

# 渠道土石方量计算中横断面插值算法的比较与优化施工

谢蒙蒙 梁朋

河南省水利第二工程局集团有限公司 河南 郑州 450004

**摘要:** 土石方工程量是渠道工程设计、施工组织与成本控制的核心参数,其计算精度直接影响工程投资估算的准确性与施工方案的合理性。在传统横断面法计算土石方量的过程中,原始地形数据往往稀疏且不规则,需通过插值算法在相邻实测断面间生成虚拟断面,以满足计算精度要求。本文系统梳理了线性插值、样条插值(三次样条、Akima样条)、反距离加权插值(IDW)及克里金插值(Kriging)等主流横断面插值算法的基本原理与适用条件。通过构建典型渠道地形模型,设计多组对比实验,从插值精度、计算效率、地形适应性及对土石方量计算结果的影响等维度进行综合评价。研究表明:对于地形平缓、变化规律的渠道段,三次样条插值在精度与平滑性上表现最优;对于存在陡坎、沟壑等突变地形的复杂区域,Akima样条与IDW插值能有效抑制过冲现象,结果更为稳健。基于上述比较,本文进一步提出一种融合地形特征识别与自适应插值策略的优化计算流程,并结合BIM(建筑信息模型)与GIS(地理信息系统)技术,构建了“数据采集—智能插值—动态算量—施工反馈”的闭环优化施工体系。

**关键词:** 渠道工程;土石方量;横断面法;插值算法;Akima样条;优化施工

## 引言

渠道是水资源调配、农业灌溉和防洪排涝的重要基础设施,其建设与维护在国家水利事业中至关重要。土石方工程作为渠道施工的核心,工程量计算不仅关乎开挖、填筑规模,还是工程概预算、机械调度、工期安排及环境影响评估的基础。因此,高效、精准计算土石方量一直是工程和学术界关注的重点。横断面法因原理直观、易于理解且便于与设计图纸结合,成为渠道土石方量计算的主流方法。该方法沿渠道中心线布设横断面,测量地面高程,形成离散断面数据,通过计算相邻断面平均面积与间距的乘积得到土石方量。然而,受测量成本、地形复杂性和施工进度限制,实测断面往往间距大或分布不均,导致计算结果粗糙,难以满足现代工程精细化管理需求<sup>[1]</sup>。为解决此问题,工程实践中常用插值算法在实测断面间生成虚拟断面,以加密数据、提高计算分辨率。插值算法的选择直接影响虚拟断面的几何形态和土石方量计算结果。不同算法对地形特征的刻画、数据噪声的敏感度及计算复杂度差异显著,选择不当会导致工程量估算偏差或施工方案失误,造成资源浪费甚至工程事故。目前,插值算法研究多集中于GIS或遥感领域,针对渠道土石方计算的系统性比较与优化研究相对较少。现有工程软件虽内置多种插值工具,但用户往往缺乏对算法机理的理解,难以实现最优选择。鉴于此,本文深入剖析适用于渠道横断面插值的主流算法,通过构建可控实验环境量化评估其性能,并提出融合先进信息技术的优化施工流程,为提升渠道土石方工程管理水

平提供科学依据。

## 1 横断面插值算法原理与特性分析

### 1.1 线性插值

线性插值是最简单、最直观的插值方法。对于两个相邻的实测断面 $S_i$ 和 $S_{i+1}$ ,其对应位置的高程分别为 $Z_i$ 和 $Z_{i+1}$ 。在两者之间任意一点P(距 $S_i$ 的距离为 $d$ ,断面间距为 $D$ ),其插值高程 $Z_p$ 由下式确定:

$$Z_p = Z_i + \frac{(Z_{i+1} - Z_i) \cdot d}{D}$$

线性插值计算极其简单,效率高。但其假设地形在断面间呈线性变化,忽略了实际地形的曲率。这导致生成的虚拟断面棱角分明,无法反映地形的平滑过渡,在地形起伏较大时会产生显著误差,尤其在计算填挖交界处的土石方量时偏差较大。

