

# 流量计示值准确性的现场验证及其解决方案

纪 纲（上海宝科自动化仪表研究所，上海 200940）

**关键词：**流量计 验证 质量平衡 热量平衡

**提 要：**流量计示值准确性的现场验证是交工验收的重要内容。本文介绍了现场校验法，质量平衡法，热量平衡法，设备能力法以及一些技巧。

## 1. 引言

一台流量计在出厂之前需按检定规程进行检定。有些种类流量计例如旋涡流量计、电磁流量计、涡轮流量计、科氏力质量流量计等还须在流量标准装置上通入校准流体，对被检表进行逐台校准（calibration），此校准也称对刻度进行标定，检定合格的流量计才能出厂。但是一台出厂检定合格的流量计安装到使用现场后，一般还得经过使用环节的考验，才算真正“合格”。这一环节就是交工验收时对流量计示值准确性的现场验证。将这项工作称作验证，是因为它不同于检定。检定这个术语在国家标准中的定义是“查明或确认计量器具是否符合法定要求的程序，它包括检查、加标记和（或）出具检定证书”<sup>[1]</sup>。很明显，对于流量计，检定是对某台器具所进行的工作。而一台流量计安装到使用现场后，往往还要同其他相关联的仪表（如二次表）配套，连同被测对象一起组成流量测量系统，并在特定的使用环境中运行。一个流量测量系统中所包含的各台计量器具可能全部是合格的，但组成一个流量测量系统却可能不合格，因为器具选型不当，量程选择不当，器具之间匹配不合适，安装不合理，环境恶劣使器具不能适应，测量对象对器具测量范围度要求太高等原因，都会造成系统误差太大。所以，这里所说的验证是对为一个具体的对象服务的在一个特定的环境中运行的测量系统而言。一套流量计在某个特定的环境中运行可能不“合格”，而换一个环境，可能是“合格”的。为这个对象服务可能不“合格”，改为那个对象服务，可能又是“合格”的。因此验证不能脱离具体的系统，具体的对象，具体的环境。

比对这个术语在《计量辞典》中的定义是“在规定条件下，对相同准确度等级的同类基准、标准，或工作用计量器具之间的量值进行比较”<sup>[2]</sup>。看来用比对来代表现场的验证工作也不完全合适，因为现场验证有些是在相同准确度等级的测量系统之间进行比较，而有的却不是。验证一词在 GB/T 6583-1994 中定义为“通过检查和提供客观证据表明规定要求已经满足的认可”<sup>[3]</sup>。这虽是质量管理和质量保证标准中的术语，将其借用到测量系统的质量管理，基本合用。

但是不管叫什么名称，这是必须做的，而且是十分重要的一件事。验证时可能是供应商提出很多数据和理由，证明测量系统示值是足够准确的，而由业主单位进行验收。也可能是安装调试单位交工，而由建设单位或建设单位委派的监理单位验收。而在同一个单位中，则可能是仪表计量设备部门交工，而由使用部门验收。

下面介绍常用的现场验证方法。

## 2. 流量测量系统的现场校验

### 2.1 流量测量系统零点的校验

在使用现场对流量测量系统的零点进行校验同在实验室中进行校验没有什么不同，都是使流过流量计的流量为零，然后读取流量表的示值。

经验丰富的工程监理人员或验收人员在流量计启用前对其检查验收时都要检查一下流量计的零点示值，因此项校验最容易实施，也最重要。

在校验时流量计既不能无中生有，也不能指向负值。校零时需注意如下各点。

a. 保证流过流量计的流体流量确实为零。

这是流量计校零的基础。现场使用一段时间的切断阀关闭后能做到无内泄的不是很多。所以校对零点时，这一点需得到确认，避免弄巧成拙。

b. 在流量测量管中充满被测介质。

这一点对于电磁流量计尤为重要。因为大多数电磁流量计在空管时都要指示满度值。这是因为电磁流量计在测量管空管时，电极之间开路，信号源内阻异常大，从而容易接受干扰而使示值超过满度。

测量液体流量的旋涡流量计，在测量管中充满液体时，包围在传感器周围的是液体，因此具有良好的阻尼。但若测量管中充的是气体，由于气体的密度和粘度均比液体小得多，所以阻尼特性较差，管道的振动，厂房的振动，甚至周围空气较强烈的振动，都会导致仪表示值的“无中生有”。

旋涡流量计校零时容易接受外界干扰的主要原因是因为其传感器前置放大器的变增益特性。以压电传感器为例<sup>[4]</sup>，由于传感器的输出幅值同流过测量管的流速的平方成正比，流速越高，传感器的输出幅值越大；反之，输出幅值就小。微弱的信号送入旋涡流量计的前置放大器，该放大器为了将幅值悬殊的频率信号放大到幅值近似相等的信号，采用了变增益放大器，即流速高时输入频率高，增益小，流速低时输入频率低，增益大，当然，输入频率为零时，增益最大，这时，各种干扰也一视同仁被放大了很多倍数，而高于触发器的门限值，最终被当作信号送到输出端。

