POSTAN

博思达技术方案1

蒸汽流量计量方案

问题的提出

蒸汽作为载能工质在石油、化工、冶金等工业领域能源消耗占比很高，由于蒸汽具有高温、高压、高流速等特点，不仅对计量仪表在耐温、耐压、耐磨损和抗冲击等方面要求很高，对其计量准确也有较高的要求（GB17167《用能单位能源计量器具配备和管理通则》对工业蒸汽计量系统不确度要求为2.5%）；由于影响蒸汽准确计量存在诸多且复杂的因素，若实现上述要求并非易事。因此，长期以来蒸汽计量一直是流量计量中的一个难点。大多现场情况表明，蒸汽计量中的主要问题有：

（1）一次仪表的选用

（2）相关标准及规程

（3）蒸汽密度计算

（4）流量测量范围问题

1. 一次仪表的选用

目前,用于蒸汽流量计量的一次仪表主要有下列三种类型：

① 标准节流装置

② 涡街流量计

③ 非标准差压式流量计

1.1 各类一次仪表的比较

（1）标准节流装置

1) 有国际标准、国家标准强大支持;

2) 无须实流标定;

3) 历史悠久，使用经验丰富。制造技术成熟，应用广泛（占在用仪表总量 60%～70%）；

4) 但传统孔板存在测量范围小、阻损大、检定周期短、系统构成和维护复杂等缺点。

（2）涡街流量计

1) 有标准支持，具有一定的使用经验;

2) 测量范围宽，10：1，系统构成简捷;

3) 需要实流标定;

4) 在耐高温、低流速、特别是抗振动的性能等方面尚须提高;

5) 蒸汽的湿度对信号干扰严重且无规律，目前尚无有效解决措施，易引起贸易纠纷。

（3）非 标准差压流量计

1) 无标准支持;

2) 非标准差压式流量计须经实流标定，特别是用于贸易计量的仪表（注意：仪表用液体标定，不代表可用于蒸汽计量）；

3) 应用历史短，缺少使用经验;

4) 对仪表结构安全应给予充分重视。

1.2 解决方案

选择一体化ISA1932喷嘴。

（1）传统孔板计量蒸汽对准确度影响因素：

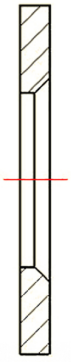
1）易磨损、易变形；

2）传统引压方式：引压管易产生液位差，会产生计量误差；

3）冬季运行引压管须保温，伴热；

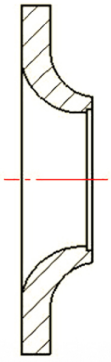
4）超检定周期问题普遍。

（2） 孔板与ISA1932喷嘴的比较



传统孔板

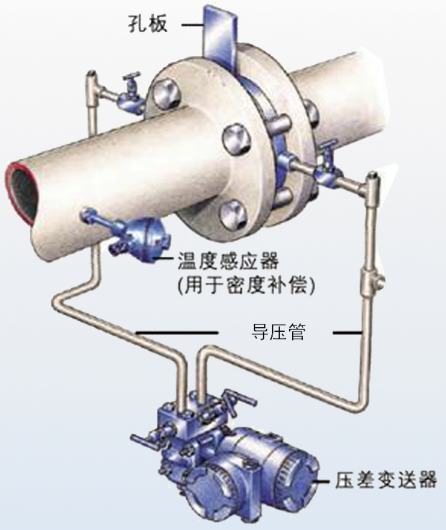
① 入口边缘易磨损
② 阻损大
③ 易变形，一般采用非定值
④ 检定周期短（一年）



