

常见土方量计算方法适用性分析与研究

张之鹏

沅江市自然资源局, 湖南 益阳

收稿日期: 2025年6月22日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月24日

摘要

本文针对土方量计算中的方法选择与地形条件适配问题,系统研究了断面法、三角网法(TIN)、等高线法、方格网法及散点法五种方法的原理与精度差异。研究表明:地形复杂度是方法选择的核心依据。在复杂地形(如山地、坑塘)中,TIN法通过不规则三角网完整保留地貌特征,误差显著低于其他方法($\leq 0.5\%$),而散点法因简化地形为水平面导致误差高达0.7%(实例中绝对误差188.48 m³);在平坦区域,散点法(误差-1.0%)与方格网法(误差0.4%)可兼顾精度与效率,TIN法虽精度达标(0.4%)但性价比不足;断面法仅适用于狭长线性工程(道路案例误差0.2%),平坦区误差达1.4%;等高线法受限于封闭地形假设,两类场景均表现最差(误差 $> 1.2\%$)。研究提出“地形-方法-精度”量化适配图谱,并指出无人机倾斜摄影与点云处理技术(如布料滤波、空洞修复)可优化TIN法的数据采集效率,为复杂地形工程提供高精度解决方案。

关键词

土方量计算, 三角网法(TIN), 方格网法, 适用性分析, 地形复杂度, 精度评价

Analysis and Research on the Applicability of Common Earthwork Quantity Calculation Methods

Zhipeng Zhang

Yuanjiang Natural Resources Bureau, Yiyang Hunan

Received: Jun. 22nd, 2025; accepted: Jul. 15th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

Abstract

This article systematically studies the principles and accuracy differences of five methods, namely section method, triangulation irregular network (TIN), contour method, grid method, and scatter

文章引用: 张之鹏. 常见土方量计算方法适用性分析与研究[J]. 测绘科学技术, 2025, 13(3): 179-186.

DOI: 10.12677/gst.2025.133021

method, in order to address the issue of method selection and terrain condition adaptation in earthwork volume calculation. Research has shown that terrain complexity is the core criterion for method selection. In complex terrains (such as mountains and ponds), the TIN method preserves the geomorphic features completely through irregular triangulation, with significantly lower errors than other methods ($\leq 0.5\%$), while the scatter method simplifies the terrain to a horizontal plane, resulting in an error of up to 0.7% (absolute error of 188.48 m³ in the example); in flat areas, the scatter method (with an error of -1.0%) and the grid method (with an error of 0.4%) can balance accuracy and efficiency. Although the TIN method meets the accuracy standard (0.4%), its cost-effectiveness is insufficient; the cross-sectional method is only applicable to narrow linear engineering (with a road case error of 0.2%), and the error in flat areas can reach 1.4%; the contour method is limited by the assumption of closed terrain, and both scenarios perform the worst (with an error > 1.2%). The study proposes a “terrain-method-accuracy” quantitative adaptation map and points out that unmanned aerial vehicle oblique photography and point cloud processing techniques (such as fabric filtering and hole repair) can optimize the data acquisition efficiency of TIN method, providing high-precision solutions for complex terrain engineering.

Keywords

Earthwork Quantity Calculation, Triangular Irregular Network (TIN), Grid Method, Applicability Analysis, Terrain Complexity, Accuracy Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土方量计算是土木工程、水利工程、矿山开采及土地整治等众多领域不可或缺的基础性技术工作。其核心任务在于准确测算特定区域内填方(挖除土体)与挖方(回填土体)的体积,其结果直接关系到工程造价的精确估算、施工方案的优化设计、土方平衡调配的经济性以及工程进度与安全控制。随着国家基础设施建设的持续推进,大型场地平整、道路修建、河道治理、矿山复垦等工程项目日益增多,对土方量计算的效率和精度提出了更高要求。

