

基于地面激光雷达的洞库容量计量

程效军^{1,2**}, 熊鑫鑫¹, 杨泽鑫^{1*}, 杨荣淇³

¹ 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

² 自然资源部现代工程测量重点实验室, 上海 200092;

³ 上海船舶研究设计院, 上海 201203

摘要 针对现有基于点云的容量计量模型的缺陷, 本文提出一种改进的洞库容量计量模型。首先, 在高度方向上将洞库点云数据由下至上切割为若干微元体; 采用提出的分层投影法准确地提取截面轮廓点, 基于改进的截面轮廓点排序算法正确地构建截面轮廓多边形, 使用坐标解析法计算截面积; 考虑洞库的构造特点, 分别采用柱体模型与棱台模型计算洞库的下部边墙及上部拱顶的微元体体积; 最后, 由下至上累加微元体的体积即可获取洞库容量表。选用三个具备代表性的洞库片段数据进行方法验证, 实验所得洞库容量表的精度优于规范要求 1 个数量级, 说明本文方法对复杂的洞库结构具有良好的适应性。

关键词 测量; 洞库容量; 分层投影法; 截面轮廓点排序; 点云切片; 地面激光雷达

中图分类号 P232

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.231201

Cavern Capacity Calculation Using Terrestrial Lidar

Cheng Xiaojun^{1,2**}, Xiong Xinxin¹, Yang Zexin^{1*}, Yang Rongqi³

¹ College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² Key Laboratory of Advanced Engineering Surveying of Ministry of Natural Resources, Shanghai 200092, China;

³ Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, Shanghai 201203, China

Abstract In this study, we propose an improved cavern capacity calculation model to address the defects of existing point cloud methods. First, the cavern preprocessed point cloud is sectioned into several point cloud slices from the bottom to the top along the height direction. For each slice, the contour points of two cross sections are extracted using the presented hierarchical projection method, and the section contour polygon is constructed correctly by using the improved ordering algorithm for section contour points. Subsequently, the area of each cross section is calculated using the coordinate analytic method. Given the structures of the caverns, the cell volumes of the lower side wall and upper arch of caverns are calculated by using models of cylinder and trustum of a pyramid, respectively. Finally, the capacity table of the caverns can be acquired based on the volume of every polyhedron from the bottom to the top. The performance of the proposed method is evaluated using three representative point cloud fragments from a cavern. The results denote that the accuracy of the output capacity table obtained by experiments is an order of magnitude higher than that demanded by the standard requirement. The proposed approach shows good adaptability with respect to the complex structure of caverns.

Key words measurement; capacity of cavern; hierarchical projection method; section contour point ordering; point cloud slicing; terrestrial lidar

OCIS codes 120.6650; 280.3640; 120.5800

1 引言

洞库储油已成为各国建立战略储备的主要形

式^[1]。相较于结构简单、建造成本低的地面储罐^[2], 地下储油洞库的安全系数高、易于管理、节省占地面积、有助于保护地表环境^[3]。但是, 在用洞库一般以

收稿日期: 2019-05-08; 修回日期: 2019-05-18; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(41671449)、上海船舶研究设计院科技项目(JSJL2016206B003)

* E-mail: zexinyang@tongji.edu.cn; ** E-mail: cxj@tongji.edu.cn

天然岩洞或人工开凿的岩洞为基础,经过简单修整后建设而成,洞壁形状不规则,属特大异形体,其容量难以被快速精确获取。溶解体积法^[4]、声纳或声波测量法^[5-6]、摄影测量法^[7]和全站仪法^[8]等传统的储油洞库容量计量方法均无法兼顾省时省力与高精度两方面的要求^[9]。

地面激光雷达作为一种高效率、高精度的三维空间数据获取手段,可对不规则储油洞库进行数字化,从而实现对储油洞库容量的快速、准确计量。虽然激光雷达已被成功应用于物堆体积计量^[10]、油罐容量计量^[11]、船舶计量^[12-13]等多个计量领域,但是采用该技术测量洞库容量的研究仍然较少,相关数据处理与容量计量方法尚不成熟。

洞库容量计量的目的是获取洞库的容量与高度间的关系,即洞库的容量表^[9,14-15]。采用地面激光雷达技术获取容量表的研究主要可分为“逆向建模”与“点云切片”两个思路。吕小宁等^[9]基于“逆向建模”的思路,使用自制的移动断面测量系统采集洞库数据,对原始数据进行去噪、配准等预处理后,采用克里金插值法构网实现洞库容量计量。该研究获取的容量曲线精度很高,但是,基于海量散乱点云进行构网,算法复杂度高,效率低。相反,采用“点云切片”的方法直接基于点云数据实现对较规则待测对象的容量计量,兼顾了高效率与高精度,正被越来越多的研究^[11-12,14-16]所采用。该方法基于积分思想,在高度方向上将点云数据由下至上切割为若干微元体,提取截面轮廓点以构建截面多边形,计算截面积,进而求得各微元体的体积,通过体积叠加的方式获取待测物体的容量表。然而,现有基于点云的容量计量模型在“截面轮廓点提取”与“截面积计算”两个环节仍存在缺陷。

