

项目一 化工测量仪表

1.1 测量仪表的基础知识

1.1.1 测量相关知识

1. 测量及测量过程

测量就是用试验的方法求取某个量的大小,例如,用米尺量取身高,其过程是用测量工具米尺做参照,与身高进行比较,得到身高的测量数值。这种用测量工具与被测物直接进行比较的方法称为直接测量法。而有些变量不便使用直接测量法,例如,用体温计测量人体体温时,温度信号的变化先通过水银转变为水银体积的变化,然后将水银液面与玻璃管外的刻度进行比较,得出体温数据,这种测量方法称为间接测量法。

由此可见,不管是直接测量,还是间接测量,它们的共性在于被测变量都要经过一次或多次能量形式的转换,然后与刻度进行比较。所以,测量过程的实质是被测变量进行能量形式的转换和比较。测量仪表就是实现这种能量形式转换和比较的工具。

2. 测量误差

测量的目的是获得真实值,但是由于人们对客观事物认识的局限性,无论采用什么样的测量方法和测量工具,都无法获得真实值。通常所说的真实值,是指用更高一级精度的仪表测量出的值,作为被测变量的真实值来使用。这样,在测量值与真实值之间就存在着一个差值,这个差值称为测量误差。测量误差通常有两种表示方法,即绝对误差和相对误差。

绝对误差指仪表的测量值与真实值之差,可以表示为

$$\Delta = x_{\text{测}} - x_{\text{真}} \quad (1-1)$$

式中, Δ 为绝对误差; $x_{\text{测}}$ 为仪表的测量值; $x_{\text{真}}$ 为被测变量的真实值。

真实值是指被测物理量客观存在的真实数值,它是无法得到的理论值。因此,所谓测量仪表在其标尺范围内各点读数的绝对误差,一般是指用被校表(精度较低)和标准表(精度较高)同时对同一被测量进行测量所得到的两个读数之差,可表示为

$$\Delta = x - x_0 \quad (1-2)$$

式中, Δ 为绝对误差; x 为被校表的读数值; x_0 为标准表的读数值。

2 | 化工仪表及自动化

测量误差还可以用相对误差来表示。相对误差等于某一点的绝对误差 Δ 与标准表在这点的读数值 x_0 之比。可表示为

$$y = \frac{\Delta}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0} \quad (1-3)$$

1.1.2 测量仪表的性能指标

1. 精度

精度又称准确度,是仪表制造加工的精密程度和指示的准确程度的合称。衡量一台仪表的误差大小,不能用绝对误差和相对误差,而必须用相对百分误差,精度就是取相对百分误差的分子值,即

$$\text{精度} = \frac{\Delta_{\max}}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\%$$

式中, $\Delta_{\max}$ 为被校表的值与标准表的值间最大的绝对误差。

2. 精度等级

仪表的精度等级(精确度等级)是指仪表在规定的工作条件下允许的最大相对百分误差。

把仪表允许的最大相对百分误差去掉“ $\pm$ ”和“ $\%$ ”,便可以用来确定仪表的精度等级。

目前,按照国家统一规定所划分的仪表精度等级有 0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 等。0.5 级仪表,表示该仪表允许的最大相对百分误差为 $\pm 0.5\%$ 。其他同理。

关于精度的几点说明如下:

(1)精度数值越小,精度越高;相反,数值越大,精度越低。

(2)精度等级常以圆圈内或三角内的数字标明在仪表面板上,如④表示 1.5 级精度的仪表。

(3)选表和校验表时,计算出的数值不可能都正好是精度等级中有的数值,这时要归挡,选表时精度归高,校验时精度归低。例如,计算结果为 1.8,如果是选表,要选 1.5 级精度的表;如果是校验表,则此表应定为 2.5 级精度。

仪表的误差还受工作条件的影响。仪表在正常工作条件(如正常的介质温度、湿度、振动、电源电压和频率等)下的最大相对百分误差称为仪表的基本误差。如果仪表不在规定的正常工作条件下工作,由于外界条件变动引起的额外误差,称为附加误差。有时,附加误差是很大的,所以使用仪表时应注意尽量避免附加误差的产生。

【例 1-1】根据工艺要求选择一测量范围为 $0 \sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流量计,要求测量误差不超过 $\pm 0.5 \text{ m}^3/\text{h}$,请确定该仪表的精度等级。

解:先求最大相对百分误差:

$$\delta = \frac{\pm 0.5}{40-0} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

因此,必须选择 1.0 级的流量计。

【例 1-2】某压力变送器的测量范围为 0~400 kPa,在校验该变送器时测得的最大绝对误差为 ± 5 kPa,请确定该仪表的精度等级。

解:先求最大相对百分误差:

$$\delta = \frac{\pm 5}{400-0} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

该结果去掉“ $\pm$ ”和“ $\%$ ”为 1.25,因此该变送器的精度等级为 1.5 级。

【例 1-3】某台测温仪表的测温范围为 200~1 000 $^{\circ}\text{C}$,工艺上要求其测温误差不能大于 ± 5 $^{\circ}\text{C}$,试确定应选仪表的精度等级。

解:工艺上允许的相对百分误差为

$$\delta_{\text{允}} = \frac{\pm 5}{1\,000-200} \times 100\% = \pm 0.625\%$$

要求所选仪表的相对百分误差不能大于 $\delta_{\text{允}}$,才能保证测温误差不大于 ± 5 $^{\circ}\text{C}$,所以所选仪表的精度等级应为 0.5 级。

仪表的精度等级越高,能使测温误差越小,但为了不增加投资费用,不宜选用过高精度等级的仪表。

3. 非线性误差

在通常情况下,总是希望测量仪表的输出量和输入量之间呈线性关系。测量仪表的非线性误差用来表征仪表的输出量和输入量的实际对应关系与理论直线的吻合程度。通常非线性误差(图 1-1-1)用实际测得的输入-输出特性曲线(也称为校准曲线)与理论直线之间的最大偏差和测量仪表量程之比的百分数来表示:

$$\delta_f = \frac{\Delta'_{\max}}{\text{测量范围上限}-\text{测量范围下限}} \times 100\%$$

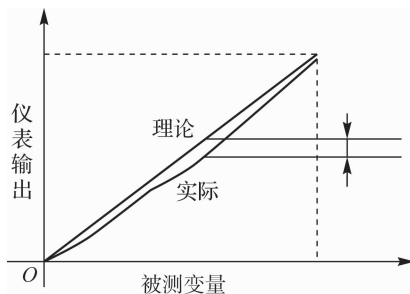


图 1-1-1 非线性误差

4 | 化工仪表及自动化

4. 变差

在外界条件不变的情况下,使用同一仪表对被测变量在全量程范围内进行正反行程(逐渐由小到大和逐渐由大到小)测量时,对应于同一被测值的仪表输出可能不等,二者之差的绝对值即为变差(图 1-1-2)。

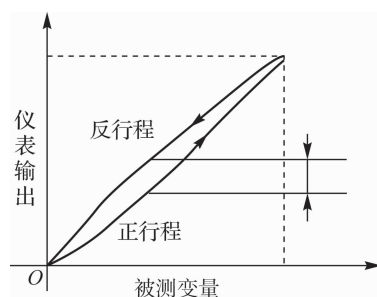


图 1-1-2 变差

变差的大小,由在同一被测值下正反特性间仪表输出的最大绝对误差和测量仪表量程之比的百分数来表示:

$$\text{变差} = \frac{\Delta''_{\max}}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} \times 100\%$$

5. 灵敏度和分辨力

灵敏度表征检测仪表对被测量变化的灵敏程度,它等于仪表输出变化量和输入变化量之比,即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

分辨力又称灵敏限,是仪表输出能响应和分辨的最小输入变化量,它也是灵敏度的一种反映。对数字式仪表来说,分辨力就是仪表变化一个二进制最低有效位(LSB)时输入的最小变化量。

1.1.3 测量仪表的组成及分类

1. 测量仪表的组成

化工生产过程中工艺变量种类繁多,生产条件又各不相同,化工测量仪表更是不胜枚举,但所有测量仪表一般都包括检测环节、传送放大环节和显示环节三个部分,如图 1-1-3 所示。

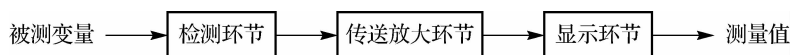


图 1-1-3 测量仪表的组成框图

检测环节直接感受被测变量的变化,并将其转换成便于测量的信号,传送放大环节对信号放大,最后送显示环节显示,或送控制仪表进行控制。这三部分在实际的仪表中有多种组合,有的三部分在一体,有的两部分在一体,有的各自独立。不管怎样组合,工作中处于现场的称为一次仪表,处于控制室的称为二次仪表。控制室装在控制柜表盘上的称为盘装仪表,装在控制柜后架子上的称为架装仪表。

2. 测量仪表的分类

测量仪表的分类方法有很多,常见的分类方法如下:

(1)测量仪表按被测变量的性质可分为压力测量仪表、温度测量仪表、流量测量仪表和物位测量仪表。

(2)测量仪表按仪表显示方式可分为指示型、记录型、累积型、信号型和远传指示型。

(3)测量仪表按仪表安装场合可分为就地指示型和远传型。

(4)测量仪表按使用场合可分为工业用仪表、范型仪表和标准仪表。

(5)测量仪表按精度等级可分为1.5级精度表、2.5级精度表等。

1.2 压力检测仪表

1.2.1 压力测量基本知识

1. 压力测量的意义

压力和差压是工业生产过程中常见的过程参数。在许多场合需要直接检测、控制的压力参数,如锅炉的气包压力、炉膛压力、烟道压力,化学生产中的反应釜压力、加热炉压力等;此外,还有一些不易直接测量的参数,如液位、流量等参数往往需要通过压力或差压的检测来间接获取。因此,压力和差压的测量在各类工业生产领域(如石油、电力、化工、冶金、航空航天、环保、轻工等)中占有很重要的地位。

化工生产中,通常需要对压力和真空度进行测量。若压力不符合要求,不仅会影响生产效率,降低产品质量,还可能造成严重的生产事故。化学反应中,压力既影响物料平衡关系,也影响化学反应速度。所以,压力的准确测量与精确控制,对保证生产过程正常进行,实现高产、优质、低消耗和安全是十分重要的。

2. 压力的基本概念

压力也称压强,化工生产中表示由气体或液体均匀垂直地作用于单位面积上的力,即

$$p = \frac{F}{S}$$

式中, p 为压力,Pa; F 为垂直作用力,N; S 为受力面积, m^2 。

在国际单位制和我国的法定计量单位中,压力的单位为牛顿/米²(N/m²),通常称为帕斯卡或简称帕(Pa)。帕这个单位在实际应用中太小,不方便计量,目前我国生产的各种压力

表都统一用 kPa(10^3 Pa)或 MPa(10^6 Pa)作为压力或差压的基本单位。我国在试行法定计量单位以前还常用工程大气压(kgf/cm²)、毫米汞柱(mmHg)和毫米水柱(mmH₂O)等单位。另外,在英、美等西方国家的一些变送器中还常用巴(bar)作为压力的单位。表 1-2-1 为几种压力单位的换算关系。

