

## 音速喷嘴法气体流量标准装置的基本原理

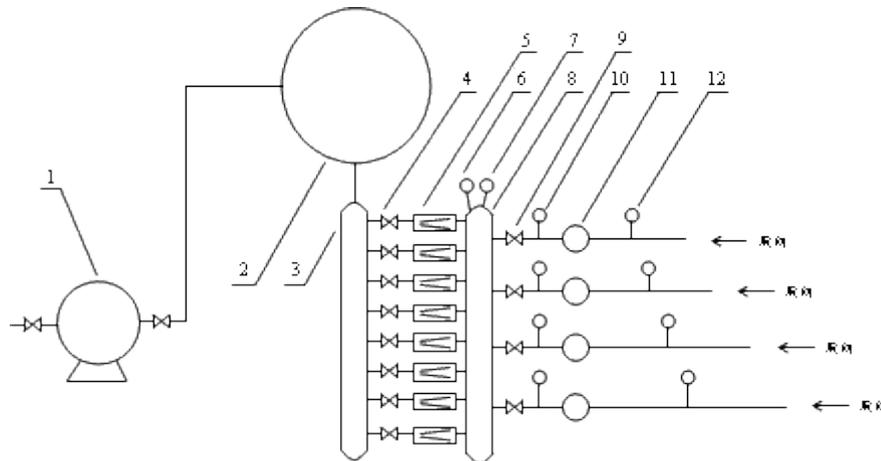
(100013 中国计量科学研究院 王东伟)

### 引言

标准表法流量标准装置的方法很多，下面介绍一种用音速文丘利喷嘴作标准表的气体流量标准装置。与用其它流量计作为标准表相比，用音速喷嘴作为标准表具有很多优点，如结构简单、性能稳定、准确度高、无可动部件、维护方便、检定周期长（五年）等等。音速喷嘴法气体流量标准装置适用于对各种气体流量计的检测和校准，可以检测质量流量计、速度式流量计、容积式流量计、转子流量计、差压式流量计或其它种类的流量计。

### 装置结构

音速喷嘴法气体流量标准装置的结构如图1所示。对于流量比较大的标准装置，需选用水环式真空泵，因此还需冷却塔、离心泵、地下水池、消音器。为了调整入口气体流场和降低噪音，还应在入口处安装喇叭形入口。被检表的前后直管段应足够长。此外，还应配备配电柜、计算机、夹表器、控制系统和数据采集系统。



1. 真空泵 2. 储气罐 3. 汇流管(容器) 4. 开关阀 5. 音速文丘利喷嘴 6. 滞止容器温度计 7. 滞止容器压力计 8. 滞止容器 9. 流量调节阀 10. 被检表后温度计 11. 被检流量计 12. 被检表前压力计

图1 音速喷嘴法气体流量标准装置

### 检定原理

如图1所示,用真空泵1将空气由被检表的上游直管段入口吸入,经过被检表前直管段、被检表11和被检表下游直管段进入滞止容器8,在滞止容器的下游,有一组音速喷嘴5,控制音速喷嘴下游的开关阀门4,可以任意选择所要开关的音速喷嘴,以达到改变被检表流量的目的,滞止容器需要测温6测压7,代入公式计算可以得到通过音速喷嘴的质量流量,亦即通过被检表处的质量流量。通过测量被检表处的温度10和压力12,可以计算出空气密度,进而得到标准体积流量。流量调节阀9一般只用于开关,也可作为调节流量的辅助手段。在进行小流量检定时,可以不用开启真空泵,只要储气罐2的真空度能够满足要求即可。真空泵的能力应满足下列两个条件:第一,真空泵所提供的流量应大于被检流量计的最大流量;第二,在测量过程中,真空泵所提供的真空度应满足音速喷嘴的临界压力比。

