

热能与动力工程测试技术知识点

第一章：

测量： 人类对自然界中客观事物量的数量概念的一种认知过程

直接测量： 直读法、差值法、替代法、零值法

间接测量： 被测量的数值不能直接从测量仪器上读的，通过一定函数关系运算求得。

组合测量：

模拟测量： 特点：直观性强、灵活、简便、价格低；测量精度低，之时起读书误差难以达到

小于 $\pm 0.5\%$ 的要求

数字测量： 测量过程断续的，被测数值一段时间内的平均值

测量仪器： 感受件（传感器）、中间件（传递件）、效用件（显示元件）

主要性能指标： 精确度 $\delta_y = \pm \frac{\Delta_j}{A} \times 100\%$ δ_y 允许误差
 Δ_j 允许的最大绝对误差
恒定值、灵敏度、灵敏度阻滞、指示滞后时间 A 仪器的满量程刻度
一般测量值选择在仪器的满刻度的 1/3 到 2/3 之间

第二章：

测量仪器的动态特性分析： 研究动态测量时所产生的动态误差， 主要用以描述在动态测量过程中输出量与输入量之间的关系。

线性定常系统的性质： 叠加性、比例性、微分性、积分性、频率保持性

串联环节传递函数：
$$H(s) = \prod_{i=1}^n H_i(s)$$

并联环节传递函数：
$$H(s) = \sum_{i=1}^n H_i(s)$$

反馈链接传递函数： 正反馈 $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{H_A(s)}{1 - H_A(s)H_B(s)}$ 负反馈 $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{H_A(s)}{1 + H_A(s)H_B(s)}$

频率响应函数：
$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{a(\omega) + jb(\omega)}{c(\omega) + jd(\omega)} = A(\omega)e^{j\Phi(\omega)}$$

一阶频率响应函数：
$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{K}{j\omega + 1}$$
 幅频和相频特性
$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$$

$$\Phi(\omega) = \arctan(-\omega\tau) = -\arctan(\omega\tau)$$

幅值误差：
$$\varepsilon = \left| \frac{B-A}{A} \right| = |A(\omega) - 1| \times 100\% \leq M$$
 M通常取5%~10%
 振动测量仪中，M以分贝值的形式给出，
 取为0.5dB(约为5%)或1dB(12%)

第三章：

测量误差：系统误差、随机误差、过失误差

系统误差：仪器误差、安装误差、环境误差、方法误差、操作误差、动态误差

消除误差方法：消除产生系统误差的根源；用修正法消除系统误差；交换抵销法、替代抵销法、预检法

代数综合法：绝对误差：
$$\Delta = \pm \Delta_1 \pm \Delta_2 \pm \dots \pm \Delta_n = \sum_{i=1}^n \Delta_i$$

相对误差：
$$\delta = \pm \delta_1 \pm \delta_2 \pm \dots \pm \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i$$

几何综合法：绝对误差：
$$\Delta = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}$$

相对误差：
$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}$$

算术综合法：绝对误差：
$$\Delta = \pm (\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n) = \sum_{i=1}^n |\Delta_i|$$

相对误差：
$$\delta = \pm (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n) = \sum_{i=1}^n |\delta_i|$$

随机误差的特性：随机误差呈正态分布曲线

单峰性、对称性、有限性、抵偿性

标准误差：
$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2$$

直接测量误差的计算：BP₄₂₋₄₄

第四章：

电测仪表测定非电量优点：易于实现集中检测、控制和远距离测量；响应速度快，可测量瞬态值及动态过程；测量准确度和灵敏度高，可测量微弱信号并将其放大和进行长距离传输；电信号易于和计算机等进行连接，记录和处理数据方便

