

如何正确应用气体状态方程

How to apply gas equation properly

常勤信 赵仁玉

(山东飞龙仪表有限公司, 龙口 265718)

摘要: 针对气体状态方程在流量测量中时有发生错误应用的问题, 本文就气体状态方程的几种用法、易发生的错误及如何正确使用, 进行了介绍。

关键词: 气体状态方程 正确使用

Abstract: for errors during gas equation application in flow measurement, this paper gives an informative presentation about several uses of the gas equation, the prone error and the proper uses.

Key words: gas equation, proper use.

在测量气体流量时, 人们常采用测量温度、压力并运用气体状态方程, 来补偿工况参数变化带来的测量误差。但是在作补偿运算时, 对气体状态方程不同形式的几个运算式, 常常发生认识上的模糊而导致错误应用。本文就此对气体状态方程不同的作用及如何正确应用作以介绍。

1、用于不同状态下体积流量转换

由于大多数的流量仪表实际测量的都是工作状态下的体积流量 (简称工况体积流量), 而控制或计量通常需要的是标准状态下的体积流量 (简称标况体积流量), 因此需要将不同状态下的体积流量相互转换。下面是我们常用的气体体积流量在不同状态下的转换式。

1.1 工作状态下的体积流量, 转换为标准状态下的体积流量。

$$q_n = q_v \frac{p_i T_n Z_n}{p_n T_i Z_i} \quad (1)$$

1.2 标准状态下的体积流量, 转换为工作状态下的体积流量。

$$q_v = q_n \frac{p_n T_i Z_i}{p_i T_n Z_n} \quad (2)$$

式中 q_v : 工作状态下的体积流量, m^3/h ; q_n : 标准状态下的体积流量, m^3/h ;
 p_n : 标准大气压, kPa 或 MPa; p_i : 工作状态下绝压, kPa 或 MPa;
 T_n : 标准状态下热力学温度, K; T_i : 工作状态下热力学温度, K;
 Z_n : 标准状态下的压缩系数; Z_i : 工作状态下的压缩系数

在上述状态转换式中重点关注“工作压力 p_i 与标准大气压力 p_n ”、“工作状态温度 T_i 与标准状态温度 T_n ”在不同应用时的变化。

2、用于求取工作密度

已知气体标准状态下的密度等相关参数, 用气体状态方程可以求得任意工况下气体的密度。

2.1 干气体

$$r_{gi} = r_n \frac{P T_n Z_n}{P_n T_i Z_i} \quad (3)$$

2.2 湿气体

$$r_{si} = r_{gn} \frac{(p_i - j_i p_{si \max}) T_n Z_n}{p_n T_i Z_i} + j_i r_{si \max} \quad (4)$$

式中 r_{gi} : 干气体工作状态下的密度, kg/m^3 ;
 r_{si} : 湿气体工作状态下的密度, kg/m^3 ;
 r_n : 干气体标准状态下的密度, kg/m^3 ;
 r_{gn} : 湿气体标准状态下干部分的密度, kg/m^3 ;
 j_i : 工作状态下气体相对湿度 0~100%
 $p_{si \max}$: 工作状态下饱和水蒸汽压力, kPa 或 MPa;
 $r_{si \max}$: 工作状态下饱和水蒸汽密度, kg/m^3 。
 其它见前式。

3、用于流量补偿

当用于流量补偿时, 应区分不同的信号制式、不同的气体流量状态、介质干湿情况时, 气体状态方程有不同的运算形式。

3.1 干气体电流信号

对于 4~20mA 的电流信号而言, 其电流与流量的对应关系是在设计参数下确定的, 如果实际工况参数与设计参数一致, 不用补偿就能得到正确的流量数值。而当实际工况参数偏离设计参数时, 要想得到正确的测量结果, 就必须用气体状态方程对偏离设计状态的工况进行补偿。

