

雷晓辉, 刘巧银, 张召, 等. 基于稳定输水状态辨识的弧形闸门过流能力计算[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1041-1050. LEI X H, LIU Q Y, ZHANG Z, et al. Calculation of flow capacity of arc gate based on stable water conveyance state identification[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1041-1050. (in Chinese)

基于稳定输水状态辨识的弧形 闸门过流能力计算

雷晓辉^{1,2}, 刘巧银^{1,2}, 张召³, 屠绎炜⁴, 韩子钧⁵, 徐璐瑶^{1,2}

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;
3. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 4. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室,
北京 100084; 5. 华北水利水电大学水资源学院, 郑州 450046)

摘要:过闸流量的精确计算是实现调水系统科学调度以及平稳运行的基础,同时也是调水工程数字孪生建设的重要水利专业模型之一,调度运行中虽已积累大量监测数据,但水流状态受节制闸调度指令影响,当前稳定输水状态被破坏,待调度完成后再次达到新的稳定状态,而监测设备无法识别过渡状态,虽然监测数据符合实际情况,但仍存在较大的波动性不利于参数率定,直接影响过流计算的可靠性。针对上述问题,提出一种稳定输水状态辨识方法,通过分析原始监测数据下流量系数变化值的分布规律得到其变化阈值。基于此,从监测数据中筛选出具有代表性的稳态数据集,结合量纲分析方法利用稳态数据率定参数,进行过闸流量计算。以南水北调中线工程中的金水河节制闸、淇河节制闸和七里河节制闸为例,对比分析利用原始监测数据和稳态数据率定参数后的流量误差效果。结果表明:流量平均相对误差从 7.26%、3.35% 和 3.80% 减少至 6.55%、3.22% 和 2.19%。该研究提高了闸门水力计算精度,为进行高精度输水调度模拟预演及决策运行提供有力支撑。

关键词:明渠调水工程; 数字孪生; 稳定输水状态; 弧形闸门; 流量计算; 量纲分析

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0103

节制闸是明渠调水工程输水系统中的重要控制性建筑物,通过调节闸门开度实现渠道水位和流量的控制目标^[1-2]。弧形闸门因其挡水面接近流线形状,具有重量轻、启闭力小和水力学结构特性较好等优点^[3],广泛应用于各大明渠调水工程之中。过闸流量的精确计算是水动力学仿真模型的基本要求,是分析渠道水力响应特性的重要依据,其计算结果可为调度人员进行输水决策提供有力支撑^[4]。随着国家水网构建以及数字孪生水利建设的全面推进^[5-6],过闸流量计算模型作为调水工程数字孪生建设的水利专业模型之一,不仅为数字孪生技术在水利工程中的精准预演和智能仿真提供了技术支持,而且其计算精度直接影响到明渠调水工程数字孪生建模的应用效果。因此,对弧形闸门过流能力的

研究具有重要意义。

目前,针对弧形闸门的过流计算已存在多种基于能量方程的公式,常见的包括清华大学公式^[7]、武水公式^[8]、Herry 公式^[9-10]、南科院经验公式^[11]、传统水力学公式^[12-15]等。以上公式虽然得到广泛应用,但经验公式中淹没系数、流量系数等参数率定过程繁琐,且由于闸门附近流态复杂,水位-流量关系曲线呈非线性,率定工作难度加大。鉴于上述问题,人们提出了基于量纲分析方法的流量计算公式。郭永鑫等^[16]针对闸孔出流建立量纲分析模型,结果表明流量计算相对误差小于 10%。Bijankhan 等^[17]针对弧形闸门流量校核问题,基于白金汉定理并利用不完全自相似概念,提出不同形式的量纲方程,经过验证可将其应用于自由出流到淹没出流的过

收稿日期: 2024-06-09 修回日期: 2024-09-09 网络出版时间: 2024-09-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240929.1757.005>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209404); 国家自然科学基金项目(52209046)

作者简介: 雷晓辉(1974—),男,陕西澄城人,正高级工程师,博士,主要从事水系统调度研究。E-mail: lxh@jwhr.com

通信作者: 张召(1992—),男,河北辛集人,高级工程师,博士,主要从事调水工程模拟与调控模型研究。E-mail: zhangzhao@jwhr.com

渡区。Vaheddoost等^[18]和Shakouri等^[19]以能量-动量方程为基础,建立收缩系数与能量损失系数的函数关系,并结合符号回归方法进行量纲分析,结果显示与传统能量公式相比,流量计算误差更小。近年来,随着大数据、人工智能等新兴信息技术的发展,王艺霖等^[20]基于长短期记忆神经网络建立弧形闸门流量计算模型,并与量纲分析方法对比,结果表明该算法更适用于大、中流量过流计算。Dou等^[21]基于不同神经网络算法建立了自由出流计算模型,结果表明在多层感知器神经网络算法下具有最佳模拟效果。严瑞昕等^[22]基于遗传算法建立了串联明渠闸门参数率定模型,并用率定后的参数进行水动力仿真计算,结果显示平均水位偏差在2 cm以内,提高了模拟精度。

虽然人工智能技术与量纲分析方法的结合在自适应能力和流量计算精度方面优于传统经验公式,但仍需充足且具有代表性的数据进行水力参数率定。实际工程输水调度时,调度人员会根据调度指令对节制闸进行操作,导致渠道水流状态从当前稳定状态进入过渡状态,待调度完成后达到新的稳定状态,而监测设备无法识别过渡区,尽管测量数据符合实际情况,但过渡状态对应的水情数据存在较大的波动性,不利于进行参数率定,拟合效果将受到显著影响。而实验室中对流量系数等闸门参数进行测定时,为了保证测量结果的准确性和可靠性,通常会待水流稳定后,记录相应的水位、流量数据进行实验,稳定的实验条件有助于在不同时间重复实验时获得一致的结果,使流量系数在一定范围内基本恒定,流动状态也不发生显著变化。基于此,提出一种稳定输水状态辨识方法,通过分析原始监测数据下流量系数变化值的分布规律得到流量系数变化阈值,在此基础上,从原始监测数据中筛选出具有代表性的水位和流量数据样本用于闸门参数率定,并结合量纲分析方法对比分析利用原始监测数据与稳态数据率定参数后的流量误差效果,为高精度闸门的水力计算提供科学依据和技术支撑。

