



046235

TK31  
0026

高等学校教学用书

# 热工测量仪表

东北工学院 高魁明 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书  
**热工测量仪表**  
东北工学院 高魁明 主编

冶金工业出版社出版  
(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)  
新华书店北京发行所发行  
冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 19 1/4 字数 458 千字  
1985年6月第一版 1985年6月第一次印刷  
印数00,001~9,900册  
统一书号: 15062·4278 定价3.65元

## 前 言

本书根据1982年冶金高等院校教材编写、出版规划所确定的任务而编写的。

根据1979年制定的“自动检测技术及仪表”课程教学大纲，本书分工编写热工测量仪表部分，即压力测量、流量测量、温度测量和物位测量等仪表。考虑到热流计是节能技术所需要的重要仪表，因此在原有教学大纲基础上增加了热流计的内容。本教材在编写中，对于压力、流量、温度和物位测量等仪表所用到的各种探测器的原理、特性和应用，都作了必要的阐述。在内容上注意反映国外新发展起来的一些测量技术和仪表，在部分章节中也编入了作者们几年来的科研成果的内容，尽量做到与国内的实际情况相结合。

本教材共分六章，绪论及第一、三两章由鲁崇恭同志编写；第二章由王师同志编写；第四、五、六章由高魁明同志编写。

本书是工业自动化仪表专业本科大学生教材，也可供从事自动化仪表技术工作人员参考。

由于编者水平所限，书中不妥及错误之处恳请读者批评指正。

编 者

1983年11月

# 目 录

绪论	1
第一章 压力测量仪表	4
第一节 概述	4
第二节 液柱式压力计	5
第三节 活塞式压力计与浮球式压力计	8
第四节 弹性压力计	11
第五节 弹性振动式压力计	13
第六节 弹性元件位移的电变换方法	19
第二章 流量测量节流装置	27
第一节 标准节流装置	27
第二节 标准节流装置的流量公式	34
第三节 节流装置流量测量误差的估算	42
第四节 节流装置流量计用的差压计	45
第五节 标准节流装置的计算	51
第六节 其他非标准节流装置	61
附录	66
第三章 其他流量测量仪表	93
第一节 动压测量管	93
第二节 转子流量计	96
第三节 靶式流量计	104
第四节 涡轮流量计	110
第五节 电磁流量计	117
第六节 涡街流量计	129
第七节 容积式流量计	136
第八节 质量流量计	143
第九节 超声波流量计	152
第十节 激光流速计	159
第十一节 流量测量仪表的标定设备	166
第四章 接触式测温仪表和热流计	174
第一节 温度测量的一般概念	174
第二节 热电偶温度计原理	176
第三节 热电极材料和常用热电偶	179
第四节 特殊热电偶与热电偶的测量线路	185
第五节 热电偶的检定	188
第六节 热电阻测温原理	190
第七节 接触式温度测量误差的讨论	195
第八节 热流计的原理与分类	199
第九节 热流计的检定与应用	204

<b>第五章 辐射测温技术及仪表</b> .....	<b>210</b>
第一节 黑体辐射源 .....	210
第二节 红外探测器 .....	223
第三节 辐射测温仪表 .....	239
第四节 辐射测温技术 .....	261
<b>第六章 物位测量</b> .....	<b>281</b>
第一节 物位测量的一般概念 .....	281
第二节 浮力式液位计 .....	283
第三节 静压式液位计 .....	285
第四节 电容式物位计 .....	288
第五节 超声波物位计 .....	291
第六节 核辐射式物位计 .....	296
<b>主要参考文献</b> .....	<b>300</b>

# 绪 论

热工测量仪表是用于生产中热工过程的测量仪表，是保证连续化生产设备安全、经济及自动化运行的重要装备之一，广泛应用于冶金、化工、电力、石油、医药和食品等各工业部门。热工测量仪表在各种热力设备上自动测量温度、压力、流量、物位及热流等热工参数，并为自动调节和控制这些参数乃至整个生产过程提供精确可靠的信息。热工测量仪表适应生产发展的需要而发展，又促进生产向更高级的阶段发展。技术科学的进步，新材料、新工艺、电子技术、计算机技术的发展，以及物理学、自动控制理论的发展，都是热工测量仪表发展的基础。

## 一、测量的基本知识

**1. 测量的概念** 测量就是用实验的方法和专门的设备，取得某项需要确定其数量概念的参数（称为被测量）与定义其数值为1的同类参数（称为单位）的比值。它可用下式表达：

$$a \approx \frac{A}{U} \quad (0-1)$$

式中  $A$ ——被测量；

$U$ ——选用的单位；

$a$ ——比值。

被测量的测得值即为比值乘单位 $aU$ 。式(0-1)取近似相等是因为任何测量都必然存在误差，因为无论测量方法和所用的设备都不可能是尽善尽美的。测量工作包括测量方法和测量设备的选择以及测得数据的处理（确定误差的界限和测得结果的可靠程度）。

