

流量测量技术与仪表

上海市仪表电讯工业局技术情报所 編譯
第一机械工业部热工仪表研究所

上海市科学技术編譯館

流量測量技术与仪表

上海市仪表电讯工业局技术情报所編譯
第一机械工业部热工仪表研究所

*

上海市科学技术編譯館出版

(上海南昌路59号)

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书館上海厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 5 1/8 字数 154,000

1963年5月第1版 1963年5月第1次印刷

印数 1—3,000

編 号：6037·97

定 价：0.90 元

前 言

物质在单位时间内的輸送量——流量——的測量与控制問題，在現代工业生产流程中，在科学研究試驗工作和国防事业中至关重要。而目前已有的測量方法和仪表远不能令人滿意，因此各国在对現有測量技术与仪表改进提高的同时，不断致力于研究探索新的測量方法，設計新型仪表。

本专輯的目的在于反映国外这方面的动态与概况，介紹在新仪表中研究得較为成熟且有广闊前途的渦輪流量計和电磁流量計，并特別介紹电磁流量計应用于液态金属和矿浆流量的測量。质量流量計虽已有較久的历史，但近年来新产品在美国仪表市場上又风行一时，ISA杂志曾专文加以評述，并介紹了美国十六家厂商的产品。在新技术应用方面，除大家都已知道的超声波、放射性同位素技术以外，还研究应用核磁共振原理，尤其适合于解决微小流量的檢測問題。在专輯中对微流量和脉动气体流量的測量問題亦有介紹。此外对目前应用得最广泛的差压式流量測量的誤差及补偿問題的探討，以及針對差压式測量方法的缺点提出离心式流量測量法和用振弦法开方根等等，也都是很有启发性的。

本专輯的出版，对有关科研人員当有实际参考价值。

本专輯在編譯工作上的錯誤和缺点在所难免，尚祈讀者指正。

編 者

1963年4月

目 录

流量計的選擇.....	1
浮子流量計理論探討.....	2
流量計檢測端的若干問題.....	6
流量計的測定範圍和誤差.....	11
脈動氣體流束的流量測定.....	22
用振弦流量計求方根.....	29
离心流量測量法.....	31
質量流量計.....	35
液體微流量計.....	45
邊界層質量流量計.....	46
灵敏的記錄型量熱式質量流量計.....	49
渦輪流量計的特性及應用.....	53
帶雙轉子的推導式流量計.....	58
電磁流量計.....	62
測量液態金屬的簡單式電磁流量計.....	67
礦漿中固態物質的流量測量.....	71
放射性氣體流量計.....	74
核共振測量流量法.....	78

流量計的選擇

C. Ш. Кивилис

为各种具体场合选择液体或气体流量計和流量表时,应根据下列的各种仪表的优缺点。

差压流量計

优点: 精度高; 造价低; 可以通用; 能远距离傳送示值。

缺点: 流量脉动和被测介质的密度、温度、压力及粘度的变动对测量精度均有影响; 由于流量与压差之間是平方关系, 所以当流量数值小于 20% 仪表刻度上限时, 实际上不可能测量流量; 测量范围为 3:1; 管道上安装了节流装置, 引起剩余压力损失。

转子流量計

优点: 不需要节流装置; 测量范围大; 可用来测量腐蚀性介质; 流量計前后的管道不需要直管段; 压力损失恒定且不大。

缺点: 玻璃测量管要定期清洗; 为了测量污浊的液体流量, 需要远距离傳送示值, 这就失去了仪表結構簡單的基本优点; 只有使用脉动衰减器才有可能测量脉动流量。

容积式液量表或气量表

(除膜片式气量表之外)

优点: 結構簡單; 大测量范围下精度高; 被测液体的品种极广。

缺点: 因为仪表装有很多的活动零件, 所以需要定期保养; 液量(气量)表活动零件的磨損会降低精确度; 如果液体中含有气体, 則必須装有气体分离器; 测量装置的成本较高。

质量流量計

测量装置有外加拖动的流量計(装有二个纵向沟槽的共軸小渦輪的流量計以及回轉仪型流量計)都属于这一类。

优点: 能直接测量质量流量, 而与被测介质的密度、温度、压力、粘度和可压缩性无关。

缺点: 成本高, 必須要有旋轉密封装置和高精度的电动机, 以保証恒定的轉速。

此外, 振动回轉仪型流量計(以振动的振幅表示被测流量)还具有下列的二个附带优点: 液流不会受到阻碍; 結構簡單。

这类仪表的缺点是: 垂直方向的尺寸大; 对紊流性敏感; 小流量时呈非线性特性。

电磁流量計

优点: 精确度和灵敏度均高; 能双向测量, 测量范围很大; 线性特性; 压力损失极微(等于相应直管段的压力损失); 能够测量很多种液体流量, 干净液体或污浊液体都能测量; 被测液体的温度和粘度对示值的精度影响不大。

缺点: 成本高; 被测液体必須是导电的液体; 被测液体的温度不应超过 200°C , 周围气温不应超过 55°C 。

超声波流量計

优点: 压力损失极微; 示值(容积单位)对液体密度无关; 测量結果能很方便地用数字形式表示出来; 仪表可用在任意空間位置。

缺点: 成本昂贵; 高粘度液体的流量不能测量; 工作温度范围为 $-55 \sim +75^{\circ}\text{C}$ 。

热风速表型流量計

优点: 对数刻度能使测量范围达到很大; 压力损失很小; 快速; 造价低廉。

缺点: 只适用于气体; 为了收集夹杂物必須安装細过滤器。

涡轮流量計

优点: 精确度高; 快速; 能在高压下使用。

缺点: 外来的研磨夹杂物会縮短軸承的寿命; 流量的强烈脉动及冲击将改变标定特性。

基于科賴奧来加速度的流量計

优点: 能测量气体、液体、蒸汽和矿浆的流量; 不仅不需要降低压力, 相反的甚至还要增大; 快速; 具有线性。

缺点：需要有保证恒定转速的高精度的传动装置；使用中要小心维护；需要旋转密封装置。

(徐宝铭译自《Экс-ин.: контрольно-измерительная техника», No. 35, реферат 251, 1961, 1~3. 汪时雍校)

浮子流量计理论探讨

G. Kunzmann

路茨 (Lutz) 的一篇文章已经对浮子流量计提出了一个一般的理论。通过这一理论再加上一张经过实际经验所提出来的特性曲线表，就有可能来计算一组规定的浮子流量计和任意介质的计量刻度。因而可省却流量仪表的校准工作并把流量测量技术提高到一个新的水平，以便可以用与孔板、喷嘴和文丘里喷嘴等类似的方法制订出一个标准。从路茨给出的特性曲线族还可提出另外二个特性曲线族，通过它们就可很方便地解决许多实际问题。本文的目的就在于说明如何凭借特性曲线来进行浮子流量计的简单计算方法。

流量方程的推导

根据雷诺相似定律 (Ähnlichkeitsgesetz)，若雷诺数相等时，则几何形状相似的流量保持相等。因为浮子流量计的测量管段只是略呈圆锥形，故当它们为不同的圆锥体时也可视为相似。对于各种不同的浮子我们要假定有这样的前提，即每个浮子相应的尺寸的比例都是相等的。这样便可应用相似定律，并且可以把一个测量仪表用一种规定的介质所获得的知識立刻沿用到一切的仪表尺寸和任何的介质上去。

