

# 激光—CCD 实时、无接触、动态线径测量的研究

林棋榕 谢树森 周川钊 李步洪 郑蔚 李晖

(福建师范大学激光研究所, 福州 350007)

**摘要** 非衍射式激光—CCD 线径测量方法, 由于没有克服光学镜头非线性畸变引起测量误差的可行办法, 至今不能得到实际应用。本文提出的计算机测量误差自动修正方法可以有效地解决这个问题, 在此基础上, 一种小体积、造价低、直径测量范围宽和高精度的线径测量装置得以研制。它在电线厂漆包线生产线上实现了实时、无接触、动态线径测量。

**关键词:** 直径测量; 在线检测; 微机误差修正

## 1 引言

利用光学衍射原理的激光—CCD 线径动态测量研究工作已经取得成果<sup>[1-2]</sup>。一方面达到很高的测量精度, 另一方面研究出克服被测线在生产线上振动引起测量误差的方法<sup>[3]</sup>。然而这种测量方法存在的一个问题是: 测量精度随着被测线直径增大而下降, 这是由光学衍射原理所决定的。如果 CCD 探测器设置为检测靠近中心衍射条纹的波峰和波谷之间距离  $X$ , 则直径  $D$  可由下式计算

$$D = \frac{\lambda z}{X} \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $z$  为观察距离, 根据对测量精确度的要求, 允许的被测线最大直径可由下面推导公式求得。

$$\frac{dx}{dD} = -\frac{\lambda z}{D^2}$$

如果要求对被测线直径  $D$  的分辨率为  $1 \mu\text{m}$ , 而相对应的 CCD 探测器对  $X$  的最高分辨率由相邻光敏中心距所决定, 目前线阵 CCD 相邻光敏元中心距是  $12 \mu\text{m}$  左右。由此可得

$$\frac{\lambda z}{D^2} = \frac{12}{1}$$

$$D = \frac{\lambda z}{12} \quad (2)$$

设  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ,  $z = 800 \text{ mm}$  则

$$D = \frac{0.6328 \times 10^{-6} \times 800 \times 10^{-3}}{12} = 2.05 \times 10^{-4} \text{ m}$$

可见为保证测量绝对误差小于  $1 \mu\text{m}$ , 在这种情况下所允许的被测线直径不能超过  $205 \mu\text{m}$ 。而在许多细线生产线上, 被测线直径一般超过这个范围, 例如漆包线生产线上许多规格漆包线直径都超过这个数值。

在漆包线的生产中, 虽然铜芯是通过金刚石模具拉制的, 可以达到直径的规格要求。但是最后一道自动化上漆工序, 对漆层的厚度有严格的要求, 而漆包线的直径标定值是包含漆层厚度的直径值。上漆的厚度在生产线上是可以调节控制的, 但普遍缺乏实时、动态、无接触的在线直径的自动显示装置: 用以指导手动或自动调节上漆厚度, 保证产品质量要求。为此本文提出这种装置的研究, 除了要具有较宽的直径测量范围, 还要考虑到生产线上能够允许放置这种测量装置的位置很小, 因此要求这种装置的小体积也是必须的。一种由半导体激光器, CCD 光电探测器和单片微机组成的非衍射式线径测量系统的研究可以解决这些问题。

## 2 组成和原理

系统组成如图1所示。激光二极管输出功率  $P = 3 \text{ mW}$ , 波长  $\lambda = 670 \text{ nm}$ 。透镜1(柱面镜)和透镜2(圆透镜)组成光学扩束系统, 把半导体激光器输出激光变换为扁平椭圆光斑(长轴  $5.77 \text{ mm}$ , 短轴  $0.88 \text{ mm}$ )的平行光输出。平行光束与被测线垂直相交。通过显微物镜使被测线径成像于线阵 CCD 光电探测器的端面, 组成一个投影成像光学系统。显微物镜  $\beta = 16$ ,  $NA = 0.25$ 。CCD 型号 TCD132D, 1024位, 相邻光敏元中心距  $14 \mu\text{m}$ 。线阵 CCD 把沿着线径方向的光信号转化为脉冲时间信号输出, 即把单向空间坐标变换为时间坐标。脉冲的相位对应于线径成像的空间位置, 而脉冲的时间宽度对应于线径的尺寸。

