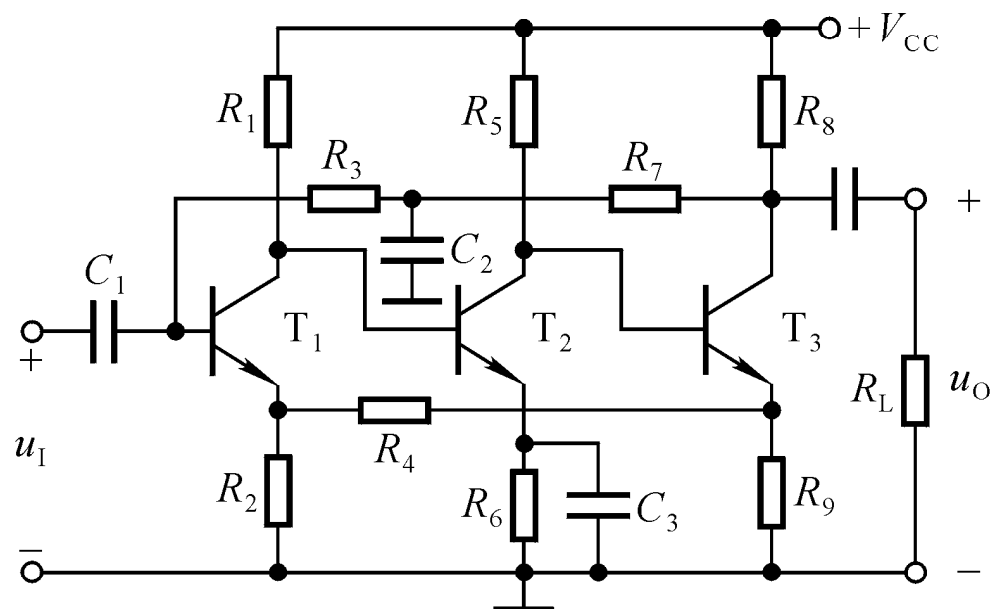
$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}} = 1 + \frac{R_4}{R_1}$$



反馈系数: $\dot{F} = \dot{I}_f / \dot{I}_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

电压放大倍数:

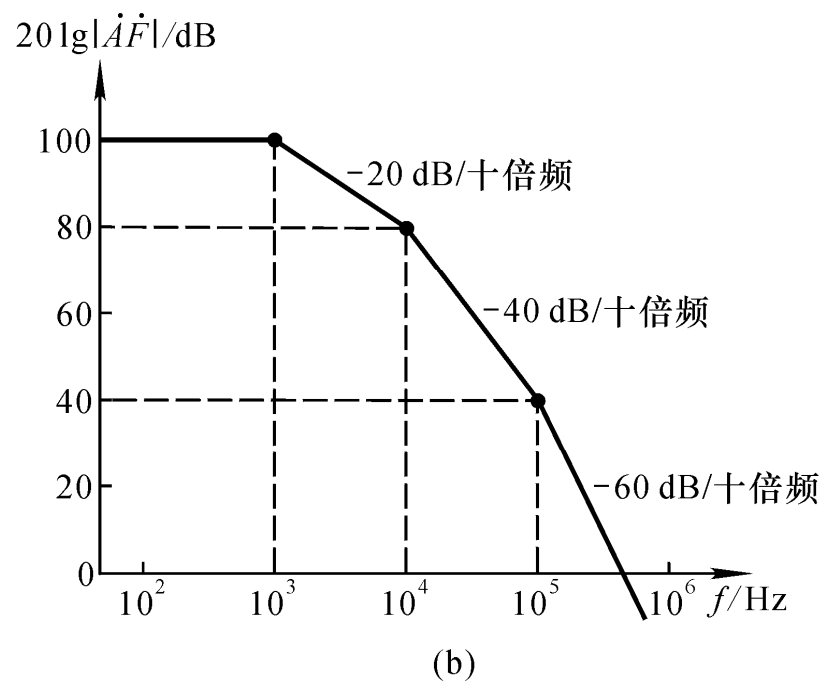
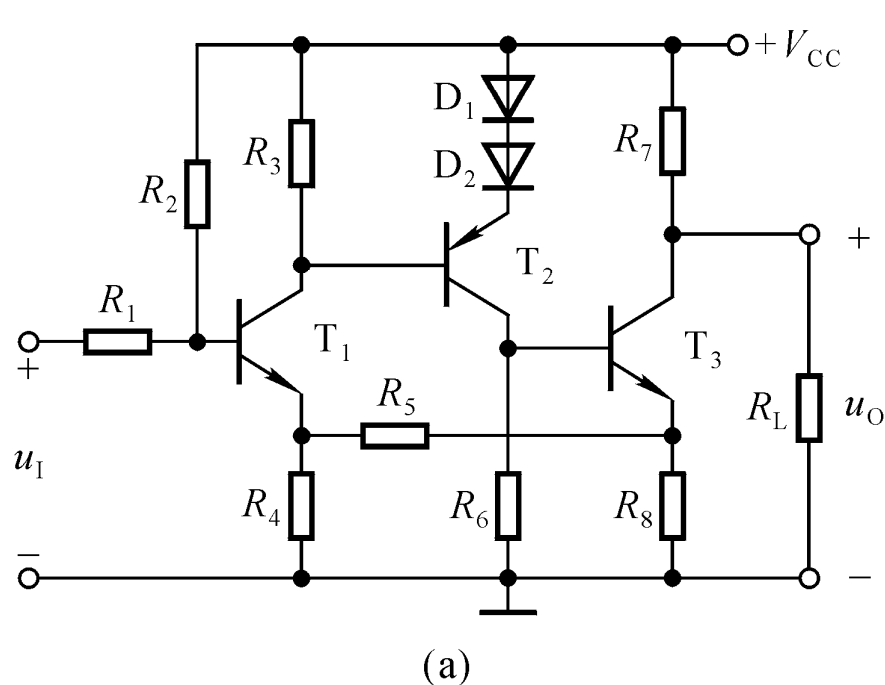
$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_o (R_4 // R_L)}{\dot{I}_f R_s} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \frac{R'_L}{R_s}$$



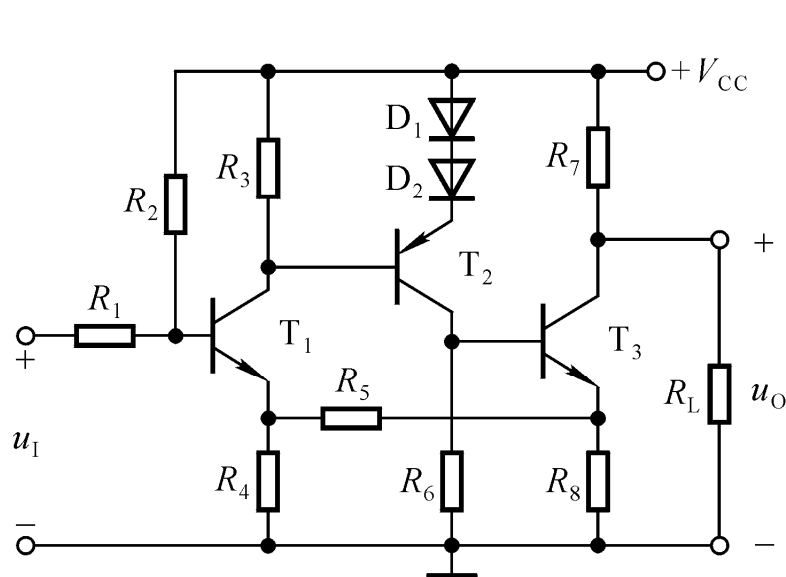
反馈系数: $\dot{F} = \dot{U}_f / \dot{I}_o = -\frac{R_2 R_9}{R_2 + R_4 + R_9}$

