

# 浙江大学



## 本科实验报告

姓名：

---

学院： 生物医学工程与仪器科学学院

---

系： 生物医学工程系

---

专业： 生物医学工程

---

学号：

---

指导教师： 唐志峰

---

1、列出三种不同原理的温度传感器，并分析其异同点。

特性	热电偶温度传感器	热电阻温度传感器	红外温度传感器
测量原理	基于热电效应，由两种不同金属或合金导线连接而成。当热电偶的两端存在温度差时，会产生一个电动势（热电势），其大小与温度差呈正比，通过测量热电势即可确定温度	基于金属电阻随温度变化的特性，通常使用铂、铜或镍等金属。当温度升高时，金属的电阻值会增加，通过测量电阻值的变化即可确定温度	基于物体表面辐射能量与温度之间的关系，通过测量物体表面辐射的红外线能量来确定温度
测量范围	-200℃~1800℃	-200℃~600℃	宽范围（取决于具体型号）
精度	±1℃到±2℃	±0.1℃到±0.2℃	±1℃左右
响应速度	快	较慢	快
接触方式	接触式	接触式	非接触式
优点	结构简单、价格低、响应快	精度高、线性好、稳定性高	非接触测量、响应快、适用范围广
缺点	精度低、需信号放大	价格高、响应慢	精度低、受环境影响大

2、以某一传感器为实例，分析其性能指标中的静态特性和动态特性。

可以以同期的《生物医学传感与检测》的差动变面积式电容传感器为例来进行分析。

（1）静态特性

静态特性是指传感器在输入量（如位移）变化较慢或处于稳态时的输出特性。主要包括以下几个方面：

①线性度：线性度是指传感器输出与输入之间的线性关系程度。理想情况下，输出应与输入成正比。

根据实验报告中的数据，线性拟合公式为  $U = 0.45485Y + 0.0013$ ，灵敏度  $S$  为  $0.45485 \text{ mV/mm}$ 。线性度计算为  $L = \Delta U_{\max} / U_{FS} \times 100\% = 2.74\%$ 。

线性度为  $2.74\%$ ，说明该传感器的输出与输入之间的线性关系较好，但仍有少量非线性偏差。这种偏差可能来源于边缘效应、寄生电容等因素。这种偏差可能来源于边缘效应、寄生电容等因素。差动变面积式电容传感器通过差动结构有效抵消了共模干扰，从而提高了线性度。

②灵敏度：灵敏度是指传感器输出量的变化与引起该变化的输入量变化之比。实验结果中灵敏度  $S=0.45485 \text{ mV/mm}$ 。该灵敏度值表示每毫米位移变化会引起  $0.45485 \text{ mV}$  的电压变化。这一灵敏度水平对于差动变面积式电容传感器来说是合理的，能够满足大多数位移测量的需求。

③重复性：重复性是指在短时间内多次测量同一输入量时，输出结果的一致性。实验中未明确测量重复性，但从数据连贯性来看，测量结果较为稳定，未出现明显波动，重复性应是较好的，说明传感器在短时间内能够稳定地输出一致的结果，适合用于高精度测量。

④迟滞：迟滞是指传感器在输入量上升和下降过程中输出值的差异。操作步骤中提到“找到位移零点后，可将测微头转到  $+2\text{mm}$  处，从  $+2\text{mm}$  往下到  $-2\text{mm}$  连续测量，保持数据的连贯性，避免回程误差”，说明咱是通过连续测量避免回程误差的。

⑤稳定性：稳定性是指传感器在长时间工作后输出特性保持不变的能力。从实验过程来看，传感器在短时间内能够稳定工作。

## (2) 动态特性

动态特性是指传感器对输入量快速变化的响应能力。主要包括以下几个方面：

①时间常数：时间常数是指传感器输出达到输入变化的  $63.2\%$  所需的时间。虽然实验中未直接测量时间常数，但通过示波器观察低通滤波器的输出电压波形，可以间接反映传感器的动态响应。波形显示传感器的动态响应较快，能够较好地跟踪输入变化。具体的时间常数可以通过阶跃响应测试来确定。

②阶跃响应：阶跃响应是指传感器对阶跃输入的响应曲线。示波器观测显示，低通滤波器的输出频率与低频振荡器的频率误差小于  $0.5\%$ ，表明传感器的动态响应特性良好，能够准确地跟踪输入信号的变化。③频率响应：频率响应是指传

