

地下能源储库群容积激光测量方法及现场实验

吕小宁¹ 刘晓丽^{1,2*} 段云岭¹ 梁建毅³

¹清华大学水沙科学与水利水电国家重点实验室, 北京 100084

²清华大学三江源协同创新中心, 北京 100084

³黄岛国家石油储备基地有限责任公司, 山东 青岛 266426

摘要 快速准确地测量大型地下能源储库群容积,不仅是检验工程设计和施工建设成果科学合理性的一种方法,也是能源储运工程的基本要求和油库运行期间动态调控的基础。为了快速精确获取储库群容积和厘米级的高程-容积曲线,研发了基于断面的激光精细测量系统(LSMS),建立了相应的数据处理方法。并成功将其应用到某地下能源储库的容积测量中,获得了厘米级的高程-容积曲线,通过回归计算,获得了容积真值,容积测量精度达到 -0.06% ,优于规范要求一个数量级。最后,结合全站仪和基站式三维激光扫描仪(TLS)的实验数据,对 8 个技术指标进行了对比分析,验证了激光精细测量系统及相应的数据处理方法的可行性和正确性。

关键词 测量; 容积测量; 激光精细测量系统; 高程-容积曲线; 地下能源储库群; 现场测量

中图分类号 TN249; TP23

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1004002

Laser Measurement Method and *in-situ* Experiment of Underground Energy Storage Caverns Volume

Lü Xiaoning¹ Liu Xiaoli^{1,2} Duan Yunling¹ Liang Jianyi³

¹State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

²Sanjiangyuan Collaborative Innovation Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

³Huangdao Oil Reserve Base Limited Company, Qingdao, Shandong 266426, China

Abstract Quickly and accurately measuring the volume of large underground energy storage caverns is not only a method to test the scientific rationality of engineering design and construction achievement, it is also the basic requirement for energy storage and transportation engineering and the foundation of the dynamic control during operation depot. In order to quickly and accurately obtain the storage caverns volume and the elevation-cumulative volume curve in centimeter level, a laser sophisticated measurement system (LSMS) based on cross section and the corresponding data processing method are developed. The method is successfully applied in the volume measurement of underground energy storage caverns and the elevation-cumulative volume curve in centimeter level is achieved. The true volume is estimated by regression analysis and the volume measurement accuracy can reach -0.06% , which is one order of magnitude better than the regulatory requirements. Combined with the experimental data of total station and terrestrial 3D laser scanner, eight technical specifications are comparatively analyzed. The feasibility and correctness of the laser sophisticated measurement system and the corresponding data processing algorithm are verified.

Key words measurement; volume measurement; laser sophisticated measurement system; elevation-volume curve; underground energy storage caverns; in-situ measurement

OCIS codes 120.1880; 280.3640; 120.6650; 120.5800; 120.4290

收稿日期: 2016-05-03; 收到修改稿日期: 2016-06-20

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013503, 2013CB035902)、国家自然科学基金优秀青年基金(51522903)、国家自然科学基金(51479094, U1361103, 51379104)、水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题(2015-KY-04, 2016-KY-05)

作者简介: 吕小宁(1987—),男,博士研究生,主要从事激光测量方面的研究。E-mail: x.n.lui.thu@gmail.com

导师简介: 段云岭(1957—),男,博士,教授,主要从事工程检测方面的研究。E-mail: yduan@tsinghua.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xiaoli.liu@tsinghua.edu.cn

1 引 言

地下能源储库群是指修建在地下,用来储存原油、液化石油气(LPG)、天然气等战略能源物资的硬岩洞库。储库群可以采用废弃盐岩矿井洞穴、人工专制盐岩洞穴、废弃矿井巷道、废弃矿井巷道加水幕系统、人工硬岩洞库加水幕系统、枯竭的油气井等形式^[1]。随着我国石油储备拉开帷幕,一批大型地下水封洞库的建设正在大力推进。快速准确测量大型水封式地下储油洞库群库容容积不仅是检验工程设计和施工建设成果科学合理性的一种方法,而且也是能源储运工程的基本要求和油库运行期间动态调控的基础。《GB50455-2008 地下水封石洞油库设计规范》^[2]规定,罐容标定成果包括洞罐总容积、沿竖向每厘米对应的容积以及罐容—高度曲线,测量误差不应大于0.5%。规范仅仅给出了标定的内容以及要求,没有给出合适的标定技术。

