

第三讲

压力检测仪表

第二章检测仪表

主要内容：

- 1.1 温度检测仪表
- 1.2 压力检测仪表
- 1.3 流量检测仪表
- 1.4 液位检测仪表
- 1.5 成分分析仪表

1.2 压力检测仪表

压力是重要的工业参数之一，正确测量和控制压力对保证生产工艺过程的安全性和经济性有重要意义。**压力及差压**的测量还广泛地应用在流量和液位的测量中。

1.2 压力检测仪表

主要研究内容：

- *压力单位及压力检测方法
- *常用压力检测仪表、压力变送器
- *压力表的选用

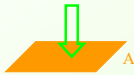
1.2 压力检测仪表

压力单位及压力检测方法

(1) 压力单位

工程技术上所称的“压力”实质上就是物理学里的“压强”，定义为均匀而垂直作用于单位面积上的力。其表达式为

$$P = \frac{F}{A}$$



式中: P ——压力;
 F ——作用力;
 A ——作用面积。

1.2 压力检测仪表

国际单位制 (SI) 中定义: 1 牛顿力垂直均匀地作用在 1 平方米面积上形成的压力为 1 “帕斯卡”。帕斯卡简称“帕”，单位符号为 Pa。

其他的压力单位“工程大气压” (即 kg/cm^2)、“毫米汞柱” (即 mmHg)、“毫米水柱” (即 mmH₂O)、1 巴(bar)、标准大气压 (即 atm) 等还在应用。

1 巴(bar)=100,000 帕(Pa)=10 牛顿/平方厘米

1 Mpa=10.19716 工程大气压

1.2 压力检测仪表

压力的单位是“帕斯卡”—— $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$
 $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$
 $1\text{工程大气压} = 1\text{kg}/\text{cm}^2 = 9.80665 \times 10^4\text{Pa}$
 $\approx 0.1\text{MPa}$

工程中压力的表示方式有:

表压、负压 (真空度)、差压、绝对压力。

工业中所用仪表的压力指示值, 大多数为表压和差压。

1.2 压力检测仪表

(2) 压力的表示方法

绝对压力 指作用于物体表面上的全部压力, 其零点以绝对真空为基准, 又称总压力或全压力, 一般用大写符号 P 表示。

大气压力 是指地球表面上的空气柱重量所产生的压力, 以 P_0 表示。

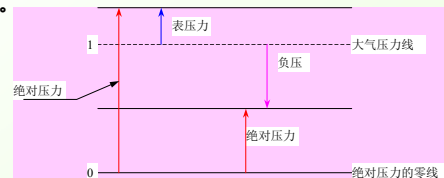


图1 绝对压力、表压力、负压之间的关系

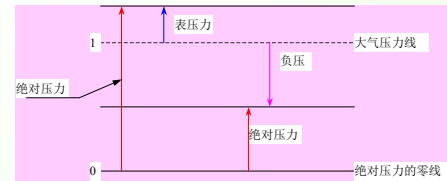
1.2 压力检测仪表

表压力 这是指绝对压力与大气压力之差，一般用 p 表示。测压仪表一般指示的压力都是**表压力**，**表压力**又称**相对压力**。

当绝对压力小于大气压力时，则表压力为**负压**，负压又可用**真空度**表示，**负压的绝对值称为真空度**。如测炉膛和烟道气的压力均是负压。

差压 任意两个压力之差称为**差压**。如静压式液位计和差压式流量计就是利用测量差压的大小来知道液位和流体流量的大小的。

1.2 压力检测仪表



1.2 压力检测仪表

绝对压力=表压力+大气压力
绝对压力=大气压力-真空度

例题：

大气环境中的压力为1.06bar, 某管道压力表的表压力为0.3bar,则其绝对压力为_____ bar,另外一个压力表测量真空泵中的压力, 真空度为0.3bar,则其绝对压力为_____ bar 。

1.2 压力检测仪表

弹性力平衡方法：基于弹性元件的弹性变形特性。

弹性元件受到被测压力作用而产生变形，而因弹性变形产生的弹性力与被测压力相平衡。**测出弹性元件变形的位移就可测出弹性力。**此类压力计有**弹簧管压力计、波纹管压力计、膜式压力计**等。

1.2 压力检测仪表

常用压力检测仪表

(1) 弹性式压力表

弹性式压力表是以弹性元件受压后所产生的弹性变形作为测量基础的。它结构简单，价格低廉，现场使用和维修都很方便，又有较宽的压力测量范围，因此在工程中获得了非常广泛的应用。

