

文章编号 1004-924X(2003)02-0171-05

双光源投影法细丝直径测量

赵斌, 颜伟彬

(华中科技大学机械科学与工程学院仪器系, 湖北武汉430074)

摘要:提出一种细丝直径在线测量方法,利用半导体激光作为点光源,发出球面波;通过细丝后在其后菲涅耳衍射区留下阴影,测量阴影宽度可得细丝直径;同时,利用两个相距一定距离的点光源对同一细丝投影,测量两个投影之间的距离可得细丝位置的晃动量,从而校正直径测量值。

关键词:在线直径测量;投影;半导体激光;点光源

中图分类号: TB92 **文献标识码:** A

Measurement of wire diameter by two point sources projection

ZHAO Bin, YAN Wei-bin

(Department of Instrumentation, School of Mechanical Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the new wire diameter online measurement system proposed, laser diode was used as the point light source to emit spheric waves passing through a wire. The diameter of a thin wire was obtained by measuring the shadow in the Fresnel diffraction zone. Two point sources at some distance were used to generate two shadows of the same wire at the same time and the deviation of the wire can be determined by the distance between the two shadows so that the wire diameter can be calibrated.

Key words: online measurement; projection; laser diode; point light source

1 引言

线材直径的在线测量是普遍的生产需求,例如金属导线的测量,纺织线、塑料线的测量等。目前线材直径的测量有光电能量法^[1]、激光束扫描法^[2-4]、激光衍射法^[5]、投影成像法^[6-7]等。各种方法都有各自的适用范围和优缺点。光电能量法受光源和探测器飘移影响大。激光束扫描法适用于直径大于1 mm的线材。衍射法适用于直径小于0.1 mm的线材(如光纤)。投影成像法就是将被测物成像到一个屏上,再测量屏上的阴影尺寸;理论上适应各种直径范围,但若用平行激光照明,

则存在准直透镜球差所导致的误差,若用非相干光照明,则为解决离焦晃动问题,需要用远心光路,且仍存在离焦像边缘判断精度不高的问题。

提出一种双光源直接投影法,它不需要成像光学透镜系统,直接测量扩展后阴影的尺寸,并且,利用自带的长度基准可补偿离焦晃动的影响,可用于直径0.1~1 mm的测量。

2 原理

图1为细丝对点光源所发出球面波的直接投影示意图;显然,由于细丝对光源的张角很小,阴影的宽度与细丝的直径是成正比的。

收稿日期:2002-09-17;修订日期:2003-01-17.

基金项目:国家自然科学基金(No. 59805006)

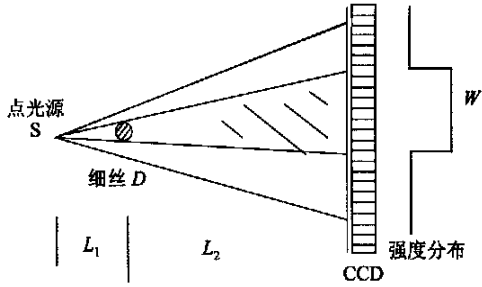


图 1 点光源投影示意图

Fig.1 Schematic diagram of point source projection

由于从光源 S 到探测器 CCD 之间没有任何其他物体,所以,从几何光学的角度出发,细丝直径 D 与投影宽度 W 之间有一简单的关系:

$$\frac{W}{D} = \frac{L_1 + L_2}{L_1}, \quad (1)$$

这是一种非常简单的光学放大关系。它以最简捷的形式获得了相当大的放大倍数;如果细丝的位置在测量过程中保持不变,则经过一次标定后,探测器就可以正确测量细丝的直径。然而,在实际的生产过程中,细丝往往是晃动的,而且往往不允许用接触的方法来固定细丝的位置,这就导致 L_1 的变化,因而测量就不准确;这是经常遇到的被测物体离焦难题。

