

气体流量测量的温度与压力补偿

摘要 综述了干、湿气体及水蒸气流量测量中的温度、压力补偿方案，还介绍了其它类型流量计的温度、压力补偿，指出几点应注意的问题。

关键词： 流量测量 气体流量 温度补偿 压力补偿

The Temperature and Pressure Compensations for Gas Flow Measurement

Abstract The strategies of the temperature and pressure compensations for flow measurements of dry gas, wet gas and steam are described. The temperature and pressure compensations for other types of flow meters are also introduced. Some cautions are pointed out.

Key words: Flow measurement Gas flow Temperature compensation Pressure compensation

由于气体的可压缩性，决定了它的流量测量比液体复杂，仪表的输出信号除了与输入信号有关，还与气体密度有关，而气体的密度又是温度和压力（简称温压）的函数。所以，气体的流量测量普遍存在温压补偿问题。在仪表的设计或对旧设备的改造中，气体流量测控系统应尽可能采用微机化仪表，根据被测气体及仪表类型，选用合适的数学模型，实施温压自动补偿。

大部分气体，可近似地视为理想气体，其密度可用经过补正的理想气体状态方程来表示。有的气体，如水蒸气，即有别于理想气体，其密度不宜简单地用理想气体状态方程来表示。气体又有干、湿之分，对于湿气体，其密度除了与温度、压力有关外，还与湿度有关。近年来，不断涌现的微机化仪表，使气体流量测量的温压补偿变得简便而精确，从而提高了测量精度。

1 干气体流量测量的温压补偿

迄今，气体的流量测量主要是采用差压流量计，其流量基本方程式为

$$q = K\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

式中： q 为被测气体在工作状态下的体积流量； ρ 为被测气体在工作状态下的密度； Δp 为差压； K 为系数，它包含流量系数、膨胀系数、管道孔径等参数。严格说，它也受温压影响，只是，在常用温压下，这一影响可以忽略。本文讨论的温压补偿是指补偿密度随温压变化所造成的影响。

在实际使用中，仪表的标尺是以标准状态下的流量 q_n 为刻度。根据管道内气体流量满足连续性方程

$$q_n \rho_n = q \rho \quad (2)$$

式中，带下标“n”的参数为标准状态下的值。由此可得到流量在两种状态（标准状态和工作状态）下的转换式：

$$q_n = \frac{\rho}{\rho_n} q \quad (3)$$

将式（1）代入式（3）得：

$$q_n = \frac{K}{\rho_n} \sqrt{\rho \Delta p} \quad (4)$$

而仪表的刻度是按设计工况设置的，即：

$$q_{ns} = \frac{K}{\rho_n} \sqrt{\rho_s \Delta p} \quad (5)$$

式（4）、式（5）相除即可得到当工况偏离设计值时密度的补偿公式：

$$q_n = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s}} \cdot q_{ns} \quad (6)$$

式中，带下标“s”的参数为设计值。

再由气体状态方程导出的在不同状态下气体的密度转换式：

$$\rho = \rho_s \frac{P T_s}{P_s T} \quad (7)$$

便可得到通常使用的温压补偿公式：

$$q_n = \sqrt{\frac{P T_s}{P_s T}} \cdot q_{ns} \quad (8)$$

从式（8）可见，当气体的实际工况与设计工况相同时，流量计的示值与实际值相符（仅与差压有关），当实际工况偏离设计工况时，实际流量还会随着温度、压力的变化而变化。例如，压力变化 25%，流量就会相差 50%，可见误差极大。因此，气体流量测量必须进行温压补偿。

2 湿气体流量测量的温压补偿

湿气体与干气体的不同点是，其密度除了与温度、压力有关外，还与湿度有关。虽然湿度对测量的影响与温压比较相对较小，但与仪表的精度比，即不可忽略。湿气体的密度可用下式表示：

$$\rho = \frac{0.804(\rho_0 + F)}{0.804 + F} \cdot \frac{PT_0}{P_nTZ} \quad (9)$$

