

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0189-05

纳米精度光杠杆微位移的测量方法

谭兴文^{1,2} 何国田³

(¹ 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715; ² 重庆大学电气工程学院, 重庆 400020)
³ 重庆师范大学物理学与信息技术学院, 重庆 400047

摘要 光杠杆微小位移测量是一种非接触式微位移测量技术, 在工业生产和科学研究中得到了广泛的应用。针对现行光杠杆测量微小长度变化的分辨率低、精度低、读数装置设计欠妥等问题, 采用一种多级放大方法和基于虚拟技术的实时自动采集技术, 设计出了基于纳米精度光杠杆与位敏探测器(PSD)传感器的固体材料线胀系数测量装置。该装置通过光学方法对微位移量进行多级放大, 大大提高了微小位移的放大倍数。同时, 采用 PSD 传感器和 LabVIEW 平台进行数据采集和分析, 较好地消除了系统中的人为因素对测量精度的影响。实验系统对黄铜、实验用铁、实验用铝和紫铜的重复测量精度分别为 7.5, 7.2, 7.6 和 8.1 nm。

关键词 测量; 光杠杆; 纳米微位移测量; 位敏探测器; 线胀系数

中图分类号 O432.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0189

Nano-Displacement Measurement Method Based on Optical Lever

Tan Xingwen^{1,2} He Guotian³

¹ School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

² College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400020, China

³ College of Physical and Information Technology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

Abstract The nano-displacement measurement based on the principle of optical lever is a contactlessly measurement technology, which has been extensively used in industry and scientific research fields. In this study, with the aim to solve some intractable issues in existing optical lever apparatus, such as low resolving power, low precision, and discommodious reading device, we present a multi-amplify and data auto-collecting system with real time technology based on optical lever and position sensitive detector (PSD) sensor, and design an apparatus to measure the linear expanding coefficient. According to the multi-amplify technology, the tiny displacement is amplified significantly, meanwhile, artificial error is eliminated based PSD sensor and LabVIEW data collecting and analysis platform. The experimental measurements indicate that the system repeat precision of brassiness, iron, aluminum and red copper is 7.5, 7.2, 7.6 and 8.1 nm.

Key words measurement; optical lever; nano-displacement measurement; position sensitive detector; linear expanding coefficient

1 引言

“热胀冷缩”是许多物体都具有的特性, 是由于物体内部分子热运动加剧或减弱从而使物质分子平均间距变大或变小造成的, 热膨胀虽然不大, 但可以产生很大的应力。因此, 在工程设计、机械制造、材料加工等过程中都要充分考虑。一般情况下, 固体在各个方向上的膨胀规律相同, 因此可以用固体在一个方向上的线膨胀规律来表征它的体膨胀。国内现有的检

测方法一般是通过千分尺、传统的光杠杆等工具进行目测, 这些方法不仅效率低, 而且误差大。

本文提出一种基于光杠杆原理和位置敏感传感器(PSD)的固体材料线胀系数测量装置, 该系统对微小位移进行多级放大, 利用 NI 公司的 LabVIEW 图形编程环境进行软件开发, 界面简洁, 易于操作。实验结果表明, 与传统检测方法相比, 该方法检测速度快、精度高、可靠性强。

基金项目: 重庆市教委(KJ080821)资助课题。

作者简介: 谭兴文(1972—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事仪器科学与技术等方面的研究。E-mail: tanxingw@swu.edu.cn

2 测量原理

固体的长度一般随温度的升高而增加,设固体的温度由 t 变化到 $t + dt$ 时,其长度由 L 变化到 $L + dL$,当温度变化 dt 足够小时,长度微小变化量 dL 与温度变化 dt 及原长 L 成正比,即

$$dL = \alpha \times L \times dt, \quad \alpha = \frac{1}{L} \times \frac{dL}{dt}, \quad (1)$$

式中比例系数 α 称为该固体材料的线膨胀系数,其含义是温度升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时固体的相对伸长量,一般随

温度变化很小,在温度变化不大时,可以把它当成不变的常量。实验中, L 可以取室温下待测固体的长度,其值容易测量, dt 也易测量,只有 dL 很小,不易测量。

为了测量金属材料的微小长度变化 dL ,本系统采用光杠杆原理对微小位移进行多级放大,通过对放大位移的测量,间接测量出微小的位移变化。光杠杆微小位移测量系统原理如图 1 所示。

