



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.001

王浩, 雷晓辉, 尚毅梓, 等. 南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 01-08. WANG Hao, LEI Xiaohui, SHANG Yizi. Key technologies of intelligent control and emergency regulation for the Middle Route of South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 01-08. (in Chinese)

南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术

王浩, 雷晓辉, 尚毅梓

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 南水北调中线工程具有输水线路长、涉及区域广、参与工程多、调水规模大、输水工况多变等特点, 给工程的调度、控制和运行管理带来极大困难。工程上技术的难题在于其背后的科学机理性问题并没有完全揭示和解决, 包括变化条件下多水源联合多维均衡调控机制、水量水质多过程耦合机理、多物质突发水污染应急调度模式、多闸门联合运用下的明渠水力学响应机理与控制等。为建立一套完备的技术体系来支撑其调度运行, 围绕“预报-调度-模拟-控制-评价”这五个关键环节对现有研究进行分类总结; 然后, 在综述以往研究不足的基础上, 对亟需攻关的关键技术进行了详细阐释, 涵盖了水源区与受水区预报调度、总干渠冰水污染多相模拟、总干渠水量水质联合调度、中线全线自动化控制技术、调度评价技术与平台建设等多个方面; 最后, 文章讨论了实现中线智能调控和应急调度亟待解决的科学问题, 并进行了研究总结。

关键词: 南水北调中线工程; 智能调控; 应急调度; 关键技术

中图分类号: TV 68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0001-08

Key technologies of intelligent control and emergency regulation for the Middle Route of South to North Water Diversion Project

WANG Hao, LEI Xiaohui, SHANG Yizi

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038)

Abstract: The Middle Route of South to North Water Diversion Project (MRP) has long canals, involves many areas and hydraulic structures, transfers water by a huge amount, and has various working conditions. These all bring great difficulties to the regulation, control, and management of the project. The technical problem of the engineering lies in the fact that the scientific and mechanism problems behind it are not fully revealed and solved, including multi-dimensional equilibrium control mechanism of multiple water sources under changing conditions, multi-process coupling mechanism of water quantity and water quality, emergency scheduling model for multi-material water pollution, hydraulic response mechanism and control of open channel under multi-gate joint application. In order to establish a complete set of technical system to support its scheduling, this paper summarizes the existing research on the five key points of forecast, scheduling, simulation, control, and evaluation. And on the basis of summarizing the previous research, the key technologies awaiting urgent research are explained in detail, including forecast and scheduling in water source areas and water receiving areas, multi-phase simulation of water pollution, water quality and water quality control, automatic control technology, evaluation technology, and platform construction. Finally, the paper discusses the scientific problems to be solved in order to realize the intelligent regulation and emergency regulation for the MRP and makes a

收稿日期: 2017-01-04 修回日期: 2017-03-16 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室创新成果培育基金(2016CG05); 国家自然科学基金(51579248)

Funds: Cycle Simulation and Regulation of the State Key Laboratory of Innovation Cultivation Fund(2016CG05); National Natural Science Foundation of China(51579248)

作者简介: 王浩(1953), 男, 北京人, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: Wanghao@iwhr.com

summary of the research.

Key words: Middle Route of South to North Water Diversion Project; intelligent control; emergency regulation; key technology

南水北调中线工程(中线工程)可解决河南、河北、北京和天津 4 个省市的水资源短缺问题,具有重要的战略意义。中线工程于 2003 年 12 月 30 日开工建设,并于 2014 年 12 月 12 日正式通水。中线工程从丹江口水库调水,全程自流,跨越长江、淮河、黄河、海河四大流域,设计年均调水量 95 亿 m^3 。中线工程具有如下几个特点:第一是长距离输水。中线总干渠长 1 432 km,沿线共被 63 座节制闸和 1 座泵站分为 63 个渠段,闸泵群联调困难、潜在的污染点较多、工程建设和运行的要求非常高;第二是水力建筑物种类繁多,水流非线性极为显著,精确控制比较困难;第三是调水量大且无在线调节水库。中线渠道在设计流量下渠池水深比较大,渠池蓄水量大,应对突发事件的调控能力小;第四是水流由低纬度流向高纬度,在冬季运行,黄河以北渠段容易出现冰情。

