

用临界流文丘里喷嘴测量气体流量

—— ISO9300 国际标准

ISO/TC30 颁布

摘 要 本文详细地叙述了文丘里音速喷嘴作为国际标准的各项规定,主要包括:名词术语及符号;基本方程;喷嘴结构、设计与安装要求;计算方法与不确定度估算;以及在设计和流量计算时所需要的系数用表。

主题词 文丘里流量计 流量测量 标准

ISO(国际标准组织)是一个世界性的国家标准部门的联合体(ISO 成员国)。国际标准的制定工作一般是通过 ISO 技术委员会予以完成。在已建立的技术委员会中的每一个成员都有权利对所感兴趣的科目发表自己的意见。国际组织、政府与非政府部门在与 ISO 联络的同时,亦就参与了工作。ISO 与国际电工委员会(IEC)在所有电工标准问题上进行密切地合作。

由技术委员会采纳的国际标准草案要求对所有成员国循环投票,至少要有 75% 的成员国投票赞成才能作为国际标准颁布。

国际标准 ISO9300 由 ISO/TC30 技术委员会(“密闭管道中的流体流量测量”)制定。

附录 A, B 和 C 形成本国际标准总体的一部份。附录 D 和 E 仅仅是参考资料,(略)。

1 范 围

本国际标准规定了采用临界流文丘里喷嘴为确定通过计量系统的气体质量流量时所要求的几何形状和使用方法(系统的安装和操作条件),同时也给出了为计算流量和它的综合不确定度所必须的资料。

本国际标准适用于在其喉部的气流能加速到临界速度(这个速度等于当地声速)的文丘里喷嘴。在临界速度条件下,通过文丘里喷嘴的气流质量流量在给定的上游条件下可以达到最大。

本国际标准仅适用于具有单相的稳定的气流流动。所涉及的临界流文丘里喷嘴只能够在所规定的范围内使用。例如,对喷嘴喉部与入口直径比值的限制以及对喉部雷诺数的限制。应对文丘里喷嘴作充分地、可靠地,直接地标定试验,以便能根据这些标定结果使用原有的计量系统,以及能把所得到的系数控制在预测的不确定度范围之内。

本国际标准中所规定的文丘里喷嘴称为“一次装置”,其它测量流量所须之仪表则称为“二次装置”。本国际标准主要针对一次装置,但有时也会讨论二次装置。

本国际标准对下列两种情况给出了数据

- a. 文丘里喷嘴上游的管线为圆形截面;
- b. 假定文丘里喷嘴上游有一个敞开的大的空间。

2 定义与符号

2.1 定义

本国际标准使用下列定义。

2.1.1 压力测量

2.1.1.1 取压嘴:在管壁上钻孔,其孔的棱边要与管道内壁平齐,在取压嘴内取得的压力应是管道中在该处的静压。

2.1.1.2 气体静压力:通过连接在取压嘴上的压力表所测量的气流实际压力。

注——本国际标准只使用绝对静压值。

2.1.1.3 气体滞止压力:在等熵过程中气流发生静止时的流动气体所具有的压力。

注——本国际标准上使用绝对滞止压力值

2.1.2 温度测量

2.1.2.1 气体静温:气流的实际温度。

注——本国际标准只使用绝对静止温度值。

2.1.2.2 气体滞止温度:在等熵过程中气流发生静止时的流动气体所具有的温度。

注——本国际标准上使用绝对滞止温度值。

2.1.3 临界流喷嘴

2.1.3.1 文丘里喷嘴:为测量流量,指定在测量系统中插入的具有收敛/扩散段的节流装置。

2.1.3.2 喉部:文丘里喷嘴中最小直径的部份。

2.1.3.3 临界文丘里喷嘴:喷嘴的几何结构和使用条件能使流量达到临界值的文丘里喷嘴。

2.1.4 流量

2.1.4.1 质量流量, Q_m :每单位时间内通过文丘里喷嘴的质量。

注——本国际标准里,术语“流量”均指质量流量。

2.1.4.2 喉部雷诺数, Re_t :根据喷嘴入口滞止条件下在喷嘴喉部的气体速度,气体密度和气体动力粘度所计算的无量纲参数。取它作为表征喉部直径在工作条件下的特性。喉部雷诺数由下面公式给出。

$$Re_t = \frac{4q_m}{\pi d \mu_0}$$

2.1.4.3 等熵指数, k :在可逆绝热(等熵)转换条件下,压力的相对变化与密度的相对变化之比。

$$k = \frac{\rho}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{\rho C^2}{p}$$

式中:

p ——气体的绝对静压;

ρ ——气体的密度;

C ——当地音速;

