



目 录

第1章 概 述

➤ 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础

第3章 不同集成度智能传感器系统介绍

第4章 智能传感器的集成技术

第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法

第6章 通信功能与总线接口

第7章 智能技术在传感器系统中的应用

第8章 智能传感器系统的设计与应用

第9章 无线传感器网络技术概述





第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础

要 点：

- ◆ 传感器系统的基本特性；
- ◆ 几种传感器的工作原理；
- ◆ 提高传感器性能的技术途径；
- ◆ 误差与测量误差分析。





§ 2.1 传感器系统的基本特性

智能化技术的主要任务之一是：提高传感器的精度，改善传感器的性能（安装、使用、维护、寿命），它的重要性在于提高经济效益，改善控制水平。

通过对传感器系统静态、动态特性的分析，了解决定传感器性能及精度的静态、动态技术指标和基本参量。

首先我们了解一下传感器的基本知识。目前已研制出来的传感器有几千种，广泛应用于各个领域，传感器的分类有这样几种方式。

按信号转换效应分：

物理型（电容式压力传感器）；化学型（气敏）；生物型（利用生物效应，如电阻的变化、产生热、生成新的物质——在生物酶的作用下）





按构成原理分：

结构型（转换特性由形状和尺寸决定）；

物性型（由传感器材料特性决定，如热电偶由塞贝克函数决定）。

按构成传感器敏感元件材料分：

半导体、陶瓷、有机材料。

按应用的用途（实际中用及比较多的）

温度，压力（电输出信号），光—光输出信号。

传感器的运作：

- 1) 接触型（电偶）、非接触型（红外测量）。
- 2) 能量转换型（热敏电阻）、能量控制型（光敏电阻）。
- 3) 转换原理、多重变换（热辐射温度计）。





对传感器系统基本特性的研究，基于两个方面的目的：

1) 用它作为一个测量系统

基于已知的系统特性和测量输出信号了解输入信号特性。

2) 用于传感器系统本身的研究、设计与建立。

根据输入信号是随时间变化还是不变化，基本特性分静态特性和动态特性，它是由系统内部自身的参数决定的。

§ 2.1.1 静态特性

静态特性又称“刻度曲线”、“标定曲线”，

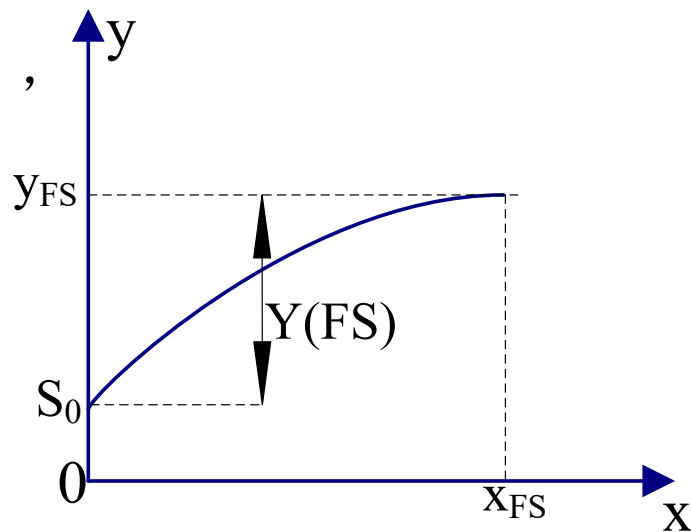
表达式： $y = s_0 + s_1x + s_2x^2 + \dots + s_nx^n$

1、静态特性的基本参数

1) 零位

当 $x=0$ 时， $y_0 = s_0$ 的值

2) 量程 $Y(FS)$ ，又称“满度值”



静态特性





输出标准化的传感器系统（又称“变送器”）

对于模拟量，零位： $y_0 = s_0 = 4mA$ ，上限值：

$y_{FS} = 20mA$ ，量程Y（FS）=16mA。数字量：尚无标准。

3) 灵敏度

a)
$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\text{输出量的变化量}}{\text{输入量的变化量}}$$

b) 相对灵敏度：
$$S = \frac{\Delta y / y}{\Delta x} \quad \text{或} \quad S = \frac{\Delta y}{\Delta x / x}$$

c) 灵敏度与静态特性（线性与非线性）；灵敏度的高与低。

d) 交叉灵敏度的概念

多输入（ $\Delta x_P, \Delta x_V, \Delta x_T$ ）单输出（ Δy ）系统

$$\Delta y = s_P \cdot \Delta x_P + s_V \cdot \Delta x_V + s_T \cdot \Delta x_T$$

智能传感器系统可以依靠强大的软件功能，降低交叉灵敏度对测量结果的影响（如采用数据融合技术）。





4) 分辨率

表征系统有效分辨输入量最小变化量的能力。

具有A/D转换器的传感器系统，分辨率为一个量化值 q 对应的输入变化量，对于实际测量，要求：噪声电平 $< q/2$ ，信号电平 $> q/2$ 。

智能传感器系统可寻取软、硬件的方式来抑制噪声，提高分辨率。比如先测出零输入的噪声信号，然后减去。

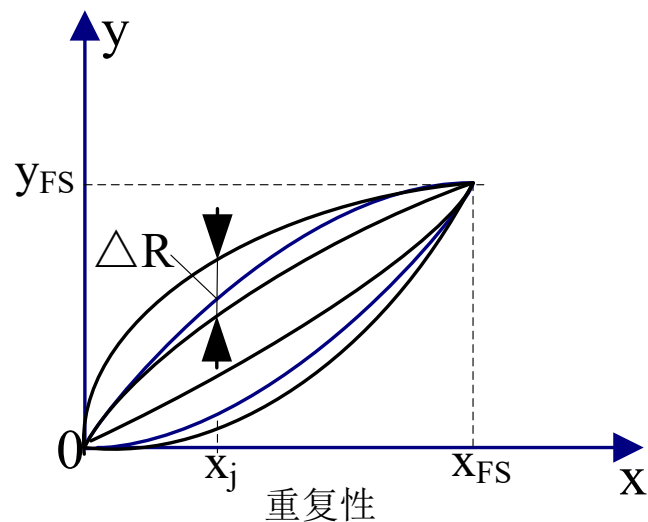
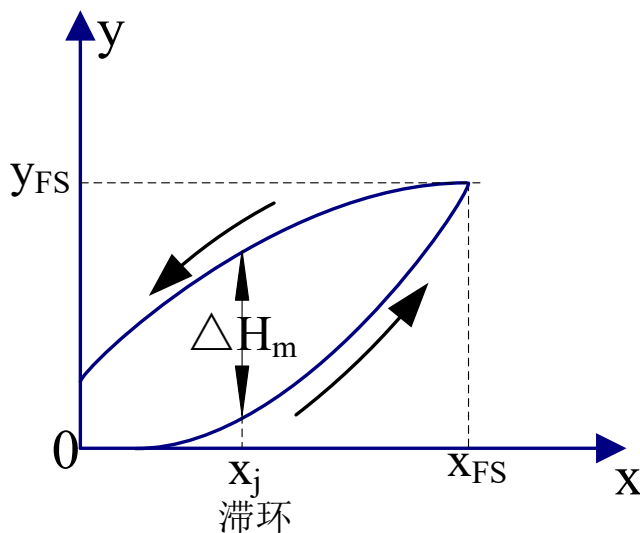
2、静态特性的性能指标

1) 迟滞

表征系统在全量程范围内，输入量由小到大（正行程）或由大到小（反行程）两个静态特性不一致的程度，如磁滞曲线。

$$\text{相对误差: } \delta_H = \frac{|\Delta H_m|}{Y(FS)} \times 100\%$$





2) 重复性

系统输入量按同一方向作全量程、连续多次变动时，静态特性不一致的程度。

相对误差：
$$\delta_R = \frac{|\Delta R|}{Y(FS)} \times 100\%$$

ΔR ：多次循环同向行程输出量的最大绝对误差，见上图。

3) 线性度

系统静态特性对选定的拟合直线的接近程度。





相对误差: $\delta_L = \frac{|\Delta L_m|}{Y(FS)} \times 100\%$

拟合直线的方法:

- a) 理论线性度;
- b) 平均选点线性度;
- c) 端基线性度;
- d) 最小二乘法线性度。

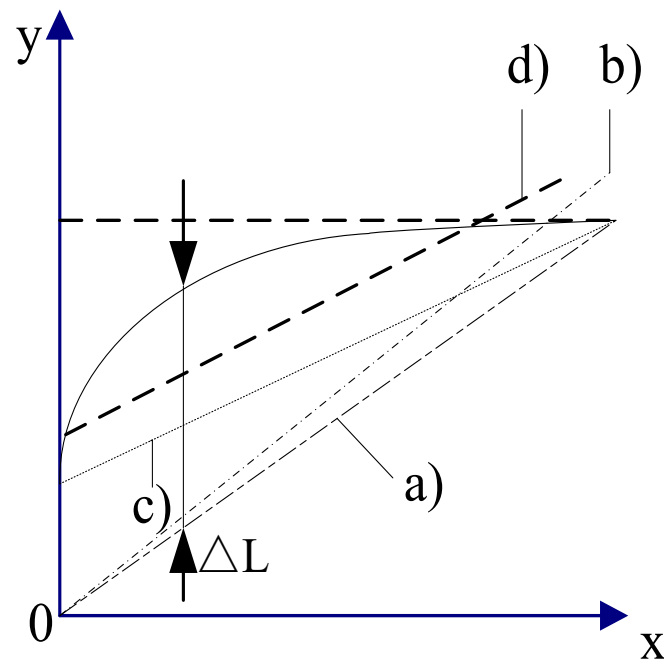
对应上述几种方式拟合直线表达式:

a)
$$y = \frac{y_{FS}}{x_{FS}} \cdot x$$

b)
$$y = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \cdot x$$

c)
$$y = \frac{y_{FS} - y_0}{x_{FS}} \cdot x + y_0$$

d)
$$y = b + kx$$





$$\Delta L_j = (b + kx_j) - y_j$$

均方差值: $\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\Delta L_j)^2 = f(b, k)$ 为最小值, 亦即:

$$\frac{\partial f(b, k)}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial f(b, k)}{\partial k} = 0$$

4) 系统的总精度为量程范围内的基本误差与满度值Y (FS) 之比的百分数。

$$\begin{aligned} A &= \frac{\text{系统误差的绝对值 (迟滞、线性度)} + \text{随机误差的绝对值 (重复性)}}{Y(\text{FS})} = \frac{\text{基本误差}}{Y(\text{FS})} \\ &= \frac{[\delta_L Y(\text{FS}) + \delta_H Y(\text{FS})] + \delta_R Y(\text{FS})}{Y(\text{FS})} = \delta_L + \delta_H + \delta_R \end{aligned}$$





传感器技术的主要任务之一就是致力于改善静态特性。

静态特性是在标准试验条件下获得的，在实际使用中，由于环境条件的改变还将产生附加误差，其中温度附加误差是主要的。

5) 温度系数与温度附加误差

a) 零位温度系数 (α_0)

$$\alpha_0 = \frac{\Delta y_{0m}}{\Delta T \cdot Y(FS)} \times 100\%$$

ΔT : 传感器系统工作温度变化范围。

未经补偿的压阻式压力传感器 $\alpha_0 = 10^{-3} / ^\circ\text{C}$

例如：量程 $Y(FS) = 100\text{mV}$ ， $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ ， $\Delta y_{0m} = 6\text{mV}$ 则温度附加误差的相对值 = 6%（满量程）。

b) 灵敏度温度系数 α_s 及其温度附加误差

$$\alpha_s = \frac{\Delta y_m}{\Delta T \cdot Y(FS)} \times 100\% \quad \alpha_s = \frac{S(T_2) - S(T_1)}{S(T_1) \cdot \Delta T} = \frac{y(T_2) - y(T_1)}{y(T_1) \cdot \Delta T}$$

未经补偿的压阻式压力传感器： $\alpha_s = -(10^{-3} / ^\circ\text{C} \sim 5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C})$





$\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ 时, α_s 引起的温度附加误差的相对值: $(6\sim 3)\%$ 。

传统的传感器改善传感器的温度稳定性比较费时费力, 经过补偿后, α_0 、 α_s 均可减小一个数量级。

智能传感器系统主要采用软件补偿技术及数据融合技术。

§ 2.1.2 动态特性

系统的动态特性反映了测量动态信号的能力, 这里主要讨论系统动态特性、信号频率范围与动态误差的相应关系。

动态特性用数学模型来描述, 有三种形式:

时域中的微分方程, 复频域中的传递函数 (差分方程、状态方程), 频率域中的频率特性。

1、微分方程

常见的传感器系统是一个一阶或二阶系统, 高阶系统由二者合成。

1) 一阶系统





$$\tau \frac{dy}{dx} + y = Kx \quad K: \text{放大倍数}, \tau: \text{时间常数}$$

如热电偶测温元件。

2) 二阶系统

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = F$$

m: 等效质量, **b**: 阻尼系数, **k**: 弹簧刚度系数

压力传感器的弹性敏感元件可等效为质量—弹簧—阻尼力学系统。

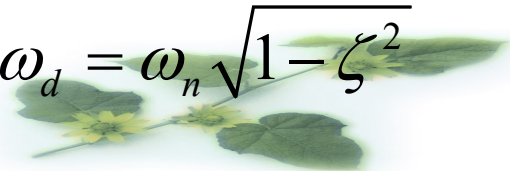
标准形式:

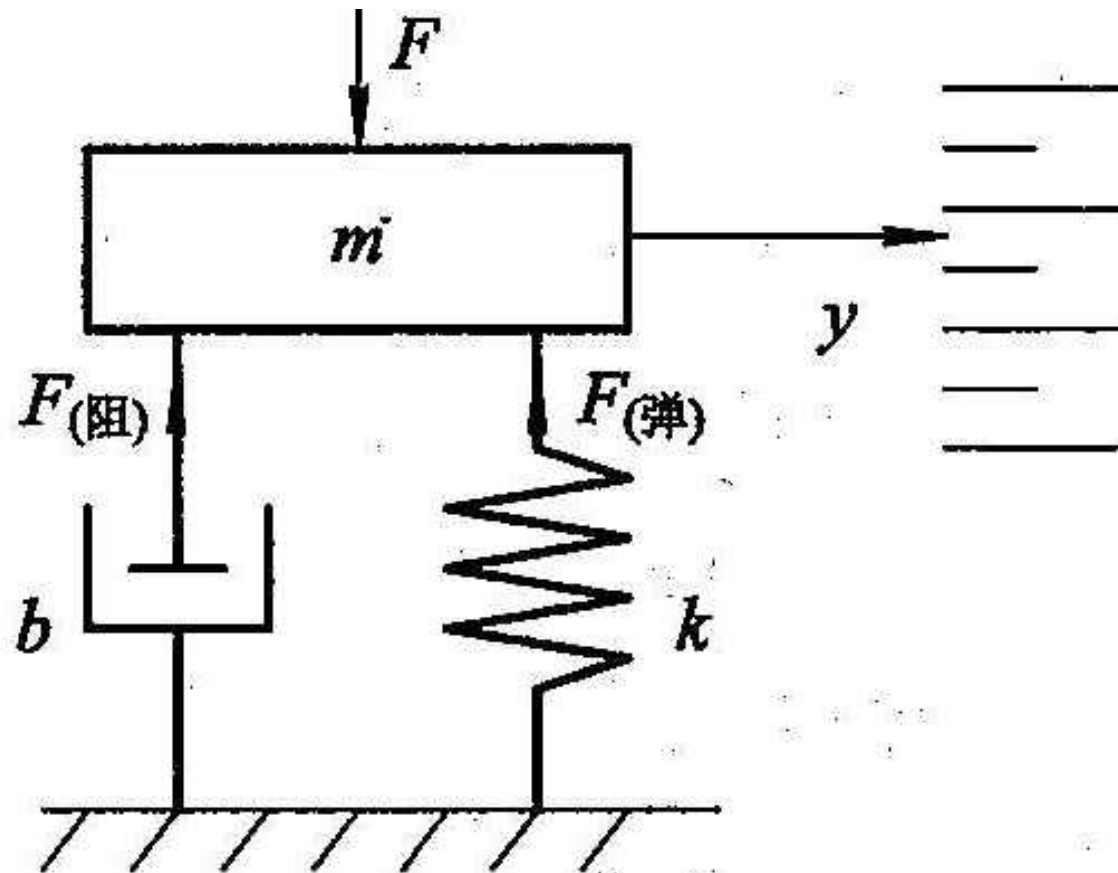
$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

ω_n : 系统无阻尼固有频率, ζ : 阻尼比, K : 直流放大倍数或静态灵敏度

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \zeta = \frac{b}{2\sqrt{mk}} \quad K = \frac{1}{k}$$

谐振频率: $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$, 固有频率: $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$





质量—弹簧—阻尼力学系统





2、传递函数

1) 一阶系统: $H(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$

2) 二阶系统: $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}$

3、频率特性

频率特性是拉氏变换因子s的实部为零的拉氏变换，又称傅氏变换。

1) 一阶系统: $H(j\omega) = \frac{K}{j\omega\tau + 1}$ τ : 特征参数

2) 二阶系统 $H(j\omega) = \frac{K}{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2] + j2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}}$ ω_n, ζ : 特征参数

$H(j\omega)$ 又可表示为: $A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$

$A(\omega)$: 幅频特性, $\varphi(\omega)$: 相频特性





* 一阶系统:

幅频特性: $A(\omega) = |H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$

对数幅频特性: $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$

相频特性: $\varphi(\omega) = -\arctan \omega\tau$

* 二阶系统:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{[1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2}} \quad L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$$

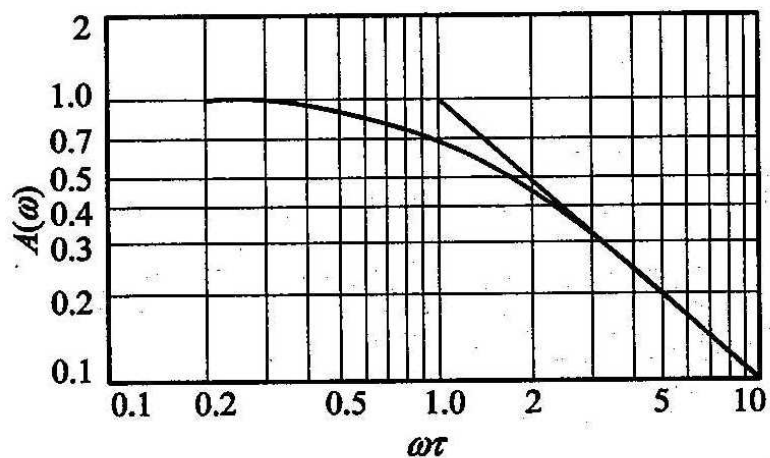
相频特性: $\varphi(\omega) = -\arctan \left[\frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2} \right]$

4、动态误差

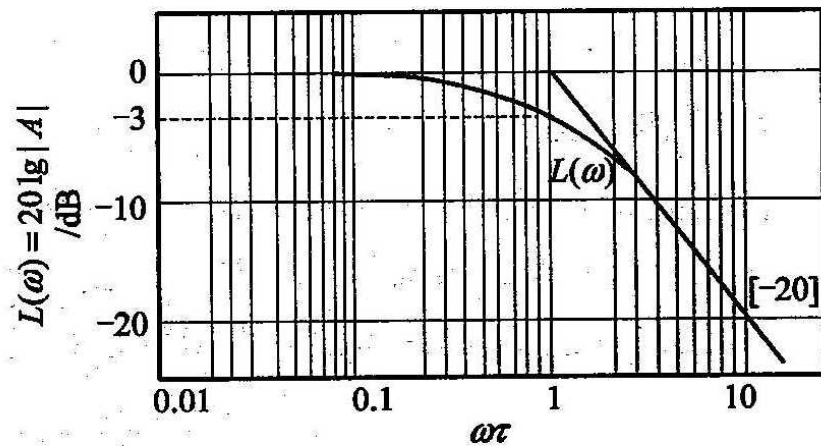
假定, 输入信号: $x(t) = x_0 \sin \omega t$

输出信号: $y(t) = y_0 \sin(\omega t + \varphi)$, 直流放大倍数为1

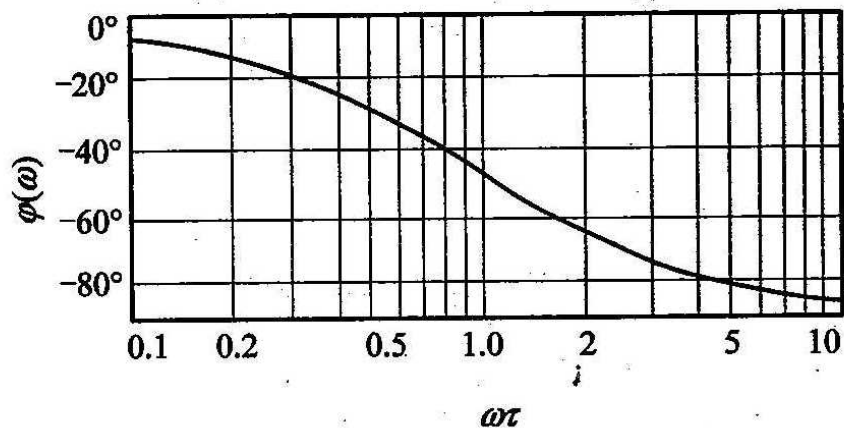




(a)



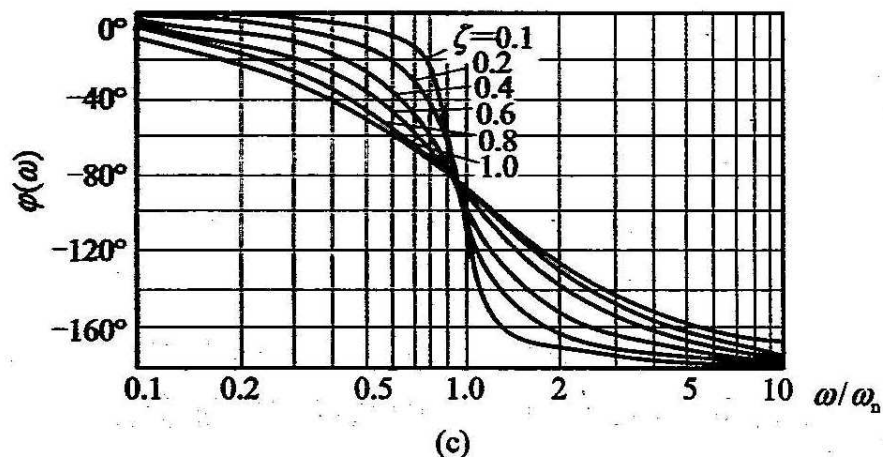
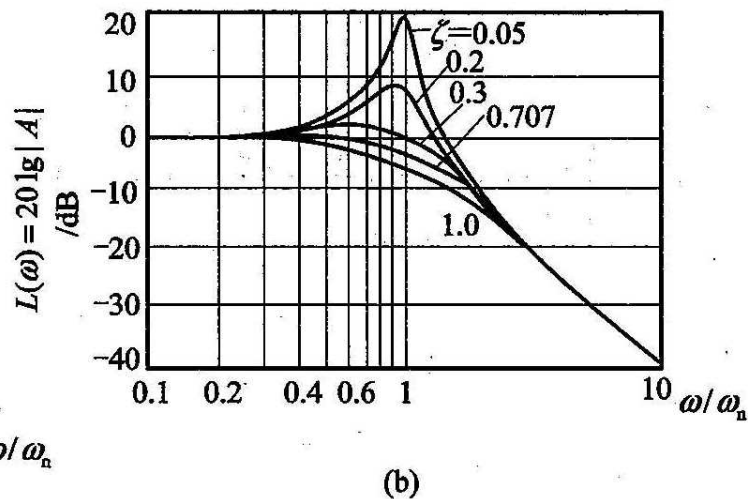
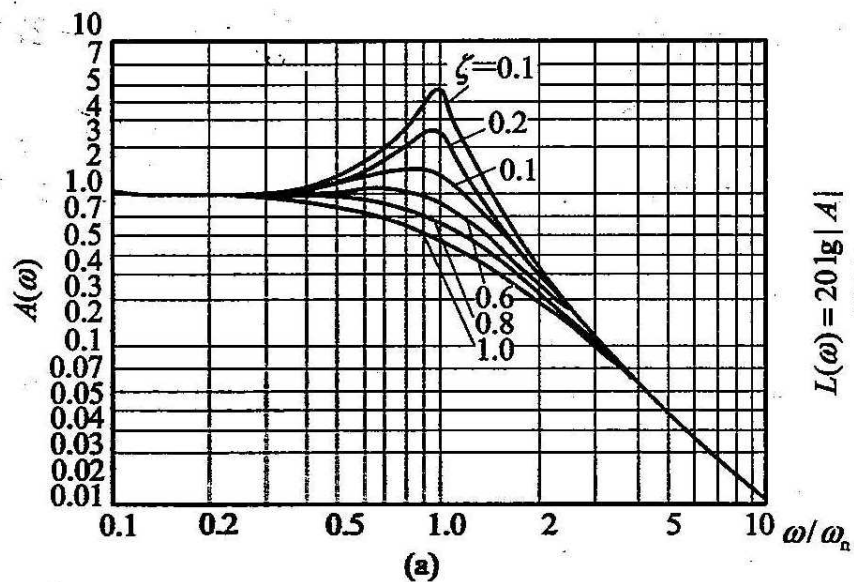
(b)



(c)

一阶系统频率特性曲线





二阶系统频率特性曲线





动态幅值误差可表示为：
$$\gamma = \frac{|H(\omega)| - |H(0)|}{|H(0)|} \times 100\%$$

$|H(0)|$ 表示 $\omega = 0$ 时的幅频特性的模，结合上述频率特性表达式可得：

1) 一阶系统：

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} - 1$$

频率越高，动态幅值误差越大，当 $\omega = \omega_\tau = \frac{1}{\tau}$ 时， $\square \gamma = 29.3\%$ 要减少 γ ，时间常数 τ 要足够小。

