

# 精密激光准直及其在大坝变形观测中的应用

潘正风 陈永奇

**[提要]** 本文首先探讨了“波带板法”激光准直的若干问题,这包括圆形波带板的成象规律、大气折光的影响以及点光源和探测器设计中的主要问题。然后介绍我院研制的准直仪器以及在大坝水平位移观测中的试验和应用。

## 一. 引言

在现代工业企业、国防和科学试验基地的建设和运营中,“精密定线”是一项基本的工程测量工作。随着科学技术的迅速发展,对定线测量的精度要求也越来越高。例如高速滑行轨道的铺设,高能粒子加速器构件位置的校正,大型机械设备安装以及大型结构物的变形和振动观测等等,都要求有 $\pm 0.1$ 毫米的点位精度或 $10^{-6}$ 的直线度。采用常规定线测量的工具和方法已很难满足这个要求了。激光的出现和激光技术的发展为精密定线测量开辟了新的途径。从六十年代末开始,世界上不少国家对激光准直技术进行了积极的研究,并有效地解决了一些工程问题。

我院从1974年开始,对“波带板”激光准直进行了研究,并研制了激光准直仪。通过几年来的试验,该仪器可用于大坝水平位移观测。与原有的大坝水平位移观测方法(“视准线法”、“测小角法”等)相比,有精度高、观测方便、观测时间短等优点,并容易实现观测的自动化。

本文对“波带板法”激光准直的有关问题,仪器结构和在大坝水平位移观测中的试验和应用进行阐述和探讨。

## 二. “波带板法”激光准直

波带板作为精密准直的一个部件,它有类似于透镜的成象作用。如图1, A、B为直线的两个固定点, i为直线AB上或其延长线上附近的任一点, S为点光源, O为接收器的零点。若要确定i点偏离直线的偏离值 $\delta_i$ ,可在A、i、B点安置相应的波带板,则在接收端,点光源S通过相应的波带板分别成象在 $P_A$ 、 $P_i$ 、 $P_B$ 点,其相对于接收器零点O的偏离值为 $\Delta_A$ 、 $\Delta_i$ 、 $\Delta_B$ ,由几何关系可得出偏离值为:

$$\delta_i = \left( \frac{Q_i - Q_B}{Q_A - Q_B} \Delta_A - \frac{Q_i - Q_A}{Q_A - Q_B} \Delta_B - \Delta_i \right) \frac{d_i}{d_p} \quad (1)$$

$$\text{式中: } Q_A = \frac{d_p - d_A}{d_A}; \quad Q_B = \frac{d_p - d_B}{d_B}; \quad Q_i = \frac{d_p - d_i}{d_i}$$

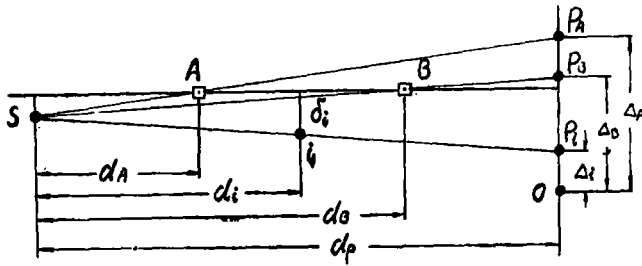


图 1

作为经常使用的情况，点光源放在 A 点，探测器放在 B 点，此时：

$$\delta_i = \Delta_i \frac{d_{Ai}}{d_{AB}}$$

在大气中进行长距离准直，有时候为了减弱折光影响或者其它原因，可以分段准直。如图 2，把 AB 直线等分成几个测点，用准直的方法分别测出 1 点相对于 A2 的偏离值  $\delta_1$ ，2

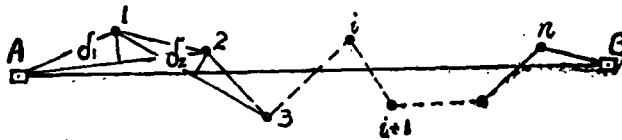


图 2

点相对于 13 的偏离值  $\delta_2 \dots$ ，这样，任一点 i 偏离直线 AB 的偏离值  $y_i$  为：

$$y_i = \frac{2}{n+1} \left[ \sum_{k=1}^i K (n+1-i) \delta_k + i \sum_{k=i+1}^n (n-k+1) \delta_k \right] \quad (2)$$