**2. 测量方法** 测量方法的选择对测量工作是十分重要的，如果方法不当，即使有精密的测量仪器和设备也不能得到理想的结果。测量方法的分类有许多种，随着研究问题的不同而采用不同的分类。按如何取得测量结果进行分类有：

(1) 直接测量法。即用基准量值定度好的测量仪表对被测量直接进行测量，直接得到被测量的数值，如用压力表测量容器中气体的压力等。此法简单迅速。

(2) 间接测量法即利用被测量与某些量有确知的函数关系，用直接测量法测得这些有关量的数值，代入已知的函数关系算出被测量的数值。例如在稳定流动的情况下，通过测量流过某截面流体的重量和时间来精确地测量流量，因为称重和计时都可以达到很高的精度。

(3) 组合测量法。当被测量与直接测量的一些量不是一个函数关系，需要求解一个方程组才能取得时即为组合测量。如测量某电阻的温度系数，其电阻值与温度的关系为： $R_t = R_0(1 + at + bt^2)$ ，式中 $R_t$ 是温度为 $t^\circ\text{C}$ 时电阻的数值，可以直接测得；温度也可直接测得。要取得系数 $a$ 和 $b$ ，需要解一个二元一次方程组。

上述分类是计算误差时应用的。从考虑测量的综合性能，确定测量方案或仪表的设计方案时，采用按测量方式来分类。

(1) 偏差式测量法。这种方法是用测量仪表指针位移大小来表示被测量数值的方法。此法简单迅速，但不易达到高的精度。如用弹簧管压力表测量压力，就是这种测量方法的例子。

(2) 零位式测量法（补偿式测量法）。此法是用已知数值的标准量具与被测量直接进行比较，调整标准量具的量值，用指零仪表判断二者是否达到完全平衡（完全补偿），这时标准量具的数值即为被测量的数值。如用天平称量就是零位式测量法。此法可以获得较高的测量精度，但操作麻烦，测量费时间。

(3) 微差式测量法。它是偏差法与零位法的结合。用量值接近被测量的标准量具与被测量进行比较，再用偏差式测量仪表指示两者的差值。被测量的值即是标准量具之值与偏差式仪表的示值之和。此法精度较高且测量简单迅速，因为不用经常调整标准量具，而且由于偏差值小，因而提高了偏差式测量的精度。X射线测厚仪即是应用这种方法的一个例子。测量前用标准厚度的钢板调零，测量时仪表指示的是被测钢板厚度的偏差值。这种测量方法可满足轧钢过程钢板厚度测量既要测量迅速又要精度高的要求。

## 二、测量误差

1. 粗大误差 测量结果显著偏离被测量的实际值所对应的误差，称为粗大误差。由于这种误差严重歪曲测量结果，故应通过理论分析或统计学方法发现并舍弃不用。

2. 随机误差 对某被测量进行多次等精度测量，只要测量仪表灵敏度足够高，则一定会发现这些测量结果有一定的分散性，这就是随机误差造成的。在剔除粗大误差和修正了系统误差之后，各次测量结果的随机误差一般是服从正态分布规律的。应用统计学方法处理随机误差，即以测量结果的算术平均值作为被测实际值的最佳估计值，以算术平均值均方根偏差的2~3倍作为随机误差的置信区间，相应的概率作为置信概率，可以提高测量精度。随机误差决定测量结果的精密度。

3. 系统误差 对某被测量进行多次等精度测量，如各测量结果的误差大小和符号均保持不变或按某确定规律变化，称此种误差为系统误差。系统误差不可能通过统计方法消除，也不一定能用统计方法发现它，因此发现系统误差很重要。可以通过较准比对、改变测量条件、理论分析和计算等方法来发现它，用改正值加以削弱。系统误差决定测量结果的准确度。

## 三、测量仪表的质量指标

1. 精确度（简称精度） 精度是仪表精密性与准确度之和，用相对误差来表示。仪表的相对误差一般有两种：（1）满度相对误差；（2）示值相对误差。

$$\text{满度相对误差} = \frac{\text{所有示值绝对误差中最大值}}{\text{仪表量程}} \times 100\% \quad (0-2)$$

$$\text{示值相对误差} = \frac{\text{示值绝对误差}}{\text{示值}} \times 100\% \quad (0-3)$$

自动检测仪表的精度等级，是按规定满度相对误差的一系列标准值来分级的(0.001、0.005、0.02、0.05、0.1、0.2、0.35、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0)。仪表精度等级规定了仪表在额定使用条件下最大误差不得超过的数值。



