

复习提纲

1. FS, T90 是什么意思?

FS: 飞秒, 一千万亿分之一秒。

T₉₀: 气体检测仪从读数 0 变到环境中所测气体浓度的 90% 时所消耗的时间

2. 过量空气系数与氧浓度的关系, 理论烟气量的计算方法

四种基准与工业分析成分或元素分析成分之间的关系:

Fc		V					A		M	
C	H	O	N	S _o	S _p	S _s	A'	M _{inh}	M _f	
daf										
d										
ad										
ar										

Fc—固定碳 V—挥发分 A—灰分 M—水分 C—碳
 N—氮 S_o—有机硫 S_p—硫化铁硫 H—氢 O—氧
 S_s—硫酸盐硫 M_{inh}—内在水分 M_f—外在水分

碳燃烧: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ C/12
 氢燃烧: $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$ H/4
 硫燃烧: $S + O_2 \rightarrow SO_2$ S/32
 燃料中的氧: $O \rightarrow 1/2 O_2$ -O/32

① 理论需空气量

$$\begin{aligned}
 V_{\text{理空}} &= 22.4 * (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) / 0.21 \\
 &= 106.7 * (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) \text{ (以体积表示)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{\text{理空}} &= 32 * (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) / 0.23 \\
 &= 139.1 * (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) \text{ (以质量表示)}
 \end{aligned}$$

② 实际需空气量 & 过量空气系数 α / 拉姆他

实际需空气量通常是理论需空气量的 λ 倍, λ 称为过剩空气系数

$$V_{\text{空}} = \lambda * V_{\text{理空}} \text{ (生物质 } \lambda = 1.4 \sim 1.7)$$

③ 过量空气系数与烟气氧浓度

- 通过分析炉烟中氧含量，测量过量空气系数，维持燃料燃烧经济性及清洁性。

过量空气系数

$$\alpha = 21 / (21 - O_2)$$

如：烟氧浓度要求大于6%。

$$\alpha = 21 / (21 - 6) = 1.4$$

$$Q_r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

- Q_r—每公斤燃料带入的热量，
- Q₁—锅炉有效利用热量，
- Q₂—排烟热损失，(最大，主要取决于过量空气系数)
- Q₃—气体不完全燃烧热损失，
- Q₄—固体不完全燃烧热损失，
- Q₅—锅炉散热损失，
- Q₆—灰渣物理热损失及其它热损失

③理论烟气量

□ 烟气量-根据前述反应公式计算

$$V_{CO_2} = 22.4 * (C/12)$$

$$V_{H_2O} = 22.4 * (H/2 + W/18)$$

$$V_{SO_2} = 22.4 * (S/32)$$

$$V_{O_2} = (\lambda - 1) * V_{理空} * 0.21$$

$$V_{N_2} = \lambda * V_{理空} * 0.79 + 22.4 * (N/28)$$

(假设燃料中的N以N₂形式排放)

所以，总烟气量是：

$$V = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}$$

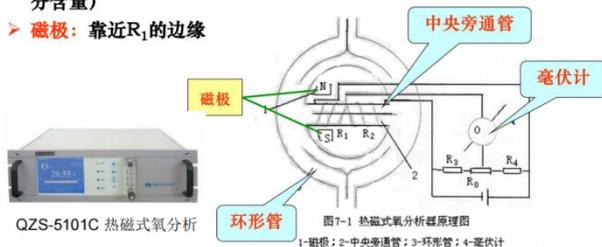
$$= (\lambda - 0.21) * V_{理空} + 22.4 * (C/12 + H/2 + W/18 + S/32 + N/28)$$

(理论烟气量计算可取λ=1)

3. 磁性氧量的工作原理？

热磁式氧分析器的组成

- 环形室
- 中央旁热磁式氧通管：水平放置；管上绕有二个铂丝加热线圈R₁和R₂，它们与另二个锰铜合金丝做成的电阻器R₃和R₄组成测量电桥的四个臂，电桥线路对角线上连接毫伏计(刻度为氧的百分含量)
- 磁极：靠近R₁的边缘



工作原理：

- 抽气器将被测气体连续吸入环形室。
- 气体中无氧时，旁通管中无电流流过，测量电桥处于平衡状态，输出电压为零，仪表指针指零。
- 气体中含氧时，【氧气被不均匀磁场吸入旁通管，被发热元件 R1 加热，磁化率降低，所受磁场引力减小，被随后低温氧气推出。氧气排出在磁道中形成磁风（称热磁对流）。】氧气在旁通管中流动时，在 R1 处被加热，流至 R2 处时，因其已被加热，对 R2 影响较小，故 $T_{R1} < T_{R2}$ ，电桥失衡，输出电压信号，信号大小反映了气体氧含量。
- 若气体中混有 NO，将影响测量结果，引起误差

4. 氧化锆的工作原理，温度对测量输出的影响，氧化锆最佳工作温度范围，能斯特公式，氧化锆输出电压

①工作原理

以氧化锆作固体电解质，高温下的电解质两侧氧浓度不同时形成浓差电池，浓差电池产生的电势与两侧氧浓度有关，如一侧氧浓度固定，即可通过测量输出电势来测量另一侧的氧含量。

②能斯特公式&氧化锆输出电压

$$\text{能斯特方程: } E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$$

式中 $\varphi_2 = p_2/p$, 参比气体中氧的容积成分;

$\varphi_1 = p_1/p$, 被测气体中氧的容积成分;

R 气体常数, n 参加反应的电子数; F 法拉第常数。

氧化锆探头的理论电势输出值

$$E = 1000 \frac{RT}{nF} \ln \frac{p_0}{p_1}$$

E——氧浓差电动势, mV;
R——气体常数, 8.3145 J/mol·K;
T——氧化锆探头的工作温度, K (K = 273.15 + t°C)
n——参加反应的电子数, (对氧而言, n=4)
F——法拉第常数, 96500C;
p₀——参比气体的氧分压;
p₁——被测气体的氧分压。

氧化锆探头的理论电势输出值

如被测气体的总压力与参比气体的总压力相同, 则上式可改写为

$$E = 1000 \frac{RT}{4F} \ln \frac{c_0}{c_1}$$

c₀——参比气体中氧的体积百分含量, 一般用空气作参比气, 取c₀=20.6% (干空气氧含量为20.9%, 25°C、相对湿度50%时, 氧含量约为20.6%)
c₁——被测气体中氧的体积百分含量, O₂%。

$$\begin{aligned} E &= 2302.5 \frac{RT}{4F} \lg \frac{20.6}{c_1} = 0.0496T \lg \frac{20.6}{c_1} \\ &= 0.0496(273.15 + t) \lg \frac{20.6}{c_1} \end{aligned}$$

③温度影响及最佳温度

因为氧浓差电势与氧化锆管工作的热力学温度成正比, 因此氧化锆管应处于恒定温度下工作或采用温度补偿装置, 以使输出不受温度影响。

- 当工作温度过低时, 氧化锆内阻很高, 正确测量其电势比较困难, 故要求工作温度在 **600°C** 以上, 但不得超过 **1200°C**。
- 当温度过高时, 烟气中可燃物质会与氧化合而形成燃料电池, 使输出增大, 产生误差, 目前常用的工作温度为 **800°C**。

类型	测量范围 测量精度	价 格	适用场合	工作原理、特点
直插式	0~10%O ₂ 0~25%O ₂ ±1.5%FS	低	中、低温直插式氧化锆探头：探头自带加热炉(自热式)，适用烟气温度<700℃的场合。主要用于火电厂锅炉、工业锅炉等，是目前用量最大的一种探头。	电势法(电位法) 1.对烟气温度波动敏感，须有温控系统，但对烟气压力波动不敏感，一般无需压力补偿 2.结构简单，价格低。 3.需要参比气、零点气和量程气。
			高温直插式氧化锆探头：探头靠高温烟气加热(旁热式)，适用于700~900℃的烟气测量。主要用于火电厂、石化厂燃煤炉、燃油炉等高温烟气场合。这种探头易受烟气温度波动的影响，应用受到一定限制。	
抽吸式	0~10%O ₂ 0~25%O ₂ ±1.5%FS	高	<ol style="list-style-type: none"> 用于烟温700~1400℃场合，例如钢铁厂的加热炉，也可用于烟温700~1400℃的燃油炉及一些烟尘含量较小的燃煤炉。对于烟尘含量大的燃煤炉，采样系统易堵，不推荐采用。 用于燃气炉，在氧化锆探头之前增加一个可燃气体检测探头，同时测量氧含量和可燃气体含量，用后者补偿前者，可以消除可燃气体对氧化锆探头的干扰和威胁。 	电流法 1.烟温变化无影响，无需温控(特别适合高温烟气测量)。 2.对样气流量波动敏感，须有流量控制。 3.结构较复杂，价格高 4.不需要参比气和零点气，仅用干燥空气校准即可。

