

压力测量

不确定度评定

中国计量测试学会
压力专业委员会
组编



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

压力测量不确定度评定

中国计量测试学会压力专业委员会 组编

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

压力测量不确定度评定 / 中国计量测试学会压力专业委员会组编. — 北京: 中国计量出版社, 2006. 10

ISBN 7-5026-2520-8

I. 压… II. 中… III. 压力计量—不确定度—基本知识 IV. TB935

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 120314 号

内 容 提 要

本书主要针对压力专业的测量不确定度评定进行全面论述, 介绍了压力测量技术和仪表的基础知识以及压力测量不确定度评定, 并结合各类压力标准装置, 详细论述了压力测量不确定度评定的具体应用。另外, 本书还通过典型实例对在工业生产和科学研究试验中的压力测量不确定度评定作了介绍。

本书可供从事压力计量、测试工作者使用, 也可供科研、生产、教学等有关人员参考。

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

*

787mm×960mm 16 开本 印张 26.75 字数 405 千字

2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 58.00 元

编 委 会

主任委员：宣 湘

副主任委员：王五一 殷卫宁 樊尚春 张玉存 刘耀武
成志尧（常务）

委 员：（按姓氏笔画排序）

马 望	王五一	王玉芳	王厚枢	王鸿雁
甘 蓉	甘妙昌	史亚丽	毕 骏	成 军
成志尧	刘 晶	刘耀武	吕中平	牟 娟
孙希任	孙晓全	孙徐仁	闫晋平	朱明武
岑月琴	杜水友	杜书利	何 欣	李 程
李孝胜	李宏斌	李祖斌	李燕华	杨 桢
张 力	张 强	张子剑	张玉存	张志杰
张金亮	张鹏程	张攀峰	武东胜	周子奇
周春龙	周谊东	胡安伦	胡海涛	赵 敏
宣 湘	宫风顺	殷卫宁	袁智荣	盛晓岩
屠立猛	董海风	蔡 绯	樊尚春	戴孝华
戴艳梅				

主 编：孙希任

副 主 编：张 力 张鹏程 毕 骏 盛晓岩 成志尧

主 审：王厚枢

副 主 审：赵 敏 屠立猛

序 言

测量不确定度在词义上表征了测量结果有效性的可疑程度和不肯定程度，是判定测量结果质量的依据，在科研、生产、商贸和国际技术交流等诸多涉及测量的领域中具有现实和重要的意义。

1978年，国际计量委员会（CIPM）要求国际计量局研究测量结果不确定度的表示，以便能在国际上取得一致。1981年，国际计量委员会在INC-1国际建议的基础上给出了测量不确定度表示方法的建议。随着全球经济和贸易发展的需要，国际上普遍采纳了CIPM不确定度表示方法的国际建议。ISO1993年正式发布并出版了《测量不确定度表示指南》（缩写为GUM），1995年修订，是关于测量不确定度表示的通用指导性标准。原国家质量技术监督局在组织有关计量和管理专家对这个指南进行广泛深入研究和探讨的基础上于1999年发布了适合我国国情的《测量不确定度评定与表示》计量技术规范（JJF 1059—1999），很快在国内科研、生产、商贸和国际技术交流等涉及测量的领域中获得了广泛响应，进行了大量有关测量不确定度评定的实践。

随着对测量不确定度理论的认识逐步深入，测量不确定度评定实践的不断发展，特别是随着实验室认可体系在我国的推行，以及法定计量检定机构考核工作的开展，广大计量测试工作者，特别是校准实验室迫切需要各类专业的测量不确定度评定与表示的书籍，更期望有在各类专业范围内规范、统一的测量不确定度评定与表示的参考资料。为此，中国计量测试学会

压力专业委员会组织了由国家和省市计量院、所，军工和部队计量测试中心，电力、机械、石油等行业的计量归口单位和相关企业，以及高等院校的专家、教授和具有丰富实践经验的压力计量测试工作者组成的编委会，经过两年多的反复切磋、研讨，编写了这本《压力测量不确定度评定》。