为了支撑中线工程的自动化调度、控制和运行管理,在“十一五”和“十二五”期间,科技部、国务院南水北调办公室和中线干线工程建设管理局(中线局)设置了一些项目/课题进行研究。2005 年,国务院南水北调办公室组织相关单位开展了“南水北调中线一期长距离调水水力调配与运行控制技术研究及应用”。2006 年,科技部设置了“十一五”科技支撑项目,其中中线相关课题有“南水北调中线水资源调度关键技术研究”和“中线工程输水能力与冰害防治技术研究”。2007 年,中线局委托相关单位设计了南水北调中线干线工程自动化调度与运行管理决策支持系统,并于同年开展了南水北调中线一期工程总干渠供水调度方案研究及编制工作。目前,中线工程运行管理决策系统已经建成投用,系统包含闸站监控、水量调度、工程防洪、水质监测、信息管理等功能模块,为科学水量调度、闸群的集中控制提供了基础。为应对中线突发水污染等其它紧急情况,2012 年,科技部在“十二五”水专项设置课题,研究了南水北调东中线水质水量联合调控与应急处置关键技术,并对其中一些技术进行示范应用。2015 年,科技部在“十二五”科技支撑计划中,设置“南水北调中线干线工程应急运行集散控制技术与示范”课题,重点围绕应急工况下的中线自动化控制开展研究。

上述项目/课题在中线工程水资源调配、常规和应急调度控制、工程运行管理等方面取得了诸多成

果。但是,由于中线工程自身特点,已有成果尚未完全解决中线工程的所有问题,还需继续深入开展相关领域的应用基础研究,更好的支撑中线工程的自动化调度运行,同时对于其它长距离调水工程的输水运行也具有重要的参考价值。

1 中线工程智能调控技术研究进展

国内主要高校、科研机构、工程设计单位围绕中线工程开展了大量基础性的研究工作,本文从水资源调度的五个关键环节“预报-模拟-调度-控制-评价”^[1](图 1)出发,对以往研究工作系统进行梳理。

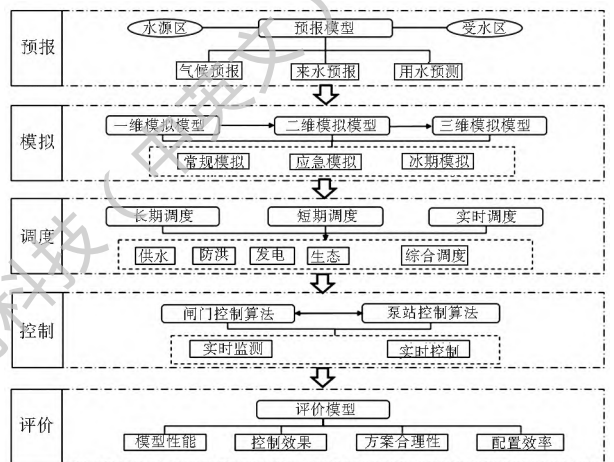


图 1 智能调度关键环节

Fig. 1 Key points of intelligent regulation

1.1 预报

预报是为模拟模型提供初始条件输入,是调度、控制模型进行决策的前提。预报包括气象、水文和径流预报。彭涛等^[2]为了提高汉江丹江口流域暴雨洪涝灾害的预报能力,研发了汉江丹江口流域水文气象预报系统,为流域的防洪减灾提供了科学决策依据。雷晓辉和王浩等^[3]用分布式水文模型对丹江口上游流域进行了水文模拟。孔祥林等^[4]研究了丹江口水库的洪水预报模型。雷晓辉和孙月等^[5]分析了各种气候情景下丹江口水库入库径流的变化规律。王元超^[6]建立了中长期径流预报模型,并将该模拟与 EFDC 模型进行耦合,能够较为完整预测和模拟丹江口水库水动力、水质变化的完整过程。此外,雷晓辉等^[7]在南水北调中线受水区建立了分布式水文模拟模型。彭辉等^[8]针对南水北调中线京石段应急供水工程,建立了岗南、黄壁庄、王快和西大洋 4 座水库的入流预报模型,来为应急供水调度提

供决策支持。胡惠方^[9]完成了郑州市的工业、农业和生活需水量预测,王雪梅^[10]对河北省的生活、工业、农业和生态需水量进行了预测。

总体来看,中线工程已经建立的预报模型还没有完全覆盖中线水源区与受水区整个区域;也没有专门的气象模型,无法为中线的冰期和生态调度提供气温、水温等信息支持。因此,建议开展针对中线工程全线开展建立集合预报模型研究,研究长中短期嵌套集合预报模式,以提高预报的准确性,增强预报对调度的指导作用。

