

蒸汽关口表的设计选型和准确度验证

杨卫东 中国石油化工股份有限公司齐鲁分公司（山东淄博 255400）

纪波峰，纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司（上海 200070）

摘要：在蒸汽供热网中，关口蒸汽表具有重要意义。它是计量管理、生产调度管理、企业经营管理以及设备管理的基础。关口计量表设计选型需满足流量测量准确度要求，范围度要求，介质高温高压要求，可靠性要求，计量检定要求以及管径大等要求。文中比较了涡街流量计和标准差压流量计在满足这些要求中，各自的优势和局限性。还叙述了流量测量准确性的现场验证实例。

关键词：蒸汽供热网 关口蒸汽表 准确度 范围度 可靠性 计量检定 准确性验证

1. 前言

① 蒸汽在热能传输中的地位

蒸汽是最重要的二次能源。在工业生产和人民生活等各个方面应用极其广泛。在蒸汽供热网中热源厂以蒸汽为热媒，依靠蒸汽自身的压力，经管道将热能输送到用户处，无需另增机泵，既环保又方便。

在蒸汽供热网中，管网始端总是装有用以计量的蒸汽总表，该仪表是蒸汽供热网计量管理、生产调度管理、企业经营管理以及设备管理的基础，在供热网中具有极其重要的作用。

② 关口蒸汽测量系统设计选型的意义

蒸汽流量测量系统的设计选型，自控设计人员一般都不陌生。这是因为蒸汽作为二次能源，不仅在供热行业，而且在石油、石化、化工、钢铁、纺织、轻工等行业，使用得也极其普遍。但在为数众多的蒸汽流量计中，用作关口表的蒸汽流量计，具有特殊的意义。作为关口表使用的蒸汽流量计，除了须具备普通蒸汽流量计必须具备的一般性能之外，还须满足关口表必须满足的特殊要求。这是由关口蒸汽流量测量系统的特殊性所决定的。

③ 关口蒸汽表的含义

关口表是一种俗称，这是从天然气供气系统中借用过来的。在天然气供气系统中，考虑燃气分配、调节和交接的需要，总是要配备一定数量的门站。该门站用于气体计量的流量测量系统，俗称关口表。

关口表通常设置在热源厂（或发电厂）与热力公司之间，通常用于贸易交接；由于管径大，所以经此表计量结果所计的费用，金额巨大。在一个大型石化、化工、钢铁企业，通常都有自备电厂，自备电厂经管道向各分厂供汽，在交接点也都少不了流量计量表计，这种情况虽有别于电厂向热力公司供汽，但这种场合所配置的蒸汽计量系统，与门站具有相同或相似的特点，所以本文中，也作为关口流量计讨论。

2. 关口蒸汽流量测量系统的特殊性

关口蒸汽流量测量系统具有其固有的特殊性。如果不注意这些特殊性，将其视作普通流量测量系统，直到系统投入运行后才发现考虑不周，造成缺憾。有的缺憾虽可在若干年后找到机会亡羊补牢，花钱整改，但有一些内容则是后悔已晚。

（1）管径大 牵涉到的金额大

关口蒸汽表一般管径都很大，经此表计所计的费用，数字巨大，往往等于整个热网的全部或很大一部分，所以对整个热网的经济效益及技术经济指标起着重要作用。因此得到供需双方的特别关注。为了维护供需双方的利益，做到绝对放心，大多数关口计量表都是供需双方各装一套，并在双

方协议中确定以某一套计量结果作为结算依据，另一套作为监督手段。

（2）可靠性要求特别高

关口流量计设置在供汽总管上。经此流量计计量的蒸汽，供整个热网使用。而一个热网的用户可能多达几十个、几百个。在整个供热网上大量的蒸汽计量表中，如果某一台分表发生故障，必须停汽才能修复，则可利用设备定期检修或计划停车、临时停车的机会予以解决。但是作为一台关口总表，如果将总阀关闭，就会影响一大片的热网用户供汽。因此，作为关口总表，即使做不到万无一失，起码也要做到在不关总阀的前提下，仍能排除故障。

（3）流量测量准确度的要求

GB17167-2006《能源计量器具配备和管理通则》规定了能源计量器具的准确度要求。对于蒸汽流量测量系统，要求做到 2.5 级，其实这是最低要求。如果只能做到 $\pm 2.5\%$ 的准确度，供需双方都不会满意。从当前流量测量技术所能达到的水平来说，也能将准确度做得更高^{[1][2]}。

在表述流量测量准确度这一技术指标时，离不开范围度这一指标。因为同一套流量计用来测量蒸汽流量，如果要求的范围度小，则能得到较高的准确度；而如果要求的范围度大，只能得到较低的准确度。所以在对流量测量准确度提要求时，应对范围度也提出相应的要求。

这里所说的范围度以前也称量程比(rangeability)。但是后来国际标准化组织将 rangeability 这个词作了重新定义，所以现在如果仍然用量程比这个词，那么在括号中就没有合适的英文可对应了。

