

实验九 接触式测温元件动态特性的测定

一、实验目的

接触式测温是最常用的测温方法。其测量结果的准确依赖测温性能的标定精度和正确的使用。本实验的目的是掌握最常见的接触式测温元件—热电偶的动态性能测定方法和动态测温方法。

二、实验原理

接触式测温要求测温元件与被测对象达到热平衡状态,这样测温元件才能正确反映被测对象的温度。测温元件都有一定的热容,因此当被测对象温度迅速变化时,测温元件的温度变化就会落后于被测对象。所测结果就不能正确指示被测温度,由此产生的误差就是动态误差。此外当被测温度高于测温元件的允许温度上限时,将热电偶迅速与被测对象接触在未达到热平衡之前拔出测温元件,根据插入时间内测温元件的温升曲线推算出高温对象的温度。研究动态误差和采用动态测温方法测量高温都需要测定元件的动态性能。

如果测温元件是裸丝热电偶,考虑被测对象是高温气体,将热电偶从常温插入高温气流,则热电偶的热接点温度 $t(\tau)$ 可表示为:

$$t = t_f - \left(\frac{\rho VC}{hF} \right) \frac{\partial t}{\partial \tau} + \left(\frac{kV}{hF} \right) \frac{\partial^2 t}{\partial X^2} + \frac{\varepsilon \sigma}{h} (T^4 - T_w^4) \quad (1)$$

式中:

t_f : 被测高温气体温度, $^{\circ}\text{C}$;

ρ : 热电偶材料密度, kg/m^3 ;

C : 热电偶材料的比热, $\text{KJ}/\text{Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$;

V : 热电偶热接点的体积, m^3 ;

h : 气体和热电偶表面间的对流换热系数, $\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$;

F : 热电偶热接点的表面积, m^2 ;

k : 热电偶材料的导热系数, $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$;

ε : 热电偶热接点的辐射率;

σ : 黑体辐射系数, 等于 $5.699\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$;

T: 热电偶接点温度, 以 K 为单位;

T_w : 壁面温度, 以 K 为单位。

若考虑实际热电偶的比热和温度的函数关系为 $C = C_0(1 + at)$ (C_0 为 0°C 时的比热), 则式(1)表示为:

$$t = t_f - \left(\frac{\rho V}{hF} \right) C_0 (1 + at) \frac{\partial t}{\partial \tau} + \left(\frac{kV}{hF} \right) \frac{\partial^2 t}{\partial X^2} + \frac{\varepsilon \sigma}{h} (T^4 - T_w^4) \quad (2)$$

通常上式可以简化使用。当热电偶长径比 l/d 大于 20 时, 导热项 $\left(\frac{kV}{hF} \right) \frac{\partial^2 t}{\partial X^2}$ 可以忽略;

若壁面温度很低, $T_w \ll T$, 可近似认为 $T^4 - T_w^4 \approx T^4$, (2)式变为:

$$t = t_f - \left(\frac{\rho V}{hF} \right) C_0 (1 + at) \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\varepsilon \sigma}{h} T^4 \quad (3)$$

若(3)式中有关物理参数都已知道, 则可以较准确地从测量曲线计算出被测气体地温度。

通常不能从(3)式中求出解析解, 只能求数值解。求解方法如下:

$$\tau_0 (1 + at) \frac{dt}{d\tau} = t_f - t + \frac{\varepsilon \sigma}{h} T^4 \quad (4)$$

式中:

$\tau_0 = \left(\frac{\rho V}{hF} \right) C_0$ 为 0°C 时热电偶地时间常数。

在温度上升曲线的时间坐标 τ 上取 N 等分, 间隔时间为 $\Delta\tau$, 得 τ_n 、 τ_{n+1} 、 τ_{n+2} ……,

对应的温度为 t_n 、 t_{n+1} 、 t_{n+2} ……。对(4)式两边积分得:

$$\tau_0 \int_{t_n}^{t_{n+2}} (1 + at) dt = \int_{\tau_n}^{\tau_n + 2\Delta\tau} \left(t_f - t + \frac{\varepsilon \sigma}{h} T^4 \right) d\tau$$

