



构皮滩水电站通航建筑物 第一级升船机形式与布置

路万锋¹, 吴俊东¹, 王贵来², 吴经干², 邵增富²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;

2. 贵州乌江水电开发有限责任公司, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 根据工程总进度安排, 构皮滩水电站在 2008 年汛后下闸蓄水, 位于水库内的第一级升船机需在蓄水前完成水下部分施工。受地形地质条件、左岸缆机平台布置、施工进度要求等因素制约, 第一级升船机布置和选型极其困难。本文通过对构皮滩水电站通航建筑物第一级升船机形式选择及布置方案进行研究, 从技术条件、通过能力、施工工期、经济效益等方面, 对采用常规全平衡式升船机形式与下水式升船机形式两种方案进行了全面比选, 研究并提出了上游下水式垂直升船机创新布置方案, 有效解决了升船机建设制约工程蓄水发电的核心矛盾。

关键词: 构皮滩水电站; 上游下水式垂直升船机; 形式选择; 布置方案

中图分类号: U642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0109-05

Type and layout of first stage ship lift for navigation structures of Goupitan Hydropower Station

LU Wanfeng¹, WU Jundong¹, WANG Guilai², WU Jinggan², SHAO Zengfu²

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: According to the general schedule, Goupitan Hydropower Station is planned to impound after the flood season in 2008. The first stage ship lift located in the reservoir needs to complete the underwater construction before impounding. The layout and selection of the first stage ship lift are extremely difficult due to the constraints of topographical and geological conditions, layout of the left bank cable crane platform, construction schedule requirements and other factors. Based on the researches on the selection and layout scheme of the first stage ship lift model of the navigation building of Goupitan Hydropower Station, this paper comprehensively compares the conventional full balance ship lift model with the launching vertical ship lift model from the aspects of technical conditions, throughput, construction period, economic benefits, etc. An innovative layout scheme of the upstream launching vertical ship lift is proposed to solve the core contradiction that the construction of ship lift restricts the water storage and power generation of the project.

Keywords: Goupitan Hydropower Station; upstream launching vertical ship lift; type selection; layout scheme

构皮滩水电站位于贵州省余庆县境内, 是乌江流域梯级滚动开发的第五级, 电站主要任务是发电, 兼顾航运、防洪及其他综合利用, 电站枢

纽由高 225 m 的混凝土双曲拱坝、右岸地下式电站、坝身泄洪孔及左岸泄洪洞等建筑物组成。大坝和地下电站于 2003 年开工建设, 2006 年起开展

收稿日期: 2022-11-10

作者简介: 路万锋 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事大型通航建筑物设计和科研工作。

通航建筑物专题研究工作。由于通航建筑物为缓建项目, 布置时既要满足与主体工程“同步建设”的要求, 又不影响在建工程的顺利施工, 确保 2008 年汛后下闸蓄水总体目标的实现。

综合本枢纽的特点、地形和河势条件, 通航建筑物线路布置在左岸石棺材—野狼湾一线, 结合通航规模、船型尺寸论证结果以及工程施工现状, 进一步研究通航建筑物形式及布置方案, 确定三级垂直升船机为本工程通航建筑物推荐形式。在此基础上, 针对第一级升船机形式选择和布置进行深入研究。

1 建设条件及背景技术

第一级升船机部位地形总体上为倾向乌江的岸坡, 地面高差大、地形较为陡峻。出露的地层中 P_{2w}^{1-1} 及 P_{1m}^{2-3} 层为强岩溶层, 即 5# 岩溶系统发育层位; P_{2w}^{1-1} 层底部为厚 3~5 m 的黏土岩及厚 0.5~1.0 m 的透镜状劣煤层, 灰岩与黏土岩接触带形成溶蚀破碎带; P_{1m}^{2-3} 层顶部古侵蚀-强溶蚀带岩溶发育。升船机后缘上部布置有左岸缆机平台及 8#、10# 施工道路, 上游右下方布置有泄洪洞及导流洞进口。由于缆机系统是大坝施工的主要手段, 泄洪洞及导流洞进口已施工完成, 因此第一级升船机的布置和施工的原则为不影响缆

