

基于三维实景与 BIM 模型的土方工程 分区调配方法研究

胡 滨¹ 张 勇² 刘 颖³ 黎 姚³

(1. 山推工程机械股份有限公司, 济宁 272073; 2. 武汉市市政建设集团有限公司, 武汉 430023;
3. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074)

【摘要】利用传统 CAD 图纸进行土方工程量计算不仅需要耗费大量的人力物力,而且计算的土方量与实际存在较大的差别;在实际施工中项目管理人员大多是根据实际工程经验制定土方调配方案,该方法不能够满足大型复杂项目的土方调配。因此在准确计算土方量的基础上满足挖填平衡、全局最优的原则建立土方调配模型,制定土方调配方案至关重要。本文依托某机场项目为其提供最优化的土方调配方案,主要介绍基于三维实景和 BIM 模型土方工程量准确算量的基本思路和方法,并在运筹学线性规划数学模型的基础上利用 MATLAB 计算土方调配方案,通过某机场的工程实例验证该方法的可行性。

【关键词】土方计算; 三维实景; 线性规划; 土方调配

【中图分类号】TU17 **【文献标识码】**A

【版权声明】文集数据被中国知网重要会议论文全文数据库(CPCD)收录,被本刊录用并在中国知网网络首发正式出版,严禁侵权转载。

引言

早在 1981 年 Mayer 和 Stark 教授就提出并构建了土方分配的线性规划数学模型,可用于解决传统土方积累图不再适用的问题,直至 2016 年 Chaojue Yi 等采用混合整数线性规划(MILP)模型为基于网格法的临时道路土方作业生成了最优布局解决方案。廖婷等于 2017 年针对考虑了土方性质的黄高填土调配提出了动态的优化调度算法,改进了多目标资源分配的问题求解方法;最近邓朗妮等于 2018 年提出通过 Civil 3D 软件精确计算土方量并通过运筹学建立多元多约束条件的数学模型,得到可行性的土方调配方案^[1]。

目前在土方调配方案的确定存在着仅凭借工程师个人经验,根据就近原则只能保证局部最优而没有综合考虑各个挖填方区土方量和运距等参数对土方调配方案的影响,此外调配准备工作、调配

区土壤类别、场地清理费用、入场施工现场施工道路建设以及维护等要素也需要综合考虑全局最优^[2]。

自 1956 年美国麻省理工 Miller 教授提出数字地面模型的概念后,数字高程模型(DEM)在测绘、军事、遥感中的应用越来越广泛^[3],近年来随着 GIS、测绘学的发展,建立高精度可视化的 DEM 模型可完成建筑场地的实景重建,实现实时查询地面任意点高程^[4]。侯铁等基于遥感卫星影像和数字高程模型构建三维地形场景路线,应用于市政工程项目中,实现了辅助项目规划设计、方案比选和景观审查以及可视化交互的效果^[5]。

在断面法、格网法、等高线法、DTM 等传统土方量计算方法的基础上,基于规则格网的 DEM 模型和基于不规则三角网的 DEM 模型也越来越被应用于土方工程量计算中,并且其计算效率和精度都优于传统计算方法^[6]。采用定向数字高程模型的方式

【基金项目】湖北省重大科技专项“智能建造关键技术及应用”(编号:2020ACA006)

【作者简介】胡滨(1981-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:智能土方;通讯作者:刘颖(1997-),女,硕士在读,主要研究方向:智能土方调配。

构造数字高程模型实现了精度更高、成果更细致的计算方法,为大面积不规则区域的土方计算工作提供了一种切实可行的方法^[7]。黄富强等等基于数字高程模型实现了在大型工程中土石方量的准确快速计算,通过精度比对分析,表明数字高程模型适用于各种地形的土石方量计算^[8]。