首先我们必须引述一些名称：测量管段所有的长度为 H 。最大的内径假定为 D_{R_1} ，而最小的内径则为 D_{R_2} 。在高度 h ① 内孔径假定为 D_R 。在已知的管子上 D_{R_1} 和 D_{R_2} 是很容易测得的。可是对于计算 h_0 ① (见图 1) 却是更为方便的。它们之间的关系为：

$$h_0 = H \cdot D_{R_2} / (D_{R_1} - D_{R_2})$$

浮子的最大直径若为 D_S ；其容积 V_S 与 D_S^3 成比例，而其密度为 ρ_S 。在高度 h 内，浮子和测量管段之间空出一个环状的横切面 F_0 ：

$$F_0 = \frac{\pi}{4} (D_R^2 - D_S^2)$$

我们把空出的横切面对浮子最大的横切面之比称为开孔比 m ：

$$m = (D_R^2 - D_S^2) / D_S^2 \quad (1)$$

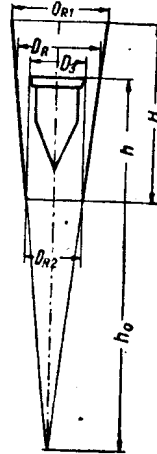


图 1 流量方程的推导

下部管段的直径 D_{R_2} 并非始终精确地和浮子的直径 D_S 相重合。因此也用了一个独特的符号。即使高度 h 是在管段的外部，而人们却喜欢从此处来计算它。确定了 h 之后，我们就可以很方便地用 h 和 h_0 来表达 D_R ：

$$D_R = D_S \cdot (h + h_0) / h_0$$

于是我们就得到 m ：

$$m = 2h/h_0 + (h/h_0)^2 \quad (2)$$

除了仪表的尺寸之外，流动介质的特性值，即密度 ρ 和粘度 η 也必须是已知的。

有三种不同的力平衡地作用到浮子上：

1. 垂直向下的重力

$$K_1 = V_S \rho_S g,$$

2. 垂直向上的浮力

$$K_2 = V_S \rho g,$$

3. 由流动阻力所引起的阻力。假定在一种层流的情况下 (这同一的方法照样也适用于湍流)，则

① 原文为 b, b_0 ，似应为 h, h_0 ——译者注。

其阻力为:

$$K_3 = C_1 \cdot \eta \cdot D_S \cdot v$$

其中 v 是在环隙中流动的速度, 而 C_1 为阻力系数, 它是由流动物体的形状而定的。

各个方向全部力的总和在平衡时等于零, 那么

$$K_1 + K_3 = K_2$$

如果代入适当的数值, 并且按照 v 来解, 便可得到:

$$v = V_S (\rho_S - \rho) g / C_1 D_S \quad (3)$$

流量是空出的环形面积与隙缝中的流动速度的乘积:

$$Q = v \cdot \frac{\pi}{4} (D_L^2 - D_S^2) \quad (4)$$

将刚才为 v 求得的数值、开孔比 m 和 $C_2 = \pi/4C_1$ 代入上式, 便得到:

$$Q = C_2 m V_S (\rho_S - \rho) g D_S / \eta \quad (5)$$

若是我们考虑到, 只允许用 $V_S = K \cdot D_S^3$ 的相似浮子, 并且若是把 C_2, K 和 m 按照方程

$$\alpha = C_2 m K$$

综合起来作为流量系数 α , 于是便可得到流量方程:

$$Q = \alpha \cdot D_S^3 (\rho_S - \rho) g / \eta \quad (6)$$

在层流区域内 α 并不受雷诺数的影响。如果想把这一方程也能用在涡流上, 那么 α 和雷诺数是有关系的。通过这样的关系这一流量方程对于各种流动形式都能应用了, 虽然它是以层流阻力定律为基础而导出的。

流量系数当然必须根据经验来测定。因为它除了和 Re 有关系以外, 同时也受 m 的影响, 因此可以用一个曲线族来表示, 在这个曲线族中 α 作为是以 m 为参数的 Re 的函数 (图 2)。雷诺数在这里是以浮子的长度作为典型长度并以环隙中的流动速度来说明的。

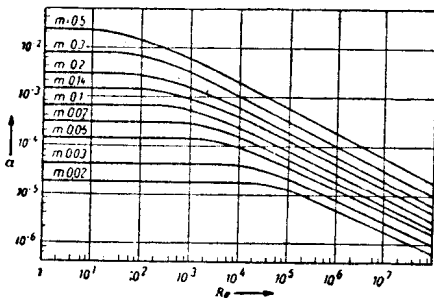


图 2 α - Re 特性曲线

$$Re = v D_S \rho / \eta$$

流量系数的图示法是以复对数尺度和约为 m

的对数级数来表示的。这一曲线族称之为 α - Re -特性曲线。可以从这个曲线族中获得另外两个表示法。一方面可以 α 作为参数而提出一组关于 m 的曲线族 Re 。这就是 Re - m -特性曲线 (图 3a); 另一方面也可以 Re 作为参数提出一组关于 m 的曲线族 α 。这就是 α - m -特性曲线。所有这三种特性曲线说明都是同样的。可根据问题来采用其中任一种特性曲线。

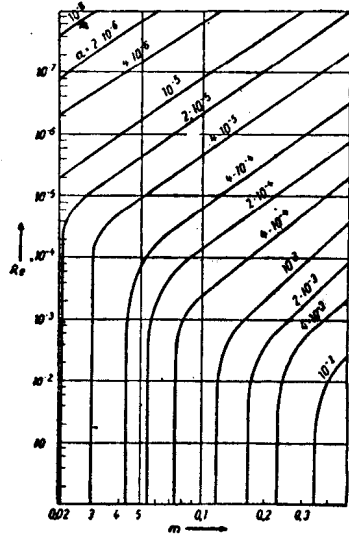


图 3a Re - m -特性曲线

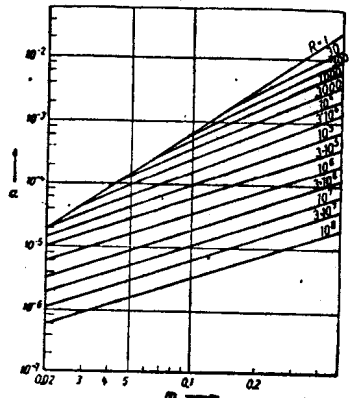


图 3b α - m -特性曲线

特性曲线的应用

在实际上可以接触到的主要有三种不同型式的问题。首先要为一个已定的浮子流量计算出工作特性值已知的一定介质的有关指示刻度。其次, 要为一种已知的介质和一种已知的浮子计算出测量管段, 以便能测量出所要求的测量范围。第三是要为

已知管段和已知介质计算出能测量所希望的流量范围。

现在首先来讨论第一个问题：这里的特性值 ρ 和 η 都是已知的，那么对于一个现代的浮子流量计，其 ρ_S 、 $V_S D_S$ 和 h_0 均为已知，应计算出它的指示刻度。

