

提高液氨计量精度的方法

蔡怀民 张以民 (上海吴泾化工总厂 200241)

纪纲 (上海同欣自动化仪表有限公司 200070)

摘要: 用二次多项式模型进行液氨温度补偿, 简单而准确。经流量系数修正后, 系统精度大大提高。

关键词: 相变 二次多项式模型 温度补偿 非线性修正

1. 液氨计量的特点

FC 6000 型通用流量演算器, 具有丰富的功能和很强的通用性, 实际精度优于 0.1%。于是, 与流量传感器一起组成流量测量系统时, 影响系统精度的决定因素就转移到了传感器上。我们在现场以 FC 6000 型演算器为二次仪表解决液氨计量时, 碰到的基本上也都是传感器问题和同流体有关的系统问题。

在微电子技术和计算机技术已发展到相当高度的今天, 智能化的二次仪表有能力较多的解决系统中存在的困难。而做好此项工作的基础, 是对流体物性有较深入的了解和对系统有较全面的认识。

笔者认为, 液氨计量有下面几个主要特点。

1.1 流体易燃易爆, 而且有较强的腐蚀性

这个问题的解决方法是选用防爆型仪表和合适的安全栅, 这些, 现在已经相当成熟。

在现场, 有的用户抱怨, 涡轮流量计中的改性石墨轴承, 在受到液氨浸蚀后, 易破碎。而旋涡流量计与流体接触的部分, 均为不锈钢, 所以, 如果选用旋涡流量计测量液氨流量, 流体腐蚀问题也就解决了。

1.2 液氨在容器中时, 其分界面汽液两相均处于平衡状态

在液氨流量测量中, 应尽量避免出现两相流。而接近汽液平衡状态的液氨, 在流过流量计时, 如果压头损失较大, 则很容易引起部分汽化。影响测量精度。

1.3 流体密度的温度系数较大

从液氨的 $\rho = f(t)$ 函数表^[1]可知, 在常温条件下, 液氨温度每变化 1℃, 其密度变化 0.2% 以上。因此, 液氨计量必须进行温度补偿。

1.4 精度要求高

化工部有关文件要求, 液氨计量应达到 1 级精度。如果不采取有效措施, 是很难达到这个要求的。

2. 防止流体汽化

人们知道, 处于汽液平衡状态的流体, 当其温度升高或压力降低时, 必然有部分液体发生相变。例如液氨在 10℃ 条件下, 平衡压力为 0.5951MPa。如果将压力降低一些 (例如将液氨中间槽中的气态氨排掉一些), 必然引起一定数量的液氨汽化, 升腾到汽相中。由于这一蒸发过程是从液相中吸取汽化热, 所以, 汽化现象发生的同时, 液相温度下降, 一直降低到与槽中新的压力相对应的平衡温度。

同样, 如果为槽中的汽相提供一定的冷量, 则有一部分气态氨变成液态氨, 槽中汽相压力相应下降。

处于汽液平衡状态的氨, 在输送过程中, 如果温度不变而将其压力升高 (例如用泵加压), 或者压力不变而将其温度降低 (例如用冷却器将液氨冷却), 则液氨进入过冷状态。

处于过冷状态的液氨, 如果压力降低一些, 只要不低于当时液氨温度相对应的平衡压力, 液氨不会出现汽化现象。

液氨储槽或中间槽, 总有一定高度。在稳态情况下, 处于汽液平衡状态的液氨, 仅仅是汽液两相分界面处的那一部分, 如果槽中无冷却管之类的附件, 槽中液体的温度可看作是均匀一致的。因此, 分界

面以下液位深处的液氨，由于液柱的作用使静压升高，所以进入过冷状态。离分界面越低，液氨过冷深度越深。

为了避免液氨流量测量时出现汽化现象，在设计和安装时，选用下面的方法是有效的。

2.1 选用压力损失较小的仪表

例如有一液氨流量测量对象，最大流量为 $40\text{m}^3/\text{h}$ ，则选用 D_N50 旋涡流量计时，最大流量所对应的压力损失为 0.02MPa ，而若选用 D_N50 涡轮流量计，相应的压力损失为 0.025MPa 。

