

1. 位移:

- ① 小位移 ($x < 1\text{cm}$) 光电式 / 光栅式 / 电容式 / 振弦式 / 磁阻式 / 磁致伸缩
- ② 位移量 ($x < 100\text{cm}$) 电感式 / 电容式 / 光纤位移
- ③ 长距离 ($x < 1\text{m}$) 电位器式 / 光电式 / 超声波 / 磁流式
- ④ 远测距 ($x > 1\text{m}$) 超声波 / 磁栅式 / 激光测距

压力: ① 弱压力: 石英晶体 / 压电陶瓷 ② 小压力: 金属应变片 / 半导体应变片

流量: ① 小流量: 光电流量计 / 超声波 ② 大流量: 涡轮 / 涡轮流量计

转速测量: ① 光电电阻 ② 光电编码器 ③ 光电三极管 ④ 太阳能电池 ⑤ 霍尔传感器 ⑥ 磁敏三极管

电阻应变计式传感器:

① 测力传感器 (P56图) 称重传感器

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{Fi} + \varepsilon_{Mi} \quad (\varepsilon_i: \text{各应变计承受的应变} \quad \varepsilon_{Fi}: \text{压(拉)应变} \quad \varepsilon_{Mi}: \text{弯曲应变})$$

4片应变计采用差动布片, 全桥接线, 优点是可排除载荷偏心或侧向力引起的干扰。

$$\varepsilon_{Fi} \text{ 都相等, } \varepsilon_{Mi} \text{ 都相等} \quad \Delta U_0 = \frac{U}{4} K [2(1+\mu)\varepsilon_F] = \frac{U}{2} (1+\mu) \frac{F}{EA}$$

② 压力传感器 (单式、组合式) 主要用来测流体压力

单式: 应变计直接粘贴在承压弹性膜片或筒上 组合式: 由承压弹性元件和应变弹性元件组合而成。

$$\text{当应变筒内腔受压力 } P \text{ 时, 筒外壁周向应变为: } \varepsilon_t = \frac{(2-\mu)d^2}{(b^2-d^2)E} \cdot P \quad \dots \text{厚筒壁} \quad \left. \varepsilon_t = \frac{(2-\mu)d}{2(D-d)E} \cdot P \quad \dots \text{薄筒壁} \right\} \text{ P57图.}$$

$$\left(\frac{D-d}{D+d} < \frac{1}{4} \right)$$

位移传感器: 应变式位移传感器把被测位移量 \rightarrow 弹性元件变形和应变, 通过电桥输出与位移成正比。

$$d = d_1 + d_2 = \left[\frac{2l^3}{3(l-a)h} + \frac{8nbh^2D^3E}{3(l-a)d^4G} \right] \cdot \varepsilon = k\varepsilon \quad \text{P58图}$$

D : 拉伸螺旋弹簧直径 n : 圈数 d_0 : 弹簧丝径 G : 切变模量 l : 悬臂梁长度 b : 簧片宽 h : 簧片厚 E : 弹性模量

d : 总位移 d_1 : 悬臂梁端部位移量 d_2 : 螺旋弹簧伸长量

上式表明: d 和 ε 成线性关系, 比例系数与梁尺寸、材料特性参数有关。

压阻式传感器

① 压阻式力传感器 P61

② 压阻式加速度传感器 P62图 (灵敏度高, 可测低频加速度)

质量为 m 的微量块受加速度 a 作用, 梁根部受弯矩产生应力: $\sigma = \frac{6ml}{bh^2} a$ (l, b, h 分别长、宽、高)

$$\varepsilon = \frac{6ml}{Ebh^2} a \quad (\mu\varepsilon) \quad \text{测量振动的加速度时, 固有频率 } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ebh^3}{4ml^3}}$$

电容式传感器

- ① 位移与尺寸测量 (0.1至几百ms的位移, 精度很高)
 举例: 电容测厚仪 (P85) 工件前给一个值, 当材料厚度出现偏差, 由杠杆传递, 主仪表显示, 最后给一个值并显示
 值并和0.
- ② 压力测量 (压力或压差) 开环压力传感器或闭环平衡式压力计
 举例: 电容压力传感器 $(-4 \sim +6) \times 10^4 \text{ Pa}$
 特点: 承受轴向力时, 应力分布均匀; 当长度比较小时, 受横向偏心力影响较小)
- ③ 力和力矩测量 (差动变压器式传感器; 优点: 承受轴向力时, 应力分布均匀; 当长度比较小时, 受横向偏心力影响较小)
- ④ 振动测量 (电容式传感器与机械-电气系统相结合;
 弹簧刚度较大, 质量很小时, 可测振动的幅值; 刚度大, 质量小时可测加速度; 频率0~150Hz)