截面轮廓点提取:在点云密度足够大的理想情况下,直接固定高程值即可获得该高度下的截面轮廓点^[16]。但是,在大型扫描工程中,需要压缩原始数据以减少计算机压力,加快处理速度,但难以保证同一高度下具有足够多的数据点。因此,现有研究^[12,14-15,17]多采用投影法生成截面轮廓点,即取微元体截面上、下各相同高度的点云数据,将其投影至截面形成截面轮廓点。该方法效率高、易实现,但是投影高度难以确定:若投影高度过小,难以保证截面轮廓点的密度;若投影高度过大,则易形成冗余点与错误点,导致截面积计算错误。常见改进方法的思路是:先基于投影法生成冗余点;再通过数字图像处理^[18]或空间拓扑关系^[17]提取其中的特征点作为截

面轮廓点。可是,这些方法不分权重地处理冗余点,可能保留远离截面的点为轮廓点,无法保证轮廓点的准确度。

截面积计算:该环节可分为截面轮廓多边形构建和截面积计算两个阶段。其中,截面轮廓多边形的正确构建是准确计算截面积的前提^[16]。构建截面轮廓多边形的本质是对截面轮廓点按顺(逆)时针方向进行排序。现有模型常采用极坐标排序法^[17],该方法只适用于凸多边形轮廓点,无法应用于洞室与巷道连接处的数据点。双向最近点搜索法^[16,19]虽然可以正确排列洞室与巷道连接处的数据点,但在凹凸不平的洞壁表面仍可能出错。在面积计算阶段,现有模型常采用三角形面积法计算截面积,但该方法也只适用于凸多边形。因此,极坐标排序算法与三角形面积法的经典组合^[11-12,14]在计算凹多边形的面积时会“错上加错”。为了解决该问题,梁雪敏^[15]采用观察法,即人工目视判别洞壁凹凸处后,手动分割点云切片,然而该方法人工成本高、效率低。坐标解析法^[16,20]可以准确求解凹多边形的面积,但其仍需要以按顺(逆)时针排序的轮廓点为输入。

针对上述问题,本文提出一种改进的洞库容量计量模型。提出分层投影法以准确地提取截面轮廓点,提出改进的截面轮廓点排序算法以正确地构建洞库复杂的截面轮廓多边形,结合坐标解析法以准确计算截面积。考虑洞库的构造特点,采用不同模型计算洞库的下部边墙及上部拱顶的微元体体积,以获取准确的容量表。

2 改进的洞库容量计量模型

改进的洞库容量计量模型沿用积分思想,其计算流程可概括为点云切片→截面轮廓点提取→截面轮廓点排序→截面积计算→微元体体积计算→容积表生成共6个步骤,具体如下。

1) 点云切片。根据给定的切割间距 h ,在高度方向上将点云数据切割为 m 个等高的微元体 \mathcal{P}_i :

$$\mathcal{P}_i = \{(x, y, z) \mid z_{\min} + i \cdot h \leq z \leq z_{\min} + (i + 1) \cdot h, i = 0, 1, \dots, m - 1\}, \quad (1)$$

式中: (x, y, z) 为点云中数据点的三维坐标; z_{\min} 为点云的高程最小值; i 为微元体的索引值。

2) 截面轮廓点提取。对于每个微元体,采用提出的分层投影法提取其顶、底两个截面的轮廓点,以降低轮廓点冗余度的同时,保证轮廓点的可靠性。

3) 截面轮廓点排序。对于步骤2)生成的每个

截面轮廓点集,提出改进的截面轮廓点排序算法排列无序的轮廓点。

4) 截面积计算。采用坐标解析法求解有序轮廓点集的包围面积,即

$$\begin{cases} S(\mathcal{L}) = \frac{1}{2} \left| \sum_{j=1}^n (x_j y_{j+1} - x_{j+1} y_j) \right|, \\ x_{n+1} = x_1, y_{n+1} = y_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathcal{L} 为某一截面的轮廓点集; $S(\mathcal{L})$ 为该轮廓点集的包围面积; (x_j, y_j) 为轮廓点的平面坐标; j 为轮廓点的索引值; n 为轮廓点集包含的点数。

5) 微元体体积计算。洞库由下部竖直边墙及上部拱顶组成,洞壁表面凹凸不平。为提高计算精度,基于两种模型计算微元体体积:下部边墙采用柱体模型;上部拱顶采用棱台模型。两种模型的测量表达式为

$$V = h \cdot S_L, \quad (3)$$

$$V = \frac{1}{3} h (S_U + S_L + \sqrt{S_U S_L}), \quad (4)$$

式中: V 为微元体的体积; S_U 和 S_L 分别为该微元体的顶、底截面积。

6) 容量表生成。由下至上累加微元体的体积,获取洞库容量表。

本模型主要针对现有基于点云数据的体积(容积)计算模型对“截面轮廓点提取”与“截面积计算”两个环节的缺陷进行了改进:提出分层投影法以解决现有研究难以准确提取截面轮廓点的问题;提出改进的截面轮廓点排序算法以解决现有方法适应性差的问题。