**2. 稳定性** 稳定性系指仪表示值不随时间和使用条件变化的性能。时间稳定性以稳定度表示，即示值在一段时间内随机变动量的大小。使用条件变化的影响用影响误差表示。如环境温度的影响，是以温度每变化一度示值变化多少来表示。

**3. 灵敏度** 灵敏度是仪表在稳定状态下输出微小变化与输入微小变化之比，即  $S = \frac{dy}{dx}$ 。式中  $dy$  是仪表示值的微小变化； $dx$  是被测量的微小变化。灵敏度是仪表输出输入特性曲线上各点的斜率。

**4. 变差** 变差是指仪表正向特性与反向特性不一致的程度，以正、反向特性之差的最大者与仪表量程之比的百分数表示，即  $E_b = \frac{\Delta_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\%$ 。式中  $\Delta_{\max}$  是正、反向特性之差的最大值； $x_{\max}$  是仪表刻度上限值； $x_{\min}$  是仪表刻度下限值。

**5. 复现性** 复现性是指同一条件下对同一被测量多次重复测量其示值不一致的程度，即  $E_f = \frac{\Delta_f \max}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\%$ ，式中  $\Delta_f \max$  是全量程中重复测量差值最大者。

**6. 动态特性** 动态特性是指仪表示值跟随被测量随时间变化的能力，一般用被测量初始值为零作单位阶跃变化时，仪表示值随时间变化所显示的时间特性来评价。（1）上升时间：示值从稳态值的5%变到95%所需的时间。（2）响应时间：示值从开始变化到进入稳态值加减基本允许误差范围内所需时间。（3）过冲量：示值最大振幅与稳态值之差对稳态值的百分数。

# 第一章 压力测量仪表

## 第一节 概 述

在工业生产过程中压力系指流体对单位面积上的垂直作用力，也就是物理学中所说的流体的压强。固体物质间的压力，在自动检测仪表中是作为机械量的力来讨论，将在机械量测量仪表中叙述。

压力是工业生产中重要的热工参数之一，在冶金、化工、石油、电力、原子能、轻工、食品等各类工业部门中均占有重要地位。以冶金生产为例，在其生产过程中各种冶炼炉、加热炉的炉膛压力、烟道压力的测量和控制，不仅是生产过程所必须的、而且对于节约能源、安全生产具有重要意义。有些参数的测量，如物位、流量等的测量，往往是通过测量压力或压差来进行的，即测出了压力或压差便可确定物位或流量。

根据前述压力的概念，压力可用下式表示：

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

式中  $p$ ——压力；

$F$ ——流体对某面积的垂直作用力；

$S$ ——流体作用的面积。

物理学中所讲的流体的压强系指绝对压力 $p_{\text{绝对}}$ ，而在工程技术中往往采用表压力 $p_{\text{表}}$ ，即超出当地大气压 $p_{\text{大气}}$ 的压力值，也就是一般压力表所指示的数值。它们之间的关系为：

$$p_{\text{绝对}} = p_{\text{表}} + p_{\text{大气(当地)}} \quad (1-2)$$

或

$$p_{\text{表}} = p_{\text{绝对}} - p_{\text{大气(当地)}} \quad (1-3)$$

有时把高于当地大气压力的部分叫正压，低于当地大气压力的部分叫负压，也叫真空度。而在差压计中往往把压力高的一侧叫正压，低的一侧叫负压，这个负压并不一定低于当地大气压。

在物理学和工程技术中有几种不同的单位制，因此作为一个导出单位的压力，随着所用单位制的不同，也有多种单位。最近国际上为了单位的统一，正在推行国际单位制，我国也正式推行国际单位制。在国际单位制中，压力的单位是在每平方米的面积上，垂直作用一牛顿力，即牛顿/米<sup>2</sup>，叫作帕斯卡，简称“帕”，符号为“Pa”。

为照顾习惯，暂时可与国际单位制并用的压力单位有CGS制：压力单位“巴”，符号“bar”达因/厘米<sup>2</sup>；标准大气压：0℃时水银密度为13.5951克/厘米<sup>3</sup>，在标准重力加速度980.665厘米/秒<sup>2</sup>下，高760毫米水银柱对底面的压力；毫米水柱：标准状态下高1毫米的水柱对底面的压力；毫米水银柱：标准状态下高1毫米的水银柱对底面的压力，也叫“毛”；工程大气压：每平方厘米的面积上垂直作用1公斤力的压力公斤力/厘米<sup>2</sup>；欧美国家常用的压力单位是磅力/英寸<sup>2</sup>，符号为“PSi”。各种压力单位的换算如表1-1所示。