(零点气，又

称为零点浓度气体，是指在自动化仪表测量过程中，用于确定仪表零点的一种已知浓度的气体。量程气，又称为测量范围气体，是指在自动化仪表测量过程中，用于标定仪表测量范围的一种已知浓度的气体。

➤ 应保持被测气体总压和参比气体总压相等，使氧分压能代表容积浓度。

➤ 须保证被测气体和参比气体都有一定的流速。由于浓差电池两侧氧浓度有趋向一致的倾向。

5. 不同烟气含氧量下，污染物浓度的折算

5.2 大气污染物基准氧含量排放浓度折算方法

实测的火电厂烟尘、二氧化硫、氮氧化物和汞及其化合物排放浓度，必须执行 GB/T 16157 规定，按公式 (1) 折算为基准氧含量排放浓度。各类热能转化设施的基准氧含量按表 4 的规定执行。

表 4 基准氧含量

序号	热能转化设施类型	基准氧含量 (O ₂) %
1	燃煤锅炉	6
2	燃油锅炉及燃气锅炉	3
3	燃气轮机组	15

$$c = c' \times \frac{21 - O_2}{21 - O_2'} \quad (1)$$

式中：
 c ——大气污染物基准氧含量排放浓度，mg/m³；
 c' ——实测的大气污染物排放浓度，mg/m³；
 O_2' ——实测的氧含量，%；
 O_2 ——基准氧含量，%。

核心公式

污染物浓度的折算公式为：

$$C_{\text{折算}} = C_{\text{实测}} \times \frac{21\% - O_{\text{基准}}}{21\% - O_{\text{实测}}}$$

参数说明：

- $C_{\text{折算}}$ ：折算到标准氧含量后的污染物浓度（如mg/m³、ppm等）；
- $C_{\text{实测}}$ ：实际测量的污染物浓度；
- $O_{\text{基准}}$ ：标准规定的基准氧含量（不同行业取值不同，见下文）；
- $O_{\text{实测}}$ ：烟气中实际测量的氧含量（%）；
- 21%：空气中氧气的理论体积含量。

行业标准氧含量 ($O_{\text{基准}}$)

不同行业或设备对应的基准氧含量不同，常见标准如下：

1. **燃煤/燃气锅炉**：9%（《锅炉大气污染物排放标准》GB 13271）；
2. **工业炉窑**：11%（如钢铁、水泥行业）；
3. **垃圾焚烧炉**：11%（《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485）；
4. **燃气轮机**：15%（部分国际标准）；
5. **柴油发电机**：按实际标准规定（通常为5%~15%）。

6. 导热式烟气分析仪的原理，导热系数差别对测量精度的影响

一、原理

对于多组分气体，由于组分含量不同，混合气体导热能力将会发生变化。根据混合气体导热能力的差异，就可以实现气体组分的含量分析。

混合气体的导热系数是由所含组分气体的导热系数共同决定的。对于彼此之间无相互作用的多组分气体，其导热系数可近似地认为是

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i$$

各组分导热系数按组成含量的加权平均值，即 $\lambda_m = \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i$ 。根据混合气体导热系数与各组分导热系数之间的关系，就可以实现多组分气体的含量分析。

【热导池的工作原理：

当电阻元件通过电流 I 时，电阻吸收的功率将全部转换成热量。此热流量一方面使电阻元件本身温度升高，另一方面也向周围散失。

电阻元件向外散失的热量主要是靠热导池内气体的导热。通过电阻元件的电流，气体成分以及热导池壁面温度一定时，电阻元件温度

上升到某一数值后，便会出现电源供给的热量与气体的导热系数相平衡的情况，以后电阻元件的温度以及热导池内的温场分布都将保持不变。】

热导式气体分析仪
热导池的特性方程

$$R = \frac{R_0(1 + \alpha t_c)}{(1 - \alpha \frac{I^2 R_0}{\lambda_m K})}$$

当电阻丝通过的电流 I 和热导池的壁面温度 t_c 固定时，电阻丝的阻值只与分析气体的导热系数有关。测量电阻丝阻值，便可对多组分气体待测组分的含量分析。

二、导热系数差别对测量精度的影响

1) 仪器的灵敏度与两个组分导热系数之差成正比，即两组分导热系数相差越大，仪器的灵敏度就越高。

2) 对于烟气和大多数多组分混合气体，各组分之间满足：

①除待分析的组分外，其余组分的导热系数接近的程度越高，测量精度越高。若个别气体的值与其它背景气体的值相差较远时，则被视为干扰成分，在分析之前要去掉。

②待分析组分与其余组分的导热系数相差很大，以保证仪器有较高的灵敏度。

③导热系数受温度影响：气体的导热系数通常与温度有关。当温度升高时，分子运动加剧，导热系数随之增大，需恒温控制或温度补偿算法；

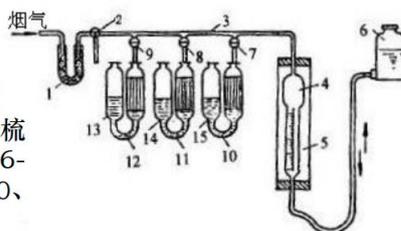
7. 奥氏烟气分析仪的原理

基本原理：烟气样品依次通过不同吸收液，每种吸收液选择性吸收特定气体，通过测量吸收前后的体积差，计算各成分的体积百分比。

剩余未被吸收的气体通常为氮气（N₂）等不可燃成分。

结构示意图：

- 三个装有吸收剂的吸收瓶，吸收瓶分别通过旋阀7、8、9与梳形管相连。
- 梳形管一端经三通阀与取样点或大气相通，另一端与量管相连。
- 量管下接平衡瓶，以吸入或排出气体。
- 过滤器：用于干燥气体。



奥氏气体分析仪结构示意图
1-过滤器；2-三通旋塞；3-梳形管；4-量管；5-水套管；6-平衡瓶；7、8、9-旋阀；10、11、12-吸收瓶；13、14、15-缓冲瓶

分析步骤：

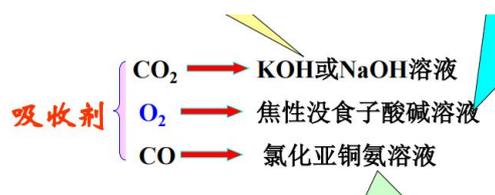
1) 仪器气密性检查

关闭7、8、9使三通阀与大气相通，使平衡瓶6升至一定高度，然后关闭三通阀，观察量管内水面，若5min不降，说明无漏气，可开始分析。

2) 液面高度调节

将三个吸收瓶中吸收液面调至同一高度，然后把量管4内的空气全部排出，用待测气体试样将容器清洗几次，即可取气体试样100ml进行分析。

3) 成分测定



分析顺序：CO₂→O₂→CO

①CO₂、SO₂吸收：烟气通过KOH溶液，CO₂、SO₂被完全吸收，剩余气体体积为V₂。使用新鲜碱液时，吸收较快，往复通过4~5次可完全

吸收。吸收量 1ml KOH——40ml CO₂

废气中 SO₂ 含量较小,故一般计入 CO₂ 中或与 CO₂ 一并用 RO₂ 表示。

②O₂吸收: 剩余气体通过焦性没食子酸溶液, O₂被吸收, 体积减少至 V₃。分析须按顺序进行, 因 Cu(NH₃)₂Cl 也能吸收 O₂。

③CO 吸收: 若分析 CO, 再通过氯化亚铜氨溶液吸收, 体积降至 V₄。

④三次吸收后剩余气体为 N₂ (%) : $N_2 = 100 - CO_2 - O_2 - CO$

优缺点: 优点是构造简单, 轻便, 操作容易, 分析速度快, 缺点是精度不高, 不能适应更复杂的混合气体分析。

8. 颗粒球形度的定义, 不同目数的筛子对应的颗粒直径 (200, 400 目对应的颗粒直径是多少?), 颗粒的粒度分布有那些统计基准, 粒度分布的累积曲线? 标准偏差和分选系数的定义, 分选系数接近于 1.0 代表什么?

