

热工信号

第二章 测量系统

测量系统的基本特性：指对被测量信号的响应性能，表现为被测量信号通过测量系统前后的变换关系。

(P6) 静态特性

- 量程 ($\frac{2}{3} \sim \frac{3}{4}$)
- 精度等级 (测量值与真值 $R = \frac{\delta_{max}}{FS} \times 100\%$)
- 线性度 ($\delta x = \frac{|AL_{max}|}{LF} \times 100\%$)
- 灵敏度 ($S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$)
- 分辨率 (引起变化的最小输入量)
- 迟滞误差 (正、反行程不一致)
- 重复性误差 (多次测量时输出的重复程度)

(P11) 动态特性

- 传递函数
- 阶跃响应函数
- 频率响应函数

第三章 测量误差和不确定度

测量误差

- 系统误差
- 随机误差：精密性是随机误差的反映。
- 疏忽误差

$$\Delta = x - x_0$$

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0}$$

表示
绝对误差: $m = x_0$ 时
相对误差: $m = \Delta$ 时

系统误差按变化特征分为

- 恒值误差
- 变值误差 (多次测量时, 误差是否改变)

线性 非线性

(P28). 消除系统误差: 1. 根源控制

2. 预检法

3. 交换法 (适用于恒值误差)

(P24) 随机误差的分布规律, 符合正态分布.

特性: ① 单峰性

② 对称性

③ 抵偿性.

不确定度 / 测量误差 区别:

① 测量误差以真值为中心, 说明测量结果与真值的差异程度, 通常真值未知, 故测量误差本身就不确定

② 测量不确定度以测量结果的最佳估计值为中心, 评估测量结果与被测量真值相符合的程度.

不确定度定义: 用于表征合理地赋予被测量之值的分散性, 是一个与测量结果相联系的参数.

评定方法	{	评定 U_A
		评定 U_B
		合成不确定度 U_C
		扩展不确定度 U

第四章 温度测量

(P53) 基本定义: 温标

国际通用温标

- 摄氏
- 华氏
- 热力学

三要素:

- 温度计
- 固定点
- 内插方程

(P54) 测温方法

- 接触式
 - 膨胀式
 - 热电式
- 非接触式
 - 热辐射测温
 - 散射光法、激光干涉法等

(P55) 接触式: ①容易破坏温度场; ②滞后较大; ③有测温范围限制

膨胀式测温计: 体积变化

- 液体
 - 玻璃液体 - 玻璃温度计
 - 液体 - 双金属
- 固体: 双金属
- 气体: 压力式

(P59) 热电偶测温

基本原理: 热电现象

基本定律:

- 均质材料定律: 均质不产生热电动势
- 中间导体定律: 接入第三种导体不影响
- 中间温度定律: $E_{AB} = E_{AB} + E_{AB}$
- 标准电极定律: $E_{AB} = E_{AC} - E_{BC}$

材料: ①铂铑10-铂热电偶 (S型): 长期上限1300℃, 短期上限1600℃

②铂铑30-铂铑6 (B型): 长期上限1600℃

③镍铬-镍硅 (N型): -200 ~ 1300℃

④铜-康铜 (T型): -200 ~ 350℃

⑤镍铬-镍硅 (K型): -200 ~ 1300℃

⑥镍铬-康铜 (E型): -200 ~ 900℃

(p63) 测量误差与安装误差.

手温接触式误差较小.
点接触式误差较大.

1. 避免顺流.

2. 使测温元件处于流速最大处.

3. 流速要足够.

4. 足够绝热层.

(p67) 非接触式热辐射测温技术.

应用场合: 高温, 非稳态热过程, 连续测量.

第五章 压力测量.

力的测量方法:

直接比较法

间接比较法

应变片式

电感式

电容式

压电式

1) 应变式传感器.

工作原理: 基于金属的电阻应变效应. 即导体与半导体

在外力作用下产生机械变形时, 电阻值随之发

生相应变化.

结构核心: 敏感栅.

基底 + 敏感栅 + 覆盖层 + 引线

桥路补偿

应变片自补偿.

2) 电容式传感器

工作原理: 力 $\rightarrow$ 位移 $\rightarrow$ 电容量变化.

通常改变电容片间隙 d .

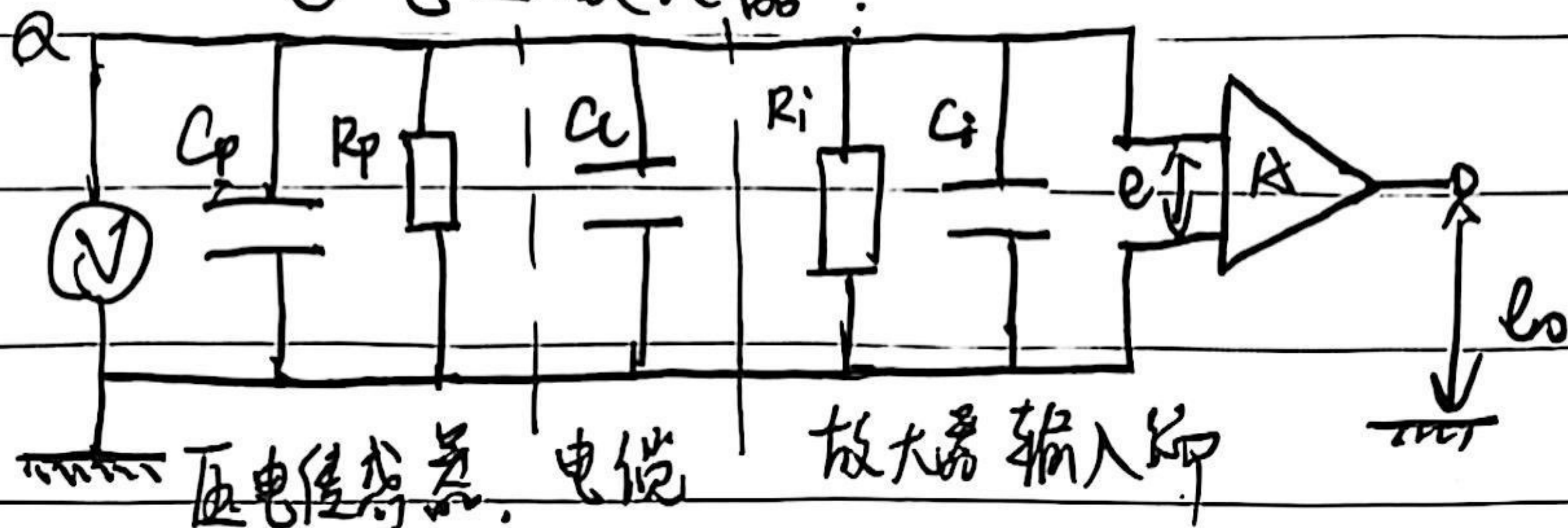
(P81) 压电式传感器.

