

微弱信号检测 - 综合作业集 (50 题)

学习者姓名: _____

要求完成时间: 5-6 小时 | 提交日期:

作业说明

本作业集旨在巩固“噪声的分类、固有噪声、放大器分析、半导体器件噪声、外部干扰与屏蔽”等核心概念。

1. **多选题（【多选】）：**请选出所有正确的选项。少选、多选、错选均不得分。
 2. **计算/分析题（【计算/分析】）：**请写出详细的推导过程和最终结果，并注意单位。
 3. **基本物理常量：**玻尔兹曼常数 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; 电子电荷量 $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$; 标准噪声温度 $T_0 = 290 \text{ K}$ 。
-

1 主题一：噪声的分类 (Q1-Q6)

Q1. **【多选】**根据噪声的**统计特性和频率特性**，以下哪些分类是工程上常用的且正确的？

- A. 按照时域特性可分为平稳随机噪声和非平稳随机噪声。
- B. 按照幅值分布可分为高斯噪声和非高斯噪声。
- C. 按照功率谱密度特性可分为白噪声、粉红噪声 ($1/f$) 和蓝噪声 (f^2)。
- D. 按照产生根源可分为固有噪声、电路噪声和外部干扰噪声。
- E. 窄带噪声和宽带噪声是按照频率范围划分的分类。
- F. 热噪声和散粒噪声是根据时域统计特性划分的分类。

Q2. **【多选】**关于白噪声 (White Noise) 的特征描述，哪些是正确的？

- A. 功率谱密度在整个频率范围内是均匀的常数。
- B. 具有无限大的总功率。
- C. 通常是平稳的随机过程。
- D. 热噪声和散粒噪声在工程可测频带内均可近似为白噪声。
- E. 其自相关函数在时延 $\tau = 0$ 处为一个狄拉克 (Dirac) 冲激函数。
- F. 其幅值分布一定服从高斯分布。

Q3. **【多选】**以下哪几种噪声通常被归类为有色噪声 (Colored Noise)?

- A. 闪烁噪声 ($1/f$ 噪声)。
- B. 肖特基噪声 (散粒噪声)。

- C. 环境电磁干扰（如工频干扰）。
- D. 爆米花噪声（Popcorn Noise）。
- E. α 粒子撞击导致的瞬时噪声。
- F. 低频区域的截止噪声（Corner Noise）。

Q4. 【多选】从抑制手段来看，固有噪声和外部干扰噪声的主要区别体现在：

- A. 固有噪声的抑制侧重于使用低噪声器件和设计、低温冷却、带宽限制。
- B. 外部干扰的抑制侧重于接地、屏蔽、滤波（EMC 技术）。
- C. 固有噪声可以通过相关检测、锁相放大等方法从信号中分离出来。
- D. 外部干扰一旦进入系统，其频率和幅度特性很难改变。
- E. 固有噪声是不可消除的，而外部干扰在理论上可以完全消除。
- F. 通常只有固有噪声需要进行等效输入噪声源分析。

Q5. 【多选】以下哪些是窄带随机噪声的典型特征？

- A. 噪声的功率集中在一个很窄的频率范围内。
- B. 可以用一个随机包络和随机相位的正弦信号来表示。
- C. 往往是非平稳的。
- D. 其自相关函数为包络为慢变的周期函数。
- E. 工频干扰（如 50Hz/60Hz）的谐波可以视为一种窄带干扰。
- F. 其功率谱密度在零频率处达到最大。

Q6. 【分析】请简述“信噪比”（SNR）和“噪声指数”（ N_F ）或“噪声系数”（ F ）在衡量系统性能时的侧重点和区别。

2 主题二：固有噪声的种类、特征和来源（Q7-Q14）

Q7. 【计算/分析】某 $10 \text{ k}\Omega$ 电阻在 300 K 温度下工作。若带宽为 $B = 100 \text{ kHz}$ ，请计算：

- a. 该电阻产生的热噪声电压的均方值 $\overline{v_n^2}$ 。
- b. 对应的热噪声电流均方值 $\overline{i_n^2}$ 。

Q8. 【多选】关于热噪声 (Thermal Noise) 的特性，哪些描述是正确的？

- A. 噪声功率与电阻 R 成正比。
- B. 噪声功率与绝对温度 T 成正比。
- C. 噪声功率谱密度与频率无关，是白噪声。
- D. 热噪声的幅值服从均匀分布。
- E. 热噪声是由于载流子在导体内作随机热运动和碰撞引起的。
- F. 热噪声在开路状态下电压最大，短路状态下电流最大。

