
金属线膨胀系数的测量

通常情况下，物体在确定的温度和压强条件下具有确定的体积。当温度发生变化时，绝大多数物体的体积会出现“热胀冷缩”现象，少数物体的体积会出现“热缩冷胀”的反常现象。具有热胀冷缩性质的物体常被称为“正膨胀材料”，具有热缩冷胀性质的物体常被称为“负膨胀材料”。然而，人们常说的“热膨胀”主要是针对正膨胀材料而言的。随着温度升高，物体的体积通常会增大，该现象是由于物体内部原子（或分子）的间距随温度升高逐渐增大导致的。

在物理学上，“膨胀系数”是用于表征物体热膨胀性质的物理量，即表征物体在受热时其长度、面积、体积增大程度的物理量。表征长度的增加程度通常用“线膨胀系数”，表征面积的增加程度通常用“面膨胀系数”，表征体积的增加程度通常用“体膨胀系数”。对于正膨胀材料，其膨胀系数为正值；对于负膨胀材料，其膨胀系数为负值。

“线膨胀系数”具体是指物体在一定温度范围内升高单位温度时在一维方向上产生的相对伸长量。线膨胀系数与物体的材料种类有关，不同材料通常具有不同的线膨胀系数。例如：铜的线膨胀系数约为 $17.1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，铝的线膨胀系数约为 $23.8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。线膨胀系数还与组成物体的材料纯度有关，材料的纯度不同，通常其线膨胀系数也不同。此外，线膨胀系数还与温度有关，在不同的温度范围内，材料的线膨胀系数通常也不相同的。例如，合金材料在其金相组织发生变化的温度附近，会出现线膨胀量的突变。

一般情况下，固体因热膨胀所产生的形变量非常小，但是却对应着固体内部非常大的应力，因此在工程设计、机械制造和材料加工等过程中，都必须对各种物质的热膨胀特性予以充分的考虑。材料的热膨胀性质已有众多应用，例如：液体温度计和喷墨打印机等。因此，材料的线膨胀系数测定，不仅对新材料的研制具有重要意义，而且也是选用材料的重要指标之一。本实验主要学习一种测量金属材料线膨胀系数的实验方法。

一、实验目的

- 1.了解材料的热膨胀性质及影响因素。
- 2.学习并掌握一种测量金属材料线膨胀系数的实验方法。
- 3.学会使用千分表测量长度的微小变化量。

二、实验仪器：

金属线膨胀实验仪，ZKY-PID 温控实验仪，千分表。

仪器介绍

1. 金属线膨胀实验仪

仪器外型如图 1 所示。金属棒的一端用螺钉连接在固定端，滑动端装有轴承(金属棒垂直测量方式的是一非金属的圆环)，金属棒可在此方向自由伸长。通过流过金属棒的水加热金属棒，金属棒的膨胀量用千分表测量。支架都用隔热材料制作。

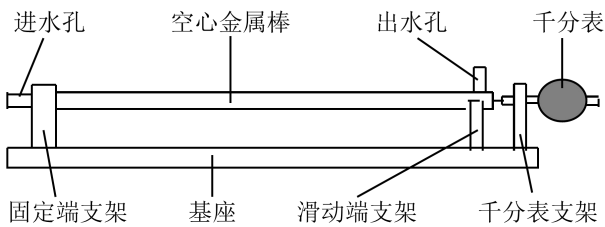


图 1 金属线膨胀实验仪

2. 开放式 PID 温控实验仪

温控实验仪包含水箱，水泵，加热器，控制及显示电路等部分。

本温控试验仪内置微处理器，带有液晶显示屏，具有操作菜单化，PID 的参数已经是通过理论分析和大量的实验得到的一个最符合本仪器的参数，已经达到最佳控制，故不可调节，能显示温控过程的温度变化曲线和功率变化曲线及温度和功率的实时值，能存储温度及功率变化曲线，控制精度高等特点，仪器面板如图 2 所示。

