



国家计量技术法规统一宣贯教材

# 流量测量不确定度分析

王 池 主编

国家质量监督检验检疫总局计量司 审定



A0970402

中国计量出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

流量测量不确定度分析: 国家计量技术法规统一宣贯教材/王池主编. —北京: 中国计量出版社, 2002.5

ISBN 7-5026-1622-5

I. 流… II. 王… III. 流量测量—不确定度—分析 IV. TB937

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 024585 号

## 内 容 提 要

本书是国家计量技术规范 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》在流量专业的宣贯教材, 由国家质检总局计量司审定。主要内容有流量计量和测量不确定度的基础知识; 相关的仪器设备、流量标准装置和各种流量计的测量不确定度分析等。

本教材可供计量部门、流量校准和检测实验室及科研单位、企业中从事流量计量、标准化、质量工作的人员使用, 也可供高等院校有关专业的师生使用。

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

E-mail jlfxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 6.5 字数 145 千字

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷

\*

印数 1—5 000 定价: 20.00 元

# 编 审 委 员 会

主 审 王自和

主 编 王 池

编 委 (按姓氏笔画顺序排列)

王东伟 王 池 李 芳

段慧明 徐英华 翟秀贞

# 序 言

测量不确定度是评定测量水平的指标，是判定测量结果质量的依据，它在科研、生产、商贸和国际技术交流等诸多相关测量领域具有重要的意义。因此，ISO /IEC 17025 要求校准实验室出具的每份证书或报告，均应包括测量结果不确定度的说明。这个要求在必要时对检测实验室也同样适用。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，相关人员急需了解和学习测量领域中不确定度的表述方法。

ISO 出版的《测量不确定度表示指南》是由国际标准化组织等 7 个国际组织联合制订的通用指导性标准。国家质量技术监督局于 1999 年发布实施的 JJF1059 《测量不确定度评定与表示》，等同采用了《测量不确定度表示指南》的基本内容。

为了宣贯 JJF1059，已出版了不少的相关书籍。但是，由于测量不确定度的概念与传统的误差理论有一定的差异，理解测量不确定度概念、掌握测量不确定度评定和表示方法不是一蹴而就的事，需要循序渐进；各类校准和检测实验室迫切需要与校准过程相类似的测量不确定度评定实例，以加深理解并参考使用。为此，我们组织编写了这本《流量测量不确定度分析》宣贯教材。这是目前第一本针对一个专业的测量不确定度进行全面论述的书。本教材主要介绍了与流量测量相关的基础知识，结合实例详述了不确定度评定的具体应用。本书可供科研、检测、教学等有关人员使用，是从事流量专业计量、标准化、质量管理及试验等工作人员的必备资料。

国家质量监督检验检疫总局计量司司长 宣 湘

2002 年 4 月

## 前 言

为了满足各校准、检测实验室对流量测量不确定度评定的需求，帮助大家理解 JJF1059 并正确进行具体的评定，我们编写了这本《流量测量不确定度分析》。

在编写过程中，我们遵循三个原则：第一个原则是符合 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》；第二个原则是理论与实际相结合，既介绍了必要的理论基础知识，又安排了较多的分析实例，以方便大家理解和使用；第三个原则是简明扼要，尽量不重复相关检定规程和书籍中已有内容，尽可能介绍我们的工作经验和研究成果。

参与本书编写的都是在中国计量科学研究院长期从事流量计量工作的专业技术人员，其中第一章由王池编写，后三章由王东伟、王池、李芳、段慧明、徐英华、翟秀贞（以姓氏笔画为序）编写，全书由王池统稿。

在编写过程中，开封仪表厂王自和高级工程师对书稿做了认真仔细的审阅，提出了大量修改意见，不但保证了本书的质量和水平，也使我们深深感佩于他丰富的经验、全面的知识和严谨的作风。国家质检总局计量司量传处陈红副处长从书稿的整体构架、法制计量要求及文字等方面，进行审查并提出了宝贵的修改意见。中国计量科学研究院肖明耀研究员、清华大学张宝芬教授在不确定度评定及流量计量方面提出了指导性意见。很多流量界同行也对本书给予了支持和关心。在此一并表示感谢。