机系统的运行和泄洪洞及导流洞进口建筑物安全, 尽可能减少水下工程施工对水库蓄水发电的制约。

根据承船厢的运行条件, 垂直升船机有全平衡式和下水式两种^[1]。全平衡式升船机船厢室为无水环境, 运行时船厢总质量始终与平衡重块的总质量相同, 运行成本低、技术成熟可靠; 下水式升船机主要应对下游引航道水位变幅大、变率快的特点, 船厢室与引航道水域连通, 承船厢出入水运行过程中与平衡重块的质量无法始终保持平衡。

为满足第一级升船机布置的各类限制, 将下水式升船机布置于上游水库中并采用逆向运行的方案, 与常规布置于水库中的全平衡式升船机、采用顺向运行的方案进行对比, 优选适用于各类制约原则的第一级升船机形式和布置方案。

2 顺向运行的全平衡垂直升船机常规方案

升船机按常规方式运行, 即上游水位高, 下游水位低, 采用钢丝绳卷扬全平衡式, 船厢不下水。上游最高通航水位 630.0 m, 下游通航水位 590.0 m, 最大提升高度 40.0 m。由于第二级升船机下游通航水位为 510.0 m, 第二级升船机提升高度为 80.0 m, 见图 1。

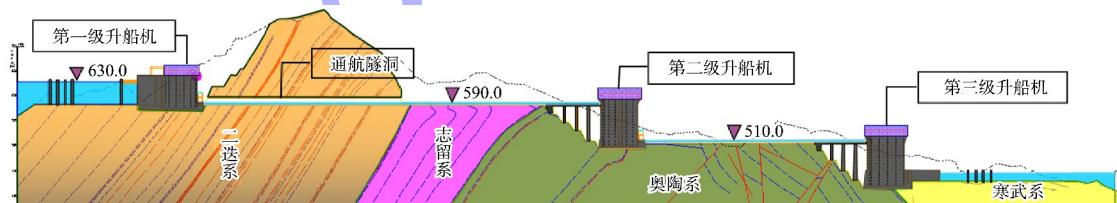


图 1 上游全平衡垂直升船 (单位: m)

该方案要求船厢室干地运行, 因此第一级升船机周边需修建挡水建筑物, 由升船机上闸首及两翼挡水坝段组成, 挡水前沿总长 308.6 m, 坝顶高程 640.5 m。上闸首采用整体 U 形结构, 总长 55.0 m、宽 60.0 m, 设工作门和辅助门各 1 道, 两侧边墩内布置门间充泄水系统、检修排水系统等设施, 闸顶设置工作门和辅助门启闭机排架。左翼挡水坝受煤炭沟地形地质条件制约,

坝轴线垂直水流并向上游偏斜 30° 布置, 右翼挡水坝呈 L 形布置。为截断挡水建筑物地基岩体内渗漏通道、降低基底扬压力和通航隧洞外水压力等, 挡水坝坝基及两岸需进行必要的渗控处理。

船厢室结构总长 64.6 m、宽 38.0 m、高 85.5 m, 主要由上部机房、承重塔柱和基础 3 部分组成。承船厢加水总质量约 3 320 t, 由 8 组共 2 150 t 的