c. 振动对旋涡流量计零点的影响

旋涡流量计在测量管充满被测介质时，如果零点示值偏高，也即存在“无中生有”的现象，一般都可通过噪声平衡（NB）调整和触发电平调整（TLA）使输出回零<sup>[5]</sup>。但若安装现场振动较严重，往往无法用仪表调整的方法解决问题，因为将触发电平调得过高，或将放大器增益（GAIN）调得太小，必将导致可测最小流量值升高，甚至在流量较大时旋涡所产生的信号仍低于触发门限值而被当作噪声予以滤除。这时就得另想办法，例如减小振动，换上耐振性更佳的仪表等。

d. 小信号切除问题

对于以模拟信号输出的流量计，由于模拟电路难免有些漂移，导致零点出现微小的偏移。通常用小信号切除的方法予以解决，这一方法也有缺点，因为切除点以下的小流量信号也一起被切除了，所以切除点不能定得太高。在流量仪表普遍实现可编程后，切除点可根据需要任意设定。为解决这一困难提供了有效的手段。但应注意，有些变送器（例如差压变送器）由于安装位置有一定的倾斜，或因承受机械应力，导致零点漂移，不能用小信号切除的方法解决，只能用调整零点的方法解决。

## 2.2 流量测量系统的示值校验

流量测量系统的零点示值校验，实施起来较容易，因为使流过流量计的流量为零，比较容易实现。本节所述的校验是零点之外其他点示值的校验。

### 2.2.1 校验前的准备工作

要对流量测量系统示值进行现场校验需具备必要的条件，如图 1 所示的校验口和切断阀，是在仪表安装时就已装设的。如果只装设了出料校验口，则只能用流量计实际被测流体校验；如果既装设了出料校验口又装设了进料校验口，就也可用其他合适的流体校验。

### 2.2.2 用容积法进行校验

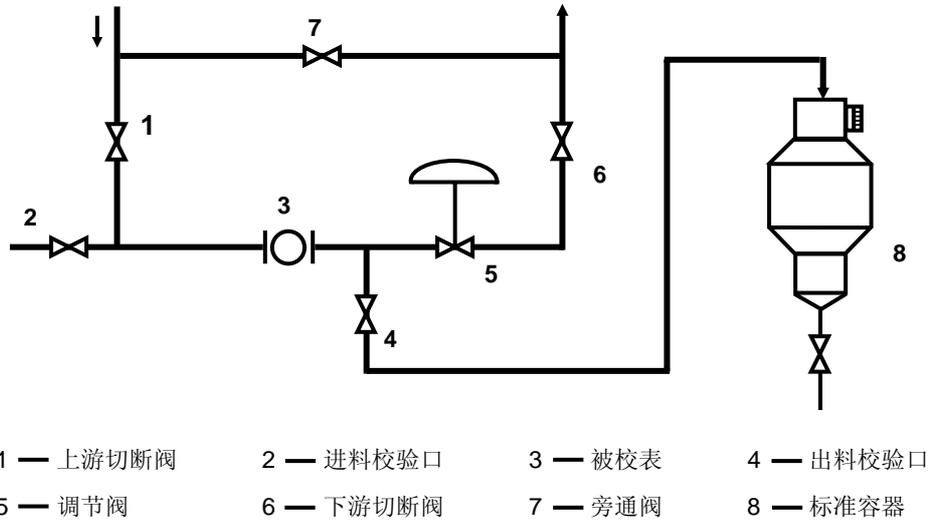


图 1 容积式校验系统图

用容积法对被校表进行校验，其管道连接如图 1 所示。适用于液体流量校验，流量校验点一般取被校流量计常用流量，可在不影响生产操作的情况下实施校验。标准容器的容量不应小于一分钟的输送量。

流量计的误差按下式计算<sup>[6]</sup>：

$$E = \frac{V_m - V}{V} \times 100 \% \quad (1)$$

式中：E —— 流量计误差（一般指累积误差）取二位有效值；

$V_m$  —— 流量计测得值（即示值）；

V —— 经修正后，流量标准装置测得值（即实际值）。

$$V = V_s \cdot C_{ts} \cdot C_{tl} \cdot C_{pl} \quad (2)$$

$$C_{ts} = 1 + \beta_s (t_s - 20) \quad (3)$$

$$C_{tl} = 1 + \beta_l (t_m - t_s) \quad (4)$$

$$C_{pl} = 1 + F_l P_m \quad (5)$$

上述各式中：

$V_s$  —— 标准装置测得的未经修正的体积值；

$C_{ts}$  —— 工作器具温度修正系数（纯数）；

$C_{tl}$  —— 工作液体温度修正系数（纯数）；

$C_{pl}$  —— 工作液体压力修正系数（纯数）；

$\beta_s$ 、 $\beta_l$  —— 分别为工作量器和工作液体的体胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

$F_l$  —— 工作液体的压缩系数， $\text{Pa}^{-1}$ ；

$P_m$  —— 流量计处表压，Pa；

$t_s$ 、 $t_m$  —— 分别为工作量器内和流量计处液温， $^{\circ}\text{C}$ 。

上面的算式是检定规程中规定的完整公式，由于现场校验受条件的限制，标准器和操作要全面达到规程的

要求还有困难，因此，温度和压力的修正也往往被简化了。

用标准容器在现场对被校表进行校验，校验点（瞬时流量值）要做到高是困难的，达到  $60\text{m}^3/\text{h}$  的例子已不多见。因为流量越大，困难越多，诸如动力、标准容器的搬移、场地、操作以及液体的回收等。

