

微小流量测量准确度的现场校准与验证

王增根 江苏阿尔法药业有限公司（江苏宿迁 223800）

路超，陈志成 江苏福瑞康泰药业有限公司（江苏宿迁 223800）

纪波峰 上海同欣自动化仪表有限公司（上海 200070）

摘要：测量微小流量的流量计在很多行业得到广泛应用。如果某一台计量计的示值准确度受到怀疑，就有必要用简单易行的方法对流量计进行现场校准、比对，以消除疑虑。对特别重要的测量点，则在正式投运前就需进行这样的校准、比对。介质为液体时，宜将液体从放净阀导出，并用容器收集称重。当介质为蒸汽时，宜将导出的蒸汽先变成凝结水，然后称重。当介质为气体时，宜用皂膜流量计、湿式气体流量计等进行在线实时校准、比对。在作零位校验时，应排除小信号切除的干扰。文中还提出了保证校准品质的措施。对于不宜作现场校准的测量点，则可用基于质量守恒定律的方法等作现场验证。

关键词：微小流量 示值准确度 现场校准 比对 验证 质量守恒定律

On-site calibration and verification of the accuracy of small flow measurement

Abstracts: Flow meters for measuring small flow are widely used in industries. If the accuracy of the meter is doubted, it is necessary to use a simple and easy method to calibrate and compare the flowmeter on site, to dispel doubts. For particularly important measurement points, such calibration and comparison are required before the formal operation. If medium is liquid, the liquid should be taken out from the drain valve and collected and weighed in a container. If medium is steam, it is suitable to turn the exported steam into condensate first, and then weigh it. If medium is gas, soap film flowmeter, wet gas flowmeter, etc. should be used for real-time calibration and comparison. When doing zero calibration, the interference of low signal cut should be excluded. The article also proposes measures to ensure the quality of calibration. For measurement points that are not suitable for on-site calibration, methods based on the law of conservation of mass can be used for on-site verification.

Key Words: small flow indication accuracy on-site calibration comparison verification conservation of mass

1. 引言

内藏孔板流量计、小孔板流量计，以其显著的特点使其在制药等精细化工行业、化工小试验装置以及轻工行业的添加剂流量测量中，得到广泛应用。是标准孔板流量计往微小流量方向的延伸。

但因其测量准确度不是由国际标准或国家标准保证的^{[1][2]}，所以初次使用者往往有些不够放心。好在这种流量计的实测流量一般都很小，可以根据工艺流程的特点，例如用流程中的切断阀、放净阀或自控专业预设的校验口，实现测量示值准确度的现场校准。

这种校准的结果因为已包含流体密度、粘度、等熵指数等物性与设计计算时的偏离，也包含了温度、压力等工况参数的偏离的影响。还包含了使用环境偏离参比条件的影响，以及安装情况对测量误差的影响，所校准得到的结果更具有实际意义。

2. 微小流量的验证

2.1 流量测量结果验证的难点

在化工、石化等生产过程中，安装有大量的过程变量测量仪表，其中温度、压力、流量、液位测量仪表数量巨大，种类也极其繁多。但是它们却有一个共同的特点，就是测量结果的使用者对仪表示值准确度产生怀疑时，都要想尽办法予以验证，搞清楚关键仪表的测量结果究竟是否准确。所以验证问题不只存在于流量之中，在温度，压力、液位的测量中，同样存在，只是流量之

外的要容易和简单得多。例如温度测量，对于特别重要的测量点，常选用双支铂热电阻、双支热电偶，或在温度传感器旁边，开设一个可以插入标准水银温度计的校验口，增加的投资也微不足道。再比如压力测量，在压力变送器附近增设一个弹簧管压力表用于对照，也只需举手之劳。而液位测量结果的校对也不困难，因为大多数配有液位测量仪表的设备上，大多同时配有玻璃管液位计、玻璃板液位计或其他原理的液位计。例如在工业锅炉汽包液位的测量中，一般都装有 3~4 套不同原理的液位测量手段，以便相互对照，确保安全。与此相似的例子在流量测量中的是不多见的。

