

水库防洪管理数字孪生的方法

丁键¹ 朱宝卫² 何清²

1 南京市江宁区水务局, 江苏南京, 211100;

2 江苏省太湖地区水利工程管理处, 江苏苏州, 215000;

摘要: 针对传统水库防洪预警依赖降雨或实时水位数据、缺乏精细化洪水模拟与动态决策支持的不足, 本研究提出一种基于数字孪生技术的“四预”(预报、预警、预演、预案)防洪管理方法。该方法以数字孪生水情分析模型和可视化展示模型为核心, 通过耦合水文、水动力算法与三维仿真技术, 实现洪水演进全过程模拟与动态管理。

关键词: 水库防洪; 数字孪生水情; 动态决策

DOI: 10. 69979/3060-8767. 25. 03. 002

技术方法包括: 1) 构建数字孪生水情分析模型, 整合产流算法(基于流域蓄水容量分布)与汇流算法(地貌瞬时单位线法), 结合水库调度模型及下游水动力模型, 生成小时级洪水水位与到达时间预报; 2) 采用聚类分析(霍顿河数率、面积率等地理参数)自适应匹配河网级别, 优化模型适用性; 3) 建立可视化展示模型, 集成 WebGIS/WebGL 引擎、三维倾斜摄影及预警预案数据库, 动态呈现洪水淹没场景与应急响应规则。通过相关系数、效率系数等四类指标率定验证模型精度, 确保预报可靠性。

该方法可实现水库下游洪水小时级精准预报, 结合防洪应急规则(如警戒水位、汛限水位)生成即时预警, 并通过三维动态预演辅助优化应急预案部署。相较于传统模式, 其优势在于融合数据驱动与机理模型, 提升预报时效性与可视化交互能力, 为水库管理者及下游居民提供前瞻性避险决策支持, 有效应对突发暴雨事件, 强化防洪减灾能力。

1 背景技术

水库防洪管理方法和系统是以数字孪生水情分析模型和数字孪生可视化展示模型 2 个模型为工作核心, 支撑“四预”(预报、预警、预演、预案)功能实现。数字孪生水情分析模型是透过降雨、水文、水动力理论耦合建立的算法模型, 输入水情数据后, 可模拟水库流域的洪水水位小时尺度时间序列, 并产制预报结果。数字孪生可视化展示模型是使用 1 套数据库管理体系和 1 个 WebGIS/WebGL 可视化界面组成, 1 套数据库内容可支撑水库防洪预警、预案管理工作; 1 个 WebGIS/WebGL 可视化界面可支撑水库防洪模拟展示预演工作。

2 技术方案

一种基于数字孪生的水库防洪管理方法, 包括以下步骤:

S1、建立数字孪生水情分析模型; S2、建立数字孪生可视化展示模型; S3、所述孪生水情分析模型的预报; S4、将所述 S3 的预报结果发布预警; S5、所述数字孪生可视化展示模型的预演。

进一步, 所述 S1 具体为:

S1.1、收集水库汇水区范围历史降雨观测时间序列、水库下游水位观测时间序列, 并对时间序列进行数据分析、校核、补遗;

S1.2、建立水文模型

使用产流算法及汇流算法的耦合模型 $f = f(R, \theta N(t))$;

所述产流算法为:

$$R = \begin{cases} PE + W - WM + WM(1 - \frac{PE + \alpha}{WMM})^{b+1} & (\alpha + PE \leq WMM) \\ PE - (WM - W) & (\alpha + PE > WMM) \end{cases}$$