表 1-1 压力单位换算表

压力单位	帕	公斤力/厘米 <sup>2</sup>	毫米水柱	毫米水银柱	毫 巴	标准大气压	磅力/英寸 <sup>2</sup>
1 帕	1	$1.02 \times 10^{-5}$	0.102	$7.501 \times 10^{-3}$	$10^{-2}$	$9.87 \times 10^{-2}$	$1.4504 \times 10^{-4}$
1 公斤力/厘米 <sup>2</sup>	$9.806 \times 10^4$	1	10 <sup>4</sup>	735.56	980.6	0.9678	$1.4224 \times 10$
1 毫米水柱	9.806	10 <sup>4</sup>	1	$7.356 \times 10^{-2}$	$9.806 \times 10^{-2}$	$0.9678 \times 10^{-4}$	$1.422 \times 10^{-3}$
1 毫米水银柱	133.3	$13.6 \times 10^4$	13.6	1	1.333	$1.316 \times 10^{-4}$	$1.934 \times 10^{-2}$
1 毫巴	100	$0.102 \times 10^{-2}$	10.2	0.7501	1	$9.87 \times 10^{-4}$	$1.45 \times 10^{-2}$
1 标准大气压	$10.13 \times 10^4$	1.033	$1.033 \times 10^4$	760	1013	1	$1.4696 \times 10$
1 磅力/英寸 <sup>2</sup>	$0.6895 \times 10^4$	$7.031 \times 10^{-2}$	$7.031 \times 10^2$	51.72	$0.6895 \times 10^2$	6.805	1

## 第二节 液柱式压力计

液柱式压力计是一种利用一定高度的液柱对底面产生的静压力与被测压力相平衡的原理，通过液柱高度反映被测压力的大小的仪器。这种压力计结构简单使用方便，有相当高的精度，缺点是量程受液柱高度的限制，玻璃管容易损坏，只能就地指示，不能给出远传信号，也不能作自动控制的发讯器，故在实验室里应用较多。

### 一、U形管压力计

这是一种最简单而又同时能测压力、真空度和压力差的仪表。它的结构如图 1-1 所示。在一个 U 形玻璃管的中间放一个双面刻度的标尺，玻璃管中充入一定量的工作液体。在没有压力作用时，两管中的自由液面同处在标尺的零点处。设工作液体的重度为  $\gamma$ ，两管工作液面上边的介质的重度分别为  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ 。根据流体静力学原理，当两管分别作用压力  $p$  和  $p_0$  时，A—A 等压面的平衡方程式为：

$$p + (H + h_1)\gamma_1 = p_0 + (H - h_2)\gamma_0 + (h_1 + h_2)\gamma \quad (1-4)$$

$$p = p_0 + H(\gamma_0 - \gamma_1) + h_1(\gamma - \gamma_1) + h_2(\gamma - \gamma_0) \quad (1-5)$$

上式为 U 形管压力计的一般公式。若被测介质有  $\gamma_1 = \gamma_0$ ，则式 (1-5) 可化简为：

$$p = p_0 + (\gamma - \gamma_0)(h_1 + h_2) \quad (1-6)$$

如果  $\gamma_0 \ll \gamma$ ，则可得：

$$p = p_0 + \gamma(h_1 + h_2) \quad (1-7)$$

此式说明，只要知道  $p_0$  和读取工作液面的高度  $h_1$  与  $h_2$ ，根据工作液体的重度  $\gamma$  即可求得压力  $p$ 。如果  $p_0$  是当地大气压力，即 U 形管一端直通大气，另一端接被测压力，则可得被测压力的表压力，其数值为：

$$p = \gamma(h_1 + h_2)$$

如果 U 形管的液柱高度  $h_1$  和  $h_2$  是用眼睛直接读取，当标尺最小分格是 1 毫米时，一边读数的绝对误差可达 1 毫米，而 U 形管压力计必须两边读数，故最大误差可达 2 毫米。所以当被测压力低时，为了减小相对误差，必须选取重度低的工作液体，以增加 U 形管压力计的灵敏度。常用的工作液有水、水银、酒精和四氯化碳等。

U 形管压力计的误差有：(1) 温度误差 温度变化将引起刻度标尺长度、工作液体重度发生变化。前项误差可以忽略，主要是工作液体重度变化引起的误差。例如水在 10℃ 时  $\gamma = 1.000 \times 10^3$  公斤力/米<sup>3</sup>，而 35℃ 时  $\gamma = 0.994 \times 10^3$  公斤力/米<sup>3</sup>，变化了 0.6%；(2) 安装位置误差。应保证 U 形管压力计的两支管处于严格的铅垂位置，否则将产生安装位置

误差。

由于工作液的密度  $\rho$  和当地重力加速度可以引用十分精确的数值，则压力的数值主要取决于液柱高度的读数精度。因此国家最高压力传递基准，是光干涉式U形管压力计，它利用光干涉仪可精确地测出水银的液面高度，其误差小于  $\pm 0.001\%$ 。

