

# 蒸汽流量测量中温压补偿实施方案的讨论

汪里迈 (上海巴斯夫染料化工有限公司 200137)

纪 纲 (上海宝科自动化仪表研究所 200940)

摘要：用查表法求取蒸汽密度，进行温压补偿，能得到较高精度。蒸汽的相变对温压补偿有一定的影响，应区别情况，逐一解决。

关键词：蒸汽流量 温压补偿 实施方案 相变影响

## 一、前言

蒸汽流量测量是企业中量大面广的测量任务。在蒸汽流量测量中进行温压补偿，也已经是老的话题了，但是，越讨论认识越深化，越能启发人们去开发价格低、精度高、功能强的仪表，越能启发自动化专业人员选好仪表用好仪表。

蒸汽流量测量中的温压补偿的目的，是在蒸汽的工况偏离设计工况时，将蒸汽的密度对测量结果的影响予以修正。因为蒸汽是处于气体状态，在其温度、压力变化时，其密度有很大的变化，如果不进行补偿，引起的误差是很大的。例如设计压力为 1MPa(表压)的饱和水蒸气，当压力下跌到 0.8MPa 时，密度下降到设计值的 82%，若不进行温压补偿，对差压式流量计的影响是使示值升高 10.4%，而对涡街流量计的影响是使示值升高 21.9%。显然，对温度、压力变化的流量测量对象，除直接法质量流量计外，必须进行温压补偿。

但是自控设计人员在实施温压补偿时遇到了一些问题，因为水蒸气在输送过程中难免要发生相变，例如过热蒸汽在经过长距离输送后，往往因沿途损失热量而脱离过热状态，进入饱和状态，甚至变成汽液两相，如果仍按过热蒸汽来处理是否会有问题？饱和水蒸气在送到生产装置后往往要先减压再使用，那么，减压后的蒸汽是否仍然是处于饱和状态等等。对于这些问题，如果处理不当，就会引起额外的误差。下面就以我们实际工作中所遇到的问题，结合具体的仪表进行分析和讨论，以求收到抛砖引玉之效。

## 二、蒸汽密度的求取

流量测量中温压补偿的主要任务是将蒸汽的温度、压力测量出来并据此求出蒸汽密度。

我们所使用的流量二次表是 FC6000 型通用流量演算器，在该仪表中，蒸汽温压补偿采用查表和内插相结合的方法求取蒸汽密度，在仪表的 EPROM 中写入三个蒸汽密度表，1 号表是过热蒸汽密度表，另外两个是饱和蒸汽密度表，采用的都是国际蒸汽密度表 1967 IFC。其中，过热蒸汽密度表有两个自变量，即蒸汽温度和蒸汽压力。而饱和蒸汽密度表都只有一个自变量。2 号表是蒸汽压力为自变量。3 号表是蒸汽温度为自变量。这样，测得蒸汽温度或测得蒸汽压力都能通过查表求得蒸汽密度。究竟是选查  $\rho=f(p)$  表格还是  $\rho=f(t)$  表格，则在填写组态菜单时由用户自己选定。

### 1. 查表的优先权问题

对于过热蒸汽来说，蒸汽密度随蒸汽温度、压力变化的关系是三维空间中的一个曲面，有两个自变量，因此在查密度表时就存在一个优先权的问题。若先从压力查起，就称压力优先；若先从温度查起，就称温度优先。

对于饱和蒸汽来说，若选压力补偿，则为压力优先；若选温度补偿，则为温度优先。

上述三种情况优先关系，用户在填写菜单时指定，如表 1 所示。

表 1 优先权指定表

蒸汽温度	蒸汽压力	补偿运算优先	项目 13 I
测定值	测定值	压力	0
测定值	手动设定值	温度	1
手动设定值	测定值	压力	2
手动设定值	手动设定值	压力	3

## 2. 蒸汽状态判别问题

FC 6000 型仪表具有蒸汽状态判别功能。根据判别结果，

查不同的密度表。以过热蒸汽为例，在图 1 所示的查表示意图中，从压力测定值  $P_0$  出发去查温度，如果温度测定值大于饱和温度  $t_1$ ，则判别蒸汽为“过热蒸汽”，查 1 号密度表，例如， $t=t_2$  则  $\rho=\rho_{f2}$ 。如果温度测定值小于  $t_1$ ，则判别蒸汽状态为“过饱和蒸汽”，查 2 号密度表， $\rho=\rho_{f1}$ ，此时，温度信号与压力信号不平衡，所以，仪表自诊断显示“000800”代码。