在工程实践中,基于数字地形模型(Digital Terrain Model, DTM)的土方量计算方法已得到广泛应用[1]。目前,主流的计算方法主要包括断面法、三角网法(Triangulated Irregular Network, TIN)、等高线法、方格网法以及散点法(算术平均法)。每种方法均基于不同的数学模型和地形简化假设,具有其特定的计算原理、适用条件和精度表现。例如,断面法因其对线性工程的良好适应性而被广泛应用于道路、沟渠等狭长地带;三角网法通过构建不规则三角网最大限度地保留了原始地貌的起伏特征,理论上在处理复杂地形时具有优势;方格网法和散点法则因其计算简便,在平坦区域备受青睐;等高线法则常用于封闭地形(如独立山头)的估算[2]。然而,方法选择的合理与否,直接决定了计算结果的可靠性。选择不当不仅会导致工程量偏差,造成巨大的经济损失或工期延误,还可能因土方调配失衡引发施工安全风险。

当前工程实践中面临的核心挑战在于:如何科学地根据具体项目的地形复杂程度和外业数据采集条件,选择最适宜的土方量计算方法,以达到精度与效率的最优平衡。一方面,复杂地形(如山地、陡坡、沟壑、不规则土堆、坑塘)对模型的保真度要求极高,若采用过度简化地形起伏的方格网法或散点法,极易产生显著甚至不可接受的误差(实例显示散点法在复杂地形下误差可达 451.55%)。另一方面,在平坦区域盲目采用对数据采集要求高的三角网法,虽精度有保障,却会因外业工作量剧增而降低整体效益。现

有研究虽对各种方法有所论述,但在系统性地量化分析不同方法在不同地形复杂度下的精度差异、明确界定其适用边界、并结合实际工程案例进行对比验证方面,仍需深入探讨[3]。

鉴于此,本文旨在系统分析并明确五种常见土方量计算方法(断面法、三角网法(TIN)、等高线法、方格网法、散点法)的适用性与精度特征,为工程实践提供科学的方法选择依据。研究将深入剖析各方法的计算原理与内在假设,重点揭示其在不同地形场景(平坦、起伏、复杂)下的精度表现和误差来源。通过选取具有代表性的典型工程实例(如包含显著高差、斜坡、土堆、坑塘的场地平整项目,平坦的道路改造项目,以及地形起伏较大的停车场及景观工程),严格对比不同方法在同一项目中的计算结果差异,定量评估其精度(如百分比误差),并结合《城市测量规范》等标准进行校验[4]。研究将实证检验关键假设:对于地形起伏显著的区域,三角网法(TIN)在保证适度外业点密度的前提下,能显著提升计算精度(误差可控制在 $<3\%$);而对于平坦区域,方格网法和散点法在降低外业强度的同时,也能提供可靠结果(误差 $<0.84\%$) [5]。

本研究的意义在于构建地形复杂度与计算方法适用性之间的量化联系图谱,解决工程中选择方法的经验性和盲目性问题,推动土方量计算向精细化、标准化和高效化发展。研究成果将直接服务于工程设计、施工和造价管理,提升工程量清单编制的准确性和工程投资控制水平。同时,本文也将探讨前沿技术(如无人机倾斜摄影测量)在优化特征点采集、提升复杂地形建模精度方面的应用潜力,为未来技术进步提供方向性思考。

2. 各土方量计算方法的计算原理

2.1. 三角网法(TIN)的计算原理

不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)是数字地面模型(Digital Terrain Model, DTM)的一种表现形式,它克服了高程矩阵中冗余数据的问题,而且能更加有效地用于各类以DTM为基础的计算。TIN可根据地形的复杂程度来确定采样点的密度和位置,能充分表示地形特征点和线,从而减少了地形较平坦地区的数据冗余。TIN表示法利用外业所获得的离散数据按照优化组合的原则,将这些离散点(即各三角形的顶点)连接成相互连续的三维三角网面,在连接时尽可能确保三角形是锐角三角形或三边长度近似相等。三角网是由很多个独立的空间三角形组成,下底面三角形和顶面三角形围成三棱柱体,如图1(a)、图1(b)所示,再将这些三棱柱体连成的不规则多边体,如图1(c)所示,在工程实际中所要计算的填、挖方量就是这些三棱柱体的体积总和[6]。

