

研究报告

大型水电工程土石方调配系统分析及其 优化调配模型

曹生荣, 王先甲, 申明亮

(武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

[摘要] 在分析了众多大型水电工程建设中土石方调配平衡问题的基础上, 利用系统的观点分析了土石方调配系统的系统组成, 系统各要素之间的相互关系, 建立了系统的线性规划优化模型, 并在实践中检验模型计算结果, 表明该模型经济可行。

[关键词] 水电工程; 土石方; 调配; 系统分析; 线性规划

[中图分类号] TV511; F224.31 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)07-0072-05

1 引言

各类大型水电工程建设过程中普遍存在土石方调配问题, 特别是以当地材料为主要建材的土石坝、堆石坝等类型工程建设, 土石方调配问题更加突出。在某些水电工程的建设过程中, 土石方调配问题已成为整个工程施工中的关键环节, 直接关系到工程的进度、质量和投资, 所以, 土石方调配问题在整个工程的规划、设计、施工过程中处于相当重要的位置^[1]。如清江水布垭面板堆石坝, 坝高达233 m(该坝为同类坝型世界最高坝), 挖方总计约 $2\ 880 \times 10^4 \text{ m}^3$, 填方总计约 $1\ 800 \times 10^4 \text{ m}^3$, 料物调配系统占整个工程投资比重很大, 解决好该问题具有显著的经济、技术价值。

以往设计部门和施工部门在解决此类问题时, 因多是凭借经验作粗线条的规划和调配, 存在一些考虑不周而影响工程进度和投资的现象, 未达到优化调配的效果。一些部门对此问题所作的研究也只提出一些定性的模型, 未能从根本上解决问题。

就目前收集到的有关土石方调配研究文献显示, 要实现优化调配都存在一定的局限性。如文献[2]从施工技术和施工规划的角度, 定性强调在施工规划阶段从全局出发做好场地及开挖、填筑的规划工作; 文献[3]运用大系统理论建立土石方线性规划调配模型, 该模型未考虑土石方调配系统的

所有要素, 如弃渣问题; 文献[4]研究了间断性运输系统的工作能力与模糊保证率之间的关系, 建立优化模型; 文献[5]综合考虑道路工程中的道路坡度和土石方调运, 建立线性规划模型; 文献[6]结合工程工期, 建立道路工程土石方运输问题的线性规划模型。

笔者利用系统的观点和优化决策方法分析了土石方调配系统的系统组成、各要素之间的相互关系和系统目标, 从理论上解决了土石方调配问题, 实现了最优调配, 并建立了系统的线性规划优化模型, 编制计算程序, 解决了实际水电工程建设中的土石方调配问题^[7]。

2 土石方调配系统

2.1 概述

土石方调配系统是指在以当地材料为主要建筑材料的水电工程施工过程中, 有关土料、砂料、石料的开挖、填筑、转运、弃渣、开采等环节及其相互关系的总和。土石方调配问题是当地材料坝施工中关系全局的核心问题, 牵涉到施工装备的配置、道路系统的布置、施工场地的征用、施工进度协调等诸多方面, 直接影响工程建设进度、投资、质量三大目标的实现。

系统优化的目的在于通过开挖、填筑、转运、弃渣、开采等环节的综合处理, 使得开挖、填筑、

[收稿日期] 2002-11-19; **修回日期** 2003-03-13

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(69874029)和湖北省自然科学基金资助项目(2001ABB047)

[作者简介] 曹生荣(1976-), 男, 浙江金华市人, 武汉大学博士研究生

弃渣和土石料的开采、运输这一系统的总费用最低，并保证工程施工进度和质量，达到快速经济施工的目的。

2.2 系统组成

将土石方调配中的土料、砂料、石料的开挖、填筑、转运、弃渣、开采等环节看作一个整体组成系统，该系统称为土石方调配系统，系统包含其中的各要素及各要素之间存在的相互关系。系统组成要素有：开挖项目、填筑项目、中转场、弃渣场、料场、道路及挖填、运输机械等。各要素之间的相互关系主要是各要素时间和空间上的相互联系，如料物的物理匹配关系，相互的运距等。道路和挖填、运输机械在本文中主要是作为土石方调配给定的已知条件。

