POSTAN

博思达技术方案3

大口径煤气流量计量方案

1、问题的提出

大口径煤气流量计量的难点：

（1）管道口径大；一般现场管道口径在0.3～3m左右，以1m以上口径居多，某些现场煤气管道直径可达4～5m。

（2）现场管道结构复杂，并且往往直管段不足。

（3）煤气流速低；大多数煤气管道平均流速都在10m/s以下，甚至低到1～3m/s。

（4）煤气压力低（密度低）；压力范围一般在几kPa至几百kPa（表压），甚至为负压（表压）。

（5）介质脏污、检测件易堵塞、易结垢。

2、解决方案

北京博思达新世纪测控技术有限公司长期致力于大口径煤气流量计量的研究，针对大口径煤气流量计量的难点，在总结多年现场实践的基础上，提出了基于流速—面积法原理的大口径管道煤气流量计量解决方案；方案采用FJP系列测管式流量计（享有多项自主知识产权）测量煤气管道截面内的一个（或数个）点的流速，由配套的FC2000系列流量计算机（含软件）实时计算管道截面煤气速度分布，进而完成管道煤气流量（能量）计算。

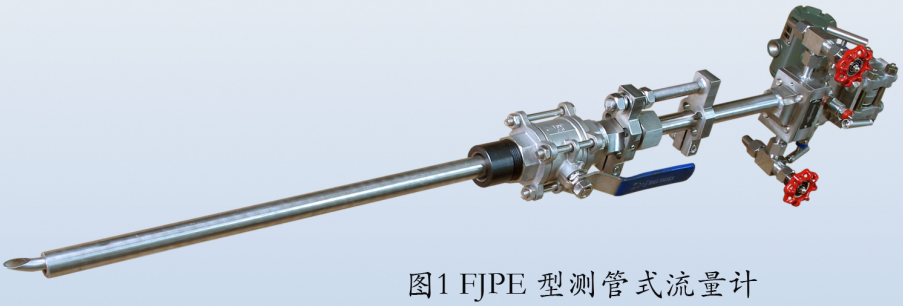


图1 FJPE 型测管式流量计

2.1 FJP系列测管式流量计测量原理

FJP系列测管式流量计的测量管插入煤气管道。通过测量管测头测量插入位置煤气的点流速，然后通过配套流量计算机（基于皮托-静压管原理）计算出管道内的流体的流量。计算公式见式1、式2。

$$Q = f(V, D, \alpha)$$ ——式1

式中：

Q —— 煤气的体积流量 m /h

V —— 测管流量计测头位置煤气的点流速 m/s

D —— 管道直径 m

α —— 管道内煤气的流速分布系数，无量纲。流速分布系数α是遵从国际标准所提供的计算模型，根据测头在管道中的位置和现场工况参数实时计算得到。

$$V = K\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$ ——式2

式中：

K —— 测管式流量计仪表校正系数 无量纲

ΔP —— 测头测量点流速得到的差压 Pa

ρ —— 煤气密度 kg/m^3

2.2 遵从的国际标准

（1）ISO7145《圆形横截面封闭管道中流体流量的测定——在横截面的一点上速度测量的方法》

（2）ISO3966《封闭管道中流体流量的测量——采用皮托静压管的速度面积法》

2.3 FJP系列测管式流量计特点

a. 用于煤气流量测量时，流速范围（管道截面平均流速）：4m/s～30m/s；专门为低流速煤气流量测量设计的FJPB型变径式测管流量计，下限流速可至1 m/s～4m/s。

b. 压力损失小。插入管道内的FJPE/FJPM型测管式流量计造成的压力损失可忽略不计。FJPB型变径式测管流量计经过特殊设计的变径管段具有压损恢复功能，实际造成的压力损失可恢复80%以上。

c. 抗堵塞的测头设计；用于脏污煤气流量测量时，测头不易堵塞。并且配有简易在线吹扫装置，可在测头发生堵塞时在线吹扫清洗。

d. FJP系列测管式流量计可在管道不停气的状况下，进行插入/拔出作业，且安装/维护简单、方便。使用专用的在线开孔器可在煤气管道上在线开孔安装FJPE型测管式流量计，施工作业量小。