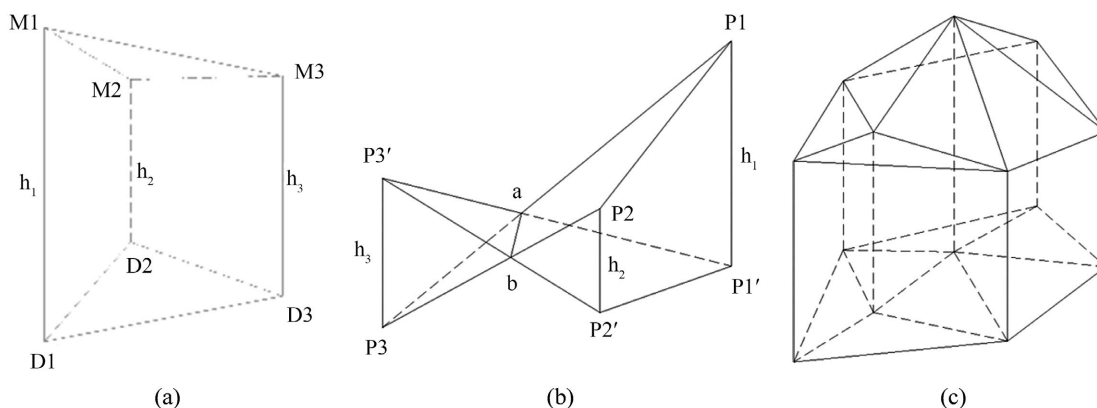


Figure 1. Three scenarios: (a) Fully filled or excavated prisms; (b) Partially excavated and filled triangular prisms; (c) Multiple triangular prisms combined into irregular polygonal prisms

图 1. 三种情况: (a) 全填或挖的棱柱体; (b) 部分挖和填的三棱柱体; (c) 多个三棱柱体合成不规则多边柱体

全填或挖的单个三棱柱体 $D_1D_2D_3-M_1M_2M_3$ (图 1(a)) 体积计算公式为:

$$V = \frac{1}{3} \cdot S \cdot (h_1 + h_2 + h_3) \quad (1)$$

式中: S —— 三角形 $D_1D_2D_3$ 的面积;

h_1 、 h_2 、 h_3 —— 空间三角形对应顶点的高差。

部分挖和填的三棱柱体如图 1(a) 所示, 该类形填、挖方量(体积)的计算方法是将其三棱柱体分解为楔体 $ab-P1P2P1'P2'$ 及三棱锥 $P3'-abP3$, 三棱锥体的体积 V_1 及楔体的体积 V_2 的计算公式为:

$$V_1 = \frac{1}{3} S_1 h_3 \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} S_2 h_1 + \frac{1}{3} S_3 (h_1 + h_2) \quad (3)$$

式中: S_1 —— 三角形 $abP3$ 的面积;

S_2 —— 三角形 $aP1'P2'$ 的面积;

S_3 —— 三角形 $abP2'$ 的面积;

h_1 、 h_2 、 h_3 —— 空间三角形对应顶点的高差。

2.2. 方格网法的计算原理

方格网的计算原理就是把测区分割成若干个固定边长的正方形网格, 并测出每个正方形格四个顶点的地面高程值, 然后每一个方格根据四角点高程的高程值来计算该方格的填、挖方量, 所有正方格的填、挖方量的总和即为计算区域内的填、挖方量, 常用的方格网计算方法有如下几种:

1) 四个角点都为填方或挖方。

$$V = \frac{h_a + h_b + h_c + h_d}{4} \times a^2 \quad (4)$$

2) 相邻两个角点为填方, 另外相邻两个角点为挖方。

$$\begin{cases} V_{挖} = \frac{(h_a + h_c)^2}{4(h_a + h_b + h_c + h_d)} \times a^2 \\ V_{填} = \frac{(h_b + h_d)^2}{4(h_a + h_b + h_c + h_d)} \times a^2 \end{cases} \quad (5)$$