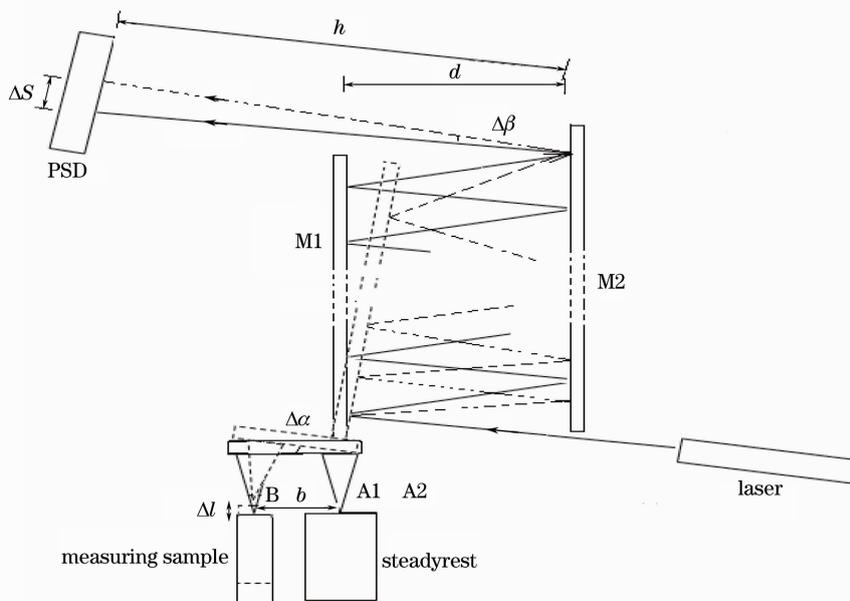


图 1 光杠杆测微系统原理图

Fig. 1 Principle of nano-displacement measurement based on optical lever

该系统中的光杠杆是在传统的光杠杆基础上,将平面镜 M1 加长,再平行放置平面镜 M2。M2 镜固定,M2 下方前端是光杠杆两前支点 A1、A2,后端是光杠杆后支点 B,即自由端。被测物以点接触的方式触碰在 B 处。激光束从 M1 镜端边缘以很小角度入射到 M2 的自由端。该光束在两平面镜间多次反射后由 M2 的另一端出射(出射角为 β),照射到光电探测器上。初始位置时 M1 和 M2 互相平行,如图 1 中实线所示,这时出射光束与探测器光敏面垂直,且出射光点位于探测器光敏面中心。当被测物体有一个微小位移 ΔL 后,光杠杆后支点 B 移动 ΔL 。光杠杆绕 A1、A2 轴线偏转微小角度 $\Delta\alpha$,如图 1 中虚线所示,表示为

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta L}{b}\right), \quad (2)$$

式中 b 为光杠杆后支点 B 到轴线 A1、A2 的垂直距离,由于 $\Delta\alpha$ 非常小,所以,可以近似为

$$\alpha = \frac{\Delta L}{b}, \quad 2\alpha = \frac{2\Delta L}{b}, \quad (3)$$

光束经过多次反射,出射角角度变化量为 $\Delta\beta$,可以表示为

$$\Delta\beta = 2n\Delta\alpha = 2n\frac{\Delta L}{b}, \quad (4)$$

式中 n 为光线在两反射镜间的反射次数。信号接收端光束在探测器光敏面的偏移量 ΔS 表示为

$$\Delta S = \Delta\beta h = 2nh\frac{\Delta L}{b}, \quad (5)$$

式中 h 是光线出射点到探测器光敏面的距离。微位移量的放大倍数为 K ,则

$$K = \frac{\Delta S}{\Delta L} = \frac{2nh}{b}, \quad (6)$$

当反射次数 n ,平面镜的长度和两平面镜之间的距离以及入射角度等各参数选取适当, K 值可达到 100 以上。

一维 PSD 又称坐标光电池。硅 PSD 是由一个或两个具有均匀阻抗表面组成的光电二极管,它与分立元素探测器相比具有位置分辨率高、反应电流简单、响应速度快、可靠性高等优点。可广泛应用于光学位置和角度的测量与控制、远程光学控制系统、

