

# 地下开采磷矿房柱法退采三维空间精准测量技术研究

袁焕炜

中化云龙有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2377

**[摘要]** 为解决地下磷矿房柱法退采空间测量难题,本文围绕三维空间精准测量技术展开研究。首先明确三维空间精准测量技术概念及房柱法退采工艺特征,进而构建多源传感器融合的三维测量技术体系,设计配套数据处理算法与精度控制方案,通过室内模拟与现场工业试验验证技术可行性。研究表明,该技术可精准表征退采空间形态,为资源核算、采场稳定评估提供可靠数据支撑,有效提升开采安全性与经济性,具备显著工程应用价值。

**[关键词]** 地下开采; 磷矿; 房柱法退采; 三维空间; 精准测量技术

中图分类号: TQ442.51 文献标识码: A

## Research on 3D Spatial Precision Measurement Technology for Underground Phosphate Mine Room and Pillar Retreat Mining

Huanwei Yuan

Sinochem Yunlong Co., Ltd.

**[Abstract]** To address the spatial measurement challenges in underground phosphate mine room and pillar retreat mining, this study focuses on 3D spatial precision measurement technology. It begins by defining the concept of 3D spatial precision measurement technology and the characteristics of room and pillar retreat mining. Subsequently, it constructs a 3D measurement technology system that integrates multiple sensors and designs corresponding data processing algorithms and precision control schemes. The feasibility of the technology is validated through indoor simulations and on-site industrial experiments. The research indicates that this technology can accurately characterize the morphology of the retreat mining space, providing reliable data support for resource accounting and stope stability assessment. It effectively enhances mining safety and economic benefits, demonstrating significant engineering application value.

**[Key words]** Underground mining; Phosphate mine; Room and pillar retreat mining; Three-dimensional space; Precise measurement technology

### 引言

磷矿是我国战略性矿产资源,地下房柱法因为工艺简单、成本低廉,在缓倾斜中厚层磷矿开采中应用广泛。但是退采阶段采场空间结构复杂、环境恶劣、动态变化大,安全要求严格,对空间测量提出了高精度、实时性的核心需求。传统的测量技术存在维度不够、精度不高这些缺陷,不能满足工程的要求。三维空间精准测量技术具有快速精准获取复杂结构信息的优点,因此开展三维空间精准测量技术在房柱法退采中应用研究,建立适合的测量技术体系,对解决房柱法退采测量难题、保证开采安全、提高资源回收率有重要的理论和工程价值。

### 1 三维空间精准测量技术概念及房柱法退采工艺特征分析

#### 1.1 三维空间精准测量技术概念

三维空间精准测量技术是指在对某一物体进行扫描时,可利用测量仪器等及时将物体整体形态、内外结构以及形状细节等快速测量并记录,随之将记录的内容转换成数据形式,通过软件控制及数据处理平台等将数据以三维图像的形式展现在计算机终端的一种技术形式。通过利用三维空间精准测量技术,相关人员可充分发挥该技术的优势,对于大部分无法利用人工深入研究及测量的地理位置和物体,均能够利用该测量技术来完成相关工作。通常情况下,该技术能够直接对大部分大型实体、复杂结构地质环境以及非标准实体等进行情景及结构再现,通过利用线、面以及空间等要素,快速在计算机终端显示器中展现出测量到的物体、地质环境等的基本形态及内部结构。

#### 1.2 房柱法退采工艺特征

房柱法退采是在房柱式开采的基础上,对遗留的矿柱和间柱进行回收的一种开采工序,它的主要目的就是在保证采场稳定的前提下,尽可能地提高资源回收率。地下磷矿房柱法退采工艺的特点有:一是采场空间结构复杂,在退采的过程中会涉及原有的矿房、矿柱和新增的采空区,空间形态不规则,有许多遮挡的区域;二是开采环境恶劣,在退采的过程中会出现顶板下沉、围岩松动等现象,地下环境还存在粉尘、潮湿、照明不足等问题,对测量设备的适应性要求高;三是开采过程动态变化,在退采作业推进的时候会引起采场空间边界、体积等参数实时变化,需要实现测量数据的实时更新<sup>[1]</sup>。

## 2 三维空间精准测量技术体系构建

### 2.1 测量技术选型与融合方案

为了满足房柱法退采三维空间测量对精度、实时性和环境适应性的要求,单靠一种测量技术难以达到要求,所以构建了激光扫描、惯性导航和GNSS辅助定位三种传感器相结合的多源传感器三维测量体系。激光扫描技术具有测量速度快、点云密度高、精度高等优点,可以快速获得采场空间三维点云数据,选择脉冲式激光扫描仪,测距精度为 $\pm 2\text{mm}$ ,扫描角度范围为 $360^\circ \times 180^\circ$ ,满足复杂空间全覆盖测量需求;惯性导航技术具有自主定位能力,不受地下遮挡环境影响,可以实现测量设备实时位置和姿态的确定,选择高精度惯性测量单元(IMU),角速度测量精度为 $0.01^\circ/\text{h}$ ,加速度测量精度为 $10\ \mu\text{g}$ ,保证定位和姿态测量的准确性;考虑到地下GNSS信号遮挡问题,采用地面基站与地下惯性导航组合的定位方案,通过地面GNSS基站获取精准定位数据,对地下惯性导航数据进行校准,提高定位精度。多源传感器数据利用时间同步和空间配准技术进行融合,时间同步使用GPS授时技术,保证各个传感器数据的时间一致。

