

# 流量测量中温压补偿测点的设计

褚斌峰 嘉科工程（苏州）有限公司上海分公司（上海 200070）

纪波峰， 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司（上海 200070）

**摘要：**用来测量气体和蒸汽流量的流量计，除了个别原理的流量计之外，都需进行流体温度、压力补偿。由于流体种类的不同，补偿的目的也不尽相同。由于温度和压力的变化，对各种不同原理流量计的影响不相同，所以测温点位置和测压点位置也有不同的要求，只有合理确定这些位置，才有可能进行准确的补偿。然而，深入流量测量仪表使用现场，你会发现，这种用途的测温口测压口所选位置五花八门，差异悬殊。这种悬殊都对测量结果产生影响。本文在阐述涡街流量计、差压流量计等几种流量计工作原理之后，分析了几种流量计温度、压力补偿的目的和温度、压力参数的测量要求，进而提出了测温口、测压口开口位置的合理选择。还提供了利用焦耳-汤姆逊系数计算上下游温差的实例。

**关键词：**温压补偿 测压口 测温口 涡街流量计 差压流量计 焦耳-汤姆逊系数

Design of Temperature and pressure compensation measuring points for flow measurement

Zhu binfeng Jacobs engineering (Suzhou) Co., Ltd. Shanghai branch(shanghai 200070)

Ji bofeng, Ji gang Shanghai tontion automation instrumentation Co., Ltd.(shanghai 200070)

Abstract: Flowmeters used to measure gas and steam flow require fluid temperature and pressure compensation except few flowmeters. Due to the different types of fluids, the purpose of compensation is not same. Due to changes in temperature and pressure, the effects on the flowmeters of different principles are different, so the position of the temperature and pressure measurement point are different too. Accurate compensation is only possible if these positions are reasonably determined. However, if you go to the working site, you will find that the temperature and pressure measurement points of this type has a wide selection of different positions. This affects the measurement results. After describe the working principle of several flowmeters such as vortex flowmeter and differential pressure flowmeter, this paper analyzes the purpose of temperature and pressure compensation of several flowmeters and the measurement requirements of temperature and pressure. Furthermore, a reasonable choice of the temperature and pressure position is proposed. An example of calculating the temperature difference between upstream and downstream using the Joule-Thomson coefficient is also provided.

Keywords: temperature and pressure compensation temperature measuring point pressure measuring point vortex flowmeter differential pressure flowmeter Joule-Thomson coefficient

## 1. 概述

在气体流量测量中，除了热式质量流量计等之外，一般都要进行温度压力补偿。

在蒸汽流量测量中，也都要进行温度压力补偿。

虽然笼统地说，都称为温度压力补偿，但补偿的意义却不尽相同。

不同原理的流量计，流体温度和压力的变化，对测量结果的影响各不相同，因此，在测得流体的温度和压力后，要按规定的关系式进行补偿。

流体在管道内流动，由于流量传感器、各种阻流件的影响，在管道的不同部位测得的温度压力值也会有很大差异，所以，用作流量测量温度压力补偿的测量点的位置，也有明确规定，不能随意确定。

下面以几种典型流量计为例，论述流量测量中温度压力检测点设计中的有关问题。

## 2. 涡街流量计温度压力测点的设计

### 2.1 涡街流量计工作原理

在流体流动的管道中设置一个旋涡发生体（阻流件），于是在发生体下游就会交替地产生有规则的旋涡。这种旋涡称为卡门涡街。

此旋涡的频率与流过发生体的流速成正比关系。由于旋涡流量传感器的流通截面积是一个常数，所以，旋涡的频率与流过发生体的流体体积流量成正比<sup>[1]</sup>

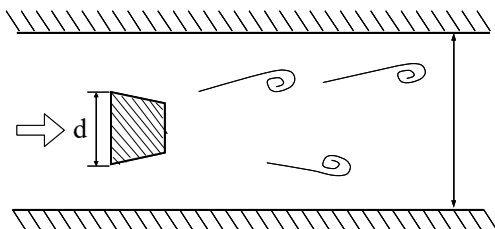


图1 卡曼涡街

$$q_{vf} = \frac{3600}{Kt} \cdot f \quad (1)$$

式中： $q_{vf}$  —— 旋涡发生体出口的体积流量， $m^3/h$

$f$  —— 旋涡频率， $P/s$ ；

$Kt$  —— 工作状态下流量系数， $P/m^3$ 。

### 2.2 温度压力补偿的目的

在气体流量测量中，测得工作状态体积流量还不是最终目标。最终目标是得到标准状态体积流量，此项由工作状态体积流量到标准状态体积流量的换算工作，一般是在流量演算器中完成。所依据的公式如下<sup>[3]</sup>：

$$q_{vn} = \frac{P_f \cdot T_N \cdot Z_N}{P_N \cdot T_f \cdot Z_f} q_{vf} \quad (2)$$