何建邦等^[3]将摄影测量技术和地图自动化技术应用到地下水封洞库的计量上,但是其操作步骤繁琐,工作量大,效率较低。洪开荣等^[4]采用免棱镜智能全站仪和机载断面软件进行洞库容积计算,虽然测点精度极高,但是测点有限,尤其是对于表面形状不规则的地下水封洞库,后续计算误差较大。Crossley^[5]将声纳技术应用到地下盐穴储气库的测量中,不仅可以获取丰富的地下岩穴的三维轮廓信息,而且可以计算得到各高程下对应的容积值;但是由于声波波速受环境(气压、温度、湿度等)的影响较大,因此测量精度较低,误差在±2%左右^[6-7]。Sellers等^[8]使用超声波对地下洞穴进行测量和三维成像,速度较快,但是由于超声波波束宽度太宽,因此精度不高。张德津等^[9]采用高速激光扫描仪结合距离和角度传感器集成技术,实现了大型料场储量测量和建模计算,测量精度可达0.4%。王海波等^[10]针对大型露天料场测量研发了车载激光测量系统,对料场分区独立扫描测量,计算料场储量,实验条件下绝对精度达到0.4%。Yakar等^[11-12]以一个露天砂石厂为研究对象,系统对比了全站仪、摄影测量和激光测量方法在体积测量方面的性能、精度和优缺点等,最终认为激光测量方法精度最高,可达1.5%。

对于无衬砌的特大容量地下储油洞室群来说,其结构复杂,洞室断面大,断面宽度高度不协调;这不仅会造成激光测量的几何条件恶化,点云质量降低,而且会导致沿洞室轴线方向激光测量的点云密度分布极不均匀,远区点云间距很大,细节刻画能力不足。此外,地下能源储库群的岩体表面粗糙度很大,工作的水幕系统导致岩体表面干燥、点渗和面渗状态共存,环境湿度很大,这些因素进一步降低了激光测量的数据质量。所以,地下能源储库群的容积无法通过常规计量方法获得。地下油库容积计量和标定在国内尚没有相关的规范,也没有可资借鉴的工程经验和技术手段,高精度、高效率的测量方法的研究十分必要。

本文研发了基于断面的激光精细测量系统(LSMS),对某地下储油洞室群进行了现场实验,通过回归计算得到洞库容积的真值,并建立了厘米级的高程—库容容积曲线;然后,通过与全站仪、基站式三维激光扫描仪(TLS)的数据进行对比,验证了激光精细测量系统在地下能源储库容积测量方面的优越性和可行性。

2 激光精细测量系统

绝大多数地下工程都属于线状结构,其纵向尺寸远大于断面尺寸,断面几何特征明显,且沿纵向变化不大。对于此类地下工程的测量,理想方法是保证激光波束尽量垂直于被测表面进行断面扫描^[13]。固定式三维激光测量方法稳定性好,设备成熟,但是测量工序繁琐(移动—安装—调平—扫描—拆卸—移动),效率较低^[14];而移动式三维激光测量方法的测量工序简单(自动移动和定位—扫描—自动移动和定位),但是需要结合工程实际自主研发测量系统。结合固定式和移动式三维激光测量方法的优点,并考虑地下工程的特点,研发了一套基于断面的轨道走停式激光精细测量系统。

2.1 系统构造

该测量系统包括数据采集和数据处理分析两大模块。数据采集模块主要包括硬件和软件两部分,硬件部分包括导轨支架装置、激光断面测量设备、导轨运动控制装置和激光扫描控制装置等,软件部分包括测量参数优化单元、断面数据输出单元和激光精细测量控制单元等。数据处理分析模块包括数据处理、数据存储、数据分析以及可视化等内容。激光精细测量系统构造和数据流如图1所示。

