

新能源系统控制与检测 复习提纲

能环2005 燕天润

复习建议！好好复习作业和复习提供就可以！

一、能源利用过程烟气组分分析

1. FS, T90是什么意思？

- a. 响应时间 (T90)：被检测气体达到稳定显示值90%的时间作为响应时间
- b. FS：检测精度误差范围

2. 过量空气系数与氧浓度的关系

- a. 烟气氧浓度要求大于6%。 $\alpha = 21 / (21 - O_2\%) = 1.4$

3. 理论烟气量的计算方法

□ 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：

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

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

4. 磁性氧量的工作原理？

- 磁化现象：任何物质处于外磁场中会受到力或力矩的作用而显示出磁性，即介质在磁场中被磁化，介质分子磁矩沿一个方向顺序排列。
- 顺磁性物质：在外磁场中被拉向磁场较强处；逆磁性物质：在外磁场中被移向磁场较弱处
- 氧气的磁化率为正，且比其它气体的磁化率高得多

5. 氧化锆的工作原理，最佳工作温度，能斯特公式，氧化锆输出电压

- a. 工作原理：具有离子导电性质的固体物质称为固体电解质。固体电解质是离子晶体结构，靠空穴使离子运动而导电。纯氧化锆(ZrO₂)不导电，掺杂一定比例的低价金属物作为稳定剂，如氧化钙(CaO)、氧化镁(MgO)、氧化钇(Y₂O₃)，就具有高温导电性，成为氧化锆固体电解质
- b. 最佳工作温度：750℃
- c. 能斯特公式：—
- d. 氧化锆输出电压：

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

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。

从上式可以看出，当参比气体中的氧含量c₀=20.6%时，氧浓差电动势仅是被测气体中氧含量c₁和温度T的函数。被测气体中的氧含量越小，氧浓差电动势越大。这对于测量氧含量低的烟气是有利的。把上式中的自然对数换为常用对数，得

$$E = 2302.5 \frac{RT}{4F} \lg \frac{20.6}{c_1} = 0.0496T \lg \frac{20.6}{c_1}$$

$$= 0.0496(273.15 + t) \lg \frac{20.6}{c_1}$$

6. 不同烟气含氧量下，污染物浓度的折算

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

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；
O₂'——实测的氧含量，%；
O₂——基准氧含量，%。

问题：某电厂烟气NO_x排放110 mg/m³，测量时烟气氧浓度为10%，针对不同的基准氧含量，折算后浓度分别是多少？

7. 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

- 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。
- 待分析组分与其余组分的导热系数相差越大，仪器的灵敏度就越高
- 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。

二、气固两相浓度测量

8. 颗粒球形度的定义

- 与颗粒等体积的球的表面积与颗粒的表面积之比

9. 不同目数的筛子对应的颗粒直径

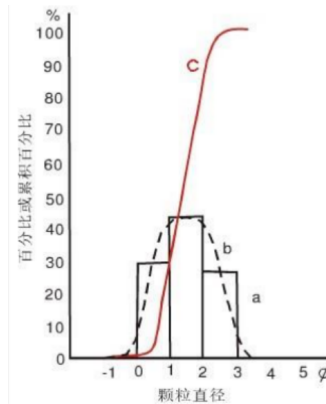
标准规则: 以200目的筛孔尺寸0.074mm为基准，乘或除模 $(\sqrt{2})^n$ (或) $(\frac{1}{\sqrt{2}})^n$ ，则得到

10. 颗粒的粒度分布有哪些统计基准

- 个数/长度/面积/重量基准分布
- 每一粒径间隔内的颗粒数/颗粒总长度占颗粒总数的比例

11. 粒度分布的累积曲线？

- a. 横坐标表示粒径，而纵坐标表示的是各粒级的累积含量



12. 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？

- a. 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

(1) 分选系数 (S_0):
$$S_0 = \frac{P_{25}}{P_{75}}$$

式中 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： $S_0=1\sim2.5$ ，分选好； $S_0=2.5\sim4.0$ ，分选中等； $S_0>4.0$ ，分选差。

(2) 标准偏差 (σ_1)

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

用标准偏差确定的六个分选级别：

$$\sigma_1 < 0.35, \text{ 分选极好}; \quad \sigma_1 = 0.35 \sim 0.50, \text{ 分选好};$$

- a. ϕ_{16} 、 ϕ_{50} 和 ϕ_{84} 分别代表累积曲线上百分含量为16%、50%、84%三处的粒径
- b. 正偏态：粗组分为主，分选性变差

