

应用数字孪生技术实现流量在线监测探讨

张莉, 张洁芳, 李凯, 张德佩

长江水利委员会水文局汉江水文水资源勘测局, 湖北 襄阳

收稿日期: 2025年11月5日; 录用日期: 2025年12月18日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

2021年水利部将“数字孪生流域”作为智慧水利建设核心抓手, 水利行业各部门应用数字孪生技术搭建平台, 发展数字赋能。本文尝试运用数字孪生技术解决受水利工程影响复杂河段流量在线监测难题。以黄家港水文站为例, 在汉江中游丹江口水库下游王家营-沈湾河段, 通过采集完整的水上水下三维数据和全息地形资料, 构建特定河段蓄水量模型, 依据水位数据测算时段蓄水变化量并折算为平均时段流量, 实现流量在线监测。结果表明: 该站逐时流量过程可以实现实时流量在线, 推算月径流量与水位流量关系曲线法推算成果最大误差 $\pm 15\%$, 统计时段误差 $\pm 2\%$, 运用河段槽蓄量变化推算流量满足水资源管理, 特别是在流域管理的省界监测设施配备不足、受水利工程影响河段有推广价值。

关键词

数字孪生, 受水利工程影响, 流量在线监测, 河段蓄水量变化, 水资源管理

Discussion on the Application of Digital Twin Technology for Online Flow Monitoring

Li Zhang, Jiefang Zhang, Kai Li, Depei Zhang

Hanjiang Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, CWRC, Xiangyang Hubei

Received: November 5, 2025; accepted: December 18, 2025; published: February 26, 2026

Abstract

In 2021, the Ministry of Water Resources of China took “Digital Twin River Basin” as the core approach for the construction of smart water conservancy. Various departments in the water conservancy industry have applied this technology to build digital twin platforms for water conservancy and promote digital empowerment. This paper attempts to use digital twin technology to solve the problem of online monitoring of flow in complex river sections affected by water conservancy projects. Taking the Huangjiagang

作者简介: 张莉, 出生于1991年12月, 湖北老河口人, 本科, 工程师, 主要研究方向: 河道水文与水资源管理, Email: 254469083@qq.com

Hydrological Station as an example, in the Wangjiaying - Shenwan section downstream of the Danjiangkou Reservoir in the middle reaches of the Han River, by collecting complete three-dimensional data above and below water surface and holographic terrain information, a specific river section water storage model was constructed. Based on water level data, the water storage change during the period was calculated and converted into the average flow during the period, achieving online flow monitoring. The results show that the hourly flow process of this station can be monitored online in real time. The maximum error between the calculated monthly runoff and the results obtained by the water level-flow relationship curve method is $\pm 15\%$, and the error for the statistical period is $\pm 2\%$. The application of river section storage change to calculate flow meets the requirements of water resources management, especially in the monitoring of provincial boundaries where monitoring facilities are insufficient and in river sections affected by water conservancy projects, which has great application value.

Keywords

Digital Twin, Affected by Water Conservancy Projects, Online Flow Monitoring, Changes in River Section Water Storage Capacity, Water Resource Management

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

发展水利数字孪生[1],实现水文数字赋能业务,水文汉江局(长江水利委员会水文局汉江水文水资源勘测局)依托自身资源搭建水利数字孪生平台,针对水利工程影响下的复杂河段流量实时在线监测难题展开研究。

黄家港水文站来水受丹江口水库发电、防洪调度控制,同时受王甫洲水利枢纽水库尾水顶托影响,水位-流量关系复杂,目前虽通过控制水位-流量曲线变化,适时开展流量监测,加密测次,但测验时机难以把控且对人力资源依赖度高。近年来安装水平式、垂直式 ADCP,通过测验发现在线监测数据代表性不足,无法实现在线监测。

本文以黄家港水文站为例,从丹江口水库坝下河段槽蓄量[2]及水位流量数据来源、河段槽蓄量变化推算流量原理分析,利用河段槽蓄量变化连续演算黄家港站逐时流量过程实现实时流量在线,对解决受水利工程影响复杂河段开展应用地形数据实现流量在线监测具有参考价值。

