

高湿多尘采空区三维激光探测数据误差分析与修正

徐 帅¹, 侯朋远¹, 梁瑞余¹, 杜永亮²

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 赤峰山金红岭有色矿业有限责任公司, 内蒙古 赤峰 025450)

摘 要: 针对地下金属矿山高湿、多尘复杂环境导致采空区三维激光探测结果失真的问题, 研制了采空区复杂环境模拟装置, 进行了 64 组不同相对湿度、粉尘质量浓度条件下的点云数据误差分析与修正实验. 结果表明, 随相对湿度和粉尘质量浓度增大, 点云平均误差比均呈“S”型趋势增大; 当粉尘质量浓度介于 $30.0 \sim 85.0 \text{ mg/m}^3$ 、相对湿度介于 $76.0\% \sim 85.0\%$ 时, 点云平均误差比呈幂指数增长; 适合采空区三维激光探测的粉尘质量浓度为 $0 \sim 5.6 \text{ mg/m}^3$, 相对湿度为 $0 \sim 49.0\%$. 同时, 提出了高湿、多尘探测环境下的点云数据误差修正公式, 并应用于福建某金矿复杂采空区的精准探测工程中, 修正后的采空区边界信息更加符合实际情况.

关 键 词: 复杂环境采空区; 三维激光探测; 粉尘质量浓度; 相对湿度; 误差修正

中图分类号: TD 76 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)09-1330-07

Error Analysis and Correction of 3D Laser Detection Data for High-Humidity and Dusty Goafs

XU Shuai¹, HOU Peng-yuan¹, LIANG Rui-yu¹, DU Yong-liang²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shandong Gold Group Hongling Non-ferrous Mining Co., Ltd., Chifeng 025450, China. Corresponding author: HOU Peng-yuan, E-mail: neuhy@163.com)

Abstract: As the high-humidity, dusty and complex environment leads to the distortion of 3D laser detection results for goafs in the underground metal mines, a device is developed to simulate the complex environment of goafs and to carry out 64 groups of point cloud error analysis and modification experiments with different dust concentrations and relative humidity. It could be observed that with the increase of dust concentration and relative humidity, the average error ratio of point cloud data showed an "S" trend. In particular, under the condition of $30.0 \text{ mg/m}^3 \leq \rho \leq 85.0 \text{ mg/m}^3$ and $76.0\% \leq w \leq 85.0\%$, the error growth rate of point cloud data increases exponentially. It can be concluded that the ρ ranging from 0 to 5.6 mg/m^3 and the w ranging from 0 to 49.0% are favorable for the laser detection of goaf. In addition, the error correction formulas of point cloud are put forward for high humidity, dusty and complex environment. After the application of test results to a gold mine in Fujian Province, the revised parameters such as the elevation, the volume and the exposed area of the goaf are more practical, which proves the accuracy of detection data.

Key words: complex goaf; three-dimensional laser detection; dust concentration; relative humidity; error correction

采空区三维激光探测技术(cavity monitoring system, CMS)因其高效率、高精度、高安全性等优点被广泛应用于国内外地下金属矿山的空区形态

探测^[1-5]. 精准的探测结果是空区治理、残矿回收、安全监管的重要基础, 但在实际空区探测中, 由于设备因素、人为因素和环境因素^[6]的影响,

获取的探测点云数据存在一定的误差. 这些误差导致采空区三维激光探测结果失真, 给空区形态的评估与稳定性分析、残留矿体的计算与回收、安全治理方案的制定与实施带来严重的影响, 不利于矿山安全高效开采.

