

线阵 CCD 测厚系统改进光斑中心定位算法的研究

黄 静¹, 夏 雷¹, 王毅强¹, 王友钊²

(1. 浙江理工大学信息学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学生物仪器工程与仪器科学学院, 杭州 310011)

摘 要: CCD探测器的像元大小和测厚系统的定位算法优劣是影响激光测厚系统测量精度的重要因素。针对 CCD探测器的像元大小不易改变和算法精度不够的问题,在结合相关法和拟合法的基础上,提出了改进型的算法作为光斑中心亚像素定位算法,并将其应用在激光测厚系统中,以提高激光测厚的精度。研究表明,改进定位算法后的激光测厚系统能达到 $1\ \mu\text{m}$ 的测量精度。

关键词: 线阵 CCD; 激光测厚; 相关法; 拟合法

中图分类号: TP360 **文献标志码:** A

0 引 言

厚度测量技术被广泛应用于建筑施工、钢材生产、工业现场检测等领域中。厚度的准确测量能够为这些行业的生产提供依据,不但能增强生产过程中的自动化,还能够降低生产成本、提高产品质量和生产效率^[1]。

激光测厚系统采用 CCD 器件作为光学检测器,激光测厚系统通过检测成像到 CCD 上的光斑位置的变化来实现传感器系统对外界物理量的静态或动态的检测^[2]。提高系统测量精度最直接的方法就是提高 CCD 的分辨率,即增加像素点阵数。这种提高硬件分辨率会提高产品造价,所以通过算法处理提高图像中目标的定位精度^[3],目前常用的光斑中心定位算法是质心法和拟合法,质心法其算法简单且定位精度高,但是它只能处理目标面积区域适中的图像,并且受噪声干扰较大,当图像信噪比较小时,误差会比较大。笔者旨在提出一种基于改进的相关法和拟合法相结合的光斑中心定位算法,作为从 CCD 器件输出的电信号中提取厚度数据的处理算法,相对于传统的拟合法,在峰值亚像素定位精度和稳定度上得到了很大的提高,该方法能提高传感探测系统的可靠性和稳定性。

1 CCD 驱动电路及信号调理电路

激光测厚系统的硬件组成包括 CCD 驱动电路、信号调理电路及嵌入式系统模块。本章节主要介绍 CCD 驱动电路和信号调理电路,它们是激光测厚系统的关键部分。CCD 用于采集激光在漫反射后光斑的位移量,信号调理电路对 CCD 采集的信号进行处理,消除噪声干扰。CCD 的突出特点是以电荷作为信号,而不同于其他大多数器件是以电流或者电压为信号,CCD 单元存储电荷多少与光的强度和 CCD 单元光积分时间成正比^[4]。CCD 工作过程中的主要问题是信号电荷的产生、存储、传输和检测。CCD 的工作原理是被摄物体反射光线到 CCD 器件上,CCD 根据光的强弱积聚相应的电荷,产生与光电荷量成正比的弱电压信号,经过滤波、放大处理,通过驱动电路输出一个能表示敏感物体光强弱的电信号或标准的视频信号^[5]。

本文研究的激光测厚系统所使用的 CCD 型号为东芝公司生产的 TCD1501C。该系统通过利用 CPLD 来设计该脉冲时序。

CCD 光电探测器在驱动时序脉冲的驱动下,能够实现光电转换,并产生模拟信号。该模拟信号分为视频信号输出及补偿输出,都存在着大量的 CCD

输出信号噪声,诸如光子噪声、复位噪声、暗电流噪声、肥零噪声、散粒噪声及输出噪声等。本文通过将视频信号及其补偿输出分别送至 AD623 的反相和同相输入端。在 AD623 的输出端接一级射极跟随器以增强信号的驱动能力。选用该器件可消除采用普通运放和外围电阻所引起的输出信号的温度漂移。经过 AD623 进行放大处理后的视频信号输出到模数接口芯片 TDA8783, TDA8783 具有相关双采样、自动增益控制电路、钳位滤波及模数转换电路等功能,能够有效消除视频信号的噪声干扰,并输出十位有效的数字视频信号。

2 激光三角法原理

激光三角法属于主动视觉测量方式,是非接触光学测量的重要方法。激光三角法是光电检测技术的一种,由于该方法具有结构简单、测试速度快、实时处理能力强、使用灵活方便等优点。系统采用直射式激光三角法,激光束垂直入射到被测物表面,采用漫反射进行测量,通过像移和实际位移之间的关系式,真实的物体位移可以由对象位移求得。当物体纵向移动时,所测的始终是同一个被测点,称为直射式。

