



中國儀器儀表學會

'84

仪表与节能论文集

第一册

仪器仪表节能应用技术交流会

1984年6月 天津

仪表与节能论文集 (一)

目 录

物 料 计 量

利用常规仪表检测气/液两相流量	李海青	陆水钧 (1)
用于火电厂热力试验及在线标定的流量计	孙玉石	武振宁 (6)
一种适于低压差使用的流量特性	汪克成	(11)
45° 方向取压的弯管流量计	陆祖祥	(18)

电能计量与管理

DSF1-A 型复费率电度表的研制	陈源	苏寄平 (23)
多用途智能电度表	汪乐宇	黄爱苹 陶勇毅 (28)
分时记度电度表的研制与应用	田亮耕	(32)
小型异步电动机节电器产品的研究与开发	王元渝	(38)
带微处理机的电度表校验装置	盛毅	纪士琤 徐晓华 (41)

燃烧过程分析

高温烟气氧化锆氧分析仪及其应用	任凤彩	(48)
加热炉烟气含氧量的连续测定与自动调节	赵育斌	(53)
燃气分析测燃烧效率及燃料浓度分布	王华芳	(58)
氧化锆氧分析器及其在节能中的应用	李羨文	(63)
燃烧效率与烟气分析	程守淦	(68)

热工参量检测

HTY-1 型光导纤维便携式测温仪的研究及其节能经济效益	郝天佑	王显庭 (75)
热水热量测量系统的精度及节能效果的分析	刘震涛	肖德云 陈肇基 (81)
水泥回转窑筒体红外扫描测温仪	张福兴	薛垂荫 魏宏人 徐哲尧 (89)
SW-1 型光电比色高温计及应用	邓恩民	郭宏先 (98)
热流计原理及应用	刘宁社	张永泉 邓克昌 (105)
热流计在热网管	荣	吕钧锋 (112)
新型数字化自控	素	王瑞杏 (119)
介绍一种新型的	杰	袁小和 (125)

自动化技术与节能成套

加热炉的节能控制	高衿昌 朱祥源 盛孝娣 (131)
合成 NH_3 生产中 H_2/N_2 比率自动控制	姜仁杰 纪云武 李东钊 (137)
小型链条锅炉分度盘式燃烧自控装置的应用及节能效果	时坚 (142)
燃油加热炉完善检测仪表节能效果显著	曹恩义 李大全 (152)
红外热像仪信号处理单元	王建国 (157)
合成气车间重油气化炉氧-油比值调节的实施	邱大荣 (164)
计算机用于工厂能源计量与管理	张学林 (169)
提高变换气中 CO_2 浓度的温度调节	贺石林 (174)
硫酸余热利用 SO_2 风机节能调速系统	陈德初 (177)
气液自动配比装置及其在泡沫整理中的应用	邬如义 俞宗耀 朱蓉芳 许元玲 (183)
光纤通讯在首钢节能中的应用	徐敬箴 李文权 (187)
搪烧炉的节能自控	黄楨地 (191)
使用气相色谱仪控制冲天炉炉气成分是节能的重要途径	陈绍强 陈文筠 (197)
调节仪表在小高炉热风控制中的节能作用	徐永和 (201)

物料计量

利用常规仪表检测气/液两相流量

李海青 陆水钧

(浙江大学化工仪表教研室)

近廿多年来,随着工业生产水平的不断提高,在化工、炼油、冶金、动力及原子能等工业部门中,大量出现了两相流体状态;所以对两相流量的检测已变得越来越迫切了。

在汽化单元、气液两相传输以及传热传质设备系统中普遍存在的气/液两相流动状态,由于流态多种多样、分散相分布的不对称性、气/液两相间的界面效应以及存在相对速度等特点,致使两相流量较之单相流量的检测要复杂得多、困难得多。国外对气/液两相流量检测做了大量的工作,也取得了一些进展,提出了借助于放射线、激光、核磁共振、高速全息摄影等新技术及用相关法、统计法来检测两相流量。

在国内,这方面的工作基本上还是空白。考虑到两相流量检测的迫切性和我国现有的工业技术水平,我们试图用常规仪表来实现气/液两相流量的检测。用常规仪表检测两相流量遇到较为困难的问题是两相流体的密度检测,在本文中,采用两点关联法避开密度问题或采用采样测取两相平均密度,提出了PVT、双孔板、均压管和弯管四种利用常规仪表的组合来检测气/液两相流量的方法,并在空气/水两相流量试验装置上进行了实验验证。

一、PVT法

PVT法是建立在气相与液相一个基本特性的差异上,即气/液两相流体中气相的体积流量与流动状态下的压力、温度密切相关;而液相的体积流量却与流动状态下的压力、温度基本无关。据此,为图1所示,可在同一管道的上、下游两个测量点1和2上,分别安装容积式流量计(V_1 、 V_2)、压力变送器(P_1 、 P_2)和温度变送器(T_1 、 T_2)来检测两相总体积流量、压力及温度。

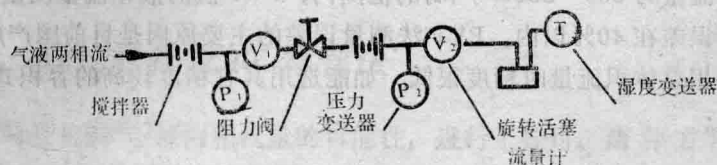


图1 PVT法原理图

度。根据这三个参数及被测介质的热力学性质即可精确的计算出各相(液相、气相)体积流量。

为进行PVT法的理论推导并建立数学模型,假定:

1. 气/液两相流体的总体积流量为各相体积流量之和。即

$$V_1 = q_{l,1} + q_{g,1} \quad (1)$$

$$V_2 = q_{l,2} + q_{g,2} \quad (2)$$

式中: V ——两相总体积流量;

q_L ——液相体积流量;

q_g ——气相体积流量;