Q9. 【计算/分析】某二极管正向偏置电流 $I_{DC} = 1 \text{ mA}$ ，在 1 MHz 的带宽内，请计算其产生的散粒噪声 (Shot Noise) 电流的均方值 $\overline{i_n^2}$ 。

Q10. 【多选】散粒噪声 (Shot Noise) 的主要特征和产生机制包括：

- A. 产生于有直流电流流过的势垒区。
- B. 源于载流子独立、随机地渡越势垒的离散性。
- C. 均方电流值与直流电流 I_{DC} 的平方成正比。
- D. 在低频到甚高频范围内可近似为白噪声。
- E. 散粒噪声的幅值也服从高斯分布。
- F. 在热平衡状态（无外加偏置）下，散粒噪声也能产生。

Q11. 【计算/分析】某 $1/f$ 噪声的电压谱密度为 $S_v(f) = \frac{K_v I_{DC}^\alpha}{f}$ ，其中 $K_v = 1 \times 10^{-12} \text{ V}^2/\text{Hz}$, $\alpha = 2$, 直流电流 $I_{DC} = 10 \text{ mA}$ 。请计算该噪声在 $[1 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}]$ 频带内的均方电压 $\overline{v_{1/f}^2}$ 。

Q12. 【多选】闪烁噪声 ($1/f$ Noise) 的特性，哪些是正确的？

- A. 噪声功率谱密度与频率成反比。
- B. 在低频区域表现出明显的优势，在高频区域可忽略不计。
- C. 通常认为与半导体器件内部的陷阱能级对载流子的捕获和释放过程有关。
- D. 存在一个截止频率 (Corner Frequency)，在该频率以下， $1/f$ 噪声超过热噪声。
- E. 仅存在于半导体器件中，金属电阻中不存在。
- F. 闪烁噪声也是一种高斯噪声。

Q13. 【分析】对于一个由电阻 R 和电容 C 组成的 RC 低通滤波器，其噪声等效带宽 B_{eq} 是多少？（请给出公式，并解释其物理意义）。

Q14. 【多选】除了热噪声、散粒噪声和 $1/f$ 噪声外，以下哪些也属于电子器件中的固有噪声？

- A. 爆米花噪声（Popcorn Noise）。
 - B. 振荡器的相位噪声（Phase Noise）。
 - C. 微波器件中的等离子体噪声。
 - D. 击穿噪声（Avalanche Noise）。
 - E. 电源纹波（Power Supply Ripple）。
 - F. ESD 引起的瞬态噪声。
-

3 主题三：放大器的性能分析方法和关键指标 (Q15-Q22)

Q15. 【计算/分析】某放大器的增益 $G = 10^3$ (30 dB)，等效输入噪声电压谱密度 $S_{v,in} = 1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，带宽 $B = 1 \text{ MHz}$ 。

- a. 若输入端短路，计算输出端的总噪声电压均方根（RMS）值 $V_{n,out}$ 。
- b. 若输入信号电压 $V_{s,in} = 1 \mu\text{V}$ ，计算输出端的信噪比 SNR_{out} （以 dB 为单位）。

Q16. 【计算/分析】假设信号源电阻 $R_s = 50\Omega$ 处于 $T_0 = 290 \text{ K}$ 。某放大器在 50Ω 下的噪声系数 $N_F = 3 \text{ dB}$ 。请计算：

- a. 该放大器的噪声系数 F 。
- b. 该放大器的等效输入噪声温度 T_e 。

Q17. 【计算/分析】某两级级联系统，第一级：增益 $G_1 = 10$ (10 dB)，噪声系数 $F_1 = 2$ (3 dB)。第二级：增益 $G_2 = 100$ (20 dB)，噪声系数 $F_2 = 10$ (10 dB)。

- a. 计算系统的总噪声系数 F_{total} 。
- b. 计算系统的总噪声指数 $N_{F,total}$ （以 dB 为单位）。

Q18. 【多选】关于噪声系数 F 的理解，哪些是正确的？

- A. F 是衡量放大器自身噪声贡献的重要指标。
- B. F 定义为放大器输入信噪比与输出信噪比的比值。

- C. $F = 1$ (或 0 dB) 表示放大器没有引入任何附加噪声。
- D. F 的测量结果与信号源阻抗 R_s 无关。
- E. 在对低噪声放大器的要求中, F 越接近于 1 越好。
- F. F 与放大器的工作频率和带宽有关。

Q19. 【计算/分析】某接收机的带宽 $B = 100$ MHz, 总等效输入噪声温度 $T_{sys} = 1000$ K。

- a. 计算系统等效输入噪声功率谱密度 $S_{N,in}$ 。
- b. 计算系统的最小可检测信号功率 MDS (假设要求 SNR = 1)。

Q20. 【多选】除了噪声系数 F 外, 以下哪些指标也常用于衡量放大器的性能?

