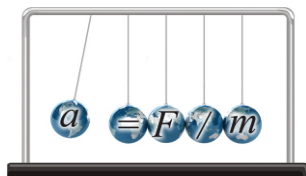


文章编号:1005-4642(2021)06-0030-07



交流电感电桥法线胀系数测量实验仪

普通物理实验

刘平安^a, 刘 恺^b

(河南大学 a. 物理与电子学院; b. 实验室与设备管理处, 河南 开封 475004)

摘 要: 将微小位移量转换成交流电桥中双线圈的电感变化量, 利用交流电桥的高灵敏度实现了微小位移量的精确电测. 采用传感器、单片机及多个 PTC 电加热器对样品棒进行均匀控温, 同时安装散热风扇可使测试装置迅速降温. 实验中增加了交流电桥调节、磁芯位移量与输出电压信号定标、最小二乘法数据处理等内容. 将交流电桥与固体线胀系数测量 2 个基础实验结合起来, 丰富了实验内容.

关键词: 线胀系数; 交流电感电桥; 定标; 最小二乘法

中图分类号: O343

文献标识码: A

DOI: 10. 19655/j. cnki. 1005-4642. 2021. 06. 004

线胀系数测量是高校理工科学生必做的基础物理实验项目, 旨在让学生掌握测量线胀系数的原理与方法. 提高固体微小变化量的测量精度是实验成功的关键, 最早的测量方法是尺度望远镜和光杠杆法^[1-2], 后来文献报道千分表法^[3]、单缝衍射法^[4-5]、激光扫描 F-P 干涉法^[6]、迈克耳孙干涉法^[7]、CCD 成像法^[8]、电容位移传感器法^[9]、交流电容电桥法^[10]等方法^[11-15]. 本文设计了交流电感电桥法测量线胀系数实验仪, 增加了定标、最小二乘法数据处理等实验内容.

1 固体的线胀系数及测量原理

设 L_0 为物体在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的长度, 则其在 $t\text{ }^\circ\text{C}$ 时的长度为

$$L_t = L_0(1 + \alpha t), \quad (1)$$

式中 α 为该物体的线胀系数, 其物理意义是: 温度升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 物体的伸长量 δL ($\delta L = L_t - L_0$) 与它在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的长度 L_0 之比. α 是很小的量, 实际测量中, 通常测量材料在一定温度范围内平均线胀系数 $\bar{\alpha}$.

先测出材料在室温 t_1 下的长度 L_1 , 再测出材料从 t_1 升至 t_2 的伸长量 δL_{21} , 则

$$\bar{\alpha} \approx \frac{\delta L_{21}}{L_1(t_2 - t_1)}, \quad (2)$$

式(2)中 δL_{21} 是光杠杆法、千分表法等方法的核心测量. 若再测出温度 t_2 下的长度 L_2 , 则

$$\bar{\alpha} \approx \frac{L_2 - L_1}{L_1(t_2 - t_1)}, \quad (3)$$

L_2 为实验的核心测量量, 本实验仪即基于该测量而设计.

为了提高 $\bar{\alpha}$ 的测量精度, 对多个不同末温 t_i 及相应 L_i 进行测量, 式(3)改写为

$$L_i - L_1 = \bar{\alpha} L_1(t_i - t_1), \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

实验中可以等间隔改变加热温度, 从而测量对应的一系列 L_i . 将所得数据采用最小二乘法进行直线拟合处理, 作 $L_i - t_i$ 曲线, 由直线斜率 $k = \frac{\delta L}{\delta t}$ 可得一定温度范围内的平均线胀系数为

$$\bar{\alpha} = \frac{k}{L_1}. \quad (5)$$

固体线胀系数精确测量的另一个关键因素是保持金属棒均匀受热并且精确测量其温度. 一般采用蒸汽加热、流水加热、电加热等方法, 再结合性能日益提高的温度传感器实现对金属棒的精确控温.

