

土石方动态调配模型与可视化研究

胡程顺¹, 钟登华¹, 张静², 洪文², 李明超¹

(1. 天津大学建工学院, 天津 300072; 2. 国家电力公司中南勘测设计研究院, 长沙 410014)

[摘要] 土石方调配是土石坝或堆石坝施工中的一个核心问题, 其合理与否对降低工程造价和保证工程的顺利进行具有重要的经济、技术价值。根据其受时间-空间影响与约束的特点, 文章在总结现有研究成果的基础上, 采用系统分析的手段, 提出了一种将动态问题静态化的方法, 并利用线性规划大M单纯形法对问题进行求解。在数学模型上, 深入而细致地考虑了实际施工中的一些人为约束因素, 增强了模型的通用性与灵活性; 借助于GIS技术的强大空间信息处理功能, 将土石方调配成果以三维动画的形式显示出来, 以达到形象直观的目的; 在程序实现上, 采用强大的程序设计语言工具VC++开发出了界面友好、操作简单、适用性强的软件。最后, 以其在某大型土石坝工程土石方调配项目中的成功应用, 验证了此项研究工作的合理性与优越性。

[关键词] 土石坝施工; 土石方调配; 动态调配; 线性规划; 可视化

[中图分类号] TP391.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)12-0073-07

1 引言

土石坝^[1,2]是一种古老而常见的坝型, 因其一系列优点而逐渐为广大工程设计人员所重视。其体积庞大, 主要采用当地土石材料, 大坝工程造价主要发生于土石料的开采、运输与填筑。土石方的最优调配与综合平衡对降低工程造价和保证工期具有重要的经济、技术价值。

土石坝工程^[3,4]工程量巨大, 可达几千万方; 大坝填筑可能采用的料源众多, 坝体不同填筑部位对土石料的品质(主要指颗粒级配)及供应时间上各有要求, 从而对料源的可利用程度产生影响; 各料源的开挖时间及利用料上坝受整个工程施工进度计划及导流、蓄水计划的约束和限制。因此土石方调配系统是一个受时间-空间影响与约束的动态调配系统。

国外对此问题专门的研究不多见^[5-7]。在国内, 以往对于土石方调配问题的研究多侧重于调配

工程量的计算方法上^[8], 如方格网法、断面法及高斯法等, 而对于土石方调配过程的研究始于天津大学的朱光熙、孙锡衡等。他们首次提出系统分析的方法, 利用线性规划对问题进行优化计算, 取得了可喜的研究成果。其后多人对此问题进行过研究^[9-11], 其中武汉大学的申明亮等对此作了更为深入地探索^[12,13], 编写了相应的计算机程序, 取得了一定的成果。

综观以上研究成果, 存在的问题在于未能将土石方调配当成一个受时间、空间影响的动态调配系统, 仅考虑了其在空间“数量”上的平衡, 而未能考虑其在时间上的综合平衡; 或者没有深入考虑调配中的一些约束条件及人为干预因素, 造成调配结果与实际操作有较大出入; 在调配成果的表达上, 仅限于一般的文本输出, 形式过于简单, 不能给人以直观的形象表达; 同时编写的计算机程序通用性不强。所有这些使其应用受到极大限制。

[收稿日期] 2003-06-05; **修回日期** 2003-08-11

[基金项目] 教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目(200166); 国家自然科学基金资助项目(50179023)

[作者简介] 胡程顺(1976-), 男, 安徽池州市人, 天津大学博士研究生

2 研究方法

由于土石方调配系统是一个受时间-空间约束限制的复杂动态调配系统,如果采用运筹学中只考虑空间因素,即只考虑运距及供、需量的一般求解调配问题优化的方法则无法解决。因此,本文采用了一种适合于求解动态调配系统的数学模型和求解方法。其思路为:将整个施工过程划分为若干时段进行递阶计算,并将状态转移关系引入中转料场的平衡约束,从而表达时-空转移条件,通过时-空转移将动态问题静态化。再采用静态规划的方法求解并进行调配系统的综合平衡规划,求出最优的调配方案。这种方法不但概念明确,直观易行,而且便于针对工程实际综合考虑各种影响因素及制约条件。此外,它将枢纽施工全过程作为一个整体进行优化,可协调各时期相互制约的关系,便于监控全过程。

