

文章编号: 1001-3806(2013)01-0006-05

单镜头激光三角法薄板厚度测量研究

汪琛赵斌*

(华中科技大学机械科学与工程学院 测控装备研究所,武汉 430074)

摘要: 为了精确测量薄板类材料的厚度,分析了双光路激光三角法测厚原理,建立了一种单镜头激光三角法厚度测量系统。该系统以半导体激光器为光源,配以单镜头成像系统、图像采集与数据处理系统。描述了系统的检测原理、检测方法和实验装置,讨论了激光器光束轴心线与成像透镜光轴夹角与系统分辨率的关系,并基于最小二乘法拟合得出了光斑距离与被测物厚度的函数关系式,最后通过标定实验对系统精度进行了实验论证。结果表明,该系统消除了双光路激光三角法上下测量系统难以同步的问题,分辨率高,精度控制在 $10\mu\text{m}$,良好地满足了工业测量的需求。

关键词: 测量与计量;激光测厚;重心法;分辨率

中图分类号: TN247; TH744.5

文献标识码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.002

Research of thin plate thickness measurement based on single lens laser triangulation

WANG Chen, ZHAO Bin

(Institute of Measurement and Control Equipment, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to measure the thickness of thin plates accurately, the principle of thickness measurement based on double light path laser triangulation was summarized, and a gauging system based upon single lens laser triangulation was established. This system consists of two symmetrically-installed laser devices, a single lens imaging system, an image acquisition system and a data analysis system. Then the principle of measurement, measurement method and experimental facility were described. In the following part, the relation between system distinguishability and intersection angle among laser beam axis line and imaging lens axis was discussed, after that the least square fitting method was selected to get the fitted equation between measure thickness and flare spacing convenient to data analysis. Finally, a calibration experiment was conducted to demonstrate the accuracy. It is found that this system not only eliminate the difficulty of synchronization problem laid in double light path laser triangulation method but also has a high distinguishability, it meets the commercial measurement demand well.

Key words: measurement and metrology; laser thickness measurement; centroid method; distinguishability

引 言

随着机械加工技术和材料成型技术的发展,板材类材料制造精度越来越高,这也对厚度测量设备的检测精度提出了更高的要求,实现高精度的在线测量能为材料加工行业的发展提供有力的支撑。在线测量技术不仅能提高生产线的自动化程度,而且能大大提高产品质量的稳定性、减少原材料的消耗、减少手工测量造成的人为干扰因素和误差。

基金项目: 国家九七三重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB714000)

作者简介: 汪琛(1988-),男,硕士研究生,主要从事精密测量、图像处理的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhaobin63@sohu.com

收稿日期: 2012-04-01; 收到修改稿日期: 2012-05-03

一般的在线测量手段采用 X 射线或超声波作为测量媒介,其造价高或对人体有害。近年来,激光三角法以其测量速度快、健康环保、安装调试方便的优点得到了广泛应用。已实现工业应用的激光检测手段其原理基于双光路激光三角法^[1],该检测设备上下探头离被测物距离较大,量程大且可满足较高温度被测物的厚度测量。但被测物上下振动时,其上下独立测量系统难以同步,测量精度难以保证。

本文中研究的测厚模型基于直射性激光三角法测位移原理^[2],采用上下对称布置的两个半导体激光器作为光源,采用两片同轴布置的成像透镜将光线汇聚到一个图像探测器上,测量过程中,图像采集和数据处理过程始终同步,消除了双光路激光三角法测厚模型上下测量系统难以同步的问题。同时,激光器光束中心线与成像透镜入射光束轴心线夹角大,测量系统的

