

# 三维激光扫描技术应用于土石方工程的研究

李滨<sup>1</sup> 冉磊<sup>2</sup> 程承旗<sup>1</sup>

(1. 北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 昆明市测绘研究院, 云南 昆明 650051)

## Research on the Application of 3D Laser Scanning in Earthwork Volume Calculation

LI Bin, RAN Lei, CHENG Chengqi

摘要: 介绍最新的三维激光扫描技术, 并通过实例探讨三维激光扫描技术在土石方工程中的实用性和适用性。

关键词: 三维激光扫描; 土石方工程; 计算

### 一、引言

随着国内经济的快速发展, 基础设施建设方兴未艾。在工程施工中, 一个重要的内容是土方量的计算。土方量的计算涉及施工前的设计阶段, 需要对施工的土方量有一个总体的预算, 这关系到工程费用的概算和各种方案的对比选优。在施工阶段, 又涉及具体的土方量计算, 这关系到土方挖掘和转运的相关费用结算。目前, 计算土方量的方法很多, 伴随着新技术的不断出现, 如何利用现场测出的地形数据快速、准确、高效、轻松地计算出土方量结果, 就成了人们日益关心的问题。而随着三维激光扫描技术的出现, 土方量计算有了新的更为快捷的途径。本文通过对新技术与传统方法的实际测试, 探讨了三维激光扫描技术在土方计算中的实用性和适用性。

### 二、土石方计算的理论方法

土石方计算的方法很多, 主要有断面法、方格网法、等高线法、平均高程法、区域土方量平衡法和不规则三角网法等。对各种方法的基本原理、方法和优缺点、实用范围和条件、精度分析等, 很多学者都做了研究<sup>[1-3]</sup>。

断面法可根据截面的方向分为水平截面法和垂直截面法, 是根据场地形状沿某一平直的方向一一测定垂直于该方向的断面数据, 断面间土方量是以断面平均截面积与断面间距确定的, 并由此计算总土方量。格网法根据格网的形状不同, 又分为四棱柱体积法和三棱柱体积法。格网法计算土方首先应设定格网间距, 然后在格网的角点测定点位高

程, 最后对每一格网面取四角高程平均值计算土方。

不规则三角网法(triangulated irregular network, TIN)是将地表近似地模拟成一组互不重叠的三角面网, 三角面的每一个节点都有坐标 $(x, y)$ 和高程值 $z$ 。每个三角面在TIN中都有一定的倾斜角度, 在地势较平坦的地区三角面的数量较少, 在地形陡峭的山区或地形起伏较大的区域三角面较密且倾斜度更大<sup>[4]</sup>。

用不规则三角网法计算土方的原理是通过建立三角网计算每一个三棱锥柱的填挖方量, 然后把每个三棱锥的方量累加, 以计算出指定范围内的填方和挖方方量<sup>[5]</sup>。从已有的研究中可以看出, 相对于断面法和格网法, 利用TIN法有助于提高土方量计算的效率和精度<sup>[6-8]</sup>。该方法也是目前土方量计算中最常用的一种方法, 并且能较好地反映计算区域的地形地貌特征。

TIN法根据三角形各角点填挖高度的不同, 可将每个参与计算的三角形区域分为两种情况: 全填全挖或有填有挖<sup>[5]</sup>。

1) 全填全挖时, 如图1(a)所示。计算公式为

$$V = \frac{S}{3} (H_1 + H_2 + H_3) \quad (1)$$

式中,  $S$ 为三角形投影至参考水平面的面积;  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 分别为各角点的填挖高差。

2) 有填有挖时, 零计算面将三角形分成两部分, 一个是底面在计算面上的三角形的锥体, 另一个是底面为四边形的楔体, 如图1(b)所示。

此种情况下锥体部分的体积计算公式为

$$V_{\text{锥}} = \frac{S}{3} \frac{H_3^3}{(H_1 + H_3)(H_2 + H_3)} \quad (2)$$

楔体部分的体积计算公式为

$$V_{\text{楔}} = \frac{S}{3} \frac{H_3^3}{(H_1 + H_3)(H_2 + H_3)} - H_3 + H_1 + H_2 \quad (3)$$

式中,  $S$  为三角形投影至参考计算面的面积;  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  分别为三角形各角点的填挖高差。

