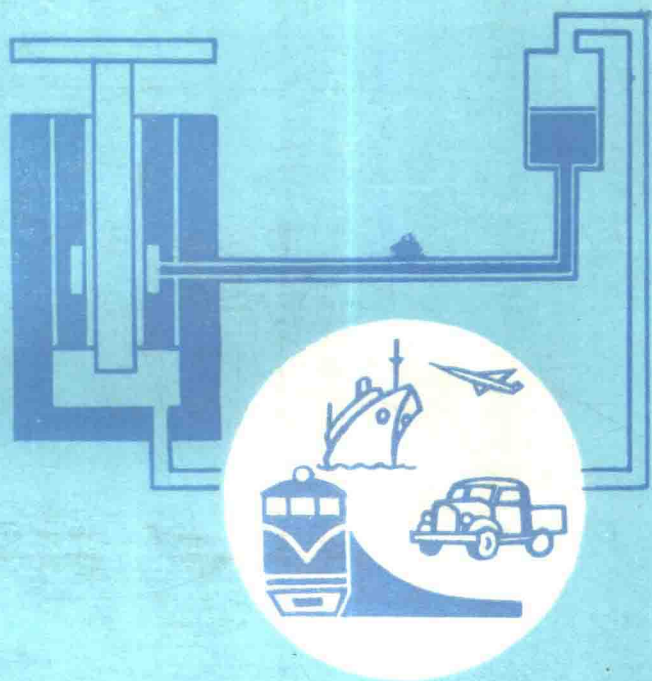




压力计量测试

许第昌 编

中国计量出版社

压力计量测试

许第昌 编

中国计量出版社

内 容 提 要

本书围绕压力计量测试人员所需掌握的技术内容及测试方法进行阐述, 主要介绍压力计量的基本概念, 各种常用压力计量仪器的结构原理和测试方法, 各类压力传感器, 静、动态压力测试方法, 超高压测试技术等。最后在附录中还介绍了压力仪器仪表由工程压力单位改为法定压力计量单位的各种具体方法。

可供计量部门和机械、石油、化工、冶金、电力、电子、航空、航天、造船、轻工、气象等部门从事压力计量测试工作的计量人员和工程技术人员参考, 也可作压力计量测试技术培训教材使用。

压 力 计 量 测 试

许第昌 编

责任编辑 徐 鹤

—

中国计量出版社出版

北京和平门11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—

开本 787×1092/32

印张 11.75 字数 267 千字

1988年10月第1版

1988年10月第1次印刷

印数 1—12 000

ISBN 7-5026-0120-1/TB·100

定价 4.00 元

前 言

压力计量测试技术不仅应用在众多的工业部门，而且在科学研究中也得到广泛应用。近年来各学科、各部门对压力计量测试技术都提出了新的要求，因而加速压力计量测试技术的研究和发展十分必要。

编者根据多年来的实践经验，又收集了国内外有关资料，编写了这本较为全面、系统介绍压力计量测试技术的参考书。在本书中，介绍了一般常规的测压技术，同时将近年来许多新的测压技术也作了介绍。对仪器仪表性能测试和使用要求的简要介绍，增加了本书的实用性。全书编写中注意了理论与实践、普及和提高的相互兼顾。

由于科学技术的不断发展，以及编者水平所限，本书一定会存在缺点和不足，欢迎广大读者批评指正。

本书在编写过程中得到中国计量科学研究院盛以唐同志、韩慧文同志，中国科协科技咨询部邹逸安同志，航空部304所许新民同志的帮助，还有众多的关心支持本书出版的同志们，在此一并表示衷心的感谢。

编 者

一九八六年九月

目 录

第一章 基本概念	(1)
第一节 绪言	(1)
第二节 压力的基本概念	(3)
第三节 压力的单位	(10)
第四节 压力仪器仪表的分类	(14)
第五节 压力量值传递系统	(20)
第二章 液体式压力仪器	(23)
第一节 作用原理及特点	(23)
第二节 U型(双管)液体式压力真空计	(24)
第三节 杯型(单管)液体式压力真空计	(28)
第四节 带有特殊装置的液体压力计	(31)
第五节 液体式微压计	(35)
第六节 环天平和钟罩式压力计	(41)
第七节 水银气压计	(43)
第八节 液体式压力计误差及修正	(45)
第九节 液体式压力计的性能测试	(52)
第十节 常见故障及处理方法	(58)
第十一节 使用和维护注意事项	(58)
第三章 弹簧式压力仪表	(62)
第一节 特点、作用原理和分类	(62)
第二节 弹性敏感元件及特性	(63)
第三节 传动机构	(71)
第四节 弹簧式压力仪表的结构	(74)
第五节 专用弹簧式压力仪表	(79)
第六节 弹簧式压力仪表的主要误差	(82)