首先我们通过 h_0 也能立即知道函数 $m(h)$ 。我们按 α 解出流量的方程(6)为：

$$\alpha = Q\eta/D_S^4 (\rho_S - \rho)g \quad (7)$$

在流量系数中我们用方程(4)来表示 v ，并用 m 来代替方程(1)中的 $(D_R^2 - D_S^2)$ 。于是雷诺数就得到了下面的形式：

$$Re = 4Q\rho/\pi m\eta D_S \quad (8)$$

我们按照 Q 来解方程(8)，并且把这个值代入方程(7)。于是便得到：

$$\alpha/Re = \pi m\eta^2/4\rho(\rho_S - \rho)gD_S^5 \quad (9)$$

或使其化为对数

$$\lg \alpha = \lg \left(\frac{\pi m\eta^2}{4\rho(\rho_S - \rho)gD_S^5} \right) + \lg Re$$

于是我们可以看出， α 和 Re 之间的关系在 α - Re -特性曲线中表现为有一根有 45° 倾角的直线。当 $\alpha = \pi m\eta^2/4\rho(\rho_S - \rho)gD_S^5$ 时该直线与纵坐标相交。从属于 m 的特性曲线的交点上取得流量系数，于是便能够计算出流量。这种运算方法适用于任一个 m 。于是读数的刻度便为已知。

至于第二个问题，介质的特性值 ρ 和 η ，并且浮子即 D_S 、 ρ_S 和 K ，均为已知，要计算测量范围从 Q_{min} 达到 Q_{max} 的一个测量管段。 Q_{min} 和 Q_{max} 是已知的。

现在就关系到求 m_{min} 和 m_{max} 的开孔比，由于可得出测量锥体的斜率，于是最后按照上述方法来划分刻度。

由于 Q_{min} 以及介质和浮子的特性值都是已知，因此我们就可以按照方程(7)来求出 α 。以我们现在

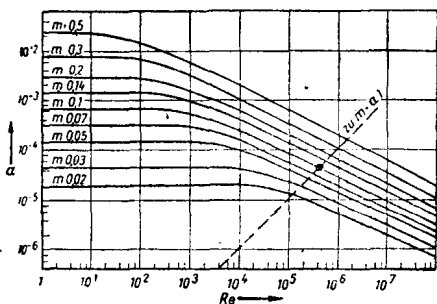


图4 读数刻度的测定

这种情况来看，根据方程(7)雷诺数只还是和 m 有关。

把方程(8)化为对数，便得到：

$$\lg Re = \lg \frac{4Q\rho}{\pi\eta D_S} - \lg m$$

这一方程在 Re - m -特性曲线族中表现为有一根有 -45° 倾角的直线。它与纵坐标相交于 $Re = 4Q\rho/\pi\eta D_S$ 点上。横坐标和属于 α 的特性曲线的交点即表现为所求的 m_{min} 。以同样的方式我们可以求得 m_{max} 。

现在我们还从 m_{min} 和 m_{max} 中来求 h_0 和 $D_R = D_S$ 这一点。根据方程(1)计算出 D_{R_1} 和 D_{R_2} ：

$$D_{R_1} = D_S \cdot \sqrt{m_{max} + 1}$$

$$D_{R_2} = D_S \cdot \sqrt{m_{min} + 1}$$

用这些量可以求出，开孔比等于零这一点 ($D_R = D_S$) 是处于测量管段之下那一个线段 H 处的。

$$H_0 = H(D_{R_1} - D_S)/(D_{R_1} - D_{R_2})$$

也可以把 h_0 写成：

$$h_0 = HD_S/(D_{R_1} - D_{R_2})$$

于是测量锥体与函数 $m(h)$ 便测定了，并且刻度也可根据开始所述的方法来进行划分。

第三个问题是除了介质的特性参数 ρ 和 η 之外，测量管段的尺寸即 D_{R_1} 、 D_{R_2} 和 H ，也是已知的。要求确定一个浮子，然后用这个浮子连同测量管段测量出所要求的流量范围。其最小的待测流量为 Q_{min} ，而最大的为 Q_{max} 。

这一问题的求解由于下列原因而变得困难：因为既不知道浮子的密度，也不知道它的直径。譬如说其密度是预先给定的，那么就可使待测的流量范围不再由这两个限值所规定，因为这个问题的一个限值所规定。我们要首先转到这一简单的问题上来，就是说若 ρ_S 和 Q_{max} 是预先规定的。

我们可以用开孔比的定义方程以 m 来表示 D_S ：

$$D_S = \frac{D_{R_1}}{\sqrt{m+1}} \quad (10)$$

把上式代入方程(7)和(8)，便得到：

$$\alpha = \frac{Q \cdot \eta}{D_{R_1}^4 (\rho_S - \rho)g} (m+1)^2 \quad (11)$$

$$Re = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \eta D_{R_1}} \cdot \frac{1}{m} \sqrt{m+1} \quad (12)$$

α 和 Re 都只和 m 有关。 m 必须选定得同时满足两个方程。选定时利用 α - m -特性曲线比较方便。根据方程(12)为每个 m 测定其雷诺数，并且就这样在 α - m -特性曲线族中得到一条曲线(在图6上以虚

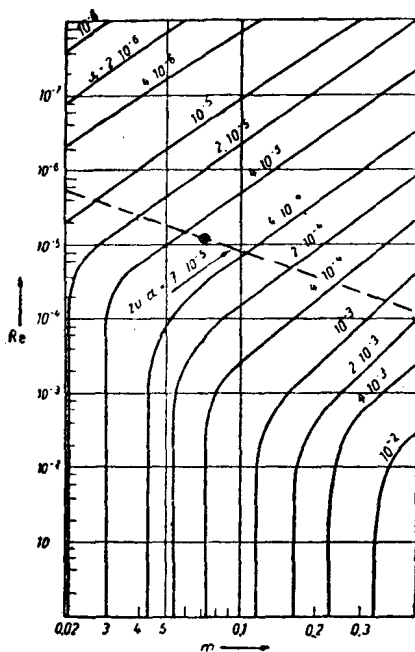


图5 在已知 Q_{max} 和 Q_{min} 时测量锥体的测定

线表示)。于是我们就根据方程(11)为每一个 m 测定其流量系数,并用这种方式在 α - m -特性曲线族中得到第二条曲线(在图6中以点线表示)。属于两根曲线交点处的 m 即为所求的 m_{max} 。于是就可把 D_s 计算出来,并且浮子便为已知,便可划分刻度。