式中：0.804 为温度 0℃，一个标准大气压下，水蒸气的密度，kg/m³； ρ_0 、 T_0 、 P_n 分别表示气体在 0℃，一个标准大气压下的密度、绝对温度、绝对压力；F 为气体的绝对湿度，kg/m³；Z 为气体压缩系数。

将式 (9) 代入式 (6) 即得到包含湿度补正的湿气体温压补偿公式：

$$q_n = \sqrt{\frac{0.804T_0}{\rho_s P_n Z}} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_0 + F)P}{(0.804 + F)T}} \cdot q_m \quad (10)$$

在工业中，有相当一部分湿气体在通常情况下是饱和气体，如：焦炉煤气，高炉煤气，混合煤气等。这类气体的绝对湿度是温度的单值函数，这使得有可能在进行温压补偿的同时实现对湿度的补正。对于混合煤气，其密度还受成分比波动的影响，可以利用微机化仪表丰富的功能，一并实现温度、压力、湿度、配比的自动综合补正。这类饱和、混合气体的综合补偿，其在工程上的实施方法详见文献 [2, 3]。

3 水蒸气流量测量的温压补偿

水蒸气流量计的标尺通常是以质量流量 q_m 为刻度的，其流量基本公式是：

$$q_m = K \sqrt{\rho \cdot \Delta p} \quad (11)$$

其密度的补偿公式为：

$$q_m = q_{ms} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s}} \quad (12)$$

前面提到，水蒸气不等同于理想气体，其密度与温度、压力没有现成的、精确的函数关系式，只能从手册中，根据温度和压力查表找出相应的密度。用户若需要使用常规仪表实施自动温压补偿，尚须建立合适的数学模型。水蒸气密度的数学

模型有多种形式，下面列出两种常用的数学模型形式，谨供参考。

对于干饱和水蒸气，有：

$$\rho = a + bP \quad (13)$$

对于过热水蒸气，有：

$$\rho = \frac{AP}{Bt + CP + D} \quad (14)$$

上述数学模型的诸常数：a, b 与 A, B, C, D 的求法，可参考文献 [4, 5]。将上述数学模型代入式 (12) 即可得到水蒸气的温压补偿公式。

近年来，有些微机化流量计内部芯片存有水蒸气密度表，可实现精确测量，还可将质量流量转换成热流量，以便对能源进行更有效的管理。

4 其它类型流量计也存在温压补偿问题

近年来，一些新型流量计逐步得到推广应用，它们的测量原理不同于孔板，各有特色。某些说明书特别指出，本流量计不受密度影响。有些用户可能认为，采用此类流量计不用进行温压补偿了。其实不然，使用此类流量计测量气体，同样存在温压补偿问题。例如涡街流量计，通过检测涡街频率 f ，根据 f 与流速 v 成正比而求得气体的体积流量。其 f 与 v 的关系式为：

$$f = Sr \frac{v}{(1 - 4d/\pi D)d} \quad (15)$$

式中： d 为漩涡发生体迎着流向的宽度； D 为管道内径； Sr 为斯特劳哈尔常数。

从公式本身看，流体的体积流量与密度无关。但涡街流量计所检测到的体积流量是工作状态下的流量 q 。而仪表的标尺是应与标准状态下的流量为刻度的。它们之间的换算关系式就是前面推得的式 (3)，即：

$$q_n = \frac{\rho}{\rho_n} q$$

由此可见，虽然原理表达式中流量与密度无关，但是刻度的换算公式中却含有密度。因此，用此类仪表进行气体流量测量时，同样存在温压补偿问题，只是补偿公式不同而已。否则，仪表的示值就不能反映真实流量，其误差也是很大的。

5 结束语

气体流量测量普遍存在温压补偿问题，这是由气体的特性所确定的。因此，在气体流量测量系统中，温压补偿是其中一个不可缺少的环节。若缺少这一环节，

或不给予应有的重视，就会给测量带来误差，有时误差可高达百分之数十，甚至更大，使仪表的示值变得毫无意义。

对于超过常用温压范围而又要进行更精确测量时，还可选用近年来开发的全补偿式流量计，它可同时补偿式（1）中的系数 K 因温压变化所造成的影响。