表 1-2-1 几种压力单位的换算关系

单位	千帕 (kPa)	兆帕 (MPa)	千克力/ 厘米 ² (kgf/cm ²)	毫米汞柱 (mmHg)	毫米水柱 (mmH ₂ O)	巴(bar)	磅/英寸 ² (psi)	标准 大气压 (atm)
千帕 (kPa)	1	0.001	0.010 197 2	7.5	102	0.01	0.145 038	0.009 869 2
兆帕 (MPa)	1 000	1	10.2	7.5×10^3	1.02×10^5	10	145.038	9.869 2
千克力/ 厘米 ² (kgf/cm ²)	98.067	0.098 1	1	735.6	10 000	0.981	14.223	0.967 8
毫米汞柱 (mmHg)	0.133	1.33×10^{-4}	1.36×10^{-3}	1	13.6	1.33×10^{-3}	0.019 3	1.32×10^{-3}
毫米水柱 (mmH ₂ O)	9.81×10^{-3}	9.81×10^{-6}	0.000 1	0.073 6	1	9.81×10^{-5}	1.422×10^{-3}	9.68×10^{-5}
巴(bar)	100	0.1	1.02	750	$1.019 7 \times 10^4$	1	14.5	0.986 9
磅/英寸 ² (psi)	6.89	6.89×10^{-3}	0.070 3	51.72	703	0.068 9	1	0.068
标准大气压 (atm)	101.33	0.101 3	1.033 2	760	$1.033 2 \times 10^4$	1.013 3	14.696	1

3. 绝对压力、表压和负压

在工程上,被测压力通常有绝对压力、表压和负压(真空度)之分,三者关系如图 1-2-1 所示。绝对压力是指作用在单位面积上的全部压力,用来测量绝对压力的仪表称为绝对压力表。地面上空气柱所产生的平均压力称为大气压力,高于大气压力的绝对压力与大气压力之差称为表压,低于大气压力的被测压力称为负压(真空度),其值为大气压力与绝对压力之差。由于各种工艺设备和检测仪表通常是处于大气之中,本身就承受着大气压力,因此工程

上通常采用表压或者负压来表示压力的大小,一般的压力检测仪表所指示的压力也是表压或者负压。

除特殊说明之外,本书所提及的压力均指表压。

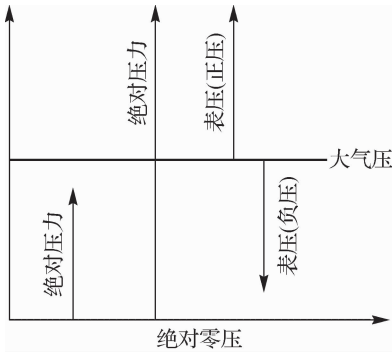


图 1-2-1 绝对压力、表压、负压的关系

4. 压力检测方法的分类

目前工业上常用的压力检测方法和压力检测仪表很多,根据敏感元件和转换原理的不同,压力检测方法一般分为以下四类。

- (1)液柱式压力检测。该方法一般采用充有水或水银等液体的玻璃 U 形管或单管进行测量。
- (2)弹性式压力检测。该方法是根据弹性元件受力变形的原理,将被测压力转换成位移进行测量的。常用的弹性元件有弹簧管、膜片和波纹管制等。
- (3)电气式压力检测。该方法是利用敏感元件将被测压力直接转换成各种电量(如电阻、电荷量等)进行测量。
- (4)活塞式压力检测。该方法是根据液压机液体传送压力的原理,将被测压力转换成活塞面积上所加平衡砝码的质量来进行测量。活塞式压力计的测量精度较高,允许误差可以小到 0.05%~0.02%,一般作为标准仪器对压力检测仪表进行检定。

1.2.2 弹性式压力计

1. 弹性元件

弹性式压力检测是把压力转换成弹性元件(图 1-2-2)位移的一种检测方法。

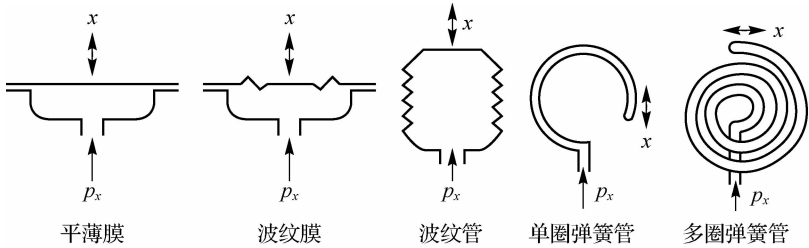


图 1-2-2 弹性元件

膜片受压力作用而产生位移,可直接带动传动机构指示,但是膜片的位移较小,灵敏度低,指示精度不高(一般为 2.5 级)。膜片更多的是和其他转换元件合起来使用,把压力转换成电信号。

波纹管的位移相对较大,一般可在其顶端安装传动机构,带动指针直接读数。其特点是灵敏度高(特别是在低压区),常用于检测较低的压力($1.0 \sim 10^6 \text{ Pa}$),但波纹管迟滞误差较大,精度一般只能达到 1.5 级。

弹簧管结构简单、使用方便、价格低廉、测量范围宽,可以测量负压、微压、低压、中压和高压,因此应用十分广泛。根据制造的要求,仪表精度最高可达 0.15 级。

2. 弹簧管和弹簧管压力表

弹簧管(图 1-2-3)是横截面呈非圆形(椭圆形或扁圆形),弯成圆弧状(中心角常为 270°)的空心管子。管子的一端为封闭,另一端为开口。闭口端作为自由端,开口端作为固定端。

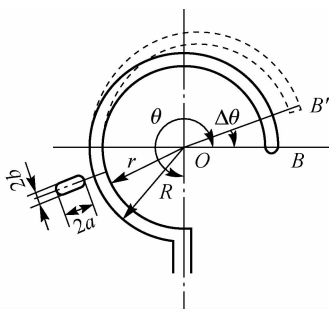


图 1-2-3 弹簧管

被测压力介质从开口端进入并充满弹簧管的整个内腔,弹簧管的非圆横截面使其又变成圆形并伴有伸直的趋势而产生力矩,其结果是使弹簧管的自由端产生位移,同时改变其中心角。位移量(中心角改变量)和所加压力有如下的函数关系:

$$\frac{\Delta\theta}{\theta_0} = p \frac{1-\mu^2 R^2}{E b h} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + \kappa^2} \Rightarrow \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \propto p$$

式中, θ_0 为弹簧管中心角的初始值; $\Delta\theta$ 为受压后中心角的改变量; R 为弹簧管弯曲圆弧的外半径; h 为管壁厚度; a 、 b 为弹簧管椭圆形截面的长、短半轴。

3. 电接点信号压力表

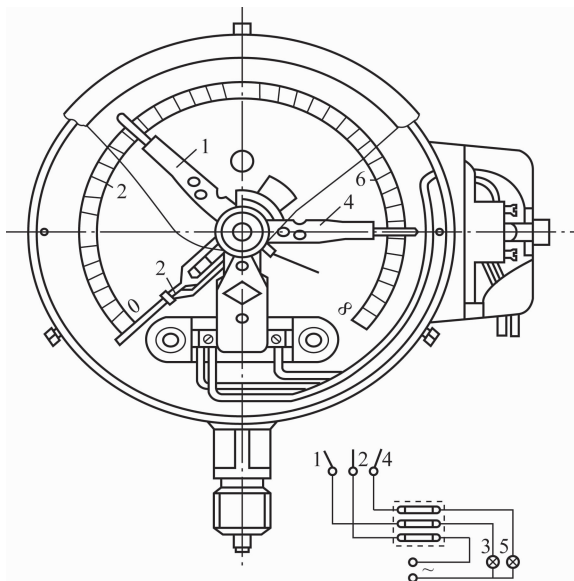
电接点信号压力表如图 1-2-4 所示。

为了实现报警,可以在弹性式压力表上增加附加机构,如图所示,在单圈弹簧管压力表的表盘上装两个电极分别对应被测压力的低限和高限。



视频

弹簧式压力计
的工作原理



1、4—静触点；2—动触点；3—绿灯；5—红灯

图 1-2-4 电接点信号压力表

【例 1-4】有一压力容器在正常工作时压力范围为 0.4~0.6 MPa,要求使用弹簧管压力表进行检测,并使测量误差不大于被测压力的 $\pm 4\%$,试确定该表的量程和精度等级。

解:由题意可知,被测对象的压力比较稳定,设仪表量程为 0~A MPa,则根据工作压力的要求有

$$A > 0.6 \div \frac{3}{4} = 0.8 \text{ MPa}$$

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

根据仪表的量程系列,可选用量程为 0~1.0 MPa 的弹簧管压力表。

由题意,被测压力的允许最大绝对误差为 $\Delta_{\max} = \pm 0.4 \times 4\% = \pm 0.016 \text{ MPa}$

这就要求所选仪表的相对百分误差为 $0.016 / (1 - 0) \times 100\% = 1.6\%$

因此,按照仪表的精度等级,可选择 1.5 级的压力表。

1.2.3 电气式压力计

1. 电气式压力计的定义

电气式压力计是一种能将压力转换成电信号进行传输及显示的仪表。

2. 电气式压力计的特点

(1) 测量范围较广,可测量 $7 \times 10^5 \text{ Pa} \sim 5 \times 10^2 \text{ MPa}$ 范围的压力,允许误差可至 0.2%。

(2) 由于可以远距离传送信号,所以在工业生产过程中可以实现压力自动控制和报警,并可与工业控制机联用。

3. 电气式压力计的组成

电气式压力计一般由压力传感器、测量线路和信号处理装置(指示器、记录仪、控制器)组成,如图 1-2-5 所示。

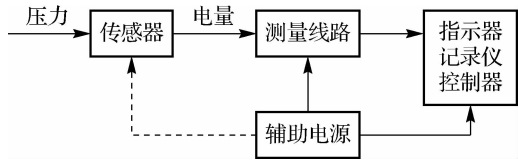
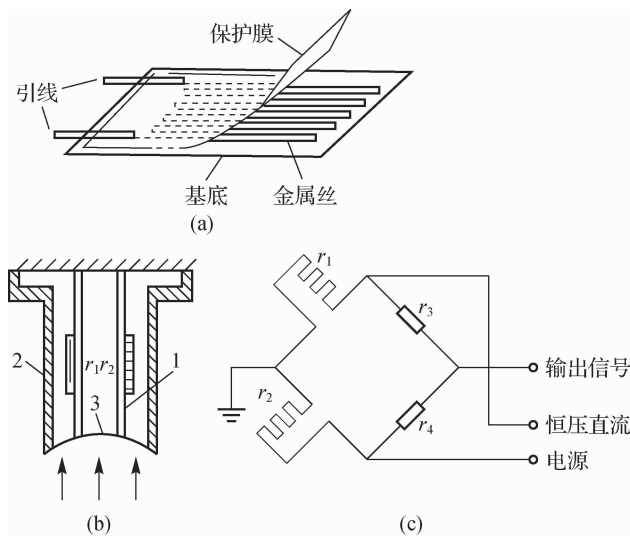


图 1-2-5 电气式压力计的组成框图

(1)应变片式压力传感器(图 1-2-6)。应变片式压力传感器利用电阻应变原理进行压力测量。电阻应变片有金属应变片和半导体应变片两类。当应变片受到压力产生压缩(拉伸)应变时,其阻值会减小(增大)。应变片阻值的变化通过测量桥路输出相应的毫伏级电势,并用毫伏计或其他记录仪表显示出被测压力值。



