

激光前向散射法高速测量 光导纤维直径

周鸣皋 周长文 王建军

(上海轻工业研究所)

提要: 本文叙述以 He-Ne 激光器作为光源, 应用光的前向散射法, 测量光导纤维直径, 并已研制成样机, 在有关工厂得到了实际应用。

High speed non-contact measurement of optical fiber diameter by forward scattering laser light

Zhou Minggao Zhou Changweng Wang Jianjun

(Light Industrial Research Institute, Shanghai)

Abstract: A prototype was developed and put into operation in factory for the measurement of optical fiber diameter by forward scattering light with He-Ne laser as light source.

Hulst 曾作了很好的论述^[1]。

一、引言

关于测量光纤直径的技术方案有扫描法、衍射法、横向干涉法和光的前向散射法等多种, 其中以光的散射法结构比较简单, 测量精度较高。

测出由物体所散射的光的振幅、相位、频率、方向以及相干条纹等, 就能在没有物理接触的情况下提供有关物体的一些特征和参数, 这可对不允许损坏、不接触、不变更物体本身的情况下进行高精度、高速度检验与测量。在科学上, 工业生产上具有很大的吸引力。

光的散射理论早在 1974 年 Van de

二、直径测量要求

在光导纤维拉制的过程中, 包括加热圆柱形石英玻璃棒(坯棒), 当它达到坯棒软化温度时, 就拉出石英细丝——光导纤维, 光纤直径 d_f , 由物质守恒所决定, 在稳定状态时

$$d_f = (V_p d_p^2) / (V_f) \quad (1)$$

这里, V_p 是插入加热区的石英坯棒的进给速度; d_p 是坯棒的直径; V_f 是光纤拉丝的速度。在时间上要求状态稳定是重要的, 有时因有局部的不规则起伏变化, 加之 d_p 不可能是常数, 因此为了要拉制出高精度尺寸的光

收稿日期: 1979 年 11 月 20 日。

纤，在拉丝过程中自动控制光纤线径尺寸是必不可缺的。

可以估算，如果光纤直径要求保持在 $\pm 1\%$ 的公差内，光纤的拉制速度为1米/秒，则直径的测量系统的精度应至少为 $\pm 0.3\%$ 。而测量速率大于100赫。此外除光纤在线测量时必须不接触外，应允许光纤在一定范围内可自由移动而不影响测量精度。

三、测量光纤直径的方法

A. 前向散射原理简述 图1是光纤坐标轴的图解，光纤的轴是 z 轴方向，由正向入射的单色平面波是 x 轴方向，与 x 轴正交的是 y 轴。散射角是 θ ，用于描述光的散射，典型的光纤直径是100~150微米。当 $\theta=0^\circ$ 时的光散射是前向散射，而 $\theta=180^\circ$ 是后向散射，光纤芯子半径为 a ，它的折射率为 m_2 。光纤的包层(外)半径为 b ，其折射率为 m_1 。

