JJF

陕 西 省 地 方 计 量 技 术 规 范

JJF（陕）XXX－2021

气体流量计（热气体法）校准规范

Calibration Specification for gas flowmeter (hot gas method)

（报批稿）

2021－XX－XX 发布　　2021－XX－XX 实施

陕 西 省 市 场 监 督 管 理 局 发布

气体流量计（热气体法）校准规范

Calibration Specification
For gas flowmeter（hot gas method）

JJF(陕)XXX－2021

归 口 单 位：陕西省市场监督管理局

主要起草单位：西安航天计量测试研究所

中国计量科学研究院

参加起草单位：陕西省计量科学研究院

本规范由陕西省市场监督管理局负责解释

本规范主要起草人：

赵 华（西安航天计量测试研究所）

崔骊水（中国计量科学研究院）

孙新新（西安航天计量测试研究所）

参加起草人：

邓鹏波（西安航天计量测试研究所）

赵米峰（西安航天计量测试研究所）

张建斌（西安航天计量测试研究所）

康 勇（陕西省计量科学研究院）

目　　录

引　言.....II
1　范围.....1
2　引用文件.....1
3　术语和定义.....1
4　概述.....1
4.1 装置组成.....1
4.2 工作原理.....2
5　计量特性.....2
5.1 示值误差.....2
5.2 重复性.....2
6　校准条件.....2
6.1　环境条件.....2
6.2　测量标准及其他设备.....3
6.3 校准气体.....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
7.2.1 示值误差.....4
7.2.2 重复性.....6
8　校准结果表达.....6
9　复校时间间隔.....6
附录 A 临界流函数计算方法.....8
附录 B 气体流量换算方法.....9
附录 C 原始记录参考格式.....14
附录 D 校准证书内容及内页格式（参考）.....16
附录 E 测量结果不确定度评定示例.....18

引　言

本规范依据 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》等基础性系列规范文件进行制定。

本校准规范为首次发布。

气体流量计（热气体法）校准规范

1 范围

本规范适用于气体流量计（以下简称流量计）在介质温度 50℃~160℃范围的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 640 差压式流量计

JJG 1029 涡街流量计

JJG620 临界流文丘里喷嘴

JJF1240 临界流文丘里喷嘴法气体流量标准装置

JJF 1004 流量计量名词术语及定义

GB/T 32201 气体流量计

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 术语和定义

下列术语和定义仅适用于本规范。

3.1 热气体法 Hot gas method

采用空气加热产生的热气体作为流量计校准介质的方法。

3.2 高温气体流量标准装置 High temperature gas flow standard facilities

以温度范围（50℃~160℃）的热气体为试验介质的正压临界流文丘里喷嘴法气体流量标准装置。

4 概述

目前，应用在热气体介质下的流量计被广泛用于火箭发动机、航空发动机地面试车时蒸发器等部件高温气体出口流量测量。主要包括有涡街流量计、孔板流量计等。为了实现在热气体状态下流量计的溯源，利用高温气体流量标准装置完成对流量计在热气体状态下的校准。

4.1 装置组成

高温气体流量标准装置组成见下图 1，主要由滞止容器、音速喷嘴、喷嘴上游滞止温度、压力测量仪表、被校流量计处温度、压力测量仪表、计时器、空气压缩机、稳压容器、加热器、冷却器及数据采集、系统控制设备等组成。