测量不确定度的理论相对较新，还在不断发展和完善。而流量测量不确定度评定方面的参考资料很少，具体评定的专业性和针对性又很强，尤其是我们对不确定度理论的理解及专业工作经验都十分有限，因此本书错误和遗漏在所难免，恳请读者批评指正。欢迎对本书有探讨兴趣的读者与我们联系。

王 池

2002年3月

# 目 录

第一章 基础知识 .....	(1)
第一节 流量计量 .....	(1)
第二节 流体力学常用物理参数 .....	(3)
第三节 流体力学基本知识 .....	(6)
第四节 测量不确定度基础 .....	(7)
第二章 相关仪器设备的测量不确定度 .....	(15)
第一节 温度计 .....	(15)
第二节 压力计 .....	(17)
第三节 湿度计 .....	(18)
第四节 密度计 .....	(20)
第五节 计时器 .....	(22)
第六节 电子秤 .....	(24)
第七节 量器 .....	(27)
第三章 流量标准装置的测量不确定度 .....	(31)
第一节 液体流量标准装置 .....	(31)
第二节 体积管 .....	(36)
第三节 钟罩式流量标准装置 .....	(40)
第四节 $p, V, T, t$ 法气体流量标准装置 .....	(46)
第五节 皂膜气体流量标准装置 .....	(52)
第六节 标准表法流量标准装置 .....	(54)
第四章 流量计的测量不确定度 .....	(61)
第一节 差压式流量计 .....	(61)
第二节 临界流流量计 .....	(66)
第三节 容积式流量计 .....	(70)
第四节 转子流量计 .....	(73)
第五节 电磁流量计 .....	(77)
第六节 涡街流量计 .....	(80)
第七节 超声流量计 .....	(83)
第八节 质量流量计 .....	(85)
第九节 水表 .....	(86)
第十节 膜式煤气表 .....	(88)
附录 .....	(91)
参考文献 .....	(93)

# 第一章 基础知识

## 第一节 流量计量

### 1 流量的定义

流体流过一定截面的量称为流量。流量是瞬时流量和累积流量的统称。

在一段时间  $\Delta t$  内流体流过一定截面的量称为累积流量，用  $Q$  表示。当流量用体积表示时称为体积流量，用  $Q_V$  表示，单位为  $m^3$ ；用质量表示时称为质量流量，用  $Q_m$  表示，单位为  $kg$ 。

当时间  $\Delta t$  很短时，流量与时间之比称为瞬时流量，用  $q$  表示，即

$$q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta t} \quad (1-1)$$

瞬时流量亦分为瞬时体积流量  $q_V$  (单位为  $m^3/s$ ) 及瞬时质量流量  $q_m$  (单位为  $kg/s$ )。

质量流量与体积流量之间存在如下关系：

$$Q_m = Q_V \rho \quad (1-2)$$

$$q_m = q_V \rho$$

式中： $\rho$ ——流体密度， $kg/m^3$ 。

累积流量主要用于贸易结算，是流量计量的重点；瞬时流量主要用于工业过程控制，是工业过程控制中的重要参数。

### 2 流量计量的意义

流量计量是能源计量的重要组成部分。能源问题是我国国民经济发展中的一个突出问题，节约能源已成为重要国策之一。要搞好节能工作，首先必须对能源进行科学管理。能源的计量测试就是能源科学管理的一项重要技术基础工作。水、油、气及其他流体介质的计量，均属流量测量范畴。因此在节能工作中，流量计量起到了极为重要的作用。

流量计量广泛用于贸易结算。从石油、天然气等的国际贸易结算，到蒸汽、自来水的供销双方的结算，直到热水、煤气的居民用户的结算，都无一例外地使用流量计作为结算的依据。每年以流量进行贸易结算的金额以千亿元计。

流量计量是工业生产质量的重要保证。流量是钢铁、电力、化工、医药、食品等工业生产过程的重要参数，流量的监测和控制水平直接关系到生产质量、生产效率和能源的利用。

流量计量是环境保护的需要。保护环境已成为 21 世纪最为紧迫的任务，而流量计量是控制环境污染的重要手段之一，废气、废水的排放量都由流量计来计量，因此流量计量在环境保护中起到重要作用。

