

# 云阳建全抽水蓄能电站水库泥沙淤积及回水特征分析

刘培<sup>1</sup>, 王蕙<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014;

2. 长沙理工大学 水利与海洋工程学院, 湖南 长沙 410114)

**【摘要】**泥沙淤积和水库回水分析对合理确定抽水蓄能电站进/出水口高程、机电设备选型、拦排沙措施、水沙调度方式和淹没范围等工程设计有着非常重要的意义。此文针对新建云阳建全抽水蓄能电站具体实际案例,从泥沙淤积量、过机含沙量和水库回水计算3个方面进行分析计算,采用一维恒定非均匀泥沙数学模型,研究拟建抽水蓄能电站在不同工况下的上下水库河道淤积量及淤积形态、过机含沙量和颗粒级配、水库回水特征等,为类似工程确定设计规模和工程运行管理提供技术参考和科学依据。

**【关键词】**抽水蓄能电站;泥沙淤积;过机含沙量;水库回水计算

**【中图分类号】**TV697

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1009-6159(2025)-10-0029-05

## Analysis on Reservoir Sedimentation and Backwater Characteristics of Jianquan Pump Storage Power Station in Yunyang

LIU Pei<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>

(1. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410014, China;

2. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** The analysis of sedimentation and reservoir backwater is of great significance for reasonably determining the elevation of inlet/outlet of pump storage power stations, the selection of electromechanical equipment, sediment interception and discharge measures, water and sediment dispatching methods, and submergence scope in engineering design. Focusing on the specific case of the newly-built Jianquan Pump Storage Power Station in Yunyang, this paper conducts analysis and calculation from three aspects: sedimentation amount, sediment concentration through turbines, and reservoir backwater calculation. A one-dimensional steady non-uniform sediment mathematical model is adopted to study the channel sedimentation amount, sedimentation morphology, sediment concentration through turbines, particle size distribution, and reservoir backwater characteristics of the upper and lower reservoirs of the station under different working conditions. It provides technical references and scientific bases for similar projects to determine the engineering design scale and engineering operation management.

**Key words:** Pump storage power station; Sedimentation; Sediment concentration through turbines; Reservoir backwater calculation

在抽水蓄能电站的前期设计工作中,水库泥沙淤积和回水计算是极为关键的研究课题,对保障抽水蓄能电站安全高效运行具有重要意义。因此,深入探究水库泥沙淤积和回水变化规律,对保障抽水蓄能电站工程安全、保障电站高效运行具有不可忽视的重要性。

大部分研究主要针对某单一水库。抽水蓄能电站相较单一水库,泥沙淤积计算不仅包括上下

水库,还需考虑抽水和发电工况下水库进/出水口断面的泥沙运动;而水库回水分析考虑计算范围也更多。因此,此文对新建的云阳建全抽水蓄能电站泥沙淤积和水库回水进行详细的分析研究,以保障抽水蓄能电站工程安全、保障电站高效运行提供科学依据。

收稿日期:2025-04-28

作者简介:刘培(1992—),男,工程师

### 1 工程概况

新建的云阳建全抽水蓄能电站位于重庆市云阳县高阳镇境内,小江河左岸支流双河洞沟,电站上水库坝址以上流域面积 3.54 km<sup>2</sup>,河道长度 3.09 km,河道平均坡降 109.1‰;下水库坝址以上流域面积为 25.3 km<sup>2</sup>(含上水库),河道长度 7.19 km,河道平均坡降 62.11‰。电站装机容量 1 200 MW,装机 4 台,单机容量 300 MW,额定水头 332.0 m,为一等大(1)型工程。

库区河道干流从坝前至库尾共布设 26 个断面(断面编号从 DM01 至 DM26),其中以 DM05 断面作为进/出水口计算控制断面;河道下游左岸支流 1 共布置断面 18 个,支流汇入口为 DM02;河道左岸上游支流 2 共布置断面 10 个,

