

流量仪表的合理选型 与耗能费的计算方法

孙延祚

(北京化工大学, 信息科学与技术学院, 北京, 100029)

[摘要] 流量仪表是能源计量器具的重要组成部份。为实施最新国家标准 **GB17167-2006**《用能单位能源计量器具配备和管理通则》，流量仪表的合理选型是关键的一环。本文将对流量计的合理选型及应考虑的重要事项予以阐述。

[关键词] 流量计选型, 准确度, 永久压力损失, 耗能费, 安装影响, 孔板, V 锥流量计, 科氏力质量流量计

一. 引言

国家标准 **GB17167-2006**《用能单位能源计量器具配备和管理通则》已于 2007 年 1 月 1 日开始实施。该国家标准中的 **4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5** 及 **4.3.8** 均为强制性条款。其主要要求是：对于用能量（包括产能量、输出能量、能源消耗量）超过限定值的用能量（包括产能量、输出能量、能源消耗量）单位或设备，如尚未配备能源计量器具，则都应加装能源计量器具。4.3.8 条则对相应的用能量（包括产能量、输出能量、能源消耗量）单位或设备的能源计量器具（如衡器，电能表，油流量表和气体流量表）的准确度等级分别提出了具体要求。对用于能源计量的流量计的准确度等级的要求是：对于成品油，为 0.5 级；对于重油和渣油，为 1.0 级；对于煤气和天然气，为 2.0 级；对于蒸

汽, 为 2.5 级; 对于水, 为 1.5 级 ($D \geq 250$ 毫米时) 或 2.5 级 ($D < 250$ 毫米时)。

由于现场的安装条件往往会直接影响流量计的准确度, 因此人们更加关注在实际安装条件下所选用的流量计的准确度。由于加装这些流量计的根本目的是为了节能降耗, 因此人们也更加关注所选用的流量计在运行时的耗能费和泵送费 (即流量计的永久压力损失)。

由于流量计的种类很多, 而选型中又涉及许多技术与经济因素。必须要综合考虑这些因素, 才有可能同时作到技术上可行和经济上合理。为了使流量计的选型更为合理, 本文将对流量计选型时需要考虑的重要事项予以阐述并给出耗能 (泵送) 费的计算方法。

二. 流量计选型的一般性准则

对于一个特定的使用场合, 流量计的选择取决于该测量课题在不同方面的重要性 (例如: 流量计在现场安装条件下的准确度, 耗能费, 安装条件的局限或被测介质的特殊性等), 因此, 它必然是一个基于工程与专业知识单独做出判断的事。在一个具有相似工作条件的特定领域内, 某种流量计的技术优势, 通常就是初选时的依据。

很明显, 在对具体的使用场合还没做详细的了解时, 就试图衡量各种限制条件, 只能是自以为是的臆断。以下是帮助我们对流量计做出正确、合理选型的五大类问题。对于其中的前三大类问题, 只有有限的选择, 利用它们能确定某种流量计是否适用。最后的两大类问题是最困难的, 因为它涉及价格与性能的比较及最后的决定。下面就是这五大类问题:

(一) 被测流体的类型是何种流体？

1. 被测流体是液体？气体？还是蒸汽？
2. 被测流体是洁净的？脏污的？还是含湿气流或浆液？
3. 被测流体是否有腐蚀性？是否有导电性？

(二) 工艺过程的工作条件如何？温度和压力的界限值是多少？

(三) 流量计的安装条件如何？

1. 计划运行的流量测量是在明渠上？还是在封闭的管道内？
2. 管道的内径尺寸是多少？
3. 工作状态下流体的管道雷诺数是多少？
4. 计划安装的流量计的上、下游都有多长的直管段？在其上游是何种扰流件？
5. 是否需要/能否使用流动调整器？
6. 工艺管道是否有过量的振动？
7. 流体的流动是定常/稳定的？还是脉动的？
8. 环境的或室内的温度和湿度条件是多少？

(四) 在流量计的性能和流量测量能力方面有哪些总的要求？

1. 要求的总的准确度是多少？要求在多大的流量测量范围内保证上述的总的准确度？对于用于贸易输送的流量计，其准确度等级优于 **GB17167-2006** 所规定的指标，如对于成品油，准确度等级为 **0.2**；对于天然气，准确度等级为 **0.5** 或 **1.0**。
2. 通常，流量计是在一个特定的流量下使用？还是在一个流量范围内使用？