2. 区域概况与数据来源

2.1. 测验河段选择

根据水量平衡方程,河段蓄水量变化等于流入量与流出量之差。按照现行流量测验规范[3]要求,尽可能选择河段(渠段)顺直、无岔沟、分流、无外水输入,河段顺直长度宜不小于 300 m 等,本分析选择的丹江口水库坝下王家营-沈湾河段(如图 1)基本满足。

2.2. 研究区域概况

黄家港水文站建于 1953 年 8 月,位于湖北省丹江口市,东经 $111^{\circ}31'$ 、北纬 $32^{\circ}31'$,该站集水面积 $95,217 \text{ km}^2$,占汉江流域面积的 60%,河床为卵石及砂质组成,断面冲淤变化不大,位于丹江口水库下游 6.0 km、王甫洲水利枢纽上游 28 km 处,本站处于该枢纽的回水末端,水位-流量关系受丹江口电站机组调整、大坝泄洪、王甫洲水利枢纽回水顶托[4]等综合因素影响,水位-流量关系复杂。目前,流量测验方式有转子式流速仪、走



图 1. 王家营 - 沈湾站断面布置图(注: 该图基于天地卫星图)

航式 ADCP (声学多普勒流速仪)、无人船等。测验项目有水位、水温、流量、悬移质输沙率、降水量、蒸发量。该站担负着为南水北调中线工程和丹江口水库的运行调度服务、为汉江中下游防洪减灾提供决策依据的任务。

2.3. 数据来源

2.3.1. 丹江口水库坝下河段槽蓄量来源

依据水文汉江局 2024 年 3 月实测的地形资料建立河道数字模型, 实现研究河段“河道三维全景即河段的数字孪生”, 以此计算获得研究河段的各水位级下的河道槽蓄量, 本文采用了分段计算河段的河道槽蓄量。

2.3.2. 丹江口水库坝下水位流量数据来源

水位: 依托汉江局在丹江口水库坝下布设王家营站(坝下 1 km)、黄家港站(坝下 6 km)、沈湾站(坝下 9 km), 各站采用安装的浮子(压力)式水位计并时时传输至分局水情室, 水位监测频次可设定 5 min、10 min、30 min, 水位观测精度 1 cm。

流量: 流量采用黄家港站实测流量, 推算初期(2024 年 9 月 1 日 0 时)采用黄家港站整编流量成果。

3. 研究方法

3.1. 建立数据模型

建立特定河段(渠段)水位 Z -蓄水量 W 的数据模型, 河段相邻时段水位 Z_1, Z_2, \dots, Z_n , 模型查算 W_1, W_2, \dots, W_n , 取用时间间隔(或历元)的河段(渠段)蓄水增量变化, 反算河段流量增量。

通过断面流量

$$Q = Q_J + Q_{\text{增}} - Q_{\text{浸损}} \tag{1}$$

$$Q_{\text{增}} = (W_1 - W_2) / \Delta t \tag{2}$$

$$Q = Q_J + (W_1 - W_2) / \Delta t \tag{3}$$

式中 Q 为通过断面的流量；

Q_J 为河段前期基流量， m^3/s ；

W_1, W_2, \dots, W_n 为相邻水位 Z_1, Z_2, \dots, Z_n 的蓄水量 m^3 ；

Δt 为相邻时段 t_1, t_2 的时间间隔；

$Q_{\text{浸损}}$ 为河段浸润损失水量，河(渠)段短可忽略；

本分析河段顺直，右岸为岩石陡岸，左岸主要为混凝土护面，浸润损失约 2%，符合灌溉与排水工程设计标准(GB 50288-2018) [5]中若其渗漏损失量占总流量的比例极小(通常小于 5%)，可忽略浸润损失。