支流汇入口为 DM15。

### 2 泥沙淤积及过机含沙量分析

#### 2.1 边界条件

1)基本资料。云阳建全抽水蓄能电站上、下水库入库沙量采用侵蚀模数进行计算,根据《四川省水文手册》查算上、下水库流域多年平均侵蚀模数为 800 t/(km<sup>2</sup>·a)。根据现场查勘,结合流域土壤、地质情况,以及其他工程的经验,推移质输沙量占悬移质输沙量按 30%估算。根据查图的侵蚀模数、流域面积及径流成果,计算得到上、下水库坝址泥沙特征值成果见表 1。

悬移质颗粒泥沙级配,采用 2 次实测采样成果平均值,实测成果见表 2,平均粒径 0.133 mm,中值粒径 0.019 mm。

表 1 上、下水库坝址泥沙特征值成果表

位置	流域面积/ km <sup>2</sup>	悬移质输 沙量/万 t	悬移质输 沙率/(kg·s <sup>-1</sup> )	多年平均含 沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	推悬比	推移质输 沙量/万 t	总输沙 量/万 t	悬移质侵蚀模 数/t·(km <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>
上水库	3.54	0.283 8	0.09	1.26	0.3	0.085 1	0.368 9	800
下水库	21.76	1.741	0.552	1.26	0.3	0.522 3	2.263	800

注:下水库坝址泥沙不包含上水库坝址以上泥沙。

表 2 电站实测悬移质泥沙颗粒级配成果表

颗粒级/mm	0.004	0.008	0.016	0.031	0.062	0.125	0.25	0.5	1
平均小于某粒径的沙重百分数/%	30.0	38.0	48.0	54.3	58.3	71.1	80.6	92.6	100

注:百分数指小于该粒径所占重量百分比。

2)计算参数。下水库暂无实测同时水面线资料,本阶段结合库区河床断面形状、河道形态以及两岸植被情况综合分析,天然河道糙率取 0.05。考虑到水库泥沙淤积量不大,建库后及泥沙淤积过程中的糙率均暂采用天然糙率。

#### 2.2 计算模型

采用中国电建集团中南勘测设计研究院与武汉大学水利水电学院联合开发的抽水蓄能电站一维恒定非均匀泥沙数学模型,对电站上、下水库泥沙淤积及过机含沙量进行计算。因抽水蓄能电站上、下水库的水位和泥沙量,会随抽水、放水过程在一天或一周内变化和交换,计算模型的计算时间步长为:在抽放水过程中每隔半小时进行一次泥沙计算;静水时按照静水持续时间来进行一次泥沙计算。

云阳建全抽水蓄能电站上水库的泥沙,由入

库径流携带泥沙和抽水过程中从下水库携带至上水库的泥沙量等两部分组成。上水库属于典型的盆状水库,因此泥沙淤积量采用静水沉降的方法计算。

上水库泥沙淤积量,计算方法如下:

1)水库水深为上水库水位与上水库进/出水口底板高程(当低于库底高程时,取库底高程)之差。

2)由沉速公式计算各粒径组泥沙的沉速,公式如下:

$$\text{在滞性区}(d < 0.1 \text{ mm}), \omega = 0.039 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d^2}{v} \quad (1)$$

$$\text{在紊流区}(d > 4 \text{ mm}), \omega = 1.044 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \quad (2)$$

在过渡区(0.1 mm ≤ d ≤ 4 mm),

$$\omega = \sqrt{(13.95 \frac{v^2}{d})^2 + 1.09 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} - 13.95 \frac{v}{d} \quad (3)$$

式中: $\omega$  为泥沙沉速,  $\text{m/s}$ ;  $\gamma_s$  和  $\gamma$  分别为泥沙和水的容重,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\nu$  为粘滞系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $d$  为泥沙粒径,  $\text{m}$ ;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

