

第七章 多相流流型识别及参数测量



主要内容

- **两相流主要参数及分类**
- **流型的识别**
- **分散相浓度测量**
- **流量的测量**
- **应用实例**

两相流主要参数及分类

两相流主要参数

两相流中，除了描述单相流动的参数，如速度、压力降、流量、温度等，在数量上要加倍外，还要额外增加一些新的参数。两相流中主要参数有：

- 流型（流态）
- 分相含率（空隙率、含气/固率）
- 速度（分相流速、相对速度）
- 流量（分相流量、平均流量）
- 密度（平均密度）
- 压力降（分相压力降）

两相流参数的分类

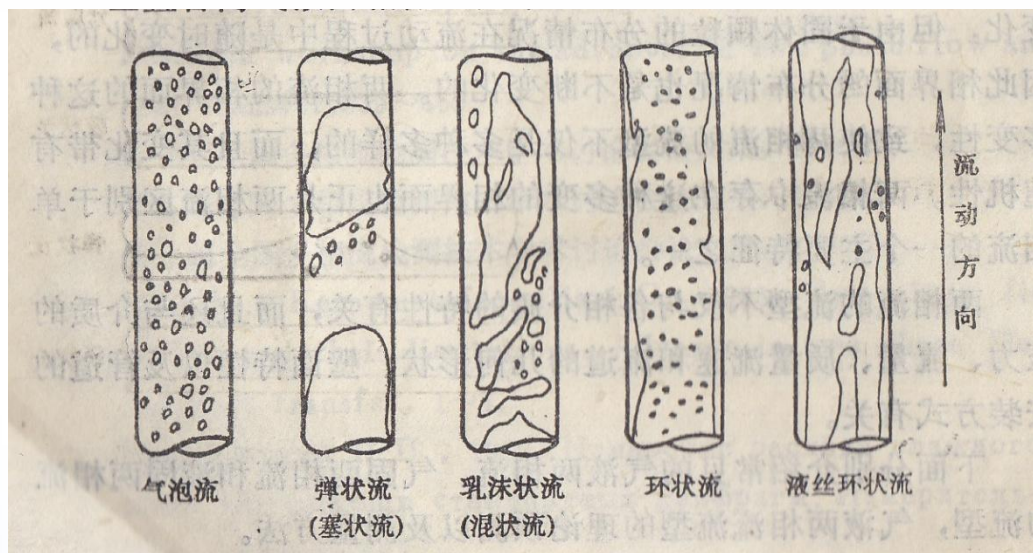
上述两相流主要参数，结合在两相流动设备和系统中的应用，通常分为以下三类：

- 直接与设计有关的参数
- 与系统研究有关的参数
- 脉动参数

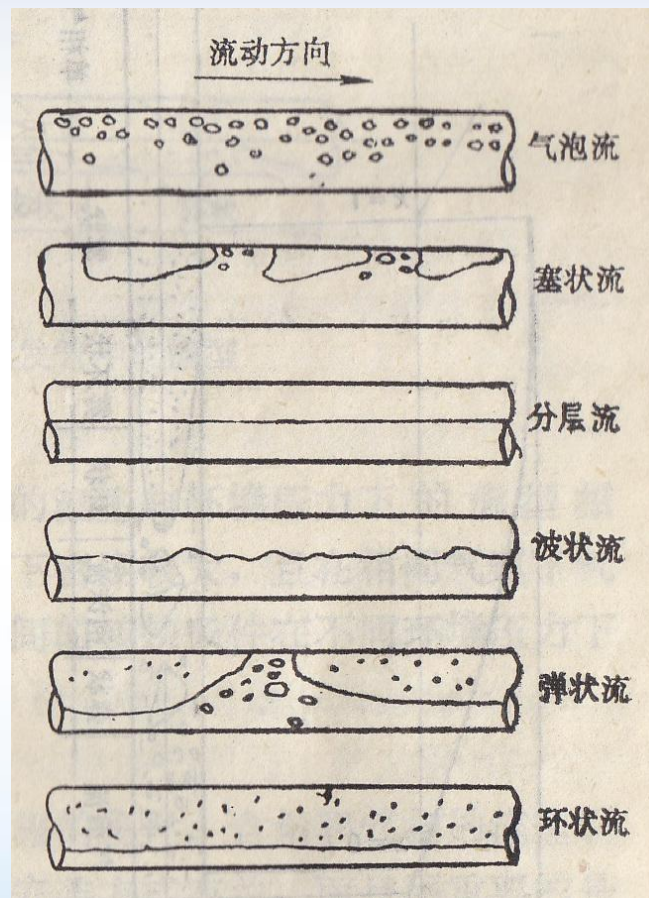
两相流流型的识别

流型的分类

• 气液两相流的流型



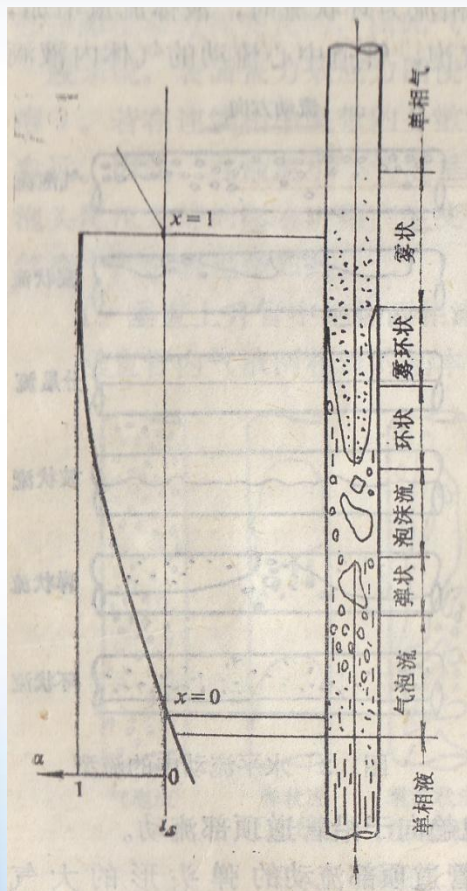
