

线性规划在三峡右岸土石方调配中的应用研究

袁建丰

(中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 本文通过分析三峡右岸多个土石方填筑和开挖工程之间的料源平衡和进度协调的关系, 采用管理科学中的运筹学方法-线性规划法, 将土石方调配问题转化成数学模型, 细致考虑施工中的实际因素, 运用计算机对数学模型进行求解, 通过土石方平衡图将计算结果表现出来。工程的实际情况验证了这种分析方法的合理性与优越性。

关键词: 管理科学; 土石方调配优化; 线性规划; 三峡工程; 数学模型

中图分类号: TV511 **文献标识码:** A

The application research on linear programming of the distribution of earth & rock works on the right bank of TGP

YUAN Jianfeng

(China Three Gorges Project Corporation , Yichang , Hubei 443002)

Abstract : By analyzing the character and relationship between excavating and filling projects , the linear programming is applied as the researching method and the actual problems are transformed to the mathematical model in this paper . Taking into account the actual factors , the mathematical result is shown by the distribution figure . The rationality and superiority of this researching method is proved by the actual result of the project .

Key words : management science ; earth & rock distribution optimization ; linear programming ; Three Gorges Project (TGP) ; mathematical model

土石方调配是土石方工程施工中的一个核心问题。对于多个开挖和填筑项目需同时进行的工程来说, 需要进行多目标的优化管理, 以降低工程造价和保证工程顺利实施。

长江三峡水利枢纽是治理和开发长江的一项关键工程, 坝址位于湖北宜昌三斗坪。大坝为混凝土重力坝, 正常蓄水位 175m。右岸土石方填筑工程(三期) 主要包括: 茅坪溪防护大坝 II 标工程, 三期土石围堰工程。右岸土石方开挖工程(三期) 主要包括: 右岸 24#~26# 厂坝基础开挖, 右岸三期基坑开挖和偏岩子开挖工程。

右岸的开挖与填筑是一个动态过程, 它不仅要求数量的匹配, 也是强度和进度的匹配。右岸茅坪防护坝工程是三峡工程中 I 等 I 级永久建筑物, 右岸三期土石围堰也是重要的临时建筑物, 填筑工程量大(总量 766.01 万 m³), 填筑强度高(月填筑强度高峰 320 万 m³/月)。通过对右岸土石方的调度管理, 可以避免土石料的多次倒运, 不仅关系到经济上的巨大效益, 而且对于加快施工进度也有着重要的意义。通过土石方的总体规划, 可以尽量减少对良田、植被和有效生存空间的破坏, 对保护环境有积极作用。

1 右岸三期土石方调度问题及优化分析方法的确定

为确保总体工期和减少工程成本, 如何确定满足填筑工程质量和数量要求的料源? 如何使土石方调配达到最优? 结合三峡右岸土石方工程的特点, 以上问题宜采用运筹学中的线性规划方法予以解决。

运筹学是现代管理的一种重要工具, 它主要解决最优生产计划、最优分配的问题。线性规划法是运筹学的重要组成部分, 它的核心是正确建立和使用模型。数学模型一般由决策变量、约束或限制条件或目标函数组成。

分析思路是:第一步,在充分考虑工程进度、填筑要求和挖填工程相互协调要求的情况下,收集、分析、整理各种数据,提出一个能够满足右岸土石方工程目标的初步供料方案;第二步,按成本最小化为目标,采用线性规划的分析方法对该问题进行建模分析;第三步,输出报告,绘制三峡右岸土石方用料平衡图。分析方法流程图如图 1 所示。

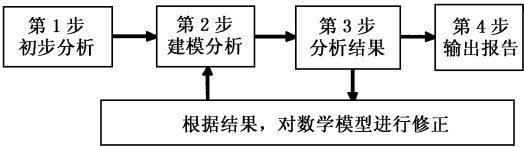


图 1 分析方法流程图
Fig. 1 Flow chart of analytical method

2 数据采集与分析

2.1 工程量

土石方设计填筑量:茅坪溪防护坝Ⅱ标的填筑量为 394.01 万 m³,其中石渣料 254.16 万 m³,石渣混合料 139.85 万 m³;右岸三期土石围堰的填筑量为 372 万 m³,其中石渣料 109/97(上游/下游) 万 m³,石渣混合料 75/91(上游/下游) 万 m³;开挖料场储量,右岸 24#~26#厂坝基础开挖、三峡右岸三期基坑、偏岩子料场开挖三个料源的储量分别是 170 万 m³、230 万 m³ 和 260 万 m³。