1.2 模拟

模拟模型是调度、运行决策基础。模拟既包括常规的水动力学模拟,还包括极端情况下的冰期模拟和水质污染下的污染模拟等。针对渠道糙率,王开等^[11]通过模型模拟分析了中线总干渠糙率变化对水面线及过流能力的影响;马吉明等^[12]通过水槽试验研究了糙率变化对中线干渠输水过程的影响。此外,王光谦等^[13]通过模型试验与理论分析,得出中线干渠的糙率合适取值;杨开林等^[14]通过拟合实测数据,得出了糙率的经验计算公式。为考虑倒虹吸的影响,王开等^[15]计算了倒虹吸的局部水头损失系数。陈文学等^[16]分析了桥梁对中线渠道水流形态改变和渠道过水能力的影响,方神光等^[17]分析了分、退水闸启闭下的渠道非恒定流过渡过程。在以上研究的基础上,方神光等^[18]通过对闸门、渡槽、倒虹吸等复杂水力建筑物进行概化处理,建立了一维模型,能模拟各种工况下的渠道水力响应过程。在冬季运行时,黄河以北 700 km 渠道中的水流由于受寒冷气温的影响,将有不同程度的冰凌产生。因此,穆祥鹏等^[19]开发了冰期输水模拟模型。范北林等^[20]分析了中线冰期输水过渡过程,并且预测了中线冰期输水渠道冰情发展的时空分布特征;刘国强^[21]综合利用模型试验、数值模拟等多种手段,评估了中线冰期输水能力。南水北调中线总干渠沿线的跨渠桥梁、交叉河流和化学品企业众多、劣质地下水内排段长,藻类滋生条件富足,容易发生各种类型的水质污染事件。因此,雷晓辉和陈翔等^[22]开发了中线一维水质模型,朱德军^[23]开发了一维及二维水质耦合模型,能够较精确的预测污染扩散过程。

当前,中线所采用的水动力学模型、冰期输水和污染扩散模拟模型主要是一维模拟模型,尚无法精确模拟渠道边壁及水力建筑物对水流影响。当受水区配套工程完善后,中线工程是由水源区、干渠、配套工程等组成的复杂输配水系统,应建立统一的耦合模型进行模拟^[24]。此外,为精细化模拟,还应该

针对不同的工况研究建立二维、三维模型。

1.3 调度

中线工程的运行调度研究,多针对水源区和中线干渠分别开展研究。水源区丹江口水库调度的首要目的是供水,但其还有防洪、发电、生态、航运等功能。杨光等^[25]考虑未来径流变化,建立了丹江口水库调度规则。王浩和董延军等^[26]建立了中线准市场水量分配模型来分析水源区的可调水量和受水区的需水量,在此基础上建立丹江口水库水量调度方案。中线干渠的调度包括常规、应急和冰期输水 3 个方面。常规调度即是面对分水口流量变化,对闸门开度进行调整,以满足闸前常水位的运行方式,目标就是在满足渠道运行安全的情况下,使渠道输水流量快速而平稳地过渡到目标流量,黄会勇^[27]建立了常规调度模式下的闸门群调度规则。为了应对中线潜在的突发水污染事件,王浩和雷晓辉等^[28]建立了“数值模拟-评价诊断-溯源预测-应急调控-污染处置”5 大环节于一体的应急调度技术体系,练继建等^[29]、聂艳华^[30]、房彦梅等^[31]在事故渠池上游段、事故渠池和事故渠池下游段建立了相应的应急调度规则。针对冰期输水调度,杨开林等^[32]建立了通过控制水位、流量来防止中线冰期输水发生冰凌灾害的冰期输水调度规则。

1.4 控制

控制是实现调度目标的具体措施。常规控制算法大致可分为“前馈”控制算法、“反馈”控制算法以及“前馈+反馈”控制算法^[33-34]。明渠非恒流输水的水动力学过程具有强耦合、大时滞等非线性控制特点,导致传统控制算法具有有限的适用性^[35]。“前馈”算法较为简单,主要的机理是通过提前蓄量补偿来减小渠池的水位波动,但无法保证中线闸前常水位运行。“反馈”算法主要是将自动化控制领域的集中控制算法应用于渠道模型。尚毅梓^[36]将鲁棒控制算法应用于中线渠道,相关试验结果表明采用闸门鲁棒算法可以避免有限扰动造成的控制失稳。此外,杨桦等^[37]、安宁^[38]分别将模糊控制算法、预测控制算法应用于模拟渠道,也都取得了较好的效果。韩延成等^[39]提出了采用流量-水位分层控制的逻辑思路,这是一种有益的尝试和探索。针对中线应急控制,尚未报导有较为成熟的控制算法。针对冰期运行,穆祥鹏等^[40]提出了防控冰凌灾害的运行控制算法,但没有考虑实时可能发生的气象条件变化。

总体而言,已有的控制算法研究推进我们对中线工程运行控制问题的认识,但不能完全解决中线

的所有的控制问题。建议根据中线实际特点,应针对明渠输水的分布式、多点、非稳态控制的特点,开展分级、分层的实时、智能控制研究。

1.5 评价

目前,在应急预案评价^[41]、河流健康评价^[42]等方面取得了较好的应用效果。这些评价方法都是先建立评价指标体系,然后进行分析,但有着主观影响较大的缺点。但是,对中线的的评价技术研究很少,目前只有针对丹江口水库的水质的评价方法^[43],对其他方面尚未涉及,这是一块亟需研究填补的空白。

2 亟需攻克和解决的技术难题

前述研究极大的推进了我们对中线工程问题的认识,但是以下八个方面技术难题还没有完全解决,需要深入研究。这八个方面的技术构成了中线智能调度研发核心技术体系(图 2)。

