

RANQIGONGCHENGZHAOTOU BIAO
JIANSHEGUANLISHIYONGZHINAN

燃气工程招标投标 建设管理 实用指南

主编 ● 郝建民

Hao Jianmin



中国大地出版社

燃气工程

招标投标建设管理实用指南

第 三 卷

中国大地出版社

第六章 天然气的计量

第一节 天然气计量标准与仪器选用

天然气的流量计量属于气体流量计量的范畴,它可分为跨行业跨部门的外输交接计量和生产装置内的过程监测计量两大类。前者的特点是以总量(累积流量)为计量对象,流量直接关系到计量交接双方的经济利益,故要求计量的准确度高,这类计量仪表属强制检定计量器具;而后者主要以监测生产装置内工艺过程和物料平衡为目的,它的对象是瞬时流量,其准确度可以低一些,但可靠性要求要高。

一、流量计量中常见名词术语

1. 管流

流体充满管道的流动称为管流。

2. 动流

流过测量横截面的流量以一常数值为中心随时间有波动的流动。

3. 多相流

两种或两种以上不同相的流体一起流动称为多相流。当只有两相流体一起流动时通常称为两相流。

4. 临界流

流体流经节流装置(如喷嘴、文丘里管)喉部,下游与上游侧绝对压力比小于或等于临界值时的流动。

5. 气体等熵指数

在等熵过程中,气体介质压力相对变化与密度相对变化的比值。

6. 整流器

具有消除漩涡,把流动调整成规则速度分布的装置,也称整流器。

7. 消气器

为从流动液流中分离和除去气体的一种装置。

8. 过滤器

安装在流量计上游的设备,装有金属网或其他过滤介质,可以清除流体中杂质的装置。

9. 压力损失

流体克服阻力(例如流过设置在管路中的流量计及阻力件等)所引起的不可恢复的压力值。

10. 流量

流体在单位时间内流过管道或设备某处横截面的数量称为流量。它可用体积流量 Q 和质量流量 q_m 两种方法表示。

流体的体积流量 Q 等于流体流速 v 与流通截面 F 之积,即

$$Q = F \cdot v \quad (6-1)$$

设测量压力、温度下流体的密度为 ρ ,在管道横断面流体的质量流量 q_m 与体积流量 Q 的关系为

$$q_m = Q \cdot \rho \quad (6-2)$$

二、流量参数的特征

流量参数具有比其他物理参数更为复杂的特点,概括起来主要表现在以下几个方面。

(1)流量不是基本物理量,而是由长度、质量、时间等基本物理量派生的导出物理量。

(2)流量是通过具体的流体介质来反映的。如天然气、原油等。大多数被测介质在物理化学性质和使用条件上都不相同,存在于不同的物理状态下的同一介质也将表现出全然不同的物理性质。

(3)流量是以介质运动为表征的,即流量是动态量。

由于流量参数具有上述的特征,因此,流量的测量和流量标准值的复现远比其他参数要复杂和困难。

三、天然气的计量标准

我国的流量测量通用标准《流量测量节流装置用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量》(GB/T 2624—1993)等效采用了 ISO 5167—1 标准。然而作为天然气计量技术标准,美国气体协会 AGA 的 AGA NO3 报告独具特色,针对天然气压缩因子对天然气的流量测量准确度影响非常大的情况,美国人做到研究天然气压缩因子和制修订标准与研究天然气流量测量和制修订标准同时进行,20 世纪 60 年代便推出了 PAN NX-19 天然气的超压缩系数计算方程,故美国的天然气计算具有全球性的影响力。我国的天然气行业计量标准《天然气流量的标准孔板计量方法》(SY/T 6143—1996)就是参照了 AGA NO3 报告中的天然气流量计算公式形式和采用了 PAP NX-19 计算天然气的超压缩系数 F_z ,并根据 GB/T 2624—1993 标准制定的。

国际标准化组织 ISO 在近几年,针对计量技术的发展和新型计量器具的产生,完

成了天然气流量测量用的气体涡轮流量计标准 ISO 9951 和气体超声流量计计量标准 ISO 12765 等一系列天然气计量的专业性计量标准的制定工作。

目前我国天然气计量专业性标准为《天然气流量的标准孔板计量方法》(SY/T 6143—1996)对于采用涡轮流量计、涡街流量计、超声流量计、旋进旋涡流量计等流量计测量天然气流量的计量标准还尚未制订。