式中： $q_{vn}$  —— 标准状态体积流量， $Nm^3/h$ ；

$P_f$  —— 使用状态流体绝对静压， $MPa$ ；

$P_n$  —— 标准状态流体绝对静压， $MPa$ （取  $P_N=0.101325MPa$ ）；

$T_f$  —— 工作状态流体热力学温度， $K$ ；

$T_N$  —— 标准状态流体热力学温度， $K$ （常取  $T_N=293.15K$ ）；

$Z_f$  —— 工作状态气体压缩系数，纯数；

$Z_n$  —— 标准状态气体压缩系数，纯数；

$q_{vf}$  —— 工况条件下的体积流量， $m^3/h$ 。

在式（2）中， $Z_f$  和  $Z_N$  一般由流量演算器按设计好的程序自动计算得到（具体计算方法请参阅参考文献[4]中的 P207）。 $q_{vf}$  由式（1）计算得到，而  $P_f$  和  $T_f$  则必须实测得到。

在蒸汽流量测量中，虽然也有温度压力补偿，但补偿的意义与式（2）完全不同<sup>[3]</sup>。

在用涡街流量计方法测量蒸汽流量的系统中，测量的目标是得到蒸汽质量流量值，或进而计算蒸汽热量流量。所用的公式如式（3）所示。

$$\begin{aligned} q_m &= \rho_f q_{vf} \\ &= \frac{3600f}{Kt} \rho_f \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $q_m$  —— 质量流量，kg/h；  
 $\rho_f$  —— 旋涡发生体出口蒸汽密度，kg/m<sup>3</sup>；  
 $q_{vf}$  —— 工作状态下体积流量，m<sup>3</sup>/h；  
 $Kt$  —— 流量系数，P/m<sup>3</sup>；  
 $f$  —— 频率，P/s。

对于过热蒸汽，可由流量演算器按式（4）自动查蒸汽密度表得到。

$$\rho_f = f(P_f, t_f) \quad (4)$$

式中： $\rho_f$  —— 旋涡发生体出口蒸汽密度，kg/m<sup>3</sup>；  
 $P_f$  —— 压力，MPa；  
 $t_f$  —— 温度，℃；

对于饱和蒸汽，则可用式（5）和式（6）由流量演算器自动查表得到。

$$\rho_f = f(P_f) \quad (5)$$

$$\rho_f = f(t_f) \quad (6)$$

由于蒸汽的状态随其温度压力参数而变化，所以有些蒸汽流量计安装地点的蒸汽状态难以确定，有时处于过热状态，有时处于饱和状态。白天管道内流速高，处于过热状态，夜间管道内流速低，进入饱和状态。这时，应对其温度压力都进行测量，然后，由流量演算器自动判断，如果处于过热状态，则仪表自动转向根据式（4）查过热蒸汽密度表。如果已进入饱和区间，则仪表自动转向按式（5）查饱和蒸汽密度表。

由蒸汽的温度压力参数自动判断蒸汽处于过热状态还是饱和状态，其原理如图2所示<sup>[3]</sup>。关键是判断蒸汽的温度压力值是落在临界饱和曲线的下方还是上方。如果落在下方，则为过热状态；如果落在上方，则为饱和状态。

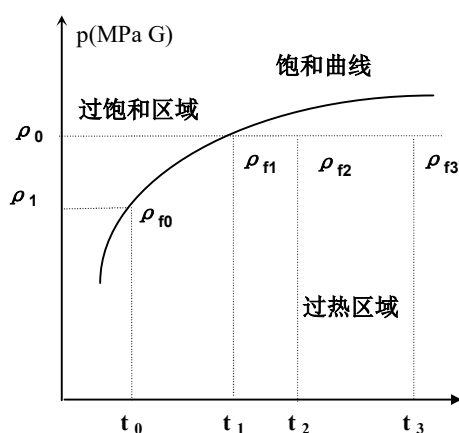


图2 自动判断蒸汽的状态

在这种情况下，一般不采用按式（6）的方法求取密度，这是因为现在的技术工具环境中，压力测量精确度高，查表得到的密度值精确度也相应的高<sup>[4]</sup>。

### 2.3 温度压力测量点位置的选取

气体和蒸汽都是可压缩流体，在流过涡街流量传感器时，都会产生一定的压降。因此，在管道上不同位置开口测流体的绝对静压，得到的结果也不同。在旋涡发生体上游处，静压最高；在旋涡发生体流速最高处，静压最低；再往下游，静压会有少许恢复。