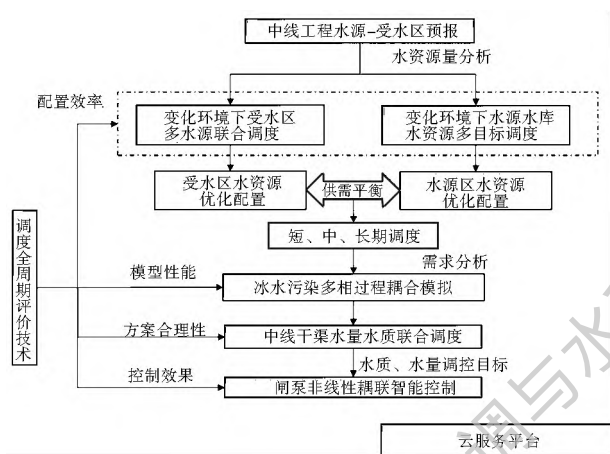


图 2 核心技术框架体系

Fig. 2 Framework of critical technologies

2.1 中线工程水源-受水区预报技术

为满足新形势下的中线水资源综合调度需求,需要建立集成气象、水文、径流预报还有用水预测模型的预报/预测平台。实现此项目标,我们还需要继续深入开展以下四方面的研究:(1)基于数值天气预报模式,研发汉江流域长-中短期多层嵌套的降水集合预报模型;(2)统计分析前期径流、降水等数值关系,并考虑气候变化对未来降雨径流影响,研究建立变化条件下的汉江流域分布式水文模型和丹江口水库来水长中短预报模型;(3)研究建立中线工程沿线受水区的气象预报模型,为中线工程的调度运行提供气温、水温等信息输入;(4)研究建立受水区大中型水库来水长中短预报模型。

2.2 变化环境下水源水库水资源多目标调度技术

目前,水源区条件较设计之初也发生了变化,中

线通水后,又规划建设鄂北调水等大型调水工程,影响丹江口水库的调度。气候变化不只影响水源区的降雨与径流,也影响着水源区的水量调度目标;此外,输配水过程中还存在着诸多不确定性的风险,如污染,水华等。因此,需要分析研究这些新的情况和形势对中线工程影响,研究兼顾多项效益目标的水源水库水资源调度技术和方法,包括以下研究:(1)开展变化环境下的汉江流域水循环机理研究,研究气候变化对水源区水资源可利用量的影响,评估丹江口上游水库群、下游需用水变化和新建外调水工程对丹江口外调水量的影响;(2)建立水污染事件风险评估模型,估计和预测水污染发生概率,研究通过改变水库流场来防止污染物进入中线干渠的陶岔闸和丹江口大坝联合运用方式;(3)研究通过径流调节抑制蓝藻水华发生的水库群调度方式和方法;(4)研发水源区水库群水资源多目标优化调度模型。

2.3 变化条件下受水区多水源联合调度技术

2012 年全国开始实施“最严格水资源管理制度”,在这项制度的引导下中线受水区用水结构发生较大变化,再生水、海水淡化等非常规水资源利用效率得到了较大幅度的提升,减少了受水区对外调水的需求;受水区某些省份,譬如河北省,借助中线工程通水的契机,开展了超采区的地下水的压采工作,增加了河北省的外调水的需调水量。因此有必要针对这些变化的条件开展分析,分析这些变化对受水区用水影响,研发受水区多水源联合调度技术,包括以下内容:(1)评估“最严格水资源管理制度考核办法”对外调水使用量的影响,分析“考核办法”实施前后受水区用水量和用水习惯的变化;(2)评估受水区再生水、海水淡化等非常规水利用对外调水使用量的影响,量化分析中线供水配套工程逐步建成后受水区的用水结构变化;(3)评估受水区水源转换对超采区地下水恢复影响;(4)研究建立受水区多水源联合优化调度模型,为调度和分水方案优化提供技术支持。

2.4 总干渠冰水污染多相多过程耦合模拟技术

中线干渠的潜在污染源和污染物种类较多,污染物的扩散会受到中线复杂水力建筑物的影响,这造成了中线的污染过程扩散模拟和追踪溯源有较大的难度。在冰期为防治冰害,需考虑气候的影响,完善冰期冰凌形成原理,并模拟冰情发展过程。因此需开展以下研究内容:(1)分析中线干渠闸门、桥梁、渡槽、倒虹吸等过水建筑物对明渠输水过程的影响,

研发能够精细化模拟水流形态的一维、二维或三维的耦合模拟模型;(2)研发水动力学模型参数的在线辨识技术,能够使水动力学模型根据实测数据动态调整参数,以进一步提高模拟计算的准确性;(3)研究建立与天气预报相耦合的冰情发展模拟模型;(4)分析不同类型污染物扩散特点,研发针对整个输配水渠系的污染扩散预测与溯源追踪技术;(5)研发地表水与地下水的耦合模拟模型,分析地下水内排对南水北调中线干渠水质的影响;(6)研究多模拟模型集成耦合技术,研发模型的快速求解技术,实现渠道冰、水动力学和污染扩散过程的在线实时模拟。

