

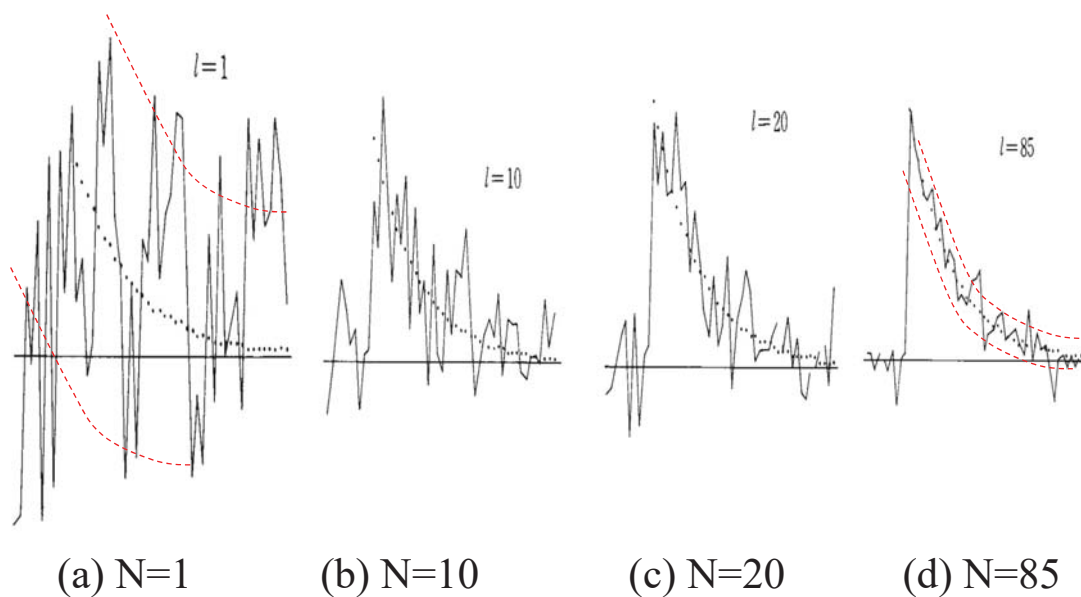
数字示波器的多次平均叠加功能可以选择 2^n 次叠加，问叠加后

- A 信噪比可以提高 n 倍
- B 信噪比可以提高 2^n 倍
- C 信噪比可以提高 2^{n-1} 倍
- D 信噪比可以提高 $2^{n/2}$ 倍

提交

1

同步加算的去噪效果——测量平均值及其不确定性



一〉数字示波器的多次(2^n 次)采样平均值与平均次数

2

机械量测量

- 机械量：

位移、长度、距离、转角、变形；
速度、转速；
力、力矩、振动、加速度等

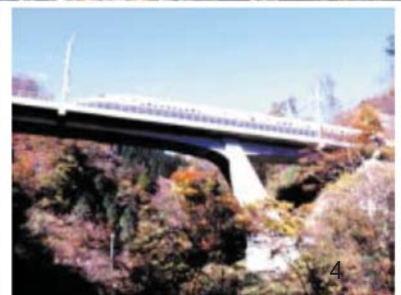
- 机械量测量

- 1) 位移测量 力-〉变形-〉位移
- 2) 距离测量
- 3) 速度、加速度测量 加速度-〉力-〉位移

3

机械量测量的应用

- 变形、扭矩测量：桥梁，铁路
- 撞击力、撞击加速度：材料强度、汽车安全
- 位移测量：车床、半导体加工
- 振动测量：气轮机



4

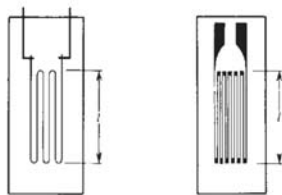
位移测量 (1)

- 应变片及其电桥电路
- 差动检测结构及其效果
- 差动电容传感器
- 电容传感器应用和电路

5

金属应变片

- 金属应变片结构



(a) 电阻丝应变片 (b) 薄膜电阻应变片

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

- 应变变量 $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$

无量纲，用 $\mu\varepsilon$ 表示。

$$-\frac{\Delta D}{D} = \nu \frac{\Delta l}{l}, \quad \nu \text{ 为材料的泊松比}$$

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\rho} / \varepsilon$$

- 金属丝的泊松比 ν 为 0.3-0.5,
- 电阻值的应变系数K约为2。

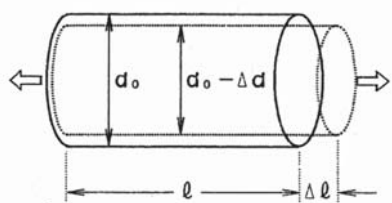
6

应变的相关知识

- 金属电阻丝的阻值受温度影响，应变测量的温度补偿重要！

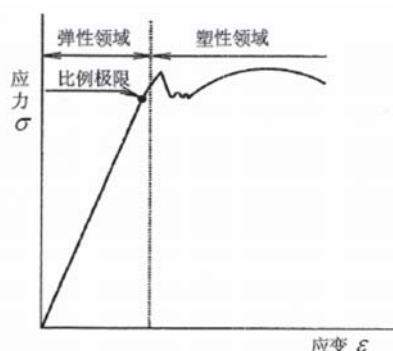
$$R = R_0[1 + \alpha(T - 20)], \quad \text{例 } \alpha = 0.004/^\circ\text{C}, \quad \Delta R / R = 4000 \mu\epsilon / ^\circ\text{C}$$

- 泊松比 $-\frac{\Delta D}{D} = \nu \frac{\Delta l}{l}$



横向应变/轴向应变=常数
—》泊松比

- 杨氏模量 $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{[N/m^2]}{[(\mu\epsilon)]}$



弹性应变系数—》杨氏模量⁷

投票 最多可选3项

设置

如何对应变片进行温度补偿？

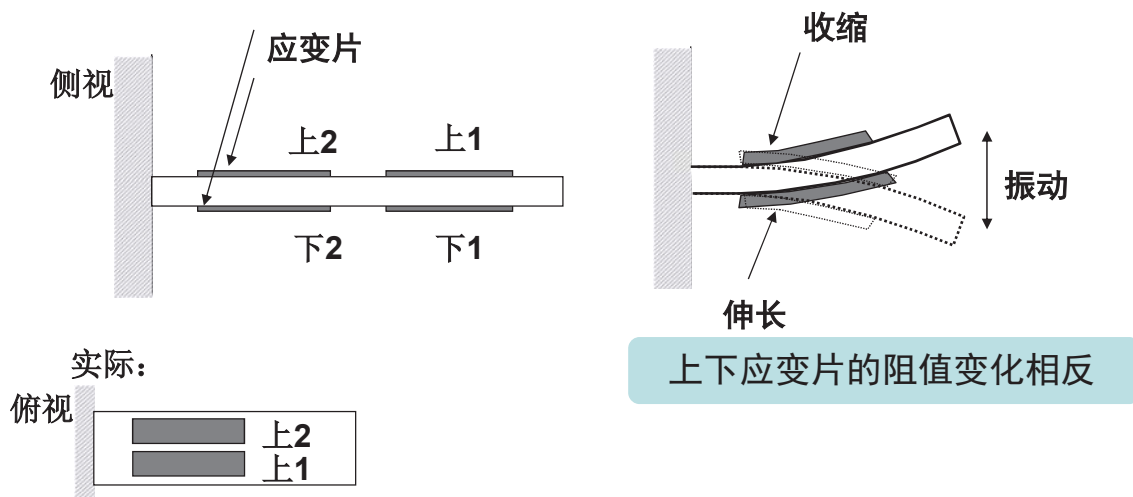
- ☐ A 采集应变片电阻值的同时采集温度数据
- ☐ B 在电桥电路里使用成对的应变片
- ☐ C 联合另一应变片进行差动式温度补偿
- ☐ D 在电桥电路里同时使用四片应变片