2.1 截面轮廓点提取

为了在降低轮廓点冗余度的同时,保证其可靠性,本文提出分层投影法以准确地提取微元体点云的截面轮廓点。算法具体步骤(以获取 z_R 高度处的截面轮廓点为例)如下。

1) 给定投影高度阈值 ϵ ,将 z_R 上、下各 ϵ 高度内的点云投影至截面处,获取可靠性较高的轮廓参考点集。

2) 根据循环次数 ξ ,计算上投影高度 z_U 与下投影高度 z_L 分别为

$$\begin{cases} z_U = z_R + \xi \cdot \epsilon \\ z_L = z_R - \xi \cdot \epsilon \end{cases} \quad (5)$$

3) 将 z_U 以上和 z_L 以下各 ϵ 高度内的点云投影至截面处,获取轮廓候选点集。

4) 对于每个轮廓候选点,以密度阈值 r 为半径形成圆域,若圆域内不存在轮廓参考点,则接受该候

选点,将其加入轮廓参考点集。

5) 重复步骤2)~5)直到循环次数满足 $\xi \geq \bar{d}/\epsilon$,其中 \bar{d} 为数据的平均点密度。

2.2 截面轮廓点排序

为了正确排列洞库点云的截面轮廓点,本文基于文献[21]的思想,提出一种改进的截面轮廓点排序算法。主要有两点改进:采用Graham扫描法^[22-23]建立凸包,解决文献[21]算法无法应用于闭合轮廓点集的问题,提高了算法的适应性;使用最小化点到线段距离原则代替最小化边长差原则,减小了算法的复杂度。改进的截面轮廓点排序算法分为“二维凸包构建”和“凹包点内插”两个阶段。

2.2.1 二维凸包构建

假设有二维点集 \mathcal{P} ,则采用Graham扫描法构建其凸包 $C(\mathcal{P})$ 的具体步骤如下。

1) 搜索 \mathcal{P} 中 y 坐标最小的点 P_S ,如图1(a)所示。若 y 坐标最小值对应多个点,则选择其中 x 值最小的点。

2) 以 P_S 为原点、横轴为极轴 L 建立极坐标系。将 \mathcal{P} 中的第一个点设置为 P_S ,其余点按极角从小到大(逆时针)排序,如图1(b)所示。若出现多点极角相等的情况,则计算每个点的极径,将极径较小的点排在前面。其中,使用极角的余弦值代替极角的计算,使用极径的平方和代替极径的计算,能提高计算效率。

3) 对于极角相等的点,只保留 \mathcal{P} 中极径最大的点,如图1(c)所示。

4) 易知 \mathcal{P} 中的第一点和第二点必为凸包的顶点。对于 \mathcal{P} 中的其余点,判断该点与前、后各一点所构成的连续三点的时针方向:若为逆时针,如图1(d)、(e)、(f)所示,表明当前点为凸包的顶点,保留该点;若为顺时针,如图1(g)所示,则表明当前点非凸包的顶点,从 \mathcal{P} 中剔除该点。假设 P_N 为当前点, P_B 为前序点, P_F 为后序点, $\overrightarrow{P_N P_B}$ 和 $\overrightarrow{P_N P_F}$ 的向量积为 Δ ,则判断标准为: $\Delta > 0$,连续三点成逆时针方向; $\Delta < 0$,连续三点成顺时针方向。