国际标准化组织(ISO)于 1998 年颁发国际标准 ISO 11631《流体流量测量—规定流量仪表性能的方法》，对范围度作了重新定义^[3]。

① 范围度(turn down, turn down ratio)是测量范围的最大流量被最小流量除的值。

② 上限(值)范围度(rangeability)是“范围最大上限值”与“最小上限值”间的比。

重新定义适应了流量测量技术发展的需要。范围度也称量程比，老式的流量计只有一档量程，以前用英文 rangeability 并无歧意，但现在有很多流量计，测量范围可以根据使用需要设定，于是重新定义的术语 rangeability 定义为测量上限可调比。

（4）介质压力和温度等级范围宽广

不同的热用户对蒸汽的压力和温度等级的要求各不相同。这是由他们的工艺过程、设备条件千差万别所决定的。压力等级有低压、中压、高压；温度有一百多度到四五百度。供方所供蒸汽的品质，最低压力不能低于需方所要求的最低压力。最低温度不能低于需方所要求的最低温度。

（5）流量计的可靠性要求高

关口蒸汽表是蒸汽供热网中最重要的计量表计。要求其具有高度的可靠性。这是因为它一旦损坏或发生故障，就要影响整个管网的计量。一旦发生故障要求做到不停汽修复。这是因为总表下游有众多的用户所对应的分表，一旦停汽必将对众多用户造成影响，带来一定的经济损失。严重的情况下甚至引发事故。

（6）流量计需经计量检定合格取得证书

关口蒸汽表绝大多数用于贸易交接，因此需按国家的相关规定实行计量检定，或供需双方约定进行计量校准(calibration)。只有检定(校准)合格才能用于贸易交接。不仅要满足首检的需要，而且要满足周期检定的需要。

有很多关口计量点，供需双方各装有一套表，而且两套表均经检定合格。但两套流量计安装投运后，计量结果却有较大差异。这时，就得进行具体分析，如果误差在允许范围之内，则可通过。如果大于允许范围，则应由工程项目的总包单位负责查找原因，直至问题得到解决。

（7）经济性原则

关口蒸汽表由于管径较大，所以投资相应较大。业主单位追求的首先是安全、准确、可靠。在满足这些要求的基础上，能省则省。大多数业主单位对关口表的投资并不过份计较。

3. 关口蒸汽流量测量系统设计与选型

(1) 蒸汽流量计的一般选型

可以测量蒸汽质量流量的流量计有几十种，例如标准差压流量计、非标差压流量计、涡街流量计、均速管流量计、超声流量计、科氏力质量流量计等。每一种流量计都有其一定的优势，满足特定的测量需求。但同时也存在一定的局限性，因此在根据测量任务的需要和具体特点作设计选型时，在多种流量计中，没有最好，只有最适合。设计人员应根据测量任务的具体要求和特点，选择最适合的流量计。

例如过程控制中用于一般监视的流量计，如果公称通径很大，选用均速管流量计，往往可以节省不少投资。因为此类用途的流量计，准确度要求不高，一般也不要求周期检定。但是用作计量交接的关口表，准确度要求和便于周期检定就成为主要矛盾，如果为了节省一些设备费，而牺牲准确度或使检定成本大幅增加，那就有点本末倒置了。

可以用来测量蒸汽流量的流量计虽有几十种，但用作贸易交接这一特定用途，在几十年的实践中，人们基本达成共识，即差压式流量计和涡街流量计，各种不同通径的蒸汽流量计中，大约平分秋色。而且具有鲜明的行业特点。例如在石化行业和电力行业，普遍采用的是标准差压流量计，对于关口蒸汽表来说更是如此。

下面拟就涡街流量计和差压流量计用作关口蒸汽计量的设计选型作一比较，以便针对计量对象的具体要求和实际条件做合理选型。

(2) 仪表准确度的比较

① 涡街表的范围度与准确度

涡街流量传感器具有范围度宽的特点。在用来测量蒸汽流量时，有的公司声称范围度可以做到 40 倍，但对其所提供的资料进行具体分析时，也只有一部分中小通径的仪表，在流体压力较高时，理论范围度能够达到 40 倍^{[4][5]}，而作为关口蒸汽表使用的大通径仪表，范围度要比 40 小得多。例如 DY300 型 DN300 涡街流量传感器，在用来测量 P=1.0MPa G 饱和蒸汽时，理论范围度为 24 倍。表 1 所示为不同通径的 DY 型涡街流量传感器，在不同压力条件下，能够获得的理论范围度。

表 1 DY 型涡街表测量饱和蒸汽时的理论范围度

通径	理 论 范 围 度									
	0.1 MPa	0.2 MPa	0.4 MPa	0.6 MPa	0.8 MPa	1 MPa	1.5 MPa	2 MPa	2.5 MPa	3 MPa
15mm	10 (5)	11 (7)	15 (11)	17 (15)	19 (18)	21	25	27	27	27
25mm	13 (9)	15 (12)	20	23	26	28	34	38	37	40
40mm	15 (14)	18	23	27	31	34	40	40	40	40
50mm	15	18	23	27	31	34	40	40	40	40
80mm	15	18	23	28	31	34	40	40	40	40
100mm	15	18	23	27	31	34	40	40	40	40
150mm	15	18	23	27	27	27	27	27	27	27
200mm	13	15	20	23	26	27	27	27	27	27
250mm	11	13	17	20	22	24	27	27	27	27
300mm	11	13	17	20	22	24	27	27	27	27
400mm	10	12	15	17	19	20	20	20	20	20

