

第六章 流体流量的测量方法

6.1 概述

瞬时流量：单位时间内流动介质流经管道中某截面的数量。

累积流量：瞬时流量在某一段时间内的累积值。

体积流量： q_v ，单位 m^3/s ，

$$q_v = \int_A v dA \quad \text{若流体在该截面上的流速处处相等 或平均速度} \quad q_v = vA$$

质量流量： q_m ，单位 kg/s ，

$$q_m = \int_A \rho v dA \quad \text{若流体在该截面上的密度和流速处处相等} \quad q_m = \rho v A = \rho q_v$$

流体的体积受流体的工作状态影响，在用体积流量表示时，必须同时给出流体的压力和温度。

1、体积流量

①直接法：以排出流体固定体积数来计算流量。

主要有：椭圆齿轮流量计、旋转活塞式流量计、刮板流量计等。

受流体的流动状态影响较小，适用于测量高黏度、低雷诺数的流体。

②间接法：先测流速，再求流量。

a. 节流式流量计：节流件前后的差压一流速

b. 电磁流量计：导电流体产生的感应电势一平均流速

c. 转子流量计：转子的高度一流体流量

d. 涡街流量计：旋涡释放的频率一流速

e. 涡轮流量计：涡轮转速一流速

f. 超声波流量计：声速在流动流体中的传播速度变化一流速

g. 速度式流量计：平均流速

2、质量流量

①直接法：直接反映质量流量。

科里奥利力检测方法

②间接法：分别测出相应参数，通过运算获取质量流量。

a. ρq_v^2 和 ρ 组成

b. q_v 和 ρ 组成

c. ρq_v^2 和 q_v 组成

6.2 容积式流量测量方法

一 **工作原理**：如果使流体以固定的、已知大小的体积 V 逐次从流量计中排放流出，则计数单位时间内排放次数就可以求得通过仪器的体积流量。这就是容积法的工作原理：

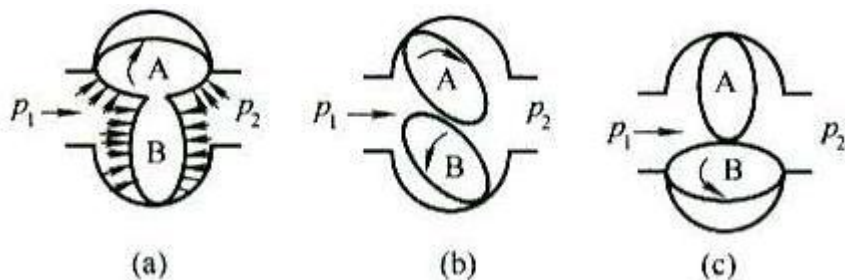
固定容积 V_0 ，活动壁转动次数 n  $Q_v = nV_0$

二 **常用的容积流量计及具体工作原理**：

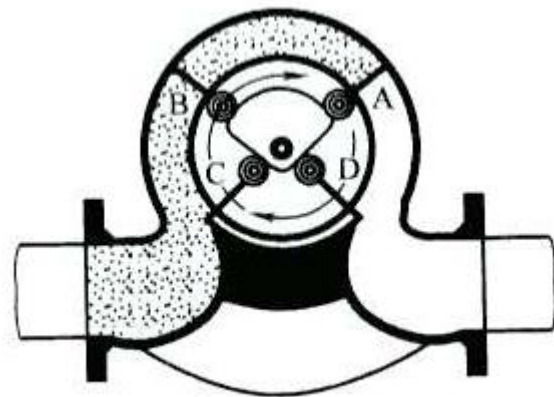
标准体积管、椭圆齿轮流量计，腰轮流量计，刮板式流量计，湿式气体流量计等

三、容积式流量计的工作特性

与流体的黏度、密度以及工作温度、压力等因素有关。



椭圆齿轮流量计



凸轮式刮板流量计

误差原因：活动壁与壳体内壁间的间隙产生流体的泄漏

在相同的流量下，流体黏度越低越容易泄漏，误差越大。

四、容积式流量计的特点

- ◆ 测量准确度较高，可达 $\pm 0.1\% \sim 0.5\%$ ，量程比一般为10:1；
- ◆ 适宜测量黏度较高的流体；
- ◆ 安装方便，对仪表前、后直管段长度无要求；
- ◆ 对仪表制造、装配的精度要求高，传动机构较复杂；
- ◆ 要求被测介质干净，在流量计前安装过滤器；
- ◆ 常用的测量口径10~150mm。

6.3 速度式流量测量方法

一 **工作原理**：直接测量管道内流体的速度测流量。如测得是平均流速 \bar{v} ，则容积流量 $q_v = \bar{v}A$ ，如测得是某点流速 v ，则体积流量 $q_v = KvA$ ， K 为平均流速与被测点流速的比值。

1) **注意事项**：因使用平均流速，故其测量结果的准确度不仅与仪表本身有关，而且与截面上的流速分布情况有关。因此在测量仪表前后有足够长的直管段或加装整流器。

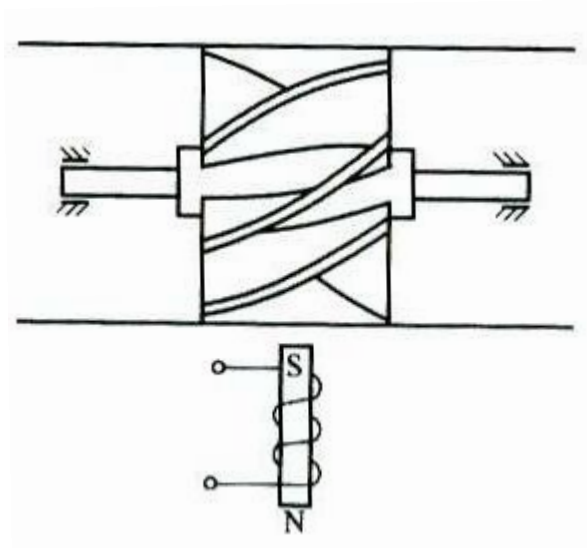
2) 要充分了解被测流体的速度分布。

二常用种类

涡轮式，电磁式，超声波式，热式和差压式。

1、涡轮流量计

涡轮的转速 \rightarrow 流量
 \downarrow
电脉冲



涡轮流量计原理

当流量较小时，受摩擦阻力矩影响，非线性

当流量 q_v 大于某一数值后，涡轮角速度 ω 与 q_v 近似线性

涡轮流量计特点：

- ◆ 测量准确度较高，可达**0.5**级以上；
- ◆ 反应迅速，可测脉动流量；
- ◆ 流量与涡轮转速之间成线性关系，量程比一般为**10:1**，主要用于中小口径的流量检测。