本测量系统为主动非接触测量,测量点云密度大且空间分布均匀,测量效率高,内业外业可同时进行,定位精度可达1~3 mm。

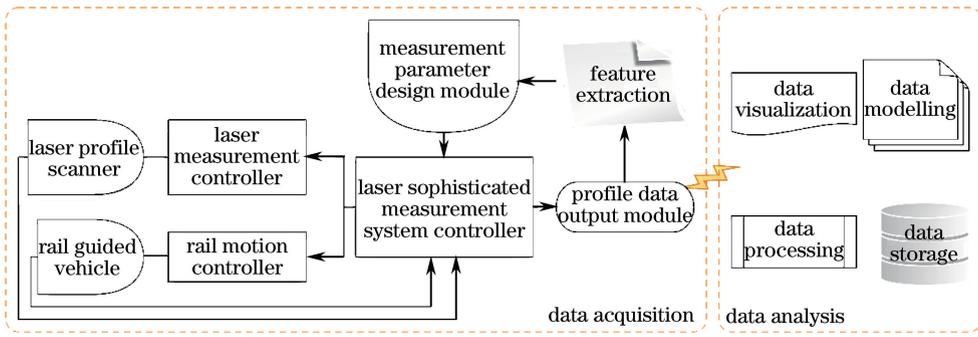
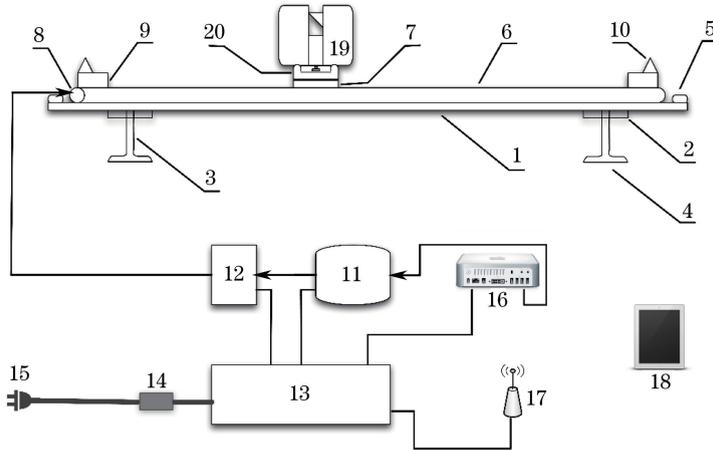


图 1 激光精细测量系统的构造和数据流

Fig. 1 Structure and data flow of the laser sophisticated measurement system

2.2 系统硬件结构

激光精细测量系统的硬件结构由导轨支架装置、激光断面测量设备、导轨运动控制装置、供电装置、主控计算机、无线接入点和平板电脑等组成。水平主梁放在导轨支架装置上,限位开关、步进电机、定位靶标固定在水平主梁上,激光断面测量设备固定在适配器上并与滑块固定,测量系统硬件结构如图 2 所示。



1: horizontal support; 2: horizontal beam; 3: vertical support; 4: support base; 5: level sensor; 6: belt; 7: slider; 8: stepper motor; 9: limit's switch; 10: position target; 11: motion controller; 12: stepper motor actuator; 13: battery set; 14: power adapter; 15: power plug; 16: server; 17: wireless AP; 18: tablet; 19: laser profile scanner; 20: helical adapter

图 2 激光精细测量系统硬件结构示意图

Fig. 2 Hardware structure diagram of the laser sophisticated measurement system

激光断面测量设备利用飞行原理对三维空间进行断面精细扫描,并实时返回断面轮廓的距离信息、角度信息和强度信息,同时,第三个维度(断面位置)由导轨运动控制装置提供。断面测量设备采用 TX5 三维扫描仪(Trimble 公司),通过限制扫描仪的水平角旋转进行二维断面扫描。

2.3 控制逻辑与数据采集流程

激光测量控制单元通过导轨运动控制装置指挥导轨支架装置移动激光断面测量设备至某位置,并控制激光断面测量设备进行断面测量,然后,重复移动、停止、断面测量等步骤,直至触发限位开关信号,完成单次测量。数据采集流程中,采用 C 语言编制了相应的控制程序,实现了激光断面测量装置的定位、启动、扫描、停止以及数据的传输和存储,以达到采集和获取数据的功能。数据采集流程如图 3 所示。

在数据采集过程中,对每个断面的测量参数都进行了优化设计,保证了测量数据的质量和精度。对每个断面的数据都进行了数据校验,减少了测量的错误。每个断面的数据均为实时传输,外业和内业同时进行,保证测量效率。

