

传感器原理与技术

课程号：27020090 任课老师：魏婧雯、辛博
转工管群 ISGSNSG (QQ:920882951) [smewin.github.io](https://github.com/smewin)

声明

本文档由 AI (Mimo-V2.5Pro) 根据课程课件 PPT 自动整理生成，仅供学习参考，如有不一致请以授课内容和原始课件为准。

1 绪论

1.1 传感器的定义

传感器 (Sensor/Transducer)：能感受被测量并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。（国标 GB/T 7665-2005）

- **Transducer**：将信号从一种物理形式转换为另一种物理形式的装置。
- **Sensor**：将物理信号转换为电信号的装置。
- **Actuator**：将电能转换为物理能的装置。

传感器好比人体感觉的延长，又称“电五官”。人通过感觉器官（感官）接收外界信号，传送给大脑分析处理后传递给肌体。对应于机器系统：传感器 $\Leftrightarrow$ 五官，计算机 $\Leftrightarrow$ 大脑，执行机构 $\Leftrightarrow$ 肌体。

1.2 测试系统的构成

1.2.1 测试系统组成

测试系统一般由以下部分组成：

非电量 $\rightarrow$ 传感器 $\rightarrow$ 信号调理电路 $\rightarrow$ 记录和处理装置

传感器将被测量（物理、化学、生物量）转换为电信号（ U, I, R, L, C 等）。

1.2.2 被测量的分类

1. **电量**：电压、电流、功率、电阻、电容、电感
2. **非电量**：

- 机械量：位移、振动、速度、加速度、力、力矩
- 热工量：温度、压力、流量
- 化工量：浓度、成分、湿度等
- 生物量：酶、抗体、抗原、微生物、细胞、核酸等

1.2.3 传感器的组成

传感器的组成包括：

- 敏感元件：直接感受被测量，输出与被测量成确定关系的某一物理量
- 传感元件（转换元件）：将敏感元件的输出转换为电参量
- 信号调理电路：将电参量转换为可用的电信号输出
- 辅助电源：为传感器提供工作能量

1.3 传感器的分类

1.3.1 按被测量分类

- 物理传感器：位移传感器、力传感器、速度传感器、振动传感器、压力传感器、温度传感器等
- 化学传感器：气体传感器、离子活度传感器、离子浓度传感器、成分传感器等
- 生物传感器：细胞传感器、免疫传感器、微生物传感器、酶传感器、组织传感器等

1.3.2 按工作机理分类

- 阻抗式传感器：电阻式、电容式、电感式传感器
- 电动势式传感器：霍尔式、压电式、热电偶传感器
- 光电式传感器：光纤传感器、红外传感器、图像传感器

1.3.3 按能量关系分类

- 能量转换型（发电型）：直接将被测量转换为电信号，如热电偶传感器、压电传感器
- 能量控制型（电参量型）：先将被测量转换为电参量，在外部辅助电源作用下才输出电信号，如应变式传感器、电容式传感器

1.3.4 按输出信号分类

- 模拟传感器：输出连续变化的模拟信号，如热电阻传感器、压电传感器
- 数字传感器：输出“1”或“0”两种信号电平，如光电编码式传感器、感应同步器

1.4 传感器的发展动向

使传感器测试系统达到：量子化、微型化、智能化、网络化、多功能、多参数测量、宽范围、高精度、可靠性好、稳定性好、指标先进、适应环境广。

1.5 课程评估

最终成绩 = 卷面成绩（60%）+ 平时成绩（40%），平时成绩包括作业、实践环节、课程网络交流。

2 测试系统的特性分析

2.1 理想测试系统

理想测试系统应满足：

- 输入量与输出量呈唯一的、稳定的对应关系，且最好是线性关系
- 输出量能实时反映输入量的变化

2.2 测试系统的静态特性

当输入信号为慢变（稳态）信号时，不随时间变化或变化较为缓慢（准静态），此时系统表现出静态特性。

2.2.1 线性度（Linearity）

线性度是指传感器实际输出-输入特性曲线与拟合直线之间的最大偏差与满量程输出之比，通常用百分数表示：

$$\delta_L = \frac{|\Delta L_{\max}|}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1)$$

常用拟合方法：端点线性度、最小二乘线性度。

2.2.2 灵敏度（Sensitivity）

灵敏度是指在稳态下，输出量的变化量与引起此变化的输入量变化量之比：

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2)$$

对于线性系统，灵敏度为常数；对于非线性系统，灵敏度随输入量变化。

2.2.3 迟滞（Hysteresis）

迟滞是指在相同工作条件下，传感器正行程和反行程之间输出-输入特性曲线的不一致程度：

$$\delta_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (3)$$

2.2.4 重复性 (Repeatability)

重复性是指在相同工作条件下，输入按同一方向作全量程连续多次变化时，所得特性曲线不一致的程度：

$$\delta_R = \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (4)$$

2.2.5 精度 (Accuracy)

精度等级：0.005、0.02、0.05、0.1、0.2、0.35、0.4、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0 等。

- **准确度 (Trueness)**：测量值与真值的接近程度
- **精密度 (Precision)**：多次测量值之间的一致程度
- **精确度 (Accuracy)**：准确度和精密度的综合

2.2.6 其他静态特性

- **分辨力**：传感器能检测到的最小输入变化量
- **阈值**：使传感器输出产生可检测变化的最小输入量
- **零漂**：输入为零时，输出随时间的变化
- **温漂**：温度变化引起的输出变化

产品示例 (板环式拉压力传感器 CLBSB)：

- 测量范围：0 ~ 1000kg
- 输出灵敏度：1.5 ~ 2.0V/V
- 非线性/迟滞/重复性：0.02 级、0.05 级、0.1 级
- 零点温度系数：< 0.05%F.S
- 灵敏度温度系数：< 0.05%F.S
- 输入阻抗：685 ± 30Ω，输出阻抗：650 ± 5Ω
- 激励电压：10V (或 12V)，工作温度：-20 ~ +80°C

2.3 测试系统的动态数学模型

2.3.1 微分方程

线性时不变系统的微分方程：

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \quad (5)$$

其中： y 为输出量， x 为输入量， t 为时间，系统阶次由 n 决定， a_i 、 b_j 均为与系统结构有关的常数。

线性时不变系统的重要性质：

- **叠加性：**多个输入同时作用的输出等于各输入单独作用输出之和
- **频率保持性：**输入信号的频率成分通过线性系统后仍保持原有的频率成分。如果输入是单一的正弦函数，输出却包含其他频率成分，就可以断定其他频率成分绝不是输入引起的，它们或由外界干扰引起，或由装置内部噪声引起，或输入太大使装置进入非线性区，或该装置中有明显的非线性环节

频率保持性的意义：如余弦信号通过非线性系统（二极管），则输出被整流，其频率成分被改变。线性系统不会改变输入信号的频率成分，这是测试系统设计的重要原则。

2.3.2 传递函数

在零初始条件下，对微分方程取拉普拉斯变换：

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (6)$$

$H(s)$ 称为系统函数或传递函数。

2.3.3 频率响应函数

令 $s = j\omega$ ，可得频率响应函数：

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (7)$$

$H(j\omega)$ 一般为复数：

$$H(j\omega) = R_e(\omega) + jI_m(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (8)$$

其中：

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{R_e^2(\omega) + I_m^2(\omega)} \quad (9)$$

$$\varphi(\omega) = \angle H(j\omega) = \arctan \frac{I_m(\omega)}{R_e(\omega)} \quad (10)$$

- $A(\omega)$ — ω ：幅频特性曲线
- $\varphi(\omega)$ — ω ：相频特性曲线
- $20 \lg A(\omega)$ — $\lg \omega$ ：对数幅频曲线
- 总称为伯德图（Bode 图）
- $\text{Im}(\omega)$ — $\text{Re}(\omega)$ 曲线：乃奎斯特图（Nyquist 图）

2.3.4 单位脉冲响应函数

令输入 $x(t) = \delta(t)$ ，则 $X(S) = 1$ ， $Y(S) = H(S)$ ，反拉普拉斯变换得：

$$y(t) = L^{-1}[H(S)] = h(t) \quad (11)$$

$h(t)$ 称为单位脉冲响应函数。

传递函数、频率响应函数、脉冲响应函数的关系：

$$H(s) \xrightarrow{s=j\omega} H(j\omega) \xleftarrow{FT} h(t) \quad (12)$$

2.4 实现不失真测试的条件

信号不失真测试是指系统响应 $y(t)$ 的波形和输入 $x(t)$ 的波形完全相似：

$$y(t) = A_0 x(t - t_0) \quad (13)$$

不失真测试条件：

1. 幅频特性为一常数： $A(\omega) = A_0$ （即平行于频率轴的直线）
2. 相频特性与频率成线性关系： $\varphi(\omega) = -t_0\omega$

2.5 常见测试系统的动态特性分析

2.5.1 环节的串联与并联

串联： $H(s) = H_1(s)H_2(s) \cdots H_n(s)$

幅频特性： $A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega)$ ，相频特性： $\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega)$

并联： $H(s) = H_1(s) + H_2(s) + \cdots + H_n(s)$

2.5.2 零阶系统

微分方程： $y(t) = \frac{E_x}{E_m} x(t) = Kx(t)$

传递函数： $H(s) = K$

频率响应函数： $H(j\omega) = K$

零阶传感器的输出和输入同步变化，不存在动态误差和延迟（无惯性系统，比例系统）。典型例子：线性电位计（位置传感器）。

2.5.3 一阶系统

微分方程： $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$

传递函数：

$$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (14)$$

频率响应函数:

$$\begin{cases} H(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau + 1} \\ A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}} \\ \varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \end{cases} \quad (15)$$

特性分析:

- 一个低通环节。当 ω 远小于 $1/\tau$ 时, 幅频响应才接近于 1
- $\omega = 1/\tau$ 时, 幅频特性降为原来的 0.707 (即 -3dB), 相位角滞后 45°
- 时间常数 τ 决定了测试系统适应的工作频率范围
- 为了减小动态误差, 增大工作频率范围, 应尽可能采用时间常数小的测试系统

阶跃响应: 输入 $x(t) = A$ ($t > 0$), 则:

$$y(t) = A(1 - e^{-t/\tau}) \quad (16)$$

- $t = \tau$ 时, $y(t) = 0.632A$
- $t = 4\tau$ 时, $y(t) = 0.982A$

例题: 用某一阶系统测量 100Hz 的正弦信号。

1. 如果要求限制振幅误差在 5% 以内, 则时间常数 τ 应取多少?

