

文章编号: 1007-2284(2020)11-0174-05

# 基于遗传算法的面板堆石坝土石方调配研究

赵 瑜<sup>1</sup> 陈传宇<sup>1</sup> 张建伟<sup>1</sup> 孙 凯<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学土木与交通学院, 郑州 450011)

**摘 要:** 土石方调配是大型水电工程建设项目的核心问题之一, 对工程施工进度、质量及造价有十分重要的意义, 合理的土石方调配方案对整个工程顺利进行具有至关重要的作用。针对河南五岳抽水蓄能电站上水库面板堆石坝土石方调配困难的问题, 在对比甄选相关问题解决方法的基础上, 改进了传统方法, 采用系统分析的方法, 并利用遗传算法对问题进行求解。在数学模型方面, 以总调配费用最低为目标, 深入而细致地考虑了各种实际施工中的约束条件, 增强模型的准确性; 在程序方面, 基于 Microsoft Visual Studio C#语言自主编程操作简单、界面友好、适用性强的软件, 通过软件确定土石方最优调配方案, 并结合实际工程验证了此次研究的合理性和实用性。

**关键词:** 土石方调配; 遗传算法; 系统应用; 面板堆石坝

**中图分类号:** TV51; TV641 **文献标识码:** A

## Research on the Earthwork Allocation of Concrete Face Rockfill Dam Based on Genetic Algorithm ZHAO Yu<sup>1</sup>, CHEN Chuan-yu<sup>1</sup>, ZHANG Jian-wei<sup>1</sup>, SUN Kai<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** Earthwork allocation scheme is one of the core issues of large-scale hydropower construction projects, which is of great significance to the construction progress, quality and cost of the project. A reasonable earthwork allocation scheme is of vital importance to the success of the whole project. In view of the difficulty of earth rock allocation of face rockfill dam of upper reservoir of Wuyue Pumped Storage Power Station in Henan Province, based on an analysis of solutions to similar problems, this paper adopts the method of system analysis, and uses genetic algorithm to solve the problem. In the aspect of mathematical model, taking the lowest total deployment cost as the goal, the constraints in various practical construction are considered deeply and carefully to enhance the accuracy of the model. In the aspect of program, based on Microsoft Visual Studio C# language, a software with simple operation, friendly interface and strong applicability is developed. Through the software, the optimal allocation scheme of earthwork is determined, and the rationality and practicability of the allocation system are verified in combination with actual projects.

**Key words:** earthwork allocation; genetic algorithm; system application; concrete faced rockfill dam

收稿日期: 2020-01-03

基金项目: 河南新华五岳抽水蓄能发电有限公司科研项目(XH-KY2018-03)。

作者简介: 赵 瑜(1964-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为施工组织管理与系统仿真。E-mail: zhaoyu@ncwu.edu.cn。

通讯作者: 张建伟(1979-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 水利水电工程教学与研究。E-mail: zjwcivil@126.com。

## 0 引 言

面板堆石坝是当今最成功的坝型之一, 应用广泛且优势明显, 但是面板堆石坝工程施工条件复杂, 影响因素众多, 并且在施工过程中往往伴随着巨大的土石方开挖、填筑工程量。土石方调配是大型面板堆石坝施工组织设计的核心问题之一, 合理的土石方调配方案直接影响到工程施工进度、质量及造价三大

目标的实现。土石方调配是指施工过程中在满足大坝开挖进度、填筑进度的前提下,对土石方料实现开挖、开采、填筑、中转、加工和弃渣等过程的综合调配,以达到提高开挖料直接上坝率,减少土石料二次调运的费用,实现面板堆石坝快速经济施工的目的<sup>[1]</sup>。当前土石方调配的研究方法颇多<sup>[2-7]</sup>,但存在一定的局限性:①有的将土石方调配这一动态问题静态化,不符合实际;②有的没有系统地考虑到土石方调配过程中的各种影响因素;③有的只考虑了部分最优没有考虑全局最优。针对工程优化中的多变量、复杂的约束条件问题<sup>[8-9]</sup>,本文通过对约束关系的系统分析,同时结合类似工程经验确定土石方转换、上坝损失率等因素,建立土石方调配模型,采用能够很好得到全局最优解的遗传算法对模型进行求解,并基于 Microsoft Visual Studio C#平台开发土石方调配系统计算机软件,确定土石方最优调配方案,指导工程施工。

