第 1 章　半导体器件的特性

1.1 知识点归纳

本章介绍了半导体的基本知识，阐说了半导体二极管、晶体管（BJT）和场效应管（FET）的工作原理特性曲线和主要参数。

1.杂质半导体与 PN 结

在本征半导体中掺入不同杂质就形成 N 型和 P 型半导体。半导体中有两种载流子，自由电子和空穴，载流子因浓度而产生的运动成为扩散运动，因电位差而产生的运动成为漂移运动。在同一种本征半导体基片上制作两种杂质半导体，在它们的交界面上，上述两种运动达到动态平衡，就形成了 PN 结。其基本特性是单向导电性。

2.半导体二极管

一个 PN 结引出电极后就构成了二极管，加上正向偏压时形成扩散电流，电流与电压呈指数关系，加反向电压时，产生漂移电流，其数值很小。体现出单向导电性。

3 晶体管

晶体管具有电流放大作用，对发射极正向偏置集电极反向偏置时，从射区流到基区的非平衡少子中仅有很少部分与基区的多子复合，形成基极电流 I_B，而大部分在集电结外电场作用下形成漂移电流 I_C，体现出 I_B 对 I_C 的控制，可将 I_C 视为 I_B 控制的电流源。晶体管有放大、饱和、截止三个工作区域。

4.场效应管

场效应管是电压控制器件，它通过栅-源电压的电场效应去控制漏极电流，因输入回路的 PN 结处于反向偏置或输入端处于绝缘状态因此输入电阻远大于晶体管。场效应管局又夹断区（即截止区）、横流区（即线性区）和可比阿安电阻区三个工作区域。

学完本章后应掌握：

1.熟悉下列定义、概念和原理：自由电子与空穴，扩散与漂移，复合，空间电荷区，PN 结，耗尽层，导电沟道，二极管单向导电性，晶体管和场效应管的放大作用及三个工作区域。

2.掌握二极管、稳压管、晶体管，场效应管的外特性，主要参数的物理意义。

1.2 习题与思考题详解

1-1 试简述 PN 结的形成过程。空间电荷压，阻挡层，耗尽层和势垒压等名称是根据什么特性提出来的。

答：PN 结的形成过程：

当两块半导体结合在一起时，P 区的空穴浓度高于 N 区，于是空穴将越过交界面由 P 区向 N 区扩散；同理，N 区的电子浓度高于 P 区，电子越过交界面由 N 区向 P 区扩散。多子由一区扩散到另一区时，形成另一区的少子并与该区的多子复合，因此，在交界面的一侧留下带负电荷的受主离子，另一侧留下带正电荷的施主离子。于是在交界面附近形成一个空间电压区，即 PN 结。

空间电荷压：在 PN 结内无可移动的带电荷之缘故。

势垒层：在 PN 结中，N 区电位高于 P 区电位，两区存在接触电位差之缘故。

耗尽层：在 PN 结中，只有不能移动的数量相等的正负离子，而载流子因扩散和复合而消耗掉了之故。

阻挡层：由于 PN 结中存在接触电势压，阻挡了电子扩散之故。

1-2（1）在室温下，当硅二极管的反向电流达到其反向饱和电流 $I_{R(sat)}$的 95%时，反向电压是多少?

(2) 计算偏压为 ±0.1V 时，相应的正向电流和反向电流的比值。

（3）如果反向饱和电流为 10nA，计算相应于电压为 0.6 时的正向电流，并说明这一结果与实际不符的原因。

解：(1) 因为 $I_D = I_{R(sat)}(e^{V_D/V_T} - 1)$

所以 $V_D = V_T \ln \frac{I_D}{I_{R(SAT)}} = 26\text{mv} \times \ln 0.95 = -1.33\ \text{mv}$

$$(2)\ \frac{I_D}{I_R} = \frac{I_{R(sat)}(e^{VD/VT} - 1)}{I_{R(sat)}(e^{VR/VT} - 1)} = \frac{V_D}{V_R} = -1$$

$$(3)\quad I_D = I_{R(sat)}\left[e^{v_0/v_T} - 1 \right] = 10nA \times e^{\frac{0.6V}{26mV}} = 1.0 \times 10^{-9} \times e^{\frac{600mV}{26mV}} = 3.1 \times 10^{-9}\ \text{A}$$

1-3 在测量二极管的正向电阻时，用表的“R×10”档测出的阻值小而用“R×100”档测出大，原因何在？

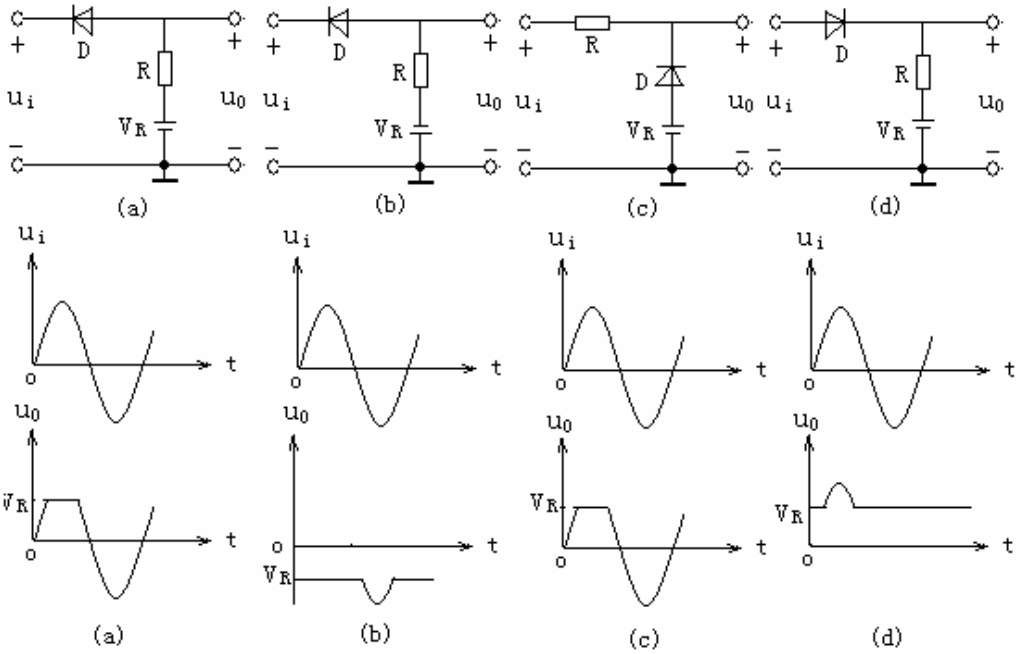
答：因为万用表“R×10”档的内阻小，测量二极管的正向阻值小,而“R×100”档的内阻大，测量的二极管的正向阻值大。

1-4 怎样用万能表判断二极管的极性和好坏？

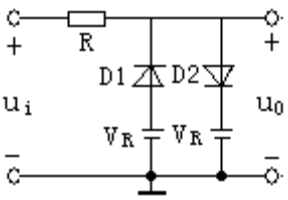
答：判断二极管的极性与好坏，选择万用表“R×1K”电阻档，此时黑表棒为正极，红表棒为电源负极。用黑红表棒接待测二极管两极，观察阻值大小，再反过来相接，观察阻值大小，若两次测量均大，说明二极管断路，若第一次测量阻值大，第二次测量阻值小，则测量值小的连接时，黑表棒接二极管的阳极，红表棒接二极管的阴极；并说明二极管是好的；若两次测量阻值均小，说明二极管被击穿。

1-5 限幅电路如图所示，设 D 为 理想二极管，输入电压 vi 为正弦波，其振幅大于 V_R，试给出输出电压为 U_O 的波形。

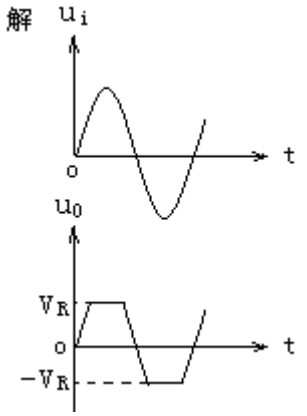
解：



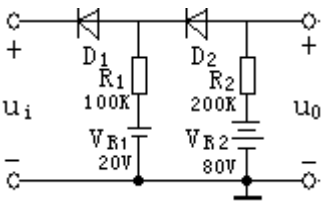
1-6 双向限幅器如图所示，设 D_1D_2 为理想二极管，输入电压为正弦波，其振幅



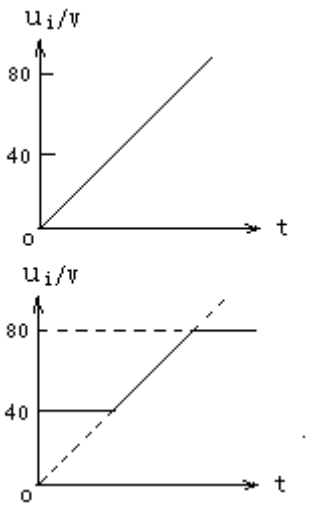
Vi=3 V_R，试给出输出电压 U_O 的波形。



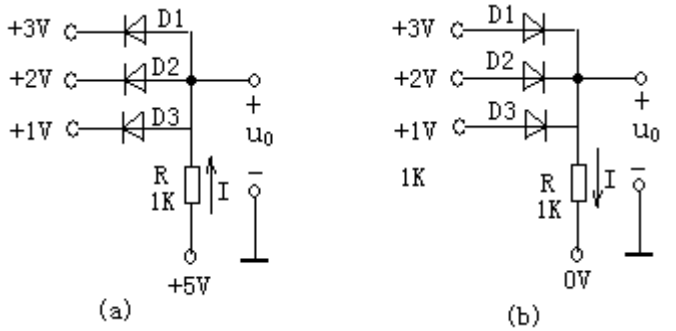
1-7 双向限幅器如图所示，设 D_1D_2 为理想二极管，输入电压 v_i 由 0-100V 作线性变化，给出相对于 v_i 的输入电压 U_O 随时间变化的曲线。



解：$V_A = \dfrac{V_{R2} - V_{R1}}{R_1 + R_2} \times R_1 + V_{R1} = \dfrac{80 - 20}{100 + 200} \times 100 + 20 = 40(V)$



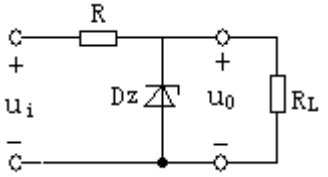
1-8 求图所示各电路中的电流 I 和电压 V（设电路中的二极管为理想二极管）



解：a　对于 D_1D_2 D_3 管正向偏压，D_3 的偏压最大先导通，随之 D_1D_2 反偏截止。所以 U_O=1V　　．$I=\dfrac{5V-1V}{1K}=4mA$

b　D_1D_2 D_3 均处于正向偏置状态，D1 的偏置电压大先导通，D_2D_3 则由于 D1 的导通反偏而截止。则 $U_O=3V, I=5mA$

1-9 稳压管稳压电路如图示，已知稳压管稳定电压 V=6V 最大稳定电流 $I_{Z\max}$ =25mA 限流电阻 R=500 Ω　　求：1．$v_i=15v, R_2=2K\Omega$ 时，电路工作是否正常？$v_o=?$



2．$v_i=10v, R_2=800\Omega$ 时，电路工作情况如何？

3．$v_i=20v, R_2$ 开路，电路可能出现什么情况？为什么？

解：(1). $I_R=\dfrac{v_i-v_e}{R}=\dfrac{15-6}{0.5}=18mA$

$$I_{RL}=\frac{v_0}{R_L}=\frac{6}{2}=3mA$$

则 $I_E=I_R-I_{RL}=18-3=15mA$

$I_{E\min} < I_E < I_{E\max}$ 所以电路正常工作 $v_0 = v_E = 6V$

(2). $I_R = \frac{v_i - v_E}{R} = \frac{10-6}{0.5} = 8mA$

$I_{RL} = \frac{6}{0.8} = 7.5mA$　　$I_E = I_R - I_{RL} = 8 - 7.5 = 0.5mA < I_{E\min}$

稳压管无法稳压

（3） $I_R = \frac{v_i - v_E}{R} = \frac{20-6}{0.5} = 28mA > I_{E\max}$ 稳压管可能会热击穿。

1-10 将两个二极管如图连接起来，是否与晶体管一样具有电流放大作用，为什么？

答：不含。因为这样连接不会形成基区，不会产生复合现象，形成小电流对大电流的控制。所以不具备电流放大效应。

1-11 为什么晶体管发射区掺杂浓度大，而基区掺杂程度小且做得很薄？

答：发射区浓度大即多数载流子浓度大，便于发射进入基区，而基区掺杂浓度小，多数载流子少，复合后仍有大量的由发射区扩散到基区的多子到达集电区，即基压也做得较窄。

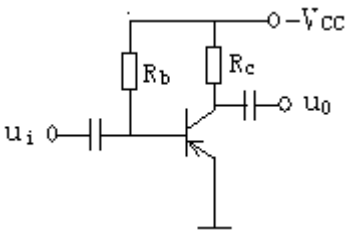
1-12 将一个 PNP 型晶体管接成共发射极放大电路，

（1）画出电路，标出电源极性。

（2）如果管子的 h_{fb}=0.98 要得到 10mA 集电极电路，问基极电流多大？

（3）试分析内部载流子的运动情况。

解 (1)



（2）$h_{fb} = 0.98$，　$h_{fe} = \frac{h_{fb}}{1-h_{fb}}$　　$I_b = \frac{I_C}{h_{fe}} = \frac{I_C(1-h_{fb})}{h_{fb}} = \frac{20 \times 0.02}{0.98} = 0.2(mA)$

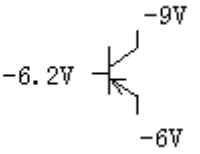
（3）分析管内载流子运动情况（略）见书 14 页

1-13 一个晶体管的 I_B=10μA，I_C=0.5mA ，在什么条件下，才能用这两个数据来计算这的交流电流放大倍数？

答：在忽略 I_{CEO} 后，且输出特性曲线平行时，$h_{fe}=h_{FE}$ 此时才可用 I_B, I_C 计算这的交流电流放大倍数。

1-14 若测得放大电路中晶体管三个电极对地的电压分别为 V_1= -6.2V,V_2= - 6V,V_3= -9V,试判断晶体管的电极和类型。

答：若晶体管工作在放大区，发射结正偏，集电路反偏，再者各电路均为负值，所以该晶体管为 PNP 型，极性如图所示。

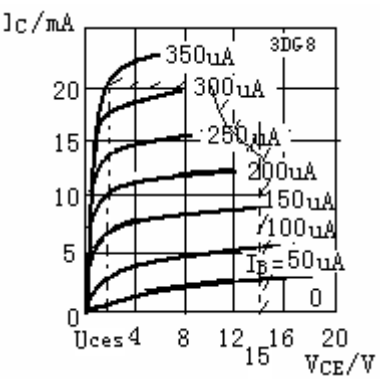


1-15 晶体管 3DG8A 的输出曲线 如图示，已知它的 P_{CM}=200mw，I=20mA, $V_{(BR)CED}$=15V

(1)定义安全工作区

（2）定出放大区

(3)当 V_{CE}=6V 时，能否使 I_C 工作在 30mA，为什么？



解：（1）阴影线外为过耗区，内为安全区。

（2）V_{CES}～$V_{(BR)CED}$ 之间为放大区，V_{CES} 为饱和压降。

（3）当 V_{CE}=6V 时，不能使 I_C 工作在 30mA

因为 I_{CM}=20mA

第 2 章　放大器基础

2.1 知识点归纳

一、放大的概念

放大实质上是将微弱的信号通过有源器件（晶体管或场效应管）对能量进行控制的过程，是将直流电源提供的能量转化为负载所获得的虽信号变化的能量。放大的前提是信号不失真。

二、放大电路的组成原则

1.放大电路的核心元件是有源器件，即晶体管或场效应管。

2.正确的直流电源电压数值、极性与其它电路参数应保证晶体管工作在放大区，场效应管工作在恒流区，即建立起合适的静态工作点。保证电路中的信号不失真。

三、放大器的主要性能指标：

1.放大倍数 A

2.输入电阻 R_i

3.输出电阻 R_0

4.最大不失真输出电压 U_{OM}

5.下限截止频率 f_L，上限截止频率 f_H 及同频带 B_W

6.最大输出功率 P_{0m} 和效率 η。

四、放大电路的分析方法

分析放大电路的方法有两种，即图解法和微变等效电路法。图解法用于确定静态工作点和分析打信号工作的动态情况，微变等效电路法只适用于分析、计算低频小信号工作时电路的动态指标。

分析电路应遵循“先静态，后动态”的原则，只有静态工作点合适，分析动态才有意义。五、晶体管和场效应管基本放大电路

1.晶体管基本放大电路有共射、共集、共基三种组态。共射放大电路即有电流放大作用，又有电压放大作用，输入电阻居三种电路之中，输出电阻较大，适应于一般放大。共集放大电路之放大电流不放大电压，因输入电阻高而行作为多级放大器的输入端因疏忽电阻低而常作为多级放大器的输出级。又因电压放大倍数约等于 1 而用作信号的跟随。共基电路之放大电压而不放大电流输入电阻小，高频特性好适应于宽频带放大电路。

2.场效应管放大电路的共源接法，共漏接法与晶体管放大电路的共射、共集接法相对应，但比晶体管电路输入阻抗高，噪声系数低，典雅放大倍数小适应于低电压

放大电路的输入级。

六、阻容耦合放大电路在中频段的放大倍数最大且为定值，当信号频率太高或太低时，放大倍数都要降低。

七、多级放大器的耦合方式有直接耦合、阻容耦合和变压器耦合。直接耦合便于集成，既可放大交流又可放大直流信号，但必须解决好零点漂移问题。阻容耦合能克服零点漂移的问题，但低频响应差，不便于集成。变压器耦合有阻抗变换作用，但低频响应差，且体大笨重，只用于特殊场合。

八、多级放大器的放大倍数为各级放大器放大倍数的乘积，通频带窄于单级放大器，级数越多，频带越窄。

学完本章应达到下列要求：

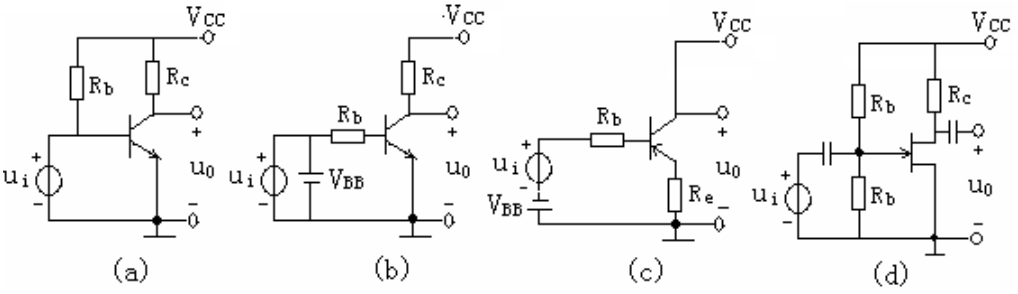
1.掌握以下基本概念和定义：放大、静态工作点、非线性失真、直流通路和交流通路、交、直流负载线、放大倍数，输出动态范围等。

2.掌握各种形式的基本放大电路的工作原理及特点，能根据要求选择电路的类型。

3.掌握放大电路的分析方法，能计算静态和动态的各种。

2.2 习题与思考题详解

2-1 图示各电路中的电容对信号可视短路，试定性分析各电路能否正常放大，为什么？



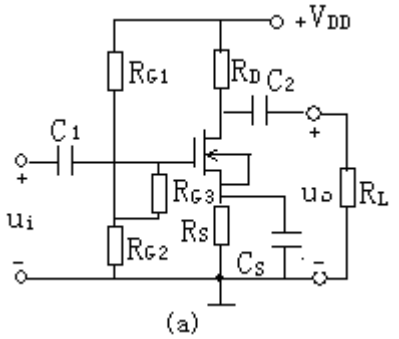
答：（a）只要 R_B R_C 取值适当使发射结正偏，集电结反偏，就可以放大信号。

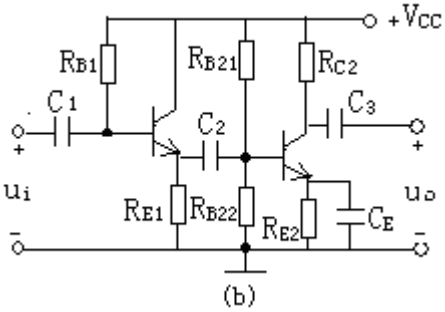
（b）只要 R_B R_C 取值适当使发射结正偏，集电结反偏，就可以放大信号

（c）V_{CC} 使集电结反偏，∴不能正常放大。

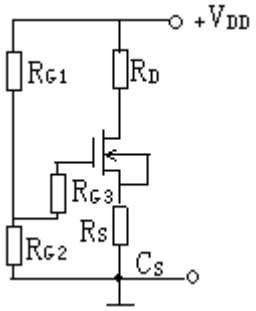
（d）∵ $U_{GS}>0$，$U_{DS}>0$，故不能正常放大。

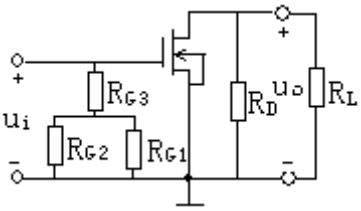
2-2 分别画出图示各电路的直流通路和交流通路。



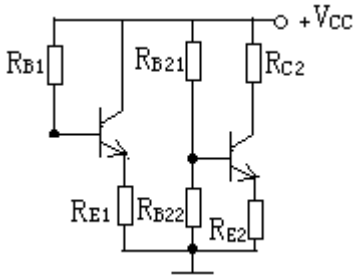


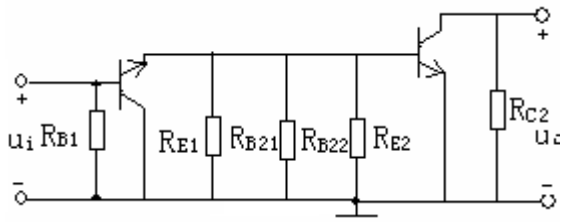
解：（a）直流通路　　交流通路



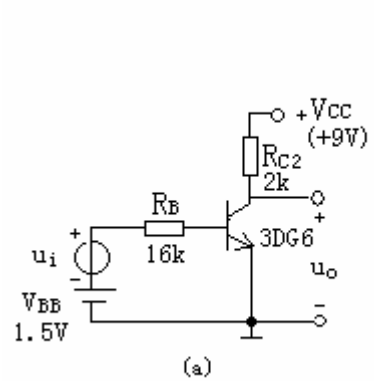


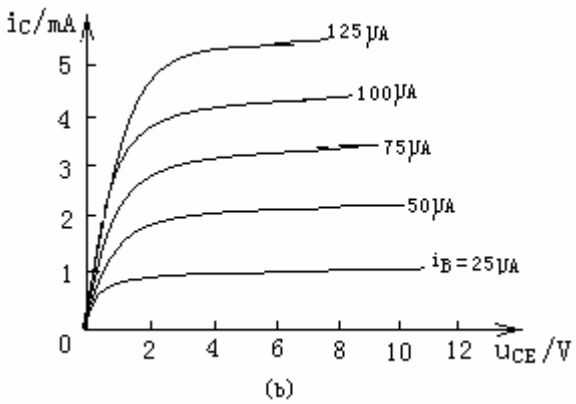
（b）直流通路　　交流通路





2-3 电路及晶体管特性如图示





（1）作负载线，找出静态工作点 Q 和放大器的动态范围。若要获得尽可能大的

动态范围，R_B应取多大数值？

（2）电路其他参数不变，R_C由$2k\Omega$变为$5.1k\Omega$，Q 点移到何处？

（3）电路其他参数不变，R_B由$16k\Omega$变成$32k\Omega$，Q 点移到何处？

（4）电路其他参数不变，V_{CC}由$9V$减到$6V$，Q 点移到何处？

解：(1)Q 点：

直流负载线 MN，M(0,4.5) N(9,0) 交 $I_B=\dfrac{V_{BB}-U_{BE}}{16K}=50\mu A$ 曲线与 Q(5.4,1.8).

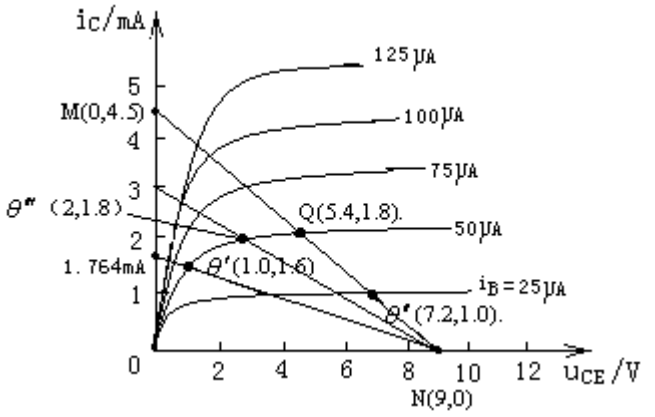
动态范围：$U_{PP}=(V_{CC}-U_{CEQ})*2=3.6*2=7.2(V)$.

由图分析可得最大动态范围 $U_{PP\max}=V_{CC}-U_{CEQ}=9-0.3=8.7(V)$,可得 Q 点 Q_m（4.35，2.4）。则 $R_B=\dfrac{U_{BB}-V_{BE}}{I_{BQM}}=\dfrac{(1.5-0.7)V}{60\mu A}=13(K\Omega)$

(2) $\dfrac{V_{CC}}{R_C}=\dfrac{9}{5.1}=1.764(mA)$.Q 点沿 $I_B=50$ 曲线左移得 θ' (1.0,1.6).

(3) $I_B=\dfrac{U_{BB}-U_{BE}}{R_B}=\dfrac{0.8V}{32K}=25(\mu A)$,Q 点沿负载线下移至 θ'' (7.2,1.0).

(4) $\dfrac{U_{CC}}{R_C}=\dfrac{6V}{2K}=3(mA)$,Q 点移至 θ'''（2,1.8）.



2-4 放大电路和晶体管特性如 2-3 题图

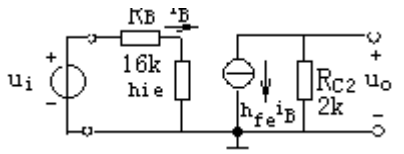
（1）求静态工作附近的 h_{fe} 和 h_{ie}.

(2)画出简化 h 参数等效电路，计算 $\dot{A}_V, \dot{R}_i, R_0$.

解：（1） $h_{fe} = h_{Fe} = \dfrac{I_{CQ}}{I_{BQ}} = \dfrac{1.8mA}{50\mu A} = 36$.

$$h_{ie} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{0.7V}{50\mu A} = 1.4*10^4(\Omega)$$

(2) h 参数电路

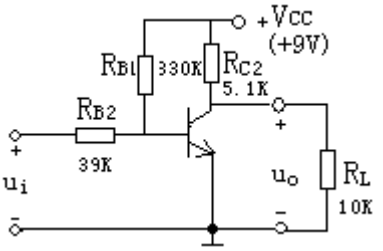


$$\dot{A}_V = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = \frac{-h_{fe} I_b R_C}{i_b (R_B + h_{ie})} = -\frac{36\times 2}{14\times 16} = -24$$

$$R_i = R_B + h_{ie} = 14 + 16 = 30(k\Omega)$$

$$R_0 = R_C = 2(K\Omega)$$

2-5 放大电路如图示， $h_{fe} = 60$ ，求：



（1）计算不带负载 R_L 时 θ 点，画出 h 参数等效电路，计算 $\dot{A}_u, R_i, R_0$.

(2)计算带上负载 R_L 后静态 θ 点，画出 h 参数等效电路，计算 $\dot{A}_u$ 和 R_0.

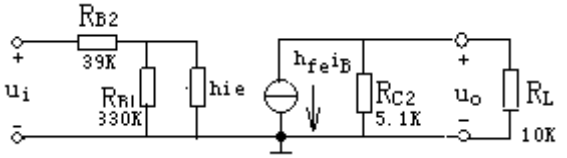
解：（1） $R_L = \infty$

$$I_{BQ}=\frac{U_{CC}-U_{BE}}{R_{B_1}}\overset{\bullet}{=}\frac{U_{CC}}{R_{B_1}}=\frac{15V}{330K}\overset{\bullet}{=}45(\mu A)$$

$$I_{CQ}=I_{BQ}\bullet h_{fe}=45*60\overset{\bullet}{=}2.7(mA)$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}\bullet R_C=15-2.7*5.1=1.23(V)$$

交流通路：h 等效电路



$$h_{ie}=R_{bb'}+(1+h_{fe})\frac{26mV}{I_{EQ}}$$

$$\overset{\bullet}{=}300+(1+60)*\frac{26}{2.7}=300+587.4$$

$$=887.4\Omega=0.887K\Omega$$

$$\dot{A}_u=\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i}\overset{\bullet}{=}\frac{-h_{fe}\cdot i_b\cdot R_C}{I_b(R_{B_2}+h_{ie})}=-\frac{h_{fe}\cdot R_C}{R_{B_2}+h_{ie}}=-\frac{60*5.1}{39+0.8}=-7.68$$

$$R_i=R_{B_2}+R_{B_1}//h_{ie}\overset{\bullet}{=}39.8(k\Omega)$$

$$R_0\overset{\bullet}{=}R_C=5.1(k\Omega)$$

（2）$R_L=10k\Omega$

$$\because R_{CE}>>R_L\text{.则}U_{CQ}=\frac{U_{CC}\cdot R_L}{R_C+R_L}=\frac{15*10}{5.1+10}=9.93(V)\overset{\bullet}{=}U_{CEQ}$$

$$I_{CQ}=\frac{U_{CC}-U_{CEQ}}{R_C}=\frac{15-9.93}{5.1}=0.99(mA)$$

$$I_{BQ}=\frac{I_{CQ}}{h_{fe}}=\frac{0.99mA}{60}=16.7(\mu A)$$

$$h_{ie}=R_{bB'}+(1+h_{fe})\frac{26mV}{I_{EQ}}=300+(1+60)\frac{26}{0.99}=1902\Omega=1.9k\Omega$$

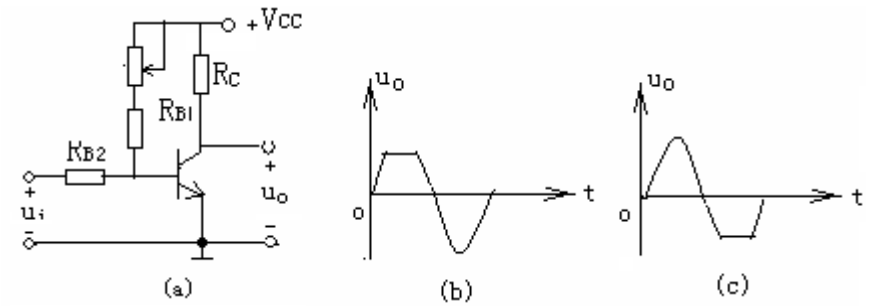
$$\dot{A}_u=\frac{\dot{U}_0}{U_i}=-\frac{h_{fe}\cdot I_b\cdot R_L'}{i_b(R_{B_2}+h_{ie})}=-\frac{60*1.384}{39+1.9}=-2.03$$

$$R_L'=R_C//R_L=\frac{5.1*1.9}{5.1+1.9}=1.384(k\Omega)$$

$$\dot{R}_i=R_{B_2}+R_{B_1}//\dot{h}_{ie}=40.9(k\Omega)$$

$$\dot{R}_0=R_C=5.1(k\Omega)$$

2-6 图示电路输入正弦信号时，若输出波形如（b）(c),试问他们为何种失真？如何调节才可能使输出不失真？若改变滑变 R_{B1} 的大小仍得不到完好正弦波输出，为什么？



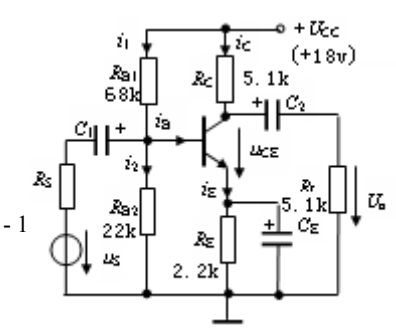
解：（1）由波形分析可知

（b）为截止失真；减小 R_{B_1} 有可能使输出不失真。

（c）为饱和失真，增大 R_{B_1} 有可能使输出不失真

（2）改变 R_{B_1} 值仍不能得到完好正弦输出，可能是 R_C 取值不当之故。

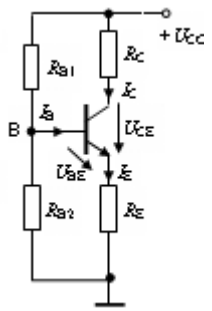
2-7 电路如图，已知 $h_{fe}=60$，电容容抗可忽略



求：

（1）计算静态工作点，

（2）画出 h 参数等效电路，计算 $\dot{A}_u$, $\dot{R}_i$ 和 R_0



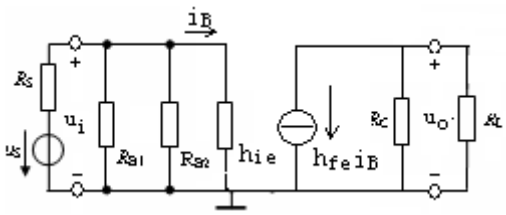
解：（1）$U_B = \dfrac{U_{CC}\cdot R_{B_2}}{R_{B_1}+R_{B_2}} = \dfrac{18*22}{68+22} = 4.4(V)$

$$I_{BQ} = \frac{\dot{I}_C}{h_{fe}} = \frac{\dot{I}_{EQ}}{h_{fe}} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E \cdot h_{fe}} = \frac{4.4-0.7}{60*2.2} = \frac{3.7}{132} = 28(\mu A)$$

$$I_{CQ} = I_{BQ}\cdot h_{fe} = 28\mu A*60 = 1680\mu A = 1.68(mA)$$

$$\dot{U}_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 18 - 1.68*(5.1+2.2) = 5.736(V)$$

（2）h 参数电路



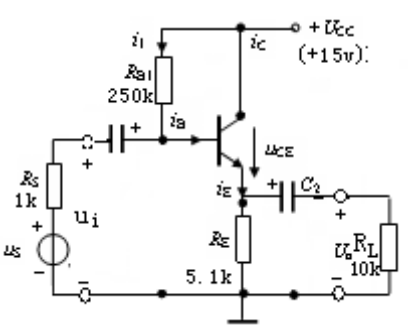
$$h_{ie} = R_{bb'} + (1+h_{fe})\frac{26mV}{I_{EQ}mA} = 300 + (1+60)\frac{26}{1.68} = 1244(\Omega) = 1.244k\Omega$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1} = -\frac{h_{fe}\cdot i_b \cdot R_L'}{i_b \cdot h_{ie}} = -\frac{60\times\frac{1}{2}\times 5.1k}{1.244k} = -122.99$$

$$R_i = R_{B_1} // R_{B_2} // h_{ie} = 1.15k\Omega$$

$$\dot{R}_0 = R_C = 5.1(k\Omega)$$

2-8 阻容耦合射极输出器如图，已知 $h_{fe} = 50$



（1）计算静态工作点。

（2）画出简化 h 参数电路，计算 $\dot{A}_u$，

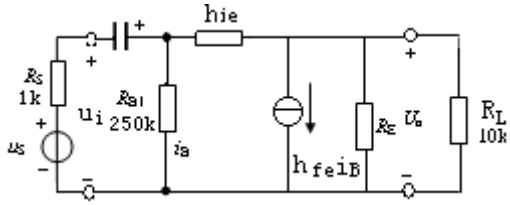
R_i和 R_0

解:(1) $I_{BQ}=\dfrac{U_{CC}-U_{BE}}{R_B+(1+h_{fe})\cdot R_E}=\dfrac{15-0.7}{250+(1+60)*5.1}=28(\mu A)$

$$I_{CQ}=I_{BQ}\cdot h_{fe}=28*50=1400(\mu A)=1.4mA$$

$$\dot{U}_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ}\cdot R_E=15-1.4*5.1=7.86(V)$$

