

激光衍射法测量细丝线径的研究

李彦明 魏晓丽 高福华

(吉林工业大学)

摘要 探讨了用激光衍射测量细线直径的方法。提出了一种适用于在线测量不透明细线直径的新方法。本方法的原理是基于取得激光衍射图上两相邻暗点之间的距离的光信息并加以处理。应用了CCD、单片机等先进技术,以取得准确、可靠及预定的测量。

一、引言

随着生产和科技的日益发展,对细丝线径进行非接触高精度动态测量的要求越来越迫切。以往对直径 $100\mu\text{m}$ 以下细丝线径的测量,往往采用普通的光学量仪或用电子测微计等手段,其测量误差大,不易实现在线测量;而激光衍射法是一种高精度的非接触测量方法。本文对几种行之有效的激光衍射图样的接收手段和快速计算处理方法加以探讨。

二、用细丝代替单缝的衍射原理

根据夫琅和费衍射理论和互补定理,当激光照射在狭缝 AB 上,如图1所示,在接收屏上形成衍射条纹。衍射光强表达式为:

$$I = I_0 \frac{\sin^2(\pi b \sin\varphi)}{\left(\frac{\pi b \sin\varphi}{\lambda}\right)^2} \quad (1)$$

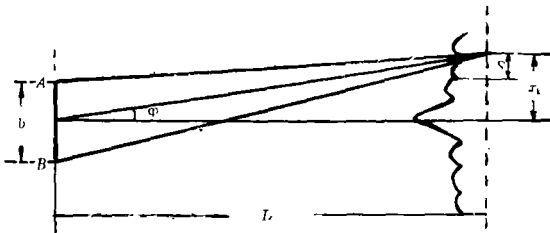


图1 单缝的衍射

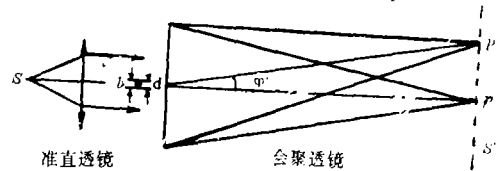


图2 细丝的衍射

式中: I_0 ——中心亮条纹中点光强

当满足夫琅和费衍射条件: $L \gg \frac{b^2}{\lambda}$ 时,且当衍射角 $\varphi \rightarrow 0$ 时: $\sin\varphi = \text{tg}\varphi = \frac{x_k}{L}$

对暗条纹有:

$$b \sin\varphi = b \frac{x_k}{L} = k\lambda \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

$$b = kL\lambda/x_k = L\lambda/s \quad (3)$$

若用窄光束垂直射向细丝时, 其衍射图样如图 2 所示。

d 表示细丝直径, 在激光束后面放上细丝观察屏幕上 P 点的振幅 Y_p' , 若将细丝换成缝宽为 b ($b = d$), 则 P 点振幅 Y_p'' , 设 Y_p 表示不放置任何障碍物时 P 点的振幅, 显然, 细丝障碍和单缝障碍加起来正好等于整个全平面。即 $Y_p = Y_p' + Y_p''$ 。则细丝衍射时 P 点的振幅 $Y_p' = Y_p - Y_p''$ 。

Y_p 除在会聚透镜焦点处 (即 P_0 点) 有一亮点, 其余场等于零。因此在细丝衍射时, 对于观察屏幕 P_0 点以外所有点。其振幅为:

$$Y_p' = -Y_p'' \quad (4)$$

$$\text{即 } |Y_p'|^2 = |Y_p''|^2 \quad (5)$$

所以除 P_0 点外, 诸点的光强分布均有:

$$I_p' = I_p'' \quad (6)$$

这说明, 除 P_0 点外, 细丝 (直径为 d) 的衍射和单缝衍射 (缝宽为 b) 具有相同的衍射图样。因此我们可以直接利用夫琅和费衍射原理同测量缝宽一样的方法测量细丝线径, 将 (3) b 换成 d 。

$$\text{即 } d = L\lambda/S \quad (7)$$

式中: L ——接收平面与被测细丝的距离

S ——衍射图样中两相邻暗点之间距离

λ ——激光波长, He-Ne 激光为 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$

若采用 He-Ne 激光器作为光源, 可以省去准直透镜, 因为从激光器中发出的光已极近于平行光。而且当观察屏离开细丝足够远时, 即当 $L \gg d^2/\lambda$, 不使用会聚透镜也可以近似认为是夫琅和费衍射。此种方法只适用于 $d = 0.5 \text{ mm}$ 以下的细丝。

