

文章编号: 1671-251X(2024)02-0035-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023090077

# 一种长巷道形变监测中轴线提取及断面构建方法

陈晓伟<sup>1</sup>, 陈雷<sup>1</sup>, 李猛<sup>1</sup>, 胡成军<sup>2</sup>, 宋磊<sup>2</sup>, 袁鹏喆<sup>2</sup>

(1. 中煤大同能源有限责任公司, 山西 大同 037034;

2. 中煤(天津)地下工程智能研究院有限公司, 天津 300120)

**摘要:** 三维激光扫描技术被广泛用于长巷道形变监测技术的研究中,但目前的研究存在多次扫描采集到的点云数据基准点移位现象;采集到的相邻点云数据公共特征不明显,多站点云拼接后会导致累计误差增大;超前巷道形变受超前支架的影响。针对上述问题,以传统十字点法中顶底板中点与两帮重点交叉的方法为基础,提出了一种基于最小二乘法的巷道中轴线提取方法。巷道定义的直角坐标系的原点位于激光束发射处, $z$ 轴位于激光扫描器的竖向扫描面内; $x$ 、 $y$ 轴均位于仪器的横向扫描面内,中轴线反映了巷道整体的走向和姿态。在巷道掘进完成未受采动影响时,整条巷道进行第一遍扫描,通过最小二乘法确定整条巷道的中心点,将各中心点连接并拟合出一条完整的中轴线。在后续的巷道变形监测中,每监测一次均通过第一次的中点位置进行点云数据叠加,准确获得巷道断面内各个点云的变化情况,进而获得巷道的形变。基于拟合的中轴线构建巷道断面。采用三维激光扫描系统在塔山煤矿 30507 工作面回风巷对巷道形变进行了测试,结果表明:① 巷道形变随着测点距工作面距离的增大而变小,且 30507 工作面回风巷的超前影响范围为 150 m,巷道形变的最大点位于底板临近采空区一侧。② 三维激光扫描和微震监测系统确定的超前范围接近,说明在进入 150 m 时支护煤体已经开始受力,且巷道形变的最大点位于底板临近采空区一侧,而不是十字点观测法观测的底板,证明三维激光扫描结果更为精确,且极大地降低了作业强度。

**关键词:** 长巷道形变监测; 中轴线提取; 断面构建; 三维激光扫描; 最小二乘法; 十字点观测法

中图分类号: TD353

文献标志码: A

A method for extracting axis and constructing section in long roadway deformation monitoring

CHEN Xiaowei<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, HU Chengjun<sup>2</sup>, SONG Lei<sup>2</sup>, YUAN Pengzhe<sup>2</sup>

(1. China Coal Datong Energy Co., Ltd., Datong 037034, China;

2. China Coal (Tianjin) Underground Engineering Intelligent Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300120, China)

**Abstract:** The 3D laser scanning technology is widely used in the research of deformation monitoring technology for long roadways. But there is a phenomenon of benchmark point displacement in the point cloud data collected through multiple scans in current research. The common features of adjacent point cloud data collected are not obvious, and the splicing of multi site clouds will lead to an increase in cumulative errors. The deformation of advanced roadways is affected by advanced supports. In order to solve the above problems, based on the traditional cross point method, which involves the intersection of the midpoint of the roof and floor and the two key points of the two sides, a method for extracting the axis of the roadway based on the least squares method is proposed. The origin of the rectangular coordinate system defined by the roadway is located at the laser beam emission point. The  $z$ -axis is located within the vertical scanning plane of the laser scanner. The  $x$ -axis and  $y$ -axis are located within the horizontal scanning plane of the scanner. The central axis reflects the overall direction and

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2024-02-05; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52104196)。

作者简介: 陈晓伟(1983—), 男, 山西大同人, 工程师, 主要从事煤炭采掘方面的研究工作, E-mail: 112652385@qq.com。

引用格式: 陈晓伟, 陈雷, 李猛, 等. 一种长巷道形变监测中轴线提取及断面构建方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50(2): 35-41.

CHEN Xiaowei, CHEN Lei, LI Meng, et al. A method for extracting axis and constructing section in long roadway deformation monitoring[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(2): 35-41.



