

附件 1

环境空气自动监测常用气体流量计 校准技术要求

(试行)

目录

前 言	II
1 适用范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 气体流量量值溯源体系	2
5 计量特性	3
6 校准条件	3
7 气体流量计量标准工作原理及组成	4
8 校准方法	6
9 质量保证和质量控制	8
10 校准结果与表示	9
附录 A（资料性附录） 校准证书格式	10
附录 B（资料性附录） 校准结果的不确定度分析示例	13

前 言

气体流量测量是影响环境空气监测数据质量的重要因素。为进一步保障环境空气颗粒物、气态污染物等监测项目中气体流量的测量准确和量值统一，规范环境空气自动监测常用气体流量计的校准工作，制定本技术要求。

本技术要求规定了环境空气气体流量计的校准方法，包括气体流量量值溯源体系、计量特性、校准条件、计量标准工作原理及组成、校准方法、质量保证与质量控制等。

本技术要求附录 A、附录 B 为资料性附录。

本技术要求为首次发布，将根据气体流量计校准工作进展适时修订。

本技术要求由中国环境监测总站和中国计量科学研究院共同编制。

本技术要求主要起草人员：师耀龙、王瑜、吴晓凤、翟东肖、吕怡兵、崔骊水。

本技术要求由中国环境监测总站解释。

环境空气自动监测常用气体流量计校准技术要求

1 适用范围

本技术要求适用于环境空气自动监测常用气体流量计的校准工作。

2 规范性引用文件

GB 3095 环境空气质量标准

JB/T 12961 钟罩式气体流量标准装置

JJG 586 皂膜流量计检定规程

JJG 643 标准表法流量标准装置

JJG 1132 热式气体质量流量计检定规程

JJG 2064 气体流量计量器具检定系统表

JJF 1001 通用计量术语及定义

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

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本技术规定

3.1 校准 *calibration*

指在规定条件下，为确定测量仪器或测量系统所指示的量值，或实物量具或参考物质所代表的量值，与对应的由标准所复现的量值之间关系的一组操作。（引自 JJF1001 通用计量术语及定义）

3.2 标准表 *master meter*

准确度高、重复性好的流量计。常见的气体标准流量计包括：临界流文丘里喷嘴、涡轮流量计、腰轮流量计及其他类型的标准流量计。（引自 JJG 2064 气体流量计量器具检定系统表）

3.3 标准表法流量标准装置 *master meter standard*

通过标准表及温度、压力、湿度、组分等配套设备测量得到流量量值的标准装置。（引自 JJG 2064 气体流量计量器具检定系统表）

3.4 体积流量/质量流量 *volume flow/mass flow*

单位时间内流经封闭管道或明渠有效截面的流体量，称为瞬时流量。当流体量以体积表示时称为体积流量；当流体量以质量表示时称为质量流量。

3.5 工况流量 actual flow

指在环境空气监测中，管道或环境实际压力、温度下气体的体积流量。

3.6 标况流量 standard flow

指在环境空气监测中，温度为20摄氏度(293.15K)、压力为一个标准大气压(101.325kPa)的体积流量。

4 气体流量量值溯源体系

我国生态环境领域气体流量量值逐级传递方式如图1所示。生态环境部门气体流量最高计量标准向下传递校准至次级标准，通过次级标准向下传递校准至传递标准，使用传递标准对环境空气监测工作计量器具进行流量测量及校准。