### 1.2 样条插值

样条插值通过构造分段多项式函数来拟合数据点,保证插值曲线在连接点处具有高阶连续性,从而获得光滑的地形表面。

#### 1.2.1 三次样条插值

三次样条在每个区间内使用一个三次多项式,并强制要求在所有数据点处函数值、一阶导数和二阶导数连续。这使得插值曲线非常光滑。三次样条能很好地拟合平滑、连续变化的地形,插值结果自然流畅<sup>[2]</sup>。然而,其“全局性”特征(任一数据点的变化会影响整条曲线)使其对局部异常值(如测量误差、陡坎)极为敏感,容易在数据点附近产生“过冲”(Overshoot)或“振荡”

(Oscillation)现象,即插值曲线在真实地形之上或之下出现不合理的波动,严重扭曲局部地形形态。

### 1.2.2 Akima样条插值

Akima样条是一种特殊的分段五次多项式插值。它通过局部斜率估计来构造插值函数,对每个插值点仅依赖于其相邻的四个数据点。Akima样条最大的优势在于其对数据突变的鲁棒性。当遇到陡坎、沟壑等地形突变时,它能有效抑制三次样条常见的过冲现象,生成的曲线在保持整体平滑的同时,能更忠实地跟随原始数据的局部趋势。这使其特别适用于包含复杂地貌的渠道地形。

### 1.3 反距离加权插值

IDW是一种基于“地理学第一定律”(距离越近,相似性越高)的空间插值方法。某点的插值高程是其邻域内所有已知点高程的加权平均,权重与距离的幂次成反比。

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

其中, $d_i$ 是点P到第*i*个已知点的距离, $p$ 是幂参数(通常取2), $n$ 是参与计算的邻近点数。IDW算法概念清晰,易于实现。通过调整幂参数( $p$ )和邻域点数( $n$ ),可在平滑性与保真度之间取得平衡。较大的( $p$ )值使插值结果更接近最近的点,能较好地保留局部细节;较小的( $p$ )值则使结果更平滑。但IDW倾向于在数据点周围生成“牛眼”状等高线,且在数据稀疏区域外推能力弱。

### 1.4 克里金插值

克里金是一种基于地统计学的最优无偏插值方法。它不仅考虑了点与点之间的距离,还通过变异函数(Variogram)模型化了空间自相关性,即数据在不同距离上的相似程度。克里金能提供插值结果的方差估计,理论上是最优的线性无偏估计量。它能生成非常平滑且符合区域地质统计规律的表面<sup>[3]</sup>。然而,其应用前提是数据需满足平稳性假设,且需要专业人员进行变异函数的拟合与模型选择,过程复杂,计算开销大,对于渠道这种线性工程的局部插值场景,其优势难以充分发挥,性价比不高。

## 2 插值算法性能对比实验

### 2.1 实验设计

为客观评价各算法性能,本文设计了两类实验场景:

理想平滑地形:模拟一条穿越平缓丘陵的渠道,地形连续、无突变。

复杂突变地形:模拟一条穿越冲沟、台地的渠道,

在特定位置设置陡坎(高差5m)。

在两类场景下,均预设高密度的“真实”断面(间距5m),作为评价基准。然后,从中抽取稀疏的“实测”断面(间距50m),分别应用四种插值算法生成间距10m的虚拟断面。通过比较虚拟断面与“真实”断面的高程差异,以及由此计算出的土石方量与“真实”土石方量的偏差,来评估算法优劣。

### 2.2 评价指标

均方根误差(RMSE):衡量插值高程的整体精度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{interp,i} - Z_{true,i})^2}$$

土石方量相对误差(RE):

$$RE = \frac{|V_{calc} - V_{true}|}{V_{true}} \times 100\%$$

计算耗时:反映算法的计算效率。

视觉效果:通过绘制断面图,定性分析插值曲线对地形特征(特别是突变点)的刻画能力。

### 2.3 实验结果与分析

#### 2.3.1 理想平滑地形

三次样条插值的RMSE最低,土石方量RE仅为0.8%,表现最佳。Akima样条与IDW次之(RE约1.5%),线性插值最差(RE达3.2%)。线性插值最快,IDW次之,样条类算法因需解方程组而稍慢,但差异在工程可接受范围内。在地形平缓区域,三次样条凭借其高阶连续性,能最精确地复原光滑地形。

#### 2.3.2 复杂突变地形

线性插值和IDW表现稳健,RE分别为4.1%和3.8%。三次样条因在陡坎处产生严重过冲,导致局部高程失真,RE高达7.5%。Akima样条成功抑制了过冲,RE为3.0%,为所有算法中最优。三次样条插值曲线在陡坎附近出现明显的“驼峰”或“凹陷”,严重偏离真实地形;Akima样条和IDW的曲线则能紧贴陡坎,准确反映地形突变。在存在地形突变的区域,算法的鲁棒性比平滑性更重要。Akima样条在保持平滑的同时,对突变的适应性最强。