图2是光纤光路截面图，显然散射角 θ 包有二路主要光线，一路是通过光纤的折射光，另一路是从它表面的反射光。这两路光以同样的角度离开光纤，在远场中两束光发

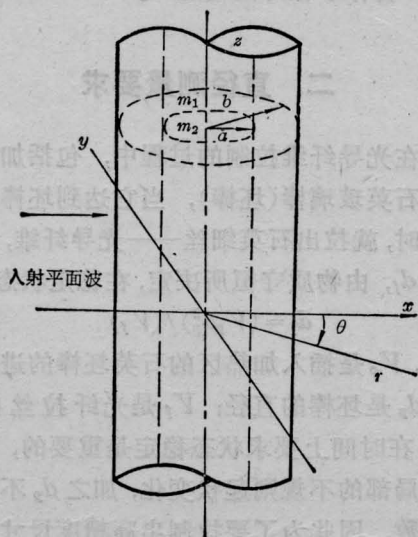


图1 光纤纤维的坐标轴

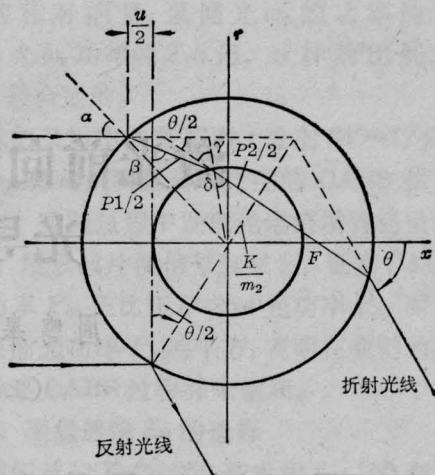


图2 光纤光路截面图

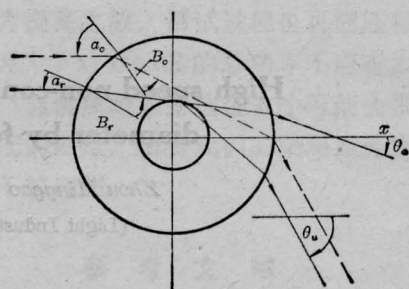


图3 光纤光路截面图

生干涉。图3为当两路折射光横向经过光纤时，有一角度范围，而以同样的散射角离开光纤。光路之一是经过光纤的芯子和包层(叫芯子光路)，另一只经过包层(包层光路)，而在一定角度范围内这二光路在远场中干涉。

B. 光导纤维的散射图样

为了测量光纤外径，有意义的是图4(a)的散射图样的干涉条纹的结构和散射图样的强度分布。文献[2]给出分析表达式，用来计算关于折射光线和反射光线之间以同样的角度离开光纤的光程差 $\Delta(\theta)$ 所形成的干涉条纹。

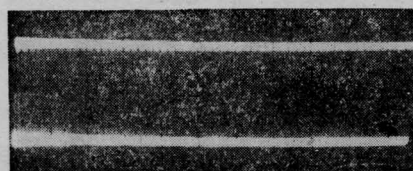
$$\Delta(\theta) = 2b \left[\sin \frac{\theta}{2} + \left(m_1^2 + 1 - 2m_1 \cos \frac{\theta}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{\lambda}{4} \quad (2)$$



(a) 散射图样的干涉条纹结构



(b) 干涉条纹的原始电信号



(c) 经处理后幅度均称的可鉴别电信号

图 4

C. 条纹计数 测量直径的方法是从一条有包层的光纤上由 He-Ne 激光束正交地照明在光纤的轴上 (x -轴方向), 由光的前向散射产生干涉条纹图样, 在一限定的角度范围内计数条纹, 而条纹的周期是反比于光纤的直径的, 如果光纤直径增加, 则条纹数亦因之增加。也就是条纹数直接与直径成正比, 可写成下式

$$N = K [\Delta(\theta_2) - \Delta(\theta_1)] / (2\pi) \quad (3)$$

这里 θ_1 和 θ_2 是散射角区域的范围, 可写成如下式

$$N = \frac{2b}{\lambda} \left\{ \left[\sin \frac{\theta_2}{2} + \left(m_1^2 + 1 - 2m_1 \cos \frac{\theta_2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] - \left[\sin \frac{\theta_1}{2} + \left(m_1^2 + 1 - 2m_1 \cos \frac{\theta_1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (4)$$

在给定角度范围内的条纹数亦是激光波长和光纤折射率的函数, 为了确定 b , 两者必须是已知的。

如果在给定最大角度为 90° 时来计数条

纹, 即 θ_1 当作 0 , 而 θ_2 为 90° , 则方程(4)简化为:

$$N = [(2b)/\lambda] 1.28 \quad (5)$$

$m_1 = 1.457$ (在波长为 0.6328 微米时熔石英的折射率), 由上式结果当光纤直径每变化一个波长 λ 就是 1.28 条纹, 所以计数全部条纹的仪器具有最大分辨率为 0.78λ (每一条纹 $= 0.78\lambda$)。当然为了提高分辨率可在条纹之间用内插法。

另外, 如应用较短波长的激光器, 亦能提高仪器的分辨能力, 例如在光纤直径为 100 微米时, $\lambda = 0.6328$ 微米, $N = 202$ 条。但在 $\lambda = 0.442$ 微米时, 则 $N = 290$ 条。