2.5 总干渠应急工况下水量水质联合调度技术

中线工程沿线存在突发水污染事故等应急工况,建议开展以下四方面研究:(1)研究能够灵活应对突发水污染事件的渠道运行方式,建立节制闸、分水口门退水闸联合运用规则;(2)研究运用闸门、分水口门和退水闸联合进行污染防控的技术手段和保障机制,制定科学合理的闸群应急调度预案;(3)以工程安全(水力、水质安全)为主、以经济调度(减少弃水、简化闸门操作程序)为辅,研究建立中线干渠的水量水质的联合调度模型,保障事故发生后中线干渠能够快速恢复至常态的闸前常水位运行方式;(4)针对受水区遭遇严重干旱情景,开展中线工程应急供水研究。

2.6 总干渠闸泵群非线性耦联智能控制技术

中线总干渠63个渠段通过水流波动相互关联,但这种关联和作用是非线性的。非线性是水流、闸门/泵站动态调节、渠道水力运行要素相互关联的纽带,是控制系统内外协同、进行水力输移机理研究的关键。我们需将闸门控制算法与渠道运行方式结合起来考虑,开展渠道运行方式、控制方式和闸门控制算法的适用性和匹配性研究:(1)检验渠道现有运行模式、实现方式和闸门自动控制技术的合理性和控制精度;(2)研究分段子系统渠道水力特性对控制系统影响的物理机制,探索合理的渠道运行方式和闸泵控制器;(3)改进渠道运行模式,开发动态耦合控制模式和控制算法,研发开发中线总干渠闸泵群实时控制平台;(4)研发冰期输水过程控制技术,研究制定冰期输水的闸泵群安全调度操作程序;(5)研究极端、事故条件下的分级、分段控制模式,研发能够处理常态和应急工况的闸泵群全自动控制平台。

2.7 南水北调中线调度全周期评价技术

全周期评价是指对模型、调度方案及效果等进

行客观的分析,不断总结经验教训,并通过及时有效的信息反馈,为调度决策完善和供水相关的方案计划修订提出建议。通过全周期评价不断对模型、方案进行持续改进,实现调度综合效益最大的目标。建议开展以下研究:(1)开展预报的准确率分析,从提高预报精度入手,研究建立针对气象、水文和径流预报模型的性能评价指标和模型;(2)开展模拟模型的标定和校核研究,研究建立水文模拟,水力学模拟、污染扩散模拟、冰期发展模拟等模拟模型的性能评价指标和模型;(3)从水资源的供需平衡角度入手,分析供水计划的完成情况,研究建立能够衡量中线工程水资源优化配置效果的指标和模型;(4)综合考虑系统控制的稳定性、快速性和准确性,研究建立控制性能评价指标和模型;(5)围绕“预报-模拟-调度-控制”四个关键环节,研究建立能综合全面反映调度措施执行效果的评价指标体系和模型。

2.8 中线工程常态与应急调度云服务平台

中线工程的云服务平台就是将前述的先进技术进行集成,以支撑中线工程全自动化运行与智能调控。要实现这一目标,需开展如下四方面研究:(1)分析提取云服务平台所集成模型的通用、共性功能,对这些功能进行抽象封装后形成应用组件,建立可以相互调用的模型或应用组件库;(2)研究中线工程现用应用系统之间信息交互方式,针对中线业务系统的需求以及闸控系统的需求,设计数据库关联关系和范式;(3)研究构建满足用水户和控制中心双向信息交互的云服务平台,满足既能在云服务平台进行信息展示,又能通过云服务平台收集水厂、用水户需求;(4)研究闸泵群控制系统与云服务平台的接入方式,研究云服务平台下信息隔离和共享技术,通过对不同的用水户设置不同的权限来达到平台的信息安全和信息共享。

3 核心科学问题

中线工程的运行调度控制是工程技术问题,但是鉴于其工程自身的复杂性和诸多组成要素的耦合关联特征,要研发核心调控技术,需要开展科学问题集中攻关。核心科学问题如下。

(1)变化条件下多水源联合多维均衡调控机制。跨流域调水渠道跨越多行政地区、多地质结构、多地貌形态,同时由于水源区供水量以及受水区的需水量的不确定性,需要深刻认识水资源调度具有社会效益、工程效益、经济效益等多维性特点,综合考虑未来可能的条件变化,以及当前目标调整情况,找出多水源联合多维均衡调控的方法和理论。

(2) 水量水质多过程耦合机理及逆时序反问题求解。中线的过水建筑物众多,复杂内边界条件造成渠道水流形态复杂,不仅影响到水动力学过程调控,同时也影响到渠道物质的对流扩散。因此,因此需要研发中线水量水质一、二、三维模型。并在一维、二维、三维模型的基础上研究追踪溯源技术。