### 3 流量计量的内容

流量是一个动态量，流量计量是一项复杂的技术。从被测流体来说，包括气体、液体和



混合流体这三种具有不同物理特性的流体；从测量流体流量时的条件来说，又是多种多样的，如测量时介质的温度可以从零下一百多度到零上五百度；介质的压力可以从几十兆帕斯卡到真空；被测流量的大小可以从几十毫升每小时到几千立方米每小时；被测流体的流动状态可以是层流、紊流等等。此外，还存在液体粘度大小不同，气体组份不同等情况。因此为了准确地测量流量，就必须研究不同流体在不同条件下的流量测量方法，并提供相应的测量仪表，这是流量计量工作的主要内容之一。

因为流量计量应用在各种不同的场合，不同的条件，而我们所选用的流量计除要适应所使用的条件之外，还要考虑很多其他因素，如价格、准确度等级、流量范围、抗干扰性、压力损失、耐腐蚀、防爆等级等等。因此为了适应不同的介质条件，不同的环境条件，不同的使用要求，各种流量计量的仪表应运而生。据不完全统计，常用的流量计种类达几十种之多。甚至可以说只要有新的技术发展起来，就会有人尝试着将它应用到流量计量当中去，比如电磁、超声、激光技术等等。

由于被测流体的特性如此复杂，测量条件又各不相同，从而产生了各种不同的测量方法和测量仪表。显然，如果没有一个统一的检定流量仪表准确度的方法，要保证大规模生产的工艺要求、保证贸易的公平是不可能的。因此流量计量的另一主要内容就是研究流量单位的复现方法和检定系统，建立流量计量的基、标准装置，规范检定方法，以保证量值传递和流量测量的准确度。

#### 4 流量计分类

流量计的种类很多，分类方法也不尽相同。按测量方法可将流量计大致分为容积式流量计、速度式流量计、差压式流量计、质量流量计、转子流量计等几大类。

容积式流量计由于具有对上游流动状态变化不敏感、测量准确度较高、可用于高粘度流体等特点，较多用于贸易结算及轻工、食品等部门。

速度式流量计包括涡轮流量计、涡街流量计、电磁流量计、超声流量计等，是以测量管道流速来得到流量的流量计。随着大管道流量计的发展，超声流量计、电磁流量计以其无可动部件、无压损的特点得到越来越多的应用。涡轮流量计较多用做标准流量计及装置比对。而差压式流量计、涡街流量计则更多用于蒸汽流量的计量。

以节流装置为检测件的差压式流量计，是历史悠久、理论与实践资料丰富、使用成熟的一类流量计，由于其具有结构简单、安装方便、工作可靠、成本低廉且具有一定准确度的特点，它在大、中口径管道的流量计量中得到广泛的应用。

质量流量计则由于可以直接得到质量流量，较多用于生产过程参数计量、检测和控制。

转子流量计以其结构简单、无直管段要求、压力损失恒定等特点，较多用于小流量的流量测量。

在各大类中，流量计又分有很多小类，应该说每种流量计都在某一限定的条件和场合适用，具有其优越性。

#### 5 流量标准装置

流量标准装置就是能够复现流量量值，最终溯源到基本量的国家基准的试验装置。该装置除可给出具有一定准确度的流量量值外，还应在流动的稳定性、前后直管道长度等方面达到一定要求。

流量标准装置最主要的用途是对流量计进行校准，这是流量计量必不可少的环节，是流

量计量的基础，通过流量标准装置对流量计进行校准，可以保证流量量值的统一与正确传递。标准装置的另一用途就是进行流量计的性能试验研究工作。通过试验可以确定流量计的准确度等级、流量范围、可靠性和寿命、重复性、动态特性等，以便对仪表进行合理设计、使用。流量标准装置还可用于研究检定条件与使用条件之间的差异对仪表准确度的影响，以采用合理的介质换算和修正的方法。

流量标准装置分为原始标准装置和传递标准装置。原始标准装置是依据流量的基本定义予以实施的装置，即以工作量器、衡器等作为体积  $V$  或质量  $m$  的度量设备，从而得到体积流量或质量流量；传递标准装置是使用由原始标准装置校准的流量计作为流量标准来进行流量计校准的装置。

## 第二节 流体力学常用物理参数

### 1. 密度

单位体积流体的质量称为密度。在流体内任意点的密度为该点流体质量  $\Delta m$  与体积  $\Delta V$  之比，即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-3)$$

