

# 基于质量守恒定律的流量测量准确性的现场验证案例分析

刘政利 广州发展新塘热力有限公司 (广州 510160)

纪波峰, 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司 (上海 200070)

**摘要:** 流量计按检定规程进行检定, 除了标准差压装置可按几何法进行检定, 其余各类流量计均需实流检定。经检定合格的流量计虽然取得了合格证书, 但在现场安装、与关联仪表配套组成流量测量系统后, 系统误差未必满足要求。所以, 验证这个特定的流量测量系统是否满足规定要求就非常重要。验证的常用方法有物料平衡法、能量平衡法、设备能力法、流量增量法等。本文针对基于质量守恒定律的物料平衡法进行详细讨论。

**关键词:** 流量计 检定 比对 验证 质量守恒 物料平衡法

## Field verification of flow measurement accuracy based on mass conservation law

Liu Zhengli Guangzhou development Xintang thermal Co., Ltd.(Guangzhou 510160)

Ji Bofeng, Ji Gang Shanghai Tontion automation instrumentation Co., Ltd.(Shanghai 200070)

**Abstract:** Flowmeter is calibrated according to calibration procedure. Standard differential pressure device can be calibrated by geometric method, the other types of flowmeters should be calibrated by real flow method. The qualified flowmeter has obtained the certificate, but systematic error does not necessarily meet the requirements after field installation, composing a flow measurement system with the associated instrument. Therefore, it is very important to verify that this particular flow measurement system meets the specified requirements. Common methods for verification include material balance method, energy balance method, equipment capability method, flow increment method, etc. This paper discusses in detail the material balance method based on the law of conservation of mass.

**Key words:** flowmeter calibration comparison verification mass conservation material balance method

## 1. 引言

在参考文献[1]中, 分析了流量计安装到使用现场并投入使用后, 是否满足规定的要求所做的验证与之前所做的检定, 校准 (Calibration) 及比对 (Comparison) 的差异。在国际计量学基本术语 (VIM) 中, 将验证 (Verification) 定义为“提供客观证据证明测量仪器满足规定的要求”的一项活动。

参考文献[2]中有一章专门讨论流量测量准确性的现场验证。常用的有物料平衡法、能量平衡法、设备能力法、流量增量验证法。其中使用最多的是基于质量守恒定律的物料平衡法。

流体从封闭管道的一端连续地流到另一端, 在管道内充满被测流体而且工况稳定的条件下, 可忽略管道中物料滞留量的变化, 因而在管道的始端和末端所测量到的流体总量应是相等的。其本质是质量守恒定律。

定律是简单的, 但基于此项定律所做的具体验证中, 会遇到各种各样的问题, 必须深入实际调查研究, 细心分析, 才能找到问题所在并最后解决问题。下面通过几个有代表性的例子, 说明验证操作的常用方法。

## 2. 用上下游 2 台流量计验证

一根管道上两套流量计, 如果是同一家制造厂所提供的相同规格的产品, 验证结果应当非常接

近，这时表现出来的其实是两套表的一致性。但是由于上下游两套表在同一根管道上的位置不同，所以温度压力参数有差异，也会带来一些问题。举例如下。

### 例 1：上下游的 DN500 喷嘴流量计示值差异微小

江苏某市的新港热电公司为附近的富德能源化工公司供汽，在上游装了一套双量程喷嘴流量计，富德在下游也装了一套 DN500 双量程喷嘴流量计，蒸汽常用压力：4.5MPa；常用温度：450℃，流量测量范围均为 0~260t/h，系统图如图 1 所示。

