

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.24

$p. V. T. t$ 法气体流量标准装置

王鹏, 张永胜, 赵玉婷

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了满足高准确度气体流量计的量值传递需求, 建立了一套 $p. V. T. t$ 法气体流量标准装置, 该装置由标准容器、温度传感器、压力传感器、标准流量积算仪等部分组成, 工作时气体经过音速喷嘴充入标准容器, 根据标准容器容积、充气时间及充气前后的压力、温度计算气体流量。该装置工作压力范围为 $0 \sim 0.6$ MPa, 流量范围为 $0.5 \sim 1000$ m³/h, 扩展不确定度为 0.1% ($k=2$), 有效提升了本单位气体流量最高标准的准确性, 增强了量值传递能力。

关键词: $p. V. T. t$; 气体流量; 正压; 常压; 不确定度

中图分类号: TB937

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0159-08

Gas Flow Calibration Facility by $p. V. T. t$ Technique

WANG Peng, ZHANG Yongsheng, ZHAO Yuting

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The gas flow calibration facility by $p. V. T. t$ technique is established for the value transmission of high accuracy gas flowmeter. It is composed of standard containers, temperature sensor, pressure sensor, standard flow accumulator, etc. When the facility is operating, gas flows through the sonic nozzle into the standard container. The gas flow can be calculated according to the volume of the standard container, inflow time, temperature and pressure. The working pressure range of the calibration facility is $0 \sim 0.6$ MPa, the flow range is $0.5 \sim 1000$ m³/h. The extended uncertainty of the calibration facility is 0.1% ($k=2$). The development of facility improves the uncertainty of the highest gas flow standard equipment in the CIMM, and enhances the ability of value transmission.

Key words: $p. V. T. t$; gas flow; positive pressure; normal pressure; uncertainty

0 引言

气体流量计量在医药卫生、能源、化工等领域应用广泛, 气体流量标准装置对保障气体流量计的量值传递准确性具有重要意义^[1-2]。 $p. V. T. t$ 法气体流量标准装置是一种原级标准装置, 国外多家法定计量机构建立了 $p. V. T. t$ 法气体流量标准装置, 其中, 美国 NIST 采用 $p. V. T. t$ 法建立的气体流量标准装置在 0.7 MPa 下最大流量为 617 m³/h, 扩展不确定度为 0.09% ($k=2$), 在 2.5 MPa 下最大流量为 4.7 m³/h, 扩展不确定度为 0.025% ($k=2$); 日本 NMIJ 采用 $p. V. T. t$ 法建立的气体流量标准装置的最大工作压力为 0.5 MPa, 最大流量为 200 m³/h, 扩展不确定度为 0.17% ($k=2$)。

本单位原有气体流量标准装置的扩展不确定度为 0.5% ($k=2$), 为了满足高准确度气体流量计的量值传递需求, 建立了一套 $p. V. T. t$ 法气体流量标准装置, 其工作压力(表压)范围为 $0 \sim 0.6$ MPa, 流量范围为

$0.5 \sim 1000$ m³/h, 扩展不确定度为 0.1% ($k=2$)。本文对该装置的结构组成、计算原理、工作过程进行介绍, 并对其不确定度进行分析, 为相关流量计量标准装置的设计研发提供借鉴。

1 基本原理

$p. V. T. t$ 法气体流量标准装置通过对压力 p 、容积 V 、温度 T 、时间 t 四个参数进行测量, 计算得出气体的质量流量^[3]。 $p. V. T. t$ 法气体流量标准装置的基本构成如图 1 所示, 包括压力传感器、标准容器、温度传感器、计时器、控制采集系统、管路阀门、真空泵等部分。

$p. V. T. t$ 法气体流量标准装置的工作过程为: 将临界流文丘里喷嘴安装在标准装置的安装段, 同时启动真空泵进行抽气, 并打开开关阀 2, 当标准容器内气体的压力达到预设状态时, 关闭开关阀 2 和真空泵, 待标准容器内气体达到平衡后, 测量得出充气平衡初态的压力 p_i 和温度 T_i 。之后开启开关阀 1, 计时器启动,

