

# 蒸汽流量计量温度、压力补偿的 数学模型研究

杨建国, 马建忠, 吕书安

(安阳钢铁集团有限公司, 河南 安阳 455004)

**[摘要]** 采用不同类型的流量仪表测量蒸汽流量, 除通过温度、压力进行密度补偿外, 还应通过计算机实现对流出系数  $C$ 、流速可膨胀系数  $\epsilon$  等参数进行全参数补偿, 进一步减小误差, 并建议对补偿所用的数学模型法制化, 使贸易计量仪表有统一、准确的标准或规程可依。

**[关键词]** 蒸汽流量; 温压修正; 微机全参数补偿; 数学模型

**[中图分类号]** TB93

**[文献标识码]** B

**[文章编号]** 1002-1183 (2004) 01-0027-03

## Research on mathematical model of temperature and pressure compensation in steam flow rate measurement

YANG Jian-guo, MA Jian-zhong, LU Shu-an

(Anyang Iron and Steel Group Co. Ltd, Anyang 455004, China)

**Abstract:** To measure steam flow rate with different kinds of flow instrument (meter), not only the density compensation with temperature and pressure, but also the full parameters compensation of flow coefficient  $C$ , flow rate expansion coefficient  $\epsilon$  with computer, are needed to decrease the error further. Moreover it is proposed to adjust the mathematical model for compensation to legal institution that there would be unity, correct standard or regulation for the trade measuring meter to rely on.

**Key words:** steam flow rate; temperature and pressure revision; computer full parameters compensation; mathematical model

随着成本意识的不断增强, 对能源计量的准确性提出了更高的要求, 流量测量的温度、压力补偿逐渐被提到了重要位置。由于流量测量装置的设计过程中, 提供的设计温度、压力与实际运行的工作温度、压力有一定的差异或者由于工艺造成流体温度、压力波动较大, 致使测出的流量不能真实反映其工作状态下的实际流量。绝大多数流量计, 只有在流体工况与设计条件一致的情况下才能保证较高的测量精度, 有些流体如气体、蒸汽, 流体工况变化对测量精度的影响特别大, 必须进行补偿。因此, 补偿所用的数学模型是决定仪表准确度的决定因素。当今流量仪表新产品层出不穷, 各种新型智能流量演算器不断涌现仪表市场, 这些仪表各自有其技术经济特点, 所采用的补偿数学模型也不尽相同。

### 1 过热蒸汽计量的补偿

在蒸汽的计量上, 密度虽然也是温度、压力的函数, 但不再遵循理想气体状态方程, 且在不同压力、

温度区间, 函数关系不同, 很难用一个简单的函数关系式表示, 因此着重论述一下常用水蒸气密度的确定方法。

#### 1.1 密度的确定

工程上应用的水蒸气大多处于刚刚脱离液态或液态较近, 它的性质与理想气体大不相同, 应视为实际气体。水蒸气的物理性质较理想气体要复杂的多, 故不能用简单的数学式加以描述, 所以, 在以往的工程计算中, 凡涉及水蒸气的状态参数数值, 大都从水蒸气表中查出。把水蒸气状态参数表装入仪表内存中, 数据量很大。

随着电子技术的发展, 计算机(或单片机)已广泛应用于流量测量仪表中, 其存储能力、快速计算能力为准确、快速地确定水蒸气的密度提供了有力的手段。

现在介绍在二次仪表中常用的水蒸气密度的确定方法<sup>[1]</sup>。

**[收稿日期]** 2003-06-05

**[作者简介]** 杨建国(1961-), 男, 河南巩义人, 工程师, 学士学位, 毕业于郑州大学, 从事仪表管理等技术工作。

**工业计量** 2004年第14卷第1期

## (1) 查表法

把水蒸气密度表装入计算机中, 根据工况的温度、压力, 从表中查出相应的密度值。

## (2) 计算法

①通过实验得到的拟合公式(或者出版物给出的公式); ②乌卡诺维奇公式; ③IFC1967公式。

目前, 我们在用的拟合公式为:

$$\rho = \frac{18.56p}{0.01t + 1.66 - (0.0001t + 0.02)p} \quad (1)$$

式中:  $t$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $p$  为表压,  $\text{MPa}$ ;  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

蒸汽实际工况条件为:

工作压力变化范围 0.1 ~ 1.1 MPa

工作温度变化范围 160 $^{\circ}\text{C}$  ~ 410 $^{\circ}\text{C}$

取特殊点对公式(1)验证:

例 1:  $p = 0.2 \text{ MPa}$   $t = 160^{\circ}\text{C}$

拟合法求得

$$\rho = \frac{18.56 \times 0.2}{0.01 \times 160 + 1.66 - (0.0001 \times 160 + 0.02) \times 0.2} \text{ kg}/\text{m}^3 = 1.14117 \text{ kg}/\text{m}^3$$