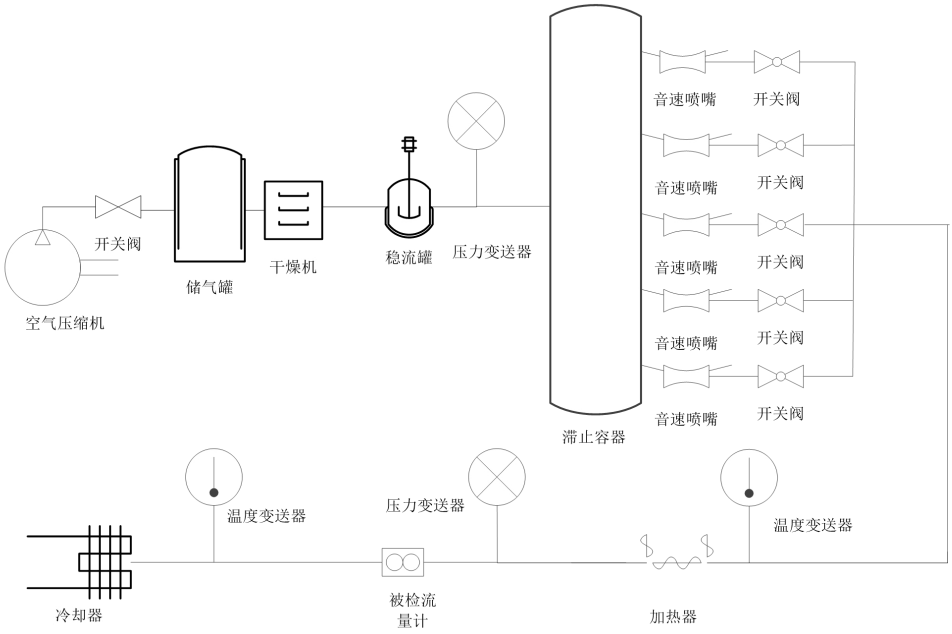


图 1　高温气体流量标准装置组成示意图

4.2 工作原理

在相同校准时间内，气体连续流过音速喷嘴及被校流量计，并在被校流量计处对空气进行加热，由于气体质量守恒，因此流过音速喷嘴的气体质量流量和被校流量计的气体质量流量相同，通过比对即可完成对被校流量计的校准。

5　计量特性

5.1 示值误差

流量计的工作在热气体介质下的示值误差应满足表 1 的要求。本表示值误差要求仅作为计算参考，不作为合格判据。

表 1 流量计示值误差要求

准确度等级		1.0	1.5	2.0	2.5
最大允许误差	Qt≤Q＜Qmax：	±1.0%	±1.5%	±2.0%	±2.5%
	Qmin≤Q＜Qt：	±2.0%	±3.0%	±4.0%	±5.0%

5.2 重复性

流量计的重复性应不得超过相应准确度等级规定的最大允许误差绝对值的 1/3。

6　校准条件

6.1　环境条件

（1）环境温度一般为（5~40）℃；

（2）环境湿度一般为（35%~75%）RH；

（3）交流电源电压应为（220±22）V；电源频率应为（50±2.5）Hz；也可根据流量计要

求，选取合适的交流或直流电源；

（4）应对校准高温管线有包覆或隔离措施，排出的热气体必须有相应的降温措施，保证人员和设备的安全。

6.2 测量标准及其他设备

校准用标准器应经过计量技术机构检定或校准，满足校准使用要求，并在有效期内。

校准用标准器及其他设备见表 2。

表 2 校准用标准器及其他设备

序号	设备名称	技术要求	备注
1	高温气体流量标准装置	流量范围：（0.5~300）m^3/h； 滞止绝对压力范围：不大于 0.8MPa； 喷嘴流出系数：≥0.95； 热气体温度范围：（50~160）℃； 装置测量不确定度：U_{rel}≤0.5%（k=2）。	
2	温度仪表	0.2 级	被校流量计处气体温度
3	压力仪表	0.075 级	被校流量计处气体压力
4	计时器	分辨率不大于 0.001s，带有晶振信号输出。	

6.3 校准气体

（1）校准用的热气体介质应无游离水或油杂质的存在；

（2）每个流量点的单次校准过程中，校准用热气体变化及流量计自身的的采集温度变化应不超过±1.5℃；

（3）每个流量点的校准过程中，压力波动不超过±1%；

（4）对流经热气体的管道均需进行保温隔热包覆，不得有裸露的高温部件，校准热气体排出时需进行强制冷却，温度一般需降至 30℃及以下。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 2。

