

第7章 压力检测技术



7.1 概述

7.2 压力检测仪表

7.3 压力检测仪表的选择与安装

7.1 概述

- 压力是工业生产过程中是重要的工艺参数之一。如在化工生产过程中，压力既影响物料平衡，也影响化学反应速度，是标志生产过程能否正常进行的重要参数。
- 从确保安全生产的角度，压力检测也非常重要。如：确保压力容器内的压力在安全指标之内，确保易燃易爆介质的压力不超标。
- 压力也是间接测量流量和物位的手段。
 - a) 用孔板测量流量仅能产生差压，而这个差压靠压力检测的方法来测取才能最终求出流量。
 - b) 物位：液面的高度可以靠测取压力的大小来表达。

7.1 概述

7.1.1 压力的基本概念和计量单位

7.1.2 压力检测方法

压力的基本概念和计量单位

1. 压力名词与定义

1) **压力**——垂直而均匀地作用在单位面积上的力称为压力。压力可表示为

$$p = F/S$$

式中， p —压力； F —垂直作用力； S —受力面积。

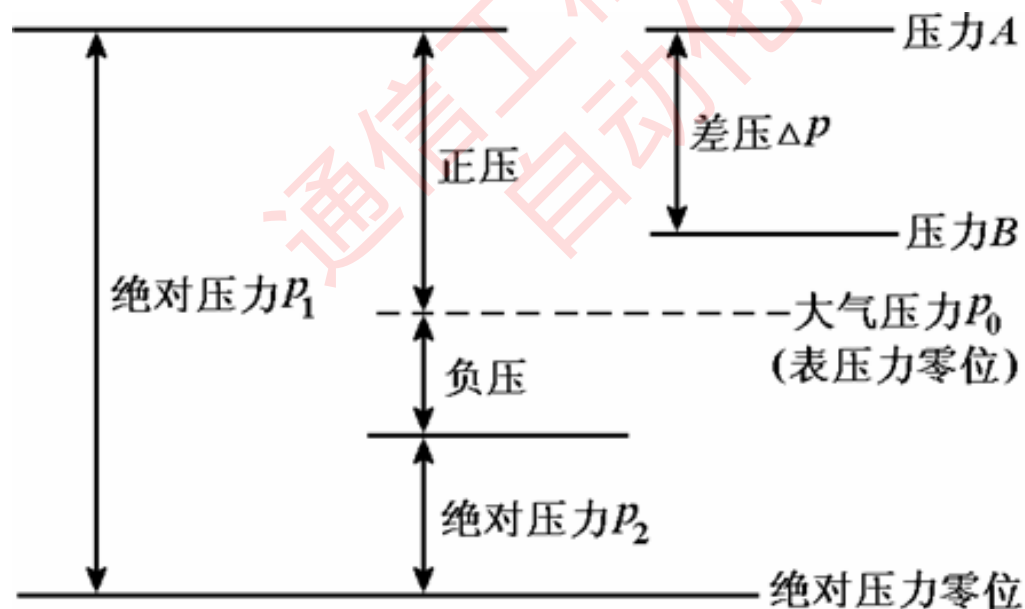
2) **绝对压力**——以完全真空（绝对压力零位）作参考点的压力称为绝对压力，用符号 p_i 表示。

3) **大气压力**——由地球表面大气层空气柱重力所产生的压力，称为大气压力，用符号 p_0 表示。

压力的基本概念和计量单位

4) **表压力**——以大气压力为参考点，大于或小于大气压力的压力称为表压力。工业上所用的压力仪表指示值多数为表压力。

5) **差压(力)** 任意两个相关压力之差称为差压(Δp)。



压力的基本概念和计量单位

2. 压力的计量单位

在国际单位制中，压力的单位为**牛顿/米²**，用符号**N/m²**表示；压力单位又称为**帕斯卡**或简称**帕**，符号为**Pa**。1Pa = 1N/m²。

因帕单位太小，工程上常用千帕(kPa)或兆帕(MPa)表示。我国已规定帕斯卡为压力的法定计量单位。

其他常用单位：工程大气压、标准大气压、巴、毫米汞柱、毫米水柱。

压力的基本概念和计量单位

压力单位换算表

单 位	帕 Pa(N/m ²)	巴 (bar)	毫米水柱 (mmH ₂ O)	标准大气 压 (atm)	工程大气 压 (kgf/cm ²)	毫米汞柱 (mmHg)
帕 Pa(N/m ²)	1	1×10 ⁻⁵	1.019716 ×10 ⁻¹	0.986923 6 ×10 ⁻⁵	1.019716 ×10 ⁻⁵	0.75006 ×10 ⁻²
巴 (bar)	1×10 ⁵	1	1.019716 ×10 ⁴	0.9869236	1.019716	0.75006 ×10 ³
毫米水柱 (mmH ₂ O)	0.980665 ×10	0.980665 ×10 ⁻⁴	1	0.9678 ×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴	0.73556 ×10 ⁻¹
标准大气 压 (atm)	1.01325 ×10 ⁵	1.01325	1.033227 ×10 ⁴	1	1.0332	760
工程大气 压 (kgf/cm ²)	0.980665 ×10 ⁵	0.980665	1×10 ⁴	0.967841	1	735.56
毫米汞柱 (mmHg)	1.333224 ×10 ²	1.333224 ×10 ⁻³	1.35951 ×10	1.316 ×10 ⁻³	1.35951 ×10 ⁻³	1

7.1 概述



7.1.1 压力的基本概念和计量单位

7.1.2 压力检测方法

压力检测方法

根据测压原理的不同，压力检测方法主要有以下几类：

1. 重力平衡法

按照压力的定义，通过直接测量单位面积上所受力的大小来检测压力。如液柱式压力计和活塞式压力计。

2. 弹性力平衡法

弹性力平衡法利用弹性元件受压力作用发生弹性变形而产生的弹性力与被测压力相平衡的原理来检测压力。可以通过测量弹性元件位移变形的大小测出被测压力。

3. 物性测量法

根据压力作用于物体后所产生的各种物理效应来实现压力测量。

7.2 压力检测仪表

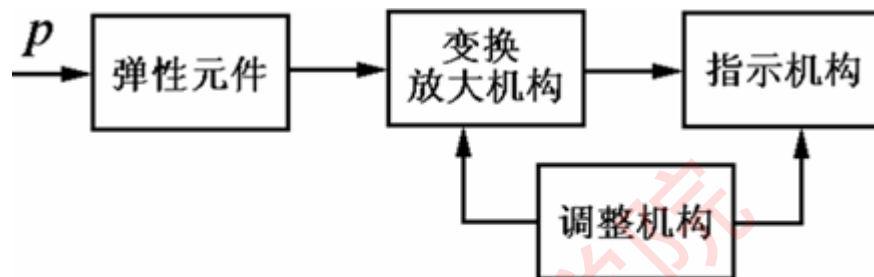
- 压力检测仪表简称压力计或压力表。
- 根据应用场合不同，可具有指示、记录或带远传变送、报警、调节等多种功能，压力显示有指针位移式或数字显示形式。