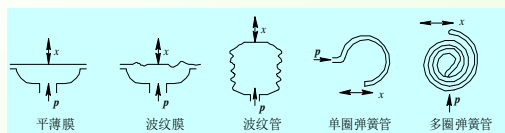
1.2 压力检测仪表

弹性元件

采用不同材料、不同形状的弹性元件作为感压元件，可以适用于不同场合、不同范围的压力测量。目前广泛使用的弹性元件有弹簧管、波纹管 and 膜片等。

1.2 压力检测仪表

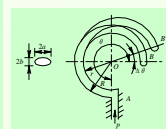
下图给出了一些常用弹性元件的示意图。其中波纹膜片和波纹管多用于微压和低压测量；单圈和多圈弹簧管可用于高、中、低压和真空度的测量。



1.2 压力检测仪表

弹簧管压力表

弹簧管压力表在弹性式压力表中更是历史悠久，应用广泛。弹簧管压力表中压力敏感元件是弹簧管。弹簧管的横截面呈非圆形（椭圆形或扁形），弯成圆弧形的空心管子，如图所示。管子的一端为封闭，作为位移输出端，另一端为开口，为被测压力输入端。当开口端通入被测压力后，非圆横截面在压力 p 作用下将趋向圆形，并使弹簧管有伸直的趋势而产生力矩，其结果使弹簧管的自由端由 B 移至 B' 而产生位移。



1.2 压力检测仪表

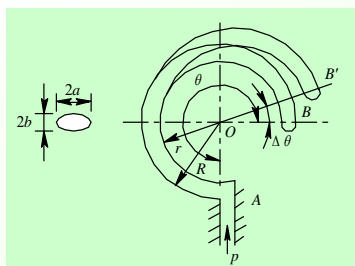
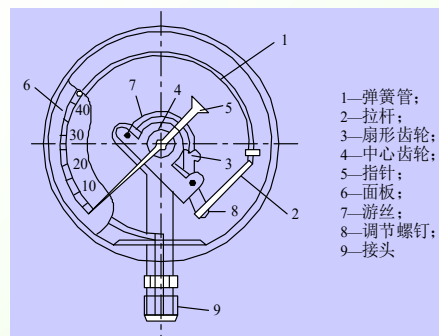


图1-17 单圈弹簧管结构

1.2 压力检测仪表



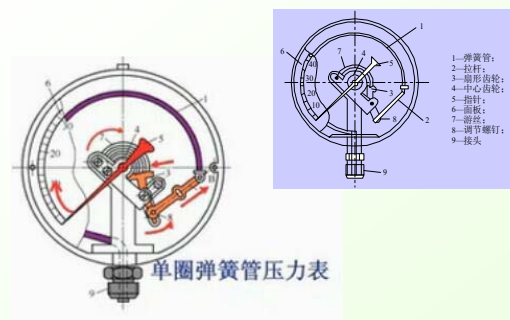
- 1—弹簧管;
- 2—拉杆;
- 3—扇形齿轮;
- 4—中心齿轮;
- 5—指针;
- 6—面板;
- 7—游丝;
- 8—调节螺钉;
- 9—接头;

1.2 压力检测仪表



单圈弹簧管压力表

1.2 压力检测仪表



单圈弹簧管压力表

1.2 压力检测仪表

压力传感器

压力传感器是能够检测压力并提供远传信号的装置。能够满足自动化系统集中检测显示和控制的要求。当压力传感器输出的电信号进一步变换成标准统一信号时，又将它称为**压力变送器**。

1.2 压力检测仪表

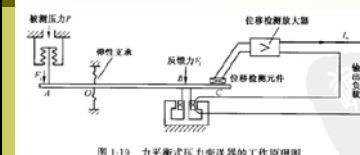


图 1-19 力平衡式压力变送器的工作原理图

这种闭环的力平衡结构的**优点**，首先在于当弹性材料的弹性模数温度系数较大时，**可以减少温度的影响**。此外，由于变换过程中位移量很小，弹性元件的受力面积能保持恒定，因而**线性度也比较好**。

由于位移检测放大器及其灵敏，杠杆实际上只要产生极微小的位移，放大器便有足够的输出电流形成反力矩与作用力矩相平衡。当杠杆处于平衡状态时，输出电流 I_0 正比于被测压力 P 。