重力平衡重及4组共1 170 t转矩平衡重平衡, 承船厢底部和平衡重底部设平衡链。下闸首结构总

长16.8 m、宽32.0 m, 航槽净宽12.0 m, 建基面高程575.0 m, 阀门高程587.0 m, 见图2。

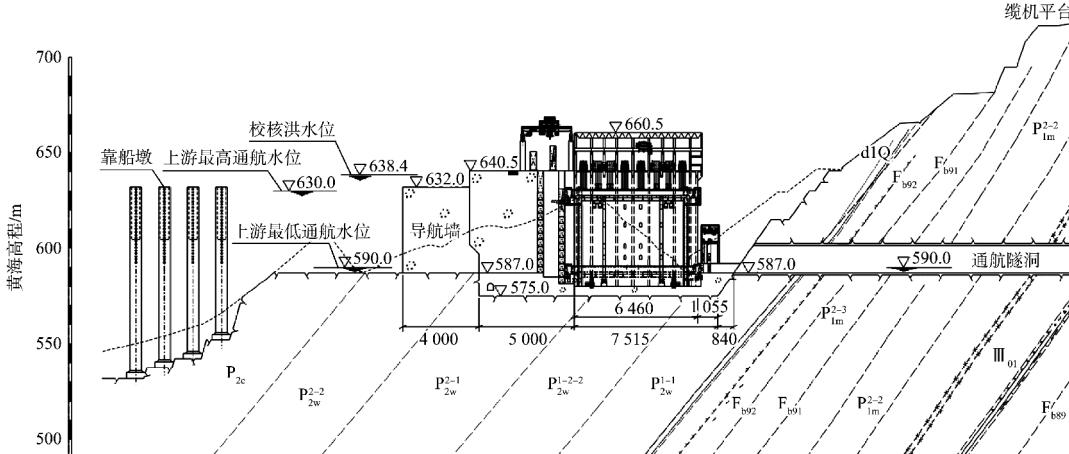


图2 第一级全平衡式垂直升船机方案布置 (尺寸: mm)

第一级升船机分两期施工, 即在不影响缆机系统运行的前提下, 在水库蓄水前完成升船机挡水部分施工, 待缆机系统拆除后, 利用已建永久结构挡水进行机室段开挖、混凝土浇筑和金属结构安装。该施工方案主要考虑一期施工基本不影响缆机运行, 二期施工不需要另设围堰, 并限制水库运行水位, 对在建工程施工和蓄水发电的影响相对较小。但由于二期开挖时上闸首和挡水坝段已建成挡水, 采用井坑式开挖对爆破控制与防护措施要求高, 运输出渣困难, 同时挡水建筑物防渗线斜穿5#岩溶系统发育的强岩溶层, 防渗处理工程量及难度较大。

3 逆向运行的上游下水式垂直升船机创新方案

上游修建逆向运行的下水式升船机, 承船厢

与上游水库直接连通, 将船厢提升至最高通航水位以上, 下游根据地形、地质条件通过明渠、渡槽或通航隧洞等建筑物形式穿越坝肩高耸山体; 再通过常规通航建筑物形式克服与下游水位之间的水头差, 达到过坝通航目的。

升船机采用钢丝绳卷扬部分平衡式的下水式升船机, 上游最低通航位为水库死水位590.0 m, 为适应库水位变幅, 需将船厢提升至最高通航水位630.0 m以上, 考虑渡槽主梁结构布置和运行检修要求, 下游通航水位拟定为637.0 m, 最大提升高度47.0 m。由于第二级升船机下游通航水位为510.0 m, 第二级升船机提升高度为127.0 m, 见图3。

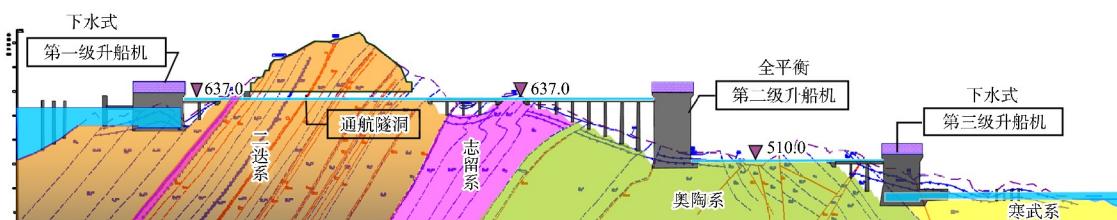


图3 上游下水式垂直升船 (单位: m)

创新方案500吨级上游下水式升船机是我国目前规模最大的下水式升船机^[2], 这种布置方式首先要解决的问题是主提升系统布置和减速器的制造可能性^[3], 余友安等^[4]通过研究提出了主提升机弯曲疲劳等效荷载最小平衡重计算方法, 确

定了平衡重质量为2 300 t, 对主提升减速器的各项制造指标提出了具体要求。由于上游升船机在库水位以下部分长期被淹没, 为避免平衡重井进水, 船厢室塔柱采用全封闭井筒式结构, 将承担巨大的外水压力, 陈小虎等^[5]通过三维有限单元

法对船厢室结构进行了整体计算和分析,研究结构各部位受力特点,为方案设计提供支撑。创新方案包括升船机上闸首、船厢室、主提升设备以及金属结构沉船厢。上闸首采用整体式结构,总长 28.0 m、宽 46.0 m,布置第一级升船机检修排水、机室充水、第一级中间渠道补水设施以及 1 道检修门,闸首左侧设置宽 8.0 m 的交通桥与左岸场内公路连接,见图 4。船厢室结构总长 80.0 m,