基于以上研究,目前已经实现了利用 DEM 进行土方量的计算,但并未实现计算准确化和利用到土方调配工作中。现提出基于无人扫描进行三维实景与 BIM 模型比对获取土方工程量,并在此基础上进行全局土方合理调配的研究问题,该研究以某机场项目为实例,进行了土方调配方案的设计和比对。该研究一方面利用无人机扫描进行实景建模能够可视化土方调配进展,另一方面三维实景模型与 BIM 模型比对提高了土方量计算的准确性。

1 基于三维实景模型的土方量计算方法

首先通过利用无人机进行场景的全过程拍照,利用深度相机完成场景的记录实现全景建模,并与已经形成的 BIM 模型进行比对,完成土方分区的划分和土方量的准确计算。利用三维实景模型进行土方计算的精度远远高于传统方法,综合考虑了设计以及现场场地的实际情况,土方量的准确计算是进行土方调配的基础,能够保证土方调配方案的合理性和准确性。

1.1 土方工程三维实景模型建立思路

三维实景建模的关键是获取场区的全景图像,除了利用扫描仪对原始地图数据进行扫描,还可利用无人机拍照扫描施工场区获取场景基础数据。采取无人机拍照扫描的方式能够避免断裂等高线不闭合、等高线内插易出现衔接误差等弊端^[9];同时利用无人机采集的点云数据具有精度高、密度大等优势还能够提高建模精度、自动完成场景信息的提取,提高可信度^[10]。

利用搭载相机传感器的无人机从垂直和倾斜等不同角度进行场区的拍照,获取场区的图像和纹理数据,为形成原始地形图提供基础数据。同时利用厘米级的 RTK 导航定位系统和高性能成像系统保证在照片成像时自动记录自身的镜头标定参数,结合照片的 POS 数据以及控制点信息,对提取的信息进行细化,将图像信息转化为计算机能够识别的矢量点云图,通过设立统一坐标点进行矢量点的位

置变换,将最终细化的矢量信息进行矢量到栅格的转换。但是在进行无人机扫描和拍照过程中会不可避免的出现测量误差和系统误差,例如镜面反射、遮挡物遮挡、场区表面粗糙不平等各种因素,这些因素会使得获取的点云数据中不可避免的出现噪声点,因此在对点云数据进行处理之前需要利用平滑滤波进行手动的去噪与平滑工作,以得到有效点云^[11]。对有效点云采用不规则三角网进行迭代处理,分类得到地形点和非地形点,并按照拟合误差最小为目标函数选择拟合精度贡献大的点云进行拟合,得到有效可靠的实景点云图^[12]。

最终利用地形图和点云模型,通过计算机的精细化处理和根据自动矢量化相关步骤以及高效率的实景建模技术迅速构建出具有准确地理位置及高精度尺寸的实景三维模型。

1.2 三维实景模型与 BIM 模型比对获取精准土方量

传统土方量计算一般采用方格网法、三角网法、断面法、等高线法等,具有计算场地局限性、计算量大、计算精度较差等缺点。

本文提出了通过建立三维实景模型,进行将三维实景模型与 BIM 模型比对获取精准土方量的方法,减少了计算工作量、提高了计算精度、减少了现场测量原始地形等数据的工作量,也提高了计算准确度和精度,并将其应用于某机场项目进行验证。

通过收集或无人机扫描获取的地形数据建立基础资料数据库并生成 DEM,将三维实景模型与依据建筑工程项目的设计图纸绘制的 BIM 模型进行综合比对,考虑实际情况和根据场地平整和土方划分原则进行项目调配区的划分,在两种模型对比的基础上选取分区的土方进行土方量的自动计算。依据设计图纸利用 Revit、南方 CASS、Civil3D 等软件进行原状地貌和实际地面的数据输入,为了加强地形精度弥补地形变化复杂,等高线缺失等问题,可增加相应补测点,进行方格网数据的相互补充,以保证 BIM 模型的准确性和可参考性^[13]。在创建好三维曲面模型之后需要进行三维模型检查,观察得到三维曲面模型是否有异常,避免因为数据添加错误而出现的曲面。在利用设计标高等设计数据的基础上建立场地平整完工后的模型,并在现场实景建模的基础上进行两种模型的比对,得到不同分区的土方施工量以及选定土块的土方量。