若测定  $\delta$  的误差为 m，那么：

$$m_{y_i} \approx 1.1 \frac{i(n+1-i)}{n+1} \sqrt{n+1} m \quad (3)$$

从 (3) 式可以看出，当  $i = \frac{n+1}{2}$  时，误差最大，此时：

$$m_{y_{max}} \approx 0.28 (n+1) \sqrt{n+1} m \quad (4)$$

至于怎样分段最合理，应该根据激光准直本身的误差和大气折光影响的数量级联合考虑，估算出最佳的分段方案。

## 1. 点光源

点光源是利用正透镜把激光束聚焦在针孔光栏上来实现的。光束经透镜变换后形成足够发散的光束,其能量分布仍是高斯型。如果波阵面的中心不与波带板中心重合,则象点中心实际上不在点光源和波带板中心的连线上,这就产生了光束照准的误差。为了把这种误差以及激光束漂移的影响减到最小程度,必须使点光源发出的光足够发散。当然,过大的发散,能量损失太大,对探测不利。实践证明,选择的发散度使得光束直径是最近一块波带板孔径的3倍左右为宜。

针孔直径的选择也要兼顾到能量的损失和固定点光源位置的精度,一般可用下式来计算针孔光栏的直径 $\phi$ :

$$\phi = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} f \quad (5)$$

式中:  $f$  —— 透镜焦距,由发散光束的发散度决定;

$\omega_0$  —— 透镜处的光斑半径;

$\lambda$  —— 激光波长。

## 2. 圆形波带板

“波带板”作为精密准直的一个部件,它的成象规律对于应用和设计都是很重要的。通过对圆形波带板成象的计算和研究,我们得出在轴线附近上任一点的光强表达式为:

$$I_{p'} = |U_{p'}|^2$$

$$\begin{aligned} \text{而 } U_{p'} = & \left( \frac{A}{L} \right) \cdot e^{ikl'} \left[ \sum_{m=1}^{2N-1} (-1)^m \left( V_0 \cos \frac{\xi}{2} + V_1 \sin \frac{\xi}{2} \right) + \right. \\ & \left. + i \sum_{m=1}^{2N-1} (-1)^m \left( V_0 \sin \frac{\xi}{2} - V_1 \cos \frac{\xi}{2} \right) + \exp \left( -i \frac{k\sigma^2 f}{2S} \right) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

式中:

$V_0(\xi, \eta)$ ,  $V_1(\xi, \eta)$  为 Lommel 函数;

$$\xi = 2\pi \left( \frac{F}{f} \right) \cdot m;$$

$$\eta = \frac{K\sigma\sqrt{\lambda F}}{S} \sqrt{m}, \quad K = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$F$  —— 波带板焦距;

$$f = \frac{rs}{r+s} \text{ 而 } r, s \text{ 分别为波带板到点光源和到成象点的距离; } L = r+s,$$

$$L' = L + \frac{\sigma^2}{2S};$$

$N$  —— 波带板通光带数;

$\sigma$  —— 所考察的点偏离轴线的距离;

$A$  —— 离光源单位长度的振幅。

通过对(6)式的计算,我们可以得出:

(1) 在轴线上第一成象点 (即  $F=f$ ,  $\sigma=0$ ) 处光强为:

$$I_p = 4N^2 \left( \frac{A}{L} \right)^2 \quad (7)$$

而方形波带板成象点的光强为:

$$I_{\text{方}} = 0.7 N^2 \left( \frac{A}{L} \right)^2 [2]$$

可见同样通光带数的园形波带板其象点中心光强为方形的 6 倍。

(2) 在轴线上 ( $F=\mu f$ ,  $\sigma=0$ ) 象点的变化规律为:

$$U_{P_f} = \begin{cases} 2N \left( \frac{A}{L} \right) e^{ikl'} & \mu \text{--- 奇数} \\ 0 & \mu \text{--- 偶数} \end{cases} \quad (8)$$

可见一块焦距为  $F$  的波带板, 把它作为  $\frac{F}{3}$ ,  $\frac{F}{5}$ ,  $\frac{F}{7}$ ... 使用时也能成象, 而且象中心强度并不减弱。

(3) 被考察点偏离正常象点的情况, 即  $\sigma=0$ ,  $f=F/\mu(1+x)$ , 这里  $x$  反映了偏离值并折合到焦距的变化, 此时有:

$$I_{P_{f'}} = \left( \frac{A}{L} \right)^2 \frac{\sin^2 N\pi\mu x}{\sin^2 \frac{\pi}{2}\mu x} \quad (9)$$