2.2 工程进度

茅坪Ⅱ标工程计划 2001 年 5 月开工,2004 年 4 月完工;右岸三期土石方围堰计划 2002 年 11 月上旬进占,12 月上旬截流合拢,2003 年 1 月上旬三期基坑闭气,1 月底基坑抽干,总计 2 个半月;24#~26#厂坝基础开挖,计划 2001 年 5 月中旬开始,2002 年 6 月底结束;偏岩子料场(位于库区内,是补充料场)开采计划从 2001 年 5 月开始,2002 年 10 月底结束;三期基坑开挖计划从 2003 年 1 月底基坑抽干开始,2003 年 9 月份结束,总计 8 个月。

2.3 土石方平衡初步分析

(1) 右岸土石方工程总填筑量为 766.01 万 m³(坝上方)。其中,一定要开挖的项目(24#~26#厂坝基础提前开挖工程和三峡右岸三期基坑开挖)的开挖量估计为 400 万 m³(自然方),料场已有堆料为 195 万 m³(松散方),这两者加起来为 595 万 m³,缺口大约为 164.27 万 m³。因此,需要开采偏岩子料场来满足填料缺口。

(2) 由于偏岩子料场距离右岸三期土石围堰较近,采料要进行爆破作业,爆破将对土石围堰的高强度填筑造成影响,因此偏岩子料场开挖作业要求在三期截流正式开始(2002 年 11 月)之前结束。

(3) 茅坪溪防护坝为Ⅰ等Ⅰ级永久建筑物,对填筑料的质量要求高,已有的堆料不能满足要求,需要从新料场开采。根据地勘报告,右岸三期基坑不能提供石渣混合料。因此茅坪坝在截流后所需的石渣混合料 44.3 万 m³需要提前开挖出来,另辟暂存料场存料。

因此,2002 年 11 月份以前,茅坪坝填筑所需料和三期土石围堰备料由 24#~26#厂坝基础开挖料、偏岩子料场和料场现有堆存料供应,2002 年 11 月份以后,由于 24#~26#厂坝基础和偏岩子料场开挖工作已经结束,茅坪坝填筑所需料由堆存料和三期基坑开挖料来供应。据此可以初步绘制右岸土石方工程平衡图,参见图 2。

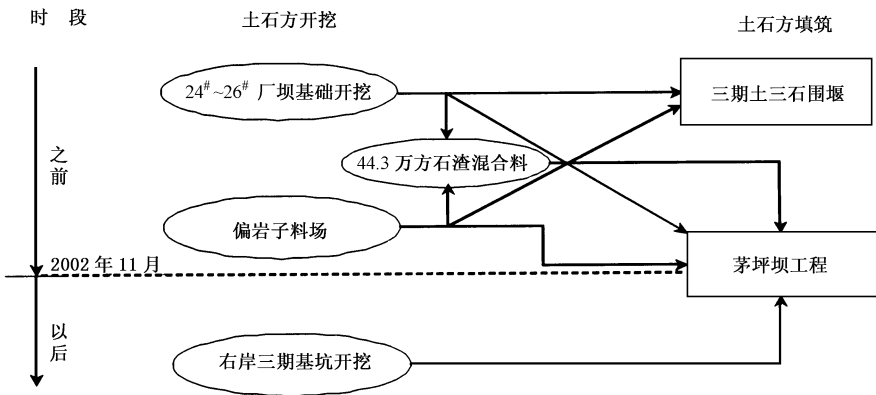


图 2 右岸土石方工程平衡图(初步方案)
Fig. 2 Distribution of earth & rock works on the right bank of TGP(prediminary scheme)