2.2 合理选择安装位置

流量传感器安装位置应选择在槽的底部出口管道上。在保证直管段的前提下，与槽的出口处应尽量近些。这样，液氨在输送过程中，可减少经输送管道从大气中吸收热量。同时，安装位置应尽量低些，这样可提高过冷深度。

2.3 提高过冷深度

横河电机公司提出了该公司生产的 YF100 型旋涡流量计压力损失和不发生气穴现象的管道压力计算公式^[2]，

$$\Delta P = 1.1\rho \cdot v \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

$$P \geq 2.7\Delta P + 1.3 P_0 \quad (2)$$

式中：

ΔP —— 压力损失，MPa；

ρ —— 液体的密度， kg/m^3 ；

V —— 流速， m/s ；

P —— 最小管道压力(绝对压力)，MPa；

P_0 —— 流体的蒸汽压力(绝对压力)，MPa。

液氨在进流量计前，经适度冷却，使 P_0 相对降低，流量计进口压力不变，也能收到不发生气穴(部分液体汽化)的效果。

3. 液氨密度的温度补偿

3.1 温度补偿模型的建立

用户要求液氨以质量流量计量，而旋涡流量计给出的仅仅是体积流量，即

$$Q = 3.6 f_i / Kt \quad (3)$$

式中：

Q —— 体积流量， m^3/h ；

f_i —— 旋涡流量传感器输出频率， P/s ；

Kt —— 旋涡流量计流量系数， P/l 。

由质量流量与体积流量的关系知

$$M = \rho \cdot Q \quad (4)$$

式中： M —— 质量流量 t/h 。

而液氨密度又是温度的函数，即 $\rho = f(T)$ 。

液氨密度随温度变化的关系，在理化手册中一般都用表格的形式描述^[1]，在二次表中，直接使用这种表格较麻烦，所以，一般都将此表格回归成表达式的形式。

由于液氨的 $\rho = f(T)$ 函数并非直线，所以如果用一次关系式去近似，那么，在不同的温度段，就必须使用不同的系数和常数^[3]。使用起来很不方便。在早期的二次仪表中，只能作一次关系式运算的情况下，实

属不得已而为之。

现在的二次表，运算功能已经相当丰富，将二次多项式的系数和常数项填入菜单并置入仪表，已是举手之劳。所以，用二次多项式

$$\rho = \rho_d [1 + a_1 (T - T_d) \cdot 10^{-2} + a_2 (T - T_d)^2 \cdot 10^{-6}] \quad (5)$$

去描述 $\rho=f(T)$ 的关系，不仅使用方便，而且精度也高。

式中：T —— 液氮温度，℃；

T_d —— 液氮参照温度，℃；

ρ_d —— 与 T_d 对应的液氮密度， kg/m^3 。

下面举例说明从表格形式变换到二次表达式的方法。

实现从表格形式到二次表达式的变换，可以用线性回归方法，但若手头没有现成的回归程序，则可列出二元一次方程组手算，这后一种方法既不复杂，而且得到的表达式精度也不低。例如有一液氮流量对象，流体常用温度为 5℃，常年可能出现的最低温度和最高温度分别为 -5℃和 15℃，从手册中查到这三个温度条件下的液氮密度，如表 1 所示。

表 1 液氮密度

温度 T(℃)	密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$
-5	645.3
5	631.7
15	617.6