直射式是入射光经透镜聚焦后垂直入射到被测表面上,直射式三角法测量等效光路如图 1 所示。 L_1 为聚焦透镜、 L_2 为成像物镜、 d_0 为物距、 d_i 为像距、 Δ 为被测物面位移、 θ 为入射光轴和成像光轴的夹角、 α 为光路夹角、 φ 为光电探测器受光面同成像物镜光轴的夹角、 δ 为像点的位移。

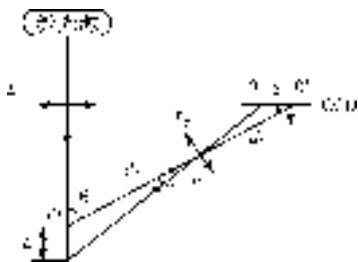


图1 直射式三角法

由图 1 可知,激光器发出的光束,经过透镜 L_1 聚焦后垂直入射到被测物体表面上,光线经物体散射后通过成像透镜 L_2 中心点 P ,成像在光电接收元件 CCD 敏感面上。

物体移动或表面变化导致入射光点沿入射光轴移动,成像点也随之移动。由图 1 可以看出,高度不同的点在成像位置也不同,光线 OA 上的点与 CCD 成像平面上 O' 与 Q 之间的投影点是一一对应的关

系。因此,只要知道光线 OA 上任何一点在 CCD 成像平面上的成像位置,就可以根据三角函数关系求出该点与基准平面上 O 点的高度,即求得该点的厚度值。

对于高精度要求的场合,一般将光电探测器的光敏面与成像透镜成 φ 角,光电探测器平面与成像透镜光轴的夹角 φ 和激光束与成像透镜光轴的夹角 θ 应满足思凯普弗拉格条件(成像面、物面和透镜主面必须相交于同一直线),并且同时满足高斯定理。即满足:

$$\begin{cases} \tan\varphi = \frac{d_0 - f}{f} \tan\theta \\ \frac{1}{f} = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 为成像透镜的焦距。

这样投射光斑便可通过成像透镜在光电探测器的光敏面清晰成像。根据解析几何中的正弦定理,得:

$$\begin{cases} \frac{d_0}{\sin(\theta - \alpha)} = \frac{\Delta}{\sin\alpha} \\ \frac{d_i}{\sin(180 - \varphi - \alpha)} = \frac{\delta}{\sin\alpha} \end{cases} \quad (2)$$

整理式(2)后得:

$$\Delta = \frac{d_0 \delta \sin\varphi}{d_i \sin\theta - \delta \sin(\varphi + \theta)} \quad (3)$$

测量时物象位置关系固定,因此物距 d_0 和像距 d_i 已知,入射光轴和成像光轴夹角 θ 和光电探测器受光面同成像物镜的夹角 φ 也已确定,这时由 CCD 探测器测量到像点的位移 δ ,代入式(3)便得被测物面位移 Δ ,即该点的厚度值。

3 光斑中心定位算法的改进

3.1 常用算法研究

光斑中心定位算法是测厚系统的关键技术,系统通过对光斑处理,得到光斑中心点,从而确定物体的厚度。常用的光斑中心定位算法为灰度质心法和拟合法。像素对光斑中心定位的作用与该像素灰度值呈线性关系,然而在实际处理中,灰度值越大对光斑中心定位的作用越突出^[6-7]。如果背景灰度值较小,目标灰度值较高,而且目标的灰度分布为抛物面或高斯曲面,那么灰度重心法可以获得较高的定位精度。但是实际图像中目标特征的情况很复杂,例如亮背景和暗目标、目标和背景的灰度值都比较高,因此用灰度作为权重的应用是有限的。常用的拟合方法有多项式、高斯函数和椭圆拟合等。使用拟合法的前提是目标的特性,如图像的灰度分布、阴影模式的噪声和测量物体等,满足已知或假定的函

数形式,通过对离散图像中的目标的灰度或坐标进行拟合,可以得到目标的连续函数形式,从而确定描述物体的各个参数值(位置、尺寸、形状、幅度)对目标进行亚像素定位^[8]。与重心法相比,拟合法的定位精度更高,并且不受灰度对称性的影响。但在测厚系统的信噪比很小的时候,拟合法的定位精度会受到很大的影响。在现实中,由于各种原因测得的信号波形会很大受到噪声的影响,针对这些问题,提出了改进型的光斑中心定位算法。