提交

应变片三种桥路连接方法

在悬臂梁上粘贴

- 1) 一枚应变片：单臂电桥电路 —》非线性误差，温度和电源
- 2) 两枚应变片：半桥电路 —》线性，温度补偿，灵敏··
- 3) 四枚应变片：全桥电路 —》线性，温度补偿，更灵敏··



9

直流电桥输出电压对应变的灵敏度

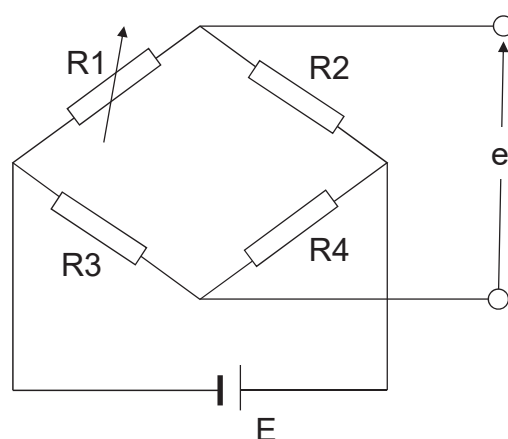
- 初始时电桥平衡：

$$R_2 / R_1 = R_4 / R_3 = n$$

- R_1 发生变化：

$$e = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) E$$

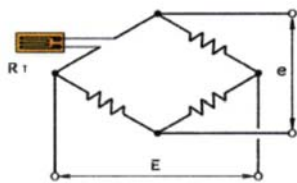
$$e = \frac{n \Delta R_1}{(1 + n + \frac{\Delta R_1}{R_1})(1 + n) R_1} E \approx \frac{n \Delta R_1}{(1 + n)^2 R_1} E$$



- 非线性误差忽略
- $n=1$ 时，最大灵敏度 $\longrightarrow e \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} E$
- 受温度和电源电压的稳定性影响

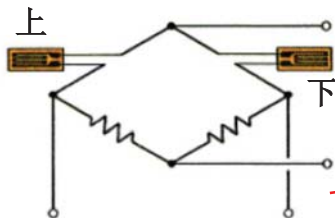
10

比较输出电压对于应变的灵敏度



$$e \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} E$$

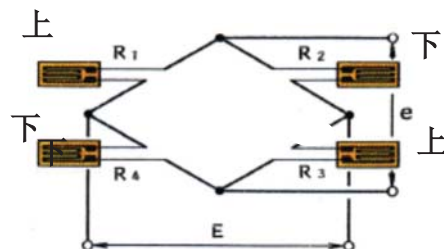
➤ 电桥后面接输入阻抗很大的放大器，如仪表放大器。



$$e = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} E$$

➤ 在平衡点附近测量，减小非线性。

$$e = \frac{\Delta R_1}{R_1} E$$

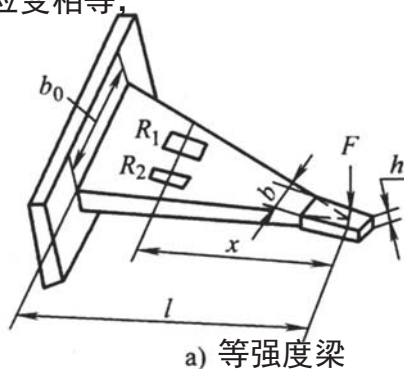


➤ 温度补偿作用

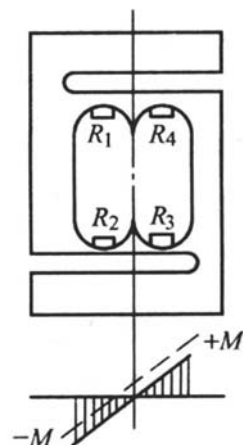
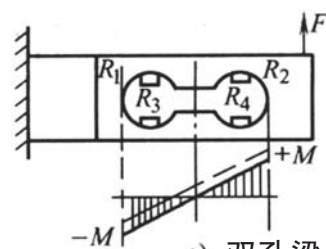
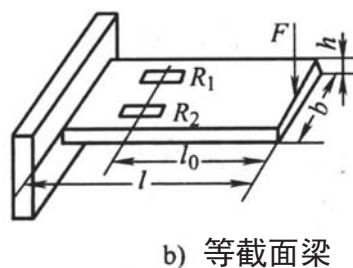
11