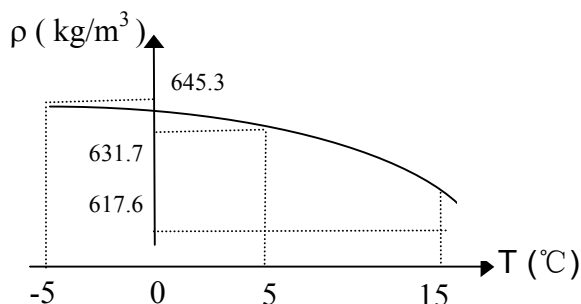


图 1 液氮密度与温度的关系曲线

选 $T_d=5^\circ\text{C}$ ，则 $\rho_d=631.7 \text{ kg/m}^3$ ，将这段曲线的两个端点的温度和密度数据，以及 T_d 、 ρ_d 数据代入式(5)，得到下面的方程组

$$[1 + (-10) \times 10^{-2} a_1 + (-10)^2 \times 10^{-6} a_2] \times 631.7 = 645.3$$

$$[1 + 10 \times 10^{-2} a_1 + 10^2 \times 10^{-6} a_2] \times 631.7 = 617.6$$

解此方程组得

$$a_1 = -0.21925$$

$$a_2 = -3.95757$$

其中 a_1 为一次项系数， a_2 为二次项系数。经验证，这一求解结果与表 1 中所列的三点 $\rho=f(T)$ 数据完全吻合，而与曲线两 endpoint 之间的其他点数据比较，最大误差为 $\pm 0.01\%$ ，所以是可以使用的。

3.2 测量元件的选型

由于液氮密度的温度系数绝对值较大，所以，测温元件最好选精度较高的 A 级 Pt100 铠装铂热电阻，在 $T=15^\circ\text{C}$ 时，其最大误差为 0.18°C 。由于 FC 6000 型二次表，在 300°C 以下时最大误差为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ，用几何和的方法合成后，测温系统最大误差为 $\pm 0.35^\circ\text{C}$ ，由此给流量测量带来的补偿误差约为 $\pm 0.08\%$ 。

4. 流量传感器非线性误差的修正

横河公司的 YF100 型旋涡流量计的名义精度为 $\pm 1\%$ ，用这种仪表与二次表配合，希望得到 $\pm 1\%$ 的系统精度，听起来好象是不可能的事，其实，只需做少量的工作，就能将系统精度大大提高。

为了将道理说清楚，我们先从旋涡流量计精度的含义讲起。

4.1 旋涡流量计精度的含义

横河公司的旋涡流量计的精度，是指某种口径的流量计，用于确定的流体(其黏度和密度都是确定的)，在仪表厂给出的测量范围内，使用仪表给出的流量系数 K_m (在使用条件下为 K_t)能保证的精度。如果实际使用的流量(流速)范围比允许使用的范围小得多，例如，在液体装桶和定量发料操作中使用的流量计，实

际使用的瞬时流量只在相当狭小的范围内变化,那么,不采用全量程的平均流量系数,而采用该台仪表《检验证书》中给出的与常用流量接近的标定点的流量系数,理论上能够得到的一次表精度与重复性误差(指示值的 0.2%)^[2]相等。

4.2 非线性误差的修正

旋涡流量计在出厂前,每一台仪表都已经过实流标定(流体一般为水),每台仪表标定得到的平均流量系数各不相同,而且同一台仪表的不同标定点(不同的流速处),流量系数也各不相同,表 2 所示为一台编号为 F9608057W35 的 YF105 型流量计的实际标定数据。

表 2 某台旋涡流量计实流标定结果(流体:水,温度:27℃)

流量 m ³ /h	流速 m/s	流量系数 Kt P/l	平均流量系数 Km P/l	误差 %	修正系数 K _α
3.6	0.51	8.518	8.568	-0.58	0.99416
7.2	1.02	8.605	8.568	0.43	1.00432
14.4	2.04	8.603	8.568	0.41	1.00408
28.8	4.08	8.614	8.568	0.54	1.00537
40.0	5.66	8.618	8.568	0.58	1.00584

