

全局水量模型在胶东调水工程冰期运行中的应用

尹晓东¹, 窦 寰², 邵春发³

(1. 山东省水网运行调度中心, 山东 济南 250100; 2. 山东省水网运行调度中心潍坊分中心, 山东 潍坊 261300;

3. 山东省水网运行调度中心鲁北分中心, 山东 滨州 256500)

【摘要】胶东调水工程冰期运行面临不同程度的结冰问题, 在气温降低前确保渠道形成稳定冰盖是冰期安全运行的关键。与之前采用分段、多次调控的传统调整方式相比, 数字孪生胶东调水工程先行先试项目中研发的全局水量智慧调配模型, 通过模型推演生成调度方案, 可一次性精准完成调整。本文通过全局水量调配模型在胶东调水工程冰期运行中的应用, 对调整方案进行了总结分析, 发现与传统调整方式比较, 模型调整较快速、准确, 但是由于渠道断面要素变化、调度指令执行不到位、结冰状态下渠道过水能力下降等原因, 部分调控站点调整结果与预期存在较大偏差。通过比较分析, 提出了合理化建议, 对模型的优化提升以及数字孪生技术的应用推广具有一定借鉴意义。

【关键词】水量模型; 冰期运行; 大型渠道; 调水工程

【中图分类号】TV85

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-05-0033-04

Application of Global Water Volume Model in Ice-period Operation of Water Diversion to Jiaodong Area Project

YIN Xiaodong¹, DOU Huan², SHAO Chunfa³

(1. Water Grid Operation and Dispatching Center of Shandong Province, Jinan, Shandong 250100, China;

2. Weifang Branch, Water Grid Operation and Dispatching Center of Shandong Province, Weifang, Shandong 261300, China;

3. Lubei Branch, Water Grid Operation and Dispatching Center of Shandong Province, Binzhou, Shandong 256500, China)

Abstract: The Water Diversion to Jiaodong Area Project faces icing problems of varying degrees during ice-period operation. Ensuring the formation of a stable ice cover in the channel before temperature drop is the key to safe operation in ice period. Different from the traditional segmented and repeated regulation mode adopted in the past, the holistic intelligent water volume allocation model developed in the pilot project of digital twin of the Project can generate scheduling schemes through model deduction and complete regulation accurately at one time. Based on the application of the holistic water volume allocation model in the ice-period operation of the Project, this paper summarizes and analyzes the regulation schemes. It is found that compared with the traditional mode, the model-based regulation is faster and more accurate. However, due to changes in channel section parameters, inadequate implementation of scheduling instructions, and reduced water diversion capacity of channels under icing conditions, the regulation results of some control stations deviate greatly from expectations. Rational suggestions are put forward through comparative analysis, which can provide reference for model optimization and the popularization and application of digital twin technology.

Keywords: Water volume model; Ice-period operation; Large-scale channel; Water diversion project

水力模型作为数字孪生技术中的重要手段, 在智慧供水、水量调度、城市内涝等方面应用日渐广泛^[1], 利用 BIM 技术建模, 根据不同需求对模型进行调整, 实现精准调控。按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”^[2]的要求, 山东省调水中心在现有水量调度系统、模型建设成果的基

础上, 开展胶东调水工程全局水量智慧调配模型建设任务, 通过不断优化算法、算力, 提高模型可靠性, 从而全面提升胶东调水工程水量精准调度能力与工程智能化管理水平。

收稿日期: 2025-10-13

作者简介: 尹晓东(1989—), 男, 工程师

1 工程概况

2022年,山东省调水中心在水利部开展的“数字孪生流域建设先行先试工作”中承担了“数字孪生胶东调水工程”任务,2023年启动实施,投资近8 000万元,分2年完成,以数字化、网络化、智能化为主线,以数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为途径,推进算据、算法、算力建设,对胶东调水工程实体以及建设、运行管理活动进行数字化映射、智慧化模拟,实现数字工程与物理工程的同步仿真运行、虚实交互、迭代优化,全面提升工程建设和运行管理的数字化、网络化、智能化水平,推动胶东调水数字化转型高质量发展。