1) **球形度:** 与颗粒等体积的球的表面积与颗粒的表面积之比

$$\psi_w = \left(\frac{d_V}{d_S} \right)^2$$

可以看出, 1. $\psi_w \leq 1$; 2. 颗粒为球形时, ψ_w 达最大值。

2) 不同目数的筛子对应的颗粒直径&200 目, 400 目对应的颗粒直径

国际标准筛制: Tyler(泰勒)标准 单位: 目

目数为筛网上 1 英寸 (25.4mm) 长度内的网孔数

200 目的筛孔尺寸 0.074mm; 400 目的孔径 38 μ m (0.038mm) (目前

标准筛系列中最细的)

标准规则: 以200目的筛孔尺寸0.074mm为基准, 乘或除模 $(\sqrt{2})^n$ (或) $(\sqrt[4]{2})^n$, 则得到

主模系列:

$0.074 \times (\sqrt{2})^n$ 得到比200目粗的筛孔尺寸

$0.074 \times (\sqrt{2})^{-n}$ 得到比200目细的筛孔尺寸

$=0.074 * \text{power}(\text{sqrt}(2.0), n | -n)$

副模系列:

$0.074 \times (\sqrt[4]{2})^n$ 得到比200目粗的筛孔尺寸

$0.074 \times (\sqrt[4]{2})^{-n}$ 得到比200目细的筛孔尺寸

$=0.074 * \text{power}(\text{power}(2.0, 0.25), n | -n)$

3) 粒度分布的统计基准

①个数基准分布(又称频度分布): 以每一粒径间隔内的颗粒数占颗粒总数的比例。

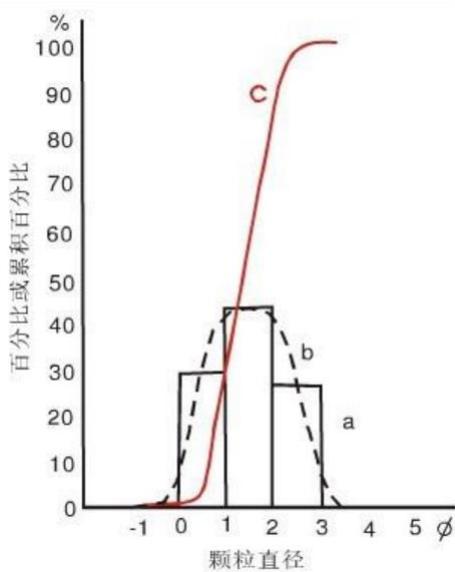
②长度基准分布: 以每一粒径间隔内的颗粒总长度占全部颗粒的长度总和的比例。

③面积基准分布: 以每一粒径间隔内的颗粒总表面积占全部颗粒的总表面积的比例。

④重量基准分布: 以每一粒径间隔内的颗粒总重量占全部颗粒的总重量的比例。

4) 粒度分布的累积曲线

用粒度分析成果中的累积重量百分比数作成的图。横坐标仍然表示粒径, 而纵坐标表示的是各粒级的累积含量。



5) 标准偏差和分选系数

标准偏差和分选系数是用来表示颗粒大小均匀程度的参数。

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

标准偏差： ϕ_{16} 和 ϕ_{84} 分别代表累积曲线上百分含量为 16%、84% 处的粒径（ ϕ 值）

$$S_0 = \frac{P_{25}}{P_{75}}$$

分选系数： P_{25} 和 P_{75} 分别代表累积曲线上颗粒含量 25% 和 75% 处所对应的颗粒直径。当颗粒分选很好时， P_{25} 和 P_{75} 两值很靠近，所以 S_0 值就接近于 1；相反， S_0 值越大则说明分选性越差。根据 S_0 值可以划分分选等级： $S_0=1\sim 2.5$ ，分选好； $S_0=2.5\sim 4.0$ ，分选中等； $S_0>4.0$ ，分选差。

6) 分选系数接近于 1.0 代表：颗粒大小均匀程度很好。

9. 平衡流、冻结流的差别？斯托克斯准则的定义

气体-颗粒两相混合物的流动中，颗粒的速度与输送气体的速度相等时，称为平衡流。

如果颗粒的速度不受输送气体的影响，或者说，颗粒没有足够的时间

来响应气体流场的变化，对于这种流动称为冻结流。

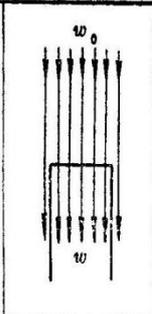
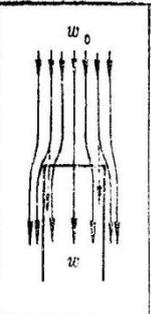
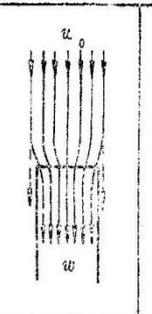
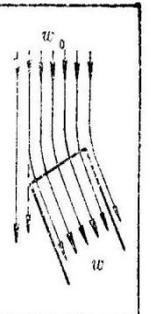
因此，平衡流也可以理解为颗粒有充分时间响应气体流场的变化，使颗粒始终保持与气体的速度相等。

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 u_g}{18\mu_g L}$$

$St \ll 1$ 称平衡流

$St \gg 1$ 称冻结流,此时颗粒的运动不受流场变化的影响而接近常数，根据经验，的流动可看着平衡流。

10. 为什么要等速取样？不同取样流速情况下对颗粒粒度分布测量的误差是怎么样子的？

取 样 工 况				
取样速度 w	$w = w_0$	$w < w_0$	$w > w_0$	$w = w_0$
取样粉尘浓度	准确	偏高	偏低	偏低
取样粉尘平均直径	准确	变大	变小	变小

一、等速取样的原因

等速取样是为了获取具有代表性的样品。以烟道粉尘采样为例，当含尘烟气进入采样嘴的速度(即取样速度 w)与烟道内该点的烟气速度(w_0)相等时，采样结果能准确反映实际情况。若二者速度不相等，就会破坏烟气流动场，使采集的样品无法真实代表被测介质中颗粒的实际情况，导致测量的烟尘浓度失准。

二、不同取样流速对颗粒粒度分布测量误差的影响

1) $w=w_0$ (等速取样): 此时取样粉尘浓度准确, 取样粉尘平均直径也准确, 能真实反映实际颗粒粒度分布情况。因为气流平稳进入采样嘴, 颗粒不会因流速差异而产生选择性进入或被排除的情况。

2) $w < w_0$ (取样速度小于实际流速): 部分原本不在采样路径上的大颗粒, 由于惯性作用, 会随气流进入采样嘴, 使得采集到的大颗粒数量相对增多, 导致测量得到的取样粉尘浓度偏高, 同时取样粉尘平均直径变大。

3) $w > w_0$ (取样速度大于实际流速): 处于采样嘴边线以外的部分气流进入采样嘴, 而其中的大颗粒由于本身的惯性作用, 不能改变方向随气流进入采样嘴, 继续沿着原来的方向前进, 使得采集到的大颗粒数量相对减少, 测量得到的取样粉尘浓度偏低, 取样粉尘平均直径变小。

4) 此外, 等速采样时, 气流进入采样嘴的状态发生改变, 会干扰颗粒的运动轨迹, 也会进一步影响粒度分布测量的准确性。如处于采样嘴边线以外的部分气流进入采样嘴, 而其中的大颗粒由于本身的惯性作用, 不能改变方向随气流进入采样嘴, 继续沿着原来的方向前进, 使得采集到的大颗粒数量相对减少, 测量得到的取样粉尘浓度偏低, 取样粉尘平均直径变小。

11. 静压零位等速取样装置的原理, 入管段有哪些压力损失, 如何补偿

一、原理: 探头内外各开有静压测孔, 若满足理想流体的假设, 则根据伯努利方程, 只要两静压相等, 即可满足等速取样的要求。

$$\frac{\rho_0 \omega_0^2}{2} + p_0 = \frac{\rho \omega^2}{2} + p_n$$

但由于实际气体具有粘性，存在各项阻力损失，从而导致不等速取样的误差。

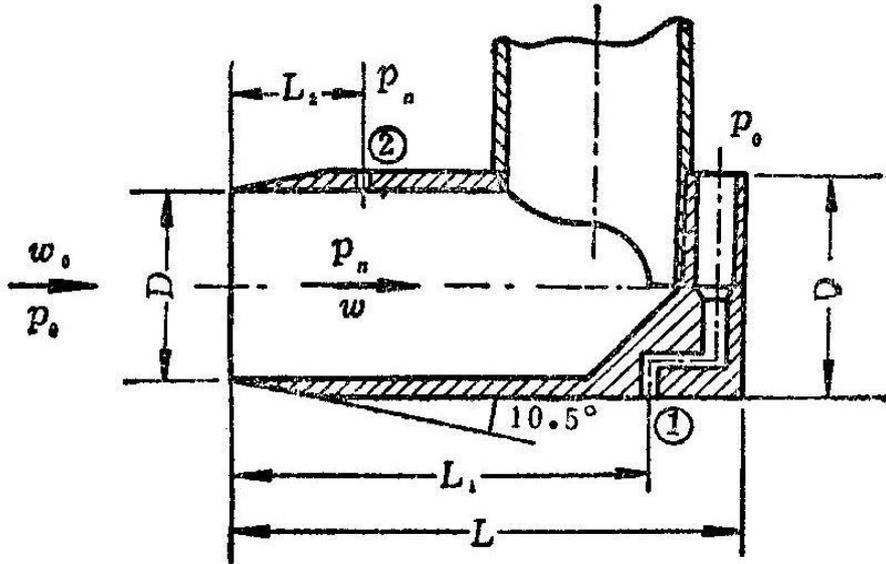


图 7-10 静压零位取样探头

$$\frac{L_1}{D} = 1.83; \quad \frac{L_2}{D} = 0.685; \quad \theta = 21^\circ$$

二、入管段压力损失：总阻力损失为探头进口阻力损失、沿程摩擦阻力损失及速度再分布损失之和。

$$p_0 + \frac{\rho_0 \omega_0^2}{2} = p_n + \frac{\rho \omega^2}{2} + \sum \Delta p, \quad \sum \Delta p = \Delta p_{jk} + \Delta p_{mc} + \Delta p_{fb}$$

