



# 天津市地方计量技术规范

JJF(津)07—2018

---

## 外夹式超声流量计校准规范

Calibration Specification for Clamp-on Ultrasonic Flowmeters

2018-12-21 发布

2019-02-01 实施

---

天津市市场监督管理委员会 发布

# 外夹式超声流量计校准规范

Calibration Specification for Clamp-on

Ultrasonic Flowmeters

---



JJF(津)07-2018

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院

本规范委托天津市计量监督检测科学研究院负责解释

**本规范主要起草人：**

安海骄           （天津市计量监督检测科学研究院）

王锡钢           （天津市计量监督检测科学研究院）

马云峰           （天津市计量监督检测科学研究院）

**参加起草人：**

赵 轶           （天津市计量监督检测科学研究院）

甄 杨           （天津市计量监督检测科学研究院）

# 目 录

引言.....	( II )
1 范围.....	( 1 )
2 引用文件.....	( 1 )
3 术语和定义.....	( 1 )
3.1 术语.....	( 1 )
3.2 计量单位.....	( 1 )
4 概述.....	( 2 )
4.1 工作原理.....	( 2 )
4.2 分类和组成.....	( 2 )
4.3 用途.....	( 2 )
5 计量特性.....	( 2 )
6 校准条件.....	( 2 )
6.1 环境条件.....	( 3 )
6.2 主标准器及配套设备.....	( 3 )
7 校准项目和校准方法.....	( 3 )
7.1 校准项目.....	( 3 )
7.2 校准方法.....	( 4 )
8 校准结果的表达.....	( 9 )
9 复校时间间隔.....	( 9 )
附录 A 校准记录参考格式 .....	( 10 )
附录 B 校准证书(内页)参考格式.....	( 12 )
附录 C 不确定度评定实例 .....	( 13 )

# 引 言

外夹式超声流量计与接触式超声流量计在安装方式、测量点选择和测量不确定度评定等方面存在诸多差异，有必要针对此类流量计制定专门的计量技术规范，相比之下，校准是该类流量计量值溯源较为合适的方法。

本规范根据我国外夹式超声流量计的使用和溯源现状，参考 JJG 1030《超声流量计》，结合 CJ/T 3063《给排水用超声流量计（传播速度差法）》行业标准进行制定，主要技术指标也参照国家规程编写。

本规范所用术语，除在本规范中专门定义的外，均采用 JJF1001《通用计量术语及定义》和 JJF1004《流量计量名词术语及定义》。

根据 JJF1071—2010《国家计量校准规范编写规则》第 3.1、3.2 条，本规范将示值误差及其扩展不确定度和修正系数及其扩展不确定度列为计量性能并作为计量校准的主要工作。

本规范是首次制定。

## 外夹式超声流量计校准规范

### 1 范围

本校准规范适用于以时间差法为原理的外夹式超声流量计（以下简称流量计）的校准。

### 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 1030-2007 超声流量计

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1004-2004 流量计量名词术语及定义

CJ/T 3063-1997 给排水用超声流量计（传播速度差法）

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）适用于本规范。

### 3 术语和定义

#### 3.1 术语

##### 3.1.1 超声流量计 (ultrasonic flowmeter)

利用超声波在流体中的传播特性来测量流量的流量计。

##### 3.1.2 超声换能器 (ultrasonic transducer)

在电信号作用下可产生声波输出，并可将其转换为电信号的器件。

##### 3.1.3 外夹式超声流量计 (clamp-on ultrasonic flowmeter)

将换能器固定在流体管道外，声波传播的路径透过流体管道壁的流量计。

##### 3.1.4 修正系数 (correction factor)

流过外夹式超声流量计测量位置的流体实际流量与流量计示值之比。

##### 3.1.5 平均修正系数 (average correction factor)

在某一校准流量点多次测量所得修正系数的平均值。

#### 3.2 计量单位

- 3.2.1 体积单位：立方米，符号  $\text{m}^3$ ；或升，符号 L。
- 3.2.2 瞬时流量单位：立方米每小时，符号  $\text{m}^3/\text{h}$ ；或升每分钟，符号  $\text{L}/\text{min}$ 。
- 3.2.3 流速单位：米每秒，符号  $\text{m}/\text{s}$ 。
- 3.2.4 压力单位：帕[斯卡]，符号 Pa；或千帕，符号 kPa。
- 3.2.5 温度单位：摄氏度，符号  $^{\circ}\text{C}$ ；或热力学温度，符号 K。