分析 (9) 式可以看出, 当波带板离开正确位置为定值时, 带数愈多, 相对于正常成象点的光强下降愈快; 当  $N$  为定值时, 波带板最大活动范围最好不超过  $\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2N-1}$ , 在这一点上象中心强度降为正确位置的 40%。因此为了使波带板有较大的活动范围, 在兼顾到光强、光斑大小的情况下, 不要一味地增加通光带数, 例如  $N=6$  时, 活动范围为  $\frac{\Delta f}{f} = 10\%$ ;

$N=11$  时,  $\frac{\Delta f}{f} = 5\%$ 。

(4) 中间为遮光带时, 象宽减小, 而且遮光带愈大变化愈明显; 通光带数越多, 其影响越小。例如中间遮一带、二带时, 象宽的减少分别为:  $N=6$  时为 15% 和 20%;  $N=10$  时为 9% 和 15%。

合理地设计园形波带板可以在一个准直线上使波带板的数目减到最少, 这对于使用更为方便。在一般准直线上, 我们建议采用通光带数为 5—7 带的园形波带板。

## 2. 激光的探测

激光探测是要精确地测定象点的中心位置。根据所要求的精度不同, 有多种不同的探测方式。在大气中进行精密准直, 要合理地解决两个主要问题, 一是探测器要有足够高的分辨力, 并能排除背景光的干扰; 二是要尽量减弱大气湍流对象点探测的影响。

对于第一个问题, 我们认为采用调制光源和相应的探测器可以较好地解决。即在光源处, 用一个机械截波器把光调制成方波, 然后用选频放大器来接受光信号。这样既可大大提高探测器的灵敏度, 又可隔离背景光的干扰。

至于大气的影晌,那是很复杂的。这种影响即有随机的,也有周期性的。若象点的正确位置为  $x_0$ , 则任一瞬间的位置  $x(t)$  为:

$$x(t) = x_0 + \sum_1^{\infty} C_n \cos n\omega t + \Delta(t) \quad (10)$$

其中,  $\Delta(t)$  是大气的随机影响,它具有正态分布的特性;而第二项是折光影响的富立叶分析,有几秒钟的短周期分量,也有几个小时的长周期影响。从(10)式可以看出,采用一段时间的积分平均值可以减弱大气影响的随机分量和短周期的分量。至于积分时间的选择取决于大气条件和所需要的精度。但对于目前应用较多的“零点对中法”探测来说,我们认为用“积分法”工作起来不太方便,而采用自动跟踪和“惯性积分”较为合适。

#### 4. 大气的折光影响

激光在大气中的传输是很复杂的,这主要是由于光路上大气密度的变化引起的。造成这种变化的因素很多,但在水平方向上影响最大的是温度梯度的水平分量。折光影响是提高激光准直精度的最大障碍,因此研究折光的影响和提出减弱它的途径是激光准直应用中的一个课题。下面从理论上分析大气折光对激光准直的影响。

众所周知,光在大气中传输,由于温度梯度的影响在水平面内产生弯曲,任何一点的曲率为:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{0.36(n_0 - 1)P}{T^2} \frac{dT}{dy} \quad [3] \quad (11)$$

式中:  $\frac{dT}{dy}$  —— 温度梯度的水平分量。

对于 H<sub>e</sub>-N<sub>2</sub> 激光器所发出的激光,  $n_0 = 1.000292$ , 从(11)式出发,我们推导出激光束在大气中传输,由于温度梯度的影响而产生的偏离  $\Delta_{折光}$  为:

$$\Delta_{折光} = 105 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2} \int_0^S (S-x) \left( \frac{dT}{dy} \right) dx \quad (12)$$

式中: S —— 测线长。

为了分析,我们取  $\rho = 760 \text{ mmHg}$ ,  $T = 300^\circ\text{K}$ , 则(12)可简化为:

$$\Delta_{折光} = 0.9 \times 10^{-6} \int_0^S (S-x) \left( \frac{dT}{dy} \right) dx \quad (13)$$

波带板激光准直是基于光的衍射效应,因此折光影响的规律与直接用激光束进行准直是有不同的。为了推导折光对“波带板法”激光准直的影响,我们可以认为,由于光路上温度梯度的存在使光线产生“弯曲”,相当于光路上很多小光楔对光产生作用。这样,由于折光影响,使波带板处光束的波阵面发生变化,而波带板后整个成象光束产生偏转。因此,在波带板激光准直中,折光对测点的影响为:

$$\Delta_{折光} = 0.9 \times 10^{-6} \frac{r}{r+s} \left[ \frac{s}{r} \int_0^r x \left( \frac{dT}{dy} \right) dx + \int_0^s (s-x) \left( \frac{dT}{dy} \right) dx \right] \quad (14)$$