## 1 遗传算法

遗传算法<sup>[10]</sup>是模拟自然界中生物的进化和遗传过程的一种全局最优化算法。遗传算法首先对实际问题参数进行染色体的编码,在编码完毕后形成初始种群,通过初始种群的不断选择、交叉、变异得到下一代种群,在算法执行过程中通过,以适应度函数为评估准则评价种群中的个体,高适应度的个体保留下来作为下一代的父代种群,反复循环这一过程后代种群的适应度会越来越高,从而实现优胜劣汰的进化过程。遗传算法基本概念包括:①编码。由于遗传算法是模拟生物基因遗传机制的,染色体是生物遗传的主要媒介,因此需要把实际问题通过编码转化为遗传算法可以识别的基因序列;②初始种群设定。遗传算法执行的过程中,首先设定初始种群最为第一代父辈种群;③选择。在上一代种群中择优选择出优秀个体,组成新一代种群,作为下一代父辈种群;④交叉。交叉操作是一种全局搜索的过程,父辈种群个体通过交叉产生下一代种群个体;⑤变异。变异在自然界生物进化过程中起核心作用,物种通过变异产生新的基因进而产生新的个体,所以在遗传算法中以此来提高个体多样性。遗传算法过程图如图1所示。

## 2 土石方调配模型

本工程的土石方调配过程主要由开挖项目、中转料场、填筑项目、弃渣场、施工道路和施工机械等要素组成。分析各组成要素之间的匹配关系,建立土石方调配匹配矩阵,以填筑期土石方调配总费用最低为目标函数,同时考虑料场约束、土石方转换、上坝损失率等因素,根据不同时段各填筑项目的用料情况及供料源的供料关系建立土石方动态调配模型。

### 2.1 目标函数

以施工全过程土石方总调配费用最小为目标函数,具体公式如下:

$$M = \min \left\{ \sum_{i=1}^k \left[ \sum_{j=1}^{n_W} \sum_{t=1}^{n_T} C_{W_i T_j}^{(t)} X_{W_i T_j}^{(t)} + \sum_{m=1}^{n_Z} \sum_{t=1}^{n_T} C_{W_i Z_m}^{(t)} X_{W_i Z_m}^{(t)} + \sum_{j=1}^{n_Z} \sum_{t=1}^{n_T} C_{Z_m T_j}^{(t)} X_{Z_m T_j}^{(t)} + \sum_{l=1}^{n_Q} \sum_{t=1}^{n_T} C_{W_i Q_l}^{(t)} X_{W_i Q_l}^{(t)} \right] \right\} \quad (1)$$