1 研究方法

1.1 闸孔出流公式

水力学闸孔过闸流量计算公式^[4]为

$$Q = \sigma_s m B e \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

式中: Q 为过闸流量, m^3/s ; σ_s 为淹没系数; m 为流量系数; B 为过水断面宽度, m ; e 为闸门开度, m ; g 为

重力加速度系数, m/s^2 ; $\Delta h = h_1 - h_2$; h_1 为闸前水深, m ; h_2 为闸后水深, m 。

考虑下游水位对闸门过流能力是否产生影响,可进一步分为闸孔自由出流和闸孔淹没出流。弧形闸门示意图见图1,图中 h_c 为收缩断面水深(单位为 m); h_s 为下游水深。设收缩断面跃后共轭水深为 h_c'' ,当 $h_s \leq h_c''$ 时,则下游水深不影响闸门过流能力,此时闸门流态为闸孔自由出流,淹没系数 σ_s 取1.0且 $\Delta h = h_1$;当 $h_s > h_c''$ 时,下游水深影响闸门过流能力,此时闸门流态为闸孔淹没出流,淹没系数 $0 \leq \sigma_s \leq 1.0$, h_c'' 计算公式^[16]为

$$h_c'' = 0.5h_c \left[\sqrt{1 + 16\varphi^2 \left(\frac{h_1}{h_c} - 1 \right)} - 1 \right] \quad (2)$$

式中: φ 为收缩断面的流速系数,对于平底板弧形闸门近似取0.97。

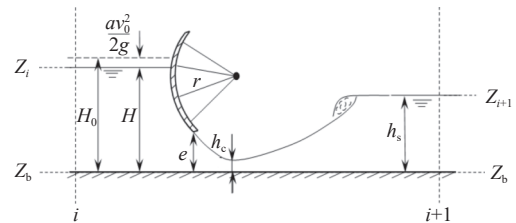


图1 弧形闸门示意

Fig. 1 Schematic diagram of the arc gate

将淹没系数 σ_s 和流量系数 m 合并,称为闸门综合流量系数 M

$$Q = M B e \sqrt{2g\Delta h} \quad (3)$$

通过等式变换,可得闸门综合流量系数 M 计算公式为

$$M = \frac{Q}{B e \sqrt{2g\Delta h}} \quad (4)$$

针对节制闸,通过式(4)已知闸门过水断面宽度、闸底高程、闸前水位、闸后水位、闸门开度和过闸流量,即可求出给定时间序列下每一时刻对应的闸门综合流量系数 M 。

1.2 稳定输水状态辨识

在原始监测数据中,水位数据和流量数据的变化并不完全同步。通过水位监测数据,调度操作人员能够了解水位的变化情况,掌握渠池的水位趋势和波动幅度,而流量监测数据直接反映单位时间内通过渠道的水量大小,是评估水资源利用效率和工程运行状态的关键指标之一。通过流量数据,调度管理人员可以及时调整水资源的分配和利用,保障工程的正常运行和水量供应的稳定性。水位数据

和流量数据分别反映了渠池的不同特征。而过闸流量系数的变化值能够综合反应不同时刻水流状态的变化情况,当过闸流量系数在一定范围内保持恒定时,水流状态基本不发生显著变化,故选择闸门综合流量系数变化值及累计变化值作为稳定输水状态辨识的判断标准,具体步骤如下。

第一步,依据 1.1 节闸孔出流公式,通过流态判别条件剔除自由出流数据,并根据淹没出流下水位、流量数据计算得到闸门综合流量系数及其变化值。

第二步,确定闸门综合流量系数变化值分布特性。正态分布作为连续型随机变量中最重要的分布之一,在水文测验中,很多现象都服从正态分布^[23]。基于 SPSS 软件,对闸门综合流量系数变化值进行正态性检验,并得到闸门综合流量系数变化值 ΔM 服从均值为 $\mu_{\Delta M}$ 、方差为 $\sigma_{\Delta M}^2$ 的正态分布,记为

$$\Delta M \sim N(\mu_{\Delta M}, \sigma_{\Delta M}^2) \quad (5)$$

第三步,确定闸门综合流量系数的变化值阈值。考虑因调度运行中对节制闸的指令操作,监测数据中易出现符合实际情况但波动较大,不利于进行参数率定的数值,故引入 k 倍标准差识别异常变化,则闸门综合流量系数的变化值 ΔM 阈值范围为

$$\mu_{\Delta M} - k\sigma_{\Delta M} = \Delta M_{\min} \leq \Delta M \leq \Delta M_{\max} = \mu_{\Delta M} + k\sigma_{\Delta M} \quad (6)$$

式中: ΔM_{\min} 为闸门综合流量系数的变化值阈值最小值; ΔM_{\max} 为闸门综合流量系数的变化值阈值最大值。

第四步,确定闸门综合流量系数的累计变化值阈值。仅依靠当前时刻与上一时刻的过闸流量系数变化值可能受到瞬时波动的干扰导致误判,因此,还需要考虑一段时间内的综合流量系数累计变化值,捕捉水情状态的长期变化趋势。在明渠调水工程中,不同输水调度工况下,由于监测数据的频率不同,稳定输水状态的持续时间也会有所不同。监测频率较高时,数据更加密集,瞬时波动可能更加频繁;而监测频率较低时,数据较稀疏,虽然波动小,但不能捕捉到短时间内水情状态变化。故引入闸门综合流量系数累计变化值阈值持续时间 t ,即在持续时间 t 内闸门综合流量系数的累计变化值小于或等于累计变化值阈值,则认为当前水情状态为稳定输水状态, t 值选取与监测数据时间尺度相关,调度人员可以根据工程经验与实际监测频率确定 t 值,则闸门综合流量系数的累计