扫码移动阅读

position and posture of the roadway. When the roadway excavation is completed without being affected by mining, the entire roadway is scanned for the first time, and the center point of the entire roadway is determined by the least squares method. Each center point is connected and fitted to form a complete central axis. In the subsequent monitoring of roadway deformation, point cloud data is superimposed based on the midpoint position of the first monitoring to accurately obtain the changes in various point clouds within the roadway cross-section, and thus obtain the deformation of the roadway. And the roadway section is constructed based on the fitted central axis. A 3D laser scanning system is used to test the deformation of the 30507 working face return air roadway in Tashan Coal Mine. The results showed the following points. ① The deformation of the roadway decreases with the increase of the distance from the measuring point to the working face, and the leading influence range of the 30507 working face return air roadway is 150 meters. The maximum point of roadway deformation is located on the side near the goaf of the floor. ② The advanced range determined by the 3D laser scanning and microseismic monitoring system is close, indicating that the supporting coal body has started to be under stress when entering 150 meters. The maximum point of roadway deformation is located on the side near the goaf of the floor, rather than the floor observed by the cross point observation method. This proves that the 3D laser scanning results are more accurate and greatly reduces the intensity of the operation.

**Key words:** deformation monitoring of long roadways; axis extraction; section construction; 3D laser scanning; least squares method; cross point observation method

## 0 引言

煤矿巷道受工作面超前应力的影响,易产生形变或破坏<sup>[1]</sup>,导致工作面通道受阻,严重影响工人安全,因此,精确的巷道形变测量对于保障煤矿安全生产具有重要意义<sup>[2]</sup>。经典的十字点法存在以下问题:仅用巷道垂直和水平 2 个位置中点处的移近量描述整个巷道断面的形变,不够全面;仅使用测点的巷道形变代替 2 个测点范围内的巷道形变,不具代表性;巷道形变观测及数据处理工作量大,劳动强度高,效率低下。快速、准确、全面地获取全巷道的真实形变是当前工作的重中之重<sup>[3-4]</sup>。

近年来,煤炭行业发展要求能够进行精准的地质信息探测,因此长巷道形变监测是智慧煤矿建设的重点研究方向<sup>[5-6]</sup>。巷道三维模型的快速获取成为地质透明化的重要一环,是煤矿智能化高效绿色开采的重要部分<sup>[7-8]</sup>。三维激光扫描技术可快速获取被测物体的表面三维坐标<sup>[9-10]</sup>,便于构建复杂的煤矿巷道模型<sup>[11-12]</sup>,被广泛用于长巷道形变监测技术的研究中。郭良林等<sup>[13]</sup>使用三维激光扫描仪对井下巷道形变进行了监测,提出两期单测点点云配准的方法,发现巷道形变表现出非均匀、非对称等特性,但未考虑断面构建问题。刘晓阳等<sup>[14]</sup>采用三维激光扫描与顶板离层仪相结合的方法对巷道顶板稳定性进行了研究,测试了断面点云拟合度,但未进行中轴线提取,结果不够精准。目前的研究主要集中在点云数据的处理和小段巷道模型构建 2 个方面,缺乏对

大场景、长距离工作面的研究,三维激光扫描技术在现场测量巷道形变时存在以下问题:多次扫描采集到的点云数据很难以较高的精度定位到同一个地理坐标系中,存在基准点移位问题<sup>[15]</sup>;采集到的相邻点云数据公共特征不明显,多站点云拼接后会导致累计误差增大<sup>[16]</sup>;在获取巷道点云数据时无法快速有效地获取巷道形变信息<sup>[17]</sup>。