矿山生产过程中凿岩、爆破、运搬等环节产生大量的炮烟粉尘. 这些炮烟粉尘在高温 - 高湿的环境下, 悬浮于空气中形成类气溶胶物质^[7]. 这种固液多相系类气溶胶物质对激光能量的吸收和折射是造成三维激光探测误差的主要环境影响因素. 针对这类环境影响因素, 一些学者分析了激光扫描轨迹曲线的拓扑关系, 采用四点插入法对深部复杂环境下采空区激光扫描异常点云数据进行了修正^[8]; 或者运用弦高比和周长比判据及 Open GL 编程进行异常点云拾取删除全面过滤^[9]; 也有一些学者基于激光光斑、大气衰减、探测距离、目标表面粗糙度和反光率以及光源的不同频率来进行探测误差的分析研究, 定性描述了上述误差源对三维激光探测精度的影响^[10-14]. 中南大学一些学者结合井下误差来源, 开展了采空区三维激光探测现场试验, 基于灰色关联理论分析了各主要因素对点云精度的影响权重^[6], 在一定程度上提高了探测的精度. 但由于各个矿山生产环境不同, 现场试验所得结论难以推广应用于其他矿山, 致使其研究结果的代表性和普适性受到了限制.

鉴于此, 本文设计了井下高湿、多尘的探测环境模拟装置, 利用采空区三维激光探测设备 CMS V400, 开展了粉尘质量浓度和相对湿度室内单因素探测数据误差分析修正实验, 量化计算了粉尘质量浓度 ρ 和相对湿度 w 对探测点云误差的影响, 并得到了相应的误差修正公式; 提出了适合采空区三维激光探测的粉尘质量浓度和相对湿度范围. 本文研究结果对提高采空区三维激光探测结果的准确性, 为采空区评估、治理提供了有效的支撑与借鉴.

1 实验设计

1.1 实验材料与设备

典型的金属矿山井下粉尘粒径约为 $0.1 \sim 50 \mu\text{m}$, 粉尘分散度^[15]如表 1 所示. 实验采用的粉尘质量浓度测定仪为 Thermo Electron 公司开发的 Personal Data RAM, 型号为 pDR - 1000, 测量范围为 $0.001 \sim 400.0 \text{ mg/m}^3$, 响应微粒尺寸范围为 $0.1 \sim 10.0 \mu\text{m}$.

表 1 典型金属矿山井下粉尘分散度
Table 1 Dispersion degree of dust in metal mine

粒径/ μm	<2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	>10.0
分散度/%	40~50	35	10~15	5~10

选用的实验粉尘为无氧化性、非可燃性、防爆性能良好的滑石粉, 为满足金属矿山井下粉尘粒径范围与分散度要求且符合粉尘质量浓度测定仪的响应尺寸, 实验粉尘粒径选取如表 2 所示.

表 2 实验粉尘粒径统计表
Table 2 Experimental dust particle size statistics

粒径/ μm	1.6	2.6	6.5	10.0
分散度/%	45	35	10	10

选用的超声波加湿器(震荡频率为 1.7 MHz) 将水抛离水面产生水雾, 构成分散型气溶胶, 水雾粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$. 选用的温湿度记录仪测量范围分别为 $-40.0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 85.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0 \sim 100.0\%$, 测量精度分别为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 0.1% .

选用的采空区三维激光探测设备为加拿大 Optech 公司开发的 CMS V400, 距离分辨率为 1 mm , 水平扫描角度范围为 $0^\circ \sim 290^\circ$, 垂直扫描角度范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 测距范围为 $15 \text{ cm} \sim 150 \text{ m}$. 其工作原理如图 1 所示. 三维激光探测设备组装完毕并伸入采空区后, 探测头一边围绕其轴向方向旋转, 一边获取扫描距离和扫描角度; 每当围绕轴向方向完成 360° 旋转后, 探测头自动以预设的纵向步进角度抬高仰角并继续围绕轴向方向旋转, 激光脉冲按新的圆周进行反射, 直至完成整个采空区的探测工作.

