前言

本书是"十二五"普通高等教育本科国家级规划教材《模拟电子技术基础》(第3版)的配套练习册,供学生课后作业和复习之用。

为了帮助学生夯实基础、提高其分析和解决问题的能力,本书有针对性地增加了每章的课后思考题,并对原教材中的习题做了适当的调整和补充;另外,为了满足相关专业对课程教学的要求,本书增加了"正弦波振荡器"和"调制与解调"部分的思考题和习题。

学生完成作业时,可省去抄题目的时间,提高了学习效率;学生交作业时,直接撕下相关页即可。

本书力求达到与课程紧密结合、循序渐进的目的,可作为相关专业本科生的教学参考书,也可供攻读硕士研究生的考生参考。

电子科学与工程学院电子电路教学中心2016年6月3日

—— 目 录 ——

第1章 半导体二极管及其应用	1 -	第6章 放大电路中的反馈	62
1.1 知识要点	1-	6.1 知识要点	62
1.2 重点与难点	1-	6.2 重点与难点	62
1.3 思考题	2-	6.3 思考题	- 63
1.4 习题	3 -	6.4 习题	66
第2章 场效应晶体管及其放大电路	7 -	第7章 集成运算放大器的应用	78
2.1 知识要点	7 -	7.1 知识要点	78
2.2 重点与难点	7-	7.2 重点与难点	78
2.3 思考题	7-	7.3 思考题	79
2.4 习题	11 -	7.4 习题	82
第3章 双极型晶体管及其放大电路	19 -	第8章 功率放大电路	92
3.1 知识要点	19 -	8.1 知识要点	92
3.2 重点与难点	19 -	8.2 重点与难点	92
3.3 思考题	20 -	8.3 思考题	93
3.4 习题	25 -	8.4 习题	96
第4章 放大电路的频率响应	43 -	第9章 正弦波振荡器	104
4.1 知识要点	43 -	9.1 知识要点	104
4.2 重点与难点	43 -	9.2 重点与难点	104
4.3 思考题	44 -	9.3 思考题	105
4.4 习题	47 -	9.4 习题	108
第5章 集成运算放大电路	53 -	第 10 章 调制与解调	116
5.1 知识要点	53 -	10.1 知识要点	116
5.2 重点与难点	53 -	10.2 重点与难点	116
5.3 思考题	54 -	10.3 思考题	117
5.4 习题	57 -	10.4 习题	120

第1章 半导体二极管及其应用

1.1 知识要点

- 一、半导体物理基础知识
- 二、PN 结的形成
- 三、半导体二极管及其模型
- 四、半导体二极管的基本电路
- 五、稳压二极管及其反向击穿特性

1.2 重点与难点

- 一、PN结的单向导电性、伏安特性
- 二、半导体二极管的理想模型、恒压降模型和小信号模型
- 三、半导体二极管构成的基本电路的简化分析法、小信号分析法
- 四、稳压二极管构成的基本电路分析

1.3 思考题

1.3.1 在杂质半导体中,多数载流子的浓度主要取决于,而少数载流子的 浓度与 关系十分密切。

A、温度, B、掺杂工艺, C、杂质浓度

1.3.2 N 型半导体是在纯净半导体中掺入 ; P 型半导体是在纯净半导体中 掺入 。

- A、带负电的电子,
- B、带正电的离子
- C、三价元素,如硼等, D、五价元素,如磷等

1.3.3 在保持二极管反向电压不变的条件下, 二极管的反向电流随温度升高而 : 在保持二极管的正向电流不变的条件下,二极管的正向导通电压随温 度升高而。

B、减小, C、不变 A、增大,

1.3.4 当 PN 结外加正向电压时,扩散电流 漂移电流,耗尽层 ; 当 PN 结外加反向电压时,扩散电流 漂移电流,耗尽层 。

A、大于, B、小于, C、等于, D、变宽, E、变窄, F、不变 1.3.5 在本征半导体中,空穴浓度 电子浓度;在 N 型半导体中,空穴浓度 电子浓度;在P型半导体中,空穴浓度 电子浓度。

A、大于, B、小于, C、等于

1.3.6 随着温度的升高,在杂质半导体中,少数载流子的浓度 ,而多数载 流子的浓度。

A、明显增大, B、明显减小, C、变化较小

1.3.7 某二极管在正向电流 I_D =10mA 时,其正向压降 U_D =0.6V。在 U_D 保持 不变的条件下,当二极管的结温升高 10°C, I_D 将。

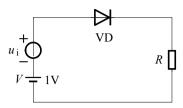
A、小于 10mA, B、大于 10mA, C、等于 10mA

1.3.8 硅二极管的正向电压从 0.65V 增大 10%,则流过的正向电流增大。

B、小于 10%, C、大于 10% A、约 10%,

1.3.9 电路如图所示, u_i =0. $lsin\omega t(V)$,当直流电源电压 V 增大时,二极管 VD 的动态电阻 r_a 将。

A、增大, B、减小, C、保持不变



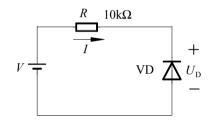
1.3.10 若题图中二极管的反向击穿电压为 100V, 在 V=10V 时, 测得 $I=1\mu A$ 。

(1) 当 V 增加到 20V 时,I 将 ;

A、为 2μA 左右,B、小于 1μA,C、变化不大,D、远大于 2μA

(2) 保持 *V* 不变,温度升高 10℃,则 *I* 将。

A、为 2µA 左右, B、小于 1µA, C、变化不大, D、远大于 2µA



答案:

1.3.1	ClA	1.3.2	DIC

1.3.5
$$C|B|A$$
 1.3.6 $A|C$

-3-1.4 习题

1.4.1 在一本征硅中,掺入施主杂质,其浓度 $N_D = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。

(1) 求室温 300K 时,自由电子和空穴的热平衡浓度值,并说明半导体为 P 型或 N 型:

(2) 若再掺入受主杂质, 其浓度 $N_{\rm A} = 3 \times 10^{14} {\rm cm}^{-3}$, 重复 (1)。

解: (1) 本征硅室温时热平衡载流子浓度值 $n_i = 1.5 \times 10^{10}$ cm⁻³。

由题目已知施主杂质 $N_D = 2 \times 10^{14} \,\mathrm{cm}^{-3} >> n_i = 1.5 \times 10^{10} \,\mathrm{cm}^{-3}$,所以多子 自由浓度为:

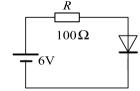
$$n_0 \approx N_D = 2 \times 10^{14} \, \text{cm}^{-3}$$

少子空穴浓度 $p_0 = \frac{n_i^2}{n_i} = 1.125 \times 10^6 \,\mathrm{cm}^{-3}$,该半导体为 N 型。

(2) 因为 $N_4 - N_D = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} >> n_i$,所以多子空穴浓度为: $p_0 \approx 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

少子电子浓度 $n_0 = \frac{n_i^2}{n_i} = 2.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$,该半导体为 P 型。

- 1.4.2 二极管电路如题图所示。已知直流电源电压为 6V, 二极管直流管压降为 0.7V。
- (1) 试求流过二极管的直流电流;
- (2) 二极管的直流电阻 R_D 和交流电阻 R_D 各为多少?



题 1.4.2 图

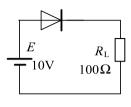
$$I_D = \frac{6 - 0.7}{100} A = 53 \text{mA}$$

$$(2) \qquad R_D = \frac{0.7V}{53 \times 10^{-3} A} = 13.2 \,\Omega$$

$$r_D = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26 \times 10^{-3} V}{53 \times 10^{-3} A} = 0.49 \Omega$$

1.4.3 二极管电路如题图所示。

- (1)设二极管为理想二极管,试问流过负载 R_L 的 电流为多少?
- (2)设二极管可视为恒压降模型,且二极管导通电 压 $U_{D(on)}$ =0.7 V, 试问流过负载 R_L 的电流是多少?
- (3)设二极管可看作是折线模型,并设二极管的门 限电压 $U_{D(on)}$ =0.7 V, $r_{D(on)}$ =20 Ω , 试问流过负载 的电流是多少?



题 1.4.3 图

- (4) 将电源电压 E 反接时,流过负载电阻的电流是多少?
- (5) 增加电源电压 E, 其它参数不变时, 二极管的交流电阻怎样变化?

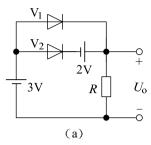
M: (1)
$$I = \frac{E}{R_I} = 100 \text{ mA}$$

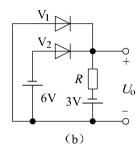
(2)
$$I = \frac{E - U_{D(on)}}{R_I} = 94 \text{ mA}$$

(3)
$$I = \frac{E - U_{D(on)}}{R_L + R_D} = 78.3 \,\text{mA}$$

- (4) *I=-Is或I≈*0
- (5) E 增加,直流电流 $I_{\rm D}$ 增加,交流电阻 $\frac{U_T}{I_T}$ 下降。

1.4.4 在题图所示各电路中,设二极管均为理想二极管。试判断各二极管是否导通,并求 U_0 的值。



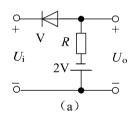


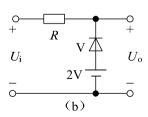
题 1.4.4 图

解: (1) 在图(a)中, V_2 导通, V_1 截止, $U_0 = 5V$ 。

(2) 在图(b)中, V_1 导通, V_2 截止, $U_0 = 0V$ 。

1.4.5 二极管限幅电路如题图 (a)、(b) 所示。将二极管等效为恒压降模型,且 $U_{D(on)}$ =0.7V。若 u_i =5 $\sin \omega t$ (V),试画出 u_o 的波形。

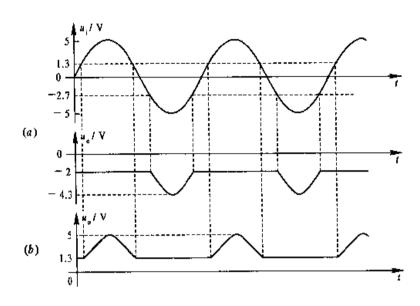




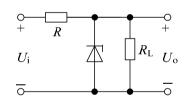
题 1.4.5 图

解: (1) 在图(a)中: 当 u_i >-2.7V 时,V管截止, u_0 =-2V; 当 u_i ≤-2.7V 时,V管导通, u_0 = u_i 。当 u_i =5sinωt(V)时,对应的 u_0 波形如图答图 (a)所示。

(2) 在图(b)中: 当 $u_i > 1.3$ V 时,V 管截止, $u_0 = ui$; 当 $u_i \le 1.3$ V 时,V 管导通, $u_0 = 2$ V。其相应波形如答图(b)所示。



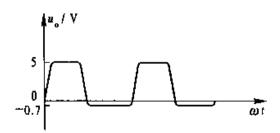
1.4.6 在题图所示电路中,稳压管的 U_z =5V,正向导通压降为 0.7V。若 u_i =10sin ωt (V),试画出 u_o 的波形。



解: 当 $u_i \ge 5V$ 时, V_z 击穿, $u_0 = 5$ V。当 $u_i \le -0.7V$ 时, V_z 正向导通, $u_0 = -0.7$ V。

题 1.4.6 图

当-0.7 $V < u_i < 5V$ 时, V_z 截止, $u_0 = u_i$ 。由此画出的 u_0 波形如下所示。



1.4.7 稳压管电路如题图所示。

(1) 设 $U_i = 20(1\pm10\%)$ V, 稳压管 D_z 的稳定电压 $U_z = 10$ V, 允许最大稳定 电流 $I_{Z_{\text{max}}}$ =30mA, $I_{Z_{\text{min}}}$ =5mA, $R_{\text{L,min}}$ =800 Ω , $R_{I_{\text{max}}}$ =∞。试选择限流电阻 R 的值;

(2) 稳压管的参数如(1) 中所示, $R=100\Omega$, $R_{\rm L}$ =250 Ω , 试求 $U_{\rm i}$ 允许的变化范围。

$$+^{\circ}$$
 R $+$ $U_{\rm i}$ $D_{\rm Z}$ $R_{\rm L}$ $U_{\rm O}$ $-$ 题 1.4.7 图

M:
$$(1)R_{min} = \frac{U_{imax} - U_{Z}}{I_{Zmin} + I_{Lmin}} = 400\Omega$$

式中,因 $R_{I,\text{max}} \rightarrow \infty$,所以 $I_{I,\text{min}} = 0$, $U_{i,\text{max}} = 20 + 20 \times 0.1 = 22 \text{ V}$

$$R_{max} = \frac{U_{imin} - U_{Z}}{I_{Zmmin} + I_{Lmax}} = \frac{(18 - 10)V}{(5 + 12.5)mA} = 457\Omega$$

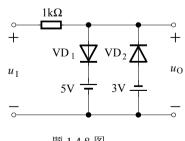
式中 $I_{I_{max}} = 10/800 = 12.5 \,\text{mA}$, $U_{i_{min}} = (20-20 \times 0.1) \,\text{V} = 18 \,\text{V}$ 选择 R 应满足: $400\Omega < R < 457\Omega$

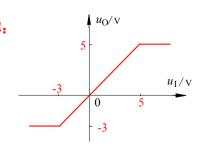
(2) $\stackrel{\text{def}}{=} R_I = 250\Omega$ 时, $I_I = 10/260 = 40 \text{ mA}$ 。

当 I_z 达到最大时 , $U_{imax} = (I_{2max} + I_{L})R + U_{Z} = 17$ (V)

当 I_z 为 $I_{z \min}$ 时, $U_{i \min} = (I_{z \min} + I_L)R + U_Z = 14.5$ (V) 即 *V*, 的变化范围是 14.5~17V。

1.4.8 电路如题图所示, VD₁、VD₂为理想二极管, 画出该电路的电压传输特 性 ($u_0 = f(u_1)$ 曲线), 要标明转折点坐标值。





题 1.4.8 图

1.4.9 三个二极管 A、B、C 的正、反向特性如题表所示。从单向导电性来评 价, 你认为哪一个二极管最好? 哪一个二极管最差? 请在对应的管子后面分 别画"√"表示最好, 画"×"表示最差。

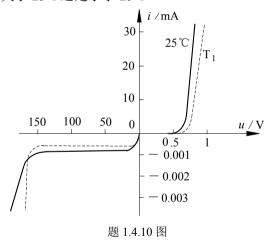
题 1.4.9 表

管号	加 0.6V 正向电压时的电流	加 10V 反向电压时的电流	评价
A	40mA	1μA	
В	50mA	1μA	√
С	60mA	1mA	×

1.4.10 已知某二极管在温度为 25℃时的伏安特性如题图中实线所示, 在温度 为 T₁时的伏安特性如图中虚线所示。

- (1) 在 25℃时,该二极管的死区阈值电压、反向击穿电压和反向电流各是 多大?
- (2) 温度 *T*₁ 是大于 25℃还是小于 25℃?

班级



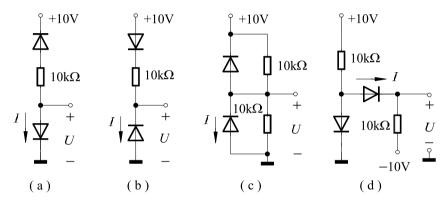
解:

- (1) 死区电压约为 0.5V; 反向击穿电压约为 160V; 反向电流约为 1uA
- (2) T₁小于25℃

解:

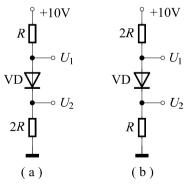
1.4.11 设题图中各二极管为理想二极管,某同学判断各电路中电流 I 和电压 U 的值如题表中所示。试改正该同学判断中的错误,把正确答案填在错误之后的空格内。

٠.									
	图号	(8	a)	(1))	((2)	((1)
	I/mA	1	0	1	0	0		1	
	U/V	0		0	10	0	5	10	0



题 1.4.11 图

1.4.12 试确定题图 (a) 和题图 (b) 中的二极管是否导通,并计算电压 U_1 和 U_2 的值(设二极管正向导通电压为 0.7V)。



题 1.4.12 图

(A) VD 截止, *U*₁=10V, *U*₂=0V

(B) VD 导通,
$$U_1 = 3.8$$
V, $U_2 = 3.1$ V

第2章 场效应晶体管及其放大电路

2.1 知识要点

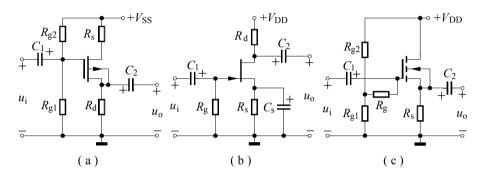
- 一、场效应管(结型场效应管、绝缘栅场效应管)结构及其特性
- 二、场效应管放大电路及其交流等效电路分析法

2.2 重点与难点

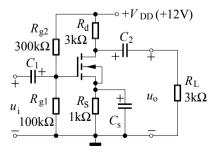
- 一、场效应管类型、工作状态的判别
- 二、场效应管的工作原理、输出特性、转移特性
- 三、场效应管基本放大电路的组成、工作原理及性能特点
- 四、放大电路静态工作点和动态参数(\dot{A}_u 、 R_i 、 \dot{R}_o 、 \dot{U}_{om})的分析

2.3 思考题

- 2.3.1 为满足下列要求,分别从题图所示电路中选择合适的电路形式。
- (1)输出电阻小,应选;
- (2) 电压放大倍数 $|A_u|$ 大, 应选 ;
- (3) 电压放大倍数 $|A_n|$ 接近 1,并且输出电压与输入电压反相,应选

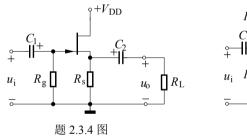


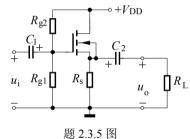
2.3.2 场效应管属于_____(A、电压,B、电流)控制型元件,其栅极的____(A、电压,B、电流)几乎等于零,而双极型晶体管属于_____(A、电压,B、电流)控制型元件,其基极电流比场效应管的栅极电流____(A、大得多,B、小得多)。所以,共源放大电路的输入电阻通常比共射放大电路输入电阻____(A、大,B、小),从信号源索取的电流也比较_____(A、大,B、小)。2.3.3 用直流电压表测量题图所示电路中g、s、d 三个极对地电压,已知表中第一组数据为正常值。试分析表中其它几组数据分别是由于何种原因(某元件短路或开路)造成的,把答案填入表内。(可多选)



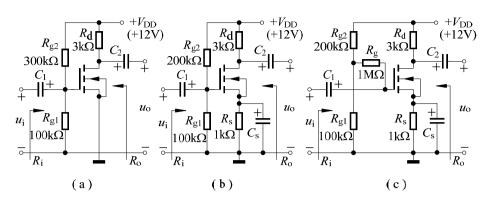
	组别	$U_{\mathrm{G}}/\mathrm{V}$	$U_{\mathrm{S}}/\mathrm{V}$	$U_{\mathrm{D}}/\mathrm{V}$	故障原因
	1	3	1.5	7.5	(正常值)
	2	0	0	12	$R_{\rm gl}$ 短路或 $R_{\rm g2}$ 开路
	3	3	1.5	12	R _d 短路
	4	12	2.7	3.9	R_{g_1} 开路或 R_{g_2} 短路
Ī	5	3	1.5	3.8	C ₂ 短路

2.3.4 在题图所示电路中,当输入一个正弦电压后,输出电压出现底部削平失真,说明管子进入了____(A、夹断区,B、可变电阻区);为了减小失真的程度,应 (A、增大 R_s , B、减小 R_s , C、减小 R_g)。



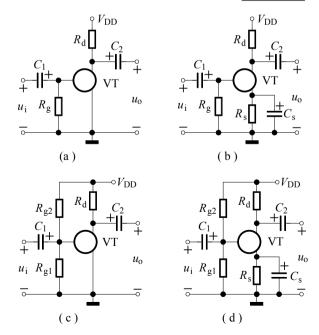


- 2.3.5 在题图所示电路中,当输入一个正弦电压后,输出电压出现顶部削平失真,说明管子进入了____(A、夹断区,B、可变电阻区),为了减小失真程度,应增大____(A、 R_{gl} , B、 R_{g2} , C 、 R_L)。
- 2.3.6 已知题图中 a、b、c 三个电路所用 MOS 管的参数相同,静态电流 I_{DQ} 也相同。比较这三个电路的性能。
- (1) 静态工作点稳定性最差的电路是___;
- (2) 电压放大倍数相同的电路有____;
- (3)输出电阻相同的电路有____;
- (4)输入电阻最大的电路是____;输入电阻最小的电路是____;
- (5) 输出电压动态范围最宽的电路是。



2.3.7 场效应管放大电路常用的栅压偏置电路如题图所示。说明下列场效应管可以采用哪些类型的偏置电路。(可多选)

- (1) 结型场效应管可以采用图示电路中的
- (2) 增强型 MOS 场效应管可以采用图示中的;
- (3) 耗尽型 MOS 场效应管可以采用图示电路中的。



2.3.8 在共源、共漏两种组态的放大电路中,若希望电压放大倍数 $|A_u|$ 大应选用______; 若希望带负载能力强应选用______; 若希望输出电压与输入电压同相应选用 。 试填空选择正确答案(A、共源组态,B、共漏组态)。

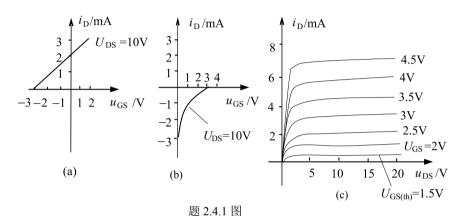
答案:

- **2.3.1** c|b|a **2.3.2** A|B|A|A|B
- **2.3.3** (2) R_{gl} 短路或 R_{g2} 开路; (3) R_{d} 短路
 - $(4) R_{g1}$ 开路或 R_{g2} 短路; $(5) C_2$ 短路
- **2.3.4** A|B
- **2.3.5** B|B **2.3.6** A|ABC|ABC|CB|A
- **2.3.7** bd|cd|abcd **2.3.8** A|B|B

姓名

2.4 习题

2.4.1 已知场效应管的输出特性或转移如题图所示。试判别其类型,并说明各管子在 $|U_{\rm DS}|$ = 10V 时的饱和漏电流 $I_{\rm DSS}$ 、夹断电压 $U_{\rm GSoff}$ (或开启电压 $U_{\rm GSth}$)各为多少。



解: FET 有 JFET 和 MOSFET。

JFET 有 P 沟 (U_{GS} 只能为正) 和 N 沟 (U_{GS} 只能为负) 之分。

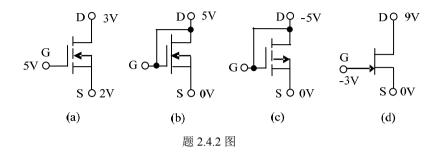
MOSFET 中有耗尽型 P 沟和 N 沟(U_{GS} 可为正、零或负)、增强型 P 沟 (U_{GS} 只能为负)和 N 沟(U_{GS} 只能为正)。

图 (a): N 沟耗尽型 MOSFET, I_{DSS} =2mA, $U_{GS(th)}$ =-3 V。

图 (b): P 沟结型 FET, I_{DSS} =3mA, $U_{GS(th)}$ =3 V。

图 (c): N 沟增强型 MOSFET, I_{DSS} 无意义 , $U_{GS(th)}$ =1.5 V。

2.4.2 已知各 FET 各极电压如题图所示,并设各管的 $U_{GS(th)}$ =2 V。试分别判别 其工作状态(可变电阻区,恒流区,截止区或不能正常工作)。



解: 图 (a)中, N 沟增强型 MOSFET,

因为 $U_{GS}=3$ V > $U_{GS(th)}=2$ V, $U_{GD}=-2$ V = $U_{GS(th)}=2$ V,所以工作在恒流区。

图 (b)中,N 沟耗尽型 MOSFET,

 $U_{GS}=5$ V > $U_{GS(th)}=-2$ V, $U_{GD}=0$ V > $U_{GS(th)}=-2$ V,所以工作在可变电阻区。

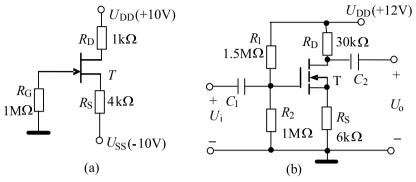
图 (c)中, P沟增强型 MOSFET,

 $U_{GS} = -5 \, \mathrm{V} < U_{GS(th)} = -2 \, \mathrm{V}$, $U_{GD} = 0 \, \mathrm{V} > U_{GS(th)} = -2 \, \mathrm{V}$, 所以工作 在恒流区。

图(d)中,为N沟JFET,

 $U_{GS} = -3 \text{ V} < U_{GS(th)} = -2 \text{ V}$,所以工作在截止区。

2.4.3 在题图(a)和(b)所示电路中,已知 JFET 的 $I_{\rm DSS}$ =5 mV, $U_{\rm GS(off)}$ =-5 V,MOSFET 的 $\mu_{\rm n}C_{\rm ox}W/2L$ =80 μ A/V², $U_{\rm GS(th)}$ =1.5 V。 试分别求 JFET 和 MOSFET 的 $I_{\rm DQ}$ 、 $U_{\rm GSQ}$ 和 $U_{\rm DSQ}$ 的值。



题 2.4.3 图

解: (1)

$$\begin{cases} I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \\ U_{GS} = U_{SS} - I_D R \end{cases}$$

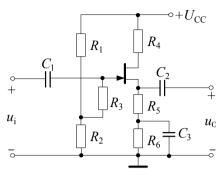
解得:
$$I_{DO} = 2.8 mA, U_{GSO} = -1.2 V, U_{DSO} = 6 V$$

(2)

$$\begin{cases} I_D = 0.1 (U_{GS} - U_{GS(th)})^2 \\ U_{GS} = 4.8 - 6I_D \end{cases}$$

解得:
$$I_{DO} = 167.6 \mu A, U_{GSO} \approx -3.8 V, U_{DSO} = 5.97 V$$

2.4.4 题图电路中 JFET 共源放大电路的元器件参数如下: 在工作点上的管子 跨 $g_{\rm m}$ =1mS, $r_{\rm ds}$. Ω , R_1 =300k Ω , R_2 =100k Ω , R_3 =1M, R_4 =10k Ω , R_5 =2k Ω , R_6 =2k Ω 。试估算放大电路的电压增益、输入电阻、输出电阻。



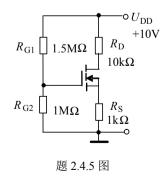
题 2.4.4 图

$$A_{u} = \frac{-g_{m}R_{L}}{1+g_{m}R_{5}} = \frac{-1\times10}{1+1\times2} = -3.33$$

$$R_{i} = R_{3} + R_{1} // R_{2} = 1000 + 100 // 300 = 1.075 MΩ$$

$$R_{0} \approx R_{4} = 10 KΩ$$

- 2.4.5 场效应管电路如题图所示。设 MOSFET 的 $\mu_{\rm n}C_{\rm ox}W/2L$ =80 μ A/V², $U_{\rm GS(th)}$ =1.5 V,忽略沟道长度调制效应。
- (1) 试求漏极电流 I_{DO} , 场效应管的 U_{GSO} 和 U_{DSO} ;
- (2) 画出电路的低频小信号等效电路,并求参数 $g_{\rm m}$ 的值。



 $I_{DQ} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (U_{GSQ} - U_{GS(th)})^2$ $= 80 \times 10^{-6} (U_{GSQ} - 1.5)^2$ $U_{GSQ} = U_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - I_L$

解:(1)设电路工作在饱和区,则

$$=1.0 \times \frac{1}{1.5+1} - I_{DQ} \times 10^{3}$$

姓名

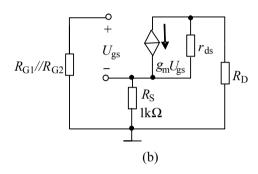
$$I_{DO} = 0.375 \,\mathrm{mA}$$
, $U_{GSO} = 3.625 \,\mathrm{V}$

$$U_{DSO} = 5.875 \,\text{V}, \quad U_{GSO} = 3.625 > U_{GS(th)} = 1.5 \,\text{V}$$

$$U_{GDQ} = V_{GSQ} - V_{DSQ} = 3.625 \,\mathrm{V} - 5.875 \,\mathrm{V} = -2.25 \,\mathrm{V} < U_{GS(th)}$$

可见符合工作在恒流区的假设条件。

(2) 低频小信号等效电路如答图(b) 所示。

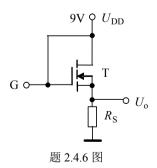


$$g_m = 2 \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (U_{GS} - U_{GS(th)}) = 340 \mu S$$

$$I_{co}$$
的变化为 $\frac{\Delta I_{co}}{I_{co}} = \frac{2.16 - 2.09}{2.09} \approx 3.3(\%)$

2.4.6 MOSFE 场效应管电路如题图所示。设 $\mu_{\rm n}C_{\rm ox}W/2L=500\mu{\rm A/V}^2$, $U_{\rm GS(th)}=3$ V。试求 $R_{\rm S}$ 分别 为 $2{\rm k}\Omega$ 和 $10{\rm k}\Omega$ 时 $U_{\rm o}$ 的值。

解:
$$R_S = 2 k \Omega$$
 时,

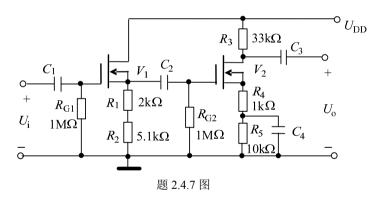


$$\begin{cases} I_{D} = \frac{\mu_{n} C_{ox} W}{2L} (U_{GS} - U_{GS(th)})^{2} \\ V_{GS} = U_{DD} - I_{D} R_{S} \end{cases}$$

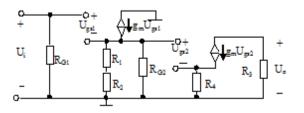
可得 $I_D = 2 \,\text{mA}, \ U_O = 4 \,\text{V}(舍去 I_D = 4.5 \,\text{mA})$

$$R_S = 10 \,\mathrm{k}\,\Omega$$
 时,计算得到 $I_D = 0.5 \,\mathrm{mA}$, $U_O = 5 \,\mathrm{V}$

- 2.4.7 两级 MOSFET 阻容耦合放大电路如题图所示。已知 V_1 和 V_2 的跨导 g_m =0.7mS,并设 r_{ds} $\rightarrow \infty$,电容 $C_1 \sim C_4$ 对交流信号可视作短路。
- (1) 试画出电路的低频小信号等效电路;
- (2) 计算电路的电压放大倍数 A_u 和输入电阻 R_i ;
- (3) 如将 R_{GI} 的接地端改接到 R_{I} 和 R_{2} 的连接点,试问输入电阻 R_{i} 为多少?



解: (1) 低频小信号等效电路如下图所示

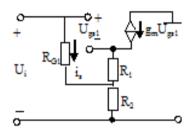


姓名

(2)
$$A_u = -\frac{g_m R_3}{1 + g_m R_4} \cdot \frac{g_m (R_1 + R_2) / / R_{G2}}{1 + g_m (R_1 + R_2) / / R_{G2}} = -11.3$$

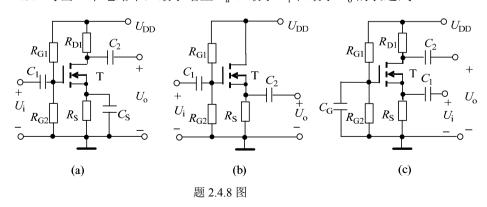
 $R_i = R_{G1} = 1M\Omega$

(3) 由下图所示电路可求得(略去 R_{G2})输入电阻 R_{i}

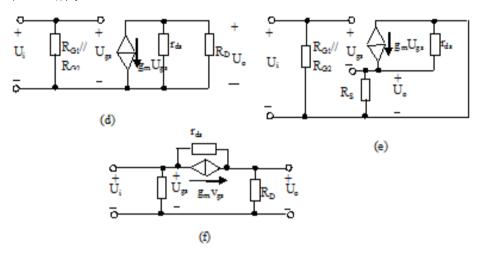


$$R_i = R_{G1} + R_2 + \frac{g_m R_{G1} (R_1 + R_2)}{1 + g_m R_1} \approx 3.08 M\Omega$$

- 2.4.8 FET 放大电路如题图所示。图中器件相同, $U_{\rm DD}$ 和相同符号的电阻相等,各电容对交流信号可视为短路。
 - (1) 说明各电路的电路组态;
 - (2) 画出个电路的低频小信号等效电路;
 - (3) 写出三个电路中,最小增益 A_u 、最小 R_i 和最小 R_o 的表达式。



- **解:**(1)图(a)是共源放大电路,图(b)是共漏放大电路,图(c)是共栅放大电路。
 - (2) 与图 (a)、(b) 和 (c) 相对应的小信号等效电路如答图 (d)、(e) 和 (f) 所示



(3) 由题图 2.4.8 可见,各电路的静态工作点相同,所以 g_m 值相等。电压放大倍数最小的是共漏放大器,由答图 (e) 可求得

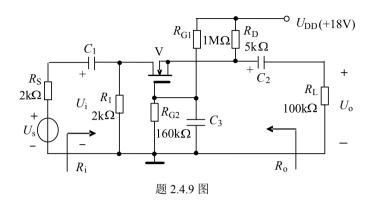
$$A_u = g_m \frac{R_S //r_{ds}}{1 + g_m \cdot R_D //r_{ds}}$$
。如考虑 r_{ds} ,且满足 $r_{ds} >> \frac{1}{g_m}$,

则
$$R_i = R_s / \left[\frac{1}{g_m} (1 + \frac{R_D}{r_{ds}}) \right]$$
。

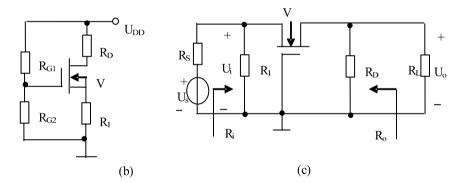
输入电阻最小的是共栅放大器。如不考虑 r_{ds} ,由答图(f)得 $R_i=R_S//\frac{1}{g_m}$;

的是共漏放大器,由答图(e)可得 $R_o = r_{ds} / \frac{1}{g_m} / / R_s$ 。

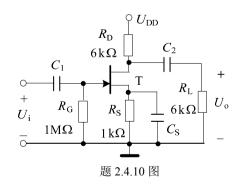
2.4.9 画出题图所示电路的直流通路和交流通路。



解:



- 2.4.10 FET 放大电路如题图所示。已知 $|U_{\rm GS(off)}|$ =2 $\rm V$, $I_{\rm DSS}$ =2 $\rm mA$, $g_{\rm m}$ =1.2 $\rm mS$, $|1/\lambda|$ =80 $\rm V$ 。
- (1) 试求该电路的静态漏极电流 I_{DQ} 和 栅源电压 U_{GSO} ;
- (2) 为保证 JFET 工作在饱和区,试问电源电压 U_{DD} 应取何值?
- (3) 画出低频小信号等效电路;
- (4) 试求器件的 r_{ds} 值, A_{u} 、 R_{i} 和 R_{o} 。



解: (1) T为N沟JFET, 所以 $V_{GS(off)}$ =-2V, 故可列出

$$\begin{cases} I_{DQ} = I_{DSS} (1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}})^2 \\ U_{GSQ} = -I_{DQ} \cdot R_S \end{cases}$$

联立解上述方程,可得

$$\begin{cases} I_{DQ} = 0.764 mA \\ I_{DQ} = 5.23 mA (不合题意而舍去) \end{cases}$$

(2) 为保证 JFET 工作在恒流区,则应满足

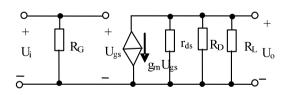
$$U_{GDQ} > U_{GS(off)}$$

因为
$$U_{DSQ}=U_{DD}-I_{DQ}(R_S+R_D)>-I_{DQ}R_S-U_{GS(off)}$$
 $U_{DD}-0.764\times7>-0.764+2$

所以
$$U_{DD} > 1.23 + 0.764 \times 7 = 6.6$$
 (V)

如果考虑一定的输出电压动态范围, U_{DD} 可取 10~12V。

(3) 低频小信号等效电路如下图所示。



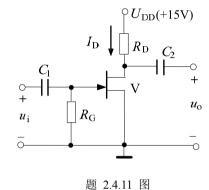
(4)
$$g_{m} = -\frac{2I_{DSS}}{U_{GS(off)}} (1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}) = -\frac{2}{U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS}I_{DQ}}$$
$$= -\frac{2}{-2} \sqrt{2 \times 0.764} = 1.236(mS)$$

$$r_{ds} = \frac{80}{0.764} \approx 105 k\Omega$$

$$A_u = -g_m \cdot R_D || R_L || r_{ds} = -1.236 \times 6 || 6 || 105 \approx -3.7$$

 $R_i = R_G = 1M\Omega$
 $R_o = R_D /| r_{ds} = 6 /| 105 k\Omega \approx 6 k\Omega$

2.4.11 电路如题图所示。设 FET 参数为: $I_{\rm DSS}$ =3 mA, $U_{\rm GS(off)}$ =-3 V。当 $R_{\rm D}$ 分别取下列两个数值时,判断场效应管是处在恒流区还是可变电阻区,并求恒流区中的电流 $I_{\rm D}$ 。 (1) $R_{\rm D}$ =3.9k Ω ; (2) $R_{\rm D}$ =10k Ω 。



解:

因为 u_{GS} =0V,所以 I_{DO} = I_{DSS} =3mA

 $(1)U_{DS}=U_{DD}-I_{D}R_{D}=3.3V$

则
$$U_{\text{GD}}$$
=-3.3V< $U_{\text{GS off}}$ =-3V
或 U_{DS} =3.3V> U_{GS} - U_{GSoff}
恒流区

 $(2)U_{DS}=U_{DD}-I_{D}R_{D}=-15V$

则 U_{GD} =15V,可变电阻区



$$R_{\rm g2}$$
 $R_{\rm d}$ $C_{\rm 2}$ $C_{\rm 2}$ $C_{\rm 2}$ $C_{\rm 1}$ $C_{\rm 2}$ $C_{\rm 2}$ $C_{\rm 1}$ $C_{\rm 2}$ $C_{\rm 2}$ $C_{\rm 2}$ $C_{\rm 3}$ $C_{\rm 8}$ $C_$

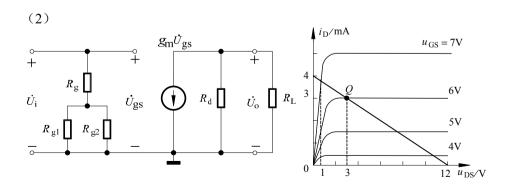
 $\begin{cases} I_{\rm DQ} = I_{\rm DO} \bigg(\frac{U_{\rm GSQ}}{U_{\rm GS(th)}} - 1 \bigg)^2 \\ U_{\rm GSQ} = U_{\rm G} - I_{\rm DQ} R_{\rm S} \\ U_{\rm G} = V_{\rm DD} \frac{R_{\rm g1}}{R_{\rm g1} + R_{\rm g2}} \end{cases}$

解得: $I_{\rm DQ} \approx 0.74 \, {\rm mA}$, $U_{\rm DSQ} \approx V_{\rm DD} - I_{\rm DQ} (R_{\rm d} + R_{\rm s}) \approx 5.3 \, {\rm V}$

2.4.12 题图所示电路中场效应管转移特性可表达为: $I_{\mathrm{D}} = I_{\mathrm{DO}} \left(\frac{U_{\mathrm{GS}}}{U_{\mathrm{GS(th)}}} - 1 \right)^2$,

其中 I_{DO} =5mA, $U_{GS(th)}$ =2V,各电容的容抗可忽略不计。

- (1) 求静态工作点 I_{DO} 、 U_{DSO} ;
- (2) 画出微变等效电路图;
- (3) 求电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 。



 $u_{\rm GS} = 7{
m V}$

6V

5V

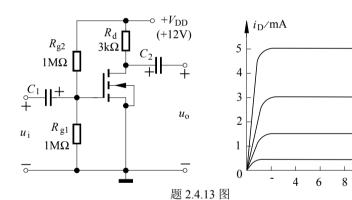
10 12 u_{DS}/V

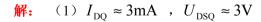
姓名

$$\dot{A}_u = -g_{\rm m}(R_{\rm d}//R_{\rm L}) \approx -13$$

$$R_{i} = R_{g} + (R_{g1} + R_{g2}) \approx 1.67 \text{M}\Omega$$
 $R_{o} = R_{d} = 10 \text{k}\Omega$

- 2.4.13 放大电路及场效应管的输出特性如题图所示, 电容对交流信号可视为 短路。
- (1)在输出特性曲线上画出直流和交流负载线,确定静态工作点 I_{DO} 、 U_{DSO} ;
- (2) 输出电压的正向最大幅度 $U_{\text{om-}}$ 和负向最大幅度 $U_{\text{om-}}$ 各等于多少?
- (3) 为了使 $U_{om_+}=U_{om_-}$,应增大 R_{g1} 还是 R_{g2} ?





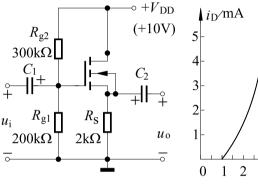
(2)
$$U_{\text{om+}} \approx 9\text{V}$$
, $U_{\text{om-}} \approx 2\text{V}$

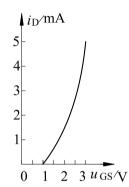
(3) 应增大 R₀,

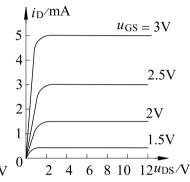
- 2.4.14 电压跟随电路和场效应管的输出特性曲线及恒流区的转移特性曲线如 题图所示。
- (1) 图解确定静态工作点 I_{DQ} 、 U_{DSO} ;

班级

- (2) 输出电压正、负向最大跟踪范围各为多少伏?
- (3) 为了使正、负向最大跟踪范围尽量相等,应增大 R_{g1} 还是 R_{g2} ?







