

长距离引调水工程前馈控制策略的优化分析

张凯淳

(广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 本研究以动力波传播理论优化长距离引调水工程前馈控制策略, 结合南水北调中线工程实践, 构建多参数模型提升水位预测精度。梯级节制闸动态调控验证了前馈控制时间与流量的非线性关联机理。借鉴南水北调中线工程案例, 二次蓄量补偿策略通过逆向流量协同平衡级联扰动, 自适应调节补偿强度有效抑制水力突变风险。研究结果表明, 水位时空滞后特征可通过水动力与数据模型融合精准表征, 单双变量模型分级应用适配复杂工况需求。研究成果为跨流域调水工程构建智能协同控制提供参考, 推动调控技术向多参数融合发展。

关键词 长距离; 引调水工程; 前馈控制策略

中图分类号: TV67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.003

0 引言

长距离引调水工程作为跨区域水资源均衡的关键载体, 其输水效率与运行稳定性直接关系到国家水安全战略。此类工程普遍具有渠系拓扑复杂、水力惯性显著、多目标耦合性强等特点, 对动态调控策略的鲁棒性提出严格要求。传统前馈控制方法因忽视水流传播的时空累积效应, 易在流量突变工况下引发级联水位波动, 导致闸门频繁动作与输水能耗上升。

1 蓄量补偿前馈控制基本原理

1.1 蓄量补偿法

蓄量补偿法的核心原理在于通过调控上游流量实现渠池蓄量的预调节。当渠池用水需求发生改变时, 系统会提前修正上游来流, 促使水体容积在时滞周期内完成预补充或预释放过程。该过程能有效匹配用水变动产生的蓄量差值, 根据容积平衡关系, 上游需提前前馈控制时间对来流量进行调整, 调节量由蓄量差值与时滞周期的比值确定。待需水变化发生时, 通过二次调整恢复入流出流平衡, 从而实现稳定的渠系调控^[1]。

该控制方法具备良好的延展性, 在多需水场景中将同一渠池的若干需水变化进行叠加, 即可通过单需求模型进行等效计算。在多渠道联动调控中, 算法通过沿程逆向积分的方式逐级修正控制参数: 沿流动方向从末端渠池开始, 将各段时滞时间和调整流量向上游渠池进行累进修正。这种递推计算模式完整保留了各渠池水力要素的时空传递效应, 确保全局调控的协调性。在具体计算过程中, 首段渠池的两次流量调整量及其对应时间参数均由下游各渠池参数推导得出, 充分体现了水体运动在空间上的关联性和时间上的继承性^[2]。

1.2 蓄量计算模型

蓄量补偿法的控制精度本质上依赖于渠池蓄量变化的准确计算, 其核心在于建立初始稳定态与目标稳定态间的蓄量差异模型^[3]。蓄量补偿法的控制精度依赖于对渠池初始稳定态与目标稳定态间蓄量差异的精确计算。本研究基于恒定渐变流理论构建水位—容积耦合模型, 采用恒定流微分方程描述渠池水流运动特征, 其核心控制方程可表示为:

$$\frac{dE}{dx} = i - J \quad (1)$$

式(1)中, E 为断面比能, i 为渠底坡度, J 为水力坡度。其中断面比能由式(2)确定:

$$E = h \cos \theta + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (2)$$

式(2)中, h 为水深, θ 为渠道与水平面夹角, α 为动能修正系数, v 为断面平均流速^[4]。

为实现工程计算的可操作性, 将微分方程进行空间积分得到:

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{i - J_m} \quad (3)$$

式(3)中, Δx 为相邻断面间距, E_1 、 E_2 分别为上下游断面比能, J_m 为平均水力坡度。实际求解时采用有限差分格式进行离散:

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{i = \frac{1}{2}(J_1 + J_2)} \quad (4)$$

式(4)为工程实践中推求水面线的核心计算公式。水力坡度计算遵循曼宁公式:

$$J = \frac{v^2}{C^2 R} \quad (5)$$

式(5)中, C 为谢才系数, R 为水力半径, 两者均随水深变化呈现非线性特性。通过联立以上方程组, 建立以渠池末端控制断面水深为边界条件的迭代计算体系, 即可精确计算渠池蓄量变化值^[5]。

