

蒸汽流量测量误差来源及解决探讨

常勤信

(山东飞龙仪表有限公司, 龙口 265718)

(摘要) 针对蒸汽流量测量中容易发生的蒸汽相变、密度不准确、信号传递失真引起的测量误差, 具体分析了产生的来源。并根据不同的信号制式, 提出了相应的补偿运算公式和方法。对解决贸易计量纠纷、提高蒸汽流量测量准确度, 提出了切实可行的探讨方案。

(关键词) 蒸汽; 误差来源; 解决方法

1 蒸汽流量测量误差的来源

在流量测量中, 蒸汽流量是最容易产生问题的一个流体, 特别是在供热结算计量方面, 常常发生供收双方总量不能相符的矛盾而难以解决。虽然可测蒸汽流量的仪表有很多, 但本文这里不谈各类流量仪表在测量蒸汽流量时的优缺点, 而是想就蒸汽流量测量发生误差的其它来源及解决方法, 谈一点本人的粗浅看法与大家探讨。

- 1) 蒸汽相变对测量的影响。
- 2) 饱和蒸汽密度失准的问题。
- 3) 测量信号传递失真问题。

1.1 蒸汽相变对测量的影响

蒸汽相变问题在实际使用中时有发生, 所谓蒸汽相变就是: 在输送过程中原本饱和蒸汽变为过热蒸汽了, 或是过热蒸汽变为饱和蒸汽了。蒸汽产生相变主要发生在管道输送过程中或使用场合,

饱和蒸汽变为过热蒸汽, 一般发生在湿饱和蒸汽被较大幅度快速减压, 温度随之也降低, 如果相变前的湿饱和蒸汽含水滴较少, 则温度降低后会仍然高于新的压力对应的饱和温度, 则蒸汽由原来的饱和状态变为过热状态。

而过热蒸汽变为饱和蒸汽, 一般是由于长距离输送的热损使温度降低, 当温度低于或等于该压力对应的饱和温度时便进入饱和状态。蒸汽发生相变对流量测量的影响可分为几种情况。

- a) 饱和蒸汽发生变化后, 仍然未脱离饱和状态, 只是与变化前的压力、温度不同而处于一种新的饱和状态。这种情况只要系统有补偿仪表, 且饱和蒸汽的干度较高, 对测量无影响。
- b) 饱和蒸汽相变后成为过热蒸汽。如果设计时就考虑到有可能会产生相变, 测量系统采用的是压力和温度双补偿, 而且蒸汽密度是采用 IFC1967 公式动态计算的, 则这个相变对测量无影响。如果蒸汽密度采用查表法, 这就要求运算仪表内除了装有《饱和蒸汽密度表》外, 还应装有《过热蒸汽密度表》及相应的判断程序。采用查表法需要的两个数表和判断程序, 缺少任何一个都会对流量测量带来误差。
- c) 饱和蒸汽测量系统采用的是单压力或单温度补偿, 相变后对测量就会带来误差, 现举例说

明。一饱和蒸汽测量系统，采用单参数补偿，现场实际表压为 0.5MPa，实际温度 170℃。从上述压力和温度看，目前该蒸汽已经变为“过热”状态，其密度为 3.0706kg/m³。

如果采用单压力补偿，依据 0.5MPa 查饱和蒸汽表得到密度为 3.1698 kg/m³，给测量带来的误差为：

$$\text{对脉冲、线性电流信号的仪表} \quad \frac{3.1698 - 3.0706}{3.0706} \times 100 = 3.23\%$$

$$\text{对方根电流信号的仪表} \quad \frac{3.1698 - 3.0706}{2 \times 3.0706} \times 100 = 1.62\%$$

如果采用单温度补偿，依据 170℃ 查饱和蒸汽表得到密度为 4.1229kg/m³，给测量带来的误差为：

$$\text{对脉冲、线性电流信号} \quad \frac{4.1229 - 3.0706}{3.0706} \times 100 = 34.27\%$$

$$\text{对方根电流信号} \quad \frac{4.1229 - 3.0706}{2 \times 3.0706} \times 100 = 17.14\%$$

从上述可以看出，对于饱和蒸汽采用单参数补偿查表法求取密度，当蒸汽发生相变时会给测量带来误差，但是采用单压力补偿的误差要小于单温度补偿。

d) 过热蒸汽变为饱和蒸汽。由于大多数的过热蒸汽测量系统基本都采用压力和温度双补偿，所以如果积算仪表的蒸汽密度是采用 IFC1967 公式动态计算的，则这个相变对测量无影响。