所谓理论范围度就是保证准确度的最高流速与最低流速之比。对于 DY 型仪表，制造厂承诺的

最高流速为 80m/s，对于范围度为 24 的规格，最低流速则为 3.33m/s，当 $V < 3.33\text{m/s}$ 时，因为雷诺数太低而准确度不能保证，当 $V > 80\text{m/s}$ 时，则因超流速引起的“漏脉冲”现象，将使仪表示值严重偏低在^[5]。

在设计选型中，还要注意能得到的实际范围度与理论范围度的关系。

如前所述，对于 DY 系列涡街表而言，理论范围度是以最高流速 80m/s 为基础的，如果安装某台涡街表的具体测量点介质最高流速只有 40m/s，在上面的例子中，能获得的实际范围度就只有 12，在蒸汽供热网的设计规范中，低压蒸汽管的推荐流速如下：

DN>200 管过热蒸汽流速：80m/s；

DN>200 管饱和蒸汽流速：60m/s。

具体设计时，往往考虑扩产因素等，实际选用的流速要比上述流速低一些。而且太高的流速在切断阀等管件处，将会产生很强的噪声，也污染环境，不受欢迎。

为了提高实际范围度，应改变根据管道通径选定涡街表的方法，采用根据最大流量选定涡街表的方法。

设计举例：有一 DN400 蒸汽总管，工艺设计参数为 $P = 1.0\text{MPa G}$ ， $q_{\text{max}} = 90\text{ t/h}$ 饱和蒸汽，根据制造厂产品样本数据选 DY300，保证准确度的流量范围：4012~97367 kg/h，实际范围度 $R = 90000 \div 4012 = 22$ 。但是如果选 DY400，因保证准确度的最小流量增大为 8002 kg/h，所以范围度减为 11。

不同品牌的涡街表，其理论范围度各不相同^[5]，有的品牌涡街表技术比较落后，测量管内流速大于 40m/s，示值就会因“漏脉冲”而严重偏低^{[5][6]}，所以设计选型前应做充分的调查研究工作。

实践证明，对于理论范围度大的涡街表，按照最大流量选定仪表通径，一般可使仪表通径比管道通径小一档，这样，不仅可提高实际范围度，而且可以节省一笔可观的投资。

关于涡街流量传感器的准确度，横河公司的 DY 型，为液体和气体、蒸汽规定了不同的指标。

测量液体流量：±0.75% R；

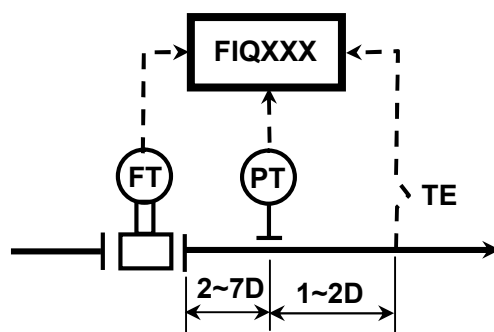
测量气体、蒸汽流量：±1.0% R ($V \leq 35\text{ m/s}$)；

±1.5% R ($V > 35\text{ m/s}$)

测量气体和蒸汽流量时能够得到的准确度，比测量液体时要低一些的原因是，测量气体和蒸汽时，存在气体可膨胀性影响^[7]，而测量液体时，由于液体是不可压缩流体，所以不存在气体膨胀性影响。

早期的涡街流量计，制造厂都是说其流量系数不受流体的温度、压力、密度、粘度等物性的影响，只要雷诺数在规定的范围之内，用液体标定得到的流量系数完全适用于蒸汽。所以有的品牌的涡街表，只给出一个准确度指标，例如 ±1.0% R，有的甚至是 ±0.5% R，实际上测量气体和蒸汽时，是做不到的。这一点在设计选型时应当注意。

在以涡街流量传感器为核心组成的蒸汽流量测量系统中，还需配置蒸汽密度测量手段和流量演算器，系统的组成如图 1 所示。这几个部分大约引入 0.3% 的不确定度。



FT— 涡街流量计；PT— 压力变送器；TE— 温度传感器；FIQ— 流量演算器（积算仪）

图 1 涡街流量计系统图

② 差压流量计的范围度与准确度

差压式流量计的种类很多。下面以历史最悠久，使用最广泛，研究最深入，积累的资料最丰富的标准差压流量计为例，进行分析比较，以求抛砖引玉之效。

差压式流量计由差压装置、差压变送器、流量演算器和其他辅助装置组成，ISO 5167 标准中所列的标准差压装置有

- a. 标准孔板；
- b. 喷嘴，包括 ISA1932 喷嘴和长径喷嘴；
- c. 文丘里管。

这几种差压装置各有各的优点，在关口蒸汽流量测量中都是不可或缺的。其中标准孔板的不确定度最优，可达 0.5%；ISA1932 喷嘴可达 0.8%；长径喷嘴为 2.0%；而文丘里管随收缩段加工方法的不同，不确定度有 0.75%、1.0%和 1.5%三种^{[8][9]}。