答案: $\tau \leq 5.23 \times 10^{-4}\text{s}$

2. 若用具有该时间常数的同一系统作 50Hz 信号的测试, 振幅误差和相角差各是多少?

答案: $\delta = 1.32\%$, $\varphi = -9^\circ 19' 56''$

2.5.4 二阶系统

微分方程:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = x(t) \quad (17)$$

传递函数 ($K = 1/k$):

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (18)$$

其中: $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 为固有角频率, $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ 为阻尼比。

频率响应函数:

$$H(j\omega) = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right) + 2j\zeta \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (19)$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (20)$$

特性分析:

- 当 $\zeta > 0.707$ 时, $A(\omega) \leq 1$, 无谐振, $A(\omega)$ 随 ω 增加而单调下降
- 当 $\zeta < 0.707$ 时, 在 ω_n 附近产生谐振, $A(\omega)$ 有峰值
- 当 $\omega \ll \omega_n$ 时, $A(\omega) \approx 1$
- 当 $0.6 < \zeta < 0.8$ 时, $A(\omega)$ 接近于 1 的频率范围最大, 相位特性接近直线
- 当 $\omega = \omega_n$ 时, 输出-输入的相位差为 90° , 利用这一特点可以测量系统的固有频率 ω_n
- 推荐采用 ζ 值在 0.7 左右, $\omega_n > (3-5)\omega_{\max}$

阶跃响应 ($0 \leq \zeta < 1$, 欠阻尼):

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (21)$$

其中: $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 为有阻尼固有频率, $\phi = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$ 。

- $\zeta < 1$ 时, 出现衰减正弦振荡; $\zeta \geq 1$ 时, 不出现振荡
- 为了提高响应速度, ζ 值一般在 $0.6 \sim 0.8$ 之间
- 当 ζ 一定时, ω_n 越大, 则响应速度越快

时域性能指标: 响应时间 t_s 、峰值时间 t_p 、延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 、超调量 M_p 、稳态误差 $e_{ss} = \frac{y_{ss}-y_c}{y_c} \times 100\%$ 。

例题: 有一个二阶力传感器, 固有角频率 $\omega_n = 800\text{rad/s}$, 阻尼比 $\zeta = 0.14$ 。

1. 使用该传感器测量频率为 400rad/s 正弦变化的力时, 振幅误差和相位偏移?
2. 若 $\zeta = 0.6$ 、 $\zeta = 0.9$ 时, 振幅误差和相位偏移又分别为多少?

解: $\omega/\omega_n = 400/800 = 0.5$

当 $\zeta = 0.14$ 时:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-0.5^2)^2 + (2 \times 0.14 \times 0.5)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.5625 + 0.0196}} = 1.312 \quad (22)$$

$$\delta = (1.312 - 1) \times 100\% = 31.2\% \quad (23)$$

$$\varphi = -\arctan \frac{2 \times 0.14 \times 0.5}{1 - 0.5^2} = -\arctan(0.1867) = -10.6^\circ \quad (24)$$

一阶系统例题: 已知某测试系统传递函数 $H(s) = \frac{1}{1+0.5s}$, 当输入信号 $x = 4 \sin \pi t$ 时, 求系统稳态输出。

解: $\omega = \pi$, $\tau = 0.5$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.5\pi)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2.467}} = 0.538 \quad (25)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan(0.5\pi) = -\arctan(1.571) = -57.5^\circ \quad (26)$$

$$y(t) = 4 \times 0.538 \sin(\pi t - 57.5^\circ) = 2.15 \sin(\pi t - 57.5^\circ) \quad (27)$$

2.6 测试系统动态特性参数的测定

2.6.1 阶跃响应法

一阶系统:

- 方法一: $t = \tau$ 时, $y(t) = 0.632A$
- 方法二: $\ln[1 - y(t)/A] = -t/\tau$, 作图求斜率

二阶系统:

$$M_p = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (28)$$

2.6.2 频率响应法

依次用不同频率 f_i 的简谐信号去激励被测系统, 同时测出激励和系统的稳态输出的幅值 y_{0i} 和相位差 ϕ_i , 得到该频率下的幅值比 A_i 和相位差 ϕ_i 。

频率响应函数是描述系统的简谐输入和其稳态输出的关系, 在求解时必须在系统响应达到稳态阶段时才测量。从最低测量频率 $f_{\min}$ 到最高测量频率 $f_{\max}$, 逐步增加正弦激励信号频率, 记录各频率对应的幅值比和相位差, 绘图得到幅频和相频特性。

一阶系统辨识: 在 $\omega = 1/\tau$ 处, $A(\omega) = 0.707$, $\varphi = -45^\circ$, 由此确定 τ 。

二阶系统辨识: 在 $\omega = \omega_n$ 处, $\varphi = -90^\circ$ (与 ζ 无关), 由此确定 ω_n ; 由谐振峰值确定 ζ 。

2.7 本章小结

1. 非线性度、灵敏度、迟滞、重复性的含义及计算
2. 系统不失真测试条件: $A(\omega) = A_0$, $\varphi(\omega) = -t_0\omega$
3. 一阶系统动态特性: 传递函数 $H(s) = 1/(\tau s + 1)$, 阶跃响应 $y(t) = A(1 - e^{-t/\tau})$
4. 二阶系统动态特性: 传递函数 $H(s) = \omega_n^2/(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$, 阻尼比 ζ 对响应的影响
5. 系统特性参数的确定: 阶跃响应法和频率响应法

2.8 本章小结

1. 非线性度、灵敏度、迟滞、重复性的含义
2. 系统不失真测试条件
3. 一阶系统动态特性分析
4. 二阶系统动态特性分析
5. 系统特性参数的确定

3 电阻应变式传感器

3.1 电阻应变式传感器概述

发展历史：1856 年发现金属材料的应变效应；1931 年制成第一片应变片；1940 年发明应变式传感器；1952 年发现箔式应变片；1970 年半导体应变片。

优点：

- 测量灵敏度和精度高：常温时精度可达 0.01% 左右
- 测量范围广： $10^{-4} \sim 2 \times 10^5$ 量级的微应变
- 频率响应好：可测量从静态到数十万赫的动态应变
- 应变片尺寸小，重量轻：最小栅长可短到 0.178mm
- 可在各种复杂环境下测量

3.2 电阻应变片的工作原理

3.2.1 电阻应变效应

电阻应变效应：金属丝（导体）在外力作用下发生机械变形时，其电阻值随着所受机械变形（伸长或缩短）的变化而发生变化的现象。

压阻效应：半导体材料受到外力作用时，其电阻率发生变化的现象。

金属丝的电阻：

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (29)$$

当金属丝受拉力 F 时：

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (30)$$

引入应变关系：

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \quad (31)$$

其中： μ 为泊松系数， $\varepsilon_x = dL/L$ 为轴向应变。

- **金属材料：**电阻率变化很小， $\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon_x$ — “电阻应变效应”
- **半导体材料：**主要是电阻率的变化， $\frac{dR}{R} = \pi_L E \varepsilon_x$ — “压阻效应”，其中 π_L 为压阻系数， E 为弹性模量

3.2.2 灵敏度系数

电阻丝的灵敏度系数 K_s ：

$$K_s = \frac{dR/R}{\varepsilon_x} \quad (32)$$

电阻应变片的灵敏系数 K （标定灵敏度系数，由实验测定）：

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_x \quad (33)$$

3.2.3 横向效应

应变片的纵向应与测量的形变方向一致。圆弧部分产生负的电阻变化，降低了应变片的灵敏度。必须采取措施减小横向效应的影响。

3.3 电阻应变片的种类

1. 线式应变片：制作简单，价格便宜，易安装；横向效应大，测量精度较差
2. 箔式应变片：敏感栅采用合金金属箔，厚度 $0.001 \sim 0.01\text{mm}$
 - 可制成多种复杂形状、尺寸准确的敏感栅
 - 横向效应小
 - 散热条件好，允许电流大
 - 蠕变和机械滞后小，疲劳寿命长
3. 薄膜应变片：采用真空沉积或离子溅射等方法，厚度在 $0.1\mu\text{m}$ 以下
4. 半导体应变片：基于压阻效应，灵敏系数比金属大，动态特性好；但温度稳定性较差

3.4 应变片的主要参数

- 应变片电阻 R ：标准化， 60Ω 、 120Ω 、 350Ω 、 600Ω 、 1000Ω 等
- 灵敏系数 K
- 最大工作电流
- 机械滞后：加载和卸载过程中同一载荷下指示应变的最大差值
- 零漂：试件空载时，应变计示值随时间变化
- 蠕变：恒温恒载条件下，指示应变随时间单向变化
- 绝缘电阻：引线与被测试件之间的电阻值
- 疲劳寿命
- 应变极限：非线性误差达到 10% 时的真实应变值

3.5 电阻应变片的动态响应特性

应变片栅长为 l ，正弦应变波波长为 λ ，平均应变与中点应变的相对误差：

$$\delta = 1 - \frac{\sin(\pi l/\lambda)}{\pi l/\lambda} \quad (34)$$

- $l/\lambda = 1/10$ 时， $\delta = 1.62\%$
- $l/\lambda = 1/20$ 时， $\delta = 0.52\%$
- 应变片栅长与正弦应变波的波长之比愈小，相对误差愈小

3.6 电阻应变片的温度误差及其补偿

3.6.1 温度误差产生的原因

温度变化 Δt 形成的总电阻相对变化：

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \alpha \Delta t + K(\beta_{\text{试}} - \beta_{\text{丝}})\Delta t \quad (35)$$