ISA1932喷嘴

① 入口圆滑不易变形
② 阻损小（是孔板的0.6倍）
③ 耐冲击，不易变形
④ 推荐采用定值
⑤ 检定周期长（四年）

（3）传统取压方式与一体化结构比较





统取压方式

① 维护工作量大：冬季需采取伴热、保温措施；
② 系统构成复杂，容易堵塞且动态性能差；
② 压管内冷凝水易产生液位差，产生计量误差。

一体化结构方式

① 不需另加隔热或防冻措施，安装、维护简单；
② 系统构成简单，不易堵塞，动态性能好；
③ 引压管不积存冷凝水。

1.3 一体化喷嘴流量计的特点

一体化喷嘴流量计是将节流件和差压变送器做成一体，差压变送器通过各种通讯方式和流量显示设备构成完整的流量检测系统。它具有以下特点：

- 采用专利技术——防冻隔离器，不需伴热、保温和隔离器，节约能源（专利号：ZL 2005 2 01274024）。
- 引压管不积存冷凝水。

- 优选定值ISA1932喷嘴，压损小（同流量，同β值情况下，为孔板的60%），检定周期长（4年）。
- 测量范围宽10：1（或20：1）。
- 介质适用性强（特别适用于蒸汽流量测量），动态性能好，结构简单，故障率低，安装维护简便。

2. 相关标准及规程

- 国家标准：GB/T2624-2006《用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量》（本标准与下述国际标准等同采用），由以下部分组成：

——第一部分：一般原理和要求；

——第二部分：孔板；

——第三部分：喷嘴和文丘里喷嘴；

——第四部分：文丘里管。

- 国际标准；ISO5167-2003《用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量》（英文版）；
- 国家检定规程：JJG640-1994《差压式流量计检定规程》（修订中）。
- 《蒸汽热量计算方法》国家标准（制定中），该标准主要参考IAPWS－IF97国际水和蒸汽性质公式。

3. 蒸汽密度计算

3.1 流量二次表物性值计算模型问题

在实际蒸汽的流量计量过程中，人们重点关注的是温度、压力和差压信号的准确性；由于缺乏对蒸汽密度计算复杂程度和计算依据的了解，往往忽略了密度值对蒸汽计量准确度的影响。

标准节流式流量计用于蒸汽计算的实用公式为：

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P \rho} \qquad (1)$$

式中 q_m ——蒸汽质量流量kg/s；

C ——流出系数；

d ——工作条件下节流件的节流孔或喉部直径

ε ——可膨胀性系数；

β ——直径比（$\beta = d/D$）

Δp ——差压，Pa。

ρ ——工作条件下蒸汽的密度

从式（1）可以看出：差压值Δp和密度值在计算中是处于同等位。此外，可膨胀性系数ε、流出系数C也会产生影响（见本文4），节流件开孔直径d、管道内径D的影响可通过控制加工和安装精度予以保证。

正是因为蒸汽密度等物性值计算复杂，目前很多流量二次仪表的蒸汽密度的计算采用以下三种方法：

（1）采用简易的数学模型（出版物给出的或自己拟合的公式）。一般出版物给出的蒸汽密度计算公式都是根据蒸汽性质表拟合得到，不仅存在拟合误差，一般只适用某一区域（过热区或饱和区）且量值范围比较小。这类公式在一些特定的条件和场所是可用的，但作为计量用计算模型其准确度和适用范围必须经过科学的认证。

（2）查表法。蒸汽表数据量很大且不连续（两个数据间的数值准确度难以保证），在实际操作中有很大困难。

（3）PVT理想气体方程修正法，在DCS上蒸汽密度计算普遍采用此法。用IAPWS-IFC 1997公式和PVT方程分别计算蒸汽密度值，对比数据见下表。

（以250℃、3.9MPa的过热蒸汽密度为参考点）

计算方法	t / pa	250℃		300℃		350℃		400℃		450℃	
		密度	偏差	密度	偏差	密度	偏差	密度	偏差	密度	偏差
97公式	2.0 MPa	8.9699	11.88 %	7.9681	14.91 %	7.2153	16.69 %	6.6134	17.84 %	6.1148	18.64 %
PVT方程		10.035		9.1558		8.4194		7.7934		7.2547	
97公式	3.9 MPa	19.478	0 %	16.504	7.65 %	14.635	11.62 %	13.257	13.99 %	12.167	15.68 %
PVT方程		19.478		17.765		16.334		15.112		14.075	
97公式	8.5 MPa			45.375	-15.76 %	35.994	-2.37 %	31.221	4.20 %	27.990	8.22 %
PVT方程				38.225		35.142		32.532		30.291	