角标 S 表示“等熵”条件。

对于理想气体⁽¹⁾, k 等于比热比 γ , 对于单原子气体等于 5/3, 对于双原子气体等于 7/5, 对于三

原子气体等于9/7,等等。

2.1.4.4 流出系数, C :它是实际流量与在相同上游滞止条件下按一维等熵流动所获得的理论流量之比,为无量纲数。这个系数用来修正粘度和流场畸变的影响。在本国际标准中规定了喷嘴的设计和安装条件,它仅仅是喉部雷诺数的函数。

2.1.4.5 临界流:在给定的上游条件下,对某一个特定的喷嘴所能产生最大的流量。当处于临界流状态时,喉部的速度等于当地声速(声学的速度),在此种速度下,几乎不会产生压力扰动的传播。

2.1.4.6 临界流函数, C_* :它是表征文丘里喷嘴入口和喉部之间等熵、一维流动的热力学特性的一个无量纲函数。它是气体性质和滞止条件的函数(参看3.2节)。

2.1.4.7 真实气体临界流系数, C_R :临界流函数的另一种形式,对于气体混合物使用它更为方便。它与临界流函数的关系如下:

$$C_R = C_* Z^{1/2}$$

2.1.4.8 临界压比, r_* :通过喷嘴的质量流量达到最大值时,喷嘴喉部的气体绝对静压与绝对滞止压力之比。

2.1.4.9 背压比:达到临界流时,喷嘴出口绝对静压力与上游滞止绝对压力之比。

2.1.4.10 马赫数, M_{a1} (在喷嘴上游静止状态下):在文丘里喷嘴入口处的平均轴向流体速度与声速之比。

2.1.4.11 压缩系数, Z :在给定的压力和温度条件下,真实气体偏离理想气体定律的特性并用数字表达的修正系数。通过方程定义为:

$$Z = \frac{PM}{\rho RT}$$

这里 R 为摩尔气体常数,等于 $8.3143\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

2.1.5 不确定度:表征估算测量真值的范围,其估算测量真值的概率为95%。

在某些情况下,这个数值范围的置信度水平可能会大于95%,不过,这种情况仅仅在计算已知流量时使用的数值的置信度水平超过95%时才会出现。在这种情况下,应参照ISO5168标准。

2.2 符号

表1中规定了本国际标准应用的符号

3 基本方程

3.1 状态方程

真实气体特性可以通过下面方程描述

$$P/\rho = (R/M)TZ$$

3.2 理想条件下的流量

对于理想临界流的存在,必须具备三个条件:

- a. 一维流动;
- b. 等熵流动;
- c. 气体为完全气体(即 $Z=1$ 和 $K=\gamma$)

在上述条件下,通过下面方程给出临界流量。

表 1 规 定 符 号

符号	名 称	量纲 ¹⁾	SI 单位
A_2	文丘里喷嘴出口横截面积	L^2	m^2
A_*	文丘里喷嘴喉部横截面积	L^2	m^2
C	流出系数	无量纲	
C_R	真实气体临界流系数(真实气体一维流动)	无量纲	
C_*	临界流函数(真实气体一维流动)	无量纲	
C_{*i}	临界流函数(完全气体的一维等熵流动)	无量纲	
D	上游管道直径	L	m
d	文丘里喷嘴喉部直径	L	m
E	相对不确定度	无量纲	
e	绝对不确定度	2)	
M	摩尔质量	M	$kg \cdot kmol^{-1}$
M_{a1}	在喷嘴入口静止状态下的马赫数	无量纲	
P_1	喷嘴入口气体绝对静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
P_2	喷嘴出口气体绝对静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
P_0	喷嘴入口气体绝对滞止静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
P_*	喷嘴喉部气体绝对静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
P_{*i}	完全气体一唯等熵流动时喷嘴喉部气体的绝对静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
$(P_2/P_0)_i$	完全气体一唯等熵流动时喷嘴出口静压与喷嘴入口滞止压力之比	无量纲	
q_m	质量流量	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$
q_{mi}	非粘性气体一唯等熵流动时的质量流量	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$
R	通用气体常数	$ML^2T^{-2}\theta^{-1}$	$J \cdot kmol^{-1}K^{-1}$
Re_d	喷嘴喉部雷诺数	无量纲	
r_c	喷嘴入口曲率半径	L	m
r_*	临界压力比 P_*/P_0	无量纲	
T_0	喷嘴入口气体绝对滞止温度	θ	K
T_1	喷嘴入口气体绝对静温	θ	K
T_*	喷嘴喉部气体绝对静温	θ	K
V_*	喉部声音流动速度,喉部临界流速	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$
Z	压缩系数	无量纲	
β	直径比	无量纲	
γ	定压比热容 c_p 与定容比热容 c_v 之比	无量纲	
k	等熵指数	无量纲	
μ_0	在滞止条件下喷嘴入口气体的动力粘度	$ML^{-1}T^{-1}$	$Pa \cdot s$
μ_*	在喷嘴喉部气体的动力粘度	$ML^{-1}T^{-1}$	$Pa \cdot s$
ρ_0	在滞止条件下喷嘴入口的气体密度	ML^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_*	喷嘴喉部的气体密度	ML^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$
1)	M =质量; L =长度; T =时间; θ =温度		
2)	这个参数的因次与量的因次有关		