竖直管内流型



水平管内流型

流型的分类

- 受热管两相流的流型



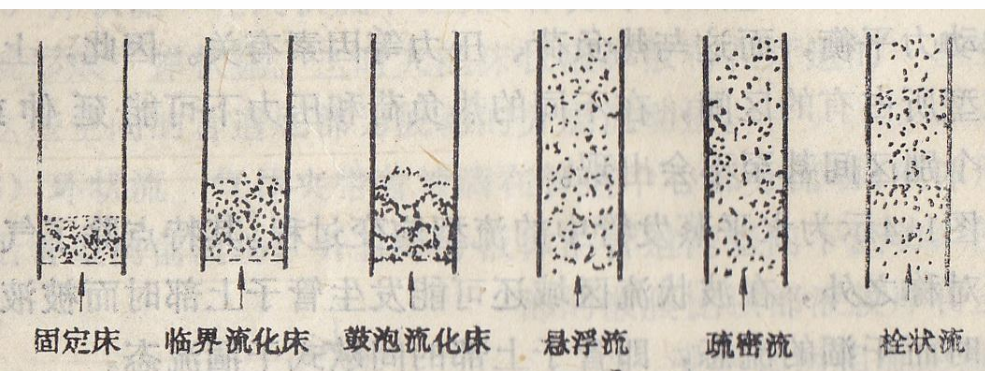
竖直管内流型



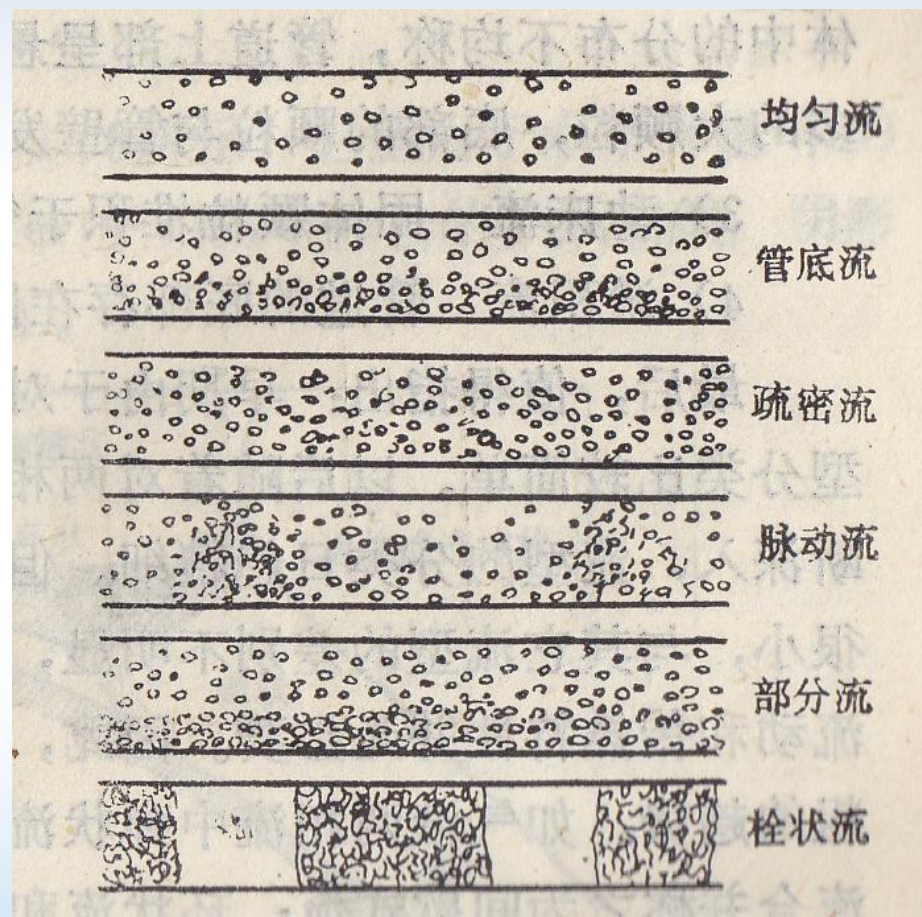
水平管内流型

流型的分类

• 气固两相流的流型



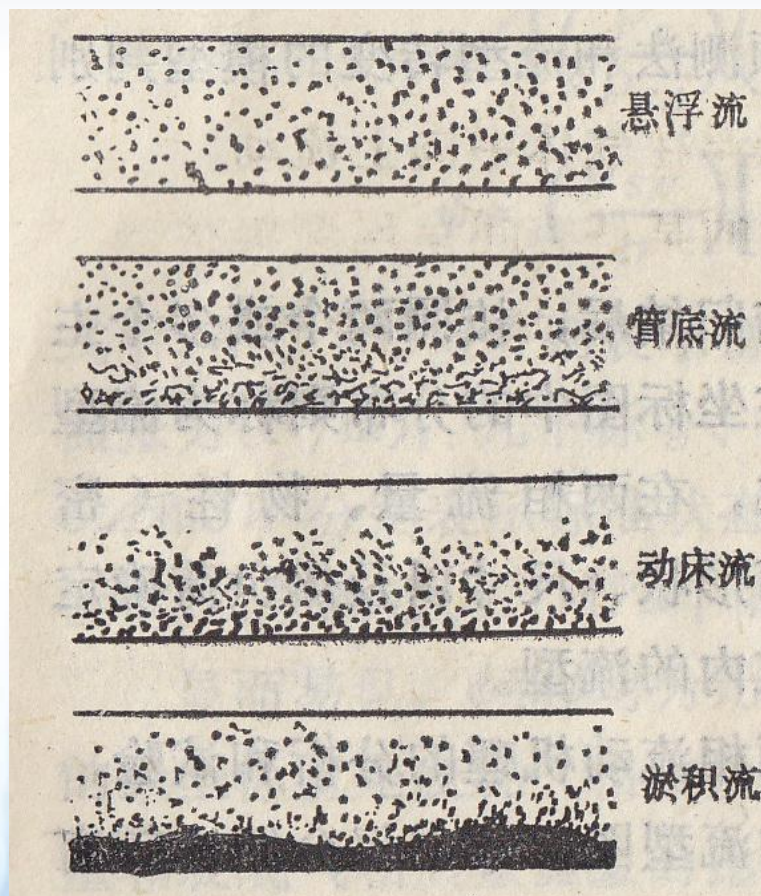
竖直管内流型



水平管内流型

流型的分类

- 液固两相流的流型



水平管内流型

流型的测量方法

1. 直接测量法

根据两相流的流动形式，直接确定流型。

2. 间接测量法

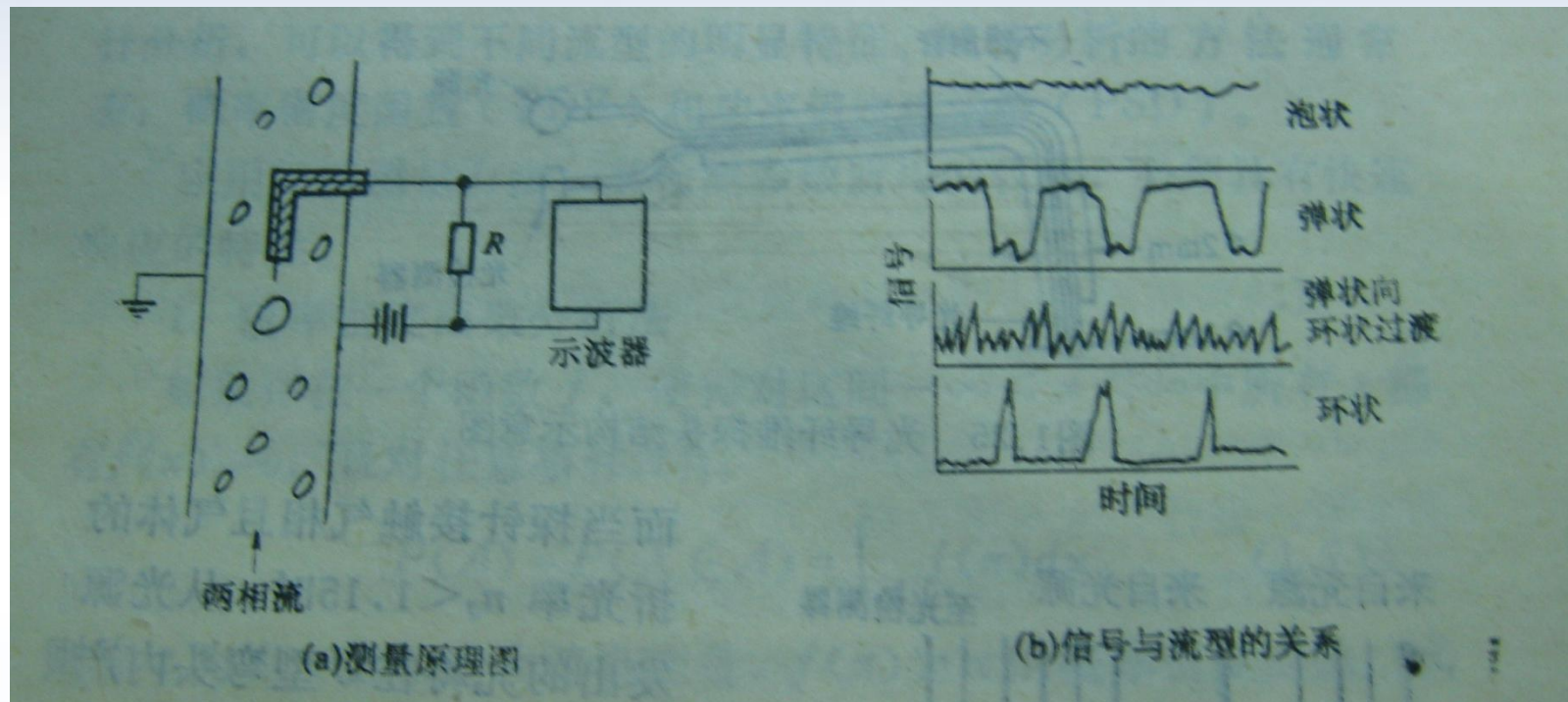
通过对反应两相流波动特性的信号进行统计分析，确定流型。

流型的直接测量法

- 目测法：通过透明管段或管段上的透明窗口，直接用眼睛观察管内的两相流流动状态。缺点是观察的结论带有较大的主观性。
- 高速摄影法：利用高速照相机或摄像机，通过透明管段或透明窗口拍摄流体的流动状态。