非电量电测系统：传感器、信号调节电路、记录和显示装置

电阻式传感器：将被测物理量的变化转换成电阻值的变化，再经相应的测量电路而最后显示或记录被测量值的变化。

○ 金属应变式传感器原理：金属的应变效应：金属丝的电阻值随其几何尺寸变化而改变的一种物理特性。由 3 部分组成：敏感元件、基底、引线

温度误差：有温度变化引起的敏感栅的电阻变化，从而导致的测量误差叫做温度误差

i 温度变化引起的敏感栅的电阻变化及附加变形

ii 试件材料与敏感栅材料的线胀系数不同，从而使应变片产生附加应变

温度补偿：桥路补偿：根据电桥原理，由温度变化引起的电阻变化相互抵消，其输出电压与温度无关；应变片自补偿：特定的应变片、双金属敏感栅自补偿应变片、热敏电阻补偿

金属应变片特点：

- 1) 性能稳定，精度高。（精度可达 0.05%，甚至 0.015%）
- 2) 测量范围宽。（如压力 0.03 ~ 1000MPa；力 0.1~107N）
- 3) 结构简单，使用方便。
- 4) 对环境条件适应能力强。（较大的温度范围、强磁场、核辐射、抗振动和冲击）

○ 半导体压阻式传感器原理：压阻效应：某些固体材料受到应力作用后，电阻率要发生变化的一种物理特性。

压阻式传感器特点：优点：灵敏度非常高，有时传感器的输出不需放大可直接用于测量；精度高，一般 0.1 ~ 0.05%，可达 0.01%固有频率高，响应快；结构简单，可实现微型化。

缺点：温度误差大，需温度补偿或恒温条件使用。

变阻式传感器：通过改变电路中电阻值的大小，将物体的位移转换为电阻的变化。由电阻元件及电刷（活动触点）两部分组成。

变阻式传感器的特点： 优点：结构简单、尺寸小、重量轻、价格低廉且性能稳定；受环境因素(温度、湿度、电磁场干扰等)影响小；输出信号大，一般不需放大。

缺点： 存在电刷与线圈或电阻膜之间摩擦， 因此需要较大的输入能量； 由于磨损不仅影响使用寿命和降低可靠性，而且会降低测量精度， 分辨力较低；动态响应较差， 适合测量变化缓慢的量。

气敏传感器： 半导体气敏元件与被测气体接触后， 会造成半导体性质的变化。 气敏传感器分为检测气体种类的气敏传感器和检测气体量的真空传感器

湿敏传感器： 利用某些材料的电阻值会随空气湿度的变化而变化的原理制成的传感器。 常用的湿敏传感器是利用水分子对元件材料表面较强的吸附和渗透性制成的水分子亲和力型湿敏元件

○ 电感式传感器原理： 基本工作原理为电磁感应，利用线圈自感或互感的变化，把被测物理量(位移、振动、压力、流量等)转换为线圈电感量变化。分为自感式和互感式两种。

○ 电容式传感器原理： 电容式传感器是将被测量变化 (如尺寸、压力等)转换成电容变化量的一种传感器。 可分为极距变化型， 面积变化型和介质变化型三种， 其中极距变化型应用最广泛。

○ 压电式传感器原理： 利用某些特殊材料的压电效应来完成力信号向电信号的转换。

顺/正压电效应： 某些晶体物质，如果沿其某一结晶轴受到外力的作用时，其内部有极化现象出现，在其受力表面会形成电荷集结；当外力撤销后，又重新恢复为不带电状态。

测量过程注意事项： 利用压电式传感器测量静态或准静态量值时，必须采取一定的措施 (如外电路负载无穷大时)，使电荷从压电晶片上经测量电路的漏失减小到足够小程度。

在动态力作用下， 电荷可以得到不断补充， 可以供给测量电路一定的电流， 故压电传感器适宜作动态测量。

○ 磁电式传感器原理： 也称感应式传感器。把被测物理量的变化转变为感应电动势，是一种机械能—电能变换型传感器。

特点： 不需要外部供电电源，电路简单，性能稳定，输出阻抗小，又具有一定的频率响应范围(一般为 $10 \sim 1000\text{Hz}$)，适用于振动、转速、扭矩等测量。但这种传感器的尺寸和重量都较大。