分辨率高。

1 工作原理

1.1 直射型激光三角法测位移原理

直射型激光三角法光路示意图如图 1 所示。激光器、成像透镜和图像探测器三者位置关系满足 Scheimpflug 成像条件^[3]。处于铅垂线方向的激光器发出的光线聚焦到被测物上表面后,漫反射光线经过成像透镜后汇聚在图像探测器上,当被测物从图示标定平面移动 ΔH 距离达到标定平面上方某一位置时,图像探测器上的光斑会相应移动 ΔH_1 的距离,二者之间的函数关系式可由相似三角形关系推导出:

$$\frac{\Delta H \sin \alpha}{d_1 - \Delta H \cos \alpha} = \frac{\Delta H_1 \sin \gamma}{d_0 + \Delta H_1 \cos \gamma} \quad (1)$$

式中 α 为激光器光束轴心线与成像透镜光轴的夹角; γ 为图像探测器感光面所在的平面与成像透镜光轴的夹角; d_1 为成像透镜光轴上的等效物距; d_0 为成像透镜光轴上的等效像距; ΔH 为被测物表面移动距离; ΔH_1 为图像探测器感光面上光斑移动距离。

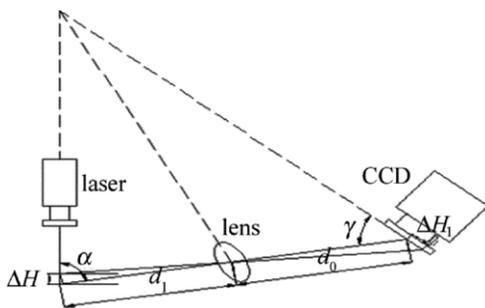


Fig. 1 Schemes of perpendicular laser triangulation

整理可得,当图像探测器上光斑移动 ΔH_1 距离时,被测物表面移动距离 ΔH 的表达式为:

$$\Delta H = \frac{d_0 \sin \alpha}{d_1 \sin \gamma - \Delta H_1 \sin \gamma \cos \alpha - \Delta H_1 \sin \alpha \cos \gamma} \times \Delta H_1 \quad (2)$$

通过图像处理得到图像探测器上光斑移动距离 ΔH_1 的值,即可求出被测物的真实位移值。

1.2 双光路激光三角法测厚原理

双光路激光三角法测厚度的光路示意图如图 2 所示。其光路结构可视为由两个上下对称布置的直射型激光三角法光路组成,被测物的上下表面可看作两个相对参考平面,分别移动的距离为 H_1 和 H_2 ,其厚度表达式为: $H = H_1 + H_2$,由前面所述知识及公式推导可得:

$$H_1 = \frac{d_0 \sin \alpha}{d_1 \sin \gamma - \Delta H_1 \sin \gamma \cos \alpha - \Delta H_1 \sin \alpha \cos \gamma} \times \Delta H_1 \quad (3)$$

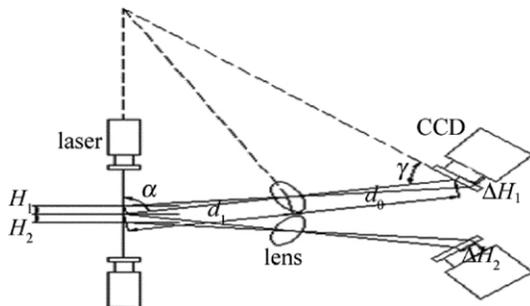


Fig. 2 Schemes of double laser triangulation

$$H_2 = \frac{d_0 \sin \alpha}{d_1 \sin \gamma - \Delta H_2 \sin \gamma \cos \alpha - \Delta H_2 \sin \alpha \cos \gamma} \times \Delta H_2 \quad (4)$$

式中 ΔH_1 和 ΔH_2 分别为 H_1 和 H_2 对应的光斑移动距离。此时,被测物厚度表达式为:

$$H = \frac{d_0 \sin \alpha}{d_1 \sin \gamma - \Delta H_1 \sin \gamma \cos \alpha - \Delta H_1 \sin \alpha \cos \gamma} \Delta H_1 + \frac{d_0 \sin \alpha}{d_1 \sin \gamma - \Delta H_2 \sin \gamma \cos \alpha - \Delta H_2 \sin \alpha \cos \gamma} \Delta H_2 \quad (5)$$