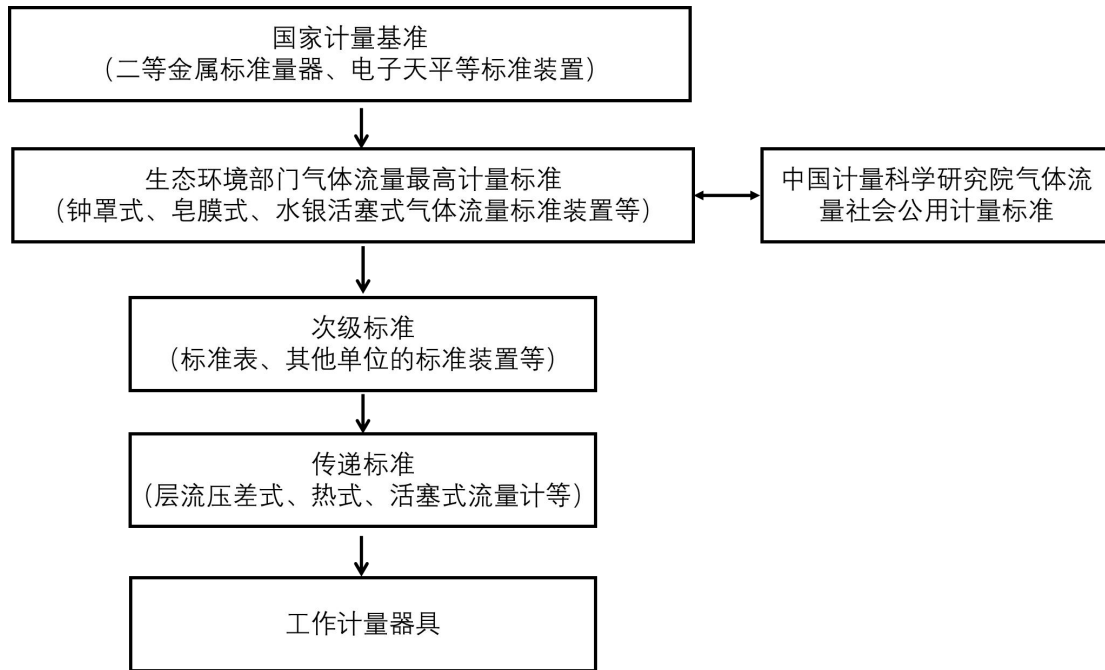


图1 气体流量量值逐级传递示意图

4.1 生态环境部门气体流量最高计量标准

为气体流量原级计量标准，其流量可直接溯源至SI单位，通过直接测量法校准次级标准。一般包括钟罩式气体流量标准装置、皂膜式气体流量标准装置与水银活塞式气体流量标准装置等。

4.2 次级标准

其量值可直接溯源到生态环境部门气体流量最高计量标准,主要用于通过比对测量法校准传递标准。一般包括标准表法气体流量计量标准装置、钟罩式气体流量标准装置、皂膜式气体流量标准装置等。

4.3 传递标准

由次级标准进行校准的传递标准,量值通过次级标准间接溯源到生态环境部门气体流量最高计量标准。主要用于在现场测量、校准环境空气监测仪或相关动态校准仪的气体流量计。一般包括层流差压式、活塞式、热式气体流量计等。

5 计量特性

环境空气监测用气体流量计主要计量特性见表1。

表1 环境空气监测用气体流量计计量特性

项目	性能要求
示值误差	大流量气体流量计: (2~5) L/min: $\pm 3\%$ [5~20) L/min: $\pm 2\%$ 小流量气体流量计: (20~40) mL/min: $\pm 3\%$ [40~100) mL/min: $\pm 2\%$
重复性	$\leq 1\%$

6 校准条件

6.1 校准环境

环境温度: (15~30) °C

环境湿度: $\leq 85\%RH$

大气压力: (86~106) kPa

交流工作电源: (220 \pm 22)VAC, (50 \pm 1) Hz

6.2 测量标准及配套设备

6.2.1 钟罩式气体流量标准装置

测量范围: (2.0~200) L/min, $U_{rel} \leq 0.5\%$, $k=2$;