相应的虚假应变：

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha}{K} \Delta t + (\beta_{\text{试}} - \beta_{\text{丝}})\Delta t \quad (36)$$

其中： α 为电阻温度系数， β 为线膨胀系数。

3.6.2 温度补偿方法

1. 桥路补偿法：利用电桥的对称性消除温度影响

2. 应变片自补偿法：

- 选择式自补偿应变片： $\alpha = -K(\beta_{\text{试}} - \beta_{\text{丝}})$ ，只适用特定试件材料
- 双金属敏感栅自补偿应变片：由两种不同电阻温度系数的材料串联组成

3.7 电阻应变式传感器的信号调理电路

3.7.1 直流电桥

直流电桥是电阻应变式传感器最基本的测量电路。

单臂电桥：当一个桥臂电阻变化 ΔR 时，电桥输出电压：

$$U_o = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} U_i \approx \frac{\Delta R}{4R} U_i = \frac{K\varepsilon}{4} U_i \quad (37)$$

半桥差动：两个相邻桥臂电阻变化 $+\Delta R$ 和 $-\Delta R$ ：

$$U_o = \frac{\Delta R}{2R} U_i = \frac{K\varepsilon}{2} U_i \quad (38)$$

全桥差动：四个桥臂都接入应变片，两个受拉、两个受压：

$$U_o = \frac{\Delta R}{R} U_i = K\varepsilon U_i \quad (39)$$

电桥的和差特性：相邻臂电阻变化符号相反时输出相加，符号相同时输出相减。

3.8 例题

例 3-1：什么是电阻的应变效应？利用应变效应解释金属应变式电阻传感器的工作原理。

答：电阻应变效应是指金属丝在外力作用下发生机械变形时，其电阻值随着所受机械变形的变化而发生变化的现象。当金属丝受拉力时长度增加、截面积减小，同时电阻率也有微小变化，综合导致电阻增大。

例 3-2：应变式电阻称重传感器的工作原理是什么？

答：被测力作用在弹性体上使其产生应变，粘贴在弹性体上的应变片感受到应变后电阻发生变化，通过电桥电路将电阻变化转换为电压信号输出，从而实现力的测量。

例 3-3: 应变片称重传感器，弹性体为实心圆柱体，直径 $D = 10\text{cm}$ ，材料弹性模量 $E = 205 \times 10^9 \text{N/m}^2$ ，用它称 50 吨重物，应变片灵敏度系数 $K = 2$ ， $R = 120\Omega$ ，求电阻变化。（ $g = 10\text{N/kg}$ ）

解：

$$F = mg = 50 \times 10^3 \times 10 = 5 \times 10^5 \text{N} \quad (40)$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times (0.1)^2}{4} = 7.854 \times 10^{-3} \text{m}^2 \quad (41)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{5 \times 10^5}{7.854 \times 10^{-3}} = 6.366 \times 10^7 \text{Pa} \quad (42)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6.366 \times 10^7}{205 \times 10^9} = 3.105 \times 10^{-4} \quad (43)$$

$$\Delta R = R \cdot K \cdot \varepsilon = 120 \times 2 \times 3.105 \times 10^{-4} = 0.0745\Omega \quad (44)$$

例：有一个电阻为 120Ω ， $K = 2$ 的应变片，粘贴在弹性极限为 400MN/m^2 ，弹性模量为 200GN/m^2 的钢件上。

1. 当应力等于弹性范围的 1/10 时， $\sigma = 40\text{MN/m}^2$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{40 \times 10^6}{200 \times 10^9} = 2 \times 10^{-4} \quad (45)$$

$$\Delta R = R \cdot K \cdot \varepsilon = 120 \times 2 \times 2 \times 10^{-4} = 0.048\Omega \quad (46)$$

2. 若应变片材料为康铜丝（ $\alpha = 20 \times 10^{-6} \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ ， $\beta_{\text{丝}} = 12 \times 10^{-6} \text{m/m}/^\circ\text{C}$ ， $\beta_{\text{钢}} = 16 \times 10^{-6} \text{m/m}/^\circ\text{C}$ ），温度变化 20°C ：

$$\Delta R_t = R[\alpha + K(\beta_{\text{试}} - \beta_{\text{丝}})]\Delta t \quad (47)$$

$$= 120 \times [20 \times 10^{-6} + 2 \times (16 - 12) \times 10^{-6}] \times 20 \quad (48)$$

$$= 120 \times 28 \times 10^{-6} \times 20 = 0.0672\Omega \quad (49)$$

可见温度变化引起的电阻变化与应变引起的电阻变化相当，说明温度补偿的重要性。

4 电容式传感器

4.1 工作原理及结构形式

用两块金属平板作电极可构成电容器，当忽略边缘效应时：

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (50)$$

其中： $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 为真空介电常数， ε_r 为相对介电常数， S 为覆盖面积， d 为极板间距。

三种基本类型：

1. 变间隙型 ($C-d$)
2. 变面积型 ($C-S$): 包括角位移型、平面线位移型、柱面线位移型
3. 变介电常数型 ($C-\varepsilon$)

4.2 变间隙的电容式传感器

4.2.1 空气介质

设动极板未移动时极板间距为 d_0 , $C_0 = \varepsilon S/d_0$ 。动极板上移 Δd :

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d/d_0}{1 - \Delta d/d_0} \quad (51)$$

当 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时, 展开:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \cdots \right] \quad (52)$$

忽略高阶项: 灵敏度 $S_n = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta d} = \frac{1}{d_0}$

考虑二阶: 非线性误差 $\delta = \frac{\Delta d}{d_0} \times 100\%$

差动式结构:

$$C_1 = \frac{\varepsilon S}{d_0 - \Delta d}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon S}{d_0 + \Delta d} \quad (53)$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \cdots \right] \quad (54)$$

灵敏度: $S_n = \frac{2}{d_0}$ (提高一倍)

非线性误差: $\delta = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \times 100\%$ (大幅减小)

4.2.2 具有固体介质

在极板间插入固体介质 (厚度 d_2 , 介电常数 ε_2), 气隙为 d_1 :

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d_1 + d_2/\varepsilon_2} \quad (55)$$

灵敏度因子 (非线性因子):

$$N = \frac{d_1 + d_2}{d_1 + d_2/\varepsilon_2} = \frac{1 + d_2/d_1}{1 + (d_2/d_1)/\varepsilon_2} \quad (56)$$

引入固体介质后, 灵敏度提高 N 倍, 但非线性误差也增大。

4.3 变面积的电容式传感器

直线位移型：

$$\Delta C = -\frac{\varepsilon b}{d} \Delta x, \quad S_n = \frac{\varepsilon b}{d} = \text{const} \quad (57)$$

圆柱形：

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln(R/r)}, \quad S_n = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(R/r)} = \text{const} \quad (58)$$

变面积型传感器具有良好的线性。

4.4 变介电常数的电容式传感器

线位移：插入介质 ε_{r2} 后， $C = \frac{(\varepsilon_{r1}(L-L_0) + \varepsilon_{r2}L_0)\varepsilon_0 b}{d_0}$ ，线性关系。

液位： $\Delta C = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)h_x}{\ln(D/d)}$ ，线性关系。

4.5 电容式传感器的等效电路

- R_p ：并联损耗电阻（极板间泄漏电阻和介质损耗）
- R_s ：串联损耗电阻（引线电阻、极板电阻）
- L ：电感（电容器本身电感和外部引线电感）

工作频率较高时：

$$C_e = \frac{C}{1 - \omega^2 LC} \quad (59)$$

工作频率应低于谐振频率。

4.6 电容式传感器的信号调理电路

4.6.1 变压器电桥电路

差动电容传感器 C_1 、 C_2 接入变压器电桥：

$$\dot{U}_0 = \frac{\Delta d}{d_0} \dot{E} \quad (60)$$

4.6.2 调频电路

把电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分，电容量变化导致振荡频率变化。灵敏度很高，最小可测 $0.01\mu\text{m}$ 的位移变化。

4.6.3 运算放大器式电路

$$\dot{U}_O = -\frac{C_0}{\varepsilon S} \dot{U}_i d \quad (61)$$

输出电压与动极板的板间距离成正比，解决了单个变极距型电容传感器的非线性问题。

4.6.4 脉冲宽度调制电路

利用对传感器电容的充放电使电路输出脉冲的宽度随传感器电容量变化而变化：

$$U_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1 \quad (62)$$

对于差动电容改变极板间距： $U_o = \frac{\Delta d}{d_0} U_1$

4.7 影响精度的因素及提高精度的措施

1. **温度的影响：**环境温度变化改变传感器的输出-输入单值函数关系，包括对几何尺寸的影响和对介质介电常数的影响
2. **漏电阻的影响：**电容传感器电容量很小（几十 pF），激励频率较低时容抗很高（几十兆欧），绝缘问题十分突出。漏电阻与容抗相近时灵敏度下降，且随环境温湿度变化产生零漂。解决：选用陶瓷、石英等绝缘性能好的材料；采用高激励频率（数千赫至数兆赫）
3. **边缘效应的影响：**适当减小极间距可减小边缘效应，但易击穿；电极应做得很薄；可在结构上增设等位环消除边缘效应——等位环与电极同平面并将电极包围，彼此电绝缘但等电位
4. **寄生电容的影响：**任何两个导体之间均可构成电容联系，寄生电容与传感器电容并联，影响灵敏度且不稳定。解决方法：
 - 增加传感器原始电容值
 - 注意传感器的接地和屏蔽
 - 集成化
 - 采用“驱动电缆”技术：内屏蔽层与芯线通过 1:1 放大器实现等电位
 - 整体屏蔽法：将传感器和转换电路、传输电缆用同一屏蔽壳屏蔽

4.8 例题

例 4-1：一个以空气为介质的平板电容式传感器，极板宽度 $a = 10\text{mm}$ 、长度 $b = 16\text{mm}$ ，极板间距 $d = 1\text{mm}$ 。测量时，一块极板沿 a 向平移了 2mm 。求电容变化量、电容相对变化量和位移灵敏度 K 。（ $\varepsilon_r = 1$ ， $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\text{F/m}$ ）

