

第四章

流量检测

4.1 概述

- 在生产过程中，经常需要测量流过的流体总量或固定管道内的**瞬时流量**，以指导工艺操作、监视设备运行情况、以及进行经济核算等。
- 所谓“**流量**”是指**单位时间**内流过管道某截面的流体的体积、质量，故称为：**体积流量**和**质量流量**。

一. 流量的定义

1. 体积流量

$$dq_v = u \cdot dA$$

式中A为管道的截面积，u为某一微小截面上的流速。
通常假定整个截面上速度分布是均匀的，则可将体积流量表示为：

$$q_v = u \cdot A \text{ (m}^3/\text{h)}$$

2. 质量流量

$$q_m = \rho \cdot u \cdot A \text{ (kg/h)}$$

ρ — 流体密度

应注意的是，流体的密度会随工况的参数（压力和温度）变化而变化。对于液体，压力和温度的变化对其影响不大，除温度变化较大或测量准确度要求较高外，通常可以忽略不计；对于气体，压力和温度的变化对其影响较大，必须同时测量，加以校正，并换算成标准状态下的流量
(20°C和760mmHg)

101.325kPa

常温下温度变化10°C,密度变化3%;
常压下压力变化10kPa,密度变化3%

3. 总量（即累积流量）

- 指某一时间间隔内，流过管道截面的流体总和，可表示为：

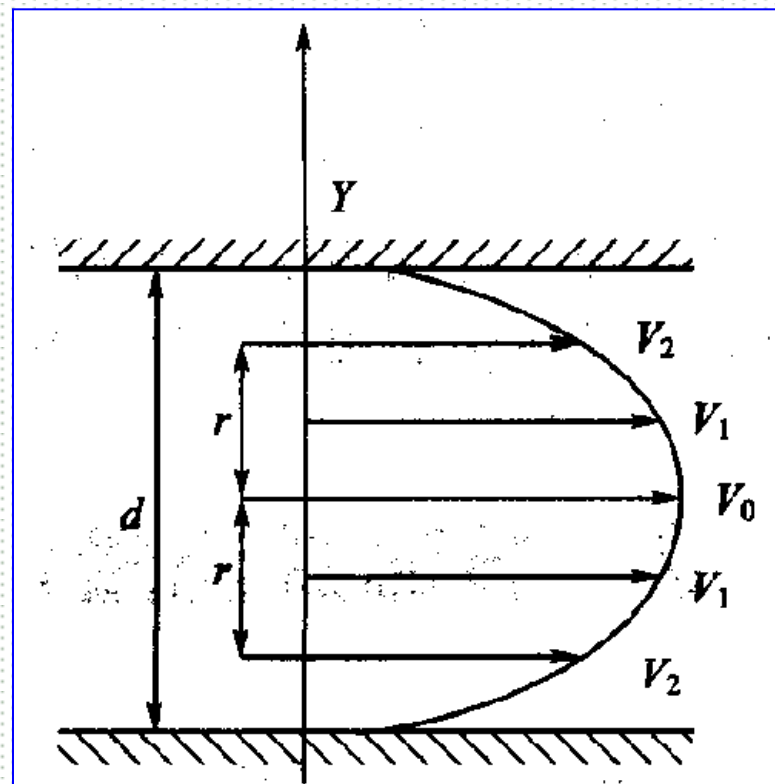
$$V = \int_{t_1}^{t_2} q_m \cdot dt$$

(kg)或(T)

二. 流动状态与流量测量

1. 层流

- 流体在管道内流动，当流速很小时，流体分层流动，互不混合。
- 流体的流速在管道中心处最大，近壁处最小，各点的流速相差较大。
- 在测量中如果仅用某个局部的流速代表整个截面流速，会产生较大的测量误差。



2. 紊流

- 随着流速的增加，流体的流线开始出现波浪状的摆动，摆动的频率及振幅随流速的增加而增加。
- 当流速增加到很大时，流线不再清楚可辨。水流在延管轴方向向前运动的过程中，各层或各微小流束上的质点形成涡体彼此混掺。
- 从整个管道截面来看，流体每个质点的运动速度接近一致。

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu}$$

- 层流或紊流状态取决于流体流动速度、流体的黏度、管道结构等因素，需要根据雷诺数 Re 的大小来判定。
- 一般管道雷诺数 $Re < 2100$ 为层流状态， $Re > 4000$ 为紊流状态。其他为过渡状态。
- 在通过测量流速 u 来确定流量的方法中，一般需要流体流动状态为紊流，流体的临界雷诺数要 > 4000 。

三. 流体流动中的能量状态转换

- 对于水平管道中流动的流体，在管道截面上的任意一个流体质点都具有动压和静压两种能量形式。
- 静压是由于流体分子不规则运动与物体表面摩擦接触产生的。
- 动压是流体流动时产生的压力，只要管道内的流体流动就具有一定的动压。
- 如果流体在流动过程中密度不随压力变化而发生改变（理想流体），则在管道任意截面上的静压能和动压能就存在一种守恒关系（伯努利方程）。

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \text{常数}$$

p ——截面上流体的静压

ρ ——流体密度

g ——重力加速度

u ——截面流体的流速

四. 流量检测的主要方法

流量测量是比较复杂的，各种因素有：

工艺条件上： 低温、低压到高温、高压；

流动状况方面： 有层流、紊流和脉动流；

流体性质： 有低粘度、高粘度、强腐蚀等；

测量对象： 有气体、液体、固体和两相流体；

测量范围： 从每秒数滴到每小时数百吨。

因此，需要使用各种**不同的测量方法和测量仪表**来测量流体的流量。

流量测量分类

- 按测量目的分类：
 - 瞬时流量
 - 总流量
- 按测量方法和结构分类
 - 体积流量
 - 质量流量

(1) 测体积流量

- 容积法（又称直接法）
- 速度法（又称间接法）

a. 容积法

- 在单位时间内以标准固定体积对流动介质连续不断地进行度量，以排出流体的固定容积数来计算流量。
- 流量越大，度量的次数越多，输出的频率越高。
- 容积法受流体流动状态影响较小，适用于测量高粘度、低雷诺数的流体。
- 根据回转体形状不同，产品有：
 - 适于测量液体流量的椭圆齿轮流量计、腰轮流量计(罗茨流量计)、旋转活塞和刮板式流量计；
 - 适于测量气体流量的伺服式容积流量计、皮膜式流量计等。

b. 速度法

- 速度法先测出管道内的平均流速，再乘以管道截面积求得流体的体积流量。基于速度法测量流量的方法主要有：
 - **差压式** 又称节流式，利用节流件前后的差压和流速关系，通过差压值获得流体的流速；
 - **电磁式** 导电流体在磁场中运动产生感应电势，感应电势大小与流体的平均流速成正比；
 - **旋涡式** 流体在流动中遇到一定形状的物体会在其周围产生有规则的旋涡，旋涡释放的频率与流速成正比；
 - **涡轮式** 流体作用在置于管道内部的涡轮上使涡轮转动，其转动速度在一定流速范围内与管道内流体的流速成正比；
 - **声学式** 根据声波在流体中传播速度的变化得到流体的流速；
 - **热学式** 利用加热体被流体的冷却程度与流速的关系来检测流速。
- 基于速度法的流量检测仪表有：
 - 节流式流量计、靶式流量计、弯管流量计、转子流量计、电磁流量计、旋涡流量计、涡轮流量计、超声流量计等。

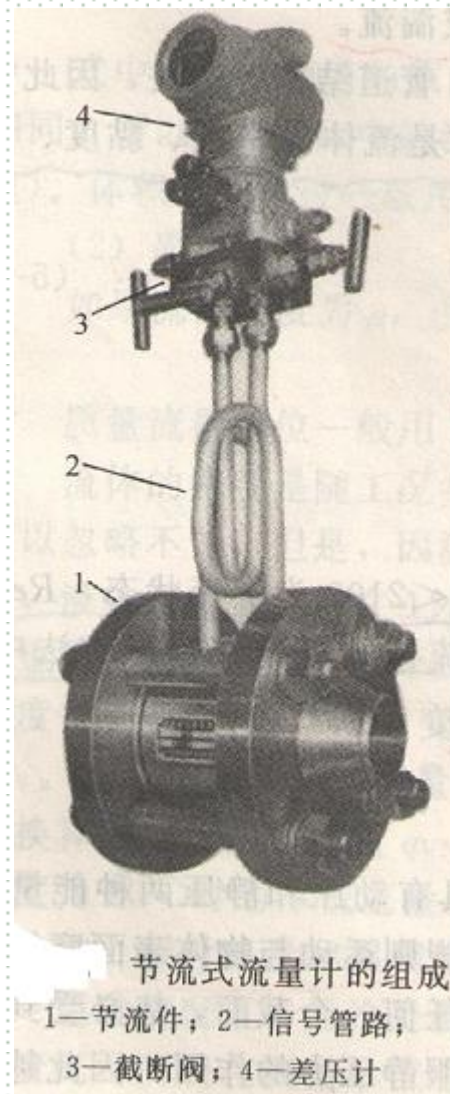
(2) 测质量流量

- 质量流量计是以测量流体流过的质量为依据的流量检测仪表，具有精度不受流体的温度、压力、密度、粘度等变化影响的优点。
- 质量流量的测量方法也分直接法和间接法两类。
- 直接法测量质量流量有科里奥利力式流量计、量热式流量计、角动量式流量计等。
- 间接法（又称推导法）测出流体的体积流量，以及密度（或温度和压力），经过运算求得质量流量，主要有压力温度补偿式质量流量计。

4.2 体积式流量计

4.2.1 差压（节流）流量计

- ❖ 节流式流量计是**应用动压能和静压能转换的方法**，通过测量管道内放置的节流元件前后的静压差的变化情况，来求得流体的流量。
- ❖ 节流式流量计是目前工业生产中测量气体、蒸气和液体流量最常用的一种仪表，据统计在化工企业中，所应用的流量计约80%是节流式流量计。



节流式流量计的组成

1—节流件；2—信号管路；

3—截断阀；4—差压计

优点：

- 测量方法简单，应用技术比较成熟；
- 没有可动零件，工作可靠；
- 适应性强；
- 可以不经实流标定而能保证一定的测量精度。

缺点：

- 安装要求严格，上下游需要足够长度的直管段；
- 测量范围窄，一般为3:1；
- 压力损失大；
- 刻度是非线性的。

节流式流量计的历史悠久，积累了丰富的经验和大量的可靠数据。

为便于推广应用，国际标准化组织（ISO）在汇总各国研究成果的基础上，将几种类型的节流装置标准化，其文件有：ISO/R541（1967年）、ISO/R781（1968年）和ISO5167（1981年）。

中国制定的流量测量标准节流装置的国家标准有：GB2624（1981年）、GB/T2624-2008（2008年，采用国际标准ISO5167）。

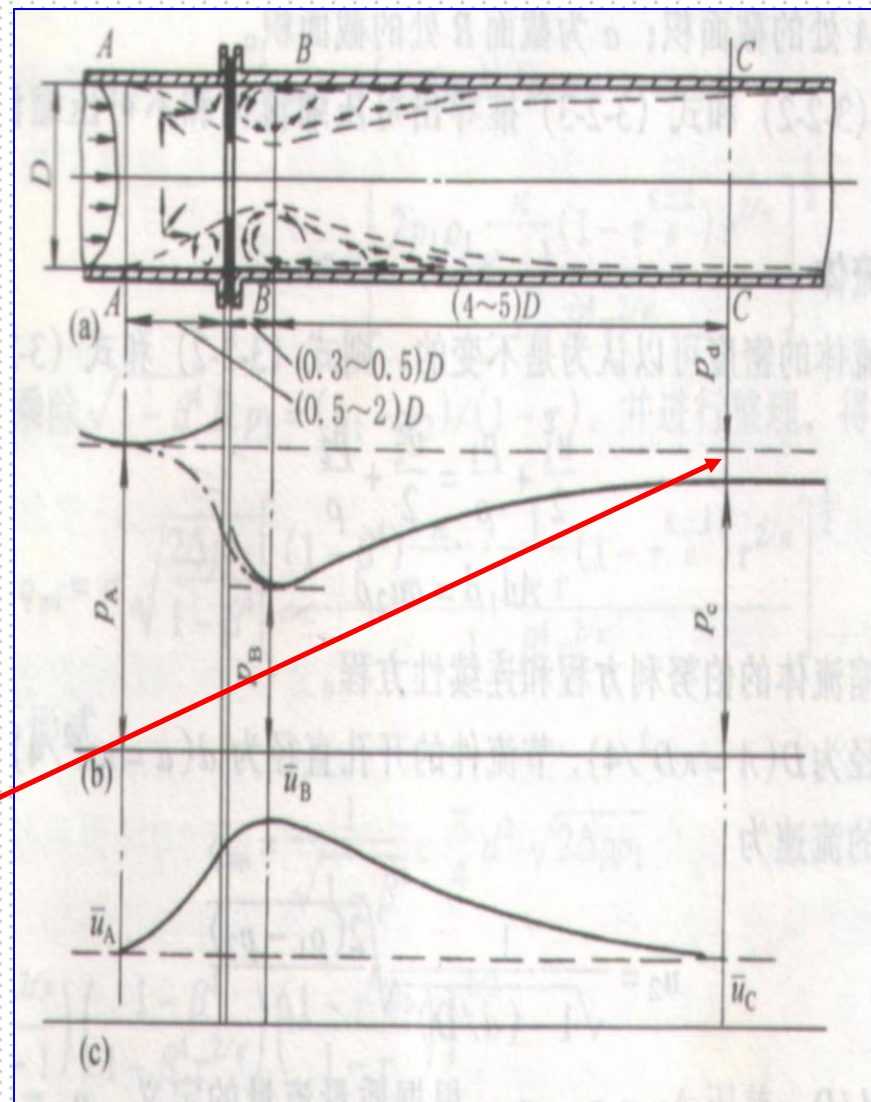
应用标准节流装置（按标准的规定来设计、加工、安装和使用的节流装置）测量流量比较方便，无需对该节流装置进行标定，其测量误差不会超出允许范围。

一. 工作原理及流量基本方程式

流体流经节流件时，其流束在孔板前大约等于管道 $(0.5\sim 2)D$ 直径处开始收缩，使流速增大，静压力减小。

由于惯性作用，流束的收缩直到孔板后 $D/2$ 处才结束，此时，流速最快，静压力最低。

过后，流束开始扩展，压力逐渐恢复到最大，但要比收缩之前小，即存在一个压力损失 δ_p 。



流量方程式

■ 体积流量 $q_v = F_0 a \sqrt{\frac{2g}{\rho} \times \Delta p}$

■ 质量流量 $q_m = F_0 a \sqrt{2g\rho \times \Delta p}$

式中 q_v ——流体的体积流量， m^3/h ；

q_m ——流体的质量流量， kg/h ；

F_0 ——节流装置流通截面积， mm^2 ；

g ——重力加速度， m/s^2 ；

流量系数 a 根据不同节流装置结构形式，其值也不相同。流量 q_v 与 Δp 的关系中的流量系数 a 以流出系数 C 表示

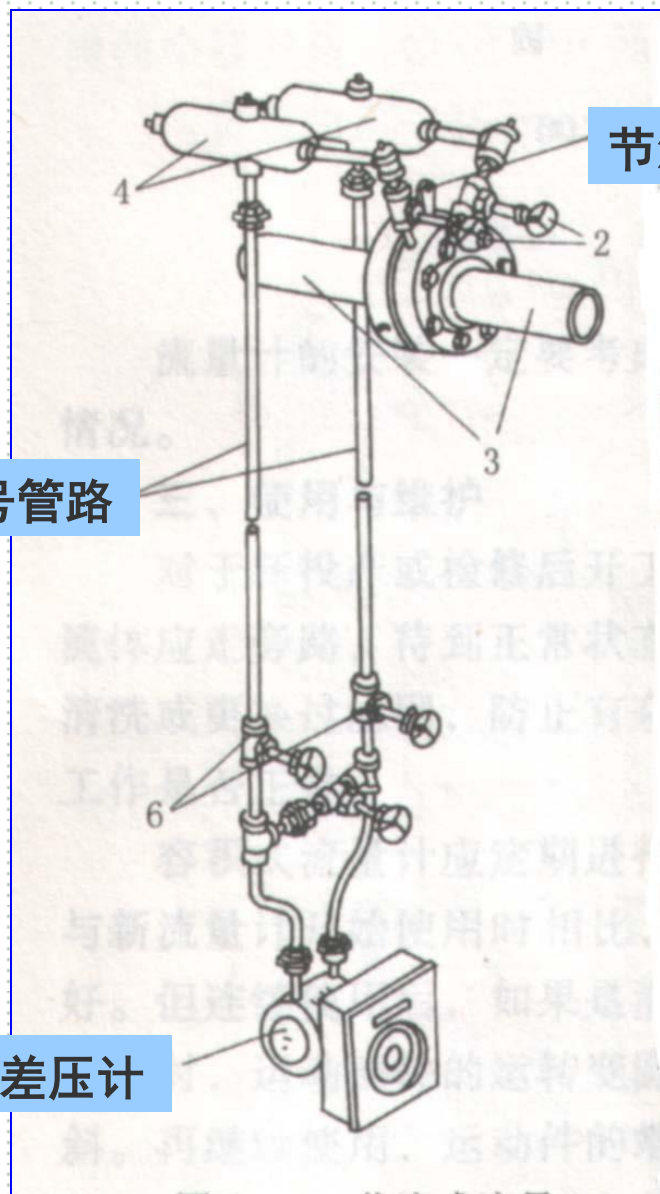
$$a = C \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