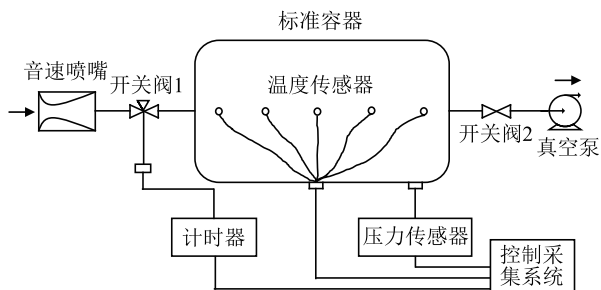


图1 p-V-T-t 法气体流量标准装置的基本构成

空气通过音速喷嘴流入标准容器内，在到达预先设定的充气时间 t 后，关闭开关阀1，停止计时，待标准容器内气体达到平衡后，测量得出充气平衡终态的压力 p_f 和温度 T_f ^[5]。通过式(1)计算出实际的气体质量流量，从而得出临界流文丘里喷嘴的流出系数^[6]。

$$q_m = \frac{VT_n z_n \rho_n}{P_n} \times \left(\frac{p_f}{T_f z_f} - \frac{p_i}{T_i z_i} \right) \times [1 + 3\alpha \times (\theta - 20)] - \Delta m \quad (1)$$

式中： V 为标准容器在 293.15 K 下的容积， m^3 ； t 为充气时间，s； p_i 为充气初态标准容器内空气的绝对压力，Pa； p_f 为充气终态标准容器内空气的绝对压力，Pa； p_n 为标况下空气的绝对压力，Pa； T_i 为充气初态标准容器内空气的热力学温度，K； T_f 为充气终态标准容器内空气的热力学温度，K； T_n 为标况下空气的热力学温度，K； z_i 为充气初态标准容器内空气的气体压缩系数； z_f 为充气终态标准容器内空气的气体压缩系数； z_n 为标况下空气的气体压缩系数； ρ_n 为标况下空气的密度， kg/m^3 ； Δm 为附加质量，kg； Δt 为换向时间（或开关时间），s； α 为标准容器材料线膨胀系数， $^{\circ}C^{-1}$ ； θ 为标准容器的壁面温度， $^{\circ}C$ 。

2 标准装置的设计

本文建立的 $p-V-T-t$ 法气体流量标准装置，其工作压力（表压）范围为 0~0.6 MPa，流量范围为 0.5~1000 m^3/h ，扩展不确定度为 0.1% ($k=2$)。该标准装置由标准容器，高精度数字压力计，铂电阻温度传感器，标准流量积算仪，换向阀组，真空泵机组，空气压缩机，测控系统等部分组成，如图2所示^[7]。

2.1 标准容器的设计

标准容器容积的确定是 $p-V-T-t$ 法气体流量标准装置设计的核心内容。根据装置所需标定的体积流量和进气前后容器内的压力计算标准容器的容积，即

$$V = \frac{q_v \rho_n R T_n t}{p_f - p_i} \quad (2)$$

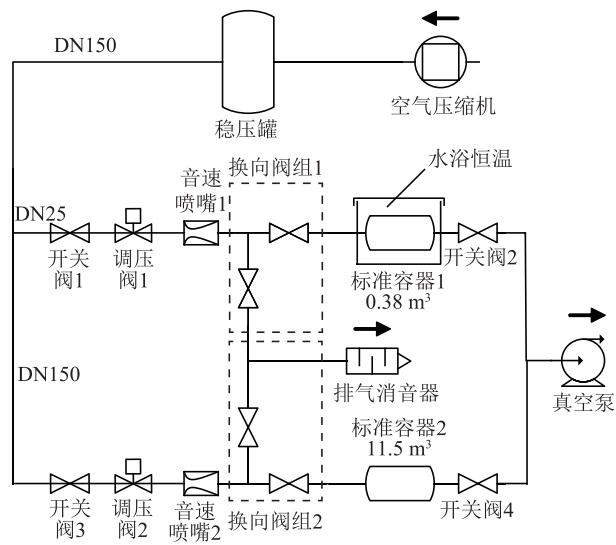


图2 p-V-T-t 法气体流量标准装置原理图

式中： q_v 为所需标定的空气体积流量， m^3/s ； R 为气体常数，287.1 J/(kg·K)。

标准装置的流量范围为 0.5~1000 m^3/h ，量程比达 2000:1，最大流量下的进气时间为 30 s，最小流量下的进气时间为 1000 min，所以设计两个标准容器，覆盖流量范围分别为 0.5~20 m^3/h 和 20~1000 m^3/h 。充气初态压力 p_i 在理论上可减小为零，但若抽为高真空，消耗时间过长，故根据经验， p_i 取 50~500 Pa， p_f 取 50~80 kPa，可保证在进气过程中音速喷嘴处气流速度始终为音速状态。