测量范围: (1.2~6.0) L/min, $U_{rel} \leq 0.5\%$, $k=2$ 。

6.2.2 皂膜气体流量标准装置

测量范围：（0.6~5.0）L/min， $U_{rel} \leq 0.5\%$ ， $k=2$ ；

测量范围：（0.02~1.0）L/min， $U_{rel} \leq 1.0\%$ ， $k=2$ 。

6.2.3 水银活塞法气体流量标准装置

测量范围：（0.02~20）L/min， $U_{rel} \leq 0.5\%$ ， $k=2$ 。

6.2.4 标准表法气体流量标准装置

测量范围：（2~20）L/min，准确度等级优于或等于 1 级；

测量范围：（10~100）mL/min，准确度等级优于或等于 1 级。

6.2.5 温度变送器

测量范围：（0~50） $^{\circ}\text{C}$ ， $U \leq 0.1^{\circ}\text{C}$ ， $k=2$ 。

6.2.6 绝压变送器

测量范围：（0~110）kPa.a、（0~350）kPa.a，准确度等级优于或等于 0.1 级。

7 气体流量计量标准工作原理及组成

7.1 钟罩式气体流量标准装置的工作原理及组成

钟罩式气体流量标准装置由钟罩、液槽、发讯机构、压力补偿机构和试验管道等构成，可动的钟罩和固定的液槽形成一个容积可变的密封空腔。钟罩下降过程中通过压力补偿机制，使其内部气体压力保持一定值，不随钟罩浸入密封液体中的深度而变化。钟罩两挡板之间的容积是固定的，测出两挡板先后通过光电发讯器所经历的时间，可计算出标准流量。装置结构如图 2 所示。

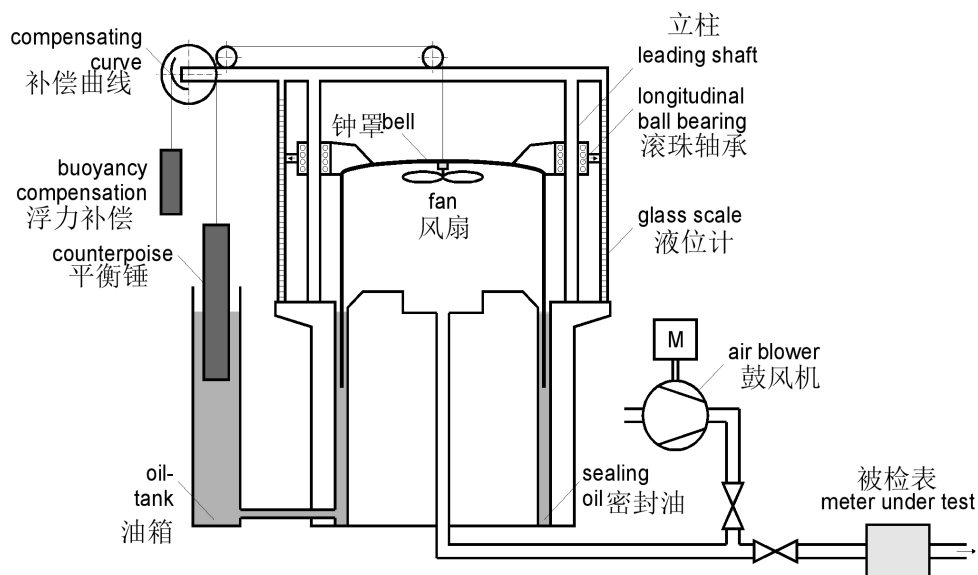


图 2 钟罩式气体流量标准装置结构简图

7.2 皂膜式气体流量标准装置的工作原理及组成

皂膜式气体流量标准装置以钟罩为气源，开关阀、调节阀、皂膜管组成。由内压恒定的钟罩作为气源，气体经过被校流量计进入皂膜管，然后挤压胶球产生皂膜，用电子秒表测量皂膜经过两刻线间的时间，求出标准流量，与被检流量计的示值比较，算出示值误差。装置结构如图 3 所示。