其中, R 为降雨产流量; PE 为降雨量; W 为土壤含水量; WM 为流域平均蓄水容量; WMM 为流域最大蓄水容量; b 蓄水分布系数, 无因次, 越小表示包气带蓄水容量分布越均匀; a 为蓄水容量曲线, 公式为:

$$a = WMM \left[1 - \left(1 - \frac{W}{WM} \right)^{\frac{1}{1+b}} \right]$$

所述汇流算法为:

$$\theta N(t) = \theta(0) \cdot \Phi(t)$$

其中, $\theta N(t)$ 为 N 级河网的地貌瞬时单位线; $\theta(0)$ 为初始状态机率向量; t 为时间; $\Phi(t)$ 内部传输机

率阵列，表达式为： $\Phi(t) = eAt$

其中，A 为传输率阵列，定义为：

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda_1 \sum_{j>1} p_{1j} & \lambda_1 p_{12} & \lambda_1 p_{13} & \dots & 0 \\ 0 & -\lambda_2 \sum_{j>2} p_{2j} & \lambda_2 p_{23} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{N \times N}$$

其中， p_{ij} 为从 i 级河网传输到 j 级河网的机率；

λ_i 为 i 级河网平均滞留时间；

S1.3、建立水库模型，表达式为：
$$\bar{I} = \bar{O} \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} + Z$$

其中， $\bar{I}$ 为时段平均入库流量； $\bar{O}$ 为时段平均出库流量； ΔV 为时段始末库容差； Δt 为时段长； Z 为时段内损失量；

S1.4、建立水库下游洪水模型

使用水动力演算法建立，所述水动力演算法内应包含下游河道和洪范区地形高程信息，供水库下游洪水模拟使用；

水动力演算法内的边界条件为水库的出流量模拟时间序列；

水库下游洪水模型通过水动力演算法计算最后会得到水库下游水位模拟时间序列；

S1.5、数字孪生水情分析模型率定验证

数字孪生水情分析模型率定验证过程，通过调整模型内参数，进行率定验证评价，直到评价结果达到可以接受或极限为止；

率定验证包括相关系数法、效率系数法、洪峰水位到达时间法、洪峰水位误差百分比法。

进一步，所述 S1.2 具体为：

S1.2.1、收集 m 个水库上游地理信息，通过地形高程分析各个水库流域分水岭得到霍顿河数率 $X_{1,m}$ 、面积率 $X_{2,m}$ 、河流平均长度 $X_{3,m}$ 、河长率 $X_{4,m}$ ，得 m 个上游地理信息为 $B_m = \{X_{1,m}, X_{2,m}, X_{3,m}, X_{4,m}\}$ ；

S1.2.2、得到 l 组聚类类别的中心点，包括霍顿河数率中心点 $c_{1,1}$ 、面积率中心点 $c_{2,1}$ 、河流平均长度中心点 $c_{3,1}$ 、河长率中心点 $c_{4,1}$ ， l 组聚类类别中心点为 $C_1 = \{c_{1,1}, c_{2,1}, c_{3,1}, c_{4,1}\}$ ；

S1.2.3、将 $C_1 = \{c_{1,1}, c_{2,1}, c_{3,1}, c_{4,1}\}$ 选取第 d 组类别 $C_d = \{c_{1,d}, c_{2,d}, c_{3,d}, c_{4,d}\}$ ， $d = 1, 2, \dots, l$ ，分别输入所述 S1.2 产流算法及汇流算法的耦合模型 $f = f(R, \theta, N(t))$ ；汇流算法的地貌瞬时单位线法选择为 3 至 N 级河网，得到 $S_{t,x} = \{(C_d, f_x$

$(C_d)\} : C_d \in C_1\}$ ， $x = 3, 4, \dots, N$ ；

并对 $S_{t,x}$ 进行评价，得到 N_d 级河网地貌瞬时单位线是最适合该第 d 组聚类类别为 $C_d \rightarrow N_d$ ；

S1.2.4、若有新水库上游地理信息，通过地形高程分析新水库流域分水岭得到霍顿河数率 Y_1 、面积率 Y_2 、河流平均长度 Y_3 、河长率 Y_4 为 $E = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$ ；

通所述 S1.2.2 的 $C_1 = \{c_{1,1}, c_{2,1}, c_{3,1}, c_{4,1}\}$ ，找到第 d' 组类，使 $\min(E - C_d)$ ；通过所述 S1.2.3 得到 $C_d \rightarrow N_d$ ，第 d' 组类别对应最适合 N_d 级河网地貌瞬时单位线法为最适合所述新水库使用。