用标准差压流量计测量蒸汽质量流量时，流量系统不确定度不仅取决于差压装置不确定度，还取决于另外 5 个因子，即

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left[\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \rho_1}{\rho_1} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

式中： $\frac{\delta q_m}{q_m}$ —— 流量测量不确定度；

$\frac{\delta C}{C}$ —— 流出系数不确定度；

$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ —— 可膨胀性系数不确定度；

$\frac{\delta D}{D}$ —— 管道内径不确定度；

$\frac{\delta d}{d}$ —— 节流件开孔直径不确定度；

$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ —— 差压测量不确定度；

$\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}$ —— 节流件正端取压口处流体密度不确定度。

在式（1）的六个因子中，对 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 所起作用的大小各不相同。而且在量程的不同区间，起决定作用因子也不相同。在三种不同类型的差压装置中，标准孔板流量计能得到的不确定度最小。图 2 所示为单量程标准孔板流量计测量气体流量，相对流量在不同的区段能获得的准确度曲线^[10]。其中

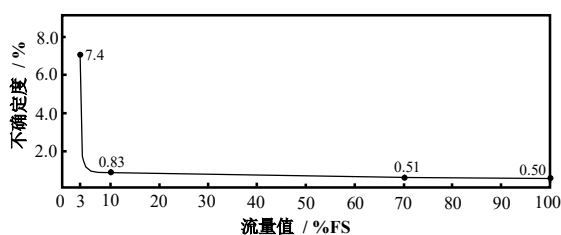


图 2 单量程孔板流量计不确定度曲线

在量程高段，起决定作用的是差压装置。因为现在的差压测量仪表，准确度已经非常之高，人们普遍选用 0.055 级差压变送器，在量程高段， $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 可忽略不计。但是在量程低段，由于相对差压很小，

而差压变送器的准确度等级是用引用误差表示的，这时虽然差压变送器仍然是 0.055 级，但是根据引用误差计算得到的不确定度却增加了很多倍，所以对 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 起决定作用的是 $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 。

关于差压式流量计的范围度问题。差压式流量计的范围度，最近六十年以来也获得了很大进步。六十年前的文献都是说差压式流量计的范围度只能做到 3 倍，这主要因为两个原因：一是将流出系数 C 和可膨胀性系数 ε 当常数来处理，所以式（1）中的 $\frac{\delta C}{C}$ 和 $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ 都小不了。另一个是当时差压测量准确度低， $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 测量不确定度大，对范围度起了制约作用^[11]。

六十年前是用浮子式差压计测量差压，准确度等级是 1.5 级，现在用差压测量仪表是 0.055 级，甚至 0.04 级，所以差压准确度提高了三百倍之多。这对提高流量测量准确度和扩大范围度起了关键作用。

其实，在差压式流量计中，流出系数 C 和可膨胀性系数 ε 都是变量，但在模拟式仪表时代，要对这两个变量进行实时计算无法实现，所以只能将 C 和 ε 当常数来处理，并限制在三倍范围度范围内使用^[11]。现在的流量演算器已经普遍实现了智能化，可将 C 和 ε 进行实时计算和在线补偿，因此范围度和准确度都获得了大幅度提升。

图 3 所示为双量程精准孔板流量计测量气体流量的准确度曲线^[10]。

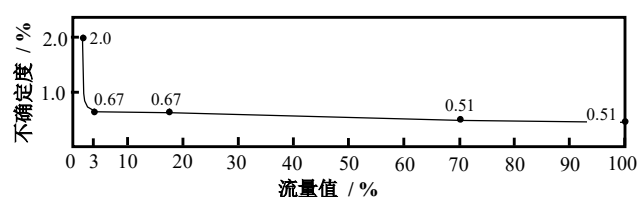


图 3 双量程孔板流量计不确定度曲线

从图 2 可知，智能单量程标准孔板流量计，在 10 倍范围度范围内， $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 优于 1.0%。从图 3 可

知，智能双量程标准孔板流量计，在 30 倍范围度范围内， $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 优于 1.0%^[10]。

喷嘴流量计和文丘里管流量计，由于差压装置不确定度都比标准孔板大，所以 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 均劣于 1.0%。

由于这个原因，凡是采用标准孔板不存在明显问题的测量点，建议一律采用标准孔板。不但准确度高而且投资也省。

（3）流量传感器温度压力等级的设计

流量传感器的温度压力等级设计，是流量测量系统设计的重要内容。如果选定的温度等级偏低，则易造成仪表的损坏。如果压力等级选得不到位，则易带来安全隐患。与之相反，如果温度压力等级选得太高，则导致投资增加，造成浪费。