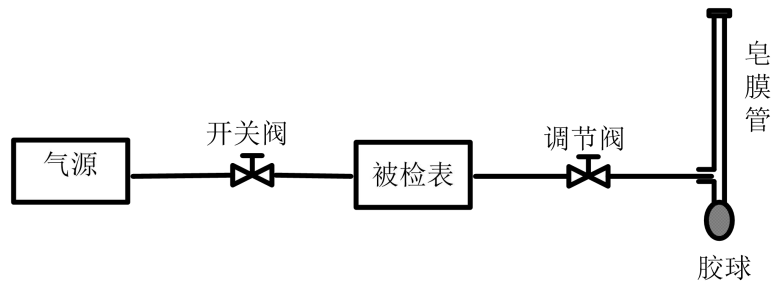


图 3 皂膜式气体流量标准装置结构简图

7.3 水银活塞式气体流量标准装置的工作原理及组成

水银活塞式气体流量标准装置由石英玻璃管、温度传感器、压力传感器、计时器和激光干涉仪等构成。气体通过被校流量计进入石英玻璃管，在气体压力的推动下，水银活塞匀速上升，计时器测量水银活塞经过两个激光干涉仪的时间，根据已知体积计算出标准流量。装置结构如图 4 所示。

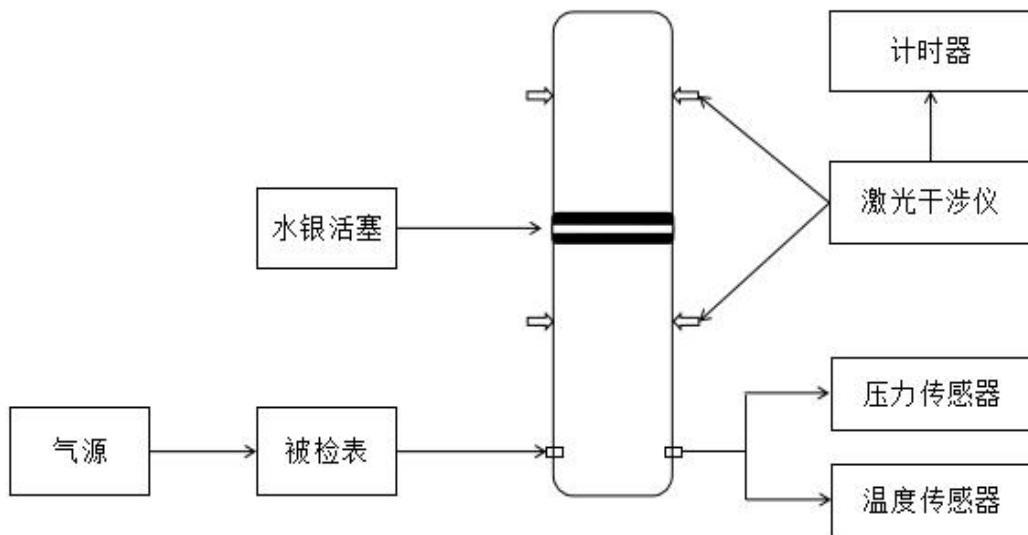


图 4 水银活塞式式气体流量标准装置结构简图

7.4 标准表法流量标准装置的工作原理及组成

标准表法流量标准装置基于流体连续流原理，以标准表流量计（高精度层流差压式、热式等流量计）为主标准器，在相同时间间隔内流体连续通过标准表和被检流量计，通过比较两者的输出流量值，确定被检流量计的计量性能。

标准表法流量标准装置主要由气源、试验管路、阀门、标准表和检测控制系统组成。装置结构如图 5 所示。

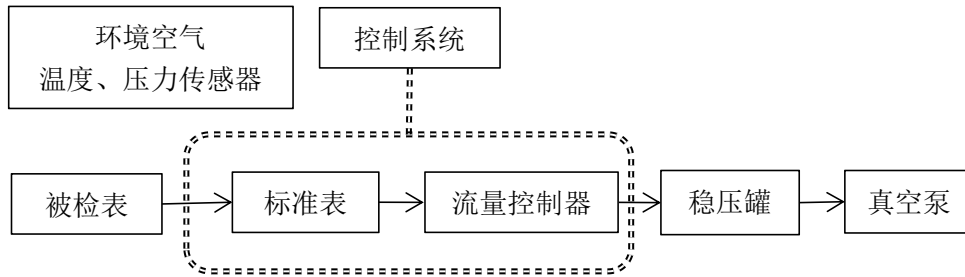


图 5 标准表法流量标准装置结构简图

8 校准方法

8.1 钟罩式气体流量标准装置校准方法

将被检表按照气流方向安装在气路中。选择校准方法（进气法/排气法，压损较高的气体流量计，如层流差压法，宜选择进气法），调节流量阀门至第一个流量点。运行钟罩式气体流量标准装置校准系统，钟罩匀速上升或下降，试运行数次，运行至气体状态稳定。