## 4 概述

### 4.1 工作原理

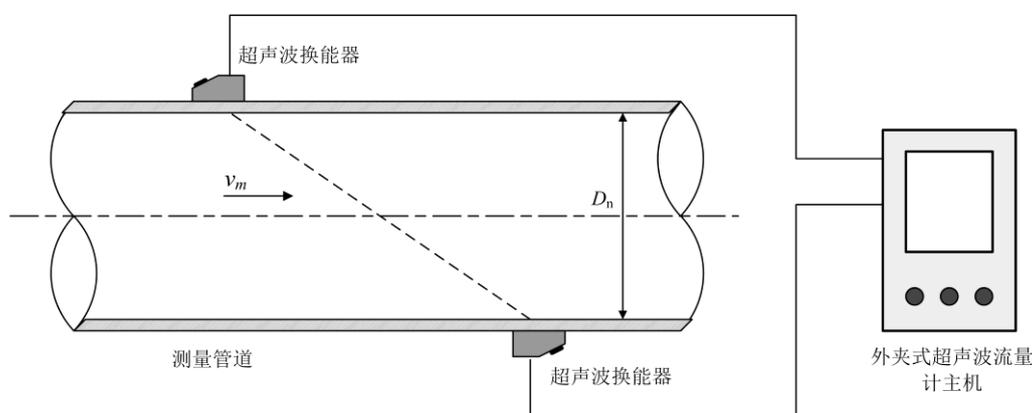


图 1 流量计测量示意图

外夹式超声流量计通过测量声波在流动介质中顺流和逆流的传播时间差测得流体流速，再根据管道截面积获得流量，流量计测量方式如图 1 所示。

### 4.2 分类和组成

外夹式超声流量计按声道数量可分为单声道和多声道流量计，主要由主机和至少一对换能器组成。单声道流量计通过配备不同规格的换能器，可以测量不同口径管道中的流体流量。多声道流量计采用两对以上换能器测量同一管道中不同截面的介质平均流速。

### 4.3 用途

由于其非接触测量方式，流量计广泛应用于管道流量的在线测量，涉及的领域包括石油、化工、冶金、给排水、环保、制药等行业。

## 5 计量特性

流量计的准确度等级一般包括 0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.0 级和 2.5 级。

## 6 校准条件

## 6.1 环境条件

### 6.1.1 大气环境条件一般应满足：

环境温度：(5~45)℃；

相对湿度：35%~95%；

大气压力：(86~106)kPa。

6.1.2 对于液体介质，在每个流量点的每次校准过程中，液体中应不夹杂气体，且温度变化应不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

6.1.3 对准确度等级不低于 1.0 级的气体流量计，每个流量点的每一次校准过程中，校准用气体的温度变化应不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，对准确度等级低于 1.0 级的气体流量计，每个流量点的每一次校准过程中，校准用气体的温度变化应不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

6.1.4 对于气体流量计，在每个流量点的校准过程中，压力波动应不超过 $\pm 0.5\%$ 。

## 6.2 主标准器及配套设备

主标准器及配套设备均应有有效的检定/校准证书。

### 6.2.1 主标准器

校准介质为气体，主标准器可选用活塞式气体流量标准装置、钟罩式气体流量标准装置、音速喷嘴法气体流量标准装置、标准表法气体流量标准装置和 M/t 法气体流量标准装置。校准介质为液体，主标准器可选用标准表法、质量法、容积法水流量标准装置或油流量标准装置。主标准器流量范围应与被校流量计的流量范围相适应，其扩展不确定度应优于被校流量计的准确度等级。

### 6.2.2 配套设备

配套设备见表 1。

表 1 配套设备

序号	设备名称	技术要求	用途
1	钢卷尺	优于 II 级（包括 II 级）	测量换能器安装距离
2	游标卡尺	分度值 $\leq 0.02\text{mm}$	测量试验管道外直径
3	$\pi$ 尺	分度值 $\leq 0.05\text{mm}$	测量试验管道外直径
4	测厚仪	分辨力：0.01mm	测量试验管道壁厚

## 7 校准项目和校准方法

## 7.1 校准项目

修正系数/示值误差的校准。

## 7.2 校准方法

### 7.2.1 一般检查

7.2.1.1 流量计主机外观应完好，按键操作正常。

7.2.1.2 每一对换能器应标有安装标识。

7.2.1.3 接插件牢固可靠，线缆完好，无破损、虚接。

### 7.2.2 试验管路的几何尺寸测量

测量几何尺寸前应将管壁上的污垢、铁锈等清理干净，露出管道材质。

#### 7.2.2.1 试验管路外径测量

用游标卡尺或 $\pi$ 尺在换能器拟安装位置附近的同一截面上等角分布测量 $n$ 次( $n \geq 6$ )外径，其平均值 $D$ 按式(1)计算。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (1)$$

#### 7.2.2.2 试验管路壁厚测量

换能器拟安装位置附近分散选择 $n$ 个测量点( $n \geq 6$ )，使用测厚仪测量管道壁厚，并按式(2)计算其平均值 $d$ 。

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (2)$$

### 7.2.3 换能器的安装

7.2.3.1 根据产品说明书的规定选择适合的换能器规格和安装方法。

7.2.3.2 将试验管道几何尺寸、介质、换能器规格等参数置入流量计主机，得出换能器安装距离 $L$ ，并标记安装位置。

7.2.3.3 在换能器表面均匀涂以耦合剂，根据介质流动方向和换能器上、下游标志安装换能器，使其发射面和接收面与管壁紧密接触。

7.2.3.4 查看流量计的信号状态指示参数，如信号强度、信号时间传输比等，保证这些参数处于说明书中给出的允许范围内并尽量接近最佳指标，若换能器安装后参数数值

不理想, 应微调换能器位置, 直至指示参数达到满意效果。

#### 7.2.4 校准点的选择及要求

7.2.4.1 流量计配备多组换能器时, 可根据客户要求针对至少一组换能器进行校准。

7.2.4.2 校准点的选择应兼顾管道口径和流量点, 且尽量接近实际工况条件。在校准过程中, 每个流量点的每次实际校准流量与设定流量的偏差应不超过设定流量的 $\pm 5\%$ 。

