

压力表的检定 校准

与测量不确定度评定

戴孝华 宫风顺 何欣 张金亮 编著



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



图 书 在 册 号 (CIP) 编 号

北 京 中 国 计 量 出 版 社 出 版

2007 年 11 月 第 1 次 印 刷

压力表的检定、校准 与测量不确定度评定

戴孝华 宫风顺 何重 张金亮 编著

本书介绍了压力表的检定、校准、测量不确定度评定的基本知识和方法。全书共分 4 章，第 1 章为绪论，第 2 章为压力表的检定，第 3 章为压力表的校准，第 4 章为压力表的测量不确定度评定。本书可作为从事压力表检定、校准、测量不确定度评定工作的技术人员和管理人员的培训教材，也可供从事压力表检定、校准、测量不确定度评定的技术人员和管理人员参考。

中 国 计 量 出 版 社 出 版

北 京 中 国 计 量 出 版 社 出 版

邮 政 编 号 100013

电 话 (010) 6432380

网 址: <http://www.xgjl.com.cn>

北 京 中 国 计 量 出 版 社 出 版

北 京 中 国 计 量 出 版 社 出 版

中 国 计 量 出 版 社 出 版

850 mm × 1168 mm 32 开本 印 张 5.75 字 数 301 千

2007 年 11 月 第 1 次 印 刷 2007 年 11 月 第 1 次 印 刷

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

压力表的检定、校准与测量不确定度评定/戴孝华等编著. —北京: 中国计量出版社, 2007. 11

ISBN 978-7-5026-2713-3

I. 压… II. 戴… III. ①压力仪表—检定 ②压力仪表—校准 ③压力计量—不确定度 IV. TH812 TB935

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 141298 号

内 容 提 要

本书介绍了压力计量和压力表的基础知识, 重点对精密压力表、一般压力表的计量检定、校准作了全面、系统的阐述, 并介绍了测量不确定度的基础知识和评定方法, 同时给出了评定实例。

本书可供质检系统各部门压力表计量检定人员阅读, 也可供有关压力工程技术人员阅读和参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

850 mm×1168 mm 32 开本 印张 7.75 字数 201 千字

2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—3 000 定价: 21.00 元



作者近照

戴孝华

上海市计量测试技术研究院热工室高级工程师，是JJG49—1999《弹簧管式精密压力表和真空表检定规程》和JJG52—1999《弹簧管式一般压力表、压力真空表和真空表检定规程》的主要起草人之一，参加过(200~2500) MPa和 (30~1500) MPa超高压力活塞式压力计国家基准研制工作，曾是全国压力仪器仪表标准化技术委员会委员，全国压力计量技术委员会第一届、第二届委员会委员兼副秘书长。

官风顺

天津市计量监督检测科学研究院压力室主任，高级工程师，国家一级计量标准考评员，天津市法定计量机构评审员，天津市计量标准考评员，全国压力计量技术委员会委员，中国计量测试学会压力计量专业委员会委员。

何欣

北京康斯特仪表科技有限公司副总经理，高级工程师，全国压力计量技术委员会委员，长期从事压力仪表校准方法的研究。

张金亮

山西省计量监督检定测试所压力室主任，工程师，全国压力计量技术委员会委员，中国计量测试学会压力计量专业委员会委员，山西省计量协会第五届理事会理事，山西省计量协会计量工作委员会压力计量专业委员会主任委员。

前言

编写本书的目的，是想和压力表计量检定人员进行技术交流。目前虽然已有方便的通讯工具和先进的信息传播技术，但是由于我国地域广大，压力表计量检定人员分散在各行各业中，信息交流仍存在难度。以前虽然举办过一些技术交流会、培训班、规程宣贯会，然而参加这些活动的毕竟是少数人。考虑到压力表计量检定人员受到时间和客观工作条件的限制，寻找到合适的学习材料不太方便，作者参考有关资料，结合自己的工作经验编写了本书，希望能起到交流的目的。

弹簧管压力表，从 1847 年法国机械师波登（E. Bourdon）将弹簧管（波登管）用于测量压力以来，已经过了 100 多年的发展历程。目前压力表已形成了测量范围宽、用途广、品种多、规格全的行业。压力表为我国强制检定计量器具，做好压力表的计量检定工作义不容辞。

为了帮助压力表计量检定人员做好检定工作，本书对精密压力表和不同类型的一般压力表的计量性能要求、通用技术要求、计量器具控制及检定时必须考虑的问题等内容作了全面的介绍和说明。