(3) 长距离调水系统多物质突发水污染应急调度模式。不同的污染物具的扩散机理不同。我们必须针对多种潜在污染物质,开展污染物扩散特性研究,研发针对不同类型污染物的应急调度模式。

(4) 多闸门联合运用下的明渠水力学响应机理与控制。任一闸门动作都会影响到上下游渠池控制点水位,上下游闸门同时操作将会造成水位、流量波动的叠加,危及渠道安全运行。分析多闸门联合运用下的明渠水力学响应,开展渠池间波动耦合机理研究,研发合适的渠道运行模式和闸群控制算法,提高输水安全性,提升输水效率。

4 结论

中线工程可解决河南、河北、北京和天津4个省市的水资源短缺问题,具有重要的战略意义。中线工程输水线路长、水力建筑物众多、工况复杂多变、尤其是存在突发水污染事故等应急工况,对中线调度控制和运行管理造成困难。此外,随着经济社会的发展和流域水文条件的变化,现在中线水源和受水区的自然水文和用水情况都较设计阶段发生了较大改变。因此亟需对中线调度运行中存在的关键技术难题开展研究,研发中线工程的智能化调控和应急调度平台,支撑中线智能化安全运行。开展这项研究需要从“预报-模拟-调度-控制-评价”五个关键环节开展,研发包括水文预报、水库调度、渠道水力特性模拟、渠道污染扩散分析、闸泵群自动化控制等在内的多种技术,涵括工程的调水方案编制到实时闸门操作的整个流程上的科学问题。解决这些关键技术难题和科学问题,将有助于最大发挥中线工程的综合效益。

参考文献(References):

- [1] 尚毅梓, 王建华, 陈康宁, 等. 智能水网工程概念辨析及建设思路[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 534-537. (SHANG Yi zi, WANG Jian hua, CHEN Kang ning, et al. Discussion on concept analysis and construction idea of smart water network engineering[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 534-537. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.03.030
- [2] 彭涛, 位承志, 叶金桃, 等. 汉江丹江口流域水文气象预报系统[J]. 应用气象学报, 2014, 25(1): 112-119. (PENG Tao, WEI Cheng zhi, YE Jir tao, et al. Hydrometeorology forecast system of the Danjiangkou Basins in Hanjiang[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(1): 112-119. (in Chinese))
- [3] 雷晓辉, 蒋云钟, 王浩, 等. 分布式水文模型 EasyDHM(0): 应用实例[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 893-907. (LEI Xiao hui, JIANG Yur zhong, WANG Hao, et al. Distributed hydrological model Easy DHM 0. Application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 893-907. (in Chinese))
- [4] 孔祥林, 张沙, 肖雪. 南水北调中线水源区水库联合调度与水情预报[J]. 水利水电快报, 2010, 31(2): 17-19. (KONG Xiang lin, ZHANG Sha, XIAO Xue. Joint dispatching and water regime forecast of the water source area of the Middle Route of South to North Water Diversion[J]. Water Resources and Hydropower Express, 2010, 31(2): 17-19. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-0081.2010.02.004
- [5] 孙月, 蒋云钟, 雷晓辉, 等. 汉江流域分布式水文模型构建及应用研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(11): 1-4. (SUN Yue, JIANG Yur zhong, LEI Xiao hui, et al. Establishment of distributed hydrological model for Hanjiang River Basin and its application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(11): 1-4. (in Chinese))
- [6] 王元超. 丹江口水库中长期径流预报及水质水量联合模拟技术[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. (WANG Yuan chao. Long term runoff forecasting and water quality and quantity simulation technology in Danjiangkou reservoir [D]. Beijing: China Academy of water resources and Hydropower Research, 2015. (in Chinese))
- [7] 雷晓辉, 王海潮, 田雨, 等. 南水北调中线受水区分布式水文模型子流域划分研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 10-13. (LEI Xiao hui, WANG Hai chao, TIAN Yu, et al. Subbasin delineation for the service areas of South to North Water Diversion Project [J]. South To North Water Transfers And Water Science & Technology, 2009, 7(3): 10-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.03.003
- [8] 彭辉, 贾仰文, 牛存稳. 南水北调中线京石段应急供水水库入流预报研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(1): 8-10. (PENG Hui, JIA Yang wen, NIU Cun wen. Inflow forecast research of to Beijing-Shijiazhuang emergent water supply reservoirs in the Middle Route of the South to North Water Transfer Project [J]. South To North Water Transfers And Water Science & Technology, 2009, 7(1): 8-10. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.01.002
- [9] 胡惠方. 郑州市需水量驱动因子及水资源需求预测分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2007. HU Hui fang. Analysis of water demand and water demand forecasting in Zhengzhou [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007. (in Chinese))
- [10] 王雪梅. 南水北调河北省受水区需水预测与水资源配置研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. (WANG Xue mei. Study on water demand forecasting and water resources allocation of Hebei province in the South to North Water Diversion Project [D]. Beijing: China Academy of water re

