物理-水动力与 GCN-LSTM 耦合的多间联合调度

尹兆祥[1] 王 震[1] 王宏冰[2] 韩晋春[3] 秦瑞娟[1]

1.内蒙古河套灌区水利发展中心总干渠分中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

2.内蒙古河套灌区水利发展中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

3.内蒙古河套灌区水利发展中心总干渠分中心第三枢纽所 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘 要】：多闸孔、多控制断面和连续来水变化会使水工程调度同时受到水位传播、流量分配和开度边界影响。本文分析明渠非恒定流、闸门过流、图卷积空间关联和长短期记忆时序预测之间的耦合关系，梳理水位、流量、开度和调度指令在多间系统中的传递方式，并讨论不同来水条件下的调度适用边界。水动力约束先筛除不可执行开度组合，GCN-LSTM 再估计短时水位过程，可减少单孔调整对相邻断面的连锁扰动。

【关键词】：水动力；GCN-LSTM；多间联合调度；闸门过流；水位预测

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.017

引言

多间联合调度常见于分水闸、节制闸、泵闸组合和串并联渠道系统。各调度单元共享上游来水，又分别对应不同下游水位、过流能力和运行边界，单独调整某一闸门会改变相邻断面的水面线与流量分担。固定规则曲线容易割裂水位传播、开度变化和局部回水影响；纯数据模型若缺少连续方程、动量方程和闸门边界约束，预测结果也会与实际水动力过程脱节。将水动力约束与 GCN-LSTM 耦合，可同时保留物理可解释性和多断面时空关联。

本文仅围绕水动力关系、图结构特征、时序预测和调度边界展开。

1 水动力耦合调度模型

1.1 明渠非恒定流水动力控制方程

多间渠道的断面面积随水位升降而变，断面流量又沿程受分流、补水和闸门回水影响，连续方程和动量方程要共同作为调度模型的第一层约束[1]。模型把每一控制断面的过水面积、沿程流量梯度、旁侧入流、水面坡降和摩阻坡降同时纳入水量平衡与动力平衡，先判断某一开度组合是否会造成局部蓄量突变，再把可接受的流量边界交给后续预测环节。调度步长过大时，水位传播时滞会被压缩成单点误差，闸门动作看似满足目标水位，实际可能在相邻断面形成反向波动。渠道糙率、断面形态和侧向补排水条件还会改变同一开度下的水面线，模型应把这些边界作为计算前提，而非在预测误差出现后再补救。

断面流量时间梯度越大，相同调度步内的水位响应越敏感，候选开度越要接受水动力边界筛选。断面流量时间梯度按式（1）表达。

$$P_Q=-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)-gA\frac{\partial y}{\partial x}+gA(S_0-S_f)\ (1)$$

式（1）中，P_Q 为断面流量时间梯度，单位为 m^3/s^2；Q 为断面流量，单位为 m^3/s；A 为过水断面面积，单位为 m^2；g 为重力加速度，单位为 m/s^2；y 为水深，单位为 m；x 为沿程距离，单位为 m；S_0 为渠底坡降，单位为无量纲；S_f 为摩阻坡降，单位为无量纲。该关系用于限制调度步内的动量变化。

1.2 闸门过流和断面水位响应模型

闸孔净宽、闸门开度和上下游有效水头共同决定过闸流量，调度指令只有转化为可核算的流量边界后，才能进入水位传播计算[2]。自由出流条件下，开度变化会放大或削弱局部水头对下游断面的影响；淹没出流、侧收缩和闸槽损失明显时，流量系数应按实测率定修正。重力加速度采用国际标准值 9.80665m/s²，只作为孔口出流关系的固定参数，不替代工程现场流量率定。

多间系统中，相邻闸孔的开度差还会改变局部回水与紊动损失，单孔计算结果必须放入上下游水位响应链条内核对，尤其要关注低水头小开度时的流量敏感性。过闸流量由孔口出流关系按式（2）计算。

$$Q_g=C_d ba\sqrt{2gH}\ (2)$$

式（2）中，Q_g 为过闸流量，单位为 m^3/s；C_d 为流量系数，单位为无量纲；b 为闸孔净宽，单位为 m；a 为闸门开度，单位为 m；g 为重力加速度，单位为 m/s^2；H 为上下游有效水头，单位为 m。该关系把开度候选转换为水动力边界。

1.3 图卷积网络的空间关联模型

多断面水位并非互相独立，上游闸门开度、相邻渠道连通性和旁侧取退水会通过河槽传播形成空间相关[3]。图卷积网络把闸门、控制断面和汇入口抽象为节点，把水力连通、距离衰减和控制关系抽象为边权，使每个节点的水位特征在邻域内聚合。邻接矩阵不宜只按几何距离设置，还要兼顾闸门控制方向、支渠汇入位置和断面代表性，否则远近关系会掩盖真实水力传递。

经过图卷积后的断面水位空间特征继续进入时序模型，承担相邻断面对当前预测状态的约束作用。断面水位空间特征按式（3）表示。

$$Z=\sigma(D^{-1/2}AD^{-1/2}XW) \quad (3)$$

式（3）中，Z 为断面水位空间特征，单位为 m；A 为含自连接的邻接矩阵，单位为无量纲；D 为度矩阵，单位为无量纲；X 为上一层水位特征，单位为 m；W 为可训练权重，单位为无量纲；σ为非线性激活函数，单位为无量纲。该关系用于聚合相邻断面影响。

