

第三章

过程装备控制技术的应用

过程检测技术

目 录

CONTENTS

■ 3.1

测量基本知识

■ 3.4

温度测量

■ 3.7

液位测量

■ 3.2

误差

■ 3.5

流量测量

■ 3.3

压力测量

■ 3.6

转速和转矩测量





■ 3.7 液位测量


容器内液体介质液面的高低称**液位**。

测量目的：

测知容器中物料的存储量，对物料进行监控，保证顺利和安全生产。

液位计分类：

直读式、浮力式、静压式、电容式、光纤式、激光式、核辐射和超声波式。



一. 浮力式液位计

工作原理：

利用漂浮在液面上的浮子实现液位测量。

浮子因浮力作用漂浮在液面上，其位置代表了液面的位置。

当液面变化时，浮子随液面一起变化，从而产生位移。经传递、放大、最终显示出液位的变化和液面高度。



■ 3.7 液位测量

(1) 恒浮力式液位计

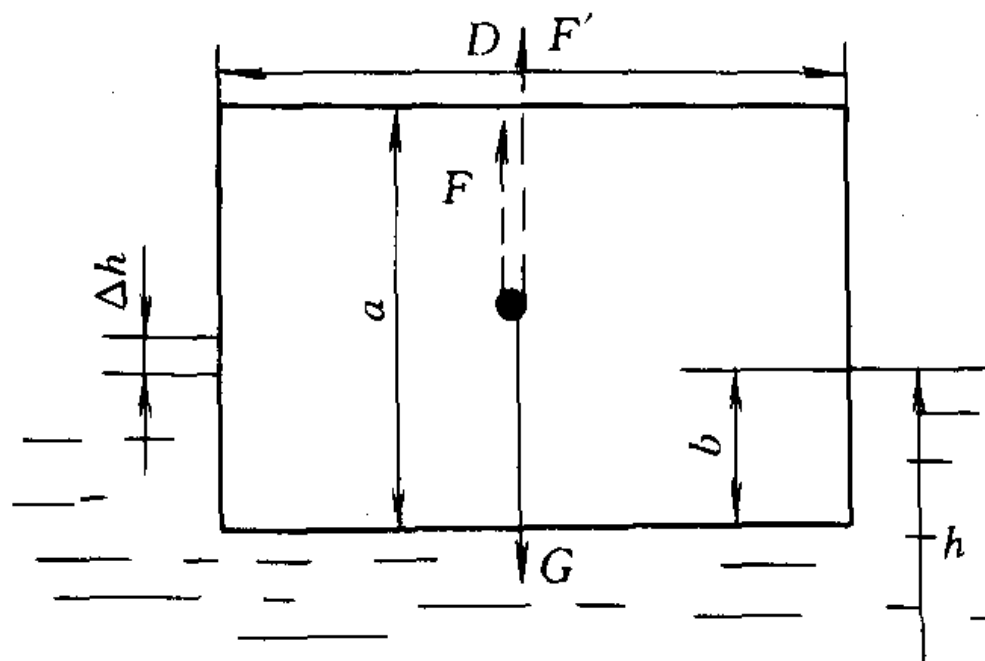
① 测量原理：

浮子自身重力：

$$G = \frac{\pi}{4} D^2 a \rho_1 g$$

浮子所受浮力：

$$F = \frac{\pi}{4} D^2 b \rho_0 g$$

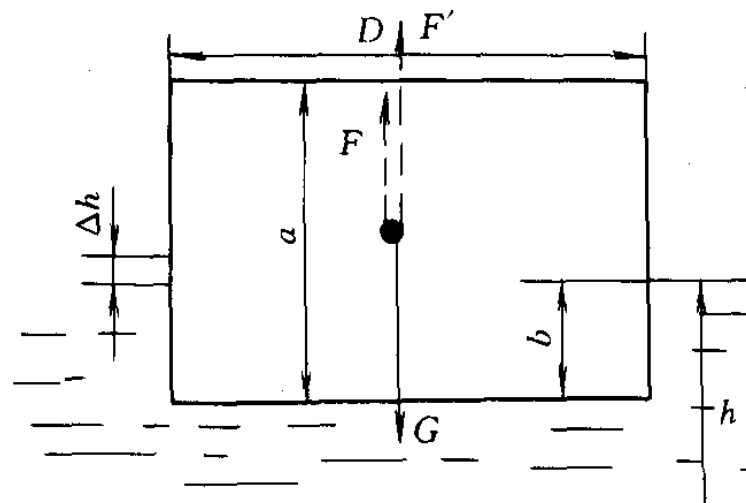


式中： ρ_1 —浮子密度；
 ρ_0 —液体密度。

■ 3.7 液位测量

设浮子所受外力为： F'
当浮子处于平衡位置时，

$$F' + F = G$$



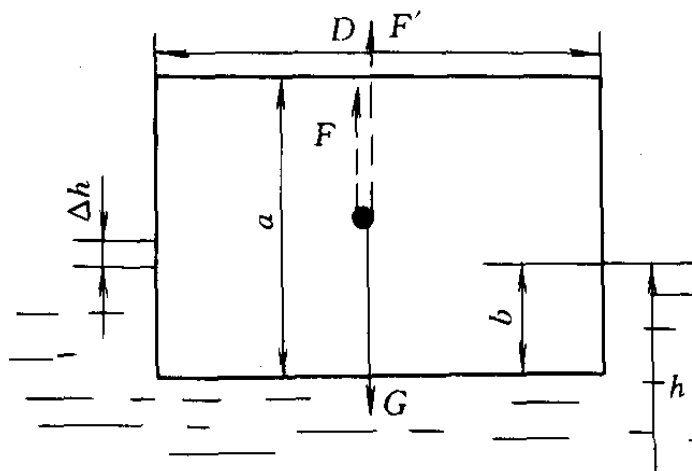
当液体上升 Δh 时，浮子浸在液体中的体积增加，浮力增大 ΔF ，则

$$\Delta F = \frac{\pi}{4} D^2 \Delta h \rho_0 g$$

在外力 F' 不变时，

$$F' + (F + \Delta F) > G$$

■ 3.7 液位测量



由于 ΔF 的作用，迫使浮子上浮。

浮子的升降是随液位的升降而变化的。

当重新达到平衡后，浮子的静止位置就表示了新液面的位置。

■ 3.7 液位测量

② 浮子的结构形式

浮力式液位计的**不灵敏区**：

由于仪表各部件之间存在摩擦等阻力，只有当浮力的变化量 ΔF 达到 ΔF_0 时，液位变化量达到仪器可感应量 Δh_0 ，浮子才能克服阻力开始动作。

$$\frac{\Delta h_0}{\Delta F_0}$$

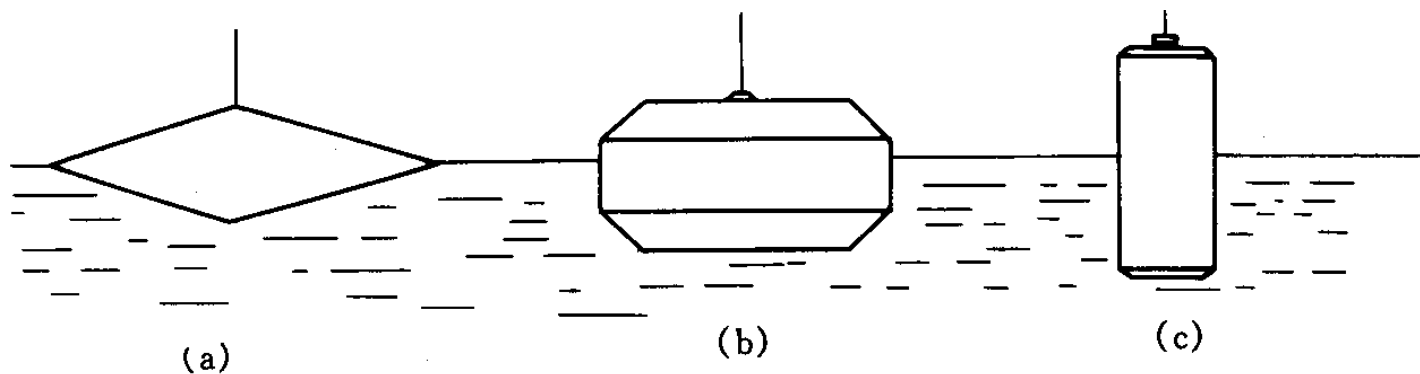
— 浮力式液位计的不灵敏区

■ 3.7 液位测量

浮力式液位计的不灵敏区

$$\frac{\Delta h_0}{\Delta F_0} = \frac{\Delta h_0}{\left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 \Delta h_0 \rho_0 g} = \frac{4}{\pi D^2 \rho_0 g}$$

直径越大，灵敏度越高。

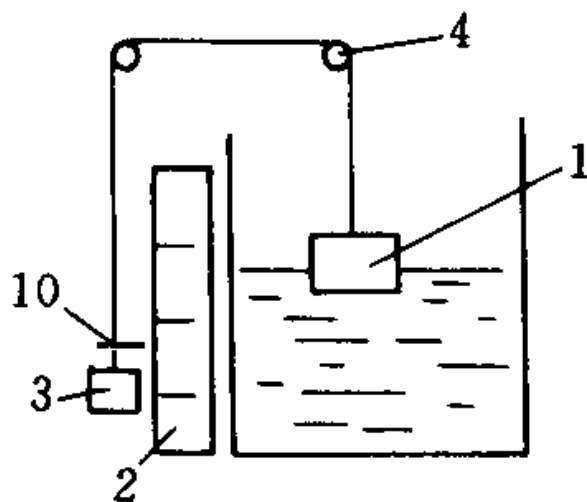


(a) 扁平浮子； (b) 扁圆柱浮子； (c) 高圆柱形浮子

■ 3.7 液位测量

③恒浮力液位计结构形式

a. 滑轮式液位计



- 1—浮子；
- 2—刻度尺；
- 3—平衡重块；
- 4—滑轮；
- 10—指针。

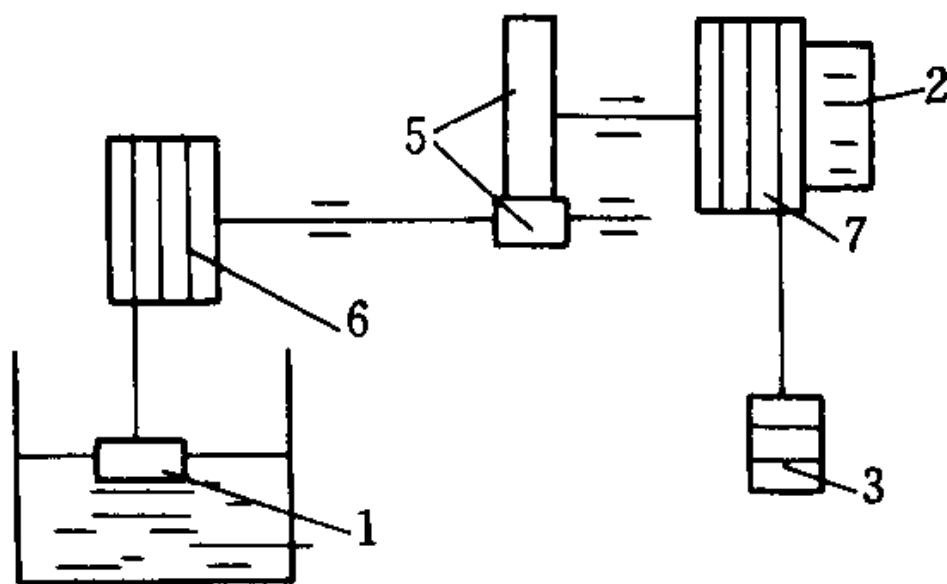
(a)