在流量为 1000 m^3/h 时，取 $p_f = 80$ kPa， $T_n = 293$ K， $t = 30$ s， $\rho_n = 1.205$ kg/m^3 ，根据式(2)可计算出 $V = 10.78$ m^3 ，考虑场地情况、容器封头、设计比例等因素，确定较大标准容器的体积为 11.5 m^3 ，主要流量点测量参数如表1所示。

表1 11.5 m^3 标准容器各流量点测量参数

$q_v/(m^3 \cdot h^{-1})$	t/s	p_f/kPa
20	1428.5	70
50	571.3	70
300	95.2	70
675	42.3	70
800	35.7	70
1000	32.6	80

根据计算结果并考虑小标准水浴结构设计^[8]等因素，确定小标准容器的体积为 0.38 m^3 （由两个立式

0.19 m³压力容器连接而成)。0.38 m³标准容器各流量点测量参数如表 2 所示。

表 2 0.38 m³标准容器各流量点测量参数

$q_v / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	t / s	p_f / kPa
0.5	1348.2	50
0.66	1021.4	50
2	337.1	50
5	134.8	50
11	61.3	50
20	47.2	70

2.2 压力测量方案

压力测量方案如图 3 所示, 高精度绝压数字压力计 P3 用于测量大气压, 其准确度为 0.01% FS, 量程为 0 ~ 130 kPa; 2 台准确度为 0.01% FS 的高精度表压数字压力计 P1, P2 分别用于测量音速喷嘴处的滞止压力和标准容器内的压力。标准装置内压力(绝压)的测量范围为 0 ~ 0.7 MPa, 综合考虑压力测量范围和测量准确度的要求, 确定 P1, P2 数字压力计的量程为 -700 ~ 700 kPa。为了保证测量的高准确度, 对数字压力计进行定点校准、修正使用。3 台高精度数字压力计将测得的压力值直接转换为数字信号并通过 RS232 接口传输至测控系统, 避免了因二次采集造成的误差。

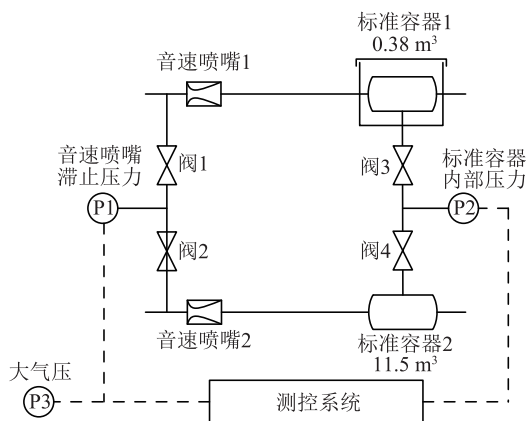


图 3 压力测量方案

2.3 温度测量方案

使用 20 支准确度为 ±0.05 °C 的四线制精密铂电阻温度传感器进行温度测量, 温度测量方案如图 4 所示, 利用温度传感器 T1 测量环境温度, T2, T3 测量两个音速喷嘴处的滞止温度, T4 ~ T7 测量 0.38 m³标准容

器内的温度, T8 ~ T20 测量 11.5 m³标准容器内的温度。使用数字电压表准确测量每支四线制铂电阻温度传感器的电阻值, 通过 RS232 接口将数字信号传输至测控系统, 在测量软件中根据分度表将电阻值转换为对应的温度。

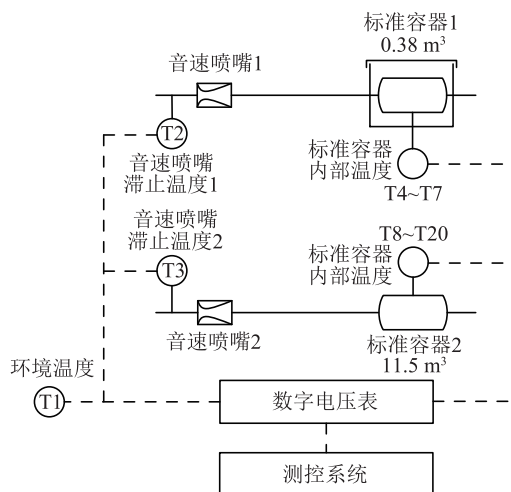


图 4 温度测量方案

0.38 m³标准容器的容积较小, 且处于 20 °C 水浴中, 温度平衡时间较短, 且温度梯度较小, 分别在每个 0.19 m³容器内的上下两个截面处布置 1 支温度传感器, 如图 5 所示, 待容器内温度平衡后进行读数。

