

材料科学基础实验报告

实验名称： 金属材料力学、热学性能参数测量

学 号： 22301079 姓 名： 张展铭 班 级： 22 材化

合作者： 桌 号：

指导教师：

实验日期：

实验考核

项目	实验预习	实验过程	分析与讨论	总评
评价				

实验内容一 动态悬挂法测量金属材料杨氏模量

【实验目的】

1. 理解动力学振动法测量材料杨氏模量的基本原理；
2. 熟悉示波器的使用，学会用示波器观察信号和识别共振；
3. 学会用外延法处理实验数据，理解本实验采用外延法的原因。

【实验原理】

1. 外力作用下，材料会发生弹性变形和塑性变形。弹性变形是最先发生的变形阶段，其在一定范围内满足胡克定律，即应力与应变成线性关系。塑性变形在超过材料的弹性极限后发生，此时材料不再能完全恢复原状。
2. 杨氏模量是衡量材料抵抗弹性形变能力的关键参数，常用的测量杨氏模量的方法有：动态法、静态拉伸法、梁弯曲法等。其中，本实验通过动态法测量试样固有频率计算杨氏模量。固有频率只与试样本身有关，结果稳定，因此适用于不同形状和材料组成的试样。
3. 实验中使用的试样为圆柱形棒材。在实际实验中，试样悬挂在两个传感器下方，两个传感器分别用于激振和拾振。试样在振动时产生特定的振动模式，不同级次振动对应不同振动频率和波形。但由于试样的形状、尺寸和质量以及悬挂点的位置影响试样做无阻尼自由振动，使我们无法直接测量固有频率。因此我们通过测量试样受迫振动达到共振状态的共振频率，然后根据公式计算杨氏模量：
当试样试棒长度 $L \gg$ 试棒直径 d 时，其横振动方程为：

$$\frac{\partial^4 y}{\partial^4 x} = \frac{\rho S}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (1)$$

【式中 ρ 、 S 、 E 、 J 分别表示试样的材料密度、试样棒的截面积、试样材料的杨氏模量和试样棒某一截面的惯量矩 ($J = \int y^2 ds$)】

令 $y(x, t) = X(x)T(t)$ ，代入方程可得：

$$J = \int y^2 dS = S \left(\frac{d}{4} \right)^2 \quad (2)$$

假设等式两边常量为 $K4$ ，即：

$$\frac{1}{X} \frac{d^4 X}{dx^4} = -\frac{\rho S}{EJ} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{d^2 T}{dt^2} = K^4 \quad (3)$$

解常微分方程得，通解为：

$$y(x, t) = (B_1 \cosh Kx + B_2 \sinh Kx + B_3 \cos Kx + B_4 \sin Kx) \cdot A \cos(\omega t + \psi) \quad (4)$$

其中：

$$\omega = \left(\frac{K^4 EJ}{\rho S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

我们称式(5)为频率公式。

对于两端自由的匀质试样，边界条件为待测试样两自由端所受垂直于轴的横向作用力 F 和弯矩 M 均为零，即：

$$F = -\frac{\partial M}{\partial x} = -EJ \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0 \quad (6)$$

其中弯矩 M 为：

$$M = EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (7)$$

将式(4)代入边界条件得：

$$\cos Kl \cdot \cosh Kl = 1 \quad (8)$$

用数值法求解可得：

$$Kl = 0, 4.730, 7.853, 10.966, 14.137, \dots \dots (9)$$

其中基频振动的本征值 $K_1 = \frac{4.730}{l}$ 。

将圆柱形棒材转动惯量 $J = \int y^2 ds = s \left(\frac{d}{4} \right)^2$ 和基频振动本征值 K_1 代入式(5)得：