（2）h 参数等效电路



$$h_{ie}=300+(1+50)\frac{26mV}{1.4mA}1.247(k\Omega)$$

$$\dot{A}_u=\frac{U_0}{U_i}=\frac{(1+h_{fe})\cdot R_L'}{h_{ie}+(1+h_{fe})R_L'}=\frac{(1+50)\dfrac{5.1\times10}{5.1+10}}{1.247+(1+50)\dfrac{5.1*10}{5.1+10}}=\frac{172.251}{173.499}=0.993$$

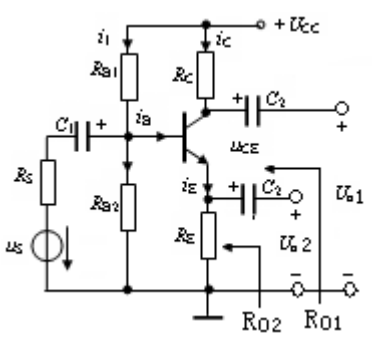
$$R_i=R_B//h_{ie}+(1+h_{fe})R_E=250//\left[1.247+(1+50)*5.1\right]$$

$$=\frac{250*261}{250+261}=127.69(k\Omega$$

$$R_0=\frac{R_S'+h_{ie}}{1+h_{fe}}//R_E=\frac{R_S'+h_{ie}}{h_{fe}}=\frac{\dfrac{R_S\cdot R_b}{R_S+R_b}+h_{ie}}{h_{fe}}$$

$$=\frac{\dfrac{1\times250}{1+250}+1.247}{50}=\frac{2.243}{50}=0.044(k\Omega)$$

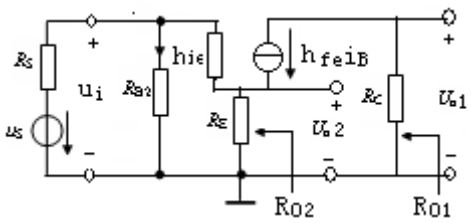
2-9 电路如图示，　　电容的容抗均可忽略



（1） 画出简化的 h 参数等效电路，计算 $\dot{A}_{u_1}=\dfrac{U_{01}}{U_i}$， $\dot{A}_{u_2}=\dfrac{\dot{U}_{02}}{U_i}$ 和 R_{01}, R_{02}

（2）当 $R_C=R_E$ 时，两个转出电压 U_{01}， U_{02} 在振幅和相位上有何关系？

解：（1）h 参数等效电路



$$\dot{A}_{u_1}=\frac{\dot{U}_{01}}{U_i}=-\frac{h_{fe}\cdot i_b\cdot R_C}{i_b\left[h_{ie}+(1+h_{fe})R_E\right]}=-\frac{h_{fe}R_C}{h_{ie}+(1+h_{fe})\cdot R_E}$$

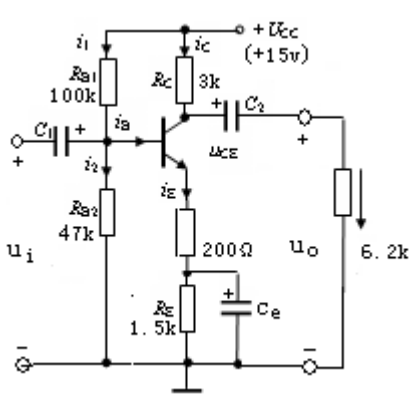
$$\dot{A}_{u_2}=\frac{(1+h_{fe})R_E}{h_{ie}+(1+h_{fe})R_E}$$

$$R_{01}=R_C$$

$$R_{02}=\frac{R_{b'}+h_{ie}}{h_{fe}}//R_E$$

（2）当 $R_C=R_E$ 时， U_{01}, U_{02} 幅度基本相等，相位相差 180°

2-10 电路如图，已知 h_{fe}=50,电容的容抗均可忽略



（1）计算静态工作点

（2）画出简化的 h 参数等效电路，计算 $\dot{A}_u$， R_i 和 R_0

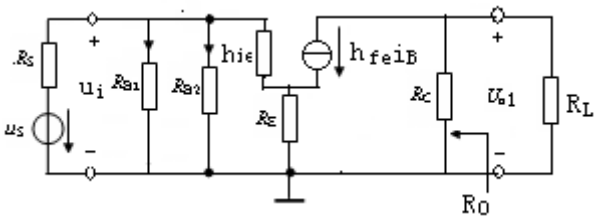
解：（1） $U_B = \dfrac{V_{CC} \cdot R_{B_2}}{R_{B_1} + R_{B_2}} = \dfrac{15*47}{100+47} \doteq 4.8(V)$

$$I_{EQ} = \frac{U_B - U_{BE}}{R_{E_1} + R_{E_2}} = \frac{4.8-0.7}{0.2+1.5} = 2.4(mA) \doteq I_{CQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{h_{fe}} = \frac{2.4}{50} \doteq 48(\mu A)$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_{E_1} + R_{E_2})$$
$$= 15 - 2.4\times(3+0.2+1.5) = 15 - 11.28 = 3.72(V)$$

(2)h 参数等效电路



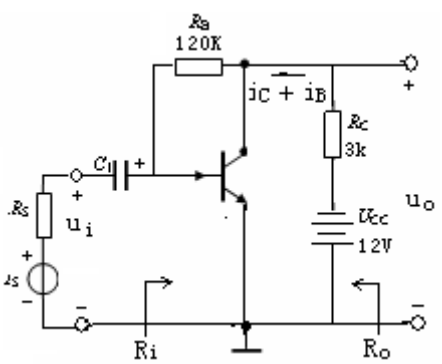
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_i} = -\frac{h_{fe} \cdot R_C // R_L}{h_{ie} + (1+h_{fe}) \cdot R_{E_1}} = -\frac{50\times\frac{3\times6.2}{3+6.2}}{0.85+(1+50)\times0.2} = -\frac{101.08}{11.05} = -9.15$$

$$h_{ie} = 300 + (1+50) * \frac{2.6mV}{2.4mA} = 852.5(\Omega)$$

$$R_i = R_{B_1} // R_{B2}(hie + (1+hfe) \cdot R_{G_1}) = 47 // 100 // 11.05 = 8.21(\mathrm{K}\Omega)$$

$$R_o = R_c = 3\mathrm{K}\Omega$$

2-11 集电极-基极偏置放大电路如图示。 T 为硅管。 $h_{fe} = 100$



（1）计算静态工作点。

（2）如果要求 $V_{CE} = 6.5v$ 的值应为多大？

（3）画出简化为 h 参数等效电路，并用密勒定理作进一步简化。

（4）推导 A_v, R_i, R_O 的表达式，并算出它的数值。

解：

$$(1)\because U_{cc}=I_BR_B+V_{BE}+I_B+(I_Bh_{fe})\cdot R_c$$

$$\therefore I_{BQ}=\frac{U_{CC}-U_{BE}}{R_B+(1+h_{fe})\cdot R_C}=\frac{12-0.7}{120+(1+50)}=41(\mu A)$$

$$I_{CQ}=I_{BQ}\cdot R_C=12-2.05\times 3=5.91(v)$$

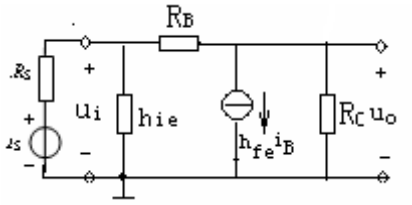
$$(2)\because U_{CE}=U_{CC}-I_CR_C\text{导出}I_C\cdot R_C=U_{CC}-U_{EE}$$

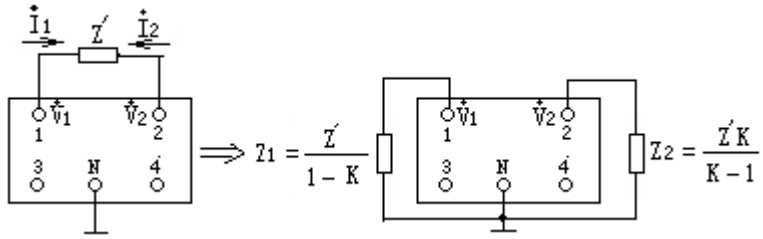
$$I_Bh_{fe}R_c=U_{cc}-U_{CE}\rightarrow U_{cc}-U_{CE}=\frac{(U_{CC}-U_{BE})\cdot h_{fe}\cdot R_C}{R_B+(1+h_{fe})\cdot R_C}$$

$$\therefore R_B=\frac{(U_{CC}-U_{BE})\cdot h_{fe}\cdot R_C}{U_{cc}-U_{CE}}-(1+h_{fe})\cdot R_C$$

$$=\frac{117\times 50\times 3}{12-6.5}-(1+50)\times 3=\frac{1755}{5.5}-153=319-153=166(K\Omega)$$

（3）h 参数等效电路，并密勒定理简化。





密勒定理指出：具有 N 个独立接点的任意网络，如图，N 为参数接点，若接点 1、2 间接有阻抗 E'。并已知节点电压 V_1 和 V_2 之比 $\dot{K}(K=\dot{V}_2/\dot{V}_1)$,断开阻抗 E'在节点 1 与 N 之间接 $Z_1=\frac{Z'}{1-K}$，节点 2 与 N 之间接 $Z_2=\frac{Z'K}{K-1}$，新网络与原网络等效。

∴密勒定理简化后：其中 $E_1=\dfrac{R_B}{1-\dot{K}}$　　$\dot{K}=\dfrac{\dot{U}_O}{\dot{U}_1}=\dot{A}u$

$$E_2=\frac{R_B\dot{K}}{K-1}\qquad K=\frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_1}=\dot{A}u$$

（4）

$$\dot{A}u=\frac{\dot{U}_O}{U_i}=\frac{-h_{fe}ib\cdot Z_2\,//\,R_C}{ib\cdot h_{ie}\,//\,Z_1}=-\frac{h_{fe}\cdot R_L'}{h_{ie}'}$$

其中$R_L'=Z_2\,//\,R_C$

$h_{ie}'=h_{ie}\,//\,Z_1$

$$R_L'=\frac{R_C\cdot\dfrac{R_B\dot{A}u}{\dot{A}u-1}}{R_C+\dfrac{R_B\dot{A}u}{\dot{A}u-1}}=\frac{\dfrac{R_C\cdot R_BAu}{Au-1}}{\dfrac{R_CAu-R_C+R_BAu}{Au-1}}=\frac{R_C\cdot R_BAu}{\left(R_C+R_B\right)Au-R_C}$$

$$h_{ie}'=\frac{h_{ie}\dfrac{R_B}{1-\dot{A}u}}{h_{ie}+\dfrac{R_B}{1-Au}}=\frac{\dfrac{h_{ie}R_B}{1-Au}}{\dfrac{-h_{ie}Au+h_{ie}+R_B}{1-Au}}=\frac{h_{ie}R_B}{h_{ie}+R_B-h_{ie}Au}$$

代入$\dot{A}u$式及：

$$\dot{A}u=-\frac{h_{fe}\cdot\dfrac{R_C\cdot R_BAu}{\left(R_C+R_B\right)Au-R_C}}{\dfrac{h_{ie}R_B}{h_{ie}+R_B-h_{ie}Au}}=-h_{fe}\frac{R_CR_BAu}{\left(R_C+R_B\right)Au-R_C}\times\frac{h_{ie}+R_B-h_{ie}Au}{h_{ie}\cdot R_B}$$

$$=-\frac{h_{fe}R_CR_BAu\times\left(h_{ie}+R_B-h_{ie}Au\right)}{\left[\left(R_C+R_B\right)Au-R_C\right]\times h_{ie}\cdot R_B}$$

$$h_{ie}\cdot R_B\cdot\left(R_C+R_B\right)Au-h_{ie}R_B\cdot R_C=-h_{fe}R_CR_Bh_{ie}-h_{fe}R_CR_B^{\,2}+h_{fe}R_CR_Bh_{ie}Au$$

$$\dot{A}u=-\frac{h_{fe}R_CR_B\left(h_{ie}+R_B\right)-R_CR_Bh_{ie}}{R_Bh_{ie}\left(R_C+R_B\right)-h_{fe}R_CR_Bh_{ie}}$$

$R_i=h_{ie}'$

$R_C=R_L'$

$$h_{ie}=300+(1+100)\times\frac{26mv}{2.05m\mathrm{A}}=1581\Omega=1.581(\mathrm{K}\Omega)$$

代入数值：$$Au=-\frac{100\times3\times120\times(1.581+120)-1.581\times120\times3}{1.581\times120\times(3+120)-100\times1.581\times3\times120}$$

$$=-\frac{4376916-569.16}{23335.56-56916}=-\frac{4376346.84}{-33580.44}=130.32$$

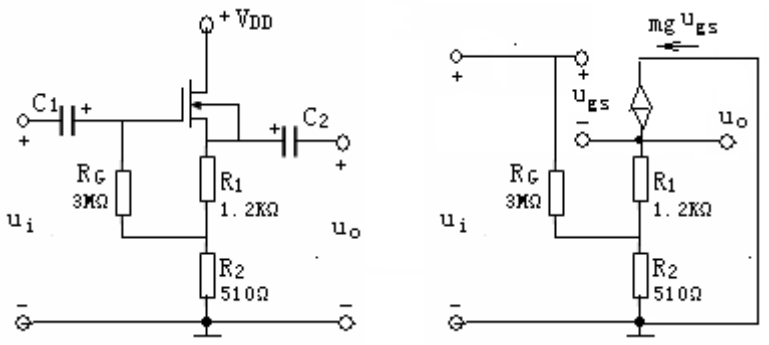
$$R_i=h_{ie}'=\frac{h_{ie}R_B}{h_{ie}+R_B-h_{ie}\dot{A}u}$$

$$=\frac{1.581\times120}{1.581+120-1.581\times130.32}=\frac{189.72}{121.581-206}=1.678(\mathrm{K\Omega})$$

$$R_O=R_L'=\frac{R_CR_BAu}{(R_C+R_B)Au-R_C}$$

$$=\frac{3\times120\times130}{(3+120)\times130-3}=\frac{46800}{59987}=0.78(\mathrm{K\Omega})$$

2-12 图示源极输出器，设 gm=1ms,rd 可略不计，是推导电压放大倍数 Av，和输入电阻 R_i的表达式，并算出其数值。



解：等效电路如图

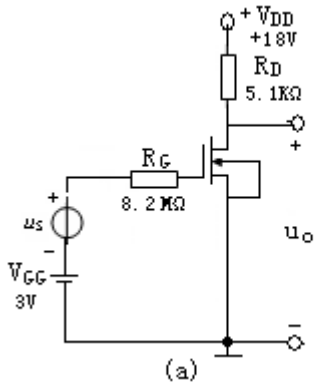
$$Au=\frac{U_O}{U_i}=\frac{g_mU_{GS}(R_1+R_2)}{U_{GS}+(R_1+R_2)g_mU_{GS}}=\frac{g_m(R_1+R_2)}{1+g_m(R_1+R_2)}$$

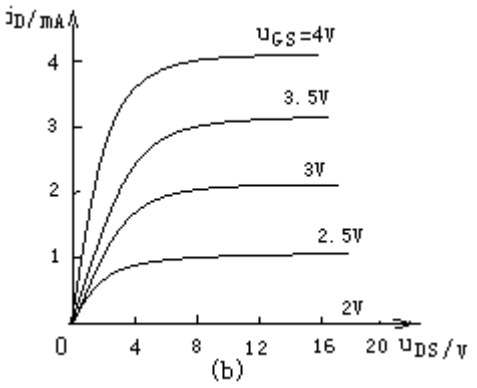
若$g_m=1ms$

$\therefore Au=0.63$

$$R_i=\frac{R_{G1}(R_1+R_2)}{(1-Av)R_2+R_1}\doteq3.7\mathrm{M\Omega}$$

2-13　MOS 管放大电路如图所示（a），放大管输出特性如图（b）,,所示

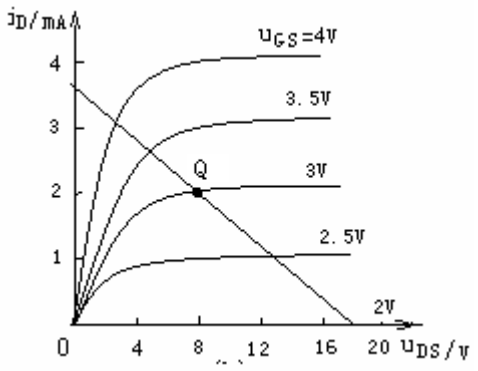




(1)用图解法确定静态工作点 Q，并求出工作点处的跨导 gm

(2)画出交流等效电路，求电压放大倍数 Av

解：



（1） $U_{DS}=U_{PD}-I_PR_D$

$U_{DS}=o$

$I_D=o$

$i_D=V_{DD}/R_D$

$U_{DS}=V_{DD}$

画负载线， $U_{GS}\doteq U_{gG}=3\nu$ 时 Q 点，[8V,2mA]

(2)

$$\because I_D=I_{D(SQt)}\left[1-\frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}}\right]^2$$

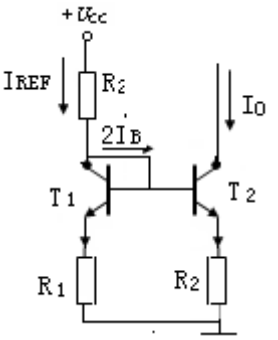
$\because U_{GS}=2V$,则：

$$I_{D(SQt)}=\frac{I_D}{\left[1-\frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}}\right]^2}=\frac{2mA}{\left[1-\frac{3}{2}\right]^2}=8mA$$

$$g_m=-\frac{2I_{D(SQt)}\left[1-\frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right]}{V_{GS(off)}}=-\frac{2\times 8\left[1-\frac{3}{2}\right]}{2}=4ms$$

$$Au=\frac{U_o}{U_i}=-\frac{g_m U_{GS}\cdot R_\partial}{U_{DS}}=-g_m R_D=-4\times5.1=-20.4$$

2-15 图示-一恒流源电路，试证：$I_o \approx I_{REF}R_1/R_2$



证：由图可得

$$V_{BE1}+I_{E1}\cdot R_1=V_{BE2}+I_{E2}\cdot R_2$$

由于$I_{E1}\approx I_{C1}\doteq I_R$

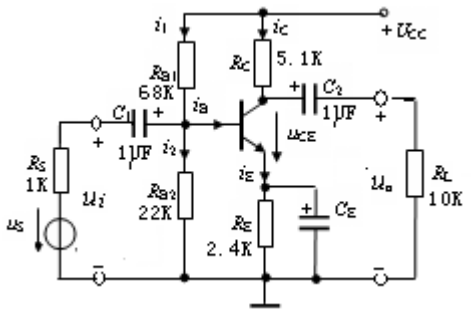
$$I_{E2}\doteq I_{C2}=I_o$$

$$\therefore V_{BE1}+I_R\cdot R_1\doteq V_{BE2}+I_O\cdot R_2$$

$$I_O\doteq I_{BEF}\frac{R_1}{R_2}$$

2-16 放大电路如图，已知晶体管系数 $r_{\partial\partial'}=200\Omega, r_{\partial'e}=900\Omega, c_{\partial'c}=3PF$

$c_{\partial'e}=100PF$　gm=60ms,,设 C_E 的容抗很小，可视短路。



（1）画出低频混合 π 等效电路，不考虑 C_2，推导出放大电路的下线效率，f_{L1} 的表达式，并算出其值

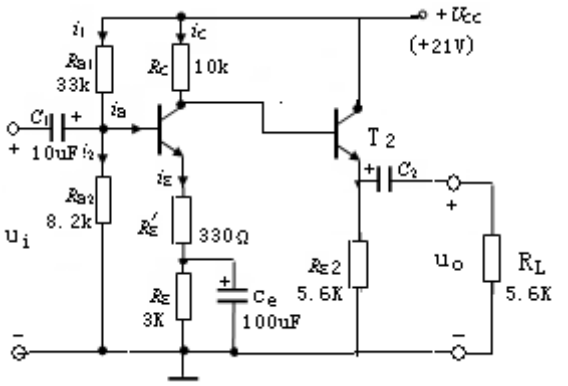
（2）不考虑 C_1，下线效率 f_{L2}=?

（3）同时考虑 C_1 C_2，画出这一放大电路的低频对数幅频特性和相频特性 f_L =?

（4）计算电路的上限频率 f_H，并画出高频段的对数幅频特性和相频特性。

解：略（1）低频混合 π 等效电路，不计 C_2 作用：

2-17 两极放大电路如图，设 $h_{fe1}=h_{fe2}=50$



（1）计算 $T_1.T_2$ 的静态工作点和 h_{ie1},h_{ie2}

（2）计算放大器的中能电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

解（1）

$$U_{B1}=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}U_{CC}=\frac{8.2\mathrm{K}\Omega}{33\mathrm{K}\Omega+8.2\mathrm{K}\Omega}\times 21=4.2v$$

T_1管Q点：

$$I_{C1}=I_{E1}=\frac{U_{B1}-U_{BE}}{R_{E1}+R_{E2}}=\frac{4.2-0.7}{(3+0.33)\times 10^3}=1.1mA$$

$$I_{B1}=\frac{I_{C1}}{h_{fe1}}=\frac{1.1mA}{50}22\mu A$$

$$U_{CE1}=U_{CC}-I_{C1}(R_C+R_{E1}+R_{E2})=21-1.1\times(10+3+0.33)=6.3v$$

T_2管Q点：

$$U_{B2}=U_{C1}=V_{CC}-I_{C1}\cdot R_C=21-1.1\times 10=10v$$

$$I_{C2}=I_{E2}=\frac{U_{B2}-U_{BE2}}{R_{E2}}=\frac{10-0.7}{5.6\times 10^3}=1.66mA$$

$$I_{B2}=\frac{I_{C2}}{h_{fe2}}=\frac{1}{50}\times 1.66=33\mu A$$

$$U_{CE2}=U_{CC}-I_{E2}\cdot R_{E2}=21-1.66\times 5.6=11.7v$$

$$T_1\text{管}h_{ie1}=r_{bb'}+(1+h_{fe1})\frac{26mV}{I_{E1}mA}=200+51\times\frac{26}{1.1}=1.4\text{K}\Omega$$

$$T_2\text{管}h_{ie2}=r_{bb'}+(1+h_{fe2})\frac{26mv}{I_{E2}mA}=200+51\times\frac{26}{1.66}=1\text{K}\Omega$$

（2）两极放大器的微变等效电路如图示

第一级放大倍数

$$A_{u1}=\frac{\dot{U}_{U1}}{\dot{U}_i}=-\frac{h_{fe1}\cdot R_{L1}'}{h_{ie1}+(1+h_{fe1})R_{E1}'}$$

其中

$$R_{L1}'=R_{C1}//\left[h_{ie2}+(1+h_{fe2})\cdot R_{E2}//R_L\right]$$

$$=10\text{K}\Omega//\left[1\text{K}\Omega+51(5.6\text{K}\Omega//5.6\text{K}\Omega)\right]=9.35\text{K}\Omega$$

$$\text{则}\dot{A}_{u1}=-\frac{50\times9.35\text{K}\Omega}{1.4\text{K}+51\times0.33\text{K}\Omega}=-25.6$$

第二级是射极输出器，放大倍数

$$\dot{A}_{u2}=\frac{(1+h_{fe2})R_L'}{r_{be2}+(1+h_{fe2})\cdot R_L'}$$

$$\text{其中}R_L'=R_{E2}//R_2=\frac{1}{2}\times5.6=2.8\text{K}\Omega$$

$$\therefore\ \dot{A}_{u2}=\frac{51\times2.8\text{K}\Omega}{1\text{K}\Omega+51\times2.8\text{K}\Omega}=0.99$$

总电压放大倍数 $A_u=\dot{A}_{u1}\cdot A_{u2}=-25.6\times0.99=-25.3$

放大器的输入电阻是第一节输入电阻：

$$R_i=\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}=R_{B1}//R_{B2}//\left[h_{ie1}+(1+h_{fe1})\cdot R'_{E1}\right]$$

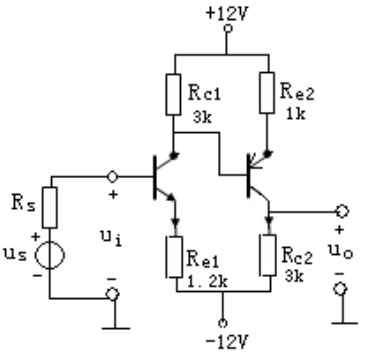
$$=33\text{K}//8.2\text{K}//(1.4\text{K}\Omega+51\times0.33\text{K})$$

$$=4.8\text{K}\Omega$$

放大器的输出电阻 $R_0=R_{E_2}//\dfrac{h_{ie2}+R_{c1}}{1+h_{fe2}}=0.2\text{K}\Omega$

2-18 两级直耦放大器如图所示试分析这一放大器结构特点以及偏置的提供方法

设 $h_{fe1}=h_{fe2}=80, h_{ie1}=h_{ie2}=1\mathrm{K}\Omega$，试计算 Av， R_i, R_O



答：（1）该电路是两极直接耦合电路， T_1, T_2 管分别为 NPN，PNP 型管，采用 ± 12 电源供电，Q 点相互牵连。

（2）交流等效电路

$$A_{u1}=\frac{U_{o1}}{U_i}=-\frac{h_{fe1}\cdot R_{C1}//\left[h_{ie2}+\left(h_{fe2}+1\right)R_{e2}\right]}{h_{ie1}+\left(h_{fe1}+1\right)\cdot R_{e1}}$$

$$A_{u2}=-\frac{U_O}{U_{i2}}=-\frac{h_{fe2}\cdot R_{C2}}{h_{ie2}+\left(h_{fe2}+1\right)R_{e2}}$$

$$A_u=A_{u1}\cdot A_{u2}=-\frac{\left[\dfrac{h_{fe1}\cdot R_{C1}\left[h_{ie2}+\left(h_{fe2}+1\right)R_{e2}\right]}{R_{C1}+h_{ie2}+\left(h_{fe2}+1\right)R_{e2}}\right]\times\left[-\dfrac{h_{fe2}\cdot R_{C2}}{h_{ie2}+\left(h_{fe2}+1\right)R_{e2}}\right]}{h_{ie1}+\left(h_{fe1}+1\right)\cdot R_{e1}}$$

$$=\frac{h_{fe1}\cdot h_{fe2}\cdot R_{c1}\cdot R_{c2}}{\left[R_{c1}+h_{ie2}+(1+h_{fe2})\cdot R_{e2}\right]\left[h_{ie1}+(1+h_{fe1})\cdot R_{e1}\right]}$$

$$=\frac{80\times 80\times 3\times 3}{\left(3+1+81\times 1\right)\left(1+81\times 1.2\right)}=\frac{57600}{85\times 98.2}=\frac{57600}{8347}\doteq 6.9$$

$$R_i=\frac{\dot{U}_i}{I_i}=h_{ie1}+\left(1+h_{fe1}\right)\cdot R_{e1}=1+81\times 1=82\left(\mathrm{K}\Omega\right)$$

$$R_o\doteq R_{C2}=3\left(\mathrm{K}\Omega\right)$$

第 3 章　集成运算放大器

3.1 知识点归纳

本章讲述了集成运放的结构特点，电路组成，主要性能参数、种类及使用方法。

1.集成运放实际上是一种好性能的直接耦合放大电路。通常由输入级、中间级、输出级和偏置电路等四部分组成，双极型管组成的集成运放，输入级多用差分放大电路，中间级为共射电路，输出级多用互补输出级，偏置电路是多路电流源电路。

2.电流源电路不仅可为各级放大电路提供合适的静态电流，又可作为有源负载，从而大大提高了运放的增益。

3 使用集成运放应注意调零、频率补偿及必要的电路保护。

学完本章应达能到下列要求

1.熟悉集成运放的组成及性能，正确理解主要指标参数的物理意义及其使用注意事

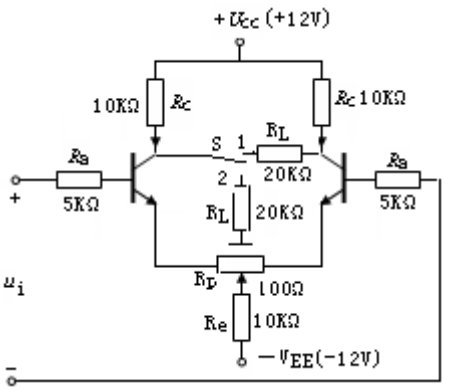
项。

2.了解电流源电路的工作原理。

3.能读懂集成运放 5G23，5G24 的工作原理。

3.2 习题与思考题详解

3-1．差分放大电路如图所示 ,Rp 为调零电位器，假设电路完全对称，两管的 $h_{fe}=50$，求：



（1）若电路作双端输出，即开关 S 与 1 接通，试计算电路的静态工作点，差模放大倍数 A_{ud}。共模放大倍数 A_{uc}，共模抑制比 K_{cmr}，差模输入电阻 R_{ic}和输出电阻 R_{od}

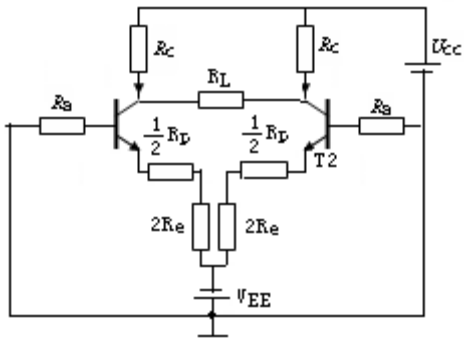
（2）若电路作单端输出，即开关 S 与 2 接通，试计算电路的静态工作点，

$A_{ud1}, A_{uc1}, K_{CMR}, R_{id}, R_{ic}$和$R_{od}$

解：（1）双端输出时

1） 电子电路对称，两管对应的电流及电压分别相等，即

$$I_{B1}=I_{B2}=I_B, I_{C1}=I_{C2}=I_C, U_{CE1}=U_{CE2}=U_{CE}$$



直流通路如图示：于流过 R_E 的两个电流大小相等，向相同，所以流过 R_E 的直流电流 $2I_E$，当于单管射极电流 I_E 流过 $2R_E$

计算静态工作点：$U_{EE}-U_{BE}=I_BR_B+I_E\dfrac{1}{2}R_P+2I_E.R_E$　　$\because R_E\geq R_P$, 则

$$U_{EE}-U_{BE}=I_BR_B+2(1+h_{fe})\ I_BR_E$$

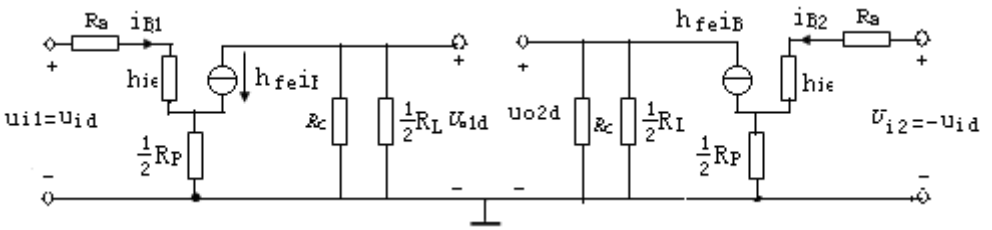
$$\therefore \frac{U_{EE}-U_{BE}}{R_B+2(1+h_{fe})\ R_E}=\frac{(12-0.7)\ V}{5K+2\times51\times10K}=11(\mu A)$$

$$I_C=h_{fe}\cdot I_B=50\times11\mu A=0.55mA$$

$$U_{CE}=U_{CC}+U_{EE}-I_CR_C-2I_ER_E=12+12-0.55\times(10+2\times10)=7.5V$$

2)差模较大时，U_i 一分为二，$U_i=U_{id}$，$U_{i2}=-U_{id}$

由于 R_E 中流过的电流的增量数值相等方向相反，所以 R_E 上无变化的压 。差模微变等电路如图：



$$U_{i1}=U_{id}=i_{b1}(R_B+h_{ie1})+(1+h_{fe})\ i_{b1}\frac{R_P}{2}$$

$$U_{Old} = -h_{fe} I_{b1} \cdot R_{L'} \qquad \left[R_{L'} = R_C // \frac{1}{2} R_P = 10K // \frac{1}{2} \times 20K = 5K\Omega \right]$$

$$\because U_{i2} = -U_{id} \qquad \therefore U_{o2} = -U_{old}$$

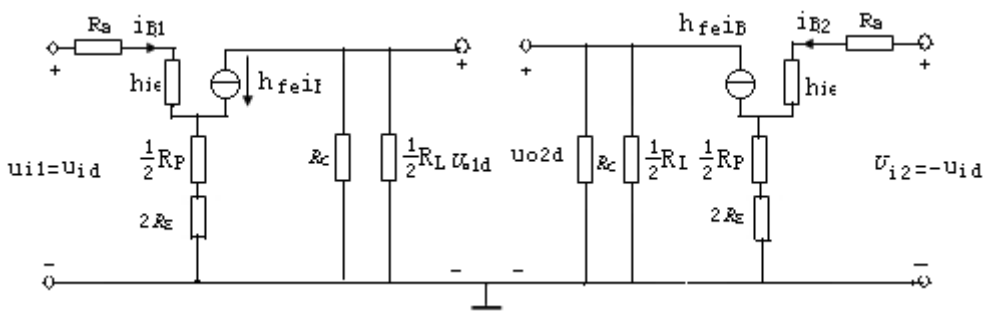
双端差模电压放大倍数

$$A_{ud} = \frac{U_{o1d} - U_{o2d}}{U_{id} - (-U_{id})} = \frac{U_{o1d}}{U_{1d}} = \frac{-h_{fe} \cdot R_L'}{R_B + h_{ie} + (1 + h_{fe}) \frac{1}{2} R_p}$$

$$h_{ie} = 300 + (1 + h_{fe}) \frac{26mv}{I_E(mA)} = 300 + 51 \times \frac{26}{0.55 + 0.011} = 2.66K\Omega$$

$$A_{Ud} = \frac{-50 \times 5K\Omega}{5K\Omega + 2.66K\Omega + 51 \times 0.5 \times 0.1K\Omega} = -24.5$$

