

CCD 激光衍射测径系统的标定方法

何丽桥¹, 高岩², 王国光¹

(1. 吉林大学 物理学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 化学学院, 长春 130022)

摘要:对测量细丝直径在 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 的电荷耦合器件激光衍射测径系统提出了两种新的标定方法,并对不同标定方法下的系统进行了测试对比。结果表明,选择恰当的标定方法可以使系统测量精度达到 $0.15\ \mu\text{m}$ 。

关键词:光电子学与激光技术;电荷耦合器件;激光衍射;标定方法;细丝

中图分类号: TN241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2008)Sup. -0182-03

Calibration method for CCD laser diffraction filament diameter measurement system

He Li-qiao¹, Gao Yan², Wang Guo-guang¹

(1. College of Physics, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Two new calibration methods for the charge coupled device (CCD) laser diffraction system to measure the filament diameter in the range of $10\sim 40\ \mu\text{m}$ were proposed, and the systems with different calibration methods were tested comparatively. The results show that the system accuracy can reach $0.15\ \mu\text{m}$ under appropriate calibration.

Key words: optoelectronics and laser; charge coupled device (CCD) laser diffraction; calibration method; filament

激光衍射计量法是细丝直径精密测量方法中最重要的测径方法^[1,2]。目前,衍射法测量细丝直径的理论已经成熟,但在实际应用中仍存在着一定的困难。当被测丝直径极小(十几微米)时,衍射条纹较宽,衍射图样微弱,衍射图样锐度不大造成了暗条纹位置不明显,尤其是五级以上的暗条纹几乎无法用线阵 CCD 接收,因此级数较高的暗纹中心位置难以确定^[3]。传统的标定方法需要取多个(至少两个)暗纹中心位置计算衍射条纹间距,利用条纹间距与细丝直径成反比的关系来标定系统。当级数较高的暗条纹中心难以确定,或确定精度不高时,用这种标定方法势必会影响整

个系统的测量精度。

针对测量粘胶长丝直径尺寸为 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 的 CCD 激光衍射测径系统,根据衍射条纹的暗级位置与细丝直径的关系,利用衍射公式推导出两种新的标定方法。实验结果表明,两种新的标定方法都能提高系统精度。

1 测量原理

1.1 激光衍射测量原理

如图 1 所示,基于巴俾涅定理:两个互补障碍物的夫朗和费衍射图形、光强分布相同,位相差 $\pi/2$ ^[4]。因此,利用狭缝的夫朗和费衍射演示公

收稿日期:2007-04-25.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040183024).

作者简介:何丽桥(1959-),女,副教授.研究方向:光学图像处理. E-mail: heliqiao@jlu.edu.cn

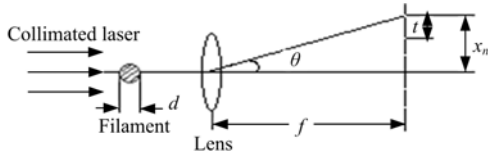


图 1 细丝衍射示意图

Fig. 1 Diagram of filament diffraction

式,得出细丝直径为 d 时的暗纹条件是

$$d \sin \theta = n \lambda, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

由几何关系可知

$$\sin \theta = x_n / \sqrt{x_n^2 + f^2}$$

式中: x_n 表示第 n 级暗条纹距衍射场中心的距离; f 为透镜焦距。

于是

$$d = n \lambda \sqrt{x_n^2 + f^2} / x_n \quad (2)$$

当 $f \gg x_n$ 时

$$d = n \lambda f / x_n, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

设 $x_n/n = t$ (t 为衍射条纹的间隔), 则有

$$d = \lambda f / t \quad (4)$$

1.2 曲线拟合法确定暗纹位置

为确定衍射条纹最小值位置,利用最小二乘法对暗纹附近 CCD 光敏元序列做二次曲线拟合,将 CCD 光电转换响应与光敏元序数之间的离散数据转变为连续函数。在此基础上,确定出拟合函数的极值位置,以此作为暗纹出现的位置^[5]。