工作原理: 压电效应. 某些结晶物质, 当给它的某个结晶轴施加力的作用时, 内部将会出现极化现象, 从而在表面形成电荷集结, 电荷量与作用力大小成正比.

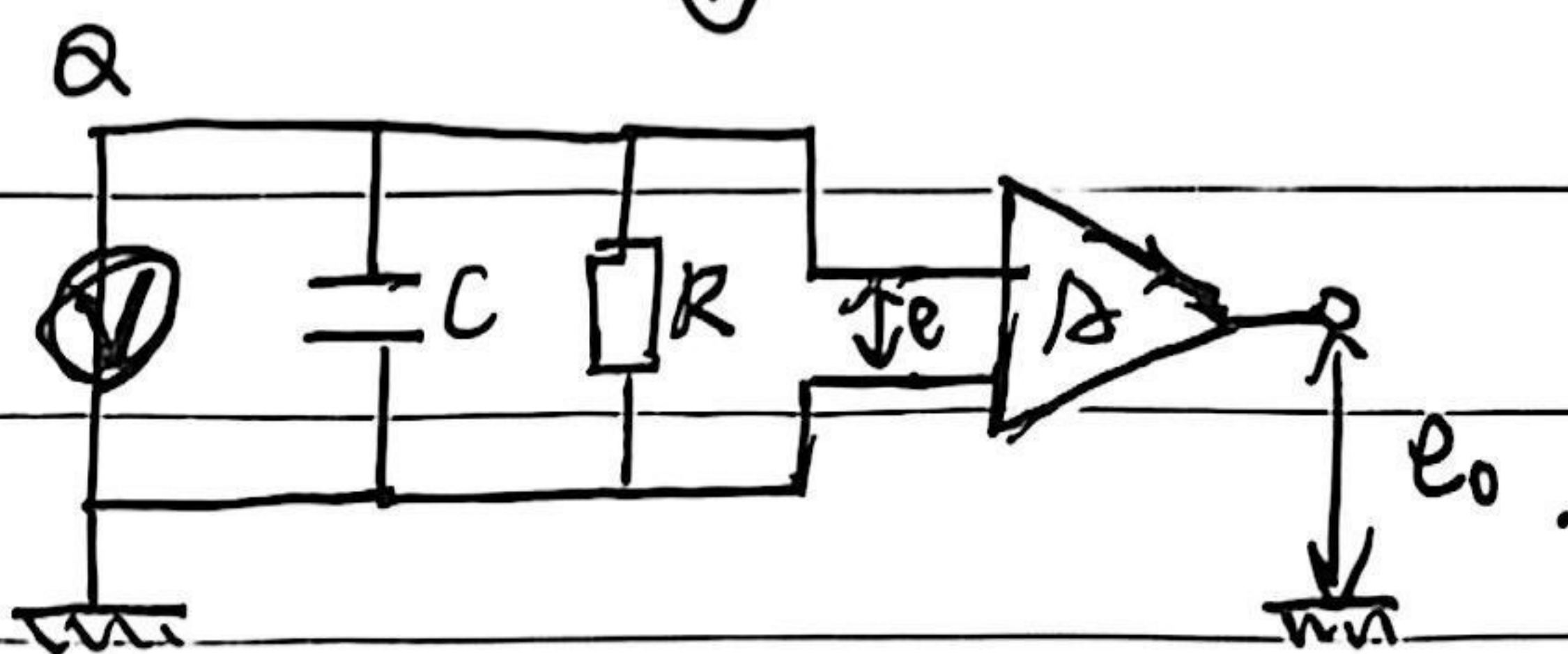
并联组合: 输出电荷量大, 电容大, T 大, 缓变信号
串联组合: 电输出电压大, 电容小, 时间常数小, 瞬变信号

测量电路:

① 电压放大器:



简化:



