

● 高等学校教学用书 ●

969303

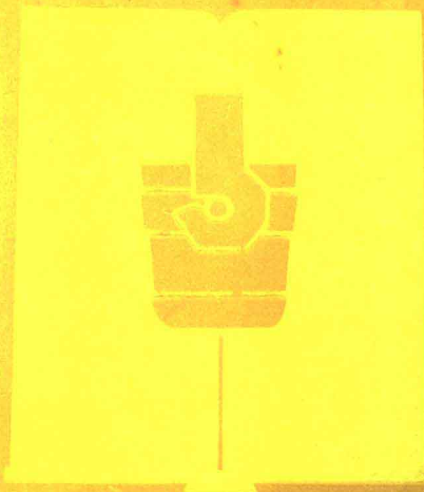
TH81  
0026E2

第 2 版  
1996 年 2 月

# 热工测量仪表

(修 订 版)

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

# 热工测量仪表

(修订版)

东北大学 高魁明 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等学校教学用书  
热工测量仪表  
(修订版)

东北大学 高魁明 主编

\*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街崇文门北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 14.25 字数 332 千字

1993年10月第一版 1993年10月第一次印刷

印数 00,001~3,500 册

ISBN 7-5024-1223-9

TH·166(课)定价6.75元

## 修 订 版 前 言

本书第一版是根据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。其内容根据1979年制定的“自动检测技术及仪表”课程教学大纲，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。

本“修订版”考虑到各院校现行的教学计划，按平均的教学学时(60学时)编写而成。

在修订中对第一版中的陈旧内容作了删减，增加了一些国内外新发展的热工测量技术和仪表，但仍保持原第一版的体系。

本书共分六章，绪论及第一、三章由鲁崇恭编写；第二章由王师编写；第四、五、六章由高魁明编写。

本书稿完成后，于1991年11月在原东北工学院召开了审稿会。华东冶金学院庄树兴副教授、北京科技大学刘国俊副教授和沈阳工业大学杨维明副教授对书稿进行了详细的审阅，并提出了许多宝贵意见。对此，编者对上述三位老师表示衷心的感谢。

本书可作为检测技术及仪表专业本科大学生的教学用书，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。

24089/04

## 第一版前言

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。

## 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。这种测量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,但不易达到较高的精度。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)。此测量方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的平衡(完全补偿),这时标准量具的量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。

(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的量值与偏差式仪表示值之和。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,因而偏差式测量仪表的精度提高。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。随机误差的大小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,如果各测量结果的误差绝对值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或减小,也不一定能用统计方法发现它,因此发现系统误差很重要。可以通过校准比对、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。系统误差与随机误差的综合决定测量结果的准确度。

## 三、测量仪表的质量指标

1. 准确度 它是表征仪表示值与被测量实际值接近程度的质量指标,用相对误差来表示。仪表相对误差一般有两种:(1)相对误差;(2)示值相对误差。

$$\text{相对误差} = \frac{\text{所有示值绝对误差中最大值}}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100, \% \quad (0-2)$$

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

自动检测仪表的准确度等级,是按国家统一规定的允许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)。它规定

了各级仪表在额定使用条件下最大相对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,即以下式表示

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (0-4)$$

式中  $S$ ——仪表的灵敏度;

$dy$ ——仪表示值的微小变化;

$dx$ ——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

$$E_b = \frac{\Delta_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100, \% \quad (0-5)$$

式中  $E_b$ ——仪表的变差;

$\Delta_{\max}$ ——正、反向特性曲线之差的最大值;

$x_{\max}$ ——仪表刻度上限值;

$x_{\min}$ ——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

$$E_f = \frac{\Delta_f \max}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100, \% \quad (0-6)$$

式中  $E_f$ ——仪表复现性;

$\Delta_f \max$ ——全量程中重复测量差值最大者。

6. 线性度(非线性误差) 对于理论上是线性输入输出特性曲线的仪表,实际特性曲线往往偏离线性关系。它们间的最大差值与量程范围之比的百分数称为线性度

$$E_l = \frac{\Delta_l \max}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100, \% \quad (0-7)$$

式中  $E_l$ ——仪表的线性度;