图 1 所示是冗余设置的双检测器涡街流量传感器^[3]。美国洛克威尔公司有一项科研成果，即一台涡轮流量计中配有两个倾角不同的涡轮，其中倾角大的涡轮转速高，准确度高，但寿命短，而倾角小的一个涡轮恰巧相反，取其寿命长的优点作为判断主涡轮失准的手段。两个涡轮的电磁检测器输出的频率保持一定的比例，并由微电子电路判断，一旦频率差超过设定的区间，即判主涡轮失准，发出报警信号。

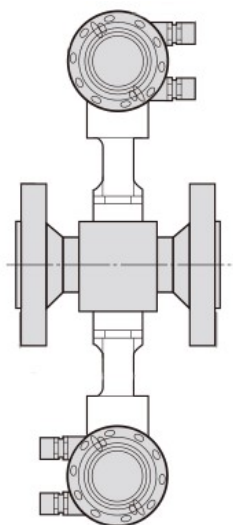


图 1 科隆 4070F 双测量系统

在大型发电机组的配套锅炉上，进水流量是一个关键参数，往往一副差压孔板上配有三对取压口和相互独立的三台差压变送器，其中一台用于控制，一台用于计量，而连锁输出则由三台变送器按三取二表决结果决定，从而确保安全^[4]。

用这种多重冗余并用三比二表决的方法确保流量测量结果安全可靠的作法，在大型石化装置中也经常采用。但要付出相应的代价。

2.2 流量测量结果准确性验证的一般方法

在文献[5]中，阐述了这种验证的常用方法：

- ① 基于质量守恒定律的方法；
- ② 基于热量平衡关系的方法^[6]；
- ③ 基于设备能力估算的方法^[7]。

其中方法①用得最多。在文献[8]中列举了 9 个实际例子。例如用于贸易交接计量的表计，大多采用一根管道两套表的配置，其中上游表计归供方所有，下游表计归需方所有^[9]。

在油库的油品发货计量站，若干台发货用的流量计定期用准确度足够高的基地式标准流量计校准。在天然气长输管网的计量站场，也普遍采用一台标准流量计对若干台发货计量表计，经阀门切换的方法实现就地校准。这种仪表配置方法在贸易交接中广泛应用，但在过程控制中却极少采用，原因之一是投资太高，其次是对准确度的要求也没有那么高。而是采用经济而且简单易行的方法。例如各分表流量示值之和与总表相等的关系。锅炉发汽流量应等于进水流量与排污流量之差的关系。经蒸汽流量计计量的蒸汽，全部凝结后应得到质量相等的凝结水的关系。在用流量批量控制仪定量装车的流程中，装车完毕，一般均需地中衡复测，这也是一个计量准确度验证的

过程。便携式超声流量计在液体流量测量的比对和维修中，扮演着重要角色。这种流量计准确度不够高，谈不上校准，但如果被怀疑的流量计的误差较大，用它来比对，还是能够做出结论的。

3. 微小流量测量仪表的现场校准

微小流量测量仪表的准确度校准、验证的特点在于“微小”，像 1~10kg/h 测量范围的内藏孔板流量计^[10]，只要一个量筒就能实现验证。一支微型浮子式气体流量计，用几十元钱一支的皂膜流量计就能实现校准。而适用于大流量测量仪表验证的方法或设备，在微小流量中，有时却不合用。