5) 按步骤4)遍历 \mathcal{P} 中所有点,更新所得点集即为凸包 $C(\mathcal{P})$,如图1(h)所示。

2.2.2 凹包点内插

在生成截面轮廓点集的凸包后,只需将剩余的凹包点(候选点)正确插入多边形即可实现对截面轮廓点集的正确排序。凹包点内插的具体步骤如下。

1) 对于每个候选点 $P_C(x_C, y_C)$,遍历多边形上所有相邻顶点,此处以 $V_B(x_B, y_B)$ 和 $V_F(x_F, y_F)$

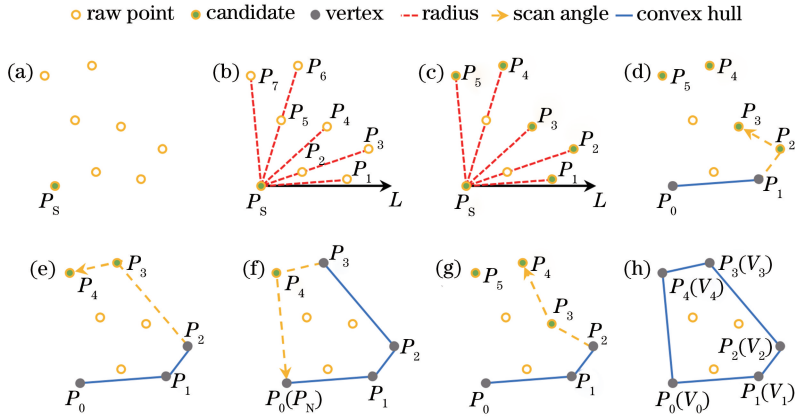


图1 Graham扫描法构建凸包的过程示意图。(a)极点搜索;(b)极坐标排序;(c)内点过滤;(d)(e)(f)连续三点成逆时针方向;(g)连续三点成顺时针方向;(h)凸包

Fig. 1 Schematic of reconstructing convex hull by Graham scan algorithm. (a) Search for pole; (b) polar-angle based ordering; (c) elimination of internal points; (d) (e) (f) three sequential points form anticlockwise direction; (g) three sequential points form clockwise direction; (h) reconstructed convex hull

表示每对相邻顶点,计算 \$P_C\$ 至线段 \$V_B V_F\$ 的距离 \$d\$ 为

$$d = \begin{cases} |\overrightarrow{V_B P_C}| = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2}, \rho \in (-\infty, 0] \\ \frac{|\overrightarrow{V_B P_C} \times \overrightarrow{V_B V_F}|}{|\overrightarrow{V_B V_F}|} = \frac{(x_C - x_B)(y_F - y_B) + (y_C - y_B)(x_F - x_B)}{\sqrt{(x_F - x_B)^2 + (y_F - y_B)^2}}, \rho \in (0, 1), \\ |\overrightarrow{V_F P_C}| = \sqrt{(x_C - x_F)^2 + (y_C - y_F)^2}, \rho \in [1, +\infty) \end{cases} \quad (6)$$

式中: \$\rho\$ 值的大小表达 \$P_C\$ 与 \$\overrightarrow{V_B V_F}\$ 的相对位置分布。若 \$\rho \in (-\infty, 0]\$, 表明 \$\overrightarrow{V_B P_C}\$ 在 \$\overrightarrow{V_B V_F}\$ 上的投影落在 \$\overrightarrow{V_B V_F}\$ 的左延长线上, 如图 2(a) 所示; 若 \$\rho \in (0, 1)\$, 表明投影落在 \$\overrightarrow{V_B V_F}\$ 上, 如图 2(b) 所示; 若 \$\rho \in [1, +\infty)\$, 表明投影落在 \$\overrightarrow{V_B V_F}\$ 的右延长线上, 如

图 2(c) 所示。\$\rho\$ 值的计算公式为

$$\rho = \frac{\overrightarrow{V_B P_C} \cdot \overrightarrow{V_B V_F}}{|\overrightarrow{V_B V_F}|} / |\overrightarrow{V_B V_F}| = \frac{(x_C - x_B)(x_F - x_B) + (y_C - y_B)(y_F - y_B)}{(x_F - x_B)^2 + (y_F - y_B)^2} \quad (7)$$

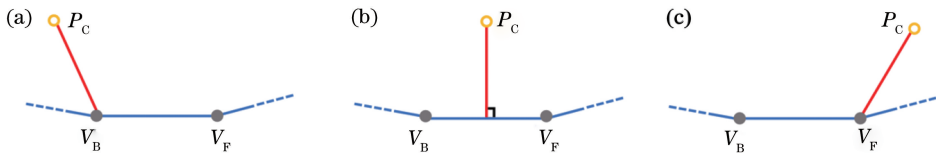


图2 候选点至线段的距离。(a) \$\rho \in (-\infty, 0]\$; (b) \$\rho \in (0, 1)\$; (c) \$\rho \in [1, +\infty)\$

Fig. 2 Distance from candidate point to edge of polygon. (a) \$\rho \in (-\infty, 0]\$; (b) \$\rho \in (0, 1)\$; (c) \$\rho \in [1, +\infty)\$

2) 根据最小化点至线段距离的原则, 将 \$P_C\$ 插入使得 \$d\$ 最小的两个相邻顶点之间, 更新多边形。

3) 重复 1)~2), 直至将所有候选点插入多边形中。

3 实验分析

3.1 实验数据

实验使用 FARO Focus^{3D} X330 地面激光雷达采集某洞库的点云数据。根据该洞库的尺寸, 采用

文献[24]方法计算最佳扫描参数和测站间距。采集过程中, 设置扫描分辨率为 1/4, 扫描质量为 4, 测站间距为 8 m 左右, 站间布设标靶球以实现基于目标的高精度配准, 共布设 8 个测站对该洞库进行全景扫描。使用 FARO SCENE 软件对原始扫描进行预处理, 包括扫描去噪(过滤每站扫描中的低质量数据点、离群点与离扫描中心超过 10 m 的点), 多站扫描的配准与融合, 点云压缩, 以获取完整的洞库点云数据。为更好地测试本文算法的适应性, 截取整体