各种品牌的涡街表，制造厂一般都能提供 4MPa 和 6.3MPa 压力等级产品，满足中低压蒸汽流量测量的需要。在设计选型时应根据法兰的材质和介质的最高温度，按照 GB/T 9124-2010 的规定核验具体可用压力，此压力必须高于介质的最高压力。例如材质为 316L 的 PN6.3MPa 法兰，介质温度为 350℃，最高工作压力只能到 3.91MPa^[12]。如果制造厂提供的标配压力等级不能满足使用要求，

则可与制造厂协商，作特殊规格定货。如果制造厂经过努力还是满足不了要求，只能改选其他品牌或其他类型的仪表。

涡街流量传感器的温度等级也很有讲究。例如一体式一般只能用到 150℃；分体式一般只能用到 260℃；高于 260℃的对象只能选用高温型。而高温型的最高温度，不同品牌也有很大差异。例如 DY 型最高可达 450℃，具体应向供应商代表咨询，并签好技术协议。

标准差压装置的多种不同型式，能满足各种温度压力等级的要求。中低压测量对象，大多选标准孔板。有时为了减少泄漏点，采用焊接方法链接。对于高温高压对象，往往选长径喷嘴或文丘里管。除了差压装置类型之外，更重要的是选择合适的材质、法兰型式以及密封垫类型。常用的耐热钢有 15CrMo、12CrMoV，超高温的可采用 P91 材质等。需与制造厂协商并签订技术协议。对于高温高压差压装置，还要履行国家安监部门逐台监检和认可的手续，以保证安全。

（4）关口蒸汽表的可靠性设计

由于关口蒸汽表要求不停汽修复，为了满足此项要求，在设计时必须切实可行而且有效的措施。这是因为仪表设备在其生命周期内总是会发生故障。例如多数品牌涡街流量传感器的探头都是设置在测量管内，而探头又容易损坏，一旦损坏就须停汽才能更换，有些品牌的涡街表，旋涡发生体是采用旋臂梁结构安装在测量管内，其自由端与支座之间的缝隙一旦有固体颗粒进入，就因自由端无法摆动而导致灵敏度丧失，也必须停汽才能清除固体颗粒或更换发生体，因此制造厂动了很多脑筋解决这个难题。其中 FOXBORO 公司采用双探头并联方法，使可靠性提高很多倍，其结构如图 4 所示。还有的公司将探头设置在测量管壳体外壁，做到完全不停汽更换探头。

图 4 FOXBORO

在不停汽修复方面，标准差压流量计具有绝对优势。因为只有差压装置与介质接触，差压装置与后续仪表之间经根部阀连接，只要将根部阀关闭，便可随意对后续仪表进行维修或更换。而管道内的节流件是非常简单的，不会损坏，因此，可靠性是有保证的。

在差压流量计使用现场，有时会发生根部阀堵塞等故障，影响测量，解决这一问题的常用方法是设置两组差压信号取压口，一旦一组出问题，则换用另一组取压口。

（5）实现计量检定的比较

在实现计量检定的方法上，标准差压流量计具有显著优势。因为标准差压流量计只要按 ISO 5167:2003 (E)，GB/T 2624-2006 标准设计、制造、安装和使用，无需实流标定就能保证准确度^{[8][13]}。而涡街表必须经过实流检定才能保证精确度。免除了实流检定这项工作，为用户带来了两方面的的好处，一是节约开支，因为关口表一般口径都比较大，实流检定需要一笔不小的费用。二是带来了方便，有些计量检定机构可以提供上门服务，申请周期检定的单位，在约定的日期将差压装置拆下清洗，然后请检定人员检定，检定完后一般当天就可装回原处，因此节约了人工和成本。

（6）流量传感器公称口径的设计

涡街流量传感器的最大通径，国外品牌只做到 400mm，这是因为通径太大时，分辨力太低。标准差压流量计具有宽广的通径范围可供选用，其中：

标准孔板 DN50~DN1000；

ISA1932 喷嘴 DN50~DN500；

长径喷嘴 DN50~DN630；

文丘里管 DN50~DN1200。

如果超出上述范围，可以制造，但需经实流标定才能保证准确度。

（7）经济性的差异

通径较小的涡街流量计，价格比标准差压流量计便宜一些。但是随着公称通径的增大，涡街表价格快速增加，尤其是介质温度高于 260℃后，涡街表需选用高温型，整套流量计的价格要比标准差压流量计贵得多。

（8）差压流量计差压信号管引向问题

差压式流量计用来测量蒸汽流量时，差压信号的引向对保证流量测量准确度至关重要，因为不合理的引向容易引起差压信号传递失真，最终引起很大的示值误差^[5]。

蒸汽管道有水平敷设和垂直敷设两种，当采用水平敷设时，差压信号管应从水平方向引出^[9]。在使用现场有的从水平线向上 45° 方向引出，出了不少问题^[5]。图 5 所示为英国国家标准 BS ISO 2186:2007 推荐的引出方向，很有道理^[14]。从图 5 还可看出，两个根部阀的手柄均放置在水平方向，这样的设计对消除冷凝罐前导压管内由汽液交换引起的差压值脉动，有重要作用。