解：

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r a b}{d} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 10 \times 10^{-3} \times 16 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} = 1.417\text{pF} \quad (63)$$

$$\Delta C = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b}{d} \Delta a = -\frac{8.854 \times 10^{-12} \times 16 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} \times 2 \times 10^{-3} = -0.283\text{pF} \quad (64)$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{-0.283}{1.417} = -20\% \quad (65)$$

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta a} = \frac{0.283 \times 10^{-12}}{2 \times 10^{-3}} = 0.142\text{pF/mm} \quad (66)$$

例 4-2: 差动式极距变化型电容传感器，动极板位移 $\Delta d = 0.75\text{mm}$ ，初始电容 $C_0 = 80\text{pF}$ ，初始距离 $d_0 = 4\text{mm}$ 。求非线性误差。若改为单只平板电容，非线性误差多大？

解: 差动式: $\delta = (\Delta d/d_0)^2 = (0.75/4)^2 = 3.52\%$ 单只: $\delta = \Delta d/d_0 = 0.75/4 = 18.75\%$

4.9 电容式传感器的应用

- 电容式位移传感器、测厚传感器
- 电容式液位计
- 电容式湿敏传感器
- 电容式微加速度传感器（如汽车安全气囊）
- 电容式差压传感器
- 电容式触摸传感器

5 电感式传感器

电感式传感器是基于电磁感应原理，把被测量转化为电感量的一种装置。常用来测量位移、压力、流量、振动等物理参数。

- 自感型：变磁阻式传感器
- 互感型：差动变压器
- 涡流型：电涡流传感器

5.1 变磁阻式传感器

5.1.1 工作原理

$$L = \frac{W^2}{R_m} \quad (67)$$

其中: W 为线圈匝数, R_m 为总磁阻。对于气隙型:

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu S}, \quad L = \frac{W^2 \mu S}{2\delta} \quad (68)$$

三种类型:

1. 变气隙厚度 ($L-\delta$): $\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right]$
2. 变气隙面积 ($L-S$): 输出特性为线性
3. 变磁导率 ($L-\mu$): 压磁式传感器, 用于力的测量

变气隙厚度型灵敏度:

$$S_n = \frac{\Delta L/L_0}{\Delta \delta} = \frac{1}{\delta_0} \quad (69)$$

适用微小位移测量, 范围为 $0.001 \sim 1\text{mm}$, $\Delta \delta = (0.1 \sim 0.2)\delta_0$ 。

差动式自感传感器:

$$\frac{\Delta L}{L_0} \approx 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (70)$$

差动式优点:

- 线性度好 (不存在偶次项)
- 灵敏度提高一倍
- 温度变化、电源波动、外界干扰等影响相互抵消

变气隙面积型: $S_n = \frac{2W^2\mu}{\delta_0}$, 线性输出, 测量范围大, 灵敏度低。

螺管式自感传感器: 铁芯在线圈中运动改变磁阻。工作原理: 当铁芯在线圈中运动时, 将改变磁阻, 使线圈自感发生变化。特点: 结构简单、制造容易, 但灵敏度低, 适用于较大位移 (数毫米) 测量。

变铁芯磁导率型 (压磁式传感器): 利用某些铁磁材料的压磁效应, 当铁磁材料受力时, 其磁导率发生变化, 从而导致线圈电感变化。主要用于各种力的测量。

5.1.2 等效电路

实际传感器等效电路包括: L (电感)、 R_c (铜损电阻)、 R_e (涡流损耗电阻)、 R_h (磁滞损耗电阻)、 C (固有电容)。

5.1.3 信号调节电路

差动变压器电桥:

$$\dot{U}_o = \frac{\Delta Z}{Z} \cdot \frac{\dot{U}}{2} \quad (71)$$

零点残余电压: 由传感器两个电感线圈的电气参数与几何尺寸不对称、磁性材料的非线性等原因引起。

5.1.4 影响精度因素

内部因素: L - δ 非线性误差 (原理性误差)、零位误差。

外部因素: 温度变化、电源电压和频率波动。

5.2 差动变压器

差动变压器式传感器本身是一个变压器, 把被测位移量转换为传感器互感的变化。分为变气隙型、变面积型和螺线管型三种。

5.2.1 螺管式差动变压器

当次级开路时，初级绕组的交流电流为：

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{E}_p}{R_p + j\omega L_p} \quad (72)$$

差动变压器输出电压：

$$\dot{E}_s = \dot{E}_{s1} - \dot{E}_{s2} = -\frac{j\omega(M_1 - M_2)\dot{E}_p}{R_p + j\omega L_p} \quad (73)$$

- 铁芯处于中间位置时： $M_1 = M_2 = M$ ， $E_s = 0$
- 铁芯上升时： $E_s = \frac{2\omega\Delta ME_p}{\sqrt{R_p^2 + (\omega L_p)^2}}$ ，与 E_p 同极性
- 铁芯下降时： E_s 与 E_p 反极性

激励频率一般选 50Hz 到 10kHz。

5.2.2 信号调节电路

全波差动整流电路：零点残存电压自动抵消。

相敏检波电路：正位移输出正电压，负位移输出负电压，特性曲线由 (a) 变成 (b)，残存电压自动消失。

5.3 涡流式传感器

当金属板置于变化着的磁场中或者在固定磁场中运动时，金属体内产生感应电流（电涡流）。

5.3.1 高频反射式涡流传感器

线圈阻抗：

$$Z = f(\rho, \mu, r, \delta, \omega) \quad (74)$$

其中： ρ 为电阻率， μ 为导磁率， r 为尺寸因子， δ 为距离， ω 为频率。

等效电路分析：

$$Z = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j\omega \left[L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \right] \quad (75)$$

整体阻抗减小，电感减小的比电阻增加的多。

5.3.2 低频透射式涡流传感器

音频（< 20kHz）激励，多用于测定材料厚度。

5.3.3 测量电路

1. 定频调幅式：LC 并联谐振回路，恒流源供电
2. 变频调幅式
3. 调频式：LC 振荡回路的谐振频率作为输出量

5.3.4 应用

- **转速测量：**若转轴上开 z 个槽（或齿），频率计读数为 f （Hz），则转速 $n = 60f/z$ （r/min）
- **无损检测金属裂纹：**仅对造成电涡流回路开路的裂纹敏感，对平行于涡流回路的裂纹不敏感。原理：裂纹引起金属电阻率、磁导率变化，综合引起传感器参数变化
- **位移测量：**电涡流式测振仪测量机器主轴的轴向窜动
- **厚度测量：**低频透射式涡流传感器用于测定材料厚度
- **接近开关**

新型电涡流传感器：脉冲电涡流无损检测传感器，利用方波脉冲电压信号（多频率信号），可实现表面下损伤的检测。

5.4 例题

例 5-1：用电涡流式测振仪测量机器主轴的轴向窜动，传感器灵敏度为 25mV/mm，最大线性范围 5mm。

1. 为得到较好线性度与最大测量范围，安装距离应设在线性范围中点，即 2.5mm
2. 根据记录波形分析振幅和基频

例 5-2：已知变隙式电感传感器铁芯截面积 $A = 1.5\text{cm}^2$ ，磁路长度 $L = 20\text{cm}$ ，相对磁导率 $\mu_r = 5000$ ，气隙 $\delta_0 = 0.5\text{cm}$ ， $\Delta\delta = \pm 0.1\text{mm}$ ， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ ， $W = 3000$ 。求单端式传感器灵敏度 $\Delta L/\Delta\delta$ 。若做成差动结构，灵敏度如何变化？

解：

$$L_0 = \frac{W^2 \mu_0 \mu_r A}{2\delta_0} = \frac{3000^2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5000 \times 1.5 \times 10^{-4}}{2 \times 0.5 \times 10^{-2}} = 848.2\text{mH} \quad (76)$$

$$S_n = \frac{L_0}{\delta_0} = \frac{0.8482}{0.5 \times 10^{-2}} = 169.6\text{H/m} \quad (77)$$

差动结构灵敏度提高一倍： $S'_n = 2 \times 169.6 = 339.3\text{H/m}$

例 5-3：某线性差动变压器用频率 1kHz、峰峰值 6V 的电源激励，衔铁运动为 100Hz 的正弦运动，位移幅值 $\pm 2\text{mm}$ ，灵敏度 2V/mm。输出电压幅值 $= 2 \times 2 = 4\text{V}$ ，频率 100Hz，与激励信号 1kHz 调制。

6 压电式传感器

6.1 压电效应与压电常数

6.1.1 压电效应

正压电效应：某些电解质，当沿一定方向对其施力而使它变形时，内部就产生极化现象，同时在这两个表面上产生符号相反的电荷；当外力去除后，又重新恢复为不带电的状态。1880 年由 Jacques 和 Pierre Curie 发现。

逆压电效应：在压电材料的极化方向施加交变电场，它们能产生机械振动（电致伸缩效应）。

6.1.2 石英晶体

石英晶体（ SiO_2 ，化学成分二氧化硅）为六角棱柱体结构。坐标轴定义：

- x 轴：电轴（沿 x 轴方向施力时压电效应最强）
- y 轴：机械轴
- z 轴：中性轴/光轴（沿 z 轴方向施力时不产生压电效应）

切型：X 切型和 Y 切型是最基本的两种切型。

石英晶体压电效应机理：石英晶体的硅氧离子可等效为正六边形排列。未受力时，正负电荷中心重合，不显示极性。沿 x 轴受压力时，正负电荷中心分离，在垂直于 x 轴的表面出现电荷；沿 x 轴受拉力时，电荷极性相反。沿 y 轴施力时，产生的电荷极性与沿 x 轴施力时相反。