$$C = C_p + C_c + C_i$$

$$R = \frac{R_p R_i}{R_p + R_i}$$

$$Q = k_p F = Q_1 + Q_2 \quad (Q_1 \text{ 为给 } C \text{ 充电的电荷: } e = Q_1 / C)$$

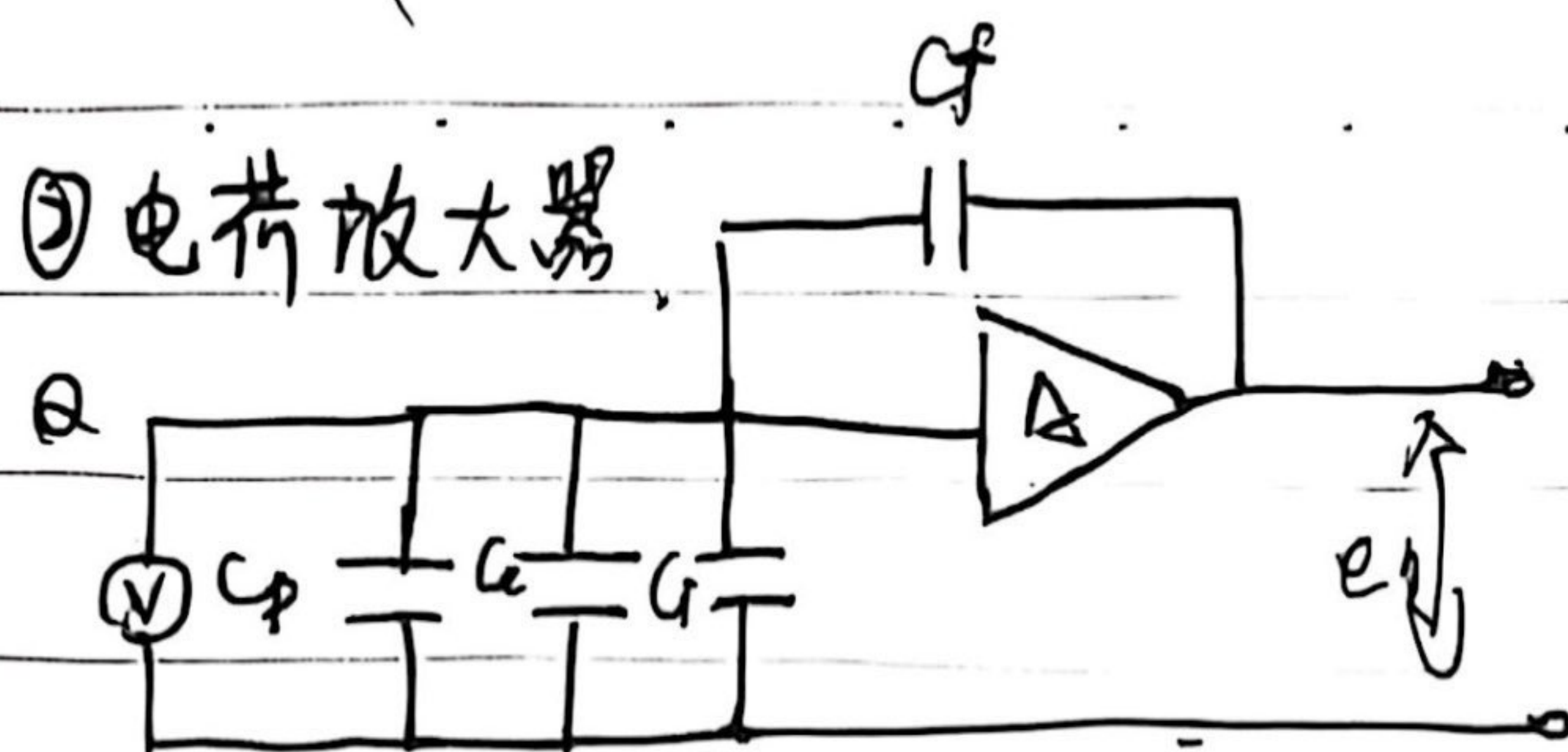
$$Q_2 \text{ 为电阻上的消耗: } e = \frac{dQ_2}{dt} R$$

$$\Rightarrow \text{特解: } e_m = \frac{k_p F \omega R}{\sqrt{1 + (\omega R C)^2}}$$

也不适合静态信号.

② 低频特性差

③ 高频特性好.



将压电式传感器视作电荷源。

输入端电压 e_i :

$$e_i = \frac{Q}{C_p + C_c + C_t + (1+A)C_f}$$

$A \gg 1$ 时, $e_i = \frac{Q}{C_f A}$

输出电压 e_o : $e_o = -e_i A = -\frac{Q}{C_f}$

(P84) 液柱式压力计: $\begin{cases} \text{U形管} \\ \text{单管} \\ \text{斜管} \end{cases}$

测量误差与修正:

① 环境温度变化的修正: 考虑封液

$$h_{20} = h[1 - \alpha_v(t - 20)]$$

② 重力加速度变化的修正: 当地 g 的影响

$$g_y = \frac{g_N (1 - 0.0026 \cos^2 \varphi)}{1 + 2h/R}$$

③ 毛细现象的影响: 封液由于毛细现象引起液面形成弯月现象

④ 其他误差

动态测量减少误差: ① 安装在需进行压力测量的部位

② 采用较小直径管径, 较短管子等

和较大内径

第六章. 流速测量.

最常用 { 皮托管

热线风速仪测速技术.

{ 接触式

非接触式.

(P97) 皮托管.

原理: $p + \frac{1}{2}\rho V^2 = p_0$.

$$\Rightarrow V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}}$$

利用总压与静压之差.

引入校正系数 ξ .

$$V = \xi \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}}$$

当被测流体为气体时需考虑压缩性效应.

$$Ma = \xi \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho p (1 + \gamma/2)}}$$

适用范围: ① 对于高流速 ~~湍流~~ 流动 (高 Ma 数). 为避免脱体激波而选用锥形探头.

② 对于超音速气流. 会有波阻损失等特殊问题. 需选用特定形式的总压和静压探头.

③ 对于尺寸较大的管内平均流速可用锥形皮托管.

④ 对于密度浓度较高的气流. 可采用吸气式. 速板式或静压式皮托管.

标定: 在校准风洞中进行.

$$\xi = \sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta h_1}}$$

无风洞用长径比大于 20 的平直风管进行标定.

尖端直径 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$.

(Pr2) 热线测速技术

组成：由探头、信号和数据处理系统组成。

探头选用热敏电阻材料，结构上分热膜和热线两种形式。

原理：探头在气流中的热量散失强度与气流速度之间的关系来测量流速。

$$I^2 R_w = h F (T_w - T_f)$$

$$V = f(I, R_w) \Leftarrow$$

$$= (a + b V^n) (T_w - T_f)$$

$$\text{或 } V = f(I, T_w)$$

恒流式：保持电流不变， $V = f(R_w)$
恒阻（恒电阻式）：保持热线电阻不变。

恒流式：灵敏度随流动变化频率减小而减小，且相位滞后。

$$V = f(I)$$

(Pr5) 激光多普勒测速技术 (LDV)。

工作原理：激光照射到跟随流体一起运动的微粒上时，散射光频率将偏离入射光频率。频率偏移量称为多普勒频移，与微粒速度成正比。

$$V_n = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} f_D$$

优点：①对流场无干扰

②输出特性的线性相当好，无需标定。

③除流体折射率外，不受其他物性参数干扰。

④频率特性好。

⑤测速范围广。

⑥测量方向特性稳定。

⑦可测流场中循环流的周流速度成分。

UP111 粒子图像测速技术 (PIV)