从表中的数据可以看出，不同的计算方法所得到的密度值差别很大，远远超出了人们的想象。另外，现场还有大量的蒸汽计量用表尚未配温度、压力补偿，其准确度难以评估。

由于没有蒸汽物性值（密度、粘度、等熵指数等）计算方法的标准，致使我国在蒸汽计量中物性值取值方法不统一，不仅导致蒸汽的流量（能量）计量不准确，造成大量贸易纠纷。

为此，国家标准化委员会于2012年批准制定《蒸汽热量计算方法》国家标准立项（计划编号：20121520-T-424），该标准由全国计量器具管理标准技术委员会组织编审。北京博思达新世纪测控技术有限公司为第一编写单位负责起草工作。目前该标准已递交送审稿。

3.2 解决方案

流量积算显示设备（DCS或流量计算机）根据《蒸汽热量计算方法》国家标准（制定中）或《IAPWS－IF97国际水和蒸汽性质公式》对蒸汽密度等物性值进行准确计算。

4. 流量测量范围问题

虽然引起孔板流量计误差因素很多，诸如直管段条件、安装条件等都可通过设计与施工予以保证，但超测量范围是引起误差的主要原因，特别是用在流量变化范围大的情况下，仪表超测量范围工作，从而造成计量误差。所以扩展测量范围是解决问题的关键所在。

4.1 影响测量范围的因素

传统上标准节流装置（孔板、喷嘴）给出的测量范围为3：1，这远不能满足实际需要。

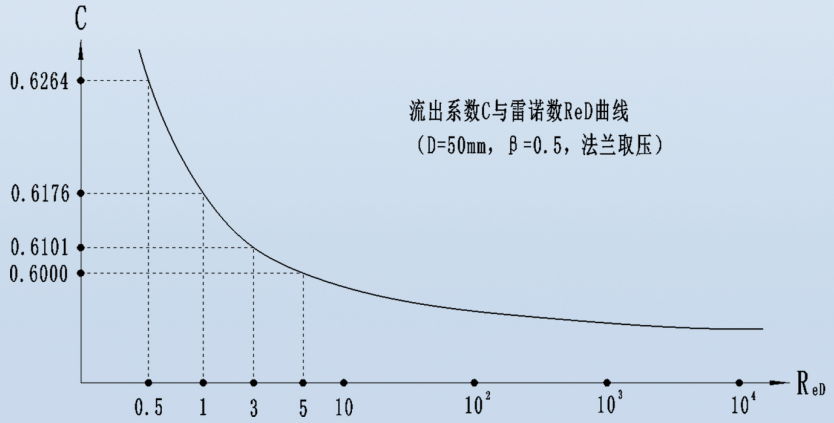
（1）差压变送器量程的影响

传统上一般认为孔板的测量范围为3：1，其实影响它的主要因素是差压变送器的量程。早期的差压变送器的差压测量范围仅为10：1，开方后流量测量范围为3：1；当今的差压变送器的差压测量范围已达100：1，为拓宽节流装置的测量范围创造了必要的条件。

（2）流量参数（C、ε）的影响

传统上节流件流出系数C、可膨胀性系数ε两个中间参数是作为固定值（置入二次仪表或DCS)参与流量计算的，由于这些参数的非线性，其准确度是有一定的范围，这一点往往被人们忽视！

下图是一台孔板流出系数曲线。



图中曲线表明：

当ReD =3×10^4，C=0.6101； ReD =1×10^4，C=0.6176；平均值=0.6139，即在3×10^4～1×10^4范围内（3：1）其不确定度为0.61%。

当ReD =5×10^4，C=0.6081； ReD =5×10^3，C=0.6264；平均值C=0.6173，即在5×10^4～5×10^3范围内（10：1）其不确定度为1.5%。

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=100mm，β=0.5）测量过热蒸汽（压力=4Mpa，温度=400℃），雷诺数在28×10^5～2.8×10^5（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%!

