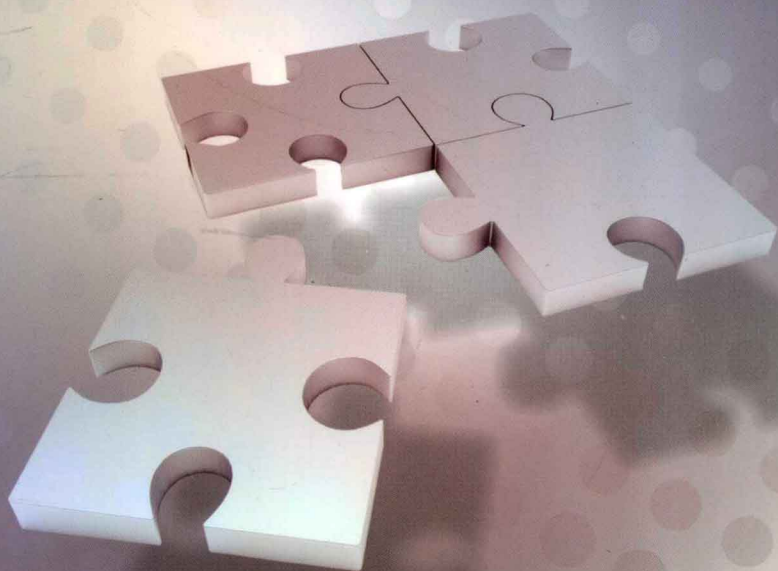


压力测量 不确定度评定实例

中国计量测试学会压力计量专业委员会 组编



 中国质检出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

压力测量不确定度评定实例 / 中国计量测试学会压力计量专业委员会组编. —北京: 中国质检出版社, 2012

ISBN 978-7-5026-3651-7

I. ①压… II. ①中… III. ①压力计量—不确定度—基本知识 IV. ①TB935

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 168348 号

内 容 提 要

本书主要针对压力测量不确定度评定进行全面论述, 首先介绍了不确定度及压力测量不确定度的基础知识, 然后重点结合压力标准装置, 运用大量实例详细论述了活塞式压力计测量不确定度评定、液体压力计测量不确定度评定、数字压力计测量不确定度评定、精密压力表测量不确定度评定及动态压力测量不确定度评定的具体过程和应用。

本书内容全面, 具有较强的实用性, 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。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100013)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010)64275323 发行中心: (010)51780235

读者服务部: (010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 9.75 字数 225 千字

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月第一次印刷

*

定价 38.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

编 委 会

主任委员：刘新民

副主任委员：张 力 李燕华 赵 勇 樊尚春 毕 骏
屠立猛 张玉存 刘耀武 张子剑 吕中平
成志尧（常务）

委 员：（按姓氏笔画排序）

马 堃	王 丽	王五一	王玉芳	王厚枢
王鸿雁	史亚丽	甘 蓉	甘妙昌	刘 晶
刘新民	刘耀武	吕中平	孙希任	孙徐仁
孙晓全	成 军	成志尧	朱明武	毕 骏
牟 娟	闫晋平	何 欣	宋玉璞	岑月琴
张 力	张 强	张子剑	张玉存	张志杰
张国春	张金亮	张鹏程	张攀峰	李 程
李孝胜	李宏斌	李祖斌	李燕华	李鑫武
杜书利	杜水友	杨 埜	杨远超	周子奇
周春龙	周谊东	武东胜	宣 湘	宫风顺
胡安伦	胡海涛	赵 敏	悦 进	殷卫宁
袁智荣	屠立猛	盛晓岩	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 李燕华 悦 进 李鑫武 刘 晶

主 审：王厚枢 宫风顺

副 主 审：赵 敏 屠立猛 王 丽 胡安伦 杨远超

前 言

中国计量测试学会压力计量专业委员会组织编写的《压力测量不确定度评定》于2006年10月由中国计量出版社出版发行以来，得到了科研、生产、教学等领域广大从事压力计量、标准化、质量管理及试验等工程技术人员的欢迎。但在实际使用时《压力测量不确定度评定》编委会了解到，其中“活塞式压力计测量不确定度的评定”由于影响量多，致使评定工作量大，而且比较复杂，不便推广应用。经压力计量专业委员会研究决定：组织部分编委组成专题小组研究、编写“活塞式压力计测量不确定度的评定方法简化方案”，并由专题小组成员和其余编委组成五个小组进行实例修改。