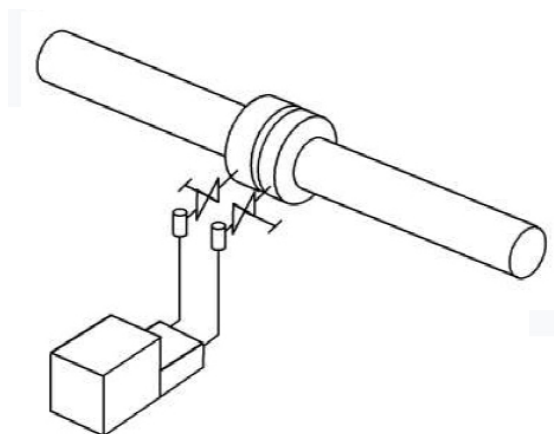


图 5 BS ISO2186:2007 标准推荐的差压信号引出方位

当工艺管道垂直敷设时，导压管的正确走向如图 6 所示。每一段差压信号管都应保持规定的坡度，以确保差压信号的不失真传递^[5]。

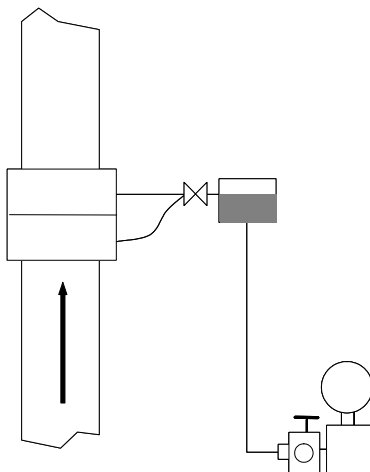


图 6 差压装置在垂直管道上的安装

4. 关口蒸汽表准确度的现场验证

经检定合格的流量计安装到现场并投入运行后，如果设计、安装、调试等各个环节也都正确无误，就应能得到准确的测量结果。要对测量结果的准确性进行判断，简单而可靠的方法是利用质量守恒定理，对上下游相关流量计的测量结果进行分析比较。由于很多关口表都是供需双方各装一套流量计，那么就可利用这两套表的测量结果直接比较。如果需方未装总表，只有若干台分表，则可利用分表之和与上游总表进行比较^[15]。

在用这一方法进行验证时应注意下列 5 点。

① 上下游两台表不能相距太远，以防部分蒸汽在管道内因损失热量而部分冷凝，影响验证结果。

② 上下游两台表之间的管道和管件，不应存在泄漏。

③ 利用瞬时流量示值进行验证时，平衡差数据往往会出现波动，建议使用 24 小时或更长的时间间隔累积流量数据进行比对。

④ 参与验证的各台流量计，流量示值都应在规定的范围度范围之内，不应存在进入小信号切除区及超范围现象。

⑤ 平衡差计算如果在允许范围之内则为合格。例如上游表为 1.0 级，下游表为 1.5 级，则极限允许误差为 $\pm 2.5\%$ 。

下面举几个验证实例。

实例 1：上下游两套蒸汽流量表比对的例子

新港热电向富德化工供中压蒸汽，管道的上下游各装一套 DN500 双量程喷嘴流量计，如图 7 所示。

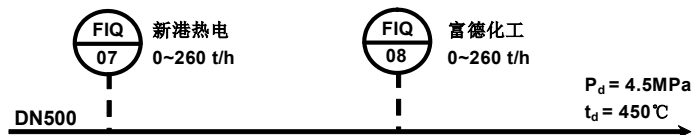


图 7 新港热电去富德化工蒸汽管网

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 8 SCADA 监控系统自动生成的报告。



图 8 富德线报表截图

一根管道上下游安装同一厂家相同规格的两套表，进行示值比对，不足之处在于：如果上下游表计存在相同缺陷，暴露不出。不同原理或不同制造厂的产品比对，更有说服力。

实例 2：不同原理不同通径流量计的示值比对

张家港沙洲电厂去华兴电力的蒸汽总管上有四套差压流量计。如图 9 所示。

图 9 中的 FIQ09、FIQ10 为双量程喷嘴流量计；FIQ11 为双量程孔板流量计，安装在供方；FIQ12 为罗斯蒙特公司产四孔孔板流量计，安装在需方。罗斯蒙特公司承诺，23 t/h 以上能保证 1.5% 准确度。

FIQ09 和 FIQ10 布置在锅炉房内，因流量计安装在减温减压阀后，流量计的直管段要求相当长。由于现场场地所限，直管段勉强凑到 25D，只得用 19 管束流动调整器解决问题。具体的布置如图 10 所示，图 11 为图 9 管束流动调整器。

