

宽量程蒸汽计量及若干问题的讨论

北京博思达新世纪测控技术有限公司 赵海升 王京安

北京 100029

[摘要] 蒸汽流量计量是供热行业计量工作中的一项主要内容, 由于行业的特点, 现场运行仪表经常碰到超测量范围、密度计算、仪表选型等问题。本文从介绍现代流量计量技术入手, 结合目前供热企业计量管理需求, 提出了一套已经获得成功应用的蒸汽流量计量器具配备方案, 该方案解决了蒸汽流量宽量程、高精度、能量计量、数据上网等现代供热计量的新要求。

[关键词] 蒸汽计量 宽量程计量 一体化喷嘴 流量计算机 数据网络

1 前言

蒸汽是城镇供热行业中主要的供热介质, 所以提高蒸汽的生产、输送及使用效率可以节约大量的能源。准确的计量是提高能源管理水平的关键。由于蒸汽的特殊性, 在计量方面存在诸多困难, 长期以来一直是城镇供热行业计量工作中的老大难问题, 逐步建立一套适合我国城镇供热企业特点, 具有科学性, 经济性, 实用性的蒸汽计量仪表的配备方案, 是当前城镇供热计量管理的紧迫课题。目前蒸汽流量测量主要采用的还是标准节流装置这一传统的测量手段, 但是常规的孔板流量计在蒸汽测量方面还有很多不足, 主要体现在测量范围小、压损大, 现场安装、维护复杂、检定周期短等方面。尤其是测量范围小的缺点, 在热负荷变化大的情况下计量误差大大增加, 使供热企业受到经济损失。目前, 通过现代技术手段, 可以很好地解决这些问题, 下面针对这些问题进行分析, 并提出一套合理的蒸汽流量计量器具配备方案。

2 供热蒸汽流量计量面临的问题

2.1 关于宽量程的问题

我们都知道, 虽然引起孔板流量计误差因素很多, 诸如直管段条件、安装条件等都可可通过设计与施工予以保证。一般仪表的准确度都是用测量范围内相对误差表示。因此当测量值越接近满度值, 其准确度越高。但在蒸汽输送过程中, 实际的流量范围往往无法准确确定, 在热负荷变化大的情况下, 使流量计长时间工作在测量范围以外, 这样就造成了很大的测量误差。因此在设计蒸汽流量计量系统时, 应考虑使用具有宽量程补偿运算功能的计量系统。对节流件流出系数 C 、可膨胀性系数 ϵ 等中间参数的实时计算是解决宽量程的关键。

节流式流量计流量计算公式为:

$$q_V = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \quad \text{式(1)}$$

式中: q_V ——体积流量 m^3/s

C ——流出系数

ϵ ——可膨胀性系数

d ——节流件开孔直径, m

D ——管道内径, m

β ——直径比, ($\beta = d/D$)

ρ_1 ——被测流体密度, kg/m^3

Δp ——差压, Pa

其中: 按 GB/T2624-2006 标准孔板流出系数 C 的计算式为:

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A)\beta^{3.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} + (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})(1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.031(M_2' - 0.8M_2'^{1.1})\beta^{1.3} \quad \text{式(2)}$$

式中： Re_D ——雷诺数

流束可膨胀系数 ϵ 的计算式为：

$$\epsilon = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad \text{式(3)}$$

式中： κ ：等熵指数

P_1P_2 ：分别节流件前后的压力，Pa

传统的节流式流量计是将流出系数 C 和可膨胀性系数 ϵ 视为定值（C 和 ϵ 由专门的节流装置设计计算软件计算得到），置入现场的流量积算仪。图 1 是一台孔板流出系数曲线。