3) 共模时 $U_{i1} = U_{i2} = U_{ic}$，R_E 上流过电流的增量相等，方向相反，即为没管发射极电流流量的 2 倍，画等效电路时把 R_E 增加一倍即可。



$\because U_{i1} = U_{i2} = U_{ic}$，则 $U_{o1c} = U_{o2c}$

双端输出共模电压放大倍数 $A_{UC} = \frac{U_{o1c} - U_{o2c}}{U_{ic}} = 0$

4) 共模抑制比　$K_{CmR} = \frac{|A_{ud}|}{|A_{uc}|} = \infty$

5) $r_{id}=\dfrac{U_{id}}{I_{id}}=\dfrac{2U_{id}}{I_{b1}}=\dfrac{2\left[I_{b1}\cdot R_B+i_{b1}(\mathrm{h}_{ie})+(1+h_{fe})\,I_{b1}\dfrac{1}{2}R_w\right]}{i_{b1}}$

$$=2\left[R_B+h_{ie}+(1+h_{fe})\frac{1}{2}R_P\right]=2\times(5+2.66+51\times0.5\times0.1)=20.42K\Omega$$

6) 由共模微变电路可得

$$r_{ic_1}=\frac{U_{ic}}{I_{ic_1}}=R_B+h_{ie_1}+(1+h_{fe})\frac{1}{2}R_P+(1+h_{fe})\times2R_E$$

$$=5K+2.66K+51\times0.5\times0.1K+51\times2\times10K$$

$$=1030K\Omega$$

对于共模信号，两输入端是并联的，因此整个差动放大器的共模输入电阻：

$$r_{ic}=\frac{1}{2}r_{ic_1}=\frac{1}{2}\times1035=515K\Omega$$

7) 双端输出的输出电阻

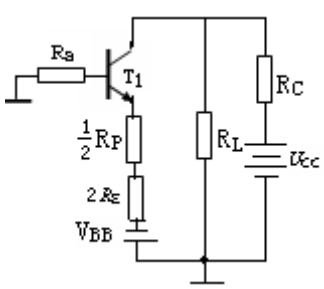
$$r_{od}=2R_C=2\times10K=20K\Omega$$

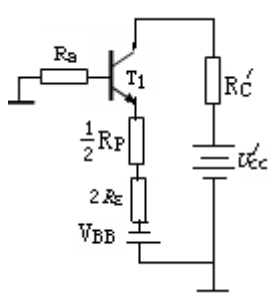
(2)开关 K 与 2 接通，电路做单端输出：

静态工作点除 U_{CE1} 外，其他系数与（1）的静态工工作点相同，即，

$I_B=11\mu A$　　$I_C=0.55mA$　　$U_{CE_2}=7.5V$

但是由于 T_1 管的集点极有一负载 R_L 接地，直流通路如图，





$$A_{UD1}=\frac{1}{2}A_{UD}=-12.25$$

$$A_{UC1}=\frac{-h_{fe}(R_C // R_L)}{R_B+h_{ie}+\frac{1}{2}(R_P+2R_e)\quad(1+h_{fe})}=-0.32$$

$$K_{CMR1}=\left|\frac{A_{UD1}}{A_{UC1}}\right|=38.28$$

$$R_{id}=20.42K\Omega$$

$$R_O=R_C=10K\Omega$$

利用戴维南定理，将左图等效成右图，其中：

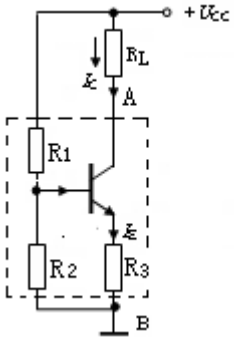
$$R_L'=R_C // R_L=10K // 20K=6.67K\Omega$$

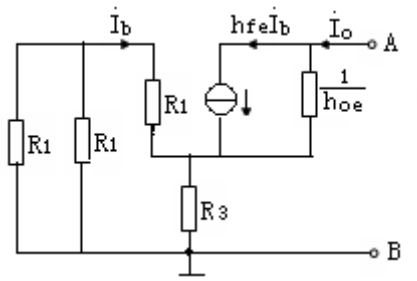
$$U_{CC}'=\frac{R_L}{R_L+R_C}U_{CC}=\frac{20K}{10K+20K}\times 12=8V$$

$$U_{CE1}=U_{CC}'+U_{EE}-I_CR_L'-\frac{1}{2}I_ER_W-2I_ER_E$$

$$=8+12-0.55\times 6.67-0.5\times 0.561\times 0.1-2\times 0.561\times 10=5.08V$$

3-2. 简单的晶体管电路如图所示，试用 h 参数等效电路（略去 h_{re}，但，$r_{Ce}=\frac{1}{h_{oe}}$不能忽略）推导出电流源的交流内阻 R_{AB}的表达式





解：恒流源等效电路如图所示，为推导交流电阻 R_{AB}，在 AB 端加一电压 $\dot{U}_O$得到电流 $\dot{I}_O$ 由图可得 $h_{ie}=r_{be}\cdot\frac{1}{h_{oe}}=r_{ce}$ ， $h_{fe}=\beta, I_O=\frac{U_O-U_E}{r_{ce}}+\beta\cdot I_b$ 则：

$$I_b = -\frac{V_E}{r_{be} + b_1 // R_1} \qquad V_E = I_0\left[R_3 // (r_{be} + R_1 // R_2)\right]$$

$$I_b = \frac{U_0}{r_{ce}} - \frac{U_E}{r_{ce}} - \frac{\beta V_E}{r_{be} + b_1 // R_1} = \frac{U_0}{r_{ce}} - \left[\frac{1}{r_{ce}} + \frac{\beta}{(r_{be} + R_1 // R_2)}\right] V_E$$

$$= \frac{U_0}{r_{ce}} - \left[\frac{1}{r_{ce}} + \frac{\beta}{r_{be} + R_1 // R_2}\right] I_0\left[R_3 // (r_{be} + R_1 // R_2)\right]$$

$$\frac{U_0}{r_{ce}} = I_0\left\{1 + \left[\frac{1}{r_{ce}} + \frac{\beta}{r_{be} + R_1 // R_2}\right] \cdot \left[R_3 // (r_{be} + R_1 // R_2)\right]\right\}$$

$$\text{即 } R_{AB} = \frac{U_0}{I_0} = r_{ce} + \left[1 + \frac{\beta r_{ce}}{r_{be} + R_1 // R_2}\right]\left[R_3 // (r_{ce} + R_1 // R_2)\right]$$

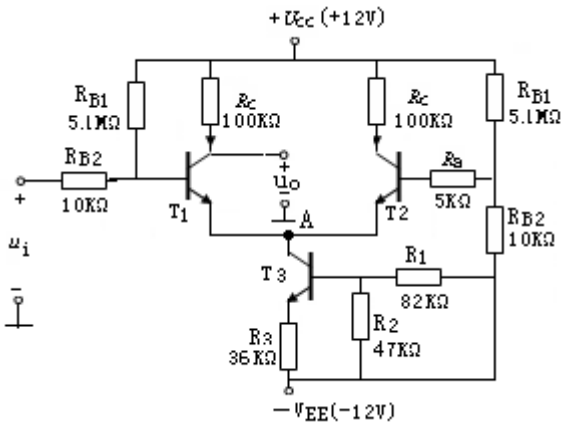
即用作恒流源的晶体管，其输出特性曲线较为平坦，也就是 $r_{ce} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}\Big|_{I_B} >> 1$.

一般 $\frac{\beta r_{ce}}{r_{be} + R_1 // R_2} >> 1$ 成立，

得到： $R_{AB} = \frac{U_0}{I_0} = r_{ce} + \frac{\beta r_{ce}}{r_{be} + R_1 // R_2} \cdot \frac{R_3 (r_{be} + R_1 // R_2)}{R_3 + r_{be} + R_1 // R_2}$

$$= r_{ce} + \frac{\beta r_{ce} \cdot R_3}{R_3 + r_{be} + R_1 // R_2} = r_{ce}\left[1 + \frac{\beta R_3}{R_3 + r_{be} + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}\right]$$

3-3. 图为带恒流源的差分放大器，设晶体管的 $h_{fe} = 50$，



1） 计算 T_1, T_2和T_3静态工作点

2） 若 $r_{ce3}=\dfrac{1}{h_{oe3}}=80K\Omega$, 利用 3.3 结果，计算恒流源的交流电阻 R_{AB}

3） 计算电路 A_{Vd1}， A_{Vc1}， K_{CMR}, R_{id}， R_{ic}和R_{od}

解：（1）计算 T_3的静态工作点：

$$V_{B3}=\frac{R_1}{R_2+R1}(-U_{EE})=\frac{82K}{82K+47K}\times(-12)=-7.6V$$

$$I_{E3}=\frac{U_{B3}-V_{BE3}+U_{EE}}{R_3}=\frac{-7.6V-0.6V+12V}{36K\Omega}=0.106(mA)$$

$$I_{B3}=\frac{I_{E3}}{1+h_{fe}}=\frac{0.106mA}{51}=0.002mA$$

$$I_{C3}=I_{E3}-I_{B3}=0.106-0.002=0.104mA$$

$$U_{CE3}=U_{E3}=8.2V$$

(2)T_1, T_2静态工作点：

$$I_{E1}=I_{E2}=\frac{1}{2}I_{C3}=\frac{1}{2}\times 0.104mA=0.052mA$$

$$I_{B1}=I_{B2}=\frac{I_{E1}}{1+h_{fe}}=\frac{0.052mA}{51}=0.001mA$$

$$I_{C1}=I_{C2}=I_{E1}-I_{B1}=0.052-0.001=0.051mA$$

$$V_{C1}=V_{C2}=V_{CC}-V_{C1}\cdot R_C=12-0.051\times 100=6.9V$$

(3)T_3管的输入电阻$r_{be3}=300+(1+h_{fe})\dfrac{26mV}{I_{E3}mA}$

$$= 300 + (1+50)\frac{26}{0.106} = 12.8K\Omega$$

恒流源的交流电阻

$$R_{AB} = r_{ce3} + \frac{h_{fe3} \cdot r_{ce3} \cdot R_3}{R_3 + r_{be3} + R_1 // R_2} = 80K\Omega + \frac{50 \times 80K\Omega \times 36K\Omega}{36K\Omega + 128K\Omega + 82K\Omega // 47K\Omega}$$

$=1.91M\Omega$

T_3管是恒流源，其直流电阻小，交流电阻大，在计算差模电压放大倍数和差模输入电阻时等效为直流电阻，忽略不计;在计算共模电压放大倍数和共模输入电阻时等效为交流电阻 R_{AB}

T_1管的输入电阻 $r_{be1} = 300 + (1+h_{fe})\frac{26(mV)}{I_{E1}(mA)} = 300 + (1+50)\frac{26}{0.052} = 25.8K\Omega$

由于单端输出，所以差模电压放大倍数：

$$A_{ud1} = -\frac{h_{fe1} \cdot R_C}{2(R_{B2} + r_{be1})} = -\frac{50 \times 100K\Omega}{2(10K\Omega + 25.8K\Omega)} = -69.8$$

（$\because R_{B1} // r_{be1}$.且$R_{B1} >> r_{be1}$，$\therefore R_{B1}$忽略）

共模放大倍数：

$$A_{uc1} = -\frac{h_{fe1} R_C}{R_{B2} + r_{be1} + 2(1+h_{fe}) \cdot R_{AB}} = -\frac{50 \times 100K\Omega}{10K\Omega + 25.8K\Omega + 2 \times 51 \times 1.91M\Omega} = -0.026$$

共模抑制比：

$$K_{CMR} = \frac{|A_{ud1}|}{|A_{uc1}|} = \frac{|-69.8|}{|-0.0261|} = 2684.6$$

差模输入电阻：

$$R_{id} = \frac{U_{id}}{I_{id}} = 2(R_{B2} + R_{B1} // r_{be1}) = 2 \times (R_{B2} + r_{be1}) = 2 \times (10K\Omega + 25.8K\Omega) = 71.6K\Omega$$

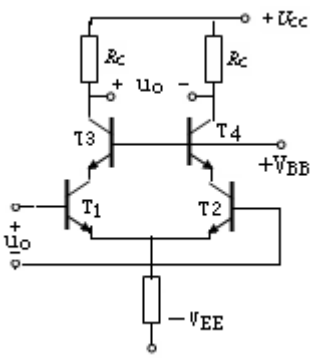
共模输入电阻：

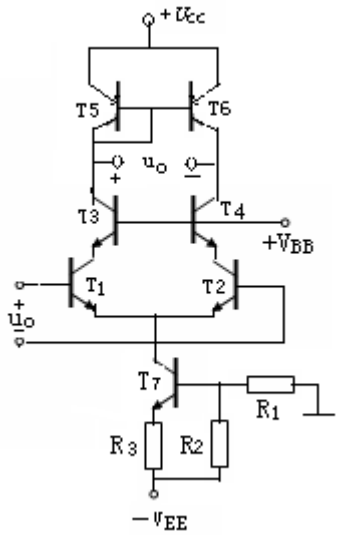
$$R_{ic}=\frac{1}{2}\frac{U_{ic}}{I_{ic}}=\frac{1}{2}\left\{R_{B2}+R_{B1}//\left[r_{be1}+2(1+h_{fe})\ R_{AB}\right]\right\}$$

$$=\frac{1}{2}\left[10K\Omega+5.1M\Omega//(25.8K\Omega+2\times51\times1.91M\Omega)\right]=2.5M\Omega$$

输出电阻 $R_{od}=R_c=100K\Omega$

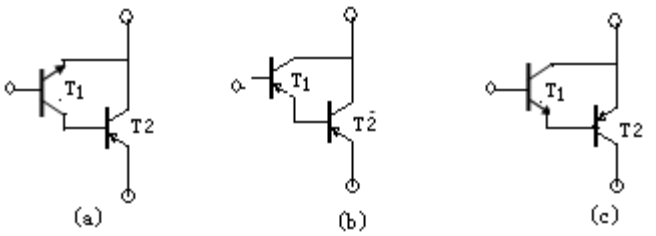
3-4 共射共基差分电路如图示，试导出其差模电压放大倍数 A_{ud}，并画出将 R_C和R_E改为恒流源电路。





答：T_1,T_2 组成共射差动电路，T_3,T_4 组成共基极电路。接在 T_1,T_2 集电极上，由于共基极电路设有电流放大能力，$I_{C3}\approx I_{E3}, I_{C4}=I_{E4}$, 则 T_1,T_2 的集电极负载分别近似为 R_C， T_1,T_2 是双入双出差动放大电路，其差模放大倍数与单管放大电路一样。即 $A_{ud}=-\dfrac{h_{fe}\cdot R_c}{r_{be1}}$。将 R_C，R_E改为恒流源的差放电路如上图示。

3-5. 指出图中哪些组合是合理的，哪些是不合理的。对于合理的复合管标出其 3 个点极。并说明是 PNP 管还是 NPN 管。

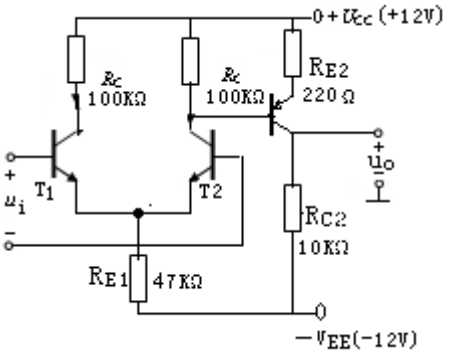


答：　（a）图合理，为 NPN 管，电极如图标

（b）图合理，为 PNP 管，极性如图标

（c）图不合理，不符合三极管电流流向。

3-6. 图示电路中 $U_i=0$时 $U_0=0$, 晶体管为硅管， $U_{BE}=0.7V, h_{fe}=80$ 试计算 R_{C1} 的值和电路的电压放大倍数



解：（1）先计算 R_{C1}

由于 $U_i=0$， $U_0=0$。则静态时：

$$I_{C3}=I_{E3}=\frac{U_{EE}}{R_{C2}}=\frac{12V}{10K\Omega}=1.2mA$$

$$U_{E3}=U_{CC}-I_{E3}\cdot R_{E2}=12-1.2\times 0.22=11.74V$$

$$U_{C2}=U_{B3}=V_{E3}-U_{BE3}=11.74V-0.7V=11.04V$$

$$U_{E2}=V_{B2}-U_{BE2}=0-0.7=-0.7V$$

$$I_{C2}=I_{E2}=\frac{V_{BE}+V_{E2}}{2R_{E1}}=\frac{12V-0.7V}{2\times 47K\Omega}=120\mu A$$

$$\therefore R_{C1}=\frac{U_{CC}-U_{C2}}{I_{C2}}=\frac{12-11.04}{120\mu A}=8K\Omega$$

（2）计算电压放大倍数 Au。

T_3管的输入电阻 $r_{be3}=300+(1+h_{fe})\dfrac{26mA}{I_{E3}mA}=300\times81\times\dfrac{26}{1.2}=2.055K\Omega$

$$\dot{A}_{u3}=-\frac{h_{fe3}\cdot R_{C2}}{r_{be3}+(1+h_{fe3})\cdot R_{E2}}=-\frac{80\times10K\Omega}{2.05K\Omega+(1+80)\times0.22K\Omega}=-40.25$$

T_1, T_2管组成双入单出差放电路。则，

$$\dot{A}_{ud1}=\frac{h_{fe2}\cdot R_L'}{2r_{be2}}\text{其中}r_{be2}=300+(1+h_{fe})\frac{26mA}{I_{E2}mA}=300+81\times\frac{26}{0.12}=17.85K\Omega$$

$$R_L'=R_{C1}//\left[r_{be3}+(1+h_{fe3})\ R_{E2}\right]=8K\Omega//\left[2.055K\Omega+81\times0.22K\Omega\right]=5.7K\Omega$$

则 $A_{ud1}=\dfrac{80\times5.7K\Omega}{2\times17.85K\Omega}=12.77$

所以，总电压放大倍数：

$$A_u=A_{ud1}\cdot A_{u3}=12.77\times(-40.25)=-514$$

第 4 章　反馈放大器

4.1 知识点归纳

本章主要研究了反馈的基本概念、负反馈放大器的一般表达式，、负反馈对放大器性能的影响和放大器电路稳定性等问题。阐明了反馈的判断方法，深度负反馈条件下放大倍数的估算方法，根据需要正确引入负反馈的方法。

1.在电路中，将输出量的一部分或全部通过一定的电路形式作用于输入回路，去影响输入量的措施称为反馈。如使净输入量减少则为负反馈，若使净输入量增加则为正反馈。若反馈存在于直流通路中则为直流反馈，若反馈存在于交流 通路中则为交流反馈。反馈量取自于输出电压则为电压反馈，若反馈量取自于输出电流则为电流反馈。交流负反馈有四种形式：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。

2.电路中“有无反馈”，取决于输出回路和输入回路是否存在反馈通路；“直流反馈和交流反馈”决定与反馈通路存在于直流通路还是交流通路；“正、负反馈”的判定采用瞬时极性法，反馈结果使净输入量增加则为正反馈，减小则为负反馈。判断“电压反馈和电流反馈”可令输出电压等于零，若反馈量随之为零，则为电压反馈，若反馈量依然存在，则为电流反馈。“串联和并联”判定是，反馈网络与基本放大器是并联连接的则为并联反馈，若是串联连接的则为串联反馈。

3.反馈的作用效果与信号源内阻 R_S 有关，对于并联负反馈，R_S 大时，反馈效果明显，R_S=0 时，无反馈作用；对于串联负反馈，R_S 越小，反馈效果越显著，反之，R_S=∞时，串联反馈无效果。

4.对于满足，$|1+\dot{A}\dot{F}|>>1$ 利用的 $|\dot{A}_F|\approx 1/|\dot{F}|=|\dot{X}_0|/|\dot{X}_f|$ 关系和 $|\dot{X}_i|\approx|\dot{X}_f|$ 的特点，求深度负反馈放大器增益。欲求电压增益，除电压串联负反馈外，其它各类型的负反馈还需进行转换。

5.引入交流负反馈后，可以改善当打电路多方面的性能，可以提高放大倍数的稳定性，改变输入电阻和输出电阻，展宽频带，减小非线性失真等。

学完本章后应达到下列要求：

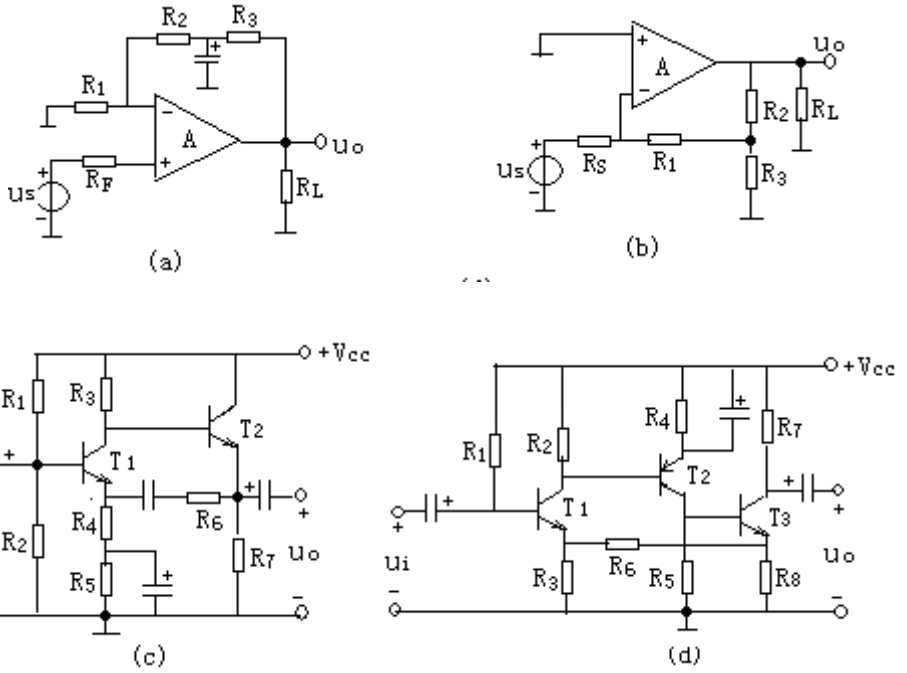
1 能够正确判断电路中是否引入了反馈以及反馈的性质。

2.正确理解负反馈放大电路放大倍数在不同反馈组台下的物理意义，并能够估算深度负反馈条件下的放大倍数。

3.掌握负反馈四种组态对放大电路性能的影响，并能根据需要在放大电路中正确的引入交流负反馈。

4.2 习题思考题详解

4-1 在图示电路中，指出反馈通路，判断所引的反馈是正反馈还是负反馈，是交流反馈还是直流反馈，设电容的容抗可以忽略。



解：

（a）反馈通路由 R_2，C，R_3 构成，反馈送至反相输入端，属于电压串联负反馈，由于 C 交流接地，故为直流电压串联负反馈。

（b）R_1，R_2，R_3 构成反馈支路，是交直流负反馈，反馈信号取至非输出端而送入输入端，故为交直流电流并联负反馈。

（c）R_4，R_5，C_2 引入本级负反馈，R_4 引入交直流电流串联负反馈，R_5 引入直流电流串联负反馈；C_3，R_6，R_5，R_4，C_2 引入两级间反馈，是电压串联正反馈。

（d）R3 引入本级电流串联负反馈。R_4，C_2 引入本级直流电流串联负反馈。R_8 引入本级交直流电流串联负反馈。R_6，R_3 引入三级间交直流电流串联负反馈。

4-3 判断上图所示各电路中交流负反馈分别是什么类型。（分析同 4-2）

4-2 指出下面的说法是否正确，如果有错，错在哪里？

1.既然在深度负反馈的条件下，闭环放大 $\left|\dot{A}_F\right| \approx \frac{1}{\left|\dot{F}\right|}$ 倍数与放大器的系数几乎无关，因此，器时的系数就没有什么实际意义了，于是可以随便用一个管子，只要适当选取 $\left|\dot{F}\right|$，就能获得恒定的且为所需大小的 $\left|\dot{A}_F\right|$。

2.负反馈能展宽起带，因此，可用低频管代替高频管，只要加上足够深的负反馈即可。

解

（1）这种说法是错误的。因为深度负反馈闭环放大倍数的近似估算式为 $A_f = \frac{1}{F}$，首先是在 $\left|1+\dot{A}\dot{F}\right| \gg 1$ 的条件下得到的。而条件中的 $\dot{A}$ 即开环放大倍数是由晶体管的系数和电路系数决定的，为 $\dot{A}_u$ 与 β，$r_{\partial\ell}$，f_B 等系数有关。如随便选择晶体管，若满足不了上述条件，则构不成深度负反馈，也就不能使用 $A_f = \frac{1}{F}$ 的关系式了。

（2）这种说法是错误的。负反馈虽然能使放大器的通频带展宽，但是在原开环电路通频带的基础上有限的宽度，且有牺牲其增益为代价的，在一定条件下，其增益带宽积是一常量。

4-3 试从物理概念上说明电流负反馈使输出电阻增加，电压负反馈使输出电阻减小，串联负反馈使输入电阻增加，和并联负反馈使输入电阻减小的道理。

答：电流负反馈主要是稳定输出电流，使输出电流接近于恒流源，当负载变化时，保持输出电流稳定，其效果就是增大了输出电阻，输出电阻越大，越接近恒流源。

电压负反馈主要稳定输出电压，使输出电压接近于恒流源，当负载变化时，电路保持输出电压稳定，其效果就是减小了输出电阻，输出电阻越小，电路带负载能力越强，越接近于恒流源。

串联负反馈由于反馈信号与原输入信号串联，故输入电阻增加。

并联负反馈由于反馈信号与原输入信号并联，故输入电阻减小。

4-4 当放大器 A_V 改变 20%时，如果要求 A_{VF}=100,而且 A_{VF} 的变化不大于 1%，

（1）试计算 A_V 和 F 值。

（2）如果无反馈的 $f_H = 20KH_z$，求引入反馈后的通带 $\beta\varpi_F$.

解：（1） $A_{vF} = \dfrac{A_v}{1+A_{vF}}$，则 $\dfrac{dA_F}{A_F} = \dfrac{1}{1+A_{vF}}\dfrac{dA_v}{A_v}, \because A_{vF} = 100. = \dfrac{A_v}{1+A_{vF}}$.

则 $\dfrac{1}{1+A_{vF}} = \dfrac{100}{A_v}$ 带入上式可得：$\dfrac{100}{A_v} \times 20\% \le 1\% . \therefore A_v \ge 2000 = 2\times 10^3$

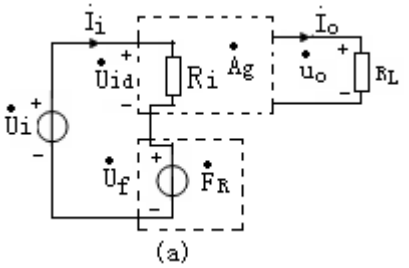
又 $\because \dfrac{1}{1+A_{vF}} = \dfrac{100}{A_v}$

.则 $F = \left(\dfrac{A_v}{100} - 1\right)\dfrac{1}{A_v} = \dfrac{1}{100} - \dfrac{1}{A_v} = \dfrac{1}{100} - \dfrac{1}{2000} = 9.5\times 10^{-3}$

(2) $\beta\varpi_F = f_H\left(1+\dot{A}_{vF}\right) = 20KH_z \times \left(1+2000\times 9.5\times 10^{-3}\right) = 400KH_z$。

4-5 试证明电流串联负反馈放大器的输入电阻 $R_{if} = R_i[1+A_G F_R]$,输出电阻为 $R_{of} = R_o[1+A_{GS0}F_R]$

解：图（a）为计算电流串联负反馈放大器输入电阻框图，可见：



(a)

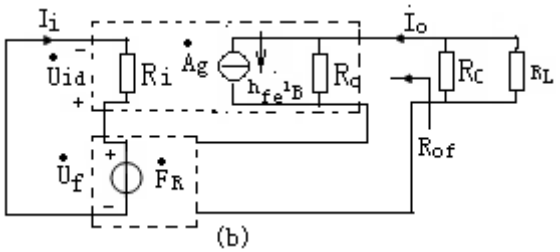
无反馈时输入电阻　$R_i = \dfrac{V_d}{I_i}$

有反馈时输入电阻　$R_{if} = \dfrac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}$

而 $\dot{V}_i = \dot{V}_d + \dot{V}_f$ ，　$V_f = F_R I_0$ ，　$I_0 = \dot{A}_G \cdot V_d$

$$\therefore r_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_d + \dot{V}_f}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_d + F_R \cdot A_G \cdot V_d}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{V}_d}{\dot{I}_i}(1+\dot{A}_G F_R) = R_i\left(1+\dot{A}_G F_R\right)$$

图（b）为计算电流串联负反馈放大器的输出电阻



将信号源 $V_S=0$，保留内阻 R_3，断开 R_L，并且在输出端施加一个交流电压源 V_0 得到电流 $\dot{I}_0$，如图所示。图中 A_{GS0} 为基本放大器输出端点电路（ $R_L'=0$ ）的开环转移导纳，忽略反馈网络输入端的降压，有：

$$\dot{I}_0=\frac{V_0}{R_0}+A_{GSO}\dot{V}_d$$

∵由图可得：$\dot{V}_d=-\dot{V}_F \qquad \dot{V}_F=F_R\dot{I}_0$

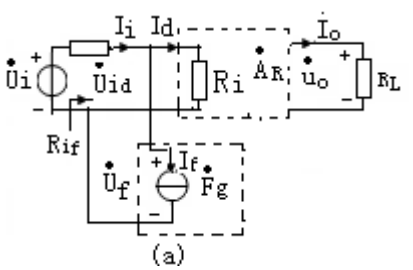
$$\therefore \dot{I}_0=\frac{V_0}{R_0}-A_{GSO}F_R\dot{I}_0$$

得 $R_{of}=\dfrac{V_0}{I_0}=R_0[1+A_{GSO}F_R]$

4-6 试证明电压并联负反馈放大器的输入电阻 $R_{if}=\dfrac{R_i}{1+A_RF_G}$，输出电阻

$$R_{of}=\frac{R_0}{1+A_{RSO}F_G}$$

解：图 a 为计算电压并联负反馈放大器输入电阻的推图，可见：



无反馈时输入电阻　$R_i=\dfrac{\dot{U}_i}{\dot{I}_d}$

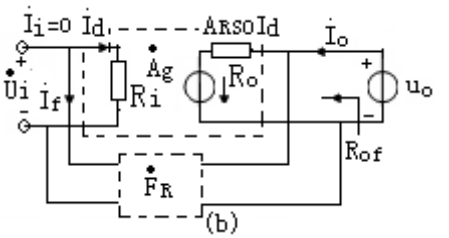
有反馈式输入电阻　$R_{if}=\dfrac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$

而　$\dot{I}_i=\dot{I}_d+\dot{I}_f \quad \dot{I}_f=\dot{F}_G\dot{U}_O$

$$\dot{U}_O=\dot{A}_R\dot{I}_d$$

$$\therefore R_{if}=\frac{\dot U_i}{\dot I_i}=\frac{\dot U_i}{\dot I_d+\dot A_R\cdot\dot F_G\cdot\dot I_d}=\frac{\dot U_i}{\dot I_d(1+\dot A_R\cdot\dot F_G)}=\frac{R_i}{1+\dot A_R\cdot\dot F_G}$$

图（b）为计算电压并联负反馈放大器输出电阻框图。



令 $\dot I_i$=0，断开负载 R_L 并且在输出端施加一个交流电压源 $\dot V_0$，得到电流 $\dot I_0$，图中 $\dot A_{RSO}$ 是负载开路时基本放大器的开环转移电阻。

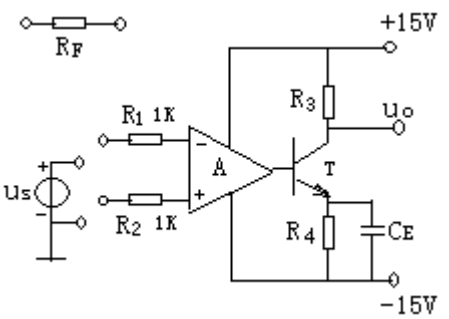
由图：$\dot V_0=I_0R_0+\dot A_{RSO}\dot I_d$，

而 $\dot I_d=-\dot I_f=-F_G\dot V_0$

$$\therefore V_0=I_0R_0-A_{RSO}\dot I_f=I_0R_0-A_{RSO}F_G\dot V_0$$

$$\therefore \dot R_{of}=\frac{\dot V_0}{\dot I_0}=\frac{R_0}{1+\dot A_{RSO}\dot F_G}$$

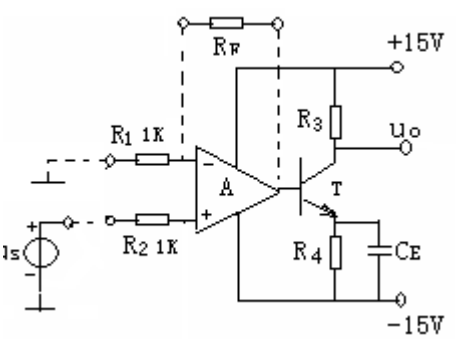
4-7．电路如图示；设运放为理想运放，



（1）合理连线，将信号源 V_s 和 R_F 正确的接入电路。使电路尽可能的高的输入电阻。

（2）保证放大倍数 $\left|\dot A_{VF}\right|=100$，问：应选多大的反馈电阻 R_F？

解：（1）连接电路如图示，引入电压串联负反馈。



(2)

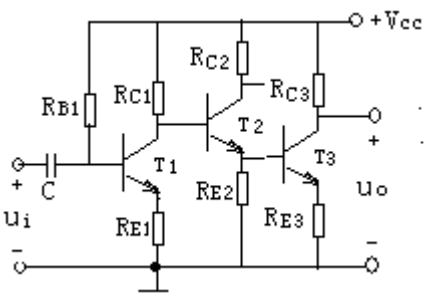
$$U_+ = U_- = U_s, \dot{I}_1 = \dot{I}_f$$

$$\frac{0-U_s}{R_1} = \frac{U_s - U_0}{R_F} \Rightarrow \frac{-U_s}{R_1} = \frac{U_s}{R_F} - \frac{U_0}{R_F} \cdot \frac{U_0}{R_F} = U_S\left[\frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_1}\right]$$

$$\frac{U_0}{U_s} = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 100,$$

$$\because R_1 = 1K, \text{则} R_F = 99K\Omega$$

4-8 图示放大电路中，为分别实现下面几个方面的要求，应引入何种类型的负反馈，请画上反馈电路：



（1）要求元件的系数改变对 T_3 的静态某电极电压影响较小。

（2）要求 T_3 某电极电流的交流成份 i_{C_3} 基本上不受 R_{C_3} 改变的影响。

（3）要求在接上外加负载 R_L 以后，电压放大倍数基本不变。

（4）要求输入端向信号源索取的电流比较小。

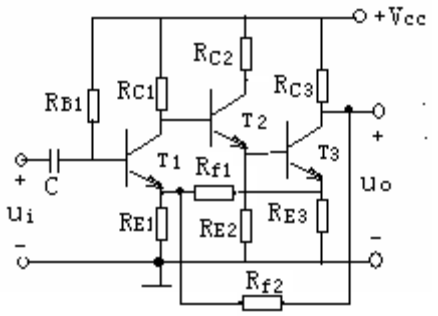
解：（1）稳定 T_3 集电极静态电压，须引入本级直流负反馈电路。为 R_{E_3} .