3.2 均值滤波

改进型光斑中心定位算法分为三步:首先采用均值滤波算法对 CCD 采集的波形进行滤波,其次使用相关函数对波形进行粗定位,最后采用高斯拟合进行亚像素定位,找到光斑的中心点。

均值滤波的基本思想是用几个像素灰度的平均值来代替每个像素的灰度。假定有一幅 $1 \times N$ 个像素的图像 $f(x)$,平滑处理后得到一幅图像 $g(x)$, $g(x)$ 由下式决定:

$$g(x) = \frac{1}{M} \sum_{x \in S} f(x) \quad (4)$$

式(4)中 $x=0,1,2,\dots,N-1$, S 是 x 点邻域中点的坐标的集合,但其中不包括 x 点, M 是集合内坐标点的总数。平滑化的图像 $g(x)$ 中的每个像素的灰度值均由包含在 x 的预定邻域中的几个像素的灰度值的平均值来决定。这种方法通过把突变点的灰度分散在其相邻点中来达到平滑效果,操作起来也简单,这样平滑往往造成图像的模糊,可以证明,对图像进行均值处理相当于图像信号通过一个低通滤波器^[9]。

3.3 相关函数粗定位

在目标定位技术中,数字相关法具有精度高、适应性强和计算量较低等优点。算法的基本思想是基于互相关函数的相关特性,利用一个已知的函数模板 $g(t)$ 来确定位置的函数 $f(t)$ 的位置,即利用一个已知的函数 $g(t)$ 不断地逼近目标函数 $f(t)$ 。但是实际图像由于受到光学系统与电路系统的低通滤波效应的影响,再加上场景中的噪声的干扰,无法做到已知函数与位置函数完全相似。也就是说图像的逼近面临着抑制噪声效应和精确定位两个要求,而这个两个要求又是互相影响的,无法同时满足,想减少噪声,就得多牺牲细节;想多保留细节,就不能有力地抑制噪声。经过大量的实验表明,CCD 感光面收集到的光斑光强曲线类似于高斯曲线。而采用相关法,利用高斯函数的一阶导数作为一种线性算子对

图像进行互相管,从而达到对图像进行平滑来抑制噪声,可以在抗噪声干扰和精确定位之间选择一个最佳折衷方案,很好地解决了这个矛盾。这种平滑是在整个图像平面上进行的。相关函数光斑粗定位的执行过程如下:

用高斯函数对图像灰度函数进行卷积,设图像灰度函数为 $f(x)$,一维零均值高斯函数如下式所示:

$$g(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

那么,结果如下所示:

$$h(x) = f(x) * g(x) \quad (6)$$

得到一个光滑的波形,通常近似地满足高斯分布。将该高斯分布存储起来,然后通过高斯函数拟合方法得到该区域的解析曲线函数,取曲线极值点为目标的亚像素位置^[10-11]。

3.4 高斯拟合亚像素细定位

对目标的高斯拟合,即通过对离散图像中的目标的灰度或坐标进行拟合可以得到目标的连续函数形式,从而确定描述物体的各个参数值(位置、尺寸、形状、幅度等)对目标进行亚像素定位。其过程如下,设一个一维的高斯方程表示为

$$f(x) = A \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

式(7)中, A 是幅值, σ 是标准差。对上式两边取对数,展开平方项并整理得

$$f \ln f = \left[\ln A - \frac{x_0^2}{2\sigma^2} \right] f + \frac{x_0}{\sigma^2} [x f] - \frac{1}{2\sigma^2} [x_0^2 f] \quad (8)$$

将由 N 个数据点组成的方程组写成矩阵形式为:

$$Q = BC \quad (9)$$

式(9)中, Q 是一个 $N \times 1$ 向量,其元素为:

$$q_i = f_i \ln f_i \quad (10)$$

C 可以表示为如下的一个完全由高斯参数复合的向量

$$C^T = \left[\ln A - \frac{x_0^2}{2\sigma^2}, \frac{x_0}{\sigma^2}, -\frac{1}{2\sigma^2} \right] \quad (11)$$

B 是一个 $N \times 3$ 矩阵,其第 i 行为:

$$[b_i] = [f_i, f_i x_i, f_i x_i^2] \quad (12)$$

则高斯函数的参数可以转换为:

$$\begin{cases} \sigma = \sqrt{-\frac{1}{2c_3}} \\ x_0 = c_2 \sigma^2 \\ A = \exp\left[c_1 + \frac{x_0^2}{2\sigma^2}\right] \end{cases} \quad (13)$$