如果采用查表法取得蒸气密度，当过热蒸汽变为饱和蒸汽后可能查不到对应的密度。因为在运算仪表内的《过热蒸气密度表》，通常只列出过热蒸汽范围的压力、温度数据，处于饱和状态下的数据一般不提供。例如现场实际表压 0.8MPa、温度 170℃。该表压 0.8MPa 对应的饱和温度为 $t_s = 175.36^\circ\text{C}$ ，而实际温度 $170^\circ\text{C} < t_s$ 明显已经处于饱和状态，因该压力下数表提供的可查温度范围 $t > 175^\circ\text{C}$ ，所以无对应的温度可查。即使仪表内装有《饱和蒸汽密度表》，但是如果没有蒸汽状态判断程序，仪表是不能自动转查《饱和蒸汽密度表》的，由此测量误差便会产生。

1.2 饱和蒸汽密度失准问题

1.2.1 失准原因分析

这里所说的饱和蒸汽密度不准确，是指脱离了临界饱和状态的蒸汽，也就是常说的湿饱和蒸汽。湿饱和蒸汽是汽液两相共存的状态，它是蒸汽和水的混合物，属于复杂的单工质气液两相流体。由于目前的流量仪表的技术性能都是在单相流状态下定义的，对于测量气液两相流的仪表，多年来尽管人们不断地进行了研究和探讨，也提出了一些运算数学模型，但是适用范围和测量准确度都不够理想，所以准确测量气液两相流的仪表仍是今后需要努力的方向。鉴于介质两相流型的复杂多变，本文这里讨论的湿饱和蒸汽密度的计算，其湿度也只能

界定在某一范围内，并认为气液是均相流动的状态为前提。

湿饱和蒸汽的形成是在实际使用中的产生的，例如热电厂送出的饱和蒸汽经过管道较长距离的输送，就会有部分蒸汽程度不等的变成冷凝水而成为湿饱和蒸汽。湿饱和蒸汽的密度与临界饱和蒸汽（以下称为干饱和蒸汽）的密度是不同的。而目前使用的两个饱和蒸汽密度表（以压力和温度为自变量）中提供的蒸汽密度，均为干饱和蒸汽的密度值，数表中之所以不列入湿饱和蒸汽密度的数据，是因该数据还不能准确得到。因为要想准确得到湿饱和蒸汽的密度，就必须知道饱和蒸汽的干度指标 x 或者湿度指标 y ，但是由于技术上的原因，目前还不能在线准确获得，这就是本文所指出的，当饱和蒸汽脱离临界饱和状态变为湿饱和蒸汽后，其密度不准确的原因。

例如已知饱和蒸气工作绝压为 0.48 MPa，若已知湿度 y 为 5% ($x=0.95$)，看一下密度的差别。查表得到饱和蒸气密度 $r_g=2.5683 \text{ kg/m}^3$ ，湿饱和蒸汽实际密度为 $r_H=2.7034 \text{ kg/m}^3$ 。查表得到的干饱和蒸汽的密度与实际湿饱和蒸汽的密度误差为：

$$\frac{2.5683 - 2.7034}{2.7034} \times 100 \approx -5.0\%$$

如果蒸汽的湿度 y 不同，即使仍然处于工作绝压为 0.48 MPa 状态下，将会得到不同的密值，可自行验算这里不再举例了。

1.2.2 失准带来的影响

饱和蒸汽含水所产生的流量测量误差，引起最大的纠纷就是在贸易结算计量上。供方和收方在一根管道上装有同样的流量计，在供方由于距离热源较近，饱和蒸汽中的水滴含量可能很少，对测量影响较小。而在收方由于长距离输送会导致部分蒸汽冷凝的水滴含量增大，对测量的影响必然较大。尽管供、收双方的流量仪表都是正常的，但是供大于收的计量误差是常常发生的。

例如在供收双方流量仪表都用涡街流量计，在双方仪表都正常的情况下，供方瞬时流量显示 5.2t/h 时，在收方可能只有 4.9t/h 显示值，误差为 -5.77% 甚至示值不稳定，这就是接收方的蒸汽中含水原因所造成的。如果收方将管道的积水及时放掉，能使涡街流量计示值恢复稳定，但上述差量可能会仍然存在。因为在供方测量的几乎是“蒸汽的总的质量流量”，而在收方“有一部分汽体冷凝成液体了”，这些液体不会被检测到或是被排放掉，从而导致质量流量减少，误差也就产生了，（当然不排除水滴使少量脉冲漏计造成的部分误差），这个误差完全不是双方仪表有问题造成的，而是湿蒸汽密度不能准确得到造成的。由此常常导致供收双方多次拆下流量仪表外送校验，造成白白耗费时间财力却无功而返。