位移和振动监测、激光光束校准、自动范围探测系统以及人体运动及分析系统等。一维 PSD 的内部结构和等效电路图如图 2 所示。

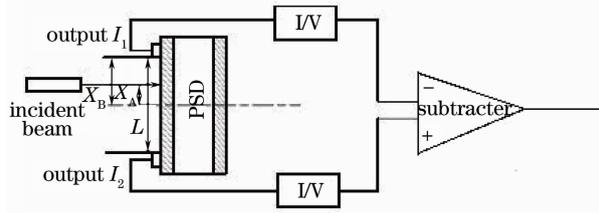


图 2 PSD 测量原理图

Fig. 2 Principle of PSD measurement

当激光照射到 PSD 的光敏面上时,它将光敏面上的入射光点位置信息转化成电信号。由于平行于结平面的横向电场作用,光生载流电子形成向两端电极流动的电流 I_1 与 I_2 , 满足 $I_0 = I_1 + I_2$, I_0 为总光电流。由于 PSD 的面电阻均匀, R_1 和 R_2 阻值的大小只与入射光的位置有关, 取 PSD 中心为坐标原点, L 表示两电极间的距离, X_A 为入射光与坐标原点的距离, X_B 为 PSD 中心到电流 I_1 输出点的距离, 满足 $X_B = L/2$ 。则有

$$I_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2}{L} X_A \right) I_0, \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{L} X_A \right) I_0, \quad (8)$$

$$I_1 - I_2 = \frac{4}{L} X_A I_0, \quad X_A = \frac{L(I_1 - I_2)}{4I_0}. \quad (9)$$

可见当总电流 I_0 一定时, 输出电流 $I_2 - I_1$ 与入射光点的位置 X_A 成线性关系。因而可通过测量 $I_2 - I_1$, 经过测量电路可将输出电流变化转化成电压值, 再利用减法器运算放大电路, 得到的输出电压值即反应了入射光点位置 X 的微小变化。

在本实验平台中, 传感器 PSD 的输出信号和热电偶的炉内温度信号经过信号处理电路进行信号的处理和放大, 输入已经编好的 LabVIEW 程序, 程序自动完成 A/D 采集和数据处理, 控制整个升温过程, 当温度达到某一设定值时, 程序开始自动监测温度与金属棒的伸长量, 当伸长量基本不变时, 同时采集温度和伸长量。测量多组数据, 用最小二乘法求出伸长量和温度 t 曲线的斜率, 再根据公式即可以求出线膨胀系数, 这个过程也是所编程序自动完成的。

3 测试系统的组成

本测试系统包含硬件系统和软件系统两个部分。

3.1 实验硬件系统

该实验装置如图 3 所示, 由光杠杆测微系统、温度控制系统和数据采集系统构成。

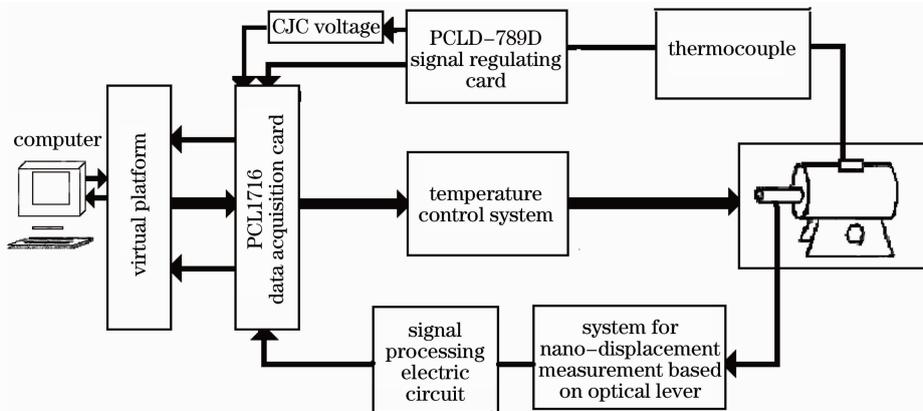


图 3 微位移测量系统方框图

Fig. 3 Measurement system for the displacement

实验通过 PCL-1716 数据采集卡为中介, 分别对两路信号进行数据的采集和转换, 即温度信号和位移伸长量信号。热电偶检测炉内温度信号; 位移传感器检测伸长量信号; 可控硅触发板接收程序的控制量, 从而控制可控硅的导通和截止, 使炉内加热升温。通过 PCLD-789D 将热电偶的温度信号进行放大, 同时提供一个 CJC 冷端补偿电压, 经过 A/D 转换以及线性拟合等处理换算成温度, 通过数据传