- sources and Hydropower Research, 2015. (in Chinese)
- [11] 王开,魏加华,王光谦.大型渠道糙率系数设计取值的不确定性影响分析[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(6):870-878.(WANG Kai,WEI Jia hua,WANG Guang qian.Uncertainty in design value of roughness coefficient for large scale channel and effects analysis[J].Journal of Basic Science And Engineering,2008,16(6):870-878.(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2008.06.012
- [12] 马吉明,史哲.南水北调典型宽浅渠道糙率系数研究[J].水力发电学报,2007,26(56):75-79.(MA Jiming,SHI Zhe.Research on the absolute roughness of the typical channel of the South to North Water Diversion Project[J].Journal of Hydroelectric engineering,2007,26(5):75-79.(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243.2007.05.015
- [13] 王光谦,黄跃飞,魏加华,等.南水北调中线工程总干渠糙率综合论证[J].南水北调与水利科技,2006,4(1):8-14.(WANG Guang qian,HUANG Yue fei,WEI Jia hua,et al. Identification of roughness coefficient value for the channel of the South to North Water Transfer(Middle Route) Project[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2006,(1):8-14.(in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2006.01.004
- [14] 杨开林,汪易森.南水北调中线工程渠道糙率的系统辨识[J].中国工程科学,2012,14(11):17-23.(YANG Kai lin,WANG Yi sen.System identification of channel roughness for Middle Route Project of South to North Water Diversion[J].Engineering Science,2012,14(11):17-23.(in Chinese))
- [15] 王开,傅旭东,王光谦.倒虹吸有压弯管的局部水头损失系数计算方法比较[J].水资源与水工程学报,2006,17(5):1-5.(WANG Kai,FU Xudong,WANG Guang qian.Comparison with calculating the coefficient of local head loss models for inverted siphons[J].Journal of Water Resources & Water Engineering,2006,17(5):1-5.(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-643X.2006.05.001
- [16] 陈文学,穆祥鹏,崔巍.南水北调中线工程桥墩壅水特性研究[J].水利水电技术,2015,46(11):121-125.(CHEN Wen xue,MU Xiang peng,CUI Wei.Study on backwater characteristics of bridge piers of Mid Route of South to North Water Diversion Project[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2015,46(11):121-125.(in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2015.11.026
- [17] 方神光,尚毅梓,李玉荣,等.大型输水渠道退水口的退水能力研究[J].水利水电科技进展,2008,28(1):58-61.(FANG Shen guang,SHANG Yi zi,LI Yurong,et al.Recession capacity of discharge outlet of large water transfer channels[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2008,28(1):58-61,(in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2008.01.015
- [18] FANG Shengguang,WEI Jiahua,WU Baosheng,et al. Simulation of Transport Channel in China's Middle Route South to North Water Transfer Project[J].Tsinghua Science and Technology,2009,14(3):367-377.
- [19] 穆祥鹏,陈文学,崔巍,等.南水北调中线工程冰期输水特性研究[J].水利学报,2011,42(11):1296-1301.(MU Xiang peng,CHEN Wen xue,CUI Wei.Study on the characteristics of flow in Middle Route of South to North Water Transfer Project during freezing period[J].Journal of Hydraulic Engineering,2011,42(11):1296-1301.(in Chinese))
- [20] 范北林,张细兵,蔺秋生.南水北调中线工程冰期输水冰情及措施研究[J].南水北调与水利科技,2008,6(1):66-69.(FAN Bei lin,ZHANG Xi bing,LIN Qiu sheng.Ice situation of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project and ice danger prevention measures[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2008,6(1):66-69.(in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2008.01.021
- [21] 刘国强.长距离输水渠系冬季输水过渡过程及控制研究[D].武汉:武汉大学,2013.(LIU Guo qiang.Study on transition process and control of long distance water conveyance system in winter[D].Wuhan:Wuhan University,2013(in Chinese))
- [22] 陈翔.南水北调中线工程应急调控与应急响应系统研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2015.(CHEN Xiang.Study on emergency response and emergency response system for the middle route of South to North Water Diversion Project[D].Beijing:China Academy of water resources and Hydropower Research,2015.(in Chinese))
- [23] 朱德军,陈永灿,刘昭伟.大型复杂河网一维动态水流水质数值模型[J].水力发电学报,2012,31(3):83-87.(ZHU De jun,CHEN Yong can,LIU Zhao wei.One dimensional hydrodynamic water quality model for large complex river networks[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(3):83-87.(in Chinese))
- [24] 郭延祥,唐学林,陈雄盛,等.大涡模拟在河道平面二维水流模拟中的初步应用[J].水运工程,2015,5:112-116.(GUO Yan xiang,TANG Xue lin,CHEN Xiong sheng,et al.Application of 2-D LES in river flow simulation[J].Port & Waterway Engineering,2015,5:112-116.(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2015.05.020
- [25] 杨光,郭生练,李立平,等.考虑未来径流变化的丹江口水库多目标调度规则研究[J].水力发电学报,2015,34(12):54-62.(YANG Guang,GUO Shenglian,LI Liping,HONG Xingjun,WANG Le.Mult-objective operation rules for Danjiangkou Reservoir under future runoff changes[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(12):54-62.(in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdx.20151206
- [26] 董延军,蒋云钟,王浩,等.南水北调中线水量分配准市场模型研究[J].南水北调与水利科技,2007,5(1):10-12.(DONG Yan jun,JIANG Yun zhong,WANG Hao,YIN Jun xian.Quasi Market Model for Water Allocation in Middle Route of SNWDR[J].South to North Water Transfers And Water Science & Technology,2007,5(1):10-12.(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2007.01.005
- [27] 黄会勇.南水北调中线总干渠水量调度模型研究及系统开发[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.(HUANG Hui yong.The main canal of the middle route of South to North Water Diversion Project water regulation model research and