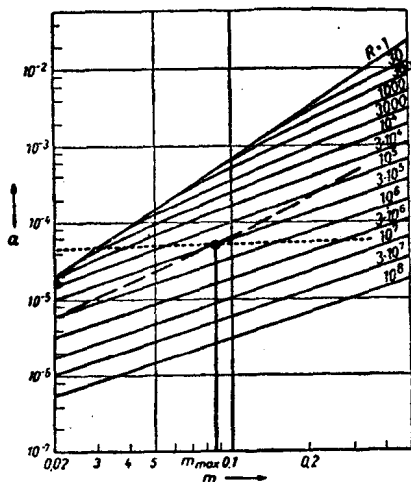


图6 Q_{max} 和 ρS 为已知时浮子大小的测定

若浮子的密度为未知,而流量的两个限值都已规定,那么问题就变得困难了。现在我们就来讨论这一问题,若选定一个 m_{max} ,那么根据方程(10) D_s 为固定,并且由此 m_{min} 也为固定。因此对每一个 m_{max} 都精确地有一个 m_{min} 。若把 m_{min} 和 m_{max} 的

方程(10)写出来,把它们彼此相除再乘方,便得到:

$$(m_{max} + 1) / (m_{min} + 1) = (D_{R_1} / D_{R_2})^2 \quad (13)$$

方程(13)可以用计算方法或图示方法来求属于每一个 m_{max} 的 m_{min} 。因为根据方程(12) Re 只包含未知数 m ,那么又可以对每一个 m_{max} 和每一个 m_{min} 列出一个雷诺数,并且在 α - m -特性曲线族中获得一根属于最大值(在图7上用虚线标出)和属于最小值(在图7上用点线标出)的曲线。我们可以从这根曲线中取出与 m 相关联的 α_{max} 和 α_{min} 。现在就可知道对于每一个 α_{min} 的一个从属的 α_{max} ,以及 α_{max} 和 α_{min} 。

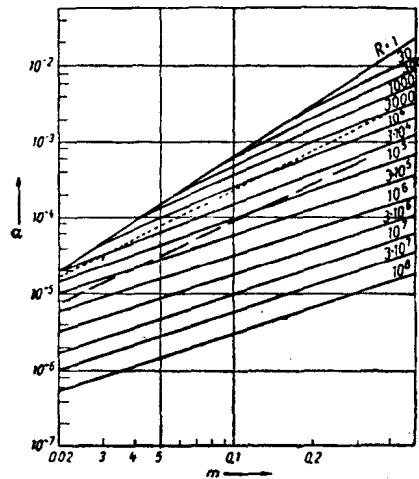


图7 Q_{max} 和 Q_{min} 已知时浮子密度和大小的测定

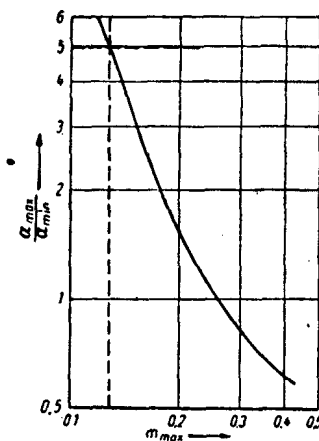


图8 Q_{max} 和 Q_{min} 为已知时最大开孔比的测定

因此,对于每一个 m_{max} 就有一个 $\alpha_{max}/\alpha_{min}$ 的比,并且可以把这一比值通过 m_{max} 用图示法表示出来(图8)。在最大和最小流量时流量系数之比是已知的。若写出这两个极限值的流量方程,并彼此相除,便得到:

$$\alpha_{\max}/\alpha_{\min} = Q_{\max}/Q_{\min} \quad (14)$$

把这个数值代入图8中，并且由此而选出一个规定的 $\alpha_{\max}/\alpha_{\min}$ 和一个 m_{\max} 。这就是所求的数值。通过 $m_{\max} D_s$ 是已知的。从 $\alpha-m$ 特性曲线中我们知道属于 m_{\max} 的流量系数 α_{\max} 。现在就可把浮子密度计算出来：

$$\rho_s = \rho + \eta Q_{\max} / \alpha_{\max} g D_s^3$$

于是浮子即可完全已知。

当然也可以阻力定律为基础给涡流提出同样的特性曲线，并且以同理应用于任何形式的流体。

(孙介铨译自《Zmsr》，No. 3, 1961, 103~106. 陆嘉校)

流量计检测端的若干问题

权田 司气 太朗

当要在新的生产过程中装设仪器时，首先必须注意有关检测端的各种问题。其中大都是原理、材料、精度、寿命以及维护管理等方面的问题。如何处理这些问题将直接影响测量结果的可靠程度。

最近以来，企图把有关检测端的问题放在受信机构之上来讨论，并且使其合理化，可以说是一种必然趋势，但实际上，到目前为止，有关检测端的情报和资料还没有充分掌握。尤其流量计检测端的若干问题比起其他几种检测端来，大问题虽较少，但牵涉面较广，因此在实际使用时，经常会找不到故障的原因。本文将对这方面的管理、构造和材料上的一些问题作肤浅的说明。

检测方式及其比较

首先叙述一下各种检测方式的梗概以及选定检测方式时必须注意的要点。

1. 差压式流量计

一、原理和构造 如果在流体的管道中安装着节流装置，那么当流经管道的流体通过节流装置时，它的动能就会增加，即动压力增加。另一方面，它的静压力减小。根据伯努利定律可知，这两个压力的差值跟流量有着一定关系，即

$$Q = \frac{C_m s}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

式中： m 为开孔比； $m = d^2/D^2$ (d 为孔板的孔径； D 为管道的直径)； s 为管道的截面积 ($s = \frac{\pi D^2}{4}$)； P_1 和 P_2 分别为在上流侧和下流侧所得的压力； ρ 为流体的密度。 ϵ 为膨胀修正系数，在测定气体之类的可压缩流体时是必要的，而由于液体可以被看作是不可压缩介质，故其 ϵ 值等于 1。此外，由于加工方

面(或经济方面)的关系，要想满足适用于伯努利定律的假定条件是很难做到的，因此，必须根据实验所得的结果来进行修正。这个修正值就是上式中的 C ，被称为流出系数。

二、差压式流量计的特征 一般所谓的薄孔板由于加工极为简单，并且可以得到相当高的测定精度，所以得到了广泛的使用。

其他如文丘里管和厚孔板(“四分圆”喷嘴)等，由于成本昂贵，故除了在流体粘度极高或含有大量固体微粒的情况下使用以外，其他几乎是不用的。上述薄孔板所具有的优点如下：

- 1) 对大流量的测定来说，成本极低；
- 2) 对流量变动小的介质来说，可以得到相当高的精度，适于作为流量调节用的检测单元；
- 3) 有理想的耐高压和耐高温能力；
- 4) 构造简单，故障少，易于维护；
- 5) 实际上，即使不用流体流过，也可以进行一般性检查。其缺点可列举如下：

- 1) 小流量(水：10 千升/小时以下)的测定比较困难；
- 2) 量程能力(range ability) 小(流量变动范围必须保持在常用流量的 $\pm 30\%$ 以内)；
- 3) 在流体的密度发生变化时，必须作麻烦的修