宽 46.0 m、高 96.5 m; 船厢室采用平板筏形基础,机室两侧塔柱采用封闭式筒体结构,塔柱顶部通过梁板连成整体,构成上部机房基础,机房内对称布置 8 套卷扬提升机构及其辅助设备。承船厢为钢质槽形结构,船厢加水总质量约 3 250 t,由 64 根钢丝绳悬吊,并通过 16 组共 2 300 t 的转矩平衡重部分平衡。下闸首采用钢结构,设置 1 道提升式平板工作门和间隙密封机构、间隙充泄水系统^[6]。

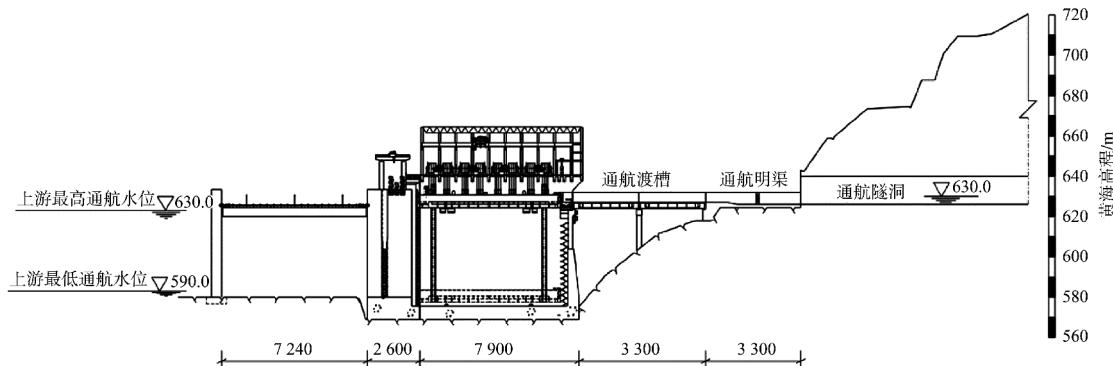


图 4 第一级上游下水式垂直升船机方案布置 (尺寸: mm)

由于升船机逆向运行,船厢室的上游及两侧无需修建挡水建筑物,建筑物基础亦不需设防渗帷幕,其布置受地形、地质条件制约较小。为保证 10#路畅通、便于缆机运行维护及拆除、减少开挖支护工程量,同时避免 P_{2w}^{1-1} 层底部的黏土岩和煤层及 P_{1m}^{2-3} 层顶部的古侵蚀-强溶蚀带在开挖边坡中出露,利于升船机下游顺向坡的安全稳定,将第一级升船机布置在煤炭沟上游,下游通过渡槽与通航隧洞连接。

4 方案比选

4.1 技术条件及通过能力

常规方案在复杂地形地质条件下修建挡水建筑物及防渗系统,其技术方案的可靠性取决于地质条件的复杂程度及准确判断,不确定因素较多,解决不当将直接影响到第一级垂直升船机水下工程的建设进度,制约工程蓄水发电计划的实现,风险较大。创新方案第二级升船机提升高度大、通航渡槽规模大,技术难度主要集中在结构设计方面,不对工程蓄水发电造成制约,进行深入研

究、妥善解决的余地较大。

经测算常规方案与创新方案年单向通过能力分别为 157.5 万、149.4 万 t, 均满足规划运量要求。

4.2 施工条件及工期

常规方案二期开挖工程量、边坡高度和施工难度均较大; 创新方案二期开挖工程量小,施工工期不受限制,且开挖区地形较平缓、距已建建筑物较远,施工难度相对较小。

常规方案混凝土工程量大,浇筑强度较高,主要为大体积混凝土,温控要求高; 创新方案混凝土工程量及浇筑强度相对较小,且大体积混凝土工程量不大,温控要求相对较低。

常规方案挡水建筑物规模较大,且地基岩溶发育,防渗帷幕工程量(近 100 km)及技术难度大,帷幕施工成为制约水库蓄水发电的关键因素。根据施工进度分析,常规方案将影响工程蓄水发电计划进度约 18 个月; 创新方案没有帷幕灌浆工程,制约水库蓄水发电的关键因素是上闸首及船厢室浇筑至初期发电水位以上。根据施工进度分析,同等条件下,创新方案具备在水库蓄水前完成第一级升船机水下工程施工的可能性。