式（1）中流出系数C的计算式为（以角接取压为例）：

$$C = 0.5959 + 0.0312\,\beta^{2.1} - 0.1840\,\beta^{8} + 0.0029\,\beta^{2.5}\left(\frac{10^6}{R_{eD}}\right)$$

式中：β —— 直径比（$\beta=d/D$）

R_{eD} —— 管径雷诺数

关于流出系数C

流出系数C是节流件重要的参数，是指通过节流装置的实际流量值与理论流量值之比，将它应用到理论流量方程中以获得实际的流量值。

在一定条件下，对于给定的节流装置，该值仅与雷诺数有关，对于不同的节流件，只要是几何相似，且在雷诺数相同的条件下，则C值是相同的。流出系数C的计算式是以大量实验所确定的数值为依据，并以标准的形式给出。

4.2 扩展测量范围的条件

（1）智能化的宽量程差压变送器；

（2）差压变送器与流量计算机之间的数字通讯（Hart协议），可满足全量程差压信号传递的准确性；

（3）流量显示设备不仅可根据温度、压力等工况参数对工况流量进行修正，更关键的是还可以根据标准，实时计算流出系数C、可膨胀性系数ε。

满足上述三个条件，即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，使我们拥有智能化宽测量范围的节流式流量计成为可能。

4.3 解决方案

在流量二次表（计算机）中开发迭代运算功能，对流出系数C和可膨胀性系数ε等中间参数进行实时修正，实现量程的自动扩展。

5. 蒸汽计量方案小结

5.1 方案选择归纳

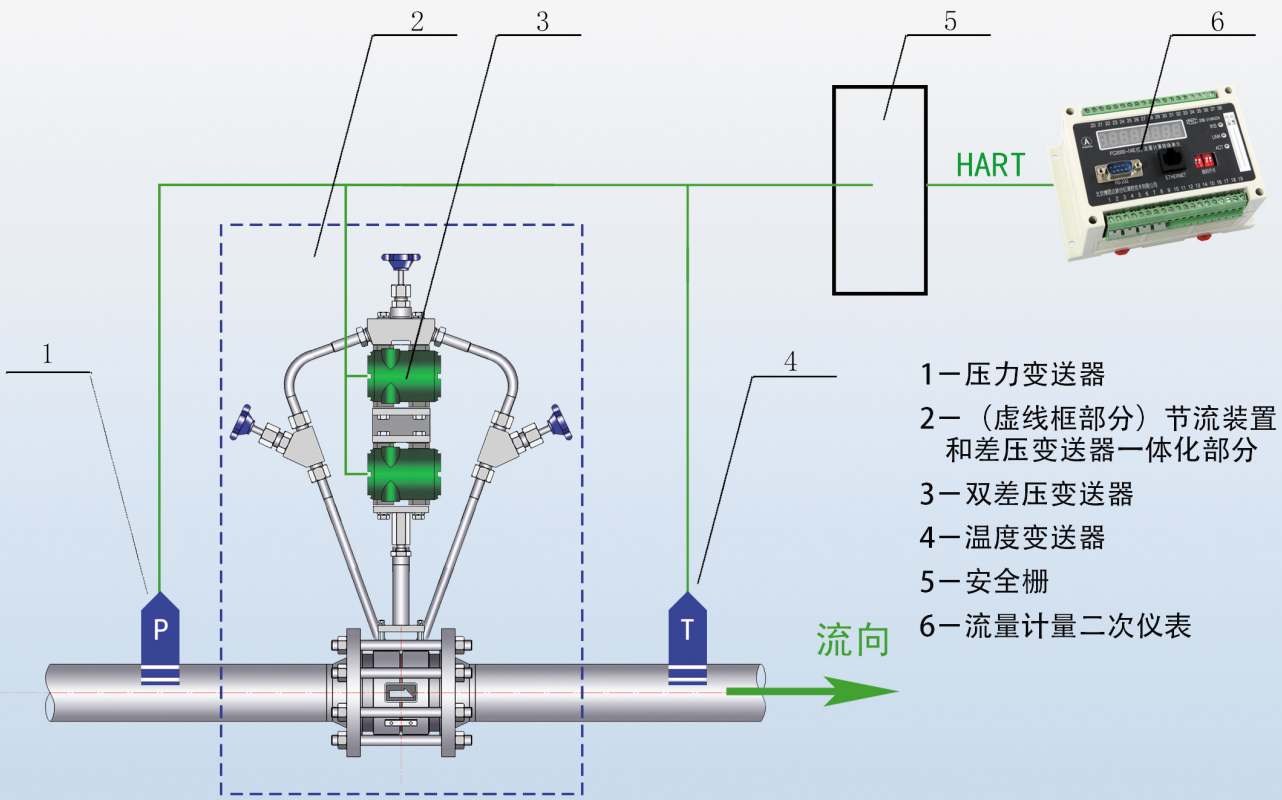
	可选择方案	选择方案	选择理由
一次仪表类 型	A 标准节流装置 B 涡街流量计 C 非标准差压式流量计	A 标准节流装置	有国际标准、国家标准支持，无须实流标定，使用经验丰富，耐高温。
节流装置型式选择	A 标准孔板 B ISA1932喷嘴	B ISA1932喷嘴	阻力损失小，耐磨损，抗冲击，周期长（4年）。
安装结构方 式	A 传统安装结构方式、 B 一体化安装结构方式	B 一体化安装结构方式	系统维护量小，不需要伴热，节省能源，连接引压管不会出现冷凝水液位差。
流量积算显示设备	A 普通流量显示设备、 B 按IF-97计算密度和对流出系数C（和ε）等参数实时补偿功能的流量积算显示设备	B 按IF-97计算密度和对流出系数C（和ε）等参数实时补偿功能的流量积算显示设备	能准确计算蒸汽的密度，可扩展测量范围。