点云中三段具备典型特征(直线形、弯折形与相交形)的点云片段作为实验数据。三个实验数据的点数与平均点密度如表 1 所示,尺寸信息与点云可视化效果如图 3 所示。可以看出,实验洞库的下部竖直边墙高 1.9 m,上部拱顶高 1.1 m,如图 3(a)所示,洞壁凹凸不平,纹理明显,如图 3(b)所示。实验数据的点数在百万级别,平均点密度为 8 mm。

表 1 实验数据的参数信息

Data	Number of points	Average point density /mm
Line-shape	981,837	8
Turning-shape	1,042,796	
Intersection-shape	1,836,865	

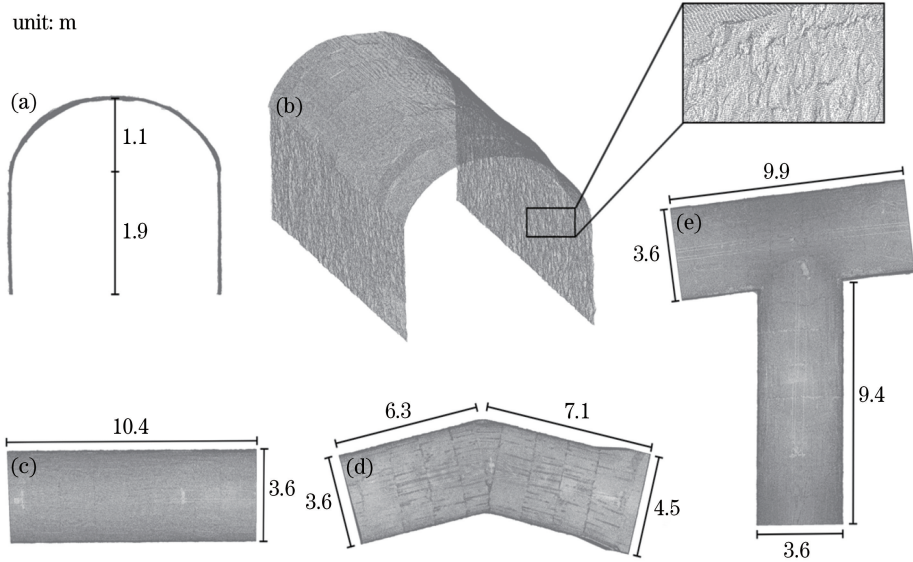


图 3 实验数据效果图。(a)洞库剖面尺寸信息;(b)直线形点云片段;(c)(d)(e)直线形、弯折形和相交形点云片段的尺寸信息
Fig. 3 Effect pictures of experimental data. (a) Size of cross section of cavern; (b) line-shaped point cloud fragment; (c)(d)(e) sizes of line-shaped, turning-shaped, and intersection-shaped point cloud fragments

3.2 实验参数

本文方法共涉及 4 个参数,参数取值如表 2 所示。在点云切片阶段,切割间距的取值直接影响容量表精度与算法运行效率两个指标。理论上,切割间距与容量表精度呈负相关,与算法运行效率呈正相关。依照文献[12]的思路设计实验,定量表达切割间距的取值与两个指标间的关系,综合考虑以确定最佳参数:洞库的上部拱顶与下部边墙的切割间距 h_U 和 h_L 分别为 4 cm 与 10 cm。在截面轮廓点提取阶段,投影间距 ϵ 和搜索半径 r 的取值均需要参照数据的平均点间距。经过多次实验对比求得参数的最优经验值为: ϵ 取平均点密度的 1/8(即循环 4 次); r 取平均点密度。

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

Stage	Parameter	Value
Point cloud slicing	h_U /cm	4
	h_L /cm	10
Contour point extraction	ϵ /mm	1
	r /mm	8

3.3 实验设计与结果分析

图 4 为采用分层投影法提取的直线形点云片段在高度 1 m 处的截面轮廓点。由图 4 可见,分层投影法提取的截面轮廓点密度适中,不存在明显错误的冗余点。

为了验证改进的截面轮廓点排序算法的正确性,设计截面轮廓点排序实验。基于分层投影法生成三个点云片段在高度 2.5 m 处的截面轮廓点,分别采用极坐标排序算法与本文排序算法对三个截面轮廓数据进行排序,人工统计排序结果的错误点数。两种方法的错误排序点的数量如表 3 所示。为了更直观地展示两种方法的排序结果,连接有序轮廓点构建出三个截面轮廓多边形(图 5,图中 X、Y 为平面坐标系的横、纵轴)。综合表 3 与图 5 可知,极坐标排序法只能正确排列直线形点云片段的截面轮廓点,而本文方法在三种类型的实验数据中均能取得正确的排序结果。