3 数据处理及分析

在数据采集过程中,每个断面数据都包含了该断面的位置、测距、测角和强度等信息,将初始激光断面测

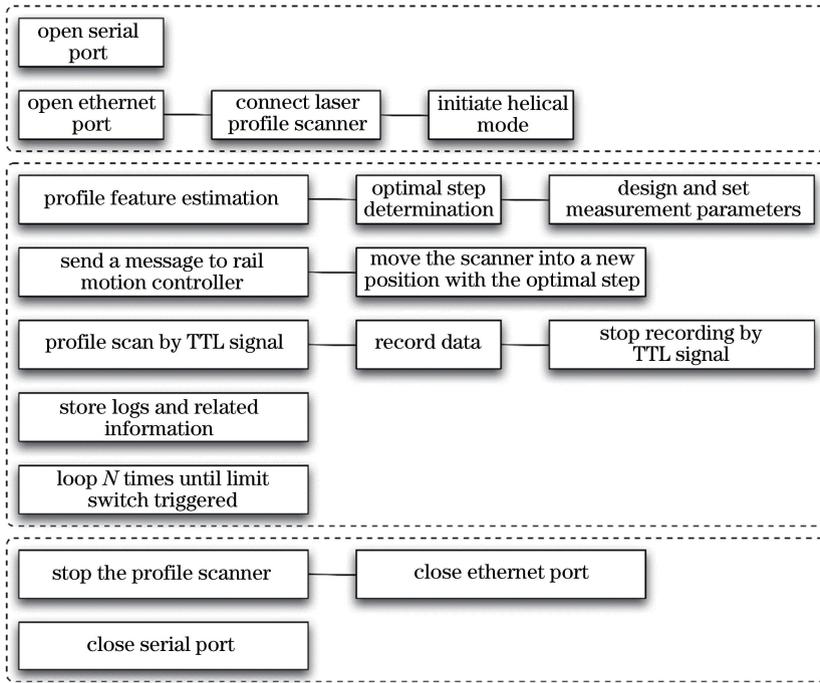


图 3 数据采集流程

Fig. 3 Data acquisition workflow

量设备的位置作为仪器坐标系原点 o ，以导轨向为 y 轴，那么就可以对单次测量结果恢复至三维空间。对于断面 i ，位置坐标 s_i ，则断面 i 上测点 j 的空间坐标和反射强度可以表示为

$$\begin{cases} x_{ij} = \rho_{ij} \cos \alpha_{ij} \\ y_{ij} = s_i \\ z_{ij} = \rho_{ij} \sin \alpha_{ij} \\ r_{ij} = r_{ij} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 (ρ_{ij}, α_{ij}) 为激光测量设备到测点 j 的测程和角度， (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 为仪器坐标系下测点 j 的三维坐标， r_{ij} 为断面 i 测点 j 表面的反射强度。通过(1)式就可以将断面测量点云数据复原到三维空间。

3.1 点云清洗

由于地下能源储库的洞室表面粗糙度大、干湿不均，洞室断面大，激光测量的几何条件差，这些都导致实际作业过程中获得的点云数据大多是不完整、不一致且含有噪声。这些噪声点(包括漂移点、孤立点、冗余点、混杂点等)不仅增加了数据量，而且严重影响点云的质量和后续模型的重建，因此需要清除这些噪声数据。

考虑到地下洞室断面之间几何特征变化不明显，即沿洞室轴线方向(y 方向)单次测量的所有断面之间点云连续性较好且断面尺寸变化不大，可以直接将单次测量的点云数据投影到某坐标平面，然后通过聚类分析识别断面轮廓的优势分布区域，并对优势区域外的点云数据进行过滤。具体步骤如下：

- 1) 根据断面设计尺寸，将单次测量的点云数据按照高程 z 值大小划分为拱顶和边墙两部分；
- 2) 将边墙数据向 yoz 平面投影，并对 x 方向的数据沿 z 方向等间距聚类，并统计每个间距内点云的优势分布区域；
- 3) 将拱顶数据向 xoy 平面投影，并对 z 方向的数据沿 x 方向等间距聚类，并统计每个间距内点云的优势分布区域；
- 4) 点云优势分布区域以内的点云保留，以外的点云过滤。

其中，聚类间距内点云优势分布区域确定方法(以边墙数据为例，聚类间距为 dz)如下：计算 dz 内的 k 个测点 x 坐标的均值 μ

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_i x_i. \quad (2)$$

计算 dz 内的 k 个测点 x 坐标的均方差 s

$$s = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_i (x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

则点云的优势分布区域为 $[\mu - s, \mu + s]$ 。针对边墙和拱顶的结合部位,可以相互重合一部分区域,然后各自聚类,再综合过滤。

3.2 点云空间配准

为了解决地下储库复杂洞室群布置下单次测量点云数据统一到整体坐标系的问题,需要进行点云的空间配准。实际的洞室测量是由一系列的单次测量组成的,单次测量的数据需要通过数据配准统一到整体坐标系中。由于主洞室测量时,仪器坐标系的三个方向与整体坐标系方向保持一致,所以旋转向量均为单位阵。假设单次测量的仪器坐标系在整体坐标系中的位置为 (X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}) ,则单次测量的点云数据在整体坐标系下的坐标可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_{sj} \\ Y_{sj} \\ Z_{sj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{s0} \\ Y_{s0} \\ Z_{s0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

实际测量中,单次测量仪器的位置由全站仪确定。

3.3 点云建模

实测的点云数据受到仪器自身、入射角和测距的双重几何条件、测量环境和岩体表面特性等因素的影响,在边墙和拱顶交接部位,点云质量较差,存在点云缺失;在拱顶部位,部分区域出现空洞,需要通过建模手段进行处理。由于考虑了原始点云与被插值点的相对位置和原始点云之间的几何相关性,克里金插值法可以达到最优、线性、无偏的估计^[15],采用克里金插值^[16]对缺失点云进行科学估计,构建沿洞室轴向 Y 方向和沿高程方向 Z 方向的规则网格数据。