第七节	弹簧式压力仪表的性能测试	(83)
第八节	调整和检修	(85)
第九节	使用和维护注意事项	(89)
第四章	活塞式压力仪器	(92)
第一节	基本概念和作用原理	(92)
第二节	活塞式压力仪器的分类	(93)
第三节	活塞式压力仪器的基本结构	(97)
第四节	几种特殊结构的油压活塞式压力计	(103)
第五节	具有倍增器的活塞式压力计	(107)
第六节	可控间隙的活塞式压力计	(108)
第七节	气动活塞式压力计	(110)
第八节	浮球式压力计和负压计	(112)
第九节	活塞式压力计的主要技术参数	(114)
第十节	活塞有效面积	(117)
第十一节	活塞有效面积的测定方法	(121)
第十二节	活塞式压力计的主要误差	(123)
第十三节	活塞式压力计的性能测试	(127)
第十四节	常见故障和处理方法	(128)
第十五节	使用维护和注意事项	(128)
第五章	压力传感器	(133)
第一节	传感器的基本概念	(134)
第二节	电阻式压力传感器	(137)
第三节	压阻式压力传感器	(149)
第四节	电容式压力传感器	(158)
第五节	电感式压力传感器	(162)
第六节	节流式压力传感器	(170)
第七节	压电式压力传感器	(173)
第八节	压杆式压力传感器	(179)
第九节	霍尔式压力传感器	(181)
第十节	力平衡式压力传感器	(183)
第十一节	振频式压力传感器	(185)

第十二节	光导纤维压力传感器	(193)
第十三节	其它压力传感器及今后发展方向	(196)
第六章	压力传感器的静态特性和测试	(201)
第一节	传感器的静态特性分类	(201)
第二节	静态特性方程	(202)
第三节	传感器的误差	(205)
第四节	传感器的理论(工作)特性	(214)
第五节	传感器的静态性能	(218)
第六节	压力传感器的静态性能测试方法	(226)
第七节	压力传感器静态性能计算	(233)
第七章	动态压力测试技术	(243)
第一节	概述	(243)
第二节	基本原理和特性	(244)
第三节	动态压力校准装置分类	(256)
第四节	周期函数发生器	(258)
第五节	非周期函数发生器	(272)
第六节	激波管	(283)
第七节	影响动态压力测试的主要因素	(293)
第八章	数字式压力计	(303)
第一节	概述	(303)
第二节	数字编码压力计	(305)
第三节	多圈弹簧管数字精密压力计	(307)
第四节	弹簧力平衡式压力计和绝压计	(309)
第五节	磁电力平衡式数字压力计	(311)
第六节	数字式气压计	(314)
第七节	固态(压阻)式数字压力计	(316)
第八节	电容式数字压力计	(320)
第九节	振动筒数字压力计	(322)
第十节	带微机的数字压力计	(324)
第十一节	数字式压力计的性能测试	(329)
第九章	超高压测试技术	(336)

第一节	概述	(336)
第二节	超高压的产生和测量原理	(338)
第三节	超高压装置简述	(340)
第四节	超高压的测试方法	(345)
第五节	氯化钠 (NaCl) 压缩曲线压标	(347)
第六节	压力定点	(349)
第七节	金属的熔化曲线测量超高压	(353)
第八节	红宝石荧光测压技术	(357)
附录一	压力仪器仪表由工程压力单位改为法定压力计 量单位的方法	(361)
附录二	帕斯卡 (Pa) 与工程中的压力单位换算表	(365)
参考文献		(366)

第一章 基 本 概 念

第一节 绪 言

在国民经济各部门中，凡是利用液体、气体或蒸汽等作为动力、传递介质、燃烧体等都要反映出压力的作用。这样就需要各种压力仪器仪表来指示出压力的有无、大小和变化等情况，以保证生产和科研能正确控制、工作进行顺利。所以，压力计量测试技术在国民经济各部门中都得到了广泛的应用。