3) 计算各粒径组泥沙的沉降水深: 第  $K$  组泥沙的沉降水深为泥沙沉速  $\omega_k$  与静水持续时间的乘积。

4) 各粒径组泥沙的沉降量计算原则: 若第  $K$  组泥沙的沉降水深  $H_k$  大于水库水深  $H$ , 则泥沙全部沉降; 否则, 泥沙的沉降比例为  $H_k/H$ 。上水库的泥沙淤积量, 扣除静水阶段的沉降量, 所剩余含沙量的加权平均值, 为过机含沙量。

下水库形状为河道型, 构建一维分汇流水库泥沙数学模型进行计算。下水库干流的上边界和下边界条件, 分别为入库径流水沙量和下水库坝前水位, 对进/出水口临近区域的水沙运动, 设置虚拟的分汇流节点, 通过构建二维或三维模型进行计算。

### 2.3 泥沙淤积计算成果

1) 泥沙淤积总量分析。对云阳建全抽水蓄能电站进行泥沙计算, 不同运行年限下, 上、下水库泥沙淤积量和排沙比结果, 见表 3。

由表 3 可知: 上水库泥沙淤积, 主要为入库

表 3 上、下水库不同运行年限泥沙淤积量及排沙比计算成果

项目		水库运行年限					
		20 年	40 年	60 年	80 年	100 年	
上水库	悬移质入库沙量/ $\text{万 m}^3$	径流	2.14	4.28	6.42	8.56	10.71
		抽水	108.79	215.38	319.47	424.70	527.84
	推移质入库沙量(径流)/ $\text{万 m}^3$	0.64	1.28	1.93	2.57	3.21	
	悬移质出库沙量(发电)/ $\text{万 m}^3$	107.91	213.71	317.01	421.40	523.72	
	悬移质排沙比/%	97.27	97.29	97.27	97.26	97.25	
	泥沙淤积总量/ $\text{万 m}^3$	7.33	14.48	21.62	28.86	36.06	
上库底部高程/ $\text{m}$		601.55	606.54	610.21	613.17	615.56	
下水库	悬移质入库沙量/ $\text{万 m}^3$	径流	7.54	15.08	22.62	30.16	37.69
		发电	107.91	213.71	317.01	421.40	523.72
	推移质入库沙量(径流)/ $\text{万 m}^3$	2.26	4.52	6.78	9.05	11.31	
	悬移质出库沙量/ $\text{万 m}^3$	抽水	108.79	215.38	319.47	424.70	527.84
		坝址下泄	1.53	3.02	4.42	5.93	7.41
	悬移质总出库沙量/ $\text{万 m}^3$	110.32	218.40	323.89	430.63	535.25	
	悬移质排沙比(径流)/%	20.33	20.44	20.56	20.67	20.68	
	泥沙淤积总量/ $\text{万 m}^3$	14.77	29.82	45.03	59.94	74.95	
	有效库容淤积量/ $\text{万 m}^3$	2.95	5.96	9.01	11.99	14.99	
	剩余有效库容/ $\text{万 m}^3$	1 003.05	1 000.04	996.99	994.01	991.01	
有效库容淤损率/%	0.29	0.59	0.90	1.19	1.49		
坝前淤沙高程/ $\text{m}$		301.32	302.57	303.70	304.79	305.83	

注: 表中泥沙淤积总量为饱和沙, 其它沙量为干实沙, 泥沙容重  $2 650 \text{ kg/m}^3$ , 孔隙率取 0.5。

径流挟带的泥沙。水库运行 20 年后, 淤积总量  $7.33 \text{ 万 m}^3$ , 坝前淤沙高程为  $601.55 \text{ m}$ ; 水库运行 40 年后, 淤积总量  $14.48 \text{ 万 m}^3$ , 坝前淤沙高程为  $606.54 \text{ m}$ ; 每隔 20 年, 坝前淤沙高程增加  $3\sim 4 \text{ m}$ ; 水库运行 100 年后, 淤积总量  $36.06 \text{ 万 m}^3$ , 坝前淤沙高程达  $615.56 \text{ m}$ 。