恒定磁通式磁电传感器的特点： 能直接测量线速度或角速度；测量位移或加速度；只适用于动态测量。

○ 热电式传感器原理： 将温度变化转换为电量变化的传感器，常用的：热电阻、热电偶

热电阻材料要求： 1) 在测温范围物理化学性质稳定；

2) 电阻温度系数尽可能大，以提高测量灵敏度；

3) 测量范围内电阻温度系数保持常数；

4) 具有抗腐蚀性，不易受被测介质腐蚀；

5) 材料容易提纯，确保较好的复制性，保证热电阻的互换性，价格便宜

热电偶的基本性质： 均质导体定律，中间导体定律，中间温度定律，标准电极定律

热电偶冷端温度补偿： 冷端温度 T_0 要受环境温度影响，难以维持在 0 ，所以必须对热电偶冷端采取一定措施以消除误差，称为热电偶的冷端温度补偿。

冷端温度补偿方法： 冷端恒温法：中间导体定律；冷端温度校正法：中间温度定律

补偿导线法（延伸导线法）：将热电偶冷端引到温度已知的地点；

热电偶冷端补偿器：中间温度定律

热电偶测温的优点： 结构简单，使用方便，易制造（大小和形状可自行配置）；测温范围广（低温用热电偶可达 -270 ，高温用热电偶可达 3000 ）；可制成小尺寸热电偶，热惯性小，适于快速动态测量、点温度测量；有源传感器，测量时无需外加电源；易于实现远距离传输和测量

○ 光电式传感器原理： 利用光电效应通过光电元件将相应光信号转换成电信号。分为外光电效应、内光电效应和光生伏特效应。

外光电效应： 在光线作用下，物质内的电子逸出物体表面向外发射的现象。

内光电效应： 半导体材料受光照后电阻率发生变化，使其导电性能增强的现象。

光生伏特效应：是指半导体材料 P-N 结受到光照后产生一定方向的电动势的效应。因此光生伏特型光电器件是自发电式的，属有源器件。

光电传感器的特点： 具有结构简单、非接触、反应快、不易受电磁等优点，应用广泛；不足是易受外界光干扰，对光信号的检测处理比较困难。

○ 霍尔传感器： 利用半导体的霍尔效应进行测量的一种非接触式传感器

霍尔效应： 长为 l 、宽为 b 、厚为 d 的半导体薄片置于磁场中，当长度方向有电流通过时，在垂直于电流和磁场的方向上（即宽度方向）将产生横向电场，这种物理现象称为霍尔效应，相应的电压称为霍尔电压。

霍尔传感器的特点与应用： 霍尔元件在静止状态下，具有感受磁场的独特能力；

具有结构简单、体积小、噪声小、频率范围宽、动态范围大（输出电势变化范围可达 1000:1）、寿命长等特点，获得广泛应用。

在测量技术中用于将位移、力、加速度等量转换为电量的传感器；在计算技术中用于作加、减、乘、除、开方、乘方以及微积分等运算的运算器等。

○ 数字式传感器特点：数字式传感器直接将非电量转换为数字量，采集时不需要进行 A/D 转换；具有使用方便、抗干扰能力强、适用于远距离传输等优点

数字式传感器分类： 代码型：以编码形式产生数字信号； 计数型：将连续信号处理后输出为离散脉冲信号

传感器综述： 结构型传感器：依靠传感器结构参数的变化实现信号转换。电容式

物性型传感器：依靠敏感元件材料本身物理性质的变化来实现信号变换。压电式

能量（有源）型传感器：将机械量直接转换成电量。常见的有磁电式、电动式、压电式等。

参数（无源）型传感器：将机械参数的变化转换成电参量的变化。如电阻、电感和电容等的变化，常见的有电阻式、电感式、电容式等。

传感器的选用原则： 灵敏度；响应特性；线性范围；稳定性；精确度；工作方式

具体见 PPT-9

信号处理电路：对传感器输出信号进行各种形式的处理，将信号调制成能被数据采集系统接受或能驱动记录设备的标准信号。

测量系统的性能：不仅取决于传感器本身，而且也取决于信号处理电路的性能

传感器信号处理电路：电桥电路，放大器，滤波器

电桥电路特点：电桥电路具有灵敏度高、测量范围宽、容易实现补偿

直流电桥电路： 单臂测量、半桥双臂测量、半桥对臂测量、四臂全桥测量

直流电桥加减特性： 两相邻桥臂的应变值相减；两相对桥臂的应变值相加

$$\text{有 } U_{BD} = \frac{1}{4} U_0 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{且} \quad \frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k \varepsilon \quad \text{则} \quad U_{BD} = \frac{1}{4} U_0 k (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