调节流量到第 i 个校准流量点（ $i=1, 2, 3, 4, 5$ ），进行校准，记录被检表示值 q 与钟罩式气体流量标准装置标准流量值 q_s ，重复以上过程至少 3 次，完成第一个流量点的校准。第 i 流量点第 j 次校准流量计的相对示值误差按式（1）中计算。

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

式中： E_{ij} ——第 i 流量点第 j 次校准被检表的相对示值误差；

q_{ij} ——第 i 流量点第 j 次校准被检表流量示值；

$(q_s)_{ij}$ ——第 i 流量点第 j 次校准标准流量示值。

依次对其它 4 个流量点进行校准，按公式（1）计算得到至少 5 组 15 个相对示值误差的数据；根据公式（2）计算每个流量点相对示值误差的平均值 E_i 。

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

式中： n ——第 i 流量点的校准次数；

E_{ij} ——第 i 流量点第 j 次校准被检表的相对示值误差，%。

按公式（3）计算被检表各流量点的重复性。

$$(E_r)_i = \left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^n (E_{ij} - E_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$(E_r)_i$ ——第 i 流量点 n 次校准被检表重复性, %。

校准结果的不确定度分析示例见附录 B。

8.2 皂膜式气体流量标准装置校准方法

将被检表按照气流方向安装在气路中。按校准流量点和一次校准时间选择皂膜管容积。调节流量到第一个校准流量点, 运行至气体状态稳定。挤压胶球, 皂液形成皂膜, 进气压力推动皂膜上升, 试运行数次至管壁湿润, 皂膜匀速上升。

调节流量到第 i 个校准流量点 ($i=1, 2, 3, 4, 5$), 进行校准, 记录被检表示值 q 与皂膜式气体流量标准装置标准流量值 q_s , 重复以上过程至少 3 次, 完成第一个流量点的校准。第 i 流量点第 j 次校准流量计的相对示值误差按式 (1) 中计算。

依次对其它 4 个流量点进行校准, 按公式 (1) 计算得到至少 5 组 15 个相对示值误差的数据; 根据公式 (2) 计算每个流量点相对示值误差的平均值 E_i 。

按公式 (3) 计算被检表各流量点的重复性。

校准结果的不确定度分析示例见附录 B。

8.3 水银活塞式气体流量标准装置校准方法

将被检表按照气流方向安装在气路中。打开校准系统, 输入校准流量点和校准次数, 运行校准系统, 调节流量到第一个校准流量点, 运行至气体状态稳定, 水银活塞匀速上升或下降, 试运行数次。

调节流量到第 i 个校准流量点 ($i=1, 2, 3, 4, 5$), 进行校准, 记录被检表示值 q 与水银活塞式气体流量标准装置标准流量值 q_s , 重复以上过程至少 3 次, 完成第一个流量点的校准。第 i 流量点第 j 次校准流量计的相对示值误差按式 (1) 中计算。

依次对其它 4 个流量点进行校准, 按公式 (1) 计算得到至少 5 组 15 个相对示值误差的数据; 根据公式 (2) 计算每个流量点相对示值误差的平均值 E_i 。

