

激光在光纤直径测量与控制中的应用

杜 柏 林

(上海传输线研究所)

提要: 本文介绍光纤直径动态测量中采用的激光扫描技术以及纤径控制中采用的逐点比较式新技术。对于直径为 50~250 微米的光纤,测量误差在 $\pm 0.5\%$ 以内。结果以数字形式显示,并转换成模拟信号,有效地控制光纤拉丝机的拉丝速度,从而保证了光纤直径均匀。

Application of laser to the measurement and control of optical fiber diameter

Du Bolin

(Shanghai Research Institute of Transmission Lines)

Abstract: This paper describes a laser scanning technique used for dynamic measurement of optical fiber diameter and a new point by point comparison-technique used for controlling optical fiber diameter. For optical fibers with outer diameters of $50\mu\text{m}$ to $250\mu\text{m}$, the error of measurement is within $\pm 0.5\%$. The results are displayed numerically and converted into simulative signals which control effectively the drawing velocity of a drawing machine, thereby ensuring the uniformity of fiber diameter.

一、引 言

在光纤的拉制过程中,纤维直径的动态连续测量与控制,不仅提高了光纤拉制工艺的自动化程度和光纤的成品率,还改善了光纤的耦合性能和传输性能。

由于光纤具有细而透光的特点,致使一般的测径仪无法测量。据国外文献报导,测量光纤直径的方法有多种,其中常见的是激光扫描法和前向散射法。本文介绍的激光扫描法,在光路上设计了平行光管,合理地选择了聚焦透镜,解决了光纤细而难测的问题;在

电路上,设计了脉冲填补电路,克服了由于光纤透光而产生的脉冲下凹现象。

本文提出的逐点比较式控制纤径的方法,经两年多时间的实际使用证明,其控制精度以及稳定性、可靠性均是令人满意的。

二、光路原理及其特点

光路原理如图 1 所示。音叉振动将使经过该透镜的光束以一定的速度平行扫描,被测光纤置于该透镜的前焦点上,扫描光束经

收稿日期: 1981 年 3 月 30 日。

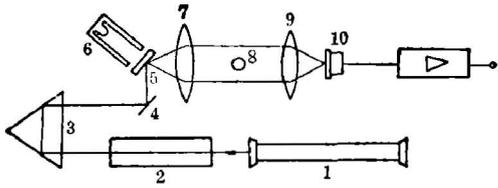


图 1

1—He-Ne 激光器；2—平行光管；3—直角棱镜；
4—平面反射镜；5—音叉上的平面反射镜；6—
音叉；7、9—透镜；8—被测光纤；10—PIN 管

透镜 9 聚焦后在 PIN 管上得到了信号。

如图 2 所示，设音叉上反射镜 5 的振动角为 2θ ，则反射后扫描光束夹角之半为 2θ ，透镜 7 的焦距为 F ，平行光束扫描宽度之半为 h ，即可得：

$$h = F \operatorname{tg} 2\theta \quad (1)$$

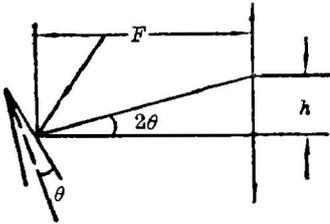


图 2

音叉以正弦规律运动，当音叉振幅较小时， $\theta = A \sin \omega t$ 。其中 A 为音叉最大摆动角； $\omega = 2\pi f$ 为其角频率， f 为音叉振动频率。由 (1) 式可得光束扫描速度为：

$$V = \frac{dh}{dt} = \frac{d(F \operatorname{tg} 2\theta)}{dt} \\ = \frac{2A\omega F \cos \omega t}{\cos^2(2A \sin \omega t)}$$

因为 $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\cos \omega t}{\cos^2(2A \sin \omega t)} = 1$

所以 $\lim_{t \rightarrow 0} V = 2A\omega F$,

其中 A 、 ω 、 F 均为常数，即 V 亦为常数。因此可得：

$$t = \frac{D}{V} = KD \quad (2)$$

其中 D 为被测光纤的直径； t 为被光纤遮断的时间； K 为常数。(2) 式证明了扫描光束被光纤遮断的时间 t 正比于光纤的直径 D 。

因此，通过测量时间 t 即可求得光纤直径的数值。这就是利用激光扫描测量纤径的基本原理。

选用 He-Ne 激光器为光源，它的发散角为 2 毫弧度，光斑直径 1 毫米。利用激光扫描原理进行测量证明，必须使光斑缩到小于被测物的直径。为此，专门设计了平行光管。

从几何光学牛顿公式可得到发散角与放大率的关系式：

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{\beta_2}{\beta_1} \quad (3)$$