流型的直接测量法

- 射线衰减法：射线衰减法有X射线衰减拍片法和多束射线（X射线或 γ 射线）密度测定法。二者都是利用射线通过介质发生吸收衰减的原理确定流型的。适用于金属等非透明管道中的流型确定。
- 接触式探头：接触式探头有电导探头（多电导探头开发流型在线显示系统）和光导探头两种。分别通过测量探头针尖处流体导电性和光强度的特征来确定该点的介质分布，进而确定流型。



流型的电导探头测量法

流型的间接测量法

在气液两相流中，除了水平管中静止或很平稳的分层流之外，所有流型都具有明显的波动特性。流型的间接测量法，通过对这些波动参数的测量，并对随机信号进行统计分析，可以得到不同流型的明显特征。统计分析的方法通常有如下两种：

- 概率密度函数（PDF）分析法
- 功率谱密度函数（PSD）分析法

两相流分散相浓度的测量

分散相浓度的定义

在两相流动过程中，流场中往往其中一相是连续流动，称之为连续流动相；而另一相是分散在连续相中，并随连续相一起流动，称为分散相。

所谓分散相浓度则是指分散相占整个两相流的含量，它反映了两相流动过程中分散相与连续相在流动管道内的比例关系。

注意：不同介质的两相流具有不同的连续相和分散相，在一定条件下连续相和分散相会发生转化。如蒸发管中。

分散相浓度的表示方法（以气液两相流为例）

- 质量流量含气率：又称干度，用符号 x 表示。它是气相的质量流量 q_{mg} 与混合物的总质量流量 q_m 之比：

$$x = \frac{q_{mg}}{q_m} = \frac{q_{mg}}{q_{mg} + q_{ml}}$$

- 容积流量含气率：用 β 表示。其定义为气相的容积流量 q_{vg} 与混合物的容积流量 q_v 之比：

$$\beta = \frac{q_{vg}}{q_v} = \frac{q_{vg}}{q_{vg} + q_{vl}}$$

- 截面含气率：又称空隙率，用 α 表示。空隙率是指管道内某一截面上气相所占的截面积 A_g 与该截面的面积 A 的比值：

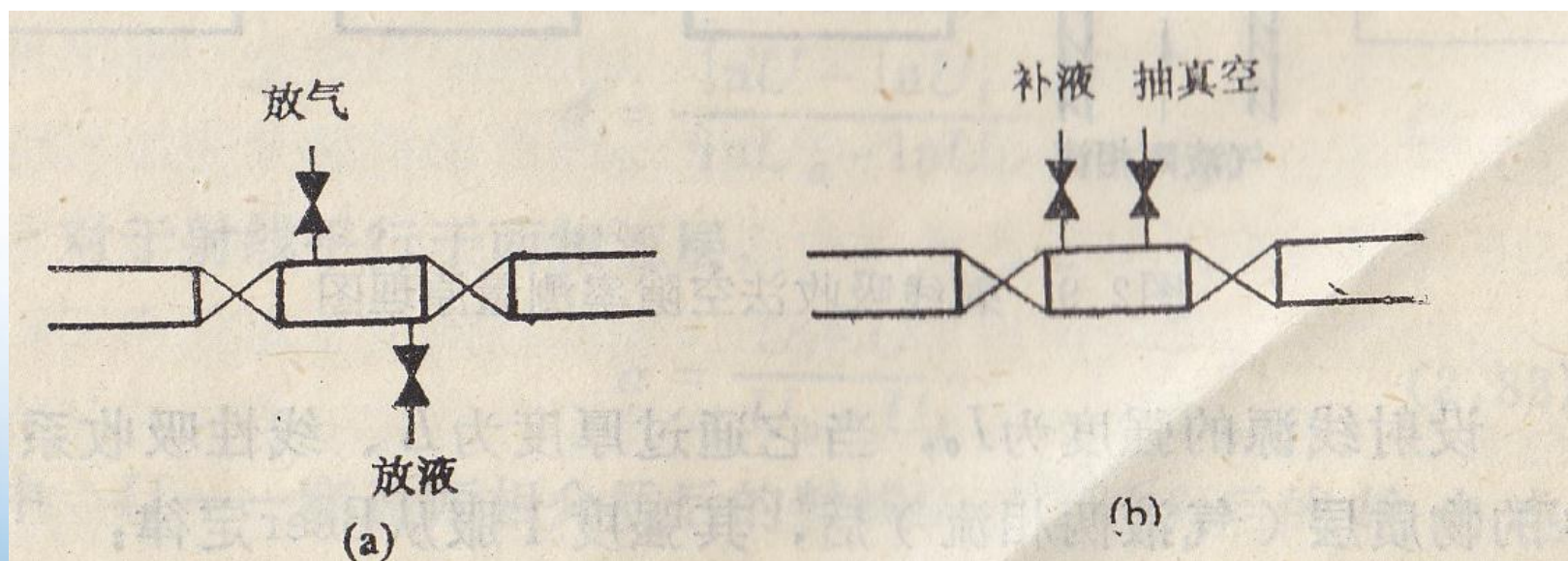
$$\alpha = \frac{A_g}{A} = \frac{A_g}{A_g + A_l}$$