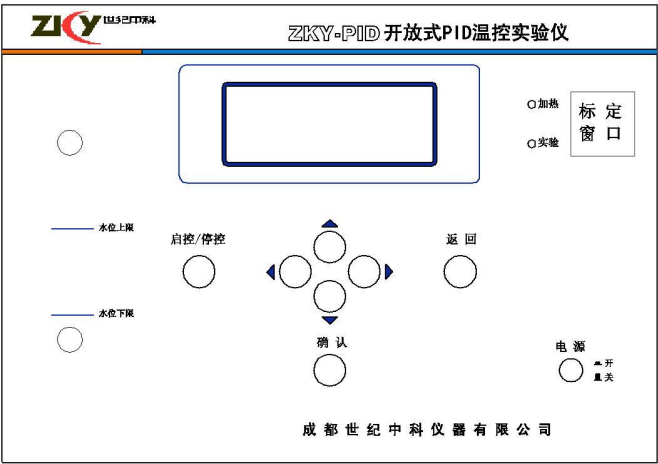


图 2 温控实验仪面板

开机后，水泵开始运转，显示屏显示操作菜单，可选择工作方式，输入序号及

室温，设定温度及 PID 参数。使用◀ ▶ 键选择项目，▲ ▼ 键设置参数，按确认键进入下一屏，按返回键返回上一屏。

进入测量界面后，屏幕上方的数据栏从左至右依次显示序号，设定温度，初始温度，当前温度，当前功率，调节时间等参数。图形区以横坐标代表时间，纵坐标代表温度（以及功率），并可用▲▼键改变温度坐标值。仪器每隔 15 秒采集 1 次温度及加热功率值，并将采得的数据标示在图上。温度达到设定值并保持两分钟温度波动小于 0.1 度，仪器自动判定达到平衡，并在图形区右边显示过渡时间

ts，动态偏差σ，静态偏差 e。一次实验完成退出时，仪器自动将屏幕按设定的序号存储（共可存储 10 幅），以供必要时查看，分析，比较。

3. 千分表

千分表的顶针（测量端子）与指针通过精密齿轮相连，通过指针转动角度可以直接读取顶针的伸缩量。使用千分表时，注意将其顶针与待测金属管横截面垂直接触。千分表是微小长度变化的测量工具，其结构如图 3 所示，设备参数如表 1 所示。千分表在使用前需要进行调零，方法是：在测头无伸缩时，松开“调零固定旋钮”，旋转表壳，使主表盘的零刻度对准主指针，然后固定“调零固定钮旋”。调零后，毫米指针与主指针都应该对准相应的零刻度。外套管用以固定仪表本身；测量杆被压缩 0.2mm 时，副指针转过一格，而主指针则转过一周，表盘上每周等分 200 小格，每小格即代表 0.001mm，千分表亦由此得名。所以千分表读数=毫米表盘读数+ 1/1000×主表盘读数（单位 mm），注意：毫米表盘读数不需要估读，主表盘读数需要估读。