1.2 压力检测仪表

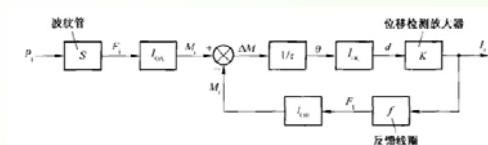


图 1-20 力平衡变送器的方块图

闭环传递函数：

$$I_0 = \frac{\frac{1}{\tau} l_{0c} K}{1 + \frac{1}{\tau} l_{0c} K f l_{0B}} S l_{0A} P_i$$

当开环增益很大，即： $\frac{1}{\tau} l_{0c} K f l_{0B} \geq 1 \Rightarrow I_0 = \frac{S l_{0A}}{f l_{0B}} P_i$

1.2 压力检测仪表

由此可知，这种变送器具有一切闭环系统的共同特点，即在开环增益足够大时，其输入量与输出量的关系只取决于输入环节及反馈环节的传递函数，而与正向通道环节的传递函数无关。

力平衡仪表虽然对弹性反力的变化不甚敏感，但对杠杆系统任何一处存在的摩擦力都十分敏感，因为摩擦力矩的引入相当于在比较点引入干扰，会直接引起误差，造成死区和变差。为此，力平衡仪表中支承点都使用弹簧钢片做成弹性支承，以避免摩擦力的引入。

在力平衡变送器中，只要测压元件的有效面积 S 能保持恒定，磁铁的磁场强度均匀稳定，力臂的长度不变，便可以得到较好的变化精度。

1.2 压力检测仪表

电测压力法

测量原理

利用转换元件（如某些机械和电气元件）直接把被测压力转换为电信号来进行测量的。

1. 弹性元件附加一些变换装置，使弹性元件自由端的位移量转换成相应的电信号，如电阻式、电感式、电容式、霍尔片式、应变式等；
2. 非弹性元件组成的快速测压元件，主要利用某些物体的某一物理性质与压力有关，如压电式等。

1.2 压力检测仪表

电容式差压（压力）变送器

当电容式差压变送器的一个被测压力是大气压时，就成为压力变送器。

电容式压力变送器是20世纪70年代初由美国公司研发。结构简单、过载能力强、可靠性好、精度高、体积小。

电容式压力变送器先将压力的变化转换为电容量的变化，然后用电路测电容。其输出信号是标准的4~20mA（DC）电流信号。

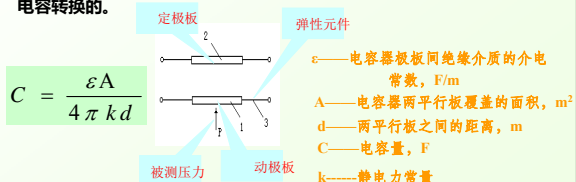
1.2 压力检测仪表

电测压力法

电容式测压原理

测量原理

采用变电容原理，利用弹性元件受压变形来改变可变电容器的电容量，然后通过测量电容量C便可以知道被测压力的大小，从而实现压力-电容转换的。



1.2 压力检测仪表

电容式差压变送器

(1) 测量部分

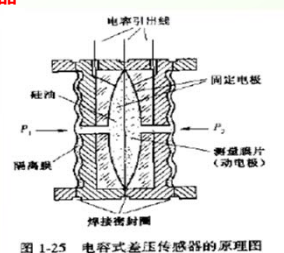


图 1-25 电容式差压传感器的原理图

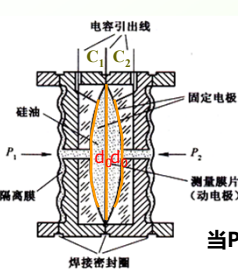
测量部分包括电容膜盒、高低压室及法兰组件等。

测量原理：将被测压力的变化转换成电容量的变化。

1.2 压力检测仪表

差压传感部件

$P_1 - P_2 = \Delta P \rightarrow$ 中心膜片变形位移 \rightarrow 电容量变化



$P_1 = P_2$ 时: $C_1 = C_2 = K_2 / d_0$

$$K_2 = \epsilon S / 4 \pi k$$

$P_1 > P_2$ 时:

测量膜片中心位移:

$$\Delta d = K_1 \Delta P$$

K_1 —弹性系数

当 P_2 是大气压时, 为压力传感部件。

1.2 压力检测仪表

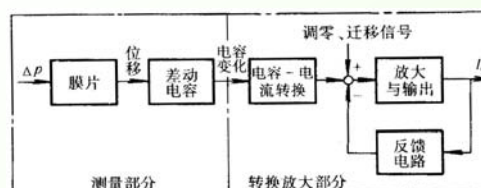
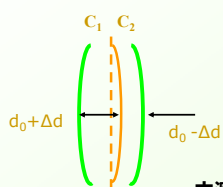


