

高精度光电自动折射仪的瞄准方法及其实现

宋克非

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 介绍了一种用于高精度光电自动折射仪并采用振动狭缝瞄准的自动瞄准方法,说明了影像宽度、振动狭缝宽度和振幅之间的几何尺寸关系。该瞄准方法采用计算机控制,实时采集经被测样品出射的单色光信号,根据该信号的幅值和相位自动确定瞄准点。给出了实现该方法的电路原理、系统组成。在 365~2600nm 范围内对大量光学材料进行测试表明,振动狭缝法的瞄准精度优于 ± 0.1 角秒。

关键词 自动瞄准 锁相放大 振动狭缝

中图分类号 TH741.4 **文献标识码** A

1 引言

高精度光电自动折射仪是对光学材料折射率进行精密测量的一种高精度光电测量仪器。为了达到高精度(10^{-6})并实现自动测量,该仪器采用了垂直照射封闭测量法^[1]。其方法是首先分别测出由等边三角形样品的三个顶角入射且垂直于底边的平行光束经样品出射后的折射角并取平均得 φ 值,然后再按式(1)算出折射率^[2]。我们知道要测出折射角首先要对出射光进

$$n = \left[\frac{1}{3} \left(4 \sin^2 \frac{\varphi}{2} + 2\sqrt{3} \sin \frac{\varphi}{2} + 3 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

行精确瞄准,其瞄准精度将直接影响折射率的测量精度。通常瞄准法分为光学瞄准法和光电瞄准法,光学瞄准法由于受人眼瞄准精度的限制,能达到的精度有限,即使采用双线对称跨单线法进行瞄准,其精度也不过 0.2~0.3 μm ,同时由于仪器工作在由紫外到红外的宽波段范围,根本无法用人眼瞄准。而用光电瞄准法精度可提高一个量级以上,且使对准和测量自动化成为可能。以往研制的自动折射仪常采用极值法瞄准^[3],即瞄准点为信号的极值点,但极值点处信号幅度变化比较缓慢,不易判别极值,误差较大。为了克服极值法瞄准的缺点,我们采用了振动狭缝瞄准法,该方法在瞄准点附近信号斜率变化较大且相位突变,易于判别,在实际应用中取得了满意效果。

2 瞄准方法

所谓振动狭缝瞄准法就是利用一个具有宽度为 B , 振幅为 A , 按频率 f 作正弦运动的振动狭缝的振动中心去对准单色仪的出射狭缝像。若振动狭缝中心相对于出射狭缝像中心的初始偏移量为 Δ , 则振动狭缝相对于被瞄准的出射狭缝像(单色仪出射光经被测棱镜所形成的出射光)中心的偏移量^[4]为

$$x = A \sin \omega t + \Delta \quad (2)$$

式中 $\omega = 2\pi f$, t 为振动扫描时间, 其 Δ 偏左和偏右时所对应的电信号波形如图 1 所示。当 $\Delta = 0$, 即振动狭缝的振动中心与出射狭缝像中心完全对准, 此时我们将图 1(b) 函数进行付氏分解可以得到信号的基波频率为零, 二次谐波成分为最大。当振动狭缝的振动中心与出射狭缝像中心不重合, 其偏移 $\Delta \neq 0$ 时即不瞄准, 其电信号可分解为基波 f , 谐波 $2f$ 、 $3f$... 等各种分量, 故分析其基波 f 的幅值大小即可判别出它的偏离程度, 而基波 f 的相位则反映了瞄准时的偏离方向。根据分析^[5] 当振动狭缝振幅 A 大于狭缝宽度 L 时, 其信号斜率和线性区都明显变坏, 当 A 等于 L 时线性区最大, 斜率不次于 A 小于 L 的情况, 其关系如图 2 所示。故为了获得较大的线性区和适当的斜率, 我们选择振动狭缝宽度 L 、振幅 A 和影像宽度 B 三者相等。