当压力不变时，不同温度下液体密度计算式为

$$\rho = \rho_{20} [1 - \beta(\theta - 20)] \quad (1-4)$$

式中： $\rho$ ——温度为  $\theta$  时液体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$\rho_{20}$ ——20℃时液体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$\beta$ ——液体的热膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

$\theta$ ——液体的温度， $^\circ\text{C}$ 。

温度不变时，不同压力下液体密度计算式为

$$\rho = \rho_0 [1 + \kappa(p_e - p_{e0})] \quad (1-5)$$

式中： $\rho_0$ ——压力为  $p_0$  时液体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$\kappa$ ——液体的体积压缩系数， $1/\text{Pa}$ ；

$p_e, p_{e0}$ ——分别为试验压力和参考压力， $\text{Pa}$ 。

我们把体积不随压力变化的流体称为不可压缩流体。实际上不可压缩流体是不存在的，仅是压力的变化可忽略不计，而近似看成不可压缩流体。通常，在  $5 \times 10^6 \text{ Pa}$  以下我们把液体看作是“不可压缩流体”，但对碳氢化合物（如原油），或在流量计量准确度高时，不能轻易地忽略液体压缩性的影响。

对气体而言，如果得到了标准状态下的密度  $\rho_n$ ，则在其他状态下的介质密度  $\rho$  由气体状态方程导出：

$$\rho = \rho_n \frac{p}{p_n} \frac{T_n z_n}{T z} \quad (1-6)$$

式中： $\rho_n$ ——标准状态下（293.15 K，101 325 Pa）干气体的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$p_n, p$ ——分别为标准状态和工作状态下气体的绝对压力，Pa；

$T_n, T$ ——分别为标准状态和工作状态下气体的热力学温度，K；

$z_n, z$ ——分别为标准状态和工作状态下气体的压缩系数。

环境条件下的空气密度计算公式为

$$\rho = \frac{p_a M_a}{R_m T z} \left[ 1 - x_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (1-7)$$

式中： $p_a$ ——环境条件下大气压，Pa；

$T$ ——环境温度，K；

$R_m$ ——通用气体常数，8.314 41 J/(mol·K)；

$M_a$ ——干空气摩尔质量，0.028 963 5 kg/mol；

$M_v$ ——水蒸气摩尔质量，0.018 015 kg/mol；

$x_v$ ——湿空气中水蒸气的摩尔分数；

$z$ ——空气的压缩系数。

## 2 粘度

流体本身阻滞其质点相对滑动的性质称为流体的粘性。流体粘性的大小用粘度来度量。同一流体的粘度随流体的温度和压力而变化。通常温度上升、液体的粘度减小，而气体粘度增大。液体粘度只在很高压力下才需进行压力校正，而气体的粘度与压力、温度关系十分密切。流体粘度常用动力粘度和运动粘度来表征。

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dh}} \quad (1-8)$$

式中： $\eta$ ——流体动力粘度或简称粘度，Pa·s；

$\tau$ ——单位面积上的内摩擦力，Pa；

$\frac{du}{dh}$ ——流体垂直于速度方向的速度变化率，1/s；

$u$ ——流体流速，m/s；

$h$ ——两流体层间距离，m。

流体的动力粘度  $\eta$  与密度  $\rho$  的比值为运动粘度  $\nu$ ，即：

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-9)$$

运动粘度  $\nu$  的单位是 m<sup>2</sup>/s。

## 3 热膨胀系数

当流体的温度升高时，流体的体积膨胀，这种特性称为流体的膨胀性。流体的膨胀性用膨胀系数  $\beta$  表示。它定义为：在一定压力下，温度每升高 1℃，流体体积的相对增加量。

