

(本试卷中各试题可能存在依赖关系，若某题有一参数未能求出或计算错误，在其他题目中出现该参数时可用符号代替，不再重复扣分。)

有些家用电器如洗衣机等，因绝缘不良而导致外壳漏电，可能造成人身事故。本试卷设计一款漏电报警器，如图 1。

J1 为三孔电源插座，提供有效值 220V 的交流电。家用电器接入相线和零线，外壳接地线。家用电器外壳漏电时，地线和零线之间存在交流电压，泄漏电流从地线经光电耦合器 U1 内部的发光二极管 D1、D2 和 R1 流回零线，构成回路。U1 内部的光电二极管 T1 接收 D1、D2 发出的光，经过放大电路 A 和放大电路 B，点亮发光二极管 D3，进行报警指示。

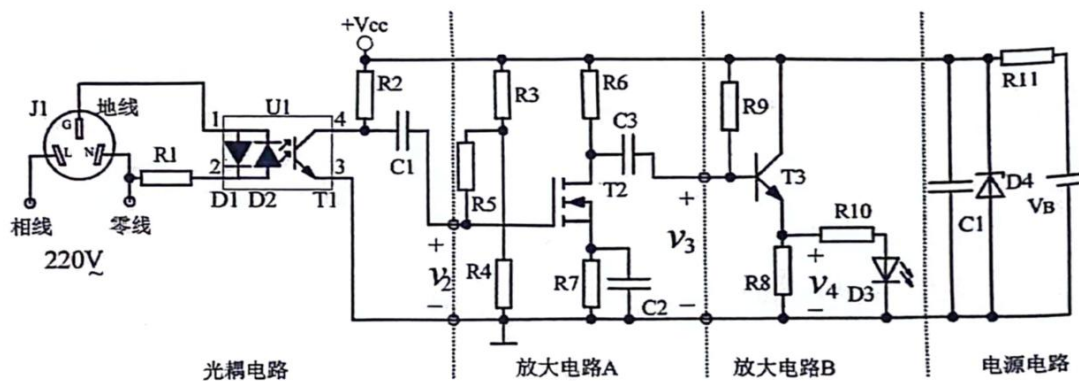


图 1 漏电报警器

1. (10 分)

(1) 说明晶体管 T2、T3 类型 (JFET/MOS/BJT, P 沟道/N 沟道, 增强型/耗尽型, PNP/NPN)。

(2) 说明放大电路 A、B 组态 (共射/共集/共基/共源/共漏/共栅)。放大电路的组态是根据什么判断的?

1)  $T_2$ : MOS, N 沟道, 增强型

$T_3$ : BJT, MPN

(2)

2. (10 分) 图 1 中的光电耦合器 U1 型号采用 ACPL-214, 输入端为两个发光二极管反向并联, 允许输入交流信号。数据手册上的若干参数如表 1 所示, 某特性曲线如图 2、图 3 所示。

表 1

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	ACPL-214	Units
Average Forward Current	$I_F(AVG)$	$\pm 50$	mA
Pulse Forward Current	$I_{FSM}$	$\pm 1$	A
LED Power Dissipation	$P_I$	65	mW
Collector Current	$I_C$	50	mA
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	80	V
Emitter-Collector Voltage	$V_{ECO}$	7	V
Isolation Voltage (AC for 1min, R.H. 40~60%)	$V_{ISO}$	3000	$V_{RMS}$
Collector Power Dissipation	$P_C$	150	mW