在工业生产中，最普遍的是锅炉中的蒸汽压力和液压机、水压机等设备上的压力测试。交通运输中的汽车、火车、轮船和飞机等使用的各类发动机动力、液压、汽压管道中的压力测试；冶金工业上的冶炼，热风管道中的压力参数的控制和测试；石油、化工工业中各种物理、化学反应的控制和监测；在发电厂中，保证压力测试正确，对于机组安全和经济运行具有重要意义；在医疗卫生中血压的测量也以压力测试为依据；和农业有关的气象分析也与压力测试紧密相连。

在航空和航天技术等部门中，一些重要的飞行参数，如高度、空速等技术性能参数的测量均以压力测试为基础。在飞行试验中，对各种发动机工作状态的测试和控制，对操作系统工作情况的了解，对飞行器周围气流进行空气动力学研究，确定飞行器表面压力分布，测量剖面阻力等，对燃油、滑油系统、液压和气压辅助动力系统，喷气速度的控制，气

密座舱和设备舱安全条件的检查中都需要大量的压力参数测试。据统计有的飞行器参数测试中，压力参数测试点竟达到所有测试参数的60%之多。

在热核反应，裂变、同位素分离、重水的获得中都需要压力的控制和测试；潜艇的运行和潜水深度的探测也使用压力仪器测试；枪炮爆破压力的测试、火药爆炸威力的测试均以压力测试为基础。

在科学研究中，很多金属和非金属材料要经过压力加工，以改变其组织结构和相态。绝大多数新型高强度材料如人造金刚石也是经高压处理而成。在特定条件下，经高压作用后气态的氢可以转变为固态的氢，它具有一切金属的性质。在超高压下非金属碳也可转变为具有金属性能的碳。另外，在超高压研究物质的相态和相变、温度、磁场、电性能等都必须进行压力的测试。

随着国民经济的发展，目前对动态压力的测试，对压力的自动控制、远距离连续测试；在高、低温、冲击加速度和磁场等特定条件下的压力测试；低、微压和超高压的测试都提出了新的要求。

近年来，随着集成电路，电子计算机技术和传感器技术的飞速发展，对压力测试技术又提出了新的更高的要求。这就是不仅对生产、试验过程或其它运动过程中的压力参数进行测试、收集和数据显示，而且还要对其结果进行适当分析、处理、转换，反馈或通讯控制等。从而把生产、试验过程与被测参数的测试和数据处理构成一个完整、统一的整体。过去需工作人员和测试仪器进行测试，而现在则由计算机通过接口控制，测试系统中的各个单元管理和控制操作测试过程，在软件和硬件的统一控制下协调工作。

压力测试技术工作，还不仅是控制和调节生产和试验过

程，保证安全，测试数据和数据处理正确可靠，而且更主要的是如何从基准器量值传递到标准器和工作用仪器仪表；对各种基准、标准器和工作用仪器仪表的研制；对量值传递系统的研究；对测试方法、检定测试规范的试验研究、制订；对如何正确选择适当的仪器仪表、正确的使用和维护仪器仪表的方法，以及对压力仪器仪表进行修理和改进等计量工作。如果上述工作不能很好保证，就可能使被测试的压力参数不准确，这将直接影响生产产品、科研成果、军事探测的正确与否，就无法判断。

由此可见，压力计量测试工作在国民经济各个部门中都占有很重要的地位。近来特别是对动态压力参数的测试，对生产过程和科学试验中压力参数的实际校准，以及特殊条件下的压力测试提出了新的要求。所以，对压力计量测试技术工作的研究，不仅对国民经济各部门十分重要，而且对经济效果和压力计量测试技术本身的发展也是必不可少的。

第二节 压力的基本概念

一 压力的定义及压力计量

垂直而均匀作用在物体单位面积上的力称为压力。

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压力称为“压强”。因而，在物理学中压力是作用力的概念。所以，工程技术中的压力与物理学中的压强概念相同。因此，本书均指工程技术中使用的名词。

根据压力的定义，压力 p 的基本公式是：

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

式中 F ——作用力 (N)；
 s ——作用面积 (m^2)。

从式 (1-1) 可知, 压力与所承受力的面积成反比, 而与所受的作用力成正比。因此, 在同一作用力的情况下, 当作用面积大时压力小, 而作用面积小时压力大; 相反, 当作用面积一定时, 压力随作用力的增大而增加, 随着作用力的减小而减少。