表 2 校准项目

序号	校准项目	计量特性章条号	校准方法章条号
1	示值误差	5.1	7.2.1
2	重复性	5.2	7.2.2

7.2 校准方法

7.2.1 示值误差

7.2.1.1 校准前准备

（1）流量计安装：根据流向标识将流量计安装在夹表区，流量计表体、流量计与高温气体流量标准装置法兰连接处需采用保温隔热材料进行包覆；

（2）对流量计进行上电、预热，检查流量计显示功能，并按照说明书要求检查流量计参数设置。

7.2.1.2 校准点的选取

（1）校准点一般包含 q_{min}、q_t、$0.4q_{max}$、q_{max}4 个点；若没有分界流量，则选择 0.2 q_{max}；除 q_{min}、q_t 和 q_{max} 应分别控制在（1~1.1）q_{min}、和（1~1.1）q_t 和（0.9~1）q_{max} 外，其他校准点均应在设定流量点的±5%内。

（2）校准时热气体温度可根据流量计实际工况环境选取温度点；

（3）每个流量点的校准次数应不少于 3 次。

7.2.1.3 校准步骤

（1）打开高温气体流量标准装置的气体干燥装置和空压机，调节流量到设定流量点，运行至流量稳定；

（2）设置热气体温度值，打开气体加热器，运行至流量、温度稳定；

（3）启动高温气体流量标准装置进行校准，按照操作规范要求运行至流量稳定；

（4）记录高温气体标准装置中滞止压力、温度、湿度和流经热气体介质后的温度、压力值，和被校流量计输出值。

（5）重复以上过程 3 次，完成对第一个点的校准，根据要求完成在某一温度点下对所有流量点的校准。

7.2.1.4 示值误差计算

（1）显示累积流量或瞬时流量的流量计

流量计单次校准流量点的示值误差按照式（1）、式（2）计算，相对示值误差按照式（3）、式（4）计算，孔板流量计采用累积流量或瞬时流量计进行计算：

$$E_n = Q_{ij} - (Q_s)_{ij} \quad (1)$$

$$E_n = q_{ij} - (q_s)_{ij} \quad (2)$$

$$E_{ij} = \frac{Q_{ij} - (Q_s)_{ij}}{(Q_s)_{ij}} \times 100\% \quad (3)$$

$$E_{ij}=\frac{q_{ij}-(q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}}\times 100\% \qquad (4)$$

式中：

E_n—第 i 点第 j 次校准流量点的示值误差，L 或者 m³；

E_{ij}—第 i 点第 j 次校准流量点的相对示值误差，%；

Q_{ij}—第 i 点第 j 次校准流量点的流量计累计流量，L 或者 m³；

$(Q_s)_{ij}$—第 i 点第 j 次校准流量点高温气体流量标准装置的累计流量，L 或者 m³；

q_{ij}—第 i 点第 j 次校准流量点的流量计瞬时流量，L/min 或者 m³/h；

$(q_s)_{ij}$—第 i 点第 j 次校准流量点高温气体流量标准装置的瞬时流量，L/min 或者 m³/h。

当装置显示为累计流量时，$(q_s)_{ij}$ 按照式（5）计算：

$$(q_s)_{ij}=\frac{(Q_s)_{ij}}{t}\times 3600 \qquad (5)$$

其中，$(Q_s)_{ij}$ 计算参考附录 B 计算。

流量计各校准流量点的相对示值误差按照式（6）计算：

$$E_i=\frac{1}{n}\bullet\sum_{j=1}^{n}E_{ij} \qquad (6)$$

式中：

E_i —第 i 校准点流量计的相对示值误差，%；

n —第 i 校准点的校准次数；

E_{ij}—第 i 点第 j 次校准流量点的相对示值误差，%。

流量计的相对示值误差按照式（7）计算：

$$E=\pm\left|E_i\right|_{\max} \qquad (7)$$

式中：

E —流量计的相对示值误差，%。

（2）采用 K 系数的流量计

$$K_{ij}=\frac{N_{ij}}{Q_{ij}} \qquad (8)$$

式中：

K_{ij} —第 i 点第 j 次校准流量点流量计高温 K 系数，L^{-1} 或（m³）$^{-1}$；

N_{ij} —第 i 点第 j 次校准流量点流量计测量到的脉冲数。

流量计各校准流量点的高温 K 系数按照下式（9）计算：

$$K_i = \frac{1}{n} \bullet \sum_{j=1}^{n} K_{ij} \qquad (9)$$

流量计输出的高温 K 系数按照下式（10）计算：

$$K = \frac{(K_i)_{\max} + (K_i)_{\min}}{2} \qquad (10)$$

式中：

$(K_i)_{\max}$、$(K_i)_{min}$—在 $q_t \le q \le q_{max}$ 校准流量范围内的各校准点高温 K 系数的最大值及最小值。