浮子通过钢丝绳经由滑轮与平衡重块相连。

液位、浮子、指针、平衡重同步移动，通过指针在刻度尺上指示的位置测得液面高度。

■ 3.7 液位测量

b. 鼓轮式液位计



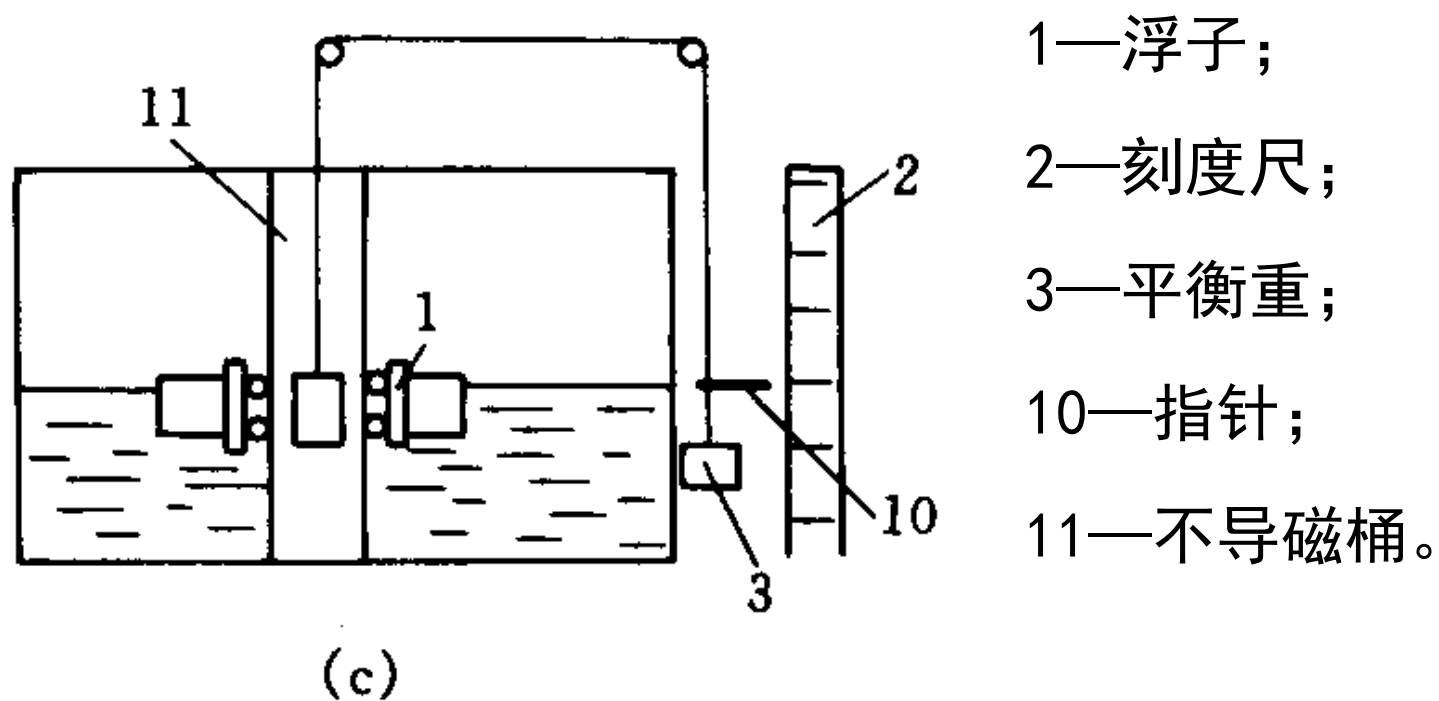
- 1—浮子；
- 2—刻度尺；
- 3—平衡重；
- 5—啮合齿轮；
- 6、7—鼓轮。

(b)

鼓轮是用齿轮啮合来传递位移，可通过改变齿轮的齿数来改变仪器的量程。

■ 3.7 液位测量

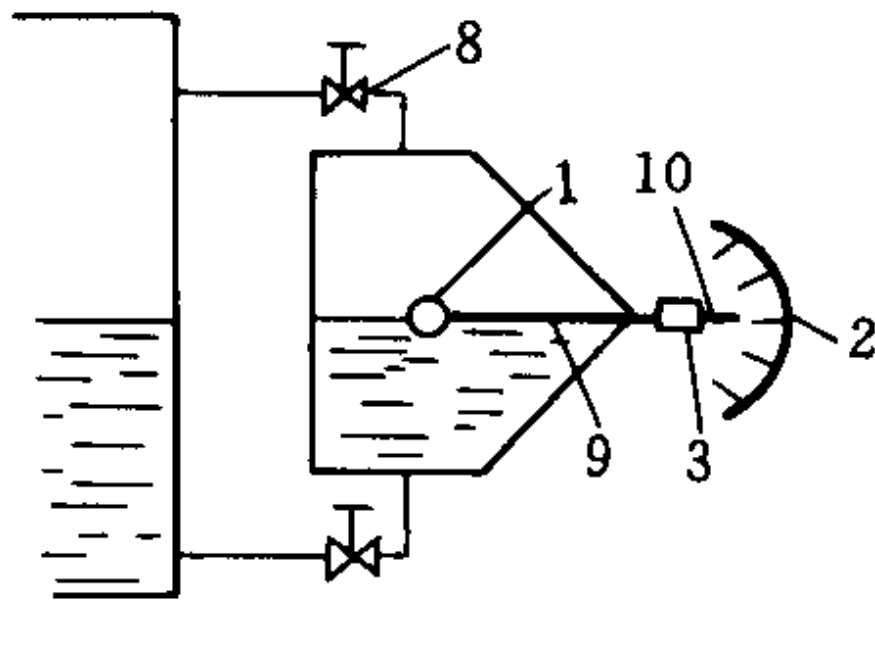
c. 磁力式液位计



利用浮子与磁铁之间的引力来实现对液位变化的信号的传递，适用于密闭容器。

■ 3.7 液位测量

d. 浮球式液位计



(d)