电容式传感器

- ① 测位移 (用途一: 金属片的静态或动态位移, 最大量程几百ms, 分辨率0.1%)
 (用途二: 液位监控系统 P92 能看框图)
- ② 测厚度 (测金属板厚: 板厚变化 \rightarrow 线圈与金属表面间距离变化 \rightarrow 输出电压变化 P92图) 圈内电阻随温度变化
- ③ 测温度 (在较小温度范围内, $P_1 = P_0 [1 + \alpha(t_1 - t_0)]$ P_1, P_0 分别为温度 t_1 与 t_0 时的电阻率; α 为给定的温度系数
 保持电容式传感器的机电参数不变, 使输出电阻随温度变化, 则得温度变化;
 适用于测液体、固体介质温度或金属材料表面温度。适合低精度温度测量)

电容式传感器优点:

- (1) 分辨率极高
- (2) 动态质量小, 可直接测量, 自身功耗, 发热和迟滞都小, 高对被测材料和被测特性
- (3) 结构简单
- (4) 过载能力强

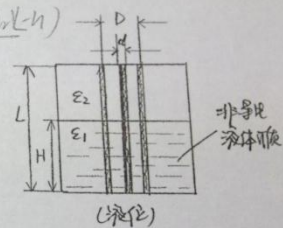
电容式传感器:

- ① 电容式位移传感器 P109 (变面积型(接触式测量)、差动式梳齿形容栅传感器、多极片型容栅传感器)
- ② 电容式加速度传感器 (举例: 弹性加速度传感器, 非接触式测量)
- ③ 电容式力和压力传感器 (称重传感器、压差传感器)
- ④ 电容式物位传感器

利用被测介质面的变化引起电容变化的变介电型电容传感器。
 当被测液面高度发生变化时, 两电极间电介质的介电常数随之变化, 从而C变;

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

电容变化 $C_x = C - C_0 = \frac{2\pi(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\ln(D/d)} H$, 即两种介电常数差别越大, D 与 d 相差越大, 灵敏度越高。



测量非导电固体颗粒料位: 由于固体摩擦“滞流”, 因此不用双屏电极。
 而用电极棒与容器组成, 则电容变化与料位升降关系为 $C = 2\pi(\epsilon - \epsilon_0)H / \ln(D/d)$

ϵ : 物料介电常数 D : 容器内径
 ϵ_0 : 空气 d : 电极直径

磁电式传感器

- ① 用于振动测量 (动铁式磁电传感器、动圈式磁电速度传感器)

优点: 输出阻抗低, 噪声小, 输出电压便于直接放大; 缺点: 易摩擦, 工作温度不可太高, 材料易老化

霍尔传感器:

霍尔元件: 结构简单, 工艺成熟, 体积小, 工作可靠, 寿命长, 线性好, 频率宽。

用于测量大电流、磁场、磁通、转速、加速度、振动、压力、流量、液位等

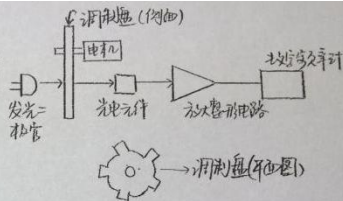
光电式传感器:

- ① 光电式转速表: 转轴涂黑白两种物质, 反光与不反光交替出现, 光电元件间接接收反射光信号, 经放大器形成方波, 由频率计测得电机转速。

$$n = 60f/z$$

f : 计数频率 z : 齿数

n : 测得转速 r/min



- ② 光电式位移传感器: (遮光式、反射式)

缺点: 响应速度慢, 信噪比低

用于精确测量时, 在光电元件前方有一 $0.1 \sim 0.2$ mm 左右狭缝的遮光板。

- ③ 视觉传感器: (由光源、镜头、摄像器件、图像存储体、监视器以及计算机系统组成)

