

JJF

中华人民共和国工业和信息化部建材计量技术规范

JJF（建材）250—202x

陶瓷窑炉用天然气流量计在 线校准规范

Online Calibration Specification of Natural Gas Flowmeters for

Ceramic Kiln

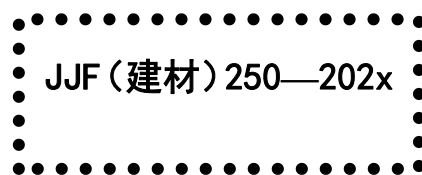
（报批稿）

××××-××-×× 发布

××××-××-×× 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

陶瓷窑炉用天然气流量计在线 校准规范



Online Calibration Specification of Natural Gas Flowmeters
for Ceramic Kiln

归口单位：中国建筑材料联合会

主要起草单位：广州计量检测技术研究院

参加起草单位：广东省清远市质量计量监督检测所

本规范委托全国建材工业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

黄阔（广州计量检测技术研究院）

万勇（广州计量检测技术研究院）

马青亮（广州计量检测技术研究院）

参加起草人：

刘纯辉（广东省清远市质量计量监督检测所）

目 录

引 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 概述.....	1
3.1 工作原理.....	1
3.2 结构.....	1
4 计量特性.....	2
4.1 示值误差.....	2
4.2 重复性.....	2
5 校准条件.....	2
5.1 环境条件.....	2
5.2 计量标准器具.....	3
6 校准项目和校准方法.....	4
6.1 校准项目.....	4
6.2 校准方法.....	4
7 校准结果表达.....	7
8 复校时间间隔.....	8
附录 A 校准数据原始记录.....	9
附录 B 校准证书内页格式.....	10
附录 C 采用标准表法（串联移动式在线校准标准装置）校准结果不确定度评定示例.....	11
附录 D 采用标准表法（外夹式超声流量计）校准结果不确定度评定示例.....	14

引 言

本规范以 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》为基础性规范进行编写。

本规范参考了 JJG 643-2024《标准表法流量标准装置检定规程》、JJG 1030-2007《超声流量计检定规程》、JJG 1037-2008《涡轮流量计检定规程》、JJF 2216-2025《电磁流量计在线校准规范》对测量标准器及配套计量器具技术指标、校准条件、校准方法等内容。

本规范为首次发布。

陶瓷窑炉用天然气流量计在线校准规范

1 范围

本规范适用于陶瓷窑炉用天然气流量计的在线校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 18604 用气体超声流量计测量天然气流量

GB/T 21391 用气体涡轮流量计测量天然气流量

GB/T 21446 用标准孔板流量计测量天然气流量

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(包括所有的修改单)适用于本规范。

3 概述

3.1 工作原理

陶瓷窑炉用天然气流量计主要用于测量天然气的瞬时流量和累积流量。天然气流量计通过测量流经管道的天然气流速、压差或频率等物理参数，结合管道截面积和气体状态方程来推算体积流量或质量流量。常见类型有符合GB/T 21391要求的涡轮流量计，依靠气体推动叶轮旋转，转速与流速成正比；符合GB/T 21446要求的孔板流量计，利用节流元件前后产生的压力差与流量的平方关系进行计量；符合GB/T 18604要求的超声波流量计，通过发射声波并检测顺流与逆流传播的时间差来计算流速。所有测量值均需换算成体积流量，从而确保计量的准确性与可比性。