从提高精度的角度看,全量程使用同一个流量系数是不合理的,合理的做法是不同的瞬时流量使用不同的流量系数,这在智能化仪表中,已经不是一件困难的事。

图 2 所示为 FC 6000 型流量二次表进行流量系数补偿的计算框图。执行这一段程序的结果是得到当时瞬时流量条件下的流量系数修正系数 K_α,其方法是以旋涡流量计实流标定数据为基础,在二维空间中制作一根 K_α=f(Q)的折线,其中各点流量系数修正系数 K_α由下式求得:

$$K_{\alpha} = \frac{K_f}{K_m} \quad (6)$$

式中: K_f —— 某标定点流量系数, P/l;

K_m —— 全量程平均流量系数, P/l;

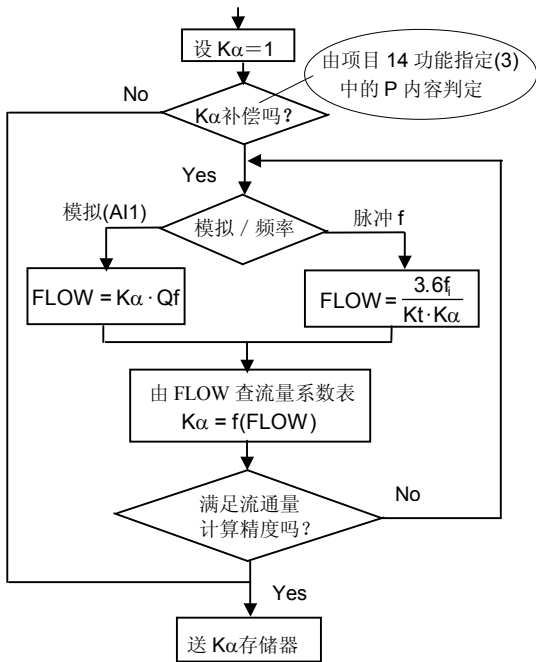


图 2 FC 6000 型仪表流量系数修正计算框图

然后从来自流量传感器的频率信号,计算体积流量,再用查表与内插相结合的方法计算出 K_α。

经过流量系数修正的体积流量 Q 同诸因素的关系如式(7)所示。

$$Q = 3.6 \frac{1}{K\alpha} \cdot \frac{f_i}{Kt} \quad (7)$$

4.3 流量系数补偿的实施

在 FC 6000 型流量二次表中，菜单的第 55 项到第 74 项是专为填写 $K\alpha = f(Q)$ 的数据而设置的，这一根修正折线最多可有 10 个折点(包括起点和终点)，其中，第 55 项到第 64 项从小到大依次填写瞬时流量值，第 65 项到 74 项依次填写与瞬时流量对应的修正系数。如果不满 10 个点也不要紧，但是一般要包括 $Q = 0$ 的一点，图 3 中折线的延长段用水平虚线画出，延长段的用途是为了在信号超过标定范围时，仪表仍旧能指示瞬时流量。完整的应用数据清单如表 3 所示。

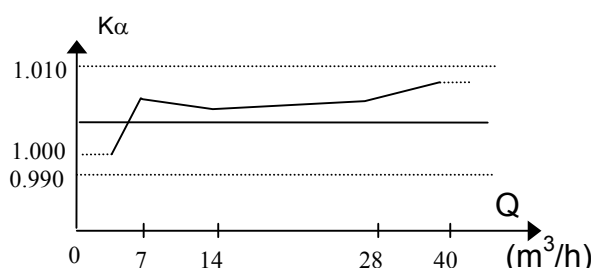


图 3 修正系数 $k\alpha$ 曲线

5. 仪表的校验

仪表的校验是对温度补偿，流量系数修正和二次表误差的综合检验。它是以频率(或电流)和温度为自变量，计入各校验点流量系数的实标数据，计算出瞬时流量和累积流量的理论值，然后测出各校验点的示值误差。

