

无人机激光雷达点云技术在线性工程中的应用

陈兆海, 金广鑫, 包旭冉

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要: 为了验证无人机激光雷达点云技术在线性工程中的实际应用, 结合长春环线二期高速工程的路基土石方量的测算数据, 采用无人机激光雷达点云技术代替传统的人工测量方法, 进行路基土石方量的测算。经实际应用, 分别基于传统的 RTK 高程点测量和无人机激光雷达点云技术测量进行土石方量测算, 取得了 2 种土石方量测算的数据。通过结果对比, 得出基于无人机激光雷达点云技术在土石方量测算方面相比于传统人工测量成本更小、安全性更高、工作效率更快, 可用于无人机技术的应用和推广。

关键词: 无人机; 雷达点云; 土石方量测算

0 引言

在各种建筑工程施工中(如场地平整、一般土方、基坑开挖等), 土方量计算精度的准确性会对工程建设产生重要影响^[1]。土方量计算作为工程施工中的重要步骤, 在设计阶段必须对土石方量进行预算, 这直接关系到工程费用预算和施工方案的选择。在实际施工中, 比较常用的土方量计算方法有横断面法、方格网法、等高线法、DTM 法(三角网法)等。4 类土石方量计算类型中, DTM 法计算精度最高, 应用最为广泛^[2]。

在长春环线二期项目中, 路基土石方量的计算通常采用断面法, 即采用 RTK 采集高程点数据, 再通过 CASS 选用最合适的方法进行计算。但这种方法会增大人工测量的劳动强度和时间成本。随着无人机技术的出现, 特别是激光雷达点云技术, 即通过无人机搭载激光雷达对地物进行扫描, 采集地物数据, 构建点云模型, 再通过配套的软件进行土石方量计算。该项技术具有作业速度快、精度高、密度大的优点, 可以有效代替传统方法。

1 土石方量计算方法

1) 横断面法

横断面法是一种比较常用的土石方量计算方法, 利用横断面图反映地物局部的特征, 适用于地形起伏较大、挖填深度较大的地区, 如山地、丘陵等地区。在地形起伏较大或挖填深度较大的地段, 横断面法能够更准确地反映地形的变化, 从而提供更精确的土方量计算结果。横断面法计算精度较高, 通过划分横断面并测量每个断面的

高差变化, 可以较为准确地计算出土方量。且操作简便, 在实际工作中, 通常采用手工在米格纸上按照一定比例用卡规和复式比例尺进行横断面图的绘制, 操作相对简便。

2) 方格网法

方格网法是一种将地形数据划分为若干固定尺寸的方格, 并根据工程的设计标高和实际标高定出测量点的高度以及位置, 再分别计算出方格中的填挖土方量的方法, 适用于地形平缓或台阶宽度较大的地块, 计算结果精度相对较高。在实际工程中, 利用 CASS 等软件结合方格网法进行土石方量计算是较为普遍的方法。然而, 对于地形起伏较大、复杂多变的区域, 方格网法的精度可能受到影响。

3) 等高线法

等高线法是利用数据生成的等高线计算土石方量的方法, 通过计算等高线所围的面积以及等高线之间的高程差确定单位面积的土石方量。当地面起伏较大、坡度变化较大时, 等高线法具有较高的适用性。尤其是在等高线精度较高的情况下, 该方法的计算结果更准确。然而, 等高线法对于地形数据的处理要求较高, 需要确保数据的准确性和完整性。

4) DTM 法

DTM 法是一种利用实际测量点构建不规则三角网格计算土石方量的方法, 通过在单独的三角网格中利用柱法计算方量, 并最终汇总得到总的土石方量。DTM 法的结构比较精准, 数据计算的精度较高, 可以适应各类地形地貌。然而, 对于