CCD 输出经信号处理单元处理后形成三个信号输出, 其一为 CCD 扫描起始脉冲即时间基准脉冲, 其二为反映线径尺寸的矩形脉冲, 其三为反映输入平均光强的信号。前面两个信号分别输入到 MCS-98 单片微机的高速输入通道 HSI. 0 和 HSI. 1。HSI 通道可自动记录 CCD 扫描起始脉冲时间值  $T_0$ 。以及反映线径尺寸的脉冲前沿时间值  $T_1$  和后沿时间值  $T_2$ 。则

$$T_A = T_1 - T_0 \quad (3)$$

$$T_B = T_2 - T_0 \quad (4)$$

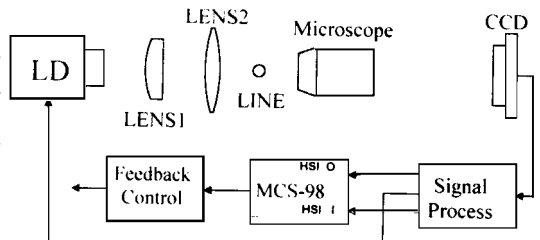


Fig. 1 Schematic outline of experimental system

$T_A, T_B$  可确定线径两个边沿的像在线阵 CCD 光敏元上的位置, 经线性变换可得线径尺寸等于:  $R = K_0(T_B - T_A)$ , 反馈控制单元把线径尺寸测定值与标定值比较产生反馈控制信号进行自动修正, 同时实时自动显示线径值。

从 CCD 光电探测器输出信号中提取的反映平均光强的信号负反馈至半导体激光器达到稳定激光器光功率的目的。虽然线径测量值从原理上不决定于光功率值, 但是由于物镜和 CCD 器件的调制传递函数 MTF 并不能达到理想化的要求, 造成 CCD 输出脉冲信号具有一定宽度的上升沿和下降沿。因此在进行二值化处理时, 脉冲宽度受到信号幅度的影响。激光功率的不稳定引起示值的不稳定。这是本系统随机误差主要来源, 所以稳定功率的措施是不可少的。

### 3 半导体激光扩束系统的实现

扩束系统光路示意图如图2所示。半导体激光器输出端为椭圆光斑。长轴方向发散半角  $\theta_{01} = 0.52 \text{ rad}$ , 短轴方向发散半角  $\theta_{02} = 0.17 \text{ rad}$ 。柱面镜轴向沿长轴方向放置, 焦距  $f_1 = 5 \text{ mm}$ 。圆透镜焦距  $f_2 = 10 \text{ mm}$ 。通过调节使半导体激光器同时位于柱面镜和圆透镜的焦点, 但要略为偏离一个很小的像散量  $\Delta$ 。经过这两个镜头的变换从圆透镜输出光束在束腰位置的椭圆光斑长轴  $OA$  等于

$$OA = \omega_{01} = f_2 \cdot \text{tg} \theta_{01} \quad 5.77 \text{ mm} \quad (5)$$

短轴  $OB$  等于

$$OB = \omega_{02} = f_1 \cdot \text{tg} \theta_{02} \quad 0.88 \text{ mm} \quad (6)$$

光束主要沿长轴方向扩束, 柱面镜沿短轴方向的作用主要为集中光能量于 CCD 端面上。

沿长轴方向的发散半角

$$\theta_{01} = \frac{\lambda}{\pi \theta_{01}} \cdot \frac{1}{f_2} = 0.41 \times 10^{-4} \quad (7)$$