7.2.4.3 当用户有要求时, 按照其要求的管道口径和流速选择校准流量点。若标准装置不能满足用户要求, 可与用户协商确定校准流量点。

7.2.4.4 当用户无要求时, 可在流量计测量范围内选择任意口径的管道进行校准, 对于液体流量计选择 0.3m/s、1m/s、2m/s 和 5m/s 对应的流量点作为校准点; 对于气体流量计选择 3m/s、6m/s、12m/s 和 30m/s 对应的流量点作为校准点。

#### 7.2.5 校准次数

流量计每个校准点至少校准 6 次。

#### 7.2.6 校准操作

7.2.6.1 将流量调到待校准的流量点, 达到稳定后, 记录标准器和被检流量计的初始示值, 同时启动标准器 (或标准器的记录功能) 和被校流量计 (或被校流量计的输出功能)。

7.2.6.2 按标准装置操作要求运行一段时间后, 同时停止标准器 (或标准器的记录功能) 和被校流量计 (或被校流量计的输出功能)。

7.2.6.3 记录标准器和被校流量计的最终示值。

7.2.6.4 分别计算流量计和标准器记录的累积流量值或瞬时流量值。

#### 7.2.7 数据处理

##### 7.2.7.1 液体流量计

流过流量计的实际体积流量按式 (3) 计算:

$$(Q_{\text{ref}})_{ij} = (Q_s)_{ij} [1 - \beta(\theta_s - \theta_m)] \cdot [1 + \kappa(p_s - p_m)]$$

$$\text{或} \quad (q_{\text{ref}})_{ij} = (q_s)_{ij} [1 - \beta(\theta_s - \theta_m)] \cdot [1 + \kappa(p_s - p_m)] \quad (3)$$

式中:

$(Q_s)_{ij}$  ( $(q_s)_{ij}$ ) —— 第  $i$  个校准点第  $j$  次试验时标准器测得的液体实际累积流量 (瞬时

流量),  $\text{m}^3(\text{m}^3/\text{h})$ ;

$\beta$ ——校准用液体在校准状态下的体膨胀系数,  $(^\circ\text{C})^{-1}$ ;

$\theta_s, \theta_m$ ——分别为第  $i$  个校准点第  $j$  次试验时标准器和流量计处的液体温度,  $^\circ\text{C}$ ;

$\kappa$ ——校准用液体在校准状态下的压缩系数,  $\text{Pa}^{-1}$ ;

$p_s, p_m$ ——分别为第  $i$  个校准点第  $j$  次试验时标准器和流量计处的液体压力, Pa。

当  $\theta_s$  与  $\theta_m$  之差小于  $5^\circ\text{C}$ , 且  $p_s$  与  $p_m$  之差小于  $0.1\text{MPa}$  时, 式 (3) 可简化为式 (4) 的形式。

$$(Q_{\text{ref}})_{ij} = (Q_s)_{ij} \quad \text{或} \quad (q_{\text{ref}})_{ij} = (q_s)_{ij} \quad (4)$$

使用质量法液体流量标准装置校准时, 需测出液体的密度  $\rho_l$ , 同时考虑到密度为  $\rho_a$  的空气浮力影响, 按式 (5) 将电子秤显示质量  $M_j$  换算到实际体积  $(Q_s)_{ij}$ :

$$(Q_s)_{ij} = \frac{M_j}{(\rho_l - \rho_a)} \quad (5)$$

### 7.2.7.2 气体流量计

流过流量计的实际体积流量按式 (6) 计算:

$$(Q_{\text{ref}})_{ij} = (Q_s)_{ij} \frac{T_m}{T_s} \cdot \frac{p_s}{p_m}$$

或

$$(q_{\text{ref}})_{ij} = (q_s)_{ij} \frac{T_m}{T_s} \cdot \frac{p_s}{p_m} \quad (6)$$

式中:  $T_s, T_m$ ——分别为第  $i$  个校准点第  $j$  次试验时标准器和流量计处的气体热力学温度, K;

$p_s, p_m$ ——分别为第  $i$  个校准点第  $j$  次试验时标准器和流量计处的气体绝对压力, Pa。

### 7.2.8 修正系数及重复性的计算

#### 7.2.8.1 修正系数的计算

在第  $i$  个流量点, 第  $j$  次校准中, 流量计的修正系数按式 (7) 计算。

$$k_{ij} = \frac{(Q_{\text{ref}})_{ij}}{Q_{ij}} \quad \text{或} \quad k_{ij} = \frac{(q_{\text{ref}})_{ij}}{q_{ij}} \quad (7)$$