3.1 液体微小流量测量仪表的现场验证

液体微小流量测量仪表的准确度大多可用称重法进行验证。典型的例子如图 2 所示。

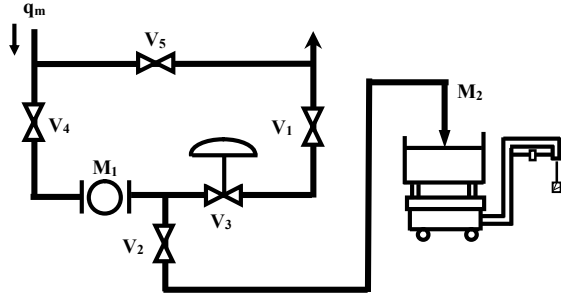


图 2 称量法现场校验管路连接图

有时流量计并不安装在调节回路中，这时就需在流量计下游管道上找到切断阀和放净阀或专门设置的校验口，如图 3 所示。

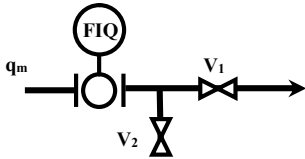


图 3 流量计下游的切断阀放净阀

在图 3 中，将切断阀 V_1 关断，就可对流量计零位进行检查，打开放净阀 V_2 就可将液体导出放入容器称重。通常可改变 V_2 开度使 FIQ 的瞬时流量 q_m 为常用值，并经软管导入容器，而且要注意软管中液体滞留量对校准、比对结果的影响。

用这种方法实施校准、比对，不仅适用于内藏孔板流量计、小孔板流量计，也适用于微小口径电磁流量计、涡轮流量计及浮子流量计等。

3.2 流量零位的检查与校验

关断切断阀对流量零位示值进行检查和校验是流量示值验证的首要任务。这是因为流量计零位如果不准，将对量程范围内的各点示值都产生影响。在作零位检查和校验时应注意以下事项。

① 确认测量管内的流体已停止流动，而且仪表处于正常测量状态。当然确保安全万无一失是首要的。

② 排除小信号切除对校零工作的干扰。

在模拟输出的流量计中，一般均有小信号切除功能。这是因为模拟电路总会有一定幅值的漂移。这种漂移往往导致实际上流体已停止流动，仪表却有微小流量指示，为了避免这种令人不快的事情出现，于是就设计了小信号切除功能^[11]，例如电磁流量计，一般取满量程流量的 2% 为切除点，即在实际流量小于 2%FS 时，仪表统统显示零流量。于是问题得到解决。但是又产生新的问题，即在实际流量小于 2%FS 甚至存在反向流动时，仪表一概显示零流量，从而产生一个假象。所以在校零时，应将小信号切除功能暂时撤销。

差压式流量计都避不开开平方运算这一环节。这一运算人们喜欢交由差压变送器去完成。这

样，相对流量较小时能获得较大的电流输出，从而使得将差压信号传送到后续仪表必不可少的 D/A 转换和 A/D 转换引入的误差予以削弱。

在差压式流量计中，小信号切除的作用更加突出，因为开平方运算的关系，使得流量在零点附近，运算模块具有非常大的增益。例如差压有 +0.04%FS 的漂移，开平方之后就有 2%FS 的输出。所以小流量信号切除点一般定得比较高。横河公司的 EJA110E 型差压变送器出厂设置定在满量程差压的 1%，对应满量程流量的 10%。这样一来使流量显示的死区变得更大。如果小信号切除模式指定为“切到 0”，则流量小于 10.0%FS 的所有各点，仪表都显示零。以至在调零操作时，外部调零螺钉顺时针或反时针旋转很多圈，输出都无动于衷。好在横河公司设计了一个“切到线性”的功能，从而使死区不死，即流量小于指定值后，输出与输入之间呈线性关系，甚至在差压为负值时，仍有对应的变化值，从而使调整更方便。这样信号切除的关系如图 4 所示。