叶轮式风流速、流量计

（参考北京北方大河仪器仪表有限公司资料）



2、漩涡流量计（涡街）

1) 检测原理

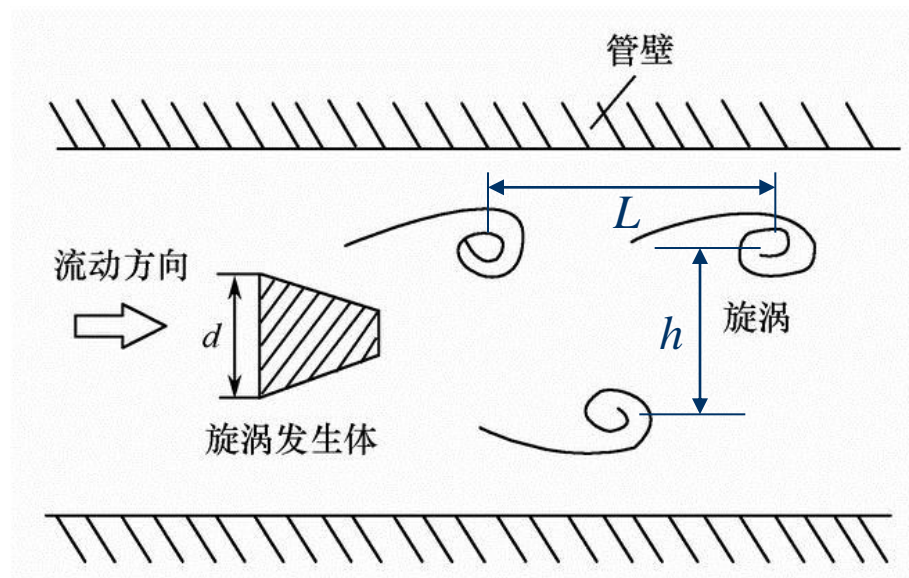
实验证明，只有满足 $h/l=0.281$ 时，卡门涡街才是稳定的，有

$$f = St \frac{v}{d}$$

在雷诺数为**500~15000**内时，斯特劳哈尔数 **St** 近似定值

流体的体积流量与漩涡频率的关系为

$$q_v = vA_0 = \frac{\pi D^2 m d}{4St} f = \frac{f}{K}$$



卡门涡列形成原理

仪表系数 **K** 与漩涡发生体、管道的几何尺寸、斯特劳哈尔数有关。

2) 涡街流量计结构

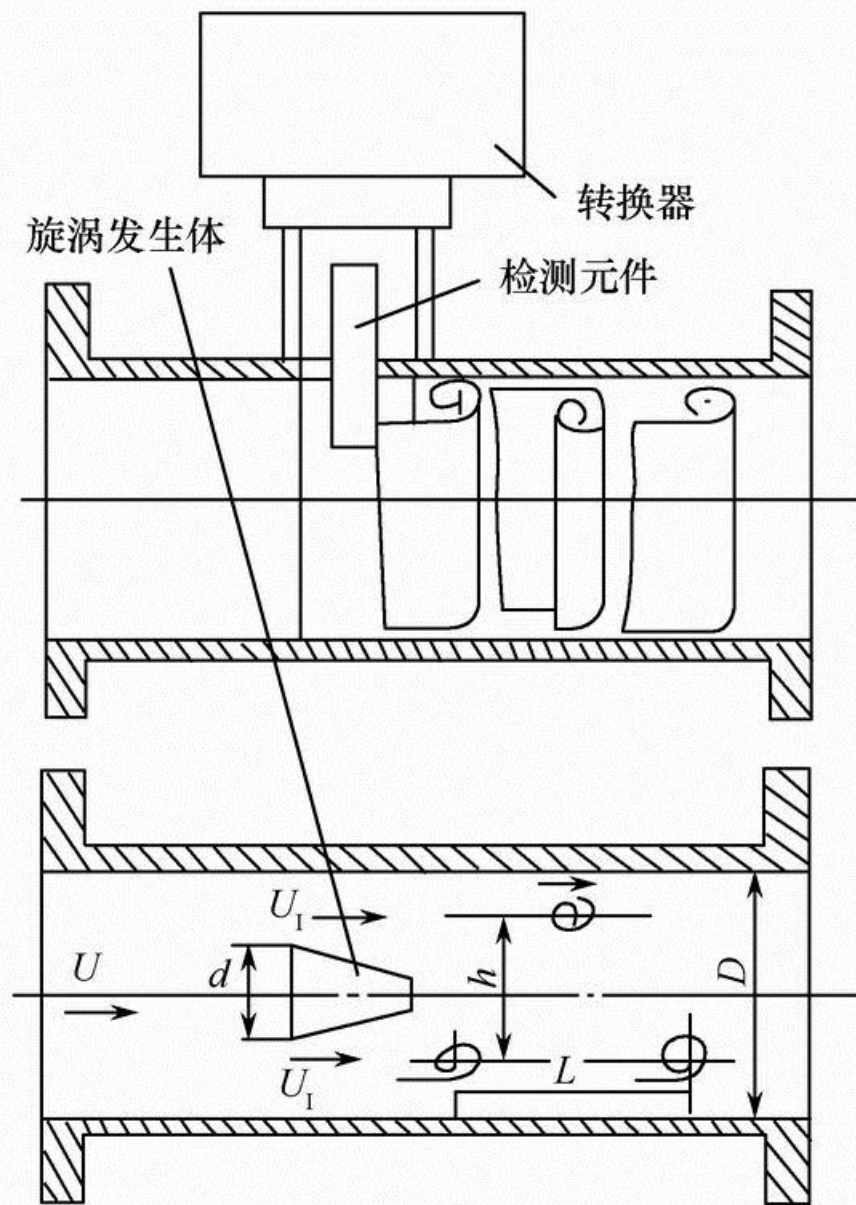
涡街流量计=传感器+转换器

◆ 传感器

- 旋涡发生体（阻流体）
- 检测元件
- 仪表表体

◆ 转换器

- 前置放大器
- 滤波整形电路
- **D / A**转换电路
- 输出接口电路、端子、支架和防护罩



涡街流量传感器

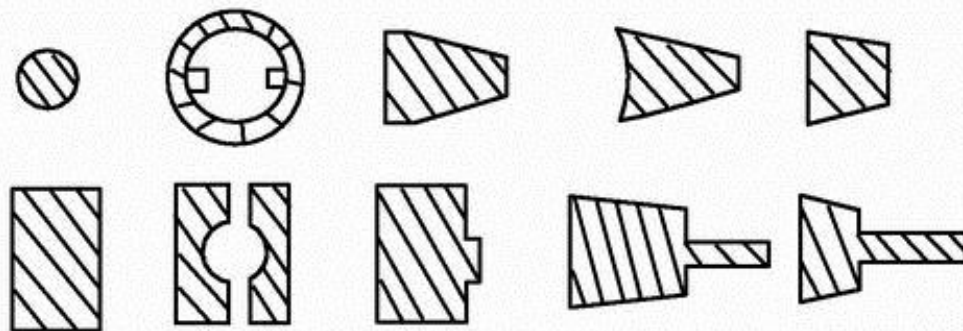
温度补偿传感器

挂壁式电池供电积算仪

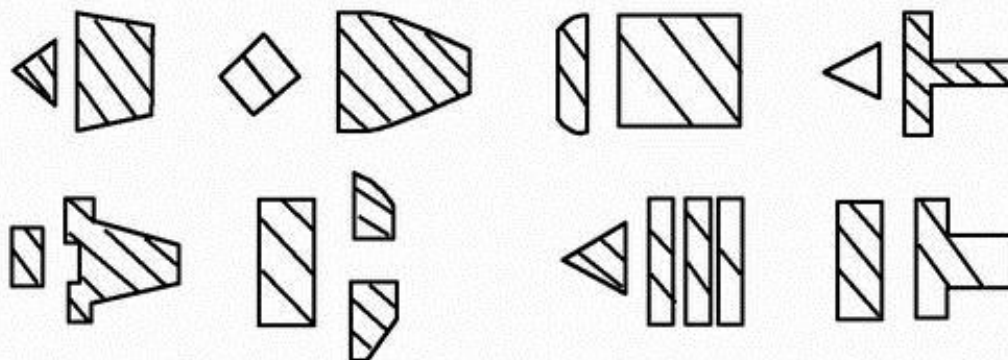


3) 旋涡发生体