本书本着规范、统一压力测量不确定度评定方法的要求，在系统介绍压力测量技术和仪表的基础知识、进一步阐释 JJF 1059—1999 规范的基础上，通过一系列典型实例详细论述了压力测量不确定度评定的具体应用。本书可供科研、生产、教学等有关人员使用，是从事压力专业计量、标准化、质量管理及试验等工作人员必备的参考资料。

国家质量监督检验检疫总局计量司司长

宣湘

2006 年 9 月

前 言

根据广大压力计量工作者关于在进一步加深理解 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》规范的基础上规范、统一压力测量不确定度评定方法的要求，我们组织编写了这本《压力测量不确定度评定》。

编写本书的指导思想：

第一，符合 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》。为此我们专门编写了旨在进一步阐释 JJF 1059—1999 的测量不确定度基础，规定采用置信水平为 95% 的扩展不确定度表示，做到与国际上的通行做法相一致。

第二，理论与实践相结合，规范、统一压力测量不确定度评定与表示。本书在内容上不仅介绍了测量不确定度评定、压力测量技术和仪表的基础知识及其发展情况，而且对静态和动态每一类压力标准装置测量不确定度评定都安排了包括压力标准装置的建标报告在内的 4~8 篇分析计算示例。同时，还提供了 3 篇科研和工业生产领域的压力测量不确定度评定报告。

为了规范统一压力测量不确定度评定与表示，本书编委会的组成，在行业 and 人数上都力争具有较为广泛的代表性。主要由中国计量科学研究院、国防科工委第一计量测试研究中心、中国测试技术研究院、总装三十一基地、国家电力公司西安热工研究院、西安工业自动化仪表研究所、华北石油管理局油气井测试公司、中国计量学院、北京航空航天大学、南京航空航

天大学、西北工业大学、南京理工大学、中北大学和北京市计量检测科学研究院、上海市计量测试技术研究院、天津市计量监督检测科学研究院、山西省计量监督检定测试所、河北省计量科学研究院、辽宁省计量科学研究院、吉林省计量科学研究院、江苏省计量科学研究院、山东省计量科学研究院、浙江省质量技术监督检测研究院、湖北省计量测试技术研究院、河南省计量科学研究院、广东省计量科学研究院、陕西省计量科学研究院、新疆自治区计量测试研究所、大连市计量所、中航一集团太原航空仪表有限公司、北京瑞赛长城航空测控技术有限公司、北京中航机电研究所、北京康斯特仪表科技有限公司、太原市太航压力测试科技有限公司、中国红旗仪表有限公司、北京普茂科技公司、北京德朗电子技术开发有限公司、天津市技术监督局实验工厂和北京市国瑞智新技术有限公司等单位的专家教授和具有丰富实践经验的压力计量工作者组成。前后经过2001年、2003年两届全国压力计量测试技术年会交流、研讨,在编写过程中又经过20余次小会和2次全体编委会的讨论,并得到中国计量科学研究院肖明耀研究员的多次热情指导,在此表示衷心感谢。

本书由两部分组成,第一部分是正文,共有5章:第1章由杜水友编写;第2章由岑月琴、官风顺、孙徐仁、杜水友、李程编写;第3章由樊尚春编写;第4章第1节由张鹏程、史亚丽、甘妙昌、周谊东、闫晋平、王鸿雁、戴艳梅、胡安伦、胡海涛编写,第2节由李燕华、官风顺、张金亮、张攀峰、杜书利编写,第3节由盛晓岩、李祖斌、张玉存、张强、张子剑、张攀峰、牟娟、张国春、李孝胜、吕中平编写,第4节由蔡绯、戴孝华、马堃、甘蓉、孙晓全编写,第5节、第7节由刘晶编