四、天然气计量的标准状态

气体的体积是随温度和压力而变化的。因此,在测量天然气体积流量时,必须指定某一温度和压力作为计量的标准温度和压力,称之为“基准状态”或“标准状态”。

《天然气流量的标准孔板计量方法》(SY/T 6143—1996)规定:101.325 kPa, 20℃作为我国的天然气计量的标准状态。

《天然气标准的参比条件》(ISO13443)中规定的参比条件为:101.56 kPa 和 288.15 K(15℃);美国天然气计量的参比条件为 14.73psig (101.56 kPa) 和 60°F (15.56℃)。

五、流量计

测量流量的仪器或仪表叫做流量计。测量体积流量的流量计称为体积流量计,测量质量流量的流量计称为质量流量计。用于测量天然气流量的仪表种类很多,常用主要有差压式流量计、容积式流量计、速度式流量计和质量流量计。我国目前使用最多的是标准孔板节流装置差压式流量计。

六、流量计选用原则

流量计的测量精度是由其测量原理、结构、制造工艺水平、被测流体的性质和使用条件等决定的。在流量计的使用中,必须考虑流量的测量原理和结构形式,必须注意使用条件和测量对象的物理性质是否与所选用的流量计性能相适应。

差压式流量计要求介质在物理上和热力学上满足单相和均匀的条件。较长的前后直管段,苛刻的安装要求和严格的取压方式,是差压式流量计正常工作的前提。另外,差压式流量计流量量程比较小,对流量的脉动比较敏感等限制了差压式流量计的使用。因此,差压式流量计适合于测量流量相对稳定、经过净化和处理的干燥天然气(即干气)的流量测量。在安装空间有限和计量管径较小的情况下,应避免使用这种流量计。

速度式流量计目前使用较多的是涡轮流量计和旋进旋涡流量计。涡轮流量计工作时转子和轴承均暴露在被测介质中,若介质中有污物,将加剧轴承的磨损。另外,涡轮流量计安装时也要求保证其前、后要有足够长的直管段,以使流体达到特定的流速分布。从技术上来讲,满足差压式流量计使用条件的场合也可选用涡轮流量计。

容积式流量计主要有罗茨流量计(腰轮流量计)和旋叶式流量计。容积式流量计的原理和结构决定了其对气体介质的适应性,它对气流条件几乎没有特殊的要求。容积式流量计的测量准确度也不亚于上述两种流量仪表。容积式流量计特别适用于井口计量等场合的湿气计量。

除了上述三种流量计外,最近十几年来,涡街流量计和音速喷嘴也逐步被采用。

涡街流量计在安装要求、输出信号形式等方面与涡轮流量计相似,但在其量程比、仪表口径和对杂质的适应性等指标比涡轮流量计更加优越。

音速喷嘴是作为标准流量计引入天然气流量计量领域的,常用来检定其他气体流量计。音速喷嘴具有很多其他气体流量计所没有的特点,若使用得当,就可获得满意的天然气流量测量结果,实现天然气流量的在线检定。

在实际工作中,一般应按下述原则来选取天然气流量测量仪表。

- (1)根据被测对象和介质选用流量计;
- (2)根据流量的范围来选用流量计;
- (3)根据工艺要求和流体参数变化来选用流量计;
- (4)根据仪表安装要求来选用流量计;
- (5)根据仪表的经济性来选用流量计。

七、几种天然气常用流量计选型指南

几种天然气常用流量计选型指南见表 6-1。

表 6-1 流量计选型指南表

影响因素	流 量 计 类 型					
	孔板流量计	涡轮流量计	涡街流量计	超声流量计	旋进旋涡流量计	旋转容积式流量计
计量条件下气体密度	对测量值起决定因素	密度增大流量降低	密度增大流量降低	密度在规定的范围内	影响不大	影响不大
气体中夹带固体颗粒	有磨损和沉积,需装过滤器	有沉积,可能损坏叶片,需装过滤器	有沉积和非流线体磨损,需装过滤器	一般无影响,若检测器污染有干扰,需装过滤器	有沉积,可能影响测量值,需装过滤器	可能损坏转子,需装过滤器
气体中有液体	可能有腐蚀和液积聚,影响计量准确度	可能有腐蚀和液体凝结,润滑油被冲淡,转子出现不平衡	液体沉积,测量值受影响	信号受干扰变坏,发信和接收器被粘塞,仪表功能减弱	影响不大	可能有腐蚀凝结,易结垢的材料受影响