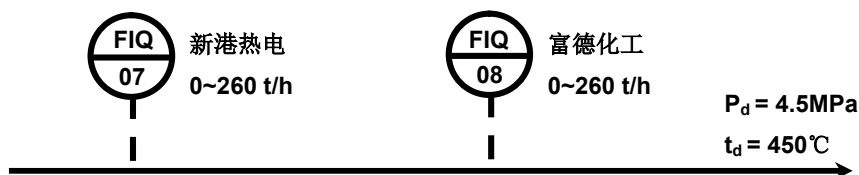


图 1 新港热电去富德化工蒸汽管网

Fig.1 Steam pipe network from Xingang Thermal Power to Fude chemical

该系统于 2015 年 10 月份投入使用，富德化工是一家新厂，投产初期蒸汽用量小，波动大，2016 年 1 月，蒸汽平均流量升高到 40 t/h，约占满量程的 15%，三个星期的累积流量差值为 0.98%，详见图 2 所示的 SCADA 监控系统自动生成的报告。于是供需双方对两套流量计的准确度表示满意。



图 2 富德线报表截图

Fig.2 Report screenshot of Fude pipe line

### 例 2：测量重油的两套科氏力流量计示值相差悬殊

中石化某分公司渣油从炼厂经管道输送到化肥二厂做原料，在一根 DN80 的管道上，各装一套相同型号规格的国外知名品牌科氏力质量流量计，整根管道上没有分支和泄漏，但接收方的计量结果比发送方高，平均累计月误差大于 1.5%，个别月份误差大于 3.5%<sup>[3]</sup>，远远大于供应商所承诺的误差限。

早期仪表制造商的产品样本和使用说明书等技术文件中，通常声称科氏力质量流量计的流量示值不受流体温度、压力、密度和黏度变化的影响。这种流量计因为测量精确度较高，有很大部分用

于贸易交接。一根管道将交接双方连接起来，在供需双方各装一套流量计，而且往往是同一制造厂的同一种型号规格产品。由于输送距离较远，流体的温度、压力、密度、黏度等参数都会有一定变化，于是引发计量量差<sup>[4]</sup>，制造厂处于非常被动的地位，只得投入人力财力作进一步研究，并收到一定效果。例如 Micro Motion 公司在其新的样本中对其不同型号的产品的流体静压影响作了表述<sup>[5]</sup>。表 1 所列是部分产品介质压力变化影响和介质温度变化影响。由于出厂检验时所用的压力是 0.1~0.2MPa，所以在实际使用压力较高时，造成的实际影响也是可观的。对压力影响进行补偿的常用方法有两个，一是在线补偿，适用于流量变送器中带有压力补偿功能的产品，另装一台压力变送器并将信号送入流量转换器，然后在转换器组态时指定补偿功能和压力信号对应的上下限压力值<sup>[4]</sup>。另一方法是离线补偿，适用于压力较稳定的对象。从常用压力值计算出流量校正系数，然后在转换器组态中将流量标定系数予以校正。温度变化因其影响值是正负双向，还不能予以校正。

表 1 介质压力、温度变化对流量示值的影响<sup>①</sup>

Table.1 Effect of media pressure and temperature change on flow indication

传感器型号	介质压力变化影响量/ $\%MV \cdot \text{psi}^{-1}$	介质温度变化影响量/ $\%q_{\text{max}} \cdot \text{°C}^{-1}$
DS300S, DS300H	-0.009	$\pm 0.004$
DS600S	-0.005	$\pm 0.004$
DS300Z	-0.009	$\pm 0.004$
DL100	-0.005	$\pm 0.002$
DL200	-0.009	$\pm 0.004$

注：1psi=6894.76 Pa。

### 3. 各分表示值之和同总表示值相等

在流体计量方面，普遍存在着分表与总表的关系。要做到各分表示值（总量）之和同总表示值（总量）基本相符，在许多情况下难度较高，这不仅同仪表本身的品质有关，还同设计条件的准确性、仪表选型、测量范围选定、仪表安装质量、环境条件、实际流量变化范围等密切相关，任何一个环节存在问题都会使平衡数据大相径庭。

在流量计选型和选定测量范围时，口径选得过大，测量上限取得过高的情况并不少见，待仪表投入运行后发现实际流量比预计的小得多，有的甚至进入“小信号切除”区间，从而导致测量误差增大。

#### 例 3：孔板流量计 C 和 $\epsilon_1$ 非线性引起误差的实例

浙江镇海某热力公司咨询，有两热力公司联合对一个用户供汽，在两个供方和一个需方的管道上各装有一套相同规格的孔板流量计，测量范围均为 0~100t/h。系统图如图 3 所示。