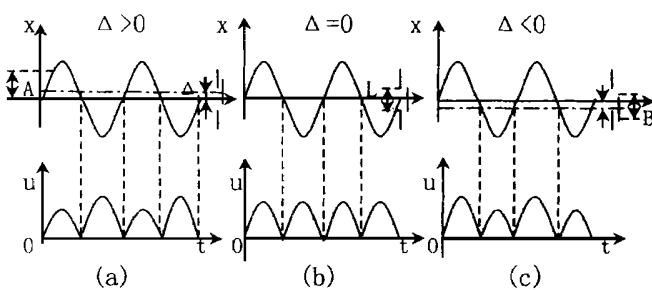


Fig. 1 Waveform of photoelectric signal

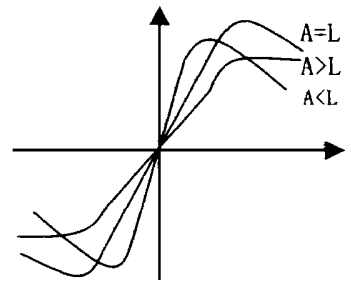


Fig. 2 Relation for amplitude vs the signal

按仪器总体要求瞄准误差应为 $\sigma \leq \pm 0.1$ 角秒, 当光学接收系统的焦距 $F = 350\text{mm}$ 时, 狭缝像中心在视场内相对于振动中心的偏移量为

$$\Delta = Ftg\alpha = 3.38\mu\text{m}$$

也就是说要实现系统的瞄准精度, 首先要分辨出 $\Delta \leq 3.38\mu\text{m}$ 时线位移所对应的微弱电信号幅值及相位。

由此可知, 当光学系统一定时, 能精确地找出瞄准点的关键在于如何降低噪声, 提高系统的信噪比。

3 瞄准方法的实现

为了能够精确地找到瞄准点, 我们设计了等效输入噪声小于 $1\mu\text{V}$ 的专用锁相放大器, 其

电路原理如图 3 所示。

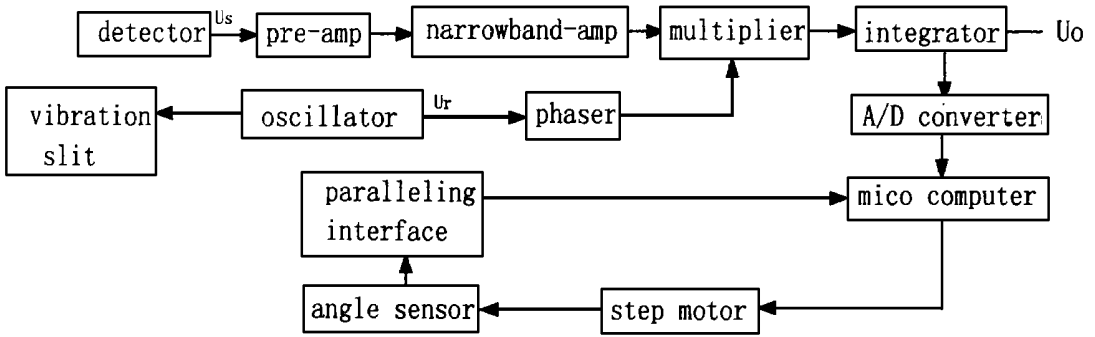


Fig. 3 Block of electronics

被测光经振动狭缝由探测器接收, 输出交变的电信号 U_s 再经前置放大器及窄带放大器后送给乘法器与由振动狭缝产生的同频参考信号 U_r 进行相关运算, 输出与偏移量 Δ 成正比的直流电压信号。通过判别直流信号的大小与相位即可得出瞄准点。