利用示踪粒子的图像来测量流体速度。

工作原理：通过测量流场中示踪粒子在某一时间微元 Δt 内的位移来求得流速。

优点：能测量整体流场的瞬时速度信息且不会产生扰动。

PIV 与 LDV 对示踪粒子要求：

① PIV 要求示踪粒子的种类、粒径、播散量有具体要求，同时要求有高的散射效率，具有良好物理化学性质，同时要求粒子能很好地跟随流体的运动速度和方向。

② LDV 要求微粒直径最好为干涉条纹宽度的 $1/2$ 左右。

第七章 流量测量

容积型流量计： $q_v = nV$

速度型流量计： A 一定， $q_v \propto v$

质量型流量计

- 直接型：直接利用 q
- 推导型：用 ρ 与 V 换算 q 。速度型 + 密度计
- 温度压力补偿型：用 t, p 求得 ρ ，再与 V 换算 q 。

选用原则：被测流体性质。

用途

工况条件

其他因素

安装条件

位置

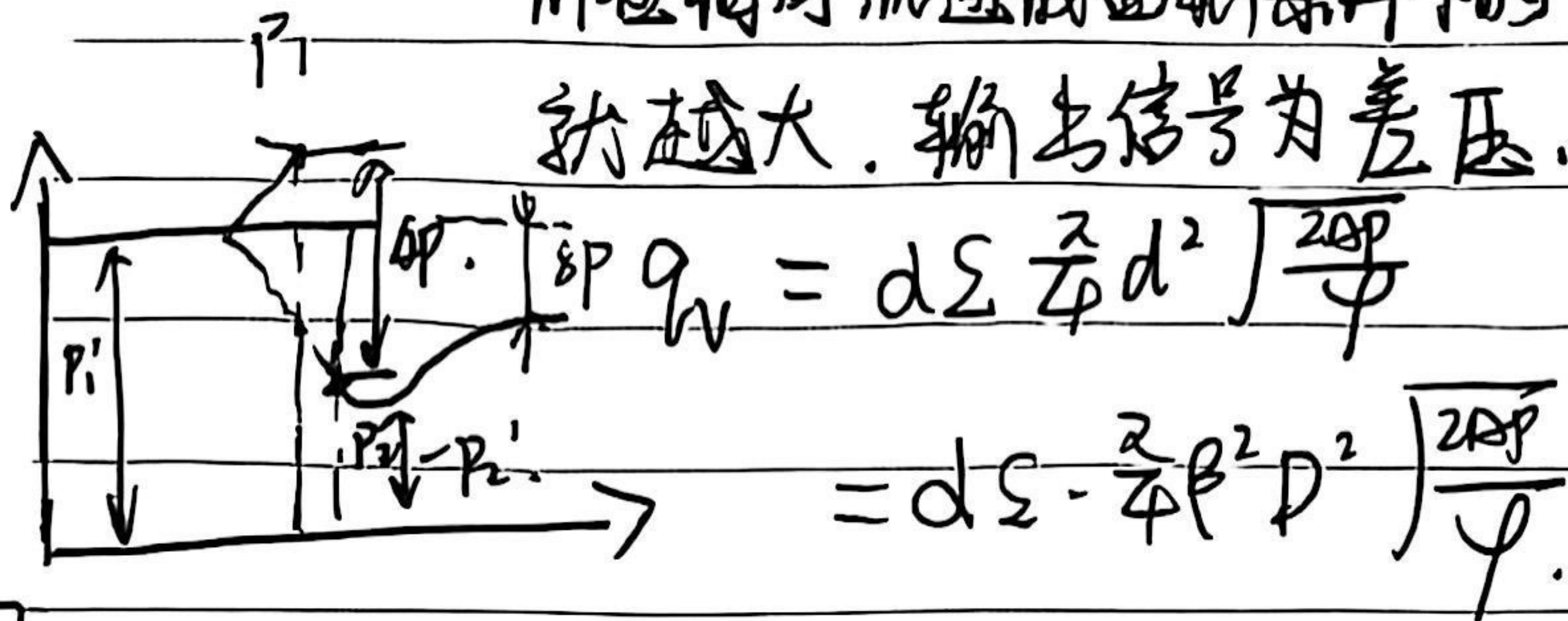
尺寸

管道管路的情况

(P120) 节流式流量计: 节流装置 + 导压管 + 差压计.

测量原理与流量方程:

流体流经管道中急剧收缩的局部截面时, 将产生流速降压的节流现象. 流体的流速越大, 即在相同流通截面积条件下的流量越大, 节流压差就越大. 输出信号为差压.



节流装置基本组成:

节流元件. 取压装置. 节流元件上下游的局部阻力元件和直管段以及连接法兰等组成.

常用节流元件有: 孔板. 喷嘴. 文丘利管. 文丘利喷嘴等.

取压装置由取压方式决定: 视取压孔位置不同取压方式有角接取压. 法兰取压. 径距取压. 理论取压和管接取压等.