(2) 若使 R_{C_3} 的交流集电极电流 i_{C_3} 不变，应引入电流负反馈，例， R_{f_1}

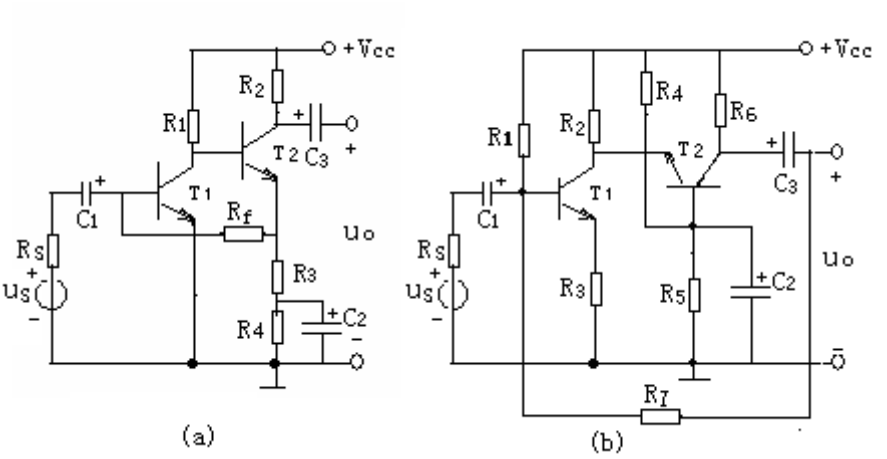
（3）若引入负载 R_L 后，电压放大倍数基本不变，应引入电压负反馈，为 R_{f_2}

（4）输入端向信号源索取电流较小，应引入串联负反馈，为 R_{f_2} 。

综上所述，引入反馈的电路网络如图所标。



4-9，负反馈放大电路如图示，设这些电路满足深度负反馈条件，试运用近似计算法计算它们的电压放大倍数。



解：（1）（a)图是电流并联负反馈电压放大电路，由于深度负反馈，则有：$I_i = I_f$

$$I_i = \frac{U_S}{R_S}，\ U_{R3} = (I_0 - I_f)R_3，\ I_f R_S = U_{R3} \text{则:} I_f = \frac{R_3}{R_3 + R_S} I_0$$

$$U_S = I_f R_S, U_0 = I_0 R_2$$

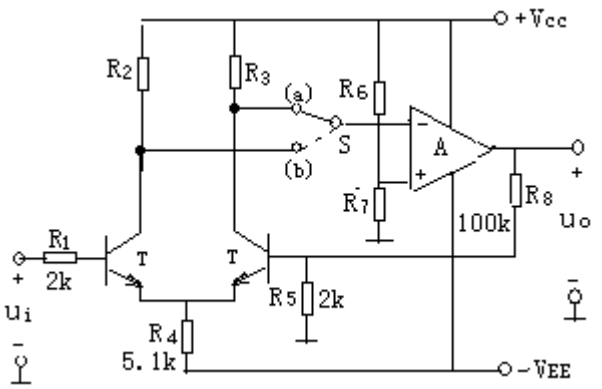
$$A_{USf} = \frac{U_0}{U_S} = \frac{R_2(R_3 + R_S)}{R_3 R_S}$$

(2) (b)图是电压并联负反馈电压放大电路，由于深度负反馈，则有：$I_i = I_f$

$$I_i = \frac{U_S}{R_S} \approx \frac{U_S}{R_3}，\ I_f = -\frac{U_0}{R_7}，\ \text{则：}\ \frac{U_S}{R_3} = -\frac{U_0}{R_7}$$

故：$A_{USf}=-\dfrac{R_7}{R_3}$

4-10．电路如图：



（1）要使电路中引入反馈为负反馈，开关 S 应置于（a）还是（b）

（2）这个负反馈属于何种负反馈？

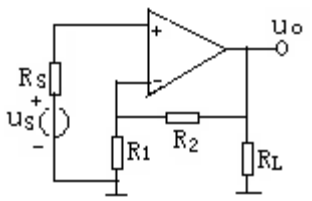
（3）设电路满足深度负反馈的条件电压放大倍数 $\dot{A}_{uf}$ 大多是多少？

解：（1）引入负反馈开关应置于(b)

（2）这个负反馈属于电压串联负反馈

（3）因为深度负反馈，则 $\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{I}}{\dot{F}_u}=\dfrac{\dot{U}_0}{\dot{U}_f}=\dfrac{U_0}{\dfrac{R_5}{R_5+R_8}U_0}=\left(1+\dfrac{R_8}{R_5}\right)=51$

4-11 负反馈放大器如图示，假设运放的差模输入电阻为无穷大，输出电阻为零。



（1）写出电压反馈系数 $\dot{F}_0$ 表达式

（2）如果基本放大器的开环增益 $\left|\dot{A}_u\right|$ 为 10^3，闭环电压增益 $\left|\dot{A}_{uf}\right|$ 为 10^2，求出 R_2/R_1

（3）如果开环放大倍数减小 20% ，那么闭环放大倍数将减少多少？

解：（1）这是一个电压串联负反馈电路，

因为为差模输入电阻无穷大，流入运放反相端的电流 $\dot{I}_-=0$ 反馈信号：

$$\dot{V}_f=\dot{V}_-=\frac{R_1}{R_1+R_2}\dot{V}_0$$

电压反馈系数 $\dot{F}_u=\dfrac{\dot{V}_f}{\dot{V}_0}=\dfrac{\dot{V}_-}{V_0}=\dfrac{R_1}{R_1+R_2}$

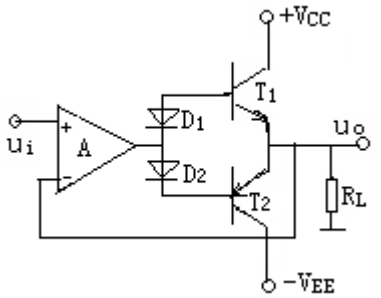
(2) 只考虑放大倍数的幅值时有：

$$\left|A_{uf}\right|=\frac{\left|\dot{A}_u\right|}{\left|1+\dot{A}_u\dot{F}_u\right|}\quad 则\quad \left|\dot{F}_u\right|=\frac{\left|\dot{A}_u\right|-\left|\dot{A}_{uf}\right|}{\left|\dot{A}_u\right|\left|\dot{A}_{uf}\right|}=\frac{1}{\left|\dot{A}_{uf}\right|}-\frac{1}{\left|\dot{A}_u\right|}=\frac{1}{100}-\frac{1}{1000}=0.009$$

而 $\dot{F}_u=\frac{R_1}{R_1+R_2}$　　所以　　$\frac{R_2}{R_1}=\frac{1}{0.009}-1=110$

(3)由已知条件知$\left|A_u\right|=10^3,\left|A_{uf}\right|=10^2$，可知，放大器引入负反馈后放大倍数下降了 10 倍，即$\left|1+\dot{A}_u\dot{F}_u\right|=10$，其稳定性提高了 10 倍，先开环放大倍数减小了 20%，即$\left|\dot{A}_u\right|=800$，那么闭环放大倍数将减小 2%，则$\left|\dot{A}_{uf}\right|=98$

4-12.负反馈放大器如图示



（1）利用近似计算法计算$\left|\dot{A}_{uF}\right|$

（2）若基本放大器取开环电压增益$\left|\dot{A}_{ui}\right|=10^2$，利用负反馈表达式计算$\left|\dot{A}_{uF}\right|$

解：（1）T_1,T_2 各自组成射极输出电路，输入信号 U_i 经运放放大后，正半周经过 D_2，由 T_2 射极输出，射极输出器电压放大倍数近似为 1。而 T_1,T_2 管电路组成功放电路，将运放信号近似不变的反馈到运放的反相输入端，则电压反馈信号系数 $F_u=\frac{\dot{U}_F}{\dot{U}_0}=1$，那么闭环放大倍数　　$\left|\dot{A}_{uf}\right|=\frac{1}{\left|\dot{F}_u\right|}=1$

（2）$\left|\dot{A}_{uf}\right|=\frac{\left|\dot{A}_u\right|}{\left|1+\dot{A}_u\dot{F}_u\right|}=\frac{100}{1+100\times1}=0.99$

第 5 章　信号运算电路

5.1 知识点归纳

本章主要研究了理想集成运算放大器的特点，基本运算电路和有源滤波电路。

1. 理想集成运算放大器引入负反馈，则工作在线性区。净输入电压为零，称为“虚短”；净输入电流也为零，称为“虚断”，“虚短”和“虚短”是分析运算电路和有源滤波电路的两个基本出发点。

2.信号运算电路的三种基本形式为：反相输入运算放大器、同相输入运算放大器和差动输入运算放大器。集成运放引入负反馈后可以实现比例、加减、乘除、积分、微分、对数和指数等各种基本运算。求解输出电压与输入电压运算关系的方法有两种：

（1）接点电流法

列出运算放大器的输入端和输出端及其它关键节点的电流方程，利用虚短和虚断的概念，求出运算关系。

（2）叠加原理

对于多信号输入电路，可分别求出每个输入电压单独作用时的输出电压，然后将它们相加，就是所有信号同时输入时的输出电压。

3.有源滤波电路通常由 RC 网络和集成运放构成，立刻用它可以抑制信号中不必要的成分或突出所需要的成分。按幅频特性的不同，有源滤波器可分为 LPF、HPF、BPF、BEF。潭门的主要性能是同带放大倍数 A_{VF}、通带截止频率 f_P、通带宽度 BW。

学完本章后，能够达到下列要求：

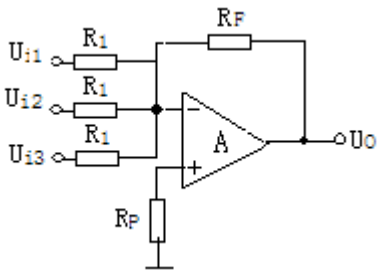
（1）.掌握比例、加减、积分电路的工作原理及运算关系，理解微分、乘除、对数和指数电路的工作原理和运算关系，，能够运用续断、虚断的概念分析各种运算电路输出电压与输入电压之间的关系，并能够合理选择电路。

（2）.能够正确理解 LPF、HPF、BPF 和 BEF 的工作原理，了解它们的主要性能，并能够合理的选择电路。

5.2 习题与思考题详解

5-1 已知加法器的运算关系为 $U_0 = -(5U_{i1} + 10U_{i2} + 0.2U_{i3})$，且反馈电阻 R_F=100 KΩ。画出电路图，并计算电路中的各电阻值。

解:加法器运算电路如图.



电路传输函数方程为:

$$U_0 = -\left(\frac{R_f}{R_1}U_{i1} + \frac{R_f}{R_2}U_{i2} + \frac{R_f}{R_3}U_{i3}\right).$$

$$R_p = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$$

$$\because \frac{R_f}{R_1} = 5. \quad \frac{R_f}{R_2} = 10. \quad \frac{R_f}{R_3} = 0.2.$$

则:$$R_1 = \frac{R_f}{5} = \frac{100\text{K}\Omega}{5} = 20\ \text{K}\Omega.$$

$$R_2 = \frac{R_p}{10} = \frac{100\text{K}\Omega}{10} = 10\ \text{K}\Omega.$$

$$R_3 = \frac{R_f}{0.2} = \frac{100\text{K}\Omega}{0.2} = 500\ \text{K}\Omega.$$

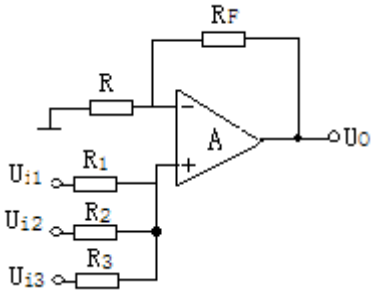
$$R_p = R_1 // R_2 // R_3 // R_f = 20//10//500//100 = 6.17\ (\text{K}\Omega)$$

5-2.同相加法器电路图如图.试导出输出电压与输入电压之间函数关系:

解:根据“虚补”“虚断”及线性叠加原理:

$$I_R = I_f.$$

$$U_+ = U_- .$$



则: $U_{01} = (1+\frac{R_f}{R_1})U_{i1}$

$U_{02} = (1+\frac{R_f}{R_2})U_{i2}$,

$U_{03} = (1+\frac{R_f}{R_3})U_{i3}$

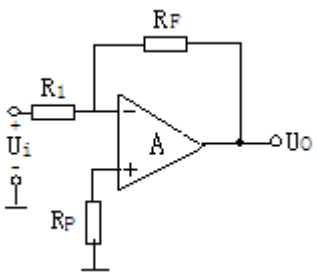
$$U_0 = U_{01}+U_{02}+U_{03} = (1+\frac{R_f}{R_1})U_{i1} + (1+\frac{R_f}{R_2})U_{i2} + (1+\frac{R_f}{R_3})U_{i3}$$

5-3 按下列要求设计一个函数电路(要求画出电路图.并算出各元件值).

(1) $U_0 = -5U_i$. 放大器总的输入电阻大于 $20\,K\Omega$.

(2) $U_0 = -100\,U_{i1}$ 放大器总的输入电阻等于 $200\,K\Omega$,电路中各电阻值不许超过 $1\,M\Omega$.

解: (1) 传输函数说明该电路是反相比例函数形式.如图:



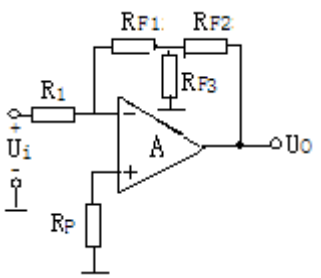
可导出 $U_0 = -\frac{R_f}{R_1}U_i$ 则 $-\frac{R_f}{R_1} = -5.$

$$R_f = 5R_1 .$$

若取 $R_1 = 40\,K\Omega$. 则 $R_f = 200\,K\Omega$.

$$R_p = R_1 // R_f = 40//200 = 33.3\,K\Omega .$$

(2)若用上图求解,得 $R_f = 4\,M\Omega$.不合提意.故采用 T 型网路代 R_f.则有图示:



$$U_+ = U_- = 0 \quad I_+ = I_- = 0.$$

$$U_a = \frac{R_{F1} // R_{F3}}{R_{F2} + (R_{F1} // R_{F3})} U_0 \qquad (1)$$

$$i_1 = i_F$$

$$\frac{U_i}{R_1} = -\frac{U_a}{R_{F1}} \qquad (2).$$

联解(1) (2)式得:$A_{Uf} = \frac{U_0}{U_i} = -\frac{R_{F1} + R_{F2} + R_{F1} \cdot \frac{R_{F2}}{R_{F3}}}{R_1}$

为满足要求.可将 $\frac{R_{F2}}{R_{F3}}$ 比值选放大一些.

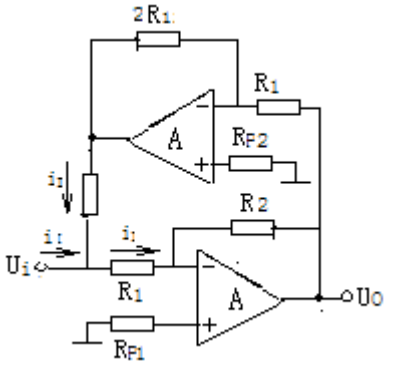
选 $R_{F2}=400\,K\Omega$. $R_{F3}=10\,K\Omega$.

已知 $R_1=40\,K\Omega$. $A_{Uf}=100$.则

$$R_{F1} = \frac{100R_1 - R_{F2}}{1 + \frac{R_{F2}}{R_{F3}}} = 87.8\,K\Omega$$

$R_p = R_1 // (R_{F2} + R_{F1} // R_{F3}) = 36.4\,K\Omega$

5-4 图为一高输入电阻及相放大器，称为输入电阻自举扩展及相放大器，A_1为主放大器。A_2为辅放大器。试推导放大器的输入电阻表达式并证明此电路提高输出电阻的原理。



解：根据虚补，虚断，虚地概念，可知：

$$U_{02}=-\frac{2R_1}{R_2}U_0$$

$$U_0=-\frac{R_2}{R_1}U_i \qquad \text{则 } U_{02}=-\frac{2R_1}{R_2}\times\left(-\frac{R_2}{R_1}\right)$$

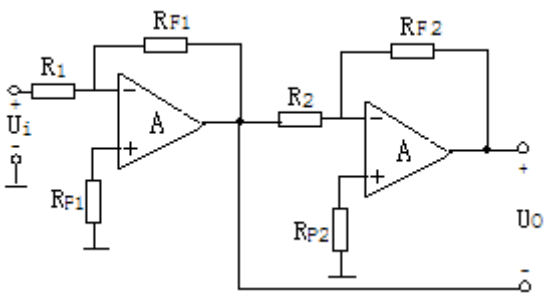
$$U_i=2U_i$$

$$R_i=\frac{U_i}{i_I}=\frac{U_i}{i_I-i}=\frac{U_i}{\frac{U_i-0}{R_1}-\frac{U_{02}-U_i}{R}}=\frac{U_i}{\frac{U_i}{R}-\frac{2U_i-U_i}{R}}=\frac{U_i}{U_i(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R})}$$

$$=\frac{1}{\frac{R-R_1}{R_1\cdot R}}=\frac{R_1\cdot R}{R-R_1}$$

该电路利用 A_2 构成反相比例运算电路，形成电流 I，减小了 A_1 的输入电流 i_I，从而提高了输入电阻。

5-5 能扩展较多函数动态范围的反相放大器为图示：通常函数所加电源电压为 ± 15v，则其动态范围约为 ± 12v,输出峰—峰值电压为 24v.采用图示电路可将动态范围扩大一倍，试说明工作原理。（此电路只适用于不接地的负载。即浮动负载情况）。



解：该电路由两级反相输入函数组成。第二级输入是第一级输出信号。最后输出是第二级输出电压和第一级输出电压之差：即：

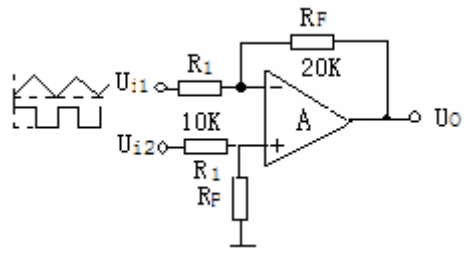
$$U_{01}=-\frac{R_{f1}}{R_1}U_{i1} \qquad U_{02}=-\frac{R_{f2}}{R_2} \quad U_{01}=\frac{R_{f1}\cdot R_{f2}}{R_1\cdot R_2} \quad U_{i1}.$$

$$U_0=U_{02}-U_{01}=\frac{R_{f1}\cdot R_{f2}}{R_1\cdot R_2} \quad U_{i1}+\frac{R_{f1}}{R_1}U_{i1}$$

若 $R_{f2}=R_2$.则。$U_0=2\frac{R_{f1}}{R_1}U_{i1}$ 。　　可见输出是 U_{01} 扩展 2 倍。

为使电路平衡。　$R_{p1}=R_{f1}//R_1$.　$R_{p2}=R_2//R_f=\frac{1}{2}R_2$.

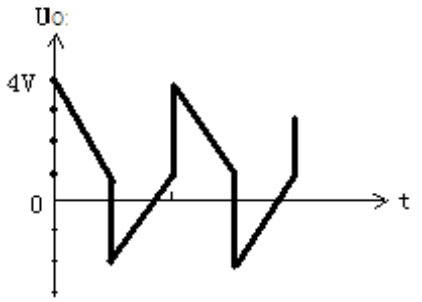
5-6 差分放大电路如图示。设输入电压 U_{i1} 为三角波，变化范围为 0～3v,U_{i2} 为 0～4v 之间变化的方波。试画出输出电压 U_0 的波形。并注明电压变化范围。



解：该电路是差动输入运算放大器，输出电压与输入差值电压〈$U_{i2}-U_{i1}$〉成正比，

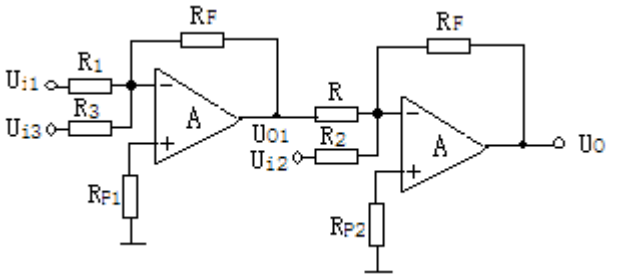
即：$U_0=\frac{R_f}{R_1}$〈$U_{i2}-U_{i1}$〉代入数据得：

输出波形如图解示：



5-6 试画出一个能实现 $U_0=10U_{i1}-5U_{i2}+0.1U_{i3}$ 的求和电路。

解：



由已知可得：$\frac{R_f^{\ 2}}{R\cdot R_1}=10$　$\frac{R_f^{\ 2}}{R_3 R}=0.1$　$\frac{R_f}{R_2}=5$

若令 $R_f=100\,K\Omega$　R=10 KΩ　则

$$R_1=\frac{R_f^{\ 2}}{10R}=\frac{10000}{10\times 10}=100\,K\Omega$$

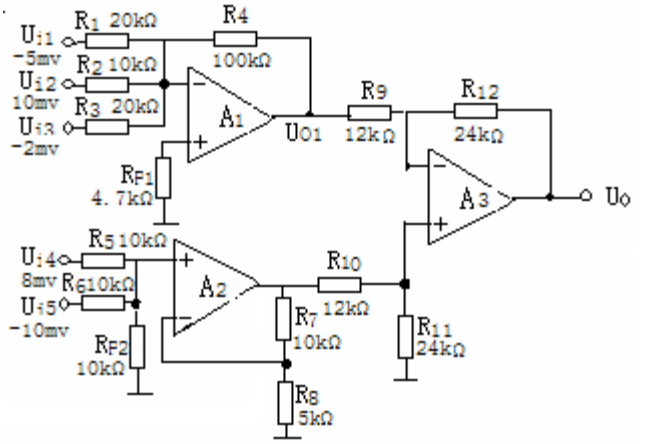
$$R_2=\frac{R_f}{5}=\frac{100}{5}=20\,K\Omega$$

$$R_3=\frac{R_f^{\ 2}}{0.1R}=\frac{10000}{1}=10^4\ K\Omega$$

$R_{p1}=R_f // R_1 // R_3=100//100//10^4=.49.75\,K\Omega$

$R_{p2}=R_f // R_2 // R=10//20//100=6.25\,K\Omega$

5-7 试求图示电路输出电压 U_0。图示集成函数均满足理想化条件。



解：(1).A_1为及相求和电路，输出为：

$$U_{01}=-\left(\frac{R_4}{R_1}U_{i1}+\frac{R_4}{R_2}U_{i2}+\frac{R_4}{R_3}U_{i3}\right)$$

$$=-\left\langle\frac{100K}{20K}(-5mv)+\frac{100K}{10K}(10mv)+\frac{100K}{10K}(-2mv)\right\rangle=-65mv$$

(2)A_2为同相加法运算电路，电路中同相端的总电阻

$$R_p=R_5//R_6//R_{p2}=10K//10K//10K=3.33K\Omega$$

反相端的总电阻：$R_N=R_7//R_8=10K\Omega//5K\Omega=3.33K\Omega$（$A_2$反相输入端为“虚地”）

$R_p=R_N$。函数两输入端直流电阻平衡，则输出：

$$U_{02}=R_7\left(\frac{U_{i4}}{R_5}+\frac{U_{i5}}{R_6}\right)=10K\Omega\times\left(\frac{8mv}{10K\Omega}+\frac{-10mv}{10K\Omega}\right)=-2mv$$

(3)A_3为差动输入。实现减法运算，其输出为同相与反相比例运算的叠加。

$$U_{+3}=\frac{R_{11}}{R_{11}+R_{10}}U_{02}\ \text{则}$$

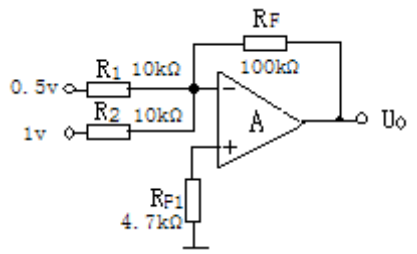
$$U_0=\left(1+\frac{R_{12}}{R_9}\right)U_{+3}-\frac{R_{12}}{R_9}U_{01}$$

$$=\left(1+\frac{R_{12}}{R_9}\right)\frac{R_{11}}{R_{11}+R_{10}}U_{02}-\frac{R_{12}}{R_9}U_{01}$$

$$=\left(1+\frac{24k}{12k}\right)\times\frac{24k}{12k+24k}(-2mv)-\frac{24k}{12k}(-65mv)$$

$$=126mv.$$

5-8. 图示为一个反相加法电路，运放的电源电压为 12v，此电路能否正常工作，为什么？若不能正常工作，应怎样修改电路。



解：根据虚短 ，虚断，虚地，$U_+=U_-=0$，$I_+=I_-=0$ 则

$$U_0'=-\left(\frac{R_f}{R_1}U_{i1}+\frac{R_f}{R_2}U_{i2}\right)=-(10\times0.5+10\times1)=-15v$$

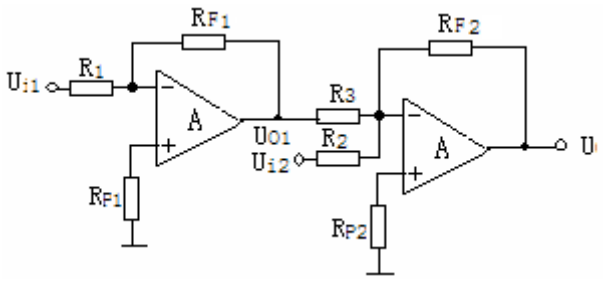
U_0'>电源电压。∴不能正常工作。

应改为 $U_0=-R_f\left\langle\frac{1}{10}U_{i1}+\frac{1}{10}U_{i2}\right\rangle=-12$.则

$$R_f=\frac{12}{\frac{0.5}{10}+\frac{1}{10}}=\frac{12}{\frac{1.5}{10}}=\frac{12\times10}{1.5}=80\ (\mathrm{K\Omega})。$$

可将 R_f 改为 $80\,\mathrm{K\Omega}$。则可以正常工作了。

5-9 反相串联减法电路如图示。试推导 U_0 与 U_{11}，U_{12} 的关系式：



解：A_1 为反相比例运算电路。A_2 为反相加法电路

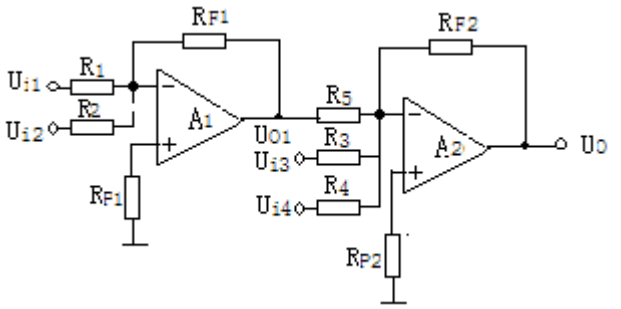
$$U_{01}=-\frac{R_{f1}}{R_1}U_{i1}$$

$$U_{02}=-R_{f2}\left(\frac{1}{R_3}U_{01}+\frac{1}{R_2}U_{i2}\right)$$

$$=-R_{f2}\left\langle\frac{1}{R_3}\left(-\frac{R_{f1}}{R_1}\right)U_{i1}+\frac{1}{R_2}U_{i2}\right)$$

$$=\frac{R_{f1}\cdot R_{f2}}{R_1\cdot R_3}U_{i1}-\frac{R_{f2}}{R_2}U_{i2}.$$

5-10 双运放加减混合运算电路如图示，请推导出输出电压与输入电压之间的关系式。

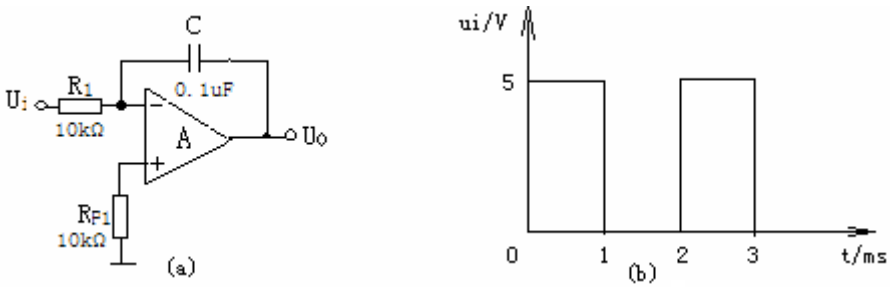


解：$U_{01}=-\left(\frac{R_{f1}}{R_1}U_{i1}+\frac{R_{f1}}{R_2}U_{i2}\right)$

$$U_0=-R_{f2}\left(\frac{1}{R_5}U_{01}+\frac{1}{R_3}U_{i3}+\frac{1}{R_4}U_{i4}\right)$$

$$U_0=\frac{R_{f2}}{R_3}\frac{R_{f1}}{R_1}U_{i1}+\frac{R_{f2}}{R_3}\frac{R_{f2}}{R_2}U_{i2}-\frac{R_{f2}}{R_3}U_{i3}-\frac{R_{f2}}{R_4}U_{i4}$$

5-11. 图示（a）为一积分电路。运放的电源电压为±15v.输入信号的波形为（b）图示



（1）试定性画出输出信号的波型。

（2）将积分电容改为 0.01uF.输出波形发生怎样的变化？

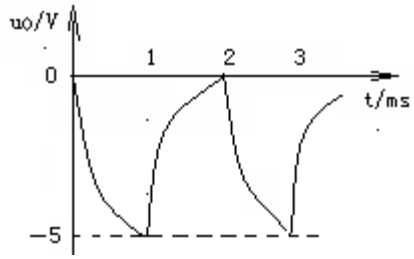
解：

（1）$U_0=\frac{-1}{R_1C_F}\int u_i dt=-\frac{1}{10\times10^3\times0.1\times10^{-6}}\int uidt=-1000\int uidt$

对于输入的第一个矩形波：t=0 时 $U_0=0$

t=1ms 时 $U_0=5v$

同样原理：对于输入一串矩形波，可以相交输出矩形为图示。

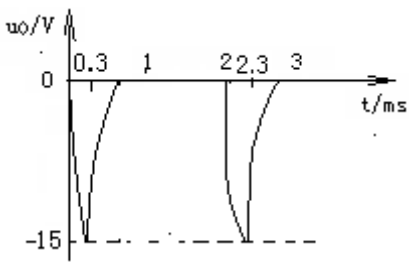


（2）若 C_F=0.01uF

当 U_i=0v. U_0=0v. 当 U_i=5v，U_0=-5000t(v)

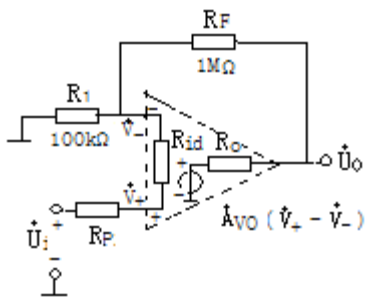
当 t=1ms, U_0=-50v. 该情况不可能，固为运放电源电压只有±15v.

若输出电压最大幅度约为电源电压-15v，输出波形为图示，图中斜线顶端对应 t 轴数值为 $t=\frac{U_{0\max}}{-50000}=\frac{-15}{-50000}$=0.3ms.



5-12. 同相输入放大器如图设函数为 5Q23.其参数 $A_{v0}=5\times10^4$ Rid=100 KΩ ,R_0=4 KΩ ,试用反相放大器的分析方法。计算 A'_{vf},Rif, R_{of}.

