

基于拱圈模型比较的大坝变形分析

王志萍

新疆疆海测绘科技有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年7月10日; 发布日期: 2024年7月17日

摘要

大坝全生命周期稳定关系到上下游生态环境与周边居民的人身财产安全, 因此定期观测大坝变形是水利部门的重要工作。以往传统的监测方式采用坝体布设观测点, 数量有限, 利用传统测量仪器获取三维坐标, 无法确保监测坝体每个部分。采用三维激光扫描技术获取大坝两期的观测数据, 分析坝体变形趋势。基于大坝点云数据建立的拱圈模型, 分析坝面的变形量, 与常见的基于近邻点(C2C)、基于点到模型(C2M)、基于多尺度模型(M3C2)方法比较分析, 试验结果证明了文中的基于拱圈模型方法可实现大坝变形监测, 精度与成熟的方法处于同一水平。

关键词

拱坝, 变形分析, 点云, 拱圈模型

Dam Deformation Analysis Based on Arch Ring Model Comparison

Zhiping Wang

Xinjiang Jianghai Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: Jun. 17th, 2024; accepted: Jul. 10th, 2024; published: Jul. 17th, 2024

Abstract

The stability of the entire life cycle of a dam is related to the ecological environment of the upstream and downstream, as well as the personal and property safety of surrounding residents. Therefore, regular observation of dam deformation is an important task for the water conservancy department. In the past, traditional monitoring methods were used to set up observation points on the dam body, with limited quantities. Traditional measuring instruments were used to obtain three-dimensional coordinates, which could not ensure the monitoring of each part of the dam body. Using 3D laser scanning technology to obtain observation data for two phases of the dam

文章引用: 王志萍. 基于拱圈模型比较的大坝变形分析[J]. 测绘科学技术, 2024, 12(3): 240-245.

DOI: 10.12677/gst.2024.123030

and analyze the deformation trend of the dam body. The arch model based on point cloud data of the dam is established to analyze the deformation of the dam surface. It is compared and analyzed with common methods based on nearest neighbor point (C2C), point to model (C2M), and multi-scale model (M3C2). The experimental results show that the arch model based method in the article can achieve dam deformation monitoring, with accuracy at the same level as mature methods.

Keywords

Arch Dam, Deformation Analysis, Point Cloud, Arch Model

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济发展的需求，生产生活中对电力的需求逐年增加。目前我国发电的主要方式分为火力发电、水利发电、光伏风力发电等，其中水利发电占据 18% 的份额，未来占到 20% 的重要组成部分。水利建设是未来一个重点工程，除了关乎民生，更重要的是实现一定程度的碳中和，因此水利工程建设必不可少。水利工程中较为常见的是大坝建设，而大坝又分为重力坝、拱坝等常见的建造形式。其中拱坝是凹向下游的一种构筑物，利用周边岩体的稳定特性支持了坝体受到的水与泥沙的冲击力。其自身不依靠重力作用来维持稳定性，主要依靠周边岩体与地基的反支撑，建造成本相对较低，是性价比与安全系数较高的坝体。拱坝案例中最具代表性的白鹤滩水电站中的大坝就采用 300 多米高的拱坝样式，已成为继三峡之后的世界第二大水电站[1]-[3]。大坝受到自身重力及水体压力的双重作用，坝体受到严重的挤压。为保证坝体的安全与上下游居民、生态环境的和平共处，定期对坝体监测必不可少。常规的水准仪、全站仪只能采集单点形式的监测点，无法确保坝体整体安全[4]-[6]。三维激光扫描技术的发展，引领测绘技术进入一个新的领域。该技术可获得被扫描体大量密集点云，具备了传统测量仪器不具备的优点，广泛应用在工程领域的变形监测中[7]-[9]。

本文以实际工程为依托，采用站式三维激光扫描仪获取坝体前后表面数据，并以点云模型建立拱坝的拱圈模型，与成熟的 C2C、C2M、M3C2 算法计算的坝体变形量比较分析，试验结果验证了与其他方法所计算的变形相差不大，证明了本文所建立模型的可行性。

2. 拱圈点云提取

拱坝作为一种三面受周边岩体约束的结构，当受到水流及其他外力作用时，依靠拱的特性，拱坝会将大部分水平推力传递至两岸岩体，其中一少部分传递至坝体地基。这证明了坝体轴向变形与坝地基变形较小，沿着水流方向产生的变形是拱坝监测的主要内容。配准两期点云数据，比较距离变化可获得拱坝坝体的形变监测变化。