式中 θ_1 为激光束的发散角； θ_2 为经平行光管后的发散角； β_1 、 β_2 分别为组成平行光管的透镜的放大率。

选用两只显微镜物镜组成平行光管，该物镜的放大率分别为 40 倍和 8 倍。从 (3) 式可知，经过平行光管后，对激光束进行扩束准直，其发散角减小到原来的五分之一。光路中未加平行光管时，只能测量 80 微米以上的光纤，加上平行光管后，可测量 30 微米的光纤。

在光路中，聚焦透镜选择也十分重要。聚焦透镜的要求是具有较小的象差、较大的孔径和适当的焦距。从焦距与聚焦后的光斑半径的关系式来看：

$$r = \frac{1.22 \lambda F}{d} \quad (4)$$

其中 r 为聚焦后光斑的半径， λ 为激光波长， F 为透镜的焦距， d 为入射光束的直径。从 (4) 式可知，欲得到较小的光斑，则要求透镜焦距短。但焦距短了，测量的动态范围也小了。为兼顾光斑大小和测量的动态范围，经试验选用 FD-50 型镜头作为聚焦透镜较好。

三、电路原理及波形处理

电路方框图见图 3 所示。从 PIN 管获得约 500 毫伏的脉冲信号，经放大、倒相后

输出 5 伏的信号,再经半峰检出、波形处理,时序平均、可逆计数直至显示。本方法可给出两种指示:当测量直径时,显示的是光纤直径值;当测量偏差时,显示的是直径值与预置数值之差,这时将有回控信号输出,对光纤拉丝机进行自动控制。

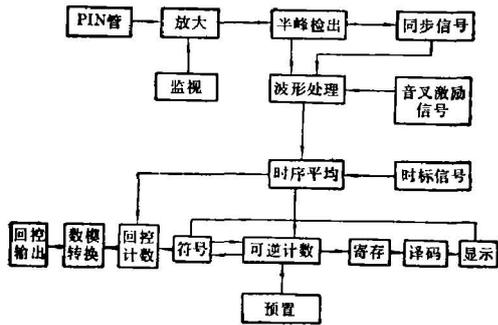


图 3

由于横扫被测光纤的光斑具有一定的尺寸,所以经 PIN 管接收以后得到的脉冲信号是一个梯形波,如图 4 所示,它的底部宽度所代表的尺寸为被测丝的直径 d 和光斑直径 d' 之和,即 $d+d'$,而顶部所代表的尺寸为两者之差,即 $d-d'$ 。若以光斑中点扫过被测丝边缘为准,则梯形波两腰中心之间的宽度所代表的尺寸为被测丝实际的直径。

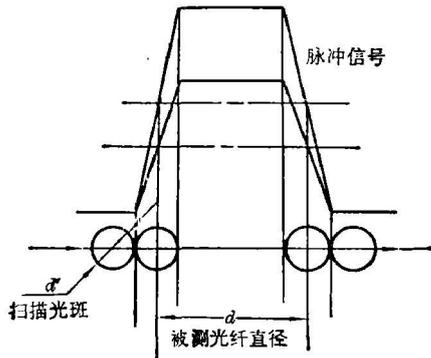


图 4

实际上激光器输出功率相当不稳,大约有 $\pm 20\%$ 的波动。因此, PIN 管输出的电压信号幅值也随之波动,这意味着梯形波脉冲信号边沿的斜率随之变动,为了使比较器整形输出波形宽度不因输入波形斜率变化而

变,就需要使比较器的直流比较电平自动跟踪在梯形脉冲信号幅值的中点。

半峰检出电路是由峰值检出器和电压比较器两部分组成的。峰值检出器跟踪信号峰值,取其二分之一作为电压比较器的参考电压。这样就使比较器输出脉冲的宽度不因输入脉冲幅度变化而不稳,从而有效地克服了由于激光器输出功率不稳而引起的测量误差。

由于光纤本身透光,当扫描光束经过光纤两个边缘时,光被散射,当光束通过光纤中心时,部分光透过光纤,使得到的脉冲信号顶部中间出现下凹现象,如图 5 所示。光纤越粗,下凹越甚。下凹不超过信号幅值的一半时,比较整形后输出的信号为单脉冲,当超过一半时,为双脉冲。对于这两种不同情况,在电路上必须预先进行处理,使之统一起来。