2) 二阶系统：

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{[1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2}} - 1$$

目标频率 ω 越高，误差越大，希望 ω_n 越大越好。由 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 可知，减少 m ，可增大 ω_n 。

采用微机械加工技术可实现微米数量级尺寸，使微型化的压阻式压力传感器固有频率 1MHz 以上，而传统压力传感器固有频率 f_n 只有几十 KHz。





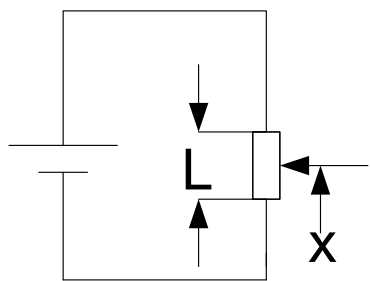
研究传感器的动态性能时，为避免复杂数学上带来的困难，通常都忽略了传感器的非线性，把传感器简化为一个集中参数系统。

用常系数线性常微分方程来描述：

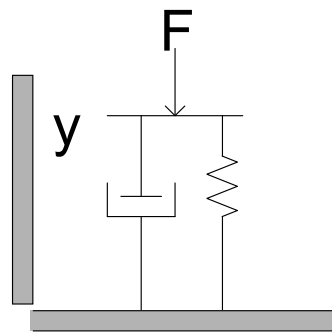
$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

传感器的物理模型，通常分别用零阶、一阶、二阶来描述。

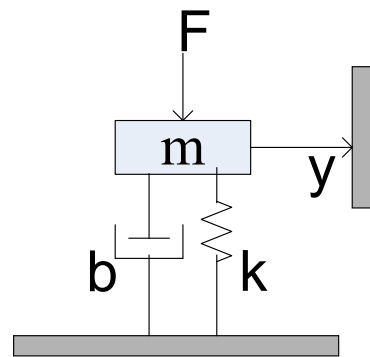
例如：



电位器传感器为零阶



热敏传感器为一阶



加速度传感器为二阶





作业2:

一个二阶传感器系统，要想改善其动态特性，应如何进行，试用不同的模型形式具体分析之。

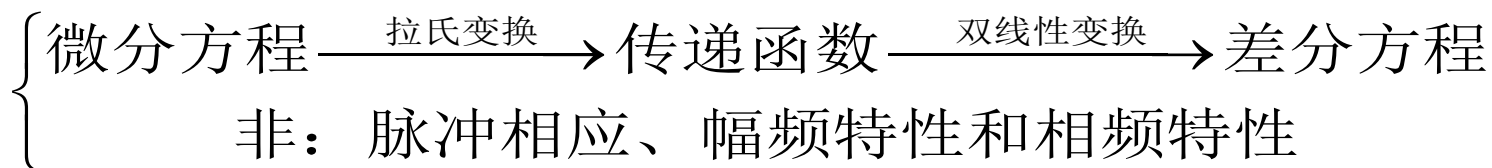




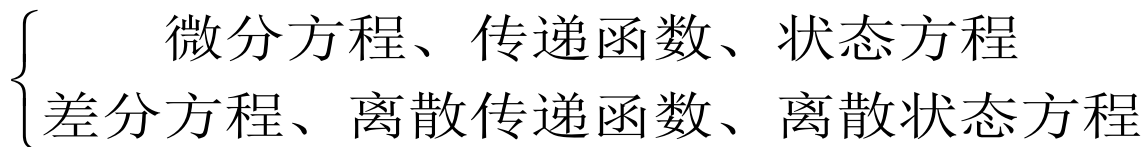
几种传感器动态特性分析方法：

1、 传感器动态模型的分类

1) 参数模型与非参数模型



2) 连续系统与离散系统模型



参数模型是个表达式，而非参数模型是条曲线。

2、 脉冲响应函数法

对于线性传感器，任意形式的输入 $x(t)$ 看成是由无数个“脉冲”叠加组成，





$x(t) \rightarrow x_1(t), x_2(t) \dots$ ，对应每一个脉冲输入，传感器都有一个响应 $y_1(t)$ ， $y_2(t) \dots$ 因此总输出 $y(t)$ 是 $y_1(t)$ ， $y_2(t) \dots$ 之和：

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau$$

$h(t)$ ：脉冲响应函数

3、动态建模方法：

1) 机理分析法

根据各种基本理论，对传感器的转换原理进行分析和抽象，提出模型，列出微分方程。

2) 实验建模法

对传感器进行动态标定，采集输入、输出数据；采用系统辨识，时间序列分析和沃尔什变换等方法，建立其差分方程或微分方程形式的数学模型。





实验建模法的特点：

- a) 需要进行动态标定实验，需要相关实验设备，如数据采集、记录设备；
- b) 要选择合适的标定方法如激励信号，既要简单、易行，又要能充分考核传感器的动态特性。
- c) 其模型不直接反映传感器的结构和原理；
- d) 所建模型便于与实验结果对照，准确、可靠。





§ 2.2 几种传感器的工作原理

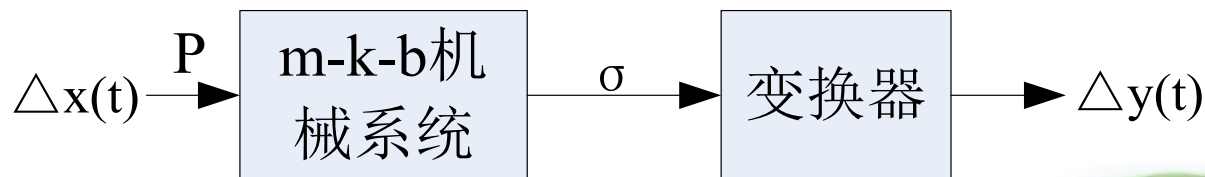
这里主要介绍几种易于采用标准集成化工艺来实现的传感器，如：

- ◆ 结构型；
- ◆ 谐振式；
- ◆ 电荷耦合器件（CCD）及指纹传感器；
- ◆ 气敏传感器。

§ 2.2.1 结构型传感器

工作原理与传统的结构型传感器完全一样，由两部分构成：

- 1) 等效机械系统，将被测量变换为中间变量；
- 2) 变换器，将中间变量变换为输出量。





主要介绍基于半导体压阻效应的电阻式变换器和基于电容效应的电容式变换器。可测：压力，加速度等参量。

1、 基于压阻效应的电阻变换器

1) 压阻效应

指半导体材料受到应力 σ （西格玛）作用时，其电阻率发生明显变化的现象。

电阻率相对变化： $\frac{d\rho}{\rho} = \pi_E \sigma$

π_E ：材料的压阻系数（Si约为 $40 \sim 80 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ）

电阻丝的电阻值： $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ ，若受拉力 F 作用时， l 增加 dl ， r （截面半径）减少 dr ，电阻率 ρ 增大 $d\rho$ ，则有：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

由材料力学： $\frac{dr}{r} = -\gamma \frac{dl}{l}$ γ :泊松比





由虎克定律: $\sigma = \pi \varepsilon = E \frac{\Delta l}{l}$

将 $\frac{d\rho}{\rho} = \pi_E E \frac{\Delta l}{l}$, $\frac{dr}{r} = -\gamma \frac{dl}{l}$ 代入 $\frac{dR}{R}$ 得:

$$\frac{dR}{R} = \pi_E E \frac{dl}{l} + \frac{dl}{l} + 2\gamma \frac{dl}{l} = (1 + 2\gamma + \pi_E E) \varepsilon = G \varepsilon$$

G: 材料的灵敏度系数 E: 弹性模量;

a) 金属材料:

无压阻效应: $\Delta\rho = 0$, $\gamma = 0.5$, $G = 1 + 2\gamma = 2$;

b) 半导体材料的压阻系数很大:

$$G = 1 + 2\gamma + \pi_E E = \pi_E E = 66 \sim 133$$

$$\pi_E = 40 \sim 80 \times 10^{-11} m^2 / N; \quad E = 1.67 \times 10^{11} N / m^2$$





1) 基于压阻效应的变换器

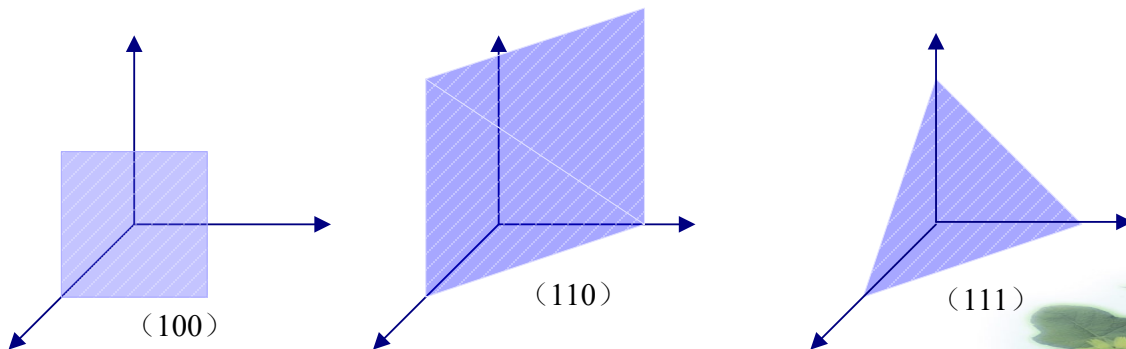
半导体硅材料的特性：具有良好的压阻特性和优良的弹性性能，
加工工艺：半导体扩散工艺，离子注入工艺；制作型式：p型硅电阻条。

电阻条在应力作用下的相对变化量：

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_i \sigma_i \quad \pi_l, \pi_i : \text{分为纵向、横向压阻系数}$$

压阻系数应具有明显的各向异性，在不同的晶面、晶向上其压阻系数不同。

三种晶面： 如下图





硅晶体结构：

硅晶胞，晶格常数为：a；

硅是共价键，四方体结构，硅原子之间共有两个电子；

晶面：节点的排列完全相同；

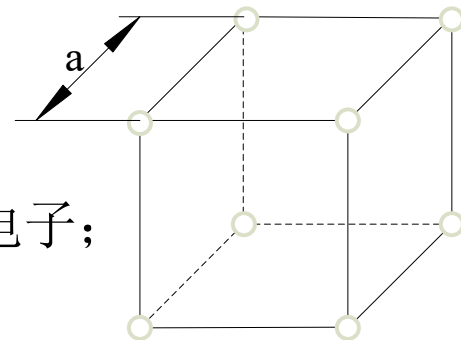
相邻面之间距离相等；一簇晶面可以把所有节点都包括进去；晶面不同，晶面上的节点密度（原子密度）就不同；晶面一般用晶面指数来标记。

取最小截距的整数值的晶面指数称为密勒指数。截距为负数，指数上划“—”作为标记：（100），（010），（001）→晶面簇{100}。

晶轴：对称性较高的晶向。

晶格间距：

$$d = \left(\frac{n^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$





晶体中所取的方向不同，其物理、化学性质不同，形成了晶体的各向异性：

| | | |
|-------|-------|---------|
| (100) | 5.42Å | 腐蚀速率，最快 |
| (110) | 3.83Å | ———快 |
| (111) | 3.13Å | ———慢 |

晶向：取与晶面垂直的法线方向表示： $[100]$, $[110]$, $[111]$ 。

一簇对应的晶向： $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 。

物理型传感器与物质常数：





| 传感器材料 | 物质常数 | 有无利用各向异性 | 基本传感器例子 |
|-------|--------|----------|---------|
| 半导体 | 霍尔系数 | 有 | 霍尔元件 |
| 半导体 | 压阻系数 | 有 | 形变规 |
| 压电体 | 压电率 | 有 | 超声波传感器 |
| 热释电体 | 热释电常数 | 有 | 红外探测器 |
| 强磁性体 | 磁阻增加率 | 有 | 磁传感器 |
| 半导体金属 | 电阻温度系数 | 无 | 热敏电阻 |
| 半导体金属 | 赛贝克系数 | 无 | 热电偶 |
| 半导体 | 量子效应系数 | 无 | 光电管 |
| 半导体 | 光电导增益 | 无 | 光电池 |





压阻效应的数学表达式

晶体中受到应力作用，在晶胞中电场分量 E_i 是电流密度 J_j 应力 σ_{kl} 的函数。

$E_i = f(J_j, \sigma_{kl})$, i、j、k、l均为1, 2, 3; 不考虑压电效应和恒流供电:

$$\frac{d\rho_{ij}}{d\sigma_{kl}} = \varphi_{ijkl}$$

压阻系数:

我们把 φ_{ijkl} 与零应力时的电阻率 ρ_0 的比值定义为压阻系数, 即:

$$\pi_{ijkl} = \varphi_{ijkl} / \rho_0$$

1) 基本压阻系数

作用在Si晶体的应力, 有三个独立的垂直应力分量 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$





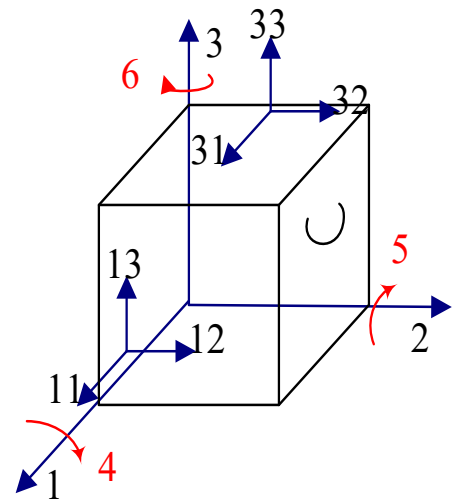
和三个独立的剪切应力分量 $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$ (见下图)

应力 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ 所引起的电阻率相对变化为:

$$(\Delta\rho/\rho_0)_1, (\Delta\rho/\rho_0)_2, \dots, (\Delta\rho/\rho_0)_6$$

电阻率变化量、压阻系数、应力三者之间的关系:

$$\begin{pmatrix} (\Delta\rho/\rho_0)_1 \\ (\Delta\rho/\rho_0)_2 \\ \vdots \\ (\Delta\rho/\rho_0)_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \dots & \pi_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_{61} & \dots & \pi_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_6 \end{pmatrix}$$



在晶轴坐标系中，三个晶轴是完全等效

的， $\pi_{11} = \pi_{22} = \pi_{33}$, $\pi_{44} = \pi_{55} = \pi_{66}$

考虑垂直应力不产生剪切压阻效应，剪切应力不产生垂直压阻效应。

压阻系数矩阵变为:





$$\begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix}$$

π_{11} : 纵向压阻系数, π_{12} : 横向压阻系数, π_{44} : 剪切压阻系数

π_{11} 、 π_{12} 、 π_{44} 统称为晶轴坐标系的压阻系数。

2) 任意坐标系 (非晶轴坐标系) 的压阻系数:

用横向压阻系数 π_t (指电流方向与应力方向垂直) 和纵向压阻系数 π_l (电流方向与应力方向一致) 表示:

$$\pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + l_1^2 n_1^2)$$

$$\pi_t = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)$$





l_1, m_1, n_1 : 纵向方向余弦; l_2, m_2, n_2 : 横向方向余弦。

2、基于电容效应的电容变换器

1) 平板电容器

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{\delta}, \quad \epsilon: \text{介电常数}, \delta: \text{板板间隙}。$$

集成传感器中制作电容变换器主要采用改变S和 δ 的方法实现。

2) 电容式变换器

a) 变间隙式电容变换器

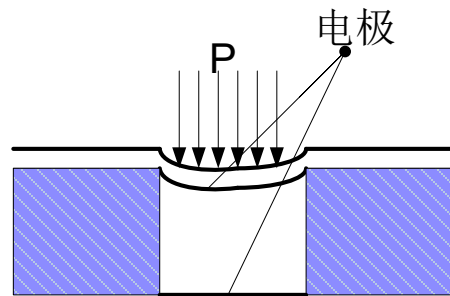
i) 输入—输出特性

$\Delta\delta \sim \Delta C$ 或 $\frac{\Delta\delta}{\delta} \sim \frac{\Delta C}{C}$ 之间的关系

在被测参量的作用下, 动电极发生位移, 产生变形,

$$C_0 + \Delta C = \frac{\epsilon S}{\delta_0 - \Delta\delta} \quad (\Delta S=0)$$

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}, \quad \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left(1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^{-1}, \quad \text{当 } \frac{\Delta\delta}{\delta} \ll 1 \text{ 时}$$





展开的幂级数为：

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right)$$

输入—输出的关系存在严重的非线性。

ii) 灵敏度 K_c ：

$$K_c = \frac{\Delta c}{\Delta \delta} = \frac{c_0}{\delta_0} \left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right)$$

近似值： $K_c = \frac{c_0}{\delta_0} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0^2}$ ，与 δ_0 的平方成反比， δ_0 越小，灵敏度越高。

iii) 理论线性度

理想的拟合曲线方程： $\Delta C = \frac{C_0}{\delta_0} \Delta \delta$

拟合偏差：

$$\Delta = \Delta C - C_0 = C_0 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right)$$

最大拟合偏差： $\Delta_m = c_0 \left(\frac{\Delta \delta_m}{\delta_0} \right)^2$





理论线性度误差：

$$\delta_l = \frac{\Delta_m}{Y(FS)} \times 100\% \approx \frac{\Delta\delta_m}{\delta_0}, \quad \delta_0 \text{ 越小, 线性度越差。}$$

线性度误差的产生，源于灵敏度的非常数。

b) 变面积式电容变换器

i) 输入—输出特性： $\Delta c = \frac{\varepsilon}{\delta_0} \cdot \Delta S$ ($\Delta \delta = 0$)

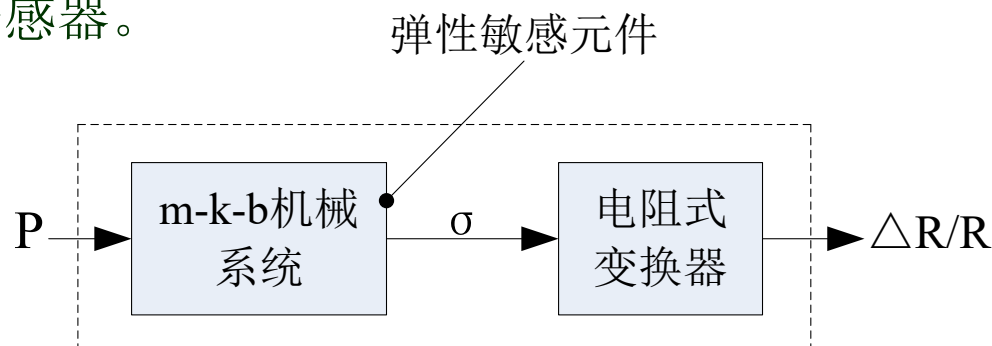
ii) 灵敏度： $K_c = \frac{\Delta c}{\Delta S} = \frac{\varepsilon}{\delta_0} = \text{常数}$

iii) 理论线性度： $\delta_l = 0$

上面我们介绍了基于“压阻效应”和“电容效应”的变换器，下面我们介绍以此为基础的传感器。

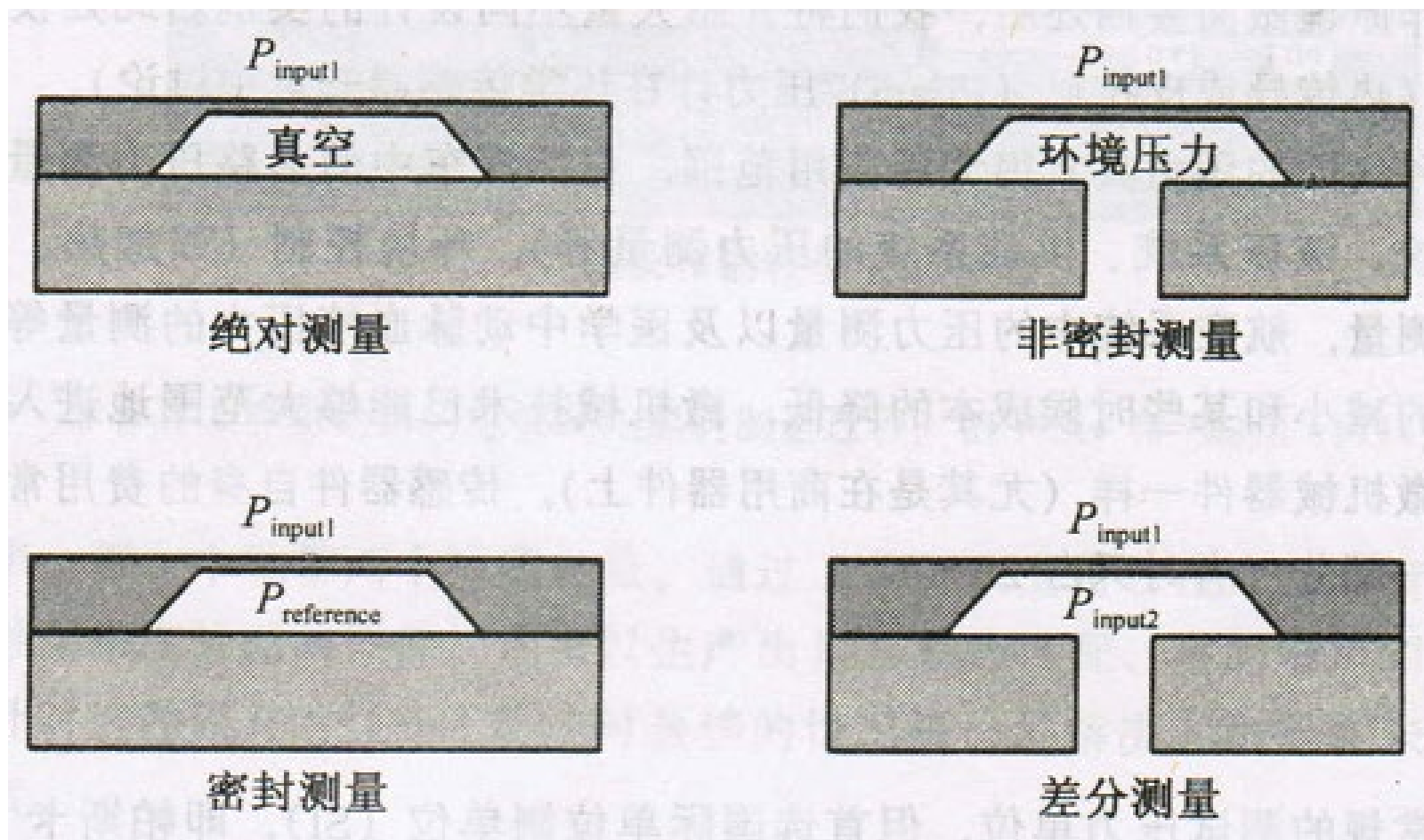
3、 压力传感器

1) 压阻式压力传感器



压阻式压力传感器组成框图





常见的微机械压力传感器类型





常用的弹性敏感元件有：周边固支的圆形、方形和矩形膜片。电阻改变量与相应部位膜片的应力 σ 成正比，下面我们推导这种关系：

a) 周边固支圆形膜片

根据弹性力学理论：

径向应力：

$$\sigma_r(r) = \frac{3P}{8h^2} a^2 \left[(1 + \gamma) - (3 + \gamma) \frac{r^2}{a^2} \right]$$

切向应力：

$$\sigma_t(r) = \frac{3P}{8h^2} a^2 \left[(1 + \gamma) - (3\gamma + 1) \frac{r^2}{a^2} \right]$$

$r=0$ ， σ_r ， σ_t 达到最大值：

$$\sigma_r(0) = \sigma_t(0) = \frac{3P}{8h^2} (1 + \gamma) a^2$$

$r=0.635a$ ， $\sigma_r=0$ ； $r=0.812a$ ， $\sigma_t=0$ ；

$r=a$ ， σ_r ， σ_t 的绝对值最大。



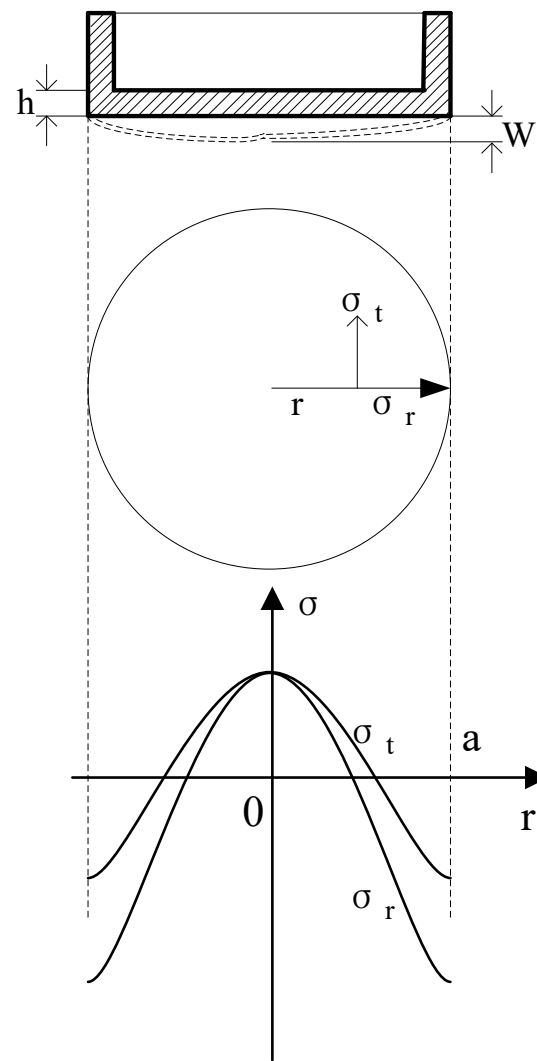
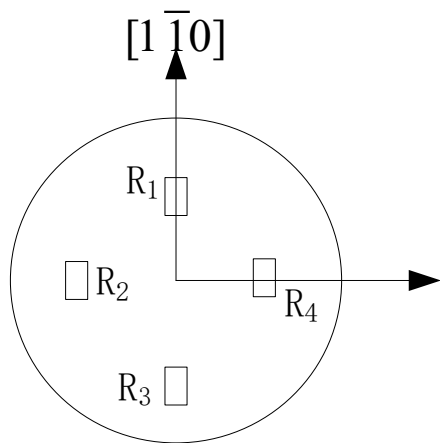


$$\sigma_r(a) = -\frac{3}{4} \frac{a^2}{h^2} P, \quad \sigma_t(a) = -\frac{3}{4} \frac{a^2}{h^2} P \gamma$$