应用应变片的力传感器

各断面应力/应变相等，
粘贴自由。

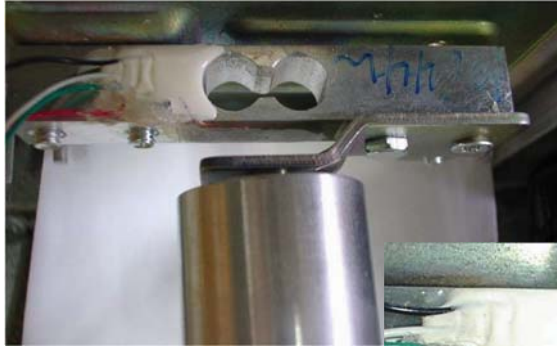


粘贴位置重要，
对称粘贴。



电子称内部的双孔梁

• 双孔梁和应变片



底朝上



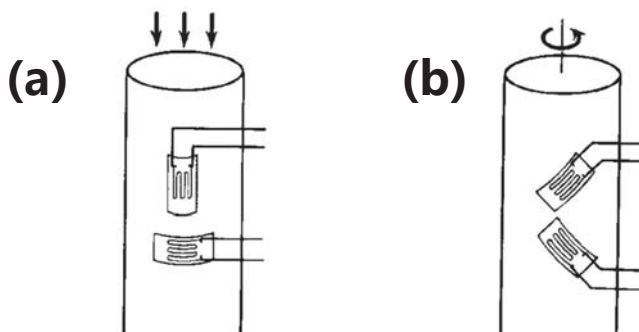
填空题 5分

设置

作答下面的填空题目，并思考用四个应变片组成全桥电路的方法。

下图中可以检测柱体承重力的是图 [填空1]；
可以检测柱体扭矩的是图 [填空2]。

两种情况都具有 [填空3] 的效果，其中 图(b)的
灵敏度还可以提高 [填空4]，因为两个应变片都处在
最大应变方向上，但应变变量符号 [填空5]。



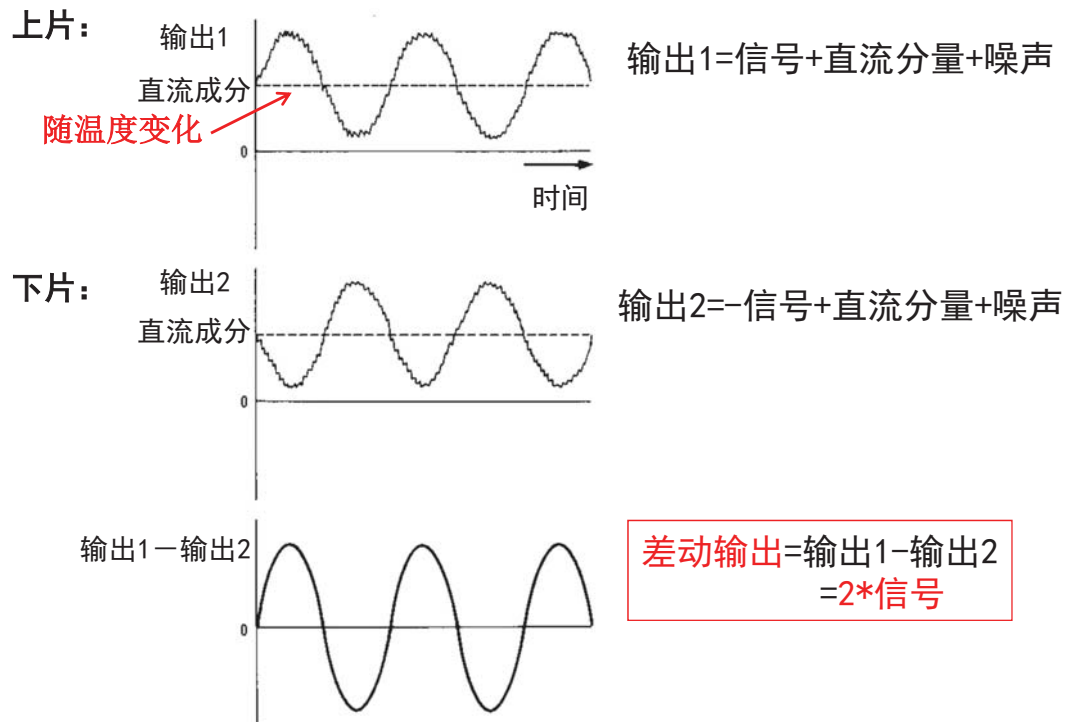
正常使用填空题需3.0以上版本雨课堂

作答

14

单臂和半桥差动信号的输出

悬臂梁振动时，



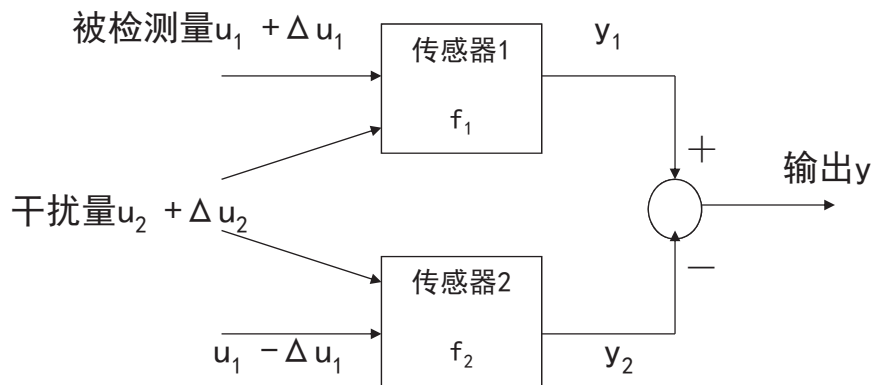
15

差动检测结构

- 结构特点：
 - 两个空间对称结构；
 - 测量参数反对称作用；
 - 干扰或影响参数对称作用。
- 处理方法：
 - 取两结构差值
- 功能特点：
 - 消除共模干扰；
 - 降低漂移；
 - 提高灵敏度；
 - 减小非线性误差；
 - 输出过零点。

16

差动检测结构分析



$$y = y_1 - y_2 = f_1(u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2) - f_2(u_1 - \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2)$$

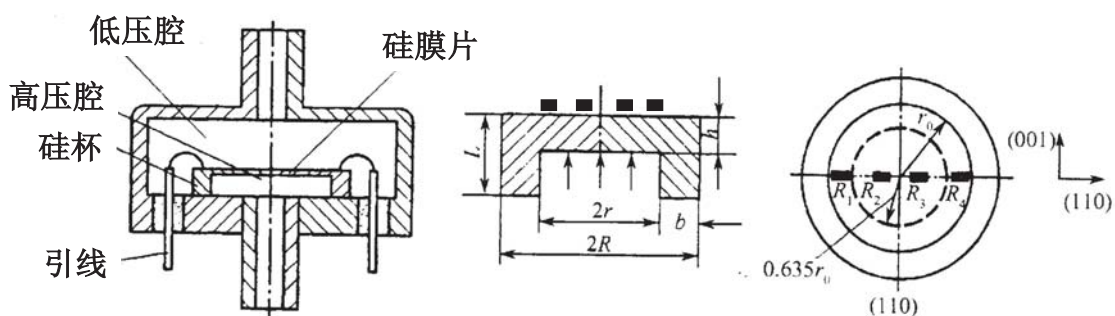
$$f_1(u_1, u_2) = f_2(-u_1, u_2)$$

$$y \approx 2 \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \Delta u_1 + 2 \frac{\partial^2 f_1}{\partial u_1 \partial u_2} (\Delta u_1 \cdot \Delta u_2)$$

泰勒展开至二次项；

如果f是u1, u2的单函数线性组合，差动输出y与Δu1 近似成比例变化。

半导体应变片和MEMS压阻式压力传感器



- 扩散型压阻式压力传感器：不用粘贴，硅膜片上加工**半导体应变片**
- 半导体的应变系数：是金属应变片的几十倍，**导电率变化**，与参杂浓度有关，可正可负
- 测量电路：电桥电路
- 优点：高灵敏度，动态响应好，稳定，小型，测微压；
- 缺点：受温度和非线性影响 => 集成电路补偿

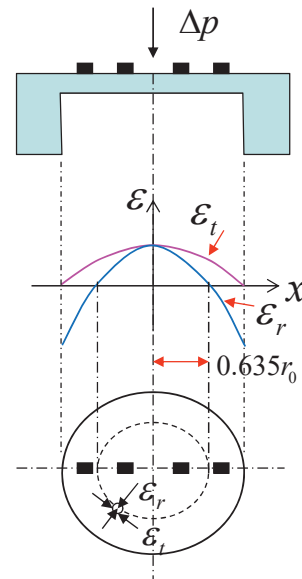
膜片上应力和应变的分布

- 在差压 Δp 作用下，膜片上各点的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t

$$\sigma_r = \frac{3\Delta p}{8h^2} \left[(1+\nu)r_0^2 - (3+\nu)x^2 \right]$$

$$\sigma_t = \frac{3\Delta p}{8h^2} \left[(1+\nu)r_0^2 - (1+\nu)x^2 \right]$$

- 膜片厚度 h
- 有效半径 r_0
- 半径变量 x
- 膜片材料泊松比 ν



19

MEMS压力传感器的广泛应用

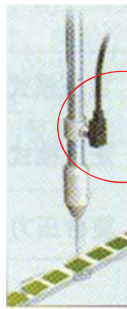
液体或气体中的压力测量，应用于
过程控制、
汽车电子控制、
血压计等

- 1) 真空吸附
- 2) 密封检测
- 3) 精密加工平整度
- 4) 气泡式水位计

.....