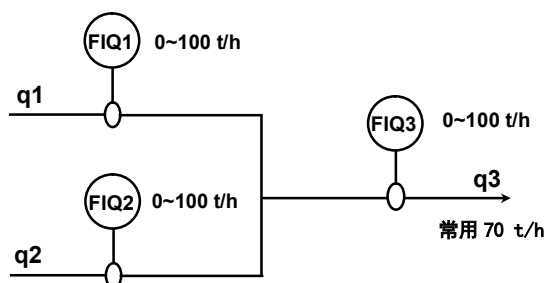


图 3 蒸汽计量系统图

Fig.3 Steam metering system diagram

咨询者介绍，图中  $q_1$  对  $q_3$  单独供汽，两台表示值基本相符。 $q_2$  对  $q_3$  单独供汽，两台表示值也基本相符，但两个供方联合对  $q_3$  供汽时， $q_1$  和  $q_2$  之和比  $q_3$  小 1.5~3%。

#### 分析与诊断：

① 由  $q_1$  单独向  $q_3$  供汽或由  $q_2$  单独向  $q_3$  供汽时，两套表均工作在较理想的区间，约为满量程流量的 60~80%。而且两套表又是相同规格，两套表之间示值基本相符是应该的。

② 在  $q_1$  和  $q_2$  联合对  $q_3$  供汽时， $q_3$  仍然运行在较理想的区间，偏离常用流量不远，但  $q_1$  和  $q_2$  实际使用区间比常用流量低得多。其对应的差压值只有常用流量的 1/4。此时，流出系数  $C$  的非线性约引起仪表示值偏低 0.1%，可膨胀性系数非线性约引起仪表示值偏低 1.5%<sup>[6]</sup>。

③ 从咨询者所介绍的情况分析，差压变送器的选型也有问题，合理的设计应是选用高低压室各有两个排放口的差压变送器，这时，将上方的一个口用作排气，可以将高低室内的空气排净，如图 4 (c) 所示。而实际安装的是只有一个排放口的差压变送器，如图 4 (a) 所示。这样，高低压室内最高点气体不能排净，为流量示值带来不确定因素。

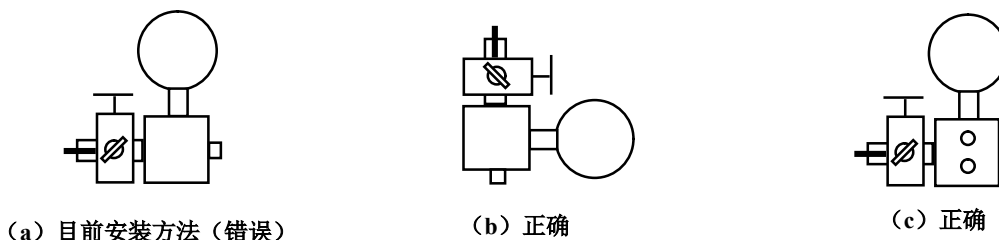


图 4 正确的差压变送器的选型与安装

Fig.4 The correct selection and installation of different pressure transmitter

处理方法：

① 三套差压式流量计均引入流出系数非线性校正和可膨胀性系数非线性补偿，保证全量程的准确度<sup>[2]</sup>。

② 改选用高低室各有两个排放口的差压变送器，或将现有的差压变送器按图 4 (b) 进行改装，使高低室内的气体，自行沿流路上升到冷凝罐。

#### 例 4：总表为喷嘴流量计分表为涡街流量计的例子

总表为喷嘴流量计，分表为涡街，计量结果吻合得很好，一个月的总量差 1%。

沙洲电厂在 2014 年铺设了一根 DN350 的低压蒸汽管供 4 个用户，关口表 FIQ13 为 FDIId 型双量程喷嘴流量计，各分表均为横河涡街。

总表与分表为不同类型的流量计，而且由不同的供应商供应。分表之和与总表示值一个月的总量差 1%，表明总表和分表都是准确的。详见 SCADA 系统自动生成的统计报表（图 6）。