顾及测站获取的点云具有离散不规则分布的特性，设置高程值为 Z 的缓冲区域，提取高程值为 $Z \pm \Delta Z$ 的点云集合。提取到的点云数据可分为两组，第一组高程值从 Z_a 到 $Z_a + \Delta Z$ 集合；第二组高程值从 Z_a 到 $Z_a - \Delta Z$ 集合。对于集合 $\{Z_a - \Delta Z, Z_a + \Delta Z\}$ 中任意点 $A_i = [x_i, y_i, z_i]$ ，在集合 $\{Z_a - \Delta Z, Z_a\}$ 中寻找最近点 $B_j = [x_j, y_j, z_j]$ 。那么 $\vec{AB}_{ij} = B_j - A_i$ 和平面 $Z = Z_a$ 的交点 $C_a = [x_a, y_a, z_a]$ 可由公式(1)计算得。

$$\begin{cases} x_a = \frac{(x_j - x_i)(z_a - z_i)}{z_j - z_i} + x_i \\ y_a = \frac{(y_j - y_i)(z_a - z_i)}{z_j - z_i} + y_i \end{cases} \quad (1)$$

3. 建立拱圈点云模型

考虑到常见拱坝跨度都较大的问题，为精确构建拱坝的拱圈模型，对不同时坝体点云采用最小二乘法拟合拱圈模型。

拱圈点云数据中假定一个子集中拟合函数 $f(x)$ 可以表示为：

$$f(x) = \sum_{i=1}^m a_i(x) p_i(x) = p^T(x) a(x) \quad (2)$$

式中 $a(x) = [a_1(x), a_2(x), \dots, a_m(x)]^T$ 为待求参数，它是坐标 x 的函数， $p(x) = [p_1(x), p_2(x), \dots, p_m(x)]^T$ 为基函数，它是 k 次完全多项式，阶数为 m 。

公式(3)中 L_2 加权离散范式：

$$J = \sum_{i=1}^n w(x - x_i) [f(x) - y_i]^2 \quad (3)$$

把公式(2)代入公式(3)中，可得如(4)式所示：

$$J = \sum_{i=1}^n w(x - x_i) [p^T(x_i) a(x) - y_i]^2 \quad (4)$$

式中， n 是在这个局部子域内影像节点的点的个数， $f(x)$ 是拟合的函数， y_i 是节点数值，即 $y_i = y_i(x_i)$ ， $w(x - x_i)$ 是节点 x_i 的权函数。要解出系数 $a(x)$ ，必须使得公式(4)计算出最小值，因此对式(4)求 a 倒数可得：

$$\frac{\partial J}{\partial a} = A(x) a(x) - B(x) y = 0 \quad (5)$$

所以有：

$$a(x) = A^{-1}(x) B(x) y \quad (6)$$

$$A(x) = \sum_{i=1}^n w(x - x_i) p(x_i) p^T(x_i) \quad (7)$$

$$B(x) = [w(x - x_1) p(x_1), w(x - x_2) p(x_2), \dots, w(x - x_n) p(x_n)] \quad (8)$$

$$y^T = [y_1, y_2, \dots, y_n] \quad (9)$$

将公式(6)代入公式(5)中，即可得到移动最小二乘拟合函数为：

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \Phi^k(x) y \quad (10)$$

式中： $\Phi^k(x)$ 表示形函数， $\Phi^k(x) = [\Phi_1^k, \Phi_2^k, \dots, \Phi_n^k] = p^T A^{-1}(x) B(x)$ 。

基函数与权函数在移动最小二乘中扮演着关键角色，权函数可分为三次样条函数、高斯权函数、径向基函数。在以节点 n_p 为圆心，影响半径为 R ，此时包含在圆内的采样点集合 p ，圆外对节点 n_p 的影响为 0，半径 R 选择的合理的值域对其影响较大。基函数中参数预先进行设置，其中包括阶数 k 与项数 m

的确定对拟合函数的拟合效果产生深远影响。阶数设置的越高、项数高产生的拟合效果越精细，但是拟合时长越长，导致的效率越低。

4. 试验结果与分析

为验证本文方法的有效性，依靠 MATLAB 软件编程实现本文的基于拱圈模型算法，与现有点云数据处理算法比较。运用开源软件 Cloud Compare 软件中包含的基于近邻点(C2C)、基于点到模型(C2M)、基于多尺度模型(M3C2)算法比较分析。这样即可快速与本文算法比较与分析，提高了大坝变形监测的内业处理效率。