式中： $k_{ij}$ —第  $i$  个流量点第  $j$  次测量得到的修正系数；

$Q_{ij}$  ( $q_{ij}$ )—第  $i$  个流量点第  $j$  次测量被校准流量计的示值， $\text{m}^3$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ )。

在第  $i$  个流量点，多次校准所测得的该点修正系数的平均值按式 (8) 计算：

$$\bar{k}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (8)$$

式中： $\bar{k}_i$ —第  $i$  个流量点修正系数的平均值；

$n$ —重复测量次数。

#### 7.2.8.2 修正系数重复性的计算

在第  $i$  个流量点，修正系数的重复性按式 (9) 计算：

$$E_{ri} = \frac{1}{k_i} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (k_{ij} - \bar{k}_i)^2} \times 100\% \quad (9)$$

式中： $E_{ri}$ —第  $i$  个流量点修正系数的重复性，%；

#### 7.2.9 示值误差及重复性的计算

##### 7.2.9.1 示值误差的计算

在第  $i$  个流量点，第  $j$  次校准中，流量计的相对示值误差按式 (10) 计算。

$$E_{ij} = \frac{Q_{ij} - (Q_{\text{ref}})_{ij}}{(Q_{\text{ref}})_{ij}} \times 100\% \quad \text{或} \quad E_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_{\text{ref}})_{ij}}{(q_{\text{ref}})_{ij}} \times 100\% \quad (10)$$

在第  $i$  个流量点，多次校准所测得的该点示值误差的平均值按式 (11) 计算：

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (11)$$

式中： $E_i$ —第  $i$  个流量点示值误差的平均值；

$n$ —重复测量次数。

##### 7.2.9.2 示值误差的重复性的计算

在第  $i$  个流量点，示值误差  $E_i$  的重复性按式 (12) 计算：

$$E_{ri} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_{ij} - E_i)^2} \quad (12)$$

式中： $E_{ri}$ —第  $i$  个流量点修正系数的重复性，%；

## 7.2.10 合成不确定度

### 7.2.10.1 被校准流量计引入的相对标准不确定度

评定被校准流量计引入的相对标准不确定度需考虑管道截面积引入的标准不确定度  $u_r(S)$  和重复测量引入的 A 类不确定度  $u_A(q)$ ，如式 (13) 所示。

$$u_r(q) = \sqrt{u_A^2(q) + u_r^2(S)} \quad (13)$$

其中  $u_A(q)$  按照式 (14) 计算：

$$u_A(q) = \frac{E_{ri}}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

### 7.2.10.2 流量计修正系数（示值误差）的相对合成标准不确定度

#### a) 液体流量计

当忽略介质温度、压力变化影响时，流量计修正系数的相对合成标准不确定度按式 (15) 计算：

$$u_r(k) = \sqrt{u_r^2(q_s) + u_r^2(q)} \quad \text{或} \quad u_r(k) = \sqrt{u_r^2(Q_s) + u_r^2(Q)} \quad (15)$$

式中， $u_r(k)$ ——流量计修正系数的相对合成标准不确定度；

$u_r(q_s) / u_r(Q_s)$ ——标准器引入的相对标准不确定度分量；

$u_r(q) / u_r(Q)$ ——被校准流量计引入的相对标准不确定度分量

流量计示值误差的相对合成标准不确定度按式 (16) 计算：

$$u_r(E) = \sqrt{u_r^2(q_s) + u_r^2(q)} \quad \text{或} \quad u_r(E) = \sqrt{u_r^2(Q_s) + u_r^2(Q)} \quad (16)$$

式中， $u_r(E)$ ——流量计示值误差的相对合成标准不确定度。

#### b) 气体流量计

流量计修正系数的相对合成标准不确定度按式 (17) 计算：

$$u_r(k) = \sqrt{u_r^2(q_s) + u_r^2(q) + u_r^2(p_s) + u_r^2(p_m) + u_r^2(T_s) + u_r^2(T_m)}$$

$$\text{或} \quad u_r(k) = \sqrt{u_r^2(Q_s) + u_r^2(Q) + u_r^2(p_s) + u_r^2(p_m) + u_r^2(T_s) + u_r^2(T_m)} \quad (17)$$

式中： $u_r(k)$ ——流量计修正系数的相对合成标准不确定度；

$u_r(T_s)$ ——标准器处温度测量引入的相对标准不确定度分量；

$u_r(p_s)$ ——标准器处压力测量引入的相对标准不确定度分量；

$u_r(T_m)$ ——被校准流量计处温度测量引入的相对标准不确定度分量；

$u_r(p_m)$ ——被校准流量计处压力测量引入的相对标准不确定度分量。

流量计示值误差的相对合成标准不确定度按式 (18) 计算：

$$u_r(E) = \sqrt{u_r^2(q_s) + u_r^2(q) + u_r^2(p_s) + u_r^2(p_m) + u_r^2(T_s) + u_r^2(T_m)}$$

$$\text{或 } u_r(E) = \sqrt{u_r^2(Q_s) + u_r^2(Q) + u_r^2(p_s) + u_r^2(p_m) + u_r^2(T_s) + u_r^2(T_m)} \quad (18)$$