式中 β ——直径比，即节流件孔径 d 管道内径 D 之比

- 流量 q_v （或 q_m ）与差压 Δp 是非线性的关系，如果在使用中未作线性化处理，显示仪表流量刻度标尺是非线性的，越接近下限的最小流量读数误差会越大。
- 流体的密度是随着不同工况发生变化的，尤其是可压缩的流体如气体和蒸汽，在温度、压力、气体组成的成分变化时，密度也会随着变化。
- 因此设计时的计算数据与实际生产运行时数据不同，读数就会发生误差。
- 如果需要精确计量，必须要考虑温度、压力等的自动补偿，以减少检测误差。

二. 节流式流量计的组成

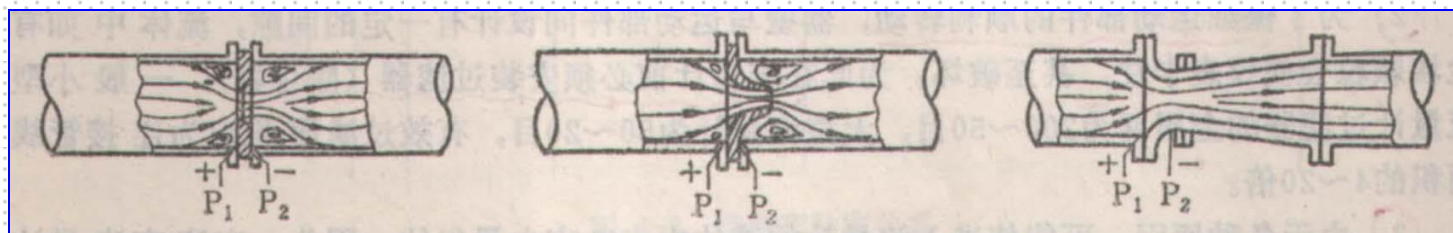
1. **节流装置**：由节流元件和取压装置组成，将被测流体的流量转换成差压信号；
2. **信号管路**：将差压信号由节流装置传送到能测量、转换或显示差压信号的仪表上去。
3. 测量差压信号的**差压计**、**差压变送器**或**显示仪表**。



节流元件：

虽然任意形状的具有开孔截面的阻流体都可以产生节流现象，但只有那些能使差压和流量之间有比较稳定的关系、并且重复性比较好的节流件才具有实用价值。

常用的节流件有：同心圆孔板、偏心孔板、圆缺孔板、1/4圆孔板、文丘里管、喷嘴、文丘利喷嘴等。



孔板

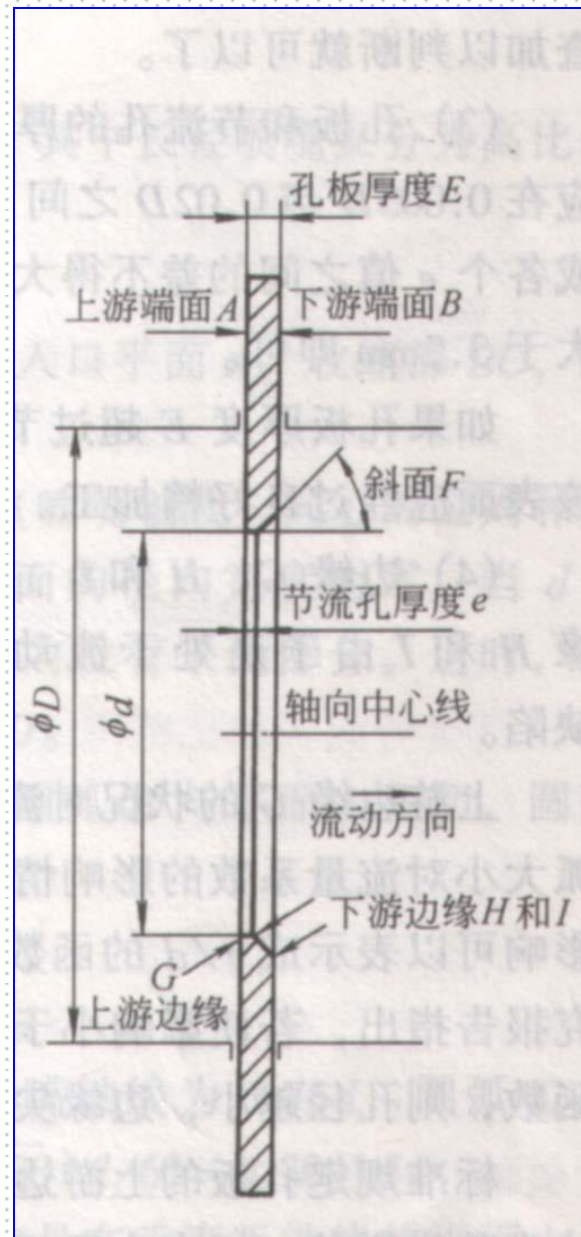
喷嘴

文丘里管

(1) 标准孔板

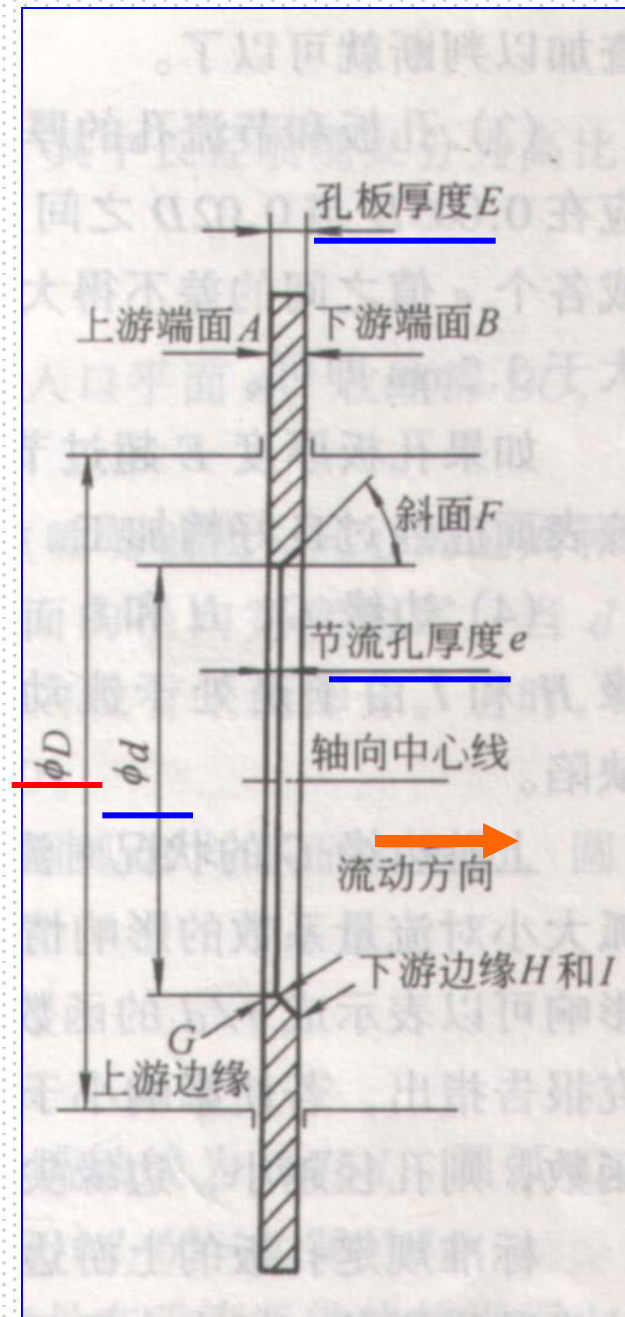
标准孔板是一块金属薄板，中间有与管道轴线同心的圆形开孔。

在上游侧，孔板开孔是直角入口，要求边缘非常尖锐，没有毛刺和划痕，肉眼观察不到光的反射；在出口处有一个向下游侧扩散的光滑锥面，斜角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。



用于不同管道内径的标准孔板，其结构形式基本是几何相似的。但孔板厚度 E 、节流孔厚度 e 的尺寸都与管道内径 D 有关；孔板的开孔直径 d 除了与管道内径 D 有关外，还与介质、流动状态、工作环境等有关。

应注意的是，流体流经孔板的方向必须从圆筒部分进，从锥体部分出，**绝对不能相反**。



(2) 标准喷嘴

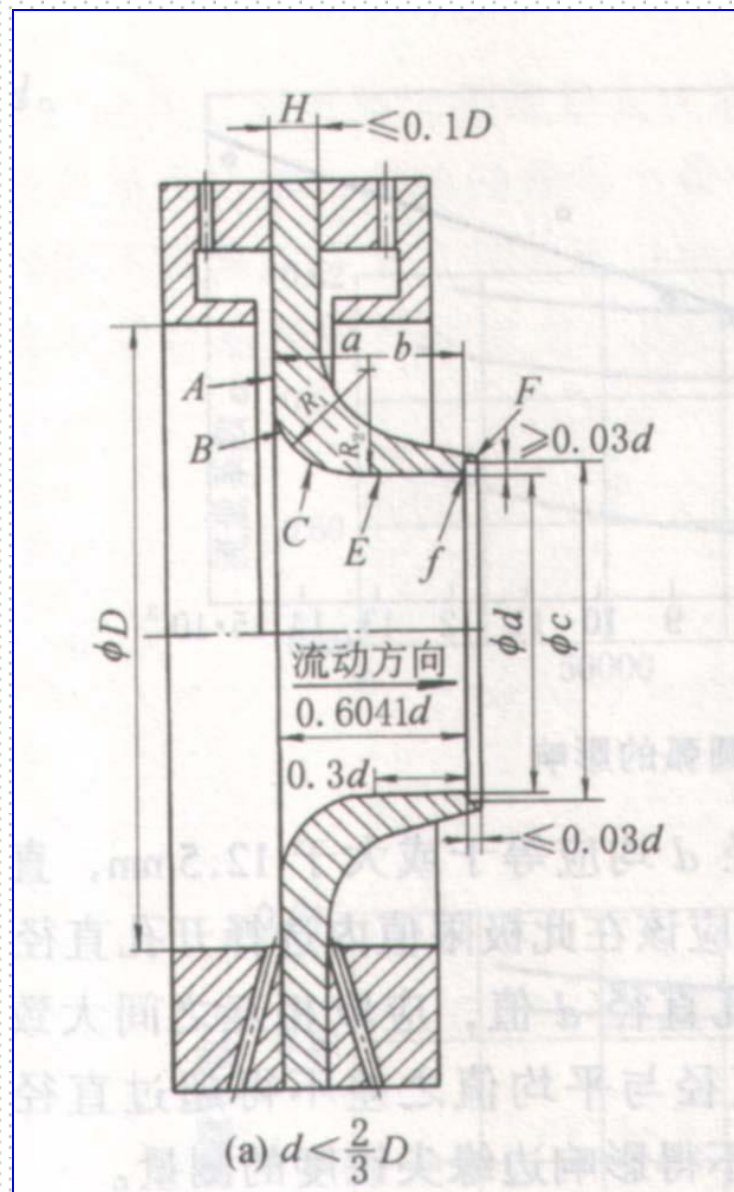
标准喷嘴的型线由四部分组成：

1. 进口端面A——位于管道内部上游侧的喷嘴入口处，是平面）；

2. 收缩部分B、C——两段圆弧组成的曲面（B圆弧曲面与A面相切，C圆弧曲面与喉部相切）；

3. 圆筒形喉部E；

4. 圆筒形喉部的出口边缘保护槽F。

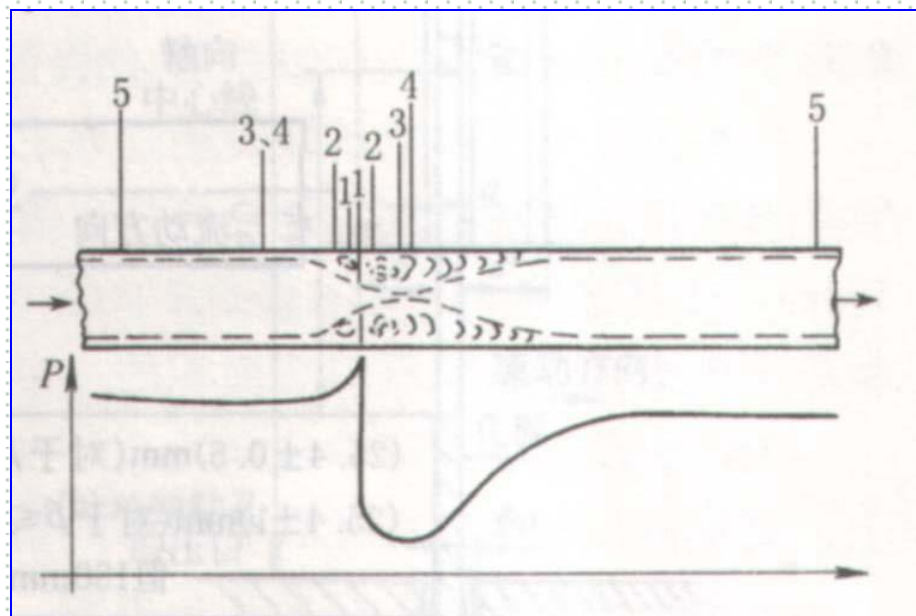


取压方式：

- **取压位置**不同时，即使流过节流件的流量是同一数值，测得的差压也是不同的。

常用的取压方式有五种：

1. 角接取压法（1-1）；
2. 法兰取压法（2-2）；
3. 径距取压法（3-3）；
4. 理论取压法（4-4）；
5. 管接取压法（5-5）。



D和D/2取
压法

标准孔板可以采用角接取压、法兰取压、D和D/2取压等方法。

取压位置恰在孔板的前后端面处

取压位置距孔板前后端面1英寸处

取压位置距孔板上下游端面D和D/2

三. 有关参数的确定

1. 流出系数 C

✓从流量公式中可以看出，只有在流出系数为常数的情况下，压差才与流量有恒定的对应关系。

$$q_m = \frac{C \cdot a}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2\rho \cdot \Delta p} = C \cdot E \cdot a \sqrt{2\rho \cdot \Delta p}$$

