

# 固增水电站首部枢纽设计变更分析与评价

张巨会

(中国水利水电第七工程局有限公司,四川 彭山 620860)

**摘要:**大型水电站工程从初步设计阶段到施工设计阶段往往要经历几年时间,此时工程施工的外部条件可能会发生较大的变化。鉴于技施阶段与初设阶段设计精细化程度存在差异,因此,有必要通过更深入的设计、在满足规范及合同要求的前提下对初步设计报告进行适当的变更调整,以达到方便施工、节约投资、有利于风险控制的目的。固增水电站在设计施工图阶段对首部枢纽的布置进行了变更,主要变更内容包括:防渗布置、上游左岸导墙布置、进水口、泄洪、冲沙闸、护坦及海漫结构等,其变更调整遵循并响应了初步设计阶段和有关审批文件的规定,满足现行国家有关规程规范和招标文件的要求,布置合理,不影响建筑物结构运行安全。阐述了对固增水电站首部枢纽设计变更进行的分析与评价。在方便施工、节约投资、风险控制方面具有重要意义。

**关键词:**固增水电站;首部枢纽;设计变更;分析与评价

中图分类号:TV7;TV22;TV51

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)05-0004-05

## Analysis and Evaluation on Design Change of Headworks of Guzeng Hydropower Station

ZHANG Juhui

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Pengshan Sichuan 620860)

**Abstract:** It often takes several years from the preliminary design stage to the construction design stage of a large-scale hydropower project, at which time the external conditions of the project construction may change considerably. Since there is a difference in design refinement between the technical construction and the preliminary design stage, it is necessary to make appropriate changes and adjustments to the preliminary design through more in-depth design on the premise of meeting the requirements of the specifications and contracts to achieve convenient construction, to save investment and to control risks. During the design and construction stage, the layout of the headworks has been changed. The main changes include: anti-seepage layout, upstream left bank guide wall layout, water inlet, flood discharge, sand sluice, apron and apron extension structure, etc. These design changes and adjustments follow and respond to the requirements of the preliminary design stage and the relevant approval documents, and meet the requirements of the current national relevant regulations and tender documents. The adjusted layout is reasonable and will not affect the safety of building structure operation. This paper introduces the analysis and evaluation of the design changes of the headworks of the Guzeng Hydropower Station. It is of great significance in terms of facilitating construction, saving investment and controlling risks.

**Key words:** Guzeng Hydropower Station; Headworks; Design changes; Analysis and evaluation

## 1 概述

固增水电站位于四川省凉山州木里县,工程枢纽由拦河闸坝、进水口、引水隧洞、调压室、压力管道、地面发电厂房组成。固增水电站采用 EPC 建设模式,充分发挥了设计施工一体化优势,在其实施过程中通过不断进行优化调整以达到方便施工、节约投资、有利于风险控制的目的。

固增水电站于 2011 年 7 月即完成初步设计报告并通过了发改委能源局委托组织的审查,其距技施阶段时长已约 8 年,在此期间,其上游的沙湾电站、俄公堡电站及卡基娃电站已相继建成发电,外部条件发生了较大变化。另外,由于技施阶段与初设阶段的设计精细化程度存在差异,通过更深入的设计,在满足规范及合同要求的前提下,对首部枢纽的设计进行适当的变更调整是必要

