

蒸汽相变对两种流量计的影响

纪纲 陈杰 上海同欣自动化仪表有限公司（上海 200070）

纪波峰, 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司（上海 200070）

摘要: 蒸汽从热源厂（站）供出时，大多为过热状态，随着输送距离的延伸，管道的自然散热引起过热度逐步降低，然后进一步变成饱和蒸汽。用涡街流量计测量湿饱和蒸汽，流量计对汽中夹带的液态水并不响应，而差压式流量计会作出一定的响应。另外，饱和蒸汽经大幅度减压，绝热膨胀也会将饱和蒸汽变成过热蒸汽，如果仍作为饱和蒸汽测量，将会导致流量示值大幅度偏高。

关键词: 过热蒸汽 饱和蒸汽 相变 绝热膨胀 涡街流量计 差压流量计

1 引言

蒸汽是生产和生活中应用最广泛的二次能源之一。蒸汽在输送和利用过程中，难免要发生相变。例如，蒸汽从热源厂（站）供出时，不管是从汽轮机背压引出还是从减温减压系统引出，都是过热状态。由于蒸汽管道的自然散热，蒸汽温度随着输送距离的增加而逐渐降低。这种温度的降低，开始的一段距离，表现为蒸汽过热度的降低，但是到了某一节点，过热度降到 0，蒸汽就呈临界饱和状态。这个渐变过程从图 1 可看得更形象：压力为 P_0 、温度为 t_3 的过热蒸汽，温度降到 t_2 时，仍然为过热状态，一旦降低到 t_1 ，才进入饱和状态。在温度降低的同时，压力的降低并不显著。

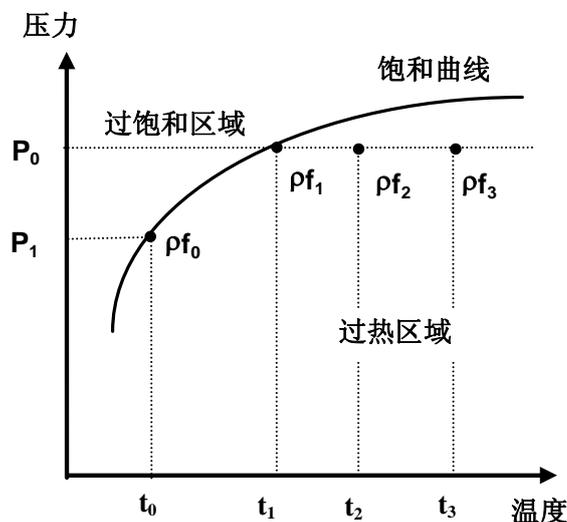


图 1 蒸汽状态变化

蒸汽继续流向下流，饱和蒸汽靠部分凝结放出凝结热来平衡管道的热量损失。从而将一定比例的饱和蒸汽变成凝结水。这种凝结水开始的时候并不多，而且是以小水珠的形态悬浮在气相中，这时气液两相为均匀分布，犹如迷雾天的大气，小水珠与空气一起随风飘荡。但是，气相将小水珠托起来是有限度的，当蒸汽的含水量越来越高，所托起的水珠体积越来越大时，水珠就因其密度比气相大得多而下沉。聚集在水平管道的底部。保持与气相相同的流向往下游流动。大雾天有时是“雾不开就是雨”，也就是气相中液态水逐渐增多的过程。自然界中，空气、水珠、流水三者共存的现

象很平常，例如江面上起迷雾：空气夹带着雾滴随风移动，江水从上游流向下游。管道中的气、水珠和分层流动的水与此相似，蒸汽夹带小水珠从上游流向下游，同时带着管道底部的凝结水向下游流动，只是由于水层与管道间的摩擦力较大，流速比蒸汽慢得多^{[1][2]}。

2 湿蒸汽对涡街流量计的影响

2.1 充分疏水后的蒸汽当作单相流测量

湿蒸汽流量测量，严格地说属于气液两相流测量问题。而两相流流量的准确测量是一件极其困难的事情，不仅投资大而且测不准。作为替代方法，是将管道底部分层流动的水，经疏水器排除，而将气相部分和其夹带的微量水珠一起，当作单相流来处理。

管道中的水不疏掉行不行？答案是不行。原因是分层流动的水被排除之后，蒸汽中仅剩下微量的液态水，其质量比约为百分之几。若不疏水，湿蒸汽中的液态水就是一个未知数，而且含水量多到一定程度，将会出现一种称为“漏脉冲”的现象，引起流量示值严重偏低，最严重的情况是脉冲全被漏掉，流量示值趋 0^{[2][3]}。