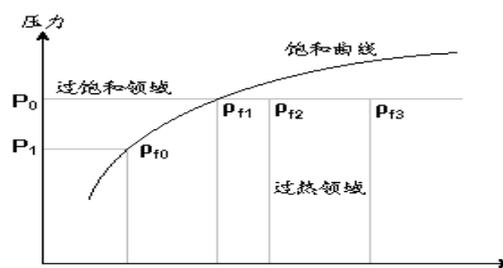


图 1 过热蒸汽密度表示意图

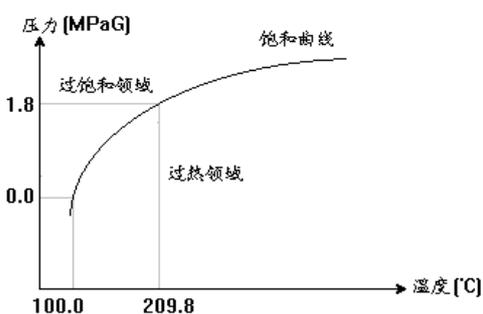


图 2 压力优先求取饱和和蒸汽密度

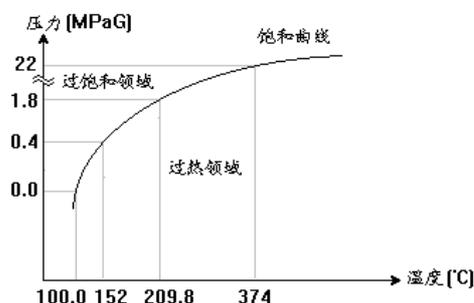


图 3 温度优先求取饱和和蒸汽密度

## 3. 饱和蒸汽密度求取方法

如果优先指定栏内填入 2(压力优先)，则“手动设定”温度置 100，从压力测定值出发，查出饱和温度。因为此时温度信号取“手动设定”值，所以判别蒸汽状态为“过饱和蒸汽”(如图 2 所示)，查 2 号密度表。如果优先指定栏内填入 1(温度优先)，则手动设定压力一般置 22MPa(密度表中压力上限)，从温度测定值出发，查饱和压力，因为此时压力信号取“手动设定”值，所以判别蒸汽状态为“过饱和蒸汽”(如图 3 所示)，查 3 号密度表。

上面所谈的蒸汽密度求取方法，对用户来说，不一定都要搞清楚，因为用户只需根据自己所用的流体参数选择合适的补偿方法，并在菜单中填入有关数据即可。但是对于饱和蒸汽来说，究竟是采用压力补偿还是温度补偿倒是很重要的。

## 三、饱和蒸汽应采用何种补偿

饱和蒸汽采用压力补偿和温度补偿，从本质上来说是一样的，因为饱和状态的蒸汽压力和温度之间呈单值函数关系，从蒸汽压力查出的密度同与此压力相对应温度查出的密度是一致的。因此，采用压力补偿和温度补偿都是可行的。

从节约投资和减少安装工作量的角度来看，是温度补偿更合算一些，因为一支铂热电阻的价格只及压力变送器的几十分之一到几分之一。从补偿精度来看，主要取决于所选的压力变送器的精度和热电阻的精度。因为我们所选用的流量二次表精度较高，其压力输入通道最大误差为  $\pm 0.1\%FS$ ，而温度输入通道，当温度  $\leq 300$  时最大误差为  $\pm 0.3$ ，温度  $> 300$  时，最大误差  $0.1\%MV$ 。

下面从一实例分析不同的传感器、变送器精度对补偿误差的影响。

有一饱和蒸汽流量计，蒸汽常用压力 1.0MPa，其饱和温度为 184.1，如果忽略温度传感器和压力变送器安装带来的误差，而且压力变送器导压管中的液柱对压力测量的影响也已做了校正，况且选用的是 A

级铂热电阻，此时测温最大误差为 $\pm 0.59$ ，用这个测量结果去查密度表，密度可能产生的最大的误差是 $\pm 0.072\text{kg}/\text{m}^3$ ，这个误差比选用 0.5 级压力变送器效果略差，比 1.0 级压力变送器效果略好。显然，采用温度补偿方法，补偿精度不如压力补偿。如果蒸汽常用压力是其他值，上面列出的数字可能会有差异，但基本结论不会变。因此，具体仪表选型时应根据系统精度要求和资金承受能力，权衡利弊得失做出抉择。