1. 进口阻力损失

$$\Delta P_{jk} = \xi_{jk} \frac{\rho w^2}{2}$$

$$\xi_{jk} = 0.125 - 0.185$$

2. 沿程摩擦阻力损失

$$\Delta P_{mc} = \xi_{mc} \frac{L_2}{D} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \text{ Pa}$$

$$\xi_{mc} = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$$

$$\text{Re} = \frac{wD}{\nu}$$

3. 速度再分布损失

气流从大空间等速进入管道时，在进口截面上分布均匀并保持原来数值。进入管内后，流体受壁面摩擦阻力影响，壁面速度逐渐减小，中央部分的气流速度增加。气体经历起始段 L_{qs} 后才趋于稳定，对于紊流流动 $L_{qs} = 40D$ 。而探头进口至内静压测孔的距离远远小于 L_{qs} ，管内速度场的变化引起动能增加，导致静压降低。这就是速度再分布损失。

$$\Delta p_{fb} = p_d - p_{a0} = \frac{2-K}{K} \cdot \frac{\rho w_0^2}{2}$$

在 5-20m/s 速度范围内， $K = 1.813 - 1.585$

三、补偿：

补偿式静压零位等速测量基本原理：在进口段后紧接一扩压段，从而使扩压增加的静压等于进口至静压测孔间的各项阻力损失，

$$\sum \Delta p = \Delta p_j$$

其中

$$\Delta p_j = \frac{\rho}{2} (\omega_0^2 - \omega_2^2)$$

即 $\sum \Delta p = \Delta p_{jk} + \Delta p_{mc1} + \Delta p_{mc2} + \Delta p_{fb} + \Delta p_{kd}$

（补：1）增大管径：在允许的情况下，适当增大入管段的管径，可以降低流体流速，减小沿程压力损失。根据达西 - 威斯巴赫公式，流速与管径成反比，管径增大，流速降低，沿程阻力系数减小，压力损失也随之减小。

2）优化管道布局：尽量减少入管段中的弯头、三通等管件数量，避免不必要的变径和阀门。

3）安装补偿器：对于因热胀冷缩等因素导致的管道变形和压力损失，可安装补偿器，吸收管道的轴向、横向和角向位移，减小因管道变形产生的压力损失。

4）表面处理：对入管段内壁进行光滑处理，如涂覆光滑的涂层，可减小管壁粗糙度，降低沿程摩擦阻力，进而减小沿程压力损失。）

12. 自感和互感式位移传感器的差别？电容式位移传感器的三种形式

（变面积，变间距，变介电常数）

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d}$$

一、自感和互感的差别

1.工作原理:

1) 自感式位移传感器—基于线圈自身电感的变化。由衔铁、铁芯和线圈三部分组成，衔铁和铁芯之间有空隙，传感器的运动部分与衔铁相连，当传感器测量物理量时，衔铁运动部分产生位移，导致气隙厚度 δ 或截面积变化，从而使线圈的电感值发生变化。

2) 差动变压器（互感传感器）：把被测的非电量变化转换为线圈互感变化。这种传感器用了电磁感应的互感原理，实质上是一个输出电压可变的变压器，当变压器一次线圈输入稳定交流电压后，二次线圈便产生感应电动势输出，该电动势随被测量的变化而变化。

2. 结构与组件

● 自感式

由衔铁、铁芯和线圈三部分组成，单一线圈结构，可能搭配可移动磁芯。

电路简单，通常需外部激励电源和信号调理电路。

● 互感式

多线圈结构（初级+次级线圈。由铁芯、衔铁和线圈组成。差动变压器上下两只铁芯均有一个初级线圈 1（又称激励线圈）和一个次级线圈 2（也称输出线圈）。上下两只初级线圈串联后接交流激励电压。两只次级线圈按电势反相串接。）

结构复杂，但输出为差动信号，抗干扰能力强。

3. 性能特点

特性	自感式	互感式
灵敏度	较低	高（差动信号放大微小变化）
线性度	较差（易受温度/磁场干扰）	优良（差动结构抵消非线性误差。其灵敏度不仅取决于磁系统的结构参数，同时也取决于初级、次级线圈的匝数比及激励电源电压的大小。可以通过改变匝数比及提高电源电压来提高灵敏度。）
抗干扰能力	弱（单端输出易受噪声影响）	强（差动输出抑制共模干扰）
测量范围	较小（受电感变化范围限制）	较大（毫米级至米级）
动态响应	较快（电感变化直接响应）	较快（依赖交流激励频率）

【4.信号处理

● 自感式

需将电感变化转换为电信号（如 LC 振荡电路、电桥）。

易受电源波动和温度漂移影响，需额外补偿电路。

● 互感式

直接输出差动交流电压，通过相敏检波解调位移方向和大小。

信号处理复杂，但能区分位移方向并提升信噪比。

5.优缺点总结

● 自感式

优点：结构简单、成本低、易于集成。

缺点：精度低、易受干扰、线性度差。

● 互感式

优点：高精度、抗干扰、宽量程、方向辨别。

缺点：结构复杂、成本高、需专用解调电路。】

13. 电涡流传感器的原理，产生的条件，高频和低频电涡流传感器的差别，什么是集肤效应，和频率的关系

一、**原理**：电涡流效应——根据法拉第电磁感应定律，块状金属导体置于变化的磁场中或在磁场中作切割磁力线运动时，导体内将产生呈漩涡状流动的感应电流，称之为电涡流。

二、**条件**：① 存在交变磁场 ② 导体处于交变磁场中

三、高频和低频的差别

1.工作原理的差异

1) 高频电涡流传感器

工作频率范围通常为 **100 kHz~10 MHz**。高频交变磁场在导体表面产生电涡流，磁场能量集中在导体表层（**趋肤效应**），对表面状态（如微小裂纹、涂层厚度）敏感。

2) 低频电涡流传感器

工作频率通常为 **1 kHz~100 kHz**。低频磁场穿透更深，电涡流分布在

导体更深的区域，适合检测材料内部缺陷或厚金属的厚度。

2.优缺点总结

类型	优点	缺点
高频	高分辨率、高灵敏度、响应快	穿透浅、易受表面污染影响、成本高
低频	穿透深、抗干扰强、适用材料广	分辨率低、响应慢、不敏感微小变化

四、什么是集肤效应：电涡流 i_2 在金属导体的纵深方向并不是均匀分布的，而只集中在金属导体的表面，这称为集肤效应。

五、集肤效应和频率的关系：集肤效应与激励源频率 f 、工件的电导率 σ 、磁导率 μ 等有关。频率 f 越高，电涡流的渗透的深度就越浅，集肤效应越严重。

14. 机械振动信号测量的三要素（振幅，频率相位），小阻尼，过阻尼，临界阻尼振动的特点

一、三要素：振幅，频率，相位。

机械振动信号的测量与分析主要围绕以下三个核心参数展开：

阻尼类型及其振动特点

阻尼是振动系统中能量耗散的机制，直接影响系统的动态响应特性。根据阻尼比 ($\zeta = \frac{c}{c_c}$, c 为实际阻尼系数, c_c 为临界阻尼系数), 振动可分为三类:

1. 欠阻尼 (小阻尼, $\zeta < 1$)

• 振动特性:

- 系统自由振动时表现为**衰减振荡**, 振幅按指数规律减小 (公式: $x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \cdot A \sin(\omega_d t + \phi)$, 其中 $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$)。
- 共振时振幅显著放大, 频响曲线尖锐。

• 应用场景:

- 需要振动能量逐渐耗散的场景 (如车辆悬挂系统、建筑减震器)。
- 缺点:** 振动衰减慢, 可能引发持续共振风险。

参 数

物理意义

测量意义

振 幅

振动的最大偏离量 (位移、速度或加速度), 表征振动强度。

反映机械系统的能量大小, 用于评估振动对结构的损伤 (如疲劳寿命)、噪声水平或故障程度 (如轴承磨损)。

频 率

单位时间内振动的周期数 (Hz), 反映振动周期性特征。

通过频谱分析可识别振动来源 (如不平衡、不对中、齿轮啮合频率), 是故障诊断的关键依据。

相 位

振动周期中某一时刻的振动状态相对于参考信号的位置 (角度差)。

用于分析振动传递路径、模态分析中的相位差 (如共振点识别), 以及多传感器同步测量时的相关性 (如动平

参
数

物理意义

测量意义

衡校正)。

二、小阻尼、过阻尼、临界阻尼

阻尼类型及其振动特点

阻尼是振动系统中能量耗散的机制，直接影响系统的动态响应特性。根据阻尼比 ($\zeta = \frac{c}{c_c}$, c 为实际阻尼系数, c_c 为临界阻尼系数), 振动可分为三类:

1. 欠阻尼 (小阻尼, $\zeta < 1$)

振动特性:

系统自由振动时表现为衰减振荡, 振幅按指数规律减小。

共振时振幅显著放大, 频响曲线尖锐。

2. 过阻尼 ($\zeta > 1$)

振动特性:

系统缓慢无振荡地回到平衡位置, 响应速度慢于临界阻尼。

频响曲线平坦, 无共振峰。

3. 临界阻尼

系统以最快速度无振荡地回到平衡位置。

无周期性振动, 频响曲线无峰值。

对比总结

阻尼类

响应特点

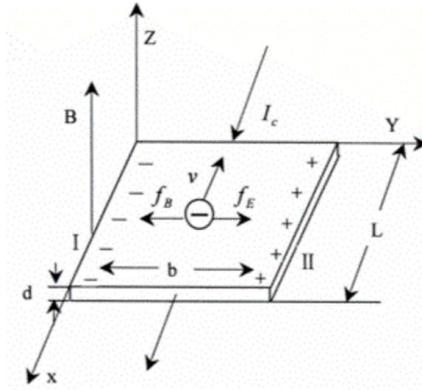
频响曲线

典型应用

型

阻尼类型	响应特点	频响曲线	典型应用
欠阻尼	衰减振荡, 共振峰尖锐	窄带高幅值峰值	车辆悬挂、乐器音板
临界阻尼	无振荡, 最快恢复平衡	无峰值	精密仪器、安全阀门
过阻尼	缓慢无振荡恢复, 响应延迟	平坦无峰	重型机械底座、桥梁减震

15. 霍尔传感器的作用原理



霍尔效应：当电流通过一个位于磁场中的导体的时候， 磁场会对导体中的电子产生一个垂直于电子运动方向上的作用力，从而在导体的两端产生电压差。定向运动的电子除受到洛仑兹力外，还受到霍尔电场的作用，当 $f_l = f_E$ 时，达到平衡。

$$U_H = -\frac{IB}{ned} = R_H \cdot \frac{IB}{d} = k_H IB$$

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad \text{霍尔系数, 材料确定} \quad k_H = \frac{R_H}{d} \quad \text{灵敏度系数}$$

后为常数

霍尔电势正比于激励电流及磁感应强度,其灵敏度与霍尔常数 R_H 成正比而与霍尔片厚度 d 成反比。为了提高灵敏度,霍尔元件常制成薄片形状。

16. 内光电，外光电传感器的差别，典型的内光电和外光电传感器有哪些

<1>工作原理

类型	物理基础	核心公式
外光电传感器	外光电效应（光电发射效应）：在光线的作用下，物体内的电子逸出物体表面向外发射的现象称为外光电效应。	爱因斯坦方程： $h\nu \geq W_0$ （ W_0 为逸出功）
内光电传感器	内光电效应：当光照射在物体上，使物体的电阻率 ρ 发生变化，或产生光生电动势的现象叫做内光电效应，它多发生于半导体内。	光电导效应： $\Delta\sigma \propto I_{光}$ 光生伏特效应： $V_{oc} \propto \ln(I_{光})$

<2>关键特性对比

特性	外光电传感器	内光电传感器
响应速度	快（纳秒级，电子直接逸出）	较慢（微秒级，载流子迁移需时间）
灵敏度	高（如光电倍增管增益达 10 ⁶ ~10 ⁸ ）	较低（依赖材料特性，需外部偏压）
光谱响应	对短波长敏感（紫外-可见光）	宽范围（可见光-红外，如硅材料响应至 1100 nm）
工作电压	需高压电源（百伏级）	低压或自供电（如光伏模式）

特性	外光电传感器	内光电传感器
环境要求	需真空/惰性气体防电子散射	固态结构，耐环境性强

<3>典型传感器举例

1) 外光电传感器

①光电管 (Phototube)

真空玻璃管内含光阴极和阳极，紫外检测常用。

应用：紫外光谱仪、火焰探测器。

②光电倍增管 (PMT)

多级倍增极放大微弱光信号，灵敏度极高。

应用：天文观测、低光成像（如 PET 扫描）。

2) 内光电传感器

①光敏电阻 (LDR)

光导效应，阻值随光照变化。

应用：自动照明开关、相机测光。

②光电二极管 (Photodiode)

光伏或光导模式，高速响应。

应用：光纤通信、激光测距。

③光电三极管

内置放大功能，灵敏度高于二极管。

应用：光电开关、编码器。

④光电池 (Solar Cell)

光伏效应，直接将光能转为电能。

应用：太阳能发电、光功率计。

⑤CCD/CMOS 图像传感器

基于光伏效应，捕获光信号生成图像。

应用：数码相机、手机摄像头。

17. 辐射能，辐射通量，辐射强度的定义，单位

辐射能(Q): 简称辐能，描述以辐射的形式发射、传输或接收的能量，单位焦耳 (J)。辐射能量是辐射通量 Φ_e 对时间的积分。

辐射通量 (Φ , 又称为辐射功率 P, 单位 W) :以辐射形式发射、传输或接收的功率，用以描述辐能的时间特性。是单位时间内发射、传播或接收的辐射能。

辐射强度(I, 单位 Wsr^{-1}):点辐射源在给定传输方向上单位立体角内的辐射通量，单位为 W/Sr (瓦每球面度)，

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \text{对点光源的辐射强度描述}$$

对于各向异性的辐射源有

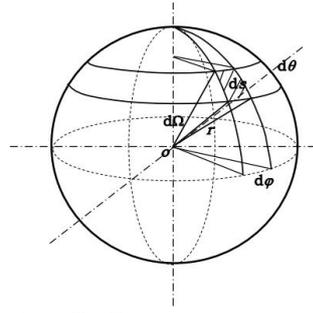
$$\Phi_e = \int I_e(\varphi, \theta) d\Omega \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_e(\varphi, \theta) \sin \theta d\theta$$

(均匀点光源) = $4\pi I_e$

辐射强度描述了光源辐射的方向特性。

立体角

立体角 Ω 是描述辐射能向空间发射、传输或被某一表面接收时的发散或会聚的角度，定义为：**以锥体的基点为球心作一球表面，锥体在球表面上所截取部分的表面积 dS 和球半径 r 平方之比**



$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{r^2 \sin\theta d\theta d\varphi}{r^2} = \sin\theta d\theta d\varphi$$

18. 1W 的功率全部转换成波长为 555nm 的光时（对于人眼最敏感的

黄绿光，为 683 流明

$$\lambda=555 \text{ nm时} \quad 1W = 683lm$$

$$\lambda=? \text{ nm时} \quad 1W = V(\lambda)683lm$$

$$\text{任意波长:} \quad \Phi_v(\lambda) = 683 \times V(\lambda)\Phi_e(\lambda)$$

- 对于任意波长 λ ， $1W = V(\lambda)683lm$ 。其中 $V(\lambda)$ 是相对视见函数，表示人眼对不同波长光的相对灵敏度，不同波长下，同样1W光功率对应的光通量需乘以 $V(\lambda)$ 进行换算。
- $\Phi_v(\lambda) = 683 \times V(\lambda)\Phi_e(\lambda)$ 。 $\Phi_v(\lambda)$ 是波长为 λ 的光通量（单位：流明，lm）， $\Phi_e(\lambda)$ 是波长为 λ 的光功率（单位：瓦，W），该公式用于计算任意波长下光功率对应的光通量。

19. 信噪比的定义，单位，噪声等效功率的定义

信噪比 SNR：是判定噪声大小的参数，是负载电阻上信号功率与噪声功率之比。

$$\frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{I_S^2 R_L}{I_N^2 R_L} = \frac{I_S^2}{I_N^2}$$