7.2.1 弹性压力计

7.2.2 电测式压力计

弹性压力计

弹性压力计根据所用弹性元件的不同构成了多种型式的弹性压力计。



弹性压力计组成框图

- 弹性元件是核心部分，用于感受压力并产生弹性位移。
- 弹性元件的位移变形较小，故设有变换放大机构，将弹性元件的变形进行变换和放大。
- 指示机构用于给出压力示值，其形式有直读式的指针或刻度标尺，也可将压力值转为电信号远传。
- 调整机构用于调整压力计的零点和量程。

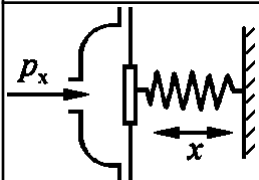
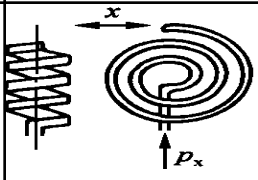
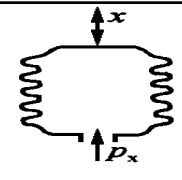
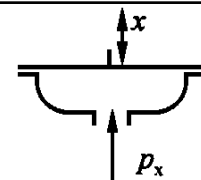
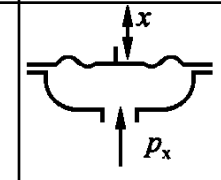
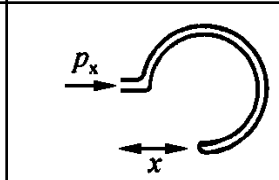
弹性压力计结构简单，价格低廉，现场使用和维修都很方便，又有较宽的压力测量范围，在工程中获得了非常广泛的应用。

弹性压力计

1. 弹性元件

弹性压力计的测压性能主要取决于弹性元件的弹性特性，它与弹性元件的材料、加工和热处理质量有关，同时还与环境温度有关。

常用弹性元件的结构和压力测量范围

弹簧管式		波纹管式	弹性膜式		
单圈弹簧管	多圈弹簧管	波纹管	平薄膜	波纹膜	挠性膜
					
0 ~ 106kPa	0 ~ 105kPa	0 ~ 103kPa	0 ~ 105 kPa	0 ~ 103kPa	0 ~ 102kPa

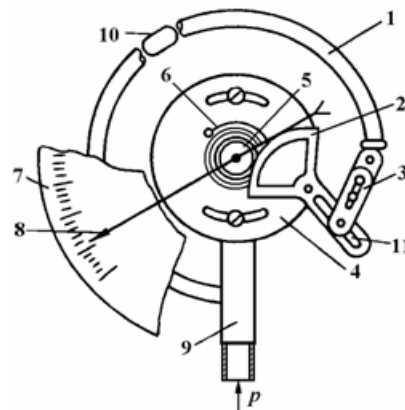
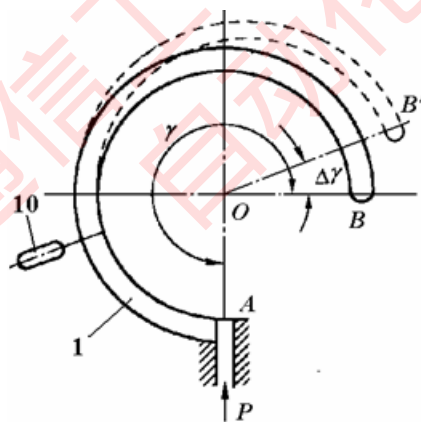
弹性压力计

2. 弹簧管压力计

弹簧管又称波登管(法国人波登发明)，是一根弯成圆弧状、管截面为扁圆形的空心金属管，其一端封闭并处于自由状态，另一端开口为固定端，被测压力由固定端引入弹簧管内腔。

弹簧管式压力计是工业生产上应用很广泛的一种测压仪表，以单圈弹簧管结构应用最多。

- ◆为提高测压灵敏度，可采用多圈弹簧管。
- ◆**特点：**结构简单，使用方便，价格低廉，测压范围宽，精度最高可达 $\pm 1\%$ 。



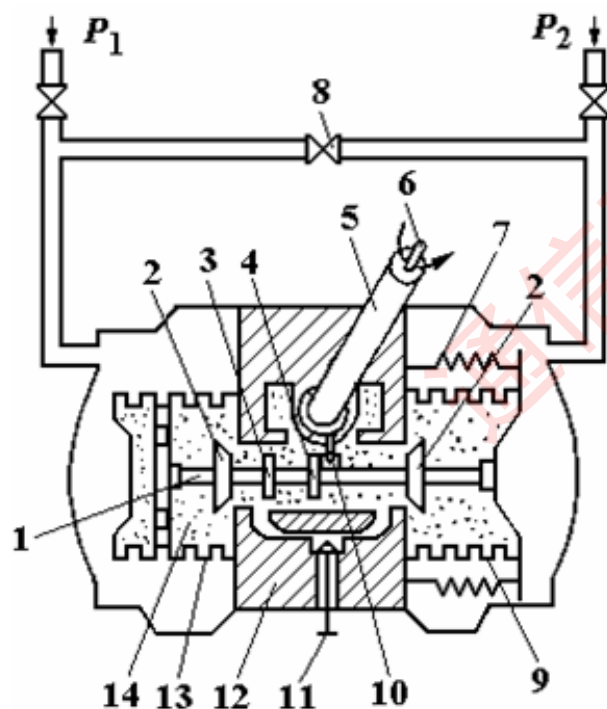
弹簧管压力计结构

1-弹簧管；2-扇形齿轮；3-拉杆；4-底座；5-中心齿轮；6-游丝；7-表盘；8-指针；9-接头；10-弹簧管横截面；11-调节开口槽

弹性压力计

3. 波纹管压力计

波纹管是一端封闭的薄壁圆管，壁面是环状波纹。被测压力从开口端引入，封闭端将产生位移。



双波纹管差压计结构

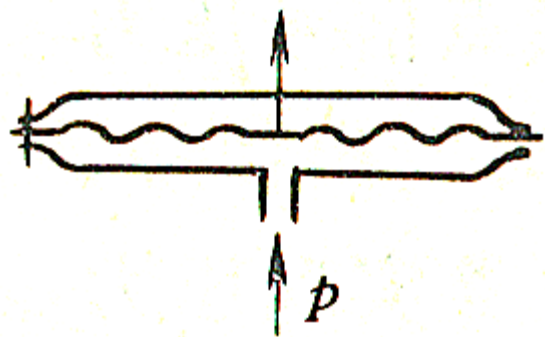
1-连接轴；2-保护阀；3-阻尼环；
4-推板；5-扭力管；6-心轴；7-量
程弹簧；8-平衡阀；9-低压波纹管
；10-摆杆；11-阻尼阀；12-中心
基座；13-高压波纹管；14-填充液

