



# 岷江老木孔航电枢纽初期蓄水位 多目标决策优化

曾超, 韦海超

(四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川乐山 614000)

**摘要:** 岷江老木孔航电枢纽初步设计设定的初期蓄水位为 358 m, 客观分析其不足。利用多目标决策原理, 对施工期围堰挡水试通航、初期发电的蓄水位进行优化研究, 提出一种系统的简化算法。简化算法获得的研究结论为: 1) 优化的蓄水位比初步设计降低 7.28 m(初期 1 台机组发电)、提前发电工期 21.6 d, 相对效益显著。2) 能发挥降低二期二段围堰运行风险、节约建设总工期等诸多溢出效应。3) 还扩展获得了初期 2 台机组发电时的最优蓄水位等成果。

**关键词:** 航电枢纽; 围堰挡水; 初期蓄水位; 多目标决策; 优化

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0176-05

## Multi-objective decision-making and optimization of initial water storage level at the Minjiang Laomukong navigation and hydro-power junction hub

ZENG Chao, WEI Hai-chao

(SPSI Minjiang Corporation, Leshan 614000, China)

**Abstract:** The initial water level of the Minjiang Laomukong navigation and hydro-power junction is 358 m in the preliminary design, and this paper objectively analyzes its shortcomings. Based on the principle of multi-objective decision, the optimization of the water storage level of cofferdam during the construction period for water retaining trial navigation and the initial power generation is studied, and a systematic simplified algorithm is proposed. The research conclusions obtained by the simplified algorithm are as follows: 1) The optimized water storage level is 7.28 m lower than the preliminary design (one unit is used for power generation in the initial stage), and the power generation period is 21.6 d ahead of schedule, with significant relative benefits. 2) It can reduce the operation risk of the second section cofferdam in Phase II, save the total construction period and other spillover effects. 3) It also expands and obtains the results such as the optimal storage level when two units generate power in the initial stage.

**Keywords:** navigation and hydro-power junction; water-retaining cofferdam; initial water storage level; multi-objective decision making; optimization

## 1 工况概况

岷江是四川重大装备出川唯一水上通道, 乐山岷江老木孔航电枢纽是岷江乐山—宜宾河段航电 4 级开发的第 1 级, 开发任务以航运为主、结合发电, 工程等别为二等, 规模为大(2)型。水库正常蓄水位 358 m, 总库容 2.07 亿 m<sup>3</sup>, 总装机容

量 405.40 MW, 渠化航道 27.6 km。枢纽主要建筑物采用一字形布置(图 1), 从左至右依次为左岸连接坝段、左岸挡水坝段、泄洪闸坝段、厂房段、船闸段、右岸连接坝段, 坝顶高程 363 m。枢纽施工采取不断航方案、二期五段导流: 一期施工右岸船闸、厂房及 8 孔泄洪冲沙闸; 二期一段施工

左岸 15 孔泄洪闸; 厂房在进、尾水闸门的保护下继续施工; 船闸基本完建并试通航; 二期二段在围堰围护下, 继续施工左岸 15 孔泄水闸剩余工程, 并依靠围堰挡水维持船闸试通航、首台机组发电。

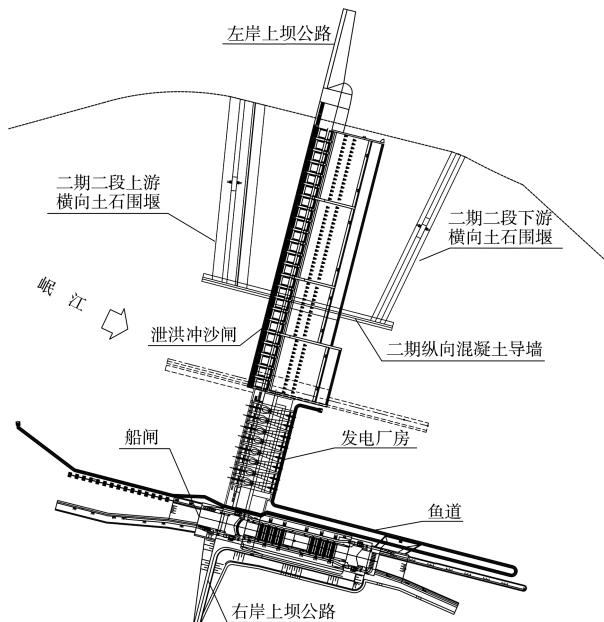


图 1 岷江老木孔航电枢纽布置

初步设计<sup>[1]</sup>综合确定利用围堰(土石围堰+纵向混凝土导墙)挡水维持船闸试通航、实现首台机组发电; 设定初期蓄水位为 358 m, 对应设计堰顶 360 m; 明确工程建设期老木孔尾水位按规划的下游东风岩航电枢纽蓄水前的最低通航水位下切 1 m, 即 340.5 m。

