

工业自动化仪表丛书

3



压力测量仪表

谭祖根 编

机械工业出版社

79.852
848

工业自动化仪表丛书

压力测量仪表

谭祖根编

机械工业出版社

前 言

工业自动化仪表是实现工业生产过程自动化的一种重要装置。通过工业自动化仪表来了解生产过程中的物质变化状态，并将生产过程控制在预定的条件之下，确保着生产的优质、高效和安全。

随着我国社会主义工业的发展，工业自动化仪表已日益广泛地应用于冶金、电力、化工、石油、轻纺、机械等工业部门，其发展前途是十分广阔的。

为了适应工业自动化仪表迅速发展的需要，进一步做好技术交流与推广工作，我们组织编写了这套《工业自动化仪表丛书》。本丛书预定为二十册。分别为：《工业自动化仪表》、《温度测量仪表》、《压力测量仪表》、《流量测量仪表》、《物位测量仪表》、《机械量测量仪表》、《核辐射式检测仪表》、《自动平衡显示仪表》、《动圈指示调节仪表》、《自动调节仪表》、《电动单元组合仪表》、《气动单元组合仪表》、《射流技术及其应用》、《工业控制计算机》、《电动执行器》、《气动执行器》、《工业程序控制装置》、《工业仪表防护》、《工业仪表应用》和《工业仪表维修》等，将陆续分册出版。

本丛书力求以深入浅出、通俗易懂的文字，辅以图表的形式，简要介绍各类工业自动化仪表的结构原理、性能特点、安装使用以及维修等知识，供同志们参考。但由于我们水平有限，因而书中一定存在不少缺点，甚至错误，欢迎同志们批评指正。

本丛书在编写过程中，曾得到有关工厂、大专院校、科研单位的大力支持，在此谨致谢意。

《工业自动化仪表丛书》编写组

目 录

第一章 绪论	1
一、压力测量的意义	1
二、压力的概念	2
三、压力的单位	3
四、压力测量仪表的分类	4
第二章 液柱式压力计	6
一、U形管压力计	6
二、单管式压力计	8
三、斜管微压计	9
四、液柱式压力计使用时注意事项	11
第三章 弹性压力计	15
一、弹簧管压力计	15
(一) 工作原理	15
(二) 弹簧管的特性与材料	17
(三) 使用安装中的注意事项	21
(四) 多圈弹簧管压力计	21
二、膜式压力计	24
(一) 膜片压力计的工作原理	24
(二) 膜片的基本知识	25
(三) 膜盒压力计	29
(四) 膜式压力计的检修	31
三、波纹管压力计	33
(一) 波纹管压力计的工作原理	33
(二) 波纹管的计算	35
四、特殊用途的压力计	38

(一) 电接点压力计	38
(二) 瞬时压力计	39
(三) 耐振压力计	40
(四) 抗硫压力计	41
(五) 隔膜压力计	41
(六) 热带型压力计	42
(七) 耐高温压力计	43
第四章 电测压力计	44
一、电阻式压力计	45
(一) 电位计式压力计	45
(二) 应变式压力计	48
(三) 压阻式压力传感器	63
二、电感式压力计	66
(一) 自感电势与电感参数	66
(二) 电感式传感器的基本原理	67
(三) 电感式压力传感器	70
(四) 测量线路	71
三、差动变压器式压力计	75
(一) 差动变压器的基本原理	75
(二) 差动变压器的结构	78
(三) 差动变压器式压力传感器	80
(四) 差动变压器的测量线路	83
四、电容式压力计	85
(一) 电容式传感器的基本工作原理	85
(二) 电容式压力传感器	89
(三) 测量线路	91
五、霍尔式压力计	97
(一) 霍尔效应与霍尔元件	97
(二) 霍尔式压力传感器的工作原理与结构	98

Ⅵ

(三) 测量电路和指示仪表	102
六、振弦式压力计	102
(一) 工作原理	102
(二) 振弦式压力传感器的结构	104
(三) 测量电路	109
七、压电式压力计	114
(一) 压电效应与压电材料	114
(二) 压电式压力传感器	116
(三) 测量电路	117
第五章 力平衡式压力计	123
一、基本原理	123
二、力平衡式压力计的基本组成部分	126
(一) 敏感元件	126
(二) 偏差指示器	126
(三) 放大器	127
(四) 可逆电动机	127
(五) 力和力矩发生器	127
(六) 示数机构	128
(七) 其他装置	128
三、SYD-1 型压力变送器	129
四、力平衡式压力计的静特性和静态误差	131
第六章 压力计的校验	138
一、标准表比较法	138
(一) 压力泵的结构原理	138
(二) 校验方法	139
(三) 压力泵的保养与一般故障的修理	140
二、砵码校验法	141
(一) 活塞式压力校验器的结构与工作原理	141
(二) 校验方法	142
(三) 活塞式压力校验器的保养	143
三、激波管校验法	144

