

土石坝位移分段激光准直监测方法及装置

张立英 吕欣怀 杜荣峰 陈 竞

摘要:本文介绍一种土石坝外部变形自动监测的方法及装置。该方法及装置可以应用于土石坝的施工期和建成后的运行期，也可以用于其他类型的大坝、边坡、护坡、边墙、挡墙和隧洞的外部变形自动监测。

1 概述

土石坝施工期和建成初期的位移较大。根据已经建成土石坝的人工观测资料统计结果，最大水平位移和垂直位移接近坝高的百分之一，如果大坝的高度为 100 米，那么最大位移将近 1000mm。目前广泛应用于混凝土坝外部变形监测的垂线法、引张线法、激光准直法都因为其量程不够而不能应用于土石坝的施工期和建成初期。近几年开始应用的、利用全球卫星定位系统（GPS）监测大坝外部位移的方法在技术上是可行的，但是造价昂贵，并且因为 GPS 天线必须暴露在外，施工期极易受到施工的破坏，另外此法还受到卫星使用权的限制。所以，目前大坝外部变形自动监测的方法和设备都不适用于施工期和建成初期土石坝的位移监测，土石坝的外部变形监测还是用人工观测，效率很低，劳动强度大，施工期观测经常受到施工的干扰，观测人员的安全难以保障，观测设施经常受到施工的破坏，资料不连续。

2 原理简介

以 5 个测点为例，如图 1 所示。

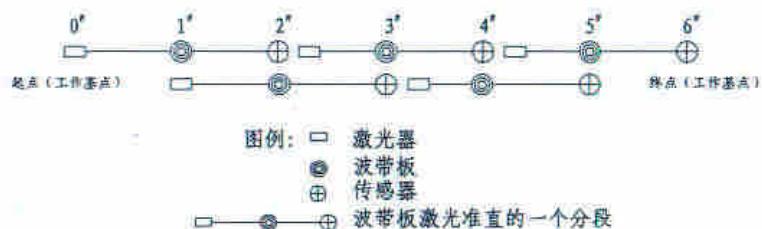


图 1 结构原理图

从起点（0[#]点）发射一束激光，在1[#]测点安置一个波带片，2[#]测点安置一个传感器。0[#]点发射来的激光经过1[#]测点的波带片衍射后，在2[#]测点的传感器上形成光斑，通过2[#]测点的检测电路测量出该光斑的位置，此为波带板激光准直的一个分段；

从1[#]测点再发射一束激光，在2[#]测点上安置一个波带片，3[#]测点安置一个传感器，1[#]测点发射来的激光经过2[#]测点的波带片衍射后在3[#]测点的传感器上形成光斑，通过3[#]测点的检测电路测量出该光斑的位置，这又是波带板激光准直一个分段；

依次类推，最后传递到终点，测量出每个测点（包括终点）传感器上光斑的位置。用这些光斑位置的变化量，就可以计算出各个测点的位移。

3 位移公式的推导

位移符号和传感器的正方向均按《混凝土大坝安全监测技术规范》规定，即水平方向向下游为正，垂直方向向下方为正；假定起点在右岸，终点在左岸，起点和终点都是工作基点，测点间距为 S ，各个传感器上的光斑位置变化量为 g_i ，各个测点的绝对位移为 X_i 。

从图 1 中取出相邻的 3 个测点，见图 2。

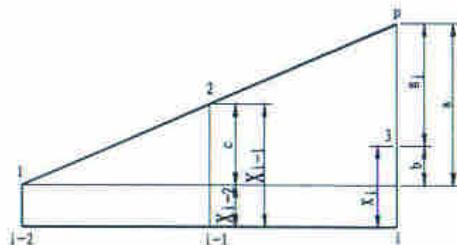


图 2 位移推导原理图

测点产生位移后，3 个点的位置由原来的在一条直线上分别移到 1、2 和 3 的位置。此时 $i-2$ 号测点发出来的激光经过 $i-1$ 号测点的波带板衍射后，在 i 测点的位敏传感器上形成的光斑位置为 P 。根据几何关系可得：

$$g_1 = -(a-b), \quad a=2c, \quad b=-(X_1 - X_{i-2}), \quad c=-(X_{i-1} - X_{i-2}) \quad \text{将后三个式子代入第一个式子, 整理后得:}$$

$$X_1 = -g_1 + 2X_{i-1} - X_{i-2} \quad \dots \quad (1)$$

将 $i=2$ 和 $i=3$ 代入(1)式即可得出 2# 测点和 3# 测点的位移

$$X_2 = -g_2 + 2X_1 - X_0,$$

$$X_3 = -g_3 + 2X_2 - X_1$$

将 $X_2 = -g_2 + 2X_1 - X_0$ 代入 3# 测点位移公式得

$$X_3 = -g_3 - 2g_2 + 3X_1 - 2X_0, \quad \text{从而可以得出一般式:}$$

$$X_i = -g_i - 2g_{i-1} - 3g_{i-2} - \dots - (i-1)g_2 + iX_1 - (i-1)X_0 \quad \dots \quad (2)$$