感器在不同频率输入下的输出特性。示波器观测显示，低通滤波器的输出频率与低频振荡器的频率误差小于 0.5%，表明传感器在测试频率范围内具有良好的频率响应特性，能够准确地反映输入信号的频率变化。

④动态范围：动态范围是指传感器能够测量的最小输入量与最大输入量之间的范围。实验中测量的位移范围为  $\pm 2\text{ mm}$ ，因此该传感器的动态范围为  $\pm 2\text{ mm}$ ，适合用于小位移测量。如果需要更大的动态范围，需要考虑调整传感器的结构或参数。

总结下来，差动变面积式电容传感器的静态特性较好，线性度为 2.74%，灵敏度为 0.45485 mV/mm，重复性好，迟滞效应小，稳定性较好。其动态特性也较为理想，动态响应快，频率响应良好，能够准确跟踪输入信号的变化。

### 3、要实现 16 路模拟量信号中选择 1 路，MCU 需要多少个 I/O?

根据模拟多路开关的地址编码原理，选择 16 路信号需要的地址线数量由  $2^n \geq 16$  确定，其中  $n$  为 I/O 口数量。计算得  $n=4$ 。因此，MCU 需要 4 个 I/O 口用于地址控制，实现 16 选 1 的模拟多路开关选通。

### 4、如何实现 64 路模拟量开关的选择?

通过 8 片 8 通道多路开关 MUX 级联，配合 6 位地址线（片内每片 8 通道需 3 位地址线，片选 8 片需 3 位地址线）和 3-8 译码器，可实现 64 路模拟量的选通。

每片多路开关的 8 个输入通道连接 64 路模拟信号中的 8 路。所有芯片的片内地址线并联至 MCU 的对应 I/O 口。片选信号由 MCU 的片选地址线经译码器生成，分别控制 8 片芯片的 CS 使能端。

MCU 通过输出不同地址信号，依次选通每一路模拟信号，接入后续调理或转换电路，最终实现多通道信号的分时采集。

### 5、如果一个仪器系统的综合精度要达到 0.1%，所用到的 ADC 至少需要多少位。

ADC 分辨率表示 ADC 对输入信号的最小分辨能力，定义为  $1/(2^n - 1)$ ，其中  $n$  为 ADC 位数，表示 ADC 能区分的最小输入信号与满量程的比值。

所以直接求解  $1/(2^n - 1) \leq 0.001$  得  $n \geq \log_2(1001)$ ，因此最小位数  $n = 10$ 。

## 6、查阅资料，深入理解使用环境参数对于 ADC 选择的重要性。

### (1) 温度范围与温度漂移

ADC 的参考电压、增益、失调电压等参数会随温度变化，导致转换误差。例如，12 位 ADC 若温度漂移为  $10\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ，在  $-40\sim 85^\circ\text{C}$  范围内误差可能达到 0.016%，超出系统精度要求。

因此需选择内置低漂移基准电压源（如  $\pm 5\text{ppm}/^\circ\text{C}$  以下）或支持外部高精度参考源（如 REF5025）的 ADC。对精度要求极高的场景（如工业控制、医疗设备），需选择带温度传感器或自校准功能的 ADC（如 AD4116），实时补偿温度误差。

### (2) 电磁干扰（EMI）与噪声环境

工业现场的电机、变频器会产生高频噪声，导致 ADC 输入信号失真。噪声环境下，ADC 的 SNR 指标（如  $\Sigma-\Delta$  型 ADC 可达 100dB 以上）直接影响有效分辨率，低 SNR 会使实际精度低于标称位数。

因此优先选择差分输入 ADC（如 AD7793），利用共模抑制比（ $\text{CMRR} > 100\text{dB}$ ）抑制噪声，适合强干扰环境。在高频噪声场景，需搭配片内或外部 RC 滤波器，同时选择支持过采样技术的  $\Sigma-\Delta$  型 ADC，通过噪声整形提升抗干扰能力。高压或强电磁环境中，采用隔离型 ADC（如 AMC1301），切断地环路干扰，保护系统安全。