2.2.1 系统组成要素

1) 开挖项目。是指因工程建设需要而进行开挖的部位，如坝基、坝肩、电站厂房、导流工程等。

2) 填筑项目。是指工程建设中所有需要进行填筑的项目，如大坝、上下游围堰等。

3) 中转场。是指因开挖项目与填筑项目在时间上不一致，而用于临时存放能满足设计参数要求的开挖料备用场所。要求将不同物理性质的料物分开存放，所以中转场既是提供料物的场所又是容纳料物的场所。

4) 弃渣场。即开挖料弃料的场所，存放不能满足填筑项目要求的开挖料，或存放虽能满足要求，但因暂时无处需要填筑且无中转场存放而弃渣。

5) 料场。是指专门用于开采填筑料物的场所。在本文中，一个料场是指空间位置同一及料物物理性质相同的场所。

2.2.2 料物流向 料物流向是指为完成工程建设，料物在系统中不同要素之间的转移。土石方调配系统中的料物流向有五类：

1) 开挖料直接利用。从开挖部位到填筑部位：意指将开挖所得能被利用的料物，直接运输至填筑部位利用。

2) 开挖料中转。从开挖部位到中转场：意指暂时未被利用开挖所得的料物转运到中转场备用。

3) 开挖料弃渣。从开挖部位到弃渣场：意指将不能使用或无处中转的料物丢弃。

4) 中转料利用。从中转场到填筑部位：意指

将存放于中转场的料物运至填筑部位利用。

5) 料场开采。从料场到填筑部位：意指将料场开采的料物直接运至填筑部位。

料物流向如图1所示：

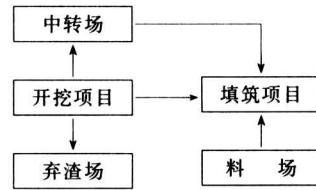


图1 料物流向图

Fig.1 Material flows

2.2.3 料物匹配关系 料物的匹配关系反映了料物从一处转移到另一处所需要费用的综合。匹配关系包含的因素较多，主要有以下几方面：

1) 料物在物理性质上的一致性，即料物从一处转移到另一处必须保证物理性质上的一致性，料物弃渣除外。

2) 不同部位之间的运距及单位数量的运输费用，与道路特征、使用的机械有关。

3) 料物的开采和存储费用，可分摊到单位数量料物上。

4) 如果不同位置料物的物理性质一致，并且存在可行的道路，则存在一匹配数据。若两者有一个不满足，从理论上讲匹配数据为无穷大。在模型中可以这样解决：当料物可转移时费用取一实际值，当不能转移时费用可取一足够大的值。（远大于前一类数据中的最大值）

料物之间的匹配关系综合反映了料物在各种料物流动中的费用。在模型中可以用转移单位料物的综合费用来表示。

3 土石方调配系统建模

3.1 系统模型符号注释

主要包括开挖项目、填筑项目、中转场、弃渣场、料场的数量和整个工程工期，开挖、填筑的工程量，中转场、弃渣场容量，料场储量，及系统五要素之间的匹配关系。

1) 开挖项目、填筑项目、中转场、弃渣场、料场的数量：

W_i ——开挖项目 ($i=1, 2, 3, \dots, n_w$)；

T_j ——填筑项目 ($j=1, 2, 3, \dots, n_T$)；

Z_k ——中转场 ($k=1, 2, 3, \dots, n_z$)；

Q_l ——弃渣场 ($l=1, 2, 3, \dots, n_Q$);

C_m ——料场 ($m=1, 2, 3, \dots, n_C$);

G_t ——工期 ($t=1, 2, 3, \dots, T$);

2) 开挖项目、填筑项目工程量:

$L_{W_i G_t}$ ——开挖项目工程量;

$L_{T_j G_t}$ ——填筑项目工程量;

3) 中转场、弃渣场容量, 料场储量:

L_{Z_k} ——中转场容量;

L_{Q_l} ——弃渣场容量;

L_{C_m} ——料场储量。

4) 匹配关系。料物匹配关系包括五类 (包含物理性质匹配关系、运距、开采/存储费用等内容):

