

采用超声波原理测量烟道气流量

——Alpha6000 超声波气体流量计 在烟道气测量中的应用

王 冲 总经理 德菲电气（北京）有限公司

文章摘要： 作为固定污染源烟气排放连续监测系统 CEMS 的一个重要参数，大管径烟道气流量的测量始终是一个难题，随着环保监测力度的加强，特别是如果建立排放权交易制度，如何准确测量烟道气流量将是一个挑战，本文主要介绍一种新型的，采用自相关原理的超声波烟道气流量计的应用，同时对比几种其它常见的烟道气流量测量方式。

关键词： CEMS 烟道气流量、超声波时差原理、自相关原理、皮托管、热式流量计、光学相关流量计

概述

烟道气是燃烧过程最终释放的废气，在我国主要来源于各种燃煤锅炉和焚烧炉、也包括少量燃气和燃油锅炉、高炉、焦炉和工业窑炉等。有几种流量监测技术已经在这个领域取得了成功的应用，直接方法包括匀速管流量计（典型的如 S 型皮托管），热式气体质量流量计，超声波气体流量计，以及光学闪烁相关流量计等；间接方法包括用燃料流量推算烟气排放量，例如天然气锅炉的温室气体排放量计量。但由于烟道通常管径大（很多为矩形烟道），压力低，直管段不足，含有粉尘、水汽等杂质，这些流量测量技术也存在一些具体应用问题，这会对测量的稳定性和日常维护带来麻烦。作为固定污染源烟气排放连续监测系统 CEMS 的一个重要参数，流量测量系统必须增强自动标定和诊断技术以提高测量精度和稳定性。随着排放交易权制度的建立，对测量系统的要求会越来越高。在世界各国的环保标准当中，没有规定哪种流量测量技术适合于烟道气测量。换句话说，没有一种绝对的参考标准，每一种测量方法都有它的优势和局限性。

超声波气体流量计并不是一个很新的技术，但用于烟道气测量需要产品具有较高的技术含量。首先要解决能适应大管径、低压气体的低频大功率超声波换能器问题，其次是关键的针对噪声干扰的数字滤波技术，要考虑传感器耐温以及耐腐蚀性能，最后还要解决传感器对中，吹扫风配置等工程问题。Alpha6000 超声波气体流量计是德菲电气（北京）有限公司引进国外先进技术，采用进口超声波换能器，结合国内现场工况而开发的，性能不亚于进口原装同类产品，目前已经批量应用于国内低压煤气，沼气等复杂流量测量。由于进口同类产品价格昂贵，目前在国内烟道气流量测量方面，采用超声波技术的并不多见。据相关市场调查显示，在美国市场，超声波气体流量计在烟道气测量方面的占有率达到 40%，我们相信基于 Alpha6000 系列产品很高的性价比，该产品在中国烟道气流量测量领域同样有着巨大的应用前景。

1、烟道气流量测量的现状

1.1 测量烟气流量的目的

烟道气流量或者流速的测量，作为污染源监测数据之一，在美国的大规模推广始于 1993 年环保局（EPA）的酸雨控制计划（Acid Rain Program），因为所关注 SO₂ 排放总量需要流量参与计算，后来的 NO_x 预算计划(NO_x Budget Program)以及近来的温室气体排放监测报告(EPA 40CFR Part 98 : Mandatory Reporting of Greenhouse Gases Rule)也需要流量的准确测量。在美国环保局相关文件中，列出了烟道气流量的参考测量方法（New Source Performance Standards, EPA 40 CFR 60, 附录 A, 参考方法 RM 1 和 2），这些方法涉及到了横穿烟道，逐点分析法，目的是为了获得一个烟道横截面的真实平均流速值。对于颗粒物参考测量方法 RM5，流速测量也是必须的，因为颗粒物等速采样要求也须参考烟气流速。

中国 2007 年颁布并实施了 HJ/T75-2007 《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》，在这个文件中，关于流量/流速规定摘录如下：

7.2.2

用参比方法进行验收时，流速至少获取 5 个该测试断面的平均值，并取测试平均值与同时段烟气 CEMS 的分钟平均值进行准确度计算。

b. 流速相对误差计算： $R_{ev}\%=(V_{CMS}-V_i)/V_i\times 100\%.....(2)$

式中：

R_{ev} ——流速相对误差，%；

V_i ——参比方法测定的测试断面的烟气平均流速，m/s(可与颗粒物测定同时进行)