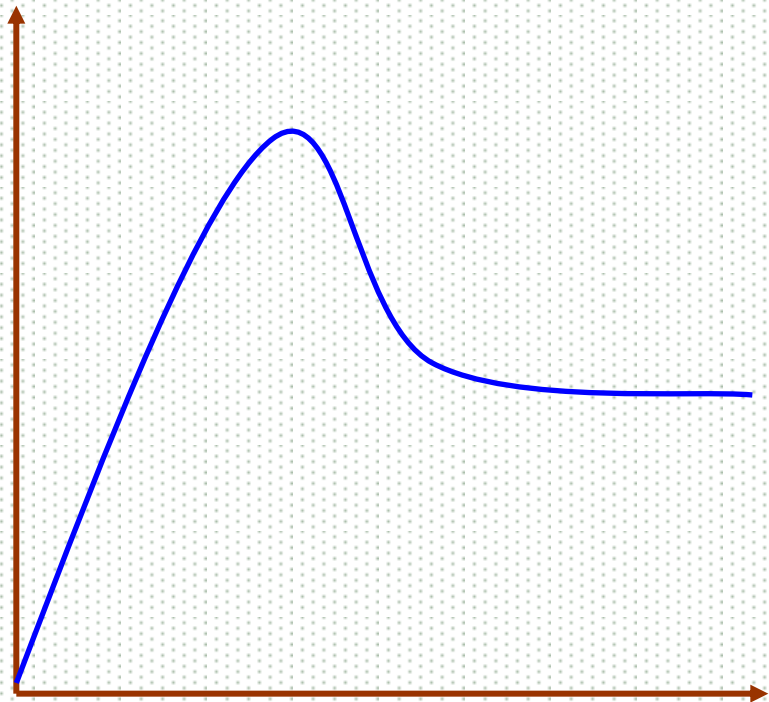
✓流出系数与节流件的形式、取压方式、节流装置的开孔直径与管道的直径之比 β 、以及流动状况（即雷诺数）有关。可以看出，一旦选定节流装置之后，前几项都不会再变。因此，流量系数只与雷诺数的变化情况有关，即：

$$C = f(\text{Re}_D)$$

当雷诺数较低时，流出系数将随雷诺数的变化而变化。

但是，当雷诺数大到一定程度后，流量系数将不再变化，而趋向一个平稳的值。

C



Re_d

流出系数是在实验管道内进行实验测得的，因此该参数的大小还与**实验管道的粗糙程度**有关。

对于角接取压方式的标准孔板，C值是在相对粗糙度为 $K/D \leq 3.8 \times 10^{-4}$ 的管道中进行试验取得的（K——等效绝对粗糙度）；

对于D-D/2取压方式的标准孔板，C值是在相对粗糙度为 $K/D \leq 10 \times 10^{-4}$ 的管道中进行试验取得的。

在使用中，只有相对粗糙度K/D值与实验条件相符，才能使用通用公式来计算C值。

2. 可膨胀系数 ε

- 测量可压缩性流体的流量时，膨胀系数 $\varepsilon \neq 1$
- 若节流装置为**孔板**，由于无法知道流束的最小截面积而没有求取膨胀系数的理论公式，只能通过实验得出经验公式：

$$\varepsilon = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/k} \right]$$

- 该式的适用范围为 $\frac{P_2}{P_1} \geq 0.75$ 。

3. 材质的热膨胀系数

- 在流量公式中涉及到的孔板开孔直径 d 和管道直径 D ，都是指工作状态下的尺寸。
- 在设计和加工时，一般是在常温下测量尺寸的，因此要根据实际的温度加以修正，即：

$$d = d_{20}[1 + \lambda_d(t - 20)]$$

$$D = D_{20}[1 + \lambda_D(t - 20)]$$

λ_d —— 节流件材质的热膨胀系数

λ_D —— 管道材质的热膨胀系数

4. 压力损失

➤ 流体经过节流件时，会有一部分能量消耗在摩擦阻力和节流件后的旋涡上，因而流体的静压力不能完全恢复，即存在着永久性的压力损失 δp 。

➤ 对于标准孔板，可以算出：

$$\delta_p = \frac{\sqrt{1 - \beta^4} - C\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4} + C\beta^2} \cdot \Delta p \approx (1 - \beta^{1.9}) \cdot \Delta p$$

在流量和节流装置的设计中，还经常要用到一些物理参数，如密度 ρ 、压缩系数 Z 、等熵指数 κ 、粘度 μ 等，其计算方法可参见相关手册。

四. 实用流量公式

在**基本流量公式**中，将各参数的单位代入，即得到流体的**实用流量公式**。

通常，使用工程上常用的单位，即：

$$q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot a \sqrt{2\rho \cdot \Delta p} = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho \cdot \Delta p}$$

$$\left(mm^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot Pa} \right) \Rightarrow \left(\frac{kg}{h} \right)$$

$$mm^2 \rightarrow 10^{-6} m^2$$

$$Pa \rightarrow 1.02 \times 10^{-5} \frac{kgf}{cm^2} \rightarrow 1.02 \times 10^{-5} \times 9.81 \frac{kg}{cm^2} \cdot \frac{m}{s^2} \rightarrow (3600)^2 \frac{kg}{m \cdot h^2}$$

$$K = 3600 \times 10^{-6} \times \frac{\pi}{4} \times \sqrt{2} = 0.003999$$

$$q_m : \frac{kg}{h}$$

$$q_v : \frac{m^3}{h}$$

$$d : mm$$

$$\Delta p : Pa$$

$$\rho : \frac{kg}{m^3}$$

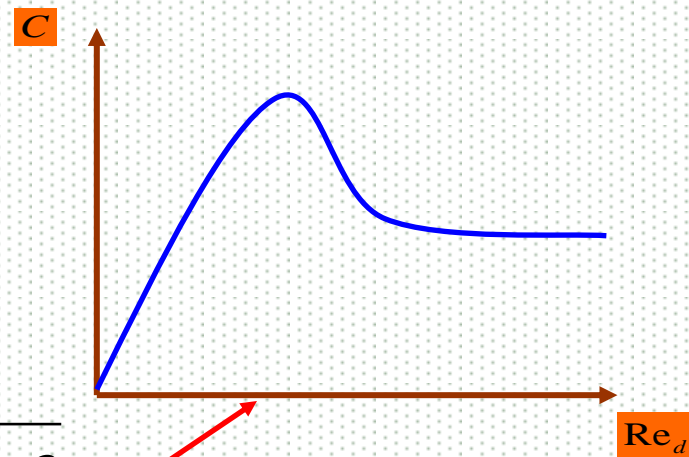
流量的实用公式：

质量流量：

$$q_m = 0.003999 \cdot \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\Delta p \cdot \rho}$$

体积流量：

$$q_v = 0.003999 \cdot \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\Delta p / \rho}$$



可见，流体的流量与压差的平方根成正比关系。

使用节流式流量计应注意事项：

- 流体必须充满管道，作稳定流动，并无相变的情况；节流装置前有足够的直管段，使流束与管道的轴线平行，不产生旋转流。
- 选择节流装置时，应根据工艺条件，尽可能降低压力损失，以减少能量的损失。
- 差压计的测量范围包括流量的整个被测范围，并留有余地，以保证测量的顺利进行及测量的精度。

五. 标准节流装置的设计计算

标准节流装置的设计计算主要有**两类命题**：

1. 已知管道内径、被测流体参数、预计的流量测量范围，以及其他必要条件，要求**选择适当的压差上限**，并**确定节流件的形式及开孔直径**。

这类命题属于新设计标准节流装置。

2. 已知节流件类型、取压方式、管道内径和节流件开孔直径、被测流体参数，以及其他必要条件，要求根据差压值计算出被测流体的流量值。

这类命题是已有了标准节流装置，要求计算出差压值所对应的流量值，属于管流计算。

第一类设计简介

1. 工艺要求

- a. 测量的精度尽可能高；
- b. 在测量范围内流量值和差压值有简单的对应关系；
- c. 节流件前后所需的直管段尽可能短；
- d. 流经节流件的压力损失尽可能小。

以上四个要求之间存在有矛盾，在设计过程中要根据具体情况，妥善解决这些矛盾。

2. 设计中所需的原始数据

- a. 被测流体的名称、组分；
- b. 被测流体的流量，包括**最大流量** $q_{m\max}$ ($q_{v\max}$) ，
常用流量 q_{mcom} (q_{vcom}) 和**最小流量** $q_{m\min}$ ($q_{v\min}$) ；
- c. 节流件上游取压孔处的工作压力（绝对压力） P_1 、
工作温度 t_1 ；
- d. 允许压力损失 δ_p ；
- e. 管道材质，20°C时的管道内径 D_{20} ，管道内壁粗糙程度；
- f. 节流件上游局部阻力情况，直管段距离；
- g. 要求采用的节流件材质、类型和取压方式。

3. 辅助计算

- (1) 根据原始数据的最大流量，确定流量标尺刻度的上限值。

注意到，确定的数值应与系列数据一致。 国产差压式流量计标尺上限系列为（1、1.25、1.6、2.5、3.2、4、5、6.3、 8×10^n ）， n 为零或整数。

工艺给出的**最大流量**不得超过流量标尺上限；

工艺给出的**常用流量**最好指示在**流量标尺的80%左右**；

工艺给出的**最小流量**最好指示在**流量标尺的30%左右**。

(2) 根据材质和工作状态，在工程手册中查出管道和节流件的线膨胀系数，求出工作状态下的管道内径 D 。

$$D = D_{20} [1 + \lambda_D (t - 20)]$$

(3) 计算工作状态下的绝对压力 P_1 、粘度 μ 和密度 ρ 。

(4) 根据工作状态下的最小流量和常用流量等参数，求出相应的雷诺数。

$$\text{Re}_{D\min} = 354 \times 10^{-3} \frac{q_{m\min}}{D\mu_1}$$

$$\text{Re}_{Dcom} = 354 \times 10^{-3} \frac{q_{mcom}}{D\mu_1}$$

(5) 根据管道材质及内壁情况，查工程手册，确定管道内壁的绝对平均粗糙度 K ，求出 K/D 值，检查 K/D 是否合格。

4. 确定差压计上限

❖ 差压上限、流量标尺上限和节流件开孔直径比 β 是节流装置设计计算中三个相互关联的变量。

❖ 差压上限取得大，意味着 β 可以取得小一些，其优点是：

- 流出系数开始呈现平稳时的雷诺数低，有利于测量范围的扩大；
- 节流件上、下游所要求的直管段较短；
- 有利于提高测量的灵敏度和准确度。

其缺点是：

- 压力损失较大，增加了动力损耗；
- 测量气体或蒸汽时， $\frac{\Delta p}{P_1}$ 较大，不利于提高测量精度。

选择合适的差压上限，可以根据现场情况分为以下几种：

a. 对压力损失、直管段长度无特别规定

取 $\beta = 0.5$ ， $C = 0.60$ ， 然后按下式计算差压上限：

$$\Delta p = \left(\frac{q_m \cdot \sqrt{1 - \beta^4}}{0.003999 \beta^2 D^2 C} \right)^2 \cdot \frac{1}{\rho_1}$$

并将计算结果圆整到较其大、但最接近的系列值上。

如果被测流体为气体，必须验证是否满足 $P_2 / P_1 \geq 0.75$ 的要求。若不满足，则应取较大的 β 值，然后重新计算，直至要求被满足。

b. 仅对允许的压力损失有特别规定

对标准孔板，取： $\Delta P_{\max} = (2 \sim 2.5)\delta_p$ ，并将结果圆整到较其小、但最接近的系列值上。

如果被测流体为气体，也必须验证是否满足要求 $P_2 / P_1 \geq 0.75$ 。若不满足，则应取较小倍数的压力损失作为差压上限值，直至满足要求。

c. 大量使用节流装置和差压显示仪表的情况

根据被测流体的工作压力高低（高、中、低）及允许的压力损失（大、中、小），选择差压的上限，尽量减少所使用的差压上限值种类，以减少仪表的备品备件，也便于维护和管理。

5. 计算节流件的开孔直径 d

a. 计算常用差压 Δp_{com} :

$$\Delta p_{com} = \left(\frac{q_{mcom}}{q_{mmax}} \right)^2 \cdot \Delta p_{max}$$

b. 求固定值

$$A_2 = \frac{q_{mcom}}{0.003999D^2 \sqrt{\Delta p_{com} \rho_1}}$$

c. 根据节流件不同, 求 β_0

d. 进行迭代计算, 求 β_n 。

求 $\varepsilon_n (n = 0, 1, 2 \dots)$

计算 $C_n (n = 0, 1, 2 \dots)$

计算 $\beta_n (n = 1, 2, 3 \dots)$

No

判断误差 $\beta_n - \beta_{n-1} < E = 0.0001$

Yes

结束迭代

e. 求 d 值。

$$d = \beta_n \cdot D$$

f. 验算流量

$$q'_{mcom} = 0.003999 \varepsilon_n \frac{C_n}{\sqrt{1 - \beta_{n+1}^4}} d^2 \sqrt{\Delta P_{com} \rho_1}$$

$$\delta_{q_m} = \frac{q'_{mcom} - q_{mcom}}{q_{mcom}} \times 100\% < \pm 0.2\%$$

g. 求 d_{20} 和加工公差 Δd_{20}

$$d_{20} = \frac{d}{1 + \lambda_d (t_1 - 20)} \quad \Delta d_{20} = \pm 0.05\% \cdot d_{20}$$

h. 求压损 δ_p
$$\delta_p = \frac{\sqrt{1-\beta^4} - C\beta^4}{\sqrt{1+\beta^4} + C\beta^4} \cdot \Delta p$$

i. 确定最小直管段长度 l_1 和 l_2 (查手册)

j. 估计流量测量的不确定度

六. 差压流量计主要特点

差压流量计应用范围广泛，可测量全部单相流体，包括液、气、蒸汽。可测量部分混相流，如气固、气液、液固等。差压流量计产品覆盖一般生产过程的管道直径，工作状态（压力和温度）。应用最普遍的标准孔板，结构易于复制，简单牢固，性能稳定可靠，使用期长，价格低廉。标准型检测元件得到国际标准化组织和国际法制计量组织的认可，无须实流校准即可投用。

差压流量计还存在一些缺点。测量的重复性，精确度在流量计中属中等水平，由于众多因素的影响，精确度提高比较困难。范围度窄，一般为3：1或4：1。现场安装条件要求较高，如需较长直管段长度（如孔板、喷嘴等），一般较难满足。检测元件与差压显示仪表之间的引压管线易产生泄漏、堵塞、冻结及信号失真等故障。压损大（指孔板、喷嘴等）。

七. 差压流量计的选用

选用标准节流装置无需个别校准。非标准节流装置原则上要校准后才能使用。

选用标准节流装置时，要注意每一种节流件皆有管道直径、直径比、雷诺数、管道内壁粗糙度等限制值。

孔板价格便宜，是首选类型。在同样差压下，经典文丘里管比孔板和喷嘴的压力损失要低4~6倍。经典文丘里管要求的上游侧最短直管段长度比孔板、喷嘴和文丘里喷嘴少得多。对腐蚀性流体或高速流体（如高压蒸汽），孔板入口边缘很快变钝，流出系数发生偏移，采用喷嘴、文丘里管。

由于喷嘴、文丘里管几何形状复制比孔板困难，未经校准的流出系数不确定度较大，如果采取实流校准则流出系数不确定度可减少。

正确选用节流装置类型考虑因素

- 1) 被测流体类型方面，是测液体、气体还是蒸汽？是洁净的还是脏污的？是否有腐蚀性或磨蚀性？
- 2) 被测流体压力、温度界限、密度、粘度等参数、是否脉动流等情况。
- 3) 检测件安装条件，如管道内径准确值、直管段长度、阻流件类型等。
- 4) 仪表性能要求，如精确度、范围度、重复性等。
- 5) 是用于计量还是自动控制。
- 6) 仪表安装和运行费用。

正确选择检测件类型

- 1) 脏污流用圆缺孔板、楔形孔板、偏心孔板。
- 2) 要求低压损，采用文丘里管或均速管。
- 3) 低雷诺数用 $1/4$ 圆孔板或锥形入口孔板。
- 4) 宽范围度用线性孔板。