三、用 CCD (电荷耦合器件) 接收衍射图样

激光与 CCD 相结合测量细丝线径方法, 现已获得普遍的重视。激光衍射法的基础是利用其衍射图样中光强的大小及所在位置与被测线径之间的函数关系。在能反映光强大小与位置的各类光电器件中, 由于 CCD 具有高精度, 高分辨率, 自扫描, 能够存贮信息与转换光学信息等一系列优点。故在测量直径在 (20—100) μm 之间的金属细丝线径中, 多采用 CCD 这样光电器件。

目前对激光衍射法——CCD 输出信号的处理方法比较典型的有以下几种:

1. 傅立叶变换——频谱分析法

所谓傅立叶变换——频谱分析法即 CCD 接收到的是前焦面光场复振幅的傅立叶变换的频谱。其方法如图 3 所示。

根据傅氏光学, 在后焦面 (频谱面) 上的光场复振幅分布为前焦面 (输入面) 光场振幅的傅氏变换。

为求相邻两暗点间距离 S 。在频谱面放置 CCD 器件, 它将光强信号转变为电压信号, 将该电压信号输入到电压比较器, 将 $\sin^2 C^2$ 函数转换为一系列相应的方波。波形图如图 4 所示。

U_0 ——比较电平

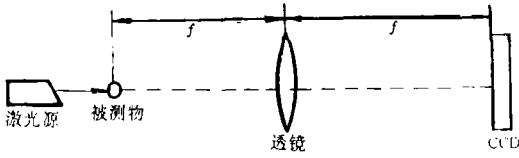


图3 傅氏变换——频谱分析法

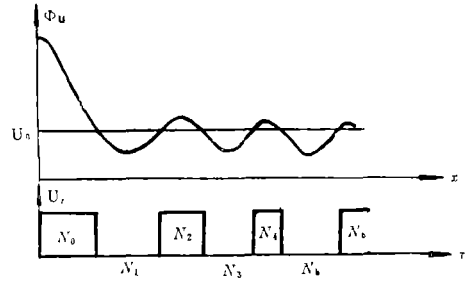


图4 傅氏变换——频谱分析法波形图

$N_1, N_3, N_5 \dots$ 为方波各间距中 CCD 复位脉冲数目

$N_0, N_2, N_4 \dots$ 为方波中的复位脉冲数, x 坐标为光敏元数表示。

经过一定的门电路及计数器, 得到各方波及方波间距内 CCD 复位脉冲 φ_k 的脉冲数 (它的一个脉冲对应于一个光敏元), 将相邻面方波的中点看作暗点, 则有:

$$KS = \left(\frac{1}{2}N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_{2k} + \frac{1}{2}N_{2k+1} \right) S_0 \quad (8)$$

$$= \left[\sum_{i=1}^{2K+1} N_i - \frac{1}{2}(N_1 + N_{2k+1}) \right] S_0$$

$$S = \frac{S_0}{K} \left[\sum_{i=1}^{2K+1} N_i - \frac{1}{2}(N_1 + N_{2k+1}) \right] \quad (9)$$

式中 K 为暗点间距的倍数, S_0 为 CCD 一个光敏元大小。

为了测 N_i 需一定的门电路及计数器, 图 5 为测量原理图。将测得的 N_i 通过接口电路输入给微机, 即可显示和记录线径数值。

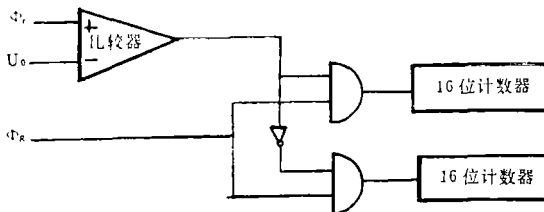


图5 测量原理图

用傅氏变换—频谱分析法来处理 CCD 输出信号具有一定的优点, 即整个测量系统硬件简单, 抗干扰能力强。其缺点是: (1) 微机处理软件比较复杂。(2) 由于切割电平 (比较电平 U_0) 不易选择适当, 所以误差较大, 并且由于是固定电平切割, 光源波动及电源干扰难以排除。(3) CCD 接收的 \sin^2 函数 (衍射信号) 范围越宽明暗之间界限越不明显, 使微机系统难以接收。

2. 自相关法

衍射图样——自相关法就是将衍射图样的光强信号转化为离散的数字信号, 再由微机作快速傅立叶反变换 (IFFT) 而得到细丝衍射场分布的自相关函数, 其在 τ 轴上的截距就是测量直径 d , 其图形如图 6 所示。