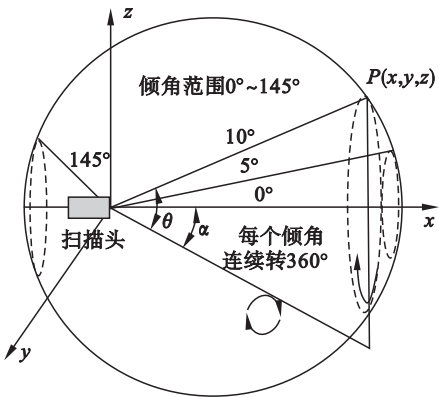


图 1 CMS 工作原理示意图
Fig. 1 Schematic of CMS working principle

采用以探测头激光发出点为坐标原点的坐标系, x 轴沿探测头轴线, 激光照射方向为正方向; y 轴在水平探测面内且与 x 轴垂直, 激光发出

方向为正方向; z 轴与 xy 平面垂直, z 轴正方向遵循左手坐标系,由此可得 CMS 测点坐标的计算公式:

$x = s \times \cos\theta \times \cos\alpha,$

$y = s \times \cos\theta \times \sin\alpha,$

$z = s \times \sin\theta.$

(1)

式中: s 为采空区边界点到激光发出点的距离,m; θ 为边界点和激光发出点连线与 xy 平面间的夹角, $(^\circ)$; α 为激光发出点和边界点连线在 xy 平面上的投影与探测头轴线方向的夹角, $(^\circ)$.

1.2 实验装置与方法

1.2.1 实验装置

高湿-多尘探测环境模拟装置如图 2 所示,设备外形为喇叭口状密封装置,主体框架由断面尺寸为 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 的 201 型不锈钢管焊接而成.为了便于观察内部情况,前面板选用厚度为 1 cm 且中间留有直径为 30 cm 圆孔的透明亚克力板制成,其余面板均选用厚度为 1 cm 的木板制成.为了提高激光的反射率,目标面板(后面板)涂有白色反光材料.实验装置的底部面板上嵌套有 5 个可调节功率的风扇,底部面板上方覆盖同尺寸风箱,且风箱顶部均匀布满圆孔,能产生均匀稳流的气体进行扬尘.装置顶部面板设置了 2 个粉尘出口和 4 个粉尘加料口,保证装置内部粉尘质量浓度达到允许范围内的动态平衡.装置左右面板上分别嵌套了 1 台粉尘质量浓度测定仪,监测探测过程中粉尘质量浓度的变化情况.装置内部布置了 2 台超声波加湿器,保证装置内部相对湿度达到允许范围内的动态平衡.装置顶部面板嵌套了 1 台温湿度记录仪,监测探测过程中的温湿度变化情况.

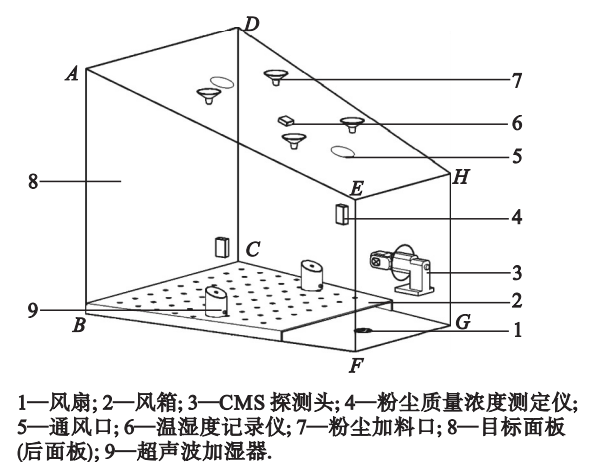


图 2 实验装置示意图
Fig. 2 Schematic of the experimental device

1.2.2 实验方法

1) 坐标校正. 每次激光探测前都需要通过 Nivo2. M 全站仪对探测头中心靶标和实验装置

的顶点坐标进行校正,保证每次探测的点云所在坐标系一致.中心靶标和实验装置各顶点坐标如表 3 所示.

2) 设置参照组. 在室内湿度($w \leq 50.0\%$)、室内粉尘质量浓度($\rho \leq 6.0\text{ mg/m}^3$)的条件下,以 1×1 精度完成目标面板的三维激光探测,其探测结果作为实验标准参照组,确定误差的允许范围.

表 3 特征点坐标值
Table 3 Coordinate value of feature points

特征点	坐标值		
	x	y	z
中心靶标	0.000	-0.025	-0.010
探测头中心	0.000	0.000	0.000
A	-0.995	2.621	1.498
B	-0.995	2.621	-0.615
C	1.004	2.621	-0.615
D	1.004	2.621	1.498
E	-0.630	-0.014	0.695
F	-0.630	-0.014	-0.615
G	0.626	-0.014	-0.615
H	0.626	-0.014	0.695

注:表中 A~H 特征点即图 2 所示实验室装置各顶点.