1—应变筒；2—外壳；3—密封膜片

图 1-2-6 应变片式压力传感器的工作原理

(a)应变片；(b)传感器筒；(c)测量桥路

(2)压阻式压力传感器(扩散硅压力变送器)。压阻式压力传感器利用单晶硅的压阻效应原理进行压力测量,如图 1-2-7 所示。

压阻式压力传感器采用单晶硅片为弹性元件,在单晶硅膜片上利用集成电路的工艺,在单晶硅的特定方向扩散一组等值电阻,并将电阻接成桥路,单晶硅片置于传感器腔内。

当圆形硅膜片受压变形时,其圆心区域和边缘区域受力性质不同。以半径的 63.2% 为界,圆心区域受拉应力,边缘区域受压应力。受拉时,扩散电阻阻值增大;受压时,扩散电阻阻值减小。四个电阻可以构成全桥电路。

在硅膜片上扩散四个阻值相等的电阻,接成全桥式输出电路,不但可以提高电桥灵敏度,还可以获得温度补偿,抵消半导体电阻随温度变化引起的误差。

压阻式压力传感器的特点是精度高、工作可靠、频率响应高、迟滞小、尺寸小、质量轻、结构简单。

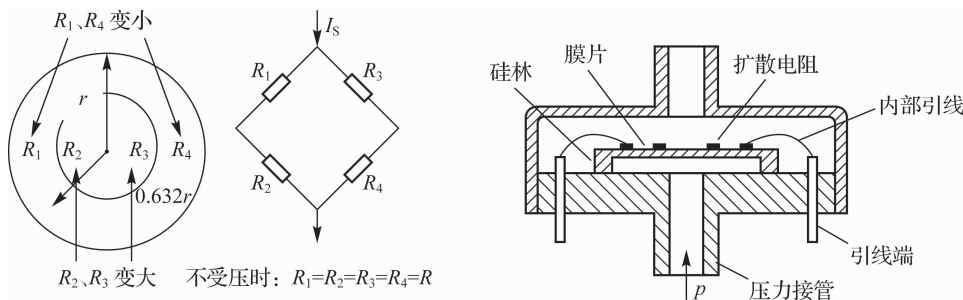
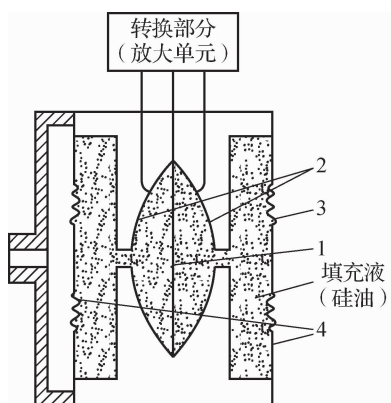


图 1-2-7 压阻式压力传感器的工作原理

(3)电容式压力变送器。电容式压力变送器的结构如图 1-2-8 所示,测量时,其先将压力的变化转换为电容量的变化,然后进行测量。



1—中心感应膜片(可动电极); 2—固定电极; 3—测量侧; 4—隔离膜片

图 1-2-8 电容式压力变送器的结构

电容式压力变送器的工作原理框图如图 1-2-9 所示。

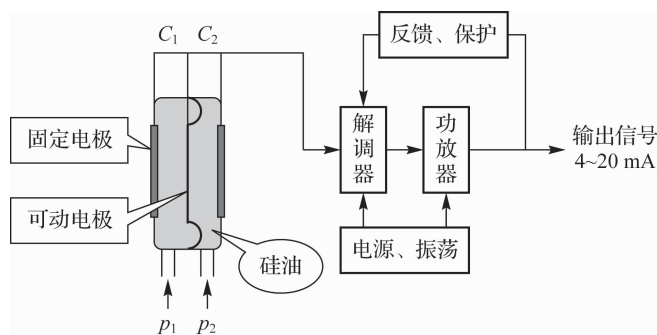


图 1-2-9 电容式压力变送器的工作原理框图



视频

电容式差压
变送器的工作
原理

目前,电容式压力变送器(图 1-2-10)在工业生产中应用非常广泛,其输出信号是标准的 4~20 mA 电流信号。

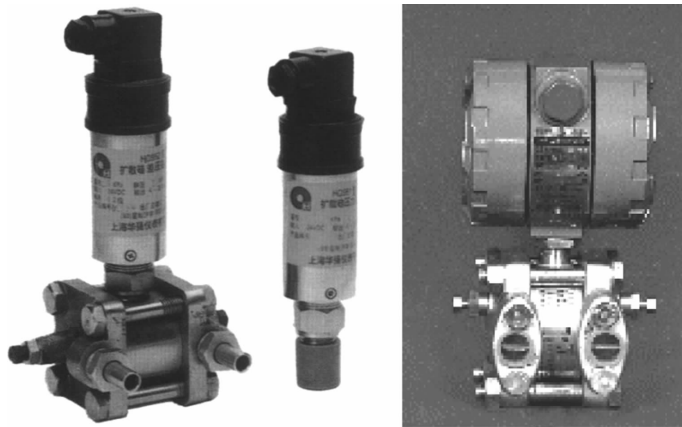


图 1-2-10 电容式压力变送器实物图

1.2.4 压力检测仪表的选用及安装

1. 压力检测仪表的选用

选用时应根据生产工艺对压力检测的要求、被测介质的特性、现场使用的环境等条件,本着节约的原则合理地考虑仪表的量程、精度、类型(材质)等。

1) 仪表量程

仪表的量程是指该仪表可按规定的精度对被测量进行测量的范围。

量程需要根据操作中需要测量的参数的大小来确定,同时必须考虑到被测对象可能发生的异常超压情况。对仪表的量程选择必须留有足够的余地,具体如下:

- (1) 测量稳定压力时最大工作压力 $p_{\max}$ 不超过上限值 $p_{\max}$ 的 $3/4$ 。
- (2) 测量脉动压力时最大工作压力 $p_{\max}$ 不超过上限值 $p_{\max}$ 的 $2/3$ 。
- (3) 测量高压压力时最大工作压力 $p_{\max}$ 不超过上限值 $p_{\max}$ 的 $3/5$ 。
- (4) 最小工作压力 $p_{\min}$ 不低于上限值 $p_{\max}$ 的 $1/3$ 。

仪表的量程等级为 1 kPa、1.6 kPa、2.5 kPa、4.0 kPa、6.0 kPa 以及它们 10^n 倍。

在选择仪表的量程时,应采用相应规程或者标准中的数值。

2) 仪表精度

(1) 根据生产允许的最大误差来确定仪表精度,即要求实际被测压力允许的最大绝对误差应小于仪表的基本误差。

(2) 在选择时应坚持节约的原则,只要仪表的测量精度能满足生产的要求,就不必刻意使用过高精度的仪表。

3) 仪表类型

正确选择仪表的类型是保证仪表正常工作及安全生产的前提,主要考虑以下几个方面:

(1) 仪表的材质。压力检测(检测仪表)的特点是压力敏感元件往往要与被测介质直接接触,因此在选择仪表材质的时候要综合考虑仪表的工作条件。

(2) 输出信号类型。只用于观察压力变化时,可选弹簧管压力表、液柱式压力计等直接指示型的仪表。

如需将压力信号远传到控制室或其他电动仪表,则可选用电气式压力检测仪表或其他具有电信号输出的仪表。

如果要检测快速变化的压力信号,则可选用电气式压力检测仪表,如压阻式压力传感器。

如果控制系统要求能进行数字量通信,则可选用智能式压力检测仪表。

(3) 使用环境。对于爆炸性的环境,在使用电气式压力仪表时,应选择防爆型压力仪表;对于温度特别高或特别低的环境,应选择温度系数小的敏感元件及其他变换元件。

上述原则也适用于差压、流量、液位等其他检测仪表的选型。

2. 压力检测仪表的安装

1) 一般压力检测量仪表的安装

无论选用何种压力仪表和采用何种安装方式,在安装过程中都应注意以下几点:

(1) 仪表必须经检验合格后才能安装。

(2) 仪表的连接处,应根据被测压力的高低和被测介质的性质,选择适当的材料作为密封垫圈,以防泄漏。

(3) 压力仪表尽可能安装在室温、相对湿度小于 80%、振动小、灰尘少、没有腐蚀性物质的环境下,对于电气式压力仪表应尽可能避免受到电磁干扰。

(4) 压力仪表应垂直安装。一般情况下,安装高度应与人的视线齐平,对于高压压力仪表,其安装高度一般应高于人的头部。

(5) 测量液体或蒸气介质压力时,应避免液柱产生的误差。压力仪表应安装在与取压口同一水平的位置上,否则必须对压力仪表的示值进行修正。

(6) 导压管的粗细应适中,一般为 6~10 mm,长度尽可能短,否则会引起测量迟缓。

(7) 压力仪表与取压口之间应安装切断阀,方便维修。

2) 特殊压力检测仪表的安装

测量高温(60℃以上)流体介质的压力时,为防止热介质与弹性元件直接接触,压力仪表之前应加装 U 形管或盘旋管等形式的冷凝器,避免因温度变化对测量精度和弹性元件产生影响,如图 1-2-11 所示。

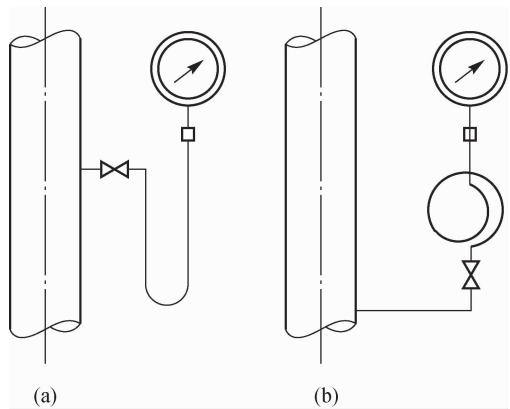
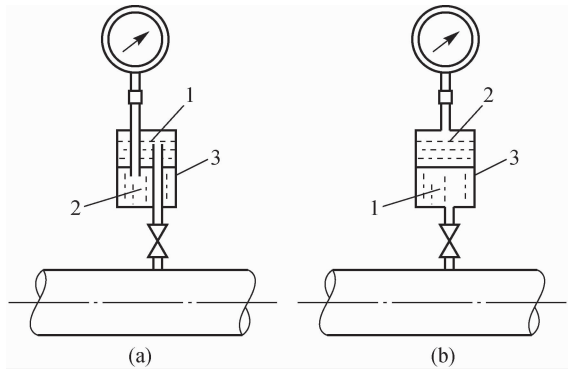


