

流量测量中蒸汽密度的求取

许麦青 上海机场（集团）有限公司管理公司 上海 200202
王建忠 上海同欣自动控制工程技术有限公司 上海 200070
纪 纲 上海同欣自动化仪表有限公司 上海 200070

摘要 简述蒸汽密度求取的数学模型法和查表法，列举了用查表法求取蒸汽密度时几种不合理操作及所引起的流量测量误差。
关键词 流量测量 蒸汽密度 数学模型法 查表法 误差

1 引言

工程上普遍使用的推导式蒸汽质量流量测量系统，关键是求取蒸汽密度。几十年以来，许多工程师为此作了大量研究工作。归纳起来主要是采用数学模拟法和查表法两类方法。

2 用数学模型求取蒸汽密度

在工程设计和计算中，工程师们经常要求取蒸汽密度数据，采用的传统方法是由蒸汽的状态数据查蒸汽密度表。但是在微处理器进入仪表之前，这种人工查表的方法还无法移植到仪表中，因此，仪表中仍采用数学模型的方法。人们建立了各种各样的数学模型以满足不同的需要，下面列举使用最广泛的几种。

(1) 一次函数法

这种方法的显著特点是简单，适用于饱和蒸汽，其表达式为

$$\rho = Ap + B \tag{1}$$

式中 ρ —— 蒸汽密度， kg / m^3 ；
 p —— 流体绝对压力， MPa ；
 A 、 B —— 系数和常数。

其不足之处是压力在较小的范围内变化时可以使用，而压力变化范围较大时，由于误差太大，就不适用了。因为对于饱和蒸汽来说， $\rho = f(p)$ 是一根曲线，用一根直线拟合它，范围越大，当然误差越大。

解决这个矛盾的方法是分段拟合，即在不同的压力段采用不同的系数和常数。表 1 所示为 0.1~2.6MPa 压力范围内，分 5 段，用不同的系数和常数拟合饱和蒸汽密度的示例。其结果是精确度有所提高，但使用起来很麻烦。

表 1 不同压力段的密度计算式

压力范围/MPa	密度计算式 $\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$	压力范围/MPa	密度计算式 $\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$
0.1~0.32	$\rho_1 = 5.2353p + 0.0816$	1.00~2.00	$\rho_3 = 4.9008p + 0.2465$
0.32~0.70	$\rho_2 = 5.0221p + 0.1517$	2.00~2.60	$\rho_4 = 4.9262p + 0.1992$
0.70~1.00	$\rho_3 = 4.9283p + 0.2173$		

(2) 用指数函数拟合密度曲线

使用较多的是

$$\rho_f = Ap^{\frac{15}{16}} \tag{2}$$

式 (2) 描述的是一根曲线，用它来拟合饱和蒸汽的 $\rho = f(p)$ 曲线能得到更高的精度，但是在压力变化范围较大的情况下，仍有千分之几的误差。

c. 状态方程法

状态方程法用于计算过热蒸汽密度，其中著名的有乌卡诺维奇状态方程。

$$\frac{pv}{RT} = 1 + F_1(T) \times p + F_2(T) \times p^2 + F_3(T) p^3 \quad (3)$$

式中 $F_1(T) = (b_0 + b_1 \phi + \dots + b_5 \phi^5) \times 10^{-9}$

$F_2(T) = (c_0 + c_1 \phi + \dots + c_8 \phi^8) \times 10^{-16}$

$F_3(T) = (d_0 + d_1 \phi + \dots + d_8 \phi^8) \times 10^{-23}$

$b_0 = -5.01140$

$c_0 = -29.133164$

$d_0 = -34.551360$

$b_1 = +19.6657$

$c_1 = +129.65709$

$d_1 = +230.69622$

$b_2 = -20.9137$

$c_2 = -181.85576$

$d_2 = -657.21885$

$b_3 = +2.32488$

$c_3 = +0.704026$

$d_3 = +1036.1870$

$b_4 = +2.67376$

$c_4 = 247.96718$

$d_4 = -997.45125$

$b_5 = -1.62302$

$c_5 = -264.05235$

$d_5 = +555.88940$

p —— 压力, Pa;

$c_6 = +117.60724$

$d_6 = -182.09871$

T —— 温度, K;

$c_7 = -21.276671$

$d_7 = +30.554171$

V —— 比容, m^3/kg

$c_8 = +0.5248023$

$d_8 = -1.9917134$

R —— 气体常数, $R=461\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\phi=10^3/T$ 。

3 计算机查表法求取蒸汽密度

上面所说的通过数学模型求取蒸汽密度的误差都是同人工查密度表方法相比较而言。现在智能化仪表将蒸汽密度表装入其内存中，在 CPU 的控制下，模仿人工查表的方法，采用计算机查表与线性内插相结合的技术，能得到与人工查表相同的精确度。