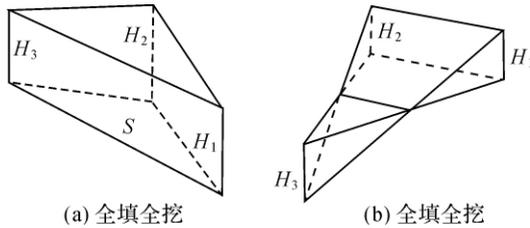


图1 三角网中的体积计算

在实际工程施工中,一般采用全站仪或者 GPS 进行外业数据点的采集,然后将采集到的原始数据点输入后处理软件中,并基于上述理论方法计算得到土方量的结果。

### 三、三维激光扫描技术

三维激光扫描技术又称作实景复制或高清晰测量 (high definition survey, HDS), 是当今最先进的测量技术的体现之一。它是利用激光测距的原理, 通过记录被测物体表面大量密集点的三维坐标、反射率和纹理等信息, 可快速复建出被测目标的三维模型及线、面、体等各种图件数据。目前, 三维激光扫描技术主要应用领域包括文物古迹保护、建筑、规划、土木工程、工厂改造、室内设计、建筑监测、交通事故处理、法律证据收集、灾害评估、船舶设计、数字城市、军事分析等<sup>[9]</sup>。

三维激光扫描系统包括获取数据的硬件和分析数据的软件。硬件用于现实数据的采集; 软件则用于对数据采集的控制、原始数据的拼接、建模、纹理贴图、线画图件提取和数据发布等。按照载体的不同, 三维激光扫描系统又可分为机载、车载和地面型 3 类<sup>[10]</sup>。三维激光扫描技术的出现, 大大拓展了测绘领域的应用范围, 使得一些传统的作业方法得以改进, 一些以往无法实现的任务现在可以完成。本文通过实例, 探讨在土方量计算中三维激光扫描技术与传统方法相比的一些特点和优势。

## 四、实例研究

### 1. 研究区概况

研究区域为昆明长水新机场建设初期的工地。昆明新机场位于昆明市官渡区大板桥镇, 是国家民航机场布局规划确定的中国面向东南亚、南亚和连接欧亚的国家大型门户枢纽机场, 是国家在“十一

五”期间唯一新建的大型枢纽机场。根据对昆明新机场的战略定位和运量预测, 新机场按规划建成后, 将是继首都机场、上海浦东机场、白云机场后国内第四大门户机场。由于地处云贵高原地区, 丘壑纵横, 在昆明机场的基础建设中, 土方的挖填量将各达到 1 亿  $m^3$  以上。在施工建设过程中, 经常需要计算和监测工程进展和土方量的挖掘进度, 需要快速、高效、准确地获取土方挖填量信息。

### 2. 应用流程

选取了一块面积约为 1.2 万  $m^2$  的测试区域, 该区域地形起伏较大, 有坑洼、有坡地, 具有典型性, 有利于说明问题。测试时将工作人员分成两组进行对比测试: 一组使用传统的 GPS 工具, 利用格网采点, 大概每 20 m  $\times$  20 m 范围采集一个数据点, 数据采集完毕后, 利用徕卡自带的后处理软件 LGO 构建 TIN, 再计算得到设计高程的土方量; 另外一组利用 HDS 架设 3 站进行数据采集, 设站位置坐标由 GPS 获得, 数据采集完毕后, 利用扫描仪自带的 Cyclone 软件进行范围选取、构建 TIN 和土方量的计算。利用三维激光扫描系统进行数据处理的流程如图 2 所示。

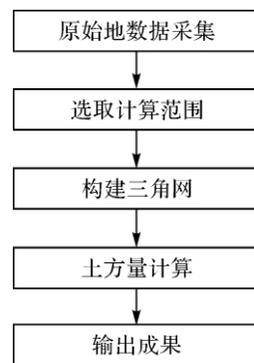


图2 数字化施工中利用 HDS 进行土方量计算的流程

### 3. 数据分析

为了统一对比, 两组实测数据都按照 1942 m 的设计高程面进行计算, 从而得出相对于该设计高程面的挖方量、填方量和填挖的面积。

利用传统 GPS 方法获取数据后, 再利用徕卡 LGO 软件中自带的土方计算功能, 可快速构建 TIN 并根据设计高程面计算出挖填方量。利用 HDS 获取数据后, 在其自带的后处理软件 Cyclone 中, 可先根据试验区范围的边界点坐标, 提取出试验区范围内的点云数据, 然后构建 TIN, 再通过软件自带的土方计算功能, 便可计算出挖方、填方、开挖区域的表面积等数据。图 3 显示了在 LGO 软件中构建的 TIN 和在 Cyclone 软件中构建的 TIN 的三维视图。从图 3