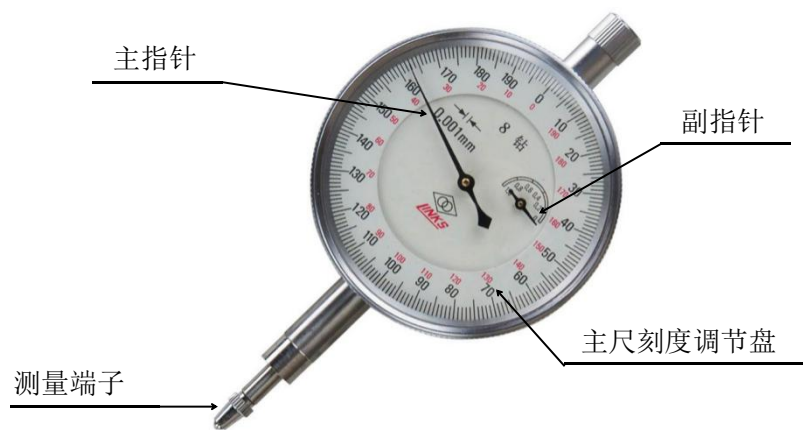


图 3 千分表

表 1 千分表的参数

名称	参数
最大量程	1 mm
最小分度值	0.001 mm
主指针	200 格，每格 0.001 mm
副指针	5 格，每格 0.2 mm

三、实验原理

1. 线膨胀系数

在常温条件下，固体的长度（ L ）与温度（ T ）之间的关系为：

$$L = L_0(1 + \alpha T) \tag{1}$$

式中 L_0 是指 0°C 时固体的长度， α 是指固体材料的线膨胀系数（表示固体材料在 $0\sim T$ 温度区间内每升高 1°C 产生的相对伸长量，单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$ ）。通常，固体材料的线膨胀系数会随温度变化而相应的发生改变。在一定的温度范围内（例如： $0\sim 100^\circ\text{C}$ ），材料的线膨胀系数可以近似看作一个常量，如表 2 所示。

表 2 常见材料的线膨胀系数

固体材料	适用的温度范围	线膨胀系数 α
铝	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$23.8 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
铜	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$17.1 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
铁	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$12.2 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
金	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$14.3 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
银	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$19.6 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
钢（0.05%碳）	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$12.0 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
康铜	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$15.2 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
铅	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$29.2 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
锌	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$32.0 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
铂	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$9.1 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$
钨	$0 \sim 100\ ^\circ\text{C}$	$4.5 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$

由公式（1）可知，在 T_1 和 T_2 温度条件下，固体的长度分别为 L_1 和 L_2 ，即：

$$L_1 = L_0(1 + \alpha T_1) \tag{2}$$

$$L_2 = L_0(1 + \alpha T_2) \tag{3}$$

用公式（3）减去公式（2），可得：

$$L_2 - L_1 = \alpha L_0(T_2 - T_1) \tag{4}$$

因此，

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_0(T_2 - T_1)} = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T} \quad (5)$$

在 0~100℃温度区间内， L_1 与 L_0 非常接近，因此可以认为 $L_1 \approx L_0$ 。将 L_1 代替 L_0 代入公式 (5)，可得：

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_1 \cdot \Delta T} \quad (6)$$

由公式 (6) 可知，通过实验手段若能测得初始温度时金属管的长度 (L_1)，温度变化量 (ΔT) 和相应的微小伸长量 (ΔL)，即可求得该固体材料的线膨胀系数 (α)。

如何精确测量微小伸长量 (ΔL) 是测量固体材料线膨胀系数的关键问题。在测量微小伸长量 (ΔL) 之前，可以先根据公式 (6) 对其进行粗略估算：以线膨胀系数 α 约为 $10.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的某种金属材料为例，若金属管的初始长度为 $L_1 = 250 \text{ mm}$ ，温度变化量为 $\Delta T = T_2 - T_1 \approx 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，则该金属管的微小伸长量约为 $\Delta L \approx 0.25 \text{ mm}$ 。对于如此微小的伸长量，用普通测量工具（如钢尺或游标卡尺）很难精确测量。常用的微小长度测量方法有：读数显微镜、光杠杆放大法、光学干涉法和千分表等。本实验选用千分表（分度值为 0.001 mm ）作为金属管微小伸长量的测量工具。

2. PID 调节原理

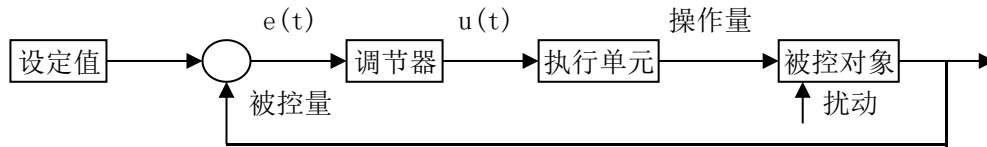


图 4 自动控制系统框图

PID 调节是自动控制系统中应用最为广泛的一种调节规律，自动控制系统的原理可用图 4 说明。

假如被控量与设定值之间有偏差 $e(t) = \text{设定值} - \text{被控量}$ ，调节器依据 $e(t)$ 及一定的调节规律输出调节信号 $u(t)$ ，执行单元按 $u(t)$ 输出操作量至被控对象，使被控量逼近直至最后等于设定值。调节器是自动控制系统的指挥机构。