地形起伏较大、测量点分布不均匀的区域，DTM 法的计算过程可能较为复杂，数据处理的工作量较大。

2 无人机激光雷达点云测量系统

2.1 测量系统的构成

系统由飞行系统、挂载系统、飞控系统、全球定位系统、数据处理系统等分系统构成。在此次实际应用中，该系统的外业操作主要由大疆 M300RTK 无人机搭配禅思 L1 激光雷达来完成。

2.2 测量方法的改进创新

长春环线 GQ03 工区二期项目位于吉林省长春市九台区北部，该工程地势起伏大，跨越河流，树林及农田，高填深挖区段多，桥梁涵洞等结构物多，工程量大，实际测量难度高。结合该工程的实际情况，并对测量效果、成本、安全、精度和周期等多方面研究，对测量方法进行创新改进，使用南方测绘无人机航测系统代替传统地形测量，无人机航测系统由大疆 M300 无人机搭载激光雷达、相机及 GPS-RTK 定位系统和 SouthLidar 点云数据处理软件、ContextCapture 实景三维建模软件组成集外业采集、内业数据处理为一体的系统。在实际应用中，无人机航测技术仅由一人一机即可完成复杂地形测量、后期数据处理、三维实景建模以及成果报告输出等一系列工作。改变测量方法后，减少了人员投入和仪器购买、维护成本，且此仪器投入后将长期应用于各个项目，大大提高了工作效率，同时在安全、进度、成本等方面都起到了明显的正向效果。

2.3 测量系统的优缺点

1) 优点

①非接触性测量。无人机激光雷达点云测量系统不需要与地物场景发生接触，相比于人工 RTK 数据采集方法，该系统可以直接对地物对象进行测量，对全场景进行覆盖，可以有效避免一些测量工作中的危险。

②高效率与快速性。常规的人工测量，需要大量时间才能采集足够准确的原始数据，而无人机激光雷达点云系统可以在短时间内完成原始数据的采集工作，工作面大，效率高(在天气环境能保障飞行安全的前提下)。特别是在进行大面积复杂条件下的土石方量测算时，无人机激光雷达点云系统的优势更能够体现出来。

③数据采集量大且精细。与常规的人工单点

测量相比，激光雷达的扫描效率达到了百万点每秒的速率。单位面积内点云密度越大，与之相对应的土石方量计算越准确，因此无人机激光雷达点云测量技术相较于传统方法在原始数据采集方面有巨大的优势。

2) 缺点

虽然无人机激光雷达点云测量系统具有诸多优点，但也存在局限性。例如该系统的运行高度和飞行路径易受到天气条件(如大风、雨雪等)的限制，这可能会影响数据的采集质量和效率；系统的数据处理和解析需要专业的技术和设备支持，对于非专业人员来说可能存在一定的学习成本和技术门槛；此外系统的成本和维护费用也相对较高。

2.4 测量系统外业流程

测量系统具体的外业流程图见图 1。

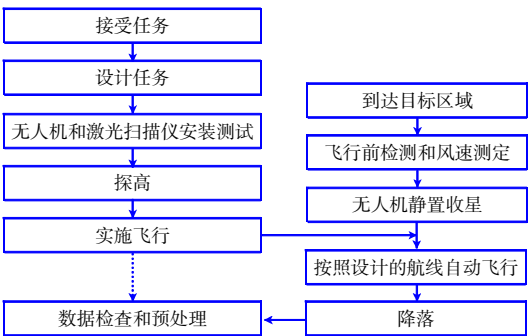


图 1 测量系统外业流程图

1) 在现场实飞操作前，首先要对现场情况进行细致的勘察。包括了解地形的复杂性、障碍物分布、安全高度要求等。通过对这些因素的评估，可以确定空域环境以及无人机的航线，从而确保飞行安全和覆盖整个测区。

2) 根据勘察结果和测量需求，制定详细的无人机飞行计划。包括选择合适的飞行路径、设定飞行高度、速度等参数，以及规划起飞、巡航、降落等关键环节。

3) 设置无人机的航线并进行激光雷达扫描。在飞行过程中，无人机搭载的激光雷达会不断向地面发射激光束并接收反射回来的信号。通过分析这些信号，可以得到地物的三维坐标信息，形成点云数据。同时，无人机会将实时数据传输至地面工作站进行处理和分析。