举例说明如下，用脉冲信号的涡街流量计测量饱和蒸汽流量，当饱和蒸汽由干饱和蒸汽变为湿饱和蒸汽后，计算一下对流量测量带来的误差。若已知蒸汽湿度 5%，绝压为 0.40 MPa，

查表密度 r_g 为 2.1635 kg/m^3 ，湿蒸汽实际密度为 r_H 为 2.2773 kg/m^3 ，仪表系数 $K=0.3396$ 。
当测量频率为 $f=135.8\text{Hz}$ 时，采用不同的密度得到的测量结果。

$$\text{依据脉冲涡街质量流量运算式 } q_m = \frac{3.6f}{K} \cdot r_i$$

$$\text{查表密度流量为 } q_m = \frac{3.6 \times 135.8}{0.3396} \times 2.1635 = 3114.523 \text{ kg/h}$$

$$\text{实际密度流量为 } q_m = \frac{3.6 \times 135.8}{0.3396} \times 2.2773 = 3278.346 \text{ kg/h}$$

$$\text{误差 } \frac{3114.523 - 3278.346}{3278.346} \times 100 = -4.997\%$$

从计算结果看饱和蒸汽湿度在 5% 的情况采用查表密度测量，将会造成约 -5% 的流量误差。

1.2.3 湿饱和蒸汽密度的计算

如前所述，下面介绍的湿饱和蒸汽密度的计算，是界定在一定范围的基础上进行的，其界定的范围如下。

当蒸汽湿度 $y \leq 5\%$ 时（干度 x 在 $99\% \sim 95\%$ 间），可认为气液是均相流动，气液速度基本相等，即速度比 $K \approx 1$ ，可用下式（1）或（2）计算密度，其准确度是可信的。

当湿蒸汽湿度 $6\% \leq y \leq 10\%$ 左右时（干度 x 在 $94\% \sim 90\%$ 间），流动状况会从“均相流动”状态，依据水平管道或垂直管道流向的不同，逐渐变成复杂的流动状态。如果对计算准确度要求不高的话，也可用式（1）或（2）尝试计算，但是密度误差会大于 $y \leq 5\%$ 时的状态，具体数值不能确定。

当湿蒸汽湿度 $y > 10\%$ 后（干度 $x < 90\%$ ），不能用下式求取湿蒸汽实际密度，因为流动状态已经不是均相流动状态，其速度比 $K \neq 1$ 了。

$$r_H = \left(\frac{1-y}{r_g} + \frac{y}{r_s} \right)^{-1} \quad \text{--- (1)} \quad r_H = \frac{r_g}{x} \quad \text{或} \quad r_H = \frac{r_g}{1-y} \quad \text{--- (2)}$$

式中 r_H ：湿饱和蒸汽的密度， kg/m^3 ；

r_g ：同状态下干饱和蒸汽的密度， kg/m^3 ；

r_s ：同状态下饱和水的密度， kg/m^3 ；

x ：饱和蒸汽的干度；

y ：饱和蒸汽的湿度。

2 蒸汽问题的解决方案

2.1 蒸汽相变问题的解决方法

a) 一是对可能产生相变的测量系统有一个事先预防措施，就是在设计时无论是测量饱和

蒸汽还是过热蒸汽，一律采用压力和温度双补偿。这样虽然一次性成本费用有所增大，但是从长远利益来看，无疑是减少矛盾、增加效益的良方。二是最好采用具有“IFC1967 公式动态计算蒸汽密度”的积算仪，它能根据测量的压力温度识别蒸汽的状态，及时计算出过热状态、饱和状态下的蒸汽密度。目前市场上已经有了具有此功能的智能流量积算仪如 FLC-2800。当然也可采用同时装有《饱和蒸汽密度表》和《过热蒸汽密度表》、且具有判断蒸汽状态功能的积算仪。以便可以根据蒸汽的实际状态及时查找不同的数表，从而得到蒸汽的密度值。