上式左侧为对温度 t 的积分, 由温度 t_n 积分到 t_{n+2} (参图 1); 右侧为对时间 τ 的积分, 由时间 τ_n 积分到 $\tau_n + 2\Delta\tau$, 左侧可以直接由积分公式解出, 右侧可以用辛普森公式近似求积, 得

$$\tau_0 \left[(t_{n+2} - t_n) + \frac{a}{2} (t_{n+2}^2 - t_n^2) \right]$$

$$= t_f \cdot 2\Delta\tau - \frac{\Delta\tau}{3} \cdot \left\{ \left[t_n + \frac{\varepsilon\sigma}{h}(t_n + 273)^4 \right] + 4 \left[t_{n+1} + \frac{\varepsilon\sigma}{h}(t_{n+1} + 273)^4 \right] + \left[t_{n+2} + \frac{\varepsilon\sigma}{h}(t_{n+2} + 273)^4 \right] \right\}$$

令:

$$X_n = (t_{n+2} - t_n) + \frac{a}{2}(t_{n+2}^2 - t_n^2)$$

$$Y_n = (t_n + 4t_{n+1} + t_{n+2}) + \frac{\varepsilon\sigma}{h}(T_n^4 + 4T_{n+1}^4 + T_{n+2}^4) \quad (5)$$

则:

$$Y_n = AX_n + B \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} A = -\frac{3\tau_0}{\Delta\tau} \\ B = 6t_f \end{cases} \quad (7)$$

X_n 、 Y_n 都由热电偶的阶跃响应曲线上获得, 故只需求得常数 A 和 B , 便可由上式求得 t_f 和热电偶时间常数 τ_0 。在上面的推导中是在曲线上任取三个点 τ_n 、 τ_{n+1} 、 τ_{n+2} 及其对应的温度值时得到的一组 A 和 B 。通过整个响应曲线就可获得多组 A 、 B 值。用最小二乘法就可获得最合理的 A 、 B 值。

从(3)式知道, 热电偶的测量结果除了与热电偶本身有关, 还与实际工况有关, 因为对流换热系数 h 不仅与流体速度有关, 还与流体本身的物理量有关, 因此若需确定热电偶的时间常数则需指定工况, 通常热电偶的时间常数是在由室温插入沸腾的水这一标准状态下进行的。在这种状态下, 热电偶热容的温度系数 a 和辐射换热都可忽略, 则(5)式可简化为:

$$X_n = (t_{n+2} - t_n)$$

$$Y_n = (t_n + 4t_{n+1} + t_{n+2}) \quad (8)$$

同样按(6)式进行最小二乘法回归 A 、 B , 再从(7)式中解出 τ_0 和 t_f 即可。

三、实验装置

采用沸水的插入式热电偶时间常数及动态测温实验装置由下述设备组成(参图 2)。

(1)带屏蔽层的($\varnothing 0.1\text{mm}$)镍铬—镍硅裸热电偶一支;

- (2)烧杯两只，一只放沸水，一只放冷水；
- (3)数字存贮示波器一台，本书以 DSS6522 型为例；
- (4) X-Y 记录仪一台(本书以 LZ3-30 为例)。