$\Delta_l \max$ ——实际特性曲线与理论特性曲线间的最大差值。

7. 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。

# 目 录

## 绪论

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第一章 压力测量仪表</b> .....      | 1   |
| 第一节 概述.....                  | 1   |
| 第二节 液柱式压力计.....              | 2   |
| 第三节 活塞式压力计与浮球式压力计.....       | 5   |
| 第四节 弹性压力计.....               | 8   |
| 第五节 弹性振动式压力计.....            | 10  |
| 第六节 弹性元件位移的电变换方法.....        | 14  |
| <b>第二章 流量测量节流装置</b> .....    | 21  |
| 第一节 标准节流装置.....              | 21  |
| 第二节 标准节流装置的流量公式.....         | 29  |
| 第三节 节流装置流量测量误差的估算.....       | 36  |
| 第四节 节流装置流量计用的差压计.....        | 40  |
| 第五节 标准节流装置的计算.....           | 45  |
| 第六节 其它非标准节流装置.....           | 56  |
| <b>第三章 流量测量仪表</b> .....      | 61  |
| 第一节 动压测量管.....               | 61  |
| 第二节 转子流量计.....               | 64  |
| 第三节 靶式流量计.....               | 70  |
| 第四节 涡轮流量计.....               | 75  |
| 第五节 电磁流量计.....               | 82  |
| 第六节 涡街流量计.....               | 91  |
| 第七节 容积式流量计.....              | 97  |
| 第八节 质量流量计.....               | 104 |
| 第九节 超声波流量计.....              | 111 |
| 第十节 激光流速计.....               | 117 |
| 第十一节 流量测量仪表的标定设备.....        | 122 |
| <b>第四章 接触式测温仪表和热流计</b> ..... | 130 |
| 第一节 温度测量的一般概念.....           | 130 |
| 第二节 热电偶温度计.....              | 133 |
| 第三节 热电阻温度计.....              | 145 |
| 第四节 接触法测温技术.....             | 149 |
| 第五节 接触式热流计.....              | 153 |
| <b>第五章 辐射测温技术及仪表</b> .....   | 160 |

|                    |                  |            |
|--------------------|------------------|------------|
| 第一节                | 黑体辐射源.....       | 160        |
| 第二节                | 红外探测器.....       | 168        |
| 第三节                | 辐射测温仪表.....      | 176        |
| 第四节                | 辐射测温技术.....      | 190        |
| <b>第六章</b>         | <b>物位测量.....</b> | <b>204</b> |
| 第一节                | 物位测量的一般概念.....   | 204        |
| 第二节                | 浮子式液位计.....      | 205        |
| 第三节                | 静压式液位计.....      | 208        |
| 第四节                | 电容式物位计.....      | 210        |
| 第五节                | 核辐射式物位计.....     | 213        |
| <b>主要参考文献.....</b> |                  | <b>216</b> |

# 第一章 压力测量仪表

## 第一节 概 述

这里所论及的压力,系指在工业生产过程中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,它的测量问题将在机械量测量仪表一书中叙述。

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,如液位的测量、流量的测量,往往也是通过测量压力或压力差来进行,即测出压力或压力差而间接测量液位或流量。

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 $p_g$ ,而在工程技术中往往采用表压力 $p_b$ 。它是指超出当地大气压 $p_a$ 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

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

或

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

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。在差压计中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力。

在物理学中和工程技术中有几种不同的单位制,现在我国法定单位基本上与国际单位制一致。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。在我国法定单位制中,其压力单位是每平方米的面积上垂直作用一牛顿的力,即 $\text{N}/\text{m}^2$ ,叫作帕斯卡,简称“帕”,符号为“Pa”。

其他压力单位,过去常用的有CGS制:压力单位是在每平方厘米的面积上垂直作用一达因的力,即 $\text{dyn}/\text{cm}^2$ ;标准大气压:0℃时水银密度为 $13.5951 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,在标准重力加速度 $980.665 \text{ cm}/\text{s}^2$ 下高760mm水银柱对底面的压力;毫米水柱:标准状态下高1 mm水柱对底面的压力;毫米水银柱:标准状态下高1 mm水银柱对底面的压力;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,即 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ;欧美国家常用的压力单位是 $\text{lbf}/\text{in}^2$ ,符号为“Psi”。各种压力单位的换算表如表1-1所示。