与仪表的流量特性（仪表系数、线性度、范围度等）和阻力特性（压力损失）密切相关



(a) 单旋涡发生体



(b) 双、多旋涡发生体

4) 旋涡频率的检测

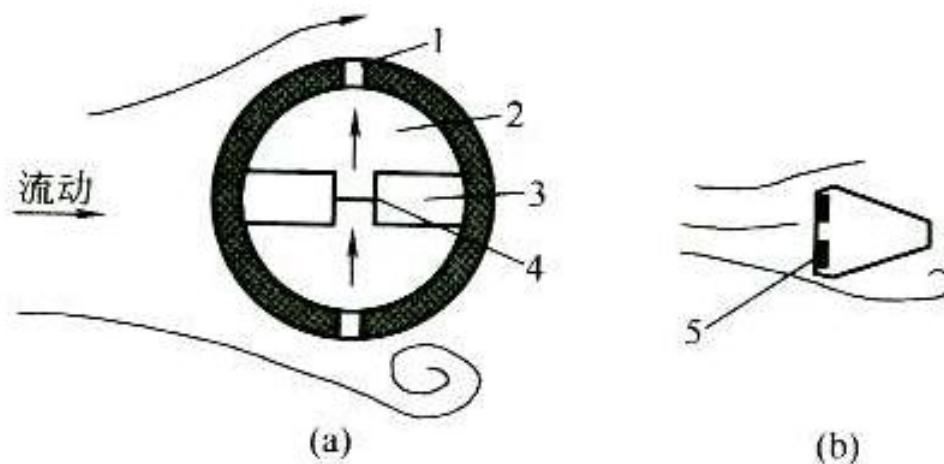
是涡街流量计的关键。

有多种检测方式：

圆柱体旋涡发生体常用**铂热电阻丝**检测频率；

三角柱旋涡发生体采用**热敏电阻或压电晶体**检测频率。

① 热电阻



② 热敏电阻

旋涡频率检测原理

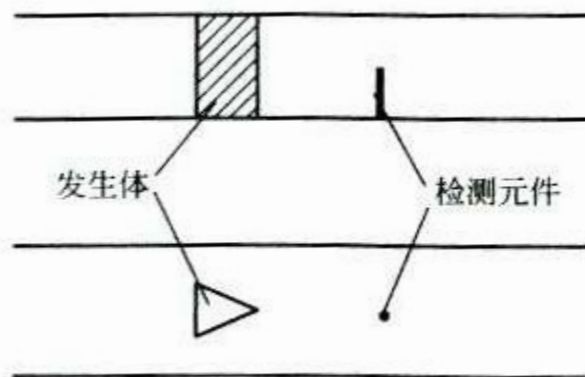
③压电元件

压电元件位于旋涡发生体的后面

输出频率 \propto 旋涡频率

◆ 灵敏度高，反应快；

◆ 但易受流体振动或管道振动的影响



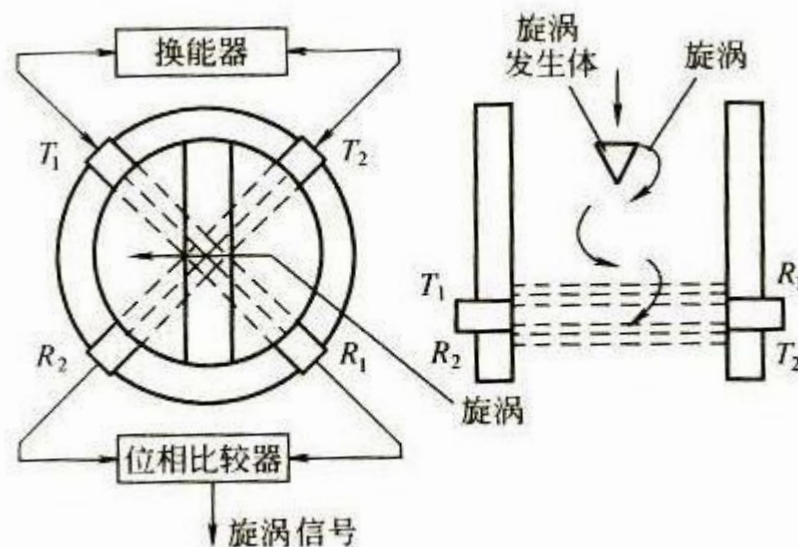
用压电元件检测旋涡频率

④超声波检测元件

调制声波 \rightarrow 旋涡频率

◆ 灵敏度较高，可测下限流速较低；

◆ 但温度变化、流场变化、液体中含气泡都对测量有较大影响。



超声波检测旋涡频率原理

5) 涡街流量计的特点

- ◆管道内无可动部件，使用寿命较长，压力损失较小；
- ◆测量准确度高[约为 $\pm(0.5\% \sim 1\%)$]，量程比一般为10:1；
- ◆在一定雷诺数范围内，几乎不受流体的温度、压力、密度、黏度等变化的影响