4) 完成激光雷达扫描后，需要对收集到的点云数据预处理，包括剔除噪声点、滤波去噪、配

准拼接等,以提高数据的准确性和完整性。

5) 用专业的点云数据处理软件对整理好的数据进行分析,生成地面模型、等高线地图等,为后续的地形测绘、工程设计和环境监测等工作提供重要依据。

2.5 测量的误差来源

无人机激光雷达点云测量技术的误差主要来自以下几个方面:激光雷达扫描仪器测量误差、飞行器姿态误差、高程误差、地面反射误差、点云滤波分类误差、坐标转换误差等。这些误差存在相互关联,多项误差有可能综合在一起,影响最后的测量精度。

在无人机激光雷达采集地面数据时,需要把数据坐标系转换到实际工程所采用的坐标系中,这个过程中同样会有误差产生,影响最后的数据精度。在现场数据采集前,需要严格遵守操作规范,控制因为仪器设备操作不当而产生的系统误差。考虑到实际的地物表面情况,雷达点云反射滤波的后处理分类至关重要。根据实际情况,设定无人机的航线和飞行高度、速度,在保证数据采集的情况下,合理的飞行规划可以有效减少误差。后续的数据处理中,雷达点云手动滤波和自动滤波,尽可能地详细,将不同地物数据抽析准确,处理越仔细,数据准确度越高。

2.6 数据处理

现阶段雷达点云数据处理的方法更多是依赖厂商配套开发的软件来完成。以本次无人机系统为例,无人机点云采集以后,运用与之搭配的 DJI Terra(大疆制图)、SouthLidar、ZiLidar 软件进行数据处理。

无人机激光雷达点云数据采集的密度高、离散性大、数据量庞大,长线性项目的路基施工面大,相对应的点云数据量是极其庞大的,与之对应的数据处理和运算能力要求很高。针对点云数据量庞大的特点,可以对作业面分块再汇总,也可以根据数据处理的精度对点云数据的抽析要求进行区分,减少对应的数据处理量。多位专家都对 Lidar 点云数据处理的方法和点云数据抽析进行过深入研究,为理解和应用这一技术提供了丰富的知识和实践指导。无论是理论层面还是实践层面,都为相关领域的研究和应用提供了重要的参考和借鉴^[3-4]。点云数据导入 DJI Terra 路基激光雷达点云数据预成像见图 2。

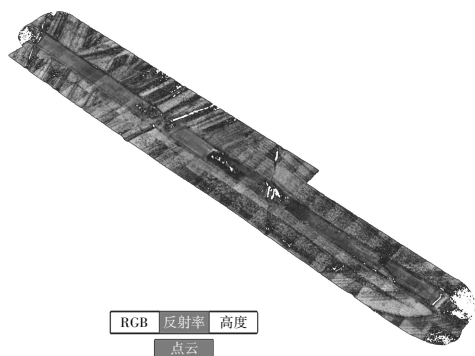


图 2 DJI Terra 路基激光雷达点云数据预成像

3 无人机激光雷达点云数据计算

3.1 无人机数据采集规划与实施

在长春环线二期项目的实施过程中,路基作为整个项目的基础,其施工质量和效率对于整个项目的成功至关重要。由于该项目路基距离相对较长,传统的数据采集方式显然难以满足需求。为了更有效地收集数据并提高工作效率,利用无人机进行路基整体的施工区域数据采集。在具体实施过程中,首先需要根据施工区域的实际情况,合理规划无人机的飞行路线和高度,以确保数据采集的全面性和准确性。然后,通过无人机搭载的摄像设备,对施工区域全方位拍摄,获取大量的影像数据,并精确计算。