将进行相关法后得到的像素点坐标和相应的像素点灰度值利用豪斯荷尔德变换,即可得到矩阵 C ,

将其代入(13),即可求得高斯曲线的参数,该曲线的极值点即为所要求的光斑中心亚像素点^[12]。

4 改进光斑中心定位算法验证

光斑的光强分布函数类似于高斯分布,光斑成像于线阵 CCD 的光强可表示为:

$$I_s = I_o \exp \left[\frac{-2(x-40)^2}{225} \right] \quad (14)$$

实验中设光斑中心峰值位置落在第 40 个像素处,光强最大值为 100。理想情况下即成像于 CCD 的光斑信号不受噪声影响时,利用改进的相关函数拟合极值法所求的峰值位置为 40.00,传统拟合法所求的峰值位置为 40.00,两者几乎没有区别。改进后的亚像素光斑中心定位算法的验证过程如图 2 所示。图 2 处理的信号为加入 10 dBW 噪声后的理想信号。在该理想信号中添加不同程度的高斯白噪声,利用原来的拟合极值法和改进型的亚像素光斑中心定位算法对其进行处理结果如图 3。

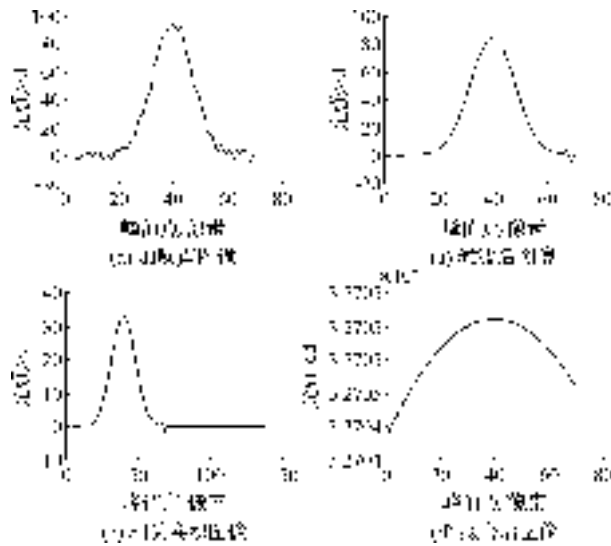


图 2 改进的算法处理图像

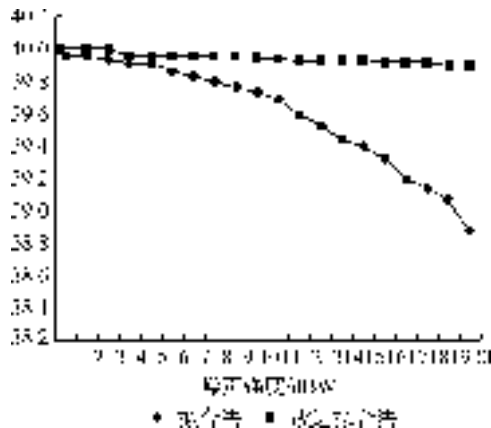


图 3 两种算法仿真结果比较

由实验结果可以看出,在模拟添加的高斯噪声 N 强度较小时,相关法和改进型的相关函数拟合极值法结果误差小,目标定位都能在亚像素级。随着模拟添加的高斯噪声逐渐增大,当噪声加至 20 dBW 时,拟合极值法的误差已经表现得很大,目标定位误差已上升至 1.14 个像素,而改进型的相关函数拟合极值法具备良好的抗干扰能力。在噪声为 20 dBW 的情况下,其定位误差在 0.1 个像素中,仍保持了较高的精度。因此可以得出改进后光斑中心亚像素定位算法应用于激光测厚系统后,能够使系统体现出较高的精确度和稳定性。

5 结 论

系统采用 TCD1501C 线阵 CCD 器件作为传感器,通过 CPLD 可编程器件产生了 CCD 驱动时序信号,利用 ARM 嵌入式处理器实现了硬件系统。由上述结果可以看出,当在噪声很高的时候,拟合极值法出现很大的误差,而改进型算法仍保持了较高的精度。在噪声为 20 dBW 的情况下,其定位误差在 0.1 个像素内。算法改进了拟合法在噪声高的情况下的精度问题。CCD 采集到数据经采集得到,通过 USB 串口上传到计算机上,得到的 TXT 数据文件如图 4 所示。图 4 中所示的像素点采集到地数据。对 CCD 采集到的一组数据采用改进后的光斑定位算法拟合后得到如图 5 所示的曲线。得到光斑中心