写，第6节由张力编写，第8节由朱明武编写；第5章由董海风、杨埜、袁智荣编写。第二部分是附录：附录1由胡安伦、张金亮、李燕华、李祖斌、蔡绯编写；附录2和附录3由成志尧、刘晶、王玉芳选编。

由于我们对测量不确定度理论的理解不够全面，压力测量不确定度评定方面的参考资料也很少，故本书错误和遗漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

中国计量测试学会压力专业委员会
《压力测量不确定度评定》编委会

成志尧

2006年9月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 压力计量在现代工业和科学研究中的应用	(1)
1.2 压力的概念	(2)
1.3 压力计量仪器的分类	(5)
1.4 压力计量溯源和传递	(7)
第2章 压力计量标准	(9)
2.1 活塞压力计	(9)
2.2 液体压力计	(20)
2.3 数字压力计	(31)
2.4 弹簧管式压力表	(49)
2.5 动态压力校准装置	(59)
第3章 测量不确定度基础	(73)
3.1 基本概念	(73)
3.2 数学模型	(77)
3.3 评定步骤	(79)
3.4 评定方法	(81)
第4章 压力计量标准的测量不确定度评定	(89)
4.1 活塞压力计	(89)
示例1 气体活塞压力计活塞有效面积测量不确定度评定	(102)
示例2 一等活塞压力计活塞有效面积测量不确定度评定	(117)

示例 3 二等活塞压力计活塞有效面积测量不确定度评定	··· (126)
示例 4 二等双活塞压力真空计测量不确定度评定	····· (131)
4.2 液体压力计	····· (139)
示例 1 二等标准补偿式微压计示值误差的测量不确定度 评定	····· (148)
示例 2 倾斜式微压计示值误差的测量不确定度评定	····· (154)
示例 3 精密液体压力计示值误差的测量不确定度评定	····· (160)
4.3 数字压力计	····· (166)
示例 1 数字压力计示值误差不确定度评定	····· (174)
示例 2 数字压力计测量结果的不确定度评定	····· (180)
示例 3 DPI610 数字压力计测量不确定度评定	····· (186)
示例 4 FLUKE744 数字压力计测量不确定度评定	····· (192)
示例 5 数字压力计示值误差测量结果不确定度评定	····· (197)
示例 6 压力变送器示值误差不确定度评定	····· (203)
示例 7 差压变送器示值误差测量结果的不确定度评定	····· (210)
4.4 精密压力表	····· (215)
示例 1 活塞压力计检测精密表	····· (222)
示例 2 数字压力计检测精密表	····· (228)
示例 3 精密表检测精密表	····· (234)
4.5 高压动态标准装置	····· (238)
4.6 正弦动态压力标准装置	····· (245)
4.7 激波管动态压力标准装置	····· (253)
4.8 准静态压力标准装置	····· (264)
第 5 章 压力测量不确定度评定	····· (276)
5.1 油罐中油量测量不确定度评定	····· (276)
5.2 电子扫描压力测量不确定度评定	····· (286)
5.3 无人机电压高度测量不确定度评定	····· (296)

附录 1 建标报告示例	(300)
附录 2 压力计量、测量技术常用术语	(354)
附录 3 附表	(405)
参考文献.....	(412)