◆特点：易于变形，位移相对较大，
灵敏度高，常用于低压或负压测量。

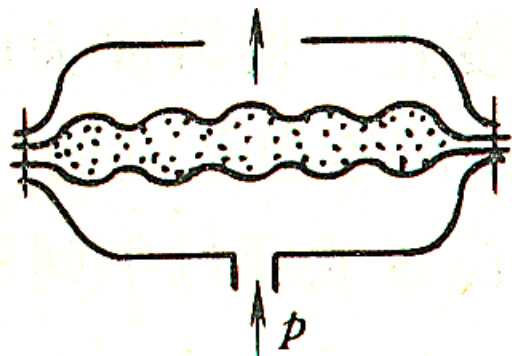
弹性压力计

4. 膜式压力计

膜式压力计有**膜片压力计**和**膜盒压力计**两种。前者主要用于测量腐蚀性介质或非凝固、非结晶的粘性介质的压力，后者常用于测量气体微压和负压。



原理：膜片（平膜片或波纹膜片）四周固定，当通入压力后，两侧面存在压差时，膜片将向压力低的一侧弯曲，膜片中心产生一定的位移，通过传动机构带动指针转动，指示出被测压力。



为了增大膜片中心位移，提高仪表灵敏度，由两张金属膜片沿周口对焊起来，成一薄壁盒子，内充液体（例如硅油），称为膜盒。

弹性压力计

实物图



弹簧管压力计



波纹管压力表

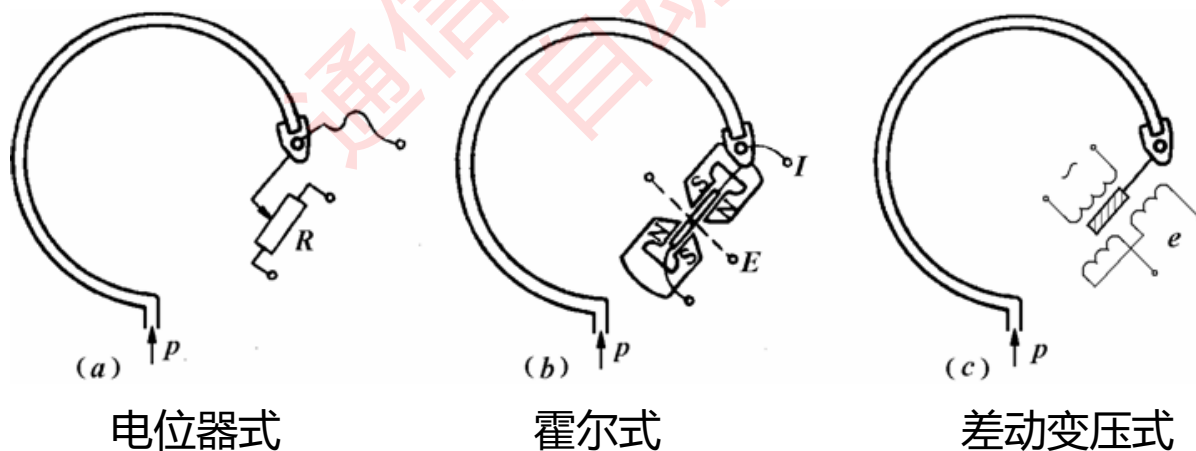


膜式压力表

弹性压力计

5. 弹性压力计信号远传方式

- ◆弹性压力计一般为直读式仪表，可就地显示被测压力。
- ◆但在许多情况下，为了便于对压力参数的检测与控制，需要能够将压力信号远传。
- ◆在普通弹性压力计的基础上，**增加转换部件**，可以**将弹性元件的变形转换为电信号输出**，就可使之除就地显示压力之外，兼有信号远传功能。

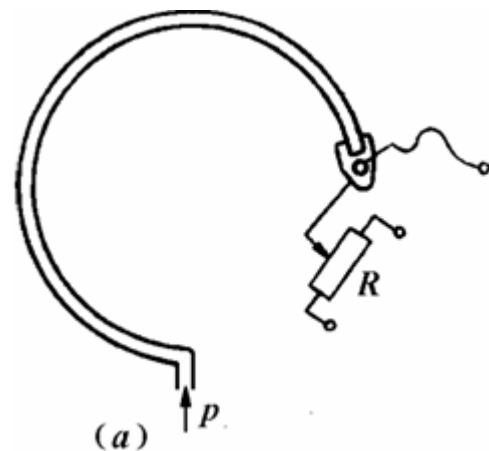


弹性压力计信号电远传方式

弹性压力计

电位器式：在弹簧管压力计内安装滑线电位器，滑动触点由弹簧管的自由端带动。在电位器两端接稳定的直流电压，则滑动触点和电阻的任意一端之间的电压将取决于滑动触点位置，即取决于被测压力。

特点：比较简单，有很好的线性输出，但滑动触点会有磨损，可靠性较差。

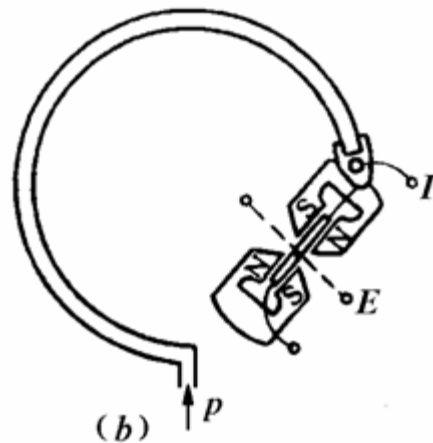


弹性压力计

霍尔式：其转换原理基于半导体材料的霍尔效应。

将片状霍尔元件固定在弹性元件的自由端，并处于两对磁场方向相反的永久磁铁的磁极间隙中，磁场强度为常数，霍尔元件两端通以恒定电流。

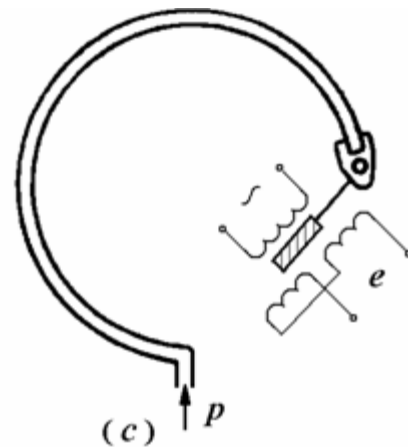
压力增大，霍尔元件被弹性元件自由端带动在磁场中移动，使其在两对磁极中的面积差增大，则产生的霍尔电势也增大。