编委在修订工作中坚持遵循JJF 1059规范的原则和要求，注意学习、参考国际上特别是主要工业发达国家压力测量不确定度评定的经验，做到与国际上的通行做法兼容。还对压力计量标准装置分类编写科学、合理的“压力测量不确定度评定大纲”，以利实现压力测量不确定度评定方案的规范、统一，并力求评定方法简单、方便、可行。

专题小组和编委经过两年多的辛勤工作，形成了“活塞式压力计测量不确定度评定（简化方案）”以及分类编写了包括活塞式压力计、液体压力计、数字压力计和精密压力表在内的压力测量不确定度评定大纲和实例。在2009年（扬州）全国压力计量测试技术交流会上，代表们赞同“简化方案”和实例的修改并积极热情地提出进一步修改完善的意见。会后专题小组和有关编委根据会议代表的意见认真地作了修改。

JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》颁布至今已有十余年时间，特别是国际标准化组织已正式颁布了ISO/IEC 导则98-3-1998（GUM）及其一系列补充标准。国家质量监督检验检疫总局于2010年组织成立了新的《测量不确定度评定与表示》国家计量技术规范起草小组，承担规范的修订工作。经过两年多时间的修订形成了JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》报批稿，为了迎接将于2012年9月召开的全国压力计量测试技术交流会，编委会

及专题小组成员按新的规范要求，对2009年扬州会议通过的《压力测量不确定度评定—续集》进一步作修改，并命名为《压力测量不确定度评定实例》。

从2006年10月《压力测量不确定度评定》的出版到《压力测量不确定度评定实例》的组织编写，大部分的压力计量专业委员会委员都参加了编写、编辑工作。其中，第1章为测量不确定度基础，由樊尚春、李鑫武、王丽编写；第2章为活塞式压力计测量不确定度评定，由悦进、胡安伦、张子剑、张攀峰、史亚丽、李鑫武、宋玉璞、马堃、杨远超、岑月琴、张鹏程、甘妙昌、周谊东、闫晋平、王鸿雁、戴艳梅、胡海涛编写，第3章为液体压力计测量不确定度评定，由李燕华、宫风顺、张金亮、张攀峰、杜书利编写；第4章为数字压力计测量不确定度评定，由盛晓岩、李祖彬、张玉存、张强、张子剑、张攀峰、牟娟、甘蓉编写；第5章为精密压力表测量不确定度评定，由蔡绯、戴孝华、马堃、甘蓉、孙晓全编写；第6章为动态压力测量不确定度评定，由张力、朱明武、李程、刘晶编写。全书由成志尧、宫风顺、悦进、李燕华、盛晓岩、刘晶、李鑫武、王丽统稿和审核。这些同志尽管工作繁忙，但对承担的《压力测量不确定度评定》、《压力测量不确定度评定实例》编写和修改工作认真负责，始终热心专心，不讲名利、不计个人得失，积极热情地完成工作，压力计量专业委员会特此致以崇高的敬意和衷心的感谢！同时，上述工作也得到国家和省市计量院、所，军工和部队的计量测试中心，电力、机械、石油等行业的计量归口单位和相关企业以及有关高等院校领导的大力支持，在此表示衷心的感谢！

由于我们对测量不确定度理论的理解还不够全面，特别是对新的JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》还没来得及深入学习、理解，故书中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计量专业委员会
《压力测量不确定度评定实例》编委会

成志尧

2012年6月

序 言

2006年由中国计量测试学会压力计量专业委员会组织编写、中国计量出版社出版的《压力测量不确定度评定》一书得到了科研、生产、教学等领域广大从事压力计量、标准化、质量管理及试验等工程技术人员的普遍欢迎。在压力计量标准的建立、计量技术法规的制定、证书/报告的发布和量值比对等方面测量不确定度评定中发挥了重要的指导作用。

JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》颁布至今已有十余年时间。国家质量监督检验检疫总局于2010年组织成立了新的《测量不确定度评定与表示》国家计量技术规范起草小组。新版JJF 1059分成三部分：

JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》

JJF 1059.2《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》

JJF 1059.3《测量不确定度在合格评定中的使用原则》

其中JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》是JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》的修订版本，并代替JJF 1059—1999。

针对新版JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》，中国计量测试学会压力计量专业委员会决定仍由2006年出版的《压力测量不确定度评定》一书的原编辑委员会成员在总结该书在编写和实际应用经验的基础上依据新版JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》的要求进行修订。通过一系列典型实例分类编制压力测量评定大纲及实例，并编写了《压力测量不确定度评定实例》。