3) 设置实验组. 由于粉尘质量浓度随湿度增大而自然下降,在实际的生产环境中,湿度与粉尘质量浓度间相互耦合的关系十分复杂,因而本文仅分别选取不同粉尘质量浓度和相对湿度作为单因素研究变量,按照表 4 的粉尘质量浓度和相对湿度进行实验组探测,其中 1~22 组为粉尘质量浓度变化实验组,23~64 组为相对湿度变化实验组,且每组重复 3 次,计算均值以降低偶然误差.

表 4 粉尘质量浓度与相对湿度
Table 4 Design range of dust concentration and relative humidity

编号	粉尘质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$		编号	相对湿度/%	
	浓度下限	浓度上限		湿度下限	湿度上限
1	0.0	10.0	23	49.6%	50.4%
2	10.0	20.0	24	50.6%	51.4%
3	20.0	30.0	25	51.6%	52.4%
4	30.0	40.0	26	52.6%	53.4%
5	40.0	50.0	27	53.6%	54.4%
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
18	170.0	180.0	60	86.6%	87.4%
19	180.0	190.0	61	87.6%	88.4%
20	190.0	200.0	62	88.6%	89.4%
21	200.0	210.0	63	89.6%	90.4%
22	210.0	220.0	64	90.6%	91.4%

探测过程中,需要时刻观察粉尘质量浓度测

定仪和温湿度记录仪的示数,在其他环境因素不变的情况下,通过粉尘加料口和加湿器控制开关分别调节实验装置内的粉尘质量浓度和相对湿度,使其处于相应梯度范围内的动态平衡,直至完成所有实验组的激光探测。

1.2.3 数据处理

数据处理流程如图 3 所示,激光发出点和探测点连线方程与各面板所在平面方程联立所得标准点的取值范围如表 5 所示. 不同粉尘质量浓度和相对湿度下的点云误差用平均误差比 $\bar{\delta}$ 表示:

$$\delta = \frac{d}{D}. \tag{2}$$

式中: δ 为距离误差比,% ; d 为探测点和标准点之间的距离,m; D 为激光发出点和标准点之间的距离,m.

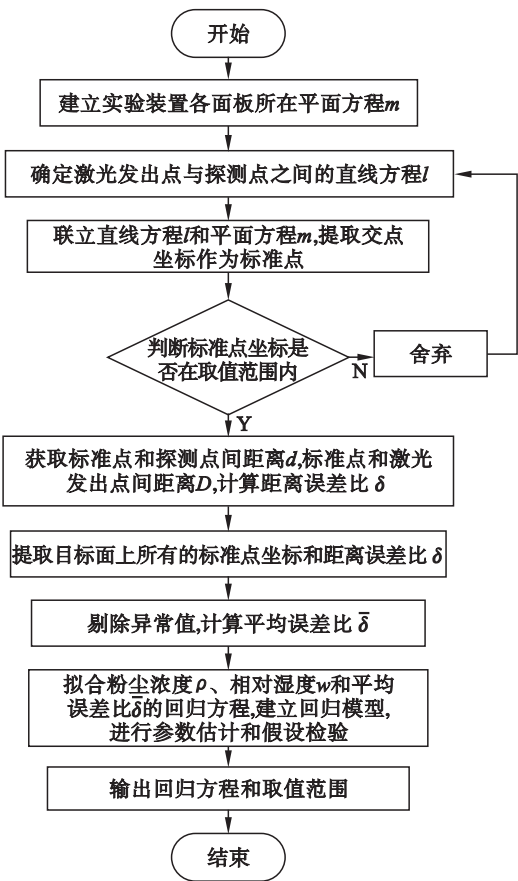


图3 数据处理流程图

Fig. 3 Flow chart of data processing

通过式(2)计算,可得如下 m 个距离误差比:

$$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_m.$$

上述 m 个距离误差比通过格拉布斯准则剔除 n 个异常值后,可得 $m - n$ 个距离误差比,如下:

$$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{m-n}.$$

则有

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{m-n} \delta_i}{m - n}, \tag{3}$$

式中 $\bar{\delta}$ 为平均误差比,% .

