

# 高纯气体流量测量中的仪表选型

徐伟清 中石化南京工程有限公司（江苏 南京 211100）

**摘要：**高纯气体具有组分稳定，无尘、无水滴、无油污的特点，为流量测量和流量计的稳定运行创造了良好的条件。在以计量收费为目的应用中，双量程孔板流量计具有显著的优势。其测量准确度达 $\pm 1.0\%$ ，量程比达33倍。文中所列举的几个这种仪表的应用实例，都表明收到良好的效果。热式气体质量流量计，在光纤、半导体行业的高纯气体流量测量中，应用十分广泛，并且获得满意的效果，但在以贸易交接的计量中，效果欠佳，这是因为前者的应用是以过程控制为目的，对测量准确度和量程比的要求都不高。而后的应用是以贸易交接为目的，对测量准确度和量程比的要求大幅度提高。因此在设计选型时，应进行周密的调查研究工作，搞清楚测量任务对测量准确度和量程比的要求，以防失误。

**关键词：**高纯气体 流量测量 双量程差压流量计 过程控制 贸易交接计量 热式气体质量流量计

## 1. 引言

高纯气体在工业生产和各行各业都有广泛的用途。它通常是经空气分离工艺制取。众多的制气商将制取的气态的高纯气体经管道或钢瓶集装格输送给用户，也用槽车将液态产品送给用户，进行贸易交接。

在用管道输送高纯气体给用户的流程中，贸易交接手段通常为气体流量计，流量计的公称口径从50mm到几百mm，多数交接量大，结算金额巨大的交接点，往往是供需双方各装一套流量计，从而做到公正计量，万无一失。

关于高纯气体流量计的选型，由于测量对象的特点和传统习惯，大多选用标准孔板流量计，这是因为这种流量计具有下列特点<sup>[1][2]</sup>：

非凡的稳定性和可靠性，超强的抗干扰能力。维护简单、方便。

口径从小到大，系列齐全。

测量准确度能满足气体贸易交接的需要。

计量检定方便。

大多采用几何检定法进行检定，操作简单而且费用较省。有的供方（或需方）要求在经过几何法检定之后，再用实流检定法检定一次，实践证明，如果一套流量计的各个环节都是合格的，则实流检定结果也会是合格的。

价格比较便宜，比科里奥利质量流量计便宜得多。

量程比较窄是孔板流量计的一大缺点，但是近年来蓬勃发展双量程孔板流量计，能将其量程比扩大到33倍，而且达到1.0%不确定度，从而弥补了其这个缺陷<sup>[3][4]</sup>。

## 2. 高纯气体的特点及其对流量测量的影响

我们知道，高纯气体的纯度极高，组成的变化，完全可以忽略不计，因此，气体的密度除了受温度、压力及压缩系数影响之外，就无其他因素了。不像变组分气体或湿气体那样，不确定因素较多，导致气体密度计算的准确性变差。而且因为高纯气体无灰尘、无水滴、无油污，这为气体流量的准确测量创造了优越的条件。

用差压式流量计测量蒸汽流量，因为必须将气相的差压信号转换成凝结水的差压信号。这一转换如果处理得不是尽善尽美，会引入些许误差。另外，当蒸汽进入饱和状态后，由于二相流的存在，也会增加一定的误差。当然，二相流对涡街流量计的影响更大。而当被测流体为高纯气体时，由于

流体是干燥的，完全不存在二相流和气相转液相的问题，所以，达到规定的准确度更有保证。

图 1 所示是福建某气体公司向隔壁的三金钢厂供气的系统图。供方在上游管道上装了三套 FDIId 型双量程标准差压流量计用于贸易交接计量，需方在下游装了三套与上游相同型号规格的流量计用于监测。