为说明本文模型所采用的坐标解析法的适用性,设计截面积计算实验。采用 Geomagic Studio 软件对三个实验数据进行三维重建后,以 0.5 m 为

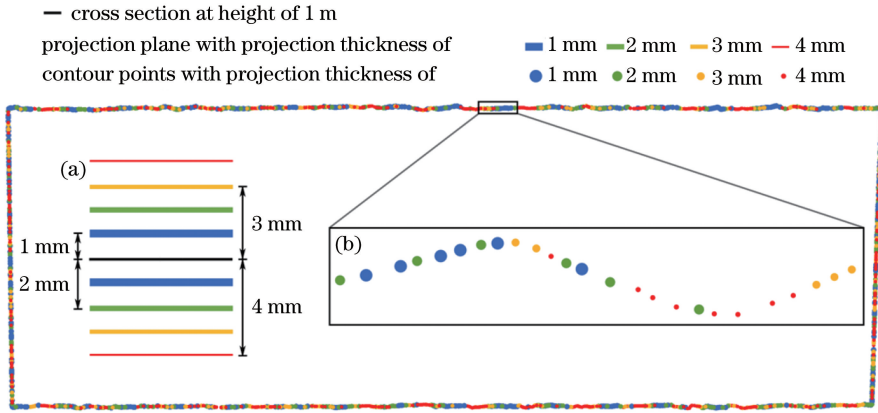


图4 轮廓点提取结果。(a)分层投影示意图;(b)轮廓点细节图

Fig. 4 Experimental results of contour point extraction. (a) Schematic of hierarchical projection; (b) detailed image of contour points

表3 极坐标排序算法与本文排序算法对比
Table 3 Comparison between polar-angle based ordering method and our method

Data	Number of points	Number of points with wrong order	
		Polar-angle based ordering	Ours
Line-shape	1,345	20	
Turning-shape	1,148	213	0
Intersection-shape	2,610	1,039	

间距依次截取高度为 0.5~2.5 m 处的 5 个截面, 获取各个截面的截面积作为截面积参考值; 分别以三角形面积法与本文算法建立三个实验数据的

面积表, 将其与面积参考值进行对比, 计算两种方法所求得截面积的相对误差。需要说明的是, 为了准确表达三角形面积法的计算结果, 避免其受极坐标排序法的干扰, 在面积实验中均采用本文排序算法排列截面轮廓点。表 4~6 列出了截面积计算实验的结果。易知, 对于规则的直线形数据(表 4), 三角形面积法和本文算法所求得截面积的最大相对误差仅为 0.028% 与 0.014%, 精度较高。对于截面为复杂凹包的弯折形与相交形数据, 三角形面积法会导致明显的面积计算错误(见表 5 和表 6 中黑体部分); 相反, 本文算法仍然可以准确地计算出截面积。

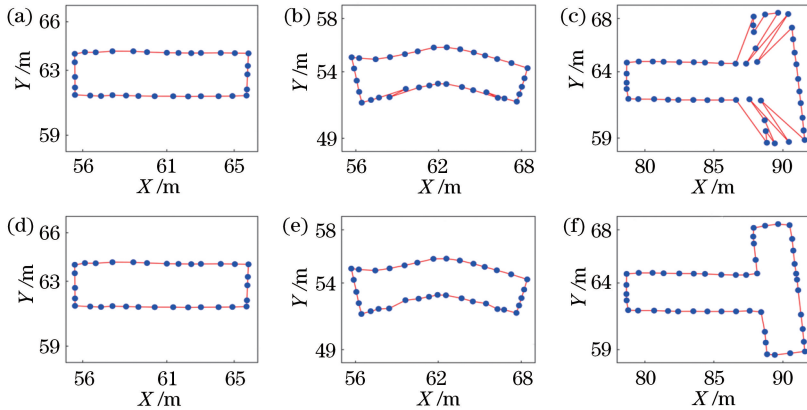


图5 截面轮廓点排序效果(为了可视化数据点被抽稀)。(a)(b)(c)极坐标排序算法;(d)(e)(f)本文算法
Fig. 5 Experimental results of section contour point ordering (data are down-sampled for better visualization).