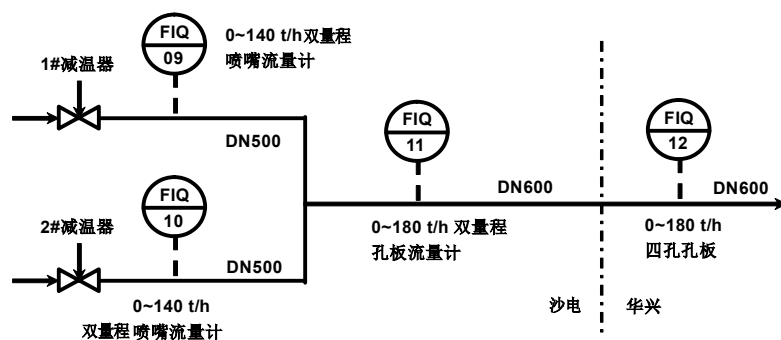


图 9 沙电厂内管网和外供蒸汽管网

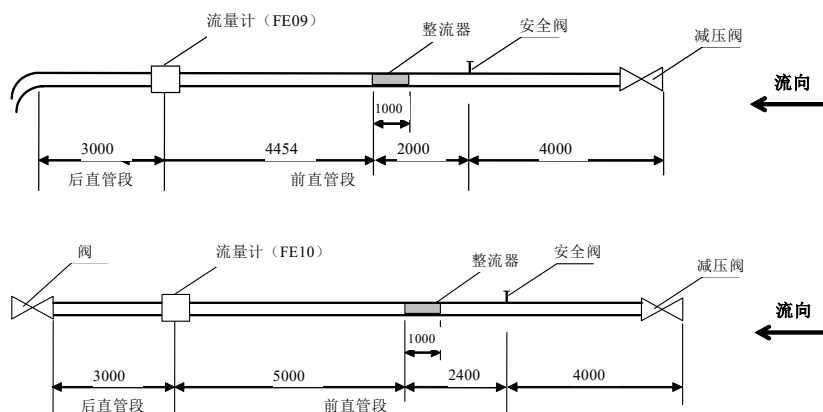


图 10 FIQ09、FIQ10 及流动调整器布置图



图 11 19 管束整流器管芯

因该流动调整器只增加一个管芯，所以开支不大，只占整套仪表的 1.5%。

图 12 所示为运行情况截图。从图中的流量示值可见，上游两台表示值之和与下游表示值基本相符。由于 FIQ12 流量计的运行数据，只在需方的 SCADA 系统中显示，所以图 12 的截图中看不出上下游两台 DN600 流量计的比对结果，但据需方代表介绍，两者值在允许范围之内。

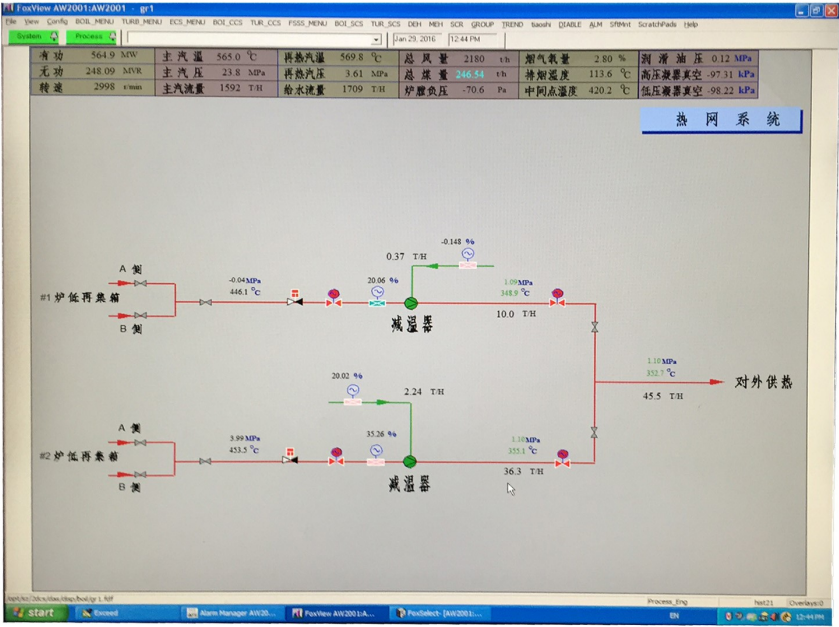


图 12 沙电 2#总管关口表运行数据截图

实例 3：用分表之和与总表进行比对例子

图 13 所示为沙电 1#外供汽总管网络图。总表为 DN350 双量程喷嘴流量计，分表共 4 台，均为横河涡街表。图 14 所示为该系统的运行报表截图。统计数据显示，一个月的总管管损为 0.98%。