角标 1 和 2——相应测量点 1 和 2 上有关参数。

2. 气相满足理想气体状态方程。即

$$\frac{P_1 q_{g1}}{T_1} = \frac{P_2 q_{g2}}{T_2} = \frac{P_0 q_{g0}}{T_0} \quad (3)$$

式中: P_0 、 T_0 为标准条件, 取 $P_0 = 1 \text{ atm}$, $T_0 = 293^\circ \text{ K}$, q_{g0} 为对应 P_0 和 T_0 条件下的气相体积流量。

3. 液相不可压缩, 并忽略其热膨胀性。即

$$q_{L1} = q_{L2} = q_L \quad (4)$$

在低压常温工况条件下, 气相在液相中的溶解可忽略不计; 液相热膨胀性很少; 气相性质也比较接近理想气体, 上述假定是比较符合实际情况的。如果测量点 1 和 2 间距离不长, 流体摩擦引起的温度变化可忽略, 即 $T_1 = T_2 = T_0$ 。则由上述 (1)、(2)、(3)、(4) 式, 可得 PVT 法检测气/液两相流量的数学模型如下:

$$q_L = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{P_1 - P_2} \quad (5)$$

$$q_{g0} = \frac{V_2 - V_1}{P_1 - P_2} P_2 \frac{P_1 T_0}{P_0 T_1} \quad (6)$$

根据式 (5) 和式 (6) 数学模型, 通过实验测量到的参数 P_1 、 V_1 ; P_2 、 V_2 ; T 的简单运算, 就可获得需要的液相体积流量 q_L 和气相体积流量 q_{g0} , 从而实现了气/液两相流量的检测。

根据 PVT 法数学模型, 采用旋转活塞式流量计检测 V 参数、电感式压力变送器检测 P 参数、水银温度计检测 T 参数, 在压力为 $4 \text{ kg} \cdot \text{f/cm}^2$ 、温度为常温的空气/水两相流试验装置 $\phi 1''$ 管道上进行了实验验证。在装置上两个测量点前安装了两个隔片式的静态搅拌器, 以达到气相与液相较均匀混合的要求。在两个测量点间还安装了阻力阀, 以便于对两点关联系统的参数进行调整。

经过实验验证及计算机上大量实验数据的处理, 在气/液体积流量比为 $0.17 \sim 4.5$, 两相总流量为 $350 \sim 2300$ 升/小时的范围内, PVT 法的液相流量测量误差在 10% 以内, 气相流量测量误差在 40% 以内。PVT 法测量误差的主要原因是目前国产旋转活塞式流量计用来测气/液两相总体积流量时精度很低。如能选用其它精度较高的容积式流量计, 则测量精度可指望提高。

二、双孔板法

孔板是测量单相流量的基本元件之一, 如何将其推进至两相流量检测, 把单相流量系数、压差、压力与两相流量关联起来, 乃是人们多年来的愿望。本文提出了在同一管道上的两个测量点 1 和 2 上, 安装两块孔板的双孔板法数学模型, 从而实现了把孔板测量单相流量的经验用于气/液两相流量的检测。双孔板法装置系统如图 2 所示。在气、液两相流态基本均匀的前提下, 利用伯努利能量守恒定律和连续性条件, 可推出在气/液两相流体流过孔板时, 孔板上差压与管道中流量的关系如下:

$$G_{TP} = \alpha_1 \sqrt{\Delta P_1 \cdot \rho_{m1}} \quad (1)$$

$$G_{TP} = \alpha_2 \sqrt{\Delta P_2 \cdot \rho_{m2}} \quad (2)$$

式中: G_{TP} ——气/液两相总质量流量, kg/s ;

α_1 、 α_2 ——孔板 1, 孔板 2 的流量系数, 由实验标定;

ΔP_1 、 ΔP_2 ——孔板 1、孔板 2 的差压, $\text{kg} \cdot \text{f/cm}^2$;

ρ_{m1} 、 ρ_{m2} ——孔板 1, 孔板 2 前的两相流体平均密度 g/cm^3 , 同时又有:

$$\frac{1}{\rho_{m1}} = \frac{x}{\rho_{g1}} + \frac{1-x}{\rho_L} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho_{m2}} = \frac{x}{\rho_{g2}} + \frac{1-x}{\rho_L} \quad (4)$$

式中: ρ_{g1} 、 ρ_{g2} ——孔板 1、孔板 2 前的气相密度;

ρ_L ——液相密度;

$x = \frac{G_g}{G_{TP}}$ ——气体干度, G_g 为

气相质量流量。

由 (1)、(2)、(3)、(4) 式可得:

$$G_{TP} = \sqrt{(\alpha_2^2 \cdot \Delta P_2 - \phi \cdot \alpha_1^2 \cdot \Delta P_1) \rho_L / (1 - \phi)} \quad (5)$$

式中: $\phi = \frac{P_1}{P_2}$ ——校正因子, P_1 、 P_2 为孔板 1、2 前的静压 $\text{kg} \cdot \text{f/cm}^2$ 。

式 (5) 即为双孔板法检测气/液两相流量的数学模型。可以注意到, 若 $\phi = 1$ 则式 (5) 无意义。因此应用时必须保证 $P_1 \neq P_2$, 在图 2 试验装置中加设降压阀来实现。

