

水库工程设计要点与调度运用方案分析

汪涛

浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司，浙江杭州，310002；

摘要：水库工程在水资源综合利用、防洪安全中具有重要地位，明确水库工程设计要点、确定合理的调度运用方案具有重要意义。本次研究中探讨防洪、兴利参数、特征水位确定方法，分析枢纽布置优化、大坝结构安全、泄洪消能系统等设计要点，在此基础上提出防洪、兴利、生态调度方案。以 T 项目为例，对水库工程设计与调度方案的有效性进行量化分析，在提升水库工程综合效益的同时，为保障水库运行安全提供支持。

关键词：水库工程；设计要点；调度运用

DOI: 10. 69979/3060-8767. 25. 08. 023

引言

水库是水资源调控与防洪的重要工程，其设计与调度与区域经济社会发展、生态环境稳定存在直接关系。从宏观层面进行分析，全球气候变化导致极端水文事件频发，由此对水库防洪能力提出更高的要求；从微观层面进行分析，不同流域水资源特点与功能需求存在差异，为此需要针对性设计和调度方案。结合实际情况确定水库核心参数、优化工程设计，并制定合理的调度方案，能够实现防洪、兴利、生态等多目标平衡，对水利工程高效建设与管理具有重要意义。

1 水库工程核心参数

1.1 防洪参数

防洪参数主要包括设计洪水标准、调洪演算成果、防洪库容等。根据《防洪标准》（GB 50201-2014），水库设计洪水标准应当以工程规模与下游防护对象重要性为依据，大型水库设计洪水重现期通常取 100~500 年一遇，校核重现期取 1000~2000 年一遇洪水。以三峡水库为例，其设计洪水标准为 1000 年一遇（洪峰流量 98800 m³/s），校核洪水标准为 10000 年一遇（洪峰流量 124300 m³/s）。

采用水量平衡方程与蓄泄关系联解方法进行调洪演算，通过试算法确定泄洪建筑物规模与防洪库容，如

（1）式所示：

$$\frac{Q_1 + Q_2}{2 \cdot \Delta t} = V_2 - V_1 + q_1 + \frac{q_2}{2 \cdot \Delta t} \quad (1)$$

式中： Q_1 -时段初入库流量-m³/s；

Q_2 -时段末入库流量-m³/s；

V_1 -时段初水库蓄水量-m³/s；

V_2 -时段末水库蓄水量-m³/s；

Δt -计算时-s

某流域 20 年一遇洪水过程计算显示，当溢洪道宽度为 30 m、堰顶高程 120 m 的情况下，可将洪峰流量由 3200 m³/s 减少至 1800 m³/s，对应防洪库容为 1200 万 m³。

1.2 兴利参数

兴利参数将综合利用水资源作为目标，主要包括径流调节计算参数、水量平衡参数。根据长系列水文资料计算径流调节，采用时历法或数理统计法推求。以丹江口水库为例，基于 1956-2016 年径流数据，采用时历法计算多年平均调节水量为 110 亿 m³，保证率 P=90% 的情况下调节水量为 85 亿 m³。

水量平衡分析应当综合考虑来水量、用水量、蒸发渗漏损失等要素，如（2）式所示：

$$W_{\text{来}} = W_{\text{用}} + W_{\text{损}} + W_{\text{蓄}} \quad (2)$$

式中： $W_{\text{来}}$ -入库水量-m³；

$W_{\text{用}}$ -供水量-m³；

$W_{\text{损}}$ -蒸发渗漏损失量-m³；

$W_{\text{蓄}}$ -水库蓄水量变化值-m³。

某中型灌溉水库计算显示，灌溉期用水量为 2.5 万 m³/d，蒸发渗漏损失率 5%，

为满足灌溉期 120 天用水需求应当预留调节库容 300 万 m³。

1.3 特征水位

通过特征水位可了解水库运行状态,主要包括死水位、正常蓄水位、汛限水位,其中确定死水位应当满足发电最小水头、灌溉引水高程、泥沙淤积预留空间等要求^[1]。例如,小浪底水库死水位 230 m,可满足下游引黄灌区取水需求,并预留有效拦沙库容 75.5 亿 m³;

正常蓄水位是水库兴利效益核心参数,通常使用经济比较法确定正常蓄水位。以向家坝水电站为例,通过动能经济计算,正常蓄水位从 370 m 提升至 380 m 时,装机容量增加 48 万 kW,淹没损失增加 32 亿元,最终确定正常蓄水位为 380 m;根据防洪与兴利平衡原则确定汛限水位,长江流域水库汛限水位通常在主汛期前下降至汛限高程,例如鄱阳湖流域柘林水库主汛期(4-6月)汛限水位 65 m,后汛期(7-9月)上升至 68 m,可同时满足防洪与发电需求。合理确定特征水,与水库综合效益、运行安全性存在直接关系。