本文基于项目初步设计相关成果, 利用多目标决策 (multi-objective decision-making method) 原理<sup>[2]</sup>, 对老木孔施工期围堰挡水试通航、初期发电的蓄水位(简称初期蓄水位)进行优化研究, 以期寻求其帕累托最优解, 实现项目建设多目标受控, 提升项目投资社会、经济效益。

## 2 初期蓄水位的优化

### 2.1 主要目标约束条件

主要目标约束条件包括行政批复的施工期通航要求、首机发电进度目标、水轮发电机组安全运行最低水位要求、二期二段施工度汛安全(简称

“度汛安全”)最低挡水要求、工程建设总进度目标等, 并力求尽早发挥社会和经济效益。

### 2.2 优化简化方法

1) 初期蓄水位的优选属于典型的多目标决策问题。

2) 多目标决策的原理: 对所有  $N$  个目标  $f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_n(x_i)$  ( $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ ), 使各目标均有极大值  $\max = \{f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_N(x_i), x_i \in \mathbf{x}, i=1, 2, \dots, m\}$ 。

3) 多目标决策中, 诸多目标常存在不可公度性 (incommensurability)。多目标决策方法众多, 但影响结论准确性的核心环节之一是不同量纲属性值的规范化。

4) 多目标决策简化计算方法。根据多目标决策理论原理, 利用诸多目标与初期蓄水位的高度关联性, 通过目标分层, 先行确定初期蓄水位的可行域并合理规避不同量纲属性值的规范化问题; 再对初期蓄水位赋值试算、拟合初期蓄水位与毛收益(毛收益 = 发电收益 - 围堰施工成本 - 纵向导墙施工成本)的函数, 通过函数极值求解获得初期蓄水位最优值  $x_{vmp}$ 。

### 2.3 目标分层

按重要性、约束刚性对各目标进行降序分层排列。**A** 必须确保度汛安全; **B** 必须满足施工期通航要求; **C** 初期发电水头必须保证初期发电时设备安全; **D** 力争扩大初期发电经济效益; **E** 力争降低围堰工程施工成本。

### 2.4 可行域的求取

1) **A** 属于系统约束, 涉及二期二段施工安全、工程安全、度汛安全, 事关重大, 必须依法确保。根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》《水利水电工程施工组织设计规范》《水电工程施工导流设计规范》等, 围堰设计导流标准不低于导流时段 10 a 重现期 ( $Q = 6200 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 根据坝址水位与流量关系曲线, 围堰设计依据上游水位为 350.72 m。亦即满足目标 **A**, 初期蓄水位  $x$  选择范围应为 350.72 m(围堰安全度汛最低挡洪能力水位)  $x \leq 358.00 \text{ m}$ (航电设计正常蓄水位)。

2) **B** 属于系统约束, 涉及社会影响与社会效益。作为航电工程, 其功能定位是以通航为主, 应有效保证。根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》<sup>[3]</sup>《岷江老木孔航电枢纽工程施工导流与施工期通航水工模型试验研究报告》<sup>[4]</sup>及通航建筑物初步设计文件, 施工期船闸上游最低通航水位取 345.60 m。亦即满足目标 **B**, 则初期蓄水位  $x$  选择范围应为 345.60 m(施工期最低通航水位)  $\leq x \leq 358.00$  m(设计最高通航水位、水库设计正常蓄水位)。

3) **C** 属于系统约束。老木孔初选水轮发电机组型号为 GZ(X)-Wy-780, 参考东芝(TOSHIBA)公司类似机组综合特性曲线<sup>[5]</sup>, 设备发电适用净水头范围为 4.00~17.50 m, 最低发电水位为 344.5 m。故初期发电蓄水位  $x$  选择范围为  $344.50 \leq x \leq 358.00$  m。