一般选 $\{001\}$, $\{011\}$, $\{211\}$

三个晶面族的晶面制作压敏电阻。

i) 若按下图在膜片上的同一应力区沿 $[1 \bar{1} 0]$ 或 $[1 \ 1 \ 0]$ 晶向制作P型硅电阻，此时电阻的压阻系数最大。





纵向压阻系数:

$$\pi_l(100) = \frac{1}{2} \pi_{44}$$

横向压阻系数:

$$\pi_i(100) = -\frac{1}{2} \pi_{44}$$

π_{44} : 剪切压阻系数, 由实验测定。

对于电阻 R_1 、 R_3 而言:

纵向应力: $\sigma_l = \sigma_r$; 横向应力: $\sigma_i = \sigma_t$, 则:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_r - \sigma_t) = -\frac{3Pr^2}{8h^2} \pi_{44} (1 - \gamma)$$

对于电阻 R_2 、 R_4 而言:

纵向应力: $\sigma_l = \sigma_t$; 横向应力: $\sigma_i = \sigma_r$, 则:

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{3Pr^2}{8h^2} \pi_{44} (1 - \gamma)$$





由上式可见，在压力 P 的作用下，电阻的变化与半径成正变，与膜片厚度成反变。当 $r=a$ 时，即在边缘处电阻变化是最大。

解释横向、纵向与径向、切向的关系。

由于 R_1 、 R_3 与 R_2 、 R_4 有相同的变化量，但符号相反，适合于构成全桥差动电路。

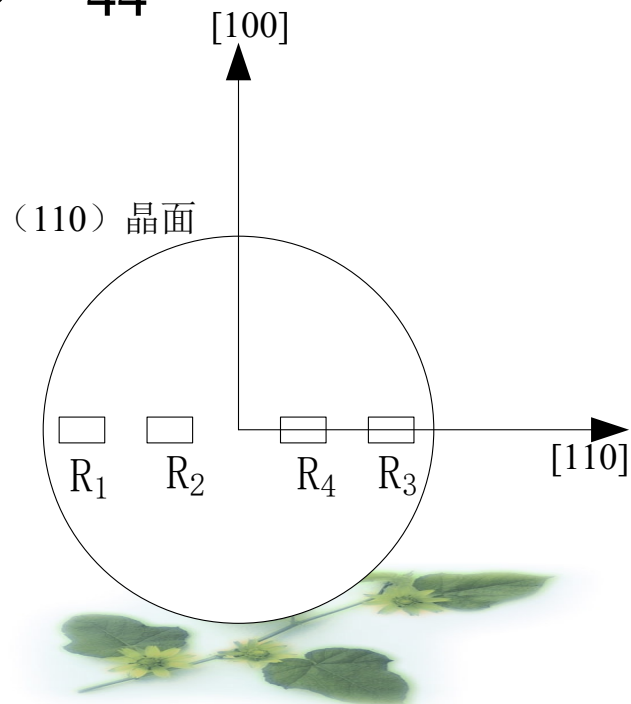
灵敏度：
$$S_R = \frac{\left| \frac{\Delta R}{R} \right|}{P} = \frac{3r^2}{8h^2} (1 - \gamma) \pi_{44}$$

ii) 若压阻电阻分别位于正、负应力区：

选用N型硅（110）晶面作弹性膜片，沿[110]晶向的直径上制作四个等值P型硅电阻，如右图所示。此时：

纵向压阻系数：
$$\pi_l(110) = \frac{1}{2} \pi_{44}$$

横向压阻系数：
$$\pi_i(110) = 0$$





引起电阻改变量的符号取决于应力的方向。

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{\pi_{44}}{2} \overline{\sigma_r}(2,4) , \quad \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{1}{2} \pi_{44} \overline{\sigma_r}(1,3)$$

通过合理的设计电阻条的长度和位置，可以保证：

$$\left| \overline{\sigma_{r2}} \right| = \left| \overline{\sigma_{r4}} \right| = \left| \overline{\sigma_{r1}} \right| = \left| \overline{\sigma_{r3}} \right| ,$$

即四个电阻条的平均应力相等。在P的作用下，四个电阻的变化量相等，而符号相反，构成差动全桥输出。

平均应力的计算公式：

$$\overline{\sigma_r} = \frac{\int_r^{r+l} \sigma_r dr}{\int_r^{r+l} dr}$$

除了圆形膜片外，还有周边固支的方形、矩形膜片，它们均可建立：

$$\frac{\Delta R}{R} = kP \quad , \quad k: \text{与压阻系数有关的常数。}$$





b) 动态性能

周边固支圆形弹性膜片的固有频率：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\perp}}{m}} = \frac{254h}{\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\gamma^2)}}$$

$\rho = 2.35 \text{ g/cm}^3$: 硅的密度;

$E = 1.67 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$: 弹性模量;

$\gamma = 0.35$: 硅的泊松比;

K_{\perp} = 模的横向刚度系数。

当 $a = 0.045 \text{ cm}$, $h = 108 \mu\text{m}$, $f_n = 2.268 \text{ MHz}$

横向刚度系数:

$$K_{\perp} = \frac{F}{W} \quad , \quad F: \text{压力}, W: \text{中心挠度}。$$

中心挠度:

$$W = \frac{3a^4(1-\gamma^2)}{16Eh^3} P = 0.16 \frac{P}{E} \frac{a^4}{h^3}$$





c) 保证线性的基本条件

i) 中心挠度 W 不能太大，要保证好的线性关系：

$$\frac{W}{h} < 0.1$$

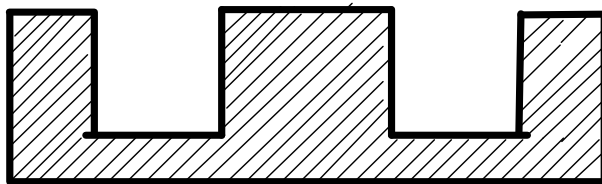
这时 $P < 0.61 \frac{Eh^4}{a^4}$ ，另外，上述一些公式的推导是建立在小挠度理论的基础上的，应力较大时这种线性关系便不成立，硅的破坏应力：

$\sigma_m = 4.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ，要求 $\sigma < 0.2\sigma_m$ ，亦即：

$\sigma_r - \sigma_t = \sigma < 0.2\sigma_m$ ，这时： $P < 0.2\sigma_m \left(\frac{h^2}{a^2}\right)$ ，

上述两个公式是对被测压力量程的要求。

ii) 采用E型结构



d) 硅弹性膜片对性能的影响

正方形、长方形膜片的输出灵敏度高于圆形；圆形膜片精度高，低微压力、高压性能好；从小型化和易于批量生产的角度，方形优于圆形。



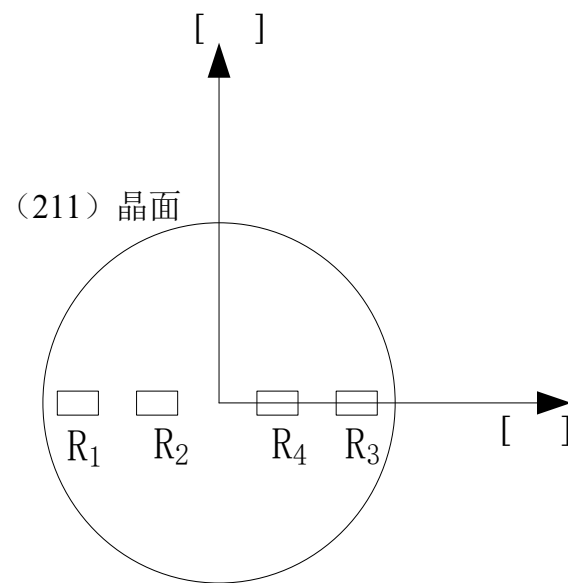


作业3:

为什么方形膜片的输出灵敏度高，而圆形膜片精度高，试分析之。

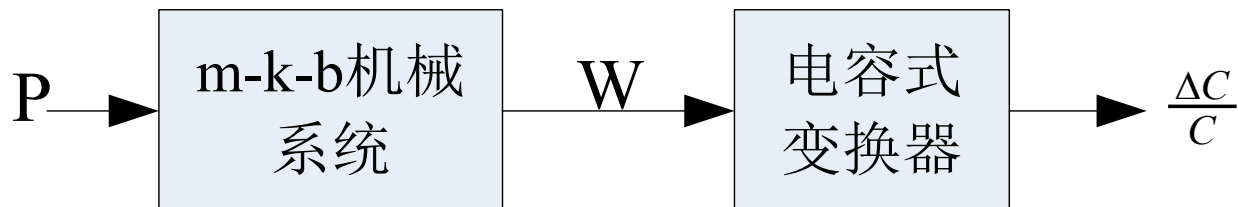
作业4:

若在 $(2\ 1\ 1)$ 晶面上制作P型硅电阻，请问按下图在膜片上的同一应力区沿什么晶向制作，此时电阻的压阻系数最大，是多少？





2) 电容式压力传感器



变换形式: $P \rightarrow W(\text{挠度}) \rightarrow \frac{\Delta c}{c}$

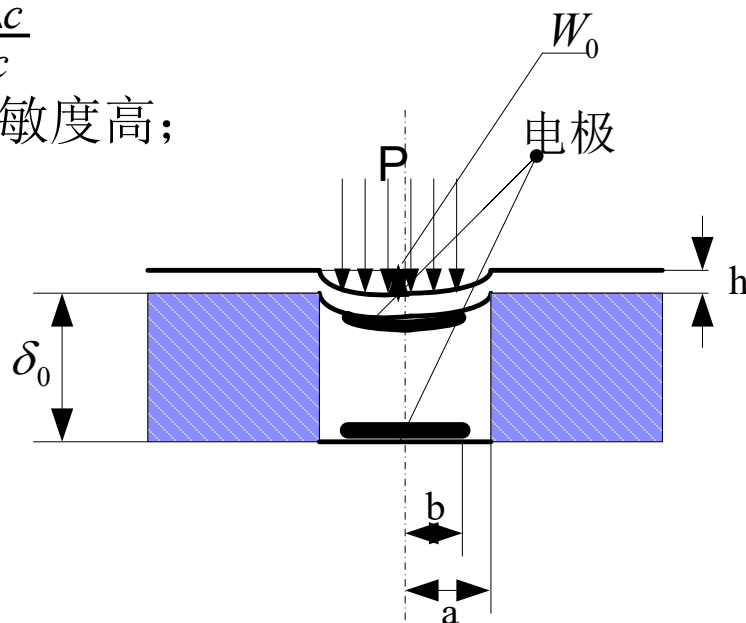
与压阻式压力传感器相比的优点: 灵敏度高;
温度稳定性好; 压力量程低。

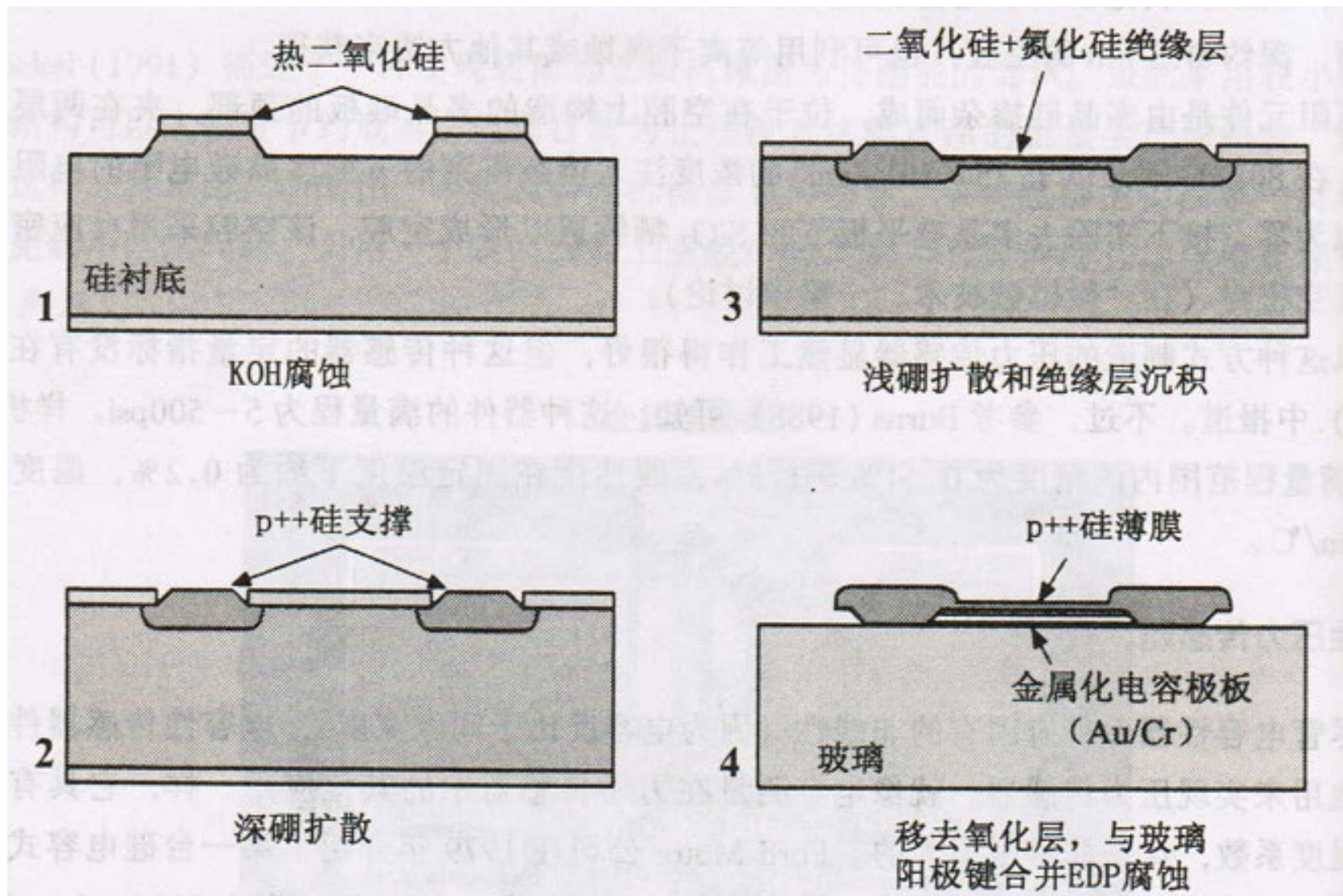
a) 圆形膜片压力敏感电容变换器

$$P = 0, C_0 = \frac{\varepsilon_0 \pi b^2}{\delta_0}$$

$$\varepsilon_0 = 8.87 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$$

$$P \neq 0, W_r = \frac{3P(1-\gamma^2)}{16Eh^3} (a^2 - r^2)^2, \quad b: \text{铝电极半径}$$







电容器的电容：
$$C = \int_0^b \varepsilon_0 \frac{2\pi r dr}{\delta_0 - W_r} \quad , \quad \text{当 } W_0 \ll \delta_0 \text{ 时,}$$

$$C = C_0 \left[1 + \left(1 - g^2 + \frac{1}{3} g^4 \right) \frac{3(1-\gamma^2)a^4}{16Eh^3\delta_0} P \right] \quad , \quad \text{其中, } g = \frac{b}{a} \quad .$$

举例说明：

$$\delta_0 = 22 \mu\text{m}, \quad a = 500 \mu\text{m}, \quad b = 350 \mu\text{m}, \quad h = 20 \mu\text{m}$$

当 $P = 9.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 时，

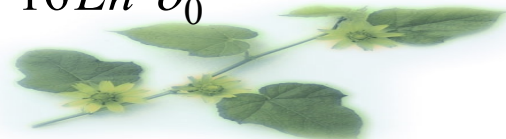
$$C_0 = 1.7 \text{ pF} \quad , \quad W_0 = 0.77 \mu\text{m} \quad , \quad C = 2.08 \text{ pF} \quad .$$

i) 输入—输出特性

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \left(1 - g^2 + \frac{1}{3} g^4 \right) \frac{3(1-\gamma^2)a^4}{16Eh^3\delta_0} P$$

ii) 压力灵敏度

$$S_C = \frac{\Delta C / C_0}{P} = \left(1 - g^2 + \frac{1}{3} g^4 \right) \frac{3(1-\gamma^2)a^4}{16Eh^3\delta_0}$$





与压阻式的比较:

$$\frac{S_c}{S_R} = \frac{(1 - g^2 + \frac{1}{3}g^4)(1 + \gamma)}{2E\pi_{44}} \frac{a^2}{\delta_0 h}$$

按上例的参数:

$$\frac{S_c}{S_R} = 51.5$$

说明: 电容式压力传感器比压阻式压力传感器灵敏度高。

b) 动态性能

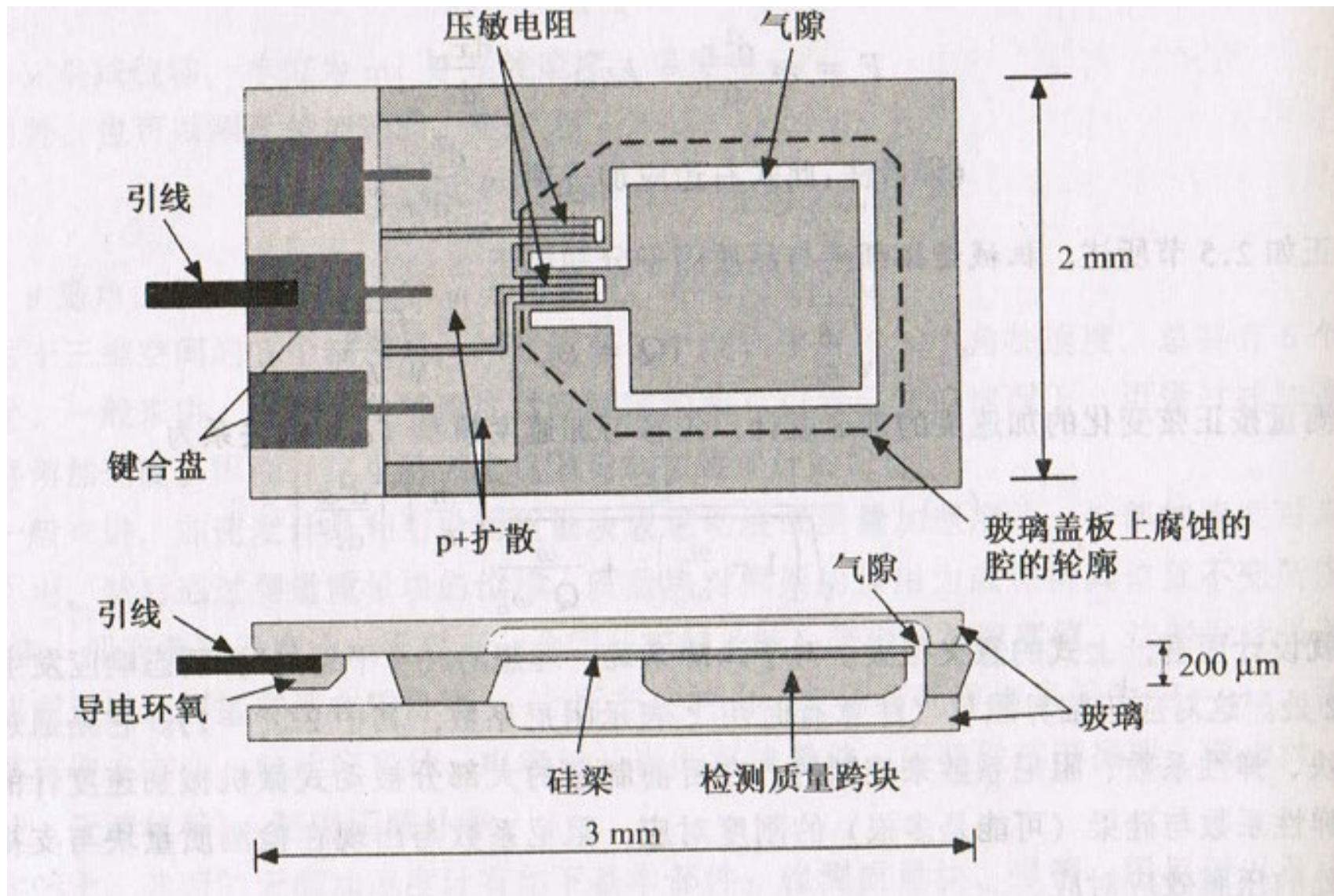
取决于弹性敏感元件, 应该与压阻式压力传感器一致。

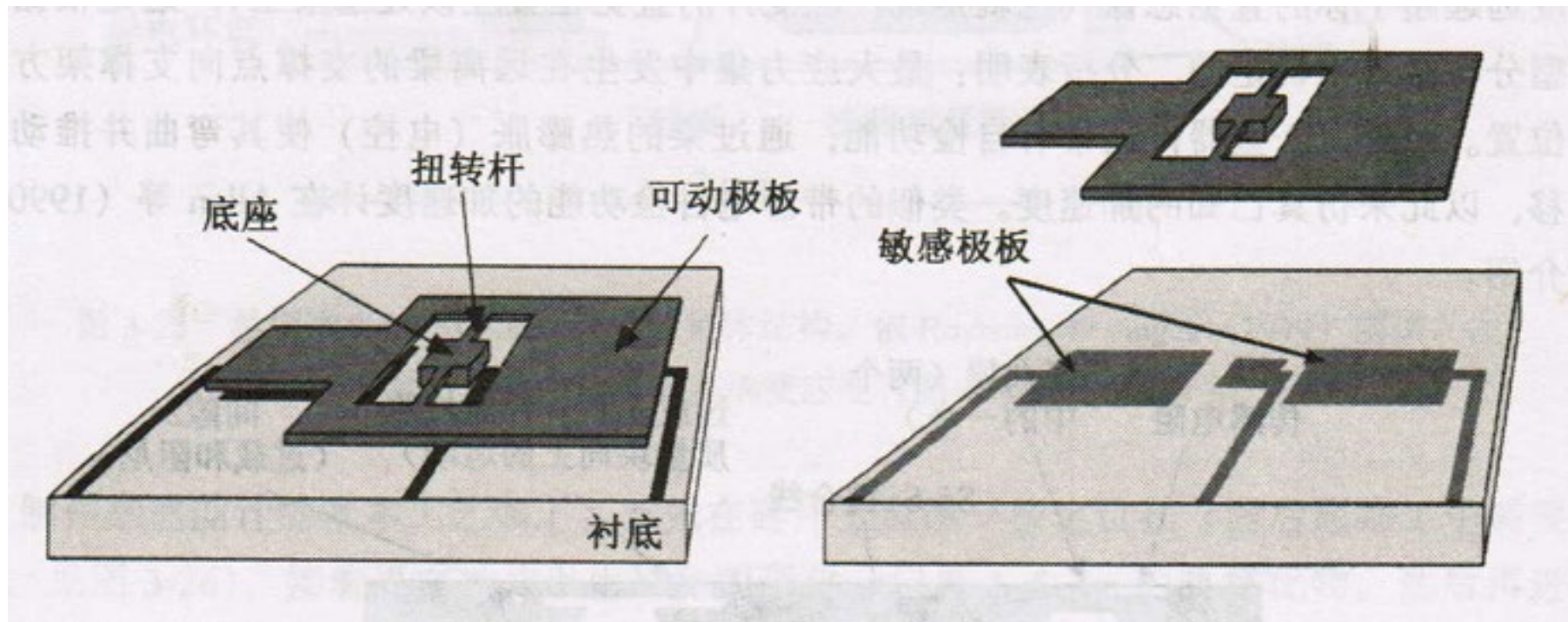
4、加速度传感器

1) 测量加速度的方法 (原理)

压阻式, 电容式, 压电式, 利用的基本上是 $m-k-b$ 机械系统, 只是变换器输出的参量不同, $\Delta R, \Delta c, \Delta v$ 。







非对称扭转极板电容加速度计





在惯性式加速度计的力学模型中，我们需要了解的是其特性与参量间的关系：

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \mathbf{K} \text{ 无阻尼固有振荡频率} \\ |H_a(0)| = \frac{1}{\omega_n^2} = Km = \frac{m}{k} \mathbf{K} \text{ 静态灵敏度} \end{cases}$$

m-k-b机械力学系统完成对被测加速度 $\mathbf{a} = \ddot{x}$ 转换为中间变量（ σ ，变形位移 y ）的任务，配以不同形式的检测 σ 或 y 的变换器则构成不同形式的加速度传感器。

