



电路与电子技术II

期末复习

浙江大学电工电子教学中心

蔡忠法



课程内容：

- 基本概念与放大基础知识
- 多级放大电路与差分放大电路
- 负反馈与运算电路
- 波特图与稳定性
- 波形发生电路
- 功率放大与稳压电源电路

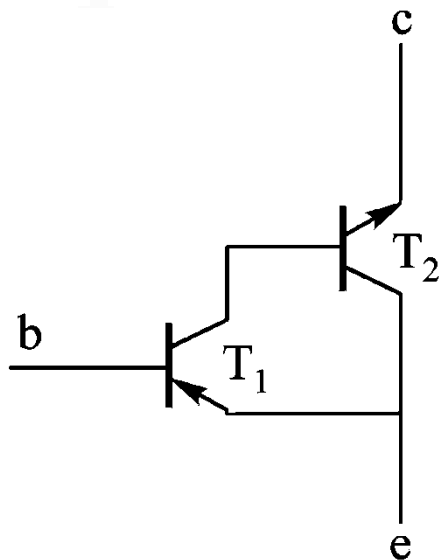


➤ 基本概念与放大基础知识

- ✧ 达林顿复合管的特性
- ✧ 放大电路的性能指标及图解分析法
- ✧ 放大电路的偏置电路型式
- ✧ 多级放大电路的耦合方式
- ✧ 负载线，截止失真与饱和失真
- ✧ 三组态放大电路的特点
- ✧ 集成运放的组成框图和特性

【例1】填空题

1. 复合管如图所示，设 T_1 、 T_2 管的电流放大系数分别为 β_1 、 β_2 。该复合管等效为 PNP 型三极管，其等效电流放大系数 $\beta = \underline{\beta_1\beta_2}$ 。



2. 多级放大电路中，要求各级静态工作点互不影响，可选用 阻容 耦合方式（阻容、直接、光电）。



3. 通用型集成运放的输入级采用差分放大电路，主要是因为它的 **【 C 】**

A. 输入电阻高

B. 输出电阻低

C. 共模抑制比大

D. 电压放大倍数大

4. 判断正确或错误：

(1) 三种基本组态放大电路的输入电阻均与负载电阻无关。 **【 × 】**

(2) 一个理想的集成运算放大器只能放大差模信号，不能放大共模信号。 **【 ✓ 】**

(3) 实际运放在开环时，输出很难调整到零电位，只有在闭环时才能调至零电位。 **【 ✓ 】**

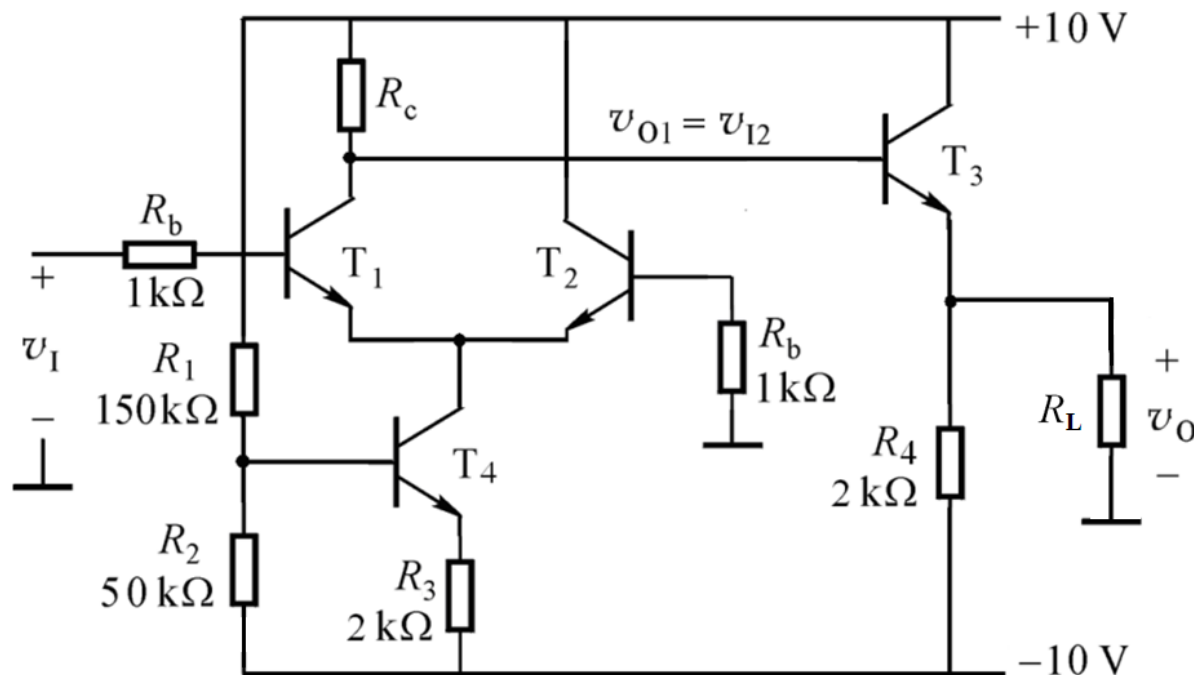


➤ 多级放大电路与差分放大电路

- ✧ 会利用直流通路求出静态工作点
- ✧ 会画出微变等效电路计算性能指标 A_v 、 R_i 、 R_o
- ✧ 会计算最大不失真输出电压
- ✧ 多级放大电路应采用“逐级计算”，并考虑“负载效应”
- ✧ 差分放大电路“差模与共模叠加”原理
- ✧ 差模交流通路与共模交流通路的特点
- ✧ 差分放大电路的4种输入输出方式及特点
- ✧ 掌握电流源在差分放大电路中的应用



【例2】多级放大电路

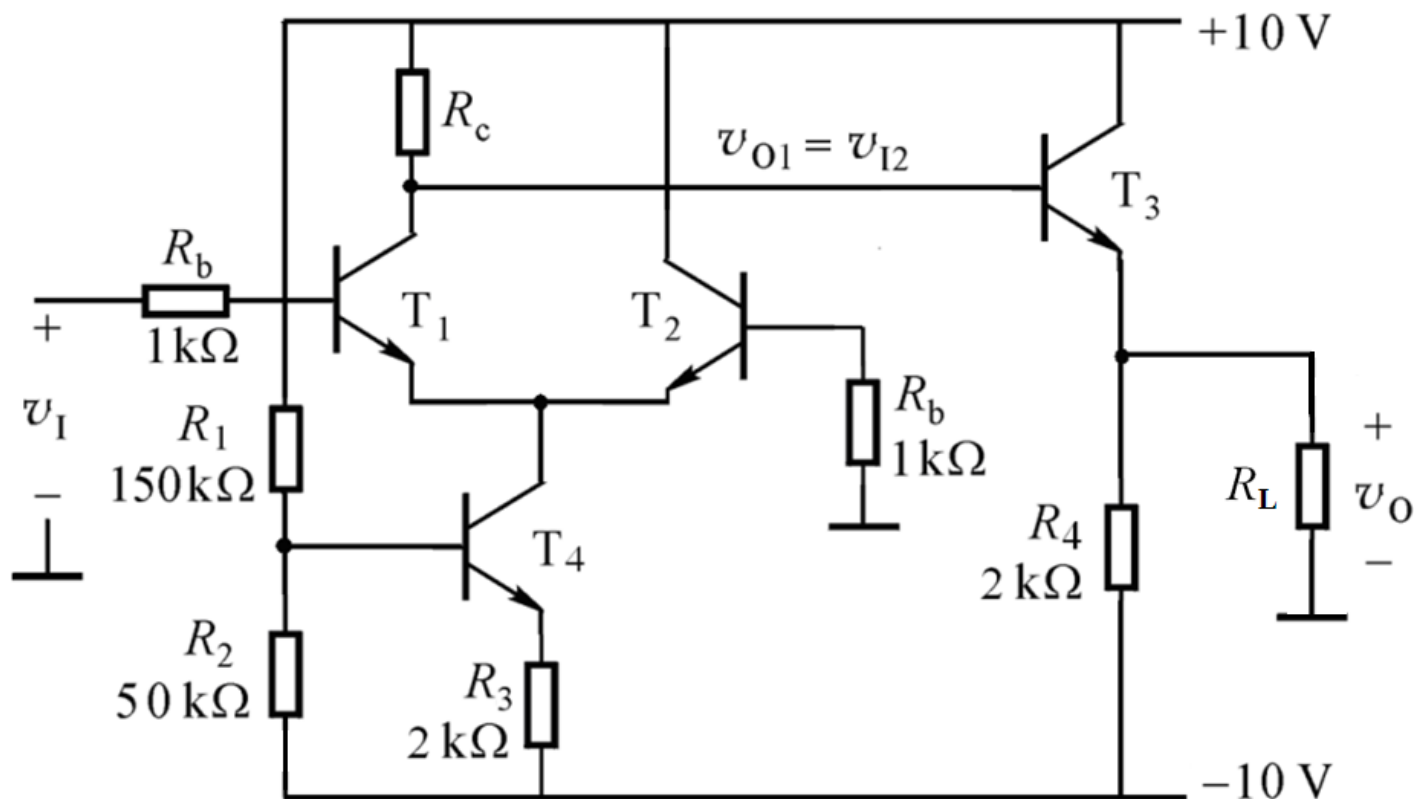


图示电路中，三极管的 β 均为50， $V_{BE}=0.7V$ ， r_{be} 均已知。

- (1) 电路中 T_4 构成什么电路？起什么作用？
- (2) 当 $V_I=0$ 时，输出静态电压 $V_O=0$ ，求 R_c 的值；
- (3) 写出电压增益 $A_{v1} = \Delta v_{O1} / \Delta v_I$ 和 $A_{v2} = \Delta v_O / \Delta v_{I2}$ 的表达式；
- (4) 写出输入电阻 R_i 的表达式。