收稿日期:2023-05-10

的。其主要部位有:防渗布置,上游左岸导墙布置,进水口、泄洪、冲沙闸、护坦及海漫结构,均属于一般设计变更。具体介绍于后。

## 2 设计变更的分析与评价

### 2.1 防渗布置方案的变更

#### 2.1.1 变更内容

与初设阶段相比,对技施阶段首部枢纽防渗线的走向、两岸防渗深度、防渗长度均进行了一定的调整。

(1)防渗线平面布置走向的调整。初设阶段左岸防渗线布置在进水口底部靠近下游侧,导致进水口底部扬压力较大。为满足整体稳定应力要求,进水口下游侧边墙采取与左岸挡水坝相结合的类型导致进水口混凝土方量偏大,而且其结构受力较复杂。为减小进水口底部的扬压力、有利于进水口结构的稳定,同时节省投资,技施阶段对防渗线走向进行了局部调整。防渗线依旧采用折线布置,将防渗墙河床部位布置在闸前长度为13.5 m的混凝土铺盖下,防渗中心线桩号为(闸)0+011.00;右岸从桩号(坝)0+038.00处向下游转至右岸挡水坝段底部靠上游侧(闸)0+002.50),与右岸岸坡深入基岩的防渗帷幕相连接;左岸在取水口底部靠上游侧(取)0+001.50布置,再沿引水中心线方向上游9 m布置至左岸岸坡与岸坡深入基岩的防渗帷幕相连接。混凝土防渗墙的方量在初设阶段为3 608 m<sup>3</sup>,技施阶段为2 340 m<sup>3</sup>。

首部枢纽防渗线走向的调整有利于进水口结构的稳定,安全且合适。

(2)两岸防渗深度、长度的调整。初设阶段采用河床段全封闭混凝土防渗墙+两岸帷幕灌浆深入弱风化、弱卸荷岩体下限的方案。技施阶段河床段依然采用全封闭混凝土防渗墙,墙底深入基岩1 m,与初设阶段一致。由于该电站首部枢纽挡水高度较低(最大挡水高度为22 m),根据该工程闸址区水文地质条件并结合闸坝布置特点,技施阶段对两岸帷幕施工考虑采取分期形式实施,第一期先实施洞口段的帷幕灌浆(左岸30 m,右岸30 m),帷幕深入岩体弱风化、强卸荷线下,与河床段防渗标准一致。第一期防渗帷幕施工完成后进行压水试验,若其透水率小于5 Lu,可不进行第二期帷幕灌浆,否则需采取第二期防渗帷幕

进行处理,以确保电站渗漏量在可控范围内。

#### 2.1.2 防渗布置方案变更的分析评价

通过渗流计算对基础防渗的安全性及经济性进行了评价与分析。变更后的总渗流量较小,为0.068 m<sup>3</sup>/s,仅占枯期平均流量49 m<sup>3</sup>/s的0.14%,对电站的运行及电能损失极小。

(1)运行安全。技施阶段的方案与初设阶段的方案在覆盖层段的防渗布置方案一致。通过复核,其闸室基础水平段和出口段的渗透坡降均小于土层允许的渗透坡降,且其护坦底部布置有排水和反滤层,渗流稳定安全裕度大。因此,其基础渗透稳定是安全的。

通过防渗线的调整,将大坝左岸防渗体布置在进水明渠上游侧可减少明渠底部扬压力,有利于其结构稳定。

(2)运行效益。由于技施阶段的方案与初设阶段的方案在基岩段的防渗范围有所区别,故其在渗流量方面存在差异。根据合同要求,设计总渗流量(包括坝基、坝体、两岸绕渗量)应不高于国内已建类似规模水电工程挡水建筑物实际渗漏量的平均值。而根据相关规范<sup>[1]</sup>,四川省境内的一些已建工程,如太平驿、福堂、姜射坝、冷竹关、桑坪、小沟头等工程的基础渗漏量一般按小于枯期平均流量的1%~3%设计。该工程技施阶段防渗布置调整后其总渗流量仅占枯期平均渗流量的0.14%,远小于一般工程要求,对电站运行的电能损失极小,可忽略不计。

(3)工程投资。通过调整防渗的范围,技施阶段帷幕灌浆的长度以及灌浆平洞的长度均有一定程度的减少,故其投资亦相应地减少。

综上所述,技施阶段实施的变更后的防渗方案其渗流稳定安全并有利于进水口稳定;渗流量满足合同以及一般工程要求;在不影响工程质量、安全的前提下,还可以节省工程投资。因此,所实施的防渗布置方案合理。