$P_{W_i T_j}$ ——开挖项目到填筑项目;

$P_{W_i Z_k}$ ——开挖项目到中转场;

$P_{W_i Q_l}$ ——开挖项目到弃渣场;

$P_{Z_k T_j}$ ——中转场到填筑项目;

$P_{C_m T_j}$ ——料场到填筑项目。

3.2 未知变量

未知变量是指系统各要素之间的料物调配 (运输) 量, 相应地也有五类:

$D_{W_i T_j G_t}$ ——开挖项目到填筑项目;

$D_{W_i Z_k G_t}$ ——开挖项目到中转场;

$D_{W_i Q_l G_t}$ ——开挖项目到弃渣场;

$D_{Z_k T_j G_t}$ ——中转场到填筑项目;

$D_{C_m T_j G_t}$ ——料场到填筑项目。

3.3 目标函数

系统的目标为土石方调配系统的总费用最低, 因此目标函数为所有调配活动费用的总和, 相应也有五部分组成。设调配系统总费用函数为 F , 则目标函数如下:

$$F = \min \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_W} \sum_{j=1}^{n_T} (P_{W_i T_j} \cdot D_{W_i T_j G_t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_W} \sum_{k=1}^{n_Z} (P_{W_i Z_k} \cdot D_{W_i Z_k G_t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_W} \sum_{l=1}^{n_Q} (P_{W_i Q_l} \cdot D_{W_i Q_l G_t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{n_Z} \sum_{j=1}^{n_T} (P_{Z_k T_j} \cdot D_{Z_k T_j G_t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{n_C} \sum_{j=1}^{n_T} (P_{C_m T_j} \cdot D_{C_m T_j G_t}) \right]$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{n_C} \sum_{j=1}^{n_T} (P_{C_m T_j} \cdot D_{C_m T_j G_t}) \Big]$$

3.4 约束条件

约束条件包括有各开挖项目、填筑项目工程量, 料场开采量限制, 中转场、弃渣场容量限制, 非负约束。具体如下:

1) 开挖量相等。指在某个时段某个开挖项目的开挖量之和等于在该时段运往所有其他可能场所的运量之和:

$$\sum_{j=1}^{n_T} D_{W_i T_j G_t} + \sum_{k=1}^{n_Z} D_{W_i Z_k G_t} + \sum_{l=1}^{n_Q} D_{W_i Q_l G_t} = L_{W_i G_t} \circ$$

2) 填筑量相等。指在某个时段某个填筑项目的填筑量之和等于在该时段所有可能运到该填筑项目的运量之和:

$$\sum_{i=1}^{n_W} D_{W_i T_j G_t} + \sum_{k=1}^{n_Z} D_{Z_k T_j G_t} + \sum_{m=1}^{n_C} D_{C_m T_j G_t} = L_{T_j G_t} \circ$$

3) 料场开采量限制: $\sum_{j=1}^{n_T} \sum_{t=1}^T D_{C_m T_j G_t} \leq L_{C_m} \circ$

4) 弃渣场容量限制: $\sum_{i=1}^{n_W} \sum_{t=1}^T D_{W_i Q_l G_t} \leq L_{Q_l} \circ$

5) 中转场容量限制:

$$0 \leq \sum_{i=1}^{n_W} \sum_{t=1}^T D_{W_i Z_k G_t} - \sum_{j=1}^{n_T} \sum_{t=1}^T D_{Z_k T_j G_t} \leq L_{Z_k} \circ$$

6) 非负约束:

$$D_{W_i T_j G_t} \geq 0; D_{W_i Z_k G_t} \geq 0; D_{W_i Q_l G_t} \geq 0; D_{Z_k T_j G_t} \geq 0;$$

$$D_{C_m T_j G_t} \geq 0 \circ$$

4 模型求解与应用

从模型的目标函数和约束条件中可以看出, 该模型为一线性规划模型。计算复杂程度取决于实际问题的规模, 主要与时间、开挖项目个数、填筑项目个数有关。当问题不是很复杂时, 可以用单纯形法求解; 当问题规模较大, 维数较高时, 可以考虑采用 Wolf 算法或内点算法求解。