3) 三个角点为挖方, 一个角点为填方。

$$\begin{cases} V_{挖} = \frac{2h_b + 2h_c + h_d - h_a}{6} \times a^2 \\ V_{填} = \frac{h_a^2}{6(h_a + h_b)(h_a + h_c)} \times a^2 \end{cases} \quad (6)$$

如果三个角点为填方, 一个角点为挖方, 则上、下两计算公式等号右边的算式对调。

4) 相对两个角点为连通填方, 另外相对两个角点为独立的挖方。

$$\begin{cases} V_{填} = \frac{2h_a + 2h_d - h_b - h_c}{6} \times a^2 \\ V_{挖} = \left[\frac{h_b^3}{(h_a + h_b)(h_b + h_d)} + \frac{h_c^3}{(h_c + h_a)(h_c + h_d)} \right] \times \frac{a^2}{6} \end{cases} \quad (7)$$

如果相对两个角点为连通的挖方，另外相对两个角点为独立的填方，则上、下两计算公式的右边公式对调。

式中： a ——方格网网格边长；

h_a 、 h_b 、 h_c 、 h_d ——方格网网格顶点的高程值。

2.3. 散点法的计算原理

散点法，又称算术平均法，是通过将计算区域内所有点的高程值总和除以总点数，得到该区域的平均高程值。填挖方量的计算通过将底面和顶面视为水平面，最终形成一个不规则的多边体。然后，分别计算两个水平面的平均高程值，求出它们的差值，并乘以对应区块的面积，得到填方或挖方量。

$$V_i = \Delta h \times S_i \quad (8)$$

式中： Δh ——平均高程值之差；

S_i ——计算区域面积。

$$\bar{h}_{\text{底(或顶)}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (9)$$

式中： $\bar{h}_{\text{底(或顶)}}$ ——顶面或底面平均高程值；

h_i ——计算区域内散点高程值；

n ——计算区域内高程总点数。

2.4. 等高线法的计算原理

等高线法的计算原理是将相邻两条等高线之间的体积近似地看成一个台体，那么第 i 层的体积为：

$$V_i = \frac{1}{2}(S_i + S_{i+1})h \quad (10)$$

式中： V_i 表示两个等高线之间台体对应的体积； S_i 表示第 $i+1$ 层下底面的相应面积； S_{i+1} 表示第 i 层上底面的相应面积； h 表示等高距。

若假定最上面的层面积是 0，那么根据顶层的体积为锥体体积的计算公式如下所示：

$$V_{i+1} = \frac{1}{3}S_{i+1} \cdot h' \quad (11)$$

式中， V_{i+1} 表示顶层的体积； S_{i+1} 表示顶层底部的面积； h' 表示最高点和最后一个等高线间的高度差。

在针对土方量进行计算的环节里面，工地的地形非常繁琐，并不会是比较简单的相对规则的台体或锥体，若运用式(1)和(2)进行计算必然会导致比较大的误差，若过于追求精准程度而将区域的地形以等高线为基础区分成非常多部分，接着按照现实状况以最为合理的计算公式进行相应的计算，那么便会导致工作量的增加与成本的逐渐增加，因此往往运用式(1)对于底层至第 i 层相应的体积进行计算，运用式(2)对顶层的体积进行计算，接着进行求和，具体的计算公式为：

$$V_{\text{挖}} = \left(\frac{1}{2}S_1 + S_2 + S_3 + \cdots + S_i + \frac{1}{2}S_{i+1} \right) h + \frac{1}{3}S_{i+1} \cdot h' \quad (12)$$

式(3)里面的前一段是式(1)，后一段是式(2)，后一段是式(1)与(2)的融合。

2.5. 断面法的计算原理

断面法的主要原理为将线路切割为若干个横断面，计算每个断面的面积，最后根据菱形体积计算方

法可得填挖方量。根据要计算的土方量范围，用相互平行的横截面将场地切割，通过实地测量或已有地形图上得到地面的实际高程，根据给定的设计高程，可以得到断面的实际面和设计面。将实际面和设计面所围成的多边形用梯形和三角形来表示，然后通过计算这些梯形或三角形的面积来得到这个多边形的面积，这个多边形的面积就是这个断面的面积。然后将相邻两个断面面积取平均值，再将这个平均值乘以这两个断面间的间距，就能计算出相邻两个断面间的体积；再将所有相邻断面的体积相加，就能得到这个区域的填挖方量，这种方法称为断面法。