3.2. 河段槽蓄量变化推算流量过程

依据水文汉江局提供的各水位级河道槽蓄量表，建立王家营至黄家港、黄家港至沈湾站及王家营至沈湾河段水位 - 槽蓄量关系模型。

王家营至黄家港站水位槽蓄量关系

$$W_{\text{王黄}} = 13.697 * Z_{\text{王}}^2 - 1966.8 * Z_{\text{王}} + 68529 \tag{4}$$

王家营至黄家港河段水位 - 槽蓄量关系图(如图 2)。

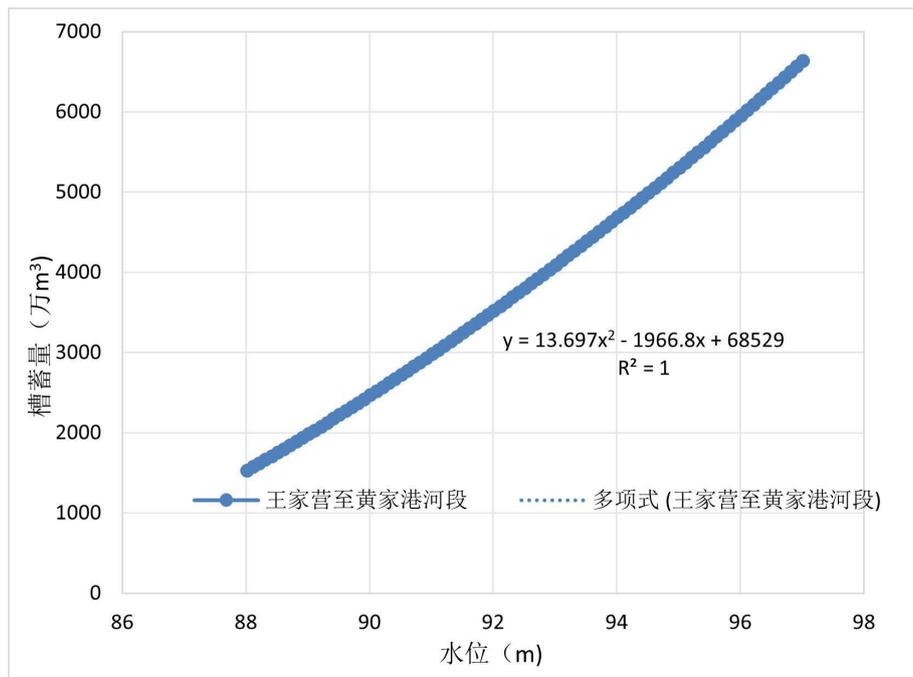


图 2. 王家营至黄家港河段水位 - 槽蓄量关系图

黄家港至沈湾站水位槽蓄量关系

$$W_{\text{黄沈}} = 7.4769 * Z_{\text{黄}}^2 - 1170.9 * Z_{\text{黄}} + 45775 \tag{5}$$