V_{CMS} ——流速 CMS 与参比方法同时段测定的烟气平均流速，m/s。

7.2.3 验收测试结果按附录 D 中的表 D-5 和表 D-8 表格形式记录。

验收检测项目		考核指标
流速	相对误差	流速 > 10m/s 时，不超过±10%； 流速 ≤ 10m/s 时，不超过±12%

C.1.2 烟气流量的计算

实际工况下的湿烟气流量 Q_s 按式 (3) 计算：

$$Q_s=3600\times F\times V_s.....(3)$$

式中：

Q_s —实际工况下湿烟气流量，m³/h；

F —测定断面的面积，m²

标准工况下干烟气流量 Q_{sn} 按式 (4) 计算：

$$Q_{Sn}=Q_S \times (273/273+t_s) \times [(B_a+P_s/101325)] \times (1-X_{sw}) \dots\dots\dots (4)$$

式中:

Q_{Sn} —标准状况下干烟气流量, m^3/h ;

B_a —大气压力, Pa ;

P_s —烟气静压, Pa ;

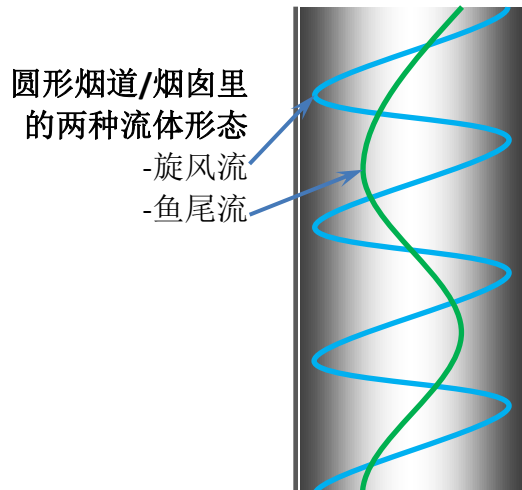
t_s —烟温, $^{\circ}C$;

X_{sw} —烟气中含湿量, %。

1.2 烟道气流量测量难点

1.2.1 流态不稳定

我们通常把进入烟囱前的烟道称为烟道, 对于小型锅炉或焚烧炉, 烟囱和烟道通常是圆形的, 直径通常在 0.5 到 2m 的范围内; 对于大型燃煤锅炉, 由于烟囱较高, CEMS 系统通常安装在水平矩形烟道上, 这类烟道很大, 300MW 机组达 5.3×6m, 600MW 机组可达 5.7×10m, 而且由于是在现场用钢板焊接, 外形往往不太规则。



由于直管段不足, 烟道内流态通常不稳定, 圆形烟道流态见上图。矩形烟道由于更大, 流场不规则, 内部流态更加难以描述。

1.2.2 含有粉尘、水汽、粘稠杂质

烟道气中含有腐蚀性气体、粉尘、水汽等, 湿法脱硫装置的出口烟气含有粘稠的石膏浆滴, 这些会给流量测量仪表带来腐蚀、沾附、堵塞等一系列问题。

1.2.3 压力低, 温度高, 气体流速较低

烟道气通常是微正压或微负压, 温度通常在 50 到 150 $^{\circ}C$, 而流速相对不高, 有时会给下限高的差压类流量计带来很大的考验。

1.3 常用烟道气流量计对比

1.3.1 皮托管等差压类流量计

目前国内烟道气流量测量以差压流量计为主，主要是 S 型皮托管。原理：差压原理。节流元件置于烟道内，烟道内流体在通过该节流件时，在节流件前后将产生一定的压力差。对于一定形状和尺寸的节流件、一定的测压位置和前后直管段、一定的流体参数情况下，节流件前后的差压 ΔP 与流量 Q 之间关系符合伯努利方程。通过测量差压值求得流量。

