

水库水位变化对溢洪道流量分布的影响分析

谢昌发

赣州市第六建筑工程有限公司 江西赣州 341000

【摘要】采用数值模拟方法研究水库水位变化对溢洪道流量分布的影响规律，建立了不同水位条件下的水力模型。通过计算分析水位从正常蓄水位至设计洪水位期间的流量变化过程，揭示了水位变化与溢洪道流量分布之间的关系。研究表明，随着水位升高，溢洪道各泄槽单宽流量分布呈现出明显的变化规律，且泄槽间的流量差异度也随之发生变化。研究发现，在正常蓄水位条件下，边侧泄槽受边墙影响流量分布不均；随着水位升高至设计洪水位，各泄槽流态趋于稳定；当达到校核洪水位时，需重点关注空化和振动等影响。基于研究结果，提出了针对不同水位工况的优化调度建议，可为水库运行管理提供理论指导，对提高溢洪道泄洪效率具有重要意义。

【关键词】水库水位；溢洪道；流量分布；数值模拟；水力特性

水库溢洪道作为泄洪建筑物的重要组成部分，其流量分布直接影响到泄洪效率和水库安全。水位作为影响溢洪道流量分布的关键因素，其变化会导致入流条件、压力分布以及流态发生显著改变。近年来，全球气候变化加剧了暴雨强度和频率，给水库防洪带来新的挑战。深入研究水位变化规律与溢洪道流量分布的关系，对于提高水库防洪能力和优化泄洪建筑物设计具有重要意义。溢洪道流量分布直接关系到泄洪建筑物的安全运行和水库防洪能力的发挥，尤其在遭遇超标准洪水时，合理的流量分布可以充分利用泄洪通道能力，降低上游壅水位，提高防洪安全度。

1 水库水位变化特征

1.1 水位变化的时空分布

水库水位变化具有显著的时间和空间分布特征。从时间尺度看，水位变化可分为年际变化、年内变化和短期波动三个层次。年际变化主要受流域降水量变化影响，呈现出丰、平、枯水年的交替特征；年内变化则表现为汛期水位快速升高，非汛期逐步降低的周期性变化规律；短期波动主要受降雨过程、上游来水和水库调度等因素影响，体现为水位的动态波动特性^[1]。从空间尺度看，水库水位呈现出纵向和横向分布差异。纵向上，从坝前至库尾形成水面比降，且这种比降随着水位升高而减小；横向上，受河床地形、支流汇入等影响，不同断面的水位存在差异^[1]。这种时空分布特征直接影响着溢洪道入流条件，进而影响流量分布。

1.2 典型水位情景分类

根据水库运行要求和防洪安全标准，水位情景可分为以下几种典型工况：一是正常蓄水位工况，此时水库处于常规运行状态，水位维持在设计蓄水位附近波动，溢洪道以小流量泄洪为主，各泄槽流量相对稳定；二是汛限水位

工况，水库需降至防洪限制水位以预留防洪库容，溢洪道根据调度规则进行泄洪，水位变化频繁，对流量分布影响明显；三是设计洪水位工况，当遭遇设计洪水时，水位上升至设计洪水位，溢洪道全面开启泄洪，水流状态充分发展；四是校核洪水位工况，面临超标准洪水时，水位可能超过设计洪水位，此时溢洪道在极端条件下运行。在实际运行中，水库水位往往在这些典型工况之间转换，每种工况下溢洪道的进口条件、水流状态和能量特性都存在显著差异，这直接影响着溢洪道的流量分布特征和泄洪效率。

1.3 水位过程分析方法

水位过程分析采用统计分析和水文模拟相结合的方法。统计分析主要包括：水位频率分析，通过对历史水位资料进行统计，得出不同频率水位的概率分布规律；水位持续时间分析，研究各种水位的持续时间特征；水位涨落速率分析，计算水位上升和下降过程的变化速率。水文模拟则基于水量平衡方程，结合水库调度规则，模拟不同来水条件下的水位变化过程。这些分析方法为研究水位变化规律提供了科学依据，同时也为评估水位变化对溢洪道流量分布的影响奠定了基础^[2]。分析中需要考虑水文气象条件、上游来水特征、水库调度方式等多个影响因素，以确保分析结果的准确性和可靠性。