查表法得  $\rho = 1.01626 \text{ kg}/\text{m}^3$

$$\delta = \frac{\rho' - \rho}{\rho} = \frac{1.14117 - 1.01626}{1.01626} \times 100\% = 12.29\%$$

例 2:  $p = 0.5 \text{ MPa}$ 、 $t = 200^{\circ}\text{C}$ , 用拟合法求得

$$\rho = 2.54945 \text{ kg}/\text{m}^3$$

查表法得  $\rho = 2.35294 \text{ kg}/\text{m}^3$

$$\delta = \frac{\rho' - \rho}{\rho} = 8.35\%$$

例 3:  $p = 0.8 \text{ MPa}$ 、 $t = 250^{\circ}\text{C}$ , 用拟合法求得

$$\rho = 3.60039 \text{ kg}/\text{m}^3$$

查表法得  $\rho' = 3.41064 \text{ kg}/\text{m}^3$

$$\delta = \frac{\rho' - \rho}{\rho} = 5.56\%$$

例 4:  $p = 1.1 \text{ MPa}$ 、 $t = 400^{\circ}\text{C}$ , 用拟合法求得

$$\rho = 3.64962 \text{ kg}/\text{m}^3$$

查表法得  $\rho' = 3.59454 \text{ kg}/\text{m}^3$

$$\delta = \frac{\rho' - \rho}{\rho} = 1.53\%$$

通过以上计算可知, 我们目前采用的密度补偿公式的计算误差太大, 不能满足计量仪表的要求。我国的能源计量绝大部分已进入微机网络, 因此, 理想的是采用“IFC1967公式”。

## (3) 比较

查表法

根据“IFC1967公式”制定的数表, 考虑了各个

不同区域的特性, 它是最完整的、最全面的。但它数据量大, 占了大量的空间, 应用数据表要首先判断是饱和蒸汽还是热蒸汽, 再查不同的数据表, 另外数据表的变量是有一定步长的非连续量, 对于两点之间的数据, 需经过数学内插处理获得。应用公式计算不需占用大量的内存空间, 便于智能仪表应用, 至于使用哪一个公式, 根据不同场所, 不同需要, 选用不同公式。采用“IFC1967公式”虽然公式繁杂一些, 但在压力为 0 ~ 16.65 MPa 范围内, 计算的过热蒸汽及饱和蒸汽密度值完全符合国际标准。应用公式只需安装有温度、压力变送器不需要判断是饱和状态或过热状态就可以准确测量。对于确定是饱和蒸汽的场合, 只需要将公式稍做变动, 只用测温或测压, 也可准确计算饱和蒸汽密度。

## 1.2 流量公式的确定

用节流式流量计测量蒸汽的实用计算公式为<sup>[1]</sup>:

$$q_m = \frac{c \epsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (2)$$

式中:  $q_m$  为质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $c$  为流出因数;  $d$  为节流件开孔直径,  $\text{m}$ ;  $\epsilon$  为可膨胀性因数;  $\rho$  为被测流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\beta$  为节流件孔径与直管段内径之比,  $\beta = d/D$ ;  $\Delta p$  为差压,  $\text{Pa}$ 。

而用涡街流量计计量时, 它的输出脉冲信号不受流体组分变化的影响, 即仪表系统在一定雷诺数范围内仅与漩涡发生体及管道的尺寸有关, 但是作为流量计在物料平衡及能源计量中需检测质量流量, 这时流量的输出信号应同时检测体积流量和流体密度, 流体组份对流量计还是存在直接影响的, 其流量公式为:

$$q_v = \frac{f}{k} \quad (3)$$

式中:  $q_v$  为体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $k$  为仪表常数,  $\text{m}^{-3}$  由实液标定得到;  $f$  为漩涡的发生频率,  $\text{Hz}$ 。

$$q_m = \rho q_v \quad (4)$$

式中:  $q_v$  为体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $q_m$  为质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $\rho$  为被测流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

考虑上述原因, 有必要对补偿软件和智能流量计算机进行测试和校准<sup>[2]</sup>。方法为: 由《LG 节流装置设计和管理软件》计算出对应点补偿流量的理论值, 再对流量计输入相同工况参数得到相应的显示值, 这时将流量计的显示值与理论值进行比较即可达到校准的目的。历来流量校准与设备和流量仪表两大主题是研究的中心, 流量仪表标准和检定规程是流量准确计量的保证, 针对目前国内二次仪表和相关计算机软件现状, 建议国家有关部门应出台一部相应的检定校

准规程, 以便于技术监督和管理, 即依法治理。

## 2 计算机的全参数补偿<sup>[3]</sup>

对于节流式流量计

$$q'_m = k \cdot q_m \quad (5)$$

式中:  $q_m$  为设计状态质量流量值,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $q'_m$  为实际工作状态质量流量值,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $k$  为补偿因数。

$$k = \frac{\epsilon' c'}{\epsilon c} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} \quad (6)$$