图 1-2-11 冷凝器

(a)U 形管;(b)盘旋管

测量高压流体介质的压力时,安装时压力仪表表壳应朝向墙壁或无人通过之处,以防发生意外。

测量腐蚀性介质的压力时,除选择具有防腐能力的压力仪表之外,还应加装隔离装置,利用隔离器中的隔离液将被测介质和弹性元件隔离开,如图 1-2-12 所示。



1—被检测介质; 2—隔离液; 3—隔离器

图 1-2-12 隔离装置

测量波动剧烈的压力(如泵、压缩机的出口压力)时,应在压力仪表之前加装针形阀和缓冲器,必要时还应加装阻尼器,如图 1-2-13 所示。

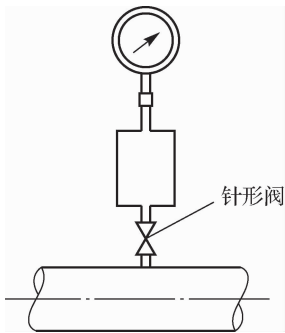


图 1-2-13 针形阀

测量黏性大或易结晶的介质的压力时,应在取压装置上安装隔离罐,使罐内和导压管内充满隔离液,必要时可采取保温措施,如图 1-2-14 所示。

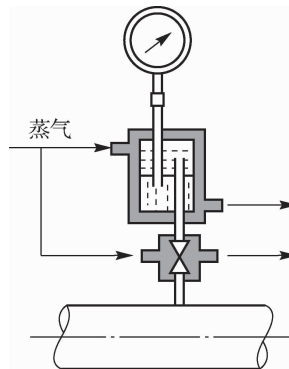


图 1-2-14 隔离罐

测量含尘介质的压力时,最好在取压装置后安装一个除尘器,如图 1-2-15 所示。

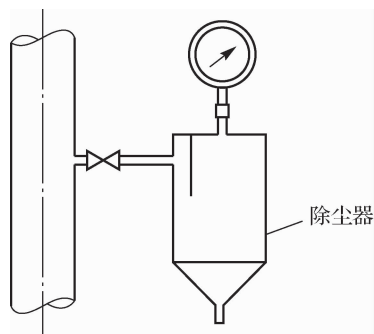


图 1-2-15 除尘器

总之,安装时针对被测介质的不同性质,要采取相应的防热、防腐、防冻、防堵和防尘等措施。

1.2.5 弹簧压力表的校定

压力表必须按照国家检定规程进行检定。

1. 检定设备与条件

(1)检定设备。采用弹簧管式精密压力表、精密真空表,其他同等级精度的标准器。校验时,标准器的综合误差应不大于被检压力表基本误差绝对值的 1/3。

(2)其他设备。主要有压力校验器,气体压力源、真空源,工作电压为 500 V 的兆欧表,检定氧气表用的隔离器。

(3)校定时环境温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

(4)检定用工作介质。

①测量上限不超过 0.25 MPa 的压力表,工作介质为清洁的空气,或无毒、无害和化学性

质稳定的气体。

②测量上限为 0.25~250 MPa 的压力表,工作介质为无腐蚀性的液体。

③测量上限为 400~1 000 MPa 的压力表,工作介质为药用甘油和乙二醇混合液或根据标准器所要求使用的工作介质。标准器与压力表使用液体为工作介质时,它们的受压点应基本在同一水平面上,否则应考虑由液柱高度差所产生的压力误差。

2. 安装

将被检表和标准表安装在压力表校验器上,接头内应放置密封垫,以防止泄漏。

3. 零点检查

(1)有零点限止钉的仪表,其指针应紧靠在限止钉上。

(2)无零点限止钉的仪表,其指针应在零点分度线宽度范围内。

4. 检定项目

一般压力表的检定项目有示值误差、回程误差和轻敲位移误差三项,对于电接点压力表应增加绝缘电阻项目。

5. 检定方法

检定时,标准表和被检表受压点应在同一平面上,如不在同一平面应考虑液柱差产生的误差。压力表的示值应按照分度值的 1/5 估读。

压力表的示值检定按标有数字的分度线进行。检定时平稳升压(或降压),当示值达到上限时,切断压力源(或真空源),耐压 3 min。然后按原检定点平稳地降压(或升压)倒序回检。

(1)检定点一般不少于 5 点,应包括常用点。精度等级低于 2.5 级的仪表,其校准点可以取 3 点,但必须包括常用点。

(2)对于每一个检定点,在升压和降压检定时,轻敲表壳,指针稳定后读数。

(3)示值误差、回程误差和轻敲位移的要求。

①仪表的示值误差不应超过仪表的允许误差。

②仪表的回程误差不应超过仪表允许误差的绝对值。

③仪表的轻敲位移不应超过仪表允许误差绝对值的 1/2。

6. 压力真空表真空部分的特殊检定要求

(1)测量上限为 2.4 MPa 的压力真空表放空后应能指向真空方向。

(2)测量上限为 0.15 MPa 真空部分检定两点示值。

(3)测量上限为 0.06 MPa 真空部分检定三点示值。

7. 电接点压力表的特殊检定要求

(1)绝缘电阻。压力表的电气部分与表壳之间的绝缘电阻在环境温度 15~35 °C,相对

湿度不大于 80%时,应小于 20 MΩ。

(2)设定点误差和切换差检定。使设定指针位于设定值上,平稳缓慢地升压或降压,直至信号接通或断开为止,在标准表上读取压力值为上切换差或下切换差。

(3)设定点误差应满足表 1-2-2 的要求。

表 1-2-2 电接点压力表设定点误差要求

精度等级	设定点偏差的允许值(以量程的百分数计算)/%	
	直接作用式	磁助作用式
1	±1	±0.5~±4
1.6(1.5)	±1.6	
2.5	±2.5	

(4)切换差要求。直接作用式应不大于允许误差的绝对值,磁助作用式应不大于量程的 3.5%。

(5)电接点压力表的接点动作误差应符合厂家规定值。对于厂家未规定接点动作误差的,其值应不超过仪表允许误差的绝对值的 1.5 倍。

8. 检定结果处理

(1)经检定合格的压力表应发检定证书,证书上说明合格的精度等级,强制检定的附有封泥标志。

(2)经检定不合格的压力表,发检定不合格通知书,并注明不合格项及内容。

(3)封装。压力表校定合格后,应予封印,标明校验日期。对于不符合原等级的压力表可以降级使用,但必须更改精度等级标志。

9. 检定周期

压力表的检定周期一般不超过半年。

1.3 流量测量

1.3.1 流量测量的认识

在化工和炼油生产过程中,为了有效地进行生产操作和控制,需要及时了解生产过程中各种介质的流量,对于某些输送设备(如压缩机、泵),通过控制流量的大小可以掌握其运行情况;同时为了实行成本核算,实现高产、低耗,也要知道某一段时间(如一班、一天、一月)内流过的介质总量。所以要保证化工生产过程优质高产,低耗安全,提高经济效益,必须对流量进行测量和控制。

1. 流量的基本概念

流量是指单位时间内流体通过管道某一截面的数量,称为瞬时流量,简称流量;而某一

段时间内流体通过管道某一截面的数量,称为总量。总量是瞬时流量在某一段时间内的累积值。

流量通常有两种表示方法:体积流量和质量流量。以体积表示的流量称为体积流量,常用符号 q_v 表示;以质量表示的流量称为质量流量,常用符号 q_m 表示。对应的总量也有体积总量、质量总量。

在国际单位制中,流量的单位是千克/秒(kg/s)和米³/秒(m³/s)。常用的单位有千克/小时(kg/h)、米³/小时(m³/h)等。总量的单位一般采用千克(kg)、吨(t)、立方米(m³)等。

测量流体流量的仪表是流量计,测量总量的仪表是计量表,然而两者并不能截然分割,在流量计上配以累积机构,也可以读出总量。

2. 流量测量仪表的分类

目前生产的流量测量仪表(流量计)的种类繁多,按其结构原理分类可概括如下。

(1)容积式流量计。这种流量计同日常生活中用容器计量体积的方法类似(被测流体不断充满一定容积的测量室),只是为了适应工业生产的情况,要在密闭管道中连续地测量流体的体积,就需设计一个特别的计量室,一般由仪表的表壳和活动壁组成。流体经过仪表时,在仪表的入口、出口之间产生压力差。此流体压力差推动活动壁旋转,将流体一份份排出,再统计积算机构累计排出的次数,即可得出流体的体积流量。如椭圆齿轮流量计、刮板流量计、腰轮流量计、旋转活塞式流量计。

(2)差压式流量计。这种流量计在流体流通的管道中插入一流通面积较小的节流件,根据动压能和静压能转换的原理,造成流体通过节流装置时,在节流装置的上下游之间产生静压差,通过测量压差求出流量值。如转子流量计、层流流量计、堰式流量计。

(3)速度式流量计。这种流量计在管道中安放一个翼形叶轮或螺旋叶轮,两端由轴承支撑着。当流体流过管道时,流体冲击叶轮使其旋转,其转速与流体的流量近似呈线性关系,从而由叶轮的转速求出流量的大小。如水表、涡轮流量计等。

(4)动压原理式流量计。这种流量计在迎着流体流动的方向安放一阻力体或使管道弯曲,则流体流过时由于流体流动受阻或迫使流体方向改变,流体必然要冲击此障碍物,失去动量并加在阻力体或弯曲管道上一个动压力。测出这个动压力或者作用在阻力体上的作用力,便可以知道流速,进而求出流量。如靶式流量计、挡板流量计、动压管流量计、皮托管流量计等。

(5)电磁流量计。这种流量计应用电磁感应原理测量流量,目前应用最广泛的是根据法拉第电磁感应定律进行流量测量的电磁流量计。

(6)超声波流量计。由于声波在静止流体中的传播速度与在流动流体中的传播速度不同,可以通过测量声波在流动介质中的传播速度的方法,求出流量的大小。

此外,还有应用流体离心力原理测量流量的离心式流量计,应用流体振荡原理测量流量

的旋进旋涡流量计和卡曼旋涡流量计,应用热能测量流量的热线风速计、托马斯流量计和边界层流量计等。

为了便于比较和选用,将常用流量计的原理、主要特点和应用场合列表,如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 各种流量计的原理、主要特点和应用场合

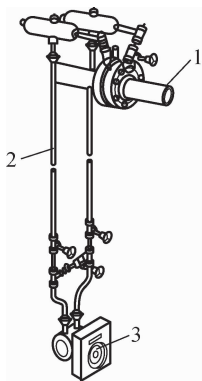
种 类	原 理		主要特点	应用场合
椭圆齿轮流量计	容积法原理		不受黏度因素影响,精度高,灵敏度高,结构复杂,量程比为 10 : 1	用于液体介质的测量,但介质应清洁,不受介质性质影响
腰轮流量计				用于液体介质的测量,但介质应清洁,不受介质性质影响,还可测大流量的气体流量
叶轮流量计	速度式测量原理		简单,可靠,量程比为 10 : 1	水表
涡轮流量计			精度高,灵敏度高,测量范围大,量程比为 10 : 1	用于气体、液体介质的测量,但介质应清洁
转子流量计	节流原理	恒压差原理	应用广泛,使用前要校正,量程比为 10 : 1	广泛用于气体、蒸气、液体介质的流量测量
差压式流量计		变压差原理	结构较简单,使用普遍,量程比为 3 : 1	
靶式流量计	动压原理		结构简单,可测一般流体和某些特殊介质,用途广,量程比为 3 : 1	气体、蒸气、液体介质,允许液体黏度大些及含杂质、固体颗粒、结晶等
电磁流量计	电磁感应原理		测量元件与介质不接触,不受流体性质的影响,量程比为 100 : 1,精度高	用于导电介质的测量,不受介质密度、黏度的影响,但不能测高压、高温介质
旋进旋涡流量计	流体振荡原理		不受流体性质的影响,精度高,量程比为 30 : 1	适用中小口径管道测量,可测高温、高压介质
卡曼旋涡流量计				适用于大口径管道测量

1.3.2 差压式流量计

1. 差压式流量计的组成

差压式流量计又称节流式流量计,它由三部分组成,如图 1-3-1 所示。

- (1) 节流装置,用于将被测流体的流量变换成差压信号,包括节流元件和取压装置。
- (2) 信号管路,用于传输差压信号。
- (3) 差压计或差压变送器及显示仪表,用于测量差压值。