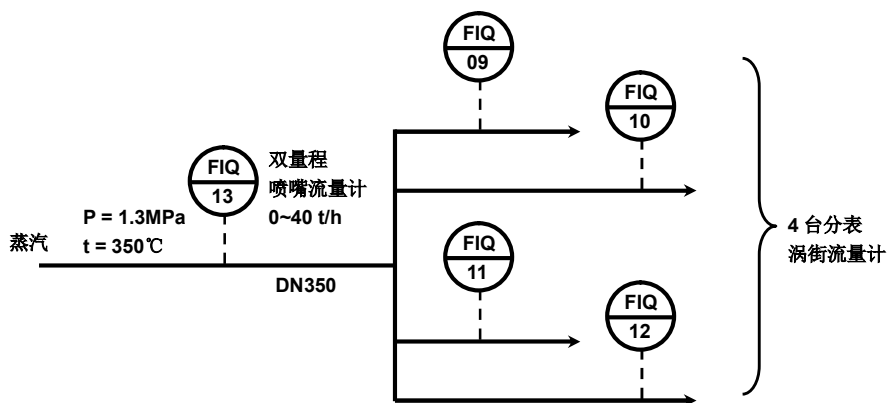


图 5 沙电 1#外供汽总管网络图

Fig.5 Shazhou Power Plant 1# main external steam pipe network diagram

热网数据信息监测与管理系统 - 高级用户 - Version: 0.3.001 Standard - Beta

热网客户端

实时数据 数据查询 数据统计 故障查询 系统管理

2014年10月月数据统计

2014年10月09日 上-月 本月 下-月

刷新数据 生成EXCEL

序号	用户	平均温度(℃)	平均压力(MPa)	质量流量累积(T)	热量流量累积(GJ)	补差	补全	用汽时间	
1	源胜化工	147.7852	0.4162	307.9430	845.5923	0.0000	0.0000	0.02	
2	越洋码头	148.0273	0.4070	420.1585	1154.0686	0.0000	0.0000	0.02	
3	联合铝业	159.6295	0.5188	8116.4950	22398.7050	0.0000	0.0000	0.02	
4	焊材厂	154.3246	0.5080	1.5623	4.3060	0.0000	0.0000	0.00	
5	总管	257.4850	0.5809	8932.0000	26563.0000	0.0000	0.0000	0.00	
④= 总供量				8,932.0000	26,563.0000				
④= 总用量				8,846.1588	24,402.6719				
④= 补差补全合计						0.0000	0.0000		
质量流量(供)		质量管损		热量流量(供)		热量管损		热量流量售热率	
8,932.0000		85.8412		26,563.0000		2,160.3280		92%	

图 6 沙电 1#蒸汽总管计量报表

Fig.6 Shazhou Power Plant 1# main steam pipe metering report

#### 4. 根据质量守恒关系对计量数据作出判断

质量守恒是自然界的基本规律，在应用这一方法验证时，必须排除各种干扰因素对计量结果的影响。

##### 例 5：锅炉发汽流量比进水总量大 2%

青岛某厂的一台 220 t/h 锅炉，有一个不解之谜，即发汽流量总是比锅炉进水流量与减温水流量之和 2% 左右。于是仪表人员对孔板计算书进行复算，对各台仪表进行复验，对仪表安装进行检查均未发现问题。最后要求仪表制造厂作解释。于是有关人员对这两个测量系统方方面面的情况作了较全面的调查。除氧水温度因故比设计条件低 50℃，而这一偏离在进水流量表中既未作相应的修正，也未引入温度补偿。由于温度的这一偏离，使流体实际密度增大 4%，进水流量计偏低 2% 是理所当然的事<sup>[2]</sup>。

#### 5. 用凝结水量验证蒸汽流量计的准确性

经过流量计计量后的蒸汽，送用热设备，蒸汽放出热量后变成质量相等的凝结水，然后从疏水器排出。将一段时间内的凝结水收集起来，测量其质量，然后与同一段时间内蒸汽表所计的总量比较，验证蒸汽表的准确性，是在流量计安装使用现场经常使用的简单而易行的方法。