【解】

(1) T_4 构成什么电路？起什么作用？



T_4 管构成电流源；作为差分放大电路的射极偏置。



(2) 求 R_c 的值:

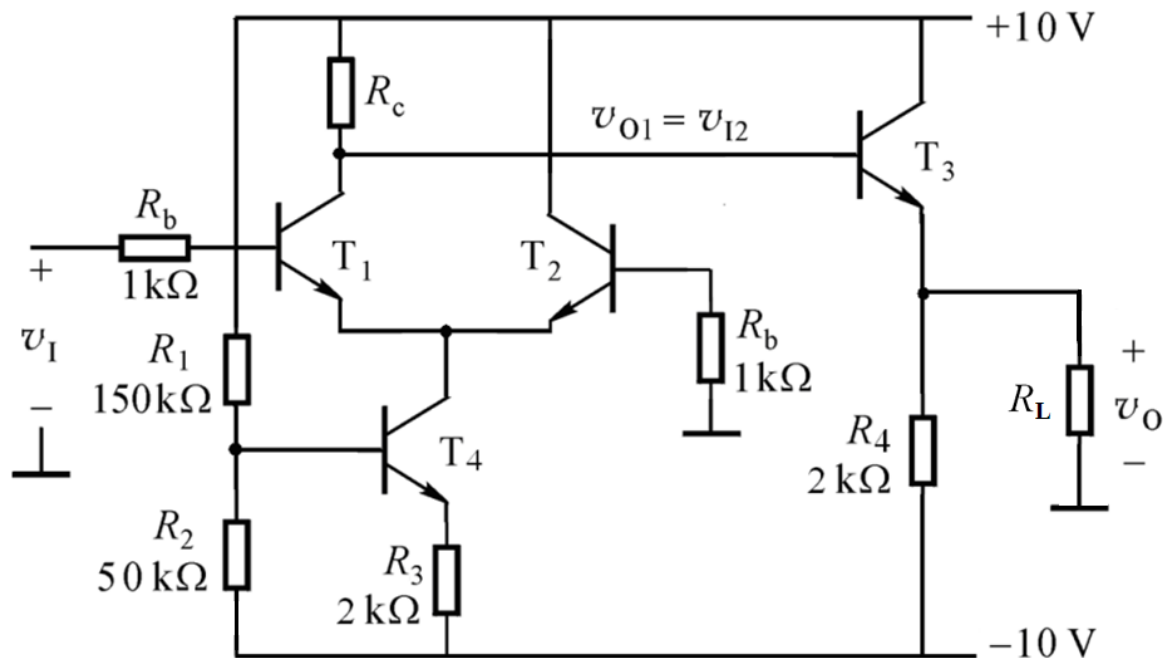
$$I_{E4} = \frac{\frac{50}{150+50} \times 20V - V_{BE}}{\frac{R_1 // R_2}{1+\beta} + R_3} = \frac{5-0.7}{\frac{37.5}{51} + 2} = 1.57 \text{ mA}$$

$$I_{C1} = 0.79 \text{ mA}$$

$$I_{E3} = \frac{10V}{2} = 5 \text{ mA}$$

$$I_{B3} = \frac{5}{50} = 0.1 \text{ mA}$$

$$R_c = \frac{10-0.7}{0.79+0.1} = 10.4 \text{ k}\Omega$$



(3) 电压增益：

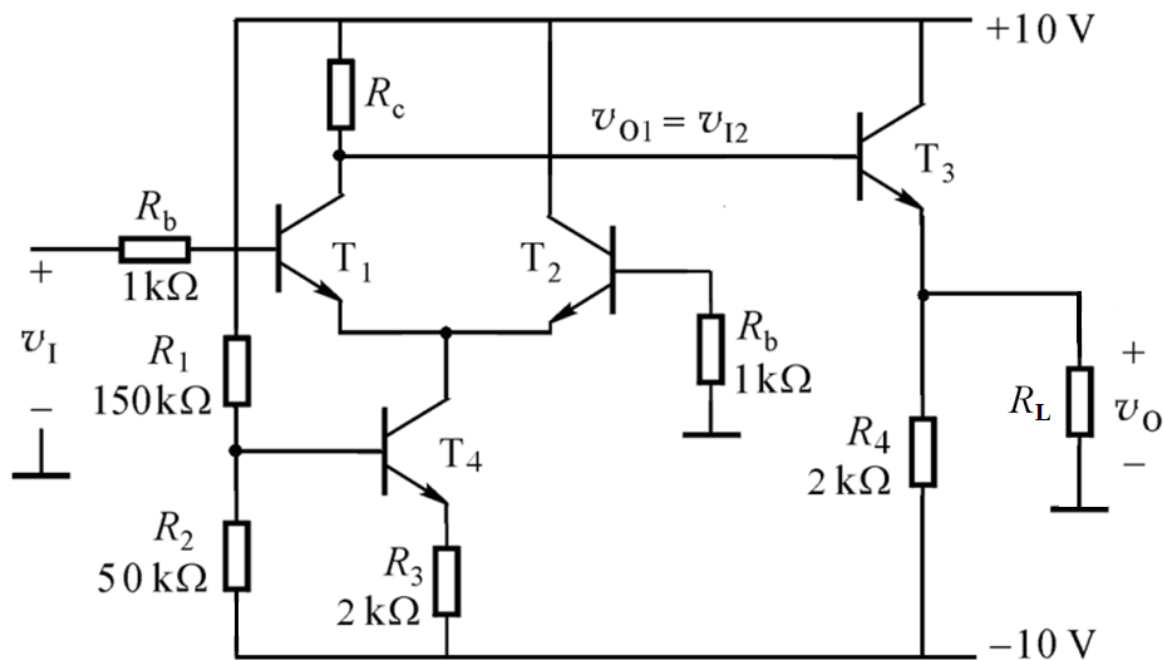
$$A_{v1} = -\frac{\beta(R_c // R_{i2})}{2(R_b + r_{be1})}$$

$$R_{i2} = r_{be3} + (1 + \beta)(R_4 // R_L)$$

$$A_{v2} = \frac{(1 + \beta)(R_4 // R_L)}{r_{be3} + (1 + \beta)(R_4 // R_L)}$$

(4) 输入电阻：

$$R_i = 2(R_b + r_{be1})$$



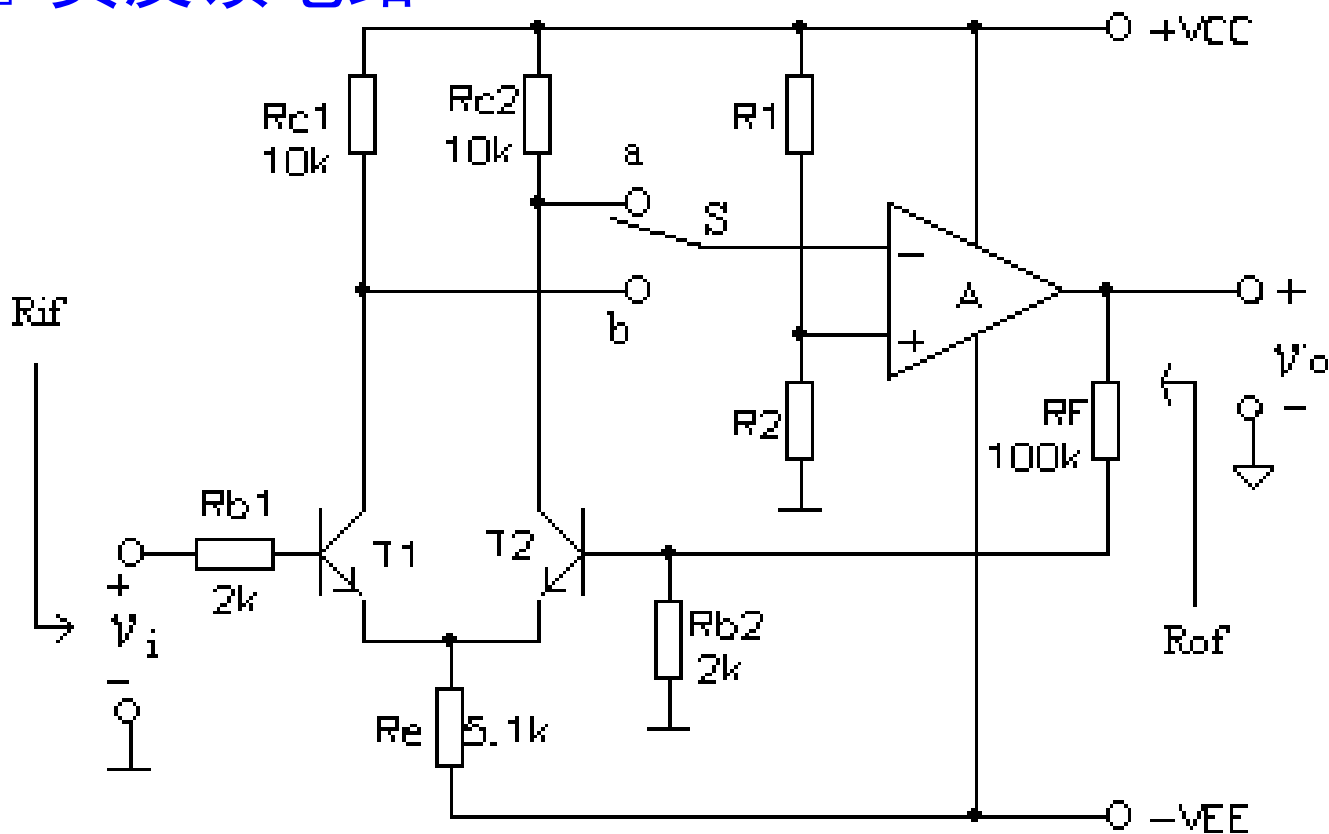


➤ 负反馈与运算电路

- ✧ 反馈极性和类型的判断
- ✧ 掌握负反馈对放大电路性能的影响
- ✧ 理解深度负反馈中“虚短”和“虚断”的本质含义，掌握深度负反馈的近似计算
- ✧ 会区别集成运放的“线性应用”与“非线性应用”
- ✧ 熟练掌握反相放大、同相放大、积分运算等运算电路
- ✧ 会用“虚短”和“虚断”分析较复杂的运算电路