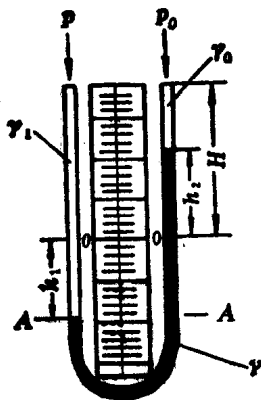


图 1-1 U形管压力计

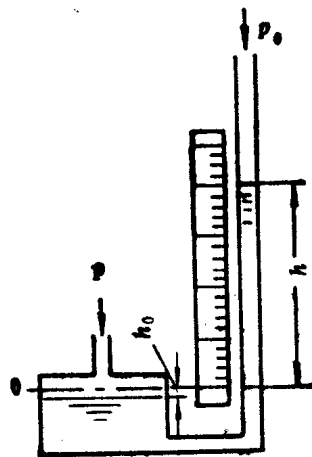


图 1-2 单管压力计

## 二、单管压力计

由于U形管压力计需要两面读取液面高度，使用不方便，因此设计成一面读取液面高度的单管压力计，其原理如图1-2所示。从图中可以看出，它仍是一个U形管压力计，只是它两面管子的直径差得很大。在两面压力作用下，一边液面下降，另一边液面上升，下降液体的体积应当与上升液体的体积相等，故有

$$F_0 h_0 = F h \quad (1-8)$$

式中  $F_0$ ——左边管的截面积；

$F$ ——右边管的截面积；

$h_0$ ——左边管中液面下降的高度；

$h$ ——右边管中液面上升的高度。

根据公式 (1-7) 有：

$$p = p_0 + \gamma(h + h_0)$$

由公式 (1-8) 有： $h_0 = \frac{F}{F_0} h$ ，代入上式得：

$$p = p_0 + \gamma h \left( 1 + \frac{F}{F_0} \right) \quad (1-9)$$

当结构一定时， $F$  和  $F_0$  是定值， $\gamma$  也是定值，故只要读取  $h$  值就可求得压力差  $p - p_0$ ，如已知  $p_0$ ，即可求得  $p$  值。一般  $F_0 \gg F$ ，可以用修正值的办法将  $\left( 1 + \frac{F}{F_0} \right)$  值计入测量结果，

要求不高时也可以忽略  $\frac{F}{F_0}$  的值。例如当两管的直径分别是  $d = 5$  毫米， $D = 200$  毫米时，则

$$\frac{F}{F_0} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{25}{40000} = 0.000625, \text{ 这个数值很小, 可以略去, 由此而引起的误差为 } 0.0625\%.$$

### 三、斜管压力计

这是一种变形单管压力计，它主要是用来测量微小压力、负压和压力差的。由于被测压力很小，单管压力计中的液柱高度也小。为了减小读数相对误差，拉长液柱、把测量管斜放一个角度，如图1-3所示。在被测压力作用下管内液面升高  $h$  时，由公式 (1-9) 可得：

$$p = p_0 + \gamma h \left( 1 + \frac{F}{F_0} \right)$$

又  $h = l \sin \alpha$

则  $p = p_0 + l \gamma \sin \alpha \left( 1 + \frac{F}{F_0} \right)$  (1-10)

式中  $l$  ——斜管内液柱的长度；

$\alpha$  ——斜管的倾斜角度。

式中  $\gamma \sin \alpha \left( 1 + \frac{F}{F_0} \right)$  为常数，故读得  $l$  值即可求得  $p - p_0$ 。 $\alpha$  角越小  $l$  越长，灵敏度越高，但不能太小，否则读值困难，反而增加读数误差。

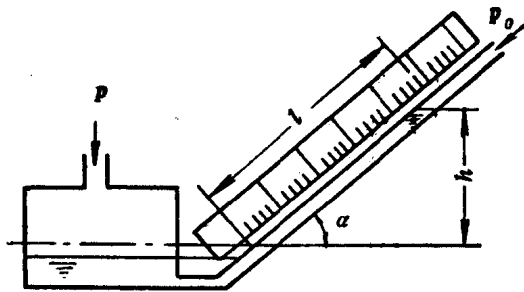


图 1-3 斜管微压计

### 四、补偿式微压计

如图1-4所示，它是一个测量120毫米水柱以下压力、负压或压差的压力计，测量精度比较高，读数误差小于0.02~0.05毫米水柱。它是容器1和2中间用橡胶管3连接成的一个连通器。容器1的中心有一个螺母，螺母中旋入一个测微螺杆4，螺杆下端铰接于仪器的底座上，上面与刻度盘5相连。当刻度盘5转动时，容器1即沿螺杆上下移动。在压力或压差作用下容器1内的水面升高，而容器2内的水面就下降。转动刻度盘5，使容器1升高，直到容器2内的液面回到初始的零位，通过反射镜（图1-4下图）观察到视察钉7的尖与它自己像的尖正好相对，如A向视图所示。标尺12每分格2毫米，刻度盘5一周分为200分格，故刻度盘5每转过一分格即使容器1升高或降低0.01毫米。由于测微螺杆与螺