旋涡发生体前后的永久性压降，横河公司提供了计算公式：

$$\Delta P = 1.08 \rho_f v^2 \quad (7)$$

式中： $\Delta P$  —— 压降，Pa；  
 $\rho_f$  —— 流体密度，kg/m<sup>3</sup>；  
 $v$  —— 流速，m/s。

在横河公司旋涡流量计的说明书中，对用于温度压力补偿的温度压力测量点的安装位置有不

同的表述。

在其 YF100\*C 型旋涡流量计的说明书中，未对温度压力测点位置提出要求。到了 YF100\*CD 型时，提出压力测点取在旋涡发生体下游 3.5D~5.5D 处，如图 3 所示。

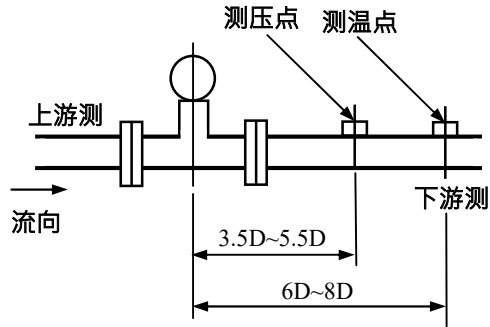


图 3 温度压力测点位置 (\*CD 型)

到了 YF100\*D 型和 \*E 型时，压力测点位置有了变化，要求达到 3.5D~7.5D 的位置，如图 4 所示。

而到了 DY 型时，压力测点的位置又有了少许变化，如图 5 所示。

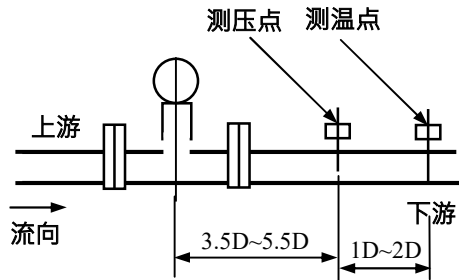


图 4 温度压力测点位型 (\*D 型, \*E 型)

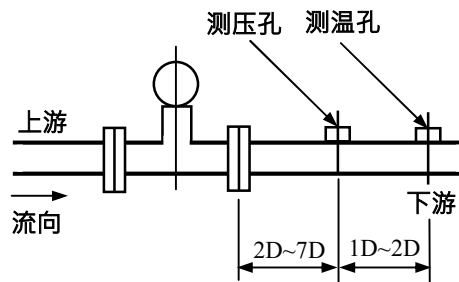


图 5 温度压力测点位置 (DY 型)

不同型号的涡街有不同的要求，而且，上限距离与下限距离有很大差异，这就使设计人员犯了难。为此，有必要搞清楚决定此距离的依据。

在图 3 中，压力测点距离旋涡发生体为 3.5D~5.5D，到了图 4，就变成了 3.5D~7.5D，这是为什么。在询问横河公司无果之后，仔细研究了横河涡街产品的发展历史。在 \*CD 型发展阶段，最小通径只做到 DN25，对于 DN25 涡街产品，5.5D 即为 138mm，这样，在法兰下游的管道上开取

压口，在工程上还是可行的。但到了\*D型发展阶段，最小通径做到了DN15，同样是5.5D，但对应的尺寸就变成了83mm，要在如此短的距离上开取压口，工程上变得不可行了，所以只能放宽一些。从而使得在工程上的实现成为可能。因而本质上是一致的。

