

湿煤气流量测量

林鸿稼 (上海申佳铁合金股份有限公司, 上海 200940)

刘 军 (上海同欣自动化仪表有限公司, 上海 200070)

摘 要: 用均速管测量大管径煤气流量, 具有明显的优越性。用 FC6000 通用流量演算器完成湿煤气的干部分计算, 既简便又准确。

关键词: 煤气干部分 流量测量 均速管

1. 煤气流量测量的特点

煤气是钢铁厂普遍应用的二次能源, 高炉、转炉、发生炉等所产生的煤气, 又作为另一些窑炉的燃料。这些煤气的准确计量, 对加强管理和节约能源具有十分重要的意义。受到人们的普遍关注。

工厂煤气计量工作虽已开展多年, 但是现在大多数企业, 计量精度仍不尽人意。究其原因, 主要是由于人们对煤气的特殊性还认识不足以及使用一般气体流量仪表测量流量。为了解决煤气流量测量中存在的问题, 我们就得先搞清楚煤气计量的特点及其对计量仪表的要求。

1.1 介质污秽

从不同类型的窑炉引出来的煤气, 其组成和洁净程度也不同。同一台窑炉引出来的煤气, 在流程的不同部位, 其洁净程度也有差异。但共同特点是污秽。多数含有焦油和灰尘, 有些煤气在经过洗涤前尘含量大于 100 mg/m^3 , 洗涤后仍有几十 mg/m^3 。

污秽的流体易将仪表同介质接触的部分玷污和使管道流通截面变小, 影响测量精度, 严重时将使仪表引压管堵死, 将可动部分卡死, 以致仪表完全失效。因此, 仪表选型时应考虑便于清洗和不断流拆卸。

1.2 煤气静压低、流速低、密度小, 管道直径大, 允许压损小

煤气一般用风机输送, 所以静压低, 多数只有几 kPa 。为了使用户处仍有足够压力, 同时也是为了节约动力, 输送过程中应减小压损, 这就必须将管道直径放大, 降低流速, 同时要求仪表的永久压力损失尽量小。

1.3 水汽含量高

从高炉回收的煤气, 温度较高, 将其冷却到常温后, 一般均有水析出^[1]。从其他窑炉回收的煤气, 由于含尘量高, 在送到用户之前, 一般均经以净化为目的水洗涤, 洗涤器出口的煤气, 水分含量均呈饱和状态, 即相对湿度为 100%。

1.4 有一定的毒性和腐蚀性

有些煤气, 从炉子里带出少量硫化氢和二氧化硫, 使得煤气有一定的腐蚀性, 仪表一般选型时应考虑耐腐蚀, 而大多数场合, 并无明显的腐蚀性。

2. 仪表选型

2.1 插入式涡街流量计

一般说来, 涡街流量计范围度大, 精度也较高。而插入式涡街流量计用来测量污秽流体流量, 不仅清洗方便, 而且可以实现不断流拆卸。这种仪表在结构方面, 也适合大管径

流量测量，即使管径在 1m 以上，价格也不很贵。所以用来测量煤气流量的实例，也有些报道^[2]。

这种仪表唯一的不足是下限流量小不了和抗干扰能力差。

因涡街流量计测量气体流量，制约下限流量的因素有两个，其一是流体雷诺数，其二是流体密度。对于 DN50 的涡街流量计，用来测量 $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$ 的煤气时，雷诺数不成问题，但密度有一定的问题。因为在这种情况下，测量管中的流速一般要达到 5m/s 才能可靠测量^[3]。而工艺对流速下限的要求一般要低到 2m/s，因此差距甚远，如果勉强使用，则在低流速情况下使用时极易接受外界干扰。

人们知道，涡街流量计中的敏感元件的信号强度与流体流速的平方成正比^[4]，2m/s 流速时产生的信号，其幅值只及 5m/s 时的 16%。如此微弱的信号比很多干扰的幅值小很多，因此在调低触发电路的门限值让微弱脉冲信号送到输出端的同时，干扰也一起跟进。作者在现场调试时发现，下限流速调到 2m/s 的插入式涡街流量计，在实际流速为 0 时，管道只要有轻微振动，流量计的输出就升得很高。附近有铲车或卡车开过时，仪表示值也相应升高。行车驶近仪表，同样影响很大。这表明信噪比太小时，仪表不能正常工作。

2.2 圆缺孔板和阀式孔板流量计

圆缺孔板是专门用来测量湿气体流量的，已有几十年的应用历史，在国内冶金行业用得不少。其唯一缺点是普通的圆缺孔板节流件无法实现不断流拆卸。故清洗维护不便，而近年来发展起来的阀式（圆缺）孔板弥补了这一不足。但是真正使用这种节流装置也有一些困难，即体积大，造价高，例如一副 DN500 的阀式孔板就需数万元。

2.3 均速管流量计

均速管流量计是在毕托管流量计的基础上发展起来的较新型流量测量仪表。均速管是采用近似积分理论。用较多的点来描述流速方程，其输出信号代表了整个测量管截面上的平均流速。现在普遍采用的菱形截面均速管，有效地控制了附面层的分离点，使其分离位置与雷诺数无关，从而使流量系数稳定，提高了测量精度^[5]。经过 JJG 640 - 90 规程检定的均速管，精度可达 1.0%，如果采用仪表厂提供的通用流量系数，精度再降低一些。

均速管流量计显著的优点有：

- a. 结构简单牢固，无运动部件，长期稳定性好，工作可靠。
- b. 带切断阀的均速管可在不断流情况下从测量管中卸下和装入，因此，清洗维修方便。
- c. 耐振性好。不象涡街流量计那样娇嫩。
- d. 永久压力损失小。属于一种节能仪表。
- e. 购置费和安装费均较低。不带测量管的均速管，每台仅一二千元，而且管径增大，价格升高不明显。

所以，用来测量煤气流量，很有推广价值。

3. 温压补偿问题

在钢铁厂中，煤气流量计量点流体压力大多不高，流体温度大多也不高，往往与大气温度接近，这一特点往往给人们造成一种印象，即煤气流量测量即使不进行温压补偿所引起的误差也不大。确实，按照理想气态方程，在下面所讨论的实例中，压力即使变化 50

%FS，所引起的误差也只有 1.48%，温度在 0 ~ 50℃ 范围内变化，所引起的误差约为 ±4.2%，但是，人们往往忽视了一个重要因素，即流体温度变化的同时，煤气中的水汽含量发生很大变化。

钢铁厂中生产和消耗的煤气，在净化过程中都经过水洗工序，煤气中的水份含量一般呈饱和状态，即相对湿度为 100%，随着温度的变化，水汽含量也发生变化。

从表 1 可知，如果煤气温度的在 0~50℃ 范围内变化，水汽分压变化量为 11.729kPa，水汽密度变化量为 0.0782kg/Nm³，由于煤气密度比较小，在本文所讨论的例子中，20℃ 时的密度为 1.1423kg/m³，如果是焦炉煤气，仅约 0.45kg/Nm³，所以湿度变化必然引起较大的测量误差。有很多以煤气为燃料的装置，夏季煤气单耗比冬季高得多，究其原因，大多是由于煤气流量测量中未考虑湿度变化的因素。

其实，煤气计量真正有意义的是对煤气的干部分进行计量。煤气中的水汽不应当作煤气进行计量。因为煤气在燃烧时，其中的水汽不仅不能产生热量，相反还带走了很多热量，这是由于排烟温度比煤气中的水汽温度高得多的缘故。

3.1 煤气流量测量温压补偿模型

对于已知相对湿度 ϕ 的湿气体，其工作状态（ p ， t ）下的密度可按下式计算：

$$\rho = \rho_g + \rho_s \quad (1)$$

式中：

- ρ —— 湿气体在工作状态下的密度，kg/m³；
- ρ_g —— 湿气体干部分在工作状态下的密度，kg/m³；
- ρ_s —— 湿气体中水汽在工作状态下的密度，kg/m³。

ρ_g 和 ρ_s 可分别按下列公式计算：

$$\rho_g = \rho_n \cdot \frac{p - \phi \cdot p_{s\max}}{p_n} \cdot \frac{t_n}{t} \cdot \frac{z_n}{z} \quad (2)$$

$$\rho_s = \phi \cdot \rho_{s\max} \quad (3)$$

式中： P 、 t 、 Z —— 分别为工作状态下绝对压力、绝对温度和气体压缩系数；

$p_{s\max}$ 、 $\rho_{s\max}$ —— 分别为工作状态下水汽的饱和分压和相应密度；

ϕ —— 工作状态下的湿气体相对湿度，%；

P_n 、 t_n 、 Z_n 、 ρ_n —— 分别为标准状态绝对压力、绝对温度、气体压缩系数和湿气体干部分密度；

根据差压式流量计的一般公式^[6]知湿气体体积流量为

$$Q = \frac{k\varepsilon\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{\rho}} \cdot \frac{p}{p_n} \cdot \frac{t_n}{t} \quad (4)$$

式中： k —— 系数；

ε —— 流速膨胀系数；

Δp —— 差压

而湿气体干部分的体积流量则为

$$Q_g = K\varepsilon \frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{\rho}} \cdot \frac{p_f - \phi p_{s \max}}{p_N} \cdot \frac{t_n}{t} \quad (5)$$

由此式可推导出湿气体干部分流量同气体温度、压力和相对湿度的关系，即当湿气体温度和压力偏离设计值时，可用下式进行补偿。

$$Q_g = Q_f \frac{p_f - \phi_f \cdot p_{fs \max}}{p_d - \phi_d \cdot p_{ds \max}} \cdot \frac{t_d}{t_f} \cdot \frac{z_d}{z_f} \cdot \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho_f}} \quad (6)$$

式中： Q_f —— 未经补偿的体积流量；

ρ_d —— 设计状态(p_d, t_d, Z_d, ϕ_d)湿气体的密度 kg/m^3 ；

ρ_f —— 使用状态(p_f, t_f, Z_f, ϕ_f)湿气体的密度 kg/m^3 ；

从式中(1)、(2)、(3)可得 ρ_d 和 ρ_f 表达式。

$$\rho_d = \rho_n \cdot \frac{p_d - \phi_d \cdot p_{ds \max}}{p_n} \cdot \frac{t_n}{t_d} \cdot \frac{z_n}{z_d} + \phi_d \cdot \rho_{ds \max} \quad (7)$$

$$\rho_f = \rho_n \cdot \frac{p_f - \phi_f \cdot p_{fs \max}}{p_n} \cdot \frac{t_n}{t_f} \cdot \frac{z_n}{z_f} + \phi_f \cdot \rho_{fs \max} \quad (8)$$

式中： p_f, p_d, p_n —— 分别为使用状态、设计状态和标准状态绝对压力；

t_f, t_d, t_n —— 分别为使用状态、设计状态和标准状态绝对温度；

Z_f, Z_d, Z_n —— 分别为使用状态、设计状态和标准状态气体压缩系数；

$P_{fs \max}, \rho_{fs \max}$ —— 分别为使用状态下，水汽饱和分压和相应的密度；

$P_{ds \max}, \rho_{ds \max}$ —— 分别为设计状态下，水汽饱和分压和相应的密度；

ϕ_f, ϕ_d —— 分别为使用状态下和设计状态下湿气体相对湿度。

3.2 煤气流量测量温压补偿的实施

从上面的公式看，测量湿气体干部分流量好像是件麻烦的事，因为涉及的参数多，又要查水汽饱和分压表、密度表，还要推算相对湿度。但在可编程仪表已经普及的今天，所有这些查表演算的事都可由仪表自动完成。例如：上海宝科自动化仪表研究所生产的FC6000型通用流量演算器，表内就装有一般湿气体干部分流量温压补偿的完整程序和必要的表格，用户只要将必要的工艺参数和有关设计参数填入菜单，写入仪表，它会根据湿气体温度测量值自动查 $P_{s \max} = f(t)$ 表格和 $\rho_{s \max} = f(t)$ 表格，求取 $p_{fs \max}$ 和 $\rho_{fs \max}$ ；根据温度、压力测量值等数据进行密度补偿和干部分流量计算。表2所列就为本文所讨论的实例和所用的组态数据表，其中第14条第N字^[7]填入4，即为指定的仪表进行湿气体干部分计算。

4. 应用举例

4.1 已知条件

a. 煤气干部分相对组成：70%CO+8.1%CO₂+6.7%H₂+1%O₂+1.2%CH₄+12%N₂+1%CH₂

等其他气体。含尘量 $150\text{mg}/\text{Nm}^3$

- b. 流体常用温度: $t_d=20^\circ\text{C}$
- c. 流体标准状态温度: $t_n=20^\circ\text{C}$
- d. 流体常用压力: $p_d=3\text{kPa}$ (表面值)
- e. 流体标准状态压力: $p_n=101.33\text{kPa}$ (绝对值)
- f. 压力变送器测量范围: $0\sim 6\text{kPa}$
- g. 流体标准状态密度: $\rho_n=1.1423\text{kg}/\text{m}^3$
- h. 流体相对湿度: $\phi_f=\phi_d=100\%$
- i. 流体压缩系数: $Z_f=Z_d=Z_n=1$
- j. 流量测量上限: $1250\text{Nm}^3/\text{h}$
- k. 常用流量: $Q_{ch}=850\text{Nm}^3/\text{h}$
- l. 最小流量: $Q_{min}=375\text{Nm}^3/\text{h}$
- m. 流体粘度: $\mu=0.000018\text{Pa}\cdot\text{S}$
- n. 管道内径: $D_{20}=209\text{mm}$

4.2 设计与工程计算

a. 计算雷诺数

经计算, 最小流量时的雷诺数为 4.2×10^4 , 满度流量时的雷诺数为 1.3×10^5 , 均落在均速管允许范围内 (允许范围为 $3\times 10^4 < Re_d < 3\times 10^7$) [8]。因此可以认为在使用范围之内, 管道流体均为充分发展的管流。适合用均速管流量计测量。

b. 工作状态下湿煤气密度 ρ 的计算

查表知[9]工作状态下饱和水蒸气分压 $P_{s\max}=2.3340\text{kPa}$

查表知工作状态下饱和水蒸气密度 $\rho_{s\max}=0.0173\text{kg}/\text{m}^3$

由式 (1) 得

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_g + \rho_s = \rho_n \cdot \frac{p - \phi p_{s\max}}{p_n} \cdot \frac{t_n}{t} \cdot \frac{z_n}{z} + \rho_{s\max} \\ &= 1.1423 \cdot \frac{(101.33 + 3) - 2.3340}{101.33} + 0.0173 \\ &= 1.1671\text{kg}/\text{m}^3\end{aligned}$$

c. 计算差压计上限 (流量用标准状态下干部分的体积流量表示)

查表得 $K=0.56$

$N=0.01251$

计算得

$$\begin{aligned}F_R &= \frac{p_n \cdot t}{p \cdot t_n} = \frac{101.33}{104.33} \\ &= 0.97125 \\ \therefore h_{20\max} &= \left[\frac{Q_{\max} \cdot p \cdot \sqrt{\rho}}{KND^2(p - \phi p_{s\max})} \right]^2 \cdot F_R^2 \\ &= \left[\frac{1250 \times 104.33 \sqrt{1.1671}}{0.56 \times 0.01251 \times 209^2 (104.33 - 2.3340)} \right]^2 \times 0.97125^2 \\ &= \pm 2206\text{mmH}_2\text{O}\end{aligned}$$

$$= 188.5 \text{ Pa}$$

4.3 填写菜单

按 FC6000 通用流量演算器说明书介绍的菜单填写方法将实例中的技术数据填入菜单并写入仪表。如表 2 所示。

4.4 制作校验单并对流量演算器进行校验

根据使用温度 t_f 查《气体的饱和水汽含量表》^[1]查得水汽饱和分压 P_{smax} 和密度 ρ_{smax} ，并根据式(6) (7) (8) 制作校验单，然后对演算器进行校验，校验单格式和校验结果如表 3 所示。从校验结果可以看出，在进行温度压力补偿的情况下，二次表所显示的煤气干部分流量最大误差 $\pm 0.04\%F \cdot S$ ，显然，该二次表通道和煤气干部分计算具有很高的精度。

5. 仪表安装

5.1 均速管和导压管的安装

5.1.1 一般要求

a. 均速管应从水平工艺管的上方插入管道，穿过管道圆截面的直径。

为了避免煤气管道中积液，影响煤气的正常输送，流量计前后的煤气管道应保持一定坡度，上游高，下游低，而且在最低点应安装疏水装置。

b. 均速管轴线应与管道轴线垂直。

c. 均速管的迎流面应正对着流体方向。

表 1 煤气中水分饱和含量

煤气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	0	10	20	30	40	50
饱和水蒸汽压力 $P_{smax}(\text{kPa})$	0.6080	1.2258	2.3340	4.2483	7.3746	12.337
饱和水蒸汽密度 $\rho_{smax}(\text{kg}/\text{m}^3)$	0.0048	0.0094	0.0173	0.0304	0.0512	0.0830

表 3 流量演算器验结果

$t_f = t_d$

理论示值		压力输入 信号	P=0kPa	P=3kPa	P=6kPa9
实际示值 Nm³/h			Ip=4mA	Ip=12mA	Ip=20mA
流量输入信号			K=0.98496	K=1.0000	K=1.0148
0%	4.00 mA		0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0
20%	4.64 mA		246.2 / 246.2	250.0 / 250.0	253.7 / 253.7
40%	6.56 mA		492.5 / 492.5	500.0 / 500.0	507.0 / 507.4
60%	9.76 mA		738.7 / 738.6	750.0 / 749.9	761.1 / 761.0
80%	14.24 mA		985.0 / 984.8	1000.0 / 999.8	1014.8 / 1014.6
100%	20.00 mA		1231.2 / 1230.9	1250.0/1249.7	1268.5/ 1268.2

$$P_f = P_d$$

理论示值		温度输入 信号	$t_f=0^{\circ}\text{C}$	$t_f=20^{\circ}\text{C}$	$t_f=50^{\circ}\text{C}$
实际示值 Nm^3/h 流量输入信号			$R_t=100.00\Omega$	$R_t=107.79\Omega$	$R_t=119.40\Omega$
			$K=1.05053$	$K=1.0000$	$K=0.87357$
0%	4.00 mA	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	
20%	4.64 mA	246.6 / 246.6	250.0 / 250.0	218.4 / 218.4	
40%	6.56 mA	525.3 / 525.2	500.0 / 499.9	436.8 / 436.7	
60%	9.76 mA	787.9 / 787.7	750.0 / 749.8	655.21 / 655.0	
80%	14.24 mA	1050.5 / 1050.2	1000.0 / 999.7	873.6 / 873/3	
100%	20.00 mA	1313.2 / 1312.7	1250.0 / 1249.6	1092.0 / 1091.6	

允许误差: $\pm 0.2\%$

实际最大误差: -0.04%

5.1.2 关键要求

使引压通道不被冷凝液堵塞, 是这种流量计成功的关键。这是因为均速管在测量低流速低密度流体流量时, 所产生的差压信号很小, 有时满量程只有 200Pa 左右, 这样, 在引压通道中只要有一滴冷凝液封住通道, 就会使流量示值相差甚远, 所以安装时采取了如下几个措施。

a. 拆除均速管出厂时所带的正负压针形切断阀, 代之以软管接头。如图 1 所示。因为针形阀“低进高出”的流路容易积液。

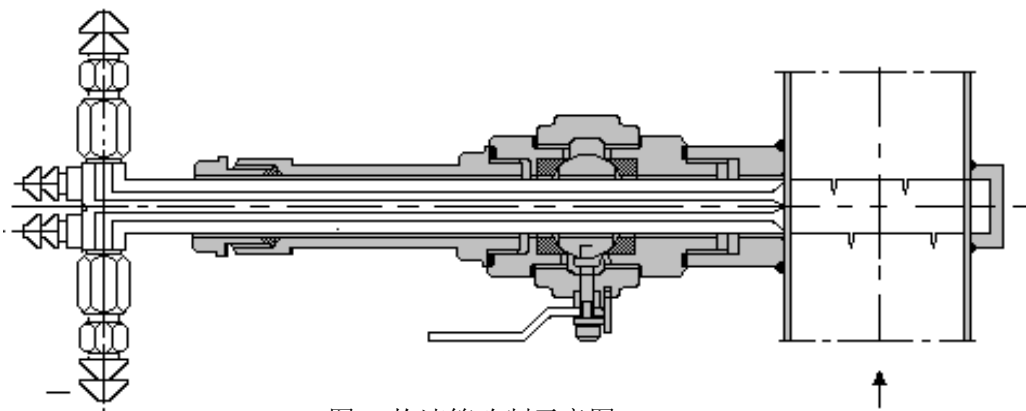


图 1 均速管改制示意图

b. 用内径 10mm 的透明塑料管作引压管。引压管坡度应使管中可能产生的冷凝液顺利流回母管。采用透明管引压是为了便于观察引压管内壁结液情况。

c. 均速管露出测量管的部分, 进行伴热保温, 以防引压通道在冬季结液, 结冰。

d. 在测量管保持一定坡度的情况下, 仅有上面三条还不够, 因为均速管的相应倾斜必然导致均速管负压引出侧无法保证坡度, 所以, 可将均速管引出口按图 1 中的虚线进行改装, 将正负引出口移到上方。

5.2 差压变送器的安装

a. 由于配套差压变送器的测量范围很小, 如果环境振动较大, 会引起零位输出不稳。

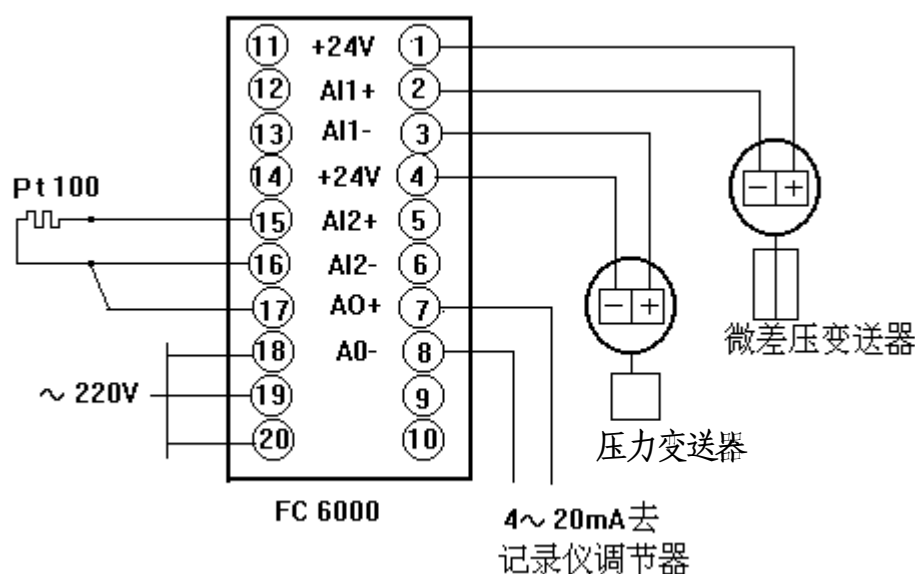
如果受到太阳直接照射，由于受热的不均匀，仪表零位易产生漂移。所以，差压变送器应安装在无明显振动，无太阳直接照射的地方。

b. 为了让差压变送器的正负压室中可能出现的冷凝液顺利流回母管，变送器安装高度应高于均速管，而且变送器上的正负压室中应使其不存在冷凝液。

c. 为了避免三阀组中积液影响差压信号的不失真传递，均速管与差压变送器之间不装三阀组，而采取直接连接。

5.3 电气接线

流量演算器与变送器和温度传感器之间的线路连接如图 2 所示。



6. 仪表运行情况

上面列举的均速管流量计用于某铁合金厂烘矿铬窑煤气流量测量，于 95 年 4 季度投入运行，收到了良好的效果。

a. 差压变送器零点稳定。24 小时最大漂移量 $\pm 0.02\%F\cdot S$ 。

b. 均速管和差压变送器之间用透明塑料管直接连接，校零和维修并未感到困难。引压管未发生冷凝液堵塞事件。

c. 经用斜管式（差）压力计校对，流量显示值准确。

d. 系统运行二年以来，均速管取压孔被灰尘堵塞事件发生过一次，除此以外，未发生过其他故障。

由此可见，选用均速管与差压变送器和 FC6000 演算器配合，实现低温低压煤气的干部分流量测量，设计是合理的。

另外，FC6000 通用流量演算器还具有辅助输出功能。经温压补偿的干部分流量，被转换成 4~20mA 信号，可送到记录仪和调节器，完成燃烧自动调节。

7. 结束语

a. 用带球阀均速管流量计测量大管径煤气流量，具有明显的优越性，但必须正确安装，

以保证差压信号的不失真传递。

b. 当煤气中含有饱和的水汽时，对其中的干部分进行测量，更有意义，更有利于能耗考核与节约。

c. FC6000 通用流量演算器能对流体的温压变化进行补偿，能对湿煤气的干部分进行查表、计算，简便而准确。

参考文献

1. 文端中等. 煤气湿度检测与流量计量自动补偿技术的研究与开发 冶金自动化信息网 建网 20 周年论文汇编 119~123
2. 株洲冶炼厂. 曹王钊. 含有杂质的煤气流量测量
3. 上海横河电机有限公司. YF100 型旋涡流量计使用说明书
4. 杨进行. 涡街流量计的量程下限. 自动化仪表. 1997.9. 9~10
5. 计量出版社. 均速管流量计
6. 国家标准. GB2624-81 流量测量节流装置的设计安装和使用
7. 上海宝科自动化仪表研究所. FC6000 通用流量演算器操作说明书
8. 扬中化工仪表配件厂. JL 系列均速管流量计

（本文原载于《世界仪表与自动化》'98 专辑）