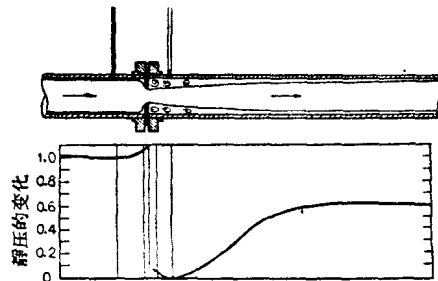


图 1

正。尤其对于气体来说，只要压力稍有变动，就会给指示带来误差；

4) 在设置时必须要有适当的直管段(大约为管径的20倍以上)；

5) 不能用于测定高粘度或含有大量固体微粒的介质。

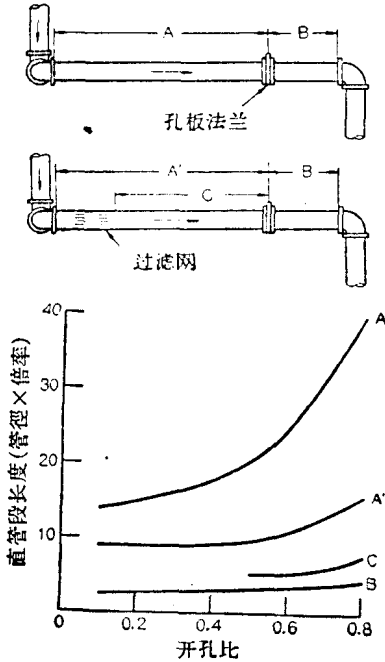


图 2

2. 容积式流量计

一、原理和构造 如图3所示，在仪表内的转子由于流入侧与流出侧的流体压力差而动作，同时

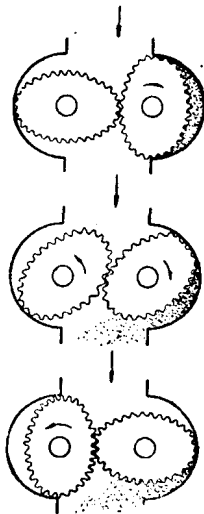


图 3

把充满于转子和壳体之间一定体积的流量排出，每当转子回轉一周就形成四次这样的一定体积。设这个一定体积为 V ，那么转子回轉 n 周所排出的液体体积 Q 与轉数所成的比例为

$$Q = 4nV$$

这里，一定体积 V 是各流量计所固有的量值。同时，由于转子回轉速度与流量成正比，所以依靠这种机构就可以测知流量。

二、容积式流量计的特征 由于容积式流量计最近在测定精度方面有了提高，故障率也逐渐有所降低，故开始被用来作为代替流体柜 (tank) 检查的测定器。由于能够在达到要求精度的前提下进行連續和远距离测定，因此自然就满足了各工厂在经济利用厂房面积、提高作业效率以及防止事故等方面所提出的条件。今后这种流量计是很有发展前途的。最近，与远距离瞬时指示机构和已成套的电动式调节器组合作为流量调节器的检测端使用，类似的应用范围也正在日益广泛。其主要优点有：

1) 在非常注意的条件下可制成测定精度达 0.1% 左右的产品；

2) 几乎不受粘度等因素变化的影响，尤其是由于温度所造成的误差可以忽略 (误差小于流体柜检查的情况)；

3) 量程能力较大，可以测定小流量。但亦有下列一些缺点：

1) 不宜用于气体的流量测定；

2) 对大流量的测定来说，成本高，重量也大，并且维护不便；

3) 当液体中含有固体微粒时，就会有损于机构；

4) 流体即使是液体，其中一旦混入气体，也会引起误差。

3. 面积式流量计

一、原理和构造 也称为浮子式转子流量计类型。概略的原理和构造如下所述，基本上与差压式流量计没有差异。

在向上扩展的空心圆锥管内放入浮子，并使流体从下往上流过。这样一来，受流体运动影响的浮子被迫上升，直到表征重量 (由自重减去浮力所得的重量) 与浮子上下的压力差达到平衡的位置为止。流量愈是增加，压力差就愈大，浮子也就升得愈高。因此，浮子位置与流量之间产生了一定的关系。

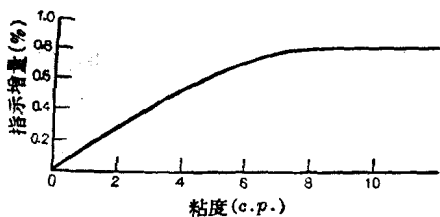


图4 容积式流量计的指示增量与粘度变化的关系

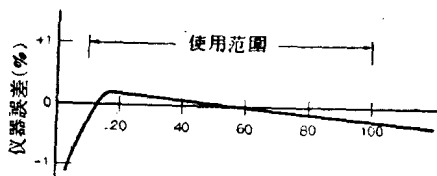


图5 容积式流量计的仪器误差与流量变化的关系

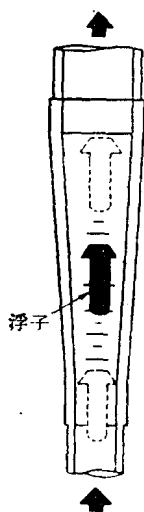


图 6

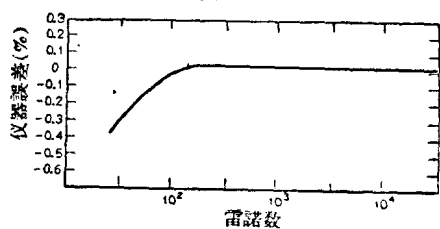


图7 浮子式流量计的仪器误差与雷诺数的关系

二、特征 这种流量计的最大优点是，可以测定高粘度流体，并且量程能力大。因此，在高粘度食品和纸浆车间中被广泛使用。主要优点如下：

- 1) 可以进行高粘度流体的测定；
- 2) 量程能力大；
- 3) 压力降是一定的；
- 4) 小流量(水: 1升/小时以下)的测定也可以进行。另一方面有下列缺点：

- 1) 测定精度不够高；
- 2) 在流量降低且雷诺数减小时，会使误差剧增；
- 3) 如果制成远测型和固定型的话，精度就会愈加下降。

使用材料	仪器误差
青 铜	-0.0054%
不 锈 钢	-0.0048%
铸 铁	-0.0036%

检测端管理上的若干问题

1. 差压式流量计

前面所提到的差压式流量计的检测端，其构造是极其简单而坚固的。对于干净的流体，腐蚀性较弱和不易凝固的介质来说，在管理上很容易。然而，一般在管道中是有污垢积存和导压管堵塞等现象的，虽然程度上随被处理流体的种类有所不同，但大约每年清洗一次是有必要的。尤其是因为导压管部分的堵塞对指示的影响极为敏感，所以当测定含有污垢的流体时，必须在导压管的下部装设排水阀之类的机件，并且必须经常进行清洗。

此外，孔板还会由于液体的影响而发生腐蚀、磨损等，仔细研究了金属板对液体的耐蚀性和耐磨损性，发现费用也相差极微，所以宜由高级材料来代替。除了特殊型式以外，孔板的正反面决定其上流侧和下流侧。如果在安装时把这一点弄错的话，就会使指示产生显著的误差(最小也要超过10~20%)，因此必须十分注意。此外，应该事先做成使得在工作过程中也可以从外部来分辨出高压侧和低压侧。