2 模型原理

冰期运行主要应用水力响应特性的水量平衡模型。利用水力学恒定流模型计算可得到不同工况下的渠池流量-水位-蓄量-水头差曲线,曲线可较为准确地刻画渠池稳态时水位状态。为支撑全工况水力响应特性计算,以节制闸及泵站为间隔,将潍坊段明渠输水系统划分为各个渠池。上游流量以节制闸、泵站设计流量为上限,平均划分为若干流量工况,下游水位以节制闸前水位范围、泵站泵前水位运行范围平均划分为若干个水位工况,每个渠池以上游流量、下游水位排列组合形成的工况组合来描绘水力响应特性。渠池在水文模拟中既是供水水源,又有输水作用,在水量转化和平衡中有重要作用,在水力特性曲线的支撑下,可作为等效水库来调度优化计算。

基于水力特性曲线构建渠池水量平衡模型,即可实现替代水动力快速模拟、多日全局滚动优化的目的,渠池水量平衡模型为:

$$V_{t+1} = V_t + (Q_{\text{上}}^t - Q_{\text{下}}^t + Q_{\text{入}}^t - Q_{\text{分}}^t) \Delta t \quad (1)$$

式中: V_t 为渠池在 t 时刻的蓄量, m^3 ; $Q_{\text{上}}^t$ 为渠池 t 时段上游节制闸平均过流流量, m^3/s ; $Q_{\text{下}}^t$ 为渠池 t 时段下游节制闸平均过流流量, m^3/s ; $Q_{\text{入}}^t$ 为渠池 t 时段降雨入渠平均流量, m^3/s ; $Q_{\text{分}}^t$ 为渠池 t 时段平均分退水流量, m^3/s ; Δt 为 t 时段时间长度, s 。

$$Z_{\text{下}}^{t+1} = f_1(Q_{\text{稳}}^{t+1}, V_{t+1}) \quad (2)$$

式中: $Z_{\text{下}}^{t+1}$ 为渠池 t 时刻下游节制闸前水位, m ; $Q_{\text{稳}}^{t+1}$ 为渠池 $t+1$ 时刻达到稳态时上游节制闸过流流量, m^3/s ; f_1 为渠池水位-流量-蓄量曲线; V_{t+1} 为渠池在 $t+1$ 时刻的蓄量, m^3 。

$$Z_{\text{上}}^{t+1} = f_2(Q_{\text{稳}}^{t+1}, Z_{\text{下}}^{t+1}) Z_{\text{下}}^{t+1} \quad (3)$$

式中: $Z_{\text{上}}^{t+1}$ 为渠池 $t+1$ 时刻上游节制闸后水位, m ; $Z_{\text{下}}^{t+1}$ 为渠池 $t+1$ 时刻下游节制闸后水位, m ; $Q_{\text{稳}}^{t+1}$ 意义同前; f_2 为渠池水头差-流量-蓄量曲线。

3 应用分析

每年12月20日至次年2月底一般为胶东调水工程冰期运行阶段。文章以2023—2024年度胶东调水工程冰期运行为例,说明全局水量模型在长距离大型渠道冰期运行中的应用。其中方案一、方案二由模型生成,方案三由人工完成。

3.1 方案一:冰期运行第一阶段

1) 根据各关键控制工程实时监测数据、冰期目标水位、目标运行流量 Q_B 等数据,利用原理中的公式进行计算,得到各渠池当前蓄量和稳态目标蓄量,进一步求得各渠池距离冰期运行目标的蓄量差 ΔW 。

2) 根据冰期运行目标流量差 ΔQ_B 和 ΔW 蓄量差,计算各渠段达到稳态目标蓄量的时间间隔 ΔT 。自方案起始时间,依次推得各关键控制工程调整时间。

$$\Delta T = \Delta W / \Delta Q_B \quad (4)$$

3) 闸门开度依据闸门过流公式,计算各关键控制工程开度。

$$Q = mBe\sqrt{2g(H_0 - H_2)} \quad (5)$$

式中: m 为闸门综合流量系数; B 为过水断面宽度, m ; e 为闸门开度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H_0 为闸前水深, m ; H_2 为闸后水深, m 。生成的第一轮调整方案见表1。方案一共选取39个调控站点,东营段2个,潍坊段21个,青岛段16个,共有8处水位偏差 $\geq 30 \text{ cm}$ 的站点。潍坊段共6处站点水位偏差 $\geq 30 \text{ cm}$,除去宋庄泵站,均低于目标水位值;青岛段共2处站点水位偏差 $\geq 30 \text{ cm}$,小刘庄至小清河段闸门操作时间与开度未按照指令执行以及渠道段面要素变化,可能导致模拟有偏差。