其数学表达式为

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta \theta} \quad (1-10)$$

式中： $\beta$ ——流体的热膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

$V$ ——流体的原有体积， $\text{m}^3$ ；

$\Delta\theta$ ——流体的温度增量， $^\circ\text{C}$ ；

$\Delta V$ ——流体的体积增量， $\text{m}^3$ 。

#### 4 压缩系数

当作用在流体上的压力增加时，流体所占有的体积将缩小，这种特性称为流体的压缩性。流体的压缩性用压缩系数（或压缩因子） $\kappa$ 表示。它定义为：在一定的温度下，压力每增加一个压力单位，流体体积的相对缩小量，其数学表达式为

$$\kappa = - \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-11)$$

式中： $\kappa$ ——流体的体积压缩系数， $1/\text{Pa}$ ；

$V$ ——流体的原有体积， $\text{m}^3$ ；

$\Delta p$ ——流体的压力增量， $\text{Pa}$ ；

$\Delta V$ ——流体体积的增加量， $\text{m}^3$ 。

#### 5 气体的等熵指数

在流量计量中，在假设气体的热力过程为等熵膨胀的情况下，压力与体积的关系式为

$$pV^\kappa = \text{常数} \quad (1-12)$$

式中： $\kappa$ ——等熵指数。

当被测气体服从理想气体定律时，等熵指数等于绝热指数，即比定压热容  $c_p$  与比定容热容  $c_v$  之比。由于  $c_v = c_p - R$ ，则

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1}{1 - \frac{R}{c_p}} \quad (1-13)$$

式中： $c_p, c_v$  的单位为  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，气体常数  $R$  的定义为

$$R = \frac{R_m}{M} \quad (1-14)$$

式中  $M$  为摩尔质量， $\text{kg}/\text{mol}$ 。不同的气体，其气体常数  $R$  的值不同，对于空气， $R = 287.1 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。 $R_m$  为通用气体常数， $R_m = 8.314 41 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

对于实际气体，等熵指数  $\kappa$  的计算式为

$$\kappa = \frac{\rho}{p} \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_S \quad (1-15)$$

式中： $S$ ——熵。

### 第三节 流体力学基本知识

#### 1 管道雷诺数和流态

雷诺数是表征流体惯性力与粘性力之比的无量纲量，即

$$Re_D = \frac{vD}{\nu} = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (1-16)$$

式中： $Re_D$ ——管道雷诺数；

$v$ ——流体的特征流速，如在管流中取过流断面上的平均流速，m/s；

$\rho$ ——流体密度，kg/m<sup>3</sup>；

$D$ ——特征长度，如在圆管中取管内径值，m；

$\nu$ ——流体运动粘度，m<sup>2</sup>/s；

$\eta$ ——流体动力粘度，Pa·s。

由雷诺数的大小可以判别流动状态，一般管道雷诺数  $Re_D < 2\,300$  为层流状态； $Re_D = 2\,000 \sim 4\,000$  为过渡状态； $Re_D > 4\,000$  为紊流状态。不同流动状态，管道内流速分布及流体运动方程有不同的形式。

#### 2 连续性方程

认为流体是由无数流体微团连续分布而组成的连续介质，也就是认为表征流体属性的密度、速度、压力的流体物理量也是连续分布的。对于定常流，根据质量守恒关系，在同一管道内，截面1的质量流量  $q_{m1}$  和截面2的质量流量  $q_{m2}$  应有如下关系：

$$q_{m1} = q_{m2} \quad (1-17)$$

由此导出封闭管道的连续性方程如下：

$$\text{可压缩定常流动：} \quad \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = q_m \quad (1-18)$$

$$\text{不可压缩定常流动}(\rho_1 = \rho_2)： \quad v_1 A_1 = v_2 A_2 = q_V \quad (1-19)$$

式中： $\rho$ ——流体密度，kg/m<sup>3</sup>；

$v$ ——液体在管道的平均流速，m/s；

$A$ ——管道横截面积，m<sup>2</sup>；

$q_m$ ——质量流量，kg/s；

$q_V$ ——体积流量，m<sup>3</sup>/s。

#### 3 伯努利方程

伯努利方程是流体流动的能量方程，在流体运动时，不同性质的机械能可以相互转换，且总的机械能守恒。因此流管中两截面间有如下关系成立：

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{v}_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{v}_2^2}{2} + h_w \quad (1-20)$$