3.2 数据划块处理

考虑到数据量大的特点,进行数据划块处理。这样可以将庞大的数据集分成若干个相对较小的数据块,便于后续的数据处理和分析。同时,数据划块还能够提高数据处理的速度和效率,减少数据冗余和错误。

数据划块时,需要确保各个数据块之间的衔接性和连贯性,以保证后续数据处理和分析的准确性及可靠性。此外,还需要对每个数据块进行详细标注和记录,以便在需要时能够迅速找到相关的数据和信息。

3.3 点云数据初步处理

点云数据的初步处理是一个细致且重要的步骤,直接关系到后续数据分析的准确性和有效性。在这一阶段,首先利用先进的 CASS 软件对点云数据进行自动滤波处理,通过算法智能识别并去除其中的噪点,从而初步净化数据。为了确保数据的精度和完整性,再对滤波后的点云数据进行手动分类,依靠专业人员的经验和判断,对数据进一步的细分和筛选。如此不仅能够有效去除干

扰信息, 还能更加精准地提取出点云数据中的关键特征, 为后续的数据分析和应用奠定了坚实的基础。

3.4 路基横断面生成与二次处理

根据实际的路基作业面, 设置相对应的横断面参数, 包括横断面的宽度、间隔距离等。在 SouthLidar 软件中生成路基横断面, 并对横断面中的点云数据二次处理, 确保生成的横断面中的点

云特征点不丢失。在此过程中, 坐标转换已经完成, 对应的坐标转换为实际工程坐标, 保证数据的准确性。

3.5 路基填挖方量计算与结果

通过设置路基工程基础设计参数, 结合数据生成路基横断面, 计算出相对应的路基填挖方量, 在主页面生成方量计算结果。ZtLidar 路基横断面土方量计算成果见图 3。