3. 采用的流量计是否仅为了进行流量控制？如仅为了进行流量控制，必要的响应频率是多少？（对于小口径管道的流量控制，通常要求 0.1 秒）
4. 被测流量的范围是多少？偶然可能会遇到的最大与最小流量值是多少？

（五）流量计安装和运行的经济性如何？在经济方面应综合考虑的有以下费用：

1. 一次检测装置，二次仪表和附属设备的购置费；
2. 安装费：包括劳务费和配管费；
3. 为使流量计运行的耗能费和补偿总的永久压力损失的泵送费；
4. 维护费与仪表可靠性的比较；
5. 是否有备件？是否有售后服务的方便条件？
6. 在未来的使用场合，可能的用途；
7. 试用一种新型流量计的风险。

以上各项都是决定选用某种流量计的因素。在相关手册和仪表样本中可找到与这些决定因素有关的信息。在比较各种流量计的费用时，除了实际的购置费外，还有一系列的因素应加以考虑，在做出决定前，应权衡以下几个重要因素：

- （1）由于流量计的准确度和测量范围的改善，可减少未被计量的能源，由此对经济效益，企业的效率及产品质量的影响；

(2) 同时还要估算安装费，长期的维护费和流量计运行时的耗能费以及为补偿总的永久压力损失的泵送费。

只有综合考虑并权衡了以上这些重要因素，才能作到流量计的合理选型。

三. 永久压力损失

除一些无阻挡的流量计（如不带流动调整器的电磁和超声流量计）外，每一种流量计都有大于相同长度直管道的永久压力损失。

1. 流动调整器永久压损的计算方法

国际上一般常用的非专利的流动调整器有：**19**束管束式流动调整器和赞克（**Zanker**）板式流动调整器；专利的流动调整器有：加拉格尔（**Gallagher**）流动调整器和**K-Lab NOVA**多孔板式流动调整器。一般可以用压损系数 **K_{PL}** 来计算它们的永久压力损失 $\Delta \omega$ 。这些流动调整器永久压力损失的统一计算公式，如下式所示：

$$\Delta \omega = (\mathbf{K_{PL}} \times \rho \times V^2) / 2$$

式中， $\Delta \omega$ -----流动调整器的永久压力损失，**Pa**；

ρ -----工况下流体的密度，Kg/m³；

V -----管道中流体的平均流速，m/s

K_{PL} -----各种流动调整器的压损系数，(无量纲)。

各种流动调整器的压损系数 **K_{PL}** 各不相同，它们数值分别为：

对于**19**束管束式流动调整器（**1998**）：**K_{PL}=0.75**

对于赞克（**Zanker**）板式流动调整器：**K_{PL}=3**

对于加拉格尔（**Gallagher**）流动调整器：**K_{PL}=2**

对于 **K-Lab NOVA** 多孔板式流动调整器流动调整器： $K_{PL}=2$

2. 常用节流装置永久压损的计算方法

常用节流装置永久压损的计算公式如下：

孔板的压损公式： $\Delta \omega = (1 - \beta^{1.9}) \Delta P$

V 锥节流装置的压损公式： $\Delta \omega = (1.3 - 1.25 \beta_v) \Delta P$

流量喷嘴（包括 ISA 1932 喷嘴和长径喷嘴）的压损公式：

$$\Delta \omega = (1 + 0.014 \beta - 2.06 \beta^2 + 1.18 \beta^3) \Delta P$$

出口锥度为 15° 的文丘里管的压损公式：

$$\Delta \omega = (0.436 - 0.86 \beta + 0.59 \beta^2) \Delta P$$

出口锥度为 7° 的文丘里管的压损公式：

$$\Delta \omega = (0.218 - 0.42 \beta + 0.38 \beta^2) \Delta P$$

以上各式中， $\Delta \omega$ -永久压力损失，**Pa**， β -直径比， β_v -等效直径比，

ΔP -差压值，Pa

四. 泵送（耗能）费

在许多情况下，由总的永久压力损失所造成的额外的耗能费，是在流量计选型时必须要考虑的一个重要因素。特别是对于较大口径、较大流量的管道，由泵或压缩机输送流体所需的泵送费是很大的。在此情况下，应选用一个永久压损小或无阻挡（不带整流器）的流量计。这个流量计虽然可能贵些，但可以证明选用它是合算的。

