

高等学校教材

高压技术基础 (三)

高压测试技术基础

王曙光 朱林泉 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书系《高压技术基础》丛书之三。本分册系统地介绍了高压测试技术的基础理论和基本方法。本书由三部分组成，第一部分介绍压力计、压力传感器、中间变换器和记录仪器；第二部分从信号与系统分析的角度阐述动态压力测试理论，及测试信号的数字处理方法；第三部分介绍密封压力下的温度、流量的测量方法。

本书适于有关测试技术人员阅读，亦可供有关专业的高年级大学生、研究生参考。

高压测试技术基础

王曙光 朱林泉 编著

*

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京通县建新印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.5 字数: 354.12千字

1991年4月第1版 1991年4月第1次印刷

印数: 1~1400 定价: 3.74元

ISBN 7-80038-256-7/1·12 (课)

出版说明

遵照国务院关于高等学校教材工作的分工，原兵器工业部教材编审室自成立之日起就担负起兵工类专业教材建设这项十分艰巨而光荣的任务。由于各兵工院校、特别是参与编审工作的广大教师积极支持和努力，及国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的紧密配合，自1985年到1988年共编审出版了89种教材。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映兵工科学技术的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，在总结第一轮教材编审出版工作的基础上，制订了兵工教材编审工作的五个文件。指导思想是：以提高教材质量为主线，完善编审制度，建立质量标准，明确岗位责任，充分发挥各专业教学指导委员会的学术和咨询作用，加强从教材列选、编写到审查整个教材编审过程的科学管理。

1985年根据教学需要，我们组织制订了“七五”教材编写规划，共列入教材176种。这批教材主要是从经过两遍教学使用、反映较好的讲义中遴选出来的，较好地反映了当前兵工教材的科学性和适合我国情况的先进性，并不同程度的更新了教材内容，是一批较好的新型教材。

本教材由潘德恒主审，经机械电子工业部兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有错误之处，希望广大读者批评指正。

机械电子工业部兵工教材编审室

1989年8月

前 言

本书系《高压技术基础》丛书之三，它是在国内外有关资料的基础上编写而成的，并注重反映国内外的新成就。全书系统地介绍了高压测试技术的基础理论和基本方法。为了不失一般性和连续性，本书还介绍了低、中压和超高压的测试理论和方法。

本书由三部分组成。第一部分包括第一至第三章，介绍压力、压力测试的有关概念，以及压力计、压力传感器、中间变换器和记录仪器等，其中还着重介绍了国内外新近研制的（超）高压压力计和（超）高压传感器等；第二部分包括第四和第五章，着重从信号与系统分析的角度介绍动态压力测试理论和测试信号的数字处理方法，并突出了国内外有关新成就、新方法；第三部分包括第六章和第七章，介绍常压和密封高压下流体的温度、流量的测量方法。

本书由太原机械学院王曙光和朱林泉同志编著，潘德恒教授主审。

本书在编写过程中，太原机械学院的潘德恒、路宏年、赵纪兰、韩焱、杨志刚和任树梅等同志提出了许多宝贵意见和建议。参加编写工作的还有王丽霞、杨述平、宋方道和刘稳兵等同志。路宏年同志参加了审校工作。此外，机电部兵工教材编审室杨士诚等同志和兵器工业出版社周延民等同志对本书的编写和出版给予了热情指导和大力支持。在此一并致谢！

限于水平，书中错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者批评、指正。

编 著 者

1988.10

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 压力的概念	(1)
1.2 压力测试	(3)
第二章 压力计	(5)
2.1 基准压力计	(5)
2.2 其它压力计	(10)
2.3 高压压力计	(14)
第三章 压力传感器	(20)
3.1 应变式压力传感器	(20)
3.2 压阻式压力传感器	(24)
3.3 压电式压力传感器	(29)
3.4 电容式压力传感器	(34)
3.5 电感式压力传感器	(38)
3.6 光纤压力传感器	(42)
3.7 高压压力传感器	(44)
3.8 信号调节器	(52)
3.9 信号记录仪器	(56)
第四章 动态测试基本理论	(62)
4.1 信号与系统分析的基本概念	(62)
4.2 测试系统的静态特性	(67)
4.3 测试系统的动态特性	(69)
4.4 测试系统的无失真传输条件	(73)
4.5 测试系统的传输特性与输出特性分析	(77)
4.6 准静态条件下的动态压力测试	(86)
4.7 传感器的安装与测压管道	(91)
4.8 测试系统动态特性的校准	(97)
4.9 高压测试系统动态灵敏度的比对与落锤动校装置	(107)
4.10 高压测试系统频响特性的准 δ 冲激校准	(110)
第五章 测试信号的数字处理	(114)
5.1 离散信号与离散系统	(114)
5.2 时频域采样定理与窗函数	(118)
5.3 离散傅里叶变换及其主要性质	(126)
5.4 离散傅里叶变换的应用	(136)
5.5 快速傅里叶变换 FFT	(147)
5.6 数字滤波器与数字模拟	(161)

