

东南大学考试卷 (A 卷)

课程名称 模拟集成电路设计 考试学期 19-20-1 得分
适用专业 集成电路工程 考试形式 闭卷 考试时间长度 120 分钟

题目	一	二	三	四	五	六	合计
得分							

一、选择题 (每题 3 分, 总计 18 分)

每题共有 3 个选项, 根据题意选取其中最合适的一项并填写在括号中

1、多级差分放大器与多级差分比较器, 两者关系合理的表述是 (B)

- (A) 两者可相互替代使用;
(B) 差分放大器可用作差分比较器, 但比较器不能用作放大器;
(C) 差分比较器可用作差分放大器, 但放大器不能用作比较器;

2、推挽放大器可工作在 A、AB、B 等各类状态, 但最常用的工作状态是 (C)

- (A) class A (甲类); $I_{static} \text{ 较大}$
(B) class B (乙类); $I_{static} \rightarrow 0$
(C) class AB (甲乙类);

3、CS-CD 两级开环放大器构成的两阶系统, 其开环阻尼因子 ζ 通常满足 (A)

- (A) $\zeta > 1$: $A_{OL} = \frac{F+1/A_v}{F+1/(A_v A_0)} = \frac{A_0}{F A_0 + 1 + (\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2})s + \frac{1}{P_1 P_2} s^2} = \frac{A_0}{1 + \frac{1}{HFA_0}(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2})s + \frac{1}{HFA_0 P_1 P_2} s^2}$
(B) $\zeta = 1$: $\omega_0 = \sqrt{(HFA_0)P_1 P_2}$
(C) $\zeta < 1$: $\zeta \approx \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{HFA_0} \frac{1}{P_1} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{(HFA_0)P_1 P_2}}{(HFA_0)P_1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_2}{(HFA_0)P_1}}$ $F=0 \rightarrow \text{开环} \cdot \zeta_{OL} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} > 1$

4、稳定的单调型自偏置电路(4 管+1 电阻构成), 环路增益为 T, 正确的描述是 (B)

- (A) 电路上电启动时环路为负反馈, 在 Q 点 (偏置点) 处变为正反馈且 $T < 1$;
(B) 电路上电启动时环路为正反馈且 $T > 1$, 在 Q 点 (偏置点) 处仍保持正反馈且 $T < 1$;
(C) 电路上电启动时环路为正反馈且 $T < 1$, 在 Q 点 (偏置点) 处变为负反馈;

5、由多级反相器 INV 级联构成的 n 级环形闭环结构, 其中级数分别为 n=2, 3, 5, 且每级 INV 延迟单元延迟均相同, 则可形成振荡且振荡频率最高的是 (B)

- (A) n=2;
(B) n=3;
(C) n=5;

6、PM 为相位裕度, LHP 为左半平面, RHP 为右半平面, 则有关多级增益系统的稳定性问题, 下表述错误的是 (A)

- (A) 若开环均为 LHP 极点, 则构成的单位负反馈环路一定有 $PM > 0$, 闭环系统收敛;
(B) 若闭环均为 LHP 极点, 则闭环系统一定收敛, 并且其环路一定有 $PM > 0$;
(C) 若开环有一个 RHP 极点, 则其构成的闭环一定发散, 并且其环路一定有 $PM < 0$;

$$A_v = \frac{A_0}{1 + \frac{1}{HFA_0}(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2})s + \frac{1}{HFA_0 P_1 P_2} s^2}$$

二、简述题(每小题 5 分, 总计 25 分)

1、简要说明 MOS 管受控源的类别属性, 以及跨导 g_m 和输出导纳 g_d 的物理含义, 阐述 MOS 管作为放大器和有源负载的具体条件?