在普通的光学成像测径方法中,当光学放大倍数不是很大时,为解决离焦问题,可以采用远心光路,即将光阑放置在成像透镜的焦点处。这时离焦后主光线的方向不变,主光线与像面交点不变,这时离焦所导致的光点弥散斑是以主光线交点为中心的对称图形,可以用卷积来处理直边缘的扩展问题。但当光学放大倍数很大时,相同离焦量所导致的光点弥散显著增大,由于几何像差和物体照度本身不均匀等,各视场的弥散斑光强分布难以预测,且不可能完全相同,这就使得直边弥散像的实际光强分布不能用卷积来处理,而如果仍用卷积处理的结论来计算直边的位置,必然会带来误差。

为了解决此问题,提出一种双点光源投影的方案。其基本思路如下:

如果在测量信号中,不仅含有细丝直径信息,也含有细丝位置信息,则可以纠正测量误差。

在图 2 中,原来一个点光源变为两个相距 H 的点光源,则他们各自将产生各自的细丝投影。

这两个投影在探测器上的分布有两种可能,一是部分重合在一起,形成一阶梯状的光强分布(图 2);另一是阴影完全分离(图 3)。

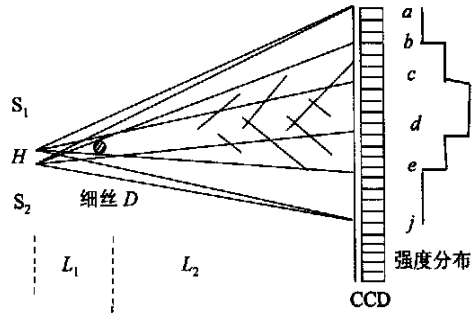


图 2 阴影部分重叠的情况

Fig.2 Overlap of shadows

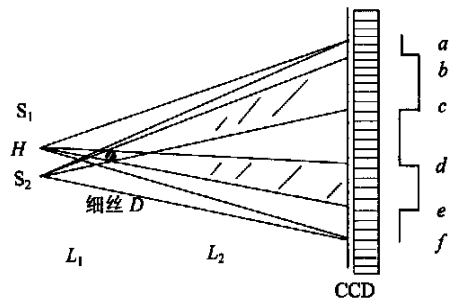


图 3 阴影完全分离的情况

Fig.3 Total separation of shadows

在图 2 中, cd 段是阴影重合的部分, bc 和 de 段是单阴影部分; bd 段和 ce 段都对应细丝的直径,且他们等于:

$$bd = ce = D \frac{L_1 + L_2}{L_1}, \quad (2)$$

而 b 点和 c 点对应细丝的同一条边,其宽度由两点光源间距和细丝位置决定:

$$bc = de = H \frac{L_2}{L_1}, \quad (3)$$

如果已知 H ,则可以根据 bd 、 bc 求出 D

$$D = bd / (1 + bc/H) = W / (1 + h/H), \quad (4)$$

其中: $W = bd$ 、 $h = bc$ 。而 H 可以用一已知精确直径 D_0 的细丝来标定:

$$H = bc / (bd/D_0 - 1) = h / (W/D_0 - 1), \quad (5)$$

这样,当细丝在测量过程中存在一定晃动时,仍可

以根据所测得的阶梯状信号各段的宽度计算出细丝的直径。

对于图3的情形, b 和 d 点之间的距离对应细丝的位置:

$$bd = H \frac{L_2}{L_1}, \quad (6)$$

因为 $bc = de = W$, 将式(6)代入式(1)得

$$D = W / (1 + bd/H) = W / (1 + h/H), \quad (7)$$

其中: $h = bd$ 。同样, 可以用一已知精确直径 D_0 的细丝来标定:

$$H = h / (W/D_0 - 1), \quad (8)$$

由于 S_1 和 S_2 的距离 H 是固定不变的, 一旦确定, 它实际上就作为一个自带的长度基准。在工作中, 通过一种三角关系, 通过测量他们分别对细丝投影的距离, 可测出细丝晃动的轴向位置, 达到对细丝两个方向的测量; 这就是本方法的实质。