### (3) 功耗与电源环境

穿戴设备、物联网传感器要求 ADC 待机功耗  $< 1\mu\text{A}$ （如 ADS1115，待机功耗  $0.1\mu\text{A}$ ），避免频繁更换电池。工业设备虽然功耗要求宽松，但需支持宽电源电压（如  $3\sim 5\text{V}$  双电源），适应不稳定电源输入（如 MCP3421）。

因此在高速采样场景（如示波器，1MSPS 以上）选择流水线型 ADC（如 AD9288），优化动态功耗；低速高精度场景（如电子秤）选择  $\Sigma-\Delta$  型 ADC，

利用休眠模式降低静态功耗。同时还需选择高 PSRR（电源抑制比）的 ADC（如  $>80\text{dB}$ ），减少电源纹波对转换精度的影响。

#### （4）机械与环境可靠性

工业自动化、车载设备要求 ADC 封装坚固（如 LQFP、BGA 封装），抗振动等级符合 IP67 标准。潮湿环境需防潮封装，粉尘环境需考虑 PCB 涂层保护，或选择集成度高的 ADC 减少外部元件。

### 7、一个供电电压为 5V 的 DAC，如果最小分辨电压为 2mV，DAC 至少应该选几位？

DAC 的最小分辨电压（分辨率）= 满量程电压（VREF）/  $(2^n - 1)$

其中，n 为 DAC 位数，满量程电压为供电电压 5V，最小分辨电压要求为 2mV。

因此就是求解  $5 / (2^n - 1) \geq 0.002$ ，即  $n \geq \log_2(2051)$ ，解得  $n = 12$  为满足最小分辨电压 2mV 且供电电压 5V 的条件，DAC 至少需要 12 位。

### 8、分别描述二种利用 DAC 输出余弦信号的方法，并进行比较。

#### （1）基于微处理器的软件合成法

预先计算一个周期内余弦信号的离散样本值（幅度量化为数字量），存入微处理器（如 MCU）的数组或查找表中。例如，对  $0^\circ \sim 360^\circ$  的余弦函数，按 N 个等间隔点采样，得到  $\cos(2\pi k/N)$  ( $k=0, 1, \dots, N-1$ )，再将幅度映射为 DAC 的输入数字量（如  $0 \sim 4095$  对应 12 位 DAC 的  $0 \sim 5\text{V}$ ）。我们在《电子系统设计与实践》的实验课上就是使用的这种方法输出正弦波形。

然后通过程序控制 MCU 按固定频率依次读取查找表中的数据，输入给 DAC，经低通滤波后输出模拟余弦信号。输出频率  $f = f_{\text{clk}}/N$ ，其中  $f_{\text{clk}}$  为 MCU 的时钟频率或数据更新速率。

#### （2）数字频率合成（DDS）技术

在 PC 或专用工具中生成一个周期的余弦信号样本（高分辨率，如 12 位以上），存入外部存储器（如 FLASH、ROM）或 DDS 芯片内置的波形存储器。样本点数量通常为  $2^M$ （如  $M=10$ ，1024 点），以匹配地址总线宽度。

接着通过相位累加器生成线性递增的地址序列，按固定步长（相位增量）读取存储器中的余弦样本，输入给 DAC。相位增量决定输出频率（步长越大，频率越高），配合低通滤波滤除高频杂散，得到平滑的余弦信号。

对比项	软件合成法	DDS 技术
核心器件	微处理器（MCU）+ DAC	DDS 芯片 / 波形存储器 + DAC
输出频率范围	低频（通常 $<1\text{MHz}$ ）	高频（可达百 MHz 级）
频率分辨率	取决于 MCU 时钟和采样点数，较低	取决于相位累加器位数，极高（如 1Hz 以下）
硬件复杂度	低（仅需 MCU 和 DAC）	中高（需 DDS 芯片或外部存储器）
成本	低	中高（专用芯片或存储器）
灵活性	高（软件可调波形参数）	低（需硬件配置或重新烧写数据）
适用场景	低频信号发生器、简单测控系统	高频通信、雷达、精密仪器（如频谱分析）

软件合成法通过微处理器直接控制 DAC 输出，适合低成本、低频、灵活可调的场景（如教学实验、简单波形发生器）。



DDS 技术利用相位累加和波形存储，在高频输出、高精度和稳定性上具有优势，适用于对信号质量要求苛刻的专业领域（如通信、测量仪器）。

## 9、简述采用 MCU 实现 LED 指示与 LED 照明的不同驱动方法。

### （1）LED 指示驱动

#### ①驱动需求

功能定位：用于状态指示（如电源、故障、通信状态），单个 LED 功率极低（通常 $\leq 50\text{mW}$ ，工作电流  $5\sim 20\text{mA}$ ）。