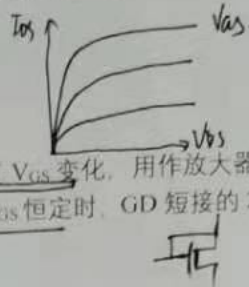
答: MOS 管可作为电压控制电流源 (VCCS) (1 分)

跨导 g_m : 栅压对输出电流的控制作用 (1 分)

导纳 g_d : 漏压对输出电流的控制作用 (1 分)

MOS 管作为放大器条件: 三端口且在 MOS 管栅源电压 V_{GS} 变化, 用作放大器 (1 分)

MOS 管作为有源负载条件: 三端口 MOS 管栅源电压 V_{GS} 恒定时, GD 短接的 2 端口器件, 可以作为有源负载 (1 分)

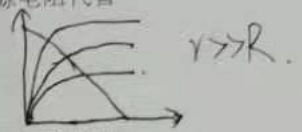


2、放大电路中的线性负载电阻起什么作用? IC 模拟电路中通常用 MOS 有源电阻代替无源线性电阻, 请分析其中的主要原因。

答: 线性负载电阻作用: AC I-V 转换, 形成电压输出, 提供电压增益, (1 分)

DC I-V 转换, 影响静态偏置点 (1 分)

原因: 交直流阻抗分离, 解决了静态工作点与增益的矛盾 (1 分), 直流低阻用于确定静态工作点 (1 分), 交流高阻用于提高增益 (1 分)。



3、如何理解共漏 (CD) 放大器的增益 < 1? 既然 CD 放大器并不能增大环路的增益, 那么 CD 结构在放大电路中究竟能起到何种作用? 请简要分析。

答: CD 结构的电压增益为

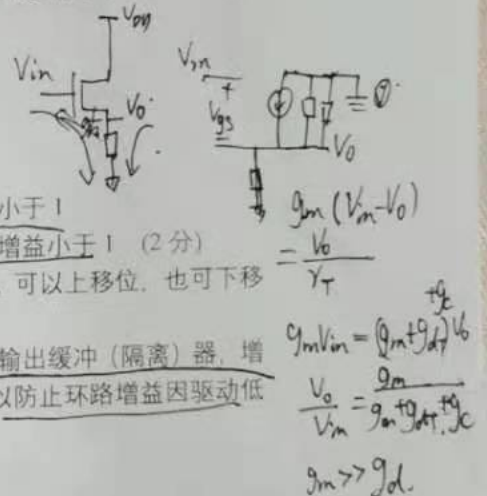
$$A_{V0} = \frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{d, total} + g_d}$$

其中, g_{m1} 为放大管的跨导, 由于一般 $g_m \gg g_d$, 因此 $A_{V0} \approx 1$ 但恒小于 1

CD 电路的特征之一是输出包含在输入信号的通路中, 所以增益小于 1 (2 分)

DC 大信号看, CD 电路具有直流电平移位的作用, 利用恒定的 V_{GS} , 可以上移位, 也可下移位 (1 分)

AC 小信号看, CD 电路由于输入阻抗较高、输出阻抗较低, 可作为输出缓冲 (隔离) 器, 增强负载驱动能力 (1 分)。因此, 随 CD 不能增加环路增益, 但却可以防止环路增益因驱动低阻而下降。 (1 分)



4、说出开环放大器的功能类型, 以及闭环负反馈的结构类型名称。设开环放大器 (增益为 A_i) 经过负反馈构成闭环放大器 (增益为 A_f), 请说明在何种条件下, 才能得到 $A_f \approx 1/F$, 其中 F 为无源网络的反馈系数, 无源反馈网络用于将开环构成闭环。

答: 开环放大器根据功能可分为四种: 电压放大器、跨阻放大器、跨导放大器、电流放大器, (1.5 分)

闭环负反馈的结构类型分为四种: 电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈、电流并联负反馈 (1.5 分)

在开环放大与闭环反馈放大同型 (1 分) 且开环增益 A_i 趋于无穷 (1 分) 的条件下, 才能得到 $A_f \approx 1/F$

$$A_f = g_m(R // \frac{1}{sC})$$

5、简要说明线性模拟电路结构中零、极点形成的物理机制。采用 Miller 电容补偿的两级放大器，分析在何种条件下其单位负反馈闭环系统会产生一对 LHP 共轭复极点。