1.4 长短期记忆网络的时序预测模型

来水过程具有滞后、突增和退水不对称特征，单步回归难以同时保留前期蓄水状态和当前开度扰动。LSTM 通过输入门、遗忘门和输出门保存关键历史状态，可把连续时段的水位、流量和开度序列转化为下一调度步的预测向量。训练样本应覆盖平稳流、涨水和退水过程，并把缺测、闸门检修和异常水位单独标记，避免模型把设备状态误学成水动力规律。预测窗口过短会削弱滞后表达，窗口过长又可能引入陈旧边界，实际应用要结合调度步长和渠道响应时间确定。

1.5 水动力约束下多间流量调度模型

耦合调度的核心不是把预测结果直接下发，而是在物理约束、空间关联和时序预测之间建立反馈控制式校核。模型先由连续方程、动量方程和闸门过流关系限定候选开度，再用 GCN-LSTM 估计各控制断面的短时水位过程，最后以安全水位、下泄流量和闸门动作幅度为边界选择调度指令。若预测水位满足目标但对应开度越过设备边界，候选方案仍应剔除；若物理计算可行但预测显示下游断面波动过大，也要调整相邻闸门分担。

调度输出还应保留原因链，说明哪些开度因水量平衡、过流能力或水位波动被排除，便于运行人员核对。图 1 展示模型耦合计算链条。

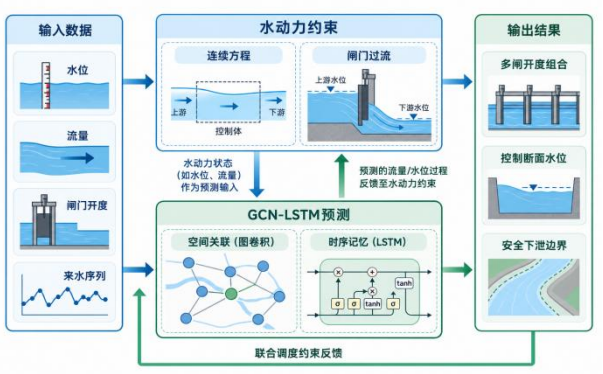

图 1 水动力与 GCN-LSTM 耦合的多间调度计算链条

图 1 显示，水动力约束先筛选开度边界，GCN-LSTM 预测再反馈水位和流量过程，输出结果同步约束控制断面水位与安全下泄边界。

2 调度结果与适用分析

2.1 不同来水条件下多间调度过程

平稳来水条件下，联合调度更强调各闸孔流量分担和下游目标水位的平滑保持；突增来水条件下，模型应优先压制上游水位快速抬升，并控制相邻闸门开度差，避免单孔集中泄流造成局部冲刷；退水阶段则要防止过快关闸引起下游水位断崖式下降[4]。三类过程都以水动力边界筛除不可执行指令，再利用预测序列比较不同开度组合的连续影响。调度人员据此区分立即放大泄量和分段平滑调整两类动作，把预泄、削峰和水位恢复放入同一时间链中判断。

2.2 控制断面水位过程适用分析

控制断面水位是判断多间调度是否有效的直接对象，但其适用性取决于边界条件是否稳定、观测断面是否代表主要水力变化、训练样本是否覆盖常见来水过程。对常规流量区间，耦合模型能够把邻近断面影响和时间滞后同时纳入判断；遇到超标准洪水、闸门故障或突发堵塞时，模型输出只能作为计算建议，还要接受水工规程、现场校核和人工指令复查。若断面传感器漂移或支渠取水突然改变，预测偏差会快速传递到开度组合，现场复核应优先检查边界数据、闸门率定、闸前闸后水位和上下游水位同步性，而非盲目调参。

3 结语

水动力与 GCN-LSTM 耦合的多间联合调度，应把物理约束放在预测输出前后共同校核。明渠连续关系限定水量平衡，闸门过流关系把开度转换为流量边界，图卷积网络刻画多断面空间影响，长短期记忆网络识别来水和水位序列的滞后变化。常规工况下，模

型可比较候选开度组合并保持水位过程平顺；极端洪水、设备异常和样本外边界下，调度结果仍要接受水工规程、现场复查和运行经验共同约束。

参考文献：

[1] 吴承昊,刘家珲,陈建钊,等.基于 SSL-GCN-LSTM 的换道意图识别方法[J].山东理工大学学报(自然科学版),2026,40(6):17-23.

[2] 周子涵.基于 GCN-LSTM 的地铁短时客流预测[J].中国科技纵横,2026,(12):34-36.

[3] 毛训梁,潘红忠,黄爽兵,等.基于 LSTM-GA 的三峡水库水质模拟及优化调度方案研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2026,47(4):118-126.

[4] 林宏志,王奕博,李赫,等.基于 CNN-LSTM 的水库多目标优化调度规则提取[J].水利水电快报,2025,46(11):43-49.