例 6：上海某热力公司租用浦东王桥地区的一家纺织厂锅炉房，向 2km 远处的天马公司供饱和蒸汽，始端装了一台 DY150 型涡街流量计，用户端装了一台 DY100 型涡街流量计，涡街流量计精确度等级：1.5%<sup>[7]</sup>。由于距离较远，而且其他用户还只在筹划之中，管内蒸汽流速很低。用户端蒸汽带水严重。沿途虽装有 31 只疏水器（如图 7）但为了减少热量损失，一个也没有开。咨询者介绍，始端表计流量示值稳定指示 2.5 t/h，但用户端表计流量示值时有时无。流量最大时也只有 0.75 t/h。

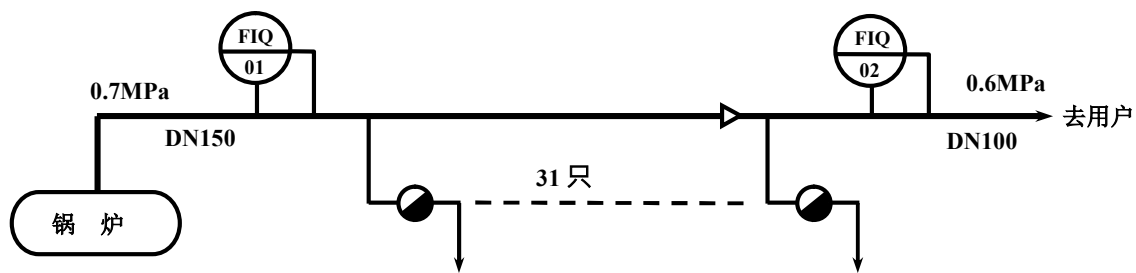


图 7 王桥热源厂供汽系统图

Fig.7 Wangqiao Thermal Power Plant steam pipe system diagram

笔者接受了用户的咨询。经分析认为：

① 流量示值时有时无的原因

由于管线长，流速低，而热源厂送入管网的又是饱和蒸汽，所以，在用户端流量计处，蒸汽带水严重。从而导致涡街流量计出现“漏脉冲”现象。

② 作者建议将靠用户端流量计最近的两个疏水器打开，然后观察靠用户端流量计最近的一个疏水情况。如果疏水断断续续，则不必再开第三个疏水器，如果疏水不停，则必须再往前多开一个疏水器。

咨询者依上述建议开了两个疏水器，其中后面一个疏水器难得有水排出。再观察用户端流量计显示，示值在 1 t/h 左右稳定显示。

对于蒸汽管始端和终端两套流量计的流量示值之差，咨询者进行了分析，认为始端流量计是正确的，因为其流量示值与锅炉的进水流量及产汽量基本相符。但终端流量只有 1t/h，显然偏低。

为此，用测量疏水器排出的凝结水量的方法进行验证。如果凝结水量与两台流量计流量显示值之差基本相等，则终端流量计也是准的。

关于凝结水闪蒸损失的计算：

从图 7 中的蒸汽参数并查蒸汽性质表表知，凝结水排出之前温度为  $t_1=165^{\circ}\text{C}$ ，焓值  $h_1=697.06$  kJ/kg；凝结水排入大气时，温度  $t_2=100.0^{\circ}\text{C}$ ，焓值  $h_2=419.07$  kJ/kg，蒸发热  $r=2256.9$  kJ/kg<sup>[8]</sup>，则每 kg 高温水变成低温水时，将有  $x$  水闪蒸变成蒸汽：

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{h_1 - h_2}{r} = \frac{697.06 - 419.07}{2256.9} \\ &= 0.1232 \text{ kg/kg} \end{aligned} \quad (1)$$