计算可见课本 BP95

第五章：

温度测量方法： 接触式测温—— 利用热传递原理测量温度； 非接触式测温—— 利用不同温度物体产生热辐射能量的大小测量温度。

接触式与非接触式测温方法比较：

	接触式	非接触式
必要条件	感温元件必须与被测物相接触	感温元件能接收到物体辐射能
特点	易破坏被测温度场；不适宜热容量小的物体温度及动态温度测量；便于多点、集中测量和自动控制	被测物体温度不变；不适宜测量低温；适宜动态温度及表面温度测量
测温范围	适宜1000℃以下的温度测量	适宜高温测量
测温精度	测温范围的1%左右	一般10℃左右
滞后	较大	较小

温度计分类：

	温度计分类	使用温度范围
膨 胀 式	压力式温度计	- 80 ~ 550 ℃
	双金属温度计	- 100 ~ 600 ℃
	水银温度计	- 38 ~ 356 ℃
	有机液体温度计	- 100 ~ 100 ℃
接 触 式	铂电阻温度计	13.81 ~ 961.78 K
	铜电阻温度计	- 50 ~ 150 ℃
	铱铁电阻温度计	0.1 ~ 73 K
	镍电阻温度计	- 60 ~ 180 ℃
	碳电阻温度计	30 K 以下至 mK
	热敏电阻温度计	- 40 ~ 150 ℃
热 电 偶 式	铜 — 康铜	- 200 ~ 400 ℃
	铂铑 — 铂	0 ~ 1800 ℃
	镍铬 — 考铜	0 ~ 800 ℃
	镍铬 — 镍硅（镍铝）	0 ~ 1300 ℃
非 接 触 式	全辐射高温计	700 ~ 2000 ℃
	单色光学高温计	800 ~ 2000 ℃
	比色光学高温计	800 ~ 2000 ℃
	红外温度计	100 ~ 700 ℃

○ 膨胀式温度计： 利用物质的体积随温度升高而膨胀的特性。可分为 玻璃管液体温度计、压力式温度计、双金属温度计

玻璃管液体温度计特点： 优点：精度较高，素数直观，结构简单，价格便宜，使用方便，应用广泛缺点：信号不能远程传输，不能用于自动测量系统

水银温度计特点： 不沾玻璃，不易氧化，容易获得很高的精度；在 200 以下，水银的膨胀系数几乎和温度成线性关系；可作为精密的标准温度计。

存在的问题：

零点漂移：玻璃的热滞后效应带来的零点漂移误差

露出液柱的校正：温度计插入深度不够引起的误差，校正公式 $t = t_B - n(t_B - t_A)$

非线性误差

工作液的迟滞性：液体与管壁间的表面吸附力

压力式温度计： 压力式温度计由温包、 毛细管和弹簧管所构成的密闭系统和传动指示机构组成。

压力式温度计的特点： 必须将温包全部浸入被测物质中； 温包材料具有良好导热性能和防腐蚀性能；毛细管不能太长，否则会由于环境温度波动带来较大误差；使用方便，抗振动；精度较低。

双金属温度计 :用线膨胀系数不同的两种金属构成的金属片作为感温元件， 当温度变化时，两种金属的膨胀不同，双金属片就产生与被测温度大小成比例的变形。

○ 热电阻式温度计原理： 利用金属导体或半导体的感温电阻，把温度的变化转换成电阻值变化的传感器，分为热电阻和热敏电阻。

○ 热电偶温度计： 热电偶是利用“热电效应”制成的一种测温元件。热电偶温度计是目前温度测量中应用极为广泛的一种温度测量系统。

热电偶温度计组成： 由热电极、绝缘管（或绝缘子）、保护套管、接线盒等几部分组成。

温度计的校验目的： 重新确定温度计的等级精度

温度计的校验方法：

比较法： 利用高一级的标准温度传感器与被标定温度计在同一温度环境下进行对比， 误差超过允许值为不合格。

定点法：被标定温度计测量某些物质的固定点（标准温度点），与标准值进行比较，根据它们之间的差异计算出被标定温度计的基本误差，确定其精度等级。

测温元件的安装： 尽量与被测介质形成逆流； 使测温元件处于管道中心， 即应处于流速最大处；测温元件的插入深度要符合要求； 在直径小的管道上安装测温元件可装置扩大管； 测温元件插入处的管道壁要有足够的绝热层（减少辐射和导热引起的误差）。