13. 400目对应的颗粒直径是多少？

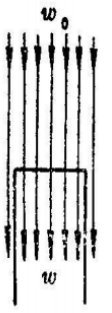
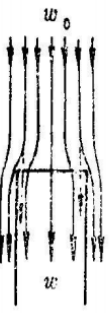
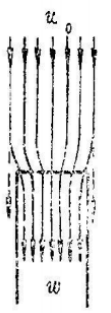
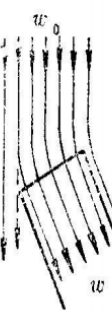
- a. 孔径是38 μm

14. 平衡流、冻结流的差别？斯托克斯准则的定义

- a. 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。
- b. 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。

15. 为什么要等速取样？不等速情况下对颗粒粒度分布测量的误差是怎么样的？

- a. 不等速取样所造成误差的大小，目前尚缺乏严格的理论计算方法

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

16. 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

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

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

由于实际气流都具有粘性，从取样探头进口至内静压测孔一段距离内存在各项阻力损失：

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

- b. 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。
- c. 补偿的基本原理：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。

三、机械量测量

电感式位移测量-电容式位移测量-霍尔传感器

17. 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，什么使集肤效应，和频率的关系

- a. 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。
- b. 产生条件：存在交变磁场+导体处于交变磁场中
- c. 区别：高频反射 和 低频透射式 电涡流传感器
- d. 集肤效应：电涡流只能检测 导体表面的各种物理参数
- e. 与频率的关系：频率越低，检测深度越深，减小频率，克服集肤效应

18. 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

- a. 临界阻尼：阻力使振动物体刚能 不作周期性振动而又能最快地回到平衡位置

- b. 过阻尼：系统则需要较长时间才能达到平衡位置
- c. 欠阻尼：系统如果所受的阻尼力较小，则要振动很多次，最后才能达到平衡位置

19. 霍尔传感器的作用原理

- a. 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

四、光电测量

20. 外光电、内光电传感器的差别，典型传感器有哪些

- a. 外光电效应：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。向外发射的电子叫做光电子。光电管、光电倍增管
- b. 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。半导体

21. 辐射能，辐射通量，辐射强度的定义，单位

- a. 辐射能Q：描述以辐射的形式发射、传输或接收的能量，单位焦耳（J）
- b. 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
- c. 辐射强度I：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)

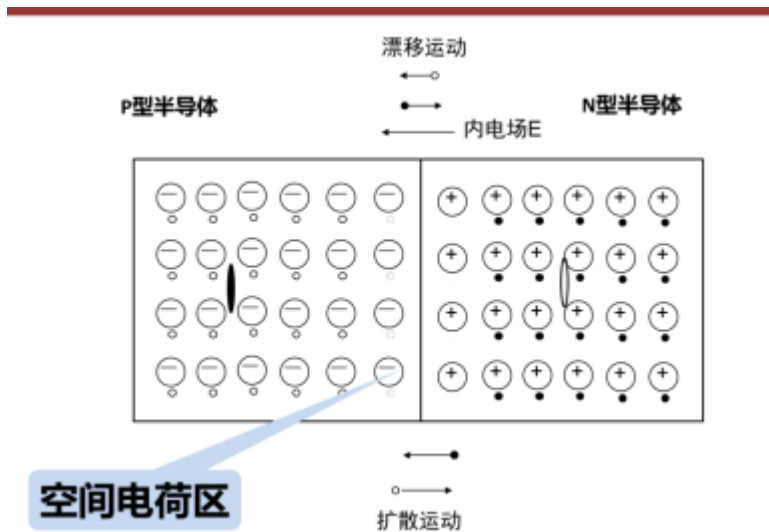
22. 1W的功率全部转换成波长为555nm的光，为683流明

23. 信噪比的定义，单位，噪声等效功率的定义

- a. 信噪比（SNR）：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，dB
- b. 噪声等效功率(NEP)：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)

24. 半导体内电场的方向，漂移和扩散运动的差别

- a. 过渡区形成了一个电场，方向:N \rightarrow P
- b. 漂移运动：半导体内存在电场时，自由电子和空穴会在电场力的作用下产生运动
- c. 扩散运动：当半导体内载流子浓度存在差异，载流子将从浓度高的区域自发地向浓度低的区域扩散