式中： $u_r(E)$ ——流量计示值误差的的相对合成标准不确定度。

#### 7.2.11 扩展不确定度

流量计修正系数或示值误差的相对扩展不确定度按式 (19) 计算：

$$U_r = 2 \times u_r(k) \quad \text{或} \quad U_r = 2 \times u_r(E) \quad (19)$$

### 8 校准结果的表达

原始记录和校准证书格式见附录 A 和 B。

### 9 复校时间间隔

流量计的复校时间间隔建议一般为 1 年。

## 附录 A

## 校准记录参考格式

送校单位\_\_\_\_\_ 器具名称\_\_\_\_\_

制造单位\_\_\_\_\_ 型号规格\_\_\_\_\_ 器具编号\_\_\_\_\_

环境温度\_\_\_\_\_℃ 相对湿度\_\_\_\_\_% 大气压力\_\_\_\_\_kPa

校准地点\_\_\_\_\_

校准日期\_\_\_\_\_ 证书编号\_\_\_\_\_

校准员\_\_\_\_\_ 核验员\_\_\_\_\_

校准依据\_\_\_\_\_

校准所用的主要标准器:

名称\_\_\_\_\_ 型号\_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_ 测量范围\_\_\_\_\_

准确度等级□/最大允许误差□/扩展不确定度□: \_\_\_\_\_

证书编号\_\_\_\_\_ 有效期限\_\_\_\_\_

## 试验管道几何尺寸测量记录

测量次数 测量值 (mm)	1	2	3	4	5	6	平均值	$U_A$
外径 $D$								
壁厚 $d$								



## 附录 B

## 校准证书（内页）参考格式

B.1 校准依据：

B.2 校准所用主要标准器

名称	不确定度或准确度	有效期至
----	----------	------

B.3 环境和介质条件

环境温度：	大气压力：	相对湿度：
-------	-------	-------

校准用介质：	介质温度：	介质压力：
--------	-------	-------

B.4 校准用管道参数：

管道标称内径：	管道外径：	管道壁厚：
---------	-------	-------

B.5 校准结果

修正系数或示值误差校准结果

序号	校准流量点 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	平均修正系数 $k_i$ 或示值误差 (%)	相对扩展不确定度 $U_i$
1			
2			
3			

B.6 复校时间间隔建议： 年

## 附录 C

## 不确定度评定实例

## C.1 液体流量计

## C.1.1 概述

## C.1.1.1 标准器及配套设备

标准表法水流量标准装置： $U_{\text{rel}}=0.16\%$  ( $k=2$ )

压力变送器：0.075 级

一体化温度变送器： $U=0.1^\circ\text{C}$  ( $k=2$ )

$\pi$ 尺：分度值 0.02mm

超声波测厚仪：分辨力 0.01mm

钢卷尺：II 级

## C.1.1.2 测量数据

试验管道几何尺寸测量记录见表 C.1。

表 C.1 试验管道几何尺寸测量记录

测量次数 测量值 (mm)	1	2	3	4	5	6	平均值	$U_A$
外径 $D$	207.54	208.18	207.86	207.86	207.54	207.22	207.7	0.138
壁厚 $d$	4.05	4.07	4.09	4.07	4.06	4.07	4.07	0.006

流量计校准数据见表 C.2。

表 C.2 流量校准记录

流量点 $\text{m}^3/\text{h}$	标准器 处压力 $p_s/\text{kPa}$	标准器处 温度 $\theta_s/^\circ\text{C}$	标准器修 正流量 $q_{\text{ref}}(\text{m}^3/\text{h})$	被校表 压力 $p_m/\text{kPa}$	被校表 温度 $\theta_m/^\circ\text{C}$	被校表 流量 $q(\text{m}^3/\text{h})$	示值误 差 $E_{ij}/\%$	平均示值 误差 $E_i/\%$	重复 性/ $\%$
19.86	160.5	15.8	19.86	160.1	15.8	19.95	+0.45	+0.40	0.25
	160.5	15.8	19.86	160.1	15.8	19.93	+0.35		
	160.5	15.8	19.86	160.1	15.8	19.88	+0.10		
	160.5	15.8	19.86	160.1	15.8	19.93	+0.35		
	160.5	15.8	19.86	160.1	15.8	20.03	+0.86		
	160.5	15.8	19.86	160.1	15.8	19.92	+0.30		
301.20	155.8	15.8	301.20	155.2	15.8	302.40	+0.40	+0.34	0.16
	155.8	15.8	301.20	155.2	15.8	302.48	+0.43		
	155.8	15.8	301.20	155.2	15.8	301.80	+0.20		