传统土方量计算方法仅仅根据二维图纸,缺乏对施工现场地的实际情况考虑,因此计算精度较低。通过对比,完善分区的划分界限,充分考虑实际场地情况,建立三维实景模型提高土方量的计算精度,达到土方工程量准确计算的目的,为土方调配的合理性提供了保障。

2 土方工程量调配方法研究

2.1 实施技术路线

土方调配设计就是确定土方的调配量和运输路线,具体包括根据项目图纸在道路拐弯处划分或按照结构形式划分土方调配区,再根据项目现场的三维实景模型和 BIM 设计模型进行二者比对获取各个调配区的土方量,经过验证确定最终挖填方量。其次,根据挖填方的体积以及填方土块和挖方土块的重心距离计算挖填方调配区之间的平均运距,形成土方运距图,选取合理的线性规划模型建立数学模型分析求解调配方案,以保障挖方和填方尽量达到平衡,减少重复倒运,最终发布施工决策,具体的技术路线见图 1。

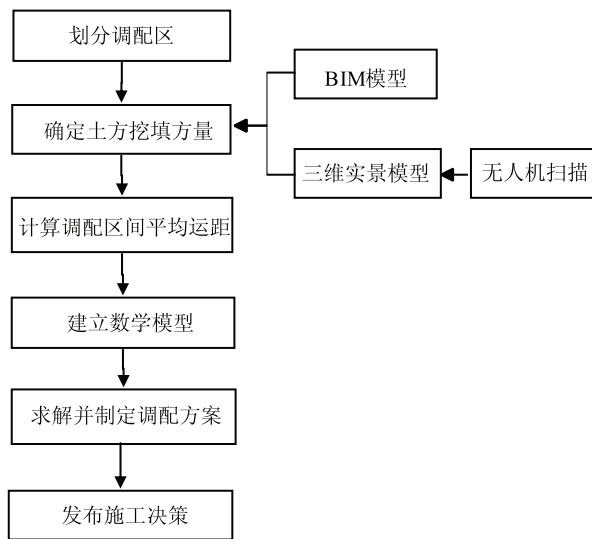


图 1 技术路线图

2.2 土方工程量调配模型

运筹学提供了许多运用数学模型解决线性规划实际问题的数学算法,例如运用图解法可以解决变量较少的最大最小值问题;动态规划可以解决资源分配问题等;表上作业法可以解决工程中的产销平衡问题等。

在土地平整项目中,要力求使挖方量和填方量

基本达到平衡,在挖方的同时进行填方,减少重复倒运。挖填方量与运距的乘积之和尽可能为最小,及运输路线和路程合理,运距最短,总土方运输量或者运输费用最小。因此考虑以上限制条件,将挖填方量与运距的乘积之和设为目标函数,在尽可能满足挖填平衡的条件下采用线性规划求解最优土方调配量与路径。针对土方调配的多变量问题,最终采用运筹学的单纯形法建立解决土方调配的数学模型。

土方调配的目标函数是为了保证土方运输量与土方运距的乘积最小,并在最大程度保证场区内部挖填平衡的约束条件下建立数学模型。考虑到建设工程项目场区内有 n 个挖方区域和 m 个填方区域,分别用 i, j 表示挖方区域和填方区域的编号; c_{ij} 表示从第 i 个挖方区到第 j 个填方区的距离; x_{ij} 表示从第 i 个挖方区域调配到第 j 个填方区域的土方工程量。则目标函数 Z 为:

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}$$

约束条件为:

$$x_{11} + x_{12} + \dots + x_{16} \leq a_1$$

$$x_{21} + x_{22} + \dots + x_{26} \leq a_2$$

.....