3、系统构成及配套流量计算机功能

3.1 由单支测管式流量计组成的流量测量系统

单支测管式流量计组成的流量测量系统符合ISO7145《圆形横截面封闭管道 中流体流量测量——在横截面的一 点上速度的测量方法》。系统构成见图2。

a. 测管式流量计的测头插至管道中心，即最大流速点上。

b. 配套的FC2000系列单路流量计算机接收测管式流量计输出的点流速差压信号及温度、压力、补偿信号。流量计算机计算管道煤气流量并输出。

c. 单支测管式流量计流量测量系统的测量不确定度≤3%。

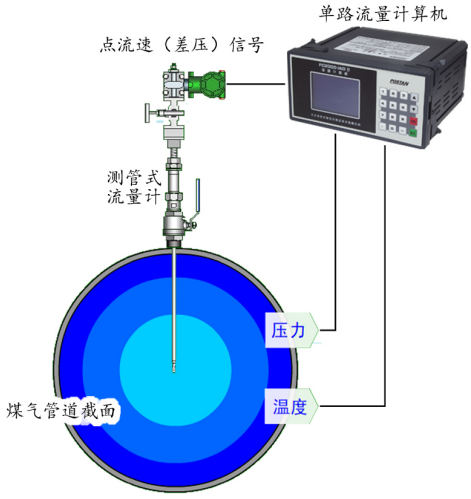


图2 单支测管式流量计
组成的流量测量系统

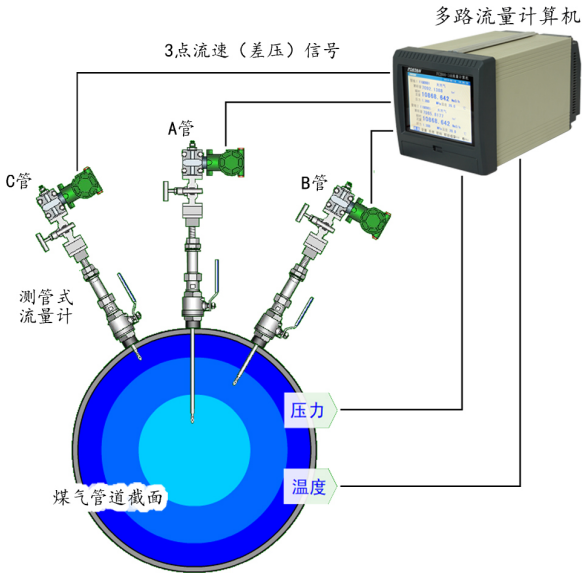


图3 三支测管式流量计
组成的流量测量系统

3.2 由三支测管式流量计组成的流量测量系统

三支测管式流量计组成的流量测量系统符合ISO3966《封闭管道流体流 量的测量——采用皮托静压管 的速度面积法》。系统构成见图3。

a. 三支测管式流量计的测头分别插至管道内的三个不同位置（不同 的流速点）。

b. 配套的FC2000系列多路路流量计算机接收三支测管式流量计输出的流量差压信号及温度、压力补偿信号。流量计算机计算管道煤气流量并输出。

c. 三支测管式流量计流量测量系统的测量不确定度≤3%。

3.3 测管式流量计测量系统对直管段的要求

测点上游侧阻流件形式	前后直管段要求
单个90° 弯头或三通（流体仅从一个支管流出）	前10D后5D
在同一平面上的两个或多个90° 弯头	前15D后5D
在不同平面上的两个或多个90° 弯头	前20D后5D
渐缩管（在1.5D至3D长度内由2D变为D）	前10D后5D
截止阀全开	前10D后5D