电压放大倍数:
$$\begin{aligned} \dot{A}_{uf} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{I}_o (R_7 // R_8 // R_L)}{\dot{U}_f} \\ &= -\frac{(R_2 + R_4 + R_9)(R_7 // R_8 // R_L)}{R_2 R_9} \end{aligned}$$

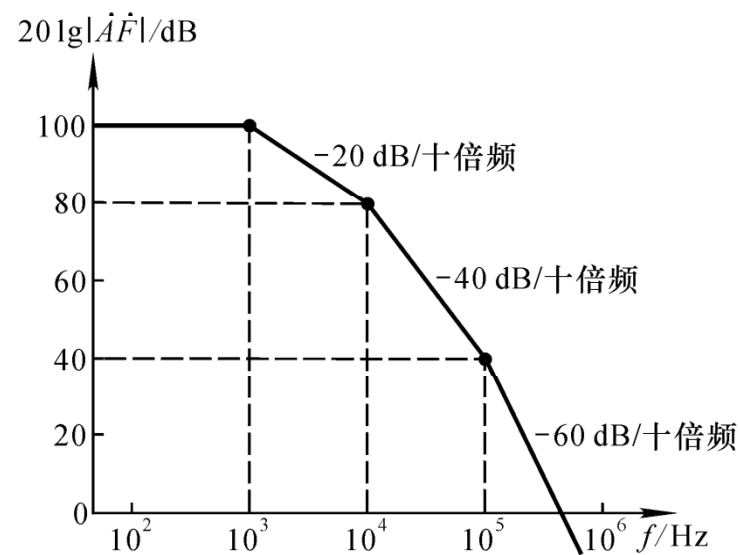
- 4、图 (a) 所示放大电路 的波特图如图 (b) 所示。
- (1) 判断该电路是否会产生自激振荡？
 - (2) 若电路产生了自激振荡，则应采取何措施消振？
 - (3) 若仅有一个50pF电容，分别接在三个三极管的基极和地之间均未能消振，则接在何处有可能消振？



- (1) 会
- (2) 晶体管 T_2 的基极与地之间加消振电容
- (3) 晶体管 T_2 基极和集电极之间加消振电容



(a)



(b)

第七章 信号的运算和处理

内容

- 重点节：7.1.2-7.1.5, 7.2.3, 7.3.1, 7.3.2一, 7.3.3一
- 次重点节：7.3.3二、三
- 不要求节：7.1.7, 7.2.2, 7.3.4-5, 7.4

应用/实践	理论
运算	运算电路及其分析方法： 比例、求和、加减、积分、 微分、基本对数和指数、 除法、开方等
滤波	滤波电路及分析方法： 一阶LPF、HPF，二阶LPF、 HPF、BPF

要求

- 掌握集成运放线性工作区的特点；
- 会用‘虚短’ ‘虚断’方法分析比例、求和、加减、积分、微分、基本对数和指数、用模拟乘法器组成的除法和开方等各种运算电路的输出电压与输入电压的关系；
- 掌握比例、求和、加减运算电路的特点，掌握其性能指标的分析方法： R_i , R_o , 共模输入电压 U_{IC} ；
- 正确理解通带电压放大倍数 A_{up} 、通带截止频率 f_p 的含义；
正确理解一阶LPF、HPF和二阶LPF、HPF、BPF的电路组成及工作原理，能够根据需要合理选择电路。

电路总结

- 比例、求和、加减、积分、微分、基本对数和指数、用模拟乘法器组成的除法和开方等各种运算电路，一阶LPF、HPF，二阶压控电压源LPF、HPF，简单二阶BPF、BEF

方法总结

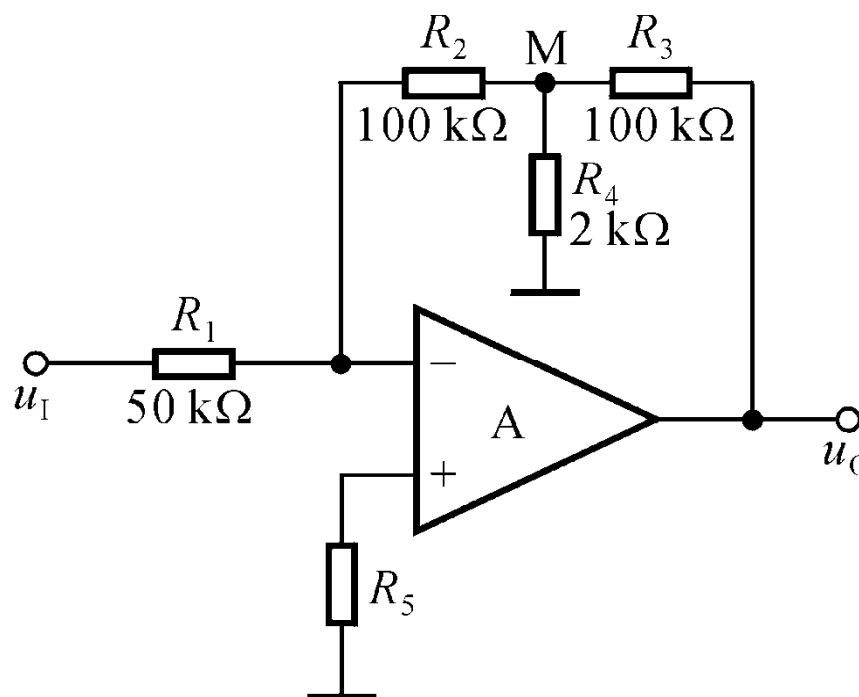
- 虚短、虚断+基尔霍夫定律 (节点电流+回路电压方程)
- 虚短、虚断+叠加原理
- 虚短、虚断+戴维南/诺顿等效定理

常见题型

- 判断电路是否为运算电路和属于哪种基本运算电路。
- 运算电路的分析计算。
- 根据需求选择运算电路。
- 有源滤波器的识别及电路分析。
- 工作在线性区的集成运放的其它应用电路的分析。