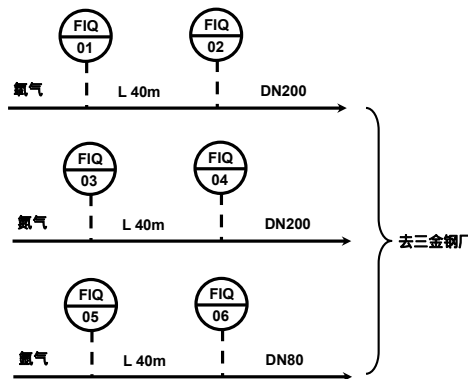


图 1 侨源气体公司去三金钢厂的供气管网

6 套流量计由用户开表投运后，FIQ03 和 FIQ04 之间，FIQ05 和 FIQ06 之间，24 小时累积流量差值 < 0.5%；FIQ01 和 FIQ02 之间，24 小时累积流量差值略大于 1%，经现场检查是因 FIQ01 的差压变送器高低压室内有水（由于用水实流检定时水未排尽）。将残存的水排尽后，该路流体上下游流量示值之差回到 0.5% 以内，图 2 所示为 DCS 显示的运行数据。

| 介质 | 位号        | 瞬时 Nm <sup>3</sup> /h | 累计 Nm <sup>3</sup> | 温度 °C | 压力 MPa |
|----|-----------|-----------------------|--------------------|-------|--------|
| 氮气 | FIQ2701_1 | 3110                  | 958574             | 38    | 1.0    |
|    | FIQ2701_2 | 3132                  | 584190             | 39    | 1.0    |
|    | FIQ2701_3 | 0                     | 0.000              | 25    | 0.5    |
| 氮气 | FIQ2801_1 | 3726                  | 391288             | 38    | 1.0    |
|    | FIQ2801_2 | 3713                  | 408133             | 39    | 1.0    |
|    | FIQ2801_3 | 20940                 | 63873.398          | 38    | 1.0    |
| 氩气 | FIQ3201_1 | 18                    | 598735             | 43    | 1.0    |
|    | FIQ3201_2 | 42                    | 595814             | 43    | 1.0    |
|    | FIQ3201_3 | 5075                  | 2431.500           | 37    | 1.0    |

图 2 DCS 显示的 6 台双量程孔板流量计运行数据（2013 年 6 月）

图 2 中所示的氩气上下游瞬时流量，数值很小，但差值很大，这是因为这路气暂时停用，瞬时流量已进入小信号切除区。但是供方不希望切除，为的是经济利益。

### 3. 高纯气体流量测量的另一个实例

青海西宁某单晶硅厂将氧气、氮气和氢气分别通过 DN50、DN50 和 DN80 管道送到下游的光纤厂。为了进行贸易交接，供方在上游安装了三套 FDIId 型双量程差压流量计，需方则在下游安装了三套用于监测的流量计，为了节省投资，选用了热式气体质量流量计（TMF）。

这 6 套流量计投入运行后，三路气体的 24 小时累积流量都表现为上游大下游小，差值约为 6~10%。其中氢气相差最大。

由于上下游计量结果差值较大，而且计量数据用于财务结算，所以双方对此差值都非常关注。供方认为，上游的双量程差压流量计准确度高，量程比大，而且经过政府授权机构检定合格，所以

计量结果是可信的。而需方认为，自己的热式气体质量流量计尽管价格便宜，但也有 1.5 级准确度，而且有出厂合格证书，应当也是很准的。双方争执不下，于是咨询了专业人士。详细分析如下。