英国有一个BS7405的国家标准，对流量计的现场安装作了规定。图6所示为涡街流量计的安装要求<sup>[5]</sup>。

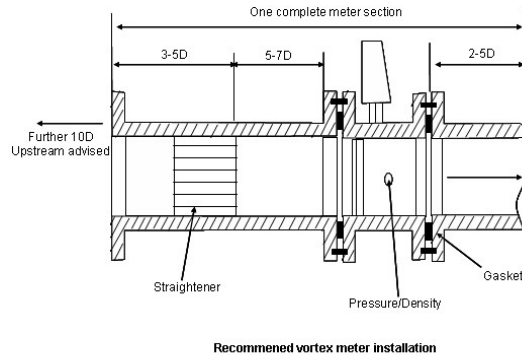


图6 涡街流量计安装的建议

图中的压力/密度测量点取在旋涡发生体下游的旋涡生成处，由于旋涡在此处生成，仪表输出频率代表的也就是此处的（工况条件下）体积流量，此处的流体密度与体积流量相乘就得到质量流量，与式（3）所示的关系完全一致。可惜的是，到现在为止，没看到哪家涡街流量传感器在这个位置开有测压孔。而作为用户来说，又不便在仪表上开设取压孔，于是退而求其次，就在涡街流量传感器下游侧法兰后面的管道上尽量短的距离开口取压。此处测得的流体静压，或许会比图6所示的方法测得的静压高出一个微小的数值，但对于一台1.0级精确度等级的仪表，由此引入的误差应是可以忽略的。

涡街流量计测压点的位置不能搞错。图7所示为北京的一家仪表公司说明书中推荐的测压点位置图。如果不进行校正，测得的流体静压可能就比应有静压高出式（7）所示的 $\Delta P$ 。

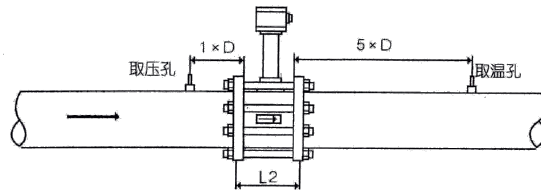


图7 温度压力测点位置建议

### 3. 差压流量计温度压力测点位置的设计

差压式流量计的种类很多，下面以使用最多的标准差压式流量计为例，说明温度压力测点位置的设计。

#### 3.1 差压流量计工作原理

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1} \quad (8)$$

式中  $q_m$  —— 质量流量，kg/s；

$C$  —— 流出系数；

$\beta$  —— 直径比， $\beta = d/D$ ；

$D$  —— 管道内径，m；

$\varepsilon_1$  —— 节流件正端取压口平面上的可膨胀性系数；

$d$  —— 工作条件下节流件的开孔直径，m；

$\Delta p$  —— 差压, Pa;

$\rho_1$  —— 节流件正端取压口平面上的流体密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

差压流量计的本质是质量流量计, 在式 (8) 中, 没有出现温度和压力这两个变量, 但应用这种流量计测量气体和蒸汽的流量时, 流体温度和压力的变化, 将使式中的密度  $\rho_1$  产生变化, 进而影响流量示值。

对于组份稳定的气体, 可用式 (9) 计算  $\rho_1$ :

$$\rho_1 = \frac{P_1 \cdot T_N \cdot Z_N}{P_N \cdot T_1 \cdot Z_1} \rho_N \quad (9)$$

式中:  $\rho_1$  —— 节流件正端取压口平面上的流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$P_1$  —— 节流件正端取压口平面上的流体压力, MPa;

$P_N$  —— 气体标准状态压力, 0.101325MPa;

$T_1$  —— 节流件正端取压口平面上的流体温度, K;

$T_N$  —— 气体标准状态温度, 273.15K;

$Z_1$  —— 工作状态下气体压缩系数, 纯数;

$Z_N$  —— 标准状态下气体压缩系数, 纯数;

$\rho_N$  —— 标准状态流体密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

对蒸汽来说, 可用式 (10) 由流量演算器自动查表的方法得到  $\rho_1$ <sup>[8]</sup>:

$$\rho_1 = f(P_1, T_1) \quad (10)$$

毫无疑问, 式 (9) 和式 (10) 都表明, 压力取自正端取压口, 在具体实施时也没有困难。难的是正端取压口处的流体温度的测量。

ISO 5167-1: 2003 (E) 和 GB/T 2624.1-2006 的第 5.4.4 节规定, 流体温度最好在一次装置下游测量。测量时需特别小心。温度计套管或插套所占空间应尽可能小, 如果插套位于下游, 其与一次装置之间的距离至少应为 5D (当流体是气体时, 最大为 15D)。如果套管位于上游, 则根据一次装置的形式, 采用规定的值<sup>[6][7]</sup>。