1—节流装置；2—信号管路；3—变送器

图 1-3-1 差压式流量计组成示意图

下面分别介绍各部分的原理及其安装投运知识。

2. 节流原理

节流装置就是能使流体的流束产生收缩的元件，工业生产中应用广泛的有孔板、喷嘴和文丘里管。下面以孔板为例介绍节流原理。

流体流动时由于有压力而产生静压能，又由于有流动速度而具有动压能，这两种能量形式在一定条件下可以相互转化。根据能量守恒定律，流体的静压能和动压能在忽略阻力的条件下恒等转化。

如图 1-3-2 所示，当流体通过孔板时，截流面积突然缩小，流束必然产生局部收缩，流速加快。根据能量守恒定律，流速加快必然导致静压能降低，因而孔板的前后产生静压差。这个静压差的大小与流过流体的流量有一定关系，所以通过测量此压差，便可知流量的大小。

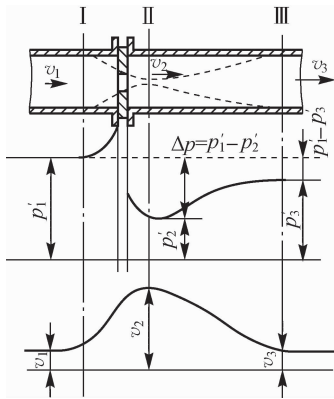


图 1-3-2 孔板附近流束及压力分布情况

3. 标准节流装置

(1)对于差压式流量计，由于使用历史长久，人们已经积累了丰富的实践经验和完整的实验资料。因此，国内外已把最常用的节流装置孔板、文丘里管等标准化，并称为“标准节流



视频

流体通过孔板
时流体的流动
状态和产生的
压力差



视频

孔板流量计

装置”。标准化的具体内容包括节流装置的结构、尺寸、加工要求、取压方法、使用条件等。例如,标准孔板对尺寸和公差、粗糙度等都有详细规定。如图 1-3-3 所示,其中 d/D 应在 $0.2\sim 0.8$;最小孔径应不小于 12.5 mm ,直孔部分的厚度为 $(0.005\sim 0.02)D$;总厚度 $H<0.05D$;锥面的斜角 $\alpha=30^\circ\sim 45^\circ$ 等,需要时可参阅设计手册。

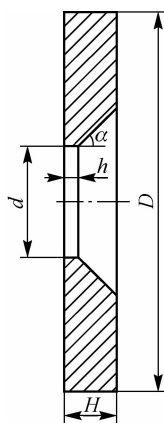


图 1-3-3 标准孔板轮廓图

(2)标准节流装置的取压方式。根据节流装置上下游侧取压孔的不同位置,标准节流装置的取压方式分为角接取压方式和法兰取压方式。角接取压方式是指上下游侧取压孔的轴线与孔板上下游侧端面的距离等于取压孔径的 $1/2$ 或取压环隙宽度的 $1/2$ 。角接取压具体形式有两种,即环室取压和单钻孔取压。法兰取压方式是指上下游侧取压孔的轴线与孔板上下游侧端面距离等于 $(25.4\pm 0.8)\text{ mm}$ 。

4. 变送器

变送器是单元组合仪表中不可缺少的基本单元之一,其作用是将感测部分测出的工艺变量转换成标准的信号,然后根据系统的需要送到有关单元。

按测量和传送的工艺变量不同,变送器可分为压力变送器、差压变送器、液位变送器、温度变送器等。

(1)压力变送器。一般意义上的压力变送器主要由测压传感器(压力传感器)、测量电路和过程连接件三部分组成。压力变送器能将测压传感器感受到的气体、液体等物理压力参数转换成标准的电信号(如 $\text{DC } 4\sim 20\text{ mA}$ 等),以供给指示报警仪、记录仪、控制器等二次仪表进行测量、指示和过程控制。

压力变送器根据测量范围可分成一般压力变送器($0.001\sim 35\text{ MPa}$)、微差压变送器($0\sim 1.5\text{ kPa}$)和负压变送器三种;从精度角度,又可以分为高精度压力变送器(0.1% 、 0.2% 或 0.75%)和一般压力变送器(0.5%);根据传感器种类,可分为电容式压力变送器、扩散硅压力变送器、单晶硅压力变送器,其中前两类应用最广,如 FisherRosemount 公司主要采用电容式(绝对压力采用扩散硅式)传感元件,而 Honeywell 公司则主要采用扩散硅式传感元件。

①电容式压力变送器的被测介质的两种压力通入高、低压室,低压室压力采用大气压或真空,作用在敏感元件的两侧隔离膜片上,通过隔离片和元件内的填充液传送到测量膜片两侧。测量膜片与两侧绝缘片上的电极各组成一个电容器,当两侧压力不一致时,测量膜片产生位移,其位移量和压力差成正比,故两侧电容量不等,通过振荡和解调环节,将电容量转换成与压力成正比的信号。

②扩散硅压力变送器由进口扩散硅压力芯片制成,当外界压力发生变化时,压力作用在不锈钢隔离膜片上,通过隔离硅油传递到扩散硅压力敏感元件上引起电桥输出电压变化,经过精密的补偿技术、信号处理技术转换成标准的电流信号。

③单晶硅压力变送器采用电磁激励和电磁拾振方式工作,输出为频率信号,抗干扰能力强,稳定性好,不需 A/D 转换,既能测量绝对压力,也能测量压差,精度达 0.1%,其量程可根据具体应用需求调整,是压力变送器中的一种高端产品。

(2)差压变送器。差压变送器是测量变送器两端压力之差的变送器。所测量的结果是压差。与一般的压力变送器不同的是,差压变送器均有 2 个压力接口,即正压端和负压端。一般情况下,差压变送器正压端的压力应大于负压端的压力才能测量。测量介质正负两端的压力差,转化成可以反映压力差的标准电流信号(4~20 mA)。

(3)3051C 型智能压力变送器。3051C 型智能压力变送器原理框图如图 1-3-4 所示,其由传感器组件和电子组件两大部分组成。工作时,高、低压侧的隔离膜片将过程压力传递给灌充液,接着灌充液将压力传递到传感器中心的传感膜片上。3051C 型智能压力变送器传感膜片是一个张紧的弹性元件,其位移随所受压而变化(对于 3051GP 压力变送器,大气压和施加在传感膜片的低压侧一样),3051AP 绝对压力变送器,低压侧始终保持一个参考压力。传感膜片的最大位移量为 0.004 英寸(0.1 mm),且位移量与压力成正比。两侧的电容极板检测传感膜片的位置。传感膜片和电容极板之间电容的差值被转换为相应的电流、电压或数字输出信号。

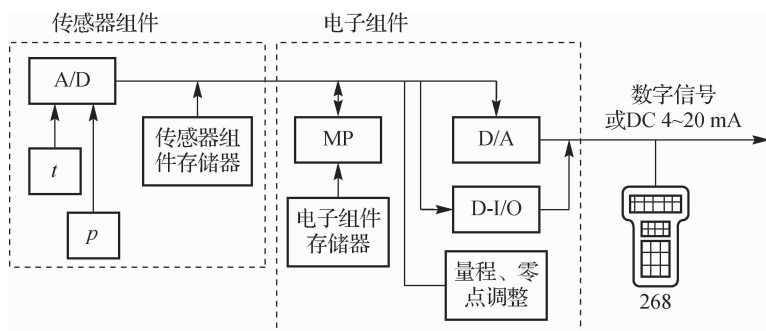


图 1-3-4 3051C 型智能压力变送器原理框图

(4)ST3000 智能压力变送器。ST3000 智能压力变送器原理框图如图 1-3-5 所示,其由复合传感器和微处理器两个主要部分组成。复合传感器将压力(或差压)、温度、静压三种传

感器采用集成电路的扩散工艺集成在一片单晶硅片上,三种传感器的测量信号周期地读入微处理器,经综合运算处理,完成精确的压力计算,一路经 D/A 转换输出 DC 4~20 mA 信号,另一路经数字 I/O 与采用同一通信协议的控制系统进行数字通信。

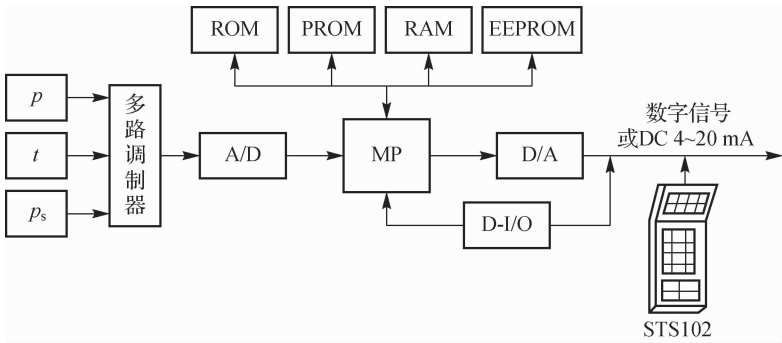


图 1-3-5 ST3000 智能压力变送器原理框图

5. 流量显示仪表

流量的显示一般有三种:就地显示、变送器显示和积算显示。

比例积算器结构框图如图 1-3-6 所示。它由直流转换器、积分电路、基准电压、间歇振荡器、单稳态触发器、驱动放大器、电磁计数器等部分组成。

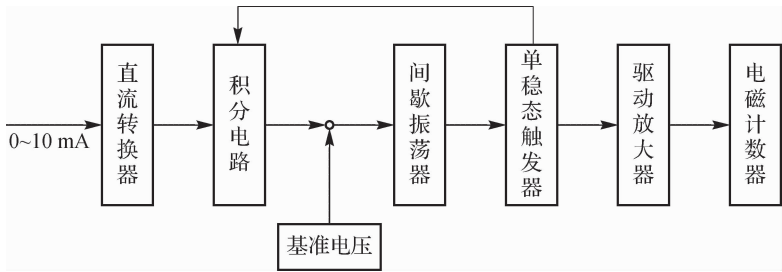


图 1-3-6 比例积算器结构框图

比例积算器先将反映流量大小的 0~10 mA 输入直流电流信号经转换器转换成恒定电流,再对积分电路中的积分电容充电。当充电电压达到基准电压时,间歇振荡器立即被触发动作,输出一脉冲信号,使单稳态触发器翻转。在单稳态触发器翻转的同时,一方面对驱动电路发出驱动信号带动电磁计数器跳字计数,另一方面又使积分电路电容迅速放电,接着又重新充电。这样就把输入的直流电流信号转换成驱动计数机构动作的脉冲信号。由于积分电容上的电压与其充电电流之间存在积分关系,因此,驱动脉冲的频率就与输入电流信号的大小成比例,从而实现了输入信号的累积,这就是比例积算器的工作原理。

比例积算器配合数字显示装置,还可显示瞬时流量。

6. 差压式流量计的选用、安装及投运

(1)差压式流量计的选用与安装。要使差压式流量计能够精确地实现流量测量,正确地选用和安装是十分重要的。只有按国家规定的各项技术要求正确地选用与安装节流装置、引压管和差压计,才能保证信号的正确获取、变送和显示。

差压式流量计的选用原则与压力表的选用原则是一致的,只是选择节流装置时,要注意节流装置与差压计配套。另外,介质的性质也要符合流量计设计中规定的要求。

差压式流量计的安装原则也与压力表的安装原则相同,只是在安装标准节流装置时,一定要符合标准节流装置的使用条件,还要注意节流装置的安装方向,并保证节流装置的开孔和管道的轴线同心以及节流装置的端面与管道的轴线垂直。此外,在差压计前要安一组平衡阀。