接触式温度测量误差及减小误差的措施：

- a 热辐射引起的误差：采用表面光滑的感温元件保护套筒，减小辐射传热系数；改善对流传热条件，增大气体对感温元件的对流传热系数；给感温元件加防辐射隔离罩。
- b 热传导引起的误差： 从感温元件的热导率、 内外径及感温元件的插入深度着手减小该误差。
- c 高速气流的测温误差：与传感器的恢复系数及气流的马赫数有关；需专门进行设计。
- d 安装误差：根据不同被测物质和工作条件，采取适当的安装方法，尽量减小误差。
- e 感温元件响应引起的误差：与传感器的时间常数有关（影响时间常数的因素包括感温元件的质量、比热、 插入的表面积、 表面传热系数等）；测瞬时温度采用时间常数小的感温元件；测平均温度可用时间常数大的感温元件。

非接触式温度计： 利用测定物体辐射能的方法测定温度。

○ 单色辐射式光学高温计： 利用亮度比较取代辐射出射度比较进行测温。

“亮度温度” < 实际温度：在波长为 λ T 时的亮度 B

绝对黑体在温度 T_s 时的亮度 B_0 T_s 称为亮度温度。

分类：灯丝引灭式光学高温计：使用方便、灵敏度高、测量范围广， 主观误差大、测量不连续、也不能实现自动测量。

光电高温计：灵敏度高、测量范围广、响应时间短、可实现自动测量与控制。 特点：灵敏度最高，比色温度计次之，全辐射温度计最低。

○ 全辐射高温计： 根据绝对黑体的全辐射定律式设计的高温计。

“辐射温度” > 实际温度：温度为 T 的物体全辐射出射度 M 等于温度为 T_s 的绝对黑体全辐射出射度 M_0 时， T_s 称为辐射温度。

特点：环境有杂质时，受影响最大，光学温度计次之，比色温度计最小。

○ 比色高温计： 通过测量热辐射体在两个波长的光谱辐射亮度之比来测量温度。

“比色温度”：温度为 T 的物体在两个波长下的亮度比值等于温度为 T_s 的黑体在同样波长下的亮度比值时， T_s 称为比色温度。

分类：单通道光电比色高温计、双通道比色高温计。

特点：准确度高，响应快，可观察小目标，误差最小，与实际温度最接近。

气体温度计原理及分类： 属于低温温度计。 基本原理为理想气体状态方程 （测出的温度就是热力学温度）。分类有定容气体温度计、定压气体温度计以定容法为主。

气体温度计的修正： 工作气体的非理想性修正；毛细管体积修正；测温泡体积冷缩的修正；
热分子压差的修正

第六章：

压力测量的基本方法：

- a.重力与被测压力平衡法：液柱式压力计、活塞式压力计。
- b.弹性力与被测压力平衡法：弹簧管压力计、波纹管压力计、波纹管压差计。
- c.利用物质某些与压力有关的物理性质进行测压：压阻式传感器、压电式传感器。