- A. 1 dB 压缩点 ($P_{1\text{ dB}}$)。
- B. 三阶截点 (IP3)。
- C. 最小可检测信号 (MDS)。
- D. 动态范围 (Dynamic Range)。
- E. 增益平坦度。
- F. 噪声温度 T_e 。

Q21. 【分析】请解释为什么在级联放大器设计中, 通常要求第一级具有高增益和低噪声系数。

Q22. 【多选】在进行放大器噪声分析时, 将所有噪声源归算到输入端形成等效输入噪声源 (e_n 和 i_n) 模型的目的是什么?

- A. 方便计算不同信号源阻抗 R_s 时的总噪声。
- B. 简化噪声系数 F 的计算。
- C. 将放大器视为一个无噪声的理想放大器。
- D. 方便比较不同器件在同一信号源下的噪声性能。
- E. 准确分析放大器内部各级噪声的贡献。
- F. 方便找出最佳噪声匹配的信号源阻抗 R_{opt} 。

4 主题四：半导体器件物理与噪声 (Q23-Q26)

Q23. 【多选】半导体器件中散粒噪声的产生与以下哪些物理现象或机制紧密相关？

- A. 载流子（电子、空穴）的扩散运动。
- B. 载流子在 PN 结势垒区随机、独立地渡越。
- C. 载流子在晶格中发生碰撞和散射。
- D. 多数载流子和少数载流子的复合与产生。
- E. 势垒区内电场的强度和均匀性。
- F. 霍尔效应。

Q24. 【多选】 $1/f$ 噪声与器件的表面和体效应有关。以下哪些因素被认为是 $1/f$ 噪声在半导体中产生的主要原因？

- A. 晶体管表面氧化层和界面处存在大量的陷阱能级。
- B. 载流子被陷阱随机捕获和释放，导致导电沟道中的载流子数量随机波动。
- C. 载流子在运动过程中与晶格的周期性振动发生碰撞。
- D. 欧姆接触区的高温热激发。
- E. 载流子寿命的随机波动。
- F. 器件的直流偏置电流 I_{DC} 的大小。

Q25. 【多选】在半导体电阻中，热噪声的本质来源于：

- A. 载流子在热激发下在导电体中的无规则运动。
- B. 载流子与晶格的非弹性碰撞。
- C. 导电体的电导率 σ 。
- D. 欧姆接触处的势垒效应。
- E. 导电体内的直流电流 I_{DC} 。
- F. 绝对温度 T 。

Q26. 【分析】在 PN 结的噪声分析中，扩散电容的噪声贡献是否应该被考虑？简述理由。

5 主题五：BJT 和 FET 的构造、等效电路和噪声分析 (Q27-Q34)

Q27. 【多选】对于双极型晶体管 (BJT) , 其主要的固有噪声源有哪些?

- A. 基极电阻 $r_{bb'}$ 的热噪声。
- B. 集电极电流 I_C 产生的散粒噪声。
- C. 基极电流 I_B 产生的散粒噪声。
- D. I_C 和 I_B 产生的 $1/f$ 噪声。
- E. 负载电阻的热噪声。
- F. 饱和区电流的复合噪声。

Q28. 【计算/分析】某 BJT 工作在 $I_C = 1 \text{ mA}$, $\beta = 100$, $T = 300 \text{ K}$, $r_{bb'} = 50\Omega$ 。请计算在中频段 (忽略 $1/f$ 噪声):

- a. 等效输入噪声电压源 e_n 的谱密度 $S_{v,BJT}$ (忽略 I_B 贡献)。
- b. 等效输入噪声电流源 i_n 的谱密度 $S_{i,BJT}$ 。

Q29. 【多选】对于结型场效应管 (JFET) , 其主要的固有噪声源有哪些?

- A. 漏极电流 I_D 产生的散粒噪声。
- B. 沟道电阻 r_d 的热噪声。
- C. 栅极漏电流 I_G 产生的散粒噪声。
- D. 沟道载流子运动产生的 $1/f$ 噪声。
- E. 源极电阻 R_S 的热噪声。
- F. 栅极感应噪声。

Q30. 【计算/分析】某 JFET 的跨导 $g_m = 5 \text{ mS}$, 沟道热噪声系数 $\gamma \approx 0.7$, 工作在 $T = 300 \text{ K}$ 。请计算其中频段等效输入噪声电压谱密度 e_n 。

Q31. 【多选】相比 BJT, MOSFET 在低噪声应用中的优势和劣势有哪些?