式中:  $M$  为目标函数,即总调配费用;  $C_{W_i T_j}^{(t)}$  为在  $t$  时段内,开挖项目

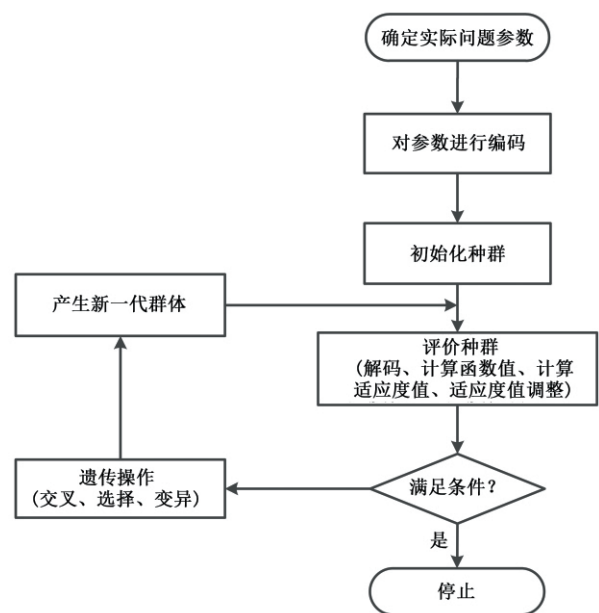


图1 遗传算法过程图

Fig.1 Genetic algorithm process chart

目  $W_i$  到填筑项目  $T_j$  的调配单价;  $C_{W_i Z_m}^{(t)}$  为在  $t$  时段内,开挖项目  $W_i$  到中转场  $Z_m$  的调配单价;  $C_{Z_m T_j}^{(t)}$  为在  $t$  时段内,中转场  $Z_m$  到填筑项目  $T_j$  的调配单价;  $C_{W_i Q_l}^{(t)}$  为在  $t$  时段内,开挖项目  $W_i$  到弃渣场  $Q_l$  的调配单价;  $X_{W_i T_j}^{(t)}$  为在  $t$  时段内,开挖项目  $W_i$  到填筑项目  $T_j$  的运输方量;  $X_{W_i Z_m}^{(t)}$  为在  $t$  时段内,开挖项目  $W_i$  到中转场  $Z_m$  的运输方量;  $X_{Z_m T_j}^{(t)}$  为在  $t$  时段内,中转场  $Z_m$  到填筑项目  $T_j$  的运输方量;  $X_{W_i Q_l}^{(t)}$  为在  $t$  时段内,开挖项目  $W_i$  到弃渣场  $Q_l$  的运输方量;  $W_i$  为开挖项目编号、 $T_j$  为填筑项目编号、 $Z_m$  为中转场编号、 $Q_l$  为弃渣场编号、 $t$  为施工时段。

### 2.2 约束条件

结合工程特点和实际情况,建立如下约束条件:

#### (1) 受料源约束

$$\sum_{j=1}^{n_W} X_{W_i T_j}^{(t)} + \sum_{m=1}^{n_Z} X_{W_i Z_m}^{(t)} = S_{T_j}^{(t)} \quad (2)$$

式中:  $S_{T_j}^{(t)}$  为  $t$  时段内填筑项目的填筑总量,一般用实方表示。

#### (2) 供料源约束

$$\sum_{j=1}^{n_T} X_{W_i T_j}^{(t)} + \sum_{m=1}^{n_Z} X_{W_i Z_m}^{(t)} + \sum_{l=1}^{n_Q} X_{W_i Q_l}^{(t)} = S_{W_i}^{(t)} \quad (3)$$

式中:  $S_{W_i}^{(t)}$  为  $t$  时段内开挖项目的开挖总量,一般用自然方表示。

#### (3) 中转场容量约束

$$S_{Z_m}^{(t)} + \sum_{i=1}^{n_W} X_{W_i Z_m}^{(t)} - \sum_{j=1}^{n_T} X_{Z_m T_j}^{(t)} \leq V_{Z_m} \quad (4)$$

式中:  $S_{Z_m}^{(t)}$  为  $t$  时段内中转场的土石料初始堆存量;  $V_{Z_m}$  中转场最大存储量。

#### (4) 弃渣场容量约束

$$\sum_{i=1}^{n_W} \sum_{l=1}^k X_{W_i Q_l}^{(t)} \leq V_{Q_l} \quad (5)$$

式中:  $V_{Q_l}$  弃渣场最大存储量。

#### (5) 中转场平衡约束

$$S_{Z_m}^{(t+1)} = S_{Z_m}^{(t)} + \sum_{i=1}^{n_W} X_{W_i Z_m}^{(t)} - \sum_{j=1}^{n_T} X_{Z_m T_j}^{(t)} \tag{6}$$

式中:  $S_{Z_m}^{(t+1)}$  为  $t+1$  时段内中转场的土石料初始堆存量。

- (6) 调配结束中转场堆存量的零约束  
在土石方调配结束时, 中转场的土石料堆存量应为零。

$$S_{Z_m}^{(t)} + \sum_{i=1}^{n_W} X_{W_i Z_m}^{(t)} - \sum_{j=1}^{n_T} X_{Z_m T_j}^{(t)} = 0 \tag{7}$$