题 2.4.14 图

- \mathbf{M} : (1) I_{DO} ≈1.1mA , U_{DSO} ≈ 8V
 - (2) 正向跟踪电压范围约为 6.8V, 负向跟踪电压范围约为 2V
 - (3) 应增大 R₀₁

第3章 双极型晶体管及其放大电路

3.1 知识要点

- 一、双极型晶体管的工作原理、伏安特性曲线
- 二、双极型晶体管放大器的工作原理及其性能特点
- 三、双极型晶体管放大器的静态分析与设计
- 四、双极型晶体管放大器的动态分析与设计
- 五、多级晶体管放大电路的分析与设计

3.2 重点与难点

- 一、晶体管放大状态下的电流分配关系
- 二、晶体管三种模式(放大、饱和和截止)的工作条件和性能特点
- 三、晶体管的直流模型和混合π型交流小信号模型
- 四、晶体管基本放大电路的组成、工作原理及性能特点
- 五、晶体管放大电路静态工作点的概念和偏置电路参数的估算
- 六、晶体管放大电路图解分析方法、交流小信号等效电路分析方法以及放大电路动态参数(\dot{A}_u 、 R_i 、 R_o)的分析
- 七、非线性失真的概念以及晶体管放大电路的动态范围
- 八、多级放大电路的直流静态分析和交流动态分析

3.3 思考题

3.3.1 晶体管工作在放大区时,发射结为_____,集电结为_____,此时流过发射结的主要是_____,流过集电结的主要是_____。

A、正向偏置,

B、反向偏置,

C、零偏置

D、扩散电流,

E、漂移电流

3.3.2 某直接耦合放大电路中,当在输入电压为 0.1V 时,输出电压为 8V; 当输入电压为 0.2V 时,输出电压为 4V (均指直流电压),则该放大电路的 电压放大倍数为 。

A, 80,

B, 40,

 $C_{5} - 40$

D₂ 20

3.3.3 有两个放大倍数相同但输入和输出电阻不同的放大电路 A 和 B,对同一个具有内阻的信号源电压进行放大。在负载开路的条件下测得电路 A 的输出电压比 B 的小,这说明电路 A 的____ (A、输入电阻,B、输出电阻)和输出电阻比电路 B 的____ (C、大,D、小)。

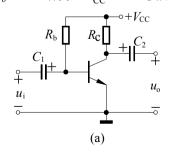
3.3.4 放大电路中的静态分量是指_____, 动态分量是指_____。

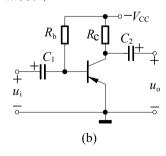
A、直流电源所提供的电压、电流

B、电压、电流中不随输入信号变化的部分

C、电压、电流中随输入信号变化的部分

D、正弦交流输入、输出信号





3.3.6 某双极型晶体管放大电路中,测得 u_{BE} =(680+20sin ωt)mV,

 $i_{\rm B}$ =(50+20sin ωt) μ A ,则该放大电路中晶体管的 $r_{\rm be}$ ≈ _____该晶体管是 _____。

 A_s 13.6 k Ω ,

 $B_{\lambda} 34 k\Omega$,

 $C_{\lambda} = 0.4 \,\mathrm{k}\Omega$

 $D_{s} 1 k\Omega_{s}$

 $E_{\lambda} = 10 \,\mathrm{k}\Omega$,

F、硅管,

G、锗管

3.3.7 根据不同要求,分别从题图所示电路中选择合适的电路形式。

(1) 电压放大倍数 $|\dot{A}_{u}| > 10$,并具有较大的电流放大能力;

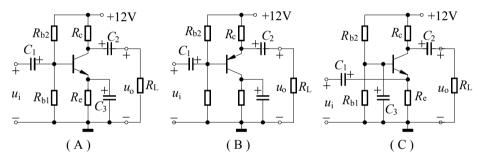
(2) 电压放大倍数|A_u|>10,并且输出电压与输入电压同相;

(3) 电压放大倍数 $|\dot{A}_{u}| \approx 1$,输入电阻 $R > 100 \text{k}\Omega$;

(4) 电压放大倍数 $|A_u|>10$,高频响应特性好;

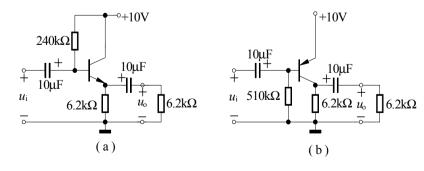
(5) _____电压放大倍数 $|\dot{A}_{u}| > 10$,输出与输入反相;

(6) _____电压放大倍数 $|\dot{A}_u|\approx 1$,输出电阻小。



3.3.8 题图所示电路中晶体管的 β 均为 50,输入电压有效值均为 10 mV 的 1 kHz 正弦信号,则输出电压有效值,图(a)约为_____,图(b)约为_____。

A, 10V, B, 1V, C, 100mV, D, 10mV



3.3.9 根据下面选项,完成正确选择:

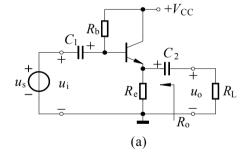
A、共射组态, B、共集组态, C、共基组态

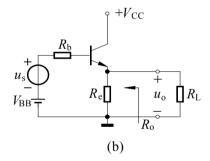
在共射、共集、共基三种基本放大电路组态中,输入电阻最大的是_____,输入电阻最小的是_____,输出电阻最小的是_____,电压放大倍数最小的是_____,电流放大能力最小的是_____。若希望功率放大倍数大,应选用_____;若希望输出电压与输入电压反向,应选用_____;若希望高频响应性能好,应选用_____;若希望输入电阻大,应选用_____;若希望负载电阻变化时,输出电压基本不变,应选用_____;若希望电压放大倍数绝对值大,可选用_____;希望带负载能力强,应选用_____;若希望从信号源索取电流小,应选用_____;若希望即能放大电压,又能放大电流,应选用_____。

3.3.10 判断题图所示电路中,输出电阻 R_0 的表达式哪个是正确的? ()

A,
$$R_0 = R_e$$
, B, $R_0 = R_e // R_L$, C, $R_0 = R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta}$,

D,
$$R_o = R_e / \frac{r_{be} + R_b}{1 + \beta}$$
, E, $R_o = R_e / \frac{r_{be} / R_b}{1 + \beta}$



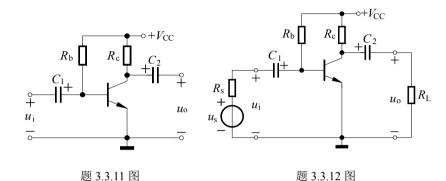


3.3.11 电路如题图所示,晶体管的 β =60。若要求电路有尽可能大的线性工作范围,则当 R_c =1kΩ时, R_b 应选_____(A、10 kΩ,B、60 kΩ,C、120 kΩ,D、1MΩ);若用直流电压表测出 $U_{CE} \sim V_{CC}$,可能是因为_____;若用直流电压表测出 $U_{CE} \sim 0$,可能是因为_____;若用直流电压表测出 $U_{CE} \sim 0$,可能是因为_____;在,B、 R_c 开路,C、 R_b 开路,D、 β 过大)。

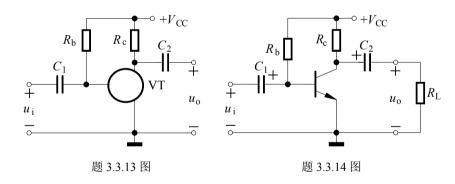
3.3.12 在题图所示放大电路中,当逐渐增大正弦输入电压幅度时,发现输出电压出现顶部削平失真。试分析:若保持输入不变,当增大 $R_{\rm I}$ 时,将会出

现什么现象? ()

- A、顶部失真加重, B、顶部失真减轻或消失
- C、顶部失真基本不变,而底部也可能产生削平失真



3.3.13 题图所示电路加有正弦输入电压。当 R_b 逐渐减小时,输出电压顶部开始出现削平失真,说明该放大电路使用的是____(A、NPN,B、PNP)型晶体管,此时若保持 R_b 不变,则 (A、增大,B、减小) R_c 可使失真减小。



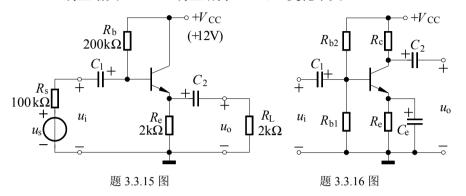
3.3.14 在线性放大条件下,调整题图所示电路有关参数。根据下面选项,完成正确选择:

A、增大, B、减小, C、基本不变 当 $R_{\rm c}$ 增大时,静态电流 $I_{\rm CQ}$ 将____,电压放大倍数 $\left|\dot{A}_{u}\right|$ 将____,输入电阻 $R_{\rm i}$ 将____,输出电阻 $R_{\rm o}$ 将____;当 $V_{\rm CC}$ 增大时,静态电流 $I_{\rm CQ}$ 将____,电压放大倍数 $\left|\dot{A}_{u}\right|$ 将____,输入电阻 $R_{\rm i}$ 将____,输出电阻 $R_{\rm o}$ 将____。

3.3.15 射极输出电路如题图所示。若保持 U_i 不变,将 R_L 减小一半,这时 U_o 将 : 若保持U。不变,将R,减小一半,这时U。将 。

A、明显增大,

- B、明显.减小,
- C、变化不大



3.3.16 题图所示电路中,当用直流电压表测出 $U_{CF} \approx V_{CC}$, 可能是因为 ; 当测出 U_{CF} ≈0,可能是因为。

A、R_c 开路,

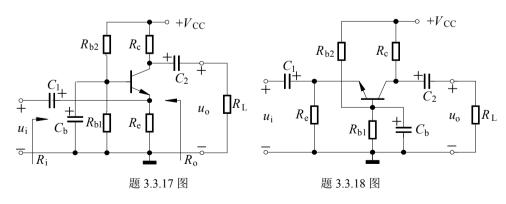
- B、 R_{c} 短路,
- C、 $R_{\rm h1}$ 开路,

- D、 R_{b2} 开路,
- E、 β 过大,
- F、Vcc 过大

3.3.17 题图所示电路中, 当晶体管的 β 从 100 降低到 80 (其它参数不变), 电路的电压放大倍数将 ,输入电阻将 ,输出电阻将 。

A、增大,

- B、减小, C、变化不大

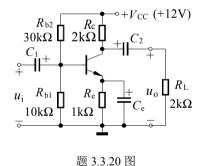


3.3.18 分析题图所示的共基放大电路。当某一参数变化时,集电极静态电流

 $I_{\rm CO}$ 的变化情况。 $R_{\rm bl}$ 增大时, $I_{\rm CO}$ 将 ; $R_{\rm bl}$ 减小时, $I_{\rm CO}$ 将 ; $R_{\rm c}$ 减 小时, I_{CO} 将 ; R_e 增大时, I_{CO} 将 ; 管子 β 增大时, I_{CO} 将 。 B、减小, A、增大, C、变化不大

3.3.19 填空。某放大电路中,在负载开路时,测得输出电压为 5V,在输入电 压不变的情况下接入 $3k\Omega$ 的负载电阻,输出电压下降到 3V,说明该放大电 路的输出电阻为; 当该电路接入一个内阻等于零的信号源电压时, 测得输出电压为 5V, 在信号源内阻增大到 1kΩ, 其它条件不变时, 测得输出 电压为 4V, 说明该放大电路的输入电阻为 ; 当该电路接有 2kΩ负 载电阻时,测得输出电压为3V,在输入电压不变的情况下断开负载电阻,输 出电压上升到 7.5V, 说明该放大电路的输出电阻为

3.3.20 在题图所示图示电路中,晶体管的 β =100, $U_{\rm REO}$ =0.7V, $U_{\rm CES}$ = 0.3V。 当发生表中所列的故障时(同时只发生一种故障),晶体管的 e、b、c 极对地 直流电压 $U_{\rm F}$ 、 $U_{\rm R}$ 、 $U_{\rm C}$ 约等于多少?晶体管处于什么状态(放大、饱和、 截止)?答案填入表内相应的位置。



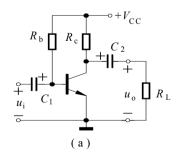
故障原因	$U_{ m E}/{ m V}$	$U_{\rm B}/{ m V}$	U _C /V	状态
Rc短路	2.3	3	12	放大
R _{b2} 开路	0	0	12	截止
e-b 结开路	0	3	12	截止
C _e 短路	0	0.7	0.3	饱和
RL短路	2.3	3	7.4	放大

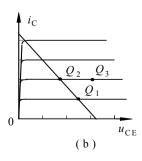
3.3.21 拟用晶体管构成一个多级三极放大电路。要求从信号源索取的信号电 流小、带负载能力强、电压放大倍数大,则输入级应选用 ,中间级应选 用 ,输出级应选用 ; 如果负载变化时要求有较稳定的输出电流,则 输出级宜采用 或 : 如果负载变化时要求有较稳定的输出电压,则输 出级宜采用 ; 如果输入信号源为高内阻电压源,则输入级应采用

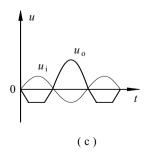
- A、共射放大电路, B、共基放大电路,
- C、共集放大电路

3.3.22 在多级放大电路中,直接耦合与变压器耦合之间主要不同点是 (A、 所放大的信号不同, B、交流通路不同, C、直流通路不同); 因为变压器耦 合放大电路 (A、各级静态工作点 O 相互独立, B、O 点相互影响, C、 各级 A_u 相互影响, $D \times A_u$ 互不影响), 故这类电路 (A、温漂小, B、能 放大直流信号, C、放大倍数稳定), 但是 (A、温漂大, B、不能放大 直流信号, C、放大倍数不稳定); 因为直接耦合放大电路 (A、各级静 态工作点 Q 相互独立,B、Q 点相互影响,C、各级 A_u 互相影响,D、 A_u 互 不影响), 故这类电路 (A、温漂小, B、能放大直流信号, C、放大倍 数稳定),但是 (A、低频特性不好,B、放大倍数不稳定,C、必须进 行电平配合); 另外, 阻容耦合放大电路 (A、各级静态工作点 Q 相互独 立, B、O 点相互影响, C、各级 A_{i} , 相互影响, D、各级 A_{i} , 相互不影响), 故 这类电路 (A、温漂小,B、能放大直流信号,C、放大倍数稳定),但 是 (A、温漂大,B、不能放大直流信号,C、放大倍数不稳定)。 3.3.23 当在一个同相放大电路中当输入一个正弦信号时, 若输出电压顶部削 平了,说明该放大电路出现了 ;如输出电压的相位与输入不同相,说明 该放大电路出现了 。

A、饱和或截止失真, B、交越失真, C、频率失真 3.3.24 放大电路和晶体管输出特性分别如题图 (a)、(b) 所示。若要静态工作点由 Q_1 移到 Q_2 ,应使_____; 若要静态工作点由 Q_2 移到 Q_3 ,应使_____(A、 $R_b \uparrow R_c \downarrow$,B、 $R_b \uparrow R_c \uparrow$,C、 $R_b \downarrow R_c \uparrow$,D、 $R_b \downarrow R_c \downarrow$);若其输入输出电压如图 (c) 所示,则表明该电路产生了_____,而为减小这种失真,可采取的措施为_____(A、截止 $R_c \downarrow$,B、饱和 $R_c \uparrow$,C、截止 $R_b \downarrow$,D、饱和 $R_b \uparrow$)。





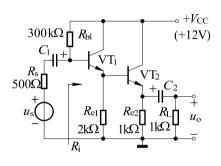


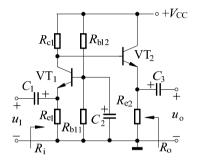
3.3.25 多级放大电路如题图所示,设晶体管 VT_1 、 VT_2 的特性相同。若出现 $R_{\rm el}$ 支路断路故障,则与 $R_{\rm el}$ 支路正常接入相比,放大电路的参数 $I_{\rm CQ1}$ 、 $r_{\rm bel}$ $r_{\rm bel}$ 、 $r_{\rm bel}$ $r_{\rm bel}$

A、增大, B、减小, C、不变

3.3.26 多级放大电路如题图所示。若不慎将电容 C_2 开路,则与电容 C_2 正常接入相比,输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 、电压放大倍数 A_i 。

A、增大, B、减小, C、不变





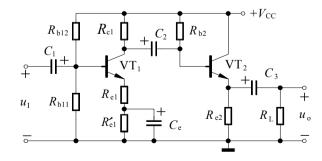
题 3.3.25 图

题 3.3.26 图

3.3.27 阻容耦合放大电路如题图所示。设输入一正弦信号时,输出电压波形出现了顶部失真。若输出电压波形出现了顶部失真的原因是第一级静态工作点不合适,则第一级产生了____,而为消除该失真,可调整 R_{b12} ,使其阻值_____,若输出电压波形出现了顶部失真的原因是第二级静态工作点不合适,则第二级产生了____,而为消除该失真,可调整 R_{b2} ,使其阻值____。

A、饱和失真,

- B、截止失真,
- C、增加,
- D、减小



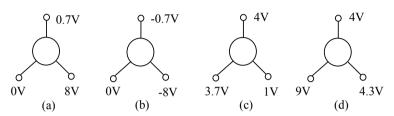
学院		班级	半 旦	
	性名			- 24 -
				- 44 -

答案:			
3.3.1	AB DE	3.3.2	C
3.3.3	A D	3.3.4	B C
3.3.5	B B	3.3.6	D F
3.3.7	A C D C C B	3.3.8	D B
3.3.9	B C B B C; A A C B F	B A B B A	
3.3.10	C D	3.3.11	C C D
3.3.12	C	3.3.13	B B
3.3.14	C A C A; $A A B C$	3.3.15	C B
3.3.16	D AC	3.3.17	C AC
3.318	A A C B C	3.3.19	$2~k\Omega 4~k\Omega 3k\Omega$
3.3.20	见表	3.3.21	C A C; A B; C; C
3.3.22	C A A B B B C A A B	3	
3.3.23	A C	3.3.24	$R_{\rm b}\downarrow R_{\rm c}\uparrow;$ 饱和 $ R_{\rm b}\uparrow$
3.3.25	B A B A	3.3.26	A C B
3.3.27	B D A C		

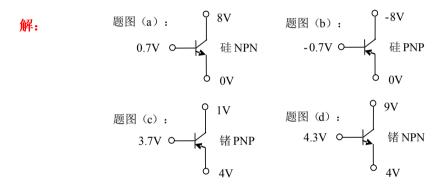
姓名

3.4 习题

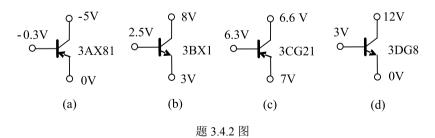
3.4.1 已知晶体管工作在线性放大区,并测得个电极对地电位如题图所示。试画出各晶体管的电路符号,确定每管的b、e、c 极,并说明是锗管还是硅管。



题 3.4.1 图



3.4.2 已测得晶体管电极管各电极对地电位如题图所示,试判别各晶体管的工作状态(放大、饱和、截止或损坏)。



解: 题图 (a) 3AX 为 PNP 锗管, $U_{BE} = -0.3 \, \text{V}$ (正偏), $U_{CE} = -4.7 \, \text{V}$ (反偏),放大状态

题图 (b): e结反偏, c结反偏, 截止状态

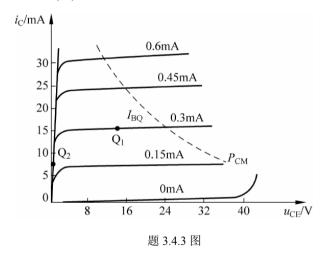
题图 (c): e结正偏, c结正偏, 饱和状态

题图 (d): e结开路,晶体管损坏

班级

3.4.3 某晶体管的共射输出特性曲线如题图所示。

- (1) 求 I_{BO} =0.3mA 时, O_1 、 O_2 点的 β 值;
- (2) 确定该管的 $U_{(BR)CEO}$ 和 P_{CM} 。

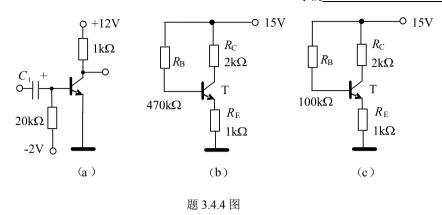


解: (1) Q_1 点: $\beta \approx 50$, Q_2 点: $\beta \approx 0$.

(2) $U_{\text{(BR)CEO}} \approx 40V$, $P_{\text{CM}} \approx 330 \text{mW}$.

3.4.4 硅晶体管电路如题图所示。设晶体管的 $U_{\mathrm{BE(on)}}$ =0.7 V, β =100 ,判别电路的工作状态。

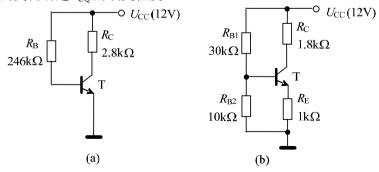
解: 在题图(a)中,由于 U_{BE} < 0,因而管子处于截止状态 $U_C = U_{CC} = 12V_\circ$ $I_{BQ} = \frac{15 - 0.7}{R_B + (1 + \beta)R_E} = 25\mu A, \quad I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.5mA$



题图 (b): $I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.5 mA$ $U_{CEQ} = 15 - 2.5 \times 3 = 7.5 (V)$, 表明晶体管处于放大状态

题图 (c): I_{BQ} =71 μ A, I_{CQ} =7.1 mA U_{CEQ} =15-7.1(2+1)=-6.3 (V) 不可能,表明晶体管处于饱和状态。

3.4.5 题图 (a)、(b) 所示分别为固定偏置和分压式电流负反馈偏置放大电路。两个电路中的晶体管相同, $U_{\rm BE(on)}$ =0.6V。在 20° C 时晶体管的 β =50, 55° C 时, β =70。试分别求两种电路在 20° C 时的静态工作点,以及温度升高到 55° C 时由于 β 的变化引起 $I_{\rm CO}$ 的改变程度。



题 3.4.5 图

解: 题图 (a) 为固定偏流电路。

(1) 20℃时

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE(on)}}{R_B} = \frac{12 - 0.6}{246} = 0.046mA$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.046 = 2.32mA$$

$$U_{CEO} = U_{CC} - I_{CO}R_C = 12 - 2.32 \times 2.8 = 5.5 \text{ (V)}$$

(2) 55℃时

$$\beta = 50 + 50 \times 1\% \times (55 - 20) = 67.5$$
 $I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 67.5 \times 0.046 = 3.105 mA$
 $U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_C = 12 \text{V} - 3.105 \times 2.8 \text{V} = 3.306 \text{V}$

$$I_{cQ}$$
的变化为 $\frac{\Delta I_{cQ}}{I_{cQ}} = \frac{3.105 - 2.32}{2.32} = 33.8\%$

图(b)为分压式电流负反馈偏置电路。

(1) 20℃时

$$U_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{10}{30 + 10} \times 12 = 3(V)$$

$$R_B = R_{B1} / / R_{B2} = 30 / / 10 = 7.5 (k\Omega)$$

$$I_{CQ} = \frac{U_{BB} - U_{BE(on)}}{R_B / \beta + R_E} = \frac{3 - 0.6}{7.5 / 50 + 1} = 2.09 (mA)$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 12 - 2.09(1.8 + 1) = 6.15(V)$$

(2) 55℃时

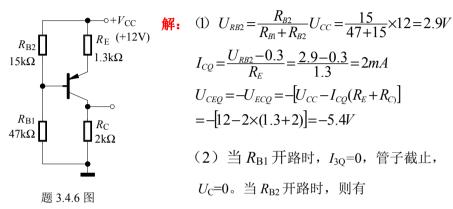
$$I_{CQ} = \frac{U_{BB} - U_{BE(on)}}{R_B / \beta + R_E} = \frac{3 - 0.6}{7.5 / 67.5 + 1} = 2.16 mA$$

$$U_{CEO} = U_{CC} - I_{CO} (R_C + R_E) = 12 - 2.16 (18 + 1) = 5.95 V$$

$$I_{co}$$
的变化为 $\frac{\Delta I_{co}}{I_{co}} = \frac{2.16 - 2.09}{2.09} \approx 3.3(\%)$

3.4.6 晶体管电路如题图所示。已知 β =100, U_{BE} =-0.3V。

- (1) 估算直流工作点 I_{CO} , U_{CEO} ;
- (2) 若偏置电阻 $R_{\rm B1}$ 、 $R_{\rm B2}$ 分别开路,试分别估算集电极电位 $U_{\rm C}$ 值,并说明各自的工作状态;
- (3) 若 $R_{\rm B2}$ 开路时要求 $I_{\rm CO}$ =2mA, 试确定 $R_{\rm B1}$ 应取多大值。



$$I_B = \frac{U_{CC} - 0.3}{R_{BI} + (1 + \beta)R_E} = \frac{12 - 0.3}{47 + 101 \times 1.3} = 0.066 mA$$

$$I_{B(sat)} = \frac{U_{CC} + U_{CE(sat)}}{(R_E + R_C)\beta} = \frac{12 - 0.3}{(1.3 + 2) \times 100} = 0.035 mA$$

因为 $I_B > I_{B(sat)}$,所以晶体管处于饱和状态。此时

$$U_C \approx \frac{U_{CC} + U_{CB(sat)}}{R_C + R_E} R_C = \frac{12 - 0.3}{2 + 1.3} \times 2 = 7.1V$$

(3)当 R 册 野时,由于

$$I_{CQ} = \beta \frac{U_{CC} + U_{BE}}{R_{Pl} + (1 + \beta)R_{E}} = 100 \times \frac{12 - 0.3}{R_{Pl} + 101 \times 1.3} = 2mA$$

由此解得 $R_{R1} = 454K\Omega$

3.4.7 设计一个分压式电流负反馈偏置放大电路。要求温度在-55~125 ℃ 范围内变化时, $1mA \le I_C \le 1.15mA$ 和 $5V \le U_{CE} \le 6V$, $R_C = 1.5k\Omega$, $U_{CC} = 12V$ 。

BJT 参数是: T=-55°C 时, $\beta=60$, $U_{\rm BE}=0.88{\rm V}$;T=125°C 时, $\beta=150$, $U_{\rm RE}=0.48{\rm V}$ 。

解: (1) R_E 的估算。根据题意,当 T = -55°C 时,电流 I_C 应是最低值 1mA, U_{CE} 应是最大值,因为 R_C 已给出,故可写出:

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E), 6V = 12V - 1mA \times (1.5k\Omega + R_E)$$

解得 $R_{\rm E}$ =4.5k Ω

如果 R_C 未知,可以根据 U_{CC} 的数值假设 $U_E = I_{CO}R_E$ 某一数值,

本题设 $I_{CO}R_E=U_{CC}/3=4V$,则 $R_E=4/1=4(k\Omega)$ 。

(2)
$$R_B$$
的估算。因为 $I_{CQ} = \frac{U_{BB} - U_{BE(on)}}{R_B/\beta + R_E}$

所以将T = -55°C和T = 125°C时各参数值代入可得:

$$1mA = \frac{U_{BB} - 0.88\text{V}}{\text{R}_{B}/60 + 4.5\text{k}\Omega}$$
 ($T = -55^{\circ}C$ 时)

1.15
$$mA = \frac{U_{BB} - 0.48V}{R_B/150 + 4.5k\Omega}$$
 ($T = 125^{\circ}C$ 时)

联立求解上述两式,可得: $U_{BB} \approx 5.9 \text{V}, R_{\text{B}} = 32 k \Omega$ 如果不利用上述关系式运算,也可以利用经验公式,比如选取

$$R_{\rm B} = (5 \sim 10) R_{\rm E}$$
 去求解。例如设 $R_{\rm B} = 10 R_{\rm E} = 45 \mathrm{k}\Omega$,则

$$U_{\rm BB} = \frac{45}{60} + 0.88 + 1 \times 4.5 \approx 6.13 (\text{V})$$
,当 T=125°C时,

 $I_{\text{CQ}} = \frac{6.13 - 0.48}{45/150 + 4.5} = 1.177 (\text{mA})$,此时 $I_{\text{CQ}} > 1.15 \text{mA}$ 的技术要求,因此还需要重新选取 R_{B} 值,直至满足要求为止。

姓名

(3) R_{B1} 和 R_{B2} 的计算。

$$R_{B1} = \frac{U_{CC}}{U_{RR}} R_B = \frac{12}{5.9} \times 32k\Omega = 65k\Omega$$

$$R_{B2} = \frac{R_{B1}}{R_{R1} - R_R} R_B = \frac{65}{65 - 32} \times 32k\Omega = 63k\Omega$$

(4) 核算 T=125°C 时的 U_{CE} 值。

$$U_{CE}=U_{CC}-I_{CO}(R_C+R_E)=12\text{V}-1.15(1.5+4.5)\text{V}=5.1\text{V}$$

上述结果在允许的范围内,表明设计有效。

- 3.4.8 电路如题图所示。已知晶体管的 β =50, U_{BE} =-0.2V,试求:
- (1) $U_{BO}=0$ 时, R_B 的值;
- (2) $R_{\rm E}$ 短路时 $I_{\rm CQ}$ 、 $U_{\rm CEQ}$ 的值;
- (3) $R_{\rm E}$ 开路时 $I_{\rm CO}$ 、 $U_{\rm CEO}$ 的值。

解:

$$0 I_E = \frac{U_{EE} + U_{BE}}{R_E} = \frac{12 - 0.2}{12} = 1mA$$

$$U_{CC} = I_E R_C + \frac{I_E}{1 + \beta} R_B$$

$$R_B = \frac{U_{CC} - I_E R_C}{I_E} (1 + \beta) = 561k\Omega$$

$$(2)I_{BQ} = \frac{U_{EE} - U_{CC} + U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_C} = 0.039mA$$

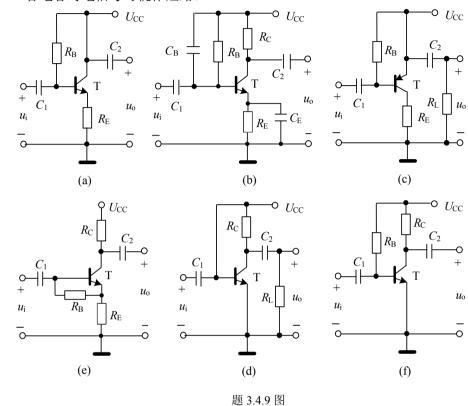
$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.039 = 1.95mA$$

$$U_{CEO} = -U_{ECO} = -(12 + 12 - 1.95 \times 1) = 22.05V$$

$$(3)R_B$$
 开路时, $U_B = 0$,有 $I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{EE} - 0.2}{R_E} = \frac{12 - 0.2}{12} \approx 1 mA$

$$U_{CEQ} = -(U_{CC} - I_{CQ}R_C + 0.2) = -11.2V$$

3.4.9 试判别题图所示各电路能否对正弦信号进行电压放大?为什么?假设各电容对电信号可视作短路。



解: 图 (a): 因为输出信号被短路了,所以不能进行电压放大。

图 (b): 因为输入信号被 C_B 短路了,所以不能进行电压放大。

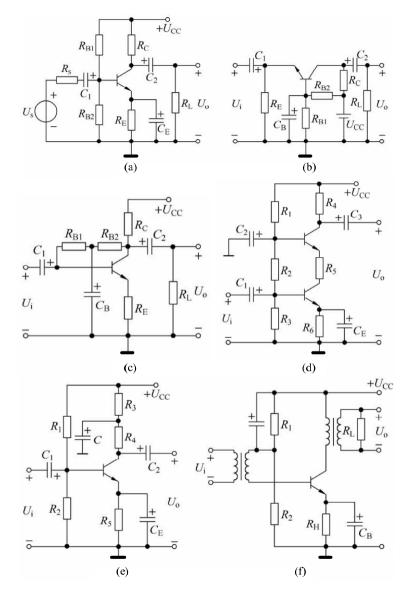
图(c)中管子截止,电路不能正常放大。应将 R_B 改接在 b 极与地之间。

图 (d): 晶体管基极偏置为零,不能进行放大。

图(e)中会使 e 结烧坏且输入信号短路,因而电路不能正常放大,应在 b 极到 U_{cc} 之间接偏置电阻 R_{B} 。

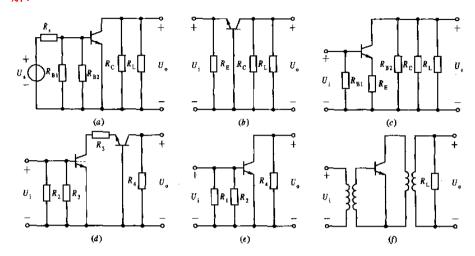
图(f)中电路可以正常放大。

3.4.10 试画出题图所示电路的直流通路和交流通路。

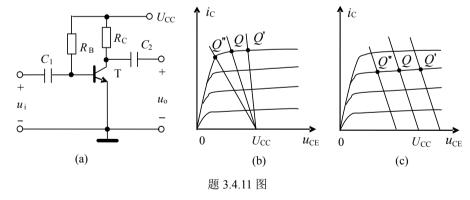


题 3.4.10 图

解:



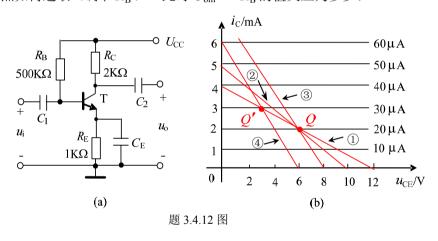
3.4.11 放大电路如题图(a)所示,正常工作时静态工作点为 Q。(1)如工作点变为题图(b)中的 Q'和 Q'',试分析是由电路中哪一元件参数改变而引起的?(2)如果工作点变为题图(c)中 Q'和 Q''的,又是电路中哪一元件参数改变而引起的?



解:

(1) U_{cc} 不变, R_B 不变, I_{BQ} 不变,而 R_C 变化,工作点的变化可见图 (b)。 若原工作点为 Q, R_C 减小时,移至 Q' , R_C 增加时,移至 Q'' 。

- (2) R_C 不变,负载线斜率不变,和同时变化,工作点的变化如图(c)所示。如原工作点为 Q, U_{CC} 增加, R_B 也增加,工作点可移至 Q',反之, U_{CC} 下降, R_B 也下降,工作点可移至 Q''。
- 3.4.12 放大电路及晶体管三极管的输出特性如题图(a)和(b)所示。设 $U_{\rm BE(on)}=0$,各电容对信号视作短路。
- (1) 晶体管的 β 和 r_{cc} 各为多少?
- (2) 在题图(b)上作直流负载线和交流负载线;
- (3) 如题图 (a) 电路中加接 $R_L = 2 k\Omega$ 的负载, 重复 (2);
- (4) 当 $R'_L=R_C//R_L=2k\Omega//2k\Omega$ 时,为得到最大的输出电压振幅值 U_{om} ,工作点如何选取(调节 R_B)?此时 U_{om} =? R_B 的值又应为多少?



解: (1) 输出特性理想化, $U_A = \infty$, $r_{ce} = \infty$, $\beta = 100$ 。

(2) 先求工作点
$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BE(on)}}{R_B + (1+\beta)R_E} = \frac{12}{500 + 100} = 20$$
 (μ A),

直流负载线 $U_{CE}=U_{CC}-I_C(R_C+R_E)=12-3I_C$,取两点 $(U_{CE}=0,I_C=4mA;I_C=0,U_{CE}=12V)$,可得直流负载线如图(b)中①线,

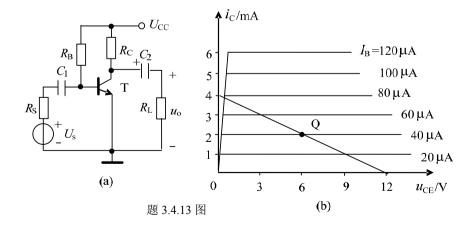
工作点 Q(U_{CEQ} =6 V, I_{CQ} =2 mA),交流负载线的斜率为-1/ R_{C} =-1/2,可得图

- (b) 中②线(交流负载线)。
- (3) 此时直流负载线不变,仍如图 2.14 (b) 中①线,而交流负载线的斜率 为 $-\frac{1}{R_c//R_t} = -\frac{1}{1}$,如题图 (b) 中③线。
- (4) 为得最大 U_{om} ,工作点应选在交流负载之中点。将图 2.18 (b) 中③线 (R'_L ==1k Ω) 平移使之与直流负载线①线的交点是此交流负载线之中点,即 Q'点(U'_{CEO} =3 V, I'_{CO} =3 mA)。此时, U_{om} =3 V。

调节
$$R_B$$
 使 I'_{BQ} =30 μ A,则 30×10⁻⁶= $\frac{U_{CC}-U_{BE(on)}}{R_B+(1+\beta)R_E}\approx \frac{12}{R_B+101\times10^3}$,

解得 $R_{\scriptscriptstyle B} = 300\,\mathrm{k}\,\Omega$ 。

- 3.4.13 在题图(a)放大电路中, $U_{\rm CC}$ =12 V, $R_{\rm B}$ =300 k Ω , $R_{\rm C}$ =3 k Ω 。晶体管的输出特性曲线如题图(b)所示,实线为直流负载线,Q点为 $I_{\rm CQ}$ =2 mA, $U_{\rm CEO}$ =6 V。
- (1) 如电路中 $R_r = 3k\Omega$,试画出该电路的交流负载线;
- (2) 如基极正弦波电流 i_b 的峰值为 $40\,\mu\text{A}$ (即在 $0\sim80\,\mu\text{A}$ 范围内变动),试画出相应的 i_C 与 u_o 的变化波形,并标出该放大电路中不失真的最大输出电压的峰峰值 U_{OPP} 。



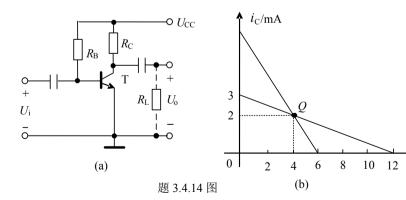
解:

解: (1) 在图 2.19 (b) 上作斜率为 $-1/R'_L = -1/(3//3)k\Omega = -1/1.5k\Omega$ 的辅助线 AB,再过 Q 点作平行于 AB 的直线 MN,MN 即为交流负载线。或者,设 P 点是 Q 点在横轴上的垂足,QP 相应于 $I_{CQ} = 2$ mA 的值,因此,在横轴上截 PM= $I_{CQ}R'_L = 3$ V,连接 MQ 并延长至纵轴 N 的直线就是斜率为 $-1/R'_L$ 的交流负载线。

(2) 在图 2.19 (b) 上以 Q 点为中心,以 $i_b = 40\mu$ A 那根线起始,画幅度为 40μ 4 的正弦波,即从 40μ 4 变到 80μ 4,再回到 40μ 4;接着变到 0μ 4,再返回到 40μ 4,变成一个周期,如图所示。随着 i_b 的变化,输出回路的工作点将沿着交流负载线(而不是沿着直流负载线)上、下移动,即 Q 点在 Q_1 至 Q_2 范围内变化,由此即可画出相应的 u_{ce} (即 u_o)和 i_c 的正弦波型。图 (b) 中有斜线的电压和电流波形对应 u_i 的正半周。不难看出, u_o 与 u_i (即 u_b)的相位是相反的(相位差 180^0)。

从图看出波形无明显失真,所以 $U_{o(P-P)}$ =9-3=6 (V)

- 3.4.14 放大电路如题图 (a) 所示,已知 β =50, $U_{\rm BE}$ =0.7V, $U_{\rm CES}$ =0, $R_{\rm C}$ =2k Ω , $R_{\rm L}$ =20k Ω , $U_{\rm CC}$ =12V。
- (1) 若要求放大电路由最大的输出动态范围,问 R_B 应调到多大?
- (2) 若已知该电路的交、直流负载线如题图 (b) 所示,试求: U_{CC} =? R_{C} =? U_{CEO} =? I_{CO} =? R_{L} =? 输出动态范围 U_{OPP} =?

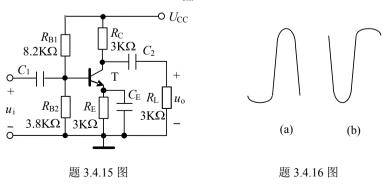


即 $I_{CQ}(2//20) = 12 - 2I_{CQ} - 0.7$,解得 $I_{CQ} = 3mA$, $I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = 0.06mA$ $R_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{I_{BQ}} = \frac{12 - 0.7}{0.06} = 188K\Omega$

(2) 由直流负载线得: $U_{CC} = 12V, R_C = \frac{12}{3} = 4K\Omega, U_{CEQ} = 5V,$ $I_{CQ} = 2mA, R'_L = R_C // R_L = 4 // R_L = \frac{2}{2} = 1,$ 即 $R_L = 1.3K\Omega$.而 $I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{2}{50} = 0.04mA$ 则 $R_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{I_{BO}} = 283K\Omega, \quad U_{OPP} = 2U_{om} = 2 \times (6 - 4) = 4V$

3.4.15 放大电路如题图所示,已知晶体管的 β =50, $U_{\rm BE(on)}$ =0.7 V,各电容对信号均可视为短路。

- (1) 计算工作点 Q 的 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 值;
- (2) 当输入信号幅度增加时,输出电压 u_0 将首先出现何种类型的失真?该电路最大不失真输出电压幅度 U_{om} 为何值?
- (3) 若要提高最大输出电压幅度 U_{om} , 应改变哪个元件值?如何改变?



Prior (1)
$$U_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{3.8}{8.2 + 3.8} \times 12 = 3.8 \text{ (V)}$$

$$R_B = R_{B1} / / R_{B2} = 8.2 / / 3.8 = 2.6 \text{ (k}\Omega)$$

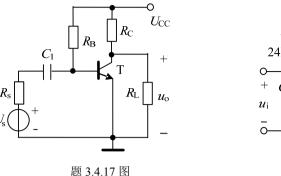
$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BB} - U_{BE(on)}}{R_E} = \frac{3.8 - 0.7}{3} \approx 1 \text{ (mA)}$$

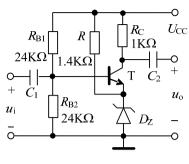
$$U_{CEO} = U_{CC} - I_{CO}R_C - I_{EO}R_E \approx 12 - 1(3+3) = 6$$
 (V)

(2) 因为 $U_{CEQ} = 6$ V,而 $I_{CQ}(R_C // R_L) = 1(3 // 3) = 1.5$ $I_{CQ}(R_C // R_L) = 1(3 // 3) = 1.5$ (V)

所以, u_o 首先出现截止失真, $U_{om} = 1.5 \,\mathrm{V}$ 。

- (3) 要减小截止失真,则 Q 点需往上移。减小 R_{B1} 或 R_{B2} 增大,皆可达到之。
- **讨论:** 一放大电路在工作点 Q 安置好了之后,该电路的最大不失真输出电压的峰-峰值 $U_{o(P-P)}$ 即动态范围已被确定,它取决于 $\left(U_{CEQ} U_{CES}\right)$ 和 $I_{CQ}\left(R_C \parallel R_L\right)$ 中的小者。调整电路中的元件值(比如 R_{B1} 或 R_{B2})改变 Q 点,使 Q 点位于交流负载线的中点时, $\left(U_{CEQ} U_{CES}\right) = I_{CQ}\left(R_C \parallel R_L\right)$,此时可获得的动态范围为该电路的最大值。
- 3.4.16 假设 PNP 管固定偏流共射放大器的输出电压波形分别如题图 (a) 和题图 (b) 所示。试问:
- (1) 电路产生了何种非线性失真?
- (2) 偏置电阻 RB 应如何调节才能消除失真?
- **解**:对于图(a)所示的波形,电路产生了截止失真,应将 R_B 减小。对于图(b)所示的波形,电路产生了饱和失真,应将 R_B 增大。
- 3.4.17 试计算题图所示共射放大电路的静态工作点 U_{CEQ} , 源电压放大倍数 $A_{us} = U_{o}/U_{s}$, 输入电阻 R_{i} 和输出电阻 R_{o} 。设基极静态电流 $I_{\text{BQ}} = 20\mu\text{A}$, $R_{\text{C}} = 2 \, \text{k}\Omega$, $R_{\text{L}} = 2 \, \text{k}\Omega$, $U_{\text{CC}} = 9 \, \text{V}$, $R_{\text{S}} = 150\Omega$, $r_{\text{bb}} = 0$,厄尔利电压 $\left| U_{\text{A}} \right| = 100 \, \text{V}$, $\beta = 100$, C 为隔直、耦合电容。





题 3.4.18 图

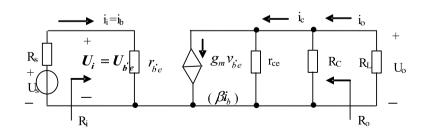
解: (1) 计算工作点和 r_{be} 、 r_{ce} 。 已知 $I_{BQ} = 20\mu$ A
则 $I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times 0.02 = 2$ (mA) $U_{CEQ} = U_{CC} - IR_C = U_{CC} - \left(I_{CQ} + \frac{U_{CEQ}}{R_L}\right)R_C = 9 - \left(2 + \frac{U_{CEQ}}{2}\right)2$ (V)

由以上关系式可以看出,因电路输出端没有隔直电容,负载电阻 $R_{\rm L}$ 与工作点有关。由上式解得 $U_{\rm CEO}$ = 2.5 $\rm V$

$$\vec{m}$$
 $r_{be} = (1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}} = \beta\frac{U_T}{I_{CQ}} = 100\frac{26}{2} = 1.3$ (kΩ)
$$r_{ce} = \frac{|U_A|}{I_{CQ}} = \frac{100}{2} = 50$$
 (kΩ)

(2) 计算源电压放大倍数 A_{us} 。

先画出题图 3.4.17 电路的小信号等效电路如下图所示。



$$A_{us} = \frac{U_o}{U_i} \cdot \frac{U_i}{U_s} = -\beta \frac{r_{ce} //R_C //R_L}{r_{be}} \cdot \frac{r_{be}}{R_S + r_{be}}$$
$$= -\beta \frac{r_{ce} //R_c //R_L}{R_S + r_{be}} = -100 \frac{50 //2 //2}{0.15 + 1.3} \approx -69$$

(3) 计算输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 。 $R_i = r_{be} = 1.3\,\mathrm{k}\,\Omega\;,\;\; R_o = R_c\;//r_{ce} \approx R_C = 2\,\mathrm{k}\,\Omega$

3.4.18 放大电路如题图所示。设晶体管的 β =20, r_{bb} =0, D_Z 为理想稳压管, U_Z =6 V,晶体管的 I_{CO} =5.5 mA。试问:

- (1) 将 D_Z 反接,电路的工作状态有何变化? I_{CO} 又为多少?
- (2) 定性分析由于 D_2 反接,对放大电路电压增益、输入电阻的影响。

解: (1) D_Z 反接, I'_{CQ} = $\beta \frac{10-2\times0.7}{24//24}$ A=14.3 mA, V'_{CEO} =5 V,电路仍工作在放大区

(2) D_Z 反接, I_{CQ} 增加 $I_{CQ}'>2I_{CQ}$, g_m 增加, r_{be} 下降, R_i 下降, A_u 增大,

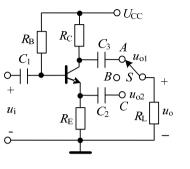
即使考虑正向二极管的 $r_e = \frac{V_T}{I_{CQ}}$, 结论亦同上。

- 3.4.19 电路如题图所示,其中所有电容对信号可视为短路;若 $r_{ce}=\infty$, $R_{C}=R_{E}=R_{L}=R$,S 为开关。试回答以下问题:
- (1) S接B点, u_{ol} 、 u_{o2} 和 u_{i} 三者在相位、幅值上是什么关系?
- (2) S接A点, u_{01} 、 u_{02} 的幅值有何变化, 为什么?
- (3) S接C点, u_{01} 、 u_{02} 的幅值有何变化, 为什么?