由计算成果可知, 上水库运行 100 年泥沙淤积总量为  $36.06 \text{ 万 m}^3$ , 按全部淤积在死库容内考虑, 约占死库容  $14.24\%$ , 按全部淤积在调节库容内考虑, 约占调节库容  $4.16\%$ 。

下水库运行 20 年后, 泥沙淤积总量  $14.77 \text{ 万 m}^3$ ,

坝前淤沙高程为  $301.32 \text{ m}$ ; 下水库每运行 20 年, 坝前淤沙高程增加不多; 水库运行 100 年后, 泥沙淤积总量为  $74.95 \text{ 万 m}^3$ , 坝前淤沙高程达到  $305.83 \text{ m}$ 。

2) 下水库泥沙纵向淤积形态。下水库的干流、支流河道, 不同运行年限下, 泥沙淤积的纵剖面高程变化如图 1~3。进出水口位置 DM05 附近运行 100 年泥沙淤积高程为  $300.37 \text{ m}$ , 按入库泥沙平铺考虑泥沙淤积高程为  $305.83 \text{ m}$ , 因此按平铺考虑工程上更偏安全。由图 1~3 可知, 水库运行 100 年, 干流河道泥沙主要淤积在河道中部与

库尾,支流 1 主要淤积在河道中部,支流 2 河道较短,主要淤积在支流汇合口附近。

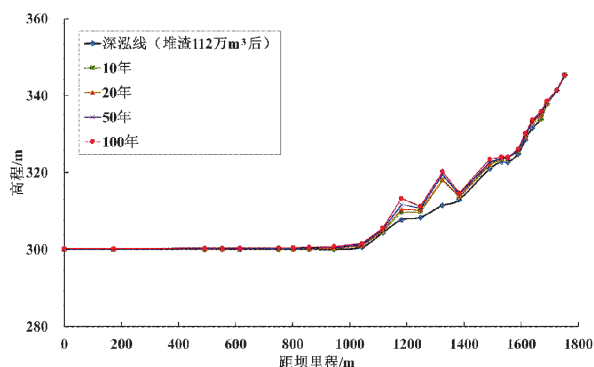


图 1 下水库干流河道不同运行年限泥沙淤积纵剖面图

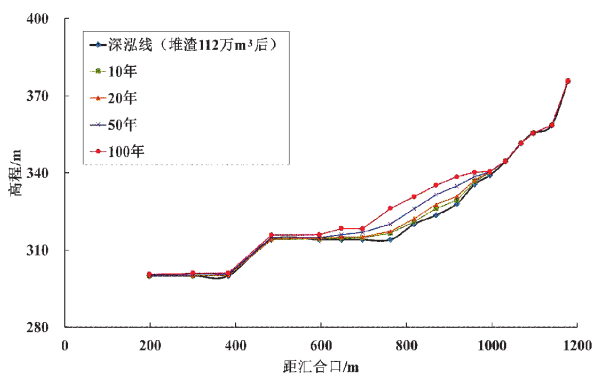


图 2 下水库支流 1 河道不同运行年限泥沙淤积纵剖面图

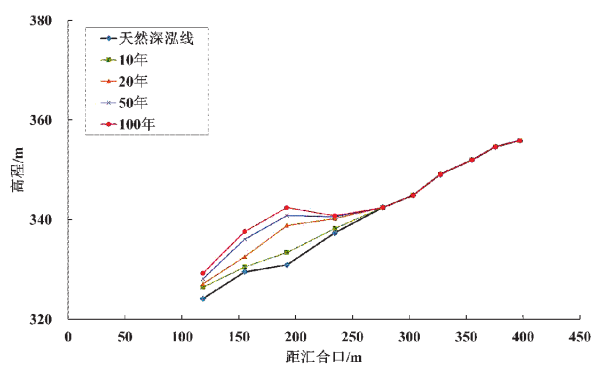


图 3 下水库支流 2 河道不同运行年限泥沙淤积纵剖面图

3)过机含沙量及级配。根据数学模型计算成果可知,水库各运行年限下,抽水过机泥沙粒径大于 0.062 mm 的比例仅占 0.1%;发电工况时,过机泥沙的最大粒径均小于 0.125 mm。新建抽水蓄能电站运行 100 年内,抽水、发电工况月平均过机含沙量在水库运行 100 年内为 89 g/m<sup>3</sup> 左右,最大过机泥沙粒径大于等于 0.25 mm 的泥沙占到总量的比例不到 0.1%。因此,可以认为,新建抽水蓄能电站过机泥沙粒径基本符合设计规范要求。

### 3 水库回水特征分析

#### 3.1 淹没对象设计洪水标准

云阳建全抽水蓄能电站需新建上下水库,根据移民安置和土地征迁要求,新建电站淹没设计洪水标准为:移民安置采用的设计洪水重现期为 20 年一遇(即 P=5%),土地征迁淹没范围采用的设计洪水重现期为 5 年一遇(即 P=20%)。