(1) 对于标况体积流量补偿

线性电流补偿式为:

$$q_{in} = q_{\max} A_i \frac{p_i \cdot T_d \cdot Z_d}{p_d \cdot T_i \cdot Z_i} \quad (5)$$

方根电流补偿式为:

$$q_{in} = q_{\max} \sqrt{A_i \frac{p_i \cdot T_d \cdot Z_d}{p_d \cdot T_i \cdot Z_i}} \quad (6)$$

式中 q_{in} : 补偿后的标况体积瞬时流量, m^3/h ;
 q_{\max} : 标况体积流量上限, m^3/h ;
 A_i : 变送器未开方的电流信号, 0~100%
 p_d : 设计状态绝压, kPa 或 MPa;
 T_d : 设计状态热力学温度, K;
 Z_d : 设计状态气体压缩系数;
 其它见前式。

(5)、(6) 式是对偏离设计状态的标况体积流量进行补偿, 注意与 (1)、(2) 式的不同点。(1)、(2) 式是以标准数据为基准进行转换, 而 (5)、(6) 式是以设计数据为基准进行补偿, 且这两式只能进行补偿运算, 不能进行流量状态转换, 这一点一定要清楚。

(2) 对于工况体积流量补偿

在工艺过程控制中，有时需要知道工作状态下的体积流量值，这种情况下，速度式脉冲信号的流量计，直接采用该信号就可以得到。而对于电流信号的流量计，就应该用（7）或（8）式对偏离设计状态的工况体积流量进行补偿，才能正确得到当前工作状态下的体积流量值。

线性电流补偿式为：

$$q_{iv} = q_{v\max} A_i \frac{p_d \cdot T_i \cdot Z_i}{p_i \cdot T_d \cdot Z_d} \quad (7)$$

方根电流补偿式为：

$$q_{iv} = q_{v\max} \sqrt{A_i \frac{p_d \cdot T_i \cdot Z_i}{p_i \cdot T_d \cdot Z_d}} \quad (8)$$

式中 q_{iv} ：补偿后的工况体积瞬时流量， m^3/h ；
 $q_{v\max}$ ：工况体积流量上限， m^3/h ；
 其它见前式。

对于采用工况体积单位的流量数值应注意的，相同数量的工况体积流量，如果温度和压力参数不同其质量流量是不同的。所以工况体积流量不能较为准确地表达气体的真实量值，很少用于计量结算。

3.2 干气体脉冲信号

脉冲信号补偿

$$q_{in} = \frac{xf}{k} \times \frac{p_i \cdot T_n \cdot Z_n}{p_n \cdot T_i \cdot Z_i} \quad (9)$$

式中 f ：频率信号，Hz；
 k ：流量计的仪表系数， p/L 或 p/m^3 ；
 x ：换算系数，3.6 或 3600；

其它见前式。

由于脉冲信号测量的是实际工况体积流量，它的每一个脉冲都对对应着一个具体的工况体积值，并随实际的工况参数变化，因此（9）式与（1）式是相同的。它的补偿作用是能跟踪实际工况参数的变化，将工况体积流量转换为标况体积流量。

3.3 湿气体电流信号

在含有水分的湿气体流量测量中，常常需要的是测量湿气体中的干部分流量，因此补偿运算采用下式。线性电流补偿式为：

$$q_{in} = q_{\max} A_i \frac{(p_i - j_i p_{si\max}) \cdot T_d \cdot Z_d}{(p_d - j_d p_{sd\max}) \cdot T_i \cdot Z_i} \quad (10)$$

方根电流补偿式为：

$$q_{in} = q_{\max} \sqrt{A_i} \times \frac{(p_i - j_i p_{si\max}) \cdot T_d \cdot Z_d}{(p_d - j_d p_{sd\max}) \cdot T_i \cdot Z_i} \times \sqrt{\frac{r_{sd}}{r_{si}}} \quad (11) \quad [1]$$