$$E = 1.6067 \frac{l^3 m}{d^4} f^2 \quad (10)$$

【式中 l 为棒长、 d 为圆形棒的截面直径； m 为棒的质量； f 为试样固有频率】

【实验仪器】

DY-A 型金属动态杨氏模量测定仪、金属动态杨氏模量测试台、待测金属试样、游标卡尺、螺旋测微计、天平、示波器等。

【实验过程】

1. 测量待测试样的长度 l 、直径 d 和质量 m 并估算待测试样的固有频率 f 。根据不锈钢棒和铜棒在室温下的杨氏模量标准值，预先计算出试样的固有频率，以便后续寻找共振点。
2. 在实际操作中，悬挂点无法直接在节点处实现试样的激发振动，因此无法做无阻尼自由振动。所以实验需选取偏离的悬挂点。在节点附近选择两个等距位置并记录位置 x 。悬挂待测试棒并测量相应共振频率 f 。调节信号频率时需缓慢进行，确保共振点的建立。
3. 在节点的两侧选择不同位置悬挂待测试棒，测量不同悬挂点处的共振频率。要求节点两侧各有两个及以上的悬挂点。
4. 绘制图表，得到悬挂点位置和共振频率之间的变化曲线。根据曲线规律，采用内插法或外延法处理数据，计算悬挂点在节点处的共振频率后代入式 (10)，得到待测试样棒材的杨氏模量 E 并与已知标准杨氏模量进行比较，分析和讨论实验误差。

【实验数据】

试样 1: 不锈钢棒 节点位置 (距离端面): 33.608 mm

次数	1	2	3	4	5	平均值
长度 (mm)	150.06	150.00	150.06	150.10	150.02	150.048
直径 (mm)	5.90	5.98	5.90	5.94	5.88	5.920
质量 (g)	33.300	33.300	33.300	33.300	33.300	33.300

次数	1	2	3	4	5
端点距悬挂点距离 x (mm)	15	20	25	40	50
共振频率 f (Hz)	1178.7	1176.7	1175.6	1174.6	1176.7

理论式样 1 固有频率值计算得: 1.165×10^3 Hz

式样 2: 铜棒 节点位置 (距离端面): 33.604 mm

次数	1	2	3	4	5	平均值
长度 (mm)	150.02	150.00	150.06	150.00	150.02	150.020
直径 (mm)	6.00	5.96	5.94	5.90	5.90	5.940
质量 (g)	34.930	34.930	34.930	34.930	34.930	34.930

次数	1	2	3	4	5
端点距悬挂点距离 x (mm)	15	20	25	40	50
共振频率 f (Hz)	833.4	831.8	831.1	830.8	832.1