第六章 温度的测量	(172)
6.1 引言.....	(172)
6.2 膨胀式温度计与压力式温度计.....	(174)
6.3 电阻式测温.....	(176)
6.4 热电偶测温.....	(180)
6.5 非接触测温技术.....	(191)
6.6 热流量测量.....	(201)
6.7 高压下的温度测量.....	(204)
第七章 流量的测量	(207)
7.1 概述.....	(207)
7.2 常用的流量计.....	(208)
7.3 新型流量计.....	(215)
7.4 流量计的定度.....	(219)
7.5 高压流量计.....	(220)
参考文献	(222)

第一章 绪 论

1.1 压力的概念

本节介绍流体压力的定义、单位及其分类。

一、流体压力的定义

在工程上，通常把流体的压强称为压力。所谓压强是指流体介质垂直作用于单位面积上的力，并用作用于该表面上的力与该表面面积之比来表示，即

$$p = F/S \quad (1-1)$$

式中 p ——压强，流体压力 (Pa)；

S ——表面积 (m^2)；

F ——垂直作用力 (N)。

进一步讲，流体的压力是分子热运动的宏观表现。当流体与物体（如容器壁）接触时，由于热运动，不规则运动的流体分子将与容器壁碰撞而产生动量交换。总的动量交换取决于单位时间内冲击容器壁的分子总数和分子的平均速度。当平均压强用来表示分子热运动的宏观表现时，对于理想气体，有

$$\bar{p} = \frac{1}{3} n m v_s^2 \quad (1-2)$$

或

$$\bar{p} = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 \quad (1-3)$$

其中

$$v_s = \sqrt{3kT/m} \quad (1-4)$$

$$\bar{v} = \sqrt{8kT/(m\pi)} \quad (1-5)$$

式中 n ——分子的密度（数密度）；

m ——分子的质量；

v_s ——分子运动的均方根速度；

$\bar{v}$ ——分子运动的平均速度；

T ——气体的绝对温度 (K)；

k ——玻尔兹曼 (Boltzman) 恒量， $k = 1.3803 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；

$\bar{p}$ ——（气体）平均压强。

值得指出，分子运动的均方根速度 v_s 与平均速度 $\bar{v}$ 相差很小。

由于液体分子间的平均距离较气体的小得多，其原子间的联系是很紧密的，其分子平均自由程很小，分子间的亲和力起着极其重要的作用，因此，对于理想气体来说，其分子的平均自由程可由麦克斯韦 (Maxwell) 平均自由程来表示，即

$$l = 1/(\sqrt{2} \pi n \delta^2) = 0.707/(\pi n \delta^2) \quad (1-6)$$

式中, δ 为气体分子的有效碰撞直径。由式 (1-6) 可见, 平均自由程随气体分子数密度 n 的减小而增大。

由于液体和气体分子间的平均距离和分子平均自由程都有差别, 所以它们在某些宏观表现上有着重要的差别, 如气体的可压缩性要比液体的大得多; 液体具有较大的表面张力和毛细现象; 气体不受容器的限制, 可以任意扩散, 其体积的膨胀几乎是无止境的等等。但液体和气体在某些力学和运动学性质上仍有共同点。

二、压力的单位

在国际单位SI制中, 压力单位为Pa (帕), $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。在高压计量中, 经常使用MPa (兆帕) 和GPa (吉帕), $1\text{GPa} = 10^3\text{MPa} = 10^9\text{Pa}$ 。

在实际中, 还使用着其它计量单位, 如标准大气压、工程大气压和巴等。

三、压力的分类

如果以真空和大气压力作比较基准, 则压力有绝对零压力 (即真空)、大气压力、绝对压力和表压力等种类。

1. 真空

理想的真空即绝对零压力。在绝对零压下, 该空间完全不存在任何物质。但实际上该空间气体分子的平均自由程远超过容器的大小时, 即认为达到了物理上所指的真空。

2. 大气压力

如前所述, 大气压力是相对于真空而定义的大气静压力。除标准状态下大气压力为一定值外, 不同时间、地点和气候情况下的大气压力都是变动的, 故有“当地大气压力”之称。