本书可供科研、生产、教学等领域的有关人员使用，是从事压力计量、标准化、质量管理及试验工作必备的参考资料。

中国计量测试学会副理事长

刘新民

2012年6月

目 录

第 1 章 测量不确定度基础	(1)
1.1 基本概念	(1)
1.2 测量模型	(6)
1.3 测量不确定度评定的步骤	(8)
1.4 评定方法	(9)
第 2 章 活塞式压力计测量不确定度评定	(17)
2.1 活塞式压力计测量不确定度评定	(17)
附录 2.1 灵敏系数的推导	(25)
附录 2.2 表 2-3 的说明	(30)
附录 2.3 活塞有效面积测量中“直接平衡法”与“全压法”计算公式的 转换	(33)
2.2 活塞式压力计测量不确定度评定大纲	(34)
2.3 活塞式压力计测量不确定度评定实例	(36)
实例 2.1 0.005 级活塞式压力计活塞有效面积测量不确定度评定	(36)
实例 2.2 0.02 级活塞式压力计压力测量不确定度评定	(40)
实例 2.3 0.02 级活塞式压力计活塞有效面积测量不确定度评定	(45)
实例 2.4 0.02 级气体活塞式压力计活塞有效面积测量不确定度评定	(48)
实例 2.5 0.05 级活塞式压力计活塞有效面积测量不确定度评定	(55)
实例 2.6 0.02 级双活塞式压力真空计活塞有效面积测量不确定度和 K 值测量不确定度评定	(58)
第 3 章 液体压力计测量不确定度评定	(65)
3.1 液体压力计示值误差测量不确定度(简化方案)评定大纲	(65)
附录 3.1 补偿式微压计测量不确定度分量	(68)
附录 3.2 倾斜式微压计测量不确定度分量	(68)
附录 3.3 精密液体压力计测量不确定度分量	(69)
3.2 液体压力计示值误差测量不确定度评定实例	(69)
实例 3.1 二等标准补偿式微压计示值误差测量不确定度评定	(69)
实例 3.2 倾斜式微压计示值误差测量不确定度评定	(73)

实例 3.3 精密液体压力计示值误差测量不确定度评定	(77)
第 4 章 数字压力计的测量不确定度评定	(82)
4.1 数字压力计示值误差测量不确定度评定大纲	(82)
4.2 数字压力计示值误差测量不确定度评定实例	(83)
实例 4.1 数字压力计示值误差测量不确定度评定	(83)
实例 4.2 数字压力计示值误差测量不确定度评定	(87)
实例 4.3 数字压力计示值误差测量不确定度评定	(92)
实例 4.4 数字压力计示值误差测量不确定度评定	(96)
实例 4.5 数字压力计示值误差测量不确定度评定	(99)
实例 4.6 压力变送器示值误差测量不确定度评定	(104)
实例 4.7 差压变送器示值误差测量不确定度评定	(109)
第 5 章 精密压力表测量不确定度评定	(113)
5.1 精密压力表示值误差测量不确定度评定大纲	(113)
5.2 精密压力表示值误差测量不确定度评定实例	(115)
实例 5.1 活塞式压力计测量精密压力表示值误差测量不确定度评定	(115)
实例 5.2 数字压力计测量精密压力表示值误差测量不确定度评定	(116)
实例 5.3 精密压力表测量精密压力表示值误差测量不确定度评定	(118)
第 6 章 动态压力测量不确定度评定	(121)
实例 6.1 高压动态标准测量结果不确定度评定	(121)
实例 6.2 正弦动态压力标准测量结果不确定度评定	(125)
实例 6.3 激波管动态压力标准测量结果不确定度评定	(130)
实例 6.4 准静态压力校准不确定度评定	(138)

第 1 章 测量不确定度基础

1.1 基本概念

本节介绍与压力测量过程密切相关的一些基本概念。

(1) 量值（全称量的值，简称值）

用数和参照对象一起表示的量的大小。量值是量的表示形式。通常任何可测的量都是由数值和计量单位组合而成，如 10^5Pa ， 760mmHg ， 30psi 等压力的量值。应当区分数值与量值。数值是数，它是量值的组成部分，上例中的 10^5 ， 760 ， 30 是数值，它们不包含计量单位，故非量值；而 Pa ， mmHg ， psi 为计量单位。应当指出：数值大的不定量值大，数值小的也不定量值小。