第1章 绪 论

1.1 压力计量在现代工业和科学研究中的应用

在现代工业、科学研究及日常生活中，压力计量技术有着很重要的地位。在工业生产上，压力与其他的物理参数一样，是工业生产过程及自动化过程中不可缺少的控制参数，其计量准确程度直接影响到生产的经济效益和能源的利用率。例如，蒸汽发电机组需要高温高压蒸汽，在机组的运行过程中，为数众多的压力仪表以及其他的各种仪表控制着整个过程。在化工生产上，压力是决定其反应过程的重要参数之一，如在合成氨的生产中，合适的压力保证各物质以一定的数量比例进行反应，当压力太低时，生产的合成氨产量很低，而压力太高时又会给安全生产带来一定的影响。在科学研究及现代技术方面，很多金属材料和非金属材料都需要经过压力加工以改变其结构组织或相态，许多种金属必须在超低压状态下进行提炼才能得到很高的纯度。人造金刚石的生产必须在 $\text{GPa}(10^9 \text{ Pa})$ 的超高压量级上进行。这些方面的实例是很多的。目前，越来越受到重视的非金属镀膜技术，则需要在真空中进行。在超高压的情况下，流体的可压缩性、黏度等，金属的相态和相变、导电性，材料的晶格变化和力学性能等都要发生不同于常压状态下的变化。对于这类问题的研究首先需要解决的是超高压计量技术。在国防工业中，压力也是一个很重要的参数，在飞机模型及实体的风洞试验中，飞机表面的压力分布，测量机翼的型面阻力、检验和控制，发动机燃油和润滑系统，液压和气压辅助动力系统，喷气速度的控制，在高空中对高度的测量等，都需要压力仪表来指示和控制。

随着工农业生产的发展,科研工作的进一步深入,人们对压力计量技术提出了新的要求。尤其是对超高压和微压的计量,目前,世界上可计量的超高压可达数万兆帕,我国在超高压计量方面做了大量的工作,可计量的超高压为 2.5×10^3 MPa。在微压计量方面,世界上可计量的最低的绝对压力为 10^{-12} Pa,我国目前可达到的最低绝对压力为 10^{-10} Pa。这方面的工作专门由真空学科进行研究。

从测压对象来讲,被测压力有气体压力和液体压力,有静态压力和动态压力等,有的测压对象要求禁油,有的测压对象具有一定的毒性,或是高黏度的流体,压力计量的任务就是研究如何解决这些问题。除此之外,它还研究如何把压力量值从基准器传递到标准仪器和工作仪器,选择适当的压力基准、标准设备和测量仪表,研究新的压力测量与计量方法,促进压力测量与计量技术的发展。

1.2 压力的概念

1.2.1 定义

众所周知,力是物体间的相互机械作用,当施力于物体上时,其体积、形状都会发生变化,或者改变物体的机械运动状态而产生加速度。在物理学和工程技术中,将液体、气体或蒸汽等连续介质垂直作用于单位面积上的力称为压力,也称压强,即

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

式中 p ——压力;

F ——作用于物体上的力;

A ——力作用的表面积。

对于非均匀受力体,其压力的表达式为

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (1-2)$$

1.2.2 表示方法

在工程技术上,为了使用上的方便,采用许多种表示压力的方法,主要有以下几种:

(1) 大气压力

大气压力是指地球表面上的空气因自重所产生的压力,也就是围绕地球表面的空气由于地球对它的吸引力,在物体单位面积上所产生的力,它随测定点的海拔高度及纬度和气象情况的不同而不同,也随时间、地点和温度的变化而变化。大气压力一般用 p_b 表示。

(2) 绝对压力

绝对压力是指液体、气体或蒸汽所处空间的全部压力;它表征某一测定点以绝对真空作参考点真正所受到的压力。绝对压力一般用 p_a 表示。

(3) 表压力

表压力是指测压仪器仪表所显示的压力,也即超过大气压力以上的压力数值,一般用 p 来表示, $p = p_a - p_b$ 。

(4) 疏空(又称负压)

当绝对压力小于大气压力时,大气压力与绝对压力之差称为疏空,疏空有时也称为疏空压力或负压,一般用 p_h 表示, $p_h = p_b - p_a$ 。

(5) 真空度

小于大气压力的绝对压力称为真空度。

(6) 差压

两个压力值之差称为压差,如果泛指这种压差的压力时,则称为差压,一般用 p_d 表示。

在工业生产和科学研究中,大多数的测量都是测量被测对象的表压力或疏空,这不仅是由于许多实际情况的特殊需要,而且就大多数仪器本身来讲,如果没有用特殊的方法将它与大气压力隔绝,它只能指示被测对象的表压力或疏空。通常所讲的压力测量就是表压的测量。