3. 绝对压力

绝对压力是指流体作用于容器壁单位面积上的力的绝对值。或者说, 它是相对于绝对零压力 (理想真空) 而测得的压力。显然, 绝对压力永远大于真空压力, 它不可能出现负值。大气压力就是一种绝对压力。

4. 表压力

表压力是绝对压力与当地大气压力之差, 因而, 它是相对于当地大气压力 (环境压力) 测得的压力, 简称为“表压”。显然, 表压不能简单地理解为表测压力。

若以 p_a 、 p_0 和 p_g 分别表示绝对压力、当地大气压力和表压力, 则

$$p_g = p_a - p_0 \quad \text{或} \quad p_a = p_0 + p_g$$

因此, 当绝对压力 p_a 大于当地大气压力 p_0 时, 表压 p_g 为正, 称为“正表压”; 当绝对压力 p_a 小于当地大气压力 p_0 时, 表压 p_g 为负, 称为“负表压”。应该指出, 表压的正负绝不意味着绝对压力可负。

5. 真空度

负表压的绝对值即为“真空度”。真空度反映压力接近真空的程度。真空度 p_v 写作

$$p_v = p_0 - p_a = -p_g = |p_g|$$

可见, 由于绝对压力 p_a 总是非负, 因此真空度 p_v 的值始终小于当地大气压力 p_0 。

6. 差压

差压是指任意两个压力之间的差值,或相对于某一参考压力测得的压力,故也叫“压力差”。

上述诸压力之间的关系如图1-1所示。

如果从压力随时间变化的程度来分,则有静态压力与动态压力。

从压力测试的角度上讲,把压力分为静态压力与动态压力是很有意义的。静态压力是不随时间变化或变化非常缓慢的;而动态压力是指随时间变化的压力信号,即压力信号是时间的函数,例如枪炮的膛压信号、爆炸波冲激压力和发动机燃烧室的压力均为动态压力。静态压力与动态压力对压力测量装置或压力测试系统的要求是不相同的。

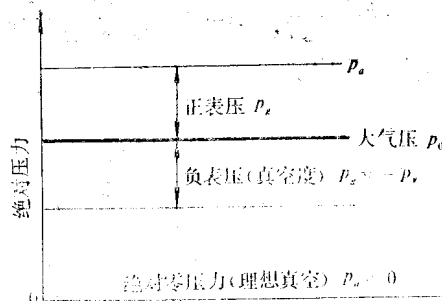


图1-1 各压力间的关系

1.2 压力测试

人类对自然界的一切认识与改造活动均离不开获取自然界的信息,因此获取信息是人类最基本的活动之一。

在日常生活中,人们可以凭借感觉器官获取满足日常生活需要的大量信息。但是,在浩瀚的科学技术领域中要想获取足以揭示事物内在规律的信息,无论是在信息的幅度上,还是信息的时间、空间上,或在分辨能力等方面,人们的感觉器官是十分有限的。测试,作为定量地获取事物信息的一种手段,正是基于这样的背景,而成为当代科学技术的一个重要领域。

简单地讲,测试是依靠一定的科学技术定量地获取某种研究对象原始信息的过程。显然,压力测试所要获取的信息是有关压力的。测试不同于一般的通信,从根本上讲,测试所要获取的信息总是未知的。

这里所说的信息是指事物的状态或属性,例如一枚发射的火箭,其燃烧室内气体的温度、压力和流速等是燃烧室工作状态的信息,而温度、压力和流速等之间的相互关系则是燃烧室属性的信息,因此,测试获取的信息既是指事物的状态,同时也包含事物的属性。测试直接获取的信息一般是事物的状态,而其属性方面的信息则要从中提取。

测试获取信息的过程同人们通过感觉器官获取信息的过程相似。以看书为例,书上文字在光照射下反射给读者的视觉器官,经过大脑的分析、处理获得了书上的文字。同样,讲话的语音是通过空气振动传给听众的听觉器官,听觉器官接收了这种随时间变化的空气振动后,送入大脑分析、处理,得到了语音的信息。这里,文字信息为反射光强所转载,语音信息为空气振动所转载。通常,将这种转载一定信息的随时间或空间变化的物理量称为信号,即信号是信息的载体(信号与信息是不同的概念,但习惯上多不严加区分)。由此可见,人们在日常生活中获取信息的过程,首先是将待获取的信息为一定形式的信号所转载,并接收这种信号,而后从接收到的信号中提取原来的信息。

因此,测试获取信息的过程是,通过一定的特殊装置(测试装置或测试系统)将被测的信息转换成一定形式的、易于传输、转换、显示和记录(存贮)的信号(这一过程称为信号的测试),而后根据测试系统的标定或校准结果等,按一定的方式从中提取出被测信息(这