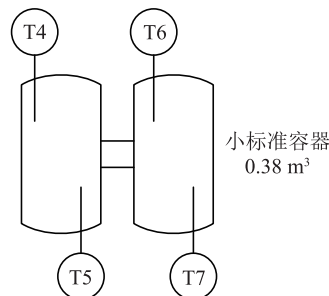


图 5 0.38 m³标准容器内温度传感器布置示意图

11.5 m³标准容器设计为卧式容器, 在其内部布置 13 支温度传感器^[9], 其中 1 支布置在中心点, 其它 12 支分别布置在容器径向三个位置(上、中、下) × 轴向 4 个位置(L1 ~ L4), 如图 6 所示。保证此标准容器周围无热源且不受阳光直射, 待其温度平衡后进行读数。表 3 为某次试验充气后大标准容器内温度分布的数据, 可以看出经过足够长的时间, 标准容器内的平均温度为 288.51 K, 最大温差为 0.19 K, 证明气体温度已达到平衡状态。

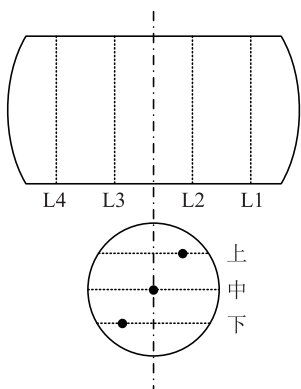


图6 11.5 m³标准容器内温度传感器布置示意图

2.4 进气时间测量方案

进气时间的测量通过标准流量积算仪和换向阀组共同实现。标准流量积算仪采用双时间脉冲插值法，既能测量时间，又具有方便与计算机相连的 RS232 接口。晶振频率检定后，可将检定数据输入至标准流量积算仪内部，使得时间测量准确度大幅提高为 1×10^{-6} s。换向阀组由两个同型号的开关阀组成，两个开关阀的开关时间、换向动作及流量特性具有高度一致性。标准流量积算仪通过接收换向阀组的开关量信号控制计时器的启动和停止，从而准确地测量进气时间。

$$u_r(q_m) = \sqrt{u_r(V)^2 + u_r(t)^2 + u_r(p_f)^2 + u_r(T_f)^2 + u_r(z_f)^2 + [c_r(\Delta m)u_r(\Delta m)]^2 + \left(\frac{\Delta t}{t - \Delta t}\right)^2 u_r(\Delta t)^2 + \left(\frac{p_i}{p_f - p_i}\right)^2 [u_r(p_i)^2 + u_r(T_i)^2 + u_r(z_i)^2]} \quad (3)$$

式中： $u_r(q_m)$ 为空气质量流量的合成标准不确定度； $u_r(V)$ 为标准容器的容积的相对标准不确定度； $u_r(t)$ 为充气时间的相对标准不确定度； $u_r(\Delta t)$ 为换向时间的相对标准不确定度； $u_r(p_f)$ 为充气终态标准容器内压力的相对标准不确定度； $u_r(T_f)$ 为充气终态标准容器内温度的相对标准不确定度； $u_r(z_f)$ 为充气终态空气压缩系数的相对标准不确定度； $u_r(p_i)$ 为充气初态标准容器内压力的相对标准不确定度； $u_r(T_i)$ 为充气初态标准容器内温度的相对标准不确定度； $u_r(z_i)$ 为充气初态空气压缩系数的相对标准不确定度； $u_r(\Delta m)$ 为附加质量的相对标准不确定度； $c_r(\Delta m)$ 为附加质量不确定度的灵敏系数。

使用标准容器的标定数据进行不确定度评估，标准容器标定数据见表4。

表4 标准容器标定数据

标准容器	充气初态 温度/K	充气初态 压力/Pa	充气终态 温度/K	充气终态 压力/Pa	标准 容积/m³
小标准容器	288.64	336	288.66	55727	0.362568
大标准容器	288.16	440	288.51	53961	11.5298