续表

影响因素	流 量 计 类 型					
	孔板流量计	涡轮流量计	涡街流量计	超声流量计	旋进旋涡流量计	旋转容积式流量计
压力和温度变化	突然的压力和温度变化会引起孔板的变形	突然的压力和温度变化会损坏叶片	既有危险又会增大测量误差	无影响	增大测量误差	突然的压力温度变化会引起危险并使测量失准
脉动流	准确度受其影响,大小取决于脉动频率和幅度	引起高的测量结果,大小取决于频率、幅度和涡轮的惯性	准确度受其影响,大小取决于脉动频率和幅度	当脉动频率高于超声流量计的收发频率时,有影响	准确度受影响,其大小取决于脉动频率和幅度	影响不大
允差内的测量范围(量程比)	10:1 (测量范围由变送器量程决定)	30:1 (气体密度大,测量范围就大)	30:1 (气体密度大,测量范围就大)	40(160):1	12:1 (气体密度大,测量范围就大)	30:1
超量程运行	在压差允许范围内可以	短时间超量程可以	短时间超量程可以	可以	短时间超量程可以	短时间超量程可以
增大测量能力	加大孔板或增加回路或提高计量压力	加大的流量或增加回路或提高计量压力	加大的流量或增加回路或提高计量压力	加大的流量或增加回路或提高计量压力	加大的流量或增加回路或提高计量压力	加大的流量或增加回路或提高计量压力
连续使用性能	流量计发生故障时不影响供气	流量计发生故障时不影响供气	流量计发生故障时不影响供气	流量计发生故障时不影响供气	流量计发生故障时不影响供气	流量计发生故障时要终止供气
占用空间	上下游需一定长度的直管段,依据 SY/T 6143—1996 确定	上下游需一定长度的直管段,依据有关标准及产品说明书	上下游需一定长度的直管段,依据有关标准及产品说明书	上下游需一定长度的直管段,依据有关标准及产品说明书	上下游需一定长度的直管段,依据有关标准及产品说明书	上下游需一定长度的直管段,依据有关标准及产品说明书
通常要求的直管段长:						
上游侧	30D	10D	20D	10D	4D	4D
下游侧	7D	5D	5D	5D	2D	2D

注: D 为测量管内径(或流量计口径)。

第二节 常用天然气计量仪器

一、标准孔板差压式流量计

(一) 天然气孔板流量计与节流装置

1. 孔板流量计组成

天然气流量测量中所使用的孔板流量计,是指通过测量安装在管路中心的同心孔板两侧的差压,用以计算流量的一种检测设备。它由节流装置、差压计、压力计和温度计等组成。如图 6-2-1 所示,只要获得压力、温度、差压即可根据一定的数学关系式计算出天然气的流量。

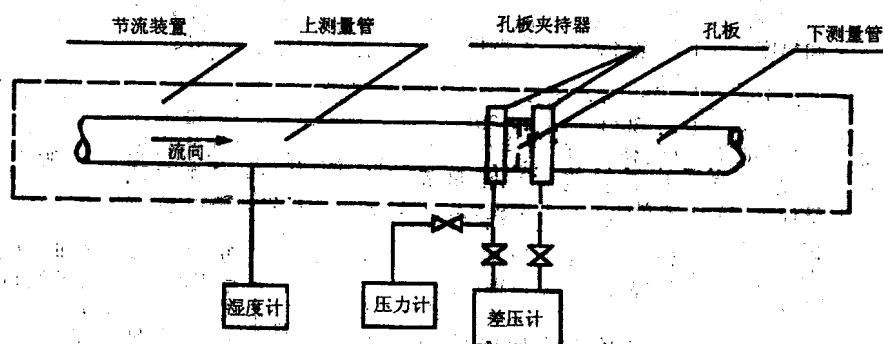


图 6-2-1 孔板流量计组成示意图

2. 节流装置的组成

上述孔板流量计中除了测量压力、差压、温度的仪表外,其他设备即为节流装置的组成部分。根据标准 SY/T 6143—1996 的规定,节流装置由下列零部件组成。

(1) 标准孔板;

(2) 孔板夹持器:包括角接取压中环室取压的环室和单独钻孔取压用的夹紧环或设有取压孔的法兰;

(3) 节流前 $10D$ 和节流后 $4D$ 长的测量管。

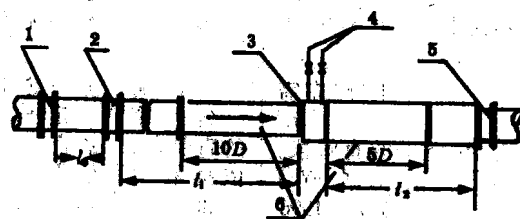


图 6-2-2 标准节流装置的组成示意图

1—上游侧第二阻流件;2—上游侧第一阻流件;3—孔板和孔板夹持器;4—差压信号管路;5—下游侧第一阻流件;6—孔板前后测量管; l_0 —第一阻流件和第二阻流件之间的直管段; l_1 —孔板上游侧的直管段; l_2 —孔板下游侧的直管段