式中： $z_g$ ——单位重量流体在过流断面上的位能的平均值；

$\frac{p}{\rho}$ ——单位重量流体在过流断面上的压力能的平均值；

$\frac{\bar{v}^2}{2}$ ——单位重量流体在过流断面上的动能的平均值；

$h_w$ ——平均单位重量流体从断面 1 流到断面 2 的能量损失。对理想流体， $h_w$  为零。

#### 4 气体状态方程

一定质量气体的体积与压力的乘积和它的热力学温度成正比，此关系用公式表示称为理想气体状态方程：

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = mR \quad (1-21)$$

$$p = \rho RT$$

式中： $p$ ——气体压力；

$V$ ——气体体积；

$T$ ——气体热力学温度；

$\rho$ ——气体密度；

$m$ ——气体质量；

$R$ ——气体常数。

一切实际气体都不能准确满足理想气体状态方程式。实际气体状态方程式是

$$z = \frac{pV}{RT} \quad (1-22)$$

式中： $z$ ——气体压缩系数。

### 第四节 测量不确定度基础

本节介绍测量不确定度评定中常用的概念、基本内容和方法，对于流量计量中较少用到的输入量相关、反正弦分布等不做介绍。

#### 1 基本概念

〔量的〕真值：与给定的特定量的定义一致的值。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缺，所以通过测量通常不能获得真值。

约定真值：对于给定目的具有适当不确定度并赋予特定量的值。有时该值是约定采用的。约定真值有时称为指定值、最佳估计值、约定值或参考值。通常用某量的多次测量结果来确定约定真值。

测量结果：由测量所得到的赋予被测量的值。在给出测量结果时，应说明它是示值、未修正测量结果或已修正测量结果，还应表明它是否为几个值的平均。测量结果仅是被测量的最佳估计值，并非真值。在测量结果的完整表述中应包括测量不确定度，必要时还应说明有关影响量的取值范围。

仪器准确度：测量结果与被测量真值之间的一致程度。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。

[测量结果的] 重复性：在相同测量条件下，对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性。相同测量条件是指：相同的测量程序、相同的观测者、使用相同的测量仪器、相同的地点、在短时间内进行重复测量等。重复性可以用测量结果的分散性定量地表示。

[测量结果的] 复现性：在改变了的测量条件下，同一被测量的测量结果之间的一致性。这里变化了的测量条件包括：测量原理、测量方法、观测者、测量仪器、参考测量标准、地点、时间、使用条件。复现性可以用测量结果的分散性定量地表示。

[测量] 不确定度：表征合理地赋予被测量之值的分散性，是与测量结果相联系的参数。它可以是标准差或其倍数，或说明了置信水平的区间的半宽度。不确定度恒为正值，在其数值前面不要加“±”号。

标准不确定度：以标准偏差表示的测量不确定度。绝对标准不确定度用  $u$  表示。

相对不确定度：不确定度除以测量结果  $y$  的绝对值（设  $y \neq 0$ ）。流量计量中大多采用相对不确定度的方式表述，相对标准不确定度用  $u_r$  表示。

合成标准不确定度：当测量结果是由若干个其他量的值求得时，按其他各量的方差或协方差算得的标准不确定度。合成标准不确定度用  $u_c$  表示，相对值用  $u_{cr}$  表示。

扩展不确定度：确定测量结果区间的量，合理赋予被测量之值分布的大部分可望含于此区间。扩展不确定度用  $U$  表示，相对值用  $U_r$  表示。

包含因子：为求得扩展不确定度，对合成标准不确定度所乘之数字因子。包含因子记为  $k$ 。

自由度：在方差的计算中，和的项数减去对和的限制数。自由度反映相应实验标准差的可靠程度。自由度记为  $\nu$ 。

## 2 数学模型

在实际测量的很多情况下，被测量  $Y$ （输出量）不能直接测得，而是由  $N$  个其他量  $X_1, X_2, \dots, X_N$ （输入量）通过函数关系  $f$  来确定：

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1-23)$$

式 (1-23) 表示的这种函数关系就称为数学模型或测量模型。

由  $X_i$  的估计值  $x_i$ ，可得到  $Y$  的估计值  $y$ ：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (1-24)$$

$x_i$  是  $y$  的不确定度来源。寻找不确定度来源时，可以从测量仪器、测量环境、测量人员、测量方法、被测量等方面全面考虑，应做到不遗漏、不重复，特别应考虑对结果影响大的不确定度来源。

$X_1, X_2, \dots, X_N$  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，比如常温下金属量器的体积修正值，液体流量的压力、温度修正值等。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，其数学模型可能会不同。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