### 2.2 上游左岸导墙布置方案变更

#### 2.2.1 变更内容

与初设阶段相比,技施阶段对首部枢纽上游左岸导墙的长度进行了一定程度的缩短;对导墙高度进行了一定程度的增高,增加了0.5 m;对清污坝段进行了一定程度的加长。

初设阶段,一期上游横向围堰中心线桩号为(闸)0—087.00,上游左岸导墙上游端桩号为(闸)0—157.38,超出一期上游围堰约 70 m。对于这一段 70 m 的上游导墙采用的施工方式是枯期水下开挖、水下浇筑混凝土,但其施工工期较长且混凝土施工质量难以得到保证。为节约工期、减少上游水下混凝土施工的难度并保证上游导墙的混凝土浇筑质量,有利于上游围堰及导流明渠的布置,在技施阶段,适当缩短了上游左岸导墙的长度。地质资料显示:闸首区域两岸闸肩边坡高陡,岩性为三叠系上统曲嘎寺组( $T_{3q}$ )中厚层灰岩夹薄层灰岩,局部夹板岩,岩层倾向下游,为斜横向坡,现场地质测绘未发现有大规模的失稳及变形现象,两岸闸肩边坡整体稳定,故在技施阶段将上游导墙的总长度由初设时的 112.7 m 减短为技施阶段的 49.5 m。至上游围堰后,由靠近清污平台坝段的半重力式导墙渐变至上游的贴坡式护坡。对导墙上游一定范围的边坡进行开挖以使导墙与上游岸坡平顺连接。考虑到水流条件,将上游导墙顶高程由初设阶段的 2 215 m 抬高至技施阶段的 2 215.5 m,超出正常蓄水位 2 215 m 高程 0.5 m。根据对清污工作场地的要求,将上游左岸导墙与取水口间的清污坝段由初设阶段的 8 m 加长至 12 m。

### 2.2.2 方案变更分析

分别进行的多级流量的流速测定和流态观测的水工模型试验成果表明:当上来流量较小、坝前水位保持的汛期排沙运行水位 2 212 m 高程运行(原设计方案坝前水位)的情况下,库区水流平缓,水面平静,闸前及电站进水口附近河段流速均较小。当流量  $Q$  为  $169 \text{ m}^3/\text{s}$  时,电站发电,泄洪闸、冲沙闸全关的情况下,实测闸前附近河段的流速均为  $0.4 \text{ m/s}$  左右。随着流量的增加,电站取水口及闸前附近河段的流速亦随之增大,当流量  $Q=450 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $Q=641 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $P=50\%$ ),坝前水位保持在 2 212 m 高程运行时,实测冲沙闸前最大流速分别为  $1.37 \text{ m/s}$  和  $2.19 \text{ m/s}$ ,泄洪闸前的最大流速分别为  $0.96 \text{ m/s}$  和  $1.42 \text{ m/s}$ 。模型还实测了当来流量分别为  $Q=1\,020 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $P=10\%$ )、 $1\,230 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $P=3.33\%$ )、 $1\,440 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $P=1\%$ ) 和  $1\,720 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $P=0.2\%$ ),电站停机时,在冲沙闸和泄洪闸全敞泄冲沙的情况下,闸前河道

流速的分布由于该枢纽闸上游河床坡降大,闸前附近的流速随着流量的增大及闸前水位的壅高而逐渐减小,上述各级流量在靠近上游导墙桩号(闸)0—090.00 附近的最大流速分别为  $0.78 \text{ m/s}$ 、 $1.02 \text{ m/s}$ 、 $0.86 \text{ m/s}$  和  $0.89 \text{ m/s}$ 。相对而言,取水口上游流速不大,因此,适当缩短上游左岸导墙的变更方案可行。