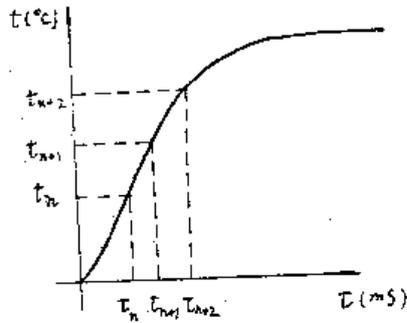


图 1 阶跃相应求解图

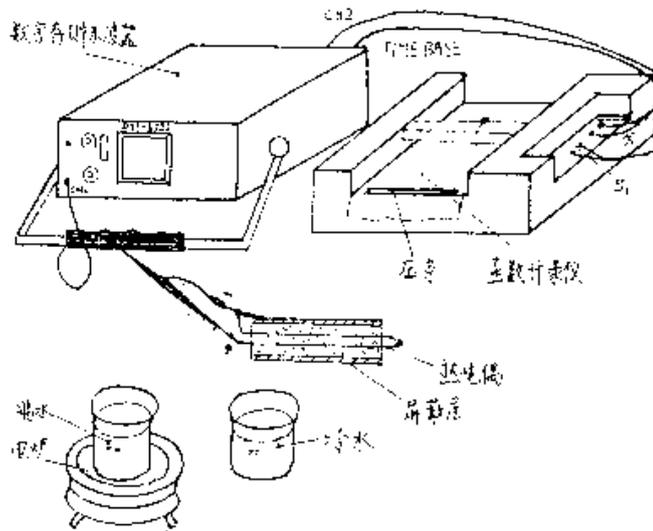


图 2 实验装置图

四、实验步骤

1、数字存贮示波器背板上 **CH₂**(或**CH₁**) 插头通过电缆与 X-Y 记录仪 Y₁ 输入端联接，Y₁ 的量程置 1V/cm。示波器的 **TIME BASE** 插头通过电缆与记录仪 X 输入端联接，X 的量程置为 1V·cm。记录仪工作状态选择为 X-Y 记录方式。

2、数字存贮示波器开关选择(见图 3)

垂直轴：

操作模式(VERT MODE)—**CH₂**(或**CH₁**)按下：

灵敏度—5mv/DIV，**PULLX5** 旋钮拉出，等效灵敏度为 1mv/DIV。

输入信号偶合方式选择 **AC-GND-DC**—开关扳到 DC。

SCOPE、PEN 方式选择—选择 SCOPE，即示波器方式。

水平(指时间)轴:

选择时基: 对于 $\varnothing 0.1$ 的热电偶选为 50ms/DIV。选择之后记录下这个数据。

选择存贮器: 本实验可任选。

选择记录模式(一般 NORMAL 或四线 4TRALL): 选择 NORMAL。

扫描模式选择:

选择单信号 **SINGLE** 模式, 按一下 **SINGLE** 键即可。

显示模式选择:

滚动 **ROLL** 和自动清除 **AUTO ERASE** 选择: 选 **ROLL**。

滚动方向 A (, B () 选择: 选 A。

预延迟 **PREDELAY**: 按一下, 触发点 TRIG、POINT 选择在 5.0DIV 处。

触发模式选择:

AC/DC: 选择 DC

极性+/-: 选择+

INT/TIME/EXT: 选择内触发按钮 **INT**。

触发电平 LEVEL: 旋钮旋在中间位置。

3、将一个烧杯放满水放在电炉加热至沸腾, 另一烧杯与室温相同的水, 并记录室温。

4、将热电偶与示波器通道 2 **CH₂** 的探头相连。探头地线夹子夹住热电偶的负极, 并与热电偶屏蔽层相连。探头钩子钩住热电偶正极, 探头倍率开关打到 1。

5、按下 **SINGLE RESET** 键, 这时 **READY** 灯亮, 且 TRIG 灯不亮。若不能同时到达这种状态, 调节 **LEVEL** 旋钮。

6、将热电偶迅速插入沸水中, 若 TRIG 灯亮, 等到 **STORGED** 灯亮, 拿出热电偶。则记录下的热电势将固定显示在屏幕上, 如下图, 其显著标志是有一条触发位置的触发线, 触发线的位置在预延迟设定的格数上。若热电偶插入之后 TRIG 灯不亮, 则需调节 LEVEL 旋钮。然后用吸水纸吸干热电偶上沸水后将其放入冷水中冷却, 再吸干水后重新插入沸水中测试, 直到成功的记录。