为了保证用户安装、使用方便以及差压传递的准确,实际上在工厂出厂时还应包括连接法兰和一段导压管以及导压管上的截止阀。图 6-2-2 给出了节流装置各组成部分的示意图。

3. 节流装置

节流装置乃是利用流体流过节流件(孔板)时在节流件的两侧产生静压差的原理来测出稳定圆管流的瞬时流量。在节流件及其取压方式以及节流前后的管道条件符合标准的条件下,流量与差压之间便有确定的数值关系,而不必通过试验标定。标准化的内容就是为了能达到上述的目的而对节流件及其取压方式、管道条件、测量范围、流量计算方法,以及测量的误差等规定的标准要求。标准 SY/T 6143—1996 就是为了达到上述目的的一个标准。

4. 标准 SY/T 6143—1996 的适用范围

(1)适用的介质:油气田中产出的以甲烷为主的混合气体。

(2)适用的取压方式:法兰取压与角接取压标准孔板节流装置。

(3)适用的管道条件: $50\text{ mm} \leq D \leq 1000\text{ mm}$,且孔板上游测量管内壁相对粗糙度满足标准 SY/T 6143—1996 中表 4 的要求,直管段最短长度满足标准 SY/T 6143—1996 中表 2 的要求。

(4)适用的雷诺数范围:在 $d \geq 12.5\text{ mm}$, $50\text{ mm} \leq D \leq 1000\text{ mm}$ 和 $0.20 \leq \beta \leq 0.75$ 的条件下,对于法兰取压, $R_{ed} \geq 1260\beta^2 D$;对于角接取压, $R_{ed} \geq 5000$ 。具体要求见标准 SY/T 6143—1996 中表 3。

(5)流动条件:通过节流装置的流动必须是稳定的或仅随时间缓慢变化的亚音速的单相流动。不适用于双相流、脉动流、临界流,且不得有旋转流。

(二)标准孔板节流装置的流量基本方程式推导

标准孔板节流装置测量流量是基于流体流动的节流原理,利用流体流经节流装置时产生的压力差来实现流量测量的。

从图 6-2-3 可以看出,当气体流经管道中的节流件孔板时,气体的流速将在节流件处形成流体的局部收缩,从而使流速增加,静压力降低,动能增加,静压能降低,于是在节流件的上、下游侧便产生压力差;流量越大,压力差越大,流量减小,压差也将减小,这种现象就叫做流体的节流现象。

实践证明,节流件前后的压差信号 Δp 与流量 Q 有如下的关系,流量 Q 与差压 Δp 的开平方成正比例关系,所以通过检测出流体流经节流件后产生的压差信号 Δp ,也就可以间接地测出对应的流量 Q ,这就是差压式节流装置的测流原理。

推导流量基本方程式的目的,在于确定压差和流量之间的定量关系,以利于对节流原理的深入分析和节流装置的设计计算。

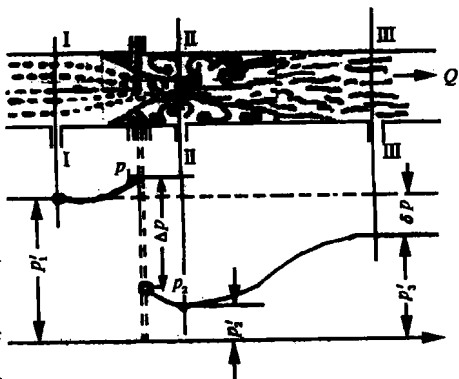


图 6-2-3 孔板节流原理框图

根据流体节流现象及其原理,流量方程式的推求可以伯努利方程式和流体流动的连续性方程式为依据。为了简化对问题的讨论,我们先假定流体是理想的(即不可压缩的、无粘性的),求出理想流体的流量基本方程式,然后再考虑到实际流体和理想流体之间的差别,加以适当的修正,最后获得适用于实际流体的流量基本方程式。

实验表明,被测介质流经各种节流装置时,其流速和压力的分布特性是类似的。图 6-2-3 中,管道截面 I-I、II-II 处流体的绝对压力分别为 p_1' 和 p_2' ,两截面流体的平均流速分别为 v_1, v_2 ,孔板入口侧和出口侧流体的绝对压力为 p_1 和 p_2 。

在孔板前后取其断面 I 和 II (如图 6-2-3 所示)。按理第一个断面应取流体未收缩以前处,第二个断面应取孔板后收缩最小处。实际上由于流量大小不同时两个断面位置也是不固定的,因此在制造节流装置时,有意识地把取压孔安排在孔板前后固定的位置上,其误差将通过水力试验来校正。由于取压化位置的不同,因而才有了所谓的不同取压方式,也就有了不同的校正系数(即不同的流量系数或流出系数)。