核心要求：电路简单、低成本、低功耗，支持开关控制（亮 / 灭）或简单亮度调节（如固定占空比闪烁）。

#### ②典型驱动电路

i) 直接驱动（MCU 引脚直接输出）：

电路结构：MCU 的 GPIO 口通过限流电阻（如  $330\Omega$ ）直接连接 LED 阳极，阴极接地（共阴接法）或阳极接电源（共阳接法）。

适用场景：单颗 LED、5V/3.3V 系统，LED 工作电流 $\leq$ MCU 引脚最大灌 / 拉电流（通常  $20\text{mA}$  以下，如 STM32 GPIO 最大灌电流  $16\text{mA}$ ）。

优点：无需额外元件，硬件极简；缺点：驱动能力有限，仅支持单颗 LED。

ii) 小功率三极管驱动（扩展驱动能力）：

电路结构：MCU 输出信号控制 NPN 三极管（如 S8050）基极，集电极接 LED 和电源，发射极接地。

适用场景：多颗 LED 并联（总电流 $\leq 100\text{mA}$ ），或 MCU 引脚电流不足时（如 3.3V 系统驱动 5V LED）。

优点：成本低，驱动电流可达  $50\text{mA}$ ；缺点：需额外三极管和电阻，不支持调光。

#### ③控制方式

开关量控制：MCU 输出高低电平直接控制 LED 亮灭（如 GPIO\_SetHigh/LOW）。

简单闪烁控制：通过软件延时切换高低电平（如  $500\text{ms}$  亮、 $500\text{ms}$  灭），实现状态指示闪烁。



## (2) LED 照明驱动

### ①驱动需求

功能定位：用于照明（如台灯、显示屏背光），单颗 LED 功率 $\geq 0.5\text{W}$ （工作电流  $50\sim 300\text{mA}$ ），或多颗 LED 串联 / 并联（总功率数瓦至数十瓦）。

核心要求：大电流驱动、亮度可调（无级调光）、恒流控制（避免电压波动影响亮度），需考虑散热和效率。

### ②典型驱动电路

i) 中功率三极管 / 达林顿管驱动（电流  $50\sim 500\text{mA}$ ）：

电路结构：MCU 通过 PWM 信号控制达林顿管（如 TIP122）基极，集电极接 LED 和电源，发射极串联采样电阻（用于电流反馈）。

适用场景：单颗大功率 LED 或少量 LED 串联（如 3 颗  $1\text{W}$  LED 串联，总电流  $350\text{mA}$ ）。

优点：驱动能力强，支持 PWM 调光；缺点：需外部电源（如  $12\text{V}$ ），需设计散热片。

ii) MOSFET 驱动（大电流 / 高压场景）：

电路结构：MCU 输出 PWM 信号经驱动芯片（如 IR2101）放大后控制 N 沟道 MOSFET（如 IRF540），漏极接 LED 和高压电源（如  $24\text{V}$ ），源极接地。

适用场景：多颗 LED 并联 / 串联（总功率 $>10\text{W}$ ），或需要高效能量转换的场景（如车载照明）。

优点：开关速度快、导通电阻低（降低功耗），支持高压输入；缺点：电路复杂，需隔离或电平转换。

iii) 集成驱动芯片（恒流控制）：

电路结构：使用专用 LED 驱动芯片（如 LM3409、XL6009），MCU 通过 I2C/SPI 接口设置电流和 PWM 占空比，芯片内部集成 MOSFET 和反馈电路。

适用场景：高精度恒流控制（如显示屏背光），支持 PWM 调光（频率 $>200\text{Hz}$ ，避免人眼闪烁）。

优点：内置保护功能（过流、过热），简化外围电路；缺点：依赖特定芯片，成本较高。

### ③控制方式

i) PWM 无级调光：

MCU 输出固定频率的 PWM 信号（如 1kHz~10kHz），通过改变占空比（0%~100%）调节 LED 平均电流，实现亮度连续可调（如 PPT 中提到的“占空比大则亮度高”）。