沿短轴方向的发散半角

$$\theta_{02} = \frac{\lambda}{\pi \theta_{02}} \cdot \frac{1}{f_1} = 0.25 \times 10^{-3} \quad (8)$$

从对线径投影成像质为出发点, 主要是为减小沿长轴方向的发散角。

另外, 在 CCD 探测端面上光功率分布的均匀性也是必须考虑的。沿长轴方向光强的高斯分布

$$I = e^{-2^2 / \omega_{01}^2} \quad (9)$$

中心点光强分布为最大值

$$y = 0$$

$$I = 1$$

CCD 探测端面长度为  $L$  ( $L = 14.336 \text{ mm}$ ), 它两端的光强分布值

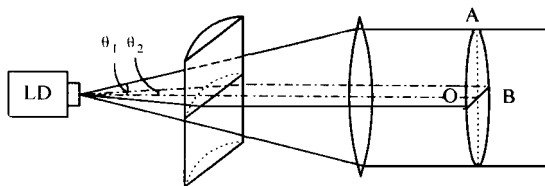


Fig. 2 Schematic of beam expander

$$y = \frac{L}{2\beta}$$

$$I = e^{-2(\frac{L}{2\beta})^2/\omega_0^2} \quad 0.988 \quad (10)$$

$$\frac{I - I'}{I} \quad 1.2\%$$

可见沿 CCD 探测面光强最大相对变化为 1.2%，保证了 CCD 各光敏元照明的均匀性。但是必须注意调节椭圆光斑的长轴与 CCD 线阵方向相一致，以免受到沿短轴方向光强变化的影响。

## 4 改善测量精确度的方法

本系统把光学投影成像方法应用于直径测量。虽然简单易行，但必须克服光学镜头非线性畸变产生的误差，否则不能满足高精度测量的要求。按照本系统测量精度的要求，物镜的非线性畸变必须小于 0.1%，这一点给光学镜头的设计和加工造成很大困难。计算机的应用为系统误差的自动修正创造了条件，但是由于被测线在动态运动中不能保证处于视场的一个固定位置；这样一方面必须修正直径  $R$  变化引起非线性失真，另一方面还必须修正同一被测线处于视场不同位置而产生的非线性失真。综合这两个因素产生的误差修正将是一个二维变量的函数。计算机需要储存的误差修正量的数目将是十分庞大的，总数在几十万个以上。这样大数目修正量的测试校正工作将是难以实现的。

一种可行的方法是把 CCD 输出反映线径尺寸的距形脉冲（负脉冲）分解为前沿和后沿，分别修正反映线径尺寸的前沿出现时间和后沿出现时间的非线性误差。前沿误差修正方法是：选择一根直径 1 mm 的金属线放置于视场中间处于完全挡光情况，而后用标准微位移装置推动它，移动 1  $\mu\text{m}$  为一点，通过 MCS-98 微机读一次对应的负跳变时间。

线阵光敏面长度  $L = 14.336 \text{ mm}$ ，物镜放大倍数  $\beta = 16$ ，所需校正测试的点数  $n = 0 - 896$ 。如图 3 所示，前沿位置  $x_A$  可表示为（整部函数）：

$$x_A = K[n + \frac{1}{2}] \quad (11)$$

$x_A$  与  $n$  值保持线性关系，与之相对应计算机读出的前沿时间

$$t_A = f[n + \frac{1}{2}] \quad (12)$$

$t_A$  与  $n$  为非线性关系，由  $t_A$  线性变换所得到前沿位置示值  $x_{A_t}$

$$x_{A_t} = K_0 t_A = K_0 f[n + \frac{1}{2}] \quad (13)$$

$x_{A_t}$  可能不等于  $x_A$ ，由此得到误差修正量

$$\Delta x_A = x_A - x_{A_t} = K[n + \frac{1}{2}] - K_0 f[n + \frac{1}{2}] \quad (14)$$