2 水库工程设计要点

2.1 枢纽布置优化设计

枢纽布置过程中应当综合考虑地形地质条件、工程任务、运行需求,通过多方案比选使功能协同与经济性达到最佳。枢纽布置核心设计流程:根据河谷形态确定坝址位置,采用等高线地形图与三维建模技术对地形约束条件进行分析;根据防洪、发电、供水等任务配置水工建筑物,形成“大坝+泄洪设施+输水系统”格局;通过工程投资、施工难度、运行安全评估确定优选方案。

枢纽布置将建筑物间水流衔接作为工作重点。通过水工模型试验验证泄洪水流流态,在此基础上优化溢洪道与消力池衔接角度,确保泄洪时水面线平稳过渡。例如黄河小浪底水利枢纽,通过设置多级孔板消能泄洪洞与排沙洞,使下泄流速由 35m/s 降至 8m/s,有效降低对下游河道造成的冲刷。

2.2 大坝结构安全设计

大坝结构设计过程中,将抵御水荷载、地震作用、渗透破坏作为重点目标,同时还应当满足强度、稳定性、耐久性要求。混凝土坝设计过程中,应当对重力坝抗滑稳定进行计算,如(3)式所示:

$$K_f = \frac{f'(\sum W - \sum U)}{\sum P} \quad (3)$$

式中:

f' -抗剪断摩擦系数;

$\sum W$ -垂直荷载总和-N;

$\sum U$ -扬压力总和-N;

$\sum P$ -水平荷载总和-N。

我国规范要求基本荷载组合要求 $K_f \geq 1.1$,特殊荷载组合 ≥ 1.05 。如三峡大坝坝基抗剪断摩擦系数为 0.9,经计算抗滑安全系数为 1.32,满足设计标准。土石坝设计应当将渗流与边坡稳定作为控制重点。采用有限元软件模拟渗流场,在此基础上确定浸润线位置、渗透坡降,防止发生管涌、流土等现象。以小浪底土石坝为例,通过设置斜心墙防渗体与下游排水棱体,有效控制坝体渗透坡降 < 0.3 ,满足《碾压式土石坝设计规范》(SL 274-2020)要求。地震工况下采用拟静力法或动力分析法对坝体抗震性能进行计算,通过设置抗震墙、加强坝坡防护等措施使抗震能力得到提升^[2]。

大坝耐久性设计将考虑环境侵蚀因素作为重点。使用抗硫酸盐水泥与表面涂层技术对混凝土坝进行处理,可有效降低水化学侵蚀风险;在植被护坡与排水系统设计支持下,土石坝可有效减少雨水冲刷与冻融破坏。例如丹江口大坝在加高工程,采用界面处理剂对新老混凝土结合面进行处理,使粘结强度达到 2.8MPa,有效提升结构整体性。

2.3 泄洪消能系统设计

泄洪消能系统设计需要确保洪水安全下泄,同时控制下游冲刷。设计内容包括泄洪能力计算、消能工选型、水力模型验证。根据伯努利方程计算溢洪道过流能力,如(4)式所示:

$$H_0 = h + \frac{v^2}{2g} + \xi \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中:

H_0 -作用水头-m;

H -堰顶水深-m;

V -流速-m/s;

g -重力加速度-9.81m/s²;

ξ -局部阻力系数。

某溢洪道设计中,经计算堰顶高程 150m、溢流宽度 40m,相应的最大泄流量为 2500m³/s。消能工选型应当结合下泄流量、河床地质条件。底流消能适用于软基河道,通过消力池形成水跃消能,消能率最小值为 40%、最大值为 70%^[3]。例如湖南柘溪水电站消力池深 5m、长

50m, 将下泄流速由 28m/s 降至 5m/s。挑流消能常用于岩基河道, 通过鼻坎将水流挑射至远离坝脚区域, 例如三峡左岸泄洪洞采用窄缝式挑坎, 使水舌扩散宽度达到 80m, 冲刷坑深度减少 40%。

新型消能工技术持续发展, 多级孔板消能、内消能工等技术在高水头工程中广泛应用。黄河小浪底工程采用孔板消能泄洪洞, 运用孔板突缩突扩效应, 在 160m 水头下成功限制洞内流速 $<40\text{m/s}$, 消能率 $>90\%$ 。设计中通过 1:50 比尺水工模型试验验证消能效果, 确保下游河床冲刷深度不超过设计允许值。