2) 基于压电效应的加速度传感器

压电效应是可逆的，压电传感器是一种典型的“双向传感器”。

a) 正压电效应：沿一定方向对某些电介质加力而使其变形，在一定表面上产生电荷，外力去掉，又重新回到不带电的状态。

b) 逆压电效应：在电介质的极化方向施加电场，电介质在一定方向上产生机械变形或机械应力。

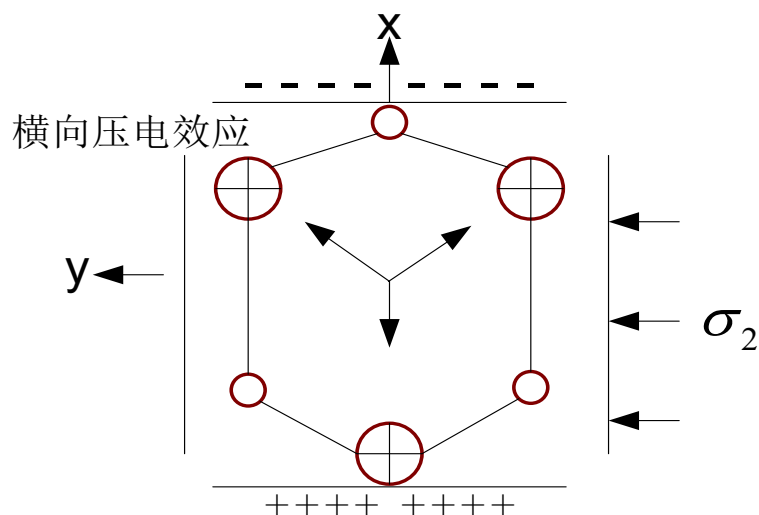
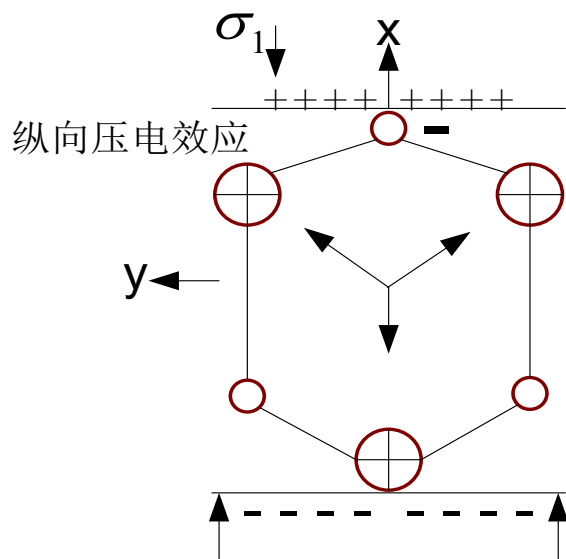




c) 缺点：无静态输出，要求有很高的电输出阻抗，需用低电容的低噪声电缆，工作温度 25°C 。

输出电荷表达式： $Q = dF$ ， d ：压电系数

压电式加速度传感器： $Q = d_{ij}m\ddot{x}$





3) 伺服式加速度计

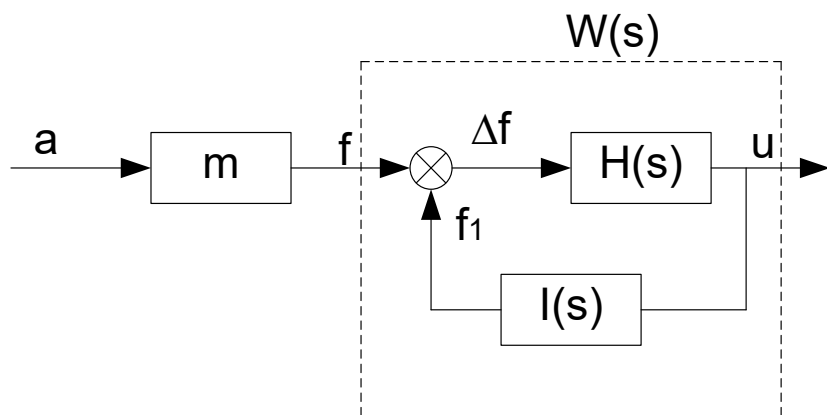
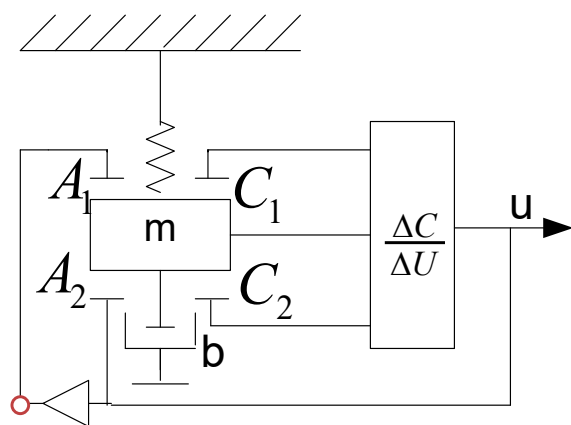
又称力平衡式加速度计，具有负反馈环节。

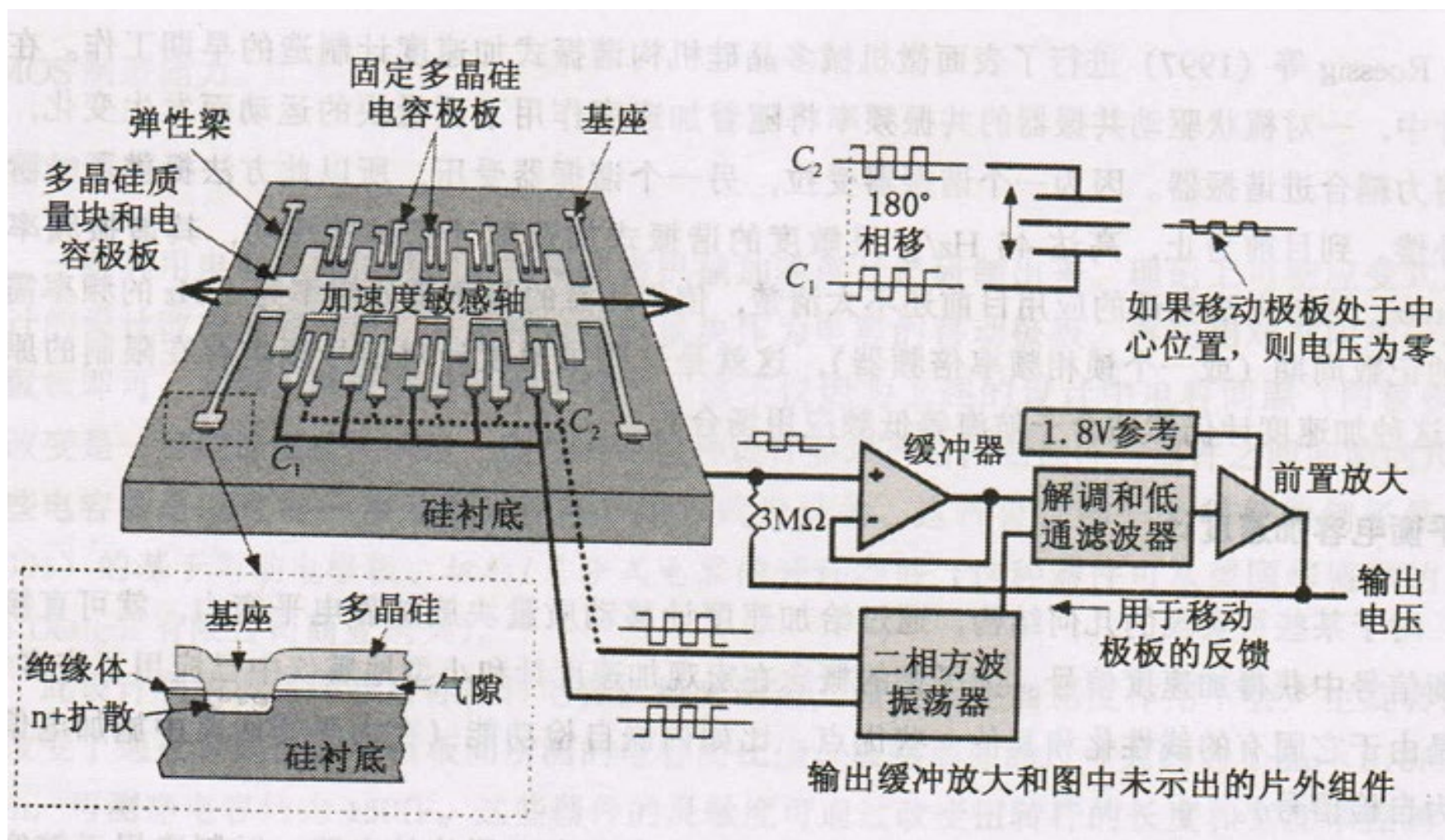
优点：大大改善加速度计的动态性能与静态精度。

在下图中假设： $\Delta c / \Delta u$

转换系数为1，则闭环系统的前向通道的传递函数：

$$H(s) = \frac{U(s)}{F(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1}$$







无反馈时，输出电压 u 在一定频带范围内（ $0 \ll \omega \ll \omega_n$ ）与惯性力 f 或者说被测加速度 a 成正比。

有反馈时， $I(s)$ 是一个反向传感器， f_1 与 u 成正比，方向与 f 相反，当系统处于动态平衡时， $\Delta f \approx 0$ ，质量块位移量极小。

反向传感器传递函数： $I(s) = \frac{F_1(s)}{U(s)} = K_2 = \text{常数}$

闭环传递函数：

$$W(s) = \frac{U(s)}{F(s)} = \frac{H(s)}{1+H(s)I(s)} \quad H(s) = \frac{U(s)}{\Delta F(s)},$$

以加速度 a 为输入，电压 u 为输出：

$$H_a(s) = \frac{U(s)}{A(s)} = W(s)m = \frac{H(s)}{1+H(s)I(s)} m = \frac{1}{\frac{1}{H(s)} + I(s)} m$$

$$= S_0 \frac{1}{\frac{1}{\omega_n'^2} + \frac{2\zeta'}{\omega_n'} s + 1}, \quad S_0 = \frac{Km}{\sqrt{1+KK_2}}, \quad \zeta' = \frac{\zeta}{\sqrt{1+KK_2}},$$

$$\omega_n' = \omega_n \sqrt{1+KK_2}$$





对于上述系统总传递函数，我们可作如下讨论：

a) 该系统仍为一个二阶系统；

i) $\omega'_n = \omega_n \sqrt{1 + KK_2}$ ，固有角频率扩大了 $\sqrt{1 + KK_2}$ 倍。

ii) 阻尼比 ζ' 减少了 $\sqrt{1 + KK_2}$ 倍。

iii) $\omega = 0$ 时，静态增益为 S_0 ，减少了 $\sqrt{1 + KK_2}$ 倍。

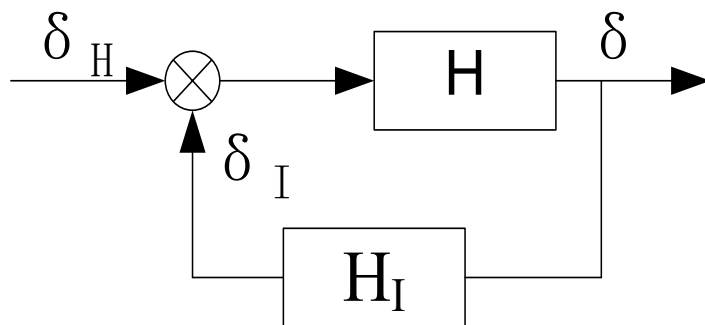
b) 闭环系统的静态精度

系统的相对误差：

$$\delta = \delta_H \frac{1}{1 + KK_2} - \delta_I \frac{KK_2}{1 + KK_2}$$

若： $\delta_H = 10\%$ ， $KK_2 = 20$ ， $\delta_I = 1\%$

则： $\delta = -0.5\%$ 。





§ 2.2.2 谐振式频率输出型传感器

谐振式传感器需要解决的问题：

谐振式与被测对象之间关系的建立：激振方式的选择，频率的测量。

特点：直接输出准数字量，如频率，相位或计数脉冲；精度高，稳定性好。

- 1) 谐振结构形式：悬臂梁、振弦、振膜、振筒等等。
- 2) 使力学结构起振的方式：利用逆压电效应的压电激励、热脉冲激励、光脉冲激励；利用电容效应的静电力激励；加电流脉冲的激励。
- 3) 测量方式：利用压电效应的压电变换器，基于压阻效应的电阻变换器；电容变换器等。

为维持等幅振荡，需加入具有正反馈的环节。

举例说明谐振传感器的工作原理：





1、 一根张紧弦的固有频率

单自由度机械力学系统的无阻尼固有频率：

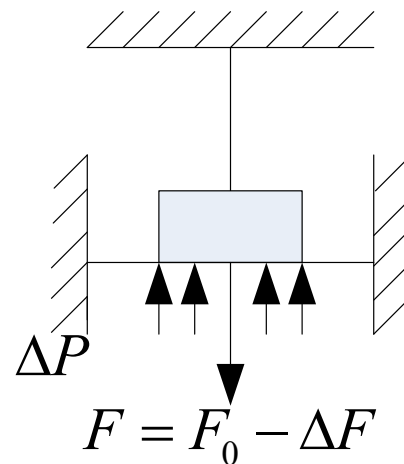
$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$k = \pi^2 \frac{F_0}{l}$: 张紧弦的横向刚度系数 ;

$m = l \rho_l$, ρ_l : 线密度; 则:

$$f_n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho_l}}$$

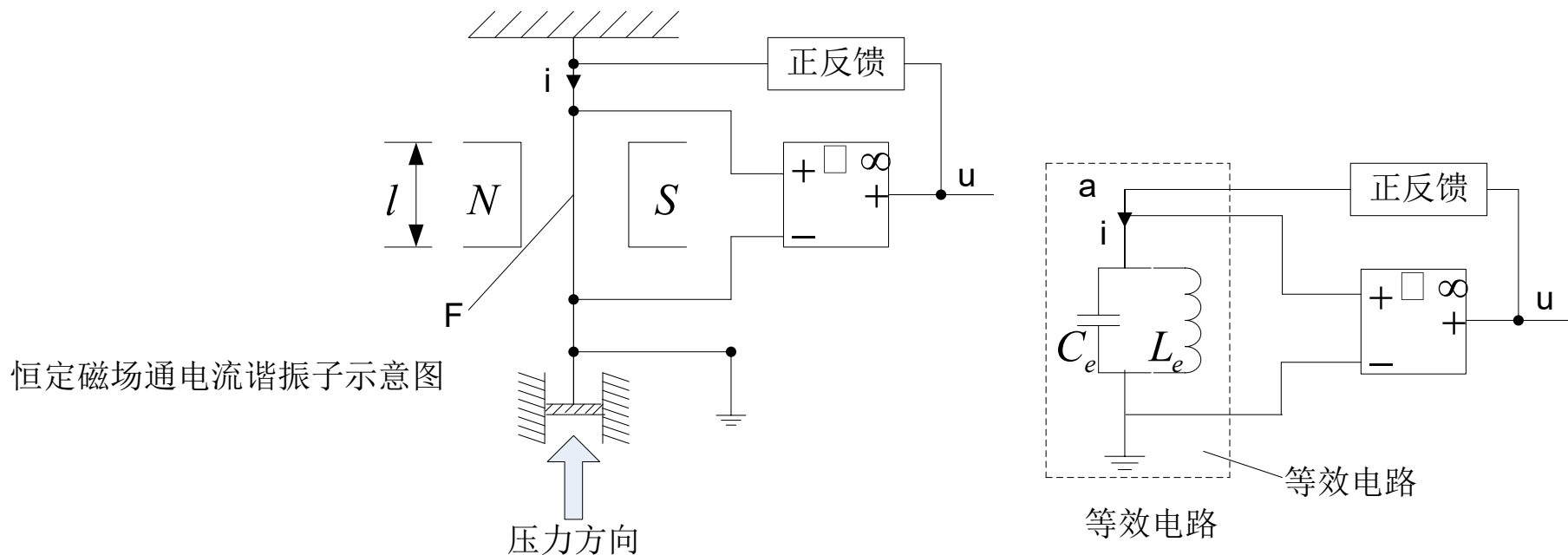
根据上式，可测：力、位移、压力、等，构成频率输出型传感器。



2、 恒定磁场中通电流振弦的等效电路

主要是建立起一种变换关系，即在m—k—b机械系统与LC并联电路之间建立一种关系。





在上图中, $i = i_C + i_L$, $F = F_C + F_L$,

$$u_L = L_e \frac{di_L}{dt} \quad u_C = \frac{1}{C_e} \int i_C dt$$

* 电流 i_C 受到的磁场作用力 F_C 为克服惯性力使弦产生加速度 $\frac{dv_C}{dt}$, 其位移引起电容量变化, 因此:

$$F_C = Bli_C = m \frac{dv_C}{dt} \quad , \quad v_C = \frac{1}{m} \int F_C dt \quad ,$$





$$e_C = Blv_C = \frac{B^2 l^2}{m} \int i_C dt$$

- * 电流 i_L 受到的磁场作用力 F_L 为克服弹性力使振弦产生横向变形位移 x , $F_L = Bli_L = kx$, k : 弦的横向刚度系数;
弦长的变化引起电感量的变化, 弦的形变位移速度: $v_L = \frac{dx}{dt}$

$$e_L = Blv_L = \frac{B^2 l^2}{k} \frac{di_L}{dt}$$

与前面的公式相互比较:

$$L_e = \frac{B^2 l^2}{k}, \quad C_e = \frac{m}{B^2 l^2} \quad \text{。} \quad \text{LC并联回路的谐振频率:}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_e}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

说明: 在恒定磁场中通以电流 i 的振弦, 其力学系统的固有频率与其





等效 C_e 、 L_e 并联电路的谐振频率一致，从而说明输出电压信号的频率可以直接反映压力的变化。

3、 测量电路

可采用上述的等效电路模型。

举例：日本横河公司开发出的H型硅微结构谐振式压力变送器，量程为 10^4 Pa的精度为 $\pm 0.1\%$ ，（ $-40^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$ ）工作范围内的综合精度为 $\pm 0.49\%$ 。

4、 振弦式力谐振传感器的输出—输入特性

在公式 $f_n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho_l}}$ 中，假定： $F = F_0 + \Delta F$ ， 则：

$$f = f_n \sqrt{1 + \frac{\Delta F}{F_0}} ;$$

它的幂级数展开式为：

$$f = f_n \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F_0} - \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^3 - \dots \right]$$





$$= f_n + \Delta f, \Delta f = f - f_n = f_n \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F_0} - \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^3 - \dots \right]$$

具有较大的非线性，忽略高阶项，理论线性度：

$$\delta_L = \frac{\frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2}{\frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F_0}} = \frac{1}{4} \frac{\Delta F}{F_0}$$

灵敏度：

$$S = \frac{\Delta f / f_n}{\Delta F / F_0} = \frac{1}{2}$$

若采用差动式结构，即一个固有振荡频率增加，另一个减少，两者输出之差作为输出，则 $\delta_L = \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2$ ， $S=1$ ；

5、 谐振型温度计

利用晶体的各向异性，通过选择适当的切割角度，把温度系数小的晶体用作频率的基准，温度系数大的作为测量频率。

特点：分辨率高，稳定性好，输出频率信号。

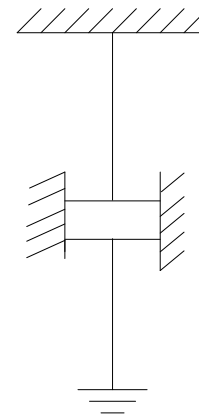




晶体振子频率 f_t 的温度特性近似用下式表示：

$$f_t = f_0[1 + \alpha(t - t_0) + \beta(t - t_0)^2 + \gamma(t - t_0)^3] \quad ;$$

α 、 β 、 γ ： 由切割角度决定的常数。





§ 2.2.3 CCD图像传感器 (charge coupling device)

CID (charge infusion device) 电荷注入器件

补充：光传感器

1)、作为光量检测的方法

- a) 将光照射到显示光电效应的物质上，直接得到电输出；
- b) 光被物质吸收而转变为热，从而测量物质温度的升高而反映光的信息；
- c) 利用光的干涉效应，产生光波频率的和及差，反映光的信息。

光电效应分：

a) 内光电效应：入射光子引起元件物质内部产生或感应出电子和空穴等载流子，这些载流子停留在物质内部，引起物质电性质发生变化（内量子效应），它分光电导效应和光电效应。

i) 光电导效应：改变元件物质的电导率，用于制作光敏电阻。



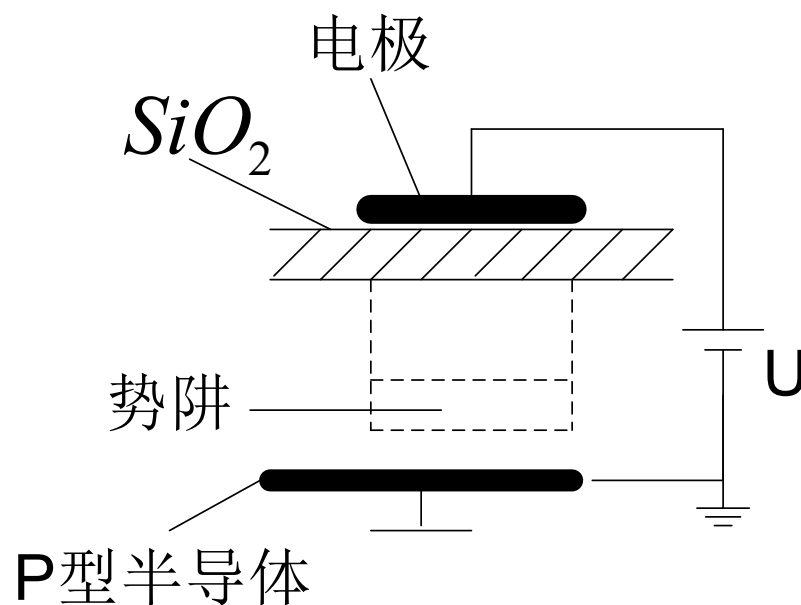


ii) 光电效应：入射光在两种半导体的结合处激发起电子—空穴对，电子与空穴分别向相反的方向移动，从而产生感应电势。P—N结、光敏二极管、三极管、CCD等。

b) 外光电效应：入射光被物质的表面所吸收，并从表面向外部释放电子，又称光电发射效应，如光电管、光电倍增管。

2)、 MOS结构的非稳定性

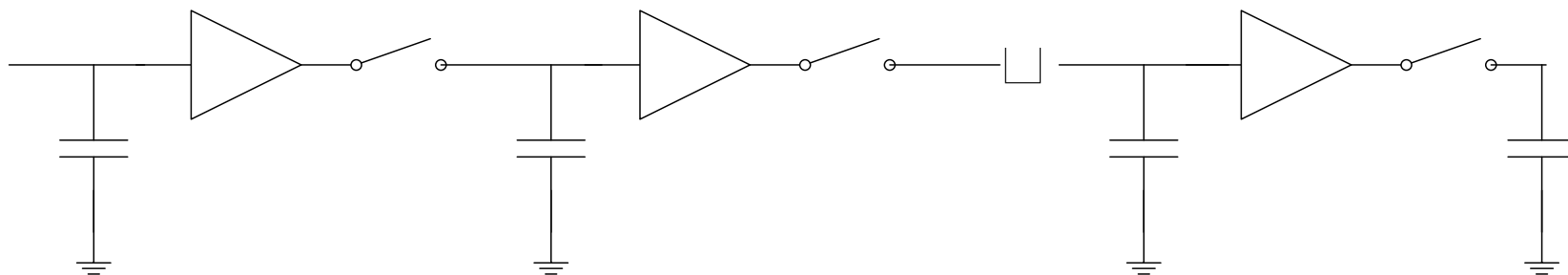
当足够数目的电子汇集在表面时，达到饱和状态，此时离开表面的扩散电流和流向表面的漂移电流达到动态平衡，达到饱和状态所需要的时间称为热驰豫时间，室温下为1秒到几秒，信号电荷的存贮时间





要远小于热驰豫时间。

3)、电荷传输的简单模型



4)、转移效率

CCD是一种动态模拟移位寄存器，信号电荷的转移效率最重要，设从一个电极转移到下一个电极的转移效率为： $\eta = \frac{Q_1}{Q_0}$ 。

对应的 $\varepsilon = \frac{Q'_0}{Q_0}$ 称为失效率， $Q'_0 + Q_1 = Q_0$ 。转移N个电极后电荷量为 Q_N ，则： $\frac{Q_N}{Q_0} = \eta^N = (1 - \varepsilon)^N$ ，一般要求 $\frac{Q_N}{Q_0} > 90\%$ 。