b) 对于饱和蒸汽单参数补偿的系统，尽量采用压力补偿，这样即使发生了相变，也会使误差远小于单温度补偿的系统。

c) 流量计安装地点应妥善考虑，应选择不容易导致蒸汽发生相变的位置，如避开经常有减压操作的设备和减压阀门后面，输送蒸汽的管道和测量传感器加强保温措施等。

2.2 饱和蒸汽密度不准的解决方法

对于湿饱和蒸汽密度需要知道蒸汽的干度或湿度，而这个数据目前又难以在线得到的问题，笔者提出了一个解决方案供大家讨论。

供收双方在确认了双方流量仪表都处于正常良好的工作状态前提下，可以根据长期存在的差量和现场的实际工况，根据经验确定出不同时间段湿蒸汽的含水程度，然后在积算仪表内设置相应的湿度补偿运算公式，通过人工输入蒸汽干度 x 或湿度 y 数值，就可以对湿饱和蒸汽进行湿度补偿运算^[1]。只要湿度指标估算基本正确，双方差量的矛盾就可以大大缓解。下面介绍蒸汽湿度补偿的几个运算式，准确度较好的湿度适用范围为 $1\% \leq y \leq 5\%$ ，可探讨的扩展适用范围为 $6\% \leq y \leq 10\%$ 。

2.2.1 脉冲信号的仪表

根据脉冲信号的流量运算式

$$q_v = \frac{3.6f}{K} \quad \text{--- (3)} \quad q_m = \frac{3.6f}{K} \cdot r_i \quad \text{--- (4)}$$

用湿蒸汽实际密度 r_H 参与运算应为

$$q_{mz} = \frac{3.6f}{K} \cdot r_H \quad \text{--- (5)}$$

将 (2) 式带入 (5) 式可得到湿蒸汽补偿运算式

$$q_{mz} = \frac{3.6f}{K} \cdot \frac{r_g}{(1-y)} \quad \text{或} \quad q_{mz} = \frac{3.6f}{K} \cdot \frac{r_g}{x} \quad \text{--- (6)}$$

2.2.2 线性电流信号的仪表

根据线性电流信号的流量运算式 $q_m = q_{m\max} \cdot A_i \frac{r_i}{r_d}$ --- (7)

用湿蒸汽实际密度 r_H 参与运算应为

$$q_{mz} = q_{m\max} \cdot A_i \frac{r_H}{r_d} \quad \text{--- (8)}$$

将 (2) 式带入 (8) 式可得到湿蒸汽补偿运算式

$$q_{mz} = q_{m\max} \cdot A_i \frac{r_g}{r_d \cdot x} \quad \text{或} \quad q_{mz} = q_{m\max} \cdot A_i \frac{r_g}{r_d \cdot (1-y)} \quad \text{--- (9)}$$

2.2.3 方根电流信号的仪表

根据方根电流信号的流量运算式
$$q_m = q_{m\max} \sqrt{A_i \frac{r_i}{r_d}} \quad \text{--- (10)}$$

用湿蒸汽实际密度 r_H 参与运算应为

$$q_{mz} = q_{m\max} \sqrt{A_i \frac{r_H}{r_d}} \quad \text{--- (11)}$$

将 (2) 式带入 (11) 式可得到湿蒸汽补偿运算式

$$q_{mz} = q_{m\max} \sqrt{A_i \frac{r_g}{r_d \cdot x}} \quad \text{或} \quad q_{mz} = q_{m\max} \sqrt{A_i \frac{r_g}{r_d \cdot (1-y)}} \quad \text{--- (12)}$$

上式中: q_m : 未加湿度补偿的质量流量, kg/h;

q_{mz} : 加湿度补偿后的质量流量, kg/h;

q_v : 工况体积流量, m^3/h ;

r_i 、 r_g : 饱和蒸汽工作状态的密度查表值, kg/m^3 ;

f : 脉冲信号频率, Hz;

K : 脉冲流量计系数, P/L;

$q_{m\max}$: 电流上限对应的质量流量;

A_i : 电流信号, $A_i = \frac{I_i - 4}{16} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}}$;

r_d : 设计状态下的蒸气密度, kg/m^3 ;