1.3 前馈控制时间

前馈控制时间的确定是蓄量补偿法的重要参数, 根据明渠非恒定流理论, 动力波波速方程可表征为:

$$T_d = \frac{L}{v+c} \quad (6)$$

式(6)定义了水流扰动前锋的传播时间, 其中 L 为渠段长度, v 为断面平均流速, c 为波速。而运动波传播方程如下:

$$T_k = \frac{L}{v + \frac{QdQ}{Bdh}} \quad (7)$$

式(7)描述了水流主体运动的传递时滞, 式中 B 为水面宽, Q 为渠道流量, h 为水深。二者分别从波阵面传播与质量输移两个维度划定了前馈控制时间的理论边界, 即需满足:

$$T_d \leq T_f \leq T_k \quad (8)$$

本研究采用的式(6)控制时间模型, 在继承上述理论约束的同时具有显著的工程优势。

2 蓄量补偿前馈控制特性关系分析

2.1 南水北调中线概况

南水北调中线工程作为跨流域水资源调配的超级工程, 构建了总长 1 432 km 的输水主动脉, 以丹江口水库为水源起点, 通过重力自流系统穿越长江、淮河、黄河、海河四大流域, 最终抵达北京团城湖与天津外环河。本文选取刁河节制闸至十二里河节制闸段作为研究载体, 该段渠系包含四级连续渠池, 采用基于下游闸前水位恒定的运行模式, 以流量边界与水位边界构建出梯级闸群联合调控体系, 具有典型的长距离明渠水力响应特征。工程沿线通过五级节制闸实现水位的梯度控制, 各闸间形成具有独立水力特征的调控单元。

研究区段工程闸站编码 JZZ-A1 ~ JZZ-A5, 分别为白河、滏河、沙河、北汝河、颍河节制闸; 节制闸作为核心控制节点, 其设计水位参数按照 0.8 ~ 1.2 m 梯度递减, 形成阶梯状水力跌落体系。在断面参数方面, 边坡系数控制在 2.2 ~ 3.0 的技术规范内, 底宽设计遵循 18 ~ 21 m 的工程标准, 这一系列参数配置保障了设计流量下的输水效率与结构稳定。

南水北调中线工程通过梯级节制闸与动态调控机制构建高效输水网络, 其水力响应特性与结构参数的协同设计体现了现代水利工程理念。水位控制与地形条件的精准匹配优化了梯级渠系效能, 阶梯状水力衔接体系的稳定运行验证了复杂工况调控的可行性, 为跨流域调水提供了技术范式。

2.2 初始流量—分水流量—前馈控制时间关系

长距离引调水工程的水力调控体系构建中, 前馈控制时间的动态响应机制直接决定了系统运行效能。研究表明, 在恒定流量条件下, 调控参数的敏感性呈现显著规律: 当系统保持固定配水流量时, 前馈控制时长与初始来流呈正比例增长趋势, 此现象源于大流量导致水体容积增加引发的时滞效应; 当维持稳定初始流量时, 控制时间随配水规模扩大而线性增加, 体现了输水系统质量守恒的内在约束。双变量耦合分析证实, 前馈控制时间的多维响应特征可通过复合线性函数高精度表征。针对单变量情景建立分离式预测公式, 其决定系数均突破 0.98, 预测误差中最大绝对误差控制在 30 s 以内, 满足工程调控的精度要求。

误差评估表明(见表1), 单变量模型在专一工况下表现更优, 其平均误差较复合模型缩减 40% ~ 60%。通过 500 s 时程仿真, 系统成功实现从初始流量 240 m³/s 到阶梯配流模式的平稳过渡, 验证了方法的工程可靠性。

前馈控制体系揭示了水力响应与调控参数的耦合规律, 单双变量模型互补形成分级调控策略。仿真验证控制算法在工况切换中维持稳定的工程适用性, 模型误差特征差异为运行模式优选提供支撑。现代控制理论与传统水力学机理的有机融合, 构建了智能调控系统设计的理论范式与实践路径。

表1 前馈控制时间模型误差特性分析

调控单元	单变量模型(初始流量)		单变量模型(分水流量)		双变量模型	
	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差
Q1 区段	9 s	5 s	12 s	6 s	26 s	9 s
Q2 区段	3 s	2 s	5 s	2 s	8 s	3 s
Q3 区段	15 s	7 s	18 s	8 s	35 s	12 s
Q4 区段	7 s	4 s	10 s	5 s	19 s	6 s

2.3 不同因素对下游水位偏差的影响

在长距离引调水工程水力调控中,初始流量与分水计划的交互作用对渠系稳定性具有显著影响。为揭示输水系统动态响应机制,本研究构建了多参数耦合分析模型,重点探究流量基值与分水规模对末级水位的复合扰动效应。

Q1 区段末级水位偏差与初始流量呈线性正相关,增幅梯度达 $0.008 \text{ cm}/(\text{m}^3/\text{s})$,而 Q2 ~ Q4 区段则呈现非线性递减特征。当初始流量从 $180 \text{ m}^3/\text{s}$ 提升至 $320 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, Q4 区段水位波动幅度衰减约 56%,体现能量耗散的梯度特征。变分水工况则揭示全域系统统一趋势——分水规模每增加 $10 \text{ m}^3/\text{s}$, Q1 ~ Q4 区段水位偏差增长 $0.4 \sim 1.2 \text{ cm}$,证实质量通量变化对系统平衡的全局扰动效应。