本文是在天津大学已有研究成果的基础上,采用系统分析的方法,根据工程实际施工进度,以全过程系统调配成本最低为目标,深入而细致地考虑了调配中的一些约束条件和人为干预因素,建立调配系统优化模型;在成果的表达上,本文借助于GIS强大的空间信息处理功能^[14],以三维动画的形式将整个工程的调配过程显示出来,以达到直观形象的目的;并利用VC++技术^[15]进行了相应的软件开发,软件的界面友好,操作简单,适用性较强。最后,以某大型土石坝工程的调配为例对本文的研究进行了验证。

3 土石方动态调配数学模型

3.1 模型准备

在建立此问题的数学模型之前,先对调配的料源作一说明。在这里,将料源划分为供料源与受料源,并依据其不同的性质,供料源可细分为建筑物开挖供料源、直接开采料场供料源以及中转料场(堆渣场)供料源。受料源细分为坝体受料区受料源及中转料场受料源。可以看出,中转料场既是供料源,又是受料源。由于程序中的开挖方量均为有效利用量,故在此不考虑弃渣的料,也就不存在专门的弃渣场。

土石方调配的目的即为确定各施工时段由各供料源到各受料源的调配方量。任意时段土石方调配示意图如图1所示。从图中可以看出,任意时段的

土石方调配包括了运输路径的任意选择,但不包括从一个中转料场到另一个中转料场的调配,这是根据实际操作的要求而加入的一个约束条件。

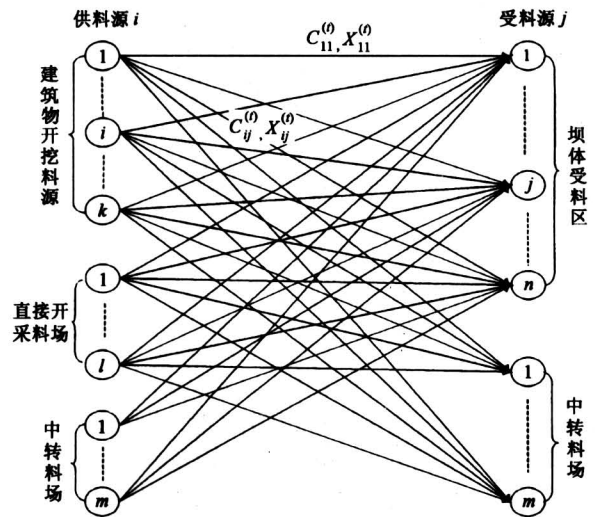


图1 任意时段土石方调配示意图

Fig.1 The sketch map of earth allocation in any stage

在建立土石方动态调配系统的数学模型时遵循了下面两个假定:一是所有的料场规划(包括料场数量、位置及储量等)已经完成,即土石方调配是在既定的料场规划下进行的;二为直接开采料场任意时段开采的料没有数量与质量上的约束限制,即认为直接开采料场可满足任何坝体受料区颗粒级配的要求,且开采的量可满足任意需求量的要求。

3.2 数学模型

为了描述方便,先对各料源的数量作统一规定: k 个建筑物开挖料源, l 个直接开采料场, m 个中转料场, n 个坝体受料区。此问题的线性规划数学模型可简单描述为:土石方调配就是在满足各项施工进度和填筑材料质量与级配要求的前提下,满足:1)合理调配各建筑物、开采料场、中转料场的土石料;2)全过程调配成本最低的目标,以确定各时期、各区域相应的调配规划。

3.2.1 目标函数 其目标函数为:

$$\min Z = \sum_t \sum_i \sum_j C_{ij}^{(t)} \cdot X_{ij}^{(t)}, \quad (1)$$

这里, Z 为目标函数,即总的调配费用(万元), $C_{ij}^{(t)}$ 是 t 时段由供料源 i 调配到受料源 j 的土石料的单位费用(元/ m^3), $X_{ij}^{(t)}$ 为 t 时段由供料源 i 调配到受料源 j 的土石料调配量($10^4 m^3$), i 为供料源编号, j 为受料源编号, t 为施工时段。

3.2.2 约束条件

1) 供量约束

$$\sum_{j=1}^{m+n} X_{ij}^{(t)} = a_i^{(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, k; t = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij}^{(t)} \leq A_i^{(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