4) 初期蓄水位优化约束条件见图 2。求解取值交集, 确定初期蓄水位选取的可行域  $\mathbf{X} = \mathbf{A} \cap \mathbf{B} \cap \mathbf{C} = \{x | x \in [350.72, 358.00]\}$ 。

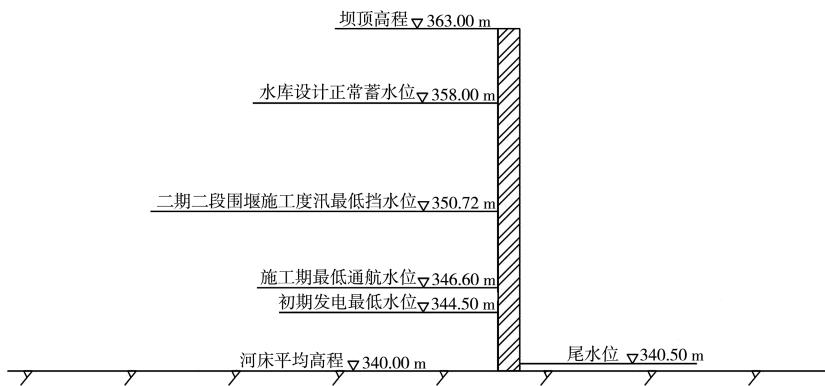


图 2 初期蓄水位优化约束条件

5) 初期蓄水位对目标 **A**、**B**、**C** 均只作 0(不满足)、1(满足)两种互斥判断(IF 函数), 故下文优选计算中未考虑初期蓄水位变化对目标 **A**、**B**、**C** 的边际贡献及由此带来的不同量纲属性值的规范化问题。

## 2.5 最优初期蓄水位的求取

在可行域内, 对目标 **D**、**E** 进行成本收益分析。以初期蓄水位为单一变量, 对成本、收益进行试算, 取得初期蓄水位  $x$ 、毛收益  $y$  数据散点, 采取 Excel 拟合获得  $x$ - $y$  曲线及函数, 求算函数极值获得初期蓄水位最优解。初期蓄水位优化计算基础要素见表 1。

表 1 初期蓄水位优化计算基础要素

项目	基础要素	备注
围堰填筑	围堰长度	根据初步设计
	堰底(河床)高程	根据初步设计
	堰顶宽度	根据初步设计
	围堰边坡坡比	根据初步设计
	填筑进度强度	同类项目常规水平
初期发电	围堰填筑单价	根据初设概算
	最低尾水位	根据初步设计
	二期二段施工期间平均来水流量	根据初步设计
	水轮发电机组综合效率	参考类似机组
	平均上网电价	标杆电价

续表1

项目	基础要素	备注
围堰防渗	围堰防渗深度	根据初步设计
	围堰防渗结构形式	根据初步设计
	防渗施工进度强度	同类项目常规水平
	围堰防渗综合单价	根据初设概算
围堰抗冲	每延米迎水抗冲体面积	根据初步设计
	钢筋石笼平均厚度	根据初步设计
	钢筋石笼单价	根据初设概算
围堰拆除	围堰拆除方量	填筑+防渗+抗冲
	围堰拆除综合单价	根据初设概算
纵向混凝土导墙	长度	根据初步设计
	顶宽	根据初步设计
	墙身坡比	根据初步设计
	导墙底部高程	根据初步设计
	混凝土单价	根据初设概算
初期发电	最低尾水位	根据初步设计
	二期二段施工期间平均来水流量	根据初步设计
	水轮发电机组综合效率	参考类似机组
	平均上网电价	标杆电价

1) **D** 属于目标约束。按照《初步设计》成果, 设定期施工围堰挡水发电尾水位、施工期间平均来水流量、机组综合效率、发电综合小时利用率为常数, 以初期蓄水位  $x$  为单一变量, 以施工计划总工期减去围堰工期为初期发电时长, 利用式(1)建立初期发电收益函数:

$$N=9.81\eta QH \quad (1)$$

式中:  $N$  为机组出力(kW);  $\eta$  为机组综合效率系数;  $Q$  为引用流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $H$  为发电水头(m)。