平均正向电流  
正向浪涌电流

集电极-发射极电压  
发射极-集电极电压

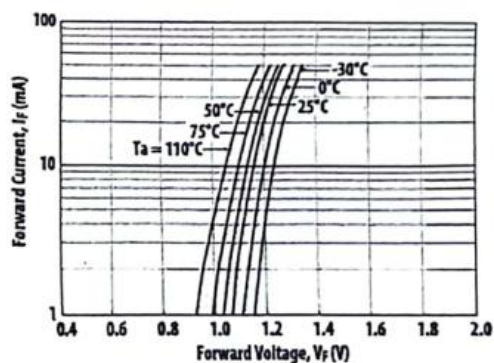


图 2

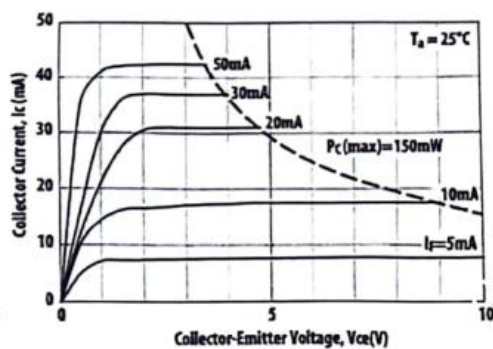
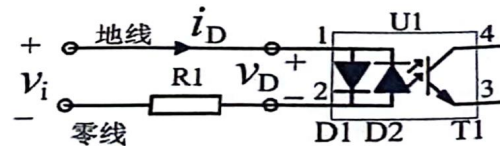


图 3

(1) 从表 1 中任意选 3 个参数, 说明符号及其对应的中文名称。

(2) 图 2、图 3 分别是什么特性曲线??

3. (16分) 图1中光耦输入端电路如图。发生漏电时,  $v_i$  存在 50Hz 正弦波交流电。根据国家标准《GB/T 3805-2008 特低电压限值》, 在干燥条件下安全电压限值为交流 33V。对于交流电压, 人体感知电流约为交流 1mA, 摆脱电流约为交流 10mA, 致命电流约为交流 100mA。本题要求当交流  $v_i > 33V$  时, 发光二极管 D1、D2 正向电流峰值  $i_D > 1mA$ , 以便推动后级电路报警。设 D1、D2 用折线模型分析, 死区电压  $V_{th} = 1V$ , 电阻  $r_D = 50\Omega$ , 最大正向电流为 50mA。若无特别说明, 本题中交流电压、电流均指有效值。
- (1) 求电阻 R1 的取值范围。
  - (2) 若  $v_i = 5\sin(2\pi \times 50t) V$ , 对  $v_i$  分若干区间, 分析二极管 D1、D2 导通情况, 画出各个区间的等效电路, 求出各个区间的  $v_D$  表达式 (不需带入数值)。
  - (3) 图1中为什么没有直接对地线和零线之间的漏电电压进行检测, 而使用了光电耦合器?



4. (20 分) 图 1 中光耦输出端电路如图(a), 内部是一个光电三极管,  $R_L$  是后级放大电路 A 的输入电阻, 设  $R_L = 1\text{M}\Omega$ ,  $R_2 = 1\text{k}\Omega$ 。光电三极管可以等效为光电二极管  $D_p$  后接三极管  $T_1$ , 此时图(a)输出端等效为图(b)。若将光电二极管  $D_p$  的电流用电流源表示, 则图(b)可以等效为图(c), 其中  $i_p$  处箭头指示光电流的真实方向。光电二极管  $D_p$  的等效电路如图(d), 电流源  $i_r$  代表入射光产生的光电流,  $R_p$  代表电流源内阻,  $R_s$  代表引线电阻,  $D$  代表普通二极管,  $C_j$  代表二极管结电容。硅光电二极管  $R_p$  为数  $\text{M}\Omega$  以上,  $R_s$  为几十  $\Omega$  以下。  $R_p$ 、 $D$  中流过的电流并不反映接收光的强弱。  $C_j$  和  $R_p$  的充放电时间常数很大, 会影响光电二极管对光变化的快速响应。光耦的光电三极管  $T_1$  的集电极电流与发光二极管  $D_1$ 、 $D_2$  发射电流之比称为电流传输比  $\text{CTR}$ , 设  $\text{CTR}=100$ 。设  $T_1$  的  $\beta=100$ ,  $r_{be}=200\Omega$ , 温度的电压当量  $V_T=26\text{mV}$ , 饱和压降  $V_{CES}=0.4\text{V}$ 。设电源  $V_{CC}=5\text{V}$ 。