沿 x 轴方向施加作用力：

$$Q = d_{11}F_x, \quad q_{xx} = d_{11}\sigma_{xx} \quad (78)$$

其中： d_{11} 为压电系数（C/N）， σ_{xx} 为应力。

沿 y 轴方向施加作用力：

$$Q = d_{12}F_y, \quad d_{12} = -d_{11} \quad (79)$$

6.1.3 压电常数

表面电荷密度方程组：

$$q_{xx} = d_{11}\sigma_{xx} + d_{12}\sigma_{yy} + d_{13}\sigma_{zz} + d_{14}\tau_{yz} + d_{15}\tau_{zx} + d_{16}\tau_{xy} \quad (80)$$

$$q_{yy} = d_{21}\sigma_{xx} + d_{22}\sigma_{yy} + d_{23}\sigma_{zz} + d_{24}\tau_{yz} + d_{25}\tau_{zx} + d_{26}\tau_{xy} \quad (81)$$

$$q_{zz} = d_{31}\sigma_{xx} + d_{32}\sigma_{yy} + d_{33}\sigma_{zz} + d_{34}\tau_{yz} + d_{35}\tau_{zx} + d_{36}\tau_{xy} \quad (82)$$

石英晶体的压电常数矩阵：

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (83)$$

矩阵中第三行和第三列全部为零：说明沿 z 轴方向施力或施加电场时，不产生压电效应。

6.2 压电材料

6.2.1 石英晶体

- 居里点温度高（ 573°C ），稳定性好
- 无热释电现象
- 压电常数小，成本高

6.2.2 压电陶瓷

人工制造的多晶压电材料，如锆钛酸铅（PZT）及 BaTiO_3 。

- 压电常数大，成本低
- 居里点温度低，稳定性不如石英
- 有热释电现象
- 需要极化处理后才具有压电特性

6.2.3 新型压电材料

- 压电半导体材料：ZnO、CdTe、GaAs
- 有机高分子材料：PVDF（聚偏二氟乙烯），柔软、防水、频率响应范围宽

6.3 压电传感器的等效电路

电荷源等效电路：电荷源 Q 与电容 C_a 并联

电压源等效电路：电压源 $U = Q/C_a$ 和电容 C_a 串联

压电元件的联接方式：

- 并联： $Q' = 2Q$ ， $U' = U$ ， $C' = 2C$ — 容量大，适用于缓变信号
- 串联： $Q' = Q$ ， $U' = 2U$ ， $C' = C/2$ — 容量小，响应快，适用于高频信号

6.4 压电传感器的信号调理电路

压电式传感器是有源电容器，高内阻、小功率，需要前置放大器。

6.4.1 电压放大器

放大器输入电压幅值：

$$U_{im} = \frac{d_{ij} F_m \omega R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (84)$$

其中 $\tau = RC = R(C_a + C_c + C_i)$ 为放电时间常数。

限制：连接电缆不能太长，否则电缆电容 C_c 使灵敏度降低。

6.4.2 电荷放大器

具有深度电容负反馈的高增益放大器：

- 将高内阻的电荷源转换为低内阻的电压源
- 输出电压正比于输入电荷

- 在一定条件下，传感器灵敏度与电缆长度无关
- 输入阻抗高达 $10^{10} \sim 10^{12}\Omega$ ，输出阻抗小于 100Ω

6.5 压电传感器的应用

优点：频带宽、灵敏度高、信噪比大、结构简单、工作可靠、体积小重量轻

缺点：无静态输出，高的电输出阻抗，需用低电容的低噪声电缆

6.5.1 压电式加速度传感器

$$Q = d_{33}F = d_{33}ma \quad (85)$$

质量块感受与基座相同的振动，受到与加速度方向相反的惯性力。

6.5.2 压电式测力传感器

用于动态切削力的测量，三向力传感器可同时测量 F_X 、 F_Y 、 F_Z 。

6.5.3 压电式换能器

利用正压电效应和逆压电效应，实现声信号和电信号的相互转换。

- 当交变信号加在压电陶瓷片两端面时，陶瓷片产生机械振动，在空气中激发出声波（声频信号发生器）
- 当一定频率的声波作用在换能器上时，压电陶瓷上出现充放电现象（声频信号接收器）
- 如果振荡频率在超声波范围，则为压电超声换能器

应用：超声波流量计（顺流和逆流的相位差与流速成正比）、声速随深度分布测量。

6.5.4 压电式传感器的误差

1. **横向灵敏度的影响：**实际压电传感器除主轴方向外，对其他方向的力也有响应
2. **环境影响：**温度变化影响压电常数和绝缘电阻
3. **电缆噪声：**电缆振动产生摩擦电荷，应使用低噪声电缆
4. **接地回路噪声：**多点接地形成地回路，应采用单点接地

6.5.5 案例：交通监测

将高分子压电电缆埋在公路上，可获取车型分类信息（包括轴距、轮距、单双轮胎）、车速、收费站地磅、闯红灯拍照、交通数据信息采集（道路监控）等。

6.6 例题

例：某压电传感器由两片石英晶片并联而成，每片尺寸 $(50 \times 4 \times 0.3)\text{mm}^3$ ， $\varepsilon_r = 4.5$ ，1MPa 压力沿电轴垂直作用， $d_{11} = 2.31 \times 10^{-12}\text{C/N}$ 。

解：

$$Q = 2d_{11}PS = 2 \times 2.31 \times 10^{-12} \times 1 \times 10^6 \times 50 \times 4 \times 10^{-6} = 924\text{pC} \quad (86)$$

$$C = 2 \times \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{h} = 2 \times \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 4.5 \times 50 \times 4 \times 10^{-6}}{0.3 \times 10^{-3}} = 5.31\text{pF} \quad (87)$$

$$U = Q/C = 174\text{V} \quad (88)$$

7 磁敏式传感器

7.1 磁敏电阻

7.1.1 磁阻效应

当载流导体置于磁场中，其电阻会随着磁场而变化的现象叫磁阻效应。当温度恒定时，在磁场中，磁阻与磁感应强度 B 的平方成正比。

如果器件在只有电子参与导电的情况下，磁阻效应方程为：

$$\frac{\Delta R}{R_0} \propto \mu^2 B^2 \quad (89)$$

其中 μ 为载流子迁移率。迁移率越高的材料（如 InSb、InAs、NiSb 等半导体材料）磁阻效应越明显。

从微观上讲，材料电阻率增加是因为电流的流动路径因磁场的作用而加长所致。

7.1.2 磁敏电阻的结构

为提高灵敏度，必须提高 W/l 值。可在 InSb 半导体薄片上通过光刻形成栅状的 In 短路条。圆盘形磁阻元件的磁阻最大。

7.1.3 主要特性

- 灵敏度特性： $K = R_{0.3}/R_0$ （ $R_{0.3}$ 为施加 0.3T 时的电阻值， R_0 为无磁场时的电阻值）
- 温度特性：半导体磁阻元件温度特性不好，一般需设计温度补偿电路

7.2 磁敏二极管和三极管

磁敏二极管和磁敏三极管是基于磁阻效应的半导体器件，具有较高的灵敏度。

7.3 霍尔式传感器

7.3.1 霍尔效应

金属或半导体薄片置于磁感应强度为 B 的磁场中，磁场垂直于薄片，当薄片通以电流 I 时，在薄片的两侧面出现电势差 U_H ，称为霍尔电势。

$$U_H = -\frac{IB}{nqd} \quad (90)$$

其中： $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 为电子电荷量， n 为电子浓度， d 为薄片厚度。

定义霍尔系数 $R_H = \frac{1}{nq}$ ，霍尔灵敏度 $K_H = \frac{R_H}{d}$ ，则：

$$U_H = K_H IB \cos \alpha \quad (91)$$

霍尔电压与材料性质、元件尺寸、控制电流及磁场强度有关。

结论：

- P 型半导体（载流子为空穴）： $U_H = \frac{pIB}{qd}$
- $R_H = \rho\mu$ （ ρ 为电阻率， μ 为迁移率）

7.3.2 霍尔元件及测量电路

霍尔元件由霍尔片、四根引线和壳体组成。多采用 N 型半导体材料，霍尔元件越薄 K_H 越大。

7.3.3 主要特性参数

1. 额定功耗 P_0
2. 输入电阻 R_i
3. 输出电阻 R_o
4. 额定激励电流 I_H 和最大允许激励电流 I_M
5. 不等位电势 U_0 和不等位电阻 r_0
6. 霍尔温度系数 α
7. 内阻温度系数 β
8. 灵敏度 K_H
9. 电磁特性

7.3.4 误差和补偿

不等位电势误差：由于霍尔电极安装位置不对称等原因造成。可等效为四臂电阻电桥，采用并联电阻补偿。

温度误差：恒流源温度补偿电路。补偿电阻：

$$R = \frac{(\beta - \alpha)R_{i0}}{\alpha} \approx \frac{\beta R_{i0}}{\alpha} \quad (92)$$

7.3.5 应用

霍尔电势 $U_H = K_H IB \cos \alpha$ 是关于 I 、 B 、 α 三个变量的函数。利用这个关系可以使其中两个量不变，将第三个量作为变量。

- 霍尔式位移传感器：利用磁场梯度变化，位移引起 B 变化从而改变 U_H
- 霍尔式压力传感器：压力引起弹性元件变形，带动霍尔元件在梯度磁场中移动
- 霍尔式转速传感器：转盘上安装小磁铁，霍尔传感器检测磁场变化， $n = 60f/z$
- 霍尔式角位移测量仪：角位移改变磁场与霍尔元件的夹角 α
- 霍尔特斯拉计（高斯计）：直接测量磁场强度
- 霍尔式接近开关：当磁铁接近到动作距离时，霍尔式接近开关动作，可用于限位控制
- 霍尔电流传感器：被测电流导线穿过检测孔，导线周围产生磁场，穿过霍尔元件产生与电流成正比的霍尔电压。可做成钳形电流表
- 汽车 ABS：霍尔转速传感器检测车轮转动状态，控制刹车力大小

7.4 例题

7-3：某霍尔元件 $L \times b \times d = 10 \times 3.5 \times 1\text{mm}^3$ ， $K_H = 22\text{V/AT}$ ， $I = 1.0\text{mA}$ ， $B = 0.6\text{T}$ 。求输出霍尔电势。