#### 4. 热式质量流量计在高纯气体流量测量中的应用

##### (1) TMF 工作原理

TMF 分热分布和基于金氏定律的浸入型。在管径较大时，用的都是后者。

金氏定律的热耗散型 TMF 中有两根铂热电阻，分别置于气流中的两根金属细管内，其中一根热电阻测量气流温度  $T_1$ ，另一根热电阻经功率恒定的电热加热到  $T_2$ ，流量为 0 时，温差  $\Delta T = T_2 - T_1$  最大，随着质量流量  $q_m$  的增大，气流带走更多热量，温度下降，测得  $\Delta T$  就可计算出  $q_m$ 。消耗功率  $P$ 、温差  $\Delta T$  与质量流量  $q_m$  之间的关系如式 (1) 所示：

$$\frac{P}{\Delta T} = D + Eq_m^k \quad (1)$$

式 (1) 中， $k$  为常数； $E$  是与所测气体物性如导热系数、比热容、粘度等有关的系数。如果气体成分和物性恒定，则视为常数。 $D$  则是与实际流动有关的常数<sup>[5][6]</sup>。

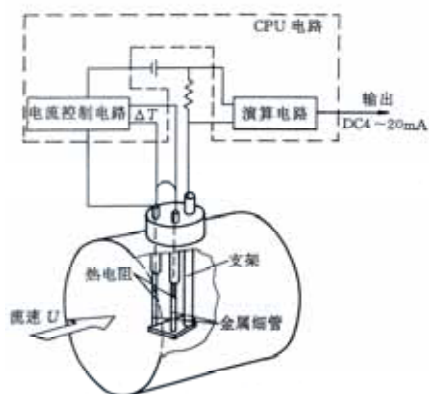


图 3 浸入型 TMF 原理

##### (2) TMF 误差分析

上游流量计的准确度是  $\pm 1.0\%$ <sup>[4]</sup>，下游流量计的名义准确度为  $\pm 1.5\%$ ，两者差异并不大，但是仔细分析后会发现其中奥秘。

热式质量流量计由于其工作原理和结构的特点，准确度常用引用误差或者示值误差与引用误差相结合的方法来表示<sup>[5][6]</sup>。例如热式流量计市场份额居首位的 Fluid Components International LLC (FCI) 公司的 ST98 型热式气体质量流量计，制造厂承诺该种仪表的量程比为 10:1 或 20:1。

$$E = \pm (1.0\%q_m + 0.5\%FS)$$

式中  $q_m$ ——质量流量实际值； $FS$ ——质量流量满度值。

当流量为满度值时， $E = \pm 1.5\%q_m$ ；

当流量为  $10\%FS$  时，最大误差就达  $\pm 6.0\%q_m$ 。如果流量更小，则最大误差变得更大。而双量程差压流量计，从参考文献[4]的图 4 可知，在  $q_m = 3\%FS$  和  $q_m = 17.3\%FS$  时，准确度仍能达到  $\pm 1.0\%q_m$ <sup>[4]</sup>，从而使上下游两套表的计量结果出现较大差异。

##### (3) 替代法标定会引入误差

为什么用于氢气流量测量的上下游两套表计量结果差得更多呢？这要从热式质量流量计的标定、检定方法剖析。

对于高纯氢气，其标准状态下的密度是稳定的而且是已知的。所以用差压式流量计测量其流量，

能得到与测量氮气和氧气相同的准确度。但是，用热式流量计测量氢气流量时，出现另一个差异。即热学特性的差异。

众所周知，热式流量计在出厂前就要经过实流逐台标定，在送计量检定机构检定时，也都要实流检定。对于热式质量流量计来说，气体的种类是多种多样的，不可能每一种气体都建流量标准装置。为了解决这个问题，一般采用替代法标定、检定。

GB/T 20727-2006/ISO14511:2001 规定，热式气体质量流量计可使用和（或）类似于待测过程气体的替代气体校准 TMF 流量计。然后用 K 系数进行修正或进行数值计算，转换成待测过程气体和（或）过程条件<sup>[5][6]</sup>。文献[5]中认为，可直接用空气标定，然后用 K 系数进行修正。实验证明，大约增加 2%左右的不确定度<sup>[5][8]</sup>。表 1 所示为文献[5]给出的几种气体的转换系数。