注意防止测量误差

选用标准节流装置时必须严格遵循标准文件要求，
否则会造成较大的测量误差

八. 差压流量计的安装使用

安装注意事项

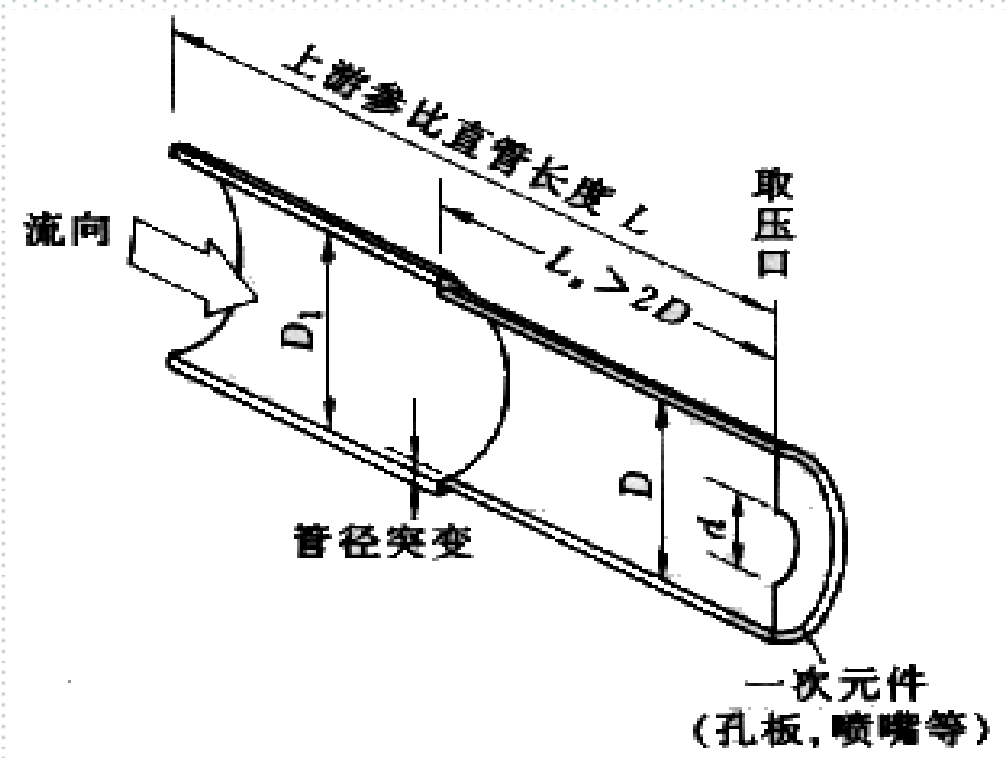
差压式流量计的安装要求包括管道条件、管道连接情况、取压口结构、节流装置上下游直管段长度以及差压信号管路的敷设情况等。

a. 测量管

测量管是指节流件上下游直管段。用于计算节流装置直径比的管道内径 D 值应为上游取压口的上游 $0.5D$ 长度范围内的内径平均值。直管段管道内表面在紊流状况下光滑管与粗糙管的流速分布是不一样的。对于新安装的管道应选用符合粗糙度要求的管道，如果达不到要求采取措施，如加涂层或进行机加工。在仪表长期使用后，由于测量介质特性（腐蚀，粘结，结垢等）作用，内表面可能发生改变，应定期检查进行清洗维护。

b. 节流件

节流件安装的垂直度、同轴度及与测量管之间的连接都有严格的规定。节流件应垂直于管道轴线。节流件应与管道或夹持环(采用时)同轴。节流件前后测量管的安装时离节流件 $2D$ 以外，节流件与第一个上游阻流件之间的测量管，可由一段或多段不同截面的管子组成。



c. 差压信号管路

差压信号管路是指节流装置与差压变送器(或差压计)的导压管路。差压流量计故障中导压管路引起的故障最多，如堵塞、腐蚀、泄漏、冻结、假信号等等，因此差压信号管路的安装很重要。

1) 取压口

取压口一般设置在法兰、环室或夹持环上，当测量管道为水平或倾斜时取压口的安装方向如图4-11所示。它可以防止测液体时气体进入导压管或测气体时液滴或污物进入导压管。当测量管道为垂直时，取压口的位置在取压位置的平面上，方向可任意选择。

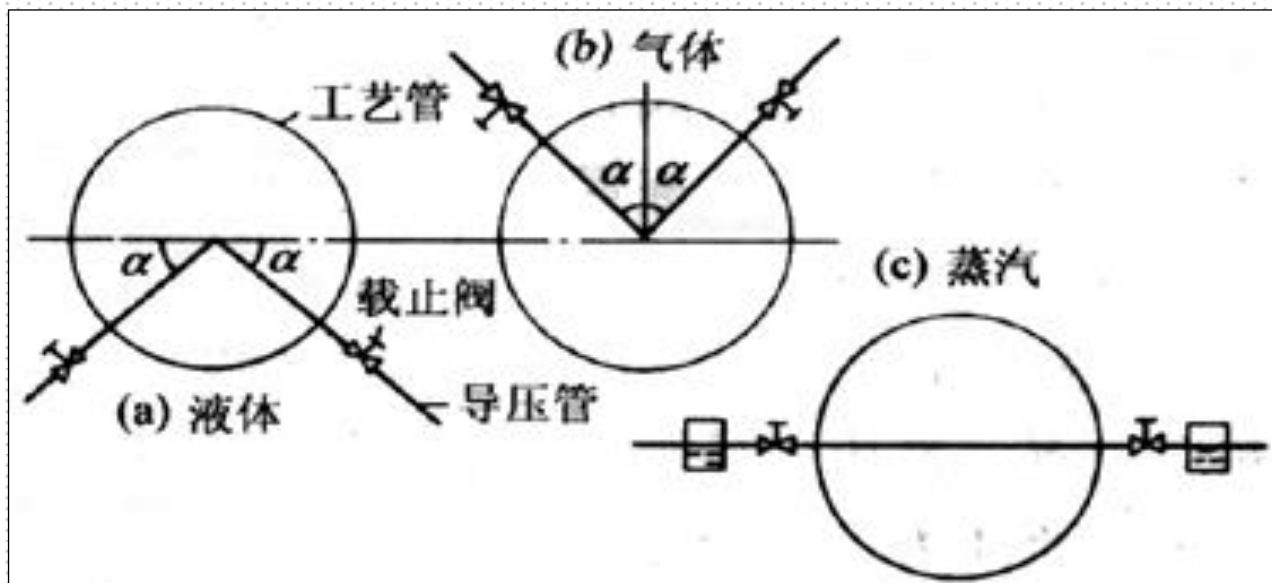


图4-11 取压口位置安装示意 ($\alpha \leq 45^\circ$)

2) 导压管

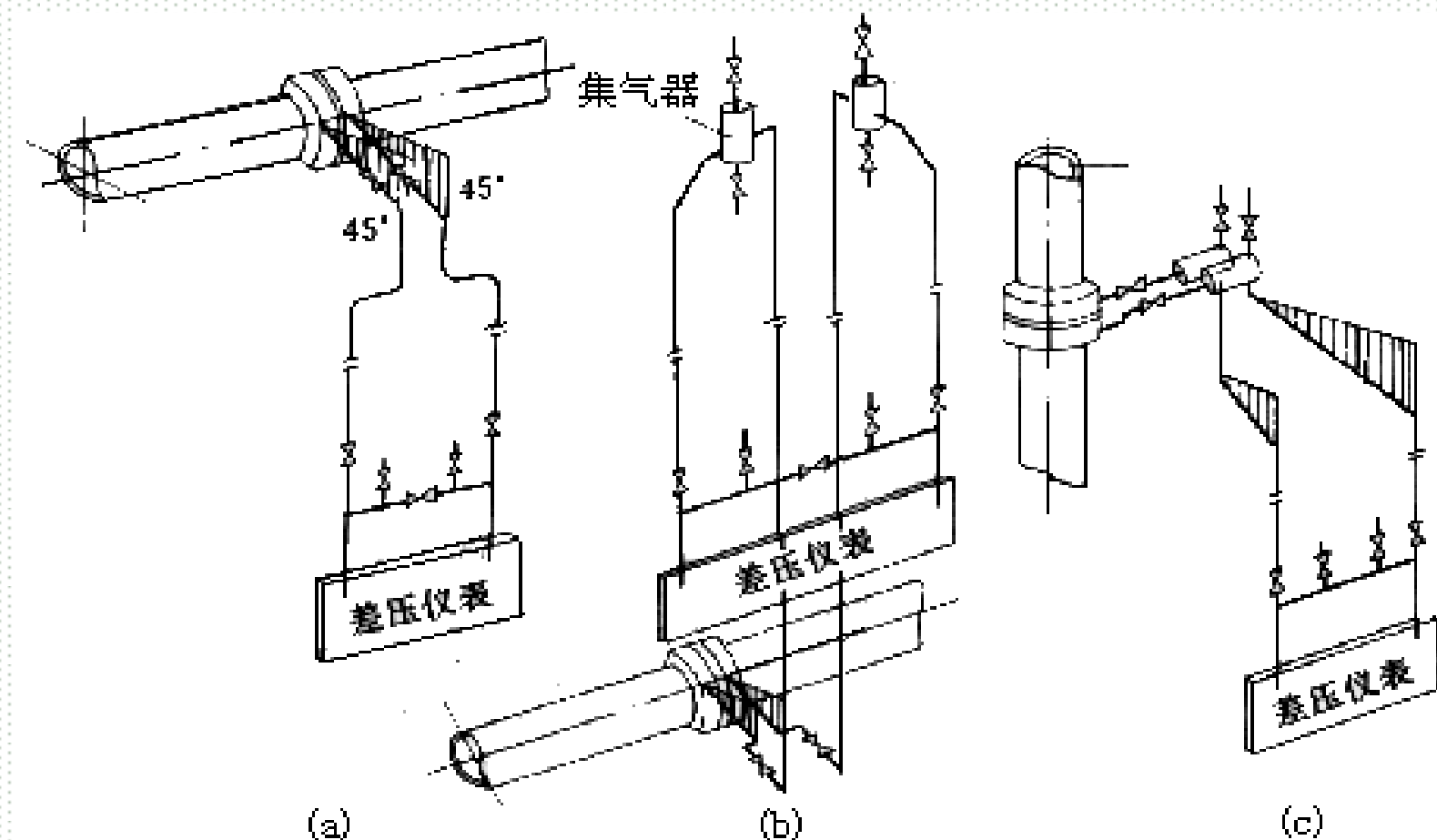
导压管的材质应按被测介质的性质和参数选用耐压、耐腐蚀材料制造。导压管应垂直或倾斜敷设，其倾斜度不小于1:12，粘度高的流体，其倾斜度应更增大。当导压管长度超过30m时，导压管应分段倾斜，并在最高点与最低点装设集气器（或排气阀）和沉淀器（或排污阀）。正负导压管应计量靠近敷设，防止两管子温度不同使信号失真，严寒地区导压管应加防冻保护，用电或蒸汽加热保温，要防止过热引起导压管中流体汽化，造成假差压。

导压管的内径和长度 mm

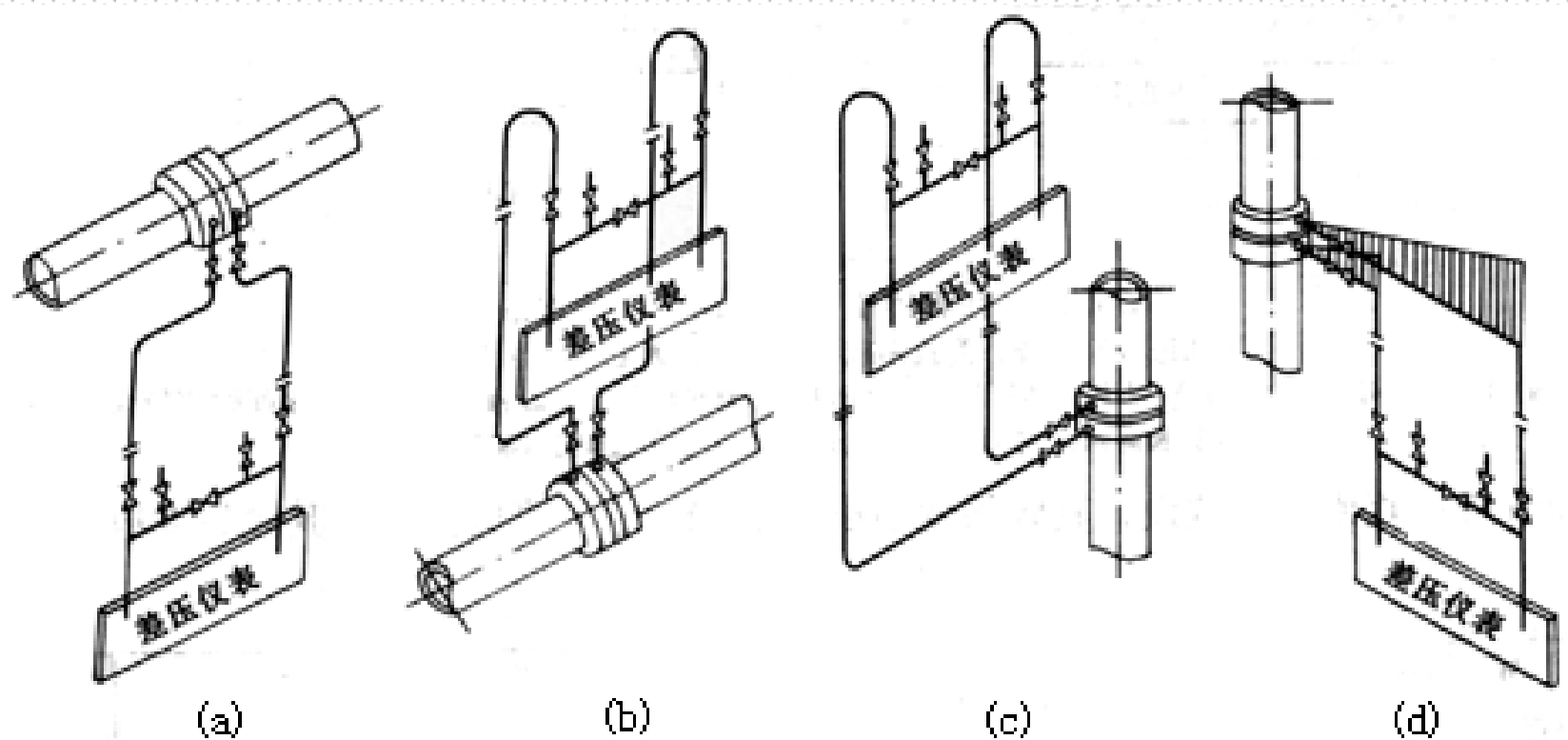
被测流体	导压管长度/mm		
	<16000	16000~45000	45000~90000
水、水蒸气、干气体	7~9	10	13
湿气体	13	13	13
低、中粘度的油品	13	19	25
脏液体或气体	25	25	38

3) 差压信号管路的安装

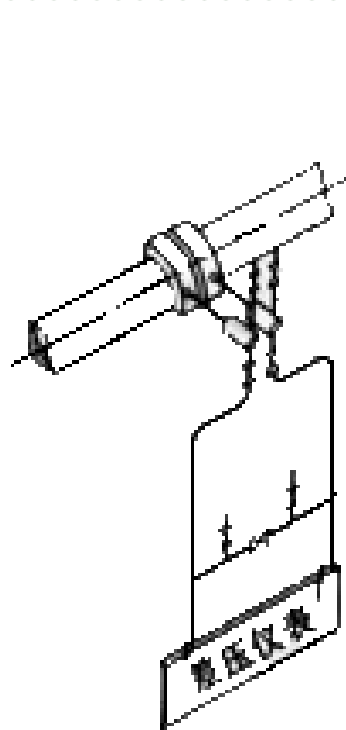
被测流体为清洁液体时



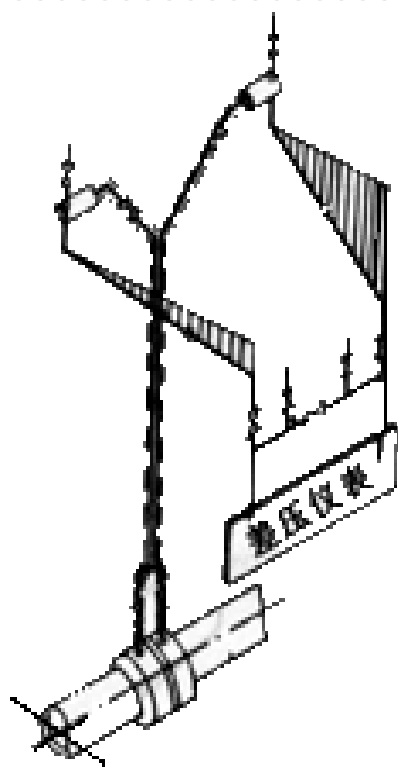
被测流体为清洁干气体时



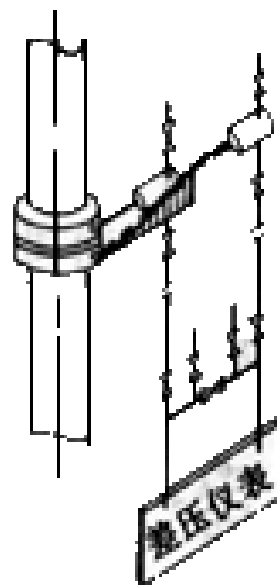
被测流体为水蒸气时



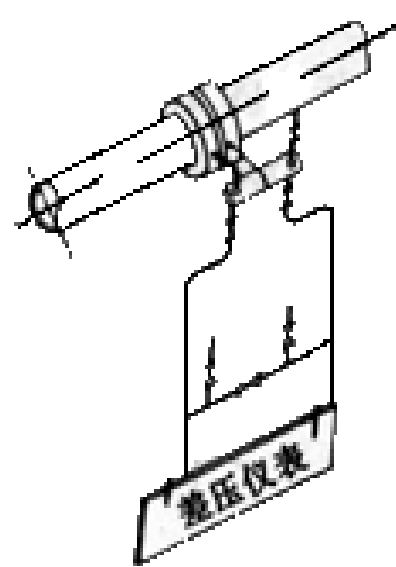
(a)