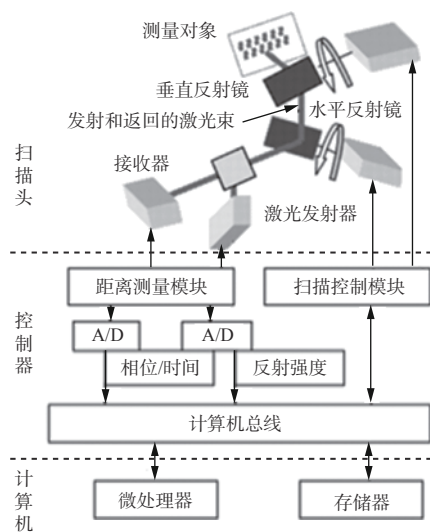
针对上述问题,本文提出了一种基于最小二乘法的巷道中轴线提取方法。首先将点云数据进行拼接,降低由于长距离拼接产生的累计误差;然后采用最小二乘法对巷道中轴线进行二次曲线拟合,避免过拟合问题;最后采用基于中值滤波法去噪的点云预处理技术对超前巷道形变的噪点进行处理。以同煤大唐塔山煤矿有限公司 30507 工作面回风巷为监测对象,进行三维激光扫描观测,从巷道点云数据采集、断面提取、切片叠加等方面进行了应用。

## 1 基于点云的巷道中轴线提取及断面构建方法

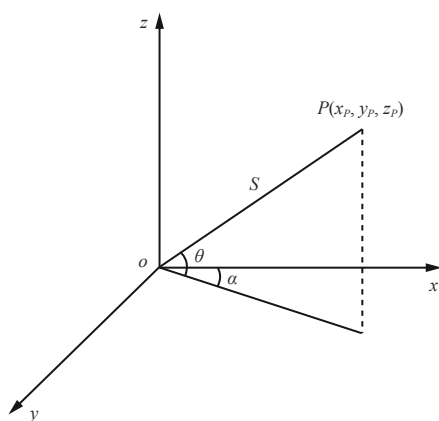
### 1.1 三维激光扫描工作原理

三维激光扫描仪(图 1)发射器发出一个激光脉冲信号,经物体表面漫反射后,沿几乎相同的路径反向传回到接收器,计算目标点  $P$  与扫描仪的距离  $S$ ,控制编码器同步测量每个激光脉冲横向扫描角度观测值  $\alpha$  和纵向扫描角度观测值  $\theta$ 。三维激光扫描测量一般为仪器自定义坐标系。 $x$  轴在横向扫描面内, $y$  轴在横向扫描面内与  $x$  轴垂直, $z$  轴与横向扫描面垂直。目标点  $P$  的坐标<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} x_p = S \cos \theta \cos \alpha \\ y_p = S \cos \theta \sin \alpha \\ z_p = S \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$



(a) 激光扫描仪



(b) 扫描点坐标

图1 激光扫描仪原理

Fig. 1 Principle of the laser scanner

### 1.2 基于最小二乘法的巷道中轴线提取方法

三维激光扫描系统采集到的点云空间位置信息是以仪器坐标系作为坐标基准,受超前应力的影响,基准点移位导致累计误差增大。为了确保基本点不受形变影响,以传统十字点法中顶底板中点与两帮重点交叉的方法为基础,本文提出基于最小二乘法的巷道中轴线提取方法。巷道定义的直角坐标系的原点 $o$ 位于激光束发射处, $z$ 轴位于仪器竖向扫描面内,向上为正; $x$ 、 $y$ 轴均位于仪器的横向扫描面内,其中 $y$ 轴正方向指向的是巷道走向,如图2所示,中轴线反映了巷道整体的走向和姿态。在巷道掘进完成未受采动影响时,整条巷道进行第1遍扫描,通过算法确定整条巷道的中心点,将这些中心点连接拟合出一条完整的中轴线。在后续的巷道变形监测中,每监测一次均通过第1次的中点位置进行点云

数据叠加,准确获得巷道断面内各个点云的变化情况,进而获得巷道的形变。

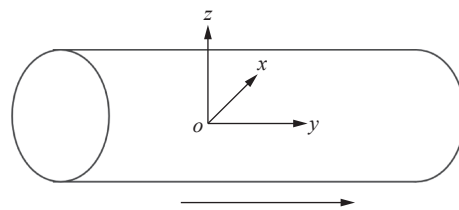


图2 巷道坐标系建模

Fig. 2 Modeling of roadway coordinate system

基于最小二乘法的巷道中轴线提取方法是任意选取巷道一段区间的点云数据,将其分别投影至 $xoy$ 面和 $yozy$ 面,并沿 $y$ 方向设置适当步长 $\Delta y$ ,求出该步长范围内投影后的点云在 $x$ 和 $z$ 方向上的最大值、最小值及平均值;采用二次多项式对选定区间的中值进行曲线拟合,得到 $xoy$ 和 $yozy$ 面上的中轴线方程,如图3所示。