是测试信号的处理过程)。

概括地讲,测试系统是由有关器件、仪器和装置等有机组合而成的具有获取某种信息之功能的整体。

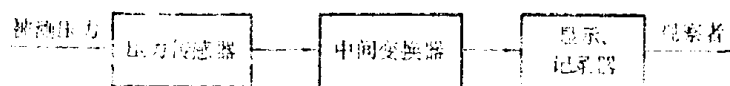


图1-2 简单的压力测试系统

图1-2示出了简单的压力测试系统,它是由压力传感器、中间变换器以及显示、记录器等若干“功能块”组成的。压力传感器是检测被测压力、并将其变为便于传输、变换和测量的电信号(非电量电测)的装置。中间变换器是在保存原始信号中所需要的信息内容的前提下,将传感器送来的电信号进行再转换,如放大或衰减、调制和解调、阻抗变换、微分或积分等,使信号变成一些合乎需要、便于显示、记录和后续处理的信号。显示、记录器是将信号变为一种为人们的感官所能接受的形式,以便观测和分析,或记录保存起来,而后重放出来进行分析处理。

在实际工作中,这些功能块所包含的具体仪器或装置有较大的伸缩性,视需要而变动,如中间变换器有时可以由很多仪器组合后完成一特定功能;有时却很简单,甚至可能仅为一根导线。

测试系统往往还引进测试信号的后续分析和处理仪器,如图1-3所示。

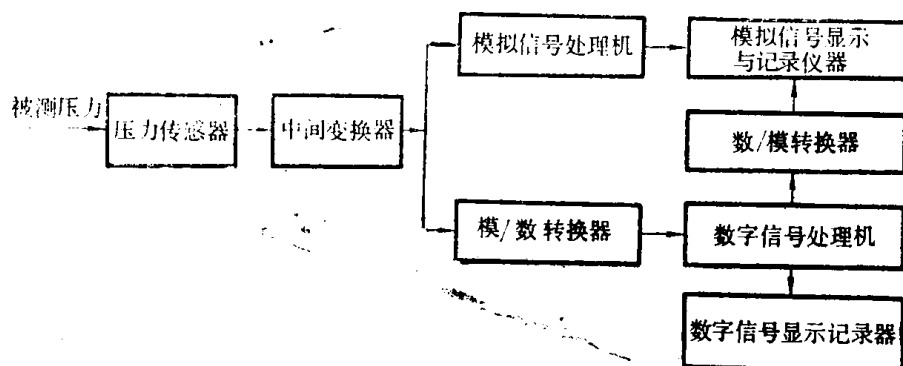


图1-3 压力测试系统的组成

测试技术是一门新兴的边缘学科,随着各种有关学科的发展,新型的传感器、测试电路、显示记录仪器以及新的测试方法、技术,新的测试信号分析理论、处理方法和仪器不断地出现,而且随着测试技术在各个领域中应用的广泛和深入,又必将促进各个领域更为迅速地发展。

第二章 压力计

压力计是测量静态压力的主要手段。本章主要讨论基准压力计、高压压力计和其它压力计。

2.1 基准压力计

在工程技术中,压力范围极大,可由 10^{-10}Pa 到 10^{10}Pa ^[7]。这么大的压力范围是很难用一种或少数几种压力测量设备来完成的,也很难用少数几种测量原理来实现。在1979年3月国际计量局召开的压力计量专业会议上,决定将压力计量范围划分为^[55]:甚低压($10^{-4}\sim 1\text{Pa}$),低压(微压)($1\sim 10^3\text{Pa}$),气压(中压)($10^3\sim 10^6\text{Pa}$),高压($>10^6\text{Pa}$)和超高压($>10^8\text{Pa}$)。并设立分档压力计量基准和基准设备。本书主要讨论高压情况。为了不失一般性和连续性,本书还讨论低压、中压和超高压的情况。

压力测量仪表按用途可分为基准(或标准)压力计(表)和工业用压力表。基准压力计是用于压力仪表和传感器的静态标定,这种压力计在使用环境受一定限制的情况下具有较高的准确度。当然,离开规定的使用条件、没有经过国家有关各级计量单位的校准或不持有有关计量单位签发的精度等级和校准时间的证书,是不能作为基准(或标准)压力计使用的。