采用高温 K 系数的流量计相对示值误差按照式（11）、式（12）计算：

$$E = \frac{(K_i)_{\max} - (K_i)_{\min}}{(K_i)_{\max} + (K_i)_{\min}} \times 100\% \quad ， \quad q_t \leqslant q < q_{\max} \text{ 范围内} \qquad (11)$$

$$E = \frac{(K_i)_{\max} - K}{K} \times 100\% \quad ， \quad q_{\min} \leqslant q < q_t \text{ 范围内} \qquad (12)$$

7.2.2 重复性

流量计各校准点的重复性按照下式（13）进行计算：

$$(E_r)_i = \sqrt{\frac{1}{n\text{-}1} \sum_{j=1}^{n} (E_{ij} - E_i)^2} \qquad (13)$$

采用高温 K 系数时：

$$(E_r)_i = \frac{1}{K_i} \sqrt{\frac{1}{n\text{-}1} \sum_{j=1}^{n} (K_{ij} - K_i)^2} \times 100\% \qquad (14)$$

式中：

$(E_r)_i$—第 i 校准点的重复性，%；

n —校准次数。

流量计的重复性按照下式（14）计算：

$$E_r = [(E_r)_i]_{\max} \qquad (15)$$

E_r—流量计的重复性。

8 校准结果表达

校准完成后，按照本规范给出校准结果，出具相应的校准证书，校准证书应准确、客观的报告校准结果，以校准数据形式给出，校准证书的内页格式参见附录 D。

9 复校时间间隔

根据使用状态由使用单位自行确定复校时间间隔。流量计工作的热气体温度大于等于

100℃或不低于 1.0 级的复校时间间隔建议不超过 12 个月，流量计工作的热气体温度小于100℃的复校时间间隔建议不超过 24 个月。

附录 A

临界流函数计算方法

为了精确计算临界流函数C_{*i}，根据经验方程进行计算，适用于除了二氧化碳气、氧气和蒸汽以外的所有气体，该方程如下所示：

$$C_{*i}=\sum_i a_i \pi^{b_i} \tau^{c_i} \qquad (A.1)$$

式中：$\pi=\frac{p_0}{p_c}$，$\tau=\frac{T_0}{T_C}$。

在附表中给出了方程的系数和相应的临界压力和临界温度，在临界流计算中，使用此方程不会引入任何明显的不确定度。

表 A.1 方程（A.1）的系数—空气

i	a_i	b_i	c_i
1	0.019679479	0	-3
2	-0.02774414	0	-1
3	0.703190683	0	0
4	-0.003448411	0	1
5	-0.113593977	1	-7
6	0.150732595	1	-3
7	-0.002403455	1	0
8	1.22463×10^{-6}	1	3
9	-0.003064388	2	-2
10	0.211628554	2.5	-8
11	$5.1288E\times10^{-5}$	2.5	0
12	-1.66669×10^{-6}	3	1
13	-0.655405214	3.5	-8
14	0.013908314	4	-8
临界参数： p_c=3.786MPa；T_C=132.5306K； 对于空气，压力在 20MPa 以下，温度在 250K 到 600K 范围内，方程(A.1)有效。			

