

井下三维扫描技术在采空区测量中的应用及精度验证

刘贤红

伊吾县宝山矿业有限责任公司

DOI:10.12238/jpm.v6i4.7918

[摘要] 本文以新疆哈密地区金属矿为研究对象，深入探讨井下三维扫描技术在采空区测量中的应用及精度验证。详细阐述该技术原理，分析设备选型、测量路径规划、数据采集处理和模型构建等应用环节。通过对比方法与标准，开展不同地质条件下精度测试，分析测量数据稳定性及误差并提出优化策略，为井下采空区精确测量提供科学依据与技术参考，推动矿山开采安全与资源高效利用。

[关键词] 井下三维扫描技术；采空区测量；精度验证；新疆哈密金属矿

Application and accuracy verification of downhole 3 D scanning technology in goaf survey

Liu Xianhong

Yiwu County Baoshan Mining Co., LTD.

[Abstract] In this paper, the metal mine of Hami area in Xinjiang province deeply discusses the application and accuracy verification of downhole 3 D scanning technology in goaf survey. The principle of this technology is elaborated in detail, including analysis of equipment selection, measurement path planning, data acquisition and processing, and model construction. Through comparing the methods and standards, the accuracy test is carried out under different geological conditions, the stability and error of the measurement data are analyzed and the optimization strategy is proposed, so as to provide scientific basis and technical reference for the accurate measurement of the underground goaf, and promote the safety of mining and the efficient utilization of resources.

[Key words] downhole 3 D scanning technology; goaf measurement; accuracy verification; Xinjiang Hami metal mine

矿山开采过程中，采空区精确测量对于确保后续作业安全、防治地质灾害以及提高资源利用率等方面，起到了至关重要的作用。传统的测量手段面对井下复杂的环境和采空区不规则的形态，存在很多局限性。随着科学技术的进步，井下三维扫描技术以其效率高、精度高、全方位的数据采集等优点，逐渐成为采空区测量的一种新选择。新疆哈密地区金属矿采矿活动较为频繁，对该项技术在此进行应用研究和精度验证，可以为地方和同类矿山提供可行的技术方案，有利于矿业的可持续发展。

一、井下三维扫描技术的原理

井下三维扫描技术是一种高级测量手段，该技术原理建立在激光测距、光学成像和数据处理多学科理论上，可快速准确获得井下采空区三维空间信息。

激光测距为这一技术提供了核心基础，三维扫描仪发出激光束，当激光束与目标物体相遇时被反射，扫描仪根据光速不

变原理，通过测量激光来回运动时间来计算扫描仪到目标点的距离。以普通脉冲式激光测距为例，扫描仪发出短脉冲激光后，激光命中目标后反射到扫描仪上，其内时间测量装置准确地记录下激光来回时间差，通过公式 $d = c \times t / 2$ （其中， d 表示距离， c 表示光速， t 表示时间差）就能得到距离值^[1]。

为获得目标物体的全方位三维信息，扫描仪测量过程中会连续变换激光束发射方向。由内置旋转电机及角度编码器控制激光束沿横向及纵向扫描。在水平方向上，扫描的角度通常可以达到 360° ，而在垂直方向上，它也可以覆盖更大的角度，例如 -90° 至 $+90^\circ$ ，从而实现对周边空间的全方位覆盖。在扫描过程中，每个测量点都对应着特定的水平角度和垂直角度，结合测量得到的距离信息，就可以确定该点在三维空间中的坐标 (x, y, z) 。光学成像技术协助激光测距提供了更加丰富的物体表面信息。扫描仪一般都装有高分辨率相机，边激光扫描边获取图像。将相机采集到的影像与激光测量点云数据

配准并融合，赋予每一个三维点以色彩及纹理信息，使得到的三维模型更直观逼真。以井下采空区为例，既可以观察采空区空间结构，又可以清楚地辨别岩石颜色、纹理特征等等，为下文采空区地质状况分析提供帮助。

二、井下三维扫描技术在采空区测量中的应用

(一) 设备选型与参数

井下采空区勘察时，设备选型非常关键，需要考虑很多因素才能保证勘察准确高效。市面上三维扫描仪种类繁多，可以选择地面三维激光扫描仪和便携式三维扫描仪。对于井下复杂的环境，一般优先选用体积小、携带方便、适应恶劣环境的装置。以某款便携式三维激光扫描仪为例，该扫描仪机身小巧、重量轻，便于操作员在井下狭窄巷道内进行搬运作业^[2]。