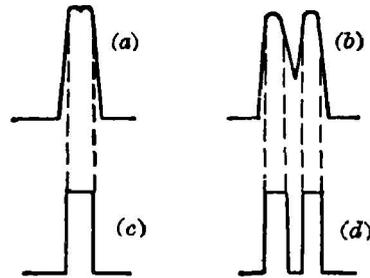


图 5

图 6 和图 7 是波形处理部分的电路图和波形图。其中 CP_1 为半峰检出输出信号,它的宽度就代表被测光纤的直径; CP_2 是 CP_1 经积分整形后的信号。这部分的设计思想是:首先对可能出现的两种情况加以判别,是单脉冲时,使之顺利通过;当是双脉冲时,使之加上一个填补脉冲,将下凹部分填平后输出。其工作过程简述如下:

音叉激励信号是一个方波,其频率为 CP_1 的二分之一(因为在音叉激励信号一周期内,光束对被测丝扫描二次)。音叉以正弦规律运动,它将滞后于激励信号。为实现同步,由与非门 5、6 组成单稳电路,将激励信号

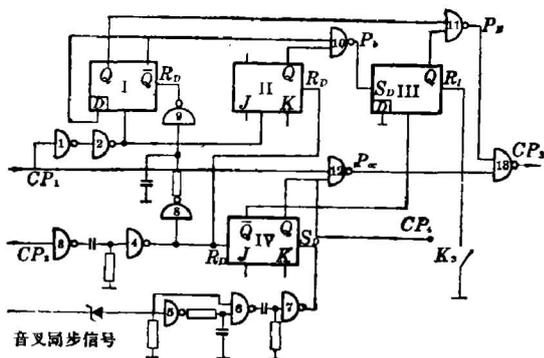


图 6

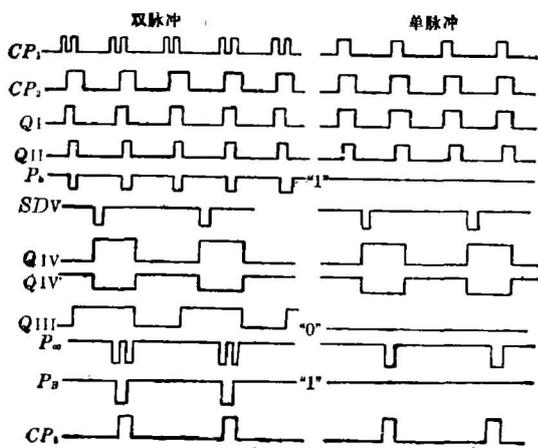


图 7

延迟一定时间,由单稳出来的信号,经微分后取其后沿为触发器 IV 的置“1”信号, IV 的置“0”由 CP₂ 微分后取其后沿来实现。I 和 II 分别为 D 触发器和 J-K 触发器,这里都接成翻转触发器。然而 CP₁ 只有在 IVQ 端为“1”时才能通过与非门 12,所以进来二个 CP₁ 输出一个,另一个被 IVQ 端“0”电平封住。在单脉冲情况下,因为 P₀ 为“1”电平, III 在 IVQ 端信号作用下,其 Q 端始终为“0”电平。与非门 11 关闭, P_E 为“1”电平, CP₁ 通过与非门 13 输出。在双脉冲时, III 在 P₀ 信号作用下置“1”,在 IVQ 端信号作用下置“0”,当 IIIQ 端为“1”时,与非门 11 开,将来自 IQ 端的填补脉冲送至与非门 13 输入端。P_E 和 P₀₀ 信号是严格对应的,它们将在与非门 13 中完成填补,输出 CP₃ 信号,此信号的宽度与 CP₁ 相同而中间的下凹已被

填平。至此,脉冲下凹现象被克服了, CP₃ 信号经过时标信号、时序平均、可逆计数、寄存、译码、显示以及回控电路,实现了对光纤外径的动态测量。

四、纤径的自动控制

纤径控制的方式主要有两种:一是温度控制法,该法是通过调节光纤拉丝炉中气体流量来控制光纤预制件加热的温度来实施的;二是速度控制法,该法是通过调节拉丝速度来实施的。由于气体小流量控制目前在技术上还存在一些问题,所以我们选用第二种控制方法。

开始直接利用测径仪输出的偏差信号来进行控制,即由偏差信号去控制拉丝机收线速度。当纤径变粗时,由于偏差信号的作用,使收线速度加快,纤径也随着减细了;当纤径太细时,偏差信号立即使收线速度减慢,纤径也随着加粗了,从而达到了控制纤径变化的目的。经现场试验,纤径变化能控制在 ±3 微米以内。但这种方法控制范围仅在 ±9 微米以内,同时拉丝速度的范围也不能太大。因此在实际使用时还不太理想。