表 1-1 压力单位换算表

| 压力单位                                           | 帕<br>(Pa)            | 公厘力/厘米 <sup>2</sup><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 毫米水柱<br>(mmH <sub>2</sub> O) | 毫米水银柱<br>(mmHg)        | 毫 巴<br>(mbar)          | 标准大气压<br>(atm)          | 磅力/英寸 <sup>2</sup><br>(lbf/in <sup>2</sup> ) |
|------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|
| 1帕<br>(N/m <sup>2</sup> )(Pa)                  | 1                    | $1.02 \times 10^{-5}$                         | 0.102                        | $7.501 \times 10^{-3}$ | $10^{-2}$              | $9.87 \times 10^{-6}$   | $1.4504 \times 10^{-4}$                      |
| 1公斤力/厘米 <sup>2</sup><br>(kgf/cm <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<br>(mmH <sub>2</sub> O)                  | 9.806                | $10^{-4}$                                     | 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<br>(mmHg)                               | 133.3                | $13.6 \times 10^{-4}$                         | 13.6                         | 1                      | 1.333                  | $1.316 \times 10^{-4}$  | $1.934 \times 10^{-3}$                       |
| 1毫巴<br>(mbar)                                  | 100                  | $0.102 \times 10^{-3}$                        | 10.2                         | 0.7501                 | 1                      | $9.87 \times 10^{-4}$   | $1.45 \times 10^{-3}$                        |
| 1标准大气压<br>(atm)                                | $10.13 \times 10^4$  | 1.333                                         | $1.033 \times 10^4$          | 760                    | 1013                   | 1                       | $1.4696 \times 10$                           |
| 1磅力/英寸 <sup>2</sup><br>(lbf/in <sup>2</sup> )  | $0.6895 \times 10^4$ | $7.031 \times 10^{-3}$                        | $7.031 \times 10^3$          | 51.72                  | $0.6895 \times 10^3$   | 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大小的仪器。这种压力计结构简单使用方便，有相当高的准确度；缺点是量程受液柱高度的限制，玻璃管易损坏，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，故多用于实验室。

### 一、U型管压力计

这是一种最简单而又能测量压力、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边刻度的标尺，管中充一定量的工作液体。在没有被测压力作用时，两管中的自由液面同在标尺的零点处。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 $\gamma_0$ 。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1mm时，一边读数的绝对误差可达1mm，而U形管压力计必须两边读数，故最大误差可达2mm。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。

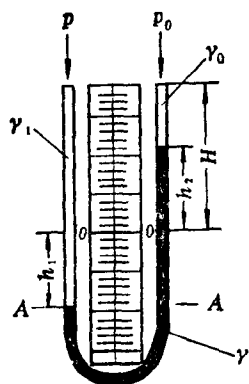


图 1-1 U型管压力计

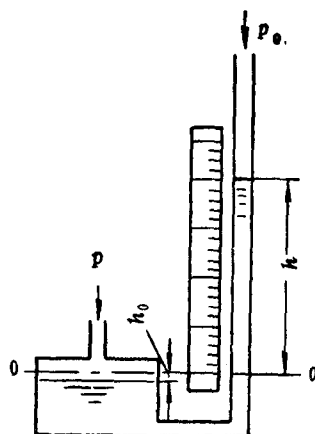


图 1-2 单管压力计

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 $\gamma = 1.000 \times 10^3 \text{ kgf/m}^3$ ，而35℃时 $\gamma = 0.994 \times 10^3 \text{ kgf/m}^3$ ，变化了0.6%；（2）安装位置误差。应保证U形管压力计的两个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，则压力数值的误差主要取决于液柱高度的读数精度。因此国家最高的压力传递基准，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 $\pm 0.001\%$ 。

## 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，因此设计出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，只是它的两面管子的直径差得很大。在两边压力作用下，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  $p - p_0$ , 即已知  $p_0$  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  $d = 5\text{mm}$ ,  $D = 200\text{mm}$  时, 则