可以看出,从 HDS 获取数据并构建的 TIN 要比 GPS 构建的 TIN 网密集、细致得多。

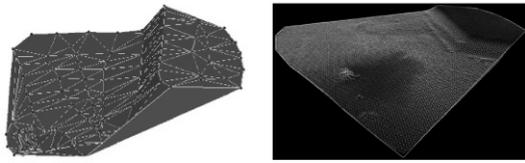


图3 LGO 软件中和 Cyclone 软件中构建的 TIN

表 1 列出了此次实测对比的结果。从数据量上看,利用传统 GPS 工具,采集的数据点数只有 227 个,而用 HDS 获取的数据点达到了 3 105 807 多个。利用 HDS 获取的数据可称为真正的海量数据。虽然 HDS 采集的数据量很大,但获取数据的时间只有 1 h,约是传统方法所用时间的 30%。从总人力上看,利用 HDS 这一新工具可节省大约 70% 的人力成本。

从数据的处理结果对比来看,挖方量、填方量、总土方量的误差都在 1.7% 以下,分别为 1.67%、0.19% 和 0.86%,符合一般的工程要求的 10% 误差以下的规范要求。而填挖表面积误差达到 5.53%,分析其原因,是因为利用 GPS 方法采集的数据点较少,对于一些地表的细节特征没有表达出来。而利用 HDS 采集的点数非常多,对于地形起伏中的细微特征,都予以保留,这样在计算表面积的时候,HDS 计算得就更为细致,因此,表面积也就相应的要大于 GPS 方法。另外一个值得注意的现象是:挖方、填方、总土方量和挖填表面积误差都是正值,这都是因为 HDS 刻画地表细节能力更强,因此计算出来的数据更为细致,所以数值都大于传统 GPS 方法。

表 1 GPS 与 HDS 实测数据计算结果比较表(以 1942 m 海拔高程为计算面)

	GPS	HDS	偏差量	偏差率/(%)
采集点数	227	3 105 807	3 105 580	99.99
挖方量/m <sup>3</sup>	3 915.34	3 982.01	66.67	1.67
填方量/m <sup>3</sup>	56 033.97	56 141.15	107.18	0.19
总土方量/m <sup>3</sup>	59 949.32	60 470.87	521.55	0.86
填挖表面积/m <sup>2</sup>	12 352.29	13 075.32	1 333.46	5.53
操作人数/人	1	1	0	0
作业时间/h	3.5	1	-2.5	-71.43
总人力/(人小时)	3.5	1	-2.5	-71.43

## 五、结束语

本文基于常用的不规则三角网法,对使用三维激光扫描技术和传统方法的实例进行了对比研究。可以看出,传统方法需要采集大量的散点,速度相对较慢,且采样间隔比较大,精度可满足施工要求,但工作量大,工作人员很辛苦。但使用三维激光扫描新技术,能够快速获取所需的数据,并可以实时三维显示,外业人员也大大减轻了工作量。同时,数据处理结果表明,新技术的应用在精度上有保证,在人力投入上大大减少,是一种效率高、成本低的应用解决方案。

## 参考文献:

- [1] 罗德仁,邹自力,汤江龙. 工程土方量计算比较分析[J]. 东华理工学院学报, 2005, 28(1): 59-64.
- [2] 赵志强. 土方量计算方法的比较与分析[J]. 西部探矿工程, 2009, 21(B03): 167-168.
- [3] 张婷婷,王铁良. 土方量计算方法研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(22): 6047-6050.
- [4] 林文. 断面数据土方量计算方法研究[J]. 地矿测绘, 2010, 26(1): 39-41.
- [5] 程会超,张永珍. DTM 法土方计算与误差分析[J]. 城市勘测, 2011(3): 150-151.
- [6] 刘国华,张云文,周信水. 基于 TIN 的土方量计算算法研究[J]. 江西测绘, 2006(2): 39-40.
- [7] 杨友长,景妮. 构 TIN 法填挖方计算方法研究[J]. 金属矿山, 2008(7): 88-91.
- [8] 赵秉东. 土石方计算软件在 CAD 下的设计与开发[J]. 地理空间信息, 2005(1): 59-61.
- [9] 李滨. 徕卡三维激光扫描系统在文物保护领域的应用[J]. 测绘通报, 2008(6): 72-73.
- [10] 李滨,李跃明,宋济宇. 地面三维激光扫描系统中的“五度”研究[J]. 测绘通报, 2012(3): 43-45.