第一章 绪 论

一、压力测量的意义

在现代工业生产过程中，压力是一个非常重要的参数，它决定了生产过程能否正常的进行。例如在合成氨生产中，氢气与氮气在合成塔内合成，压力是决定这个化学反应的主要因素之一，它既影响物料平衡关系，也影响化学反应速度，所以必须严格遵守工艺操作条件，保持一定的压力，才能确保生产正常地进行。

近代热力设备趋向于采用高压工质，如果对压力缺乏可靠的检查，可能会使设备损坏，甚至引起设备爆炸事故，直接危及设备和工作人员的安全。例如发电厂的高温高压鼓形锅炉，若没有汽锅压力计和水位计连续监视汽压和水位的变化情况，就很难正确控制给水量，对这类锅炉只要停止半分钟给水，就会使压力突增，如无压力计监视报警，将会发生重大爆炸事故。又如化肥厂多台高压机在运行中需用机油来润滑活动部位，当油泵输出压力下降而未检测到，设备不能及时得到润滑，将使活动部位温度上升而损坏设备。

在某些条件下，压力还直接决定设备的经济性，例如汽轮机排汽的真空度，内燃机的排气背压都对设备的效率有重大影响。

此外，在研制一些新产品时，例如工业汽轮机、内燃机、航空发动机等，必须测得压力和其它参数间的关系，以确定其性能。

由于在工业生产过程和科学实验中，压力测量是一个非常重要的环节，所以压力测量仪表在工业生产中使用得非常广泛。例如一台五万千瓦发电机组所用的压力表有近百只之多，直接关系到主机的安全、经济运行的压力参数测量共有十一处，它包括主蒸汽压力、汽锅压力、给水压力、汽轮机监视段压力、汽轮机调速门压力、汽轮机真空度等。在以前常用的压力测量仪表大多为液柱式压力计和弹性压力计，随着工业技术的不断发展，很多企业的生产要进行集中控制和使用电子计算机控制，所以普通弹性压力计的压力测量仪表就无法实现，为此必须采用把压力转换为电参数的电测压力计，以便于观察、记录、远传和控制，这也是今后压力测量仪表生产和使用的一个方向。

二、压力的概念

在物理学中，将液体、气体或蒸汽介质垂直作用于单位面积上的力称为“压强”，在工程技术上一般称它为“压力”。这种压力是由介质的分子运动对容器壁的作用而产生的。

根据上述定义，压力 p 可用下式表示：

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中 F ——物体上作用的力；

A ——力作用的表面积。

在工程技术中，经常采用两种表示压力的方法，即绝对压力和表面压力。绝对压力 p_g 是指被测介质作用在单位面积上的全部压力，而表压力 p_b 是相对压力，为超出大气压力 p_d 的压力。它们之间的关系可用下式表示：

$$p_g = p_b + p_d \quad (1-2)$$

或

$$p_b = p_g - p_d \quad (1-3)$$

由于生产过程中使用的压力测量仪表，一般都是处于大气压力之中，所以它的指示值总是指出被测介质压力超出大气压力的数值，即表压力。在后面各章中如无特别说明，各种压力测量仪表测量出的被测介质的压力均指表压力。

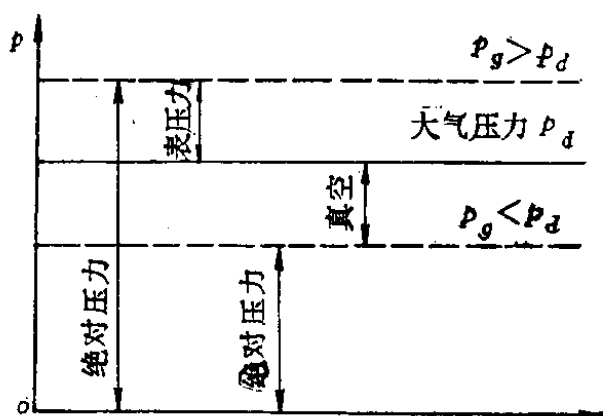


图1-1 压力间的关系

当绝对压力低于大气压力时，由式（1-3）可知， p_b 变为负值，这种比大气压力低的压力通常称为负压力或真空度，用 p_s 表示，即

$$p_s = p_d - p_g \quad (1-4)$$

表压力，真空度和大气压力间的关系可用图 1-1 来表示。

三、压力的单位

根据压力的定义，它的大小是等于单位面积上的作用力，所以它的单位是由力和面积的导出单位。在物理学和工程上应用各种不同的单位制，因此压力的单位也随所选用的单位制不同而不同。下面介绍几种目前经常采用的压力单位。