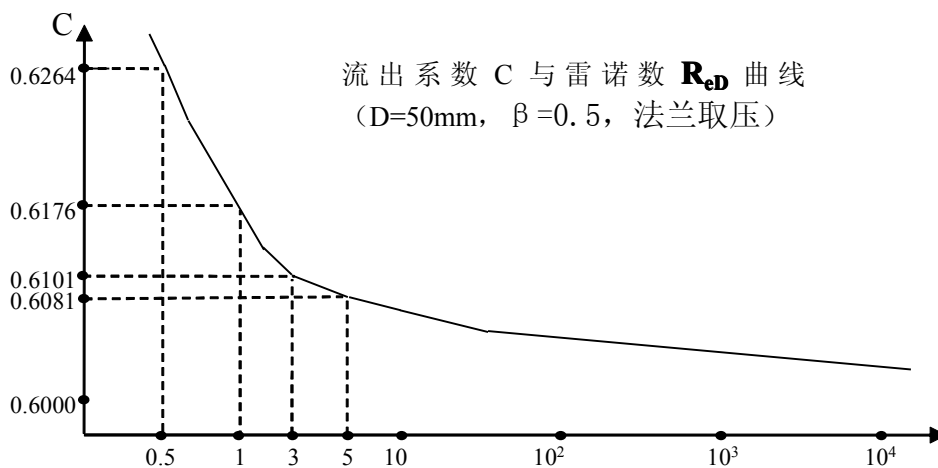


图 1

图 1 曲线表明：当 $Re_D=3 \times 10^4$ ， $C=0.6101$ ； $Re_D=1 \times 10^4$ ， $C=0.6176$ ；平均值 $\bar{C}=0.6139$ ，即 Re_D 在 $3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^4$ 范围内（3：1）其不确定度为 0.61%。

当 $Re_D=5 \times 10^4$ ， $C=0.6081$ ； $Re_D=5 \times 10^3$ ， $C=0.6264$ ；平均值 $\bar{C}=0.6173$ ，即 Re_D 在 $5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^3$ 范围内（10：1）其不确定度为 1.5%，远不能满足用于贸易结算的一级表对不确定度的要求。同样，可膨胀性系数 ϵ 在超测量范围情况下，所引起的测量不确定度更不容忽视，例如，一台角接取压孔板流量计（ $D=100\text{mm}$ ， $\beta=0.5$ ）测量过热蒸汽（压力=4Mpa，温度=400℃）， Re_D 在 $28 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ （介质流速：52~5.2 米/秒）范围内，可膨胀系数 ϵ 的不确定度为 3.0%！因此要实现宽量程，就必须对流出系数 C 和可膨胀性系数 ϵ 进行实时计算。

由式（2）可以看流出系数 C 的计算很复杂。相关标准给出了计算流出系数 C 的迭代方法，所以流量积算仪表必须具有高速、高精度的运算功能和比较大的存贮空间，以完成这些复杂的中间参数的补偿运算。

智能化宽量程的差压变送器和补偿功能更为完善的流量计算机的问世，使我们能拥有宽量程的智能化节流式流量计成为可能。归纳起来它应具备三个条件：1. 智能化的宽量程差压变送器（差压范围为 100：1）。2. 差压变送器与流量计算机之间数字通讯（Hart 协议）除能满足全量程差压信号传递的准确性，而且能够自动迁移测量范围。3. 流量计算机不仅可根据温度、

压力等工况参数对工况流量进行修正，还可以实时计算流出系数 C 、可膨胀性系数 ϵ 等。符合上述条件的宽量程智能化差压式流量计，在满足准确度同时，流量测量范围可真正达到 10:1(或更宽)，节流式流量计的这一飞跃是多项技术进步的成果，它改变着人们对节流式流量计的传统认识。

2.2 关于蒸汽密度问题

对于蒸汽的流量测量，人们都知道要进行压力和温度补偿，但是由于对蒸汽性质的复杂程度了解不够，在整个一套测量系统中，往往只重视差压、温度、压力信号的准确与否，并尽量使用高精度的变送器，而忽略了密度在测量中的重要地位，从式(1)中可以看出差压与密度在测量中是处于同等地位的。目前流量类二次显示仪表(系统)中蒸汽流量密度的计算，有相当数量的仪表采用的是简单的数学表达式或查表法，其准确度往往不能满足要求。

和一般通用气体相比，在计算水蒸汽流量时有三个难点：

(1) 密度的确定：

水蒸汽的性质与理想气体大不相同，应视为实际气体。水蒸汽的物理性质较理想气体要复杂的多，故不能用简单的数学式子加以描述；所以，在以往的工程计算中，凡涉及水蒸汽的状态参数数值，大都从水蒸汽表中查出。把蒸汽参数表装入仪表中，数据量很大。

(2) 水蒸汽在应用过程中由于参数的变化，会发生状态变化；如过热蒸汽变为饱和蒸汽，饱和蒸汽变为过热蒸汽。所以必须先判别蒸汽的状态(是饱和蒸汽或是过热蒸汽)，再查不同的数表或用不同的公式计算。

(3) 湿饱和蒸汽含有饱和水，是两相流。要准确测量蒸汽流量还必须知道干度。而干度测量难度很大，国外已有一些研究成果，但未见普遍推广应用，国内目前仍处于研究阶段。

通常有以下两种水蒸汽密度的确定方法：

(1) 查表法：把水蒸汽密度表装入计算机中，根据工况的温度、压力，从表中查出相应的密度值。

(2) 计算法：

① 自己拟合公式(或者出版物给出的公式)