3 数学模型与计算结果

3.1 模型总体描述

三峡土石方平衡问题是典型的线性规划中的物资调运问题,这类问题可以简单描述为:将物资从 m 个仓库(产地)运到 n 个目的点,其中第 i 个源点储量为 $a_i(i=1,2,\cdots,m)$,第 j 个目的地需求量为 $b_j(j=1,2,\cdots,n)$,从 i 点运到 j 点的运输成本和运输量分别为 c_{ij} 和 x_{ij} 。模型可写为:

目标函数:
$$\min F(x_{ij}) = \min_{s.t.} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

约束条件:1) 运量不能超过储量
$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i \quad (i=1,\cdots,m) \tag{2}$$

2) 运量要求等于需求量
$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad (j=1,\cdots,n) \tag{3}$$

3)
$$x_{ij} \geq 0 \quad (i=1,\cdots,m; j=1,\cdots,n) \tag{4}$$

3.2 具体建模和运算

3.2.1 决策变量

该模型的决策变量是每一个料场(Source)向每一个堆场(Destination)分配的数量。料场三个:分别是偏岩子料场、24#~26#厂坝基础开挖和三期基坑开挖。堆场三个:分别是茅坪坝、三期上游围堰、三期下游围堰。料的种类决定成本费用,需要对不同的料类进行不同的分析。考虑到料场的开挖料主要是石渣料和石混料,所以把这两种料的分配数量作为决策变量记作 X_{ijn} ,其中: i 代表料场, $i=1,2,3$; j 代表堆场, $j=1,2,3$; n 代表料的种类, $n=1,2$ 。 X_{ijn} 的分类见表 1。

3.2.2 目标函数

通过该数学模型的计算,得到能使成本最小化的分配方案。该目标函数可表示为:
$$\min F = \min \sum_{ijn} c_{ijn} X_{ijn}$$
(其中 i,j,n 的含义同上)。

c_{ijn} 是与决策变量相对应的综合单价,它是通过对各料场采、翻、挖,并运到不同堆场的实际条件逐一分析计算得出来的(见表 2)。需要指出,对于施工时间较长的土石方工程,综合单价会由于物价等因素的影响发生变化,应作阶段的动态平衡分析。右岸土石方工程(三期)工程量大,但施工期短,因此综合单价按不变考虑。三期基坑开挖料不可能向三期土石围堰备料,而且三期基坑不产石渣混合料,为使这些决策变量为零,故设定变量系数 $c_{321}, c_{331}, c_{312}, c_{322}, c_{332} = 999999$ (元/方)(参见表 2)。

3.2.3 约束条件

1) 料场的开采量要满足储量的限制,可以设定:

$$X_{111} + X_{121} + X_{131} + X_{112} + X_{122} + X_{132} \leq 260$$
$$X_{211} + X_{221} + X_{231} + X_{212} + X_{222} + X_{232} \leq 170$$
$$X_{311} + X_{321} + X_{331} + X_{312} + X_{322} + X_{332} \leq 230$$

2) 堆场的备料量要满足填筑的要求。减掉上、下游料场已堆存料(三峡右岸一期和二期工程建设中,在右岸上、下游料场已经堆存了部分料源。根据收方测量结果,上游料场已储备石渣料 81 万 m^3 、石渣混合料 45 万 m^3 ,下游料场已储备石渣料 38 万 m^3 、石渣混合料 31 万 m^3)。填筑工程对三个开挖料场的需求见表 3。

根据表 1 和表 3,可以设定:

表 1 数学模型决策变量表

Table 1 Decision variables of mathematical model

石渣料/石渣混合料				
料 场	堆 场	茅坪坝	三期上游围堰	三期下游围堰
偏岩子料场		X_{111}/X_{112}	X_{121}/X_{122}	X_{131}/X_{132}
24#~26#厂坝基础开挖		X_{211}/X_{212}	X_{221}/X_{222}	X_{231}/X_{232}
三期基坑开挖		X_{311}/X_{312}	X_{321}/X_{322}	X_{331}/X_{332}