### 2.2.3 方案变更评价

首部枢纽上游导墙的调整不影响上游水流条件及岸坡稳定,亦不影响电站安全并可缩短施工工期、节约工程投资,保证上游混凝土的浇筑质量。因此对其进行的方案调整是合适的。

## 2.3 进水口结构的变更

### 2.3.1 方案变更内容

与初设阶段相比,技施阶段对首部枢纽进水口的结构体型进行了一定程度的调整。

技施阶段将取水口的底板顶高程由原设计方案的 2 202 m 降低了 1 m,为高程 2 201 m。孔口数量维持初设阶段的 3 孔,其宽度由初设时的 8 m 调整为 7 m。对取水口、引渠段及渐变段的结构体型进行了一定程度的优化。由于进水口结构的调整,仅保留了左岸储门槽挡水坝段。

### 2.3.2 方案变更分析

固增水电站的天然悬移质年输沙量为 159 万 t,多年平均年含沙量为  $398 \text{ g/m}^3$ ,推移质年输沙量为 3.57 万 t,考虑到卡基娃水库建成拦沙后其悬移质年输沙量为 44.3 万 t,多年平均年含沙量为  $111 \text{ g/m}^3$ ,且因卡基娃坝址到固增闸址区属高山峡谷地貌,入库推移质仍按天然情况考虑。根据四川省近年部分已建成水电站泥沙资料、取水口高程的确定可以看出:固增水电站推移质输沙量不大。根据工程类比,目前电站取水口的底板顶高程高出冲沙闸底板以上 5 m 是合适且合理的,能够满足电站引水防沙要求。

该电站初设阶段取水口的过栅流速为  $0.94 \text{ m/s}$ ,远小于规范规定的  $1.2 \text{ m/s}$ ;技施阶段,取水口底板顶高程降低 1 m 后,孔口宽度由初设时的 8 m 调整为 7 m,过栅流速略有增加,为  $0.98 \text{ m/s}$ ,远小于规范值,完全能够满足规范<sup>[2]</sup>和合同要求。

从计算结果可以得出以下结论:(1)在各种计算情况下,建筑物基底面的抗滑稳定安全系数满足相关规范要求;(2)在各种计算情况下,建筑物

的平均基底应力不大于地基允许承载力,最大基底应力不大于地基允许承载力的1.2倍,满足相关规范要求;(3)建筑物地基基础为第3层( $a_1 + p_1 Q_1^2$ )含漂(块)碎(卵)砾石土层,密实程度为坚实,基底应力的最大值与最小值之比满足规范要求。在正常情况下,基础应力分布均匀,有利于减小基础不均匀沉降,使其结构的受力更为合理;(4)技施阶段对建筑物结构进行了优化,优化后的结构安全系数不低于现行规范要求的1.1倍,能够满足招标文件要求。

### 2.3.3 方案变更评价

技施阶段对进水口结构的调整只是在初设阶段方案的基础上进行的局部调整并通过了复核计算,优化后的结构安全系数不低于现行规范要求的1.1倍,其基础应力分布均匀,所进行的调整不影响电站安全,可缩短施工工期并节约工程投资,满足相关要求。

## 2.4 泄洪、冲沙闸等结构的变更

### 2.4.1 方案变更内容

与初设阶段相比,技施阶段对首部枢纽泄洪、冲沙闸、铺盖等结构进行了一定程度的调整,对抗冲耐磨措施亦进行了一定程度的调整。

(1)将泄洪、冲沙闸底板高程抬高了1 m。根据河床区域的原始地形,初设阶段泄洪、冲沙闸的底板顶高程为2 195 m,低于原始河床地面线1 m;技施阶段,为了确保引水防沙及良好的泄洪效果,将泄洪、冲沙闸室底板及铺盖高程由2 195 m抬高至2 196 m,基本接近主河床高程。