20

MEMS压力传感器的典型应用



(1) 吸附检测



(2) 泄漏检测



(3) 就位检测

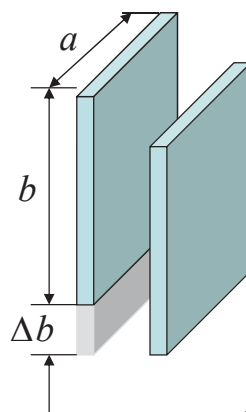
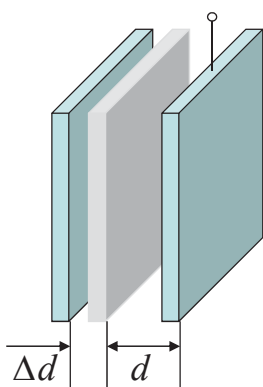


(4) 过滤器筛眼堵塞的监控

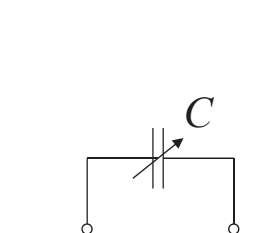
(5) 液罐的液位检测

21

变极距或变面积式电容位移检测

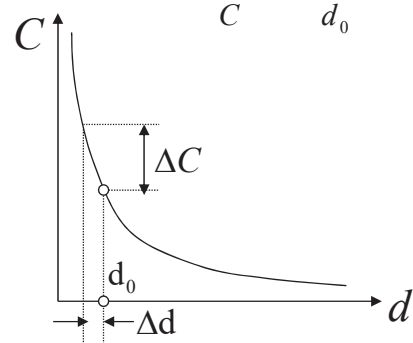


- 近似线性
- 局部微小位移测量
- 限位误差
- 环境湿度/温度影响
- $\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d}{d_0}$



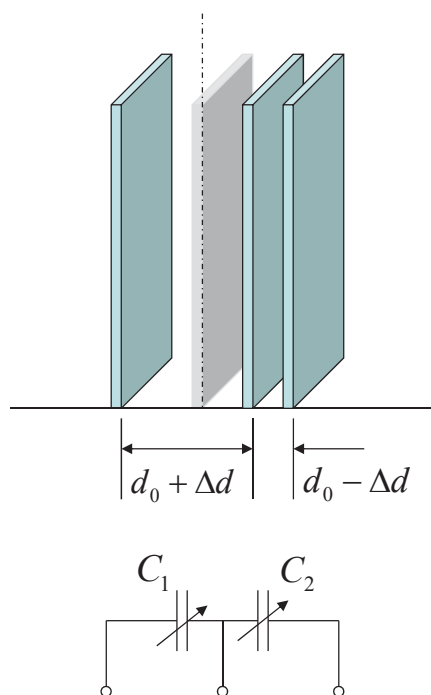
$$C = \frac{Q}{V}$$

$$C = \epsilon \frac{ab}{d}$$



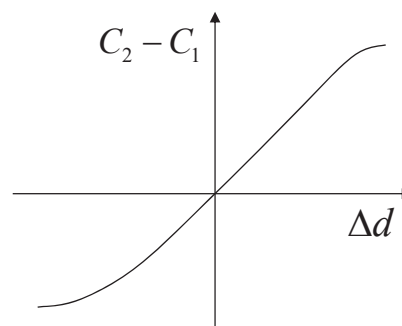
22

差动电容式位移检测



$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{d_0 + \Delta d}{d_0 - \Delta d}$$

$$\frac{C_2 - C_1}{C_0} \approx \frac{2\Delta d}{d_0}$$



23

单电容的局部线性度

$$\begin{aligned} \Delta C &= \frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d} - \frac{\varepsilon A}{d_0} \\ &= -\frac{\varepsilon A}{d_0} \frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} \\ &= -C_0 \frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} \end{aligned}$$

$$\text{则 } \frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta d}{d_0} \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right)$$

省略上式 Δd 的二阶以上高次项，得

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx -\frac{\Delta d}{d_0}$$



24

差动电容的线性度

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{d_0 + \Delta d}{d_0 - \Delta d}$$

$$\frac{\Delta C_1}{C_0} = -\frac{\Delta d}{d_0} \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right)$$

$$\frac{\Delta C_2}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left(1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right)$$

$$\text{则 } \frac{C_2 - C_1}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left(2 + 2 \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + 2 \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^4 + \dots \right)$$

忽略上式中 Δd 的三阶以上高次项，得

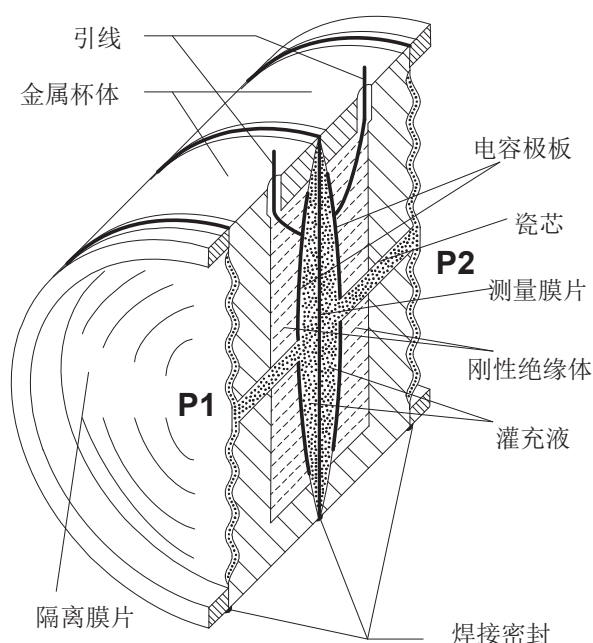
$$\frac{C_2 - C_1}{C_0} \approx \frac{2\Delta d}{d_0}$$

差动电容结构的优点：

- 提高线性度和灵敏度
- 保证零点

25

差动电容式--差压传感器



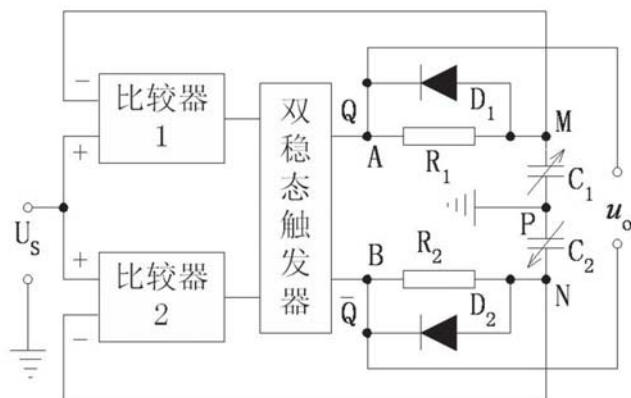
若 $p_1 = p_2$ ，则 $C_1 = C_2$ ；
 若 $p_1 > p_2$ ，则 $C_1 < C_2$ ；
 若 $p_1 < p_2$ ，则 $C_1 > C_2$ 。