特点：结构简单，灵敏度高，寿命长，对外部磁场敏感，耐振性差。

弹性压力计

差动变压器式：可移动的铁芯与弹性元件的自由端相连并处于差动变压器的线圈中。变压器原边通以交流电，副边匝数相等、按同名端极性反向串联。被测压力增大，铁芯被弹性元件自由端带动而偏离中央位置，副边将出现交流电压，从而可测出压力值。



特点：线性好、附加力小、位移范围较大。但当铁芯处于中央位置时，因有一定的残余电压而使输出不为零，需要采取一定措施加以补偿。

7.2 压力检测仪表


7.2.1 弹性压力计

7.2.2 电测式压力计

电测式压力计

能够测量压力并提供远传电信号的装置称为**压力传感器**，如果装置内部还设有适当处理电路，能将压力信号转换成工业标准信号(如4~20mA直流电流)输出，则称为**压力变送器**。

电测式压力传感器

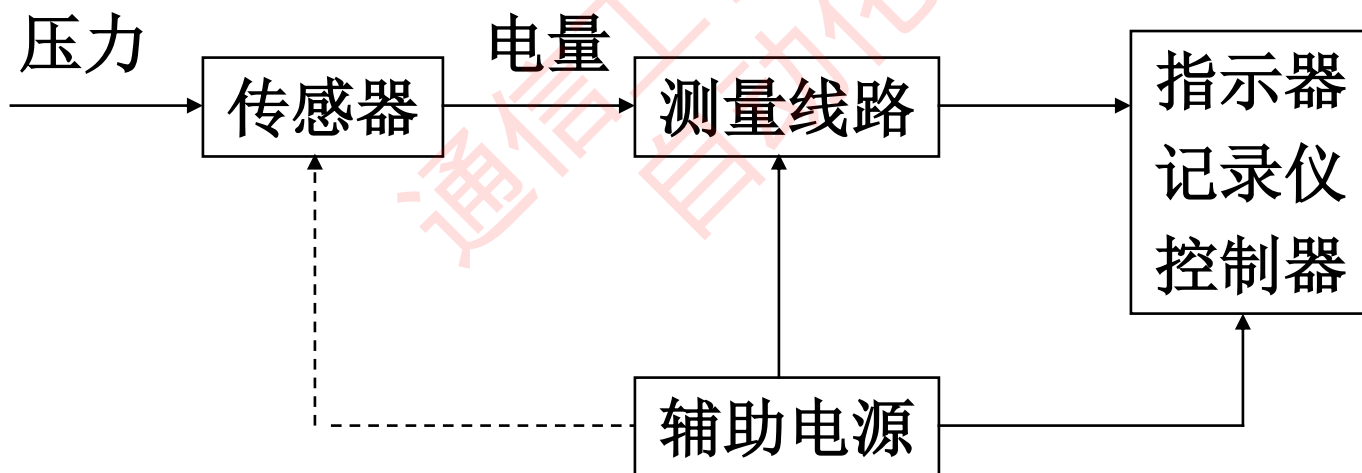


- 应变式
- 电容式
- 压电式
- 振频式
- 光电式
- 光纤式
- 超声式压力传感器

电测式压力计

电测式压力计通过机械和电气元件将被测压力转换成电量（如电阻、电容、电感或电势等）。

优点：快、测量范围广、精度高、远距



电测式压力计组成方框图

电测式压力计

1. 应变式压力传感器

应变式压力传感器是一种通过测量弹性元件因压力的作用而产生的应变来间接测量压力的传感器，它由弹性元件、应变片及测量电路等组成。

- ◆弹性元件有多种形式，常见的有筒式、膜片式、弹性梁等。
- ◆应变片有金属和半导体两类，阻值随压力变化而变化。
- ◆测量电路将应变片阻值的变化转换为电信号输出，实现被测压力的测量和信号远传。

特点：具有精度高、体积小、重量轻、测量范围宽等优点，同时抗振动、抗冲击性能良好。但应变片阻值受温度影响较大，需要考虑温度补偿。

电测式压力计

1) 应变筒式压力传感器

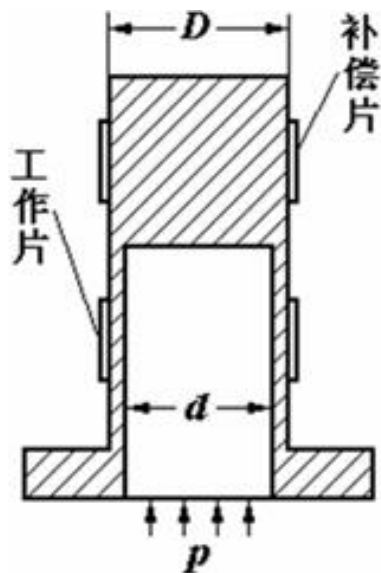
当应变筒内腔承受压力时，薄壁筒表面的周向应力最大，相应的周向应变 ε 为：

$$\varepsilon = \frac{p(2 - \mu)}{E(D^2 / d^2 - 1)}$$

式中， p —被测压力； E —应变筒材料的弹性模量； μ —应变筒材料的泊松比； D —应变筒外径； d —应变筒内径。

四片应变片接成全桥，电桥电压输出与压力变化相对应。

优点：应变筒式压力传感器结构简单，制造方便，能进行静、动态压力测量，测量范围也比较宽。



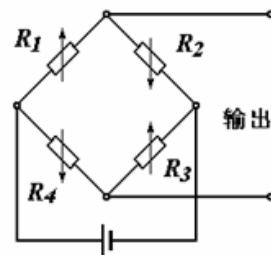
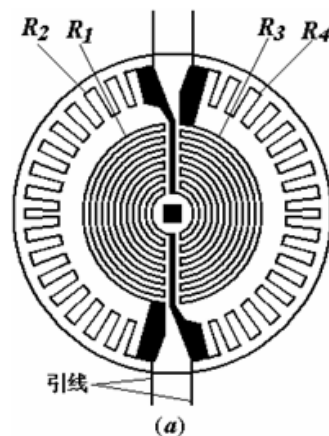
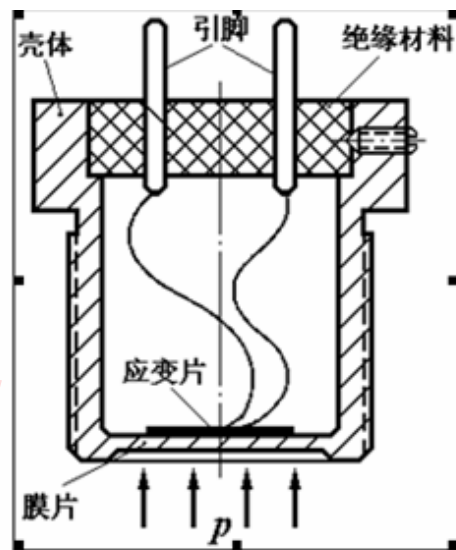
电测式压力计