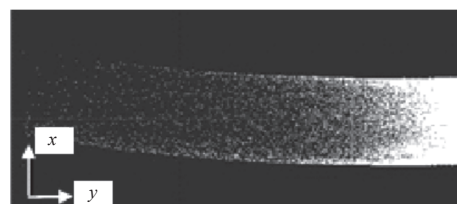
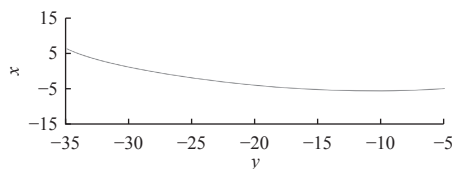
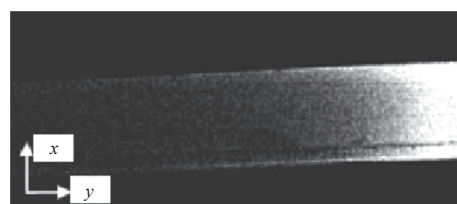
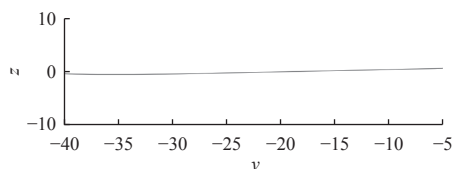
(a) 点云在 $xoy$ 面的投影(b)  $xoy$ 面上的中轴线拟合(c) 点云在 $yozy$ 面的投影(d)  $yozy$ 面上的中轴线拟合

图3 最小二乘法

Fig. 3 Least-square method

1) 将点云数据分别投影至 $xoy$ 和 $yozy$ 面,并从 $y$ 方向的最小值开始,以步长 $0.1\text{ m}$ 沿 $y$ 方向对 $x$ 、 $z$ 搜索最大值和最小值。

2) 计算任一点 $y_c$ 在 $x$ 方向和 $z$ 方向上的平

均值。

$$\begin{cases} x_c = (x_{c\max} + x_{c\min}) / 2 \\ z_c = (z_{c\max} + z_{c\min}) / 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x_c$ ,  $z_c$  分别为  $y_c$  在  $x$  方向和  $z$  方向的平均值;  $x_{c\max}$ ,  $x_{c\min}$  分别为  $y_c$  在  $x$  方向的最大值、最小值;  $z_{c\max}$ ,  $z_{c\min}$  分别为  $y_c$  在  $z$  方向的最大值、最小值。

3) 利用最小二乘法<sup>[19]</sup>对  $x_c, y_c, z_c$  进行二次曲线拟合, 得到巷道的中轴线

$$\begin{cases} x = f(y) = a_0 + a_1y + a_2y^2 \\ z = g(y) = b_0 + b_1y + b_2y^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $y$  为中心点  $Y$  轴坐标;  $f(y)$  为中心轴在  $xoy$  面的投影曲线函数;  $g(y)$  为中心轴在  $yozy$  面的投影曲线函数;  $a_0, a_1, a_2$  为  $f(y)$  的系数;  $b_0, b_1, b_2$  为  $g(y)$  的系数。

### 1.3 基于拟合中轴线的巷道断面构建方法

通过拟合出的中轴线来构建断面, 首先通过巷道内壁任意一点  $q(x_q, y_q, z_q)$  在中轴线上搜寻与该点距离最近的一点, 假设为  $p(x_p, y_p, z_p)$ , 点  $p$  满足中轴线方程。

$$\begin{cases} F(x, y) = 0 \\ G(y, z) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $F(x, y)$  为  $f(y)$  的隐函数;  $G(y, z)$  为  $g(y)$  的隐函数。

在中轴线上作过点  $p$  的切向量, 则该切向量为当前横断面的法向量, 可求出该平面方程为

$$y + k_p x + k'_p z + m = 0 \quad (5)$$

式中:  $k_p$  为  $x$  对  $y$  的导数;  $k'_p$  为  $z$  对  $y$  的导数;  $m$  为常数项。

由于点云落在特定平面的数量较少, 可将巷道内壁一定间隔内的点视为同一平面。若断面厚度为  $d$ , 那么距离横断面小于  $d/2$  的点都视为该平面上的点。