- (7) 供料线路约束

供料线路约束包括运输路径约束和道路运输强度约束。路径约束用二维匹配矩阵表示, 行表示受料源, 列表示供料源, 如果供料源与受料源之间存在物料调运关系, 两地间运距取实际距离, 否则取-1, 供料线路反映了各供料源与受料源之间的匹配关系。道路运输强度约束为每条施工道路的设计最大运输强度, 任何阶段在道路上的最大运输强度不允许超过设计最大运输强度。

$$Q_{\max} \leq Q_S \tag{8}$$

式中:  $Q_{\max}$  为道路的最大运输强度;  $Q_S$  为道路的设计最大运输强度。

- (8) 非负约束  
所有变量的值为非负数。

2.3 程序的实现

土石方调配系统计算机软件基于 Microsoft Visual Studio C# 平台开发。土石方调配基本流程如图 2。

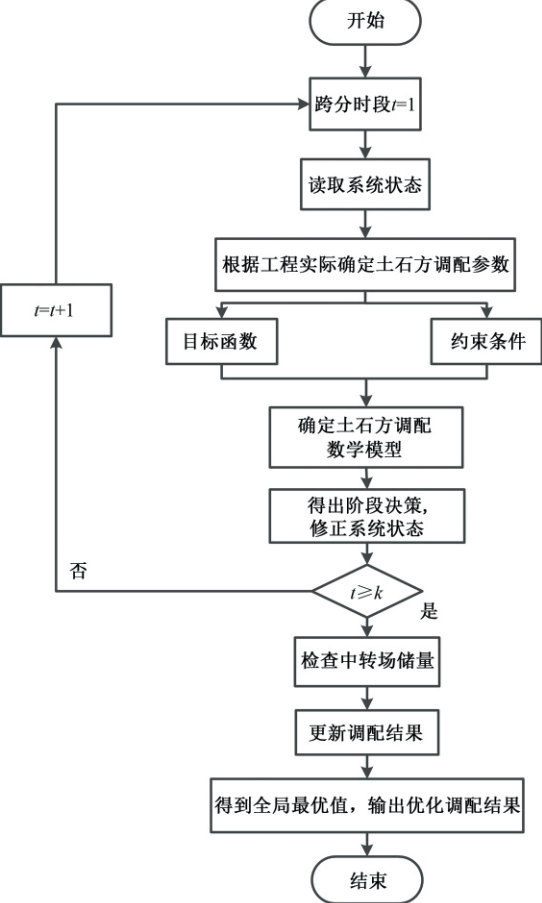


图2 土石方调配流程图  
Fig.2 Earthwork allocation flow chart

3 工程实例

3.1 工程概况

河南五岳抽水蓄能电站(简称五岳蓄能电站)工程位于河南省信阳市光山县殷棚乡,本工程是一座综合效用的大(二)型水利工程,主要建筑物为2级。电站装机容量100万kW(4×25万kW),设计年发电量8.57亿kW·h,年抽水电量11.43亿kW·h。枢纽工程主要由上水库、下水库、输水发电系统及地面开关站等4部分组成。上、下水库大坝均为混凝土面板堆石坝,最大坝高分别为128.20和28.8m。上水库枢纽工程明挖包括上水库主副坝坝基开挖、库岸开挖、基础处理开挖及上水库进/出水口开挖等。上水库开挖区地层岩性为燕山晚期中粒二长花岗岩,岩石致密坚硬,中等风化花岗岩的单轴饱和抗压强度为61.6~75.1MPa。岩石强度较高,工程开挖石料中的中等风化~新鲜岩体可满足堆石料的质量技术要求。强风化中下部可作为次堆石区上部用料。本工程地下洞室及上水库库岸开挖料质量及数量均满足砂石骨料加工需求,若采用地下洞室及上水库库岸开挖料作为砂石骨料料源,可充分利用工程开挖料,减少弃渣及征占地,降低工程造价。