笔者已经根据本模型编制了计算程序^[7], 并应用于清江水布垭工程的土石方调配平衡中。计算结果与设计单位的数据相比, 各类指标都有较大幅度的提高, 取得了满意的技术经济效果。

5 计算实例

某水电工程有一远离主体工程的局部区域, 需对其做土石方调配工作。该区域工期为 6 个月, 开挖项目 4 个, 填筑项目 4 个, 料场 3 个, 中转场 3

个，弃渣场2个。该区域规划阶段开挖项目、填筑项目的挖填工程量，料场的储量、中转场的容量、弃渣场的容量，以及系统各要素之间的匹配关系分别如表1、表2、表3所示。

表3中的数值“9999”表示料物来源与料物去向之间不匹配（9999远大于表中居次值的数字），因为两者在物理性质上不一致，或两者之间不存在通行的施工道路。其他数值表示转移单位料物所需要的费用。

据该局部工程数据，依据本文所建立的模型，运用单纯形法进行求解。求解结果如表4所示。

表1 某水电工程施工进度计划

Table 1 Work quantity of each excavation item and filling item $10^4 m^3$

项目名称	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月
开挖项目1	1.2	1.5	1.5	1.2	0	0
开挖项目2	1	1.3	1.3	1	0.9	0
开挖项目3	0	1.2	1.5	1.5	1.5	0
开挖项目4	0	0	1	1.1	0	0
填筑项目1	0	0	1	1.2	1.2	1
填筑项目2	0	1.2	1.2	1.5	1.2	0
填筑项目3	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0
填筑项目4	0.8	1	1.2	1	0.6	0

表2 料场的储量、中转场的容量、弃渣场的容量

Table 2 Storage of material station, capability of storage station and spoiling station $10^4 m^3$

场地名称	料场1	料场2	料场3	中转场1	中转场2	中转场3	弃渣场1	弃渣场2
容量/储量	10	5	8	6	5	4	10	15

表3 系统各要素之间的匹配关系

Table 3 Matching relationships among system items $元/m^3$

料物来源	填筑项目1	填筑项目2	填筑项目3	填筑项目4	中转场1	中转场2	中转场3	弃渣场1	弃渣场2
开挖项目1	15	9999	10	9999	20	9999	9999	12	10.5
开挖项目2	9999	5.8	9999	9.7	9999	2.3	4.6	3.5	2.8
开挖项目3	13	9999	5	9999	14	9999	9999	11	3.6
开挖项目4	9999	7.9	9999	8.2	9999	3.5	5.5	2	9.4
中转场1	20	9999	14	9999	9999	9999	9999	9999	9999
中转场2	9999	2.3	9999	3.5	9999	9999	9999	9999	9999
中转场3	9999	4.6	9999	5.5	9999	9999	9999	9999	9999
料场1	10.6	9999	21.3	9999	9999	9999	9999	9999	9999
料场2	9999	15.8	9999	17.6	9999	9999	9999	9999	9999
料场3	13.6	9999	30.5	9999	9999	9999	9999	9999	9999

表4列出了优化调配的详细结果，记录包含每一次料物转移的时间、料物来源、料物去向、料物数量等信息。每一次料物转移的所有要素都已经确定，有关单位就可以根据调配结果施工，达到了优化的目的。即计算结果在理论上保证了最优，在工程施工实际中也是可行的。

此外，根据计算结果和实际需要可以得到一系列统计参数，并可为规划、设计、施工提供参考意见。在本例中，所有填筑项目所需要的料物有 $13.4 \times 10^4 m^3$ 来自开挖项目， $2.1 \times 10^4 m^3$ 来自料场2， $1.4 \times 10^4 m^3$ 来自中转场，其比例分别为开挖料79.3%，料场料12.4%，中转料8.3%。开挖料共有 $18.7 \times 10^4 m^3$ ，有 $13.4 \times 10^4 m^3$ （71.6%）直接用于填筑。从调配结果可以看出，开挖料没有弃渣，说明中转场的容量足够大（也许已经过

大）；料场料（共有 $23 \times 10^4 m^3$ ）也只利用了 $2.1 \times 10^4 m^3$ ，占料场料总储量的9.1%。因为料场、中转场的勘探和管理都需要费用，如果施工规划未完全确定，可考虑减小中转场的容量和料场的储量。方案调整后，可再次计算，比较两者的优劣。