收稿日期: 2021-01-15; **修改日期:** 2021-02-05

资助项目: 2019 年度河南省高等教育教学改革研究与实践重点项目; 2019 年物理与电子学院首届自制实验教学仪器项目 (No. ZYYQ1901); 2019 年物理与电子学院研究性课程教学改革项目

作者简介: 刘平安 (1965—), 男, 河南博爱人, 河南大学物理与电子学院副教授, 学士, 从事大学物理实验教学与研究. E-mail: henulpa@163.com

通讯作者: 刘 恺 (1990—), 男, 河南开封人, 河南大学实验室与设备管理处实验师, 硕士, 从事实验室设备管理与仪器研制工作. E-mail: 419217570@qq.com



2 交流电感电桥法线胀系数实验仪及测量原理

图 1 所示为交流电感电桥测线胀系数电路图。空心线圈 H_1 和 H_2 并排放置,柱状铁氧体磁芯左右两端分别位于 2 个线圈中心位置,改变电位器 R_s 和 R_p 可将交流电桥调节至平衡状态。当旋转微分头使磁芯向左或向右移动时,两线圈的电感参量同时发生改变,且改变方向相反,使得电桥平衡被破坏,输出电压值增大。经测试,位移量与输出电压信号在一定范围内成线性关系。记录微分头旋转时的刻度值与对应的电桥输出电压,采用最小二乘法即可完成对交流电桥的定标。

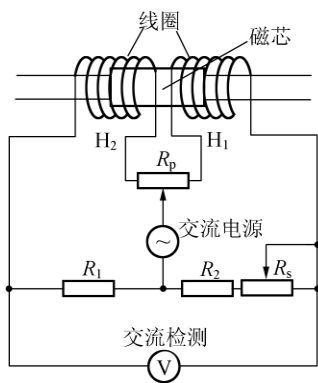


图 1 交流电感电桥测线胀系数电路图

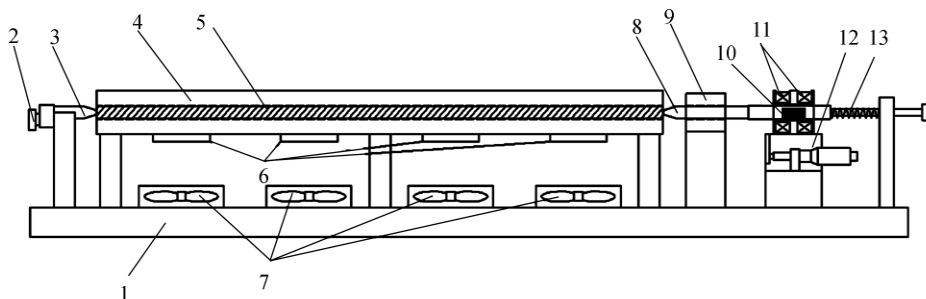
使用定标后的交流电桥,当温度改变时,金属棒膨胀推动与之刚性相连的磁芯发生微小移动,灵敏度优于 11 mV/mm 的交流电桥有较大的输出电压变化。通过测量不同温度下交流电桥输出的电压值,可求得金属棒的伸长量 δL 。

将交流电桥的高灵敏度特性与金属棒长度的微小变化量相联系,是本实验装置能精确地测量金属材料线胀系数的根本原因。

图 2 为交流电桥法线胀系数测量实验仪的装置图,实物图如图 3 所示。各部分功能如下:

- 1)底座:固定各器件;
- 2)固定螺栓:固定顶针的位置,使样品棒左端位置不动,拧松后可拆下顶针,从而更换样品棒;
- 3)顶针:顶住样品棒左端,固定其位置;
- 4)加热炉:铝合金制,包裹住样品棒使之均匀加热,并装有温度传感器;
- 5)样品棒:被测样品(铝和黄铜 2 种材料);
- 6)PTC 平板加热器:紧贴加热炉,为加热炉的热源;
- 7)风扇:对加热炉进行降温;
- 8)测量端顶针:顶住样品棒右端,能够随样品棒的伸缩左右平移;
- 9)线性导轨:保证测量端顶针沿轴向移动;
- 10)铁氧体磁芯:与测量端顶针刚性连接并随之平移;
- 11)双电感线圈:固定在微分头平移台上,其电感参量会随铁氧体磁芯的平移而改变;
- 12)微分头平移台:带动双电感线圈左右平移,用于定标位移读数与交流电桥输出信号间的关系;
- 13)弹簧:保证测量端顶针紧靠样品棒右端,中间不会有间隙,更换样品时能起到弹出样品的作用。

该实验装置利用传感器、单片机与多个 PTC 电加热器实现了对样品棒均匀控温,安装一排散热风扇又可使金属棒迅速降温。



1.底座 2.固定螺栓 3.顶针 4.加热炉 5.样品棒 6.PTC 平板加热器 7.风扇 8.测量端顶针 9.线性导轨
10.铁氧体磁芯 11.双电感线圈 12.微分头平移台 13.弹簧