式中: 带上角标的参数为实际工况下参数, 不带角标为设计状态参数。式 (2) 中流出因数  $c$  的计算式为 (以角接取压为例):

$$c = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 - 0.0029\beta^{2.5} \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} \quad (7)$$

式中:  $\beta$  为直径比 ( $\beta = d/D$ );  $Re_D$  为管径雷诺数;  $d$ 、 $D$  值的单位为 mm。

流出因数是指通过节流装置的实际流量值与理论流量值之比, 将它应用到理论流量方程中以获得实际的流量。在一定条件下, 对于给定的节流装置, 该值仅与雷诺数有关, 对于不同的节流装置, 只要这些装置是几何相似, 并且在相同的雷诺数条件下, 则  $c$  值是相同的, 流出因数  $c$  的计算式是以大量实验所确定的数值为依据, 并以标准的形式给出。

传统的节流式流量计是将该流出因数  $c$  视为定值, 置入现场的流量积算仪, 图 1 是  $D = 50\text{mm}$ ,  $\beta = 0.52$  的孔板流出因数曲线。

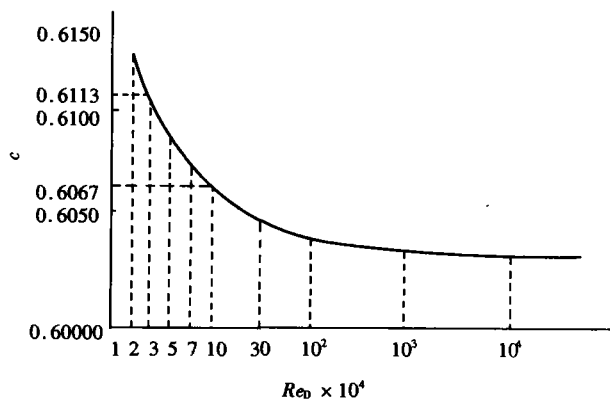


图 1 孔板流出因数曲线

流出因数曲线表明, 当  $Re_D = 3 \times 10^4$  时, 流出因数为 0.6113,  $Re_D = 1 \times 10^5$  时, 流出因数为 0.6067, 仅在 3:1 测量范围内, 其附加误差为 0.75%, 当测量范围超出 3:1, 其附加误差更大。所以, 要实现宽量程, 就必须对流出因数  $c$  进行实时计算, 由 (2) 式可以看出流出因数  $c$  的计算很复杂。标

工业计量 2004 年第 14 卷第 1 期

准中给出计算流出因数  $c$  的迭代方法, 同理, 公式 (1) 中可膨胀性因数  $\epsilon$  等参数, 也须实时计算。计算机具有高速、高精度的运算功能和比较大的存贮空间, 可以完成这些复杂的中间参数的实时补偿计算。

对涡街流量计

$$q'_m = k \cdot q_m \quad (8)$$

式中:  $q_m$ 、 $q'_m$  与上面相同;  $k_1$  为补偿因数。

$$k_1 = \frac{k}{k'} \cdot \frac{\rho'}{\rho} \quad (9)$$

式中:  $k$  为常温时, 涡街流量计仪表常数;  $k'$  为常温下, 涡街流量计仪表常数;  $\rho$  为设计状态下介质参数;  $\rho'$  为实际工况下介质参数。

显然要实现真正意义上的全补偿, 必须求出实际工况下的  $c'$ 、 $\epsilon'$  及  $\rho'$ , 这对于以单电机为核心的智能仪表, 无论是速度、容量及软件支持上都是难以实现的, 所以往往是把  $c'$ 、 $\epsilon'$ 、 $\rho'$  取为常数值或在一个不同区间用线性补偿。这些都会带来方法误差。

随着电子技术的发展, 计算机已进入流量测量领域, 其大容量、高速及完善的软件支持, 完全可以实时计算  $c$ 、 $\epsilon$ 、 $\rho$ , 致使传统的补偿方法发生了根本变化。它不仅可以按照标准规定的数学模型, 实时计算  $\epsilon$ 、 $c$ 、 $\rho$ 、 $q$  等参数, 还具有通信、联网、数据贮存、故障判断、形成报表等管理功能, 这是流量仪表的发展方向。

## 3 结束语

在流量测量中补偿所用的数学模型的确定是十分重要的, 在测量介质、测量装置、流体工况均发生变化的场合, 除采用正确的温度、压力补偿方式, 还应进行包括流出因数  $c$  在内的全参数补偿, 才能获得准确的流量。计算机的应用也堪称检测技术中的一场革命, 它使各类过程参数的检测由常规仪表时代进入了高科技的计算机时代, 同时也使企业综合自动化和生产过程的最优控制得以实现, 是今后检测与控制系统发展的必然方向。

[参考文献]

- [1] 孙准清, 王建中. 流量测量节流装置设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [2] 蔡武昌, 孙准清. 流量测量方法和仪表的选用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [3] 苏彦勋, 盛健. 流量计量与测试 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1993.

[编辑: 邓茂焕]