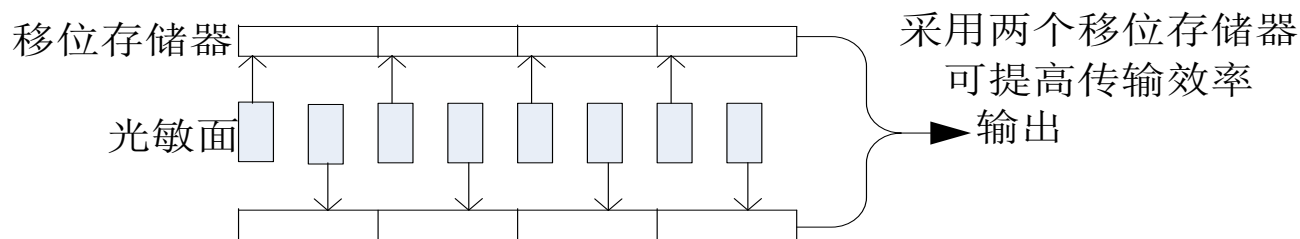
表面沟道电荷耦合器件（SCCD）与埋沟道电荷耦合器件（BCCD）的区别：

BCCD的优点：传输效率达到99.99%，传输速度提高；

缺点：工艺复杂，结电容小，电荷存贮能力下降。

在P型衬底上外延或扩散薄n层，形成P—N结，当在P—N结上加反向偏压时，在P—N结区便形成了耗尽层。

5)、线阵CCD

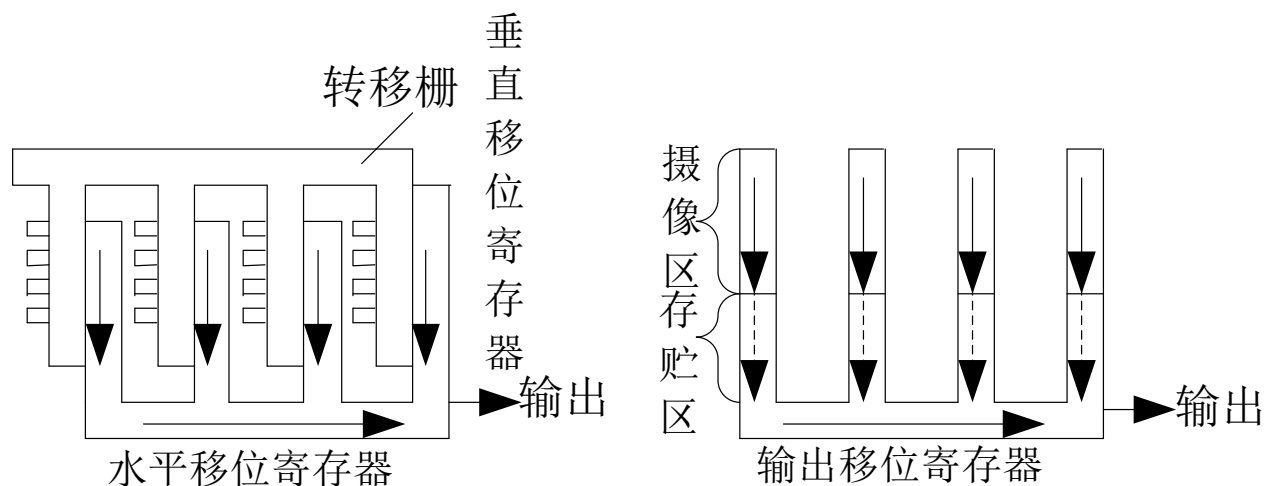


6)、面阵CCD:

a) 行间传输结构

b) 帧传输结构





7) CCD摄像器件的重要特性

a) 光电特性

输出信号电压与入射的照度是线性关系，入射照度 $>100 \text{ lx}$ 输出饱和

b) 光谱特性

对蓝光和黄光的灵敏度低，因为反射的影响，需采用透明电极。

c) 暗电流

室温为 $5 \sim 10 \text{ nA/cm}^2$ ，对存贮时间有影响。

d) 噪声





CCD是一种低噪声器件，CCD噪声主要由输入电路、寄存器本身输出电路引起。主要从结构（BCCD）设计和工艺的改进方面降低噪声。

e) 分辨率：

由像素总数和传输效率决定。

CCD的工作过程：

通过光学系统将被测物体成像在器件的受光面上，受光面下的像素小单元将像光量转换为电荷信号并存储，然后在时序控制信号作用下，被存储的电荷信号被转移传输和顺序输出。

1、基本单元（参照前图）

作用：电荷的存储；电荷的转移。

2、基本单元的功能

1) 电荷存储

—— 加正电压，P型硅里的空穴被赶尽，形成负离子空间电荷（又





称耗尽区），没有导电的载流子。对于带负电的电子来说，耗尽区是电子的“势阱”。

——“势阱”具有存储电子的功能，存贮了电荷的势阱称为电荷包。

——势阱的深度决定于正电压 U 的大小，宽度决定电极的宽度。

——每个独立的存贮电子电荷的MOS基本单元被称为一个“像素”。

势阱中存储的电子来源有两种方式：

a) 光注入

光入射到半导体硅片上，产生电子空穴对，光生电子被附近的势阱俘获，空穴被排斥出耗尽区，光电子数量与光强成正比，该单元既可存储电荷，又有感光的作用，称为“光敏元”。

b) 由光电二极管阵列产生的光生载流子注入产生

光生电子被势阱俘获，光生空穴被赶走，该单元只起存储电荷的作用，如TCD142D型线阵CCD器件。





2) 电荷耦合

势阱中的电荷从一个MOS单元转移到另一个MOS单元是基于MOS单元的电荷耦合功能来实现的。

将一定规则变化的电压加到各个MOS单元的电极上，电极下的电荷包就能沿半导体表面按一定方向移动。

通常，把MOS元的电极分为几组，有三组，有两组。

三相驱动时钟脉冲相位相差120°。

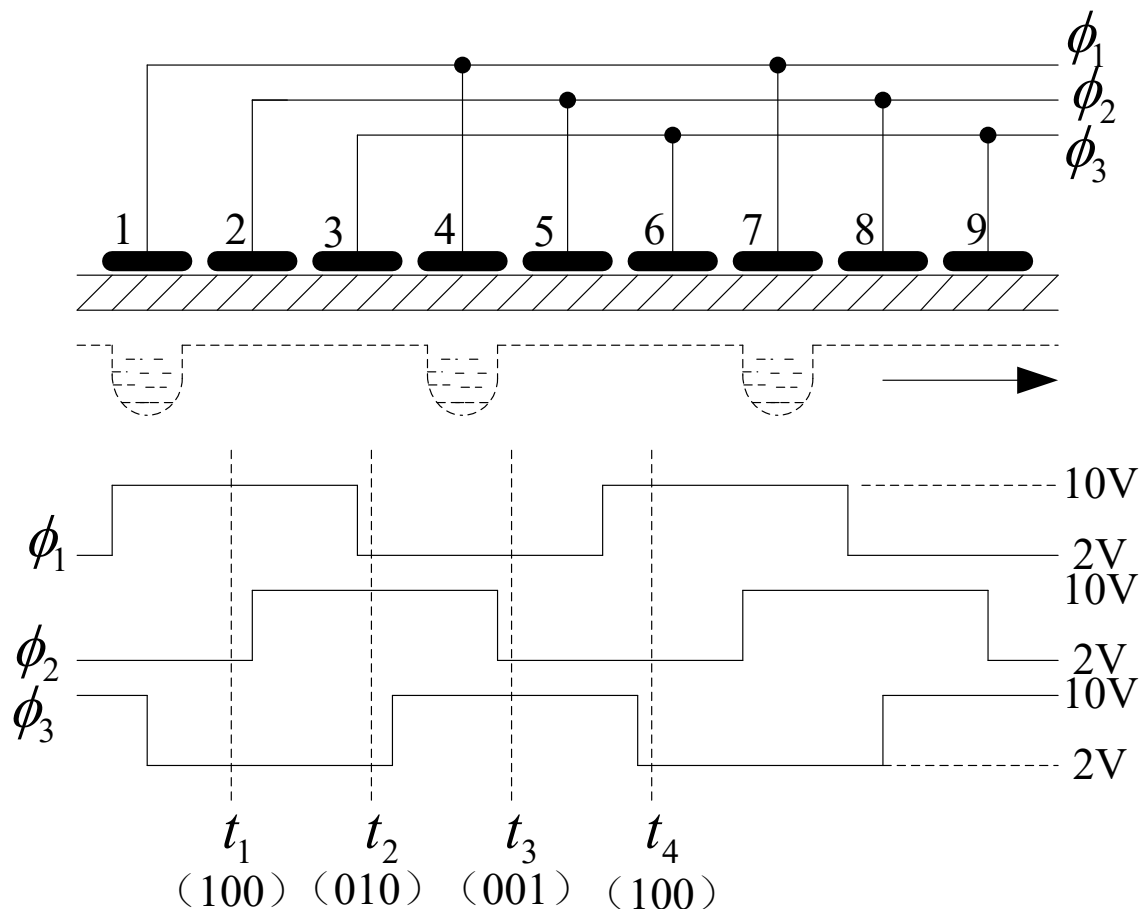
为了不使电极间隙下方界面处出现阻碍电荷转移的势垒，间隙宽度应小于 $3\text{ }\mu\text{m}$ ，只有电极间隙足够小，前一电极下势阱由深到浅，后一电极下的势阱由浅变深才相通，电荷的转移不会受阻碍。

电荷转移传输的MOS单元阵列称为读出移位寄存器，它们须遮光。

3) 电荷的输出

被转移传输的信号电荷要输出，输出方式有多种，下图为电流输出方



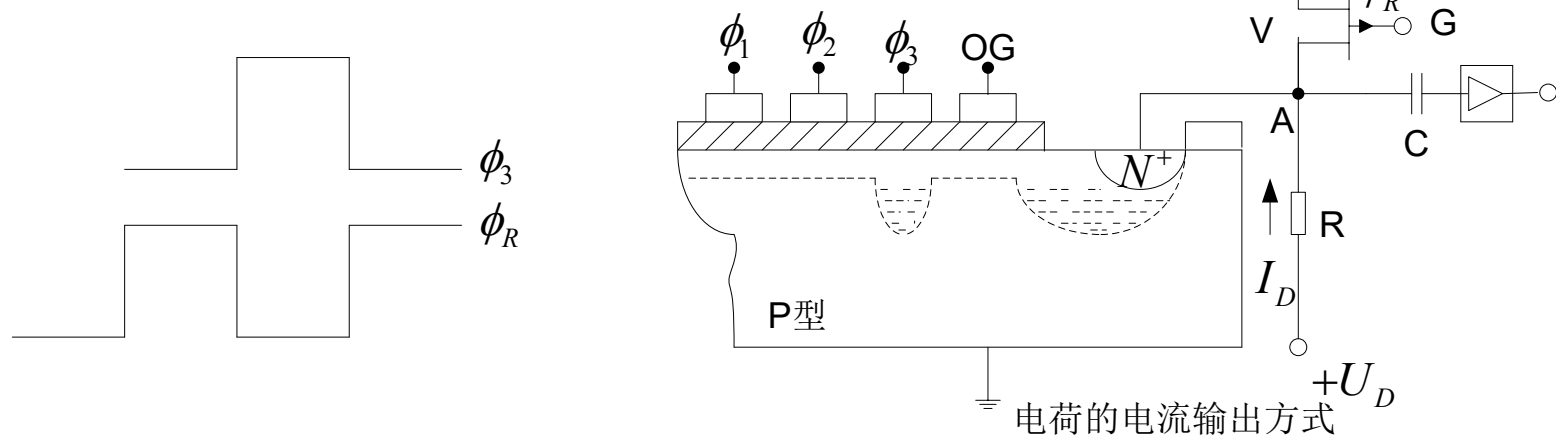


三相脉冲驱动的电荷转移示意图

式。

OG: 输出栅极，加直流偏置以使漏扩散和时钟脉冲之间退耦，实际上是防止在时钟脉冲作用下最终信号电荷扩散掉。





N^+ 区与P型硅接触处构成PN结，施加 U_{DD} 构成反向偏置二极管，转移到 ϕ_3 下面的电荷包越过输出栅流入到反向偏置二极管的深势阱中。在 dt 时间内，流入的信号电荷为 Q_S ，二极管输出电流 $I_D = \frac{Q_S}{dt}$ 。

A点电位： $U_A = U_D - I_D R$

A点的电位变化量与信号电荷的量成正变， ΔU_A 经C耦合至放大器放大输出。

v为复位管，它的作用就是在 ϕ_3 电极下的势阱未形成前在栅极G加复位脉冲，使 A点电位复位到 V_{DD} ，当 Q_S 到来时，v截止。





3、二相线阵TCD142D型CCD器件的基本结构

组成部分：有2124个光电二极管线阵，其中前64个和后面12个是被遮蔽的，构成像素的是中间2048个单元。为提高传输速率，采取上下两行存贮栅的结构，分别存贮奇偶列的信号电荷。

单元： $14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ ，中心距： $14\mu\text{m}$

有效总长： $2048 \times 14 = 28.672\text{mm}$ 。

存贮栅的作用：相当于数据采集系统中采样器的作用；

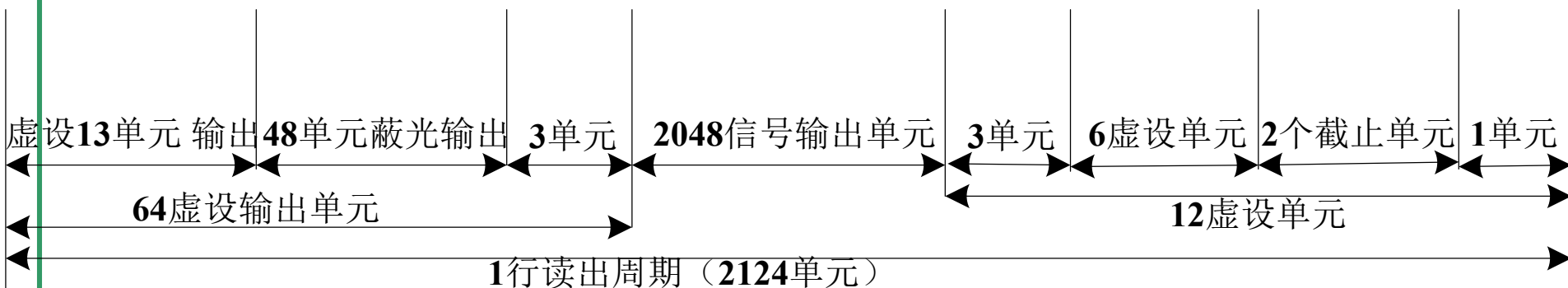
移位寄存器的作用：相当于数据采集系统中保持器的作用；

转移栅的作用：相当于数据采集系统中采样开关的作用。





4、 TCD142D型CCD器件的工作时序



5、 应用举例

利用线阵CCD器件自动检测工件直径，表面检测。机器人视觉系统应用。





单片指纹传感器

生物识别技术 (Biometric Identification Technology) 是利用人体生物特征进行身份认证的技术。

“认人不认物”的特征要求：人各有异，终身不变，随身携带。

同时具备这三个特点的人体生物特征主要有指纹、虹膜、DNA。

适用于生物识别的人体特征有手形、指纹、脸形、虹膜、视网膜、脉搏、耳廓等。行为特征有签字、声音、按键力度等。目前，指纹机和手形机在人体特征识别技术市场中的占有率最高，分别为34%，26%。

1、 指纹识别基本原理

1) 指纹图像的两大特点：

- a) 具有唯一性，匹配上12个特征的两个指纹相同的几率仅为 $1/10^{50}$
- b) 具有基本不变的相对稳定性

指纹识别的过程分四个步骤：读取指纹图像、提取特征、保存数据和对比。





2) 指纹图像的获取

主要有4种：光学取像设备、压电式指纹传感器、半导体指纹传感器、超声波指纹扫描仪。

在半导体指纹传感器中又分温差感应式（FCD4B14）和电容感应式（FPS100）。

3) 指纹识别技术的基本原理

指纹特征分两类：一类是总体特征，用眼睛可直接观察到的特征；另一类是局部特征，主要指节点特征，主要以：

- a) 节点类型；
 - b) 方向；
 - c) 曲率；
 - d) 位置（ x ， y 座标）
- 方面来区分。

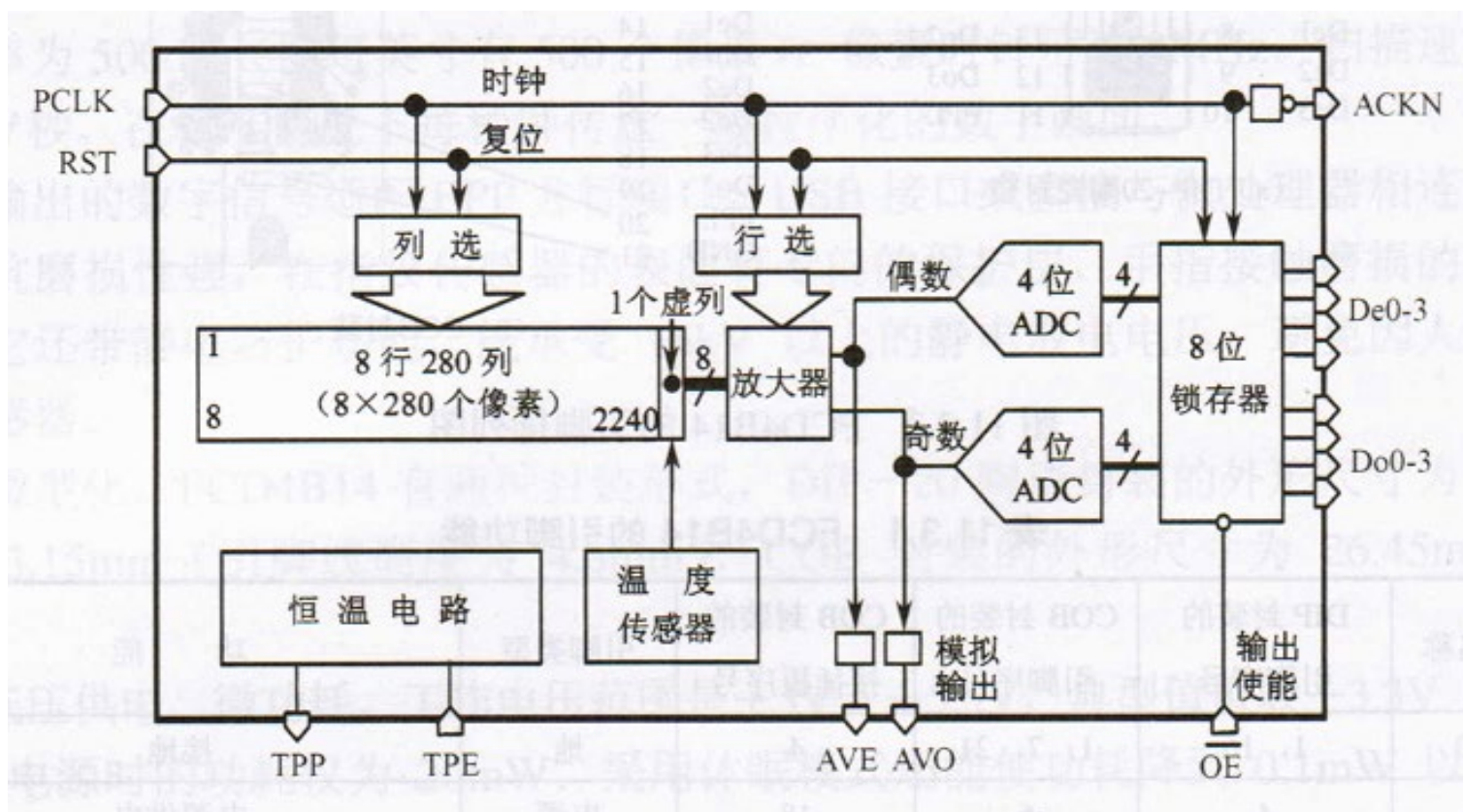




指纹识别过程:

指纹采样→预处理→二值化→细化→纹路提取→细节特征提取→指纹匹配

2、 FCD4B14/AT77C101B型指纹传感器（内部结构见下图）



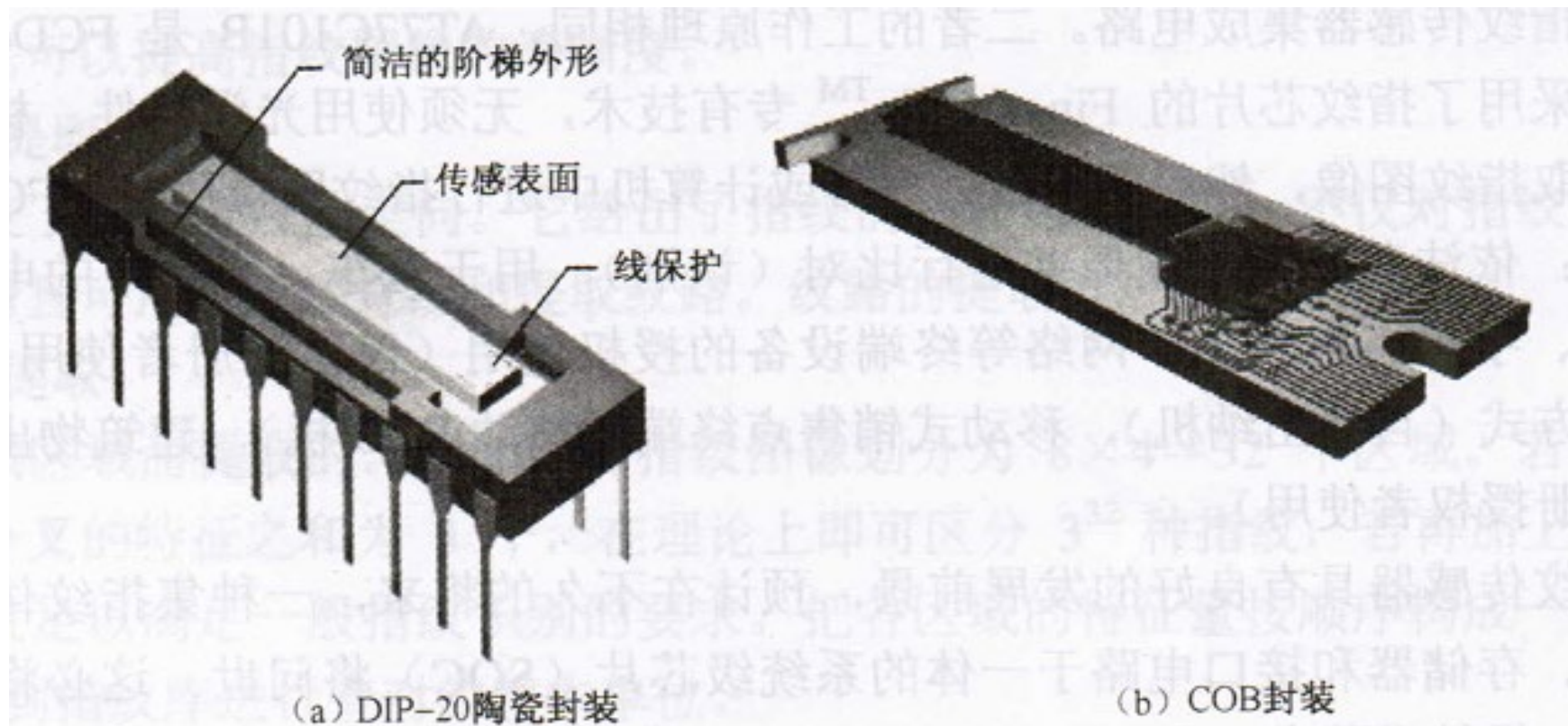
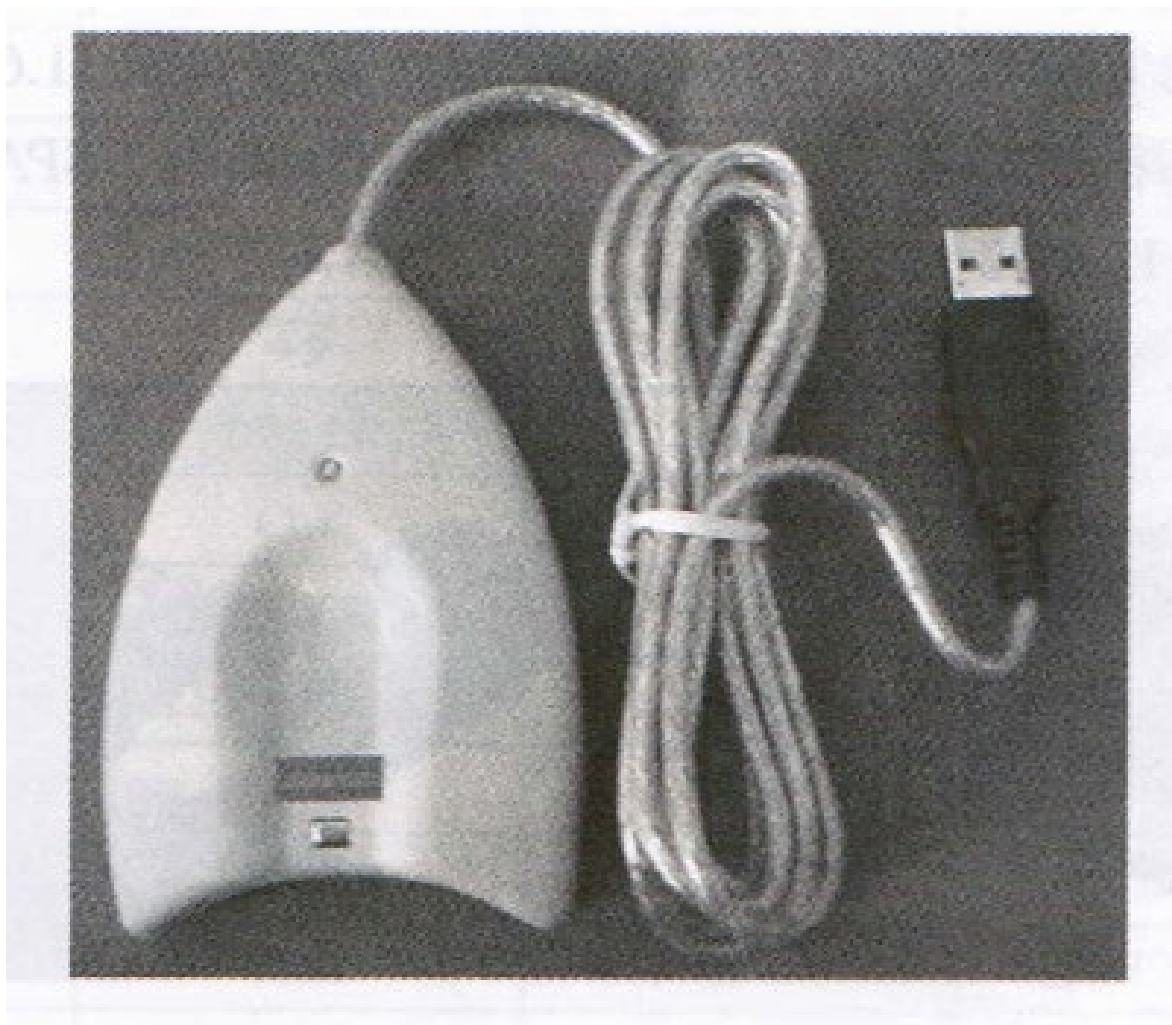
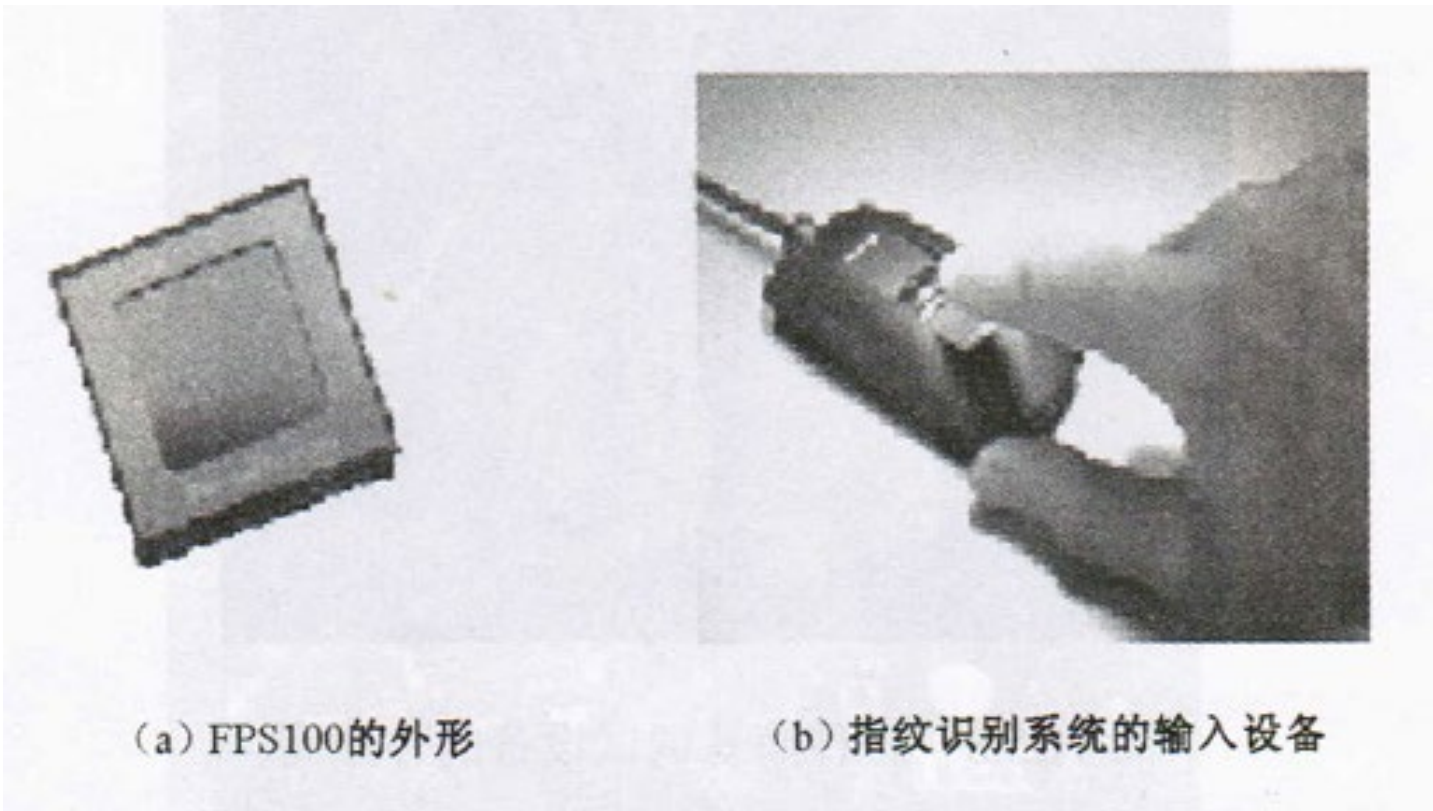