$\frac{F}{F_0} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{25}{40000} = 0.000625$ , 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  $p = p_0 + l \gamma \sin \alpha \left( 1 + \frac{F}{F_0} \right) \quad (1-10)$

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, 否则读数困难, 反而增加读数误差。

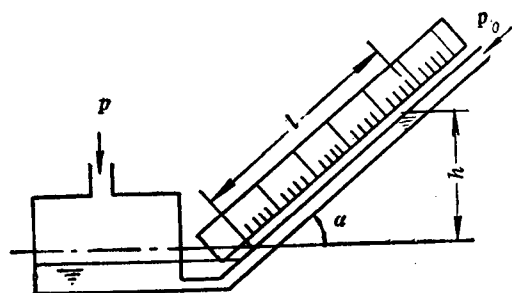


图 1-3 斜管微压计

### 四、补偿式微压计

如图1-4所示, 它是一个测量120mmH<sub>2</sub>O以下压力、负压或差压的压力计, 测量准确

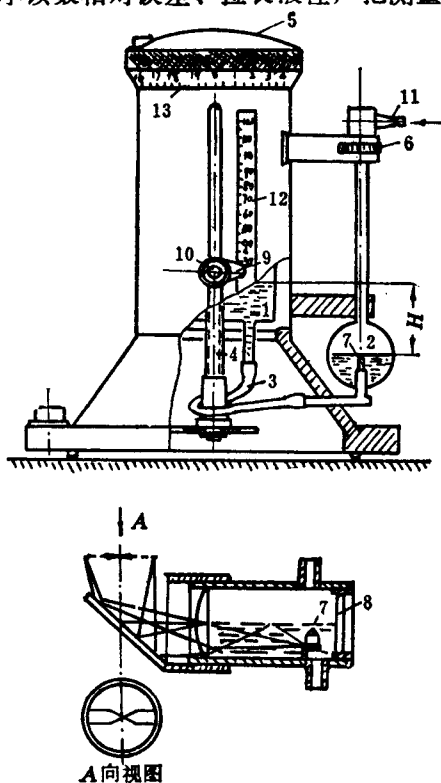


图 1-4 补偿式微压计

- 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

度高, 读数误差小于 $0.02 \sim 0.05 \text{ mmH}_2\text{O}$ 。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。在压力差作用下容器 1 内的液面升高, 容器 2 内液面下降。转动刻度盘 5, 使容器 1 沿螺杆升高, 直到容器 2 内的液面回到初始零位, 通过反射镜 (图 1-4 下图) 观察到观察钉 7 的尖与它自己在液体中所成像的尖正好相对, 如图中 A 向视图所示。标尺 12 每分格为  $2 \text{ mm}$ , 刻度盘 5 每周分为 200 分格, 故刻度盘每转过一分格使容器 1 升高或降低  $0.01 \text{ mm}$ 。由于测微螺杆与螺母之间有螺纹间隙, 故精度只能达到  $0.02 \sim 0.05 \text{ mmH}_2\text{O}$ 。

### 第三节 活塞式压力计与浮球式压力计

#### 一、活塞式压力计

活塞式压力计是检验、标定压力表和压力传感器的标准器之一, 也是一种标准压力发生器, 在压力基准的传递系统中占有重要地位。作为压力基准的副原器精度为  $0.002\%$ , 其次有作为国家基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 (校验氧气表用液体石蜡)。活塞 1 的上部是承重盘 4, 其上放置砝码 2。当加压泵 9 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  $F$

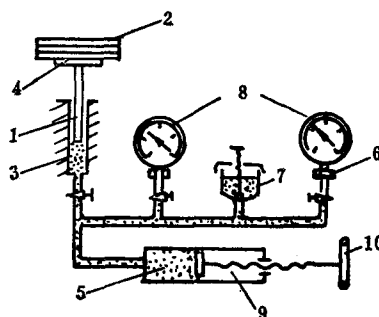


图 1-5 活塞式压力计

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

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

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对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利用其上的水泡, 将其调成水平。