浮球随液位升降，通过转轴带动指针转动，在刻度盘上指示液位的位置。

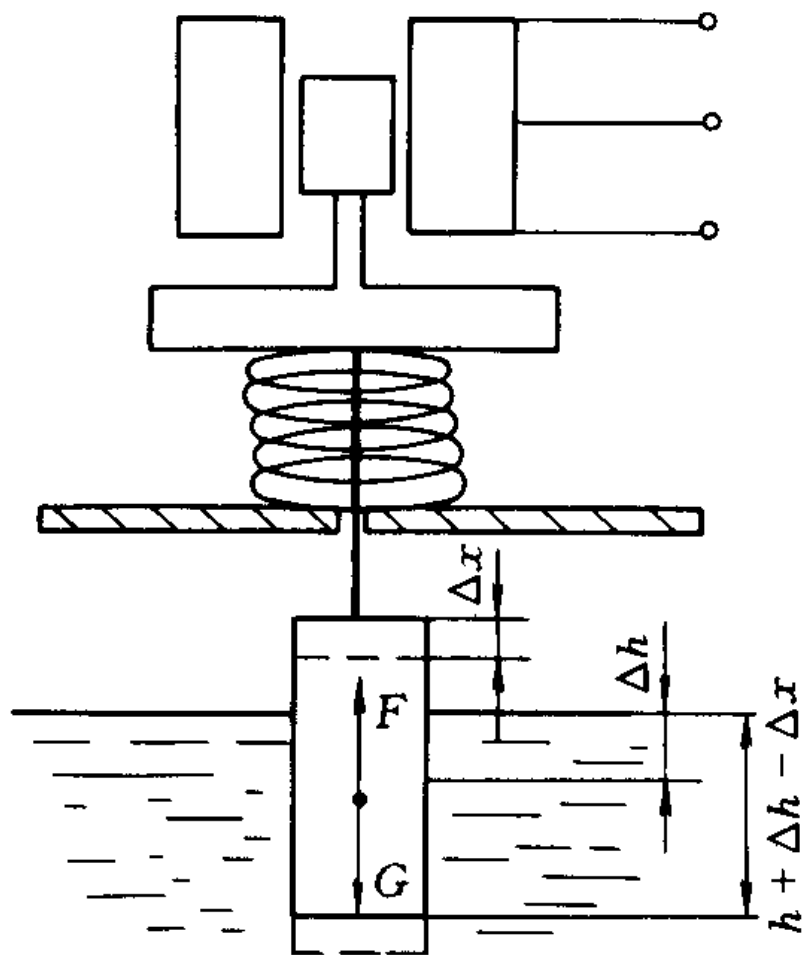
■ 3.7 液位测量

(2) 变浮力式液位计

浮筒—将液位变化转化为力的变化；

弹簧—将力的变化转化为机械位移；

差动变压器—将位移转换成电信号。



■ 3.7 液位测量

浮筒悬挂在弹簧上，当浮筒的一部分浸入液体时，由于浮力作用而使浮筒上移，当与弹簧力平衡时，浮筒停止运动。对于浮筒存在以下平衡关系：

$$cx = G - Ah\rho_0g$$

c —弹簧刚度；

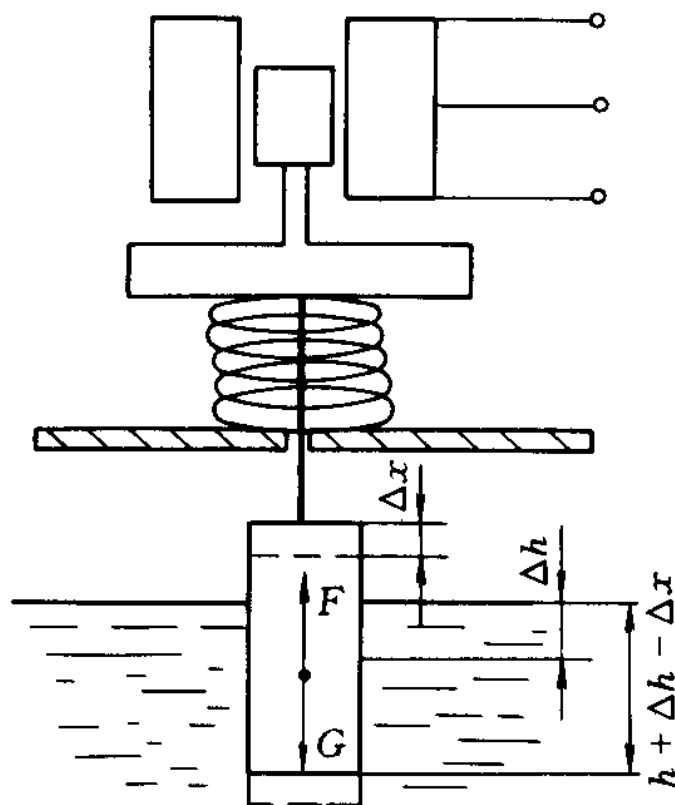
x —弹簧压缩量；

G —浮筒重量；

A —浮筒的截面积；

h —浮筒浸入液体高度；

ρ_0 —液体密度。



■ 3.7 液位测量

$$cx = G - Ah\rho_0 g$$

当液位发生变化升高 Δh ，则浮筒由于所受浮力变化引起浮筒位置的变化，上升 Δx ，则平衡关系为：

$$c(x - \Delta x) = G - A(h + \Delta h - \Delta x)\rho_0 g$$

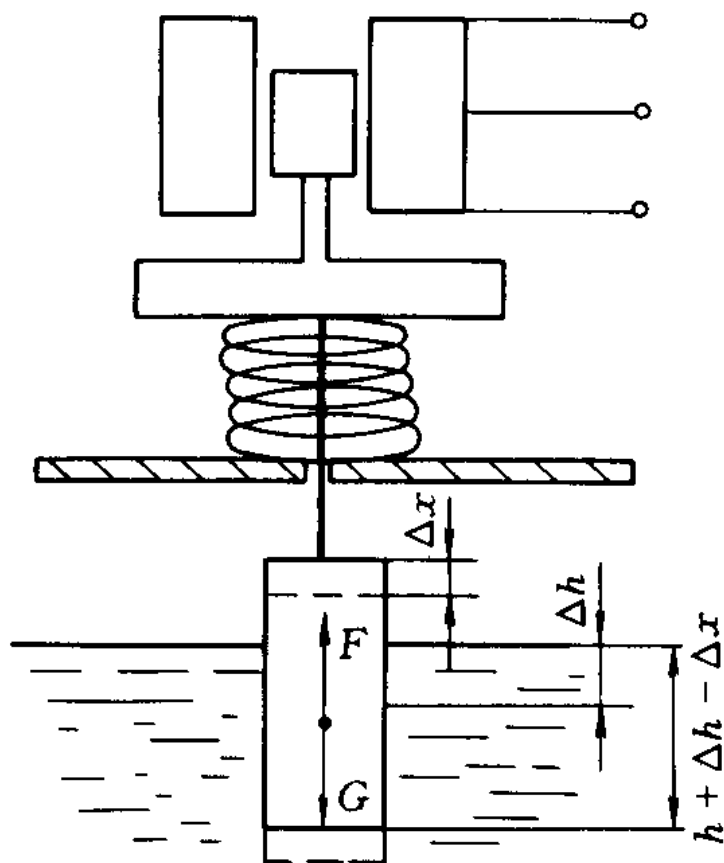
与 $cx = G - Ah\rho_0 g$ 相减得：

$$c \cdot \Delta x = A\rho_0 g(\Delta h - \Delta x)$$

$$\Delta h = \left(1 + \frac{c}{A\rho_0 g}\right)\Delta x = k\Delta x$$

■ 3.7 液位测量

$$\Delta h = \left(1 + \frac{c}{A\rho_0 g} \right) \Delta x = k\Delta x$$



液位变化量 Δh 与浮筒位移 Δx 成正比，在浮筒连杆上装上市针，可直接指示液位。

若在浮筒上装上铁芯，通过差动变送器，可输出电信号，从而间接测出液位。

■ 3.7 液位测量

(3) 磁浮筒式液位计

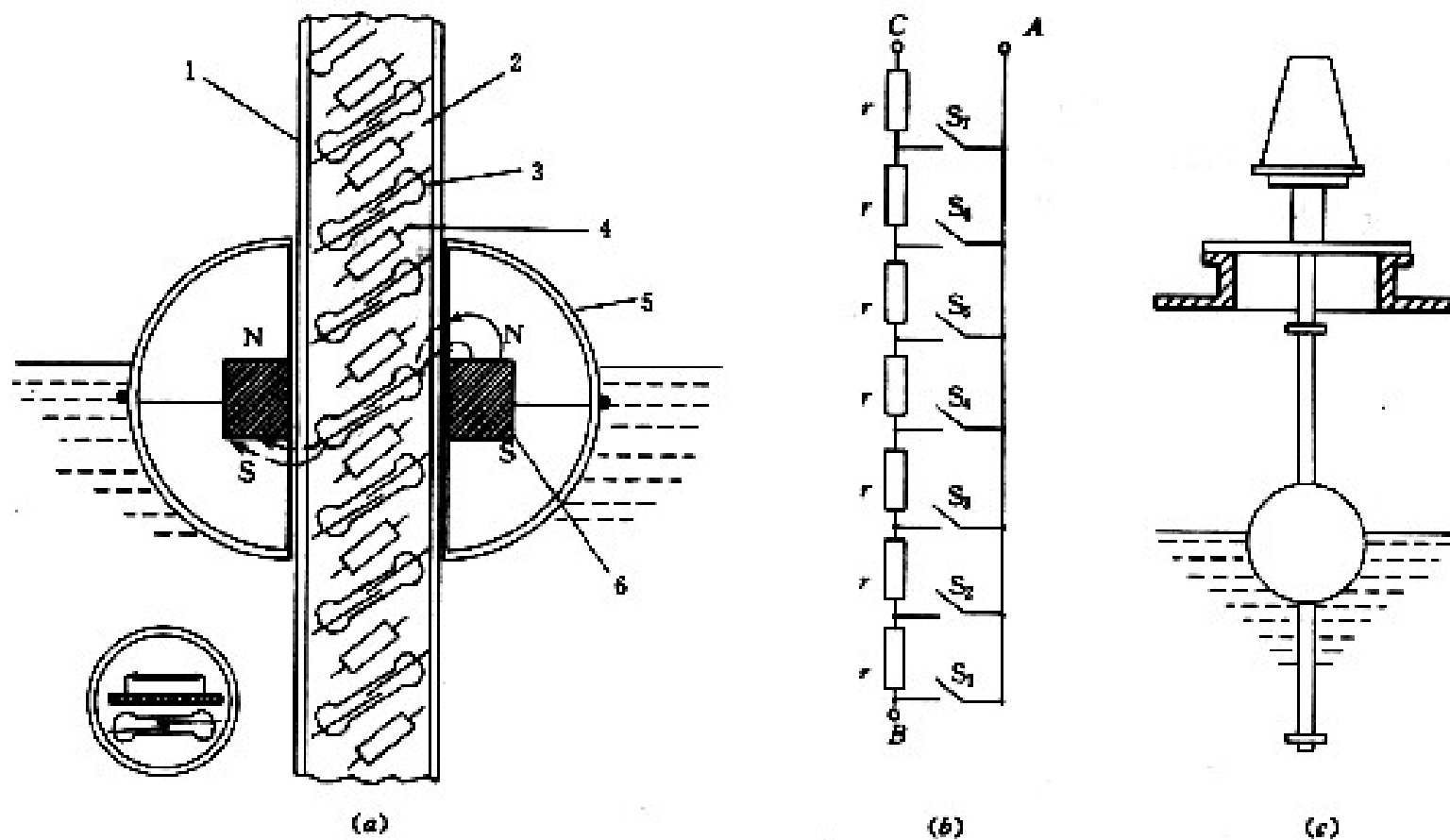
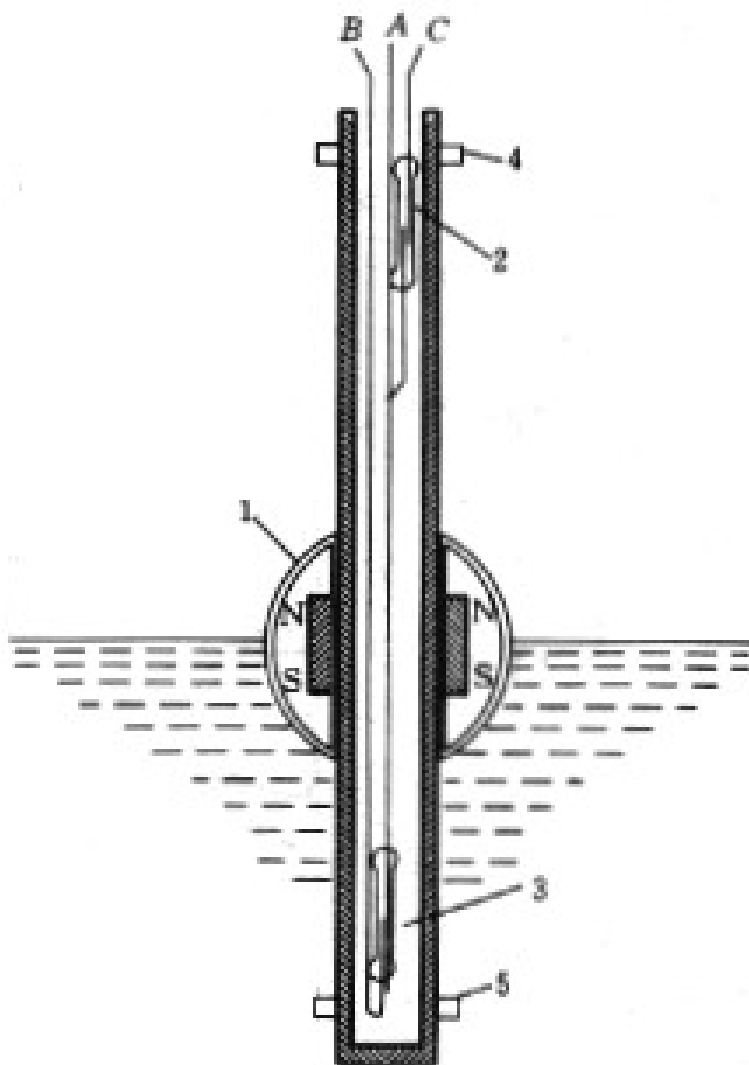


图 5.3.4 磁浮子舌簧管液位计

1-下端封闭的不锈钢管；2-条形绝缘板；3-舌簧管；4-电阻；
5-佛珠形浮子；6-环形永磁铁氧体。

■ 3.7 液位测量

磁浮筒式液位开关



用途：液位的越限报警

二. 静压式液位计

1. 测量原理:

静压式液位计:

测量容器某点的压力或该点与另一参考点的压差来间接测量液位。

由流体静力学可知，当液体在容器内有一定高度时，会对容器的底面或侧面产生一定的压力。

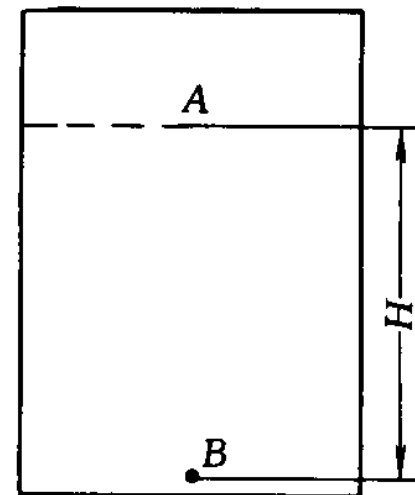


■ 3.7 液位测量

a. 密闭容器：

取A、B两点，设B点为参考点，
则：

$$\Delta p_{AB} = p_A - p_B = \rho g H$$



b. 敞口容器：

液体自由表面处的压力等于大气压。

$$p = p_A - p_B = \rho g H$$

■ 3.7 液位测量

$$\Delta p_{AB} = p_A - p_B = \rho g H$$

$$p = p_A - p_B = \rho g H$$

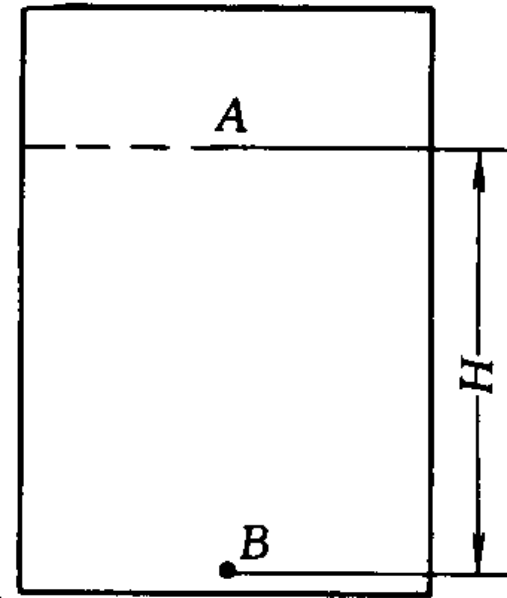
密闭容器：

A、B两点的垂直高度与密闭容器中两点的压差 Δp 成正比。

敞口容器：

A、B两点的垂直高度与B点的表压 p 成正比。

通过测量 p 或 Δp 将液位测量转化为压力测量，间接测量液位。

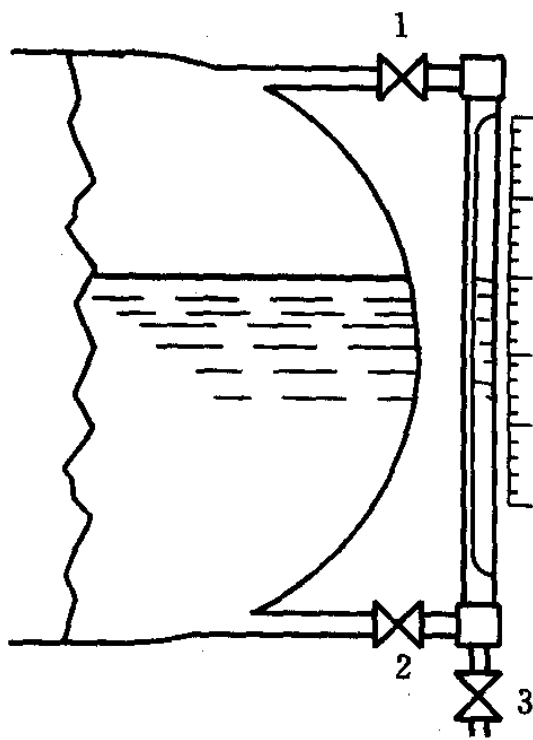


■ 3.7 液位测量

2. 静压式液位计的结构

(1) 玻璃管液位计：

利用连通器的原理制成，通过玻璃管来显示液柱高度，直接观察液位。

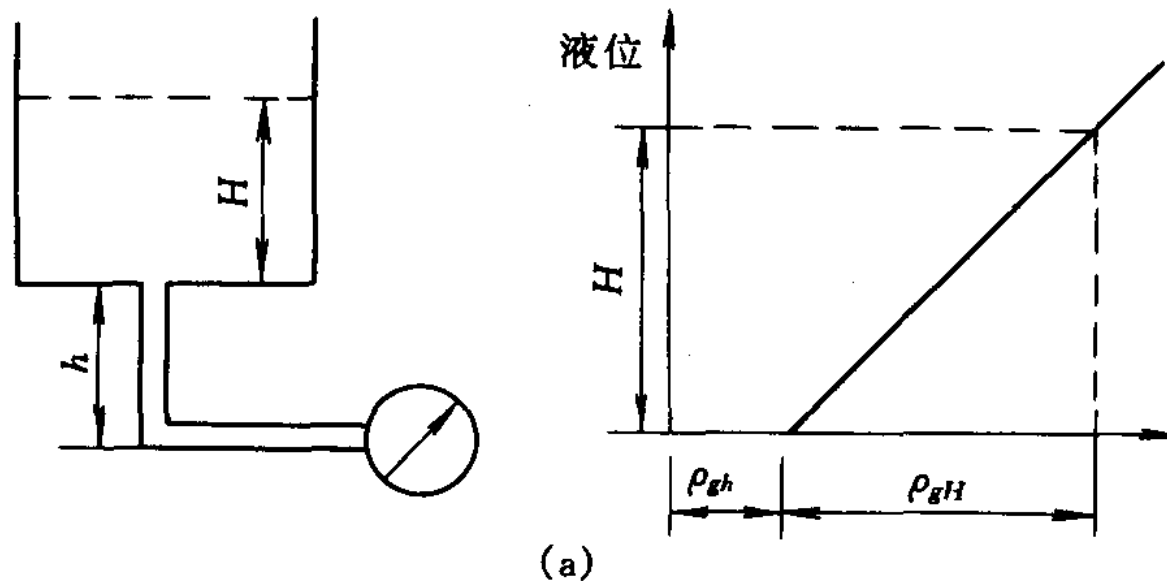


■ 3.7 液位测量

(2) 压力式液位计

利用测压仪表（表压）来测量液位。

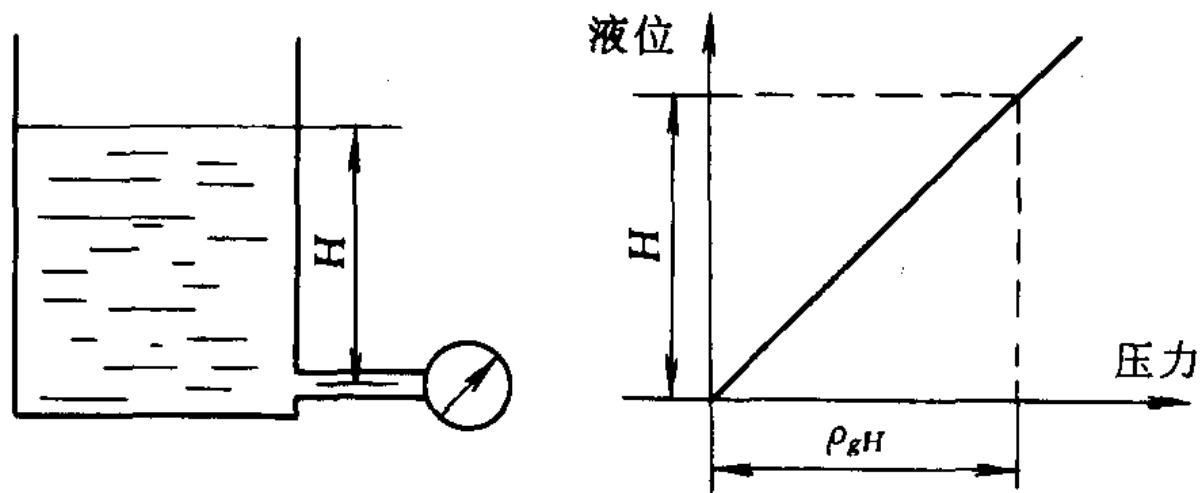
适用范围：敞口容器



$$p = \rho g H + \rho g h$$

$$p = \rho g H + C$$

■ 3.7 液位测量



$$p = \rho g H$$




■ 3.7 液位测量

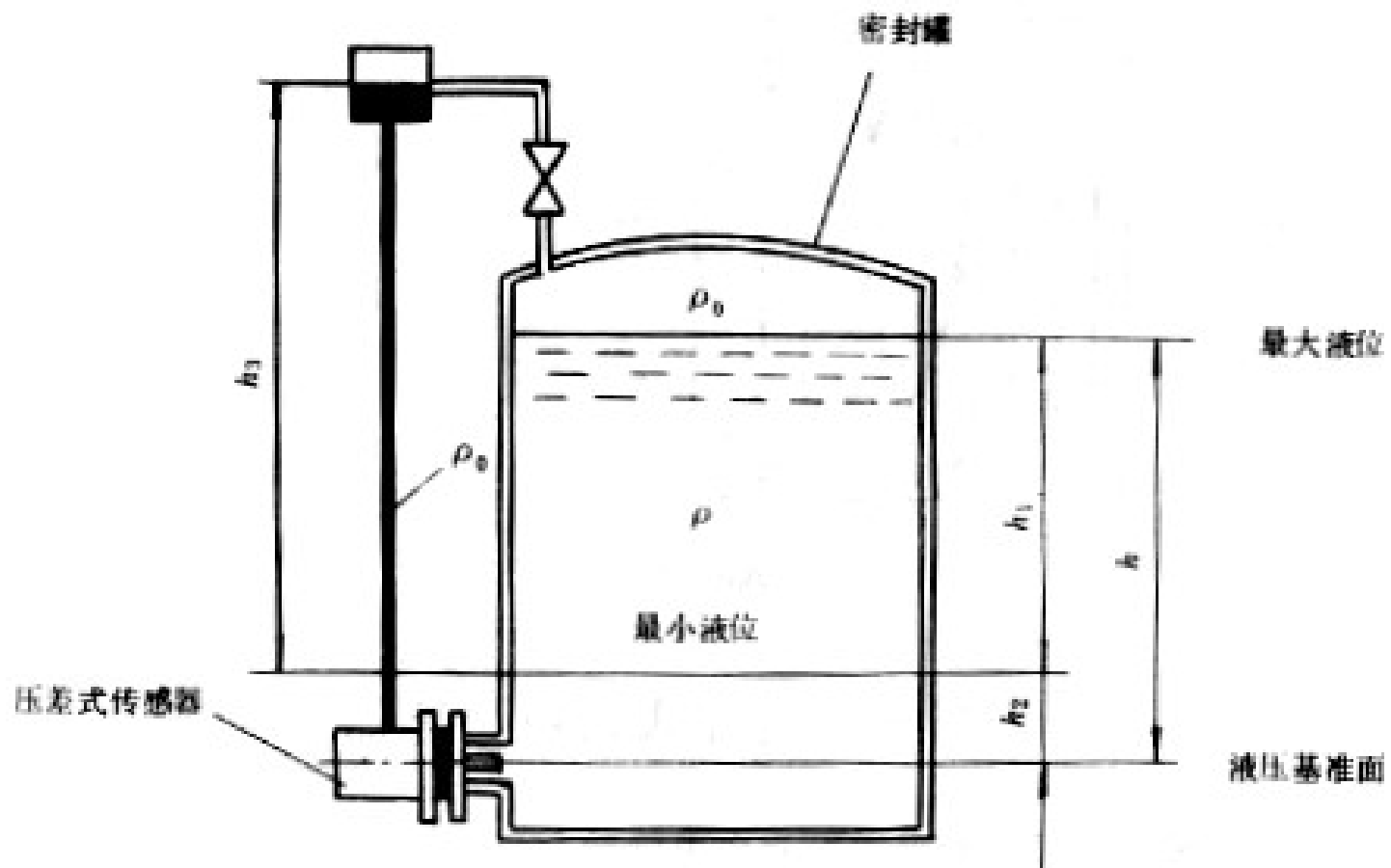
(3) 压差式液位计

对于密闭式容器，当液位变化时，液面处的气压也随之发生变化。此时气压对压力计指示有影响，只能用压差计来测量气、液两相的压差。

压差大小通过气动或电动差压变送器传送，并转化为电信号，最终显示出液位的大小及其变化。

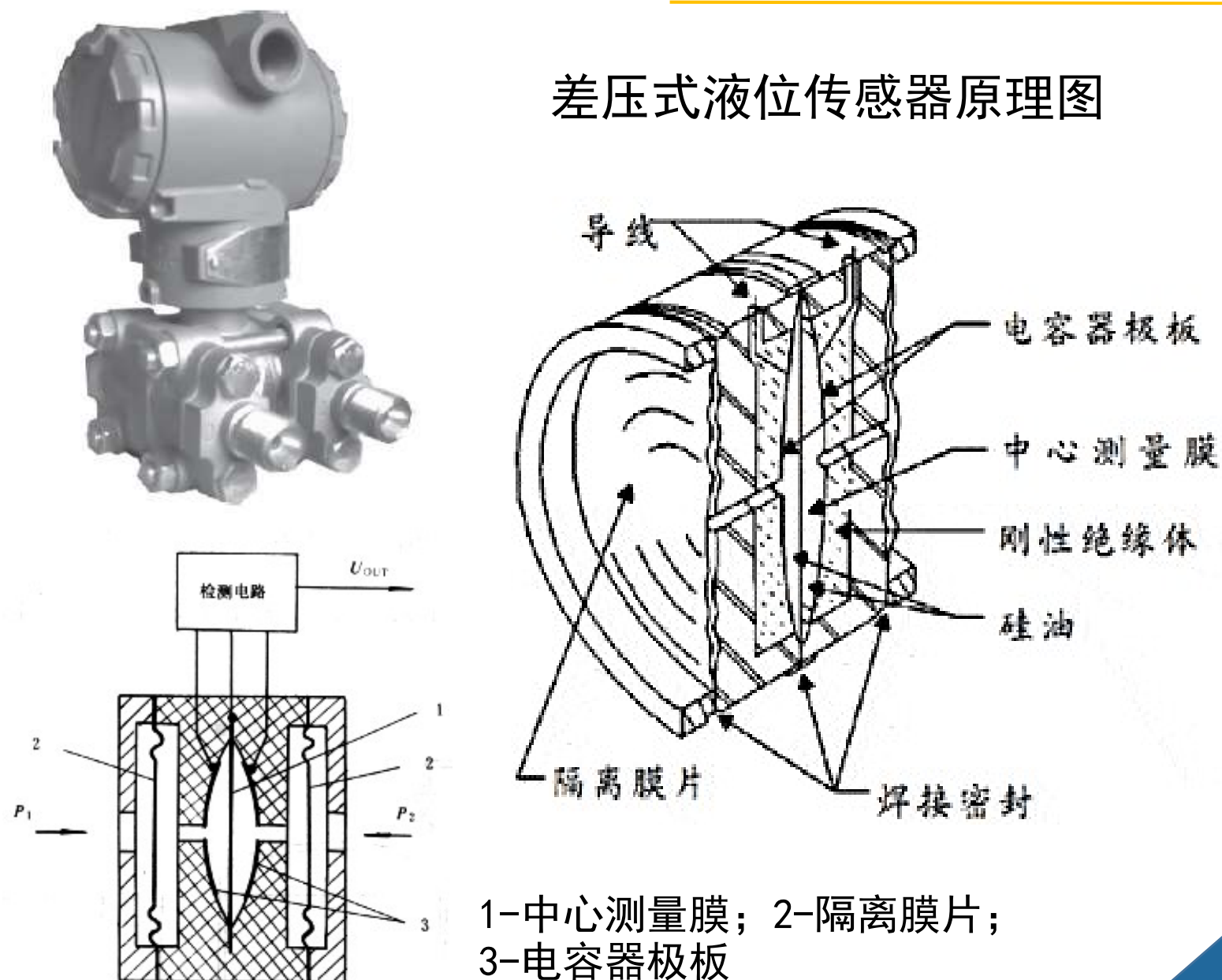