图 11.3.1 FCD4B14 的外形图







(a) FPS100的外形

(b) 指纹识别系统的输入设备





§ 2.2.4 半导体气敏传感器

传统手段:电化学—使用电极与电介液对气体进行检测。

光化学—利用气体的光学折射率或吸收等特性。

缺点: 检测速度慢, 设备复杂, 成本高, 使用不方便。

新型半导体气敏传感器的优点:

元件体积小, 功耗低, 特性一致性好, 适合自动, 连续过程检测。
其中以薄膜型器件为好, 它可以与集成电路的制造工艺兼容。

半导体气敏传感器按控制机理分类:

- 1) 电阻控制型气敏传感器 (金属氧化物半导体);
- 2) 非电阻控制型气敏传感器 (半导体材料硅);

气敏传感器的要求:

- 1) 具有良好的选择性 (半导体法的选择性较差)
- 2) 较高的灵敏度和宽的动态响应范围。
- 3) 性能稳定, (半导体法稍差, 可靠性也不是很好)





4) 响应速度快, 重复性好

5) 保养简单, 价格便宜

1、电阻控制型气敏传感器机理

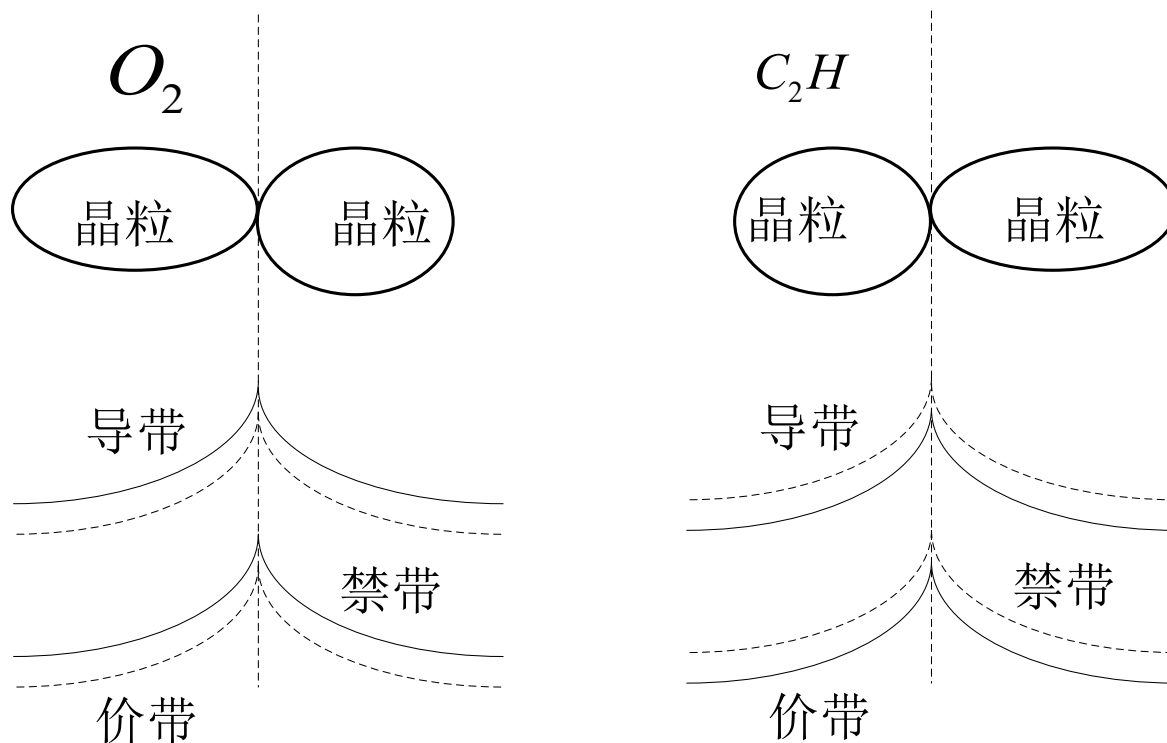
敏感元件与被测气体接触引起电导变化, 电导变化分表面电导变化与体电导变化。

一般构成: 加热器 + 温度测量元件 + 气敏元件

a) 晶界势垒模型

根据多晶体半导体能带模型。半导体气敏材料是半导体微粒的集合体。由于粒子接触界面势垒的存在, 当晶粒接触面吸附可以容纳电子性的气体 (O_2 等氧化性气体) 时, 势垒更加增高, 阻碍了电子在晶粒之间的运动, 材料表现为较高的电阻率; 当吸附可以供电子性的气体 (H_2 等还原性气体) 时, 势垒变低, 促进了电子在晶粒之间的运动, 材料的电阻率降低, 有些气体吸附后, 势垒无明显变化。





对于半导体气敏机理（或工作原理）的解释，不同类型的传感器可以归纳成四种模式：* 接触粒界势垒理论；* 整体原子价控制理论；* 能级生成理论（ SnO_2 ， ZnO ）；* 表面电荷层理论。

b) 颈部模型

参见相关参考书中的内容。





1) 表面控制型

利用半导体表面因吸附气体引起半导体元件电阻值变化的特性。

检测对象：多数是可燃性气体。

传感器材料： SnO_2 ， ZnO 。

激活剂（添加剂）：掺有少量的贵金属（如Pt等）。

2) 体控制型

利用体电阻的变化。

检测对象：液化石油气（丙烷），煤气（ CO ， H_2 ），天然气（甲烷）

传感器材料： Fe_2O_3 ， TiO_2 ， CuO 等。

2、影响电阻控制型气敏传感器的因素及改善方法

1) 氧化分压的影响

气敏传感器对还原性气体的测量是建立在首先在氧化性气体中被氧化





的基础之上的，因此环境中氧化分压， P_{O_2} 对传感器的灵敏度影响很大，氧吸附接近饱和时，吸附覆盖度：

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{H_2} = \frac{K_{H_2} P_{H_2}}{K_{O_2} P_{O_2}} \dots K : \text{吸附平衡系数} \\ Q_{O_2} = 1 \end{array} \right.$$

2) 温度

因为温度可以促进氧化或还原反应的进行，因此温度对传感器的灵敏度影响很大，每种传感器都有一个最佳工作温度点。

SnO_2 : $\sim 300^\circ\text{C}$; ZnO : $450^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$;

实际应用中，尽量选择工作温度低，灵敏度高的气敏传感器。

3) 湿度

为减少或消除湿度对传感器特性的影响，应尽可能选择较高的工作温度。根据水蒸气分压对传感器电导的影响特性，也可以将金属氧化物半导体用作湿敏材料。





4) 改善选择性

- a) 掺杂其他金属氧化物或其他添加物。
- b) 控制元件的烧结温度。
- c) 改变元件工作时的加热温度。

三种方法需要在实验的基础上进行不同的组合应用，才能取得好的效果。

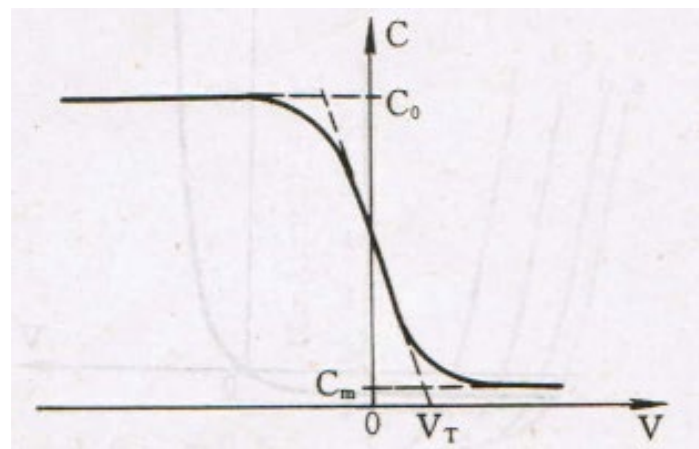
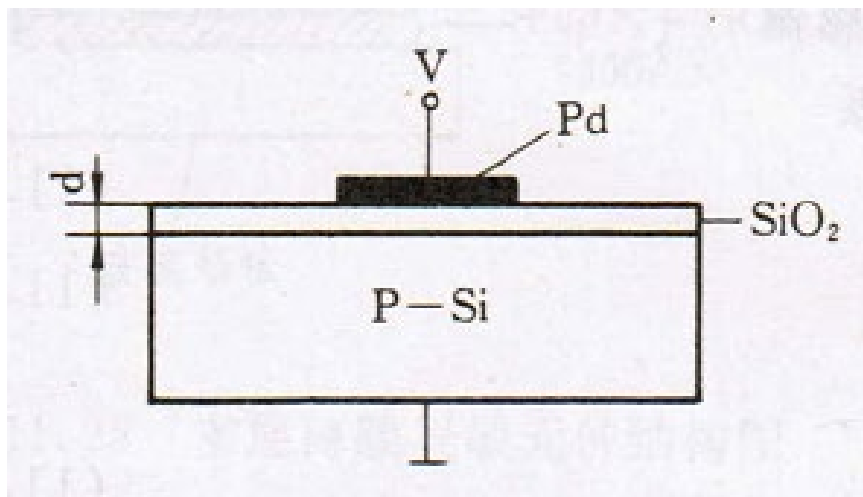
3、 非电阻型气敏传感器

主要是利用金属和半导体接触的肖特基二极管的伏—安特性，金属—氧化物—半导体场效应管（MOSFET）的阈值（ V_T ）电压变化特性进行测量。

1) 金属栅MOS元件基本原理：

MOS电容器：
$$C_0 = \frac{\epsilon_{0x}}{d}$$
 ϵ_{0x} : SiO_2 介电常数





MOS 电容 C - V 特性曲线

$$C_m = \frac{\epsilon_{0x}}{[d + (\epsilon_{0x} / \epsilon_s) D]}, \quad \epsilon_s : \text{硅介电常数}, D: \text{最大耗尽层厚度}$$

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{1 + 2\epsilon_{0x}^2 V / eN_A \epsilon_s d^2}}, \quad N_A : \text{P型硅的掺杂受主浓度};$$

V_T : MOS电容器的阈值电压, 与金属栅的功函数及半导体的材料的性质和制造工艺有关。

$$V_T = \Phi_M - x - \frac{E_g}{2e} + \Phi_F + \sqrt{(4e\epsilon_s N_A \Phi_F - Q_f) / C_0}$$





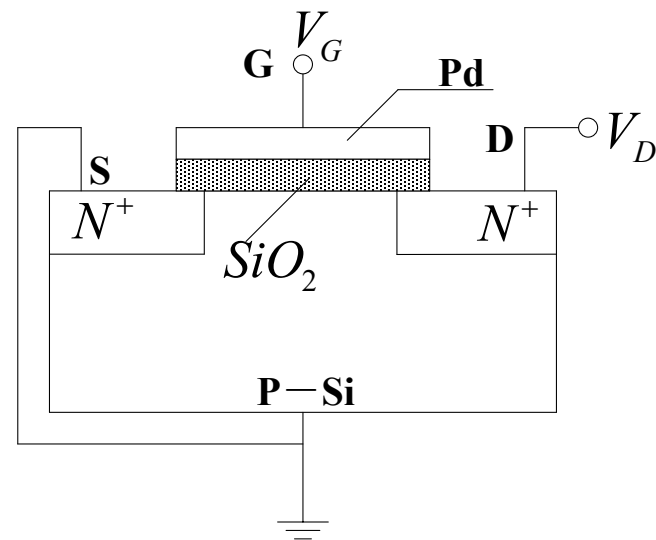
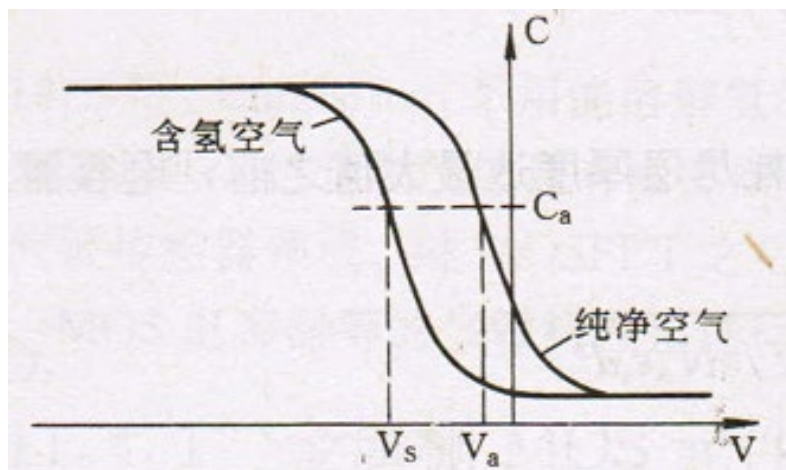
Φ_M : 金属的功函数; χ : 半导体的电子亲和势;

E_g : 半导体的禁带宽度;

Φ_F : 半导体的费米能级与其本征费米能级之差;

Q_f : 氧化物的固定电荷量。

如下图所示:



2) MOSFET工作原理

在MOSFET的结构图中, $V_D \geq |V_{GS} - V_T|$ 时, MOS管工作于饱和状态, 漏源电流:





$$I_{DS} = \beta(V_{GS} - V_T)^2 \quad ;$$

β : 常数, V_D : 漏极电压, V_{GS} : 栅源电压差。保持 I_{DS} 不变, 将栅极与漏极短接, 则:

$$\Delta V_{GS} = \Delta V_T \quad .$$

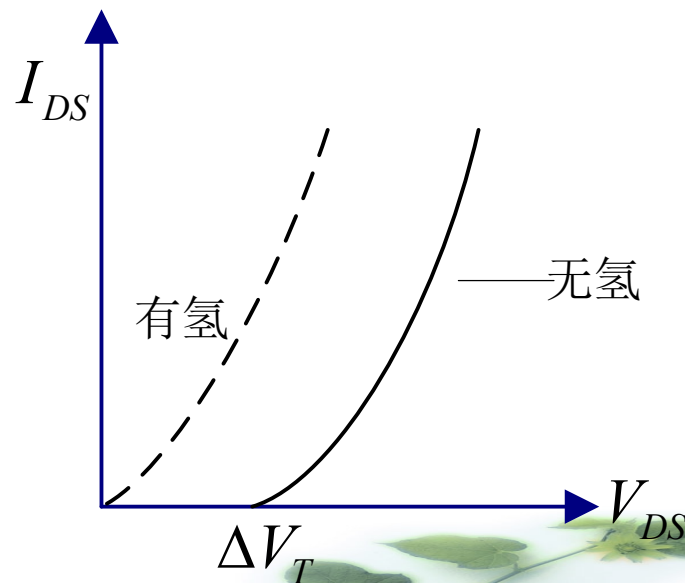
在Pd-MOSFET氢敏器件中:

$$\Delta V_T = \Delta V_{TM} \frac{K \sqrt{P_{H_2}}}{1 + K \sqrt{P_{H_2}}}$$

ΔV_{TM} : Pd- SiO_2 界面吸附氢原子饱和时, ΔV_T 变化的最大值, 见下图:

$$K = \sqrt{\frac{c_1}{d_1}} \quad ,$$

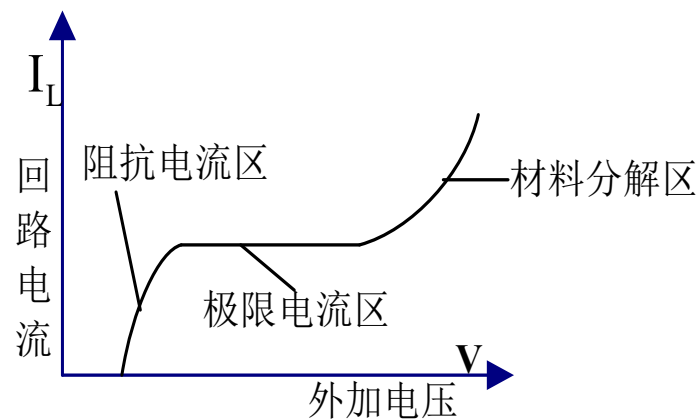
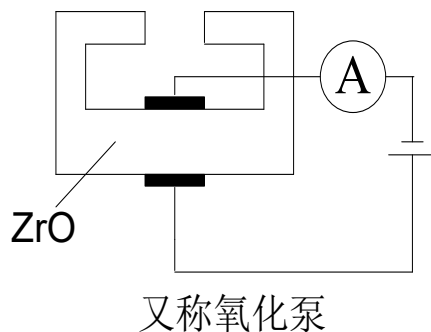
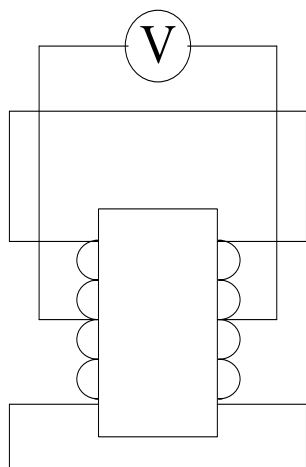
c_1, d_1 为正、逆反应的速度函数。