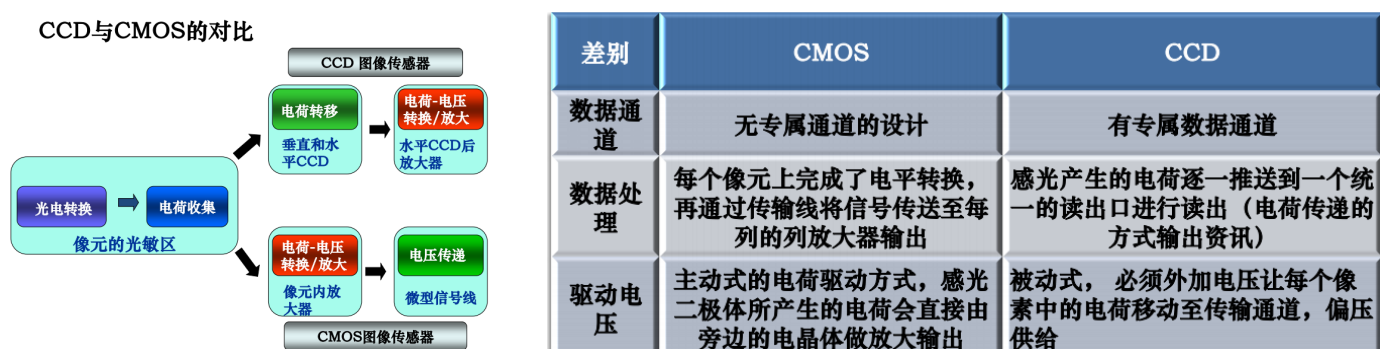
25. 光电管与光电倍增管的差别？

- a. 光电管，利用外光电效应制成的器件，一般都是真空的或者充气的光电器件
- b. 光电倍增管：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，获得大的光电流。
- c. 结构上，多了一个**倍增极（次阴极）**

26. 本征光敏电阻与杂质型光敏电阻的差别，适用范围

- a. 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
- b. 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
- c. 本征型用于可见光长波段，杂质型用于红外波段

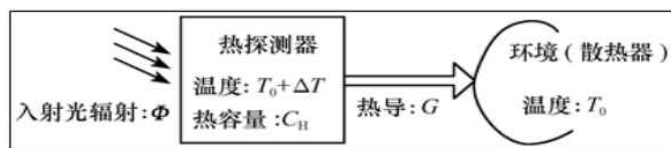
27. 图像成像的CCD和CMOS传感器的差别



五、光热测量

28. 光热传感器的能量平衡方程？减少光热传感器误差的方法

- 使用细导线，真空环境，减小探测器热敏元件的体积和重量



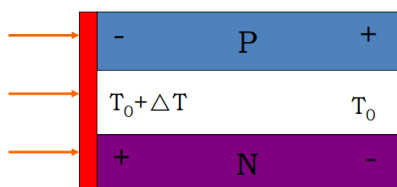
$$\alpha \Phi = C_H \frac{d(\Delta T)}{dt} + G \cdot \Delta T$$

吸收的能量

内能的增加

与环境热交换

29. 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） $V/^{\circ}C$

30. 热释电传感器的工作原理

a. 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

31. 主动红外成像和被动红外成像的差别

a. 主动：利用不同物体对红外辐射的不同反射

b. 利用物体自然发射的红外辐射

六、燃烧控制

32. 基本控制方式：锅炉跟随，汽机跟随，机炉协调

33. 燃烧控制的基本任务：满足机组负荷要求，燃烧过程经济性、稳定性和清洁性

34. 燃烧控制主要调节的三个物理量：燃料，送风，引风

35. 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

36. 主蒸汽压力受到的扰动来源：

a. 燃烧率扰动，称为基本扰动或内部扰动

b. 汽轮机调节阀开度的扰动，称为外部扰动

37. 维持含氧量的主要调节手段：

a. 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。

b. 煤量变化、炉膛负压变化也影响含氧量，称为外扰。

38. 燃烧过程控制应具有如下功能：

- a. 迅速改变炉膛燃烧率，适应外部负荷变化
- b. 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。
- c. 确保燃料、送风和引风等参数协调变化。保证燃烧经济性
- d. 确保燃烧过程的稳定性，避免炉膛压力大范围波动。