上水库大坝填筑分为堆石区、块石护坡、垫层料、过渡料和碎石铺盖填筑。大坝填筑土石料均在当地开采,根据调查及经济技术比较和料源选择,本工程大坝填筑料、混凝土骨料及垫层料料源均采用工程开挖利用料。根据工程施工进度的安排,坝体填筑分2期进行,大坝开挖进度、填筑进度、匹配矩阵、中转场弃渣场特性如表1~4所示。

表1 大坝开挖进度 万 m³

Tab.1 Dam excavation progress

编号	供料源	一期	二期	总计划
W <sub>1</sub>	上水库副坝	26.70	0	26.70
W <sub>2</sub>	上水库库岸	469.71	248.57	718.28
W <sub>3</sub>	上水库进出水口	0	28.01	28.01
W <sub>4</sub>	上库闸门井、引水上平洞	2.31	0	2.31
W <sub>5</sub>	其他洞室	8.31	0	8.31

注: 以上数据为自然方。

表2 大坝填筑进度 万 m³

Tab.2 Dam filling progress

时段	堆石区等	过渡料	垫层区	碎石铺盖
一期	411.62	10.89	9.63	0
二期	241.62	30.81	17.28	6.32
合计	653.24	41.70	26.91	6.32

注: 以上数据为压实方。

3.2 土石方调配原则

本着好料好用、差料差用、物尽其用的原则进行土石方调配<sup>[11]</sup>,具体调配原则如下: ①在满足大坝开挖进度、填筑进度及料源质量的前提下,合理进行土石方调配; ②土石方就近开采运输,降低成本; ③弃渣调配遵循两个优先的原则: 利用填筑

表 3 匹配矩阵  
Tab.3 Matching matrix

供料源	堆石 区等	垫层料	过渡料	碎石 铺盖	上水库 转存场	砂石加 工毛料 堆存场	上水库 弃渣场
上水库副坝	525	-1	-1	-1	3 522	-1	2 029
上水库库岸	2 050	-1	2 050	-1	2 363	928	1 600
上水库 进出口	750	-1	750	-1	2 513	-1	1 753
上库闸门井、 引水上平洞	-1	-1	750	-1	2513	-1	1 753
其他洞室	-1	-1	-1	-1	-1	1 703	-1
上水库转存场	3 163	-1	3 163	-1	-1	-1	-1
砂石加工系统	-1	1 279	-1	1 279	-1	-1	-1

表 4 弃渣场、转存场规划特性  
Tab.4 Characteristics of spoil yard and transit field

项 目	堆存容量/万 m <sup>3</sup>	堆渣高程范围/m
上水库弃渣场	280.00	170.00~310.00
上水库转存场	130.00	130.00~200.00
砂石加工毛料堆存场	85.00	110.00~140.00

场地者优先 运输经济者优先; ④土石方调配尽量满足时间、空间上协调平衡,提高直接上坝率,减少转存规模和容量; ⑤调配时优先选择费用较低、满足施工进度、运距较短的调配方案<sup>[12]</sup>。

3.3 调配结果分析

通过土石方调配模型,在目标函数和各约束条件下,利用软件进行优化计算(软件的部分应用界面和迭代寻优过程如图 3~6 所示),即可确定最优的土石方调配方案。对于堆、砌石料,填筑方(压实方)换算成需要量(自然方)时考虑了 5%的损耗系数;混凝土骨料需要量考虑了 1.35 的加工损耗及 1.05 的运输、施工损耗,其他加工料需要量考虑了 1.25 的加工损耗及 1.05 的运输、施工损耗。天然填料与压实填料之间的换算系数,见表 5;上水库面板堆石坝土石方调配结果见表 6。从物料上坝情况来看,开挖料的直接上坝利用量为 545.3 万 m<sup>3</sup>,直接