当流量更大时，可利用现场现成的水池、槽、罐等代替标准容器，用一段时间内容器中液位的变化计算容积值，然后同流过流量计的总量进行比较。但是计算时，容积值的计算不能以竣工图数据为准，须实测，容器上人孔、法蓝口、内件的影响都要扣除，阀门不能泄漏，旁路管道流出流入的量要特别注意。

### 2.2.3 用称量法进行校验

用称量法对被校表进行现场校验，其管路连接如图 2 所示。

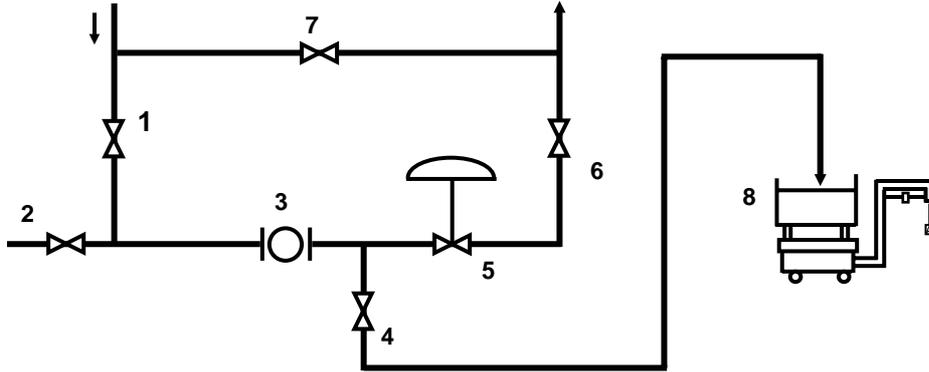


图 2 称量法现场校验管路连接图

流量计的误差按下式计算：

$$V = V_S \cdot C_{tl} \cdot C_{pl} \quad (6)$$

式中：

$$V_S = \frac{M}{\rho_l} \cdot C \quad (7)$$

$$C = 1 + \rho_a \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho} \right) \approx 1.00106 \quad (8)$$

$$C_{tl} = 1 + \beta_l (t_m - t_s) \quad (9)$$

$$C_{pl} = 1 - F_l \rho_m \quad (10)$$

上述各式中：

$V$  —— 经换算修正得到标准装置测得的体积值， $\text{m}^3$ ；

$V_S$  —— 标准装置测得的未经修正的体积值， $\text{m}^3$ ；

$M$  —— 称量液体所加的标准砝码示值， $\text{kg}$ ； $M = M_2 - M_1$ ；

$C$  —— 空气浮力修正系数（纯数）；

$\rho_l$  —— 工作液体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$\rho$  —— 标准砝码的材料密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$\rho_a$  —— 空气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$C_{tl}$  —— 工作液体温度修正系数（纯数）；

$C_{pl}$  —— 工作液体压力修正系数（纯数）；

$\beta_l$  —— 工作液体膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

$F_l$  —— 工作液体压缩系数， $1/\text{Pa}$ ；

$t_m, t_s$  —— 分别为流量计处和称重容器内的工作液体的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\rho_m$  —— 流量计处表压,  $\text{Pa}$ 。

当标准秤不用砝码时, 式(8)变为:

$$c = 1 + \rho_a / \rho_l \approx 1.0012 \quad (11)$$

称量法在现场校验中比容积法用得更多, 原因是标准秤比标准容器容易得到, 灵活性也更大。

#### 2.2.4 用标准表法进行校验

上面所述的容积法和称重法只能用液体进行校验, 而标准表法既适用于液体又适用于气体。用标准表法进行现场校验, 流程如图 3 所示。

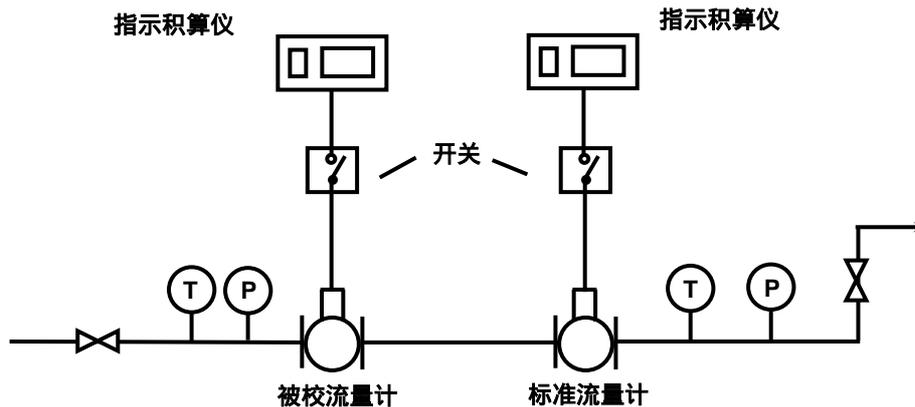


图 3 标准表法现场校验管路连接图

标准表的选择灵活性很大, 主要取决于交工单位和验收单位的资源情况, 在不得已的情况下, 有时也使用精确度达不到规程要求的流量计作标准表。对于液体, 选精度优于 0.2 级涡轮流量计是适宜的, 对于气体, 流量不大时选用煤气表, 流量较大时, 选用临界流流量计。连接管道时, 下面各点应注意。