体积平均空隙率：

$$\alpha = \frac{V_g}{V} = \frac{V_g}{V_g + V_l}$$

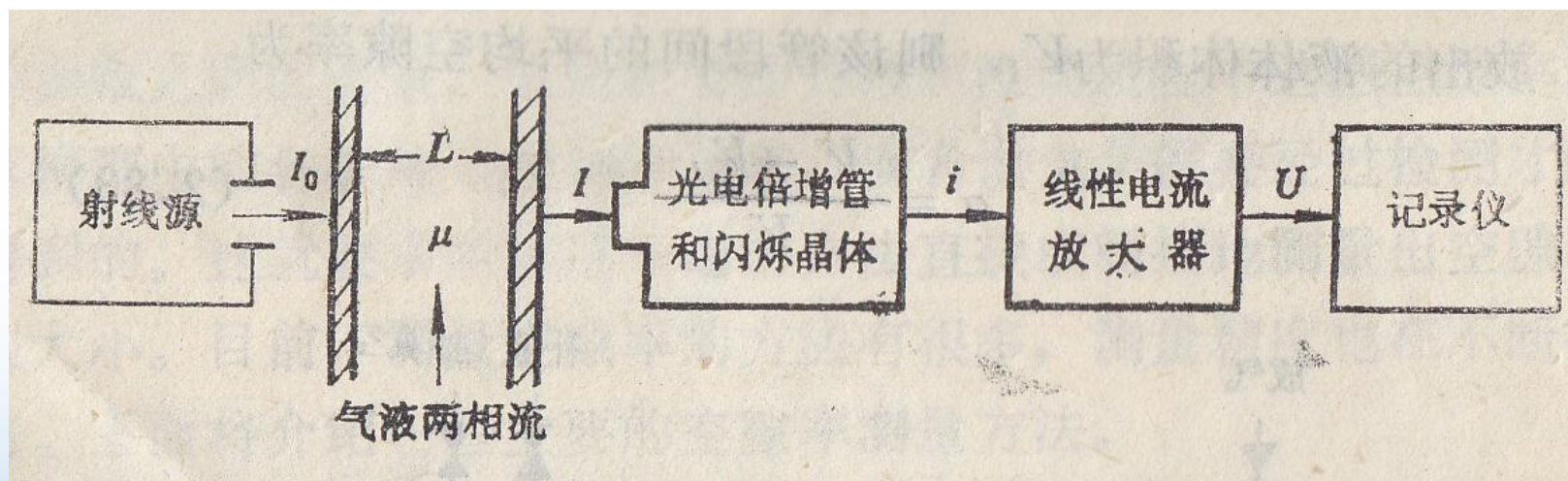
空隙率的测量方法

- 空隙率的直接测量技术：直接测量空隙率的一个最常用的方法是在气液两相流试验段的两段安装两个同时动作的快关阀，当两相混合物的流动达到稳定时，同时关闭这两个阀门，通过气液分离便可求出二阀门间的体积平均空隙率。这种方法准确、有效，目前主要用于实验室的两相流研究以及对空隙率测量装置的标定。



空隙率的测量方法

- 射线吸收法：射线吸收法的基本原理如下图所示。从某个射线源发出的射线（如 γ 射线、X射线和 β 射线等）经过流体时部分射线被流体所吸收，吸收的程度与气液两相混合物的空隙率有关。



空隙率的测量方法

- 射线散射法：主要有 γ 射线散射法和中子散射法。

γ 射线散射法：根据射线吸收法测量空隙率的原理， γ 射线通过气液混合物时要产生衰减，其中一部分能量是由于康普顿散射所引起。根据康普顿散射理论，当 γ 射线与原子核中的电子作用时，将部分能量传递给电子，同时在与入射 γ 线成 θ 角的方向上产生一定能量的光子，这部分散射光子的能量 $E'(\theta)$ 是射线初始能量 E 和散射角 θ 的函数：

$$E'(\theta) = \frac{E}{1 + 1.96E(1 - \cos \theta)}$$

空隙率的测量方法

散射的光子能量可以用一个安装在与入射 γ 线成 θ 角的光子探测器进行检测。通过对散射光子的计数，就可以确定管道内的空隙率。

空隙率的测量方法

除了上述方法之外，测量空隙率还有电学法、光学法、热学法、核磁共振法、微波法、模糊综合评判法等多种方法。

两相流流量的测量

两相流流量的测量

两相流流量的测量方法按原理分类有以下四种：

- 节流法
- 速度法
- 容积法
- 质量流量法

节流法

当两相流混合物通过节流装置（孔板、喷嘴、文丘里管）时，与单相流相似，将产生压力降，该节流装置前后的静压差与两相混合物的流量及分相含率等因素有关。不少科学工作者对通过节流装置的两相流动分别按均相流和分相流建立了两相流量测量模型；对单相流量与两相流量间参数的关联方面，也做了大量工作。