3.2 结构

陶瓷窑炉用天然气流量计主要由传感器/检测件，变送器/信号转换器，流量积算仪/显示仪表等核心部件组成。常见类型中，陶瓷窑炉用天然气流量计的结构如图1所示。

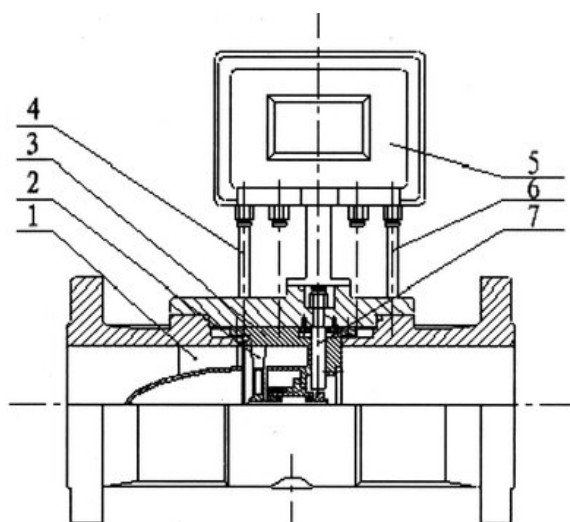


图1 天然气流量计结构示意图

1-前导流 2-叶轮 3-支架 4-压力传感器
5-智能积算仪 6-温度传感器 7-脉冲信号传感器

4 计量特性

4.1 示值误差

在线校准的陶瓷窑炉用天然气流量计示值误差通常用相对误差表示，最大允许误差见表1。

表 1 天然气流量计的最大允许误差

流量	低区	高区
	$q_{\min} \leq q < q_t$	$q_t \leq q < q_{\max}$
最大允许误差	$\pm 3.0\%$	$\pm 1.5\%$
注： 1 $q_{\min}$ 、 $q_{\max}$ 分别对应天然气流量计的最小流量、最大流量，单位为 m^3/h ，具体数值见铭牌或说明书； 2 q_t 为分界流量，对应为 $0.2q_{\max}$ ，单位为 m^3/h 。		

4.2 重复性

陶瓷窑炉用天然气流量计的重复性应不超过其最大允许误差绝对值的1/3。

注：以上所有指标不用于合格性判别，仅供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 环境条件应满足：

环境温度：（0～45）℃；

相对湿度：（35～95）%；

大气压力：（86～106）kPa。

5.1.2 在防爆区域开展在线校准工作时，所有设备设施及工具应符合相关安全防爆要求。

5.1.3 电源满足现场工况要求。

5.1.4 场地满足安全操作要求。

5.1.5 在工作压力下在线装置各部件连接处应无泄漏。

5.1.6 外界磁场对在线装置和被校流量计的影响可忽略。

5.1.7 振动和噪声对在线装置和被校流量计的影响可忽略。

5.2 计量标准器具

5.2.1 校准标准装置形式与结构

5.2.1.1 形式

陶瓷窑炉用天然气流量计量校准标准装置有串联移动式和外夹式两种形式，将溯源过的计量标准与陶瓷窑炉用天然气流量计量系统进行串联移动式或外夹式连接，使天然气在相同时间间隔内连续通过计量标准和被校天然气流量计，比较二者输出的流量值，从而确定被校天然气流量计的计量性能。应优先采用串联移动式在线校准标准装置。

5.2.1.2 结构

串联移动式在线校准标准装置主要由标准流量计、温度、压力变送器、试验管路、阀门、信号处理与控制系统等组成。

外夹式超声流量计主要由流量计表体、超声换能器及其安装部件、信号处理单元和（或）流量计算机组成。

5.2.2 串联移动式在线校准标准装置

5.2.2.1 标准流量计

标准流量计的准确度等级不低于0.5级，且应具有有效的检定/校准证书。

5.2.2.2 温度、压力变送器

温度、压力测量不确定度所引起的流量测量不确定度分别应不超过标准装置扩展不确定度的1/5。否则，标准装置合成标准不确定度应考虑温度、压力测量不确定度。

5.2.3 外夹式超声流量计计量标准

5.2.3.1 标准流量计

外夹式超声流量计的准确度等级不低于1.0级，且应具有有效的检定/校准证书。

5.2.3.2 配套计量器具

配套计量器具应具有有效的检定/校准证书。游标卡尺、秒表、测厚仪最大允许误差分别为 $\pm 0.02\text{mm}$ 、 $\pm 0.5\text{s/d}$ 、 $\pm 0.1\text{mm}$ ，钢卷尺准确度等级应不低于 1.0 级。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