2 溢洪道流量分布计算

2.1 流量分布基本理论

溢洪道流量分布理论基于水力学基本原理，主要包括伯努利方程、动量方程和连续性方程。根据伯努利方程，溢洪道流量与水头高度呈现非线性关系，流量系数受到进口形式、堰顶形状和下游水位等因素影响^[3]。对于宽顶堰型溢洪道，其单宽流量可表示为 $q=mh^{3/2}$ ，其中 m 为流量

系数, h 为溢流水头。动量方程描述了水流运动过程中的能量转换关系, 对于多泄槽溢洪道, 各泄槽之间存在相互影响, 造成流量分布不均。连续性方程则体现了总流量在各泄槽之间的分配关系, 确保总流量守恒。这些基本理论为分析水位变化对流量分布的影响提供了理论基础。

2.2 计算模型建立

建立溢洪道流量分布计算模型需考虑水流的三维特性和水位变化的动态过程。模型基于Navier-Stokes方程组, 其中连续性方程为:

$$\partial \rho / \partial t + \partial(\rho u_1) / \partial x_1 + \partial(\rho u_2) / \partial x_2 + \partial(\rho u_3) / \partial x_3 = 0;$$

动量方程为:

$$\partial(\rho u_i) / \partial t + \partial(\rho u_i u_j) / \partial x_j = -\partial p / \partial x_i + \partial T_{ij} / \partial x_j + \rho g_i$$

其中, ρ_{false} 为流体密度, u_i 为速度分量, p 为压力, T_{ij} 为粘性应力张量, g_i 为重力加速度。在求解过程中, 采用有限体积法进行空间离散, 采用二阶迎风格式处理对流项, 采用SIMPLE算法求解压力场。网格划分采用结构化与非结构化相结合的方式, 在溢流面和泄槽等关键部位加密网格。对于自由水面的追踪, 采用VOF方法:

$$\partial F / \partial t + \partial(F u_1) / \partial x_1 + \partial(F u_2) / \partial x_2 + \partial(F u_3) / \partial x_3 = 0$$

其中 F 为水体积分数。湍流采用标准 $k-\epsilon$ 模型, 近壁面采用壁面函数处理。通过这些基本方程的耦合求解, 结合适当的边界条件和初始条件, 可以准确模拟水位变化过程中的流量分布特征, 为后续分析提供数值基础。

2.3 边界条件确定

边界条件的确定是保证计算结果准确性的关键。入口边界采用给定水位的方式, 水位值根据不同工况设定, 同时考虑水流速度分布; 出口边界采用自由出流条件, 确保下游水流状态不影响上游计算; 固壁边界采用无滑移条件, 并使用壁面函数处理近壁区域流动^[2]。对于水面边界, 考虑大气压力和表面张力的影响。在泄槽之间的分隔墩处, 需要特别处理壁面附近的网格, 以准确模拟分隔墩对水流的导向作用。边界条件的设置需要随着水位的变化而动态调整, 以反映不同水位条件下的流动特征。

3 水位变化影响分析

3.1 不同水位工况下的流量分布特征

水库水位变化过程中, 溢洪道流量分布呈现显著的阶段性特征^[4]。在正常蓄水位条件下, 由于水头较小, 边侧泄槽受两侧边墙影响明显, 流量小于中间泄槽, 各泄槽间流量分布不均匀性较大。进口处的收缩效应显著, 实际流量系数低于理论值, 水流动能较小导致泄槽间水力联系较弱。当水位上升至设计洪水位时, 水流动能增大, 收缩效应减弱, 各泄槽进口流态趋于稳定, 流量系数接近理论值, 中