(a)(b)(c) Polar-angle based ordering method; (d)(e)(f) our method

为了检验本文洞库容量计量模型的有效性, 设计容量计算实验。采用 Geomagic Studio 软件对三个实验数据进行三维重建后, 以 0.25 m 为间距依次截取高度为 0.5~2.5 m 处的 9 个截面, 获取该高度下的模型体积作为容量参考值; 以本文算

法建立三个实验数据的容量表, 与容量参考值进行对比, 计算本文方法所求得容量的相对误差。容量计算实验的结果如表 7 所示。由表 7 可以看出, 在采用本文算法获取的三个实验数据的容量表中, 最大相对误差仅为 0.006%、0.010% 和

表4 直线形数据的面积表

Table 4 Area table of line-shaped data

Height /m	Area of cross sections /m ²			Relative error /%	
	Ground truth	Trigonometric method	Ours	Trigonometric method	Ours
0.5	36.105	36.103	36.105	0.006	0
1.0	36.208	36.204	36.205	0.011	0.008
1.5	36.030	36.040	36.035	0.028	0.014
2.0	35.466	35.472	35.469	0.017	0.008
2.5	28.746	28.750	28.749	0.014	0.010

表5 弯折形数据的面积表

Table 5 Area table of turning-shaped data

Height /m	Area of cross sections /m ²			Relative error /%	
	Ground truth	Trigonometric method	Ours	Trigonometric method	Ours
0.5	43.839	43.950	43.846	0.253	0.016
1.0	43.874	43.994	43.874	0.274	0
1.5	43.881	43.914	43.867	0.075	0.032
2.0	43.065	44.127	43.068	2.466	0.007
2.5	34.114	35.117	34.109	2.940	0.015

表6 相交形数据的面积表

Table 6 Area table of intersection-shaped data

Height /m	Area of cross sections /m ²			Relative error /%	
	Ground truth	Trigonometric method	Ours	Trigonometric method	Ours
0.5	67.061	79.039	67.073	17.861	0.018
1.0	66.966	79.055	66.975	18.052	0.013
1.5	66.791	79.196	66.785	18.573	0.009
2.0	66.902	79.047	66.906	18.153	0.006
2.5	53.924	67.249	53.920	24.711	0.007

表7 三个实验数据的容量表

Table 7 Capacity table of three experimental data

Height /m	Line-shaped data			Turning-shaped data			Intersection-shaped data		
	Ours /m ³	Ground truth /m ³	Relative error /%	Ours /m ³	Ground truth /m ³	Relative error /%	Ours /m ³	Ground truth /m ³	Relative error /%
0.50	18.019	18.019	0	21.879	21.878	0.005	33.532	33.530	0.006
0.75	27.055	27.054	0.004	32.840	32.840	0	50.286	50.284	0.004
1.00	36.107	36.105	0.006	43.804	43.805	0.002	67.038	67.035	0.004
1.25	45.146	45.144	0.004	54.771	54.772	0.002	83.771	83.766	0.006
1.50	54.165	54.163	0.004	65.742	65.743	0.002	100.482	100.477	0.005
1.75	63.169	63.166	0.005	76.705	76.707	0.003	117.169	117.163	0.005
2.00	72.124	72.122	0.003	87.625	87.629	0.005	133.958	133.953	0.004
2.25	80.729	80.728	0.001	97.992	97.999	0.007	150.186	150.184	0.001
2.50	88.480	88.480	0	107.257	107.268	0.010	164.773	164.773	0

0.006%，均优于《地下水封石洞油库设计规范：GB 50455-2008》^[25]的要求（测量误差不应大于0.5%）一个数量级。综上所述，本文方法能快速、准确地计算洞库容量，适应性强。

4 结 论

以快速、准确地实现洞库容量计量为目标，提出

一种改进的基于点云的洞库容量计量模型，并使用三个具备典型特征的洞库点云片段进行方法验证。主要结论为：1) 针对现有模型采用投影法及其改进算法难以准确提取截面轮廓点的缺陷，提出分层投影算法，兼顾了轮廓点的密度与准确度；2) 针对经典组合（极坐标排序算法与三角形面积法）存在适应性差的问题，提出了改进的截面轮廓点排序算法以

正确构建截面凹包,并采用坐标解析法求解截面凹包的面积。实验结果表明本文方法能准确地计算复杂截面的面积,稳健性强;3)考虑洞库的构造特点,计算洞库的上、下部容量时采用不同的微元体模型,更符合实际情况。基于本文方法计算直线形、弯折形与相交形洞库点云片段的容量表,求得容量的最大相对误差为0.010%,优于规范要求(0.5%)一个数量级。