图 2 交流电桥法线胀系数测量实验仪装置图

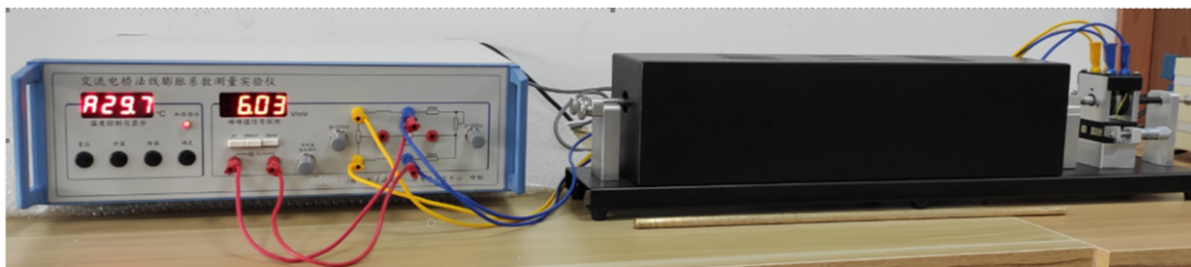


图 3 交流电桥法线胀系数测量实验仪实物图

详细技术指标:温度显示分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度控制范围为室温至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 加热器工作电压为 AC30 V; 交流信号源频率 1 kHz, 幅度 $0\sim 5.5\text{ V}$ 峰峰值连续可调; 电感线圈线径 0.13 mm , 3 000 匝; 交流信号峰峰值检测, 三位半数码管显示, 分 3 挡, 量程分别为 2 V, 200 mV 及 20 mV, 最小挡能显示 0.01 mV 电压变化; 位移测量灵敏度优于 11 mV/mm ; 微分头读数精度为 0.01 mm , 测量范围为 $0\sim 13\text{ mm}$; $\phi 8\text{ mm}\times 400\text{ mm}$, 材质为铝和黄铜的金属样品棒各 1 根。

3 实验方法

3.1 交流电感电桥输出电压与微分头位移量关系定标

微分头放在可平滑移动的台上, 能够带动 2 个电感线圈同时沿轴向移动, 保持铁氧体磁芯不

动, 将交流电桥调节至平衡, 即“峰峰值信号探测”所示电压值在“20 mV”挡位, 无论 2 个线圈向左或向右移动, 检测到的交流电压信号都会增大。因此, 定标曲线呈“V”字型, 但测量线胀系数时仅用其单调增加或减小的一部分。实际测量时线圈不动, 产生位移量的是铁氧体磁芯, 因此定标时若电感线圈向左移动, 应看作铁氧体磁芯向右移动, 反之亦然。定标步骤如下:

1) 用连接线分别将主机前面板 2 个电感线圈的接口与装置上电感线圈的接口相连, 然后将交流电桥的电压输出端接口与信号探测输入端接口相连, 如图 4 所示, 用连接线将主机后面板 3 个接口与装置外壳上的 3 个接口相连并锁紧;

2) 测量样品棒长度 L_1 , 按下左侧 2 个固定顶针的固定螺栓, 将样品棒塞入加热炉, 装回顶针, 拧紧固定螺栓;