变化值 $\Sigma\Delta M$ 阈值范围为

$$t\mu_{\Delta M} - k\sigma_{\Delta M} = \Sigma\Delta M_{\min} \leq \Sigma\Delta M \leq \Sigma\Delta M_{\max} = t\mu_{\Delta M} + k\sigma_{\Delta M} \quad (7)$$

式中: $\Sigma\Delta M_{\min}$ 为闸门综合流量系数的累计变化值阈值最小值; $\Sigma\Delta M_{\max}$ 为闸门综合流量系数的累计变化值阈值最大值; t 为闸门综合流量系数累计变化值阈值持续时间,单位与选取的用于计算的监测数据时间尺度相同。

第五步,稳定输水状态辨识。根据第三步及第四步得到的闸门综合流量系数的变化值阈值范围和累计变化值阈值,对长序列原始监测数据(下文以原始数据简称)进行筛选,得到稳定输水状态下对应的水情数据(下文以稳态数据简称)。

1.3 量纲分析法

量纲分析法作为建立数学模型的重要方法,针对较复杂的问题,可以通过确定各个影响因素对研究目标的作用情况,从而确定研究问题中的函数关系式^[24]。Chadwick 等^[25]首次将量纲分析应用于闸门过流计算。针对弧形闸门,假定在淹没出流条件下,单宽流量 q 可视为闸门开度 e 、重力加速度 g 、能量差 H_E 和绝对黏性系数 μ 的函数,则 q 和 H_E 的函数表达式为

$$q = f(e, g, H_E, \mu) \quad (8)$$

$$H_E = H_1 - H_2 \quad (9)$$

式中: H_1 为上游水深, m; H_2 为下游水深, m。若水流流态为自由出流, $H_2 = 0$ 。

假定过闸流量具有如下形式

$$q = m(e^a g^b H_E^c \mu^d) \quad (10)$$

式中: m 、 a 、 b 、 c 和 d 为常数系数。

基于量纲分析

$$(q^2/g)^{1/3} = m^{2/3} e(H_E/e)^{2c/3} \quad (11)$$

令 $K = (q^2/g)^{1/3}$, $i = m^{2/3}$, $j = 2c/3$, 通过变量代换为

$$K/e = i(H_E/e)^j \quad (12)$$

为便于综合流量系数的率定,对公式(12)等式两边取对数,可得

$$\lg(K/e) = \lg(i) + j\lg(H_E/e) \quad (13)$$

令变量 $y = \lg(K/e)$, $x = \lg(H_E/e)$, $a = j$; $b = \lg i$, 将公式(12)简化为线性方程:

$$y = ax + b \quad (14)$$

基于公式(15),利用实测数据能够较方便地拟

合出方程的斜率和截距,并可求出公式(14)中的 2 个系数值,从而得到闸门开度、流量和水头的关系式,其中:

$$i = 10^b, j = a \quad (15)$$

进而得到基于量纲分析法的弧形闸门流量计算公式为

$$Q = B \sqrt{g \left[ei \left(\frac{H_E}{e} \right)^j \right]^3} \quad (16)$$

1.4 计算结果评判标准

以决定系数 R^2 、均方根误差 E_{RMS} 、平均绝对误差 E_{MA} 、平均相对误差百分比 E_{MAP} 、纳什效率系数 E_{NS} 作为评价标准。决定系数 R^2 反映的是一个计算值与实测值拟合的程度, R^2 的值越接近 1, 表明模型对数据的解释能力越强, 相关程度越高。均方根误差 E_{RMS} 反映的是计算值与实测值之间的差异, E_{RMS} 越趋近于 0, 表明与实际值之间的差异越小, 模型精度更高。平均绝对误差 E_{MA} 反映的是计算值与实测值误差的平均大小; 平均相对误差百分比 E_{MAP} 反映的是计算值与实测值的相对误差大小。 E_{MA} 和 E_{MAP} 越小, 表明预测值更接近实际值。纳什效率系数 E_{NS} 是一种用于评估水文模型模拟性能的指标, 反映的是计算值与实测值之间的匹配程度, E_{NS} 越接近 1 表明模型的性能越好, 匹配程度越高。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (18)$$

$$E_{\text{MA}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (19)$$

$$E_{\text{MAP}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \right) \times 100\% \quad (20)$$

$$E_{\text{NS}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - Q_{m,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - \bar{Q}_0)^2} \quad (21)$$

式中: y_i 为过闸流量系数实测值; \hat{y}_i 为过闸流量预测值; \bar{y} 为过闸流量系数实测值的平均值; n 为数据列长度; $Q_{0,i}$ 表示实际流量; $Q_{m,i}$ 表示拟合计算的流量;

\bar{Q}_0 表示实际流量的平均值。

2 研究区域概况

南水北调中线一期工程自 2014 年 12 月 12 日正式通水以来, 已安全平稳运行超过 9 年, 截至 2024 年 3 月 18 日, 累计调水突破 700 亿 m^3 , 其中, 中线工程向北京、天津、河南和河北调水 625.93 亿 m^3 。工程全长 1 432 km, 沿线共布置 61 座节制闸, 输水主要采用明渠自流方式^[26]。对于中线工程而言, 对弧形闸门的流量监测至关重要, 直接影响工程安全和输水调度效率。目前, 中线工程总干渠沿线共安装了 161 个流量计, 但由于地理位置、施工难度、可操作性等因素影响, 流量计安装位置多处于节制闸前分水口及闸后出口渐变段处, 使监测设备本身存在一定的系统误差。另外, 为保障工程沿线生产、生活和生态用水需求进行大流量输水时, 频繁的调度操作导致监测数据存在一定变化。直接利用长序列监测数据率定过闸流量系数存在拟合精度低、参数适应性差等问题, 进而影响流量计算精度。本文研究对象选取南水北调中线工程的金水河节制闸、淇河节制闸、七里河节制闸, 各节制闸基础工程信息见表 1。