表 4 流量二次表典型校验结果

体积流量 $Q (m^3/h)$	流量系数 $Kt (P/L)$	流量输入信号 $f_i (P/s)$	温度输入信号 $-5^\circ C (98.04\Omega)$	温度输入信号 $5^\circ C (101.95\Omega)$	温度输入信号 $15^\circ C (105.85\Omega)$
0.0		0.000	0.000 / 0.000	0.000 / 0.000	0.000 / 0.000
3.6	8.518	8.518	2.323 / 2.323	2.274 / 2.274	2.323 / 2.323
7.2	8.605	17.210	4.646 / 4.646	4.548 / 4.548	4.447 / 4.448
14.4	8.603	34.412	9.292 / 9.291	9.096 / 9.094	8.893 / 8.891
28.8	8.614	68.912	18.585 / 18.581	18.193 / 18.191	17.787 / 17.785
40.0	8.618	95.756	25.812 / 25.808	25.268 / 25.264	24.704 / 24.700

表 4 所示是与编号为 F9608057W35 的旋涡流量计配用的 FC 6000 型流量二次表用于液氮计量的校验结果。表中用分数表示的数据，分子为瞬时质量流量理论值，分母为被校表指示值，单位均为 t/h。从表中可以看出，最大误差小于读数值的 0.1%。

选择两个试验点校验累积流量，一点是 $f_i = 8.518 \text{ p/s}$ 、 $T = 15^\circ C$ ，1 小时累积误差为 0.001t。另一点是 $f_i = 95.756 \text{ P/S}$ 、 $T = -5^\circ C$ ，1 小时累积误差为 -0.005t。均 $< 0.1\% MV$ 。

在实际应用时，能够得到的系统精度可能比上述校验结果略差一些，这一方面是受流量传感器重复性的影响，另一方面是由于液氮的粘度与标定时流体(水)粘度有些差异，因此，流体雷诺数也相应有些差异，这在流速低的使用点会带来一定的附加误差。

测量系统的线路连接^[4]如图 4 所示。

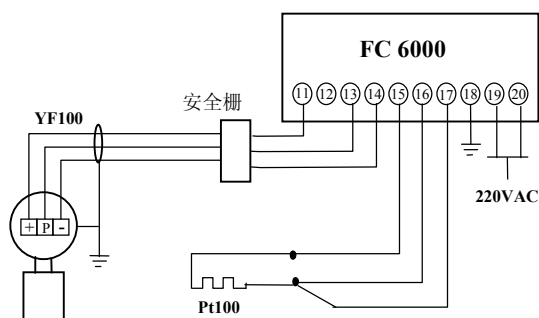


图 4 系统连接图

6. 现场投运情况

图 4 所示的测量系统在上海吴泾化工总厂合成氨一厂的氨产量计量中使用已近一年，获得了满意效果，其计量数据与原容积法人工读数和未引入流量计流量系数修正及液氨密度在线连续温度补偿的两种测量方法相比，具有更高的准确度，更合理地反映了生产负荷的实际情况，因而受到操作、管理人员的好评(由于篇幅所限，有关记录报表数据从略)。

7. 结束语

在液氨流量测量中，应防止液氨汽化。选用合适的流量计，并且正确安装，采用合适的数学模型进行流体温度补偿，同时引入流量计的流量系数修正，能将系统精度大大提高。

此方法同样适用于和液氨相似的丙烯、氯乙烯单体等液体计量。

参考文献

1. 石油化学工业部化工设计院，氮肥工艺设计手册理化数据分册，216
2. 上海横河电机有限公司，YF100 型旋涡流量计 使用说明书，6-9, 9-2
3. 朱步陶，液氨计量中的温度补偿及应用. 化工自动化及仪表, 1994(5)
4. 上海宝科自动化仪表研究所，FC 6000 型通用流量演算器操作说明书.