

蒸汽相变对流量测量的影响

纪 纲 (上海宝科自动化仪表研究所, 上海 200940)

关键词: 流体相变 流量测量 质量流量 温压补偿

摘 要 讨论蒸汽流量测量中, 由于流体散热和减压等原因导致流体发生相变而偏离设计状态所引起的流量测量误差, 并提出了解决方法。

水蒸气顾名思义是气相, 但在一定条件下会变成液相; 饱和水蒸汽中的水滴本是液相, 但在一定条件下会被蒸发变成气相。这是蒸汽质量流量测量中常常碰到的汽水相变。

目前, 蒸汽质量流量测量使用的方法基本上仍然采用推导法(间接法), 这可能是因为科里奥利质量流量计用来测量蒸汽流量投资太大, 而且还有很多局限性。

在推导式质量流量计中, 关键环节是蒸汽密度的求取, 蒸汽相变发生后, 就使得通常由蒸汽温度压力求取其密度的关系发生变化, 因此必须认真对待。

一、 气相变液相

过热蒸汽在经过长距离输送后, 往往会因为热量损失温度降低使其从过热状态进入饱和状态, 甚至部分蒸汽冷凝出现相变而变成水滴。这些水滴对流量测量结果究竟有多大影响, 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 10% 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

$$X = \frac{q_{mS}}{q_m} = \frac{q_m - q_{mL}}{q_m} \quad (1)$$
$$= 90\%$$

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

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

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

因为

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

在该例中, $R_V = 99.93\%$, 由此可见, 在湿蒸汽中, 水滴所占的体积可忽略不计。

1. 选用涡街流量计时湿度对测量结果的影响

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。

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，冷凝水不收费，则在本例中相变对测量的影响微不足道，可以忽略。如果冷凝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)。

2. 选用孔板流量计时湿度对测量结果的影响

从 GB/T 2624-93 标准知^[1]，孔板流量计测量蒸汽质量流量时有下面的公式。

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

式中： q_m — 质量流量，kg/s；

C — 流出系数；

β — 节流件孔径与管道内径之比， $\beta = d/D$ ；

ε_1 — 流束膨胀系数；

d — 节流件孔径，m；

D — 管道内径，m；

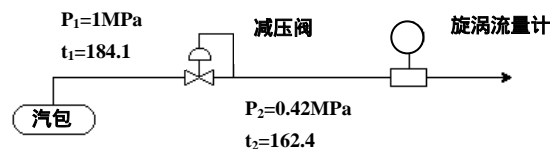
Δp — 差压，Pa；

ρ_1 — 节流件入口端流体密度，kg/m³

当过热蒸汽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，测量结果偏低多少也是个未知数。

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



蒸汽减压和流量测量示意图

二、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。

1. 相变过程

湿饱和蒸汽中的水滴，其压力和温度处于平衡状态，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。如果温度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。

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。

3. 举例

有一化工厂^[2]，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。现从下图所示的一个实例着手进行分析。

用作进装置蒸汽计量的旋涡流量计安装在减压（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 $t_2=162.4$ 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

$$\delta_{mp} = \frac{\rho_2'' - \rho_2}{\rho_2} = 3.2\%$$

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

$$\delta_{mt} = \frac{\rho_2'' - \rho_2}{\rho_2} = 28.37\%$$

4. 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，不存在相变问题，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。

(3) 如果减压阀的稳压性能较好，可将流量计上游压力值作为一个恒定值(通过面板操作)设置到二次表内进行温度压力补偿。

参考文献：

- 1 GB/T 2624-93《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》.1993
- 2 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

编者按：纪纲同志，高级工程师，长期从事仪表自动化工作，在自控系统设计、调试、维修等方面积累了较丰富的经验。本刊从本期起将连载由他独自撰写或他同他人合作撰写的关于流量测量仪表现场应用中存在的问题及其解决方法的文章，希望读者踊跃来稿进行交流。

(摘自《医药工程设计》2001年第1期 37-39页)