表 1 各节制闸基础工程信息

Tab. 1 Basic engineering information of each control gate

节制闸名称	底高程/m	底宽/m	孔数/个	设计水位/m
淇河节制闸	135.040	27.601	4	143.070
金水河节制闸	112.992	28.000	4	119.990
七里河节制闸	77.767	19.200	3	84.920

3 结果与讨论

3.1 稳定输水状态识别

3.1.1 正态检验

选取 2022 年 7 月—2023 年 7 月共 1 年 2 h 时间尺度的原始监测数据作为计算数据, 图 2 为金水河节制闸、淇河节制闸和七里河节制闸的闸门综合流量系数变化值正态检验直方图并配有正态曲线, 结果显示: 3 个节制闸的闸门综合流量系数变化值正态曲线基本对称, 且呈中间高两边低的“钟形”分布, 说明 3 个节制闸综合流量系数变化值服从正态分布。其中: 金水河节制闸综合流量系数变化值服从平均值为 0.000 134、标准偏差为 0.072 343 的正态分布; 淇河节制闸综合流量系数变

化值服从平均值为-0.000 076、标准偏差为 0.028 942 的正态分布;七里河节制闸综合流量系数变化值

服从平均值为 0.000 034、标准偏差为 0.030 359 的正态分布。

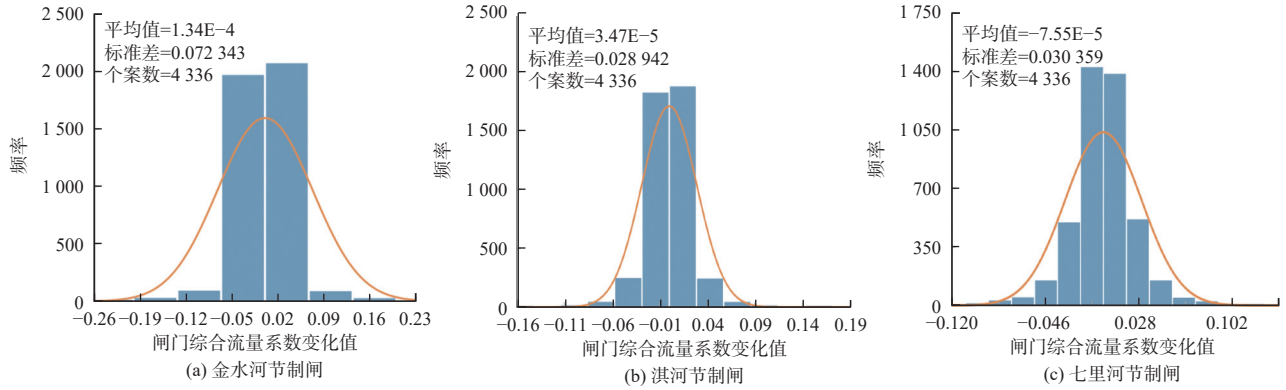


图 2 3 座节制闸综合流量系数变化值正态检验直方图

Fig. 2 Normal test histogram of change value of comprehensive flow coefficient of three control gates

3.1.2 阈值结果

考虑 95% 的置信区间,使数值在平均值的 2 个标准差范围内, k 值取 2。考虑计算数据时间尺度为 2 h, 基于工程经验, 选择闸门综合流量系数累计变化值阈值持续时间为 4 h, 即在连续 4 h 内综合流量系数累计变化值不超过阈值, 则认为该段时间为稳定输水状态, 并从原始数据中筛选出相应时间段对应的水位、流量数据作为稳态数据。表 2 为 3 个节制闸闸门综合流量系数变化值及累计变化值的阈值结果, 结果显示: 金水河节制闸、淇河节制闸以及七里河节制闸的综合流量系数变化值阈值和累计变化值阈值差别不大甚至接近。分析原因为: 一方面, 采用 95% 置信区间和 2 个标准差范围的统计处理方法, 确保数据的一致性, 在统计上表现为相近的范围; 另一方面, 基于工程经验选择的持续时间, 保证工程在实际运行中对变化的监控和响应能力, 使得单次变化和累计变化在较短时间内趋同, 差距较小。

表 2 综合流量系数变化值及累计变化值的阈值

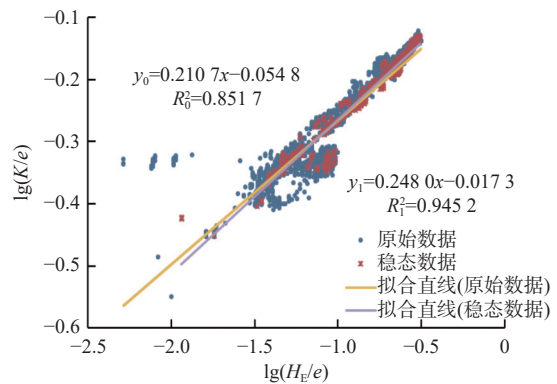
Tab. 2 The threshold value of comprehensive flow coefficient change value and cumulative change value

节制闸名称	综合流量系数变化值		综合流量系数累计变化值	
	最小值	最大值	最小值	最大值
金水河节制闸	-0.144 6	0.144 8	-0.144 2	0.145 2
淇河节制闸	-0.057 8	0.057 9	-0.057 7	0.058 0
七里河节制闸	-0.060 8	0.060 6	-0.061 0	0.060 4