2.2 湿蒸汽中的水珠对涡街流量计的影响

湿蒸汽中的水滴对流量测量结果的影响究竟有多大，下面举例说明。

有一常用压力为 1.0MPa 的过热蒸汽，其流量为 q_m ，假设经长距离输送后有 5% q_m 冷凝成水滴，令其为 q_{mL} ，而保持气态的部分为 q_{mS} ，从定义知，此时湿蒸汽的干度为

$$\begin{aligned} X &= \frac{q_{mS}}{q_m} = \frac{q_m - q_{mL}}{q_m} \\ &= 95\% \end{aligned} \quad (1)$$

由于采用温压补偿，所以按照临界饱和状态查表，得到此时的蒸汽（干部分）密度为 $\rho_s = 5.6808 \text{ kg/m}^3$ ，查水密度表知此时水滴的密度为 $\rho_L = 882.47 \text{ kg/m}^3$ ，显然水滴与蒸汽干部分的体积流量为

$$q_{VL} = q_{mL} / \rho_L \quad (2)$$

$$q_{VS} = q_{mS} / \rho_s \quad (3)$$

式中 q_{VL} —— 水滴的体积流量， m^3/s ，

q_{VS} —— 蒸汽干部分的体积流量， m^3/s 。

由定义知，蒸汽干部分体积流量占湿蒸汽总体积流量 q_V 之比 R_V 为

$$R_V = \frac{q_{VS}}{q_V} = \frac{q_{VS}}{q_{VS} + q_{VL}} = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_L} \cdot \frac{q_{mL}}{q_{mS}} + 1} \quad (4)$$

因为

$$\frac{q_{mL}}{q_{mS}} = \frac{q_m - q_{mS}}{q_{mS}} = \frac{1}{q_{mS} / q_m} - 1 \quad (5)$$

所以

$$R_V = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_L} \left(\frac{1}{X} - 1 \right) + 1} \quad (6)$$

在该例中， $R_V = 99.97\%$ ，由此可见，在湿蒸汽中，水滴所占的体积比可忽略不计。

涡街流量计说到底还是体积流量计。涡街流量计的输出仅与流过测量管的流体流速成正比，在测量湿饱和蒸汽时，水滴对涡街流量计输出的影响可忽略，故可认为，涡街流量计的输出完全是由湿

蒸汽的干部分所引起。而干部分的密度，无论是压力补偿或温度补偿，都可较精确地查出^{[4][5]}。

蒸汽计量的结果往往作为供需双方经济结算的依据，如果双方约定按蒸汽干部分结算费用，凝结水不收费，则在本例中相变对测量的影响微不足道，可以忽略。如果凝结水也按照蒸汽一样收费，则涡街流量计的计量结果偏低值为 (1-X)。

如引言中所述，饱和蒸汽夹带的凝结水较多时，就会在水平管道底部形成分层流动的水。

这种沿着水平管道底部流动的凝结水，分布在管道底部只是薄薄一层。凝结水量（包含悬浮在气相中的水珠）如果以瞬时流量表示，即使液—汽质量比达到 1:1（即蒸汽湿度为 50%），液—汽体积比也只有 0.6%（以饱和蒸汽压力等于 1MPa 为例），这是因为凝结水的密度比气相密度大得多的缘故（前者是后者的约 155 倍）。这个水层在流量测量之前应及时疏掉，否则，积累到一定的量就会导致涡街流量计产生“漏脉冲”现象，使得流量示值大幅度偏低^[6]。