4.1. 试验

本次试验对某拱坝进行两期的地面三维激光扫描数据采集，其中第一期采集时间为 2023 年 2 月 2 日~4 日；第二期采集数据时间为 2023 年 12 月 2 日至 4 日。两期点云数据采集时，坝内蓄水量基本一致。设备选用 Trimble SX10 三维激光扫描仪，为保证数据的准确性两期采集时基本保持同一位置，且仪器内参数设置均相同。每期数据在拼接、去噪之后方可进行拱坝坝体形变计算与分析，第一期点云模型为基准，计算第二期点云模型变形量，拱坝背水面形变值用颜色梯度来表示，以水流流向方向为正方向，即 Y 轴方向。统计变形量可用平均变形值(Mean)与标准差(Standard deviation)。

(1) 基于近邻点(C2C)算法

由图 1(a)所示，无法估计大坝变形方向与各个区域变形情况，得到的变形之普遍偏大，由图 1(b)可知，坝体变形之区间在 $-50.18\text{ mm} \sim -10.25\text{ mm}$ 之间，坝体的平均变形值为 -30.21 mm 。

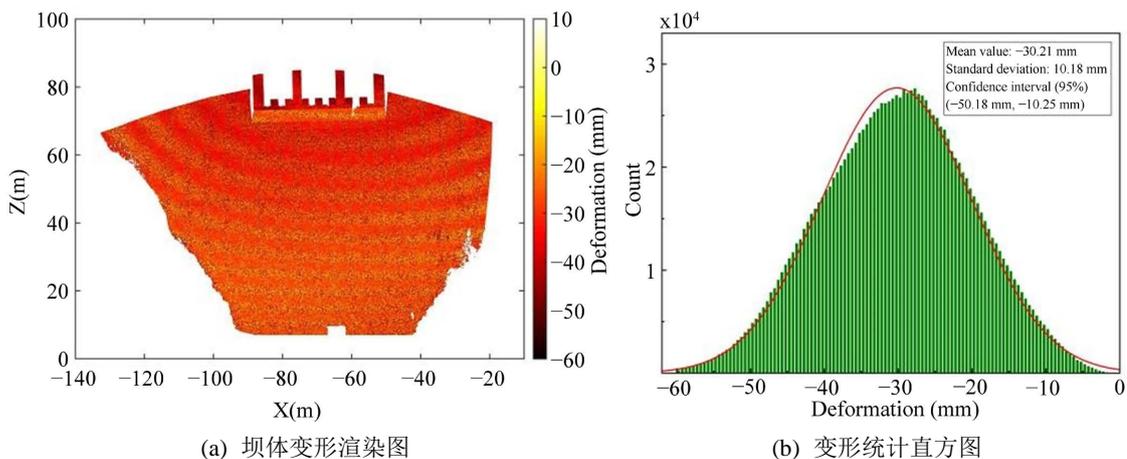


Figure 1. Deformation results based on nearest neighbor point (C2C) algorithm

图 1. 基于近邻点(C2C)算法变形结果

(2) 基于点到模型(C2M)

以水流方向为 Y 方向，计算变形方向与数值。由图 2(a)中颜色区分可知，坝体整体有负向位移，越靠近坝顶，变形值越大，坝体两端相对于中部变形较小。在靠近坝底的位置，存在少量的正向变形。由图 2(b)可知，坝体整体变形区间为 $-27.23\text{ mm} \sim 4.07\text{ mm}$ ，平均变形值为 -12.01 mm 。

(3) 基于多尺度模型(M3C2)算法

由图 3(a)可以看出，该算法计算的坝体变形分布于 C2M 算法计算的结果较为相似，大坝平均变形为 -11.92 mm 。由图 3(b)可知，坝体的变形区间为 $-26.70\text{ mm} \sim 2.86\text{ mm}$ 区间。