本系统因散射花样干涉条纹处理关系, 取 $\lambda = 0.6328$ 微米, 在一定的散射角度范围内, 每一条纹 $\approx 1.55\lambda = 1$ 微米, 如光纤直径为 150 微米时, 则 $N = 150$ 条。

四、系统装置和光电信号处理

图 5 是本系统的结构简图和外形图。

由前向散射法获得的光信号图像是在垂直于纤维轴平面上一列与纤维轴平行的干涉条纹, 而条纹的光强和间距随着散射角的扩展而变化, 即亮度随散射角增大而减弱(低角度的亮度 10 倍于高角度亮度), 间距随散射角增大而由疏到密。当光纤直径变化时或者引起干涉条纹的移动, 或者引起一定角度内的条纹数发生变化。所以信号的特点是不规则, 且有较大的变化范围。要处理这种特征信号, 可采用电荷耦合器件(CCD)并配以微处理机进行工作。

经比较分析, 本系统采用多面体棱镜扫描, 将长列分布的干涉条纹转换为序列扫描信号, 用装有 0.1 毫米狭缝光阑的光电倍增管接收, 将参差变化明暗相间的条纹输入信号, 用运算放大器构成的前置网络处理, 再通过前置放大、微分电路、缓冲级转换成幅度较均称的可鉴别信号(图 4(b)是由倍增管输

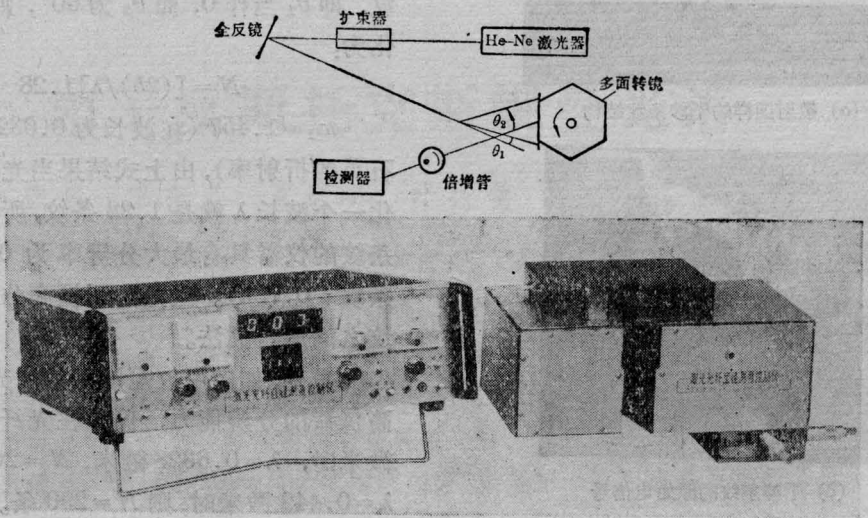


图5 系统结构图和外形图

出的原始信号图,图4(c)是幅度较均称的可鉴别信号),送入鉴别电路得到计数信号,再经缓冲、限幅输出,送入由MOS集成电路构成的计数器,从而得到比例于线径的测量结果。再配合选用调整一定散射角的计数开关闸门信号,使所得结果的数值和直径的微米数对应,系统既经调整妥当后就不必再用标准直径来校正。系统还给出连续测定直径数的显示和自动打印记录,再对数值进行数模转换处理,为纤维拉丝马达提供自动控制信号,实现生产的连续监控。

上述电子线路的方框图如图6所示,并已制成JGCK-1型激光光纤直径测量控制仪。

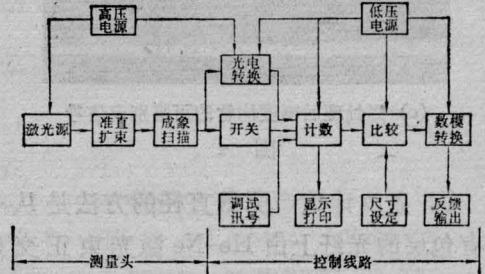


图6 电气系统方框图

参 考 文 献

- [1] H. C. Van de Hulst, *Light Scattering by Small Particle* (1974).
- [2] L. S. Watkins; *JOSA*, 1974, **64**, 767.
- [3] D. H. Smithgall *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 9, 2395.