3 水库调度运用方案

3.1 制定防洪调度规则

制定合理的防洪调度规则可有效保障水库与下游防洪安全, 制定过程中需要结合设计洪水标准、泄洪能力、下游防洪需求。防洪调度规则主要包括分级调度、预泄机制、补偿调度。依据《水库洪水调度规程编制导则》(SL 769-2018), 当入库流量小于防洪限制水位对应泄流能力时, 采用自由泄洪; 超过该阈值时启动分级调度, 优先启用溢洪道, 流量 $>5000\text{ m}^3/\text{s}$ 时同步开启泄洪洞。

3.2 制定兴利调度运行策略

兴利调度以水资源综合利用为目标, 拟定过程中应当同时满足供水、发电、航运等需求。确定分级供水为供水调度策略, 当水库蓄水量超过正常蓄水位 90%的情况下, 按 100%保证率供水; 蓄水量下降至死库容以上 20%的情况下, 启动应急供水方案, 优先保障生活用水, 降低工业用水 30%。以丹江口水库为例, 该水库通过优化调度, 向华北地区平均调水 40 亿 m^3 /年, 满足沿线 5000 万人用水需求。

发电调度需要遵循“电调服从水调”原则, 结合电力负荷曲线与来水情况制定运行方案。日调节水电站应当在峰荷时段加大发电流量, 例如浙江紧水滩水电站通过实时跟踪华东电网负荷变化, 在用电高峰时段将发电流量由 $40\text{ m}^3/\text{s}$ 提升至 $80\text{ m}^3/\text{s}$, 发电效率提高 18%。年调节水库需要根据径流丰枯特性调整发电策略, 枯水年减少发电用水量 25%, 保障下游生态基流^[4]。

3.3 明确生态调度控制方法

生态调度将维持河流生态系统功能为目标, 满足生态基流、鱼类繁殖、湿地补水需求。生态基流采用 Ten

nant 法、 Q_p 法等多种方法校核确定, 通常情况下取多年平均流量的 10%-30%作为常年生态基流。黄河流域水库群通过统一调度, 确保沿程最小生态流量 $\geq 25\text{ m}^3/\text{s}$, 以此维持河道连通性^[5]。

通过模拟自然水文节律确定鱼类繁殖调度。长江中游水库群在 4-6 月鱼类繁殖期, 通过脉冲式放水模拟洪峰过程, 下泄流量从 $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 骤增至 $8000\text{ m}^3/\text{s}$ 且持续 48h, 促进四大家鱼产卵。监测数据显示, 实施生态调度后长江中游鱼类产卵量相比调度前增加 35%。

4 水库工程设计要点与调度运用方案实践—以 T 项目为例

4.1 项目概况

T 项目位于长江支流清江中游, 控制流域面积 1.2 万 km^2 , 平均径流量 128 亿 m^3 。T 工程以防洪、发电为主, 兼顾航运与生态功能, 为 II 等大(2)型水利枢纽。枢纽建筑物包括碾压混凝土重力坝、岸边溢洪道、坝后式电站、通航建筑物, 其中大坝坝顶高程 215m, 最大坝高 142m, 正常蓄水位 210m, 总库容 28.6 亿 m^3 、调节库容 15.3 亿 m^3 。工程设计洪水标准为 100 年一遇(洪峰流量 $18500\text{ m}^3/\text{s}$), 校核洪水标准为 1000 年一遇(洪峰流量 $25800\text{ m}^3/\text{s}$), 电站装机容量 $6\times 35\text{ 万 kW}$, 年发电量 48 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。项目建成后可将下游防洪标准由 20 年一遇提升至 50 年一遇, 并改善 120km 航道通航条件。

4.2 设计要点与调度运用

4.2.1 优化枢纽工程设计

T 项目采用集中式方案开展枢纽布置, 利用“V”型河谷地形实现对大坝、溢洪道、电站的紧凑布置。大坝采用碾压混凝土重力坝, 通过掺加 30%粉煤灰降低水化热, 坝体防渗采用双排帷幕灌浆, 固定孔距 2m, 灌浆深度达到基岩透水性 $\leq 5\text{Lu}$ 处。溢洪道设置 5 孔开敞式溢流堰, 堰顶高程 198m、单孔净宽 15m, 采用挑流消能, 鼻坎反弧半径 25m、挑射角 28° , 水工模型试验验证发现, 可控制下泄水流挑距控制在坝脚 120m 以外。在大坝左岸布置电站厂房, 采用单机单管引水方式, 压力钢管内径 8m、设计水头 105m, 水轮机额定流量 $380\text{ m}^3/\text{s}$, 额定效率 94.5%。