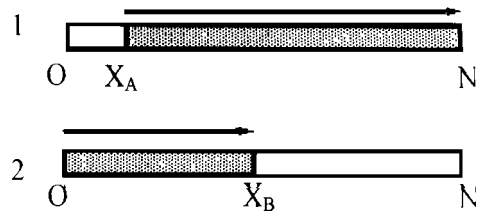


Fig. 3 Diagram of systemic error correcting method

后沿时间误差修正方法同前沿。但是金属线的位置不是处于视场中间,而是在视场边沿(不挡光情况),而后逐点向内移动,计算机逐点读出脉冲正跳变时间,后沿位置  $x_B$  等于

$$x_B = K \left[ n + \frac{1}{2} \right] \quad (15)$$

对应的后沿时间

$$t_B = \mathcal{Q} \left[ n + \frac{1}{2} \right] \quad (16)$$

$$x_{Bt} = K \circ t_B = K \circ \mathcal{Q} \left[ n + \frac{1}{2} \right] \quad (17)$$

后沿误差修正量

$$\Delta x_B = x_B - x_{Bt} = K \left[ n + \frac{1}{2} \right] - K \circ \mathcal{Q} \left[ n + \frac{1}{2} \right] \quad (18)$$

将测试所得到的前、后沿误差修正量存储于 MSC-98 单片机系统的 EPROM 中。总数不到 2 k 是可行的。另外,还可以设计自动化校准装置,使这种误差校准能够迅速完成。计算机程序根据每次测量所得反映线径的前沿位置  $x_{At}$  值和后沿位置  $x_{Bt}$  值,从 EPROM 中寻出相对应的误差修正量  $\Delta x_A$  和  $\Delta x_B$ ,计算出准确的线径值  $R$

$$R = (x_{Bt} + \Delta x_B) - (x_{At} + \Delta x_A) \quad (19)$$

## 5 动态运行和实验结果

在线动态测量和静态测量相比主要麻烦问题是被测线动态运行过程的抖动对测量的影响。虽然在机械上通过动滑轮控制被测线的运行,使之尽可能保持平稳,但是绝对的稳定运行是难以实现的。总有一些抖动。这个抖动是低频的,跟 MSC-98 计算机高速测量相比,相对于每一次测量被测线可近似看作相对静止的。但是不同次测量之间被测线所处的位置由于抖动而变化。被测线位置的抖动可以分解为沿物镜视场方向的抖动和沿工作距方向的抖动。沿视场方向被测线位置的变化主要由于物镜的非线性畸变引起测量误差,这已经由计算机误差修正程序得到自动修正。这里主要考虑沿工作距方向的抖动对测量的影响。当被测线由于运动中抖动偏离对准平面时,线径边沿的一个点在对准平面成为一弥散斑。在普通光源照明条件下,这个弥散直径  $Z$  等于<sup>[4]</sup>

$$Z = \frac{D \Delta}{2P} \quad (20)$$

$\Delta$  为偏离对准平面的偏离量,  $D$  为物镜入瞳直径,  $P$  为对准平面到入瞳距离。当被测线运行抖动可能的最大偏离量  $\Delta = 1 \text{ mm}$  时,可计算  $Z = 0.4 \text{ mm}$ 。经过物镜放大  $\beta$  倍后在 CCD 端面上的弥散斑直径

$$Z = \beta Z = 4 \text{ mm}$$

将产生严重的测量误差。本系统改用激光扩束后的平行光照明,式(20)的计算是不适用的。这时被测线偏离对准平面所产生的弥散斑如图4所示,  $A_1A_2$  为对准平面,  $B_1B_2$  为偏离位置。 $\theta_0$  照明光束的发散半角。弥散斑直径  $Z$  等于。