图2-29 电容式差压变送器构成框图

1.2 压力检测仪表

两个电容的电容量变为:

$$C_1 = \frac{K_2}{d_0 + \Delta d} \quad C_2 = \frac{K_2}{d_0 - \Delta d}$$



$$\text{有: } \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{K_1}{d_0} \Delta P$$

$$= K_3 \Delta P$$

$$K_3 = K_1 / d_0$$

由测量电路将电容变化量转换为电压。

1.2 压力检测仪表

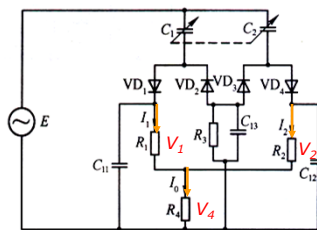
如图是一种测电容充放电电流的原理电路。

正弦波电压 E 加于差动电容 C_1 、 C_2 上, $R_1 \sim R_4$ 的阻抗都比 C_1 、 C_2 的阻抗小得多, 则流过 C_1 、 C_2 的半周期电流近似为:

$$I_1 = \frac{1}{C_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} I_0$$

$$= \frac{C_1}{C_1 + C_2} I_0$$

$$I_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} I_0$$



1.2 压力检测仪表

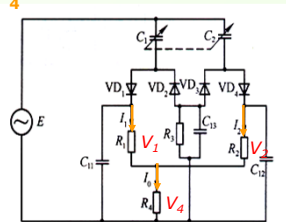
令 V_1 、 V_2 、 V_4 表示 R_1 、 R_2 、 R_4 的压降

因为: $V_1 = I_1 R_1$ 、 $V_2 = I_2 R_2$ 、 $V_4 = I_4 R_4$,

$$\text{则: } \frac{V_2 - V_1}{V_4} = \frac{C_2 R_2 - C_1 R_1}{(C_1 + C_2) R_4}$$

取 $R_1 = R_2 = R_4$, 得:

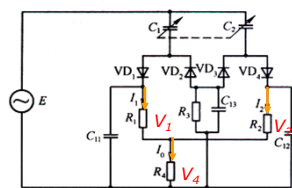
$$\frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} = \frac{V_2 - V_1}{V_4} = K_3 \Delta P$$



1.2 压力检测仪表

$$\frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} = \frac{V_2 - V_1}{V_4} = K_3 \Delta P$$

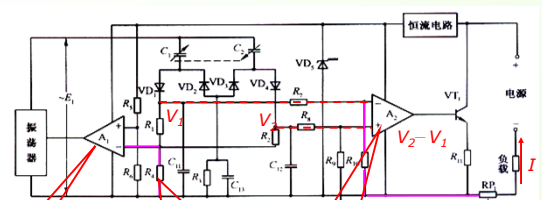
由上式可知, 当 $V_4 = I_0 R_4$ 不变时, 测出 $V_2 - V_1$, 则可知 ΔP



在实际电路中, 当差动电容 C_1 、 C_2 变化时, 用负反馈自动调节供电电压 E 的幅度, 使流过它们的电流之和 I_0 保持恒定。

1.2 压力检测仪表

如图为电容式压力变送器的原理线路。



- A_1 供给振荡器电源
- 通过负反馈保证 R_4 两端的电压恒定
- A_2 将 R_1 、 R_2 两端的电压相减
- RP_1 调整电流负反馈, 实现量程迁移

1.2 压力检测仪表

特点: 灵敏度高, 量程宽, 过载能力强。没有杠杆传动机构, 因而结构紧凑, 稳定性与抗振性好, 测量精度高, 可达0.2级。



电容差压变送器



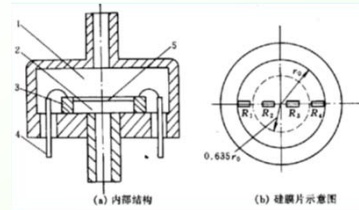
法兰式电容差压变送器

1.2 压力检测仪表

压阻式压力传感器（固态测压）

压阻元件是指在半导体材料的基片上用集成电路工艺制成的扩散电阻。它是基于**压阻效应**工作的，即当它受压时，其电阻值随电阻率的变化而变化。常用的压阻元件有**单晶硅膜片**以及在N型单晶硅膜片上扩散P型杂质的**扩散硅**等，也是依附于弹性元件而工作。