表3 11.5 m³标准容器充气平衡后的温度分布

序号	位置	测量温度/K
1	容器中心	288.52
2	L1 截面上	288.60
3	L1 截面中	288.54
4	L1 截面下	288.43
5	L2 截面上	288.59
6	L2 截面中	288.53
7	L2 截面下	288.44
8	L3 截面上	288.57
9	L3 截面中	288.54
10	L3 截面下	288.42
11	L4 截面上	288.56
12	L4 截面中	288.53
13	L4 截面下	288.41

3 标准装置的不确定度评定

由式(1)可得出 p, V, T, t 法气体流量标准装置的不确定度模型为^[10]

3.1 充气时间测量引入的不确定度分量 $u_r(t)$

标准流量积算仪时间测量的准确度为 1×10^{-6} s，在不确定度计算中可以忽略不计。时间的分辨力为 1 ms，最短充气时间为 30 s，按均匀分布计算，可得充气时间测量的相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(t) = \frac{0.001}{30 \times \sqrt{3}} = 0.002\% \\ c_r(t) = 1$$

3.2 换向时间测量引入的不确定度分量 $u_r(\Delta t)$

换向时间是通过多次测量取平均值得出的，同一喷嘴的开关时间范围一般在 ± 5 ms 以内，标准装置最短测量时间为 30 s，按均匀分布计算，可得换向时间测量的相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(\Delta t) = \frac{0.005}{30 \times \sqrt{3}} = 0.01\%$$

$$c_r(\Delta t) = \frac{\Delta t}{t - \Delta t} = \frac{0.005}{30 - 0.005} = 1.7 \times 10^{-4}$$

3.3 充气终态压力测量引入的不确定度分量 $u_r(p_f)$

充气终态的压力测量，在定点修正使用时准确度

可达 ±20 Pa。根据表 4 中的数据，充气终态的绝对压力按 55 kPa 计算，按均匀分布，充气终态压力测量的相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(p_f) = \frac{20}{55000 \times \sqrt{3}} = 0.021\%$$

$$c_r(p_f) = 1$$

3.4 充气终态温度测量引入的不确定度分量 $u_r(T_f)$

精密铂电阻温度传感器的最大允许误差为 ±0.05 K，由于温度传感器放置在标准容器内的不同位置，测量平均温度时引入的误差不会超过 ±0.01 K，因此认为温度测量引入误差不超过 ±0.06 K。根据表 4 中的数据，充气终态温度按照 288.5 K 计算，按均匀分布，充气终态温度测量的相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(T_f) = \frac{0.06}{288.5 \times \sqrt{3}} = 0.012\%$$

$$c_r(T_f) = 1$$

3.5 充气终态空气压缩系数引入的不确定度分量 $u_r(z_f)$

空气压缩系数通过查表得到，热力学性质表中空气压缩系数的允差为 0.01%，按均匀分布计算，可得出充气终态空气压缩系数相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(z_f) = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.006\%$$

$$c_r(z_f) = 1$$

3.6 充气初态压力测量引入的不确定度分量 $u_r(p_i)$

使用与充气终态压力测量相同的高精度数字压力计进行充气初态压力测量，在定点修正使用时准确度可达 ±20 Pa。根据表 4 数据，充气初态的绝对压力按 400 Pa 计算，按均匀分布，可得充气初态压力测量的相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(p_i) = \frac{20}{400 \times \sqrt{3}} = 2.9\%$$

$$c_r(p_i) = \frac{p_i}{p_f - p_i} = \frac{400}{55000 - 400} = 0.007$$

3.7 充气初态温度测量引入的不确定度分量 $u_r(T_i)$

与充气终态温度测量相同，认为温度测量引入的误差不超过 ±0.06 K。充气初态温度也按照 288.5 K 计算，按均匀分布考虑，充气初态温度测量的相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(T_i) = \frac{0.06}{288.5 \times \sqrt{3}} = 0.012\%$$

$$c_r(T_i) = \frac{p_i}{p_f - p_i} = \frac{400}{55000 - 400} = 0.007$$

3.8 充气初态空气压缩系数引入的不确定度分量 $u_r(z_i)$

空气压缩系数通过查表得到，热力学性质表中空气压缩系数的允差为 0.01%，按均匀分布计算，可得出充气初态空气压缩系数相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(z_i) = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.006\%$$

$$c_r(z_i) = \frac{p_i}{p_f - p_i} = \frac{400}{55000 - 400} = 0.007$$

3.9 标准容器容积引入的不确定度分量 $u_r(V)$

标准容器的标准容积数学模型为

$$V = [1 - 3\alpha \times (\theta - 20)] \times \frac{m}{T_f z_f} - \frac{P_i}{T_i z_i} \times \frac{P_n}{T_n z_n \rho_n} \quad (4)$$