适合于大口径管道的流量测量

流量计安装有直管段要求，上游：**20D**；下游：**5D**

旋涡频率的检测方法易受流体介质特性及外部条件等的影响。



1000 1000 1000 1000

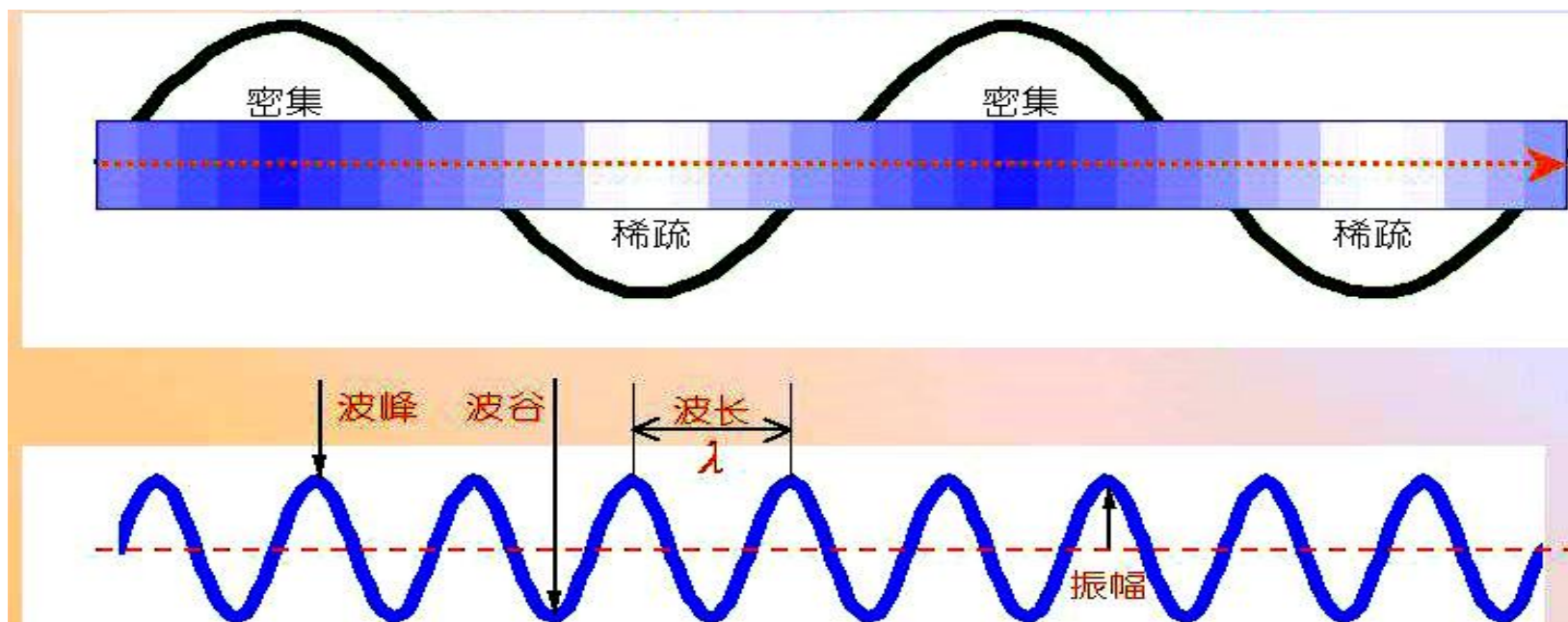
6.3 速度式流量测量方法

3、超声波流量计

20KHz以上频率的机械波称为**超声波**。

超声波的传播波型主要可分为纵波、横波、表面波等几种。

纵
波



◆ 超声波声速不仅介质有关，而且与介质所处的状态有关。

在气体中，声速随温度↑而↑

在很多固体和液位中，声速随温度↑而↓

◆ 声波在介质中传播时被吸收而衰减

吸收：气体>液体>固体

衰减：气体>液体>固体

◆ 声波传播时的方向性随频率↑而增强。

◆ 声波在两种介质分界面上会产生反射和折射。

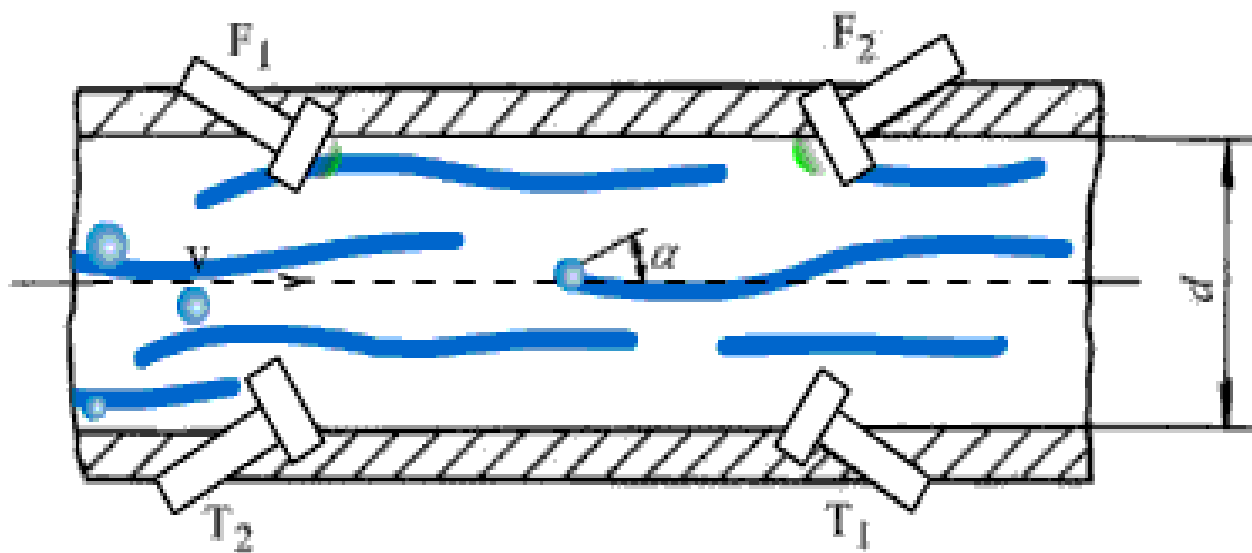
垂直入射时，反射系数为：

$$R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2$$

如声波从水传播到空气， $Z_1=1.44 \times 10^6$ ， $Z_2=4 \times 10^2$ ，带入公式可得 $R=0.999$ ，声波几乎全部被反射。

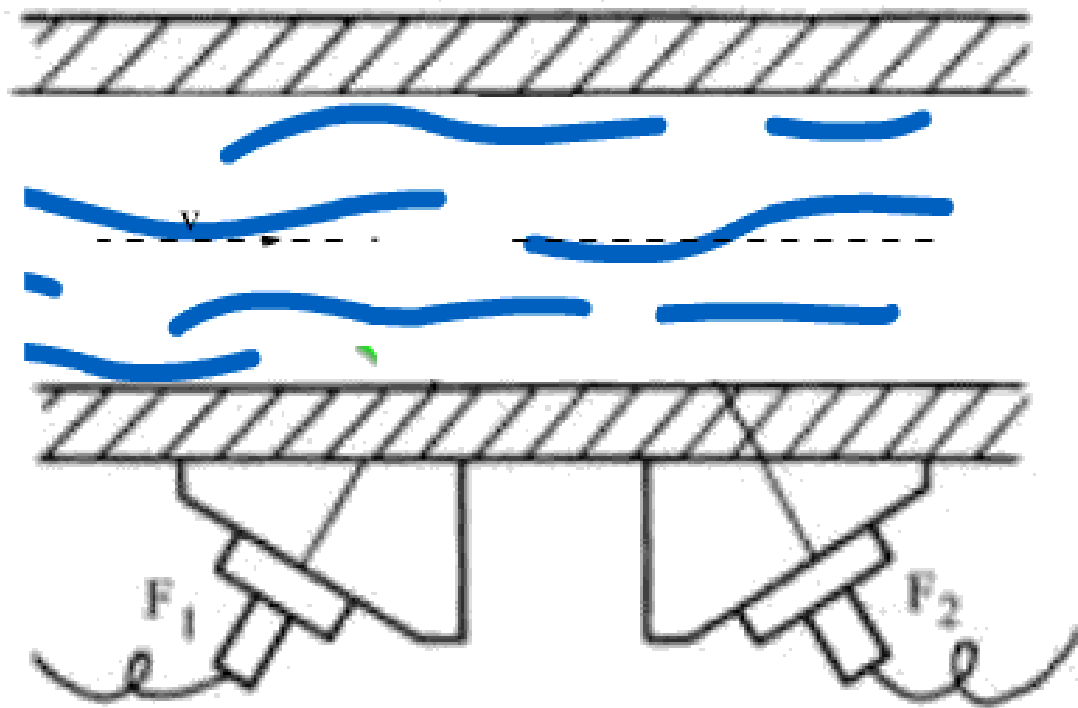
6.3 速度式流量测量方法

3、超声波流量计



F_1 发射的超声波先到达 T_1

发射、接收探头也可以安装在管道的同一侧



1) 时差法

- ◆ 声速受温度影响较大;
- ◆ 时差 Δt 数量级很小。

2) 相位差法

- ◆ 声速受温度影响较大;

3) 频率差法

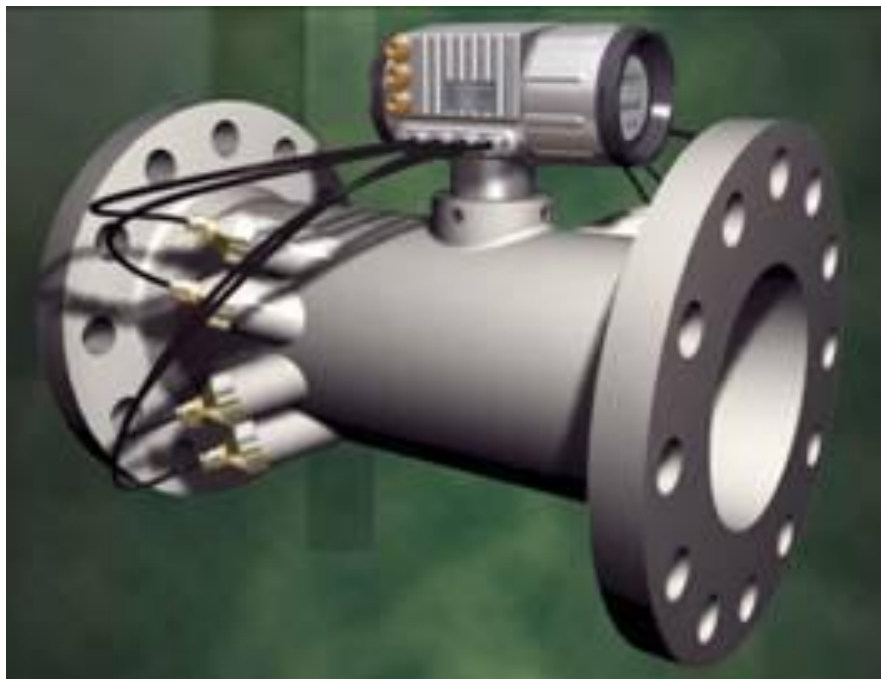
- ◆ 消除了声速的影响。

超声波流量计的优点：非接触测量。

- ◆不接触被测介质，不破坏流体的流场，没有压力损失；
- ◆测量准确度几乎不受被测流体温度、压力、密度、粘度等参数的影响；
- ◆量程比一般为**20:1**；
- ◆不仅可以测液体、气体的流量，而且对两相的流体流量也可测量

但流速分布对其影响较大，也和雷诺数有关，需要修正。

同侧式超声波流量计的使用



(参考北京菲波仪表有限公司资料)