② 乌卡诺维奇公式

③ IFC1967 公式

我国没有制定“水蒸汽热力学性质表”的国家标准，而是采用国外出版物的水蒸汽热力学性质表。我国曾翻译过美国的、前苏联的、西德的水蒸汽热力学性质表，近年来逐步统一到 IFC1967 公式的数表。因此，我们在流量测量中使用的仪表应该按照 IFC1967 公式进行实时的密度计算才是最理想和准确的方法。目前我国 JJG1003-2005《流量积算仪》检定规程已引用了该公式。

《JJG1003-2005》检定规程的一个重要特点是把流量积算仪表与流量变送器、被测流体紧密结合在一起，检定的理论值完全按有关国家标准给出的数学模型计算得到。由于涉及的流量变送器种类、被测流体的类型较多，计算公式各异且相当复杂。为此，中国计量科学研究所和北京博思达新世纪测控技术有限公司联合开发了《FIMJ-01-WIN 版流量积算仪检定软件》以满足用户对流量积算仪(含流量计算机、DCS、PLC 数据采集系统等)型式检定、出厂检定、周期检定以及对在线仪表进行现场检定的需要。

2.3 关于能量计量问题

不同状态下等质量的蒸汽含有的热能相差很大。例如：在压力为 0.8Mpa、温度为 200℃ 的条件下的过热蒸汽，每公斤所含的热能为 2838.6 千焦；在压力 0.8Mpa 温度为 220℃ 的条件下的过热蒸汽，每公斤所含的热能为 2884.2 千焦，二者相差 1.6%。所以，以质量为蒸汽的结算单位不能真实反映蒸汽的价值。针对上述情况，以能量作为蒸汽的结算单位，已不仅是学术界的共识，而且也得到了广大蒸汽的生产和使用单位的响应，呼吁国家出台相关标准以进一步科学的规范蒸汽计量，并考虑到人们多年使用蒸汽质量为交结单位的习惯，作为一种过渡，仍应保留以质量为蒸汽结算单位。改动贸易计量单位是一个较复杂的问题，但先在企业内部推行蒸汽的能量计量在技术层面上是可行的，在管理层面将是一项十分有益的实践。

2.4 关于非标准差压式流量计

近年来，各种各样的非标准差压式流量计依其各自的特点，在流量测量方面进行了积极的探索。但是由于它们不能像标准节流件一样，有成熟且通行的国际、国家标准支持，其仪表系数必须通过实流标定获得（所谓实流标定一般是指在标准明确规定的情况下，被测介质和实验介质应为同一介质，及测量蒸汽的仪表应使用蒸汽进行标定）否则，在贸易计量中容易产生争议。

2.5 关于数据网络的问题

目前企业的生产装置自动化水平越来越高，很多供热企业已经建立了数据网络。为适应各种通讯网络的要求，选用的流量计量仪表要具有多种网络接口，生产厂家能提供使用多种通讯协议的软件。

3 蒸汽流量计量仪表配备方案

3.1 一套合理、先进的蒸汽计量系统应该具有以下特征：

- (1) 现场仪表符合准确度要求、免维护、故障率低、稳定性好、检定周期长。
- (2) 补偿功能完善且补偿的算法符合相关标准。
- (3) 具有较宽的测量范围。
- (4) 具有历史数据存储、事件报警等管理功能。
- (5) 便于实现网络化。
- (6) 具有能量计量的功能。

3.2 一次仪表配备方案

本文推荐的蒸汽流量计量一次仪表是一体化喷嘴流量计，并配套温度、压力变送器进行温度、压力补偿。

节流式流量计在蒸汽计量中占有重要的地位。节流式流量计技术成熟，特别是标准节流装置按标准（ISO15167-2003E、GB/T2624-2006）设计、制造就无须实流标定，是其它流量计无法比拟的。实际上，目前我国蒸汽计量用表有 90% 以上的仍采用标准孔板节流装置。为何大力推荐采用标准喷嘴而不是孔板，其原因如下：

标准孔板的一个缺点是入口直角锐利度在流体冲刷下易发生钝化，据悉国内有关部门曾对新装孔板进行跟踪校验，在孔板连续使用 2—3 个月时，钝化引起流出系数偏度在 1—3%，个别严重的在 4% 以上，这已引起了人们的高度重视。目前，解决标准孔板钝化问题的最好方法是采用标准喷嘴，由于喷嘴的入口为光滑曲面，不易磨损（见图 2）。它的流出系数非常稳定，所以 JJG640-94 规程规定 ISA1932 喷嘴的检定周期为 4 年（孔板检定周期是 1 年）。再者，喷嘴在相同流量和相同 β 值条件下，阻力损失比孔板小得多（仅为孔板的 50-60%），有利于减