基准压力计是以流体静力学的静重与压力相平衡的基本原理为基础来测量压力的。基准压力计主要有两种:液柱压力计和静重砝码(活塞)式压力计。下面分别予以介绍。

一、液柱压力计

液柱压力计是压力计量发展史上最原始、最经典的计量标准,也是目前压力计量上相对精确度最高的计量标准。由于这种经典的压力计与现代的高精度测长手段(如应用光干涉原理制成的测长仪器)有机地结合起来,从而使高精度的标准水银压力计(精确度为 $2\times 10^{-6}\sim 5\times 10^{-6}$,测量范围为 $1\times 10^3\sim 1.5\times 10^6\text{Pa}$ 和 $0\sim 10^3\text{Pa}$)研制成功,并且在许多国家作为最高压力基准。

1. 液柱压力计的原理

液柱压力计有U型管液柱压力计、槽形液柱压力计、液柱气压计和斜管液柱压力计等四种基本形式^[7],分别如图2-1(a)、

(b)、(c)和(d)所示。这四种型式的

液柱压力计的基本原理都是根据流体静力学的平衡理论,建立液柱高度或高度差与被测压力 p 或压力差 Δp 之间的关系。读出液柱高度(差)值,便得到被测压力(差)值。

对于U型管液柱压力计,如图2-1(a)所示,有

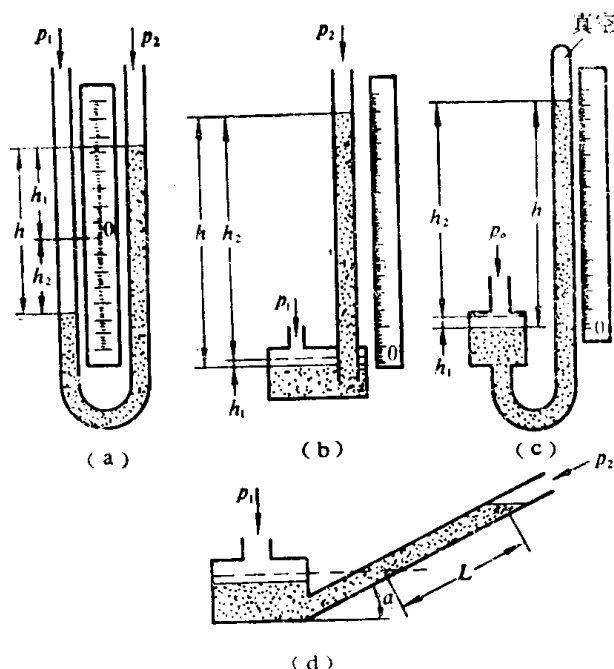


图2-1 液柱压力计的基本型式

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g h = \rho g (h_1 + h_2) \quad (2-1)$$

式中 Δp ——被测压力差 (Pa) ;
 ρ ——液体介质的密度 (kg/m^3) ;
 h_1 、 h_2 、 h ——分别为两个液柱高度和两个液柱高度之差;
 g ——当地重力加速度 (m/s^2) 。

槽形液柱压力计如图2-1 (b) 所示, 其基本关系式仍为 (2-1) 式。但是, 由于槽的面积 S 远大于管的截面积 s , 而两边液体体积的改变量是相等的, 所以在 Δp 的作用下, 槽内液面下降 (或上升) 的高度 h_1 比管内液面上升 (或下降) 的高度 h_2 要小得多。即

$$S h_1 = s h_2$$

或

$$h_1 = \frac{s}{S} h_2$$

于是

$$\Delta p = \rho g (h_1 + h_2) = \left(1 + \frac{s}{S} \right) \rho g h_2 \quad (2-2)$$

由式 (2-2) 可见, 当 $S \gg s$ 时, 有

$$\Delta p \approx \rho g h_2 \quad (2-3)$$

图2-1 (c) 所示的液柱气压计则用于测量绝对压力, 且

$$p_a = \rho g h \quad (2-4)$$

式中 p_a 为被测压力 (系绝对压力) 。

由上述分析可知, 被测压力的范围取决于液体的密度 ρ 和液柱玻璃管的长度。对于高压测量, 当密度一定时, 液柱就很高, 管也很长, 这是很不利的。为此, 对于高压测量, 一般选密度大的液体作介质, 如水银等。但水银有剧毒, 故对于非高压测量, 也可选用纯水或酒精作介质。这几种介质的密度列于表2-1。

表2-1 水银、纯水和酒精的密度

介质	温度 $^{\circ}\text{C}$	质量密度 $\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$
水银	0	1.35951×10^4
	20	1.35459×10^4
纯水	4	1.0×10^3
	20	0.999×10^3
酒精	20	0.789×10^3