2) 平膜式压力传感器

平膜片式压力传感器中，弹性元件是周边固定的平圆膜片，其上粘贴箔式组合应变片。四个应变片组成电桥，输出相应的电压信号。

将4个应变片按布置方式接成的全桥电路灵敏度大，并具有温度自补偿的作用。

优点：结构简单，性能稳定可靠，精度、灵敏度较高，但频率响应较低，输出线性差。

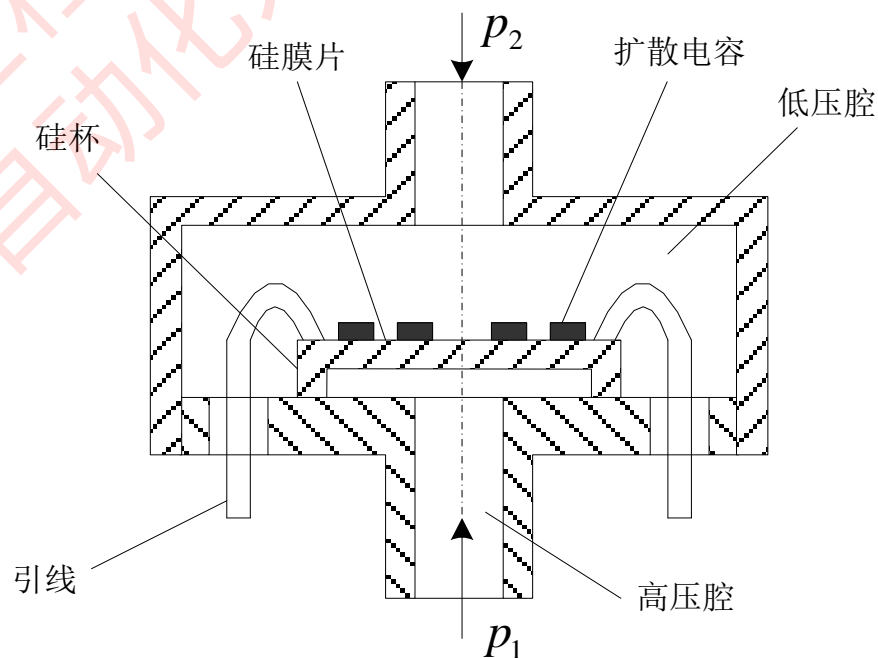


电测式压力计

3) 压阻式压力传感器

压阻式压力传感器是基于半导体材料的压阻效应制成的，它是利用集成电路工艺直接在作为弹性元件的硅平膜片上按一定晶向制成扩散电阻，这样就很容易得到尺寸小、高灵敏度、高自振频率的压力传感器。

特点：重复性、稳定性好，工作可靠；灵敏度高，固有频率高；测量范围宽；精度高；易于微型化。特别适合于中、低温条件下的中、低压测量。



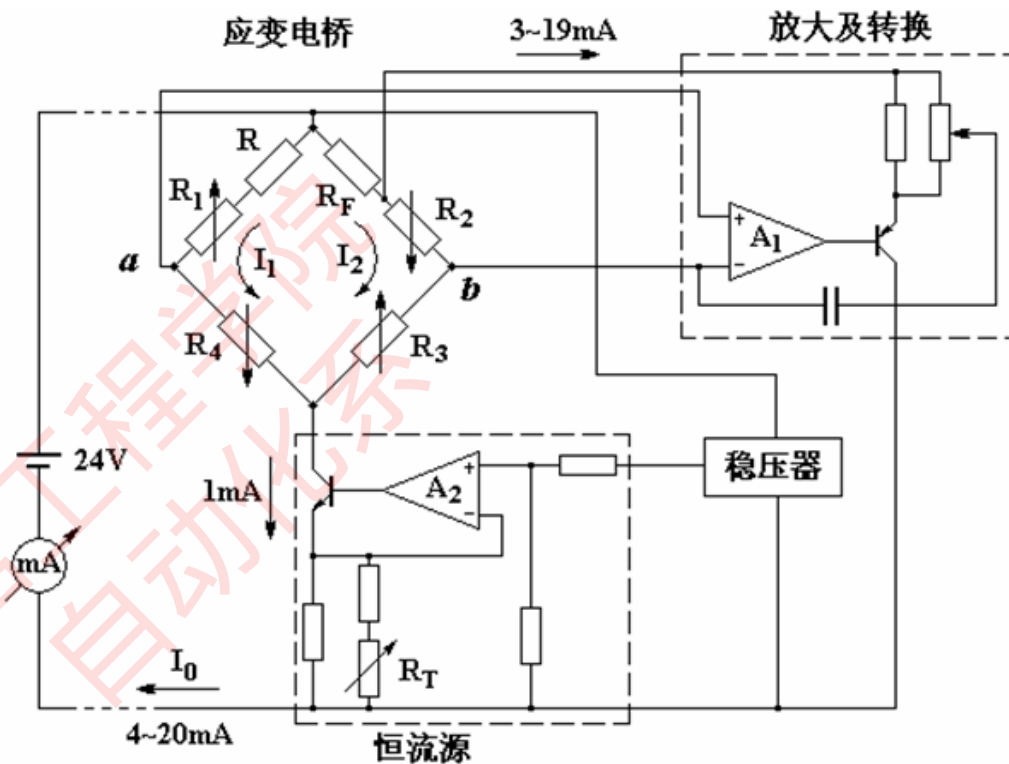
电测式压力计

4) 压力传感器的变送电路

- 将传感器的输出通过一定的变送电路转换成形式和数值范围都符合工业标准的信号，则因为有了统一的信号形式和数值范围，就可以选择使用标准的后续检测仪表组成检测系统或调节系统。
- 只要有同样标准的输入接口，就可以从变送器获得被测量的信息。
- 工业上最广泛采用4~20mA直流电流作为标准信号来传输模拟量。
- 电流输出型变送器有4线制、3线制、2线制等几种。长距离传输时以2线制变送器最为经济、方便，因而应用最多。

电测式压力计

在变送电路中，应变电桥由1mA的恒流源供电。未承受压力时，左右桥臂支路的电流相等，a、b两点电位相等，电路输出电流为 $I_0=4\text{mA}$ 。当受压时，b点电位升高，a点电位降低，电桥输出电压送入放大器A1，经电压-电流转换电路转换成电流 $I_0+\Delta I_0$ ，这个增大的电流流过反馈电阻 R_F 使其上的反馈电压增加而导致b点电位降低，直至a、b两点电位相等，应变电桥在压力作用下达到新的平衡。当压力达到传感器量程上限时， $I_0=20\text{mA}$ 。