	155.8	15.8	301.20	155.2	15.8	302.76	+0.52		
	155.8	15.8	301.20	155.2	15.8	302.38	+0.39		
	155.8	15.8	301.20	155.2	15.8	301.46	+0.09		
600.53	148.2	15.8	600.53	148.0	15.8	601.94	+0.23	+0.34	0.15
	148.2	15.8	600.53	149.0	15.8	601.69	+0.19		
	148.2	15.8	600.53	150.0	15.8	603.44	+0.48		
	148.2	15.8	600.53	151.0	15.8	602.94	+0.40		
	148.2	15.8	600.53	152.0	15.8	603.70	+0.53		
	148.2	15.8	600.53	153.0	15.8	601.61	+0.18		

### C.1.2 数学模型

由于 $\theta_s$ 与 $\theta_m$ 之差小于 $5^\circ\text{C}$ ，且 $p_s$ 与 $p_m$ 之差小于 $0.1\text{MPa}$ ，被校准流量计的示值误差可简化为(C.1)的形式：

$$E = \frac{q - q_s}{q_s} \times 100\% \quad (\text{C.1})$$

式中：

$E$ —被校准流量计的示值误差，%；

$q_s$ —标准器测得的瞬时体积流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ；

$q$ —被校准流量计的示值， $\text{m}^3/\text{h}$ ；

考虑 $q_s \approx q$ ，由(C.1)得到修正系数的不确定度传播率：

$$u_r^2(E) = c_r^2(q_s)u_r^2(q_s) + c_r^2(q)u_r^2(q) \quad (\text{C.2})$$

式中，相对灵敏系数 $c_r(q_s) = -1$ ， $c_r(q) = 1$ 。

### C.1.3 标准不确定度分量

由式(C.2)可见，流量计修正系数的不确定度来源主要有：

- 标准器引入的不确定度分量 $u_r(q_s)$ ；
- 被校准流量计引入的不确定度分量 $u_r(q)$ ；

### C.1.4 标准不确定度的评定

以 $19.86\text{m}^3/\text{h}$ 流量点为例，评定各不确定度分量。

- 标准器引入的不确定度分量 $u_r(q_s)$ ；

标准表法水流量标准装置的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=0.16\%$ ，包含因子 $k=2$ ，其相对标准不确定度为

$$u_r(q_s) = \frac{0.16\%}{2} = 0.08\%$$

b) 被校准流量计引入的不确定度分量  $u_r(q)$

由于试验管道截面积的测量直接影响被校准流量计的流量测量结果, 需考虑几何尺寸测量引入的标准不确定度。

试验管道截面积  $S$  由 (C.4) 得到

$$S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_n^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D-2d)^2 \quad (\text{C.4})$$

截面积  $S$  的标准不确定度为:

$$u(S) = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D_n \cdot u(D_n) \quad \text{或} \quad u_r(S) = 2 \cdot \frac{u(D_n)}{D_n} \quad (\text{C.5})$$

试验管道内径  $D_n$  的不确定度由外径  $D$  和壁厚  $d$  的不确定度合成, 可表示为:

$$u(D_n) = \sqrt{u^2(D) + u^2(d)} \quad (\text{C.6})$$

外径  $D$  的不确定度包括重复测量引入的 A 类不确定度和量具引入的 B 类不确定度, 如式 (C.7) 所示。

$$u(D) = \sqrt{u_A^2(D) + u_B^2(D)} \quad (\text{C.7})$$

分度值为 0.02mm 的  $\pi$  尺测量  $50\text{mm} \leq D < 500\text{mm}$  范围, 直径最大允许误差为  $\pm 0.05\text{mm}$ , 因此, 外径  $D$  的 B 类不确定度为 0.029mm, 进而得到  $u(D) = 0.14\text{mm}$ 。根据超声波测厚仪的校准证书, 引入的 B 类不确定度为 0.03mm, 得到  $u(d) = 0.031\text{mm}$ 。进一步得到  $u(D_n) = 0.143\text{mm}$ ,  $u_r(S) = 0.15\%$ 。

除了几何尺寸测量引入的不确定度分量, 被校准流量计引入的不确定度  $u_r(q)$  还包括重复测量引入的 A 类不确定度, 按照式 (C.8) 计算。

$$u_A(q) = \frac{E_r}{\sqrt{n}} = 0.103\% \quad (\text{C.8})$$

式中:

$E_r$ —多次测量的重复性误差, %;

$n$ —重复测量次数;

由式 (C.9) 得到被校准流量计引入的不确定度。

$$u_r(q) = \sqrt{u_A^2(q) + u_r^2(S)} = 0.182\% \quad (\text{C.9})$$

### C.1.5 合成标准不确定度计算

将各标准不确定度分量代入式 (C.2)，得到  $E$  的合成标准不确定度

$$u_r(E) = \sqrt{0.08^2 + 0.182^2} = 0.183\%$$

### C.1.6 扩展不确定度计算

取包含因子  $k=2$ ，扩展不确定度为  $U_r = 2 \times 0.183\% = 0.37\%$ 。

### C.1.7 校准结果 (表 C.3)

表 C.3 校准结果

序号	校准流量点 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	示值误差 $E_i$	扩展不确定度
1	19.86	+0.40	$U_r=0.37\%$ ( $k=2$ )
2	301.20	+0.34	$U_r=0.33\%$ ( $k=2$ )
3	600.53	+0.34	$U_r=0.33\%$ ( $k=2$ )