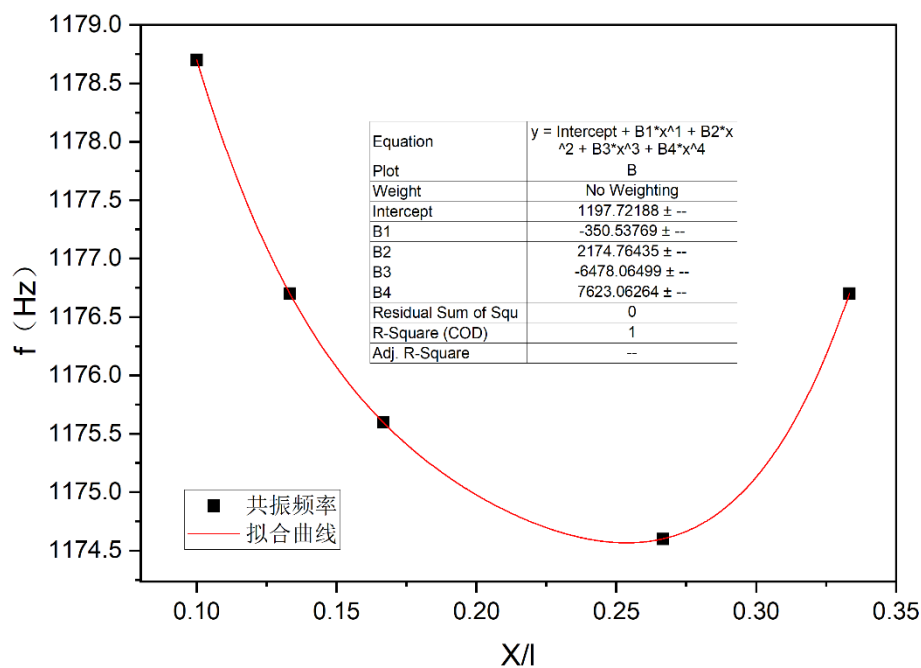
理论式样 2 固有频率值计算得: 8.879×10^2 Hz

【数据分析】

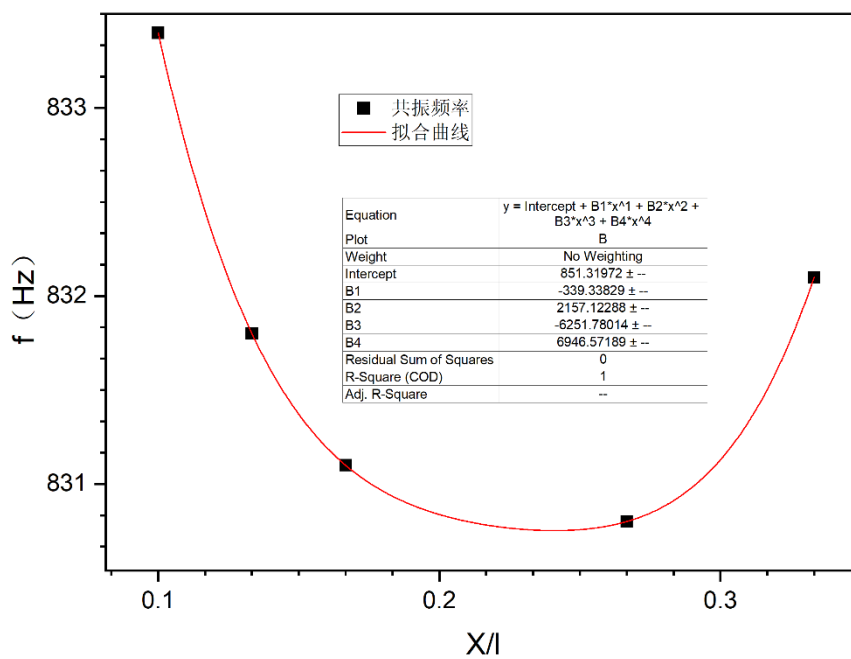
1. 根据公式 (10) 可以计算出, 不锈钢棒的固有频率计算值为 1.165×10^3 , 铜棒的固有频率计算值为 8.879×10^2 。
2. 查阅资料得知: 共振频率用四次多项式拟合的相较其他而言更为准确。故本实验采用四次项进行拟合, 拟合公式如下:

$$y = \text{Intercept} + B1 \cdot x + B2 \cdot x^2 + B3 \cdot x^3 + B4 \cdot x^4$$

3. 不锈钢棒共振频率的拟合曲线图如下:



4. 铜棒共振频率的拟合曲线图如下:



5. 根据上述图可以得出:

不锈钢棒共振频率拟合曲线的方程为:

$$y = 1197.72 - 350.54x + 2174.76x^2 - 6478.06x^3 + 7623.06x^4$$

铜棒共振频率拟合曲线的方程为:

$$y = 851.32 - 339.34x + 2157.12x^2 - 6251.78x^3 + 6946.57x^4$$

进而对上述方程分别求偏导, 令:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0$$

便可得出曲线最小值点分别为: (0.254, 1174.563) (0.241, 830.751)

代入公式(10)可以得出:

不锈钢棒的杨氏模量 $E_1 = 2.0302 \times 10^{11}$

铜棒的杨氏模量 $E_2 = 1.0505 \times 10^{11}$

6. 根据相对误差公式可以得出:

$$\Delta E_1 = \frac{2.0302 \times 10^{11} - 2 \times 10^{11}}{2 \times 10^{11}} \times 100\% = 1.51\%$$

$$\Delta E_2 = \frac{1.2 \times 10^{11} - 1.0505 \times 10^{11}}{1.2 \times 10^{11}} \times 100\% = 12.46\%$$

【结果分析】

1. 在数据分析中我们可以得到曲线最小值点分别为:(0.254, 1174.563) (0.241, 830.751), 这两个点与理论的 $x/l=0.224$ 具有一定的差异。本人推测是因为拟合所采取的曲线为四次的, 具有五个未知数, 而本次实验只测量了五组数据, 以至于无论如何拟合曲线的方差都为 1, 看似拟合结果十分完美, 实际是因为样本容量不足而得不到更为理想的拟合曲线。

2. 除此之外, 我们还分别得到了不锈钢棒和铜棒的杨氏模量相对误差, 分别为 1.51% 和 12.46%。由此可见不锈钢棒杨氏模量的计算结果是非常理想的, 而铜棒的相对误差虽在合理范围之内, 但相较于不锈钢棒较大。由实验测得数据可知, 铜棒测量得到的共振频率值也在 830Hz 左右。因而本人推测可能是铜棒成分和工艺与理论有所差异。以上在后续误差分析中也有叙述。

2. 误差分析:

(1) 系统误差

①环境: 实验当天的温度、湿度所带来的误差。

②仪器: 仪器本身精度的影响, 如本次仪器测量只能取到小数点后一位, 存在一定的误差。

③材料: 不锈钢棒和铜棒的加工工艺可能会对杨氏模量产生一定的影响, 使不同的不锈钢棒和铜棒具有不完全相同的杨氏模量。由实验结果可以看出, 铜棒的成分和工艺可能和理论有所差异, 以至于测量得到的共振频率值在 830Hz 左右, 与理论值 887.9Hz 差距较大。