从压力表的生产量和使用面来说，可谓是“量大面广”，而且品种还在不断增加，本书对目前用得较多的各种类型的压力表的结构和工作原理作了比较全面的介绍。对每一位压力表计量检

定人员而言,由于工作性质和分工的不同,不可能在自己的岗位上检定各种不同准确度等级和测量范围的压力表;但是,对目前国内压力表的总体概况有一个全面的了解是非常必要的。

为了增加感性认识,书中配以相关的表格、举例、插图,特别是在介绍检定精密压力表和一般压力表时,为选择标准器而设计的表格更具特色。

本书还特别对近几年出现的气体介质和水介质压力表手动校验器、油介质压力表电动校验器、水介质活塞式压力计、数字显示活塞式压力计作了专门介绍。同时对压力表计量检定技术的发展也进行了说明和探讨。

使用测量不确定度评定方法评价测量结果的质量已成为必要手段,经过几年的学习和实践,“测量不确定度评定与表示”已成为我国计量界了解和接受。本书对测量不确定度的基本知识和评定方法作了详细阐述,并给出了典型评定实例,希望对读者有所启迪。

本书在编著和出版过程中得到多方面的支持和帮助,在此表示衷心感谢。

欢迎读者对本书中的不足和错误提出意见,在此留下电子邮箱(E-mail: daixhsh@sina.com)。

编著者

2007.03

目 录

第 1 章 概述	(1)
----------------	-------

1.1 压力的定义	(1)
1.2 常用压力的定义及其相互关系	(3)
1.3 压力计量	(5)
1.4 压力计量单位及其换算关系	(5)
小知识 帕斯卡生平简介及帕斯卡定律	(9)
1.5 压力表的分类及基本参数	(10)

第 2 章 弹性元件特性及其应用	(16)
------------------------	--------

2.1 弹性元件的种类及使用材料	(16)
2.2 弹性元件的基本特性	(16)
2.3 弹性元件基本特性在弹簧管设计和使用中的 应用	(22)

第 3 章 压力表的结构和工作原理	(26)
-------------------------	--------

3.1 弹簧管压力表	(26)
3.2 膜片压力表	(32)
3.3 隔膜压力表	(33)
3.4 膜盒压力表	(35)
3.5 波纹管压力表	(37)
3.6 带附加功能的压力表	(39)
3.7 专门用途的一般压力表	(42)

第 4 章 压力表的检定和校准	(55)
4.1 精密压力表的检定	(55)
4.2 一般压力表的检定	(83)
4.3 膜盒压力表的检定	(104)
4.4 膜片压力表的检定	(112)
4.5 隔膜压力表的检定	(113)
4.6 带有附加功能的一般压力表的检定	(115)
4.7 专门用途的一般压力表的检定	(123)
4.8 压力表计量检定技术的现状及展望	(134)
4.9 压力表的计量校准	(138)
第 5 章 测量不确定度评定及评定实例	(141)
5.1 概述	(141)
5.2 概率论与数理统计基本知识	(147)
5.3 测量不确定度评定	(158)
5.4 测量不确定度评定实例	(183)
附录 A 国际上三大计量组织简介	(205)
附录 B 国际建议 (一般压力表)	(208)
附录 C 国际建议 (精密压力表)	(222)
附录 D 全国主要城市重力加速度一览表	(233)
附录 E 0.4 级精密压力表或一般压力表检定记录单	(234)
格式	(234)
附录 F t 分布在不同置信概率 p 与自由度 ν 的 $t_p(\nu)$ 值 (t 值) (补充件)	(235)
附录 G 测量误差和测量仪器示值误差有关术语及定义	(237)
参考文献	(240)

第1章 概述

1.1 压力的定义

1.1.1 一般定义

压力是垂直作用并均匀分布在单位面积上的力。从字面上看,定义用字不多,很简单;从另一面讲,是精炼,是对压力含义的高度概括。所以,在解读压力定义的时候,要着重理解其中两个重要因素,即力的垂直性和分布的均匀性,这两个重要的因素是从事压力计量和测试工作的出发点。

压力定义的科学性和可操作性还反映在可用简单的数学公式表示:

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

式中 p ——产生的压力;

F ——垂直作用力;

S ——受作用力的单位面积。

由公式(1-1)可以知道,压力的大小决定于作用力和受力面积的大小。它与作用力成正比,与受力面积成反比。活塞式压力计是实现公式(1-1)的最理想的压力计量仪器。

注:

1 压力在物理学上称压强。

2 根据我国使用法定计量单位规定,公式(1-1)中压力符号 p 是用

1.1.2 广义定义

前面介绍了压力的一般定义,但在实际工程技术中常常要用

到压力的广义定义。

假设有一任意平面（图 1-1），其法线方向为 $n-n$ ，即 $n-n$ 垂直该平面。有一任意方向的作用力 F ，与法线 $n-n$ 的夹角为 α 。因此，作用力 F 在法线方向上的分力 F_n 大小为

$$F_n = F \cos \alpha \quad (1-2)$$

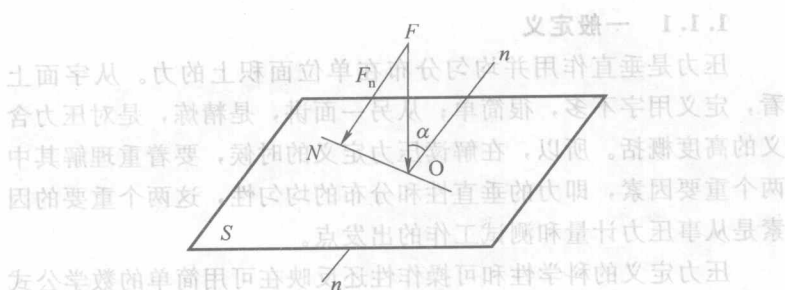


图 1-1 压力的广义定义图

根据压力的一般定义，作用力 F 垂直作用在面积 S 上产生的压力为

$$p' = \frac{F_n}{S} = \frac{F \cos \alpha}{S} \quad (1-3)$$

由式 (1-1) 可知，压力 p' 比作用力 F 直接垂直于面积 S 上产生的压力 p 小，小的程度取决于夹角 α 的大小， α 越大， p' 越小； α 越小， p' 越大。因此，在检定或校准压力表时，通常要求压力表要垂直安装；在活塞式压力计的检定规程中，对活塞的安装位置提出了垂直度的要求。

压力的定义是设计、制造、使用、计量压力仪器仪表的依据，在压力计量的实践中应全面、深入理解压力定义的含义，并用它来指导压力计量技术工作和计量检定工作。

1.2 常用压力的定义及其相互关系

1.2.1 常用压力的定义

(1) 大气压力

地球表面大气层的空气柱重力产生的压力。通常以符号 p_b 表示。

注：大气压力随着海拔高度和地理纬度的不同而变化。

(2) 绝对压力

以完全真空为参考点的压力。通常以符号 p_a 表示。

(3) 差压 [力]

任意两个相关压力的差值。通常以符号 p_d 表示。

(4) 表压力

以大气压力为参考点，大于或小于大气压力的压力。

(5) 正 [表] 压力 (又称压力)

以大气压力为参考点，大于大气压力的压力。通常以符号 p 表示。

(6) 负 [表] 压力 (又称负压)

以大气压力为参考点，小于大气压力的压力。通常以符号 p_h 表示。

(7) 静态压力

在所研究的领域内，不随时间变化或随时间缓慢变化的压力。

(8) 动态压力

在所研究的领域内，随时间变化的压力。

(9) 脉动压力

随时间而作周期性变化的压力。

(10) 真空度

表示真空状态下气体的稀薄程度，通常用压力值表示。

1.2.2 常用静态压力的相互关系

如图 1-2 所示, 用一只压力容器与一台 U 形管压力计相连通的装置, 来说明几种常用压力之间的关系:

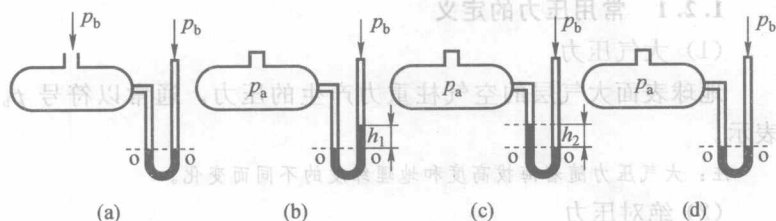


图 1-2 几种静态压力的相互关系

(a) 图的状态是压力容器与大气相通, 而 U 形管也与大气相通, 两者都受大气压力的作用, 当压力平衡时, U 形管两边工作介质两端面处于同一水平面 $o-o$ 上, 即 $p_b = p_b$, 所以, 大气压 p_b 是用气压计来测量的。