就设备参数而言，测量精度为关键指标。通常情况下，井下的采空区测量需要扫描仪的精确度达到毫米级别，例如±5mm，这样才能满足对采空区空间尺寸进行精确测量的要求。扫描范围亦不可忽略，需要依据采空区大小来选择适合扫描范围内的装置。在处理大型的采空区时，可以考虑使用扫描半径可以达到100米或更远的扫描设备；对小采空区而言，扫描半径为数十米的装置就可以达到要求。另外，扫描速度是一个很重要的参数，扫描速度快可以提高测量效率和缩短井下作业时间。比如有的高端扫描仪每秒钟就能采集上万个点，极大地缩短测量周期。装置的防护性能也是至关重要。井下环境湿度大、尘土飞扬，甚至会有有害气体产生，所以扫描仪需要有很好的防尘、防水及防爆性能。该装置外壳一般为高强度耐腐蚀材料，对内部电路及光学部件做了特殊防护处理，以保证在恶劣环境中的稳定工作，从而保证了测量工作的顺利开展。

(二) 测量路径规划

合理规划测量路径，对确保井下采空区完整、准确地进行测量具有重要意义。在计划测量路径之前，必须先详细了解井下采空区地质条件、巷道分布情况等。通过调阅地质资料和现场勘查，初步掌握了采空区大体形态、边界及与周边巷道贯通状况^[3]。结合采空区实际条件确定测量站点分布范围，测量站点要均匀布置于采空区四周和内部的关键位置，以保证能对采空区进行完全覆盖。对形状规则采空区，可以按一定网格间距设置测量站点；对外形复杂或者有特殊构造的采空区，在构造变化显著的地方和转角处等加设测量站点。如在采空区进口处、内靠近支柱处和顶板起伏明显处布置测量站点等，从而得到较精确的三维信息。测量路径设计时应兼顾操作人员安全及装置移动便捷性，尽可能选择平整、无障碍物巷道为测量路径，尽量避免通过危险区域，如顶板碎裂、积水严重等路段。在规划路径的过程中，必须确保相邻的测量站点之间存在一定程度的重叠区域，并将重叠率控制在30% - 50%的范围内，这样可

以确保在后续的点云拼接工作中能够实现准确的匹配，从而保障模型的完整性和准确度。

(三) 数据采集处理

在井下三维扫描技术运用过程中，数据采集作为基础环节需要严格遵守操作规程，才能获得优质数据，每一个测量站点都必须先准确校准扫描仪，以保证设备测量参数的准确，将扫描仪固定于稳定支架上，并调节水平及垂直角度，以便能精确地对目标区域进行扫描^[4]。开机扫描仪时，根据设置扫描参数采集数据，扫描时，应密切注意扫描仪的运行情况，保证激光束的正常收发，以免由于遮挡、反射异常而造成数据丢失或出错。同时同步获取相机图像数据，以保证图像和点云数据准确配准。采集的原始数据中含有大量噪声及异常点，对其数据处理提出了要求，对于数据滤波，利用高斯滤波和中值滤波剔除噪声点，保留真实高效测量点。接着对数据进行拼接，采用扫描站点间重叠区域的方法，运用特征匹配算法对每个站点点云相对位置关系进行计算，并对多站点点云数据进行拼接，形成完整采空区点云模型。拼接时，应严格把关拼接精度，保证拼接误差处于容许的范围。对拼接好的点云模型还需要空洞填补和平滑处理来改善其质量，采用插值算法填充模型内部空洞，使得模型表面更全面；采用平滑算法处理模型表面，去除测量误差等因素造成的局部波动，获得平滑精确的采空区三维点云模型，从而为下文模型构建与分析奠定了可靠数据基础。

(四) 模型建构与呈现

在对三维点云数据进行处理的基础上，运用专业三维建模软件建立采空区三维模型，常见建模方法包括三角网建模和曲面建模，三角网建模就是把点云数据构造为三角形网格，并将邻接点连接成三角形面片，再构造采空区表面模型。该方法简便、直观，适合多数采空区建模。曲面建模方法是通过数学函数来拟合点云数据，从而创建一个平滑的曲面模型，这种模型特别适用于具有复杂表面形状和高精度要求的采空区建模^[5]。模型构建时需要处理好模型细节，例如精确刻画采空区顶板起伏情况、巷道衔接位置特征，同时在模型中加入属性信息，如岩石类型和采空区生成时间，以丰富其信息量。所建三维模型可采用多种手段展现，例如在计算机屏幕上作二维可视化展示，以及采用旋转和缩放操作对采空区结构作不同角度的观测；用户还可以利用虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术进行沉浸式的展示，这使得其仿佛进入了一个采空区，从而更加直观地体验到采空区的空间结构^[6]。

三、井下三维扫描技术在采空区测量中精度验证

(一) 对比方法与标准

为了验证井下三维扫描技术对采空区测量的准确性，必须要有科学的对比方法与清晰的准则，通常采用比较方法，即比

较三维扫描测量和传统测量方法。全站仪等传统测量方法是由全站仪对角度、距离等参数进行测量，并利用极坐标法来确定目标点三维坐标。在采空区内选择一定量的特征点，分别采用三维扫描仪及全站仪对其进行实测。对比标准的制定主要是根据测量精度要求及有关行业规范制定的，在进行采空区的测量时，通常需要确保平面位置的精度达到 $\pm 50\text{mm}$ ，同时高程的精度也要达到 $\pm 50\text{mm}$ 。将三维扫描得到的特征点坐标与全站仪的测量数据进行了对比，并计算其之间的坐标偏差，这包括了平面坐标的差异（ Δx 、 Δy ）以及高程坐标的差异（ Δz ）。通过对这些差异进行统计分析来评价三维扫描测量精度是否符合要求。比如计算全部特征点坐标差值平均值与标准差，如果平均值都在容许误差之内，标准差很小，则表明三维扫描测量的精度比较稳定。