在工程技术中, 由于各种不同的测试目的和要求, 以及需要测试的环境条件也各不相同, 所以需要研究压力测试的情况也不相同。

当施力于物体上时, 其体积和形状就发生变化, 而当力停止作用后, 物体又能恢复其原来的体积和形状的现象称为弹性。所以, 一般都可以用物体的弹性来表示压力的量值。

在固体中, 当力作用于任何固定不动的物体上时, 就会产生一种由物体体积改变所引起的应力; 而在液体中, 如将液体装在用活塞密闭的容器中。当在活塞上施力时, 那么容器中产生的压力会均匀分布到液体的所有质点 (液体所占体积的各点), 同时液体又将压力垂直地传到它周围的器壁。

在气体中, 压力也是传播到气体所占体积的所有各点。气体的体积随压力不同而改变。同时, 气体的弹力, 即恢复其原来体积的能力也随压力成比例地改变。气体和液体一样, 也能将压力传播到器壁, 而且一般是向限制它的表面传递。

在工程技术中, 压力的量值都是根据物体如上述的一些性质所制造的压力仪器仪表来测量的。因此, 用压力仪器仪表来对目的物进行比较或测量压力量值的过程叫压力计量。

由于应用压力是多种多样的, 因而就产生了不同的压力状态。

二 在流体力学中的压力

1 静止流体中的压力（静压力）

流体静压力的方向永远沿着作用力的法线方向，流体中任一点上各方向的静压力均相等。流体对装流体的容器底部和侧壁均有压力作用，其任一点的压力与流体表面到该点深度成正比。在同一水平面的所有各点压力是相等的，而且同一深度各方向压力相等。如果不是这样，那么流体在该点某些方向上有不平衡的力，会使流体在该点处于运动中。

液体的自由面处于静止，并且保持与水平面平行。

加在密闭液体上的压力，能够按照原来的大小由液体向各个方向传递。这就是著名的帕斯卡定律。

2 运动流体的压力

对于运动流体，任何一点的压力是所取平面方向的函数，并在与流动方向垂直的面为最大值。根据运动流体力学系统中动能和位能的关系可知，当某一质量为 m 的流体以速度 v 运动时，它的动能等于 $mv^2/2$ ；而当质量为 m 的流体上升高度为 h 时，其位能等于 mgh ，其中 g 为重力加速度。对于某一封闭的力学系统而言，总的能量应等于动能和位能之和、并保持常量：

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{常数} \quad (1-2)$$

对不可压缩的无粘滞性的流体，即理想流体而言，在物理学中，根据流体的连续原理可以得到伯努利方程：

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{常数} \quad (1-3)$$

式中 p ——压力；
 ρ ——流体的密度。

当流体处于静止时，即流体的速度为零，那么式(1-3)变成：

$$p + \rho gh = \text{常数} \quad (1-4)$$

当流体处于水平方向流动时，即 $h = 0$ ，那么式(1-3)变成：

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{常数} \quad (1-5)$$

一般将压力 p 称为静压， $\rho v^2/2$ 称为动压。所以，这时静压和动压和为常数，那么流速大时静压低；反之，流速小时静压高。实际上，由于流体有粘滞阻力引起的能量损失，所以，总压力不能保持常数，而沿流动方向减少。

三 压力名词术语

在工程技术中，为了区别测试的目的不同，常使用以下压力名词术语：

1 绝对压力 p_A

绝对压力是相对于绝对真空所测得的压力，即从完全真空的零压力开始所测得的压力。它是液体、气体或蒸汽所处空间的全部压力，也叫不带条件起算的全压力。当然得到完全真空是不可能的，因此一般说流体的绝对压力应是流体的压力与真空中残余压力之差值。但是，随着科学技术的发展，已可能得到几乎接近完全真空。对一般压力计量测试而言，其真空度到 $(10^{-1} \sim 10^{-2})\text{Pa}$ (约 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ mmHg}$) 则可认为是完全真空。一般用 p_A 或 abs 表示绝对压力。

2 大气压力 p_b

大气压力就是地球表面上的空气柱重量所产生的压力。即围绕地球的大气层，由于它本身的重力对地球表面单位面积上所产生的压力。它随某一地点离海平面的高度、所处纬度和气象情况而变化。并且随着时间、地点的不同而变化，用