$$Z = 2\Delta \sin \theta_{01} \quad (21)$$

由式(7)  $\theta_{01} = 0.41 \times 10^{-4}$ , 当  $\Delta = 1$  mm 时可计算  $Z = 0.08 \mu\text{m}$ ,  $Z = 1.28 \mu\text{m}$  对测量误差的影响可以忽略。可见本系统设计的半导体激光扩束系统可以克服动态运行中抖动对测量误差的影响。另外由于光束发散角小, 同时克服了斜光束造成的被测表面定位误差  $\delta^{[4]}$

$$\delta = \frac{R\theta_{01}}{6} \quad (22)$$

$R$  为被测线直径, 当  $R = 0.5$  mm 时,  $\delta = 0.034 \mu\text{m}$ 。

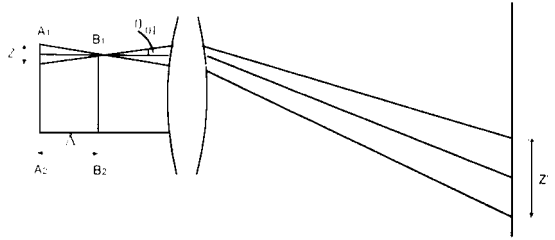


Fig. 4 Dispersive spot of the measured line deviated from alignment

Table. 1 Experimental data comparison between dynamic and static measuring on a line

|               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R$ (dynamic) | 0.245 | 0.246 | 0.248 | 0.251 | 0.254 | 0.254 | 0.255 | 0.257 | 0.258 | 0.258 |
| $R$ (static)  | 0.245 | 0.247 | 0.248 | 0.252 | 0.255 | 0.254 | 0.255 | 0.256 | 0.257 | 0.258 |

整机装置在电线厂漆包线生产线上进行实验, 动态运行情况下使用本机测量线径值, 同时停机静态用千分尺对照测量。得到实验对照数据如表1所示(单位: mm)。整机线径测量范围  $30 \mu\text{m} \sim 800 \mu\text{m}$ , 允许被测线动态运行速度  $100 \text{ m/min}$ , 测量误差  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] Xing X Z, LI M, Ozono S. High Accuracy Microdiameter Measurement System by Using a Laser and a CCD. Measurement, 1987, 5(2): 91 ~ 95
- [2] Guiraes M F, Doiron T D. High-speed High-resolution Fine Wire Diameter Measurement System. Proc SPIE, 1993, 2066: 124 ~ 132
- [3] Shi D, Xing X, Wolbarsht M L. Influence of Vibration on Microdiameter Measurement Using a Laser CCD System. App. Opt, 1993, 32(13): 2304 ~ 2311
- [4] 徐家骅. 计量工程光学. 北京: 机械工业出版社, 1981, 175 ~ 271

## Laser-CCD System for Real-time, Non-contact and Dynamic Measurement of Diameter of Wire

Lin Qirong, Xie Shusen, Zhou Chuanzhao, Li Buhong, Zheng Wei, Li Hui  
(*Institute of Laser, Fujian Normal University, Fuzhou 350007*)

### Abstract

The non-diffracted laser-CCD measuring of diameter of a wire can not by now obtain practical use because of the failure of the practical method to overcome the measurement errors caused by non-linear deformation of optical lens. The auto-amendment method for measurement errors by microcomputer presented in this paper can solve this problem effectively. On this basis, a measurement of diameter of a wire with advantages of small volume, low cost, wide measuring range and high precision has been produced. Our system will solve the problem of real-time, non-contact and dynamic measurement of diameter of a wire especially in the real manufacturing line of enamelled wire.

**Key words:** Measurement of diameter of a wire; On line detection, Error amendment by microcomputer

**林棋榕** 1938年出生。1960年毕业于海军电子工程学院, 现任福建师范大学激光研究室主任。长期从事光电检测的光、机、电、计一体化领域的研究工作, 取得多项研究成果, 先后完成激光—CCD 线径动态检测仪、光电扫描式医用血球数仪和激光荧光医用图像处理系统的研制工作。