- ④ 细丝类物件的在线检测

$$\begin{cases} D_A = (V - v) t_A \\ D_B = (V + v) t_B \end{cases} \Rightarrow D = \frac{V}{2} (t_A + t_B) \quad \begin{matrix} V: \text{扫描速度} & v: \text{被测对象运动速度} \\ D: \text{被测对象直径} & t: \text{扫描时间} \end{matrix}$$

超声波检测技术

- ① 测厚度 (共振法、干涉法、脉冲回波法) 超声波以波测表面接触, 发射 \rightarrow 反射 \rightarrow 接收 $h = \frac{1}{2}ct$ (体积、重量)

- ② 测液位: P. 95

$$\begin{cases} \text{时差法: } v = \frac{c^2}{2L \cos \theta} \cdot \Delta t \\ \text{相位差法: } v = \frac{c^2}{2\pi L \cos \theta} \Delta \varphi \\ \text{频率差法: } v = \frac{L}{2 \cos \theta} \Delta f \end{cases} \quad \begin{matrix} (L \text{ 为两探头间距}) & \theta: \text{两探头与水平线夹角} & c: \text{超声波速} \\ & v: \text{液体平均流速} \end{matrix}$$

红外辐射检测技术:

- ① 红外测温: "测量过程不影响被测目标温度分布" "响应速度快" 更准确、分辨率高 ② 测温范围宽

- ③ 红外气体分析 ④ 红外遥感 P. 306.

压电式 CGR 1.4.3

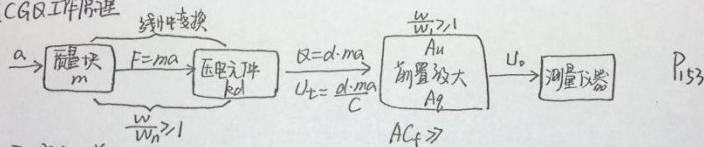
应用最多的是测力, 尤其是对冲击、振动的加速度的测量; 主要应用类型见 P. 149 表 6-4

应用特点: (1) 灵敏度和分辨率高, 线性范围大, 结构简单、牢固, 可靠性好, 寿命长

(2) 体积小、重量轻、刚度、强度、承载能力和测量范围大, 动态响应频率高, 动态误差小。

(3) 易于大量生产, 便于选用、使用和校准方便, 并适用于近测、遥测。

压电式加速度 CGR 工作原理



主要类型: 压缩型、剪切型、复合型

压电式 (压电) CGR P. 155

实现力-电转换在应力、压力和力矩测量场合, 采用双片或多片石英片作压电元件;

d : 刚度大, 动态特性好; 测量范围宽, $10^2 \sim 10^4$ kN; 线性及稳定性好; 可测单向力, 多向力

压电式压力 CGR P. 157

二、热电偶式 CGR P. 173

最直接的应用: 测量温度

测量管道流量: R_{t1} 和 R_{t2} 为热敏电阻, R_{t1} 放入被测流量管道中; R_{t2} 放入不受流体流速影响的容器内, R_{t1} 和 R_{t2} 为一般电阻, 四个电阻组成电桥。

当流体静止时, 电桥平衡, 电流计 $I=0$; 当流体流动时, R_{t1} 热量被带走, 电桥不平衡, I 值与流速 v 成正比。

④值与流速 v 成正比。

· 热式继电器

气体成分分析仪：右图。

电阻丝阻值与相分析气体含量之间在一定范围内呈线性关系。

R_{K1}, R_{K2} ：参考室，充入纯净空气

R_{X1}, R_{X2} ：充入相分析的混合气体。

工作时先通入空气到 R_{X1}, R_{X2} ，使电桥平衡，后将被测

混合气体通入分析室，电桥失去平衡，不平衡输出是混合气体成分的函数。

金属材料鉴别仪

采用两个相同材料电极，one 加热，由温差电势，求出

回路的热电势。 $Y = \frac{E_1}{E_2}$ ， Y 值只与被测物 O_x, N_x 有关。

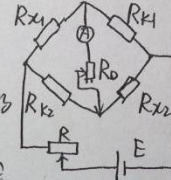
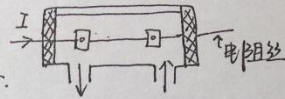
三、光纤CGR