在我们的温控系统中，调节器采用 PID 调节，执行单元是由可控硅控制加热电流的加热器，操作量是加热功率，被控对象是水箱中的水，被控量是水的温度。

PID 调节器是按偏差的比例(proportional)，积分(integral)，微分(differential)，进行调节，其调节规律可表示为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

式中第一项为比例调节， K_P 为比例系数。第二项为积分调节， T_I 为积分时间常数。第三项为微分调节， T_D 为微分时间常数。

PID 温度控制系统在调节过程中温度随时间的一般变化关系可用图 2 表示，控制效果可用稳定性，准确性和快速性评价。

系统重新设定（或受到扰动）后经过一定的过渡过程能够达到新的平衡状态，则为稳定的调节过程；若被控量反复振荡，甚至振幅越来越大，则为不稳定调节过程，不稳定调节过程是有害而不能采用的。准确性可用被调量的动态偏差和静态偏差来衡量，二者越小，准确性越高。快速性可用过渡时间表示，过渡时间越短越好。实际控制系统中，上述三方面指标常常是互相制约，互相矛盾的，应结合具体要求综合考虑。

由图 5 可见，系统在达到设定值后一般并不能立即稳定在设定值，而是超过设定值后经一定的过渡过程才重新稳定，产生超调的原因可从系统惯性，传感器滞后和调节器特性等方面予以说明。系统在升温过程中，加热器温度总是高于被控对象温度，在达到设

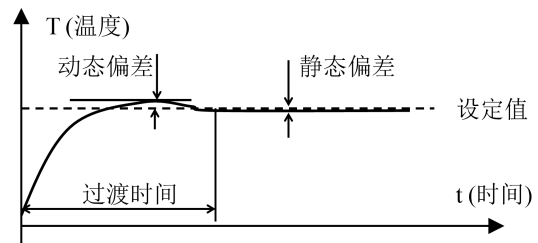


图 5 PID 调节系统过渡过程

定值后，即使减小或切断加热功率，加热器存储的热量在一定时间内仍然会使系统升温，降温有类似的反向过程，这称之为系统的热惯性。传感器滞后是指由于传感器本身热传导特性或是由于传感器安装位置的原因，使传感器测量到的温度比系统实际的温度在时间上滞后，系统达到设定值后调节器无法立即作出反应，产生超调。对于实际的控制系统，必须依据系统特性合理整定 PID 参数，才能取得好的控制效果。

由（7）式可见，比例调节项输出与偏差成正比，它能迅速对偏差作出反应，并减小偏差，但它不能消除静态偏差。这是因为任何高于室温的稳态都需要一定的输入功率维持，而比例调节项只有偏差存在时才输出调节量。增加比例调节系数 K_P 可减小静态偏差，但在系统有热惯性和传感器滞后时，会使超调加大。

积分调节项输出与偏差对时间的积分成正比，只要系统存在偏差，积分调节作用就不断积累，输出调节量以消除偏差。积分调节作用缓慢，在时间上总是滞后于偏差信号的变化。增加积分作用(减小 T_I)可加快消除静态偏差，但会使系统超调加大，增加动态偏差，积分作用太强甚至会使系统出现不稳定状态。

微分调节项输出与偏差对时间的变化率成正比，它阻碍温度的变化，能减小超调量，克服振荡。在系统受到扰动时，它能迅速作出反应，减小调整时间，提高系统的稳定性。

PID 调节器的应用已有一百多年的历史，理论分析和实践都表明，应用这种调节规律对许多具体过程进行控制时，都能取得满意的结果。

四、实验内容与步骤

1. 测量金属管长度：

在室温条件下，用普通刻度尺测量出金属管铜管的初始长度 (L_1)，要求重复测量 6 次，求平均值，减小误差。

2. 检查仪器前面的水位管，将水箱水加至水位下限与上限之间。

加水前，须确认放水孔开关处于关闭状态。平常加水从仪器顶部的注水孔注入。若水箱排空后第 1 次加水，应该用软管从出水孔将水经水泵加入水箱，以便排出水泵内的空气，避免水泵空转（无循环水流出）或发出嗡鸣声。