其中, $a_i^{(t)}$ 是 t 时段第 i 供料源开挖料的有效利用量 (10^4 m^3), $A_j^{(t)}$ 为 t 时段初第 j 中转料场土石料堆存量 (10^4 m^3), p 为时段总数。

2) 需量约束

$$\sum_{i=1}^{k+l+m} X_{ij}^{(t)} = b_j^{(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{k+l} X_{ij}^{(t)} \leq B_j^{(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

这里, $b_j^{(t)}$ 为 t 时段第 j 坝体受料区填筑量 (10^4 m^3), $B_j^{(t)}$ 是 t 时段初第 j 中转料场空容量 (10^4 m^3)。

3) 中转料场平衡约束 (时空转移条件)

$$A_i^{(t+1)} = A_i^{(t)} - R_i^{(t)} + Q_i^{(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$B_i^{(t+1)} = V_i - A_i^{(t+1)}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

其中, $R_i^{(t)}$ 为 t 时段第 i 中转料场的调出量 (10^4 m^3), $Q_i^{(t)}$ 是 t 时段第 i 中转料场的调入量 (10^4 m^3), V_i 为第 i 中转料场的总容量 (10^4 m^3)。

将式 (7) 代入式 (5), 则可得式 (8):

$$\sum_{i=1}^{k+l} X_{ij}^{(t)} + A_j^{(t)} \leq V_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

4) 优先料源约束。优先料源约束指的是某些开挖出的土石料在优先满足坝体相应颗粒级配的部位填筑要求下, 多余的土石料在其他受料源进行统一调配。如有多个优先选择的料源, 则按照选定的优先级别进行调配。即

$$X_{ij}^{(t)} = \begin{cases} a_i^{(t)}, & a_i^{(t)} \leq b_j^{(t)} \\ b_j^{(t)}, & a_i^{(t)} > b_j^{(t)} \end{cases} \quad (9)$$

如地下工程开采的土石料优先用于主堆石区的填筑, 如有多余则满足次堆石区的填筑等, 依此类推。

5) 中转料场出料约束。中转料场的出料约束指的是从中转料场调出的料要满足中转料场已有供

料源库存料的要求, 即

$$\sum_{i=1}^{k+1} X_{ij}^{(t)} = X_{cj}^{(t)}, \quad j = 1, 2, \dots, n; c = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$\sum_{r=2}^t \sum_{j=1}^n X_{ij}^{(r)} \leq \sum_{r=1}^{t-1} X_{ic}^{(r-1)} \quad i = 1, 2, \dots, k; c = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

这里, $X_{ij}^{(t)}$ 指从第 c 中转料场库存的第 i 供料源 (除中转料场) 调配到第 j 坝体受料区的方量 (10^4 m^3), $X_{ic}^{(t-1)}$ 是上一时段从第 i 供料源 (除中转料场) 调配到第 c 中转料场的方量 (10^4 m^3)。

6) 不可能运输路径约束。不可能运输路径有两层含义, 它既反映了各供料源与受料源的使用规划、开挖填筑项目的关系, 同时也隐含反映了道路系统及料物类型与开挖填筑的关系, 是进行土石方动态调配最重要也是最基础的数据。根据前面叙述过的供料源与受料源的详细划分, 可建立起一个二维矩阵, 其行表示供料源, 列表示受料源。行列相交的元素取值满足以下要求: 不符合设计规定的运输路径取任意一负值如 -1 , 如开采出的石料不可能运输到粘土层进行填筑, 则其运输距离取为 -1 ; 对于符合设计规定的取实际运距, 如表 1 为某工程的土石方调配运距表。

对于某不可能的运输路径 $i \rightarrow j$, 其调配量为 0, 即

$$X_{ij}^{(t)} = 0. \quad (12)$$

7) 中转料场调配结束的零约束。所有中转料场在调配结束时其储量应为零, 即

$$A_i^{(p)} - R_i^{(p)} + Q_i^{(p)} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

其中, $A_i^{(p)}$ 为最后时段 p 中转料场 i 的初始堆存量, $R_i^{(p)}$ 为时段 p 内中转料场 i 的调出量, $Q_i^{(p)}$ 为时段 p 内中转料场 i 的调进量。