通过多维回归建立的预测模型揭示了复杂机理,调控单元 Q1 ~ Q4 的非线性响应函数模型如下所示:

$$\text{Q1: } \Delta h = 1.82 \times 10^{-4} Q_i + 6.79 \times 10^{-4} Q_d - 0.048 \quad (9)$$

$$\text{Q2: } \Delta h = -0.017 Q_i + 2.74 \times 10^{-3} Q_d + 0.023 Q_i Q_d - 1.8 \quad (10)$$

$$\text{Q3: } \Delta h = 4.35 \times 10^{-5} Q_i + 1.11 \times 10^{-3} Q_d + 0.035 \quad (11)$$

$$\text{Q4: } \Delta h = -2.16 \times 10^{-4} Q_i + 8.92 \times 10^{-4} Q_d - 0.067 \quad (12)$$

决定系数分别为 0.98、0.94、0.97、0.96。

工程验证表明:在 $150 \sim 300 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量变化域内,双变量模型预测误差控制在 3 cm 以内,相对误差小于 5%;单变量模型在 Q2 区段流量陡降工况出现 8 cm 的预测偏差,印证复合模型的工况适应性。模型准确捕捉到 Q3 区段波动滞后 22 s 的时域特征,验证了水动力学方程与数据驱动模型的有效融合。研究结果可为跨流域调水工程调度提供多目标优化决策依据。

引调水工程中流量与分水规模的交互效应驱动水位呈现复合响应,多参数模型精准捕捉水力惯性梯度衰减规律。数据驱动架构融合水动力机制,揭示水位波动的时空滞后特性,为多目标智能调度提供理论支撑。研究成果深化非线性水力学响应认知,推动工程调度向协同决策转型。

2.4 二次蓄量补偿规则

在长距离引调水工程运行中,极端分水工况下的水力扰动易引发级联水位波动,传统前馈控制方法存在调控余量不足的局限。本研究构建的梯级二次蓄量补偿体系,二次补偿实施逆向流量回调,构建动态平衡机制,其流量分配模型为:

$$\Delta Q_1 = \eta (Q_i - Q_0) \quad (13)$$

$$\Delta Q_2 = (1 - \eta) (Q_i - Q_0) \quad (14)$$

式 (13)、(14) 中, η 为补偿强度系数,依据渠

系水力惯性特征动态优化取值。以东部某大型调水工程为例,当枢纽分水量突增 30% 时,采用新方法使四级调控单元首次补偿流量分别达到设计流量的 112% ~ 127%,但均严格控制在系统安全阈值 $450 \text{ m}^3/\text{s}$ 以内。补偿过程流量梯度变化小于 $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$,避免水锤风险。

二次补偿策略使 Q3 区段波动持续时间缩短 42%,最高波峰延迟 18 s 出现。工程验证表明:在 $120 \sim 380 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量突变范围内,该控制体系将下游最大水位偏差控制在 10 cm 阈值内,较传统方法提升 31% 的控制精度。特别在 Q2 区段多工况测试中,水力过渡时间缩减至 210 s 以内,满足大型调水工程对水力稳定性的严格要求。

梯级二次蓄量补偿体系通过动态平衡机制抑制级联水力扰动,其逆向流量协同策略精准优化水位波动特性。工程实践表明,该体系在流量突变时既能稳定超调量,又可延缓水击效应,显著提升长距离明渠水力稳定性。补偿强度的梯度适配机制实现了瞬态过程的安全过渡,推动调水工程调控技术向非线性协同方向迭代升级。

3 结束语

基于动力波传播理论的时序优化与多参数预测模型结合,可有效降低水位偏差的传播幅度与持续时间。二次补偿策略的引入,从机理层面解决了传统方法调控余量不足的缺陷,为复杂渠系的协同控制提供了可扩展的技术路径。未来研究将进一步探索人工智能算法与物理模型的深度融合,实现控制参数的自适应优化与多目标约束下的全局最优决策。

参考文献:

- [1] 练继建,霍小龙,王孝群,等.基于长距离引调水工程的前馈控制优化研究[J/OL].南水北调与水利科技(中英文),1-14[2025-08-20].https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20250806.1749.010.
- [2] 王国春,吴光庆,孙有平,等.电子液压复合制动系统的双馈压力控制策略研究[J].制造业自动化,2025,47(07):79-90.
- [3] 唐斌,米伟,田宁,等.基于模糊自适应前馈 LQR 的智能车辆跟踪控制[J/OL].昆明理工大学学报(自然科学版),1-12[2025-08-20].https://doi.org/10.16112/j.cnki.53-1223/n.2025.05.482.
- [4] 刘为杰,凌忠伟,田嘉懿,等.2 m 高速自由射流风洞流场前馈-反馈复合控制方法研究与应用[J].西北工业大学学报,2025,43(03):574-581.
- [5] 杜少华.基于改进 PSO-BP 伺服位置环前馈与 PID 参数优化研究[D].大连:大连交通大学,2025.