若用分贝（dB）表示，为

$$\left(\frac{S}{N}\right) = 10\lg \frac{I_S^2}{I_N^2} = 20\lg \frac{I_S}{I_N}$$

噪声等效功率 NEP：（定义）信号功率与噪声功率比为 1（SNR=1）时，入射到探测器件上的辐射通量(单位为瓦)。//这时，投射到探测

器上的辐射功率所产生的输出电压（或电流）等于探测器本身的噪声电压（或电流），一般一个良好的探测器件的 NEP 约为 $10^{-14}W$ 。NEP

$$NEP = \frac{\Phi_e}{SNR} (W)$$

越小，噪声越小，器件的性能越好。

20. 半导体内电场的方向，漂移和扩散运动的差别。

一、半导体内电场的方向

在半导体中，内电场主要存在于 **PN 结 或 非均匀掺杂区域**，其方向由载流子扩散和空间电荷分布决定：

PN 结内建电场： P 区（空穴多）与 N 区（电子多）接触时，载流子扩散形成空间电荷区（耗尽层）。

电场方向： 从 **N 区指向 P 区**（正离子区→负离子区）。

作用：阻碍扩散运动，平衡漂移与扩散电流。

二、漂移 vs 扩散：

漂移依赖电场，载流子（电子与空穴）定向（电子逆电场方向，空穴顺电场方向）运动；

扩散由浓度梯度驱动，载流子（电子与空穴）自发迁移（电子和空穴扩散电流都和浓度梯度方向相同）。

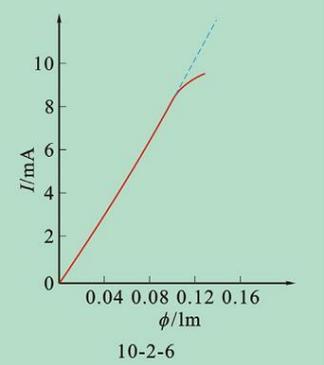
21. 光电管与光电倍增管的差别？本征光敏电阻与杂质型光敏电阻的差别，适用范围

一、光电管和光电倍增管（外光电效应）

	光电管	光电倍增管
结构	由一个阴极和一个阳	光电倍增管由阴极、

	<p>极构成，并且密封在一只真空玻璃管内。阴极装在玻璃管内壁上，其上涂有光电发射材料。阳极通常用金属丝弯曲成矩形或圆形，置于玻璃管的中央。</p>	<p>倍增极（次阴极）和阳极组成，这些电极被封装在真空的玻璃管中。</p> <p>(1) 闪烁光子作用在光阴极上时，由于光电效应可产生出电子。</p> <p>(2) 电子倍增是通过一系列倍增极所构成的倍增系统完成。</p> <p>(3) 从阳极上得到的电子流与入射到光电倍增管光阴极上的闪烁光强度成正比。</p>
原理	<p>光 → 阴极 → 光电子 → 阳极 → 空间电子流 → 外接电阻 → 压降 $U=f(I)$。</p> <p>光电阴极通常采用逸出功小的光敏材料(如铯 Cs)。当光线照射到光敏材料上便有电子</p>	<p>当入射光很微弱时，普通光电管产生的光电流很小，只有零点几 μA，不易探测。常用光电倍增管。光电倍增管的工作原理建立在光电发射和二次发射的基础上，获</p>

	<p>逸出，这些电子被具有正电位的阳极所吸引，在光电管内形成空间电子流，在外电路就产生电流。</p>	<p>得大的光电流。</p>
<p>特性</p>	<p>1. 光照特性：通常指当光电管的阳极和阴极之间所加电压一定时，光通量与光电流之间的关系。光照特性曲线的斜率(光电流与入射光光通量之比) 称为光电管的灵敏度。</p> <p>2. 光谱特性：由于光阴极对光谱有选择性，因此光电管对光谱也有选择性。保持光通量和阴极电压不变，阳极电流与光波长之间的关系称为光电管的光谱特</p>	<p>光照特性：阳极电流 I 和光通量 ϕ 之间的关系。 ➤ 当光通量较小时，光照特性呈现线性；当光通量很大时 ($\phi > 0.1 \text{ lm}$) 时，光照特性出现严重的非线性。 ➤ 暗电流：没有光信号输入（无光照），加上电压后阳极仍有电流 ➤ 原因：热电子发射、极间漏电流、场致发射等。 ➤ 一般在使用光电倍增管时，必须把管子放在暗室里避光使用，使其只对</p>

	<p>性。</p> <p>3.伏安特性: 在一定的光照射下, 光电管的阴极所加电压与阳极所产生的电流之间的关系</p>	<p>入射光起作用; 暗电流对于测量微弱光强和精确测量的影响很大, 通常可以用补偿电路加以消除。</p>  <p style="text-align: center;">10-2-6</p>
--	--	--

二、光敏电阻按半导体材料的不同可分为本征型和杂质型两种,

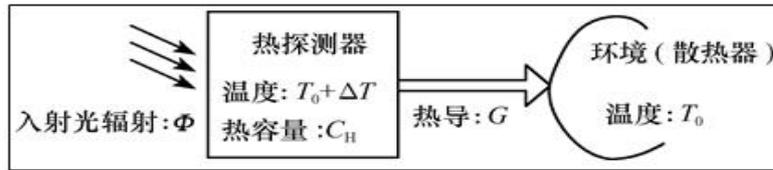
1.适用范围 ➤ 本征型半导体光敏电阻常用于可见光长波段检测

➤ 杂质型常用于红外波段至远红外波段光辐射的检测

本征型光敏电阻: 当入射光子的能量等于或大于**半导体材料的禁带宽度 E_g** 时, 激发一个电子-空穴对, 在外电场的作用下, 形成光电流。

杂质型光敏电阻: 对于**N型**半导体, 当入射光子的能量等于或大于**杂质电离能 ΔE** 时, 将施主能级上的电子激发到导带而成为导电电子, 在外电场的作用下, 形成光电流。

22. 光热传感器的能量平衡方程? 减少光热传感器误差的方法



$$\alpha \Phi = C_H \frac{d(\Delta T)}{dt} + G \cdot \Delta T$$

吸收的能量

内能的增加

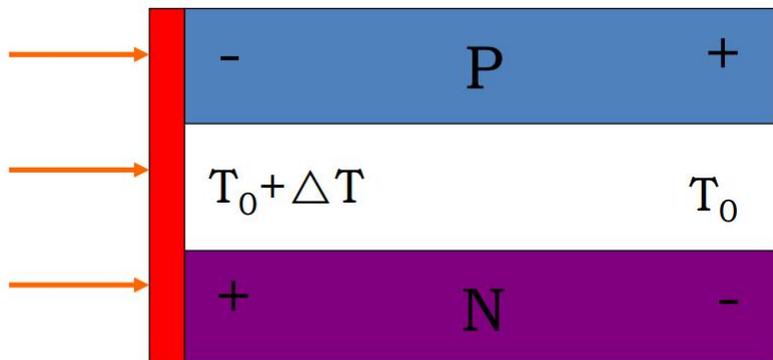
与环境热交换

23. 半导体辐射热电偶的原理

用涂黑的金箔将N型和P型半导体材料连在一起构成热结，另一端（冷端）将产生温差电势，P型半导体的冷端带正电，N型半导体的冷端带负电。开路电压 U_{oc} 与入射辐射使金箔产生的温升 ΔT 的关系

$$U_{oc} = M_{12} \Delta T$$

M_{12} 称为泽贝克常数（温差电势率） $V / ^\circ C$



24. 热释电传感器的工作原理

1. 某些晶体可以因温度变化而引起晶体表面电荷，这一现象称为**热释电效应**。 $\Delta P = p \Delta T$

当外加电场施加于热释电晶体时，电场的改变会引起晶体温度变化，这种现象称为**电卡效应**。

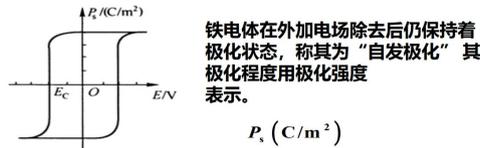
2. 压电、热释电和铁电效应的关系

➤ 在**压力**作用下可产生**极化**现象，此即**压电效应**。

➤ 当**晶体温度**改变时，从而使晶体表面出现**束缚电荷**，此即**热释电效应**；

➤ 自发**极化**强度矢量在**电场**作用下会改变方向，此即**铁电效应**

(2) 铁电体的极化



(3) 极化强度 P_s

介质表面单位面积上的电荷量称为自发极化强度。

应.

$$P_s = \frac{\sigma_s \cdot \Delta S \cdot l}{\Delta S \cdot l} = \sigma_s$$

热释电效应定义：

因为 P_s （极化强度）或 σ_s （表面吸附电荷）随温度的升高而减少，所以当红外辐射照射到已经极化的铁电体薄片时，薄片温度升高，表面电荷减少，相当于热“释放”了部分电荷。释放的电荷可用放大器转变成电压输出。这就是**热释电效应**。

辐射持续作用，表面电荷将达到新的平衡，不再释放电荷，热释电器件在恒定辐射作用的情况下输出的信号电压为零。在**交变辐射**的作用下才会有信号输出。

25. 主动红外成像和被动红外成像的差别

利用不同物体对红外辐射的不同反射：**主动式红外成像系统（红外夜视仪）**。主动式红外成像系统自身带有红外光源，是根据被成像物体对红外光源的不同反射率，以红外变像管作为光电成像器件的红外成像系统。红外变像管是主动式红外成像系统的核心，是一种高真空图像转换器件，完成从近红外图像到可见光图像的转换并增强图像。