符号 p_b 表示。

3 表压力 p_g

表压力是高于大气压力的绝对压力与大气压力之差，或者相对将大气压力作为零压力就称为表压力。一般压力仪表，若无特殊装置，其零点压力实际上就是当时的大气压力。所以，当 $p_A > p_b$ 时，表压力 p_g 为：

$$p_g = p_A - p_b \quad (1-6)$$

变换后得绝对压力 p_A 为：

$$p_A = p_g + p_b \quad (1-7)$$

一般情况下，直接用 p 表示（表）压力。有时将大于大气压力的表压力又称为正（表）压力。也可用符号“+”表示。

4 负压（疏空或真空表压力） p_v

当绝对压力小于大气压力时，大气压力与绝对压力之差，即比大气压力低的表压力称为负压力，用 p_v 表示，或用符号“-”表示。所以，当 $p_A < p_b$ 时，负压 p_v 为：

$$p_v = p_b - p_A \quad (1-8)$$

5 真空度 (V)

当绝对压力低于大气压力时的绝对压力称为真空度。

6 差压 p_d

两个压力之间的差值称为差压，或者以大气压力以外的任意压力作为零点所表示的压力，用 p_d 表示。

7 静压

不随时间变化的压力叫静压。当然，绝对不变化是不可能的，因而规定压力随时间的变化，每秒钟为压力计分度值的 1%，或每分钟在 5% 以下的变化压力均称为静压。

8 动压

压力随时间的变化超过静压所规定的限度的变化叫动

压。一般又将非周期变化的压力叫变动压；把连续而且变化大的叫冲击压；作周期变化的叫脉动压。

从图 1-1 可以清楚地看出前述几个压力之间的关系。

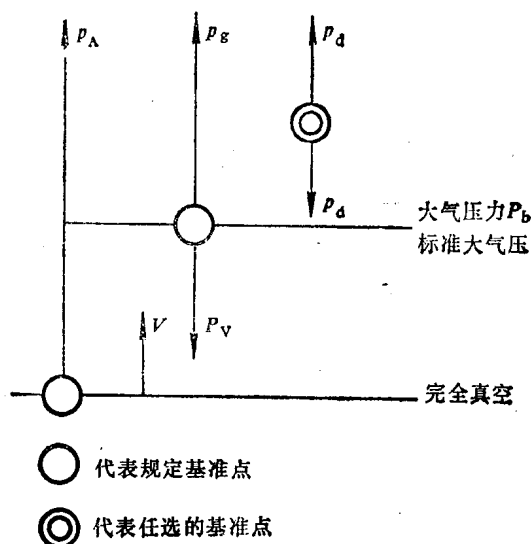


图 1-1 压力术语间的关系

从图中可见，各术语仅在于所取的基准零点不同而已。绝对压力又称绝压是以完全真空即真正的零压为基准点。在工程技术中，如气象部门使用的气压计就是绝压计，在指示飞行高度时也用绝压计；潜水深度的测量也使用绝压计。

从图中还看出，绝对压力大于大气压力时，绝对压力是表压力与大气压力之和；当绝对压力与大气压力相等时，只指示出大气压力。所以，大气压力是绝对压力的一种方式。从式(1-6)可知，当 $p_A = p_b$ 时 $p_g = 0$ ，即不能用表压表示，必须用绝压计测出。而表压力都是以大气压力为基准零点进

行测量的。

在物理学，或标准大气参数中规定，在纬度为 45° 海平面处，当温度为 0°C 时，重力加速度为 9.80665 m/s^2 (米/秒²)，水银密度为 $13\,595.1\text{ kg/m}^3$ (千克/米³) 时，760 mmHg 所产生的压力为 $101\,325\text{ Pa}$ (帕)，此压力称为标准大气压 (或物理大气压)，符号为 atm。因而，一般说的大气压并不等于标准大气压，只有当大气压力为 $101\,325\text{ Pa}$ (760 mmHg) 时，此时才是标准大气压。

一般的表压力仅指相对于当时环境的大气压力为基准零点，表压力加上当时的大气压力时就是绝对压力。因此，当无绝压计而又需测绝对压力时，只要有一台标准气压计测出当时的大气压力值，然后加上表压力就是被测的绝对压力值。

低于一个标准大气压的负压又叫真空。目前真空技术已成为一项专门的技术，为此本书不加详述。

差压可以是某任意点作为基准零点所求出的两压力之差。实际上，表压也是差压，只不过此时将大气压力作为零点对待而已。

上述的几个名词还可以用如图 1-2 所示的 U 型管进一步加以说明。

在图 1-2 (a) 中，U 型管 其中一管端封闭，管内抽成

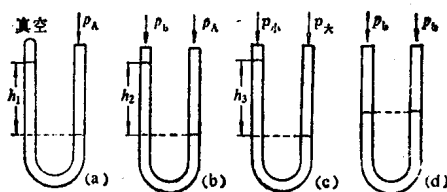


图 1-2