- a. 保证前后直管段。
- b. 保证管道中充满被测流体。因此, 当被测流体为液体时, 常将管道末端向上翻高, 如图 3 所示。

计算标准流量计测得的体积值, 并进一步计算被校表误差。当被测流体为液体时,

$$V = V_s \cdot C_{t1} \cdot C_{p1} \quad (12)$$

$$C_{t1} = 1 + \beta_1 (t_m - t_s) \quad (13)$$

$$C_{p1} = 1 - F_1 (P_s - P_m) \quad (14)$$

上述各式中:  $V$  —— 标准流量计测得的修正过的体积值,  $\text{m}^3$ ;

$V_s$  —— 标准流量计测得的未经修正的体积值,  $\text{m}^3$ ;

$C_{t1}$ 、 $C_{p1}$  —— 分别为标准流量计处流体分别受温度和压力影响的修正系数;

$\beta_1$ 、 $F_1$  —— 分别为工作液体的体积膨胀系数 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) 和液体压缩系数 ( $\text{Pa}^{-1}$ );

$t_m$ 、 $t_s$  —— 分别为被校流量计和标准流量计处的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$P_m$ 、 $P_s$  —— 分别为被校流量计和标准流量计处的表压力,  $\text{Pa}$

当被测流体为气体时, 情况要复杂一些。因为气体温度膨胀系数大, 又容易被压缩, 当其状态偏离标准状态较远时, 还需进行压缩系数修正。被校表的类型有多种, 标准表的类型也可以有多种, 对于直接式质量流量

计，其示值不受流体状态影响，而其他类型仪表，必须进行流体温度、压力、压缩系数补偿。测压点的位置要求也有很大差异，例如旋涡流量计要求装在流量传感器下游数倍管径的管道上；孔板流量计要求装在节流装置正端取压口处；其他原理流量计，大多数要求装在流量计上游管道上，因此，如何处理被校表和标准表测量数据，应按相应的仪表说明书，得到被校表和标准表的示值后，按式（1）计算被校表误差。

### 2.2.5 用夹装式超声波流量计进行校验

上面所述的三种方法具体实施时，最重要的是注意安全，包括人身安全和生产流程的安全。三种方法都不适用于高温高压流体、易燃易爆流体、强腐蚀流体以及有毒有害流体。至于生产流程的安全，主要是校验时不要影响生产的正常进行，不要对产品产量、质量以及环境造成影响。本节所介绍的用夹装式超声波流量计进行现场校验，在安全方面具有独特的优点。因为超声波探头被夹装在管道外面，对管道内流体的流动毫无影响，因此对生产安全和人身安全无直接影响。

用超声波流量计对流量计进行现场校验，从方法来分类仍属标准流量计法，但是超声波流量计的实际准确度多半达不到规程要求，例如单声道时差法超声波流量计，流速精度为读数值值的 0.5~1%，所以也只能称为比对或验证。

在用超声波流量计对被校流量计进行现场校验时应注意以下各点：

a. 管道中流体的雷诺数  $Re_D$  对超声波流量计的示值有影响，在  $Re_D \geq 5000$  后，仪表才能稳定指示。所以流速太低时，不宜使用。

b. 管道内流体流速分布不均匀，对仪表示值影响较大。如果换能器安装位置上、下游存在弯头、异径管、阀、泵或管道内有阻流物等，流体形成横向二次流，流速分布偏离，在直管段长度不够时，测量精度下降，在有旋涡的情况下甚至不能测量<sup>[7]</sup>。

图 4 所示为上游有 90° 弯管，不同直管段长度的测量误差，共 3 组试验数据。

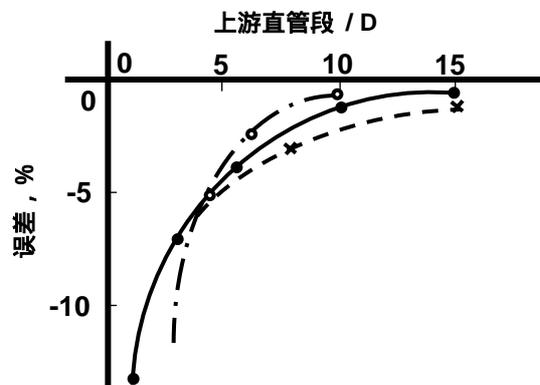


图 4 上游直管段的影响

c. 管道内径和壁厚尺寸必须实际精确测量，不能用名义值代替。据富士电机公司资料介绍，管道内径误差  $\pm 1\%$ ，会引起约  $\pm 3\%$  的流量误差。

d. 注意管道内壁沉积结垢，因为这使得声道偏离原预设的声道，也改变了流通截面积。有的旧管道结垢严重或起皮，以致无法正常测量流量。

e. 换能器安装在水平管道上时，为避开管道顶部可能存在的气隙和底部可能沉积的泥沙或其他固形物，尽可能安装在与水平成  $\pm 45^\circ$  角的位置，如图 5 所示。