式中 r_{sd} ：设计状态下气体的密度， kg/m^3 ；

j_d ：设计状态下气体的相对湿度，0~100%；

$p_{sd\max}$ ：设计状态下饱和水蒸汽压力，kPa 或 MPa；

其它见前式。

用差压测量湿气体中干部分的流量要进行两方面的计算，一个是实际工况参数变化引起的工作状态下湿气体密度的变化对测量结果的影响^[1]，另一个是扣除了湿气体中的水蒸气并对实际工况参数偏离设计状态的补偿运算。需要注意的是该式也不能进行流量状态的转换运算。

3.4 湿气体脉冲信号

测量湿气体中的干部分流量，脉冲信号运算公式为：

$$q_{in} = \frac{xf}{k} \times \frac{(p_i - j_i p_{si\max}) \cdot T_n \cdot Z_n}{p_n \cdot T_i \cdot Z_i} \quad (12)$$

式中符号意义见前式。

该式是扣除了湿气体中的水蒸气并将工况体积流量转化为标况体积流量的补偿运算。

3.5 混合气体流量测量混合比变化的补偿

混合气体流量因混合比变化对测量的影响，不是简单的温度压力补偿所能解决的，且补偿运算较为复杂，笔者将另文介绍。

4、方程中压缩系数的取舍

在实际应用中，鉴于工况压缩系数计算较为复杂，人们常常将将压缩系数 Z_n 、 Z_i 忽略不计简化为 1.0 处理，不对压缩系数进行补偿运算，这样做对流量测量会带来怎样的影响，笔者列举了几种常用气体计算数据来说明这个问题，见下（表 1）。

表1 部分气体压缩系数对密度影响一览表

压力 (G)MPa	0.1	0.2	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
空气	密度 1	2.3941	3.5851	7.1649	10.7550	13.1539	19.1690	25.2083	31.2692	37.3496
	密度 2	2.3925	3.5809	7.1459	10.7110	13.0877	19.0295	24.9712	30.9130	36.8548
	误差 %	-0.0668	-0.1172	-0.2652	-0.4091	-0.5033	-0.7277	-0.9406	-1.1391	-1.3248
N ₂	密度 1	2.3153	3.4668	6.9268	10.3947	12.7109	18.5149	24.3363	30.1728	36.0217
	密度 2	2.3140	3.4634	6.9115	10.3570	12.6584	18.4052	24.1521	29.8989	35.6458
	误差 %	-0.0561	-0.0981	-0.2209	-0.3627	-0.4130	-0.5925	-0.7569	-0.9078	-1.0435
O ₂	密度 1	2.6455	3.9627	7.9269	11.9097	14.5751	21.2738	28.0216	34.8169	41.6581
	密度 2	2.6407	3.9559	7.8943	11.8327	14.4583	21.0223	27.5864	34.1504	40.7144
	误差 %	-0.1814	-0.1716	-0.4113	-0.6465	-0.8014	-1.1822	-1.5531	-1.9143	-2.2653
H ₂	密度 1	0.1664	0.2489	0.4958	0.7418	0.9054	1.3124	1.7170	2.1191	2.5186
	密度 2	0.1665	0.2492	0.4973	0.7454	0.9108	1.3244	1.7379	2.1514	2.5649
	误差 %	0.0601	0.1205	0.3025	0.4853	0.5964	0.9144	1.2172	1.5242	1.8383
CO	密度 1	2.3165	3.4690	6.9341	10.4099	12.7328	18.5590	24.4103	30.2840	36.1775
	密度 2	2.3148	3.4646	6.9139	10.3632	12.6627	18.4115	24.1604	29.9092	35.6580
	误差 %	-0.0734	-0.1268	-0.2913	-0.4486	-0.5505	-0.7948	-1.0237	-1.2376	-1.4360
CO ₂	密度 1	3.6526	5.4958	11.1473	16.9938	21.0084	31.4983	42.7278	54.8432	68.0450
	密度 2	3.6342	5.4393	10.8545	16.2698	19.8799	28.9053	37.9307	46.9562	55.9816
	误差 %	-0.5038	-1.0281	-2.6266	-4.2604	-5.3717	-8.2322	-11.2271	-14.3810	-17.7286
天然气	密度 1	1.5986	2.3987	4.8238	7.2866	8.9499	13.1852	17.5340	22.0005	26.5888
	密度 2	1.5945	2.3866	4.7626	7.1386	8.7226	12.6826	16.6427	20.6027	24.5627
	误差 %	-0.2565	-0.5044	-1.2687	-2.0311	-2.5397	-3.8118	-5.0833	-6.3535	-7.6201