$$x_{71} + x_{72} + \dots + x_{76} \leq a_n$$

$$x_{11} + x_{21} + \dots + x_{71} \leq b_1$$

$$x_{12} + x_{22} + \dots + x_{72} \leq b_2$$

.....

$$x_{16} + x_{26} + \dots + x_{76} \leq b_m$$

其中, a_n, b_m 分别表示挖方区和填方区的挖方量和填方量。

3 机场土方调配应用实例

3.1 某机场项目背景介绍

现以一在建机场项目为实例,进行土方调配方案的优化设计。该机场位于湖北省,距长江左岸约 500m,场地地形平坦,地面标高 22.88 ~ 23.86m,最大相对高差 0.98m。该项目主要是满足某机场的改扩建工程,机场项目场地图如图 2 所示,按照结构形式分为停机坪、垂直联络道、平行滑行道、跑道等,根据现场的实际情况、设计要求、结构形式同时为了满足施工和分包的要求,最终划分为了 13 个分区,现根据图纸分区进行土方调配方案的制定。



图2 机场项目场地图

3.2 三维实景与 BIM 模型比对分区土方量结果

该机场项目现场较为空旷,无屋檐和树木遮挡,因此无人机采集数据方案实施较为顺利,经过无人机采集和计算机能够生成项目现场三维实景模型。在三维实景模型中通过手动框定区域并输入相应的标高,能够计算出选定区域相对于标高的体积差异。此外,将两个扫描模型对齐可以实现对体积差异超过一定阈值的区域进行高亮显示,直观可视化的展示出选定区域的体积差异,土方量计算精度可达到 0.001m^3 ,远远高于利用图纸计算的传统方法。

现以机场的部分土方计算为例,在已建立好的三维实景模型中手动框选闭合的土方区域,通过输入真实尺度进行尺度的恢复,以保证土方计算量的准确性,并根据 BIM 设计模型查找相应点的设计标高,输入标高,自动完成圈中区域的土方体积计算,计算结果如图 3 所示。



图3 三维实景土方量计算示意图

除了能够计算框选区域的土方体积,还可以进行两个扫描模型重叠体积的计算,可形成比对结果,能够达到土方施工进度的实时监控。将前后两次的扫描模型导入并进行对齐,保证同一区域部分

点的匹配与重合,即可完成体积差的计算,土方计算体积差的精度依然可以达到 0.001m^3 ,这是传统方法无法达到的,比对土方计算结果如图 4 所示。



图4 土方量比对结果

3.3 土方调配最优方案设计与确定

项目管理者需要根据场地完成土方区域的划分,确定挖填方区,利用网格法划分成 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 或者 $40\text{m} \times 40\text{m}$ 的小方格,并测量出每个小方格角点的实际标高与设计标高进行比对,计算出施工高度。在此基础上利用传统的 CAD 图纸或者 DEM 数字高程模型计算出每个方格的挖填方量,最终确定各个土方分区的挖填方量。确定各个土方分区的土方量是土方调配的基础,也是土方施工中计算量最大的一部分。

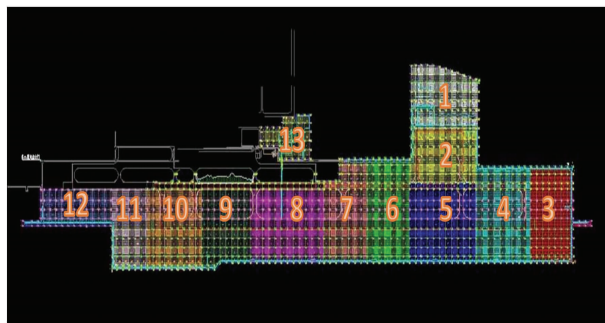


图5 机场土方分区划分示意图

根据项目图纸将汉南机场的施工场地划分为 13 个土方调配区域,土方分区示意图见图 5,其中 3、5、9、10、11、12、13 为挖方区,1、2、4、6、7、8 为填方区,共计 7 个挖方区,6 个填方区。各区域的挖填方量以及总方量如表 1 所示,各个土方分区之间的运距如表 2 所示。