1.3 测厚原理及特点

由几何光学知识可知,光学系统近轴区内可视为理想光学系统,在近轴区内,理想光学系统的垂轴放大率 β 定义为像的大小与物体的大小之比^[4]。图 3 为本测量系统等效光路图。图 4 为理想光学系统成像示意图。如图 4 所示,被测物上下表面的光斑可分别视为相对于参考平面上方和下方高度为 h_1 和 h_2 的两个物体,在成像透镜后方所成像的像高分别为 Δh_1 和 Δh_2 ,有: $\Delta h_1 = \beta h_1, \Delta h_2 = \beta h_2$ 。于是有 $(\Delta h_1 + \Delta h_2) = \beta (h_1 + h_2)$,式中 $(h_1 + h_2)$ 即为被测物的实际厚度, $(\Delta h_1 + \Delta h_2)$ 即为图像探测器感光面上上下两光斑之间的距离。

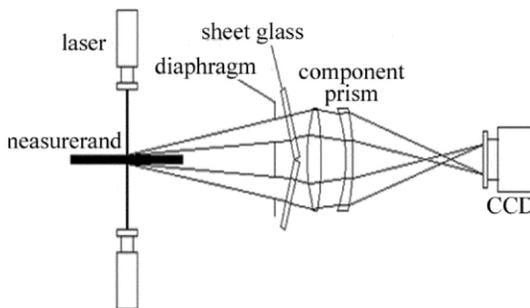


Fig. 3 Schemes of light path

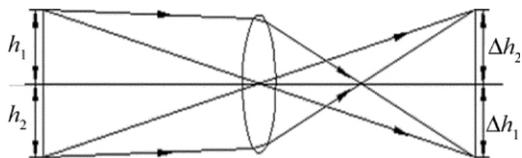


Fig. 4 Schemes of ideal optical imaging system

图 5 是光路示意图的斜二轴测图。在图 5 中,上下激光器分别发射 1 束光束经激光器前端透镜聚焦到被测物上下表面形成两个光斑,漫反射光线通过组合透镜汇聚到图像探测器感光面上形成两个成像光斑,

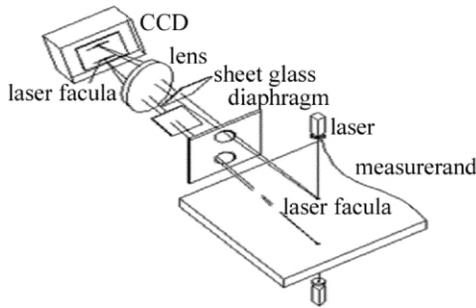


Fig. 5 Cabinet drawing of light path schemes

由前述推导可知,被测物上下表面两光斑的间距与图像探测器感光面上的两成像光斑的间距成线性关系,通过图像处理提取两成像光斑的重心,并计算重心之间的距离,对测量系统进行标定后,便可计算出膜上下光斑之间的距离。膜上下两光斑的距离即认定为被测物的厚度。

图6为测量方式示意图。测量位置选择传送装置的滚轮附近,因为滚轮附近被测物晃动较小,因晃动造成的物面倾斜角度也较小,物面倾斜带来的误差也较小。测厚设备可采用手持的方式也可固定在某一测量位置,沿板材的宽度方向移动U型架可实现板材厚度沿宽度方向的厚度测量。

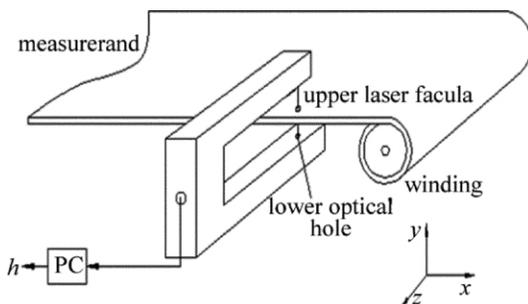


Fig. 6 Schemes of measuring mode

通过改进双光路激光三角法光路结构,优化光路设计,将双光路激光三角法中的上下透镜和图像探测器合二为一,测量系统的上下光路采用同一光学系统和成像系统,通过图像处理设备同时抓取上下光斑图像并实时处理,很好地保证了上下光路中图像采集和处理的同步性,既消除了双光路中上下独立测量系统难以同步的问题,又减小了结构尺寸,减轻了设备重量。