- A. 优势: MOSFET 的输入电流噪声 (由栅极漏电流决定) 通常极小。
- B. 优势: MOSFET 的 $1/f$ 噪声截止频率通常高于 BJT。
- C. 优势: MOSFET 的输入阻抗极高, 适合高源阻抗信号。

- D. 劣势：MOSFET 的沟道热噪声谱密度通常比 BJT 的 e_n 大。
- E. 劣势：MOSFET 的 $1/f$ 噪声通常较大，且受表面状态影响严重。
- F. 劣势：MOSFET 的击穿电压通常较低，限制了动态范围。

Q32. 【计算/分析】某放大器的等效输入噪声电压谱密度 $e_n = 2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，等效输入噪声电流谱密度 $i_n = 5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。请计算该放大器实现最佳噪声匹配时所需的信号源电阻 R_{opt} 。

Q33. 【分析】当信号源电阻 R_s 极高（例如 $R_s = 100 \text{ M}\Omega$ ）时，放大器的总输入噪声电压主要由哪个因素决定？请解释 JFET 或 MOSFET 在此场景下的优势。

Q34. 【多选】在 BJT 的等效输入噪声电路模型中，等效输入噪声电压源 e_n 主要用来描述哪种固有噪声？

- A. 基极电阻 $r_{bb'}$ 的热噪声。
 - B. 集电极电流 I_C 的散粒噪声（归算到输入端）。
 - C. 信号源电阻 R_s 的热噪声。
 - D. 基极电流 I_B 的散粒噪声。
 - E. 负载电阻 R_L 的热噪声。
 - F. 放大器内部电压放大级引入的噪声。
-

6 主题六：典型放大器的噪声特性 (Q35-Q38)

Q35. 【多选】关于低噪声放大器 (LNA) 的设计原则，哪些是正确的？

- A. 必须使用 R_{opt} 接近信号源阻抗 R_s 的器件。
- B. 采用低温或深冷技术可以有效降低热噪声。
- C. 尽量提高第一级的增益，以减小后续级噪声的贡献。
- D. 在低频段应选择 $1/f$ 截止频率低的 FET 作为输入级。
- E. 采用级联反馈可以有效降低系统的 $1/f$ 噪声。
- F. 在射频 LNA 中，需要进行共轭匹配以获得最大的功率增益。

Q36. 【分析】请简要说明互阻抗放大器 (TIA) 在处理高阻抗电流源信号（如光电二极管）时的主要噪声限制因素是什么，并指出其噪声分析的核心。

Q37. 【多选】针对宽带放大器的噪声设计，以下哪些措施是有效的？

- A. 采用分立低噪声器件设计输入级。
- B. 采用级联结构以提高总增益，同时减小后级噪声影响。
- C. 适当减小工作电流，以降低散粒噪声。
- D. 采用负反馈以稳定增益和带宽。
- E. 采用窄带滤波器来限制噪声带宽。
- F. 尽量使用无源元件进行阻抗匹配。

Q38. 【计算/分析】某差分放大器，输入级使用两个匹配的 BJT，其共模抑制比 $CMRR = 60$ dB。若输入端的共模电压噪声 $V_{cm} = 1$ mV (RMS)，请计算输出端因此产生的差模噪声 $V_{dm,out}$ (假设差模增益 $A_{dm} = 100$)。

7 主题七：外部干扰噪声分类和干扰途径 (Q39-Q44)

Q39. 【多选】外部干扰噪声按照其传播媒介或耦合方式，可以分为哪几类？

- A. 传导干扰 (Conducted Interference)。
- B. 辐射干扰 (Radiated Interference)。
- C. 容性耦合干扰 (Capacitive Coupling)。
- D. 感性耦合干扰 (Inductive Coupling)。
- E. 共模干扰 (Common Mode Interference)。
- F. 差模干扰 (Differential Mode Interference)。

Q40. 【多选】传导干扰的主要传播途径有哪些？

- A. 信号线上的电压或电流波动。
- B. 电源线和地线上的公共阻抗耦合。
- C. 空间电磁波的接收。
- D. 耦合到地线上的干扰电流。
- E. 绝缘体表面的电荷积累。
- F. 电路板上长导线间的互容。

Q41. 【计算/分析】假设两条平行导线长度 $L = 10 \text{ cm}$, 间距 $d = 2 \text{ cm}$, 回路面积 $A = 2 \text{ cm}^2$ 。若附近有一 50 Hz 、幅度为 1 T 的交流磁场 B (与回路垂直), 请估算该回路中感应出的干扰电压 V_{ind} 的峰值。

Q42. 【多选】容性耦合干扰 (电场耦合) 的特点和抑制方法是?