典型案例：利用孔板测量气液两相流流量；利用长喉颈文丘里管测量气固两相流流量。

速度法

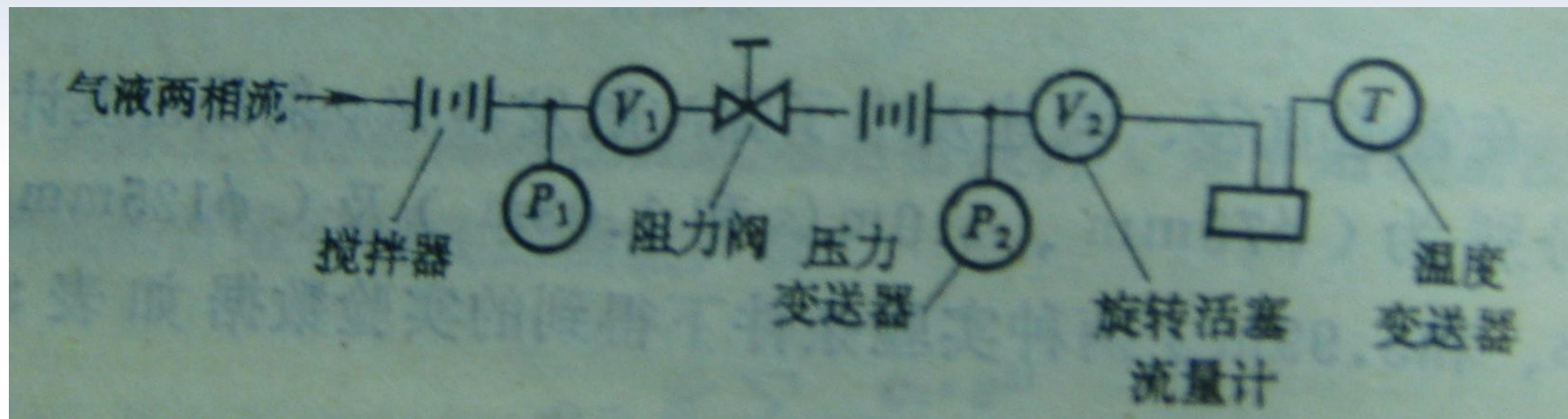
速度法是基于测量两相流的流速来得到两相流流量的方法，是测量两相流量的最基本的方法。可分为力学法、相关法、光学法、声学法、热学法、电磁法、核磁共振法、示踪法等等。

典型案例：毕托管法，涡轮流量计法。

容积法

容积法又称PVT法。PVT法是建立在气相与液相一个基本特性的差异上：即气液两相流体中气体的体积流量与流动状态下的压力、温度密切相关；而液体的体积流量却与流动状态下的压力、温度基本无关。可在同一管道的上下游两个测量点，分别检测两相总体积流量、压力及温度。根据这三个参数及被测介质的热力学性质即可精确计算出各相的体积流量。

基于PVT法数学模型研制的智能化多相流量计，在油田井口原油（油、气、水）流量计量中得到了广泛应用。



基于PVT法数学模型研制的智能化多相流量计，在油田井口原油（油、气、水）流量计量中得到了广泛应用。

质量流量法

在温度、压力波动频繁剧烈的工况下，两相流体的密度变化致使测量体积流量不能满足要求，而希望测量两相流体的质量流量。测量方法有两类：

- 直接检测与质量流量成正比例的量，相应的仪表称直接式质量流量计。如角动量式涡轮流量计和科里奥利里式质量流量计等。
- 用体积流量计和密度计组合，附加温度压力等自动补偿环节来测量质量流量，相应的仪表称间接式或补偿式质量流量计。如用于粉煤气化装置的粉煤质量流量计：

射线式密度计+速度计

电容式密度计+速度计

应用实例

湿蒸汽的干度测量

湿蒸汽（又称湿饱和蒸汽）是指既有水又有蒸汽的单组分两相混合物。

在湿蒸汽两相流动中，常常用干度 x 这个参数来表示湿蒸汽中干蒸汽所占的比例，其定义为：

$$x = \frac{q_{mv}}{q_{mv} + q_{mw}} \times 100\%$$

式中 q_{mv} 和 q_{mw} 分别为湿蒸汽中干饱和蒸汽和饱和水的质量流量。在研究汽轮机中湿蒸汽两相流时，还使用湿度 y 来表示湿蒸汽饱和水的含量，湿度与干度具有如下关系：