解： $U_H = K_H IB = 22 \times 1.0 \times 10^{-3} \times 0.6 = 13.2\text{mV}$

8 光电式传感器

光电式传感器是利用光电器件把光信号转化成电信号的装置。可直接检测光的强度、相位、偏振面等参数，也可检测能转换成光量变化的其它量。

8.1 光电效应与光电器件

8.1.1 光电效应

每个光子具有的能量：

$$E = h\nu \quad (93)$$

其中： $h = 6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数， ν 为光的频率。

外光电效应：在光线作用下，物体内部的电子获得光子的能量而从表面释放出来的现象（1887 年赫兹发现）。

光电效应方程：

$$h\nu = \frac{1}{2}m_e v_0^2 + W_0 \quad (94)$$

其中： W_0 为逸出功， $m_e = 9.109 \times 10^{-31}\text{kg}$ 为电子质量。

红限频率： $\nu_0 = W_0/h$ ，只有入射光频率大于 ν_0 时，电子才会逸出。

结论：

1. 光电子能否产生取决于光子能量是否大于逸出功 W_0
2. ν 一定时，光电流与光强成正比
3. 逸出的光电子具有动能

基于外光电效应的器件：光电管、光电倍增管。

内光电效应：物体受光照射后，其原子的外层电子脱离原子核的束缚成为自由电子，使物体的电阻率发生变化或产生光电动势。

- **光电导效应：**电子吸收光子能量从键合状态过渡到自由状态，引起材料电导率变化。器件：光敏电阻、光电二极管、光电晶体管
- **光生伏特效应：**在光作用下使物体产生一定方向电动势。器件：光电池、光敏二极管、三极管

8.1.2 光电器件

光电管：

- **伏安特性：**当阴极发射的电子全部到达阳极时，阳极电流达到饱和状态
- **光照特性：**电压一定时，光通量与光电流之间的关系
- **光谱特性：**不同光电阴极材料有不同的红限频率。对红外光源常用银氧铯阴极，对紫外光源常用铯铍阴极和铯镉阴极

光电倍增管： $M = \delta^n$ ，一般 M 在 $10^5 \sim 10^8$ 之间，阳极和阴极之间电压 $1000 \sim 2500V$ ，相邻倍增电极电位差 $50 \sim 100V$ 。

- **倍增系数 M ：** $I_n/i = \delta^n$ ， i 为初始光电流， n 为倍增极个数
- **光电阴极灵敏度：**一个光子在阴极能打出的平均电子数
- **总灵敏度：**一个光子在阳极上产生的平均电子数
- **暗电流：**无光信号输入时仍有电流（由温度、热辐射等引起）

光敏电阻：

- **暗电阻/亮电阻/光电流：**光电流 = 亮电流 - 暗电流
- **光照特性：**多数光敏电阻是非线性的，一般用做开关式光电转换器
- **光谱特性：**硫化镉峰值在可见光区域，硫化铅峰值在红外区域
- **伏安特性：**电压越高光电流越大，无饱和现象

- **频率特性：**多数光敏电阻时延较大，不能用于快速响应场合
- **温度特性：**温度变化影响暗电阻和灵敏度，峰值随温度上升向波长短方向移动

光电池：利用光生伏特效应把光直接转变成电能（太阳能电池）。

- **硅光电池：**价格便宜，转换效率高，寿命长，适于红外光，峰值在 800nm 附近
- **硒光电池：**光电转换效率低，适于可见光，峰值在 540nm 附近
- **砷化镓光电池：**转换效率最高，光谱与太阳光谱最吻合，适于宇宙飞船等
- **光照特性：**短路电流在很大范围内与光强成线性关系；开路电压与光强非线性，在 2000lx 时趋于饱和
- 作为测量元件时应作为电流源使用，负载电阻越小越好
- **频率特性：**硅光电池频率响应很高，可用于高速记数
- **温度特性：**开路电压随温度升高而下降较快，短路电流随温度升高缓慢增加

光敏二极管：PN 结设置在管壳顶部正下方。电路中一般处于反向工作状态，无光照射时截止（反向电阻大，暗电流小），受光照射时导通。光电流与照度成正比。

光敏晶体管：基区做得较大以扩大光照面积，发射区面做得较小并在基区边缘。

- **光谱特性：**存在最佳灵敏度的峰值波长
- **伏安特性：**与一般晶体管类似，只需把光电流看作基极电流
- **温度特性：**温度变化对光电流影响很小，对暗电流影响很大，需温度补偿
- **频率特性：**减小负载电阻可提高响应频率，但输出降低

8.2 CCD 图像传感器

CCD（Charge Coupled Device）具备光电转换、信息存贮和传输等功能。

8.2.1 工作原理

MOS 光敏元结构：P 型硅衬底 + SiO₂ 层 + 金属电极。

基本功能：电荷的产生、存储、转移和输出。采用三相时钟脉冲 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 驱动实现电荷定向转移。

8.2.2 分类

线阵型：用于产品尺寸非接触测量、传真、光学文字识别等。包括：

- 单行结构：光敏单元 → 转移栅 → CCD 移位寄存器 → 输出
- 并行结构：两组 CCD 移位寄存器分别输出

- 光积储式、MOS 式、分离式

面阵型：用于摄像领域，能在 x 、 y 两个方向实现电子自扫描，获得二维图像。包括：

- 线转移式：由行扫描电路、垂直输出寄存器、感光区和输出二极管组成
- 帧转移式：光积分结束后，信号电荷迅速转移到存储器面阵，再逐行输出
- 行间转移式：光敏单元与垂直转移寄存器交替排列，转移栅电位由低变高时信号进入转移寄存器

8.2.3 主要特性指标

- 尺寸大小：如 $1/3''$ 、 $1/2''$ 、 $2/3''$ 等
- 像素数目：总像素数决定分辨率
- 灵敏度
- 信噪比
- 单位像素面积：面积越大，信噪比越高

8.2.4 应用

- 扫描仪：线阵 CCD 逐行扫描
- 尺寸测量： $L = (a/f - 1) \cdot np$ ，其中 f 为焦距， a 为物距， n 为像素数， p 为像素间距
- 字符识别
- 数码照相机：CCD 将图像以数字形式记录在存储器中
- 数码显微镜
- 工业检测：非接触测量、表面质量评定
- 汽车工业：车身检测
- 机器人视觉

彩色 CCD：

- 3CCD：三棱镜将光分离为红、绿、蓝三色，分别由三个 CCD 接收。效果理想但价格昂贵
- BAYER 滤光片：相邻四个像素分别接收一色光（2 绿、1 红、1 蓝），通过软件合成为彩色
- 四色感应 CCD：新增颜色加强自然风景的解色能力

特殊 CCD：

- 超级 CCD： 45° 排列结构，八角形像素外形，达到传统 CCD 两倍的分辨力

8.3 光纤传感器

8.3.1 光纤结构与传光原理

光纤由纤芯 (n_1)、包层 (n_2 , $n_1 > n_2$)、护套组成。基于全反射传播。

数值孔径: $NA = \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

归一化频率: $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}$, $V < 2.405$ 为单模光纤。

8.3.2 分类

按折射率: 阶跃型、渐变型。按模式: 单模光纤 (频带宽)、多模光纤 (存在模分散)。

按光纤作用: 功能型 (传感型)、非功能型 (传光型)、拾光型。

按调制形式: 强度调制型、相位调制型、偏振调制型、波长调制型、频率调制型。

8.3.3 特点

高灵敏度、抗电磁干扰、电绝缘性好、环境适应强、远距离测量、体积小、功耗低。

8.3.4 功能型光纤传感器

基于各种物理效应实现测量:

- 法拉第磁光效应: 平面偏振光通过带磁性物体时偏振面发生偏转, $\theta = V \int_0^L H \cdot dl$, 用于测量磁场和电流
- 光弹效应: 垂直于光波传播方向施加压力时材料产生双折射, $\varphi = 2\pi kpl/\lambda$, 用于测量压力
- 赛格纳克效应: 用于测量旋转 (角速度)
- 多普勒效应: 用于测量速度

8.3.5 传光型光纤传感器

光纤只作传光媒介, 调制功能由其他光电转换元件实现。光转换元件包括: 液晶 (温度、压力)、半导体膜 (温度)、波克尔斯元件 (电场)、法拉第元件 (磁场)、光弹性元件 (压力、应变) 等。

8.3.6 应用

- 光纤温度传感器: 功能型 (相位调制) 和传光型 (温度-光反射/透射转换器)
- 光纤开关与定位装置: 电路板标志检测、IC 芯片引脚检测
- 光纤水听器: 把光纤作为敏感元件的声传感器

发展趋势: 全光纤微型化、多参量实时化、高精度实用化、阵列化和网络化。

8.4 例题

例 8-1: 某光纤的纤芯和包层的折射率分别为 $n_1 = 1.64$, $n_2 = 1.45$, 求数值孔径。若外部媒质为空气 $n_0 = 1$, 求最大入射角。

解:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1.64^2 - 1.45^2} = \sqrt{0.5871} = 0.766 \quad (95)$$

$$\theta_c = \arcsin(NA/n_0) = \arcsin(0.766) = 50.0^\circ \quad (96)$$

8.5 本章小结

1. 光电效应原理（外光电效应、光电导效应、光生伏特效应）
2. 光电器件的基本结构和特性参数（光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电池、光敏二极管/三极管）
3. CCD 的基本结构（MOS 电容）、工作原理（电荷产生、存储、转移和输出）、分类和应用
4. 光纤的结构、传光原理（全反射、数值孔径）、分类（阶跃型/渐变型、单模/多模）
5. 光纤传感器的分类、调制形式（强度/相位/偏振/波长/频率调制）和应用