黄家港至沈湾河段水位 - 槽蓄量关系图(如图 3)。

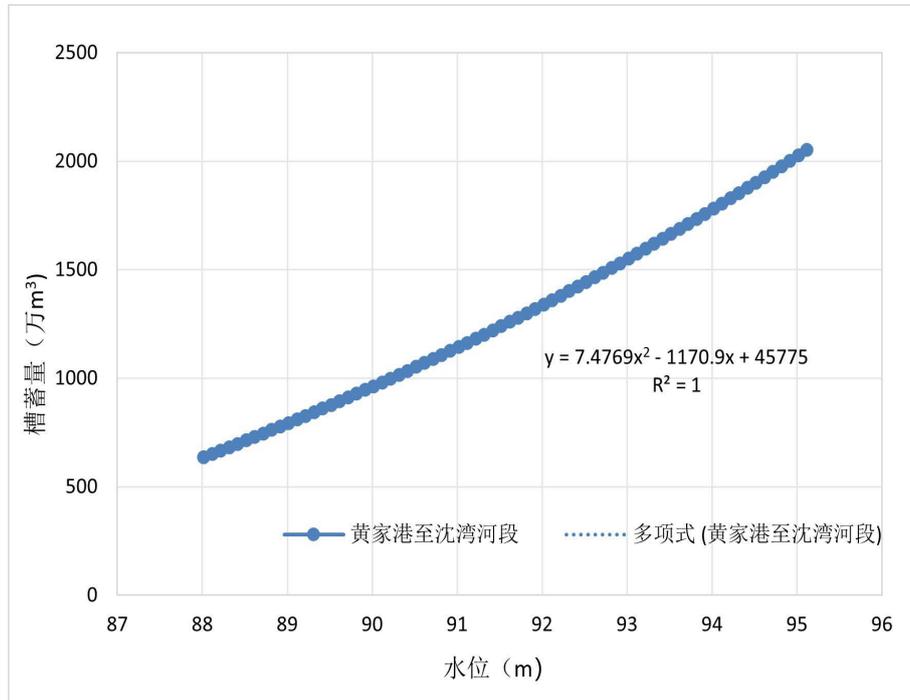


图 3. 黄家港至沈湾河段水位 - 槽蓄量关系图

王家营至沈湾站(全河段)水位槽蓄量关系

$$W_{全} = 21.155 * Z_{王}^2 - 3134.3 * Z_{王} + 114145 \quad (6)$$

王家营至沈湾河段水位 - 槽蓄量关系图(如图 4)。

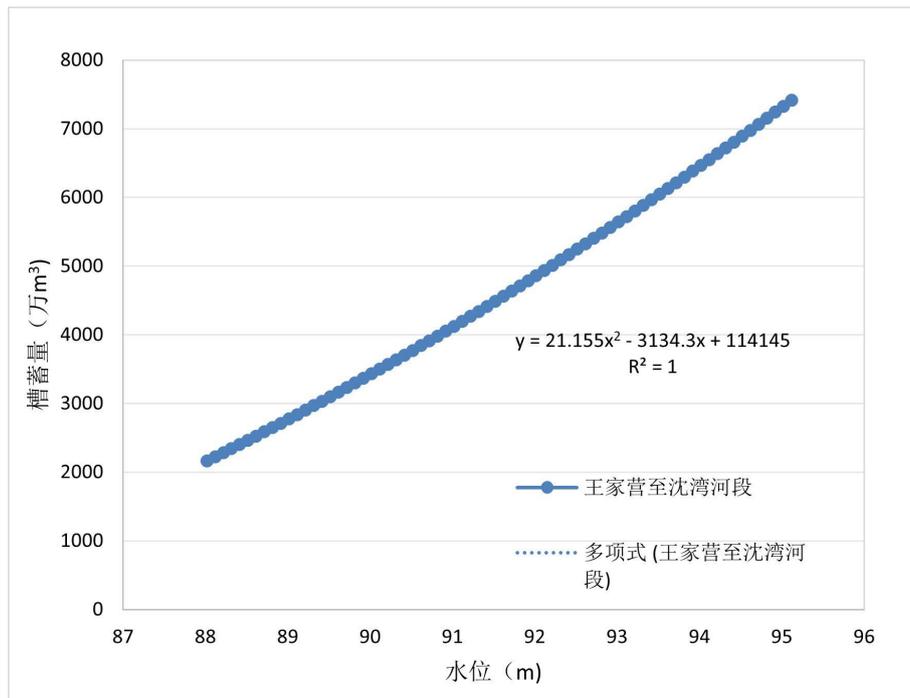


图 4. 王家营至沈湾河段水位 - 槽蓄量关系图

$$\text{或 } W_{\text{全}} = W_{\text{王黄}} + W_{\text{黄沈}} \tag{7}$$

本次分析计算采用 1 小时水位，计算各时间河段槽蓄量，连续推算，相邻时段的槽蓄变量为该时段的增量，并计算各时间流量，采用水文行业专用南方片整编软件。

考虑到王家营至黄家港站河段水位落差较大，黄家港至沈湾站河段受王甫洲水电站水库尾水影响落差小，分析时分别进行单站水位、河段平均水位及分段合成法计算各时段流量，分析计算时该统计时段黄家港站布置多次流量测次，演算过程以实测流量作为真值修订之前演算成果，新时段演算以本次作为基值，依次循环。将计算成果与 2024 年 9 月~2025 年 2 月黄家港站实测流量成果、整编成果对比。