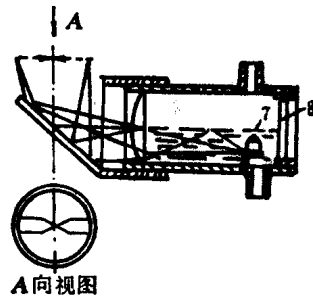
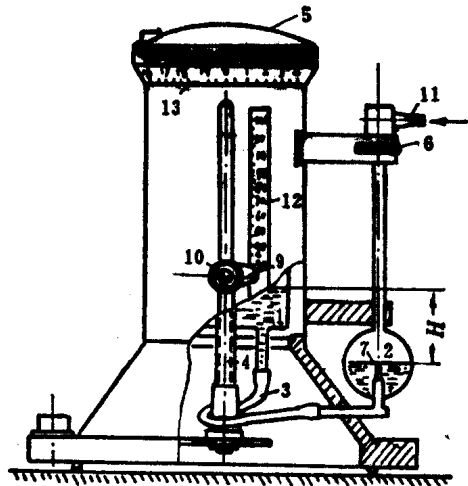


图 1-4 补偿式微压计

- 1—容器；2—容器；3—连通管；4—测微螺杆；
- 5—刻度盘；6—螺母；7—视察钉；8—玻璃板；
- 9—刻度指示线；10—固定螺钉；11—进气嘴；
- 12—标尺；13—刻度盘的刻度

母间有螺纹间隙，故精度只能达到0.02~0.05毫米水柱。

### 第三节 活塞式压力计与浮球式压力计

#### 一、活塞式压力计

它是校验、标定压力表和压力传感器等的标准器之一，也是一种标准压力发生器，在压力标准的传递系统中占有重要地位。作为压力标准的副原器精度为0.002%，其次有作为国家标准器的活塞式压力计，精度为0.005%，一等标准精度为0.01%，二等标准为0.05%，三等标准为0.2%。

1. 工作原理和结构 活塞式压力计的原理如图1-5所示，它是利用流体静力学中的巴斯加原理，即作用于平衡液体部分边界上的外力所产生的压力，能均匀地传递到液体的每一点。经过精磨加工的活塞1、活塞缸3、加压泵9和被标压力表共同形成一个连通器，中间充以清洁的变压器油。活塞1的上部是承重盘4，其上放置砝码2。当加压泵压给连通器中的油液加压时，可使承重盘浮起。这时油液中的外加压力 $p$ ，等于承重盘和砝码重量的总和 $G$ 除以活塞的有效面积 $F$ ：

$$p = \frac{G}{F} \quad (1-11)$$

砝码和承重盘的重量可以利用精密天平精确标定，活塞的有效面积是通过活塞式压力计的标定计算得到的。利用活塞式压力计标定其他压力表时，为了减少活塞与活塞缸间静摩擦力的影响，承重盘浮起后要轻轻地拨转承重盘，承重盘浮起的高度要使得活塞杆上的刻线与活塞缸上的刻线对齐。活塞应处于铅垂位置，即活塞压力计的底盘应调成水平。

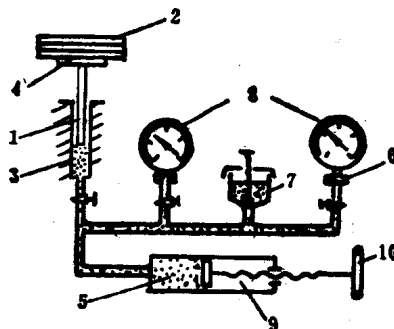


图 1-5 活塞式压力计

1—活塞；2—砝码；3—活塞缸；4—承重盘；5—油；6—表接头；7—油杯；8—被校压力表；9—加压泵；10—手轮

2. 产生误差的各种影响因素 活塞式压力计受重力加速度变化的影响最大。重力加速度的数值与所在地的海拔、纬度有关，可用下式计算：

$$g_{\phi} = \frac{980.665(1 - 0.00265 \cos 2\phi)}{1 + \frac{2H}{R}} \quad (1-12)$$

式中  $g_{\phi}$ ——活塞式压力计使用地点的重力加速度，厘米/秒<sup>2</sup>；

$R$ ——地球半径，按 $R = 6371 \times 10^3$ 米计算；

$H$ ——压力计使用地点的海拔高度，米；

$\phi$ ——活塞式压力计使用地点的纬度。

空气浮力的影响。当地重力加速度按式 (1-12) 算出后, 再考虑空气对砝码产生浮力的影响, 则压力值应按下式计算

$$p = \frac{G}{F} \times \frac{g_{\phi}}{980.665} \times \frac{1}{(1 - \rho_1/\rho_2)} \quad (1-13)$$

式中  $\rho_1$ ——当地空气密度, 公斤/厘米<sup>3</sup>;  
 $\rho_2$ ——砝码材料的密度, 公斤/厘米<sup>3</sup>;  
 $G$ ——承重盘与砝码重量的总和, 公斤力;  
 $F$ ——活塞的有效面积, 厘米<sup>2</sup>。