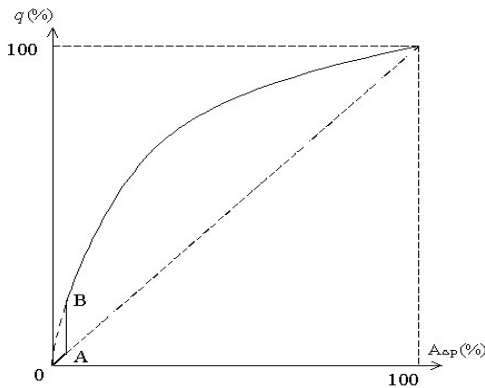


图 4 小信号切除的模式

③ 流量零点与差压零点的差异

差压式流量计在做校零操作时，习惯性动作是将三阀组中的负压阀关闭，然后打开平衡阀，如果变送器输出不为 4mA，则作相应调整。调校完毕将流量计投入运行，这时如果将与流量计串联的切断阀关断，流体停止流动，有时会发现流量示值并不为零，甚至会有负的差压显示。这多半是因仪表的安装有缺陷，流动虽已停止，节流件前后差压已为零，但因差压信号传递失真，使得变送器接收到的差压信号并不为零。因此，差压变送器零点准确并不等于流量零点准确。需要在变送器完成校零后，关断切断阀，流量示值仍为零。因此需排除安装缺陷。

3.3 流量示值现场验证的操作

流量计示值准确性的验证，由于现场条件所限，一般不能采取实验室校准所用的方法。按照计量检定规程，流量计在作实流校准时，在规定的时间内，同时读取被校表示值和标准表示值 N 次，然后取平均值并计算该校验点本次校验示值误差。

$$E_i = \frac{q_{mi} - q_{si}}{q_{si}} \quad (1)$$

式中 E_i —— 示值误差，%；

q_{mi} —— 被校表示值，kg/h；

q_{si} —— 标准表示值，kg/h。

一个校验点相同的校验进行三次，得到三个误差值，然后计算该校验点平均误差和重复性。

现场校准所用的方法，从原理来看与式（1）是相同的，但操作方法有明显的差异。现场校准、比对中，式（1）中的 q_{mi} 用累积值的增量 Q_m 代替， q_{si} 用称量结果代替，校准点为常用流量。因此要简单得多。

3.4 精馏塔各路流量的验证

液相进料顶底采出的精馏塔在制药厂用得很多，而且多配有流量计，由于精馏塔塔顶采出量 D、塔底采出量 B 与进料量 F 之间有下面的关系

$$F = D+B \quad (2)$$

所以可用这个关系对相关的三路流量进行分析判断。

3.5 气体微小流量测量仪表的现场验证

气体微小流量测量仪表的现场校准、比对，同液体流量计不同，因为从流程中导出的气体无法被收集并用称重的方法得到其质量，只能用另一台流量计对其进行测量。

在石化、化工行业的分析室，分析人员用皂膜流量计对气相色谱仪上的微型浮子流量计进行标定。类似的情况，这种标准流量计也可用来对流程中的微小气体流量计进行校准，在这种流量计中，不同规格的玻璃管对应的流量范围也不同，最大可测量 60L/min 的流量，准确度可达 1.0%，其外形如图 5 所示。



图 5 智能皂膜流量计外形

湿式气体流量计是一种典型的容积式流量计，不确定度可达 0.5%，也适合作为标准器，流量测量上限可达 3000L/h，其工作原理如图 6 所示。

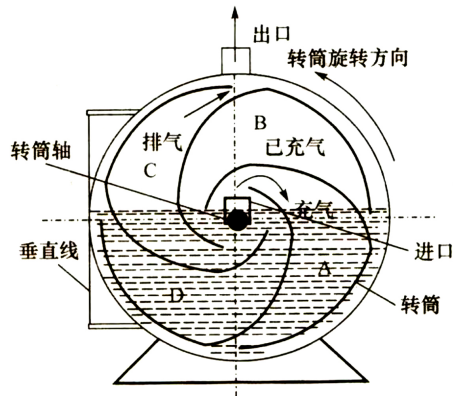


图 6 湿式气体流量计工作原理

上述两种可作标准表使用的气体流量计，显示的都是当时当地大气压力条件下当时气体温度条件下的体积流量，如果要得到标准状态体积流量，则需用式 (3) 进行换算。

$$Q_n = \frac{P_A \times 293.16}{101.325 \times (t_f + 273.16)} Q_f \quad (3)$$

式中 Q_n —— 标准状态体积流量 Nm^3 ;