条件：基准温度20°，工作温度20°，大气压Pa=101.33kPa。
表中天然气组分含量：

甲烷	乙烷	丁烷	2-甲基丙烷	戊烷	2-甲基丁烷	己烷	氮气	氦气	二氧化碳
0.9	0.0625	0.0072	0.0064	0.0025	0.0034	0.0027	0.0004	0.0068	0.0157

表中密度 1 和密度 2 是分别采用有压缩系数运算和将其化简运算的结果。从上述对比来看，当压力 $P \leq 0.2 \text{ MPa}$ 时，化简后影响较小，产生的误差还是可以接受的。当压力 $P \geq 0.5 \text{ MPa}$ 后，化简后的密度误差逐渐增大，其中二氧化碳和天然气较为明显，误差达到 -2.6% 和 -1.3% 。压力继续增加误差也逐渐增大，天然气压力在 0.8 MPa 时，误差已大于 -2.0% 。仅化简压缩系数带来的误差，就已经超出 GB17167-2006 中对整套计量器具准确度等级的要求，这对用于贸易计量的天然气流量来讲是不能接受的。由此我们可以得知，压缩系数“可以忽略不计”是有条件的，只有当压力较小时才可以将其化简为 1.0 处理。

5、方程中标准温度的取值

气体状态方程中标准温度 T_n 有两种取值： 0°C (273.15K) 或 20°C (293.15K)， 0°C 或 20°C 的取值对测量准确度是没有影响的，区别在于标准温度的取值不同，相同数量的标况体积流量，其质量流量是有差别的。例如，都是 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 标准状态下的空气流量，以 0°C 为基准的其质量为 1292.8kg ，而以 20°C 为基准的其质量为 1204.1kg ，二者相差 88.7kg 。因此在用标准体积流量作为流量数据时，应注意因标准温度的取值不同而造成的质量数值差别，是否对工艺控制指标以及对计量结算可能带来的影响。

另外对差压信号的流量仪表来讲，当节流件采用相同的几何尺寸、相同的工艺参数、相同的标况流量上限条件下，若标准温度取值不同，设计得到的差压量程是不同的。以 0°C 为基准的差压量程总是大于以 20°C 为基准的差压量程。而且在测量过程中，相同的流量将在变送器产生不同的差压。在这种情况下切不可用差压值是否相同，来判定用于计量结算双方仪表的准确性。

6、如何正确使用

6.1 分清不同的用法

气体状态方程用于流量测量主要有三个方面的应用：一是用于不同状态下的体积流量相互转换或兼补偿；二是用于求取工作密度；三是用于工况参数偏离设计参数时的补偿。它们最明显的区别是看基准数据，若以标准状态的压力温度为基准，是不同状态下的体积流量转换（1、2 式）、转换兼补偿（9、12 式）、求取密度（3、4 式）。若以设计状态的压力温度为基准，是用于工况参数偏离设计参数时的补偿（5~8、10~11 式）。

6.2 常见的几种应用错误

(1) 将线性电流信号用 (13) 式补偿运算。

$$q_{in} = q_{\max} A_i \frac{p_i \cdot T_n \cdot Z_n}{p_n \cdot T_i \cdot Z_i} \quad (13) \times$$