8) 非负约束。要求线性规划的所有变量为非负数, 即

$$X_{ij}^{(t)} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k + l + m; j = 1, 2, \dots, m + n \quad (14)$$

$$A_i^{(t)} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

$$X_{ij}^{(t)} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k + l; j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

表1 土石方调配运距表

Table 1 The table of haul distance of possible cut-and-fill pair

m

供料源	坝体受料区						中转料场			
	II A	III A	III B	III C	IV A	IV B	中转场 1	中转场 2	中转场 3	
建筑物开挖料源	(1) 溢洪道开挖	-1	-1	-1	-1	652	-1	1 035	-1	-1
	(2) 泄洪洞明挖	-1	-1	-1	-1	726	-1	816	-1	-1
	(3) 引水渠明挖	-1	-1	-1	-1	451	-1	-1	-1	2 595
	(4) 出现平台明挖	-1	-1	-1	-1	466	-1	-1	-1	2 202
	(5) 尾水渠明挖	-1	-1	-1	-1	1 016	-1	-1	-1	783
	(6) 引水及竖井等洞挖	-1	505	505	-1	505	-1	-1	2 396	-1
	(7) 主厂房及主变室	-1	920	920	-1	920	-1	-1	394	-1
	(8) 厂房的其它洞室	-1	1 020	1 020	-1	1 020	-1	-1	425	-1
	(9) 泄洪洞洞挖	-1	883	-1	-1	883	-1	1 180	-1	-1
	(10) 导流洞及灌浆洞洞挖	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1 438	-1
开采料场	(11) 开采料场	4 716	4 716	4 716	4 716	4 716	4 716	3 658	2 546	2 341
中转料场	(12) 中转场 1	816	816	816	816	816	816	-1	-1	-1
	(13) 中转场 2	516	516	516	516	516	516	-1	-1	-1
	(14) 中转场 3	616	616	616	616	616	616	-1	-1	-1

综合以上式(1)~式(16)(式5,7已合并为式8),便构成了土石方动态调配系统的数学模型。

3.2.3 土石方动态调配程序设计 上述土石方动态调配系统的数学模型是一个线性规划模型,对线性规划的求解一般有单纯形法、图解法以及改进的单纯形法,本文采用改进的单纯形法对问题进行求解^[16,17],这种方法通过对模型添加人工变量、松弛变量与剩余变量,从而将模型标准化,进一步求解得出最终结果。其程序流程如图2所示。通过程序的运行实例可知,这种求解算法运行速度快,对于一个常见的约束(如1 000个各种变量)只需要不到1 min的时间即可完成算法。

4 可视化的土石方动态调配

鉴于以往调配成果表达上的不足,本文采用目前强大的空间地形处理工具地理信息系统技术对其进行了处理。地理信息系统(GIS)是一门近年来迅速发展起来的、介于地球科学与信息科学之间的交叉学科,也是一门地学空间数据与计算机技术相结合的新型空间信息技术^[18,19]。它是以地理空间数据库为基础,在计算机软硬件的支持下,对空间数据进行采集、管理、操作、分析和显示,并采用

地理模型分析方法,实时提供多种空间和动态地理信息的计算机技术系统^[20]。

成果可视化表达的第一步是建立整个施工场地的三维数字地形模型^[21]。对地形表面模拟采用较多的是不规则三角网模型或规则网格模型。水利工程一般均建立在地形起伏较大的高原和山区,因此建立工程地表三维数字地形模型时,一般先由地形等高线原始数据按一定的算法生成不规则三角网模型来实现。

土石方调配涉及到与地理空间位置或特征相关联的空间地物,包括:地表和地下的各种人工和自然现象,依据地理实体的分布特征、空间特征及其相互关系,可将空间对象抽象为三维空间中的点、线、面、体等四种不同的基本图形元素^[22],然后通过以这四种基本几何为基础的各种几何运算和操作,构造复杂的地物模型。

最后运用动画技术显示整个调配过程。由优化调配计算程序得出的调配成果按照一定格式写入GIS数据库中;并进行处理,形成各条调配路径,由GIS以图形的形式表现出来。通过众多这种画面的连续播放形成了动画,将调配的各时段依次联接起来,于是就演示了土石方调配的整个时段,达到直观、形象的目的。