1. 物理大气压：这是科学技术中最早采用的一种压力单位。其定义为在温度为 0°C （此时水银重度为 13.5951克/厘米^3 ）和标准重力加速度（ 980.665厘米/秒^2 ）下，760 毫米高的水银柱作用于底部水平面上的压力，即为一个物理大气压或称标准大气压。

2. 工程大气压：这是工程技术中应用最广泛的一种压力单位。它用 1公斤力/厘米^2 （ kgf/cm^2 ）表示，也就是指每一

平方厘米的面积上有一公斤力的压力。

3. 毫米水柱和毫米水银柱：由于在实际工作中，有时常常直接从水柱或水银柱的高度读出压力的数值，所以毫米水柱（ mmH_2O ）或毫米水银柱（ mmHg ）的单位使用起来很方便。毫米水柱相当于重力加速度为 980.665 厘米/秒^2 ，温度为 4°C 时，水柱垂直高度所产生的压力；毫米水银柱相当于重力加速度为 980.665 厘米/秒^2 ，温度为 0°C 时水银柱垂直高度所产生的压力。

4. 磅/英寸²：这是英、美等国家常采用的一种压力单位。相当于在每一平方英寸的面积上有一磅力的压力。

5. 皮兹：皮兹是指 1 平方米的面积上受有 1 斯正的力（斯正是 MTC 制中力的单位，是指 1 吨质量的物体产生 1 米/秒^2 加速度的力）。在压力测量中，通常以百皮兹为单位，百皮兹又称为巴。

以上几种压力单位之间的换算关系列于表 1-1。

表1-1 压力单位换算表

工程大气压 (公斤力/ 厘米 ²)	物理大气压	毫米水柱 (mmH_2O)	毫米水银柱 (mmHg)	磅/英寸 ²	百皮兹 (巴)
1	0.9678	10000	735.56	14.223	0.9806
1.0332	1	10332	760	14.696	1.0132
0.0001	0.000097	1	0.0735	0.00142	0.000098
0.00136	0.00131	13.6	1	0.01934	0.00133
0.0703	0.068	703	51.715	1	0.0689
1.0197	0.9869	10197	750.06	14.504	1

四、压力测量仪表的分类

由于生产过程中需要测量的压力范围很广，从几个毫米

水柱到几千甚至几万公斤力/厘米²；同时由于使用环境、条件及要求的多样性，所以压力测量仪表的种类很多，分类的方法也有好多种，有按工作原理、用途、结构特征、精度以及显示方式等各种分类方法，简单介绍如下：

1. 按仪表的工作原理分有：

(1) 液柱式压力计——利用液体高度产生的力去平衡未知力的方法来测量压力的压力计。

(2) 弹性压力计——利用弹性元件受压后变形产生的位移来测量压力的压力计。

(3) 电测压力计——通过某些转换元件，将压力变换为电量来测量压力的压力计。

2. 按所测的压力范围分有：

(1) 压力计——测量表压力的仪表；

(2) 气压计——测量大气压力的仪表；

(3) 微压计——测量 1 公斤力/厘米² 以下的表压力的仪表；

(4) 真空计——测量真空度或负压力的仪表；

(5) 差压计——测量两处压力差的仪表。

3. 按仪表的精度等级分有：

(1) 标准压力计——精度等级在 0.5 级以上的压力计；

(2) 工程用压力计——精度等级在 0.5 级以下的压力计。

4. 按显示方式分有

(1) 指示式；

(2) 自动记录式；

(3) 远传式；

(4) 信号式。

第二章 液柱式压力计

液柱式压力计是利用液柱所产生的压力与被测介质压力相平衡，然后根据液柱高度来确定被测压力值的压力计。液柱所用的液体种类不限，可以采用单纯物质，也可以用液体混合物，但所用液体在与被测介质接触处必须有一个清楚而稳定的分界面，也就是，所用液体不能与被测介质发生化合作用或混合作用，以便准确地读数。同时所用液体的重度及其与温度关系必须是已知的，液体在环境温度的变化范围内不应汽化或凝固。常用的工作液体有水银、水、酒精、甲苯等。

液柱压力计最后测量是液面的相对垂直位移，因此上限只可能达 1 米左右，否则就不便于观察，其下限如借助于光学设备，约可测至 0.005 毫米，因此液柱式压力计的使用范围约达 1 米水银柱高压力。