1、电路如图，集成运放输出电压的最大幅值为 $\pm 14\text{V}$ ， u_i 为 2V 的直流信号。分别求出下列各种情况下的输出电压。

- (1) R_2 短路
- (2) R_3 短路
- (3) R_4 短路
- (4) R_4 断路



T型反馈网络反相比例运算电路，有

$$u_O = -\frac{R_2 + R_3}{R_1} \left(1 + \frac{R_2 // R_3}{R_4} \right) u_I$$

1. R_2 短路时,

$$u_O = -\frac{R_3}{R_1} u_I = -2 u_I = -4 \text{ V}$$

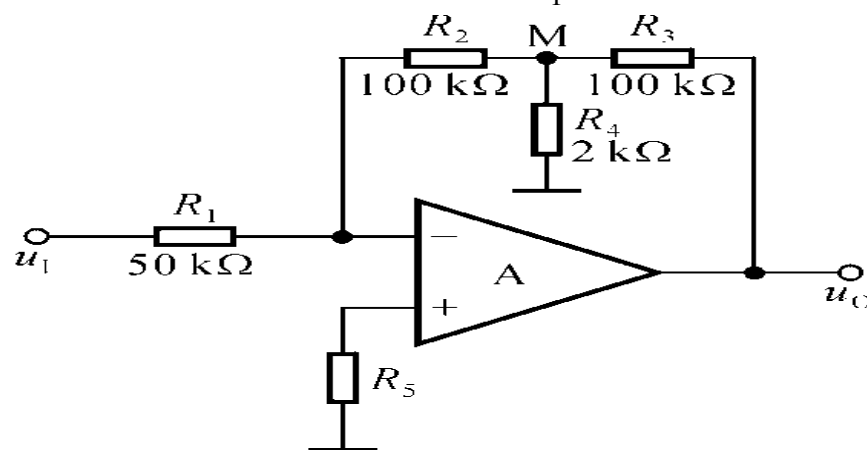
2. R_3 短路时,

$$u_O = -\frac{R_2}{R_1} u_I = -2 u_I = -4 \text{ V}$$

3. R_4 短路时, 电路无反馈, $u_O = -14 \text{ V}$

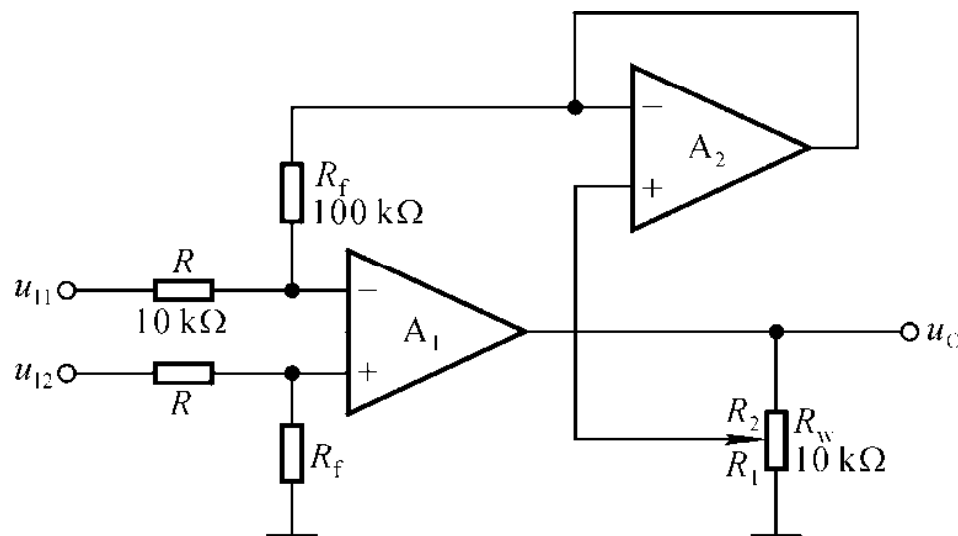
4. R_4 断路时,

$$u_O = -\frac{R_2 + R_3}{R_1} u_I = -4 u_I = -8 \text{ V}$$



2、电路如图所示，

- 1) 写出 u_O 与 u_{I1} 、 u_{I2} 的运算关系式；
- 2) 当 R_W 的滑动端在最上端时，若 $u_{I1}=10\text{mV}$ ， $u_{I2}=20\text{mV}$ ，则 $u_O=?$
- 3) 若 u_O 的最大幅值为 $\pm 14\text{V}$ ，输入电压最大值 $u_{I1\text{max}}=10\text{mV}$ ， $u_{I2\text{max}}=20\text{mV}$ ，最小值均为 0V ，则为了保证集成运放工作在线性区， R_2 的最大值为多少？



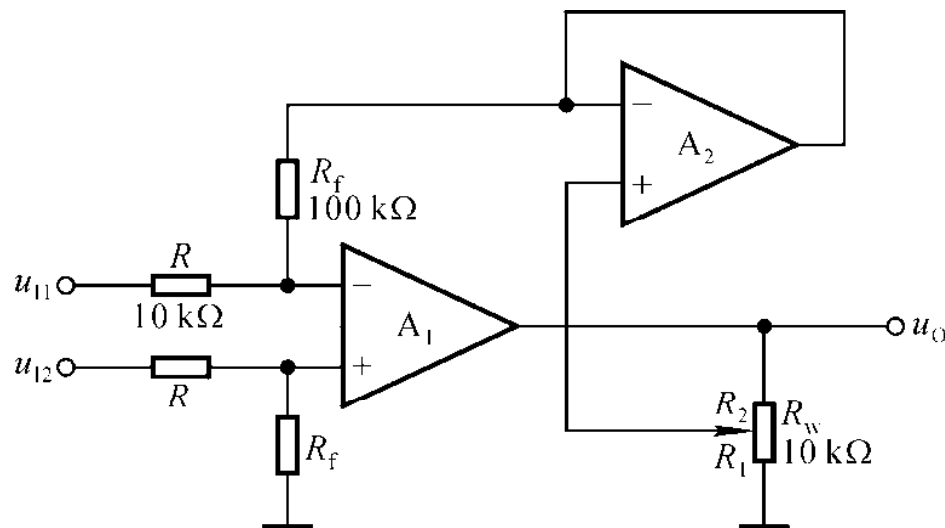
1) A_2 同相输入端电位 $u_{P2} = u_{N2} = \frac{R_f}{R}(u_{I2} - u_{I1}) = 10(u_{I2} - u_{I1})$
 输出电压 $u_O = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot u_{P2} = 10(1 + \frac{R_2}{R_1})(u_{I2} - u_{I1})$

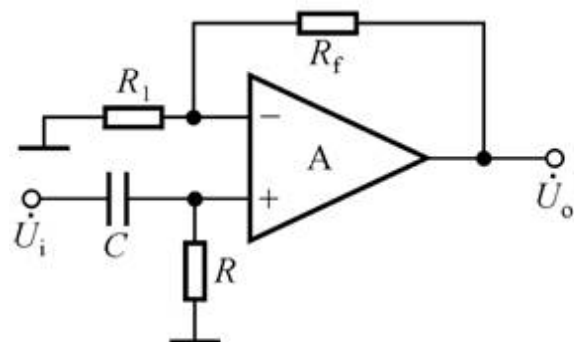
2) $u_{I1} = 10\text{mV}$, $u_{I2} = 20\text{mV}$, $R_2 = 0$ 代入, 得 $u_O = 100\text{mV}$

3) $(u_{I2} - u_{I1})$ 最大值为 20mV 。若 R_1 为最小值, 为保证运放工作在线性区, $(u_{I2} - u_{I1}) = 20\text{mV}$ 时运放输出 $+14\text{V}$, 则

$$u_O = 10 \cdot \frac{R_W}{R_{1\min}} \cdot (u_{I2} - u_{I1}) = 10 \cdot \frac{10}{R_{1\min}} \cdot 20 = 14$$

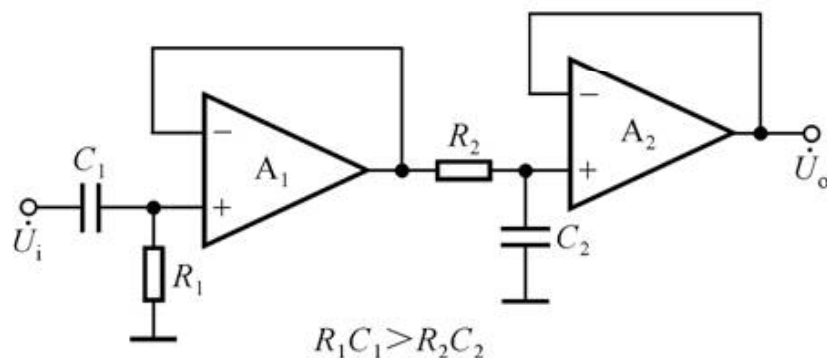
故 $R_{1\min} \approx 143\Omega$; $R_{2\max} = R_W - R_{1\min} \approx 9.86\text{ k}\Omega$