【例3】负反馈电路



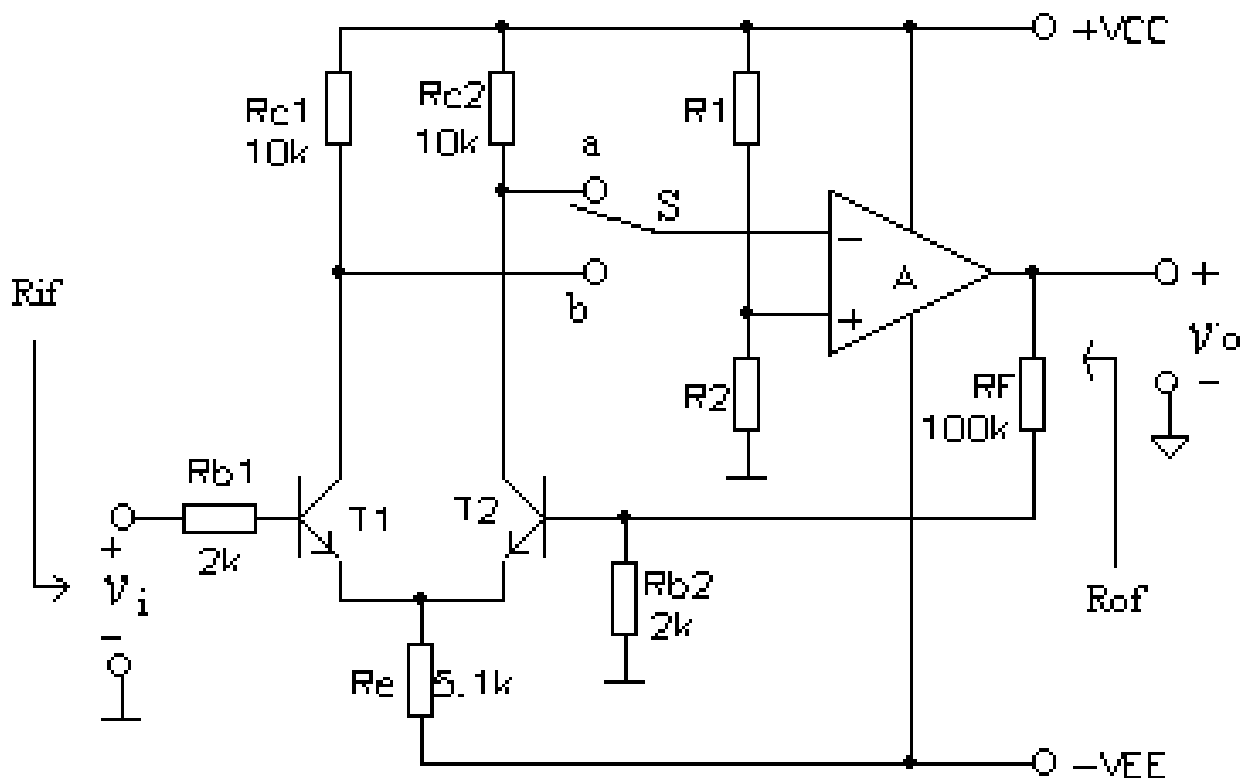
- (1) 开关S应置于a端还是b端，才能引入负反馈？
- (2) 与开环时相比， R_{if} 、 R_{of} 是增大了还是减少了？
- (3) 如满足深度负反馈条件， $A_{vf} = \Delta v_o / \Delta v_i \approx ?$
- (4) 在电路中为什么要接入 R_1 、 R_2 ？其分压比应如何选择？



【解】 (1) S置于b端，才能引入负反馈。

(2) R_{if} 增大， R_{of} 减少。

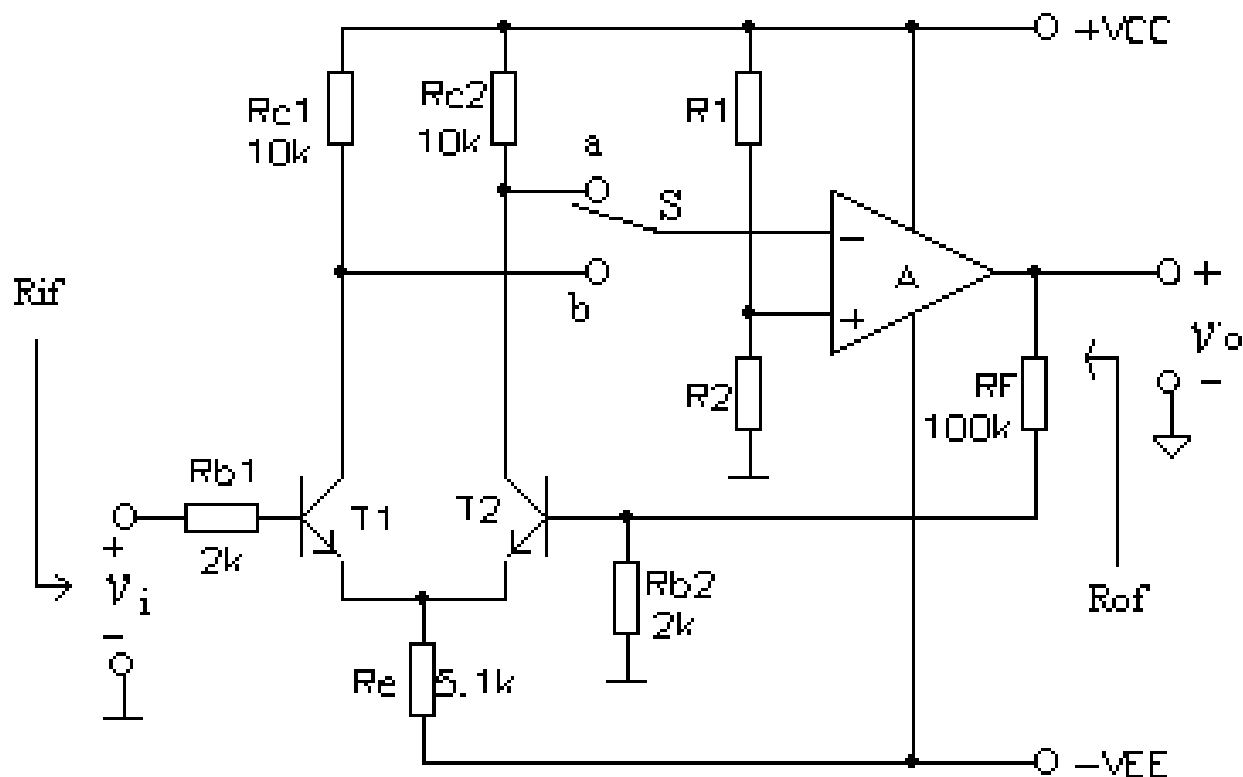
$$(3) A_{vf} = \frac{\Delta v_o}{\Delta v_i} = \frac{R_f + R_{b2}}{R_{b2}} = 51$$





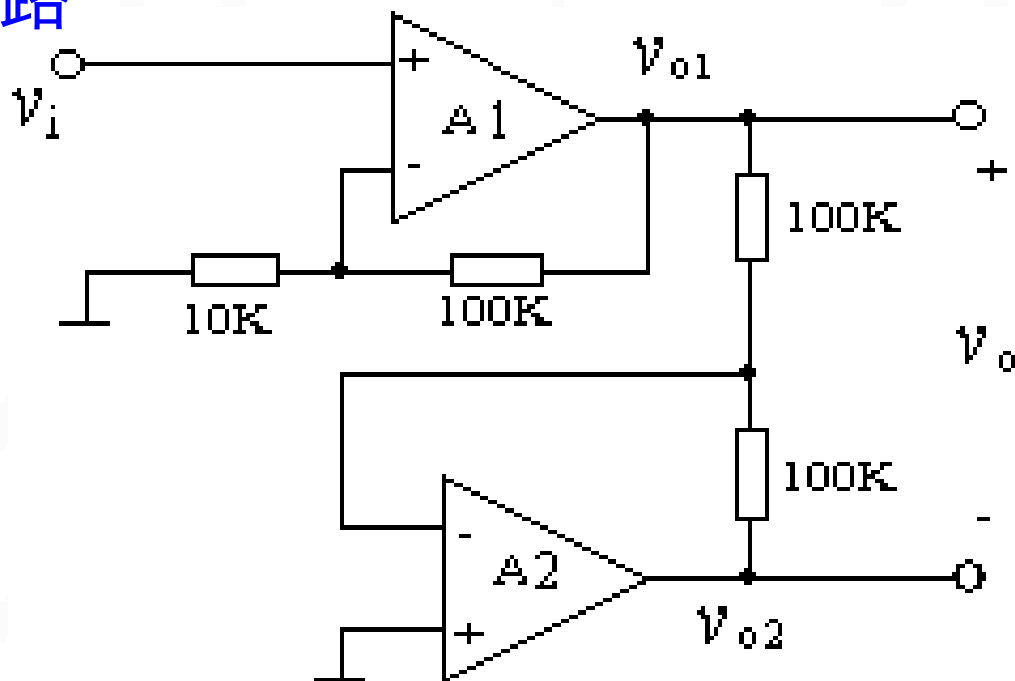
(4) 在电路中接入 R_1 、 R_2 是因为运放工作在线性放大区，要求静态时输入电压近似为 0，否则运放输出处于饱和状态。