在液体中有固体微粒混入的场合以及在常温下有气态相变危险的情况下，检测端必须采用液封。当为了必要而使用时，只是在维护方面比较麻烦。

2. 容积式流量计

容积式流量计的检测部分，即使从机构上来说也是最主要的部分，因此在其管理方面必须予以最大的注意。尤其在有固体微粒混入检测部分的危险时更需注意。在这种情况下，要监视出口和入口的压差，一旦压差有了增加，最好立即进行拆卸和清洗。

容积式流量计跟差压式和面积式流量计不同，

是直接对体积进行連續实测的,一般來說,对其測定精度的要求也比較高。它的檢查方法除了利用基准容器①或基准重量計等进行实测以外,沒有其他的方法。如果破例來說的話,与其他容积式流量計进行比较測定大概可算是简单的方法了。各种試驗方法的比較如下:

1) 用秤来計量流过流体的重量(W , 公斤),并測出該流体的密度(重量)(ρ , 公斤/米³),然后可以由下式求出容积(Q , 米³):

$$Q = W / \rho$$

一般來說,虽然可以用最精确的方法使計量精度超过1/10,000,但是会增加很大的麻煩。

2) 通过量借助基准容器或基准长頸瓶可以求得。这种方法比較简单,但是測定精度却稍有降低(約为1/1000)。

3) 把其他容积式流量計預先用1)或2)方法檢定,然后把它跟使用中的容积式流量計作比較測定。其精度难免要比1)或2)的試驗方法更降低一些。

拿容量为300千升/小时水的流量計來說,必須配备10千升以上的基准容器或10吨以上的基准重量計。

3. 面积式流量計

因为沒有特別簡便的管理方法,也沒有特別高的精度要求,所以普通总是由容器的納入量来監視其精度。对不同的流体,必須进行不同程度的內部清洗和尺寸檢查等工作。

检测端构造上的若干问题

1. 差压式流量計

就孔板的形状來說,美、德、英等国都有着公认的标准,日本工业系統所用的孔板也都是基于这些标准来制作的。

常用的压差測取方法有法兰导压和縮流导压(或称理論导压)两种,前者是把导压口設在法兰盘上的,后者設置了一种可以測得流动过程中最高压差的导压口,两者都是基于德国工业标准来制成的。法兰导压的精度稍低,用于大直徑管道时成本高,但是,相反地,管道安装使不必接触重要的測檢部分,工程监督方面比較便利。等距导压成本可以降低,即使流量有大的变化,安装位置也不必变更,但是精

度稍有降低。縮流导压成本低,此外,如果在安装过程中非常注意的話,可得到极高的精度。但是安装位置严格地根据流量大小而导这一点是不方便的。

在孔板前后必須設置的直管段长度視其附近有無弯头和閥之类的机件而定,大都是以大于管徑多少倍来表示的,但是考虑到以后流量有加大的可能,最好預先取得充裕一些(參照图2)。

2. 容积式流量計

在实际构造中,为了使轉子能順利回轉,在轉子与壳体內壁和上下盖之間是留有空隙的,因此从流入口通过該空隙而流出出口的漏泄流体的体积沒有被指示出。設这个漏泄量为 ϵ ,則真正的通过量 Q 为

$$Q = 4nV + \epsilon。$$

不論在制造时把这个空隙留得多么小,但在使用过程中轉子和其他部分会发生磨損而使空隙变大。其結果造成了漏泄量增加,并使仪表誤差有負向增大的趋势。因此,在进行拆卸和清洗时切勿忘記对影响仪表誤差的各元件进行測定,例如,轉子长短徑方向的尺寸以及其厚度、壳体內壁、止推环直徑等方面的測定。

混入測定流体中的固体微粒进入流量計中以后,往往会損伤轉子的輪齿。这种固体顆粒有些是从外部混入流体的,也有些是管道內壁的锈垢因受振动和冲击而落入的。經常容易发生如下情况:在为了整理装备而拆下流量計,此后由于忽视了上流側的清洗,致使从管道內壁脱落的锈垢仍然留着,在启动后就立即影响轉子,使齿面受到损伤。为了防止发生这些事故,在接近流量計的上流側裝設过滤网。而且一有机会就进行清除,并預先檢查有沒有破裂和堵塞。

为了使轉子平稳地回轉,必須把它的轉軸沿水平方向安装。在为了便于讀取指示值而将流量計整体傾斜装置时,轉軸即承受不适当的負載,特别是对大型的流量計來說,就会引起故障,同时又会因摩擦增加而使仪表誤差增大。

3. 面积式流量計

用浮子型流量計,流体必須垂直流入,而对活塞型必須是水平流入的。如果將它們傾斜装置,就会使浮子或活塞与內壁之間发生干涉,同时产生滞后現象。在安装时不需要直管段。

① 这一段所称的基准并非指国家最高基准,而是經過檢定的标准——校者注。

检测端材料选择上的若干问题

尽管测定原理有所不同,然而被测定的流体还是有限的,故在选择和研究材料时,就会遇到类似的情况。这里根据腐蚀、磨损、膨胀等几点来讨论一下。

1. 腐 蚀

很早以来,一直用 SS-41 级的对硫化物的腐蚀抗力极强的铬钢(含铬 4~6%)作为检测部分的材料,但最近以来,已经开始采用 13 号铬钢以及相当于 SUS-27、SUS-32 的钢材。

正象前面所附带提过的那样,当检测部分是孔板时,可以不必计较成本而采用高级材料,故问题不大。但在容积式和面积式流量计方面价格的影响相当大,故非慎重考虑不可。

首先以本公司的容积式流量计来说,流体为高粘度的油类时,用相当于 SS-41 的材料;流体为灯油、轻油以及处理过的汽油时,用镀过防锈剂的材料;流体为未处理过的汽油时,用相当于 SUS-32 的材料;苛性苏打、稀硫酸以及工业用水等方面实际效果还很差,所以不能推广使用。

总之,必须采纳各有关方面专门研究腐蚀的人员的意见,从成本和寿命来选定最适当的材料。

在面积式流量计方面最近开始使用合成树脂,但由于合成树脂对某种有机流体会呈可溶性,所以不适合。此外,它和玻璃一样,对高温和高压的抗力较弱。

2. 磨 损

在容积式和面积式流量计中,由于转子和浮子是可动的,因此不仅有孔板方面的那种静止时流动所产生的磨损,而且还附加了相互接触部分的磨损。

侵蚀与流速和作业温度有关,磨损是受相互接触材料的硬度差、单位时间的接触次数以及流体的粘度(润滑性)等因素影响的。

当孔板前面的光洁度相当差时,毕竟也会影响到测定精度。还必须考虑到加工表面粗糙时磨损就会加速的事实。

将粘度大的流体(如重油)和粘度小的流体(如挥发油)进行比较时,可知粘度小的场合元件磨损较快。尤其在容积式流量计中,由于转子之间或者驱动齿轮之间相互接触,故润滑性能的优劣直接关系到磨损量,也就是对寿命有影响。

有些报告中谈到:齿轮单位时间的接触次数,亦即摩擦速度的大小对磨损量影响的程度是决定于材料的。例如:铸铁达到最大磨损量时的速度要比钢更高,以机械破坏为主,但是在超过这个最大磨损时的速度情况下,则磨损机构的接触面温度就会升高,而且有熔化的可能。