$$y = 1 - x$$

湿蒸汽的干度测量

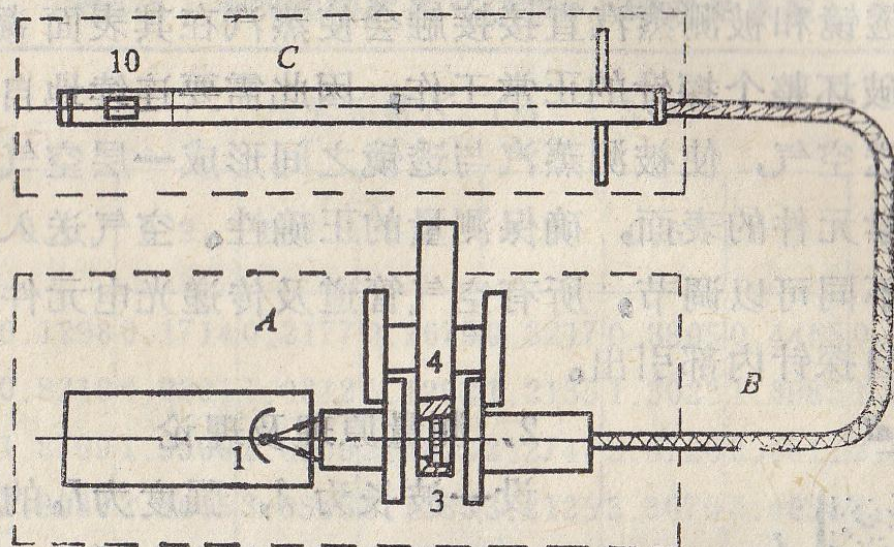
蒸汽干度测量方法有好多种，如热力学法、光学法、化学法以及原子-化学法等，在实验室条件下还可采用其他一些方法，如电学法、全息摄像法等。

下面主要以光学法中的全散射式光学探针测量方法。

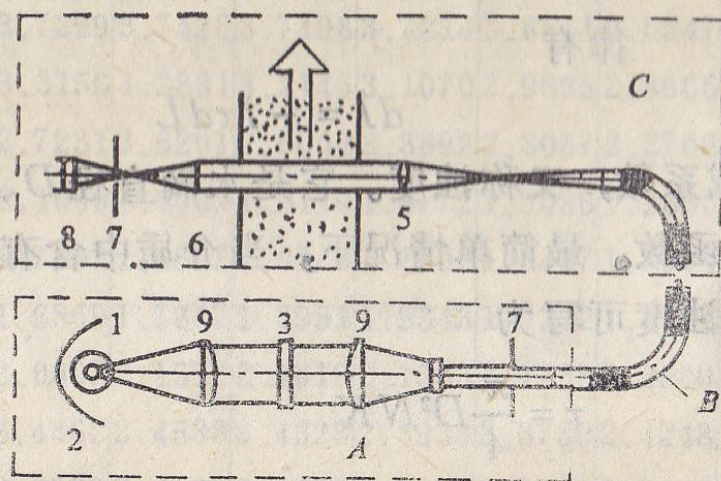
全散射式光学探针

全散射式光学探针是基于光散射原理设计的。当蒸汽湿度不太大时，湿蒸汽中的水一般以水滴状态出现，当光线通过含有这样细小水滴的蒸气时，将产生散射现象，并使穿过蒸汽的光束强度减弱。根据光散射理论，透射光的减弱与水滴的折射率 m （ $=1.33$ ）、水滴直径 D 和水滴浓度（对应于蒸汽湿度）存在着一定的对应关系，由此可确定蒸汽干度。

探针构造和光学系统



(a)装置结构



(b)光学系统

A.光源部分
B.光导纤维
C.探针

测量原理及理论

设一波长为 λ ，强度为 I_0 的平行光在均匀介质中传播，经薄层 dL 后，光强减弱了 dI ，则根据光的透光定律有：

$$dI = -I\tau dL \quad (1)$$

式中 τ 为衰减系数，也称浊度。它是水滴直径 D ，水滴个数 N 和消光系数的函数。最简单情况下，当介质中含有大小相等的球形水滴时，其浊度为：

$$\tau = \frac{\pi}{4} D^2 N K_e \quad (2)$$

式中 K_e 称为消光系数，根据米氏光散射理论，当入射光为非偏振光时，消光系数为：

$$K_e = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}[a_n + b_n] \quad (3)$$

测量原理及理论

式中 $\alpha = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)$ 称为水滴的无因次尺寸参数， a_n 和 b_n 如下：

$$a_n = \frac{\psi_n(\alpha)\psi'_n(m\alpha) - m\psi'_n(\alpha)\psi_n(m\alpha)}{\zeta_n(\alpha)\psi'_n(m\alpha) - m\zeta'_n(\alpha)\psi_n(m\alpha)} \quad (4)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n(\alpha)\psi'_n(m\alpha) - \psi'_n(\alpha)\psi_n(m\alpha)}{m\zeta_n(\alpha)\psi'_n(m\alpha) - \zeta'_n(\alpha)\psi_n(m\alpha)} \quad (5)$$

其中 ψ_n 和 ζ_n 是关于贝塞尔函数和汉克尔函数的函数。

测量原理及理论

对已一定折射率，消光系数随无因次尺寸参数 α 而变。
将式（2）代入式（1）积分后得到适用于湿蒸汽的计算式：

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\tau L} = e^{-\frac{\pi}{4} D^2 K_e N L} \quad (6)$$

实际生产中，锅炉或汽轮机中的水滴直径大小不等，此时的浊度公式应为：

$$\tau = \frac{\pi}{4} \int_0^{\infty} K_e(D) N(D) D^2 dD \quad (7)$$

式中 $N(D)$ 为水滴直径的个数分布函数。为简化计算，定义水滴的平均消光系数为：

$$\bar{K}_e = \frac{\int_0^{\infty} K_e(D) N(D) D^2 dD}{\int_0^{\infty} N(D) D^2 dD} \quad (8)$$