1. 泵送能耗值的计算

对于不同的介质，采用不同的流量单位时，可采用以下不同的能耗值的计算公式：

(1). 对于液体:

$$W=(\Delta \omega \times Q)/(60 \times \eta)$$

式中: **W**—能耗值, **W(瓦)**; $\Delta \omega$ —永久压损值, **KPa**;

Q—工况下的体积流量值, L/min; η —泵和电动机的效率 (常取 $\eta=0.8$);

(2). 对于气体 (蒸气):

$$W=(Z_{f1} \times T_{k1} \times \Delta \omega \times Q_{scmh})/(10.415 \times \eta \times P_n)$$

式中: **W**—能耗值, **W(瓦)**; $\Delta \omega$ —永久压损值, **KPa**;

Z_{f1}—上游流动工况下气体的压缩因子; **T_{k1}**—上游取压孔处气体的绝对温度, **K**;

Q_{scmh}—标准状况 (293.15K, 101325Pa) 下, 气体的标况体积流量值, Nm³/h;

P_n—工况下, 上游取压孔处, 流动气体的绝对压力, **KPa**;

η —泵和电动机的效率 (常取 $\eta=0.8$)

(3). 当被测量是液体或气体 (蒸汽) 的质量流量时:

$$W=(\Delta \omega \times Q_{kph})/(3.6 \times \eta \times \rho_n)$$

式中: **W**—能耗值, **W(瓦)**; $\Delta \omega$ —永久压损值, **KPa**;

Q_{kph}—液体或气体 (蒸气) 的质量流量, Kg/h;

η —泵和电动机的效率 (常取 $\eta=0.8$);

ρ_n —在工况下,在上游取压孔处, 流动液体或气体 (蒸汽) 的密度, **Kg/m³**;

2. 年耗能费的计算:

可按下式计算每年的耗能费, 元/年

年耗能费(元/年)=(**W/1000**) (运行时数/年) (? 元/ 千瓦小时)

3. 耗能费计算例题

例题一, 流动调整器耗能费的计算例题

[1]. 已知条件:

被测介质: 天然气;

所采用流动调整器的型式: 赞克 (Zanker) 板式流动调整器;

被测介质的相对密度, $Gr = 0.6640$;

工况下, 被测介质的平均流速, $V = 30 \text{ m/s}$;

被测介质的工作温度, $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$;

被测介质的工作压力, $P = 5.5 \text{ MPa}$, 表压;

工况下, 被测介质的压缩系数, $Z_1 = 0.87$

管道内径, $D = 500 \text{ mm}$

[2]. 要求计算得出该流动调整器, 在上述流动条件下的年耗能费

[3]. 辅助计算:

(1) 天然气在标况下的密度, $\rho_{20} = Gr \times 1.2046 = 0.6640 \times 1.2046 = 0.7999 \text{ Kg/m}^3$;

(2) 天然气在工况下的密度,

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_{20} P_1 \times T_{20} \times Z_n / \{P_n \times T_1 \times Z_1\} \\ &= 0.7999 (5.5 + 0.1) \times 293.15 \times 1 / \{0.1 \times (273.15 + 15) \times 0.87\} \\ &= 52.38 \text{ Kg/m}^3\end{aligned}$$

(2) 工况下, 天然气的体积流量,

$$Q = \pi D^2 V / 4 = \pi \times 0.5^2 \times 30 \times 3600 / 4 = 21205.8 \text{ m}^3/\text{h}$$

(3) 标况下, 天然气的体积流量,

$$\begin{aligned}Q_{\text{scmh}} &= Q \times P_1 \times T_{20} \times Z_n / \{P_n \times T_1 \times Z_1\} \\ &= 21205.8 \times (5.5 + 0.1) \times 293.15 \times 1 / \{0.1 \times (273.15 + 15) \times 0.87\}\end{aligned}$$

$$=1388656.112 \text{ N m}^3/\text{h}$$

[4]. 按下式计算赞克 (Zanker) 板式流动调整器的压损值, $\Delta \omega$

$$\begin{aligned}\Delta \omega &= (\mathbf{K_{PL}} \times \rho \times V^2) / 2 = [3 \times 52.38 \times 30^2] / 2 = 70713\text{Pa} \\ &= 70.713\text{Kpa}\end{aligned}$$