答：电路节点的 RC 时间常数是引起零极点的根源。

模拟电路中的放大器均为电流输出驱动负载并转换为电压，因此负载 RC 并联谐振形成 LHP 极点 (1 分)，负载 RC 串联谐振形成 LHP 零点 (1 分)；另一种前馈产生的零点 (RHP 或 LHP)。(1 分)

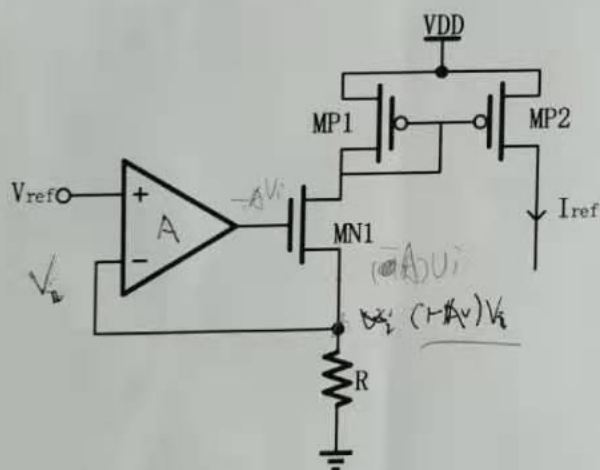
$$\text{闭环阻尼因子 } \xi_{CL} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{p_1}{p_2}} + \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \right) \frac{1}{\sqrt{1+FA_{v0}}} = \frac{\xi_{OL}}{\sqrt{1+FA_{v0}}} \quad (1 \text{ 分})$$

当 $P_2 < 4(1+FA_{v0})P_1 \approx 4GBW$, $0 < \xi_{CL} < 1$, 闭环产生一对 LHP 共轭复极点 (1 分)

三、作图分析题(每题 8 分，合计 16 分)

1、高增益 CMOS 开环运放 OP 具备近似的“虚短-虚断”特性，请画出一个利用 OP 控制的 V-I 转换结构。如果选用的基准电压 $V_{ref} = 0.6V$ ，请说明对 OP 电路结构的关键性要求；对于产生的输出电流，请说明降低其温度系数的可行调节方法。

答：



作图 3 分：OP 极性正确(1 分)，电阻位置正确(1 分)，PMOS 电流镜正确且电源地标注或区分明显(1 分)

因基准共模电平偏低，所以 OP 必须采用 PMOS 差分对(1 分)；因要求足够的环路增益，而 MN1 为源跟随器不提供环路增益，因此 OP 需具有 2 级增益 (1 分)；若 OP 为 2 级 CS 增益级，需要内部 Miller 电容补偿，若 OP 采用 Fold (折叠式) Cascode 结构，则无需频率补偿(1 分)；

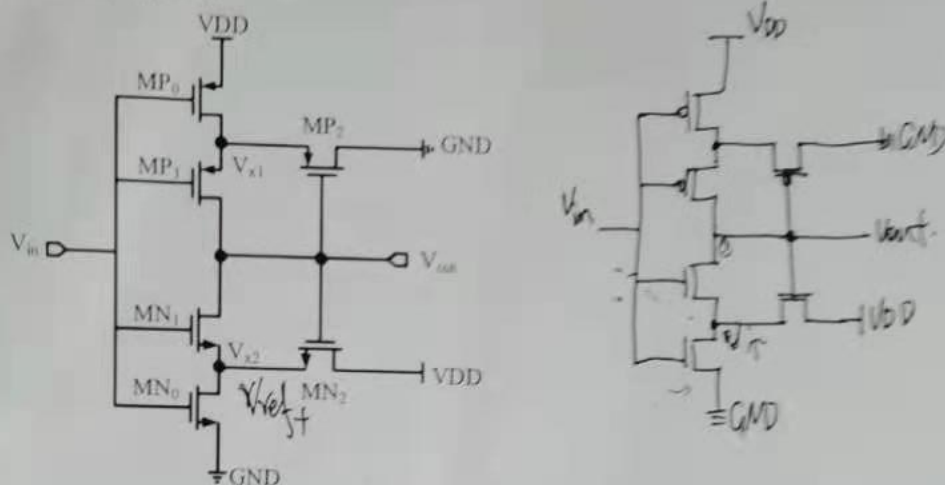
调节方法：① V_{ref} 采用基准设计，温度系数最小；同时采用复合电阻 (正温度系数+负温度系数=0 温度系数) 设计，将电阻温度系数降低到 0 (1 分)；②若 R 有一定的温度系数，则调节 V_{ref} 的温度系数，使两者的温度系数性质相同，数值相近，降低 V_{ref}/R 的温度系数。(1 分)