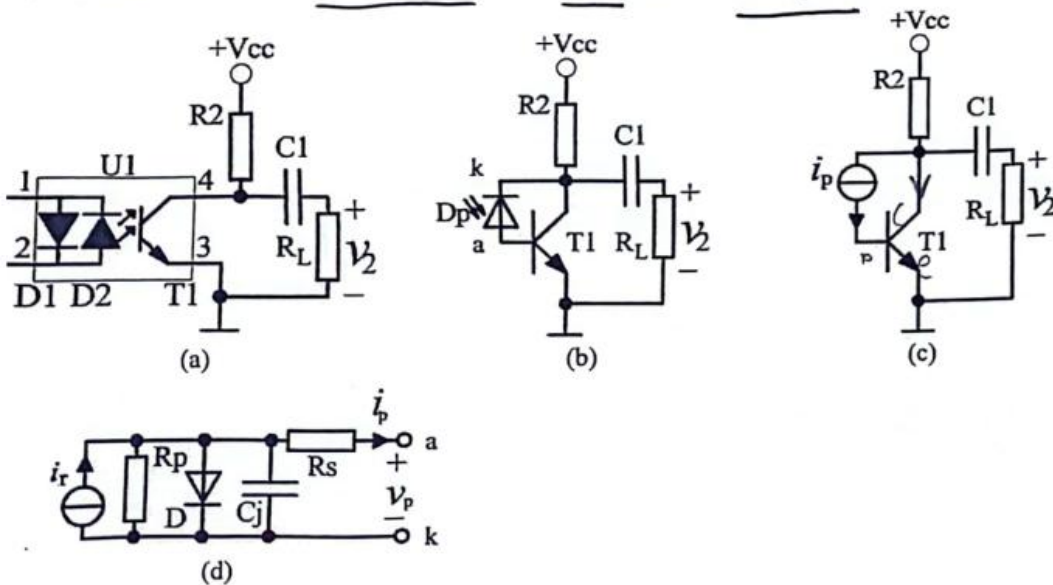
(1) 光电二极管可工作在零偏置 (又称光伏或短路) 模式、反向偏置 (光导) 模式。由图(d), 分析光伏和光导模式有什么不同的优缺点? 光耦中的光电二极管  $D_p$  工作于什么模式?

(2) 图(c)中设  $i_p = 10\mu\text{A}$  为直流电流, 求此时的  $I_C$ 、 $V_{CE}$ 。判断  $T_1$  工作于什么状态 (放大/截止/饱和)?

(3) 图(c)中, 以电流源  $i_p$  作为输入, 画出交流通路及小信号等效电路。

(4) 图(c)中, 以电流源  $i_p$  两端作为输入端, 求互阻增益  $A_v = \frac{v_2}{i_p}$ 、输入电阻  $R_i$ 、输出电阻  $R_o$  的表达式 (无需代入数值计算)。

(5) 发生漏电时,  $D_1$ 、 $D_2$  流过较大电流。定性画出此时输出电压  $v_2$  波形。

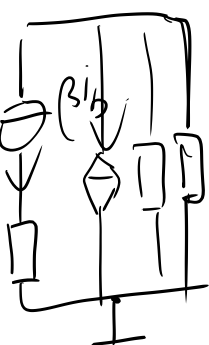


(2) 放大  $I_C = \beta I_p = 1\text{mA}$

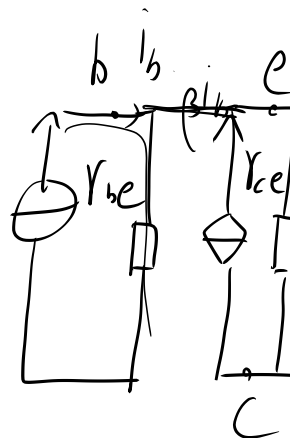
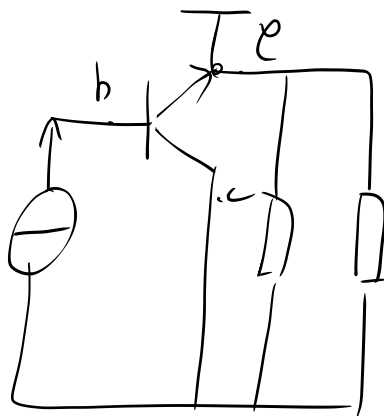
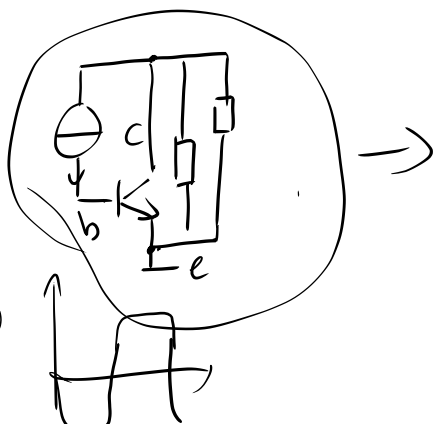
$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C + I_p)R_2 \approx V_{CC} - I_C R_2$$

$$V_{CE} > V_{CES}$$

(3)