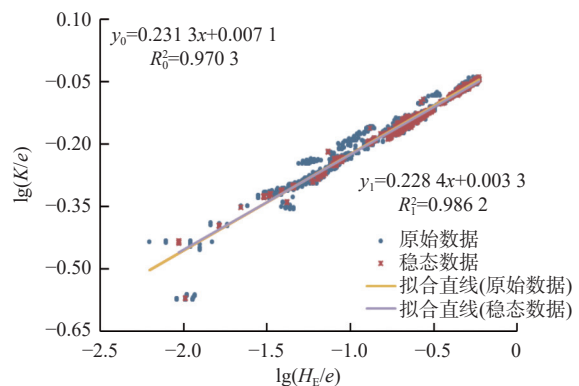
3.2 闸门参数率定

图 3 为基于量纲分析法以 $\lg(H_E/e)$ 为横坐标轴, 以 $\lg(K/e)$ 为纵坐标轴, 分别绘制的金水河节制闸、

淇河节制闸以及七里河节制闸的闸门综合流量系数拟合曲线。结果显示: 通过稳定输水状态辨识方法从原始数据中筛选得到的稳态数据更具有代表性, 数据点更加集中, 分布更靠近拟合直线, 拟合效果较原始数据都有提升。其中金水河节制闸的原始数据集存在大量离散的数据点, 拟合直线不能包含全部数据点, R_0^2 为 0.851 7, 而稳态数据下拟合直线基本能够包含所有数据点, 闸门综合流量系数拟合曲线效果更好, R_1^2 为 0.945 2, 与原始数据拟合效果相比提升了 11%。



(a) 金水河节制闸



(b) 淇河节制闸

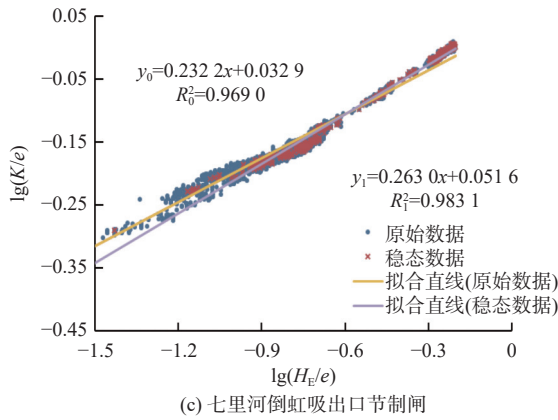


图 3 3 座节制闸无量纲综合流量系数拟合曲线

Fig. 3 Three dimensionless comprehensive flow coefficient fitting curves of control gates

表 3 为通过曲线拟合公式计算得到的 3 座节制闸无量纲综合流量系数率定结果统计。结果显示:金水河节制闸利用原始数据率定时, E_{RMS} 为 0.030 5, 而利用稳态数据率定时, E_{RMS} 为 0.017 4; 淇河节制闸和七里河节制闸利用原始数据进行率定时, 闸门

综合流量系数的 R^2 均在 0.96 及以上, E_{RMS} 在 0.01~0.02, 而利用稳态数据率定时, R^2 均在 0.98 及以上, E_{RMS} 均小于 0.01。以上分析说明, 通过稳定输水状态辨识方法得到的稳态数据相比原始数据具有更高的准确性和可靠性, 提高了拟合精度。

3.3 过流能力计算

图 4 至图 6 为 3 座节制闸过闸流量实测值与计算值散点图。结果显示: 金水河节制闸在利用原始数据率定后, 流量计算的 R^2 为 0.651 7, 而利用稳态数据率定后 R^2 显著提升至 0.768 3; 淇河节制闸在原始数据率定后, 流量计算的 R^2 为 0.779 5, 使用稳态数据率定后上升至 0.795 5; 七里河节制闸在原始数据率定后, 流量计算的 R^2 为 0.899 0, 而稳态数据率定后, 显著提高到 0.944 9。这表明利用稳态数据率定后的流量计算效果明显优于原始数据率定, 展现出其在流量计算中的优越性, 提高了流量计算精度。

表 3 3 座节制闸无量纲综合流量系数率定结果

Tab. 3 Calibration results of dimensionless comprehensive flow coefficient of three control gates

节制名称	数据类型	拟合公式	流量系数 i	流量系数 j	R^2	E_{RMS}
金水河节制闸	原始数据	$y_0 = 0.2107x - 0.0548$	0.8815	0.2107	0.8517	0.0305
	稳态数据	$y_1 = 0.2480x - 0.0173$	0.9611	0.2480	0.9452	0.0174
淇河节制闸	原始数据	$y_0 = 0.2313x + 0.0071$	1.0164	0.2313	0.9703	0.0175
	稳态数据	$y_1 = 0.2284x + 0.0033$	1.0077	0.2284	0.9862	0.0093
七里河节制闸	原始数据	$y_0 = 0.2322x + 0.0329$	1.0787	0.2322	0.9690	0.0139
	稳态数据	$y_1 = 0.2630x + 0.0516$	1.1263	0.2630	0.9831	0.0099

注: y 表示 $\lg(H_e/e)$; x 表示 $\lg(K/e)$; 下角标 0 表示原始数据; 下角标 1 表示稳态数据。

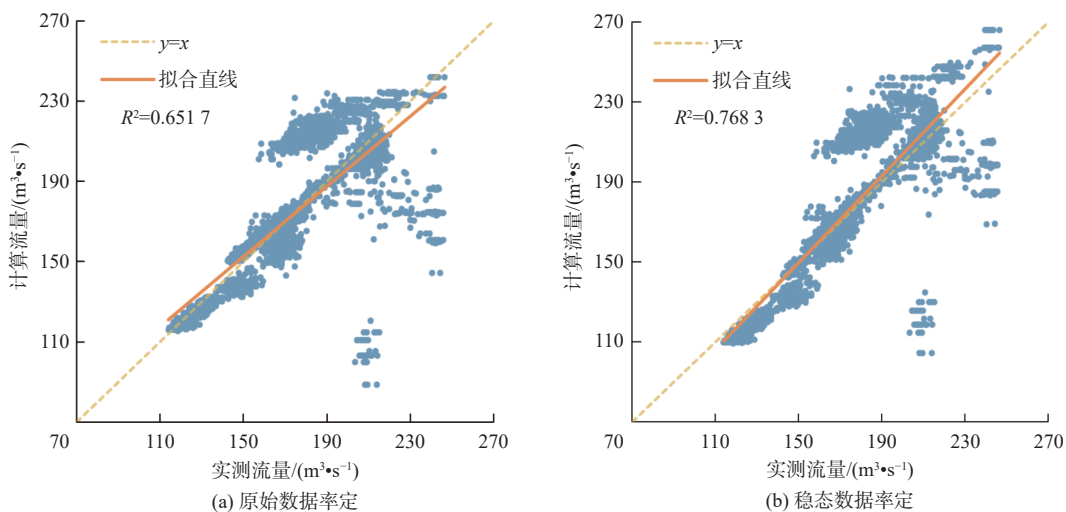


图 4 金水河节制闸过闸流量计算值与实测值

Fig. 4 The calculated values and measured values of the gate flow of Jinshui River control gate