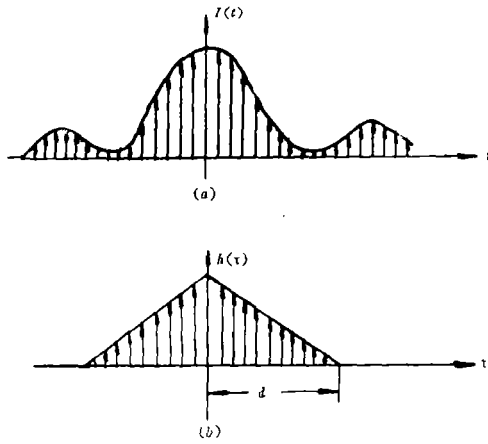


图6 (a) 光强的离散采样
(b) $I(x)$ 的傅氏反变换函数

激光束垂直照在细丝（线径为 d ）上，在接收屏上产生衍射图样，零级条纹附近光强由 CCD 接收，CCD 输出信号经低通滤波器后送入采样保持电路。再送微机系统进行处理。并且显示和记录细丝线径值。其测量系统框图如图 7 所示。

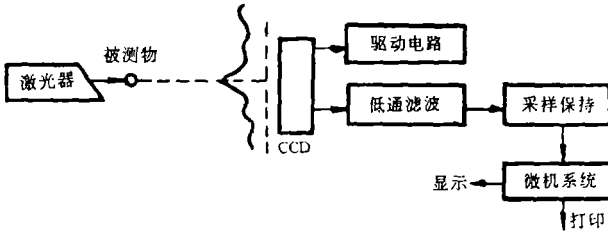


图7 测量系统原理框图

用衍射图样——自相关法来处理 CCD 输出优点是它充分利用了 CCD 接收的全部信息。缺点是（1）零级光强影响 CCD 对其它级的接收。（2）进行 IFFT 需要时间较长，不适合实时动态测量。（3）软件复杂不适用于单片（板）机处理。

3. 曲线拟合法

所谓曲线拟合法即是用多项式曲线以最小二乘法条件拟合所采集的数据，再求得曲线的峰值点坐标为衍射图形的暗点位置来计算细丝线径。将 CCD 固定在标尺上，置于衍射图样中如图 8 所示的位置。将 CCD 输出信号经低通滤波器，A/D 转换最后送微机系统进行数据处理。

$$d = n\lambda \left(1 + \frac{L^2}{x_n^2}\right) \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \because 2x_n &= T + T_{1n} - T_{2n} \\ &= T + (N_{1n} - N_{2n})S_0 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\text{故 } x_n = \frac{T + (N_{1n} - N_{2n}) \cdot S_0}{2} \tag{12}$$

式中： L 为细丝到 CCD 之间的距离， n 为暗点级数， x_n 为 n 级暗点坐标，

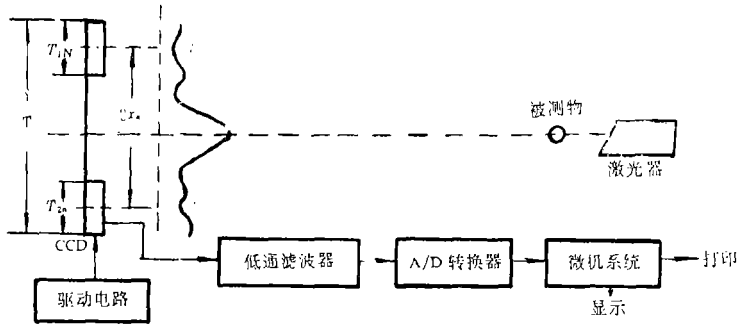


图8 曲线拟合法测量原理框图

S_0 为CCD光敏元大小, N_{1n}, N_{2n} 为暗点到CCD一端的脉冲个数

曲线拟合法优点为测量精度高, 缺点为软件处理比较复杂。使用单片(板)机进行实时在线测量比较困难。

4. 谷点间距法

以上论述三种方法各有所长, 各有利弊。我们采纳了上述方法的优点, 结合自己具体情况, 总结出一种新型衍射图样 CCD 信号处理电路, 建立了模数结合, 软硬件结合的信号处理方法, 即谷点间距法。它具有较高精度和较为简单的硬件电路及简便的软件处理。

我们选定衍射图样中第二级和第三级暗点(谷点)之间的距离作为 S 。这是因为当衍射图样的级数升高时, 亮区与暗区的对比度降低, 对 CCD 分辨不利; 而零级衍射条纹的光又太强, 会造成 CCD 的输出饱和之故。这样, 将 CCD 置于接收平面的 II、III、IV 级衍射条纹上, CCD 的输出就是和光强分布相一致的脉冲电压信号了。