液柱压力计包括 U 形管压力计、单管压力计、斜管微压计等。这种压力计是最早用来测量压力的一种仪表，由于结构简单、使用方便、价格便宜，在一定的条件下比较容易得到较高的精度，目前还得到广泛的应用。但是由于它不能测量较高的压力，也不能进行自动的指示和记录，所以它的应用范围受到限制。一般可作为实验室中低压的精密测量以及用于仪表的检定和校验。

一、U 形管压力计

U 形管压力计的结构如图 2-1 所示。它是一根弯成 U 形

的玻璃管 1 和 2，在 U 形管中间装有刻度标尺 3，读数的零点在标尺的中央，管内充液体到零点处。管 1 通过接头与被测介质相接通，管 2 则通大气。

当被测介质的压力 p_x 大于大气压力 p_d 时，管 1 中的工作液体液面下降，而管 2 中的工作液体液面上升，一直到两液面差的高度 h 产生的压力与被测压力相平衡时为止。

如果被测介质是气体的话，可得到被测压力值 p_x 为：

$$p_x = h \cdot \gamma \quad (2-1)$$

式中 γ ——工作液体的重度
(克/厘米³)。

如果被测介质是液体，平衡时还要考虑被测介质的重度，这时被测压力为：

$$p_x = h(\gamma - \gamma_x) \quad (2-2)$$

式中 γ_x ——被测介质的重度 (克/厘米³)。

液柱式压力计一般是以毫米均匀刻度的，其压力测量单位采用毫米水柱（当工作液采用水时）或毫米水银柱（当工作液体为水银时）。

由式(2-1)可以写出 U 形管压力计的静特性方程式为：

$$h = \frac{1}{\gamma} p_x \quad (2-3)$$

通过求导数的方法，可得到仪表的灵敏度为：

$$K = \frac{dh}{dp_x} = \frac{1}{\gamma} \quad (2-4)$$

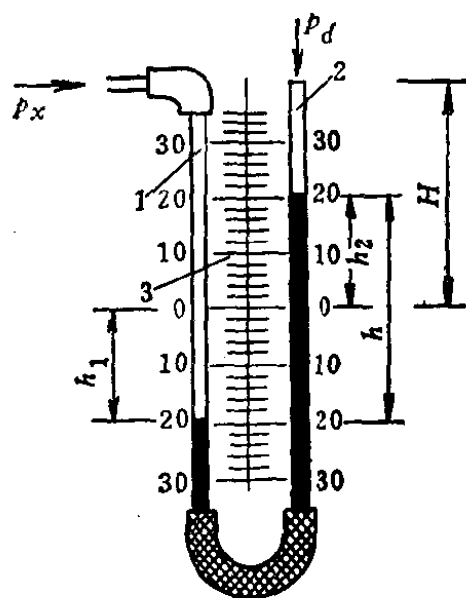


图2-1 U形管压力计

1、2—玻璃管 3—刻度

由式 (2-4) 可知, 工作液体的重度 γ 愈小, 仪表的灵敏度愈高。

在U形管压力计中很难保证两管的直径完全一致, 因而在确定液柱高度 h 时, 必须同时读出两管的液面高度, 否则就可能造成较大的测量误差。

U形管压力计的测量范围一般为 $0 \sim \pm 800$ 毫米水柱或毫米汞柱, 精度为 1 级, 可测表压、真空度、差压以及作校验流量计的标准差压计。其特点是零位刻度在刻度板中间, 使用前无须调零, 液柱高度须两次读数。

二、单管式压力计

单管式压力计如图 2-2 所示, 它的结构与U形管压力计的区别仅在于以较大的金属容器 1 来代替一根玻璃管。在测量压力时, 被测介质接到较大直径的容器, 容器和玻璃管内充工作液体到刻度标尺的零点处。

当被测介质的压力大于大气压力 p_d 时, 则在被测介质的压力作用下, 玻璃管 2 内的液面上升 h_1 , 而容器 1 中的液面下降 h_2 , 这时两液面之差 $h = h_1 + h_2$, 经过简单的运算可得到:

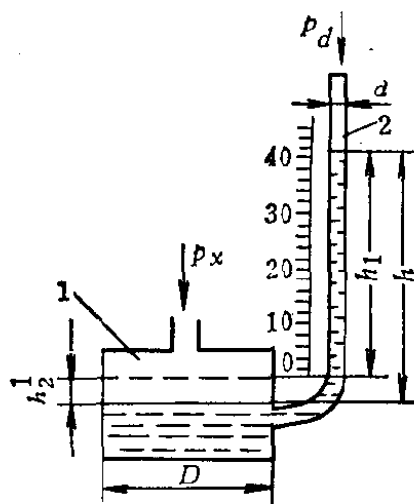


图2-2 单管式压力计

1—容器 2—玻璃管

$$p_x = h\gamma = h_1\gamma \left(1 + \frac{s_1}{s_2} \right) \quad (2-5)$$

式中 γ ——工作液体的重度;
 s_1 ——玻璃管内截面积;
 s_2 ——容器内截面积。

当 $s_1 \ll s_2$ 时, 则 $\frac{s_1}{s_2}$ 变得很小, 可忽略不计, 因而式

(2-5) 可简化为:

$$p_x = h_1 \gamma \quad (2-6)$$

由式 (2-6) 可以看出, 只要一次读出玻璃管中液面的高度 h_1 , 就可确定被测压力值。由于读数比 U 形管压力计减少了一次, 所以读数误差减小了一倍, 从而提高了精度。但是由于在式 (2-6) 略去了 h_2 的数值, 在结果中也引入了附加误差, 因此在要求较高精度时要加以修正。

当被测介质的压力为负压时, 则应将被测介质与玻璃管 2 相连, 而使容器 1 通大气, 仍可由玻璃管的液面高度决定负压的大小。

单管压力计的测压范围一般为 0~1500 毫米水柱或毫米汞柱, 精度为 0.5~1 级, 可测表压、负压和作标准表之用。其特点为零位刻度在刻度标尺的下端, 液柱高度只须一次读数, 使用前需调好零点。

三、斜管微压计

斜管微压计的结构如图 2-3 所示。它是用来测量微小的压力和负压用的。为此将与大容器连通的玻璃管做成倾斜式的, 以便能反映出微小压力的变化, 并进一步提高读数精度。

在被测介质的压力作用下, 由于容器与被测介质相通, 因此容器内的液面下降

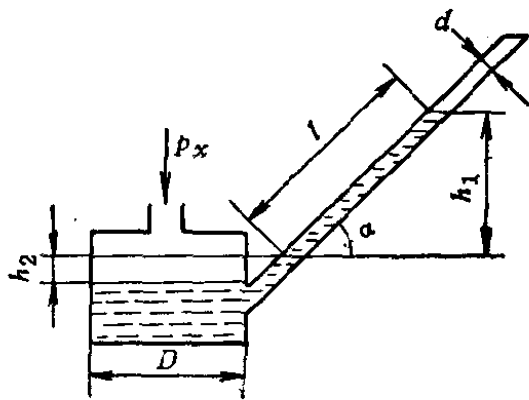


图2-3 斜管微压计

h_2 ，而玻璃斜管的液面升高 h_1 ，显然两液面的高度差 $h = h_1 + h_2$ ，而 $h_1 = l \sin \alpha$ ，因此可以得到斜管微压计的静特性方程式为：

$$p_x = h\gamma = l\gamma \left(\sin \alpha + \frac{s_1}{s_2} \right) \quad (2-7)$$

式中 l ——斜管中液柱长度；

α ——斜管的倾斜角度；

s_1 和 s_2 ——斜管和大容器的内截面积。

当 $s_2 \gg s_1$ 时， $\frac{s_1}{s_2}$ 可略去不计，此时式 (2-7) 可简化为

$$p_x = l\gamma \sin \alpha \quad (2-8)$$

由 (2-8) 式可见，由于斜管倾斜了一个角度，因而增加了工作液体沿斜管的长度，即增大了 $\frac{1}{\sin \alpha}$ 倍，使读数精度有所提高。但斜管也不能倾斜得太厉害，否则会使斜管内的液面过份拉长甚至冲散，反而读数不准确，一般 α 不小于 $15 \sim 20^\circ$ 。

由于酒精有较小的重度，常用它作为斜管微压计的工作液体，以提高微压计的灵敏度。微压计如果是以毫米分度，则被测压力的读数可以将读得斜管工作液体长度 l 乘以系数 K ($K = \sin \alpha$)。如果需要精确测量，为了修正大容器液面下降的误差，则应把读数乘以系数 $K' = \gamma \left(\sin \alpha + \frac{s_1}{s_2} \right)$ 。

如果要求斜管微压计测量不同的压力范围时，则可采用斜管倾斜角度可变的微压计，即通过改变倾斜角 α 的大小来改变压力测量范围。

斜管压力计测压范围一般为 $0 \sim \pm 200$ 毫米水柱，精度为 $0.5 \sim 1$ 级，可用来测表压、负压、差压和作校验低压的标准