上述压力概念之间的相互关系,参见附录2压力计量、测量技术常用术语的图附2-1。

1.2.3 单位

根据压力的定义可以看出,压力是由作用力与作用面积的比值所决定的,因此,在任何一种单位制中,压力的单位都是一个导出单位,根据国家标准规定,压力的基本单位为帕斯卡,简称帕,记为 Pa,其物理意义为在每平方米的面积上垂直且均匀地作用着 1 牛顿的力,即

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

除了帕[斯卡]为法定单位外,目前,还普遍存在着一些使用比较广泛的非法定单位,例如:

(1) 工程大气压

一个工程大气压等于 1 千克力垂直并均匀作用于每平方厘米的面积上产生的压力。常用千克力/厘米²表示,或记为 kgf/cm²。

(2) 物理大气压

大气压力是地球大气圈内的空气柱因自重在地表上产生的压力。大气压力是随时间、地点和温度的变化而变化的量。人们规定温度为 0℃ 和重力加速度为 9.80665 m/s² 下,高度为 760 mmHg (汞的密度为 13.5951 g/cm³) 在海平面上所产生的压力称作一个物理大气压,它被作为一种压力的单位。物理大气压也称作标准大气压,记为 atm。

(3) 毫米汞柱

1 毫米汞柱等于在重力加速度为 9.80665 m/s² 时,1 mm 高的水银柱在 0℃ 时(汞的密度为 13.5951 g/cm³) 所产生的压力,记为 mmHg。

(4) 毫米水柱

1 毫米水柱等于在重力加速度为 9.80665 m/s² 时,1 mm 高的水柱在 4℃ 时(水的密度为 1.0 g/cm³) 所产生的压力,记为 mmH₂O。

除了以上几种工程上所用的压力单位外,还有巴(bar)、米水柱(mH₂O)和磅力/英寸²(lbf/in²)等其他非国际单位制的压力单位,它们之间的相互换算关系为

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.980665 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.332 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mHg} = 133.322 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ lbf/in}^2 = 6.89476 \times 10^4 \text{ Pa}$$

单位之间的换算关系参见附录 3 压力单位换算系数。

1.3 压力计量仪器的分类

在测量压力时，由于被测对象的不同，需要用不同的测量压力范围和不同准确度等级的压力仪器仪表。在不同的使用条件下，采用相应的压力仪表，如在有机械振动的地方使用时，需采用耐震的压力表等。为了工作的方便，对目前常用的压力测量仪器仪表，可根据仪器工作原理、准确度等级、压力量值的大小和被测量的种类等来分类。

1.3.1 按仪器的工作原理

(1) 液体式压力计

液体式压力计是基于流体静力学原理而制作成的压力计。被测压力被一定高度的液柱产生的压力所平衡，液柱的高度可以直接测量或通过计算等方法来获得。常用的液体式压力计有水银气压计、U形管和杯形压力计、倾斜式压力计、环天平式压力计、钟罩式压力计和浮标式压力计等。

(2) 弹性式压力计

弹性式压力计是利用弹性敏感元件（如弹簧管等）的弹性变形来平衡被测压力的压力计。一般弹性敏感元件的弹性变形量很小，都需要经过放大机构和传动机构将变形量加以放大，并转换成与被测量值成函数关系的指针位移。因使用的弹性元件的形状及作用形式有所不同，相应地有 C 形弹簧管、螺旋弹簧管、膜片、膜盒和波纹管等类型的弹性式压力仪表。

(3) 活塞式压力计

在活塞式压力计中，被测压力与作用在已知有效面积并加有已知质量砝码的活塞上的力相平衡，然后通过计算来求得压力。因为活塞的面积和砝码的质量都可以精确地测量出来，所以活塞式压力计可制作得比较精