(2) 量的真值（简称真值）

与量的定义一致的量值。真值只有在被测量有完善的定义，并通过完善的测量才有可能获得。由于被测量的定义和测量都不可能做到完美无瑕，所以通过测量不能获得真值。

注：

- 1 在描述关于测量的“误差方法”中，认为真值是唯一的，实际上是不可知的。在“不确定度方法”中认为，由于定义本身细节不完善，不存在单一真值，只存在与定义一致的一组真值，然而，从原理上和实际上，这一组值是不可知的。另一些方法免除了所有关于真值的概念，而依靠测量结果计量兼容性的概念去评定测量结果的有效性。
- 2 在基本常量的这一特殊情况下，量被认为具有一个单一真值。
- 3 当被测量的定义的不确定度与测量不确定度其他分量相比可忽略时，认为被测量具有一个“基本唯一”的真值。这就是 Guide to the expression of uncertainty in measurement（简称 GUM）和相关文件采用的方法，其中“真”字被认为是多余的。

(3) 约定量值（又称量的约定值，简称约定值）

对于给定目的，由协议赋予某量的量值。有时该值是约定采用的。约定量值有时称为指定值、最佳估计值、约定值或参考值。通常用某量的多次测量结果的平均值来确定约定量值。

(4) 测量结果

与其他有用的相关信息一起赋予被测量的一组量值。

注：

- 1 测量结果通常包含这组量值的“相关信息”，诸如某些可以比其他方式更能代表被测量的信息。它可以概率密度函数（probability density function）的方式表示。
- 2 测量结果通常表示为单个测得的量值和一个测量不确定度。对某些用途，如认为测量不确定度可忽略不计，则测量结果可表示为单个测得的量值。在许多领域中这是表示测量结果的常用方式。
- 3 在传统文献和 1993 版 International vocabulary of metrology（简称 VIM）中，测量结果定义为赋予

被测量的值，并按情况解释为平均示值、未修正的结果或已修正的结果。

(5) 测量准确度（简称准确度）

被测量的测得值与其真值间的一致程度。可以用准确度高低、准确度为 0.25 级、准确度为 3 级等表述方法。特别应注意：不要用术语“精密度”、“精度”来表示“准确度”。因为精密度反映在规定的条件下各独立测量结果间的分散性。多次测量同一量所得结果的分散性小，但并不表明测得的结果与真值一致。精度过去用来描述仪器的综合误差，现在国标已不再采用。

注：

- 1 概念“测量准确度”不是一个量，不给出有数字的量值，当测量提供较小的测量误差时就说该测量是较准确的。
- 2 术语“测量准确度”不应与“测量正确度”、“测量精密度”相混淆，尽管它与这两个概念有关。
- 3 测量准确度有时被理解为赋予被测量的测得值之间的一致程度。

(6) 测量精密度（简称精密度）

在规定条件下，对同一或类似被测对象重复测量所得示值或测得值间的一致程度。

注：

- 1 测量精密度通常用不精密度以数字形式表示，如在规定测量条件下的标准偏差、方差或变差系数。
- 2 规定条件可以是重复性测量条件、期间精密度测量条件或复现性测量条件。
- 3 测量精密度用于定义测量重复性、期间测量精密度或测量复现性。
- 4 术语“测量精密度”有时用于指“测量准确度”，这是错误的。

(7) 测量重复性（简称重复性）

在一组重复性测量条件下的测量精密度。

重复性可以用测量结果的分散性定量地表示。由重复性引入的不确定度是诸多来源之一。重复性用在重复性条件下，重复观测结果的实验标准差（称为重复性标准差） s_r 定量地给出。重复观测中的变动性是由于所有影响结果的影响量不能完全保持恒定而引起的。

(8) 重复性测量条件（简称重复性条件）

相同测量程序、相同操作者、相同测量系统、相同操作条件和相同地点，并在短时间内对同一或相类似被测对象重复测量的一组测量条件。

(9) 测量复现性（简称复现性）

在复现性测量条件下的测量精密度。复现性可以用测量结果的分散性来定量地表示。它用复现条件下，重复观测结果的实验标准差（称为复现性标准差） s_R 定量地给出。这里，测量结果通常理解为已修正的结果。复现性又称为再现性。

(10) 复现性测量条件（简称复现性条件）

不同地点、不同操作者、不同测量系统，对同一或相类似被测对象重复测量的一组测量条件。

注：

- 1 不同的测量系统可采用不同的测量程序。
- 2 在给出复现性时应说明改变和未变的条件及实际改变到什么程度。

(11) 实验标准偏差 (简称实验标准差)

对同一被测量进行 n 次测量, 表征测量结果分散性的量。用符号 s 表示。

注:

- 1 n 次测量中某单个测得值 x_k 的实验标准偏差 $s(x_k)$ 可按贝塞尔公式计算:

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-1)$$

式中 x_i ——第 i 次测量的测得值;

n ——测量次数;

\bar{x} —— n 次测量所得一组测得值的算术平均值。

- 2 n 次测量的算术平均值 \bar{x} 的实验标准偏差 $s(\bar{x})$ 为

$$s(\bar{x}) = s(x_k) / \sqrt{n} \quad (1-2)$$

(12) 测量不确定度 (简称不确定度)

根据所用到的信息, 表征赋予被测量量值分散性的非负参数。

注:

- 1 测量不确定度包括由系统影响引起的分量, 如与修正量和测量标准所赋量值有关的分量及定义的不确定度。有时对估计的系统影响未作修正, 而是当作不确定度分量处理。
- 2 此参数可以是诸如称为标准测量不确定度的标准偏差 (或其特定倍数), 或是说明了包含概率的区间半宽度。
- 3 测量不确定度一般由若干分量组成。其中一些分量可根据一系列测得值的统计分布, 按测量不确定度的 A 类评定进行评定, 并可用标准偏差表征。而另一些分量则可根据基于经验或其他信息所获得的概率密度函数, 按测量不确定度的 B 类评定进行评定, 也用标准偏差表征。
- 4 通常, 对于一组给定的信息, 测量不确定度是相应于所赋予被测量的值的。该值的改变将导致相应的不确定度的改变。
- 5 本定义是按 2008 版 VIM 给出的。而在 GUM 中的定义是: 表征合理地赋予被测量之值的分散性, 与测量结果相联系的参数。

不确定度有绝对和相对两种表示形式, 绝对形式表示的不确定度与被测量的量纲相同, 相对形式无量纲。

(13) 标准不确定度 (全称标准测量不确定度)

以标准偏差表示的测量不确定度。

(14) 相对标准不确定度 (全称相对标准测量不确定度)

标准不确定度除以测得值的绝对值。

(15) 合成标准不确定度 (全称合成标准测量不确定度)

由在一个测量模型中各输入量的标准测量不确定度获得的输出量的标准测量不确定度。

注: 在数学模型中的输入量相关的情况下, 当计算合成标准不确定度时必须考虑协方差。

(16) 扩展不确定度 (全称扩展测量不确定度)

合成标准不确定度与一个大于 1 的数字因子的乘积。

注:

- 1 该因子取决于测量模型中输出量的概率分布类型及所选取的包含概率。
- 2 本定义中术语“因子”是指包含因子。

(17) 包含因子

为获得扩展不确定度，对合成标准不确定度所乘的大于1的数。

注：包含因子通常用符号 k 表示。

(18) 自由度

在方差的计算中，和的项数减去对和的限制数。

注：

- 1 在重复性条件下，用 n 次独立测量确定一个被测量时，所得的样本方差为 $(v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2) / (n-1)$ ，其中 v_i 为残差： $v_1 = x_1 - \bar{x}$ ， $v_2 = x_2 - \bar{x}$ ， \cdots ， $v_n = x_n - \bar{x}$ 。和的项数即为残差的个数 n ，和的限制数为1。由此可得自由度 $\nu = n - 1$ 。
- 2 当用测量所得的 n 组数据按最小二乘法拟合的校准曲线确定 t 个被测量时，自由度 $\nu = n - t$ 。如果另有 r 个约束条件，则自由度 $\nu = n - t - r$ 。
- 3 自由度反映了相应实验标准偏差的可靠程度。用贝塞尔公式估计实验标准偏差 s 时， s 的相对标准差为： $\sigma(s) / s = 1 / \sqrt{2\nu}$ 。若测量次数为10，则 $\nu = 9$ ，表明估计的 s 的相对标准差约为0.24，可靠程度达76%。
- 4 合成标准不确定度 $u_c(y)$ 的自由度，称为有效自由度 ν_{eff} ，用于在评定扩展不确定度 U_p 时求得包含因子 k_p 。

(19) 包含概率

在规定的包含区间内包含被测量的一组值的概率。

注：

- 1 为避免与统计学概念混淆，不应把包含概率称为置信水平。
- 2 在GUM中包含概率又称“置信的水平”。
- 3 包含概率替代了曾经使用过的“置信水准”。

(20) 测量误差（简称误差）

测得的量值减去参考量值。

注：

- 1 测量误差的概念在以下两种情况下均可使用：
 - ① 当涉及存在单个参考量值，如用测得值的测量不确定度可忽略的测量标准进行校准，或约定量值给定时，测量误差是已知的；
 - ② 假设被测量使用唯一的真值或范围可忽略的一组真值表征时，测量误差是未知的。
- 2 测量误差不应与出现的错误和过失相混淆。