当接收的信号为 $U_s = S_1(t) + n(t)$, 参考信号为 $U_r = S_2(t)$, 则经锁相放大器的输出信号即上面两个信号的互相关函数^[6]为

$$U_0 = R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T U_s(t) U_r(t - \tau) dt$$

$$R_{S_1 S_2}(\tau) + R_{n S_2}(\tau) \quad (3)$$

由于接收信号与参考信号都来自振动狭缝, 故有最大的相关性, 而参考信号与噪声的产生机制不同又非同源, 其相关度为零即 $R_{n S_2}(\tau) = 0$ 。所以(2)式可简化为

$$U_0 = R_{S_1 S_2}(\tau) \quad (4)$$

接收信号经窄带放大器后变成正弦波, 其频率与基波频率相同。则当 $U_s = U_1 \sin(\omega_t + \varphi_1)$, $U_r = U_2 \sin(\omega_t + \varphi_2)$ 时, 由相关检测原理可知锁相放大器的输出 U_0 可表示为

$$U_0 = \frac{U_1 U_2}{2} \cos \varphi \quad (5)$$

$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 是 U_s 与 U_r 的相位差。为使锁相放大器输出直流电压 U_0 达到最大值, 可用移

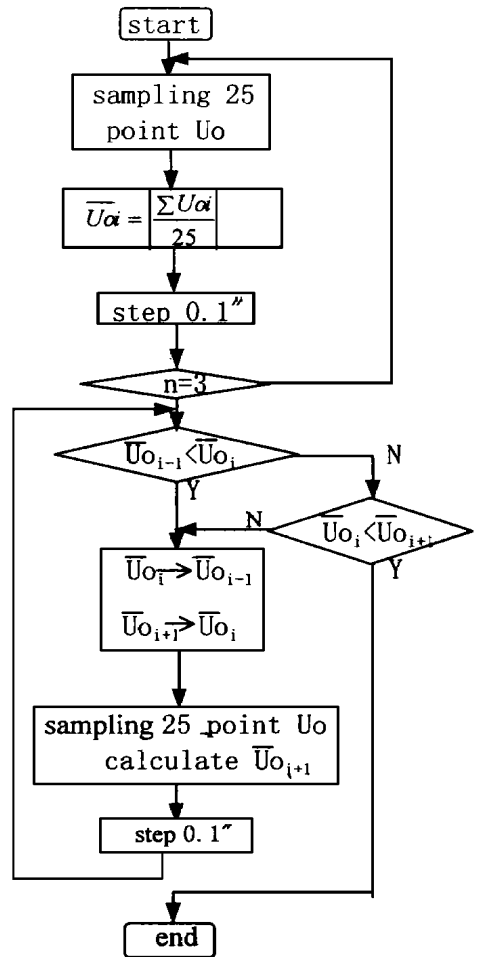


Fig. 4 Aim program chart

相器调节让 $\varphi_1 = \varphi_2$ 。

所以, 根据图 1 所示的波形和锁相放大器的特征可知, 当 $\Delta = 0$ 时, 其探测器输出电信号不含基波, 锁相放大器输出为零。而 $\Delta \neq 0$ 时, 其探测器输出电信号基波 f 不为零。其大小反映了偏移量, 而该电压的正负就可反映出偏离方向。

在我们所设计的仪器中, 前置放大器采用了超低噪声场效应管作为输入级。当放大器输入端短路时, 测得等效输入噪声为 $0.7\mu\text{V}$ 。为了有效地抑制噪声提高系统的动态范围和动态储备, 选用了二阶具有高 Q 值的窄带放大器, 其工作频率与狭缝振动频率相同。由于信号经前置放大器和窄带放大器后会产生一定的相移, 为获得最大输出在参考通道中加入了移相范围为 $0\sim 90^\circ$ 的移相器以提高检波效率。锁相器的核心相敏放大检波器(PSD)由一个乘法器和一个积分器组成, 乘法器选用 LZX1 全波相敏整流放大器并选择漂移小的放大器作积分器以减小积分器零点漂移对最小可检测电平值的影响。从原理上讲, 积分器的时间常数 R_0C_0 愈大愈好, 因为等效噪声带宽 $f_n = \frac{1}{4R_0C_0}$, 但实际上积分时间常数总是有限的, 所以噪声是在零点附近变化, 为进一步提高信号质量, 在自动寻找零点时对采样点进行累加平均并对相邻三个采样点绝对值进行比较。其自动瞄准程序如图 4 所示。软件在移动瞄准系统时分三个阶段工作, 首先快速扫描到光束位置, 然后中速搜索信号, 最后微动慢速瞄准。这样既保证寻找信号的可靠性, 又加快测量速度。