8

附录 B

气体流量换算方法

（1）计算主标准器音速喷嘴处的质量流量

单个喷嘴的质量流量为：

$$q_{mi}=\frac{A_{*}C\,C_{*i}P_{0}}{\sqrt{\frac{R_{M}}{M}T_{0}}} \qquad (B.1)$$

q_{mi}---- 音速文丘里喷嘴在实际条件下的质量流量(kg/s)；

C_{*i}---- 气体在实际条件下的临界流函数，根据附录 A 进行计算；

C ---- 流出系数。喷嘴检定证书给出；

P_0---- 音速文丘里喷嘴前的气体滞止绝对压力(Pa)，现场压力变送器测得；

T_0---- 音速文丘里喷嘴前的气体滞止绝对温度(K)，现场温度变送器测得；

R_M ---- 通用气体常数(J/(kg×K))，对于空气，R=287.0494005；

M----空气摩尔质量；

A_* ---- 音速文丘里喷嘴的喉部面积(m^2) ，喷嘴制作完成后，喉径面积已经固定，可以在喷证书中查询得到。

（2）湿度修正方法

采用 GB/T 21188-2007/ISO 9300: 2005 的湿度修正方法，修正后的质量流量$q_{m,h}$为，

$$q_{m,h}=q_{m}[1+X_{CO_2}(0.25+0.04732\pi)+\frac{RH}{100}AB] \qquad (B.2)$$

式中：X_{CO_2}——空气中 CO_2所占的摩尔分数（如果未知，可用 0.0004）；

RH ——空气的相对湿度，%。

此外，

$$A=0.127828\tau^{3}-0.789422\tau^{2}+1.63166\tau-1.12818 \qquad (B.3)$$

式中，$\tau=\frac{T_0}{T_c}$。

$$B = -0.000288749\pi^2 - 0.00191022\pi + 0.00569536 - \frac{0.0719995}{\pi} \quad \text{（B.4）}$$

式中，$\pi = \frac{p_0}{p_c}$。

其中，T_0为喷嘴上游滞止温度，p_0为喷嘴上游滞止压力，临界温度$T_c = 132.5306K$，临界压力$p_c = 3.786MPa$。

（3）介质密度计算方法

湿度修正完成得到音速喷嘴处的标准流量后，需要换算到被校表处温度、压力下的流量值，首先需要计算气体密度。干燥空气在某一温度、压力的状态下的密度计算，可根据国家标准规定的气体状态方程进行计算：

$$PV = zRT \quad \text{（B.5）}$$

$$d=m/V=28.9653n/V \quad \text{（B.6）}$$

换算后可得到空气的密度方程为：

$$d = 28.9653 * P / zRT \quad \text{（B.7）}$$

式中： d—为空气的密度；

28.9653—为 1 摩尔空气的质量；

P—为被检表处的介质绝对压力；

T—为被检表处的温度；

R—为常数 8.314

z—气体压缩因子

表 B.1 空气压缩因子对照表

压力/MPa 温度/K	0.1	0.5	1	2	4	6	8	10	15	20
90	0.9764							0.4581	0.6779	0.8929
100	0.9797	0.8872					0.3498	0.4337	0.6386	0.8377
120	0.9880	0.9373	0.8660	0..6730			0.3371	0.4132	0.5964	0.7720
140	0.9927	0.9614	0.9205	0.8297	0.5856	0.3313	0.3737	0.4340	0.5909	0.7699
160	0.9951	0.9748	0.9489	0.8954	0.7802	0.6603	0.5696	0.5489	0.6340	0.7564

180	0.9967	0.9832	0.9660	0.9314	0.8625	0.7977	0.7432	0.7084	0.7180	0.7986
200	0.9978	0.9886	0.9767	0.9539	0.9100	0.8701	0.8374	0.8142	0.8061	0.8540
250	0.9992	0.9957	0.9911	0.9822	0.9671	0.9549	0.9463	0.9411	0.9450	0.9713
300	0.9999	0.9987	0.9974	0.9950	0.9917	0.9901	0.9903	0.9930	1.0074	1.0326
350	1.0000	1.0002	1.0004	1.0014	1.0038	1.0075	1.0121	1.0183	1.0377	1.0635
400	1.0002	1.0012	1.0025	1.0046	1.0100	1.0159	1.0229	1.0312	1.0533	1.0795
450	1.0003	1.0016	1.0034	1.0063	1.0133	1.0210	1.0287	1.0374	1.0614	1.0913
500	1.0003	1.0020	1.0034	1.0074	1.0151	1.0234	1.0323	1.0410	1.0650	1.0913