3.4 容积计算

对于建模后的规则网格数据,假设 Y 方向网格节点序号为 $i=1, 2, \dots, n$,节点间距为 Δ_i , Z 方向网格节点序号为 $j=1, 2, \dots, m$,节点间距为 Δ_j ,则格点 (i, j) 处的 X 方向长度 L_{ij} 可以表示为

$$L_{ij} = |X_{ij}^R - X_{ij}^L| \quad (5)$$

式中 X_{ij}^L 、 X_{ij}^R 分别为左右边墙格点 (i, j) 处的插值点值。那么, j 层网格的面积 S_j 可以用复合梯形公式表示为

$$S_j = \Delta_i \left[L_{1j} + \sum_{i=2}^{n-1} L_{ij} + L_{nj} \right] \quad (6)$$

则 j 层到 $j+1$ 层之间的容积 V_j 可以表示为

$$V_j = \Delta_j (S_j + S_{j+1}) \quad (7)$$

将多个洞室的容积按照(7)式逐层计算,并按照其高程位置,总装到整个高程的逐层容积网格中,形成整体坐标系下的逐层容积,进而可以得到沿高程的高程-容积曲线。

总容积 V 可以表示为

$$V = \sum_{j=1}^{m-1} V_j \quad (8)$$

至此,容积计算完成。

4 现场实验

4.1 实验条件

本实验是在国内某地下水封原油储库中进行的,储库主洞室断面采用三心拱直墙洞室,宽度为 20 m,高度为 30 m。洞室采用钻爆法施工,分顶层、中层 1、中层 2、中层 3 和底板多层开挖,洞室的典型断面尺寸如图 4 所示。

洞罐底板上铺设 80 mm 的素混凝土层,比较平整,适合导轨装置的移动。由于施加有水幕系统,地下储库的湿度超过 90%,岩面存在面渗、点渗,洞室底板有积水,洞内缺少光照条件。考虑到实验条件的限制,

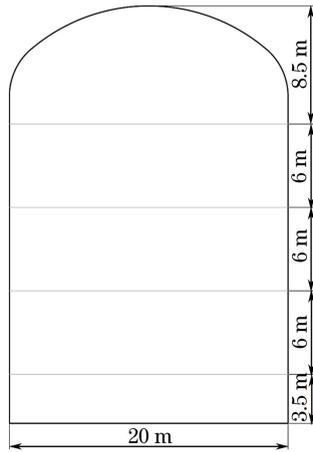


图 4 主洞室断面设计尺寸图

Fig. 4 Cross section design dimension figure of the main cavern

选取某个主洞室的部分区段作为实验对象,实验区域桩号为(0+469)~(0+493),实验长度为 24 m。

4.2 数据采集参数

进行容积测量前,需要将测量部位的粉尘、碎石渣等杂质用高压水冲洗干净,并保证洞室底板及测量部位无积水。以设计单位确定的地面控制点和洞室内施工控制点作为整个洞库群统一的测量控制网。以底板平面作为整体坐标系的零水平面,竖直向上为 Z 轴正向,主洞室轴线方向为 Y 轴,大桩号方向为正, X 轴满足右手定则。

针对选择的区段,通过 Leica TCR1202+ 全站仪进行测量区域洞室轴线的放样。激光断面测量设备采用 Trimble TX5 设备,扫描分辨率为 1/2,扫描质量为 4×。考虑到导轨长度,单次测量长度为 3 m。测量系统放置在洞室轴线上。断面间距初步选择最优的步距 Δ 为

$$\Delta = 1.718\omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda\rho}{\pi\omega_0^2}\right)^2}, \quad (9)$$

式中 λ 为激光波长,对于 TX5 断面测量设备来说,激光波长为 905 nm, ω_0 为激光束腰宽度, ρ 为测量范围。考虑到测量断面几何尺寸,计算可得最优步距为 6.84~14.5 mm,取均值 10 mm 作为初始最优步距。后续的断面间距根据前一步的测量断面特征确定。

4.3 数据采集

实际测量时,将精细测量系统放置在预先放样的轴线点位上,保证系统的激光测量设备棱镜旋转平面与洞室断面平行。将系统各个部件连接电源,调整至工作状态。

按照 2.3 节的具体测量流程,实时获取断面数据,并根据断面的特征,实时调整后续的采集参数,达到动态精细测量,直至完成轨道行程,单次测量结束。移动精细测量系统至下个轴线点位,进行单次测量。依次循环,完成全部测量。

由于采用的是走停式测量模式,轨道已经提供了精确的定位信息,连续两次的测量区域不需要重合测量,但是为了校验,通常需保证单次测量两端的断面重合。

对于倾斜断面的测量(比如施工巷道)有两种方式:垂直于巷道底板的断面测量和垂直于水平面的断面测量。考虑到测量布置简单,实施方便,选用垂直于巷道底板的断面测量方法,并在洞室变化连接段进行加密局部处理。