流量示值误差和重复性。

6.2 校准方法

6.2.1 标准表法（串联移动式在线校准标准装置）

6.2.1.1 适用范围

串联移动式在线校准标准装置（以下简称移动式装置）适用于口径为 DN(10~100) mm 的天然气流量计在线校准。

6.2.1.2 校准前准备

按下列步骤进行：

- a) 将移动式装置移至校准现场，确认其外观正常、连接稳固、电源断开、阀门处于关闭状态。
- b) 将移动式装置与被校天然气流量计旁路管道口连接，关闭被校天然气流量计下游第一个阀门，打开旁路阀门及移动式装置所在管路阀门，使移动式装置与被校天然气流量计串联连接，安装如图 1 所示。确认整个管道及连接部位牢固无泄漏，确认供电电源正常，温度、压力变送器、控制设备、调节阀及测量设备等与电源连接正常。
- c) 开启移动式装置，在被校天然气流量计实际工作的流量点运行一段时间（一般不少于 5 min），保证校准管线和标准流量计充满天然气，然后停止运行，关闭标准流量计所在管路阀门。

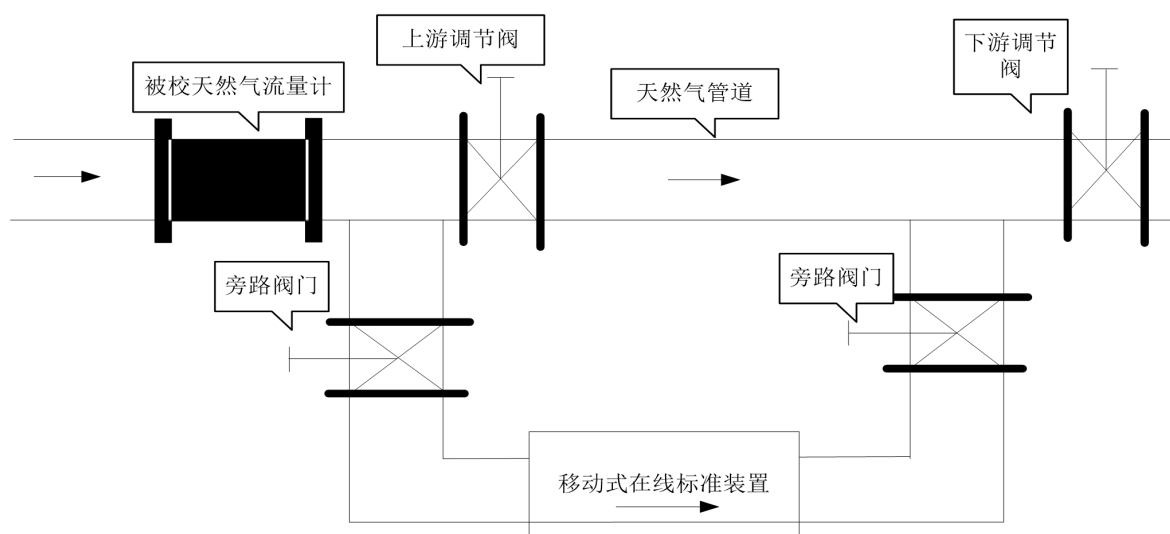


图1 串联移动式在线校准标准装置安装示意图

6.2.1.3 流量示值误差校准

根据被校天然气流量计的流量范围，以现场实际工况对应的流量作为校准点或客户指定校准点，待流量稳定后同步采集标准流量计和被校天然气流量计信号，经过一定的校准时间(10min~30min)后停止采集，记录被校天然气流量计累积流量 Q 和标准流量计累积流量 Q_s ，完成1次校准，重复上述步骤完成至少3次。

单次校准累积流量示值误差为：

$$E_{ij} = \frac{Q_{ij} - (Q_s)_{ij}}{(Q_s)_{ij}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