综合结论:不存在一种“放之四海而皆准”的最优插值算法。算法的选择应紧密结合渠道沿线的具体地形特征。

## 3 基于插值算法比较的优化施工体系构建

### 3.1 自适应插值策略

根据前述研究结论,本文提出一种“地形特征驱动”的自适应插值策略:(1)地形预处理与特征识别:利用高密度初始测量数据(如无人机航测点云),通过

计算断面间的最大高差、坡度变化率等指标,自动识别出平缓区、过渡区和突变区。(2)分区插值:对平缓区采用三次样条插值以保证精度;对突变区采用Akima样条或IDW插值以保证稳健性;对过渡区可采用线性插值作为折中方案<sup>[4]</sup>。(3)动态验证与调整:在关键节点(如桥梁、渡槽进出口)进行补充测量,对插值结果进行动态校验,必要时调整插值分区和算法参数。

### 3.2 BIM-GIS集成的闭环优化施工体系

为将优化的插值算法融入施工全过程,本文构建了一个“数据驱动、动态反馈”的BIM-GIS集成优化施工体系,其核心流程如下:

#### 3.2.1 高精度数据采集与建模

采用无人机(UAV)搭载LiDAR或摄影测量系统,对渠道全线进行快速、高密度的地形数据采集。将点云数据导入GIS平台,生成高精度数字高程模型(DEM)。在BIM平台(如Revit,Civil3D)中,依据设计图纸建立渠道的三维参数化模型(设计BIM模型)。

#### 3.2.2 智能插值与动态算量

将DEM与设计BIM模型在统一坐标系下进行空间叠加。基于自适应插值策略,在BIM平台中沿渠道中心线自动生成加密的横断面。BIM平台自动计算每个断面的填挖面积,并累加得到分段及全线的动态土石方量。该过程可实现“所见即所得”,计算结果可视化程度高。

#### 3.2.3 施工组织优化与资源调度

基于精确的土石方量分布,BIM平台可进行土方平衡分析,优化取土场、弃土场的选址,规划最优的运输路径,实现“就近平衡”,最大限度减少运距和成本。将土石方量数据与施工进度计划(4DBIM)关联,可动态模拟不同施工方案下的资源(挖掘机、运输车)需求,实现精细化的资源调度。

#### 3.2.4 施工过程监控与反馈

在施工过程中,定期使用无人机复测开挖/填筑后的

地形,生成新的DEM。将新DEM与原始设计模型及当前施工进度模型进行比对,实时计算实际完成的土石方量,并与计划量进行偏差分析。根据偏差信息,动态调整后续施工计划和资源投入,形成“计划-执行-检查-行动”(PDCA)的闭环管理。

## 4 结语

本文围绕渠道土石方量计算中的横断面插值问题,系统比较了线性、三次样条、Akima样条及IDW等算法的性能。研究表明,算法的选择必须与地形特征相匹配:三次样条适用于平滑地形,而Akima样条在处理突变地形时更具优势。基于此,本文创新性地提出了地形特征驱动的自适应插值策略,并进一步构建了融合BIM与GIS技术的闭环优化施工体系。该体系通过高精度数据采集、智能插值算量、施工资源优化及动态过程监控,实现了土石方工程从“粗放估算”到“精准管控”的转变。未来,随着人工智能技术的发展,可进一步探索利用深度学习模型自动识别更复杂的地形模式,并实现插值算法的全自动最优选择,推动水利工程施工向更高水平的智能化、精细化迈进。

## 参考文献

- [1]赵坤.土石方量计算方法的对比[J].云南水力发电,2024,40(01):149-152.
- [2]罗蓉.渠道土石方工程量计算分析[J].东北水利水电,2016,34(05):9-11.
- [3]王腾蛟.AutodeskCivil3D快速生成横断面图并计算土石方工程量在线性工程中的应用[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(下册).云南建投第一水利水电建设有限公司,2024:691-692.
- [4]陈鹏,胡玉祥,尹相宝,等.土石方工程多手段测量及计算方法对比分析[J].测绘与空间地理信息,2022,45(11):213-216.