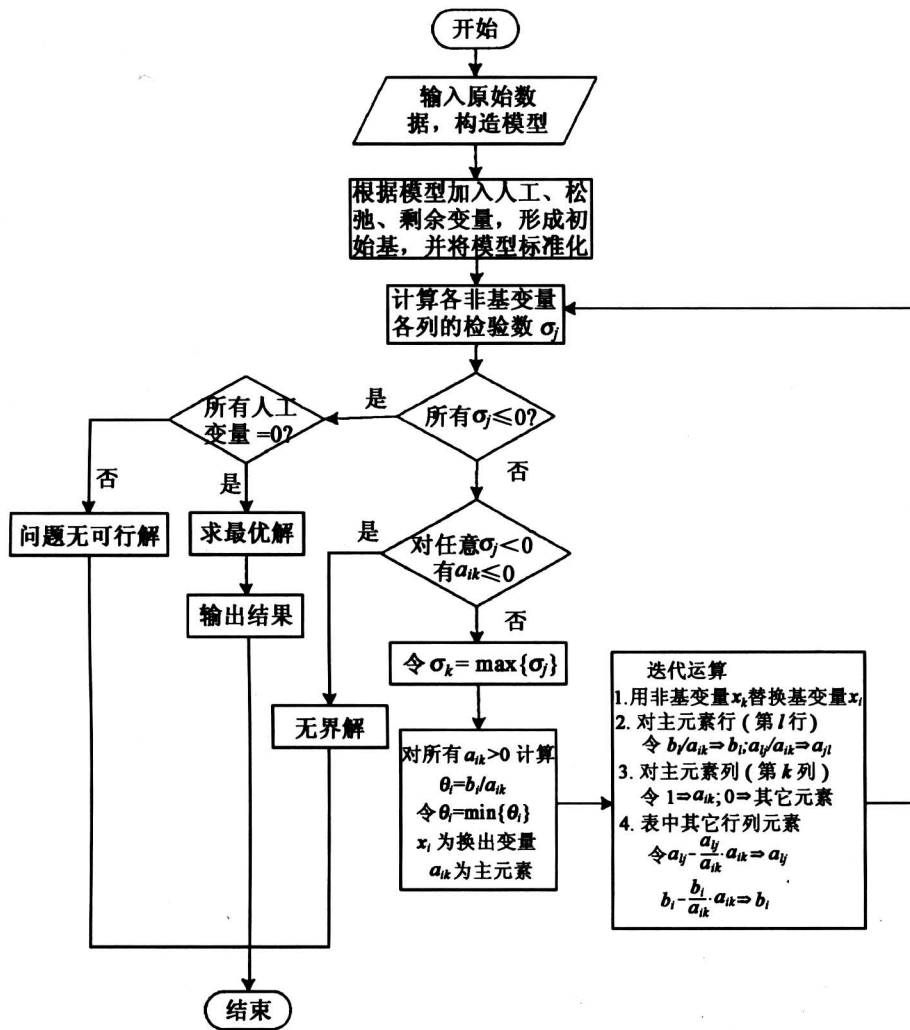


图 2 土石方动态调配规划程序流程图

Fig.2 The program flow chart of earth allocation

5 工程实例

某混凝土面板堆石坝工程最大坝高 185.5 m, 坝顶长 423.75 m, 宽高比为 2.28, 属狭窄河床高面板堆石坝。坝体总填筑方量为 $961.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

本工程有土料场四个, 石料场最终确定为一个, 其运距较远, 但料性及容量均能满足要求。同时可利用料为 $343.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 尚需从石料场开采堆石料 $593.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ (压实方), 考虑各种损耗并折算成自然方为 $577.13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

根据工程施工进度的安排, 坝体填筑分五期进行, 考虑前期准备及中间停歇, 坝体共分八期进行施工, 坝体分区如图 3 所示。从施工进度表上确定各时期的开挖量与填筑量, 并依实际工程的要求建

立调配运距表 (如表 1 所示) 及确定各种约束条件, 然后利用软件进行优化计算 (软件的部分应用界面如图 4 和图 5 所示), 即可确定最优的调配方案。调配结果表明直接上坝率偏低, 仅为 37%, 其原因为开挖利用料的主要填筑区开始填筑时间较迟, 开挖料需转运堆存, 造成直接上坝率较低。因数据量过大, 详细调配结果在此从略。