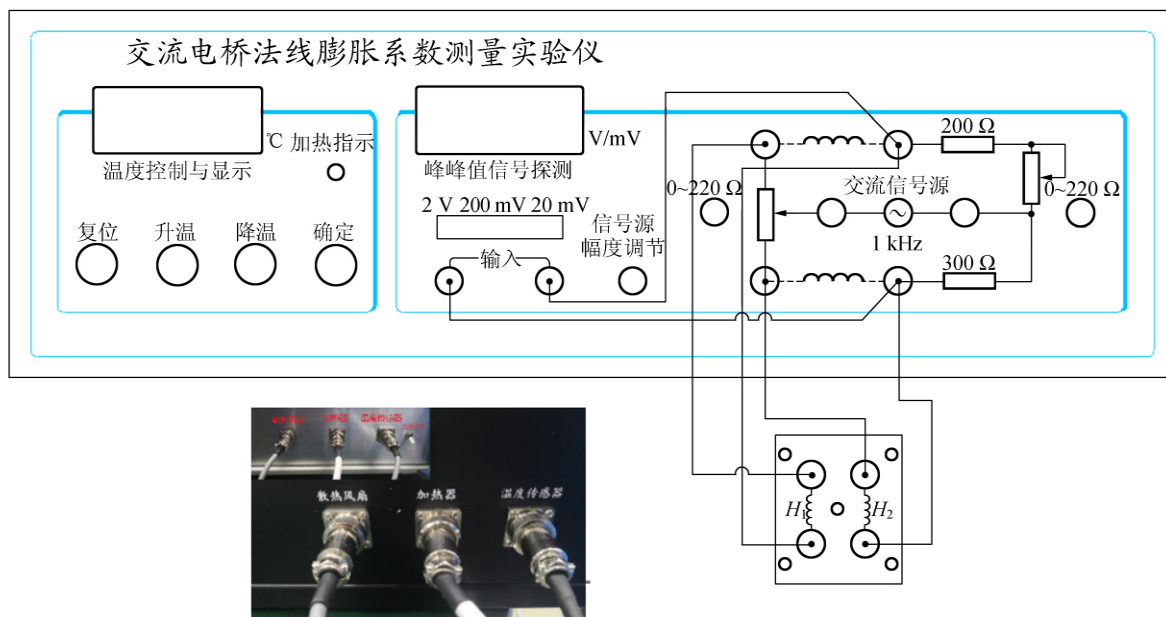


图 4 仪器主机与装置前后面板接线图

3)保持样品棒温度不变(20~25 °C 不变或将温度稳定控制于 30 °C),旋转微分头移动平移台,使其位于 5~8 mm,此时磁芯左右两端分别位于 2 个线圈的中心位置,探测灵敏度较高;

4)调节主机前面板上“信号源幅度调节”旋钮,顺时针旋转为增大,幅度越大,电桥的灵敏度越高;

5)交替调节电位器 R_p 和 R_s ,将交流电桥调至平衡;

6)旋转微分头,记录主机上显示的电压 U 与微分头刻度值 X ,通过线性拟合得到定标公式 $U = aX + b$,确定可用于测量的线性范围。

3.2 金属棒线胀系数的测量

1)旋转微分头使平台带动线圈移动,观察主机上探测所得的电压值,使线圈位于适用于定标公式的线性范围内;

2)设置控温模块的初始温度为 t_1 :按“升温”按钮至所需温度(一般可设为高于室温 5 °C 左右的整数温度),按“确定”开始加热。待加热炉内温度(即“温度控制与显示”的温度)与交流电桥输出电压值均稳定后,记录温度与电压值;

3)增加控温模块温度,如改变量为 5 °C,分别设置末温为 $t_i = t_1 + 5i, i = 1, 2, 3 \dots$,最高末温 ≤ 80 °C;

4)测量得到对应的一系列输出电压值 U' ;

5)通过定标公式 $U = aX + b$ 将电压值 U' 换算为位移量 X' ,线性拟合微分头读数 X' 与样品棒温度 t_i ,得到其斜率 k 。结合样品棒长度 L_1 ,即可计算得到样品棒的线胀系数。

说明:原本拟合不同末温 t_i 与金属棒相应长度 L_i 之间的关系曲线 L_i-t_i ,因为 $L_i - L_1 = \delta L_i = \delta X_i = X_i' - X_0$, X_0 为交流电桥平衡时微分头的初始读数,是定值,因此,以 $X_i'-t_i$ 曲线代替 L_i-t_i 曲线,这样,无需每次测量金属棒在不同温度下的长度,记录微分头的读数即可。

4 实验结果

4.1 $L_1 = 400$ mm 黄铜棒的线胀系数

记录微分头读数从 6.000 mm 逐渐增大至 7.500 mm 时的输出电压信号,如表 1 所示。微分头位移量与输出电压信号的 $U-X$ 曲线如图 5 所示。

表 1 装入黄铜棒时微分头位移量与输出电压

X/mm	U/mV	X/mm	U/mV
6.000	0.52	6.800	10.36
6.100	1.48	6.900	11.70
6.200	2.66	7.000	13.00
6.300	3.92	7.100	14.34
6.400	5.20	7.200	15.55
6.500	6.52	7.300	16.85
6.600	7.86	7.400	18.16
6.700	9.05	7.500	19.44