假设

- 流体是充满圆管的、充分发展的定常流;
- 阻力损失忽略不计,且流体流经孔板时为绝热过程,没有能量损失;
- 管道水平安装;
- 流体流经孔板的前后,其比容不变。

根据前面的假设,在绝热稳定流动过程中,圆管内沿流线水平方向,断面 I 和断面 II 上的流体质点之间将遵守下面的能量方程式:

$$C^2 \int_1^2 V dp + \int_1^2 U dU = 0 \quad (6-3)$$

式中 C ——为了补偿任意两点的摩擦影响所列入的一个经验系数,称为流出系数,它与节流件的几何形状、取压位置及雷诺数等有关,通常由试验确定;

V ——平均比容, m^3/kg ;

p ——静压力, Pa ;

U ——流体质点的线速度, m/s ;

$\int_1^2 U dp$ ——从点 1 到点 2 所测量的压力变化;

$\int_1^2 U dU$ ——从点 1 到点 2 所测量的速头变化。

对式(6-3)积分后得

$$C^2(p_2 - p_1)V = \frac{-(U_2^2 - U_1^2)}{2}$$

对上式整理后得:

$$U_2^2 - U_1^2 = 2C^2(p_1 - p_2)V \quad (6-4)$$

又根据连续性方程,通过各截面的体积流量恒等:

$$A_1 U_1 = A_2 U_2 = q_v \quad (6-5)$$

式中 A_1, A_2 ——分别为测量管横截面积和孔板开孔面积, m^2 ;

U_1, U_2 ——分别为 A_1, A_2 处的流速, m/s ;

q_v ——通过测量管的体积流量, m^3/s 。

根据式(6-5)可分别求出 $U_1 = q_v/A_1$ 和 $U_2 = q_v/A_2$ 。

将 U_1 和 U_2 代入(6-4)便得到:

$$\begin{aligned} \left(\frac{q_v}{A_2}\right)^2 - \left(\frac{q_v}{A_1}\right)^2 &= 2C^2(p_1 - p_2)V \\ \left(\frac{q_v}{A_2}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right] &= 2C^2(p_1 - p_2)V \end{aligned} \quad (6-6)$$

$$\text{令} \quad \beta = \frac{d}{D}$$

$$\text{则} \quad \beta^2 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 = \frac{A_2}{A_1}$$

将 β^2 代入式(6-6),则可求出孔板开孔面积 A_2 处的流速:

$$U_2^2 = \frac{C^2}{1 - \beta^4} \times 2(p_1 - p_2)V$$

等式两边同时开方并以平均密度代替平均比容后得:

$$U_2 = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2(p_1 - p_2)/\rho} \quad (6-7)$$

根据连续性方程,质量流量有:

$$q_m = q_{v1}\rho_1 = q_{v2}\rho_2 = q_v\rho$$

根据式(6-5)便有:

$$q_m = U_2 A_2 \rho \quad (6-8)$$

将式(6-7)代入式(6-8)中并令 $\Delta p = p_1 - p_2$ 后得:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} A_2 \sqrt{2\Delta p\rho} \quad (6-9)$$

令 $\alpha = C/\sqrt{1 - \beta^4}$,称为流量系数。

令 $E = 1/\sqrt{1 - \beta^4}$,称为渐近速度系数。故流出系数 C 与流量系数的关系为 $C = \alpha/E$ 。

于是,方程(6-9)可改写为式(6-10)的形式:

$$q_m = CE \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p\rho} \quad (6-10)$$

对气体而言,在流经孔板时,由于流速和压力的改变而伴随着密度的改变(气体从 p_1 降为 p_2 因膨胀而使密度减小),为适应此种变化以修正因假设密度等于常量而

对流量引起的偏差,因此必须加入一个系数,这个系数被称为可膨胀系数,用符号 ϵ 表示。于是式(6-10)可改写为

$$q_m = CE \frac{\pi}{4} \epsilon d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (6-11)$$

当以上游条件为测量依据时,上式变为

$$q_m = CE \frac{\pi}{4} \epsilon_1 d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (6-12)$$

$$q_v = q_m / \rho_1 \quad (6-13)$$

式(6-12)和式(6-13)为流体流比孔板时的流量基本方程。当流体为液体时, $\epsilon_1 = 1$; 流体为气体时, $\epsilon_1 < 1$ 。