6 结论

1) 本模型基于对土石方调配系统的分析，阐述了问题的实质，建立了优化调配模型，从理论上保证了调配结果的最优。

2) 实用性取决于料物匹配关系中系数的精确程度。只要系数取得合理，调配结果在工程施工实际中是可行的。与以前的调配方案比较，本模型的结果更经济、合理，可以降低系统费用。

3) 本文对调配系统的分析和文中建立的模型

表4 计算结果详表

Table 4 Detailed results of earth-rock allocation

10⁴ m³

时间/月次	来源	去向	数量	时间/月次	来源	去向	数量
1	开挖项目 1	填筑项目 3	0.5	3	料场 2	填筑项目 4	0.1
1	开挖项目 2	填筑项目 4	0.8	3	开挖项目 3	中转场 1	1.4
1	开挖项目 1	中转场 1	0.7	4	开挖项目 1	填筑项目 1	1.2
1	开挖项目 2	中转场 2	0.2	4	开挖项目 2	填筑项目 2	1
2	开挖项目 2	填筑项目 2	1.2	4	开挖项目 4	填筑项目 2	0.5
2	开挖项目 1	填筑项目 3	0.6	4	开挖项目 3	填筑项目 3	0.6
2	开挖项目 2	填筑项目 4	0.1	4	开挖项目 4	填筑项目 4	0.6
2	料场 2	填筑项目 4	0.7	4	料场 2	填筑项目 4	0.4
2	中转场 2	填筑项目 4	0.2	4	开挖项目 3	中转场 1	0.9
2	开挖项目 1	中转场 1	0.9	5	开挖项目 3	填筑项目 1	1.2
2	开挖项目 3	中转场 1	1.2	5	开挖项目 2	填筑项目 2	0.9
3	开挖项目 1	填筑项目 1	1	5	料场 2	填筑项目 2	0.3
3	开挖项目 2	填筑项目 2	1.2	5	开挖项目 3	填筑项目 3	0.3
3	开挖项目 1	填筑项目 3	0.5	5	中转场 1	填筑项目 3	0.2
3	开挖项目 3	填筑项目 3	0.1	5	料场 2	填筑项目 4	0.6
3	开挖项目 2	填筑项目 4	0.1	6	中转场 1	填筑项目 1	1
3	开挖项目 4	填筑项目 4	1				

对其他类型工程中的类似问题同样有效,如场地平整中的土石方调配、道路工程中的土石方调配、机场建设的土石方调配等。

参考文献

- [1] 周克己. 水利水电工程施工组织与管理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998
- [2] 朱纯祥, 黄土成, 杜成基, 等. 莲花水电站筑坝堆石料的获得及平衡 [J]. 水力发电, 1997, (5): 36~39
- [3] 王晓梅, 梁 轶. 大系统理论在面板堆石坝工程土石方平衡规划中的应用 [J]. 水利水电快报, 2001, (9): 14~17
- [4] 宋春节. 建筑工程施工中的运输资源最佳配置研究 [J]. 系统工程理论与实践, 1999, (3): 132~136
- [5] Moreb, Ahmad A. Linear programming model for finding optimal roadway grades that minimize earthwork cost [J]. European Journal of Operational Research, Aug 23, 1996: 148~154
- [6] Jayawardane A K W, Harris F C. Further development of integer programming in earthwork optimization [J]. Journal of Construction Engineering and Management, Mar 1, 1990: 18~34
- [7] 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

Systems Analysis and Constitution of Linear Programming Model for the Earth-rock Allocation System of Massive Water Resources and Hydropower Projects

Cao Shengrong, Wang Xianjia, Shen Mingliang

(School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

[Abstract] On the basis of the analysis work of many massive water resources and hydropower projects, and by using systemic view, the thesis analyses the composition of the system and the mutual relations among the elements. According to it, Linear Programming Model is constituted. The calculating result by the model is verified in real work. It's proved economic and feasible.

[Key words] water resources and hydropower projects; earth-rock; allocation; systems analysis; linear programming