(2)闸室结构尺寸的调整。根据初步设计审查意见:“根据地质提供的参数对泄洪闸、冲沙闸及左、右岸挡水坝段进行稳定应力计算结果,在各种工况下均满足稳定应力要求,且抗滑稳定安全系数偏大,施工图阶段根据实际情况可作适当优化。”技施阶段,为响应审查意见,节约工程投资,设计单位对闸室结构根据稳定应力计算成果进行了适当优化,将泄洪冲沙闸的底板厚度由初设阶段的4 m调整为3 m;闸室的边墩和缝墩由初步设计时的3 m调整为2.5 m。

(3)抗冲耐磨措施的调整。结合国内已建成的采用急流衔接电站的运行情况,技施阶段将泄洪闸工作门后底板表层的钢衬改为40 cm厚的抗冲耐磨C40硅粉混凝土,泄洪闸1.2 m高边墙的

钢衬和冲沙闸底板、边墙的钢衬维持原初设方案不变。

### 2.4.2 方案变更分析

根据相关规范<sup>[3]</sup>:“闸槛高程不宜低于闸址处枯水期河槽的河床平均高程”“山区河道推移质泥沙较多时,闸槛高程宜略高于闸址处枯水期河槽的河床平均高程”。初步设计阶段的泄洪、冲沙闸底板顶高程为2 195 m,低于原始河床地面线1 m多,较易造成淤积。技施阶段,为了确保引水防沙及良好的泄洪排沙效果,将泄洪、冲沙闸室底板及铺盖高程由2 195 m抬高至2 196 m,基本接近主河床高程,能够满足规范要求,且对泄洪、冲沙闸的安全运行更有利。水工模型试验成果表明:闸底板高程适当抬高,对冲沙更为有利<sup>[4]</sup>。

根据泄流能力计算,设计洪水位高程为2 208.52 m,校核洪水位高程为2 210.98 m,分别比初步设计方案高1.33 m、1.49 m;但远小于正常蓄水位高程2 215 m,能够满足电站泄洪要求。

由于上游龙头水库——卡基娃水库建成蓄水后,固增水电站坝址以上入库的大部分泥沙被拦淤在水库内,河流来沙量(特别是易造成闸室混凝土磨损加剧的推移质)将大幅度减少。根据已建工程的经验,闸室采用钢板衬护对于抵抗泄洪高速水流挟带泥沙的冲刷效果更好,但其施工工艺复杂,质量保证率要求高,若施工质量稍有缺陷未进行处理,泄洪时高流速水流及其挟带的推移质将会对衬护钢板造成破坏。由于泄洪闸工作门后具有易检修和维护的条件,技施阶段将泄洪闸工作门后底板表层的钢衬改为40 cm厚的抗冲耐磨C40硅粉混凝土,其既能满足相关规范要求且施工工艺简单,施工质量和工期更能够得到保障。对泄洪闸工作门后的底板表层采用抗冲磨混凝土作为抗冲措施同样为类似工程普遍采用,因此,最终确定对泄洪闸工作门后的底板表层采用C40硅粉混凝土作为抗冲耐磨材料以替代初设阶段的钢板衬护。由于冲沙闸泄流量小,同时兼顾小流量泄洪和冲排沙功能,其使用更为频繁,故仍然采用全闸室钢板衬护方案。

### 2.4.3 方案变更评价

将泄洪、冲沙闸底板高程抬高1 m未减少工程安全裕度,未削弱工程的功能,并可改善泄洪效果,对冲沙更为有利,能够确保工程运行的安全,

满足相关规范要求,故调整后的方案是合适的。

技施阶段,为响应审查意见,节约工程投资,对闸室结构进行了优化。优化后的结构安全系数不低于现行规范要求的 1.1 倍,满足招标文件要求,因此,调整后的方案是合适的。

由于河流上游电站的建成使河流来沙情况大为改善,故将该电站泄洪闸工作门后的抗冲耐磨材料由原设计的钢板调整为抗冲耐磨混凝土即能够满足抗冲磨要求,亦能达到简化施工、降低造价的目的,故调整后的方案是合适的。

## 2.5 护坦及海漫结构的变更

### 2.5.1 方案变更内容

与初设阶段相比,技施阶段对该工程的首部枢纽护坦、海漫结构进行了一定程度的调整,主要变更内容为:

(1)将护坦段贴坡扭面改为直墙型式,对左岸边墙采用半重力式;右岸首端块边墙结合永久交通公路布置。本着尽量保留原公路、少开挖、少支护的原则并考虑生态流量管的布置,最终决定采用外侧挡土侧台阶加高的半重力式挡墙。

(2)根据水工模型试验的建议取消了护坦上冲沙闸与 1 号泄洪闸之间的中隔墩;根据下游洪水水位,适当降低了护坦边墙高度,由高程 2 206 m 降低至 2 205 m。

由于泄洪冲沙闸闸室底板顶高程抬高了 1 m,其相应下游护坦底板顶高程由初设阶段的高程 2 191 m 抬高了 1 m 至高程 2 192 m。

(3)将护坦下游 20 m 长的钢筋混凝土海漫改为大块石护底。闸首施工完成后,实测河道地形,对护坦下游两岸一定范围进行了清理并采用混凝土结构进行防护。

### 2.5.2 方案变更分析

水工模型试验成果表明:在 1 号泄洪闸和冲沙闸之间设置中隔墩将会影响冲沙运行时水流的扩散,加剧其对左岸的冲刷;而取消冲沙闸下游右侧隔墙则可使水流的扩散更加充分,尽可能地减小了泄水流对左岸河床及岸壁的直接冲刷,能够改善中小流量情况下冲沙闸开启运行时坝下游的消能条件。鉴于以上原因,在技施阶段取消了该隔墙。

### 2.5.3 方案变更评价

调整护坦边墙型式后能够使护坦内部的水流

更为平顺,能够减轻对护坦的磨蚀,同时能够尽量减小开挖对右岸公路的影响,降低施工难度,因此,方案调整是合适的。

该工程的下游消能采用急流衔接方式,适当抬高护坦高程有利于护坦与下游河道的衔接,平顺护坦内的水流,减小其对护坦结构的冲刷;取消护坦内冲沙闸与 1 号泄洪闸之间的隔墙,可以使枢纽在冲沙闸小流量泄洪拉沙运行时水流扩散更为充分<sup>[5]</sup>,从而减轻其对左岸的冲刷。根据水工模型试验成果:护坦校核洪水工况下的下游水位均低于护坦边墙约 2.37 m。因此,适当降低护坦边墙顶高程,完全能够满足下游消能防冲水位对护坦岸坡防护的要求,在宣泄设计洪水时其下游的静水位亦较边墙更低,故以上方案的变更是合理的。

该工程将护坦末端下游的钢筋混凝土海漫变更为大块石护底,只要在满足块石粒径足够大、强度足够高的前提下,同样能起到类似海漫调整流速分布和保护河床免受冲刷的作用。调整方案后对两岸防护的强度并没有减小,调整方案后有利于简化施工,降低造价,故调整后的方案是合适的。

## 3 结 语

由于初设阶段到技施阶段期间其施工的外部条件变化及设计精细化程度差异性的存在,在施工阶段对初步设计进行适当的变更调整十分必要。固增水电站首部枢纽施工阶段进行的设计变更调整遵循和响应了初步设计阶段和有关审批文件的规定,满足现行国家有关规程规范和招标文件的要求,变更后布置合理,在方便施工、节约投资、风险控制方面具有重大的意义。

### 参考文献:

- [1] 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范,SL/T 62-2020[S].
- [2] 水利水电工程进水口设计规范,SL285-2020[S].
- [3] 水闸设计规范,NB/T 35023-2014[S].
- [4] 冯济慈.关于引水式电站首部枢纽水工模型试验结果分析评价[J].价值工程,2019,25(2):250-251.
- [5] 沈文莉,田华,石江涛.红叶二级水电站的护坦、海漫设计[J].水电站设计 2002,18(3):30-32.

### 作者简介:

张巨会(1976-),女,吉林九台人,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)