Q_{ij} —单次校准时的天然气流量计的累计流量示值， m^3 ；

$(Q_s)_{ij}$ —单次校准时的标准流量计的累计流量示值， m^3 ；

天然气流量计示值误差按式（2）计算。

$$E = (E_{ij})_{\max} \quad (2)$$

式中：

$(E_{ij})_{\max}$ —取单次校准示值误差的最大值。

6.2.1.4 重复性校准

天然气流量计重复性 $(E_r)_i$ 按式（3）计算

$$(E_r)_i = \frac{(E_{ij})_{\max} - (E_{ij})_{\min}}{d_n} \quad (3)$$

式中：

$(E_{ij})_{\max}$ —取校准流量点示值误差的最大值；

$(E_{ij})_{\min}$ —取校准流量点示值误差的最小值；

d_n —极差系数。

极差系数值见表 2。

表2 d_n 数值表

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_n	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97	3.08

6.2.2 标准表法（外夹式超声流量计）

6.2.2.1 适用范围

外夹式超声流量计标准装置适用于口径为 DN50mm 以上的天然气流量计在线校准。

6.2.2.2 管径测量

用量具在标准表换能器安装位置附近的同一截面上等角分布测量 m 次外直径，或测量 m 次外周长计算出外直径，其平均值 D 按式（4）计算：

$$D = \frac{\sum_{i=1}^m D_i}{m} \quad (4)$$

式中：

m —测量次数， $m \geq 4$ ；

D_i —第 i 点测得的管道外直径或计算出的外直径。

6.2.2.3 壁厚测量

在标准表每个换能器安装位置上的四角和中间分布 5 个点，使用测厚仪测量管道壁厚，并取其平均值。

6.2.2.4 其它情况

对无法测量的参数，如管道材质、衬里材料等，根据技术资料现场查明确认。

6.2.2.5 标准表的安装

将以上管道参数输入标准表内，得出标准表换能器安装距离 L 。换能器安装在天然气流量计上游或下游直管侧（上游直管段一般大于 $10D$ ；下游直管段一般大于 $5D$ ），当上游有阀门等阻件时，直管段长度至少还要延长 $3D \sim 5D$ ，当安装位置不满足直管段要求时，

须在校准报告中注明。

外夹式超声流量计标准装置安装如图 2 所示。

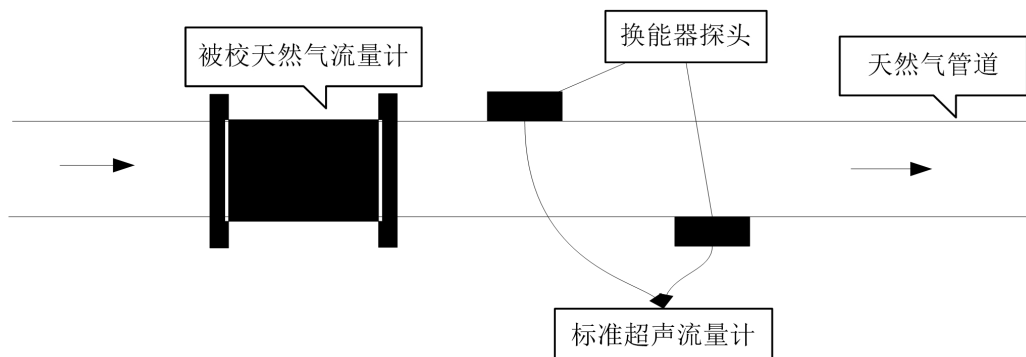


图 2 外夹式超声流量计标准装置安装示意图

6.2.2.6 示值误差校准

a) 根据被校天然气流量计的流量范围，以现场实际工况对应的流量作为校准点或客户指定校准点。每次校准，当标准流量计的流量稳定，其流量最大值与最小值之差小于 5% 时，同时读取并记录天然气流量计和标准流量计的示值。若读取的数值为瞬时流量时，被校天然气流量计应每隔 10s 进行读数，至少读取 20 个数值，取其平均值；若读取的数值为累积流量时，天然气流量计应保证大于最小读数的 1000 倍或读数（10 min~30 min）的累积流量。重复上述步骤完成至少 3 次。