若函数是理想的，则 $\dot{A}_{vf}$=？因函数不理想而引起 $\dot{A}_{vf}$ 的相对误差有多大？



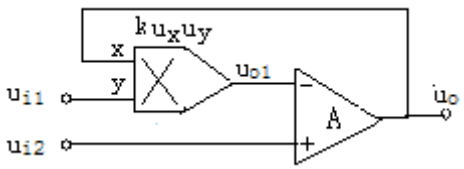
解：若函数是理想的，则 $F=\dfrac{U_F}{U_0}=\dfrac{R_1}{R_1+R_F}=\dfrac{100}{100+1000}=0.0909$，

$$A_{vf}=\frac{1}{F}=\frac{R_1+R_F}{R_1}=\frac{100+1000}{100}=11$$

$$R_{if}=(1+A_{V0})R_{id}=(1+50000x0.0909)x100k\Omega=454.6k\Omega$$

$$R_{of}=\frac{R_0}{1+A_{VO}F}=\frac{4}{1+50000X0.0909}=0.8\Omega$$

5-13．图示电路，设所用器件均具有理想特性，U_{i1}>0.(1)分别写出 U_{01} 和 U_{02} 的表达式。（2）指出该电路是何种电路。



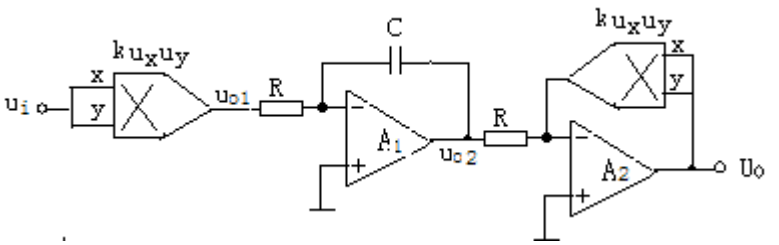
解；（1）$U_{01}=kU_{i1}U_0$

$U_0=A（U_{i2}—U_{01}）$

联解：$U_0=A（U_{i2}—kU_{i1}U_0）$　　$U_0=\dfrac{U_{i2}}{1+kU_{i1}}$　　$U_{01}=\dfrac{kU_{i1}U_{i2}}{1+kU_{i1}}$

可见 U_{01} 完成乘法运算。U_0 完成除法运算。

5-14 电路如图，设模拟乘法器和放大器都是理想条件，设电容器上的初始电压为零，试写出 U_{01}，U_{02} 及 U_0 表达式。



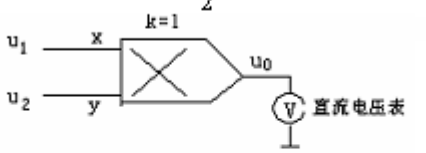
解：$U_{01}=kU_{\Delta}^{2}$　$U_{02}=-\frac{1}{Rc}\int_0^t kU_{\Delta}^{2}dt=-\frac{k}{Rc}\int_0^t U_{\Delta}^{2}dt$

A_3：∵ $U_+=U_-=0$　则 $\frac{U_{02}}{R}=-\frac{U'}{R}$　∴ $U_{02}=-U'=-kU_0^{2}$

∴ $U_0^{2}=-\frac{U_{02}}{k}=\frac{k}{kRC}\int_0^t U_{\Delta}^{2}dt=\frac{1}{RC}\int_0^t U_{\Delta}^{2}dt$

$$U_o=\sqrt{\frac{1}{RC}\int_0^t U_{\Delta}^{2}dt}$$

5.15 用乘法器可对两个正弦波的相位差进行测量见图所示电路，设 $u_1=V_{1m}\sin(\omega t+\varphi_{1)},\ u_2=V_{2m}\sin(\omega t+\varphi_2)$，求 u_0 的表达式和其中直流分量 V_0 的表达式。（提示：$\sin A\sin B=\frac{1}{2}[\cos(A-B)-\cos(A+B)]$）

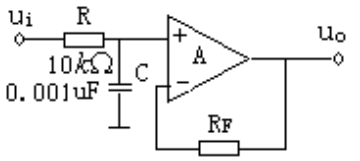


解：$u_0=ku_1u_2=V_{1m}\sin(\omega t+\varphi_1)V_{2m}\sin(\omega t+\varphi_2)$

$=\frac{1}{2}V_{1m}V_{2m}[\cos(\varphi_1-\varphi_2)-\cos(2\omega t+\varphi_1+\varphi_2)]$

直流分量：$V_0=\frac{1}{2}V_{1m}V_{2m}\cos(\varphi_1-\varphi_2)$

5-16 图示一个一阶低通有源滤波器电路，设 A 为理想运算放大器，试导出电路的传输函数，并求低通截止频率 f_p。



解：$u_+=\frac{\frac{1}{j\omega c}}{R+\frac{1}{j\omega c}}u_i=\frac{1}{1+j\omega RC}u_i$　　$u_0\approx u_-=u_+$

$$A_{VF}=\frac{u_0}{u_i}=\frac{1}{1+j\omega RC},\quad |A_{VF}|=\frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

当 $\omega=\omega_h=\frac{1}{RC}$　通带截止，此时 $f_p=\frac{1}{2\pi RC}=1.59\times10^4\,H_Z$

第 6 章　波形发生器

6.1 知识点归纳

本章主要介绍了正弦波发生器、电压比较器和非正弦波发生器电路。

1.正弦波发生器

（1）正弦波发生器的组成一般应由放大器，正反馈网络、选频网络和稳幅缓解 4 个部分组成。

（2）振荡的自激条件为 $\dot{A}\dot{F}=1$，　又可分为振幅平衡条件 $|\dot{A}\dot{F}|=1$ 和相位平衡条件$\varphi_A+\varphi_F=2n\pi$，起振的幅值条件是$|\dot{A}\dot{F}|>1$。

（3）振荡频率是由相位平衡条件决定的。RC 串并联式镇弦波振荡器中，振荡频率是：

$f_0=\dfrac{1}{2\pi RC}$；LC 正弦波振荡器有变压器反馈式、电杆三端式和电容三端式等几种，它们的振荡频率由谐振回路决定，即 $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$。

(4)判断正弦波振荡器能否振荡的一般方法和步骤是：

①观察电路是否具有放大、反馈、选频、稳幅四个基本环节。

②检查放大电路是否满足放大条件，运放的输入端是否有直流通路，有无放大作用。

③分析是否满足相位平衡条件，方法是断开回路，引进“输入”，分析反馈信号是否同相，即$\varphi_A+\varphi_F=2n\pi$。

④在检查是否满足幅值平衡条件。

2.电压比较器

（1）比较器是用来比较输入信号电压大小的电路。它的输入电压是模拟量，输出电压通常只有高电平和低电平两个稳定状态。

（2）通常用电压传输特性来描述电压比较器输出电压与输入电压之间的函数关系。电压阐述特性具有三个要素：一是输出高低电平，它决定于集成运放输出电压的最大幅度或输出端的限幅电路；二是阈值电压，它是使集成运放同相输入端和反

相输入端电位相等的输入电压；三是输入电压过阈值电压时输出电压的跃变方向，它决定于输入电压是作用于即晨昏运放的反向输入端，还是同相输入端。

（3）单限比较器只有一个门限电压，双限比较器和滞回比较器各有两个门限电压值。

3.非正弦波发生器

（1）矩形波发生器由具有卡关特性的器件（带有正反馈的滞回比较器），反馈网络（能把输出信号恰当的具有开关特性的器件，使其输出改变状态），延时环节，为实现时间的延时和所需要的振荡频率，常用有源和无源 RC 电路实现）3 个部分组成。在三角波和锯齿波发生器中除了上述部分还应加积分环节。

（2）判断非正弦波发生器起振的条件是：接通电源，开关器件的输出电压应迅速为高电平或低电平，在经过一定的延迟时间后，又能使比较器改变输出状态。

（3）分析电路时要注意比较器输出电压跳变的临界条件和 RC 电路的瞬态过程，由此来确定肺正弦波的振荡周期。

学完本章应达到如下要求：

1.熟悉掌握电路产生正弦波振荡的幅值平衡条件和相位平衡条件，以及 RC 正弦波振荡电路的组成、起振条件和振荡频率，了解 LC 正弦波振荡器的工作原理，理解其振荡频率与电路参数的关系，能根据相位平衡条件判断电路是否可产生正弦波振荡。

2.正确理解有集成运放构成的矩形波、三角波和锯齿波发生电路的工作原理、波形分析和有关参数。

6.2 习题与思考题详解

6-1. 什么是振荡器，它与放大器最本质的区别是什么？

答：（1）不需要输入信号，自己就能产生各种周期性波形输出的电路则为振荡器。

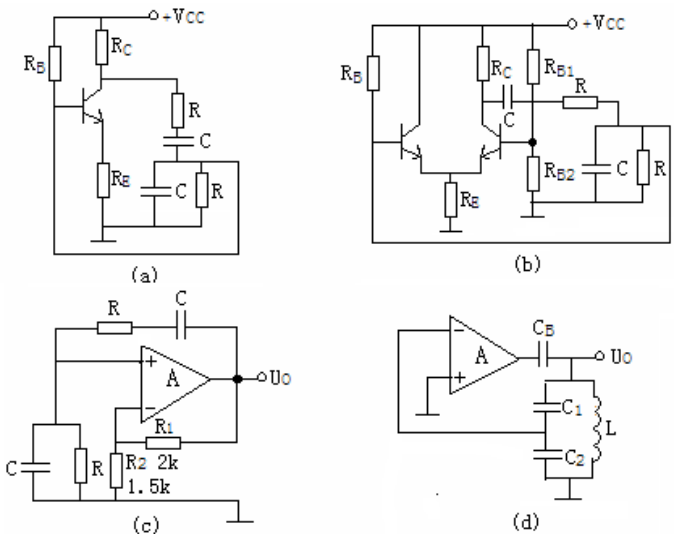
（2）振荡器与放大器本质的区别在于不需要外加输入信号的激励。

6-2. 正弦波振荡器由哪几部分组成。在正弦振荡器中若无稳幅环节，输出将会出现什么现象？

答：（1）正弦波振荡器由放大电路、反馈网络、选频网络和稳幅环节四部分组成。

（2）没有稳幅环节只能靠放大器中晶体管的非线性来稳定输出信号幅度，输出波形会失真。

6-3.RC 文氏桥正弦波振荡器电路如图，试指出哪个电路能产生自激振荡，哪个不能，并说明理由。



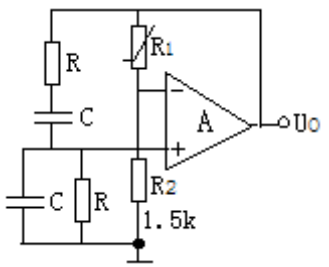
解：　A.根据相位平衡条件，可知，相移 $\varphi=180°$，是负反馈，故无振荡。

B. 根据相位平衡条件，可知，相移 $\varphi=360°$，是正反馈，可能振荡。

C. 根据相位平衡条件，可知，相移 $\varphi=0°$，是正反馈，可能振荡。

D. 根据相位平衡条件，可知，相移 $\varphi=-180°$，是负反馈，故无振荡。

6-4. RC 文氏桥正弦波振荡器如图：



(1).写出同相输入端和输出端的电压传输系数

(2).试分析这一电路中的正负反馈网络由哪些元件组成

(3).写出输出端到同相输入端的反馈系数

(4).写出振荡器振荡频率的表达式

(5).根据起振条件，试求 R_1 的值

(6).为了稳定振幅，又使输出波形不失真，对反馈电阻 R_1 有什么要求？

解：（1） $\dot{A}_V=\dfrac{\dot{U}_O}{U_+}=1+\dfrac{R_1}{R_2}$

（2）正反馈由 RC 文氏电桥组成；负反馈由热敏电阻 R_1 和电阻 R_2 组成。

（3） $F=\dfrac{U_+}{U_0}=\dfrac{1}{Z+Z(\omega RC-\dfrac{1}{\omega RC})}$ 当 $\omega=\dfrac{1}{RC}$ 时 $\dot{F}=\dfrac{1}{3}$

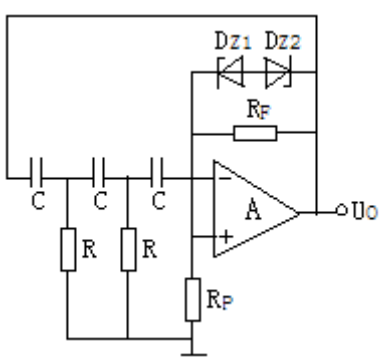
（4）当 $\omega_0=\omega=\dfrac{1}{RC}$， $f_0=\dfrac{1}{2\pi RC}$。

（5）起振幅值条件 $\left|\dot{A}\dot{F}\right|\geq 1$。

即 $(1+\dfrac{R_1}{R_2})\bullet\dfrac{1}{3}\geq 1$， $\therefore R_1\geq 2R_2=2\times 1.5k\Omega=3k\Omega$。

（6）R_1 应是具有负温度系数的热敏电阻，当流过 R_1 的电流减小，其阻值增大，当流过 R_1 的电流增大，其阻值减小，这样才能起到稳幅作用，输出波形基本不失真。

6-5.图示 RC 相移式正弦振荡器电路，该电路的反馈网络稳幅环节分别由哪些元件组成，试分析这一电路产生正弦振荡的原理。

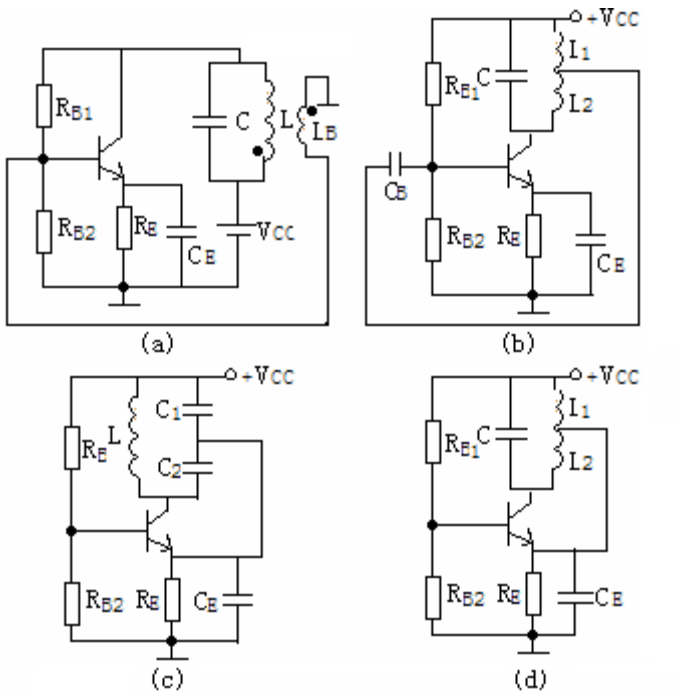


解：（1）三只电容器 C 和两个电阻 R 组成三级 RC 相移反馈网络，两只稳压二极管 D_{Z_1}、D_{Z_2} 组成稳幅环节，输出电压幅度为 $\pm(U_Z+0.7)\,\mathrm{V}$。

（2）三节 RC 网络在某一频率下产生 $180°$ 相移。而运算放大器输出经三节 RC

相移电路反馈输入端，而运放相移也是 $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$，即 $\varphi_A+\varphi_F=360°$，满足振荡相位平衡条件，只要放大器有足够的放大倍数，电路就能振荡输出振荡正弦波形。　　振荡频率 $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$

6-6.LC 正弦波振荡电路如图示，试判断它们是否可能振荡，若不能试修改电路。



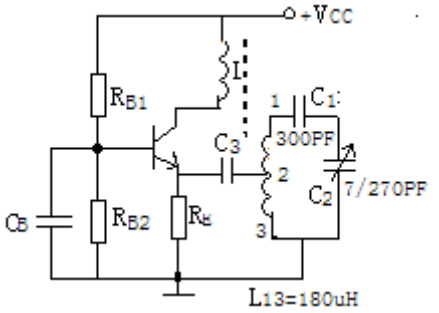
答：（A）该电路不能振荡。电路是变压器反馈式 LC 振荡器，反馈网络 $C_{\max}=\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}=\dfrac{300\times270}{300+270}=142PF$ 的同名端错了不应画在下端，才能使 $\varphi_F=\pi$，满足 $\varphi_A+\varphi_F=2n\pi$ 相位平衡条件，另外，反馈网络缺少一个隔离电容，使 V_B 电位经 L_B 接地，晶体管截止。基极与 L_B 之间应串接一个隔离电容 C。

（B）反馈信号 U_{L_1} 反馈到基极回路形成负反馈，故不振荡。应改点为电感三点式振荡器。即将 C_B 从基极断开，改接于发射极。

（C）旁路电容 C_E 将反馈信号短路到地了，应去掉 C_E 即可。

（D） L_1 将 V_{CC} 直接接入发射极，故晶体管截止， 不能振荡。可在 L_1 、 L_2 间抽头线中串接一个隔离电容即可。

6-7.LC 正弦波振荡器如图，试分别算出回路电容和频率的变化范围。

解： 当 

C_1 为 7PF 时 C_1、C_2 串联电容最小：

$$f_{\min}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{13}C_{\max}}}=\frac{1}{6.28\times\sqrt{180\times10^{-6}\times142\times10^{-12}}}=1MHz$$

此时振荡频率最大：

$$f_{\max}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{13}C_{\min}}}=\frac{1}{6.28\sqrt{180\times10^{-6}}\times6.8\times10^{-12}}=4.55\text{MHz}$$

当 C_1 为 270PF 时，串联电容值最大：

$$C_{\max}=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}=\frac{300\times270}{300+270}=142PF\text{。}$$

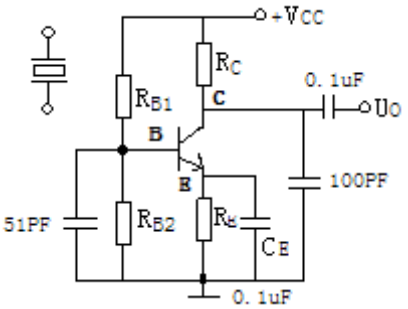
振荡频率为最小值：

$$f_{\min}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{13}C_{\max}}}=\frac{1}{6.28\times\sqrt{180\times10^{-6}\times142\times10^{-12}}}=1MHz$$

所以 LC 回路总电容的变化范围为 6.8PF----142PF

电路振荡频率范围：4.55MHz---1MHz。

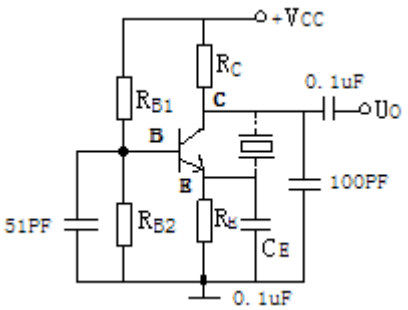
6-8.电路如图示



（1）应将石英晶体接在哪两点它才可能产生正弦波振荡。

（2）接好石英晶体后，试画出交流通路，并分析其振荡频率。

解：（1）石英晶体接在三极管 B、C 极之间电路才有可能产生振荡。如图：



（2）该电路是并联型石英晶体振荡电路，晶体等效为电感，它与 $F=\dfrac{\dot{U}_i}{\dot{U}_0}=\dfrac{(-\dot{\partial}\dot{x}_1)\dot{I}}{\dot{\partial}\dot{x}_2\dot{I}}=-\dfrac{\dot{x}_1}{x_2}$、$C_2$ 组成电容三点式振荡电路，等效电路如上图所示。

$x_1=\dfrac{1}{\omega C_2}$　　$x_2=\dfrac{1}{\omega C_2}$　　$x_3=\omega L$　　反馈系数

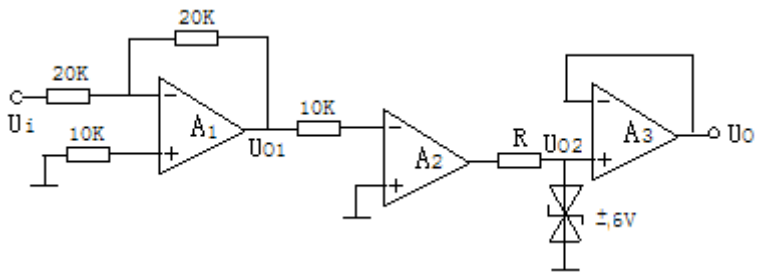
$$F=\frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_0}=\frac{(-\dot{\partial}\dot{x}_1)\dot{I}}{\dot{\partial}\dot{x}_2\dot{I}}=-\frac{\dot{x}_1}{x_2}$$

负号表示 $\varphi_F=\pi$，而 $\varphi_A=\pi$　　$\therefore\varphi=\varphi_A+\varphi_F=2\pi$

满足相位平衡条件。同时也满足“射同基反”原则。

振荡频率　$f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$，　其中 $C=\dfrac{C_1\bullet C_2}{C_1+C_2}$

6-9.图示电路，设集成运放 $A_1A_2A_3$ 均为理想运放。稳压管正向导通电压可略。



（1） $A_1A_2A_3$ 各组成什么应用电路。

（2）若输入信号 $U_i=5\sin\omega t$V，试分别给出相应 $U_{01}U_{02}U_0$ 波形。

（3）试简述 $A_1A_2A_3$ 各工作在线还是非线性质？

解 1.(1) A_1 为反相比例运算放大器

$$U_{01}=-\frac{R_f}{R_1}U_i=-U_i>0$$

U_{02}=-6V

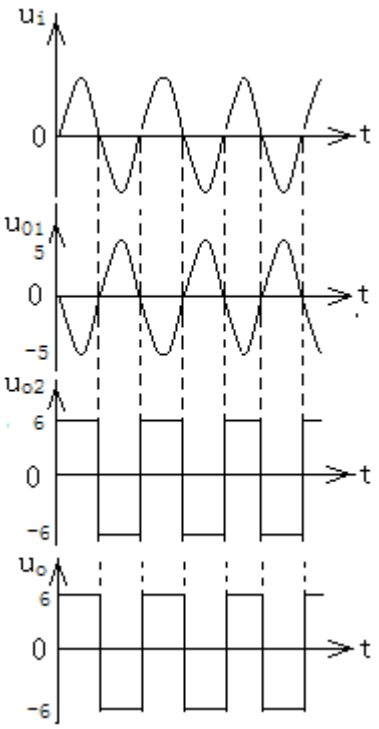
（2） A_2 为过零电压比较器电路。

$U_{02}=\pm 6V$

当 U_{01}<0　　U_{02}=6V

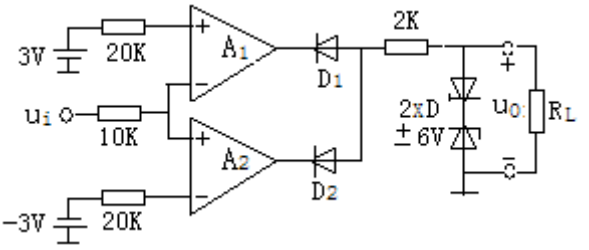
(3) A_3 为电压跟随器电路。 $U_0=\pm 6V$

2. 输入信号 $U_i=5\sin\omega t$V，试分别给出相应 $U_{01}U_{02}U_0$ 波形



3. A_1 A_3均工作在线性质，A_2工作在非线性质。

6-10.试求图示电路比较器阈值，并给出它的传输特性。



解：该双限比较器有两个阈值电压，分别为+3V，-3V。

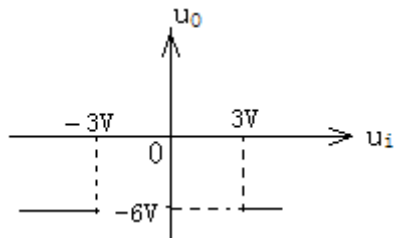
当　$U_i > +3V, U_o = U_{o-} + U_{D1}$ 为低电平-6V。

$U_i < +3V, U_o = U_{o+}$，D1 反偏截止，U_o=0V

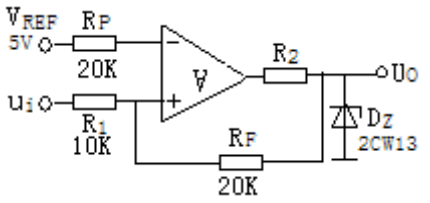
$U_i > -3V, U_o = U_{o+}$　　D2 反偏截止　U_o=0V

$U_i < -3V, U_o = U_{o-} + U_{D2}$

为低电平　U_o=-6V



6-12.同相输入滞回比较器如图：求：



（1）推导滞回特性的三个参数 V_1,V_2 和 V_H.

（2）给出传输特性，并注上数值。

（3）若输入电压为 $U_i = 8\sin\ \omega t V$,试给出 U_0 波形。

解：

（1）比较器的临界条件　U+= U-,

$$U+ = \frac{R_1}{R_1+R_f}U_0 + \frac{R_f}{R_1+R_f}U_i$$

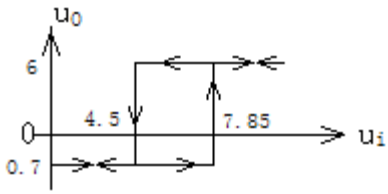
当 $U_\perp$ <U+ 时，U_0 为 $-U_0 = -0.7V$。

$U_\perp$= U+，　U0 为 Uz=6V

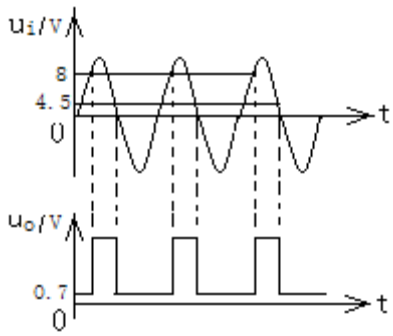
而 U-=5V,解：$V1 = \pm U_z \quad V_2 = (U_+ - \frac{R_1}{R_1+R_2}U_{0+})\frac{R_1+R_f}{R_f} = 4.5(V)$

$\therefore U_H = (V_1 - V_2) = 3.35V$

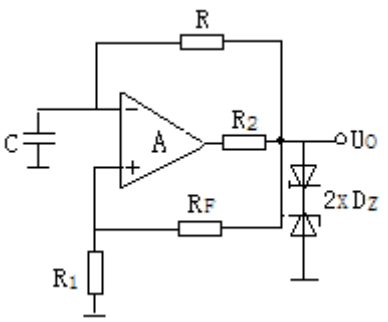
(2) 传输特性



（3）$U_i = 8\sin\ \omega t V$　　U_0 波形



6-14.方波发生器如图示，设 $R_1 = R_F = 5k\Omega$，要求 f=5kHz,Vm=16V



（1）选择稳压二极管

（2）计算电路中元件

（3）R 和 C 的值除受 5 的限制外，还受哪些因素的制约

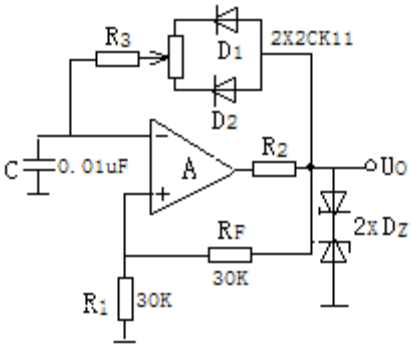
解（1）输出方波电压幅度为 $\pm U_Z$，选择稳压管型号为 2cw16D, U_Z =8V,忽略稳压管正向导通压降，有 $U_m = 2U_z = 16V$

（2）电路的频率 $f = \dfrac{1}{2RC\ln(1+\dfrac{2R_1}{R_F})}$，取 R=5k Ω,则

$$c = \frac{1}{2fR\ln(1+\frac{2R_1}{R_F})} = \frac{1}{2\times 5\times 10^3\times 5\times 10^3\times \ln(1+2)} = 0.0182(\mu F)$$

(3) R 和 C 的值除受频率 f 的限制外，还要受到组成正反馈 R1,RF 的限制,在 f 固定的情况下，$\dfrac{R_1}{R_F}$ 值大，C 和 R 取值就小。

6-15.图示一矩形波发生器，这个电路在调整占空比时其频率保持不变，要求 f=1kHz,Vm=20V,占空比 $\dfrac{T_1}{T}$ 可从 10%调到 90%。试选择稳压二极管，并计算 R3,Rw 的阻值。



解（1）由于要求输出电压值为 20V，则选择稳压值为 Uz=20V 的稳压二极管。

（2）计算 R3,R_w。

1）.运放同相输入端电压 $U_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_F}(\pm U_Z) = \frac{30K}{30K + 30K} \times (\pm 20) = \pm 10V$。

当 U_0=+20V 时，D1 导通，D2 截止，电容 C 被充电，电位器 Rp 滑到最上端，$\tau_{充}$ 为最小，即 $\tau_{充}$=R_3C，此时占空比为 $\frac{T_1}{T}$=10%，T_1=0.1T

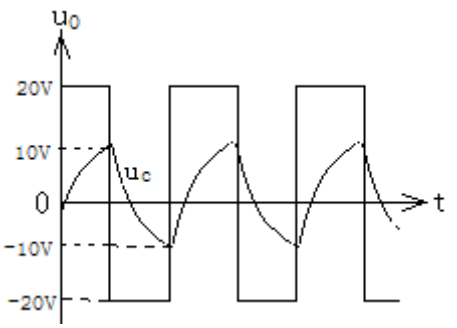
利用三要素法写出电容 C 充电过程的表达式

$$U_C(O+) = -10V, U_C(\infty) = 20V, \tau_{充} = R_3 \bullet C$$

则：$U_C(t) = U_C(\infty) - [U_C(O+) - U_C(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau_{充}}t} = 20 - 30e^{-\frac{1}{R_3 C}t}$

当 Uc 上升至+10V，U+=U-，电路翻转，输出 Uo=-20V.电容准备放电。

如图示



由题意，此时，t=T_1=0.1　　T= $\frac{0.1}{f}$

则　　$10 = 20 - 30e^{-\frac{1}{R_3 C}t} = \frac{1}{3}$，两边取对数整理可得：

$$R_3 = \frac{1}{10fC\ln 3} = \frac{1}{10 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} \times 1.0986} = 9.1K\Omega$$

2）. 当 Rp 滑到最下端，充电时间常数为最大 $\tau_{充} = (R_3 + R_\omega)C$，此时 $\frac{T_1}{T}$=90%，

T_1=0.9T= $\frac{0.9}{f}$

同理，利用三要素法写出 C 放电过程的表达式（放电时 D_1 截心，D_2 导通）

$$U_C(0+)=-10V, U_C(\infty)=-20V, \tau_{较}=(R_3+R_\omega)C$$

则　　$U_C(t)=U_C(\infty)+[U_C(0+)-U_C(\infty)]e^{-\frac{1}{\tau_2}t}=-20+30e^{-\frac{1}{(R_3+R\omega)C}t}$

当 Uc 下降至-10V 时，U+=U-电路翻转输出 Uo=+20V,电容 C 准备充电，见上图，根据题意

此时 t=T_1=0.9T=$\frac{0.9}{f}$,则

-10=-20+$30e^{-\frac{1}{(R_3+R\omega)C}t}$，即 $e^{-\frac{1}{(R_3+R\omega)C}}=\frac{1}{3}$，两边取对数整理可得，

$$R_\omega=\frac{0.9}{fC\ln 3}-R_3=\frac{0.9}{10\times 0.01\times 10\times 1.0986}-9.1K\Omega=72.8K\Omega$$

可见，选取标准阻值为 75 $K\Omega$的电位器即可。

第 7 章 功率电路

7.1.知识点归纳

本章介绍了功率放大电路和直流稳压电源的组成及工作原理。

1.功率放大器电路是在电源确定的情况下，以输出尽可能大的不失真信号功率和具有尽可能高的转换效率为组成原则。功放管工作在极限应用状态。有变压器耦合乙类推挽电路、OTL、OCL、BTL 等功率放大电路。

2.采用图解法分析功放电路，OTL 为直接耦合功放电路，为消除交越失真，静态时应使功放管微导通，故 OTL 电路常工作在甲乙类状态。

3.直流稳压电源有整流电路、滤波电路和稳压电路组成。

（1）整流电路有半波和全波两种，常用单相桥式整流电路。

（2）滤波电路通常有电容滤波、电杆滤波和复式滤波，负载电流较大时，应采用电杆滤波电路，对滤波效果要求较高时，常采用复式滤波电路。

（3）稳压电路有二极管并联稳压，调整管串联稳压。在串联型线性稳压电路由调整管、基准电压、输出电压取样电路和比较烦放大电路组成。开关型稳压电路的调整管工作在开关状态因而功率较小，电路效率高，但输出文波电压较大，适应于电压调节范围小，负载对输出纹波要求不高的场合。

（4）在集成稳压器和分立元件稳压电路中，还常包含过流、过压和过热等保护电路。

学完本章后一般应达到下列要求：

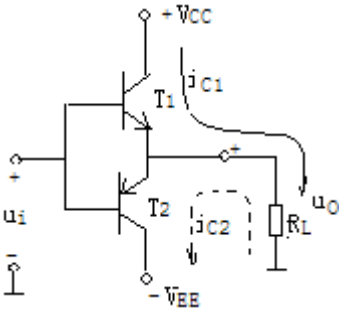
1.掌握下列概念：晶体管甲类、乙类、甲乙类工作状态，最大输出功率、转换效率、整流、滤波、稳压。

2.正确理解功率放大电路组成原则，掌握 OCL 的工作原理，正确估算功率放大电路的最大输出功率和效率，合理选择功放管。

3.掌握直流稳压电源的工作原理，能够估算电路的基本参数。

7.2　习题与思考题详解

7-1 乙类互补功率放大器如图所示。设 $V_{CC}=|V_{EE}|$=9V，$R_L=8\Omega$ 晶体管饱和压降 $V_{CE(sat)}=1V$ 输交流信号足够大，使集电极电流电压的动态范围充分利用。试计算 P_{om}，ηm　P_T



解：（1）最大输出功率：$P_{om}=\frac{1}{2}\frac{(V_{CC}-V_{CE(sat)})^2}{R_L}=\frac{1}{2}\frac{(9-1)^2}{8}=4(W)$

电源提供的最大功率：$P_{CC}=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}v_{cc}I_{cm}\sin\omega td(\omega t)$

$$=\frac{1}{\pi}v_{cc}I_{cm}\left[-\cos(\omega t)\right]_o^{\pi}$$

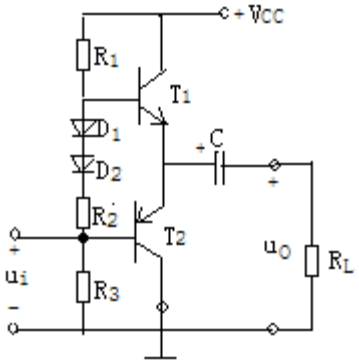
$$=\frac{2}{\pi}v_{CC}\frac{v_{CC}-v_{CE(sat)}}{R_L}$$

$$=\frac{2}{\pi}\times 9\times\frac{9-1}{8}\approx 5.73W$$

（2）$\eta_m=\frac{P_{OM}}{P_{CC}}=\frac{4}{5.73}=69.8\%$

（3）管耗 $P_T=P_{CC}-P_{OM}=5.73-4=1.73W$

7-2 甲乙类对称功率放大器如图所示，设 $R_L=8\Omega,V_{CC}=12V$，晶体管饱和压降 $V_{CE(sat)}\approx 1V$ 电容 C 的容量足够大，并假定工作点较低，计算电路参数时可视为乙类工作状态，试计算 P_{om}　P_T　η_m



解：这是 OTL 功放电路，工作时电容 C 两端被充电 $\frac{1}{2}V_{CC}$ 电压值，两只晶体管的工作电压均为 $\frac{1}{2}V_{CC}$

最大输出功率：

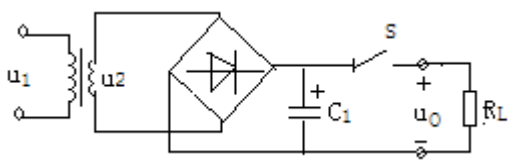
$$P_{OM}=\frac{1}{2}\frac{(\frac{1}{2}V_{CC}-V_{CE(sat)})^2}{R_L}=\frac{1}{2}\times\frac{(6-1)^2}{8}=1.56(W)$$

电源提供功率 $P_{CC}=\frac{2}{\pi}\frac{1}{2}V_{CC}\frac{\frac{1}{2}V_{CC}-V_{CE(sat)}}{R_L}=\frac{12}{\pi}\times\frac{6-1}{8}=2.39(W)$

管耗 $P_T=P_{CC}-P_{OM}=2.39-1.56=0.83(W)$

最大效率 $\eta_m=\frac{P_{OM}}{P_{CC}}=\frac{1.56}{2.39}=65.3\%$

7-3 单相桥式整流电流滤波电路如图示，变压器输入电流电压为 220V 50HZ ，要求输出直流电压 $V_0=45V$ ，直流电流 $I_0=200mA$ 试选择电路元件。



解：（1）选择二极管，对于桥式全波整流，流过二极管的平均电流是负载电流的 $\frac{1}{2}$，

即 $I_D=\frac{1}{2}I_0=\frac{1}{2}\times200mA=100mA$ 二极管承受的最大反向电流 $V_{DRM}=\sqrt{2}V_2$

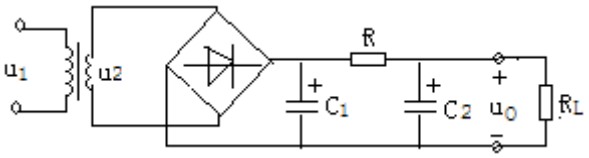
因为单相全波整流电路 $V_0=1.2V_2$ 所以 $V_2=\frac{V_0}{1.2}=\frac{45}{1.2}=3.75$ V 所以 $V_{DRM}=\sqrt{2}V_2=1.414\times37.5=53.025(V)$ 可见：选择二极管型号为 2CZ82C（$I_{DM}=100mA\geq I_D, V_{RWH}=100V>V_{DRM}$）

（2）选用滤波电容：一般要求 $R_{LC} \geq (3\sim 5)\frac{T}{2}$ 则 $R_{LC} = \frac{5T}{2} = \frac{5}{2f}$ ，

$$R_L = \frac{V_0}{I_0} = \frac{45V}{200mA} = 225(\Omega), C = \frac{5}{2R_W} = \frac{5}{2\times 225\times 50} = 222\mu V$$