2 实验结果分析与讨论

按照图 3 流程进行数据处理,得出参照组实验条件下(相对湿度 $w = 49.0\%$,粉尘质量浓度 $\rho = 5.6 \text{ mg/m}^3$) 的平均误差比 $\bar{\delta} = 1.23\%$,即采空区三维激光探测允许误差范围为 $0 \sim 1.23\%$.

2.1 粉尘质量浓度对探测数据的影响

2.1.1 实验结果

不同粉尘质量浓度 ρ 与探测点云平均误差比 $\bar{\delta}$ 的关系曲线如图 4 所示. 探测点云平均误差比 $\bar{\delta}$ 随着粉尘质量浓度 ρ 的升高呈“S”型趋势增大. 当粉尘质量浓度 $\rho \leq 30.0 \text{ mg/m}^3$ 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 增长速率较慢,基本呈线性增长,最大平均误差比不超过 5.0% ;当粉尘质量浓度 ρ 介于 $30.0 \sim 85.0 \text{ mg/m}^3$ 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 增长速率明显加快,大致呈指数型增长,最大平均误差比约为 46.0% ;当粉尘质量浓度 $\rho \geq 85.0 \text{ mg/m}^3$ 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 增长速率再次降低,基本恢复线性增长. 从理论上来说,当粉尘质量浓度 ρ 无限接近 0 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 也无限接近 0 ;当粉尘质量浓度 ρ 无限大时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 无限接近于 100% .

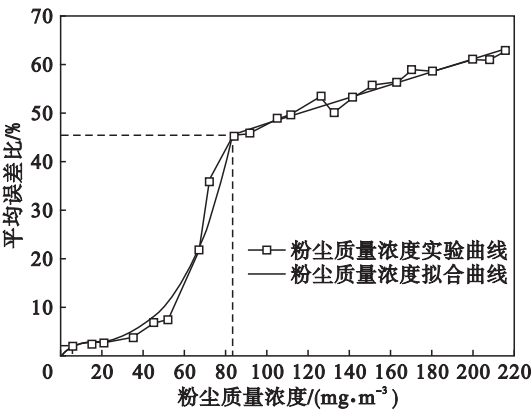


图4 粉尘质量浓度和点云平均误差比曲线图

Fig. 4 Curves of dust concentration vs average error ratio

2.1.2 结果分析与讨论

实验结果表明,粉尘质量浓度 $\rho \leq 5.6 \text{ mg/m}^3$ 时,三维激光探测平均误差比 $\bar{\delta}$ 为 1.23% ,在允许范围内,可忽略不计;当粉尘质量浓度 ρ 介于 $5.6 \sim 30.0 \text{ mg/m}^3$ 时,三维激光探测精度受其影响很小;而当粉尘质量浓度 $\rho \geq 30.0 \text{ mg/m}^3$ 时,

探测精度对于粉尘质量浓度的敏感性显著提高. 这表明,采空区三维激光探测设备对粉尘质量浓度的响应范围为 $\rho > 5.6 \text{ mg/m}^3$,特别是粉尘质量浓度 $\rho \geq 30.0 \text{ mg/m}^3$ 时,影响更加明显. 井下探测时,应注意采取必要的通风除尘手段使粉尘质量浓度降到 5.6 mg/m^3 以下.

结合实验结果,按照图 4 所示粉尘质量浓度和点云平均误差比增长趋势,分别以 $6.0, 85.0 \text{ mg/m}^3$ 为分界点,分段拟合不同粉尘质量浓

度和点云平均误差比的回归方程,输出取值范围,修正点云数据误差,所得拟合曲线如图 4 所示,所得误差修正公式如式(4)所示.

$$\bar{\delta} = \begin{cases} 0.22\rho, 0 < \rho \leq 6.0; \\ 1.046^{\rho}, 6.0 < \rho \leq 85.0; \\ 0.13 \times \rho + 34.73, 85.0 < \rho \leq 220.0. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{\delta}$ 为点云平均误差比,%; ρ 为探测环境的粉尘质量浓度, mg/m^3 .