间泄槽与边侧泄槽的流量差异逐渐减小, 总体流量分布更加均匀。在校核洪水位工况下, 虽然各泄槽流量分布已趋于稳定, 但需重点关注空化、振动等安全问题。水流脉动加剧可能引起结构振动, 巨大的动能需要有效消散以避免下游冲刷。研究表明, 水位升高过程中, 溢洪道各泄槽的流量分布均匀性逐渐改善, 这主要归因于水头增加导致的水流动能增大, 减弱了进口段收缩效应的影响。

3.2 泄槽流量变化规律

溢洪道泄槽流量随水位变化呈现出明显的非线性特征。在低水位阶段, 由于水头较小且进口段收缩效应显著, 流量增长速率较缓。随着水位升高, 流量增长加快, 展现出典型的堰流特性。当水位接近设计水位时, 由于泄槽过流能力接近设计值, 流量增长趋于平缓。从空间分布来看, 中间泄槽流量变化曲线较为平滑, 而边侧泄槽受两侧边墙影响, 其流量变化曲线存在一定波动。从时间序列分析, 边侧泄槽流量变化相对滞后于中间泄槽, 这种滞后性在水位快速变化时表现得更为明显。通过定量分析发现, 不同泄槽间的流量差异也随水位升高而变化, 在低水位时差异较大, 高水位时趋于一致。这种变化规律与进口段水流状态、泄槽间相互干扰以及边墙效应等因素密切相关, 对总体泄洪效率产生重要影响。

3.3 流量分布均匀性分析

采用变异系数法对溢洪道流量分布均匀性进行定量评价, 通过计算各泄槽单宽流量的标准差与平均值之比来表征分布均匀程度。研究表明, 在低水位条件下, 变异系数较大, 表明流量分布不均匀性显著; 随着水位升高, 变异系数逐渐降低, 当接近设计水位时, 流量分布趋于均匀。通过分析流量分布的偏度和峰度, 发现其概率分布特性也随水位变化而改变, 在高水位时各泄槽流量分布更加集中。为深入评价均匀性, 引入熵值法分析流量分布的有序度, 结果表明随着水位升高, 系统熵值呈增大趋势, 反映出流量分布的均匀性逐步提高。这种定量分析方法为评价溢洪道泄流性能和优化调度方案提供了科学依据, 同时也揭示了水位变化对流量分布均匀性的影响机理, 如图1所示。通过建立水位-均匀性关系曲线, 可为实际工程运行提供参考依据。(见图1)

4 应用与建议

4.1 水位控制建议

基于水库水位变化对溢洪道流量分布的影响规律, 提出针对性的水位控制建议。在汛期来临前, 应根据预报水情科学制定水位控制方案, 合理安排预泄流量, 避免水位快速上升导致流量分布不均。当水位处于正常蓄水位至汛限水位区间时, 应采用分级控制策略, 通过逐级抬高水位的方式, 使各泄槽流态逐步适应水位变化。对于超设计洪水

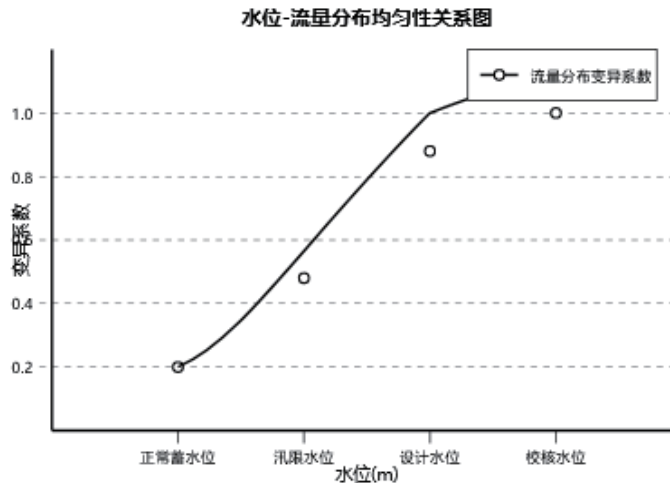


图1 水位-流量分布均匀性关系图

情况，制定应急水位控制预案，明确不同水位下的预警指标和处置措施。同时，建议建立水位变化速率控制标准，当水位变化速率超过阈值时，及时采取调控措施，确保流量分布均匀性。此外，结合水库调度规则，优化汛限水位的确定方法，在保证防洪安全的前提下，减少水位剧烈波动对溢洪道流量分布的不利影响。