## 流量计算公式

### 1. 临界压力比及其计算公式

当气流处于亚音速时,喉部的气体流速将随节流压力比(即出口压力  $P_1$  与上游滞止压力  $P_0$  之比)的减小而增大。当节流压力比减小到一定值时,喉部流速达到最大流速——音速,即达到所谓的临界流,此时,如果  $P_0$  不变,再减小  $P_1$ (即再减小节流压力比)流速将保持不变,也就是说,流速不再受下游压力的影响。此时的文丘利喷嘴称为音速文丘利喷嘴,又称临界流文丘利喷嘴,此时的节流压力比称为临界压力比。

在理想条件下,即气流是一维流动、等熵、完全气体,则从理论上可导出临界压力比的计算公式:

$$\left(\frac{P_1}{P_0}\right) = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1)$$

式中,  $k$ ——气体等熵指数,对于完全气体,  $k$  等于比热比。

对于空气,  $k=1.4$ , 则  $(P_1/P_0) = 0.528$

### 2. 理想条件下的质量流量

在理想条件下,音速文丘利喷嘴的质量流量公式:

$$q_{mi} = \frac{A_* c_{*i} P_0}{\sqrt{R_M T_0}} \quad (2)$$

式中,  $q_{mi}$ ——音速文丘利喷嘴在理想条件下的质量流量 (kg/s)

$A_*$ ——音速文丘利喷嘴的喉部面积 ( $m^2$ )

$C_{*i}$ ——气体在理想条件下的临界流函数

$$c_{*i} = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (3) \quad P_0 \text{——音速文丘利喷嘴前的气体滞止绝对压力 (Pa)}$$

$T_0$ ——音速文丘利喷嘴前的气体滞止绝对温度 (K)

$R_M$ ——气体常数 (J/(kg×K)), 对于空气,  $R=287.1$

### 3. 实际条件下的质量流量

在实际条件下,音速文丘利喷嘴的质量流量公式:

$$q_{mi} = \frac{A \cdot C_c \cdot C_* \cdot P_0}{\sqrt{R_M T_0}} \quad (4)$$

式中,  $q_m$ ——音速文丘利喷嘴在实际条件下的质量流量 (kg/s)

$C_*$ ——气体在实际条件下的临界流函数, 假定气体为一维、等熵流动, 利用实际气体的热力学性质表, 可用计算机计算出来。

$C$  ——流出系数,  $C$  是对“一维、等熵流动”等假设条件的修正。 $C$  只是雷诺数  $Re_d$  的函数。

$$Re_d = \frac{4q_m}{\pi d \mu_0} \quad (5)$$

式中,  $Re_d$  ——音速文丘利喷嘴的喉部雷诺数 (无量纲)

$d$  ——音速文丘利喷嘴的喉部直径 (m)

$\mu_0$  ——气体在滞止条件下的动力粘度 (kg/(m·s))

从式(4)中可以看出, 只要用试验的方法求得流出系数  $C$ , 就可按测得的滞止压力  $P_0$  和滞止温度  $T_0$  (由查表可得  $C_*$ ) 计算出质量流量  $q_m$ 。

### 装置流量范围的选择方法和确定

根据音速喷嘴的流量计算公式 (式 (4)) 可知, 在临界条件下, 改变音速喷嘴的滞止压力值, 则可改变通过音速喷嘴的质量流量值。实际上, 是通过调节压力调节阀来调节流量。

同样, 也可通过改变流通面积来改变流量, 即通过若干个音速文丘利喷嘴的组合, 或设计时将某一个音速喷嘴的面积增大来达到所需要的流量。在设计高压或常压式音速喷嘴法气体流量标准装置时, 都可以采用这种方法。

装置流量范围和流量点的选择原则: 第一, 选择该装置主要检定的流量计 (如涡街流量传感器或涡轮流量计) 的流量范围。第二, 根据 JJG198-1994《速度式流量计检定规程》规定的流量检定点, 选择音速文丘利喷嘴的流量及数量。