(2)差压式流量计的投运。差压式流量计在安装完毕,经过检查和检验,确认无误后,就可以投入运行。

开表前,必须首先将引压管内充满液体或隔离液,要通过排气阀将引压管中的空气排除干净。

在开表过程中,要特别注意差压计或差压变送器的弹性元件不能突然受压冲击,更不要处于单向受压状态。

以图 1-3-7 所示的差压式流量计测量系统为例说明仪表投运时的操作,图中,有关各阀起始时都处于关闭状态。

- ①打开节流装置引压口截止阀 1 和 2,使压力经引压管传至表前。
- ②打开平衡阀 7,并逐渐打开正侧切断阀 5,使差压计的正、负压室承受同样压力。
- ③开启负侧切断阀 6,并逐渐关闭平衡阀 7,仪表投入运行。

仪表在停运时,则与开表步骤相反,即先打开平衡阀 7,然后关闭正、负侧切断阀 5、6,最后关闭平衡阀 7。

运行过程中如果需要校验仪表零点,只需打开平衡阀 7,关闭切断阀 5、6 即可。

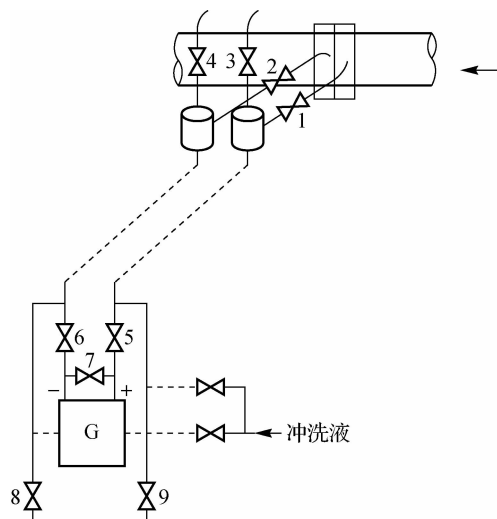


图 1-3-7 差压式流量计测量系统

1.3.3 转子流量计

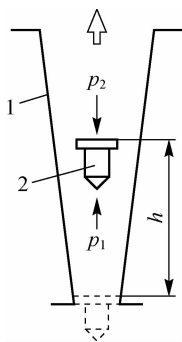
1. 转子流量计的原理

图 1-3-8 所示为转子流量计的原理结构,它由两部分组成:一部分是自下而上逐渐扩大的锥形管(通常用玻璃制成,锥度为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$);另一部分是放在锥形管内可以自由运动的转子。工作时,被测流体自下而上流过转子与锥形管之间的环隙,此时转子也是一个节流元件,根据节流原理,转子前后产生一个静压力 Δp ,这个静压力对应的“冲力”为 $F = \Delta p \cdot A_d$ (A_d 为转子面积),转子在这个“冲力”的作用下向上移动。移动过程中,流体流经转子的流通面积随之增大,根据节流现象,则对应的“冲力”随之降低。当“冲力”等于转子在流体中的重量时,转子就稳定在一个新的高度上。这样,转子在锥形管中平衡位置的高低与被测介质的流量大小相对应。如果在锥形管外沿其高度刻上对应的流量值,那么根据转子平衡位置的高低就可以直接读出流量的大小。



视频

转子流量计



1—锥形管; 2—转子

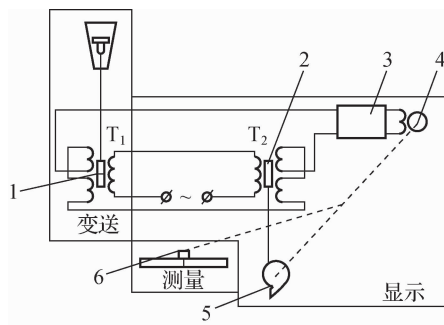
图 1-3-8 转子流量计的原理结构

2. LZD 系列电远传式转子流量计

转子的高度可以通过机械结构转换成电信号(或气信号),进行自动指示、记录和控制。

LZD 系列电远传式转子流量计的工作原理如图 1-3-9 所示,被测流体的流量变化引起转子产生位移的同时,也带动发送变压器 T_1 中的铁心 1 做上下移动,发送变压器 T_1 输出信号随之变化,经功率放大器 3 放大后,驱动可逆电机 4 转动,使反馈凸轮 5 偏转,同时带动指针 6 指示出流量的变化,带动接收变压器 T_2 的铁心 2 上下移动,使 T_2 输出的信号跟随 T_1 输出的信号变化。当两个变压器输出的信号相等时,功率放大器 3 接收到 0 信号,使可逆电机停转,这时整个仪表系统处于平衡状态。

由此可见,转子流量计和差压式流量计一样,都是根据节流原理实现流量测量的,不同的是差压式流量计采用变压差的节流原理工作,转子流量计采用恒压差的节流原理工作。



T_1 —发送变压器； T_2 —接收变压器

1、2—铁心；3—功率放大器；4—可逆电机；

5—反馈凸轮；6—指针

图 1-3-9 LZD 系列电远传式转子流量计的工作原理

1.3.4 其他流量计

1. 椭圆齿轮流量计

椭圆齿轮流量计属于容积式流量计，其测量原理如图 1-3-10 所示。当流体流过仪表时，在其入口、出口之间形成压差（节流原理），此压差推动两齿轮旋转，将流体一份一份地排出，其排出的流体总量为

$$q_v = 4nV_0$$

式中， n 为齿轮转速， r/min ； V_0 为齿轮与外壳间包围的体积， m^3 。

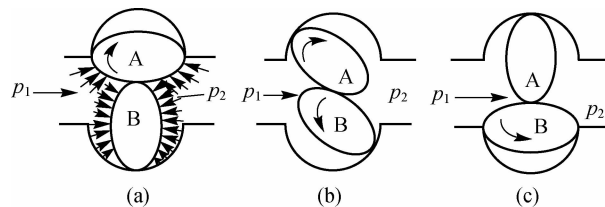


图 1-3-10 椭圆齿轮流量计的测量原理

这样，就将流量的测量转换成齿轮转速的测量。

2. 电磁流量计

图 1-3-11 所示为电磁流量计的原理结构，当导电流体在磁场中流动时，根据法拉第电磁感应定律，流体垂直切割磁力线，在两个电极上产生感应电动势，感应电动势的方向可以用右手定则判定。感应电动势的大小为

$$E_x = BDv$$

式中， E_x 为感应电动势， V ； B 为磁感应强度， T ； D 为管道直径， m ； v 为流体垂直于磁力线方向的流速， m/s 。



视频

椭圆齿轮流量计的工作原理

体积流量 q_v 与流速的关系为 $q_v = \frac{\pi}{4} D^2 v$, 将此关系式代入上式得

$$E_x = \frac{4B}{\pi D} q_v = K q_v$$

式中, K 为仪表常数。

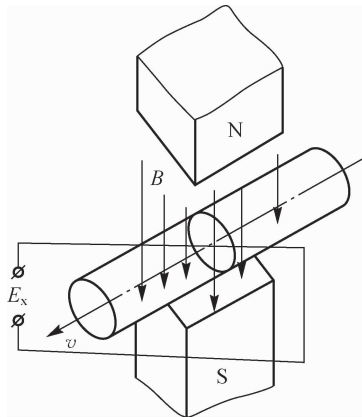
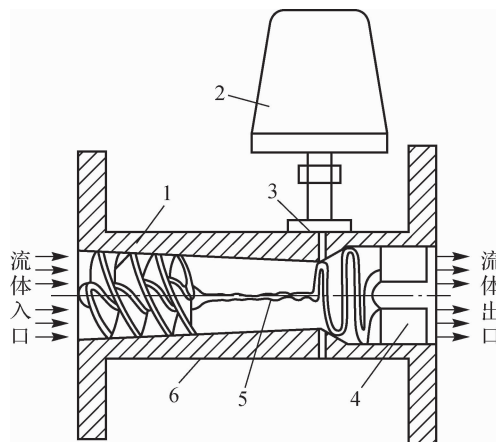


图 1-3-11 电磁流量计的原理结构

当管道已经确定, 并保持磁感应强度不变时, K 为常数, 则流量的大小与感应电动势 E_x 呈线性关系。因此, 在管道两侧各插入一根电极, 由电极引出的感应电动势的大小即可知流量值。

3. 旋涡流量计

旋涡流量计是根据流体振荡的原理设计而成的一种流量测量仪表, 它由测量管和变送器两部分组成, 如图 1-3-12 所示。



1—螺旋导流架；2—放大器；3—检测元件；4—除旋整流架；5—流体旋涡流；6—壳体

图 1-3-12 旋涡流量计原理示意图



视频
旋涡流量计

当被测流体流入测量管,经过螺旋导流架 1 后,形成具有旋转中心的涡流。在螺旋导流架 1 之后,测量管逐渐收缩,使涡流的前进速度逐渐加快。此时,流体中心是一束沿测量管中心线向前运动的、速度很高的旋涡流。在检测元件后,由于测量管内径突然扩大,流速突然急剧减慢,导致一部分流体形成回流。这样,从收缩部分出来的旋涡流的旋涡中心受到回流的影响后改变前进方向,使旋涡流不再沿着测量管的内腔中心线运动,而是围绕中心线转动,即旋进。旋进频率与流速成正比,只要测出旋涡流的旋进频率,就可获得被测流体的流量值。这种仪表也称旋进型旋涡流量计。



视频

涡轮流量计的

工作原理

由于旋涡流量计的输出是脉冲频率,所以可以用数字显示、积算以及与工业控制计算机联用。它具有精度高、结构简单、无可动部件、维护简便、量程比宽、使用寿命长等优点,几乎不受被测流体的压力、温度、密度、粘度等因素影响,因而使用越来越广泛。

1.4 温度测量

1.4.1 温度测量的基本知识

1. 温度测量的意义

温度是化工生产中既普遍又重要的操作变量。我们知道,任何一种化工生产过程都伴随物质的物理性质和化学性质的改变,也必然有能量的交换和转化,其中最普通的交换形式是热交换。因此,在不少反应过程中,温度对产品的质量和产量都有很大影响。如在石油工业中,精炼各种石油产品,就要严格地测量和控制温度,以保证产品的纯度。又如,合成氨是由氢和氮按 3 : 1 的比例在合成塔里通过 500 °C 左右的催化剂作用而生成的,如果温度变化了,产品的质量和产量就会受到影响。所以在化工生产中,温度的测量与控制是保证生产正常进行,实现安全、高产、优质、低耗的重要环节。

2. 温度的基本概念

温度是表征物体冷热程度的物理量,而物体的冷热程度又是由物体内部分子平均动能的大小决定的。

在自然界中,某些物质在温度变化时,其本身的某些物理性质(如体积、电阻等)会发生变化。这种物质即感温物质,人们正是利用感温物质来测量温度的。具体做法是:用感温物质与被测温物质接触,热交换达到平衡状态时,感温物质的温度就等于被测温物质的温度。而感温物质在温度变化时,本身的某个物理性质发生了变化。这样就将温度的测量转化成某个物理量的测量。例如,玻璃体温计是利用水银受热膨胀测温的,热电阻温度计是利用导体的电阻值随温度变化测温的。

3. 温标的概念

温标就是用来衡量温度的标尺,它是用数值来表示温度的方法,规定了温度的起点和测量温度的基本单位“度”。不同温标对同一点的温度表示的数值不同。

(1)摄氏温标(C)。摄氏温标又称百分温标,它是利用水银等物质体积热膨胀的性质建立起来的。摄氏温标规定在标准大气压下,冰的熔点为 0℃,水的沸点为 100℃,在 0℃和 100℃之间分成 100 等份,每 1 等份为 1℃。