按公式 (3) 计算被检表各流量点的重复性。

校准结果的不确定度分析示例见附录 B。

8.4 标准表法流量装置校准方法

使用钟罩式气体流量标准装置、皂膜式气体流量标准装置或水银活塞式气体流量标准装置校准标准表, 根据校准结果计算出各校准流量点的示值误差 Δq 。

$$\Delta q = q_v - q_s \quad (4)$$

式中: Δq ——标准表示值误差;

q_s ——钟罩、皂膜或水银活塞标准装置标准流量值;

q_v ——标准表示值流量值。

将被检表与标准表按照气流方向安装在气路中。调节质量流量控制器到第一个校准流量点, 运行至气体状态稳定。

调节流量到第 i 个校准流量点 ($i=1, 2, 3, 4, 5$)，进行校准，根据公式 (4) 和标准表示值可计算出标准流量值，记录被检表示值 q 与标准表示值 q_v ，根据公式 (5) 计算标准表装置标准流量值。

$$q_s = q_v - \Delta q \quad (5)$$

式中： q_s ——标准表装置标准流量值；

q_v ——标准表示值流量值；

Δq ——标准表示值误差。

重复以上过程至少 3 次，完成第一个流量点的校准。第 i 流量点第 j 次校准流量计的相对示值误差按式 (1) 计算。

依次对其它 4 个流量点进行校准，按公式 (1) 计算得到至少 5 组 15 个相对示值误差的数据；根据公式 (2) 计算每个流量点相对示值误差的平均值 E_i 。

按公式 (3) 计算被检表各流量点的重复性。

校准结果的不确定度分析示例见附录 B。

9 质量保证和质量控制

9.1 系统验漏

校准流量计前需进行气体流量标准装置的气密性检查。管路连接、阀门松动、垫圈老化等因素都会影响标准器具的气密性，进而影响校准结果。

钟罩式气体流量标准装置：打开校准系统软件，在钟罩内部无气流的情况下，点击标定/检漏选项，选择钟罩检漏/静态标定编码器系数开始检漏，查看静态标定编码器脉冲数，如果脉冲数为负值，则钟罩内有气体泄露；如果为 0 值，则说明钟罩内无气体泄漏。

水银活塞式气体流量标准装置：连接气路，打开校准系统软件，将水银活塞提升至玻璃管中上端位置，关闭电磁阀，记录水银活塞具体位置，静置一小时后，测量水银活塞下降高度，计算泄露系数，泄露系数如低于 0.4mm/min，说明装置气密性正常；如高于 0.4mm/min，则说明装置出现漏气情况。

9.2 期间核查

使用标准法流量装置校准被校气体流量计时，至少每月使用皂膜气体流量标准装置、钟罩式气体流量标准装置或水银活塞式气体流量标准装置校准一次标准表，并根据校准结果形成质控图，分析系统漂移等对校准结果的影响。如出现异常数据应停止校准工作，排查问题，保证计量标准装置的稳定性。

9.3 量值溯源和传递要求

气体流量标准装置（皂膜气体流量标准装置、钟罩式气体流量标准装置、标准表法流量装置、水银活塞式气体流量标准装置）和相关配套设备（温度传感器、绝压传感器）等应按计量检定规程/校准规范的要求进行周期性检定或校准，所有设备均应在有效期内使用。

9.4 测量审核

生态环境部门气体流量最高计量标准装置每年和中国计量科学研究院进行测量审核,次级标准每年和中国环境监测总站或中国计量科学研究院进行测量审核,保证环境监测系统气体流量标准的可比性与一致性。测量审核满意度 $|En| \leq 1$ 为满意,证明数据具有可比性;若 $|En| > 1$,应立即停止校准工作,排查问题,保证校准结果的准确性。

10 校准结果与表示

对校准后的气体流量计出具校准证书。校准证书格式见附录 A,校准证书应包括以下信息:

标题:“校准证书”;

实验室名称和地址;

校准地点;

校准证书编号、页码及总页数的标识;

客户名称;

被校仪器的制造单位、名称、型号及编号;

校准单位业务专用章;

校准日期;

校准所依据的技术规范名称及代号;

本次校准所用有证标准物质和主要测量设备名称、型号、准确度等级/不确定度/最大允许误差、仪器编号、证书编号及有效期;

校准时的环境温度、相对湿度;

校准结果;

对校准规范偏离的说明(若有);

复校时间间隔的建议;

“校准证书”的校准人、核验人、批准人签名及签发日期;

校准结果仅对被校仪器本次测量有效的声明;