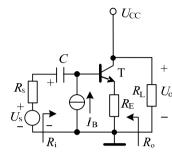
解: (1) S接B点, $|u_o| = |u_{o2}| \le |u_i|$, $u_{o1} = u_i$ 反相; $u_{o2} = u_i$ 同向

- (2) S 接 A 点,集电极负载减小一半, $\frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{1}{2}$; u_{o2} 基本不变
- (3) S 接 C 点,集电极负载不变,发射极电阻减小一半,所以 u_{ol} 增大一倍; u_{o2} 变化不大。

3.4.20 电路如题图所示,BJT 的 β = 100 , $r_{\rm bb}$ = 0 , $U_{\rm T}$ = 26 mA ,基极静态电流由电流源 $I_{\rm B}$ 提供,设 $I_{\rm B}$ = 20 μ A , $R_{\rm S}$ = 0.15k Ω , $R_{\rm E}$ = $R_{\rm L}$ = 2 k Ω , 电容 C 对信号可视为短路。试计算 A_{us} = $U_{\rm O}/U_{\rm S}$ 、 $R_{\rm i}$ 和 $R_{\rm O}$ 。



题 3.4.19 图



题 3.4.20 图

其小信号等效电路如图略。

$$R_{i} = r_{be} + (1 + \beta)(R_{E}//R_{L}) = 1.3 + (1 + 100)(2//2) \approx 102.3 \quad (k\Omega)$$

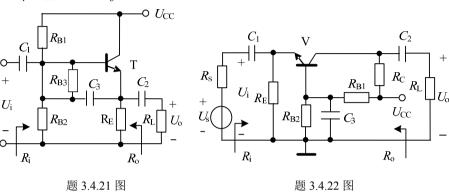
$$A_{us} = \frac{U_{o}}{U_{s}} = \frac{U_{o}}{U_{i}} \bullet \frac{U_{i}}{U_{s}} = \frac{(1 + \beta)(R_{E}//R_{L})}{R_{i}} \bullet \frac{R_{i}}{R_{S} + R_{i}}$$

$$= \frac{(1 + \beta)(R_{E}//R_{L})}{R_{S} + r_{be} + (1 + \beta)(R_{E}//R_{L})} = \frac{101(2//2)}{0.15 + 102.3} = 0.986$$

用辅助电源法可求得输出电阻为

$$R_o = R_E / \frac{R_S + r_{be}}{1 + \beta} = 2 / \frac{0.15 + 1.3}{101} \approx 14.4(\Omega)$$

3.4.21 在题图所示共集放大电路 (基极自举电路),已知晶体管的 $r_{bb'}$ =300 Ω , $r_{b'e}$ =1 k Ω , r_{ce} = ∞ , g_m =100 mS; R_{B1} = R_{B2} =20 k Ω , R_{B3} =100 k Ω , R_E = R_L =1 k Ω ,电容 C_1 、 C_2 、 C_3 对信号可视为短路。试画出该电路的交流通路,求输入电阻 R_i 和输出电阻 R_0 的值。

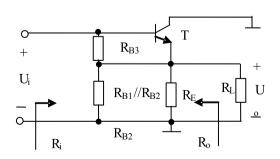


解: 其交流通路如图 2.28 (b) 所示。

$$\beta = g_m r_{be} = 100 \times 1 = 100$$
 因为 $R_{B3} >> r_{bb} + r_{be}$

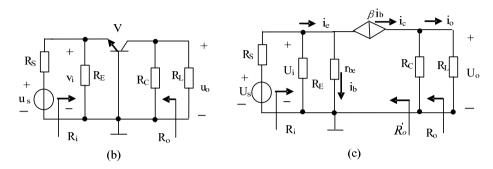
所以
$$R_i \approx r_{bb'} + r_{b'e} + (1+\beta)(R_{B1}//R_{B2}//R_E//R_L) = 49.4(k\Omega)$$

$$R_o \approx \frac{r_{bb} + r_{be}}{\beta} / R_{B1} / R_{B2} / R_E = \frac{1.3}{101} / (20 / (20 / (1 \approx 1.27 (\Omega))))$$



3.4.22 共基放大电路如题图所示。晶体管的 r_{bb} =0, r_{be} =1.3 k Ω , r_{ce} =50 k Ω , β =100; R_{S} =150 Ω , R_{C} = R_{L} =2 k Ω , R_{E} =1 k Ω ,各电容对交流信号可视为短路。试计算电压增益 A_{us} = U_{o}/U_{s} 、输入电阻 R_{i} 和输出电阻 R_{o} 。

解: 其交流通路和小信号等效电路分别如图,则



$$A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{U_o}{U_i} \cdot \frac{U_i}{U_s} \approx \frac{\beta(R_C//R_L)}{n_{be}} \cdot \frac{R_E//\frac{n_{be}}{1+\beta}}{R_E//\frac{n_{be}}{1+\beta} + R_S} \approx \frac{R_C//R_L}{1+\beta} + R_S = \frac{n_{be}}{1+\beta} + R_S$$

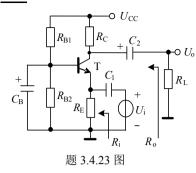
$$R_i = R_E / \frac{r_{be}}{1+\beta} = 13\Omega$$

用辅助电源法可求得晶体管共基组态的输出电阻为 $R_o=R_C=2k\Omega$

- 3.4.23 在题图所示共基放大电路中,晶体管的 β =50, r_{be} =2.2k Ω 。
- (1) 计算放大器的直流工作点;
- (2) 求放大器的 A_{u2} 、 R_i 和 R_0 。

#: (1)
$$U_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{15 \times 12}{30 + 15} = 4V I_{CQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{4 - 0.7}{2} = 1.65 mA$$

$$I_{CQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{4 - 0.7}{2} = 1.65 mA U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} (R_C + R_E) = 3.75 V$$



(2)
$$r_{be} = r_{bb'} + \beta \frac{26}{I_{CO}} = 838\Omega$$

$$A_u = \frac{U_0}{U_i} = \frac{\beta R'}{r_{be}} = \frac{50 \times (3//3)}{0.838} = 89.5$$

$$R_i = R_E / \frac{r_{be}}{1 + \beta} = 2 / \frac{0.838}{51} = 16\Omega$$

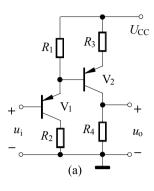
$$R_0 = R_C = 3K\Omega$$

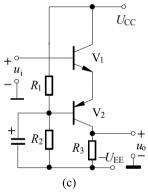
- 3.4.24 试判断题图所示各电路属于何种组态放大器。并说明输出信号相对输入的相位关系。
- 解:图(a)所示电路为共集-共射组合电路。输出与输入反相。
 - 图(b)所示电路为共射-共基组合电路。输出与输入反相。
 - 图(c)所示电路为共集-共基组合电路。输出与输入同相。
 - 图(d)所示电路由于 V_1 管集电极端具有恒流特性,因而 V_2 管组成以恒流 管为负载的共射放大器。输出与输入反相。
- 3.4.25 共集-共基组合电路如题图所示。若两个晶体管参数相同: $r_{\rm bb}=0$, $r_{\rm be}=1\,{\rm k}\Omega$, $\beta=100$, $r_{\rm ce}=\infty$ 。各电容对信号可视为短路。
- (1) 计算输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o :
- (2) 计算电压增益 $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ 。

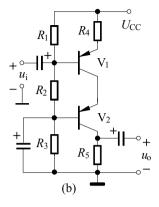
解: (1)
$$R_i = r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_{i2})$$
 其中 $R_{i2} = \frac{r_{be}}{1+\beta} = \frac{1}{101} \approx 10(\Omega)$

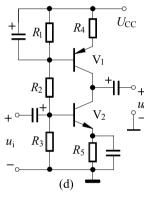
所以
$$R_i = 1 + 101(72/(0.01) \approx 2 \text{ (k}\Omega)$$
 $R_o \approx R_C = 2 \text{ (k}\Omega)$

(2)
$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = \frac{(1+\beta)(R_E//R_{i2})}{r_{b'e} + (1+\beta)(R_E//R_{i2})} \frac{\beta R_C}{r_{b'e}} = 10^2$$

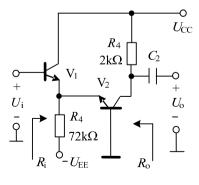




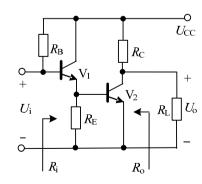




题 3.4.24 图



题 3.4.25 图

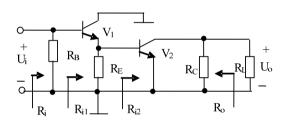


题 3.4.26 图

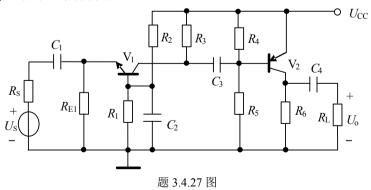
- 3.4.26 组合放大电路如题图所示。已知两个晶体管的参数相同: $r_{\rm bb}$ =0, $r_{\rm be}$ =1 k Ω , β =50, $r_{\rm ce}$ = ∞ ; $R_{\rm C}$ = $R_{\rm L}$ =5 k Ω , $R_{\rm E}$ =1 k Ω , $R_{\rm B}$ =150 k Ω 。
- (1) 画出该电路的交流通路;
- (2) 求该电路的输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 和电压增益 $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ 。

解:(1)该电路的交流通路如图 2.34(b)所示。

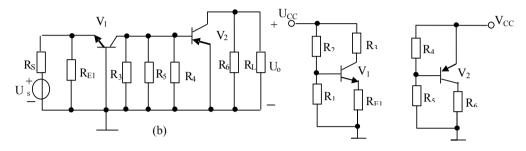
(2)
$$R_{\rm i} = R_B / [r_{be} + (1 + \beta) \cdot R_E / / r_{be}] = 22.5 \text{ k}\Omega$$
,
 $A_u \approx -125$, $R_0 \approx 5 \text{ k}\Omega$



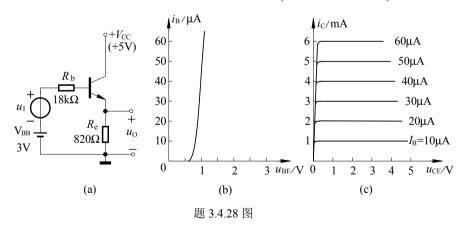
- 3.4.27 两级放大电路如题图所示,各电容对交流信号可视作短路。
- (1) 试画出电路的交流通路和直流通路;
- (2) 说明各级的电路组态和耦合方式;
- (3) R_1 和 R_2 的作用是什么? R_L 短路对电路有何影响?
- (4) R_{E1}开路对电路有何影响?



- 解:(1)交流通路和直流通路分别如题图2.36(b)(c)所示
 - (2) V_1 组成共基电路, V_2 组成共射电路,信号与电路输入端、输出端与负载、级间均采用阻容耦合方式。
 - (3) R_1 和 R_2 是晶体管 V_1 的基极偏置电路。 R_1 短路将使 V_1 截止。
 - (4) R_{E1} 开路, V_1 无直流通路,则 V_1 截止。



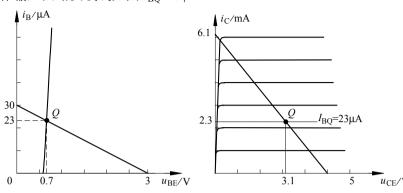
- 3.4.28共集放大电路及晶体管输入、输出特性如题图所示。
- (1) 确定晶体管的 β 值;
- (2) 在输入特性曲线上,图解确定静态电流 I_{BQ} ;
- (3) 在输出特性曲线上图解确定静态电流 $I_{\rm CQ}$ 和静态电压 $U_{\rm CEQ}$ 。



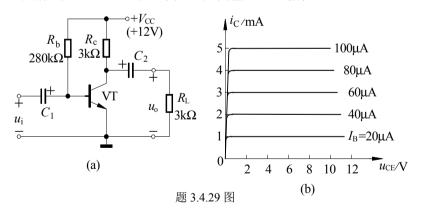
解: (1) *β*≈100

(2)
$$U_{\text{BE}} = V_{\text{BB}} - (I_{\text{BQ}}R_{\text{b}} + I_{\text{EQ}}R_{\text{e}}) \approx V_{\text{BB}} - I_{\text{BQ}}(R_{\text{b}} + \beta R_{\text{e}})$$

作输入回路负载线如图 I_{BO}≈23µA

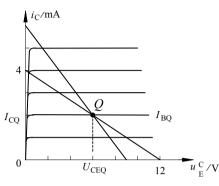


- 3. 作输出回路负载线(如上图) *I*_{CO}≈2.3mA, *U*_{CEO}≈3.1V
- 3.4.29 放大电路及相应的晶体管输出特性如题图所示。若假设 $U_{\rm BEO}$ =0.7V, $U_{\rm CFS} \approx 0.5 \rm V$,且电容容量足够大。
- (1) 根据晶体管输出特性确定晶体管的 β 值;
- (2) 求出静态电流 I_{BO} 的值,并用图解法确定 I_{CO} 和 U_{CEO} 的值;
- (3) 图解确定此时该电路的最大不失真输出电压幅值。



解: (1) *β*≈50

(2) I_{BO}≈40µA , 作直流负载线 I_{CO}=2mA, U_{CEO}=6V



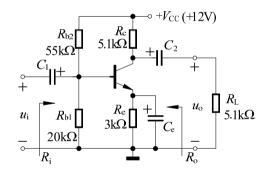
 $R'_{\rm L} = R_{\rm a} / / R_{\rm L} = 1.5 {\rm k} \Omega$, 过 Q 作交流

负载线,斜率为 $-\frac{1}{1.5k\Omega}$,

作图得: *U*_{om}+≈3V, *U*_{om}-≈5.5V,

∴最大不失真输出电压幅值 Uom=3V

- 3.4.30 已知题图示电路中晶体管的 $\beta=150$, $r_{bb'}=300\Omega$, $U_{BEO}=0.7V$, 电容 的容量足够大,对交流信号可视为短路。
- (1) 要求静态电压 U_{CEO} =4V, 估算 R_{b2} 的值;
- (2) 求电压放大倍数 $\dot{A}_{u}(\dot{U}_{o}/\dot{U}_{i})$ 、输入电阻 R_{i} 、输出电阻 R_{o} ;
- (3) 当负载电阻 R_L 开路时,求电压放大倍数 \dot{A}_u 。



(1) $I_{\text{CQ}} \approx I_{\text{EQ}} = \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{CEQ}}}{R_{\circ} + R_{\circ}} \approx 0.99 \text{ mA}$

 $U_{\rm B} = I_{\rm EQ} R_{\rm e} + U_{\rm BEQ} \approx 3.66 \text{V},$ $R_{\rm b2} = \frac{V_{\rm CC} - U_{\rm B}}{U_{\rm B} / R_{\rm b1}} \approx 46 \text{k}\Omega$

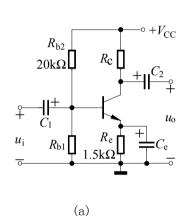
题 3.4.30 图

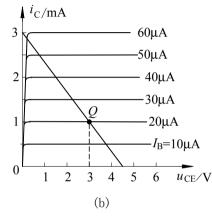
(2)
$$r_{\rm be} = r_{\rm bb'} + (1 + \beta) \frac{U_{\rm T}}{I_{\rm EO}} \approx 4.25 \text{k}\Omega$$
, $\dot{A}_u = -\frac{\beta (R_{\rm c} // R_{\rm L})}{r_{\rm be}} \approx -90$

 $R_i = R_{b1} / / R_{b2} / / r_{be} \approx 3.3 \text{k} \Omega$, $R_0 = R_c = 5.1 \text{k} \Omega$

$$(3) \dot{A}_u = -\frac{\beta R_c}{r_{be}} \approx -180$$

- 3.4.31 某硅晶体管的输出特性曲线和用该晶体管组成的放大电路及其交流负载线、静态工作点 *O* 分别如题图 (a) 和 (b) 所示。
- (1) 画出直流负载线。
- (2) 该电路的电源电压为多少伏? R_{b1} 应取多大(设 U_{BEO} =0.7V)?
- (3) 在给定的静态工作点下,最大不失真输出电压幅值是多少?
- (4) 为获得更大的不失真输出电压, Rb1 应增大还是减小?





题 3.4.31 图

解: (1) 由图得 R_c =4.5/3kΩ=1.5kΩ 直流负载线如图,斜率

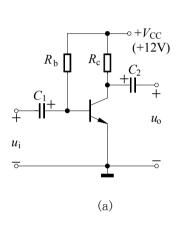
$$-\frac{1}{R_e + R_c} = -\frac{1}{3k\Omega}$$

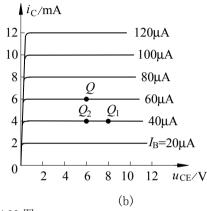
(2) $V_{\text{CC}} = 6\text{V}$, $U_{\text{B}} = I_{\text{EO}}R_{\text{e}} + U_{\text{BEO}} \approx 2.2\text{V}$

$$R_{\rm b1} = U_{\rm B} / \left(\frac{V_{\rm CC} - U_{\rm B}}{R_{\rm b2}} - I_{\rm BQ} \right) \approx 13 \text{k}\Omega$$

或
$$R_{\rm b1} \approx U_{\rm B} / \left(\frac{V_{\rm CC} - U_{\rm B}}{R_{\rm b2}} \right) \approx 11.6 \text{k}\Omega$$

- 3.4.32 放大电路如题图所示,已知该电路的静态工作点位于输出特性曲线的 Q 点处。
- (1) 确定 R_c 和 R_h 的值(设 $U_{BEO}=0.7V$);
- (2) 为了把静态工作点从 Q 点移到 Q_1 点,应调整哪些电阻?调为多大?若静态工作点移到 Q_2 点,又应如何调整?





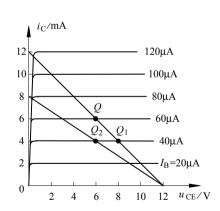
题 3.4.32 图

解:(1)作直流负载线(下图)

$$R_{\rm c} = \frac{12}{12} \, \mathrm{k}\Omega = 1 \mathrm{k}\Omega$$

或
$$R_c = \frac{V_{CC} - U_{CEQ}}{I_{CO}} = 1 \text{k}\Omega$$

$$R_{\rm b} = \frac{12 - 0.7}{0.06} \text{k}\Omega \approx 188 \text{k}\Omega$$



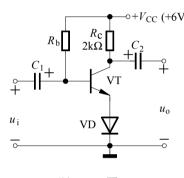
(2) 方法同1

对
$$Q1$$
: $R_{\rm b} \approx 283 {\rm k}\Omega$, $R_{\rm c}$ 不变

对
$$Q2$$
: $R_{\rm b} \approx 283 {\rm k}\Omega$, $R_{\rm c} = 1.5 {\rm k}\Omega$

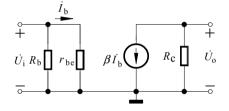
3.4.33 在题图所示电路中,三极管 β =100, $r_{bb'}$ =300 Ω , U_{BEQ} =0.7V;二极管的正向导通压降为 0.7V,动态电阻可忽略不计;电容足够大,对交流信号可视为短路。

- (1) 已知电路在静态时的 $I_{CO}=1.5$ mA,求 U_{CEO} 和 R_b 的值;
- (2) 画出简化混合π型交流等效电路图;
- (3) 求电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 。



#: (1) $U_{\text{CEQ}} = V_{\text{CC}} - I_{\text{CQ}} R_{\text{c}} - U_{\text{D}} = 2.3 \text{V}$

$$R_{\rm b} = \frac{V_{\rm CC} - U_{\rm BEQ} - U_{\rm D}}{I_{\rm CO} / \beta} = 307 \,\mathrm{k}\Omega$$



(3)
$$r_{\text{be}} = r_{\text{bb'}} + (1 + \beta) \frac{U_{\text{T}}}{I_{\text{EQ}}} \approx 2.03 \text{k}\Omega$$
, $\dot{A}_u = -\frac{\beta R_c}{r_{\text{be}}} \approx -98$

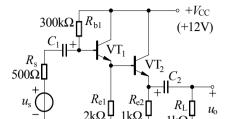
$$R_{\rm i} = r_{\rm be} // R_{\rm b} \approx 2.02 \text{k}\Omega$$
, $R_{\rm o} = R_{\rm c} = 2 \text{k}\Omega$

3.4.34 试估算题图所示多级放大电路的静态工作电流 I_{CQ1} 、 I_{CQ2} ,电压 U_{CEQ1} 、 U_{CEQ2} ,并判断 VT_1 、 VT_2 的工作状态。设 VT_1 、 VT_2 的特性相同,且 β =49, $U_{\text{BE}}=0.7\text{V}$, $I_{\text{B2}}\!\!<\!<\!I_{\text{E1}}$ 。

M:
$$I_{\text{CQ1}} \approx I_{\text{EQ1}} = \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{BE}}}{\frac{R_{\text{b1}}}{1 + \beta} + R_{\text{e1}}} \approx 1.41 \text{mA}$$

$$U_{\text{CEQ1}} = V_{\text{CC}} - I_{\text{EQ1}} R_{\text{e1}} = 9.18 \text{V}$$

 $I_{\text{CQ2}} \approx I_{\text{EQ2}} = (I_{\text{EQ1}} \cdot R_{\text{e1}} - U_{\text{BE}}) / R_{\text{e2}} \approx 2.12 \text{mA}$

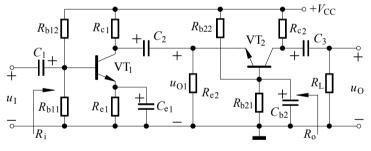


题 3.4.34 图

 $U_{\rm CEQ2}$ = $V_{\rm CC}$ - $I_{\rm EQ}R_{\rm e2}$ = 9.88V, VT_1 、 VT_2 工作在放大区。

3.4.35 阻容耦合两级放大电路如题图所示。设电容器对交流信号均可视为短路,试写出下列各表达式:

(1)
$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_{i}}, \quad \dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_{o}}{\dot{U}_{o1}};$$
 (2) R_{i}, R_{o}



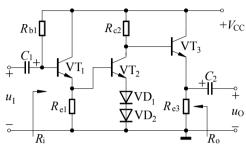
题 3.4.35 图

解:

(1)
$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta \left(R_{c1} // R_{e2} // \frac{r_{be2}}{1 + \beta_2} \right)}{r_{be1}}, \quad \dot{A}_{u2} = \frac{\beta \left(R_{c2} // R_L \right)}{r_{be2}}$$

(2)
$$R_{\rm i} = R_{\rm b11} // R_{\rm b12} // r_{\rm bel}$$
, $R_{\rm o} = R_{\rm c2}$

- 3.4.36 多级放大电路如题图所示,设 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 特性相同, r_{be1} 、 r_{be2} 、 r_{be3} 、 VD_1 的 r_{d1} 、 VD_2 的 r_{d2} 均已知,且 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$ 。
- (1) 判断各管构成的基本放大电路组态:
- (2) 写出 $\dot{A}_{\mu}=\dot{U}_{0}/\dot{U}_{i}$, R_{i} , R_{o} 的近似表达式。



题 3.4.36 图

解: 1. VT₁、VT₃为共集(CC)组态,VT₂为共射(CE)组态;

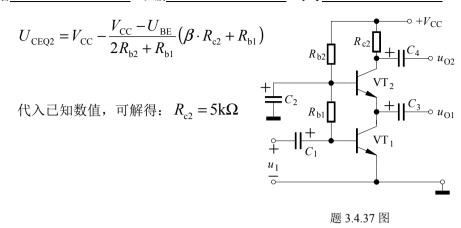
2.
$$\dot{A}_{u} = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdot \dot{A}_{u3} \approx \dot{A}_{u2} \approx -\frac{\beta (R_{c2} // R_{i3})}{r_{be2} + (1 + \beta)(r_{d1} // r_{d1})}$$

$$R_{\rm o} = R_{\rm e3} / \frac{r_{\rm be3} + R_{\rm c2}}{1 + \beta}$$

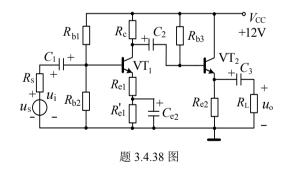
3.4.37 放大电路如题图所示, VT_1 、 VT_2 的特性相同,且 β =100, U_{BE} =0.7V,电源电压 V_{CC} =15V,电阻 R_{b2} =465k Ω 。要求 U_{CEQ1} = U_{CEQ2} =5V,试问电阻 R_{b1} 和 R_{c2} 的各选多大?

M:
$$U_{\text{CEQ1}} = U_{\text{CQ1}} = \frac{R_{\text{b1}}}{2R_{\text{b2}} + R_{\text{b1}}} (V_{\text{CC}} - U_{\text{BE}})$$

代入已知数值,可解得: $R_{\rm hl} = 500 {\rm k}\Omega$



- 3.4.38 已知题图所示电路中, 所有电容对交流可视为短路。试分析:
- (1) 第二级是何种组态的电路, 其作用是什么?
- (2)设输入一个正弦信号时,输出电压波形出现了顶部失真。若原因是第一级的Q点不合适,问第一级产生了什么失真?如何消除?若原因是第二级Q点不合适,第二级将产生什么失真?又如何消除?



解:

- (1)后级是共集电极电路,用以隔离第一级与负载以便增大第一级的放大倍数,同时减小输出电阻。
- (2)第一级产生了截止失真,可增大 R_{b2} 或减小 R_{b1} 。后一级是跟随器,顶部失真与共射极

电路的失真不同,为饱和失真,消除的方法是增大 R_{b3} 。

3.4.39 放大电路(a)、(b) 和测得的信号电压波形如题图(c) 所示。问两种 放大电路各产生了何种失真?为了减小失真,如何调整 R_b 和 R_b ?

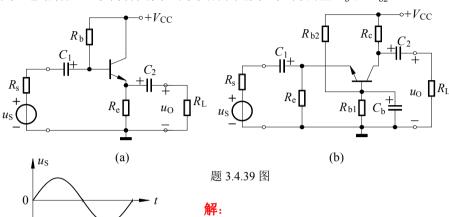


图 (a) 截止失真,应减小 $R_{\rm B}$;

图 (b) 饱和失真,应增大 R_{B2} 。

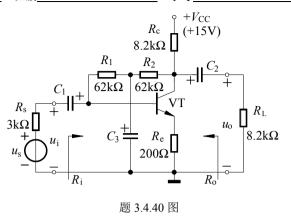
3.4.40 己知题图所示电路中晶体管的 β =50, $r_{\rm bb'}$ =300 Ω , $U_{\rm BEO}$ =0.7V,各电 容的容量足够大,对交流信号可视为短路。

(1) 估算电路在静态时的 I_{CQ} ;

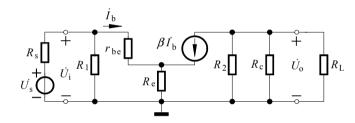
(c)

- (2) 画出简化混合π型交流等效电路图;
- (3) 求电压放大倍数 \dot{A}_u 、 $\dot{A}_{us}(\dot{U}_o/\dot{U}_s)$ 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o ;
- (4) 若 C_3 开路,定性分析静态工作点、 $\left|\dot{A}_{us}\right|$ 、 R_i 、 R_o 有何变化?

M: (1)
$$I_{\text{CQ}} = \frac{\beta (V_{\text{CC}} - U_{\text{BEQ}})}{R_1 + R_2 + (1 + \beta)(R_c + R_e)} \approx 1.3 \text{mA}$$



(2) 混合π型交流小信号等效电路图



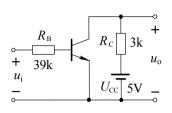
(3)
$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_{T}}{I_{EQ}} \approx 1.3 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{A}_{u} = -\frac{\beta (R_{c} // R_{2} // R_{L})}{r_{be} + (1 + \beta)R_{e}} \approx -17, \quad \dot{A}_{us} = \dot{A}_{u} \frac{R_{i}}{R_{s} + R_{i}} \approx -13$$

$$R_{\rm i} = R_{\rm l} / / [r_{\rm be} + (1 + \beta)R_{\rm e}] \approx 9.7 \,\mathrm{k}\Omega$$
, $R_{\rm o} = R_{\rm c} / / R_{\rm 2} \approx 7.2 \,\mathrm{k}\Omega$

(4) 对 Q 点无影响, $\left|\dot{A}_{us}\right|$ 、 R_{i} 、 R_{o} 都减小 (引入了电压并联负反馈)

3.4.41 硅晶体管电路如题图所示, β =50。 试求 u_i 分别为 0V 和 3V 时的输出 电压 u_{0} 。



- (1) 当 u_i = 0 时, U_{BE} = 0,晶体管截止。 此时 u_o = U_{CC} = 5 V (2)当 u_i = 3 V 时,晶体管导通。

$$I_{\text{BQ}} = \frac{u_{\text{i}} - U_{\text{BE(on)}}}{R_{\text{B}}} = \frac{3 - 0.7}{39} = 0.06 \,\text{mA}$$

题 3.4.41 图

可以先假设管子工作在放大区,则有

$$I_{\rm CQ} = \beta I_{\rm BQ} = 50 \times 0.06 = 3 \text{mA}$$

$$U_{\text{CEO}} = U_{\text{CC}} - I_{\text{CO}} R_{\text{C}} = 5 - 3 \times 3 = -4 \text{V} < 0.7 \text{V}$$

该结果与假设不符,因此管子应进入了饱和状态: $u_0=0.3V$

得 $U_{\rm B}>U_{\rm C}$,因此集电结正偏。

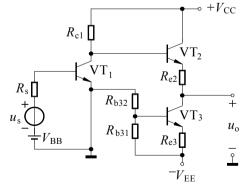
3.4.42 多级放大电路如图示。设晶体管 $VT_1 \sim VT_3$ 特性相同,且 $\beta=50$, $U_{\rm BE}$ =0.7V,电源电压 $V_{\rm CC}$ =12V, $V_{\rm EE}$ =6V, $V_{\rm BB}$ =1V;电阻 $R_{\rm s}$ =15k Ω , $R_{\rm c1}$ =8.3k Ω ,

 $R_{\rm e2}=3{\rm k}\Omega$, $R_{\rm b31}=3.7{\rm k}\Omega$, $R_{\rm b32}=2.3{\rm k}\Omega$. 为满足零输入(u_s=0)时零输出的 要求, Re3 阻值应选多大?

解:

$$I_{R_{\rm cl}} \approx I_{\rm CQ1} = \beta \frac{V_{\rm BB} - U_{\rm BE}}{R_{\rm s}}$$

$$I_{R_{\rm cl}} \cdot R_{\rm cl} + U_{\rm BE} + I_{\rm EQ2} R_{\rm e2} = V_{\rm CC}$$



题 3.4.42 图

$$I_{\rm EQ2} \approx I_{\rm EQ3} = \frac{V_{\rm EE}}{\frac{R_{\rm b31}}{R_{\rm b31} + R_{\rm b32}}} - U_{\rm BE}}{R_{\rm e3}}$$

代入已知参数,联解上述方程,可得 $R_{e3} = 3k\Omega$ 。欲使 VT_2 工作在

放大区,
$$U_{\text{BQ2}} < U_{\text{CQ2}} = V_{\text{CC}} - I_{\text{CQ2}} R_4 = 9V$$
,

故
$$3.4 \text{V} < U_{\text{BO2}} < 9 \text{V}$$

而
$$U_{\text{BQ2}} \approx V_{\text{CC}} \frac{R_6}{R_5 + R_6}$$
,故选 3.3kΩ < R_5 < 25.3kΩ

第4章 放大电路的频率响应

4.1 知识要点

- 一、频率响应的概念
- 二、放大电路的低频、中频和高频等效电路
- 三、晶体管的频率参数
- 四、波特图

4.2 重点与难点

- 一、放大电路频率响应和相频失真的概念
- 二、放大电路的低频、中频和高频等效电路,电抗原件对各频段的影响
- 三、晶体管频率参数: 共射极截止频率、特征频率、共基极截止频率
- 四、共射电路频率响应特性、上限截止频率产生的原因
- 五、单管放大电路频率响应的分析方法
- 六、波特图的概念

4.3 思考题

4.3.3 填空。已知某放大电路的电压放大倍数的复数表达式为:

$$\dot{A}_{u} = \frac{-100 \left(j\frac{f}{100}\right)}{\left(1+j\frac{f}{100}\right)\left(1+j\frac{f}{10^{6}}\right)}$$
(式中 f 的单位为 Hz)

则该放大电路的中频增益为______dB,中频段输出电压和输入电压相位差为______度,上限截止频率为______Hz,下限截止频率为______Hz。4.3.4 由两个频率特性相同的单级直接耦合放大电路组成的两级放大电路的

4.3.4 由两个频率特性相同的单级直接耦合放大电路组成的两级放大电路的上限截止频率 ,下限截止频率 。

A、变高,

B、变低,

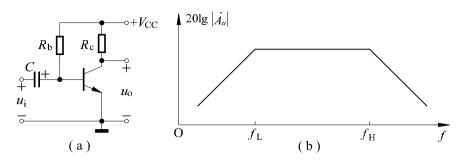
C、不变

4.3.5 在双极型晶体管三种基本接法中,高频响应特性最好的是______,最差的是____。

A、共射接法, B、共集接法, C、共基接法

4.3.6 已知题图(a)所示电路的幅频响应特性如题图(b)所示。影响 f_L 大小的因素是____,影响 f_H 大小的因素是____。试选择正确答案,用 A 、B 或 C 填空。

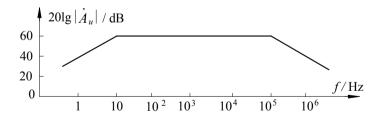
A、晶体管极间电容, B、晶体管的非线性特性, C、耦合电容



4.3.7 在阻容耦合放大电路中,电路的上限截止频率主要取决于____,下限截止频率取决于。

A、耦合电容, B、晶体管的极间电容, C、晶体管的非线性特性 4.3.8 在阻容耦合放大电路中,耦合电容的大小将影响____,线路分布电容的大小将影响____,晶体管的极间电容的大小将影响____。试选择正确答案填空(A、上限截止频率的高低,B、下限截止频率的高低)。

4.3.9 某放大电路电压放大倍数 \dot{A}_u 的折线近似幅频特性如题图所示。则中频电压放大倍数 $|\dot{A}_{um}|$ 为____ (A、60, B、1000, C、3) 倍,下限截止频率为____ (A、1Hz,B、10Hz,C、100Hz),上限截止频率为____ (A、10kHz,B、100kHz,C、1000kHz)。当信号频率恰好等于上限截止频率或下限截止频率时,该电路的实际电压增益约为____ (A、60dB,B、-3dB,C、57dB)。



4.3.10 由上限截止频率为 1.5MHz、下限截止频率为 100Hz 的两个相同的单级 放大电路组成一个两级放大电路。这个两级放大电路的上限截止频率约为 _____ (A、1MHz, B、1.5MHz, C、2MHz), 下限截止频率约为 ____ (A、70Hz, B、100Hz, C、150Hz)。

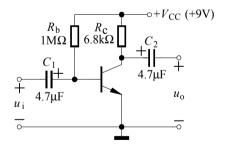
4.3.11 已知两个单管放大电路 A 和 B 的上、下限截止频率分别为 f_{HA} =1MHz, f_{LA} =10Hz 和 f_{HB} =10MHz, f_{LB} =100Hz。若把 A 和 B 连接成一个两级放大电路,则这个两级放大电路的上、下限截止频率分别为 f_{H} ≈_____(A、10MHz,B、5MHz,C、1MHz,D、0.5MHz), f_{L} ≈_____(A、500Hz,B、100Hz,C、50Hz,D、10Hz)。

4.3.12 由两个频率特性相同的单级阻容耦合放大电路组成的两级放大电路的上限截止频率 ,下限截止频率 。

A、变高, B、变低, C、基本不变

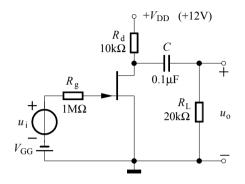
4.3.13 在某放大电路存在频率失真但无非线性失真情况下,当输入为正弦信号时,输出信号___(A、仍为正弦,并且与输入同频率,B、仍为正弦,但频率与输入不同,C、为非正弦);当输入为方波信号时,输出信号___(A、仍为方波,并且周期与输入相同,B、仍为方波,但周期与输入不同,C、波形发生失真)。

4.3.14 在题图所示电路中,晶体管 β =100, r_{be} =3.3k Ω 。经分析可知,放大电路的中频电压放大倍数 $|\dot{A}_{um}|$ 约为____ (A、50,B、100,C、200),下限截止频率 f_{L} 约为____ (A、1,B、10,C、100)Hz。;当 U_{i} =7mV, $f=f_{L}$ 时, U_{o} 约为 ____ (A、0.1,B、0.7,C、1,D、1.4)V,且当输入信号频率 $f=f_{L}$ 时,输出电压与输入电压相位差约为 ____ (A、45°,B、-45°,C、-135°,D、-225°)。



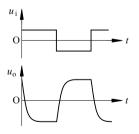
4.3.15 在题图所示电路中,已知场效应管的 g_m =3mS 。该放大电路的中频电压放大倍数 $|\dot{A}_{um}|$ 为_____(A、10,B、20,C、30),下限截止频率 f_L 约为 ____Hz (A、10,B、50,C、100);当输入信号频率 $f=f_L$ 时,输出电压与输入电

压相位差为 ____ (A、45°, B、-45°, C、-135°, D、-225°); 当电路中的 $R_{\rm g}$ 减小后,放大电路的中频电压放大倍数 $|\dot{A}_{\rm um}|$ 、上限截止频率 $f_{\rm H}$ 和下限截止频率 $f_{\rm L}$ 将分别 、 、 (A、增大,B、减小,C、基本不变)。



4.3.16 当一个正弦电压加到某同相放大电路的输入端, 若该放大电路存在频率失真, 则输出电压的波形____(A、仍为正弦波, B、为非正弦波), 输出电压的频率____(A、与输入相同, B、与输入不相同), 输出电压的相位____(A、与输入相同, B、与输入不相同)。

4.3.17 当某阻容耦合放大电路输入一个方波信号时,输出电压波形如题图所示,说明该电路出现了____________;(A、非线性失真,B、频率失真),造成这种失真的原因主要是___________(A、晶体管 β 过小,B、晶体管的特征频率太低,C、耦合电容太小,D、静态工作点不合适)。



4.3.18 填空。已知某晶体管的 f_T =300MHz,并在 f=1kHz 时,测得 β =100,则该晶体管的 f_β =_______; 另一个晶体管的 f_β 已知为 2MHz,并在 f=10MHz 时,测得 β =20,则该晶体管的 f_T = ,低频 β = 。

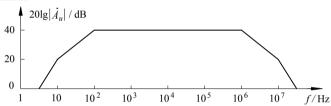
学号

- 46 -

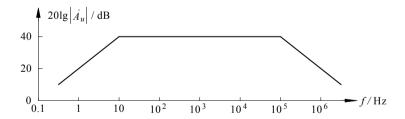
4.3.19 填空。当阻容耦合放大电路的输入信号频率下降到下限截止频率时, 放大倍数的幅值下降到中频放大倍数的 倍,即下降了 dB: 放大倍数的相位与中频时相比,附加相移约为 度。

4.3.20 填空。上限截止频率为 1MHz 的两个相同的单级放大电路连接成一个 两级放大电路,这个两级放大电路在信号频率为 1MHz 时,放大倍数的幅值 下降到中频放大倍数的 倍,即下降了 dB,放大倍数的相位与 中频时相比,附加相移约为 度。

4.3.21 填空。某放大电路的幅频特性如题图所示。该放大电路的中频电压放 大倍数 $|\dot{A}_{um}|$ 约为 ,上限截止频率 $f_{\rm H}$ 约为 Hz,下限截止频率 fL约为 Hz。



4.3.22 填空。已知某同相放大电路的对数幅频特性如题图所示。当信号频率 f=1kHz 时, \dot{A}_{μ} 的相位角 ϕ 约为 ; 当 f=10Hz 时, ϕ 约为 ; 当 f=1MHz 时, ϕ 约为。



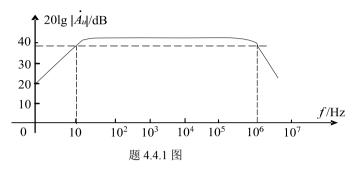
答案:

- 0.7; 3; 45; 0.7; 3; -454.3.1
- 4.3.2 37; 20; 10
- 40; -180 (或 180); 10^6 ; 1004.3.3
- 4.3.4 B|C
- 4.3.5 C|A4.3.6 C|A
- 4.3.7 B|A4.3.8 B|A|A
- 4.3.10 AIC 4.3.9 B|B|B|C
- 4.3.12 B|A 4.3.11 C|B
- 4.3.14 C|B|C|C 4.3.13 A|C
- 4.3.16 A|A|B 4.3.15 B|B|C|C|A|C
- 4.3.17 B|B 4.3.18 3MHz|200MHz|100
- $1/\sqrt{2}$ (或 0.7); 3; 45 4.3.19
- 0.5; 6; -904.3.20
- 4.3.21 $100: 10^6: 100$
- $4.3.22 \quad 0^{\circ}: 45^{\circ}: -90^{\circ}$

姓名

4.4 习题

4.4.1 已知某放大器的幅频特性如题图所示。



- (1) 分析该放大器的中频增益 A_{ul} 、上限频率 f_{t} 和下限频率 f_{t} 、通频带 BW;
- (2) 当 u_i =10sin(4 π ×10⁶t)(mV)+20sin(2 π ×10⁴t)(mV) 和 u_i =10sin(2 π ×5t)(mV)+20sin(2 π ×10⁴t)(mV)时,输出信号有无失真? 是何种性质的失真? 分别说明之。

解:

- (1)由题图 4.1 可得:中频增益为 40dB,即 100 倍, f_H =10 6 Hz, f_L =10Hz(在 f_H 和 f_L 处,增益比中频增益下降 30dB), $BW=10^6-10\approx 10^6$ Hz。
- (2) 当 $u_i = 10 \sin(4\pi \cdot 10^6 t)(mV) + 20 \sin(2\pi \times 10^4 t)(mV)$ 时 , 其 中 $f=10^4$ Hz 的频率在中频段,而 $f=2\times 10^6$ Hz 的频率在高频段,可见输出信号 要产生失真,即高频失真。

当 $u_i = 10 \sin(2\pi \cdot 5t)(mV) + 20 \sin(2\pi \times 10^4 t)(mV)$ 时,f=5Hz 的频率在低频段, $f=10^4$ Hz 的频率在中频段,所以输出要产生失真,即低频失真。

4.4.2 某一放大器的中频增益为 A_{ul} =40dB,上限频率为 f_H =2MHz,下限频率 f_L =100Hz,输出不失真的动态范围为 U_{opp} =10V。输入下列信号时会产生什么失真?