误差应该是一个确定的值，是客观存在的测量结果与真值之间的差。但由于真值往往不知道，故误差无法准确得到。误差与不确定度是两个不同的概念。测量不确定度是说明测量结果分散性的参数，由人们通过分析评定得到，即与人的认识程度有关。测量结果可能非常接近真值（误差很小），但由于认识不足，评定得到的不确定度可能较大。也可能测量误差实际上较大，但由于分析估计不足，给出的不确定度却偏小。故在进行不确定度分析时，应当充分考虑各种影响因素，并对不确定度的评定加以验证。

需要指出的是，仪器的测量不确定度：由所用测量仪器或测量系统引起的测量不确定度的分量。

① 除原级测量标准采用其他方法外，仪器的不确定度是通过测量仪器或测量系统的校准得到的。

② 仪器不确定度通常按 B 类测量不确定度评定。

③ 对仪器的测量不确定度的有关信息可在仪器说明书中给出。

用测量标准进行检定或校验时，标准装置引入的不确定度仅为测量结果不确定度的分量之一。当测量标准装置由多台仪器及其配套设备组成时，其不确定度由测量方法及所用的仪器设备等对给定的标准量值有影响的各不确定度分量进行合成得到，通常用扩展不确定度表示。测量标准装置的不确定度可以用向高一等级测量标准溯源的方法进行检定，或用与多台同类标准装置比对的方法进行验证。

(21) 修正

对估计的系统误差的补偿。

注：

- 1 补偿可取不同形式，诸如加一个修正值或乘一个修正因子，或从修正值表或修正曲线上得到。
- 2 修正值是用代数法与未修正测量结果相加，以补偿其系统误差的值。修正值等于负的系统误差估计值。
- 3 修正因子是为补偿系统误差而与未修正测量结果相乘的数字因子。
- 4 由于系统误差不能完全知道，因此这种补偿并不完全。

(22) 相关系数

相关系数是两个变量之间相互依赖性的度量，它等于两个变量间的协方差除以各自方差之积的正平方根，用符号 $\rho(x, y)$ 表示：

$$\rho(x, y) = \rho(y, x) = \frac{v(y, x)}{\sqrt{v(y, y)v(x, x)}} = \frac{v(y, x)}{\sigma(y)\sigma(x)} \quad (1-3)$$

注：

- 1 定义的协方差是在无限多次测量条件下的理想概念。有限次测量时相关系数的估计值用 $r(x, y)$ 表示：

$$r(x, y) = r(y, x) = \frac{s(x, y)}{\sqrt{s(x, x)s(y, y)}} = \frac{s(x, y)}{s(x)s(y)} \quad (1-4)$$

- 2 相关系数是一个 $[-1, +1]$ 间的纯数。
- 3 对于多变量概率分布，通常给出相关系数矩阵，该矩阵的主对角线元素为 1。

(23) 独立

如果两个随机变量的联合概率分布是其每个概率分布的乘积，那么这两个随机变量是统计独立的。如果两个随机变量是独立的，则它们不相关。但反过来不一定成立。

(24) 测得的量值（又称量的测得值，简称测得值）

代表测量结果的量值。

注：

- 1 对重复示值的测量，每个示值可提供相应的测得值。用这一组独立的测得值可计算出作为结果的测得值，如平均值或中位值，通常它附有一个已减小了的与其相关联的测量不确定度。
- 2 当认为代表被测量的真值范围与测量不确定度相比小得多时，量的测得值可认为是实际唯一真值的估计值，通常是通过重复测量获得的各独立测得值的平均值或中位值。
- 3 当认为代表被测量的真值范围与测量不确定度相比不太小时，被测量的测得值通常是一组真值的平均值或中位值的估计值。
- 4 在测量不确定度表示指南（GUM）中，对测得的量值使用的术语有“测量结果”和“被测量的值的估计”或“被测量的估计值”。

(25) 包含区间

基于可获得的信息确定的包含被测量一组值的区间，被测量值以一定概率落在该区间内。

注：

- 1 包含区间不一定以所选的测得值为中心。
- 2 不应把包含区间称为置信区间，以避免与统计学概念混淆。
- 3 包含区间可由扩展测量不确定度导出。

(26) 定义的不确定度

由于被测量定义中细节量有限所引起的测量不确定度分量。

注：

- 1 定义的不确定度是在任何给定被测量的测量中实际可达到的最小测量不确定度。
- 2 所描述细节中的任何改变导致另一个定义的不确定度。

(27) 零的测量不确定度

测得值为零时的测量不确定度。

注：

- 1 零的测量不确定度与零位或接近零的示值有关，它包含被测量小到不知是否能检测的区间或仅由噪声引起的测量仪器的示值区间。
- 2 零的测量不确定度的概念也适用于当对样品与空白进行测量并获得差值时。