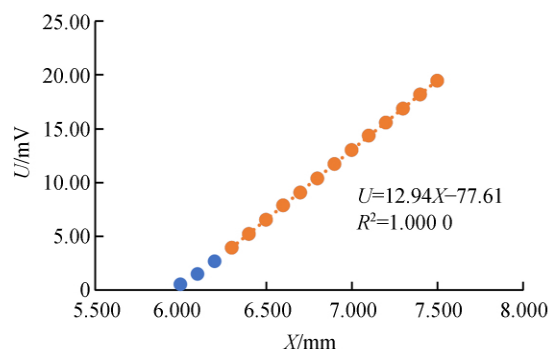


图 5 黄铜棒的 $U-X$ 关系曲线

首先要保证铁氧体在定标的最佳线性范围内移动。因为黄铜棒受热膨胀推动磁芯的运动和定标时磁芯的相对运动相同(与实际移动的线圈方向相反),所以,保持微分头的初始位置不变或者稍微减小即可。

每间隔 5 °C,记录系统输出电压值如表 2 所示。注意,系统稳定的温度可能会和设定温度有少许偏差,但只要温度和输出电压达到双稳定状态即可记录数据,这不影响测量结果。

表 2 黄铜棒在不同温度下输出电压及计算的位移量 X'

$t/^\circ\text{C}$	V/mV	X_i'/mm
39.9	12.28	6.946
44.6	11.90	6.916
50.0	11.42	6.879
55.0	10.96	6.844
60.0	10.49	6.808
64.9	10.06	6.774
70.0	9.57	6.736
75.0	9.11	6.701
80.1	8.63	6.664

根据定标拟合得到的微分头位移量与输出电压的关系方程,计算出不同末温时微分头的位移量 X_i' 。用最小二乘法拟合黄铜棒输出电压与位移量 $X_i'-t_i$ 图线如图 6 所示。

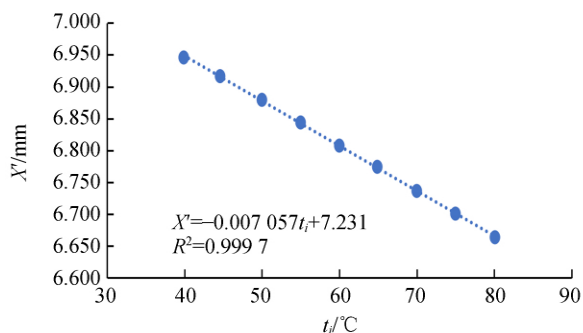


图 6 黄铜棒的 $X_i'-t_i$

根据式(5)得黄铜棒的线胀系数为 $\alpha_{\text{铜}} = 17.64 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

4.2 $L_1 = 400 \text{ mm}$ 铝棒的线胀系数

记录微分头读数从 6.000 mm 逐渐减小至 5.000 mm 时输出电压值,如表 3 所示,结果显示初期线性差,删除这 3 个数据进行定标。拟合 $U-X$ 如图 7 所示。

根据图 7,可以计算出不同末温时微分头的位移量 X_i' ,如表 4 所示。分析位移量和输出电压的关系曲线,可发现加热初期 5 °C 内,线性差,这可能与刚开始铝棒受热不均匀有关,也可能与微分头回到初始位置附近产生了回程差有关。拟合 45 °C 以上数据如图 8 所示,根据式(5)得到线胀系数 $\alpha_{\text{铝}} = 22.75 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

表 3 装入铝棒时微分头位移量与输出电压信号关系定标

X/mm	U/mV	X/mm	U/mV
6.500	0.73	5.700	9.76
6.400	1.13	5.600	10.97
6.300	2.17	5.500	12.20
6.200	3.43	5.400	13.44
6.100	4.68	5.300	14.68
6.000	5.99	5.200	15.87
5.900	7.23	5.100	17.01
5.800	8.52	5.000	18.21

因为金属棒受热膨胀推动磁芯的运动和定标时方向一致,所以微分头要回到定标的初始位置 6.500 mm,或稍小的位置。

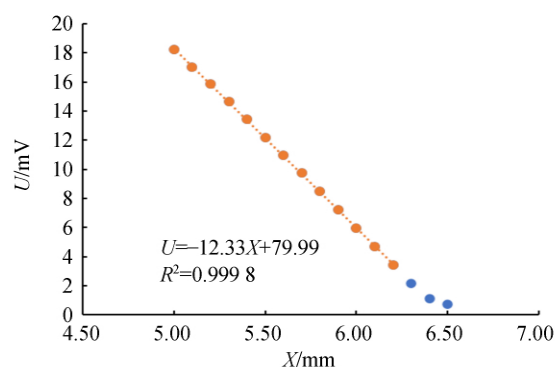


图 7 铝棒的 $U-X$ 关系曲线

表 4 铝棒在不同温度下输出电压及计算的位移量 X'