b) 流量计在线示值相对误差

瞬时流量法单次测量的在线示值相对误差 E_{ij} 按式（5）计算。

$$E_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

q_{ij} —单次校准时的天然气流量瞬时流量示值， m^3/h ；

$(q_s)_{ij}$ —单次校准时的标准天然气流量瞬时流量示值， m^3/h ；

累积流量法各次测量的在线示值相对误差 E_{ij} 按式（1）计算。

天然气流量计示值误差按式（2）计算。

6.2.2.7 重复性校准

天然气流量计重复性按式（3）计算。

7 校准结果表达

校准结果应在校准证书（报告）上反映，校准证书（报告）应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 进行校准的地点；
- c) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- d) 客户的名称和地址；
- e) 被校准对象的描述和明确标识；
- f) 进行校准的日期；
- g) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- h) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- i) 校准环境的描述；
- j) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- k) 对校准规范的偏离的说明；
- l) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- m) 校准结果仅对被校对象的有效声明；
- n) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

校准记录和校准证书格式见附录 A 和附录 B。

8 复校时间间隔

陶瓷窑炉用天然气流量计的复校时间间隔由被校单位根据实际使用情况确定，复校时间间隔不宜超过 1 年。

附录 A

校准数据原始记录

记录编号:

委托单位:		地址:					
被校流量计	名称:	型号:		编号:			
	制造单位:	准确度等级:		校准地点:			
	规格: mm	管道外径: mm		管道壁厚: mm			
	流量范围:	特征系数:					
校验方法	标准表法(移动式装置) ☐			标准表法(外夹式超声波) ☐			
计量标准器	型号规格	不确定度或准确度等级或最大允许误差		名称/型号	编号	测量范围	
环境条件	温度:		相对湿度:		校准地点:		
介质参数	介质温度		介质压力:		介质密度:		
校准依据							
序号	流量点	被校流量计示值	标准示值		示值误差	平均误差	重复性
	(m ³ /h)	(□m ³ /□m ³ /h)	时间 (s)	流量值 (□m ³ /□m ³ /h)	(%)	(%)	(%)
1							
2							
3							
不确定度评定过程		扩展不确定度 $U_{rel} =$, ($k=2$)					
备注		建议复校时间间隔: 个月。					

校准:

核验:

校准日期:

年

月

日

附录 B

校准证书内页格式

器具名称		器具编号			
使用地点		校准日期			
校准依据的技术文件	陶瓷窑炉用天然气流量计在线校准规范				
环境条件	温度(℃):	相对湿度(%):			
校准地点					
本次校准所用计量器具					
名称/型号	编号	证书编号	证书有效期		
示值误差和重复性					
序号	流量点(m ³ /h)	被校流量计 示值(m ³ /h)	标准示值 (m ³ /h)	示值误差 (m ³ /h)	重复性(%)
1					
2					
3					
校准结果的扩展不确定度: $U_{rel} =$, $k=2$					

说明: 1、建议复校时间间隔: 个月

校准员: 核验员:

附录 C

采用标准表法（串联移动式在线校准标准装置）校准结果不确定度评定示例

C.1 概述

C.1.1 校准方法：采用5.2.1中标准表法（串联移动式在线校准标准装置）校准。

C.1.2 环境条件：环境温度31.2℃，相对湿度62%。

C.1.3 被校准流量计：测量范围为(25~300) m³/h，准确度等级1.5级的DN80天然气流量计。

C.1.4 校准用标准器具：串联移动式在线校准标准装置。

用串联移动式在线校准标准装置校准DN80天然气流量计，校准流量点240m³/h，被校天然气流量计累积量 $Q=81.101\text{ m}^3$ ，标准累积量 $Q_s=80.010\text{ m}^3$ ，校准时间1200.1s。