(b)

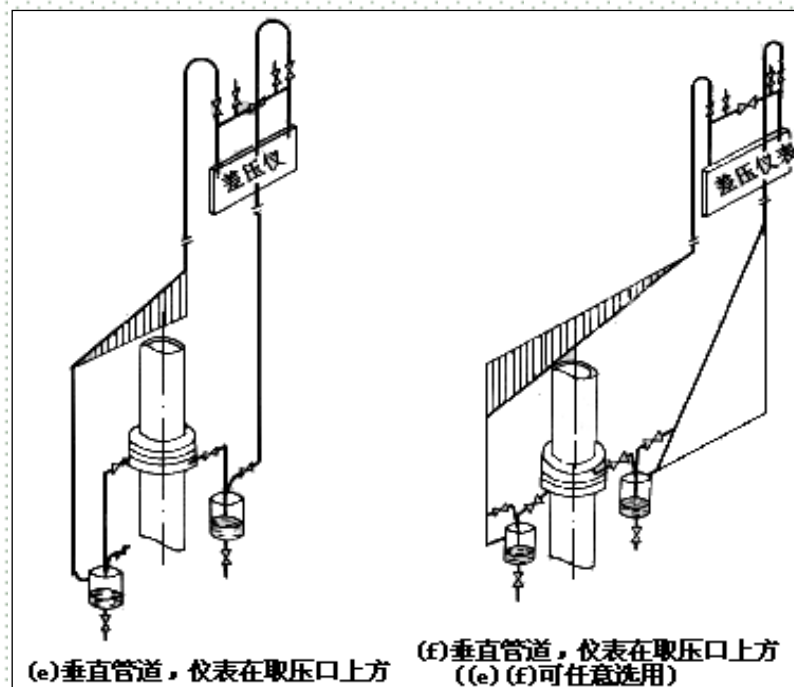
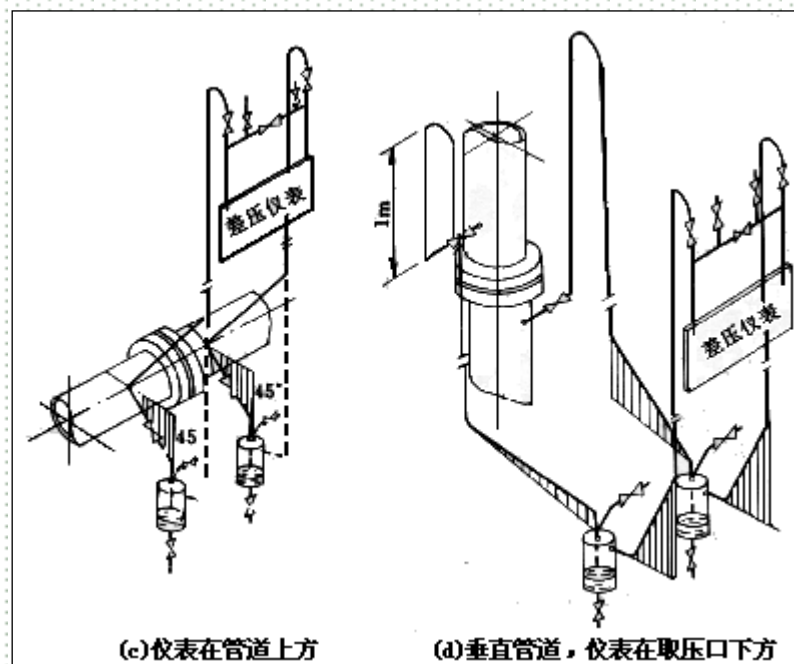
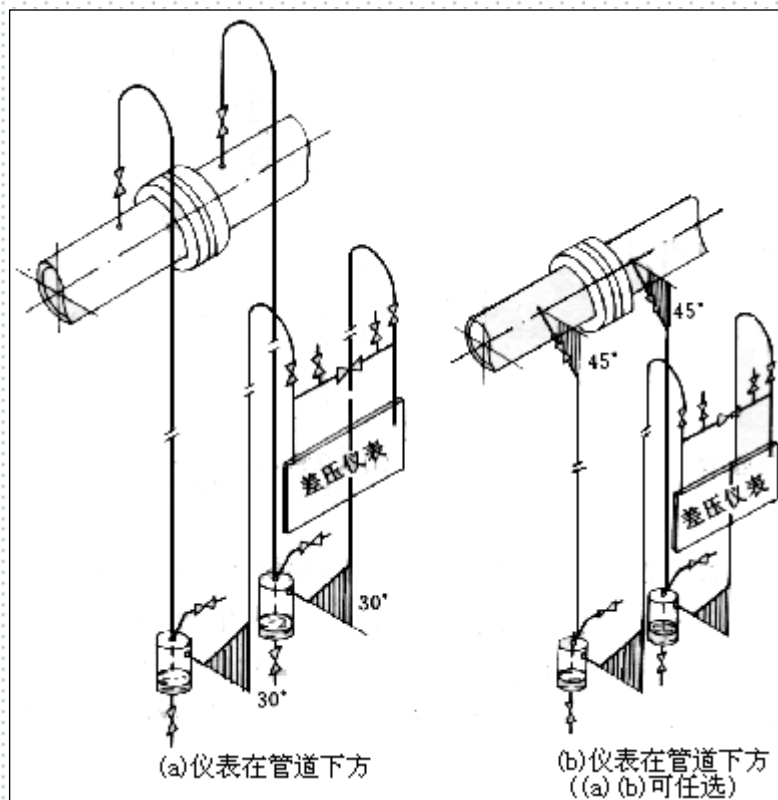


(c)



(d)

被测流体为清洁湿气体时



d. 辅助设备

差压信号管路的辅助设备包括截断阀、冷凝器、集气器、沉降器、隔离器、喷吹系统等。

靠近节流件和冷凝器的信号管路上要安装截断阀。

冷凝器的容积应大于全量程内差压仪表空间的最大容积变化的3倍。

在导压管的最高点上安装集气器或排气阀，以便定期收集和排出信号管路中的气体，尤其当差压仪表的安装高于主管道时。

在导压管的最低点应安装沉降器或排污阀，以便定期收集和排出信号管路中的积液。

对于高粘度、有腐蚀、易冻结、易析出固体物的被测流体，应采用隔离器和隔离液，使被测流体不与差压仪表接触，以免破坏仪表工作性能。

隔离器中隔离液的体积变化应大于差压仪表在全量程范围内工作空间的最大体积变化。正负压隔离器应装在垂直安装的导压管上，并有相同高度。应确定隔离器中隔离液的最高液面和最低液面位置。

使用注意事项

差压流量计标准规定的工作条件在现场要完全满足比较困难，要估计偏离标准的程度，如果能进行适当的补偿（修正）是最好的，否则要加大估计的测量误差。

节流装置安装在现场长期运行后，无论管道或节流装置都会发生一些变化，如堵塞、结垢、磨损、腐蚀等等。要定期检查。

在节流装置设计计算任务书中的使用条件在仪表投用后发生变化，使被测介质的物性参数发生变化，这时要及时检查工艺参数，对仪表进行修正或采取一些措施，如更换节流件，调整差压变送器量程等。

4.2.2 电磁流量计

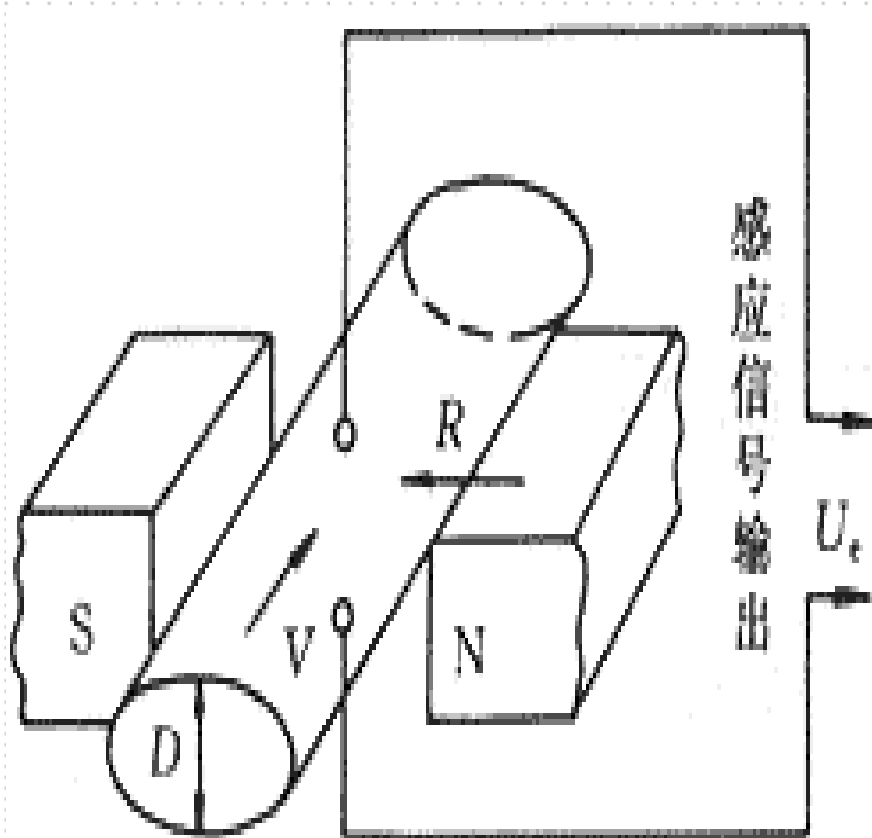
- 在炼油、化工生产中，有些液体介质是具有导电性的，因而可以应用电磁感应的方法来测量流量。
- 常用的电磁感应式测量仪表是根据法拉第电磁感应定律来测量流量的电磁流量计。



测量原理：

在磁感应强度为 B 的均匀的磁场中，垂直于磁场方向有直径为 D 的管道。管道由不导磁材料制成，内表面有绝缘衬里。

当导电的液体在管道中流动时，切割磁力线，从而在与磁场以及流动方向垂直的方向上产生感应电动势 E_x ，其方向可用右手定则判定。



感应电动势的大小为：

$$e = BD\bar{u}$$

则流体的体积流量为：

$$q_v = \frac{\pi D^2}{4} \bar{u} = \frac{\pi D e}{4B}$$

可见，流体的体积流量与电极上产生的感应电势的大小成比例。测量出感应电势，即可测量出流体的体积流量。

电磁流量计的特点：

- 测量精度为 1%；
- 量程比为100：1；
- 压力损失较小；
- 可测量含有颗粒、悬浮物等流体的流量；
- 几乎不受工况变化的影响；
- 只能测量导电液体的流量。

使用电磁流量计应注意的问题：

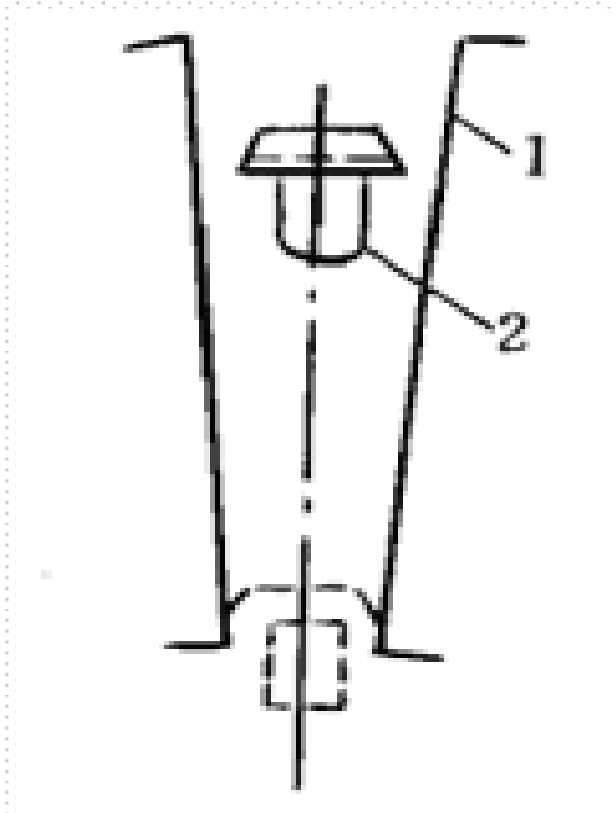
- 安装位置；
- 输出信号微弱，容易受到干扰；
- 安装地点应远离磁源；
- 转换器和二次仪表使用电源中的同一相线；
- 清洁保养

4.2.3 转子流量计

转子流量计又称浮子流量计，主要用于中小口径流量测量，可以测液体、气体、蒸汽等，产品系列规格齐全，得到广泛的应用。

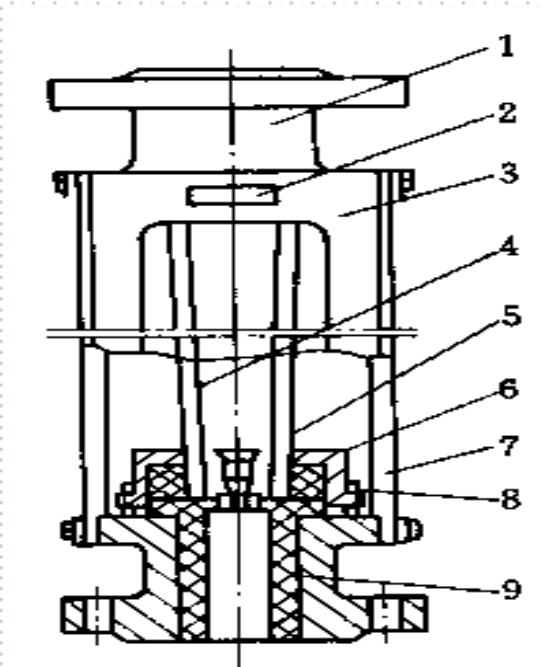
工作原理

根据转子在锥形管内的高度来测量流量。利用流体通过转子和管壁之间的间隙时产生的压差来平衡转子的重量，流量越大，转子被托得越高，使其具有更大的环隙面积，也即环隙面积随流量变化，所以一般称为面积法。它较多地利用于中、小流量的测量，有配以电远传或气远传发信器的类型。



转子流量计分类

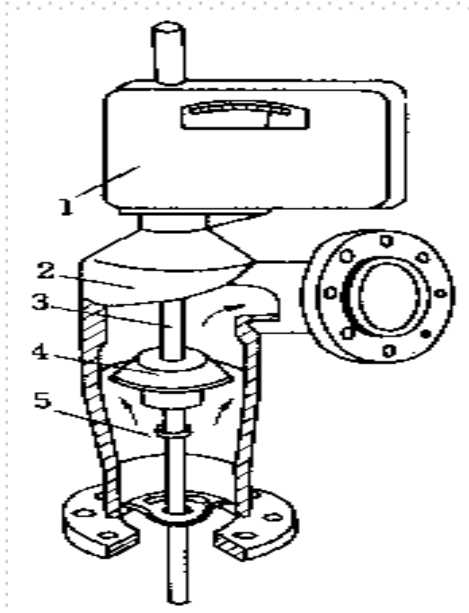
■ 透明材料锥管



1——基座；2——标牌；3——防护罩；4——透明锥形管；
5——转子；6——压盖；7——支承板；8——螺钉；9——

衬套

■ 金属锥管



1——转换部分；2——传感部分；3——导杆；
4——转子；5——锥形管部分

转子流量计的主要特点

- 转子流量计适用的被测流体种类多，在小、微流量测量领域中应用最多。
- 对上游直管段长度要求不高。
- 宽范围度，一般为10:1。
- 输出特性近似为线性，压力损失较低。
- 玻璃管转子流量计结构简单，价格便宜，多用于现场就地指示。
- 金属管转子流量计可以用在高温高压场所，并且有标准信号输出，但价格较贵。
- 使用流体和出厂标定流体不一致时，要进行流量示值修正。
- 一般校准流体液体为水，气体为空气，现场被测流体密度与粘度有变化时要进行流量示值修正。