在此基础上,利用上述数学模型建立土方调配的目标函数以及约束条件。

表 1 土方分区挖填方量计算结果

部位	1	2	3
	总方量	填方	挖方
1	110958.063	113779.502	-2821.439
2	71899.975	144357.693	-72457.718
3	-30606.842	12648.136	-43254.978
4	2288.696	56945.810	-54657.113
5	-34341.464	52792.523	-87133.987
6	41333.386	80956.000	-39845.337
7	41757.323	81602.661	-39845.337
8	10181.137	62316.598	-52135.460
9	-1994.082	29104.520	-31098.602
10	-46379.000	7496.000	-53875.000
11	-45128.000	1460.000	-46588.000
12	-74658.000	2097.000	-76755.000
13	-57350.000	4184.000	-61534.000
合计	-12038.806	472265.444	-484304.438

表 2 土方运距图

挖方 填方	1	2	3	4	5	6	挖方量
	1	884	750	320	1080	1335	1760
2	580	310	410	380	660	1315	34341
3	1560	1480	1836	1063	800	425	1994
4	1880	1610	2190	1410	1150	780	46379
5	2180	2100	2480	1700	1440	1060	45128
6	2500	2430	2600	2030	1780	1400	74658
7	1040	1010	1420	710	530	413	57350
填方量	110958	71899	2288	41333	41757	10181	278418

$$\begin{aligned} \min z = & 884x_{11} + 750x_{12} + 320x_{13} + \\ & 1080x_{14} + 1335x_{15} + 1760x_{16} + 580x_{21} \\ & + \dots + 413x_{76} \end{aligned}$$

通过计算可知,该项目场区内部的总挖方量为 290457.389m³,总填方量为 278418.582m³,很明显该机场项目的场区内部挖填土方量不平衡,因此需要根据挖填平衡原则进行约束条件的改进。由于填方量小于挖方量因此首先满足内部填方量的需求,再将多余土方进行弃土,因此改进的约束条件

如下所示:

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{12} + \dots + x_{16} &\leq 30607 \\ x_{21} + x_{22} + \dots + x_{26} &\leq 34341 \\ \dots & \\ x_{71} + x_{72} + \dots + x_{76} &\leq 57350 \\ x_{11} + x_{21} + \dots + x_{71} &= 110958 \\ x_{12} + x_{22} + \dots + x_{72} &= 71900 \\ \dots & \\ x_{16} + x_{26} + \dots + x_{76} &= 10181 \end{aligned}$$

由于计算量较大,因此利用 Matlab 中的 linprog 函数计算出土方调配的结果,如表 3 所示,为更好的展示计算结果,保留整数部分,函数形式如下:

$$\begin{aligned} \min f^T X \\ \text{s.t. } tAX &\leq B \\ Aeq &= Beq \\ lB &\leq X \leq uB \end{aligned}$$

最终根据该机场的场地划分的分区形成可视化的土方调配方案如图 6 所示。

该土方调配方案是在综合考虑了场地内各个分区的土方运距和土方量的基础上,以实景建模和 BIM 模型比对精准获取分区土方量为基础,利用线性规划模型求解土方调配的最优方案,通过 MATLAB 进行数据计算,得到以上的土方调配方案。其中利用三维实景模型进行土方量计算的精度达到 0.001m³,远远高于利用二维图纸计算。为该机场项目的土方调配提供了一种尽量满足项目内部挖填平衡、全局最优的,相比于依靠管理者经验调配的更优化方案。