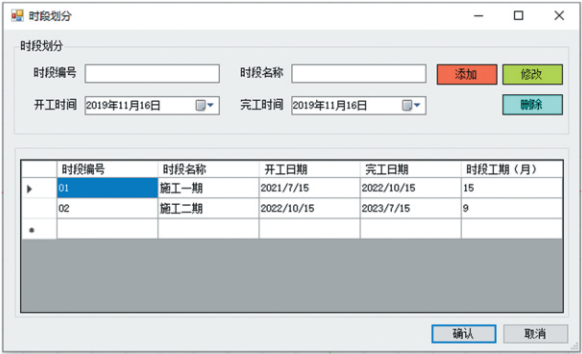


图 3 软件时段划分界面  
Fig.3 Software time division interface

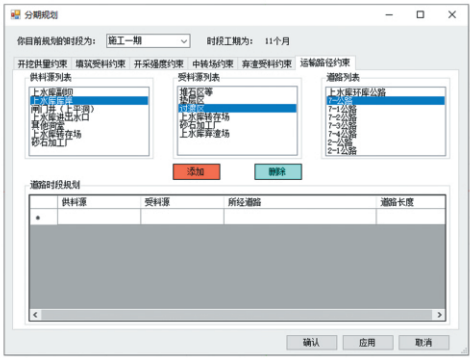


图 4 软件分期规划(道路约束)界面  
Fig.4 Software stage planning (road constraint) interface

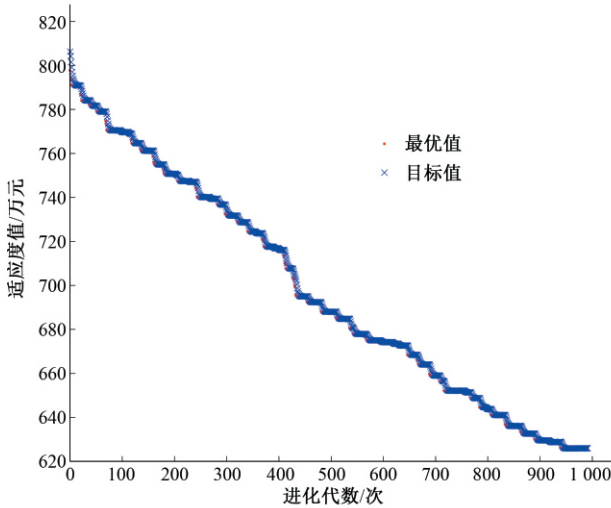


图 5 施工一期迭代寻优过程  
Fig.5 Stage one iterative optimization process

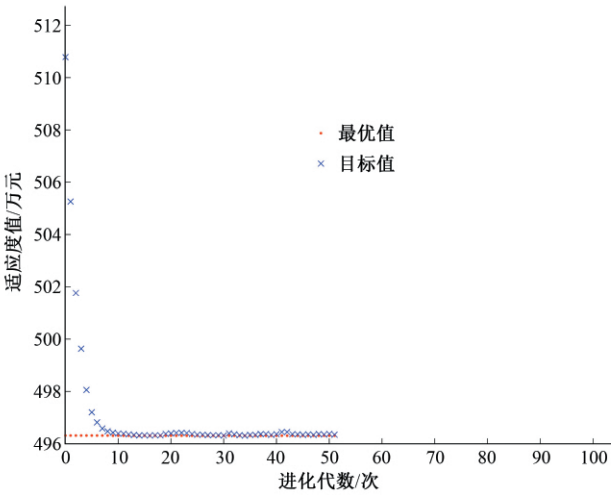


图 6 施工二期迭代寻优过程  
Fig.6 Stage two iterative optimization process

表 5 土石方转换系数

填筑区	堆石区等	垫层区	过渡料	碎石铺盖
自然方与实方转换系数	1.18	0.90	1.18	0.90

表 6 土石方调配成果表  
Tab.6 Results of earthwork allocation

时段	供料源	受料源						
		堆石区等	垫层料	过渡料	碎石铺盖	上水库 转存场	砂石加工 毛料堆存场	上水库 弃渣场
1 期	上水库副坝	26.39	0	0	0	0.26	0	0.05
	上水库库岸	304.81	0	8.80	0	30.32	30.19	95.58
	上水库进出水口	0	0	0	0	0	0	0
	上库闸门井、引水上平洞	1.28	0	0.22	0	0.01	0	0.80
	其他洞室	0	0	0	0	0	8.31	0
	上水库转存场	16.35	0	0.21	0	0	0	0
	砂石加工系统	0	10.70	0	0	0	0	0
2 期	上水库副坝	0	0	0	0	0	0	0
	上水库库岸	175.58	0	0	0	0	19.99	53.00
	上水库进出水口	28.01	0	0	0	0	0	0
	上库闸门井、引水上平洞	0	0	0	0	0	0	0
	其他洞室	0	0	0	0	0	0	0
	上水库转存场	1.17	0	26.11	0	0	0	0
	砂石加工系统	0	19.20	0	7.02	0	0	0

上坝率为 87% ,开挖料的中转上坝利用量为 625.85 万 m<sup>3</sup> ,中转上坝率为 7% ,开挖料的加工料上坝利用量为 36.92 万 m<sup>3</sup> ,加工料上坝率为 6% ,中转部位较少 ,过渡区、堆石区等直接上坝率较高 ,垫层区、碎石铺盖全部采用加工料直接上坝 ,这与其物料特性及其填筑方式有关。从结果可以看出 ,本次优化一定程度地提高了直接上坝率 ,有效减少了二次调运 ,降低了工程造价并提高了效率 ,同时满足施工进度、质量要求 ,方案对工程土方分配规划有指导意义。