■ 3.7 液位测量

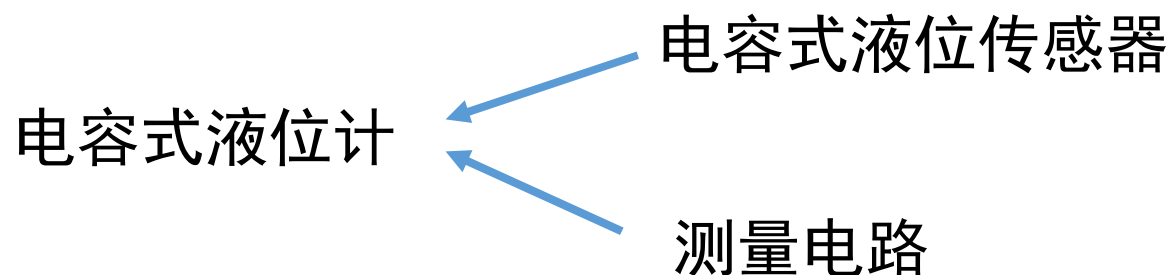


■ 3.7 液位测量

差压式液位传感器原理图



三. 电容式液位计



特点：

传感部件结构简单，动态响应快，能够连续、及时地测量液位的变化。

适用于各种导电、非导电液体的液位测量。

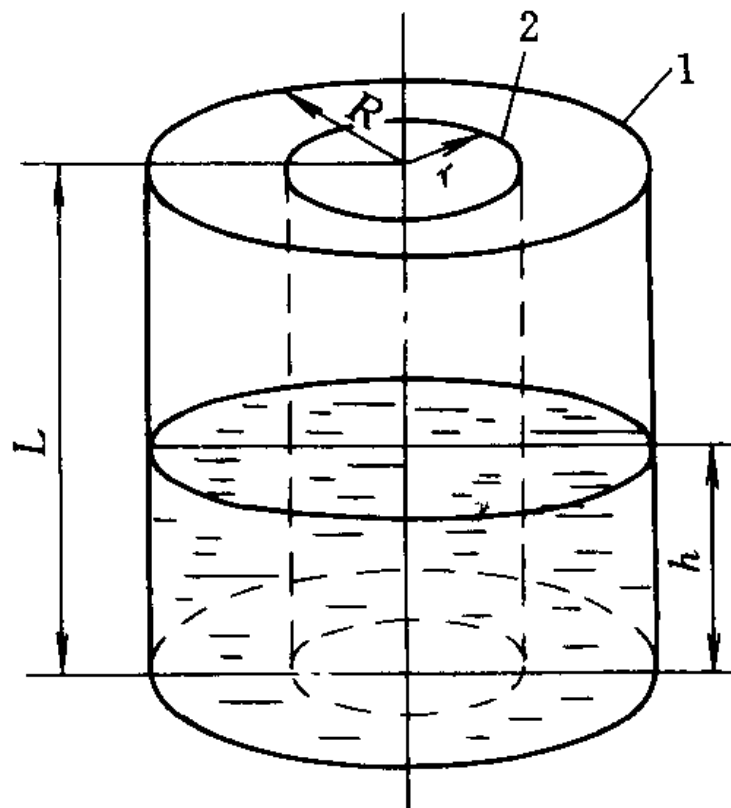
■ 3.7 液位测量

1. 电容法测液位原理

电容器由两个同轴的金属圆筒组成，圆筒半径分别为 R 、 r ，高为 L 。

当两筒之间充满介电常数为 ε 的介质时，则电容量为：

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon L}{\ln(R/r)}$$



■ 3.7 液位测量

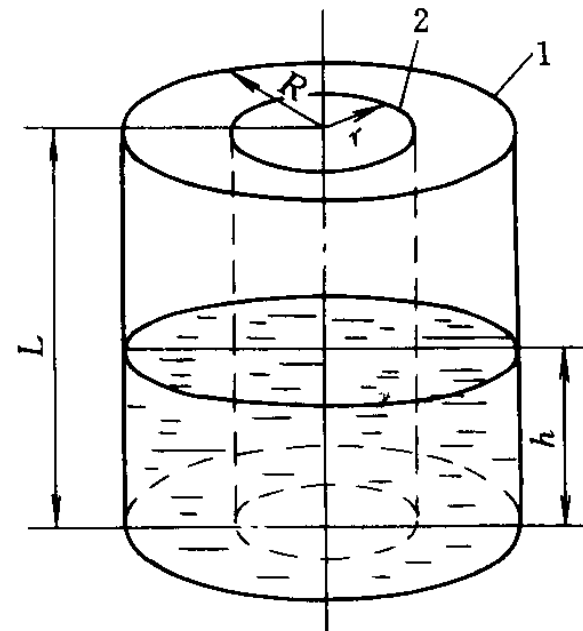
若圆筒电极的一部分被介电常数为 ε_1 ($\varepsilon_1 > \varepsilon$)的另一种介质充满，电容量将发生变化：

$$C = \frac{2\pi\varepsilon(L-h)}{\ln(R/r)} + \frac{2\pi\varepsilon_1 h}{\ln(R/r)} = \frac{2\pi\varepsilon L}{\ln(R/r)} + \frac{2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon)h}{\ln(R/r)}$$

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon L}{\ln(R/r)}$$

两式相减：

$$\Delta C = \frac{2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon)h}{\ln(R/r)}$$



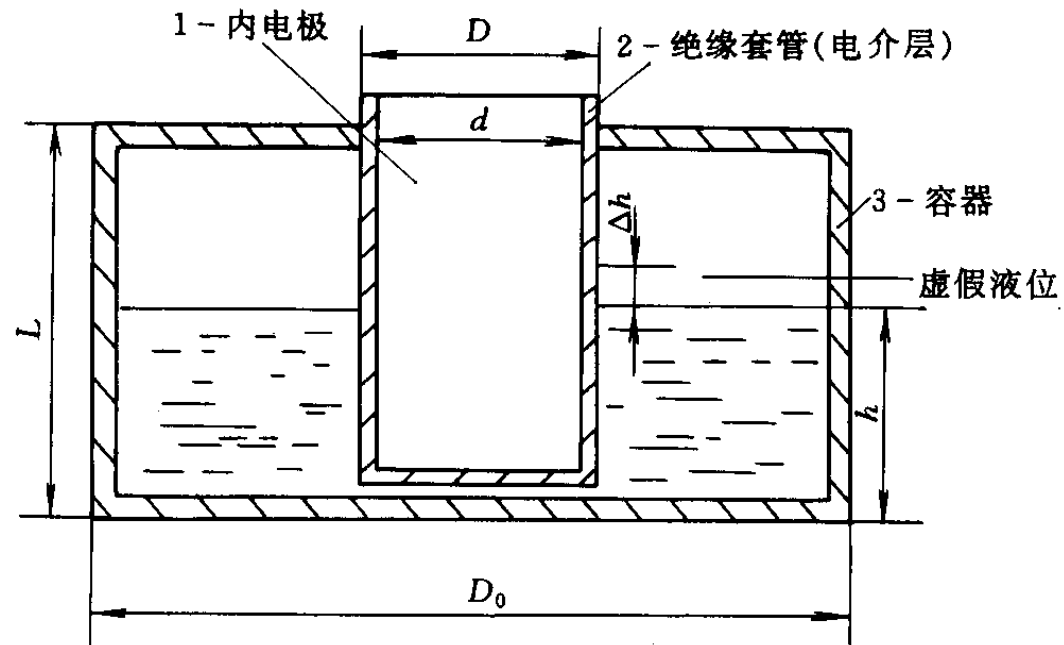
■ 3.7 液位测量

$$\Delta C = \frac{2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon)h}{\ln(R/r)}$$