一种2线制的压阻式差压传感器的变送器电路原理

由应变电桥、恒流源、温度补偿网络、放大及电压-电流转换等几部分组成，采用24V直流供电。

电测式压力计

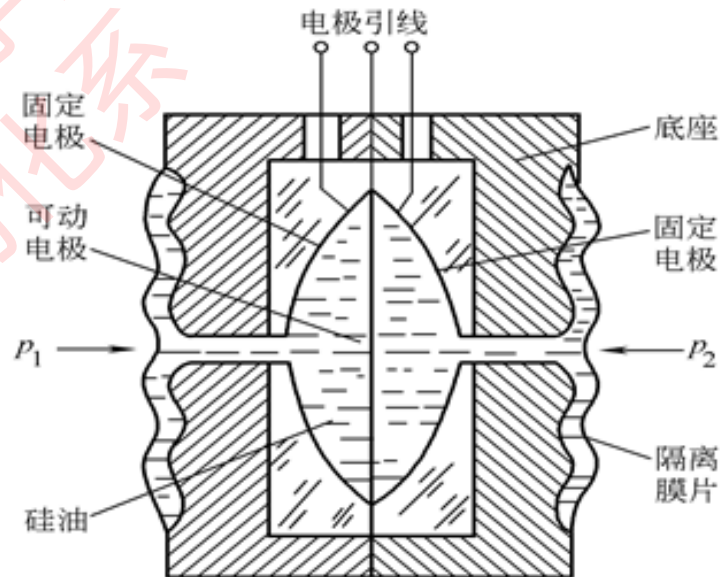
2. 电容式压力传感器

电容式压力传感器采用变电容测量原理，将被测压力引起的弹性元件的位移变形转变为电容的变化，测出电容量，便可知道被测压力的大小。

1) 差动变极距式电容压力传感器

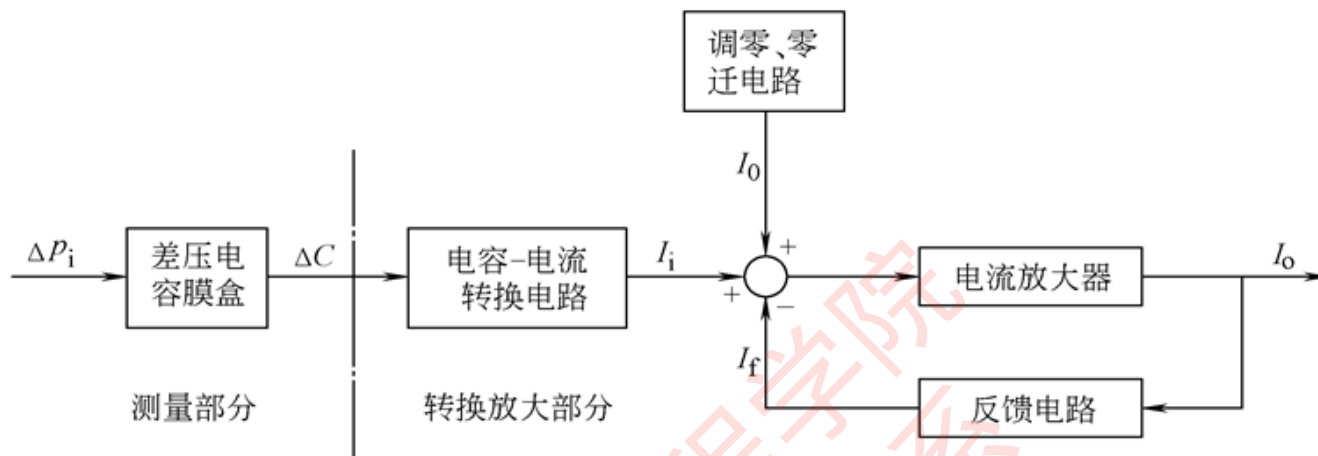
对于平板电容，在被测压力作用下，电容值 C 会因两平行板间距 d 发生的微小变化而变化。

特点：采用差动法可改善非线性、提高灵敏度、并可减小因极板间电介质的介电常数 ϵ 受温度影响而引起的不稳定性。

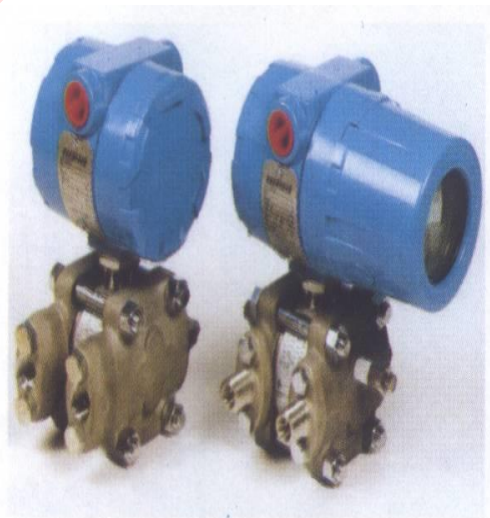
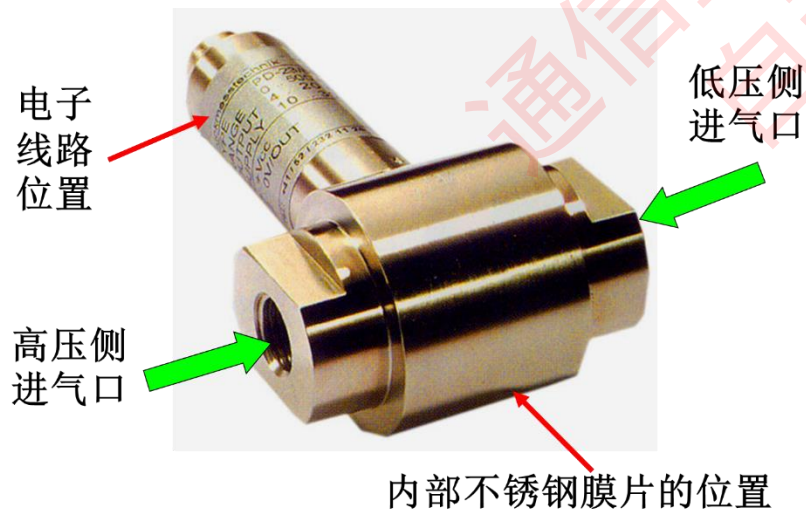