(2) 将方根电流信号用 (14) 式补偿运算。

$$q_{in} = q_{\max} \sqrt{A_i \frac{p_i \cdot T_n \cdot Z_n}{p_n \cdot T_i \cdot Z_i}} \quad (14) \times$$

(3) 不注意区分体积流量的状态，当流量为工况体积且电流信号时，用下式作补偿运算并试图将工况体积转换为标况体积。

$$q_{in} = q_{v\max} A_i \frac{p_i \cdot T_d \cdot Z_d}{p_d \cdot T_i \cdot Z_i} \quad (15) \times$$

$$q_{in} = q_{v\max} \sqrt{A_i \frac{p_i \cdot T_d \cdot Z_d}{p_d \cdot T_i \cdot Z_i}} \quad (16) \times$$

(4) 在密度直接补偿或 P、t 间接补偿中直接将工况体积流量转换为标况体积流量。

$$q_{in} = q_{iv} \frac{r_i}{r_d} \quad \text{或} \quad q_{in} = q_{iv} \sqrt{\frac{r_i}{r_d}} \quad (17) \times$$

$$q_{in} = q_{iv} \frac{p_i \cdot T_d \cdot Z_d}{p_d \cdot T_i \cdot Z_i} \quad (18) \times$$

上述列举了几例干气体流量补偿容易发生的错误。对于测量湿气体干部分流量易发生的错误基本类似，读者可自行分析这里不再列出。

6.3 常见的错误用法二

工作压力 $P \geq 0.5 \text{MPa}$ 后，仍然将压缩系数简化为 1.0 处理，从而造成整个测量系统准确度隐形下降而不被察觉。正确的是应该采用 “Redlich-Kwong (雷德利克-孔)” 运算式求得压缩系数并参与计算。当然如果有时需要估算某一个数据，是可以化简压缩系数的。

6.4 常见的错误用法三

方程中的压力单位采用的都是绝对值，即“工作表压+当地大气压”。如果不分所在地理位置的不同和实际表压的大小，一律将大气压按照 0.1MPa 来对待，有时会带来较大的测量误差。

大气压取值对方程运算影响的程度，应视工作压力高低而论。当工作压力较低时大气压影响较大，当工作压力较高时影响较小。例如表压为 0.1MPa、温度 20℃ 时的空气，实际大气压为 95kPa，以此计算密度为 2.3188kg/m³。若大气压按照 100kPa 计算，则密度为 2.3783 kg/m³。采用不准确的大气压造成的误差为 2.57%。若压力是 1.0MPa 时，仍按照 100kPa 计算，造成的误差降低到 0.46%。

在冶金或焦化行业中煤气流量的压力一般都很低，有的甚至只有几 kPa。这时大气压对运算的影响就非常大，决不可轻易采用 0.1MPa 的统一数值进行计算，否则带来的测量误差会是很大的。笔者曾设计过四川某钢厂的煤气流量仪表，煤气压力为 5kPa，当地年平均大气压为 87.68kPa。若按照 0.1MPa 的大气压数值来计算，带来的误差会高达 13.3%。因此无论是使用者还是设计者，在大气压数值的采用上，不可盲目采用 0.1MPa 的统一数值，而应该根据工作压力的高低、地理位置的不同、正确取值大气压，才能避免不必要的误差产生。

[1]: 纪纲编著, 流量测量仪表应用技巧, 第二版 [M]北京: 化学工业出版社, 2009

作者: 山东飞龙仪表有限公司 常勤信

地址: 山东省龙口市高新技术工业园飞龙路

电话: 0535-8619054 手机: 13465575659 (随身) 、15725455319 (办)

传真: 0535-8619598

邮编: 265718

E-mail: Changqinxi888@163.com

第一作者简介: 常勤信 (1949—), 山东飞龙仪表有限公司总工程师, 自动化仪表专业, 现从事流量仪表的设计研究和开发工作。

第二作者简介: 赵仁玉 (1979—), 山东飞龙仪表有限公司总经理, 经济师。

发表在《工业计量》2011年第4期