○ 液柱式测压仪表： U 型管压力计、单管压力计、斜管微压计。

测量误差来源：环境温度变化、重力加速度变化、毛细现象、安装误差、读数误差。

○ 弹性测压仪表： 弹簧管压力计、波纹管压差计、膜式（膜片、膜盒）压力计。

测量误差来源：迟滞误差、温度误差、间隙和摩擦误差。

○ 最高压力表： 常测量内燃机气缸内的最高燃烧压力。机械式和气电式。

○ 典型测压传感器： 石英晶体压电传感器 （瞬态）、电容式差压传感器 、电阻应变式传感器、电感式传感器、霍尔压力式传感器。

气流总压： 在被流体绕流的物体上有一些点上的流体完全滞止， 即速度等于零， 称为临界点 /驻点。临界点 /驻点上的压力就是总压 （滞止压力）。

气流总压测量方法： 总压管的管口轴线对准气流方向， 另一端管口与压力计连通， 这样便可测出被测点的气流总压与大气压之差。

总压管的选择： 根据气流速度、 流道条件、 对气流方向的不敏感性来选择总压管的结构型式；

在满足上述要求的前提下， 总压管的结构越简单越好； 在保证结构刚度的情况下， 应使总压管尺寸较小，从而减少对流场的干扰。

总压管的类型： 单点 L 形总压管；圆柱形总压管；带导流套的总压管；多点总压管 ；附面层总压管

气流静压测量方法：静压测量有时在机械的固体壁面处进行，有时需在流场中进行；前者采用壁面静压孔，后者采用静压管。

壁面静压孔测量加工要求：开孔直径以 0.5~1.0mm 为宜，此时由开孔引起的误差较小；静压孔的轴线应与管道内壁面垂直，孔的边缘应尖锐、无毛刺、无倒角；静压孔的长度 /直径 3；连接静压孔与导压管的管接头要固定在管道壁上。

静压管的类型及特点：

- a.L 型静压管：结构简单，加工容易，轴向尺寸大，对流场干扰大，测量误差大。
- b.圆盘形静压管：与圆盘平面方向不敏感，对气流与轴线夹角 极为敏感，加工精度要求高。
- c.带导流管的静压管：不敏感偏流角大，可用于三元气流测量，结构复杂，加工困难。
- d.毕托管（风速管、动压管、速度探针）

测压仪表的标定：

静态标定：静压平衡原理。

动态标定：得到频率响应特性，确定其适用范围和动态误差等。对比法和激波管

第七章：

毕托管组成：由总压探头和静压探头组成，利用流体总压与静压之差测速。

毕托管特点：结构简单，制造方便，价格低廉，精度高。

测速原理： $v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p^* - p)}$ 引入修正系数则有 $v = \zeta \sqrt{\frac{2}{\rho}(p^* - p)}$ 校准系数：1.01~1.02

当被测气体且流速 $Ma > 0.3$ 时，需考虑压缩性效应。 $v = \zeta \sqrt{\frac{2(p^* - p)}{\rho(1 + \varepsilon)}}$

压缩性系数 与马赫数 Ma 的对应值

<i>Ma</i>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ε	0.0025	0.0100	0.0225	0.0400	0.0620	0.0900	0.1280	0.1730	0.2190	0.2750

对于可压缩气体，以马赫表示速度：

$Ma = \zeta \sqrt{\frac{2(p^* - p)}{kp(1 + \varepsilon)}}$ k：对于空气取 1.40

使用毕托管的几点要求：普通毕托管测速要求流动 Ma 小于临界 Ma_c ；对高 Ma 下（ Ma 接近 1）的流动，采用细长的锥形探头可避免在其头部产生脱体激波；测量超音速气流需要选用特定形式的总压和静压探头，并进行严格标定。