输线与计算机相连, 从而将数据送到采集卡里面进行处理后供给虚拟平台做进一步的处理。再输出控制温度的信号, 形成一个闭环的系统。

3.2 软件系统

系统的软件主要由 LabVIEW 编程软件组成, 实验平台的软件组成如图 4。软件模块大致由以下几部分组成: 位移信号采集模块、温度信号采集模块、比例积分微分(PID)调节模块、数据处理模块。

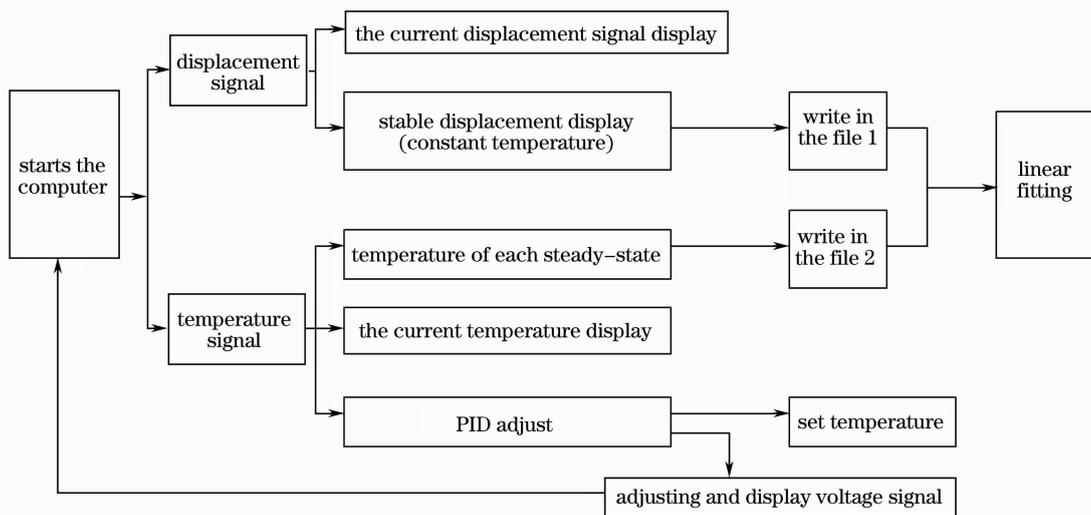


图 4 软件程序方框图

Fig. 4 Frame diagram of software procedure

首先初始化 PID 各参数,设定一个温度值。系统会输出一控制信号来控制加热装置。在此过程中会显示出每一时刻的温度、位移以及控制信号。当温度达到稳定时记录一组温度-位移数据,当保存的温度-位移数据足够多时,提取温度位移数据运用最小二乘法进行线性拟合求得位移随温度的变化率,最后再求出物体的膨胀系数。

信号采集显示模块实现数据的采集与数据初处理,它得到的当前温度值可调用到 PID 控制模块,以实现温度的反馈,通过该模块可以直观看到温度和位移的变化规律。其中“滤波模块”为低通滤波,

作用为将采样信号中的高频部分(主要为噪音和静电干扰)滤掉,但滤去后得到的数据振动仍然较大,这与两信号的本身特性不符,故再加一采样压缩输出其平均值,便可得到较为理想的波形和数据。

数据保存与 PID 调节模块的功能是系统温度的设定与准确控制。同时,将采集的一系列温度和位移量保存到数组和文件,用于后续计算。

数据处理模块利用数组索引提取数据直接进行线性拟合,在虚拟界面上直接显示出实验结果。程序与虚拟界面如图 5 所示。



图 5 工作中的虚拟仪器界面

Fig. 5 Interface of instrument

4 实 验

利用所设计的测试平台对黄铜等几种材料的线膨胀系数进行了测量,测试结果如表 1 所示,4 种材料

的测量精度分别为 24,85.64,23 nm,重复测量精度分别为 7.5,7.2,7.6,8.1 nm。可见该测试平台精度高,易于操作,实验值与理论值能很好地吻合,很