根据在空气/水两相流量试验装置中, $\phi 2''$ 管道上, 孔板 1 开孔直径 $d_1 = 25.07 \text{mm}$, 孔板 2 开孔直径 $d_2 = 27.39 \text{mm}$ 的双孔板上进行实验, 标定出其流量系数为:

$$\alpha_1 = 0.15408$$

$$\alpha_2 = 0.19919$$

由上述流量系数确定的气/液两相流量公式 (5), 经实验验证, 其测量误差在 10% 以内。

三、均压管法及 90° 弯管法

本文还对利用均压管和 90° 弯管检测气/液两相流量的可能性, 进行了探讨。两种方法中均涉及到气/液两相流体的平均空隙率及平均密度问题。

1. 气/液两相流体平均密度的检测

在空气/水两相流试验装置上, 我们用快速断流采样法测取平均空隙率及平均密度。快速断流采样装置原理如图 3 所示。设两个同步电磁阀间的管道容积为 V , 当两个电磁阀同步快速关闭后, 由放液管放出至计量筒的液相体积为 V_L , 则可按下式计算出平均空隙率 α_g 和平均密度 ρ_m :

$$\alpha_g = \frac{V - V_L}{V} \quad (1)$$

$$\rho_m = (1 - \alpha_g) \rho_L + \alpha_g \rho_g \quad (2)$$

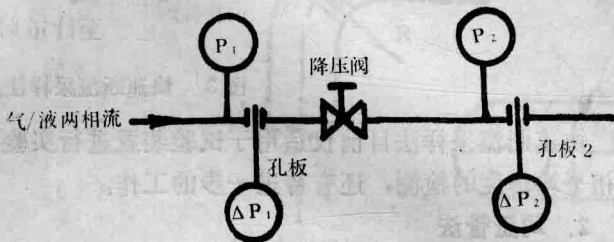


图 2 双孔板法原理图

式中: ρ_g 、 ρ_L ——分别为气相、液相密度。

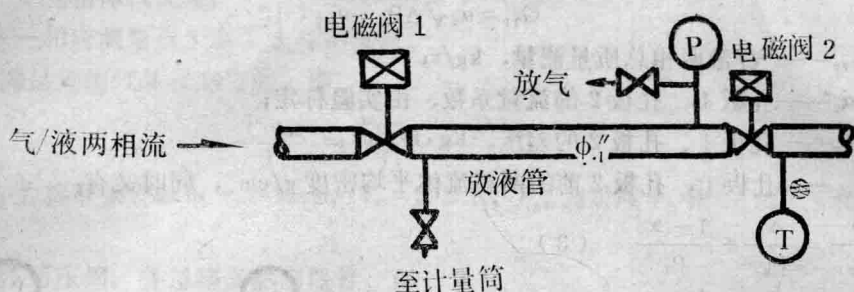


图3 快速断流采样法原理图

快速断流采样法目前仅适用于试验装置进行实验研究。利用常规仪表进行在线的气/液两相平均密度的检测,还有待进一步的工作。

2. 均压管法

将毕托管插入气/液两相流体中,其局部压差 Δp 遵循下列关系:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \gamma \rho_c v_c^2 + \beta (1 - \gamma) \rho_e v_e^2 \quad (3)$$

式中: ρ ——局部密度, v ——局部速度, γ ——连续相的局部空隙率, β ——校正系数, C ——连续相下标, e ——分散相下标。

若连续相是水,分散相是小空气泡,则 $\beta = 0.5$ 。相间没有滑动,则 $v_g = v_L = v$,下标 L 和 g 分别代表水和空气。并以 α_g 表示平均空隙率,则有

$$\Delta p = \frac{1}{2} [(1 - \alpha_g) \rho_L + \alpha_g \rho_g] v^2 \quad (4)$$

由(2)、(4)式得:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_m}} \quad (5)$$

如果用均压管代替毕托管直接获取平均压差 Δp ,并考虑校正系数 ξ (由实验确定)、设管道截面面积为 A ,则可得均压管检测气/液两相流量的数学模型如下:

$$G_{TF} = \xi \cdot A \cdot v \cdot \rho_m = \xi \cdot A \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_m} \quad (6)$$

式中: G_{TF} ——气/液两相质量流量。

我们在空气/水两相流试验装置中,在 $\phi 1''$ 管道上安装了自制均压管直接检测平均差压 Δp ,经过实验标定得到,在空隙率 $\alpha_g < 0.7$ 情况下, ξ 为一常数($\xi = 0.85$)。在 $\alpha_g < 0.7$ 的范围内,公式(6)用以检测气/液两相质量流量的误差在12%以内。

3. 90°弯管法

为建立用弯管径向压差检测气/液两相流量的数学模型,对气/液两相流提出下列限制条件

- (1) 系统中无相变,且气相不溶于液相。
- (2) 气相在常温常压下近似满足理想气体状态方程。
- (3) 气/液两相在管中分布均匀,不会形成冲击型弹状流。

(4) 在90°弯管内,两相流分别满足速度面积分布定律,气、液速度成一定比例。同时定义: q_g ——气相体积流量, q_L ——液相体积流量, Q_{TF} ——气/液两相体积流量, V_g ——

气相体积, V_L ——液相体积, ρ_g ——气相密度, ρ_L ——液相密度, v_g ——气相表观速度, v_L ——液相表观速度, R ——弯管曲率半径, r_0 ——弯管半径, $x = \frac{q_g}{q_L}$ ——气液比, $\beta = \frac{q_g}{q_L + q_g}$ ——气液速度比, $f_g = \frac{V_g}{V_L + V_g}$ ——空隙率。

在上述假设定义下, 根据分相理论, 并设两相在弯管截面中占的面积分别为 S_L , S_g 如图 4 所示。应有

$$\frac{q_g}{q_L} = \frac{u_g \cdot S_g}{u_L \cdot S_L} = \frac{u_g \cdot k_1 h_g}{u_L \cdot k_2 \cdot h_L} = x \quad (1)$$

$$\frac{h_g}{h_L} = a \cdot x \quad (2)$$

式中 $a = f(R, r_0, x)$

$$h_L + h_g = 2r_0 \quad (3)$$

由(2)、(3)式可得:

$$h_L = 2r_0 / (1 + ax) \quad (3')$$

$$h_g = 2r_0 ax / (1 + ax) \quad (3'')$$

同时, 对微体积元作力平衡分析, 则有:

$$df_r = d_m \frac{u_r^2}{r} = \rho \frac{u_r^2}{r} ds \cdot dr \quad (4)$$

式中: u_r ——曲率半径为 r 处的表观速度, ρ ——流体密度, df_r ——微体积元受到的离心力。

$$df_p = ds \cdot dp \quad (4')$$

式中: df_p ——微体积元受到的由压差引起的力, 此力在稳定流动时应与离心力平衡。

微体积元上还受到重力的作用, 但由于 $\frac{u_r^2}{r} \gg g$, 故忽略之。

由面积速度分布定律, 有如下关系:

$$\frac{u_r}{r} = \frac{u_R}{R} \quad (5)$$

又

$$u_R = \frac{Q}{\pi r_0^2} \quad (6)$$

由(4)、(4')、(5)、(6)式可解得:

$$dp = r \frac{\rho Q^2}{R^2 r_0^4 \pi^2} dr \quad (7)$$

则

$$\Delta P = \int dp = \int_{R+r_0-h_L}^{R+r_0} \frac{r \rho_L Q^2}{R^2 r_0^4 \pi^2} dr + \int_{R-r_0}^{R+r_0-h_L} \frac{r \rho_g Q^2}{R^2 r_0^4 \pi^2} dr \quad (8)$$

当 $\rho_g/\rho_L \ll 1$ 时, 上式后项可忽略, (8)式积分代入(3')式, 则有:

$$Q = \sqrt{\frac{\pi^2 R r_0^3 \Delta P}{2 \rho_L} \cdot \frac{1 + ax}{1 + x}} \quad (9)$$

以 $x = \beta/(1 - \beta)$ 代入(9)式, 则得到90°弯管检测气/液两相流量的数学模型:

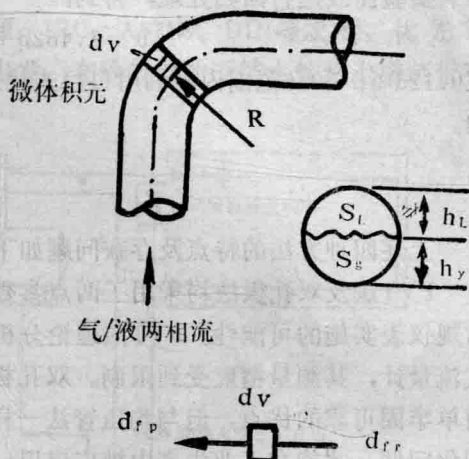


图 4 弯管法原理图

$$Q = \sqrt{C\beta + 1} \cdot \sqrt{Rr_0^3 \cdot \frac{\pi^2}{2\rho_L} \cdot \Delta P} = \theta \sqrt{R \cdot r_0^3 \cdot \frac{\pi^2}{2\rho_L} \cdot \Delta P}$$

$$= 7.921 \times 10^{-4} \cdot \theta \cdot \sqrt{R \cdot r_0^3 \cdot \frac{\Delta P}{\rho_L}} \quad (10)$$

式中: $\theta = \sqrt{C\beta + 1}$, θ 与 β 、 r_0 、 R 有关, 由实验确定。对在 $\phi 1\frac{1}{2}$ " 的 90° 弯管上得到的 $\theta \sim \beta$ 实验曲线进行回归处理, 得到:

$$\theta = 1.462\beta + 1 \quad (11)$$

在 $0.125 \leq \beta \leq 0.6$ 范围内, 利用 (11) 式代入 (10) 式, 检测气/液两相流量的最大误差在 8% 以内。

上述四种方法的特点及存在问题如下:

PVT 法及双孔板法均采用了两点参数的关联, 避开了两相密度检测的难题, 保证了采用常规仪表实施的可能性。PVT 法理论分析可靠, 数学模型简单, 但目前国内尚缺有效的容积式流量计, 其测量精度受到限制。双孔板法的两相标定尚需标准化系列化。弯管法具有结构简单牢固可靠的优点, 但与均压管法一样, 尚需解决在线两相平均密度检测问题, 标准化系列化问题, 才能在工业生产中推广应用。

用于火电厂热力试验及在线 标定的流量计

孙玉石 武振宁

(东北电管局技术改进局)

随着节能活动的深入发展, 火电厂的运行经济分析得到了进一步的加强。由此要求测试工作不仅保证准确可靠, 而且测试过程应有最低的能源消耗。在这方面流量表尤为突出。如主蒸汽流量表、给水流量表测量值的误差为 1% 时, 影响到设备效率的误差也为 1%, 可见保证流量表的准确性是非常重要的。火电厂中的给水和主蒸汽均是高温高压流体, 一次元件的安装往往不能满足规程要求, 尤其是运行中出现缺陷以后, 难以及时处理。当前由于流量表失准或精度偏低是影响电厂经济活动分析的重要环节之一。所以在一些发达国家或国际组织制订的一些汽轮机试验规程中, 规定用温度、压力较低的凝结水量来推算主蒸汽流量。另一方面随着机组参数和容量的提高, 节流式流量表的压力损失已成为不容忽视的因素。如一台 200MW 的汽轮发电机, 按年 7000 利用小时计算, 当主蒸汽压力损失为 0.5 kgf/cm^2 时 (一般流量表最大压差 ΔP 为 $16000 \text{ mmH}_2\text{O}$), 则一年相当于多耗标准煤 200 吨, 故在一些发达国家的

大型汽轮机上,测量主蒸汽流量已采用汽轮机特定的压力信号(如调节级压力等)转换为流量值的办法来代替节流式流量计,但这种流量计的在线标定尚未妥善解决,因而在应用上受到限制。

一、改进方案

由于节流装置在测量蒸汽流量中存在的实际问题,IEC、ASME、DIN等规程,优先推荐以凝结水量代替机组的主蒸汽流量。从综合治理出发,在除氧器的凝结水管路上增装带有