当流体中含有坚硬的颗粒时,这些颗粒恰好起了石粉的作用,致使磨损增加。

就孔板而言,其磨损的状态是体现于边缘变钝,并渐渐形成了圆角。同时开口面积增大,致使开口比随之逐步变大。在容积式流量计中转子的接触面迅速磨损,为此,转子与内壁之间的空隙加大,流入口和流出口直接沟通,漏泄量随之增多。

面积式流量计中,由于圆锥管与浮子之间的距离是不断变动的,因此,有效面积与浮子位置的关系变得复杂了。

3. 膨 胀

下表所示为各种金属材料的膨胀系数,与液体相比要小几十倍甚至几百倍。然而,有时是影响动作的,故非注意不可。例如,因为转子和壳体内部的空间是极狭小的,所以当由于热膨胀而把这个空隙完全挤满时,磨损量就会增大,寿命相应缩短。如果再进一步膨胀,就会使旋转停止。

金属的线膨胀系数

材 料	线 膨 胀 系 数
黄 铜	19~23×10 ⁻⁶
青 铜	17.1~17.8
不 锈 钢	16.4
镍 钢	8.7~11.1
镍 钢 (含 镍 10%)	13
铜 锡 合 金	17~18
磷 青 铜	17

若圆锥管和浮子是用合成树脂制成,由于膨胀系数比金属材料大,故在精度高的场合不能使用。尤其因为玻璃对温度急剧变化的适应性较差,所以要求选用十分可靠的耐热硬质玻璃。

在差压式流量计方面,由于热膨胀所产生的影响是与管径平方有关的,因此当用于高温时,在设计过程中,必须把膨胀和收缩所引起孔径面积的扩大和缩小作为首要问题来进行计算。

(李华康译自《计量管理》, Vol. 10, No. 7, 1961, 12~16. 汪时雍校)

流量計的測定範圍和誤差

高山

流量計的原理和方式

一般的流量計是用来連續測定单位時間內流过多少容积流体的仪表。設某瞬間的容积流量为 Q ，一定時間 t 內流过流体的全部容积（积算值）为 V ，那末

$$V = \int_0^t Q dt \quad \text{或} \quad Q = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

当流体流过截面积为 A 的管道时，若流体在該截面位置上的流速为 v ，則

$$Q = Av \quad (2)$$

由于粘性的影响，在管道的中心部分和接近于管道內壁部分流体的流速值照理是不同的，但是式中 v 是表示截面上各点流速的平均值。

此外，在測定流体的流量时，常常希望測知有多少质量的流体在运动。設对应于前面 Q 的质量流量为 G ，則

$$G = Q\gamma = A\gamma v \quad (3)$$

式中： γ 为流体密度（单位体积的重量或质量）。

以上是流量測定的基本原理。目前广泛应用的流量計大致可分成容积式和速度式两种，前者是測出式(1)所示的 V 后再求 Q 的，后者是測出式(2)所示的 v 后再求 Q 的。下面将对这两种方式作进一步的划分。

1. 按測量原理分类

一、容积式 这种流量計具有一定容积的計量室，当流体經過这个計量室时，就会由于流体的压力或者积存在計量室中的流体重量而自动使計量轉数的指示机构动作。換句話說，这种流量計是借助流体本身的能量对“增量”进行連續測定的，其測定轉数用 V 表征。

这种流量計按計量室形状和构造可分成下列几种型式：

- 1) 鼓形（圓筒型，图 1）；
- 2) 盘形（圓板型，图 2）；
- 3) 旋轉活塞型（图 3）；
- 4) 直动活塞型（图 4）；

5) 轉子型（轉子型，使用罗茨式和橢圓式居多，图 5，图 6）。

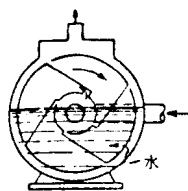


图 1 湿式气量計

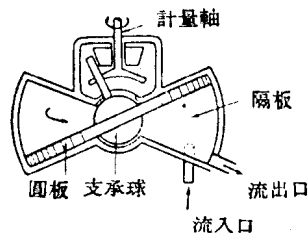


图 2 圓板型

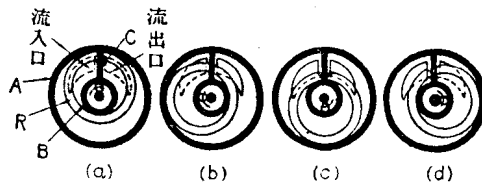


图 3 旋轉活塞型

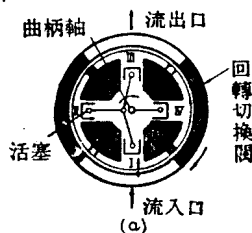


图 4 直动活塞型

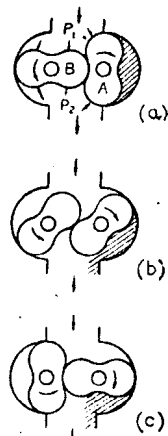


图 5 罗茨式

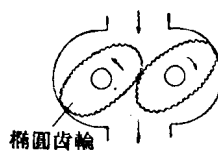


图 6 橢圓式

在这些型式中，1) 型多数用于湿式气量計等方面，4) 型常用于汽油站等場合，由于 5) 型最适宜用

作工业仪表,因此把这种型式的流量计作为容积式的典型。

关于转子型流量计,如果设转子的长径为 d , 宽度为 l , 转数为 n , 每转流过的流体容积为 V_s , 那末

$$V = nV_s = ncd^2l \quad (4)$$

式中: c 是根据转子形状所确定的常数,如果是罗茨式的为 0.8 左右,椭圆式的为 0.7 左右。

二、速度式 属于这种型式的流量计与直接计量流体容积的流量计不同,它是先测出流体经过一定截面部分时的速度,然后根据式(2)求得 Q 或者根据式(3)求得 G 。这种型式可进一步分类如下:

(1) 差压式 是一种基于著名的伯努利定律,利用流体的速度和压力之间关系的型式。在直管段中安装着节流装置,测出其前后的压力差后即可求出流速。

这种节流装置方面除了有标准孔板(图7)、标准喷嘴和标准文丘里喷嘴以外,还有圆缺孔板、Herschel 管以及适用于低雷诺数流体条件的“四分圆”喷嘴和双重孔板等特殊型式。在考虑了测定部分的条件、容许压力损失以及制造的工艺性等之后,酌情选用。

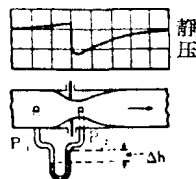


图7 孔板式的原理

设节流装置上流侧的压力为 p_1 , 密度为 γ_1 , 下流侧的压力为 p_2 , 则下列关系成立:

$$Q = C_1 A \sqrt{\frac{2g}{\gamma_1} (p_1 - p_2)} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度, C_1 是根据孔板的形状和流体的种类所确定的常数。

(2) 面积式 与差压式相同,其原理是基于伯努利定律的,流体从一个锥形管的下端流入,此管的上面内径大于下面内径,其中放着比重大于液体的浮子。由于浮子前后的压差是利用浮子的重量而保持一定的,因此管道内壁和浮子之间的通过面积与流速相对应。换句话说,流速可根据浮子在管内的位置来测出。一般所谓的转子流量计就属于这种型式。