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = V_{CC} - I_{C1Q} R_{c1}$$





【例4】运算电路



在图示电路中，设 A_1 、 A_2 为理想运放。

- (1) 分别说明 A_1 、 A_2 所组成的电路中引入了哪种组态的交流负反馈。
- (2) 求出 v_{o1} 、 v_{o2} 、 v_o 对 v_i 的运算关系式。



【解】

(1)

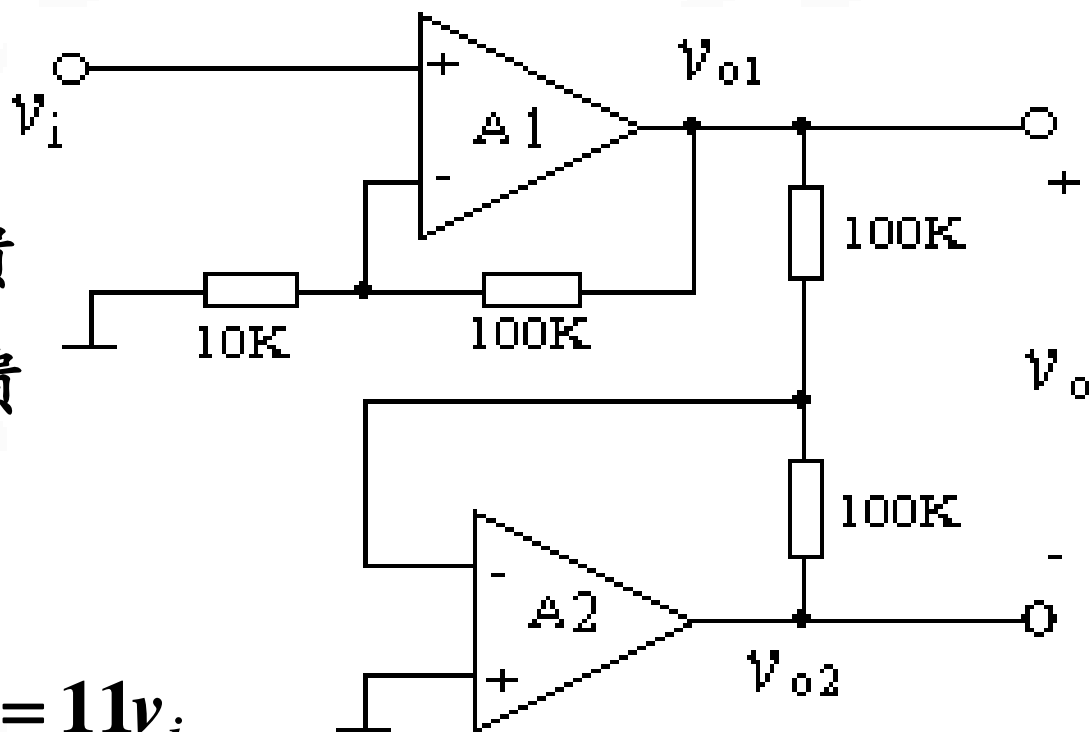
 A_1 : 电压串联负反馈 A_2 : 电压并联负反馈

(2)

$$v_{o1} = \left(1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \right) v_i = 11v_i$$

$$v_{o2} = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} v_{o1} = -v_{o1} = -11v_i$$

$$v_o = v_{o1} - v_{o2} = 22v_i$$





➤ 波特图及稳定性

- ✧ 掌握耦合电容、结电容对放大电路频率响应特性的影响
- ✧ 掌握频率特性表达式的表示及波特图的画法
- ✧ 理解负反馈放大电路产生自激振荡的原因
- ✧ 掌握负反馈放大电路的稳定判据，会求取负反馈放大电路的稳定裕度

【例5】波特图及稳定性

某负反馈放大电路的开环放大倍数表示为：

$$\dot{A} = \frac{10^5}{(1 + j \frac{f}{10^4})(1 + j \frac{f}{10^5})(1 + j \frac{f}{10^6})}$$

- (1) 画出波特图（对数幅频和相频特性曲线）；
- (2) 若闭环时取 $|\dot{F}| = 1/100$ ，判断电路是否会自激？
- (3) 若采用电容补偿后，使 f_{p1} 由 10^4 Hz 下降为 10^2 Hz ，求此时的相位裕度 $\varphi_m = ?$

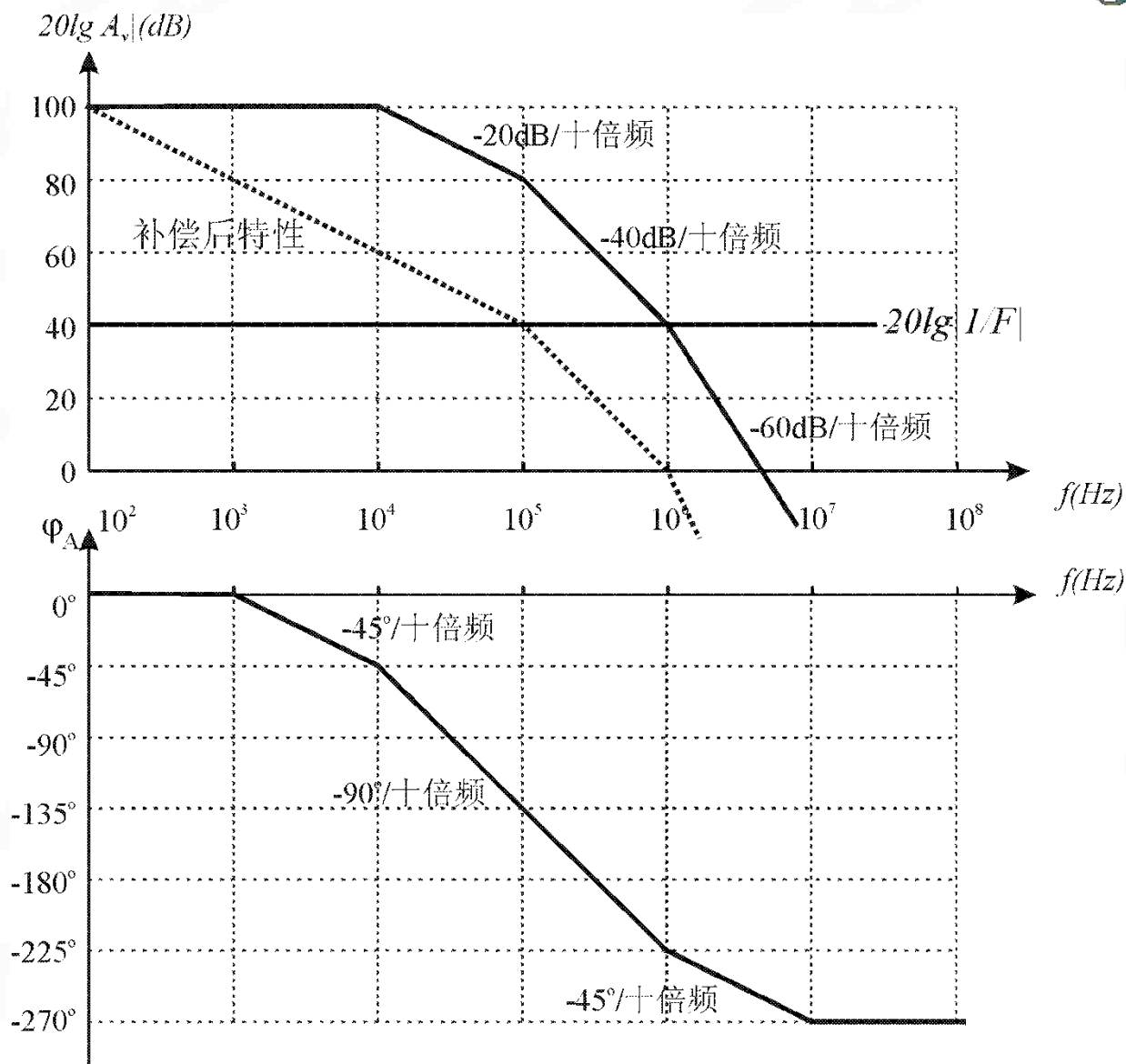


【解】

(1) Bode图:

(2) 若 $|\dot{F}| = 1/100$,
则会产生自激。

(3) 采用电容补
偿后, 相位裕
度 $\varphi_m = 45^\circ$ 。



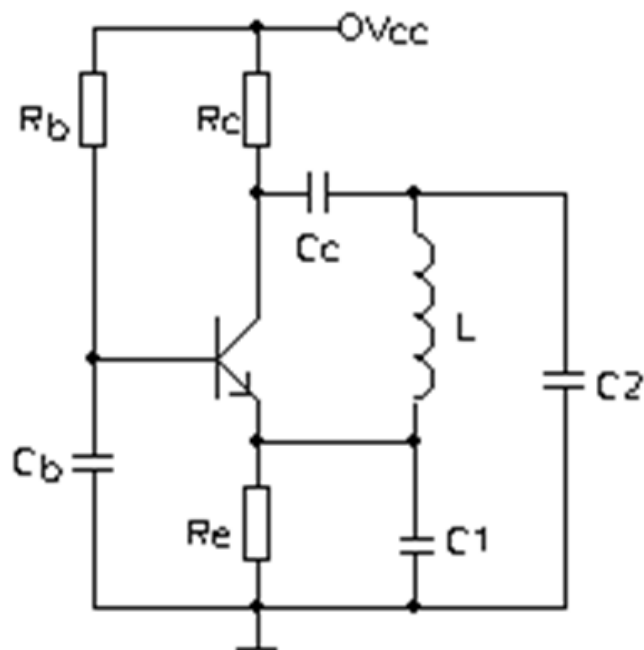
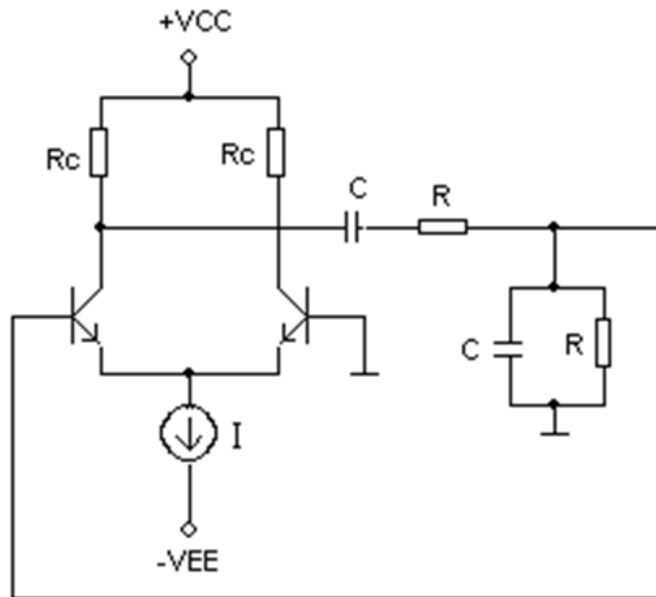