C.2 数学模型

C.2.1 被校天然气流量计的相对示值误差 E 按式（C.1）计算：

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

式中：

q ——被校天然气流量计瞬时流量平均值，m³/h；

q_s ——标准装置瞬时流量平均值，m³/h；

Q ——被校天然气流量计累积值，m³；

Q_s ——标准装置累积值，m³。

C.2.2 合成标准不确定度传播律：

$$u_c^2(E) = C_1^2 u^2(Q) + C_2^2 u^2(Q_s) \quad (\text{C.2})$$

式中：

$$C_1 = 1/Q_s ; C_2 = -Q/Q_s^2$$

C.3 不确定度来源分析

经分析，测量不确定度的主要来源有计量标准器的不确定度、被校天然气流量计的测量重复性、分辨力和介质压力变化等综合影响等组成。由于数据采集、信号处理及数据处理的不确定度所引起的测量不确定度相对于其他各不确定度分量很小，故忽略不计。

C.4 不确定度分量评定

C.4.1 各种不确定度分量的计算

C.4.1.1 计量标准器带来的标准不确定度 $u(Q_s)$

采用移动式装置作为标准装置, 移动式装置准确度 0.5 级, 即最大允许误差限为 $\pm 0.5\%$, 采用 B 类方法评定, 服从均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u(Q_s) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.29\%$$

C.4.1.2 被校天然气流量计的不确定度 $u(Q)$ C.4.1.2.1 测量重复性引入的不确定度分量 $u(rep)$

在规定流量点下, 对被校天然气流量计连续重复测量 3 次, 示值误差分别为 0.65%、0.72%、0.89%, 采用极差法计算, 极差系数取 1.69, 则由测量重复性引入的不确定度分量 $u(rep)$ 为:

$$u(rep) = \frac{0.89\% - 0.65\%}{1.69} = 0.14\%$$

C.4.1.2.2 标准器与被校流量计时间不同步引入的不确定度分量 $u(\Delta t)$

估计此值在 $\pm 0.5s$, 服从均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u(\Delta t) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289s$$

$$u_r(\Delta t) = \frac{0.289}{1200.1} = 0.0241\%$$

C.4.1.2.3 其它综合影响引起的不确定度分量 $u_2(Q)$

考虑到标准流量计与被校天然气流量计由于介质密度、压力变化等综合影响, 测量误差经长期实验其影响量小于 0.1%, 服从均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u_2(Q) = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.058\%$$

C.4.1.2.4 标准不确定度 $u(Q)$

$$u(Q) = \sqrt{u^2(rep) + u_r^2(\Delta t) + u_2^2(Q)} = \sqrt{(0.14\%)^2 + (0.0241\%)^2 + (0.058\%)^2} \times 100\%$$

$$\approx 0.153\%$$

C.4.2 合成标准不确定度 $u_c(E)$

C.4.2.1 标准分量不确定度汇总表 (见表 C.1)。

表C.1 标准分量不确定度一览表

序号	不确定度分量符号	不确定度来源	分布, k 值	标准不确定度 $u(x)$	灵敏系数	标准不确定 $ C *u(x)$
1	$u(Q_s)$	标准器带来的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	$0.29\%Q_s$	$-Q/Q_s^2$	0.29%
2	$u(Q)$	被校天然气流量计引入的不确定度	—	$0.153\%Q$	$1/Q_s$	0.153%
2.1	$u(rep)$	重复性引入的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	0.14%	1	0.14%
2.2	$u_r(\Delta t)$	时间不同步引入的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	0.0241%	1	0.0241%
2.3	$u_2(Q)$	其它综合影响引起的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	0.058%	1	0.058%

C.4.2.2 合成标准不确定度 $u_c(E)$

以上各标准不确定度分量相互无关, 合成标准不确定度为:

$$u_c(E) = \sqrt{C_1^2 u^2(Q) + C_2^2 u^2(Q_s)} = \sqrt{(0.153\%)^2 + (0.29\%)^2} \times 100\% \approx 0.33\%$$