[5]. 按下式计算赞克 (Zanker) 板式流动调整器的能耗值

$$\begin{aligned}\mathbf{W} &= (\mathbf{Z_{fl}} \times T_{kl} \times \Delta \omega \times Q_{scmh}) / (10.415 \times \eta \times \mathbf{p_n}) \\ &= (0.87 \times 288.15 \times 70.713 \times 1388656.112) / (10.415 \times 0.8 \times \mathbf{5.6} \times 1000) \\ &= 527587.5771 \text{ W}\end{aligned}$$

[6]. 按下式计算赞克 (Zanker) 板式流动调整器的年耗能费

(假定当地电价为每千瓦小时 1 元)

$$\begin{aligned}\text{年耗能费(元/年)} &= (\mathbf{W}/1000) (\text{运行时数/年}) (? \text{元/ 千瓦小时}) \\ &= (527587.5771/1000) (24 \times 365) (1) = 4621677.18 \text{ 元}\end{aligned}$$

答案: 在上述流动条件下, 该赞克 (Zanker) 板式流动调整器的年耗能费为 **462 万 1677.18 元**

例题二 (以中压过热蒸汽为例, 计算用 V 锥取代孔板后, 可节约的年耗能费)

命题: 目前在 x x 石化公司, 由第三热电站向化工一厂输送中压蒸汽的管道上正在使用孔板流量计, 它的有关参数如下: 最大流量 $q_{mmax} = 150\text{t/h}$, 常用流量 $q_{mcom} = 105\text{t/h}$, 孔板的直径比, $\beta = 0.6208$, 最大差压 $\Delta P_{max} = 111.57\text{Kpa}$, 在工况下, 在上游取压孔处, 中压过热蒸汽的密度 $\rho_1 = 7.24638 \text{ Kg/m}^3$

要求计算: 如用所设计的 V 形内锥流量计取代目前正在使用的孔板流量计, 在常用流量 $q_{mcom} = 105 \text{ t/h}$ 下, 每年可节约的耗能费。

计算:

(1) 计算在常用流量 q_{mcom} 下，孔板流量计的常用差压 ΔP_{com}

$$\Delta P_{com} = (q_{mcom} / q_{mmax})^2 \times \Delta P_{max} = (105/150)^2 \times 111.57 \text{Kpa} = 54.67 \text{Kpa}$$

(2) 计算在常用流量 q_{mcom} 下，孔板流量计的压损 δP_1

$$\delta P_1 = (1 - \beta^2) \Delta P_{com} = (1 - 0.6208^2) \times 54.67 \text{Kpa} = 33.6 \text{Kpa}$$

(3) 计算在常用流量 q_{mcom} 下，V 锥流量计的常用差压 ΔP_{comV}

$$\Delta P_{comV} = (q_{mcom} / q_{mmax})^2 \Delta P_{maxv} = (105/150)^2 \times 25.241 \text{Kpa} = 12.37 \text{Kpa}$$

(4) 计算在常用流量 q_{mcom} 下，V 锥流量计的压损 δP_2

$$\delta P_2 = (1.3 - 1.25 \beta) \Delta P_{comV} = (1.3 - 1.25 \times 0.75) \times 12.37 \text{Kpa} = 4.484 \text{Kpa}$$

(5) 计算在常用流量 q_{mcom} 下，孔板流量计与 V 锥流量计的永久压力损失的差值 $\Delta \omega$

$$\Delta \omega = \delta P_1 - \delta P_2 = 33.6 - 4.484 = 29.116 \text{Kpa}$$

(6) 按下式计算在常用流量 q_{mcom} 下，由孔板所多消耗的能量值，

W:

$$W = (\Delta \omega \times q_{mcom}) / (3.6 \times \eta \times \rho_1)$$

式中：**W**--所多消耗的能量值，**W**;

$\Delta \omega$ --永久压损值的差值，**KPa**;

q_{mcom} --过热蒸汽的常用质量流量，**Kg/h**;

η --泵和电动机的效率（常取 $\eta=0.8$ ）;

ρ_1 :在工况下,在上游取压孔处，过热蒸汽的密度,**Kg/m³**;

$$\therefore W = (29.116 \times 105000) / (3.6 \times 0.8 \times 7.24638) = 146489.81 \text{W}$$

(7) 计算可节约的年耗能费

可按下式计算每年可节约的耗能费，元/年（如当地电价为：**1元/千瓦小时**）

年耗能费(元/年)=(W/1000) (运行时数/年) (1 元/ 千瓦小时)