3.3. 结果分析

本次分析计算槽蓄量时间历时 1 小时(间隔)，黄家港站流量实测不为整时，槽蓄量法流量演算过程各流量实测用于下一整点计算；各推算时段流量基值为实测成果，推算起算流量基值 2024 年 9 月 1 日 0 时采用黄家港站 2024 年整编成果。

对统计时段(2024 年 9 月~2025 年 2 月)进行了王家营至黄家港站、黄家港至沈湾站分段验算及王家营至沈湾站河段采用多种方案进行黄家港站断面流量演算，并分别按照王家营 - 黄家港站、黄家港至沈湾站、王家营至沈湾站河段上下断面水位及河段特征河段水位(相应河段平均)为推算参数计算河段槽蓄量及各时段槽蓄及间隔 1 小时槽蓄变量、流量。

$$Q = Q_j + (W_{\text{王沈1}} - W_{\text{王沈2}}) / \Delta t \tag{8}$$

经试算效果不理想。

$$Q = Q_j + (k_1 * (W_{\text{王黄1}} - W_{\text{王黄2}}) + k_2 * (W_{\text{黄沈1}} - W_{\text{黄沈2}})) / \Delta t \tag{9}$$

公式(9)黄家港流量演算采用。

从演算结果看，方案一采用王家营至黄家港河段槽蓄量关系以王家营水位推算槽蓄量演算流量；方案二以王家营至黄家港至沈湾分段推算槽蓄量演算流量；方案三以相应河段上游水位加流量权重系数(王家营至黄家港占比 k_1 取 0.6、黄家港至沈湾站占比 k_2 取值 0.4)推算槽蓄量演算流量，并与黄家港站水位 - 流量关系曲线法推算成果对比。

经本分析成果认为：方案三演算结果较好(分析统计见表 1、表 2)，从方案三分析数据中随机抽取样本，将河段槽蓄量法推算流量与实测流量作对比分析(分析统计表见表 3)，符合两种流量测验方法对比时，

表 1. 王家营 - 黄家港站河段槽蓄量法与水位 - 流量推流法成果对比表

| 年份：2024~2025；测站编码：61802800；槽蓄量 W：(万 m³)；流量 Q：(m³/s) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|-----|--------|-------------|-----|--------|-------------|-----|-------|-------------|-----|-------|------------|-----|--------|------------|-----|-------|
| 月份 | 2024 年 9 月 | | | 2024 年 10 月 | | | 2024 年 11 月 | | | 2024 年 12 月 | | | 2025 年 1 月 | | | 2025 年 2 月 | | |
| 日期 | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% |
| 1 | 766 | 837 | 9.27 | 488 | 510 | 4.51 | 514 | 563 | 9.53 | 626 | 583 | -6.87 | 544 | 478 | -12.13 | 634 | 840 | 32.49 |
| 2 | 850 | 907 | 6.71 | 519 | 553 | 6.55 | 540 | 547 | 1.30 | 567 | 582 | 2.65 | 517 | 471 | -8.90 | 605 | 814 | 34.55 |
| 3 | 770 | 829 | 7.66 | 539 | 583 | 8.16 | 498 | 459 | -7.83 | 568 | 571 | 0.53 | 567 | 428 | -24.51 | 597 | 830 | 39.03 |
| 4 | 614 | 669 | 8.96 | 520 | 543 | 4.42 | 519 | 504 | -2.89 | 550 | 562 | 2.18 | 503 | 358 | -28.83 | 606 | 828 | 36.63 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 668 | 576 | -13.77 | 567 | 473 | -16.58 | 536 | 513 | -4.29 | 517 | 501 | -3.09 | 659 | 879 | 33.38 | | | |
| 30 | 548 | 504 | -8.03 | 501 | 470 | -6.19 | 617 | 564 | -8.59 | 514 | 502 | -2.33 | 617 | 824 | 33.55 | | | |