## C.2 气体流量计

### C.2.1 概述

#### C.2.1.1 标准器及配套设备

临界流文丘里喷嘴法气体流量标准装置： $U_{\text{rel}}=0.3\%$  ( $k=2$ )

绝压变送器：0.075 级

一体化温度变送器： $U=0.1^\circ\text{C}$  ( $k=2$ )

游标卡尺：分度值：0.02mm

超声波测厚仪：分辨力 0.01mm

#### C.2.1.2 测量数据

试验管道几何尺寸测量记录见表 C.4。

表 C.4 试验管道几何尺寸测量记录

测量次数 测量值 (mm)	1	2	3	4	5	6	平均值	$U_A$
外径 $D$	133.22	133.30	133.18	133.20	133.36	133.12	133.23	0.036
壁厚 $d$	4.02	4.16	4.05	4.09	4.01	4.07	4.07	0.023

流量计校准数据见表 C.5。

表 C.5 流量校准记录

流量点 $m^3/h$	标准器 处压力 $p_s/kPa$	标准器处 温度 $t_s/$ $^{\circ}C$	标准器修 正流量 $q_{ref}(m^3/h)$	被校表 压力 $p_m/kPa$	被校表 温度 $t_m$ $^{\circ}C$	被校表 流量 $q(m^3/h)$	修正系 数 $k_{ij}$	平均修 正系数 $k_i$	重复 性/%
202.42	100.9	27.8	202.42	100.9	27.6	202.16	1.0013	1.0014	0.05
	100.9	27.8	202.42	100.9	27.6	202.18	1.0012		
	100.9	27.8	202.42	100.9	27.6	202.01	1.0020		
	100.9	27.8	202.42	100.9	27.6	202.22	1.0010		
	100.9	27.8	202.42	100.9	27.6	202.03	1.0019		
	100.9	27.8	202.42	100.9	27.6	202.23	1.0009		
606.30	100.5	27.8	606.30	100.5	27.5	606.10	1.0003	1.0001	0.03
	100.5	27.8	606.30	100.5	27.5	606.48	0.9997		
	100.5	27.8	606.30	100.5	27.5	606.45	0.9998		
	100.5	27.8	606.30	100.5	27.5	606.09	1.0003		
	100.5	27.8	606.30	100.5	27.5	606.22	1.0001		
	100.5	27.8	606.30	100.5	27.5	606.01	1.0005		
1210.43	99.3	27.8	1210.43	99.2	27.7	1202.25	1.0068	1.0067	0.03
	99.3	27.8	1210.43	99.2	27.7	1202.32	1.0067		
	99.3	27.8	1210.43	99.2	27.7	1202.03	1.0070		
	99.3	27.8	1210.43	99.2	27.7	1202.98	1.0062		
	99.3	27.8	1210.43	99.2	27.7	1202.61	1.0065		
	99.3	27.8	1210.43	99.2	27.7	1202.26	1.0068		

### C.2.2 数学模型

被校准流量计的修正系数如式 (C.10) 所示:

$$k = \frac{q_{ref}}{q} = \frac{q_s \cdot T_m \cdot p_s}{q \cdot T_s \cdot p_m} \quad (C.10)$$

式中:

$k$ —被校准流量计的修正系数;

$q_{ref}$ —流过被校准流量计的实际瞬时体积流量,  $m^3/h$ ;

$q_s$ —标准器测得的瞬时体积流量,  $m^3/h$ ;

$q$ —被校准流量计的示值,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$T_s, T_m$ —标准器和被校准流量计处的气体热力学温度, K;

$p_s, p_m$ —标准器和流量计处的气体绝对压力, Pa。

由 (C.10) 得到修正系数的不确定度传播率:

$$u_r^2(k) = c_r^2(q_s)u_r^2(q_s) + c_r^2(q)u_r^2(q) + c_r^2(p_s)u_r^2(p_s) + c_r^2(p_m)u_r^2(p_m) + c_r^2(T_s)u_r^2(T_s) + c_r^2(T_m)u_r^2(T_m) \quad (\text{C.11})$$

式中, 相对灵敏系数  $c_r(q_s) = c_r(T_m) = c_r(p_s) = 1$ ,  $c_r(q) = c_r(T_s) = c_r(p_m) = -1$ 。

### C.2.3 标准不确定度分量

由式 (C.11) 可见, 流量计修正系数的不确定度来源主要有:

- 标准器引入的不确定度分量  $u_r(q_s)$ ;
- 被校准流量计引入的不确定度分量  $u_r(q)$ ;
- 标准器处温度测量引入的不确定度分量  $u_r(T_s)$ ;
- 标准器处压力测量引入的不确定度分量  $u_r(p_s)$ ;
- 被校准流量计处温度测量引入的不确定度分量  $u_r(T_m)$ ;
- 被校准流量计处压力测量引入的不确定度分量  $u_r(p_m)$ 。