激光精细测量系统现场工作如图 5 所示。

4.4 数据处理

首先将断面测量数据结合位置信息恢复至三维空间,并对实际点云进行数据滤波。图 6 为单次测量实际点云数据聚类分析获得的点云优势分布中心(红线所示)和优势分布区域,其中黑色实线为设计断面形状。

然后,将单次测量的数据配准到统一的测量控制网中,配准后的三维效果如图 7 所示。采用克里金插值方法对配准的点云数据进行插值得到规则网格数据,如图 8 所示。

通过容积计算,可以建立沿高程厘米级的高程-累积容积曲线,如图 9 所示。



图 5 激光精细测量系统容积测量图

Fig. 5 Volume measurement figure of the laser sophisticated measurement system

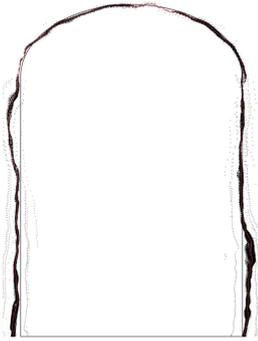


图 6 聚类算法获得的单次测量优势点云分布中心和区域

Fig. 6 Dominant distribution center and zone of point cloud in single measurement by cluster algorithm

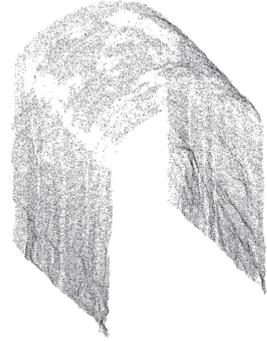


图 7 多次测量数据配准三维效果图

Fig. 7 Three-dimensional effect map of multiple measurement by data registration

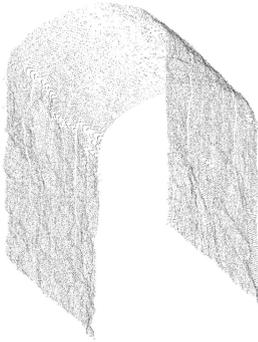


图 8 多次测量数据插值后的三维效果图

Fig. 8 Three dimensional effect map of multiple measurement by data interpolation

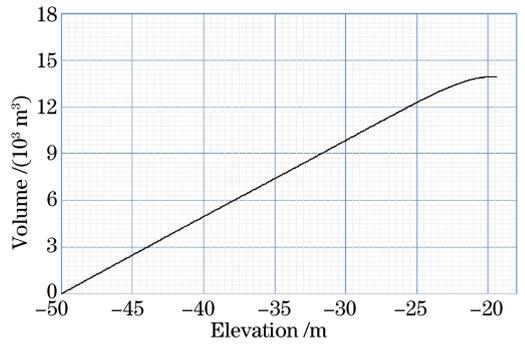


图 9 厘米级高程-累积容积曲线

Fig. 9 Elevation-cumulative volume curve in centimeter level

通过容积计算,可得 8 个连续单次测量结果的总容积为 13947.08 m^3 。

5 分析与讨论

5.1 真实容积回归计算

针对单次测量的点云数据,提取不同断面间距的数据,进行相应的插值计算和容积计算,得到不同断面间距的容积值,如图 10 所示。通过对不同间距的容积进行回归分析(图 10 中虚线)可以得到单次测量的真实容积。通过对 8 次测量容积的回归,可以得到真实的容积为 13955.0 m^3 ,精细测量系统总容积的测量误差为 -0.06% ,优于规范要求(0.5%)一个数量级。

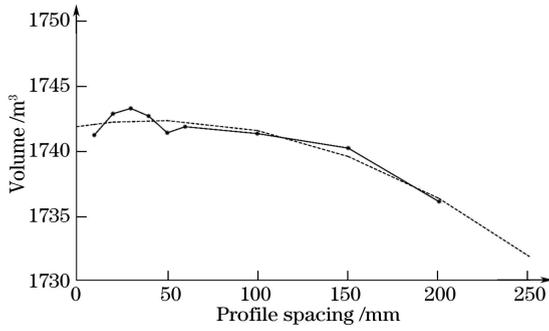


图 10 单次测量时容积随断面间距的变化

Fig. 10 Volume variation with profile spacing in single measurement

5.2 点云密度影响

不同的步距和点云采样间隔会产生不同的点云密度。将原始的点云数据按照不同的步距和不同的断面点云间距进行抽样,获得不同点云密度下的原始数据,并对该数据进行插值和容积计算,得到点云密度与容积测量值之间的关系,如图 11 所示,图中虚线为 0.5% 误差线,可以看到,点云密度为 16 pts/m² 时,激光精细测量系统的测量误差已经满足规范的要求。在实际容积测量中,可以适当调整步距和断面点云间距,提高测量效率。