光纤液位传感器：P215 基于全内反射原理

光纤角速度传感器：P216 适用于高压输电大电流的测量，范围 $0 \sim 1000 A$ ，精度 1%

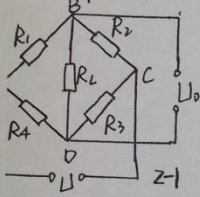
光纤电流传感器：P217 法拉第效应，由电流产生磁场引起光纤中传输光的偏转，由偏转角大小得出相应

光纤光栅传感器：P217 通过检测微小光栅反射回来的信号光波长值的变化，来实现对被测参数的测量



测量电路 P48

直流电桥及平衡特性



电桥平衡条件:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

负载 $R_L = \infty$: 输出接向输入阻抗放大器

$$U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot U$$

平衡

$$\Delta U_0 = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \cdot U$$

不平衡

令桥臂比 $\frac{R_2}{R_1} = n$ (即 $\frac{R_3}{R_4} = n$)

$$\Delta U_0 = \frac{nU}{(1+n)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \times$$

$$\left[1 + \frac{n}{1+n} \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) + \frac{1}{1+n} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right]^{-1}$$

令 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 即全等臂时

$$U_0 = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \times$$

$$\left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right]$$

$\frac{\Delta R_i}{R_i}$ 是造成输出量的非线性因素。

$\Delta R_i \ll R_i$, 或 $\frac{\Delta R_i}{R_i} \leq 10\%$ 时

$$\Delta U_0 = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

单臂: 只有一个桥臂变计 $\Delta U_0 = \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R}$, $S_U = \frac{U}{4}$

双臂: 两个桥臂接入 $\Delta U_0 = \frac{U}{2} \frac{\Delta R}{R}$, $S_U = \frac{U}{2}$

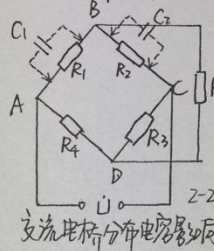
全臂: 四个桥臂接入 $\Delta U_0 = U \frac{\Delta R}{R}$, $S_U = U$

ΔR 正负: 按桥臂设定, 一般拉为正, 压为负。

若接入两个应变计: 邻边, ΔR 正负相反。

若 -- 四 --: 邻边相反, 对边相同 ΔR 变化

2. 交流电桥的平衡条件 P51 (将左圆环换成 Z)



输入输出为交流

平衡条件:

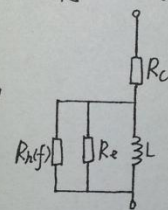
$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

预调平衡 (图 2-2):

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ 和 } R_3 G_4 = R_4 G_3$$

CHP 3 变磁阻式 CGR

1. 自感 P65 等效电路

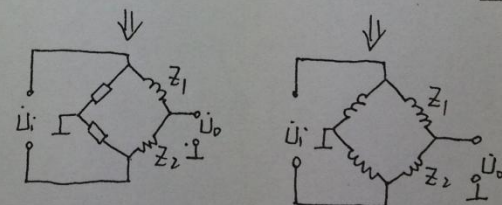
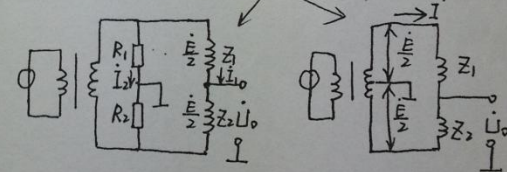


R_c : 线圈铜耗电阻

R_e : 铁心涡流损耗电阻

R_{hf} : 磁滞损耗电阻

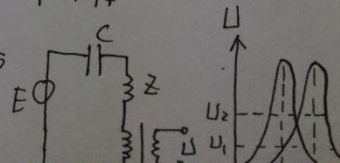
2. 自感测量电路: 电桥电路

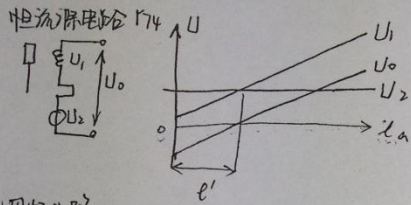


$$U_0 = \frac{E}{Z} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{E}{Z} \cdot \frac{\Delta r + j\omega \Delta L}{r_0 + j\omega L_0} \approx \frac{E}{Z} \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