年耗能费=(146489.81/1000) (24 x 365)) (1 元/ 千瓦小时) =1283250.74 元

答案: 如用所设计的 V 锥流量计取代目前正在使用的孔板流量计, 在常用流量 q_{mcom} =105 t/h 下, 每年可节约的耗能费为 128 万 3250.74 元

例题三 (在大口径管道中, 采用科式力质量流量计(CMF)计量油品时, 年耗能费计算实例)

命题: 目前在 x x 石化公司, 在口径为 300 毫米管道中, 采用科式力质量流量计(CMF)作为贸易输送计量汽油的流量计。

有关工艺参数如下:

汽油流量 $Q = 800 \text{ m}^3/\text{h}$; 汽油密度 $\rho = 760 \text{ Kg/ m}^3$; 永久压力损失

$\delta \omega = 0.35 \text{ MPa}$;

要求计算: 年耗能费

计算:

(1) 流量换算:

$$Q = 800 \times 1000 / 60 = 13333.33 \text{ L/min};$$

(2) 永久压力损失换算:

$$\delta \omega = 0.35 \times 1000 = 350 \text{ Kpa};$$

(3) 耗能量计算:

$$W = (\Delta \omega \times Q) / (60 \times \eta) = (350 \times 13333.33) / (60 \times 0.8) \\ = 97222.2 \text{ W};$$

(4) 年耗能费计算

可按下式计算每年的耗能费, 元/年 (如当地电价为: 1 元/ 千瓦小时)

年耗能费(元/年)=(W/1000) (运行时数/年) (1 元/ 千瓦小时)

年耗能费=(97222.2/1000) (12 x 365) (1 元/ 千瓦小时) = 42 万 5833.33 元

(在以上例题三中,按每日 1.5 个班[12 小时]计算流量计的运行时间)

(5) 分析: 如何理解 CMF 有如此巨大的永揪压力损失值?

原工艺管道的内径 **D** 为 300 mm, 而在 CMF 中则变成两根细长的 U 型管, 每一根 U 型管的内径 **d** 仅为 80 mm。每根 U 型管的总长度约为 4m。

在 CMF 的两根细长的 U 型管中, 流体的流通横截面面积 **a** 仅为原工艺管道中流体流通横截面面积 **A** 的 14.2%。

证明如下:

$$a/A = [(\pi d^2/4) \times 2] / (\pi D^2/4) = [(80^2) \times 2] / 300^2 = 0.142 = 14.2\%$$

尽管在文献 1 中, 早有提示: “CMF 不能用于较大管径, 目前尚局限于 150 (200) mm 以下”, 此例应属于流量计的选型不当, 它直接违背了米勒先生在其专著“流量测量工程手册”中所提示的流量计选型原则。在使用中, CMF 的零点漂移严重, 则是它的另一严重缺点。

五. 流量计选型的基本要求

为了贯彻和实施国家标准 GB17167-2006 《用能单位能源计量器具配备和管理通则》, 流量仪表的合理选型是关键的一环。基于当今流量计量技术的发展水平, 在进行流量计选型时, 笔者认为: 应尽可能全面满足以下十条基本要求:

1. 流量仪表的重复性要好 (小于 0.1%);
2. 流量测量系统的总准确度要较高 (优于 ±0.5%);

(对于非贸易输送的计量系统,可适当降低 1 和 2 的指标)

3. 流量计本身有相当强的流动调整能力,要求较短的直管段,无需流动调整器;

4. 总的永久压力损失要小、耗能费要少;

(对于大口径、大流量的流量计,尤其要求总的永久压力损失要小);

5. 流量测量的量程比要较宽 (至少 10: 1);

6. 流量计本身有自清扫能力,可测量脏污流体,无需过滤器;

7. 流量计本身耐受流体磨蚀能力要强,性能要长期稳定,可靠耐用;

8. 流量计本身无可动部件,检定周期较长,使用寿命较长;

9. 流量计本身故障率要小,维护与修理费用要少

10. 流量计的购置费与校准费要适中,安装与运行花费要少。

国内外大量的实验和测试结果及使用经验都已证明:V 锥流量计能较好地全面满足以上流量计选型的这十条基本要求。

六. 参考文献

1. “流量测量方法和仪表的选用”,蔡武昌等编著,化工版,2001 年 4 月,第 1 版,188 页

2. ”Flow Measurement Engineering Handbook” , R.W. Miller, McGRAW HILL, Third Edition, 1996

3. International Standard ISO 5167 -1 , Second Edition, 2003 -03-01

Part 1: General principles and requirements