其中 X_1 为 1# 测点的位移，是未知数， X_0 为起点的位移。

结合图 1 知， X_0 为终点的位移。因为起点和终点都是工作基点，它们的位移是已知的，通常它们都是不动点，所以，为了论述简便，不妨令 $X_0=0$ ， $X_6=0$ 。将 $X_0=0$ 代入(2)式得出各个测点位移通式为

$$X_i = -g_i - 2g_{i-1} - 3g_{i-2} - \dots - (i-1)g_2 + iX_1 \quad \dots \quad (3)$$

将 $X_6=0$ 代入上式得

$$X_1 = (5g_6 + 4g_5 + \dots + 1g_1) / 6.$$

求出 X_1 后，利用(3)式，就可以依次求出 X_2 至 X_5

实际上，不论有多少个测点，都可以用(3)式求出 X_i ，之后依次求出其他测点的位移。

以上就是分段激光准直的原理，它就是在两个工作基点间形成两条激光准直光路，每条准直光路由若干个分段组成，每个分段由相邻 3 个测点组成激光准直光路。两条准直光路是半错开（半搭接）的。

4 该方法的精度分析

如果起点和终点之间的测点数为奇数，则正中间的测点精度是最差的，如果它的精度满足要求，那么其他测点地精度也满足要求。所以，只分析正中间的测点精度就可以了。

对于有奇数个测点的系统，正中间测点的位移通式为：

$$X_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i j \times g_{n+2-j} + \frac{1}{2} \sum_{j=i-1}^1 j \times g_{j+1}$$

n 为两端点间的测点数

如果测点间距 S 为 30 m, 测点数为 19, 那么可以测量的土石坝长度为 $20 \times 30 \text{ m} = 600 \text{ m}$ 。中间点的位移公式为:

$$X_{10} = (1g_{10} + 2g_{11} + \dots + 9g_{19} + 10g_{10}) / 2 + (9g_{10} + 8g_{11} + \dots + 2g_3 + 1g_2) / 2$$

每个传感器测值 g_i 的精度是相同的, 对于目前的 CCD 或者 PSD 而言, g_i 的中误差 m 可以达到正负 0.04 mm, 那么, 根据误差传播定律, 经计算, X_{10} 的中误差为 $M_1 = \pm 0.52 \text{ mm}$ 。

以上分析的是偶然误差。

在 g_i 中还包含系统误差。在本方法中, 系统误差主要是折光差。因为每个分段的准直距离为 60 m, 中间点折光差最大, 根据折光差公式,

$$\epsilon = 3.933U \cdot V \cdot \frac{P}{T^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial Y}$$

式中: ϵ —— 测点偏离值的折光差

U —— 测点至点光源距离

V —— 测点至探测仪距离

P —— 大气压强, 即工作真空间度

T —— 绝对温度

$$\frac{\partial T}{\partial Y}$$

经计算得知每个测点 g_i 包含的最大折光差为 0.03 mm。

X_{10} 计算公式的各项系数之和为 50。最不利的情况是每个测点的折光差方向相同, 那么, X_{10} 的系统误差为 $M_2 = 1.5 \text{ mm}$ 。

$$X_{10}$$
 的综合误差 $M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} = 1.59 \text{ mm}$ 。

从以上的分析可以看出, 对于坝顶长度为 600 m 的土石坝, 用本方法测量坝顶位移, 其中误差最大只有 $\pm 0.48 \text{ mm}$, 系统误差最大为 1.5 mm, 最大综合误差 1.56 mm。对于施工期和建成初期的几十厘米甚至到米级的位移值而言, 其相对精度至少不会低于 0.5%, 这个精度是完全满足大坝监测的要求的。对照混凝土拱坝径向位移综合中误差不大于 2 mm 的要求, 本方法的精度也满足大坝建成后的正常使用期的监测精度要求。

对于长度大于 600 m 的土石坝, 测点数增加, 系统误差的累积将超过 2 mm。大坝建成几年后进入正常使用期时, 这样的精度就不满足要求了, 这种情况就必须增加抽真空系统来减小折光差。