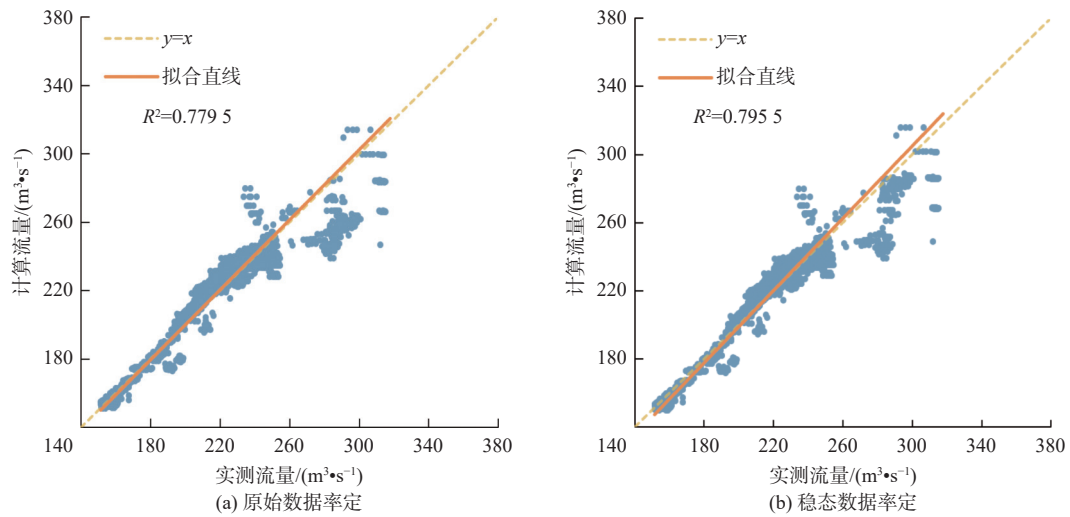


图5 淇河节制闸过闸流量计算值与实测值

Fig. 5 The calculated values and measured values of the gate flow of Qi River control gate

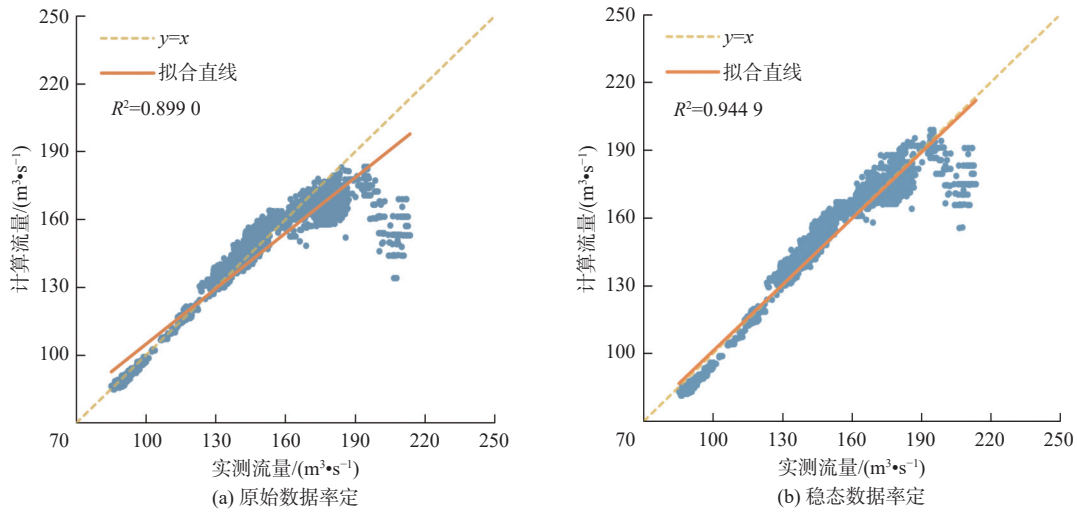


图6 七里河节制闸过闸流量计算值与实测值

Fig. 6 The calculated values and measured values of the gate flow of Qili River control gate

表4为3座节制闸流量计算效果对比。结果显示:针对金水河节制闸,利用原始数据率定后,流量计算的 E_{NS} 为0.634 1, E_{MA} 为12.984 0 m^3/s , E_{MAP} 为7.26%,利用稳态数据率定后, E_{NS} 提升到0.870 5, E_{MA} 下降到6.552 0 m^3/s , E_{MAP} 降低至6.55%;针对淇河节制闸,利用原始数据率定后, E_{NS} 为0.702 6, E_{MA} 为8.411 2 m^3/s , E_{MAP} 为3.35%,利用稳态数据率定后, E_{NS} 显著提升至0.706 1, E_{MA} 下降到7.993 9, E_{MAP} 降低至3.22%;针对七里河节制闸,利用原始数据率定后, E_{NS} 为0.943 9, E_{MA} 为5.444 2 m^3/s , E_{MAP} 为3.80%,利用稳态数据率定后, E_{NS} 进一步提升至0.962 2, E_{MA} 下降到3.023 2 m^3/s , E_{MAP} 降低至2.19%。金水河节制闸和淇河节制闸位于中线总干渠上中游段,沿线分水口密集,调度操作频繁,监测数据易受水位波动影响,增加了流量测量的不确定性,进而影响了流量计算的精度。通过引入稳态数据,有效减