温度变化的影响。温度变化将影响活塞的有效面积, 当考虑温度变化的影响时, 公式 (1-13) 变为:

$$p = \frac{G}{F} \times \frac{g_{\phi}}{980.665} \times \frac{1}{(1 - \rho_1/\rho_2)} \times \frac{1}{[1 + (\alpha_1 + \alpha_2)(t - 20)] \left[ 1 + \beta \cdot \frac{G}{F} \right]} \quad (1-14)$$

式中  $\alpha_1, \alpha_2$ ——活塞与活塞缸材料的线膨胀系数, 1/°C;  
 $t$ ——工作时环境温度, °C;  
 $F$ ——20°C时活塞的有效面积, 厘米<sup>2</sup>。

当活塞与活塞缸材料同时有:

$$\beta = \frac{1}{E} \left( 2\nu + \frac{r^2}{R^2 + r^2} \right) \quad (1-15)$$

式中  $E$ ——活塞与活塞缸材料的弹性模数, 公斤力/厘米<sup>2</sup>;  
 $\nu$ ——泊松系数;  
 $r, R$ ——活塞、活塞缸半径。

## 二、浮球式压力计

它与活塞式压力计相同, 也是一种压力标准仪表, 同样也是一种标准压力发生器, 其精度为±0.05%。这是一种新发展的压力标准表, 具有精度高、稳定性好、灵敏度高、操作简便等优点。由于工作介质是压缩空气, 故克服了活塞式压力计中因油的表面张力、粘度等产生的摩擦力, 也没有漏油问题, 对于禁油类压力计和传感器的标定更方便。

1. 工作原理与结构 利用一个精密光洁的钢球, 在压缩空气作用下悬浮在喷嘴中, 如图1-6所示。从气源来的压缩空气经过滤减压, 保持最大工作压力的1.2~1.5倍, 再经

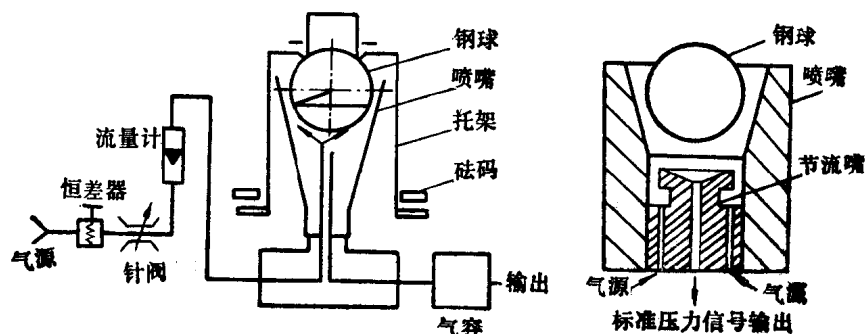


图 1-6 浮球压力计工作原理

定值器调节，达到所需流量（由转子流量计看出）。此气流进入内腔呈锥形的喷嘴，钢球在此锥形腔中，其下部受压缩空气流的作用，自动悬浮在此气流中。压缩空气从钢球与腔之间的间隙排出，其流量与来流相等。达到平衡时浮球下部压缩空气向上的作用力，即等于浮球、托架和砝码重量总和：

$$p = \frac{\Sigma G}{S} \quad (1-16)$$

式中  $p$ ——压缩空气的压力；

$\Sigma G$ ——浮球、托架和砝码重量的总和；

$S$ ——浮球的有效面积。

浮球上下浮动，自动调节排气量。如果喷嘴内空气压力大于理论压力  $p$ ，浮球将升高一些，空气排量增加，自动维持平衡。公式 (1-16) 中的  $\Sigma G$  可以用精密天平称量，很容易得到较高的精度。有效面积  $S$  是通过对此压力计的标定而得到的，它是一个常数。此压力计对气源有一定的要求，要求用除去灰尘、油和水等杂质的空气，为此需要有一套过滤装置。整个浮球式压力计的系统如图 1-7 所示。图中 1 为二通阀，2 为气源压力表，3 为分水滤气器，4 为过滤减压器，5 为工作压力表，6 为气动恒差器，7 为玻璃转子流量计，8 为输入气容，9 为压力计，10 为输出气容。