3.4 配套流量计算机主要功能

FC2000-IAH、FC2000-IAD型流量计算机、FC2000-IAE（G）型流量计算转换单元均有用于与测管式流量计配套的大口径煤气流量计量版本。

流量计算机（流量计算转换单元）装载的煤气流量计量专用软件严格遵循国际标准 ISO7145《圆形横截面封闭管道 中流体流量测量——在横截面的一 点上速度的测

量方法》、ISO3966《封闭管道流体流量的测量——采用皮托静压管 的速度面积法》。

流量计算机（流量计算转换单元）采集来自测管式流量计的差压信号以及温度、压力补偿信号，通过煤气流量计量专用软件计算出管道煤气流量。

流量计算机（流量计算转换单元）特点：

a. 可输入煤气各组份的百分比，自动计算出煤气的密度。也可直接输入煤气密度。

b. 通过采集温度、压力补偿信号，实时进行煤气工况密度修正。

c. 在管道煤气流量（管道雷诺数）变化时，实时进行流速分布系数α计算。

d. 通过煤气湿度修正，计算出煤气中干部分的流量。

e. 当计量点直管段长度不足时（上游节流件为单个90° 弯头）时，通过干扰系数γ修正流量值。修正后，可使流量误差15%以上减小到5%左右。

f. 流量计算机（流量计算转换单元）还具强大的通讯功能，可以通过多种方式实现数据远传。

4、低流速大口径管道煤气流量测量解决方案

现场大口径管道煤气流量测量，常会遇到煤气流速低的问题。当管道煤气流速＜3m/s时，流速低于国际标准给出的下限流速值，并且差压值很低，无法准确测量。

本公司针对这一问题，在采用计算流体力学理论分析的基础上，进行了大量试验研究，开发了满足低流速煤气流量计量要求的FJPB变径式测管流量计。FJPB变径式测管流量计由FJPE型测管式流量计和特殊设计的低压损变径管两部分组成；见图4。

FJPB变径式测管流量计的低压损变径管由收缩变径段、喉部测量段及下游渐扩段组成。

收缩变径段采用了低流阻型线（类似于标准喷嘴）设计，其作用可以在很短的距离内将低流速煤气整流提速至测管流量计最适合的流速测量范围之内，同时具有良好的整流效果（可降低对上游直管段的要求）。

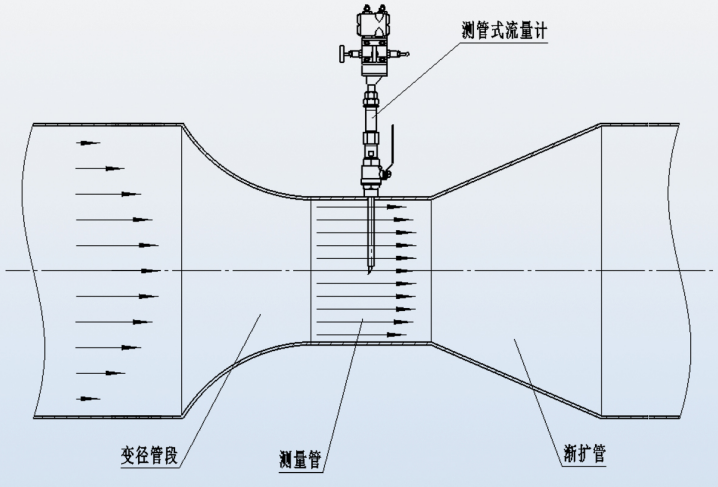


图4 FJPB型变径式测管式流量计结构

喉部测量段是一段内径精确、内壁光洁管段。经过提速后的煤气进入喉部测量段后已经形成对称稳定的流场，FJPE型测管式流量计的测头插入至喉部测量段中心。

下游渐扩段采用低流阻的渐扩设计。煤气流经收缩变径段及喉部测量段后会有一定的压力损失（压损大小与变径比有关），下游渐扩段可以使损失的压力得到恢复。

理论上，下游渐扩段可以将压力损失恢复到90%以上；实际应用中，下游渐扩段一般采用压力损失恢复到80%以上的设计。使整个变径式测管流量计的压力损失近似于文丘里管。FJPB变径式测管流量计见图5。

FJPB变径式测管流量计的低压损变径管已获国家专利（专利号：200920156477.3)。



图5 FJPB变径式测管流量计

为总结此项研究，研究人员撰写了《FJPE型测管对大口径流量测量的试验研究》论文（作者：北京博思达新世纪测控技术有限公司 周国祥、王京安）。此文由中国计量测试学会推荐在第十五届国际流量会议（FLOMEKO 2010）上作为宣读论文发表。《FJPE型测管对大口径流量测量的试验研究》介绍了用FJPE型测管流量计为提高大口径流量测量准确度的几个试验，着重介绍了用变径式测管流量计对一个弯头形成的非充分发展管流的试验研究过程、部分数据处理结果、管道横断面流速分布情况，研究结论表明，用变径式测管流量计测量大口径流量，对流体有明显的整流效果，可缩短对直管的要求，且仪表常数在较宽雷诺数范围波动小，为大口径流量测量提供一种新思路。