将调配成果在 GIS 环境下进行处理, 可获得可视化的输出, 图 6 为时段四的调配过程示意图。

6 结语

土石方调配是土石坝设计与施工中必须考虑的一项重要内容, 是进行其他各项工作的基础。本文在现有研究成果的基础上, 采用系统分析的方法,

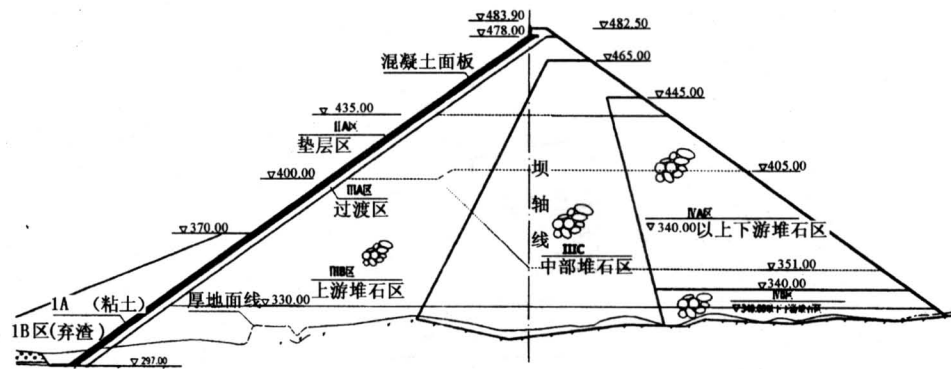


图3 某堆石坝坝体分区示意图

Fig.3 The sketch map of zones of the rock-fill dam

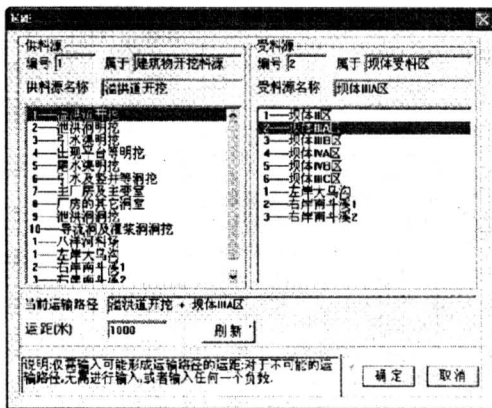


图4 软件运距约束对话框

Fig.4 The dialogue of hauling distance of the software

形象地展现出来; 开发的软件不仅可以满足土石坝施工中料物调配的需要, 还适用于其他相类似工程的土石方调配, 如港口工程、公路工程等, 因此, 具有较强的通用性。

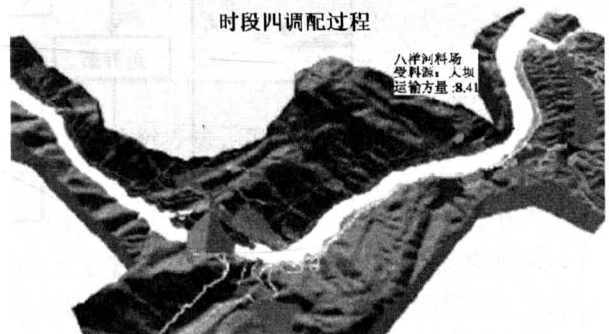


图6 施工时段四的调配过程示意图

Fig.6 The demo graph of earth allocation process in 4th stage

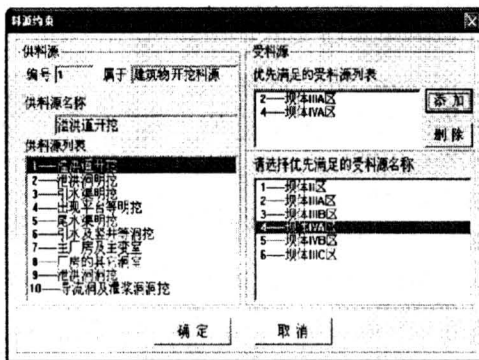


图5 软件料源优先约束对话框

Fig.5 The dialogue of priority constraints of accepting sources of the software

将一个受时间-空间约束的动态问题静态化, 利用线性规划对问题进行求解, 简化了问题的复杂性。同时, 建立的数学模型灵活性强, 可进行一些人为的干预; 调配成果的可视化表达能使调配过程直观