差动变极距式电容压力传感器结构

电测式压力计



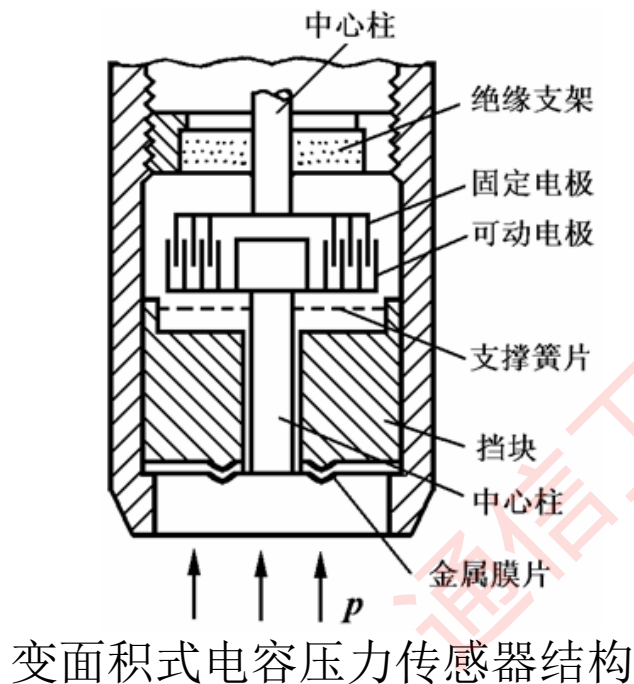
电容式差压变送器原理框图



各种电容式差压变送器外形

电测式压力计

2)变面积式电容压力传感器

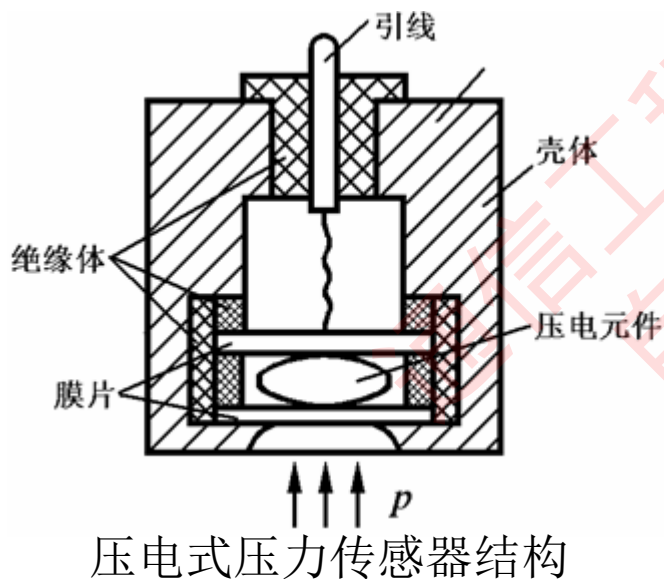


特点：灵敏度高，输出信号大；测量精度高；结构简单、牢固，可靠性高，环境适应性强，能承受高过载，耐冲击与振动，可在高温条件下工作；由于可动极板质量小，故传感器固有频率高，动态响应快。但易受分布电容影响，制造难度大。

电测式压力计

3. 压电式压力传感器

由压电材料制成的压电元件受到压力作用时产生的电荷量与作用力之间呈线性关系。

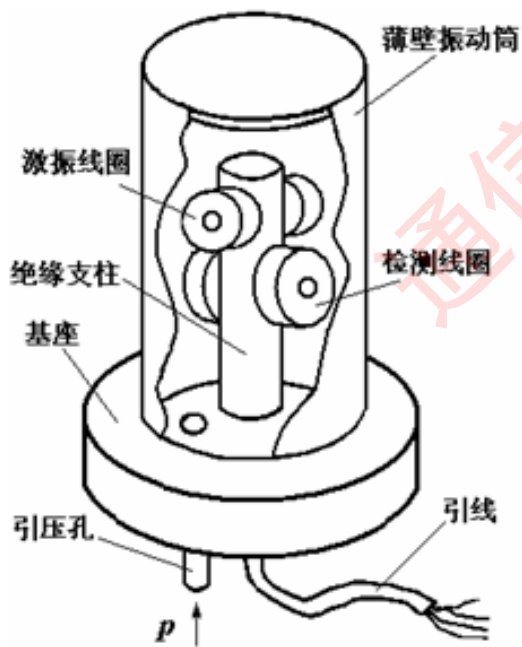


特点：压电式压力传感器体积小，结构简单，工作可靠；测量范围宽；测量精度较高；频率响应高。但不适宜测量缓慢变化的压力和静态压力。

电测式压力计

4. 谐振式压力传感器

谐振式压力传感器是靠被测压力所形成的应力改变弹性元件的谐振频率，通过测量频率信号的变化来检测压力。根据谐振原理可以制成振筒、振弦及振膜式等多种型式的压力传感器。



振筒式压力传感器结构



振筒式压力传感器

电测式压力计

振筒有一定的固有频率，当被测压力作用于筒壁时，筒壁内应力增加使其刚度加大，振筒固有频率相应改变。振筒固有频率与作用压力的关系可近似表示为：

$$f_p = f_0 \sqrt{1 + \alpha p}$$

式中，
 f_p —为受压后的振筒固有频率；
 f_0 —为筒内外压力相等时的固有频率；
 α —为振筒结构系数；
 p —为被测压力。

特点：适用于气体压力的测量，其体积小，输出频率信号，重复性好，耐振；精度高，且有良好的稳定性。

7.3 压力检测仪表的选择与安装

7.3.1 压力检测仪表的选择

7.3.2 压力检测仪表的安装

7.3.3 动态压力检测的管道效应

压力检测仪表的选择

1、类型选择

压力仪表类型的选择主要应从以下几个方面考虑:

- ◆要考虑被测介质的物理、化学性质(如温度高低、粘度大小、腐蚀性、易燃易爆性能等), 以选择相应的仪表。
- ◆要根据生产工艺对压力仪表的要求和用途, 选择压力仪表。
- ◆要考虑压力仪表使用现场环境条件。
- ◆还要考虑被测压力的种类(压力、负压、绝对压力、差压等)、变化快慢等情况, 选择压力仪表。

压力检测仪表的选择

2、量程选择

压力仪表的量程要根据被测压力的大小及在测量过程中被测压力变化的情况等条件来选取，为保证测压仪表安全可靠地工作，选择量程时必须留有足够的余地。

- ◆测量稳定压力时，正常操作压力应小于满量程的 $2/3$ ；
- ◆测量脉动压力时，正常操作压力应小于满量程的 $1/2$ ；
- ◆测量高压时，正常操作压力应小于满量程的 $3/5$ 。
- ◆被测压力的最小值，不应低于满量程的 $1/3$ 。