上水库集雨面积较小,蓄水后库面呈盆状,库内支沟的平均坡降大于临界坡降,洪水时为急流状态,基本不产生回水上延。下水库河道支流较短,支沟的平均坡降大于临界坡降,判断不会产生回水。此文仅对下水库干流河道设计频率为 P=5%、P=20%的设计洪水,计算天然水面线和建库后水面线,其中天然水面线采用现状情况下河道纵横断面成果进行计算,建库后水面线采用库盆修整和泥沙淤积 20 年后断面成果进行计算,为实物指标调查提供依据。

#### 3.2 计算方法

采用明渠一维恒定渐变流方法即伯努利方程,进行水库回水水面线的计算。

1) 库区断面布置。下水库干流河道长度约 1.7 km,于左岸距坝址约 0.2 km 处汇入支流 1,距坝址 1.4 km 处汇入支流 2,支流坡降大于临界坡降未计算回水,干流回水计算分段流量时考虑支流汇入。结合水库特性及库区地形,下水库干流共布置了 26 个横断面。电站建成后水面线计算采用水库运行 20 年后的断面资料。

2)设计洪水洪峰流量及起推水位。云阳建全抽水蓄能电站下水库坝址设计频率 P=5%、P=20%下天然洪水设计洪峰流量分别为 290 m<sup>3</sup>/s、191 m<sup>3</sup>/s。建库之后采用设计洪水流量根据干流、支流各控制点设计洪水洪峰流量取值,进/出水口下游断面考虑加入发电流量。

下水库干流 DM02 断面为支流 1 汇合口下游断面及进出水口下游断面,天然情况下直接采用坝址设计洪峰流量,建库后考虑发电流量加入。电站建成前天然水位线起推水位为坝址处 5%、20%设计频率洪峰流量对应天然水位,查坝址处水位-流量关系曲线得到相应的坝址天然水位分别为 277.19 m 和 276.40 m。电站建成后回水起推水位为遭遇 5%、20%设计频率洪水对应

的最高洪水位,根据电站下水库各特征水位方案洪水调节计算成果,则拟建抽水蓄能电站下水库干流流量和相应的起推水位见表4。

表4 下水库干支流分段设计洪峰流量及起推水位表

项目	天然		建库后	
	P=5%	P=20%	P=5%	P=20%
干流 洪峰流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	290	191	707.6	608.6
起推水位/m	277.19	276.40	341.60	341.33

3)其他边界条件。下水库暂无实测同时水面线资料。基于现场情况分析,河道为砾石、卵石间有孤石的山区河流,结合库区河床断面形状、河道形态以及两岸植被情况综合分析,河道糙率取0.05。