现在国际上通用的蒸汽密度表是根据“工业用 1967 年 IFC 公式”算出来的。1963 年于纽约举行的第八届国际水蒸气性质会议上，成立了国际公式委员会 (IFC)。若干年后，该委员会提出了国际公认的“工业用 1967 年 IFC 公式”及“通用和科研用 1968 年 IFC 公式”。二十一年后在 1984 年于莫斯科举行的第十届国际水蒸气性质会议上又废除了“通用和科研用 1968 年 IFC 公式”。因此，“工业用 1967 年 IFC 公式”仍是当前公认的描述水蒸气热物性参数的权威公式^[1]。

由于这个公式十分复杂，一般使用者很难直接使用它，IFC 根据这个公式编制了蒸汽性质表格，供人们查阅。

下面以典型智能流量演算器为例说明自动查表的实施方法^[2]。

(1) 独立查表法

独立查表法适用于已经知道水蒸气的状态，而且状态不变化的特定条件，这时可根据自变量去查确定的一张蒸汽密度表，得到蒸汽密度值。

具体做法是，在仪表的内存中存放有三张蒸汽密度表，即

① 以温度为自变量的饱和蒸汽密度表；

② 以压力为自变量的饱和蒸汽密度表；

③ 以温度、压力两个参数为自变量的过热蒸汽密度表。

使用者用硬件的方法或软件的方法根据需要预先选择使用其中的一张表格，程序运行后，仪表就会自动查表获得蒸汽密度。

这种方法的优点是简单，但适用范围有限。因为蒸汽在输送过程中，难免要发生相变而出现状态的转换^[3]，即原来的过热蒸汽因损失热量而发生部分蒸汽变成液相，其状态也从过热变成饱和。与此相反，原来的饱和蒸汽因大幅度减压等原因而发生部分小水滴蒸发，如果

小水滴蒸发完后蒸汽温度仍高于当前压力所对应的饱和温度，其状态即转换为过热。

在出现状态转换的情况下，独立查表法就显得力不从心，虽经程序上的一些处理仍能获得密度值，但在转换点附近，将出现较大误差，在贸易结算中甚至会因此而引发纠纷。

(2) 综合查表法

综合查表法与独立查表法的不同之处，在于程序设计中多了一个状态判断模块，在查表之前，计算机根据蒸汽压力值和温度值先判断该流量测量点的蒸汽是处于过热状态还是饱和状态，然后依约定，将程序转向三个密度表中的一个，查表得到密度值。

在智能流量演算器的 EPROM 中写入 3 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 1967IFC。其中，过热蒸汽密度表有蒸汽温度和蒸汽压力两个自变量。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

过热蒸汽的密度随蒸汽温度、压力变化的关系是 3 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。

而对于饱和蒸汽，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，由用户在填写菜单时指定，如表 2 所列。

表 2 优先权指定表

蒸汽温度	蒸汽压力	补偿运算优先	功能代码
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

典型流量演算器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 $\rho = \rho_{t2}$ ，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， $\rho = \rho_{t1}$ ，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，表示蒸汽状态已进入饱和区。

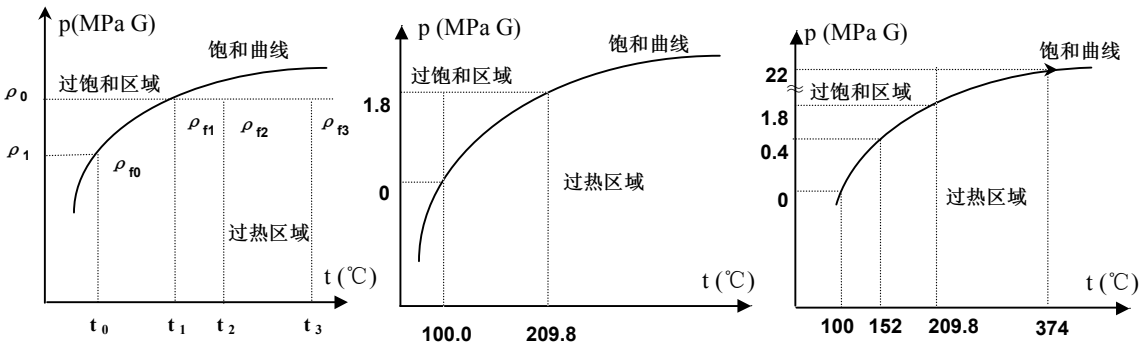


图 1 过热蒸汽密度查表示意图 图 2 压力优先求取饱和和蒸汽密度 图 3 温度优先求取饱和和蒸汽密度

3) 饱和蒸汽密度求取方法

如果优先权指定栏内填入 2（压力优先），则手动设定温度置 100℃，从压力测量值出发

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 号表。

如果优先权指定栏内填入 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 号表。

上面所谈的蒸汽密度求取方法，用户不一定都要搞清楚，其原因在于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。但是对于饱和蒸汽究竟是采用压力补偿还是温度补偿是很重要的。