(b) 图的状态是压力容器内的绝对压力大于大气压力, 使左边管子内的工作介质下降, 而右边管子内的工作介质上升。当压力平衡时, 在 U 形管内形成了液位差 h_1 , 在同一水平面 $o-o$ 上压力相等, 所以, 绝对压力 p_a 等于大气压力 p_b 与正 [表] 压力 p ($p = \rho g h_1$) 之和, 即 $p_a = p_b + p$, 又有 $p = p_a - p_b$ 。由此可知, 压力表测量的压力是大于大气压力的正 [表] 压 (又称压力)。

(c) 图的状态是压力容器内的绝对压力小于大气压力, 使左边管子内的工作介质上升, 而右边管子内的工作介质下降。当压力平衡时, 在 U 形管内形成了液位差 h_2 , 在同一水平面 $o-o$ 上压力相等, 所以, 绝对压力 p_a 等于大气压力 p_b 与负 [表] 压力 p_h ($p_h = \rho g h_2$) 之差, 即 $p_a = p_b - p_h$, 又有 $p_h = p_b - p_a$ 。由此可知, 真空表所测量的压力是小于大气压力的负 [表] 压 (又称负压)。

(d) 图的状态是压力容器内的绝对压力 p_a 等于大气压力 p_b , 即 $p_a = p_b$, 所以, U 形管内工作介质两端面处于同一水平面 $o-o$ 上。这是 (a) 图状态的特殊形式, 由气压计进行测量。

几种常用静态压力之间的相互位置关系,如图1-3所示。

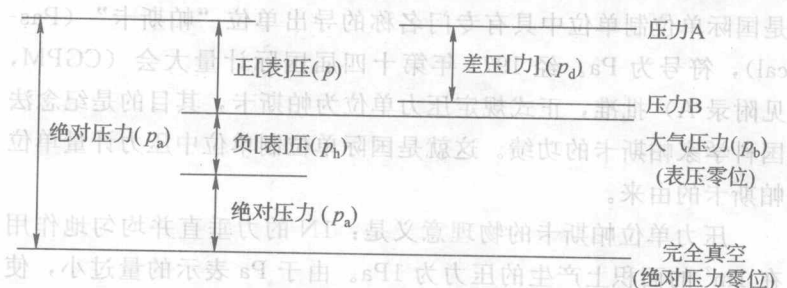


图1-3 大气压力、绝对压力、表压力相互位置图

1.3 压力计量

压力计量是实现压力单位统一,量值准确、可靠、一致而进行的活动。

所谓活动,包括技术工作、法制要求、计量管理等内容。实现压力单位统一,就是在我国统一实行法定计量单位。量值的准确,是指量值准确在一定的不确定度、误差极限或允许误差范围内;量值的可靠,是指量值是可重复、可再现(复现)、可比较的,是被确认为具有有效性的;量值的一致,就是量值不仅在國內是一致的,在国际上进行量值比对时也是一致的。

1.4 压力计量单位及其换算关系

由压力定义可知,压力的大小决定于作用力大小和承受作用力的面积大小。因此,压力单位是一个导出单位,是由力的单位和面积单位组合而成的。下面介绍压力的法定单位和几种常见的非法定计量单位及它们之间的换算关系。

1.4.1 法定计量单位

1969年,国际计量委员会(CIPM,见附录A)通过一项决

议,建议给压力一个专门单位“牛顿每平方米”(N/m²),这就是国际单位制单位中具有专门名称的导出单位“帕斯卡”(Pascal),符号为 Pa。经 1971 年第十四届国际计量大会(CGPM,见附录 A)批准,正式规定压力单位为帕斯卡,其目的是纪念法国科学家帕斯卡的功绩。这就是国际单位制单位中压力计量单位帕斯卡的由来。

压力单位帕斯卡的物理意义是:1N 的力垂直并均匀地作用在 1m² 的面积上产生的压力为 1Pa。由于 Pa 表示的量过小,使用时可以在前面加词头,如 k(千)、M(兆)、G(吉)等,可根据测量压力的大小选择 GPa、MPa、kPa 作计量单位。

帕斯卡在国际单位制中的量纲可表示为

$$1\text{Pa} = \frac{1\text{N}}{1\text{m}^2} = \frac{1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2}{1\text{m}^2} = 1\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \quad (1-4)$$

1.4.2 从物理学的绝对单位制中形成的三种压力单位

(1) 米·千克·秒制(MKGS 制)