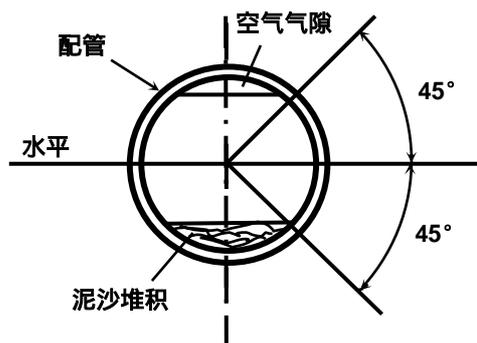


图5 换能器安装位置

f. 换能器不能安装在管道焊缝或法蓝安装处。如图6所示。

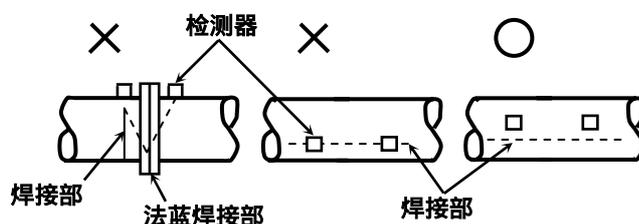


图6 安装避开焊缝和法蓝

g. 保证直管段长度

为了消除流速分布不均匀对示值的影响，各生产厂家都规定了上、下游直管段的下限长度。例如富士电机产品规定上游直管段为  $10D$  以上，下游为  $5D$  以上。如果上游有泵、阀等设备，则要求  $30D$  以上。实际上这一规定只适用于流速在  $2\text{m/s}$  以下的  $90^\circ$  弯管和流体自然流下的场合，如图7所示。如果流速超过  $2\text{m/s}$ ，要求直管段的长度为上述规定的  $1.5\sim 2$  倍。

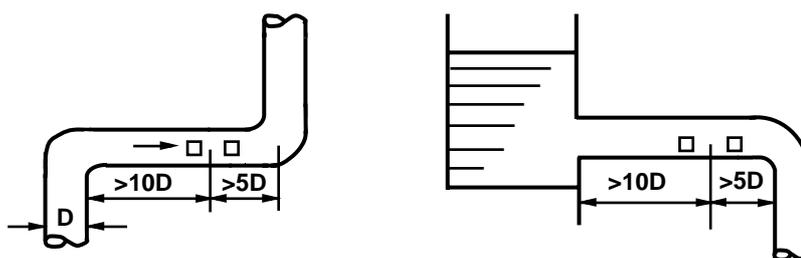


图7 直管段基本要求

### 3. 流量测量系统示值准确性的现场验证

上面所说的容积、称量和标准表三种现场校验的方法，在交工验收时并不经常使用，因为费力费工，十分麻烦，实际交工验收时首先用到的是对各有关流量计的测量结果进行验证，只是在发现较大误差而用其他方法又查不出原因所在时，才对重点怀疑的流量计进行校验。

流量测量系统示值准确性的现场验证经常采用质量平衡法，热量平衡法，设备能力法等。

#### 3.1 质量平衡法

### 3.1.1 一根管道两套表

在生产和经营活动中，一根管道上串联装有两套计量表的情况并不少见。例如：

a. 用于物料交接的一根管道上，交接双方各装一套计量表。

b. 在发电厂，锅炉出口和汽机进口一般都装有蒸汽流量计，在采用一炉对一机运行方式时，也存在一根管道两套表的情况。

c. 在发电厂，汽机背压引出的蒸汽一般都装有流量计，低压蒸汽总管上也装有流量计，在汽机只有一台运行时，总管上的蒸汽流量应与汽机出口流量相等。

一根管道上的两套流量计，一段时间内所计的总量应相等，这是常识。在利用这一关系验证两套表的测量结果时，应注意两套表之间的管路上不应有泄漏，也不应有引入物料或引出物料的支管存在。如果两套流量计相距较远，应注意物料在管道中输送时是否已发生了变化，例如饱和蒸汽在管道中经长距离输送后，其中一部分蒸汽因损失了热量而变成水，如果下游的一台流量计是旋涡流量计，因为它对水不响应，因而导致下游的一套流量计示值明显低于上游的一套流量计。

### 3.1.2 各分表示值之和同总表示值相等

居民家用电度表往往采用大表拖小表的做法，即一幢楼房装有一台总表，楼房中的每个家庭各装一台分表，各分表所计总和，应与总表一致，否则就会有表计不准或偷电之嫌。

在流体计量方面，也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。

平衡差允许值同流体类型和仪表精度等级有关，对于蒸汽来说，如果使用的都是旋涡流量计（1.5级），验收方完全有理由提出平衡差绝对值 $\leq 3\%$ 的要求。各台流量计相对流量较高时，达到这一要求并不困难，但在相对流量较低时，达到这一要求很不容易。