为了达到更好的控制效果,经过试验,采用了逐点比较式的控制方式,其方框图如图 8 所示。

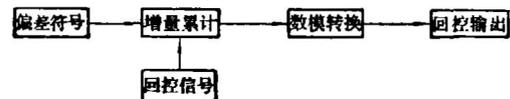


图 8

其中回控信号的周期为 50 毫秒(与测量周期相同,即每测量一次提供一个控制信号),增量累计如图 9 所示,由三块 5G655 组成三级 16 进制可逆计数器,每测量一次选通一次,符号脉冲经 2CW17 转换电平后,负的从非门通过 5G601 进入 5G655 累计;正的直接通过 5G601 进入 5G655 累计。偏差符号是每次测量值与预置数比较的结果,如果

是正,可逆计数器中的数累加,经数模转换输出使纤径变细的信号;如果是负,可逆计数器的数累减,将输出使纤径变粗的信号。这样,每次测量的结果都使纤径与预置值逐渐逼近,直至相等。

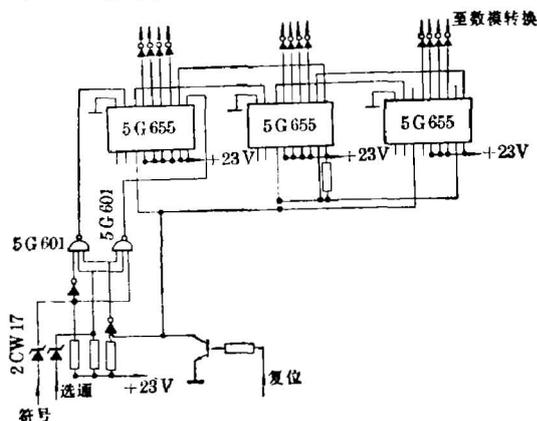


图 9

不同的拉丝系统,对控制信号的大小要求也是不同的,通过调节运算放大器的放大倍数,即可满足各种不同的拉丝系统所要求的控制信号的大小。

上述控制系统在本所光纤拉丝机上联试时,测量点离预制件加热点距离约30厘米,当拉丝速度为15米/分时,控制精度在±1%以内。从控制方法本身来说,其精度可在±0.3微米以内。影响控制精度的主要原因是加热点与测量点之间的距离太长,引起了时间上的滞后。如上所述,在30厘米的距离下,速度为15米/分,即要滞后1.2秒。为了缩短滞后时间,就要求减小加热点到测量点的距离,同时也要求提高拉丝速度。今后将采用温度和速度联合控制方法,进一步提高纤径控制的精度。

安徽大学和温州地区无线电厂参加了本方法的研究工作。

参 考 文 献

- [1] L. G. Cohen, P. Glynn; *Rev. Sci. Instrum.*, 1973, 44, No. 12.
- [2] 高均林;《电子计测》,1975, No. 4, 49.
- [3] D. H. Smithgall et al.; *Appl. Opt.*, 1977, 16, No. 9, 2395.

(上接第 25 页)

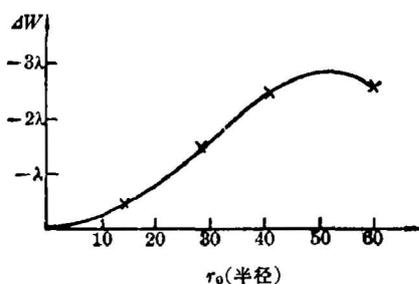


图 10 线全息图再现波前的误差测量
×—实验数据;实线——理论曲线

λ/33。应该指出,在图6装置中,我们忽略了片基影响的计算,但其在测量中却是不可忽视的因素,因此测量值较计算值大。

附 录

对轴对称的象差波面来说,产生计算全息图的计算公式为:

$$W = A_0 + A_1 x + 2[A_2 x^2 + A_4 x^4 + A_6 x^6 + \dots]$$

其中 A_0 表示坐标原点沿 x 轴方向的位移; A_1 与平行于 y 轴的倾斜平面的参考波有关; A_2 为发散镜相对于被检镜移动而引起的象差系数; A_4 、 A_6 都是高级象差系数,它们分别由如下参数表示:

$$\begin{aligned} A_0 &= 0, \\ A_1 &= ND/\lambda; \\ A_2 &= d/2R^2; \\ A_4 &= 1 - e/8R^3; \\ A_6 &= 1 - e^2/16R^5, \end{aligned}$$

其中 N 是条纹数; D 是被检镜的口径; λ 是波长; d 是发散镜移动量; R 是被检镜的顶点曲率半径; $e = 1 - \epsilon^2$, ϵ 是被检镜的偏心率。

参 考 文 献

- [1] A. F. Fercher; *Opt. Acta*, 1976, 23, 347.
- [2] B. R. Brown, A. W. Lohmann; *IBM J. Res. and Dev.*, 1969, 13, 160.
- [3] Toyohiko Yalagai, Hiroyoshi Saito; *Appl. Opt.*, 1978, 17, 558.