➤ 波形发生电路

- ✧ 正弦振荡器的特点；幅值条件、相位条件
- ✧ RC桥式正弦波振荡器的电路结构，频率计算，稳幅方法
- ✧ LC正弦振荡电路的电路型式，频率计算，能用瞬时极性法判断LC振荡器是否满足相位条件
- ✧ 比较器的电路型式（单限比较器、滞回比较器、窗口比较器、三态比较器）及电压传输特性分析
- ✧ 两种方波发生电路(**RC电路+反相滞回比较器；积分器+同相滞回比较器**)的电路结构，会分析工作原理，会画波形，会推导周期



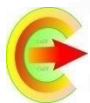
【例6】正弦振荡电路



各电路中，设各耦合电容和旁路电容在工作频率下其容抗可忽略不计。

(1) 判断电路能否产生正弦振荡？若电路不能振荡，试在图上改正。

(2) 在满足自激振荡的条件下，写出电路的振荡频率表达式。

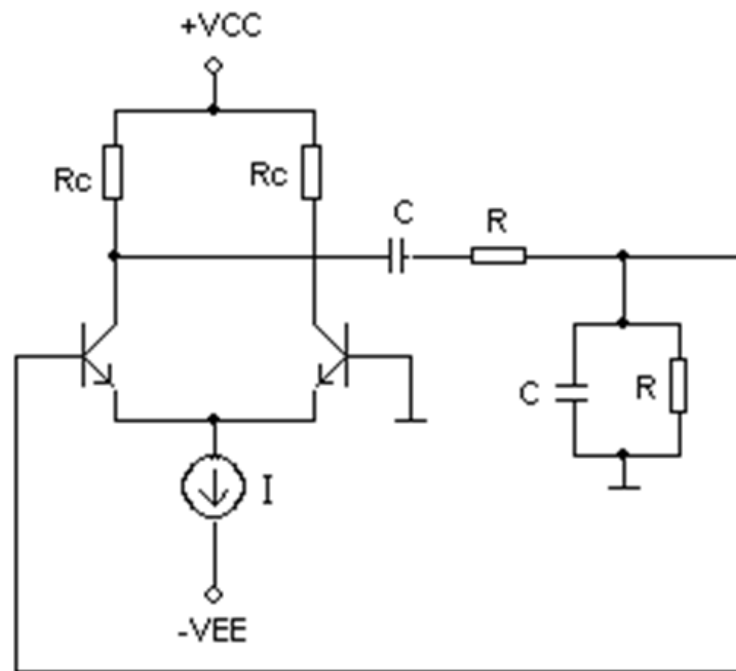
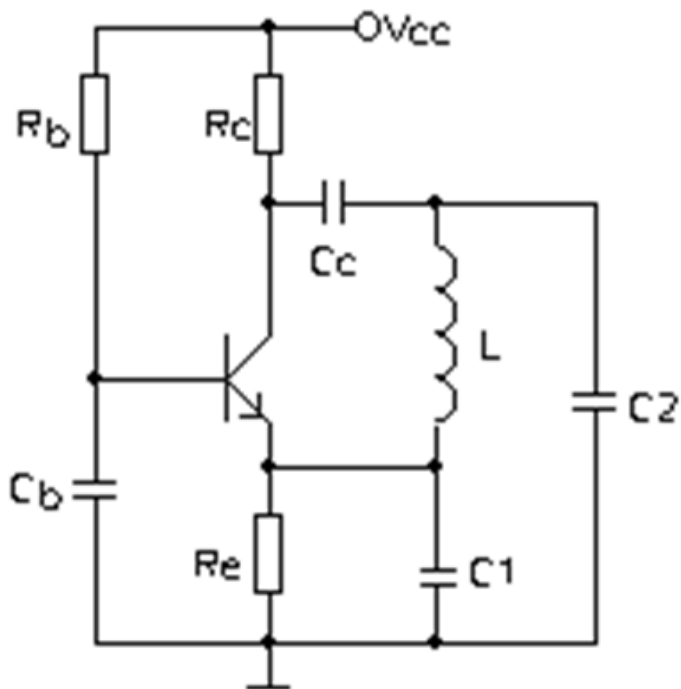


【解】

图(a): 不能产生正弦振荡。

改正: 从 T_2 管c极引出。

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$



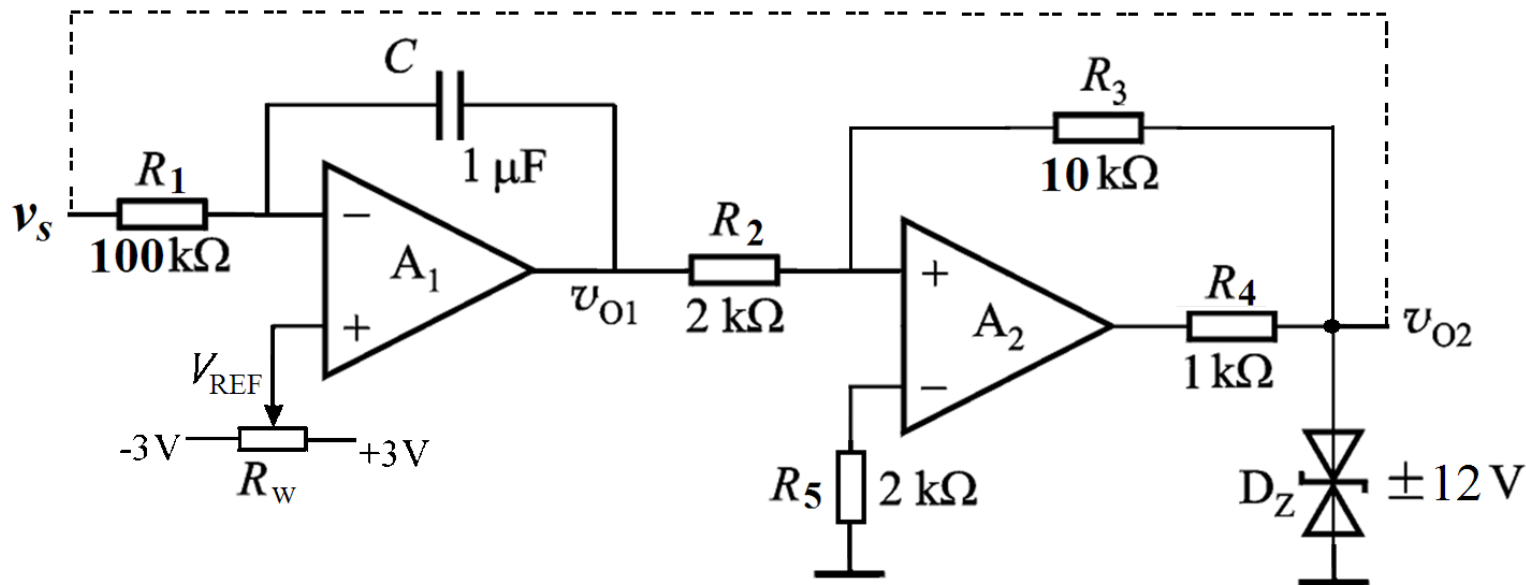
图(b): 不能产生正弦振荡。

改正: 反馈引入基极, 发射极通过旁路电容接地。

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$



【例7】非正弦波发生电路

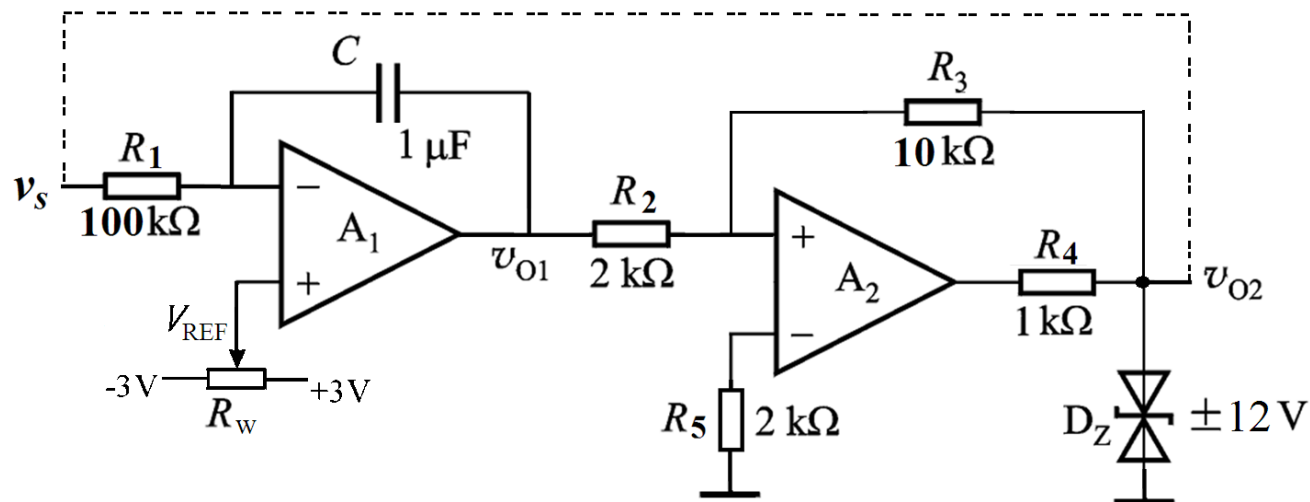


已知 A_1 、 A_2 为理想运放，运放电源接 $\pm 15\text{ V}$ ，电位器 R_W 处于中间位置。设 $t=0$ 时， $v_C(0)=0$ ， $v_{O2}(0)=+12\text{ V}$ 。