3) 氧化锆氧传感器。

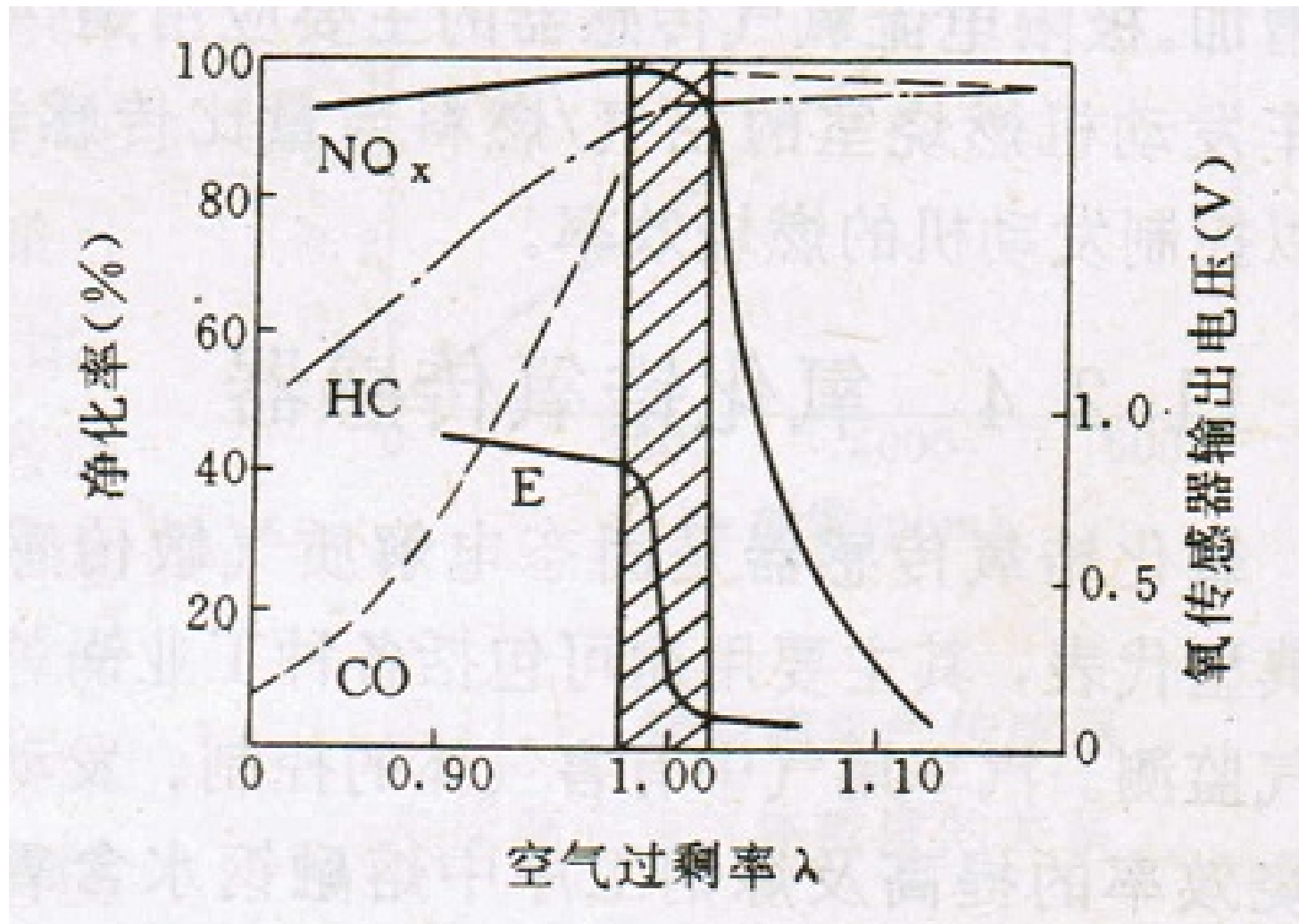
工作原理的不同分：电位式、极限电流式。



4) 三元催化剂处理尾气： NO_x 、 CH 、 CO

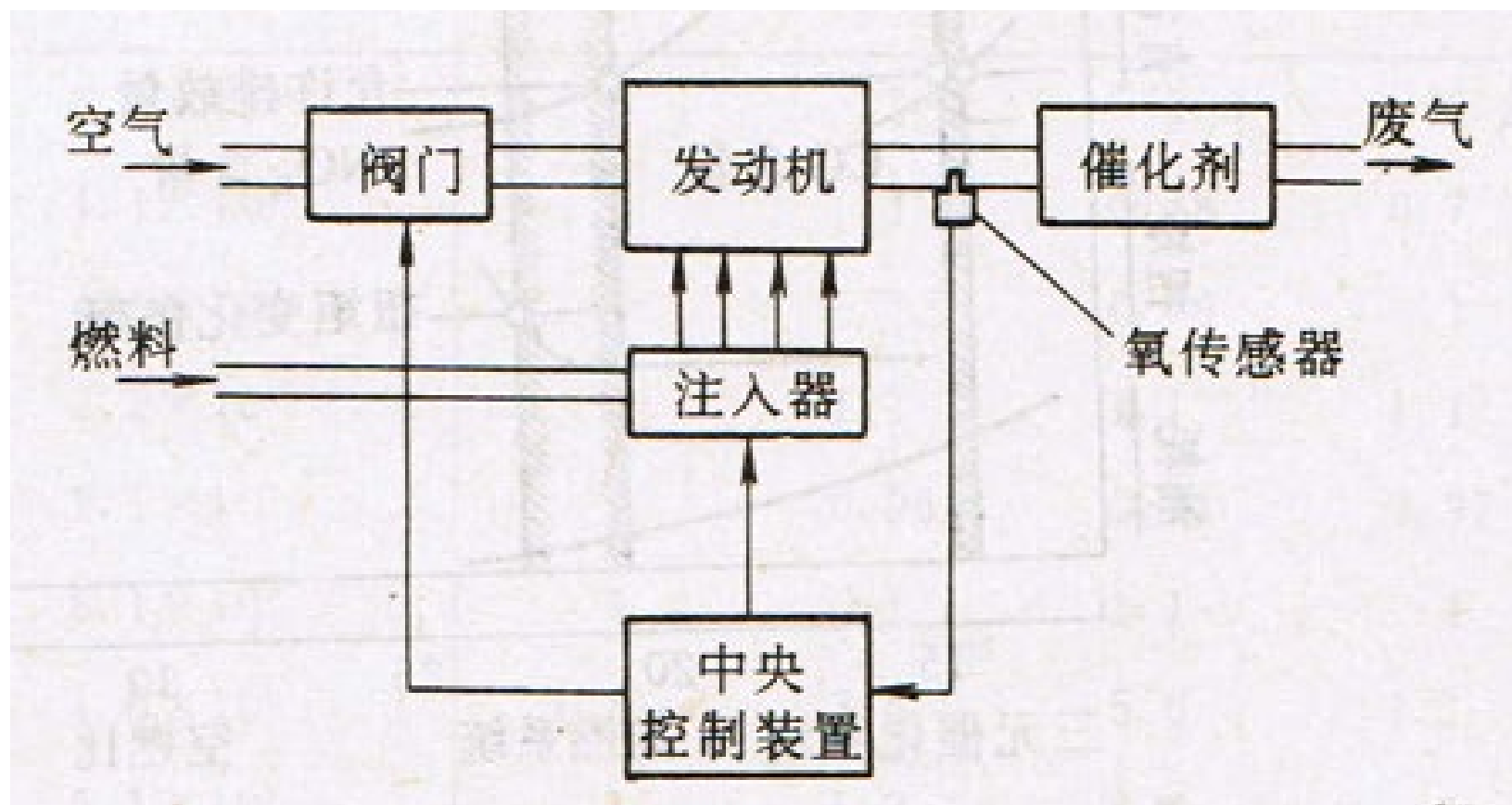
见下图：





催化剂废气净化率与传感器输出特征的关系





控制燃烧室空燃比的电路原理图





为提高燃烧效率，一般希望发动机工作在贫燃状态，这样对氧含量的检测提出了比较高的要求，这时采用极限电流式。

4、 气敏传感器的集成化与智能化

集成化和智能化的含义：

- a) 多个传感器集成在同一芯片上，构成阵列式，提高选择性。
- b) 信号处理电路与传感器集成在一起。

1) 集成化对气敏元件的要求

须采用与集成电路兼容工艺制备，即特殊工艺不能对其它集成元件构成不良影响。

2) 集成化设计





a) 相邻相似单元

可以消除因环境因素所产生的系统误差，提高测量精度。

b) 带有自恒温系统与信号处理电路的传感器

使气敏传感器工作在对被测气体灵敏度最高的合适温度。

c) 气敏单元阵列

作用：提高传感器的选择性和浓度测量精度，类似于数字信号处理中的相关分析。





§ 2.3 提高传感器性能的技术途径

传感器性能主要指：稳定性、可靠性、精度、动态响应范围等。

§ 2.3.1 合理选择结构、参数和工艺

1、 如压阻式压力传感器，硅敏感膜片有C型到E型、EI型。

按照前面的介绍，E型与C型比，可以提高它的线性度，EI型还可以提高灵敏度。

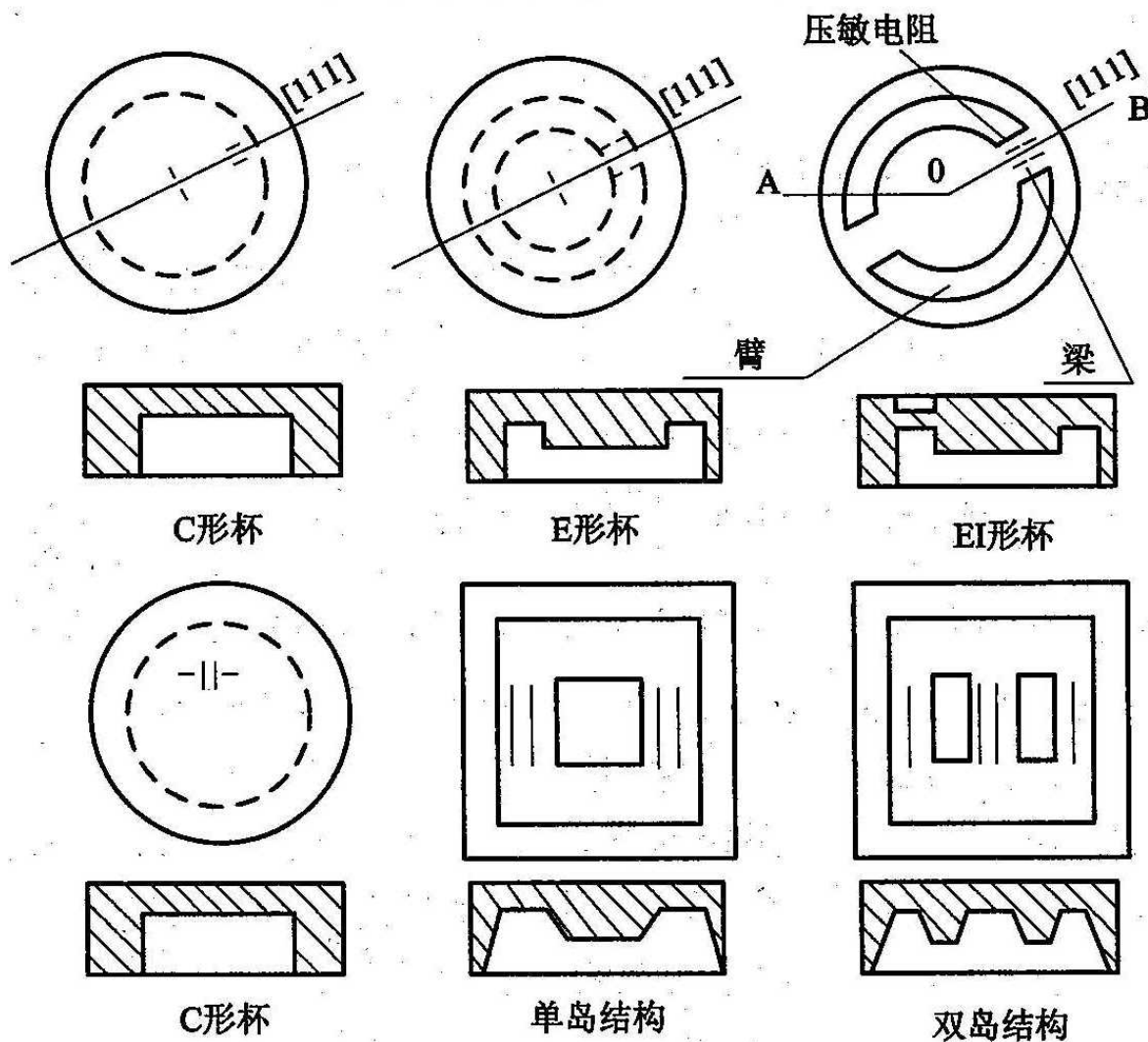
2、 压阻式加速度传感器

从双梁变到4梁，升到双岛五梁，其演变的结果，可以得到高的灵敏度和小的横向效应。

§ 2.3.2 基于差动对称结构的差动技术

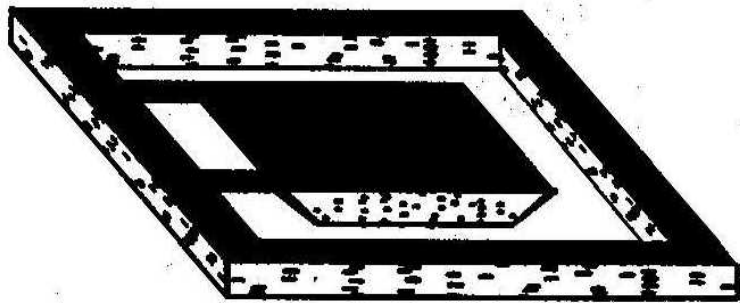
差动技术的优越性：可以消除零位值，减小非线性，提高灵敏度，抵消共模误差干扰。



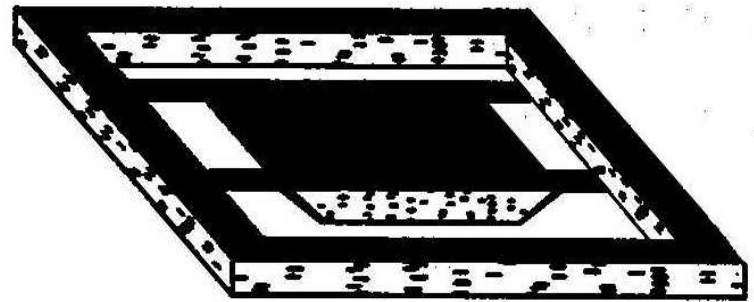


压阻式压力传感器硅敏感膜片的各种结构形式

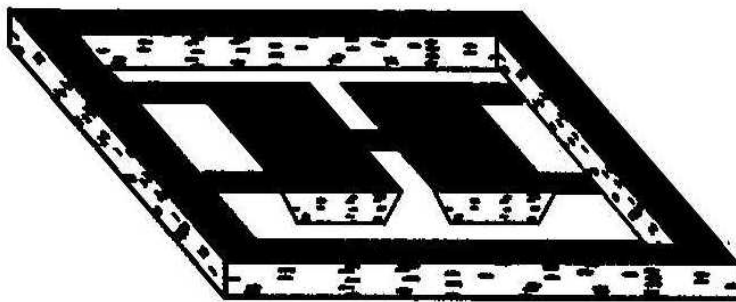




(a)



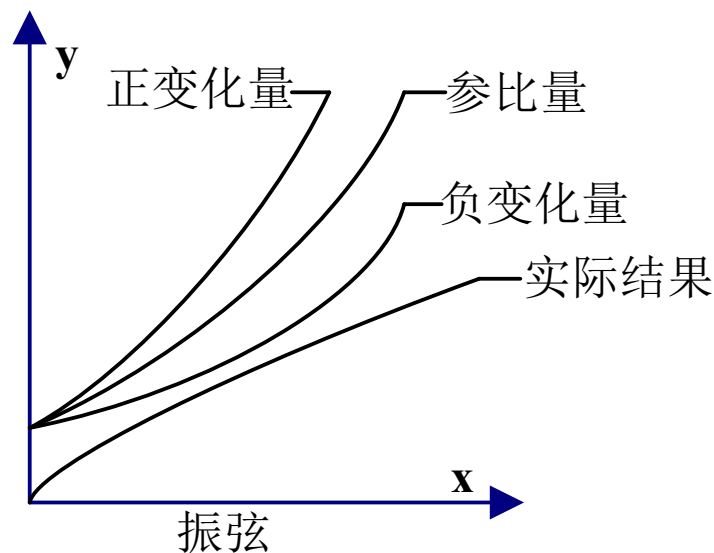
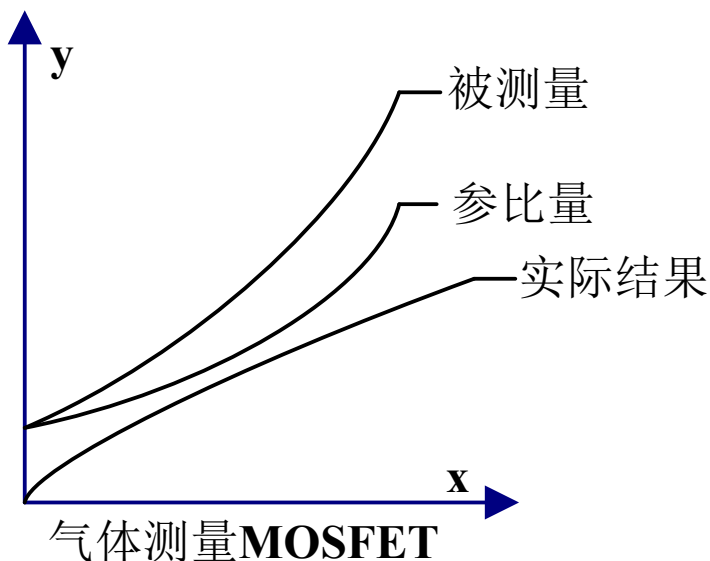
(b)



(c)

压阻式加速度传感器的各种结构形式





1、差值输出形式

如前面介绍过的振弦谐振式压力传感器的差动结构。

$$\Delta f_s = f_n \left[\frac{\Delta F}{F_0} + \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^3 + \dots \right]$$

与理论线性度相比，非线性误差减小 $\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)$ ，灵敏度提高一倍。

2、差与和之比值为输出形式

变间隙式电容变换器存在有严重的非线性：

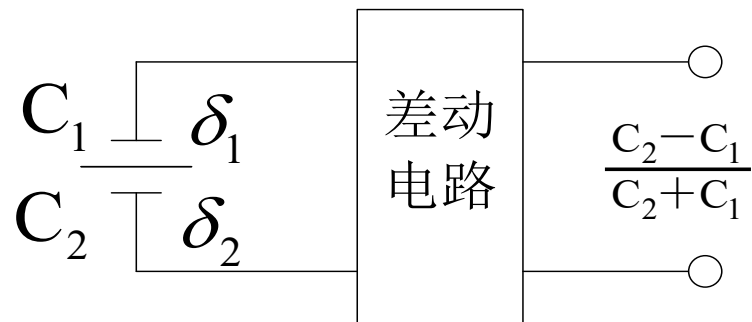




$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta \quad \delta_2 = \delta_0 - \Delta\delta$$

$$C_1 = C_0 - \Delta C = \frac{C_0}{1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$

$$C_2 = C_0 + \Delta C = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}}$$



1) 差值输出

$$\Delta C = C_2 - C_1 = C_0 \left[2 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + 2 \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + 2 \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^5 + \dots \right]$$

理论线性度: $\delta_L = \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2$, $\left(\delta'_L = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)$;

灵敏度: $K_C = 2 \frac{C_0}{\delta_0}$, $\left(K'_C = \frac{C_0}{\delta_0} \right)$;

另外消除了零点值的项。





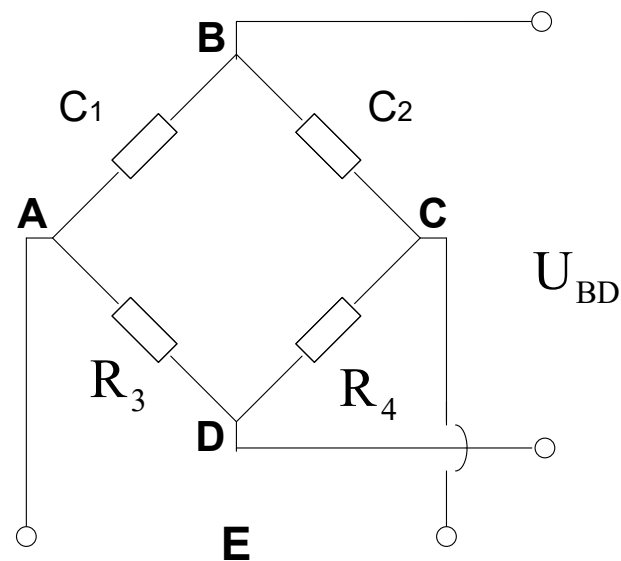
2) 差与和之比值:

$$\frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0}, \text{ 非线性误差为零。}$$

3) 电路实现形式 (如右图)

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$$

$$Z_3 = R_3 = R = Z_4 = R_4$$



$$U_{BD} = E \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} = \frac{E}{2} \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{E}{2} \frac{\Delta\delta}{\delta_0}$$

U_{BD} 与 $\Delta\delta$ 之间是理想的线性关系。

3、 $(\Phi - \frac{1}{\Phi})$ 输出形式

仍以差动电容为例, 定义: $\Phi = \frac{C_1}{C_2}$, 则: $\frac{1}{\Phi} = \frac{C_2}{C_1}$, 通过公式变换, 略去高阶项:

$$\Phi - \frac{1}{\Phi} = -4 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 \right]$$





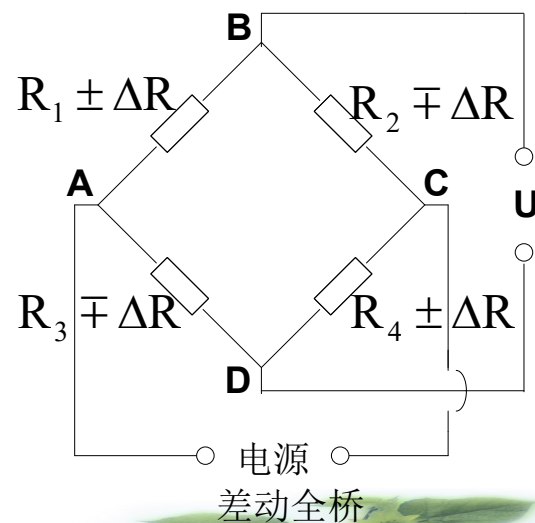
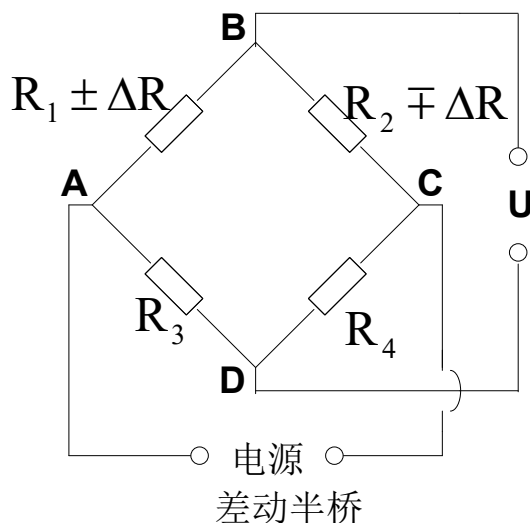
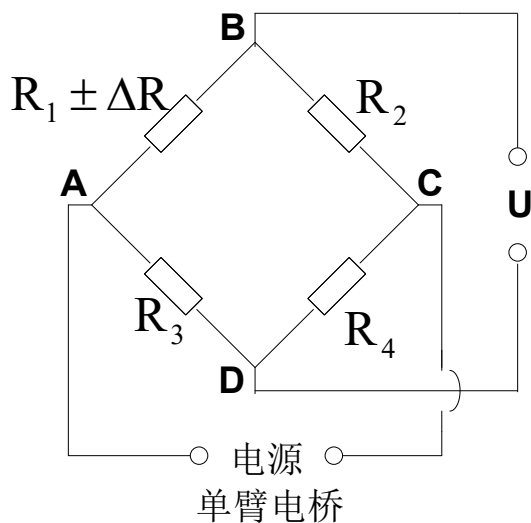
线性度: $\delta''_L = \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2$, 与差值输出一样;

灵敏度: $|K''_C| = 4$, 与差值输出比提高2倍, 比单个输出提高4倍。

4、电桥电路

电桥电路是集成式传感器一种重要的输出电路形式, 对于压阻式电阻变换器, 它是基本的配接电路。

1) 电桥的连接方式:





2) 恒流源与恒压源作为供电电源的差别

a) 电压源: $U = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E$, 灵敏度: $S_\alpha = \frac{U}{\Delta R / R}$;

单臂桥: $U = \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R_0} \frac{1}{1 + \Delta R / 2 R_0} \approx e$, $S_E = \frac{E}{4} \frac{1}{1 + \Delta R / 2 R_0}$;

线性度: $\delta_E = \frac{\Delta R}{2 R_0}$ 。

半桥: $U = 2e = \frac{E}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$, $S_E = \frac{E}{2}$;

全桥: $U = 4e = E \frac{\Delta R}{R_0}$, $S_E = E$ 。

b) 电流源:

$$U = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I$$

单臂桥: $U = \frac{I}{4} \Delta R \frac{1}{1 + \Delta R / 4 R_0} \approx e'$, $S_I = \frac{I}{4} R_0 \frac{1}{1 + \Delta R / 4 R_0}$

线性度: $\delta_I = \frac{\Delta R}{4 R_0}$ 。





$$\begin{aligned} \text{差动半桥: } U &= \frac{I}{2} \Delta R = 2e' , & S_I &= \frac{I}{2} R_0 \\ \text{全 桥: } U &= I \Delta R = 4e' , & S_I &= I R_0 \end{aligned}$$

恒流源供电时，单臂电桥的非线性误差是电压源供电时的1/2。

3) 电桥对共模干扰量的补偿特性

书中有比较详细的公式推导及结果，这里不作说明，但要了解单臂、差动半桥、差动全桥以及电压源与电流源供电时的差别。

- a) 电桥对同符号的共模干扰量 ΔR_T ，具有补偿作用。
- b) 恒流源供电的差动全桥，理论上无温度误差。
- c) 实际电路在制作过程中不可能保证特性完全一致，因而仍存在零位输出、零位漂移以及灵敏度温度误差，需要采用进一步的补偿措施。





§ 2.3.3 补偿措施

这里主要介绍针对压阻式传感器的一些补偿措施。

1、改善非线性的内补偿法

1) 指导思想：想办法使两桥臂的非线性误差数值相等，符号相反。

2) 具体实现形式：双岛结构的方形硅膜片是一种结构补偿的形式（见右图）。

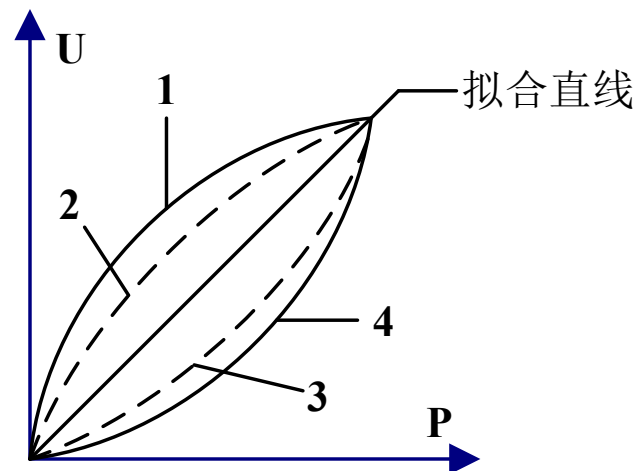
3) 补偿要求：

$$\delta = 0 \rightarrow n = \frac{W_A}{W_B} = 2.48$$

2、拼凑补偿法

1) 温度补偿

以保证输出量与目标量之间的单值函数关系为前提，寻求目标参量之外的变化量之间的相互补偿。如电压源和电流源可被制作成一个与未补偿电桥输出具有相反温度特性的供电电源。



1: P-U₁特性 2: P-U₂特性
3: P-U₃特性 4: P-U₄特性





§ 2.3.4 多信号测量法

1、二信号法

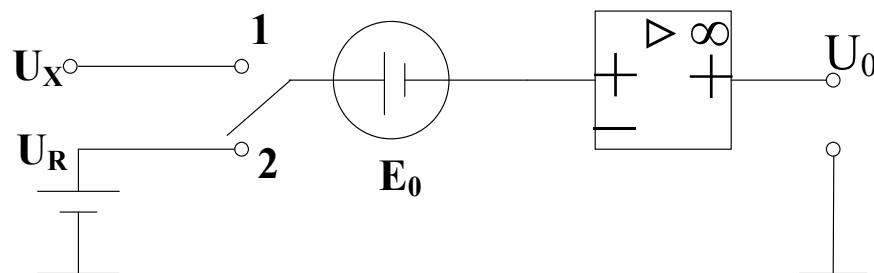
前提：有相同的系统误差，该系统误差可被大大减小（见下图）。

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{E_0}{U_x} \left(\frac{U_{01}}{U_{02}} - 1 \right)$$

如果直接测量：

$$\frac{\Delta U_{01}}{U_{01}} = \frac{E_0}{U_x},$$

希望 $U_R \rightarrow U_x \Rightarrow U_{01} \rightarrow U_{02}$ ，使得相对误差越小。

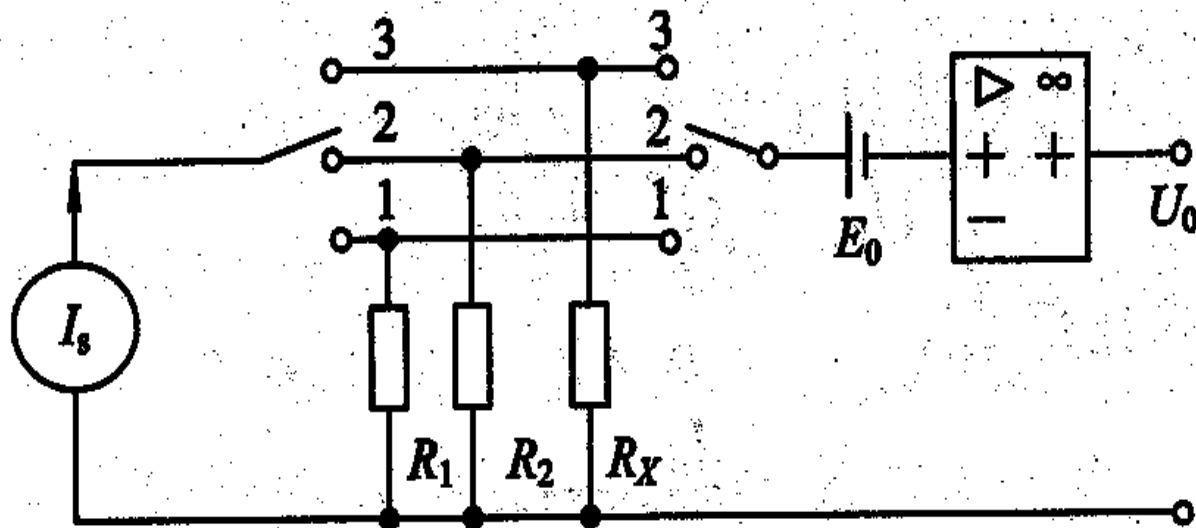




2、三信号法

$$N = \frac{U_{03} - U_{01}}{U_{02} - U_{01}} = \frac{R_x - R_1}{R_2 - R_1}, \quad R_x = N(R_2 - R_1) + R_1$$