二维气流速度的测量： 平面流动方向的测量， 一般采用方向探针来测量， 即三孔测速管， 可测量流速的大小和方向。 详细计算及测量方法见 BP₁₄₅₋₁₄₆

毕托管的标定： 各种毕托管由于结构上的不同和制造上的差异， 在制造后或使用前都必须经过标定。 a.在校准风洞里进行 b.自制风管 +标准毕托管

热线 (热膜)测速技术： 热线风速仪用于测量气体或液体的平均速度、脉动速度等多种流动参数

测量原理： 利用探头热量在气流中的散失强度与气流速度之间的关系来测量流速

$$I^2 R_W = hF(T_W - T_f)$$

对与流体流动方向垂直放置的探头，其散热量可表示为：

$$I^2 R_W = hF(T_W - T_f) = (a + bv^n)(T_W - T_f)$$

测速方法： 恒流式、恒温 (恒电阻)式。

恒流式受热惯性影响， 灵敏度随被测流体流动变化频率减小而降低， 且产生相位滞后等缺点；所以热线风速仪大多采用频率特性较好的恒温式。

热线风速仪的探头结构： 热线、热膜，三维热线探头

热线风速仪的特点：

a.几何尺寸小，对来流干扰较小，能测量附面层及狭窄流道内的参数；热惯性小，可测量透平压缩机旋转失速、燃烧室内湍流强度等脉动气流参数；

b.热膜探头机械强度高， 受振动小， 可在恶劣流场中工作， 但其频率响应范围比热线探头窄，

c.测量精度不高，工艺复杂，损坏后不易修复；

d.热线探头机械强度低，承受的电流小，不适于在液体或带有颗粒的气流中工作。

第八章：

瞬时流量： 流体在单位时间内流经某一有效截面的体积或质量，称瞬时流量

体积流量： $q_v = uA$

质量流量： $q_m = \rho q_v$

○ 容积型流量计： 单位时间内被测流体充满 (或排出)某一定容容器的次数： $q_v = n \cdot V$

形式：椭圆齿轮式、腰轮式 (罗茨)流量计、刮板式等

特点：流动状态对测量的影响小，精度较高；有一定的压力损失；适合于高粘度、低雷诺数

流体介质测量；不宜高温、高压、脏污介质的测量。

○ 速度型流量计： 当流通截面确定时，流体体积流量与截面上平均流速成正比 $q_V = u_m \cdot A$

形式：节流式、转子式、涡轮式、电磁式、超声波式

特点：使用性能好，用于高温、高压介质的测量；流动状态、 Re 数对测量的影响大

○ 质量型流量计： 以测量与流体质量有关的物理效应为基础，有直接式、推导式和温度压力补偿式。

压力损失： 压力损失小，流体能消耗小，输运流体的动力要求小，测量成本低。反之则能耗大，经济效益相应降低。

流量计的选用原则： 根据被测介质的性质选择； 根据用途选择； 根据工况条件选择； 根据安装条件选择

流量方程：

$$q_V = \alpha \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$
$$= \frac{\pi}{4} \alpha \beta^2 D^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

α — 流量系数；
 ε — 流体膨胀校正系数（不可压缩 $\varepsilon=1$ ）
 d — 节流元件的开孔直径；
 D — 流动管道内径；
 $\beta=d/D$ — 直径比。

节流装置的基本组成： 节流元件、 取压装置、 节流元件上下游的局部阻力元件和直管段以及连接法兰组成。

节流装置： 板孔、喷嘴、文丘里管。孔板的 Δp 最大，文丘里管的静压损失 Δp 最小，而喷嘴的 Δp 值则介于两者之间。

静压力损失： 流体通过节流装置后有一部分静压力不能恢复， 从而造成压力损失， 即所谓静压力损失 Δp 。

取压方式： 根据节流装置取压口位置可将取压方式分为理论取压、角接取压、法兰取压、 径距取压与管接取压。

流体条件： 流体连续地充满流经圆管；流体为单相；流速稳定，不存在漩涡，流量不随时间变化。

管道条件： 流元件前后必须有足够长度的直管段； 直管段截面应为圆形， 即节流件及取压装置安装在两圆形直管之间。

安装条件： a.节流元件前端面必须与管道轴线垂直；

b.节流元件的开孔必须与管道同心；

c.节流元件在受热时能自由膨胀，防止变形；

d.调节流量用的阀门最好安装在节流元件后最小直管段长度以外。

选型 : 下列情况优先选取标准喷嘴 :

被测流体易沉淀或有腐蚀性 ; 对节流元件的压力损失有严格要求 ; 被测管道较粗糙 ; 高参数、大流量生产管道的长期在线检测。

标准节流装置主要参数的确定 : 1) 流量系数由实验获得 , 当测试条件不符合实验条件则应按相关标准进行修正。

$$\alpha = K_1 K_2 K_3 \alpha_0 \quad \text{字母表示见 BP}_{165}$$

2) 流体膨胀校正系数与节流件类型、节流件前后的压比、被测流体的等熵指数及直径比有关 , 可查阅标准文件。

压差计 : 节流式流量计的信号检出部分

标准节流装置的配套仪表 : 双管差压计 ; 双波纹管差压计 ; 膜盒式差压计 ; 气动差压变送器

节流式流量计测量结果的修正 : 详见课本 **BP**₁₆₇

理论应用 : 详见课本 **BP**₁₆₈