设拟合函数为

$$V(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (5)$$

欲使 $V(x)$ 与测量值拟合最佳,要求节点 x_i 处回归值 $V(x_i)$ 与实测值 V_{xi} 的偏差平方和

$$S(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^N [V_{xi} - V(x_i)]^2 \quad (6)$$

取极小值。式中 $i=1, 2, \dots, N$, N 是衍射暗纹区域内的光敏元数目。

通过选择 a_k , 使

$$\partial S / \partial a_k = 0, \quad k = 0, 1, 2 \quad (7)$$

于是有如下方程

$$\begin{bmatrix} N & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum V_{xi} \\ \sum V_{xi} x_i \\ \sum V_{xi} x_i^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由该方程解出拟合多项式的系数 a_0, a_1, a_2 。

衍射条纹的暗纹中心应落在光敏元响应拟合

函数 $V(x)$ 的极小值处,满足 $\left. \frac{dV(x)}{dx} \right|_{x=X} = 0$, 得

$$X = -a_1 / (2a_2) \quad (9)$$

图 2 是细丝直径为 $37.27 \mu\text{m}$ 的衍射条纹第一暗纹的拟合曲线。

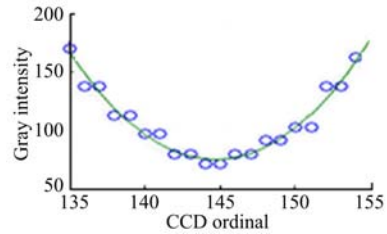


图 2 二次曲线拟合例图

Fig. 2 Conic matching example

1.3 系统结构

系统结构如图 3 所示。半导体激光经准直系统后,照射在被测细丝上形成衍射光,再由透镜收集,在透镜后焦平面的线阵 CCD 上形成衍射图样。在 CCD 前面放置与光轴同心的不透明掩模,用于防止中心线的饱和。CCD 通过光电转换,再经过数据采集把电信号传至微机中进行处理运算^[6]。系统采用像元数 2048 的线阵 CCD,像元间距为 $14 \mu\text{m}$ 。

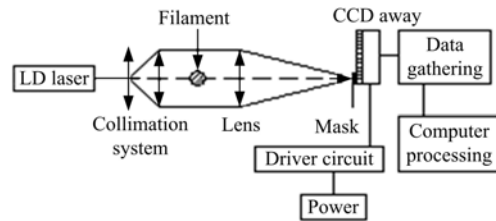


图 3 系统结构示意图

Fig. 3 Diagram of system structure

2 系统标定

标定方法 I 利用条纹间隔进行标定(传统标定方法)

根据式(4)确立标定公式

$$d = a/t + b \quad (10)$$

式中: a, b 是待定系数。

d 与 $1/t$ 成线性关系,做线性拟合求得 a, b 。

标定方法 II 利用暗条纹位置进行线性近似标定

式(3)中,设 $x_n = x + \Delta x$, x 为第 n 级暗条纹距 CCD 下边缘距离, Δx 为偏差。对同一级暗条纹确立标定公式

$$d = a/(x - b) \quad (11)$$

x 与 $1/d$ 成线性关系,做线性拟合得参数 a, b 。

标定方法Ⅲ 利用暗条纹位置进行曲线拟合
标定

将式(2)两侧取平方,经整理可确立标定公式

$$d = \sqrt{1/D + n^2 \lambda^2} \quad (12)$$

式中: $D = x_n^2 / (n^2 \lambda^2 f^2)$,对同一级暗条纹确立 D 与暗纹位置 x 的拟合公式如下

$$D = ax^2 + bx + c \quad (13)$$

取 5 根标准细丝,利用设计的测量系统进行有关参数的测量和处理,得到相关数据列于表 1。

表 1 标定用数据

Table 1 Data for demarcating

Sample	$d/\mu\text{m}$	t	x
1	12.73	414.54	416.04
2	25.46	218.33	220.30
3	15.67	346.53	347.33
4	31.57	173.38	174.82
5	37.27	143.36	145.94