$$V_{os} = V_{gs} - V_{th}$$

2、请画出 6 管 CMOS 迟滞比较器的电路结构（标识清楚元器件及信号名称），同时画出该电路输入-输出传输特性曲线示意图。如果在电源电压 V_{DD} 不变的条件下，要求增大该电路的迟滞窗口，此电路中相关 MOS 管的尺寸应做何种变化？（定性说明即可）

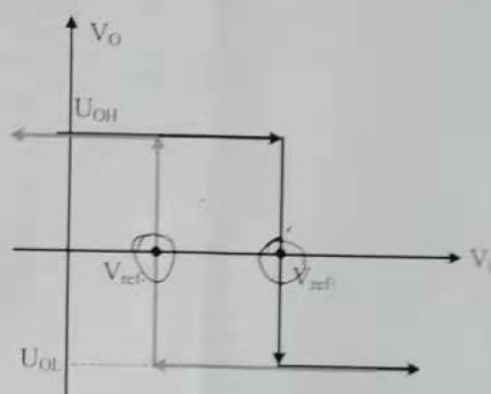
答：

1)、电路结构 (3 分)



NMOS、PMOS 标注清楚 1 分，电源地标注清楚 1 分，输入-输出标注清楚 1 分

2)、电路输入-输出传输特性曲线 (2 分)



反相比较特性 1 分，迟滞极性正确 1 分，

3)、增大该电路的迟滞窗口

根据电路传输特性曲线，增大该电路的迟滞窗口，即增大电路的 V_{ref+} 、或减小 V_{ref-} ，或再增大 V_{ref+} 的同时降低 V_{ref-} ；为实现上述目标，需增大 V_{X2} 电位、或降低 V_{X1} 电位、或增大 V_{X2} 的同时降低 V_{X1} (1 分)

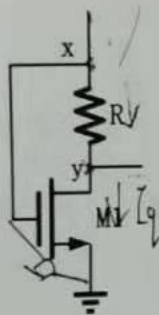
增大 V_{X2} 电位，主要靠减小 MN0 管 W/L、增加 MN2 管 W/L (1 分)

降低 V_{X1} 电位，主要靠减小 MP0 管 W/L、增加 MP2 管 W/L (1 分)

四、阻抗分析题 (12 分)

如下图所示电路中, NMOS 管流过某一恒定的静态电流 I_q , 设该 MOS 管的跨导为 g_m , 输出导纳为 g_d , R 为接入漏端的线性电阻, NMOS 管 W/L 保持不变

- (1) 若 $R=0$, 求从 x 点看到 GND 的输入阻抗 r_x ; (2 分)
- (2) 若 $R>0$, 求电压小信号从 x 点传递到 y 点的增益 A_v , 并分析该增益值正负极性可控的物理根源; (2 分)
- (3) 若 $R>0$, 求 x 点看到地的阻抗 r_x ; (2 分)
- (4) 当 I_q 从 0 逐渐增大时, 该 NMOS 管将从饱和恒流源区过渡到线性电阻区, 请说明原因, 并且指出 x 、 y 点电位在此过程中变化的特征是什么。 (2 分)
- (5) 若 $1/g_m = R = 1/g_d$, 其中 g_m 、 g_d 为饱和恒流源区下跨导和输出导纳, 在此区域内有 $g_m > g_d$ 。当 I_q 从 0 逐渐增大时, 即 MOS 从饱和恒流源区向线性电阻区的过渡过程中, 交流阻抗 r_x 是变大还是变小。请说明理由。 (2 分)

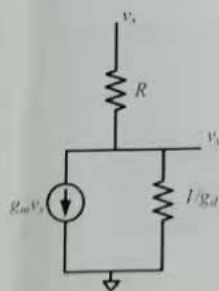


答:

- (1) 此时 $V_{GS}=V_{DS}$, MOS diode 结构, 由小信号模型可知: (1 分, 说明依据)

$$r_x = \frac{1}{g_m + g_d} \quad (1 \text{ 分, 忽略 } g_d \text{ 可不扣分})$$

- (2) 方法一: 给出小信号模型, 建立方程求解。



$$A_v = \frac{v_y}{v_x} = \frac{1 - g_m R}{1 + g_d R} \quad (1 \text{ 分})$$

方法二: 增益等于 CS 放大增益叠加上电阻分压

$$A_{v2} = \frac{v_y}{v_x} = -g_m \left(R \parallel \frac{1}{g_d} \right) + \frac{g_d}{R + \frac{1}{g_d}} = \frac{1 - g_m R}{1 + g_d R}$$

增益包含电阻分压的同相传输与 CS 反相增益传输, R 大小影响两者的相对强度,
 $0 < R < 1/g_m$ 时, 分压传递占主导地位, 总的增益为正, (0.5 分)
 $R > 1/g_m$ 时, 反相增益传输占主导地位, 总的增益为负, (0.5 分)

(3) 从 x 输入一电压信号 v_x , y 点电压为 v_y , i_R 为流过 R 的电流, 则:

$$r_x = \frac{v_x}{i_R} = \frac{v_x}{\frac{v_x - v_y}{R}} = R \frac{1}{1 - A_{vy}} = \frac{1 + g_d R}{g_m + g_d} \quad (2 \text{ 分})$$

阻抗公式概念对得 1 分, 结果正确 1 分

(4) 电阻两端的电压 $V_R = I_D R = V_X - V_Y$, V_R 随着 I_D 的增大而增大, 当 $V_R = I_D R \leq V_{DD}$ 时, 管子处于饱和恒流源区, 当电阻上压降持续增大总能满足 $V_R = I_D R \geq V_{DD}$, 此时 MOS 管 $V_{DS} \leq V_{GS} - V_{TH}$, 则进入线性电阻区; (1 分)

当电流 I_D 从零逐渐增大, 一开始当 MOS 管仍处于饱和区时, 因饱和管 V_{GS} 箝位作用, x 点电位 V_X 上升缓慢, 而 V_R 随电流线性增加导致 V_Y 近似随 I_D 的增加而线性下降, 此时 V_Y 下降的速度明显高于 V_X 上升的速度; (1 分), 可近似 V_X 不变 V_Y 变(下降), MOS 管子进入线性区后, V_{GS} 箝位作用消失, 相反线性 MOS 管要提供越来越大的电流, 只能依靠更大的 V_{GS} 实现, 所以以后 V_X 开始上升速度变快, 并且明显快于 V_Y 下降的速度, (1 分) 可近似 V_X 变(增加) V_Y 不变。

(5) 由题知 $g_d R = 1$, g_m ? g_d , 根据 3 中公式得饱和区条件下:

$$r_x \approx \frac{1}{g_m} = \frac{1}{\sqrt{2K' \frac{W}{L} I_D}}$$

当 I_D 从 0 逐渐增大时, 若 MOS 管仍处于饱和区, 则 g_m 随电流增大而增大, 导致 r_x 随电流增大而减小, (1 分);

进入线性区以后, 电流继续增加, 可进入深度线性区, 此时 g_m ? g_d 成立, 则根据阻抗公式

$$r_x = \frac{1 + g_d R}{g_m + g_d} \approx \frac{1 + g_{d,lin} R}{g_{d,lin}} = \frac{1}{g_{d,lin}} + R = r_{in} + R \approx R$$

(物理意义是: 进入深度线性区后, MOS 线性电阻很小趋近 0 可忽略), 则最终的 r_x 看近似为 R 保持不变(1 分)

因 $R > 1/g_{m, sat}$, 所以阻抗随电流完整变化过程为: 开始在饱和区时阻抗逐渐减小, 进入线性区阻抗开始增大, 最后进入深度线性区后, 阻抗近似为 R 保持不变, (1 分)