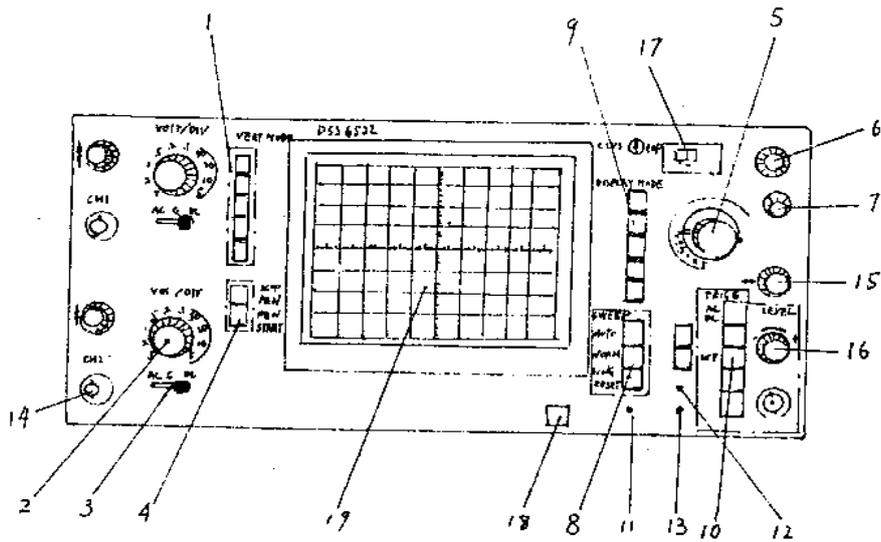


图3 数字存储示波器面板

- 1—垂直操作模式 2—通道2灵敏度选择 3—输入信号耦合方式 4—屏幕或笔方式选择
 5—水平(时间)坐标, 时间/DIV 6—存储体选择 7—记录模式选择 8—扫描模式选择
 9—显示模式选择 10—触发模式选择 11—READY灯 12—TRIG'D(已触发)灯
 13—STORED(已存贮)灯 14—通道2探头插座 15—水平位置 16—水平触发电平
 17—延迟触发点选择 18—电源开关 19—屏幕(CRT)

7、在数字存贮器上记录成功后, 将图形转换到记录仪的记录纸上:

1)首先按下示波器的 REN 键, 调节记录仪零点。

2)记录仪开关打到抬笔, 按示波器的 **PENSTART** 开始画图, 这时记录仪的笔不接触纸空走, 可观察画图位置是否合适, 不合适时调整记录仪零点。

3)按 **PENSTART** 返回。

4)记录仪落笔, 按 **PENSTART** 画图, 画完之后, 记录仪开关打到抬笔, 按 **PENSTART** 回笔

5)在上述情况下示波器输出速度很快, 记录仪响应速度不够, 故记录纸上画出的图形与示波器上记录显示的图形不一致。这表示当记录仪系统动态响应不够时, 系统记录的曲线带有很大的动态误差。

6)将示波器 TIME 选择开关为 1S/DIV, 再按 4)步画图, 记录仪的记录曲线就能不失真的记录热电偶的响应, 然后在记录纸上标上原选择的时基开关(50ms/DIV)数做为横轴的坐标。纵轴按每大格 1mv 标上坐标(见图 3)。

五、数据处理

1、在记录仪的热电偶阶跃响应曲线上取 5 至 10 个点。注意按时间轴(横轴)等间隔取点(不一定要从起始取数), 注意加上冷端温度。

2、按式(5)计算 X_n 、 Y_n 填入下表, 然后按最小二乘拟合的方法列表计算:

表 1

τ (格)	E(格)	T(°C)	X_n	Y_n	X_i^2	Y_i^2	$X Y$	Σ

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 / n \quad (9)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) / n \quad (10)$$

$$A = S_{xy} / S_{xx} \quad (11)$$

$$B = \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) / n - A \cdot \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) / n \quad (12)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 / n \quad (13)$$

$$R = \frac{|S_{xy}|}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}} \quad (14)$$

3、按式(7)计算出时间常数 τ_0 和被测对象温度 t_f 。

六、实验报告主要内容

- 1、简述实验目的、原理、实验装置。
- 2、叙述实验过程和操作要点。
- 3、处理数据。
- 4、思考题和测量方法改进的讨论。

七、思考题

- 1、从示波器几种输出速度下记录仪的记录曲线讨论动态响应和动态误差。
- 2、通过试验结果分析误差因素。
- 3、如果忽略传导和辐射传热后，直接从式(1)解出的温度响应解析式，能否用来测量时间常数。

(执笔人：周勇敏、简淼夫)