1.4 光路系统特点

要获得较大的分辨率,可选用像元尺寸小的高分辨率 CCD,这大大增加了成本。由前述直射型激光三角法测位移原理分析及公式推导可知,(2)式两边同时对 ΔH 求导即可得到直射型激光三角法的分辨力表达式:

$$\Delta H = \frac{(d_1 \sin \gamma - \Delta H \sin \gamma \cos \alpha - \Delta H \sin \alpha \cos \gamma)^2}{d_0 d_1 \sin \alpha \sin \gamma} \times \Delta H_1 \quad (6)$$

整理得:

$$\Delta H = \frac{[d_1 \sin \gamma - \Delta H \sin(\alpha + \gamma)]^2}{d_0 d_1 \sin \alpha \sin \gamma} \Delta H_1 \quad (7)$$

这里的 ΔH_1 表示 CCD 的像元尺寸。分析上式可知,当 γ 一定时, α 越大,分子变小同时分母变大, ΔH_1 前面的系数就变小, ΔH 的值也变小,也就是说分辨率变高了;反之, γ 一定时, α 越小,分辨率越低。本系统中 α 设计角度接近 90° , 系统分辨率较双光路激光三角法更大^[5-7]。

由光路的可逆性和折射定律、反射定律中光线方向的确定性,可得出每一个物点对应唯一的一个像点,也就是说 CCD 的位置是唯一的^[8]。由于散斑效应,当被测物很薄时,图像探测器上的两光斑间距将很小甚至彼此相连,难以得到两光斑中心的距离,本系统中,通过在孔径光阑后方加入一片平面玻璃,用来改变光线传播方向,入射光束进入平面玻璃内部发生折射后沿平行于入射方向继续传播,当平面玻璃呈一定角度放置时,出射点的位置向平面玻璃边沿方向发生移动,这样, CCD 像面上的成像光斑也同方向的随之移动一定距离,如图7所示。这样就扩大了成像光斑的距离,使系统对于很薄的被测物也能得到两个彼此分离的光斑。

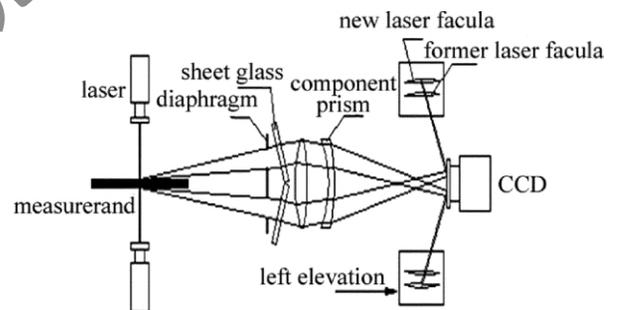


Fig. 7 Schemes of image deflection

2 图像处理部分

2.1 图像预处理

图像探测器采用北京微视新纪元有限公司生产的型号为 MVC3000F 的 CCD。像元尺寸为 $3.2\mu\text{m} \times 3.2\mu\text{m}$, 采集幅面为 2048×1536 。选用华科激光型号为 DD635-1-3 的半导体激光器为光源,其光斑直径在焦平面处最小尺寸为 0.15mm , 1:1 成像后成像光斑最大宽度约为 45 个像元尺寸大小。为提高处理速度,相机采集幅面截取为 2048×768 。采集到 1 幅图片后,首先利用阈值法确定是否有光斑存在,若存在且为两个光斑则将灰度值按列方向进行投影,找到峰值对应的横坐标,截取峰值横坐标左右一定区域作为光斑目标区域进行找中心处理。为降低背景噪声的影响,对目标区域进行均值滤波处理,消除孤立噪声点的影响,同时通过阈值分割将目标区域的背景灰度置为 0,减