表 2 运费综合单价表

Table 2 Unit price of transport expenses

石渣料/石渣混合料					元/ m^3
料 场	堆 场	茅坪坝	三期上游围堰	三期下游围堰	
偏岩子料场		26/19	22.4/16.4	24.7/19.5	
24#~26#厂坝基础开挖		25.4/18.5	24/17.5	21.1/15.4	
三期基坑开挖		28.5/999999	999999/999999	999999/999999	

表 3 填筑工程所需数量表

Table 3 Required embankment volume

					$10^4 m^3$
所 需 料	堆 场	茅坪坝	三期上游围堰	三期下游围堰	
石渣料		254.16	28	59	
石渣混合料		139.85	30	60	

$$X_{111}+X_{211}+X_{311}=254.16;X_{112}+X_{212}=139.85$$

考虑 44.3 万 m³ 石渣混合料提前开挖, 设定 $X_{312}=0$;

$$X_{121}+X_{221}+X_{321}=28; \quad X_{122}+X_{222}+X_{322}=30;$$
$$X_{131}+X_{231}+X_{331}=59; \quad X_{132}+X_{232}+X_{332}=60$$

3.3 计算结果输出

模型求解借助于计算机, 软件为 Microsoft 办公软件的 Excel , 使用其中的命令“ 规划求解” 。模型运算部分结果见表 4(其中单价同表 2, 故未列出) , 敏感性报告见表 5。

表 4 线性规划计算模型表
Table 4 Linear programming model

1	决策变量:料场到堆场的数量(单位:万 m ³)						
料 场 \ 堆 场	石渣料			石渣混合料			
	茅坪	上游围堰	下游围堰	茅坪	上游围堰	下游围堰	
	偏岩子料场	62.15	28.00	0.00	139.85	30.00	0.00
	24#~26#厂坝基础开挖	51.00	0.00	59.00	0.00	0.00	60.00
	三期基坑开挖	141.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	约束条件						
1. 储量限制要求	料场		开挖量		储量		
	偏岩子料场		260		260		
	24#~26#厂坝基础开挖		170		170		
	三期基坑开挖		141.01		230		
2. 填筑要求	料类		填筑量		要求		
	茅坪石渣料		254.16		254.16		
	茅坪石渣混合料		139.85		139.85		
	上游石渣料		28		28		
	上游石渣混合料		30		30		
	下游石渣料		59		59		
	下游石渣混合料		60		60		
3	目标函数						
最低运费=SUMPRODUCT (C5:E7,C11:E13) +SUMPRODUCT (F5:H7,F11:13)							
总运费=12 875(万元)							

3.4 运算报告分析

敏感性报告提供关于求解结果对这些微小变化的敏感性的信息。对于线性模型, 此报告中将包含缩减成本、影子价格(机会成本) 、目标系数(允许有小量增减额) 以及右侧约束区域^[1]。

从敏感性报告可以看出目标系数的允许变化范围, 直接从表中允许的增量和减量可以看出, 例如: 报告中偏岩子料场运到茅坪的石渣料运量的成本系数为 26, 允许的增量为 2.5, 允许的减量为 0.1, 因此成本系数的变化范围是(25.9, 28.5) , 即在这个范围内变化不会引起最优解的变化。从敏感性报告的阴影价格, 可以看出右端约束项的变化对函数目标值的贡献。例如: 报告中下游石渣混合料的设计需求量为 60(万 m³) , 阴影价格为 18.5(万元) , 说明如果设计需求量增加 1 万 m³ , 函数目标值即总的运输成本将增加 18.5 万元。

3.5 检验并评价模型

根据表 4 的决策变量的运算结果, 和工程实际情况基本上是相符合的: 偏岩子料场提供茅坪坝需要的全部石渣混合料; 偏岩子料场提供上游围堰的缺口料; 24# ~26# 厂坝基础开挖提供下游围堰的缺口料。上述结果, 主要是料场和堆场的位置分布起着决定因素。