表 5 平面方程与标准点取值范围统计表				
Table 5 Value range statistical table of plane equations & normal points				
面板	平面方程	标准点取值范围		
		x	y	z
左 m_1	$\frac{1\,113\,551}{200\,000}x + \frac{154\,249}{200\,000}y + \frac{87\,962\,077}{25\,000\,000} = 0$	$-0.995 \leq x \leq -0.630$	$-0.014 \leq y \leq 2.621$	$\begin{aligned} & -0.615 \leq z \leq \\ & \frac{0.803 \times (y + 0.014)}{2.635} + \\ & 0.695 \end{aligned}$
右 m_2	$\frac{1\,113\,551}{200\,000}x - \frac{399\,357}{500\,000}y - \frac{1\,748\,298\,313}{500\,000\,000} = 0$	$0.626 \leq x \leq 1.004$	$-0.014 \leq y \leq 2.621$	$\begin{aligned} & -0.615 \leq z \leq \\ & \frac{0.803 \times (y + 0.014)}{2.635} + \\ & 0.695 \end{aligned}$
上 m_3	$\frac{1\,605\,197}{1\,000\,000}y - \frac{1\,053\,473}{2\,000\,000}z + \frac{3\,683\,291\,433}{1\,000\,000\,000} = 0$	$\begin{aligned} & \frac{0.365 \times (y - 2.621)}{-2.635} - 0.995 \\ & \leq x \leq \\ & \frac{0.365 \times (y - 2.621)}{2.635} + 0.995 \end{aligned}$	$-0.014 \leq y \leq 2.621$	$0.695 \leq z \leq 1.498$
下 m_4	$\frac{1\,053\,473}{2\,000\,000}z + \frac{129\,577\,179}{400\,000\,000} = 0$	$\begin{aligned} & \frac{0.365 \times (y - 2.621)}{-2.635} - 0.995 \\ & \leq x \leq \\ & \frac{0.365 \times (y - 2.621)}{2.635} + 0.995 \end{aligned}$	$-0.014 \leq y \leq 2.621$	$z = -0.615$
后 m_5	$\frac{4\,223\,887}{1\,000\,000}y - \frac{11\,070\,807\,827}{10\,000\,000\,000} = 0$	$-0.995 \leq x \leq 1.004$	$y = 2.621$	$-0.615 \leq z \leq 1.498$

2.2 相对湿度对探测数据的影响

2.2.1 实验结果

不同相对湿度 w 与探测点云平均误差比 $\bar{\delta}$ 关系曲线如图 5 所示. 探测点云平均误差比 $\bar{\delta}$ 随着相对湿度 w 的升高呈“S”型趋势增大. 当相对湿度 $w \leq 76.0\%$ 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 增长速率较慢,基本呈线性增长,最大平均误差比不超过 5.0% ;当相对湿度 w 介于 $76.0\% \sim 85.0\%$ 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 增长速率明显加快,大致呈指数型增长,最大平均误差比约为 70.0% ;当相对湿度 $w \geq 85.0\%$ 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 增长速率再次降低,基本恢复线性增长. 从理论上来说,当相对湿度 w 无限接近 0 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 也无限接近 0 ;当相对湿度 w 无限接近 100% 时,平均误差比 $\bar{\delta}$ 也无限接近 100% .

2.2.2 结果分析与讨论

实验结果表明,当相对湿度 $w \leq 49.0\%$ 时,三维激光探测点云平均误差比为 1.23% ,在允许范围内,可忽略不计;当相对湿度 w 介于 $49.0\% \sim 76.0\%$ 时,三维激光探测精度受其影响很小;而当相对湿度 $w \geq 76.0\%$ 时,探测精度对于相对湿度的敏感性同样显著提高. 由此可见,采空区三维激光探测设备对相对湿度的响应范围为 $w > 49.0\%$,特别是相对湿度 $w \geq 76.0\%$ 时,影响更加明显. 井下探测时,应注意采取必要的通风降湿手段使相对湿度降到 49.0% 以下.