3.4 调配方案与设计方案的比对和分析

设计方案是根据场地形状将场地划分为 6 个大区,每区内分为挖方区、土面区填方、道面区填方,挖方区又根据挖方土的性质分为表皮土和非表皮

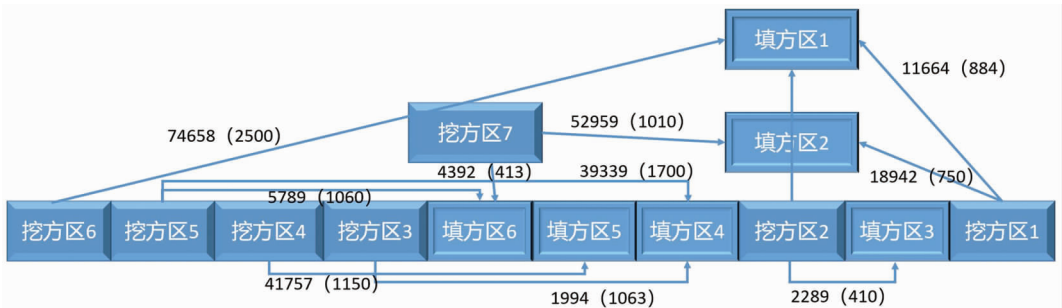


图 6 土方调配方案示意图

表 3 最优土方调配

挖方 \ 填方	挖方						实际挖方	挖方量	备注
	1	2	3	4	5	6			
1	11664	18942	0	0	0	0	30606	30606	
2	24636	0	2289	0	0	0	26925	34341	弃土 7416
3	0	0	0	1994	0	0	1994	1994	
4	0	0	0	0	41757	0	41757	46379	弃土 4622
5	0	0	0	39339	0	5789	45128	45128	
6	74658	0	0	0	0	0	74658	74658	
7	0	52959	0	0	0	4392	57351	57350	
实际填方	110958	71901	2289	41333	41757	10181	278419	290457.4	
填方量	110958	71899	2288	41333	41757	10181	278418	278418	

表 4 全场土石方调配工程数量

分区编号	道面区填方		土面区填方		土方调配			挖方	
	填方数量	换算数量	填方数量	换算数量	调配方量	运距(m)	土方来源	挖方数量	表皮土
1 区	17	23	2571	3059	23	180	挖 1	80478	1249
					2571	250	挖 1		
2 区	563	749	18268	21739	749	350	挖 2	78476	13875
					21739	180	挖 2		
3 区	358	476	70508	83904	476	120	挖 3	93162	18217
					83905	230	挖 3		
4 区	9002	11973	155623	185191	11576	230	挖 4	93162	16527
					53649	150	挖 4		
					56067	1050	挖 2		
					75475	1760	挖 1		
5 区	2505	3332	64367	76597	3332	230	挖 5	54351	10791
					61515	150	挖 5		
					49190	/	外借方		
6 区	21931	29168	130552	155357	16523	250	挖 6	1458	15065
					27644	720	挖 3		
					14873	1350	挖 2		
					125385	/	外借方		

土。在 6 个土方分区的前提下,坚持全局最优、土方调配量和运距乘积最小的原则,制定了全场土石方调配方案,全场土石方及调配工程数量表见表 4。传统方法仍然是手工或者利用二维图纸计算土方量再进行土方调配,而基于三维实景和 BIM 模型比对获取土方量更加精准也更加适用于准确测算土方量,并在此基础上进行土方调配。

在全局最优的前提下,调配方案是将场地根据场地形状、结构形式划分为 13 个分区,相比于设计方案而言,土方分区划分更加细致准确,因此在此基础上进行线性规划模型计算得到的调配方案更加合理,解也更优。

4 结语

本文介绍了一种基于三维实景模型与 BIM 模型比对获取土方量,进而进行土方工程分区调配的方法。利用该方法获取土方量减少了现场测量和

人工计算工作,综合考虑了场地实际情况,并且大幅度提高土方计算精确度。在此基础上建立线性规划数学模型,在全局最优的原则下尽可能满足挖填方平衡,以土方量与运距乘积之和最小为目标函数,求解得到比依据项目经理实际经验更优的土方调配方案,在某一机场项目中进行了实例验证,用以指导施工,降低土方运输成本。

参考文献

[1] 邓朗妮,罗日生,郭亮,马晋超,黄晓霞. 基于线性规划数学模型算法的土方调配[J]. 土木工程与管理学报, 2018,35(2): 25-31.