- (1) A_1 、 A_2 分别组成什么电路？
- (2) 若虚线断开， v_S 加入 12 V 阶跃信号后，请画出 v_{O1} 和 v_{O2} 波形，并求出输出经过多长时间后 v_{O2} 翻转为 -12 V 。
- (3) 按虚线将 v_{O2} 与 v_S 相连后，画出 v_{O1} 和 v_{O2} 波形，并计算周期。
- (4) 若调节电位器 R_W 使 $V_{\text{REF}} > 0$ ，则 v_{O2} 的波形将如何变化？



【解】

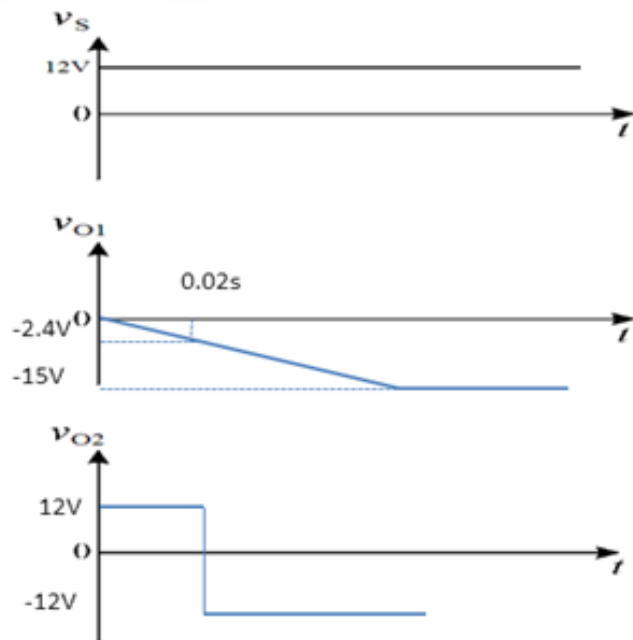


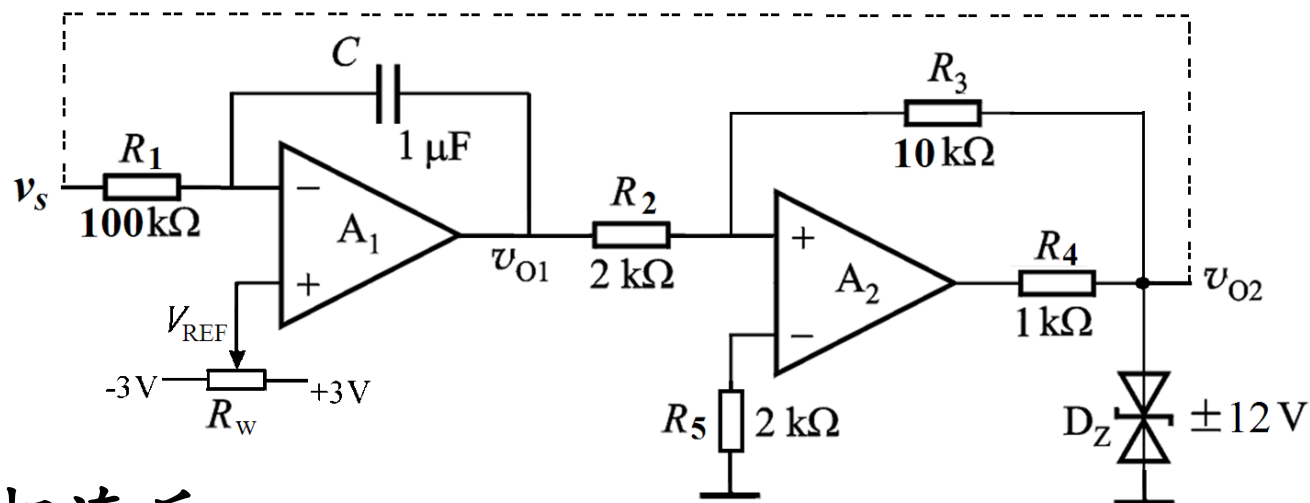
(1) A_1 组成积分电路， A_2 组成同相滞回比较器。

(2) v_s 加入 12 V 阶跃信号

$$v_{O1} = -\frac{1}{C} \int \frac{v_s}{R_1} dt = -\frac{12V}{R_3} R_2 = -2.4$$

$$t = 0.02s$$



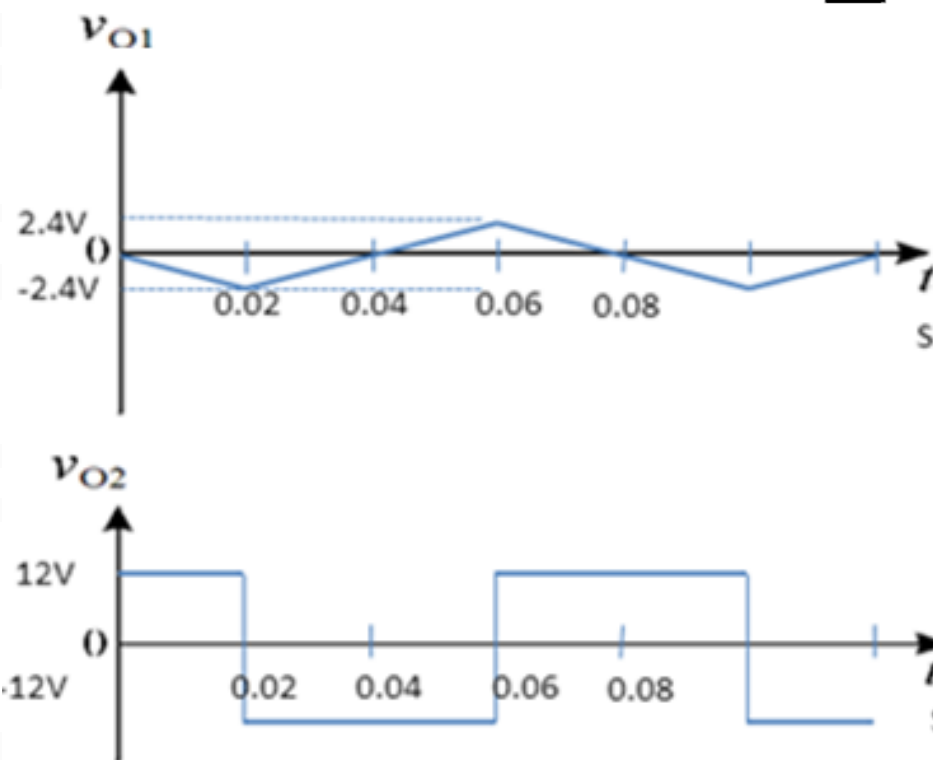


(3) 将 v_{O2} 与 v_s 相连后:

$$T = 0.08s$$

(4) $V_{REF} > 0$ 时:

v_{O2} 波形将变为矩形波，高电平宽度增大，低电平宽度减小。





➤ 功率放大与稳压电源电路

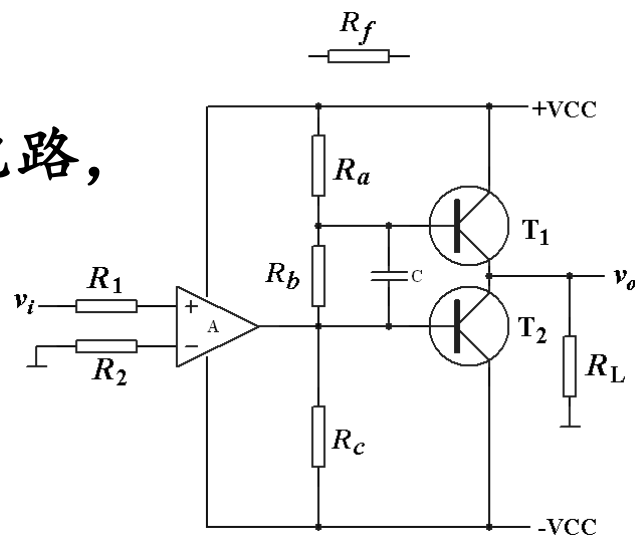
- ✧ 掌握功放电路的电路型式与工作原理
- ✧ 掌握集成运放的电流扩展
- ✧ 掌握 P_o 、 P_E 、 P_T 、 η 的计算，掌握功放管极限参数 ($V_{BR(CEO)}$ 、 I_{CM} 、 P_{CM}) 的选择
- ✧ 了解直流稳压电源的组成
- ✧ 掌握桥式整流、电容滤波的工作原理
- ✧ 掌握线性串联稳压电路的工作原理，会计算输出电压、调整管管耗



【例8】功率放大电路

图示为一集成运放驱动功率放大电路，
 $V_{CC}=15\text{ V}$ ， $R_L=20\Omega$ ， $R_1=R_2=1\text{ k}\Omega$ 。