【红外变像管 从结构材料上分，红外变像管可以分为金属结构型和

玻璃结构型；从工作方法上分，可以分为连续工作方式和选通工作方式。主动式红外成像系统的工作波长范围取决于红外变像管的光阴极响应谱区，一般为0.76~1.2um近红外光。】

利用物体自然发射的红外辐射：被动式红外成像系统（红外热像仪）。

红外热成像系统是被动式成像系统。自然界中，温度高于绝对零度的一切物体，总是在不断地发射红外辐射。收集并探测这些辐射能，就可以形成与景物温度分布相对应的热图像。

26. 机组控制的基本控制方式:锅炉跟随，汽机跟随，机炉协调

27. 燃烧控制的基本任务:满足机组负荷要求（，维持主蒸汽压力稳定）；
保证燃烧过程经济性、稳定性和清洁性

燃烧过程控制任务

(1) 满足机组负荷要求，维持主蒸汽压力稳定；

燃烧过程控制任务与机组运行方式有关

(2) 保证燃烧过程经济性

使燃料得以充分燃烧

(3) 保证燃烧过程稳定性

维持锅炉炉膛压力稳定

(4) 保证燃烧清洁性

维持锅炉低污染燃烧



28. 燃烧控制主要调节的三个物理量:燃料量，送风量，引风量

1. 燃料量调节

调节燃料量使入炉燃料燃烧所产生的量能与锅炉外部负荷需求的量能相适应。

2. 送风量调节

燃料量改变时，送风量也应改变，以保证燃料的完全燃烧和排烟热损失最小。调节送风量的目的是保证锅炉燃烧过程的经济性。

3. 引风量调节

调节引风量的目的是使引风量与送风量相适应，以保持炉膛压力在要求范围内，以保证燃烧过程稳定性。

29. 炉膛负压的控制范围，一般炉膛压力维持在比大气压力低 20～50Pa 左右

30. 主蒸汽压力受到的扰动来源有二个：

(1) 燃烧率扰动称为**基本扰动或内部扰动**；

(2) 汽轮机调节阀开度的扰动，称为**外部扰动**

31. 维持含氧量的主要调节手段是调节送风机入口挡板控制的送风量，也是其主要扰动，称为**内扰**。煤量变化、炉膛负压变化也影响含氧量，称为**外扰**。

32. 燃烧过程控制应具有如下功能：

① 迅速改变炉膛燃烧率，适应外部负荷变化。

② 控制系统能迅速发现并消除燃烧率扰动。燃烧率扰动通常指燃料量和燃料热值的变化扰动。

③ 确保燃料、送风和引风等参数协调变化。保证燃烧经济性。

④ 确保燃烧过程的稳定性，避免炉膛压力大范围波动。

33. 燃料量反馈控制一般用热量信号，由主蒸汽流量和汽包压力变化构成，其中蒸汽流量也可以用汽轮机第一级压力代替

$$D_Q = D + C_b \frac{dp_b}{dt}, \quad D_Q = p_1 + C_b \frac{dp_b}{dt} \quad C_b \text{ 蓄热系数}$$

34. 对于燃煤锅炉燃烧控制风煤交叉限制是指：在机组增、减负荷动态过程中，使燃料得到充分燃烧就要保证有足够的风量。需要保持一定的过量空气系数，因此，在机组增负荷时，就要求先加风后加煤；在机组减负荷时，就要求先减煤后减风，这样就需要风煤交叉限制。

35. 风量调节的主要方式：节流，变角，变速。

节流调节就是改变风机进口或出口管路上的节流挡板的开度，来改变风机的工作点，从而调节风机的通风量。

出口节流和进口节流的差异

出口节流调节：采用风机出口节流调节时，节流挡板装置在风机出口管路上。改变管道系统特性曲线，从而使风机的风量改变。**缺点**：产生节流损失，经济性下降；风机喘振。一般已不采用这种调节方式。

进口节流调节：节流挡板设置在风机的进口管路上，通过改变风机进口节流挡板的开度，来改变风机进口压力和性能曲线，使风机工作点移动，达到调节风量目的。

进口节流调节要比出口节流调节的运行经济性要好，但挡板开度与风量变化不成线性关系，不宜采用自动调节，调节性能较差，因此大容量风机也不采用这种调节方式。

（风机常采用变角调节中的入口导流器调节。）

36. 汽包水位过高，过低的危害

水位过高，会破坏汽水分离装置的正常工作，严重时会导致蒸汽带水

增多，从而增加在过热器管壁上和汽轮机叶片上的结垢，甚至使汽轮机发生水冲击而毁坏叶片；水位过低，则会破坏水循环，引起水冷壁的破裂。

37. 水位的正常控制范围：

正常范围：±30~50mm
异常情况：±200mm
事故情况：>±350mm

38. 影响汽包水位的主要因素有：锅炉蒸发量（负荷 D），给水量 W，炉膛热负荷（燃烧率 M），汽包压力 P_b。

给水量扰动下，水位的波动特性，虚假水位的原因？

水位在给水量扰动下的传递函数可表示为

$$\frac{H(s)}{W(s)} = \frac{\varepsilon}{s} - \frac{\varepsilon T}{1 + Ts} = \frac{\varepsilon}{s(1 + Ts)}$$

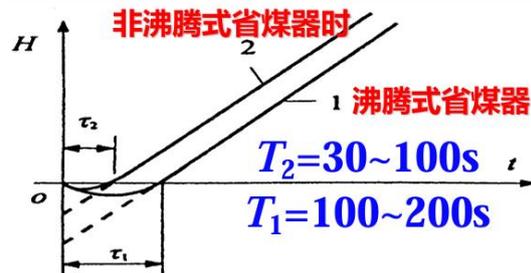
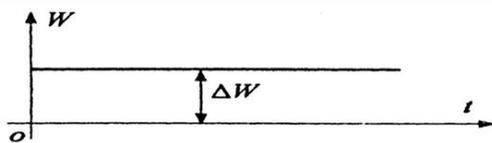


图. 给水量扰动时水位阶跃响应曲线

水位对象可近似认为是一个积分环节和一个惯性环节并联/串联的形式：

$$\frac{H(s)}{W(s)} = \frac{\varepsilon}{s} e^{-\tau s} \quad \text{响应速度:} \quad \varepsilon = \frac{\Delta H(s)}{\tau \Delta W(s)}$$

蒸汽量扰动下，水位的波动特性，虚假水位的原因？

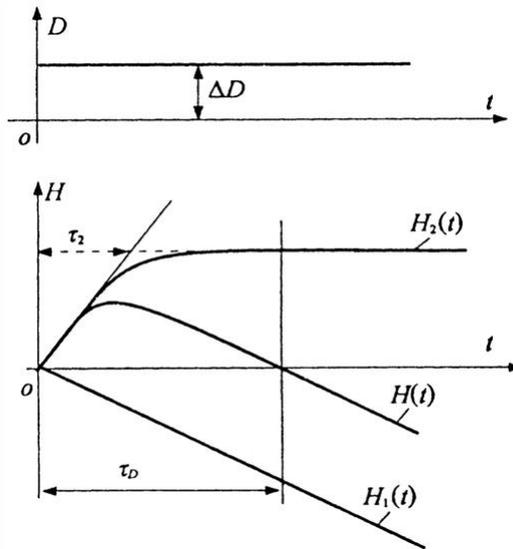
“虚假水位”：由于负荷增加时，在汽水循环回路中的蒸发强度也将成比例增加，水面下汽泡的容积增加得也很快，此时燃烧率 M 还来不及

及增加，汽包中水的体积增大而水位上升。

当过了一段时间后，即汽泡容积和负荷相适应而达到稳定后，水位就

传递函数
$$\frac{H(s)}{D(s)} = \frac{k_2}{(1+T_2s)} - \frac{\varepsilon}{s}$$

要反映出物质平衡关系而下降。



炉膛热负荷扰动下，水位的波动特性，虚假水位的原因？

炉膛热负荷扰动即是指燃烧率 M 的扰动。

燃烧率增加时，锅炉吸收更多的热量，使蒸发强度增大，**如果不调节蒸汽阀门**，由于锅炉出口汽压提高，蒸汽流量也增大，这时蒸发量大于给水量，**水位应下降。**//但由于在热负荷增加时蒸发强度的提高，使汽水混合物中的汽泡容积增加，而且这种现象必然先于蒸发量增加之前发生，从而使汽包水位先上升，从而引起“**虚假水位**”现象。当蒸发量与燃烧量相适应时，水位便会迅速下降，这种“虚假水位”现象比蒸汽量扰动要小一些，但其持续时间长。