#### 四、流体相变对测量结果的影响

##### 1. 汽相变液相

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而脱离过热状态，进入饱和状态，甚至部分蒸汽冷凝变成水滴而出现相变。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  $q_{mL}$  而保持汽态的部分为  $q_{mS}$ ，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 $\rho_S=5.6808\text{kg}/\text{m}^3$ ，查水密度表知此时水滴的密度为 $\rho_L=882.47\text{kg}/\text{m}^3$ ，显然水滴与蒸汽干部分的体积流量为

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

$$Q_S = q_{mS} / \rho_S \quad (3)$$

式中： $Q_L$ ——水滴的体积流量；

$Q_S$ ——蒸汽干部分的体积流量。

由定义知，蒸汽干部分体积流量占湿蒸汽总体积流量之比  $R_V$  为

$$R_V = \frac{Q_S}{Q_m} = \frac{Q_S}{Q_S + Q_L} = \frac{1}{\frac{\rho_S}{\rho_L} \cdot \frac{q_{mL}}{q_{mS}} + 1} \quad (4)$$

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

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

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。

##### 2. 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两方经济结算的依据，如果两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 $(1-X)$ 。

##### 3. 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，孔板流量计测量蒸汽质量流量时有下面的公式<sup>[2]</sup>。

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

式中：  $q_m$  —— 质量流量 Kg/s；  
 $C$  —— 流出系数；  
 $\beta$  —— 节流件孔径与管道内径之比  $d/D$ ；  
 $\varepsilon_1$  —— 流束膨胀系数；  
 $d$  —— 节流件孔径 m；  
 $\Delta p$  —— 差压 Pa；  
 $\rho_1$  —— 节流件入口端流体密度  $\text{kg/m}^3$ 。

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 $\rho_1$ 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( $X \geq 95\%$ )时流体可视为单相流体。温压补偿可按通常方法进行。但出现一定误差。在式(7)中， $\rho_1$ 是实际流体湿饱和蒸汽的密度，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，管道中的流体处于二相流状态。情况严重时。流体分层流动，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。

##### (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

- 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。

- 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。

第一种情况是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。

第二种情况是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。

第三种情况是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，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 4 所示的一个实例着手进行分析。

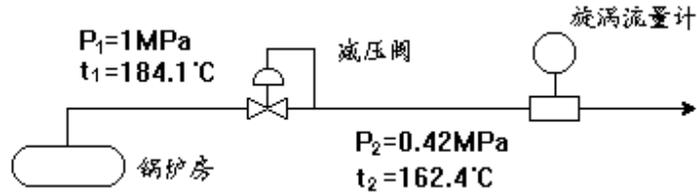


图 4 蒸汽减压和流量测量示意图

用作进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 4 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  $\rho_2=3.4528\text{kg}/\text{m}^3$ ,而按照  $t_2$  和  $P_2$  两个测量值查过热蒸汽密度表,得密度  $\rho_2'=2.27187\text{Kg}/\text{m}^3$ ,所以质量流量计算结果出现 24.36%的误差,即

$$\delta_{mt} = \frac{\rho_2' - \rho_2}{\rho_2} = 24.36\%$$

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  $\rho_2''=2.7761\text{Kg}/\text{m}^3$ ,则补偿误差为

$$\delta_{mp} = \frac{\rho_2'' - \rho_2}{\rho_2} = 2.1\%$$

#### (4) 解决办法

- 将总蒸汽流量计安装在减压阀之前

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。

- 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。
- 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。

## 五、结束语

1. 饱和蒸汽的工况补偿,可以采用压力补偿,也可以采用温度补偿。但前者补偿精度高一些,后者投资省一些。
2. 过热蒸汽变成过饱和蒸汽后,对涡街流量计无大影响,但对孔板流量计影响较大。
3. 过饱和蒸汽变成过热蒸汽后,若采用的是压力补偿,引入的误差很小;若采用的是温度补偿,引入的误差很大。但合理选择仪表测量点位置。选用合适的补偿方式,可将此误差消除或降到很小。

### 参 考 文 献

1. 上海宝科自动化仪表研究所 FC6000 型通用流量演算器操作说明书。
2. 国家技术监督局 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。

The programme of temprature and presure compensation in steam flow measurement

Wang limai ( Shanghai BASF dyestulf chemical Co.LTD 200137 )

Ji Gang ( Shanghai Baoke process automation instrumentation institute 200940 )

Abstract : Use table method to steam density and obtain steam density and compsat temperature and presure。 sothat improve precision。 Phase change of stesm affecte compensation of tmperature and presure。 It should be resolved resolved respectively。

Key Word : seam flow temperature and presure compensation programme phase change action

( 本文原载于《石油化工自动化》1998 年第 3 期 )