续表

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 31 | | | 538 | 587 | 9.11 | | | | 533 | 510 | -4.32 | 649 | 843 | 29.89 | | | | |
| 系统误差 | | | 1.03 | | 3.62 | | | | -4.83 | | 2.66 | | | 0.64 | | | | 4.41 |
| 平均 | 622 | 625 | 0.48 | 521 | 539 | 3.45 | 544 | 516 | -5.15 | 546 | 560 | 2.56 | 564 | 571 | 1.24 | 617 | 645 | 4.54 |
| 最大 | 1400 | 1440 | | 1240 | 1400 | | 1140 | 1290 | | 1000 | 1100 | | 1180 | 1420 | | 1200 | 1410 | |
| 月统计 | 日期 | 30 | 15 | 29 | 23 | | 7 | 29 | | 19 | 26 | | 29 | 29 | | 11 | 11 | |
| 最小 | 300 | 221 | | 302 | 114 | | 300 | 220 | | 312 | 278 | | 330 | 201 | | 303 | 294 | |
| 日期 | 13 | 12 | | 16 | 26 | | 25 | 25 | | 13 | 25 | | 26 | 4 | | 12 | 13 | |
| 附注 | 统计时段水量误差 1.26%。 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

表 2. 王家营 - 黄家港 - 沈湾站河段槽蓄量法(权重)法与水位 - 流量推流成果对比表

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|------|--------|-------------|------|--------|-------------|------|--------|-------------|------|-------|------------|------|--------|------------|------|-------|
| 年份: 2024~2025; 测站编码: 61802800; 槽蓄量 W: (万 m ³); 流量 Q: (m ³ /s) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 月份 | 2024 年 9 月 | | | 2024 年 10 月 | | | 2024 年 11 月 | | | 2024 年 12 月 | | | 2025 年 1 月 | | | 2025 年 2 月 | | |
| 日期 | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% | Z~Q | W 法 | 误差% |
| 1 | 766 | 837 | 9.27 | 488 | 510 | 4.51 | 514 | 563 | 9.53 | 626 | 583 | -6.87 | 544 | 516 | -5.15 | 634 | 699 | 10.25 |
| 2 | 850 | 907 | 6.71 | 519 | 553 | 6.55 | 540 | 547 | 1.30 | 567 | 582 | 2.65 | 517 | 499 | -3.48 | 605 | 665 | 9.92 |
| 3 | 770 | 829 | 7.66 | 539 | 583 | 8.16 | 498 | 459 | -7.83 | 568 | 571 | 0.53 | 567 | 473 | -16.58 | 597 | 688 | 15.24 |
| 4 | 614 | 672 | 9.45 | 520 | 541 | 4.04 | 519 | 454 | -12.52 | 550 | 562 | 2.18 | 503 | 435 | -13.52 | 606 | 695 | 14.69 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 668 | 576 | -13.77 | 567 | 473 | -16.58 | 536 | 516 | -3.73 | 517 | 501 | -3.09 | 659 | 724 | 9.86 | | | |
| 30 | 548 | 504 | -8.03 | 501 | 475 | -5.19 | 617 | 564 | -8.59 | 514 | 502 | -2.33 | 617 | 677 | 9.72 | | | |
| 31 | | | | 538 | 587 | 9.11 | | | | 533 | 510 | -4.32 | 649 | 691 | 6.47 | | | |
| 系统误差 | | | 1.04 | | | 3.61 | | | -5.86 | | | 2.64 | | | -2.98 | | | -9.11 |
| 平均 | 622 | 539 | -13.34 | 521 | 539 | 3.45 | 544 | 511 | -6.07 | 546 | 560 | 2.56 | 564 | 548 | -2.84 | 617 | 560 | -9.24 |
| 最大 | 1400 | 1400 | | 1240 | 1400 | | 1140 | 1290 | | 1000 | 1100 | | 1180 | 1390 | | 1200 | 1340 | |
| 月统计 | 日期 | 30 | 23 | 29 | 23 | | 7 | 29 | | 19 | 26 | | 29 | 29 | | 11 | 5 | |
| 最小 | 300 | 114 | | 302 | 114 | | 300 | 202 | | 312 | 278 | | 330 | 235 | | 303 | 286 | |
| 日期 | 13 | 26 | | 16 | 26 | | 25 | 6 | | 13 | 25 | | 26 | 3 | | 12 | 12 | |
| 附注 | 统计时段水量误差-1.78%，王家营 - 黄家港 - 沈湾蓄水量影响系数 0.60、0.40。 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