前提：在测量过程中， E_0 、 I_s 、 A 均保持不变， R_1 、 R_2 均为精密电阻。



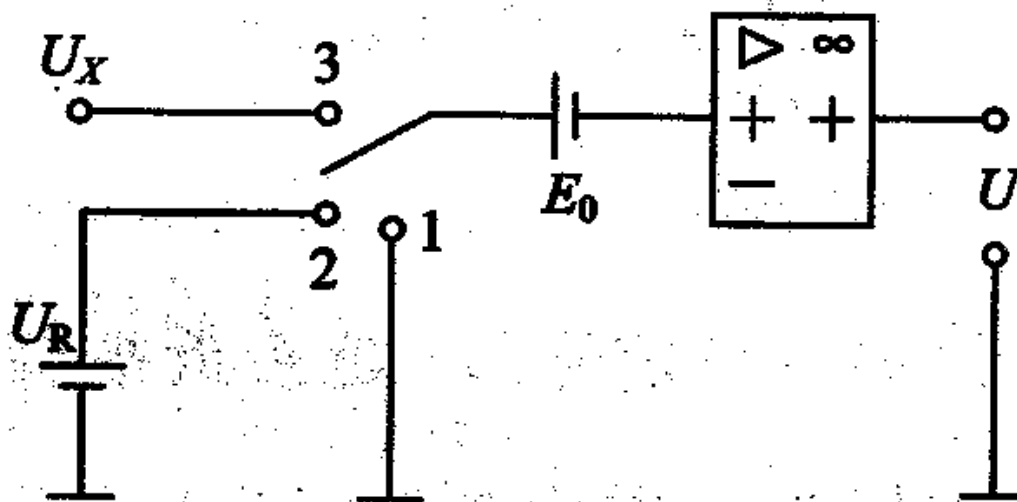
优点：可以用低精度的放大器、恒流源获得高精度的测量结果。





3、 三步测量法

- 1) 测零点;
- 2) 用参考量 U_R 作标准对全系统总增益作实时标定;
- 3) 测量: 其中 U_R 要有足够的精度才能保证测量精度。





§ 2.4 误差与测量误差分析

在这一节里，主要是系统性的介绍误差的概念、误差分析的方法及如何进行测量误差的分析，以便在进行传感器及仪器设备系统研制时，合理的分解分配各部分误差；对研制好的传感器及仪器设备，通过综合各部分的误差，对其性能给予正确的评价。

§ 2.4.1 误差的概念

1、 误差的定义及相关术语

1) 真值、约定真值

真值：表征在研究某量时所处的条件下完善地确定的量值；

约定真值：为了给定的目的，可以替代真值的量值。

2) 精度（精确度）、精密度、准确度

精度：表示测量结果与被测“真值”靠近的程度；





精密度：精度的组成部分之一，反映被测量测量值中的随机误差大小。一般用标准偏差 σ 或者用或然误差 (0.6745σ) 来表示。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n}}$$

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

其中，测量值的50%落在 $\pm 0.6745 \sigma$ 之间，测量值的68.3%落在 $\pm \sigma$ 之间。

准确度：精度的组成部分之一，反映被测量测量值中的系统误差大小。一般给出其修正公式而不作为性能指标。





3) 变差（迟滞误差）

4) 再现性与重复性、漂移

再现性是指经过一段时间以后，在同一工作条件下，输入/输出特性曲线间的一致程度。

再现性包含零点误差、量程误差、变差、不灵敏区、重复性、漂移。

5) 线性度

6) 测量误差与绝对误差、相对误差

测量误差=测量值-真值；

它反映的是测量值偏离真实值的大小和方向，因此又常称它为绝对误差。

绝对误差一般只适用于标准量具或标准仪表的校准，注意绝对误差具有符号。

绝对误差和相对误差均可以用来判断测试的精确程度，但绝对误差只





能用于判断同一被测量的测试精度，相对误差可用于比较不同类量或同类量而不同值的测试精度，以及具有不同类量变换的测试装置精度和多档测试装置精度。

7) 引用误差

是直读式指针仪表中通用的一种误差表示方法。

8) 偏差

偏差=测量值-算术平均值

误差与偏差概念上的差别：误差是测量值和真值之差。

9) 算术平均误差

在一组 n 次测量中，各次测量偏差的绝对值的平均值称为算术平均误差，

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n}, d_i = x_i - \bar{x}$$





算术平均误差是一种常用的表示误差的方法，但它不能反映出测量值的分布情况。

10) 标准误差（标准偏差）

标准误差（严格意义上来说应为标准偏差）也称为均方根误差。它的定义是：一组 n 次测量中（ n 是一个很大的数），各次测量偏差平方算术平均值的根称为单个测量值的标准偏差（或测量的标准偏差），

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

标准偏差的平方称为方差。

测量次数较少时，尤其当 $n < 5$ 时，常用如下计算公式：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$$





在 $n \geq 10$ 时， σ 与 S 差别很小。

11) 或然误差

或然误差常用符号 γ 表示。它表示在一组测量中，测量值的误差落在 $+\gamma$ 和 $-\gamma$ 之间的概率是 $1/2$ 。

当测量次数足够多时，或然误差 γ 、标准偏差 σ 、算术平均偏差 δ 之间存在一定的关系，见下表：

| 误差 | σ | γ | δ |
|----------|----------|----------|----------|
| σ | 1.0000 | 1.4826 | 1.2533 |
| γ | 0.6745 | 1.0000 | 0.8454 |
| δ | 0.7989 | 1.1829 | 1.0000 |





12) 基本误差

指传感器、仪表在规定的标准条件下所具有的误差，仪表的精度等级由其基本误差决定。

标准条件一般指：电源电压 $(220 \pm 5) \text{ V}$ ；电网频率 $(50 \pm 2) \text{ Hz}$ ；环境温度 $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ；大气压力 $(1013 \pm 10) \text{ mbar}$ ；湿度 $65\% \pm 5\%$ 。

13) 附加误差

当传感器、仪表的使用条件偏离额定条件时，就会出现附加误差。

14) 零点误差、量程误差

零点误差：传感器、仪表输入为零时的输出值，一般用满量程的百分数来表示；

量程误差：传感器、仪表输出的理想量程与实测量程之差，一般用满量程的百分数来表示。

15) 仪器误差、环境误差

16) 粗大误差、人员误差、疏失误差





粗大误差：明显地歪曲了测量结果的异常误差。在进行误差分析处理时，含有粗差的测量值称为坏值，应该剔除。

17) 方法误差、定义误差、理论误差

方法误差：由于测量方法不完善及所依据的理论不严密所产生的，如：在测量结果的表达式中没有得到反映，而在实际测量中又起作用的一些因素所引起的误差。

定义误差：指对被测量的定义不够明确而形成的误差。

理论误差：指测量理论不够完善，而只能进行近似测量所引起的误差。

18) 测量的不确定度

是用来表示误差范围的一个重要概念。所谓不确定度，是指测量值附近的一个范围，这个范围可能（相当于标准差的置信概率）包括被测量量的真值。





在计量工作和精密测试中，已普遍使用不确定度来评定实验结果的误差。

19) 系统误差、随机误差/偶然误差

系统误差：对同一物理量进行多次重复测量时，如果误差按照一定的规律性出现，则称该误差为系统误差，又称为确定性误差。

随机误差：在相同条件下多次重复测量同一量时，误差的大小与符号均发生变化，且没有确定的变化规律，但多次测量其平均值趋于零的误差。

在测量中，系统误差、偶然误差、疏失误差三者同时存在，但它们对测量的影响不同。

系统误差、偶然误差均很小，测量的精确度高；

在工程测量中，有的测量结果是不可取的；

在测量中，系统误差与偶然误差的数量级必须一致，只有两者数值相当，其测量结果才是可取的。





2 误差的分类

按其数字表达式可分为：绝对误差和相对误差；

按其性质特点可分为：系统误差、偶然误差、疏失误差。

§ 2.4.2 误差分析理论

1 系统误差

1) 系统误差的特征、来源及分类

系统误差的特征

在确定的实验条件下，具有确定性。

系统误差的来源

测量仪器误差；个人因素引起的误差；测量方法或测量理论误差；
环境误差；使用误差；定义误差。

系统误差的分类

已定系统误差/未定系统误差；恒定系统误差/变化系统误差。





2) 如何发现实验或测量中存在系统误差

分析实验所依据的理论公式所要求的约束条件在测量中是否已满足；
分析实验仪器所要求的使用条件在测量过程中是否满足。

◆ 对比的方法

包括实验方法、测量仪器、测量方法、测量条件的对比。

◆ 数据分析法

主要用于发现测量中是否存在变化的系统误差。

方法1：将测量值数列的偏差按测量的先后次序排列，观察其数值和符号的变化。要求：系统误差远较偶然误差为大。

方法2：将测量值序列分为前后两半，比较两部分偏差之和的差值 Δ ，如果显著不为0，则表明存在系统误差。





◆ 剩余误差观察法

与数据分析法类似，画出p-n分布图，观察其变化规律。

◆ 计算数据比较法

根据判据关系式确定测量中是否存在系统误差的标志。

$$C = \frac{|\bar{x}_i - \bar{x}_j|}{\sqrt{S_i^2 + S_j^2}} < 3$$

◆ 多组测量的方差分析

◆ 不同公式计算标准误差比较法





3) 如何消除实验或测量中的系统误差

从误差来源上消除系统误差；

用修正方法消除系统误差；

应用测量技术消除系统误差。

恒值系统误差：对换测量法；替代法；异号法。

变值系统误差：对称观测法；半周期偶然数观测法；使系统误差随机化；引入更正值法；直接比较法；替换法；差值法；正负误差相消法。

4) 如何确定实验或测量中的系统误差已被消除

某一项或几项残余系统误差的代数和的绝对值 $|e_m|$ 不超过测量结果的误差绝对值 $|e|$ 的最后一位有效数字的1/2单位，可将 $|e_m|$ 舍去，且不会对测量结果的精度产生可察觉的影响。





5) 系统误差的综合与分配

系统误差的综合

绝对误差的综合:

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) \quad ;$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \cdots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \quad ;$$

若 dx_i 的符号不清楚, 可采用公式:

$$dy = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} dx_i \right| \quad \circ$$

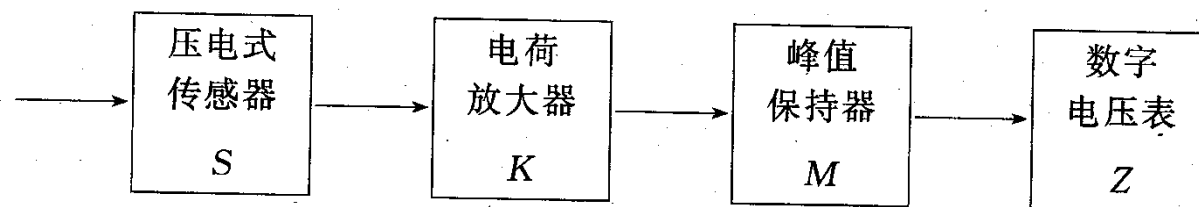
相对误差的综合:

$$\frac{dy}{y} = \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{dx_1}{y} + \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{dx_2}{y} + \cdots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \frac{dx_n}{y}$$



系统误差的分配

在仪表或传感器系统设计中，一般都是按照各部件或元件的最大允许误差进行误差分配的。



测振仪系统结构框图

整台测振仪的特性：

$$N = S \bullet K \bullet M \bullet Z$$

系统综合误差：

$$\delta_N = \delta_S + \delta_K + \delta_M + \delta_Z$$





系统误差的分配方法和原则：

无论什么样的系统，均可以用全微分的方法来综合和分配其误差；
根据误差综合公式合理分配误差，以避免不必要的过高要求；
必须照顾到各部分可能达到的误差水平，进行可行的误差分配；
充分利用局部系统误差若存在正、负则可以相互抵消的特点，以减小系统误差，从而采用质量较低的元件或部件构建整个系统，以降低成本。





2 随机误差/偶然误差

1) 随机误差的产生及其与系统误差的关系

随机误差是许多微小的、独立的、不可分割的系统误差的统计综合。一次测量的单个随机误差没有任何预知的确定规律，但在多次重复测量的总体上，随机误差服从统计规律。统计规律中，高斯正态分布是最基本和最重要的。服从正态分布的随机误差具有抵偿性，当测量次数趋于无穷时，其随机误差的总体平均值趋近于零。习惯上将这种具有抵偿性的随机误差又称做偶然误差。

在一定条件下，系统误差和偶然误差可以相互转化，两者之间并不存在绝对的界限。





2) 随机误差的分布

随机误差的3个特点：

小误差比大误差出现的机会多；

绝对值相等的正、负误差出现的机会相等；

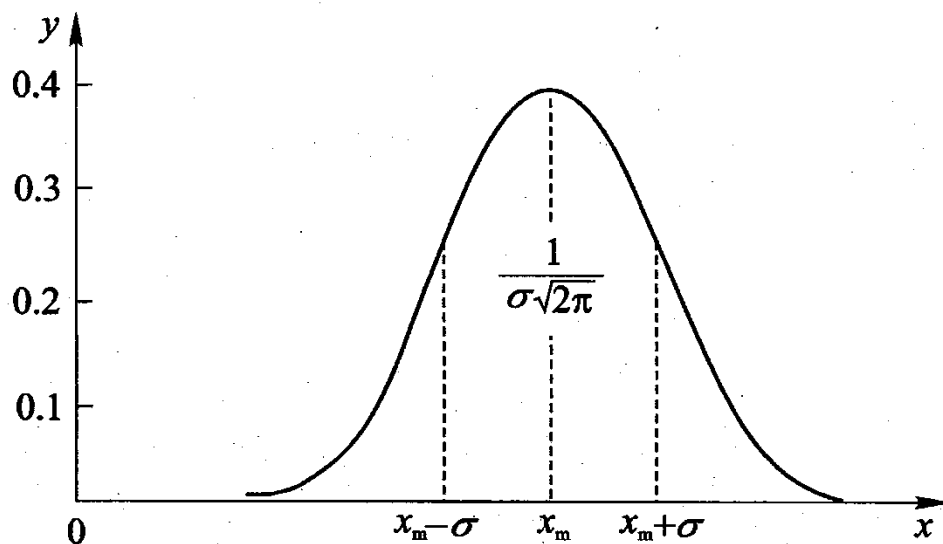
在一定的实验条件下，误差的绝对值有一定的限度。

$$p(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2(x-x_m)^2}$$

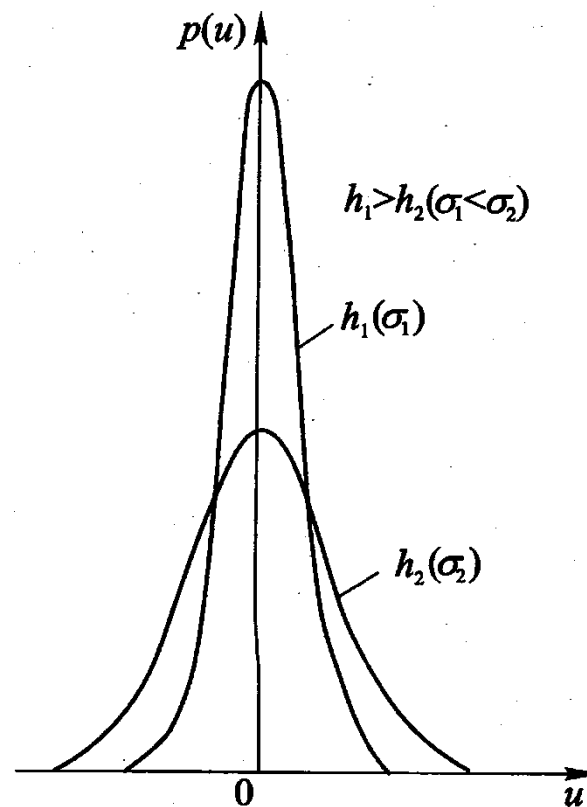
x ：测量值； $P(x)$ ：测量值的概率密度； x_m ：被测物理量的真值；

$h = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma}$ ：精密度指数； σ ：测量值的标准偏差； $u = x - x_m$ ：误差。





测量值的概率密度分布曲线



精密度指数h的物理意义





一般的工程实验误差分布均近似的遵循正态分布；我们在给出其误差值大小的同时，亦应给出对应的概率大小；对于绝对值大于 3σ 的误差一般不应作为随机误差来考虑，这是区分系统误差、粗大误差和随机误差的基础。





§ 2.4.3 测量结果的数据处理

1 直接测量结果的数据处理

1) 单次测量结果的数据处理

单次测量无法进行误差计算而只能作误差估计。这种估计主要依据所使用的仪器精密度、测量环境条件、实验者的辨别能力等。

单次测量结果必须写成如下形式：

$$N \pm \Delta N$$

2) 等精度多次测量结果的数据处理

等精度多次测量结果的数据处理步骤：

判断系统误差，并消除或减小其影响；

求算术平均值；

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_k}{K}$$





求剩余误差

$$d_i = x_i - \bar{x}$$

求算术平均值的标准差

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{K}}, \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k d_i^2}{K-1}}$$

求算术平均值的极限误差

$$\delta \lim \bar{x} = \pm 3S_{\bar{x}}$$

写出测量结果

$$x = \bar{x} \pm \delta \lim \bar{x} = \bar{x} \pm 3S_{\bar{x}}$$

建立在正态分布上的标准差计算结果，在测量次数较少时，对实际精度评价过高。因此，对于 $K < 10$ 的测量结果精度估计，常用置信概率和置信限来表示测量结果的误差限。





3) 非等精度多次测量结果的数据处理

非等精度多次测量结果的数据处理步骤：

判断系统误差，并消除或减小其影响；

将测量数据分成多组，每组按等精度数处理。根据每组的测量条件（如精度高低或测量次数），确定各组测量值的权值，求加权求算术平均值；

$$\bar{x} = \frac{P_1 \bar{x}_1 + P_2 \bar{x}_2 + \cdots + P_k \bar{x}_k}{P_1 + P_2 + \cdots + P_k} = \frac{[P\bar{x}]}{[P]}$$

求剩余误差及其加权平方和；

$d_i = \bar{x}_i - \bar{x}$ ，按 $[Pd]=0$ 来检验计算是否正确，然后求加权平方和 $[Pd^2]$





求加权算术平均值的标准差；

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{[Pd^2]}{(m-1)[P]}} \quad , \quad S_{\bar{x}} = S_{\bar{x}_i} \sqrt{\frac{P_i}{[P]}}$$

写出测量结果：

$$x = \bar{x} \pm \delta \lim \bar{x} = \bar{x} \pm 3S_{\bar{x}}$$

2 间接测量结果的数据处理

间接测量结果的数据处理就是把直接测量各参量的算术平均值代入函数关系式，求得间接测量的结果。

基本上和系统误差的综合与分配相对应。





1) 间接测量的误差计算

设A、B为直接测量的量，N是待测量， $N=f(A, B)$ ，在简单函数关系下，有：

如果 $N=A+B$ ，则：
$$\Delta N = \Delta A + \Delta B ;$$

如果 $N=A-B$ ，则：
$$\Delta N = \Delta A + \Delta B ;$$

如果 $N=A \times B$ ，则：
$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} ;$$

如果 $N=A/B$ ，则：
$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} 。$$





2) 误差合成的一般方法

误差合成的一般方法实际上就是函数的微分法，因此，各种微分法都可以用于解决误差合成的问题。

如： $y=F(u)$ ，而 $u=\Phi(v)$ ， $v=\varphi(\omega)$ ， $\omega=f(x)$ ，则y的误差传递系数为：

$$C = C_u \bullet C_v \bullet C_\omega \bullet C_x$$

3) 随机误差的合成

随机误差按理论上达到0.99以上的概率来估算合成后的实际分布范围，其合成规律如下：

$$\Delta_{\lim} = \pm 3\sigma \approx \pm 3\sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \sigma_i^2} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 (3\sigma_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \Delta_{i\lim}^2}$$





3 静态测量结果的数据处理

1) 测量数据的统计处理

前提条件：

测量条件保持不变，且系统误差已减小到可以忽略。

测量数据的整理规程：

将一系列等精度测量读数按先后顺序列成如下表格形式：

计算测量读数的算术平均值；

在每个测量读数旁列出剩余误差 p_i ；

检查 $\sum_{i=1}^n p_i = 0$ 的条件是否满足，若不满足，说明计算有误，需重新计算；





在每个剩余误差旁列出 p_i^2 ，然后求出均方根误差 σ ；

检查是否有 $p_i > 3\sigma$ 的读数。若有，舍去此数据，然后从第2项重新计算；

为谨慎起见，可用Peters公式再计算均方根误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\sum_{i=1}^n |p_i|}{\sqrt{n(n-1)}}} \approx \frac{5}{4} \frac{\sum_{i=1}^n |p_i|}{n-1/2} \quad ,$$

将此结果与第5步的结果比较，若相差太大，判定是否存在系统误差。

若有系统误差，应设法消除，并重新进行多次重复测量。

计算测量读数算术平均值的均方根误差 $\bar{\sigma}$ ；

写出最后的测量结果： $x = \bar{x} \pm \bar{\sigma}$ 或 $x = \bar{x} \pm 3\bar{\sigma}$ 。





2) 有效数字及其运算规则

有效数字的一般概念

通常把测量结果中可靠的几位数字加上可疑的一位（或二位）数字，统称为测量结果的有效数字。

有效数字的应用规则：

误差一般只有有效数字，最多不超过二位；

在任何一个物理量值中，数值的最后一位，在位数上应与误差的最后一位划齐；

一数值的有效位数越多，其百分数误差越小，数值的准确度越高；

有效数字的位数与十进制单位的变换无关。

数值的有效数字完全取决于绝对误差的大小，多次测量平均值的有效数字由它的绝对误差确定。





确定有效数字的粗略方法

直接测量中，以仪器最小刻度中估计的一位为产生误差的一位，即以仪器能读出的有效数字为准。

间接测量有效数字的粗略定法：

对于加减、乘除运算，计算结果的有效位数与参加运算的各数中有效数字位数最少的相同；乘方、开方运算，结果保留与原运算数相同的有效位数。

数字计算规则

加减法

- ① 找出各量中具有最大误差的量；
- ② 以此量的末位作标准，简化其它分量，使其末位数在位数上仅仅多一位；
- ③ 进行数值计算；
- ④ 由绝对误差定出结果的有效位数。





乘除法

- ① 找出各量中具有最少有效数字的量；
- ② 以此量的有效数字为标准，简化其它分量，使其末位数在位数上仅仅多一位；
- ③ 进行数值计算，每经过一次运算，得出的数值就按第②步简化；
- ④ 由绝对误差定出结果的有效数字。

4 动态测量结果的数据处理

比较复杂，在这里暂不做讲解。





§ 2.4.4 测量结果的不确定度表示法

1 不确定度与误差在概念上的区别

对于 $y = X \pm \Delta X$, $E = \Delta X / X$ ，一般概念中， ΔX 称为绝对误差， E 称为相对误差。

1) 误差

测得值与真值之差。

2) 偏差

多次测量时某次测量值与算术平均值之差。分算术平均偏差和标准偏差。

3) 不确定度

说明测量结果的参数，用于表征测量真值的散布性。

若称 ΔX 为不确定度，则该不确定度是指在一定置信概率下误差限的绝对值。





2 不确定度与误差在处理上的区别

在工程或物理实验中，通常把误差分为偶然误差、系统误差和过失误差三大类。一般认为，过失误差应避免，系统误差应尽量消除，所以实际仅计算偶然误差。在单次测量或计算的偶然误差小于仪器误差时，才以仪器出厂误差限作为测量误差。

引入不确定度的概念后，在可修正的系统误差修正后，将余下的全部误差划分为A、B两类分量。

A类分量——可用统计方法求出的不确定度，相当于偶然误差及部分随机性质的系统误差；

B类分量——由不同于A类分量的其它方法求出的不确定度，剩余部分的系统误差。

在采用不确定度概念后，既要评定A类分量不确定度，又要评定B类分量不确定度，最后以合成不确定度表示测量结果中的不确定度。





3 测量结果的不确定度分析与表示

1) 工程或物理实验中如何分析测量结果的不确定度

测量结果不确定度的来源：

- ① 被测量定义的不完善；
- ② 实现被测量定义的不理想；
- ③ 所测样本不能完全代表定义的被测量的抽样；
- ④ 对测定的环境条件参数测得不准；
- ⑤ 人员读数偏移；
- ⑥ 仪器分辨率；
- ⑦ 基准器和标准物质给出的值；
- ⑧ 计算中用到的常数及其它参数；
- ⑨ 测量方法和程序的近似性；
- ⑩ 重复观测时的偶然变化等。





在工程或物理实验中，只要注意以下三个方面的不确定度来源就可以了：

- ① 多次测量中由标准差算出A类不确定度，并进行分布修正；
- ② 由仪器误差所带来的B类不确定度；
- ③ 由测试条件不符合要求带来的B类不确定度。

2) 单次测量时不确定度的表示

在工程或物理实验中，单次测量的不确定度只要考虑仪器的误差限作为不确定度的主要来源。

3) 间接测量量的不确定度传递

间接测量量的误差传递公式可近似借用数学中多元函数求等公式。





4) 测量结果的表示

测量结果最后要给出的参数有：

- ① 算术平均值或各直接测量量的算术平均值计算的测量结果；
- ② 不确定度 σ ；
- ③ 自由度 γ ；
- ④ 置信概率 P 。

| | | | |
|------|---------------|---------------|-------------|
| 测量值 | L | | |
| 不确定度 | $L - \sigma$ | $L + \sigma$ | $(P=0.683)$ |
| | $L - 2\sigma$ | $L + 2\sigma$ | $(P=0.955)$ |
| | $L - 3\sigma$ | $L + 3\sigma$ | $(P=0.997)$ |