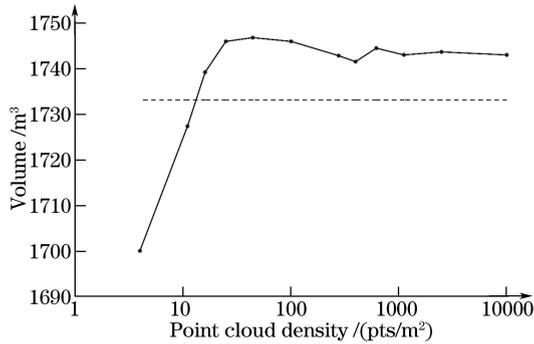


图 11 单次测量时容积随点云密度的变化

Fig. 11 Volume variation with point cloud density in single measurement

5.3 三维激光扫描仪容积测量结果分析

针对相同的区段采用固定基站式三维激光扫描仪进行测量。测量设备采用 Trimble TX5 扫描仪,单站测量长度取 15 m,分两站扫描。点云分辨率为 1/2,扫描质量为 4×。采用直径为 10 cm 的标靶球 7 个和 A4 标靶纸 4 张作为控制点,其中,轴线上的三个标靶球位置采用全站仪定位。

利用标靶进行两站点云数据的拼接,拼接精度 2.03 mm。根据三个标靶球的测量坐标系坐标,将仪器坐标系纠正到整体坐标系。然后,保留(0+469)~(0+493)桩号间的点云数据,并进行相应的插值计算和容积计算,可以得到各高程下的累积容积曲线,如图 12 所示。

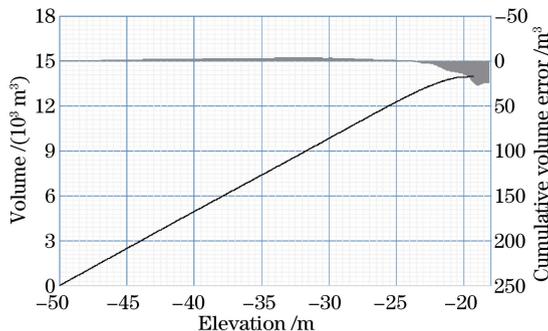


图 12 TLS 测量得到的高程-累积容积曲线

Fig. 12 Elevation-cumulative volume curve measured by TLS

将 TLS 的测量容积总量与精细测量方法回归获得的容积真值进行对比,误差为 0.12%, 优于规范的要求。在主洞室边墙区域,测量结果误差较小,累积误差最大为 4.50 m³;但是在拱顶区域,累积误差增加至 27 m³,原因在于拱顶几何形状比较复杂,三维扫描仪受到几何条件、被测目标等因素的影响,因此拱顶数据质量不高。

5.4 全站仪容积测量结果分析

针对相同的区段采用 Leica TCR1202+ 全站仪进行了库容容积测量。测量断面间距为 1.5~3 m,每个断面测点 120 个左右,共 11 个断面,1255 个测点。针对该区段的点云数据,进行相应的插值计算和容积计算,可以得到各高程下的累积容积曲线,如图 13 所示。

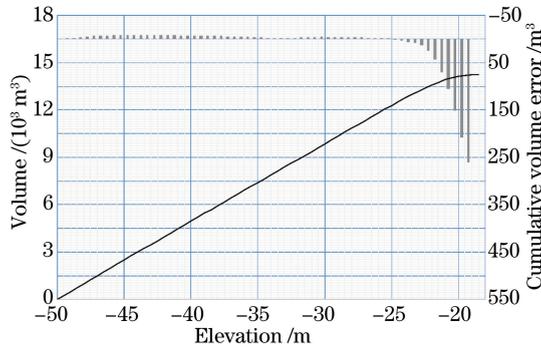


图 13 全站仪测量得到的高程-累积容积曲线

Fig. 13 Elevation-cumulative volume curve measured by total station

将全站仪的测量容积总量与精细测量方法回归获得的容积真值进行对比,误差为 1.94%, 差于规范的要求。在主洞室边墙区域,测量结果误差较小,最大累积误差为 8 m³。但是在拱顶区域,累积误差急剧增加至 260 m³,原因有两个方面,第一,拱顶几何形状比较复杂,而全站仪测点较少,不能精细刻画拱顶区域的形状;第二,全站仪测点稀疏,空间分辨率差,导致测量结果较差。