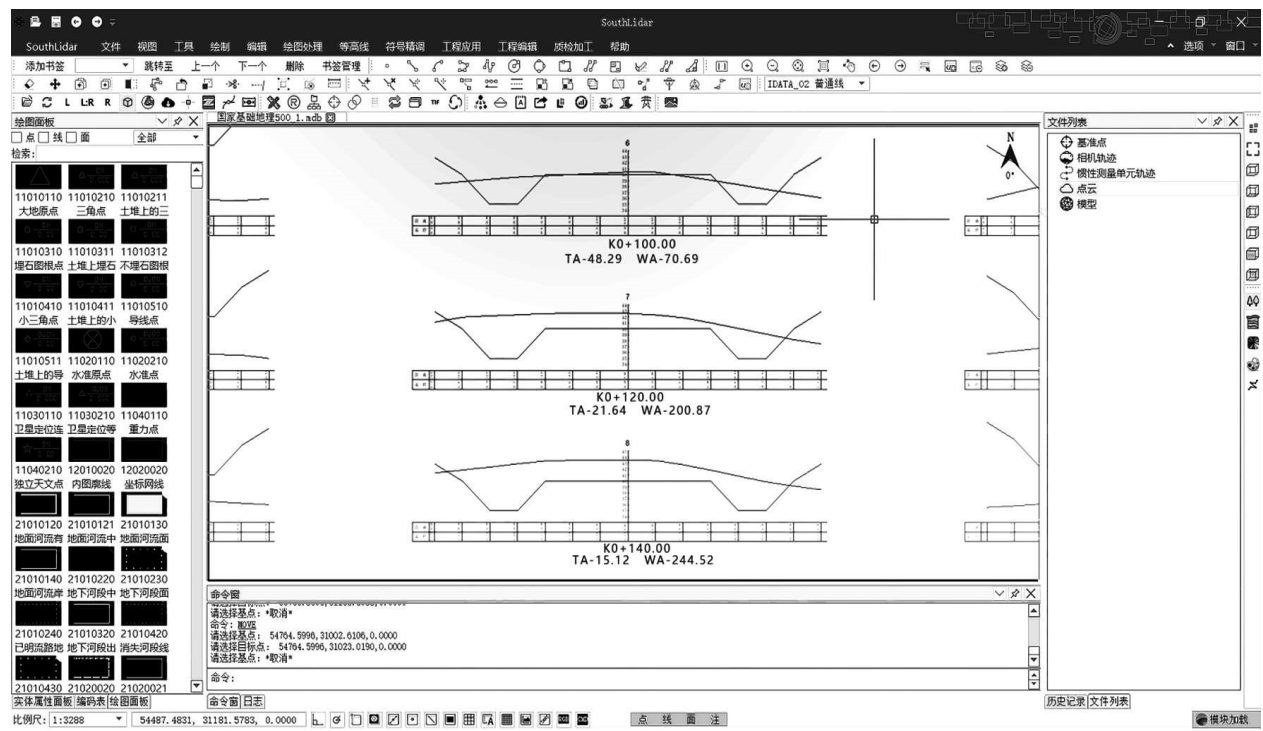


图 3 ZtLidar 路基横断面土方量计算成果

4 无人机激光雷达点云土石方量计算结果验证

4.1 水平精度

使用 RTK 对地面进行测量, 共测 10 个点,

通过将点云提取的数据与 RTK 测量的控制点数据对比, 进行精度验证。控制点平面坐标对比信息及偏差统计如表 1 所示。

表 1 控制点平面坐标对比信息及偏差统计

点号	控制点		测量点		误差值	
	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY
1	4 905 225.783	529 958.715	4 905 225.822	529 958.757	-0.039	-0.042
2	4 905 222.925	529 956.759	4 905 223.033	529 956.767	-0.108	-0.008
3	4 905 219.745	529 954.583	4 905 219.784	529 954.554	-0.039	0.029
4	4 905 218.455	529 953.701	4 905 218.446	529 953.726	0.009	-0.025
5	4 905 217.911	529 953.328	4 905 218.007	529 953.298	-0.096	0.030
6	4 905 213.621	529 950.393	4 905 213.618	529 950.323	0.003	0.070
7	4 905 206.529	529 945.541	4 905 206.569	529 945.459	-0.040	0.082
8	4 905 205.695	529 944.970	4 905 205.629	529 944.958	0.066	0.012
9	4 905 202.962	529 943.100	4 905 202.969	529 943.093	-0.007	0.007
10	4 905 197.685	529 939.489	4 905 197.672	529 939.480	0.013	0.009

通过对比分析 ΔX 最大误差为 -0.108 ，最小误差为 0.003 ； ΔY 最大误差为 0.082 ，最小误差为 0.007 。对本表中平面中误差进行计算为 ± 0.055 。通过对比分析与计算，根据我国现行的 GB/T 14912—2005《1:500 1:1 000 1:2 000 外业数字测图技术规程》中对 1:500 比例尺地形图平地检查点不符值的规定：用点云提取的数据精度完全可以满足其精度要求。本次测试平面坐标中误差为 5.5 cm ，满足 1:500 大比例尺地形图平地检查点的中误差在 $\pm 0.15\text{ m}$ 以内的精度要求。

4.2 高程精度

使用 RTK 联测水准点，再结合 RTK 自主打点，共 15 个点进行高程对比。在点云数据中找到对应点位，提取高程值进行对比，对比结果如表 2 所示。

表 2 控制点高程对比信息及偏差统计

点号	控制点			点云测量控制点 Z	ΔZ
	X	Y	Z		
1	4 905 225.783	529 958.715	188.939	188.875	0.064
2	4 905 222.925	529 956.759	189.123	189.044	0.079
3	4 905 219.745	529 954.583	189.459	189.451	0.008
4	4 905 218.455	529 953.701	188.507	188.408	0.099
5	4 905 217.911	529 953.328	189.334	189.315	0.019
6	4 905 213.621	529 950.393	189.599	189.572	0.027
7	4 905 206.529	529 945.541	190.810	190.690	0.120
8	4 905 205.695	529 944.970	190.160	190.090	0.070
9	4 905 202.962	529 943.100	190.247	190.166	0.081
10	4 905 197.685	529 939.489	190.495	190.428	0.067
11	4 905 186.038	529 931.520	190.783	190.759	0.024
12	4 905 217.745	529 977.392	190.239	190.171	0.068
13	4 905 215.107	529 975.594	190.152	190.071	0.081
14	4 905 213.395	529 974.426	188.844	188.823	0.021
15	4 905 212.549	529 973.849	190.320	190.332	-0.012