式中： m 为标定容器过程中的充气质量，kg。

由式(4)可得出标准容积的合成标准不确定度公式

$$u_r(V) = \sqrt{u_A(V)^2 + c_r(m)^2 u_r(m)^2 + c_r(p_i)^2 u_r(p_i)^2 + c_r(T_i)^2 u_r(T_i)^2 + c_r(p_f)^2 u_r(p_f)^2 + c_r(T_f)^2 u_r(T_f)^2 + c_r(\alpha)^2 u_r(\alpha)^2 + c_r(\theta)^2 u_r(\theta)^2 + c_r(z_i)^2 u_r(z_i)^2 + c_r(z_f)^2 u_r(z_f)^2} \quad (5)$$

3.9.1 标准容积的 A 类标准不确定度

表 5 为多次标定标准容器的容积值，使用贝塞尔公式可得出标准容积的 A 类不确定度。

表 5 标准容器标定的容积值

序号	小标准容器容积/m ³	大标准容器容积/m ³
1	0.362562	11.5305
2	0.362539	11.5283
3	0.362569	11.5313
4	0.362551	11.5288
5	0.362598	11.5286
6	0.362586	11.5314
平均值	0.362568	11.5298

其中，小容器容积的 A 类不确定度为

$$u_A(V_{小}) = 0.006\%$$

大容器容积的 A 类不确定度为

$$u_A(V_{大}) = 0.012\%$$

3.9.2 称重仪器的测量不确定度

标定小容器使用的天平量程为 5.2 kg，标准不确定度为 7.5 mg，称得气体的质量为 210 g，可得标定小容器的称重仪器的测量不确定度为

$$u_r(m_{小}) = \frac{7.5 \times 10^{-6}}{0.21} = 0.004\%$$

标定大容器使用的天平量程为 64 kg，标准不确定度为 3 mg，称得气体的质量为 6.4 kg，可得标定大容

器的称重仪器的测量不确定度为

$$u_r(m_{\text{大}}) = \frac{3 \times 10^{-6}}{6.4} = 0.00005\%$$

$$c_r(m) = 1$$

3.9.3 压力的测量不确定度

由上述可知, 充气初态压力的测量不确定度和灵敏系数为

$$u_r(p_i) = 2.9\%$$

$$c_r(p_i) = \frac{\frac{p_i}{T_i z_i}}{\frac{p_f}{T_f z_f} - \frac{p_i}{T_i z_i}} = 0.007$$

充气终态压力的测量不确定度和灵敏系数为

$$u_r(p_f) = 0.021\%$$

$$c_r(p_f) = \frac{\frac{p_f}{T_f z_f}}{\frac{p_f}{T_f z_f} - \frac{p_i}{T_i z_i}} \approx 1$$