3 讨 论

以上推导是基于几何光学的。实际上细丝投影总是受衍射影响的; 不过, 由于所讨论之细丝的直径远大于激光的波长, 而且投影距离也不会太大, 故可以看成是非涅尔 fresnel 直边衍射。根据衍射理论^[8], 直边衍射的边缘位置在强度的 $1/4$ 处, 可据此来确定 bd 、 bc 。

近似理想点光源的实现可直接采用半导体激光器, 因为 LD 的发光区域尺寸在其大扩散角 (30°) 方向小于 $1 \mu\text{m}$, 所以完全可以作为理想点光源。任何采用透镜方法产生的点光源都难以避免像差 (即使采用多个球面镜或高精度非球面镜在理论上将球差校正, 仍可能存在装调像差), 从而偏离球面波, 造成投影的变化和测量误差。

双光源的实现可以直接用两个半导体激光器并列, 但由于单个 LD 总是有一定大小的, 故两光源间距无法很小。因此, 细丝投影会完全分离, 即第2种情况, 当光学放大倍数不需要很大时, 这种情况对信号处理有利。但当希望获得大的光学放大率时, 一方面光源距细丝不能太远, 因为那将导致细丝到探测器的距离 L_2 太长, 使系统尺寸太大, 且衍射效应可能进入夫朗和费 fraunhofer 区, 细丝阴影中部将出现衍射亮带, 阴影边缘的光强

分布也将发生变化, 这将造成测量误差; 另一方面, 这时若两光源相距过远, 则它们的投影也将分得很大, 从而超出 CCD 探测器范围。

为解决此问题, 就要得到小点光源间隔 H , 可以采用双折射晶体来产生双光源 (如图4)。由于双折射, 球面波透过晶体平板后分解成两束球面波, 其中一束为寻常光, 另一束为非寻常光, 他们偏振方向相互垂直, 只是横向有一个错位, 错位量与晶体平板厚度成正比, 通过加工不同厚度的双折射晶体平板, 可以得到所需的点光源间隔。由于用这种方法可以得到很小的点光源间隔, 投影距离很长时, 两个阴影也不会分得过远, 这有利于得到大的投影放大率。

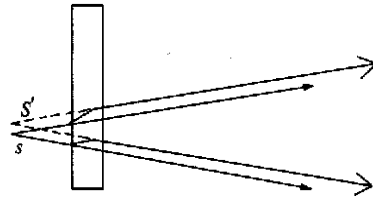


图4 用双折射晶体平板产生双点光源

Fig. 4 Generation of two point sources by birefringence crystal plate

4 实 验

实验采用两个半导体激光器。光路结构如图3, 光源到 CCD 距离约 220 mm, 细丝在 110 mm 左右范围移动。所测细丝直径分别为 0.15、0.4 和 0.6 mm, 其中 0.4 mm 的实验结果示于图5。图5中各曲线依次为被测细丝朝向 CCD 探测器移动 5 mm 后的投影强度测量曲线。其中两阴影之间的高频光强度起伏是由于难以避免的杂散光造成的激光散斑影响, 这说明如果有合适的高亮度非相干点光源效果将会更好。

经数据处理后可以得到两个阴影的平均宽度 W 和中心距 h 。图6为 $W-h$ 曲线, 其中的三条曲线分别对应直径 $\varphi = 0.15 \text{ mm}$ (O)、 0.45 mm (*)、 0.60 mm (∇) 的金属丝。式(7)是各参数间的基本关系, 变换后可得:

$$\frac{W}{D} = 1 + \frac{h}{H}, \quad (9)$$

即在细丝直径 D 和双光源间距 H 不变时, 不同位置处的 W 和 h 成线性关系, 因此, 可用此式检验实验数据。

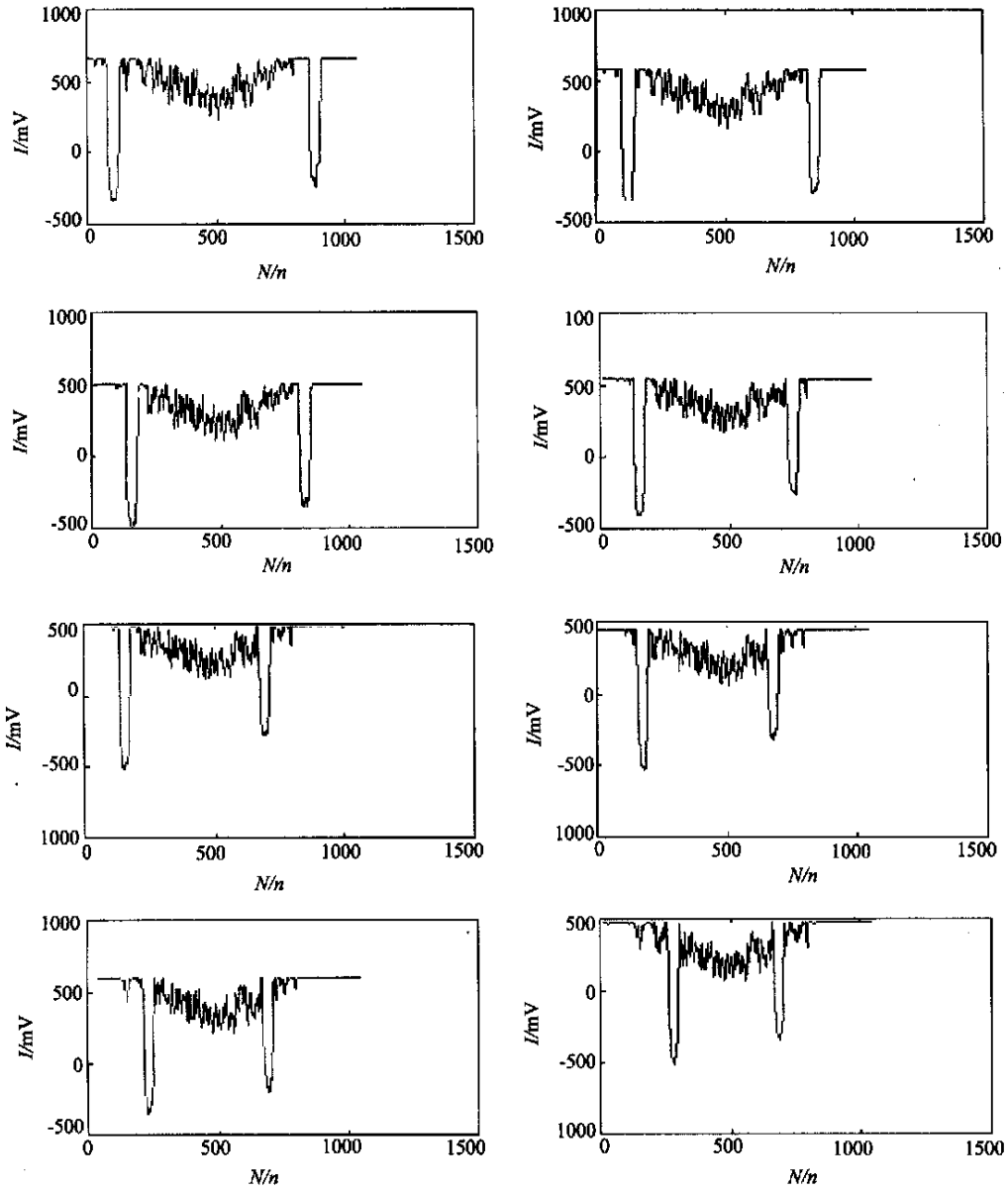


图 5 双光源不同位置细丝投影曲线
Fig. 5 Two point sources projection of wire at different positions

图 6 的实验曲线显示 $W-h$ 基本满足线性关系。

由于式(9)中只有两个参数 D 和 H , 可以用不同位置处所测得的 W 、 h 数据用线性拟合的方法计算出 D 和 H (单位是像素)。用这种方法, 由于数据量多且分散, 可以抑制单个位置测量数据所存在的衍射和散斑误差, 有利于提高测量数据的可靠性。