C.4.3 校准结果的扩展不确定度 U_{rel}

取 $k=2$, 采用标准表法 (串联移动式在线校准装置) 校准结果的扩展不确定度为:

$$U_{rel}=ku_c(E)=2 \times 0.33\% \approx 0.7\%$$

附录 D

采用标准表法（外夹式超声流量计）校准结果不确定度评定示例

D.1 概述

D.1.1 校准方法：采用5.2.2中标准表法（外夹式超声流量计）校准。

D.1.2 环境条件：环境温度31.2℃，相对湿度62%。

D.1.3 被校准设备：测量范围为(25~300) m³/h，准确度等级1.5级的DN80天然气流量计。

D.1.4 校准用标准器具：准确度等级1.0级的外夹式超声流量计。

用外夹式超声流量计校准DN80天然气流量计，校准流量点240m³/h，被校天然气流量计累积量 $Q=81.101\text{ m}^3$ ，标准累积量 $Q_s=80.010\text{ m}^3$ ，校准时间1200.1s。

D.2 数学模型

D.2.1 被校天然气流量计的相对示值误差 E 按式（D.1）计算：

$$E = (q - q_s)/q_s \times 100\% = (Q - Q_s)/Q_s \times 100\% \quad (\text{D.1})$$

式中：

q ——被校天然气流量计瞬时流量平均值，m³/h；

q_s ——标准表瞬时流量平均值，m³/h；

Q ——被校天然气流量计累积值，m³；

Q_s ——标准表累积值，m³。

D.2.2 不确定度传播律：

$$u_c^2(E) = C_1^2 u^2(Q) + C_2^2 u^2(Q_s) \quad (\text{D.2})$$

式中：

$$C_1 = 1/Q_s ; C_2 = -Q/Q_s^2$$

D.3 不确定来源分析

经分析，测量不确定度的主要来源有标准器及检测方法、检测条件带来的不确定度、被校天然气流量计分辨力、测量重复性等因素带来的不确定度分量。

D.4 不确定度分量评定

D.4.1 各种不确定度分量的计算

D.4.1.1 标准器及检测方法、检测条件带来的不确定度 $u(Q_s)$

超声流量计计算公式:

$$Q_s = q_s \cdot t \cdot x = \frac{v \pi d^2}{K} tx$$

$$u_r^2(Q_s) = u_r^2(v) + 4u_r^2(d) + u_r^2(t) + u_r^2(x)$$

式中:

v ——声道上线平均速度, m/s;

K ——流速分布修正系数;

d ——管道内径, mm;

$u_r(v)$ ——标准器流速测量准确度带来的影响相对量, %;

$u_r(d)$ ——测量管径准确性带来的影响相对量, %;

$u_r(t)$ ——标准器校准时间准确性和标准器与被校流量计时间不同步带来的影响相对量, %;

$u_r(x)$ ——其它环节带来的影响相对量, 包括流速的稳定性、换能器耦合的可靠性、被检天然气流量计安装的合理性(对中、前后直管段长度、可靠接地等)、介质条件, %。

D.4.1.1.1 标准器引入的不确定度分量 $u(v)$

标准超声流量计准确度 1.0 级, 服从均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u(v) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \times 80.010 = 0.462 \text{ m}^3$$

$$u_r(v) = \frac{0.462}{80.010} = 0.578\%$$

D.4.1.1.2 管径测量引入的不确定度分量 $u(d)$

一般测量准确度在 $\pm 0.2 \text{ mm}$, 服从均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u(d) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.116 \text{ mm}$$

$$u_r(d) = \frac{0.116}{80} = 0.144\%$$

D.4.1.1.3 校准时间和时间不同步引入的不确定度分量 $u(t)$

1) 标准器校准时间引入的不确定度分量

估计此值在 $\pm 0.1 \text{ s}$, 服从均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u(t) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ s}$$

$$u_r(t) = \frac{0.058}{1200.1} = 0.0048\%$$

2) 标准器与被校流量计时间不同步引入的不确定度分量

估计此值在 $\pm 0.5\text{s}$ ，服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u(\Delta t) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289\text{s}$$