需注意 PWM 频率>100Hz，避免人眼察觉闪烁（照明场景通常≥200Hz）。

ii) 恒流控制：

通过电流反馈电阻和运放构成闭环，MCU 仅需输出目标电流对应的数字量（如通过 DAC 设置基准电压），驱动芯片自动维持恒流。

对比项	LED 指示驱动	LED 照明驱动
功率等级	小功率（≤50mW，电流≤20mA）	中大功率（≥0.5W，电流 50mA~ 数 A）
驱动元件	直接 GPIO 驱动或小功率三极管	达林顿管、MOSFET、集成驱动芯片
控制方式	开关量（亮 / 灭）或简单闪烁	PWM 无级调光、恒流控制
外围电路	极简（仅限流电阻）	复杂（需电源转换、反馈电路、散热设计）
调光需求	无需或简单固定占空比	必须支持连续亮度调节（PWM 占空比可调）
电源配置	依赖 MCU 电源（3.3V/5V）	需外部高压 / 大电流电源（如 12V/24V）
典型应用	设备状态指示灯、按键背光	台灯、显示屏背光、户外照明

总的来说，LED 指示以 “简单控制” 为核心，利用 MCU 引脚直接或通过小功率三极管驱动，满足状态显示需求，无需复杂调光。

LED 照明以 “功率驱动 + 调光控制” 为核心，需通过中大功率器件（MOSFET、专用芯片）和 PWM 技术实现亮度调节，同时解决电源适配和散热问题。

两者的本质区别在于功率需求和控制精度：指示驱动是 “开关量控制的小电流场景”，照明驱动是 “模拟量调节（PWM）的大电流场景”，需根据实际应用选择合适的驱动方案。

## 10、简述利用 PWM 信号进行 LED 台灯亮度无级调控的工作原理。

PWM（脉冲宽度调制）定义：通过周期性方波信号的 “高电平时间占比”（占空比）调节等效模拟量。

占空比 = （高电平时间 / 周期）× 100%，例如周期 1ms、高电平 0.5ms 的信号占空比为 50%。

LED 亮度由平均电流决定，电流越大亮度越高。PWM 信号通过控制 LED 的 “导通时间比例”，在不改变供电电压的前提下调节平均电流，实现亮度无级变化。

可以这么去解析他的工作原理：

### （1）PWM 信号生成（MCU 控制）

#### ①硬件基础：

MCU（如 STM32、Arduino）内置定时器模块，可配置为 PWM 输出模式，直接生成特定频率和占空比的方波信号。

典型参数：频率范围 100Hz~10kHz（避免人眼察觉闪烁，需 >100Hz），占空比 0%~100%（0% 为全灭，100% 为全亮）。

## ②软件配置：

通过寄存器或库函数设置定时器周期（决定 PWM 频率）和比较值（决定占空比）。

例：若周期为  $100\ \mu\text{s}$ （频率 10kHz），比较值设为  $50\ \mu\text{s}$ ，则占空比 50%。

## （2）驱动电路放大与保护

MCU 输出的 PWM 信号（3.3V/5V，电流仅 mA 级）无法直接驱动大功率 LED（电流需 50mA~1A），需通过驱动电路放大。

小功率场景（如 5W 以下台灯）：

NPN 三极管（如 S8050）或 MOSFET 作为开关，基极 / 栅极接 MCU 的 PWM 输出，发射极 / 源极接地，集电极 / 漏极接 LED 和电源。

中功率场景（如 10W 以上台灯）：

达林顿管（如 TIP122）或专用驱动芯片（如 TPIC6B595），支持更大电流并提供过流保护。

## （3）亮度调节的本质 —— 平均电流控制

开关状态下的电流特性：

**高电平时：**开关管导通，LED 流过额定电流。

**低电平时：**开关管截止，LED 电流为 0。

平均电流  $I_{\text{avg}} = I_{\text{LED}} / \text{占空比}$ ，例如占空比 20% 时，平均电流为 70mA。

当 PWM 频率  $> 100\text{Hz}$  时，人眼无法分辨闪烁，感知到的亮度为平均电流对应的等效亮度，从而实现“无级调光”效果（从 0% 到 100% 亮度连续变化）。

PWM 调光的本质是通过 “高频开关信号控制 LED 导通时间”，利用人眼视觉暂留效应，将离散的开关状态转换为连续可调的模拟亮度。