其中 x 或 y 为人工估算输入值。

3 解决方案的验证计算

对上面提出的对饱和蒸汽进行人工湿度补偿的方法, 可通过下面的模拟计算看一看得到

的效果。

举例 1: 涡街流量计脉冲信号, 饱和蒸汽工作绝压 0.45MPa, 湿度 $y=5\%$ (干度 $X=0.95$), $K=0.3396$, 测量频率 $f=195.2\text{Hz}$, 当前工作压力下的查表密度 r_g 为 2.4169 kg/m^3 , 计算得到 r_H 为 2.544 kg/m^3 。

$$\text{用查表密度运算 (4) 式的质量流量为: } q_m = \frac{3.6 \times 195.2 \times 2.4169}{0.3396} = 5001.2\text{kg/h}$$

$$\text{用蒸汽实际密度运算 (5) 式的质量流量为: } q_m = \frac{3.6 \times 195.2 \times 2.544}{0.3396} = 5264.192\text{kg/h}$$

$$\text{用查表密度运算的质量流量的误差为 } \frac{5001.2 - 5264.192}{5264.192} \times 100 = -5.0\%。$$

用湿度补偿运算 (6) 式得到蒸汽的质量流量为

$$q_{mz} = \frac{3.6 \times 195.2 \times 2.4169}{0.3396 \times 0.95} = 5264.41\text{kg/h}$$

(6) 式与 (5) 式计算结果基本一致。

举例 2: 线性电流信号, 当前工作绝压 0.30 MPa, 湿度 $y=5\%$ (干度 $x=0.95$), 设计绝压 0.25 MPa, 设计密度 $r_d=1.392\text{ kg/m}^3$, 流量 $0\sim 2500\text{ kg/h}$ $A_i=25\%$ ($I=8\text{mA}$)。当前工作压力下的查表密度 r_g 为 1.651kg/m^3 ; , 计算得到 r_H 为 1.738kg/m^3 。

$$\text{用查表密度运算 (7) 式的质量流量为: } q_m = 2500 \times 0.25 \frac{1.651}{1.392} = 741.29\text{kg/h}$$

$$\text{用蒸汽实际密度运算 (8) 式的质量流量为: } q_{mz} = 2500 \times 0.25 \frac{1.738}{1.392} = 780.352\text{kg/h}$$

$$\text{用查表密度运算的质量流量的误差为 } \frac{741.29 - 780.352}{780.352} \times 100 = -5.0\%$$

用湿度补偿运算 (9) 式得到蒸汽的质量流量为

$$q_{mz} = 2500 \times 0.25 \frac{1.651}{1.392 \times 0.95} = 780.777\text{kg/h}$$

(9) 式与 (8) 式计算结果基本一致。

举例 3: V 锥流量计方根电流信号, 当前工作绝压 0.68MPa, 湿度 $y=5\%$ (干度 $x=0.95$), 设计绝压 0.80MPa, , 设计密度 $r_d=4.162\text{ kg/m}^3$, 流量 $0\sim 20000\text{ kg/h}$, 差压 $0\sim 25.717\text{kPa}$, $A_i=75\%$ ($I=16\text{mA}$)。当前工作压力下的查表密度 r_g 为 3.568kg/m^3 ; , 计算得到 r_H 为 3.756kg/m^3 。

用查表密度运算（10）式的质量流量为 $q_m = 20000 \sqrt{0.75 \frac{3.568}{4.162}} = 16036.96 \text{kg/h}$

用蒸汽实际密度运算（11）式质量流量为 $q_m = 20000 \sqrt{0.75 \frac{3.756}{4.162}} = 16454.03 \text{kg/h}$

用查表密度运算的质量流量的误差为

$$\frac{16036.96 - 16454.03}{16454.03} \times 100 = -2.53\%$$

用湿度补偿运算（12）式得到蒸汽的质量流量为

$$q_m = 20000 \sqrt{0.75 \frac{3.568}{4.162 \times 0.95}} = 16451.27 \text{kg/h}$$

（12）式与（11）式计算结果基本一致。

从上述举例计算结果来看，补偿后的质量流量与实际质量流量相差无几，当然这是从理论上计算的结果。实际应用中由于蒸汽湿度的估计不太准确会带来一定的误差，当 $6\% \leq y \leq 10\%$ 范围的非均相流影响，也会使误差加大，但是比起没有补偿的测量结果肯定要好的多。

[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：0.535-8619054 8613478 手机：13465575659（随身）、15725455319（办）

传真：0535-8619598

邮编：265718

E-mail：Changqinxi n888@163.com

作者简介：常勤信（1949—），男（满族），吉林省大安市人，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。

2010-06-22

已发表在《工业计量》2010年第5期