得到密度后，就可以根据质量流量和密度换算成体积流量。

（4）被校表处的体积流量计算方法

$$q_v = \frac{q_{m,h}}{d} \qquad \text{（B. 8）}$$

（5）计算举例说明

例：选择喷嘴喉径为 15.290mm，查证书流出系数为 0.99380，滞止容器压力为 0.63MPa,滞止容器温度为 23.4℃，湿度为 57%，被校表处压力为 0.41MPa,被校表处温度为 150.2℃，计算被校表处工况流量。

① 根据附录 A 计算临界流函数C_{*i}

表 B.2 π 及 τ 计算表

P_c（MPa）	P_0(MPa)	T_c（K）	T_0(K)
3.786	0.63	132.5306	296.55
$\pi = P_0/P_c$	0.166402536	$\tau = T_0/T_c$	2.237596449

表 B.3 临界流函数C_{*i}计算表

序号	a_i	b_i	c_i	$a_i \pi^{bi}\tau^{ci}$
1	0.019679479	0	-3	0.00176
2	-0.02774414	0	-1	-0.01240
3	0.703190683	0	0	0.70319
4	-0.003448411	0	1	-0.00772

5	-0.113593977	1	-7	-0.00007
6	0.150732595	1	-3	0.00224
7	-0.002403455	1	0	-0.00040
8	1.22463E-06	1	3	0.00000
9	-0.003064388	2	-2	-0.00002
10	0.211628554	2.5	-8	0.00000
11	5.1288E-05	2.5	0	0.00000
12	-1.66669E-06	3	1	0.00000
13	-0.655405214	3.5	-8	0.00000
14	0.013908314	4	-8	0.00000
C*=0.68659138				

②计算喷嘴质量流量

根据公式（B.1）可知：

$$q_{mi}=\frac{A_* C\, C_{*i} P_0}{\sqrt{\mathrm{R}_M T_0}}=\frac{3.1415926*(0.01529/2)^2*0.9938*0.68659*630}{\sqrt{287.0494005*(273.15+23.4)}}$$

$$q_{mi}=973.90804\text{kg/h}$$

③进行湿度修正

根据公式（B.2）进行湿度修正：

$\pi=P_0/P_c=0.166402536$，$\tau=T_0/T_c=2.237596449$；

$$A=0.127828\tau^3-0.789422\tau^2+1.63166\tau-1.12818=0.00240187$$

$$B=-0.000288749\pi^2-0.00191022\pi+0.00569536-\frac{0.0719995}{\pi}=-0.42731319$$

湿度修正系数$=1+X_{CO_2}(0.25+0.04732\pi)+\frac{RH}{100}AB=0.999546$

$$q_{m,h}=q_m[1+X_{CO_2}(0.25+0.04732\pi)+\frac{RH}{100}AB]=973.90804*0.99952=973.46635\text{kg/h}$$

④介质密度计算

在被校表处绝对压力为0.41MPa,被校表处温度为150.2℃气体的密度计算见下式：

$$d=m/V=28.9653n/V=\frac{28.9653*410}{8.314*(273.15+150.2)*1.0012}$$

$$d=3.36982 kg/m^3$$

⑤被校表处的体积流量计算

$$q_v = \frac{q_{m,h}}{d} = \frac{973.46635}{3.36982} = 288.87785 m^3/h$$

这样，根据连续性原理质量流量相等，就将标准表音速喷嘴处 23.4℃、0.63MPa、湿度为 57%的质量流量换算到被校流量计处 150.2℃、0.41MPa 工况环境下的流量，通过与被校流量计采集流量进行比对即可完成校准。

附录 C

原始记录-K 系数（参考格式）

客户名称		证书编号		校准日期	
仪器名称		型号/规格		出厂编号	
生产厂商		环境温、湿度	℃ %RH	校准地点	

主要标准器信息

名称	编号	测量范围	准确度等级/最大允许误差	证书编号	有效日期

序号	平均标准流量/（m^3/h）	标准体积/m^3	滞止温度/℃	滞止压力/kPa	被校温度/℃	被校压力/kPa	脉冲	时间/s	高温 K 系数 K_{ij}/（m^3）$^{-1}$	平均高温 K 系数/（m^3）$^{-1}$	相对示值误差/%	重复性