[2] 曹明振,李岩松,王江悦. 无人机实景建模辅助 BIM + 3DGIS 在建筑改造设计中的应用研究[C]. 中冶建筑研究总院有限公司. 2020 年工业建筑学术交流会议论文集(中册). 中冶建筑研究总院有限公司:工业建筑杂志社,2020,399-402.

[3] 杨海霞,郭清. 应用数字高程模型(DEM)实时查询地

- 面任意点高程的新方法[J]. 华北自然资源, 2020(1): 72-73.
- [4] 罗杨. 数字高程模型发展与应用前景概述[J]. 化工管理, 2019(9): 21.
- [5] 侯铁, 王大铭, 冉巧. 基于遥感影像的三维地形场景模拟及其在市政工程领域的应用探索[A]. 中国图学学会建筑信息模型(BIM)专业委员会. 第五届全国 BIM 学术会议论文集[C]. 中国图学学会建筑信息模型(BIM)专业委员会: 中国建筑工业出版社数字出版中心, 2019, 5.
- [6] 席靖智. 基于 DEM 的工程土方计算方法优化分析及应用研究[D]. 重庆交通大学, 2013.
- [7] 李钦荣. 数字高程模型在不规则区域土方计算中的应用[J]. 科技资讯, 2009(26): 70-71.
- [8] 黄富强. 数字高程模型在金堆城矿山工程量计算中的应用[J]. 矿山测量, 2018, 46(5): 107-108+118.
- [9] 姜佃高. 地形图扫描建立数字高程模型[J]. 科技经济市场, 2016(12): 4+36.
- [10] BASZCZAK-BAK W, JANOWSKI A, KAMIN'SKI W, et al. Application of the Msplit method for filtering airborne laser scanning data-sats to estimate digital terrain models [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(9): 2421-2437.
- [11] 苏永涛, 邢艳秋, 焦义涛, 邢万里, 尤号田. 机载激光雷达林区数字高程模型的建立[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(10): 30-34.
- [12] 景明, 白中科, 崔艳, 张继栋. 基于线性规划和数字高程模型的排土场复垦土方调配优化[J]. 金属矿山, 2013(2): 130-134.
- [13] 刘森. 倾斜摄影三维建模技术流程及案例分析[J]. 科技资讯, 2017, 15(30): 1, 3.

Research on Zoning Allocation Method of Earthwork Based on 3D Real Scene and BIM Model

Bin Hu¹, Yong Zhang², Ying Liu³, Rao Li³

(1. Shantui Construction Machinery Co., Ltd., Jining, 272073;

2. Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, 430023;

3. School of Civil & Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074)

Abstract: Using traditional CAD drawings for earthwork calculation not only requires a lot of manpower and material resources, but also the calculated earthwork amount is quite different from the actual; in actual construction, most project managers make earthwork allocation plans based on actual engineering experience. This method Can not meet the earthwork deployment of large and complex projects. Therefore, it is very important to establish an earthwork allocation model based on the accurate calculation of the earthwork volume and satisfy the principle of digging and filling balance and global optimization, and to formulate an earthwork allocation plan. This article relies on an Airport project to provide it with the most optimized earthwork allocation plan. It mainly introduces the basic ideas and methods for calculating the amount of earthwork based on the three-dimensional real scene and BIM model, and uses MATLAB to calculate the earthwork based on the mathematical model of operations research linear programming. The deployment plan is used to verify the feasibility of the method through an engineering example at an airport.

Key Words: Earthwork Calculation; Three-dimensional Real Scene; Linear Programming; Earthwork Allocation