④原理: 本实验计算的杨氏模量所需要的固有频率是由拟合曲线出来的, 与事实存在误差。以及电流不恒定导致输入输出相位不一致所带来的误差。

(2) 偶然误差

①读数: 在读取频率时, 可能会由于主观取舍固有频率的波动值而产生一定的误差。在悬挂时, 也难以完全准确地固定悬挂点在指定位置。

②计算: 在对数据进行四舍五入和拟合分析时, 可能会产生偶然误差。

(3) 有关减小误差的改进方案

①仪器: 可以使用测量精度更高的仪器来减小仪器所带来的测量误差。

②计算: 本实验在数据处理过程中, 尽可能用测量数据直接代入总计算式进行整体运算, 减小了对中间数据四舍五入所带来的误差。

③原理: 查阅文献可知, 可以通过在输入端加上一个交流恒流源的方式, 使输入线圈的电流的有效值保持恒定, 共振时输入和输出信号的相位的一致^[1]。

【思考题】

1. 什么是杨氏模量? 杨氏模量的意义?

答: 杨氏模量是材料力学中的一个重要参数, 指在材料受到拉伸或压缩时, 单位面积内的应力与相应的应变之间的比值, 通常用符号 E 表示。换言之, 杨氏模量衡量了材料在受力时的刚度, 即材料对外部应力的响应程度。

杨氏模量的意义在于:

①比较不同材料的应力应变性质: 通过比较不同材料的杨氏模量, 可以评估它们

在特定应力条件下的相对性能。这对于工程设计和材料选择至关重要，因为杨氏模量直接影响到材料在使用过程中的变形和稳定性。

②设计应用的指导：杨氏模量是工程设计中的重要参数之一。它用于计算结构在受力时的变形、应力分布等，有助于工程师设计出更加稳定和符合要求的结构。

2. 试讨论，试样的长度 l 、直径 d 、质量 m 、共振频率 f 分别应该采用什么规格的仪器测量？为什么？

答：

(1) 试样的长度 l 和直径 d 用最小刻度 0.02mm 的游标卡尺测量，这样可以使测量尽可能准确，减少实验误差。

(2) 质量 m 用最小刻度 0.001g 的电子天平测量，这样可以使测量尽可能准确，减少实验误差。

(3) 共振频率 f 用最小刻度 0.1Hz 的示波器测量，这样可以使单次改变频率的值尽可能小，能更加准确的找到相应的共振峰。如果精度不够的话，可能会出现无论怎么变化都得不到共振峰的情况。

实验内容二 基于迈克尔逊干涉测量金属材料线膨胀系数

【实验目的】

1. 观察材料的线膨胀现象，了解测量材料线膨胀系数的基本原理；
2. 了解光学干涉现象及迈克尔逊干涉的基本原理及调节方法；
3. 理解测量微小尺寸变化的方法。

【实验原理】

1. 线膨胀系数是固体材料每升高 1°C 时单位长度的伸长量。通常情况下，在温度变化不大的情况下，线膨胀系数可视为常量。
2. 当温度变化不太大时（由 t_1 变化至 t_2 ），固体材料在确定方向上的长度变化量与温度变化量成正比，其关系可由线膨胀系数：

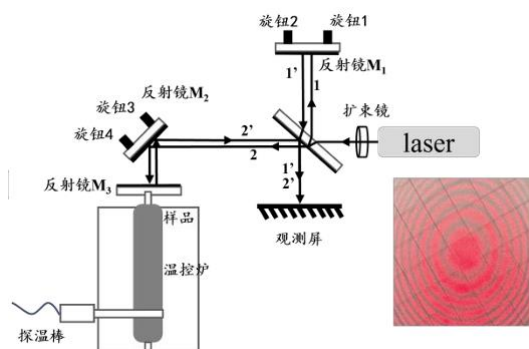
$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta t} \quad (1)$$

表示，这里， ΔL 是长度变化量， L_0 是初始长度， ΔT 是温度变化量。

对于温度变化较大的情况，则线膨胀系数通常为：

$$\alpha = A + Bt + Ct^2 + \dots \quad (A, B, C \text{ 均为常数})$$

3. 迈克尔逊干涉是基于光的分振幅法实现干涉的波动现象。通过适当的装置，可以实现光程差的动态调节，观察干涉条纹的变化。在实验中，利用迈克尔逊干涉现象，通过测量干涉图样中干涉条纹的变化，可以推导出材料在一定温度范围内的线膨胀系数。原理图如下所示：