5 传感器量程确定

如果坝长 600 m, 中间点的最大位移为 2 m, 位移分布曲线假定为圆弧形, 其半径为 R , 见图 3。

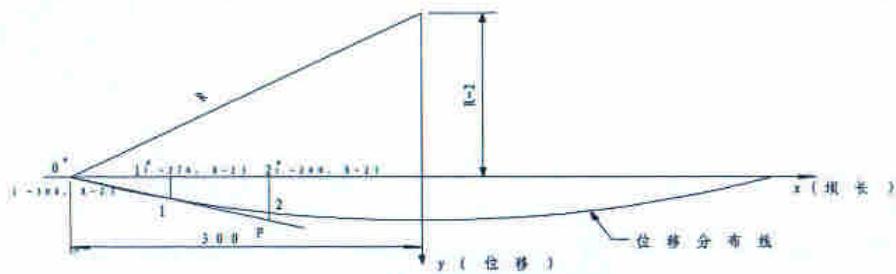


图 3 传感器量程计算原理图

由简单的几何关系求出 $R=22501\text{ m}$, 位移分布曲线方程为

$$X^2+Y^2=22501^2$$

$$1^\# \text{测点的 } Y_1^2=22501^2-X_1^2=22501^2-(-270)^2$$

解得 $Y_1=22499.38$, 那么 $1^\# \text{测点 } Y \text{ 向位移即为 } Y_1-(R-2)=0.38\text{ m}$, 同理可得 $Y_2=22499.72$, $2^\# \text{测点 } Y \text{ 向位移为 } 0.72\text{ m}$. 从而可知光斑位置 P 到测点之间的距离 $P2=2\times 0.38\text{ m}-0.72\text{ m}=0.04\text{ m}=40\text{ (mm)}$, 这个数值即为传感器的计算量程。实际采用传感器的量程为 50×50 是足够用的。

如果坝体又短又高, 位移较大, 位移分布曲线曲率半径变小, 计算量程就会增大。此时如果选用更大的传感器, 就很不经济了。可以将测点上的波带板位置设计成可调节的, 如果光斑脱离传感器, 调整波带板位置, 使光斑回到传感器上。一共调节两到三次就可以了, 调节很方便。通过调节, 只要最大位移与其所在高程的坝长比值不大于 $1/200$, 就可以用本方法进行测量。目前绝大多数的土石坝都能满足这个条件。

其他类型(曲线型除外)的大坝、边坡、护坡、边墙、挡墙和隧洞的外部变形都小于土石坝, 所以本方法对上述建筑或物体的变形也能进行自动监测。

6 土石坝外部变形自动监测装置

根据本方法所设计的装置结构图见图 4。

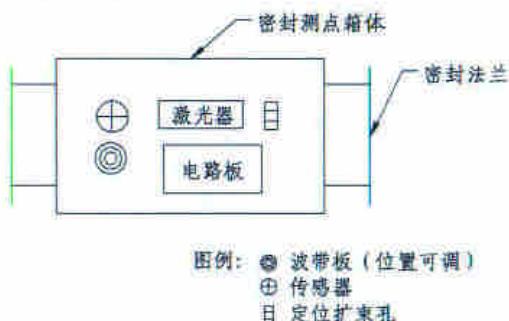


图 4 装置结构图

在该装置中, 将一支激光器、一套传感器和一块波带板组合在一起, 该波带板是用来衍射前一个测点发射来的激光, 并成像在下一个测点的传感器上, 形成光斑; 该激光器发射的激光经过小孔扩束后射向下一个测点的波带板; 该传感器是用来接收前一个测点的波带板衍射来的光斑。

7 结语

通过上面的论述可以看出, 对于目前国内国际的绝大多数土石坝, 该方法在技术上是可行的, 经济上是合理的, 精度是满足规范要求的。

本方法解决了土石坝施工期和运行初期位移大、一般传感器量程不够的土石坝位移自动监测难题; 系统全密封无任何机械运动, 长期稳定可靠; 长度 600 米以内的系统不必抽真空, 免去了成本很高的自动抽真空系统和真空管道, 操作也变得十分简单, 测量时间短(一个系统一次测量只需 5 分钟), 可真正实现实时和远程监测, 维护的工作量很小; 起点和终点不必建观测房; 若需要抽真空, 管道直径小于 159mm, 管道成本低, 占用空间少, 易于布置; 可实现一维或二维位移监测; 全天候测量, 不受大坝泄洪和震动的影响; 系统安装在马道地面以下, 可以避免坝体填筑施工对系统的破坏; 保证了施工期观测人员和设备的安全以及观测资料的连续性。

本方法也可以用于其他类型(曲线型除外)的大坝、边坡、护坡、边墙、挡墙和隧洞的外部变形自动监测。