此标准还规定, 一般可以假设差压口上游和下游的流体温度是相同的。然而, 如果流体是非理想流体, 而又需要最高的精确度, 且上游取压口和一次装置下游测温处又存在较大的压力损失, 则假设两点之间是等焓膨胀, 必须根据下游温度计算上游温度。对于孔板, 计算时, 应根据下式计算压力损失  $\Delta \omega$ 。

$$\Delta \omega = (1 - \beta^{1.9}) \Delta P \quad (11)$$

式中:  $\Delta \omega$  —— 一次装置压力损失, Pa;

$\beta$  —— 直径比,  $\beta = \frac{d}{D}$ ;

$\Delta P$  —— 差压, Pa;

然后, 可以采用焦耳-汤姆逊系数  $\mu_{JT}$  计算上游取压口到下游测温处的相应的温度下降  $\Delta T$ <sup>[6][7]</sup>:

$$\Delta T = \mu_{JT} \Delta \omega \quad (12)$$

在上面的两个式子中, 式 (11) 是经常用的, 使用并不难。而式 (12) 使用的并不多, 原因是  $\mu_{JT}$  求取有难度<sup>[9]</sup>。

### 3.2 $\mu_{JT}$ 的求取

国际标准 ISO 5167.1-2003 的第 3.3.4 节定义, 焦耳-汤姆逊系数 (Joule Thomson Coefficient) 又称等焓温度—压力系数, 是等焓下相对于压力的温度变化速率:

$$\mu_{JT} = \left. \frac{\partial T}{\partial P} \right|_H \quad (13)$$

或

$$\mu_{JT} = \left. \frac{R_0 T^2}{p C_{m,p}} \frac{\partial Z}{\partial T} \right|_p \quad (14)$$

式中：T —— 绝对（热力学）温度；

p —— 流经管道的流体静压；

H —— 焓；

R<sub>0</sub> —— 通用气体常数；

C<sub>m,p</sub> —— 定压摩尔比热容；

Z —— 压缩系数。

与式(13)相比，式(14)较复杂，而且  $\left. \frac{\partial Z}{\partial T} \right|_p$  的获得也是一件困难的事情。下面举例说明式(13)

的应用。

有一电厂蒸汽关口表采用标准孔板流量计：常用温度 t = 300℃；

常用压力 P = 0.9MPa A；

差压上限 ΔP<sub>max</sub> = 98 kPa；

直径比 β = 0.7；

流量为满度的 70%时，试计算上下游流体温差 ΔT。

解：① 先计算差压 ΔP，

$$\Delta P = 0.7^2 \Delta P_{\max} = 48.02 \text{ kPa}$$

② 计算压损 Δω

$$\begin{aligned} \Delta \omega &= (1 - \beta^{1.9}) \Delta P \\ &= (1 - 0.7^{1.9}) \times 48.02 \\ &= 23.6 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (15)$$

③ 求取  $\left. \frac{\partial T}{\partial P} \right|_H$  的值

根据等焓膨胀的关系，先求 t = 300℃、P = 0.9MPa A 工况下的  $\left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p$  和  $\left. \frac{\partial H}{\partial P} \right|_T$ ，然后再计算  $\left. \frac{\partial T}{\partial P} \right|_H$ 。

从蒸汽性质表可查得下列工况条件的蒸汽焓值 H<sup>[10]</sup>：

t = 300℃，P = 0.95MPa H = 3053.4 kJ/kg

t = 300℃，P = 0.85MPa H = 3056.0 kJ/kg

$$\begin{aligned} \text{则 } \frac{\Delta H}{\Delta P} &= (3053.4 - 3056.0) / (0.95 - 0.85) \\ &= -26 \text{ kJ/MPa} \end{aligned}$$

P = 0.9MPa，t = 310℃ H = 3076.0 kJ/kg

P = 0.9MPa，t = 290℃ H = 3033.4 kJ/kg

$$\begin{aligned} \text{则 } \frac{\Delta H}{\Delta t} &= (3076.0 - 3033.4) / (310 - 290) \\ &= 2.13 \text{ kJ/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