个数可能减少。所以测量数学模型可能简单到如下形式：

$$Y = X_1 - X_2 \quad (1-25)$$

甚至：
$$Y = X \quad (1-26)$$

式 (1-25) 可用于被测量  $Y$  为示值误差、偏差等情况，式 (1-26) 可用于被测量  $Y$  直接赋值或定值等情况。

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，可有以下两种方法：

$$a) \quad y = \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{Nk}) \quad (1-27)$$

式中， $y$  是取  $Y$  的  $n$  次独立观测值  $y_k$  的算术平均值，其每个观测值  $y_k$  的不确定度相同，且每个  $y_k$  都是根据同时获得的  $N$  个输入量的一组完整的观测值求得的。

$$b) \quad y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (1-28)$$

式中， $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik}$ ，它是独立观测值  $x_{ik}$  的算术平均值。

以上两种方法，当  $f$  是输入量  $X_i$  的线性函数时，式 (1-27) 和式 (1-28) 的计算结果相同，但当  $f$  是  $X_i$  的非线性函数时，则可能不同，以式 (1-27) 的计算方法较为优越。比如流量测量时求涡轮流量计、容积式流量计等的仪表系数时，流量是脉冲数的线性函数，两种计算方法的结果相同；而对孔板流量计，流量是压差的平方根的函数，这时两种计算方法的结果是不同的，此时应按式 (1-27) 进行计算。

在计算测量值时，应将所有修正量加入测量值。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），都会产生异常的测量值。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，不得包括在测量值的范围内。

不确定度依据其评定方法可分为“ $A$ ”，“ $B$ ”两类，它们与过去“随机误差”与“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，并用方差或标准差表征。

由于在流量测量中，通常用相对值表述测量结果，因此也以相对不确定度的方式来表述不确定度。以下相关公式和论述中的标准不确定度和扩展不确定度均可用相对值表示。

### 3 标准不确定度的 A 类评定

用对观测列进行统计分析的方法，来评定标准不确定度称为不确定度的 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：

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} \quad (1-29)$$

测量结果  $\bar{x}$  的 A 类标准不确定度  $u(\bar{x}_i)$  即为测量平均值的实验标准差  $s(\bar{x}_i)$ ，它与单次测



量结果  $x_{ik}$  的实验标准差的关系为

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (1-30)$$

在流量测量中, 单次测量不确定度的评定方法主要有贝塞尔公式法和极差法, 其中贝塞尔法为主要方法, 而在测量次数较少时也可使用极差法。

$$\text{贝塞尔法: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} = \sqrt{\frac{n \sum_{k=1}^n (x_{ik})^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_{ik}\right)^2}{n(n-1)}} \quad (1-31)$$

$s(x_i)$  与  $s(\bar{x}_i)$  的自由度均为  $\nu = n - 1$ 。

$$\text{极差法: } s(x_i) = \frac{R}{C} = u(x_i) \quad (1-32)$$

式中:  $R = x_{ik \max} - x_{ik \min}$ ; 系数  $C$  及自由度  $\nu$  如表 1-1 所示。

表 1-1 极差系数  $C$  及自由度  $\nu$

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9
$C$	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97
$\nu$	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.3	6.0	6.8

在重复性条件下所得的测量不确定度, 通常比用其他评定方法所得到的不确定度更为客观, 并具有统计学的严格性, 但要求有充分的重复次数。此外, 这一测量过程的重复观测值应互相独立。例如: 测量仪器的调零是测量程序的一部分, 重新调零应称为重复性的一部分。

格拉布斯测量异常值剔除法: 适用于一组测量值中只有一个粗差的情况, 且被剔除的测定值的置信水平为 5%。则若测量值符合式 (1-33), 测量值被剔除。

$$|x_k - \bar{x}| > sG \quad (1-33)$$

式中:  $s$  为单次测量实验标准差,  $G$  为统计学中的格拉布斯数, 其值见表 1-2。

表 1-2 实验次数  $n$  与格拉布斯数  $G$  的关系

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$G$	1.155	1.481	1.715	1.887	2.020	2.126	2.215	2.290	2.355	2.412

#### 4 标准不确定度的 B 类评定

用不同于对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度, 称为不确定度的 B 类评定。