设浮子从静止位置开始上升的高度为 l , 管道的圆锥角为 θ , 则下式成立(图8):

$$Q = 2\sqrt{2g\pi V_f} \left(\frac{\gamma_f}{\gamma} - 1 \right) \cdot C_2 \tan \frac{\theta}{2} \cdot l \quad (6)$$

式中: C_2 —— 出口口的流量系数;

V_f, γ_f —— 浮子的体积和密度;

① 即通常所谓超声波流量计——校者注。

γ —— 流体的密度。

(3) 其他 除了前面已经讲过的方式以外,还有下列各种方式:利用流体冷却作用的热线式、转数随流速变化的涡轮式,利用流量变化产生电磁现象的电磁式以及利用流速对超声波传播速度影响的音响式①等。这里将提出最近特别有发展且引人注目的电磁式(图9)作为代表。

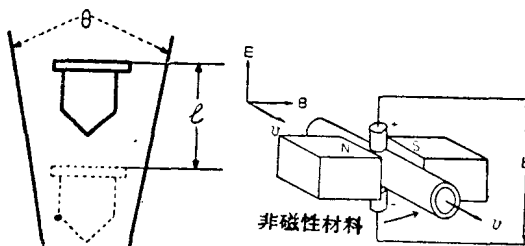


图8 转子流量计 图9 电磁流量计

根据法拉第定理可知,当导电性流体沿垂直于磁场的方向流动时,就会在流体中与流动方向和磁场方向成直角的方向上感应出一个与流速成比例的电动势。设此感应电压为 E , 则

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 v = \frac{\pi}{4} d C_3 \frac{E}{B} \quad (7)$$

式中: B —— 磁场的磁感应;

d —— 流体流过的管道直径;

v —— 流体的平均流速。

所用的单位如下: E —— 伏; B —— 高斯; d —— 厘米; v —— 厘米/秒; Q —— 厘米³/秒; C_3 是无因次的,该值大小是 10^8 。

2. 各种方式的比较

将上节中的各种方式归纳起来作一下比较,容积式尽管计量室的形状有差别,然而从原理上来看可以认为完全是相同的。此外在速度式方面,由于差压式和面积式都是遵循伯努利定律的,同时即使以式(5)与式(6)来比较,流体密度项列入平方根中这一点也是非常相似的。就是说,在流体的密度变化时,这两种方式均受到同样的影响。

在第3类方式中几乎都是测定平均流速的,没有把密度项列入式中。此外,把直接测定的量(例如:电磁式中的感应电动势)作为1次项列入求流量 Q 的式子中。与其相比,在差压式中作为直接测定量的压差则以平方根形式列入求 Q 的式子中。此外,在与差压式同样基于伯努利定律的面积式方面,因为作为直接测定量的浮子高度 l 与流量 Q 成正

比,所以在这一点上面积式与电磁式是相似的。

流量计的误差

1. 误差的主要因素

不仅从仪表本身的精度而且还要由前面探讨过的流量计的原理和方式来分析一下流量计的误差,无论哪种方式都有其独特的性质。

先从原理来看,基于伯努利定律的差压式和面积式,当流速降低,雷诺数减小时,湍流变成了层流,于是开始适应于 Hagen-Poiseuille 法则,不能采用前面所求出的式子。很早以前就知道这可作为孔板的公差极限。

由于这种影响,使管道内流体的流速分布也起了变化,因此即使对涡轮式和音响等来说,也是产生误差的主要因素。一方面,在考虑到小流量的条件时,容积式流量计也会由于涉及到计量室的容积和漏泄而受到影响。

此外,如前面式(3)所示,当由这些容积流量计来求质量流量时,误差都是由密度的变化而引起的。而且即使在测定容积流量的场合下,面积式与其他方式也有着根本的不同。在差压式中,作为直接测定量的压差和流速之间的关系不成比例,而压差的平方根与流速(流量)成比例,在这种场合下,即使对误差来说也会产生与其他方式不同的问题。

以下把这些误差的主要因素大致加以划分,就体积流量测量方面的误差而言,是分析流量与直接测定量的关系对误差的影响,然后,就质量流量测量方面的误差而言,将提出密度变化的影响,并且对典型的方式进行逐一比较。

2. 体积流量测量方面的误差

容积式是一种以计量室的容积为单位的计数仪表,适用于求出式(4)所示的积算流量 V 。因此,把每转一周时的误差看作是恒定的,在积算任意流量时的误差量必然与其流量成比例。由于误差量不是时间的函数而是转数的函数,因此这种比例关系在考虑 $Q = \left(\frac{dV}{dt}\right)$ 时也是相同的。

设实际流量为 q_1 ,其中有 Δq 的误差;并设测定流量亦即流量计的示值为 q_2 ,根据以上关系,将 q_1, q_2 和 Δq 都化为无因次数后,即得

$$q_2 = q_1 + q_1 \Delta q \quad (8)$$

图10就是表示这种关系。

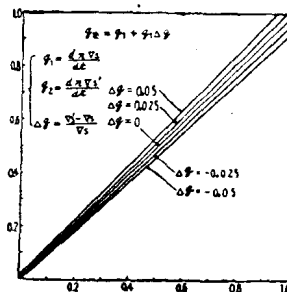


图10 容积式流量计的误差

其次,来研究一下面积式和电磁式等,它们与一般的指示仪表相同,误差量以满刻度的百分数来表征;而且总是一定的,与当时的流量示值无关。

因此 q_1, q_2 与 Δq 的关系与式(8)不同,所构成的关系如图11所示为

$$q_2 = q_1 + \Delta q \quad (9)$$

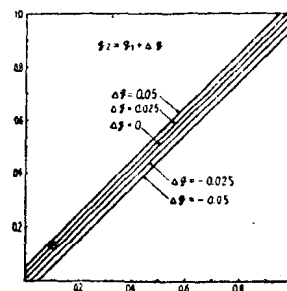


图11 一般方式的误差

可是,差压式的直接测量 x 和仪表指示量 y 的关系与其他方式有所不同(如图12所示)。就是说,直接测量的误差 Δx 与 x 值无关,并且是一定的,然而仪表指示量的误差 Δy 仍然是改变的。

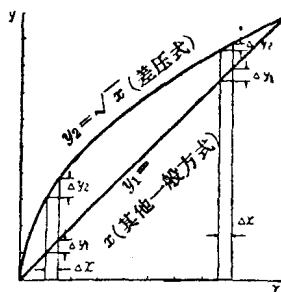


图12 直接测量与仪表指示量的关系

设对应于流量 q_1 和 q_2 的压差各为 h_1 和 h_2 ,并设 h_1 的误差为 Δq ,则 h_1, h_2 和 Δq 之间的关系可以考虑由和式(9)相同的形式来表示,因此由

$$q_2 = \sqrt{h_2} = \sqrt{h_1 + \Delta q}$$

和
得

$$q_1 = \sqrt{h_1}$$

$$q_2 = \sqrt{q_1^2 + \Delta q} \quad (10)$$