P_A —— 当前大气压, kPa A;

T_f —— 气体温度, $^{\circ}\text{C}$;

Q_f —— 未经补偿的体积流量, m^3 。

如果要得到质量流量，则需再乘上气体的标准状态密度 ρ_n 。

当需要校准的流量值更大时,则可选用玻璃浮子流量计,只是准确度较低,只能用作比对。

有些被校对象气体静压较高,而且现场有容积已知的容器,也可应用 PVTt 法实现校准、比对或验证^[8]。

3.6 蒸汽微小流量测量仪表的现场验证

上述用于验证气体流量计的三种标准表都不适合测量蒸汽流量,但仍可用称重法予以校准,例如从校验口导出的微小流量蒸汽,可以经软管送到装有冰屑与水的混合物的容器底部,将其变成凝结水,然后称重,再计算示值误差。

3.7 保证校准品质的措施

① 被校表所给出的累积流量应具有足够高的分辨力,参与计算误差的流量示值有效数应在 4~5 位之间。合理设置流量计的积算速率,就能满足这一要求。

② 收集导出液的容器应足够大,每次测量时间一般不短于 1 分钟。

③ 称重用的衡器,准确度应足够高。

4 结束语

① 在很多行业使用着大量测量微小流量的流量计。如果某一台流量计的示值准确度受到怀疑,就有必要用简单易行的方法对其进行校准、比对,或通过质量守恒关系进行验证,以消除疑虑。

所用的标准器测量结果的不确定度不大于被校流量计最大允许误差绝对值 1/3 时,称为校准,否则只能称比对。在不用标准器时,属于验证。

② 测量液体微小流量的流量计,宜利用现场的切断阀、放净阀,将液体导出、收集、称重,然后计算误差。

③ 测量气体微小流量的流量计,宜采用皂膜流量计、湿式气体流量计等作标准,进行在线实时校准或比对。

④ 测量蒸汽微小流量的流量计,宜将蒸汽从校验口导出,经软管送到装有冰屑与水的混合物的容器底部,将其变成凝结水,然后称重用于误差计算。

⑤ 这种现场校准、比对得到的结果不仅包含器具本身的误差,而且包含流体密度、粘度、等熵指数等物性数据与设计计算的偏离引入的影响,温度、压力等工况参数偏离所产生的影响。还包含了安装情况对测量误差的影响以及使用环境偏离参比条件的影响,所以,校准、比对、验证的结果更具有实际意义。

上述校准方法符合有关计量检定规程^[12],并在现场应用中获得良好效果。

参考文献

1. ISO. ISO 5167-2: 2003 (E) Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full[S]. Switzerland: ISO, 2003.
2. 上海工业自动化仪表研究所. GB/T 2624-2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
3. 杨卫东, 纪波峰, 纪纲. 蒸汽关口计量表的设计选型. 石油化工自动化. 2021, 57(6): 70~74.
4. 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.
5. 王建忠, 纪纲. 流量计示值准确性的现场验证及其解决方案. 石油化工自动化. 2003(6): 52~56
6. 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
7. 蔡武昌. 流量仪表的现场校准和验证. 第六届工业仪表与自动化学术会议论文集. 上海: 2005
8. 刘政利, 纪波峰, 纪纲. 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. 化工与医药工程. 2019: 4.

11~17

9. 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
10. 路超, 陈志成, 王增根, 纪波峰. 内藏孔板和小孔板流量计的实践. 化工与医药工程.
11. 刘政利, 纪纲. 流量计小信号切除的最优化. 自动化仪表, 2007, 28(10): 51~54
12. JJG1030-2007. 超声流量计计量检定规程.

(本文源自《化工与医药工程》2022 年第 4 期)