表 3. 实测流量与槽蓄量法推算流量比测误差表

| | | | | | | | | | | | |
|------|---|----|-------|-------|-------|-------------|----------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 年 | 月 | 日 | 施测时间 | | | 测流水位 (m) | 测验方法 | 实测流量 (m ³ /s) | 槽蓄量法 推算流量 (m ³ /s) | 绝对误差 (m ³ /s) | 相对误差 (%) |
| | | | 起止 | 平均时间 | | | | | | | |
| | | | 时:分 | 时:分 | 时:分 | | | | | | |
| 2024 | 9 | 12 | 16:44 | 17:02 | 16:53 | 88.50 | ADCP 走航式 | 802 | 780 | -22 | -2.74 |
| 2025 | 2 | 07 | 16:14 | 16:51 | 16:32 | 88.80 | ADCP 走航式 | 1030 | 1075 | 45 | 4.37 |
| 2025 | 2 | 13 | 09:34 | 09:53 | 09:43 | 88.37 | ADCP 走航式 | 307 | 302 | -5 | -1.63 |

相对误差 $< \pm 5\%$ ，推算月径流量与水位流量关系曲线法推算成果最大误差 $\pm 15\%$ ，统计时段总径流量 $< \pm 2\%$ ，符合水文资料整编规范(SL/T247-2020) [6]中不同方法计算的年径流量相对误差小于 $\pm 3\%$ 的要求，该方案可以实现实时流量在线，可作为黄家港站流量测验整编、精度验证的辅助成果。

4. 结论和建议

数字孪生作为一种创新的技术手段，正在广泛应用于现代水利领域，为水资源管理带来了新的可能性。受水利工程影响的水文站，采用河段槽蓄量变化推算流量满足水文报讯精度，在水文测站测验河段河道地形变化不大(断面形变 $< 3\%$)，且有测验河段上下地形、河槽蓄水量资料，在测站上下游增设水位观测设施，运用河段槽蓄量变化推算流量可实现实时流量在线，作为流量测验整编、精度验证的辅助成果。该方法满足水资源管理，特别是在流域管理的省界、水利工程影响河段有推广价值。

建议：做好水位自记日常运行维护，确保水位观测精度，做好自记水位与人工水位的校对，出现超误差及时修正；采用高频次(5分钟时间间隔)的水位资料演算河段槽蓄量流量与实测流量资料对比，提高单次演算成果精度，进而提高河段槽蓄量流量演算精度。

参考文献

- [1] 郭亮亮, 麻观胜, 王茂洋, 等. 数字孪生水利数据共建共享技术研究[J]. 吉林水利, 2015(10): 1-7.
- [2] 原松, 沈健. 复杂河型下槽蓄量计算模式改进方法研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(8): 23-26.
- [3] GB 50179-2015 河流流量测验规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [4] 申亚飞. 水文站受变动回水顶托的影响分析[J]. 河北水利, 2023(2): 43-44.
- [5] GB 50288-2018 灌溉与排水工程设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [6] SL/T247-2020 水文资料整编规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.