- (1) $u_i(t) = 0.1\sin(2\pi \times 10^4 t)$ (V);
- (2) $u_i(t) = 10\sin(2\pi \times 3 \times 10^6 t) \text{ (mV)};$
- (3) $u_i(t) = 10\sin(2\pi \times 400t) + 10\sin(2\pi \times 10^6 t)$ (mV);
- (4) $u_i(t) = 10\sin(2\pi \times 10t) + 10\sin(2\pi \times 5 \times 10^4 t)$ (mV);
- (5) $u_1(t) = 10\sin(2\pi \times 10^3 t) + 10\sin(2\pi \times 10^7 t)$ (mV).

解: 输入信号为单一频率正弦波,所以不存在频率失真问题。但由于输入信号幅度较大(为0.1V),经100倍的放大后峰峰值为0.1×2×100=20V,已大大超过输出不失真动态范围(U_{OPP}=10V),故输出信号将产生严重的非线性失真(波形出现限幅状态)。

- (2)输入信号为单一频率正弦波,虽然处于高频区,但也不存在频率 失真问题。又因为信号幅度较小,为 10m V,经放大后峰峰值为 100×2×10 =2V,故也不出现非线性失真。
- (3) 输入信号两个频率分量分别为 10Hz 及 1MHz,均处于放大器的中频区,不会产生频率失真,又因为信号幅度较小(10m V),故也不会出现非线性失真。
- (4)输入信号两个频率分量分别为 10Hz 及 50KHz,一个处于低频区,而另一个处于中频区,故经放大后会出现低频频率失真,又因为信号幅度小,叠加后放大器也未超过线性动态范围,所以不会有非线性失真。
- (5)输入信号两个频率分量分别为 1KHz 和 10MHz,一个处于中频区,而 另一个处于高频区,故信号经放大后会出现高频频率失真。同样,由于输入 幅度小。不会出现非线性频率失真。

4.4.3 某晶体管在 $I_{\rm CQ}$ =2mA, $U_{\rm CEQ}$ =5V 时, β =100, $f_{\rm T}$ =250MHz, $C_{\rm bc}$ =4pF, $r_{\rm bb'}$ =150 Ω , $U_{\rm A}$ =-100V。试计算该管的高频混合 π 型参数,并画出高频混合 π 型模型。

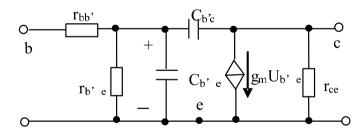
解:混合参数的计算:

$$r_e = \frac{26}{2} = 13\Omega$$
 $g_m = \frac{1}{r_e} = 76.92mS$

$$r_{b'e} = (1+100)r_e = 1.3k\Omega$$
, $r_{ce} = \frac{U_A}{I_{CO}} = \frac{100}{2} = 50k\Omega$

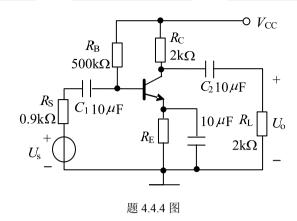
$$C_{b'e} = \frac{1}{2\pi f_T r_e} = \frac{1}{2\pi \times 250 \times 10^6 \times 13} = 49 \, pF$$

混合π型模型如题下图所示。



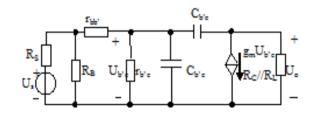
4.4.4 电路如题图所示。已知晶体管的 $r_{\rm e}=10\Omega$, $r_{\rm bb'}=100\Omega$, $r_{\rm ce}=\infty$, $\beta=100$, $C_{\rm b'e}=100{\rm pF}$, $C_{\rm b'e}=3{\rm pF}$

- (1) 试画出电路的高频等效电路;
- (2) 利用密勒定理近似求上限频率 f_H。



解: (1) 高频等效电路如下图所示:

$$r_{\dot{be}} = \beta r_e = 1k\Omega, g_m = \frac{1}{r_e} = 100mS$$



(2) 利用密勒近似,将 Cbc 折算到输入端,即

$$C_{M} = (1 + g_{m}(R_{C} || R_{L}))C_{b'e} = 303 pF$$

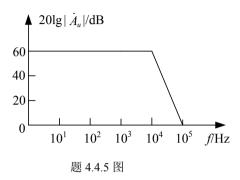
$$C_{i} = C_{M} + C_{b'e} = 403 pF$$

$$R'_{S} = r_{b'e} || (R_{B} || R_{S} + r_{bb'}) = 0.5k\Omega$$

$$f_{H} = \frac{1}{2\pi R'_{S}C_{i}} = \frac{1}{6.28 \times 0.5 \times 10^{3} \times 403 \times 10^{-12}} \approx 0.79 MHz$$

4.4.5 已知某电路的幅频特性如题图所示, 试问:

- (1) 该电路的耦合方式;
- (2) 该电路由几级放大电路组成;
- (3) 当 $f=10^4$ Hz 和 $f=10^5$ Hz 时,附加相移分别为多少?



解: (1)因为下限截止频率为 0, 所以电路为直接耦合电路;

- (2) 因为在高频段幅频特性为-60dB/十倍频程, 所以为3级放大电路。
- (3) 当 f=10⁴Hz 时,附加相移为-135°;

当 f=10⁵Hz 时,附加相移为-270°。

4.4.6 已知一个两级放大电路各级电压放大倍数分别为

- (1) 写出该放大电路的表达式;
- (2) 求出该电路的 £和 £ 各约为多少;
- (3) 画出该电路的波特图。

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_{i}} = \frac{-25j f}{\left(1 + j \frac{f}{4}\right) \left(1 + j \frac{f}{10^{5}}\right)}$$

$$\dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_{o}}{\dot{U}_{i2}} = \frac{-2j f}{\left(1 + j \frac{f}{50}\right) \left(1 + j \frac{f}{10^{5}}\right)}$$

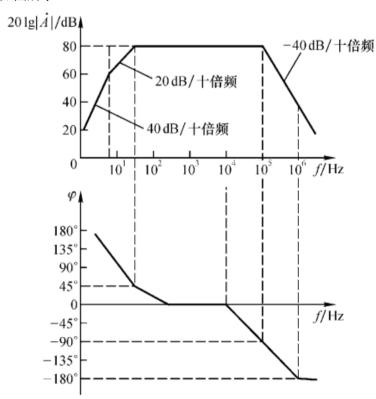
解:(1) 电压放大电路的表达式:

$$\dot{A}_{u} = \dot{A}_{u1}\dot{A}_{u2} = \frac{-50 f^{2}}{\left(1 + j\frac{f}{4}\right)\left(1 + j\frac{f}{50}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^{5}}\right)^{2}}$$

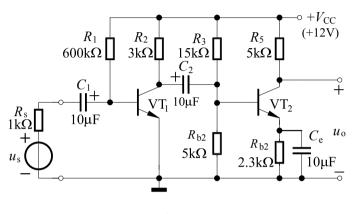
(2) $f_L \approx 50 \text{Hz}$,

$$\frac{1}{f_H} \approx \frac{1}{1.1\sqrt{2} \times 10^5}, \ f_H \approx 64.3 \, kHz$$

(3)根据电压放大倍数表达式可知,中频增益为 10⁴,即 80dB。 波特图如图所示。

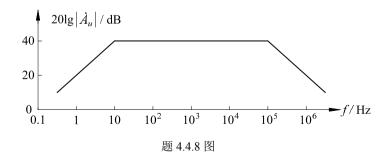


- 4.4.7 电路如题图所示。试定性分析下列问题,并简述理由。
- (1) 哪一个电容决定电路的下限频率;
- (2)若 VT1 和 VT2 静态时发射极电流相等,且 $r_{bb'}$ 和 C_i 相等,则哪一级的上限频率低。

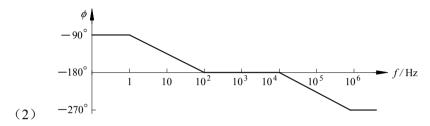


题图 4.4.7

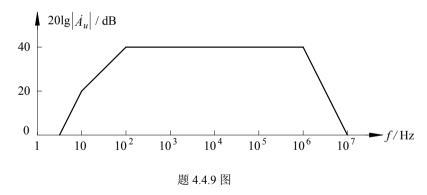
- \mathbf{m} : (1) 决定电路下限频率的是 C_e , 因为它所在回路的等效电阻最小。
 - (2) 因为 $R_2//R_3//R_4 > R_1//R_S$, C_{i2} 所在回路的时间常数大于 C_{i1} 所在回路的时间常数,所以第二级的上限频率低。
- 4.4.8 某反相放大电路的折线近似幅频特性如题图所示。
- (1) 写出复数电压放大倍数 \dot{A}_{u} 的表达式;
- (2) 画出该放大电路的相频特性曲线 (用折线近似)。



解: (1)
$$\dot{A}_{u} = \frac{-100\left(j\frac{f}{10}\right)}{\left(1+j\frac{f}{10}\right)\left(1+j\frac{f}{10^{5}}\right)}$$
 (f的单位为 Hz)



- 4.4.9 某阻容耦合多级放大电路的折线近似幅频特性如题图所示,试问:
- (1) 该电路包含几级阻容耦合电路?
- (2) 每级的上、下限截止频率各为多少?
- (3) 这个多级放大电路的上、下限截止频率分别为多少?



(2)
$$f_{H1} = f_{H2} = 10^6 \text{ Hz}$$

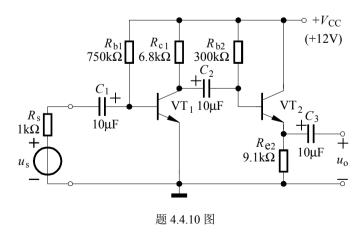
 $f_{L1} = 10 \text{Hz}$, $f_{L2} = 100 \text{Hz}$
 $f_{L} = 100 \text{Hz}$

$$f_{\rm H} \approx \frac{1}{1.1 \sqrt{\left(\frac{1}{f_{\rm H1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{f_{\rm H2}}\right)^2}} \approx 6.43 \times 10^5 \,\mathrm{Hz}$$

$$\vec{x} \qquad \frac{\dot{A}_{u\rm H}}{\dot{A}_{u\rm m}} = \frac{1}{\left(1 + j\frac{f}{f_{\rm H1}}\right)^2} \qquad \qquad \left|\frac{\dot{A}_{u\rm H}}{\dot{A}_{u\rm m}}\right| = \frac{1}{\left(1 + j\frac{f_{\rm H}}{f_{\rm H1}}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

解得 $f_{\rm H} = \sqrt{\sqrt{2} - 1} \cdot f_{\rm H1} \approx 6.44 \times 10^5 \, \rm Hz$

- 4.4.10 在题图所示电路中,已知两个晶体管的 β 和 r_{be} 相同, $\beta_1 = \beta_2 = 50$, $r_{\rm bel} = r_{\rm bel} = 2 \mathrm{k} \, \Omega$.
- (1) 定性分析 C_1 、 C_2 、 C_3 中哪一个电容对放大电路的下限截止频率 f_1 起决 定性作用? (简要说明理由)
- (2) 估算该放大电路 $\dot{A}_{us}(\dot{U}_{o}/\dot{U}_{s})$ 的下限截止频率 f_{Lo}



解:

姓名

(1) 因为负载开路,所以 C_3 构成的回路时间常数为 ∞ ; VT_2 管为共集电路, 输入电阻 R_{i2} 很大,因此 C_2 与 R_{i2} 构成的回路时间常数也较大; VT_1 为共射电 路,输入电阻 R_{i1} 较小,信号源内阻 R_{i} 又不大,所以 C_{1} 构成的回路时间常数 最小,对整个放大电路的允起决定作用。

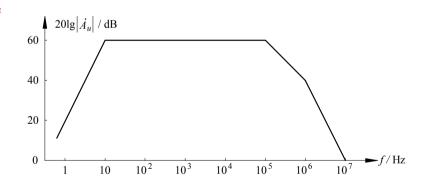
(2)
$$f_{\rm L} \approx f_{\rm L1} = \frac{1}{2\pi (R_{\rm s} + r_{\rm bel}//R_{\rm bl})C_{\rm l}} \approx 5.3 {\rm Hz}$$

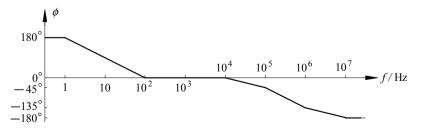
4.4.11 某放大电路的电压放大倍数复数表达式为:

$$\dot{A}_u = \frac{-10f^2}{\left(1 + j\frac{f}{10}\right)^2 \left(1 + j\frac{f}{10^5}\right) \left(1 + j\frac{f}{10^6}\right)}$$
, 式中 f 的单位为 Hz。

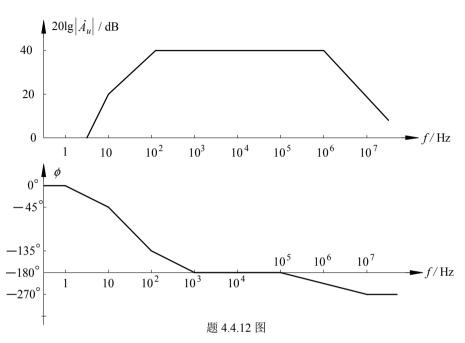
画出该放大电路的波特图(包括幅频特性和相频特性,标明转折点坐标值)。

解:





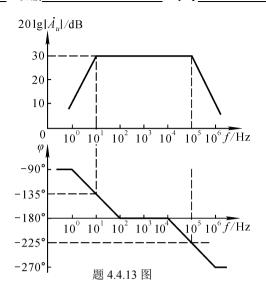
4.4.12 某放大电路频率响应特性如题图所示,写出该放大电路电压放大倍数 \dot{A}_{u} 的复数表达式。

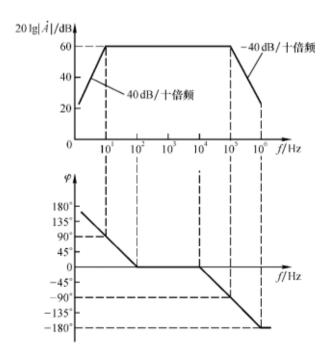


$$\dot{A}_{u} = \frac{-100\left(j\frac{f}{10}\right)\left(j\frac{f}{100}\right)}{\left(1+j\frac{f}{10}\right)\left(1+j\frac{f}{100}\right)\left(1+j\frac{f}{10^{6}}\right)} = \frac{0.1f^{2}}{\left(1+j\frac{f}{10}\right)\left(1+j\frac{f}{100}\right)\left(1+j\frac{f}{10^{6}}\right)}$$

4.4.13 两级放大电路各级的波特图均如题图所示,试画出整个电路的波特图。

解:级联后的放大电路中频增益为60dB,频率小于10Hz时,斜率为+40dB/ 十倍频程,频率大于 105Hz 时斜率为-40dB/十倍频程。波特图如图示。





<u>-53-</u> 第 5 章 集成运算放大电路

5.1 知识要点

- 一、集成运算放大电路的特点
- 二、电流源电路
- 三、差动放大电路的分析
- 四、差动放大电路的传输特性
- 五、差动放大电路的失调和温漂

5.2 重点与难点

- 一、差分放大电路的组成和工作原理
- 二、差分放大电路静态和动态参数的分析方法
- 三、镜像电流源、比例电流源电路的结构、工作原理和分析方法
- 四、典型集成运算放大电路的组成及其各部分的特点
- 五、典型集成运算放大电路的电压传输特性
- 六、典型集成运算放大电路的主要参数
- 七、差分放大电路零点漂移现象、失调和温漂的概念及其克服的方法

生名_	
	5.3.9 威尔逊电流源是的一种改进形式。
	A、镜像电流源, B、比例电流源, C、微电流源
	5.3.10 使用差动放大电路的目的是为了提高。
	A、输入电阻, B、电压放大倍数
	C、抑制零点漂移能力, D、电流放大倍数
	5.3.11 差动放大电路中,差模放大倍数越大表示,而共模抑制比越大则
	表示。
	A、有用信号的放大倍数越大
	B、共模信号的放大倍数越大
	C、抑制共模信号和温漂的能力越强
	5.3.12 差动放大电路的作用是输入信号。
	A、放大差模, B、放大共模
	C、抑制共模, D、抑制共模,又放大差模
	5.3.13 差动放大电路中,当 U_{II} =300mV, U_{I2} =-200mV,分解为共模输入信号
	$U_{\rm IC}$ =mV,差模输入信号 $U_{\rm ID}$ =mV。
	A, 500, B, 100, C, 250, D, 50
	5.3.14 在相同条件下,阻容耦合放大电路的零点漂移。
	A、比直接耦合电路大
	B、比直接耦合电路小
	C、与直接耦合电路相同
	5.3.15 差分放大电路中的差模输入信号是两输入端信号,共模输入信号
	<mark>是两输入端信号的。</mark>
	A、差, B、和, C、比值, D、平均值
	$5.3.16$ 若差动放大电路由双端输出改为单端输出,则共模抑制比 K_{CMR} 减小,
	其原因是。
	A 、 A_{UD} 不变, A_{UC} 增大 B 、 A_{UD} 减小, A_{UC} 不变
	C、A _{UD} 減小,A _{UC} 增大 D、A _{UD} 增大,A _{UC} 減小
	5.3.17 差动放大电路中,差模输入信号是两个输入信号的,共模输入信
	<mark>号是两个输入信号的。</mark>
	A、和, B、差, C、比值, D、平均值

5.3 思考题

法有关

数的一半。

A、直接耦合,

C、电感耦合,

A、高, B、低,

A、差动放大电路,

C、共源放大电路,

A、差动放大电路, C、共源放大电路,

5.3.1 集成运放是一种多级放大电路,级间采用 耦合方式。

5.3.2 集成运放的输入级要求其输入阻抗。

5.3.3 集成运放的输入级通常采用 电路。

5.3.4 集成运放的输出级通常采用 电路。

5.3.5 以下关于差动放大电路的说法中,错误的是。

B、差动放大电路只放大两输入端的差信号

A、开环差模电压放大倍数为无穷大

B、差模输入电阻为无穷大 C、差模输出电阻为无穷大 D、共模抑制比为无穷大

5.3.6 关于理想运算放大电路的主要特性,错误的说法是。

A、均为无穷大, B、均为无穷小, C、不相同 5.3.8 在长尾式的差分放大电路中, Re对 有负反馈作用。 A、差模信号, B、共模信号, C、任意信号

B、阻容耦合,

D、变压器耦合

B、共射放大电路

B、共射放大电路

A、差动放大电路的性能不仅与输出端的接法有关,而且与输入端的接

C、双端输出差模电压放大倍数等于半边差模等效电路的电压放大倍数 D、单端输出的差模电压放大倍数等于半边差模等效电路的电压放大倍

5.3.7 具有理想电流源的差分放大电路,采用不同的连接方式,其共模抑制比

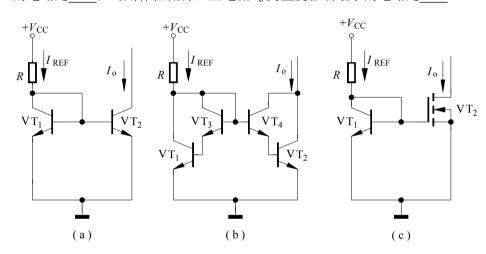
D、互补射随器

D、互补射随器

C、适中

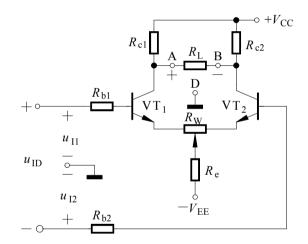
- 5.3.18 差动放大器抑制零点漂移的效果取决于
 - A、两个晶体管的静态工作点,
- B、两个晶体管的对称程度
- C、各个晶体管的零点漂移,
- D、两个晶体管的放大倍数
- 5.3.19 比较题图所示中的三个电路,选择(a)、(b)、(c)填空:

不能用作恒流源的电路是;可用作恒流源,且更接近于基准电流 IREE 的电路是 ; 可用作恒流源,且电流 Io 受温度影响最小的电路是 。



- 5.3.20 在差分放大电路中,试就下列问题,选择正确答案。
- (1) *I*_{IB}越小,则失调电流 *I*_{IO} ;
- A、越小, B、越大, C、不变
- (2) Un 越大, 表明运放
 - A、开环差模电压放大倍数越小
 - B、差放输入级 U_{BE} 或 (U_{GS}) 的失配越严重
 - C、差放输入级 β 的失配越严重)
- (3) I_{IO}越大,表明运放;
 - A、差模输入电阻越小
 - B、差放输入级*B*的失配越严重
 - C、差放输入级 U_{BE} 或 (U_{GS}) 的失配越严重
- (4) *K*_{CMR} 越小,表明电路 ;

- A、放大倍数越不稳定
- B、输入信号中差模成分越小
- C、抑制温漂能力越弱
- D、交流放大倍数越小
- 5.3.21 实验电路如题图所示。设调零电位器 $R_{\rm W}$ 滑动端位于中点,试就下列问 题,选择正确答案(A、右移,B、左移,C、不移)填空。
- (1) 若只因为 $R_{h1} > R_{h2}$,而其它电路参数均对称,则为了使两边单端输出放 大倍数 $|A_{u1}| = |A_{u2}|$, 应将 R_{W} 滑动端
- (2) 若只因为 $R_{cl} > R_{c2}$, 而其它电路参数均对称,则为了使两边单端输出放 大倍数 $|A_{"1}|=|A_{"2}|$, 应将 R_{W} 滑动端_



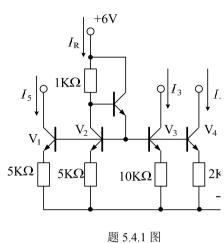
答案:

H >14.							
5.3.1	A	5.3.2	A	5.3.3	A	5.3.4	D
5.3.5	A	5.3.6	C	5.3.7	A	5.3.8	В
5.3.9	A	5.3.10	C	5.3.11	A C	5.3.12	D
5.3.13	A D	5.3.14	В	5.3.15	A D	5.3.16	X
5.3.17	B D	5.318	В	5.3.19	图 (c),	图 (b),	图 (a)
<i>5</i> 2 20	AIDIDIC	C 2 21	D.I.A				

A|B|B|C 5.3.21 $B \mid A$

5.4 习题

5.4.1 电路如题图所示,设各晶体管 $\beta>>1$, $U_{\rm BE(on)}=0.7{\rm V}$ 。试求各支路电流值。



解:

题图是具有基极补偿的多电流源电路。 先求参考电流 I_R ,

$$I_R = \frac{6 - (-6) - 2 \times 0.7}{1 + 5} = 1.8 \text{ (mA)}$$

则
$$I_5 = I_R = 1.8$$
 (mA)

$$I_3 = \frac{5}{10}I_R = 0.9 \text{ (mA)}$$

$$I_4 = \frac{5}{2}I_R = 4.5 \text{ (mA)}$$

5.4.2 对称差动放大电路如题图所示。已知晶体管 $\pmb{\beta}$ =50 ,并设 $U_{\rm BE(on)}$ =0.7V, $r_{\rm bb}$ =0, $r_{\rm ce}$ =∞。试求:

- (1) V_1 和 V_2 的静态集电极电流 I_{CO} 、 U_{CO} 和晶体管的输入电阻 $r_{b'e}$;
- (2) 双端输出时的差模电压增益 A_{ud} ,差模输入电阻 R_{id} 和差模输出电阻 R_{od} ;
- (3)若 R_L 接 V_2 集电极的一端改接地时,求差模电压增益 $A_{ud}(^{\mu})$ 、共模电压增益 A_{uc} 、共模抑制比 K_{CMR} 、共模输入电阻 R_{ic} 和共模输出电阻 R_{oc} 。

解:

(1) 因为电路对称,所以
$$I_{C1Q} = I_{C2Q} = \frac{I_{EE}}{2} = \frac{U_{EE} - 0.7}{2 \times R_E + \frac{2}{R_B}} = 0.52 mA$$

$$U_{C1Q} = U_{C1Q} = 6 - 0.52 \times 5.1 = 3.35V$$
, $r_{b'e} = \beta \cdot U_T / I_{C1Q} = 2.5k\Omega$

(2) 差模电压增益:
$$A_{ud} = -\beta \frac{R_C //\frac{1}{2} R_L}{R_R + r_{he}} = -19$$

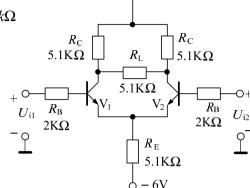
差模输入电阻: $R_{id} = 2(R + r_{be}) = 9k\Omega$

差模输出电阻: $R_{od} = 2R_C = 10.2k\Omega$ (3) 单端输出差模电压增益:

$$A_{\text{ud}(\mathring{\text{H}})} = \frac{1}{2} \beta \frac{R_C // R_L}{R_R + r_{b'_e}} \approx -14.2$$

$$A_{\rm uc} = -\beta \frac{R_C /\!/ R_L}{R_B + r_{b'e} + (1 + \beta) 2R_E} = -0.24$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{\text{ud}} \text{ ($\dot{\text{p}}$)}}{A_{\text{uc}}} \right| = 59.2$$



0 +6V

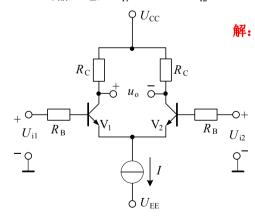
共模输出电阻: $R_{oc} = R_C = 5.1k\Omega$

题 5.4.2 图

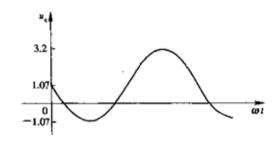
共模输入电阻: $R_{ic}=R_R+r_{b'e}+(1+\beta)2R_E=524.7k\Omega$

5.4.3 在题图所示的恒流源式差分放大电路中,晶体管 V_1 、 V_2 特性对称,且 β =60, r_{bb} =300 Ω , U_{BE} =0.7V。 R_C =11K Ω , R_B =2K Ω , U_{CC} =12V, U_{EE} =6V。恒流源电流为 1.1mA。试估算:

- (1) 静态工作点 I_{C1} 、 I_{C2} 、 U_{C1} 、 U_{C2} ;
- (2) 当输入电压 $u_{11}=10$ mV, $u_{12}=11$ mV 时, 双端输出信号电压 $u_{0}=?$



题 5.4.3 图

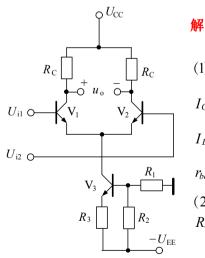


- (3) $u_0 = A_{ud}(u_{i1} u_{i2})$ $=-200\times(-10^{-2}\sin\omega t)=2.14\sin\omega t(V)$
- (4) $U_{B3} = \frac{R_1 U_{EE}}{R_1 + R_2} = -\frac{20 \times 15}{10 + 20} = -10V$ $U_{C1}=U_{CC}-I_{CO}R_{C}=15-1\times6=9V$ 故共模输入电压 U_{ic} 应满足:

 $-10V < U_{ic} < 9V$

5.4.4 电路如题图所示。已知 V_1 、 V_2 、 V_3 管的 $\beta = 50$, $r_{bb} = 200\Omega$, $R_C = 6K\Omega$, $U_{CC} = U_{EE} = 15 \text{V}$, $R_1 = 20 \text{K}\Omega$, $R_2 = 10 \text{K}\Omega$, $R_3 = 2.5 \text{K}\Omega$

- (1) 求 V_1 和 V_2 的静态集电极电流 I_{CO} 和晶体管的输入电阻 r_{be} ;
- (2) 分别求差模电压增益 A_{ud} ,差模输入电阻 R_{id} 和差模输出电阻 R_{od} ;
- (3) 若 u_{i1} =0, u_{i2} =10 $sin\omega t(mV)$, 试求 u_{o} =?
- (4) 若 $u_{i1}=u_{i2}=U_{ic}$, 试求 U_{ic} 允许的最大变化范围。



解:

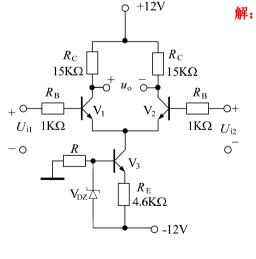
(1)
$$U_{R2} = \frac{R_2 U_{EE}}{R_1 + R_2} = \frac{10 \times 15}{20 + 10} = 5V$$

 $I_{CB} \approx I_{E3} = \frac{U_{R2} - U_{BE}}{R_3} = \frac{5 - 0.7}{2.1} = 2mA$
 $I_{EQ} = \frac{1}{2} I_{C3} = 2 \times \frac{1}{2} = 1mA$
 $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_{CQ}} = 200 + 51 \times \frac{26}{1} = 1.5 K\Omega$
(2) $R_{id} = \frac{1}{2} I_{C3} = \frac{1}{2} I_{C3} = \frac{1}{2} I_{C4} = \frac{1}$

题 5.4.4 图

5.4.5 双端输入、双端输出,带恒流源的差分放大电路如题图所示。两晶体管 特性对称, β =50, r_{bb} =300 Ω , U_{BE} =0.7V,稳压管 V_{DZ} 的稳压值 U_Z =5.3V。试 估算:

- (1) 静态工作点 I_{C1} 、 I_{C2} 、 U_{C1} 、 U_{C2} ;
- (2) 差模电压放大倍数 Aud;
- (3) 当输入电压 $u_{11}=10$ mV, $u_{12}=2$ mV 时, 双端输出信号电压 $u_{0}=?$
- (4) 最大允许共模输入电压 U_{ICM} 。



题 5.4.5 图

$$(1)I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2}I_{C3} \approx \frac{1}{2}I_{E3}$$
$$= \frac{1}{2}\frac{U_Z - U_{BE}}{R_e} = 0.5 \text{mA}$$

$$U_{\rm C1} = U_{\rm C2} = V_{\rm CC} - I_{\rm C1} R_{\rm c1} = 4.5 \text{V}$$

$$C_{12}^{12}$$
 (2) $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{E1}} \approx 2.95 \text{k}\Omega$

$$A_{\rm ud} = \frac{u_{\rm O}}{u_{\rm 11} - u_{\rm 12}} = -\frac{\beta R_{\rm c}}{R_{\rm b} + r_{\rm be}} \approx -189.87$$

$$(3) u_0 = A_{ud}(u_{11} - u_{12}) = 1.52V$$

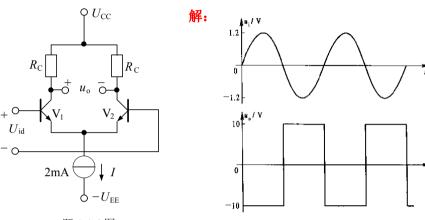
(4)正向最大共模输入电压约为 4.5V 负向最大共模输入电压约为-6V

姓名

5.4.6 电路如题图所示。已知参数如下:

$$U_{\text{CC}}=U_{\text{CE}}=15\text{V}$$
, $I=2\text{mA}$, $R_{\text{C}}=5\text{K}\Omega$, $u_{\text{id}}=1.2\text{sin}\omega t(\text{V})$

- (1) 试画出 u_0 的波形, 并标出波形幅度;
- (2) 若 $R_{\rm C}$ 变为 10K Ω , u_0 波形有何变化? 为什么?

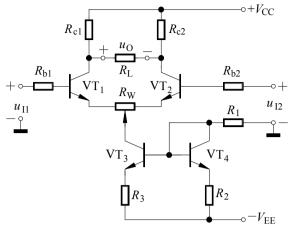


- 题 5.4.6 图
- (1) U_{id} =1.2V>>0.1V, 电路呈现限幅特性, 如图所示。
- (2) 当 $R_{\rm C}$ 变为 $10k\Omega$ 时, u_0 幅度增大,其值接近±15V,此时,一管饱和,另一管截止。
- 5.4.7 恒流源式差分放大电路如题图所示。设各晶体管特性均相同,且 $U_{\rm BE}$ =0.7V,已知电阻 R_3 =1k Ω ,电源电压 $V_{\rm CC}$ = $V_{\rm EE}$ =9V,且负电源提供的总电流为 4mA,现要求 VT_1 、 VT_2 静态集电极电流 $I_{\rm C1}$ = $I_{\rm C2}$ =1mA。试选择电阻 R_1 和 R_2 的电阻值。

M: $U_{R_2} = U_{R_3} = 2I_{C1}R_3 = 2V$

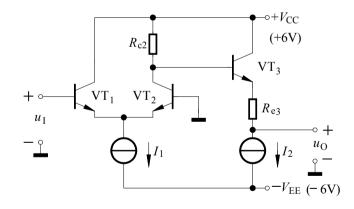
$$R_3 = \frac{U_{R_3}}{I_{C_3}} = \frac{U_{R_2}}{I_{C_3}} = \frac{I_{C_4} \cdot R_2}{I_{C_3}} = 0.93 \text{k}\Omega$$

选 R_1 为 3.3K Ω , R_2 为 1K Ω



题 5.4.7 图

5.4.8 放大电路如题图所示。设晶体管 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 特性相同,且 β =100, U_{BE} =0.7V,电阻 R_{c2} =30k Ω , R_{e3} =80 Ω ,电流源 I_1 =100 μ A, I_2 =10mA。 试求静态电压 U_{CEO1} 、 U_{CEO2} 、 U_{CEO3} ,并判断各管工作状态。



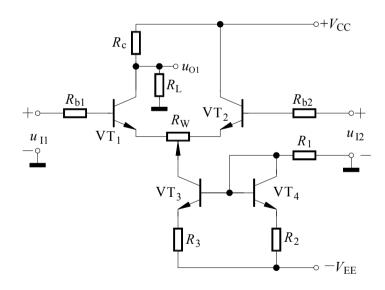
题 5.4.8 图

M: $U_{\text{CEQ1}} = V_{\text{CC}} - U_{\text{EQ1}} = 6.7\text{V}$ $I_{R_{c2}} = I_{\text{C2}} + I_{\text{B3}} = 0.15\text{mA}$

 $U_{\text{B3}}=V_{\text{CC}}-I_{R_2}\cdot R_{\text{c2}}=1.5\text{V}$,故VT₁、VT₂、VT₃均工作在放大区

姓名

- 5.4.9 恒流源式的差分放大电路如题图所示。各晶体管的参数均相同,且 β = 60, r_{bb} =300 Ω , U_{BE} =0.7V,电源电压 V_{CC} =12V, V_{EE} =6V,电阻 R_c = R_L =10k Ω , R_{b1} = R_{b2} = R_b =2k Ω , R_1 =1k Ω , R_2 = R_3 =4.3k Ω , R_W =200 Ω ,且其滑动端位于中点。试估算:
- (1) 静态时各管的 $I_{\rm C}$ 和 VT₁、VT₂管的 $U_{\rm C}$;
- (2) 差模电压放大倍数 $A_{udl} = u_{Ol}/u_{ID}$;
- (3) 差模输入电阻 R_{id} 和输出电阻 R_{od} ;
- (4) 共模电压放大倍数 $A_{uc1} = \frac{u_{O1}}{u_{Ic}}$ 和共模抑制比 $K_{CMR2} = \left| \frac{A_{ud2}}{A_{uc2}} \right|$ 。



题 5.4.9 图

(1)
$$I_{C3} = I_{C4} \approx \frac{V_{EE} - U_{BE}}{R_1 + R_2} \approx 1 \text{mA}$$

$$I_{\text{C1}} = I_{\text{C2}} = \frac{1}{2}I_{\text{C3}} \approx 0.5 \text{mA}$$

$$U_{\text{C1}} = V_{\text{CC}} \frac{R_{\text{L}}}{R_{\text{c}} + R_{\text{L}}} - I_{\text{C1}} (R_{\text{c}} // R_{\text{L}}) = 3.5 \text{V}$$

$$U_{\text{C2}} = V_{\text{CC}} = 12 \text{V}$$

(2)
$$r_{\text{bel}} = r_{\text{be2}} = r_{\text{be}} = r_{\text{bb'}} + (1 + \beta) \frac{U_{\text{T}}}{I_{\text{Cl}}} \approx 3.47 \text{k}\Omega$$

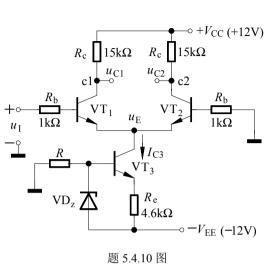
$$A_{ud1} = -\frac{1}{2} \frac{\beta (R_{c} // R_{L})}{R_{b} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{w}}{2}} \approx -13$$

(3)
$$R_{\text{id}} = 2 \left[R_{\text{b}} + r_{\text{be}} + (1 + \beta) \frac{R_{\text{w}}}{2} \right] \approx 23.14 \text{k}\Omega$$

$$R_{\rm od} \approx R_{\rm c} = 10 \text{k}\Omega$$

(4)
$$A_{uc1} = 0$$
; $K_{CMR1} = \infty$

5.4.10 单端输入、单端输出恒流源式差分放大电路如题图所示。各晶体管参数均相同, β =50, r_{bb} =300 Ω , U_{BE} =0.7V,稳压管的稳压值 U_{Z} =5.3V,输入正弦信号电压 u_{I} =10sin ω t mV,试画出 VT₁、VT₂发射极信号电压 u_{E} 及集电极信号电压 u_{C1} 和 u_{C2} (均对地)的波形图,并标出各电压的峰值。



$$\begin{array}{c|c}
u_{1}/mV \\
10 \\
0 \\
-10 \\
-10
\end{array}$$

$$u_{E}/mV \\
0 \\
u_{C1}, u_{C2}/mV \\
0 \\
0$$

$$\omega t$$

 $U_{\rm cm1} = U_{\rm cm2}$ 的计算如下:

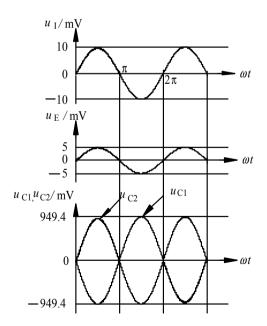
$$I_{\text{C1}} = I_{\text{C2}} \approx I_{\text{E1}} = I_{\text{E2}} = \frac{1}{2}I_{\text{E3}} = \frac{U_{\text{Z}} - U_{\text{BE}}}{2R_{\text{e}}} = 0.5 \text{mA}$$

$$r_{\text{bel}} = r_{\text{be2}} = r_{\text{be}} = r_{\text{bb'}} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{\text{El}}} \approx 2.95 \text{k}\Omega$$

$$|A_{ud1}| = |A_{ud2}| = \frac{\beta R_c}{2(R_b + r_{be})} = 94.94$$

故
$$U_{\text{cm1}} = U_{\text{cm2}} = |A_{ud1}| \cdot U_{\text{im}} = 949.4 \text{mV}$$

解:



第6章 放大电路中的反馈

6.1 知识要点

- 一、反馈的基本概念及基本关系式
- 二、反馈类型及负反馈对放大电路性能的影响
- 三、反馈放大电路的分析和近似计算
- 四、反馈放大电路稳定性讨论

6.2 重点与难点

- 一、反馈类型及其判断方法
- 二、四种基本负反馈对放大电路性能的影响
- 三、深度负反馈条件下,放大电路的近似估算
- 四、负反馈放大电路产生自激振荡的原因、放大电路稳定工作的条件

6.3 思考题

631根据	下面选项,	完成正确选择:
0.3.1 年10日		

A、直流负反馈, B、交流负反馈, C、交流正反馈

在放大电路中, 若要求稳定静态工作点, 应该引入 : 若要求稳定放 大倍数,应该引入 ; 若要求提高放大倍数,应该引入 ; 若要求展 宽通频带,应该引入; 若要求抑制温漂,应该引入。

6.3.2 根据下面选项,完成正确选择:

A、电压负反馈, B、电流负反馈, C、串联负反馈, D、并联负反馈 若要求减小放大电路向信号源索取电流,应该引入 ; 若要求有较强 的反馈作用而信号源内阻很大,则宜采用 ;若要求有较强的反馈作用而 信号源内阻很小,则宜采用 ; 若要求在负载变化时输出电流稳定,应该 引入 : 若要求在负载变化时输出电压稳定,则应该引入 。

6.3.3 交流负反馈有如下四种组态。根据下面选项,完成正确选择:

A、电压串联, B、电压并联, C、电流串联, D、电流并联 要求跨导增益 $A_{ivf}=i_o/u_i$ 稳定,应选用 : 要求跨阻增益 $A_{vif}=u_o/i_i$ 稳 定,应选用 ;要求电压增益 $A_{inf}=u_0/u_i$ 稳定,应选用 ;要求电流增 益 $A_{iif} = i_0/i_i$ 稳定,应选用 ; 要求带负载能力增强,应选用 或 ;