式中:  $r \cdot s$  分别为波带板到光源和成象点的距离。分析(14)式可以看出:

- (1) 波带板附近的温度场对准直成果的影响最大；  
 (2) 假定整个测线上温度梯度是一致的话，即为  $\Delta T$ ，那么折光影响为

$$\Delta'_{\text{折光}} = 0.45 \times 10^{-6} r \cdot s \cdot \Delta T \quad (15)$$

在一条长度为  $L$  的测线上，当  $r = S = \frac{L}{2}$  时折光影响最大，此时：

$$\Delta'_{\text{max}} = 0.11 \times 10^{-6} L^2 \cdot \Delta T \quad (16)$$

例如  $\Delta T = 0.01^\circ\text{C}/\text{m}$ ， $L = 1000$  米，此时  $\Delta'_{\text{max}} = 1.1\text{mm}$ ，可以看出，在一公里的测线上要达到  $10^{-6}$  的精度，必须选择有利的观测时间，并且测线上不能有热辐射源存在。

### (3) 与“激光照准法”比较

用“激光照准法”进行准直，需要在测点和一个端点上探测光斑，因而大气折光对准直成果的影响为在这两点上影响的综合结果。“照准法”中，如果在端点和测点探测时，整个光路不发生改变（可以认为折光的长周期分量满足这个条件），那么对测点的影响为：

$$\Delta''_{\text{折光}} = 0.9 \times 10^{-6} \left\{ \frac{S}{L} \int_0^L (L-x) \left( \frac{dT}{dy} \right) dx - \int_0^S (S-x) \left( \frac{dT}{dy} \right) dx \right\} \quad (17)$$

式中： $L$ ——测线长； $S$ ——准直仪到测点的距离

同样考虑一种简单情况，即温度梯度均为  $\Delta T$ ，此时影响最大的点在测线中间，其值为：

$$\Delta''_{\text{max}} = 0.11 \times 10^{-6} L^2 \Delta T \quad (18)$$

比较 (16)、(18) 两式可以看出折光的长周期分量对两者的影响相当。

但是对于短周期分量和随机分量而言，由于照准端点和中间各测点不是同一瞬间，在这个过程中，整个光路是发生变化的。因此其影响比用 (17) 式估算的要大。

综上所述，我们认为，大气对“波带板法”激光准直的影响比对“照准法”的影响要小。然而，大气折光影响是很复杂的，还要进一步研究和实验。

## 三、激光准直仪

波带板激光准直仪由三部分组成：点光源、波带板和探测器，现分别介绍如下：

### 1. 激光点光源

激光器点光源采用固定埋设和活动安置两种结构形式。固定埋设的点光源如图 3 所示。激光器和调制器分成两个部件。激光管和聚焦透镜装在铝壳圆筒内，圆筒用六个调整螺丝支撑在支架的圆环内，调整六个螺丝，可使聚焦的激光束通过调制器的针孔射出。针孔光栏固定在调制器的

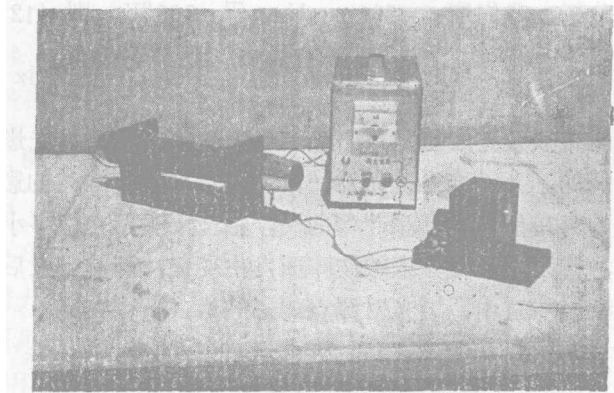


图 3

前面板上, 装有叶片齿轮的微型电机固定在后面板上, 叶片齿轮紧靠光栏。激光器和调制器通过地脚螺栓直接固定在观测墩上。活动安置的激光器点光源其针孔光栏位于仪器的旋转轴上, 当转动仪器使激光照准波带板时, 光栏中心位置不变。