9 数字式传感器

数字式传感器特点：测量精度高，读数直观准确；测量范围大，分辨率高；易于实现自动化和数字化；稳定性好，抗干扰能力强。

9.1 感应同步器

利用电磁感应原理，把平面绕组间的相对位移量转换成数字量。

9.1.1 结构与工作原理

由定尺（连续绕组）和滑尺（正、余弦绕组，空间相差 90° ）组成。

在定尺上施加正弦激励电压 $u_m = U_m \sin \omega t$:

$$e_s = k\omega U_m \cos \omega t \cos \frac{2\pi}{W}x \quad (97)$$

$$e_c = -k\omega U_m \cos \omega t \sin \frac{2\pi}{W}x \quad (98)$$

9.1.2 测量系统

鉴幅型: $e = k\omega U_m \sin(\phi_{机} - \theta) \cos \omega t$

鉴相型: $e = -k\omega U_m \sin(\omega t + \phi_{机})$

9.2 编码器

9.2.1 脉冲式编码器

脉冲盘式编码器（增量式编码器）：旋转时输出脉冲信号，通过计数脉冲数目得到角位移。分辨率由每转脉冲数决定。

9.2.2 码盘式编码器

码盘式编码器（绝对式编码器）：直接输出与角位置对应的数字码。码道数决定分辨率， n 位码盘可分辨 2^n 个位置。优点：断电后位置信息不丢失。

9.2.3 编码器的应用

- 数控机床位置控制
- 机器人关节角度测量
- 电机转速测量
- 长度测量（配合丝杠）

9.3 光栅传感器

9.3.1 结构

主光栅（标尺光栅）和指示光栅（动光栅），刻线密度 10~200 线/mm，栅距 $W = a + b$ 。

9.3.2 莫尔条纹

主光栅和指示光栅之间有微小夹角 θ ，形成莫尔条纹。条纹间距 $B_H = W/\theta$ 。

特性：准确性（误差平均效应）、同步性、放大性（ $B \gg W$ ）、可调性、方向性。

输出信号： $u = U_0 + U_m \cos(2\pi x/W)$

9.3.3 鉴向与细分

鉴向：在相距 $(1/4)B_H$ 处安放两个光电元件，获得相位差 90° 的信号。

细分：四倍频细分在一个栅距内得到四个计数脉冲，提高分辨力。

9.3.4 光栅传感器的应用

- 数控机床位置控制：控制系统生成指令 P_c 控制工作台移动，光栅传感器不断检测实际位置 P_f 进行反馈，形成位置偏差 P_e ，调整工作台位置
- 2 自由度/3 自由度光栅数显
- 机加工中的在线测量

9.4 其他栅式传感器

- **磁栅：**磁尺 + 磁头。价格低于光栅，录磁方便、易于安装，测量范围宽可超过十几米，抗振动和抗冲击能力强。应用于磨床测长系统
- **容栅：**基于变面积工作原理的电容传感器，多对电极排列如同栅状。精度稍差但体积小、造价低。广泛应用于电子数显卡尺、千分尺、高度仪等。典型指标：量程 750mm，分辨率 0.001mm，示值误差 0.0075mm
- **时栅：**基于时间测量位移的新型传感器

9.5 例题

例 10-3-1：某光栅每毫米刻线数为 100 线，主光栅和指示光栅之间夹角 $\theta = 1.8^\circ$ ，采用 4 倍细分技术。求栅距、分辨力和莫尔条纹宽度。

解：

$$W = \frac{1}{100} = 0.01\text{mm} = 10\mu\text{m} \quad (99)$$

$$B_H = \frac{W}{\theta} = \frac{0.01}{1.8 \times \pi / 180} = \frac{0.01}{0.03142} = 0.318\text{mm} \quad (100)$$

$$\text{分辨力} = \frac{W}{4} = \frac{10}{4} = 2.5\mu\text{m} \quad (101)$$

例 10-3-3：某光栅栅线密度为 50 线/mm， $\theta = 0.01\text{rad}$ 。

1. 莫尔条纹间距 $B_H = W/\theta = (1/50)/0.01 = 2\text{mm}$
2. 若用四只光敏二极管接收，光敏二极管响应时间 10^{-6}s ，最快运动速度 $v = W/(4 \times 10^{-6}) = 0.02/(4 \times 10^{-6}) = 5000\text{mm/s} = 5\text{m/s}$

10 温度传感器

10.1 概述

10.1.1 温标

1. **摄氏温标：**冰点 0°C ，沸点 100°C
2. **华氏温标：**冰点 32°F ，沸点 212°F ， $^\circ\text{F} = 1.8n + 32$
3. **热力学温标：**水三相点 273.16K
4. **国际温标 ITS-90：** $t_{90} = T_{90} - 273.15$ ，规定四个温区、17 个定义固定点

温标换算关系： $T_C = T_K - 273.15$ ， $T_F = 1.8T_C + 32$ 。

ITS-90 主要固定点包括：水三相点 (0.01°C)、镓熔点 (29.7646°C)、铟凝固点 (156.5985°C)、锡凝固点 (231.928°C)、铝凝固点 (660.323°C)、银凝固点 (961.78°C)、金凝固点 (1064.18°C) 等。

10.1.2 温度测量的主要方法及分类

表 1: 温度测量方法分类

类型	传感器	测温范围	使用场合
接触式	热膨胀式	$-100 \sim 600^{\circ}\text{C}$	轴承、定子等
	金属热电阻	$-200 \sim 600^{\circ}\text{C}$	液体、气体温度
	热电偶	$-200 \sim 1800^{\circ}\text{C}$	高温测量
非接触式	辐射式高温计	$700 \sim 3500^{\circ}\text{C}$	火焰、钢水等
	红外测温	$-30 \sim 3000^{\circ}\text{C}$	远距离非接触

10.1.3 热电偶工作原理

热电效应（塞贝克效应）：两种不同材料的金属导体组成闭合回路，两个结点温度不同时产生热电动势。

产生条件：两种不同材料；热端和冷端温度不同。

总热电势：

$$E_{AB}(T, T_0) = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \ln \frac{N_A(t)}{N_B(t)} dt$$

(102)

10.1.4 基本定律

均质导体定律：热电势只与材料和两端温度有关。

参考电极定律： $E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0)$

中间导体定律：插入第三种导体两端温度相等时，热电势不变。

中间温度定律： $E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0)$

10.1.5 冷端补偿

1. 热电势修正法： $E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_0) + E_{AB}(T_0, 0)$
2. 电桥补偿法
3. 补偿导线法
4. 冰点法

例题：用镍铬-镍硅 K 型热电偶测炉温，冷端温度 $t_0 = 30^{\circ}\text{C}$ ，直流电位差计测得 $E_{AB}(t, 30) = 38.500\text{mV}$ ，求炉温。

解：

1. 查 K 型热电偶分度表： $E_{AB}(30, 0) = 1.203\text{mV}$

2. 根据中间温度定律: $E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, 30) + E_{AB}(30, 0) = 38.500 + 1.203 = 39.703\text{mV}$

3. 查分度表: $t = 960^\circ\text{C}$

例题: 热电偶灵敏度为 $0.08\text{mV}/^\circ\text{C}$, 电压表接线端温度 50°C , 电位计读数 60mV 。热端温度 $T = 60/0.08 + 50 = 800^\circ\text{C}$ 。

例题: 用镍铬-镍硅热电偶测炉温, 未采用冷端补偿时仪表示值 600°C , 冷端温度 $t_0 = 65^\circ\text{C}$ 。直接 $600 + 65 = 665^\circ\text{C}$ 是不对的。正确方法: 查分度表 $E(600, 0)$ 和 $E(65, 0)$, 再用中间温度定律计算。

10.1.6 热电偶材料

国际电工委员会 (IEC) 推荐的八种标准热电偶:

- **B 型** (铂铑 30-铂铑 6): 测温上限高, 适用于高温测量
- **R 型** (铂铑 13-铂) 和 **S 型** (铂铑 10-铂): 精度高, 用作标准热电偶
- **K 型** (镍铬-镍硅): 最常用, 测温范围 $-200 \sim 1300^\circ\text{C}$
- **E 型** (镍铬-铜镍): 灵敏度最高
- **J 型** (铁-铜镍)
- **T 型** (铜-铜镍): 适用于低温测量 ($-200 \sim 350^\circ\text{C}$)
- **N 型** (镍铬硅-镍硅): 改良型

10.1.7 热电偶结构

1. **普通装配型:** 热电偶丝、绝缘套管、保护套管、接线盒
2. **铠装型:** 热电极与高温绝缘材料预置在金属保护管中。特点: 可制作得很细 (解决微小、狭窄场合测温)、抗震、可弯曲、可长达上百米
3. **隔爆型:** 利用间隙隔爆原理, 所有产生火花的零部件密封在接线盒内。用于化工等易燃易爆场合
4. **薄膜型:** 两种热电极材料蒸镀到绝缘板上, 热结点极薄 ($0.01 \sim 0.1\mu\text{m}$), 响应时间仅几 ms, 适用于壁面温度快速测量

10.1.8 动态特性

传递函数 $H(s) = 1/(\tau s + 1)$, 阶跃响应 $T_j = T + (T_0 - T)e^{-t/\tau}$ 。

10.2 金属热电阻测温

10.2.1 铂热电阻

$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3)$, $A = 3.96847 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 。常用 Pt100。

10.2.2 铜热电阻

适用于 $-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ ，线性好，灵敏度高，价格便宜。

10.2.3 测量电路

- **二线式电桥**：将热电阻接到电桥的导线会产生附加电阻 r_1 、 r_2 ，是产生测量误差的重要原因。适于引线不长、精度要求较低的场合
- **三线式电桥**（工业用法）： $R_1 = R_2$ ， R_3 为精密电阻。当 $r_1 = r_2$ 时， $R_3 = R_t$ ，消除引线电阻影响
- **四线制**：两根线通恒流源电流，两根线测电压，完全消除引线电阻影响。精度最高

10.3 半导体温度传感器

10.3.1 热敏电阻

利用半导体的电阻值随温度显著变化的特性制成，由金属氧化物按不同配方比例经高温烧结而成。特点：温度系数大（灵敏度高）、结构简单体积小（可测点温度）、电阻率高热惯性小（适于动态测温）、互换性差非线性严重精度低、成本低应用广泛。