进一步，所述相关系数法和所述效率系数法是由水库下游水位观测时间序列和水库下游水位模拟时间序列进行计算统计，计算出来的结果越接近于 1 代表数字孪生水情分析模型模拟结果越好，越可信；

所述洪峰水位到达时间法是由水库下游水位观测尖峰到达时间和水库下游水位模拟尖峰到达时间相减计算，计算出来的结果越接近于 0 代表数字孪生水情分析模型模拟结果越好，越可信。

所述洪峰水位误差百分比法是由水库下游水位观测尖峰和水库下游水位模拟尖峰相减后，除以水库下游水位观测尖峰，计算出来的结果越接近于 0 代表数字孪生水情分析模型模拟结果越好，越可信。

进一步，所述 S2 具体步骤为：

S2.1、建立水情分析数据库；

建立三组数据库接口包括未来小时降雨预报时间序列、水库下游水位预报时间序列、水库下游预警发布时间序列；

S2.2、建立可视化图层数据库；

带有地理信息数据，包括 GIS 地图、三维倾斜摄影、三维模型图层；

S2.3、建立预警预案数据库；

所述预警预案数据库内容是由水库管理人提供包括防洪应急预案、防洪应急预案；

所述防洪应急预案信息为防洪应急响应级别规定内容包括水库操作规线、正常蓄水位、防洪高水位、设计水位、校核水位、汛限水位、堤顶高程、河道设防水位、警戒水位、保证水位；

S2.4、建立 WebGIS/WebGL 可视化界面；

将各个数据库，输入至 WebGIS/WebGL 可视化引擎

里处理,并在可视化界面服务器展示,水情分析数据在可视化图层数据的地理关系;水情分析数据在预警预案数据里应发布、部署和执法信息使用。

进一步,所述 S3 具体步骤为:

S3.1、收集水库汇水区范围过去小时降雨观测时间序列、未来小时降雨预报时间序列,并对时间序列进行数据分析、校核、补遗;

S3.2、所述时间序列输入调用数字孪生水情分析模型进行模拟,最后产制水库下游水位预报时间序列;

进一步,所述 S5 具体为:

S5.1、调用数字孪生可视化展示模型;

S5.2、数字孪生可视化展示模型预演

防洪预演情境调用所述 S2 可视化图层数据库和 WebGIS/WebGL 可视化界面服务器展示动态预演成果。

3 有益效果

应用数字孪生模型,支撑预报、预警、预演、预案的功能实现,对水库管理者下游居民群众安全的四预机制建立;

传统水库管理者的预警机制主要为透过降雨预报或实时水位预报发布预警工作;

通过该方法的数字孪生水情分析模型,可知道水库

流域未来洪水水位和到达时间预报,且预报时间尺度为小时,可以更有效面对不可预知的突发暴雨事件,并且优化传统水库管理者工作内容。

通过数字孪生水情分析模型产制洪水水位和到达时间预报,和当地防洪应急预案规则结合,可实时进行即时且领先的预警发布,对水库管理者和下游人民群众起到更提前感知避险的安全意识。

通过该方法的数字孪生可视化展示模型,可大范围、全天候、多频次、多角度、快速、低成本动态模拟展示未来洪水演变过程,对预警可能发生洪灾应变不足的地方进行补强。最后可提供水库管理者辅助决策工作,与当地防洪应急预案结合,执行部署和执法工作。

参考文献

- [1] 刘希阳. 磨盘山水库防洪设施提升工程全速推进[N]. 哈尔滨日报, 2025-03-17(001).
- [2] 黄晓敏. 小型防洪灌溉水库除险分析及加固治理实践研究[J]. 云南水力发电, 2025, 41(03): 203-206.
- [3] 王清正, 梁满营, 王龔, 等. 碧流河水库防洪预泄调度规则研究[J]. 东北水利水电, 2025, 43(03): 52-55+72. DOI: 10.14124/j.cnki.dbslstd22-1097. 2025. 03. 017.