笔者在国内最高的一座大厦内建立蒸汽计量网时，锅炉总共有四台，冬季开其中的三台，总蒸发量  $28 \text{ t/h}$  左右，但到了夏季，整个蒸汽网的消耗量才  $2 \text{ t/h}$ 。如此大的变化范围为流量计提出了非常高的要求。例如有一台分表，管道为  $D_N300$ ，建筑设计院提供的数据是  $20 \text{ t/h}$  蒸汽，于是据此选用了  $D_N200$  旋涡流量计，其最小可测流量为  $2.1 \text{ t/h}$ ，（流体为  $P = 0.87 \text{ MPa}$  饱和蒸汽），仪表投入运行后，冬季最大流量也只有  $4 \text{ t/h}$  多一些，不到设计院所提条件值的四分之一。夏季到来后，该路流量更小，有时甚至低于切除点  $600 \text{ kg/h}$ ，引起分表示值之和比总表示值小  $30\%$  左右，后来业主单位根据实际运行数据对设计条件做了调整，改用  $D_N80$  的旋涡流量计来测量该路流量，使计量精度有了保证，从而使低负荷运行条件下流量计量数据平衡差  $\leq 4\% R$ ，满足了委托方的要求。

### 3.1.3 根据质量平衡关系对计量数据作出判断

质量平衡是自然界的基本法则，在生产过程中也不例外，大到一个生产系统，小到一个生产设备，采出物料总量总是同投入物料总量相等。例如单一进料的精馏塔，顶底出料之和同进料量相等，锅炉发汽流量同锅炉进水流量平衡等等。但在做锅炉汽水平衡计算时，应考虑汽水采样损失、泄漏损失、蒸汽带水损失以及下汽包排污损失。还应考虑汽包压力和水位的变化引入的汽包存水量的变化。为了消除这些因素对平衡计算的影响，一般做法是在测试期间停止排污，流量累积值读数时，汽包压力和水位应在规定范围内。

在根据质量平衡关系对流量计计量数据进行平衡计算时，如果数据平衡差值为零，并不能肯定与平衡计算有关的各台流量计误差为零，但是没有理由说流量计不准，因为计量数据符合质量平衡的规律。

在用质量平衡法对相互有关系的流量计进行验证时，应注意流体状态的变化，有时候就是由于流体状态的差异，引起仪表测量误差，或者流体状态已经有很大变化了，运行人员仍然按照变化之前的数量概念来估算流量值。下面就是这方面的两个实例。

#### 例 1：流体温度变化引起流量测量误差

青岛某厂的一台 220 t / h 锅炉，发汽流量和进水流量均用孔板流量计测量，锅炉长期以来一直满负荷运行，但有一个不解之谜，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。照理说根据差压式流量计测量结果计算出来的平衡差能达到  $\leq 2\%$  已属不易，但运行人员仍不满意。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。于是作者对这两个测量系统方方面面的情况作了较全面的调查。最后，当问及流体实际运行工况同孔板计算书中的设计工况是否偏离时，运行人员解释除氧水温度因故比设计条件低  $50^{\circ}\text{C}$ ，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。

#### 例 2：液体温度升高，体积膨胀，体积流量相应增大。

江苏某化工厂两台  $\text{DN}100$  电磁流量计分别测量两根管道的两种稀酸，汇合后进入总管并由  $\text{DN}200\text{mm}$  电磁流量计计量总流量。使用单位向仪表制造厂反映总表流量为分表流量之和的 120%~130%，认为 3 台仪表均不准确。经现场了解管道压力为  $0.6\text{MPa}$  绝对压力，两分管液体温度为  $30^{\circ}\text{C}$ ，混合液体进入总表前经反应器热交换，温度升高到  $180^{\circ}\text{C}$ 。假定稀酸的温度体积膨胀系数与水相近，从  $30^{\circ}\text{C}$  升高到  $180^{\circ}\text{C}$  体积增加约 12%，可判定总表和分表总和之间读数差主要是液体温度变化所致。此外， $0.6\text{MPa}$  绝对压力  $158.5^{\circ}\text{C}$  水已开始沸腾，流过总表的流体，在液体中夹有部分蒸汽，亦会增加总表体积流量的读数，可认为找到了总表读数多 20%~30% 的原因。

### 3.1.4 用冷凝水量验证蒸汽流量计的准确性

有许多蒸汽用户是取用蒸汽中的热量，此蒸汽经过流量计计量后，送用热设备，蒸汽放出热量后变成质量相等的冷凝水，然后从疏水器排出。将一段时间内的冷凝水收集起来，测量其质量，然后与同一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，但应注意下面两点：

a. 冷凝水在排出疏水器时总要夹带少量的蒸汽，进行总量比较时应予考虑。最好是将疏水器排入装有适量冷水的容器底部，从而使残余的蒸汽全部变成冷凝液，测量之。

b. 如果流经流量计的是饱和蒸汽，必须考虑其中夹带的水滴对平衡计算的影响。现在使用旋涡流量计测量蒸汽流量的方法应用十分普遍，而旋涡流量计对蒸汽中的水滴基本不响应<sup>[8]</sup>，而在疏水器的排出液中却包含了这些水滴，因此，如果蒸汽的湿度为 5%，那么，冷凝水总量比蒸汽流量计所计的总量高 5% 则属正常。困难的是蒸汽的湿度究竟是多少难以测量。只知道在进流量计之前，如果管道上装有疏水器，则可将分层流动的水排放掉，这时蒸汽中的水滴含量约为 0 ~ 5%（质量比）。