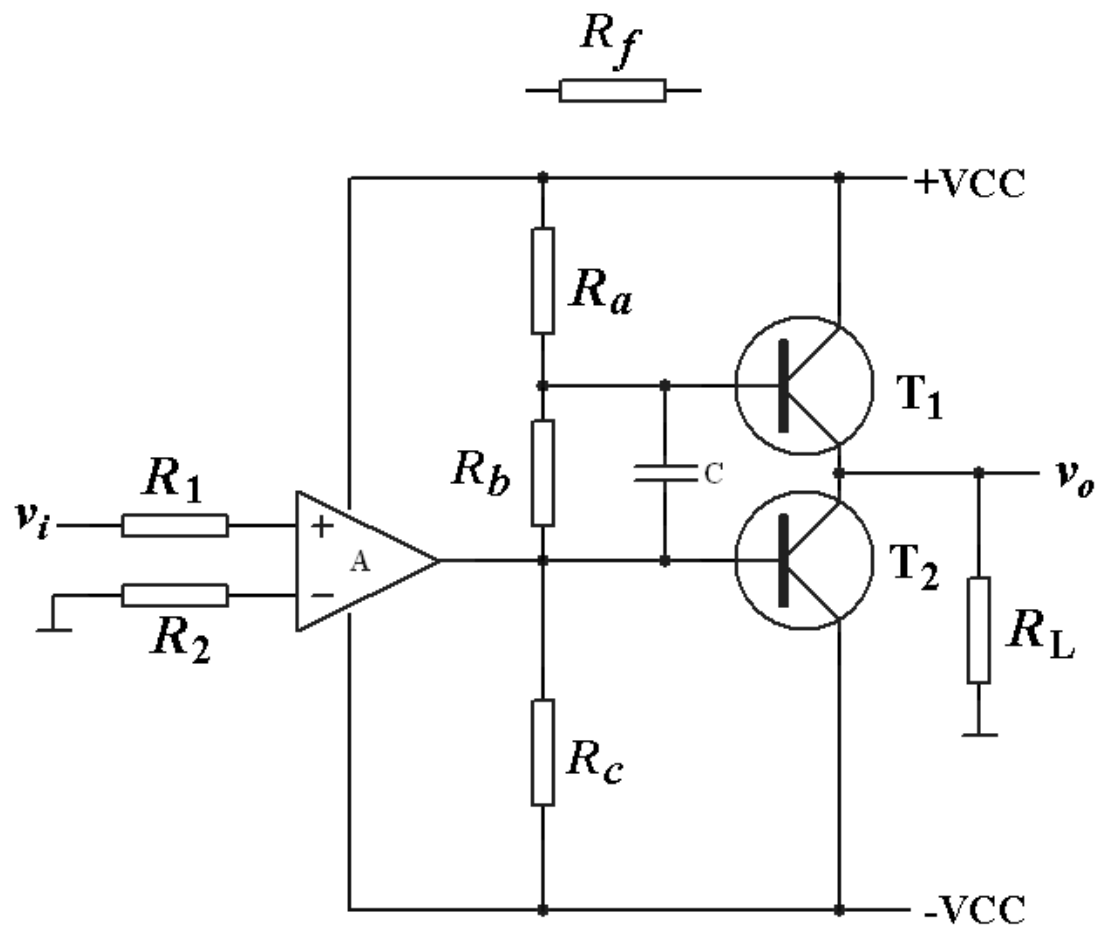
(1) 在图上标出三极管 T_1 、 T_2 的发射极箭头方向，并说明电阻 R_a 、 R_b 、 R_c 、电容 C 在电路中的作用。



(2) 当输出 $v_o = 8\sin\omega t\text{ V}$ 时，求：负载上所得到的输出功率 P_o ；功放级的效率 η ； T_1 、 T_2 的管耗 P_{T1} 、 P_{T2} 。

(3) 在调试过程中，若不小心将电阻 R_b 短路，估计会出现什么现象？若 R_b 断开，又会出现什么现象？

(4) 为了提高带负载能力，并改善输出波形，应如何引入负反馈电阻 R_f （请在图中画出）。若要求引入负反馈后 $A_{vf}=50$ ，求 R_f 的阻值。





【解】

(1) 箭头方向：如图。

R_b 提供偏置电压，
 R_a 、 R_c 提供 R_b 电流， C
 使 R_b 交流短路。

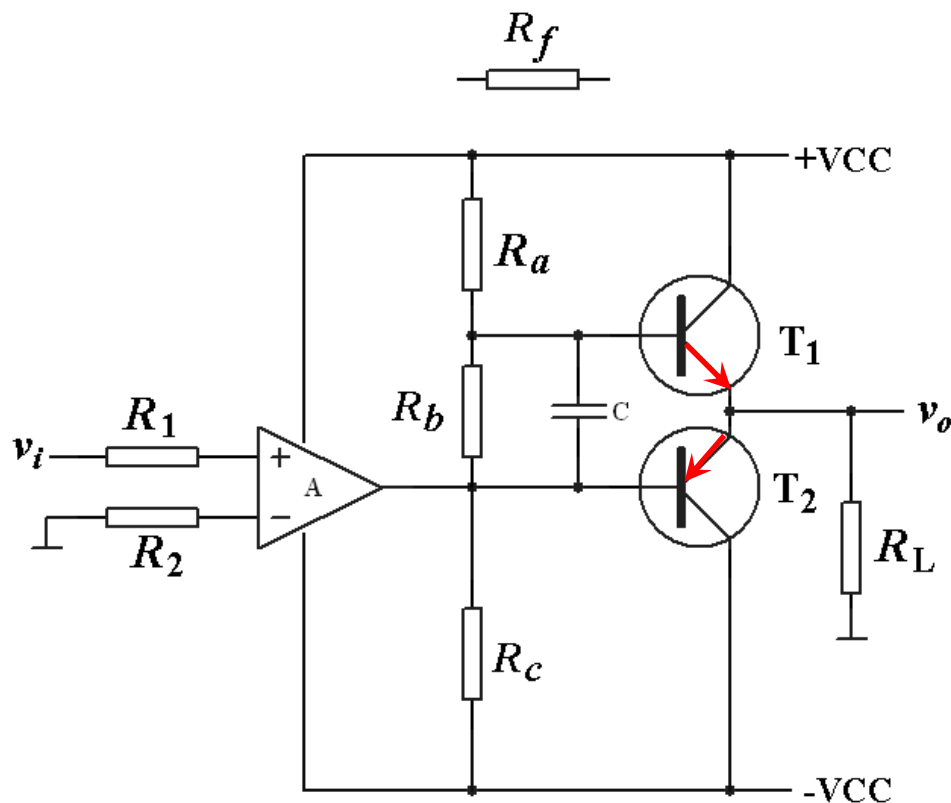
(2) 求功率、效率、管耗

$$P_o = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = \frac{64}{2 \times 20} = 1.6W$$

$$P_E = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} = \frac{2 \times 15 \times 8}{\pi \times 20} = 3.8W$$