(28) 目标不确定度（全称目标测量不确定度）

根据测量结果的预期用途，规定作为上限的测量不确定度。

(29) 不确定度报告

对测量不确定度的陈述，包括测量不确定度的分量及其计算和合成。

注：不确定度报告应该包括测量模型、估计值、测量模型中与各个量相关联的测量不确定度、协方差、所用的概率密度分布函数的类型、自由度、测量不确定度的评定类型和包含因子。

1.2 测量模型

本节介绍在测量不确定度评定中所用到的测量模型。

测量模型，简称模型：测量中涉及的所有已知量间的数学关系。

注：

- 1 测量模型的通用形式是方程：

$$h(Y, X_1, \dots, X_N) = 0 \quad (1-5)$$

其中，测量模型中的输出量 Y 是被测量，其量值由测量模型中输入量 X_1, \dots, X_N 的有关信息推导得到。

- 2 在有两个或多个输出量的较复杂情况下，测量模型包含一个以上的方程。
- 3 在测量模型中，输入量与输出量间的函数关系又称测量函数。

测量模型与测量方法有关。

x_i 是 y 的不确定度来源。寻找不确定来源时，可以从测量仪器、测量环境、测量人员、测量方法、被测对象不完善等方面考虑，如：

- (1) 被测量的定义不完整；
- (2) 被测量定义的实现不完善；

- (3) 取样的代表性不够, 即被测样本可能不完全代表所定义的被测量;
- (4) 对测量过程受环境影响的认识不恰如其分或对环境的测量不完善;
- (5) 对模拟式仪器的读数存在人为偏移;
- (6) 测量仪器的计量性能(如最大允许误差、灵敏度、鉴别力、分辨力、死区及稳定性等)的局限性, 即导致仪器的不确定度;
- (7) 测量标准或标准物质提供的量值的不准确;
- (8) 引用的数据或其他参数的不准确;
- (9) 测量方法和测量程序中的近似和假设;
- (10) 重复观测中测得值的变化。

测量不确定度的来源必须根据实际测量情况进行具体分析。分析时, 除了定义的不确定度外, 可从测量仪器、测量环境、测量人员、测量方法等方面全面考虑, 特别要注意对测量结果影响较大的不确定度来源, 应尽量做到不遗漏、不重复。

X_1, X_2, \dots, X_N 本身可看作被测量, 也可取决于其他量, 甚至包括具有系统效应的修正值。在准确度要求高时, 可能导出一个复杂的函数关系式。当修正值与合成标准不确定度相比很小时, 修正值可不加到测量结果之中, 比如常温下活塞压力计的有效面积的修正值, 应变式压力传感器的工作电压的修正值等。因此, 在实际测量中, 同一被测量 Y 在不同的测量准确度要求下, 其测量模型可能会不同。如果测量过程较简单, 准确度要求不高, 所考虑的输入量或影响量个数可能很少。所以测量模型可能简单到如下形式:

$$Y = X_1 - X_2 \quad (1-6)$$

甚至:

$$Y = X \quad (1-7)$$

式(1-6)可用于被测量 Y 为示值误差、偏差等情况, 式(1-7)可用于被测量 Y 直接被赋值或定值等情况。

被测量 Y 的最佳估计值 y , 在通过输入量 X_1, X_2, \dots, X_N 的估计值 x_1, x_2, \dots, x_N 得出时, 可有以下两种计算方法:

(1)

$$\begin{aligned} y = \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k \\ &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{Nk}) \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中, y 是取 Y 的 n 次独立测得值 y_k 的算术平均值, 其每个测得值 y_k 的不确定度相同, 且每个 y_k 都是根据同时获得的 N 个输入量 X_i 的一组完整的测得值求得的。

(2)

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (1-9)$$

式中, $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{i,k}$, 它是第 i 个输入量的 k 次独立测量所得的测得值 $x_{i,k}$ 的算术平均值。