4 测量结果及结论

我们所设计的高精度光电折射仪的振动狭缝是由特殊材料制做的音叉驱动的, 具有 10^{-4} 量级的频率稳定性和 10^{-3} 量级的振幅稳定性。其振动频率 f 为 535Hz 。计算机通过 12 位双极性 A/D 和并行 I/O 接口采集由专用锁相放大器输出的光电瞄准信号和角度传感器输出的角度信号。表 1 给出了该瞄准装置对某一波长的单色光通过被测样品时进行多次瞄准的结果。

Table 1 Measuring results of collimating angle

A/D	- 0001	0000	0002	0002	0000	- 0001	0000	0001	0000	- 0001	0000	- 0002	0000
Angle ($42^\circ 29'$)	21.75"	22"	22.25"	22"	22"	22"	22"	22"	22"	22"	22"	22"	21.75"

根据表中数据可以求得多次瞄准时的算术平均值标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (v_i - \bar{v})^2}{n - 1}}$$

$$= \pm 0.12(\text{角秒})$$

式中 n 为测量次数, v_i 和 \bar{v} 分别表示每次测量值和多次测量的平均值。当折射率 $n = 1.5$, 测角误差为 ± 1 角秒时, 所带来的折射率测量误差仅为 $\pm 1.6 \times 10^{-6}$, 而由上面的结果可知, 瞄准误差 $\sigma = \pm 0.12$ 角秒, 可见它对折射率测量误差的贡献可以忽略。我们在从 365 至 2600nm 范围内对大量光学材料进行实际测量表明, 其瞄准误差均达到了 ± 0.1 角秒的仪器总体要求。

综上所述, 振动狭缝法由于在瞄准点处信号基波为零, 且相位突变, 瞄准精度很高。

参 考 文 献

- 1 苏大图等. 一种高精度测量光学玻璃折射率和色散的方法. 全国光学测试学术交流会论文, 南京, 1986
- 2 米宝永. 光谱范围从 365 至 12000 nm 的高精度光电自动折射仪. 光学精密工程, 1998, 6(3): 79~ 84
- 3 Wood D L, Fleming J W, Jr. Computerized refractive index measure for bulk materials at UV, visible and IR wavelengths. Rev Sci Instrument, 1982, 53(1), Jan: 43~ 47
- 4 殷纯永等. 光电精密仪器设计. 北京: 机械工业出版社, 1998, 6(3) : 79~ 84
- 5 乐中道, 金圣经, 刘人彦. 光电经纬仪电学部分的精瞄设计. 仪器仪表学报, 1981, (3) : 35~ 49
- 6 曾庆勇. 微弱信号检测. 浙江: 浙江大学出版社, 1986

Collimating Method and Its Realization for the Photoelectric Automatic Refractometer with high Precision

SONG Ke-Fei

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

A automatic collimating method with vibrating slit for the photoelectric automatic refractometer with high precision was introduced in this paper and geometry size relation of width among image and vibrating slit and amplitude was described also. This collimating method was realized through acquiring really-time signal of monochromatic light from sample measured and judging automatically collimating point on the basis of amplitude and phase of this signal by computer. The circuit principle and constitution were represented in detail. Many optical materials are measured in the wavelength rang of 365 to 2600 nm . The results show the precision of this collimating method is batter than $\pm 0.1''$.

Key word: Automatic collimate , Lock-in phase AMP, Vibrating slot

宋克非 女, 1967 年 9 月出生, 1988 年毕业于吉林工学院电子工程系, 1998 年获中国科学院长春光学精密机械研究所硕士学位。毕业后一直从事微弱信号检测及光电测量仪器的研究工作。作为主要骨干参加研制的“等离子刻蚀终点检测仪”获 1991 年度电子工业部优秀成果奖, 1995 年获中科院科技进步三等奖。