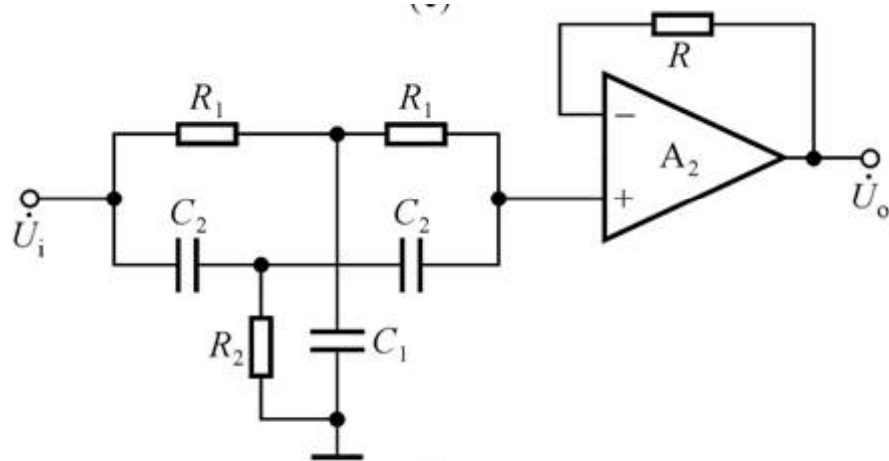


3、试说明图示各电路属于哪种类型的滤波电路，是几阶滤波电路

(1) 一阶高通

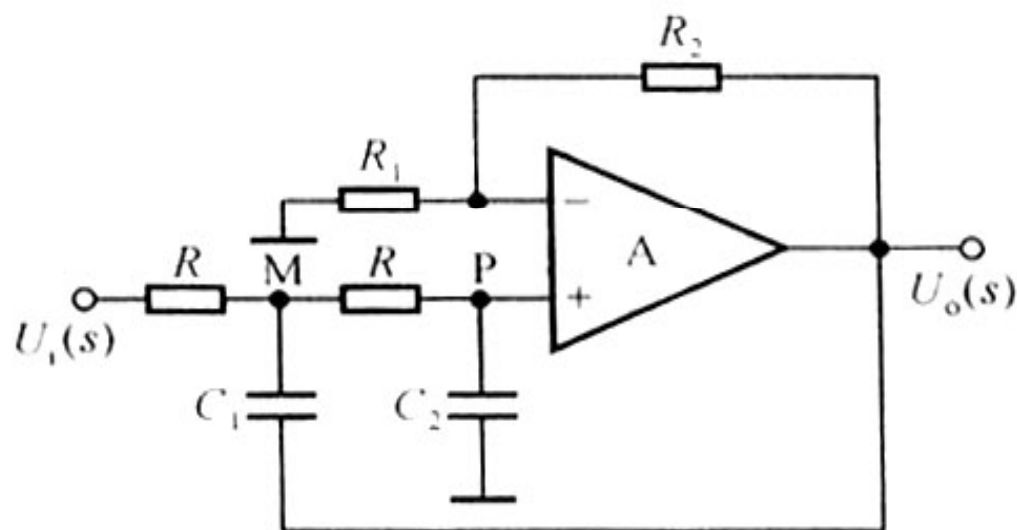


(2) 二阶带通



(3) 二阶带阻
双T网络滤波

4、电路如图，已知通带放大倍数为2，截止频率为1kHz， C 取值为 $1\mu\text{F}$ 。试选取电路中各电阻的阻值



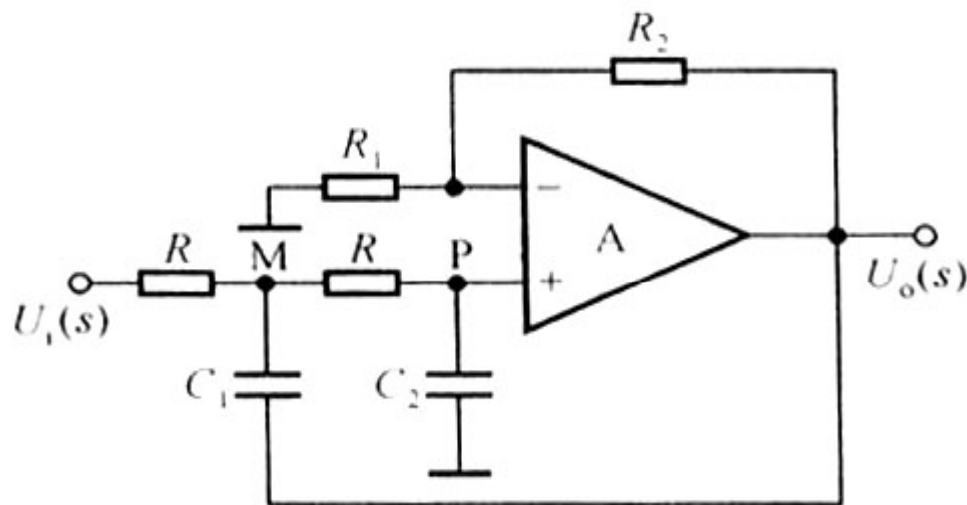
(1) 近似求解

近似有 $f_p \approx f_0$, 而 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

可解得 $R \approx 160\Omega$

为使集成运放同相和反相输入端对称, 则

$$R_1 = R_2 = 4R \approx 640\Omega$$



(2) 精确求解

通带放大倍数 $\dot{A}_{up} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 2$

得 $R_1 = R_2$

因
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{up}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j(3 - \dot{A}_{up})\frac{f}{f_0}} = \frac{2}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j\frac{f}{f_0}}$$

令分母的模等于 $\sqrt{2}$ ，可解 $f_p = \sqrt{\frac{1+\sqrt{5}}{2}}f_0$ ，又 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

可解 $R \approx 202\Omega$

且 $R_1 = R_2 = 4R \approx 808\Omega$

第八章 波形的发生和信号的转换

内容

- 重点节：8.1.1-8.1.3, 8.2.1-8.2.4, 8.3.1-8.3.3
- 次重点节：8.1.4, 8.3.4(一), 8.4.3
- 不要求节：8.2.5, 8.3.4(二), 8.3.5, 8.4.2

应用/实践	理论
正弦波	正弦波振荡的条件 正弦波振荡电路的组成、工作原理及分析方法
非正弦波	电压比较器的工作原理和电压传输特性 方波、矩形波、三角波、锯齿波电路的组成、工作原理 电压-频率转换电路的工作原理

要求

- 掌握正弦波振荡的幅值条件和相位条件，掌握正弦波振荡电路的分析方法，即会分析正弦波振荡电路的四个组成部分、会分析放大电路能否正常工作、会用瞬时极性法判断正反馈，同时了解幅值条件的判断
- 掌握RC桥式正弦波振荡电路的组成、起振条件和振荡频率，了解其稳幅方法；理解LC正弦波振荡电路的工作原理
- 正确理解单限电压比较器、滞回比较器、窗口比较器的工作原理和电压传输特性，掌握用三要素法分析电压比较器
- 正确理解方波、占空比可调的矩形波、三角波、锯齿波电路的组成和工作原理、波形分析以及振荡频率与电路参数的关系；正确理解电压-频率转换电路的工作原理、波形分析、电压与振荡频率的关系

电路总结

- RC桥式正弦波振荡电路；LC正弦波振荡电路（变压器反馈式、电感反馈式、电容反馈式、石英晶体）。过零比较器、一般单限比较器、滞回比较器、窗口比较器。方波、占空比可调的矩形波、三角波、锯齿波电路。电荷平衡式电压-频率转换电路