## 2. 波带板装置

波带板装置也有活动和固定两种形式, 活动式的是采用强制对中杆安置波带板, 如图 4 所示。它是由对中杆和三脚架两部分组成。对中杆下端是不锈钢锥形孔, 强制对中在测点上, 对中杆中部安置有可旋转的气泡盘, 安置有园气泡和长气泡(长气泡格值随对中精度而定)。对中杆上端是安置波带板的园形框架。三角架是支撑对中杆的, 它有活动架头, 通过四个微动螺丝可调整 and 固定对中杆。这种装置能保证波带板中心有  $\pm 0.1 \sim 0.2$  毫米的对中精度。

在一些测线上(如大坝的廊道中)可安置固定装置。用电磁铁或微型电机来控制波带板自动起落。

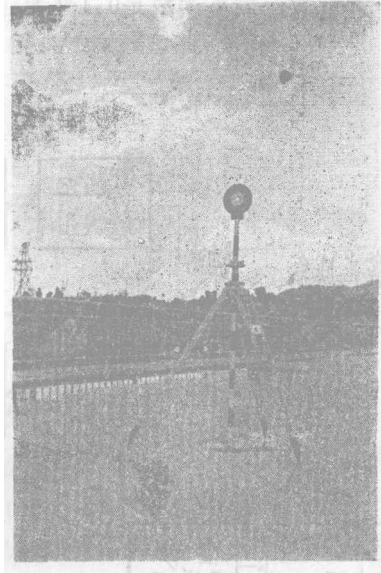


图 4

## 3. 自动找中位移数显探测器

自动找中位移数显探测器如图 5 所示。它包括机械部分和电子线路部分。机械部分由光

电探头, 水平导轨和垂直轴三部分。可逆电机通过丝杆连接探头, 电机转动使探头水平移动。垂直方向通过手轮, 伞形齿轮和丝杆传动做上下移动。电子线路的电原理框图如图 6 所示。由波带板形成的象点照在二象限硅光电池上, 分别产生二个电信号, 一起送到电压差放大

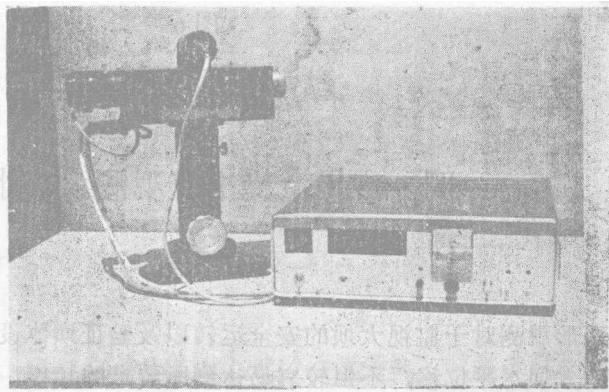


图 5

器放大后, 输出差动放大信号, 通过带通滤波器, 选频放大器进行放大后送至解调器。同时由光电池产生的二个电信号经电压和放大、滤波、选频和整形后, 形成矩形脉冲信号, 对差动信号进行解调。差动信号变成直流信号后, 送至直流放大器。为了推动交流可逆电机, 须将直流信号调制成 50 周的交流信号, 并经电压及相敏功率放大后, 推动可逆电机转动, 由丝杆连接使光电探头移动。当象点离开光电池中心线较远时, 产生的差动信号较大, 电机转动就快。当光电池中心线接近象点中心时, 电机就慢下来, 电机的转动直到象点中心与光电池中心线重合时为止。实际上由于大气湍流的影响, 象点产生漂移, 使电机在中心位置来回

不停地转动，增大积分时间常数可使电机转动缓慢。位移变送器和光电探头连接在一起，探头移动时，位移变送器输出信号，经数显器电子线路转换，由数码管显示位移。记录读数应同时观察指零表，当表头指针在零点左右摆动时，即可记录显示器的读数。有四个数码管显示四位十进制数，最小读数是0.1毫米。