优点：通用性好，价格便宜，在线零点和量程自动校准可以实现，但通常只能校验压力变送器本身。

缺点：点流速测量，虽然可选多个节流装置测量同一横截面多点平均差压，但在实际应用中很少采用；

节流元件与测量介质接触，介质中的粉尘、液滴等杂质会粘附在节流元件上。会造成流量计测压孔堵塞、维护量大的情况；

离轴的气流（旋风）会造成误差，大约每 2° 离轴会产生 1%的读数误差；

1.3.2 热式气体质量流量计

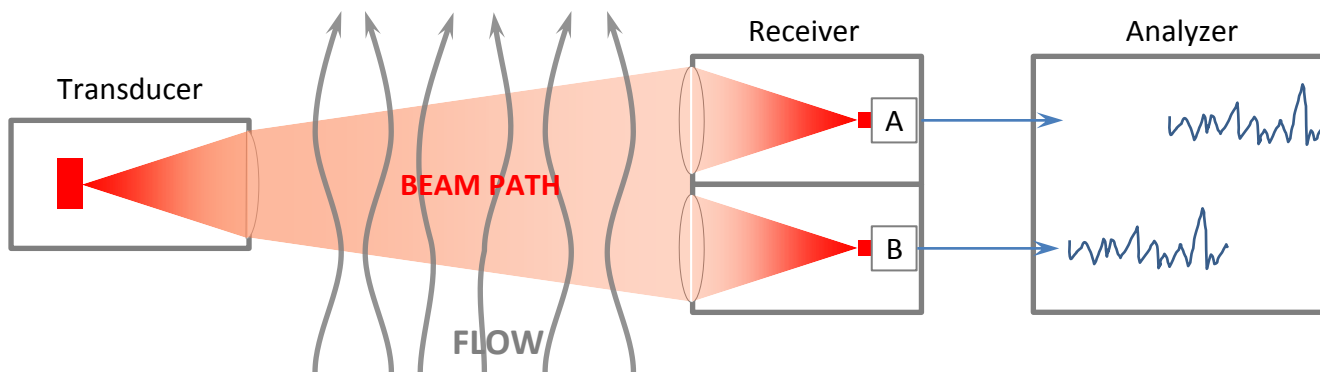
目前有少量烟道气测量采用这种流量计，一般用于燃料比较纯净的锅炉，例如燃气锅炉。原理：采用 2 个铂金属细丝绕制的热电阻传感器，一个加热，另一个感受它的热扩散，分为恒功率和恒温差两种形式，直接测量气体的质量流量。

优点：直接测量质量流量而无须温度、压力补偿；安装简便；在线零点和量程自动校准可以实现，通常仅电子单元部分。好的热式流量计在干净气体测量中可以提供较高的精度，较宽的量程比以及较低维护量。如果气体组分比较多，得到的流量值可能与实际不一致，热式流量计的局限性大致有以下四点：

- a. 加热传感器并不能辨别出是流速降低还是传感器外表面附着颗粒，因为两者都会减少热损失，有效的建议是增加压缩空气的反吹系统，但是我们并不能确定空气清洁法什么时候能够完成清洁，因此热式流量计不适于含粘附性颗粒物的介质中测量。
- b. 加热传感器并不能区分是流速提高还是液滴撞击或是表面水汽蒸发造成，这两点都会使热量损失增加，因此不能够应用于有液滴气流中。
- c. 即使轴向没有流量，非轴向气体流动仍会制冷加热传感器，而在非轴向有很高气体流动的情况也不适于用热式流量计。
- d. 点流速测量，虽然可选多点传感器测量同一线或多传感器测量同一横截面多点平均差压，但在实际应用中很少采用；

1.3.3 光学闪烁烟气流量计

这是一种相对比较新的技术，实际上在用于烟道气流速测量以前，这种技术已经用于测量飞机跑道的风速，通过星光闪烁测量大气风速等。其原理示意图如下：



LED 光源发出的光穿过烟道，被相距很近的 A、B 两个感光器接收，由于烟道气中涡流、粉尘等的散射和折射作用，感光器接收的信号形成一定的特征谱线，由于两个感光器很接近，两个谱线具有一定的相关性，而由于风速的作用，这两个谱线具有一定时间差，通过测量这个时间差就可以得到风速。还有一种无光源方式的，利用热烟气本身的红外特征信号来检测相关性。

优点：穿越烟道的线平均流速测量；可同时测量颗粒物。

缺点：不是所有烟道都存在涡流粉尘扰动，有些现场不能使用；

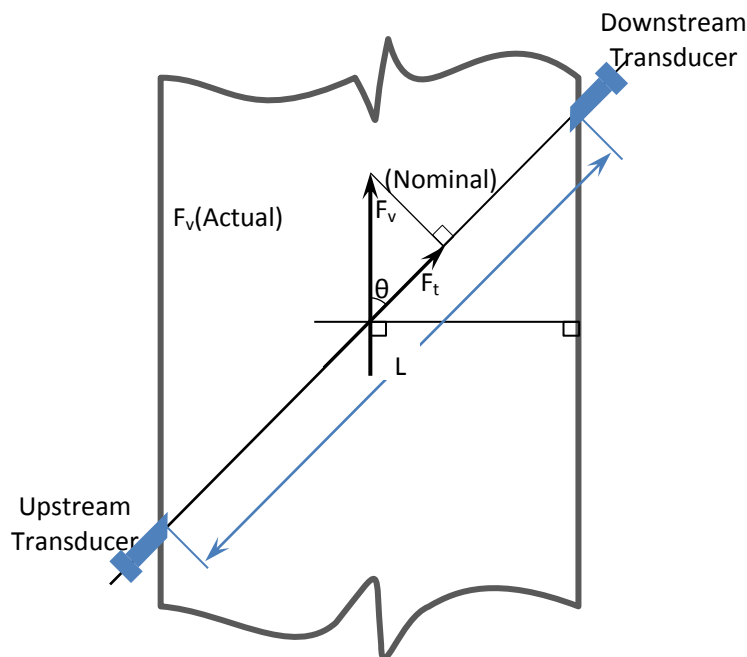
与光学粉尘仪一样，光窗会粘附介质中的粉尘、液滴等杂质，即使有吹扫风，会造成测量失效、维护量大的情况；吹扫风会造成闪烁效应，引起测量误差；

2、Alpha6000 超声波气体流量计

Alpha6000 超声波流量计是针对高湿、低压、低流速、大管径工业或市政现场状况开发的一种流量仪表，满足市政、工业测量需求。通用性强，可单独工作或接入 CEMS 系统。

2.1 原理

超声波在流体中的传播速度与流体流动速度有关，据此，可以实现流量测量。超声波的发射和接收采用双探头方式。可以互换使用或进行双向收发。如下图所示，两个超声波传感器相向安装于气体管道的上下游，上游传感器向下游传感器发射超声波，传输时间被定义为 t_1 ；反过来，下游传感器向上游传感器发射超声波，传输时间被定义为 t_2 。这两个时间的差值可以被用来计算气体流速。



声波从上游传感器到下游传感器的传播速率:

$$V_1 = c_s + F_v (\cos \theta)$$

声波从下游传感器到上游传感器的传播速率:

$$V_2 = c_s - F_v (\cos \theta)$$

V_1, V_2 = 气体流速

c_s = 声波传输速率

θ = 声波传输夹角

F_v = 气体流速

求的气体流速 F_v 为:

$$F_v = \frac{V_1 - V_2}{2 \cos \theta}$$

其中 $V_1=L/t_1$, $V_2=L/t_2$:

$$F_v = \frac{L}{2 \cos \theta} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} \right)$$

F_v = 气体流速

L = 两传感器之间的距离

t = 两传感器上下传输时间

当然, 实际的计算还要进行复杂的补偿运算, 最终计算出实际的流速 V_{act} 。

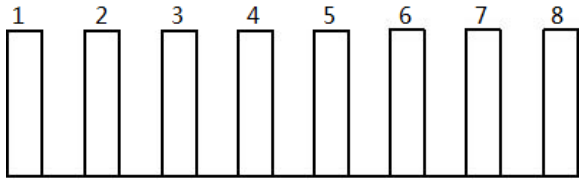
2.2 独特优势

2.2.1 自相关检波技术

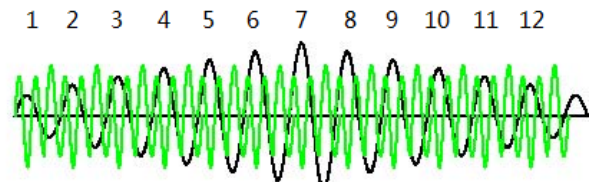
设超声波信号为 $S(n)$, 噪声干扰信号为 $U(n)$ 。即实际采样得到的信号 $X(n) = S(n) + U(n)$ 。假定 $S(n)$ 是周期性的。周期为 M , $X(n)$ 的采样长度为 N , 且 $N \gg M$, 那么 $S(n)$ 的自相关函数为:

$$r_x(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [S(n) + U(n)] [S(n+m) + U(n+m)]$$

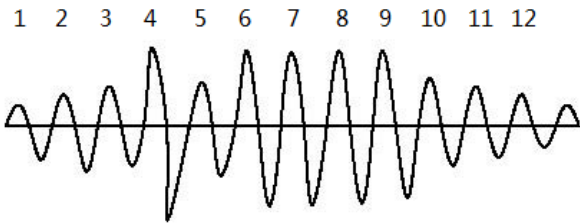
$$= r_s(m) + r_{us}(m) + r_{su}(m) + r_u(m)$$



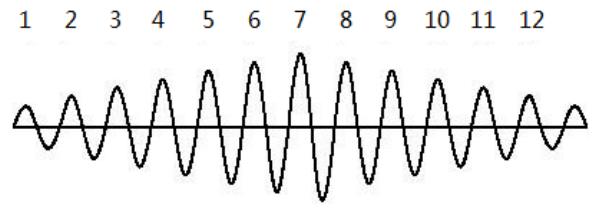
发射波形



有干扰的接收波形



发生畸变的接收波形



经过自相关算法后得到的正常波形

式中， $r_{us}(m)$ 和 $r_{su}(m)$ 是 $S(n)$ 和 $U(n)$ 互相关函数，因为噪声信号是随机产生的，和超声波信号不相关的。这两项近似为零。 $r_u(m)$ 是噪声干扰信号 $U(n)$ 的自相关函数。它的值主要集中在 $m=0$ 处。 $M>0$ 后迅速降低。因此若信号 $S(n)$ 是以 M 为周期的。那么 $r_s(m)$ 也是以 M 为周期的。且在 $m=0, M, 2M, \dots$ 处出现峰值。由此可见，采样信号的自相关函数 $r_x(M)$ 近似等于超声波信号 $r_s(M)$ 的自相关函数，噪声干扰的信号基本被消除。

Alpha6000 超声波气体流量计采用自相关检波技术，有效克服管道振动和阀门开闭等原因造成的噪音干扰，大大提高了仪表的抗干扰能力。使仪表可以适应工业现场的恶劣条件。

2.2.2 全数字化电子单元

电子单元采用最新的微电子技术和元件，极大地减少了二次仪表的电子元件的数量。采用数字算法程序，使仪表信号处理更精确，运算速度更快捷。也增加了二次仪表的抗干扰能力。

2.2.3 先进的传感器

超声波传感器采用耐腐蚀不锈钢外壳，可以测量工业和市政过程中的各种气体流量，特氟龙面不易粘附，对于湿气、脏气、混合气体介质有很好的适应性。精选频率、波束角、和发射功率，可以解决大管径、低压、低流速的测量难题。测量时，传感器表面与过程气体接触，对于烟道气采用插入式安装方式。

2.2.4 低维护、低运行费用

传感器没有可造成堵塞或聚集残留物得部件, 没有被磨损的运动部件, 很少需要日常维护, 插入式传感器通过球阀组建安装, 可以方便的实现在线插拔。方便维护。特殊场合应用可选传感器空气/氮气吹扫装置, 该装置也可防止温度突变对传感器的影响。传感器对流体不产生阻碍, 从而消除了其他流量计由压损造成的能量损失和高维护问题, 并能承受周期性热胀冷缩带来的应力问题。

2.2.5 高精度

穿越烟道的线平均流速测量, 精度可达到 $\pm 1\sim\pm 2\%$ 的读数, 宽量程比可达 150:1。对于直管段不足的地方, 可选择双通道 X 方式布置传感器, 通过两个通道求和平均, 可以提高测量稳定性、准确性, 同时仪表具有双向测量能力。根据用户需求, 附加温度、压力测量, 计算质量流量。

温度压力自动补偿方式

无补偿:

$$Q_0=Q_v$$

温度自动补偿:

$$Q_t = \left(\frac{273.15K}{t + 273.15K} \right) \times Q_v$$

压力自动补偿:

$$Q_p = \left(\frac{P + 101.325kPa}{101.325kPa} \right) \times Q_v$$

温度、压力自动补偿:

$$Q_{tp} = \left(\frac{273.15K}{t + 273.15K} \right) \times \left(\frac{P + 101.325kPa}{101.325kPa} \right) \times Q_v$$

Q_{tp} 为当时工况下的气体体积流量, m^3/h ;

t 为温度, $^{\circ}C$;

P 为压力, kPa。

2.3 性能指标

变送器

测量原理: 超声波时差原理, 自相关检波信号处理技术

流速范围: 0.03~40m/s

适用管道: 500mm~10m

精度: $\pm 1\%$ 的读数(在0.5~20m/s范围内)注: 精度取决于安装、管道条件和通道数;

重复性: $\pm 0.2\%$ 的读数到 $\pm 0.5\%$ 的读数(在0.5~30m/s范围内)

显示: 带背光128×64点阵图形液晶屏, 显示瞬时流量、流速、累计流量; 可切换温

度、压力、信号强度

温度范围: -20~60℃ (电子单元)

湿度: 0-100%相对湿度

输入: 单或双通道传感器信号, 可选温度信号, 压力信号。

输出: 标准4~20mA模拟信号, 最大600欧姆负载,
2个SPDT限值报警继电器, 1个SPDT故障报警继电器/自清洁吹扫控制继电器
数字接口RS232或RS485

供电: 直流18~36VDC或交流供电90~260VAC, 50~60Hz, 功率15W

温压补偿: 可输入温度、压力信号, 计算质量流量

外壳: 不锈钢, 防护等级IP65

防爆等级: Ex d IIC T6

传感器

材质: 316不锈钢, 特氟龙传感器面

电缆: 标准长度10英尺(3.1米), 可选长度25英尺(7.6米) 更长或特殊要求请向厂家咨询

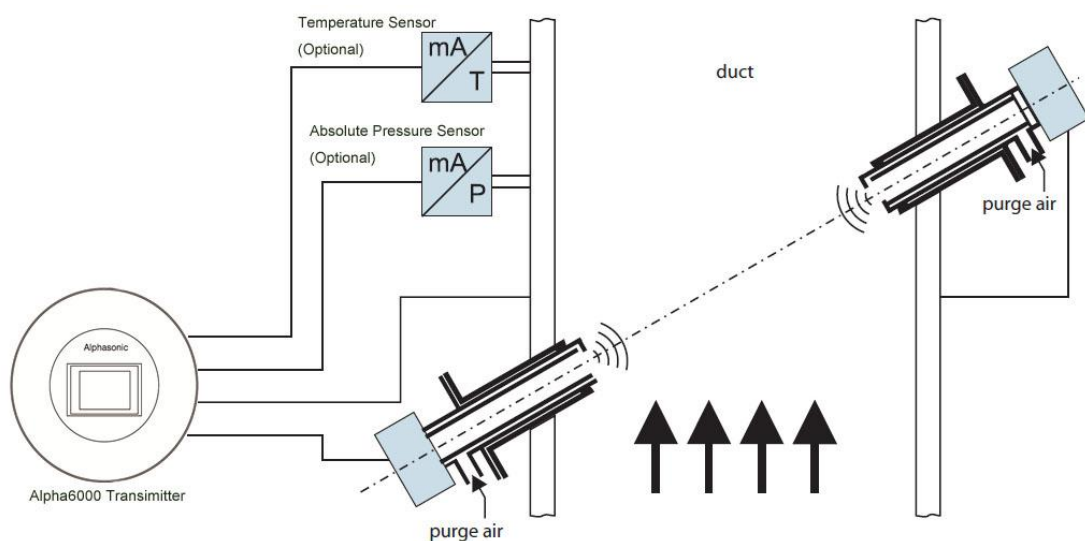
压力范围: 0~2.6Mpa (更高向厂家查询)

温度范围: -20~200℃

工艺连接: 螺纹或法兰(通过专用卡套或通过球阀组件)

3、烟道气流量测量系统

3.1 系统组成



*Alpha6000 控制单元

* 2 个 Alpha6000-I 超声波传感器

* 吹扫风系统

*温度补偿 (可选)

* 压力补偿 (可选)

3.2 安装规范

3.2.1 选择合适的测量点

超声波流量计传感器的安装要求：在烟道/烟囱相对的两面打孔，传感器严格对中，要综合考虑烟道直径/跨度，直管段，温度、颗粒物浓度以及现场平台搭建等因素，选择一个合适的测量点。

3.2.2 吹扫风配置

吹扫风的目的是有两个，一是保护传感器免受烟道气高温冲击；二是避免传感器沾附颗粒物，粘稠液滴等杂质，当然少量沾附对超声波传感器影响不大。吹扫风可采用仪表风，压力要求不高，略高于烟道压力即可。

吹扫风理论上可能带来测量误差，但当烟道足够大时，吹扫风对测量产生的误差已经很小，可以通过变送器切除；

3.3 零点和量程的自动校准

对于超声波流量计，由于它测量距离和时间等基本量，所以国际上通用的做法都是干标定，即检验传感器的安装角度，插入深度等指标，只要安装合乎规范，没有变动，流量计应该是准确的；

但对于环保监测仪器，最好能够进行在线零点和量程自动校准，我们可以通过检测整个流量计各个组成部分来实现在线自动校准：

a. 零点校准，这时只有上游传感器发射超声波信号，发射 2 组脉冲信号，下游传感器只接收信号，但电子单元和软件把这两组脉冲信号当作上下游传感器对射所产生的信号，因为这个两组信号都是从上游传感器发出穿越整个烟道，所以没有时间差，电子单元应该得到一个“零流速”，这样就测试了上游传感器的发射和下游传感器的接收性能，以及电子单元和软件的性能。我们称之为变通的零点校准。

b. 量程校准，这时只有下游传感器发射超声波信号，发射 2 组脉冲信号，上游传感器只接收信号，但电子单元和软件把这两组脉冲信号当作上下游传感器对射所产生的信号，因为这个两组信号都是从下游传感器发出穿越整个烟道，所以没有时间差，电子单元应该再次得到一个“零流速”，这样就测试了下游传感器的发射和上游传感器的接收性能，以及电子单元和软件的性能。我们称之为变通的量程校准。

3.4 超声波烟道气流量计的局限性

传感器的安装要求在烟道/烟囱相对的两面打孔，传感器严格对中，所以在实际操作中，增加了不少难度，烟道往往需要两侧搭建平台；

由于传感器必须上下游安装，夹角最大 60°，所以需要更大空间，这使安装在直管段本来就不足的地方更加局促；

以下现场条件需要仔细考虑：烟道过大，颗粒物浓度高，含小液滴多，烟气温度高。

参考文献：

- 1、 James A. Jahnke 《Continuous Emission Monitoring》 Second Edition
- 2、 HJ/T75-2007 《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》
- 3、 Richard Myers 《Compliance Flow Monitoring In Large Stacks and Ducts》

索引

概述.....	1
1、烟道气流量测量的现状	2
1.1 测量烟气流量的目的	2
1.2 烟道气流量测量难点	3
1.2.1 流态不稳定	3
1.2.2 含有粉尘、水汽、粘稠杂质	3
1.2.3 压力低，温度高，气体流速较低	3
1.3 常用烟道气流量计对比	4
1.3.1 皮托管等差压类流量计	4
1.3.2 热式气体质量流量计	4
1.3.3 光学闪烁烟气流量计	5
2、Alpha6000 超声波气体流量计	5
2.1 原理	5
2.2 独特优势	6
2.2.1 自相关检波技术	6
2.2.2 全数字化电子单元	7
2.2.3 先进的传感器	7
2.2.4 低维护、低运行费用	8
2.2.5 高精度	8
2.3 性能指标	8
3、烟道气流量测量系统	9
3.1 系统组成	9
3.2 安装规范	10
3.2.1 选择合适的测量点	10
3.2.2 吹扫风配置	10
3.3 零点和量程的自动校准	10
3.4 超声波烟道气流量计的局限性	10
参考文献:	11