4 操作不当引入的误差

不管是人工查表还是计算机自动查表，在用查表法求取蒸汽密度的过程中如果操作不当，都会引入误差。其中最容易发生的操作不当有将表压力当绝对压力处理，从非法定计量单位到法定计量单位的不当换算以及过度简化。

（1）从表压到绝压的换算

国际蒸汽表中的自变量压力均以绝压表示，而工程上习惯使用表压力，压力测量采用表压力变送器，成千上万台普通压力表显示的也都是表压力，操作人员习惯用表压力进行操作。因此就产生了从表压力到绝对压力的换算问题。按照原理，一台表压力变送器或一台普通压力表所测压力如果用绝压表示，应为其表压力示值加上仪表周围的大气压，但是此大气压是每时每刻都在变化的，工程上用仪表所在地区的全年平均大气压来代表此周围大气压，这样处理虽对当前值有少许影响，但在一年期间由于影响值有正有负，正负相抵，全年平均影响值近似为零。在此项操作中容易引起误解的有：

a. 用标准大气压代替当地大气压

在流量二次表出厂校验时，往往因不明具体的一台仪表最终用户在何处以及某个地区当地全年平均大气压数值，而将当地全年平均大气压设定为标准大气压 101.325kPa（A），如果在仪表开表投运时不将此压力值参改为当地全年平均大气压的实际数据，就会因此而引入少许误差。

b. 查表时过度简化，用 100 kPa 代表当地大气压

在制作仪表校验单时，需人工查密度表，容易犯的错误是将表压力值简单地加上 100 kPa 即作为绝对压力然后去查密度表，而被检表中的当地全年平均大气压仍为 101.325kPa，因此出现了 1.325 kPa 的计算误差和相应的密度误差，曾经发生过计量检定机构因为简化操作而将本来合格的仪表判为不合格的事件。

按照关系式计算，当被检表为 0.2 级时，压力在 0.55MPa（G）以下的检定点都会因此引起不合格。

检定人员如此查表也有他们的理由，有的出版物上面提供的蒸汽密度表特别强调一句话，即“本表不供精确内插，更不允许外推”。为了不违背作者的忠告，下面的方法可以解决这一矛盾。即将被检表中的当地全年平均大气压也设定为 100 kPa，这样，计算机查表和人工查表就能得到相同的结果。但应注意，检定证书上应标明当地全年平均大气压为 100 kPa 这一检定条件，而且在该二次表投入使用时应当用当地全年平均大气压的实际值代替检定时的“假定值”。

（2）将绝对压力值当作表压力处理引入的误差

在流量二次表中一般具有选择压力计量单位和指定压力属于表压力或绝对压力的能力，由于配套使用的压力变送器一般均为表压力变送器，所以压力输入通道理所当然应指定为“表压力”，但在差压式流量计中，进行压力补偿还得在菜单中填入设计状态压力，一般从

节流装置计算书中查到，遗憾的是有的计算书中并未注明是表压力还是绝对压力，问题往往出在设计计算时，取的是绝对压力，而做流量演算器组态时却将此压力值当作表面压力来处理。

将绝对压力当作表面压力处理（或与之相反将表压力当作绝对压力处理）带来的误差是显著的，而且操作压力越低，影响越大。

例如：有一台差压式流量计用来测量饱和蒸汽流量， $p_d = 0.8\text{MPa}$ （绝对值）相应的密度 $\rho_d = 4.162\text{ kg/m}^3$ ，将此压力当作表压力处理后 $p'_d = 0.8\text{ MPa}$ （绝对值），则 $\rho'_d = 4.655\text{ kg/m}^3$ ，那末在实际操作压力为 0.8MPa （绝对值）时，仪表示值仅为应有值的 $\sqrt{\rho_d / \rho'_d}$ 即 94.56%。

如果流量计为模拟输出的旋涡流量计，犯这一错误带来的误差更可观，按关系式可知，仪表值仅为应有值的 ρ_d / ρ'_d 倍。

在实际工作中如果碰到此类问题，最有效的方法是从计算书提供的流体密度数据去查对。在上面的例子中，如果计算书中列出的工作状态下流体密度为 4.162 kg/m^3 ，在查对蒸汽密度表后，毫不费力地就可作出判断。

（3）用非法定计量单位压力代替法定计量的单位压力

曾经由于这种不当操作引发过一件事。某电厂的一台蒸汽流量计已使用多年，在一次计量周期检定中发现孔板计算书中的“蒸汽密度”值有 2%左右的误差，经向节流装置制造厂追查，原来计算机中装的密度表其压力单位还是 kg/cm^2 ，后来由流量显示仪表制造厂根据既定的蒸汽密度反推出设计状态蒸汽压力，并出具计算书，经有关方面确认后，了结了一场风波。

参考文献

1. 钟史明, 汪孟东, 范仲元编著. 具有焓参数的水和水蒸气性质手册. 北京: 水利电力出版社, 1989
2. 纪纲编著. 流量测量仪表应用技巧. 北京: 化学工业出版社, 2003
3. 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