超声波流量计现场使用



6.4 差压式流量测量方法

1 工作原理：伯努利定律，通过测量流体流动过程中产生的差压来测量流速或流量。

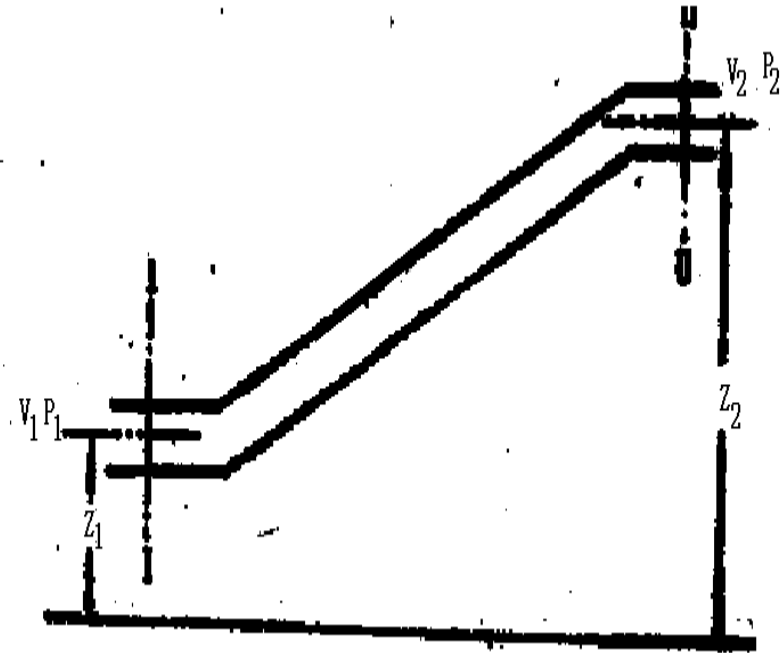
2 种类：毕托管、均速管、节流变压降流量计。

流体伯努力方程

$$gZ_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} = gZ_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2}$$

对不可压缩的流体

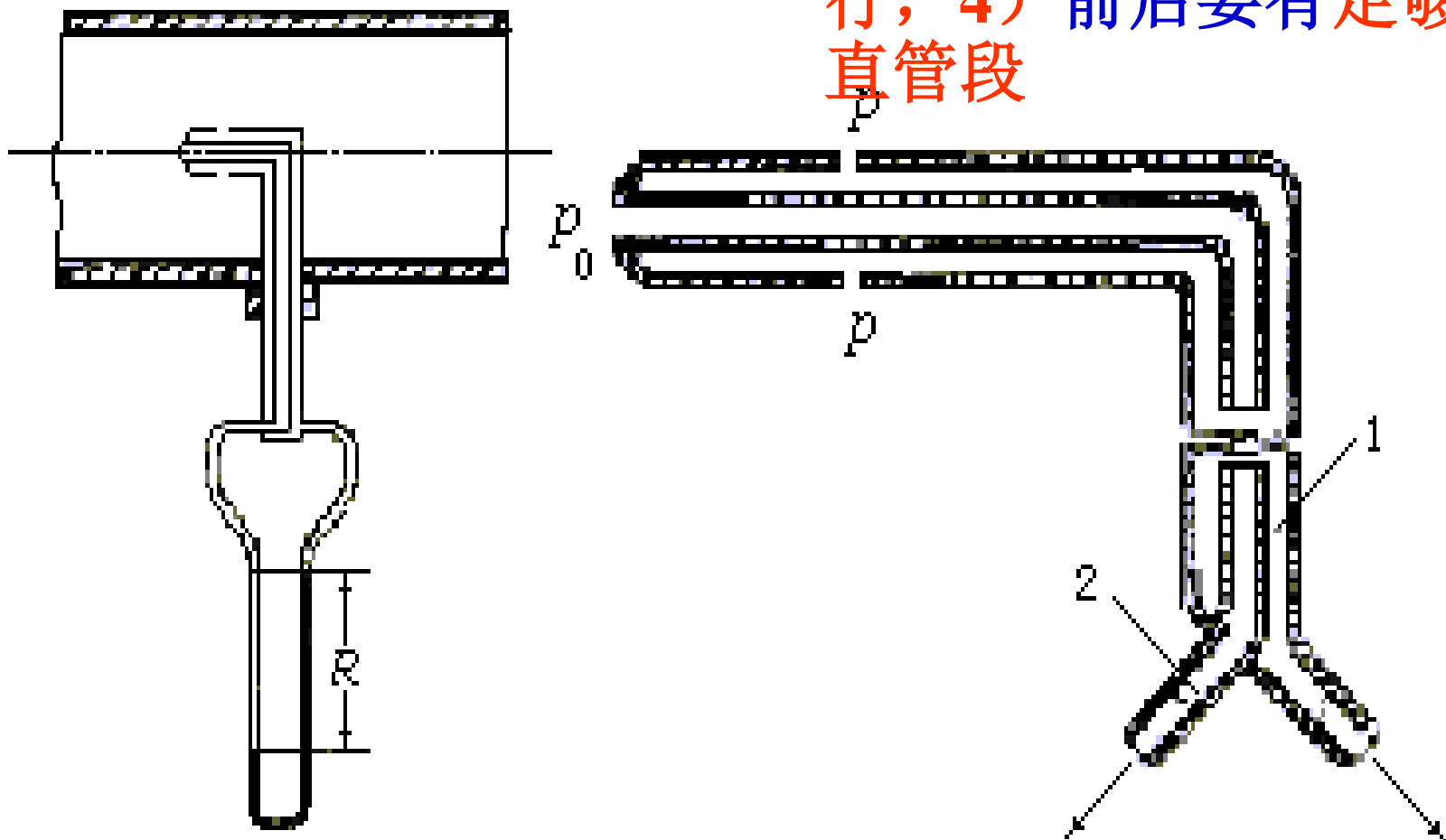
$$gZ_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