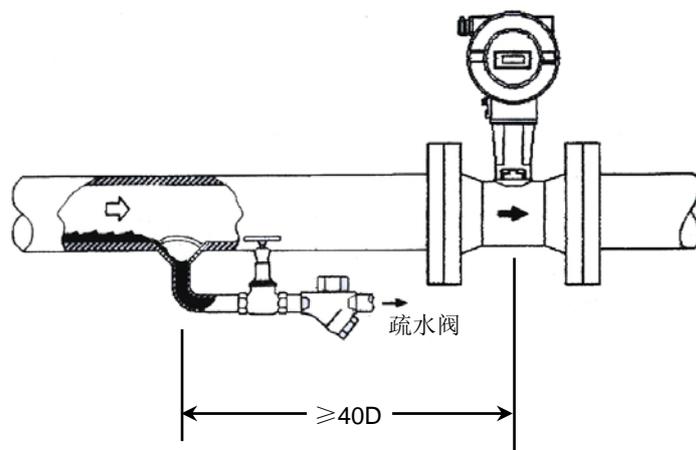


图 2 涡街流量计前充分疏水

3 湿蒸汽对差压流量计的影响

以孔板流量计为例，从 GB/T 2624-2006 标准知，孔板流量计测量蒸汽质量流量时，其流量方程式如式 (7) 所示^{[7][8]}。

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1} \quad (7)$$

式中 q_m —— 质量流量，kg/s；

C —— 流出系数；

β —— 直径比， $\beta = d/D$ ；

D —— 管道内径，m；

ε_1 —— 节流件正端取压口平面上的可膨胀性系数；

d —— 工作条件下节流件的开孔直径，m；

Δp —— 差压，Pa；

ρ_1 —— 节流件正端取压口平面上的流体密度，kg/m³。

当过热蒸汽因热量损失而脱离过热状态后，只可能出现两种情况。一种是进入临界饱和状态，另一种是进入过饱和状态。如果进入临界饱和状态，从理论上讲，流量计不会因此而增大误差，因

为在式(7)中,根据蒸汽压力查出的 ρ_1 与实际密度是相符的。如果进入过饱和状态,情况就复杂了。

一般认为,蒸汽干度较高($X \geq 95\%$)时流体表现为均相流动。温压补偿可按通常方法进行;但出现一定误差。在式(7)中, ρ_1 是实际流体湿饱和和蒸汽的密度,其值比临界饱和状态的大,而且干度越低密度越大。而人们根据压力查出的是临界饱和状态的密度,比实际密度小,所以质量流量计算结果出现负误差。在湿度不进行测量的情况下, X 是未知数,因此,测量结果偏低多少是个未知数。

在蒸汽干度较低($X \leq 95\%$)时,管道中的流体出现分层流动,产生误差更大。

4. 湿饱和蒸汽变成过热蒸汽

湿饱和蒸汽变成过热蒸汽,一般发生在湿饱和蒸汽突然较大幅度减压,流体出现绝热膨胀时。

4.1 相变过程

湿饱和蒸汽中的蒸汽和水滴,处于汽液相平衡状态,在压力突然降低而低于平衡压力时,水滴部分蒸发,同时从液相和汽相中吸收汽化热,使汽液相温度降低。如果压力降低得不多或蒸发前湿度较高,都会使温度迅速降低到与新的压力所对应的饱和温度,建立新的平衡,这时蒸汽仍为湿饱和和蒸汽。如果压力降低得很多或蒸发前湿度较低,则因水滴蒸发而使温度降低后仍高于新的压力所对应的饱和温度,则蒸汽变为过热状态^[9]。

4.2 蒸发对流量测量的影响

① 上述蒸发发生后得到的两种结果,前一种对我们的补偿无影响,仅仅是蒸汽中的干部分增加,干度相应增大。

② 如果蒸发发生后,蒸汽变为过热状态,而流量计又恰巧安装在减压之后的管道上。这时对流量计的影响分三种情况。

设计时已经考虑到蒸汽变为过热状态或处于何种状态难以确定或有时是过热状态有时是饱和状态,所以采用温压补偿,则上述相变对测量结果无影响。

设计时按饱和蒸汽考虑,而且采用压力补偿,则上述相变将带来较小的误差,即过热蒸汽温度同饱和温度之差所对应的密度差造成的补偿误差。

设计时按饱和蒸汽考虑,但采用温度补偿,则将过热蒸汽温度当作饱和温度去查密度表。一般会引起较大的误差。

4.3 举例

有一化工厂,锅炉房供饱和蒸汽,并根据各用户中蒸汽压力要求值最高的一个决定锅炉供汽压力为1.0MPa,多数用户在蒸汽总管进装置时先经减压阀减压。现从图3所示的一个实例着手进行分析^[9]。

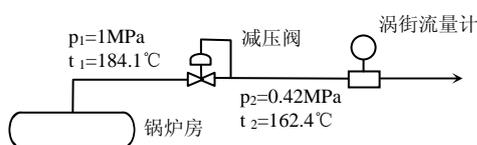


图3 蒸汽减压和流量测量示意图

用作进入装置蒸汽计量的涡街流量计安装在减压（稳压）阀之后。原设计按饱和蒸汽考虑，采用温度补偿。经减压，蒸汽总管带入的水滴蒸发完后汽温仍高于饱和温度，呈过热状态，现场采集到的数据如图所示。这时流量二次表按照所测量到的温度 $t_2 = 162.4^\circ\text{C}$ 查饱和蒸汽密度表，得 $\rho_2 = 3.4528 \text{ kg/m}^3$ ，而按照 t_2 和 p_2 两个测量值查过热蒸汽密度表，得密度 $\rho_2' = 2.6897 \text{ kg/m}^3$ ，所以质量流量计算结果出现 28.37% 的误差，即