要求输出电阻小,应选用 或 。

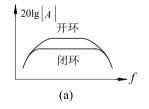
- 6.3.4 构成放大电路反馈通路的
 - A、只能是电阻、电容或电感等无源元件
 - B、只能是晶体管、集成运放等有源器件
 - C、可以是无源元件,也可以是有源器件
- 6.3.5 放大电路引入负反馈能减小非线性失真是指
 - A、负反馈放大电路总能将输入波形放大成正弦波形
 - B、反馈环外非线性元器件引起的非线性失真
 - C、反馈环内非线性元器件引起的非线性失真
- 6.3.6 负反馈放大电路最容易引起自激振荡的情况是。
 - A、闭环放大倍数 A, 大, B、开环放大倍数 A 大
- - C、环路放大倍数 AF 大, D、反馈系数 F 大

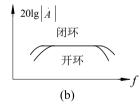
- 6.3.7 阻容耦合放大电路引入负反馈后, 直接耦合放大电路引入负反 馈后, ____。
 - A、只可能出现低频自激
 - B、只可能出现高频自激
 - C、低、高频自激均有可能出现
- 6.3.8 负反馈放大电路的闭环增益表达式为 $\dot{A}_{\rm f} = \frac{A}{1+\dot{A}\dot{F}}$ 。试分析该表达式,

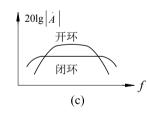
并在以下几种答案中选择正确者填空。

- A, $\dot{A}\dot{F} < -1$, B, $-1 < \dot{A}\dot{F} < 0$,
- $C \sim \dot{A}\dot{F} >> 1$

- D, $\dot{A}\dot{F} > 0$, E, $\dot{A}\dot{F} = -1$, F, $\dot{A}\dot{F} = 0$
- (1) 放大电路已进入非线性工作状态,表达式不再适用的条件是;
- (2) 放大电路变为正反馈工作状态的条件是:
- (3) 放大电路变为深度负反馈的条件是:
- (4) 放大电路不存在反馈的条件是:
- (5) 放大电路为负反馈工作状态的条件是:
- (6) 放大电路变为自激振荡的条件是。
- 6.3.9 负反馈可以展宽放大电路的通频带。有人画出了题图所示的三种负反馈 放大电路开环与闭环的对数幅频特性,其中正确的一种是。







- 6.3.10 只要在放大电路中引入正反馈,就 。在三级或三级以上的级间负 反馈放大电路中, 。
 - A、有可能产生自激,
- B、一定会产生自激
- 6.3.11 负反馈放大电路产生自激振荡的条件是
 - A, $\dot{A}\dot{F}=0$, B, $\dot{A}\dot{F}=-1$, C, $\dot{A}\dot{F}=1$, D, $\dot{A}\dot{F}=\infty$.
- 6.3.12 由集成运放 A₁、 A₂ 、A₃和晶体管 VT₁、VT₂组成的放大电路如题图

姓名

班级

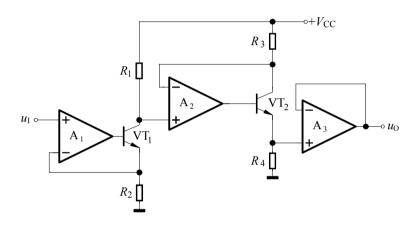
学号

- 64 -

所示。分析电路中的负反馈组态,并根据下面选项,完成正确选择:

A、电压串联, B、电压并联, C、电流串联, D、电流并联。

- (1) 运放 A_1 和晶体管 VT_1 引入的级间负反馈组态为
- (2) 晶体管 VT₁引入的局部负反馈组态为;
- (3) 运放 A₂和晶体管 VT₂引入的级间负反馈组态为;
- (4) 晶体管 VT2 引入的局部负反馈组态为;
- (5) 运放 A₃引入的局部负反馈组态为。



6.3.13 为防止多级负反馈放大电路产生自激,在选择各级参数时,应____。

A、尽量一致, B、尽量分散, C、无特殊要求。

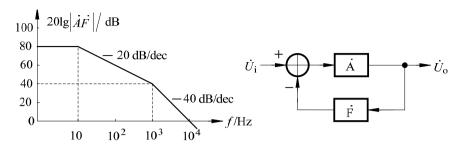
- 6.3.14 放大电路引入负反馈所能抑制的干扰和噪声是指____。
 - A、输入信号所包含的干扰和噪声
 - B、反馈环内的干扰和噪声
 - C、反馈环外的干扰和噪声
- 6.3.15 一个反馈放大电路在反馈系数 $\dot{F} = 0.1$ 时的对数幅频特性如图所示。试就下列问题选择正确答案填空。
- (1) 其基本放大电路的放大倍数 $|\dot{A}|$ 是_____,接入反馈后闭环放大倍数 $|\dot{A}_{\rm f}| = |\dot{U}_{\rm o}/\dot{U}_{\rm i}|$ 是_____。

A, 10, B, 10^2 , C, 10^3 , D, 10^4 , E, 10^5 , F, 10^6

(2) 已知 $\dot{A}\dot{F}$ 在低频时为正数,当电路按负反馈连接时,若不加校正环节,

则系统____。

A、不会自激, B、可能自激, C、一定自激。



6.3.16 填空。若要求负反馈放大电路的闭环电压增益 A_{uf} 为 40dB,而且当开环电压增益 A_u 变化 10%时, A_{uf} 的变化为 1%,则其反馈深度为_____dB,开环电压增益 A_u 应为_____dB;

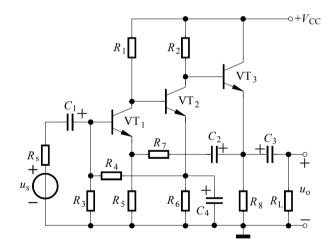
6.3.17 填空。已知某放大电路在输入信号电压为 1mV 时,输出电压为 1V; 当引入负反馈后达到同样的输出电压时,需外加输入信号电压为 10mV。由 此可知所加的反馈深度为_____dB,反馈系数约为_____dB。

6.3.18 填空。已知某负反馈放大电路的反馈深度为 20dB,开环时的输出电阻 为1kΩ。若引入的是电压负反馈,则闭环时环内的输出电阻将变为_____; 若引入的是电流负反馈,则闭环时环内的输出电阻将变为_____。

6.3.19 根据题图所示的反馈放大电路,选择正确的答案填空:

- (1) 若将电容 C_4 开路。则将 ;
 - A、影响静态工作点,且影响电压放大倍数
 - B、影响静态工作点,但不影响电压放大倍数
 - C、不影响静态工作点,但影响电压放大倍数
 - D、不影响静态工作点,也不影响电压放大倍数
- (2) 若将电容 C_2 开路。则将 ;
 - A、对电路的静态工作点和动态性能均有影响
 - B、对电路的静态工作点和动态性能均无影响
 - C、影响静态工作点,但不影响电路的动态性能,
 - D、不影响静态工作点,但使该支路的负反馈效果消失

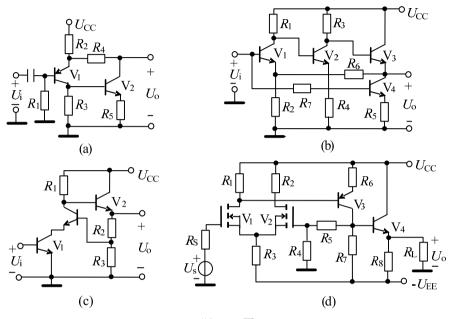
- (3) 若将电容 C_2 短路,但仍能正常放大,则将 ;
 - A、有利于静态工作点的稳定
 - B、使静态工作点的稳定性变差
 - C、对电路的静态工作点和动态性能均无影响
 - D、不影响静态工作点,只影响电路的动态性能
- (4) 若 R₇增大,则;
 - A、交流负反馈增强, B、交流负反馈减弱,
 - C、不影响反馈深度, D、使静态工作点不稳定
- (5) 在正常放大条件下,若 R_4 减小,则 ;
 - A、电压放大倍数增大
 - B、电压放大倍数减小
 - C、电压放大倍数变化不大



答案:			
6.3.1	ABCBA	6.3.2	CDCBA
6.3.3	C B A D AB AB		
6.3.4	C	6.3.5	C
6.3.6	C	6.3.7	CB
6.3.8	ABCFDE	6.3.9	a
6.3.10	AA	6.3.11	В
6.3.12	CCCAA	6.3.13	В
6.3.14	В	6.3.15	EA A
6.3.16	20dB, 60dB	6.3.17	20dB, -41dB
6.3.18	100Ω , $10\mathrm{k}\Omega$	6.3.19	CDABC

6.4 习题

6.4.1 试判断题图所示各电路的级间反馈类型和反馈极性。



题 6.4.1 图

解: 电路(a)为串联电压负反馈。

电路(b)为串联电压负反馈。

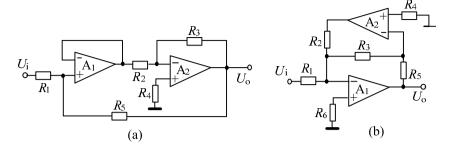
电路(c) V₁与 V₃间为电压串联负反馈。

电路(d)为电压由 V_3 的射极经 R_6 至 V_1 的射极组成了电压串联负反馈。

6.4.2 试判别题图所示各电路的反馈类型和反馈极性。

解: 电路(a)为电压并联负反馈。

电路(b): \mathcal{L}_{A_2} 、 R_2 组成电压并联正反馈电路; \mathcal{L}_{A_2} 经 \mathcal{L}_{A_2} 从 电压并联负反馈电路。



题 6.4.2 图

6.4.3 某一电压串联负反馈放大器,其基本放大器的电压增益 A_u =100,反馈 网络的反馈系数 B_u =0.1。由于温度变化, A_u 增大到 120,试求负反馈放大电路的电压增益变化率 $\Delta A_{uf}/A_{uf}$ 。

解:
$$\frac{\Delta A_{vf}}{A_{vf}} = \frac{\Delta A_{v}}{A_{v}} \bullet \frac{1}{(1 + A_{v} + \Delta A_{v})B_{v}} \approx 1.54\%$$

或
$$\frac{\Delta A_{vf}}{A_{vf}} = \frac{\Delta A_{v}}{A_{v}} \bullet \frac{1}{1 + A_{v}B_{v}} \approx 1.8\%$$

6.4.4 某一放大器的电压放大倍数 A_u 在 150~600 之间变化,现加入负反馈,反馈系数 F_u =0.06,问:闭环放大倍数的最大值和最小值之比是多少?

解: 因 为
$$A_i = \frac{A}{1 + AF}$$
,所以
$$A_{f \min} = \frac{A_{\min}}{1 + A_{\min}F} = \frac{150}{1 + 150 \times 0.06} = 15$$

$$A_{f \max} = \frac{A_{\max}}{1 + A_{\max}F} = \frac{600}{1 + 600 \times 0.06} \approx 16.2$$
故 $\frac{A_{f \max}}{A_{f \min}} = \frac{16.2}{15} = 1.08$

6.4.5 某一电压串联负反馈放大电路,其环路增益 T=49,环路增益的变化量 ΔT =25,设反馈系数 $B_{\rm u}$ 为常数,试求负反馈放大电路电压增益 $A_{\rm uf}$ 的相对变化量。

解:因为环路增益的变化量较大,负反馈放大电路电压放大倍数相对于环路增益的变化量为

$$\frac{\Delta A_{uf}}{A_{uf}} = \frac{\Delta A_u}{A_u} \cdot \frac{1}{1 + (A_u + \Delta A_u)B_u}$$

因为 $T = A_{\mu}B_{\mu}$, $\Delta T = \Delta A_{\mu}B_{\mu}$,所以上式又可写为

$$\frac{\Delta A_{uf}}{A_{uf}} = \frac{\Delta T}{T} \cdot \frac{1}{1 + A_u B_u + \Delta A_u B_u}$$
$$= \frac{\Delta T}{T} \cdot \frac{1}{1 + T + \Delta T} = \frac{25}{49} \cdot \frac{1}{1 + 49 + 25} = 0.0068$$

6.4.6 一个电压并联负反馈放大器开环互阻增益 $A_{\rm r}$ = $10^3{\rm k}\Omega$,互导反馈系数 $B_{\rm e}$ = $0.01{\rm m}{\rm S}$,试求:

- (1)当开环互阻增益的相对变化率为 $\Delta A_{\rm r}/A_{\rm r}$ =20%时,闭环互阻增益的相对变化率 $\Delta A_{\rm rf}/A_{\rm rf}$;
- (2) 当信号源内阻 $R_{\rm S}$ 不变时,闭环电压增益的相对变化率 $\Delta A_{uf}/A_{uf}$ 。

M: (1)
$$\frac{\Delta A_{rf}}{A_{rf}} = \frac{\Delta A_r}{A_r} \cdot \frac{1}{1 + (A_r + \Delta A_r)B_g} \approx 1.54\%$$

(2) 因为 $A_{uf} = \frac{U_o}{I_S R_S} = A_{rf} \cdot \frac{1}{R_S}$, R_S 不变,则闭环电压增益的相对变化

率也为
$$\frac{\Delta A_{uf}}{A_{uf}} \approx 1.54\%$$

6.4.7 有一个电压串联负反馈放大器,其开环基本放大电路的电压放大倍数 $A_u=U_o/U_i=800$,输入电阻 $R_i=6k\Omega$,输出电阻 $R_o=4k\Omega$,负载电阻 $R_i=10k\Omega$,反馈系数 $B_u=0.015$,信号源内阻 $R_s=1k\Omega$ 。

- (1) 试计算电路的反馈深度 D:
- (2) 计算反馈电压放大倍数 A_{uf} , 输入电阻 R_{if} 和源电压增益 A_{usf} ;
- (3) 计算输出电阻 $R_{\rm of}$ 。

解:

(1)
$$D = 1 + A_u B_u = 1 + 800 \times 0.015 = 13$$

(2)
$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + A_u B_u} = \frac{800}{13} = 61.5$$

$$R_{if} = R_i (1 + A_u B_u) = 6 \times 13 = 78 k\Omega$$

$$A_{usf} = A_{uf} \frac{R_{if}}{R_S + R_{if}} = 61.5 \times \frac{78}{1 + 78} = 60.7$$

$$(3) \quad R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_{uso} B_u}$$

式中 A_{uso} ,是基本放大电路 R_L 开路时的源电压增益

$$A_{uso} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_{uo} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_u \cdot \frac{R_o}{R_o / / R_L} = \frac{6}{1 + 6} \times 800 \times \frac{4}{4 / / 11} = 960$$

所以
$$R_{of} = \frac{4}{1 + 960 \times 0.015} \approx 260\Omega$$

显然,电压串联负反馈可使电压增益下降,输入电阻增加,输出电阻下降。

6.4.8 某放大器的放大倍数 A(jω)为

$$A(j\omega) = \frac{1000}{1 + j\frac{\omega}{10^6}}$$

姓名

若引入F=0.01的负反馈,试问:

- (1) 开环中频放大倍数 A=? $f_H=?$
- (2) 闭环中频放大倍数 A_{lf} =? f_{Hf} =?

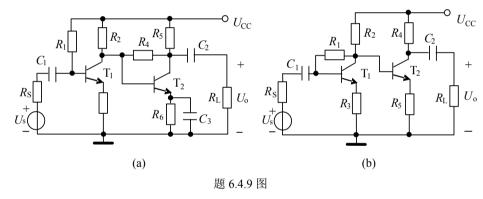
 $(1)A_I = 1000(60dB)$

$$f_{H} = \frac{\omega_{H}}{2\pi} = \frac{10^{6}}{2\pi} = 159.2kHz$$

$$(2)A_{If} = \frac{A_{I}}{1 + FA_{I}} = \frac{1000}{1 + 0.01 \times 1000} = 90.9$$

$$f_{Hf} = (1 + FA_{I})f_{H} = 11 \times 159.2 \times 10^{3} = 1.7512MHz$$

6.4.9 电路如题图(a)和(b)所示。试问:



- (1) 反馈电路连接是否合理? 为发挥反馈效果,两个电路对 R_S 有何要求?
- (2)当信号源内阻变化时,哪个电路的输出电压稳定性好?哪个电路源电压增益的稳定性能力强?
- (3) 当负载 R_L 变化时,哪个电路输出电压稳定性好?哪个电路源电压增益稳定能力强?
- **解**: (1) 图(a): 第一级是电流串联负反馈,第二级是电压并联负反馈,第一级对第二级相当于恒流源激励,对第二级是合理的;对第一级要求恒压源激励,以使电流串联负反馈起作用,即 R_S 越小越好。
 - 图(b): 第一级是电压并联负反馈,第二级是电流串联负反馈,第一级对

第二级相当于恒压源激励,对第二级是合理的;对第一级要求恒流源激励以使电压并联负反馈起作用,即 Rs 越大越好。

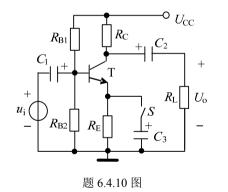
(2) 图(a): 输入端是串联负反馈, R_{if} 大, R_{S} 小,而且 R_{if} >> R_{S} ,当 R_{S} 变化时,源电压增益的变化不大,即稳定性较好,输出电压当然也就稳定。

图(b): 输入端是并联负反馈, R_{if} 小, R_{S} 大,而且 R_{if} << R_{S} ,当 R_{S} 变化时,源电压增益不稳定,输出电压也不稳定

(3) 图(a): 输入端是电压负反馈, R_{of} 小,是恒压源, R_{L} 变化时,输出电压稳定,源电压增益也稳定。

图(b): 输出端是电流负反馈, $R_{\rm of}$ 大,是恒流源, $R_{\rm L}$ 变化时,输出电压不稳定,源电压增益也不稳定。

6.4.10 电路如题图所示,试从反馈的角度回答: 开关 S 的闭合和打开,对电路性能的影响(包括增益、输入电阻、输出电阻、上限频率、下限频率等)。



解:

S 闭合,电路仅有直流负反馈,S 打开,电路便引入了串联电流负反馈(反馈网络为 $R_{\rm E}$),那么,增益将减小,输入电阻将增大,输出电阻基本不变(管子一路输出电阻增大,但与 $R_{\rm C}$ 并联后,总的输出电阻仍近似为 $R_{\rm C}$),上限频率 $f_{\rm H}$ 提高,下限频率 $f_{\rm L}$ 将下降。

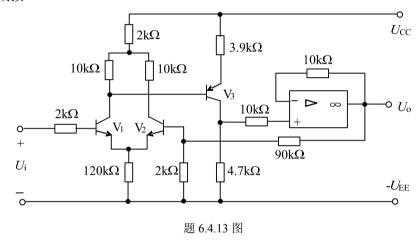
- 6.4.11 反馈放大器电路如题图所示, 试回答:
- (1)判断该电路引入了何种反馈?反馈网络包括哪些元件?工作点的稳定主要依靠哪些反馈?
- (2) 该电路的输入输出电阻如何变化,是增大还是减少了?
- (3) 在深反馈条件下,交流电压增益 A_{uf} =?

(2) 闭环增益 A_{uf} 为

$$A_{u} = \frac{U_{O}}{U_{i}} = \frac{U_{O1}}{U_{i}} \times \frac{U_{O}}{U_{O1}} = \left(1 + \frac{R_{3}}{R_{2}}\right) \times \left(-\frac{R_{5}}{R_{4}}\right) = -\frac{R_{5}}{R_{4}} \left(1 + \frac{R_{3}}{R_{2}}\right)$$

6.4.13 负反馈放大电路如题图所示。

- (1) 试判别电路中引入了何种反馈?
- (2)为得到低输入电阻和低输出电阻,应采用何种类型的负反馈?电路应如何改接?

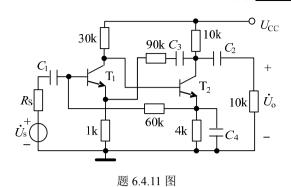


解:

- (1)输出信号 U_0 通过 $90k\Omega$ 电阻接至 V_2 的基极,故构成电压串联负反馈。
- (2) 应采用电压并联负反馈。其改接方法为:将 V_3 的基极由接在 V_1 的集电极改接到 V_2 的集电极;将输出端的 $90k\Omega$ 电阻,由接在 V_2 的基极改接到 V_1 的基极。

6.4.14 电路如题图(a)和(b)所示,各电容对信号可视为短路。

- (1) 试分别判断电路级间交流反馈的极性和类型;
- (2) 分别写出反馈系数的表达式;
- (3) 分别估算满足深度反馈条件下的源电压增益 Ausf 的表达式或数值。

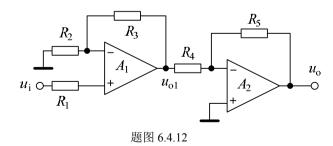


 \mathbf{M} : (1) 90 $k\Omega$ 电阻和 1 $k\Omega$ 电阻构成两级之间的交流串联电压负反馈。

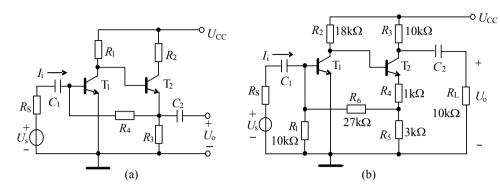
- $4k\Omega$ 、 $60k\Omega$ 以及 V_1 构成两级之间的直流电流负反馈,以保证直流工作点更加稳定。
 - (2) 该电路输入阻抗增大,输出阻抗减小。
 - (3) 在深反馈条件下:

$$A_{ui} = \frac{1}{F} = \frac{1k + 90k}{1k} = 91$$

- 6.4.12 电路如题图所示,试回答:
- (1) 集成运放 A₁和 A₂各引进什么反馈?
- (2) 求闭环增益 $A_{uf}=U_0/U_i$ 。



 \mathbf{M} : (1) 运放 \mathbf{A}_1 引入了串联电压负反馈;运放 \mathbf{A}_2 引入了并联电压负反馈。



姓名

题 6.4.14 图

解: (1) 图(a): 电压并联负反馈 图(b): 电流并联负反馈

(2)
$$\mathbb{E}(a)$$
: $B_g = \frac{I_f}{U_a} = -\frac{1}{R_4}$ $\mathbb{E}(b)$: $B_i = \frac{I_f}{I_{C2}} = \frac{R_5}{R_5 + R_6}$

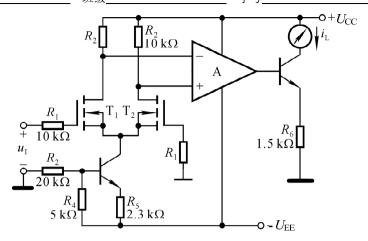
(3)
$$\boxtimes$$
 (a): $A_{usf} = -\frac{R_4}{R_5}$ \boxtimes (b): $A_{usf} = -\frac{R_5 + R_6}{R_5} \times \frac{R_3 \| R_L}{R_S} = 50$

6.4.15 电路如题图所示。

- (1) 试通过电阻引入合适的交流负反馈,使输入电压 u_1 转换成稳定的输出电流 i_1 ;
- (2) 若 u_I = 0~5V 时, i_L =0~10mA,则反馈电阻 R_F 应取多少?

解:

(1)引入电流串联负反馈,通过电阻 R_f 将三极管的发射极与 T_2 管的栅极连接起来。



题 6.4.15 图

(2) 首先求解 \dot{F} , 再根据 $\dot{A}_{\varepsilon} \approx 1/\dot{F}$ 求解 R_{f} 。

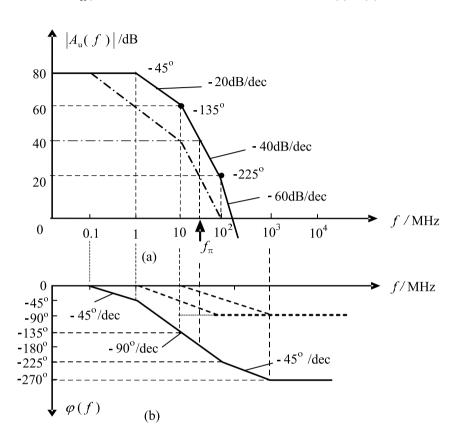
$$\dot{F} = \frac{R_{\rm i}R_{\rm f}}{R_{\rm i} + R_{\rm f} + R_{\rm 6}}$$
 $\dot{A}_{\rm f} \approx \frac{R_{\rm i} + R_{\rm f} + R_{\rm 6}}{R_{\rm i}R_{\rm f}}$ 代入数据
$$\frac{10 + R_{\rm f} + 1.5}{10 \times 1.5} = \frac{10}{5}$$
 所以 $R_{\rm f} = 18.5 \, \mathrm{k} \, \Omega$

6.4.16 已知某电压串联反馈放大器,其基本放大器的电压增益表达式为

$$A_{u}(jf) = \frac{10^{4}}{\left(1 + j\frac{f}{10^{6}}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^{7}}\right)^{2}\left(1 + j\frac{f}{10^{8}}\right)}$$

- (1) 画出 $A_u(if)$ 的幅频和相频的渐进波特图,并标出每个线段的斜率;
- (2) 利用渐进波特图说明在什么频率下,该电路将产生自激?
- (3) 为了使电路在闭环后能稳定地工作,并具有 45° 的相位裕量,利用波特图说明反馈系数的最大值 $B_{\rm u}$ 为多少?
- (4) 若要求闭环增益 A_{uf} =100,有 45° 的相位裕量,已知产生第一个极点频率的节点呈现的等效电阻 R_1 =100kΩ,采用简单电容补偿时的补偿电容值?

解: (1) $A_{uf}(if)$ 的幅频和相频渐进波特图分别如下答图(a)和(b)所示。



- (2) 由答图 (a)可知, 在 f_{π} =31.6MHz 时, 反馈放大器将产生自激。
- (3) 若留 45° 的相位裕量,从答图(a)上可以看出,相应的 $20 \lg A_f = 60 dB$,

则
$$B \approx \frac{1}{A_f} = \frac{1}{10^3}$$
。

(4) $20lgA_f = 40dB$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_{n_1} R_1} = \frac{1}{2\pi f_1 R_1} = \frac{1}{6.28 \times 10^6 \times 100 \times 10^3} = 1.6 \, pF$$

采用补偿电容后,第一个极点频率移到 f_d ,

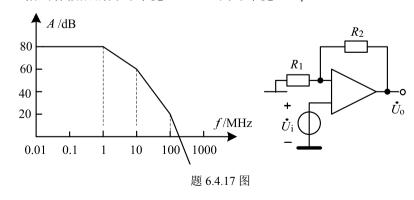
$$f_d = \frac{f_{p2}}{A_{ud}B_u} = \frac{f_{p2}}{A_{ud}}A_{uf} = \frac{10^7}{10^4} \times 10^2 = 10^5$$

补偿电容为

$$C_{\varphi} = \frac{1}{w_d R_1} - C_1 = \frac{1}{2\pi \times 10^{5 \times 10} \times 10^5} - 1.6 = 14.4(pF)$$

如果
$$A_{\rm uf}$$
 = 1, 则 f_d = $10^3 HZ$ $C_{\omega} \approx 1600 pF$

- 6.4.17 某放大器的开环幅频响应如题图所示。
- (1) 问当施加 F=0.001 的负反馈时,此反馈放大器是否能稳定工作?相位裕度等于多少?
- (2) 若要求闭环增益为 40dB,为保护相位裕度大于等于 45°,试直接在题图上画出密勒电容补偿后的开环幅频特性曲线;
- (3) 指出补偿后的开环带宽 BW=? 闭环带宽 BW_f=?



姓名

圧级

学号

72 -

解: (1) F=0.001, A_f=1/F=1000(60dB), 此时有 45°相位裕度。

- (2) 要求 A_f =100 (40dB), 仍有 45° 的相位裕度。开环特性应校正为的曲 线略。
- (3) 补偿后的开环带宽 BW=0.1MHz, 闭环带宽 BW_f=10MHz。

6.4.18 已知负反馈放大电路的
$$\dot{A} = \frac{10^4}{(1+j\frac{f}{10^4})(1+j\frac{f}{10^5})^2}$$
 。

试分析:为了使放大电路能够稳定工作(即不产生自激振荡),反馈系数的上限值为多少?

解: 根据放大倍数表达式可知,放大电路高频段有三个截止频率, 分别为

$$f_{L1} = 10^4 \text{Hz}$$
 $f_{L2} = f_{L3} = 10^5 \text{Hz}$

因为 $f_{L2}=f_{L3}=10\,f_{L1}$,所以,在 $f=f_{L2}=f_{L3}$ 时, |A|约为 60dB,附加相移 约为 -180° 。

为了使 $f = f_{L2} = f_{L3}$ 时的 $20 \lg |\dot{A}\dot{F}|$ 小于 0 dB,即不满足自激振荡的幅值条件, 反馈系数 $20 \lg |\dot{F}|$ 的上限值应为-60 dB,即 \dot{F} 的上限值为 10^{-3} 。

6.4.19 已知反馈放大器的环路增益为

$$A_u(j\omega)F = \frac{40F}{\left(1 + j\frac{\omega}{10^6}\right)^3}$$

- (1) 若 F=0.1,该放大器会不会自激?
- (2) 该放大器不自激所允许的最大 F 为何值?
- (3) 若要求有 45° 的相位裕度,则最大 F 应为何值?

解: (1) 由题可知,开环放大倍数为 $A_{\rm u}(j\omega) = \frac{40}{\left(1+j\frac{\omega}{10^6}\right)^3}$

它是一个具有 3 个重极点的放大器,如果每级附加移相为 -60° ,则三级共移相 -180° ,那么加反馈后会开始自激。因为每级相移为 -60° ,那么有 $-\arctan\frac{\omega}{10^6}$ = -60°

由此可导出所对应的频率为
$$|A_u(j)\sqrt{3}\times10^6| = \frac{40}{\left(\sqrt{1+(\sqrt{3})^2}\right)^3} = 5$$

然后再看是否满足振荡条件(即附加相移 $\Delta \psi = -180^\circ$ 时, $|A_u \cdot F|$ 是否大于等于 1)。 $|A_u(j\omega)|_{\omega = \sqrt{3} \times 10^6} \times F = 5 \times 0.1 = 0.5 < 1$

可见,该放大器引入F=0.1的负反馈后不会产生自激振荡。

(2) 求该放大器不产生自激的最大允许值 F_{max}=?

曲
$$|A_u(j\omega)| \times F_{\text{max}} = 1$$
,可得 $F_{\text{max}} = \frac{1}{|A_u(j\omega)|} = \frac{1}{5} = 0.2$

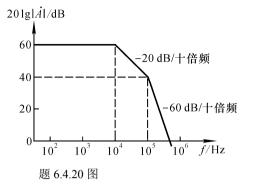
(3) 若要求有 45° 的相位裕度,则每级相移为 -135° / $3=-45^{\circ}$,所对应的上限频率 $\omega=10^{6}$,开环增益为

$$A_{u}(j\omega)|_{\omega=10^{6}} = \frac{40}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega^{2}}{10^{6}}\right)^{3}}} = \frac{40}{\left(\sqrt{2}\right)^{3}} = 14.13$$

那么
$$|A_u(j\omega)| \times F_{\text{max}} \le 1$$
, $F \le \frac{1}{|A_u(j\omega)|} = \frac{1}{14.13} = 0.07$

可见,要求有45°的相位裕度,反馈系数必须小于等于0.07。

6.4.20 已知一个负反馈放大电路的基本放大电路的对数幅频特性如题图所示,反馈网络由纯电阻组成。试问:若要求电路稳定工作,即不产生自激振荡,则反馈系数的上限值为多少分贝?简述理由。



解:

因为 $f = 10^5$ Hz 时, $20 \lg |\dot{A}| = 40 dB$, $\varphi_A = -180^\circ$; 为使此时 $20 \lg |\dot{A}\dot{F}| < 0$,则需 $20 \lg |\dot{F}| < -40 dB$,即 $|\dot{F}| < 10^{-2}$

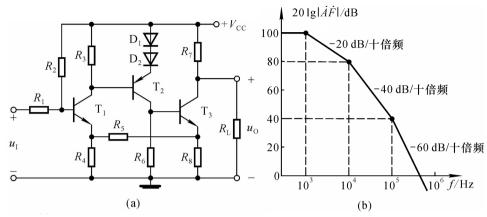
- 6.4.21 题图 (a) 所示放大电路 $\dot{A}\dot{F}$ 的波特图如题图 (b) 所示。
- (1) 判断该电路是否会产生自激振荡? 简述理由:
- (2) 若电路产生了自激振荡,则应采取什么措施消振?要求直接在题图(a)中画出来;
- (3) 若仅有一个 50pF 电容,分别接在三个三极管的基极和地之间均未能消振,则将其接在何处有可能消振?为什么?

解:

- 解: (1) 电路一定会产生自激振荡。 因为在 $f=10^3$ Hz 时附加相移为 -45° , 在 $f=10^4$ Hz 时附加相移约为 -135° , 在 $f=10^5$ Hz 时附加相移约为 -225° , 因此附加相移为 -180° 的频率在 10^4 Hz $\sim 10^5$ Hz 之间,此时 $|\dot{A}\dot{F}| > 0$,故一定会产生自激振荡。
 - (2) 可在晶体管 T₂的基极与地之间加消振电容。

注:方法不唯一。

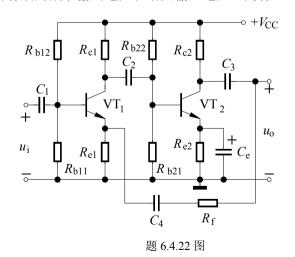
(3)可在晶体管 T_2 基极和集电极之间加消振电容。因为根据密勒定理,等效在基极与地之间的电容比实际电容大得多,因此容易消振。



题 6.4.21 图

6.4.22 反馈放大电路如图所示,若将电路中的反馈取样点从输出端改接至 VT_2 的集电极,去掉反馈支路中的隔直电容(将 C_4 短路),并在输入端接上一个具有10M Ω 内阻的电压信号源。试问:

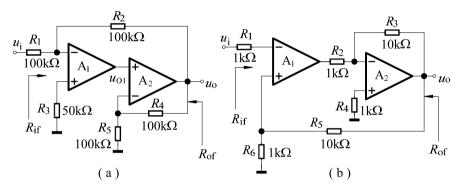
- (1) 能否稳定电路的静态工作点? 为什么?
- (2) 能否有效的减小输出电阻和增大输入电阻? 为什么?



- \mathbf{M} : (1) 不能。因为隔直电容 C_2 仍然存在,不能构成直流负反馈通路。
 - (2) 不能。因为信号内阻太大,使串联反馈效果很差。

6.4.23 由集成运放 A_1 、 A_2 等元器件组成的两个反馈放大电路如题图所示,设 A_1 、 A_2 均为理想运放。试计算

- (1) 闭环电压放大倍数 $A_{mf} = u_0/u_i$;
- (2) 输入电阻 R_{if};
- (3) 输出电阻 Rof。



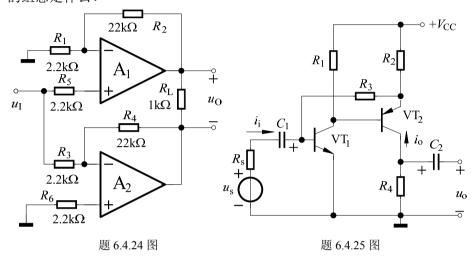
题 6.4.23 图

解: (1) 图 (a):
$$A_{uuf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1} = -1$$

图 (b):
$$A_{uuf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_5}{R_6} = 11$$

- (2) 图 (a): $R_{if} = R_1 = 100 \text{k}\Omega$, 图 (b): $R_{if} = \infty$
- (3) 图 (a): $R_{\text{of}} = 0$, 图 (b): $R_{\text{of}} = 0$

6.4.24 由集成运放 A_1 、 A_2 组成的反馈放大电路如图所示。试指出电路中的放大通路和反馈通路,判断其反馈极性,是直流反馈还是交流反馈,交流反馈的组态是什么?



解: 电阻 R_5 和运放 A_1 为放大通路,其反馈通路由电阻 R_1 、 R_2 组成,且为交、直流负反馈,其交流反馈组态为 电压串联负反馈;电阻 R_3 和运放 A_2 为另一放大通路,其反馈通路由电阻 R_4 组成,且为交、直流负反馈,其交流反馈组态为 电压并联负反馈。

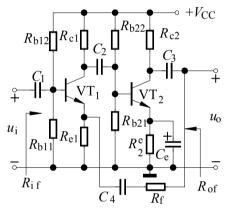
6.4.25 两级反馈放大电路如题图所示,设电容 C_1 、 C_2 对交流信号均可视为短路。已知电阻 $R_1 = R_2 = R_4 = 10 \mathrm{k}\Omega$, $R_3 = 15 \mathrm{k}\Omega$, $R_s = 4.7 \mathrm{k}\Omega$ 。试指出级间反馈支路,判断反馈极性和组态;若为负反馈,试估算闭环电流放大倍数 $A_{iif} = \frac{i_o}{i_i}$ 及闭环电压放大倍数 $A_{uuf} = \frac{u_o}{u_s}$ 。

 \mathbf{M} : 级间交流反馈支路为 R_3 、 R_s , 电流并联负反馈。

闭环电流放大倍数
$$A_{iif} = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_{e2}}{i_i} \approx -\frac{R_2 + R_3}{R_2} = -2.5$$

闭环电压放大倍数
$$A_{uuf} = \frac{u_o}{u_s} \approx \frac{-i_o R_4}{i_i R_s} \approx 5.3$$

6.4.26 两级电压串联负反馈放大电路如题图所示。已知电阻 $R_{\rm el}=200\Omega$, $R_{\rm bl1}=10{\rm k}\Omega$, $R_{\rm bl2}=30{\rm k}\Omega$, $R_{\rm c2}=3{\rm k}\Omega$, $R_{\rm f}=9.8{\rm k}\Omega$, 并设所有电容器对交流信号均可视为短路。试在深度负反馈条件下估算:输入电阻 $R_{\rm if}=?$ 输出电阻 $R_{\rm of}=?$ 闭环电压放大倍数 $A_{\rm uuf}=\frac{u_{\rm o}}{u_{\rm i}}=?$



题 6.4.26 图

题 6.4.27 图

M:
$$A_{uuf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_{el}} = 50$$
,

$$R_{\rm if} \approx R_{\rm b11} // R_{\rm b12} = 7.5 {\rm k}\Omega$$

$$R_{\rm of} = 0$$

6.4.27 理想集成运放 A 组成的反馈放大电路如图所示,试写出电路下列性能指标的表达式:

- (1) 闭环放大倍数 $A_{iif} = \frac{i_o}{i_i}$ 和 $A_{iuf} = \frac{i_o}{u_i}$;
- (2) 输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

#: 1.
$$i_0 = i_{R_3} - i_f$$
, $i_f = i_i = \frac{u_i}{R_1}$

$$i_{R_3} = \frac{u_{R_3}}{R_3}$$
, $u_{R_3} = -i_{\rm f}R_2 = \frac{-R_2}{R_1}u_{\rm i}$

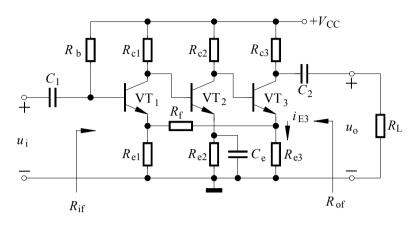
$$i_{R_3} = -\frac{R_2}{R_1 R_3} u_i$$
, $i_0 = -\frac{R_2 + R_3}{R_1 R_3} u_i = -\frac{R_2 + R_3}{R_3} i_i$

故
$$A_{iif} = -\frac{i_o}{i_i} = -\frac{R_2 + R_3}{R_3}$$

$$A_{iuf} = -\frac{i_o}{u_i} = -\frac{R_2 + R_3}{R_1 R_3}$$

2.
$$R_{\rm if} \approx R_1$$
, $R_{\rm of} = \infty$

- 6.4.28 三级反馈放大电路如题图所示,设容抗均可忽略不计。
- (1) 指出级间交流反馈支路的反馈极性与组态,写出反馈系数表达式;
- (2) 写出深度负反馈闭下环电压放大倍数 A_{uuf} 、输入电阻 R_{if} 以及输出电阻 R_{of} 的表达式。



题 6.4.28 图

 \mathbf{M} : (1) $R_{\rm f}$ 、 $R_{\rm el}$ 、 $R_{\rm e3}$ 为级间交流电流串联负反馈支路,

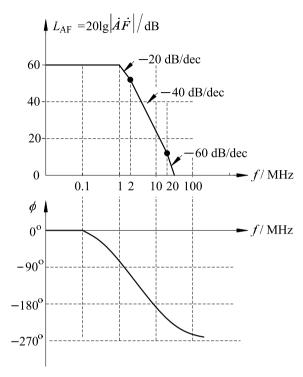
反馈系数
$$F_{ui} = \frac{u_f}{i_{e3}} = \frac{R_{e1}R_{e3}}{R_{e1} + R_{e3} + R_f};$$

(2)
$$\boxtimes u_{\rm i} \approx u_{\rm f} = \frac{R_{\rm e1}R_{\rm e3}}{R_{\rm e1} + R_{\rm e3} + R_{\rm f}} i_{\rm e3} = \frac{R_{\rm e1}R_{\rm e3}}{R_{\rm e1} + R_{\rm e3} + R_{\rm f}} \left(-\frac{u_{\rm o}}{R_{\rm c3} //R_{\rm L}}\right)$$

故
$$A_{uuf} = \frac{u_o}{u_i} \approx -\frac{R_{e1} + R_{e3} + R_f}{R_{e1}R_{e3}} \cdot \frac{R_{c3}R_L}{R_{c3} + R_L}$$

$$R_{\rm if} \approx R_{\rm b}$$
, $R_{\rm of} \approx R_{\rm c3}$

- 6.4.29 某一反馈放大电路回路增益的波特图如题图所示,又已知反馈系数 \dot{F} = -0.1。完成:
- (1) A的频率特性表达式;
- (2) 该电路闭环时能否稳定工作?
- (3) 若要求该电路具有 $G_m = -10$ dB 的幅度裕度, $\dot{F} = ?$



题 6.4.29 图

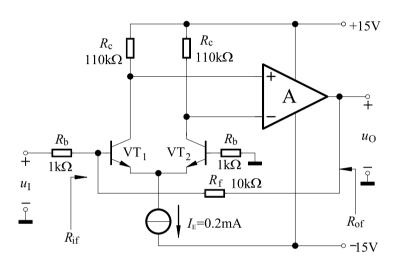
解: (1)
$$\dot{A} = \frac{-10^4}{\left(1 + j\frac{f}{1}\right)\left(1 + j\frac{f}{2}\right)\left(1 + j\frac{f}{20}\right)}$$
 (f单位 MHz)

- (2) 否,因为当 $\phi = -180^{\circ}$ 时, $L_{AF} = 20 dB > 0$
- (3) -0.0003 (-70dB)

(提示:
$$201g|\dot{F}| = -20dB - 40dB - 10dB = -70dB$$
)

6.4.30 在题图所示的反馈放大电路中,设 VT_1 、 VT_2 为特性对称的硅三极管,A 为理想运放。试计算电路的下列性能指标。

(1) 闭环电压放大倍数 $A_{uuf} = \frac{u_o}{u_i}$; (2) 输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

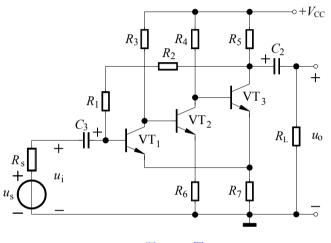


题 6.4.30 图

M: (1)
$$A_{uuf} = \frac{u_o}{u_i} \approx -\frac{R_f}{R_b} = -10$$

(2)
$$R_{\rm if} \approx R_{\rm b} = 1 \text{k}\Omega$$
, $R_{\rm of} = 0$

- 6.4.31 放大电路如图所示,设电容器对交流信号均可视为短路。
- (1) 说明图中两路级间反馈的类型及其对静态工作点和输入电阻的影响;
- (2) 两路反馈对输入电阻的影响是否有矛盾?若有,可对某一路反馈进行改动(加进一个元件),使整个电路的输入电阻增加,又能保持各级静态工作点的稳定,试问在电路的什么地方,加进什么元件?并在图中画出。



题 6.4.31 图

解:

- (1) R_1 、 R_2 引入直流负反馈,稳定 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 三级放大电路的静态工作点,同时又是交流电压并联负反馈,使输入电阻减小。
- R_7 引入直流负反馈,稳定 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 三级放大电路的静态工作点,同时又是交流电流串联负反馈,使输入电阻增大。
- (2) 两路级间交流负反馈对输入电阻的影响恰好相反,为增加输入电阻,又保持静态工作点的稳定,可在电阻 R_1 和 R_2 的连接点对地接一个电容量足够大的电容器,以消除交流并联负反馈对输入电阻的影响,保持直流负反馈,稳定各级静态工作点。

第7章 集成运算放大器的应用

7.1 知识要点

- 一、集成运算放大电路在信号运算电路中的应用
- 二、集成运算放大电路在电压比较电路中的运用
- 三、集成运算放大电路在驰张振荡器中的运用

7.2 重点与难点

- 一、理想集成运算放大电路的概念
- 二、集成运算放大电路——比例放大电路的分析方法
- 三、集成运算电路——加法器、减法器、微分器、积分器的结构、工作原理和分析方法
- 四、典型电压比较器的电路组成、工作原理和性能特点
- 五、驰张振荡器的电路组成、工作原理和性能特点

7.3 思考题

7.3.1 与工作在非线性状态的运放不同,运算电路中的运放通常工作在。 A、开环状态, B、深度负反馈状态, C、正反馈状态 7.3.2 当集成运放工作在非线性放大状态时,可运用 概念进行分析。 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 7.3.3 选择 "A、反相比例运算电路"或 "B、同相比例运算电路"填空。

(1) 中,集成运放反相输入端为虚地,而中,集成运放两个输 入端的电位等于输入电压。

(2) 的输入电阻大,而 的输入电阻小。

(3) 的输入电流等于零,而 的输入电流等于流过反馈电阻中的 电流。

(4) 的比例系数大于1, 而 的比例系数小于零。

7.3.4 现有电路如下:

A、反相比例运算电路, B、同相比例运算电路

C、积分运算电路,

D、微分运算电路

E、加法运算电路, F、乘方运算电路

选择一个合适的答案填入空内。

(1) 欲将正弦波电压移相+90°, 应选用 :

(2) 欲将正弦波电压转换成二倍频电压,应选用 ;

(3) 欲将正弦波电压叠加上一个直流量,应选用 :

(4) 欲实现 A_{ν} =-100 的放大电路, 应选用 ;

(5) 欲将方波电压转换成三角波电压,应选用;

(6) 欲将方波电压转换成尖顶波电压,应选用:

(7) 欲实现函数 $Y=aX_1+bX_2+cX_3$ 的运算,应选用 。

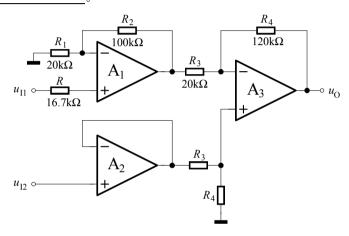
7.3.5 设集成运放的最高输出电压为 $\pm U_{om}$,则由它组成的运算电路的电压输出 范围为 , 电压比较器的输出为 。

7.3.6 与单门限电压比较器相比,迟滞电压比较器。

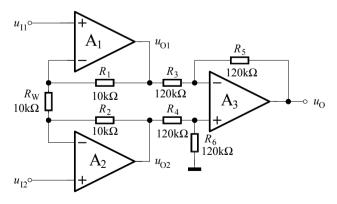
A、抗干扰能力差,灵敏度高, B、抗干扰能力差,灵敏度低

C、抗干扰能力强,灵敏度高, D、抗干扰能力强,灵敏度低

7.3.7 若希望在输入 u_i <3V 时,输出 u_o 为高电平,而在 u_i >3V 时, u_o 为低电平, 则可以采用反相输入的 (A、单门限,B、双门限)电压比较器。 7.3.8 请选择正确答案填空。图示电路中, 电路中 A₁组成 电路, A₂组成 电路, A₃组成 电路。 若设 A_1 、 A_2 、 A_3 均为理想运算放大器。 $u_{11}=0.1$ V, $u_{12}=1$ V ,则输出电压 $u_0 =$



7.3.9 题图示放大电路中,已知 A_1 、 A_2 、 A_3 均为理想运算放大器。若 $u_{11} = 2V$ 、 $u_{12}=3$ V,则 $u_{01}=$, $u_{02}=$;若 $R_2=0$,其它参数不变,则 u_{01} = , $u_{02} =$, $u_0 =$.