(三) 天然气流量计算方法

1. 天然气体积流量计算基本方程

在天然气工业经营管理中,均采用标准状态下的体积流量 Q_n 作为核算产量的依据,故式(6-13)可以改写为

$$Q_n = q_m / \rho_n \quad (6-14)$$

式中 ρ_n ——天然气在标准状态下的密度, kg/m^3 。

将式(6-11)代入式(6-14)得:

$$Q_n = CE \frac{\pi}{4} \epsilon_1 d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1 / \rho_n} \quad (6-15)$$

式中 ρ_1 ——天然气在上游工况条件下的密度, kg/m^3 。

2. 天然气流量计算实用方程

(1) 由真实气体的相对密度求气体的真实密度。

根据气体状态方程可导出工况下的密度方程。即:

$$\rho_1 = \frac{M_g p_1}{Z_1 R T_1} \quad (6-16)$$

式中 ρ_1 ——实际工况下(p_1, T_1)流动天然气的密度, kg/m^3 ;

p_1 ——上游取压口流动天然气绝对压力, MPa;

T_1 ——上游流动天然气热力学温度, K;

M_g ——天然气的相对分子质量;

Z_1 ——实际工况下(p_1, T_1)天然气的压缩因子;

R ——通用气体常数, $R = 0.00831448 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

同样,也可写出标准状态下(p_n, T_n)的密度方程:

$$\rho_n = \frac{M_g p_n}{Z_n R T_n} \quad (6-17)$$

式中 ρ_n ——在标准状态下, (p_n, T_n)天然气的密度, kg/m^3 ;

p_n ——标准状态下绝对压力($p_n = 0.101325 \text{ MPa}$);

T_n ——标准状态下热力学温度($T_n = 293.15\text{K}$);

Z_n ——标准状态下,天然气的压缩因子。

其他符号意义同前。

同样,对空气亦可写成与式(6-17) 相同的形式:

$$\rho_a = \frac{M_a p_n}{Z_a R T_n} \quad (6-18)$$

式中 ρ_a ——标准状态下干空气的密度, kg/m^3 ;

Z_a ——标准状态下,干空气的压缩因子($Z_a = 0.99963$);

M_a ——干空气的相对分子质量($M_a = 28.9626$)。

其他符号意义同前。

天然气真实相对密度的定义为:在相同状态下天然气的密度与干空气的密度之比。在标准 SY/T 6143—1996 中,采用如下定义(标准状态时):

$$G_r = \frac{\rho_n}{\rho_a} \quad (6-19)$$

将式(6-17) 和式(6-18) 代入式(6-19) 整理后得:

$$G_r = \frac{M_g}{M_a} \cdot \frac{Z_a}{Z_n} \quad (6-20)$$

定义天然气的理想相对密度为

$$G_r = \frac{M_g}{M_a} \quad (6-21)$$

于是

$$G_r = G_i \frac{Z_a}{Z_n} \quad (6-22)$$

或

$$G_i = G_r \frac{Z_n}{Z_a} \quad (6-23)$$

式(6-22) 和式(6-23) 代表了真实气体的相对密度与理想气体的相对密度之间的关系。

当我们首先对式(6-16), (6-17) 中的 M_g 以式(6-21) 中的理想相对密度 G_i 替代($M_g = G_i M_a$) 时,则有

$$\rho_1 = \frac{G_i M_a p_1}{Z_1 R T_1} \quad (6-24)$$

$$\rho_n = \frac{G_i M_a p_n}{Z_n R T_n} \quad (6-25)$$

将式(6-24) 和(6-25) 中的 G_i 以式(6-23) 中的真实相对密度 G_r 替代后,则

有

$$\rho_1 = \frac{G_r Z_n M_a p_1}{R Z_a Z_1 T_1} \quad (6-26)$$

$$\rho_n = \frac{G_r M_a p_n}{R Z_a T_n} \quad (6-27)$$

通过求解式(6-26)和(6-27)我们便可通过真实气体的 G_r 求出方程(6-15)中的气体真实密度 ρ_1 和 ρ_n , 进而求出天然气在标准状态下的体积流量。

(2) 天然气流量计算实用方程的导出。

将式(6-15)中的 ρ_1 和 ρ_n 分别用式(6-26)和(6-27)替代后, 便可得到

$$Q_n = \frac{CE \frac{\pi}{4} \epsilon_1 d^2 \sqrt{2\Delta p \frac{G_r Z_n M_a p_1}{R Z_a Z_1 T_1}}}{\frac{G_r M_a p_n}{R Z_a T_n}}$$

将分母平方后进入根号, 经整理并把部分常数项提到前面后, 则有

$$Q_n = CE \epsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{R Z_a T_n}{M_a p_n^2}} \sqrt{2} \sqrt{\frac{T_n Z_n}{G_r T_1 Z_1}} \sqrt{\Delta p p_1}$$