示值误差	Qmin≤Q＜Qt：		Qt≤Q＜Qmax：		重复性	Qmin≤Q＜Qt：		Qt≤Q＜Qmax：	
测量不确定度						气体温度：			
校准人：		日期：		核验人：			日期：		

原始记录-瞬时流量或累计流量（参考格式）

客户名称				证书编号				校准日期			
仪器名称				型号/规格				出厂编号			
生产厂商				环境温、湿度		℃ %RH		校准地点			
主要标准器信息											
名称		编号		测量范围		准确度等级/最大允许误差		证书编号		有效日期	
序号	平均标准流量/（m³/h）	标准体积/m³	滞止温度/℃	滞止压力/kPa	被校温度/℃	被校压力/kPa	被校体积/m³	时间/s	被校流量/（m³/h）	单点示值误差/%	示值误差	重复性
示值误差	Qmin≤Q＜Qt：			Qt≤Q＜Qmax：			重复性	Qmin≤Q＜Qt：		Qt≤Q＜Qmax：		
测量不确定度								气体温度：				
校准人：			日期：		核验人：				日期：			

附录 D

校准证书内容及内页格式（参考）格式

D.1　校准证书应至少包括以下信息：

a）标题：“校准证书”；

b）实验室的名称和地址；

c）进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；

d）证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；

e）送校单位的名称；

f) 被校对象的描述和明确标识；

g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；

h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；

i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；

j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；

k) 校准环境的描述；

l) 校准结果及测量不确定度的说明；

m）对校准规范的偏离的说明；

n）校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；

o）校准结果仅对校准对象有效的声明；

p）未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。

D.2 校准证书内容及内页格式（参考）

校准证书内页格式（推荐样式）

<table>
<tr><td colspan="6">校 准 结 果</td></tr>
<tr><td colspan="6">1. 示值误差：
2. 重复性：
3. 高温 K 系数：</td></tr>
<tr><td colspan="6">校 准 数 据</td></tr>
<tr><td colspan="6">气体温度</td></tr>
<tr><td>标准流量/（m^3/h）</td><td>被校流量/（m^3/h）</td><td>介质温度/℃</td><td>高温 K 系数/（m^3）$^{-1}$</td><td>单点示值误差</td><td>测量结果不确定度</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="4"></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td colspan="6">以下空白</td></tr>
</table>

附录 E

测量结果的不确定度评定示例

E.1 概述

E.1.1 环境条件：温度：18.9℃，湿度：49.5%RH。

E.1.2 测量标准：高温气体流量标准装置，温度范围：（30~160）℃，流量范围（0.5~300）m³/h，装置不确定度 U_{rel}=0.46%（k=2）。

E.1.3 被测对象：气体流量计，设计温度上限：150℃，流量范围（25~200）m³/h。

E.2 数学模型

按照本规范规定的方法进行校准，其示值误差的测量模型为：

$$E_n = Q_{ij} - (Q_s)_{ij} = Q_{ij} - \frac{t \times A_* C\, C_{*i} P_0}{3600 \times d\sqrt{\frac{R_M}{M} T_0}}$$

式中：

E_n—第 i 点第 j 次校准流量点的示值误差；

q_{ij}—第 i 点第 j 次校准流量点的气体流量计累计流量；

$(q_s)_{ij}$—第 i 点第 j 次校准流量点高温气体流量标准装置累计流量；

E.3 标准不确定度来源分析

标准不确定度分量来源如表 E.1 所示：

表 E.1 标准不确定度来源分析表

序号	标准不确定度分量来源	符号
1	测量重复性引入	u_1
2	喷嘴引入	u_2
3	滞止压力引入	u_3
4	滞止温度引入	u_4
5	被校表处温度测量引入	u_5
6	被校表处压力测量引入	u_6
7	计时器引入	u_7
8	气体压力稳定引入	u_8