(4)

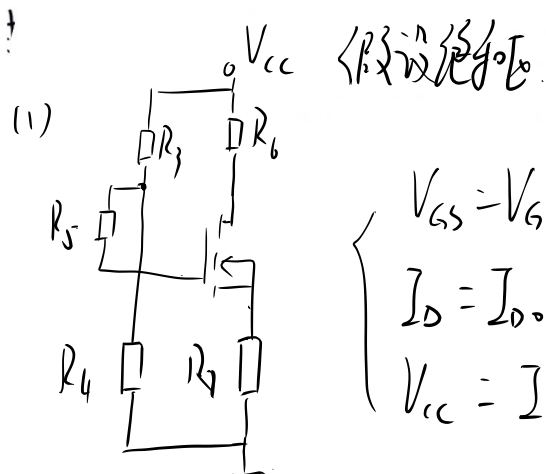
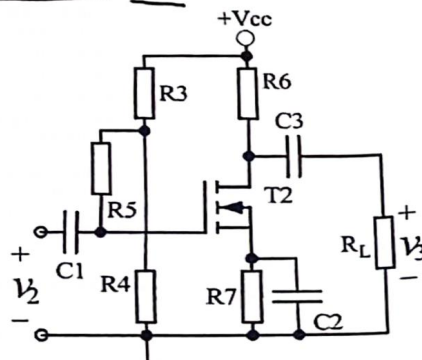




5. (20 分) 图 1 中的放大电路 A 如图, 已知  $R_4=10k\Omega$ ,  $R_3=1M\Omega$ ,  $R_6=2k\Omega$ ,  $R_7=1k\Omega$ ,  $C_1=C_2=C_3=100\mu F$ , 电源电压  $V_{cc}=5V$ 。T1 型号为 2SK1828, 开启电压  $V_T=0.7V$ , 电流  $I_{D0}=10mA$ ,  $r_{ds}$  忽略不计。  $R_L$  为后级放大器 B 的输入电阻,  $R_L$  由第 6 题获得, 设  $R_L \approx 100k\Omega$ 。要求  $I_{DQ}=0.9mA$ 。

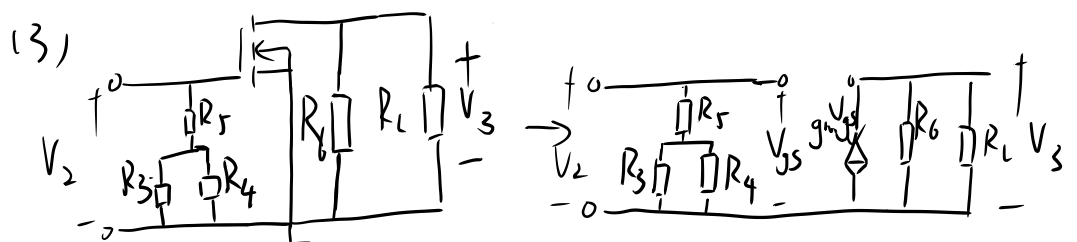
- (1) 设计  $R_3$  的阻值。求静态工作点  $V_{DSQ}$ 。
- (2) 求跨导  $g_m$ 。
- (3) 画出交流通路和小信号等效电路。
- (4) 求增益  $A_v$ 、输入电阻  $R_i$ 、输出电阻  $R_o$ 。

$R_3$  的作用是什么?



$$\begin{cases} V_{GS} = V_G - V_S = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{CC} - I_D R_7 \\ I_D = I_{D0} \left( \frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 \\ V_{CC} = I_D (R_6 + R_7) + V_{DS} \end{cases}$$

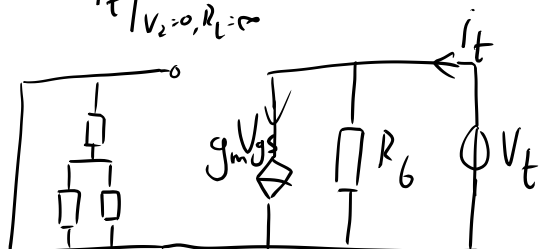
(2)  $g_m = \frac{2}{V_T} \sqrt{I_{D0} I_{DQ}}$