$$u_r(\Delta t) = \frac{0.289}{1200.1} = 0.0241\%$$

D.4.1.1.4 其它因素引入的不确定度分量 $u(x)$

估计所带来的影响在 $\pm 0.2\%$ 之间，服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u(x) = \frac{0.002}{\sqrt{3}} \times 80.010 = 0.092\text{m}^3$$

$$u_r(x) = \frac{0.092}{80.010} = 0.115\%$$

D.4.1.1.5 综上所述

$$u_r(Q_S) = \sqrt{u_r^2(v) + 4u_r^2(d) + u_r^2(t) + u_r^2(\Delta t) + u_r^2(x)}$$

$$= \sqrt{(0.578\%)^2 + 4 \times (0.144\%)^2 + (0.0048\%)^2 + (0.0241\%)^2 + (0.115\%)^2}$$

$$= 0.656\%$$

$$u(Q_S) = 0.656\% \times 80.010 = 0.525\text{m}^3$$

D.4.1.2 被校天然气流量计的不确定度 $u(Q)$

$$u^2(Q) = u_r^2(\delta) + u^2(rep)$$

D.4.1.2.1 被校天然气流量计分辨力引入的不确定度分量 $u(\delta)$

被校流量计分辨力为 0.001m^3 ，服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u(\delta) = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.0006\text{m}^3$$

$$u_r(\delta) = \frac{0.0006}{80.010} = 0.75\text{‰}$$

D.4.1.2.2 测量重复性引入的不确定度分量 $u(rep)$

在规定流量点下，对被校天然气流量计连续重复测量3次，示值误差分别为0.61%、0.79%、0.98%，采用极差法计算，极差系数取1.69，则由测量重复性引入的不确定度分量为：

$$u(rep) = \frac{0.89\% - 0.65\%}{1.69} = 0.22\%$$

D.4.1.2.3 综上所述

$$u(Q) = \sqrt{u_r^2(\delta) + u^2(rep)} = \sqrt{(0.75\%_0)^2 + (0.22\%)^2} \times 100\% \approx 0.22\%$$

D.4.2 合成标准不确定度 $u_c(E)$

D.4.2.1 标准不确定度分量一览表见表 D.1

表D.1 标准不确定度分量一览表

序号	不确定度分量符号	不确定度来源	分布 k 值	标准不确定度 $u(x)$	灵敏系数	标准不确定 C * $u(x)$
1	$u(Q_s)$	标准器及检测方法、检测条件带来的不确定度	正态, $k=2$	$0.656\%Q_s$	$-Q/Q_s^2$	0.656%
1.1	$u_r(v)$	标准器引入的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	0.578%	1	0.578%
1.2	$u_r(d)$	测量管径引入的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	0.144%	2	0.288%
1.3	$u_r(t)$	检测时间引入的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	0.0048%	1	0.0048%
1.4	$u_r(\Delta t)$	时间不同步引入的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	0.0241%	1	0.0241%
1.5	$u_r(x)$	其它因素引入的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	0.115%	1	0.115%
2	$u(Q)$	被检器带来的不确定度	—	$0.22\%Q$	$1/Q_s$	0.22%
2.1	$u_r(\delta)$	被检器分辨力引入的不确定度	均匀, $k=\sqrt{3}$	$0.75\%_0$	1	$0.75\%_0$

2.2	$u(rep)$	重复性引入的不 确定度	—	0.22%	1	0.22%
-----	----------	----------------	---	-------	---	-------

D.4.2.2 合成标准不确定度 $u_c(E)$

以上各标准不确定度分量相互无关，合成标准不确定度为：

$$u_c(E) = \sqrt{C_1^2 u^2(Q) + C_2^2 u^2(Q_s)} = \sqrt{(0.22\%)^2 + (0.656\%)^2} \times 100\% \approx 0.692\%$$

D.4.3 校准结果的扩展不确定度 U_{rel}

取 $k=2$ ，采用标准表法（外夹式超声流量计）校准结果的扩展不确定度为：

$$U_{rel} = k u_c(E) = 2 \times 0.692\% \approx 1.4\%$$