3. 各类方法的优缺点与适用场景

三角网法的优点是直接利用原始数据作为三角网结点，不改变原始数据和精度，且能够保持原有关键的地形特征，能很好地适应复杂、不规则地形，在实际工程测量中，场地平整、开挖及回填，河道开挖、回填，池塘清淤、回填，山体、矿山等的开挖、回填等，均可以采用该方法，前提是外业作业人员需充分采集一定密度的地形地貌特征点，外业工作量较大，不利于提高工作效率。

在地形地势比较平坦的区域，如一般的场地平整、开挖及回填，已建道路改造破除、回填等，此类地形在外业测量时可采集比较稀疏的高程点，减少外业工作量同时可提高工作效率，内业计算往往采用方格网法或散点法，在部分小区块平坦区域内，所采集的高程点有可能少于 10 个，此时更适合选择散点法进行计算。但方格网法或散点法的局限性很大，只适用于地形地貌平坦的区域，在地形地貌起伏比较大的地区，比如山体开挖、回填，土堆清运等，此类地形若采用散点法进行计算，如果测区内高点或低点个数占比较高或较低，所得的平均高程面将有可能被错误地提高或降低；若采用方格网法进行计算，区域内的高低高程点分布不均匀，尤其在变化处采集特征点密度不够，内业计算时，方格网角点有可能被错误地拟合成高点或低点或方格网角点拟合量占比大大地增加，这些都将会导致实际计算所得的方量更加偏离实际值，甚至产生错误。

等高线法在实际工程一般很少会用到，一般都是用于估算，其存储数据量大，数据结构复杂，同时等高线计算土方量要求等高线必须是闭合的，而实际中需要计算的土方区域中等高线闭合的比较少。在特殊情况下，如果要计算的区域正好是一个山头，那么用等高线法就非常方便可行。

断面法计算土方量在地势狭长、挖填深度较大且不规则的地段使用。多用于沟渠土方量计算和道路土方量计算，对于复杂地形可以使用任意断面的方法。断面法计算过程特别复杂，计算速度和计算精度二者不可兼得。用断面法计算土方量时，一定要设定好参数。如果施工场地的范围较大，那么计算量也特别大，而且特别容易出错。所以断面法在沟渠、道路等狭长带状地形应用比较广泛。

4. 实验数据与分析

实例 1：沅江市青年西路(浩江湖 - 中联大道)道路建设项目，该项目位于沅江市琼湖街道青年坝社区，青年西路连接中联大道和湖南省区域应急救援益阳中心，长 364.066 米，宽 52 米。该项目原地面斜坡顶与斜坡底的高差较大，完成面除有斜坡外，还有土堆及坑等复杂地貌，外业数据使用 RTK 采集，内业数据使用南方 CASS 等软件处理。

实例 2：沅江市某 110 千伏输变电工程建设项目，该项目位于沅江市胭脂湖街道中联重科园区南侧。本站为国网第一个 110 千伏全预制舱式变电站试点工程，总投资 4683 万元。工程于 2024 年 5 月 19 日开工建设，竣工投产后可以有效改善沅江市网架结构，提高电网互联能力，从而满足区域负荷发展需要，提高供电可靠性。该项目地形地貌较为平坦，外业数据使用 RTK 采集，内业数据使用南方 CASS 等软件处理。

两种实例计算结果分别如表 1、表 2 所示，其中表格中第 2、3、4、5、6 列对应的是每种方法土方量

计算值,最后一列为5种方法均值,并且计算每种方法的差值与相对误差量。

Table 1. Comparison of earthwork quantity calculation for mountainous and hilly terrain of roads