$t/^\circ\text{C}$	U/mV	X_i'/mm
40.0	7.07	5.914
44.8	7.36	5.891
49.6	7.84	5.852
54.6	8.35	5.810
59.7	8.92	5.764
65.0	9.45	5.721
70.0	10.11	5.667
75.1	10.63	5.625
80.0	11.35	5.567

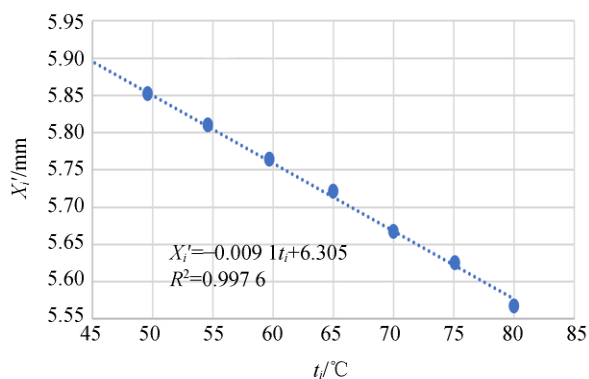


图 8 铝棒的 $X_i'-t_i$ 关系图

5 分析与总结

电感电桥不常用的原因是电感不易测量,但将交流电桥双线圈中电感的变化量转换成微小位移量,仅仅利用了电感电桥输出电压与引起电感变化的位移量的线性关系实现了微小位移量的电测。虽然使用了电感电桥,但无须测量电感的大小,只要测量定标后交流电桥的输出电压即可推

得样品棒的位移量(以微分头上读数表示)。测量的全程,测试电路与样品棒没有接触。

交流电桥使用双线圈较之单线圈的优势^[13]:根据 $\Delta L = k_0 \Delta l$,线圈电感的变化量与磁芯在线圈中的位移量成正比,因为磁芯的左右两端分别处于左右 2 个线圈的中心位置,磁芯的位移导致了 2 个线圈的电感同时变化,不但交流电桥的输出量发生较大改变,而且在电桥调平的前提下,无论磁芯的位移向左还是向右,输出电压都在增大,从而提高了测量精度。

弹簧机构使金属棒和磁芯紧密接触,测得磁芯的位移量就能准确反映出金属棒的伸长量。弹簧弹力对样品棒的位移量的影响取决于样品棒的弹性模量。一般金属的弹性模量在 10^2 GPa 量级,而实验仪所用弹簧的弹性系数比较小,样品棒在实验仪可达到的温度范围内,线膨胀效应引起的径向形变量都小于 1 mm,根据胡克定律,弹簧施加在样品棒上的压力变化就很小,所以弹力对样品棒的位移量影响微乎其微,可以忽略不计。

顶针采用了新型不锈钢材料,线胀系数为 $1 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$,明显小于样品的线胀系数。实验仪中的顶针处于加热装置外部,且与样品棒接触的部位做成尖状,这样测试过程中,顶针的温度变化又很小,形变量微乎其微,减小了顶针自身膨胀的引入误差。

加热炉是铝合金材料,属于热的良导体,四周均匀排布 4 个相同功率的加热器,且加热炉芯与样品棒之间间隙很小,最大程度保证了加热温度的均匀性,在对不同样品棒的实际测试中也得到了很好的实验结果,因此可以认为温度的均匀性符合实验要求。高灵敏度的传感器和高精度的数字温度表(分辨率 0.1°C),使得温度表能正确反映样品棒的实际温度。

3 000 匝的电感线圈提高了位移测量的灵敏度。每次测试前必须进行定标,测量时,要使铁氧体磁芯在定标曲线线性最好的区域内移动,以提高测量的精度。

实验结果表明,用自制的交流电感电桥测得金属棒的线胀系数结果与标准仪器所测量的数据能较好的吻合。和传统方法比较,实验中增加了

交流电桥调节、磁芯位移量与输出电压信号定标、最小二乘法数据处理等内容。同时,该实验方法可以应用在其他类似的直线微小位移量的测量上。将交流电桥与固体线胀系数测量 2 个基础实验巧妙结合起来,丰富了实验内容,开阔了学生的视野,培养了学生的创新意识和实践能力。