4.3 经济合理性

建安工程静态投资见表1, 常规方案比创新方案总投资增加1.53亿元; 在达到设计通过能力的情况下, 测算创新方案运行年耗电量比常规方案多350~400万度, 按构皮滩电站上网电价计算, 年耗电费用增加91~104万元。按工程运行100 a估算, 创新方案经济性较优, 因此考虑资金的时间价值后创新方案的经济性更优。

表1 建安工程静态投资对比

方案	投资对比/亿元				合计
	建筑工程	电气设备及安装工程	金属结构、机械设备及安装工程		
常规方案	13.54	1.71	6.69	21.95	
创新方案	11.23	1.88	7.30	20.41	
差值	2.31	-0.16	-0.62	1.53	

4.4 推荐方案

综合比较, 常规方案工程投资较高, 挡水建筑物规模大, 防渗帷幕的工程量和技术难度大, 工期不确定因素多, 挡水坝及上闸首部位帷幕灌浆施工成为制约水库蓄水发电的关键因素, 直接影响工程蓄水发电时间; 创新方案工程投资较低, 不需设挡水坝及防渗帷幕, 施工程序简单, 限制性条件相对较少, 施工难度低, 对在建主体工程的施工影响较小, 具备在2008年汛后蓄水前完成第一级升船机水下工程施工的可能性。因此, 从技术、经济、通过能力以及对工程蓄水发电影响等方面综合考虑, 选取创新方案为推荐方案。

(上接第76页)

- [20] NISHIMURA F, YAMADA T, TANAKA M, et al. Ammonia removal characteristics of porous concrete with zeolite for enhancing self-purification ability in river system [J]. International journal of GEOMATE, 8(1): 1130-1137.
- [21] ALVAREZ-MOZOS J, ABAD E, GIMENEZ R, et al. Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: effects on runoff and soil loss [J]. Catena: an interdisciplinary journal of soil science hydrology-geomorphology focusing on geoecology and landscape evolution, 2014, 118: 168-178.

5 结语

1) 通过对构皮滩第一级升船机形式选择和布置进行比选, 提出了上游逆向运行的下水式升船机新方案, 该方案在高山峡谷地区可实现过坝通航目的。

2) 在地质条件等因素制约下, 采用逆向运行的下水式升船机方案, 显著降低施工难度及工程投资, 大幅缩短工期, 减少大范围边坡开挖, 将边坡或通航隧洞开挖对周边建筑物、防渗等方面不利影响降至最低, 方案经济性、可靠性均较好。

参考文献:

- [1] 钮新强, 宋维邦. 船闸与升船机设计 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 244-255.
- [2] 胡亚安, 李中华, 李云, 等. 中国大型升船机研究进展 [J]. 水运工程, 2016 (12): 10-19.
- [3] 王敬鹏, 胡亚安, 李中华. 下水式钢丝绳卷扬垂直提升升船机水力特性研究综述 [J]. 水利水运工程学报, 2013 (3): 83-91.
- [4] 余友安, 廖乐康, 金辽. 构皮滩垂直升船机金属结构和机械设备设计研究 [J]. 人民长江, 2019, 50 (5): 119-126.
- [5] 陈小虎, 徐刚, 方国宝, 等. 构皮滩水电站第一级下水式垂直升船机船厢室结构分析 [J]. 水利水电快报, 2013, 34(9): 31-35.
- [6] 水利部水利水电规划设计总院, 长江勘测规划设计研究院. 升船机设计规范: GB 51177—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.

(本文编辑 赵娟)

- [22] JAFARNEJAD M, FRANCA M J, PFISTER M, et al. Time-based failure analysis of compressed riverbank riprap [J]. Journal of hydraulic research, 2016, 55 (2): 224-235.
- [23] 冷挺, 唐朝生, 徐丹, 等. 膨胀土工程地质特性研究进展 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 112-128.
- [24] 吴建涛, 姚开想, 杨帅, 等. 引江济淮工程膨胀土水泥改良剂研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (S1): 232-235.

(本文编辑 王传瑜)