耐压 $> \sqrt{2}V_2 = 53.025(V)$ 可见：选用耐压为 63V，250μF 的电解电容器。

7-4 桥式整流 π 型滤波电路如图，要求 $V_0 = 6V$， $I_0 = 50mA$， $f = 50HZ$



（1）设允许降在 R 的直流电压为 2V，试选择整流二极管计算 C_1， C_2,R 及 V_1， I_2。

（2）按以确定的电路参数，求当输出端开路（ $R_2 = \infty$时）， V_0将升至多高。

解（1）选择整流二极管 $I_D = \frac{1}{2}I_0 = \frac{1}{2}\times 50mA = 25mA$ 取 V_0 =1.2 V_2，所以

$$V_2 = \frac{V_0}{1.2} = \frac{6V}{1.2}5V$$

每个管子所承受的反向峰值电压　　$V_{ORM} = \sqrt{2}V_2 = \sqrt{2}\times 5 = 7.1V$

所以可选择 2CZ83， $I_D = 300mA; V_{ORM} = 25V$

（2）计算电阻 R：　$R = \frac{2V}{I_0} = \frac{2}{50mA} = 40\Omega$

（3）计算变压器次级绕组电流 I_2一般取 $I_2 = 2I_0 = 2\times 50mA = 100mA$

（4）计算 C_1， C_2 因为估算滤波电容值其中 $R_L C \geq \frac{(3\sim 5)T}{2}$

$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02(S)$，

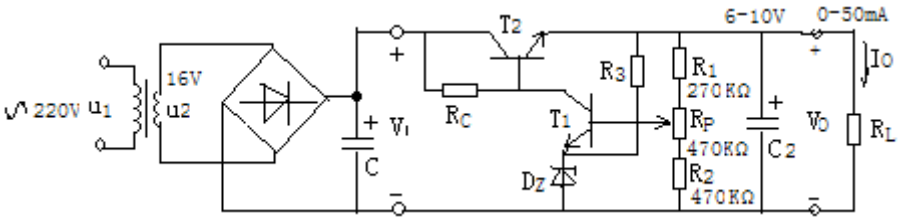
$C_1 = C_2 = \frac{3\sim 5}{2\times 120}\times 0.02 = 250\mu F \sim 417\mu F$ ，

$R_L = \frac{V_0}{I_0} = \frac{6V}{50mA} = 120\Omega$

电容的耐压应大于管子的反向峰值电压 7.1V

所以取 $300\mu F/16V$ 电解电容器即可。

7-5 串联反输式稳压电路如图，设晶体管　$V_{BE}=0.7V$



（1）求输出电压的调节范围（计算 I_{B1} 时可忽略）

（2）当电位器调至中点时，估算 $V_i, V_0, V_{B1}, V_{C1}, V_{E1}$ 的值

（3）当电网电压升高时，试说明上列各点电位的变化趋势（↑↓），并说明输出电压稳定的理由。

（4）满载时（$I_{o\max}=170mA$），V_2（有效值）=16V，电网电压波动±10% 求调整管 T_2 的最大管耗。

解：（1）由题示可设 $V_0=(R_1+R_P+R_2)\dfrac{D_Z+V_{BE}}{R_{PF}+R_2}$

当 R_P 滑到最下端时有 $V_{o\max}=(R_1+R_P+R_2)\dfrac{D_Z+V_{BE}}{R_2}$

$$=(270+470+470)\frac{6+0.7}{470}=17.25(V)$$

当 R_P 滑到最上端时有 $V_{o\min}=(R_1+R_P+R_2)\dfrac{D_Z+V_{BE}}{R_P+R_2}$

$$=(270+470+470)\frac{6+0.7}{470+470}=8.624(V)$$

所以输出电压的调节范围为　$8.624V\le V_0\le 17.25V$

(2) $V_0=(R_1+R_P+R_2)\times\dfrac{D_Z+V_{BE}}{R_{PF}+R_2}=1210\times\dfrac{6.7}{\dfrac{470}{2}+470}=11.5V$

$V_I=1.2V_2=1.2\times16=19.2V$

$V_{B1}=V_Z+V_{BE}=6+0.7=6.7V$

$V_{E1}=V_Z=6V$

$V_{C1}=V_{BE}+V_0=0.7+11.5=12.2V$

（3）

$$\ddot{V}_1\uparrow\rightarrow\ddot{V}_2\uparrow\rightarrow V_I\uparrow\rightarrow V_0\uparrow\rightarrow V_{B1}\uparrow\rightarrow I_{B1}\uparrow\rightarrow I_{C1}\uparrow\rightarrow V_{RC}\uparrow$$

$$\downarrow$$

$$V_0\downarrow\leftarrow V_{CE2}\uparrow\leftarrow I_{B2}\downarrow\leftarrow V_{C1}(V_{B2})\downarrow$$

（4）满载时 $I_{0\max}=170mA, V_2=16V$，电网波动 10% ，求 T_2 管耗

$$P_{CM}=(V_{i\max}-V_{o\min})(I_{o\max}+I_1+I_3)$$

其中 I_1 是流过采样电路的电流，I_3 是流过限流电阻 R_3 电流

$$I_1=\frac{V_{o\min}}{R_1+R_P+R_2}=\frac{8.624}{270+470+470}=\frac{8.624}{1210}=8.26\times10^{-4}A$$

$$I_3=\frac{V_{o\min}-V_Z}{R_3}=\frac{8.624-0.7}{R_3}=\frac{7.924}{R_3}$$

$V_{i\max}=V_2\times(1+10\%)=16\times1.1=17.6V$

$P_{CM}=(V_{i\max}-V_{o\min})(I_{o\max}+I_1+I_2)$

$=(V_{i\max}-V_{o\min})I_{o\max}$

$=(17.6-8.624)\times170mA$

$=8.976V\times0.17A$

$=1.526(W)$

第 8 章　数字电路基础

8.1　知识点归纳

本章学习了数制和码制、逻辑函数及表示方法和化简方法、逻辑门电路。

1.数制：二进制、八进制、十进制、十六进制的标识及它们之间的相互转换，8421BCD 码对十进制数的编码。

2.逻辑函数有 4 种表示方法：即真值表、逻辑函数表达式，卡诺图和逻辑图。

真值表是逻辑函数的表格表示法，全面、直观反映了变量及函数的全部可能取值，具有唯一性。

逻辑函数表达式是逻辑函数的数学表示法，用与、或、非等逻辑运算，简洁、方便的表示出各种逻辑关系。应用逻辑代数进行运算和化简，逻辑函数表达式不是唯一的。

卡诺图是逻辑函数的图形表示法，它利用几何位置的相邻性形象的表示了组成逻辑函数各最小项之间在逻辑上的相邻性。，常用于逻辑函数的化简。

逻辑图是逻辑函数的一种逻辑符号表示法或称逻辑电路表示法，它能层次分明的表示复杂的实际电路的逻辑功能，常用于实际逻辑电路的设计。

逻辑函数的这 4 种方法是相通的，它们之间可以相互转换。，采用哪种表示方法，视具体情况而定。

3.逻辑函数化简通常有两种方法：逻辑代数化简法和卡诺图化简法

逻辑代数化简法（公式法）不受任何条件的限制，没有固定的步骤可循，化简不仅熟练的运用各种公式和定理，还需要一定的运算技巧和经验。

卡诺图化简法简单、直观，而且有一定的化简步骤可循。当逻辑变量超过 5 个时，将失去简单、直观的优点，将失去实用的实际意义。

4.基本逻辑门电路有与门、或门、非门以及由它们组成的与非门、或非门、与或非门、异或门等。既有分立元件构成的，也有集成电路构成的。

5.在介绍晶体三极管的开关特性及基本逻辑门电路的基础上，讨论了 TTL 和 CMOS 门电路的逻辑功能和电气特性，特别是它的外特性。描述门电路性能的参数，对于所有的数字器件有普遍的意义。

学完本章后一般应达到下列要求：

1.掌握进制和码制构成原理，能进行进制的转换和编码。

2.掌握逻辑函数的 4 种表示方法及其它们之间的转换。

3.学会逻辑代数化简法和卡诺图化简法化简逻辑函数。

4.掌握各种基本逻辑门的逻辑功能及逻辑符号。

5.熟悉 TTL 与非门电路、COMS 与非门电路的电路结构和工作原理。掌握其逻辑功能，了解其电气性能。

7.学会正确使用各种逻辑门电路和选择门电路。

8.2 习题与思考题详解

8.1 将下列二进制数转换为八进制数、十进制数和十六进制数

（1）　$(100101)_2$　　（2）　$(1011)_2$

（3）　$(1011.11)_2$　　（4）$(11010.011)_2$

解：　$(100101)_2=(45)_8=(37)_{10}=(25)_{16}$

$(1011)_2=(13)_8=(11)_{10}=(B)_{16}$

$(1011.11)_2=(13.6)_8=(11.75)_{10}=(B.C)_{16}$

$(11010.011)_2=(32.3)_8=(26.375)_{10}=(1A.6)_{16}$

8.2 将下列十进制数转换为二进制数、八进制数和十六进制数

（1）$(29)_{10}$　　（2）$(219)_{10}$

（3）$(0.65)_{10}$　　（4）$(17.84)_{10}$

解：$(29)_{10}=(11101)_2=(35)_8=(1D)_{16}$

$(219)_{10}=(11011011)_2=(333)_8=(DB)_{16}$

$(0.65)_{10}=(0.1010011)_2=(0.5146314)_8=(0.A66)_{16}$

$(17.84)_{10}=(10001.11010111)_2=(21.656057)_8=(11.D7)_{16}$

8.3列出逻辑函数 $Y=A\overline{B}+AB+BC$ 的真值表

解：

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

8.4 根据反演规则，求出下列函数的反函数。

（1）$Y=AB+\overline{C}D$

（2）$Y = AB(\overline{B}C + \overline{D})$

（3）$Y = (\overline{A}B + \overline{B}C + \overline{A}C)C\overline{D}$

（4）$Y=\overline{\overline{A}+B}+\overline{B+\overline{C}}+A\overline{C}$

（5）$Y = \overline{AB + BC}(A + B)$

解：（1）$\overline{Y} = (\overline{A} + \overline{B})(C + \overline{D})$

（2）$\overline{Y} = (\overline{A} + \overline{B}) + (B + \overline{C})D$

(3) $\overline{Y} = (A + \overline{B})(B + \overline{C})(A + \overline{C}) + (\overline{C} + D)$

(4）$\overline{Y} = \overline{A}\overline{B}\overline{BC}(\overline{A} + C)$

(4) $\overline{Y} = \overline{(\overline{A} + \overline{B})(\overline{B} + \overline{C})}\,\overline{A}\,\overline{B}$

8.5 试用真值表证明分配律

$$A + BC = (A + B)(A + C)$$

证：左边真值表

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

右边真值表

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

左边真值表同右边真值表相同，所以等式成立

8.6 用代数法化简下列各式：

（1）$Y = AB(A + \overline{B})$

（2）$Y = A + ABC + A\overline{B}\overline{C} + BC + \overline{B}C$

（3）$Y = ABC\overline{D} + ABD + BC\overline{D} + ABC + AD + B\overline{C}$

（4）$Y=\overline{\overline{\overline{A}+B}+\overline{A+\overline{B}}}+(\overline{\overline{\overline{A}B}+(\overline{AB})})$

解：（1）$Y = AB(A + \overline{B})$

=AAB +AB $\overline{B}$

=AB

（2）$Y = A + ABC + A\overline{B}\overline{C} + BC + \overline{B}C$

=A（1+ BC + $\overline{A}\overline{B}$）+C（B+ $\overline{B}$）

=A + C

（3）$Y = ABC\overline{D} + ABD + BC\overline{D} + ABC + AD + B\overline{C}$

$= ABC(1 + \overline{D}) + AD(1 + B) + BC\overline{D} + B\overline{C}$

$= ABC + AD + BC\overline{D} + B\overline{C}$

$= AD + BC\overline{D} + B\overline{C} + B\overline{D}$

$= AD + B\overline{D} + B\overline{C}$

（4）$Y=\overline{\overline{\overline{A}+B}+\overline{A+\overline{B}}}+(\overline{\overline{\overline{A}B}+(\overline{AB})})$

$= \overline{(\overline{A} + B)(A + \overline{\overline{B}})} + \overline{A}B(AB)$

$= \overline{\overline{A}A + AB + \overline{A}\overline{B} + B\overline{B}}$

$= \overline{AB + \overline{A}\overline{B}}$

$= \overline{A \odot B}$

$= A \oplus B$

8.7 将下列函数展成最小项表达式：

（1） $Y(A,B,C)=\overline{\overline{A}B+A\overline{C}}$

（2） $Y(A,B,C,D)=\overline{(A+B)(C\oplus D)}$

解：

（1）
$$\begin{aligned}Y(A,B,C)&=\overline{\overline{A}B+A\overline{C}}\\&=\overline{\overline{A}B}\ \overline{A\overline{C}}\\&=(A+\overline{B})(\overline{A}+C)\\&=\overline{A}\overline{B}+AC+\overline{B}C\\&=\overline{A}\overline{B}(C+\overline{C})+AC(B+\overline{B})+\overline{B}C(A+\overline{A})\\&=\overline{A}\overline{B}C+\overline{A}\overline{B}\overline{C}+ABC+A\overline{B}C\end{aligned}$$

（2）
$$\begin{aligned}Y(A,B,C,D)&=\overline{(A+B)(C\oplus D)}\\&=\overline{(A+B)}+\overline{(C\oplus D)}\\&=\overline{A}\overline{B}+CD+\overline{C}\overline{D}\\&=\overline{A}\overline{B}(C+\overline{C})(D+\overline{D})+CD(A+\overline{A})(B+\overline{B})+\overline{C}\overline{D}(A+\overline{A})(B+\overline{B})\\&=\overline{A}\overline{B}CD+\overline{A}\overline{B}C\overline{D}+\overline{A}\overline{B}\overline{C}D+\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}+AB\,CD+A\overline{B}\,CD\\&=\overline{A}\overline{B}CD+\overline{A}\overline{B}C\overline{D}+\overline{A}\overline{B}\overline{C}D+\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}+AB\,CD+A\overline{B}\,CD\\&\quad+\overline{A}B\,CD+AB\overline{C}\overline{D}+A\overline{B}\overline{C}\overline{D}+\overline{A}B\overline{C}\overline{D}\end{aligned}$$

8.8 用卡诺图化简下列各式

（1） $Y(A,B,C)=\overline{AC+\overline{A}BC+\overline{B}\overline{C}}+AB\overline{C}$

（2） $Y(A,B,C,D)=A\overline{B}CD+AB\overline{C}D+A\overline{B}+A\overline{D}+A\overline{B}C+\overline{A}BCD$

（3） $Y(A,B,C,D)=\sum(0,2,5,7,8,10,13,15)$

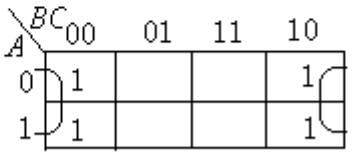
（4） $Y(A,B,C,D)=\sum(1,3,4,9,11,12,14)$

(5) $Y(A,B,C,D)=\sum(1,3,6,7,9)$ 且无关项 $\sum_d(10,11,12,13,14,15)$

（6） $Y(A,B,C,D)=\sum(0,2,6,7)$ 且无关项 $\sum_d(8,11,14,15)$

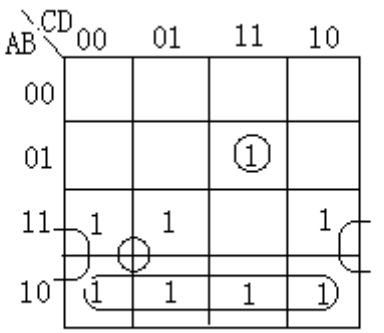
解：（1）$Y(A,B,C)=\overline{AC+\overline{A}BC+\overline{B}\overline{C}+AB\overline{C}}$

$$\begin{aligned}Y(A,B,C)&=\overline{AC+\overline{A}BC+\overline{B}\overline{C}+AB\overline{C}}\\&=\overline{AC}\ \ \overline{\overline{A}BC}\ \ \overline{\overline{B}\overline{C}}+AB\overline{C}\\&=(\overline{A}+\overline{C})(A+\overline{B}+\overline{C})(B+\overline{C})+AB\overline{C}\\&=(\overline{A}\overline{B}+\overline{A}\,\overline{C}+A\overline{C}+\overline{B}\overline{C}+\overline{C})(B+\overline{C})+AB\overline{C}\\&=\overline{A}\overline{B}\overline{C}+\overline{A}B\overline{C}+\overline{A}\,\overline{C}+AB\overline{C}+A\overline{C}+\overline{B}\overline{C}+B\overline{C}+\overline{C}\end{aligned}$$



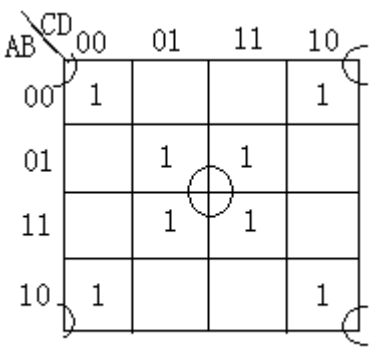
$Y(A,B,C)=\overline{C}$

（2 $Y(A,B,C,D)=A\overline{B}CD+AB\overline{C}D+A\overline{B}+A\overline{D}+A\overline{B}C+\overline{A}BCD$



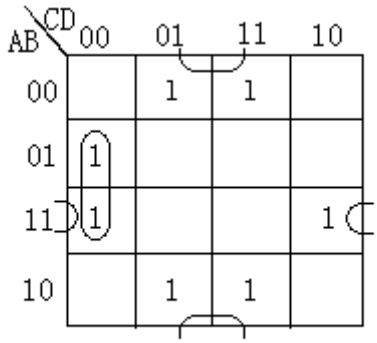
$Y(A,B,C,D)=A\overline{B}+A\overline{C}+A\overline{D}+\overline{A}BCD$

（3）$Y(A,B,C,D)=\sum(0,2,5,7,8,10,13,15)$



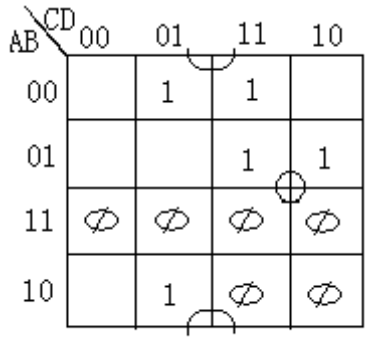
$Y(A,B,C,D)=BD+\overline{B}\overline{D}$

（4） $Y(A,B,C,D)=\sum(1,3,4,9,11,12,14)$



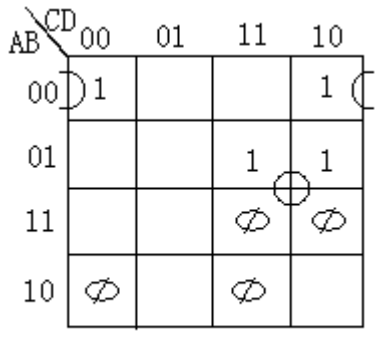
$Y(A,B,C,D)=\overline{B}D+A\overline{C}\overline{D}+AB\overline{D}$

(5) $Y(A,B,C,D)=\sum(1,3,6,7,9)$ 且无关项 $\sum_d(10,11,12,13,14,15)$



$Y(A,B,C,D)=BC+\overline{B}D$

（6） $Y(A,B,C,D)=\sum(0,2,6,7)$ 且无关项 $\sum_d(8,11,14,15)$



$Y(A,B,C,D)=BC+\overline{A}\overline{B}\overline{D}$

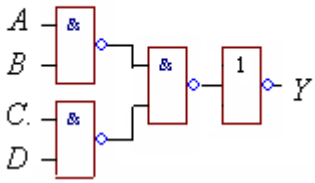
8.9 画出用与非门和反相器实现下列函数的逻辑图

（1）　$Y=\overline{AB+CD}$

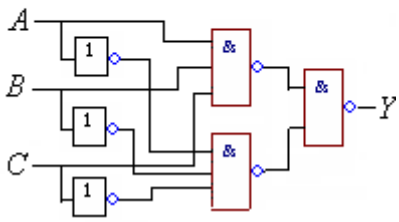
（2）$Y=(\overline{A}+B)(A+\overline{B})C$

解：（1）

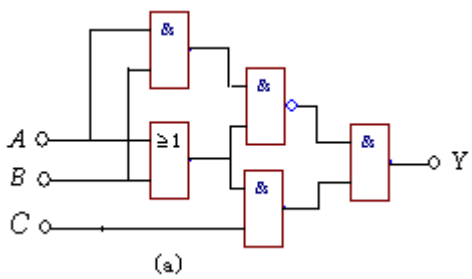
$$Y=\overline{AB+CD}=\overline{AB}\ \overline{CD}=\overline{\overline{AB}\ \overline{CD}}$$



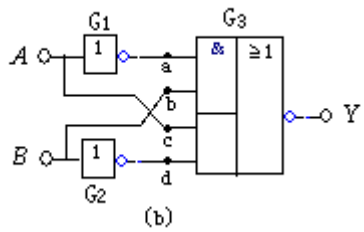
（2）
$$Y=(\overline{A}+B)(A+\overline{B})C$$
$$=ABC+\overline{A}\overline{B}C$$
$$=\overline{\overline{ABC}\ \overline{\overline{A}\overline{B}C}}$$



8. 10 写出图示逻辑电路的表达式



(a)



(b)

解：

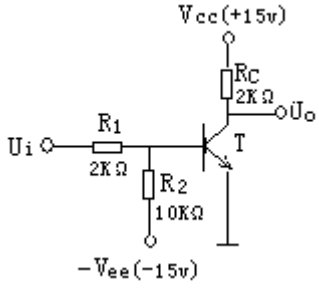
$$Y=\overline{\overline{AB\,(A+B)}\,(A+B)C}$$

$$Y=\overline{\overline{A}B+A\overline{B}}$$

8.11 由NPN型硅管组成的反相器（非门电路）如图，求：

（1），要求T可靠截止，u_i低电平的最大值是多少？

（2）要求T可靠饱和，u_i高电平的最小值是多少？



解：（1）T截止，。$I_B=0$，$U_{BE}=0V$，则$I_i = I_2 = E_B/R_2 =15/10 = 1.5$ mA

$U_i = I_iR_i = 1.5\times 2 = 3V$

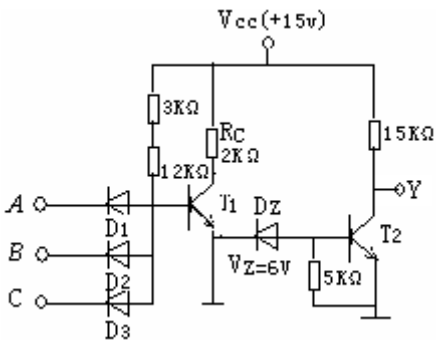
（2）T饱和，则$U_{CES} = 0.7V$,

$$I_{BS}=\frac{E_C}{\beta R_C}=\frac{15}{2\beta}mA,\quad I_2=\frac{U_B-(-E_B)}{R_2}=\frac{15V}{2K}=7.5mA$$

$$I_i = I_{BS}+I_2 =(\frac{15}{2\beta}+7.5)mA$$

$$U_i = I_iR_1+U_{BS} =(\frac{15}{2\beta}+7.5)mA\times 2K$$

8.12 图所示为高域值与非门电路（HTL），设$V_{OH}=13V, V_{OL}=1V, V_Z=6V$

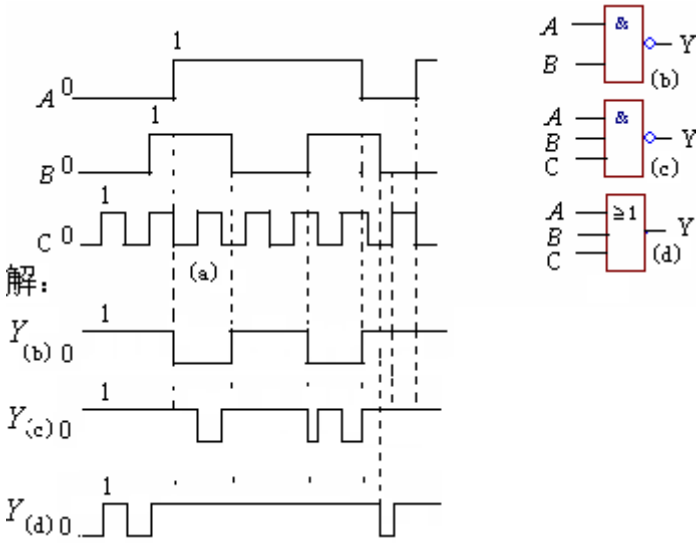


（1）说明它的工作原理。

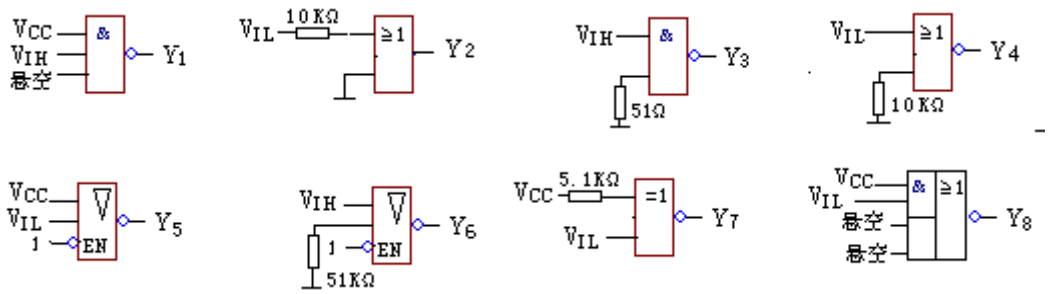
（2）求门的阈值电压V_{th}（即T_2开始导通时门的输入电压）

（3）设电压传输特性的转折区为0.5V，是大致画出电压传输特性，并估算干扰容限V_{NL}、V_{NH}。

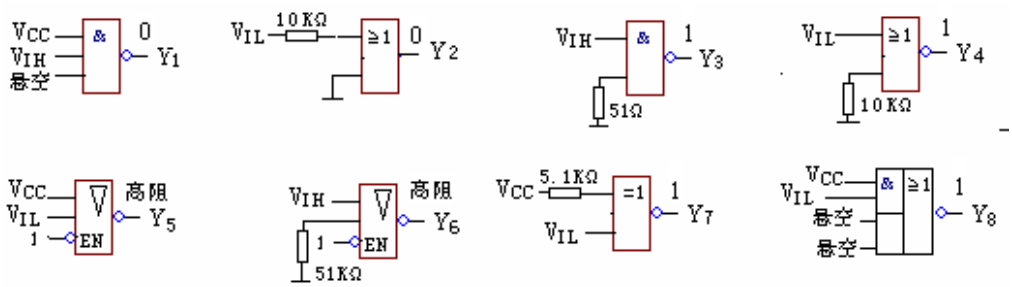
8.13 已知输入波形如图（a)所示，试画出（b）,(c),(d)各门的输出波形。



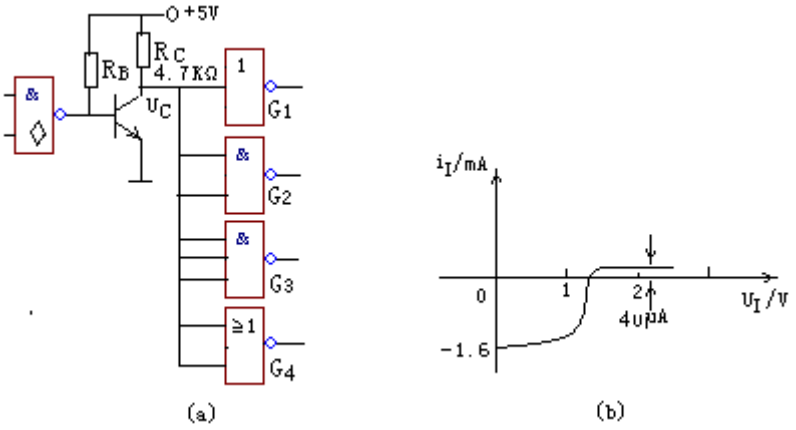
8.14 已知图示各门电路都是74LS系列TTL系列电路指出各门电路的输出是什么状态（高电平、低电平或高阻态）



解：对于TTL门电路，当R<0.7K时，$V_R < V_{OFF}$，构成低电平输入方式，这一电阻统称也称为关门电平，即为 R_{OFF}；当R〉1.5K时，$V_R > V_{ON}$，构成高电平输入方式，这一电阻通常也称开门电平，记为 R_{ON}。则有：



8.15 电路如图（a）所示，已知三极管导通时 $V_{BE}=0.7V$，饱和压降 $V_{CE(sat)}=0.3V$，三极管的电流放大系数 $h_{fe}=100$；OC门的最大允许灌电流 $I_{LM}=100mA$，输出低电平 $V_{OL}=0.3V$，OC门 G_1 截止时的漏电流可以忽略：G_2--G_5 均为74系列TTL电路，它们的输入特性如图(b)所示。

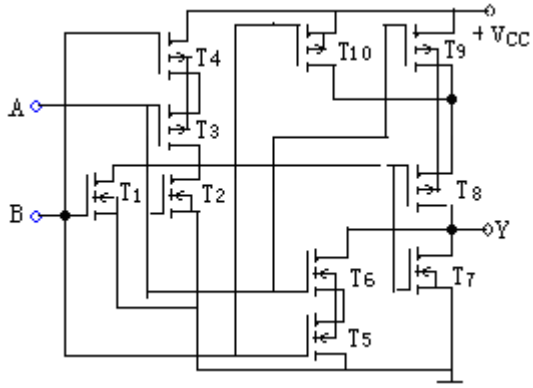


（1）在三极管集电极输出的高、低电压满足 $V_{OH}\geq 3.5V, V_{OL}\leq 0.3V$ 的条件下，R_B 的取值范围为多大？

（2）若 $R_B=20K\Omega$，则此电路能带几个TTL门。

（3）若将OC门换成普通TTL与非门，则电路会发生什么问题？

8.16 试分析图示电路的逻辑功能，写成输出函数的表达式。



解：T1，T2，T3，T4构成COS或非门，实现 $\overline{A+B}$，

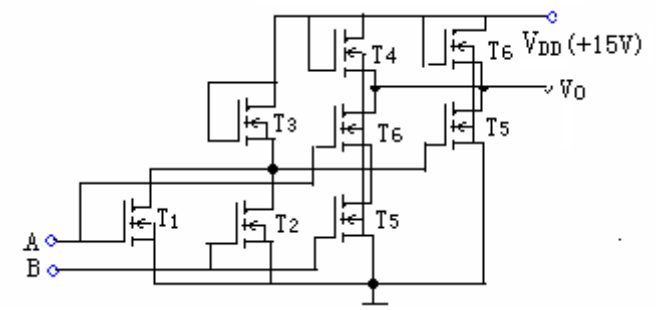
T8，T9构成COS反相器，实现 $\overline{\overline{A+B}}=A+B$，

T5，T6，T7，T10构成COS与非门，实现 $\overline{A\cdot B}$，

在输出端Y 实现线与，即 $(A+B)(\overline{A\cdot B})=A\overline{B}+\overline{A}B$

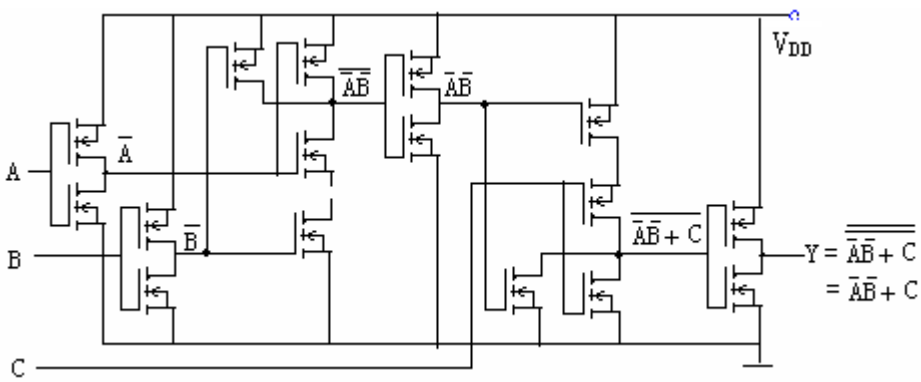
8.17 试画出实现异或逻辑功能的NMOS电路。，

解：



8.18 试画出逻辑关系为 $Y=\overline{A}\overline{B}+C$ 的COMS电路。

解



第 9 章 组合逻辑电路

9.1 知识点归纳

本章介绍了组合逻辑电路，讨论了组合逻辑电路的特点，分析方法和设计方法，并对常用的组合逻辑部件作了必要的介绍。

1.组合逻辑功能功的特点有两个方面，其一，逻辑功能上的特点，电路任意时刻的输出取决于该时刻的输入，而与食入信号作用前电路的历史状态无关。其二，在电路结构上的特点，由门电路组成，不含记忆功能。

2.组合逻辑电路种类繁多，功能各异。但分析方法和设计方法是相同的。

组合电路的一般分析步骤

（1）由给定逻辑图写出输出逻辑函数表达式。

（2）化简或变换各逻辑函数表达式。

（3）列出真值表。

（4）由真值表分析确定电路的逻辑功能。

组合逻辑电路的一般设计步骤

（1）分析实际问题，进行逻辑抽象，列出真值表。

（2）由真值表写出输出逻辑函数表达式。

（3）化简或变换输出函数逻辑表达式。

（4）由化简或变换后的输出逻辑函数表达式画出逻辑图。

3.数字电路中，比较常用的组合逻辑电路有：编码器、译码器、数据分配器、数据选择器、加法器、数值比较器等。

4.可编程逻辑器件是一种新型的、发展迅速的半导体数集成电路，谈永不只应用在组合逻辑电路中，其主要特点是可以通过编程方法设置其逻辑功能。各种 PLD 编程工作都需要在开发系统的支持下进行，在选择 PLD 的具体型号时必须同时考虑到实用的开发系统是否能支持这种型号的 PLD 编程工作。