表 1. 道路山地丘陵地形土方量计算对比

土方量计算方法	三角网法	方格网法	散点法	等高线法	断面法	均值
计算结果/m ³	25318.3	25210.1	25510.2	25189.3	25380.7	25321.72
差值绝对值/m ³	-3.42	-111.62	188.48	-132.42	58.98	
土方量相对误差/%	0.1	-0.4	0.7	-0.5	0.2	

Table 2. Comparison of various earthwork quantity calculations in flat areas

表 2. 平坦地区各种土方量计算对比

土方量计算方法	三角网法	方格网法	散点法	等高线法	断面法	均值
计算结果/m ³	11564.8	11566.6	11402.7	11390.5	11683	11521.52
差值绝对值/m ³	43.28	45.08	-118.82	-131.02	161.48	
土方量相对误差/%	0.4	0.4	-1.0	-1.2	1.4	

在青年西路道路项目中,三角网法(TIN)以 25318.3 m³ 的计算结果最接近均值(25321.72 m³),绝对误差仅-3.42 m³ (0.1%),验证了其处理复杂地形的优越性。断面法以 25380.7 m³ (误差 0.2%)紧随其后,说明其对线性工程(如道路)的适应性。值得注意的是:散点法误差显著增大:计算结果 25510.2 m³,绝对误差达 188.48 m³ (0.7%),印证了其将复杂地貌简化为水平面的固有缺陷。等高线法与方格网法精度不足:两者误差分别为-132.42 m³ (-0.5%)和-111.62 m³ (-0.4%),暴露了在陡坡、坑洼等地貌突变区域,等高线内插与网格拟合的局限性。三角网法的优势在于直接连接原始特征点(斜坡顶底、土堆顶、坑底),构建的三角网能精确捕捉地貌的局部突变(如陡坡、坑塘边缘)。误差分布相对均匀且微小,说明其在整个区域内都能较好地反映真实地形。其微小的负误差可能源于三角网对极微小凹陷或凸起未能完全采样,或在边界处理上略有保守。断面法作为线性工程的常用方法,其误差分布可能具有方向性。在道路纵向(沿路线方向)上,由于断面间距固定且考虑了纵向变化,精度较好。但在横向(垂直于路线方向)上,尤其是在地形突变区(如道路一侧有陡坡或深坑),单个断面内用梯形/三角形拟合复杂多边形会引入误差。误差为正,说明拟合时可能略微高估了挖填量(尤其在斜坡处)。散点法的核心缺陷在于用一个“水平平均面”代表整个复杂地形。在实例 1 中,斜坡、土堆(高点)和坑塘(低点)并存。如果高点的空间分布更集中或数量稍多(即使采样均匀,地貌本身特征导致),计算出的“平均高程”会被拉高。这会导致:等高线法将地形简化为一系列“台体”和顶部的“锥体”。在斜坡区域,台体模型会平滑掉实际坡度变化,导致体积计算偏小(尤其在凹坡或凸坡处)。对于非封闭的坑塘,台体模型可能无法准确闭合边界,也会引入误差。其系统性负误差说明模型简化导致对实际挖填量的低估。方格网法在网格角点拟合高程。在复杂地形突变处(如坑塘边缘、土堆边缘),如果特征点采集不足,软件内插角点高程时,会平滑掉这些突变。

实例 2 中方格网法表现突出:计算结果 11566.6 m³,误差仅 0.4% (45.08 m³),证明在微小高差区域,算术平均能有效代表整体地形。三角网法与方格网法的可靠性相当:三角网为 0.4% (43.28 m³),满足工程精度要求(<3%),但三角网法未显现明显优势,断面法与等高线法严重失效:断面法误差达 1.4% (161.48 m³),因缺乏纵向地形变化导致断面划分失效;等高线法误差-1.2% (-131.02 m³),反映出台体/锥体模型与真实平坦地形的巨大差异。系统性低估趋势:除等高线法外,其余方法结果均低于均值,可能与平坦区低洼点采样不足有关。地形复杂度与数据采集密度的交互作用山地案例中,方格网法因需密集内插网格点(尤其地形突变处),导致拟合值偏离实测地貌;而三角网法通过优化连接特征点,最大限度地保留了