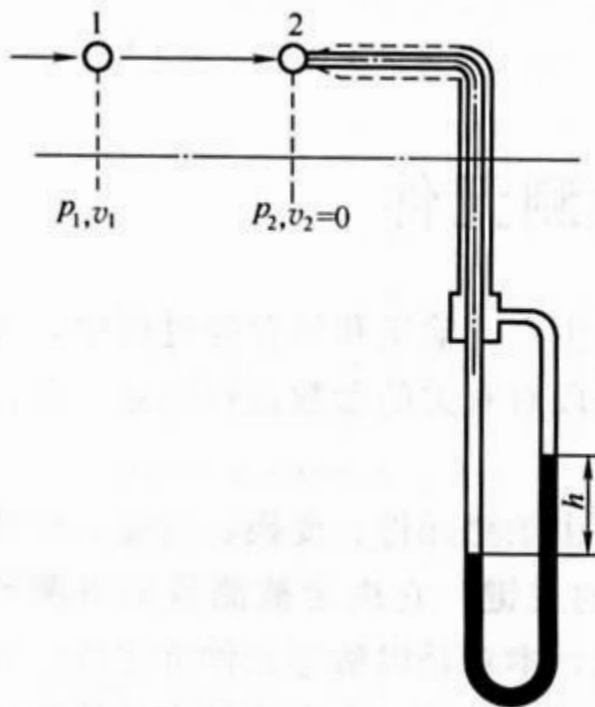


一、毕托管

毕托管的结构

- 1) 对毕托管部件尺寸有要求;
- 2) 测量时必须将毕托管固定;
- 3) 毕托管探头的轴线必须与管道中心轴线平行;
- 4) 前后要有足够长的直管段





在点1和点2内管处列伯努利方程，

$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

因为点1和点2内管处的铅垂高度一样，

且点2内管处的流速 v_2 为0，故上式可写为：

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2}$$

点2内管处
测得静压能

外管测压孔测得流体静压能为 $\frac{p_1}{\rho}$

毕托管测速的原理

给毕托管接上差压计，则差压计的读数反映流速：

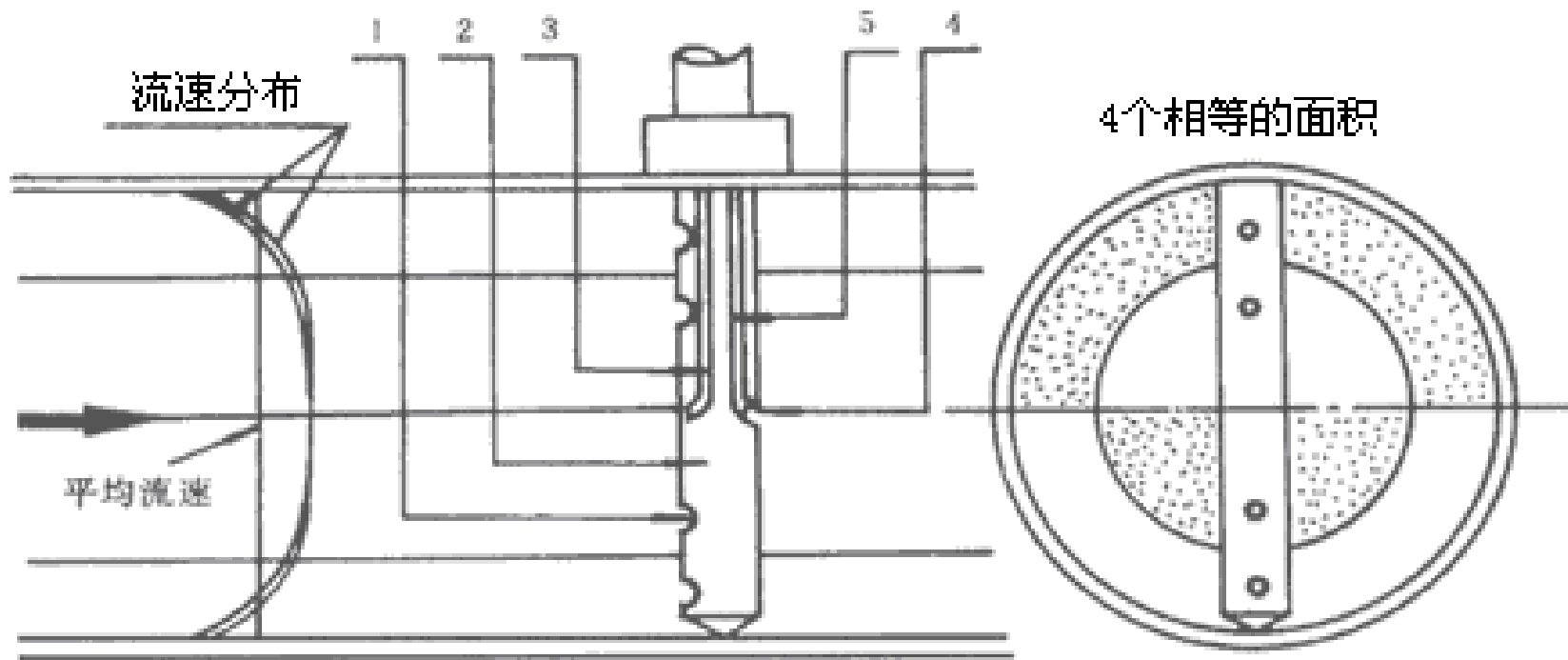
$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

第三节 差压式流量测量方法

二 均速管

1起因：

- (1) 毕托管的问题：用实验法求平均流速，计算繁琐，测试时间长，且只应用于稳定工况及大口径流量计。
- (2) 均速管（阿纽巴）可自动平均个测点得到得差压，求取截面的平均流速和体积流量。



均速管的迎流面上有四个取压孔，测取此四点的全压，
取平均后被引出；

另一压力由均速管背流面的管道中心处取得

$$q_v = A \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

2 均速管的使用及特点

- 1) 其前直管段**7-24D**，后直管段**3-4D**
 - 2) 均速管的特点：结构简单，安装维护方便，价格低，压力损失小，适用管径范围宽。
- 缺点：差压输出小，灵敏度低，量程比小（**3：1**），很难用于带尘气流的测量。