在 ε 、 ε_1 、 R 、 r 均为常数时，电容变化量 ΔC 与液位高度 h 成正比。

当测得电容变化量后，即可得到液位高度 h 的大小。

2. 导电液体电容液位计

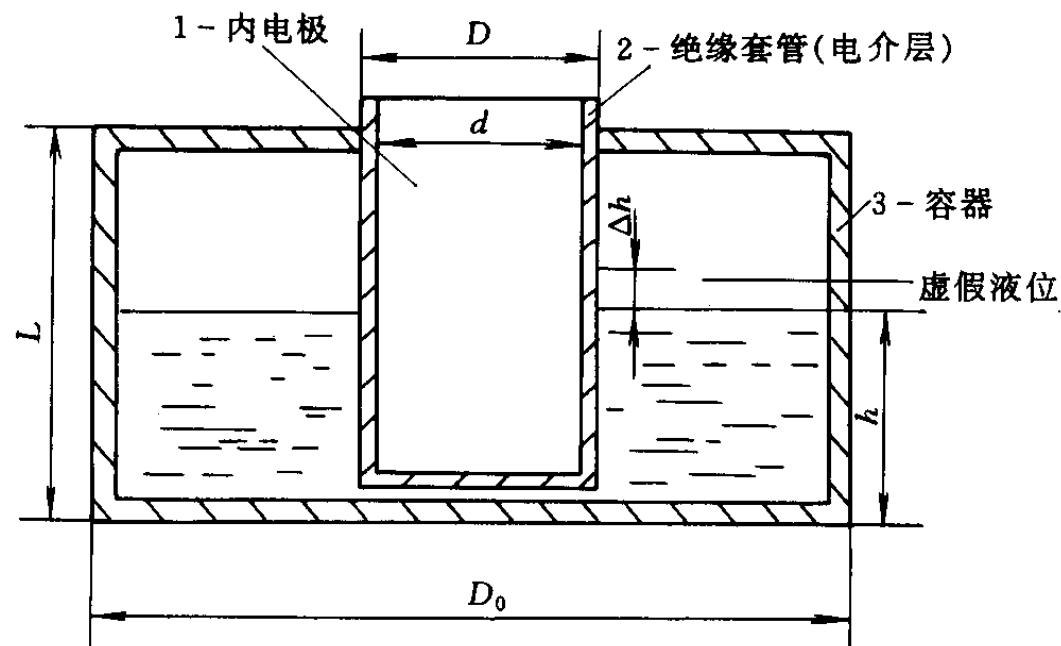


1—金属内电极，2—外套聚四氟乙烯塑料套管；

ε_1 —设绝缘套管的介电常数；

ε_2 —容器内气体的等效介电常数。

■ 3.7 液位测量



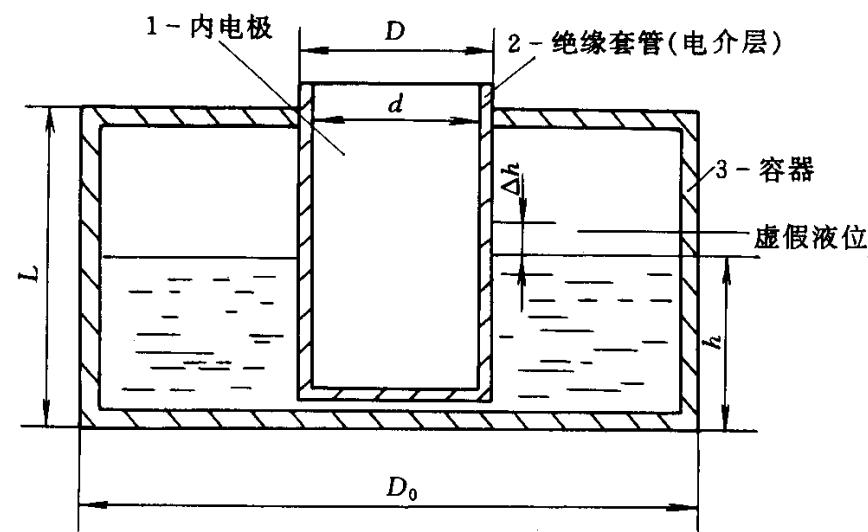
当容器内没有液体时, $h=0$, 金属容器壁作为外电极, 电容量为:

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_2 L}{\ln(D_0 / d)}$$

■ 3.7 液位测量

当容器中液体高度为 h 时，因为液体导电，外电极就应该是液体本身，直径等于绝缘套管的外直径 D 。而未被液体浸润的地方外电极仍为容器。此时，电容大小为：

$$C = \frac{2\pi\epsilon_2(L-h)}{\ln(D_0/d)} + \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln(D/d)}$$
$$= \left(\frac{2\pi\epsilon_1}{\ln(D/d)} - \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln(D_0/d)} \right) h + C_0$$



■ 3.7 液位测量

上式可以写成：

$$h = KC - KC_0$$

$$K = \frac{1}{\frac{2\pi\varepsilon_1}{\ln(D/d)} - \frac{2\pi\varepsilon_2}{\ln(D_0/d)}}$$

如果 $D_0 \gg d$, $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$

$$K = \frac{\ln(D/d)}{2\pi\varepsilon_1}$$



■ 3.7 液位测量

由此可以定义电容式液位计的灵敏度：

$$S = \frac{1}{K} = \frac{2\pi\varepsilon_1}{\ln(D/d)}$$

当 ε_1 越大，绝缘层越薄，灵敏度越高

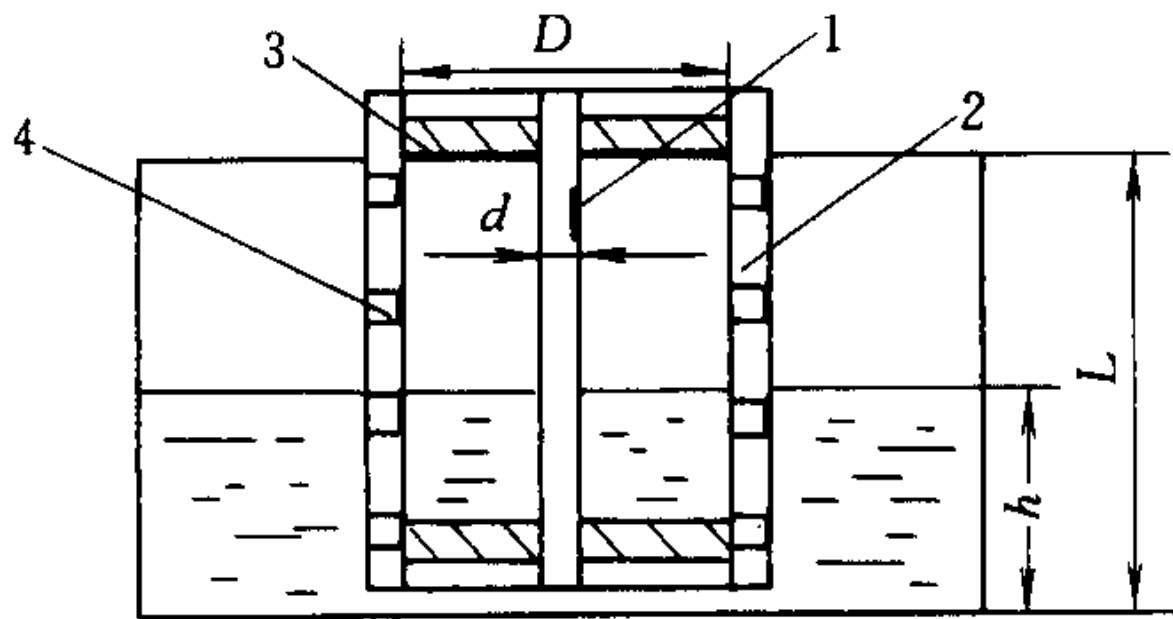


■ 3.7 液位测量

3. 非导电介质电容液位计

非导电介质电容液位计有专门的外电极。

为了保证介质流动顺畅，在外电极上开了很多小孔。



- 1—内电极
- 2—外电极
- 3—绝缘套
- 4—通液孔

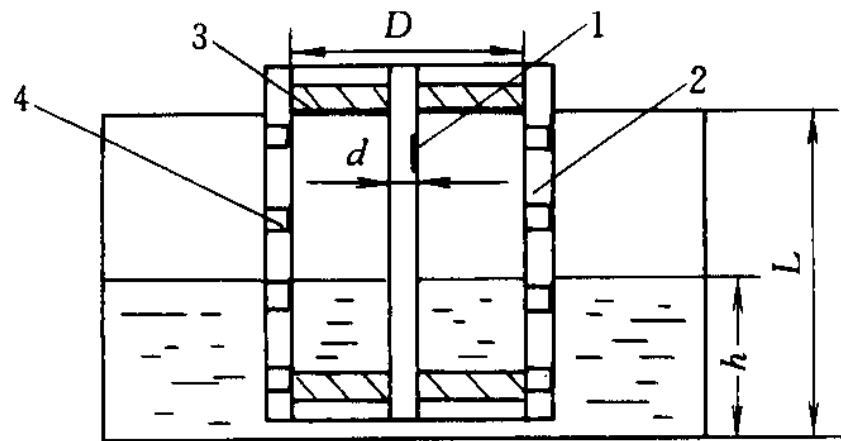
■ 3.7 液位测量

设：空气介电常数为 ε_0 ，液体介电常数为 ε_1

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0(L-h)}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\varepsilon_1 h}{\ln(D/d)} = \left(\frac{2\pi\varepsilon_1}{\ln(D/d)} - \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(D/d)} \right) h + C_0$$

$$C = \left[\frac{2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{\ln(D/d)} \right] h + C_0$$

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln(D/d)}$$



测出电容量C，即可计算出液位高度 h 。

当 $\varepsilon_1 - \varepsilon_0$ 越大， D/d 值越接近于1时，灵敏度越高。

四. 超声式液位传感器

超声波是机械波的一种。超声波的频率高于20kHz，由于波长短，绕射现象小，且方向性好，能定向传播，超声波在传播过程中衰减很小，超声波在工业和医学领域有着广泛的应用。