未经实验室书面批准,部分复制证书或报告无效的声明。

附录 A
(资料性附录)
校准证书格式

校准证书

证书编号: XXXX-XX-XXXX

客户名称: _____
器具名称: _____
型号/规格: _____
出厂编号: _____
生产厂商: _____
校准日期: _____

批准人:

地址: _____ 邮编: _____
电话: _____ 传真: _____
网址: _____ 电子邮箱: _____

证书编号：XXXX-XX-XXXX

校准所依据/参照的技术文件（代号、名称）

校准环境条件及地点：

温度：℃

地点：

湿度：%RH

气压：kPa

校准使用的计量标准装置/主要仪器

名称	测量范围	不确定度或最大允许误差	证书编号	证书有效期至
气体流量标准装置	(0.02~20) L/min	$U_{rel} \leq 1.0\%$, $k=2$	XXXXXXXX	XXXXXXXX

校准结果

一、外观检查:

二、密封性检查:

三、校准结果:

标准流量 (mL/min)	示值流量 (mL/min)	示值误差(%)	重复性 (%)	扩展不确定度 $U_{rel} (k=2)$

说明:

- 1、介质为空气。
- 2、本次校准为标况流量，标准状态（20℃、101.325kPa）。
- 3、根据标准文件和相关技术规范的规定，通常情况下12个月校准一次。

声明:

校准员:

核验员:

附录 B
(资料性附录)
校准结果的不确定度分析示例

B.1 钟罩式气体流量标准装置校准结果的不确定度分析示例

被校流量计引入的不确定度：测量重复性引起的不确定度分量 u_1 。

钟罩式气体流量标准装置引入的相对标准不确定度分量 u_2 ，由检定证书得到，该标准装置的相对扩展不确定度 U_r 以及 k ，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{U_r}{k}$$

流量计处压力测量 P_m 引入的相对标准不确定度分量 u_3 ，由压力传感器的检定证书得到流量计处的压力传感器的最大允许误差为 E_{pm} ，取均匀分布，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_3 = \frac{E_{pm}}{\sqrt{3}}$$

流量计处温度测量 T_m 引入的标准不确定度分量 u_4 ，根据温度变送器校准证书给出温度传感器的最大允许误差为 E_{tm} ，取均匀分布，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_4 = \frac{E_{tm}}{(273.15 + 20.0) \times \sqrt{3}} \times 100\%$$

标准装置处压力测量 P_s 引入的相对标准不确定度分量 u_5 ，由压力传感器的检定证书得到流量计处的压力传感器的最大允许误差为 E_{ps} ，取均匀分布，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_5 = \frac{E_{ps}}{\sqrt{3}}$$

标准装置处温度测量 T_s 引入的标准不确定度分量 u_6 ，属 B 类。根据温度变送器校准证书给出温度传感器的最大允许误差为 E_{ts} ，取均匀分布，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_6 = \frac{E_{ts}}{(273.15 + 20.0) \times \sqrt{3}} \times 100\%$$

以 16.7L/min 流量点为例，流量示值误差的相对扩展不确定度：

实验室所用温度传感器、压力传感器精度均为 0.05；

被检处压力传感器量程为 350Kpa；

16.7L/min 点位 3 次测量值如下：

标准值 q_n ，被检值 q_i

n=1: $q_1=16.472$; $q_i=16.480$

n=2: $q_2=16.472$; $q_i=16.484$

n=3: $q_3=16.469$; $q_i=16.480$

$$2 * \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^3 (q_n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^3 q_i)^2} + 0.25^2 + 2 * (100 * 0.05 / (273.15 + 20))^2 + 0.05^2 + (0.05 * 3.5)^2 \right)}$$

≈ 0.62

16.7L/min 点位相对扩展不确定度为 0.62% (k=2)。

B.2 皂膜式气体流量标准装置校准结果的不确定度分析示例

被校流量计引入的不确定度：测量重复性引起的不确定度分量 u_1 。

皂膜式气体流量标准装置引入的相对标准不确定度分量 u_2 ，由检定证书得到，该标准装置的相对扩展不确定度 U_r 以及 k ，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{U_r}{k}$$