4.2 流量分布优化措施

针对不同水位条件下流量分布不均的问题，提出相应的优化措施。在工程设计层面，优化进口段布置形式，改善边侧泄槽的引流条件，减小两侧边墙对流量分布的影响。对于已建工程，可通过调整闸门开度配合泄流，实现流量的均匀分配。在低水位工况下，优先启用中间泄槽泄流，逐步过渡到边侧泄槽，避免边墙效应导致的流量分配不均。当水位升至设计洪水水位时，采用全泄槽同步泄流方式，充分发挥溢洪道的泄洪能力。通过建立流量分布优化模型，结合实时水位变化，动态调整各泄槽的泄流量，实现流量分布的最优控制。基于长期运行数据分析，总结不同水位条件下的最优泄流组合，形成标准化的操作指南，指导实际运行。同时，针对不同季节来水特点，制定差异化的流量分配方案，确保各泄槽均匀受力。

4.3 监测与预警对策

建立以水位变化监测为核心的预警体系，实现对流量分布的动态监控^[5]。重点监测内容包括：水位变化速率、各泄槽实际流量、流态特征等关键参数。采用自动化监测设备，对水位和流量进行连续监测，建立水位-流量关系数据库。设置分级预警指标，当监测参数接近预警阈值时，系统自动报警并给出处置建议。针对不同水位工况，制定相应的监测频率和巡查要求，重点关注水位快速变化时期的流量分布状态。建立监测数据分析评估机制，定期开展数据统计分析，评估水位变化对流量分布的影响程度。根据

评估结果，及时优化监测布点和预警阈值，提高预警的准确性。同时，加强监测人员培训，提高异常情况识别和处置能力，确保监测预警系统的有效运行。

5 结语

本文通过理论分析和数值模拟方法，研究了水库水位变化对溢洪道流量分布的影响规律。研究发现，溢洪道流量分布随水位变化呈现显著的阶段性特征。在正常蓄水位条件下，边侧泄槽受边墙影响导致流量分布不均；随着水位升高至设计水位，各泄槽流量分布趋于均匀；当达到校核水位时，需重点关注空化和振动等影响。基于水位-流量关系机理分析，揭示了水位变化是影响溢洪道流量分布的关键因素，其变化过程直接决定了流量分布的均匀性。

针对研究结果，提出了水位控制、流量优化和监测预警等针对性建议，可为水库防洪调度和工程设计优化提供参考。建议后续研究中结合实际工程案例，进一步验证数值模拟结果的准确性，深入探讨水位变化影响机理，为提高溢洪道泄洪效率和安全运行提供科学依据。

参考文献:

- [1] 牛元芳, 杨凯. 变化环境下水库汛期运行水位优化设计[C]//中国水利学会. 2023中国水利学术大会论文集(第四分册). 河北省邯郸市涉县水利局;水利部海委海河下游管理局水文水资源管理中心, 2023: 9.
- [2] 林祯兆. 溢洪道的水力特性研究[J]. 水利规划与设计, 2010, (02): 48-49+54.
- [3] 张子贤. 溢洪道泄洪的可靠性计算[J]. 水电能源科学, 2002, (02): 61-63.
- [4] 张子贤. 溢洪道泄洪的可靠性计算[J]. 水电能源科学, 2002, (02): 61-63.
- [5] 田阳辉, 王体俊. 高变幅水位对滑坡变形影响速率关联度研究[J]. 路基工程, 2021, (06): 104-108.