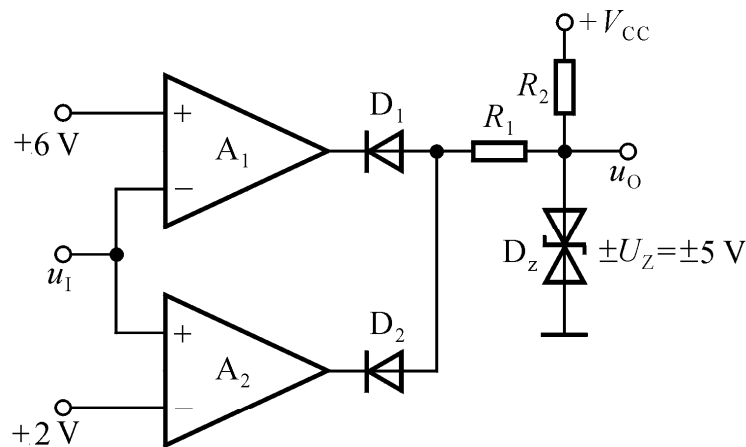
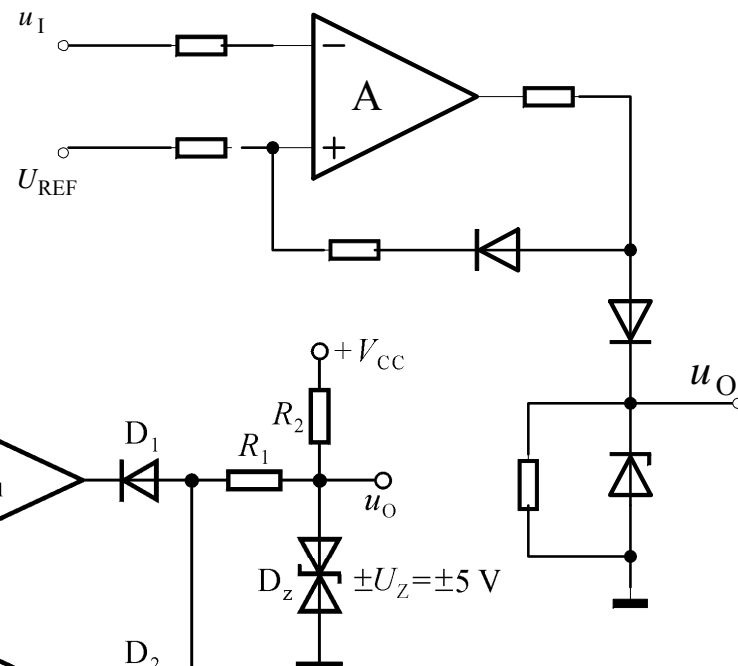
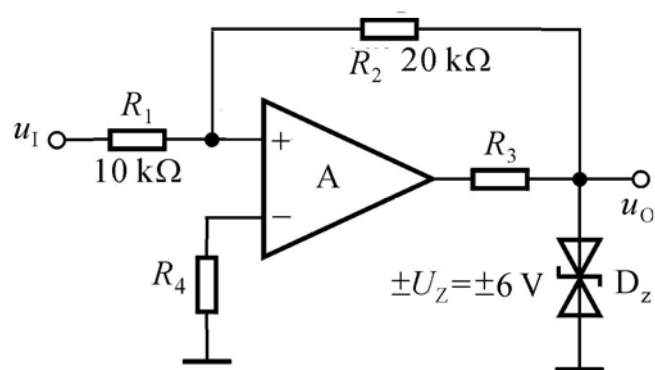
方法总结

- 正弦波振荡电路是否可能振荡的判断方法
- 判断正弦波振荡相位条件的瞬时极性法
- 电压比较器三要素分析方法
- 非正弦波发生电路波形分析，振荡频率（周期）和幅值的求解方法

常见题型

- 正弦波振荡电路：判断是否可能产生自激振荡，改错使之有可能产生正弦波振荡，标出变压器同铭端使之有可能产生正弦波振荡，连接电路构成RC桥式正弦波振荡电路，RC桥式正弦波振荡电路振荡频率和幅值的估算等
- 电压比较器：电压比较器电路的识别，选择电压比较器，从电压传输特性判断电路的类型及其主要参数，求解电路的电压传输特性，根据所需的电压传输特性设计电路等
- 非正弦波发生电路：电路的工作原理和波形分析，振荡频率(周期)和幅值的求解，改错等
- 波形变换电路：已知电路画出输入输出波形，根据波形变换的需求选择合适的电路
- 信号变换电路：精密整流电路的分析计算,电压--频率转换电路(压控振荡电路)的组成、工作原理、波形分析和主要参数的估算等

1、求解图示各电路的电压传输特性



首先应判断二极管的工作状态，它们决定于集成运放的输出电压是高电平还是低电平

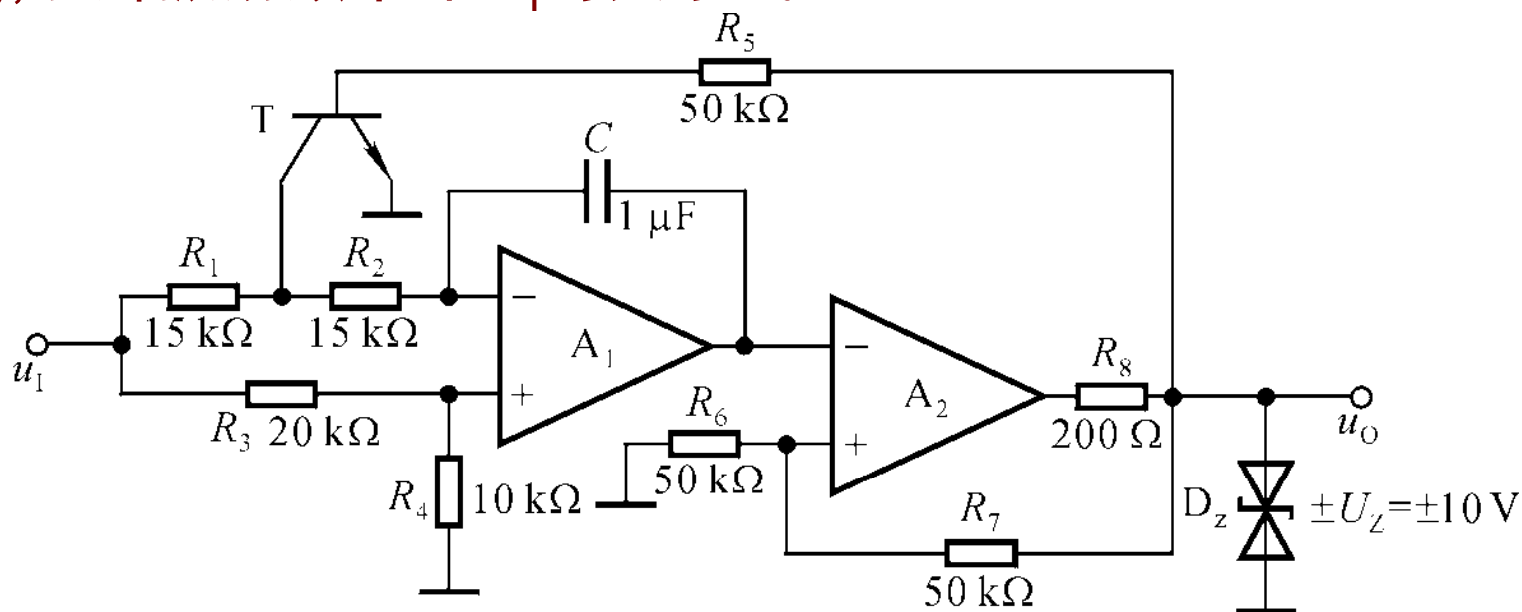
2、已知图示电路为压控振荡电路，晶体管T工作在开关状态，当其截止时相当于开关断开，当其导通时相当于开关闭合，管压降近似为零； $u_i > 0$ 。