测量微小差压（0—0.75Pa）；
 测量对大气的压力；
 测量对真空的微小绝对压力；

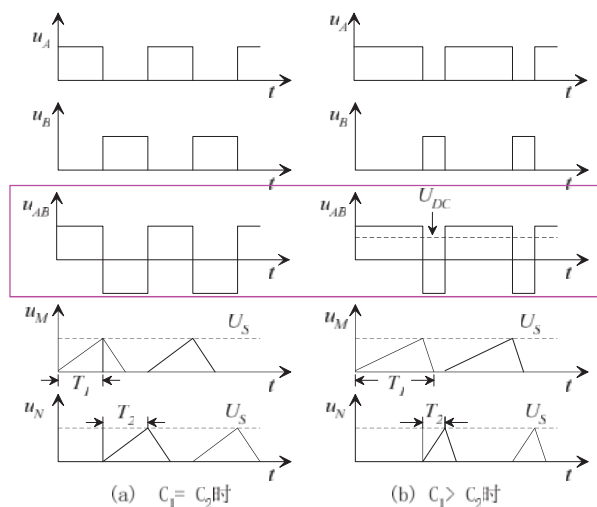
广泛应用于压力或流量仪表中

26

检测电路：差动脉宽调制电路



Q端高电位，C1充电， U_M 升高，至 $U_M > U_S$ 时，比较器1产生脉冲使双稳态器翻转，Q端变低电位。

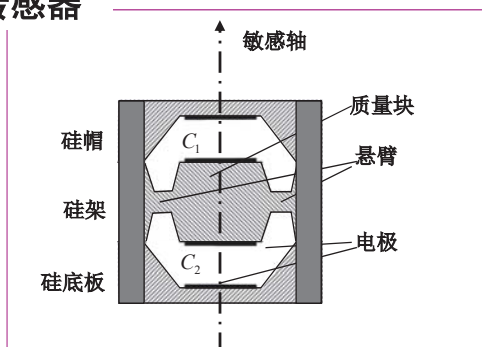


电容—》脉宽—》滤波—》直流分量

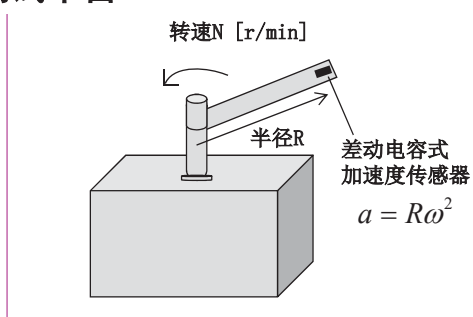
27

差动电容式--加速度传感器

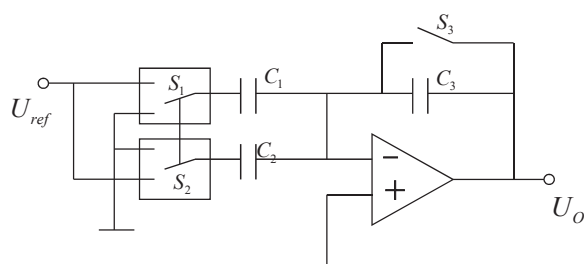
传感器



测试平台



充放电式开关电容检测电路



振荡开关—》充放电—》电压幅度

$$U_{O_{pp}} = \frac{|C_1 - C_2|}{C_3} U_{ref}$$

28

填空练习

差动电容的主要优势有三点：

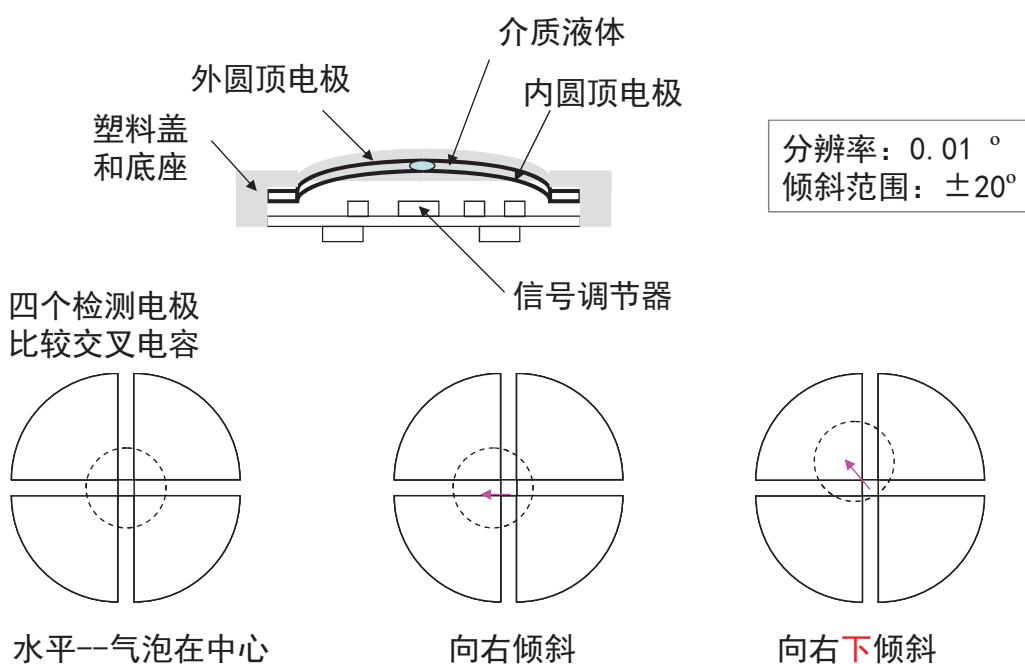
- 1) [填空1] ；
- 2) [填空2] ；
- 3) [填空3] 。

正常使用填空题需3.0以上版本雨课堂

作答

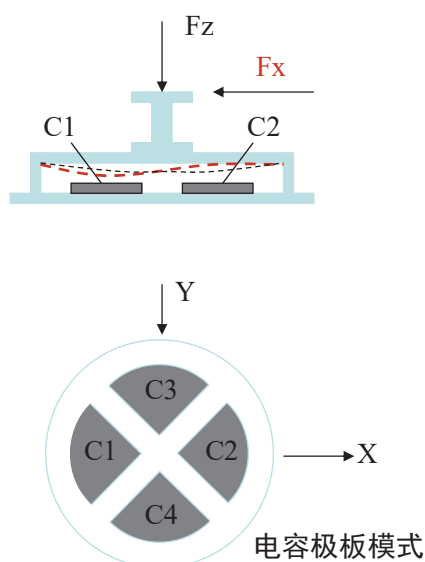
29

电容式倾斜仪



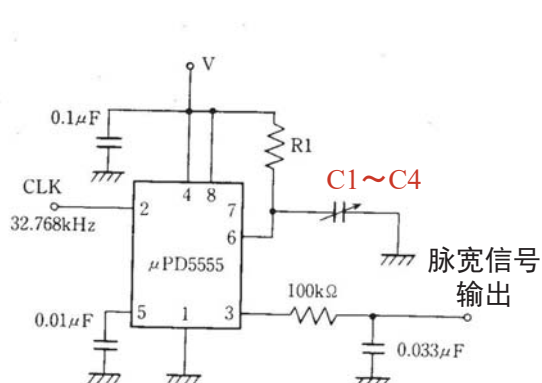
电容式三维力传感器

- 将力、力矩转换为静电容量
- $F_x: (C_2 - C_1)$, $F_y: (C_4 - C_3)$, $F_z: (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)$

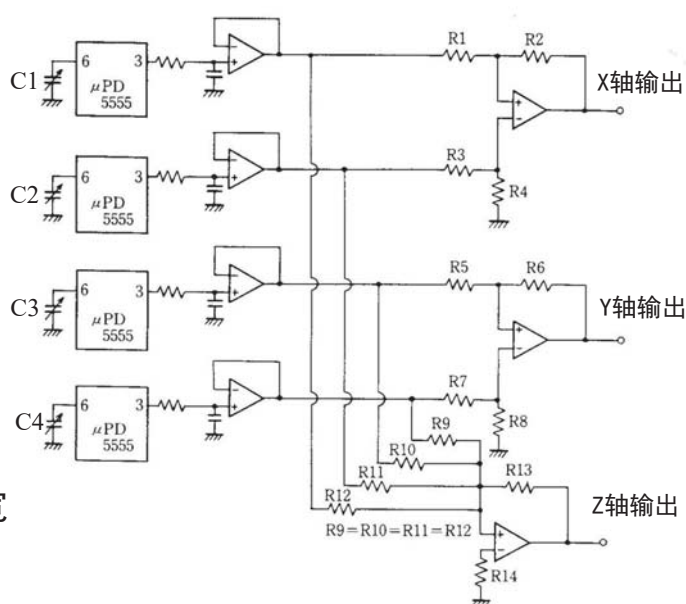


31

检测电路:输出振荡脉宽电路



电容—》时钟芯片—》脉冲宽
—》RC电路—》电压

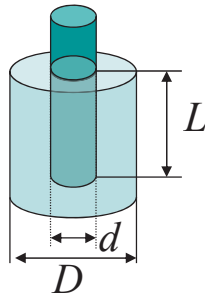


32

同心圆筒式电容传感器

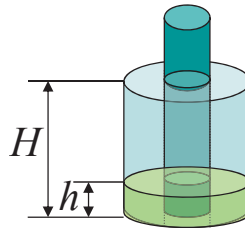
- 位移测量

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L}{\ln(D/d)}$$



- 电容式物位计

$$C = \frac{2\pi\epsilon_2\epsilon_0 h + 2\pi\epsilon_1\epsilon_0 (H-h)}{\ln(D/d)}$$