FJPB变径式测管流量计的主要技术指标：

（1）测量介质：煤气（含高炉煤气、焦炉煤气、混合煤气等）及其它气体

（2）管道公称直径：DN80～DN3000(超出此范围，可为用户定制)；

（3）流速范围：1m/s～30 m/s；

（4）最小直管段要求：总直管段≥6D；其中表前直管段3D、表后直管段1D。

（5）阻力损失：可恢复90%（可在流量计选型设计时，根据实际需要计算出FJPB变径式测管流量计的压力损失）。

5、通过修正干扰系数γ减小因直管段不足带来的测 量误差解决方案

为了保证流量测量准确，无论是采用单支或三支测管式流量计测量煤气流量，国际标准都对煤气管道的直管段有严格的要求。

一般流量计上游有几种常见的阻流件形式；测管式流量计对前后直管段的要求因上游侧阻流件形式不同而不同。在这几种阻流件形式中，管道上游只有一个90° 弯头的形式最为常见。

采用单支测管式流量计测量煤气流量，在管道上游只有一个90° 弯头时，测管式流量计的前直管段至少大于15D。实际现场管道往往不能满足直管段长度的要求；直管段长度不足带来的测量误差有时可以达到15%以上。

针对在管道上游只有一个90°弯头的阻流件形式（见图6），ISO7194《测量封闭管道中的流量——在圆管中处于旋涡及非对称流动下用皮托管及流速计组的速度面积流量测量方法》为我们提供了一个研究非充分发展管流流量测量的研究思路。

上游侧阻流件形式为单个90°弯头时下游非充分发展管流的研究实验。实验测得几种口径管道单个90°弯头下游直管段分别为3D、5D、8D管道横截面内的流速分布，得到大量实验数据，验证了ISO7194提供的方法。

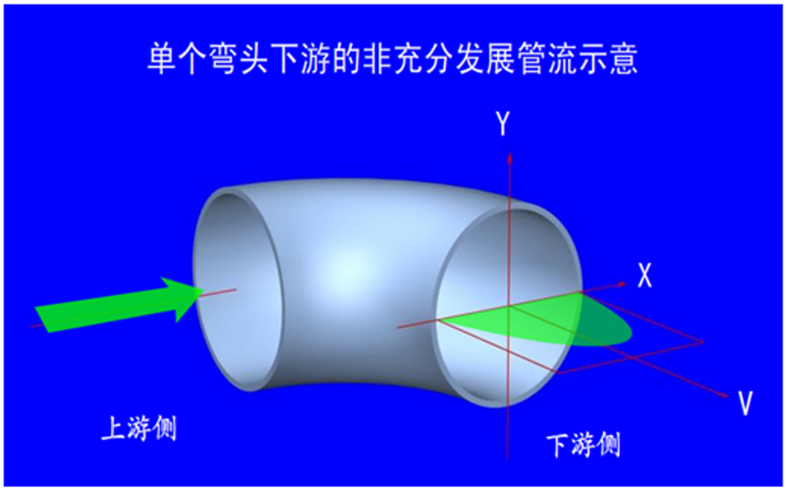


图6

通过对实验数据的分析研究，得到如下结论：

1．单支测管式流量计测头插至管道中心，并且按直管段足够长的分布系数计算流量；在直管段不足时，测量误差随上游直管段长度减小而增大。

2．可以根据ISO7194提供的方法，对不同直管段长度下的流场分布进行量化，进而修正用于流量计算的干扰系数γ。

3．根据ISO7194的要求，使用经过修正的干扰系数γ计算流量，其流量测量误差可控制在±4%（实验中流量测量误差不大于±3%）。

应用上述试验成果，采用单支FJP测管式流量计（测头插至管道中心），利用与FJP测管式流量计配套的FC2000-IAD流量计算机，在处理信号同时进行速度分布补偿。在现场管道直管段上游只有一个90°弯头，且3D＜直管段长度＜10D的情况下，其测量误差可控制在±4～5%左右。

6、应用案例

（1）唐钢集团及下属企业目前大口径煤气(含:高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气、混合煤气)流量计量全部使用测管式流量计；用于企业内部能源结算流量计量及生产过程工艺控制。这些测管式流量计均以流量计算机（流量计算状换单元）为配套二次仪表，并通过远程通讯接入企业能源网。目前，唐钢煤气产、用气流量输差小于5%。

（2）济钢在使用测管式流量计之前，全部使用均速管流量计对大口径煤气流量计量。由于煤气脏污造成均速管流量计取压孔堵塞（严重的，10几天就堵死）。更换测管式流量计后，在同样的管道上堵塞时间延长到半年甚至1年以上。在其他冶金企业煤气计量现场，测管式流量计的抗堵塞性能也得到印证。