测量原理及理论

水滴的平均直径为：

$$D_{32} = \frac{\int_0^{\infty} N(D) D^3 dD}{\int_0^{\infty} N(D) D^2 dD} \quad (9)$$

式中 D_{32} 称为Sauter平均直径，把式（8、9）代入（7），则得：

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{\bar{K}_e}{D_{32}} V_m \quad (10)$$

式中 V_w 为单位体积中水滴所占的体积，即：

$$V_w = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) D^3 dD \quad (11)$$

测量原理及理论

同时，假定水滴的运动速度与蒸汽的相同，则根据蒸汽定义：

$$V_w = \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{y}{1-y} \quad (12)$$

把（12）代入（10）后进一步代入（6），可得：

$$\frac{I}{I_0} = \exp \left[-\frac{3\bar{K}_e \rho_g y L}{2D_{32} \rho_l (1-y)} \right] \quad (13)$$

称为Lamber-Beer公式。式中包含了两个未知参数 y 和 D_{32} 。因此仅依靠测得的光强 I 和 I_0 无法得到蒸汽的湿度。解决这一问题的一个较好办法是采用双光束法，即用两个不同波长的光束为光源，让他们分别通过测量区，并用光电元件分别测量这两束光的入射光和透射光强度。

测量原理及理论

令波长为 λ_1 的光束的入射光强和透射光强的测量值为 $(I_0)_{\lambda_1}$ 和 $(I)_{\lambda_1}$ ，波长为 λ_2 的光束的测量值为 $(I_0)_{\lambda_2}$ 和 $(I)_{\lambda_2}$ ，根据式（13）可以分别得出：

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_1 = \exp\left[-\frac{3\bar{K}_{e1}\rho_g yL}{2D_{32}\rho_l(1-y)}\right] \quad (14)$$

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_2 = \exp\left[-\frac{3\bar{K}_{e2}\rho_g yL}{2D_{32}\rho_l(1-y)}\right] \quad (15)$$

式中 $\left(\frac{I}{I_0}\right)_1$ 和 $\left(\frac{I}{I_0}\right)_2$ 分别为 $\frac{(I)_{\lambda_1}}{(I_0)_{\lambda_1}}$ 和 $\frac{(I)_{\lambda_2}}{(I_0)_{\lambda_2}}$ 。

测量原理及理论

由于两束光经过的是同一测量区，气流参数 D_{32} 、 y 、 ρ_l 、 ρ_g 和被测介质的厚度 L 基本保持不变，结合式（14）和式（15）可得：

$$\frac{\bar{K}_{e1}}{\bar{K}_{e2}} = \frac{\ln(I_0/I)_1}{\ln(I_0/I)_2} \quad (16)$$

由于消光系数 $\bar{K}_{e1} = \bar{K}_{e1}(m, \lambda_1, D_{32})$ ， $\bar{K}_{e2} = \bar{K}_{e2}(m, \lambda_2, D_{32})$ ，当折射率 m 和光束波长 λ_1 、 λ_2 一定时，它们只是水滴平均直径 D_{32} 的函数，因此，测得 $(I_0/I)_1$ 和 $(I_0/I)_2$ ，即可利用式（16）获得平均直径 D_{32} ，进一步代入式（14）或式（15）可以求得蒸汽湿度 y 。

计算实例

假设实验测得，当光束波长 $\lambda_1=0.4\mu\text{m}$ 时， $(I_0/I)_1=0.39$ ； $\lambda_2=0.529\mu\text{m}$ 时， $(I_0/I)_2=0.5$ ，得到：

$$\frac{\bar{K}_{e1}}{\bar{K}_{e2}} = -\frac{\ln 0.39}{\ln 0.5} = 1.728$$

由事先计算得到的曲线通过消光系数的比值查出 $D_{32}=0.421\mu\text{m}$ 。假设测量点蒸汽压力（表压）为 $5 \times 10^3 \text{Pa}$ 。查得： $\rho_g=0.0355\text{kg/m}^3$ ， $\rho_l=995\text{kg/m}^3$ 。测口长度 $L=0.11\text{m}$ ，对于波长 $\lambda=0.4\mu\text{m}$ ，水滴的无因次尺寸参数：

$$\alpha = \frac{\pi D_{32}}{\lambda} = \frac{3.1416 \times 0.421}{0.4} = 3.3$$

查表得消光系数 $\bar{K}_{e1} = 2.0909$

计算实例

将以上数据代入式（14），求得蒸汽的湿度：

$$y = \frac{\ln(I_0 / I)_1}{\frac{3\bar{K}_{e1}\rho_g L}{2D_{32}\rho_l} + \ln(I_0 / I)_1} = 3.12\%$$

光学探针测量法的特点

优点:

无需抽取试样，克服取样过程中存在的固有误差

不仅能测量蒸汽湿度 y ，还能测量蒸汽的水滴直径

采用光学技术后，测量装置易于设计为外形尺寸较小的光学探针，对被测气流的干扰作用较小，插入被测介质进行测量。可测量气流场中各点的湿度。

光学探针法为快速测量湿度提供了条件。

缺点:

原理和设备相对复杂。另外，这种方法只能用于以水滴型式出现的湿蒸汽的湿度测量，因此湿度的可测范围也不大。