输入端对称电桥: P74

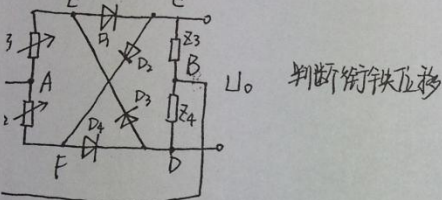
② 谐振电路





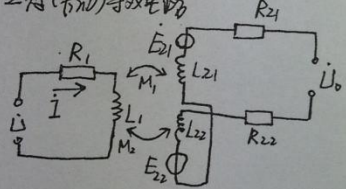
恒流源电路 P74

调频电路



判断衔铁位移
若衔铁置于中间位置, $Z_1 = Z_2 = Z$, 电桥平衡, $U_0 = 0$
若衔铁上移, $Z_1 \uparrow, Z_2 \downarrow, U_0 > U_c, U_0 = U_{DC} > 0$
若衔铁下移, $Z_1 \downarrow, Z_2 \uparrow, U_0 < U_c, U_0 = -U_{DC} < 0$

互感(带源)等效电路



$$U_0 = E_{21} - E_{22} = -j\omega(M_1 - M_2)I$$

当衔铁在中间位置时: $M_1 = M_2 = M, U_0 = 0$

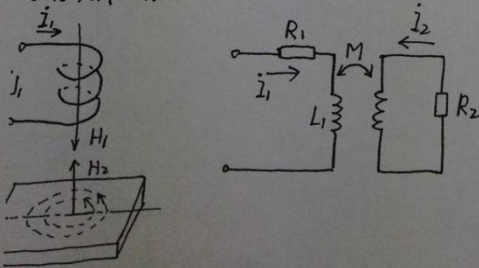
② 偏转中间时: $M_1 \neq M_2$, 带源工作,

$$M_1 = M + \Delta M, M_2 = M - \Delta M, \Delta M_1 = \Delta M_2$$

若值 $(M_1 - M_2)$ 与衔铁位移成正比, $U_0 \propto \frac{\Delta M}{M}$

互感测量电路 P82 (LJ)

电流流式 CGR

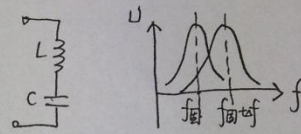


电容式测量电路 P90

2

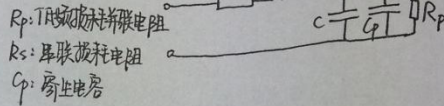
三种: 谐振电路、电桥电路、双值测试电路
被测参量: 线圈电感、阻抗、反直

谐振 DL:



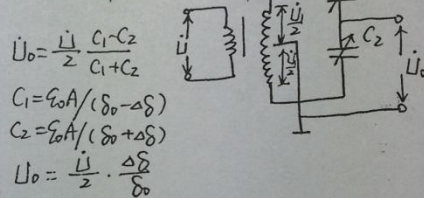
HP4 电容式 CGR

1. 等效 DL



2. 测量电路 P107 共4种, 只写3种

变压器电桥



$$U_0 = \frac{U}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C_1 = \epsilon_0 A / (\delta_0 - \Delta \delta)$$

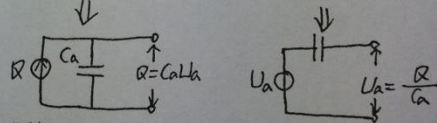
$$C_2 = \epsilon_0 A / (\delta_0 + \Delta \delta)$$

$$U_0 = \frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

HP6 五式 CGR

1. 等效电路 P144

功能上, 压电器件是电荷发生器; 特性上, 是电容源



F: 作用在压电材料上, $C_a = \epsilon_0 \epsilon_r A / t, U_a = Q / C_a$

$$K_g = \frac{Q}{F} = \frac{C_a U_a}{F}$$

$$Q = C_a U_a$$

$$K_u = \frac{U_a}{F} = \frac{Q}{C_a F}$$

$$K_u = K_g / C_a$$

2. 测量电路: 前置放大器 P145

两功能: 信号放大、阻抗匹配