6.5 质量流量计

①直接法：直接反映质量流量。

科里奥利力检测方法

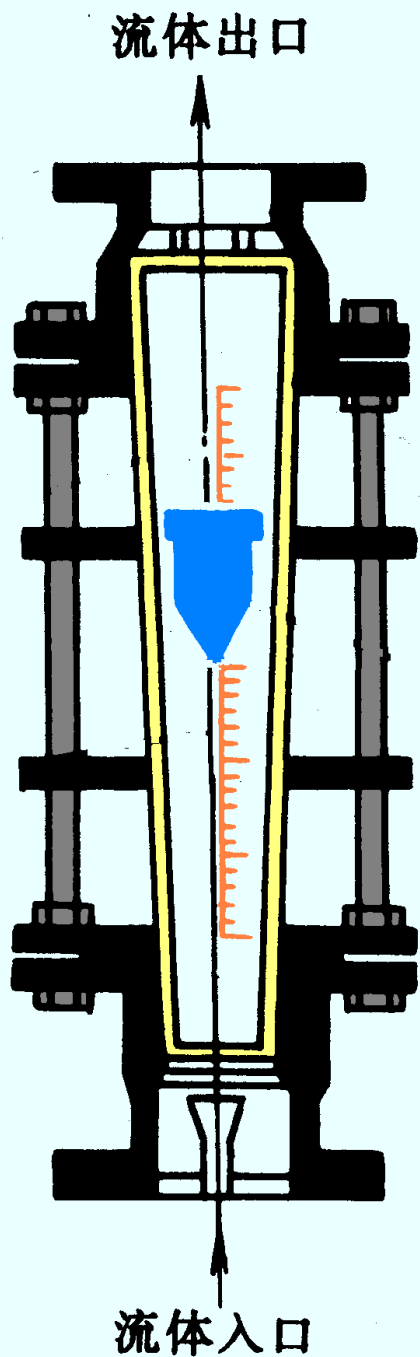
②间接法：分别测出相应参数，通过运算获取质量流量。

a. ρq_v^2 和 ρ 组成

b. q_v 和 ρ 组成

c. ρq_v^2 和 q_v 组成

6.6 其他流量计



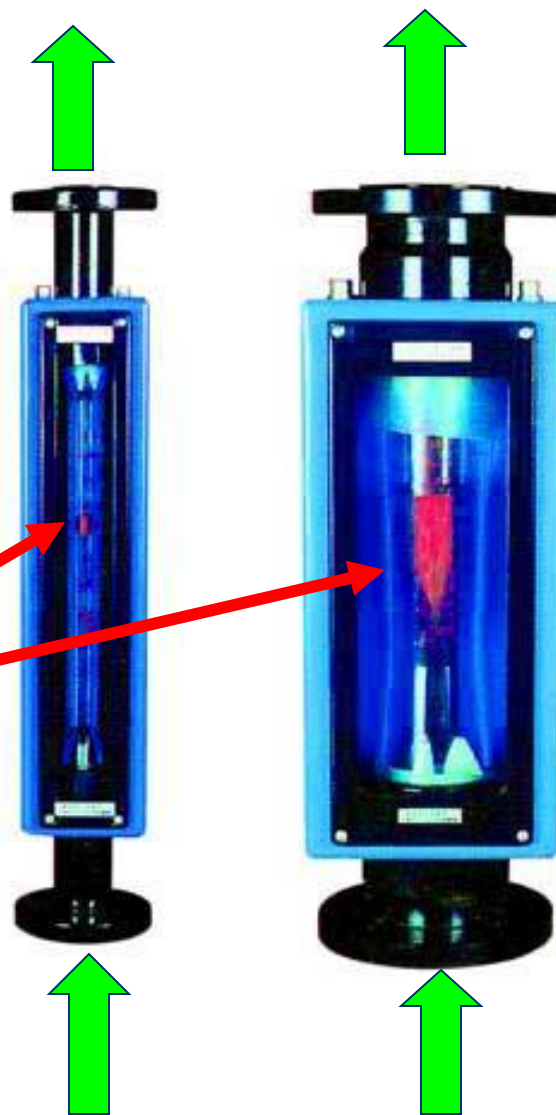
从转子的悬浮高度
直接读取流量数值。

玻璃转子流量计

转子

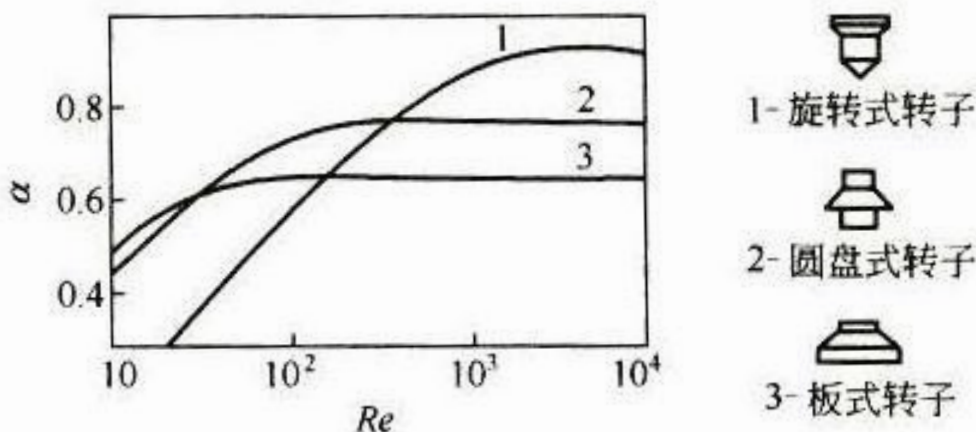
流体出口

流体入口



1、流量系数 α

与锥形管的锥度、浮子的几何形状、被测流体的雷诺数等有关。



流量系数与雷诺数的关系曲线

2、流体密度 ρ

$$q'_v = q_v \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho')\rho}{(\rho_f - \rho)\rho'}}$$

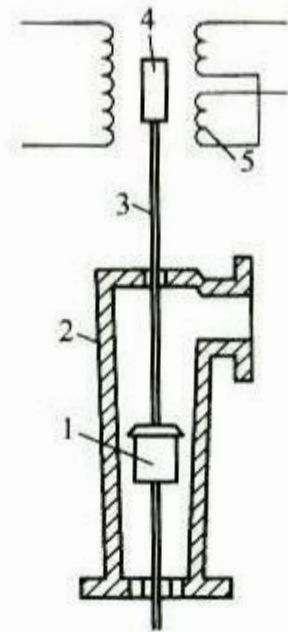
如果黏度变化较大，会影响流量系数。

3 信号转换

◆ 直接指示型转子流量计

◆ 电远传转子流量计

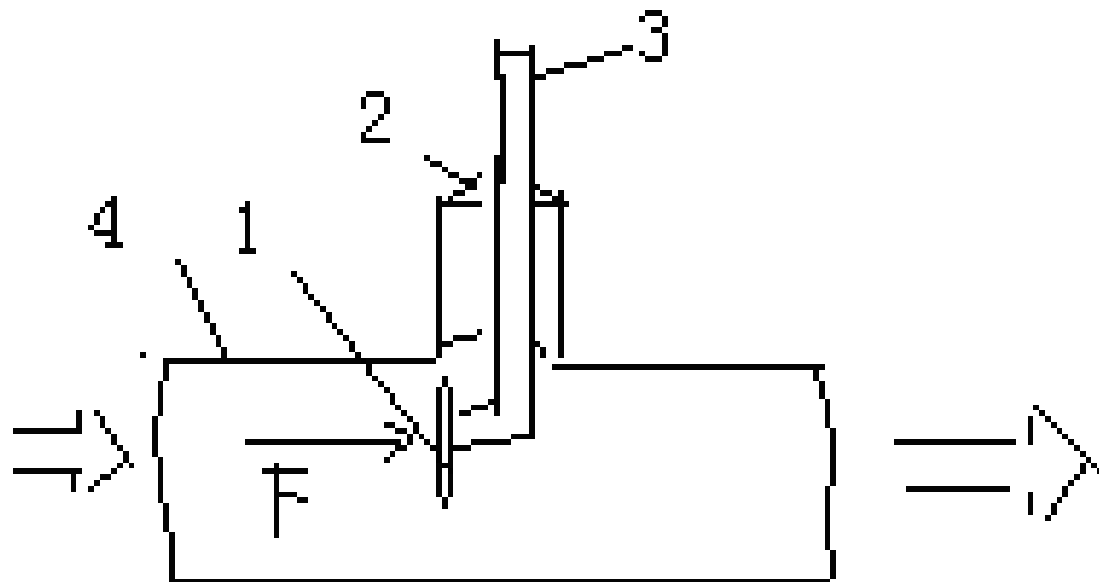
流量一位移—电信号



4 转子流量计的特点

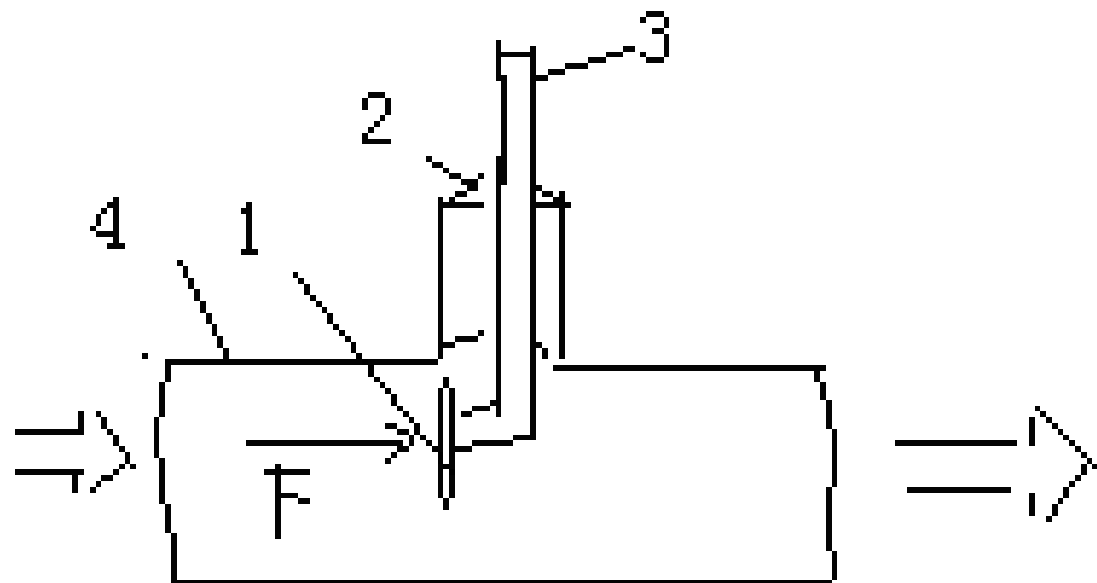
电远传转子流量计原理

- 1、适用于中小管径、较低雷诺数的中小流量检测
- 2、结构简单，使用方便，工作可靠，仪表前直管段要求不高
- 3、基本误差约为 $\pm 1\% \sim 2\%$ ，量程比可达10:1
- 4、测量准确度易受被测介质的密度、黏度、温度、压力、纯净度、安装质量等的影响



靶式流量计于六十年代开始应用于工业流量测量，主要用于解决高粘度、低雷诺数流体的流量测量。

其结构比较简单，维护方便，不易堵塞，适用于测量高粘度、高脏污及有悬浮固体颗粒介质的流量。缺点是压力损失较大，测量精度不太高。



流体经过时，由于受阻使靶受到一推力作用，此作用力与流速之间存在着一定关系。靶连接在变送器主杠杆的一端，经变送器将靶上所受推力转换为统一的电流信号输出，测此电流即可得到流体流量。