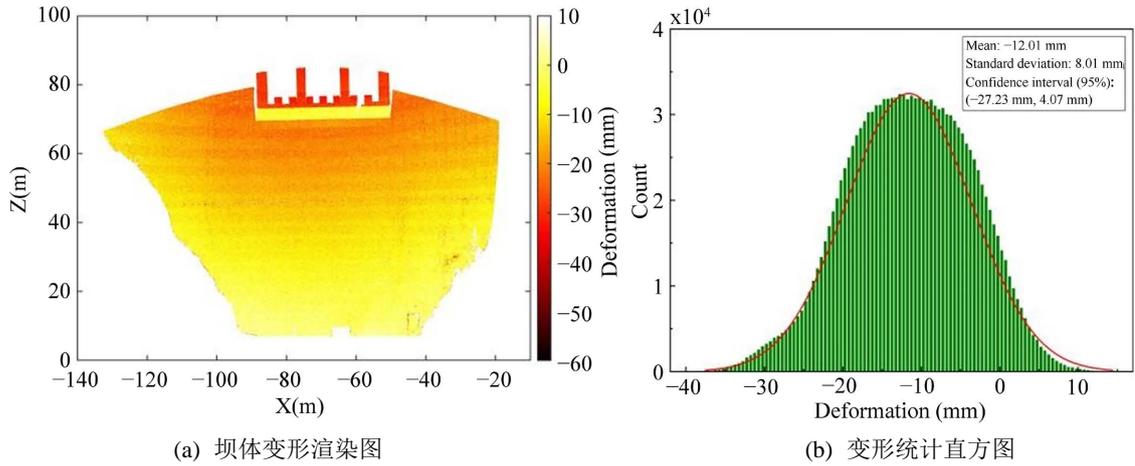


Figure 2. Deformation results based on point to model (C2M)
图 2. 基于点到模型(C2M)的变形结果