1), 分别求解T导通和截止时 u_{O1} 和 u_i 的运算关系式 $u_{O1} = f(u_i)$

2), 求出 u_O 和 u_{O1} 的关系曲线 $u_O = f(u_{O1})$

3), 定性画出 u_O 和 u_{O1} 的波形

4), 求解振荡频率 f 和 u_i 的关系式



1) T导通时, $u_{N1} = u_i/3$ 。

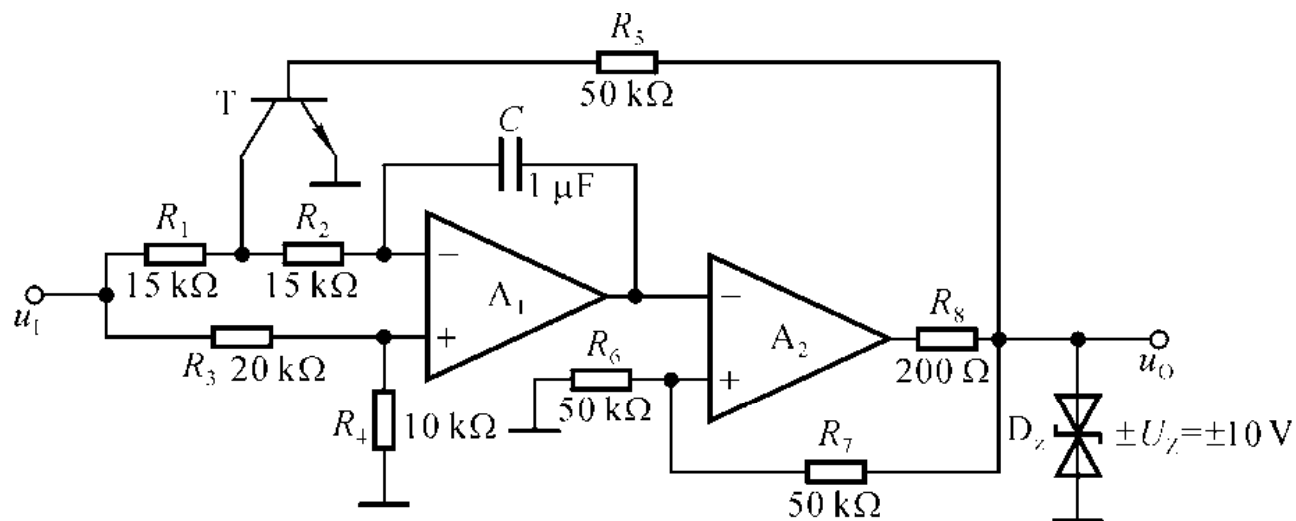
$$u_{O1} = \frac{1}{R_2 C} \cdot \frac{u_i}{3} (t_1 - t_0) + u_{O1}(t_0)$$

$$= \frac{10^3}{45} u_i (t_1 - t_0) + u_{O1}(t_0)$$

T截止时,

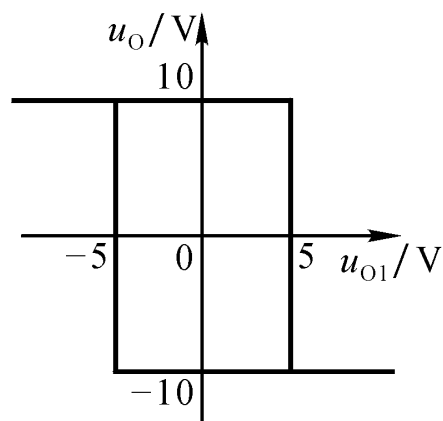
$$u_{O1} = \frac{1}{(R_1 + R_2)C} \cdot \frac{-2u_i}{3} (t_2 - t_1) + u_{O1}(t_1)$$

$$= -\frac{10^3}{45} u_i (t_2 - t_1) + u_{O1}(t_1)$$

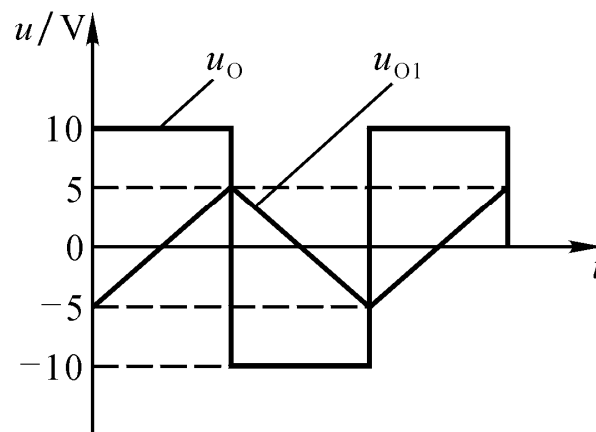


2,3) u_O 和 u_{O1} 的关系曲线如图(a)所示

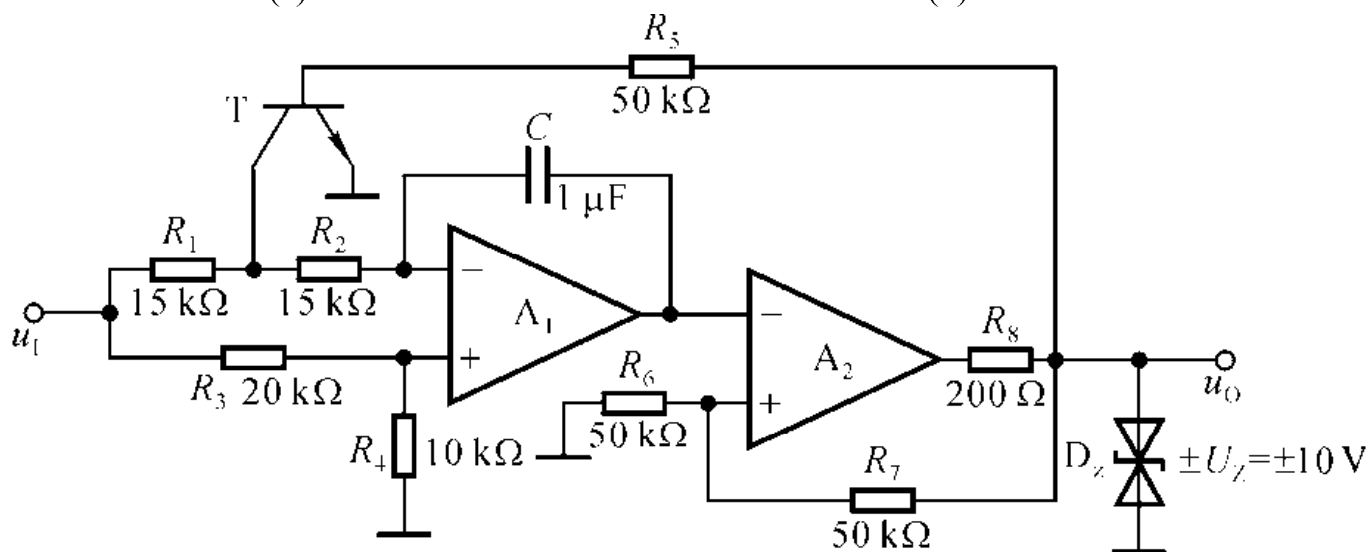
u_O 和 u_{O1} 的波形如图(b)所示



(a)



(b)