表 1 几种气体的转换系数

| 气体名称 | 化学式                           | 摩尔定压比热容 $c_p$<br>/[J/(mol·K)] | 转 换 系 数 |           |
|------|-------------------------------|-------------------------------|---------|-----------|
|      |                               |                               | 按计算     | 若干制造厂提供范围 |
| 空气   | Air                           | 29.1                          | 1       | 1         |
| 一氧化碳 | CO                            | 36.6                          | 0.795   | 0.73~0.80 |
| 二氧化碳 | CO <sub>2</sub>               | 20.9                          | 1.39    | 1.39~1.43 |
| 甲烷   | CH <sub>4</sub>               | 29.1                          | 1.002   | 1.00      |
| 乙烷   | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 35.4                          | 0.823   | 0.69~0.90 |
| 乙烯   | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 51.6                          | 0.565   | 0.48~0.56 |
| 氦    | He                            | 66.2                          | 0.44    | 0.32~0.36 |
| 氢    | H <sub>2</sub>                | 20.9                          | 1.39    | 1.37~1.43 |
| 氮    | N <sub>2</sub>                | 28.6                          | 1.019   | 0.99~1.03 |
| 氧    | O <sub>2</sub>                | 29.1                          | 1.003   | 1.00~1.02 |

表 2 所示为某制造厂提供的 DY-EP 型热式气体质量流量计换算系数。

表 2 DY-EP 热式气体质量流量计换算系数

| 气 体                              | 比热（卡/克） | 密度（克/升） | 转换系数  |
|----------------------------------|---------|---------|-------|
| Air 空气                           | 0.2400  | 1.2930  | 1.006 |
| Ar 氩气                            | 0.1250  | 1.7837  | 1.415 |
| CH <sub>4</sub> 甲烷               | 0.5318  | 0.7150  | 0.719 |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 乙烷 | 0.4241  | 1.3420  | 0.481 |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 乙烯 | 0.3658  | 1.2510  | 0.598 |
| CO 一氧化碳                          | 0.2488  | 1.2500  | 1.000 |
| CO <sub>2</sub> 二氧化碳             | 0.2017  | 1.9640  | 0.737 |

该表格的最后一行特别强调：不同资料来源，数据会有差异。

采用这一方法校准流量计其实是不得已而为之。表 1 和表 2 中所列出的换算系数，反映了待用气体的热学特性与空气的差异。对于本例中所涉及的三路流量中，氮气和氧气的热学特性与空气差异较小，因为空气的主要成份就是氮气和氧气，故采用换算方法引入的附加误差理应较小。但是氢气差异就大了。与空气相比，氢气的导热系数是空气的 7 倍，氢气的密度只有空气的 1/14，比热容  $c_p$  更是差了 13 倍。这些差异都会给换算带来较大的误差。除此之外，流体的温度和压力，也会给投入运行的 TMF 的零点和量程带来附加误差。

#### （4）过程温度和压力对 TMF 的影响

国家标准中介绍，需要在实际工作过程温度、压力条件下，用实际测量的气体，进行零点调整。关于温度、压力对量程的影响，GB/T 20727 规定，必须有标准表提供工况条件下的参比测量值，才能进行比对，然后进行调整。而要找符合要求的标准表，往往是困难的。

所有这些都为 TMF 带来较大的误差。例如有一家生产，销售工业气体的德国公司，定期为客户用钢瓶集装格送氦气，重车和空车均过秤。重车与空车的重量差，即为本次送货量。而用户端则用外国产 TMF 作为计量手段，两个计量数据进行比对。他们发现，每次送检取回后重新投入使用，TMF 都要出现 20%左右的误差（总量）。他们怀疑，这是由于氦气密度与空气相差悬殊，两者的热学特性也相差很多引起的。而检定机构又是在空气流量标准装置检定，然后换算得到计量结果。因此，用 TMF 测量此类气体时，要特别注意。