或

$$q_{mi} = \frac{A_* C_{*i} P_0}{[(R/M)T_0]^{1/2}}$$

这里

$$q_{mi} = A_* C_{*i} (P_0 \rho_0)^{1/2}$$

$$C_{*i} = \gamma^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$$

3.3 真实条件下的流量

对于真实条件下的流量,其临界流公式则变为

$$q_m = \frac{A_* C C_* P_0}{[(R/M)T_0]^{\frac{1}{2}}}$$

或

$$q_m = A_* C C_R (P_0 \rho_0)^{1/2}$$

其中

$$C_R = C_* Z_0^{1/2}$$

这里 Z_0 是喷嘴入口在滞止条件下的压缩系数值:

$$Z_0 = P_0 M / \rho_0 R T_0$$

应该注意 C_* 和 C_R 不等于 C_{*i} , 因为真实气体不是完全气体, 由于非一维流动和因为粘度的影响而存在一个附面层, 所以 C 值小于 1。

4 方法应用

为确定是采用临界流文丘里喷嘴最为适合还是采用某些其它装置最为适合, 应对每种方法进行评估。一个最重要的考虑是, 在文丘里喷嘴能够用来测量临界流量的压力范围内, 通过文丘里喷嘴的流量与下游压力无关。

其它考虑如下:

对于临界流文丘里喷嘴而言, 因为喉部条件可以根据热力学考虑进行计算, 只需要测量临界流喷嘴上游的气体压力、温度和密度。

在给定的上游滞止条件下, 临界文丘里喷嘴喉部的速度可以达到最大值, 因此, 安装的影响可以降至最小, 但在文丘里喷嘴的入口部分不得存在漩转流。

将音速文丘里喷嘴与亚音速差压式流量计比较时, 可以看出, 临界流喷嘴的流量与喷嘴上游的滞止压力成正比, 而不像亚音速流量计那样与所测量的差压的平方根成正比。

对于一台给定的临界文丘里喷嘴, 它所能达到的最大流量范围通常只限定在它的入口压力范围之内。此入口压力大于能使流量达到临界值的入口压力。

临界流文丘里喷嘴已经被广泛地应用于流量测试、标定和流量控制。

5 标准临界流文丘里喷嘴

5.1 一般要求

5.1.1 文丘里喷嘴应按本国际标准的要求进行检验。

5.1.2 文丘里喷嘴应根据指定的用途, 选择适合的材料制造。有关规定如下:

- a. 应按要求的条件对材料进行精加工, 不能选用其有坑槽、孔隙和其它非均匀性材料。
- b. 材料经过表面加工后, 在使用过程中不得受到腐蚀。
- c. 材料的几何尺寸应该稳定, 并应该知道其它的热膨胀特性(如果在不同于测量喉部直

径温度的条件下使用的话)以便能够对喉部直径进行适当的修正。

5.1.3 文丘里喷嘴锥形扩散段前面的喉部和环形入口应该研磨抛光,其算术平均粗糙度 R_a 不得超过 $15 \times 10^{-6}d$ 。

5.1.4 扩散段前面的喉部和环形入口应该没有灰尘、涂膜或其它污染物。

5.1.5 必须检验文丘里喷嘴的圆锥形扩散段的形状,以保证在此段存在的任何台阶、不连续性、不对称性和同轴度的偏差不会超过该处直径的 1%。其圆锥形扩散段的算术平均粗糙度 R_a 不得超过 $10^{-4}d$ 。