本文结合实验所得结果,按照图 5 所示相对湿度和点云平均误差比增长趋势,以 49.0% 为分界点拟合不同相对湿度和平均误差比的回归方程,输出取值范围,修正点云位置误差,所得拟合

曲线如图 5 所示,所得误差修正公式如式(5)所示.

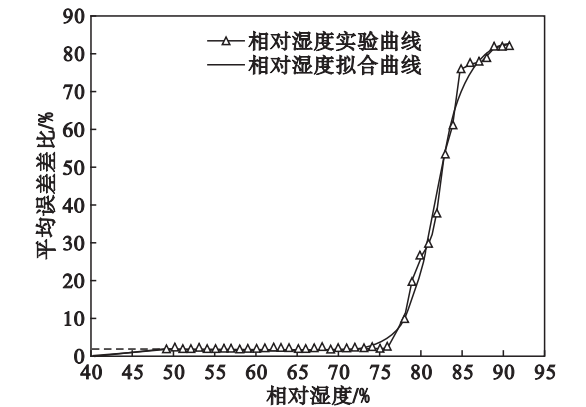


图 5 相对湿度和点云平均误差比曲线图
Fig. 5 Curves of relative humidity vs average error ratio

$$\bar{\delta} = \begin{cases} 0.025w, 0 < w \leq 49.0\% , \\ \frac{-81.56}{1 + e^{\frac{w - 82.02}{1.84}}} + 83.43, 49.0\% < w \leq 91.0\% . \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{\delta}$ 为点云平均误差比,% ; w 为探测环境的相对湿度,% .

3 现场应用

福建某金矿 2005 年 8 月投产,截止到 2014 年矿山累计采出矿石量约 65 万 t,形成空区约 24 万 m³. 项目组连续对 416 中段至 501 中段空区群进行探测,探测过程中不断收集探测区域的粉尘质量浓度(均值为 7.96 mg/m³)和相对湿度数据(均值为 72.0%). 根据式(4)和式(5)计算平均误差比 $\bar{\delta}$,所得计算结果分别为 1.43% 和 2.22%,取二者中较大值作为误差修正的依据,进而对空区 501-2 探测点云数据进行误差修正. 修正前、后对比封装结果如图 6 所示,空区参数对比如表 6 所示.

表 6 501-2 空区参数对比				
Table 6 Parameters comparison of 501-2				
参数	修正前	修正后	除尘降湿	百分差/%
顶板标高/m	518.23	518.47	518.52	+0.05 ~ +0.06
底板标高/m	503.48	503.25	503.18	-0.05 ~ -0.06
暴露面积/m ²	310.29	324.73	325.13	+4.65 ~ +4.78
空区体积/m ³	766.37	820.47	821.14	+7.06 ~ +7.15

501-2 空区顶板标高上升 0.24 m,底板标高下降 0.23 m,空区暴露面积增加 14.44 m²,空区体积增大 54.10 m³. 为检验研究结果的准确性,

项目组对 501-2 空区进行了通风降湿除尘工作,待粉尘质量浓度和相对湿度降低到允许范围后再对 501-2 空区进行探测.

对比公式修正和降湿除尘后的空区封装模型发现二者几乎一致,即修正后的空区模型更符合空区的实际边界情况.



图 6 501-2 空区探测模型误差修正前后对比
Fig. 6 Comparison of error detection models before and after correction of 501-2