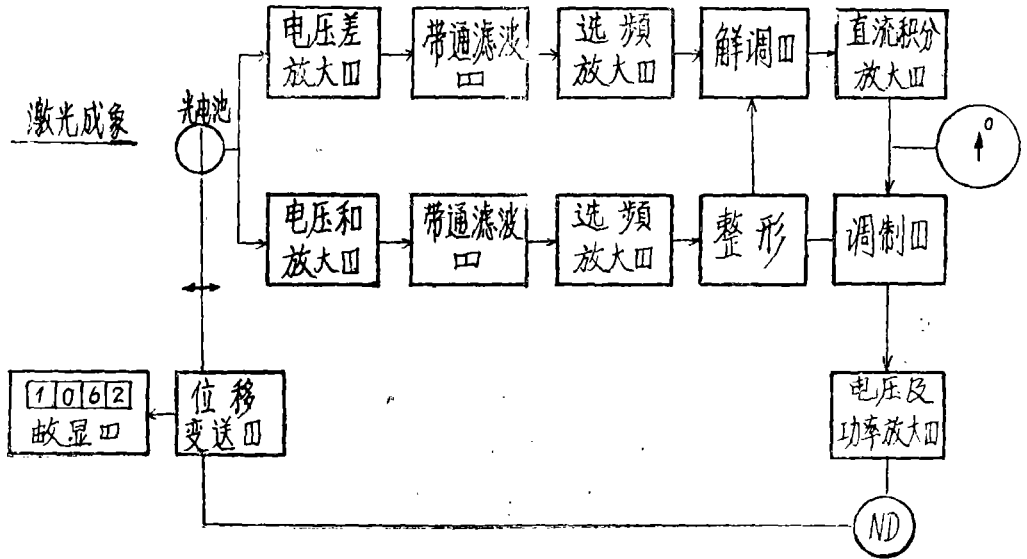


图 6

### 四. 应用激光准直观测大坝水平位移

大坝变形观测对于监视大坝的安全运转以及验证坝体设计理论都有着重要作用。应用激光准直观测大坝水平位移，不但较容易达到所要求的精度，节省人力和观测时间，而且容易实现观测的自动化。二年多来，我们对波带板激光准直应用于大坝水平位移观测做了一些实验，同时在刘家峡大坝▽715 廊道中安装了一套观测系统，从观测的数据来看，该法用于大坝位移观测是可行的，有着广阔的前景。

#### 1. 观测精度

波带板激光准直，由于象点小，受大气湍流的影响也较小，因此一般观测精度比较高。表 1 列出了在几条测线上的实验成果。

从表 1 可以看出，不管采用什么接收方式，观测精度都比较高，约为  $(2-3) \times 10^{-7}$ 。



表 1

实验地点	测线长度	探测方式	最弱点精度
刘家峡坝▽715廊道	160米	光电探测	±0.05mm
刘家峡坝▽660廊道	170米	目视	±0.05mm
南方×坝坝顶	500米	光电探测	±0.10mm
刘家峡坝顶	800米	目视	±0.22mm
刘家峡坝顶	800米	自动找中探测器	±0.17mm
北方×坝坝顶	1000米	目视	±0.30mm

(注) 观测精度是指十次读数平均值的精度

## 2. 折光影响的实验

为了研究在坝顶条件下折光影响的大小,我们在不同地区,不同长度的坝顶做了实验。

在南方×大坝做了昼夜连续观测实验。坝长500米,测点在靠近光源三分之一处,实验成果如图7所示。一昼夜中最大变化为2.2毫米,从早晨8时到下午17时变化较大,夜间基本上趋于稳定。

在800米的刘家峡坝顶上,也做了夜间连续观测实验,测点在中间,实验成果如图8。从成果可看出,如果选择有利的观测时间(例如20时到次日6时)观测值的变动可以控制在1毫米以内。

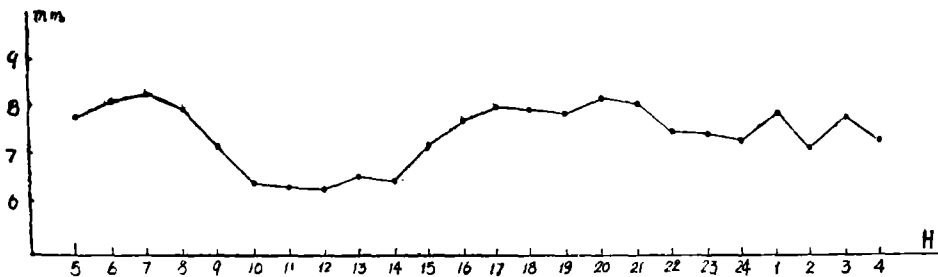


图 7

为了实验折光影响的大小,我们在一公里坝上进行“波带板”激光准直和引张线的比较观测,测点在中间,结果发现夜间的折光影响不大,两者相差0.5毫米。

从这些实验可以看出,折光影响是明显存在的,但只要选择有利的观测时间,可以达到±1.0毫米的精度要求。

## 3. 刘家峡大坝▽715激光观测系统

在刘家峡▽715廊道里,我们布设了一条160米长的激光观测系统,整个测线有七个测点,波带板采用能控制自动起落的固定装置,为了保护整个观测系统和减弱大气折光的影响,测线上铺设了直径为280毫米的钢管,波带板的起落和光源启闭都集中在观测室中进行控制。通过一年多来观测实践的检验,这套观测系统是成功的。测定位移的精度可达±0.1—0.2毫