（二）不同地质精度测试

井下地质条件复杂多变，不同的地质条件影响着三维扫描测量的精度，所以有必要开展不同的地质精度测试工作。在硬岩地质中，激光具有良好的反射作用，测量精度比较高。通过对坚硬岩石采空区的试验，统计了特征点坐标差值并分析了其准确性状况。通常情况下，三维扫描测量平面位置精度与高程精度在该地质条件下能很好地达到要求，平面位置误差可以限制在 $\pm 30\text{mm}$ 范围内，高程误差也可以限制于 $\pm 30\text{mm}$ 范围。并且在松软岩土或者破碎地质的情况下，激光束因其传播时易被散射和吸收，测量精度降低。在此类地质条件下采空区试验时会发现特征点坐标差值变大，平面位置误差可达 $\pm 80\text{mm}$ ，高程误差也可 $\pm 80\text{mm}$ 左右。鉴于此，必须采用专门的数据处理方法或者加大测量站点密度来提高测量精度。

（三）测量数据稳定性分析

测量数据是否稳定，是评价三维扫描技术是否可靠的一个重要标志。对同一采空区进行了多次反复实测，并对实测资料进行了稳定性分析。重复测量不同时刻和不同测量人员的工况，得到多组测量数据。统计分析这些资料，并统计相同特征点不同测量组坐标差值变化。若测量数据具有良好的稳定性，则不同测量组中相同特征点坐标差值较小，波动范围也比较稳定。如经过多次实测，某个特征点平面坐标差值的标准差在 $\pm 10\text{mm}$ 以内，高程坐标差值的标准差也在 $\pm 10\text{mm}$ 内，表明实测数据具有高度稳定性，三维扫描技术应用于此类采空区的测量，可靠性高。

（四）误差分析及优化

分析井下三维扫描测量时存在的误差并采取相关优化措施是提高其精度的重点。误差来源有设备误差、测量环境误差、

数据处理误差等。设备误差，例如扫描仪测距误差、角度测量误差等等，可以采用定期校准与维修设备、采用高精度校准靶标校准来降低设备误差。井下粉尘、湿度、温度变化及其他测量环境误差对激光传播及设备性能都有影响。测量之前，应尽可能地改善测量的环境，例如加装通风设备以降低粉尘的产生，采取防潮和温控措施。数据处理时，对数据滤波、拼接算法进行优化，降低了算法带来的错误。通过综合分析误差并采取有针对性的优化措施，持续提升井下三维扫描技术测量采空区的准确性与可靠性，从而为采空区安全治理及后续开发利用工作提供更为精准的数据支撑。在实践中，提高井下三维扫描技术精度仍需要不断地探索新途径。例如引入人工智能来辅助处理数据，并利用深度学习算法对点云去噪和拼接进行优化，预计误差会进一步减小。同时加强装备和环境适配方面的研究，研发适应极端井下条件下的特殊扫描装备，综合推进该项技术在采空区测量中的应用。

结束语

总之，井下三维扫描技术已在新疆哈密地区某金属矿采空区勘察中显示出较好的应用成效，并通过原理剖析及具体的应用环节的探究完成精度的验证。尽管当前这项技术在复杂的地质条件中还存在着一定的误差，但是对误差进行分析并采取优化措施可以有效地促进测量精度的提高。在今后的工作中，我们要不断推动技术的创新和改进，为矿山开采过程中提供更加准确和可靠的测量数据，来推动整个矿业的安全和高效，在资源开发和安全生产之间进行较好的权衡。

【参考文献】

- [1]王灵梅.三维激光扫描技术在矿山采空区测量中的应用分析[J].世界有色金属, 2023, (23): 127-129.
- [2]郭凯.三维激光扫描技术在金属矿山采空区测量中的应用分析[J].中国金属通报, 2023, (11): 16-18.
- [3]邹江.三维激光扫描技术在矿山巷道断面测量中的应用[J].山西建筑, 2023, 49(20): 184-187+198.
- [4]卢东明.矿山测量中三维激光扫描技术的运用[J].世界有色金属, 2023, (18): 22-24.
- [5]刘章强.三维激光扫描技术在矿山测量中运用分析[J].内蒙古煤炭经济, 2024, (23): 172-174.
- [6]何中伟.三维激光扫描技术在矿山测量中的应用[J].中国金属通报, 2024, (11): 23-24.

作者简介：刘贤红（1987-9月-24日），民族：汉族，男，籍贯：江西省赣州市，学历：大学专科，职称：测量中级工程师，研究方向：金属矿勘测测绘方向。