$$\delta_{mt} = \frac{\rho_2 - \rho_2'}{\rho_2} = 28.37\% \quad (8)$$

在本例中，如果采用压力补偿，则根据 $p_2 = 0.42\text{MPa}$ 的信号查饱和蒸汽密度表，应得到 $\rho_2'' = 2.7761\text{kg/m}^3$ ，则补偿误差为

$$\delta_{mp} = \frac{\rho_2'' - \rho_2'}{\rho_2} = 3.2\% \quad (9)$$

解决办法

① 将总蒸汽流量计安装在减压阀之前。由于上述蒸汽未经减压时，确属饱和蒸汽，所以，将流量计安装在减压阀之前，按饱和蒸汽补偿方法处理，可保证测量精确度。

② 如果流量计只能安装在减压阀后面，则可增装一台压力变送器，进行温压补偿。

5 饱和蒸汽流量计应用中的问题

现在市场上有一种专门用来测量饱和水蒸气流量的涡街流量计，其硬件结构为一台涡街流量传感器与一支铂热电阻。其原理是用铂热电阻测量涡街出口的蒸汽温度，然后去查饱和蒸汽密度表，得到蒸汽密度值，然后再与涡街送出的体积流量信号相乘得质量流量 q_m 。这种流量计显示的是临界饱和状态蒸汽质量流量。其测量的基础是蒸汽处于饱和状态，否则，无法保证的准确度。

例如有家造纸厂的烘房用蒸汽加热，并用带温度补偿的涡街流量计测量蒸汽消耗量，由于该路蒸汽从热力公司总管一个现成的支管引出，管路很长，所以安装在流量计前的疏水器有凝结水疏出，流量计测量正常，供需双方都对其准确度予以认可。一年多之后，总管有机会停汽施工，造纸厂就在总管上开口安装支管，由于距离大大缩短，所以支管上的热量损失也相应减少，可是，工厂的产量和工艺都没变，蒸汽消耗量却升高一倍。用汽方提出异议。经咨询专业工作者，怀疑改造后，流量计安装地点的蒸汽，已进入过热状态。

判断蒸汽是否进入过热状态，最简单的方法是在铂热电阻附近管道上，安装一只压力表，从压力示值查出对应的饱和温度值，如果铂热电阻测得温度高于此温度，即为过热蒸汽。

从疏水器疏水情况也可作出判断，但没有压力分析法来得准，因为临界饱和状态以及蒸汽中夹带悬浮着的水珠，同样疏不出水，而蒸汽却是处于饱和状态。

6 结束语

① 蒸汽从热源厂（站）供出时，大多为过热状态。随着输送距离的延伸，管道的自然散热，引起过热度逐步降低，然后进入饱和状态。进一步的散热使得汽中的液态水增多，从而下沉，沿着水平管道底部分层流动。

② 用涡街流量计测饱和蒸汽流量，先得将管道内分层流动的水疏掉。不疏掉这些水，容易产生“漏脉冲”现象，导致流量示值偏低，甚至完全无流量显示。

③ 湿蒸汽中夹带的液态水，所占的体积比非常小，而涡街流量计属体积流量计，所以汽中水滴不会使流量计走字。

④ 蒸汽中的液态水，使得气液混合物的密度增大，从而对差压流量计的流量示值产生作用。

⑤ 饱和蒸汽经大幅度减压后，由于绝热膨胀属等焓过程，湿蒸汽中的微量水滴会因闪蒸而气化，在一定的条件下，蒸汽会进入过热状态。这时如果仍把它当作饱和蒸汽测量，将会导致流量示值严重偏高。

参考文献

1. 斯派莎克工程(中国)有限公司. 蒸汽和冷凝水系统手册. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2007
2. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 第二版. 北京: 化工工业出版社, 2009
3. 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦. 北京: 化学工业出版社. 2012: 48~52
4. 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计. 北京: 中国石化出版社, 2006
5. 王池等. 流量测量技术全书. 北京: 化学工业出版社, 2012.
6. 余小寅. 蒸汽严重带水对涡街流量计的影响. 化工与医药工程, 2008, 29(4): 51~54
7. ISO 5167:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full
8. GB/T 2624-2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量
9. 汪里迈, 纪纲. 蒸汽流量测量中的温压补偿实施方案. 石油化工自动化, 1998 (3): 39~42
10. 纪纲. 蒸汽相变对流量测量的影响 (一). 医药工程设计, 2001(1): 37~39

摘自《仪表世界》2018年第10月号