4 结 论

( 1 ) 本文通过对土石方调配系统约束关系的系统分析 ,同时结合土石方转换、上坝损失率等因素 ,建立土石方调配模型 ,采用遗传算法对模型进行求解 ,并基于 Microsoft Visual Studio C #平台开发土石方调配系统计算机软件 ,确定土石方最优调配方案 ,不仅大大降低了工程造价而且提高了管理人员的工作效率 ,调配方案符合工程实际。

( 2 ) 本文在建立模型时没有考虑环境对施工的影响和模型的通用性 ,还需要进一步研究。 □

参考文献:

[1] 申明亮 ,刘少林 ,陈 伟. 水利水电工程施工仿真与土石方平衡 [M]. 北京: 中国水利水电出版社 ,2007.

[2] 曹生荣 ,王先甲 ,申明亮. 大型水电工程土石方调配系统分析及其优化调配模型[J]. 中国工程科学 ,2003 5( 7) : 72-76.

[3] 袁建丰. 线性规划在三峡右岸土石方调配中的应用研究[J]. 水力发电学报 ,2006 25( 1) : 99-103.

[4] 於永和 ,曹生荣. 堤防工程土石方调配优化模型与应用[J]. 武汉大学学报( 工学版) ,2006 39( 5) : 19-21.

[5] SHAHRAM M K , SEYED J M , ALI K , et al. Fuzzy Optimization Model for Earthwork Allocations with Imprecise Parameters[J]. Canadian Metallurgical Quarterly ,2007 46( 2) : 181-190.

[6] 焦艳彬 ,翟张宏 ,张文毅 ,等. 基于绿色施工的堆石坝土石方调配模型研究[J]. 中国农村水利水电 ,2015( 7) : 137-139.

[7] 邓朗妮 ,罗日生 ,郭 亮 ,等. 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.

[8] 赵 瑜 ,张建伟 ,张翌娜. GA 及惩罚函数思想在渡槽优化中的应用[J]. 灌溉排水学报 ,2005 24( 4) : 73-76.

[9] 赵 瑜 ,张建伟 ,张翌娜. 基于 MATLAB 7.0 的 GA 工具箱在渡槽优化设计中的应用[J]. 水利水电技术 ,2005 36( 10) : 93-95.

[10] 王小平. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社 ,2002.

[11] 熊新宇 ,赵 峰 ,苏利军 ,等. 某大型水电站工程土石方平衡与调配规划[J]. 人民长江 ,2011 42( 16) : 41-43.

[12] 黄建文 ,赖华庆. 面板堆石坝土石方动态调配研究[J]. 人民长江 ,2014 45( 4) : 48-51.