这一方法的实质是先求 X_i 的最佳估计值 \bar{x}_i , 再通过函数关系式计算得出 y 。

以上两种方法, 当 f 是输入量 X_i 的线性函数时, 它们的结果相同。但当 f 是 X_i 的非线性函数时, 应采用式(1-8)的计算方法。

在计算测得值时, 应将所有修正量加入测得值。在测量过程中由于粗心大意, 仪器使用不当, 或突然故障, 突然的环境条件变化 (例如突然冲击或振动、电源电压突变等), 都会产生异常的测得值。可以依据格拉布斯法判断测量异常值, 对经判断确为异常值的数据, 应予以剔除, 不得包括在测得值的范围内。

1.3 测量不确定度评定的步骤

测量不确定度评定的步骤如下:

(1) 确定被测量和测量方法

此处的测量方法包括测量原理、测量仪器以及测量和数据处理程序等。

(2) 建立满足测量不确定度评定所需的测量模型并找出所有影响测量不确定度的输入量

建立测量模型也称测量模型化。其目的是要建立满足测量所要求的准确度的测量模型, 即被测量和所有各输入量之间的函数关系:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-10)$$

要求所有对测量不确定度有影响的输入量都应包含在测量模型中。所评定的各不确定度分量, 要与测量模型中的输入量一一对应。

(3) 确定各输入量的标准不确定度

根据各输入量标准不确定度评定方法的不同, 可以分为测量不确定度的 A 类评定和测量不确定度的 B 类评定两类。

A 类评定是对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定; 用不同于测量不确定度 A 类评定的方法进行的测量不确定度分量的评定为 B 类评定。

(4) 确定对应于各输入量的不确定度分量 u_i

若输入量 x_i 的标准不确定度为 $u(x_i)$, 则标准不确定度分量为 u_i :

$$u_i = c_i u(x_i) = \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \quad (1-11)$$

式中, c_i 为灵敏系数, 它可由测量模型对输入量 x_i 求偏导数得到。 c_i 也可以由实验测量得到, 在数值上它等于当输入量 x_i 变化一个单位量时, 被测量 y_i 的变化量。

(5) 对各不确定度分量进行合成得到合成标准不确定度 u_c

根据方差合成原理, 当 N 个不确定度分量 u_i 彼此之间独立无关时, 合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 常称为不确定度传播定律。

(6) 确定被测量 y 可能值分布的包含因子

根据被测量 y 分布情况的不同, 所要求的包含概率以及对测量工作具体要求的不同, 应采用不同的方式来确定包含因子 k 。

(7) 确定扩展不确定度 U

扩展不确定度 $U = ku_c$ 。当包含因子 k 由所规定的包含概率 p 得到时, 扩展不确定度用 U_p 表示。

(8) 给出测量结果报告

简要给出测量结果及其不确定度, 以及如何由合成标准不确定度得到扩展不确定度。

1.4 评定方法

本节介绍在测量不确定度评定中所用到的主要方法。

不确定度依据其评定方法可以分为“**A**”、“**B**”两类, 它们与过去的“随机误差”和“系统误差”的分类之间不存在简单的对应关系。“随机”与“系统”表示误差的两种不同的性质; “**A**”类与“**B**”类表示不确定度的两种不同的评定方法。将不确定度评定分为“**A**”类与“**B**”类, 仅为讨论方便, 并不意味着两类评定之间存在本质上的区别, 它们都基于概率分布, 并都用方差或标准差表征。

在压力测量中, 主要用绝对值表述测量结果, 因此在下面的讨论中主要给出绝对标准不确定度。

1.4.1 不确定度分量的 A 类评定

对在规定测量条件下测得的量值, 用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定称为测量不确定度的 A 类评定。

在重复性条件或复现性条件下得出 n 个观测结果 x_k , 随机变量 x 的期望值的最佳估计是 n 次独立观测结果的算术平均值:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} \quad (1-13)$$

测量结果 \bar{x} 的 A 类标准不确定度评定 $u(\bar{x}_i)$ 即为测量平均值的实验标准差 $s(\bar{x}_i)$, 它与单点测量结果 x_{ik} 的实验标准差的关系为

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (1-14)$$

在压力测量中, 测量不确定度的评定方法主要有贝塞尔公式和极差法, 其中贝塞尔法为主要方法。

(1) 基本方法: 贝塞尔公式法

在重复性条件或复现性条件下对同一被测量独立重复测量 n 次, 得到 n 个测得值 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 被测量 X 的最佳估计值是 n 个独立测得值的算术平均值 \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-15)$$

每个测得值 x_i 与 \bar{x} 之差称为残差 v_i :

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-16)$$

单个测得值 x_k 的实验方差为

$$s^2(x_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1-17)$$