水库水面线计算终点(尖灭点)断面位置,按该断面的水库回水位不高于同流量的天然水位0.3 m 选取。

### 3.3 水库回水计算结果

基于上述方法对抽水蓄能电站下水库天然水面线及推荐水位方案建库后水面线进行计算,各频率洪水回水水面线示意图如图4、图5所示。

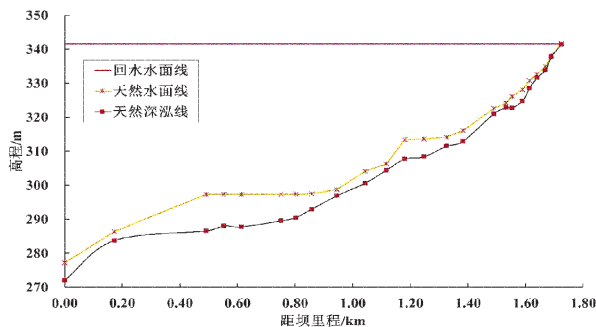


图4 P=5%频率洪水回水水面线示意图

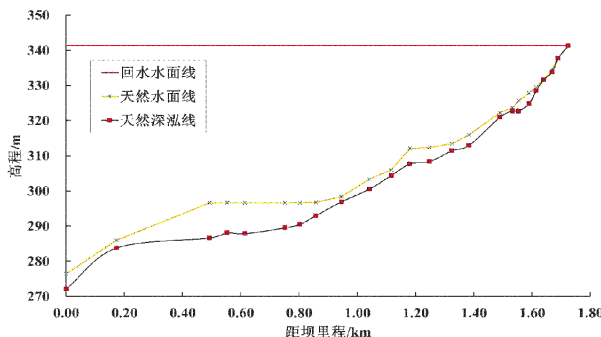


图5 P=20%频率洪水回水水面线示意图

由图4~5可知,P=5%、20%频率干流河道回水均是在DM24断面处尖灭;建库后,下水库回水水面线为坝前相应频率最高洪水位平推至库

尾,建库后水面线高于天然水面线;同一频率洪水,起推水位越高,各断面水位越高,尖灭点越靠近库尾。根据水库回水水面线的淹没范围,可为移民和征地范围提供科学依据。

## 4 结论

云阳建全抽水蓄能电站的泥沙淤积和水库回水计算,不仅考虑上、下两个水库的计算,还需考虑抽水和发电工况下上下水库进/出水口断面的泥沙运动。

通过对云阳建全抽水蓄能电站的上下水库泥沙淤积和过机含沙量的计算,分析水库运行不同年限下的河道淤积断面和淤积形态,判断过机含沙量是否满足机电设备选型要求,为水库特征水位、上水库进/出水口断面高程确定、机电设备选型等提供重要的技术依据,并为采取必要的拦排沙措施和水沙调度方式提供参考;而水库回水水面线的计算成果,为确定电站移民安置和征地范围提供重要的科学参考。

随着抽水蓄能电站运行年限不断增加,泥沙淤积量增大,泥沙淤积高程增加,水库回水水面线相应抬高,水库淹没范围增大。因此水库在规划设计中要采取相应的拦沙措施,本文中云阳建全抽水蓄能电站为降低下水库输沙量,规划设计在下水库修建2年一遇截水沟,将2年一遇以内水沙截留排出,考虑截水沟影响后下水库多年平均悬移质输沙量降至0.99万t,以降低下水库泥沙淤积高程。

## 参考文献

- [1] 燕荔.基于一维水沙模型华洲水库工程泥沙淤积及回水计算[J].陕西水利,2016(6):87-89.
- [2] 沈强.回水尖灭点确定方法对水库淹没区面积的影响[J].山东水利,2024(11):12-15.
- [3] 陶亮,余明辉,陈振虹,等.梅州抽水蓄能电站水库泥沙数学模型开发及应用[J].水力发电,2019,45(9):69-74.
- [4] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利电力出版社,1998.
- [5] 张京杰.齐河县引黄灌区泥沙淤积处理措施及建议[J].山东水利,2019(12):15-16.

基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2024JJ5022);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(24B0329)

(责任编辑 张玉燕)