### 坝顶试验成果

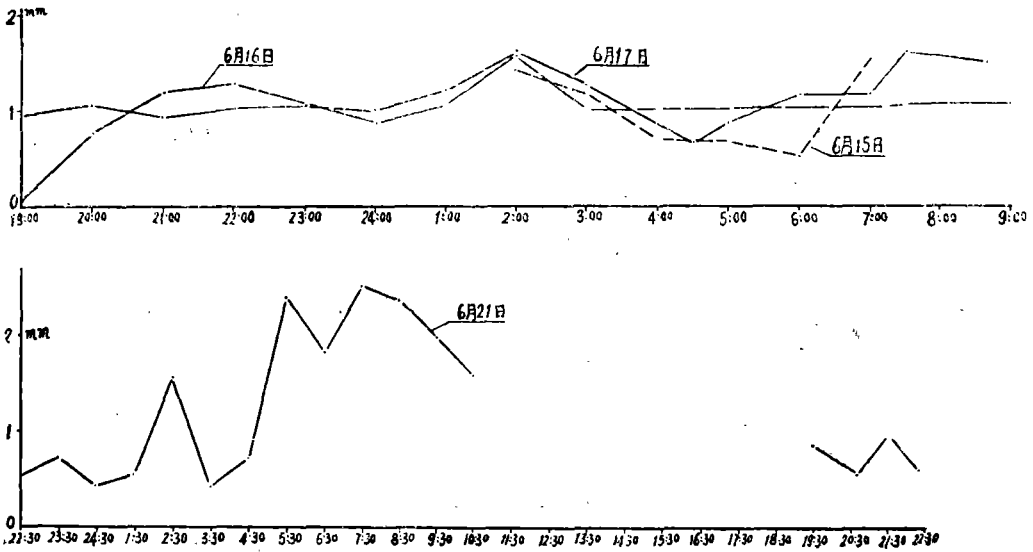


图 8

米，比视准线法要高。同时，观测时间和人力大为减少。如用视准线法需4人观测一个半小时，引张线法需二人观测一个小时，而激光观测系统只需二人在十分钟内就可测完。图9是4号测点一年中的位移过程线，图10是各测点位移的变化曲线。从图中可以看出，用激光直观观测的成果，位移与库水位相关性是很好的。