## 2 工程实践

### 2.1 工程概况

塔山煤矿位于山西省大同煤田东翼中东部边缘地带, 30507 工作面是石炭系太原组 3-5 号煤层第 5 个工作面。采用走向长壁综采放顶煤回采工艺。工作面回采长度为 1 666.94 m, 倾向长度为 193 m。平均埋藏深度为 427 m。煤层平均厚度为 11.36 m, 设计采高为 3.8 m, 放煤高度为 7.56 m。30507 工作面采用单巷布置方式, 即在工作面分别布置胶带巷和回风巷。工作面西侧布置回风巷, 东侧布置胶带巷。胶带巷东侧为实煤区, 回风巷西侧为 30509 工作面采空区, 30507 与 30509 工作面之间区段煤柱为 8 m。

考虑到回风巷是小煤柱开采, 同时受临空侧采空区的影响, 在开采过程中可能会发生严重形变, 因此本文以 30507 工作面回风巷为监测对象进行三维激光扫描观测。

### 2.2 实践方案

根据文献[20]可知, 塔山煤矿的超前影响范围不会超过 300 m, 即超前 400 m 为不受采动影响的稳定区域, 本次观测从 30507 工作面回风巷超前工作面 410 m 开始进行观测, 以 20 m 间距依次测量, 共计扫描 20 个测点, 测点布置如图 4 所示。

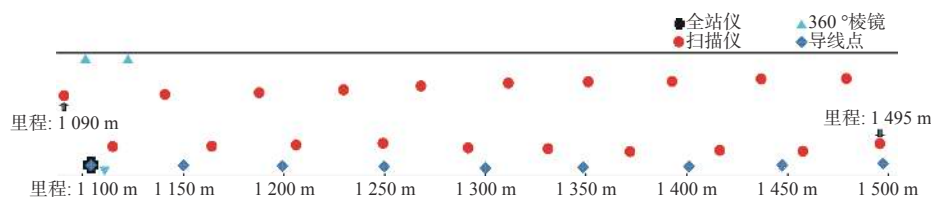


图 4 测点布置

Fig. 4 Layout of measuring points

首先在测点 1 位置上下交错架设 3 个 360°棱镜点, 将棱镜点和巷道内的导线点进行联测, 获得矿井坐标系下各个棱镜点的三维坐标。采用后方交会的方式, 每次进行巷道形变监测数据采集时, 都以这几个棱镜点作为初始测点的定向点, 将矿井坐标系赋予点云数据, 保证每次形变监测采集的点云数据处于同一空间坐标系。然后建立基准棱镜目标, 输入全站仪测出的基准棱镜坐标点, 作为基准测点。最后进行数据拼接, 以基准测点为基础, 提取各测点中球形目标, 再对球形标靶的目标进行拼接, 可得到巷

道的完整点云数据。

采用移动式三维激光扫描系统进行数据采集, 该系统由多线激光雷达、棱镜、球形标靶等组成, 如图 5 所示。



图 5 激光扫描设备

Fig. 5 Laser scanning equipment

3 结果分析

3.1 轮廓去噪

由于巷道内环境异常复杂,特别是巷道中存在人、车辆、设备等对象,在做形变分析时,这些对象均不能参与计算,所以将这些对象认定为噪点数据,在进行形变分析计算前采用中值滤波法<sup>[21]</sup>对噪点数据进行清除,保证分析计算结果的准确性。为了便于识别噪点数据,采用截面的方式浏览数据,在截面模式下选择噪点数据,即可看到去噪前的数据模型,去噪前后对比结果如图6所示。可看出去噪前的点云数据包含扫描过程中采集到人、车辆等干扰形变监测的噪点数据,经过中值滤波法清除后,去噪后的巷道只保留了参与形变监测的巷道顶板、地板和左右两帮的点云数据。