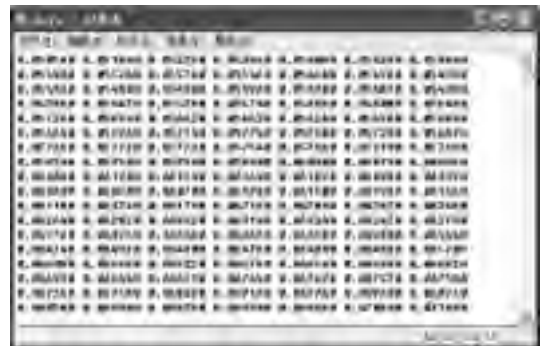


图 4 CCD 采集的数据值

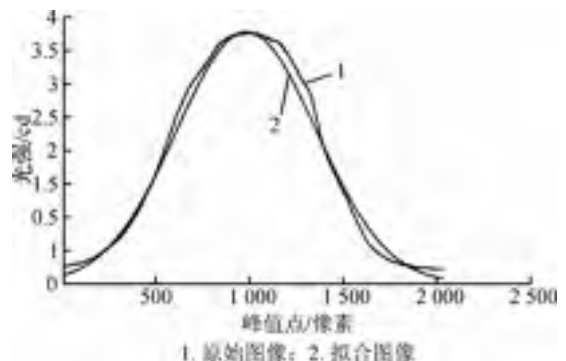


图 5 改进算法拟合结果

点为拟合后的高斯曲线的顶点,对应的 x 的坐标为 987.40,即光斑中心在第 987.40 个像素点。

研究表明,本算法具有较高的光斑中心提取精度和稳定性,同时具有良好的抗噪性和鲁棒性,当噪声较大时也能比较准确地提取出光斑中心峰值位置,能够获得 $1\ \mu\text{m}$ 精度。相对与目前市场上的其他大多数激光测厚系统,解决了他们测厚精度不够高的问题,为激光测厚仪的高精度测量提供了一种实用可靠的方法,具有不错的应用前景。

参考文献:

- [1] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [2] 米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 王忠立, 刘佳音, 贾云德. 基于 CCD 与 CMOS 的图像传感技术[J]. 光学技术, 2003, 29(3): 361-364.
- [4] 王杰艳. 线阵 CCD 图像传感器驱动电路的设计[J]. 国外电子元器件, 2006(9): 24-26.
- [5] 石凡鲁, 李俊. 基于 FPGA 的线阵 CCOTCO1501D 驱动时序电路的设计[J]. PCL&FA, 2011(6): 49-51.
- [6] 陶珺, 张霞. 光纤传感系统中光斑中心亚像素定位算法[J]. 计算机工程, 2010, 19(36): 31-33.
- [7] 张奔牛, 万红明, 毛成林. 基于差分光斑中心定位算法的位移传感技术研究[J]. 传感技术学报, 2011, 2(24): 215-219.
- [8] Lyvers E P, Mitchell O R, Akey M L. Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293-1309.
- [9] 王科俊, 熊新炎, 任楨. 高效均值滤波算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 2(27): 434-438.
- [10] 唐冠群. 几种激光光斑中心定位算法的比较[J]. 北京机械工业学院学报, 2009(1): 61-64.
- [11] Wu Jian-bo, Cui Zhen, Zhao Hong. Self-adaptive threshold method for light-knife center acquiring[J]. Tool Engineering 2000, 34(10): 27-29.
- [12] Li Chang-ming, Xu Guo-sheng. Sub-pixel edge detection based on polynomial fitting for line-matrix CCD image[J]. Information and Computing Science, 2009(2): 262-264.

Research on Improvement of Spot Center Location Algorithm by Linear Array CCD Thickness Measurement System

HUANG Jing¹, XIA Lei¹, WANG Yi-qiang¹, WANG You-zhao²

(1. The School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University,
Hangzhou 310018, China; 2. College of Bio-instrument Engineering and Instrument Science,
Zhejiang University, Hangzhou 310011, China)

Abstract: Pixel size of CCD detector and location algorithm of thickness measurement system are important factors influencing the measurement precision of laser thickness measurement system. In allusion to pixel size of CCD detector not easy to change and inadequate precision of the algorithm, this paper puts forward improved algorithm as spot center sub pixel location algorithm based on correlation method and fitting method and applies it in laser thickness measurement system, thus improving the precision of laser thickness measurement. The research result shows that the laser thickness measurement system with improved location algorithm can realize $1\ \mu\text{m}$ measurement precision.

Key words: linear array CCD; laser thickness measurement; correlation method; fitting method

(责任编辑: 陈和榜)