5.5 容积测量方法对比

以长度为 600 m 的洞室为例,对上述三种容积测量方法的测量效果进行对比,结果如表 1 所示。

表 1 地下能源储库容积测量方法对比

Table 1 Comparison of volume measurement methods in underground energy storage caverns

Technical indexes	LSMS	TLS	Total station
Quality of point cloud	Super high	High	High
Spatial resolution	Super high	High	Low
Volume accuracy	High	Moderate	Low
Time cost infield	7 h	24 h	16 h
Labor cost in field	4 persons	2 persons	1 person
Time cost in office	No additional time needed due to parallel working	2 d	4 h
Data processing	Self-processing program	Commercial software and workstation	Self-processing program
Economic analysis	High	High	Moderate

从对比结果可以看出,激光精细测量系统不仅点云质量高,空间分辨率好,采集速度快,而且相应的数据处理方法实时快速、精度高、误差小,能够满足工程需求。

6 结 论

考虑地下能源储库的工程需要,研发了基于断面测量的轨道走停式激光精细测量系统,并利用该系统对地下能源储库进行了容积测量实验。主要完成了以下工作:

1) 激光精细测量系统的测量精度高,点云密度大且空间分布均匀,测量效率高,数据处理实时,内业外业可同时进行,定位精度可达1~3 mm。

2) 建立了相应的数据处理方法,包括点云数据复原、数据清洗、数据配准、数据建模以及容积计算。针对地下能源储库的点云特征,提出了点云清洗的聚类算法。

3) 将激光精细测量系统和相应的数据处理方法成功应用到了某地下储库的容积测量中,获得了厘米级的高程-容积曲线,并通过回归计算得到了容积真值,实际容积测量误差为-0.06%,优于规范要求一个数量级。

4) 对激光精细测量系统的测量步距和点云密度进行了讨论,并结合全站仪和基站式三维激光扫描仪的测量结果,从8个技术指标对比了不同容积测量方法的优缺点,验证了激光精细测量的优越性和数据处理算法的正确性,说明该方法能够胜任地下能源储库容积的测量。

参 考 文 献

- Evans D J. A review of underground fuel storage events and putting risk into perspective with other areas of the energy supply chain[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 313(1): 173-216.
- The National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GB 50455-2008 code for design of underground oil storage in rock caverns[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
中华人民共和国国家标准编写组. GB 50455-2008 地下水封石洞油库设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- He Jianbang, Li Huiquo. The measurement method of underground oil storage in rock[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1979, (1): 26-33.
何建邦, 励惠国. 地下水封石洞油库的计量方法[J]. 勘查技术, 1979, (1): 26-33.
- Hong Kairong. Construction technology of large-scale underground water-sealed caverns[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013.
洪开荣. 大型地下水封洞库修建技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- Crossley N G. Sonar surveys used in gas-storage cavern analysis[J]. Oil & Gas Journal, 1998, 96(18): 96-108.
- Reitze A, Krieter M, Tryller H. Importance of sonar surveying in the monitoring and operation of natural gas caverns[J]. Geologia, 2009, 57(9): 769-770.
- Munson D E, Myers R E. Relative evaluation of storage cavern volume measurements[C]. SMRI Fall Meeting, 2000.
- Sellers W I, Chamberlain A T. Ultrasonic cave mapping[J]. Journal of Archaeological Science, 1998, 25(9): 867-873.
- Zhang Dejin, Li Bijun, He Li. Application on laser measurement for large storage yard based on multi-sensor integration[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0208005.
张德津, 李必军, 何 莉. 基于多传感器集成的堆场激光测量技术应用[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208005.
- Wang Haibo, Zhang Dejin, He Li. Research on large open stockyard laser measurement methods[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508002.
王海波, 张德津, 何 莉. 大型露天料场激光测量方法研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508002.
- Yakar M, Yilmaz H M, Mutluoglu O. Comparative evaluation of excavation volume by TLS and total topographic station based methods[J]. Lasers in Engineering, 2010, 19(5): 331-345.
- Yakar M, Yilma H M, Mutluoglu O. Performance of photogrammetric and terrestrial laser scanning methods in volume computing of excavation and filling areas[J]. Arabian Journal Forence & Engineering, 2014, 39(1): 387-394.
- Peji c M. Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37: 199-206.
- Lin Y, Hyyppa J, Kukko A. Stop-and-go mode: Sensor manipulation as essential as sensor development in terrestrial laser scanning[J]. Sensors, 2013, 13(7): 8140-8154.
- Guo Q, Li W, Yu H, *et al.* Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2010, 76(6): 1-12.
- Wang Jiahua, Gao Haiyu, Zhou Ye. Kriging geological mapping technique: Models and algorithms on computers[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
王家华, 高海余, 周 叶. 克里金地质绘图技术: 计算机的模型和算法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.