转子流量计的选用与安装

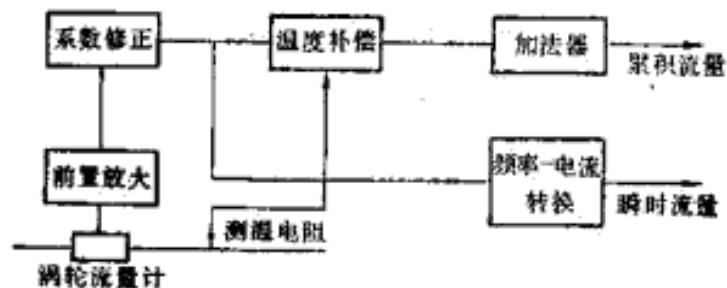
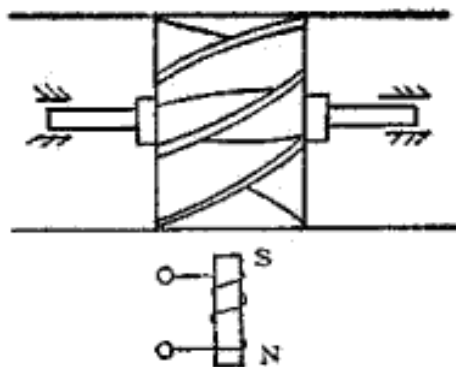
- 转子流量计可以作为直观流动指示或测量精确度要求不高的现场指示仪表使用，主要解决小、微流量测量。测量的对象主要是单相液体或气体。
 - 如果需要远传输出信号作流量控制或总量积算，一般选用电远传金属管转子流量计。
 - 如环境要求防爆则选用气远传金属管转子流量计或者防爆型电远传金属管转子流量计。
 - 测量温度高于环境温度的高粘度液体和降温易析出结晶或易凝固的液体，应选用带夹套的金属管转子流量计。
- 转子流量计垂直安装在无振动的管道上，流体自下而上流过仪表。
 - 测量污脏流体时应在仪表上游安装过滤器。
 - 如果流体本身有脉动，可加装缓冲罐。
 - 如仪表本身有振荡，可加装阻尼装置。
 - 要排尽液体用仪表内气体。

4.2.4 涡轮流量计

- 涡轮流量计采用多叶片的转子感受流体的平均流速，从而推导出流量或总量。转子的转速（或转数）可用机械、磁感应、光电检测方式检出并由读出装置进行显示和传送记录。
- 在全部流量计中，涡轮流量计与容积式流量计及科里奥利质量流量计为三大类重复性、准确度最好的流量计。
- 广泛应用于石油、有机液体、无机液、液化石油气、天然气、低温液体等。

涡轮流量计原理

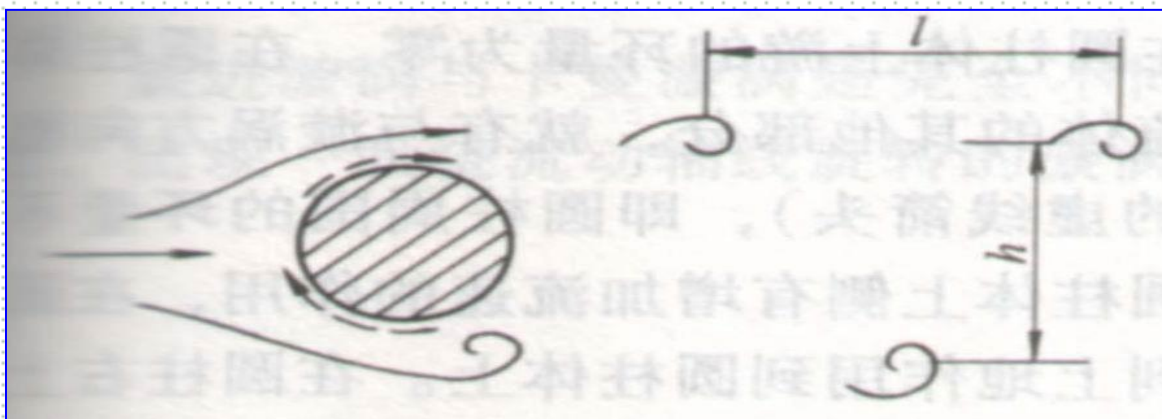
- 在管道中心安放一个涡轮，两端由轴承支撑。
- 当流体通过管道时，冲击涡轮叶片，对涡轮产生驱动力矩，使涡轮克服摩擦力矩和流体阻力矩而产生旋转。
- 在一定的流量范围内，对一定的流体介质粘度，涡轮的旋转角速度与流体流速成正比。
- 涡轮的转速通过装在机壳外的传感线圈来检测。当涡轮叶片切割由壳体内永久磁钢产生的磁力线时，就会引起传感线圈中的磁通变化。传感线圈将检测到的磁通周期变化信号送入前置放大器，对信号进行放大、整形，产生与流速成正比的脉冲信号，送入单位换算与流量积算电路得到并显示累积流量值；同时亦将脉冲信号送入频率电流转换电路，将脉冲信号转换成模拟电流量，进而指示瞬时流量值。



4.2.5 涡街流量计

应用卡曼旋涡的测量原理：

如图所示，在流体前进的路径上放置一个非流线型的物体（例如圆柱体），若流体处于某一雷诺数范围内，将在柱体的后面两侧交替产生有规律的旋涡（卡曼旋涡）。实验证明，当满足 $\frac{h}{l} = 0.281$ 时，涡列是稳定的（卡曼在理论上证明了该结论）。



实验证明，单侧旋涡产生的频率 f 与流速 u 和圆柱体直径 d 之间的关系为：

$$f = S_t \frac{u}{d}$$

S_t ——斯特罗哈尔系数
(无量纲), 在一定的雷诺
数范围内近似常数

因此，流量与旋涡产生的频率的关系为：

$$q_v = A \cdot u = A \cdot \frac{d}{S_t} \cdot f$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \left(1 - 1.25 \frac{d}{D}\right)$$

旋涡发生体处的流通截面积

可见，流体的体积流量与旋涡产生的频率成比例。测量出旋涡的频率，即可测量出流体的体积流量。

4.2.6 超声流量计

- ❖ 利用声波在**静止流体**中的传播速度与**流动流体**中的**传播速度**不同的原理。由于声波的传播速度与流体的流速有关，因而可以通过测量声波在流动介质中的传播速度来求出流速和流量。
- ❖ 通常，测量流量的声波频率都在16kHz以上，故称为超声波流量计。

测量方法

— 时差法

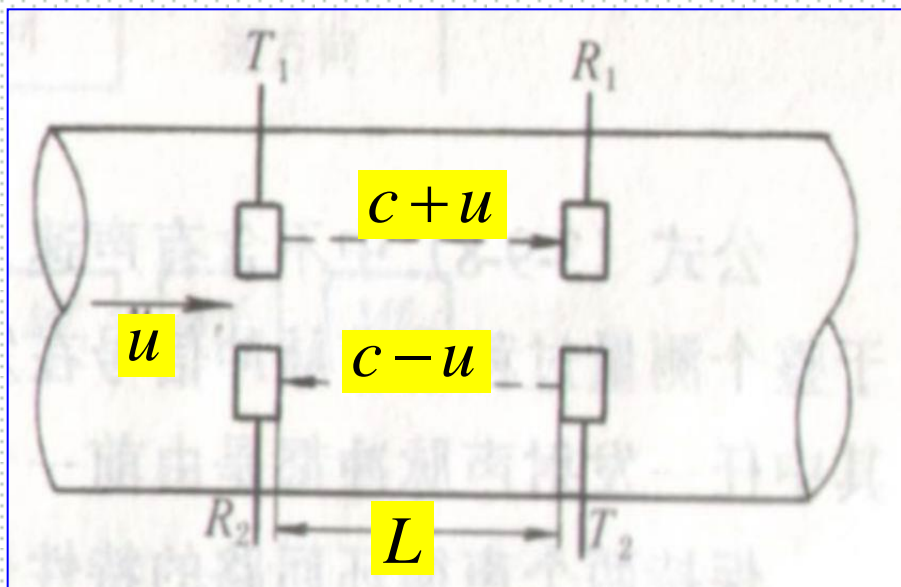
— 相位法

— 频率法

— 多普勒效应法



时差法测量原理:



c ——声波在静止流体中的传播速度;

u ——流体的流速;

L ——传播的距离

$c + u$ ——顺流时的声波速度;

$c - u$ ——逆流时的声波速度;

T_1, T_2 ——声波发生器;

R_1, R_2 ——声波接受器

两个超声波发生器发出声波之后，两个接收器分别经过不同的时间接收到声波。

$$t_1 = \frac{L}{c+u} \text{ (顺流)} \quad t_2 = \frac{L}{c-u} \text{ (逆流)}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L \cdot 2u}{c^2 - u^2} \approx \frac{2L}{c^2} \cdot u \quad (c \gg u)$$

则流体的体积流量为：

$$q_v = A \cdot u = A \cdot \frac{c^2}{2L} \cdot \Delta t$$

可见，流体的体积流量与接收器接收到声波的时差成比例。测量出时差，即可测量出流体的体积流量。

超声波流量计的特点：

- 无接触测量，不妨碍流体的流动状态；
- 可以测量高粘度的液体、非导电介质以及气体流量；
- 流量计前需要一定长度的直管段。

4.2.7 容积式流量计

测量原理：

- 通过测量元件把流体连续不断地分割成固定体积的单元流体，然后根据测量元件的动作次数给出流体的体积总量 V ，即：

$$V = n \cdot V_o$$

其中 V_o 为计量室容积; n 为计数值

容积式流量计的种类

转子式
刮板式
活塞式
其他形式

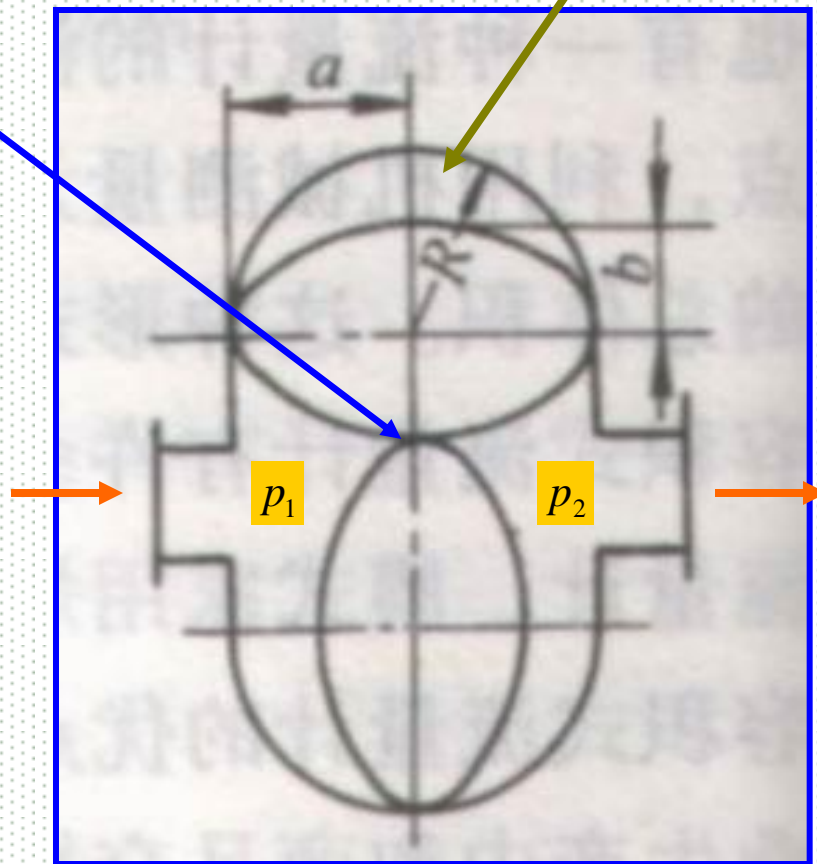
椭圆齿轮流量计
腰轮流量计
双转子流量计
螺杆流量计

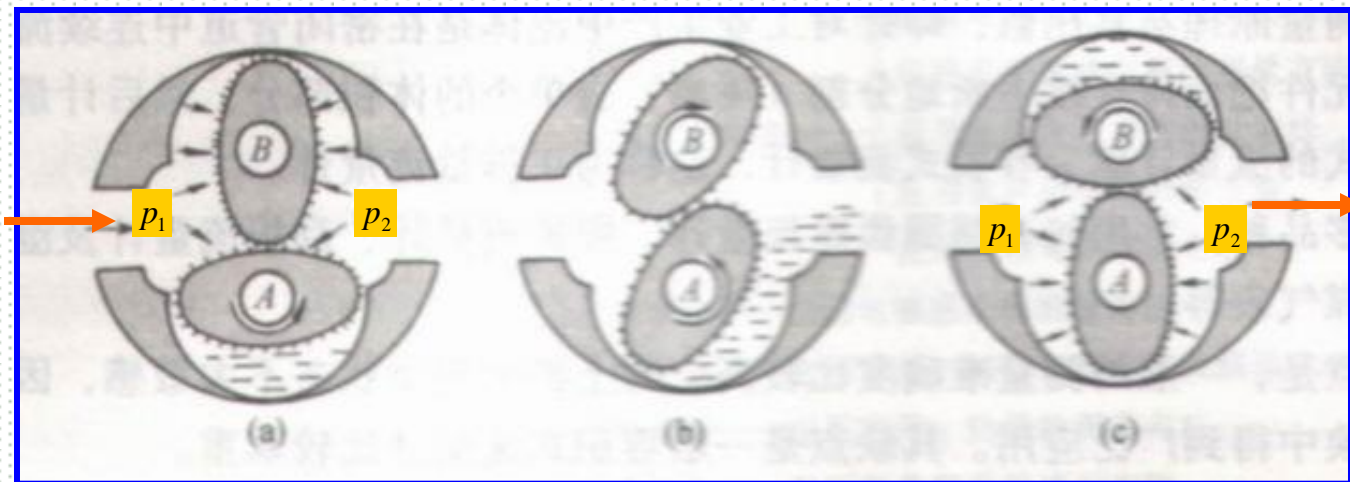
椭圆齿轮流量计

两个互相啮合的椭圆形齿轮可绕各自的轴旋转，两个齿轮所处位置不同时，分别起主、从动轮作用。

两端压差推动齿轮旋转，将充满在齿轮与壳体之间所形成的半月形计量室中的流体排出。

半月形计量室





在图(a)的位置，由于 $p_1 > p_2$ ，**轮A受到逆时针的转矩**，而轮B虽受到 p_1 和 p_2 的作用，但合力矩等于零。于是轮A是主动轮，带动轮B转动，将外壳与轮A之间半月形计量室内的流体排入下游。

当齿轮转到图(b)的位置时，**轮A受逆时针力矩，轮B受顺时针力矩**，两齿轮在 p_1 和 p_2 的作用下继续转动。

当齿轮转到图(c)的位置时，与图(a)时类似，但此时轮B为主动轮，轮A为被动轮。而且上游流体又被封入轮B与外壳之间形成的半月形计量室。

可见，椭圆齿轮每转一周两个齿轮共送出四个标准体积的流体，即流体的总量与齿轮的转数成正比：

$$V = 4 \cdot n \cdot V_o$$

其中 n 为椭圆齿轮的转数
 V_o 为半月形计量室的容积

容积式流量计的特点：

- 较高的测量精度，一般为0.2—0.5级；
- 较宽的量程范围，一般在1:10以上；
- 对被测介质的粘度要求较低；
- 对仪表前的直管段长度无严格要求；
- 成本高、重量大；
- 维护不方便。

4.3 质量流量计

在工业生产中，常常需要知道质量流量的大小，如计算物料平衡、热平衡，或经济核算时。如果测量的是体积流量，就需要乘上密度来加以换算。由于流体的密度是随温度、压力而变化的，因此要准确测量质量流量，就必须同时测量温度和压力，以求取准确的密度值。