注意: 此文 3 分分别给 3 个阶段的特征, 每个阶段特征答对给 1 分。

r_x 变大 (2 分)

五、频率特性分析题 (总计 14 分)

某一由多级开环放大器构成的单位负反馈电路, p_1 和 p_2 分别是开环电路的主极点频率, $GBW = A_{v0} p_1$ 是开环的增益带宽积, A_{v0} 是开环电路的低频增益, UGB 是环路单位增益带宽。

(1) 请说明 UGB 和 GBW 两者之间的相对位置关系。 (2 分)

(2) 若 $p_2 = GBW$, 估算的相位裕度近似取 $PM=45^\circ$, 请分析这种估算的 PM 与精确值是偏大还是偏小? 请给出具体原因。 (3 分)

(3) PM 中涉及的相移, 是指环路增益下降到 $T = FA_v = 1$ 所在频率下产生的相移, 实际计算时通常取开环增益下降到 $A_v = 1$ 所在频率下产生的相移, 请说明其中的原因。 (3 分)

(4) 环路增益 $T=1$ 时所对应的频率称为增益交点频率, 闭环负反馈附加相移为 -180° 即系统正反馈时对应的频率为相位交点频率。若系统无零点且 $PM>0$, 请说明这两个交点频率的相对位置关系, 给出判断的依据。 (3 分)

(5) 两级开环放大器通常因相位裕度不足而需要进行频率补偿, 在获得相同的 PM 条件下, 试说明 Miller 电容补偿比并联电容补偿的主要优点有哪些? 而消除 Miller 电容引入的 RHP 零点或抑制其影响, 又有哪些办法? 请简要说明。 (3 分)

答:

(1) 多极点系统中, 方程 $|A_v(j\omega)| = \frac{GBW}{\omega \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{p_2}\right)^2}} = 1$ 的解 ω , 即环路增益为 1 时的频率

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{p_1 p_2}}$$

为 UGB (1 分)。

可知 $GBW/UGB > 1$, 因此 UGB 在 GBW 的左边, 仅单极点系统两者相同 (1 分)。

(2) 估算 PM 时通常取 $UGB=GBW$, 即 UGB 高估(偏大), 导致相移偏大, 与精确值比估算的 PM 偏小, 实际的 PM 比估算值略大 (1 分)。

$$PM = 180^\circ - \arctan \frac{UGB}{p_1} - \arctan \frac{UGB}{p_2} \quad (1 \text{ 分})$$

$$= 90^\circ - \arctan \frac{UGB}{GBW}$$

由于 $GBW/UGB > 1$ 所以 $\arctan \frac{UGB}{GBW} < \arctan 1 < 45^\circ$ (1 分), 所以 $PM > 45^\circ$

(3) 反馈系统的稳定性可以由 PM 表征, PM 与环路增益为 1 时的频率 UGB 下所产生的相移有关 (1 分)。

因无源反馈系数满足 $0 < F \leq 1$, 随着 F 的增大, 闭环增益 $1/F$ 减小, UGB 频率点变高, 则引起的相移变大, 此时 PM 越小 (1 分)。

$F=1$ 对应环路 PM 最坏情况, 若此时 $PM=60^\circ$, 则其他 $F<1$ 时的 $PM>60^\circ$, 可确保任何反馈系数下系统稳定 (1 分)。

(4) 增益焦点交点频率 < 相位交点频率 (2 分)

依据: 是无零点条件下, 环路增益和相移随频率变化均为单调特性 (1 分)

(5) 优点: 并联电容补偿对次极点没有影响, 通过压缩主极点, 从而改变 UGB , 放大器带宽太小, 性能差, 且需要并联大电容, 面积很大。Miller 补偿法不仅压缩主极点, 还扩展次极点, 补偿效果更好, 且电容值较小。 (1 分)