5.2 设计

有两种标准文丘里喷嘴的设计,即喇叭形喉部文丘里喷嘴和圆筒形喉部文丘里喷嘴。

5.2.1 喇叭形喉部文丘里喷嘴

5.2.1.1 这种文丘里喷嘴必须符合图 1 的技术要求。

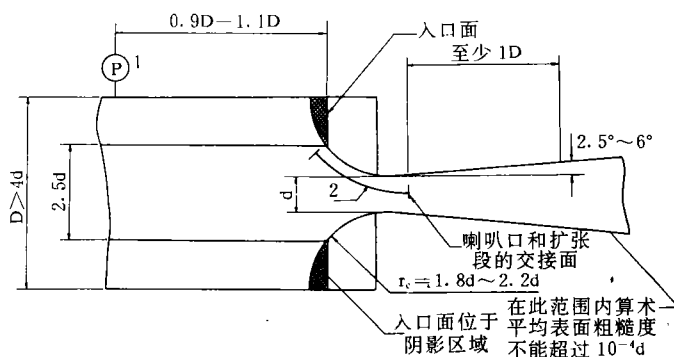


图 1 喇叭形喉部文丘里喷嘴

1. 压力测量

2. 在此范围内算术平均粗糙度不超过 $15 \times 10^{-6}d$,且廓线偏离喇叭环状线不得超过 $\pm 0.001d$

5.2.1.2 为了设置文丘里喷嘴临界流计量系统的其它元件,规定文丘里喷嘴的入口平面在直径等于 $2.5d \pm 0.1d$ 之处应与入口相交的对称轴线相垂直。

5.2.1.3 文丘里喷嘴(入口)的收敛段应是延伸到最小面积段(喉部)的圆形面的一部分,且应该与扩散段相切。入口平面的上游入口的廓线不作规定(5.2.1.2),只是每一轴线位置的表面具有的直径应等于或大于环形廓线的延长线。

5.2.1.4 位于文丘里喷嘴入口平面和扩散段之间的喇叭形表面(见图 1),其环面形状偏差不得大于 $\pm 0.001d$ 。在对称轴线平面里的喇叭形表面的曲率半径 r_c 为 $1.8d$ 到 $2.2d$ 。

5.2.1.5 文丘里喷嘴下游扩散段与环形面相切点的切线之间,应该形成一个具有半角为 2.5° 和 2.6° 之间的圆锥形的截头锥体,扩散段的长度不得小于喉部直径。

5.2.2 圆筒形喉部文丘里喷嘴

5.2.2.1 这种文丘里喷嘴应该与图 2 所示要求一致。

5.2.2.2 规定入口平面必须与文丘里喷嘴的入口廓线相切,且垂直于喷嘴的中心线。

5.2.2.3 文丘里喷嘴(入口)的收敛段应该是一个四分之一的圆形面,一方面要与入口平面相

切,另一方面要与圆筒形喉部相切。圆筒形喉部长度和四分之一圆形面的曲率半径 r_c 应该等于喉部直径。

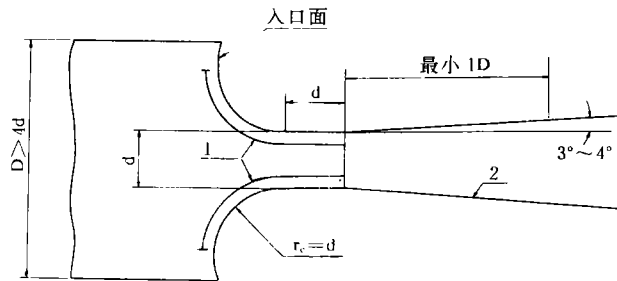


图 2 圆筒形喉部文丘里管

1. 在此范围内表面算术平均粗糙度不得超过 $15 \times 10^{-6}d$, 其廓线偏离环状线和圆柱线不得超过 $\pm 0.001d$ 。
2. 在圆锥形的扩张段内, 算术平均粗糙度不超过 $10^{-4}d$

5.2.2.4 文丘里喷嘴入口的喇叭形表面的形状偏差不得超过 $\pm 0.001d$ 。

5.2.2.5 应根据圆筒形喉部出口截面的平均直径计算流量。平均直径应该这样来确定: 在圆筒形喉部出口截面上, 以大致相等的角距, 至少测量四个直径值, 沿喉部长度方向的任一直径值与平均值相比较的偏差, 不得大于 $\pm 0.001d$ 。

喉部长度与喉部直径的差值不得超过 $0.05d$ 。

四分之一圆形面和圆筒形喉部之间的接合处, 目测应无缺陷。当发现结合处有缺陷时, 必须沿整个入口表面(四分之一圆形面和圆筒形喉部之间的接合面)进行检查, 在轴线对称的平面里的曲率半径绝对不能小于 $0.5d$ 。整个入口表面内必须打磨抛光, 以便使其算术平均粗糙度 R_a 不得超过 $15 \times 10^{-6}d$ 。

圆筒形喉部和扩散段之间的接合面也应该进行目测检查, 不应发现有缺陷存在。

5.2.2.6 文丘里喷嘴的扩散段由一个具有半角为 3° 和 4° 之间的圆锥形的截头锥体所组成。扩散段的长度不得小于喉部直径。(待续)

四川石油管理局勘察设计研究院 黄明昌 译自 ISO 9300.1990,8 第一版

四川石油管理局勘察设计研究院 魏廉敦 校

(收稿日期 1995-02-23)