（3）龙钢8万方煤气柜转炉煤气回收计量。管道直径：Φ2020，流量范围：30000Nm3/h～140000 Nm3/h，工作温度：55℃，工作压力：3KPa，直管段不满足要求。在改造前，由于流速低，产生的差压值小（常小于15Pa），不能保证准确计量。采用变径

式测管流量计对龙钢公司转炉煤气回收计量系统进行改造（仪表配置：FJPB-2000/1600型变径式测管流量计和流量计算机），取得到了良好的效果，其数据得到了各相关部门的认可。此后，龙钢公司陆续完成：

a. DN3200变径到DN2400的变径测管流量计用于其十万煤气柜转炉煤气回收流量测量；

b. DN800变径到DN600变径测管流量计用于三立炉料公司的焦炉煤气结算量计量；

c. DN800变径到DN600双向流变径测管流量计，用于陕西龙门煤化工和龙钢公司的双向流焦炉煤气流量结算计量。

采用测管式流量计对大口径煤气流量计量的企业还有：首钢（秦皇岛、曹妃甸、长治）、武钢、攀钢、承钢、邯钢、邢钢、安钢、湘钢、涟钢、、天铁、永刚、柳钢、汉钢、龙岗、舞阳钢铁、方大特钢……



焦炉煤气现场运行的单支
FJPM型测管式流量计流量测量系统



焦炉煤气现场运行的三支
FJPE型测管式流量计流量测量系统



高炉煤气现场运行的
FJPB型变径式测管式流量计



使用专用的在线开孔器
在煤气管道上带压开孔作业

附注：关于采用速度—面积法计量系统不确定度的说明

基于速度—面积法原理的系统不确定度（操作条件下的瞬时体积流量不确定度）

$U_{rel}(q_v)$ 按式3 计算。

$$U_{rel}(q_v)=2\sqrt{u_{rel}^2(\mathrm{v})+u_{rel}^2(\alpha)+u_{rel}^2(\mathrm{S})} \qquad 式3$$

式3 中的不确定度分量可以分为方法不确定度和测量不确定度两类。

1．方法不确定度：

$u_{rel}(\alpha)$ —— 管道的流速分布系数（中心点流速与平均流速之比）的相对标准不确定度，即计量方法本身的相对标准不确定度。国际标准ISO 7145《圆形横截面封闭管道中流体流量的测定——在横截面的一点上速度的测量方法》对根据在一个单独的点上速度测量来测定流量方法评估：方法不确定度（在95%的置信水平上）不超过±3%。

2．测量不确定度：

$u_{rel}(\mathrm{S})$ —— 管道截面积测量的相对标准不确定度。

$u_{rel}(\mathrm{v})$ —— 点流速测量的相对标准不确定度,按式4计算。

$$u_{rel}(\mathrm{v})=\sqrt{u_{rel}^2(\mathrm{k})+\frac{1}{4}u_{rel}^2(\Delta\mathrm{p})+\frac{1}{4}u_{rel}^2(\rho)} \qquad 式4$$

式中：

$u_{rel}(\mathrm{k})$ ——测头系数的相对标准不确定度，经标定可达到0.50%；

$u_{rel}(\Delta\mathrm{p})$ ——差压测量的相对标准不确定度，取决于差压变送器的精度与测量值与量程之比；

$u_{rel}(\rho)$——操作条件下流体密度的相对标准不确定度，按式5 计算。

$$u_{rel}(\rho)=\sqrt{u_{rel}^2(M)+u_{rel}^2(Z)+u_{rel}^2(P)+u_{rel}^2(T)} \qquad 式5$$

式中：

$u_{rel}(M)$ ——流体摩尔质量的相对标准不确定度；

$u_{rel}(Z)$ ——操作条件下流体压缩因子的相对标准不确定度；

$u_{rel}(P)$ ——压力测量的相对标准不确定度；

$u_{rel}(T)$ ——温度测量的相对标准不确定度。

从以上对系统不确定度分析可看出：基于速度—面积法原理的流量测量系统的不确定度是由方法不确定度和测量不确定度两类合成得到。其中，方法不确定度（3%）是系统不确定度的主要影响分量，测量不确定度由于现代测量仪表测量精度很高可控制在1%，不是系统不确定度的主要分量，而测头系数的不确定度仅是影响测量不确定度的一个因素。因此，用测头系数的不确定度代替流量的不确定度是不科学的，二者间有着巨大差异。

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