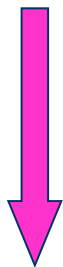
三)电磁流量计

利用**法拉第电磁感应定律**，测量**导电液体**体积流量

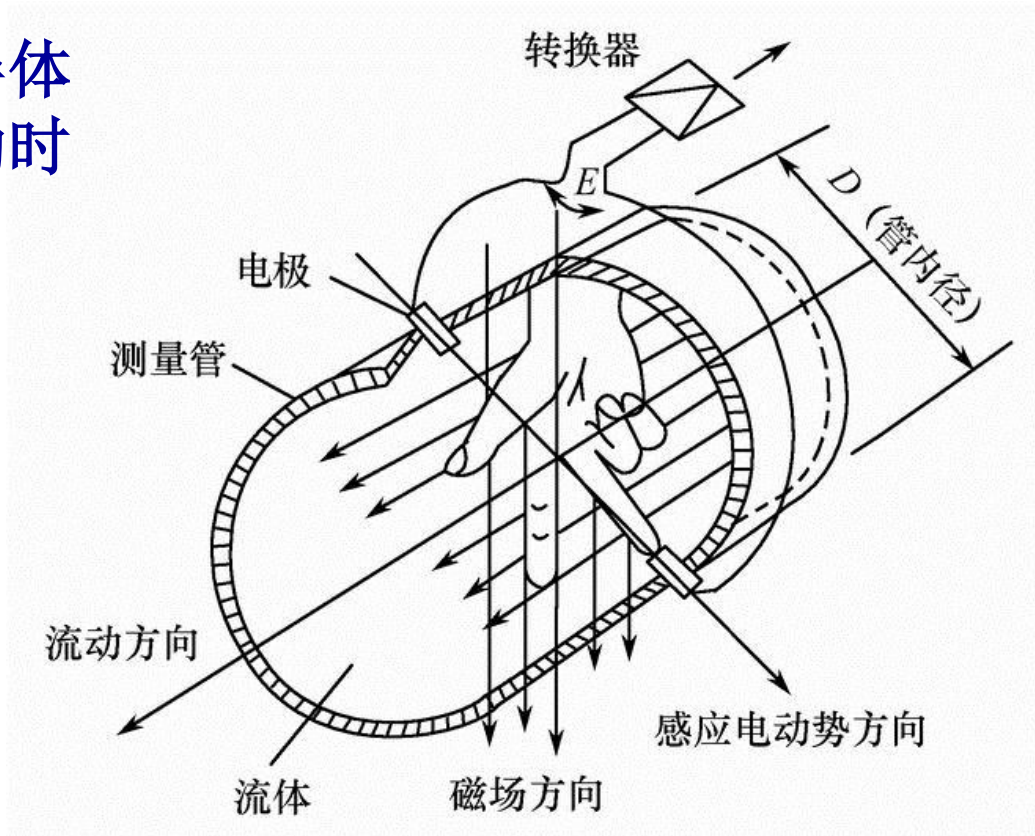
1、检测原理

法拉第电磁感应定律：导体在磁场中切割磁力线运动时产生感应电动势

$$E_x = BDv$$

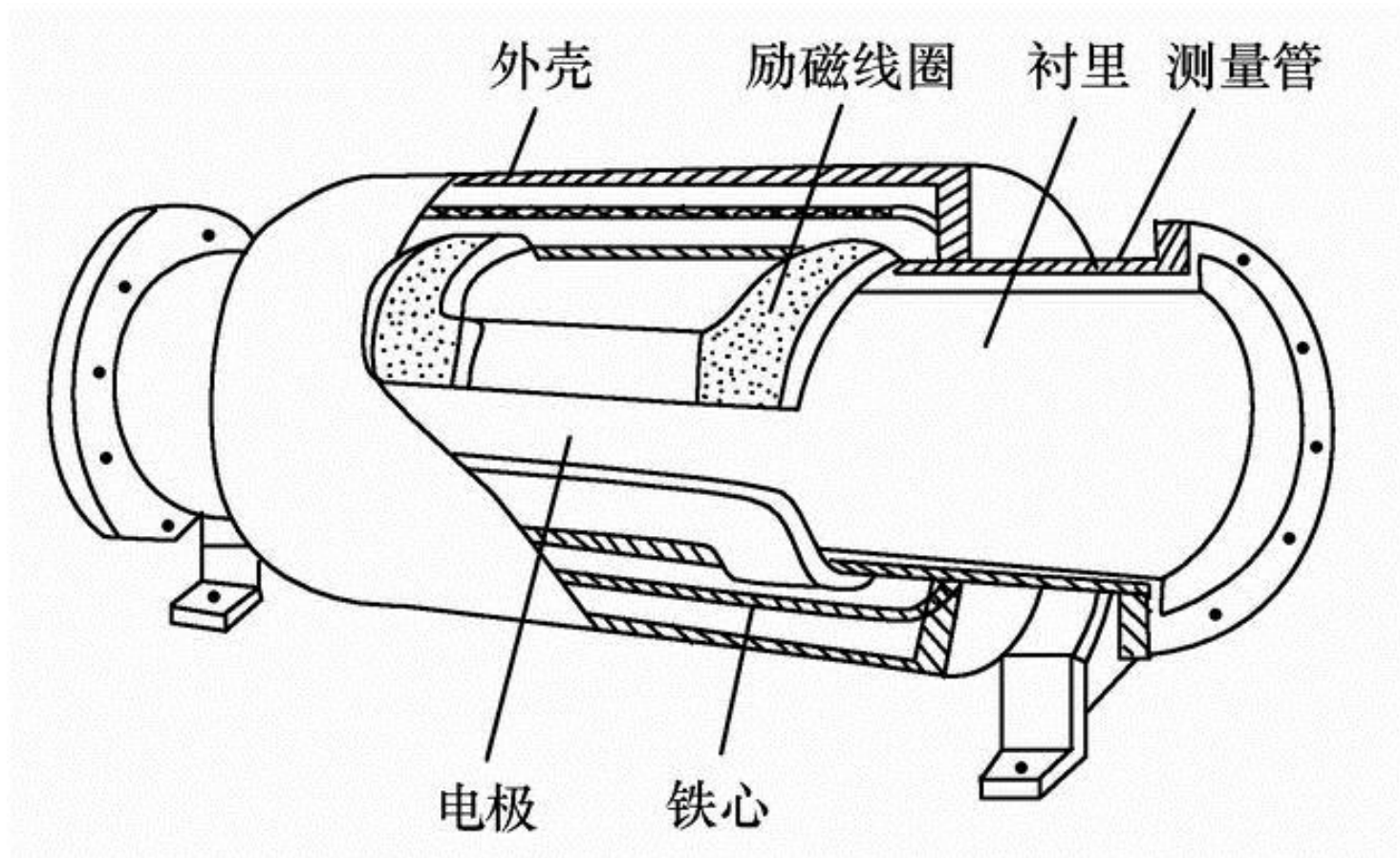


$$q_v = \frac{1}{4} \pi D^2 v = \frac{\pi D}{4B} E_x$$



2、结构

- 电磁流量计 = 流量传感器 + 转换器



① 磁路系统

- 直流磁场：结构比较简单；但电极发生极化，另外当管道直径较大时，永久磁铁也要求很大，笨重且不经济。
- 交变磁场：电极无极化现象。

3、电磁流量计的特点

- ◆管道内无可动部件或突出于管道内部的部件，压力损失极小；
- ◆只要是导电的介质都能测量；
- ◆流量计的输出与体积流量成线性关系，且不受液体的温度、压力、密度、黏度等参数的影响；
- ◆量程比一般为**10:1**，测量口径范围大（从**1mm**到**2m**以上），测量准确度一般优于**0.5%**；
- ◆反应迅速，可测脉动流量

缺点：被测流体必须导电；

使用温度0~200℃；压力不超过4MPa。

4、电磁流量计的选用与安装

应用场合：

- ◆ 大口径仪表较多应用于给排水工程。
- ◆ 中小口径常用于固液双相流等难测流体或高要求场所。
- ◆ 小口径、微小口径常用于医药工业、食品工业、生物工程等有卫生要求的场所。

选用考虑要点：

精度、流速、范围度、口径、液体电导率



流量检测复习总结

- ◆ 了解流量检测的基本概念；
- ◆ 掌握电磁流量计的工作原理；
- ◆ 掌握容积式流量计的工作原理；
- ◆ 掌握超声波流量计的工作原理；
- ◆ 掌握毕托管测量原理
- ◆ 了解其他流量计的工作原理；