对于低压或微压测量, 应选择密度小的液体作介质, 而且, 选用如图2-1 (d) 所示的斜管液柱压力计, 这种压力计的基本关系式为

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g L \sin \alpha \left(1 + \frac{s}{S \cdot \sin \alpha} \right) \quad (2-5)$$

式中 s 、 S ——斜管和槽的截面积 (m^2) ;

L ——斜管中液柱的长度（相对于起始零点），单位m；
 α ——斜管倾角。

若令
$$K_m = 1 + \frac{s}{S \cdot \sin \alpha} \quad (2-6)$$

则
$$\Delta p = \rho g L K_m \sin \alpha \quad (2-7)$$

或
$$\Delta p = L/K \quad (2-8)$$

其中
$$K = \frac{1}{K_m \rho g \sin \alpha} \quad (2-9)$$

称 K 为压力计的灵敏度。当 $S \gg s$ 时， $K_m \approx 1$ ，此时，灵敏度 K 随 α 的减小而增大。

分析表明，此压力计的灵敏度和精度都高。

2. 液柱压力计的误差分析

由于液柱压力计被用作最高的压力基准，因此，其误差分析极为重要。

影响压力计精度的因素有许多，但实质上都是通过介质密度 ρ 和液柱高度（差） h 来影响被测压力的。为此，下面简要介绍重力加速度 g 和温度等因素引起的误差。

(1) 重力加速度变化引起的误差 地理纬度 φ 和海拔高度 H 等因素会引起重力加速度的改变，从而引入压力计液柱高度 h_0 的误差 $(\Delta h)_g$

$$(\Delta h)_g = -\{g_\varphi/g_n + [R/(R+H)^2 - 2]\}h_0 \quad (2-10)$$

式中 R ——地球的公称直径， $R=6356766\text{m}$ ；

H ——自标准海平面算起的几何高度（m）；

g_n ——标准重力加速度， $g_n=9.80665\text{m/s}^2$ ；

g_φ ——不同地理纬度 φ 所对应的重力加速度。

当要求精度较高时， g_φ 可以实测，也可根据国际标准ISO2533建议，采用如下方程计算

$$g_\varphi = 9.80616(1 - 0.0026373\cos 2\varphi + 0.0000059\cos^2 2\varphi) \quad (2-11)$$

(2) 温度变化引起的误差 温度变化时，水银的密度 ρ 、玻璃管的尺寸将发生变化。温度变化 Δt 引起液柱高度 h_0 的变化量为

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= -h_0(\Delta\rho/\rho_0) = -h_0(-a_v\Delta t) \\ &= h_0a_v\Delta t \end{aligned} \quad (2-12)$$

式中， a_v 为介质的温度体胀系数。对于水银， $a_v=0.1818 \times 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ，对于水， $a_v=0.207 \times 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ 。

当温度升高时，水银密度变化所造成的液柱高度误差为正值，即液柱高度值偏大；当温度降低时，其值则偏小。

玻璃管受温度影响导致液柱高度 h_0 的变化量为

$$\Delta h_2 = -h_0 \cdot 3\beta\Delta t \quad (2-13)$$

式中， β 为玻璃的线膨胀系数。普通玻璃： $\beta=9 \times 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ；硬质玻璃： $\beta=(4 \sim 7) \times 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ；石英玻璃： $\beta=5.6 \times 10^{-7} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ 。

于是，温度所致的总的误差为

$$\Delta h_t = \Delta h_1 + \Delta h_2 = (a_v - 3\beta)h_0\Delta t \quad (2-14)$$

(3) 液体介质表面张力所致误差 在液柱压力计中，由于液体介质表面张力的作用，液面将形成弯月面。弯月面不仅使读数造成误差，而且弯月面内外将形成压差。这个压差也将造成液柱高度的误差，该误差是弯月面的高度、管径和表面张力的函数。对这种误差的修正是很困难的，一般采用大直径的管子来减小这一误差。

(4) 水银压缩效应所造成的误差即使水银是清洁纯净的、且水银的密度符合标准值或进行了实测、以及进行了温度和重力加速度的修正，但水银在被测压力作用下，将因受压而改变自身的体积和密度。这一现象叫做水银的压缩效应。这一压缩效应将随着压力的增大而变得显著。因此，精确测量时，必须修正压缩效应所致误差。在20°C和一个大气压下，水银的压缩系数 $\kappa = 3.92 \times 10^{-11} \text{Pa}^{-1}$ 。其它诸如水、酒精等介质，也有压缩效应及其所致误差。