安装要求 (P121)

测量结果的修正:

④ 节流元件开孔尺寸 d 因温度变化的修正.

$$d' = d [1 + \alpha_d (T' - T)]$$

$$C_d = \left(\frac{d'}{d} \right)^2$$

$$q' = C_d q_{v1}$$

②被测流体密度 ρ 变化的修正:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \cdot C_p q_v$$

$$C_p = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}$$

③综合修正系数

$$q'_v = C q_v$$

$$C = C_d C_p$$

(P12) 涡轮流量计 (速度型)

工作原理: 流体流经涡轮时涡轮被转动, 磁生电产生感应电动势, 发出频率为 f 的脉冲信号
 $f = zn$

涡轮转速与流量成正比

$$q_v = \frac{V}{t}$$

基本特性 + 影响测量结果的主要因素

(P12) 光纤流量计 ~~(节流式 速度式)~~

~~利用光纤传感技术检测节流元件前后差压~~

~~直接~~ } 光纤膜片式流量计: 测位移 $\rightarrow q$

光纤差压式流量计: 测 Δp (节流式)

光纤卡门涡街流量计: 测漩涡频率

(P13) 超声波流量计

原理: 基于超声波在介质中的传播速度与该介质的流动速度有关

CP133) 电磁流量计. (速度型)

基本原理: 法拉第电磁感应原理,

$$E = KBDV.$$

CP134) 质量型流量计

CP134) 冲量式固体颗粒流量计. (直接型)

基本原理: 基于冲量定理,

$$F_{\text{冲}} = m \Delta V$$

$$F = \Delta \frac{m}{\Delta t} \Delta V$$

$$= q_m \Delta V.$$

$$\Rightarrow q_m = K F_m.$$

CP135) 热式质量流量计. (直接型).

原理: $q_m = K \frac{h}{c_p} \Delta T.$

CP137) 科氏力质量流量计.

原理: 科里奥利力现象.

第八章. 液位测量.

检测液-液, 气-液或固-液之间分界面的技术.

主要原理是基于界面两侧物质的物性差异或液位改变时引起有关物理参数的变化.

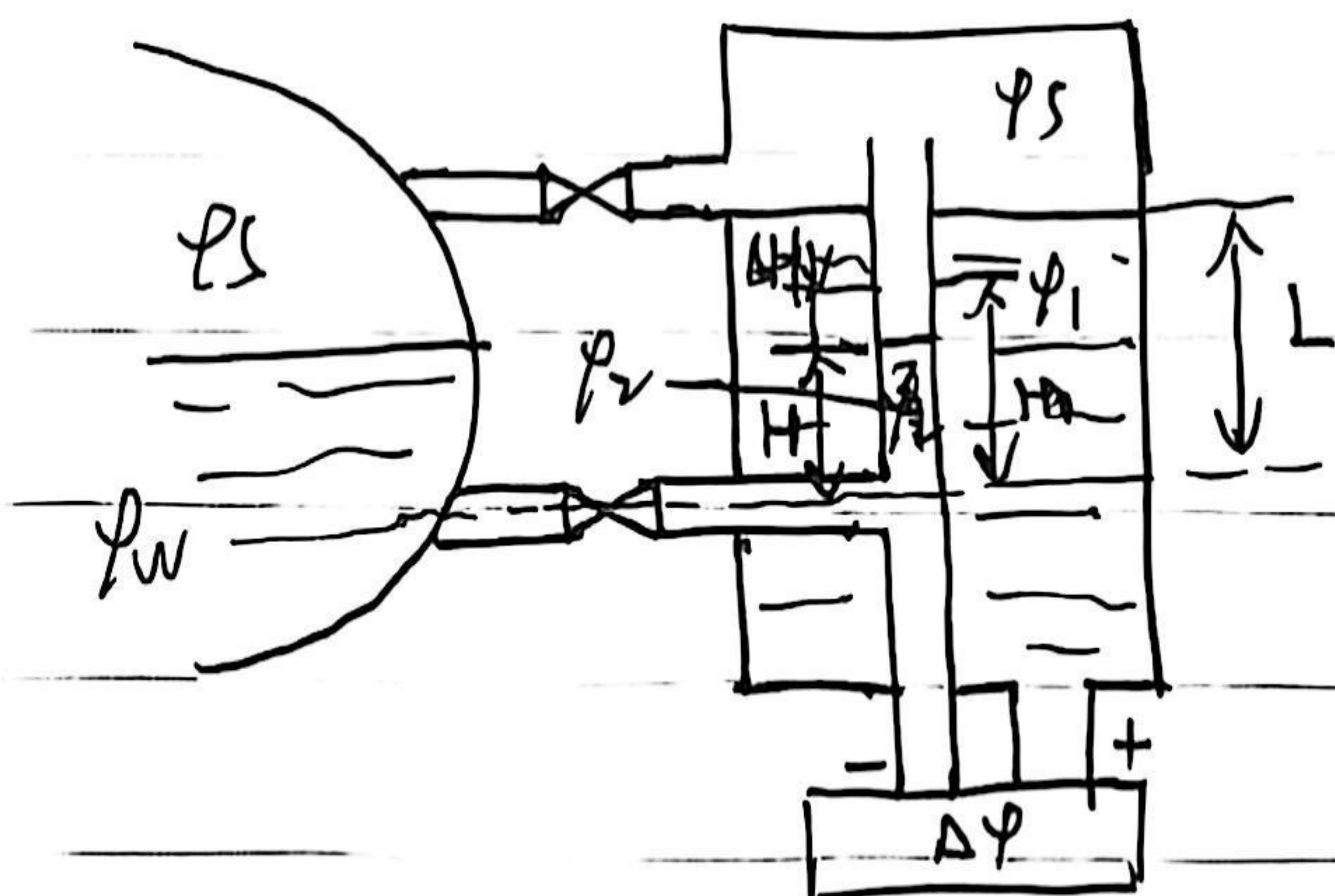
CP138) 差压式液位计

$$\text{原理: } H = \frac{P - P_0}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad \text{开口容器}$$

$$H = \frac{\Delta P - \rho_s g H_s}{\rho_l g} \quad \text{闭口容器}$$

测量锅炉汽包水位

"水位-差压"转换原理



差压计正压室与宽容器相连，由于宽容器水位为定值，正压头为定值。

负压室与汽包连通，其大小反映汽包水位变化。

$$\Delta P_0 = L\rho_1 g - [H_0\rho g + (L-H_0)\rho_s g]$$

液体 气体

若汽包水位发生变化，变化量为 ΔH ，则变为 $H_0 \pm \Delta H$ 。

$$\Delta P = L\rho_1 g - [H\rho g + (L-H)\rho_s g]$$

$$= L\rho_1 g - [H_0\rho g + (L-H_0)\rho_s g] - (\rho_2 - \rho_s) g (\pm \Delta H)$$