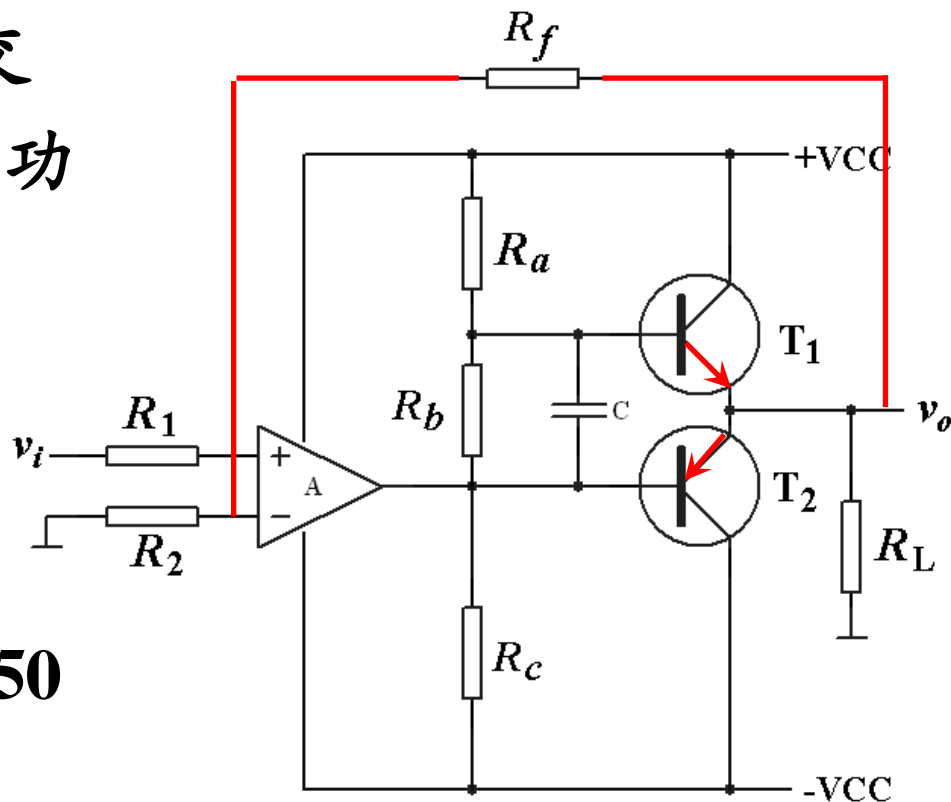
$$\eta = \frac{P_o}{P_E} = 42\%$$

$$P_{T1} = P_{T2} = \frac{P_E - P_o}{2} = 1.1W$$



(3) 若 R_b 短路, 则出现交越失真; 若 R_b 开路, 则功率管可能被烧坏。

(4) 引入负反馈: 如图。

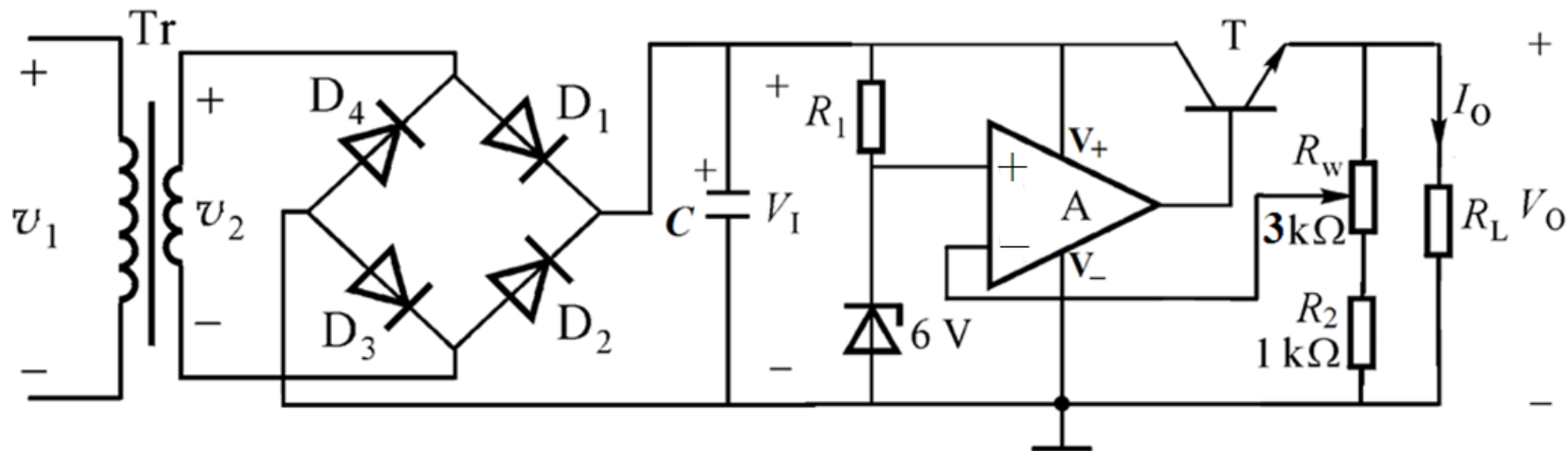


$$A_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_2} = 1 + \frac{R_f}{1 \text{ k}\Omega} = 50$$

$$R_f = 49 \text{ k}\Omega$$



【例9】稳压电源电路

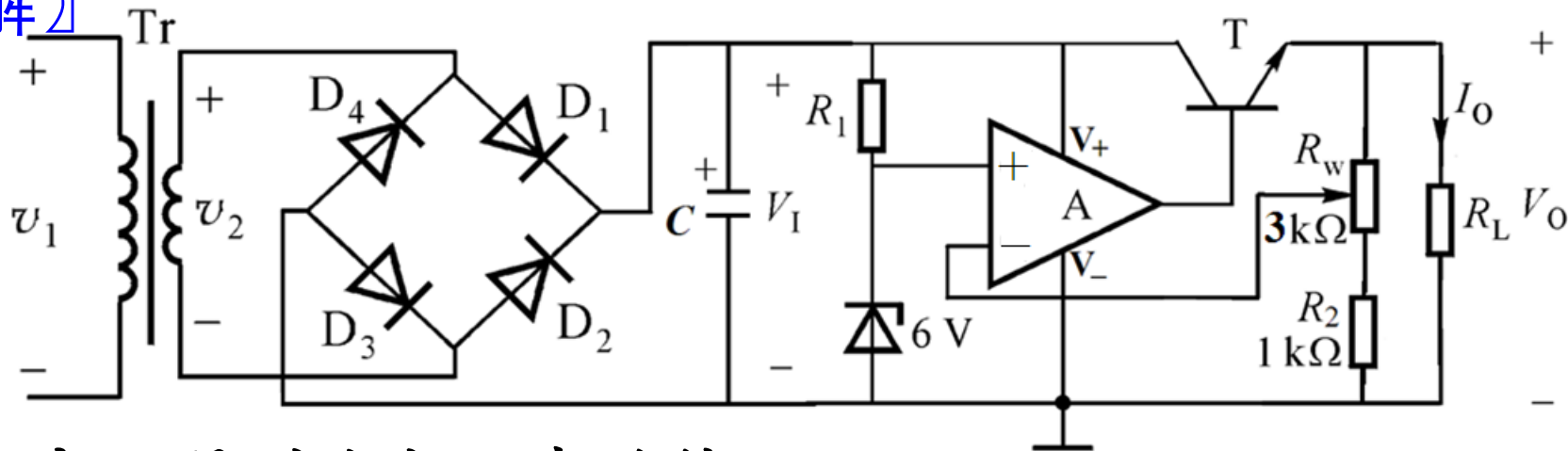


已知运放的最大输出电压为20V，最大输出电流为10mA，调整管的 $V_{BE}=0.7\text{V}$ ，稳压管的 $V_Z=6\text{V}$ ， $R_2=1\text{k}\Omega$ ， $R_w=3\text{ k}\Omega$ ， C 为 $1000\mu\text{F}$ 的电解电容，已知 $V_I=24\text{ V}$ 。

- (1) 估算变压器副边电压有效值 V_2 ；
- (2) 计算输出电压 V_O 的调节范围；
- (3) 若要求输出电流 I_O 最大可达0.5A，则调整管的电流放大倍数 β 值应大于多少？调整管的集电极允许功耗 P_{CM} 应大于多少？



【解】



(1) 变压器副边电压有效值:

$$V_I = 1.2V_2 = 24 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ V}$$

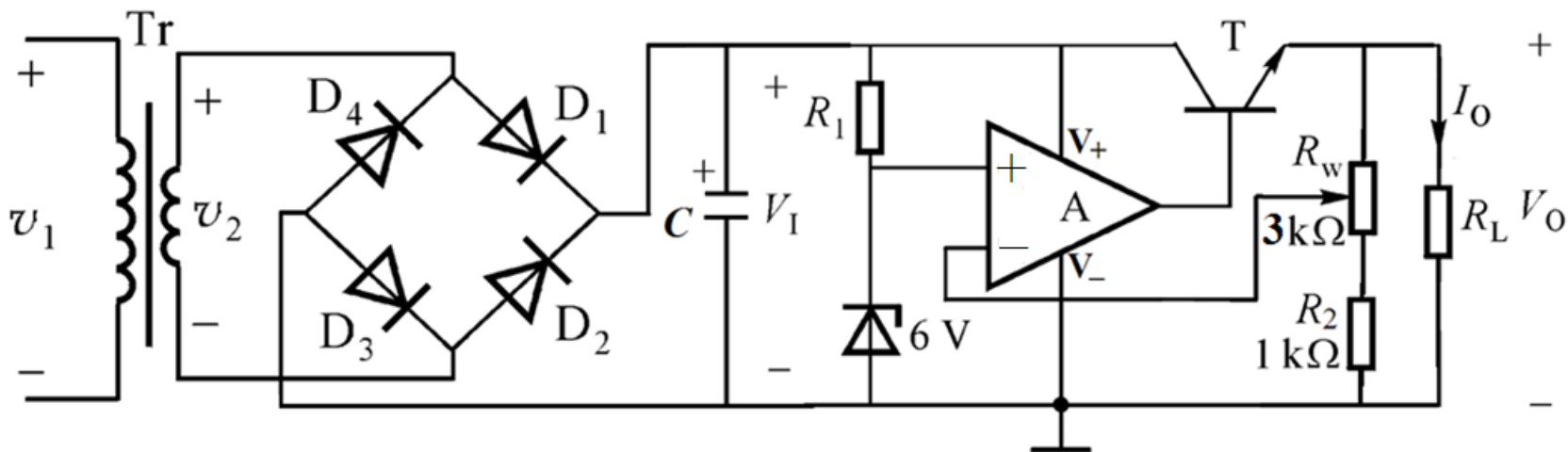
(2) 输出电压 V_O 的调节范围:

电位器 R_w 滑动端在最上方时, $V_{O\min} = 6 \text{ V}$

电位器 R_w 滑动端在最下方时,

$$V_O = \left(1 + \frac{R_w}{R_2}\right)V_Z = 24 \text{ V} > (20 - 0.7) \text{ V}$$

$$V_{O\max} = 19.3 \text{ V}$$



(3) 若要求 I_O 最大可达0.5A:

$$\beta > \frac{I_E}{I_B} \approx \frac{0.5 \text{ A}}{10 \text{ mA}} = 50$$

$$P_{CM} > V_{CE \max} I_{E \max} = (24 - 6) \times 0.5 = 9 \text{ W}$$



考试说明

✧ 范围：全部内容（以下的除外），打*的除外。

以下内容不属于考试范围：

- 场效应管放大电路的静态分析
- 集成运放内部电路；有源滤波电路(2.3.3)
- 集成电压比较器芯片；石英晶振(2.4.4)；压控振荡器
- 集成功率放大器芯片(2.5.3.二)；三端集成稳压器(2.5.5)

✧ 重点：差分及多级放大电路、负反馈、波特图及稳定性、波形发生电路、功率电路

✧ 题型：填空若干，大题（6~7题）

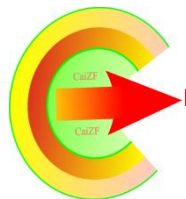


考试提示

- ✧ 日期：7月6日 星期二 10:30~12:30
- ✧ 地点：东1B-306室
- ✧ 允许物品：直尺、计算器
- ✧ 答疑：7月5日 下午 13:30-16:00 东三304室



Thank you for your attention



蔡忠法

浙江大学电工电子教学中心

Ver3.51

版权所有©

2021年