小了这些误差,提升了计算精度,因此 E_{NS} 较原始数据误差变化较大。七里河节制闸位于中线总干渠下游段,环境条件相对稳定,水位变化较为平缓,流量波动较小,因此 E_{NS} 较原始数据误差变化较小。此外,七里河节制闸为3孔闸门,奇数孔闸门在结构上具有天然的对称性,中间孔处于中央位置,左右两侧孔的流动干扰相对较少,使得流态更稳定,特别是在稳态过流条件下,中间孔可以起到“平衡”作用,有效减少流量的不确定性,使流量精度显著提升。金水河节制闸和淇河节制闸为4孔闸门,偶数孔闸门在结构上缺乏明确的中心对称,水流在各闸孔间易相互干扰,当各孔开度不一致时,流量难以均匀分配,从而导致稳态过流特性出现不稳定现象,在流量计算中引入误差,导致流量精度有提升但较七里河节制闸有差异。以上分析表明,不同节制闸因水力特性、环境条件及结构差异,利用稳态数据

率定流量系数后, 流量计算精度提升效果不同, 但整体上均有助于提高计算结果的可靠性, 使流量计

算值更接近实际观测值, 偏差更小, 准确性更高。

表 4 3 座节制闸流量计算效果对比

Tab. 4 Comparison of flow calculation effects of three control gates

节制闸名称	原始数据率定			稳态数据率定		
	E_{NS}	$E_{MA}/(m^3 \cdot s^{-1})$	$E_{MAP}/\%$	E_{NS}	$E_{MA}/(m^3 \cdot s^{-1})$	$E_{MAP}/\%$
金水河节制闸	0.634 1	12.984 0	7.26	0.870 5	6.552 0	6.55
淇河节制闸	0.702 6	8.411 2	3.35	0.706 1	7.993 9	3.22
七里河节制闸	0.943 9	5.444 2	3.80	0.962 2	3.023 2	2.19

4 结论

以南水北调中线总干渠的金水河节制闸、淇河节制闸和七里河节制闸为研究对象, 利用原始监测数据和基于稳定输水状态辨识方法筛选出的稳态数据, 对比分析参数率定结果以及弧形闸门过流能力计算结果, 得到主要结论如下:

在参数率定方面, 基于量纲分析法, 利用稳定输水状态辨识后的稳态数据进行闸门综合系数率定, 与原始监测数据相比, 金水河节制闸、淇河节制闸和七里河节制闸的综合流量系数的决定系数均有所提高, 均方根误差分别减少 43%、47% 和 29%。

在流量计算精度方面, 利用稳态数据率定后的流量计算精度优于原始监测数据, 分别将金水河节制闸、淇河节制闸和七里河节制闸的流量平均相对误差从 7.26%、3.35% 和 3.80% 减少至 6.55%、3.22% 和 2.19%。

在方法实用性方面, 针对明渠调水工程提出的稳定输水状态辨识方法, 能够识别不同输水调度工况下的稳定输水状态, 实现水位、流量代表性数据集的提取并用于参数率定, 提高了过闸流量计算精度, 为后续进行高精度输水调度模拟预演及决策提供技术支撑。

参考文献:

[1] ZHENG H Z, LEI X H, SHANG Y Z, et al. Parameter identification for discharge formulas of radial gates based on measured data[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, 58: 62-73. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.09.002.

[2] FERRO V, ZIAEI A N, NIKOU N S R, et al. New stage-discharge relationship for cylindrical and semi-cylindrical edged sluice gates[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, 70: 101639. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.101639.

[3] 苏圣致, 杨春霞, 饶天华, 等. 不同开度下某闸门流振数值模拟研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023(9): 148-155. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.09.013.

[4] 曹玉升, 畅建霞, 陈晓楠, 等. 基于遗传程序的南水北调中线节制闸过闸流量计算模型研究 [J]. *水利学报*, 2016, 47(6): 834-840. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20151393.

[5] 彭静. 发展水利新质生产力 做好科技创新大文章 [J]. *中国水利*, 2024(6): 1-5.

[6] 高英, 高尽辉, 尚银磊, 等. 数字孪生南水北调中线工程建设思路 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1080-1088. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0105.

[7] 崔巍, 吴鑫, 陈文学, 等. 大型渠道弧形闸门过流公式测试比较 [J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 141-146. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2020677.

[8] 王延召, 田甜, 徐国宾, 等. 弧形闸门面板动水压力计算方法 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4): 102-107. DOI: 10.13245/j.hust.210418.

[9] 吴景霞, 张春晋. 龙抬头式泄洪洞水力特性试验研究与数值模拟 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(7): 123-131. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.07.013.

[10] 朱哲立, 管光华, 毛中豪. 超长倒虹吸出口明满流仿真闸门动态边界设置方法 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 198-206. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0020.

[11] 管光华, 黄一飞, 熊骥, 等. 平板闸门自由-淹没孔流统一流量率定模型 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 197-204. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.022.

[12] 周奕琦. 水闸规范与水力计算手册中弧形闸门流量计算的比较分析 [J]. *水利技术监督*, 2022, 30(7): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2022.07.001.

[13] 李立群, 李伟东. 南水北调中线工程节制闸大开度检验调度方案 [J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 204-208. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2017.01.034.