(4)  $A_v = \frac{V_3}{V_2} = \frac{-g_m V_{gs} (R_6 \parallel R_L)}{V_{gs}} = -g_m (R_6 \parallel R_L)$

$$R_i = R_5 + (R_3 \parallel R_4)$$

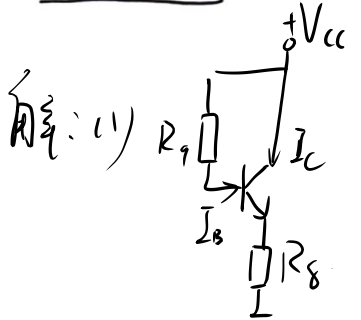
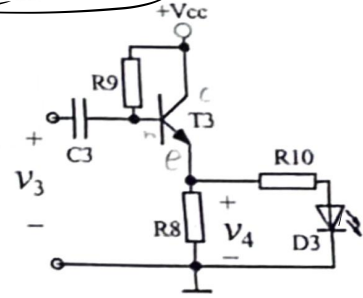
$$R_o = \frac{V_t}{i_t} \Big|_{V_2=0, R_L=\infty} = R_6$$



$R_5$ : 增大输入电阻

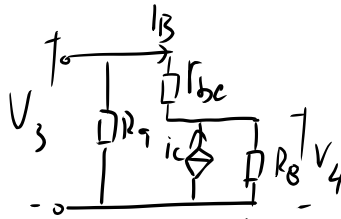
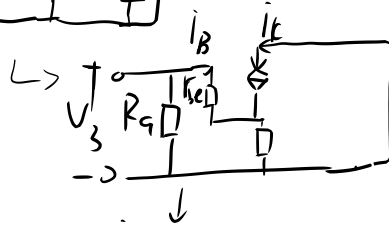
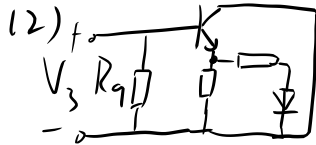
6. (16分) 图1中的放大电路B如图, T3 型号为 MMBT5551, 设  $V_{BE} = 0.7V$ ,  $\beta = 100$ ,  $r_{be} = 200\Omega$ , 温度的电压当量  $V_T = 26mV$ , 饱和压降  $V_{CEs} = 0.1V$ ,  $R_9 = 1k\Omega$ ,  $R_{10} = 100\Omega$ ,  $C_3 = 100\mu F$ , 电源电压  $V_{CC} = 5V$ . 发光二极管 D3 采用恒压降模型, 正向导通电压  $V_{on} = 1.8V$ . 未发生漏电时,  $v_3 = 0$ , 放大电路处于静态, 要求此时  $v_4 = 1.5V$ , D3 不亮. 发生漏电时,  $v_4$  峰值大于  $V_{on}$ , D3 点亮. 第(1)、(2)、(3)小题设 D3 截止.

- (1) 设计  $R_9$  的大小.
- (2) 画出交流通路和小信号等效电路.
- (3) 求  $r_{be}$ 、增益  $A_v$ 、输入电阻  $R_i$ 、输出电阻  $R_o$  的表达式 (不需代入数值计算).



$$\begin{cases} V_{CC} = I_B(R_9 + R_8) + V_{BE} \\ V_{CC} = I_C R_8 + V_{CE} \\ I_C = \beta I_B \end{cases}$$

$\Downarrow$   
 $R_9$

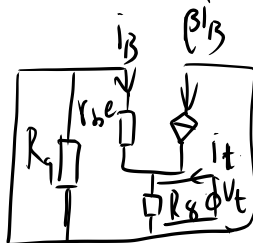


$$(3) r_{be} = r_{be0} + (1+\beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx 200 + (1+100) \frac{26}{I_{EQ}}$$

$$(4) A_v = \frac{v_4}{v_3} = \frac{R_8(I_C + I_B)}{R_8(I_C + I_B) + I_B r_{be}} = \frac{R_8(1+\beta)}{R_8(1+\beta) + r_{be}}$$