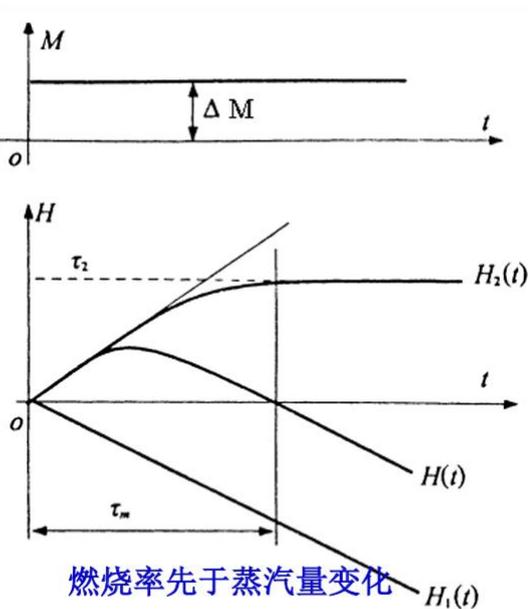


图. 燃料扰动下水位阶跃响应曲线

39. 汽包锅炉水位控制单冲量、二冲量、三冲量的区别，

冲量： 调节器入口的信号/反馈信号；

单冲量： 一个信号进入调节器，小容量锅炉

双冲量： 两个信号进入调节器，中小锅炉

物质平衡（给水量-耗汽量）：水位开环控制，不单独使用

前馈+反馈：不考虑给水量对水位的影响

三冲量： 三个信号进入调节器，大型锅炉

反馈+比值

前馈-反馈、反馈

三冲量控制的三个信号分别是：蒸汽流量 D ，给水流量 W ，水位 H 。

水位 H 是主要控制信号，水位高时应减少给水流量，水位低时应增加给水流量。蒸汽流量 D 和给水流量 W 的变化是引起水位变化的主要原因（扰动信号），它们分别作为水位控制的前馈信号和反馈信号。

D信号：前馈信号直接克服虚假水位的影响。

W信号：反馈信号

- ✓ 克服因给水阀自发扰动对 $H(t)$ 的影响，并保持稳定
- ✓ 可以增强调节过程的稳定性（使阀门动作不过调）

H信号：反馈信号，起校正作用，使汽包水位为给定值

16

40. 直流锅炉的特点，① 无汽包，不用或少用下降管，工艺简化，造价低；② 不必过多考虑金属应力变化，机组启停速度较快；③ 给水泵必须有较高压头，机械损失大；④ 蓄热容积小，对负荷变动敏感，对控制系统要求高

41. 直流锅炉通过燃水比来控制蒸发区与过热区界面位置，反应燃水比的信号是中间点温度，即上辐射区出口蒸汽温度处于微过热状态，该点是反映燃水比变化最灵敏的地方，称之为“中间点温度（微过热汽温）”。直流锅炉运行时，将中间点温度控制在一定范围内，就可认为锅炉汽水流程的相变界面相对固定，从而使燃料和给水维持一定的比值关系，保证过热汽温在可控范围内

42. 直流锅炉给水自动控制的任務：

快速满足机组负荷需求；

保持蒸汽参数（温度、压力）稳定；

保持汽水行程的中间点温度稳定；

保持风煤配比；

保持炉膛负压

43. 直流锅炉给水控制的原则：

核心：维持“燃水比”

保持四个比例关系：燃料量与负荷成比例； 给水量与燃料量成比例；

送风量与燃料量成比例；引风量与送风量成比例

二. 控制原则

核心：维持“燃水比”

保持四个比例关系：

- **燃料量与负荷成比例**
- **给水量与燃料量成比例**
- **送风量与燃料量成比例**
- **引风量与送风量成比例**

44. **汽包锅炉主蒸汽温度控制范围：**过热汽温不超过额定值的-10 - +5℃，长期偏差不允许超过±5℃。为了防止过快的蒸汽温度变化速率造成某些高温工作部件产生较大热应力，还对温度变化的速率进行限制，一般限制在 3℃/min

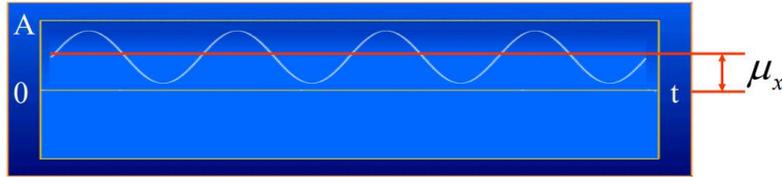
45. **影响过热汽温主要扰动有三种：**

- (1) 蒸汽流量（负荷）扰动；
- (2) 烟气热量扰动：燃烧器运行方式变化、燃料量变化、燃料种类或成分变化、风量变化等
- (3) 减温水流量扰动

46. 信号均值，方差和均方值的差别

4、均值 均值 $E[x(t)]$ 表示集合平均值或数学期望值

$$\mu_x = E[x(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

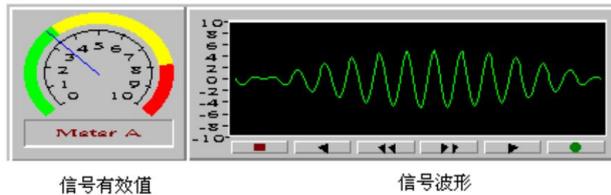


均值：反映了信号变化的中心趋势，也称之为直流分量。

5、均方值

信号的均方值 $E[x^2(t)]$ ，表达了信号的强度；其正平方根值，又称为有效值(RMS)，也是信号平均能量的一种表达。

$$\psi_x^2 = E[x^2(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$$

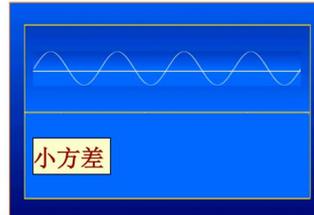
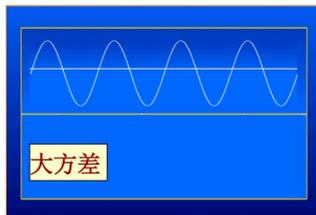


工程测量中仪器的表头示值就是信号的有效值

6、方差

信号 $x(t)$ 的方差定义为：

$$\sigma_x^2 = E[(x(t) - E[x(t)])^2] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \mu_x)^2 dt$$



方差：反映了信号绕均值的波动程度。

➤均方值、方差、均值关系

$$\varphi_x^2 = \sigma_x^2 + \mu_x^2$$

强度 波动量 静态量
均方值 方差 均值

信号的强度由2部分组成：静态量和波动量

均值为零，均方值等于方差



$$\psi_x^2 = \sigma_x^2$$

47. 相关函数的定义，如何应用于实际的测量

一、相关函数的定义：（相关指变量之间的相依关系，统计学中用相关系数来描述变量 x ， y 之间的相关性。 ρ_{xy} 是两随机变量之积的数学期望，称为相关性，表征了 x 、 y 之间的关联程度。）

2 相关函数

如果所研究的变量 x ， y 是与时间有关的函数，即 $x(t)$ 与 $y(t)$ ，这时可以引入一个与时间 τ 有关的量，称为函数的相关系数 $\rho_{xy}(\tau)$ ，并有：

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t-\tau)dt}{[\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)dt \int_{-\infty}^{\infty} y^2(t)dt]^{1/2}}$$

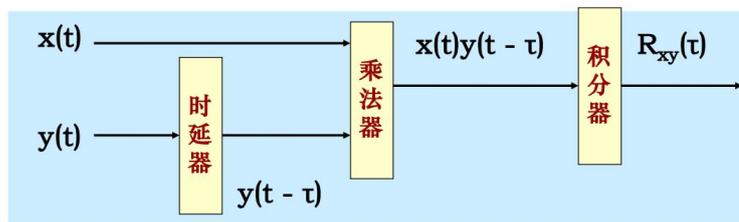
假定 $x(t)$ 、 $y(t)$ 是不含直流分量(信号均值为零)的能量信号。分母常量，分子是时移 τ 的函数，反映了二个信号在时移中的相关性，称为相关函数。

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t-\tau)dt$$

$$R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)x(t-\tau)dt$$

二、如何应用于实际的测量

计算时，令 $x(t)$ 、 $y(t)$ 二个信号之间产生时差 τ ，再相乘和积分，就可以得到 τ 时刻二个信号的相关性。



48. 周期和非周期信号傅里叶变换的频谱图有什么差别

周期信号频谱图是离散线谱（仅包含基频及其整数倍谐波频率处的冲激函数（ δ 函数））；存在谐波；功率信号（能量无限，频谱表示功率密度）

非周期信号频谱图是连续谱（能量分布在连续频率范围内，无离散冲激）；无谐波（频谱覆盖任意频率，无固定倍频关系；能量信号（能量有限，频谱表示能量密度）