3.9.4 温度的测量不确定度

由上述可知, 充气初态和终态温度的测量不确定度和灵敏系数分别为

$$u_r(T_i) = u_r(T_f) = 0.012\%$$

$$c_r(T_i) = c_r(p_i) = 0.007$$

$$c_r(T_f) = c_r(p_f) \approx 1$$

3.9.5 压缩系数的测量不确定度

由上述可得, 充气初态和终态压缩系数的测量不确定度和灵敏系数分别为

$$u_r(z_i) = u_r(z_f) = 0.006\%$$

$$c_r(z_i) = c_r(p_i) = 0.007$$

$$c_r(z_f) = c_r(p_f) \approx 1$$

3.9.6 壁面温度的测量不确定度

测量壁面温度的传感器最大允许误差为 ± 0.05 K, 考虑到容器体积较大, 按 ± 0.1 K 计算, 可得壁面温度的测量不确定度为

$$u_r(\theta) = \frac{0.1}{288.5 \times \sqrt{3}} = 0.020\%$$

取 $\alpha = 1.66 \times 10^{-5}$, $\theta = 15.35$ °C, 可得壁面温度的灵敏系数为

$$c_r(\theta) = 3\alpha\theta = 7.6 \times 10^{-4}$$

3.9.7 膨胀系数的测量不确定度

认为膨胀系数的查表误差为 $\pm 10\%$, 按均匀分布

计算, 可得膨胀系数的测量不确定度和灵敏系数为

$$u_r(\alpha) = \frac{10\%}{\sqrt{3}} = 5.8\%$$

$$c_r(\alpha) = c_r(\theta) = 7.6 \times 10^{-4}$$

标准容积的不确定度分量如表 6 所示。

表 6 标准容积不确定分析

序号	符号	来源	相对标准不确定度/%	灵敏系数	$c_r(x_i)u_r(x_i)$ /%
1	$u_A(V_{\text{小}})$	容积重复性	0.006	1	0.006
	$u_A(V_{\text{大}})$		0.012	1	0.012
2	$u_r(m_{\text{小}})$	充气质量	0.004	1	0.004
	$u_r(m_{\text{大}})$		0.00005	1	0.000
3	$u_r(p_f)$	充气终态标准容器内压力	0.021	1	0.021
4	$u_r(T_f)$	充气终态标准容器内温度	0.012	1	0.012
5	$u_r(z_f)$	充气终态空气压缩系数	0.006	1	0.006
6	$u_r(p_i)$	充气初态标准容器内压力	2.9	0.007	0.020
7	$u_r(T_i)$	充气初态标准容器内温度	0.012	0.007	0.000
8	$u_r(z_i)$	充气初态空气压缩系数	0.006	0.007	0.000
9	$u_r(\theta)$	壁面温度	0.020	7.6×10^{-4}	0.000
10	$u_r(\alpha)$	膨胀系数	5.8	7.6×10^{-4}	0.004

由式(5)可计算出大、小容器标准容积的不确定度分别为

$$u_r(V_{\text{小}}) = 0.033\%$$

$$u_r(V_{\text{大}}) = 0.035\%$$

取较大值, 则

$$u_r(V) = 0.035\%$$

3.10 附加质量引入的不确定度分量 $u_r(\Delta m)$

附加质量 Δm 的计算公式为

$$\Delta m = \frac{\Delta V}{R} \left(\frac{p_n}{T_n} - \frac{p_f}{T_f} \right) \quad (6)$$

式中: ΔV 为喷嘴与阀门之间的管道容积, m^3 。

由式(6)可以得出附加质量的合成标准不确定度公式。

$$u_r(\Delta m) = \sqrt{c_r(\Delta V)^2 u_r(\Delta V)^2 + c_r(R)^2 u_r(R)^2 + c_r(p_n)^2 u_r(p_n)^2 + c_r(T_n)^2 u_r(T_n)^2 + c_r(p_f)^2 u_r(p_f)^2 + c_r(T_f)^2 u_r(T_f)^2} \quad (7)$$