因此，能够收集到的液态凝结水只有全部凝结水的 87.68%。按照这一比例关系进行处理，得到的凝结水总量，与两套流量计流量示值之差基本相符。

## 6. 运用物料平衡法时应注意的问题

① 仪表的安装应符合规程要求，如果因现场条件限制无法完全满足，则在核算时应对由此引起的误差作出评估。

**例 7：有一幢大楼低区冷冻水系统（见图 8）流量测量总表与各分表示值之和差 5%。**

该系统共有 12 台分表，管径从 DN80~DN200，均用 IFM 型电磁流量计测量流量，而总管为 DN600，采用 AT 868 型夹装式超声流量计测量流量。供水温度和回水温度也接入二次表，以实现冷量的计量。总管流量计 HIQ 01 由于管径大，对直管段要求高，现场无法满足要求，前直管段只能勉强达到 5D，仪表投运后发现总管流量示值比各分管流量示值低 5%。

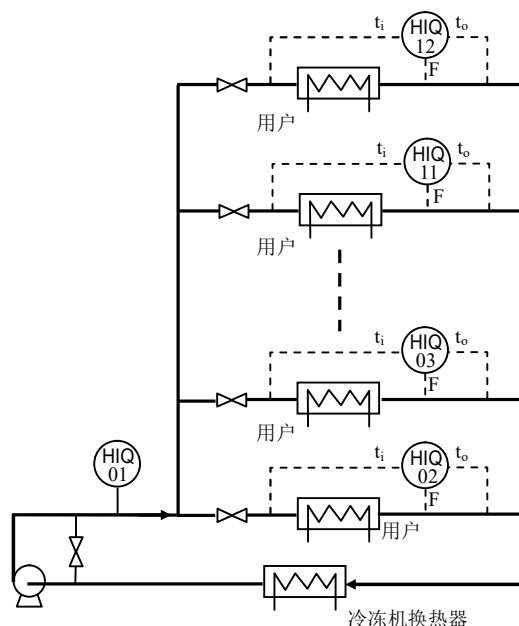


图 8 低区供冷系统

Fig.8 Low zone cooling system

在作系统误差分析中，工作人员核对了各分表的数据设置和每台表所对应的用户的设备能力，确认流量示值可信。尤其是该型号电磁流量计精确度较高，其基本误差为 $\pm 0.3\%R$ ，因此初步判定5%的量差主要是由于总管流量计误差大引起的。

在分析直管段长度不够对超声流量计示值影响的过程中，富士公司的经验帮了忙，该公司提供的三组曲线（如图9所示）都表明夹装式单声道超声流量计在直管段不够长时，示值偏低，在前直管段长度为5D时，示值约偏低5%。从而使总表与分表量差的矛盾找到了答案。

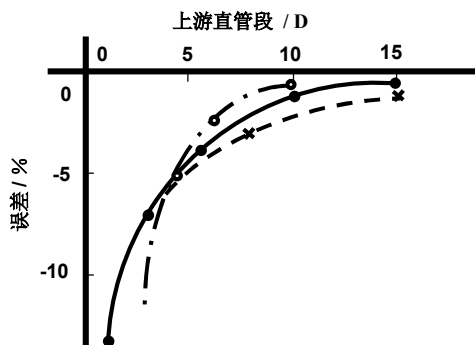


图 9 上游直管段的影响

Fig.9 Influence of upstream straight pipe section on flow

② 防止流体倒流导致重复计量而引入误差

**例 8：间歇发料系统（见图 10）停泵期间泵出口外管内存料返回到泵的进口。**

上海某氯碱厂用泵将料液从一个部门打到另一个部门。输送量由一台智能电磁流量计测量。当一批料输送完毕泵即停止运转，于是泵出口外管内的料液返回泵的进口。由于外管直径大，线路长，所以每次返回量较大。一段时间只发现流量计所计总量比储槽中用容积法所计总量大，但原因不明，后来检查中调阅智能流量计所保存的总量值，才恍然大悟，该仪表中保存的总量值有三个，即正向总量  $Q_D$ ，反向总量  $Q_R$  以及正反总量之差  $Q = Q_D - Q_R$ 。结果储槽中用容积法所计总量值与  $Q$  基本相等，于是电磁流量计面板显示总量指定为  $Q$ ，问题得到解决。