1. 声波的分类及特点

声波按频率的高低可分为：

次声波： $f < 20\text{Hz}$

声波： $20\text{Hz} \leq f \leq 20\text{kHz}$

超声波： $f > 20\text{kHz}$

特超声波： $f \geq 10\text{MHz}$ 。






■ 3.7 液位测量

振荡源在介质中可产生三种形式的振荡波：

横波——质点振动方向垂直于传播方向的波，横波
只能在固体中传播；

纵波——质点振动方向与传播方向一致的波，纵波
能在固态、液体和气体中传播；

表面波——质点振动介于纵波与横波之间，沿表面
传播的波，表面波随深度的增加而衰减快。



2. 超声波的传播

各种介质对声波的传播都呈现一定的阻抗，声阻抗与介质的密度及弹性有关。

液体的声阻抗比空气的大两千多倍；
金属的声阻抗比水的又大十多倍到几十倍。

声波作用到两种介质的分界面上时，若两种介质的声阻抗相差很大，声波就会从分界面上反射回来，只剩一小部分能透过分界面继续传播。

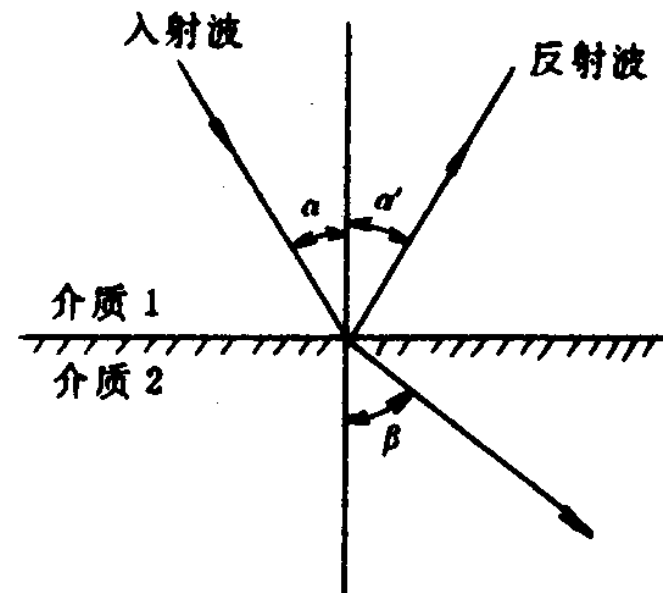


■ 3.7 液位测量

设： λ —透射系数；
 μ —反射系数；
 m —两种介质的声阻抗之比。

$$\lambda = \frac{4}{m + \frac{1}{m} + 2}$$

$$\mu = \frac{m + \frac{1}{m} - 2}{m + \frac{1}{m} + 2}$$



超声波的反射和折射

■ 3.7 液位测量

无论声波是从阻抗高的介质向阻抗低的介质传送，或按相反方向传送， λ 和 μ 的关系式都一样。

若 $m=1$ 时，表明两种介质的声阻抗相等，相互传播才能完全透过。

$$\lambda = \frac{4}{m + \frac{1}{m} + 2}$$

$$\mu = \frac{m + \frac{1}{m} - 2}{m + \frac{1}{m} + 2}$$

此时 $\lambda = 100\%$ ， $\mu = 0$ 。

3. 超声波换能器

发射超声波的换能器和接收超声波的换能器都是利用压电元件构成的。

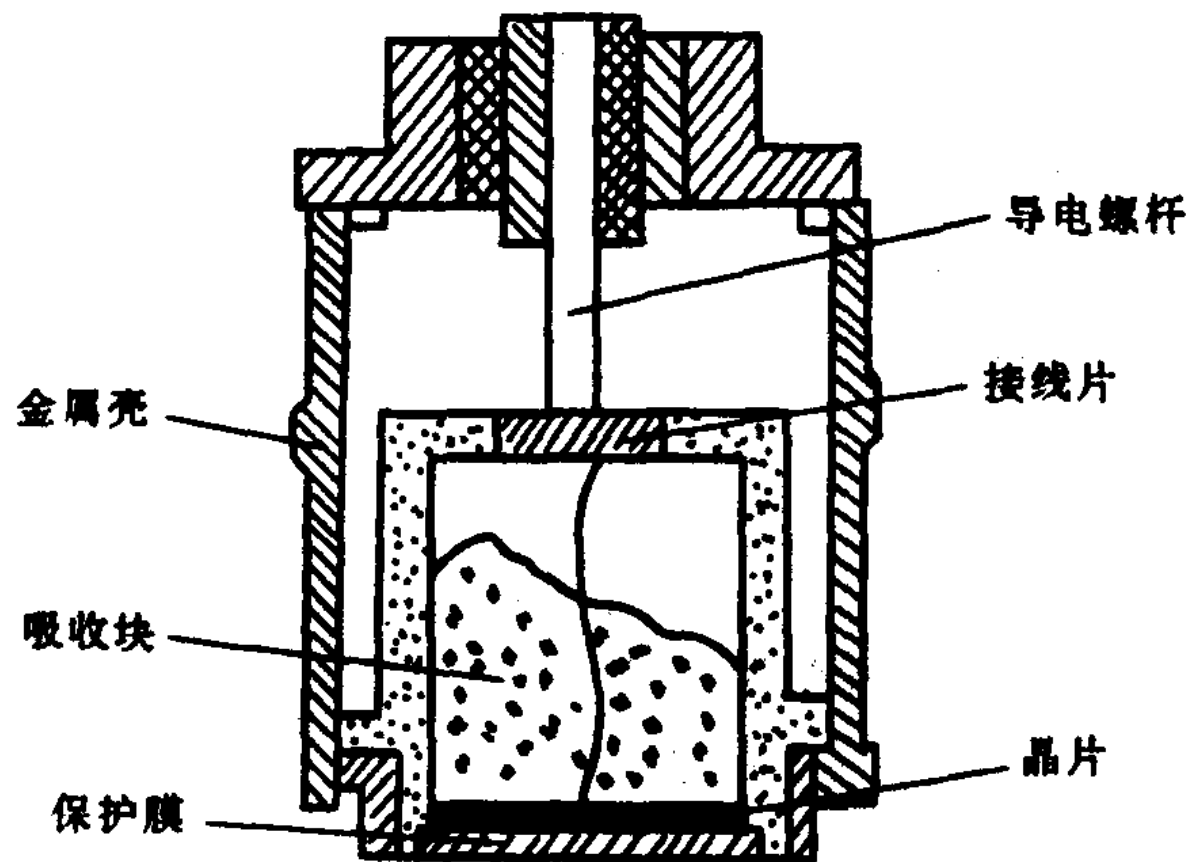
压电元件采用锆钛酸铅 (PZT) 压电陶瓷。

发射超声波时利用逆压电效应，

接收超声波时利用正压电效应 。



压电式超声波探头结构图



■ 3.7 液位测量

4. 窄缝式超声波液位开关(透射式)

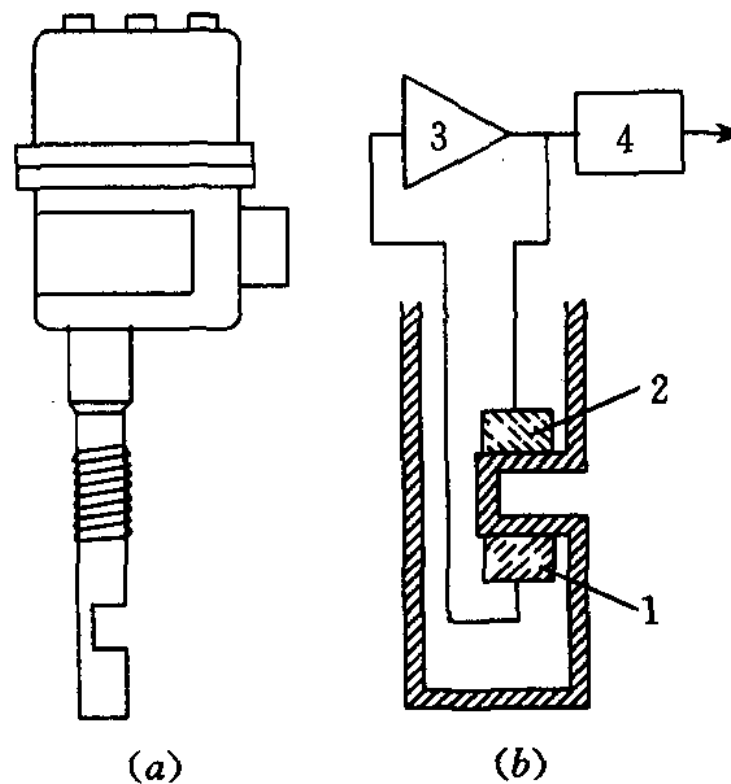
窄缝的两面内侧有压电换能器1和2。

1--接收；

2--发射；

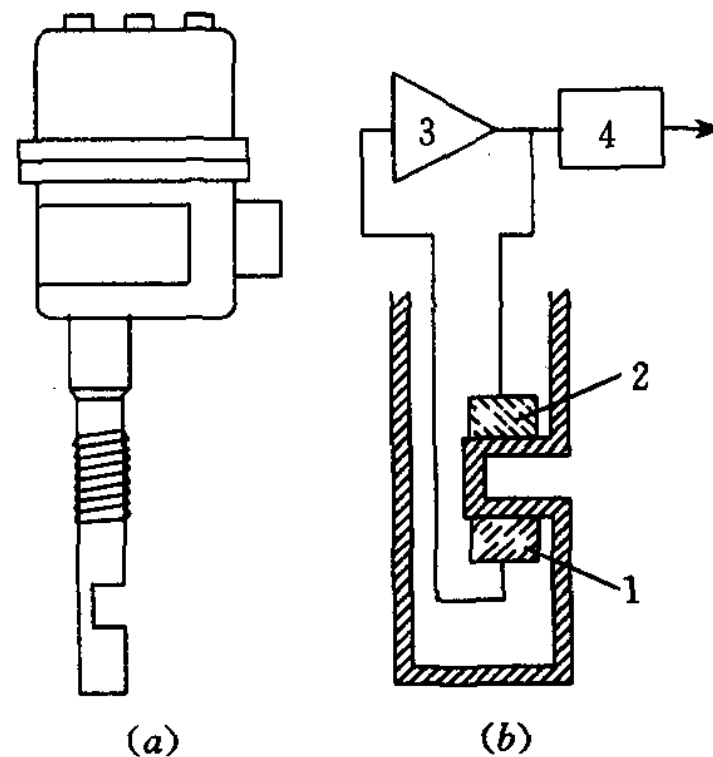
3--放大电路，

4--功率放大电路。

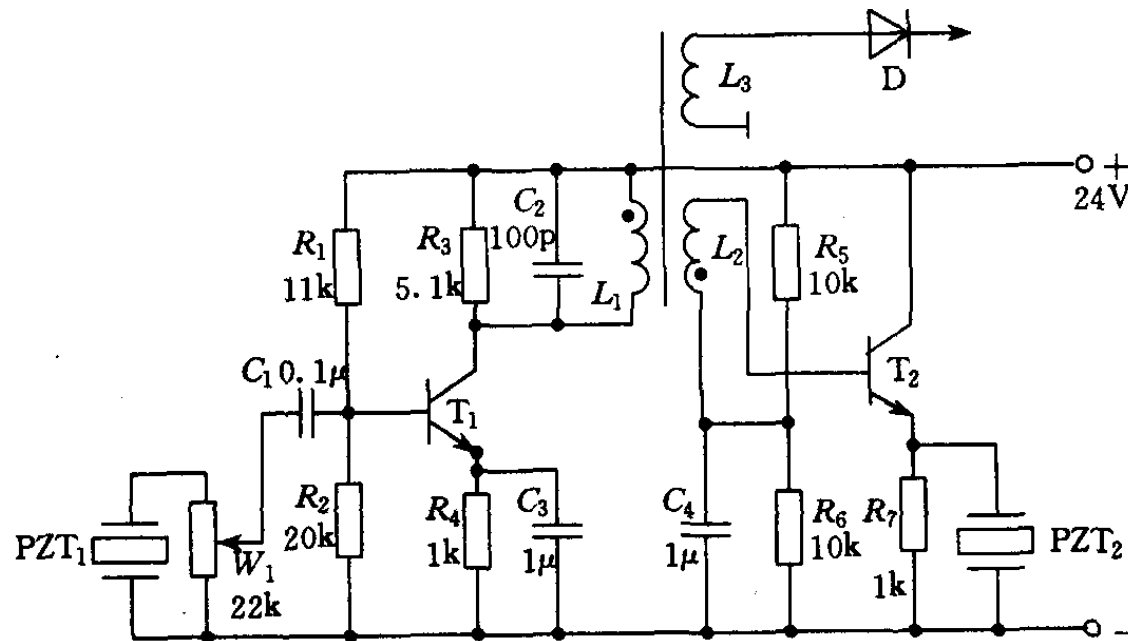


■ 3.7 液位测量

- 当窄缝被液体浸没时，超声波的能量足以透过窄缝被接收换能器检测，经过放大后供给发射换能器，维持振荡。
- 液位下降后窄缝暴露在空气中，阻抗显著变小，大部分声波被反射，接收到的声能太少不足以维持振荡，输出信号改变。