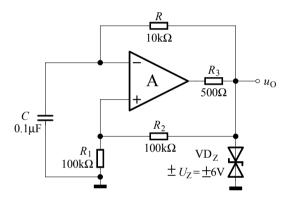


7.3.10 在题图示方波发生器中,已知 A 为理想运算放大器,其输出电压的两个极限值为±12V。现有下列不同情况:

A、稳压管断开,B、稳压管短路,C、C断开,D、正常工作

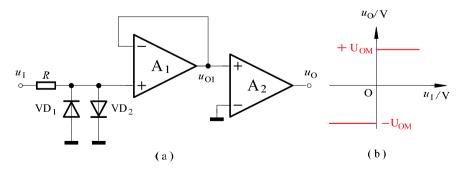
 $E \times R_1$ 短路, $F \times R_2$ 开路, $G \times A$ 的同相输入端和反相输入端接反选择填空,将产生不同测试结果的原因填入空内:

- (1) 输出电压峰-峰值为 12V: ()
- (2) 电路不产生振荡; ()
- (3)输出电压峰-峰值比正常工作时增大。 (



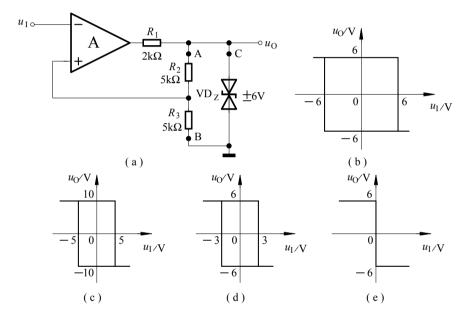
7.3.11 电路如题图(a)所示, A_1 、 A_2 为理想运算放大器,其最大输出电压幅值为± U_{OM} 。填空:

- (2) 在图(b)中画出图(a)所示电路的电压传输特性。

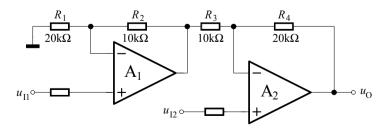


7.3.12 在题图 (a) 所示电路中, A 为理想运算放大器, 其输出电压的两个极限值为±12V。在不同情况下测得该电路的电压传输特性分别如图 (b)、(c)、(d)、(e) 所示。选择填空:

- (1) 正常工作时,该电路的电压传输特性如图 所示:
- (2) 当 A 点断开时,该电路的电压传输特性如图_____所示;
- (3) 当 B 点断开时,该电路的电压传输特性如图_____所示;
- (4) 当 C 点断开时,该电路的电压传输特性如图 所示。

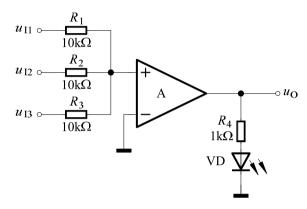


7.3.13 题图示放大电路中,已知 A_1 、 A_2 为理想运算放大器,则输出电压 u_0 与输入电压 u_1 、 u_2 间的关系式为_____。



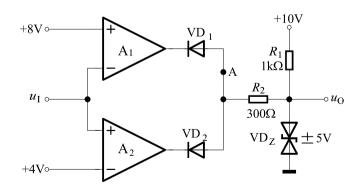
7.3.14 在题图示电路中, 已知 A 为理想运算放大器, 其输出电压的两个极限 值为±12V;发光二极管正向导通时发光。填空:

- (1) 集成运放同相输入端的电位 u_{\perp} _____;
- (2) 若 u_{II} =6V, u_{I2} =-3V, 则 $u_{I3} \ge _{V}$ 时发光二极管发光;
- (3) 若 u_{12} =2V, u_{13} =-10V,则 $u_{11} \ge _{_{_{_{_{_{11}}}}}}$ V 时发光二极管发光。



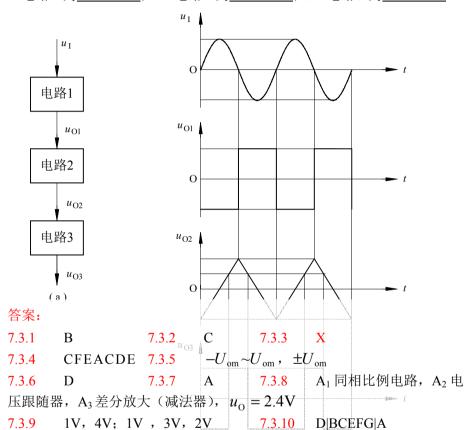
7.3.15 在题图示电路中,已知 A₁、A₂均为理想运算放大器,其输出电压的两 个极限值为±12V。填空:

- (1) $u_1 = 10V$ 时, $u_0 = ____V$;
- (2) $u_1 = 6V \text{ ft}, u_0 = V;$
- (3) $u_1 = 1V \text{ pt}, u_0 = ____V;$
- (4) 若 A 点断开, $u_1 = 6V$ 时, $u_0 =$



7.3.16 题图 (a) 所示为某电路的方框图,已知 u_1 、 $u_{01} \sim u_{03}$ 的波形如图 (b) 所示。将各电路的名称分别填入空内:

(1) 电路 1 为_____; (2) 电路 2 为____; (3) 电路 3 为__



7.3.13 $u_{\rm O} = \left(1 + \frac{R_4}{R_2}\right) u_{12} - \frac{R_4}{R_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{11}$

限幅,输入保护;见题图解 7.3.12

7.3.9

7.3.11

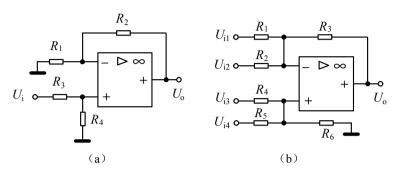
7.3.14 $\frac{1}{3}(u_{11}+u_{12}+u_{13})$, -3, 8 7.3.15 -5, +5, -5, +5

D|E|B|C

(反相输入)过零比较器,积分器,(同相输入)单限比较器 7 3 16

7.4 习题

7.4.1 试求题图中各电路的输出电压与输入电压的关系式。



题 7.4.1 图

解: (a)根据虚断特性
$$u_{+} = \frac{R_{4}}{R_{2} + R_{4}} U_{i}$$
, $u_{-} = \frac{R_{1}}{R_{1} + R_{2}} U_{o}$

根据虚短特性
$$u_{+}=u_{-}$$
,所以 $U_{o}=(1+\frac{R_{2}}{R_{1}})\frac{R_{4}}{R_{3}+R_{4}}U_{i}$

(b)当 $U_{i3}=U_{i4}=0$ 时,电路转换为反相输入求和电路,输出

$$U_{\text{ol2}} = -(\frac{R_3}{R_1}U_{\text{il}} + \frac{R_3}{R_2}U_{\text{i2}})$$

当 $U_{ij}=U_{ij}=0$ 时,电路转换为同相输入求和电路,输出

$$U_{034} = (1 + \frac{R_3}{R_1/R_2})(\frac{R_5//R_6}{R_4 + R_5//R_6}U_{i3} + \frac{R_4//R_6}{R_5 + R_4//R_6}U_{i4})$$

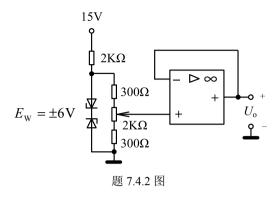
根据线性叠加原理, 总输出为:

$$U_{0} = U_{012} + U_{034}$$

7.4.2 题图所示为可调基准电压跟随器,求 U_0 的变化范围。

 \mathbf{R} : 当可变电位器的滑动触头位于最下端时, u_+ 达最小,

$$u_{+(\text{min})} = \frac{0.3}{0.3 + 2 + 0.3} \times 6 = 0.69 \text{V}$$
,

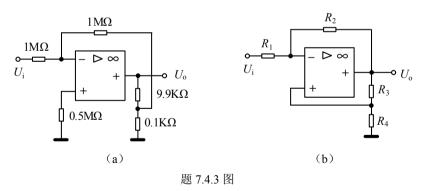


当可变电位器的滑动触头位于最上端时, u_+ 达最大,

$$u_{+(\text{max})} = \frac{2+0.3}{0.3+2+0.3} \times 6=5.31\text{V}$$
,

故 U_0 的变化范围为 $0.69V\sim5.31V$ 。

7.4.3 试求题图中各电路的输出电压的表达式。



 \mathbf{M} : (a) u_{-} 由 U_{i} 、 U_{o} 两部分通过线性叠加而成,当 U_{i} 单独作用时,

产生的分量为
$$\frac{1000+9.9//0.1}{1000+1000+9.9//0.1}U_i \approx 0.5U_i$$
,

姓名

当 $U_{\rm o}$ 单独作用时,产生的分量为 $\frac{2000//0.1}{9.9+2000//0.1} \times \frac{1000}{2000} U_{\rm o} \approx 0.005 U_{\rm o}$

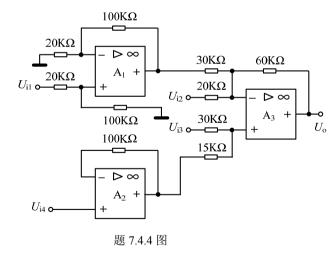
所以 u_- =0.005 $U_{\rm o}$ +0.5 $U_{\rm i}$,根据虚短、虚断特性, u_- = u_+ =0,故 $U_{\rm o}$ =-100 $U_{\rm i}$ 。 (b) 本题同时引入了正反馈和负反馈,该图中一定保证负反馈比正反馈强,故仍可用虚短和虚断特性。 u_- 由 $U_{\rm i}$ 、 $U_{\rm o}$ 两部分通过线性叠加而成,当 $U_{\rm i}$ 单独作用时,产生的分量为 $\frac{R_2}{R_1+R_2}U_{\rm i}$,当 $U_{\rm o}$ 单独作用时,产生的分量为

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_o$$
,所以 $u_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_o$

根据虚短、虚断特性, $u_{-}=u_{+}=\frac{R_{4}}{R_{2}+R_{4}}U_{o}$,

故
$$U_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i / (\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2})$$
。

7.4.4 电路如题图所示。已知 $U_1=U_2=U_3=U_4=10$ mV,试求 $U_0=?$



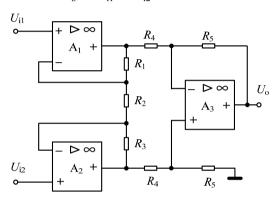
解:运放 A_1 的输出为 U_{o1} = $(1+\frac{100}{20})\frac{100}{20+100}U_{i1}$ = $5U_{i1}$,运放 A_2 的输出为 U_{o4} = U_{i4} ,运放 A_3 构成双端输入求和运算电路,输出为

$$U_{o} = \frac{60}{30} U_{o1} - \frac{60}{20} U_{i2} + (1 + \frac{60}{20//30}) (\frac{15}{30 + 15} U_{i3} + \frac{30}{30 + 15} U_{o4})$$

$$= -2 U_{o1} - 3 U_{i2} + 2 U_{i3} + 4 U_{o4}$$

$$= -10 U_{i1} - 3 U_{i2} + 2 U_{i3} + 4 U_{i4} = -7 U_{i1} = -70 \text{mV}$$

7.4.5 试求题图所示电路中 U_0 与 U_{i1} 、 U_{i2} 的关系式。

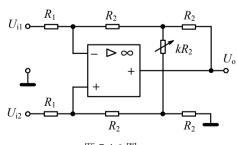


题 7.4.5 图

解: 设运放 A_1 的输出为 U_{o1} ,运放 A_2 的输出为 U_{o2} ,则 $U_{o1}-U_{o2}=\frac{U_{i1}-U_{i2}}{R_2}(R_1+R_2+R_3)$,运放 A_3 构成双端输入求和电路,其输出为 $U_o=\frac{R_5}{R_4}(U_{o2}-U_{o1})=-\frac{R_5}{R_4}\frac{R_1+R_2+R_3}{R_2}(U_{i1}-U_{i2})$

7.4.6 题图为增益调节方便的差 分运算电路,试证明输出电压表 达式为:

$$U_{o} = 2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \frac{R_{2}}{R_{1}} (U_{i2} - U_{i1})$$

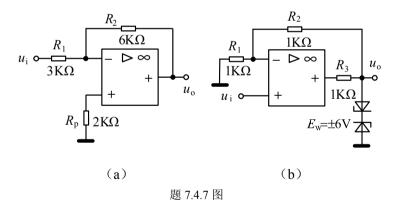


题 7.4.6 图

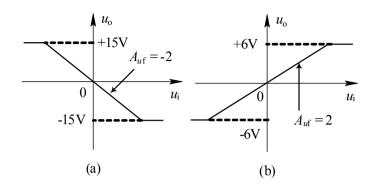
证明:
$$\frac{U_{i1}-u_{-}}{R_{1}} = \frac{u_{-}-U_{1}}{R_{2}}$$
, $\frac{U_{i2}-u_{+}}{R_{1}} = \frac{u_{+}-U_{2}}{R_{2}}$, $u_{+}=u_{-}$
可得, $U_{1}=u_{-}-\frac{U_{i1}-u_{-}}{R_{1}}R_{2}$, $U_{2}=u_{+}-\frac{U_{i2}-u_{+}}{R_{1}}R_{2}$
而 $\frac{u_{-}-U_{1}}{R_{2}} = \frac{U_{1}-U_{o}}{R_{2}} + \frac{U_{1}-U_{2}}{kR_{2}}$, $\frac{u_{+}-U_{2}}{R_{2}} = \frac{U_{2}}{R_{2}} + \frac{U_{2}-U_{1}}{kR_{2}}$
以上两式相减可得 $U_{o}=2(1+\frac{1}{k})(U_{1}-U_{2})$, 将 U_{1},U_{2} 的表达式带入,得 $U_{o}=2(1+\frac{1}{k})\frac{R_{2}}{R_{1}}(U_{i2}-U_{i1})$

7.4.7 运放组成的电路如题图 (a)、(b)所示,已知电源电压为±15V。

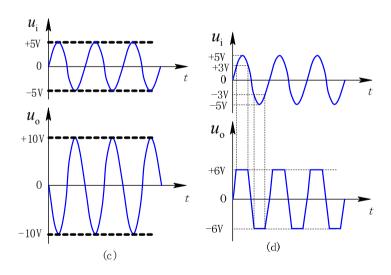
- (1) 试分别画出传输特性曲线 $u_0 = f(u_i)$;
- (2) 输入信号 $u_i = 5\sin \omega t(V)$, 试分别画出输出信号 u_o 的波形。



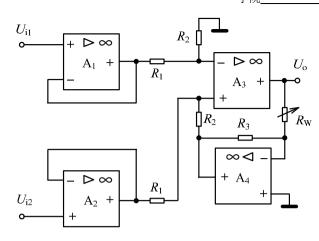
解: (1)电路 (a) 为反相比例放大器, $u_o = \frac{R_2}{R_1} u_i = \frac{6}{3} u_i = -2u_i$,电路 (b) 为同相比例放大器, $u_o = (1 + \frac{R_2}{R_1}) u_i = (1 + \frac{1}{1}) u_i = 2u_i$,所以它们的传输特性曲线分别如图 7.8′(a)(b)所示。



(2) 若输入信号 $u_i = 5\sin \omega t(V)$, u_o 的波形分别如图 7.8′(c)(d)所示。



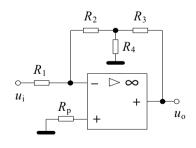
7.4.8 题图所示是增益可线性调节的差分运算电路,试求 $U_{\rm o}$ 与 $U_{\rm il}$ 、 $U_{\rm i2}$ 的关系式。



题 7.4.8 图

解: 设运放 A_1 的输出为 U_{o1} ,运放 A_2 的输出为 U_{o2} ,运放 A_4 的输出为 U_{o4} ,则 $U_{o1}=U_{i1}$, $U_{o2}=U_{i2}$, $U_{o4}=\frac{R_3}{R_W}U_o$ 。 运放 A_3 引入了负反馈,故 $u_+=u_-$,即 $\frac{R_2}{R_1+R_2}U_{o2}+\frac{R_1}{R_1+R_2}U_{o4}=\frac{R_2}{R_1+R_2}U_{o1}$,所以, $U_o=\frac{R_2R_W}{R_1R_3}(U_{i1}-U_{i2})$

7.4.9 试求题图所示电路中, u_0 与 u_i 的关系式。



题 7.4.9 图

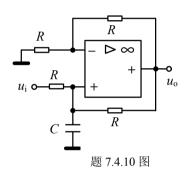
所以 $u_- = \frac{R_2 + R_3 // R_4}{R_1 + R_2 + R_3 // R_4} u_1 + \frac{(R_1 + R_2) // R_4}{R_3 + (R_1 + R_2) // R_4} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_0$

根据虚短、虚断特性, $u_-=u_+=0$, 故

$$u_{o} = \frac{R_{2} + R_{3} / / R_{4}}{R_{1} + R_{2} + R_{3} / / R_{4}} \frac{R_{3} + (R_{1} + R_{2}) / / R_{4}}{(R_{1} + R_{2}) / / R_{4}} \frac{R_{1} + R_{2}}{R_{1}} u_{i}$$

$$= \frac{R_{2} R_{3} + R_{2} R_{4} + R_{3} R_{4}}{R_{1} R_{4}} u_{i} \circ$$

7.4.10 试求题图所示同相积分器电路的 u_0 与 u_i 的关系式。



解:图题中同时引入了正反馈和负反馈,

且负反馈比正反馈强,根据"虚短"特性,

$$u_{-}=u_{+}$$
,其中 $u_{-}=\frac{1}{2}u_{o}$

$$u_{+} = \frac{\frac{1}{j\omega C} //R}{R + \frac{1}{j\omega C} //R} (u_{o} + u_{i})$$

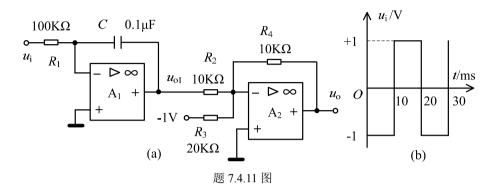
$$= \frac{\frac{R}{1 + j\omega RC}}{R + \frac{R}{1 + j\omega RC}} (u_{o} + u_{i}) = \frac{1}{2 + j\omega RC} (u_{o} + u_{i})$$

所以, u_0 与 u_i 的关系为 $u_0 = \frac{2}{\mathrm{i}\omega RC}u_i$,

或,若t=0时电容器 C 两端的初始电压 $U_{C(0)}=0$,则

 $u_{o}(t) = \frac{2}{RC} \int_{0}^{t} u_{i}(t) dt$, $u_{o} = u_{i}$ 为同相积分关系。

7.4.11 电路及输入 u_i 的波形分别如题图(a)、(b)所示。试画出 u_{ol} 和 u_{o} 的波形,并标出相应的幅度。设电容器两端初始电压为零。



 \mathbf{M} : 运放 \mathbf{A}_1 构成积分器,运放 \mathbf{A}_2 构成反相输入求和电路。

$$u_{o1}(t) = \frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_i(t) dt = \frac{1}{100 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} \int_0^t u_i(t) dt = -100 \int_0^t u_i(t) dt$$

$$u_{o}(t) = -\frac{R_4}{R_2} u_{o1}(t) - \frac{R_4}{R_3} \times (-1) = 100 \int_0^t u_i(t) dt + 0.5$$

$$t=0$$
时, $u_{01}(t)=0$, $u_{0}(t)=0.5$ V;

t=10ms 时,

$$u_{o1}(t) = -100 \int_{0}^{10 \times 10^{-3}} dt = -100 \times (-1) \times 10 \times 10^{-3} = 1 \text{ V}$$

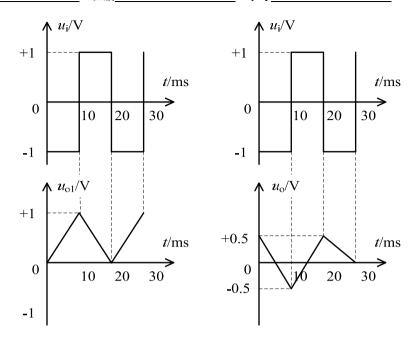
$$u_{o}(t)=100\int_{0}^{10\times10^{-3}}(-1)dt+0.5=100\times(-1)\times10\times10^{-3}+0.5=-0.5V$$
;

t=20ms 时,

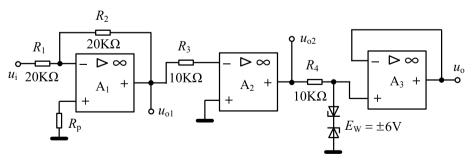
$$u_{01}(t)=1-100\int_{10\times10^{-3}}^{20\times10^{-3}}=1-100\times1\times10\times10^{-3}=0$$
 V

$$u_{o}(t) = -0.5 + 100 \int_{10 \times 10^{-3}}^{20 \times 10^{-3}} = -0.5 + 100 \times 10^{-3} = 0.5 \text{ V};$$

 u_{01} 和 u_{0} 的波形如题答图所示。



7.4.12 一个电路如题图所示。若已知运算放大器的最大输出电压为 \pm 12V, $u_{\rm i}=10\sin\omega t({\rm V})$,试画出相应的 $u_{\rm o1}$ 、 $u_{\rm o2}$ 及 $u_{\rm o}$ 的波形,并标出有关电压的幅度。

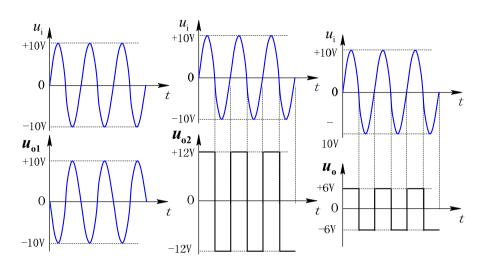


题 7.4.12 图

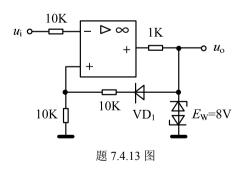
姓名

解: A₁构成反相比例放大器, $u_{\text{ol}} = \frac{R_2}{R_1} u_{\text{i}} = \frac{20}{20} u_{\text{i}} = -u_{\text{i}}$,

 A_2 构成过零电压比较器, u_{o2} = ± 12 V , A_3 构成电压跟随器, u_{o3} = $E_{\rm W}$ = ± 6 V 。相应的 u_{o1} 、 u_{o2} 及 u_{o} 的波形如下图所示。



7.4.13 迟滞电压比较器电路如题图所示。其中 $u_i = 5 \sin \omega t(V)$,电源电压为 $\pm 12V$,二极管 VD_1 为理想二极管,试画出传输特性和输出波形。

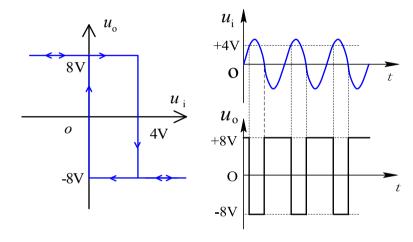


解:该迟滞电压比较器的参考电平不对称,当输出 u_0 为高电平+8V时,二极管VD1导通,则参考电平为

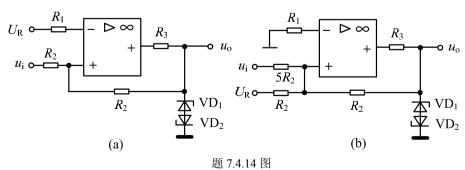
$$u_{+} = \frac{10 \text{k}\Omega}{10 \text{k}\Omega + 10 \text{k}\Omega} E_{\text{W}} = \frac{1}{2} E_{\text{W}} = 4 \text{V}$$

当输出 u_0 为低电平-8V时,二极管VD1截止,则参考电平为 $u_+=0V$ 。所以,电路的阈值电压分别为 $U_{TH}=4V_*U_{TL}=0V$ 。

当输入 u_i 足够低时,输出为高电平+8V,故电路的传输特性和输出波形分别如下图(a)、(b)所示。



7.4.14 题图所示为迟滞电压比较器电路。已知运放最大输出电压为 \pm 14V,稳压管的稳定电压 $U_{\rm Z}=6.3{
m V}$,稳压管的导通电压 $U_{\rm D(on)}=0.7{
m V}$, $U_{\rm R}=2{
m V}$ 。 试分别画出它们的传输特性,并求出回差电压 ΔU 。



解: (a)当 u_{+} = u_{-} 时,输出处于临界状态,即将发生翻转。 根据虚断特性, u_{-} = U_{R} ,

根据线性叠加原理, $u_{+}=\frac{R_{2}}{R_{2}+R_{2}}u_{i}+\frac{R_{2}}{R_{2}+R_{2}}u_{o}=\frac{1}{2}(u_{i}+u_{o})$

所以,
$$\frac{1}{2}(u_i+u_o)=U_R$$
, $u_i=2U_R-u_o=4-u_o$

当 u_0 =-7V时, u_i = U_{TH} =11V;当 u_0 =7V时, u_i = U_{TL} =-3V。 出回差电压 $\Delta U = U_{TH}$ - U_{TL} =11+3=14V。传输特性如下图(a)。

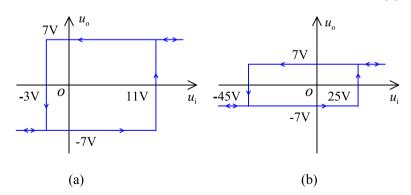
(b)当 $u_{+}=u_{-}$ 时,输出处于临界状态,即将发生翻转。

根据虑断特性, u=0, 根据线性叠加原理,

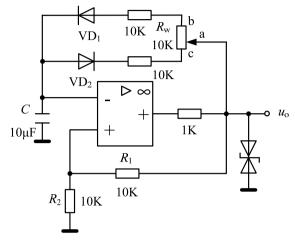
$$u_{+} = \frac{0.5R_{2}}{5R_{2} + 0.5R_{2}} u_{i} + \frac{5R_{2}//R_{2}}{5R_{2}//R_{2} + R_{2}} U_{R} + \frac{5R_{2}//R_{2}}{5R_{2}//R_{2} + R_{2}} u_{o} = \frac{1}{11} u_{i} + \frac{5}{11} U_{R} + \frac{5}{11} u_{o}$$

所以,
$$\frac{1}{11}u_i + \frac{5}{11}U_R + \frac{5}{11}u_o = 0$$
, $u_i = -5u_o - 5U_R = -5u_o - 10$

当 u_0 =-7V时, u_i = U_{TH} =25V;当 u_0 =7V时, u_i = U_{TL} =-45V。 出回差电压 $\Delta U = U_{TH}$ - U_{TL} =25+45=70V。传输特性如下图 (b)。



7.4.15 题图所示为占空比可调的驰张振荡器电路。设二极管 VD_1 、 VD_2 为理想二极管,试求输出波形 U_0 占空比的变化范围。



题 7.4.15 图

解: 输出波形 u_0 的低电平持续时间为 T_{low} =(10+ R_{wac}) $Cln(1+2\frac{R_2}{R_1})$;

高电平持续时间为 T_{high} =(10+ R_{wab})Cln(1+2 $\frac{R_2}{R_1}$)

占空比为
$$q = \frac{T_{\text{high}}}{T_{\text{high}} + T_{\text{low}}} = \frac{10 + R_{\text{wab}}}{10 + R_{\text{wab}} + 10 + R_{\text{wac}}} = \frac{10 + R_{\text{wab}}}{10 + R_{\text{w}} + 10} = \frac{10 + R_{\text{wab}}}{30}$$

$$q_{\text{min}} = \frac{10}{30} = \frac{1}{3}, \quad q_{\text{max}} = \frac{20}{30} = \frac{2}{3}.$$

7.4.16 题图所示电路(a)和(b)中,输入为正弦波,试画出相应输出波形。

解: (a)当 $u_i>0$ 时,二极管 VD 导通, $u_o=u_i$;当 $u_i<0$ 时,二极管 VD 截止, $u_o=0$ 。输出波形如答图 (a)所示。

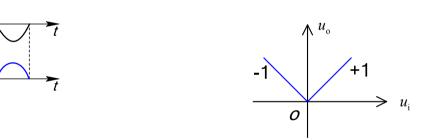
(b) 当 $u_i>0$ 时,二极管 VD_1 导通, VD_2 截止, $u_o=0$;当 $u_i<0$ 时,二极管 VD_1 截止, VD_2 导通, $u_o=-\frac{R}{R}u_i=-u_i$ 。输出波形如答图(b)所示。

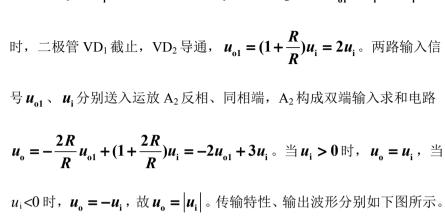
(b)

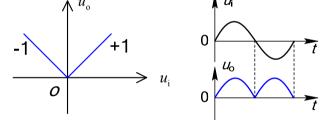
(b)

解:对运放 A_1 , 当 $u_i > 0$ 时, 二极管 VD_1 导通, VD_2 截止, $u_{a1} = u_i$; 当 $u_i < 0$

时,二极管 VD_1 截止, VD_2 导通, $u_{o1}=(1+\frac{R}{D})u_i=2u_i$ 。两路输入信







7.4.17 题图所示为一个高输入阻抗的绝对值电路。

(a)

VD

(a)

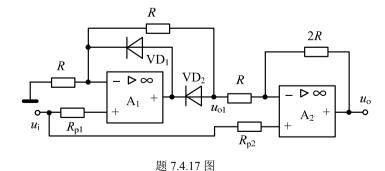
(1) 试画出传输特性;

0

R

(2) 若输入信号 u_i 为一正弦波,试画出输出信号 u_0 的波形。

题 7.4.16 图

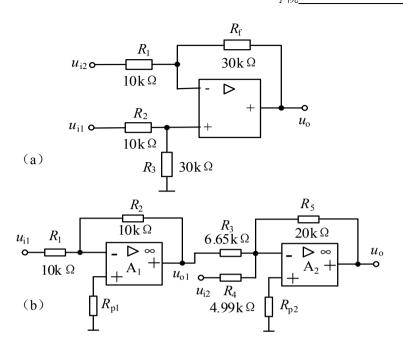


7.4.18 设计两个电路,分别实现下列运算关系。

(1)
$$u_0 = 3(u_{i1} - u_{i2})$$
;

(2)
$$u_0 = 3u_{i1} - 4u_{i2}$$

(1) 用双端输入求和电路实现所给关系式, 如答图(a) 所示。当 $R_1 = R_2, R_3 = R_{\rm f}$ 时,有 $u_o = \frac{R_{\rm f}}{R}(u_{i1} - u_{i2})$,选择 $R_1 = R_2 = 10{
m K}\Omega$, $R_3 = R_{\rm f} = 30 {\rm K} \Omega$ 则可满足题意。

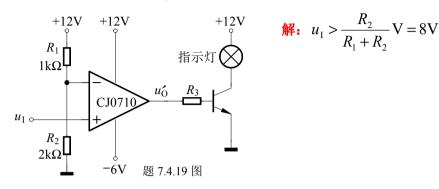


(2) 用反相比例放大器与反相输入求和电路实现所给关系式。运放 A₁ 实现 u_{i1} 反相,运放 A_2 实现 $-u_{i1}$ 和 u_{i2} 的反相相加,

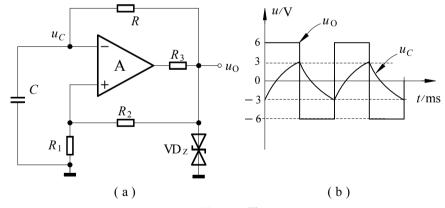
$$u_{0} = -\frac{R_{5}}{R_{3}}u_{01} - \frac{R_{5}}{R_{4}}u_{i2} = \frac{R_{5}}{R_{3}}u_{i1} - \frac{R_{5}}{R_{4}}u_{i2}$$
,如答图(b)所示。

根据题意,选用 $R_1 = R_2 = 10$ K Ω , $R_3 = 6.65$ K Ω , $R_4 = 4.99$ K Ω , $R_{\rm s} = 20 {\rm K} \Omega$.