(2)华氏温标(F)。华氏温标规定在标准大气压下,冰的熔点为 32°F,水的沸点为 212°F,中间分成 180 等份,每 1 等份为 1°F。

摄氏温标与华氏温标之间的关系为

$$F=1.8C+32$$

式中,C 为摄氏温标的温度示值;F 为华氏温标的温度示值。

(3)热力学温标(K)。热力学温标是以热力学第二定律为基础的温标,它已被国际权度大会采纳为国际统一的基本温标。热力学温标又称开氏温称(以 K 表示),它规定分子运动停止时的温度为绝对零度。热力学温标是纯理论性的,不能实际应用,于是就采用协议性的国际实用温标,这种温标不仅与热力学温标相接近,而且复现精度高,使用方便。

(4)国际实用温标。国际实用温标是用来复现热力学温标的,1989 年国际计量大会通过了 1990 年国际温标(ITS-90),中国自 1994 年起正式采用。ITS-90 规定:热力学温度是基本温度,用符号 T 表示。温度的单位是开尔文,用符号 K 表示,并定义 1 开尔文等于水三相点热力学温度的 1/273.16。国际实用开尔文温度与国际实用摄氏温度分别用 T_{90} 和 t_{90} 表示,实际工作中也可用 T 和 t 表示。两者的关系为

$$t_{90}=T_{90}-273.16\text{ K}$$

4. 测温仪表的分类

化工生产过程中温度的变化范围极广,有的处于接近绝对零度的低温,有的处于几千摄氏度的高温。这样宽的范围,需用各种不同的测量方法和测温仪表。下面重点介绍化工生产中最常见的热电偶和热电阻式测温仪表,对其他类型测温仪表只做一般介绍。各种测温仪表的分类、测温原理和特点见表 1-4-1。

表 1-4-1 各种测温仪表的分类、测温原理和特点

形 式	名 称		测温原理	测温范围/℃	特 点
接触式	膨胀式 温度计	液体膨胀式	利用液体、固体受热膨胀的原理	-200~500	结构简单,使用方便,比较准确,但不便远传和记录,用于轴承、定子点处的现场指示
		固体膨胀式			

续表

形 式	名 称		测温原理	测温范围/℃	特 点
接触式	压力式温度计	气体式	利用封闭在固定体积中的气体、液体或某种液体的饱和蒸气受热时,其体积或压力变化的性质	0~300	机械强度高,耐振动,但滞后大,用于测量易爆、有振动处的温度
		蒸气式			
		液体式			
	热电阻温度计		利用导体或半导体受热后电阻值变化的性质	-200~500	精度高,便于集中控制,但不能测高温,用于液体、气体、蒸气的中低温测量
	热电偶温度计		利用物体的热电效应现象	0~1 600	
非接触式	辐射高温计	光学式	利用物体辐射能的性质	600~2 000	结构复杂,价格高,只能测高温,用于测量火焰、钢水等的温度
		光电式			
		辐射式			

1.4.2 简单测温仪表

1. 双金属片温度计

双金属片温度计中的感温元件是用两片线膨胀系数不同的金属片叠焊在一起制成的。双金属片受热后,由于金属片的膨胀长度不相同而产生弯曲,如图 1-4-1 所示。温度越高,产生的线膨胀长度差越大,引起弯曲的角度就越大。

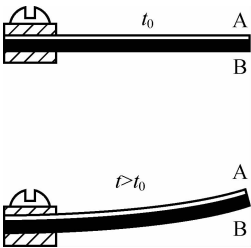


图 1-4-1 双金属片

用双金属片制成的温度计(图 1-4-2),通常被用作温度继电控制器、极值温度信号器或某一仪表的温度补偿器,也可制成工业用指示式双金属片温度计。

2. 压力式温度计

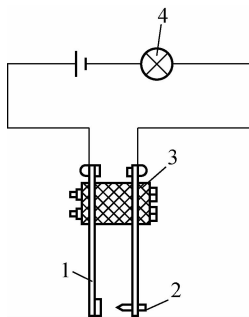
压力式温度计是基于封闭容器中的液体、气体或某种液体的饱和蒸气受热后体积膨胀或压力变化的性质来工作的。

压力式温度计的结构如图 1-4-3 所示,它由测温元件(温包和接头)、毛细



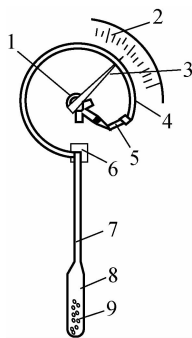
视频
压力式温度计
的工作原理

管和盘簧管等元件构成一个封闭系统,系统内充填的工作介质可以是气体、液体或低沸点液体的饱和蒸气等。温包置于被测介质中,温包内的工作物质因温度升高而压力增大,该压力变化经毛细管传给盘簧管,并使其产生一定的形变,然后借助指示机构指示出所测的温度数值。



1—双金属片；2—调节螺钉；3—绝缘子；4—信号灯

图 1-4-2 双金属片温度计的结构



1—传动机构；2—刻度盘；3—指针；4—盘簧管；5—连杆；6—接头；7—毛细管；8—温包；9—工作物质

图 1-4-3 压力式温度计的结构

温包、毛细管和盘簧管是压力式温度计的三个主要元件,仪表的质量与各元件的关系极大。因此,对它们的性能有一定的要求。

温包是直接与被测介质接触、用来感受被测介质温度变化的元件,因此要求它具有较高的强度、小的膨胀系数、高的热导率以及抗腐蚀等性能。温包常用黄铜制造,在测量腐蚀性介质的温度时,可以用不锈钢来制造。

毛细管是用铜或钢等材料冷拉成的无缝细圆管,用来传递压力的变化。它的直径越细,长度越长,则传递压力的滞后现象就越严重,也就是该温度计对被测温度的反应越迟钝。然而,在同样长度下毛细管越细,仪表的精度就越高。毛细管容易被损伤、折断,因此必须加以保护,对不经常弯曲的毛细管可用金属软管做保护管。

盘簧管为一般压力表的弹性元件。

压力式温度计用于测量 $0\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度,其允许误差不超过 $\pm 2.5\%$,测温距离不超过 60 m 。它的构造简单,价格便宜,不怕震动,不需电源。这些特点使其特别适用于化工生产

中转动设备的温度测量,所以目前在尿素生产中的 CO_2 压缩机上有多处采用它测温。它的缺点是滞后较大,因此,在要求快速反映温度变化的场合不适用。

3. 集成温度传感器

近几年,集成温度传感器得到了广泛的应用,几乎应用于所有的电子系统,测温范围一般为 $-40\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。例如,一部手机中至少需要用一个温度传感器来监视电池工作,笔记本电脑至少会用四个温度传感器监测 CPU、交流适配器和 PCMCIA 卡等元器件的温度。与传统温度传感器(热敏电阻、热电偶等)相比,集成温度传感器具有很多优越性,如体积小、反应快、线性好、性能高、价格低,不需要线性化或冷补偿就能提供更好的噪声特性,且可以与数字系统直接连接等。

集成温度传感器的工作原理利用了半导体器件的温度特性。因为晶体管的基极-发射极之间的正向压降随温度升高而减小,利用这一性质,将感温 PN 结晶体管与有关电子线路进行集成,从而构成一体化温度检测元件。

在实际组成电路中还包括恒流、稳压、输出和校正电路等。集成温度传感器的外形与普通晶体管基本相同,有的用金属封装,有的用塑料封装。使用时,因其响应速度取决于热接触条件,所以要求其必须与被测物体有良好的接触。

按照输出信号的模式,集成温度传感器可分为集成模拟式、集成数字式和逻辑输出式三种类型。

(1)集成模拟式温度传感器。集成模拟式温度传感器输出与被测温度呈线性关系的电压或电流信号。对应这两种输出信号,通常将集成模拟式温度传感器分为电流输出型和电压输出型,如图 1-4-4 和图 1-4-5 所示。在组成上,集成模拟式温度传感器将驱动电路、信号处理电路及必要的逻辑控制电路全部集成在单片集成电路上,大大减小了传感器的实际尺寸,使用极为方便。与传统模拟式温度传感器(如热电偶、热敏电阻等)相比,其具有温度线性好、不需要进行冷端补偿或引线补偿、热惯性小、响应时间快等优点。

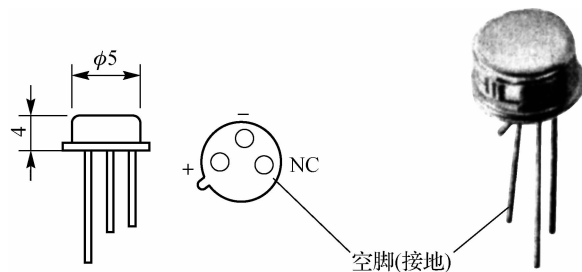


图 1-4-4 电流输出型集成温度传感器(AD950)

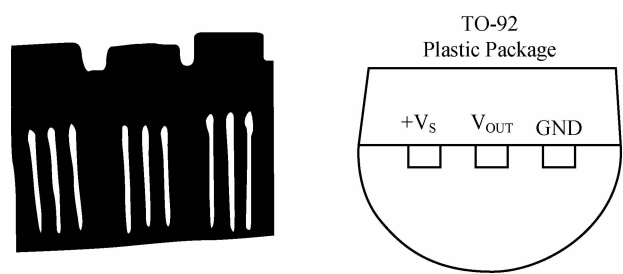


图 1-4-5 电压输出型集成温度传感器(LM35)

(2)集成数字式温度传感器。集成数字式温度传感器输出与被测温度呈对应关系的频率、周期或定时三种信号。通过单线与微处理器进行温度数据的传送,在一条传输线上可挂接多个传感器实现多点检测、直接输出数字量;通过双向总线,可以实现同外部电路进行控制信号和数据的通信。图 1-4-6 所示为利用 89C51 单片机的 I/O 接口和 DS1820 数字式温度传感器实现多点温度检测。

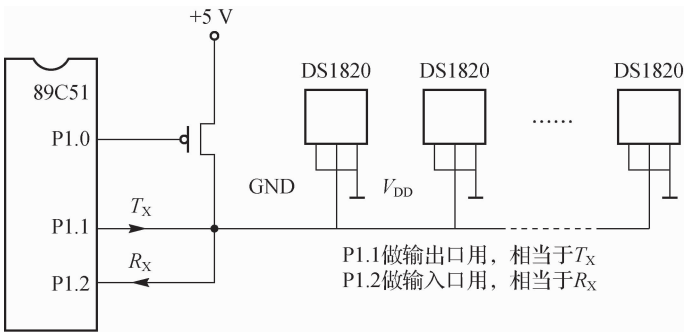


图 1-4-6 集成数字式温度传感器实现多点温度检测

(3)逻辑输出式温度传感器。逻辑输出式温度传感器的作用是当被测温度超出规定的设定范围时,发出报警信号,启动或关闭风扇、空调、加热器或其他控制设备。如图 1-4-7 所示,利用逻辑输出式温度传感器控制计算机 CPU 的散热风扇。