3.6 结果输出

优化计算结果通过用料平衡图予以反映。该图的优点是科学直观、简洁明了, 能够清晰地反映用料流向和用料平衡关系, 它可以作为土石方工程管理的调度图。用料平衡图(见图 3) 包括以下几个基本要素^[3]: ①源框, 即提供料源供应信息的图框, 主要信息包括料场名称、所需填料的品种及用量等; ②目标框, 即提供料源供应信息的图框, 所展示的信息有填筑部位的名称、所需填料的品种及用量等; ③箭线, 用以表示物料流向, 标注的信息有物料流动的种类及流动量、流动距离及运输手段等。

表 5 敏感性报告

Table 5 Sensitivity analysis report

可变单元格	名字	终值	递减成本	目标式系数	允许的增量	允许的减量
\$C \$5	偏岩子料场 茅坪	62.15	0.00	26	2.5	0.1
\$D \$5	偏岩子料场 上游围堰	28.00	0.00	22.4	2.199999994	1E +30
\$E \$5	偏岩子料场 下游围堰	0.00	3.00	24.69999999	1E +30	2.999999993
\$F \$5	偏岩子料场 茅坪	139.85	0.00	19	0.1	1E +30
\$G \$5	偏岩子料场 上游围堰	30.00	0.00	16.4	1.699999994	1E +30
\$H \$5	偏岩子料场 下游围堰	0.00	3.50	19.5	1E +30	3.499999997
\$C \$6	24＃～26＃厂坝基础开挖 茅坪	51.00	0.00	25.4	0.1	2.999999993
\$D \$6	24＃～26＃厂坝基础开挖 上游围堰	0.00	2.20	23.99999999	1E +30	2.199999994
\$E \$6	24＃～26＃厂坝基础开挖 下游围堰	59.00	0.00	21.1	2.999999993	1E +30
\$F \$6	24＃～26＃厂坝基础开挖 茅坪	0.00	0.10	18.5	1E +30	0.1
\$G \$6	24＃～26＃厂坝基础开挖 上游围堰	0.00	1.70	17.49999999	1E +30	1.699999994
\$H \$6	24＃～26＃厂坝基础开挖 下游围堰	60.00	0.00	15.4	3.499999997	1E +30
\$C \$7	三期基坑开挖 茅坪	141.01	0.00	28.5	999974.1	2.5
\$D \$7	三期基坑开挖 上游围堰	0.00	999974.10	999999	1E +30	999974.1
\$E \$7	三期基坑开挖 下游围堰	0.00	999974.80	999999	1E +30	999974.8
\$F \$7	三期基坑开挖 茅坪	0.00	999999.00	999999	1E +30	999999
\$G \$7	三期基坑开挖 上游围堰	0.00	999980.10	999999	1E +30	999980.1
\$G \$7	三期基坑开挖 下游围堰	0.00	999980.50	999999	1E +30	999980.5
约束						
单元格	名字	终值	阴影价格	约束限制值	允许的增量	允许的减量
\$E \$25	下游石渣混合料 开挖量	60	18.5	60	51	60
\$E \$17	24＃～26＃厂坝基础开挖 开挖量	170	－3.1	170	141.01	51
\$E \$18	三期基坑开挖 开挖量	141.01	0	230	1E +30	88.99
\$E \$20	茅坪石渣料 开挖量	254.16	28.5	254.16	88.99	141.01
\$E \$21	茅坪石渣混合料 开挖量	139.85	21.5	139.85	62.15	139.85
\$E \$22	上游石渣料 开挖量	28	24.9	28	62.15	28
\$E \$23	上游石渣混合料 开挖量	30	18.9	30	62.15	30
\$E \$24	下游石渣料 开挖量	59	24.2	59	51	59
\$E \$16	偏岩子料场 开挖量	260	－2.5	260	141.01	62.15