质量流量计可以直接测量出质量流量。

质量流量的基本方程式为：

$$q_m = \rho \cdot u \cdot A$$

A ——管道的流通截面积,通常为常数

测量质量流量的方式主要有两种：

直接式——直接检测出与 $\rho \cdot u$ 成比例的信号（如 $\rho \cdot q_v$ ）

推导式——分别检测出密度 ρ 和流速 u ，在仪表中相乘之后输出。

除了以上两种方式外，还有一种方式是采用温度、压力补偿的方法，即对各种体积式流量计进行温度和压力的修正，最后计算出质量流量。

这种方式适用于检测温度和压力变化较小、且服从理想气体定律的气体，或密度与温度成线性关系的液体。

一. 直接式质量流量计

直接式质量流量的测量方法：

1. 差压式测量方法；
2. 角动量式测量方法；
3. 热量式测量方法；
4. 科氏力测量方法。

1. 科氏力流量计

科里奥利力：

根据理论力学, 质点在**旋转参照系**中做**直线运动**时, 将同时受到旋转角速度和直线速度的作用, 即受到科里奥利力 (Coriolis, 简称科氏力) 的作用。

- **科氏力质量流量计**是20世纪80年代出现的质量流量计，是利用**流体在振动管中流动时能产生与流体质量流量成正比的科里奥利力**的原理制成的。
- **科氏力质量流量计**的特点是：可以测量双向流；没有轴承、齿轮等转动部件；测量管道中无插入部件；测量精度为 $\pm 0.15\%$ ，适用于高精度的流量测量。
- **科氏力质量流量计**的测量管道形状：U形；环形；直管形；螺旋形。



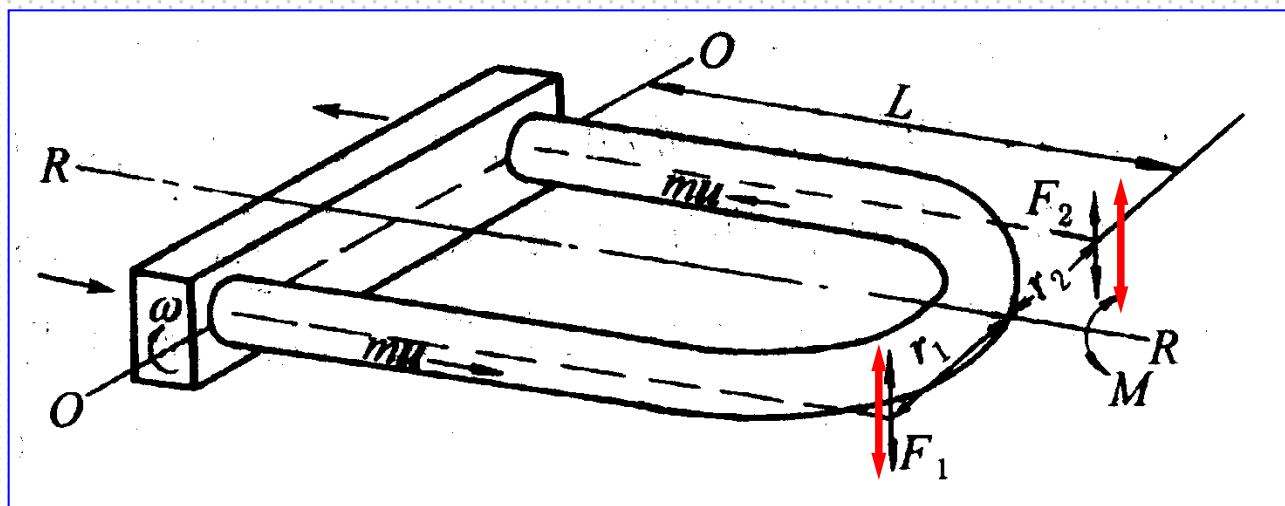
科氏力流量计的测量原理:

- 传感器的测量主体为U形管，两个开口端固定，流体由此流入和流出；
- U形管顶端装有电磁装置，激发U形管以O-O为轴、按固有的自振频率、垂直于U形管所在平面**振动**；
- 流体在直线运动速度 u 和旋转运动角速度 ω 的作用下，对管壁产生一个反作用力（科氏力） F ：

$$F = 2m\omega u$$

m --- 流体的质量;

F, ω, u --- 向量



注意到：

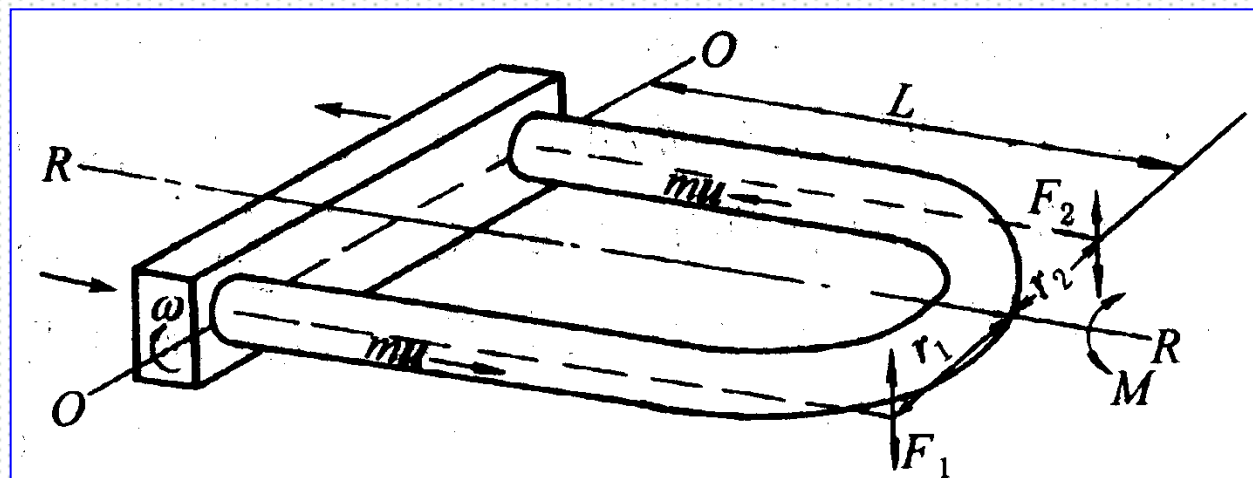
- 流体越靠近U形管管端，由于振动越大而在垂直方向的速度也越大（即具有加速度）；
- 由于入口侧与出口侧的流向相反，流体作用于U形管两侧的力大小相等、方向相反，使得**U形管产生扭曲运动**（绕R-R轴扭曲）；
- 扭力矩的大小为：

$$F = 2m\omega u$$

$$M = F_1 r_1 + F_2 r_2 = 2Fr = 4m\omega ur = 4\omega r L q_m$$

$$q_m = m/t$$

$$u = L/t$$



U型管的弹性模量

- 由U形管的刚性作用所形成的反作用力矩为：

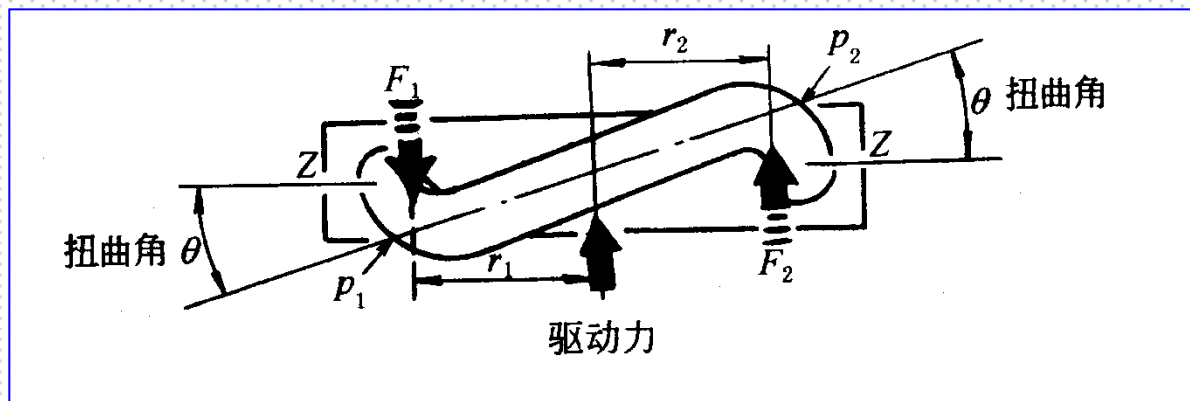
$$T = K_s \theta$$

$$M = 4\omega r L q_m$$

$$\therefore T = M$$

$$\therefore q_m = \frac{K_s}{4\omega r L} \theta$$

即质量流量的大小与U形管的扭曲角成正比。



- 另外也可以由传感器测出U型管两侧中心平面的时间差 Δt ，它与质量流量的关系式为

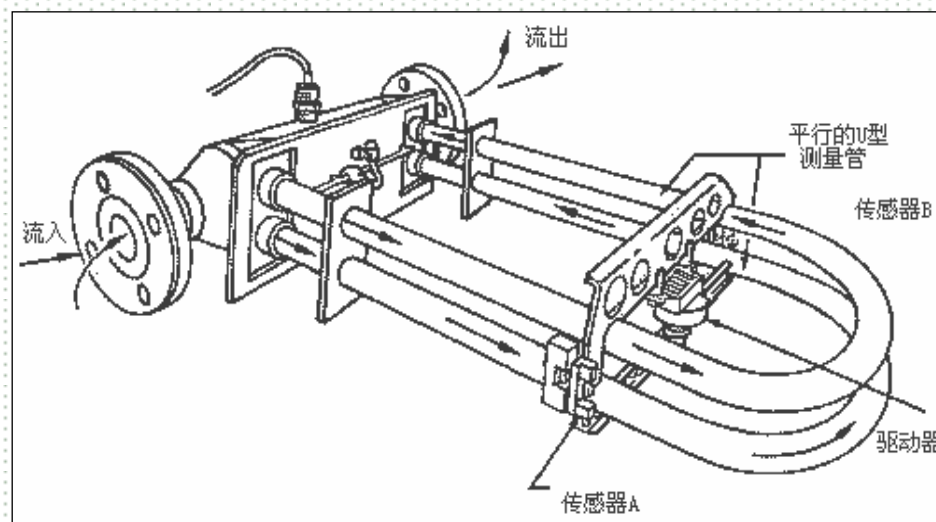
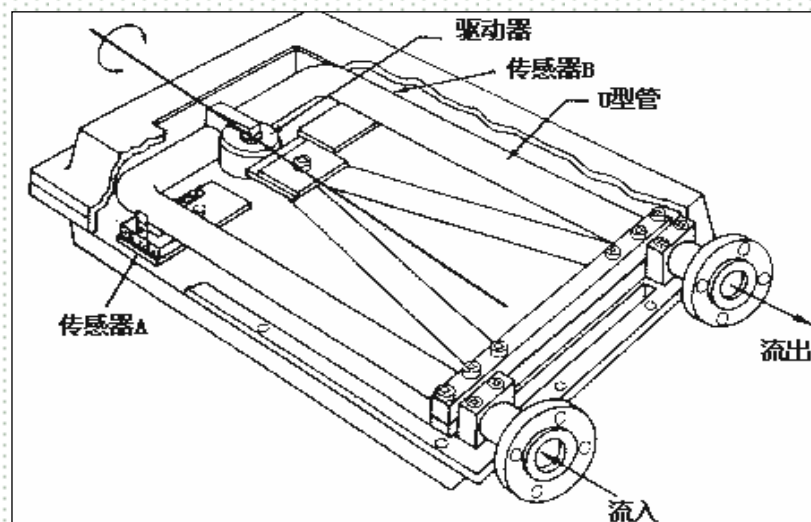
$$q_m = \frac{K_s \theta}{8\gamma^2} \Delta t$$

科氏力流量计分类

- 按用途分类，可分为液体用和气体用；
- 按测量管形状分类，有弯管型、直管型；
- 按测量管段数等分类，有单管型、双管型。

科氏力流量计结构

- 按用途分类，可分为液体用和气体用；
- 按测量管形状分类，有弯管型、直管型；
- 按测量管段数等分类，有单管型、双管型。



科氏力流量计特点

- 可以直接测量质量流量，不受流体物性（密度、粘度等）影响，测量精度高。
- 测量值不受管道内流场影响，无上、下游直管段长度的要求。
- 可测量各种非牛顿流体以及粘滞的和含微粒的浆液。
- 可作多参数测量，如同期测量密度、溶液中溶质所含浓度。
- 影响测量精度因素较多，如零点不稳定形成零点漂移；管路振动；测量管路腐蚀与磨损、结垢等。
- 不能用于低密度气体的测量，液体中含气量较大会影响测量值。
- 阻力损失较大。

科氏力流量计的选用注意事项

- 大部分科氏力流量计只适合测量液体，如果要测量气体，须明确在什么工况下使用。
- 对被测液体的粘度适应性范围宽，从低粘度的液化石油气到高粘度原油和沥青液，适用于非牛顿流体和液固双相流体，如乳胶、悬浮高岭土液、巧克力、肉糜浆等。
- 用于混相流测量时，气液混合物中气泡小且分布均匀，以及液固混合物中含少量固体杂质是可以应用的。
- 要注意游离气体的排出，注意测量管的磨损和堵塞。

科氏力流量计安装使用注意事项

- 1) 由于测量管形状和结构设计的差异，同一口径相近流量范围不同型号的流量计尺寸和重量差别很大。
- 2) 注意安装姿势和位置，要使测量管内充满液体，避免测量管内残留固形物、滞留气体等。
- 3) 科氏力流量计上下游设置截止阀，并保证无泄漏。控制阀应装在流量计下游，流量计保持尽可能高的静压，以防止发生气蚀和闪蒸。
- 4) 注意现场脉动和振动频率是否接近科氏力流量计的共振频率，可通过设置脉动衰减器等措施。
- 5) 科氏力流量计法兰与管道法兰连接旋紧螺栓时要均匀，避免产生应力。
- 6) 定期监测、清洗测量管道，尤其是强磨蚀性浆液测量管。
- 7) 注意零点漂移和调零。调零必须在安装现场进行，流量传感器排尽气体，充满待测流体后再关闭上下游阀门，在接近工作温度的条件下调零。