用  $\frac{\Delta H}{\Delta t}$  代替  $\left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p$ ，用  $\frac{\Delta H}{\Delta P}$  代替  $\left. \frac{\partial H}{\partial P} \right|_T$  并进行单位换算，然后代入式(13)得

$$\left. \frac{\partial T}{\partial P} \right|_H = \left. \frac{\partial H}{\partial P} \right|_T / \left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p = -26 / 2.13$$

$$= -12.2 \text{ K/MPa} \quad (16)$$

将式 (15) 和式 (16) 代入式 (12) 得

$$\begin{aligned} \Delta T &= -12.2 \times \frac{23.6}{1000} \\ &= -0.26 \text{ K} \end{aligned}$$

#### ④ 对流量测量结果影响的估算

在本例中，如果用下游温度代替上游温度而且不做任何修正，则密度  $\rho_1$  增大 0.05%，对最终结果的影响是使流量示值升高 0.025%。

### 4. 涡轮流量计温度压力测点的设计

涡轮流量计用来测量气体流量时，也需要进行温度压力补偿，以便将工作状态下的体积流量换算到标准状态体积流量。

此换算所依据的公式与式 (2) 相同，但是由于测量原理的不同，测压点的位置有很大的差别。GB/T 21391-2008 给出了涡轮流量计在管道上典型的安装图<sup>[11]</sup>。同时在文字描述中规定，涡轮叶轮处的静压测压口至少要有有一个，孔径在 3mm~12mm 之间。

该标准同时规定，温度传感器应安装在叶轮的下游端，其离叶轮的距离应小于 5D，伸入管道公称口径大约 1/3 处，但长度不能超过 150mm。

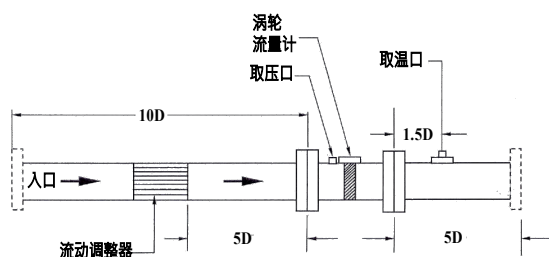


图 9 涡轮流量计在管道上的典型安装

### 5. 结束语

① 用来测量气体和蒸汽流量的流量计，除了个别原理的流量计之外，都需进行流体温度、压力补偿。由于流体种类的不同，补偿的目的也不尽相同；由于温度和压力的变化，对各种不同原理流量计的影响不相同，所以测温点位置和测压点位置也有不同的要求，只有合理确定这些位置，才有可能准确的补偿。

② 涡街流量计用温度压力补偿的测压口，宜选在旋涡发生体下游的直管段上，应尽可能靠近流量计，但应便于施工和维修（不能选在旋涡体上游的直管段上）。测温口应选在测压口下游 150~200mm 处。

③ 差压流量计用于温度压力补偿的测压点，应选在差压正端取压口处。测温点一般选在差压装置下游 5D~15D 处，并假设差压口上游和下游的流体温度是相同的。

如果是非理想气体，而又需要最高的精确度，且上游取压口和差压装置下游测温处又存在较大的压力损失，则可采用焦耳-汤姆逊系数计算上游取压口到下游温口处的相应下降  $\Delta T$ 。

④ 基于绝热膨胀等焓变化的原理，利用蒸汽性质表，可方便地求取适用于蒸汽的焦耳-汤姆逊系数。

⑤ 涡轮流量计用于温度压力补偿的测压点，宜设在涡轮叶轮前取压口处。测温口应选在叶轮



下游段。离叶轮的距离应小于  $5D$ 。

### 参考文献

1. 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计. 北京: 中国石化出版社, 2006
2. 王池, 王自和, 张宝珠, 孙淮清. 流量测量技术全书. 北京: 化学工业出版社, 2012.
3. 汪里迈, 纪纲. 蒸汽流量测量中的温压补偿实施方案. 石油化工自动化, 1998 (3): 39~42
4. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 第二版. 北京: 化工工业出版社, 2009
5. BS7405: The principles of flowmeter selection.
6. ISO 5167: 2003(E) Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full
7. GB/T 2624-2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量
8. 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦. 北京: 化学工业出版社, 2012.
9. 毛伟, 张立德. 焦耳-汤姆逊系数计算方法研究. 特种油气藏, 2002 (5): 44~46
10. 王森, 纪纲. 仪表常用数据手册 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2006
11. GB/T 21391-2008 用气体涡轮流量计测量天然气流量.

本文源自于一石油化工自动化 2019.4