## 3.2 热量平衡法

将与被测流量相关联的有关数据代入热量平均方程式，计算出流量理论值，用以验证流量计示值，这是仪表工程师们常用而有效的验证方法。

下面所举的是计算锅炉除氧器蒸汽消耗量的实例。

例：有一台除氧器用  $P = 1.2 \text{ MPa}$ （表压力），温度为  $250^\circ\text{C}$  的蒸汽经减压后对进水进行加热，除氧器进水温度为  $45^\circ\text{C}$ ，出水温度为  $105^\circ\text{C}$ ，在锅炉产汽流量为  $15\text{t/h}$  的条件下，除氧器消耗蒸汽应为多少？

解：设除氧器加热蒸汽流量为  $x$ ，则除氧器进水流量应为  $15 \text{ t/h} - x$ 。从蒸汽的温度和压力参数查表知其比焓为  $2954 \text{ kJ/kg}$ ， $1\text{kg}$  蒸汽变成  $105^\circ\text{C}$  冷凝水放出的热量为  $2514\text{kJ}$ ，则根据热量平衡关系有下面的方程式成立。

单位质量蒸汽放热量  $\times$  蒸汽流量 = 水的比热  $\times$ （出水温度 - 进水温度） $\times$  进水流量

将已知数据代入上式得：

$$2514 \text{ kJ/kg} \cdot X \text{ kg/h} = 4.1868 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C} \cdot \text{kg}} (105^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}) \cdot (15000 \text{ kg/h} - X)$$

则  $x = 1363 \text{ kg/h}$

除氧器顶部排放氧气的时候，还要带走少量蒸汽，排放量以加热耗汽量的  $3\%$  计，则除氧器总汽量应为  $1404\text{kg/h}$ 。

本例计算是建立在除氧器送出的除氧水全部进入锅炉并全部变成蒸汽这一基础上，因此汽水系统不能有泄漏，测试期间不能排污，而且汽水采样损失的水量作忽略不计考虑，如果采样量较大而不容忽略，则应对损耗量作一测试或估算。

### 3.3 设备能力估算法

根据设备能力来估算流量是个“古老”的方法，早在几十年前，煤气公司就用煤气压缩机开机台时作为输送煤气的计量手段，直到有了较先进的煤气流量计的现在，这一方法仍作为监视、核对流量计示值的手段。

运用该方法时，应注意下面各点：

- a. 压缩机出口压力应为规定值，因为出口压力不同，压缩机的内泄量也相应变化。
- b. 设备的效率同其完好状况密切相关，在其完好状况不佳时，输出流量相应减小。

c. 压缩机毕竟不是计量器具，它没有计量准确度的概念，同一种型号同一个规格的压缩机，在规定的条件下考核，排气量也允许有  $-5\% \sim +10\%$  的差异<sup>[9]</sup>。多年来人们沿用这一方法，一是煤气压缩机出现得早，在其投入工业应用时，还没有合用的流量计可选用；二是有“正排量”（positive displacement）的概念，即压缩机每旋转一周或每往复一次，就有固定量的气体被吸入和排出。三是因为出口压力很低，机内泄漏可以忽略，在其他类型的压缩机上，因为出口压力较高，机内泄漏受多种因素影响，仍使用这个方法不够可靠。

将这一方法引伸到泵上，也应区别对待，因为泵的种类很多，对于齿轮泵，属正排量类型，用其铭牌上所标的输送流量数据作参照，意义较大，但应考虑出口压力、流体粘度和齿轮新旧程度对机内泄漏的影响，出口压力越高、流体粘度越小、齿轮磨损越严重，机内泄漏越大。对于离心泵，其铭牌上所标的输送流量数据基本上不能用作验证流量计示值的依据<sup>[10]</sup>。下面的三个例子是仪表制造厂现场服务工程师实际碰到的有代表性实例，都是由验收单位用离心式水泵铭牌数据验证流量计示值，由于对水泵的特性认识不深而引发的误解。

例 1：两合同规格水泵由于实际性能差异引发的误解

某水厂两台同规格水泵输给两条管线，分别装有  $\text{DN}600\text{mm}$  电磁流量计，布置如图 8 所示。该水厂运行人员从泵铭牌上的额定流量来核对仪表读数，称泵 A 通 A 表（即关闭阀 C）仪表误差  $+(10-15)\%$ ，泵 B 通 B 表误差为  $-5\%$ ，认为两台仪表均不准确。仪表厂服务人员即利用装有阀 C 的有利条件，试测泵 A 通 B 表和泵 B 通 A 表的流量，得出与上述相近的数据。两台流量计测出同一台泵的输水量相近，证明除管网负载有些差别