代入 ΔP_0 得: $\Delta P = \Delta P_0 - (\rho_2 - \rho_s) g (\pm \Delta H)$

可见，汽包水位上升时， ΔP 减小。

汽包水位下降时， ΔP 增大。

测量误差

① 向外散热导致 ρ_1, ρ_2 数值改变。

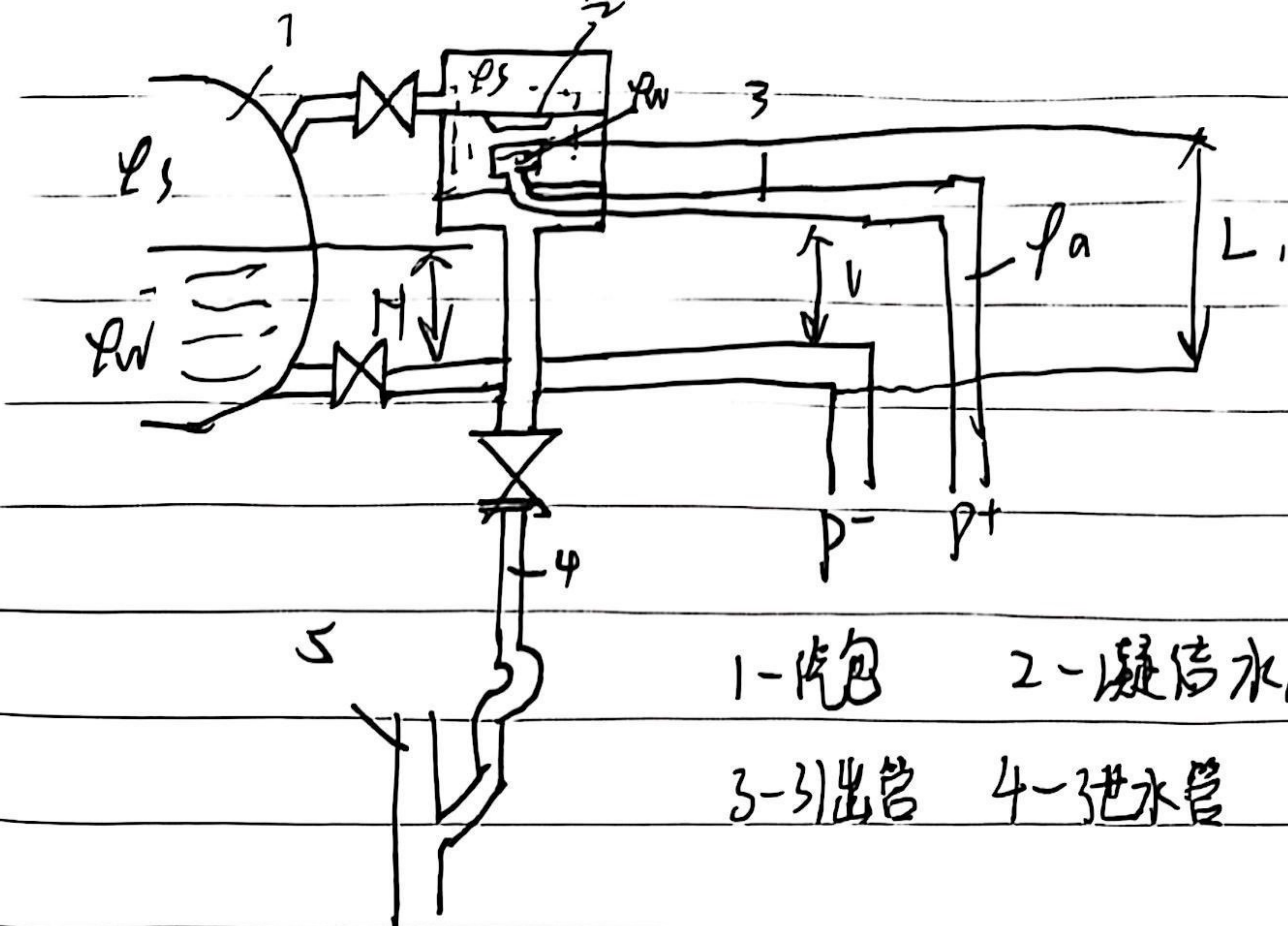
一般采用蒸汽套进行保温，使 $\rho_1, \rho_2 = \rho_w$ ， ρ_w 为汽包压力下饱和水的密度。

$$\Rightarrow \Delta P = (L-H)(\rho_w - \rho_s)g$$

② 汽包偏离额定压力时， ρ_w 与 ρ_s 变化，偏离液位计标定条件。

$\rho_w - \rho_s$ 和压力引起的误差还与 L 有关， L, H 越大，引起的误差越大。

可以用具有压力补偿作用的中间接头平衡容器。



1-汽包 2-凝结水漏盘

3-引出管 4-进水管 5-下降管

$$\Delta p = L(p_w - p_s)g + (p_a - p_w)g - H(p_w - p_s)g$$

$$\text{或 } H = \frac{L(p_w - p_s)g + (p_a - p_w)g - \Delta p}{(p_w - p_s)g}$$

$$\text{及写成 } H = \frac{L(k_1 - k_2 \rho) + (k_3 - k_4 \rho) - \Delta p}{k_1 - k_2 \rho}$$