2. 活塞式压力计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

$$g_s = \frac{9.80665(1 - 0.0025 \cos 2\phi)}{1 + \frac{2H}{R}} \quad (1-12)$$

式中  $g_\phi$ ——活塞式压力计使用地点的重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$R$ ——地球半径, 按  $R=6371 \times 10^3 \text{m}$  计算;

$H$ ——压力计使用地点的海拔高度,  $\text{m}$ ;

$\phi$ ——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

$$p = g_\phi \frac{G}{F} \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (1-13)$$

式中  $\rho_1$ ——当地空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_2$ ——砝码材料的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$G$ ——承重盘与砝码质量的总和,  $\text{kg}$ ;

$F$ ——活塞的有效面积,  $\text{m}^2$ 。

温度变化的影响。温度变化将影响活塞的有效面积, 当环境温度不是  $20^\circ\text{C}$  时, 公式1-13变为

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

式中  $\alpha_1, \alpha_2$ ——活塞与活塞缸材料的线膨胀系数,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$t$ ——工作时的环境温度,  $^\circ\text{C}$ 。

当活塞与活塞缸材料相同时

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

式中  $E$ ——活塞与活塞缸材料的弹性模量;

$\nu$ ——泊松系数;

$r, R$ ——活塞、活塞缸半径。

## 二、浮球式压力计

浮球式压力计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  $\pm 0.05\%$ 。这是一种新发展起来的压力标准表, 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, 自动悬浮在此空气流中。压缩空气从钢球与锥腔之间的间隙排出, 其流量与来流流量相等。达到平衡时浮球下部压缩空气向上的作用力与其上部空气压力形成的向下作用力之差, 等于浮球、托架和砝码重量之总和。

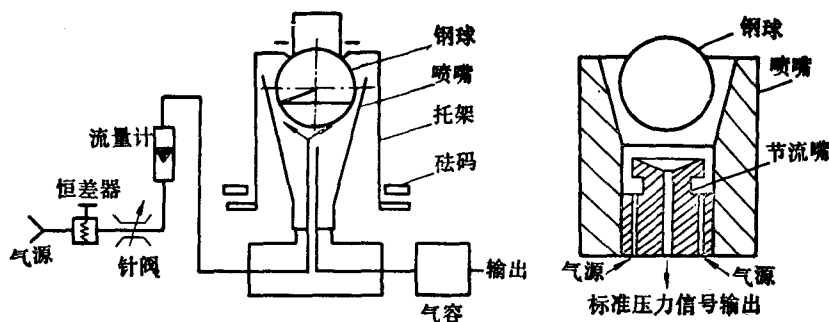


图 1-6 浮球压力计工作原理

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

式中  $p$  —— 压缩空气的压力;  
 $\Sigma G$  —— 浮球、托架和砝码重量之总和;  
 $S$  —— 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式1-16确定的压力  $p$ , 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, 很容易得到较高精度的数值。有效面积  $S$  是通过对此压力计的标定得到的, 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、油和水等杂质的净化空气, 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为气动定值器, 7为玻璃

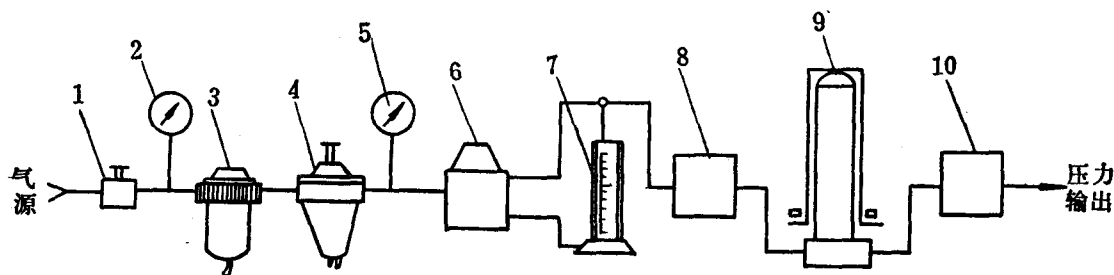


图 1-7 浮球压力计系统

转子流量计, 8为输入气容, 9为浮球式压力计, 10为输出气容。

## 2. 误差来源

(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, 还要进行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  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  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。