工程计划施工总工期按 11 月 1 日—翌年 4 月 30 日计算。围堰防渗结构施工为围堰工程进度控制关键线路, 围堰填筑与防渗工期考虑合理搭接因素。围堰防渗结构形成具备蓄水条件作为初期发电的时间起点。

2) **E** 属于目标约束。按照初步设计成果, 设定上横围堰填筑、防渗深度、抗冲结构与纵向混凝土导墙等几何参数, 围堰填筑施工强度、防渗施工强度及相关施工项目单价等常数, 以初期蓄水位  $x$  为单一变量, 建立围堰(含纵向混凝土导墙)施工成本函数。

3) 试算法计算初期蓄水位。在可行域  $[350.72, 358.00]$  内, 按照蓄水位步距 0.5 m 试算毛收益, 根据数据散点利用 Excel 回归获得  $x$ - $y$  函数。试算拟合的初期一台机组  $x$ - $y$  方程为  $y=-14.233x^2+9848.9x-2 \times 10^6$  ( $x \in [350.72, 358.00]$ ), 为单调递减连续函数, 见图 3; 初期二台机组  $x$ - $y$  方程为  $y=-20.106x^2+14184x-2 \times 10^6$  ( $x \in [350.72, 358.00]$ ), 为先增后减连续函数, 见图 4。

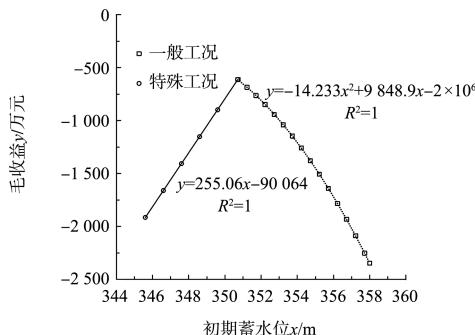


图 3 初期 1 台机组发电  $x$ - $y$  关系曲线

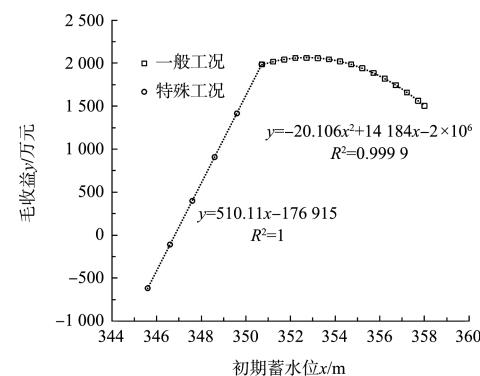


图 4 初期 2 台机组发电  $x$ - $y$  关系曲线

4) 特殊工况下  $x$ - $y$  关系曲线。初期蓄水位选择中面临特殊工况, 即围堰按度汛标准对应水位 350.72 m 进行设计修建, 但实际蓄水位按照同时满足目标 **B**、**C** 进行选择, 对应蓄水位取值范围为 345.60~350.72 m。拟合获得 1 台机组发电时  $x$ - $y$  关系为  $y=255.06x-90064$  ( $x \in [345.60, 350.72]$ ), 见图 3; 拟合获得 2 台机组发电时  $x$ - $y$  关系为  $y=510.11x-176915$  ( $x \in [345.60, 350.72]$ ), 见图 4; 二者在  $x$  取值范围内均为单调递增函数,  $x$  为最大值时  $y$  亦为最大值。

5) 采用 Matlab、Origin 软件对各种工况下  $x$ - $y$  关系及函数进行拟合复核, 结果与前述研究结论完全吻合。初期 2 台机组发电一般工况曲线及函数见图 5。

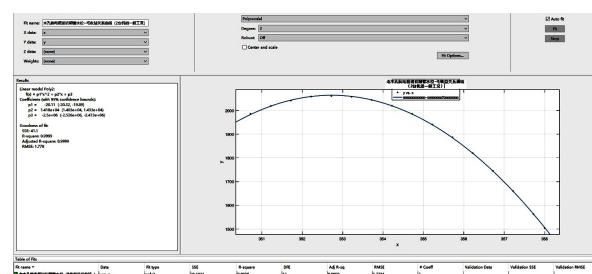


图 5 Matlab 拟合初期 2 台机组发电  $x$ - $y$  关系曲线

## 2.6 决策最优解 $x_{\text{vmp}}$

1) 根据图 3 及对应分段函数方程, 在  $x$  取值范围内(包括特殊工况)分段对  $x$ - $y$  方程求极值, 初期发电为 1 台机组时, 毛收益最大值时的初期蓄水位  $x_{\text{vmp}}$  为 350.72 m, 相应堰顶高程 351.42 m。