### ▽715 激光准直78.9~12月相对位移分布图

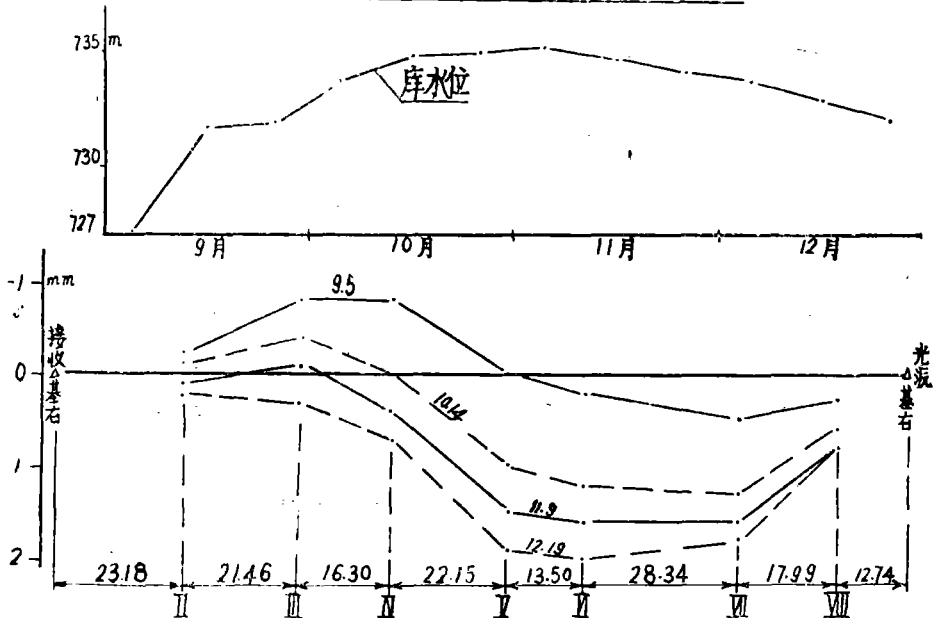


图 9

▽ 7/5 Ⅴ坝段 4°点激光准直视准线过程线

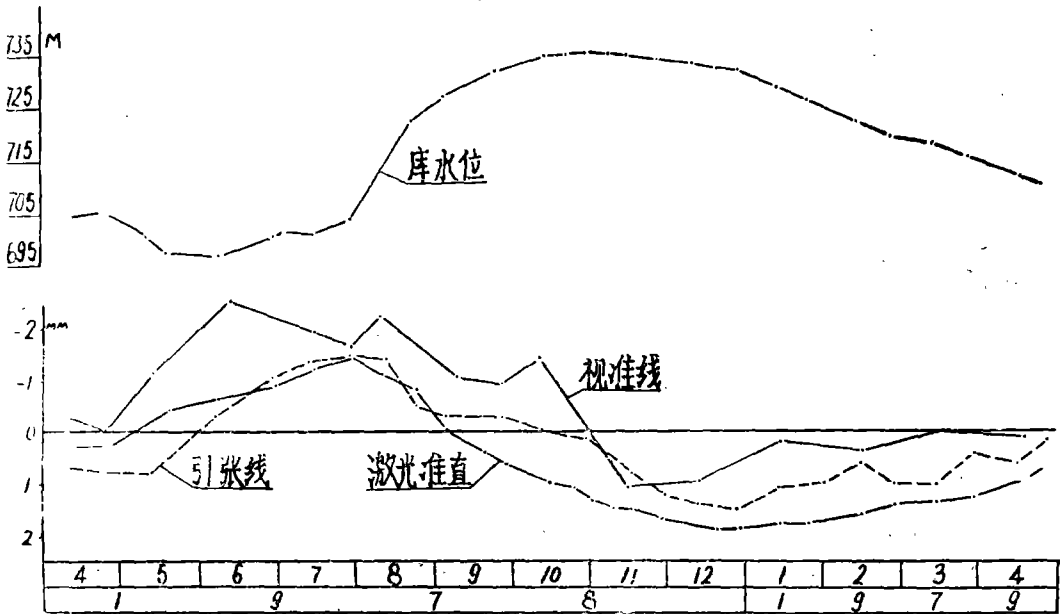


图 10

五、 几 点 看 法

1. 用“波带板法”进行精密准直，避免了对激光器高稳定性的要求，可以提高准直精度，而且仪器结构也较为简单，是一种较好的准直方法。
2. 应用圆形波带板进行准直，相对于方形波带板而言，光强强、制作简单、活动范围较大，从探测来考虑也较为方便。
3. 大气折光是激光准直精度提高的主要障碍，虽然对“波带板法”影响较小，但其影响仍然是很大的。大气折光影响是很复杂的，对于这一课题还须进一步地研究和实验，但从几次实验来看，选择有利的观测时间，要在一公里测线上达到  $10^{-6}$  的准直精度是有可能的。
4. 在大坝水平位移观测中，应用波带板激光准直是一种较好的方法，与传统的方法相比缩短观测时间，减轻劳动强度，而且容易实现观测自动化。

参 考 文 献

[1] 潘正风、陈永奇：“波带板激光准直及其应用”。中国测绘学会第二届综合性学术年会论文。1979。  
 [2] Applied optics No.6 1968

- [ 3 ] A comparison of precision alignment methods  
《The Canadian Surveyor》Vo1.30,NO.2
- [ 4 ] Высокоточный лазерный створофиксаторы  
《Г. и АЭР.》вып. 3.1976
- [ 5 ] A laser-based technique for alignment and deflection measurements  
《Civil engineering》March 1973

## Precision Laser Alignment and its Use in the Measurement of the Horizontal Deformation of Large Dams

Pan Zhengfeng      Chen Yongqi

### Abstract

In this paper, firstly, the authors studied some of the problems concerning laser alignment, which include: the laws of the image formed by round zone plate, atmospheric effect on laser alignment and main points in designing laser source and detector. Secondly, they described the Laser Alignment Instrument developed by the Engineering Surveying Laboratory in our College and its use in the measurement of the horizontal deformation of large dams. The conclusions are as follows:

a) Laser alignment using round zone plate is a better method for alignment survey as compared with other methods.

b) Atmospheric effect on the method using round zone plate is smaller than on other-laser alignment methods. But to obtain an accuracy of  $10^{-6}$  on a one-kilometer line, good atmospheric conditions must be chosen.

c) In the measurement of the horizontal deformation of large dams, this method proves to be a good one, in which the time for measurement can be shortened, man power reduced and automatic measurement realized with more ease.