极板间介质的
相对介电常数：

ϵ_1 : 真空为1

ϵ_2 : 油为4.5, 水为78.5

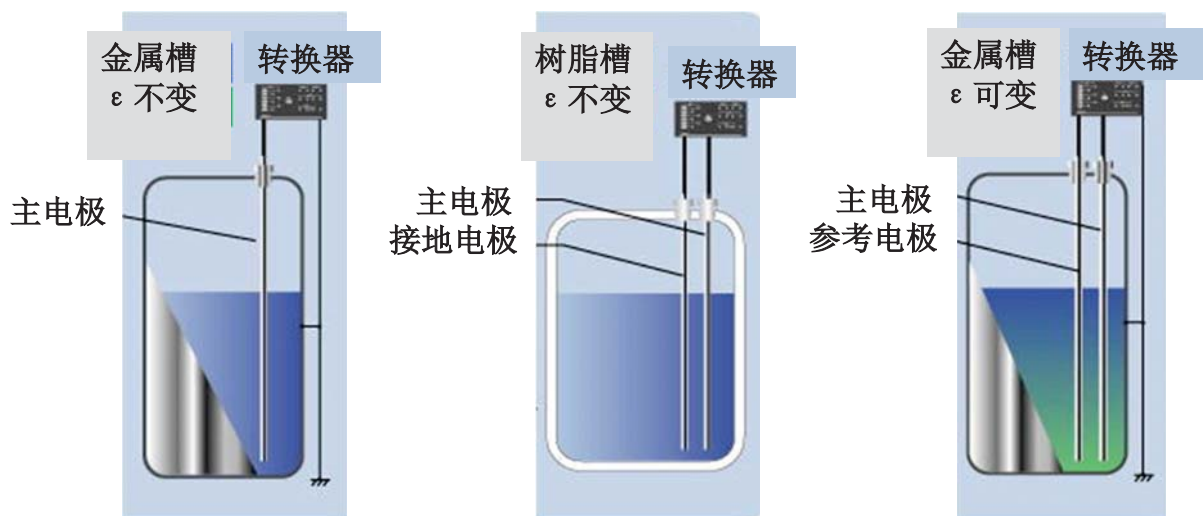
水: 0°C时88,
100°C时55.53。

- 圆筒式差动电容传感器 (实验)

33

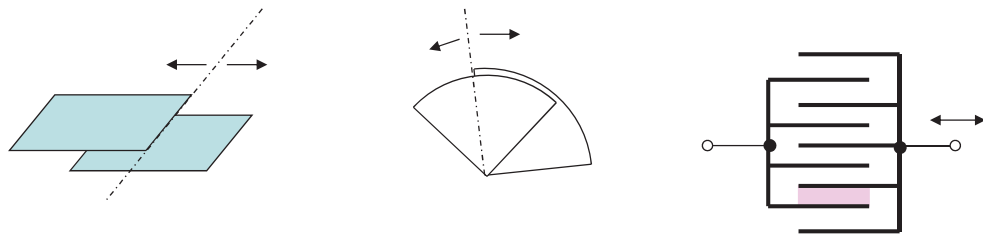
电容式物位计

工业应用特点：耐高温高压，抗腐蚀

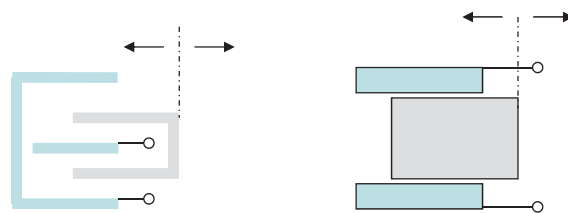


34

变面积式电容传感器



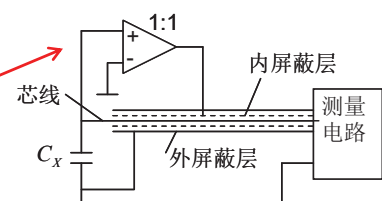
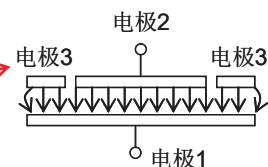
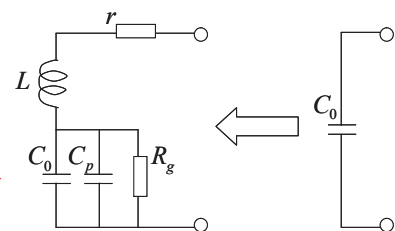
变电介质式电容传感器



35

电容传感器的注意事项

- 减小环境温度湿度变化的影响，要防水防潮防污染。
- 漏电阻和激励频率，等效电路有功损耗 $\tan \delta$ 可以测含水量。
- 减少边缘效应，保护电极
保护电极与激励电极保持绝缘但等电位。
- 屏蔽电极
隔离外电场干扰
- 寄生电容
要减少走线电容的影响，驱动电缆技术。



36

电容式接近开关传感器

Capacitive_proximity_switch_sensor

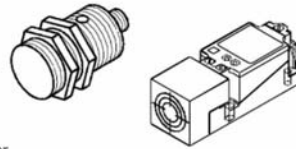
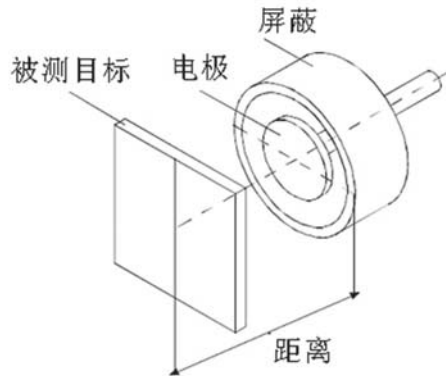


Diagram 3.7: Examples of a cylindrical and a rectangular capacitive sensor.

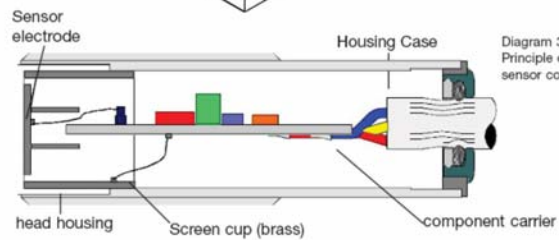


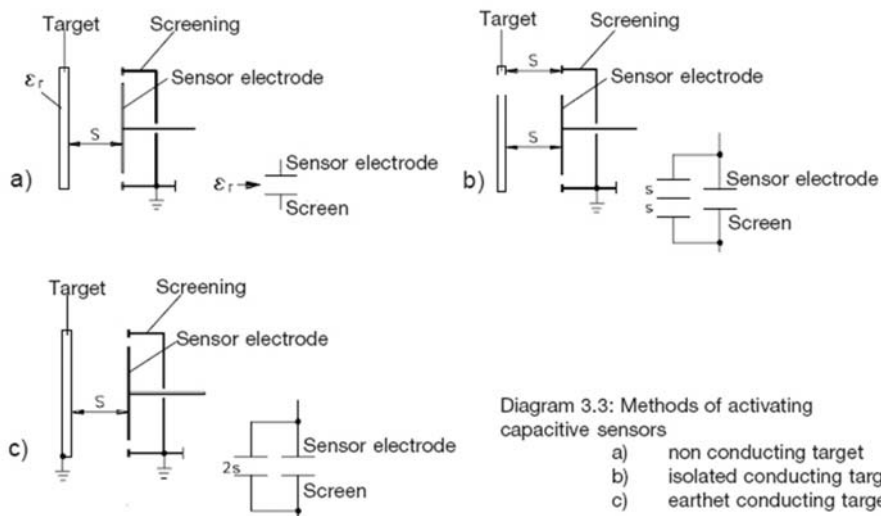
Diagram 3.8: Principle of the capacitive sensor construction.