- A. 耦合路径是高阻抗的, 与频率成正比。
- B. 抑制方法主要包括使用电屏蔽 (法拉第笼)。
- C. 耦合强度与两条导线之间的距离成正比。
- D. 耦合强度与两条导线之间的互容 C_m 成正比。
- E. 容性耦合通常在低频段更容易发生。
- F. 采用双绞线可以有效抑制容性耦合。

Q43. 【多选】感性耦合干扰 (磁场耦合) 的特点和抑制方法是?

- A. 耦合路径是低阻抗的, 与频率成正比。
- B. 抑制方法主要包括使用磁屏蔽 (高导磁率材料)。
- C. 采用双绞线可以有效减小回路面积 A 。
- D. 耦合强度与两条回路之间的互感 M 成正比。
- E. 耦合强度与干扰电流的变化率 (dI/dt) 成正比。
- F. 感性耦合通常发生在长距离传输的低速信号线中。

Q44. 【多选】关于共模干扰 (Common Mode Interference) 的描述, 哪些是正确的?

- A. 干扰信号同时同相地作用于差分信号线的两端。
- B. 差分放大器的共模抑制比 CMRR 是抑制此类干扰的关键指标。
- C. 通常是由地电位差或外部辐射耦合引起的。
- D. 必须通过电容耦合才能进入电路。
- E. 在理想的差分电路中, 共模干扰会被完全消除。
- F. 共模干扰通常可以通过将信号线屏蔽层接地来泄放。

8 主题八：干扰途径，屏蔽技术等 (Q45-Q50)

Q45. 【多选】关于电屏蔽 (Electric Shielding) 的原理和应用，哪些是正确的？

- A. 主要用于抑制高频电场干扰。
- B. 屏蔽体通常采用高导电率的材料，如铜、铝。
- C. 屏蔽体利用反射和吸收来衰减电磁波。
- D. 屏蔽体必须进行良好接地，为感应电流提供泄放通路。
- E. 屏蔽体的厚度必须大于电磁波的趋肤深度。
- F. 对于静电场干扰，即使不接地，屏蔽体也能完全消除内部电场。

Q46. 【多选】关于磁屏蔽 (Magnetic Shielding) 的原理和应用，哪些是正确的？

- A. 主要用于抑制低频磁场干扰。
- B. 屏蔽体通常采用高导磁率的材料，如坡莫合金。
- C. 屏蔽体利用“分流”原理，将磁力线引导通过屏蔽体。
- D. 对于高频磁场，可以采用高电导率的材料，利用涡流效应进行屏蔽。
- E. 磁屏蔽的效率主要取决于屏蔽材料的导磁率 μ 和厚度。
- F. 磁屏蔽体必须进行多点接地。

Q47. 【分析】请简述单点接地和多点接地的适用场景和各自的优缺点。

Q48. 【多选】双绞线 (Twisted Pair) 在抑制噪声中的作用原理是什么？

- A. 减小相邻导线之间的互容，从而抑制容性耦合。
- B. 有效减小信号回路的环路面积，从而抑制磁场耦合。
- C. 扭绞使得外部磁场在导线中感应的电动势相互抵消。
- D. 平衡信号传输，提高共模抑制能力。
- E. 增加信号线的机械强度。
- F. 在高频应用中，能有效防止天线效应。

Q49. 【计算/分析】某屏蔽体使用电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ (铜) 的材料制作，工作频率 $f = 1 \text{ GHz}$ 。

- a. 计算该频率下的趋肤深度 δ 。(真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
- b. 若屏蔽体厚度 $t = 5\delta$, 请估算由吸收损耗 A 产生的衰减量 (以 dB 为单位)。

Q50. 【多选】以下哪些是系统设计中用于抑制外部干扰的滤波措施?

- A. 在电源线上使用 EMI 滤波器。
- B. 使用共模扼流圈 (Common Mode Choke)。
- C. 在信号输入端使用旁路电容 (Bypass Capacitor)。
- D. 采用陷波滤波器 (Notch Filter) 来抑制特定窄带干扰 (如工频)。
- E. 采用数字信号处理中的自适应滤波算法。
- F. 增加放大器的增益。