7.4.19 题图所示电路为电平检测器。CJ0710 为集成电压比较器,外接三极管 以驱动指示灯。试问,在 $u_{\rm I}$ 的什么取值条件下,指示灯才亮。



7.4.20 题图 (a) 所示为方波发生器.已知 A 为理想运算放大器, 其输出电压 的最大值为 \pm 12V; $R_2 = 100$ k Ω ; 该电路输出电压 u_0 和电容两端电压 u_C 的 波形如题图(b)所示。试求解稳压管的稳压值 U_7 及电阻 R_1 的阻值。



题 7.4.20 图

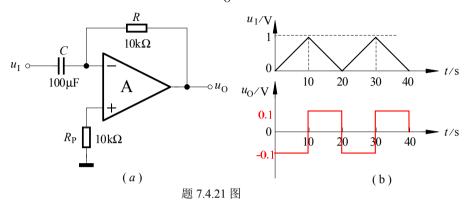
解:
$$U_Z = U_{OM} = 6V$$
 $\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z = U_T$ 解得 $R_1 = 100$ kΩ。

姓名

班级

之号

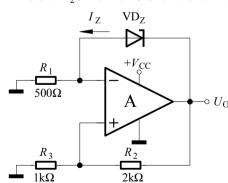
7.4.21 微分运算电路如题图(a)所示,题图(b)为输入电压 u_1 波形,A 为理想运算放大器。试画出输出电压 u_0 的波形图,并标明有关数值。



解:
$$u_{\text{O}} = -RC \frac{\mathrm{d}u_{\text{I}}}{\mathrm{d}t} = -1 \times \frac{\mathrm{d}u_{\text{I}}}{\mathrm{d}t}$$
, 波形如题图所示。

7.4.22 基准电压源电路如题图示,A 为理想运算放大器,稳压管的稳压值 $U_{\rm Z}=6{\rm V}$ 。

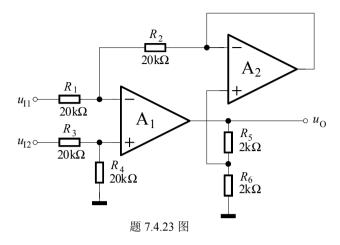
- (1) 写出输出电压 U_0 的表达式。求 U_0 =? 流过稳压管的电流 I_z =?
- (2) 简述 R, 支路的反馈极性及其目的。



解: (1) $U_0 = \frac{U_Z}{R_2} (R_2 + R_3) = 9V$ $I_Z R_1 = \frac{U_Z}{R_2} R_3 , 则 I_Z = 6mA$

 $(2) R_2$ 支路为正反馈,目的是当接通电源时,加速稳压管的击穿。

题 7.4.22 图 7.4.23 题图所 A₁、A₂为理想运算放大器。



甲、乙两同学在推导输出电压 u_0 的表达式时,得到如下不同的结果。你认为谁的结果正确?并分析原因。

$$\exists u_{O2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{12}$$

$$u_{O} = \frac{u_{O2} - u_{I1}}{R_3} \left(R_3 + R_4\right) + u_{O2} = \left(2 + \frac{R_4}{R_3}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{12} - \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) u_{I1}$$

$$\angle : \quad u_{O} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) u_{I1} - \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{I2}$$

eta析: 甲错。因为 u_{02} 是 A_1 放大电路一个输入信号,对 u_{02} 亦有放大作用。 乙对。

第8章 功率放大电路

8.1 知识要点

- 一、功放的特点、分类、技术指标
- 二、乙类推挽功率放大电路的工作原理、分析计算

8.2 重点与难点

- 一、功率放大电路的三种工作状态、效率和失真情况
- 二、功率放大电路最大输出功率和转换效率的分析方法
- 三、乙类推挽功率放大电路的组成、工作原理、性能特点和分析方法

8.3 思考题

8.3.1 选择正确答案填空:	
(1) 功率放大电路的主要特点是	;

A、具有较高的电压放大倍数, B、具有较高的电流放大倍数

C、具有较大的输出功率

(2) 功率放大电路的最大输出功率是负载上获得的 ;

A、最大交流功率, B、最大直流功率, C、最大平均功率

(3) 功率放大电路的效率是 ;

A、输出功率与输入功率之比

B、输出功率与功放管耗散功率之比

C、输出功率与电源提供的功率之比

(4)甲类功率放大电路中,功放管的导通角为;甲乙类功率放大电路中, 功放管的导通角为 : 乙类功率放大电路中, 功放管的导通角为 :

 $A_{\lambda} > \pi$, $B_{\lambda} \pi$, $C_{\lambda} < \pi$, $D_{\lambda} 2\pi$, $E_{\lambda} 0$

(5) 功率放大电路与电流放大电路的共同之处是 ; 功率放大电路与电 压放大电路的共同之处是:

A、都放大电压, B、都放大电流, C、都放大功率

(6) 对于甲类功率放大电路, 当输出功率增大时, 功放管的管耗将 ; 对于乙类功率放大电路, 当输出功率增大时, 功放管的管耗将 。

A、增大, B、不变, C、减小, D、可能增大或减小

(7) 功率放大电路的主要作用是使负载获得 ;

A、尽可能大的电压,B、尽可能大的电流,C、尽可能大的交流功率

(8) 对于甲类功放电路, 当输出电压增大时, 电源提供的功率将 : 对 于乙类功率放大电路, 当输出电压增大时, 功放管的管耗将 ;

A、增大, B、不变, C、减小, D、可能增大或减小

(9) 分析功率放大电路时,应着重研究电路的:

A、电压放大倍数和电流放大倍数

B、输出功率与输入功率之比

C、最大输出功率和效率

(10) 功率放大电路的最大输出功率是:

A、负载获得的最大交流功率

B、电源提供的最大功率

C、功放管的最大耗散功率

(11) 当功率放大电路的输出功率增大时,效率将;

A、增大, B、减小, C、可能增大或减小

(12) 分析功率放大电路时,应利用功放管的:

A、特性曲线, B、h 参数模型, C、高频混合 π 模型

(13) 在选择功率放大电路的功放管时,应特别注意其参数。

A, I_{CBO} , I_{CEO} , B, I_{CM} , $U_{(BR)CEO}$, P_{CM} , C, f_{T} , C_{ob} 8.3.2 有如下三种功率放大电路, 选择正确答案填空:

A、甲类功率放大电路

B、甲乙类功率放大电路

C、乙类功率放大电路

当输出功率变化时,电源提供的功率也随之变化的电路是; 若三 种电路最大输出功率相同,要求功放管耗散功率最大电路是 : 功放管 的导通角大于 π 目小于 2π 电路是。

8.3.3 填空。在输出功率增大时,甲类功率放大电路中,放大管的管耗将 ;与甲类功率放大电路相比,乙类功率放大电路的效率, 其最大值为 ; 若乙类功率放大电路的最大输出功率为 10W, 则

其功放管的最大集电极耗散功率 $P_{\rm CM}$ 至少应取多少 W。

8.3.4 填空。甲类功率放大电路中,放大管的导通角 θ = , 乙类功率 放大电路中,放大管的导通角 $\theta \approx$:由于乙类功率放大电路会产生

失真,所以要改进电路。常使放大管工作在 类状态。

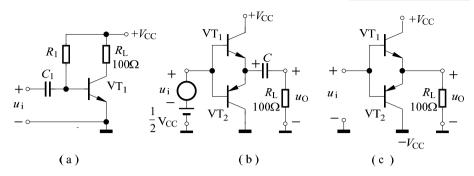
8.3.5 如题图所示三个功率放大电路,已知输入电压u;为正弦波。填空:

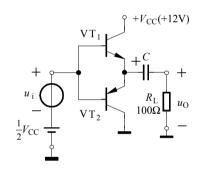
(1) 图 所示电路的放大管工作在甲类状态:

(2) 图 所示电路的放大管工作在乙类状态;

(3)图 所示电路在输出功率变化时电源提供的功率基本不变;

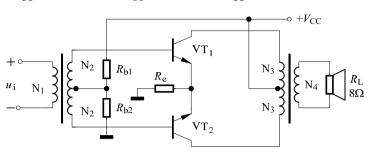
(4) 图 所示电路的电压放大倍数近似为 1。

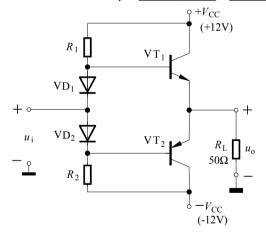




- 8.3.7 在如题图所示变压器耦合功率放大电路中,已知输入电压 u_i 为正弦波,幅值可调;晶体管 VT_1 和 VT_2 的饱和管压降为 U_{CES} ; 电阻 R_e 上的电压可忽略不计;输出变压器效率 η_T =1,匝数比 $n=N_3/N_4$ 。选择填空:
- (1) 从输出变压器的初级看进去的等效负载电阻 R_L 等于 ;
 - $A_{\lambda} R_{\rm L}/n^2$,
- $B_{\lambda} nR_{L}$,
- $C_{\rm s}$ $n^2 R_{\rm L}$
- (2) 若电路的静态功耗过大,则应减小电阻
 - $A_{\lambda} R_{h1}$
- B, R_{b2} ,
- C R_e
- (3) 若晶体管 VT_1 和 VT_2 的饱和管压降 U_{CES} 增大,则电路的效率______
 - A、降低,
- B、保持不变,
- C、升高

- (4) 晶体管 VT₁和 VT₂承受的最大管压降约为
 - A, $V_{\rm CC}/2$,
- B, V_{CC} ,
- $C_{\Sigma} 2V_{CC}$





- 95 -姓名_ 班级 学号

答案:

- 8.3.1 C|A|C|DAB|CC|CD|C|BD|C|A|C|A|B
- 8.3.3 减小; 高, π/4; 2 8.3.2 BC|A|B
- BC|A|B 2π, π; 交越, 甲乙 8.3.5 A|BC|A|BC 8.3.4
- 6, 6, 0; $\frac{\left(\frac{V_{\text{CC}}}{2}\right)^2}{2R_{\text{L}}}$, 0.18 8.3.7 C|B|A|C
- 8.3.8 $\frac{(V_{\text{CC}} U_{\text{CES}})^2}{2R_{\text{L}}}$, 1W ; $\frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{\text{CC}} U_{\text{CES}}}{V_{\text{CC}}}$, 65.4%

姓名

8.4 习题

8.4.1 设 2AX81 的 I_{CM} =200mA, P_{CM} =200mW, $U_{\text{(BR)CEO}}$ =15V;3AD6 的 P_{CM} =10W(加散热板), I_{CM} =2A, $U_{\text{(BR)CEO}}$ =24V。求它们在变压器耦合单管甲类功放中的最佳交流负载电阻值。

解: 当静态工作点 Q 确定后,适当选取交流负载电阻值 R'_{L} ,使 Q 点位于交流负载线位于放大区部分的中点,则可输出最大不失真功率,此时的 R'_{L} 称为最佳交流负载电阻。

忽略三极管的饱和压降和截止区,则有 $U_{CC} = I_{CO}R'_{L}$ 。

同时应满足以下限制:
$$U_{\text{CC}} \cdot I_{\text{CQ}} \leq P_{\text{CM}}$$
, $U_{\text{CC}} \leq \frac{U_{(\text{BR})\text{CEO}}}{2}$, $I_{\text{CQ}} \leq \frac{I_{\text{CM}}}{2}$ 。

(1) 对 2AX81 而言,应满足 $U_{\rm CC}\cdot I_{\rm CQ} \le 200 {\rm mW}$, $U_{\rm CC} \le 7.5 {\rm V}$, $I_{\rm CQ} \le 100 {\rm mA}$ 。取 $U_{\rm CC}\cdot I_{\rm CQ} = 200 {\rm mW}$ 。

当 $U_{\rm CC}$ = 7.5V 时, $I_{\rm CO}$ = 26.7mA ,此时 $R_{\rm L}'$ 最大,

$$R'_{L(max)} = \frac{7.5}{26.7} = 0.28 k\Omega$$
;

当 I_{CQ} =100mA, U_{CC} =2V时,此时 R'_{L} 最小,

$$R'_{L(min)} = \frac{2}{100} = 0.02 \text{k}\Omega$$
;

故最佳交流负载电阻值 $R'_{\rm I}$ 为: $0.02 {\rm k}\Omega \sim 0.28 {\rm k}\Omega$ 。

(2) 对 3AD6 而言,应满足 $U_{\rm CC}\cdot I_{\rm CQ}\le 10{\rm W}$, $U_{\rm CC}\le 12{\rm V}$, $I_{\rm CQ}\le 1{\rm A}$ 。 取 $U_{\rm CC}\cdot I_{\rm CQ}=10{\rm W}$ 。

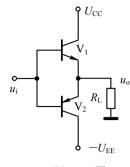
当
$$U_{\rm CC}$$
=12V时, $I_{\rm CQ}$ =0.83A,此时 $R_{\rm L}'$ 最大, $R_{\rm L(max)}'=\frac{12}{0.83}$ =14.46 Ω ;

当 $I_{\text{CQ}} = 1 \text{A}$ 时, $U_{\text{CC}} = 10 \text{V}$,此时 R'_{L} 最小, $R'_{\text{L(min)}} = \frac{10}{1} = 10 \Omega$;

故最佳交流负载电阻值 $R'_{\rm L}$ 为: $10\Omega \sim 14.46\Omega$ 。

8.4.2 题图所示为理想乙类互补推挽功放电路,设 U_{CC} =15V, U_{EE} =-15V, R_{L} =4 Ω , $U_{\text{CE(sat)}}$ =0,输入为正弦信号。试求:

- (1) 输出信号的最大功率:
- (2)输出最大信号功率时电源的功率、集电极功耗(单管)和效率:
- (3)每个晶体管的最大耗散功率 P_{Tm} 是多少? 在此条件下的效率是多少?



P: (1)
$$P_{\text{om}} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{CC}}^2}{R_{\text{L}}} = \frac{1}{2} \times \frac{15^2}{4} = 28.13 \text{W}$$

(2)
$$P_{\text{Em}} = 2U_{\text{CC}} \cdot \frac{U_{\text{CC}}}{\pi R_{\text{I}}} = \frac{2}{\pi} \times \frac{15^2}{4} = 35.83 \text{W}$$

$$P_{\rm T} = \frac{1}{2}(P_{\rm E} - P_{\rm o}) = \frac{1}{2} \times (35.83 - 28.13) = 3.85 \text{W}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4}\xi = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

(3)
$$P_{\text{Tm}} = 0.2P_{\text{om}} = 0.2 \times 28.13 = 5.63 \text{W}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \xi = \frac{\pi}{4} \times \frac{2}{\pi} = 50\%$$

8.4.3 电路如题 8.4.2 图所示,设 $U_{\rm CC}$ =12V, $U_{\rm EE}$ =-12V, $R_{\rm L}$ 为 8 Ω 的扬声器,输入充分激励时可得最大不失真的输出功率。

- (1) 计算 Pom;
- (2) 如再并上一个 8Ω 的扬声器,输出功率有什么变化?
- (3) 在电源电压不变时,能否使每个扬声器发出和原来一样大小的声音?

 $U_{\rm CC}$

+35V

 $0.1\,\Omega$

题 8.4.4 图

#: (1)
$$P_{\text{om}} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{CC}}^2}{R_{\text{L}}} = \frac{1}{2} \times \frac{12^2}{8} = 9 \text{W}$$

(2)
$$P'_{\text{om}} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{CC}}^2}{R'_{\text{L}}} = \frac{1}{2} \times \frac{12^2}{4} = 18 \text{W}$$
,输出功率变为原来的 2 倍。

(3)在电源电压不变的条件下,每个扬声器获得的功率不变,发出和原来一样大小的声音。

8.4.4 互补推挽功放电路如题图所示, 其中负载电流 i_L =0.45 $cos\Omega t(A)$,如忽 略 R_6 和 R_7 的影响,试求

- (1) 负载上获得的功率 P_{o} ;
- (2) 电源供给的平均功率 $P_{\rm E}$;
- (3) 每管的管耗 P_{T} ;
- (4) 每管的最大管耗 P_{Tm} ;
- (5) 放大器效率 n。

解: (1)

$$P_0 = \frac{1}{2}I_{Lm}^2R_L = \frac{1}{2} \times 0.45^2 \times 35 = 3.54$$
W

(2)
$$P_{\rm E} = 2 \times 0.5 U_{\rm CC} \cdot \frac{I_{\rm Lm}}{\pi} = \frac{35}{\pi} \times 0.45 = 5.02 \text{W}$$

(3)
$$P_{\rm T} = \frac{1}{2}(P_{\rm E} - P_{\rm o}) = \frac{1}{2} \times (5.02 - 3.54) = 0.74 \text{W}$$

(4)
$$P_{\text{Tm}} = 0.2 P_{\text{om}} = 0.2 \times \frac{1}{2} \times \frac{(0.5 U_{\text{CC}})^2}{R_{\text{I}}} = 0.1 \times \frac{(0.5 \times 35)^2}{35} = 0.88 \text{W}$$

(5)
$$\eta = \frac{P_o}{P_E} = \frac{3.54}{5.02} = 70.5\%$$

8.4.5 单管甲类功放电路如题图所示,输出变压器的 匝比 n=3,其初级直流电阻 $r_1=10\Omega$,次级直流电阻 $r_2=1\Omega$,采用 3AX61 管(参数为 $I_{CM}=500$ mA, $P_{CM}=500$ mW, $U_{(BR)CEO}=30$ V, $\beta=80$),忽略 $U_{CE(sat)}$ 。调节上偏电阻 R_{BI} 可使 R_L 获得最大不失真输出功率为多少?

U_{CC} 6V R_{B1} C_{1} v u_{i} R_{B2} R_{E} 10Ω $+ C_{\text{E}}$

解:由题意知:

$$R'_{\rm L} = n^2 (R_{\rm L} + r_2) + r_1 = 9 \times (8+1) + 10 = 91\Omega$$

 $U_{\rm CEO} = U_{\rm CC} - I_{\rm CO} (r_1 + R_{\rm E}) = 6 - 20I_{\rm CO}$

题 8.4.5 图

当 Q 点位于交流负载线位于放大区部分的中点时,可输出最大不失真功率。所以, $U_{\rm CFO}=I_{\rm CO}R_{\rm L}'$,即 $6-20I_{\rm CO}=91I_{\rm CO}$ 。

解得
$$I_{\text{CQ}} = 0.054 \text{A} = 54 \text{mA}$$
 , $U_{\text{CEQ}} = 4.91 \text{V}$

$$R'_{\rm L}$$
获得最大不失真输出功率为 $P'_{\rm o} = \frac{1}{2}U_{\rm CEQ}I_{\rm CQ} = 0.13W$

$$R_{\rm L}$$
获得最大不失真输出功率为 $P_{\rm o} = P_{\rm o}' \frac{n^2 R_{\rm L}}{R_{\rm L}'} = 0.13 \times \frac{72}{91} = 0.10 {
m W}$ 。

8.4.6 变压器耦合单管甲类功放电路如题 8.4.5 图所示,设 $U_{\rm CC}$ =12V, $U_{\rm CQ}$ =12V, $I_{\rm CQ}$ =0.5mA,电路的最大输出功率 $P_{\rm om}$ = $U_{\rm CC}I_{\rm CO}/2$ (理想情况)。

- (1) 如把电源电压 U_{CC} 提高一倍,而保持 I_{CQ} 和其它条件不变,输出功率如何变化?
- (2) 如提高 I_{CO} , 其它条件不变,输出功率又如何变化?
- 解:发射极电阻(10Ω)和变压器初级线圈的直流损耗一般很小,忽略不计,则直流负载线是与横坐标垂直的直线,此时 $U_{\text{CEQ}} = U_{\text{CC}} = 12 \text{V}$ 。等效的交流负载电阻用 R'_{CEQ} 表示。当电路输出最大功率 $P_{\text{om}} = U_{\text{CC}}I_{\text{CO}}/2$ 时,

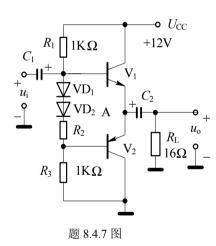
满足
$$U_{\text{CEQ}} = I_{\text{CQ}} R'_{\text{L}}$$
,故 $P_{\text{om}} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{CC}}^2}{R'_{\text{L}}} = \frac{1}{2} I_{\text{CQ}}^2 R'_{\text{L}}$ 。

- (1)如把电源电压 $U_{\rm CC}$ 提高一倍,而保持工作点和其它条件不变,导致 $U_{\rm CEQ}$ 加倍,但最大不失真输出电压振幅仍为 $I_{\rm CQ}$ $R_{\rm L}'$,最大不失真输出电流振幅仍为 $I_{\rm CQ}$,故输出功率不变。
 - (2) 如提高 I_{CO} , 其它条件不变,则 U_{CFO} 不变,最大不失真输出电压

振幅仍为 $U_{\rm CC}$,最大不失真输出电流振幅仍为 $\frac{U_{\rm CC}}{R_{\rm L}^\prime}$,故输出功率不变。

8.4.7 电路如题图所示, 试问:

- (1) 静态时,A 点电位等于多少? 电容器 C_2 两端电压为多少? 调整哪个电阻才能达到上述要求?
- (2)V₁和 V₂的 I_{CM} =200mA, P_{CM} =200mW, $U_{(BR)CEO}$ =24V,晶体管饱和压降为 0.5V,电路最大输出功率为多少?
- (3) 如晶体管的 β =50,当二极管开路时 将产生什么后果?
- (4) 动态时, 若输出电压波形出现交越失真, 应调整哪个电阻? 如何调整?



解: (1) 静态时,A 点电位等于 6V,电容器 C_2 两端电压为 6V,调整电阻 R_1 、 R_3 能达到上述要求。

(2)
$$P_{\text{om}} = \frac{1}{2} \times \frac{(\frac{1}{2}U_{\text{CC}} - U_{\text{CES}})^2}{R_{\text{I}}} = \frac{1}{2} \times \frac{(6 - 0.5)^2}{16} \text{W} = 0.945 \text{W}$$

核算:
$$P_{\text{Tm}} = 0.2 \times \frac{(0.5U_{\text{CC}})^2}{2R_{\text{I}}} = 0.2 \times 1.125 = 0.225(\text{W}) > 200\text{mW}$$

此时,
$$U_{\text{om}} = \frac{U_{\text{CC}}}{\pi} = \frac{12}{3.14} \text{V} \approx 3.82 \text{V}$$
, $I_{\text{cm}} = \frac{U_{\text{om}}}{R_{\text{L}}} = \frac{3.82}{16} \text{A} \approx 239 \text{mA}$

$$U_{\rm CC} = 12 \text{V} < U_{\rm BR(CEO)} = 24 \text{V}$$

$$I_{\rm cm} = \frac{U_{\rm om}}{R_{\rm L}} = \frac{5.5}{16} \,\text{A} \approx 344 \,\text{mA} > 200 \,\text{mA}$$

由此可见:最大输出功率受器件 P_{Tm} 、 I_{cm} 的限制不能得 0.945W,

得 $I_{\rm cm} \leq 160$ mA 或 $I_{\rm cm} \geq 320$ mA ,因 $I_{\rm cm} \approx 239$ mA 时管耗最大,故只能取 $I_{\rm cm} \leq 160$ mA , 又 因 $I_{\rm Cm} = 200$ mA , 故 输 出 电 流 振 幅 最 大 值 取 $I_{\rm cm} = 160$ mA , 输出功率最大值为

$$P_{\text{om}} = \frac{1}{2} I_{\text{cm}}^2 R_{\text{L}} = \frac{1}{2} \times (0.16)^2 \times 16 \text{W} \approx 0.2 \text{W}$$

(3)
$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = \frac{U_{CC} - 2U_{BE(on)}}{R_1 + R_3} = \frac{12 - 1.2}{2} \text{ mA} = 5.4 \text{ mA}$$

$$I_{\text{CO1}} = I_{\text{CO2}} = \beta I_{\text{BO}} = 80 \times 5.4 \text{mA} = 432 \text{mA} > I_{\text{CM}} = 200 \text{mA}$$

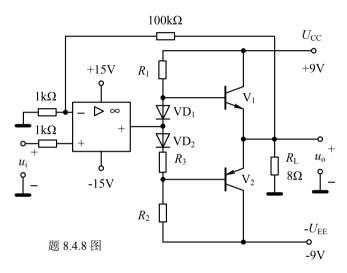
$$P_{\rm c} = \frac{1}{2}U_{\rm CC}I_{\rm CQ} = \frac{1}{2} \times 12 \times 0.432 \text{W} = 2.592 \text{W} >> 300 \text{mW}$$

由上计算可看出, 当二极管开路时会造成功放管 V₁和 V₂的损坏。

(4) 动态时,若输出电压波形出现交越失真,应调整电阻 R_2 ,增大 R_2 的阻值,使功放管的静态偏置电压 $U_{\rm BEO}$ 升高。

8.4.8 功放电路如题图所示, 试问:

- (1) 指出电路中的反馈通路,并判断反馈组态;
- (2) 估算电路在深度负反馈时的闭环电压增益;
- (3)设晶体管的饱和压降为 0.5V,电路的最大输出功率为多少? 晶体管的 参数 I_{CM} 、 P_{CM} 、 $U_{CRD,CEO}$ 如何选取?
- (4) 如要求输出电压 U_{om} =8V,输入信号 U_{im} =?



解:

(1) 100kΩ、1 kΩ 电阻构成了互补乙类功放电路和运放构成的同相比例放大器之间的反馈通路。引入了级间电压串联负反馈。

(2)
$$U_{\mathbf{f}} = \frac{1}{100+1} U_{\mathbf{o}}$$
, 根据 $U_{\mathbf{i}} = U_{\mathbf{f}}$, 所以得 $A_{\mathbf{uf}} = \frac{U_{\mathbf{o}}}{U_{\mathbf{i}}} = \frac{100+1}{1} = 101$

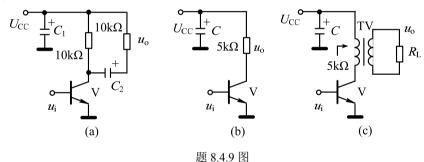
(3)
$$P_{\text{om}} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{om}}^2}{R_{\text{L}}} = \frac{1}{2} \frac{(U_{\text{CC}} - U_{\text{CE(sat)}})^2}{R_{\text{L}}} = \frac{1}{2} \times \frac{(9 - 0.5)^2}{8} = 4.52 \text{W}$$

晶体管的参数应满足如下条件:

$$\begin{split} P_{\text{CM}} & \geq 0.2 \times \frac{1}{2} \frac{U_{\text{CC}}^2}{R_{\text{L}}} = 0.2 \times 5.06 = 1.01 \text{W} \\ I_{\text{CM}} & \geq \frac{U_{\text{om}}}{R_{\text{L}}} = \frac{U_{\text{CC}} - U_{\text{CE(sat)}}}{R_{\text{L}}} = \frac{8.5}{8} = 1.06 \text{A} \\ U_{\text{(BR)CEO}} & \geq 2U_{\text{CC}} - U_{\text{CE(sat)}} = 18 - 0.5 = 17.5 \text{V} \end{split}$$

(4) 因为
$$A_{\rm uf} = 101$$
, $U_{\rm om} = 8 \text{V}$,所以 $U_{\rm im} = \frac{U_{\rm om}}{A_{\rm uf}} = \frac{8}{101} \text{V} = 79.2 \text{mV}$

8.4.9 题图所示为三种甲类功放的输出电路,晶体管和 U_{CC} 相同,饱和压降和穿透电流均为 0,图(c)中的变压器效率为 1。比较三种电路中哪种电路的输出功率最大?哪种电路的效率最低?(C_1 、C、 C_2 为耦合电容,设输入激励充分)



解: (1) 题图(a):

$$R_{\rm L}' = R_{\rm C} /\!/ R_{\rm L} = 5 {\rm k}\Omega$$
 $U_{\rm CEQ} = I_{\rm CQ} R_{\rm L}' = U_{\rm CC} - I_{\rm CQ} R_{\rm C}, I_{\rm CQ} = \frac{U_{\rm CC}}{R_{\rm C} + R_{\rm L}'} = \frac{U_{\rm CC}}{10 + 5} = \frac{U_{\rm CC}}{15} {\rm mA}$
 $P_{\rm oa} = \frac{1}{2} I_{\rm CQ}^2 R_{\rm L}' = \frac{1}{2} \times \frac{U_{\rm CC}^2}{15^2} \times 10 = 0.022 U_{\rm CC}^2 {\rm mW} (R_{\rm L}$ 得到的是 $\frac{1}{2} P_{\rm oa}$)
题图(b):

$$R_{\rm L}' = R_{\rm C} = R_{\rm L} = 5 {\rm k}\Omega$$

$$U_{\rm CEQ} = I_{\rm CQ} R_{\rm L}' = U_{\rm CC} - I_{\rm CQ} R_{\rm C}, I_{\rm CQ} = \frac{U_{\rm CC}}{R_{\rm C} + R_{\rm L}'} = \frac{U_{\rm CC}}{5 + 5} = \frac{U_{\rm CC}}{10} {\rm mA}$$

$$P_{\rm ob} = \frac{1}{2} I_{\rm CQ}^2 R_{\rm L}' = \frac{1}{2} \times \frac{U_{\rm CC}^2}{10^2} \times 5 = 0.025 U_{\rm CC}^2 {\rm mW} (R_{\rm L}$$
得到的是 $P_{\rm ob}$)

题图(c):

$$R'_{L} = 5k\Omega$$

$$U_{CEQ} = I_{CQ}R'_{L} = U_{CC}, I_{CQ} = \frac{U_{CC}}{R'_{L}} = \frac{U_{CC}}{5} = \frac{U_{CC}}{5} \text{mA}$$

$$P_{\text{oc}} = \frac{1}{2} I_{\text{CQ}}^2 R_{\text{L}}' = \frac{1}{2} \times \frac{U_{\text{CC}}^2}{5^2} \times 5 = 0.1 U_{\text{CC}}^2 \text{mW}(R_{\text{L}}$$
得到的是 P_{oc})

由以上计算可见,虽然这三种电路的等效交流负载电阻都为 $5k\Omega$,但图 (c)电路的输出功率最大。

$$P_{\rm E} = U_{\rm CC}I_{\rm CQ} = U_{\rm CC}\frac{U_{\rm CC}}{15} = \frac{U_{\rm CC}^2}{15}$$

$$\eta = \frac{P_{\rm o}}{P_{\rm E}} = \frac{0.011U_{\rm CC}^2}{P_{\rm E}} = \frac{0.011U_{\rm CC}^2}{\frac{U_{\rm CC}^2}{15}} = 0.165$$

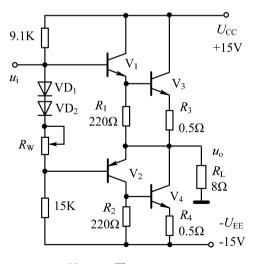
$$P_{\rm E} = U_{\rm CC}I_{\rm CQ} = U_{\rm CC}\frac{U_{\rm CC}}{10} = \frac{U_{\rm CC}^2}{10}$$
题图(b):
$$\eta = \frac{P_{\rm o}}{P_{\rm E}} = \frac{0.011U_{\rm CC}^2}{P_{\rm E}} = \frac{0.025U_{\rm CC}^2}{\frac{U_{\rm CC}^2}{10}} = 0.25$$

$$P_{E} = U_{CC}I_{CQ} = U_{CC}\frac{U_{CC}}{5} = \frac{U_{CC}^{2}}{5}$$
题图(c):
$$\eta = \frac{P_{o}}{P_{E}} = \frac{0.1U_{CC}^{2}}{P_{E}} = \frac{0.1U_{CC}^{2}}{\frac{U_{CC}^{2}}{5}} = 0.5$$

由以上计算可见,虽然这三种电路的等效交流负载电阻都为 $5k\Omega$,但图 (a)电路的效率最低。

8.4.10 OCL 功放电路如题图所示,输入电压 u_i 为正弦波信号。已知当输入信号幅度达到最大时, V_3 、 V_4 管的最小压降 $u_{CE(min)}=2V$ 。

- (1) 求 V_3 、 V_4 管承受的最大电压 $u_{CE(max)}$;
- (2) 求 V_3 、 V_4 管流过的最大集电极电流 $i_{C(max)}$;
- (3) 求 V_3 、 V_4 每个管子的最大管耗 P_{Tm} ;
- (4) 若 R_3 、 R_4 上的电压及 V_3 、 V_4 的最小管压降 $u_{CE(min)}$ 忽略不计,则 V_3 、 V_4 管的参数 I_{CM} 、 P_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 应如何选择?



题 8.4.10 图

姓名

ž

学号

 \mathbf{M} : (1) \mathbf{V}_3 、 \mathbf{V}_4 管承受的最大电压 $\mathbf{u}_{\mathrm{CE(max)}}$

$$u_{\text{CE(max)}} = 2U_{\text{CC}} - u_{\text{CE(min)}} - \frac{R_4}{R_4 + R_1} (U_{\text{CC}} - u_{\text{CE(min)}}) = 30 - 2 - \frac{0.5}{8.5} \times 13 = 27.2 \text{V}$$

- (2) V_3 、 V_4 管流过的最大集电极电流 $i_{C(max)} = (U_{CC^-} u_{CE(min)}) / (R_3 + R_L) = 13/8.5 = 1.53 A$ 。
- (3) V_3 、 V_4 每个管子的最大管耗 P_{Tm}

$$P_{\text{Tm}} = 0.2 \times \frac{1}{2} \frac{U_{\text{CC}}^2}{R_3 + R_{\text{L}}} = 0.2 \times \frac{1}{2} \times \frac{15^2}{8.5} = 2.65 \text{W}$$

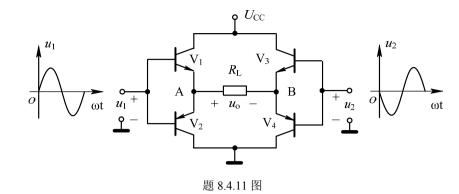
(4) 若 R_3 、 R_4 上的电压及 V_3 、 V_4 的最小管压降 $u_{CE(min)}$ 忽略不计,则 V_3 、 V_4 管的参数 I_{CM} 、 P_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 如下:

$$I_{\rm CM} > \frac{U_{\rm CC}}{R_{\rm L}} = \frac{15}{8} = 1.88 \,\mathrm{A} \;, \;\; P_{\rm CM} > 0.2 \times \frac{1}{2} \frac{U_{\rm CC}^2}{R_{\rm L}} = 0.2 \times \frac{1}{2} \times \frac{15^2}{8} = 2.81 \,\mathrm{W} \;,$$

$$U_{\rm (BR)CEO} > 2U_{\rm CC} = 30$$
V

8.4.11 TCL 和 OCL 功放电路效率都较高,但电源的利用率较低,当电源电压分别为 $U_{\rm CC}$ 和 $U_{\rm CC}$ 时,负载上获得的最大电压分别为 $U_{\rm CC}$ 和 $U_{\rm CC}$ 。若采用由两组互补推挽电路组成桥式推挽电路(BTL:Balanced Transformer Less),则负载上得到的最大电压可增大一倍。题图所示为单电源 BTL 电路, $V_1\sim V_4$ 特性相同,静态时, $u_{\rm A}=u_{\rm B}=U_{\rm CC}/2$, $u_{\rm o}=0$ 。动态时,外加信号 u_1 和 u_2 极性相反。试证明在理想情况下($U_{\rm CE(sat)}=0$), $u_{\rm o}$ 的峰值电压可达 $U_{\rm CC}$,输出最大功率为 $0.5\,U_{\rm CC}^2/R_{\rm L}$ 。

解: 为清晰起见,图题 8-11 中未画出左、右两输入信号中的直流成分 0.5 U_{CC} ,但在以下分析过程中,必须考虑这一点。当 u_1 处于正半周时, u_2 处于负半周,则 V_1 、 V_4 导通, V_2 、 V_3 截止。由于 $U_{CE(sat)}=0$,则 R_L 左端电位最大值为 U_{CC} , R_1 石端电位最小值为 0,故 R_1 两端的电压最大值可达 U_{CC} 。



同理,当 u_1 处于负半周时, u_2 处于正半周,则 V_1 、 V_4 截止, V_2 、 V_3 导通。 R_L 两端的电压最小值可达- U_{CC} 。

故 $R_{\rm L}$ 两端的电压为一完整的正弦波, $u_{\rm o}$ 的峰值电压可达 $U_{\rm CC}$,输出最大功率为 $0.5\,U_{\rm CC}^2$ / $R_{\rm L}$ 。

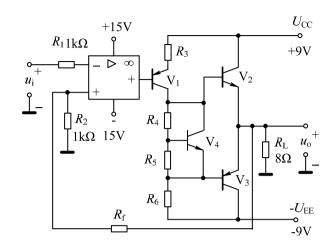
8.4.12 OCL 功放电路如题图所示,分析电路回答下列问题。

- (1) V₄、R₄、R₅在电路中起什么作用?
- (2) 若要稳定电路的输出电压,应引入何种组态的负反馈? 试在图上画出反馈支路:
- (3) 若要求电路输入信号幅度 $U_{\text{im}}=140\text{mV}$ 时,负载 R_{L} 获得最大不失真输出功率,则反馈支路中的元件应如何取值?设管子的饱和压降 $U_{\text{CE(sat)}}=1\text{V}$ 。

解: (1) V_4 、 R_4 、 R_5 在电路中给 V_2 、 V_3 提供合适的发射结偏置电压,克服交越失真现象。

- (2) 若要稳定电路的输出电压,应引入级间电压负反馈。在输出端与运放同相端间引入反馈,如图题 $8-12 + R_{f}$ 。
 - (3) 负载 R_L 获得的最大不失真输出电压幅值为 U_{CC} - $U_{CE(sat)}$ =9-1=8V,

从而可求得反馈电路的闭环增益为 $A_{\mathrm{uf}}=rac{U_{\mathrm{om}}}{U_{\mathrm{im}}}=rac{8}{0.14}=57.14$ 。



题 8.4.12 图

图题 8.4.12 中 R_f 引入了串联电压负反馈, $A_{uf} = \frac{R_f + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_f}{R_2} = 1 + R_f$,

故 $R_f = 47.14$ kΩ,可选用标称值为 47kΩ的电阻。

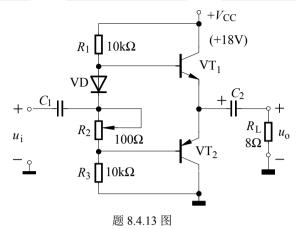
8.4.13 在如题图所示 OTL 电路中,已知输入电压 u_i 为正弦波,三极管的饱和管压降 $|U_{CES}| \approx 2V$; 电容 C_1 、 C_2 对于交流信号可视为短路; 静态时,输入端电位和 A 点电位应为 9 伏。回答下列问题:

- (1) 负载电阻 R_L 上可能得到的最大输出功率 P_{om} 约为多少瓦?
- (2) 静态时,A点电位 $U_{\rm A}>9{
 m V}$,则应增大哪个电阻的阻值?
- (3) 若电路仍产生交越失真,则应增大哪个电阻的阻值?

解:

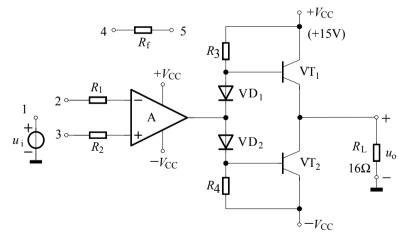
(1)
$$P_{\text{om}} = \frac{\left(\frac{V_{\text{CC}}}{2} - U_{\text{CES1}}\right)^2}{2R_{\text{L}}} = 3.1 \text{W}$$

(2) R_1 (3) R_2



8.4.14 题图示电路是没有画完的功率放大电路,已知输入电压 u_i 为正弦波,运算放大电路为理想运放。

- (1) 标出三极管 VT_1 和 VT_2 的发射极箭头,并合理连接输入信号 u_i 和反馈电阻 R_f ,使电路输入电阻 $R_i = R_1$ 、输出电压稳定;
- (2)设三极管 VT_1 和 VT_2 的饱和管压降 $|U_{CES}|=2V$,估算负载电阻 R_L 上可能获得的最大输出功率 P_{om} 及输出级的效率 η 。



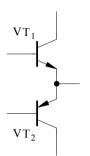
题 8.4.14 图

解:

(1) 1接2,3接地,4接运放反相输入端,5接输出端。

(2)
$$P_{\text{om}} = \frac{(V_{\text{CC}} - U_{\text{CES}})^2}{2R_{\text{L}}} \approx 4.69 \text{W},$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{CES}}}{V_{\text{CC}}} \approx 68\%$$

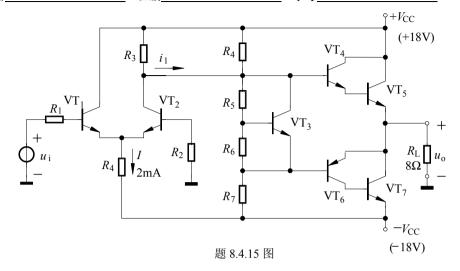


8.4.15 电路如题图所示,已知输入电压 u_i 为正弦波,当输入电压幅值达到最大时 VT_5 、 VT_7 的最小管压降 $\left|U_{\rm CEmin}\right|=2V$;所有三极管导通时 $\left|U_{\rm BE}\right|$ 均为 0.7V。试问:

- (1) 若静态时,输出电压 u_0 =0V,则 VT_2 的集电极电位 U_{C2} =? 若 i_1 可忽略不计,则 R_3 约取多少千欧?
- (2) 负载电阻 R_L 上能够得的最大输出功率 P_{om} =?

P: (1)
$$U_{C2} = 1.4\text{V}$$
, $R_3 = \frac{V_{CC} - U_{C2}}{\frac{I}{2}} = 16.6\text{k}\Omega$

(2)
$$P_{\text{om}} = \frac{(V_{\text{CC}} - U_{\text{CES}})^2}{2R_{\text{L}}} = 16\text{W}$$



第9章 正弦波振荡器

9.1 知识要点

- 一、正弦波振荡的基本概念
- 二、RC 正弦波振荡电路
- 三、LC 正弦波振荡电路
- 四、石英晶体振荡器

9.2 重点与难点

- 一、正弦波振荡电路的组成和振荡原理
- 二、根据相位平衡条件, 判断电路能否震荡
- 三、RC桥式正弦波振荡电路的组成、工作原理和性能特点
- 四、LC正弦波振荡电路组成、工作原理和性能特点
- 五、石英晶体正弦波振荡电路的组成、工作原理和性能特点

9.3 思考题

9.3.1 填空。正弦波振荡器主要由	`	和		共
三部分电路组成,其输出信号最初是由		产生。	通常,	产生
20Hz~20kHz 低频正弦波可用	振荡□	电路产生; 7	产生 2M	Hz~
20MHz 的接收机的本机振荡信号可用		振荡电路;	制作频率	非常
稳定的测试用信号源,可用	振荡电路。)		
9.3.2 在负反馈放大电路中,当(A	$\dot{A}\dot{F}=0$,	B, $\dot{A}\dot{F}=1$,	C、 ÀF	=-1,
D、 $\dot{A}\dot{F}$ =∞)时,电路将产生自激振荡。	在正弦波	振荡电路中	,利用正	E反馈
产生自激振荡,其幅值起振条件是	(A, AF >	1, B, $\dot{A}\dot{F}$ >	1, C, A	F=1,
D、 $\dot{A}\dot{F}=1$),相位平衡条件是(A	$\phi_{AF} = 2n$	$n\pi$, B, ϕ_{AF} :	$=(2n+1)\tau$	τ);
同时,为了保证正弦波振荡幅值稳定且波	形较好,	通常还需要	引入	(A,
微调, B、屏蔽, C、限幅, D、稳幅) 环	5节。			
9.3.3 桥式(文氏桥) RC 正弦波振荡电路	由 <i>RC</i> 串并	+ 联选频网络	和	(A,
放大电路, B、反相比例运算, C、同相比	(例运算)	两部分电路:	组成,且	1.电路
应满足(A、 φ_A =-180°, φ_F =+180°, B	$\varphi_A = +18$	0° , $\varphi_{\rm F}$ =+180	ρ^{o} , C , φ	$A=0^{\circ}$
$\varphi_{ ext{F}}\!\!=\!\!0^{ ext{o}})$.				