图 9 为处理 CCD 输出信号的电路原理框图。从 CCD 输出的电压信号, 经过视频放大, 检波和滤波, 得到 CCD 输出脉冲电压的包络。对包络采用浮动二值化处理, 以消除由于激光光源不稳定、电源电压波动及 CCD 各光敏元对光强敏感的离散性等原因带来的干扰。图中 U_0 是浮动二值化的切割电平, ϕ_R 是外加的计数脉冲。

采用 8031 内部计数器计数并对数据进行处理, 就可得到所需间距 S 。

S 的计算公式为:

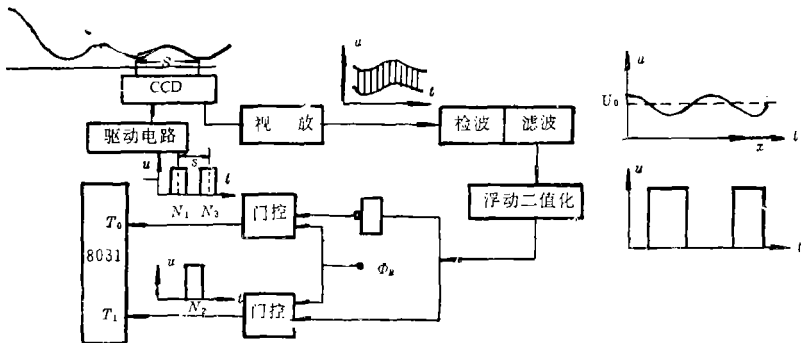


图9 CCD输出信号处理电路原理框图

$$S = \left(\frac{N_1 + N_3}{2} + N_2 \right) \cdot r \quad (\text{cm}) \quad (13)$$

式中, N_1, N_2, N_3 为相应输出方波中被填充 φ_n 高频脉冲数, r 为每个脉冲的尺寸当量。与 N_1 和 N_3 相应两方波的中点间的距离就是衍射图样中第 II、III 级条纹谷点间的距离 S 。

四、实 测 结 果

由公式 $d = L\lambda/S$ 可知, d 的测量精度与 L, λ 和 S 有关, 但当采用 He-Ne 激光光源, 用光栅尺标定 L, λ, L 对测量的精度的影响可以忽略。所以 d 的测量精度主要取决于测取的谷点间距 S 的精度。导致 S 产生误差理论上有下列几个因素: (1) 单缝和圆丝衍射图样的差异; (2) 衍射角的正弦 $\sin\theta$ 用 $\text{tg}\theta$ 代替引入的误差; (3) CCD 传感器分辨率的误差; (4) 重复性误差。我们在实际测量中采用稳定的电源、光源、精选元器件等措施, 完全可以满足一般细丝线径测量精度要求。下面表 1 是一组采用谷点法的实测数据。被测细丝 $d = 80\mu\text{m}$, 式 (13) 中 $r = 14\mu\text{m}$, 式 (7) 中 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ 。

表 1

组数	$\frac{N_1 + N_2 + N_3}{2}$	S (μm)	L (cm)	d (μm)	组数	$\frac{N_1 + N_3}{2} + N_2$	S (μm)	L (cm)	d (μm)
1	3EB	14 042	178.8	80.57	8	3F ₄	14 168	178.7	79.81
2	3EC	14 056	179.2	80.67	9	3F ₇	14 210	178.9	79.66
3	3FC	14 182	178.6	79.69	10	3F ₀	14 112	179.0	80.26
4	3EA	14 018	179.3	80.88	11	3F ₂	14 140	179.2	80.19
5	3FO	14 112	178.8	80.17	12	3F ₁	14 126	179.1	80.83
6	3EE	14 084	178.6	80.24	平均值	3F ₀	14 112	178.94	80.25
7	3EC	14 056	179.1	80.63					

从实测结果可知, 绝对误差不超过 $1\mu\text{m}$ 。

五、结 束 语

以上我们对用 CCD 接收衍射图样的四种方法进行了探讨, 指出了各自的优缺点。其中谷点法是一种具有足够测量精度的测量方法, 我们已将此种方法应用到实际中, 取得较好的效果。

Investigation on the Measurement of the Diameter of Fine Threads by Means of Laser Diffraction

Li Yanming, Wei Xiaoli and Gao Fuhua

Abstract

This paper presents the measurement method for the diameter of fine threads by means of laser diffraction. A new method suitable for

on-line measurement of the diameter of non-transparent fine threads is proposed. The principle of this method is based on the obtaining and processing of the optical informations of the distance between two successive dark points in the laser diffraction diagram. Advanced techniques and devices like CCD, chip microprocessor etc., are used to achieve precise, reliable and steady measurements.