学完本章后，应达到下列要求；

1.掌握组合逻辑电路在逻辑功能和电路结构上的特点。

2.掌握组合逻辑电路的分析方法和设计方法，能对实际的组合电路进行正确的分析和设计。

3.熟悉常用的组合逻辑部件，如编码器、译码器、数据分配器、数据选择器、加法器、数值比较器等。

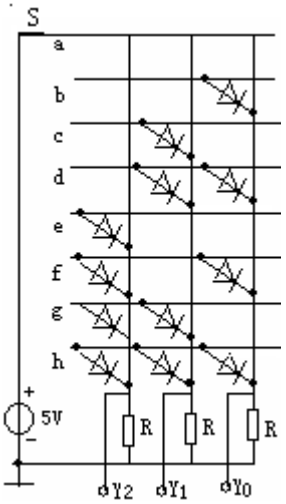
4.了解可编程逻辑器件的结构和使用设计方法。

9.2　习题与思考题详解

9.1 由二极管组成的编码器如图所示，它有八个输入端和三个输出端，

（1）试分析当每个输入端分别接高电平（5V）时相应的输出代码；

解：当一个输入端接高电平，联有二极管输出为高电平，其余为低电平，Y 线上联有节点的输入端之间为与逻辑，，输出代码见真值表所示：

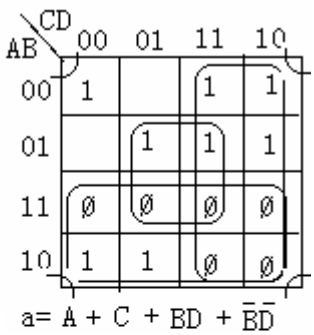


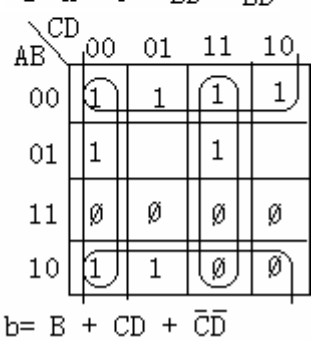
a	b	c	d	e	f	g	h	Y_2	Y_1	Y_0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

9.2 用最少的与非门构成 8421BCD 码七段码显示译码器时，若显示 6 时 a 段也亮，显示 9 时 d 段也亮，其他数字显示均不变化，试写出在这种要求下 8421BCD 码七段显示译码器的真值表；列出 a 段、b 段的最简逻辑表达式并指出对图的修改说明。

解：

ABCD	a	b	c	d	e	f	g	
0000	1	1	1	1	1	1	0	0～9
0001	0	1	1	0	0	0	0	
0010	1	1	0	1	1	0	1	
0011	1	1	1	1	0	0	1	
0100	0	1	1	0	0	1	1	
0101	1	0	1	1	0	1	1	
0110	1	0	1	1	1	1	1	
0111	1	1	1	0	0	0	0	
1000	1	1	1	1	1	1	1	
1001	1	1	1	1	0	1	1	
1010	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	禁用码
1011	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	
1100	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	
1101	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	
1110	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	
1111	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	





9.3 一个保险柜具有 A、B、C3 个控制按钮，要求当 B 和 C 同时按下时，锁才能被打开，而在其它情况下（A、B、C 均不按下情况除外）锁均打不开并能自动报警，试设计这个保险锁的控制逻辑电路。

解：设打开锁 F=1，报警 Y=1。否则 F、Y 全为 0，按钮按下为 1，否则为 0。

(1)列出真值表

A	B	C	F	Y
0	0	0	Ø	Ø
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

（2）卡诺图化简

F	BC 00	01	11	10
A 0	Ø	0	1	0
A 1	0	0	1	0

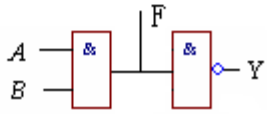
	BC 00	01	11	10
A 0	Ø	1	0	1
A 1	1	1	0	1

（3）写出逻辑函数表达式

$F = BC$

$Y = \overline{B} + \overline{C} = \overline{BC}$

（4）画出逻辑电路图



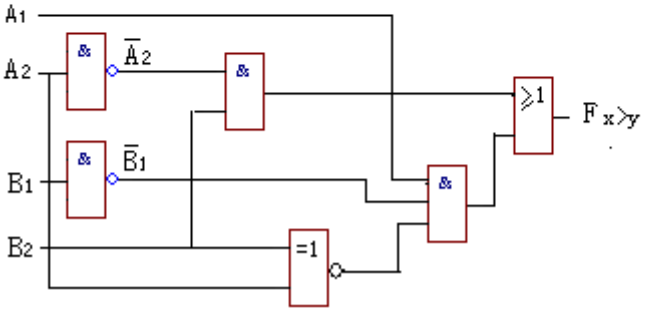
9.4 两个 2 位二进制 $x = A_2A_1, y = B_2B_1$,试设计出一个能判断出 $x \rangle y$ 的逻辑电路。

解：

A_2 B_2	A_1 B_1	$F_{x>y}$
$A_2 > B_2$	x	1
$A_2 = B_2$	$A_1 > B_1$	1

$F_{x>y} = (A_2 > B_2) + (A_2 = B_2)(A_1 > B_1)$

$= \overline{A}_2 B_2 + A_2 \odot B_2 A_1 \overline{B}_1$



9.5 试用与非门构成一个 4 位奇偶校验器，即当 4 位数中有奇数个 1 时，输出为 1，否则输出为 0。

解：

ABCD	F
0000	0
0001	1
0010	1
0011	0
0100	1
0101	0
0110	0
0111	1
1000	1
1001	0
1010	0
1011	1
1100	0
1101	1
1110	1
1111	0

AB \ CD	00	01	11	10
00		1		1
01	1		1	
11		1		1
10	1		1	

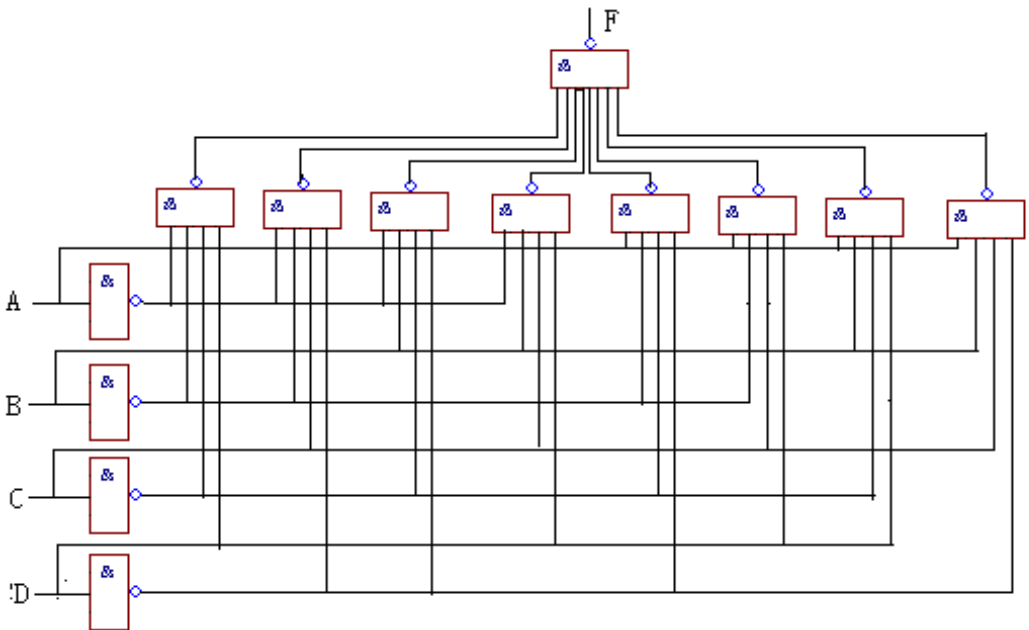
$$F = \bar{A}\bar{B}\bar{C}D + \bar{A}\bar{B}C\bar{D} + \bar{A}B\bar{C}\bar{D} + \bar{A}BCD + A\bar{B}\bar{C}\bar{D} + A\bar{B}CD + AB\bar{C}D + ABC\bar{D}$$

$$= \overline{\bar{A}\bar{B}\bar{C}D + \bar{A}\bar{B}C\bar{D} + \bar{A}B\bar{C}\bar{D} + \bar{A}BCD + A\bar{B}\bar{C}\bar{D} + A\bar{B}CD + AB\bar{C}D + ABC\bar{D}}$$

$$= \overline{\bar{A}\bar{B}\bar{C}D} \cdot \overline{\bar{A}\bar{B}C\bar{D}} \cdot \overline{\bar{A}B\bar{C}\bar{D}} \cdot \overline{\bar{A}BCD} \cdot \overline{A\bar{B}\bar{C}\bar{D}} \cdot \overline{A\bar{B}CD} \cdot \overline{AB\bar{C}D} \cdot \overline{ABC\bar{D}}$$

9.6 试设计一个 4 输入、4 输出的逻辑电路。当控制信号 C=0 时，输出状态分别与输入状态相同；C=1 时，输出状态分别与输入状态相反。

解：先列出一位输入、一位输出，在控制信号 C 的作用下的真值表



C	A_1	Y_1
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Y_1	A_1 0	1
C 0	0	1
1	1	0

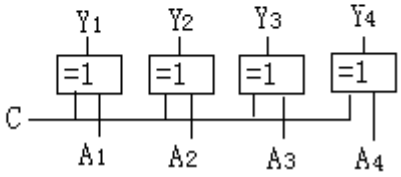
逻辑表达式：$Y_1 = \bar{C}A_1 + C\bar{A}_1 = C \oplus A_1$

同理有：$Y_2 = \bar{C}A_2 + C\bar{A}_2 = C \oplus A_2$

$Y_3 = \bar{C}A_3 + C\bar{A}_3 = C \oplus A_3$

$Y_4 = \bar{C}A_4 + C\bar{A}_4 = C \oplus A_4$

逻辑电路图：



9.7 试设计一个十六进制中 A，B，C，D，E，F 等 6 个字母的七段码字符显示译码器，字符的样图如图所示：



解：1.列出真值表

8421BCD码七段显示译码器真值表

输入				输出							显示
A	B	B	D	a	b	c	d	e	f	g	字形
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	2
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	3
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	5
0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	6
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	9
1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	A
1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	b
1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	C
1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	d
1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	E
1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	F

2 卡诺图化简，并列　　出表达

式.

a

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	1	1	1
01	0	1	1	1
11	1	0	1	1
10	1	1	0	1

$a=\bar{A}\bar{B}+A\bar{D}+\bar{B}C+\bar{A}D+\bar{B}\bar{D}$

b

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	1	1	1
01	1	0	1	0
11	0	1	0	0
10	1	1	0	1

$b=\bar{A}\bar{B}+\bar{B}\bar{D}+\bar{A}\bar{C}\bar{D}+\bar{A}CD+A\bar{C}D$

c

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	0	1	0
01	1	1	1	1
11	0	1	0	0
10	1	1	1	1

$c=\bar{A}B+A\bar{B}+\bar{A}\bar{C}\bar{D}+A\bar{C}D+\bar{A}CD$

d

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	0	1	1
01	0	0	0	1
11	1	1	0	1
10	1	1	1	1

$d=\bar{B}\bar{D}+C\bar{D}+\bar{B}C+A\bar{C}+A\bar{B}$

e

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	0	0	1
01	0	0	0	1
11	1	1	1	1
10	1	0	1	1

$e=\bar{B}\bar{D}+AB+C\bar{D}+AC$

f

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	0	0	0
01	1	1	0	1
11	1	1	1	1
10	1	1	1	1

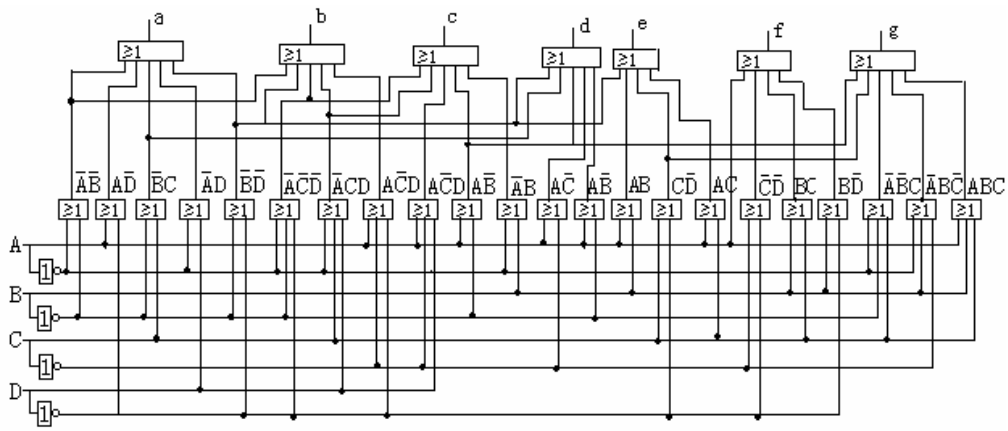
$f=A+\bar{C}\bar{D}+BC+B\bar{D}$

g

AB \ CD	00	01	11	10
00	0	0	1	1
01	1	1	0	1
11	0	0	1	1
10	1	1	1	1

$g=A\bar{B}+C\bar{D}+\bar{A}\bar{B}C+\bar{A}B\bar{C}+ABC$

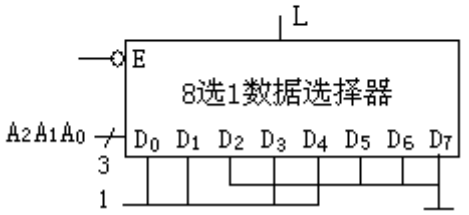
3.逻辑表达式



9.8 试用 8 选 1 数据选择器产生逻辑函数 $L=\overline{B}\overline{C}+\overline{A}C$。

解

$$L=\overline{B}\overline{C}+\overline{A}C$$
$$=A\overline{B}\overline{C}+\overline{A}\overline{B}\overline{C}+\overline{A}BC+\overline{A}\overline{B}C$$
$$=m_0+m_1+m_3+m_4$$



9.9 试用 4 选 1 数据选择器产生逻辑函数 $L=\overline{A}\overline{B}+\overline{A}C$

解：$L(A,B,C)=A\overline{B}\overline{C}+\overline{A}\overline{B}\overline{C}+\overline{A}BC+\overline{A}\overline{B}C$

用数据选择器实现逻辑函数可用代数法，也可用卡诺图法。用卡诺图法的四个步骤：

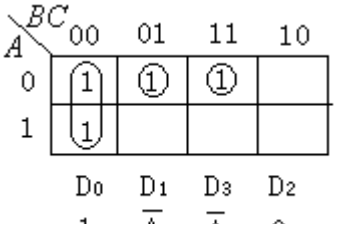
（1）将卡诺图画成与数据选择器相适应的形式。所使用的数据选择器有几个地址输入端，逻辑函数卡诺图的一边就应有几个变量，且将这几个变量作为数据选择器的地址输入变量。

（2）将要实现的函数填入卡诺图并化简。化简时不仅要圈最小项和任意项，而且还只能地址输入的变量方向圈，以保证地址输入变量不被化简掉。

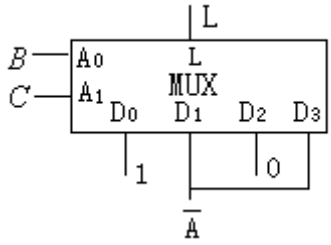
（3）读图时不要读地址输入变量，只需读其他变量的化简结果，这些结果就是地址输入变量所选择的数据输入 D 的值。

（4）根据地址输入变量和数据输入值，画出数据选择器实现的逻辑图。

本题的卡诺图为：



逻辑电路图为：



9.10 试用 8 选 1 数据选择器产生逻辑函数

$L = A \oplus B \oplus C$。

解：

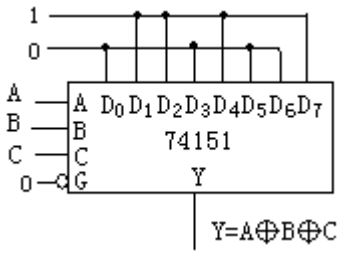
$$
\begin{aligned}
L &= A \oplus B \oplus C \\
&= (\overline{A}B + A\overline{B}) \oplus C \\
&= (A\overline{B} + \overline{A}B)\overline{C} + \overline{A\overline{B} + \overline{A}B}C \\
&= A\overline{B}\,\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + ((\overline{A} + B)(A + \overline{B}))C \\
&= A\overline{B}\,\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + ABC + \overline{A}\,\overline{B}C \\
&= 0\,\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C} + 1\overline{A}\,\overline{B}C + 1\,\overline{A}B\overline{C} + 0\overline{A}BC + 1A\overline{B}\,\overline{C} + 0A\overline{B}C + 0\,AB\overline{C} + 1ABC
\end{aligned}
$$

比较 8 选 1 数据选择器 74151 的输出函数有：

$D_0 = D_3 = D_5 = D_6 = 0$

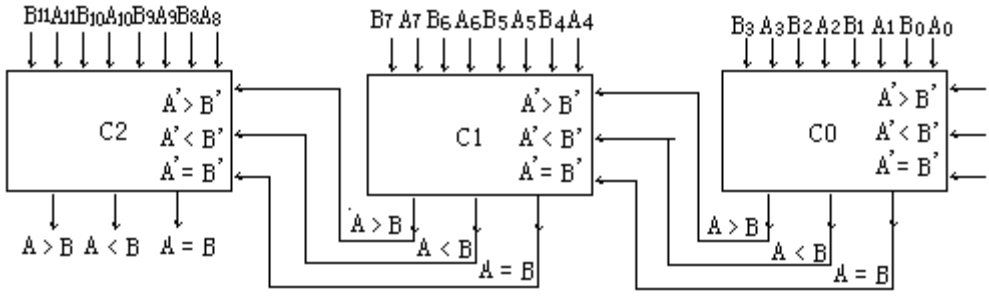
$D_1 = D_2 = D_4 = D_7 = 1$

实现电路如右图



9.11 画出用 3 片 4 位数值比较器组成 12 位数值比较器的连线图，并说明其工作原理。

解：



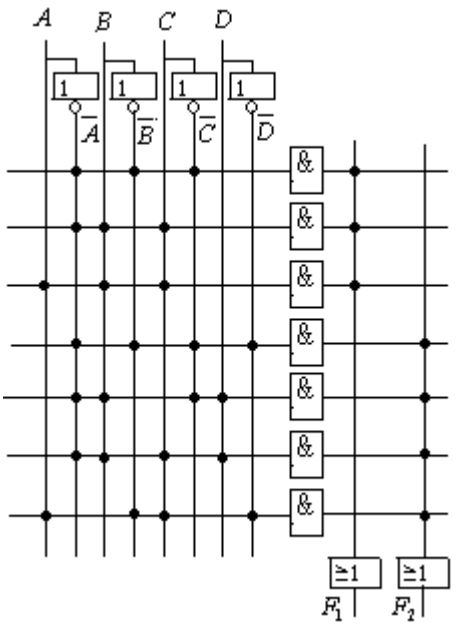
上图所示为3片4位数值比较器扩展为12位数值比较器的逻辑图，先从高4位（C2比较器）开始比较，若高4位A11—A8，B11—B8的比较结果相等，则C2的比较结果取决于C2的级联信号 $A' \rangle B', A' \langle B', A' = B'$，而这些级联信号又直接与C1的输出相连，因此比较结果就取决于低4位（C1比较器）A7—A4、B7---B4的比较，如果此时低4位也相等，即 $A' \rangle B', A' \langle B', A' = B'$ 则C2的比较结果取决于C2的级联信号

$A^{'}\rangle B^{'}, A^{'}\langle B^{'}, A^{'}=B^{'}$，而这些级联信号又直接与C0的输出相连，因此比较结果就取决于低4位（C0比较器）A3—A0、B3---B0的比较，如果此时低4位也相等，C0的级联信号 $A^{'}\rangle B^{'}, A^{'}\langle B^{'}, A^{'}=B^{'}$ 的状态为001，表示12位数值均相等。

9.12 画出逻辑函数 F_1 和 F_2 的 PLD 表示：

$$F_1=\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}+\overline{A}BC+ABC$$

解



9.13 试分别画出全加器和全减器的 FPLA 阵列图。

解：1.全加器

全加器真值表

A_i	B_i	C_{i-1}	S_i	C_i
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

逻辑函数表达式

$$S_i=\overline{A}_i\overline{B}_iC_{i-1}+\overline{A}_iB_i\overline{C}_{i-1}+A_i\overline{B}_i\overline{C}_{i-1}+\overline{A}_i\overline{B}_i\overline{C}_{i-1}$$

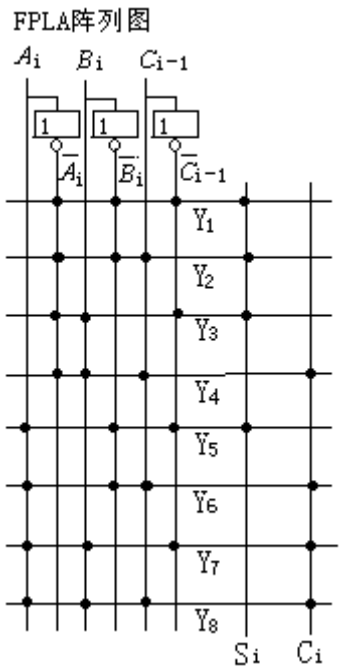
$$C_i=\overline{A}_iB_iC_{i-1}+A_i\overline{B}_iC_{i-1}+A_iB_i\overline{C}_{i-1}+A_iB_iC_{i-1}$$

$$Y_1=\overline{A}_i\overline{B}_i\overline{C}_{i-1}\qquad Y_2=\overline{A}_i\overline{B}_iC_{i-1}$$

$$Y_3=\overline{A}_iB_i\overline{C}_{i-1}\qquad Y_4=A_i\overline{B}_i\overline{C}_{i-1}$$

$$Y_5=\overline{A}_iB_iC_{i-1}\qquad Y_6=A_i\overline{B}_iC_{i-1}$$

$$Y_7=A_iB_i\overline{C}_{i-1}\qquad Y_8=A_iB_iC_{i-1}$$



2. 全减器（略）

第 10 章 时序逻辑电路

10.1　知识点归纳

本章主要介绍了时序逻辑电路的特点，逻辑功能的分析方法及常用的时序逻辑部件如寄存器、计数器等。

1.时序逻辑电路在逻辑功能上的特点是:带内陆在任意时刻的输出状态逼近取决于该时刻的输入状态，而且与输入信号作用前电路的历史状态有关；在电路结构上的特点是，必包含具有记忆功能的存储电路，而且存储电路的输出与输入信号一起决定时序电路的输出状态。通常，是虚电路由存储电路和许和电路两部分组成，存储电路一般由触发器承担，组合电路为门电路。

2.是虚电路的逻辑功能分析主要步骤有：

（1）根据给定的时序电路，写出逻辑方程组，在写逻辑方程时，先写出存储电路（触发器）的驱动方程，再代入触发器的特性方程写出电路的状态，最后写出电路的输出方程。

（2）列出状态转换表，确定电路的初始状态，依次代入状态方程中求出各次态，据此可列出状态转换表。

（3）根据状态方程或状态转换表可画出状态转换图或时序图，注意时钟条件。

3.时序逻辑部件常用的主要有寄存器和计数器。

寄存器用来存放数据或指令的时序电路，有数码寄存器和移位寄存器两类，数码寄存器具有存储数据和清除原有数据的功能，又有双拍或单拍之分，即存储数据前，先清除原有数据即为双拍工作方式，无须清除原有数据而直接存储的为单拍工作方式。移位寄存器除存放数据外，还具有多所存储的数据在寄存器中实现左移或右移的功能。

4.计数器不仅具有对时钟脉冲的计数功能，而且具有分频、定时，节拍脉冲产生和数字运算等多种功能。计数器按触发器的翻转次序可分为同步计数器和异步计数器两类；按计数容量不同又可分为二进制、市进制和任意进制计数器，又可分为加法计数、减法计数和可逆（加/减）计数的三种形式。

学完本章后，以达到下列要求

1.熟悉时序逻辑电路在逻辑功能和电路结构的特点。

2.掌握时序电路逻辑功能的分析方法。

3.了解时序电路的一般设计方法。

4.掌握寄存器和计数器的电路特点和逻辑功能分析。

5.学会用集成计数器产品构成任意进制的计数器。

10.2　习题与思考题详解

10.1 由或门组成的基本 R-S 触发器如图 P10.1 所示，试分析其逻辑功能，总结出特性表。

解：

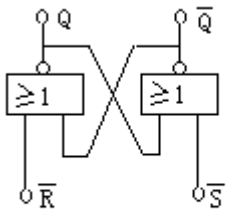


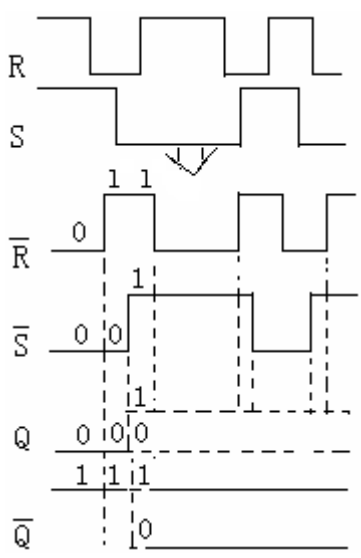
图 P10.1

$\overline{R}$	$\overline{S}$	Q^n	Q^{n+1}
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	不定态
1	1	1	不定态

10.2 在图 P10.1 所示的基本 R-S 触发器中，加上如图 P10.2 所示的输入信号，试绘出 Q 和 $\overline{Q}$的波形。

解：图 P10.2

解：



P10.1 所示的基本 R-S 触发器中，设初态 Q=1。若输入波形如图 P10.3 所示，在不计门延迟的情况下，试画出 Q 端的波形。

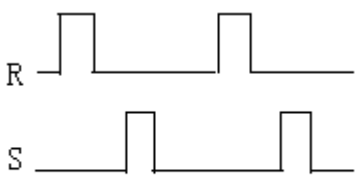
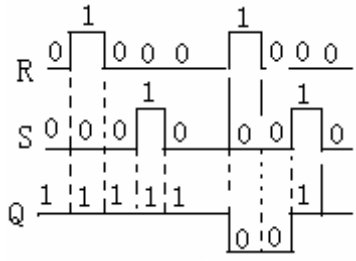


图 P10.3

解：



10.4 图 P10.4 所示为一个无反跳开关，是说明其 Q（或 $\overline{Q}$）端为什么消除由手动开关 S 倒向 A（或 B）时的机械弹跳使触点多次接触而造成的多余脉冲。

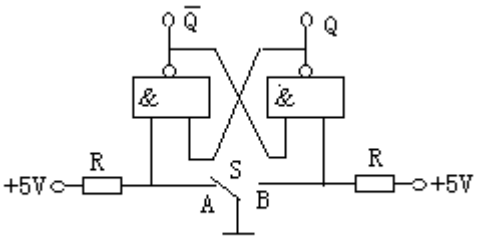


图 P10.4

解：两个与非门构成的基本 RS 触发器电路，输出端 Q 的状态的翻转 $\overline{R}$ = 0 电平，$\overline{S}$ = 1 电平是有条件的，

假设 S 接 A 端 0 电平，即：

则：

Q = 0 电平

当开关 S 在 A 点振动，出现 A=0 或 A=1，触发器输出处于保持状态，不会因 A 点电平变化而变化，这样就消除由手动开关 S 倒向 A（或 B）时的机械弹跳使触点多次接触而造成的多余脉冲，是开关可靠的接触。。

10.5 设同步 R-S 触发器起始状态为 Q=0、R、S、CP 端的输入信号如图 P10.5 所示，试绘出输出端 Q 和 $\overline{Q}$ 的波形。

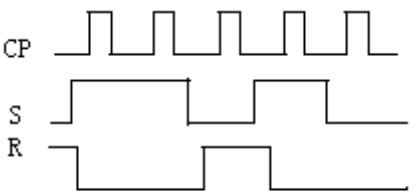
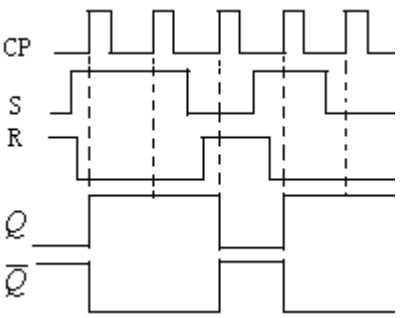


图 P10.5

解：同步 R-S 触发器的状态方程为：

$$Q^{n+1} = S + \overline{R}Q^n$$
$$RS = 0$$

触发器在 R=1 时触发翻转，波形如图：



10.6 设主从 J-K 触发器的 CP、J、K 信号的波形如图 P10.6 所示，设初始状态 Q=0，试绘出 Q 的波形。

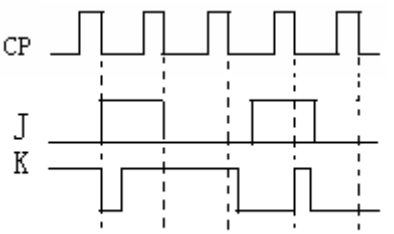
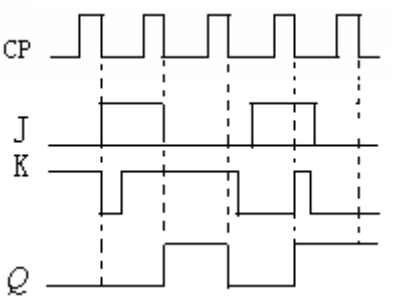


图 P10.6

解：状态方程为： $Q^{n+1}=J\overline{Q^n}+\overline{K}Q^n$　CP↓



10.7 维持阻塞 D 触发器的 CP、D、$\overline{S_d},\overline{R_d}$ 信号波形如图 P10.7 所示，试绘出输出 Q 的波形。

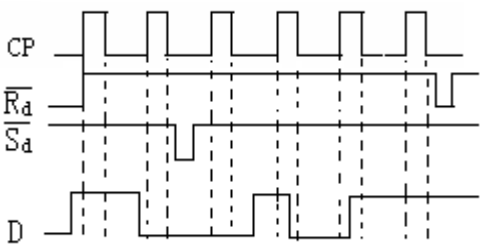
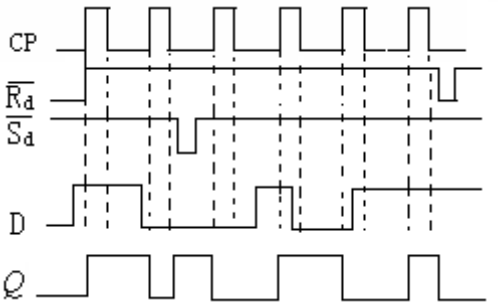
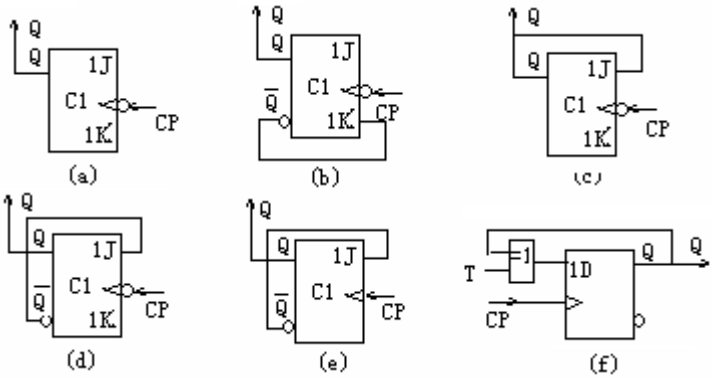


图 P10.7

解： D 触发器的 $Q^{n+1}=D^n$　CP↑ 状态方程为：



10.8 试画出下列各电路在时钟脉冲 CP 等信号作用下的输出波形，设触发器的初态均为 0，电路及时钟波形参看图 P10.8。



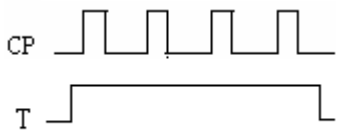
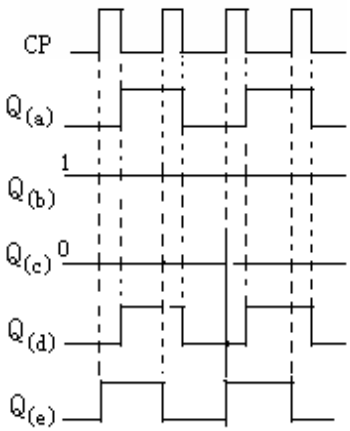
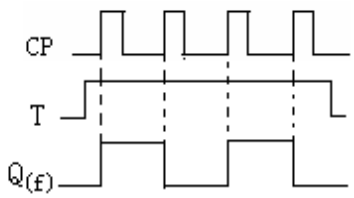


图 P10.8

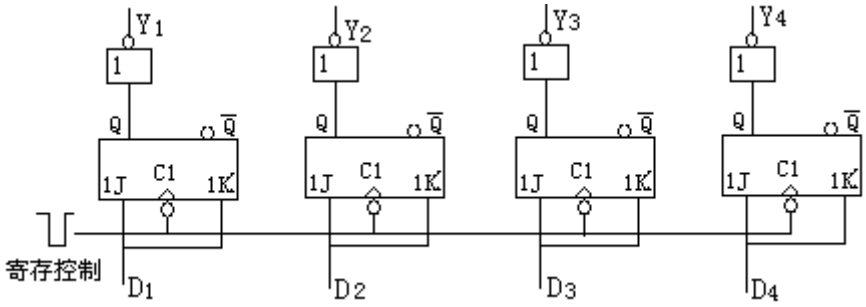
解：



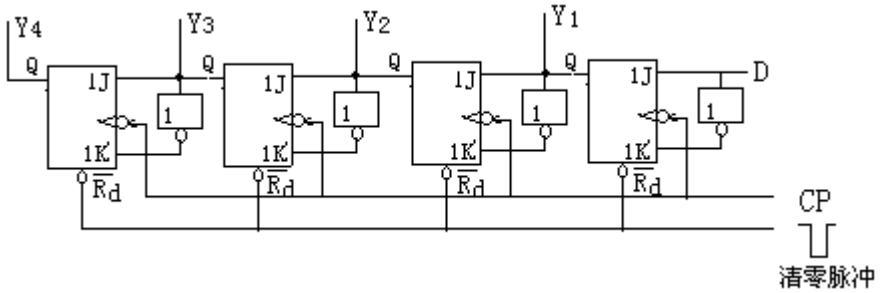


10.9 试用 J-K 触发器构成一个 4 位单拍接受方式的寄存器和一个左移移位寄存器。

解：4 位单拍接受方式的寄存器

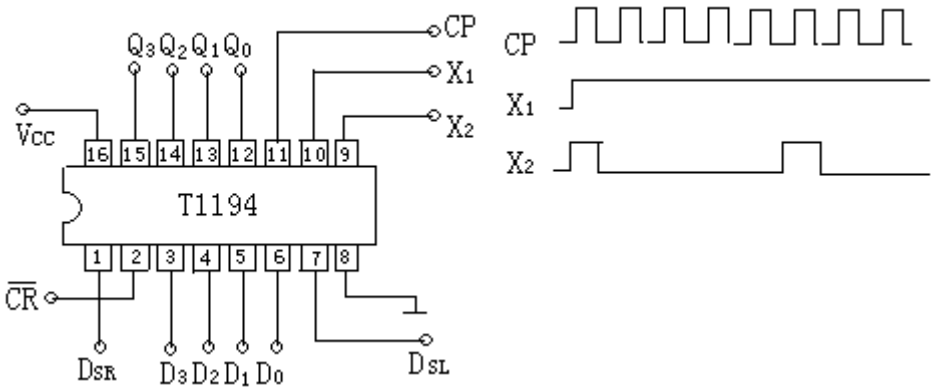


左移移位寄存器



10 试用中规模集成双向移位寄存器 T1194 将并行数码 $D_3D_2D_1D_0$ 转换成串行数码 $D_3D_2D_1D_0$，简述其转换步骤。

解：根据T1194功能表知，在CP=1，X_1=1，X_2=1时，$D_3D_2D_1D_0$并行输入，当CP=1，X_1=1，X_2=0时，Q_3串行输出$D_3D_2D_1D_0$的数值，只要满足上述条件，就可以实现题目所要求功能，将并行输入数据转化成串行数据输出。