5.2 几款蒸汽流量计性能比较

	传统孔板	涡街流量计	一体化节流式（ISO1932喷嘴）流量计
准确度	1．0	1．0	1．0
范围度	3：1	10：1	6：1或20：1
阻力损失	大	小	小
耐高温性能	好	一般	好
低流速特性	好	一般	好
抗振性能	好	差	好
蒸汽湿度影响	小	大	小
检定周期	一年	二年	四年
系统构成	复杂	简单	简单
安装维护	复杂	简单	简单
引压管冷凝水液位差	可能有	无	无

5.3 系统构成

双差压变送器＋温度、压力补偿，HART协议信号传输，仅需1根2芯电缆。



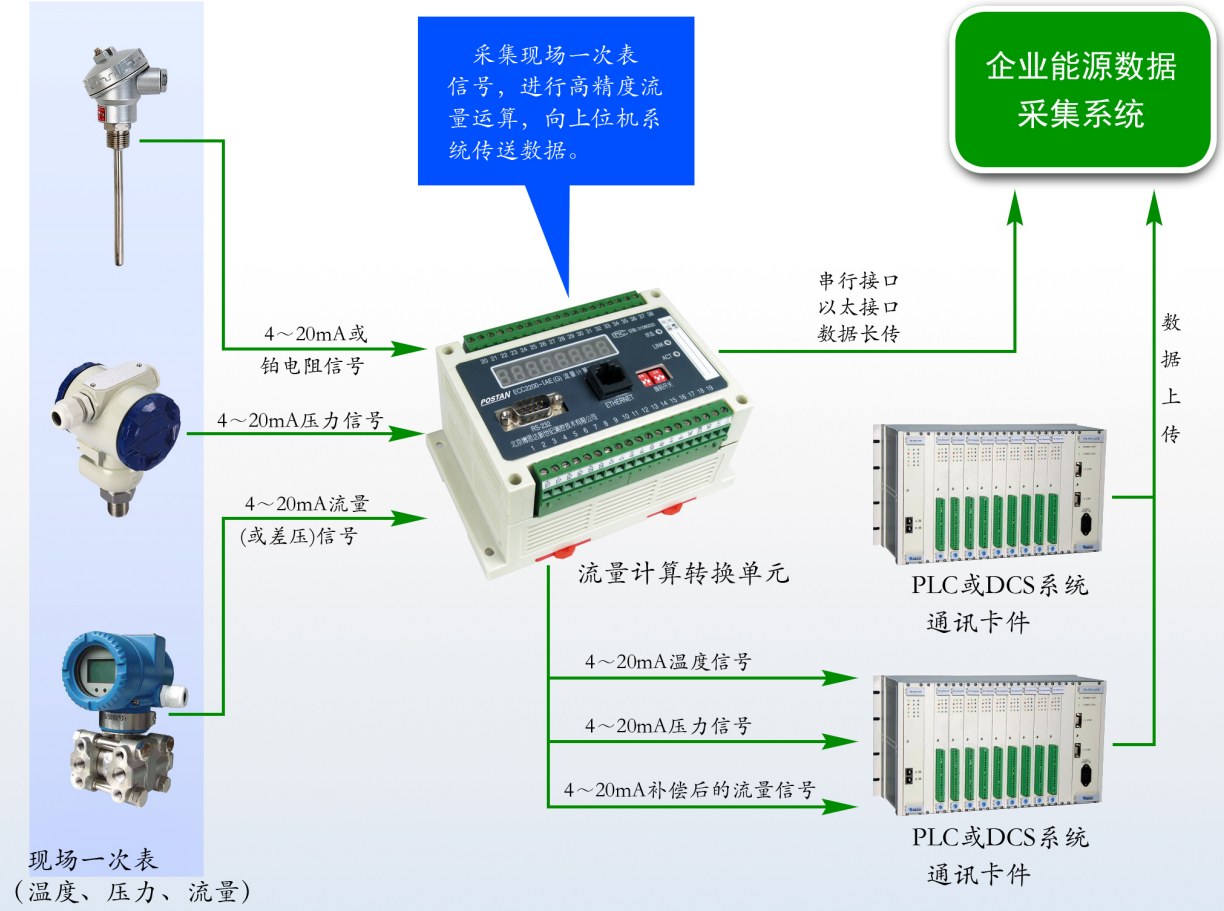
5.4 流量计算转换单元的应用

流量计算转换单元是一款全新概念的网络化流量计量设备，无键盘、微型显示及小型化的设计，使其能够密集安装在仪表柜内。通过采集到现场流量、压力、温度信号并完成:

（1）根据《蒸汽热量计算方法》国家标准（制定中）或IAPWS－IF97国际水和蒸汽性质公式。对蒸汽密度等物性值进行高精度计算;

（2）对流出系数C和可膨胀性系数ε等中间参数进行实时修正；流量计算机可自动实时计算流出系数C、（和可膨胀系数ε），这是实现节流式流量计宽量程自动补偿的关键所在。符合上述条件的差压式流量计，在满足准确度同时，流量测量范围可真正达到6：1（或20：1）；

（3）将准确的流量数据由以太网、串行接口等数字方式或由4～20mA标准电流信号，将数据上传至DCS系统或上位机系统。



流量计算转换单元的数据上传示意图

6. 成功案例