### 2.2 测量系统硬件组成

三维空间精准测量系统硬件主要由激光扫描单元、惯性导航单元、数据采集与传输单元、供电单元组成。激光扫描单元采用高精度脉冲式激光扫描仪,配有广角镜头,可实现大范围无死角扫描,惯性导航单元由IMU、里程计组成,里程计辅助惯性导航,减小累积误差,数据采集与传输单元使用工业级嵌入式计算机,带有大容量存储模块和无线通信模块,无线通信模块支持Wi-Fi、蓝牙、4G、5G通信,可以实现测量数据的实时传输和存储,供电单元使用锂电池组,具有大容量、长续航能力,同时配备备用电源,保证测量作业的连续性<sup>[2]</sup>。另外系统配有便携支架,在地下狭小空间内架设设备时使用,支架具有水平调节功能,保证测量设备的安装精度。

### 2.3 数据处理算法设计

多源传感器融合得到的原始数据带有噪声、冗余数据,需要经过一系列的数据处理算法才能得到退采空间三维重构。首先对点云进行去噪处理,采用统计滤波和半径滤波相结合的方式,统计滤波是根据每个点的邻域点距离均值和标准差来剔除噪声点,半径滤波是设置一个半径阈值,剔除邻域点数量不够的孤立点,经过去噪处理后的点云数据信噪比明显提高。第二,进行点

云配准,采用基于特征点的配准算法,提取点云的SIFT特征点,用RANSAC算法去除误匹配的特征点,然后用ICP算法进行精细配准,使多站扫描点云数据融合成一个统一的点云模型。接着用三维建模,使用面绘制算法,根据去噪、配准后的点云数据生成三角网格模型,使用网格优化算法消除网格漏洞和重叠,提高模型的完整性、光滑度。最后提取测量参数,从三维模型中提取采空区体积、矿柱尺寸、顶板下沉量等主要参数,给退采作业提供数据支持。

## 3 精度控制方案设计

### 3.1 误差来源分析

房柱法退采三维空间测量过程中产生的误差主要是系统误差、随机误差和环境误差。系统误差主要是由于测量设备本身的精度限制造成的,例如激光扫描仪测距误差、惯性导航单元定位误差、传感器安装误差等;随机误差主要是由于数据采集过程中偶然因素造成的,例如激光扫描过程中大气散射、数据传输过程中信号干扰等;环境误差主要是由于地下环境变化造成的,例如温度、湿度变化导致设备精度漂移、围岩振动对测量设备的影响等<sup>[3]</sup>。利用误差传递理论对各个误差源进行定量分析,建立误差传递模型,确定各个误差源对最终测量结果的影响程度,为精度控制方案的设计提供依据。

### 3.2 精度控制措施

根据误差来源分析结果,从设备校准、测量路径优化、数据处理优化三个方面来设计精度控制措施。在设备校准方面,定时对激光扫描仪、惯性导航单元等设备展开校准。激光扫描仪用标准靶标做测距精度校准,惯性导航单元用地面GNSS基站做定位精度校准,保证设备处于最佳工作状态。在测量路径优化方面,依照退采空间的结构特点,采取多站式扫描方案,合理安排扫描站点的位置,保证每个站点可以覆盖最大的测量范围,避开扫描死角,使相邻站点之间的重叠区域不少于30%,提高点云配准精度。在数据处理优化方面,改进点云配准和三维建模算法,采用自适应阈值的统计滤波算法,根据不同的测量环境自动调节滤波阈值,提高去噪效果;引入机器学习算法对ICP配准算法进行优化,提高配准效率和精度<sup>[4]</sup>。在测量作业过程中采取防风、防尘、减震等措施,减小环境因素对测量精度的影响。

### 3.3 精度验证方法

用室内模拟试验和现场工业试验相结合的方式检验测量系统的精度。室内模拟试验建立与实际退采空间相似的模拟场景,采用高精度全站仪测量模拟场景的关键尺寸作为真值,将三维测量系统的测量结果与真值进行对比,计算测量误差;现场工业试验选取某地下磷矿房柱法退采工作面,在不同的开采阶段进行测量,用传统测量方法(如全站仪测量)的测量结果作为参考,对比分析三维测量系统的测量精度和稳定性。同时用重复测量试验来验证测量系统的重复性,计算多次测量结果的标准差来评价系统的可靠性<sup>[5]</sup>。