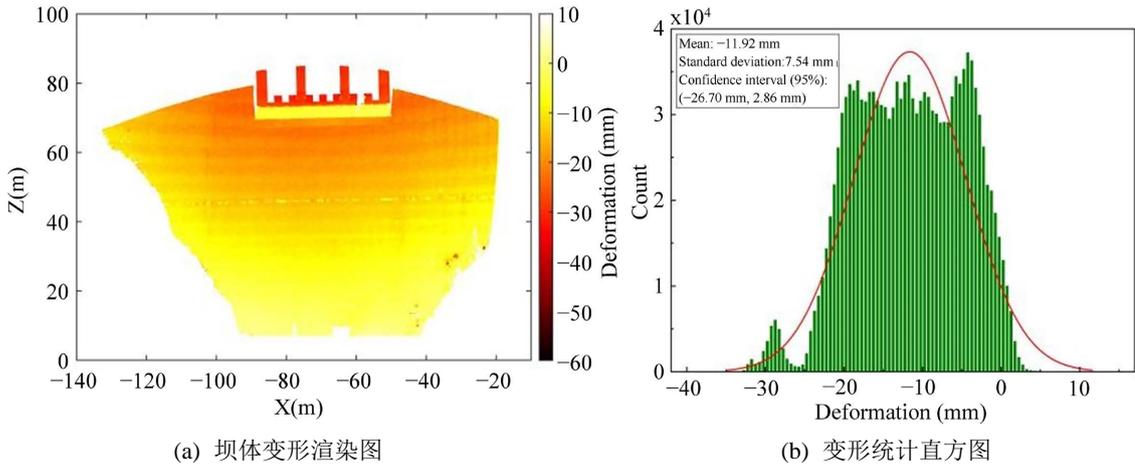


Figure 3. Results based on multi-scale model (M3C2)
图 3. 基于多尺度模型(M3C2)结果

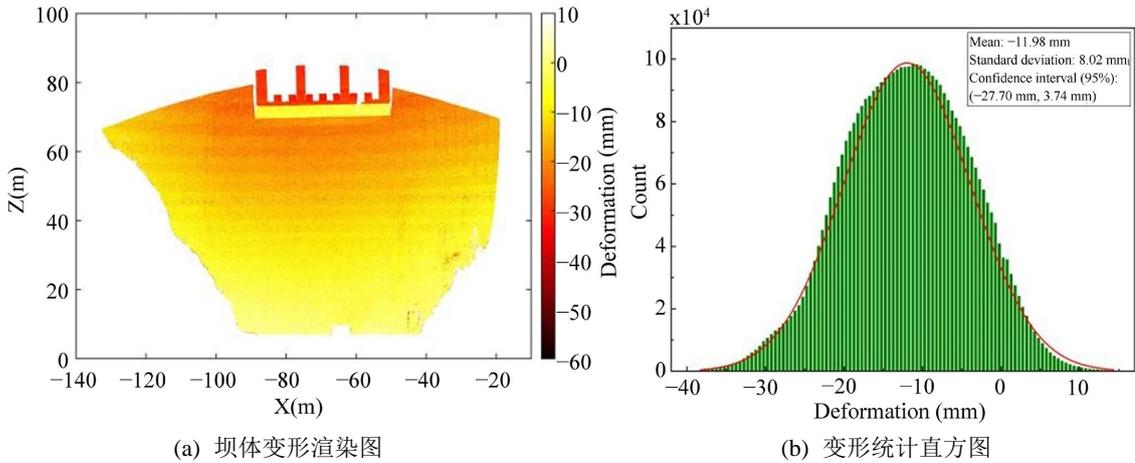


Figure 4. Results of the method in this article
图 4. 本文方法结果

(4) 本文方法

本文方法中对所获取的点云数据构建了 4018 个曲线模型，并进行了距离计算，获取了该拱坝的变形量分布图，如图 4(a)所示。由图可知，二期拱坝点云相对于一期有负向位移，且越接近坝顶变形越大，越靠近中间变形同样越大，四个闸门附近变形量有正向 27 mm。中部区域受到的静水压力与库容水位相关，相同水位时，坝体两侧水压力逐渐变小，坝体变形分布较合理更加符合实际情况。由统计直方图图 4(b)可以看出，坝体变形量主要分布在 3.74 mm~-27.10 mm 区间，平均变形量-11.98 mm。

4.2. 对比分析

上文中比较了三种常见成熟的点云变化计算算法与本文方法，利用激光扫描测量得到拱坝坝体的点云数据，计算结果表明了变形结果与预期相差不大。统计直方图与高斯曲线拟合计算变形平均值、标准差。统计如表 1 所示，表格中负号数值为变形方向为上游，C2C 方法平均变形值最大，标准差同样最大，表明该方法不适合拱坝变形监测。本文方法与其他另两种均值与标准差相差较小，证明了本文方法达到了主流算法的水平。

Table 1. Calculation results of each method

表 1. 各方法计算结果

计算方法	均值(mm)	标准差(mm)	变形范围(mm)	耗时(min)
C2C	-30.21	10.18	-50.18 mm~-10.25 mm	7
C2M	-12.01	8.01	-27.23 mm~4.07 mm	25
M3C2	-11.92	7.54	-26.70 mm~2.86 mm	49
本文方法	-11.98	8.02	-27.10 mm~3.74 mm	18

5. 结束语

本文基于点云数据建立拱坝的拱圈模型，并与成熟的三种算法比较分析。四种算法应用于同一拱坝点云变形监测项目，研究了四种方法在拱坝变形监测中差异性与影响变形分析的因素。本文方法在变形范围、均值精度方面均与成熟模型一致的精度，效率方面也达到了主流水准，试验结果表明了文中所提方法能够满足拱坝的变形监测精度要求。

参考文献

- [1] 吴夏, 赵亮. 三维激光扫描在某水电站大坝基础廊道变形监测的应用[J]. 水电站设计, 2023, 39(4): 101-104.
- [2] 郜士彬, 王康, 沈宗颢, 等. 基于三维激光扫描技术的大坝安全监测方法研究[J]. 水利技术监督, 2023(10): 30-34+70+81.
- [3] 程佳音. GPS + 3D 激光扫描技术在大坝变形检测中的应用[J]. 江西建材, 2023(6): 56-57+60.
- [4] 罗禹. 不同大坝变形监测方法的应用效果对比分析研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(6): 67-69.
- [5] 黄劲风. 机载雷达测绘技术在大坝沉降分析中的应用——以 XL 水电站为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(5): 159-161+166.
- [6] 汪勇. 基于三维激光扫描的水库大坝变形监测系统[J]. 大坝与安全, 2023(1): 68-71.
- [7] 范泯进, 朱燕梅, 张宏达, 等. 基于三维激光扫描的高精度大坝变形监测技术研究[J]. 水利技术监督, 2023(1): 32-35.
- [8] 孙健, 王君杰, 王雁昕, 等. 无人机 LiDAR 技术在矿区大坝监测中的应用研究[J]. 矿山测量, 2021, 49(6): 50-54.
- [9] 杨传训, 杨骥, 李勇, 等. 面向水库大坝形变监测的三维激光扫描点云分析方法[J]. 测绘通报, 2021(10): 54-59.