### （5）世界上最精确的热式质量流量计

国外有一家生产热式质量流量计的公司，在它的产品样本首页声称，其产品是世界上最精确的热式质量流量计：

- 精确度： $\pm 0.5\%$ 读数；
- Dial-A-Pipe 可修改管道尺寸；
- Dial-A-gas 可切换气体种类；
- 量程比 100:1。

粗看这几条光鲜靓丽的指标之后，就令人感到这是一种精确度极高，量程比极宽，可适用于各种管径，还适用于不同的气体的万能的流量计。但仔细看了其隐藏在后面的性能规格所作的解释中，对其所列的精确度作了补充说明：

- $\pm 0.5\%$ 读数（在 50%FS 以上）；
- $\pm 0.5\%$ 读数+0.5%FS（在 50%FS 以下）。

心就凉了大半截，因为 0.5 级精确度没有错，但却是引用误差；其量程比 100 倍也没有错，但在流量为 1%FS 时，允许误差竟高达 50.5%读数。这还称得上高精度吗。所以作为一个用户或自控设计人员，看了仪表公司宣传的指标后，应冷静地思考一下，看其中是否隐芷有猫腻。

由于 TMF 有这些固有的特性存在，难免使其在实际应用中出现较大误差。后来下游的用气单位只得花第二次投资，将三台流量计也换成 FDI 型双量程标准孔板流量计，才使上下游表计量结果基本相符，从而结束长达一年之久的纷争。

其实，下游的用气单位选用热式气体质量流量计测量高纯气体也不算错。很多年以来，TMF 在光纤、半导体等行业具有非常好的业绩。在光纤、半导体工厂，几百、上千台小口径 TMF 长期可靠运行，而且测量准确度也获得用户好评。而在本应用实例中，实际效果却并不理想，究其原因这是由于测量任务的差异。在光纤厂、半导体工厂，大面积使用 TMF 是用于过程控制，对流量测量准确度和量程比，都要求不高。而在本例中，测量目的是计量收费。对测量准确度和量程比都要求非常高，尤其是在相对流量很小时，测量准确度不能满足使用要求。因此出现上下游表计的计量结果出现显著的差异。

## 5. 结束语

高纯气体具有组分稳定，无尘、无水滴、无油污的特点，为流量测量和流量计的稳定运行创造了良好的条件。

在高纯气体的流量测量中，双量程孔板流量计以其固有的特点，占有显著的优势。在以计量收费为目的应用中，更是如此。其测量准确度达  $\pm 1.0\%$ ，量程比达 33 倍。

TMF 在光纤、半导体行业的高纯气体流量测量中，具有非常好的业绩。这是因为此类应用是以过程控制为目的，对测量准确度和量程比的要求都不高。但在以计量收费为目的的应用中，表

现欠佳，这是因为在计量收费的应用中，对测量准确度和量程比的要求高得多。

所以在设计选型时，应进行周密的调查研究工作，搞清测量任务对测量准确度和量程比的要求，以防失误。

#### 参考文献

1. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧(M) 第2版. 北京:化学工业出版社,2009
2. 陈勇, 马璐文, 陈新亮等. 双量程孔板流量计不确定度及量程比[J]. 石油化工自动化, 2013, 49[5]: 52~56
3. 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦. 北京: 化学工业出版社. 2012
4. 张宝良, 张恩科, 纪波峰, 纪纲. 提高孔板流量计测量精确度的研究. 石油化工自动化, 2017, 53(4): 48~51.
5. 王池, 王自和, 张宝珠, 孙淮清. 流量测量技术全书. 北京: 化学工业出版社, 2012
6. 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用. 北京: 化学工业出版社. 2001
7. GB/T 20727-2006 封闭管道中流体流量的测量 热式质量流量. 《流量测量仪表标准汇编》. 北京:中国标准出版社. 2008 中国标准出版社第四编辑室编.
8. 蔡武昌, 应启蔓. 新型流量检测仪表. 北京: 化学工业出版社. 2005: 163-183

本文源自《石油化工自动化》2021,(57)1:69~72