- **NTC**（负温度系数）：多为 Fe、Ni、Co、Mn 等过渡金属氧化物， $-100 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 。电阻-温度关系： $R_T = R_0 e^{B(1/T - 1/T_0)}$ ，其中 B 为材料常数
- **PTC**（正温度系数）：BaTiO₃ 系列陶瓷材料，掺入微量稀土元素半导体化。温度超过某一数值时电阻值快速增加。应用于各种电器设备过热保护、发热源定温控制、限流元件
- **CTR**（临界温度电阻）：以 VO₂ 为代表的半导瓷材料，在某一温度附近电阻值突降 3 ~ 4 个数量级。主要用途：温度开关、报警

热敏电阻应用领域：家用电器（电熨斗、电冰箱、空调等）、汽车电子（电子喷油嘴、空调等）、测量仪器（流量计、风速表等）、办公设备、医疗器具、工业生产（电动机过热保护）等。

10.3.2 集成温度传感器

利用 PN 结的伏安特性与温度之间的关系，将温度敏感元件和放大、运算、补偿等电路集成在一片芯片上。

- **AD590**（电流型）：输出与绝对温度成正比的电流，每变化 1K 变化 $1\mu\text{A}$ ， 0°C 时输出 $273.15\mu\text{A}$ 。相当于恒流源，通过负载电阻可转换为电压输出（ 10mV/K ）
- **LM35/45**（电压型）：直接输出与摄氏温度成正比的电压
- **DS18B20**（数字型）：单线接口，无需外部元件；不需要备份电源，可用数据线供电；测温范围 $-55 \sim +125^{\circ}\text{C}$ ，最大误差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ （ $-10 \sim 85^{\circ}\text{C}$ 范围内精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ）；可编程 9 ~ 12 位数字读数；支持多点组网，多个 DS18B20 可并联使用

集成温度传感器在电脑中用于 CPU 散热保护电路。

10.4 红外测温

红外辐射俗称红外线，波长范围 $0.75 \sim 1000\mu\text{m}$ ，频率 $4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11}\text{Hz}$ 。任何温度高于 0K 的物体都会向周围空间发出红外辐射。1800 年英国天文学家赫歇尔发现红外辐射。

10.4.1 热探测器

利用红外辐射的热效应，敏感元件吸收辐射能后引起温度升高，进而使物理参数发生变化。

1. **热敏电阻型红外传感器**：利用固体材料电阻随温度变化。无选择性探测器，从 X 射线到微波波段都可响应，室温工作。时间常数大（毫秒级）
2. **热电偶型红外传感器**：利用导体材料的热电特性。时间常数较大
3. **高莱气动型红外传感器**：利用气体受热膨胀特性。灵敏度高，性能稳定，但响应时间长，只适合实验室
4. **热释电型红外传感器**：利用铁电体极化强度与温度的关系。吸收红外辐射温度升高，极化强度降低，表面电荷减少放电。测量动态变化的温度信号

10.4.2 光子探测器

利用入射光辐射的光子流与探测器材料中电子互相作用，改变电子能量状态（光子效应）。包括内光电和外光电探测器。

特点：灵敏度高，响应速度快，具有较高响应频率，但探测波段较窄，一般需低温工作。

10.4.3 红外测温应用

- **红外测温**：远距离和非接触测量，反应速度快、灵敏度高、准确高、范围广（ $-30^{\circ}\text{C} \sim 3000^{\circ}\text{C}$ ）
- **红外探测**：热释电传感器用于自动亮灯、防盗报警器
- **探测运动物体**
- **示温涂料（变色涂料）**：温度升高后颜色变化，可用于 CPU 散热监测等

红外测温仪工作原理：光学系统汇聚视场内的目标红外辐射能量，聚焦在光电探测器上转变为电信号，再经换算转变为温度值。

温度传感器发展趋势：从模拟式向数字式、集成式、网络化、智能化方向发展。

10.5 机械式测温器件

10.5.1 液体玻璃温度计

基于液体在透明玻璃外壳中的热膨胀作用。当温度变化时，液体和贮液泡体积变化，毛细管中液柱弯月面升高或降低，从液柱高低读出温度。

10.5.2 双金属片温度计

由膨胀系数不同的两种金属片牢固结合制成，一线固定，另一线为自由端。温度变化时曲率变化，自由端产生位移，经传动放大机构带动指针。

优点：不需要电源，耐用。缺点：感温部件体积较大。

10.6 本章小结

1. 温标的概念及换算：摄氏、华氏、热力学温标、ITS-90
2. 热电效应原理及热电偶的四个基本定律
3. 热电偶冷端温度修正及补偿方法（热电势修正法、电桥补偿法、补偿导线法、冰点法）
4. 热电偶的材料、结构类型和动态特性
5. 金属热电阻（铂热电阻 Pt100、铜热电阻）的工作原理及测量电路
6. 半导体温度传感器（NTC/PTC/CTR 热敏电阻、集成温度传感器 AD590/DS18B20）
7. 机械式测温器件的原理
8. 红外测温的原理、探测器类型及应用

11 湿度传感器

11.1 湿度的概念

绝对湿度： $\rho_v = M_v/V$ （单位体积空气中水汽质量）

相对湿度： $RH = \rho_v/\rho_{v,sat} \times 100\%$

多尔顿分压定律： $P = P_a + P_v$

露点温度：在一定空气压力下，逐渐降低空气温度，当水蒸气达到饱和状态而开始结露或结霜时的温度。

11.2 经典湿度计

1. 毛发湿度计：空气湿度变化影响毛发长度变化，带动指针位置变化。优点：使用简单、安装成本低。
缺点：湿度测量范围小、测量慢、非电量输出、需频繁还原毛发长度
2. 干湿球湿度计：由干球温度计和湿球温度计（包裹纱布并浸水）组成。利用干球和湿球温度差查表求相对湿度。当湿球温度低于干球温度时，说明空气未饱和，温差越大相对湿度越低
3. 露点湿度计：金属杯中装入乙醚溶液，记录金属杯外开始结露的温度值即为露点温度。冷镜式露点仪精度更高

11.3 湿度传感器

11.3.1 电解质系湿度传感器

1. **登莫（Dunmore）式**（1938 年）：由支架（毛玻璃管/薄铝管）、感湿膜（聚苯乙烯憎水层 + 聚乙烯醇和氯化锂感湿膜）、金属导线组成。单个传感器测湿量程约 20%RH，不能用于 15%RH 以下低湿范围
2. **浸渍式**：在基片（天然树皮）上直接浸渍氯化锂溶液。体积小、高温特性好
3. **光硬化树脂电解质湿敏元件**：用光硬化树脂代替 PVA，耐高温（80°C 以上）
4. **高分子电解质系**：如聚苯乙烯 + 磺酸 + 锂。特点：整个相对湿度内均有感湿特性；湿滞误差小；稳定性好；耐水性好

11.3.2 有机物及高分子聚合物湿度传感器

利用高分子材料吸湿后介电常数或电阻率变化的特性制成。

11.3.3 半导体及陶瓷湿度传感器

按制作工艺分类：

1. **烧结体型**：如 $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$ （铬酸镁-二氧化钛）。工艺：配料 → 研磨 24h → 压模成型 → 在 1250 ~ 1300°C 空气中烧结约 2h → 切割成 $4 \times 5 \times 0.3\text{mm}^3$ 薄片。特点：体积小、测湿范围宽、承受温度达 600°C、可反复清洗
2. **涂覆膜型**：如 Fe_3O_4 （四氧化三铁）。工艺：调浆 → 涂覆（滑石瓷基片）→ 干燥热处理（100 ~ 200°C）及老化（80°C）。特点：可在全湿范围测量，但高温湿滞误差较大，响应时间长
3. **厚膜型**
4. **薄膜型**
5. **MOS 型**

湿度表示方法及关系；各类湿度传感器的原理与特点。

表 2: 核心公式速查表

章节	公式	说明
线性度	$\delta_L = \frac{ \Delta L_{\max} }{y_{FS}} \times 100\%$	拟合直线偏差
灵敏度	$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$	输出/输入变化比
一阶系统	$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$	传递函数
一阶阶跃	$y(t) = A(1 - e^{-t/\tau})$	$t = \tau$ 时 $y = 0.632A$
一阶频率	$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\tau\omega)^2}}$	幅频特性
二阶系统	$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$	固有频率 ω_n , 阻尼比 ζ
不失真	$A(\omega) = A_0, \varphi(\omega) = -t_0\omega$	幅频常数, 相频线性
应变效应	$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon_x$	金属
压阻效应	$\frac{dR}{R} = \pi_L E \varepsilon_x$	半导体
应变灵敏度	$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_x$	K 为灵敏系数
电容	$C = \frac{\varepsilon S}{d}$	平板电容
差动电容	$S_n = \frac{2}{d_0}, \delta = (\frac{\Delta d}{d_0})^2$	灵敏度翻倍, 非线性减小
自感	$L = \frac{W^2 \mu S}{2\delta}$	变气隙型
差动变压器	$\dot{E}_s = -\frac{j\omega(M_1 - M_2)\dot{E}_p}{R_p + j\omega L_p}$	输出电压
电涡流阻抗	$Z = f(\rho, \mu, r, \delta, \omega)$	多参数影响
霍尔效应	$U_H = K_H I B \cos \alpha$	霍尔电压
霍尔系数	$R_H = \frac{1}{nq} = \rho\mu$	材料特性
压电效应	$Q = d_{ij}F, q = d\sigma$	力-电转换
电荷放大	$U_o = -Q/C_f$	与电缆无关
光电效应	$h\nu = \frac{1}{2}m_e v_0^2 + W_0$	爱因斯坦方程
光纤 NA	$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$	数值孔径
莫尔条纹	$B_H = W/\theta$	条纹间距
感应同步	$e_s = k\omega U_m \cos \omega t \cos \frac{2\pi x}{W}$	感应电势
热电偶	$E_{AB}(T, T_0) = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \ln \frac{N_A}{N_B} dt$	塞贝克效应
中间温度	$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0)$	冷端补偿
铂热电阻	$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3)$	Pt100
NTC 热敏	$R_T = R_0 e^{B(1/T - 1/T_0)}$	负温度系数
绝对湿度	$\rho_v = M_V/V$	单位体积水汽质量
相对湿度	$RH = \rho_v/\rho_{v,sat} \times 100\%$	饱和度