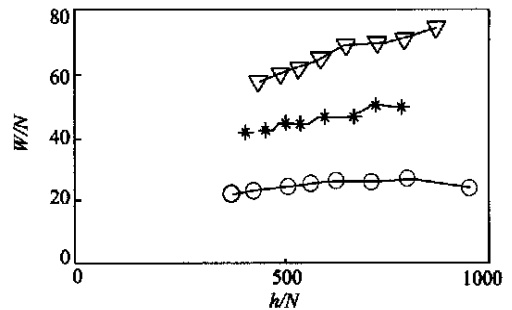


图 6 $W-h$ 关系曲线
Fig. 6 $W-h$ curves

图6中三条直线与纵坐标的交点就是 D 。分别约为43、33、18(像素), CCD每个像素为14 μm ,对应直径为0.602、0.462和0.252 mm。可见直径较大时测量值与实际值相符合,而当直径较小时,与 D 存在非线性,且直径越小,非线性越大,其原因是直径越小,衍射及其它影响越大。因此,一方面有必要深入地研究在接近夫朗和费衍射区的细丝衍射宽度计算问题,另一方面在实际应用中,必须先用标准件标定,然后对实际测量数据进行非线性校正。

图6中个别点对直线的偏差与激光衍射、散斑、CCD探测器的噪声和非线性等有关,因此在实用设计时,一定要在光源强度匹配、杂散光消

除、电路线性等方面仔细考虑。

由于本实验中细丝移动范围达40 mm,理论上完全可以满足实际生产中对晃动细丝的在线测量。当然,要作实用设计,还需对系统各环节结构和参数进行全面的分析。

5 结 论

采用点光源直接投影法测量细丝的直径,不需透镜即可得到大的光学放大率;采用双点光源投影,可以测量细丝的轴向晃动,校正投影测量结果,消除晃动的影响,实现在线测量。

参考文献:

- [1] 秦积荣. 光电检测原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1987.
QIN J R. *Principle and application of opto-electronical testing* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1987. (in Chinese)
- [2] 吕海宝. 激光光电检测[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2000.
LU H B. *Laser opto-elctronical testing* [M]. Changsha: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [3] 王海清. 激光测径仪在高速线材生产线上应用的可行性分析[J]. 钢铁, 1994, 29(8): 64-67.
WANG H Q. Feasibility analysis of laser gauge applied on hight speed wire rod production line[J]. *Iron and Steel*, 1994, 29(8): 64-67. (in Chinese)
- [4] 李承志. 钢管在线动态激光测径仪测量精度分析[J]. 钢管, 1995, (1): 50-52.
LI CH ZH. Analysis of measurement accuracy of laser gauge for steel pipe in - line dynamic diameter measurement [J]. *Steel Pipe*, 1995, (1): 50-52. (in Chinese)
- [5] 张凤生, 刘冲. 高精度激光衍射测径系统[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 149-151.
ZHANG F SH, LIU CH. Superprecision laser diffraction measuring system for fine diameter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(3): 149-151. (in Chinese)
- [6] 李为民, 俞巧云, 裘凌红. 投影法 CCD 测径系统[J]. 仪表技术与传感器, 2001, (1): 35-39.
LI W M, YU Q H, PEIL H. Projection method of diameter measurement system with CCD [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2001, (1): 35-39. (in Chinese)
- [7] 林棋榕. 激光—CCD 实时、无接触、动态线径测量的研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(2): 109-115.
LIN Q R Laser-CCD system for real-time, Non-contact and dynamic measurement of diameter of wire [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(2): 109-115.
- [8] GHATAK A K, THYAGRAJAN K. 近代光学[M]. 北京:高等教育出版社, 1987.
GHATAK A K, THYAGRAJAN K. *Contemporary optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987. (in Chinese)

作者简介:赵斌(1963-),男,江西人,1995年获华中理工大学博士学位,现为华中科技大学仪器系副教授,从事光学精密测量研究。