小能耗。长期运行情况表明，由于喷嘴在结构上的优势具有耐冲击抗变形的优点，适应于高温、高压、高流速介质。

节流式流量计的系统构成比较复杂，有较长的引压管，容易阻塞，冬季运行还需对引压管、冷凝系统进行保温、伴热，稍有不慎便造成故障，且仪表的维护工作量大。一体化喷嘴很好的解决了上述问题，一体化喷嘴是将节流件和差压变送器做成一体，并装有防冻隔离器，不仅缩短了引压管线，还省去了冷凝和排污系统，使系统构成简单，无需保温供热，在减少维护量的同时，也节省了能源。

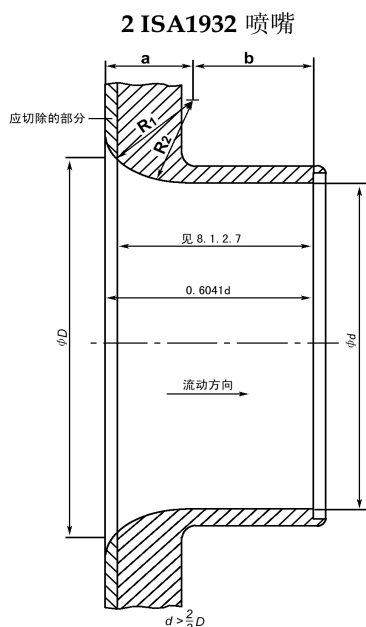


图 2 ISA1932 喷嘴

一体化喷嘴的特点：

- ◆ 采用标准节流件，测量准确度有依据；
- ◆ 采用防冻隔离技术，冬季运行无须伴热，维护量少；
- ◆ 喷嘴节流件阻力损失小(同样流量下为相同 β 值孔板的 60% 左右)；
- ◆ 没有孔口钝化的问题，耐冲击不易变形，系数稳定，检定周期长（4 年）；
- ◆ 配置智能型差压变送器，流量测量范围度可达 10: 1 或更宽；
- ◆ 安装简便。

3.3 二次仪表配备方案

蒸汽流量计二次仪表我们推荐采用流量计算机类产品。流量计算机具有高精度补偿运算、数据显示存储以及运用网络实现通讯功能的新一代计量仪表，其依据有关国际标准与建议、国家与行业标准，针对不同介质和流量计类型建立了多种数学模型和相应计算软件。一台流量计算机可完成温度、压力、湿度、密度、组分等补偿运算。对节流式流量计的流出系数 C 、流束可膨胀系数 ϵ 、压缩系数 Z 等参数作为动态量进行实时逐点运算。流量计算机所使用的流量计算软件必须通过国家权威部门认证。

流量计算机具有以下优点：

- ◆ 依据有关国际标准与建议、国家与行业标准，针对不同介质和流量计类型建立了多种数学模型和相应计算软件，可以计算蒸汽质量流量和能量流量。
- ◆ 对节流式流量计的流出系数 C 、可膨胀性系数 ϵ 等参数作为动态量进行实时逐点运算

以实现宽量程。

- ◆ 具有历史数据存储、报警记录、仪表断电、修改参数设置等审计记录功能，即使网络系统发生故障流量计量数据也会存储在其中不至于丢失。
- ◆ 知名品牌的流量计算机所使用的流量计算软件已通过国家权威部门认证。
- ◆ 流量计算机具有强大的通讯功能，对现场仪表除可适配 4~20mA 信号、脉冲信号外，还可以适配 HART、Modbus 等数字信号；对上位机可采用包括程控电话网、以太网等方式构成计算机网络应用系统，实现远程监督管理和建立集散式计量管理系统。

4 结束语

目前，由一体化喷嘴流量计和流量计算机构成的蒸汽计量系统，将经典技术与现代技术相结合，克服了传统孔板流量计量程小、阻力损失大、容易变形、检定周期短、系统安装、维护复杂等缺点。实践表明该方案在蒸汽流量计量方面已日趋成熟，并已在我国石化、化工、冶金以及城市供热等行业中得到了广泛应用，在蒸汽流量计量方面做了有益的探索。

参考文献：

- (1) GB/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》
- (2) JJG1003-2005 《流量积算仪》