流量计处压力测量 P_m 引入的相对标准不确定度分量 u_3 ，由压力传感器的检定证书得到流量计处的压力传感器的最大允许误差为 E_{pm} ，取均匀分布，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_3 = \frac{E_{pm}}{\sqrt{3}}$$

流量计处温度测量 T_m 引入的标准不确定度分量 u_4 ，根据温度变送器校准证书给出温度传感器的最大允许误差为 E_{tm} ，取均匀分布，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_4 = \frac{E_{tm}}{(273.15 + 20.0) \times \sqrt{3}} \times 100\%$$

标准装置处压力测量 P_s 引入的相对标准不确定度分量 u_5 ，由压力传感器的检定证书得到流量计处的压力传感器的最大允许误差为 E_{ps} ，取均匀分布，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_5 = \frac{E_{ps}}{\sqrt{3}}$$

标准装置处温度测量 T_s 引入的标准不确定度分量 u_6 ，属B类。根据温度变送器校准证书给出温度传感器的最大允许误差为 E_{ts} ，取均匀分布，其引入的相对标准不确定度为：

$$u_6 = \frac{E_{ts}}{(273.15 + 20.0) \times \sqrt{3}} \times 100\%$$

以100mL/min流量点为例，流量示值误差的相对扩展不确定度：

实验室所用温度传感器、压力传感器精度均为0.05；

100mL/min 点位3次测量值如下：

标准值 q_n ，被检值 q_i

n=1: $q_1=103.888$; $q_i=104.3$

n=2: $q_2=104.088$; $q_i=104.4$

n=3: $q_3=104.026$; $q_i=104.4$

$$2 * \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^3 (q_n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^3 q_i)^2} + 0.5^2 + (100 * 0.05 / (273.15 + 20))^2 + 0.05^2 \right)} \approx 1.01$$

100mL/min 点位相对扩展不确定度为1.01。

B.3 水银活塞式气体流量标准装置校准结果的不确定度分析示例

体积管直径测量不确定度由校准证书给出，为 $U=0.003\text{mm}$ ， $k=2$ ，直径越小引入的测量不确定度越大，取最小直径管19.002mm计算，不确定 u_1 为：

$$u_1=0.003 / (2 \times 19.002) \times 100\% = 0.008\%$$

检测开关距离测量引入的不确定度 u_2 为：0.001%

压力测量引入的不确定度 u_3 为：0.015%

温度测量引入的不确定度 u_4 为：0.0045%

时间测量引入的不确定度 u_5 为：0.005%

被校流量计引入的不确定度：

以 8L/min 流量点为例，流量示值误差的相对扩展不确定度：

8L/min 点位 3 次测量值如下：

标准值 q_n ，被检值 q_i

n=1: $q_1=7.957$; $q_i=7.982$

n=2: $q_2=7.960$; $q_i=7.981$

n=3: $q_3=7.948$; $q_i=7.982$

测量重复性引起的不确定度分量 $u_6=0.08\%$

$$2 \times \sqrt{0.08^2 + 0.005^2 + 0.0045^2 + 0.015^2 + 0.001^2 + 0.008^2} \approx 0.17$$

8L/min 点位相对扩展不确定度为 0.17。

B.4 标准表法气体流量标准装置校准结果的不确定度分析示例

标准表的相对拓展不确定度 u_1

被检表重复性引入的不确定度 u_2

以 5L/min 流量点为例，流量示值误差的相对扩展不确定度：

假设已知标准表 5L/min 的相对拓展不确定度为 0.63%

标准表值 q_n ，被检值 q_i

n=1: $q_1=4.991$; $q_i=4.96$

n=2: $q_2=4.991$; $q_i=4.95$

n=3: $q_3=4.991$; $q_i=4.96$

被检表重复性 $u_2=0.12\%$

$$\sqrt{0.12^2 + 0.63^2} \approx 0.64$$

5L/min 点位相对扩展不确定度为 0.64。