将常数 $\pi, R, Z_a, T_n, p_n, M_a$ 等代入后, 得

$$Q_n = 3.1794 \times 10^{-6} CE \epsilon_1 d^2 \sqrt{\frac{1}{G_r}} \sqrt{\frac{T_n}{T_1}} \sqrt{\frac{Z_n}{Z_1}} \sqrt{\Delta p p_1} \quad (6-28)$$

式中, Q_n 的单位为 m^3/s 。

$$\text{令 } F_G = \sqrt{\frac{1}{G_r}} \text{ (称为相对密度系数)}$$

$$F_T = \sqrt{\frac{T_n}{T_1}} \text{ (称为流动温度系数)}$$

$$F_Z = \sqrt{\frac{Z_n}{Z_1}} \text{ (称为超压缩因子)}$$

$$A_s = 3.1794 \times 10^{-6} \text{ (称为秒计量系数)}$$

则方程(6-28)变为下面形式:

$$Q_n = A_s CE d^2 F_G \epsilon_1 F_T F_Z \sqrt{p_1 \Delta p} \quad (6-29)$$

式(6-29)即为我们在天然气经营中所日常使用的流量实用方程。

式中 Q_n ——标准状态下天然气体积流量, m^3/s ;

d ——孔板开孔直径, mm ;

ϵ_1 ——可膨胀性系数;

p_1 ——孔板上游侧取压孔气流绝对静压力, MPa ;

Δp ——孔板上、下游侧取压孔处静压力差, Pa 。

其他符号意义同前。

(四) 天然气流量计算中各系数参数的确定

1. 秒计量系数 A_s

常数项 A_s 定义为秒计量系数, 其值的大小取决于状态标准和采用的计量单位。当采用 SI 制计量单位, 标准状态采用 0.101325 MPa, 293.15 K (即 20℃) 并采用秒立方米流量时, 则 $A_s = 3.1794 \times 10^{-6}$ 。在现场流量测量以及在节流装置设计中, 常以小时流量作天然气流量的计量单位, 此时 $A_h = A_s \times 3600 = 0.011446$ 。如果以日流量为计量单位, 此时则为 $A_d = A_s \times 86400 = 0.2747$ 。

2. 流出系数 C

流出系数 C 按下面经验方程计算:

$$\left. \begin{aligned} C &= 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 & (A) \\ &+ 0.0900L_1\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} - 0.0337L_2\beta^3 & (B) \\ &+ 0.0029\beta^{2.5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.75} & (C) \end{aligned} \right\} \quad (6-30)$$

式中 $L_1 = l_1/D$ (为对孔板上游侧取压位置的修正)

$L_2 = l_2/D$ (为对孔板下游侧取压位置的修正)

l_1, l_2 分别为孔板上、下游取压口位置 (相对孔板端面而言), D 为测量管内径。

式 (6-30) 称为 Stolz 方程, 它由三个部分组成:

第 1 部分 (A) 是孔板的理想流出系数, 其条件是雷诺数为无穷大。

第 2 部分 (B) 是对上、下游侧取压位置的修正 (相对孔板上、下游端面而言)。这一段是方程的通用部分。其中第一项是指上游取压位置; 第二项是指下游取压位置。

对角接取压: $l_1 = l_2 = 0$, 此时流出系数为

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.75}$$

对法兰取压: $l_1 = l_2 = 25.4 \text{ mm}$ 。当上游取压位置 $0.0900 \frac{l_1}{D} \geq 0.0390$ 时, $\beta^4(1 - \beta^4)^{-1}$ 前的系数一律取 0.0390。此时, 流出系数为

$$\begin{aligned} C &= 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0390\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} \\ &- 0.8560D^{-1}\beta^3 + 0.0029\beta^{2.5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.75} \end{aligned}$$

第 3 部分 (C) 是描述雷诺数的相关性, 在此处它仅仅依赖于 β 值。从概念上说, 方程最后一项的形式具有很大的优越性, 因为它把系数计算与通过孔板的流体力学结合成了一个整体。

SY/T 6143—1996 在表 A1 中提供了法兰取压和角接取压的流出系数 C 值。但是该值表仅仅用于使用者在计算现场实际应用装置的流出系数时作为检验计算正确与否而用。该表不能用来内插和外推。实际计算流出系数 C 值时, 宜采用计算器, 直接