- [14] 徐苏, 窦明, 米庆彬, 等. 五种过闸流量计算方法在槐店闸的适用性及改进的杜岫公式精度分析 [J]. 水电能源科学, 2016, 34(3): 36-39.
- [15] 刘昉, 吴敏睿, 周世佳, 等. 凌庄子水厂保水堰流量系数试验 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2021, 19(2): 352-357. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0037.
- [16] 郭永鑫, 汪易森, 郭新蕾, 等. 基于流态辨识的弧形闸门过流计算 [J]. 水利学报, 2018, 49(8): 907-916. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20171188.
- [17] BIJANKHAN M, FERRO V, KOUCHAKZADEH S. New stage-discharge relationships for radial gates[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, 139(5): 378-387. DOI: 10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000556.
- [18] VAHEDDOOST B, SAFARI M J S, ZEYNALI R I. Discharge coefficient for vertical sluice gate under submerged condition using contraction and energy loss coefficients[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 80: 102007. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102007.
- [19] SHAKOURI B, ISMAIL I, SAFARI M J S. Energy loss and contraction coefficients-based vertical sluice gate's discharge coefficient under submerged flow using symbolic regression[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(31): 76853-76866. DOI: 10.1007/s11356-023-27388-1.
- [20] 王艺霖, 靳燕国, 陈晓楠, 等. LSTM神经网络和量纲分析法在弧形闸门过流计算中的对比 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20(3): 590-599. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0060.
- [21] DOU M, QIN C G, LI G Q, et al. Research on calculation method of free flow discharge based on artificial neural network and regression analysis[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 72: 101707. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101707.
- [22] 严瑞昕, 岩应叫, 孔令仲, 等. 基于遗传算法的串联明渠多参数率定方法研究 [J]. 中国农村水利水电, 2023(4): 195-202. DOI: 10.12396/znsd.221182.
- [23] 黄振平, 陈元芳. 水文统计学 [M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [24] 于思雨, 苏志伟, 高玺炜, 等. 基于量纲分析的弧形闸门过流公式应用 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2019, 41(5): 25-28. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2019.05.005.
- [25] CHANWICK A, MORFETT J, BORTHWICK M. *Hydraulics in civil and environmental engineering* [M]. 5th ed. New York: CRC Press, 2013.
- [26] ZHANG Z, LEI X H, TIAN Y, et al. Optimized scheduling of cascade pumping stations in open-channel water transfer systems based on station skipping[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019, 145(7): 05019011. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001080.

Calculation of flow capacity of arc gate based on stable water conveyance state identification

LEI Xiaohui^{1,2}, LIU Qiaoyin^{1,2}, ZHANG Zhao³, TU Yiwei⁴, HAN Zijun⁵, XU Luyao^{1,2}

(1. College of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Control gates play a crucial role in managing water levels and flow rates in water transfer canal systems. Arc gates are particularly favored due to their hydraulic efficiency and lightweight construction. Accurate flow rate calculation through these gates is essential for hydraulic simulation models and water management decisions. However, traditional empirical formulas face challenges due to the complex nature of arc gates, leading to the proposal of dimensionless analysis-based approaches. Combined with emerging technologies like artificial intelligence, these approaches improve adaptability and flow calculation accuracy. Yet, challenges persist, such as the need for representative data for parameter calibration and the impact of factors like equipment failures and dispatch instruction operations on monitoring data accuracy. In digital twin basin construction, accurately characterizing gate flow characteristics is crucial for effective water management. Therefore, identifying stable water delivery states and obtaining representative hydrological data are essential steps for analyzing gate flow coefficients and ensuring accurate flow rate calculations, ultimately supporting real-time monitoring and decision-making in water transfer projects.

A stable water conveyance state identification method was introduced to accurately characterize stable water delivery states and select representative data for gate parameter calibration in digital twin basin construction. Leveraging dimensionless analysis, it contrasts flow rate calculation accuracy between monitoring and stable state data, validating the method's effectiveness. The aim is to provide scientific basis and technical support for precise gate flow capacity depiction and real-time gate state synchronization in water transfer projects. The methodology involves deriving discharge formulas, stable state identification, and dimensionless analysis. Threshold values for discharge coefficient change and cumulative change are determined by selecting stable state data from historical monitoring data. The dimensionless analysis method establishes a mathematical model for gate flow calculation. Additionally, the dimensionless analysis method establishes a mathematical model for gate flow calculation. Evaluation criteria, including R^2 , E_{RMS} , E_{MA} , E_{MAP} , and E_{NS} , assess method accuracy and performance. This comprehensive approach ensures reliable gate parameter calibration and enhances the robustness of water management decisions in open channel water transfer systems.

The study examines three control gates from different South-to-North Water Transfers Project segments: Jinshui River Control Gate, Qi River Control Gate, and Qili River Control Gate. Using one year data from July 2022 to July 2023, at 2-hour intervals, stable state identification involved normality testing of comprehensive flow coefficient changes, revealing a bell-shaped distribution for three gates. Thresholds, based on a 95% confidence interval and a 4-hour cumulative change duration, identified stable water conveyance states. Specific thresholds were set for change values and cumulative changes at each gate, ensuring reliable data for water transfer management decisions. Stable state data showed greater representatives, utilizing stable state data identified through dimensionless analysis, the determination coefficients of the comprehensive flow coefficients for the Jinshui River Control Gate, Qi River Control Gate, and Qili Control River Control Gate were all improved compared to original monitoring data. Additionally, the root mean square error (E_{RMS}) significantly decreased, with reductions of 43%, 47%, and 29%, respectively. Moreover, the accuracy of flow rate calculations using stable state data surpassed that of original monitoring data, reducing the average relative errors for the Jinshui River Control Gate, Qi River Control Gate, and Qili River Control Gate from 7.26%, 3.35%, and 3.80% to 6.55%, 3.22%, and 2.19%, respectively.

Significant insights emerge when comparing results derived from original monitoring data and stable state-identified data. First, parameter calibration utilizing stable state-identified data enhances the determination coefficient of the comprehensive flow coefficient for all three gates, leading to notable reductions in root mean square error (E_{RMS}). Second, the precision of flow calculations improves when using stable state data, resulting in decreased average relative errors in flow for each gate. Third, the proposed stable water conveyance state identification method enables the extraction of representative datasets for different scheduling conditions, and offering robust support for high-precision water transfer scheduling simulations and canal hydraulic capacity analyses. In conclusion, this method demonstrates promising applicability and potential for widespread adoption in practice.

Key words: open channel water transfer project; digital twin; stable water conveyance state; arc gate; discharge calculation; dimensional analysis