方法: ① 将 RHP 零点推远: 使 $z > 10GBW$, 即 $g_{m2} > 10g_{m1}$ 。

② 将 RHP 零点变成 LHP 零点: 串联一个电阻 R , 当 $R > 1/g_{m2}$ 时, 变成 LHP 零点。

或补偿支路增加电压跟随或电流跟随消除前馈通道, 进而消除 RHP 零点

3 个措施中答出任 2 点，得 2 分

六、电路设计题（总计 15 分）

采用 N-Well CMOS 工艺（只有衬底寄生 PNP 管，没有 NPN 管），请设计一款利用电流镜控制的电压模带隙基准电路，电源电压典型值为 3.3V，要求输出基准电压尽可能低的温度系数。以下设计或修改均可采用图表描述或文字说明，表达清晰无误即可。

(1) 画出设计的电路原型结构，指出各元器件在电路中的基本作用，说明输出电压基准值大小及其温度系数的调剂方法；（6 分）

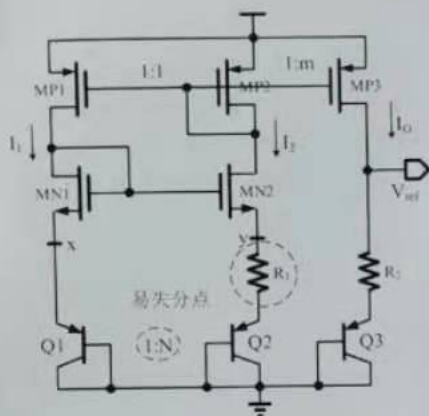
(2) 分析所设计的原型电路在性能上存在哪些不足或缺陷，并针对指出的各类问题给出相应的改进策略，具体包含电路结构的改进或参数的优化选取；（5 分）

(3) 为获得多值输出基准电压，请说明才采用的各种不同类型的基准结构。（4 分）

答：

1、

1)



(2 分，图有细节错误一个扣 0.5 分，直至扣完)，如采用 OP 等其它结构，即使对，也要扣 1 分

2)

① MP1、MP2、MN1、MN2：用于定义支路电流比，并确保 x、y 两点电压相等；（0.5 分）

② Q1、Q2：用于构造 ΔV_{BE} 正温度系数电压并通过电阻 R1 将其转为正温度系数电流；

③ MP3：管将正温度系数电流按比例 1:m 拷贝到输出支路，再通过电阻 R2 转化为正温度系数电压；

④ Q1、Q2 的发射结面积之比 N、电阻 R1、R2 阻值的大小、以及电流传输比 m 共同构成正温度系数电压的系数。（第 2、3、4 条可合并，提到 Q1、Q2、R1、R2、MP3 共同提供正温度系数电压即可给 1 分）

⑤ Q3：用于构造负温度系数电压 V_{BE} ；（0.5 分）

3) $V_{ref} = V_{BE} + m \frac{R_2}{R_1} V_T \ln N \approx 1.2V$ （1 分，写出公式 0.5 分，写出答案 0.5 分）

4) 由上式可知，温度系数的调整可通过调整：电阻 R2 与 R1 比值、Q2 管和 Q1 管发射机面积之比、电流传输系数之比 m，以及支路电流 I1 和 I2 的比值来调整。若温度系数偏

负，则升高式 $m \frac{R_2}{R_1} \ln N$ 的值；若温度系数偏正，则降低式 $m \frac{R_2}{R_1} \ln N$ 的值；（1 分）

2、

缺陷	改进	给分
x、y 两点失调电压较大，导致电路精度差	改用 Cascode 电流镜或采用运放虚短、虚断特性来使 x、y 两点电压相等；可以调整电流支路电流 I_1 、 I_2 的比或三极管发射级面积之比来减小失调的影响；	回答关键点给 5 分
电源抑制比 (PSRR) 差	改用 Cascode 电流镜结构	
驱动能力差	改漏驱动为运放控制的源驱动结构	
输出基准电压值为固定值，范围小	后接 op buffer 进行缓冲调节、后接运放配合电流镜电路进行 V-I 转换、采用电流模形式的基准电路。	

3、

后接 op buffer 进行缓冲调节 (2 分)；

采用电流模形式的基准电路 (1 分)、

利用 OP 控制，将电流镜控制两支路电流的匹配结构改变为电阻控制两支路电流匹配的结构。负载电流驱动可以保留漏驱动，也可改为源驱动 (1 分)