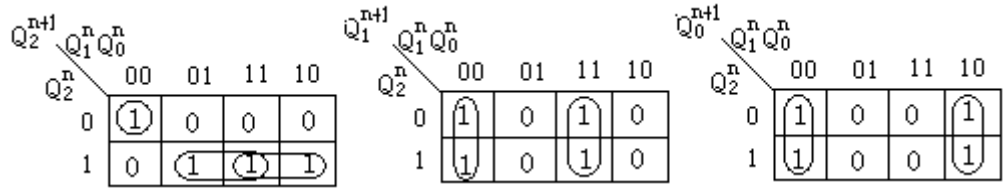


10.11 试用 D 触发器构成一个八进制减法计数器。

解：1.列出.状态转换表

CP	$Q_2^nQ_1^nQ_0^n$			$Q_2^{n+1}Q_1^{n+1}Q_0^{n+1}$		
0	1	1	1	1	1	0
1	1	1	0	1	0	1
2	1	0	1	1	0	0
3	1	0	0	0	1	1
4	0	1	1	0	1	0
5	0	1	0	0	0	1
6	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	1	1	1

2.画出卡诺化简图



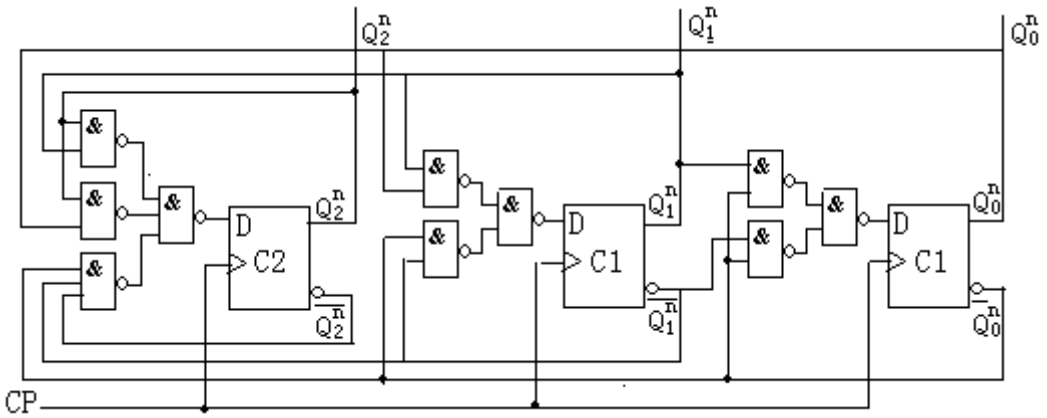
3.写出状态方程

$$Q_2^{n+1} = Q_2^nQ_1^n + Q_2^nQ_0^n + \overline{Q_2^n}\,\overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n}$$
$$= \overline{Q_2^nQ_1^n + Q_2^nQ_0^n + \overline{Q_2^n}\,\overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n}}$$
$$= \overline{Q_2^nQ_1^n} \cdot \overline{Q_2^nQ_0^n} \cdot \overline{\overline{Q_2^n}\,\overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n}}$$
$$= D_2^n$$

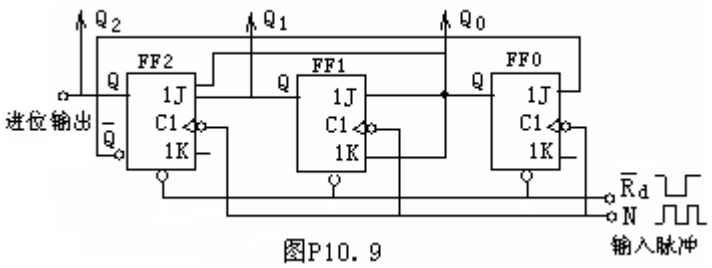
$$Q_1^{n+1} = \overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n} + Q_1^nQ_0^n$$
$$= \overline{\overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n} + Q_1^nQ_0^n}$$
$$= \overline{\overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n}} \cdot \overline{Q_1^nQ_0^n}$$
$$= D_1^n$$

$$Q_0^{n+1} = \overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n} + Q_1^n\overline{Q_0^n}$$
$$= \overline{\overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n} + Q_1^n\overline{Q_0^n}}$$
$$= \overline{\overline{Q_1^n}\,\overline{Q_0^n}} \cdot \overline{Q_1^n\overline{Q_0^n}}$$
$$= D_0^n$$

4.画出逻辑电路图：



10.12 由 J-K 触发器构成的同步计数器如图 P10.9 所示，使指出它是一个几进制计数器并绘出工作波形图。



图P10. 9

解：1.驱动方程和状态方程：

驱动方程

$J_0=\overline{Q_2^n}$　　$K_0=1$

$J_1=K_1=Q_0^n$

$J_2=Q_0^n$　　$K_2=1$

状态方程

$Q_0^{n+1}=J_0\overline{Q_0^n}+\overline{K_0}Q_0^n=\overline{Q_2^n}\overline{Q_0^n}$

$Q_1^{n+1}=Q_0^n\overline{Q_1^n}+\overline{Q_0^n}Q_1^n=Q_0^n\oplus Q_1^n$

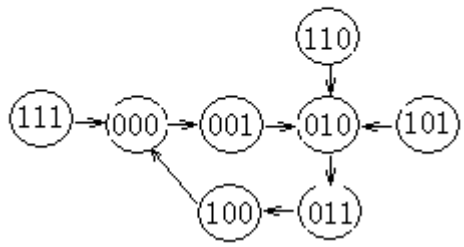
$Q_2^{n+1}=Q_0^n\overline{Q_2^n}$

2.状态转换表和状态转换图

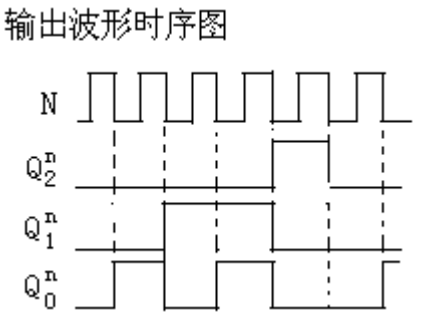
状态转换表

N	Q_2^n	Q_1^n	Q_0^n	Q_2^{n+1}	Q_1^{n+1}	Q_0^{n+1}
1	0	0	0	0	0	1
2	0	0	1	0	1	0
3	0	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	0	0
5	1	0	0	0	0	0
	1	0	1	0	1	0
	1	1	0	0	1	0
	1	1	1	0	0	0

状态转换图

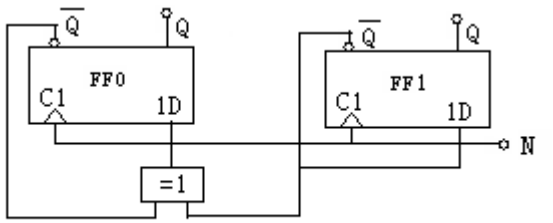


3.输出波形时序图



4.结论：该电路时能自启动的同步五进制计数器

10.13 试分析如图 P10.10 所示的数字逻辑部件的性质，并绘出 Q_0, Q_1 的波形（设触发器的初始状态为 0 态）。



图P10.10

解：1.驱动方程、状态方程及输出波形图：

驱动方程

$D_0 = \overline{Q_0^n} \oplus \overline{Q_1^n}$

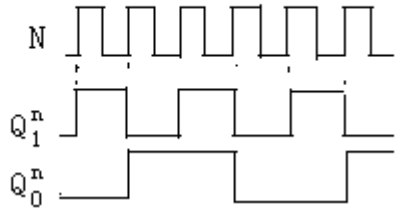
$D_1 = \overline{Q_1^n}$

状态方程

$Q_0^{n+1} = \overline{Q_0^n} \oplus \overline{Q_1^n}$

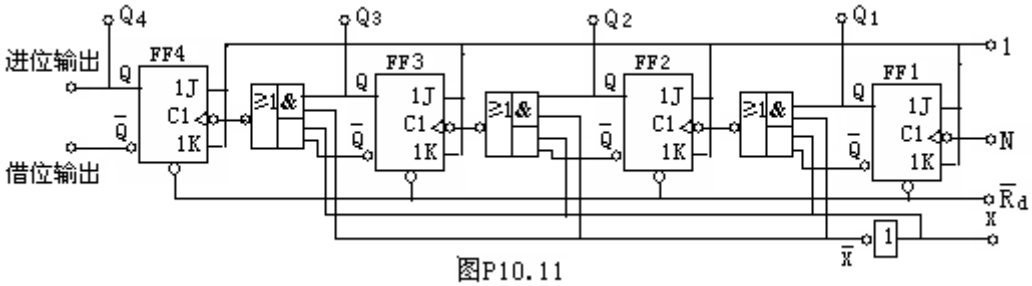
$Q_1^{n+1} = \overline{Q_1^n}$

输出波形时序图



FF0 是二分之一分频器，FF1 是四分之一分频器。

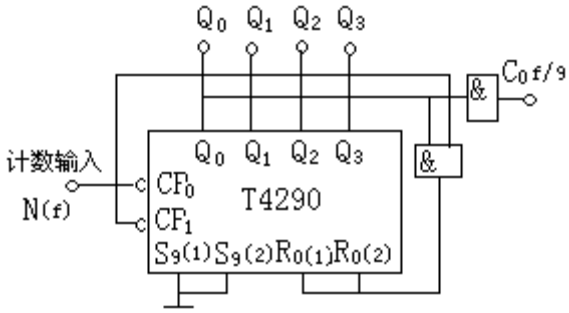
10.14 异步二进制可逆计数器如图 P10.11 所示，X 为加/减控制器试以 FF_1, FF_2 之间的控制电路为例说其可逆计数的工作原理。



图P10.11

10.15 试绘出用中规模集成计数器 T4290 构成的九进制计数器的原理电路图。

解：已知 T4290 位异步是进制计数器，M=10。构成 99 进制计数器的 N=9，，满足 M＞N。可用反馈法使十进制计数器的状态跳过 10-9=1 个无关状态即可构成 9 进制计数器。其电路原理图如图示：

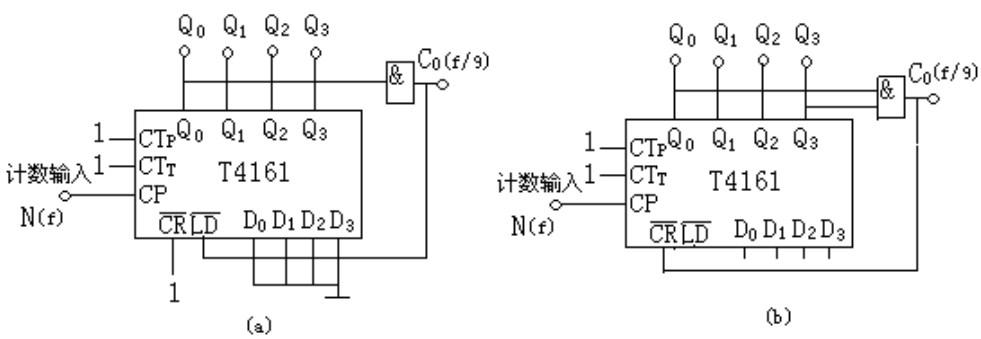


10.16 试绘出两种利用中规模集成计数器 T4161 构成的九进制计数器的原理电路图。

解：利用 T4161 构成 9 进制计数器：

1.如图（a）所示：以 0000 为计数器的初态，当第 8 个脉冲到达后，G_1 输出的低电平加到预置控制端，使$\overline{LD}$=0，做好置数准备，待第 9 个脉冲的上升沿到达 T4161 将 $D_3D_2D_1D_0$=0000 同步置入计数器，完成了一个计数周期。

2.如图（b）所示，利用计数到 N=9 时，G1 反馈的低电平使 T4161 清零，完成一个计数周期。



第11章　脉冲电路和综合电路系统

11.1知识点归纳

本章主要介绍了脉冲波形的产生、变换和整形电路，555定时器、D/A和A/D转换电路。

1.多谐振荡器是一种自激式脉冲振荡器。它没有稳态，只有两个暂稳态，不需外加触发信号，只要接通电源，振荡就会自行建立。输出的矩形波宽度由电路本身的参数决定。多谐振荡器在结构上有门电路组成的多谐振荡器，施密特触发器组成的多谐振荡器，555定时器组成的多谐振荡器，其中门电路组成的多谐振荡器有TTL型的，也有CMOS型门电路的。他们的电路形式有用一对反相器交叉耦合成正反馈的，有用奇个与非门或反相器首尾相接构成环形振荡器的，也有在多谐振荡器中接入石英晶体以提高频率稳定性的石英晶体多谐振荡器的。在这些电路中，除环形振荡器是利用闭合回路延迟负反馈作用产生振荡外，其余几种电路都是利用闭合回路的正反馈作用产生振荡的。

2.单稳态触发器只有一个稳态，在外加触发脉冲作用下，触发翻转为暂稳态经过一定时间电路有自动返回原来的稳态，单稳态触发器输出的脉冲的宽度由电路本身的参数决定而与外加触发脉冲无关。

3.施密特触发器有两个稳态，可将边沿变化缓慢的输入信号整形为矩形波。

4.555定时器是一个应用广泛的集成单片定时器，多用于脉冲产生及定时。

5.A/D、D/A转换器是现今控制、检测、运算等数字系统必不可少的接口电路。分析了其电路组成和工作原理。狮子系统的转换速度和转换精度最终由A/D、D/A转换器的转换速度和转换精度所决定。

学完本章，应达到下列要求：

熟悉多谐振荡器的类型、电路结构、功能特点及其工作原理。

学会用波形法分析多谐振荡器的工作过程，会估算输出脉冲的宽度、频率及占空比。

熟悉单稳态触发器的类型、电路结构、功能特点及其工作原理。

学会用波形法分析单稳态触发器的工作过程，会估算输出脉冲的宽度、频率及占空比。

熟悉施密特触发器的电路结构和工作原理，会估算上、下限触发电平及回差电压的值。

了解 555 定时器的内部结构，熟悉其外特性，学会用 555 定时器接成施密特触发器、多谐振荡器和单稳态触发器。

11.2　习题与思考题详解

11-1 555 定时器有哪几种工作方式？在电路连接上有何区别？

解：555 定时电器，可构成单稳态触发器，多谐振荡器，施密特触发器，在电路上连接方式：（1）以 555 定时器的输入 u_{i2} 作为触发信号，并将有 D 和 T_D 组成的反向器输出电压

u_o'接至 u_{i1}，同时在 u_{i1} 接电容 C，就构成了单稳态触发器，如图 11.1（a）所示。

（2）将 555 定时器的 u_{i1} 合 u_{i2} 两个输入端连在一起作为输入信号，可得施密特触发器，如图 11.1（b）所示。

（3）只要将施密特触发器的反相器输出端经 RC 积分电路接回到它的输入端，即使多谐振荡器，如图 11.1（c）所示。

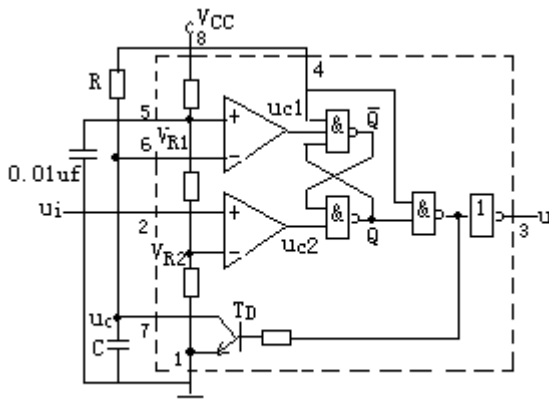


图11.1(a)用555定时器构成单稳态触发器

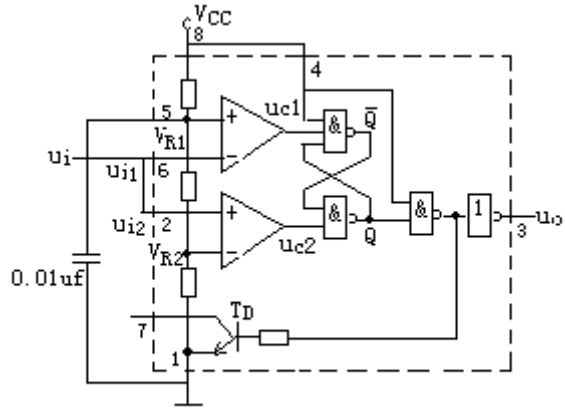


图11.1(b)用555定时器构成施密特触发器

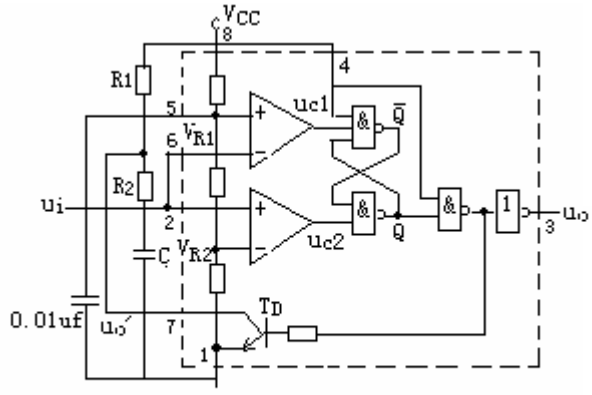


图11.1（C）　用555定时器构成多谐振荡器

11-2 由 555 定时器构成的施密特触发器中，输出脉冲宽度取决于什么？

答：施密特触发器输出的高、低电平随输入信号的电平改变，所以，使出脉冲的宽度是由输入信号决定的。

11-3 由 555 定时器构成的单稳态触发器中，输出脉冲宽度取决于什么？
答：单稳态触发器中输出脉冲宽度取决于：

$$T_W = RC\ln\frac{V_{CC}-0}{V_{CC}-\frac{2}{3}V_{CC}} = RC\ln 3 = 1.1RC$$

11-4 在施密特触发器、单稳态触发器、多谐振荡器中，作为脉冲整形的是哪种电路？作为脉冲产生的是哪种电路？
答：作为脉冲整形电路的是，施密特触发器、单稳态触发器，作为脉冲产生电路的是多谐振荡器和单稳态触发器。

11-5 如图 11.3.1 所示的 555 定时器构成的单稳态触发器中，R_i 和 C_i 是什么环节，它起什么作用？在什么情况下可不用此环节？

Ri,Ci 是输入回路认得微分环节，确保 V_2 的负脉冲宽度 $tp_1<tpo$,一般要求 tpi>5RiCi,在电源接通后，若未加负脉冲，Vi 保持高电平，在稳定的状态下，RiCi 的微分环节从放电完成，Ci 相当处于开路状态，因此触发器输入电压 V_2 也为高电平。

11-6 如图 11.2.2 所示由 555 定时器构成的施密特触发器中，若电源 V_{CC}=9V，V_M 不加电压时，正、负向阈值电平 V_{T+}和 V_{T-} 及回差ΔV 各为何值。

解：
$$V_{T+} = \frac{2}{3}V_{CC} = 6V$$

$$V_{T-} = \frac{1}{3}V_{CC} = 3V$$

$$\Delta V = V_{T+} - V_{T-} = 3V$$

11-7 上题中，若 V_M=5V，正、负向阈值电平 V_{T+}和 V_{T-} 及回差ΔV 各为何值。
解：　若 V_M=5V，

$$V_{T+} = V_M + 5V$$

$$V_{T-} = \frac{1}{2}V_{MM} = 2.5V$$

$$\Delta V = V_{T+} - V_{T-} = 2.5V$$

11-8 在图 11.4.1 用 555 定时器构成的多谐振荡器电路中，若 R_1=R_2=4.7KΩ，C=0.01μF，电源电压 V_{CC}=12V，试计算电路的振荡频率。
解：　充电时间

$$tph = (R_A + R_B)C\ln 2 = 0.7\times 9.4\times 10^3\times 0.01\times 10^{-6} = 6.58\times 10^{-5}s$$

放电时间

$$t_{pl} = R_B C \ln 2 = 0.7 R_B C = 0.7 \times 4.7 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} = 3.29 \times 10^{-5} s$$

$$T = t_{ph} + t_{pl} = 9.87 \times 10^{-5} s$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{9.87 \times 10^{-5}} = 0.1 \times 10^4 = 10 KH_Z$$

11-9　8 位 DAC 的分辨率是多少？

解：对于 n 位 D/A 转换器的分辨率为 $\frac{1}{2^n - 1}$，所以，8 位 DAC 的分辨率为 $\frac{1}{2^8 - 1} = 3.92 \times 10^{-3}$

11-10　A/D 转换器中转换速度最快的是哪一种？

答：并联型 A/D 转换器的转换速度最快。例，8 位并联型 A/D 转换器的转换速度可达 50ns 以内。

11-11　R/2R DAC 转换器中的电阻值有几种？

答：R/2R DAC 转换器中的电阻值有 $2^n R$种，n 为 DAC 转换位数。例：8 位 DAC 转换器，需 8 个电阻，阻值从 R---128R。

11-12　时钟周期为 T_c 的 8 位逐次比较式 A/D 转换器的最小转换速度是多少？

答：逐次比较式 A/D 转换器的转换时间取决于转换中数字位数 n 的多少，完成每位数字的转换需要 1 个时钟周期，对于 n 位转换器，第 n 个时钟脉冲作用后，转换完成，所以该转换器的转换最小时间为 nTc。

11-13　两种 R/2R 电阻 DAC 转换网络结构上有何不同，各有什么不同？

答：两种 R/2R 电阻 DAC 转换网络转换器有：

1. 倒 T 形电阻网络转换器，如图 11.2 所示

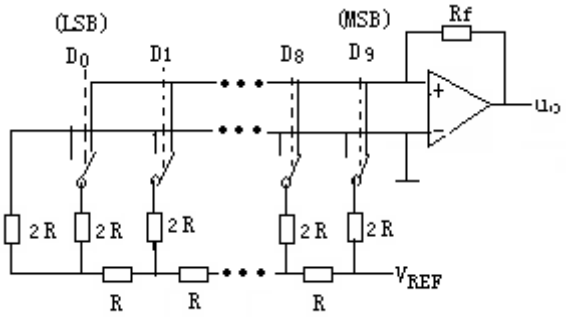


图11.2 10位倒T形电阻网络D/A转换器

转换器中的电阻值不是 R，就是 2R，克服了权电阻转换器中电阻阻值多的缺点，该转换器输入数字量和输出模拟量之间的关系，，可以用输入端数字量 1000，0100，0010 和 0001，然后计算出对应各个是字量和模拟量的方法获得。

2. R/2R T 型电阻网络转换器

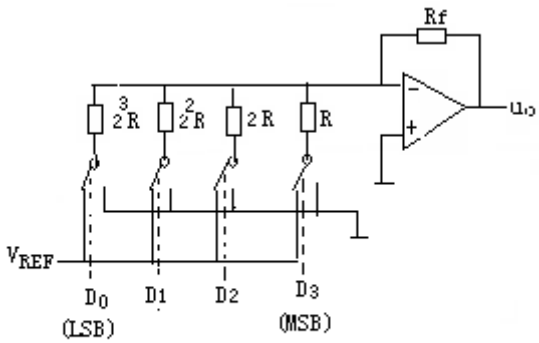


图11.3 T形电阻网络D/A转换器

T 型电阻网络转换器的运放输入端 V-的电位总是接近于 0V（虚地），所以，无论数字量 $D_3D_2D_1D_0$ 控制的开关是接虚地还是接真地，流过各个支路的电流都保持不变。

11-14 试推求单稳态触发器的输出脉冲宽度。

解：输出脉冲宽度 t_w 等于暂稳态的持续时间，而暂稳态的持续时间却决于外电阻 R 和电容 C 的大小，即 t_w 等于电容电压在充电过程中从 0 上升至 $\frac{2}{3}V_{CC}$，所需用的时间。

$$u_c(t)=\{u_c(\infty)+[u_c(0)-u_c(\infty)]\}^{-\frac{t_w}{RC}}$$

即：$\frac{2}{3}V_{CC}=[V_{CC}+(0-V_{CC})^{-\frac{t}{RC}}$

$$t=RC\ln\frac{u(\infty)-u(0_+)}{u(\infty)-u(t_w)}=RC\ln\frac{V_{CC}-0}{V_{CC}-\frac{2}{3}V_{CC}}=RC\ln 3=1.1RC$$

11-15 试推求多谐振荡器的输出脉冲宽度和输出脉冲周期。

解：电容的充电时间

$$T_1=(R_1+R_2)C\ln\frac{u(\infty)-u(0_+)}{u(\infty)-u(0_{充})}=(R_1+R_2)C\ln\frac{V_{CC}-V_{T-}}{V_{CC}-V_{T+}}=(R_1+R_2)C\ln 2$$

即为脉冲宽度

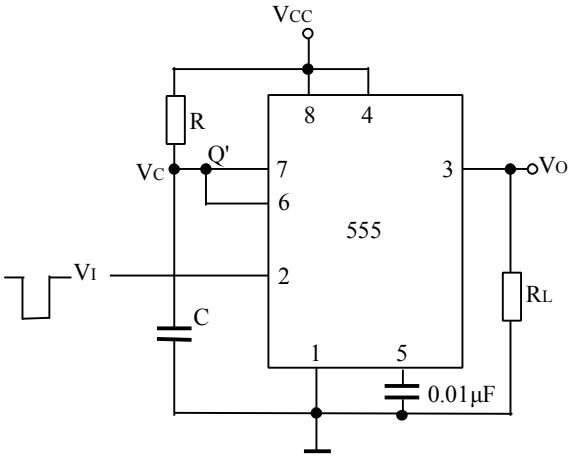
电容的放电时间

$$T_2=R_2C\ln\frac{0-V_{T+}}{0-V_{T-}}=R_2C\ln 2$$

输出脉冲周期　　$T=T_1+T_2=(R_1+2R_2)\ln 2$

11-16 在 555 定时器构成的单稳态触发器中如图 11.4 所示，若 V_{CC}=5V，R_L=16KΩ，R=10KΩ，C=0.1μF，则在图示输入脉冲 V_I 作用下，其电容上电压 V_C 及输出电压 V_O 的波形是怎样的？请画出波形图，并计算出这个单稳态触发器的输出脉冲宽度 t_{po} 为何值？

解：输出电压波形图：如图 11.5 所示



题 11-4 图

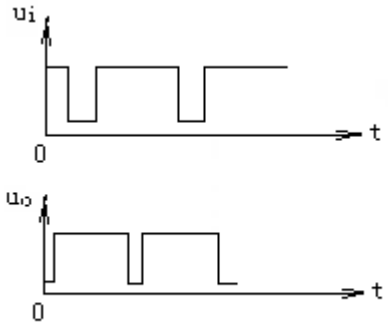


图11.5 单稳态触发器输出波形图

$$t_{po} = RC\ln 3 = 1.1\times10^{3}\times0.1\times10^{-6} = 1.1\times10^{-4}(s)$$

11-17 试用 555 定时器设计一个单稳态触发器，要求输出脉冲宽度在 1~10 秒的范围内可手动调节。给定 555 定时器的电源为 15v，取电容 C=10μF，触发信号来自 TTL 电路，高低电平分别为 3.4v 和.01v。

解：$\because t_p = RC\ln 3 \qquad \therefore R = \dfrac{t_p}{C\ln 3}$

$$R_{\min} = \frac{1}{10\times10^{-6}\times1.1} = 10^{5} = 100\text{K}\Omega$$

$$R_{\max} = \frac{10}{10\times10^{-6}\times1.1} = 10^{6} = 1000\text{K}\Omega$$

555 定时器单稳态触发器如图 11.6 所示

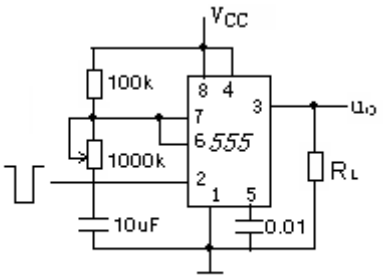
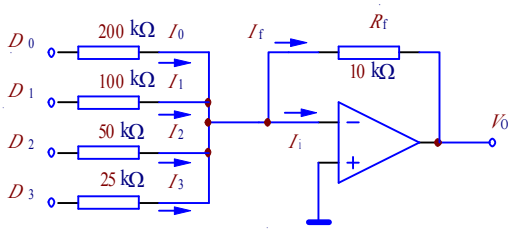


图11.6　单稳态触发器电路图

11-18 图 11-7 所示的电路中，输入信号 D_0、D_1、D_2、D_3 的电压幅值为 5V，试用电压表测量输出电压 V_O 在 D_0=5V、D_1=0V、D_2=5V、D_3=0V 的值。用电流表观察各个电流之间的关系。



题 11-7 图

解：$\because I_O = \dfrac{V}{8R}, \qquad I_1 = \dfrac{V}{4R} \qquad I_2 = \dfrac{V}{2R} \qquad I_3 = \dfrac{V}{R}$

又∵　V_0=5V ，V_1=0V ，V_2=5V ，V_3=0V ，　R=25K

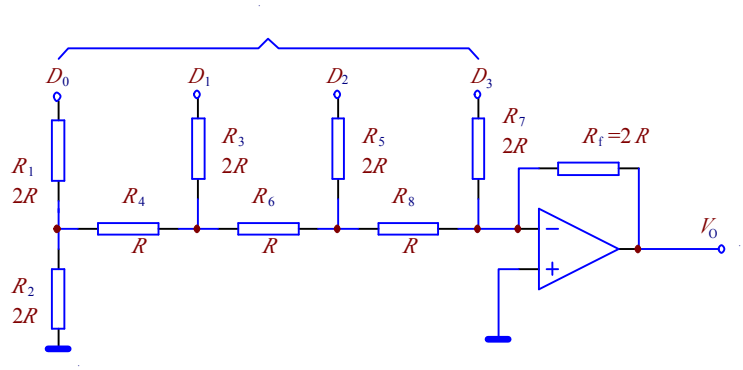
则：$I_O = \dfrac{5}{8\times25K} = 25\mu\text{A}$

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = \frac{5}{2 \times 25K} = 0.1mA$$

$$I_3 = O$$

11-19 图 11-8 所示的电路中，输入信号 D_0、D_1、D_2、D_3 的电压幅值为 5V，试用电压表测量输出电压 V_O 在 D_0=5V、D_1=0V、D_2=5V、D_3=5V 的值。图中 R=1kΩ。用电流表观察各个电流之间的关系。



题 11-8 图

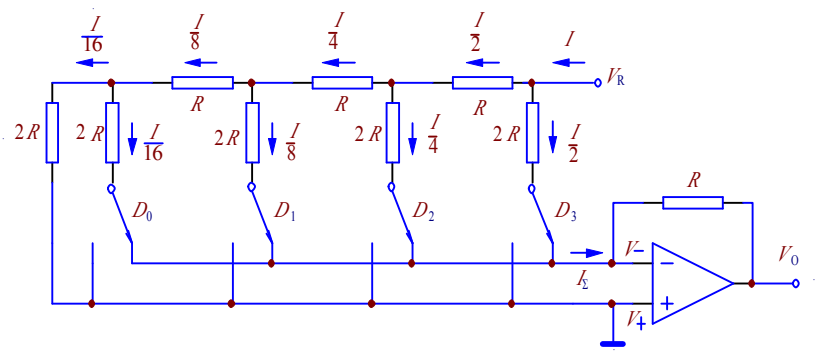
解：若 $D_0D_1D_2D_3$ 为 1000，　$I = \frac{5V}{2R} = 2.5mA$

0100，　$I = \frac{2.5V}{2R} 1.25mA$

0010，　$I = \frac{1.25V}{2R} = 0.625mA$

0001，　$I = \frac{0.625V}{2R} = 0.3125mA$

11-20　图 11-9 所示的电路中，若是输入 D_0、D_1、D_2、D_3 的值为 1 就相当于开关动触点接通运放反相端，为 0 相当于连接运放通相端。试用电压表测量输出电压 V_O 在 D_0=1、D_1=0、D_2=1、D_3=0 的值。图中 R=1kΩ，参考电压为 5V。用电流表观察各个电流之间的关系。



题 11-9 图

解：$I_\Sigma = \frac{I}{2}D_3 + \frac{I}{4}D_2 + \frac{I}{8}D_1 + \frac{I}{16}D_0$

而　　$I = \frac{V_B}{R} = \frac{5V}{1K} = 5mA$

若：$D_3D_2D_1D_0$ 为 0101，则 $I_3 = 0$，　$I_2 = \frac{5V}{4K} = 1.25mA$，

$$I_1 = 0，\quad I_0 = \frac{5V}{16K} = 0.3125mA$$

11.21　试用电阻、比较器、8-3 线优先编码器和译码显示电路设计一个 3 位并行 A/D 转换器。要求画出电路图并仿真。

解：3 位并行 A/D 转换器电路图如图 11.10 所示：

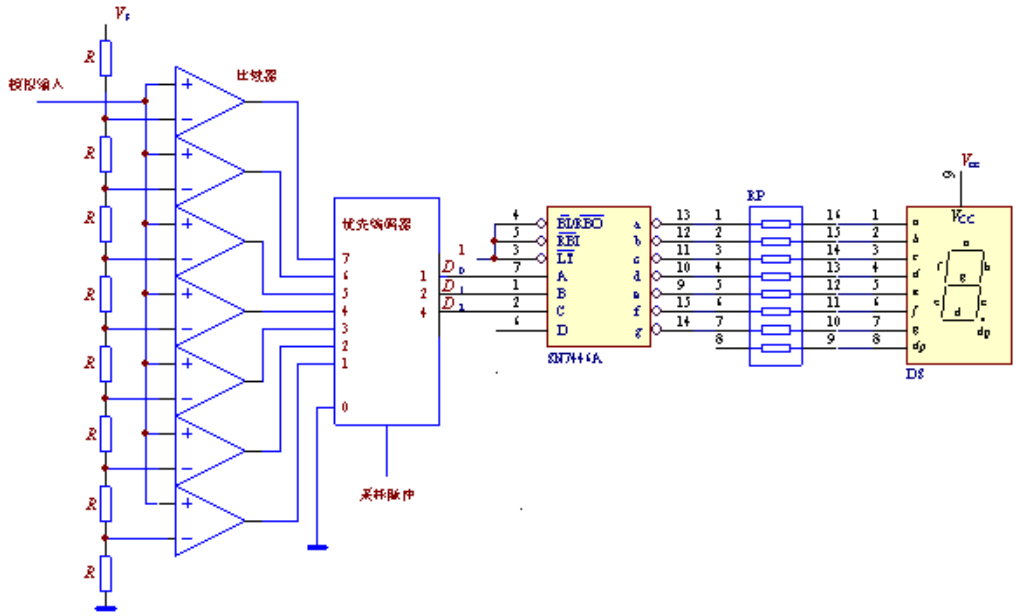


图 11.10　　3 位并行 A/D 转换器电路图