(5) 测高误差 高度测量时，如果使用现代的高精度测长仪测液柱高度，也存在误差；使用标尺，还有分度不准和刻线太粗所致误差。

此外，还有质量密度或重量密度（重力加速度）测量误差。被测压力不稳定，使用环境不稳定、液柱气压计的真空度（一般要求在 10^{-4}mmHg 以内）不高及人为因素等都会造成误差。

二、活塞式压力计

1. 活塞式压力计的结构

图2-2为活塞式压力计结构示意图^[7]，由图可见，它主要由压力缸、油液、测量缸、测量柱（活塞）、砝码、贮油器、进油阀和被校压力表等组成。

活塞式压力计也是以流体静力学的平衡原理为基础的。标准砝码和柱塞的重力通过已知直径的柱塞、作用于密闭的流体系统，从而产生如下的标准压力 p ，并且与测量缸中的被测压力平衡

$$p = 4g(m_1 + m_2)/(\pi D^2) \quad (2-15)$$

式中 p ——标准压力，等于被测压力（Pa）；

m_1 ——标准砝码的质量（kg）；

m_2 ——柱塞的质量（kg）；

D ——柱塞直径（m）；

g ——当地重力加速度（ m/s^2 ）。

由式（2-15）可见，压力 p 与砝码和柱塞的质量成正比，与柱塞的面积成反比。因此，在一定的压力作用下，柱塞的直径越大，所需砝码的质量越大。对于高压计量，若柱塞的直径较大，砝码的质量也大，个数也多。所以，在不影响截面测量精度的前提下，一般尽量减小直径。

活塞压力计的工作介质可以是液体（如蓖麻油、变压器油或矿物油等），也可以是气体

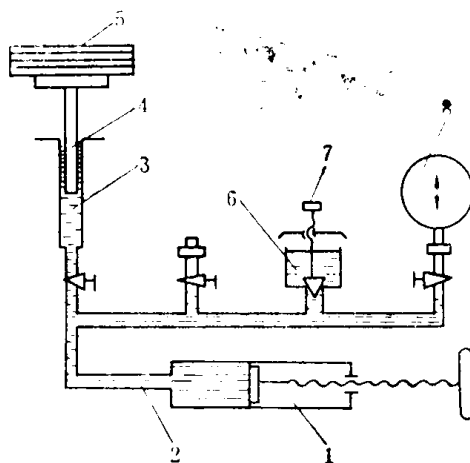


图2-2 活塞压力计示意图

- | | | |
|---------|---------|--------|
| 1—压力缸； | 2—油液； | 3—测量缸； |
| 4—测量柱塞； | 5—砝码； | 6—贮油器； |
| 7—进油阀； | 8—被校压力表 | |

(如空气、氮气等)。前者叫做油动活塞压力计, 后者叫做气动活塞压力计。

2. 活塞压力计的精度分析

活塞压力计所产生的标准压力的精度主要取决于柱塞、砝码重量的精度(包括重力加速度的影响)与柱塞直径的测量精度。此外, 柱塞的机械摩擦和粘性摩擦、柱塞和测量缸的变形以及环境温度等因素也都将影响着压力计的精度。

柱塞和砝码的质量的精确测量是容易做到的, 这项误差目前可以控制在 10^{-6} 之内; 摩擦是无法准确计算和修正的。因此, 通常的做法是, 当柱塞连同标准砝码在压力油作用下上升到规定的高度后, 使砝码和柱塞一起旋转, 以减小柱塞与其配合面间的摩擦力; 在进行低压高精度的压力计量时, 还必须对砝码所受的空气浮力作出修正。

当环境温度和重力加速度值偏离标准值时, 应分别修正如下:

$$\Delta p_t = p(a_{1\alpha} + a_{1\beta})(20 - t) \quad (2-16)$$

式中 p 、 Δp_t ——压力及其修正量 (Pa);

$a_{1\alpha}$ 、 $a_{1\beta}$ ——柱塞和测量缸材料的线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$);

t ——环境温度 ($^\circ\text{C}$)。

$$\Delta p_g = p(g/g_n - 1) \quad (2-17)$$

式中 p 、 Δp_g ——压力及其修正量 (Pa);

g_n ——标准重力加速度 (m/s^2);

g ——当地重力加速度 (m/s^2)。

此外, 对于高压下使用的高精度活塞式压力计, 还要修正截面积对压力变化的影响。

活塞压力计作为一种基准压力计, 得到广泛的应用。例如, 高一级标准的活塞压力计可以标定低一级标准的压力计(如确定柱塞的有效直径或有效面积); 标定其它非基准压力计或工业用压力表; 标定压力传感器(系静态标定)。关于中压值传递系统可参阅表2-2^[55]。