## 4 试验研究与结果分析

### 4.1 室内模拟试验

室内模拟试验建立尺寸为 $10\text{m}\times 8\text{m}\times 5\text{m}$ 的模拟采场,用混凝土浇筑模拟矿柱和顶板,矿柱尺寸为 $1\text{m}\times 1\text{m}\times 5\text{m}$ ,共设置4根矿柱。试验使用高精度全站仪(测量精度 $\pm 1\text{mm}$ )对模拟采场的长度、宽度、高度和矿柱尺寸进行测量,作为真值。将三维测量系统架设在模拟采场的3个不同站点上进行扫描测量,对采集的点云数据进行去噪、配准和三维建模,提取测量参数。试验结果表明,三维测量系统测量的模拟采场长度误差为 $\pm 2.1\text{cm}$ ,宽度误差为 $\pm 1.8\text{cm}$ ,高度误差为 $\pm 2.3\text{cm}$ ,矿柱尺寸误差为 $\pm 1.5\text{cm}$ ,均小于设定的 $\pm 5\text{cm}$ 误差阈值;多次重复测量的标准差小于 $1\text{cm}$ ,说明测量系统具有较好的重复性、稳定性。

#### 4.2 现场工业试验

现场工业试验选择某地下磷矿房柱法退采工作面,该工作面埋深 $280\text{m}$ ,退采区域长度 $50\text{m}$ ,宽度 $30\text{m}$ ,高度 $8\text{m}$ ,矿柱尺寸为 $2\text{m}\times 2\text{m}\times 8\text{m}$ 。试验前对三维测量系统进行设备校准,使用地面GNSS基站对惯性导航单元进行定位校准;试验过程中,将测量系统架设在退采工作面的5个扫描站点上,每个站点扫描时间为15分钟,采集点云数据并实时传输到地面控制中心;对采集到的点云数据进行处理后,构建退采空间三维模型,提取采空区体积、矿柱尺寸及顶板下沉量等参数。同时用全站仪对相同参数进行测量作为参考。从试验结果可知,三维测量系统对采空区体积的测量误差为 $\pm 2.5\%$ ,矿柱尺寸的测量误差为 $\pm 2.8\text{cm}$ ,顶板下沉量的测量误差为 $\pm 2.2\text{cm}$ ,测量数据与全站仪测量数据的一致性较好,数据采集和处理的时间为 $1.5\text{h}$ ,满足实时性的要求,在地下粉尘、潮湿的环境下,测量系统运行稳定,没有出现设备故障,环境适应性好。

#### 4.3 结果分析

室内模拟试验和现场工业试验结果表明,本研究提出的地下开采磷矿房柱法退采三维空间精准测量技术,可以满足退采过程中三维空间测量的精度和实时性要求。测量误差控制在 $\pm$

$3\text{cm}$ 之内,优于设定的 $\pm 5\text{cm}$ 误差范围,可以准确反映退采空间的三维形态,数据采集和处理时间是 $1.5$ 小时,可以实现测量数据的实时更新,给开采作业决策提供及时的数据支持,测量系统在地下恶劣环境下运行稳定,具有较好的环境适应性。用三维测量技术得到的精确的空间数据可以准确地计算退采资源储量,避免资源浪费;实时监测顶板和矿柱的变形情况,提前预警采场失稳的风险,保证开采安全。

#### 5 结论

综上所述,本文明确了三维空间精准测量技术核心概念与地下磷矿房柱法退采工艺关键特征,成功构建多源传感器融合的三维空间精准测量技术体系,形成配套高效的数据处理算法与全面的精度控制方案。试验验证表明,该测量技术可实现退采空间形态的精准表征,能为退采资源储量核算、采场稳定性评估及开采作业优化提供可靠数据支撑,有效提升了地下磷矿房柱法退采的安全性与经济性,具备显著工程应用价值。

#### [参考文献]

- [1]刘路,孙茂锐,李星.测绘工程中三维城市测量技术的应用[J].四川建材,2025,51(11):64-67.
- [2]陈爽,陈胜伦,王沉,等.某磷矿房柱法开采地压规律及矿柱宽度研究[J].黄金科学技术,2025,33(05):1063-1073.
- [3]梁恩金.三维激光扫描技术在矿山地质测绘中的应用[J].世界有色金属,2025,(12):186-188.
- [4]万飞,王青松,董承旺,等.某磷矿房柱法开采空区治理技术研究与应用[J].现代矿业,2024,40(09):72-76.
- [5]张先萌,李耀基,李小双,等.房柱法开采磷矿围岩稳定性仿真分析[J].矿业工程,2013,11(06):29-32.

#### 作者简介:

袁焕炜(2000--),男,汉族,云南宣威人,本科,研究方向:测绘工程(矿山测量)。