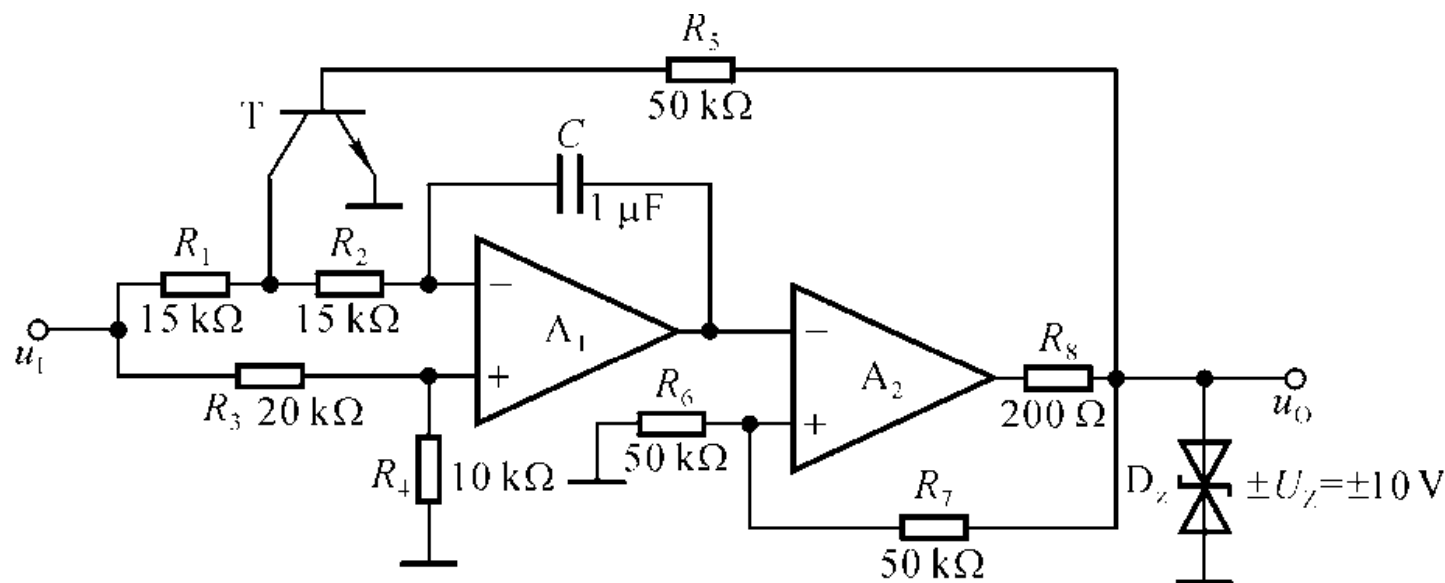


4) 首先求出振荡周期，然后求出振荡频率，如下：

$$U_T = \frac{10^3}{45} \cdot u_I \cdot \frac{T}{2} - U_T$$

$$T = \frac{2U_T \times 90}{10^3 u_I} = \frac{0.9}{u_I}$$

$$f \approx 1.1 u_I$$



3、图示电路中，已知 $R_1=10k\Omega$ ， $R_2=20k\Omega$ ， $R=10k\Omega$ ， $C=0.01\mu F$ ，稳压管的稳压值为6V， $U_{REF}=0$ 。

1) 分别求输出电压 u_O 和电容两端电压 u_C 的最大值和最小值

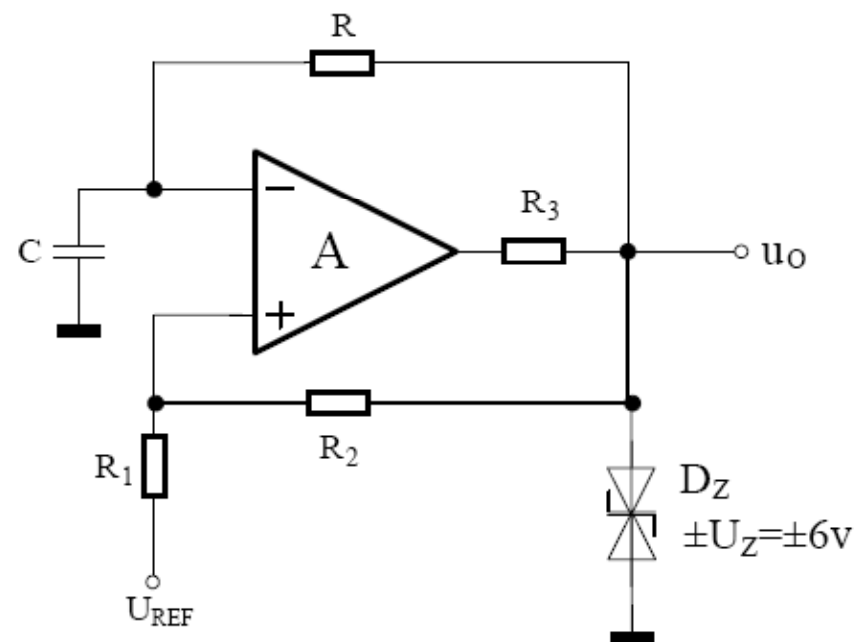
u_O 最大值和最小值分别为+6V 和-6V；

u_C 的最大值 U_{cmax} 为：

$$U_Z \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 2V$$

u_C 的最小值 U_{cmin} 为：

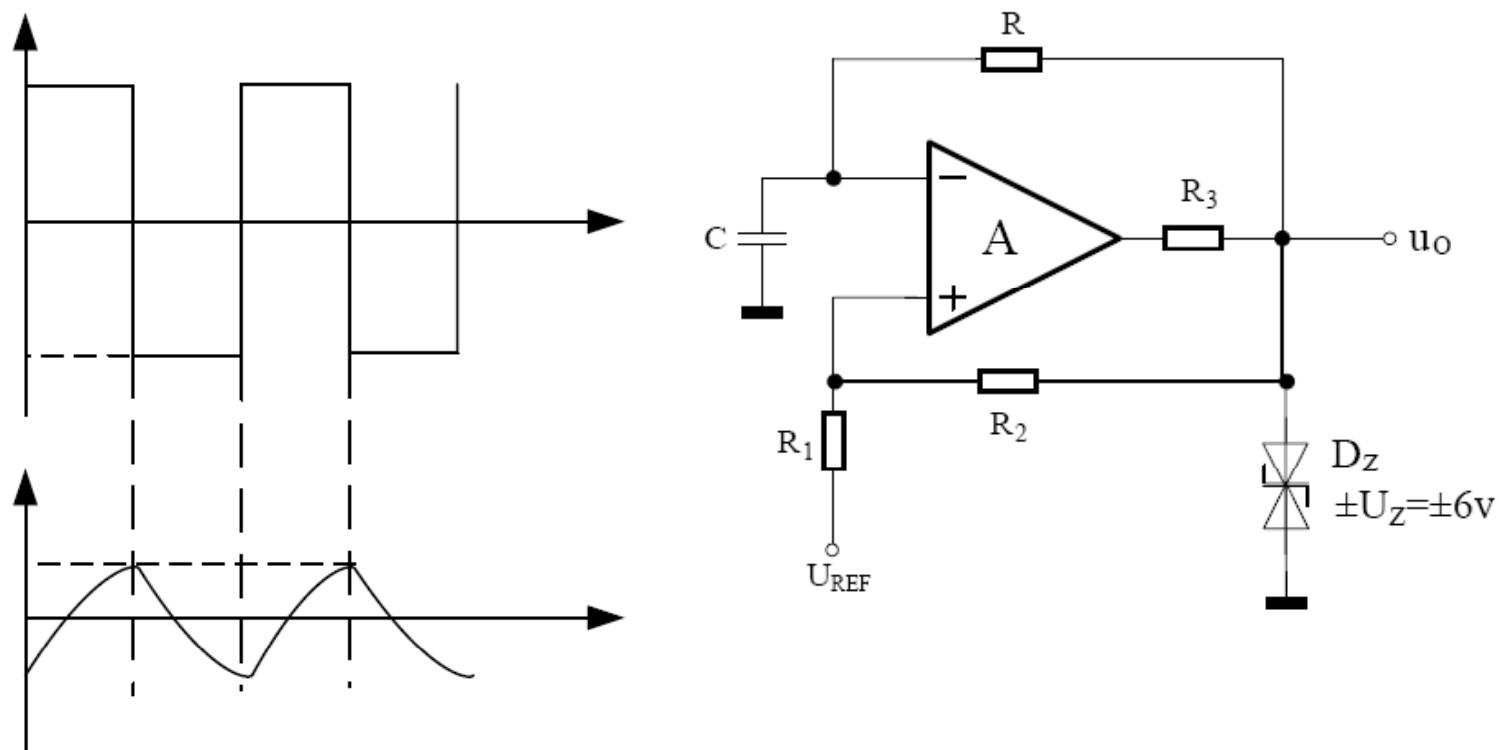
$$-U_Z \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -2V$$



2) 计算输出电压 u_O 的周期，对应画出 u_O 和 u_C 的波形，标明幅值和周期。

设 u_O 的周期为 T ， 则 $T = 2RC \ln(1 + \frac{2R_1}{R_2}) = 138.6\mu s$

u_O 和 u_C 的波形如下图所示



- 3) 若增大 R_1 的阻值, 将如何影响 u_O 的幅值和周期
 u_O 的周期将变大, 幅值将不变
- 4) 若增大 R 的阻值, 将如何影响 u_O 的幅值和周期
 u_O 的周期将变大, 幅值将不变
- 5) 若增大 U_Z , 将如何影响 u_O 的幅值和周期
 u_O 的周期将不变, 幅值将变大