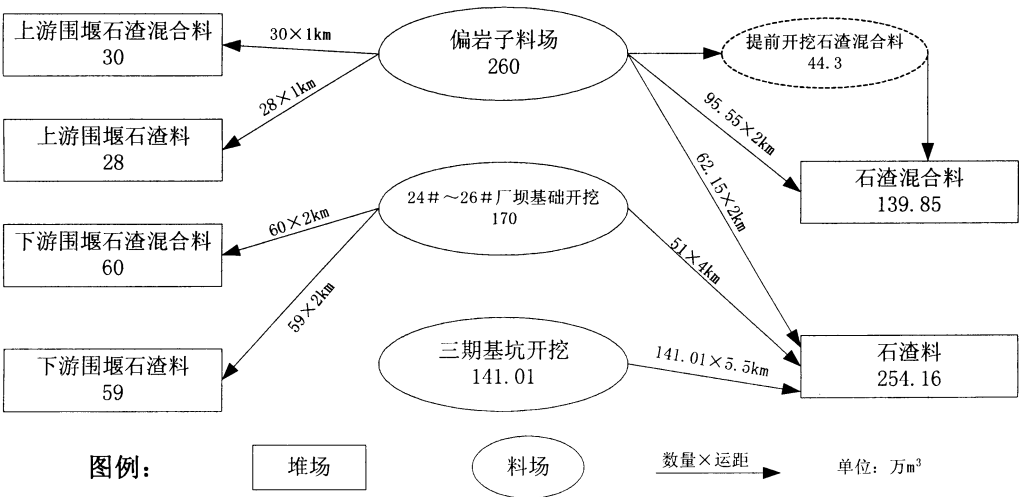


图 3 右岸土石方（三期）调配图

Fig. 3 Distribution of earth & rock works on the right bank in phase III

(下转第 29 页)

表 3 初始方案与优化方案拱厚比较

Table 3 The arch thickness comparison of initial and optimum schemes

拱圈高程/m	拱厚/m			备注
	初始方案	荷载组合②优化方案	荷载组合①微调方案	
120	6.76	6.273	6.273	荷载组合①最终微调方案最大主压应力 5.71MPa,最大主拉应力-1.15MPa
100	13.73	8.289	12.639	
80	19.79	11.356	13.873	
60	24.92	15.473	14.673	
40	29.13	20.642	16.942	
20	32.41	26.861	23.861	
0	34.77	34.131	32.931	
坝体混凝土体积/m ³	649 765	434 065	446 328	

参考文献:

[1] 朱伯芳,黎展眉.双曲拱坝的优化[J].水利学报,1981,(2) .

[2] 黎展眉.复形法在拱坝优化中的应用[J].贵州工学院学报,1992,(1) .

(上接第 103 页)

5 总结

长江三峡工程右岸三期土石方工程填筑料场的优化是项目的关键。没有好的优化,就不可能实现该项目高速、低耗实施的目标。本文结合右岸三期土石方工程建设的实际情况,阐述土石方平衡优化分析方法-运筹学的线性规划法在土石方管理中的应用,通过建立数学模型,解决土石方工程中的以下两个主要问题:

- (1) 确定满足填筑数量和进度等要求的料源地;
- (2) 提出土石方料在多个料源地和多个填筑目标之间的分配方案。

数学模型的分析计算结果在工程实际中得到了应用和检验,有力保障工程的顺利实施,这种优化的土石方管理方法可以用于其它同类型水电工程的建设管理。

需要指出,为了简化计算,本模型重点分析了主要填筑料(石渣料、石渣混合料),尚未考虑土石方工程的其他填筑料(如风化砂和反滤料等) 的调配问题,在今后的土石方工程调配分析中,可以提前做好模型的设计工作,尽量让模型真实、丰满,以便更好地指导实际施工。

水电工程建设规模大,经常需要调配大量的人力、物力和设备,因此在工程建设中需要自觉地运用包括运筹学等先进的管理理论,广泛使用包括线性规划方法在内的优化管理技术,从技术手段的角度提高劳动效率和资源利用效率,让我国水电工程的建设管理质量上一新的台阶。

参考文献:

[1] 杨超.运筹学[M].北京:科学出版社,2004.

[2] 周厚贵.二期围堰填筑料场的优化[J].中国三峡建设,1999,(7) :27~28.