表 1 全局水量模型生成的第一轮调整方案

序号	调控站点	日期	调控 时间	开度/ m	目标流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	目标水 位/m
1	王道泵站	15 日	17:15	/	33	1.9
2	预备河倒虹闸		15:04	1.77	30.5	3.85
3	塌河倒虹闸		09:23	1.41		3.27
4	双王城水库分水口		/	/	5	/
5	西张僧河倒虹闸		06:06	1.63	2.33	
6	宋庄泵站		03:58	/	25	1.8
7	东张僧倒虹闸	14 日	19:15	1.49		9.97
8	弥河西堤倒虹闸		12:54	0.8		9.41
9	联盟化工		/	/	0.3	/
10	官庄沟倒虹闸		04:12	1.34	24.7	8.23
11	新丹河倒虹闸	13 日	16:03	1.42		7.54
12	龙泽分水闸		/	/	0.45	/
13	大地盐化		/	/	0.2	/
14	丹河倒虹闸		12:30	1.3	24.05	4.54
15	崔家河倒虹闸		06:39	1.25		6.03
16	白浪河倒虹闸		02:01	1.46		5.08
17	干河倒虹闸	12 日	01:02	1.62	23	4.54
18	徐林庄节制闸		21:25	2.89		2.47
19	利民河倒虹闸		20:48	1.52		3.85
20	阜康河倒虹闸		20:29	2.97	22.5	2.86
21	王藕泵站		18:02	/		2.5
22	昌邑水厂		/	/	0.5	/
23	夹沟河倒虹闸	11 日	16:59	1.24	20.5	11.71
24	潍河中堤穿涵闸		15:56	1.28		10.56
25	东黄埠节制闸		15:52	1.34		9.8
26	入吴沟河节制闸		15:08	1.25	20.1	9.4
27	北胶新河倒虹闸		14:24	1.03		9
28	胶莱河倒虹闸		14:24	1.74		8.9
29	明村分水闸	10 日	/	/	20.5	/
30	联合沟倒虹闸		12:29	1.4		8.42
31	小刘庄节制闸		09:33	1.69		7.47
32	昌平河倒虹闸		08:19	1.6	21.1	7.15
33	亭口泵站		07:46	/		6.26
34	高密分水闸		/	/		6.26
35	陈家沟倒虹闸	9 日	06:59	1.56	21.5	12.59
36	白沙河倒虹闸		03:25	1.5		12.08
37	清水河倒虹闸		01:37	1.54		11.31
38	小清河倒虹闸		00:56	1.72	20.5	10.85
39	西新河倒虹闸		00:06	1.7		10.43
40	助水河倒虹闸		23:50	1.39		9.65
41	刘家荒节制闸	8 日	21:38	1.39	20.5	9.01
42	利民河倒虹闸		20:35	1.34		8.2
43	大沽河倒虹进口闸		17:19	0.98		7.37
44	东小埠节制闸		15:45	1.36	20.5	5.85
45	小新河上节制闸		15:00	0.99		/
46	即墨分水闸		/	/	1.8	/
47	棘洪滩					

实际执行时间存在偏差, 执行偏差在 1~50 min 不等; 个别调控站点有 3 孔闸门, 导致执行过程中无法做到同步操作; 个别调控站点还存在自行调整的情况, 这些都导致了渠道水位偏离目标水位。

4.4 调控站点融冰装置可靠性不足

调整完成后, 受持续低温影响, 部分泵站清污机前、倒虹进口处发生严重结冰, 由于部分调控站点融冰装置可靠性不足, 导致渠道过流能力下降, 渠道水位逐渐偏离目标水位。