### C.2.4 标准不确定度的评定

以  $202.42 \text{ m}^3/\text{h}$  流量点为例, 评定各不确定度分量。

- 标准器引入的不确定度分量  $u_r(q_s)$ ;

临界流文丘里喷嘴法气体流量标准装置的扩展不确定度为  $U_{\text{rel}}=0.30\%$ , 包含因子  $k=2$ , 其相对标准不确定度为

$$u_r(q_s) = \frac{0.30\%}{2} = 0.15\%$$

- 被校准流量计引入的不确定度分量  $u_r(q)$

由于试验管道截面积的测量直接影响被校准流量计的流量测量结果, 需考虑几何尺寸测量引入的标准不确定度。

试验管道截面积  $S$  由 (C.12) 得到

$$S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_n^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D-2d)^2 \quad (\text{C.12})$$

截面积  $S$  的标准不确定度为:

$$u(S) = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D_n \cdot u(D_n) \quad \text{或} \quad u_r(S) = 2 \cdot \frac{u(D_n)}{D_n} \quad (\text{C. 13})$$

试验管道内径  $D_n$  的不确定度由外径  $D$  和壁厚  $d$  的不确定度合成, 可表示为:

$$u(D_n) = \sqrt{u^2(D) + u^2(d)} \quad (\text{C. 14})$$

外径  $D$  的不确定度包括重复测量引入的 A 类不确定度和量具引入的 B 类不确定度, 如式 (C. 15) 所示。

$$u(D) = \sqrt{u_A^2(D) + u_B^2(D)} \quad (\text{C. 15})$$

测量范围为 300mm, 分度值为 0.02mm 游标卡尺的最大允许误差为  $\pm 0.04\text{mm}$ , 因此, 外径  $D$  的 B 类不确定度为 0.023mm, 进而得到  $u(D) = 0.043\text{mm}$ 。根据超声波测厚仪的校准证书, 引入的 B 类不确定度为 0.03mm, 得到  $u(d) = 0.037\text{mm}$ 。进一步得到  $u(D_n) = 0.056\text{mm}$ ,  $u_r(S) = 0.09\%$ 。

除了几何尺寸测量引入的不确定度分量, 被校准流量计引入的不确定度  $u_r(q)$  还包括重复测量引入的 A 类不确定度, 按照式 (C. 16) 计算。

$$u_A(q) = \frac{E_r}{\sqrt{n}} = 0.021\% \quad (\text{C. 16})$$

式中:  $E_r$ —多次测量的重复性误差, %;

$n$ —重复测量次数;

由式 (C. 17) 得到被校准流量计引入的不确定度。

$$u_r(q) = \sqrt{u_A^2(q) + u_r^2(S)} = 0.092\% \quad (\text{C. 17})$$

c) 标准器处温度测量引入的不确定度分量  $u_r(T_s)$

测量标准器处温度的一体化温度变送器的扩展不确定度为  $U = 0.1^\circ\text{C}$  ( $k=2$ ), 其引入的标准不确定度为

$$u_r(T_s) = \frac{0.1}{300.95 \times 2} = 0.017\%$$

d) 标准器处压力测量引入的不确定度分量  $u_r(p_s)$

用于测量标准器处绝对压力的绝压变送器为 0.075 级, 其满量程误差限为  $\pm 0.075\%$ ,

测量上限为 106kPa，按照均匀分布考虑，则

$$u_r(p_s) = \frac{0.075\% \times 106}{\sqrt{3} \times 100.9} = 0.046\%$$

e) 被校准流量计处温度测量引入的不确定度分量  $u_r(T_m)$ ;

测量被校准流量计处温度的一体化温度变送器的扩展不确定度为  $U=0.1^\circ\text{C}$  ( $k=2$ )，其引入的标准不确定度为

$$u_r(T_m) = \frac{0.1}{300.75 \times 2} = 0.017\%$$

f) 被校准流量计处压力测量引入的不确定度分量  $u_r(p_m)$

用于测量被校准流量计处绝对压力的绝压变送器为 0.075 级，其满量程误差限为  $\pm 0.075\%$ ，测量上限为 106kPa，按照均匀分布考虑，则

$$u_r(p_m) = \frac{0.075\% \times 106}{\sqrt{3} \times 100.9} = 0.046\%$$

#### C.2.5 合成标准不确定度计算

将各标准不确定度分量代入式 (C.11)，得到  $k$  的合成标准不确定度

$$u_r(k) = \sqrt{0.15^2 + 0.092^2 + 2 \times 0.017^2 + 2 \times 0.046^2} = 0.189\%$$

#### C.2.6 扩展不确定度计算

取包含因子  $k=2$ ，扩展不确定度为  $U_r = 2 \times 0.189\% = 0.38\%$ 。

#### C.2.7 校准结果 (表 C.6)

表 C.6 校准结果

序号	校准流量点 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	平均修正系数 $k_i$	扩展不确定度
1	202.42	1.0014	$U_r=0.38\%$ ( $k=2$ )
2	606.30	1.0001	$U_r=0.38\%$ ( $k=2$ )
3	1210.43	1.0067	$U_r=0.38\%$ ( $k=2$ )