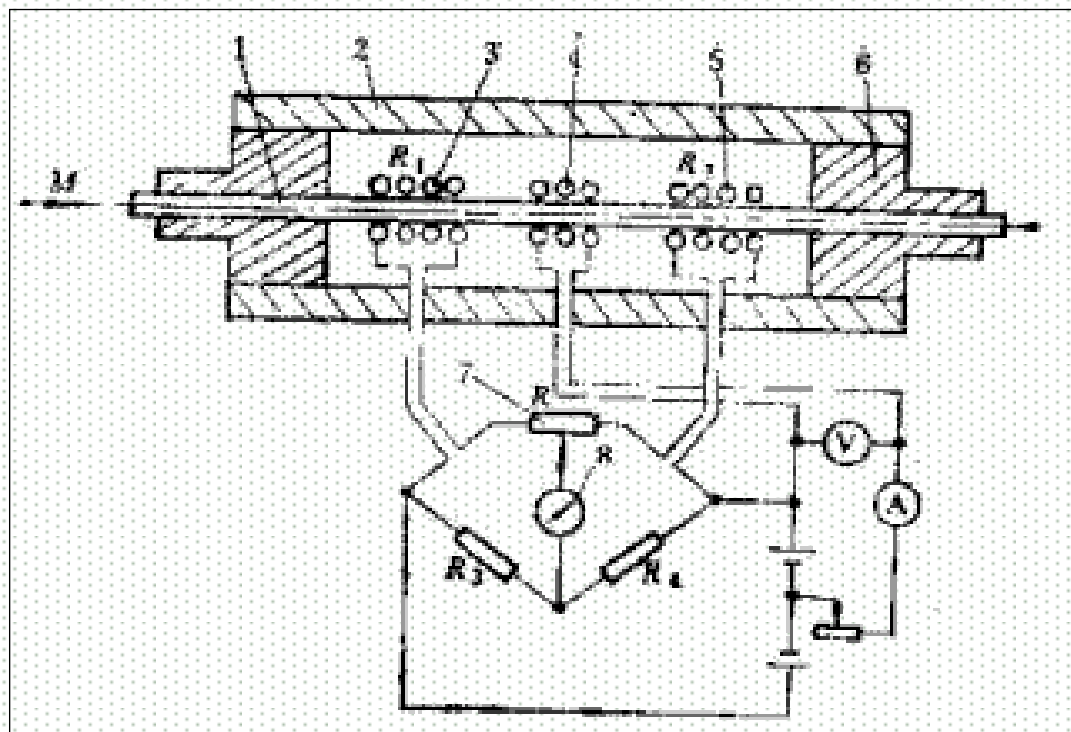
2. 热式质量流量计

利用传热原理检测流量的仪表，即根据流动中的流体与热源（流体中外加热的物体或测量管外加热体）之间热量交换关系进行测量。

主要测量气体，有两大类，即热分布式和浸入式（或插入式）。

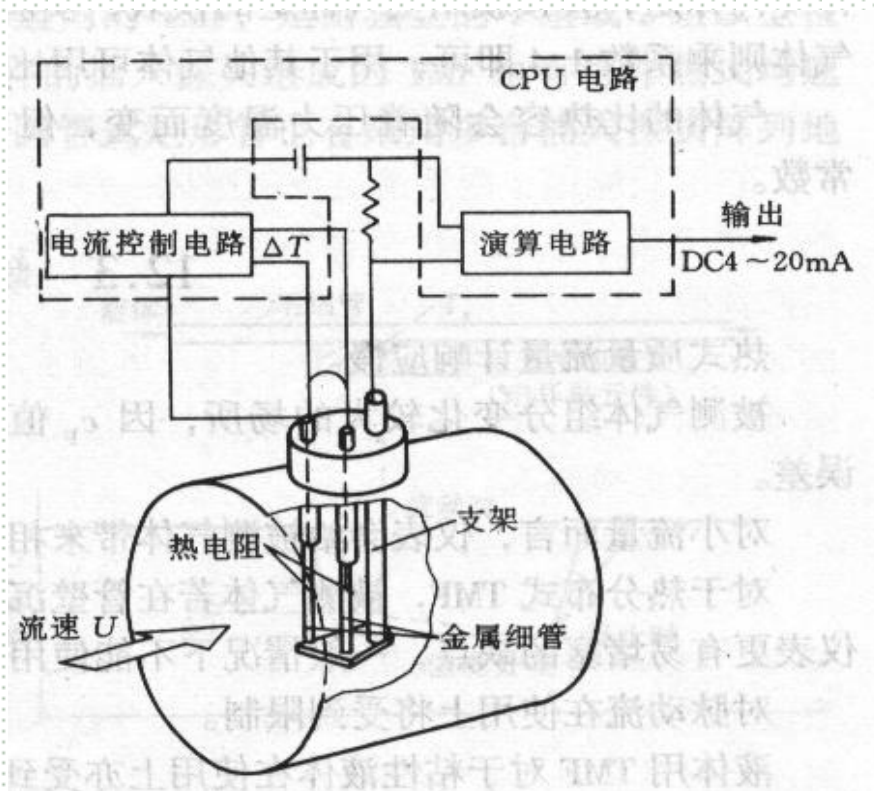
(1) 热分布式质量流量计

- 加热及测温元件都置于流体管道外，与被测流体不直接接触。



(2) 浸入式热式质量流量计

- 两温度传感器（热电阻）分别置于两金属细管内，一根用于测量气体温度，另一根加热。当气体流过检测件时，该温度将随气流流速而变。



(3) 热式质量流量计特点

■ 1) 热分布式质量流量计

- 直接测量质量流量无需温压补偿；非接触式，无活动部件，无阻流件，压力损失小，可靠性高；可测量低流速微小气体流量，最低5ml/min（标准状态）；要求气体介质干燥洁净，不含水分、油等杂质；分流型可获线性特性，可用于测量大、中气体流量，使用时要保证分流比恒定；动态响应慢，时间常数5秒左右。

■ 2) 浸入式热式质量流量计

- 直接测量质量流量无需温压补偿；无活动部件，可靠性高；适用于大口径、非圆截面管道、现场空间狭窄处测量（插入式）；检测件为带不锈钢外壳的铂电阻传感器，对于气体中的粉尘、固体颗粒、油分、水分不敏感。插入式可以不断流取出维修更换。可用于测量脏污流体测量。

(4) 热式质量流量计的选用

- 1) 针对小、微量气体流量，热分布式质量流量计可用于单一组分气体或固定比例的混合气体测量。
- 2) 大口径流量测量中可选用插入式金氏律热式质量流量计。

(5) 热式质量流量计安装使用注意事项

- 1) 安装姿势方面，大部分热分布式的质量流量计可任何姿势（水平、垂直或倾斜）安装，只要在安装好后在工作条件压力、温度下作电气零点调整，但是有些仪表则对安装姿势敏感，必须严格按说明书进行。大部分浸入式热式质量流量计性能不受安装姿势影响，但是在低流速时要严格按说明书进行进行。
- 2) 前置直管段方面，热分布式不敏感，而带测量管的浸入式流量传感器和插入式仪表需要一定长度前置直管段，按制造厂家建议值设置。
- 3) 连接热式质量流量计的管道在常见范围内的振动不会产生振动干扰。而插入式热式质量流量计的检测杆必须固定于管道并避开振动场所。
- 4) 热式质量流量计响应时间长，不适用于脉动流。

三. 间接式质量流量计

- 间接（推导）式质量流量计由可连续测量流体密度的**密度计**（如同位素式、超声波式和振荡管式密度计）和测量流体体积流量的**流量计**所组成，**对两信号加以运算后**，得到仪表的输出信号。
- 由于测量流体体积流量的流量计各不相同，因此流量计和密度计有几种不同的组合方式：
 1. ρq_v^2 **流量计和密度计的组合方式**
 2. q_v **流量计和密度计的组合方式**
 3. ρq_v^2 **流量计和 q_v 流量计的组合方式**

1. ρq_v^2 流量计和密度计的组合方式

有些流量计的测量结果与 ρq_v^2 值成正比：

节流式流量计： $q_v = K \cdot \sqrt{\Delta p / \rho}$

则： $\Delta p = K_1 \cdot \rho q_v^2$

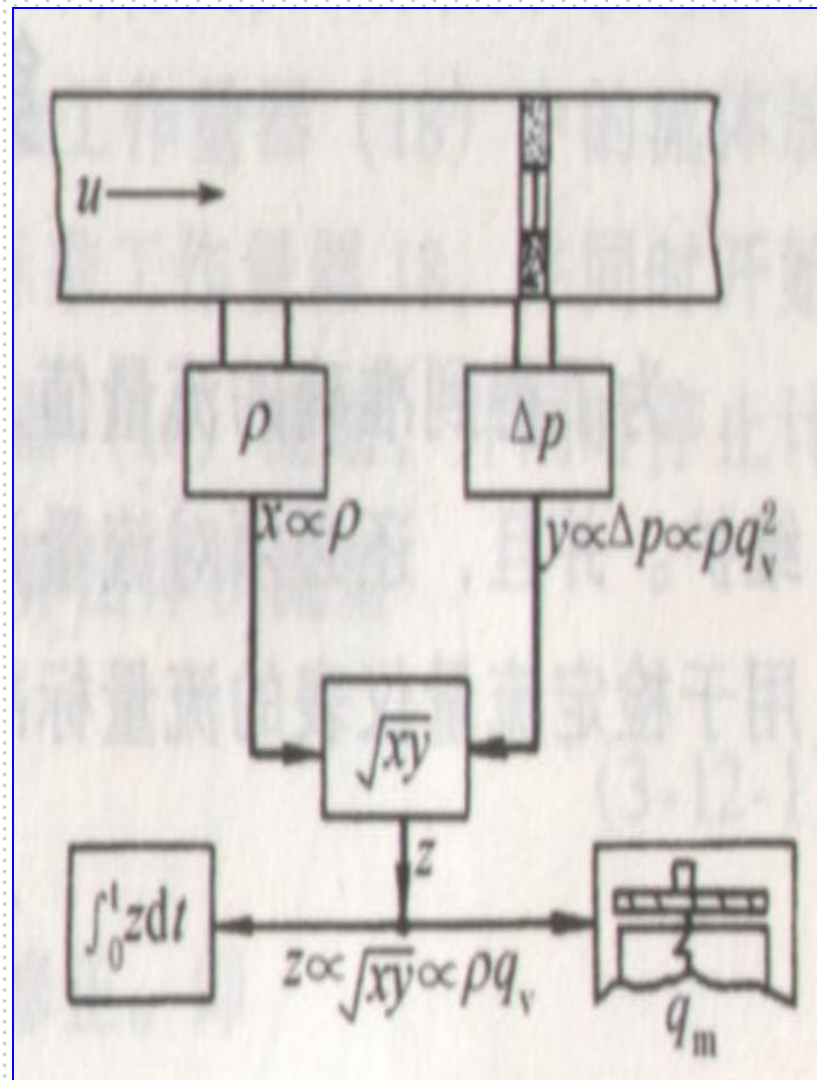
靶式流量计： $q_v = K \sqrt{F / \rho}$

则： $F = K_1 \cdot \rho q_v^2$

在图中，**密度计**连续测量流体的密度，其输出 x 正比于密度 ($x \propto \rho$)；**节流式流量计**测量孔板两端的压差，其输出 y 正比于差压信号 ($y \propto \Delta P \propto \rho q_v^2$)

在乘法器中，将 x 和 y 相乘后再开方，其输出为 z ，正比于质量流量，即：

$$\begin{aligned} z &= \sqrt{x \cdot y} \\ &= \sqrt{(K_1 \rho q_v^2) \cdot (K_2 \rho)} \\ &= K \cdot \rho \cdot q_v = K \cdot q_m \end{aligned}$$



2. q_v 流量计和密度计的组合方式

一些流量计的测量结果与体积流量值成正比，如容积式流量计、涡轮流量计、电磁流量计、旋涡流量计等。

涡轮流量计：

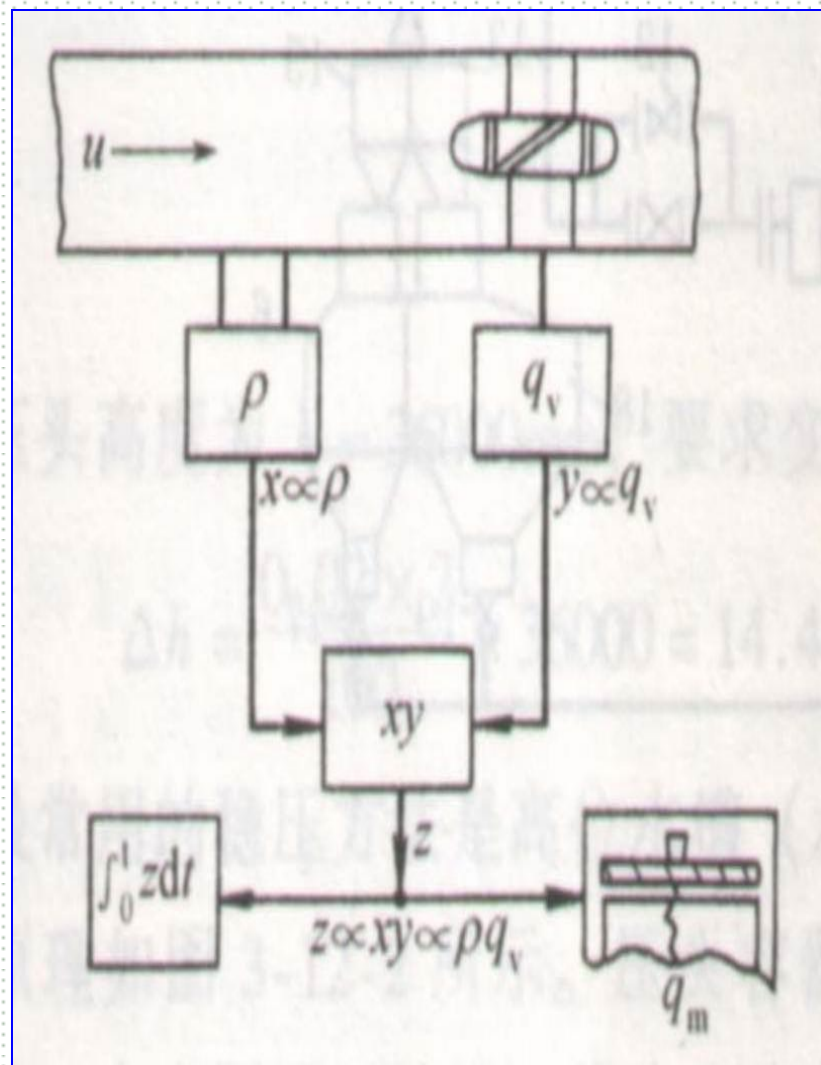
$$\omega = \frac{K_1 \cdot \tan \theta}{A \cdot r} \cdot q_v = K \cdot q_v$$

密度计的输出 x 正比于密度
($x \propto \rho$) ; **流量计**的输出 y
正比于体积流量 ($y \propto q_v$) 。

在乘法器中, 将 x 和 y 相乘后,
其输出 z 就正比于质量流量,
即:

$$\begin{aligned} z &= x \cdot y \\ &= (K_1 \cdot \rho) \cdot (K_2 \cdot q_v) \\ &= K \cdot \rho \cdot q_v \end{aligned}$$

注意到, 有些流量计的输出为
脉冲信号 (如涡轮流量计),
则应转换成连续的电信号
(f/V) 后, 才能进行相乘的
运算。



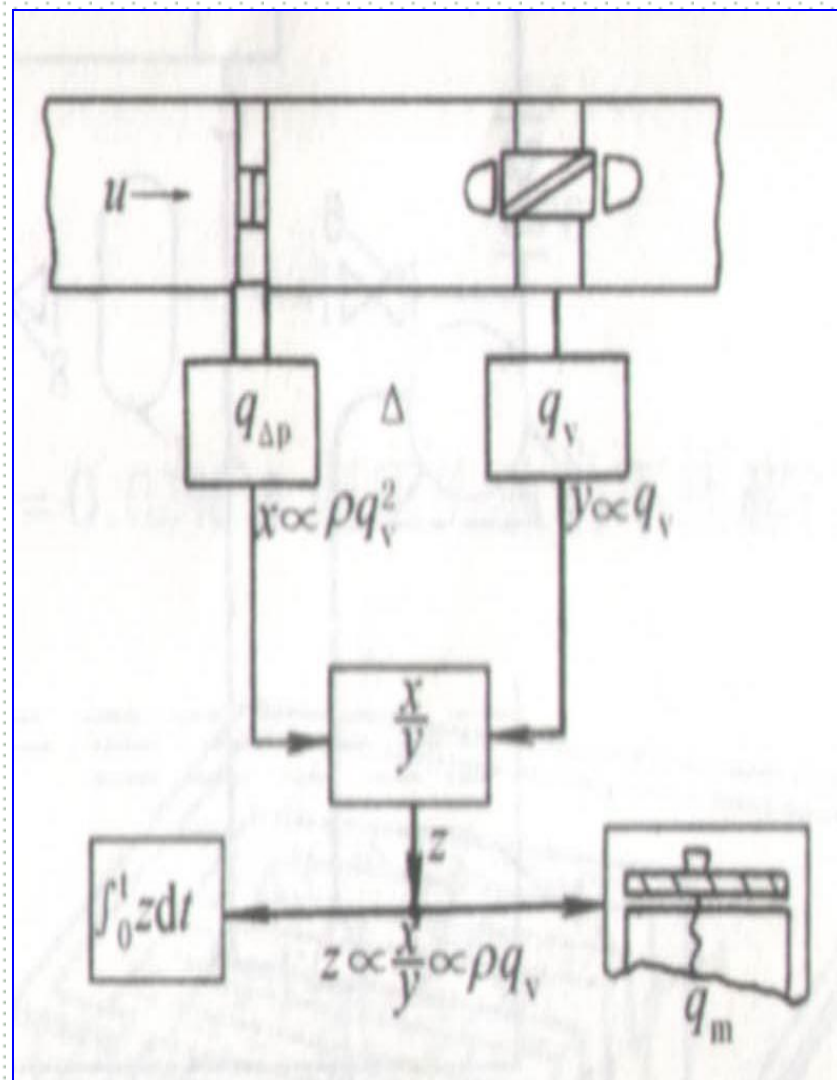
3. ρq_v^2 流量计和 q_v 流量计的组合方式

- 这种方法不需要使用密度计，而是同时用两种体积流量计进行测量，并对结果加以运算，求得质量流量。

在管道中同时放置两种流量计（节流流量计和涡轮流量计）。
 差压流量计的输出信号 x 正比于差压信号（ $x \propto \Delta P \propto \rho q_v^2$ ），
 涡轮流量计的输出信号 y 正比于体积流量（ $y \propto q_v$ ）。

在乘法器中，将 x 和 y 相除后，其输出 z 就正比于质量流量，即：

$$z = \frac{x}{y} = \frac{K_1 \cdot \rho \cdot q_v^2}{K_2 \cdot q_v} = K \cdot \rho \cdot q_v$$



END