目前我国出厂的压力检测仪表有统一的量程系列(1、1.6、2.5、4、6) $\times 10^n$ MPa，其中 n 为正或负整数。

压力检测仪表的选择

3.精度等级选择

压力检测仪表的精度等级应根据生产过程对压力测量所允许的最大误差。选择时应坚持**经济**的原则，在能满足生产要求的条件下，不应追求使用过高精度的仪表。

作为**工作计量器具**，压力仪表的精度等级分为**1.0、1.6、2.5、4.0级**；而作为**压力标准器**，用于压力量值传递的精密压力仪表的精度等级分为**0.1、0.16、0.25、0.4级**。

压力检测仪表的选择

例：某压力容器内介质的正常工作压力范围为0.4~0.6MPa，用弹簧管压力表进行检测。要求测量误差不大于被测压力的5%，试确定该压力表的量程和精度等级。

解：由于被测对象压力稳定，设压力表量程为A，则根据最大工作压力有：

$$A > 0.6 \div 2/3 = 0.9 \text{MPa}$$

根据最小工作压力有：

$$A < 0.4 \div 1/3 = 1.2 \text{MPa}$$

故根据仪表的量程系列，可选用量程范围为0~1.0MPa的弹簧管压力表。

由题意，被测压力允许的最大绝对误差为：

$$|\Delta_{\max}| = 0.4 \times 5\% = 0.02 \text{MPa}$$

仪表精度等级的选取应使得其最大引用误差不超过允许测量误差。

对于测量范围0~1.0MPa的压力表，其最大引用误差为：

$$\gamma = 0.02 \text{MPa} \times 100\% / 1.0 \text{MPa} = 2\%$$

故应选取1.6级的压力表。

7.3 压力检测仪表的选择与安装

7.3.1 压力检测仪表的选择

7.3.2 压力检测仪表的安装

7.3.3 动态压力检测的管道效应

压力检测仪表的安装

1、取压点选择

取压位置要具有代表性，能真实地反映被测压力。应按下述原则选择：

- 1) 取压点不能处于流束紊乱的地方，要选在直管段上，不可选在管路弯曲、分岔、死角或其他能形成涡流的区域；
- 2) 取压点上游侧不应有突出管路或设备的阻力件(如温度计套管、阀门、挡板等)，否则应保证有一定的直管段长度；
- 3) 测量**液体压力**时，取压点应在管道下侧，不宜取在最低部；测量**气体压力**时，取压点应在管道上侧；
- 4) 取压口开孔轴线必须与介质流动方向垂直，引压管口端面应与设备连接处的内壁保持平齐。

压力检测仪表的安装

2、引压管的敷设

引压管路用于将被测容器的压力引至压力仪表。引压管的敷设应注意以下几点：

- 1) 引压管的粗细、长短均应选取合适。
- 2) 水平安装的引压管应保持有 $1:10 \sim 1:20$ 的倾斜度，以避免引压管中积存液体(或气体)，并有利于这些积液(或气)的排出。
- 3) 若当被测介质易冷凝或冻结，应增加保温伴热措施；
- 4) 取压点与压力表之间在靠近取压口处应安装切断阀，以备检修压力仪表时使用。

压力检测仪表的安装

3、压力仪表的安装

- 1) 压力仪表应安装在能满足规定的使用环境条件和易于观察、维修之处；仪表安装处与取压点之间的距离应尽量短；
- 2) 为避免温度变化对仪表的影响，当测量高温气体或蒸汽压力时，应装冷凝管或冷凝器；
- 3) 仪表安装在有振动的场所时，应加装减振器；
- 4) 测量有腐蚀性、粘度较大、有结晶或沉淀物等介质压力时，应采取相应的保护措施(如安装适当的隔离容器)，以防腐蚀、堵塞等发生；
- 5) 压力仪表的连接处根据压力高低和介质性质，必须加装密封垫片，以防泄漏；
- 6) 当被测压力较小而压力仪表与取压点不在同一高度时，应考虑修正液体介质的液柱静压对仪表示值的影响。

7.3 压力检测仪表的选择与安装



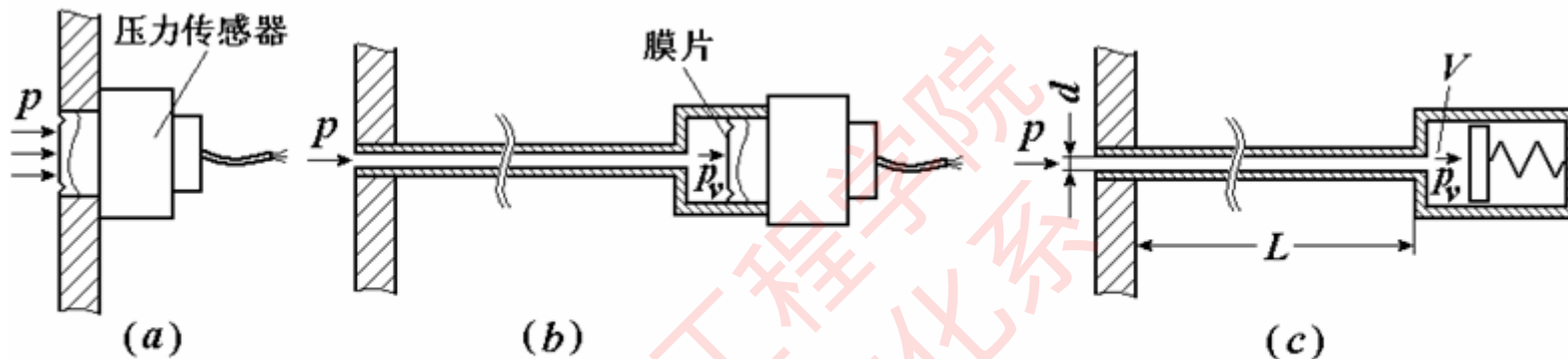
7.3.1 压力检测仪表的选择

7.3.2 压力检测仪表的安装

7.3.3 动态压力检测的管道效应

动态压力检测的管道效应

感压元件前的引压管道和空腔的存在会引起压力信号的衰减和相位滞后，这就是动态压力测量的管道效应。



动态压力检测的管道效应

引压管道、空腔这一压力传输系统的固有频率 f 可近似估算为：

$$f = \frac{cd}{4\sqrt{\pi V(L + 0.35d)}}$$

式中， c —流体声速； d —引压管内径； L —引压管长度； V —空腔体积。

动态压力检测的管道效应

- ◆引压管道、空腔系统的固有频率 f 与流体 c 声速成正比，为提高系统频率，可在管道与空腔内充液体以提高声速；
- ◆引压管道越长，空腔容积越大，则系统频率 f 越低，因此应尽可能减小管长和传感器膜片前的空腔容积；
- ◆在引压管道长度一定的条件下，增大管径可提高频率 f 。