小背景灰度对光斑找中心的影响,然后利用重心法求取两光斑中心并计算两光斑间距。图像处理流程图如图 8 所示。

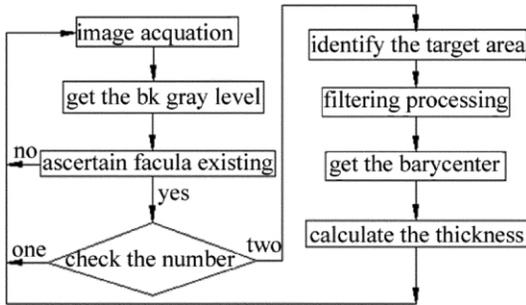


Fig. 8 Image processing flow chart

2.2 阈值的确定

阈值分割是对灰度图像选取一个合适的阈值,以确定每一个像素点是属于目标区域还是背景区域。常用的阈值计算方法有直方图法、Ostu 法、最小误差法、均匀化误差法、最大熵法和概率松弛法^[9-12]等。本系统采用阈值分割法进行图像预处理,选取原点处长宽为 100×100 个像元大小的区域灰度平均值作为阈值

$$T = \frac{\sum_{i=0}^{99} \sum_{j=0}^{99} f(i, j)}{100^2}$$

$f(i, j)$ 是坐标为 (i, j) 点处的灰度

值。然后将目标区域中灰度值小于阈值的点全部置为 0,以减小背景灰度对光斑求重心的影响。

2.3 厚度计算

图像预处理完毕后,计算左右光斑重心的横坐标,并在重心处画十字丝标定,如图 9 所示。



Fig. 9 Experimental picture

重心横坐标表达式为:

$$X = \frac{\sum_{i=m}^n \sum_{j=p}^q i \times G(i, j)}{\sum_{i=m}^n \sum_{j=p}^q G(i, j)} \quad (8)$$

式中 m, n, p, q 分别为目标区域左右边界的横坐标和上下边界的纵坐标; $G(i, j)$ 是坐标为 (i, j) 处的灰度值。计算沿 x 轴方向两重心之间的像素个数 $N = (X_2 - X_1)$ 作为两光斑距离。通过标定实验可得到像素个数与测量厚度之间的函数关系式 $H = f(N)$,将实时测得的像素个数带入该函数表达式,即可得出被测物的厚度值。

3 系统标定及数据分析

实际测量中,由于加工误差和定位误差引起的 CCD 像面不与被测物垂直,上下激光器没有严格对中,加之光学系统像差较大等原因,CCD 像面上光斑间距与被测物厚度往往不成线性关系,为此,用最小二乘拟合来近似确定函数关系式。设 Δh 和 h 满足 2 阶函数式 $h = p_1 \Delta h^2 + p_2 \Delta h + p_3$,其中 Δh 为 CCD 像面上两光斑间距 h 为被测物厚度值 p_1, p_2 和 p_3 分别代表标定系数。

标定实验在系统量程内设计了 13 组标准厚度被测物,对系统进行标定。采用沧州市市长城量具有限责任公司生产的塞尺作为待测件,该套塞尺处在设计量程中的尺片厚度为 0.02mm, 0.03mm, 0.04mm, 0.05mm, 0.06mm, 0.07mm, 0.08mm, 0.09mm, 0.10mm, 0.15mm, 0.20mm, 0.25mm, 0.30mm 共 13 组,其厚度增量值及厚度范围完全满足标定实验的需求。标定实验每片塞尺分别测量 100 次,取 100 次光斑间距值的平均值参与拟合。对测量数据进行最小二乘拟合得:

$$h = 4.0246 \times 10^{-6} \Delta h^2 - 6.5619 \times 10^{-3} \Delta h + 2.51078 \quad (9)$$