4. 实验中，将待测金属试样置于温控炉内，并对其进行加热，观察干涉图样中干

涉条纹的变化。通过测量干涉条纹冒出或消失的数量，并结合波动光学干涉基本原理得出：

$$\Delta L = N \frac{\lambda}{2} (N \epsilon Z) \quad (2)$$

【 λ 为激光光源的光波波长：当 N 为奇数时，两束光相干结果为干涉暗纹；当 N 为偶数时，为干涉明纹】

将上式代入式 (1) 中即可计算出待测试样在此温度范围内的线膨胀系数：

$$\alpha = \frac{N \frac{\lambda}{2}}{L_0 \cdot (t - t_0)} \quad (3)$$

【实验仪器】

热膨胀实验仪、黄铜以及硬铝试样。

【实验过程】

1. 准备待测试样，使用游标卡尺在不同方位测量室温下待测试件的初始长度，记录多次测量结果并求平均值。
2. 小心轻放待测试样进入温控炉，确保测温孔洞对准温控炉，严禁直接松开待测金属试样以避免损坏。插入测温探头并固定，安装反射镜，注意反射镜的安装和取下过程，确保操作正确。
3. 打开氦氖激光器，调整光路使得两路光线在接收屏上产生干涉条纹。根据观察到的干涉条纹微调反射镜，确保干涉条纹图案清晰且条纹中心位于接收屏中间。
4. 设置加热炉的最高温度并启动加热。记录试样的初始温度 t_1 ，并观察干涉条纹随温度变化的环数变化，测量过程中需等待试样均匀膨胀后再开始记录数据。
5. 记录此时干涉条纹环数随温度的变化量，达到预定的条纹变化数（建议：10-15 条）的时候，记下此时温控表上的温度 t_2 。
6. 停止加热，将温控表上的目标温度设置到室温以下，对加热炉进行冷却。

【实验数据】

式样: 铜棒

测量次数	式样长度 L_1 (mm)	温度 (°C)			干涉环 变化数 N
		t_0	t	Δt	
1	150.00	25.6	26.7	1.1	11
2	150.00	27.5	28.6	1.1	11
3	150.00	29.0	30.1	1.1	11
4	150.00	31.0	32.1	1.1	11
5	150.00	32.9	34.0	1.1	11

试样: 铝棒

测量次数	式样长度 L_1 (mm)	温度 (°C)			干涉环 变化数 N
		t_0	t	Δt	
1	150.00	30.0	31.0	1.0	11
2	150.00	31.6	32.6	1.0	11
3	150.00	33.3	34.3	1.0	11
4	150.00	35.0	36.0	1.0	11
5	150.00	36.8	37.8	1.0	11

【数据处理】

1. 将 $L = 150.00\text{mm}$ $\lambda = 632.8\text{nm}$ $N = 11$ 以及上述测量的温度代入公式 (3), 可以计算出每次测量的线膨胀系数, 取平均值后得出:

铜棒的线膨胀系数平均值 $\bar{\alpha}_1 = 2.1093 \times 10^{-5} (/^{\circ}\text{C})$

铝棒的线膨胀系数平均值 $\bar{\alpha}_2 = 2.3203 \times 10^{-5} (/^{\circ}\text{C})$

2. 将实验数据代入下列不确定度计算公式并进行计算 (计算结果详见 3):

A 类不确定度:

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

不确定度传递公式：

$$U_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial u}{\partial x_i} \right)^2 U_i^2}$$

不确定度：

$$U_x = \sqrt{(U_A)^2 + (U_B)^2}$$

3. 数据总结

综上所述，数据处理结果如下：

	数据	A 类不确定度	B 类不确定度	总不确定度
铜棒线膨胀系数 (/ °C)	2.1093×10^{-5}	3.4740×10^{-5}	0.25×10^{-5}	3.54×10^{-5}
铝棒线膨胀系数 (/ °C)	2.3203×10^{-5}	3.9453×10^{-5}	0.33×10^{-5}	4.05×10^{-5}