6) 若 $U_{REF}=3V$, 将如何影响 u_O 的幅值和周期

u_O 的周期将变大, 幅值将不变

u_C 的最大值 U_{cmax} 增加为: $U_{REF} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_Z \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 4V$

u_C 的最小值 U_{cmin} 增加为: $U_{REF} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_Z \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0V$

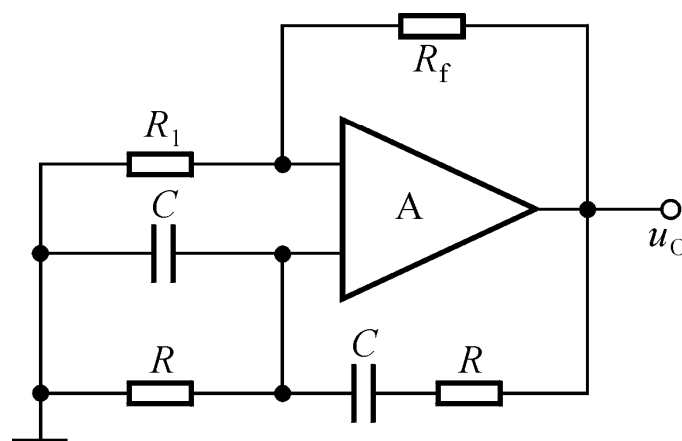
设 u_O 的周期为 T , 利用RC 一阶电路的三要素法列方程如下:

$$U_{cmax} = (U_Z - U_{cmin}) \left(1 - e^{-\frac{T}{2RC}}\right) + U_{cmin}$$

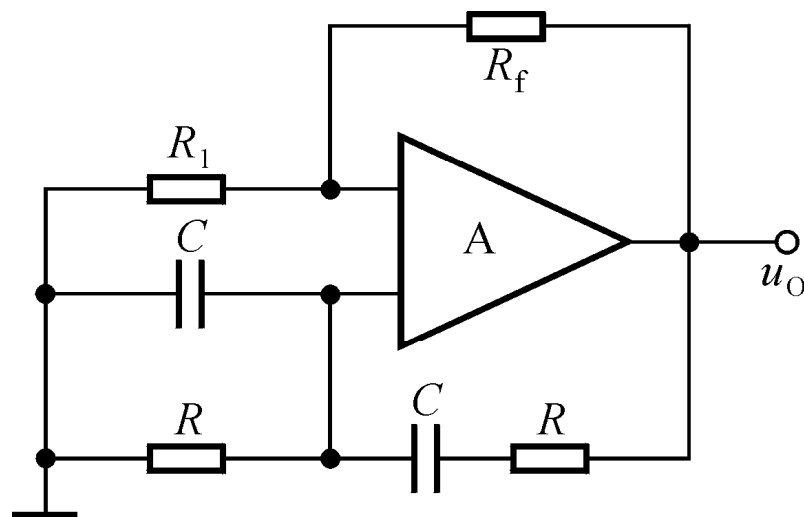
u_O 和 u_C 的周期将增大

4、电路如图所示。

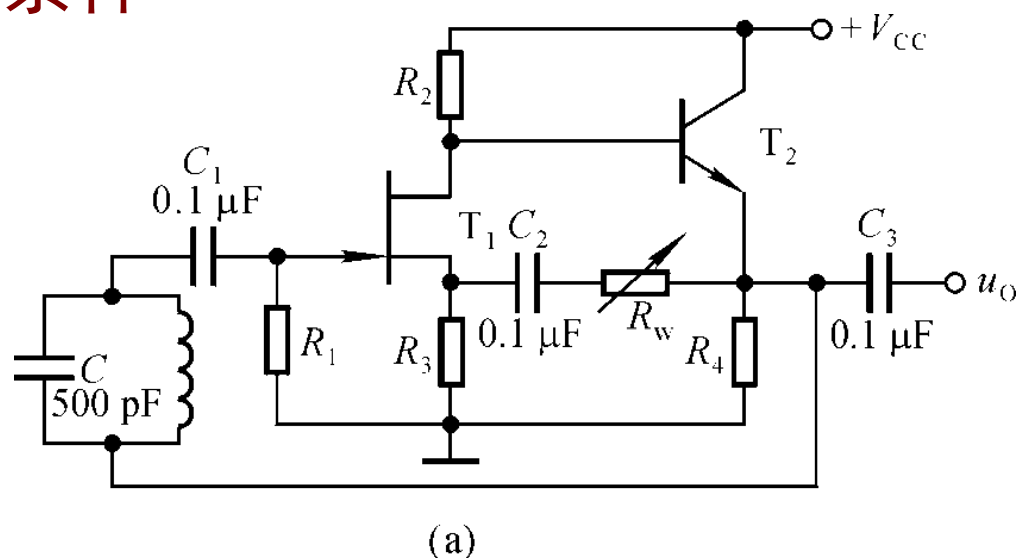
- 1) 为使电路产生正弦波振荡，标出集成运放的“+”和“-”；并说明电路是哪种正弦波振荡电路。
- 2) 若 R_1 短路，则电路将产生什么现象？
- 3) 若 R_1 断路，则电路将产生什么现象？
- 4) 若 R_F 短路，则电路将产生什么现象？
- 5) 若 R_F 断路，则电路将产生什么现象？



- 1) 上 “-” 下 “+”。
- 2) 若 R_1 短路，则电路输出严重失真，几乎为方波
- 3) 若 R_1 断路，则电路输出为零
- 4) 若 R_F 短路，则电路输出为零
- 5) 若 R_F 断路，则电路输出严重失真，几乎为方波



5、试分别指出图中电路中的选频网络、正反馈网络和负反馈网络，并说明电路是否满足正弦波振荡的相位条件

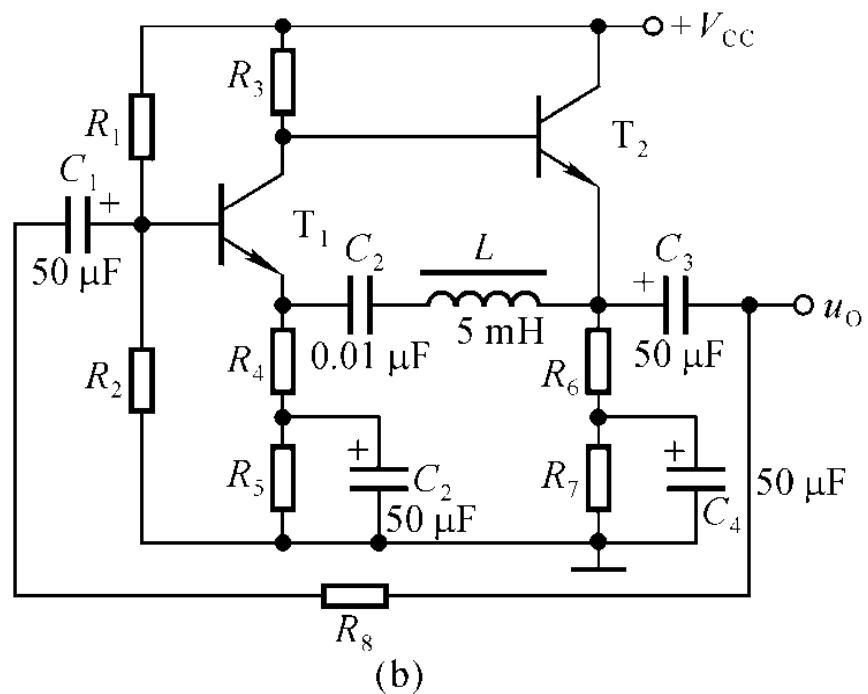


选频网络： C 和 L

正反馈网络： R_3 、 C_2 和 R_w

负反馈网络： C 和 L

电路满足正弦波振荡相位条件



选频网络： C_2 和 L

正反馈网络： C_2 和 L

负反馈网络： R_8

电路满足正弦波振荡相位条件

谢谢大家!