“试验用的节流式流量计”(以下简称试验流量计)的旁路管比较合适。现以N100-90/535型汽轮机为例说明改进情况。改进前后的系统示意图见图1。原除氧器系统中高压加热器疏水经阀门5进入除氧器,而凝结水经低压加热器后通过阀门4及凝结水流量孔板进入除氧器,因此除氧器有两根进水管。为使进入汽轮机的主蒸汽之凝结水尽可能多地通过试验流量计,在进行试验或做在线标定时,将阀门5关闭,打开5号高加(GJ₅)与4号低加(DJ₄)间的疏水联络门6,将高加疏水导入低加,水汇同一处经试验喷嘴后进入除氧器。同时为了减少运行中的能源消耗,和保证仪表的精度,将试验流量计装在凝结水管的旁路上。

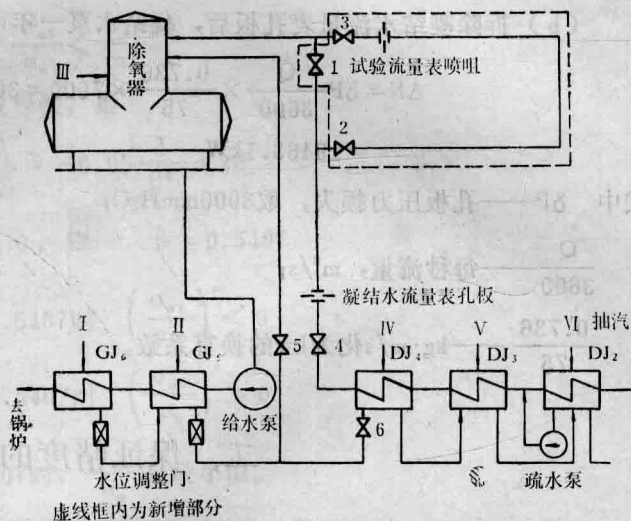


图1 改进前后的系统示意图

量表装在凝结水管的旁路上。

1. 本系统运行方式

- (1) 正常运行时: 与改前运行系统相同, 开1, 4, 5号门; 关2, 3, 6号门。
- (2) 机组试验或压力信号主蒸汽流量计在线标定时, 开2, 3, 4, 6号门; 关1, 5号门。

2. 优点

- (1) 一次元件安装在低温(160℃以下)、低压(绝对压力8kgf/cm²以下)的凝结水中, 安装条件好, 易于达到规程要求。
- (2) 一次元件为非连续性工作, 易于保持精度稳定。
- (3) 符合国际上现行的汽轮机试验规程中由凝结水推算主蒸汽流量的要求, 提高了汽轮机试验精度和可靠性。
- (4) 当汽轮机采用压力信号主蒸汽流量计时, 此系统则可解决在线标定问题。从而可拆除节流式流量计, 甚至还可拆除凝结水流量计。这样一来就可达到节能和简化测量系统的目的。

现仍以N100-90/535型汽轮机为例, 进行节能估算。

(a) 取消节流式主蒸汽流量表节约的标准煤量 ΔW

$$\Delta W = \frac{q_a \times 0.0005 \times N \times 7000}{Q_R \times \eta \times 1000} = \frac{2200 \times 0.0005 \times 100000 \times 7000}{7000 \times 0.94 \times 1000} = 117 \text{ 吨}$$

式中 q_a ——汽轮发电机的热耗率, 2200kcal/kW·h;

0.0005——主蒸汽压力改变0.5kgf/cm²时的热耗修正系数;

N ——汽轮发电机的额定出力, 100000kW·h;

7000——年利用小时数。

Q_R ——标准煤的发热量, 7000kcal/kg;

η ——锅炉效率, 取94%。

(b) 拆除凝结水流量表孔板后, 凝结水泵一年可节约的电量 ΔN

$$\Delta N = \delta P \frac{Q}{3600} \times \frac{0.736}{75} \times 7000 = 3000 \times \frac{340}{3600} \times \frac{0.736}{75} \times 7000$$

$$= 19463.1 \text{ kW}$$

式中 δP ——孔板压力损失, 取3000mmH₂O;

$\frac{Q}{3600}$ ——每秒流量, m³/s;

$\frac{0.736}{75}$ ——kg·m/s化为kw的换算系数。

二、保证精度的措施

试验流量表保证精度的措施如下: 欲获得较高的流量测量精度和使用精度, 关键问题是一次元件。因而在一次元件的选择、设计、制造、装配、安装、使用等各个环节都要给予充分注意。

1. 在制造、安装一次元件时保证使用精度的措施

(1) 制造一次元件时带有6D ($l_1 = 4D$, $l_2 = 2D$) 的测量管, 并以良好的装配工艺加以成套组装。

(2) 考虑到水流的磨损作用, 一次元件选用标准喷嘴, 而且装在旁路上, 不连续使用。

(3) 在安装时业已考虑充分满足直管段长度的要求。

2. 一次元件及测量管一起进行单独标定。这样使一次元件工作时的条件更接近于实验条件。单独标定需要委托有关的计量测试部门进行, 目前我国计量测试部门的设备条件较差, 还不能对电厂的较大管径和大雷诺数 (10^7) 的一次元件进行标定。

3. 一次元件不能标定而又希望尽可能地提高精度, 因此在设计一次元件时要千方百计降低误差。当被测介质为水或水蒸汽时, 一次元件(包括差压变送器)的标准误差中, 流量系数的误差 σ_{α_0}/α 所占比例最大。因而在一次元件设计时要设法得到最小的 σ_{α_0}/α 值。

(1) 根据GB2624-81中6.4.5, 6.4.6条的规定, 分析 σ_{α_0}/α 的公式, 并求取最小值。

(a) 角接取压标准喷嘴的光管流量系数 α_0 的基本相对误差为

$$\frac{\sigma_{\alpha_0}}{\alpha_0} \pm \left[0.1 + \frac{0.05}{2\beta^2} + 0.5\beta^4 + 0.125 (\log_{10} Re_D - 6)^2 \right] \% \quad (1)$$

(b) 角接取压标准喷嘴的糙管流量系数 α 的基本相对误差为

当 $\beta^2 \geq 0.2$ 时

$$\frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha} = \pm 0.25 \left[1 + 3\beta^4 + 100(r_{Re} - 1) + (\log_{10} R_{eD} - 6)^2 + \frac{50}{D} \right] \% \quad (2)$$

当 $0.1 \leq \beta^2 < 0.2$ 时

$$\frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha} = \pm 0.25 \left[\frac{0.224}{\beta^2} + 100(r_{Re} - 1) + (\log_{10} R_{eD} - 6)^2 + \frac{50}{D} \right] \% \quad (3)$$

对以上三式的逐项分析及简单的试算可以看出, 对任一 β 值, 光管流量系数的基本相对误差小于糙管流量系数的相对误差, 即

$$\frac{\sigma_{\alpha 0}}{\alpha_0} < \frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha}$$

进一步对式(1)加以分析。对 β 取导数, 得

$$\left(\frac{\sigma_{\alpha 0}}{\alpha_0} \right)' = -0.05 \frac{1}{\beta^3} + 2\beta^3$$

令 $\left(\frac{\sigma_{\alpha 0}}{\alpha_0} \right)' = 0$, 则 $\beta = 0.5407$

当 $\beta < 0.5407$ 时 $\left(\frac{\sigma_{\alpha 0}}{\alpha_0} \right)' < 0$

当 $\beta > 0.5407$ 时 $\left(\frac{\sigma_{\alpha 0}}{\alpha_0} \right)' > 0$

$\therefore \beta = 0.5407$ 时, $\frac{\sigma_{\alpha 0}}{\alpha_0}$ 有最小值。

(2) 按 $\beta = 0.5407$ 并参考以下因素设计流量计。

(a) 安装的直管段应充分满足, 且不计压力损失, 所以在确定 β 时不考虑这些因素的影响。

(b) 不采用流量刻度的测量仪表, 对不同的 R_{eD} 区段选用不同的 α_0 值, 再按流量公式计算流量, 所以确定 β 时, 不必考虑 $R_{eD \min}$ 的影响, 同样差压也无特殊计算及选择系列值的必要。

(c) 管道的选择。对于喷嘴, 当相对平均粗糙度 $K/D \leq 0.53$ 时, 在 $\beta^2 < 0.3$ ($\beta < 0.548$) 时, 管道即视为光管。此时就可直接取 $\beta = 0.5047$ 来确定喷嘴的 d 值。

4. 举例

现以某一试验流量计的数据为例, 确定流量值和包括显示仪表在内的流量测量总误差。

(1) 已知条件

被测介质	凝结水
被测介质表压力	8 kgf/cm ²
被测介质温度	155°C
实测管道内径	$D_{20} = 259.1 \text{ mm}$
实测一次元件内径	$d_{20} = 139.93 \text{ mm}$
工作状态下 β 值	$\beta = 0.540$

(2) 流量值的确定

按 $M = 0.01252 \alpha_0 \beta^2 D_t^2 \sqrt{\rho \Delta P}$

式中 ρ ——工作状态下水的密度, kg/m^3 ;

ΔP ——差压变送器示值, kgf/cm^2 ;

α_0 ——流量系数, 按下表的值代入。

Re_D	5×10^4	7×10^4	1×10^5	2×10^5	1×10^6	2×10^6	4×10^6
对应流量 t/h	6.4	9.0	12.8	25.6	128.1	256.2	512.4
α_0	1.0079	1.0110	1.0128	1.0143	1.0148	1.0148	1.0148
$\frac{\sigma_{\alpha_0}}{\alpha_0}$	0.440	0.395	0.353	0.289	0.228	0.240	0.273

为方便起见, 可将流量公式制成“ $\Delta P-M$ ”表使用。

(3) 包括差压变送器在内的流量总误差 (标准误差的相对值) 的估算。

实际的流量测量总误差应为:

$$\frac{\sigma_M}{M} = \pm \left[\left(\frac{\sigma_{\alpha_0}}{\alpha_0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 4 \left(\frac{\beta^4}{\alpha} \right) \left(\frac{\sigma_d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta P} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_\rho}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \%$$

$$(a) \frac{\sigma_{\alpha_0}}{\alpha_0} = \pm \left[0.1 + \frac{0.05}{2\beta^2} + 0.5\beta^4 + 0.125(\log_{10} Re_D - 6)^2 \right] \%$$

计算结果列于前表中第4行。

当流量在130~500t/h范围内时

$$\left(\frac{\sigma_{\alpha_0}}{\alpha_0} \right)^2 = 0.0521 \sim 0.0745$$

(b) 被测介质为凝结水, 所以流束膨胀系数基本相对误差为0。

$$\left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 = 0$$

$$(c) \quad 4 \left(\frac{\beta^4}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sigma_D}{D} \right)^2 = 4 \left(\frac{0.54^4}{1.0148} \right)^2 0.1^2 = 4 \times 0.0702 \times 0.01 = 0.000281$$

$$(d) \quad 4 \left(1 + \frac{\beta^4}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sigma_d}{d} \right)^2 = 4 \left(1 + \frac{0.54^4}{1.0148} \right)^2 \times 0.05^2$$

$$= 4 \times 1.175 \times 0.0025 = 0.01175$$

$$(e) \quad \frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta P} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{3} \zeta_b \frac{\Delta P}{\Delta P_{com}} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{3} \times 0.25 \times \frac{3}{2} \right)^2 = 0.00391$$

式中 ζ_b ——差压变送器的精度等级。选用CECC型或1151型电容式差压变送器, 其精度等级为0.25。

$$(f) \quad \frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_\rho}{\rho} \right)^2 = \frac{1}{4} \times 0.03^2 = 0.000225$$

(g) 综合以上各项的计算值, 得出

$$\frac{\sigma_M}{M} = \pm \left[(0.0521 \sim 0.0745) + 0.000281 + 0.01175 + 0.00391 + 0.000225 \right]^{1/2}$$

$$= 0.261 \sim 0.301 \%$$

(4) 包括显示仪表在内的流量测量总误差:

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_M}{M} &= \pm \left[\left(\frac{\sigma_M}{M} \right)^2 + \xi_x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \% = \pm \left[(0.261 \sim 0.301)^2 + 0.2^2 \right]^{\frac{1}{2}} \% \\ &= \pm [(0.068 \sim 0.091) + 0.04]^{\frac{1}{2}} \% = \pm (0.329 \sim 0.361) \%\end{aligned}$$

式中 ξ_x ——显示仪表的精度等级。选用0.2级毫安表。

由以上计算可知，用误差不超过0.4%的流量计计量或推算汽轮机的主蒸汽量和压力信号主蒸汽流量表的在线标定，在现阶段应认为是比较理想的了。

三、结 论

1. 火力发电厂在除氧器入口水管上装设特制的试验用流量计有以下好处。

(1) 提高了汽轮机的鉴定试验精度。

(2) 提高了汽轮机压力信号主蒸汽流量计在线标定的精度，使此项技术得以推广，从而降低了发电厂运行的能源消耗，并简化了仪表测量系统。

2. 为保证试验流量计的精度，最完善的办法是对一次元件单独标定。若做不到时，可采用光管条件下 $\beta = 0.5407$ 的角接取压标准喷嘴。

一种适于低压差使用的流量特性

汪 克 成

(上海工业自动化仪表研究所)

【提要】 调节阀在调节介质流量时，必然形成一定的压降损失，这就带来了能量损耗问题。随着生产过程的强化，这种能耗也越益严重，为此如何在保证调节阀性能的同时，减少这种压降损失造成的能耗已成为人们关注的问题。本文从减小阀上压差可以节约能耗的观点出发，对压差与流量特性的关系作了全面分析，并在此基础上提出一种新型流量特性的模式，它在低压差条件下，即低串联管道阻力(S)条件下具有令人满意的直线工作流量特性，可以比直线，等百分比流量特性更好的满足现场使用要求，并能实现减少调节阀能耗的目的。

一、概 述

调节阀是以节流原理工作的，所以在调节流量的同时必将产生一定的压力损失，成为系统动力消耗的重要部分。如图1所示，这种压力损失可以用阀上的压差来表示。对一已知系统，若流量Q和输出压力 P_2 不变条件下，阀上压差越少所需泵的扬程或功率就越低。如表1所示，当 $\Delta P / \Sigma \Delta P_L$ 由1下降为0.43时，所节约动力25%；降为0.25时，可节约动力31%，可见降低阀上压差，合理确定 $\Delta P / \Sigma \Delta P_L$ 的比值，可显著降低泵的功率、减少系统的动力损失，实现节能的目的。

表 1

S	$\Delta P/\Sigma P_L$	$P_2 \text{ kgf/cm}^2$	$\Sigma P_L \text{ kgf/cm}^2$	$\Delta P_v \text{ kgf/cm}^2$	泵扬程米	节约动力
0.5	1.0	4	10	10	240	—
0.3	0.43	4	10	4	180	25%
0.2	0.25	4	10	2.5	165	31%
0.1	0.11	4	10	1.2	152	36.6%

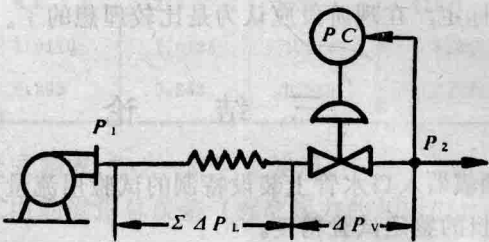


图 1

二、降低阀上压差对调节阀性能影响的分析

按照线性调节理论，为使系统的广义对象具有线性特性，还要求调节阀以一定的规律来调节流量，即要求以一定的流量特性来补偿对象的非线性。一般说来典型的调节阀流量特性有直线，等百分比和快开三种，如图 2 所示。其中尤以等百分比和直线特性得到广泛的使用。

1. 调节阀的流量特性

调节阀流量特性是指流体通过阀门的相对流量与相对开度间的关系，即：

$$\frac{Q}{Q_{max}} = f\left(\frac{1}{L}\right) \tag{1}$$

式中： Q/Q_{max} ——相对流量，即调节阀某一开度的流量与全开流量之比；

$1/L$ ——相对开度，即调节阀某一开度下的行程与全开行程之比。

调节阀的流量特性分固有流量特性和工作流量特性两种。固有流量特性，即在阀前后压差恒定的情况下得到的流量特性，它取决于阀芯的设计，如柱塞形阀芯的曲面形状，套筒的窗口形状等。在这种情况下，流量只是流通能力 C 的函数，因此也可以写成如下关系式：

$$\frac{C}{C_{max}} = f\left(\frac{1}{L}\right) \tag{2}$$

工作流量特性是在阀前后压差变化情况下得到的流量特性，因此这时流量是额定流量系数和压差的函数。

固有直线流量特性的数学表达式为：

$$\frac{C}{C_{max}} = \frac{1}{R} \left[1 + (R - 1) \frac{1}{L} \right] \tag{3}$$

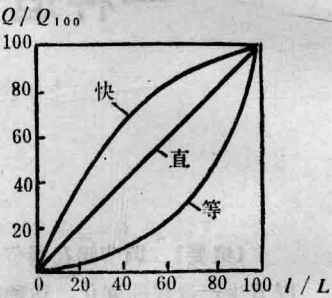


图 2 固有流量特性曲线

固有等百分比流量特性的数学表达式为：

$$\frac{C}{C_{\max}} = R \left(\frac{1}{L} - 1 \right) \quad (4)$$

式中 R ——可调比，一般为 30。

2. 压差对流量特性的影响

实际使用中调节阀总是与其它局部阻力串联使用的，因此阀上的压差并不是恒定的，这种压差的变化将改变阀的固有流量特性，形成一种工作流量特性，它对使用者更具有实际意义。它的变化规律可从图 3 和 4 的分析可知。

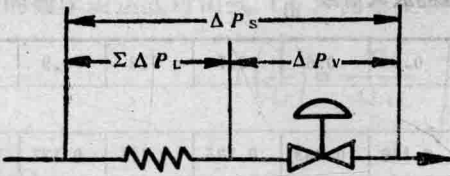


图3 串联管道场合

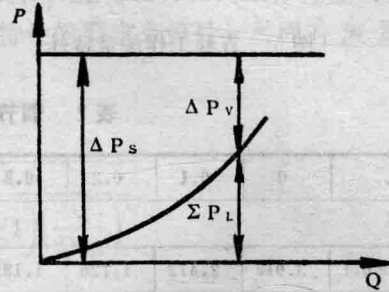


图4 串联管道时调节阀压差变化情况

对一个两端压差一定的系统，若管道、装置、设备等局部阻力损失与流量的平方成正比，那么调节阀上的压差就会随着流量的增加而减小，这个压差的变化就使流量特性发生变化，形成一个新的规律，即工作流量特性。

在流量完全紊流状态并亚临界流动条件下，即各局部阻力损失与流量的平方成正比时，求得阀上压差变化规律后即可方便的推得工作流量特性的计算公式：

$$\frac{Q}{Q_{100}} = f \left(\frac{1}{L} \right) \sqrt{\frac{1}{(1-S)f^2 \left(\frac{1}{L} \right) + S}} \quad (5)$$

式中 Q_{100} ——有管道阻力时调节阀的全开流量；

S ——调节阀全开时的压差与系统总压差之比。

$$\left(S = \frac{\Delta P_v}{\Delta P_s} \right)$$

将相应的固有流量特性关系式和不同的 S 值代入式 (5) 即可计算得到具体的工作流量特性，如图 5、6 所示。

从图可知，当 $S = 1$ 时，系统的总压差全部降落在调节阀上，工作流量特性与固有流量特性一致，但随着 S 的减小，不仅调节阀全开时放大倍数减小，同时调节阀的流量特性曲线也发生很大畸变，直线特性趋向于块开特性，等百分比特性趋向于直线特性（有拐点），也就是说，随着管道阻力的增加，对固有流量特性的偏离越来越大，总的趋势是小开度放大倍数增加，大开度放大倍数减小。

从表 2 和图 7 可知直线特性当 $S < 0.5$ 后已趋向快开，放大倍数变化达 3~30 倍；等百分比特性在 $S < 0.3$ 后，一般认为趋向直线特性，实际上从放大倍数的变化（5~7.7 倍）来看，它也不是真正的直线特性。可见，为节约能量，减小阀上压差使阀在低 S 值条件下运行

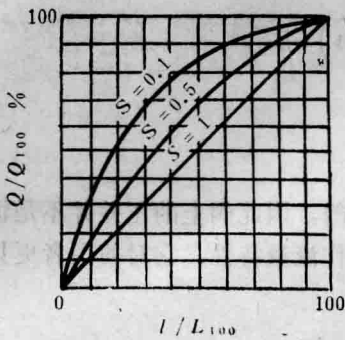


图5 直线工作流量特性

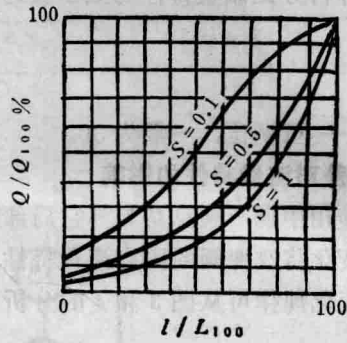


图6 等百分比工作流量特性

表 2 调节阀工作特性的放大倍数 $\frac{dQ}{dl}$

1/L	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
直 线 特 性	S = 0.1	3.012	2.472	1.726	1.132	0.734	0.486	0.333	0.235	0.171	0.097
	S = 0.2	2.147	1.960	1.632	1.281	0.970	0.726	0.546	0.413	0.317	0.193
	S = 0.3	1.758	1.665	1.489	1.273	1.052	0.853	0.686	0.550	0.442	0.290
等 百 分 比 特 性	S = 0.1	0.350	0.491	0.670	0.894	1.130	1.325	1.373	1.210	0.902	0.584
	S = 0.2	0.249	0.353	0.489	0.672	0.896	1.152	1.373	1.463	1.333	1.027
	S = 0.3	0.204	0.290	0.404	0.560	0.761	1.015	1.284	1.506	1.555	1.370

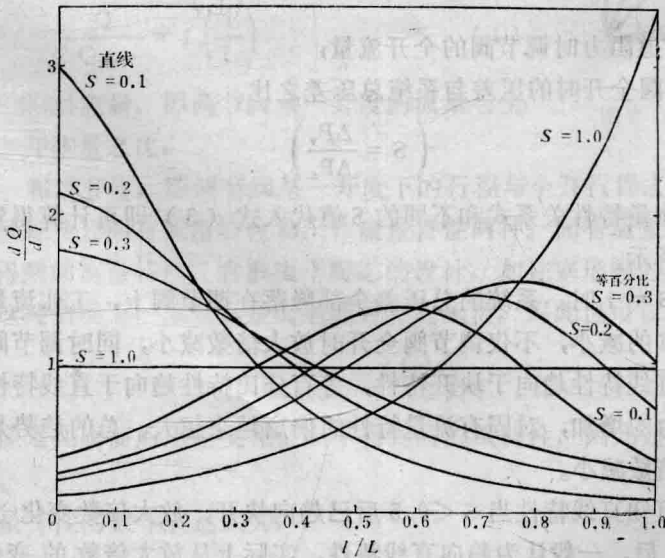


图7 直线和等百分比放大倍数变化曲线