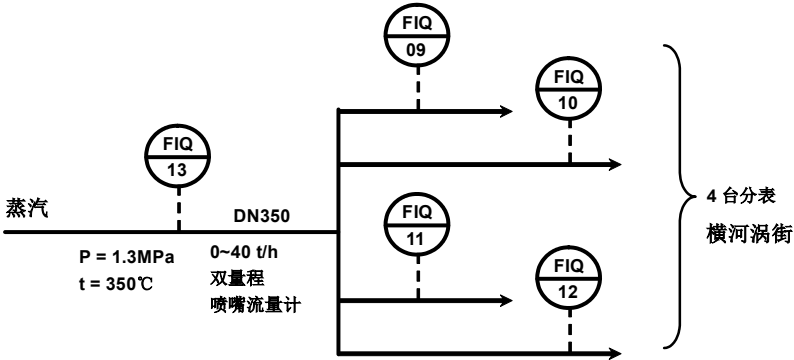


图 13 沙电 1#外供汽总管网络图

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)	升泵	补全	用汽时间
1	里 源胜化工	147.7852	0.4162	307.9430	845.5923	0.0000	0.0000	0.02
2	里 越洋码头	148.0273	0.4070	420.1595	1154.0696	0.0000	0.0000	0.02
3	里 联合铝业	159.6295	0.5198	8116.4050	22298.7950	0.0000	0.0000	0.02
4	里 焊材厂	154.3246	0.5080	1.5623	4.3060	0.0000	0.0000	0.00
5	里 总管	257.4850	0.5909	9932.0000	26563.0000	0.0000	0.0000	0.00
00+	总供量			8,932.0000	26,563.0000			
00+	总用量			8,846.1588	24,402.6719			
00+	补差补全合计					0.0000	0.0000	

质量流量(供)	质量流量(用)	质量管损	质量管损率	质量流量管损率	热量流量(供)	热量流量(用)	热量管损	热量管损率	热量流量管损率
8,932.0000	8,846.1588	85.8412	0%	100%	26,563.0000	24,402.6719	2,160.3280	8%	92%

图 14 沙电 1#蒸汽总管计量报表

5. 结束语

① 关口蒸汽表是蒸汽供热网计量管理、生产调度管理、经营管理以及设备管理的技术基础。在蒸汽供热网中具有极其重要的作用。

关口蒸汽表绝大多数选用差压式流量计和涡街流量计。

② 涡街流量计具有范围度宽的优点。

关口蒸汽流量测量系统中使用涡街表，大多口径较大，测量中低压蒸汽流量时，如果设计合理，实际范围度一般可达 20 倍，流量系统不确定度可达 1.3% ($V \leq 35\text{m/s}$) 到 1.8 ($V > 35\text{m/s}$ 时)。

智能化标准孔板流量计，单量程配置范围度可达 10 倍；双量程配置，范围度可达 30 倍。流量系数不确定度可达 1.0%。标准喷嘴和文丘里管，系统不确定度要大一些。

③ 蒸汽的温度压力等级有好几档，在作流量计选型时，必须全部满足要求，其中法兰的压力等级初步选定之后，应根据法兰材质和介质的最高温度，按国家标准核验具体可用工作压力。此压力必须高于介质的最高压力。

④ 关口蒸汽表要求具有极高的可靠性。安装在蒸汽管道上的流量传感器一旦发生故障，要求做到不停汽维修。选用双探头涡街流量传感器和为差压装置配备两对差压信号取压口，都是很成功的经验。

⑤ 标准差压装置可采用几何法进行检定，不仅可节约开支而且可为用户带来很多方便。

⑥ 流量计准确度的现场验证，是检查流量计设计、制造、安装、调试各个环节均正确无误的有效方法。通常是依据质量守恒定理，对上下游流量计测量结果进行分析比对，得出结论。

参考文献

1. 张万路, 王顺安, 何相助等. GB 17167-2006 能源计量器具配备和管理通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
2. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2009.55
3. 上海工业自动化仪表研究所. GB/T 22133-2008 流体流量测量—规定流量仪表性能的方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
4. 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
5. 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
6. 何志俊, 殷胜军, 纪波峰, 纪纲. 供热网 SCADA 系统中的管损统计及应用实例[J]. 自动化仪表 2017.38(6): 93-95,99
7. 孙江平, 戴铮, 蔡方明, 纪纲, 纪波峰. 气体的膨胀性对流量测量的影响及对策研究[J]. 石油化工自动化, 2018,

54(5)

8. ISO. ISO 5167:2003 Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full[S]. Switzerland: ISO, 2003
9. 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, 2001:59
10. 张宝良, 纪波峰, 纪纲. 提高孔板流量计精确度的研究[J]. 石油化工自动化, 2017, 53(04)
11. 上海工业自动化仪表研究所. 流量测量节流装置设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社. 1966, 172~208
12. 邱晓来, 李俊英, 刘建等. GB/T 9124-2010 钢制管法兰技术条件[S].北京: 中国标准出版社, 2011.
13. 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.
14. BS ISO2186:2007 fluid flow in closed conduits-connections for pressure signal transmissions between primary and secondary elements.[S]
15. 王建忠, 纪纲. 流量测量准确性的现场验证及其解决方案[J]. 石油化工自动化, 2003(6)52~56

本文源自《石油化工自动化》2021, (57)6: 70~74