$$= \frac{k_5 - k_6 \rho - \Delta p}{k_1 - k_2 \rho}$$

(P143) 电容式液位计。

导电液体，以不锈钢棒和被测导电液体组成

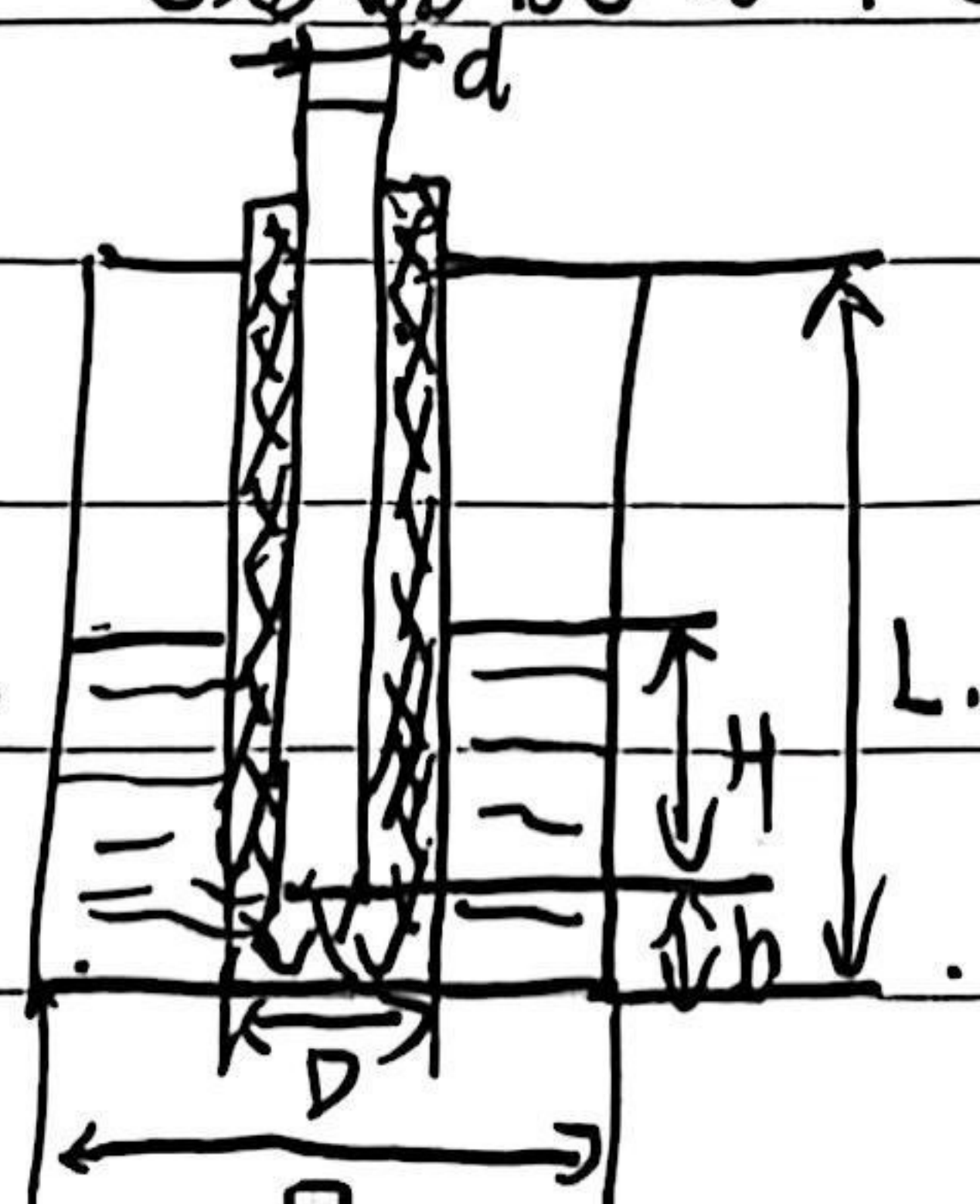
电容器的两个电极。不锈钢棒外套聚四氟

乙烯电绝缘材料

$10^{-2} S/m$ 的液体，

不适用于大粘度

液体。



乙烯套管。

$$H=0 \text{ 时, } C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$H>0 \text{ 时, } C_H = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 L H}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$\Delta C = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} - \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$D_0 \gg D, \quad \epsilon > \epsilon_0$$

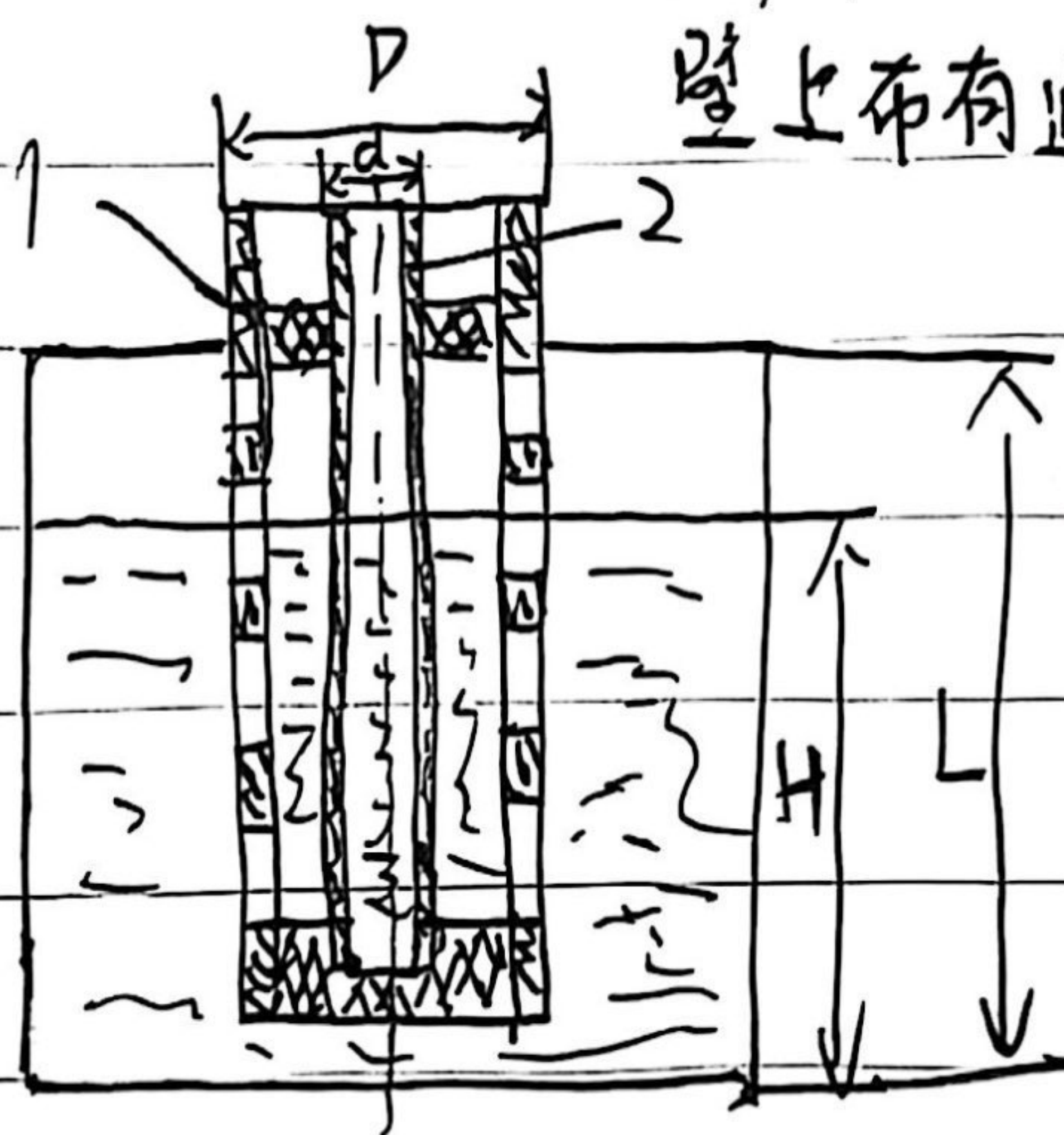
$$\Rightarrow \Delta C \approx \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$\therefore \Delta C = KH$$