参考文献:

- [1] 杨述武. 普通物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2000:48-51.
- [2] 仇旭,史建君,李小云,等. 光杠杆法测量固体的线膨胀系数[J]. 高校实验室工作研究,2012(1):52-53,63.
- [3] 范利平. 采用千分表测定金属线胀系数[J]. 大学物理,2005,24(2):61-62.
- [4] 周秀娟,刘心宇. 利用单缝衍射测金属材料的线膨胀系数[J]. 桂林电子科技大学学报,2007,27(3):224-226.
- [5] 花世群. 光的干涉法测金属线胀系数[J]. 光学技术,2001,27(4):383-384.
- [6] 陈海良,马明建,曾慧,等. 利用 F-P 干涉仪测量固体材料线膨胀系数[J]. 光学技术,2011,37(5):571-573.
- [7] 张定梅,蒋再福,孙宪刚. 基于迈克尔逊干涉仪测金属线胀系数[J]. 实验室科学,2018,21(4):20-22.
- [8] 余小英. 基于 CCD 成像系统的衍射法测金属线胀系数[J]. 广西民族师范学院学报,2013,30(3):25-27.
- [9] 刘崧,钟双英,李鸿. 基于电容位移传感器的金属线胀系数测量[J]. 实验室研究与探索,2013,32(1):30-32.
- [10] 李儒颂,马红梅,徐芹. 固体线膨胀系数的交流电桥测法研究[J]. 大学物理,2016,35(7):42-46.
- [11] 赵斌,陈明伟. 金属线膨胀系数测定[J]. 武汉工业学院学报,2004,23(2):109-110.
- [12] 李儒颂,徐芹,魏怀鹏. 交流电桥测量金属线膨胀系数[J]. 实验技术与管理,2018,32(12):69-72.
- [13] 骆敏,骆泽如,陈雷,等. 多重反射激光光杠杆测量金属线胀系数[J]. 物理实验,2018,38(7):14-16.
- [14] 许巧平. 激光衍射法测金属线胀系数[J]. 河南科学,2015,33(5):713-715.
- [15] 严琴,李东风. 低膨胀固体材料线膨胀系数的干涉测量方法[J]. 激光技术,2004,28(2):202-204.

Linear expansion coefficient measurement instrument using AC inductance bridge method

LIU Ping-an^a, LIU Kai^b

(a. School of Physics and Electronics; b. Laboratory and Facilities Management Office,
Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: The micro displacement was converted into the inductance variation of the double coils in the AC bridge, and the accurate electrical measurement of the micro displacement could be realized due to the high sensitivity of the AC bridge. The sensor, single chip microcomputer and several PTC electric heaters were used to uniformly control the temperature of the sample rod. And a row of cooling fans were installed to cool the test device rapidly. The adjustment of AC bridge, the calibration between the core displacement and voltage output signal, and the data processing by the least square method were added in the experiment. The experimental contents were enriched by the combination of two basic experiments of AC bridge and solid linear expansion coefficient measurement.

Key words: linear expansion coefficient; AC inductance bridge; calibration; least square method

[责任编辑:郭 伟]

(上接 29 页)

Research on the control of suspended particles based on phase-controlled focusing principle

MA Man-qian^a, KONG Ling-hao^a, GU Hao-tian^a,

ZENG Tian-you^a, ZENG Yu-feng^{a,b}

(a. College of Physics and Telecommunications Engineering;

b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A concave spherical dual emitter ultrasonic array structure was designed, and the phase-controlled focusing principle was combined. The phase parameters of the input signal of the transducer were controlled in-time by the FPGA hardware system, and the standing-wave focused sound field with strong suspension ability was formed. According to the preset trajectory of the suspended particles, the phase difference of the array signal was adjusted regularly to realize the dynamic focusing of the ultrasonic beam. The suspended particles near the node moved as the sound field moved. The accuracy of controlling the movement of particles was studied, and two directions were selected for trajectory error analysis. Finally, the controllable range of particles was studied respectively on the vertical plane and the horizontal plane, which illustrated the strong suspension stability and the wide control range of the device.

Key words: ultrasonic standing wave field; phase-controlled focusing principle; FPGA; full three dimensional movement

[责任编辑:任德香]