3.10.1 管路容积的测量不确定度

通过几何法测量喷嘴与阀们之间的管道容积，按容积允差为 ±1% 计算，可得相对标准不确定度及灵敏系数为

$$u_r(\Delta V) = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

$$c_r(\Delta V) = 1$$

3.10.2 气体常数的测量不确定度

气体常数的不确定度及灵敏系数为

$$u_r(R) = 0.01\%$$

$$c_r(R) = 1$$

3.10.3 大气压力的测量不确定度

测量大气压的数字压力计的最大允许误差为 ±13 Pa，可得大气压的不确定度及灵敏系数为

$$u_r(p_n) = \frac{13}{101325 \times \sqrt{3}} = 0.0007\%$$

$$c_r(p_n) = \frac{p_n}{T_n} \approx 2$$

$$c_r(p_n) = \frac{p_n}{T_n} - \frac{p_f}{T_f}$$

3.10.4 充气终态压力的测量不确定度

由上述可知，充气终态压力测量不确定度及灵敏系数为

$$u_r(p_f) = 0.023\%$$

$$c_r(p_f) = \frac{p_f}{T_f} \approx 1$$

$$c_r(p_f) = \frac{p_n}{T_n} - \frac{p_f}{T_f}$$

3.10.5 大气温度的测量不确定度

大气温度传感器测量的最大允许误差为 ±0.05 °C，按均匀分布可得

$$u_r(T_n) = \frac{0.05}{288.5 \times \sqrt{3}} = 0.01\%$$

$$c_r(T_n) = c_r(p_n) \approx 2$$

3.10.6 充气终态温度的测量不确定度

由前面分析可知，充气终态温度测量不确定度及灵敏系数为

$$u_r(T_f) = 0.012\%$$

$$c_r(T_f) = c_r(p_f) \approx 1$$

附加质量 Δm 的不确定分析如表 7 所示。

由式(7)可计算出附加质量的不确定度及灵敏系数为

$$u_r(\Delta m) = 0.58\%$$

$$c_r(\Delta m) = \frac{\Delta m}{m - \Delta m} \approx 1 \times 10^{-4}$$

表 7 附加质量 Δm 的不确定分析

序号	符号	来源	相对标准不确定度/%	灵敏系数	$c_r(x_i)u_r(x_i)$ /%
1	$u_r(\Delta V)$	管道容积	0.58	1	0.58
2	$u_r(R)$	气体常数	0.01	1	0.01
3	$u_r(p_n)$	大气压力	0.007	2	0.014
4	$u_r(p_f)$	充气终态标准容器内压力	0.023	1	0.023
5	$u_r(T_n)$	大气温度	0.02	2	0.04
6	$u_r(T_f)$	充气终态标准容器内温度	0.012	1	0.012

3.11 标准装置测量不确定度的合成

表 8 为 p. V. T. t 法气体流量标准装置测量不确定度一览表，按上述影响量进行不确定度分析，由式(3)可计算得出合成标准不确定度为 0.047%，相对扩展不确定度为 0.094% (k=2)。

表 8 p. V. T. t 法气体流量标准装置测量不确定度一览表

序号	符号	来源	相对标准不确定度/%	灵敏系数	$c_r(x_i)u_r(x_i)$ /%
1	$u_r(V)$	标准容积	0.035	1	0.035
2	$u_r(t)$	充气时间	0.002	1	0.002
3	$u_r(\Delta t)$	换向时间	0.01	1.7×10^{-4}	0.000
4	$u_r(p_f)$	充气终态标准容器内压力	0.021	1	0.021
5	$u_r(T_f)$	充气终态标准容器内温度	0.012	1	0.012
6	$u_r(z_f)$	充气终态空气压缩系数	0.006	1	0.006
7	$u_r(p_i)$	充气初态标准容器内压力	2.9	0.007	0.020
8	$u_r(T_i)$	充气初态标准容器内温度	0.012	0.007	0.000
9	$u_r(z_i)$	充气初态空气压缩系数	0.006	0.007	0.000
10	$u_r(\Delta m)$	附加质量	0.58	0.0001	0.000

4 结论

经过本文分析可知：影响 p. V. T. t 法气体流量标准装置测量不确定度的主要分量为标准容积、压力测

量和温度测量。可通过分段测量、细分校准等方法提高压力测量的准确度,进一步控制整个装置的不确定度。

使用数字化高精度传感器控制影响量较大的参数,评定 $p-V-T-t$ 法气体流量标准装置的扩展不确定度为 $U_r=0.094\%$ ($k=2$),满足设计要求。该装置的研制有效提升了本单位气体流量最高标准的准确性,提高了流量量值传递能力,具有一定技术借鉴价值。

参 考 文 献

- [1] 刘梅. 临界流文丘里喷嘴气体流量标准装置的研制[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [2] 高山. 气体流量装置的能力提升及微小音速喷嘴流出特性研究[D]. 保定: 河北大学, 2019.
- [3] 马丹. $pVTt$ 气体流量标准装置的研究[J]. 计量与测试技术, 2016, 43(12): 83-84.
- [4] 王池, 王自各, 张宝珠, 等. 流量测量技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [5] 陈弘. 高压进气式 $pVTt$ 法流量标准装置原理及设计[J]. 自动化仪表, 2014, 35(2): 58-60, 65.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 619-2005 $p-V-T-t$ 法气体流量标准装置检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- [7] 林毅文, 陈云麒. 多用途 $pVTt$ 气体流量装置控制系统的设计实现[J]. 自动化仪表, 2016, 37(8): 80-83.
- [8] 刘大壮, 纪建英, 翟恒涛, 等. 基于夹套和水浴方式的 $pVTt$ 气体流量标准装置关键技术研究[J]. 计量技术, 2016, (11): 37-40.
- [9] 徐志鹏, 洪育仙, 樊奇, 等. 多传感器 $pVTt$ 法气体流量标准装置测温方案研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(5): 635-640.
- [10] 孙凤举, 王慧龙, 王光明, 等. 正压式 $pVTt$ 法气体流量标准装置不确定度评定[J]. 宇航计测技术, 2019, 39(6): 19-25.

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-03-26

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(JSJC2013205B201)

作者简介

王鹏(1983-), 男, 山西宁武人, 高级工程师, 主要研究方向为动态温度计量、流量计量、流速计量。