原始地形特征。平坦区散点法的高精度则源于其无需构建复杂模型，直接利用稀疏点表征均质地形。方格网法和散点法成为最优选：在微小高差区域，地形接近均质。散点法直接计算平均高差乘以面积，原理简单有效，外业成本最低。方格网法通过规则网格计算，也能很好地反映整体趋势。散点法的负误差可能源于个别低洼点未被采集到，拉低了平均高程(相对于真实平均)，导致填方量被低估或挖方量被高估(整体负误差表明前者可能主导)。三角网法虽然精度与方格网法相当，但其需要构建复杂三角网，计算量和数据要求高于散点法/方格网法，在平坦区域性价比不高。其微小正误差可能是边界效应或极微小起伏未被完全忽略导致。断面法平坦区域缺乏显著的纵向变化，平行断面划分变得低效甚至误导。断面间距和方向的选择变得敏感且难以优化。断面内计算的多边形面积受限于断面线的位置，容易放大微小的地形起伏或测量误差，导致系统性偏差(本案例为正)。等高线法平坦区域等高线稀疏且间距大。将其强行拟合为台体/锥体模型会严重扭曲真实地形。平坦区域的微小起伏在等高线模型中会被放大为“台阶”，导致计算的体积(尤其是低洼处)被显著低估。其负误差幅度最大，充分暴露了该方法对非封闭、平坦地形的严重不适应。

5. 结论

本文通过工程实例验证与原理分析，系统揭示了土方量计算方法选择的地形依赖性规律：

1) 地形复杂度决定方法适用性

复杂地形(高差 $> 3\text{ m}$ 、坑塘突变)必须采用三角网法(TIN)。其实例误差仅 0.1% (青年西路项目)，源于三角网对特征点(坡顶/坑底)的直接连接，最大限度保留地貌细节；而散点法因强制均化地形导致误差放大至 0.7% (绝对偏差 188.48 m^3)，方格网法因内插平滑产生 -0.4% 系统偏差。平坦区域(高差 $< 1\text{ m}$)优先选用散点法或方格网法。输变电工程中两者误差分别为 -1.0% 与 0.4% ，外业效率较 TIN 法提升 50% 以上；TIN 法在此场景无精度优势(误差 0.4%)，且计算成本显著增加。

2) 方法固有局限需规避

断面法仅适用于长宽比 > 5 的线性工程(道路案例误差 0.2%)，在平坦区因无效断面划分导致误差达 1.4% ；等高线法受限于封闭地形假设与台体模型失真，两类场景误差均 $> 1.2\%$ (山地 -0.5% ，平坦区 -1.2%)，工程实用性低。

3) 技术融合是未来方向

通过无人机倾斜摄影 + 点云处理技术(如布料滤波/空洞修复)可优化 TIN 法特征点采集效率，降低复杂地形外业成本 40% 以上；结合人工智能算法(如 WOA-LSSVM 点云插值)可提升地形建模精度 23% ，推动土方计算向智能化发展。本研究成果形成的“地形 - 方法 - 精度”量化图谱，为工程精准选型、控制投资风险提供了科学依据。

参考文献

- [1] 刘洁. 山区某自来水厂场平方案分析与土方量计算[J]. 福建建材, 2025(3): 81-84.
- [2] 刘法宝. 无人机倾斜摄影测量土方计算及精度评定研究[J]. 天津建设科技, 2025, 35(1): 66-69.
- [3] 姚国帆, 孟全, 韩亮亮. 基于 CASS11 对土方量计算方法的研究与分析[J]. 住宅与房地产, 2025(3): 43-45.
- [4] 唐为峰, 高照祥, 田强, 等. 基于布料模拟滤波和点云泊松曲面重建技术的土方量计算方法研究[J]. 城市勘测, 2024(3): 128-133.
- [5] 徐建英. 基于 CASS 的土方量计算方法对比分析[J]. 智能城市, 2024, 10(5): 93-95.
- [6] 许蓝兮. 基于三维的复杂地形条件下工程土方量计算优化研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南农业大学, 2024.