来源: 《Manual_for_capacitive_switch_sensor》

37

电容式接近开关传感器的检测对象

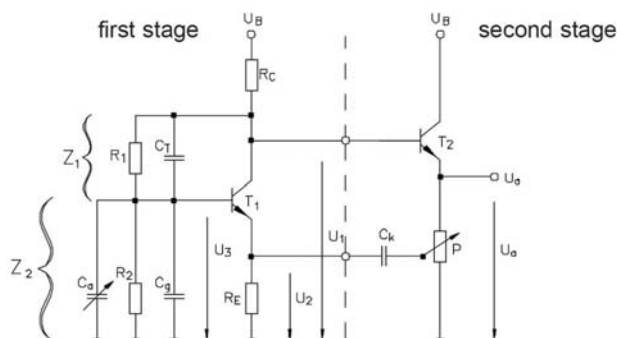
(a) 非导体 (b) 孤立导体 (c) 接地导体



实验分析: 导体和绝缘体的宽度和厚度对开关距离的影响。

38

电容式接近开关的检测电路



电容式接近开关的RC振荡电路

RC振荡电路

Z2大：不振荡

$$V_1 \cdot V_2 \cdot A = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \cdot A < 1$$

被测物接近—C变大

Z2小：振荡

$$V_1 \cdot V_2 \cdot A > 1$$

$$V_1 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}; (U_3 \gg U_2).$$

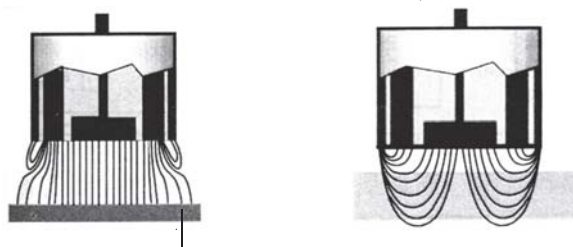
$$V_2 = \frac{U_a}{U_1} = 1.$$

$$A = \frac{U_2}{U_a} \quad \text{adjusted.}$$

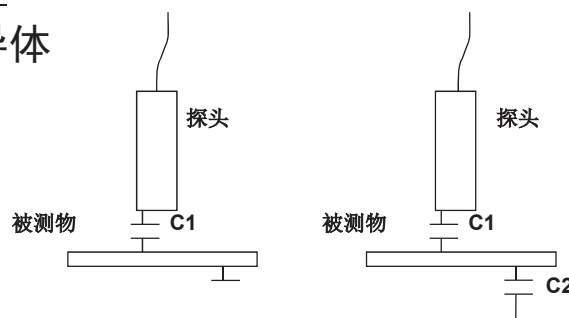
39

电容式接近开关传感器的工作距离

- 被测物体是接地导体和绝缘体，传感器前端电场分布



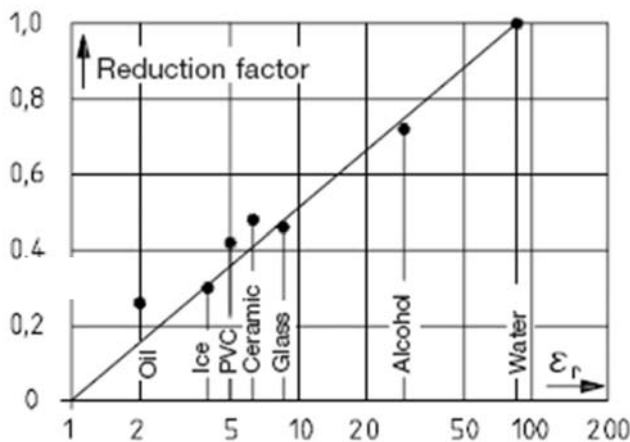
- 接地导体和浮地导体



电容检测是检测发射电极与地之间的电流，**浮地电容C2**会影响开关动作距离。

40

电容式接近开关传感器的 s/s_n



s_n : 接地金属导体的开关工作距离,

非金属目标（电介质）的等价衰减比:

$$\text{reduction factor} = s/s_n$$

41

思考题

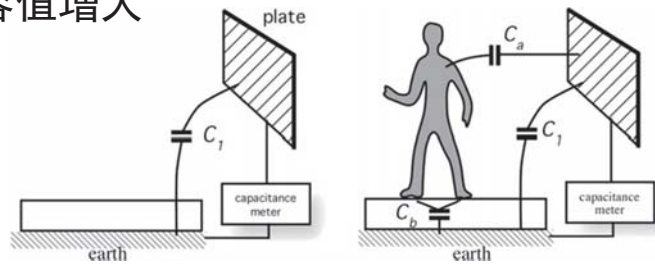
- 3-1 金属应变片的应变系数有多大？半导体应变片的应变系数呢？
- 3-2 悬臂梁自由端位移量测量中，应变片的单臂、半桥和全桥电路是如何连接的，区别何在？
- 3-3 应变片的半桥或全桥电路是否还需要考虑温度补偿？用公式推导分别说明与单臂电桥电路输出电压的差别。
- 3-4 用半桥电路差动检测悬臂梁自由端的振动时，上下两个应变片连接在 R_1 和 R_2 处，和连接在 R_1 和 R_3 处有何不同？用公式推导说明。
- 3-5 差动检测结构的特点是什么？
- 3-6 差动电容传感器有哪些应用？测量电路有哪几种？
- 3-7 为什么说变极距式差动电容位移测量比单电容局部线性位移测量的线性度还要好？
- 3-8 电容式接近开关传感器对接地导体的动作距离为 s_n ，非导体的动作距离一定比 s_n 小，并且介电常数越小，动作距离越小。是否正确？
- 3-9 调研力传感器及其应用的案例。可以重点关注：新型传感原理、传感器结构、调理电路、标定方法、以及应用中存在的问题等。

42

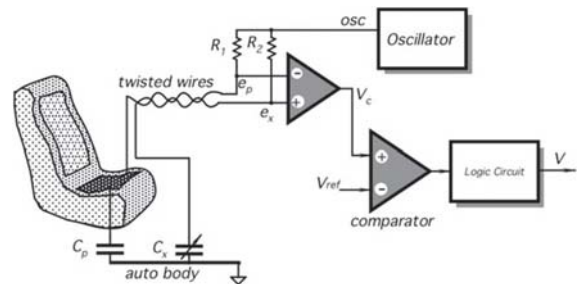
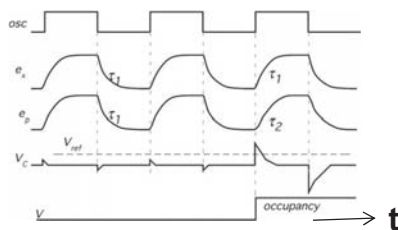
人体接近/占有的电容法检测

- 人体介入使检测电容值增大

$$C = C_1 + \Delta C = C + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b}$$