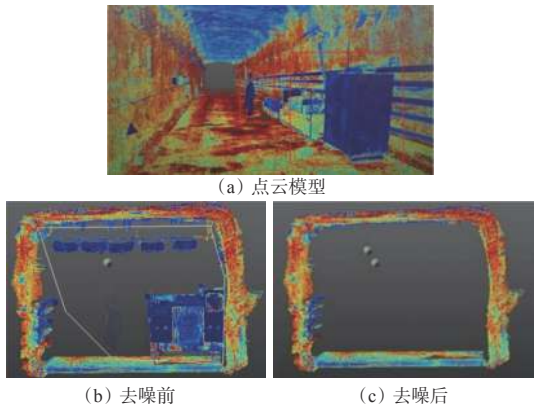


图6 去噪前后对比结果

Fig. 6 Comparing results before and after denoising

3.2 巷道形变

在获得去噪的巷道三维点云数据后,在同一位置进行切片,得到剖面,获得相同位置不同时间的横截面,利用2期的截面数据进行叠加对比分析,从而获得巷道形变的变化规律。

在人工测量的基础上,采用三维激光扫描仪对30507工作面回风巷超前400 m区域进行了全巷道扫描建模,开采进度监测周期为3 d,巷道形变对比云图如图7所示。可看出巷道形变随着测点距工作面距离的增大而变小。整个测量体现了巷道形变的全过程,直观地展现了巷道整体形变情况。巷道的形变明显存在不对称性。巷道顶板变化较小,只在巷道肩窝处有较大形变,其他位置均基本保持稳定,这与现场观测结果相吻合。而底板表现出明显的底鼓,可看出塔山煤矿的巷道顶底板移进量主要以底鼓为主,而巷道两帮形变也呈现整体平移特征。结合形变图可知,巷道形变的最大值并不位于巷道的中心点或两帮的中心点。

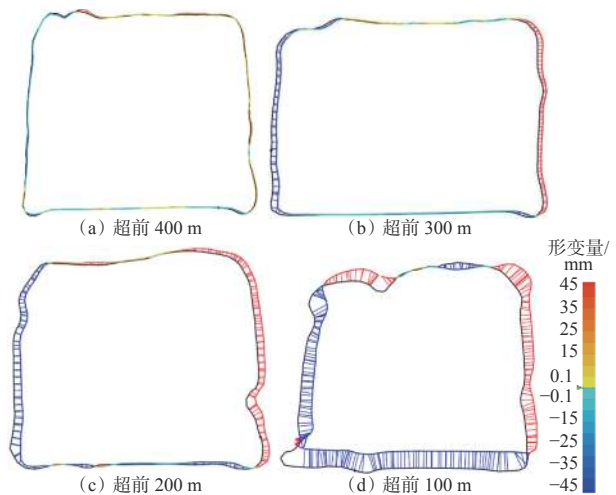


图7 巷道形变对比云图

Fig. 7 Cloud chart of roadway deformation comparison

测点数据见表1,可看出随着工作面推进,巷道形变逐渐增加。当测点距离工作面150 m时,巷道开始出现微小的形变(3 mm),说明已经进入超前影响范围;当测点距离工作面120 m时,巷道形变继续增加;当测点距离工作面70 m时,巷道形变更加剧烈。

表1 测点数据

Table 1 Measuring point data		
测点距工作面距离/m	最大形变量/mm	影响范围/m
150	3	10.3
120	6	12.6
70	11	18.8

3.3 精度分析

为了验证和对比三维激光扫描的精准度,在30507工作面回风巷安设了十字观测点、微震监测系统和三维激光扫描系统,对超前影响范围及其剧烈程度进行了对比,结果见表2。①在30507工作面回风巷内距工作面前方410 m处布设测点,沿巷道轴向布置20个测点,测点位置与三维激光扫描测量位置相同,每个测点布设3个测量断面。②在30507工作面回风巷、胶带巷分别布置8个拾震器,相邻测点间距为40 m。

表2 不同监测方法精度对比

Table 2 Accuracy comparison of different monitoring methods			
监测方法	超前范围/m	最大形变量/mm	最大形变位置
三维激光扫描	150	93	临空侧小煤柱靠底板处
微震监测系统	145	—	—
十字点观测法	110	87	顶底板