通过对比分析与计算，本表中误差为 ± 0.046 ，根据我国现行的 JTG C10—2007《公路勘测规范》中对 1:500 比例尺地形图高程检查点不符值的规定，本次测试高程坐标中误差为 4.6 cm ，满足 1:500 大比例尺地形图高程精度中误差 $\pm 0.2\text{ m}$ 要求。

4.3 土石方量计算比较

在验证测算结果阶段，采用常规的人工 RTK 测量+CASS 软件后处理对选用的相同路基区域土石方量进行计算。两者计算结果比对如表 3 所示。

由数据得出，填方数量总计 $18\ 624.17\text{ m}^3$ ，通

表 3 路基土石方数量计算对比表

桩号	面积/ m^2		距离/m	平均面积/ m^2	填方数量/ m^3	点云处理/ m^3
	挖方	填方				
K66+000	0	22.113	48.5	20.89	1 013.17	986.59
K66+100	0	20.006	100.0	21.06	2 106.00	2 261.00
K66+200	0	19.049	100.0	19.53	1 953.00	1 846.32
K66+300	0	17.492	100.0	18.27	1 827.00	1 986.00
K66+400	0	74.597	14.5	48.00	696.00	645.00
K66+500	0	45.742	100.0	60.17	6 017.00	5 862.00
K66+600	0	19.335	100.0	32.54	3 254.00	3 567.00
K66+700	0	15.823	100.0	17.58	1 758.00	1 645.43

过点云处理总计 $18\ 799.34\text{ m}^3$ ，可知通过人工常规方法测量和无人机激光雷达点云技术测量计算出的土石方量相对误差不超过 4%，证明了无人机激光雷达点云土石方量测算的可靠性。

无人机激光雷达点云采集展现出了明显的优势。其采集密度高，数据分布均匀，无论是平坦地面还是崎岖山区，都能实现全方位、无死角的获取数据。更关键的是，由于点云数据的丰富和细致，使得抽析分类更为精准，能够为后续的数据处理提供更坚实的基础。从实际工程作业的角度来看，无人机激光雷达点云测量不仅更符合作业要求，而且在作业效率上也实现了大幅提升；不仅减少了人工测量的劳动强度和时间成本，更通过高精度的数据获取，为工程决策提供了更为可靠的数据支持。

5 结语

通过对无人机激光雷达点云系统的实际应用，并经过数据采集和数据处理验证后，得出结论：无人机激光雷达点云系统在土石方量测算中展现出可靠的应用性能，其效率与准确性均能满足工程建设的需求。相较于传统的人工测量方法，无人机激光雷达点云测量具有显著的优势，为工程施工提供了更高效、更优质的服务。然而，该测量系统也存在一定的误差，未来应进一步研究和探讨如何避免或减小这些误差，以提高测量精度和可靠性，从而更好地满足工程应用的需求。

参考文献：

- [1] 高文军. 计算土石方量的几点体会[J]. 北京测绘, 2015(1): 143-146.
- [2] 陈爱梅, 吴昊, 吴北平, 等. 四种土方量计算方法的对比研究与应用[J]. 北京测绘, 2015(1): 104-108.
- [3] 崔磊, 张凤录. 地面三维激光扫描系统内外业一体化研究[J]. 北京测绘, 2013(1): 47-49, 90.
- [4] 郑德华. 三维激光点云数据处理的理论和方法[D]. 上海: 同济大学, 2005.