利用表 1 中数据,根据上述三种标定方法,确立系统计算细丝直径公式如下

$$d_{\text{I}} = 5577.1/t + 0.0848$$

$$d_{\text{II}} = 5216.8/(x - 10.318)$$

$$d_{\text{III}} = [(4.9122 \times 10^{-8} x^2 - 7.519 \times 10^{-6} x + 7.9622 \times 10^{-4})^{-1} + 0.4007]^{1/2}$$

系统中激光中心波长 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$,方法 II、III 取第一暗纹位置,拟合曲线如图 4。

3 实验数据分析

选取 4 根细丝,利用 40 倍高精度测量显微镜测量其直径,为真实值 d_0 。分别利用上述三种标定方法确定的细丝计算公式进行测量比对和误差分析,具体数据见表 2。

表 2 实验数据

Table 2 Experimental data

细丝直径 $d/\mu\text{m}$	标定方法 I		标定方法 II		标定方法 III	
	d_1	$E_a/\% E_r/\%$	d_2	$E_a/\% E_r/\%$	d_3	$E_a/\% E_r/\%$
27.28	26.89	0.39 1.4	26.95	0.33 1.2	27.42	0.14 0.5
16.80	17.21	0.41 2.4	16.59	0.21 1.3	16.74	0.06 0.3
18.00	18.33	0.33 1.8	17.69	0.31 1.7	17.88	0.12 0.7
10.70	10.41	0.29 2.7	10.90	0.20 1.9	10.70	0.00 0.0

注: E_a 为绝对误差, E_r 为相对误差。

由表 2 可见,利用方法 I 标定的系统测量细丝直径的相对误差高于 2%,其主要原因是:为了计算条纹间距 t ,进行了两次二次曲线拟合确定

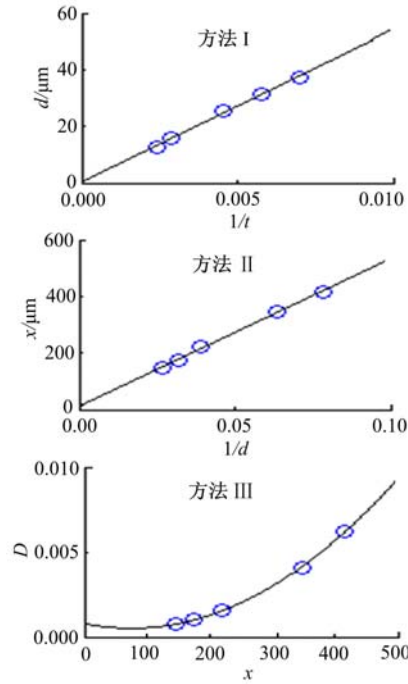


图 4 三种方法标定系统的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of three kinds of calibrating methods

暗纹中心。由于级数较高的暗条纹位置不明显,在确定其中心时会产生一定的偏差。而利用方法 II、III 标定的系统测量,精度明显提高,相对误差低于 2%,尤其是用方法 III,标定的系统精度达到 $0.15 \mu\text{m}$,系统相对误差不高于 1%。

参考文献:

[1] Moore E M, Shamhaugh R L, Papavassiliou D V. Ensemble laser diffraction for online measurement of fiber diameter distribution during the melt blowing process [J]. INJ Summer, 2004, 13(2): 44-47.

[2] He X F, Liu W Y, Xu S D. Measurement of cotton fiber length distribution by large CCD-Array [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005, 16(7): 821-824.

[3] Zhao B, Yan W B. Measurement of wire diameter by two point sources projection [J]. Optics and Precision Engineering, 11(20): 171-175.

[4] Sun D Y, Zhou G X, Liu D. Measurement of filament by diffraction method. instrument [J]. Technique and Sensor, 2002(5): 21-23.

[5] Zhang Y. Two Improving methods of object orientation precision by CCDs [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2003, 14(10): 1118-1120.

[6] Zhang S B, Wang Q Y, Guo Qing. A study on target size automation measurement using color linear CCD [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 12(11): 1159-1161.