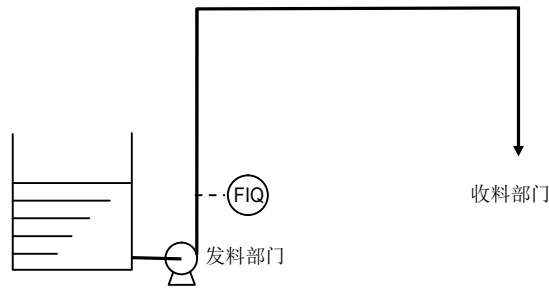


图 10 液料间歇输送系统  
Fig.10 Liquid intermittent conveying system

## 7. 用 PVTt 法校验

### 例 9：应用 PVTt 法校验气体流量计

工作原理：PVTt 法是用来检定音速喷嘴等高精确度气体流量计的标准装置。是某一时间间隔  $t$  内，气体进入容积为  $V$  的容器，根据容器内气体的绝对压力  $P$  和热力学温度  $T$  的变化，求得气体的质量流量<sup>[9]</sup>。在仪表使用现场应用 PVTt 方法对流量计进行校验，往往是利用现场现成的容器，标出其容积，然后根据容器内气体压力和温度的变化，计算质量流量总量，与被校表的总量示值作比较。

其质量流量的数学模型如式（2）所示。

$$q_m = \frac{V}{t} \left( \frac{P_F}{T_F Z_F} - \frac{P_E}{T_E Z_E} \right) \frac{T_N Z_N}{P_N} \rho_N \quad (2)$$

式中：  $q_m$  —— 气体的质量流量，kg/s；

$t$  —— 计时器测得的时间，s；

$T_N$  —— 标准热力学温度， $T_N = 293.15K$ ；

$P_N$  —— 标准绝对压力， $P_N = 101325Pa$ ；

$Z_N$  —— 在标准状态（ $T_N$ 、 $P_N$ ）下的气体压缩系数；

$\rho_N$  —— 在标准状态下的气体密度， $kg/m^3$ ；

$T_F$  —— 检定结束后在标准容器内测得的气体平均热力学温度，K；

$P_F$  —— 检定结束后在标准容器内测得的气体绝对压力，Pa；

$Z_F$  —— 在  $T_F$ 、 $P_F$  下的气体压缩系数： $Z_F$  可由  $T_F$ 、 $P_F$  求得；

$T_E$ 、 $P_E$ 、 $Z_E$  —— 分别为检定前标准容器内气体平均绝对温度、绝对压力、压缩系数；

其质量总量即为

$$Q_m = V \left( \frac{P_F}{T_F Z_F} - \frac{P_E}{T_E Z_E} \right) \frac{T_N Z_N}{P_N} \rho_N \quad (3)$$

式中：  $Q_m$  —— 质量总量，kg；

其余符号意义与式（2）相同。

当流量计显示的是标准状态体积流量时，计算公式即为

$$Q_{VN} = V \left( \frac{P_F}{T_F Z_F} - \frac{P_E}{T_E Z_E} \right) \frac{T_N Z_N}{P_N} \quad (4)$$

式中：  $Q_{VN}$  —— 体积总量， $Nm^3$ ；

其余符号意义与式（2）相同。



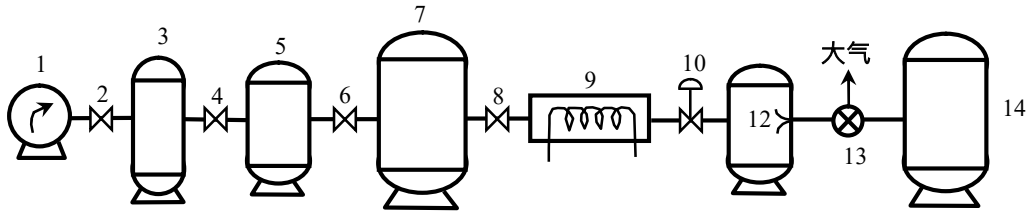


图 11 高压气体流量标准装置

Fig.11 High pressure gas flow standard device

1—压气机；3—过滤器；5—干燥器；7—贮存容器；9—温度调节器；10—压力调节器；  
11—滞止容器；12—音速喷嘴；13—换向阀；14—标准容器；2、4、6、8—阀门