进行计算。

3. 渐近速度系数 E

渐近速度系数定义为

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (6-31)$$

渐近系数 E 是在流量基本方程的导出过程中所定义的一个系数,用以描述节流装置渐近段(上游测量管)的流速到孔板开孔处的流速之间的关系。

4. 可膨胀性系数 ϵ

当气体流经孔板时,由于流速和压力的改变而伴随着密度的变化,因此必须加入一个系数以便适应此种变化,这个系数称为可膨胀性系数 ϵ 。 ϵ 值按下面经验公式计算:

$$\epsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p}{10^6 p_1 k} \quad (6-32)$$

在现场实际应用中可根据式(6-32)按 $\Delta p/p_1$ (Δp 以帕代人, p_1 以兆帕代人)、 $\beta(d/D)$ 和实际 k 值进行计算。

按式(6-32)计算 ϵ 值时应满足以下要求:

- (1) 孔板上、下游绝对静压力之比应大于或等于 0.75 (即 $p_2/p_1 \geq 0.75$);
- (2) 差压 Δp 按实际流量时的差压计示值,压力 p 按上游绝对压力取值;
- (3) 等熵指数 k 按标准 SY/T 6143—1996 中 A1.3 确定。

5. 相对密度系数 F_G

相对密度系数 F_G 定义为

$$F_G = \sqrt{\frac{1}{G_r}} \quad (6-33)$$

式中 G_r ——天然气的真实相对密度,确定方法见标准 SY/T 6143-1996 A1.2。

6. 天然气超压缩因子 F_Z

超压缩因子 F_Z 是对实际气体特性偏离理想气体定律的修正。当用压缩因子 Z 对理想气体进行修正时,可用它导出流量方程中的系数 $\sqrt{\frac{Z_n}{Z_1}}$ 。为方便起见,把这个系数叫做超压缩因子 F_Z 。因此,可得出下面的定义式

$$F_Z = \sqrt{\frac{Z_n}{Z_1}} \quad (6-34)$$

式中 Z_n ——天然气在标准状态下的压缩因子;

Z_1 ——天然气在流动状态下的压缩因子。

关于超压缩因子 F_Z 有两种方法可以求解:

- (1) 根据 AGA NX-19“天然气超压缩性因子手册”求 F_Z 值。此法为标准 SY/T

6143—1996 所规定的求解 F_Z 值的方法。

该法根据各种天然气实际相对密度等参数直接算出 F_Z 值(计算方程见标准 SY/T 6143—1996 A1.4)。其使用条件是:天然气以甲烷为主加上乙烷和其他少量的重烃;真实相对密度小于或等于 0.75;二氧化碳和氮气稀释剂分别不超过 15% 摩尔分数时,其 Z 值精度为 $\pm 0.5\%$ 。

现场使用该方法时应根据计量站场的工况及操作范围(常用压力和温度范围),运用电子计算器(计算机),选取适当的步长制表或者编制程序,以备操作者日常计算使用。

(2) 根据 AGA NO.8 号报告求 F_Z 值。该法目前已推荐为国际标准。在常用范围内,其精度最高可达 0.1%。

由于 AGA NO.8 号报告在计算方法和使用硬件设备方面要求苛刻(计量点需具备天然气全组分分析结果和计算机才能较为顺利地完成任务),因而目前我国天然气计量现场暂时还难以普遍推广应用。

7. 流动温度系数 F_T

流动温度系数 F_T 定义为

$$F_T = \sqrt{\frac{T_n}{T_1}} \quad (6-35)$$

式中 T_n ——标准状态温度, $T_n = 273.15 + 20 = 293.15\text{K}$;

T_1 ——气流实际温度, $T_1 = 273.15 + t$ (t 为气流摄氏温度)。

8. 流动条件下孔板开孔直径 d 的确定

在流动条件下孔板开孔直径按下式确定:

$$d = d_{20}[1 + \Lambda_d(t - 20)] \quad (6-36)$$

式中 d ——工况温度条件下,孔板开孔的工作直径,mm;

d_{20} ——孔板在 20℃ 条件下检测的开孔直径,mm;

Λ_d ——孔板材质的热膨胀系数, $\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$ 可由标准 SY/T 6143—1996 表 A4 查得;

t ——气流实测温度,℃。

在天然气集输工程和商品气计量站场中,均采用金属材料制作孔板,由于金属材料在现场常用操作温度中(-10°C 至 $+40^\circ\text{C}$ 之间)线膨胀系数变化甚微,对孔板开孔直径引起的误差可忽略不计,在此种情况下,使用 $d \approx d_{20}$ 即可满足计算精度需要。超过上述温度变化范围或要求精确计算时,则可按式(6-36)计算实际工作直径。

9. 气流绝对压力 P_1

P_1 为在孔板上游侧取压孔处实测的绝对压力,其值可用绝对压力计实测或按下式将表压力换算成绝对压力: