

线性孔板差压流量计原理及其在蒸汽计量中的应用

于 阳 （嘉兴市能源利用监测中心，嘉兴 314001）

纪 纲 （上海同欣自动化仪表有限公司，上海 200070）

徐华东 （斯帕莎克工程（中国）有限公司，上海 200233）

摘 要 线性孔板是一种新型差压式流量计，范围度宽，测量精确度高，可测范围（1~100）%FS，在（5~100）%FS 范围内，精确度±1%，尤其适合蒸汽计量使用。

关键词 线性孔板 流量计 蒸汽 流量测量 应用

1 概述

传统的孔板流量计最大的不足是在被测流量相对于满量程流量较小时，差压信号很小，这一缺点大大影响其范围度和测量精确度。人们针对其不足，在传统的孔板式差压流量计基础上，开发了可变面积可变压头孔板流量计。因为其输出的差压信号与被测流量之间有线性关系，所以也称线性孔板差压流量计。

线性孔板最早由英国斯派莎克（Spirax Sarco）公司开发并命名为 GILFLO，1993 年进入中国市场后，由于其突出的优点，使得其在测量范围度要求大，测量精确度要求高，振动较明显等场合很受青睐。

2 线性孔板流量计工作原理^[1]

线性孔板又称弹性加载可变面积可变压头孔板，其环隙面积随流量大小而自动变化，曲面圆锥形塞子在差压弹簧力的作用下来回移动，环隙变化使输出信号（差压）与流量成线性关系，并大大地扩大范围度，其结构如图 1 所示。

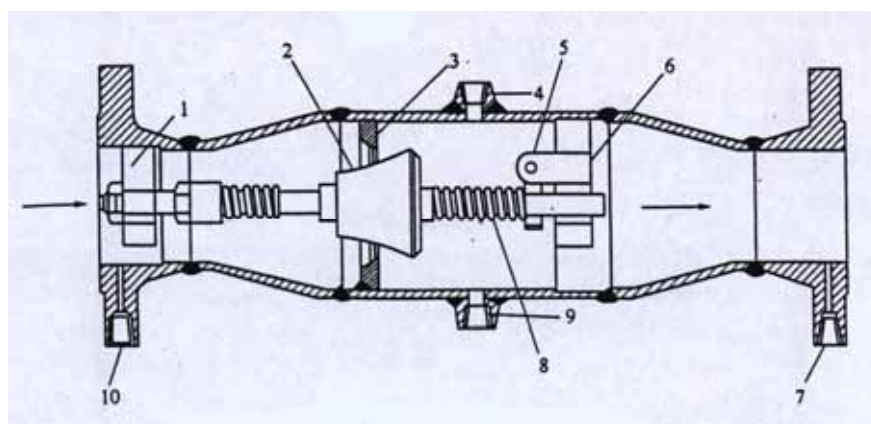


图 1 线性孔板（GILFLO 型节流装置）

1 — 稳定装置；2 — 纺锤形活塞；3 — 固定孔板；4 — 排气孔；5 — 标定和锁定蜗杆装置；6 — 轴支撑；

7 — 低压侧差压检出接头；8 — 高张力精密弹簧；9 — 排水孔；10 — 高压侧差压检出接头

在孔板流量计中，当流体流过开孔面积为 A 的孔板时，流量 q 与孔板前后产生的差压之间有如下关系：

$$q = K_1 \cdot A \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

式中 q —— 流量；

K_1 —— 常数；

A —— 孔板开孔面积；

Δp —— 差压。

在如图 1 所示的线性孔板中，于孔板处插入一个纺锤形活塞，由差压引起的活塞—弹簧组件的压缩量（活塞的移动距离）为 X ，则式（2）成立：

$$\Delta p = K_2 X \quad (2)$$

式中 K_2 —— 弹簧系数。

当活塞向前移动时，流通面积受活塞形状的影响而发生变化，其关系为：

$$A = K_3 \cdot \sqrt{X} \quad (3)$$

式中 K_3 —— 常数。

由式 (2) 和 (3) 得

$$A = K_3 \cdot \sqrt{\Delta p / K_2} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1) 得

$$\begin{aligned} q &= K_1 \cdot K_3 \cdot \sqrt{\Delta p / K_2} \cdot \sqrt{\Delta p} \\ &= K \cdot \Delta p \end{aligned} \quad (5)$$

式中 K —— 常数 ($K = K_1 \cdot K_3 \cdot \sqrt{1/K_2}$)。

由式 (5) 可知，流量与差压成线性关系，所以取出差压信号即可得到流量。

3 特点

(1) 范围度宽

典型的线性孔板差压式流量计可测范围为 1%FS~100%FS，保证精度的范围为 5%FS~100%FS，因此，对于流量变化大的测量对象，一台流量计就可解决。能适应蒸汽、燃油测量的夏季、冬季负荷变化。

(2) 精确度高

由于逐台经过水标定，并进行多项补偿，因此测量精确度大大提高，在 5%FS~100%FS 范围内，精确度可达±1%。

(3) 线性差压输出

差压信号与流量成线性关系，被测流量相对于满量程流量较小时，差压信号幅值也较大，有利于提高测量精确度。

(4) 直管段要求低

由于孔板的变面积设计，使其成为在高雷诺数条件下工作的测量机构，可在紧靠弯管、三通下游的部位进行测量（为了保证测量精确度，制造厂还是要求上游直管段≥6 倍管径，下游直管段≥3 倍管径）。

(5) 耐振性好

在振动较大的恶劣场所，人们总是抱怨涡街流量计用不好，容易出现“无中生有”和示值偏高问题。线性孔板耐振性要比涡街流量计优越。

4 保证测量精确度的措施

典型的线性孔板流量计 GILFLO 承诺具有±1%精确度，为了达到这一指标，采取了几项重要措施，其中：

(1) 对线性孔板逐台用水标定

从式 (2) 和 (3) 可知，只要线性孔板中的弹簧线性好，而且活塞被加工成理想形状，使得流通面积 A 与位移 X 的 1/2 次方成线性关系，就能使差压与流量之间的线性关系成立，但是，活塞的曲面加工得很理想是困难的，最终不得不用逐台标定的方法来弥补这一不足。

Spirax-sarco 公司对线性孔板进行逐台标定是以水为介质，不同口径的线性孔板均选择 14 个标定点，其中流量较小时，标定点排得较密，图 2 所示为一台 DN200

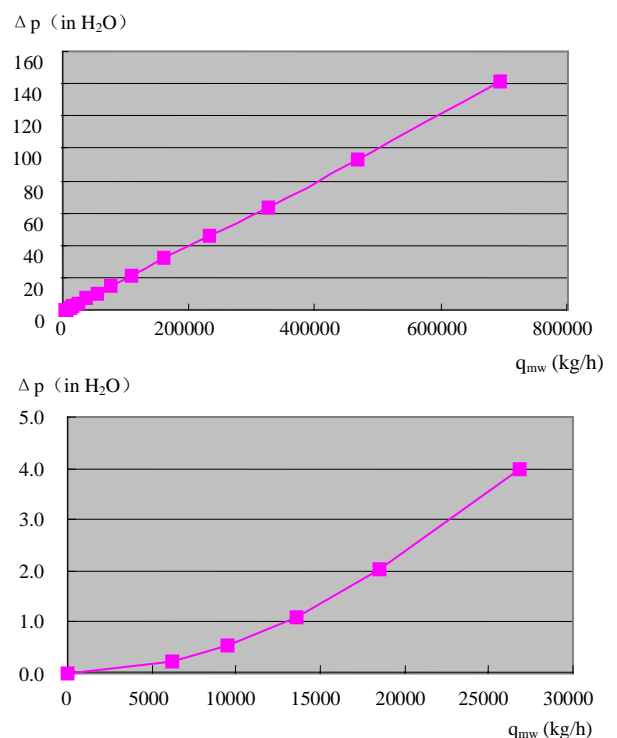


图 2 线性孔板标定曲线（介质：水）例

线性孔板的标定曲线。图中的差压单位为英寸水柱，(1英寸水柱 = 249.0889Pa)，表 1 所列是一台 DN200 的线性孔板的实际标定数据，其中从体积流量换算到质量流量是建立在水的密度 $\rho = 998.29 \text{ kg/m}^3$ 基础上的。

而利用标定数据对线性孔板的非线性误差进行校正还须借助于流量二次表。具体做法是将标定数据写入二次表中的折线表，然后二次表根据输入的差压信号（电流值）用查表和线性内插的方法求得水流量值 q_{mw} 。

表 1 GILFLO 线性孔板水标定例 (DN200)

标 定 数 据		查 表 数 据	
水的实际流量 (20℃)	差 压	差压变送器输出电流	工作流体流量
kg / h	in H ₂ O	mA	L / min
0.0000	0.0000	4.0000	0.0000
6247.4055	0.2450	4.0280	104.3018
9475.9305	0.5425	4.0620	158.2027
13543.0335	1.0938	4.1250	226.1039
18556.5315	2.0300	4.2320	309.8053
26804.5443	3.9813	4.4550	447.5076
40256.9694	6.8250	4.7800	672.0988
55856.3351	10.2988	5.1770	932.5336
78318.6682	14.7263	5.6830	1307.5470
111950.1528	21.5600	6.4640	1869.0319
163394.0063	31.7363	7.6270	2727.8981
235423.2212	45.7363	9.2270	3930.4414
327416.7604	63.7175	11.2820	5466.2934
469675.5153	92.8900	14.6160	7841.3340
693845.3638	141.3038	20.1490	11583.8979

注: in H₂O=249.0889Pa

式中 q_m —— 被测流体质量流量, kg/h;
 q_{mw} —— 标定流体 (水) 流量, kg/h;
 ρ_f —— 被测流体密度, kg/m³;
 ρ_w —— 标定流体 (水) 密度, kg/m³。

得到水流量值还不是最终目的, 因为被测流体不一定是水, 当被测流体为其他液体时, 用式 (6) 进行密度校正。

$$q_m = q_{mw} \cdot \sqrt{\rho_f / \rho_w} \quad (6)$$

(2) 雷诺数校正

孔板流量计的流量系数同雷诺数之间有确定的函数关系^[1], 当质量流量变化时, 雷诺数成正比变化, 因而引起流量系数的变化。在 GILFLO 型流量计中, 采用较简单的经验公式 (7) 进行雷诺数校正。

$$k_{re} = (1 - n/q_{mw})^{-1} \quad (7)$$

式中 k_{re} —— 雷诺数校正系数;
 n —— 常数, kg/h。

但若计算结果大于 m 值时, 则取 $k_{re} = m$ 。 n 和 m 数值同孔板的口径 DN 有关, 已经固化在制造商提供的流量二次表内。

(3) 温度对线性孔板的影响及其校正

温度对线性孔板影响使之产生误差主要通过三条途径:

- ① 流体温度变化引起流体密度变化、从而导致差压与流量之间的关系变化。
- ② 流体温度变化引起管道内径、孔板开孔直径以及活塞几何尺寸的变化, 温度升高, 环隙面积增大, 导致流量计示值有偏低趋势。
- ③ 流体温度变化, 线性孔板中的承载弹簧温度相应变化, 引起式 (2) 中的弹性常数 K_2 发生变化。温度升高, K_2 减小, 活塞位移 x 增大, 用通俗的话来说就温度升高, 弹簧变软, 在相同的差压条件下, 活塞位移增大。因此, 环隙面积相应增大, 流量计示值也有偏低趋势。

上述三条途径对流量示值的影响都可以进行校正，其中途径 a，可由下文式（10）中的流体密度进行补偿。在线性孔板用来测量蒸汽流量时，流体温度作为自变量，参与查蒸汽密度表。从而可由二次表自动进行此项补偿。

上述途径 b 和 c 流量示值的影响关系较复杂，在 GILFLO 型流量计中，采用式（8）所示的经验公式进行校正：

$$k_t = 1 + B(t - t_c) \quad (8)$$

式中 k_t —— 温度校正系数；

B —— 系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ （取 $B = 0.000189^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）；

t —— 流体温度 $^{\circ}\text{C}$ ；

t_c —— 标定时流体温度， $^{\circ}\text{C}$ （ t_c 常为 20°C ）。

此项校正也是在流量二次表中完成的，其中 t 为来自温度传感器（变送器）的流体温度信号。

（4）可膨胀性校正

节流式差压流量计用来测量蒸汽、气体流量时，必须进行流体的可膨胀性（expansibility）校正，线性孔板也不例外。依据 ISO 标准，在 GILFLO 型流量计中用经验公式（9）进行校正^[2]：

$$k_\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} \quad (9)$$

式中 k_ε —— 可膨胀性系数；

β —— 直径比（孔板开孔直径与管道内经之比，制造商常取 0.6325）；

Δp —— 差压，Pa；

κ —— 等熵指数；

p_1 —— 节流件正端取压口绝压，Pa。

可膨胀性校正也在流量二次表中完成，由二次表进行在线计算。

（5）蒸汽质量流量的计算

用 GILGLO 型流量计测量蒸汽流量时，蒸汽质量流量在二次表中由式（10）计算得到：

$$q_{ms} = k_{re} \cdot k_\varepsilon \cdot k_t \cdot \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_w}} \cdot q_{mw} \quad (10)$$

式中 q_{ms} —— 蒸汽质量流量，kg/h；

k_{re} —— 雷诺数校正系数；

k_ε —— 可膨胀性系数；

k_t —— 温度校正系数；

ρ_f —— 被测流体工作状态密度， kg/m^3 ；

ρ_w —— 标定流体（水）的密度， kg/m^3 ；

q_{mw} —— 水的质量流量，kg/h。

在流量二次表中，先由差压输入信号查折线表得到 q_{mw} ，再由蒸汽温度、压力值查蒸汽密度表得 ρ_f ，然后与校正系数 k_{re} 、 k_ε 、 k_t 一起（ ρ_w 为设置数据）计算得到蒸汽质量流量 q_{ms} 。

5 安装和使用

GILGLO 型流量计的安装如图 3 所示。

① 水平度要求

线性孔板应安装在水平管道上，其原因主要有两个，其一是线性孔板内部的纺锤形活塞及承载弹簧都有一定的重量，如果管道倾斜此重力势必引起输出差压信号的漂移。其二是因差压取压口距离较大，如果管道倾斜势必导致两只取压口高度差 10mm，由此引起的零点漂移约为 $\pm 0.4\% \text{FS}$ 。

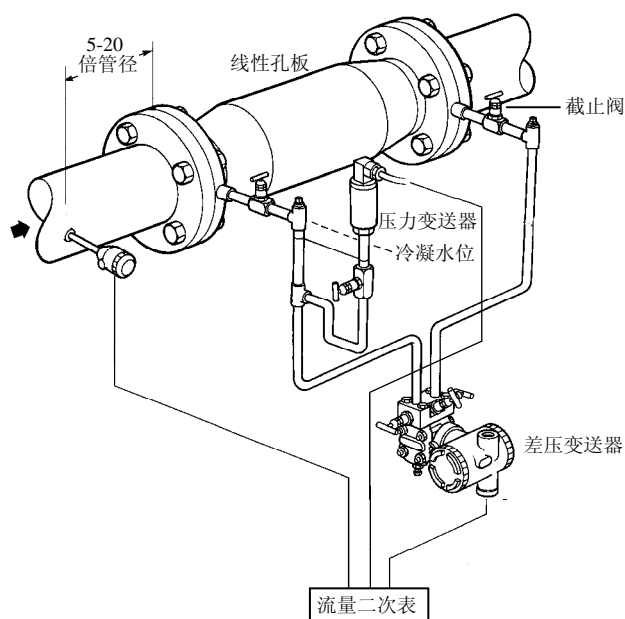


图 3 GILFLO 型流量计的安装

② 引压管的引向如图 2 所示。如果线性孔板安装位置很高，考虑维修的方便，可以将差压变送器安装在维修人员便于接近的位置，但应按仪表安装规程保证引压管的坡度，确保引压管内充满冷凝水，以利差压信号的不失真传递。

③ 用线性孔板测量减温减压器前（或后）蒸汽流量时，安装部位应尽量远离减温减压器设备，因为减温减压器振动都较大，更重要的是减温减压过程引起的流动脉动容易引起流量示值升高^[1]，远离脉动源可因脉动幅值的衰减而减小影响。但总的来说，相同的脉动条件对线性孔板的影响要比标准孔板小得多，这是因为线性孔板的变截面特性，使得流过节流部位的流速比标准孔板高。

④ 当线性孔板用来测量液体时，应注意从排气孔（图 1 中件号 4）排气，以免因气体的聚集引起误差。用来测量可能析出凝液的气体时，应注意从排液孔（图 1 中件号 9）排液，以免因液体在底部聚集引起误差。

6 流量二次表的国产化

与 GILFLO 线性孔板配用的流量二次表，进口原装产品为 M200 系列流量显示计算机，国产化产品为 FC6000 Spirax Sarco 型流量演算器。供应商既可供应进口原装产品又可供应国产化产品。

流量二次表实现国产化的目的主要有两个，其一是降低售价，增强竞争力。其二是根据中国的国情和微电子技术发展的新成果增加了用户需要的，有些是必不可少的重要功能，例如下文所述的各项功能。

6.1 下限流量计费功能^{[3][4]}

任何流量计都有保证精确度的最小流量和可测量最小流量，如果流量进一步减小，将会出现精确度无法保证或小信号切除的情况，这对贸易计量来说是不公正的。为了防止效益的流失，对于一套具体的热能计量设备，供用双方往往根据流量测量范围和能够达到的范围度，约定某一流量值为“下限流量”，而且约定若实际流量小于该约定值，按照多少流量收费。

在智能二次表菜单中，有一条写入“下限流量约定值”，另一条写入“下限收费流量”，仪表运行后，如果实际流量小于“下限流量约定值”，即以“下限收费流量”取代实际流量进行积算。

6.2 停汽判断功能

有些用户在休息天将蒸汽完全关闭，停止用汽，如果采用二部计费法，这时不能再按“下限收费流量”计费，方法是由仪表根据停汽后流体温度、压力参数的变化作出判断，判断结果一旦为“停汽”，即停止积算。

由仪表对停汽作出灵敏而正确的判断，以流体温度和压力为信号具有相同的效果。当供汽总阀关闭后，管道内温度很快降低到饱和温度，随着管内流体的进一步冷却，温度和压力同步降低，当低于“标志值”时，仪表作出已停汽的判断。从现场运行情况来看，为了加快温压降低的速度，在总阀关闭后开一下总阀后的排汽阀是有效的。

另外，这一功能的运用，供用双方协商设置一个合适的“标志值”是重要的。

6.3 超计划耗用计费功能

流量计如果超过设定范围运行，一般均导致计量值偏低。除此之外，在热网中如果超计划耗能，还将影响热网的供热品质。这不仅损害供方利益，而且损害其他用户利益。遇此情况，热力公司有时为了保证供热品质，被迫启动调峰机组，这必将使运行成本相应增加。为了鼓励用户计划用能，热力公司一般同需方约定最大用能量，如果超过此量，一般约定加 1 倍或数倍收费。

智能二次表实现这一功能需占用二条菜单，一条写入“最大耗用流量”，另一条写入“超用费率”。仪表运行时，依次显示两个瞬时流量，一个是“实际流量”，另一个是“收费流量”。

6.4 掉电记录功能

用于热能计量的表计一般都为电动式，当其电源中断后，仪表停止工作，累积值虽能保持但不会继续增加。有时需方为了少付热费，就将仪表电源拉掉一段时间，显然这是很不公平的。流量演算器的掉电记录功能就是要将这种有意拉电和无意掉电事件一次不漏地记录下来。

智能二次表内部装有实时时钟，其集成电路自带长寿命蓄电池，可以长期使用，当主电源掉电时，仪表自动记下实时时钟所指的日期和时间，当主电源恢复供电时，仪表再一次记下实时时钟所指的日期和时间。因此，每次掉电事件，仪表的 E²PROM 中都自动记下四条数据，一台仪表最多可记录 60 次掉电事件，而且记满之后如果再有掉电事件发生，则自动推掉最陈旧的一次记录。

掉电记录数据可通过仪表面板上的操作键调阅，但无法擦掉。使用者可按供需双方的约定，依一定的计算方法对掉电期间少计的累积值进行处理。

6.5 定时抄表功能

定时抄表功能，就是仪表在抄表员所指定的抄表时刻（在菜单中预先设置），读取流量累积值并存放在仪表的一个单元中，当抄表人员按下抄表键时，仪表显示抄表符号和该单元中的数据。该单元中的累积值一直保持到下一天的“抄表时间”才被刷新。如果全厂流量演算器设置同一抄表时间，那么，抄表人员巡回路线和时间的差异都不影响抄录结果，因此有利于分表和总表的平衡计算。

定时抄表功能在智能二次表中占用一条菜单，即“抄表时间”。

6.6 无纸记录功能

有许多流量测量系统都希望具备记录功能，记下重要数据和信息，但是传统的记录仪不仅体积大，价格高，维修工作量大，而且能够记入的数据和信息通道不够多，因此，人们渴望有新型的记录仪充当这一角色。

在智能流量演算器中加上一片海量存储器，在软件的支持下，使仪表具有无纸记录功能，从而可收到简单、可靠、价廉、存储的信息量大的效果。例如在一片 Flash Rom 海量存储器中可存入 11520 组与流量测量有关的重要数据和信息，每一组数据除了日期和时间数据之外，还可以包含质量流量累积值、热量累积值、质量流量瞬时值、热量瞬时值、流体压力、流体温度、故障诊断结果、流体密度等，重要数据和信息。这样，如果每 1 分钟存储一组最新数据，则一片海量存储器中可存放 8 天的最新数据。如果每 10 分钟存储一组数据，则可存放 80 天的最新数据。保存数据的时间间隔最长为 1 小时。

这些数据存放在流量二次表中，便于查询和抄录。

海量存储器存入的数据，第二个用途是通过二次表的通讯口传送到计算机中，从而用于历史曲线和报表制作、事件登录等。

二次表与计算机之间实现数字通讯的媒质既可以是专用电缆（屏蔽双绞线），也可以是公共电话网、无线电、GPRS 等。

7 GILFLO 蒸汽流量计实际应用情况

从 2006 年 7 月开始在嘉兴嘉爱斯热电有限公司的 13 家用户中采用了 Dg50-200mm 口径的 GILFLO 流量计 21 台，其中 8 家印染企业原来采用标准孔板流量计，最小口径 250mm，最大 400mm，另外 5 家企业是新增用户，直接采用了 GILFLO 流量计。8 家印染企业是热网主要用户，蒸汽用量占整个供热量的 2/3，每小时用量达到 180-220 吨，在使用标准孔板流量计时，每天在两个交接班时段共计约 3 个小时流量明显减少，大部分时间，部分设备在运行，流量值小于标准孔板流量计的下限值，导致流量指示为零，造成蒸汽计量的损失。以下是 8 家用户的基本情况：

单位名称	口径 (mm)	设计最大流量 (t/h)	实际流量 (t/h)	下限流量 (t/h)
欣悦天丝染整	400	50	35	4.33
锦丰印染	400	35	25	3.03
金宇达印染	350	30	23	2.60
天伦纳米印染	350	30	24	2.60
新永联染整	350	40	28	3.46
南洋印染	250	15	12	1.30
汇源染整	400	50	42	4.33
汇泉印染	250	12	8	1.04
合计		262	197	22.06

每天按照 2 小时计算，每天损失蒸汽 44.12 吨。按照蒸汽价格 130 元/吨计，每天损失 5500 元。自更换了（15 台 Dg200 口径的 GILFLO 流量计后，由于下限计量范围明显下降，交接班时的小流量计量明显得到改善，每年可增收汽款达到了 160 多万元，仪表的投资约 105 万元，经济效益十分明显。通过 2006 年半年的实际运行，仪表工作状态非常稳定、可靠。从 2007 年开始，在与热用户签定供热协议时，将 GILFLO 流量计作为双方贸易结算计量的标准配置。在处理大用户计量时采用了 Dg200

口径双表并联运行的方式，并留有进行再并联的接口，确保最大流量满足用户的需要。在更新流量计的同时，采用了 GPRS（或 CDMA）远程通讯系统，将二次仪表（FC6000）采集的数据及时地传送到供热管理部门，使整个蒸汽计量系统得到了进一步的完善。

8 结束语

① 线性孔板是新一代孔板流量计，测量范围度大，测量精确度高，在涡街流量计不能胜任的许多恶劣场所，在普通孔板流量计不能胜任的要求高的场合，线性孔板均能显示其独特的优越性。是在传统孔板差压式流量计基础上的飞跃。

② 国产化的智能流量二次表，结合中国实际增设的许多功能，在热能贸易计量中，有实际效果，为维护热力公司的合法权益作出贡献。

参考文献

1. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 北京: 化学工业出版社. 2003
2. GB/T 2624-93 流量测量节流装置用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量
3. 余小寅, 纪纲. 流量测量应用技术—热能贸易结算中的计量要求及表计功能(二). 医药工程设计, 2001(2): 33~36
4. 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用. 北京: 化学工业出版社. 2001

（摘自《上海计量测试》2008年第2期）