由于影响土石方调配的因素众多, 且随机事件时有发生, 如何更加真实地体现其受到的众多约束以及人为干预因素, 即如何更进一步增强软件的通用性, 将是今后进行此项研究工作的重要内容。

参考文献

[1] 葛文辉. 我国碾压式土石坝的发展[J]. 施工组织设计, 1992,(1):1~8

[2] 蒋颂涛, 韩正海, 等. 混凝土面板堆石坝设计与施工[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991

[3] 水利电力部水利水电建设总局. 水利水电工程施工组织设计手册(第二卷)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990

[4] 袁光裕编. 水利工程施工(第三版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001

- [5] Mohamed Marzouk, Osama Moselhi. Optimizing earthmoving operations using object-oriented simulation [J]. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000:1926~1932
- [6] Govindan Kannan, Julio C. Martinez. A framework for incorporating dynamic strategies in earth-moving simulations [J]. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, 1997:1119~1126
- [7] Henderson, Vaughan E. Solving the shortest route cut and fill problem using simulated annealing [J]. European Journal of Operational Research, 2003, (145): 72~84
- [8] 陈小平. 高斯方程在土方调配计算中的应用[J]. 铁道建设, 1997, 3(42):13~16
- [9] 梁向峰, 刘晓奇. 线性规划在料场优化调配中的应用[J]. 陕西水力发电, 2001, 17(3):33~35
- [10] 刘琼芳. 天生桥一级水电站土石方平衡规划与实施[J]. 云南水力发电, 2001, (2):101~104
- [11] 郑家祥, 殷奎生. 高土石坝施工过程计算机模拟[J]. 水电站设计, 1993, (2):70~75
- [12] 申明亮, 杨树明, 等. 堆石坝施工中料物调配问题研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(5):16~18
- [13] 申明亮, 倪锦初. 料物平衡方法研究与软件开发[J]. 人民长江, 2001, 32(4):25~26
- [14] 钟登华, 郑家祥, 等. 可视化仿真技术及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002
- [15] Kruglinski J, Wingo S. Visual C++ 6.0 技术内幕[M]. 北京:北京希望电子出版社, 2001
- [16] 《运筹学》教材编写组编. 运筹学(修订版)[M]. 北京:清华大学出版社, 1998
- [17] 孙锡衡, 齐东海. 水利水电工程施工计算机模拟与程序设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997
- [18] 李德仁, 龚健雅, 边馥苓. 地理信息系统导论[M], 北京:测绘出版社, 1993
- [19] 曹瑜, 胡光道. 地理信息系统在国内外应用现状, 西南科技大学城建学院张文君地理信息系统资料网
- [20] Li R. Data structure and application issue in 3D Geographical information system[J]. Geomatic, 1991, 48(3):209~224
- [21] Li Zhilin. Objective representation of DTM surface in scale dimension[J]. Dynamic and Multi-Dimensional GIS, 1999, 33(4):23~27
- [22] 钟登华, 周锐, 刘东海. 水利水电工程施工系统三维建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2003(1)

Study on the Model and Its Visualization for Dynamic Allocation of Earth

Hu Chengshun¹, Zhong Denghua¹, Zhang Jing², Hong Wen², Li Mingchao¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Middle South Hydroelectric Investigation & Design Institute of SPC, Changsha, 410014 China)

[Abstract] For construction organization plan, the optimized allocation and overall balance of earth is of great significance to reduce the project cost and ensure the construction period in the construction of rock-fill dam. Because of the characteristic of being influenced or constrained by time-space, a new method of changing its dynamic into static is presented with the system analysis based on the existing research. Meanwhile, Linear Programming is introduced to solve the problem. In order to strengthen the commonness and agility of model, some human interventions are in an in-depth and particular consideration in building the mathematics model. And then for the expression of results, Geographic Information System (GIS) is referred to demonstrate the allocation process with graph or animation to avoid its powerless expression. With the help of powerful VC++ , corresponding software is drawn up, whose interface is friendly operation is easy and applicability is preferable. At last a large-scale rock-fill dam is illustrated. The successful application of the software to it shows the reasonability and effectiveness of the method.

[Key words] rock-fill dam construction; earth allocation; dynamic allocation; linear programming; visualization