4.2.2 防洪兴利联合调度方案

T 项目防洪调度采用三级控制规则: 当库水位小于汛限水位 195m 的情况下, 按来水流量自由泄洪; 当 >19

5m 的情况下,启动 2 孔溢洪道并控制泄量 $\leq 3000\text{m}^3/\text{s}$;库水位 198m 的情况下,全开溢洪道并启动泄洪洞,最大泄量为 $8500\text{m}^3/\text{s}$ 。2023 年 7 月实测洪水过程中,入库洪峰流量 $16200\text{m}^3/\text{s}$,通过预泄腾库及分级调度,控制下泄流量 $5800\text{m}^3/\text{s}$,有效削减洪峰 64%。

T 项目兴利调度执行“丰蓄枯补”策略,每年 5-9 月主汛期将水位控制在汛限水位运行,10 月开始蓄水至正常蓄水位。发电调度结合华中电网负荷曲线,峰荷时段(8:00-11:00、18:00-23:00)机组全开运行,平荷时段保留 3 台机组发电,发电量 1300 万 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{d}$ 。航运调度通过调节下泄流量维持航道水深 h 至少为 3m,枯水期平均过闸船舶 22 艘次/d,相比工程建设前提升 45%。

4.2.3 生态调度保障措施

按多年平均流量 10%确定生态基流为 $40\text{m}^3/\text{s}$,通过生态放水孔持续下泄。鱼类繁殖期(4-6 月)实施脉冲式调度,每月开展 2 次流量骤变过程,流量从 $40\text{m}^3/\text{s}$ 提升至 $200\text{m}^3/\text{s}$ 并维持 36h。配套建设过鱼设施,采用鱼道与集运鱼系统结合方案,鱼道总长 480m,设 42 级水池,池长 12m、宽 5m,上下游水位差 0.6m,监测显示鱼类过坝成功率为 82%。

4.3 效果分析

表 1 所示为 T 项目防洪效益统计数据,通过对表 1 进行分析发现,工程建成后,下游防洪标准从 20 年一遇提升至 50 年一遇,在 2023 年实测洪水过程中,控制最大下泄流量 $8500\text{m}^3/\text{s}$,洪峰削减率 64%,有效保障下游 30 万人口与 1.2 万 hm^2 耕地安全。

表 1 T 项目防洪效益统计数据

项目	工程前	工程后	改善幅度
防洪标准	20 年一遇	50 年一遇	-
设计洪峰流量 (m^3/s)	18500	18500	-
校核洪峰流量 (m^3/s)	25800	25800	-

最大下泄流量 (m^3/s)	-	8500	-
洪峰削减率	-	64%	-

表 2 所示为 T 项目兴利与生态效益统计数据,通过对表 2 进行分析发现,电站年发电量达到 48 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,平均供水量 2.8 亿 $\text{m}^3/\text{年}$,航道通航能力提升至 1000t 级;生态基流达标率 98.5%,鱼类过坝成功率 82%,有效促进流域水资源综合利用与生态保护协调发展。

表 2 T 项目兴利与生态效益统计表

指标	数值
年发电量(亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$)	48
年均供水量(亿 m^3)	2.8
航道通航能力(t)	1000
生态基流达标率	98.5%
鱼类过坝成功率	82%

5 结束语

通过对水库工程设计要点与调度运用方案进行研究,有助于提升水库综合效益、保障区域安全。未来在开展相关研究的过程中,应当深入探索新型材料、技术在水库工程中的应用,深化多目标协同调度研究,加大生态友好型调度方案创新力度,推动水库工程智能化、绿色化发展,为社会经济、生态保护提供支持。

参考文献

- [1] 犹鸿森,李永,张泽宇,等.考虑输水工程滞时特性的水库群协同调度研究[J/OL]. 人民长江,1-10[2025-07-02].
- [2] 吴恒飞.岩板桥水库除险加固工程设计研究[J]. 科学技术创新,2025,(13):189-192.
- [3] 安皓源.某水库导流洞封堵工程设计及施工技术[J]. 黑龙江水利科技,2025,53(05):80-83.
- [4] 胡英明.水库安全集中供水工程设计及实施方案[J]. 低碳世界,2025,15(05):106-108.
- [5] 洪佳.芦坝水库扩建工程水文水利计算与调度运用计划[J]. 水资源开发与管理,2025,11(03):15-22.