图 1-4-7 CPU 散热风扇控制系统

1.4.3 热电偶

1. 热电偶的结构与选用

各种热电偶通常均由热端、热电极、绝缘子、保护套管和接线盒等部分组成,图 1-4-8 所示为普通热电偶的结构。

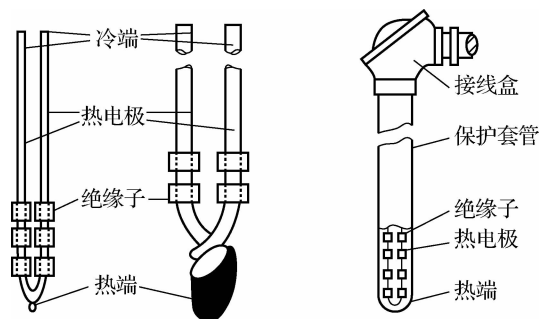


图 1-4-8 普通热电偶的结构

热电偶的热端可以采用电弧、乙炔焰或氢氧焰对接或钎焊成光滑的小圆点。两根热电极分别套有绝缘子,以防短路。为了使热电极免受化学或机械损伤,以获得较长的使用寿命和较高的准确性,通常将套有绝缘子的热电极装入由不锈钢或其他材料制成的保护套管内。自由端由接线盒内端子与外部导线相连接。

热电偶的结构形式除上述带有保护套管的以外,还有薄膜式、套管式(也称铠装式)和树枝式。

一般在常压下可采用普通热电偶;温度变化频繁时,采用时间常数小的热电偶;被测介质具有一定压力时,可采用固定螺纹和普通接线盒结构的热电偶;当周围环境恶劣,须防水、防腐蚀、防爆时应采用密封式接线盒的热电偶;对于高压流动介质,须采用有固定螺纹和锥形保护管的热电偶;对于狭小管道内的温度测量应采用套管式热电偶,它是由热电极、绝缘的氧化物材料和金属套管三者组合加工而成的坚实组合体,最大特点是直径可小于 $\phi 0.25\text{ mm}$,热惰性小。时间常数在 $0.05\sim 1.5\text{ s}$,具有良好的可挠性,耐冲击,是弯曲的狭小管道和高压装置的理想测温元件。对于表面温度的测量可采用薄膜式热电偶,其特点是反应速度快(可达 $10\text{ ms}\sim 1\text{ s}$),精度高,适宜小面积表面温度测量。此外,在小型合成氨厂测量合成塔内各触媒层反应温度时,因设备上只留一个保护管,不能装多对热电偶,一般用 $\phi 0.5\text{ mm}$ 左右的镍铬-镍硅热电偶丝制成树枝式热电偶。

2. 热电偶冷端温度的影响及其补偿方法

分析热电偶的测温原理时假定冷端温度恒定,而热电偶的分度表也是在冷端为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下得到的,显示温度的仪表标尺也是按分度表进行刻度的。所以,要使被测温度能真实地反映在仪表上,就必须进行冷端温度补偿。冷端温度补偿即设法使冷端保持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或进行一定的修正的方法。

在进行冷端温度补偿前,首先应将冷端引到远离现场、温度相对恒定的地方。最简单的方法就是将热电极延长,但热电极一般都是由贵重金属材料制成的,这样做会增加仪表的成本。所以通常都是用补偿导线延伸的方法,在 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,某些材料同热电极材料的热电特性很接近,可以取代热电极将热电偶的冷端延伸到远离热源、温度稳定的地方,这种材料制成的导线称为补偿导线,补偿导线习惯上又称延长导线。因为热电偶有极性,所以补偿导线也有极性,使用时不可接错。常用热电偶的补偿导线见表 1-4-2。

表 1-4-2 常用热电偶的补偿导线

热电偶名称	补偿导线			
	正 极		负 极	
	材 料	颜 色	材 料	颜 色
铂铑 10-铂	铜	红	铜镍	绿
镍铬-镍硅(镍铝)	铜	红	铜镍	蓝
镍铬-铜镍	镍铬	红	铜镍	棕
铜-铜镍	铜	红	铜镍	白

使用补偿导线后,冷端温度相对稳定,但仍不为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,需进行冷端温度补偿。

1.4.4 热电阻

热电偶一般适用于较高温度的测量,对于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的中、低温测量,用热电偶就不一定恰当。第一,在中、低温区热电偶的输出电势很小,这样小的热电势,对于测量仪表的放大器和抗扰动能力要求很高,使得仪表结构复杂,维修也困难;第二,在较低的温度区域,冷端温度的变化和环境温度的变化所引起的相对误差就显得很突出,而冷端补偿方法中,全补偿很困难。所以在中、低温区,一般使用另一种测温元件——热电阻来进行测温。

1. 热电阻的测温原理

热电阻是基于金属导体的电阻值随温度变化而变化的特性来进行温度测量的。大多数金属导体都具有正的温度系数。实验证明,温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,电阻值增加 $0.4\%\sim 0.6\%$ 。

热电阻的电阻值与温度的关系如下:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)] = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

$$\Delta R_t = \alpha R_0 \Delta t$$

式中, R_t 为温度为 t 时的电阻值; α 为电阻温度系数; Δt 为温度的变化量; R_0 为温度为 t_0 (通常为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时的电阻值; ΔR_t 为电阻值的变化量。

可见,温度的变化导致了金属导体电阻值的变化。这样,只要设法测出电阻值的变化,便可达到测量温度的目的。

2. 热电阻的材料及结构

热电阻材料的一般要求为:电阻温度系数、电阻率要大;热容量要小;在整个测量范围内

应有稳定的化学、物理性质以及好的复现性;电阻值与温度应呈线性关系。

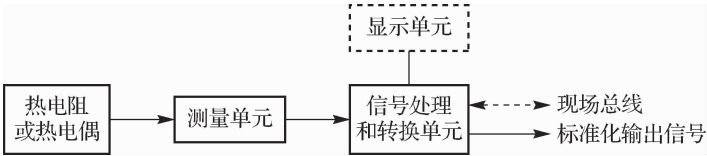
工业上常用的热电阻有铜电阻和铂电阻两种,分度号分别为 Cu50($R_0=50\ \Omega$)、Cu100($R_0=100\ \Omega$)、Pt50($R_0=50\ \Omega$)及 Pt100($R_0=100\ \Omega$)。

热电阻通常由电阻体、绝缘子、保护套管和接线盒四部分组成,除电阻体外,其余部分结构与热电偶相应部分相同,不再叙述。

1.4.5 温度变送器

温度变送器是一种将温度变量转换为可传送的标准化输出信号的仪表,主要用于工业过程温度参数的测量和控制。变送器有电动单元组合仪表系列的(DDZ-Ⅱ型、DDZ-Ⅲ型和 DDZ-S 型)和小型化模块式的、多功能智能型的。前者均不带传感器,目前已经淘汰,后两类变送器可以方便地与热电偶或热电阻组成带传感器的变送器。

带传感器的变送器通常由两部分组成:传感器和信号转换器。传感器主要是热电偶或热电阻;信号转换器主要由测量单元、信号处理和转换单元组成(由于工业用热电阻和热电偶分度表是标准化的,因此信号转换单元作为独立产品时也称为变送器),有些变送器增加了显示单元,有些还具有现场总线功能。智能温度变送器的原理图如图 1-4-9 所示。



标准化输出信号主要为 0~10 mA 和 4~20 mA(或 1~5 V)的直流电信号,不排除具有特殊规定的其他标准化输出信号。除 RWB 型温度变送器为三线制外,温度变送器按供电接线方式可分为两线制和四线制。

温度变送器接外形结构分有模块式温度变送器和导轨式温度变送器两种,如图 1-4-10 所示。

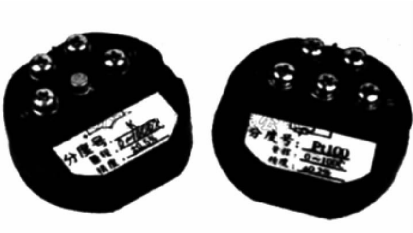


图 1-4-10 温度变送器的外形结构

1.4.6 测温仪表的选用及安装

为了经济有效地进行温度测量,测温仪表及元件的精度固然重要,但正确选用和合理安

装也是十分重要的。为此,这里就一些原则性的问题做简单的介绍。

1. 测温仪表(包括二次仪表)的选用原则

(1)根据工艺要求(是否需要指示、记录和自动控制)、操作和环境条件、被测物质的温度范围来确定测量仪表的类型。在保证技术先进、安全可靠、测量准确的条件下,选用经济实用的仪表。尤其要注意:当被测物体很小时,应选热容量小的测温元件,以免破坏被测物体的温度场;当测量不断变化的温度时,应采用短时间内见效的测温元件;测温元件不能腐蚀被测介质。

(2)测温元件确定后,要注意与显示仪表配套使用,与补偿导线配套使用,与冷端温度补偿器配套使用(针对热电偶)。

(3)所选仪表应便于安装、使用维护和修理,且能合理地保持仪表的寿命。

2. 测温元件的安装

接触式测温仪表都是通过测温元件来感受被测介质的温度,如果安装错误,即使仪表的精度很高,也测不到准确的值,也就起不到指导生产的作用。一般在安装测温元件时要掌握以下四个原则:

(1)测温元件的安装应确保测量的准确性。

(2)测温元件的安装应确保安全、可靠。

(3)测温元件的安装应便于工作人员的维修、检验和拆装。

(4)在加装保护外套时,为减小测温的滞后,可在套管之间加装传热良好的填充物。如温度低于 150℃ 时,可充填铜屑或石英砂,以保证传热良好。

3. 布线要求

(1)按照规定型号配用热电偶补偿导线,注意正、负极不能接错。

(2)导线应尽量避免有接头。

(3)不能与交流输电线合用一根穿线管,并注意有良好的绝缘。

(4)为避免交流电引起的感应,在导线附近应避免有动力线存在。

思考与练习

1. 仪表的误差如何表示? 什么是基本误差? 什么是附加误差?
2. 测量仪表由哪几部分组成? 各部分的作用是什么?
3. 压力表的选用原则是什么?
4. 解释节流原理。常用的节流装置有哪些?
5. 标准节流装置应满足哪些使用条件?
6. 转子流量计为什么要进行修正? 怎样修正?
7. 热电偶与显示仪表连接时,为什么要用补偿导线? 使用补偿导线应注意什么?
8. 什么是冷端温度补偿? 冷端温度补偿有哪几种补偿方法?

项目二 执 行 器

2.1 气动执行器

2.1.1 概述

1. 执行器

执行器接收控制器送来的控制信号,改变被控介质的流量,从而将被控变量维持在所要求的数值上或一定的范围内。按能源形式,执行器可分为以下三类:

- (1)气动执行器。
- (2)电动执行器。
- (3)液动执行器。

2. 结构

1)执行机构

执行机构是执行器的推动装置,它按控制信号压力的大小产生相应的推力,推动控制机构动作,所以它是将信号压力的大小转换为阀杆位移的装置。

2)控制机构

控制机构是执行器的控制部分,它直接与被控介质接触,控制流体的流量,所以它是将阀杆的位移转换为流过阀的流量的装置。

3. 常用辅助装置

阀门定位器是气动执行机构的辅助装置,与气动执行机构配套使用。按所配执行机构来分,有配薄膜执行机构、配活塞执行机构等。按输入信号来分,有气动阀门定位器和电-气阀门定位器。它主要有以下作用。

(1)克服阀杆与密封腔间的静摩擦力和阀芯前后压力差对阀芯产生的不平衡力的影响,使阀芯动作灵敏,保证正确定位,改善静特性。

(2)放大控制器信号功率,减少长管线、大薄膜气室引起的容量滞后,从而改善控制阀的动特性。



视频

气动薄膜调节阀