$$H = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D}{d}}$$

H ↑, 正对面积 ↑

非导电液体：两根同轴装配，相互绝缘的不锈钢管分别作为圆柱形可变电容器内、外电极，外管壁上布有通孔，以便被测液体自由进出。



1. 外电极

2. 内电极

$$H = 0 \text{ 时}, \quad C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$H > 0 \text{ 时}, \quad C_H = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 (L-H)}{\ln \frac{D}{d}}$$

$$\Delta C = \frac{2\pi(\epsilon - \epsilon_0)H}{\ln \frac{D}{d}}$$

H ↑, ϵ 变化

适用于电阻率 $\rho > 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 的液体，部分有机溶剂和液态气体。

(P145) 电阻式液位计

- 电接点液位计：液体导电特性不同
- 热电阻液位计：液体对热敏材料的热电特性不同

(P147) 光纤液位计

全反射型光纤液位计：由液位敏感元件、传输光信号的光纤、光源和光电控制单元组成。

原理：棱镜在气体中时全反射，在液体中时全反射被破坏。

浮沉式光纤液位计：浮沉液位传感器 + 光信号检测系统

- 机械转换部分。
- 光纤光路部分。
- 电子电路部分。

(P149) 超声波液位计

由声波发送和接收之间的时间计算距离。

第十章 组分测量

(P174) 色谱分析仪

保留时间：组分进入色谱柱到

出色谱柱末端浓度最大

值所需的时间。

液相色谱分析

气相色谱分析

固相 固相

液相 固定相

分配系数：

$$K = \frac{C_s}{C_m}$$

达到平衡时

的两相浓度比

原理、装置、组分定性分析

CP175) 红外气体分析技术.

原理: 除同原子的双原子气体 (H_2 , N_2 和 O_2 等) 外, 其他非对称分子气体, 如 CO , CO_2 , H_2O , NO 等在红外区有特定的吸收带 (波段).

对比室内装不台待测组分的气体.

CP177) 常用组分浓度测量技术.

① CO 和 CO_2 浓度测量:

常用热导检测技术进行测量.

流经参比室的是纯载气, 而流经测量室的是从色谱柱出来的气体 (载气与被测组分混合物).

原理: 通过不同气体热导率不同造成电桥热阻阻值不同影响电桥输出, 来判断组分浓度.

② 碳氢化合物浓度检测

氢火焰电离检测器, 用于有机组分测量.

③ 氮氧化物浓度检测.

依靠化学发光法: 利用 $\text{NO}-\text{O}_3$ 反应体系的化学发光现象.

测 NO_2 时需先将其还原为 NO

原理: $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2^* + \text{O}_2$

$\text{NO}_2^* \rightarrow \text{NO}_2 + h\nu$

④ 氧含量检测

常用氧化锆氧分析仪.

基本工作原理：利用氧化锆浓差电池所形成的氧浓差电势与 SO_2 含量之间的差值关系进行测量
氧化气体，一般为空气

工作温度控制在 $1150^{\circ}C$ 以内。800℃以上

直接式
抽气式

恒温式
温度补偿式

(P182) 颗粒物排放标准

① 烟度测量：
滤纸法/反时法
透光度法

博世烟度计 (滤纸法)
哈特里奇烟度计 (透光度法)
PHS烟度计 (透光度法)

② 颗粒物测量

重量称量法

气动力学粒径谱仪 ($1\mu m$ 以上颗粒)
扫描电镜移液器 (粒径以下)

(P186) 排放测量采样方法：
直接采样法
全量采样法
定容采样法

第十一章 振动理论

主要参量为频率、振幅和相位。

例 1 $u(t) = A \sin(\omega t + \phi)$ 表示简谐振动。其中 A 为振幅， ω 为角频率， ϕ 为初相。

周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ，频率 $f = \frac{1}{T}$ 。

例 2 $u(t) = A \cos(\omega t + \phi)$ 。

$$A = \sqrt{u_m^2 + u_n^2} = \frac{1}{\omega} \sqrt{(\dot{u}_m)^2 + (\dot{u}_n)^2}$$

振幅

例 3 $u(t) = A \sin(\omega t)$ 。

共振现象，共振频率。

$$A = \frac{(u_m)^2}{1 - (\omega/\omega_0)^2}$$

例 4 阻尼振动： $u(t) = A e^{-\gamma t} \sin(\omega_d t + \phi)$ 。

电子

振荡

阻尼 γ 。

例 5 受迫振动。

共振频率 ω_0 。

振幅 A 。

相位 ϕ 。

信号放大

电荷放大

电压放大