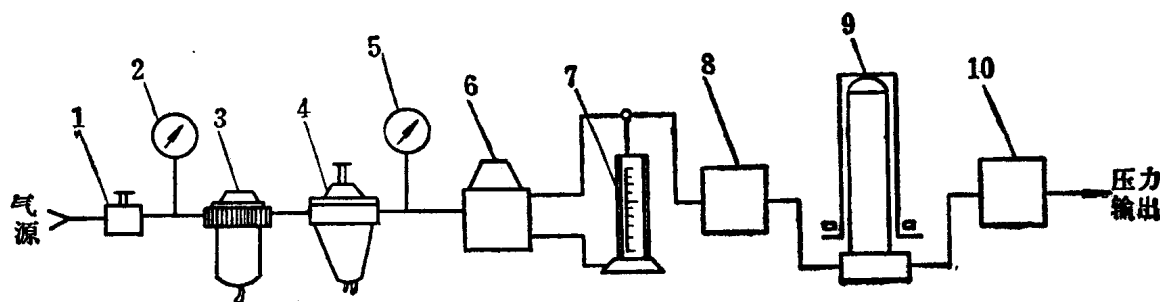


图 1-7 浮球压力计系统

## 2. 误差的来源

(1) 重量  $\Sigma G$  的计量精度：要求在精度足够高的精密天平上进行称量，还要考虑空气浮力和重力加速度的修正。

(2) 浮球直径的测量：直径和真球度的测量要用干涉仪，以便达到  $\pm 0.1$  微米的精度。

(3) 球上浮量不同对精度的影响：球上浮量的变化造成有效面积发生变化，对精度的影响如表 1-2 所示。

表 1-2 球上浮量对精度的影响（球直径为 25.4mm）

球上浮量 $H$ (mm)	0.284	0.219	0.129	0.070
对精度的影响 (%)	0.05	0.03	0.01	0.003



## 第四节 弹性压力计

利用各种弹性元件弹性变形产生的弹性力与被测压力产生的力相平衡，通过测量弹性元件弹性变形量来测量压力，这就是弹性压力计的一般工作原理。弹性压力计是工业上应用最广的压力测量仪表，在实验室中应用也很多。它可以作成各种通风计，气压计，压力计，真空计和压力—真空计等。测量范围很广，从数厘米水柱压力到近万公斤力/厘米<sup>2</sup>的压力，还可以配合各种变换元件作成各种远传压力计。这类仪表中所用感受压力的弹性元件有膜片、弹簧管和波纹管等。

### 一、弹簧管压力表

图1-8为弹簧管压力表的结构图。弹簧管的自由端经连杆与扇齿轮相连，扇齿轮与齿轮轴啮合，在小齿轮轴上装有指针。为了消除扇齿轮与小齿轮轴之间的齿侧间隙，在小齿轮轴上装有螺旋形游丝。当弹簧管中通入压力后，其自由端将产生位移，经连杆、扇齿轮、齿轮轴而传给指针，以指示被测介质的压力，其计算原理如图1-9所示。当薄壁弹簧管 ( $h/b < 0.7$ ) 管内通入压力后，其中心角的相对变化和压力之间的关系，根据仪表零件给出的公式为：

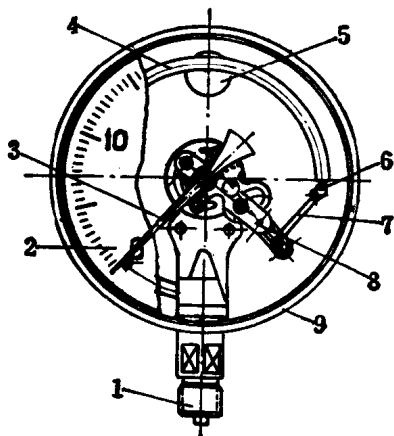


图 1-8 弹簧管压力表

- 1—接头；2—度盘；3—指针；4—弹簧管；5—安全塞；  
6—封口塞；7—连杆；8—齿轮传动机构；9—表壳

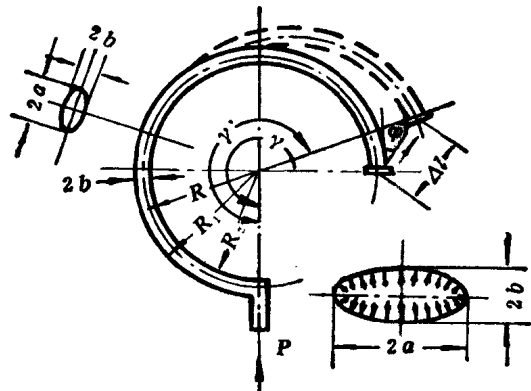


图 1-9 弹簧管的变形和自由端位移

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\gamma - \gamma'}{\gamma} = P \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{R^2}{bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{a}{\beta + x^2} \quad (1-17)$$

- 式中  $\gamma$ ——变形前弹簧管的中心角；  
 $\gamma'$ ——变形后弹簧管的中心角；  
 $\Delta\gamma$ ——弹簧管中心角的变化量；  
 $P$ ——被测压力；  
 $E$ ——弹簧管材料的弹性模数；  
 $\mu$ ——弹簧管材料的泊松系数；  
 $R$ ——弹簧管的曲率半径；  
 $a, b$ ——弹簧管断面的长半径和短半径；