很好地验证了所提出的测试系统的准确性。

表 1 金属线胀系数实验测量数据
Table 1 Experiment data of the linear expanding coefficient

Measuring material	Experimental values /(10^{-5} m / $^{\circ}$ C)					Repeatability	Measurement	Theoretical
						measurement	accuracy	values
						/(nm/ $^{\circ}$ C)	/(nm / $^{\circ}$ C)	/(10^{-5} m / $^{\circ}$ C)
Brassiness	1.7851	1.7806	1.7825	1.7817	1.7821	7.5	24	1.78
Iron	1.2199	1.2197	1.2182	1.2159	1.2188	7.2	85	1.21
Aluminum	2.3842	2.3857	2.3863	2.3870	2.3888	7.6	64	2.38
Red copper	1.6852	1.6827	1.6820	1.6811	1.6805	8.1	23	1.68

实验中 PSD 的特性是系统误差主要来源,即信号光斑的形状和尺寸对 PSD 的测试精度有着很大的影响,特别是在精密测量时,光斑的形状和尺寸也直接影响着重复定位的精度。实验证明,当光斑直径小于 1 mm 时,多次定位测量的标准偏差可小于 3.55 μ m。实验时,在 PSD 前面可利用透镜组对光束进行整形,减小光斑尺寸,并加入小孔光阑,使光斑直径小于 1 mm,从而提高重复定位精度。另外,激光器输出光束方向漂移、反射镜 M1 和 M2 面形精度等因素也会对测量精度有影响,实验时需精心选择激光器和平面镜。本实验系统采用 He-Ne 激光器(632.8 nm)作为测量光源,输出功率为 10 mW。平面镜是在真空镀膜机上自制的平面反射镜。

5 结 论

提出了一种基于纳米精度光杠杆与 PSD 传感器的固体材料线胀系数测量装置,并对其实时测量原理进行了理论分析。该系统对金属线胀系数进行适时测量,并具有结构简单、测量精度高的优点。实验结果表明,该系统对黄铜、实验用铁、实验用铝和紫铜的重复测量精度分别为 7.5,7.2,7.6,8.1 nm,很好地验证了其有效性。

参 考 文 献

1 M. de Bakker, P. W. Verbeck, G. K. Steenvoorden *et al.*. The PSD transfer function [J]. *IEEE T. Electron Dev.*, 2002, **49**(1): 202~206
2 E. Higurashi, R. Sawada, T. Ito. Monolithically integrated

optical displacement sensor based on triangulation and optical beam deflection[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(9): 1746~1751
3 O. Bochobza-Degani, D. J. Seter, E. Socher *et al.*. Design and noise consideration of an accelerometer employing modulated integrative differential optical sensing [J]. *Sensors Actuat., A-Phys.*, 2000, **84**(1-2): 53~64
4 Wang Zhanqiang, Xu Weihong, Wang Kaiyuan. One dimension PSD signal processing circuits and Its applications[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1997, (12): 25~28
王占强,徐伟弘,汪开源. 一维 PSD 信号调理电路及其应用[J]. *仪表技术与传感器*, 1997, (12): 25~28
5 Lü Aimin, Yuan Hongxing, He Anzhi. Experimental study of the effect of light source on position precision of PSD[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(3): 192~195
吕爱民,袁红星,贺安之. 位置指示光源对 PSD 定位精度影响的实验研究[J]. *激光技术*, 2000, **24**(3): 192~195
6 Wu Yu, Liu Xiaomin, Yang Gaoguang. Signal process in a novel system for nano-displacement measurement based on optical lever [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(7): 30~38
吴宇,刘晓旻,杨国光. 光杠杆纳米位移测量系统中的信号处理[J]. *光电工程*, 2007, **34**(7): 30~38
7 Zhao Min, Liu Baichun, Chen Mingnan. Measuring Young modulus using PSD sensor[J]. *Physics Experimentation*, 2008, **28**(11): 31~33
赵敏,刘柏春,陈铭南. 使用 PSD 位置敏感传感器测量固体材料的杨氏模量[J]. *物理实验*, 2008, **28**(11): 31~33
8 Tao Yonghua, Yin Yixin, Ge Lusheng. New PID Control and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 1989. 9
陶永华,尹怡欣,葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1989. 9
9 Yuan Yuan, Gu Jun. The Virtual Instrument Course [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2000
袁渊,古军. 虚拟仪器教程[M]. 成都:电子科技大学出版社,2000
10 He Xicai, Xue Yongyi. Sensor and Its Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. 27~29
何希才,薛永毅. 传感器及其应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2004. 27~29