2) 根据图 4 及对应分段函数方程, 在  $x$  取值范围内(包括特殊工况)对初期  $x$ - $y$  方程求极值,

初期发电为 2 台机组时, 毛收益最大值时的初期蓄水位  $x_{vmp}$  为 352.66 m, 相应堰顶高程约为 353.66 m。

## 2.7 优化结论与决策建议

1) 初期蓄水位多目标决策优化结论  $x_{vmp}$  为 350.72 m(初期 1 台机组发电) 和 352.66 m(初期 2 台机组发电), 全面满足目标 **A**、**B**、**C**、**D**、**E** 对初期蓄水位的约束。

2) 初期发电为 1 台机组时, 经济效益为负, 最优蓄水位为 350.72 m。相比初步设计, 优化提前发电工期约 21.6 d, 可创造相对经济效益约 1 744 万元。

3) 初期发电为 2 台机组时, 经济效益为正, 最优蓄水位为 352.66 m。相比初步设计, 优化提前发电工期约 16.4 d, 可创造相对经济效益约 2 188 万元。

4) 如在特殊工况下发电, 1 台机组发电时经济效益均为负, 只有社会效益; 2 台机组发电时, 346.81 m 为初期运行经济效益由负转正临界点。

5) 建议积极加强施工组织实现初期 2 台机组发电, 才能合理兼顾社会效益与经济效益。

## 3 初期蓄水位优化的溢出效益

1) 与初步设计相比, 初期蓄水位优化减少了围堰防渗工程量, 有利于提前实现围堰闭气、早下基坑, 为二期二段剩余工程施工争取了宝贵的有效工期, 亦有利于降低度汛安全风险。

2) 与初步设计相比, 初期蓄水位优化降低了围堰高度, 减小了围堰水下拆除的深度和难度, 有利于确保拆除质量, 对枢纽长期运行安全有益。

3) 与初步设计相比, 初期蓄水位优化降低了围堰高度、减小了拆除工程量, 可促进拆除进度, 有利于老木孔航电枢纽总体进度计划的实现。

4) 根据《水电工程施工导流设计规范》, 利用围堰临时挡水发电时, 经技术经济论证围堰等级可提高一级, 但初步设计并未将围堰等级提高。初期蓄水位优化降低了围堰高度, 一定程度降低

了围堰的运行安全风险。

5) 工程建设中一旦发生征地移民群体事件社会影响极大, 易构成工程建设最高刚性约束。初期蓄水位优化有利于缓解征地移民工作进度压力, 有利于应对工作中的不确定性。

## 4 结语

1) 无论是初期 1 台还是 2 台机组发电, 初期蓄水位设定为 358.00 m, 均属于劣解 (inferior solution)。

2) 优选老木孔初期蓄水位  $x_{vmp}$  为 350.72 m(初期 1 台机组发电)、352.66 m(初期 2 台机组发电), 锚定主因、逻辑正确、方法稳妥、结论可靠, 社会与经济效益显著。

3) 老木孔建设中, 应及早研究初期蓄水位问题, 提前储备初期蓄水多个水位方案, 并随着工程建设中诸多边界约束条件的逐步清晰, 及时科学决策初期蓄水精确水位, 追求综合效益更优。

4) 分期蓄水是航电工程建设中的概率事件甚或必然选择。本文给出了航电工程建设中围堰挡水试通航、初期发电蓄水位优选的一种系统可靠的简易实用方法, 对岷江流域航电开发等类似工程具有重要的参考使用价值。

## 参考文献:

- [1] 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司. 岷江老木孔航电枢纽工程初步设计报告[R]. 成都: 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 2020.
- [2] 方国华, 黄显峰. 多目标决策理论、方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [3] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] 重庆交通大学. 岷江老木孔航电枢纽工程施工导流与施工期通航水工模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [5] 东芝水电设备(杭州)有限公司. 碧水水电站水轮机模型试验报告[R]. 浙江: 东芝水电设备(杭州)有限公司, 2019.

(本文编辑 武亚庆)