接下来将光斑间距代入标定函数式,得到测量厚度值。

表 1 中列出了测量厚度与实际厚度的偏差。从表 1 中可看出,系统标定后被测物的测量值与实际值偏差最大为 0.0094mm,不超过 0.01mm,精度较高,适合板材制造业的生产线在线测量。

Table 1 Experimental data

No.	actual thickness/mm	measure thickness/mm	deviation/mm
1	0.02	0.0207	0.0007
2	0.03	0.0317	0.0017
3	0.04	0.0424	0.0024
4	0.05	0.0524	0.0024
5	0.06	0.0641	0.0041
6	0.07	0.0716	0.0016
7	0.08	0.0757	-0.0043
8	0.09	0.0931	0.0031
9	0.10	0.0948	-0.0052
10	0.15	0.1508	0.0008
11	0.20	0.2094	0.0094
12	0.25	0.2533	0.0033
13	0.30	0.2932	-0.0068

4 结 论

所提出的单镜头激光三角法测厚系统实现了薄板厚度的测量,进一步拓展了激光三角法在厚度测量上

的应用。单镜头激光三角法测厚系统的建立,消除了双光路激光三角法上下测量系统难以同步的问题。光学设计中平面玻璃的引用,提高了设备对超薄物体的测量能力。激光器光束轴心线与成像透镜光轴的夹角比双光路激光三角法更大,该系统具有比已有激光测厚设备更大的分辨率。以不同厚度塞尺为被测物建立标定实验对系统精度进行验证,并利用最小二乘法拟合标定数据得到标定方程,由实验数据可看出,当厚度在0.02mm~0.3mm之间时,测量误差小于10 μ m。本系统测量误差的主要影响因素在于光斑是否严格对中和物面是否保证水平。标定实验结果表明,本文中构建的单镜头激光三角法测厚系统测量误差较小、精度较高,具有良好的市场应用前景。

参 考 文 献

- [1] JIA Z G, LU Z G. Online testing technology of thickness [J]. Instrumentation Technology 2009(2): 19-21 (in Chinese).
- [2] XIONG Zh Y, ZHAO B. Design of a new laser thickness measurement instrument [J]. Laser Technology 2011, 35(5): 613-617 (in Chinese).
- [3] WANG D, ZHAO B. Laser oblique illumination method for measuring steel plate thickness [J]. Infrared and Laser Engineering 2011, 40(10): 2033-2036 (in Chinese).
- [4] YU D Y, ZHU Z D. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press 2006: 15-25 (in Chinese).
- [5] ZHAO B, WANG D, XIONG Zh Y. A kind of plate thickness of laser measurement device: China, CN101825438A [P]. 2010-09-08 (in Chinese).
- [6] BAI S J. A laser thickness gauge in the application of Handan iron and steel plate [J]. Shandong Metallurgy 2004, 26(1): 281-282 (in Chinese).
- [7] ZHAO B, ZHAO W M, LI R B. Design, manufacture and experience of Axilens [J]. Laser Technology 2000, 24(4): 219-223 (in Chinese).
- [8] ZHOU L P, ZHAO B, LI Zh. Research on laser triangulation measurement system with non-diffraction beam [J]. Laser Technology 1998, 22(1): 24-25 (in Chinese).
- [9] WANG J H, JIANG H, MAO J B. A method for improving the on-line thickness measurement precision of sheet board in laser triangulation method [J]. Journal of Henan University (Natural Science Edition) 2011, 41(6): 567-571 (in Chinese).
- [10] FAN F M, CHENG L L, XIAO L, et al. Establishment and analysis of auto-focus model for laser triangulation method [J]. Infrared and Laser Engineering 2011, 40(10): 2028-2032 (in Chinese).
- [11] WANG H, WANG H L, QIAN Sh S. Investigation and analysis of uncertainty of single-point laser optical triangulation measurement system [J]. Tool Engineering 2011, 45(3): 93-95 (in Chinese).
- [12] LIU H X, QU X H, XING Sh J, et al. Large-scale diameter measuring system based on laser triangulation [J]. Computer Measurement & Control 2011, 19(3): 506-508 (in Chinese).