由表2可看出,由于微震监测系统与三维激光扫描系统采用了先进的传感器等设备,测量的超前

范围要远超十字点观测法,三维激光扫描和微震监测系统确定的超前范围接近,说明在进入 150 m 时支护煤体已开始受力。另外三维激光扫描系统更全面地体现了巷道形变,且最大形变位置不是巷道的顶底板中点,为超前范围进行巷道修改和支护决策提供了依据。

#### 4 结论

1) 针对煤矿井下长巷道形变监测中点云数据基准点不易确定的技术难题,在十字点观测法测量原理的基础上,提出了基于最小二乘法的巷道中轴线提取方法。首先以中轴点为基准点将后续的点云数据进行拼接,确保了数据的精准,降低了由于长距离拼接而产生的累计误差;由于巷道中轴线无法用单一函数描述,采用最小二乘法进行二次曲线拟合,避免了过拟合问题。基于拟合的中轴线提出了巷道断面构建方法。

2) 采用三维激光扫描系统在塔山煤矿 30507 工作面回风巷对巷道形变进行了测试,结果表明:巷道形变随着测点距工作面距离的增大而变小,且 30507 工作面回风巷的超前影响范围为 150 m,巷道最大形变点位于底板临近采空区一侧。

3) 与微震监测系统和十字点观测法的对比结果表明,三维激光扫描系统的测量精度与微震监测系统相近,说明在进入 150 m 时支护煤体已经开始受力,三维激光扫描系统计算结果比十字点观测法更为精确,且极大地降低了工人劳动强度。

#### 参考文献(References):

- [1] 姜阔胜,李良和,韩刘帮,等.基于激光雷达技术的矿井巷道变形在线监测[J].北京信息科技大学学报(自然科学版),2020,35(5):1-4.  
JIANG Kuosheng, LI Lianghe, HAN Liubang, et al. On-line monitoring of mine tunnel deformation based on laser radar technology[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2020, 35(5): 1-4.
- [2] 王国法,杜毅博.智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J].煤炭科学技术,2019,47(1):1-10.  
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.
- [3] 杨洪涛,于印,许吉禅,等.基于线扫描原理的煤矿巷道变形测量系统[J].工矿自动化,2022,48(7):113-117,148.  
YANG Hongtao, YU Yin, XU Jichan, et al. Coal mine roadway deformation measurement system based on line scanning principle[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(7): 113-117, 148.
- [4] 李甲,王文杰,尹东.基于改进灰色 Verhulst 模型的巷道变形破坏预警方法研究及应用[J].矿业安全与环保,2022,49(2):66-71.  
LI Jia, WANG Wenjie, YIN Dong. Research and application of early warning method of roadway deformation based on improved grey Verhulst model[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 66-71.
- [5] 张华,李靖锋,魏红磊,等.基于智能视频识别技术的智能化煤矿安全管理研究与应用[J].工矿自动化,2021,47(增刊1):10-13.  
ZHANG Hua, LI Jingfeng, WEI Honglei, et al. Research and application of intelligent coal mine safety management based on intelligent video recognition technology[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(S1): 10-13.
- [6] 张平松,李洁,李圣林,等.三维地质建模在煤矿地质可视化中的应用分析[J].科学技术与工程,2022,22(5):1725-1740.  
ZHANG Pingsong, LI Jie, LI Shenglin, et al. Application status of 3D geological modeling in the development of coal mine intelligence[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 1725-1740.
- [7] 王海军,刘再斌,雷晓荣,等.煤矿巷道三维激光扫描关键技术及工程实践[J].煤田地质与勘探,2022,50(1):109-117.  
WANG Haijun, LIU Zaibin, LEI Xiaorong, et al. Key technologies and engineering practice of 3D laser scanning in coal mine roadways[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 109-117.
- [8] 李梅,康济童,刘晖,等.基于 BIM 与 GIS 的矿山巷道参数化三维建模技术研究[J].煤炭科学技术,2022,50(7):25-35.  
LI Mei, KANG Jitong, LIU Hui, et al. Study on parametric 3D modeling technology of mine roadway based on BIM and GIS[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 25-35.
- [9] 余洋,刘昌华,王世东,等.三维激光扫描测量在植被参数提取中的应用[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(4):51-57.  
YU Yang, LIU Changhua, WANG Shidong, et al. Applications of 3D laser scanning technology in the extraction of vegetation parameters[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2022, 41(4): 51-57.
- [10] 王腾,查剑锋,张民,等.基于三维激光扫描的矿区道路路沉陷监测研究[J].煤炭工程,2021,53(3):161-165.  
WANG Teng, ZHA Jianfeng, ZHANG Min, et al. Monitoring of mining area road subsidence based on 3D