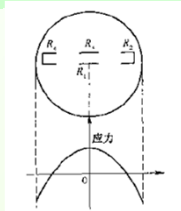
1.2 压力检测仪表



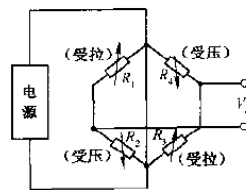
1—低压腔；2—高压腔；3—硅杯；4—引线；5—硅膜片

1.2 压力检测仪表

压阻元件受压时，其电阻值随电阻率的变化而变化。压力方向不同，则引起的电阻变化方向不同；电阻或增大或减小。



1.2 压力检测仪表



$$V_0 = V * \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = V * \left(\frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right)$$

1.2 压力检测仪表

由于半导体材料对温度的敏感性，温度漂移是这类传感器的主要问题。为解决这一问题，常在硅膜片上同时扩散专用的温度测量电阻，按扰动补偿的原则，进行温度补偿设计。



将差压、静压和温度同时测出，再送入微机系统经过运算处理后就可以得到修正后的被测差压值、静压值和温度值。

1.2 压力检测仪表

压阻式压力传感器的特点

- ①压阻式压力传感器的灵敏系数比金属应变式压力传感器的灵敏度系数要大50-100倍。有的时候压阻式压力传感器的输出不需要放大器就可直接进行测量。
- ②由于它采用集成电路工艺加工，因而结构尺寸小，重量轻。
- ③压力分辨率高，它可以检测出像血压那么小的微压。
- ④频率响应好，它可以测量几十赫的脉动压力。
- ⑤由于传感器的力敏元件及检测元件制在同一块硅片上，所以它工作可靠，综合精度高，且使用寿命长。
- ⑥由于采用半导体材料硅制作，传感器对温度比较敏感，如不采用温度补偿，其温度误差较大。

1.2 压力检测仪表

智能式差压变送器

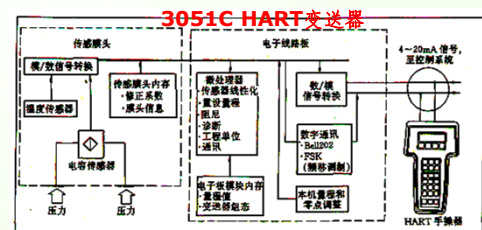
智能式差压变送器内部电路装有CPU芯片，有很强的数字处理能力。除检测功能外，还具有静压补偿、计算、显示、报警、控制、诊断等功能。与智能式执行器配合使用，可就地构成控制回路，并随时与上位机通讯。

3051C HART变送器

3051型差压变送器是美国罗斯蒙特公司的一种智能型两线制变送器，有电容式和压电式两种。

1.2 压力检测仪表

传感器部分与模拟仪表一样，测量信号经A/D转换后送微处理器处理。输出符合HART协议的数字信号叠加在由D/A输出的4~20mA信号线上。



1.2 压力检测仪表

可同时用于**数字控制系统和模拟控制系统**。将数据设定器跨接在信号线上，可以读取变送器的输出信号，并对变送器进行组态。

1.2 压力检测仪表

压力表的选择

(1) 仪表类型的选择

- 1、**满足工艺的要求**。例如是否需要远传、自动记录或报警；
- 2、**被测介质的物理化学性能**（诸如腐蚀性、温度高低、粘度大小、脏污程度、易燃易爆性能等）是否对测量仪表提出特殊要求；
- 3、**现场环境条件**（诸如高温、电磁场、振动及现场安装条件等）对仪表类型有否特殊要求等。

1.2 压力检测仪表

根据工艺要求正确选用仪表类型是保证仪表正常工作及安全生产的重要前提。

例如普通压力计的弹簧管大多采用**铜合金**，而氨用压力计弹簧管的材料却都采用**碳钢**，不允许采用铜合金。因为氨气对铜的腐蚀极强，普通压力计用于氨气压力测量时很快就要损坏。