39. 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

$$D_Q = D + C_b \frac{dp_b}{dt}$$

$$D_Q = p_1 + C_b \frac{dp_b}{dt}$$

40. 风煤交叉限制是指：

- a. 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。
- b. 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

41. 风量调节的主要方式：节流，变角，变速。出口节流和进口节流的差异

七、机组控制

42. 汽包水位过高，过低的危害：

- a. 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
- b. 水位过低--会破坏水循环，引起水冷壁的破裂。

43. 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

44. 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Pb。

45. 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

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

46. 蒸汽量扰动下，水位的波动特性，虚假水位的原因

- a. 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 还来不及增加，汽包中水的体积增大而水位上升。

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

47. 炉膛热负荷扰动下，水位的波动特性，虚假水位的原因？

- a. 虚假水位：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

48. 汽包锅炉水位控制单冲量、二冲量、三冲量的区别

- a. **冲量**：调节器入口的信号/反馈信号
- b. **单冲量**：一个信号进入调节器，小容量锅炉
- c. **双冲量**：两个信号进入调节器，中小锅炉
- d. **三冲量**：三个信号进入调节器，大型锅炉

49. 三冲量控制的三个信号分别是HWD：蒸汽流量D，给水流量W，水位H

50. 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 给水泵必须有较高压头，机械损失大
- ③ 不必过多考虑金属应力变化，机组启停速度较快
- ④ 蓄热容积小，对负荷变动敏感，对控制系统要求高

51. 中间点温度

- a. 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
- b. 即上辐射区出口蒸汽温度处于微过热状态
- c. 反映燃水比变化最灵敏的地方
- d. 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

52. 直流锅炉给水自动控制的任务：

- a. 快速满足机组负荷需求
- b. 保持蒸汽参数（温度、压力）稳定
- c. 保持汽水行程的中间点温度稳定
- d. 保持风煤配比
- e. 保持炉膛负压

53. 直流锅炉给水控制的原则：

- a. 核心：维持“燃水比”
- b. 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

54. 汽包锅炉主蒸汽温度控制范围：

- a. 过热汽温不超过额定值的-10 - +5°C，长期偏差不允许超过±5°C
- b. 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°C/min

55. 影响过热汽温主要扰动有三种：

- a. 蒸汽流量（负荷）扰动
- b. 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
- c. 减温水流量扰动

八、测量信号分析

56. 信号均值，方差和均方值的差别

均值 均值 $E[x(t)]$ 表示集合平均值或数学期望值

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

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。

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

6、方差

信号 $x(t)$ 的方差定义为：

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

57. 相关函数的定义，如何应用于实际的测量

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。

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

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

58. 周期和非周期信号傅里叶变换的频谱图有什么差别

- a. 非周期信号的频谱线是连续的

1.1 作业

1、查阅资料，了解中国的引力波计划。（天琴和太极）

“天琴计划”是中国科学院院士罗俊于2014年3月在华中科技大学的一次国际会议上提出，2015年7月在中山大学发起，是以中国为主导的国际空间引力波探测计划。其目标是在2035年前后，在约10万公里高的地球轨道上，部署3颗全同卫星，构成边长约为17万公里的等边三角形编队，建成空间引力波天文台“天琴”，开展引力波的空间探测，进行天体物理、宇宙学及基础物理前沿研究。“天琴一号”于2019年12月20日成功发射，并实现了所有预期目标。

中国科学院2016年提出了我国空间引力波探测“太极计划”。类似欧美LISA计划，“太极计划”的三星编队轨道是以太阳为中心，设计干涉臂臂长即卫星间距300万公里。“太极计划”对卫星的稳定性提出了更高要求，3颗卫星必须构成超稳超静平台。2019年8月31日，我国首颗空间引力波探测技术实验卫星“太极一号”成功发射，标志着太极计划第一步任务目标已成功实现。