$$R_i = \frac{v_3}{i_3} = \frac{v_3}{I_B + I_{R9}} = \frac{v_3}{I_B + \frac{v_3}{R_9}} = \frac{v_3}{\frac{v_3}{R_9} + \frac{v_3}{r_{be} + (1+\beta)R_8}} = \frac{1}{\frac{1}{R_9} + \frac{1}{r_{be} + (1+\beta)R_8}}$$

$$R_o = \frac{v_t}{i_t} = \frac{1}{\frac{1}{R_8} + \frac{1+\beta}{r_{be}}}$$



$$v_t = [(1+\beta)i_B + i_t] R_8 = [- (1+\beta) \frac{v_t}{r_{be}} + i_t] R_8 \Rightarrow [1 + \frac{(1+\beta)R_8}{r_{be}}] v_t = i_t R_8$$

$$v_t = -i_B r_{be} \Rightarrow i_B = -\frac{v_t}{r_{be}}$$

$$\frac{v_t}{i_t} = \frac{1}{1 + \frac{(1+\beta)R_8}{r_{be}}}$$

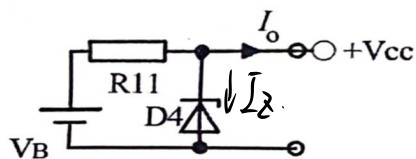
$$= \frac{1}{R_8} + \dots$$

7.

图 1 中的电源电路如图，要求供电电压  $V_{CC} = 5V$ ，耗电电流在  $I_o$  在  $0 \sim 5mA$  之间变化。采用 2 节 3V、200mAh 的 CR2032 纽扣锂电池串联成  $V_B$  供电，使用过程中电池电压  $V_B$  从 6V 最终降至低于 5.2V 则更换电池。电池经稳压管电路产生  $V_{CC}$ 。稳压管选用最大耗散功率  $P_{ZM} = 0.25W$  系列，型号 BZX84B5V1，测试电流  $I_{ZT} = 5mA$  时的稳定电压为  $V_Z = 5V$ ，此处的动态电阻为  $r_z = 60\Omega$ 。计算过程中，可将测试电流作为最小稳定电流  $I_{Zmin}$ 。

(1) 试确定限流电阻  $R_{11}$  的最大值和最小值 (不考虑动态电阻)。

(2) 在  $R_{11}$  的上述取值范围内选取平均值，求输出电流  $I_o = 5mA$  时，电池电压 5.2V~6V 变化引起的  $V_{CC}$  电压变化量  $\Delta V_{CC}$  (考虑动态电阻，可使用二极管折线模型或小信号模型分析)。根据计算结果，说明此电路设计是否合理。

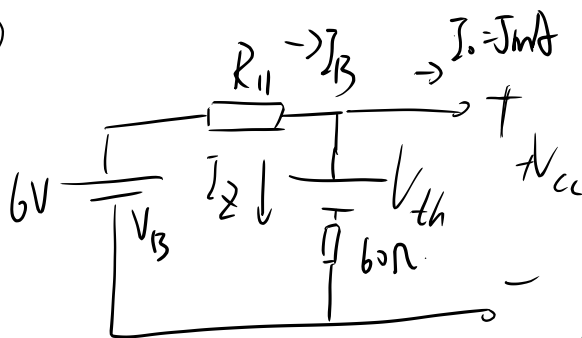


解 (1)

$$\begin{cases} \frac{V_{Bmin} - V_Z}{R_{11}} - I_{o max} \geq I_{Zmin} \\ \frac{V_{Bmax} - V_Z}{R_{11}} - I_{o min} \leq I_{Zmax} \end{cases} \rightarrow \frac{P_{ZM}}{V_Z} = 50mA$$

$R_{11} \leq 20\Omega$   
 $R_{11} \geq 20\Omega$

(2)



$\Delta I \rightarrow \Delta V$

$$\begin{aligned} V_{CC} &= V_Z + \Delta I_z r_z \\ &= V_Z + (I_Z - I_{ZT}) r_z \\ I_Z &= \frac{V_B - V_{CC}}{R} \\ I_Z &= I_o + I_Z \rightarrow 5mA \\ V_{CC} &: 5 \sim 5.6V \quad \Delta V_{CC} = 0.6V \\ &\text{稳压 4.10\%, 合理} \end{aligned}$$