- laser scanning[J]. Coal Engineering, 2021, 53(3): 161-165.
- [11] 荣耀, 曹琼, 安晓宇, 等. 综采工作面三维激光扫描建模关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 82-87. RONG Yao, CAO Qiong, AN Xiaoyu, et al. Research on key technologies of 3D laser scanning modeling in fully mechanized working face[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(10): 82-87.
- [12] 张琰, 孔祥思, 徐西桂. 基于移动三维激光扫描的隧道结构监测方案研究与应用[J]. 矿山测量, 2021, 49(1): 20-25. ZHANG Yan, KONG Xiangsi, XU Xigui. Application and research of tunnel structure monitoring solution based on moving 3D laser scanning system[J]. Mine Surveying, 2021, 49(1): 20-25.
- [13] 郭良林, 周大伟, 张德民, 等. 基于激光点云的巷道变形监测及支护研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(8): 178-183. GUO Lianglin, ZHOU Dawei, ZHANG Demin, et al. Research on deformation monitoring and supporting of tunnel based on laser point cloud[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(8): 178-183.
- [14] 刘晓阳, 胡乔森, 李慧娟. 基于三维激光扫描技术的巷道顶板监测研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(7): 81-84, 107. LIU Xiaoyang, HU Qiaosen, LI Huijuan. Research on coal mine roof monitoring based on three-dimensional laser scanning technology[J]. China Coal, 2017, 43(7): 81-84, 107.
- [15] 杨丁亮, 邹进贵. 长大隧道点云的绝对定位配准方法[J]. 测绘通报, 2022(增刊2): 179-184. YANG Dingliang, ZOU Jingui. Point cloud registration method by absolute control in long tunnel[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(S2): 179-184.
- [16] 金卓, 王占利, 张自宾. 基于三维激光扫描的矿井开拓巷道围岩变形测量技术研究[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 1120-1125. JIN Zhuo, WANG Zhanli, ZHANG Zibin. Research on measurement technology of surrounding rock deformation of mine development roadway based on 3D laser scanning[J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 1120-1125.
- [17] 郑理科, 王健, 李志远, 等. 一种局部最优邻域法向量估算的巷道点云去噪方法[J]. 测绘科学, 2023, 48(4): 140-148, 171. ZHENG Like, WANG Jian, LI Zhiyuan, et al. A denoising method of roadway point cloud based on local optimal neighborhood normal vector estimation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(4): 140-148, 171.
- [18] 常巧梅, 杨静, 阎跃观. 基于三维激光扫描技术的巷道变形测量方法[J]. 煤炭技术, 2023, 42(6): 30-32. CHANG Qiaomei, YANG Jing, YAN Yueguan. Roadway deformation measurement method based on 3D laser scanning technology[J]. Coal Technology, 2023, 42(6): 30-32.
- [19] 李小鹏, 刘少伟, 付孟雄, 等. 密集钻孔切顶卸压关键参数影响因素研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 243-253. LI Xiaopeng, LIU Shaowei, FU Mengxiong, et al. Research and application of influencing factors of key parameters of roof cutting and pressure relief by dense drilling[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 243-253.
- [20] 黄伟伟. 基于粒子群的全空间瞬变电磁二维反演方法研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(4): 79-84. HUANG Weiwei. Research on two-dimensional inversion method of transient electromagnetic in whole-space based on particle swarm[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(4): 79-84.
- [21] 张宇航, 杨武年, 任金铜, 等. 高分二号卫星影像自适应模糊阈值法小波去噪[J]. 测绘通报, 2019(3): 32-35. ZHANG Yuhang, YANG Wunian, REN Jintong, et al. Adaptive fuzzy threshold method wavelet denoising of GF-2 satellite image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(3): 32-35.