- 9.3.4 对于三点式振荡器,三极管各电极间接电抗元件 X, c-e 电极间接电抗 元件 X1, b-e 电极间接 X2, 、c-b 电极间接 X3, 满足振荡的原则是
 - A、X1 与 X2 性质相同, X1、X2 与 X3 性质相反
 - B、X1 与 X3 性质相同, X1、X3 与 X2 性质相反
 - C、X2 与 X3 性质相同, X2、X3 与 X1 性质相反
 - D、X1 与 X2、X3 性质均相同
- 9.3.5 与电感三点式振荡器相比,电容三点式的主要优点是
 - A、电路简单且易起振,
- B、输出波形好
- C、改变频率不影响反馈系数, D、工作频率比较低
- 9.3.6 下面那项措施不能提高振荡器频率的稳定性。
 - A、提高振荡回路的标准性, B、提高晶体管的放大倍数

- C、提高回路的Q值,
- D、减少电源、负载的影响
- 9.3.7 若石英晶体中的等效电感、动态电容及静态电容分别用 L、C 及 C_0 表

示,在其损耗电 $R \approx 0$ 时,石英晶体的串联和并联谐振频率分别为 f_s 和 f_n 。 当石英晶体作为正弦波振荡电路的一部分时,晶体的工作频率范围为 $(A, f < f_s, B, f_s < f < f_p, C, f > f_p)$, 此时若在石英晶体两端并联一 个小电容,可以 $(A, 使 f_0 = f_s)$ 更接近, $B, (e, f_0 = f_s)$ 更远离); 石英晶 体正弦波振荡电路的振荡频率 f₆基本上取决于 (A、电抗元件相移性质, B、石英晶体谐振频率, C、放大电路增益), 在串联型晶体正弦波振荡电路 中,晶体等效为 (A、电感,B、电容,C、电阻),在并联型晶体振荡 电路中,晶体等效为 (A、电感,B、电容,C、电阻)。

9.3.8 正弦波振荡电路如题图所示。该电路为 (A、变压器反馈式, B、 电感三点式,C、电容三点式)类型,反馈信号取自 (A、电容 C_1 ,B、 电容 C_2 , C、电感 L) 两端电压。该电路的振荡频率表达式 $f_0 \approx$ (A、

$$\frac{1}{2\pi L(C_1+C_2)}$$
, B、 $\frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_1+C_2)}}$, C、 $1/(2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}})$); 若电路不起振,

可在 $(A \times R_e, B \times R_{b2}, C \times R_{b1})$ 两端并接一个大电容。

- 9.3.9 题图所示电路为某超外差收音机中的本机正弦波振荡电路。试就下列问 题, 选择正确答案填空:
- (1) 电容器 C_1 的作用是 ;
 - A、使电路满足振荡的相位平衡条件
 - B、使 VT 基极对交流接地, 反馈信号完全加在 VT 的 b-e 之间
 - C、使正弦波振荡波形变好
- (2) 振荡频率表达式为。

A.
$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{13} \cdot \frac{(C_4 + C_5)C_3}{C_3 + C_4 + C_5}}}$$
, B. $f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{13} \cdot \left(\frac{C_4 \cdot C_5}{C_4 + C_5} + C_3\right)}}$

- 9.3.10 在题图所示电路中,已知石英晶体的谐振频率为 f_1 , LC_1 的谐振频率 为 f_2 , 试就下列问题选正确答案填空:
- (1) 为使电路能产生正弦波振荡, f_1 与 f_2 应满足 关系;

A,
$$f_1 > f_2$$
, B, $f_1 < f_2$, C, $f_1 = f_2$

半吨		

姓名

班级

学号

- 106 -

(2)振荡时,石英晶体等效一个____元件; LC_1 回路等效一个____元件; A、电容, B、电感, C、电阻

(3) 电路的振荡频率 $f_0 = ____$ 。

A、 f_1 , B、 f_2 , C、 f_1 与 f_2 之间某一频率

- 9.3.11 正弦波振荡电路如题图所示。试就下列问题,选择正确答案填空:
- (1) 电阻 R_6 阻值减小,则电路 ;

A、有利于起振, B、不利于起振, C、与起振条件无关

(2) 电容 C_1 开路,则电路_____; 电容 C_1 短路,则电路_____; 电容 C_5 开路,则电路 _____;

A、不能振荡, B、能振荡, C、可能振荡, 但不是很好正弦波 9.3.12 题图所示交流通路中的 A 为理想集成运放。为使该电路有可能产生正弦波振荡。试就下列问题,选择正确答案填空:

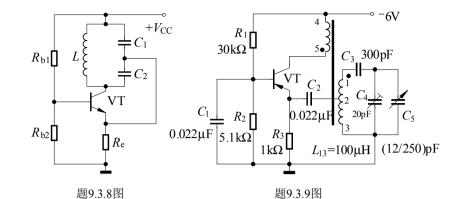
(1) 运放 A 的反馈元件 Z 应为____性质。若图示中的 Z 为 LC 串联电路,则 Z 应等效一个 。若图示中的 Z 为 LC 并联电路,则 Z 应等效一个____;

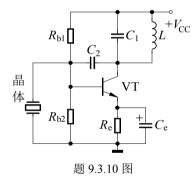
A、纯电阻, B、电容, C、电感

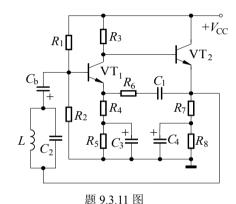
(2) 若 Z 为合适的无源反馈支路,则 A 的输入端极性应为。

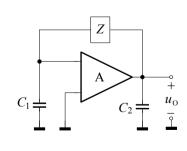
A、上"+"、下"-", B、上"-"、下"+"

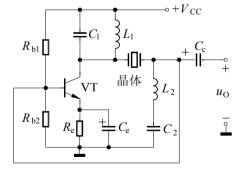
9.3.13 晶体振荡电路如题图所示。旁路电容 C_e 和耦合电容 C_c 对交流均视为短路,晶体串联和并联谐振频率分别为 f_s 和 f_p ,且 $f_2=1/2\pi\sqrt{L_2C_2}=f_p$,则电路的振荡频率 f_0 与 f_1 、 f_2 的关系是____(A、 $f_0=f_1$,B、 $f_0=f_2$,C、 $f_1< f_0< f_2$);该电路属于____(A、串联,B、并联)型晶体振荡电路,相当于一个____(A、电感三点式,B、电容三点式)正弦波振荡电路,在 $f=f_0$ 时,晶体等效为 (A、电阻,B、电感,C、电容)。











题 9.3.12 图

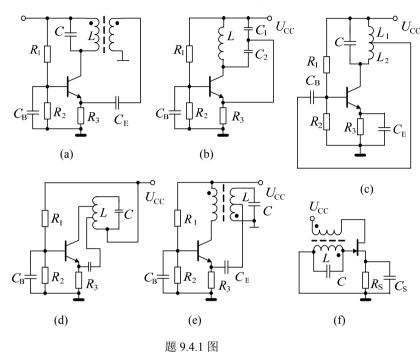
题 9.3.13 图

<u>- 107 -</u>				学院	姓名	班级	学号 <u></u>
<u>- 107 -</u> 答案:							
9.3.1	放大电路 反馈网络	各 选频网	络 干扰或噪声;	RC LC 石英晶体			
9.3.2	CAAD	9.3.3	CC				
9.3.4	A	9.3.5	В				
9.3.6	В	9.3.7	BA BCA				
9.3.8	CACB						
9.3.9	BA						
9.3.10	B BB A						
9.3.11	A ABC						
9.3.12	CCC B						

9.3.13 C|BBB

9.4 习题

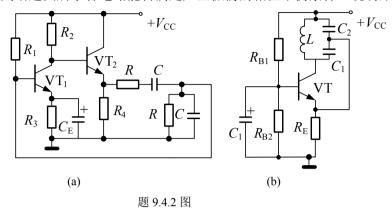
9.4.1 判断题图所示电路中那些可以产生振荡? 那些不行? 并说明理由。



分析:

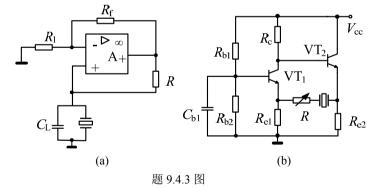
- (a) 不能振荡,变压器同名端有错误,造成负反馈。
- (b) 可能振荡,满足相位平衡条件。
- (c) 不能振荡,交流通路中, b-e 间与 c-e 间不是同性电抗,不满足三点式振荡相位平衡条件。
- (d) 可能振荡,满足相位平衡条件。
- (e) 可能振荡,满足正反馈条件。
- (f) 可能振荡,满足正反馈条件。

9.4.2 判断题图所示各电路能否满足产生振荡的相位平衡条件?说明原因。



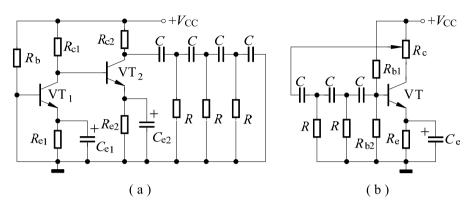
解:图 (a)电路, $\varphi_A = -180^\circ$, $\varphi_F = 0^\circ$, $\varphi_A + \varphi_F = -180^\circ$ 不满足产生振荡的相位平衡条件。图(b) 电路满足三点式法则:两电容的中间点连得到发射极。满足产生振荡的相位平衡条件。

9.4.3 石英晶体振荡电路如题图所示。试用相位平衡条件判断电路是否能振荡?并说明石英晶体在电路中的作用。



- 解: (a) 可能振荡, 石英晶体作等效电感, 电路为并联型石英晶体振荡器。
 - (b) 可能振荡, 石英晶体等效为短路线, 电路为串联型石英晶体振荡器。

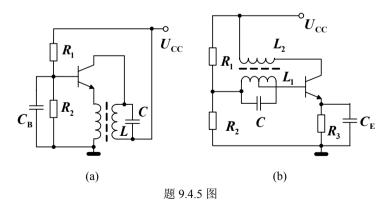
9.4.4 试根据相位平衡条件,判断题图所示两电路能否产生正弦波振荡。设放大器频带无限宽,高频时不产生附加相移。



题 9.4.4 图

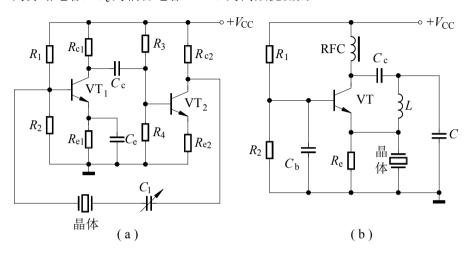
分析: 图 (a): $\varphi_A = 0^\circ$, $0^\circ < \varphi_F < 360^\circ$, 不满足相位平衡条件, 不能振荡。图 (b): $\varphi_A = -180^\circ$, $\varphi_F = 0^\circ \sim 270^\circ$, 满足自激振荡的相位平衡条件, 只要放大器的电压放大倍数足够大, 就能产生正弦波振荡。

9.4.5 标出题图所示电路中变压器的同名端, 使之满足振荡的相位条件。



分析:图(a)的同名端在同侧(在线圈的上端打点),图(b)的同名端在异侧(在 L_1 的左端、 L_2 的右端打点)。

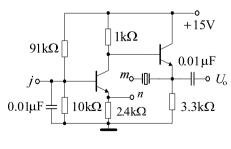
9.4.6 试判断题图所示两个电路有无可能产生正弦波振荡,如有可能,请指出它们是属于串联型还并联型石英晶体振荡电路?振荡时石英晶体呈现电阻性、电感性还是电容性?如不能振荡,简述理由,并加以改正。图中 C_b 、 C_e 为旁路电容, C_c 为耦合电容,RFC 为高频扼流圈。



题 9.4.6 图

分析: 两个电路都可能振荡。图(a)为串联型,振荡时,晶体呈电阻性;图(b)为并联型,振荡时晶体呈电感性,构成电感三点式振荡电路。

9.4.7 在题图所示的石英晶体振荡电路中, j、m、n 三点中应连接哪两点, 才能使电路产生振荡?该石英晶体振荡器属于哪种类型?



题 9.4.7 图

解: m、n 相连为正反 馈,属于串联型晶 振电路。

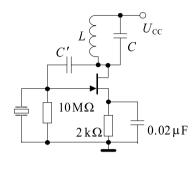
9.4.8 题图所示电路中,石英晶体的标称频率为 1MHz。当 $L=50\mu H$,C=270pF时,电路能够产生振荡。说明此时石英晶体振荡器的工作类型?回路谐振频率 $f_0=?$ 对振荡频率呈容性还是感性?

解: 晶振等效为电感,

电路属于并联型晶振电路。

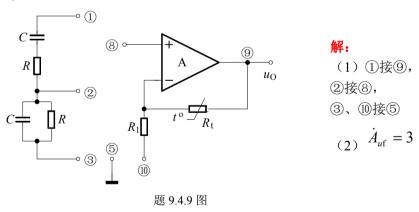
$$f_{\rm o} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 1.37 \text{MHz}$$

LC 回路对振荡频率呈感性。

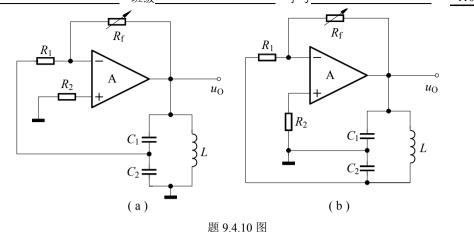


题 9.4.8 图

- 9.4.9 电路如题图所示。试回答下列各问题:
- (1)如何将图中两部分电路的有关端点加以连接,使之成为正弦波振荡电路;
- (2)当电路振荡稳定时,A组成的放大电路其闭环电压放大倍数 $\dot{A}_{\rm uf}$ =?, R_t 为负温度系数的热敏电阻。



9.4.10 试判断题图所示两个电路能否产生正弦波振荡,若不能,简述理由;若能,属于哪种类型电,并写出振荡频率 $f_{\rm o}$ 的近似表达式。设 A 均为理想集成运放。

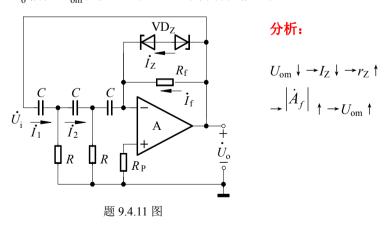


解:图(a):不满足相位平衡条件,不能振荡;

图 (b): 满足相位平衡条件,可能振荡,为电容三点式 LC 正弦波振

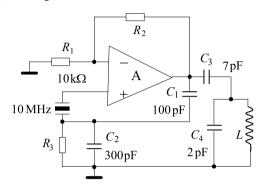
荡电路。
$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

9.4.11 RC 移相式正弦波振荡电路如题图所示,A 为集成运放。若因某种原因 $\dot{U}_{\rm o}$ 幅值 $U_{\rm om}$ 减少,试述该电路自动稳幅过程。



解:

- 9.4.12 对题图所示晶体振荡器,已知晶体串联谐振频率为10MHz.。
- (1) 说明该电路属于哪种形式的晶体振荡电路;
- (2) 求所需 L 值;
- (3) 求等幅振荡时的 R₂值。



题 9.4.12 图

- **解:** (1) 晶体振荡器为串联型晶体振荡器,晶体等效为短路元件,C2 为反馈电容,在晶体串联谐振时满足正反馈条件。
 - (2) C3<<C2, C3<<C1, 则回路谐振频率 fo 应为 10MHz。即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_3 + C_4)}}$$
,得 L=28 μ H

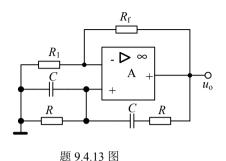
(3)
$$A=1+\frac{R_2}{R_1}$$
, $F=\frac{C_1}{C_1+C_2}$

根据振荡器振幅平衡条件 AF=1 可进一步得到:

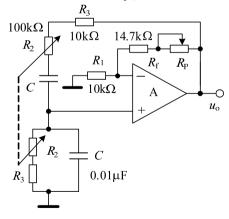
$$1 + R_2 / R_1 = 1 + C_2 / C_1 = 4, R_2 = 3R_1 = 30k\Omega$$

- 9.4.13 题图所示为正弦波振荡电路,已知 A 为理想运放。
- (1) 若电路能产生正弦波振荡, 为使输出波形频率增大应如何调整电路参数?
- (2) 已知 $R_i = 10k\Omega$, 若产生稳定振荡,则 R_i 约为多少?
- (3) 已知 $R_1 = 10$ k Ω , $R_1 = 15$ k Ω , 问电路产生什么现象? 简述理由;

(4) 若 R_f 为热敏电阻, 试问其温度系数是正还是负?



- (1) 减小 R 或者 C 的值;
- (2) 若 $R_1 = 10$ k Ω , R_f 约为 20 k Ω ;
- (3) 若 $R_{\rm l}$ = $10{\rm k}\Omega$, $R_{\rm f}$ = $15{\rm k}\Omega$, 则电路会停振,输出为 0,因为不满足振幅条件;
- (4) $R_{\rm f}$ 应为负温度系数的热温电阻。
- 9.4.14 题图所示为 RC 文氏桥振荡器。
- (1) 为保证电路振荡, 求电阻 R_n 的最小值;
- (2) 求振荡频率的 f_0 的调节范围。



题 9.4.14 图

9.4.15 电容三点式 LC 正弦波振荡电

解: 根据振荡条件, $|\dot{A}\dot{F}| \ge$

$$F_{max} = \frac{1}{3}$$

$$A = (1 + \frac{R_f + R_p}{R_1})$$

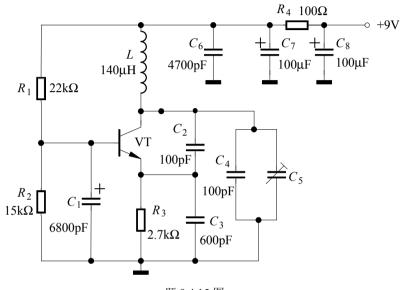
$$R_p \ge 5.3K\Omega$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi (R_2 + R_3)C}$$

\$\approx (145 \sim 1590)Hz\$

路如题图所示,试回答下列问题:

- (1) 若 C_5 很小,忽略其作用,写出振荡频率 f_0 的近似表达式,并算出其值;
- (2) 若忽略放大电路对反馈网络的负载效应,写出反馈系数 \dot{F} 的近似表达式,并算出其值。



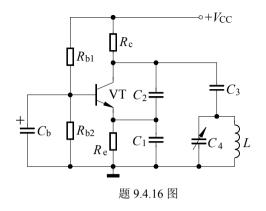
题 9.4.15 图

P: (1)
$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot \left(\frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} + C_4\right)}} \approx 987 \text{kHz}$$

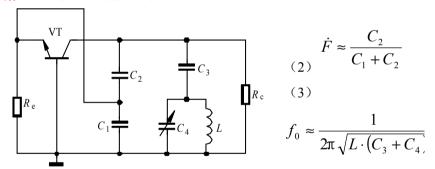
(2)
$$\dot{F} \approx \frac{C_2}{C_2 + C_2} = \frac{1}{7}$$

9.4.16 电容三点式改进型 LC 正弦波振荡电路如题图所示。设 C_b 对交流可视为短路。

- (1) 画出交流通路,并写出反馈系数 F 的近似表达式;
- (2) 若 $C_3 << C_1$, $C_3 << C_2$, 写出振荡频率 f_0 的近似表达式。



解: (1) 交流通路如图示

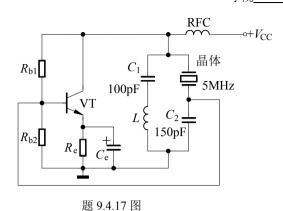


9.4.17 振荡频率为 f_o =5MHz的石英晶体振荡电路如题图所示。欲满足相位 平衡条件,电感 L 值的取有无限制?若有,是什么限制?图中 C_e 为旁路电容,RFC 为高频扼流圈。

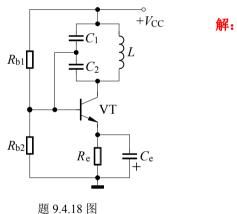
解: 欲满足相位平衡条件,必须使 LC_1 串联支路在 $f = f_0$ 时呈容性,晶体呈感性,以构成电容三点式振荡电路。即要求:

$$\omega_0 L < \frac{1}{\omega_0 C_1}$$
 于是有 $L < \frac{1}{\omega_0^2 C_1} = \frac{1}{(2\pi)^2 f_0^2 C_1} \approx 10.1 \mu H$

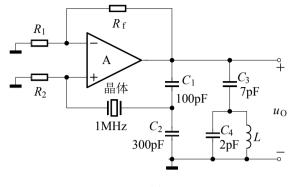
故L有最大值限制,即 $L_{max}=10.1\mu H$ 。



9.4.18 试检查图示 LC 正弦波振荡电路中接线错误, 并加以改正。改正时允许 增减元件和修改接, 但不得改变原振荡电路的基本类型。



- 9.4.19 串联型石英晶体正弦波振荡电路如题图所示, A 为理集成运算放大器。
- (1) 试判断该电路有无可能产生正弦波振荡。若不能,简理由,若有可能振 荡,则晶体是作为短路元件,电感器还是电容器?为满足起振幅值条件,对 R_f 阻值的选取有无限制?若有,是什么限制?
- (2) 若已知晶体的串联谐振频率 $f_1 = 1$ MHz, 试估算 L 值。



题 9.4.19 图

解:

(1) 该电路有可能产生正弦波振荡。晶体作为短路元件。

因为
$$|\dot{F}| \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{4}$$
,故要求 $|\dot{A}| \approx 1 + \frac{R_f}{R_1} \ge 4$ 。当 $R_1 = 10$ k Ω 时,

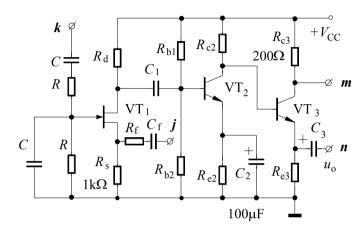
 $R_f \geq 3R_1 = 30$ k Ω 。可见 R_f 应有最小值限制,即 $R_{fmin} = 30$ k Ω 。

(2) LC 回路的谐振频率 f_3 应与晶体的串联谐振频率 f_4 一致。于是有

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L\left(C_4 + \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}\right)}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_4 + C_3)}} = 1 \text{MHz}$$

解得: $L \approx 2.81$ mH

- 9.4.20 要组成一个文氏电桥 RC 振荡器,题图所示电路中 j、k、m、n 应如何连接? 当 $R=820\Omega$, $C=0.02\mu$ F 时,
- (1) 估算振荡器的频率;
- (2) 估算满足起振条件时的 $R_{\rm f}$ 取值。



题 9.4.20 图

解:(1) n 与 k 连接,构成正反馈; n 与 j 连接构成负反馈,为外稳幅电路。

(2) 振荡频率
$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{6.28 \times 0.02 \times 10^{-6} \times 820} = 9.7 \text{KHz}$$

(3) 在深负反馈条件下,为满足幅度起振条件,应有

第10章 调制与解调

10.1 知识要点

- 一、调制与解调的基本概念
- 二、幅度调制与解调
- 三、角度调制与解调

10.2 重点与难点

- 一、调幅波的基本特征
- 二、幅度调制和解调的方法与基本电路:乘法器、调制电路与检波器
- 三、调频、调相信号的基本特征
- 四、调频、鉴频电路的组成、工作原理和性能特点

- 117 -**10.3** 思考题

10.3.1 调制的目的主要之一是。
A、放大信号电压 B、降低天线的长度
C、展宽频带 D、提高信号功率
10.3.2 在波形上它的包络与调制信号形状完全相同的是。
A、AM, B、DSB, C、SSB, D、VSB
10.3.3 调幅过程是把调制信号的频谱从低频搬移到载频的两侧,此过程产生
了新的频谱分量,所以必须采用
A、线性, B、非线性
10.3.4 填空。振幅解调方法可分为和
一般采用检波器解调普通调幅波信号,而采用检
波器解调抑制载波的双边带或单边带信号,其中,抑制载波的双边带调制只
传输,不传输,因而,同样服务范围的发射机功耗
比普通调幅波小。同步检波器主要用于和信号的解
调、其设计关键是要求插入的参考信号与调制端的载频信号、
例、
一———。
一———。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端
°
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端的载频信号。
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端的载频信号。 A、同频, B、同相, C、同频同相, D、没有要求
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端的载频信号。 A、同频, B、同相, C、同频同相, D、没有要求 10.3.6 模拟乘法器不可应用于实现的功能为。
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端的载频信号。 A、同频, B、同相, C、同频同相, D、没有要求 10.3.6 模拟乘法器不可应用于实现的功能为。 A、调幅, B、检波, C、混频, D、调频, E、鉴频
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端的载频信号。 A、同频, B、同相, C、同频同相, D、没有要求 10.3.6 模拟乘法器不可应用于实现的功能为。 A、调幅, B、检波, C、混频, D、调频, E、鉴频 $10.3.7$ 已知载波信号为 $u_{\rm C}(t)=\sin 2\pi \times 10^6 t$,则 $u(t)=2(1+\sin (2\pi \times 10^3 t))\sin 2\pi \times 10^6 t$
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端的载频信号。 A、同频, B、同相, C、同频同相, D、没有要求 10.3.6 模拟乘法器不可应用于实现的功能为。 A、调幅, B、检波, C、混频, D、调频, E、鉴频 10.3.7 已知载波信号为 $u_{\rm C}(t)=\sin 2\pi \times 10^6 t$,则 $u(t)=2(1+\sin (2\pi \times 10^3 t))\sin 2\pi \times 10^6 t$ 代表已调波为;若已调制波表示式为 $u(t)=\sin (2\pi \times 10^6 t + 3\sin 2\pi \times 10^3 t)$,则
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端的载频信号。 A、同频, B、同相, C、同频同相, D、没有要求 10.3.6 模拟乘法器不可应用于实现的功能为。 A、调幅, B、检波, C、混频, D、调频, E、鉴频 10.3.7 已知载波信号为 $u_{\rm C}(t)=\sin 2\pi \times 10^6 t$,则 $u(t)=2(1+\sin (2\pi \times 10^3 t))\sin 2\pi \times 10^6 t$ 代表已调波为;若已调制波表示式为 $u(t)=\sin (2\pi \times 10^6 t + 3\sin 2\pi \times 10^3 t)$,则该已调波为。
。 10.3.5 用乘积型同步检波器解调 DSB、SSB 信号时,要求参考信号与调制端的载频信号。 A、同频, B、同相, C、同频同相, D、没有要求 10.3.6 模拟乘法器不可应用于实现的功能为。 A、调幅, B、检波, C、混频, D、调频, E、鉴频 10.3.7 已知载波信号为 $u_{\rm C}(t)=\sin 2\pi \times 10^6 t$,则 $u(t)=2(1+\sin (2\pi \times 10^3 t))\sin 2\pi \times 10^6 t$ 代表已调波为;若已调制波表示式为 $u(t)=\sin (2\pi \times 10^6 t + 3\sin 2\pi \times 10^3 t)$,则该已调波为。 A、普通 AM 波, B、DSB 波, C、SSB 波, D、调角波

10.3.9 调幅波解调电路中的滤波器应采用。
A、带通滤波器, B、低通滤波器, C、高通滤波器, D、带阻滤波器
10.3.10 从频域看调幅、检波和混频电路的实质都是电路。
10.3.11 单音正弦调制的调幅波有个边频,其调制指数 m 的取值范围
是从到。若调幅波的最大振幅值为 10V,最小振幅值为 6V
则其调制系数 <i>m</i> _a 为。
10.3.12 二极管峰值包络检波器适用于调幅波的解调。
A、单边带, B、抑制载波双边带, C、普通, D、残留边带调幅波
10.3.13 在工作正常的大信号二极管峰值包络检波器中,若增大 $R_{\rm L}C_{\rm L}$ (即加
大负载电阻或检波负载电容),可能会引起。
A、惰性失真,B、底部切削失真,C、频率失真,D、非线性失真
10.3.14 对于 DSB 和 SSB 信号的解调应使用电路。
A、鉴频, B、平方律检波, C、包络检波, D、同步检波
10.3.15 已知下列数学表达式,指出它们分别是:
(1) $(1+\cos\Omega t/2)\cos\omega_c t$;
(2) $\cos\Omega t \cdot \cos\omega_c t$;
(3) $5\cos(\omega_c + \Omega)t$ o
A、普通调幅波, B、双边带调幅波, C、单边带调幅波
10.3.16 同步检波器要求接收端载波与发端载波。
A、频率相同、幅度相同, B、相位相同、幅度相同
C、频率相同、相位相同, D、频率相同、相位相同、幅度相同
$10.3.17$ 调频波参数 $m_{\rm f}$ 的物理含义是。
A、最大(角)频偏与调制信号(角)频率的比值
B、调制信号振幅与载波振幅之比
C、调频波的最小频率与最大频率之比
D、调频波的最大相移
10.3.18 根据调频波的特性,当单音频调制信号的振幅和频率均增大一倍时,
调频波的有效带宽将。
A、减小一倍, B、增大一倍, C、不变, D、增大两倍
$10.3.19$ 单频调制时,调频波的最大角频偏 $\triangle \omega_{ m m}$ 正比于。

118 -

A, $\phi(t)$, B, Ω , C, u_{Ω} , D, ω_{c} , E, $U_{\Omega m}$

10.3.20 下列电路中,不改变频谱结构的电路是____。

A、调幅电路, B、调频电路, C、振幅检波电路, D、混频电路 10.3.21 中国 FM 广播的最大频偏为 。

A、75kHz, B、85kHz, C、465kHz, D、460kHz

10.3.22 在各种调制电路中,最节省频带和功率的是。

A、AM 电路, B、DSB 电路, C、SSB 电路, D、FM 电路 10.3.23 若载波 $u_c(t)=U_C\cos\omega_c t$,调制信号 $u_\Omega(t)=U_\Omega\cos\Omega t$,则调相波的表达式 $u_{PM}(t)=$ ____。

A, $U_{\rm C}\cos(\omega_{\rm c}t + m_{\rm f}\sin\Omega t)$, B, $U_{\rm C}\cos(\omega_{\rm c}t + m_{\rm p}\cos\Omega t)$

C, $U_{\rm C}(1+m_{\rm p}{\rm cos}\Omega t){\rm cos}\omega_{\rm c}t$, D, $kU_{\Omega}U_{\rm c}{\rm cos}\omega_{\rm c}t\cdot{\rm cos}\Omega t$

10.3.24 若调制信号的频率范围为 300Hz~3000Hz, 那么, 窄带调频时, 调频电路中带通滤波器的通频带宽度至少应为。

A, 3000Hz, B, 5400Hz, C, 600Hz, D, 6000Hz

10.3.25 已知 FM 广播的 Δf_m =75kHz,F=15kHz,则其信号带宽等于。

A、180 kHz, B、190 kHz, C、90kHz, D、150 kHz 10.3.26 某一调频波,其调制信号频率 F=1kHz,载波频率为 10.7MHz,最大频偏 $\Delta f_m=10kHz$ 。若调制信号的振幅不变,但调制频率加倍,则此时调频波的频带宽度为____。

A, 12kHz, B, 24kHz, C, 20kHz, D, 40kHz

10.3.27 当调制信号从 2kHz 减小 1kHz,振幅从 1V 增加到 2V 时,调频波最大频偏从 $\triangle f_m$ 变化到。

A, $\triangle f_{\rm m}$, B, $0.5 \triangle f_{\rm m}$, C, $2 \triangle f_{\rm m}$, D, $4 \triangle f_{\rm m}$

10.3.28 对于调频波的下列解调方法,错误的是____。

A、通过线性网络进行频一幅变换,然后进行包络检波

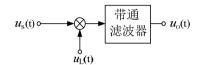
B、通过线性网络进行频一相变换,然后用乘法器鉴相

C、通过线性网络进行频-相变换以及频率-相位-振幅变换,然后进 行包络检波

D、可以想办法直接进行频率检波

10.3.29 频率为 100MHz 的载波被频率为 5kHz 的正弦信号调频, $\Delta f_m = 50kHz$,

调频信号带宽 BW=____kHz; 如果调制信号的振幅加倍,频率不变,则带宽 BW=____kHz; 若调制信号的振幅和频率都加倍,BW=____kHz。 10.3.30 若 $u_s(t)=U_s\cos\omega_s t \cdot \cos\Omega t$, $u_L(t)=U_L\cos\omega_L t$,则题图所示框图能实现_____功能。根据下面选项,完成选择。



10.3.32 双踪示波器观察到题图所示调幅波,根据所测得的数值,可确定该调幅波的调幅度为____。

答案:

10.3.1 B 10.3.2 A 10.3.3 B

10.3.4 包络检波|同相检波;包络|同相;上下边带|载波;双边带|单边带,

同频|同相 10.3.5 C

10.3.6 E 10.3.7 AD

10.3.8 6.25W, 112.5W, 125W, A

10.3.9 A 10.3.10 频谱搬移电路

10.3.11 2, 0~1, 0.25 10.3.12 C 10.3.13 A

10.3.14 D 10.3.15 ABC 10.3.16 C 10.3.17 AD

<u>- 119 -</u>	学院	姓名	班级	学号
10.3.18 C 10.3.19 E 10.3.20 A	10.3.21 A			
10.3.22 C 10.3.23 B 10.3.24 D	10.3.25 A			
10.3.26 10.3.27 C 10.3.28 D				
10.3.29 110kHz, 210kHz, 220kHz	10.3.30 B			
10.3.31 22kHz, 10kHz, 积分微分 10.3.32 C				

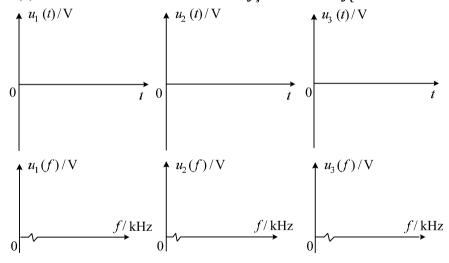
10.4 习题

10.4.1 试画出下列几种已调波信号的波形图和频谱图,并说明它们可能代表什么信号(已知 ω >>> Ω)

- (1) $u(t) = (1 + 0.3\cos 2\pi \times 10^3 t) \cos 2\pi \times 10^6 t$ (V);
- (2) $u(t) = \cos(2\pi \times 10^3 t) \times \cos(2\pi \times 10^6 t)$ (V);
- (3) $u(t) = 2\cos 2\pi (10^3 + 10^5) t$ (V).

解:

- (1)为标准调幅波,其中 $f_s = 10^3 \,\text{Hz}$, $f_c = 10^6 \,\text{Hz}$, $m_a = 0.3$ 。
- (2)为抑制载波的双边带调幅波,其中 $f_s = 10^3 \,\mathrm{Hz}$, $f_c = 10^6 \,\mathrm{Hz}$ 。
- (3)为抑制载波的单边带调幅波,其中 $f_{s} = 10^{3} \text{Hz}$, $f_{s} = 10^{5} \text{Hz}$ 。



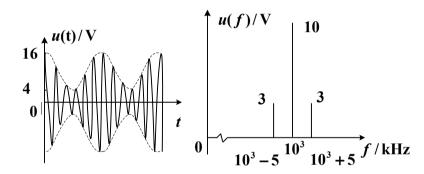
10.4.2 调制信号为 $u_s(t) = U_{sm} cos \omega_s t$,载波信号为 $u_c(t) = U_{cm} cos \omega_c t$ 。试写出是标准调幅波,同时又是调频波的已调波表达式。

解: $u_{\text{AM-FM}}(t) = U_{\text{m0}}(1 + m_{\text{a}}\cos\omega_{\text{s}}t)\cos(\omega_{\text{c}}t + m_{\text{f}}\sin\omega_{\text{s}}t + \varphi_{0})$ 其中, $m_{\text{a}}, m_{\text{f}}$ 分别为调幅度和调频指数。 10.4.3 已知已调信号 $u_{AM}(t) = (10 + 6\cos 2\pi \times 5 \times 10^3 t)\cos 2\pi \times 10^6 t$ (V)。试问:

- (1) 该信号是何种波? 画出此波的波形;
- (2) 画出该已调波的频谱图,并求带宽:
- (3) 若负载电阻 R_L =100 Ω ,求该已调波的总功率。

解: (1) 该信号为标准调幅波,其中调幅度 $m_a = 0.6$, $f_s = 5 \times 10^3 \, \text{Hz}$, $f_c = 10^6 \, \text{Hz}$;

(2) 波形、频谱图如下图所示。



$$BW = 2 \times 5 \times 10^3 = 10^4 \text{ Hz}$$

(3)
$$P_{AV} = \frac{1}{4}U_{cm}^2(2+m_a^2) = \frac{1}{4} \times 10^2 \times (2+0.36) = 59W$$

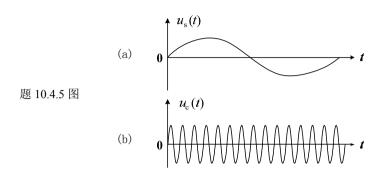
10.4.4 试写出一个调制灵敏度 k_f = 3kHz/V 的 FM 波表达式。其中,调制信号 u_0 = $2\cos 2\pi \times 10^3 t + 3\cos 3\pi \times 10^3 t$ (V),载波为 u_c = $5\cos 2\pi \times 10^7 t$ (V)。

M: $u_{\rm FM}(t) = U_{\rm cm} \cos[\omega_{\rm c} t + k_{\rm f}] u_{\Omega}(t) dt$

- $=5\cos[2\pi \times 10^{7} t + k_{\rm f}](2\cos 2\pi \times 10^{3} t + 3\cos 3\pi \times 10^{3} t] dt$
- $=5\cos[2\pi \times 10^7 t + 6(\sin 2\pi \times 10^3 t + \sin 3\pi \times 10^3 t)]dt$
- $=5\cos[2\pi \times 10^{7} t + 12\sin 25\pi \times 10^{2} t \cdot \cos 5\pi \times 10^{2} t)]dt$

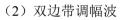
10.4.5 载波信号及调制信号如图所示,试分别画出下列相应的已调波波形:

(1) 标准调幅波; (2) 抑制载波的双边带调幅波; (3) 调频波。

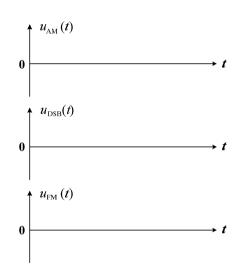


解:

(1) 标准 AM 波



(3) 调频波



10.4.6某调幅发射机的调制制式为普通调幅。载波频率和功率分别为500kHz和100kW,调制信号频率为20Hz~5kHz,调制系数m=0.5,试求该调幅波的:

- (1) 频带宽度?
- (2) 在m = 0.5调制系数下的总功率?
- (3) 在最大调制系数下的总功率?

- **M**: (1) BW= $2F = 2 \times 5 \times 10^3 = 10 \text{ zHz}$
 - (2) 当 m =0.5 时, $P_{\text{ a}} = P_{\text{C}} (1+m^2/2) = 100 (1+0.5^2/2) = 112.5 \text{ W}$
 - (3) 当 m =1 时, P = 100 (1+1/2) = 150 W

10.4.7 已知调频信号为 $u(t)=10\cos(2\pi\times10^6t+10\cos2000\pi t)$ V。

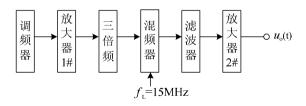
- (1) 求该 FM 波的带宽;
- (2) 若F增大一倍, U_0 不变,带宽将如何变化?
- (3) 若 U_{Ω} 增大一倍, F 不变, 带宽将如何变化?

解: (1) 由于 F = 1kHZ, $m_f = 10$, $BW = 2(m_f + 1)F = 2(10 + 1) \times 10^3 = 22kHz$

- (2) 若 F 增大一倍, U_{Ω} 不变,则 $\triangle f_m$ 不变, m_f 减半。 BW = $2(m_f + 1)F = 2(5 + 1)2 \times 10^3 = 24 \text{ kHz}$
- (3) 若 U_{Ω} 增大一倍,F 不变,则 $\triangle f_m$ 和 m_f 增大一倍。 BW = $2(m_f + 1)$ F = $2(20 + 1) \times 10^3$ = 42 kHz

10.4.8 某调频发射机框图如题图所示,调频器输出 FM 信号的中心工作频率 f_c =8MHz,最大频偏 Δf_m =40kHz,框图中混频器输出取出差频信号。试求:

- (1) 该设备输出信号的中心频率 f_0 及最大频偏 Δf_{mo} ;
- (2) 放大器 1#和放大器 2#输出的信号中心频率与频谱带宽各为多少?



题 10.4.8 图

解: (1) 输出信号的中心频率 f_0 =3×8–15=9MHz 最大频偏 Δf_{mo} =3× Δf_m =120kHz

(2) 放大器 1# 输出的中心频率为 8MHz,BW= $2(F+\Delta f_{\rm m})$ 放大器 2# 输出的中心频率为 9MHz,BW= $2(F+\Delta f_{\rm mo})$

10.4.9 有一调角波信号,其表达式为 $u(t) = 10\cos(2\pi \times 10^6 t + 10\cos 2000\pi t)$ (V),试根据表达式分别确定:

- (1) 载波频率 f_c 和调制信号频率 F_f
- (2) 最大频偏;
- (3) 最大相移;
- (4) 调频波有效带宽 BW:
- (5) 信号在 100Ω 电阻上的平均功率。

\mathbf{M}: (1) f_c =1MHz, F=1kHz

- (2) 最大頻偏: $\Delta f_m = m_f = 10 \times 10^3 = 10 \text{kHz}$
- (3) 最大相移: $\Delta \varphi_{m} = m = 10 \text{ rad}$
- (4) 信号带宽: BW = $2(m_f+1)F = 2(10+1) \times 10^3 = 22 \text{ kHz}$
- (5) 信号在 100Ω 电阻上的平均功率: $P = U_0^2/2R_L = 10^2/(2 \times 100) = 0.5W$

10.4.10 有一调频波,它的最大频偏为 75kHz,当调制信号分别等于 100Hz 和 15KHz 是,试求调频指数和频带宽度。

M: $m_f = \Delta f_m / F$; BW=2($\Delta f_m + F$)

10.4.11 有一调角波数学表达式为 $u(t)=10\cos[2\pi\times10^5t+6\cos(2\pi\times10^4)t](V)$,

- (1) 载波频率 f_c 是多少?调制信号频率 F 是多少?
- (2) 若调制信号分别为 $u_{\Omega}(t)=3\cos(2\pi\times10^4)t$ 和 $u_{\Omega}(t)=3\sin(2\pi\times10^4)t$ 时,该调角信号是调频信号还是调相信号?

M: (1) f_c =100kHz; F=105kHz

(2) $u_{\text{FM}}(t) = U_{\text{cm}} \cos[\omega_{\text{c}} t + k_{\text{f}} \int u_{\Omega}(t) dt]$ $u_{\text{PM}}(t) = U_{\text{cm}} \cos[\omega_{\text{c}} t + k_{\text{P}} u_{\Omega}(t)]$

分别 PM 波和 FM 波。

10.4.12 设调制信号 $u_{\Omega}(t) = 2\sin\pi \times 10^4 t(V)$, 调频灵敏度 $k_{\rm f}$ 为 $2\pi \times 20 \times 10^3 \text{rad/s.v}$ 若载波频率为 10MHz,载波振幅为 6V。试求:

- (1) 调频波的表达式:
- (2) 最大频率偏△fm;
- (3) 调频指数 m_f;
- (4) 最大相位偏移为多少?
- (5) 最大角频偏和最大相偏与调制信号频率和振幅的变化有何关系?

解: $m_f = \Delta f_m / F = 40 \text{kHz} / 5 \text{kHz} = 8 \text{rad}$, 其中 $\Delta f_m = k_f U_{\Omega m} = 20 \text{kHz} / \text{V} \cdot 2 \text{V} = 40 \text{kHz}$

- (1) $u_{\text{FM}}(t) = 6\cos(2\pi \times 10^6 t + 8\cos\pi \times 5 \times 10^3 t)$
- (3) $\Delta f_{\rm m} = k_{\rm f} U_{\Omega \rm m} = 20 \rm kHz/V \cdot 2V = 40 \rm kHz$
- (3) $m_f = \Delta f_m / F = 40 \text{kHz} / 5 \text{kHz} = 8 rad$
- (4) $\Delta \varphi_{\rm m} = m_{\rm f} = 8rad$
- (5)

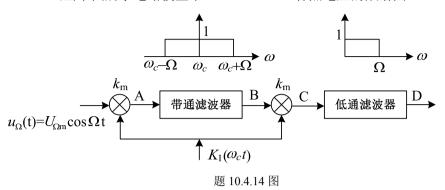
10.4.13 受音频信号 $u_s(t) = 0.5\cos\pi \times 10^4 t$ (V) 调制的某调频波的数学表达式为 $u_{\text{FM}}(t) = 8\cos(2\pi \times 10^8 t + 5\sin\pi \times 10^4 t)$ (V),试求:

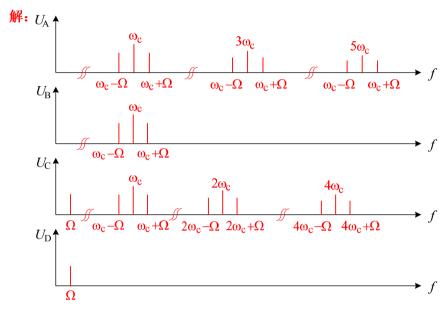
- (1) 此调频波的载频、调制频率和调频指数;
- (2) 瞬时相移 $\varphi(t)$ 和瞬时频率 f(t)的表达式;
- (3) 最大相移 $\triangle \varphi_{m}$ 和最大频偏 $\triangle f_{m}$;
- (4) 此调频波的有效频带宽度 BW。

解:

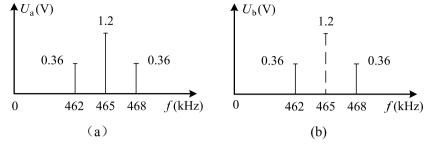
- (1) f_c =100MHz; F=5kHz; m_f =5rad
- (2) $\varphi(t) = 2\pi \times 10^8 t + 5\sin \pi \times 10^4 t$ $\square \omega(t) = d\varphi(t)/dt = 2\pi \times 10^8 + 50\pi \times 10^3 \cos 2\pi \times 5 \times 10^3 t \text{ (rad)}$ $\therefore f(t) = 10^8 + 25 \times 10^3 \cos 2\pi \times 5 \times 10^3 t \text{ (Hz)}$
- (3) $\Delta \varphi_{\rm m} = 50\pi \times 10^3 \text{ (rad)}; \quad \Delta f_{\rm m} = 25 \times 10^3 \text{ (Hz)} = 25 \text{ kHz}$
- (4) BW= $2(\Delta f_{\rm m} + F) = 60 \text{kHz}$

10.4.14 画出下图所示电路模型中 A、B、C、D 各点电压的频谱图。





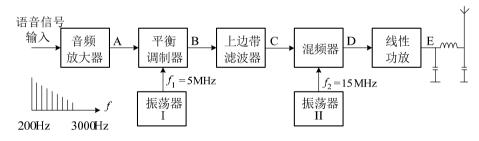
10.4.15 已知信号电压的频谱图如题图(a)和(b)所示。试求:(1)两种已调波分别是何种已调波? 写出对应信号电压的数学表达式;(2)计算两种已调波在单位电阻上消耗的边带功率和它们所占据的频带宽度。解:(1)(a)为普通调幅波。 u_a =1.2[1+0.6cos(2π ×468×10³t)] $\cos(2\pi$ ×465×10³t)(b)为双边带调幅波。 u_b =0.72cos(2π ×465×10³t)×0.36cos(2π ×468×10³t)



题 10.4.15 图

(2)
$$P_{\text{a}\dot{\text{d}}} = 2 \times \frac{1}{2R_L} (\frac{m_{\text{a}}U_{cm}}{2})^2 = 0.36W$$
, $BW = 2F = 6\text{kHz}$
 $P_{\text{b}\dot{\text{d}}} = \frac{1}{2R_L} (\frac{m_{\text{a}}U_{cm}}{2})^2 = 0.18W$, $BW = 2F = 6\text{kHz}$

10.4.16 题图所示为单边带发射机框图,其中调制信号为 300Hz~3000Hz 的音频信号。试画出各方框输出端的频谱分布图。



题 10.4.16 图