4.5 现地调整时间长, 次数多

受持续低温影响, 渠道过流能力下降, 为保障安全运行, 由现地调度指挥完成了第三轮调整, 由于冰期运行工况复杂, 加上人为调整存在偏差, 与模型调整比较, 部分调控点长时间、多次调整后才达到或接近目标水位。调整过程见表 3。

表 3 现地闸门调控过程

调控站点	目标水位/cm	实际水位/cm	调控时段及次数
胶莱河倒虹闸	提升 20	提升了 28	3 d 内调整了 7 次
白沙河倒虹闸	提升 40	提升了 29	7 d 内调整了 11 次
助水河倒虹闸	提升 40	提升了 28	8 d 内调整了 15 次
刘家荒节制闸	提升 10	提升了 16	9 d 内调整了 17 次

4.6 未及时跟踪冰期变化

调整完成后, 没有及时连续的总结冰盖变化过程, 未获取第一手数据资料; 当渠道结冰状态下输水能力下降后, 未制定调控措施, 同时没有及时跟踪天气变化, 提前预防, 导致个别调控站点出现了冰塞等应急问题。

5 建 议

5.1 复核工程沿线渠道断面要素

通过数据比对, 找出渠道断面要素发生变化的位置, 通过反复核对、复测, 及时调整现有渠道断面要素数据, 并更新全线各关键控制工程的冰期运行目标水位, 为精准调度提供保障。

5.2 优化调配模型

一方面考虑执行时间偏差等问题, 在模型的调用、计算工程中及时对模型参数进行修正, 确保模型结果更加精准; 另一方面针对冰期运行泵站清污机、倒虹进口等位置可能发生冰塞的问题, 进一步研究冰期输水方式、渠道输水能力、拦冰、扰冰和捞冰设施等, 分析冬季冰期输水调度

模式切换过程以及结冰期、融化期调度方式, 当运行过程中发生冰塞、流冰、闸门冻结等故障时能通过全局水量智慧调配系统切换调度方案, 优化调度规则^[9], 及时解决冰期运行出现的问题。

5.3 更新渠道流量-水位-蓄量曲线

冰期目标水位抬升控制方案中蓄量差计算所依据的渠道流量-水位-蓄量计算曲线来源于先前所建的水量调度系统, 在实际工程运行梯级调度控制阶段发现存在部分偏差, 各工程准确调控时间需根据实际调控进程滚动计算。为提升冰期目标水位抬升控制方案的可行性、科学性、精准性, 进一步支撑胶东调水工程调度运行管理, 建议更新渠道流量-水位-蓄量曲线。

5.4 加强运行管理

一是严格调度纪律, 杜绝各行其是。冬季运行控制站点增多, 运行复杂程度增大, 必须严格执行调度指令, 确保行为一致。二是加强运行值班和工程巡视。各单位要加强值班人员配备、后勤保障, 积极应对冰期运行水位高、风险点多的特点, 加强渠道、机电设备设施等巡查巡视, 及时发现和处理运行过程中的问题。三是严格遵守运行管理各项制度。严格值班制度、交接班制度和指令下达与反馈制度, 做到工作责任落实到位, 工作内容交接清晰。四是严格落实安全生产责任制, 加强隐患排查治理, 全面消除安全隐患。

5.5 强化应急处置能力

冰期运行, 河道水位一般要高于非冰期, 部分渠段出现雍冰, 对工程运行安全产生不利影响, 各单位要提前做好冰期运行期间的各项应对工作, 科学编制应急预案, 密切结合冰期工程运行的新情况、新特点, 做好防冰塞、防建筑物和设备冻害、防事故停电、防渠道渗漏破坏等工作, 完善应急措施, 加强预案演练, 强化预案可操作性, 切实做到需要时能准确及时执行。

参考文献

- [1] 蒋世峰. 论水力模型在智慧供水建设中的应用[J]. 测绘通报, 2016(S1): 190-191, 204.
- [2] 中华人民共和国水利部. 数字孪生流域建设技术大纲(试行)[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2022.
- [3] 杨柳, 汪妮, 解建仓, 等. 跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 49-56, 212.

(责任编辑 赵其芬)