4 结 论

- 1) 基于粉尘质量浓度和相对湿度的误差修正实验,得出适合空区激光探测的粉尘质量浓度 ρ 范围为 0 ~ 5.6 mg/m³;相对湿度 w 范围为 0 ~ 49.0%. 井下空区现场探测时,应采取有效的通风降湿措施,保证相对湿度和粉尘质量浓度在范围之内.
- 2) 随着粉尘质量浓度和相对湿度不断增大,探测点云平均误差比均呈“S”型趋势增大,当粉尘质量浓度 $\rho \leq 30.0$ mg/m³ 或相对湿度 $w \leq 76.0\%$ 时,点云误差增长速率较慢;当 30.0 mg/m³ $< \rho \leq 85.0$ mg/m³ 或 $76.0\% < w \leq 85.0\%$ 时,点云误差呈指数级快速增长;当 $\rho > 85.0$ mg/m³ 或 $w > 85.0\%$ 时,点云误差增长速率再次降低.
- 3) 应用提出的点云数据误差修正公式对福建某金矿的三维激光探测点云坐标进行了修正,修正后的采空区边界标高、采空区体积和采空区顶板暴露面积等参数更加符合实际情况.

参考文献:

[1] Slattery K T, Slattery D K, Peterson J P. Road construction earthwork volume calculation using three-dimensional laser scanning[J]. *Journal of Survey Engineering*, 2012, 138(2) : 96 - 99.

[2] Jarosz A P. Open stope cavity monitoring for the control of dilution and ore loss[J]. *Mining Engineering*, 1998(8) : 63 - 67.

[3] Armesto J, Lorenzo H, Arias P. Modeling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32 (2) :

- 607–615.
- [4] Jarosz A, Shepherd L. Application of cavity monitoring system for the control of dilution and ore loss in open stopes [C]// 11th International Congress of ISM. Cracow, 2000: 155–164.
- [5] Lou S H, Yang B, Luo Z Q. Three-dimensional information acquisition and visualization application in goaf[J]. *Procedia Engineering*, 2014(84): 860–867.
- [6] 熊立新, 罗周全, 谭浪浪, 等. 采空区激光探测精度影响因素分析及误差修正[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1244–1250.
(Xiong Li-xin, Luo Zhou-quan, Tan Lang-lang, et al. Impact factors analysis and error correction of laser scanning for goaf [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(4): 1244–1250.)
- [7] 李志, 叶勇军, 吴玉成, 等. 2 种铀矿井下常用口罩对气溶胶粒子的过滤特性研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 64–68.
(Li Zhi, Ye Yong-jun, Wu Yu-cheng, et al. Study on the filtration characteristics of aerosol particles in two kinds of uranium mines [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(5): 64–68.)
- [8] 熊立新, 罗周全, 罗贞焱, 等. 深部复杂环境下采空区激光扫描异常点云数据修正[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 438–442, 446.
(Xiong Li-xin, Luo Zhou-quan, Luo Zhen-yan, et al. Data amendment of abnormal point cloud of goaf by laser scan in deep complex environment [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(3): 438–442, 446.)
- [9] 鹿浩, 罗周全, 张文芬, 等. 复杂采空区激光扫描异常点云过滤研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(3): 14–17.
(Lu Hao, Luo Zhou-quan, Zhang Wen-fen, et al. Filtering of abnormal point cloud from cavity laser scanner [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2015, 35(3): 14–17.)
- [10] Coveney S, Fotheringham A S. Terrestrial laser scan error in the presence of dense ground vegetation [J]. *Photogrammetric Record*, 2011, 26(135): 307–324.
- [11] Palamara D R, Nicholson M, Flentje P, et al. An evaluation of airborne laser scan data for coalmine subsidence mapping [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(15): 3181–3203.
- [12] Hodge R A. Using simulated terrestrial laser scanning to analyse errors in high-resolution scan data of irregular surfaces [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(2): 227–240.
- [13] Lichti D D, Gordon S J. Error propagation indirectly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording [M]. Athens: FIG Working Week, 2004.
- [14] Luo Z Q, Liu X M, Zhang B, et al. Goaf 3D modeling and correlative techniques based on goaf monitoring[J]. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 2008, 15(5): 639–644.
- [15] 李雨成, 高建军, 李智, 等. 金川龙首矿长距离掘进巷道爆破粉尘分布分析[J]. 有色金属工程, 2016, 6(2): 69–74.
(Li Yu-cheng, Gao Jun-jun, Li Zhi, et al. Blasting dust distribution analysis of long-distance driving roadway in Jinchuan Longshou Mine [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2016, 6(2): 69–74.)