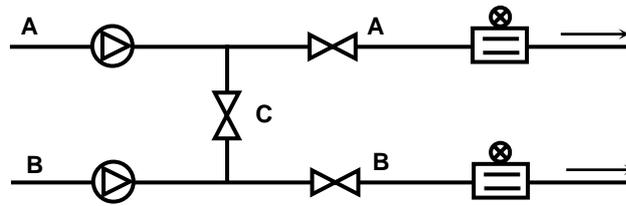


图8 双泵双表交叉测试管线

外，主要是两台水泵性能上的差异。

例2：扬程差别大的泵并联运行误认为流量仪表间相互干扰

吉林某厂用几台泵并联输送液体，每台泵的下游各装有电磁流量计，然后汇集总管输出。各泵单台运行（或其中几台并联）都很正常，但增开某一台泵并入管系，原来运行各泵的仪表指示流量明显减少，甚至出现指示反向流现象。运行人员认为该特定泵所装电磁流量计干扰了其他运行中的仪表。经检查确认为仪表正常，找出产生这一现象的原因是所增开泵的扬程比其他高得多，致使压抑低扬程泵的输出减少甚至倒流。

例3：多合同规格泵并联运行输出量变化的误解

河南洛阳某水厂如图所示 A、B 两泵房，各装有同规格水泵 7 台，各自汇集到 DN700mm 总管输出。总管上各装有一台电磁流量计，在流量计下游两总管接有连通管和闸阀，平时此闸阀全开。试开动两泵房不同台数的泵，得出如表 1 所示流量计上读数。将 A、B 两泵房开泵台数对调，所得读数亦相接近。水厂运行人员认为流量仪表线性不好，低流量时指示偏低，似乎开泵台数增加出水量应按比例地增加。实际不然，这是一种误解，在表 1 所列的数据中，除了试验序号 4 中 B 泵房开了一台泵而流量计读数却为零一项，可能是由该台泵存在问题而引起，其余各项数据同预计的一致，都是由于对离心式水泵输出特性认识有出入而引起的，其实，离心式水泵的输出流量同其出口压力有对应关系，出口压力越低，输出流量越大，反之则小。多台离心式水泵并联运行时，瞬间停掉其中的一台泵，则继续运行的各台泵出口压力下降，输出流量增大。关于此问题，文献 10 用图解法作了详细分析。

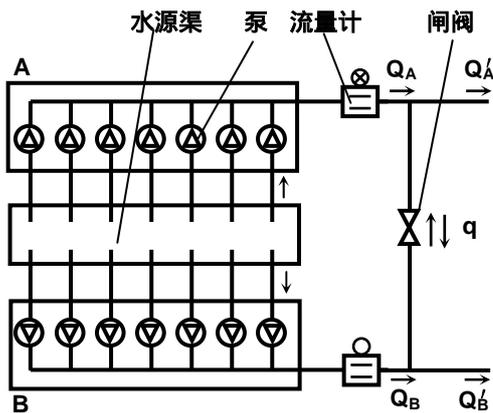


图9 泵并联运行例

表1 泵并联运行试验数据

试验序号	A 泵房		B 泵房		合计	
	开泵台数	流量计读数 / (m <sup>3</sup> /h)	开泵台数	流量计读数 / (m <sup>3</sup> /h)	开泵总台数	总流量 / (m <sup>3</sup> /h)
1	4	1800	4	1750	8	3550
2	4	1900	3	1150	7	3050
3	4	2000	2	750	6	2750
4	5	2050	1	0	6	2050

除了压缩机和泵之外还有很多设备，其铭牌数据在验证流量计示值时可作参考，在这方面，工艺工程师和设备工程师的知识比仪表人员丰富，在利用这些数据时，应共同讨论。

#### 4. 结束语

- a. 对流量测量系统示值准确性进行现场验证是一项十分细致的工作。它是用系统的方法对已经装设的流

量测量系统是否准确可靠并满足使用要求进行的验证。在设计条件确定、仪表选型及工程设计、仪表制造及安装、开表投运及系统调试中的每一个环节，都会导致合格仪表得不到满意的数据。

b. 验证的方法很多，在使用实流校验法时，应特别注意安全。在使用有关数据进行验证时，需要细心周到，不要遗漏重要因素。丰富的生产流程知识和设备方面的知识将会助您顺利地完成任务。

c. 交工验收的实践表明，供应商或承包商在承担交钥匙工程时，如果必须对流量测量系统能够达到的准确度做承诺，适宜的做法是分段承诺，即开表后流量值落在自控条件表所提范围之内，则仪表测量系统能够达到较高准确度；如果超出自控条件表所提范围，则承诺的准确度相应降低。以免交工验收时发生不愉快的事情。

## 参考文献

1. JJF 1001 – 1998 通用计量术语及定义
2. 上海市计量测试学会管理专业委员会. 计量辞典. 上海: 学林出版社, 1986
3. GB/T 6583-1994 质量管理和质量保证 术语
4. 张学巍. 涡街流量计输入电路的设计. 自动化仪表, 1998,7(6)
5. 朱德祥等. 流量仪表原理和应用. 上海: 华东化学学院出版社, 1992
6. JJG 235-90 椭圆齿轮流量计检定规程
7. 强发红. 毛协柱. 时差法超声波流量计的应用技术. 石油化工自动化. 2001.(1):60-62
8. 纪纲. 流体相变及其对流量测量的影响. 医药工程设计, 2001 (1)
9. ISO 1217 – 1986 容积式压缩机验收试验
10. 蔡武昌等. 流量测量方法和仪表的选用. 北京: 化学工业出版社, 2001