3. 调整千分表

将金属管一端固定在测试架上，另一端使其自由伸缩。然后将千分表固定在测试架上，且靠近金属管的自由端一侧，调节千分表的顶针使其垂直于金属管的横截面，并轻轻接触金属管自由端，使千分表的副指针指在 0.2 mm 左右，确保千分表与金属管自由端接触良好。

4. 设置目标温度

开机后，水泵应该开始运转，此时触摸仪器出水口的软管应有微微的颤动。显示屏显示操作菜单，可选择工作方式，输入序号及室温，设定温度。使用 ◀ ▶ 键选择项目，如第一屏的“进行实验”“察看数据”，第二屏的“序号”“室温”等。▲ ▼ 键设置参数，按确认键进入下一屏，按启控键开始升温，按停控键（与启控同一键）停止。按返回键返回上一屏。

进入测量界面后，屏幕上方的数据栏从左至右依次显示序号，设定温度 R，初始温度 T_0 ，当前温度 T，当前功率 P，调节时间 t 等参数。图形区以横坐标代表时间，纵坐标代表温度（功率），并可用 ▲ ▼ 键改变温度坐标值。仪器每隔 15 秒采集 1 次温度及加热功率值，并将采得的数据标示在图上。温度达到设定值并保持两分钟温度波动小于 0.1 度，仪器自动判定达到平衡，并在图形区右边显示过渡时间 t_s ，动态偏差 σ ，静态偏差 e。此时方可读数（千分表和当前温度 T）。

5. 测量线膨胀系数

实验开始前检查金属棒是否固定良好，千分表安装位置是否合适。一旦开始升温及读数，避免再触动实验仪。为保证实验安全，温控仪最高设置温度为 60 °C。设置金属管的目标温度值，启动加热按钮，待金属管温度稳定至目标温度后，记录千分表的数值。重复以上操作，温度的设定值每次提高

ΔT (2~5 °C)，温度在新的设定值达到平衡后，记录当前温度 T 及千分表读数于表 4 中。

五、数据记录 and 数据处理

1. 测量金属管的有效长度：（从螺丝钉中心到金属管自由端的长度）

表 3 室温时金属管的长度：

测量次数	1	2	3	4	5	6	$\bar{L}$
铜管长度 (mm)							

2. 金属管不同温度时千分表读数：

表 4 金属管不同温度时千分表读数：

温度 (°C)	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57
升温长度 (mm)										
降温长度 (mm)										
平均值	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}

3. 用逐差法求解平均伸长量：

$$\Delta \bar{L} = \frac{((L_{10} - L_5) + (L_9 - L_4) + (L_8 - L_3) + (L_7 - L_2) + (L_6 - L_1))}{5} =$$

4. 计算 $\alpha_{\text{铜}}$ ：

$$\alpha_{\text{铜}} = \frac{\Delta \bar{L}}{\bar{L} \cdot \Delta T} = \frac{\Delta \bar{L}}{\bar{L} \times 15} =$$

附注：纯铜的线膨胀系数约为 $17.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，由于材料的提炼和加工的难度较大，所以测试样品通常为非纯金属，因此实验室提供的纯铜的线膨胀系数仅供参考。

六、注意事项

- 1. 通电前，应保证水位指示在水位下限与上限之间；若水位指示低于水位下限，严禁开启电源，必须先用漏斗加水。
- 2. 实验过程中，待测铜管采用水循环方式进行加热，因此金属管的最高加热温度应不超过 60°C；

3. 待测铜管应水平放置，并且确保用螺丝钉将其一端固定紧，同时测量初始温度条件下金属管的长度时，应清楚金属管长度为螺丝钉中心与金属管自由端之间的距离；

4. 安装千分表时，应将千分表的测量端子与金属管的截面（自由端）接触并相互垂直，为了确保两者接触良好，安装千分表时应将其初始值调整至 0.2 mm 左右。

七、预习思考题

1. 对于一种材料来说，线膨胀系数是否一定是一个常数？为什么？
2. 如何利用逐差法处理数据？

八、分析讨论题

1. 该实验的误差来源主要有哪些？
2. 利用千分表读数时应注意哪些问题，如何减小误差？
3. 测量微小长度的实验工具有哪些？请至少列举三种测量微小长度的实验方法，并简要阐明其测量原理。