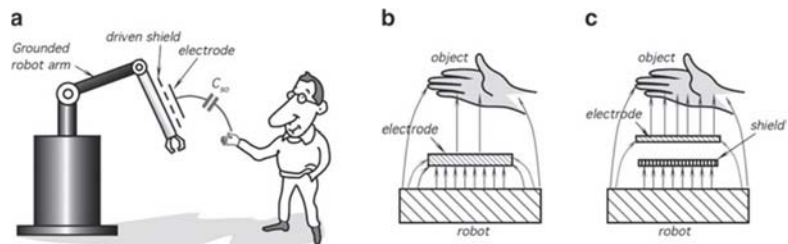
- 汽车电子中的人体占位检测



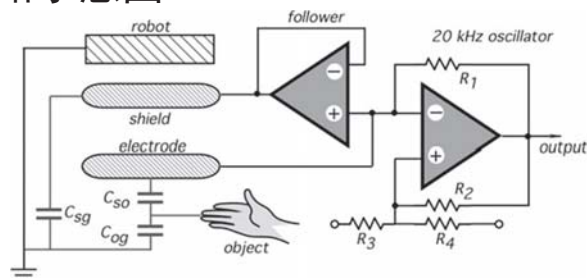
出处：英文参考教材 Handbook of Modern Sensors, P254-258⁴³

人体接近的电容法检测

- 人体靠近的检测：a机器人接地， b无驱动屏蔽， c有驱动屏蔽



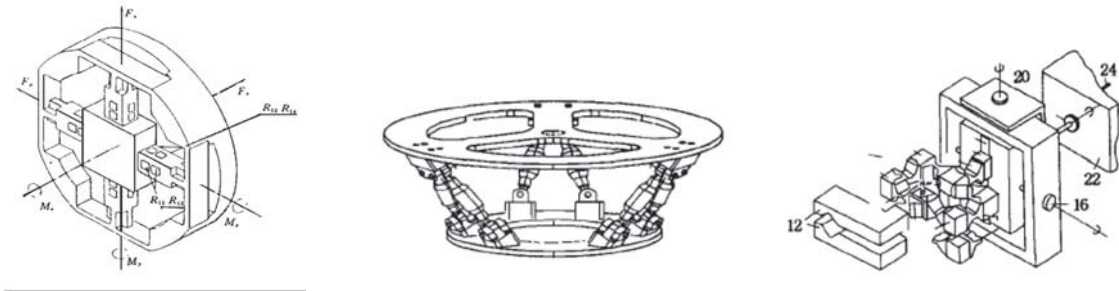
- 侵入电容检测的调频电路示意图



出处：英文参考教材 Handbook of Modern Sensors, P254-258⁴⁴

六维力传感器

- 检测三维力和三维扭矩： F_x, F_y, F_z / M_x, M_y, M_z
- 安装在机械臂末端，作为力反馈控制的信息来源
- 应变式测力传感器：弹性体、应变片、电桥电路
- 弹性体结构的案例



- 静态误差： <http://www.forcechina.com/a/1/2/1/2016/1221/758.html>
- 应变式的动态响应时间和采样率，例如有250ms、20Hz

45

六维力传感器

- 电阻式以外，还有电容式、压电式等
- 特殊环境下的力传感器：过载保护、静态压力保护等
- 灵敏系数补偿
- 不可避免有交叉敏感或互相耦合的问题
- 传感器标定矩阵：只要主分量响应与其他分量相比足够大

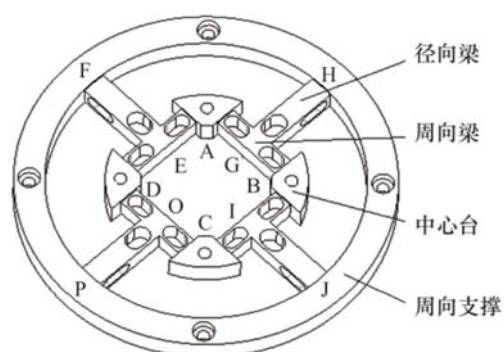
一号传感器	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_{x0}	-0.51865	-0.00238	-0.00146	0.04952	0.054	0.007705
F_{y0}	0.00669	-0.49707	0.010691	0.00623	0.007534	-0.00063
F_{z0}	-0.0033	0.001109	-0.51956	-0.000865	-0.03571	0.007326
M_{x0}	0.01019	-0.05069	0.024585	-1.51852	0.025163	-0.00262
M_{y0}	-0.09737	-0.0438	0.015384	-0.01835	-1.550789	0.08275
M_{z0}	0.00874	0.018688	-0.0336	0.00145	-0.04207	1.405681

* $0 \sim \pm 5\text{kg}$, $0 \sim \pm 5\text{kg} \times 3\text{cm}$, $\pm 2\%FS$

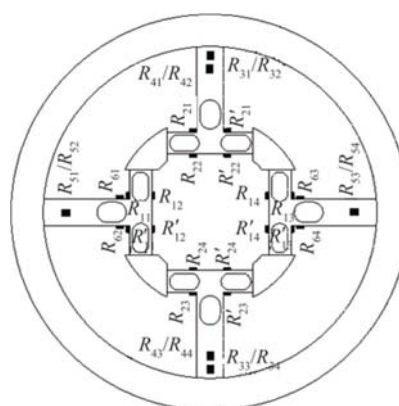
46

传感器结构和应变片组合

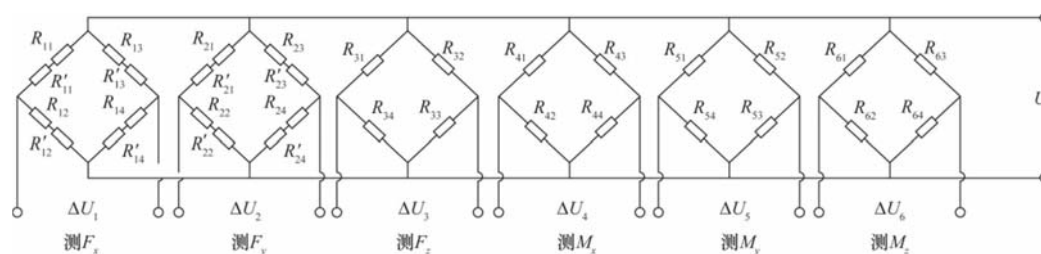
(a) 传感器弹性体结构



(b) 粘贴应变片

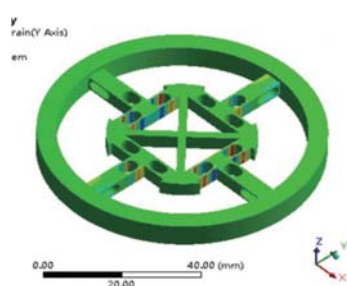


(c) 电桥电路

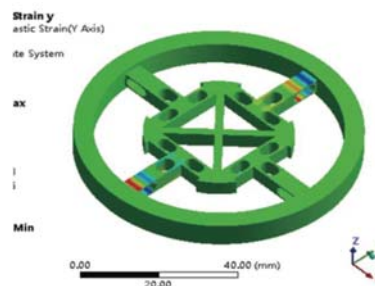


47

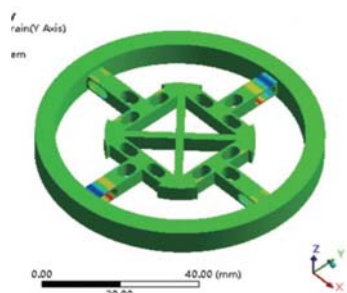
传感器结构的仿真分析



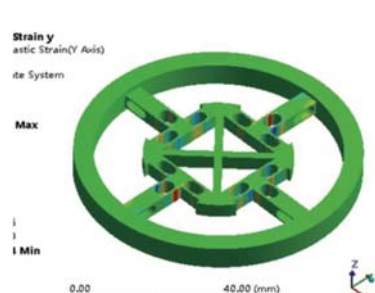
(b) $F_y=50\text{ N}$ 时Y向应变



(b) $M_x = 2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时 Y 向应变



(d) $F_x=50\text{ N}$ 时Y向应变



(d) $M_x=2.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时 Y 向应变