E.4 标准不确定度分量评定

E.4.1 重复性引入的分量

在重复性条件下，对一块 1.5 级的涡街流量计在 150℃、200m³/h 流量点下进行 10 次重复测量，得到示值误差分别为：1.12、1.02、1.27、1.23、1.15、1.09、1.18、1.33、1.03、1.15，单位（%），计算测量重复性：

$$u_1 = \sqrt{\frac{1}{n\text{-}1}\sum_{j=1}^{n}(E_{ij} - E_i)^2} = 0.10\%$$

E.4.2 （1）喷嘴流出系数 C 的不确定度 u_2

按溯源证书（中国计量科学研究院）中给出结果 U_r=0.15%，（k=2）,则喷嘴流出系数 C 的标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{0.15\%}{2} = 0.075\%$$

（2）喷嘴前滞止压力引入不确定度 u_3

设压力变送器扩展不确定度为 0.05 级，按矩形分布，假设差压变送器满量程 800kPa,工作点压力 600kPa，则喷嘴前滞止压力标准不确定度为：

$$u_3 = \frac{0.05\% * 800}{600 * \sqrt{3}} = 0.038\%$$

（3）喷嘴前滞止温度标准不确定度 u_4

设喷嘴前测量滞止温度的温度变送器 MPE 为±0.1℃，工作点温度为 20℃，则喷嘴前滞止温度标准不确定度为：

$$u_4 = \frac{0.1}{(273.15 + 20) * \sqrt{3}} = 0.02\%$$

（4）被校表处温度测量标准不确定度 u_5

设被检表处温度测量的温度变送器 MPE 为±0.1℃，测量点温度为 150℃，则被检表处温度测量标准不确定度：

$$u_5 = \frac{0.1}{(273.15 + 150) * \sqrt{3}} = 0.013\%$$

（5）被校表处压力测量标准不确定度 u_6

设被校表处的压力变送器为 0.05 级，压力变送器最大量程 800kPa，被校流

量计压力 400kPa，按矩形分布考虑，则：

$$u_6 = \frac{0.05\% * 800}{400 * \sqrt{3}} = 0.058\%$$

（6）计时器的不确定度 u_7

系统选择的计时器的晶振频率为 1MHz，测量所使用的标准计时器的频率稳定度为$\pm 1\times10^{-6}$，通过分析可得：

$$u_7 = 0.003\%$$

（7）气体压力稳定引入的不确定度 u_8

高温气体流量标准装置采用空压机产生正压压力气体源，经过二级稳压后进入装置，根据上级证书，压力稳定性为 0.3%，按矩形分布考虑，则：

$$u_8 = \frac{0.3\%}{\sqrt{3}} = 0.17\%$$

（8）临界流函数及气体常数的不确定度

由于音速喷嘴的检定也是在空气介质下进行的，A*，C*及 R 的值相同，因此可以忽略此二项不确定度。因此压缩系数的不确定度很小，可以忽略。

E.5 合成标准不确定度

标准不确定度一览表见表 E.2 所示。

表 E.2 标准不确定度一览表

序号	标准不确定度分量来源	符号	灵敏系数 C_i	评定结果 /%
1	测量重复性引入	u_1	1	0.10
2	喷嘴引入	u_2	1	0.075
3	滞止压力引入	u_3	1	0.038
4	滞止温度引入	u_4	-0.5	0.01
5	被校表处温度测量引入	u_5	1	0.013
6	被校表处压力测量引入	u_6	-1	0.058
7	计时器引入	u_7	1	0.003
8	气体压力稳定引入	u_8	1	0.17

上述不确定度分量各自相互独立，互不相关，根据合成标准不确定度公式有：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2 + c_5^2 u_5^2 + c_6^2 u_6^2 + c_7^2 u_7^2 + c_8^2 u_8^2} = 0.23\%$$

E.6 **扩展不确定度**

取包含因子 $k = 2$，可得扩展不确定度为：$U = ku_c$。

因此，可得 U=0.50%，（k=2）。