2.2 其它压力计

压力计有活塞式压力计、浮球式压力计、压力(差压)变送器和波登(Bourdon)管压力计。鉴于活塞式压力计在上一节已作较详细的介绍, 本节只给出几种国产活塞式压力计(YS-6、YS-60和YS-600)的技术数据(见表2-3和表2-4), 而主要介绍浮球式压力计、压力(差压)变送器和波登管压力计等。

表2-3 国产活塞式压力计的部分技术数据

精确度等级	基本误差限	
	压力值在测量上限值的10%以下时	压力值在测量上限值的10~100%时
0.05	测量上限值10%的 $\pm 0.05\%$	实际测量压力值的 $\pm 0.05\%$

一、浮球式压力计

浮球式压力计是一种新型的压力基准仪器, 它可以输出精确的气压信号, 可用于检验各种高精度的压力变送器、差压变送器和精密压力表。

表2-4 国产活塞式压力计的部分技术数据

参 数		单 位	压 力 值		
			0.6MPa	6MPa	60MPa
测量上限		MPa	0.6	6	60
测量下限		MPa	0.04	0.1	1
活塞公称面积		cm ²	1	0.5	0.1
底盘及活塞	公称质量	kg	0.4	0.5	1
	产生的压力	MPa	0.04	0.1	1
专用砝码	公称质量	kg	0.1; 0.5	0.5; 2.5	1; 5
	产生的压力	MPa	0.01; 0.05	0.1; 0.5	1; 5
	数量	个	6; 10	4; 10	4; 11
两端锁母			M20×1.5	M20×1.5	M20×1.5
重 量		kg	20	26	26
工作液体			变压器油 20°C时运动粘度为 $(9\sim 12) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$		
			药用蓖麻油, 其酸值有一定限度		

1. 基本原理与结构

浮球式压力计是以压缩空气或氮气作为能源、以精密圆球作为活塞的一种气动负荷压力计。如图 2-3 所示, 精密圆球置于圆筒形的喷嘴内部, 砝码通过砝码架作用在球体的顶端, 喷嘴内的气压作用在球体下部, 使圆球在喷嘴内飘浮起来。当已知质量的砝码所产生的重力与气压的作用力相平衡时, 压力计就能输出一个稳定而精确的压力值。

压缩空气或氮气通过流量调节器进入球体的下部, 并通过球体和喷嘴之间的缝隙排入大气, 从而在球体下部形成的压力, 将球体连同砝码向上托起。当排出的气体流量等于来自调节器的流量时, 系统处于平衡状态, 于是, 球体将浮起一定高度, 且球体下部的压力作用面积(即浮球的有效面积)也就一定。所以球体下部的压力通过压力稳定器后作为输出压力输出, 输出压力与砝码负荷成比例。

在砝码架上增减砝码时, 将破坏上述的平衡状态, 使浮球下降或上升, 从而改变了排入大气的气体流量, 使浮球下部的压力发生变化。调节器测出压力变化后, 立即改变气体的流入量, 使系统重新达到平衡状态, 以保持浮球的有效面积不变。因而, 保持了输出压力与砝码负荷之间的固定比例关系, 使浮球式压力计达到很高的精确度。

2. 当地重力加速度与环境温度对压力计精确度的影响

(1) 当地重力加速度对输出压力的影响 在没有提出特殊要求的情况下, 浮球式压力计的砝码是按照标准重力加速度($g_n = 9.80665 \text{m/s}^2$)制造的。当压力计使用地点的重力加

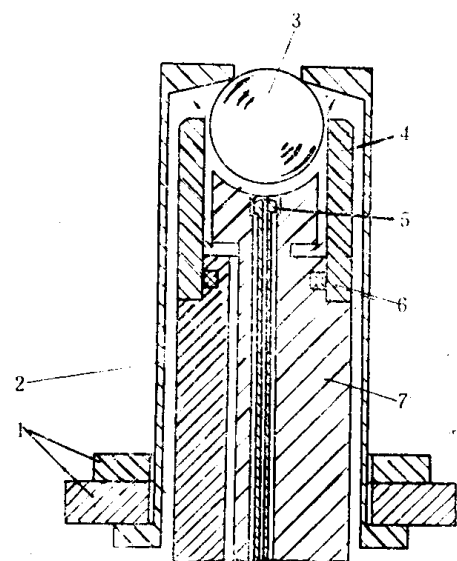


图2-3 浮球式压力计原理图

1—砝码； 2—砝码架； 3—浮球；
4—喷嘴； 5—输出节流管；
6—O型密封圈； 7—喷嘴座