■ 3.7 液位测量



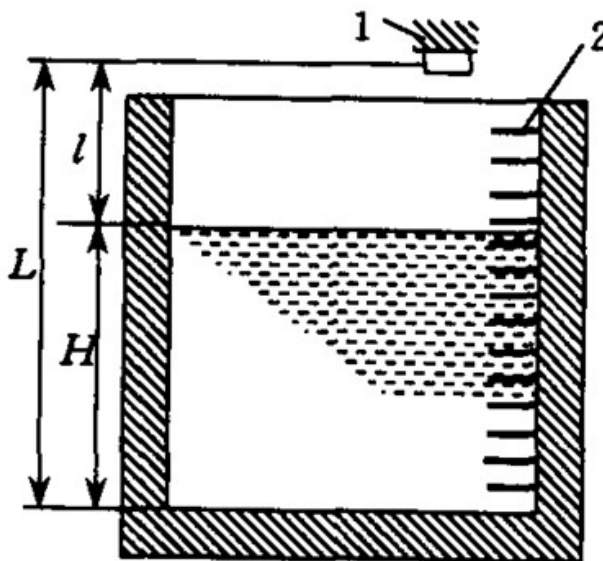
接收元件PZT₁，在超声波形成的交变压力作用下，产生交流电压，经晶体管T₁放大之后作用在变压器原边L₁上。L₁与电容C₂并联起选频作用，变压器副边L₂的电压经过射极输出晶体管T₂驱动发射元件PZT₂。在相位关系满足正反馈的条件下，如透过窄缝的超声波足够强，就会持续不断地振荡。这时变压器的另一个副边L₃将有交流输出，经过二极管D检波及其后的功率放大电路，必然能输出开关信号。

■ 3.7 液位测量

5. 气介式超声液位传感器(反射式)

连续测量液位时，发射换能器发出超声脉冲，到达液面后反射回来由接收换能器接收，根据声波往返时间判断液位(利用超声测距原理)。

发射和接收由同一换能器担任，先由它发射，随即转为接收。



■ 3.7 液位测量

换能器装在液面以上的气体介质中垂直向下发射和接收，则称为“气介式”。

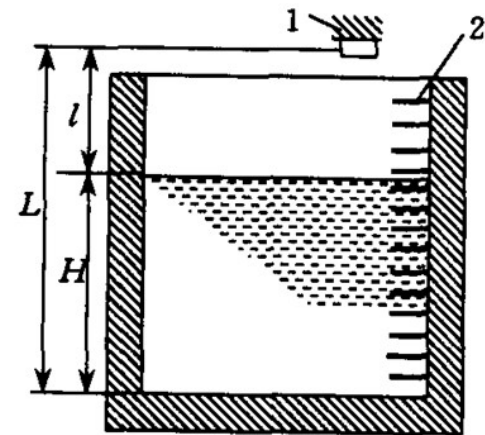
已知声波在空气中的传播速度为 c ，在测得声波往返时间 t 之后，利用式

$$l = \frac{ct}{2}$$

求出换能器至液面的距离 l 。

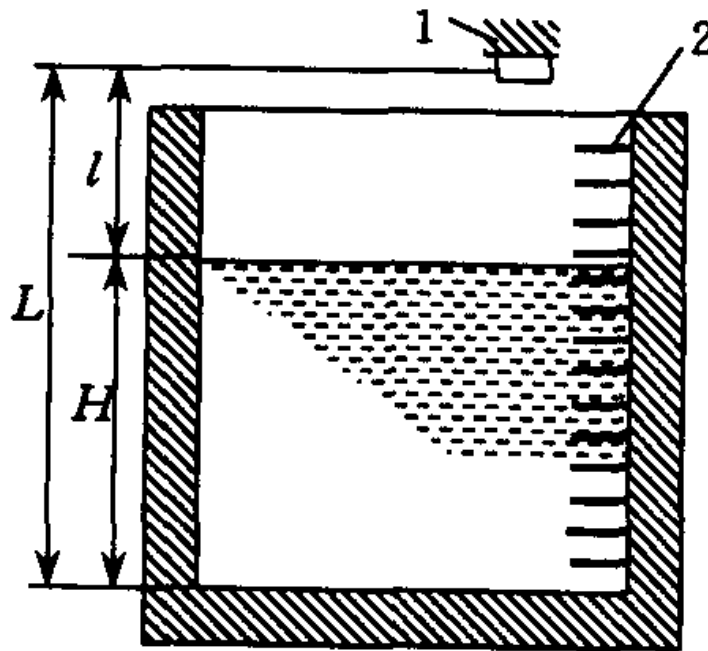
从已知的换能器安装高度 L （自液位为零的基准面算起），便可求出当时的液位 H ，即

$$H = L - l$$

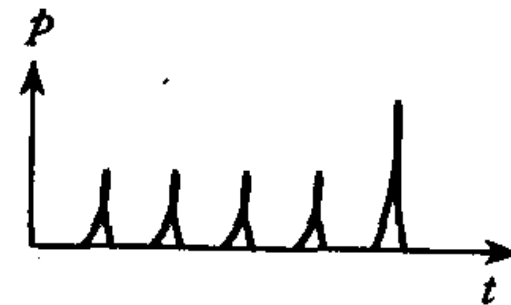


■ 3.7 液位测量

由于声波在气体介质中的传播速度受温度和压力的影响，并非常数，给测量带来了困难。因此采用以下办法进行测量。



(a)



(b)

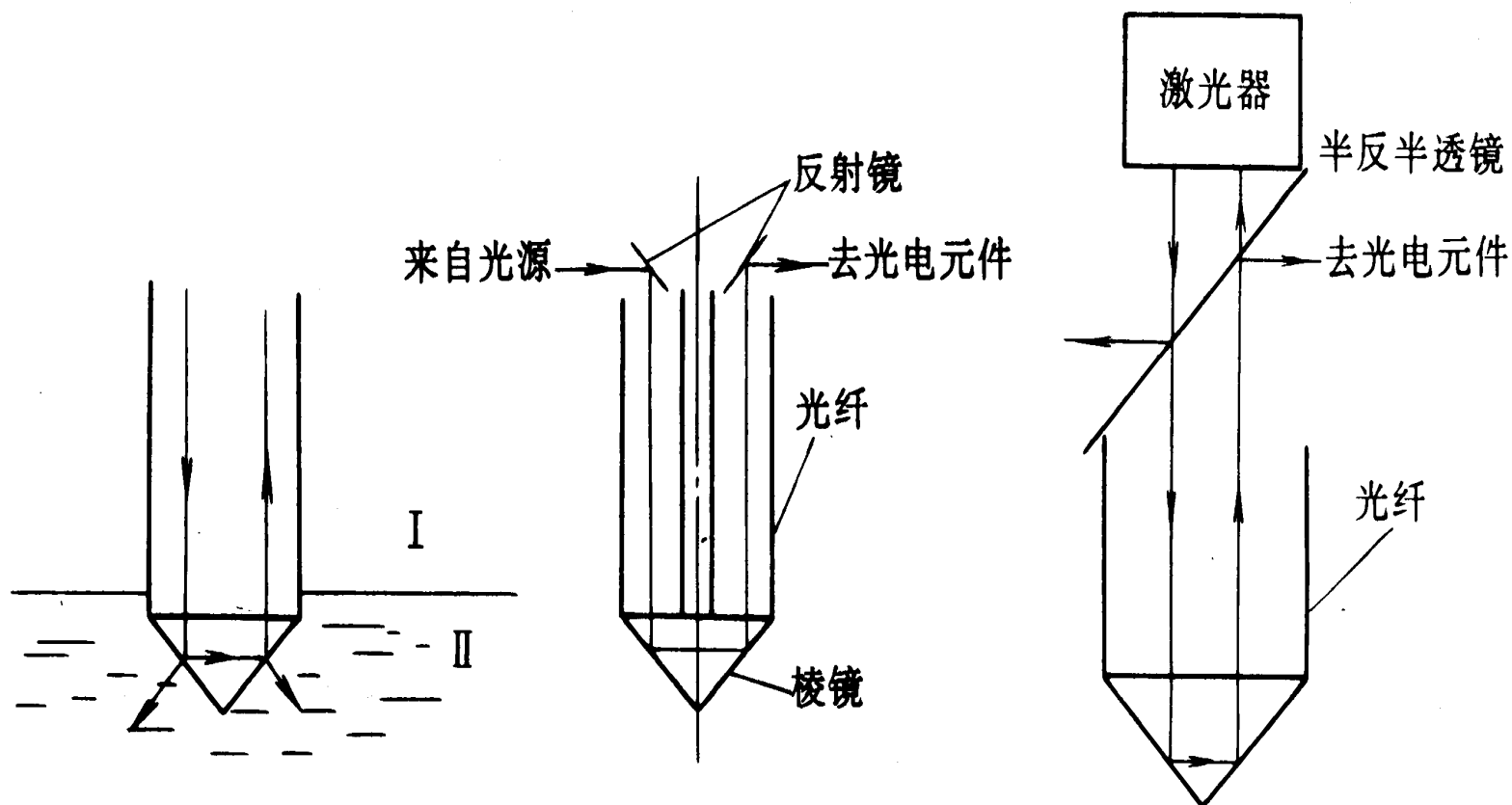
1-换能器，2-反射板

五. 光纤液位计

光纤具有绝缘性好，防暴性好，不会产生火花、高温、漏电等不安全因素，耐腐蚀性好，体积小，易弯曲等特点，在工业上得到日益广泛的应用。



■ 3.7 液位测量



在两根石英光纤的端部粘上（或烧结加工而成）石英棱镜，其中一根与光源相连，另一根与光电元件相连。



■ 3.7 液位测量

由以上原理可知，光纤液位计可用于以下几种情况：

- 易燃易爆液体的液面报警；
- 不同介质分界面的测定；
- 监控液位，防止液体泄露。



六. 液位计的选用

- 仪表特性：

主要包括测量范围、测量精度、工作可靠性等

- 工作环境：

主要包括被测对象情况、液位计的放置情况等

- 输出方式：

主要包括是否连续测量、信号传递和显示等



■ 3.7 液位测量

表 3-6 液位计的分类与性能

<div>仪表种类</div> <div>比较项目</div>		直读式液位计		压力式液位计			浮力式液位计			电容式液位计	光纤式液位计
		玻璃管式液位计	玻璃板式液位计	压力式液位计	吹气式液位计	差压式液位计	带钢丝绳浮子式液位计	浮球式液位计	浮筒式液位计		
仪表特性	测量范围/m	<1.5	<3			20	20			2.5	
	测量精度					1%		1.5%	1%	2%	
	可动部件	无	无	无	无	无	有	有	有	无	有
	是否接触被测介质	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
输出方式	连续或间断测量或定点控制	连续	连续	连续	连续	连续	连续	连续定点	连续	连续定点	连续、定点、间断
	操作条件	现场直读	现场直读	远传仪表显示	现场目测	远传仪表显示	远传可记数	报警	指示记录	指示	远传报警
测量条件	工作压力 $10^4 / \text{Pa}$	<16	<40	常压	常压		常压	<16	<320	<320	
	工作温度 $/^\circ\text{C}$	100~150	100~150			-20~200		<150	<200	-200~200	
	防爆性	本质安全	本质安全	可隔爆	本质安全	可防爆	可隔爆	可隔爆、本质安全	可隔爆		本质安全
	对多泡沫、沸腾介质的适用性	精度过低	精度过低	适用	适用	适用		适用	适用		



本章结束