又如氧气压力计与普通压力计在结构和材质上完全相同，**但是氧用压力计禁油**。因为油进入氧气系统易引起爆炸。所以，氧用压力计校验时，不用变压器油作为工作介质。

1.2 压力检测仪表

(2) 仪表测量范围的确定

为了合理、经济使用仪表，**仪表的量程不能选得太大，但为了保证测量精度，一般被测压力的最小值不低于仪表满量程的1/3为宜。**

同时为了延长弹性元件的使用寿命，**避免弹性元件因长期受力过大而永久变形**，压力计的上限值应该高于被测压力的最大值（被测压力的最大值是压力计上限值的1/2~1/3或者压力计的上限值是被测压力最大值的2~3倍），留有余量。



1.2 压力检测仪表

(3) 仪表精度的选取

仪表精度是根据工艺生产上所允许的最大测量误差来确定的。不能认为选用的仪表精度越高越好，应在满足工艺要求的前提下，尽可能选用精度较低、价廉耐用的仪表。

例题

某台压缩机的出口压力范围为25 ~ 28MPa，测量绝对误差不得大于1MPa。工艺上要求就地观察，并能高低限报警，试正确选用一台压力表，指出型号、精度与测量范围。要求条件为：

被测脉动压力25 ~ 28MPa，测量绝对误差≤1MPa，就地观察、高低限报警。

1.2 压力检测仪表

解：

脉动压力对仪表寿命影响很大，故选择仪表的上限值为：

$$p_1 = p_{\max} \times 2 = 28 \times 2 = 56 \text{ MPa}$$

若选压力表的测量范围为0 ~ 60MPa

则：25MPa / 60MPa > 1/3

被测压力的最小值不低于满量程的1/3，下限值也符合要求。

1.2 压力检测仪表

另外，根据测量误差的要求，可算得对仪表允许误差的要求为：

$$\frac{1}{60} \times 100\% = 1.67\%$$

故选精度等级为1.5级的仪表可以满足误差要求。

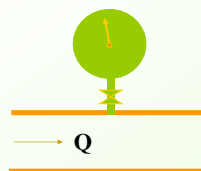
答：根据就地观察及能进行高低限报警的要求，可选用YX—150型电接点压力表，测量范围为0 ~ 60MPa，精度等级为1.5级。

1.2 压力检测仪表

压力表的安装

压力计的安装正确与否，直接影响到测量结果的准确性和压力计的使用寿命。

1、测压点的选择



① 选在被测介质直线流动的管段部分，不要选在管路拐弯、分叉或死角处。

② 测量流体压力时，应使取压点与流动方向垂直，取压管内端面与设备内壁平齐，不应有凸出物或毛刺。

1.2 压力检测仪表

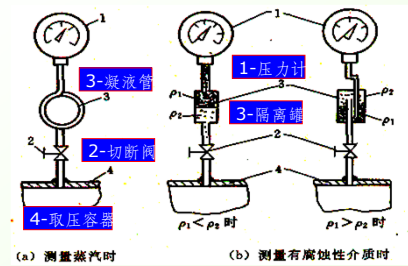
③ 测量液体压力时，取压点应在管道下部，使导压管内不积存气体；测量气体压力时，取压点应在管道上方，使导压管内不积存液体。

④ 取压口到压力计之间应装有切断阀，以备检修压力计时使用。切断阀应装在取压口附近。



1.2 压力检测仪表

测蒸汽压力时，应加装凝液管，如图(a)，以防止高温蒸汽直接与测压元件接触。对于有腐蚀性介质的压力测量，应加装有中性介质的隔离罐。



图(b)表示了被测介质密度 ρ_2 大于和小于隔离液密度 ρ_1 的两种情况。

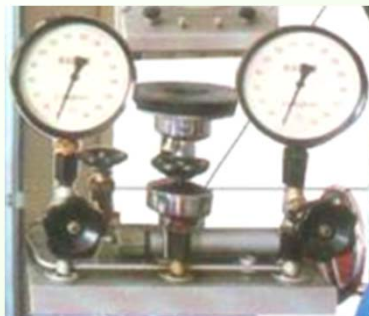
(a) 测量蒸汽时

(b) 测量有腐蚀性介质时

1.2 压力检测仪表

压力表的校验

- 1、用活塞式压力计的砝码校验。
- 2、用标准压力表校验。



1.2 压力检测仪表

变送器超时工作后需要保持稳定度：

大部分变送器在经过超时工作后会产生“漂移”，因此很有必要在购买前了解变送器的稳定度，这种预先的工作能减少将来使用中会出现的种种麻烦。

变送器的封装

变送器的封装，尤其往往容易忽略是它的机架，然而这一点在以后使用中会逐渐暴露出其缺点。

谢谢！