2、什么是测量过程的三要素？

测量单位，测量工具，测量方法

3、分析接触式测量和非接触测量的含义和优缺点。

接触测量法：测量仪表的传感器与被测对象接触的测量方法。

非接触测量法：仪表的传感器不直接与被测对象接触的测量方法。

优势	<div>① 测量速度快，曲面数据获取容易</div> <div>② 不必做探头半径补偿</div> <div>③ 可测量柔软、易碎、不可接触、薄件、毛皮、变形细小等工件</div> <div>④ 无接触力，不会伤害精密表面</div>	<div>① 测量精度高</div> <div>② 可直接测量到工件特定的几何特征</div>
缺点	<div>① 测量精度相对不是太高，无法判别特定几何特征</div> <div>② 陡峭面不易测量，在测量中会存在测量死角</div> <div>③ 工件表面与探头表面不是垂直，测量会存在一定误差</div> <div>④ 工件表面的明暗程度会影响测量的精度</div>	<div>① 需逐点测量，速度慢</div> <div>② 测量前需做半径补偿</div> <div>③ 接触力大小会影响测量值</div> <div>④ 接触力会造成工件及探头表面磨损影响光滑度</div> <div>⑤ 倾斜面测量时，不易补偿半径，精度难以保证</div> <div>⑥ 测量工件内部时，形状尺寸会影响测量值</div>

4、测量仪表主要有哪三部分组成，各部分的作用是什么？

感受件：直接与被测对象相联系，将感受到的被测量信号转换成相应的信号输出

显示件：向观察者反映被测量的变化

传送件：将感受件输出的信号，根据显示件的要求，传送给显示件

5、有一支0.5级的温度计，测量范围是-100~550℃，已知其最大绝对误差为5℃。确定该温度计是否满足精度要求？

该温度计的最大引用误差为...

6、什么是测量的精密度、正确度和准确度？当正确度和精密度产生矛盾时，哪个更为重要？

- 正确度：对同一被测量进行多次测量，测量值偏离被测量真值的程度。反映系统误差的影响。
- 精密度：对同一被测量进行多次测量，测量值重复一致的程度。反映随机误差的影响。
- 准确度：精密度与正确度的综合指标。它反映随机误差和系统误差的综合影响

1.2 作业

1. 简述热电偶的均质导体定律、中间导体定律（及其两个推论）和中间温度定律。

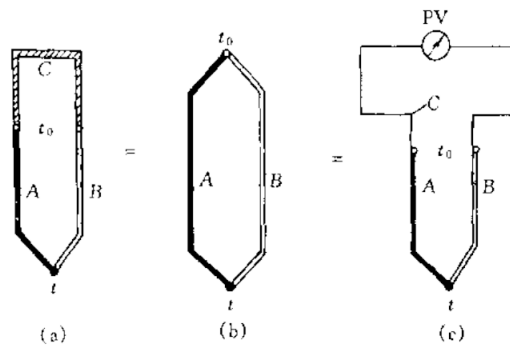
- **均质导体定律**：由同一均质导体（电子密度处处相等）组成的闭合回路中，不论导体的截面、长度以及温度分布如何，均不产生热电势。
- **中间导体定律（及其两个推论）**

由不同材料组成的闭合回路中，若各种材料接触点的温度都相同，则回路中热电势的总和等于零

$$E_{ABC}(t, t) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t) + e_{CA}(t) = 0$$

推论一

在热电偶回路中接入第三种（或更多种）导体材料，只要接入的导体材料两端的温度相同，则对热电偶回路的热电势不产生影响



推论二

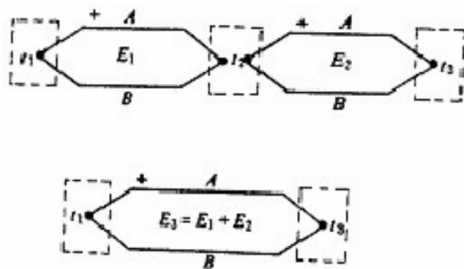
如果两种导体A、B对另一种参考导体C的热电势为已知，则这两种导体组成热电偶的热电势是它们对**参考导体**热电势的代数和。即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) + E_{CB}(t, t_0)$$