在米·千克·秒单位制中,力的单位是牛顿(简称牛,符号 N),面积的单位是平方米(m²),因此,压力单位是牛顿每平方米(N/m²)。

1N 的物理意义:使质量为 1kg 的物体,产生 1m/s²加速度的力,称为 1N。

(2) 厘米·克·秒制(CGS 制)

在厘米·克·秒单位制中,力的单位是达因(dyn),面积的单位是平方厘米(cm²),因此,压力单位是达因每平方厘米(dyn/cm²)。

1dyn 的物理意义:使质量为 1g 的物体,产生 1cm/s²加速度的力,称为 1dyn。

压力单位达因每平方厘米又称为巴利(barye)或微巴(μbar),1μbar=10⁻³mbar=10⁻⁶bar。在气象学中,曾用毫巴

(mbar) 作大气压力单位, 现在已用百帕 (hPa) 作计量单位。

(3) 米·千克力·秒制 (MKGFS 制)

在米·千克力·秒单位制中, 力的单位是千克力 (kgf), 面积的单位是平方米 (m^2), 因此, 压力单位是千克力每平方米 (kgf/m^2)。

1.4.3 由历史条件形成的几种压力单位

(1) 工程大气压——来源于压力定义

工程大气压 (单位为 kgf/cm^2 , 符号为 at, 没有专门名称) 定义: 1kgf 垂直并均匀地作用在 1cm^2 面积上产生的压力。这是在法定计量单位使用前应用最多的压力单位。

1kgf 的物理意义: 使质量为 1kg 的物体, 产生 $9.80665\text{m}/\text{s}^2$ 加速度的力。

$$1\text{kgf} = 9.80665\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 = 9.80665\text{N}$$

(2) 标准大气压——来源于大气压力

标准大气压 (单位为 Pa, 符号为 atm, 没有专门名称) 定义: 水银 (汞) 在温度为 0°C , 密度为 $13.5951\text{g}/\text{cm}^3$, 重力加速度为 $980.665\text{cm}/\text{s}^2$ 时, 760mm 高的汞柱在海平面上产生的压力称为 1 个标准大气压力。标准大气压力又称为物理大气压力。

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg}$$

由于大气压力随海拔高度地理纬度的不同而变化, 为了方便工程技术和科学研究中的使用, 科学工作者对大气压力规定了一个标准大气压力值, 1954 年第十届国际计量大会定义:

$$1\text{atm} = 101325\text{Pa}$$

(3) 毫米汞柱——来源于液体高度

毫米汞柱 (单位为 mmHg, 符号为 mmHg, 没有专门名称) 定义: 水银 (汞) 在温度为 0°C , 密度为 $13595.1\text{kg}/\text{m}^3$, 重力加速度为 $9.80665\text{m}/\text{s}^2$ 时, 1mm 高的汞柱产生的压力称为 1mmHg。

(4) 毫米水柱——来源于液体高度

毫米水柱 (单位为 mmH_2O , 符号为 mmH_2O , 没有专门名

表 1-1 常用压力计量单位的换算关系

单位 单 位	帕 Pa	工程大气压 kgf/cm ²	磅力/英寸 ² lbf/in ²	巴 bar	标准大气压 atm	毫米水柱 mmH ₂ O	毫米汞柱 mmHg
帕 Pa	1	1.019716 × 10 ⁻⁵	1.450377 × 10 ⁻⁴	1 × 10 ⁻⁵	0.986923 × 10 ⁻⁵	1.019716 × 10 ⁻¹	0.75006 × 10 ⁻²
工程大气压 kgf/cm ²	0.0980665 × 10 ⁶	1	14.224	0.980665	0.96784	10000	735.56
磅力/英寸 ² lbf/in ²	6894.76	0.070307	1	0.068948	0.068046	7.0307 × 10 ²	0.51715 × 10 ²
巴 bar	10 ⁵	1.019716	14.504	1	0.9869	1.019716 × 10 ⁴	0.750061 × 10 ³
标准大气压 atm	101325	1.03323	14.696	1.01325	1	1.0332 × 10 ⁴	0.76 × 10 ³
毫米水柱 mmH ₂ O	9.80665	1 × 10 ⁻⁴	1.42226 × 10 ⁻³	0.980665 × 10 ⁻⁴	0.9678 × 10 ⁻⁴	1	0.73556 × 10 ⁻¹
毫米汞柱 mmHg	133.3224	0.135951 × 10 ⁻²	1.934 × 10 ⁻²	1.333224 × 10 ⁻³	1.316 × 10 ⁻³	13.5951	1