【结果分析】

1. 数据分析

查阅讲义得知，铜棒的线膨胀系数参考值为 2.08×10^{-5} ，铝棒的线膨胀系数参考值为 2.36×10^{-5} 。根据相对误差公式可以得出：

$$\Delta\alpha_1 = \frac{2.1093 \times 10^{-5} - 2.08 \times 10^{-5}}{2.08 \times 10^{-5}} \times 100\% = 1.41\%$$

$$\Delta\alpha_2 = \frac{2.36 \times 10^{-5} - 2.3203 \times 10^{-5}}{2.36 \times 10^{-5}} \times 100\% = 1.68\%$$

可以看出，相对误差的值在合理范围之内而且相对较小，体现了实验操作的准确严谨。但不确定度值比数据值还要大，本人推测是因为温控仪的精度为 0.1°C ，而测量范围只有 1°C 左右，因此系统误差特别大，使实验数据偏离真实值，从而使不确定性大小超过测量数据。如果可以，实验最好使用温度测量显示更为准确的温控仪，以减小不确定度。

2. 误差分析

(1) 系统误差

- ①环境：实验当天的温度、湿度所带来的误差。
- ②仪器：仪器本身精度的影响，如温控仪本身只能取到小数点后一位，会产生一定的误差和较大的不确定度。
- ③材料：不锈钢棒和铜棒的成分和组分不均可能会对实验造成一定影响。

(2) 偶然误差

- ①读数：在读取温度时，由于较难界定何时达到与初始温度相同的干涉环状态，因此，何时读取最终的温度具有一定的主观性，进而产生偶然误差。
- ②计算：在对数据进行四舍五入计算时，可能会产生偶然误差。

(3) 有关减小误差的改进方案

- ①仪器和试样：可以使用测量精度更高的仪器、更均匀的试样来减小误差。
- ②计算：本实验在数据处理过程中，尽可能用测量数据直接代入总计算式进行整体运算，减小了对中间数据四舍五入所带来的误差。

【思考题】

1. 测量材料线膨胀系数的意义并举例说明。

答：线膨胀系数是描述材料在温度变化下尺寸变化的参数，通常用于工程设计和材料选择中。以下是材料线膨胀系数在不同方面的意义：

- ①**工程结构稳定性**：在许多工程应用中，例如建筑、桥梁、管道系统等，材料的尺寸稳定性对结构的安全和稳定至关重要。温度变化会引起材料的线膨胀或收缩，如果这些变化没有被适当考虑，可能会导致结构的不稳定或者产生过度应力，最终影响结构的性能和寿命。
- ②**材料选择和设计考虑**：在工程设计过程中，了解材料的线膨胀系数可以帮助工程师选择合适的材料，并确保设计的结构在不同温度条件下保持稳定。在高温环境下工作的设备或构件，需要选择线膨胀系数较低的材料，以减少因温度变化引起的尺寸变化对结构的影响。除此之外，比如温度在夏季和冬季会发生较大变化，在构建桥梁时就需要考虑材料的线膨胀系数，以及长度可能会随着温度的变化而发生微小的变化。如果不考虑这种长度变化，可能会导致桥梁在不同温度下出现

过度应力或结构不稳定的问题。

③**工程测量和校准**: 许多测量设备和仪器在使用时需要考虑温度对其尺寸和性能的影响。了解材料的线膨胀系数可以帮助校准这些设备,以确保它们在不同温度下提供准确的测量结果。

④**材料研究和开发**: 在材料科学和工程领域,研究材料的线膨胀系数可以帮助开发新的材料,以满足特定工程应用的需求。通过调整材料的成分和结构,可以改变其线膨胀系数,从而使其更适用于特定的温度环境下。

2. 分析实验中影响实验结果的因素有哪些。

答:

①**光源稳定性**: 光源的频率或强度的微小变化可能导致测量误差,所以实验中使用的**光源**必须具有稳定的频率和强度,以确保干涉图样的稳定性和准确性。

②**环境温度**: 金属材料的线膨胀系数与温度密切相关,因此必须确保实验室环境的温度稳定。即使微小的温度变化也可能影响金属材料的尺寸,进而影响干涉图样的解释和测量结果。

③**光路稳定性**: 迈克尔逊干涉仪的光路必须保持稳定,以确保干涉条纹的清晰度和稳定性。任何光路中的微小振动或调整都可能导致干涉图样的变化。

④**数据分析方法**: 对于干涉图样的数据分析方法必须准确可靠。对于干涉图样的解释可能会受到噪音、背景干涉以及其他干扰因素的影响,因此需要采用适当的数据处理和分析方法来提取所需的信息。