图 12 所示是一个利用现场的一台气罐校验气体流量计的例子。江苏张家港的一家化工厂，怀疑一台氢气流量计偏低，然后，将一台气罐请计量检定机构上门检定，并取得证书，得知其空间容积  $V=11.8\text{m}^3$ 。

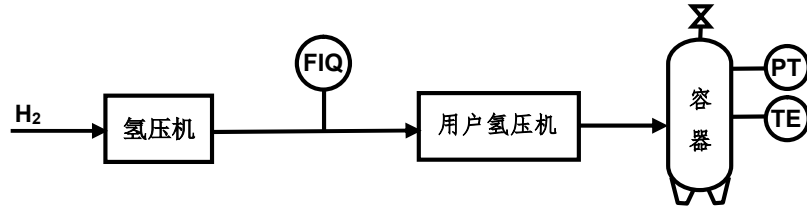


图 12 氢气输送系统

Fig.12 Hydrogen delivery system

校验起始工况：  $P_E = 0.1\text{MPa G}$ ；  $t_E = 20^\circ\text{C}$ ；

校验结束工况：  $P_F = 5.0\text{MPa G}$ ；  $t_F = 40^\circ\text{C}$ ；

查表得  $Z_N = 1.0006^{[8]}$

查图得  $Z_E = 1.001$       $Z_F = 1.022^{[8]}$

因为  $T_N = 293.15\text{K}$       $P_N = 0.101325\text{MPa A}$

代入式 (4) 得

$$\Delta V_N = 11.8 \left( \frac{5.0 + 0.101325}{(20 + 273.15) \times 1.022} - \frac{0.1 + 0.101325}{(50 + 273.15) \times 1.001} \right) \frac{293.15 \times 1.0006}{0.101325}$$

$$= 560.38 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

然后就可按式 (5) 计算误差。

$$E_i = \frac{\Delta Q_{Ni} - \Delta V_N}{\Delta V_N} \quad (5)$$

式中：  $E_i$  —— 仪表在校验点  $i$  处的示值误差，%；

$\Delta Q_{Ni}$  —— 仪表总量增量， $\text{Nm}^3$ ；

$\Delta V_N$  —— 实际容积增量， $\text{Nm}^3$ 。

## 8. 结束语

① 上下游流量计所处的位置不同，工况条件会有较大差异，对这些差异如果处理不当，会引起较大的流量测量误差。

② 上下游两套流量计如果为不同的测量原理，而测量结果又吻合得很好，则应认为两套流量计测量都较准确。

③ 流量的准确测量，严重依赖流量计的安装质量，只要有一项不符合安装要求，就有可能引起很大误差。

④ 用凝结水总量验证蒸汽流量测量准确性时，应注意蒸汽中可能夹带的液滴之影响，以及凝结水收集时，高温凝结水闪蒸引起的总量损失。

#### 参考文献

1. 纪纲. 流量测量应用技术—流量计示值准确性的现场验证 (五)[J]. 医药工程设计,2001,22(5): 38~45
2. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 第二版[M]. 北京: 化工工业出版社, 2009: 265, 279
3. 武胜林. 质量流量计计量超差原因分析[J]. 石油化工自动化, 1999.4: 66~69
4. 赵晶. 介质压力对罗斯蒙特质量流量计的影响及解决[J]. 化工自动化及仪表, 2002.29 (1): 71~72
5. 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001
6. 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012
7. 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006
8. 王森, 纪纲. 仪表常用数据手册. 第二版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
9. 苏彦勋, 梁国伟, 盛健. 流量计量与测试. 第二版. 北京: 中国计量出版社, 2007.

本文源自于一化工于医药工程 2019 第 4 期