- **中间温度定律**

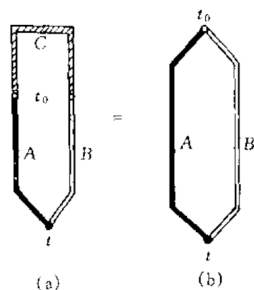
(3) 热电偶的中间温度定律

热电偶在两接点温度为 t_1 、 t_3 时的热电势等于该热电偶在两接点温度分别为 t_1 、 t_2 和 t_2 、 t_3 时相应热电势的代数和



$$E_{AB}(t_1, t_3) = E_{AB}(t_1, t_2) + E_{AB}(t_2, t_3)$$

2. 请证明中间导体定律的两个推论



证明

$$E_{ABC}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0)$$

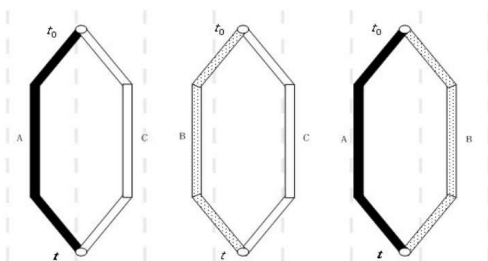
根据中间导体定律，当温度 $t = t_0$ 时，回路中总热电势为零。

$$E_{ABC}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0$$

$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$$

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$

证明



$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) - E_{BC}(t, t_0)$$

$$E_{AC}(T, T_0) = E_{AC}(T) - E_{AC}(T_0) \dots \dots \dots (1)$$

$$E_{BC}(T, T_0) = E_{BC}(T) - E_{BC}(T_0) \dots \dots \dots (2)$$

$$\begin{aligned} (1) \text{ 式减 } (2) \text{ 式: } & E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) \\ &= E_{AC}(T) - E_{AC}(T_0) - E_{BC}(T) + E_{BC}(T_0) \\ &= [E_{AC}(T) - E_{BC}(T)] + [E_{BC}(T_0) - E_{AC}(T_0)] \\ &= E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) = E_{AB}(T, T_0) \end{aligned}$$

3. 一支镍铬—镍硅（K型）热电偶，在冷端温度为20℃时，测得热电势 $E(t, 20) = 32.001 \text{ mV}$ ，试求热电偶所测的实际温度 $t = ?$ 如果没有考虑冷端温度的补偿，其绝对误差有多大？

例题：一支镍铬—镍硅（K型）热电偶，在冷端温度为20℃时，测得热电势 $E_K(t, 20) = 30.001 \text{ mV}$ ，试求热电偶所测的实际温度 $t = ?$

解：查表得 $E_K(20, 0) = 0.798 \text{ mV}$

$$\text{则 } E_K(t, 0) = E_K(t, 20) + E_K(20, 0)$$

$$= 30.799 \text{ mV}$$

查分度表求得 $t = 740 \text{ } ^\circ\text{C}$

2.1

复习题

- ◆ 用分度号Cu100的铜电阻温度计测得发电机冷却水温度为 56°C ，但检定时确知铜热电阻的 $R_0=100.8\Omega$ ，电阻温度系数 $\alpha'=4.29\times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ，试求冷却水的实际温度
- ◆ 已知某半导体热敏电阻在 20°C 时的阻值为 100Ω ，其电阻与温度斜率为 $dR/dt=-5.0\Omega/\text{K}$ 。试求：该热敏电阻在 50°C 时的阻值
- ◆ 请根据管内流体温度测量误差的计算式，归纳出减少测温误差的主要措施
- ◆ 表面热电偶有哪四种焊接形式，其导热误差的大小如何排序，为什么？

2.2

1. 测量锅炉过热器后面的烟气温度，温度计读数是 600°C ，附近冷表面的平均温度是 500°C ，烟气对测温管的对流放热系数是 $29.1\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ，测温管表面的辐射散热系数是 $4.65\times 10^{-8}\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ，请计算实际的烟气温度和测量误差
2. 用双热电偶测量气流温度，已知 $d_1=0.4\text{mm}$ ， $d_2=0.2\text{mm}$ ，分别测得 $T'=1973\text{K}$ ， $T''=2053\text{K}$ ，求实际的气流温度
3. 采用双色法进行测温，请推导实际温度 T 和比色温度 T_c 的关系

3.1

1. 请简述气体测量的主要方法
2. TDLAS测量气体浓度的原理和优点
3. 请简述压力测量的主要方法
4. 请简述液柱式压力计的主要分类和测量原理
5. 请简述弹性式压力表的主要种类（4种）

3.2

1. 请简述流量测量的方法
2. 请简述容积式流量计的主要分类和测量原理
3. 皮托管的结构和原理
4. 主要的液位测量方法