齐鲁石化公司4.0 MPa 蒸汽管网（供方为热电厂外供3条管线，需方为各二级厂26条管线）原先配备的计量仪表种类繁多，一次表有孔板、涡街、喷嘴、威力巴等；二次仪表使用多个厂家的产品或在DCS上进行补偿计算，流量运算模型既不统一，也不符合标准。多年来，一直存在较大输差（9%～15%）。

2005年统一采用ISA1932标准喷嘴（一次表）、流量计算机（二次仪表）对4.0 MPa管网计量仪表进行改造。流量计算机遵循IAPWS-IF1997公式实时计算蒸气的密度，按照GB/T2624标准给出的算法，实时计算流量系数C、可膨胀性系数ε，提高了准确度，也实现了真正意义上的量程扩展（6：1或20：1）。改造后，蒸汽管网输差达到了2%～3%并保持多年。

齐鲁石化公司蒸汽管网计量改造的成果在中石化计量系统引起了很大的反响，此类仪表配置，在该公司乃至整个中石化系统蒸汽计量逐渐成为了公认的标准配备方案。

采用这种蒸汽计量仪表配置的单位有：燕山分公司、镇海炼化、金陵分公司、天津分公司、沧州炼油厂、荆门分公司、石家庄炼厂、济南分公司、安庆分公司、洛阳分公司、中原油田、巴陵分公司、高桥分公司、岳阳分公司、九江分公司、仪征化纤公司、扬子石化公司、兰州石化公司、抚顺石化公司等。

标准节流式流量计取得这些飞跃，是多项技术进步的成果，它改变了人们对标准节流式流量计的传统认识！

地址：北京市海淀区花园东路10号 高德大厦705　　邮编：100191
电话：010-84637969、010-84638065　　传真：010-84648082
Web：www.polestar.com.cn　　Email:sales@polestar.com.cn