参 考 文 献

- [1] Li J Z. Salt cavern underground storage for petroleum strategic reserve [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(s2): 4787-4789.
李建中. 石油战略储备的新领域-地下盐穴储库[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(s2): 4787-4789.
- [2] Chen H T. Comprehensive evaluation and decision-making of China's strategic petroleum reserve [J]. Academic Exchange, 2010(4): 103-106.
陈海涛. 中国战略石油储备方式综合评价及决策[J]. 学术交流, 2010(4): 103-106.
- [3] Wang M S, Yang H J. Basic principles for design and construction of underground water-sealed hydrocarbon-storage rock caverns [J]. Engineering Science, 2008, 10(4): 11-16, 28.
王梦恕, 杨会军. 地下水封岩洞油库设计、施工的基本原则[J]. 中国工程科学, 2008, 10(4): 11-16, 28.
- [4] Yang Q Y, Li X. Free volume calculation of salt cavern during cavern leaching [J]. China Well and Rock Salt, 2010, 41(1): 22-23.
杨清玉, 李祥. 盐穴溶腔腔体净容积的计算方法[J]. 中国井矿盐, 2010, 41(1): 22-23.
- [5] Crossley N G. Sonar surveys used in gas-storage cavern analysis [J]. Oil & Gas Journal, 1998, 96(18): 96-108.
- [6] Sellers W I, Chamberlain A T. Ultrasonic cave mapping [J]. Journal of Archaeological Science, 1998, 25(9): 867-873.
- [7] He J B, Li H G. Measurement method of underground water sealing oil depot in Shidong [J]. Survey Technology, 1979, 7(1): 26-33.
何建邦, 励惠国. 地下水封石洞油库的计量方法[J]. 勘察技术, 1979, 7(1): 26-33.
- [8] Hong K R. 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.
- [9] Lü X N, Liu X L, Duan Y L, *et al.* Laser measurement method and *in situ* experiment of underground energy storage caverns volume [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1004002.
吕小宁, 刘晓丽, 段云岭, 等. 地下能源储库群容积激光测量方法及现场实验[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1004002.
- [10] Yakar M, Yilmaz H M, Ömer M. Comparative evaluation of excavation volume by TLS and total topographic station based methods [J]. Lasers in Engineering, 2010, 19(5): 331-345.
- [11] Chen X L, Hao H D, Li H J, *et al.* Study on 3D laser scanner method on volume metrology of large-scale vertical tank [J]. China Measurement & Test, 2014, 40(2): 44-48.
陈贤雷, 郝华东, 李红军, 等. 大型立式罐容量计量中三维激光扫描方法研究[J]. 中国测试, 2014, 40(2): 44-48.
- [12] Zhang J X, Cheng X J, Cheng X L. Application of three-dimensional laser scanning technology in measurement of ship displacement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1204003.
张吉星, 程效军, 程小龙. 三维激光扫描技术在船舶排水量计量中的应用[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1204003.
- [13] Wu Z L, Cheng X J, Xin P K, *et al.* Calculation method of complex tank capacity based on laser point cloud and building information modeling technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 052802.
邬镇伦, 程效军, 辛佩康, 等. 基于激光点云与建筑信息模型技术的复杂船舱容积计算方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 052802.
- [14] Song Z. A study on 3D laser scanner data processing method in large-capacity measurement and software development [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2014.
宋振. 三维激光扫描仪大容量计量数据处理方法与软件开发[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
- [15] Liang X M. A study on the capacity measurement techniques for the large oil storage caves [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2014.
梁雪敏. 大型储油洞穴容量计量技术研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
- [16] Li B, Wei J B, Ma B C, *et al.* Slicing 3D laser point cloud method for volume calculation of irregular object [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,

- 2019, 48(1): 42-52.
- 李斌, 魏俊博, 马博超, 等. 不规则体体积计算三维激光点云切片法[J]. 测绘学报, 2019, 48(1): 42-52.
- [17] Edessa D M, Bronsart R. A contribution to curves network based ship hull form reverse engineering[J]. International Shipbuilding Progress, 2015, 62(1/2): 17-42.
- [18] Cheng X J, Jia D F, Liu Y P. A fast contour generation algorithm of massive point cloud data[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2012, 40(10): 1559-1563.
- 程效军, 贾东峰, 刘燕萍. 海量点云数据轮廓特征线的快速生成算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 1559-1563.
- [19] Qian J F, Chen Z Y, Zhang S Y, *et al.* The detection of boundary point of point cloud compression [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(2): 164-169.
- 钱锦锋, 陈志杨, 张三元, 等. 点云数据压缩中的边界特征检测[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(2): 164-169.
- [20] Cheng X J, Bao F, Gu X L. Elementary surveying [M]. 5th ed. Shanghai: Tongji University Press, 2016.
- 程效军, 鲍峰, 顾孝烈. 测量学[M]. 5版. 上海: 同济大学出版社, 2016.
- [21] Wang X Y, Yan S Z, Zhu C Z, *et al.* Research and application of sorting algorithm for section data point [J]. Machine Building & Automation, 2009, 38(1): 58-59, 79.
- 王效岳, 颜世周, 朱昌志, 等. 截面线数据点排序算法研究与应用[J]. 机械制造与自动化, 2009, 38(1): 58-59, 79.
- [22] Graham R L. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set[J]. Information Processing Letters, 1972, 1(4): 132-133.
- [23] Preparata F P, Shamos M I. Computational geometry: an introduction[M]. New York: Springer Science & Business Media, 1985.
- [24] Xie X Y, Lu X Z, Tian H Y, *et al.* Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2214-2224.
- 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214-2224.
- [25] Sinopec group. Code for design of underground oil storage in rock caverns: GB 50455-2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- 中国石油化工集团公司. 地下水封石洞油库设计规范: GB 50455-2008 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.