- system development [D]. Beijing: China Institute of water conservancy and hydropower, 2013. (in Chinese)
- [28] 王浩, 郑和震, 雷晓辉, 等. 南水北调中线干线水质安全应急调控与处置关键技术研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2016, 48(2): 1-6. (WANG Hao, ZHENG He zhen, LEI Xiao hui, et al. Study on key technologies of emergency regulation and treatment to ensure water quality safety of the Main Canal of Middle Routes of South to North Water Diversion Project[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2016, 48(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 15961 /j. jsuese. 2016. 02. 001
- [29] 练继建, 王旭, 刘婵玉, 等. 长距离明渠输水工程突发水污染事件的应急调控[J]. 天津大学学报, 2013, 46(1): 44-50. (LIAN Ji jian, WANG Xu, LIU Chan yu, et al. Emergency regulation for sudden water pollution accidents of open channel in long distance water transfer project[J]. Journal of Tianjin University, 2013, 46(1): 44-50. (in Chinese))
- [30] 聂艳华. 长距离引水工程突发事件的应急调度研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2011. (NIE Yan hua. Study on emergency dispatching of long distance water diversion project[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, 2011. (in Chinese))
- [31] 房彦梅, 张大伟, 雷晓辉, 等. 南水北调中线干渠突发水污染事故应急控制策略[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 133-136. (FANG Yan mei, ZHANG Da wei, LEI Xiao hui, et al. Emergency control strategy for sudden water pollution accident in the Main Channel of Middle Route of South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 133-136. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2014. 02. 031
- [32] 杨开林, 王涛, 郭新蕾, 等. 南水北调中线冰期输水安全调度分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 1-8. (YANG Kai lin, WANG Tao, GUO Xin lei, et al. Safety regulations of water conveyance in the Middle Route of South to North Water Diversion Project in ice period[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 1-8. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2011. 02001.
- [33] 崔巍, 陈文学, 穆祥鹏, 等. 明渠运行前馈控制改进蓄量补偿算法研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 12-17. (CUI Wei, CHEN Wenxue, MU Xiangpeng, et al. Revised volume compensation algorithm for feedforward control of canal [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 12-17. (in Chinese))
- [34] 崔巍, 陈文学, 郭晓晨, 等. 明渠调水工程闸前常水位运行控制解耦研究[J]. 灌溉排水学报: 2009, 28(6): 9-13. (CUI Wei, CHEN Wei xue, GUO Xiao chen, et al. Research on decoupling of constant downstream depth operation of canal [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 9-13. (in Chinese))
- [35] 吴保生, 尚毅梓, 崔兴华, 等. 渠道自动化控制系统及其运行设计[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 746-755. (WU Bao sheng, SHANG Yi zi, CUI Xing hua, CHEN Zhi yu an. Automatic canal control system and its operation and design[J]. Advances In Water Science, 2008, 19(5): 746-755. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2008. 05. 022
- [36] Shang Yizi, Rogers Peter, Wang GuangQian. Design and evaluation of control systems for a real canal[J]. Technological Sciences, 2012, 55(1): 142-154.
- [37] 杨桦, 王长德, 冯晓波. 模糊控制在渠道运行系统中的应用[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2003, 36(1): 45-49. (YANG Hua, WANG Chang de, FENG Xiao bo. Application of fuzzy control to canal operation systems [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(1): 45-49 (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-8844. 2003. 01. 012
- [38] 安宁. 渠道运行广义预测控制技术及其仿真[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2003, 36(3): 4-6 (AN Ning. Generalized predictive control model and simulating for canals[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(3): 4-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-8844. 2003. 03. 002
- [39] 韩延成, 高学平. 长距离自流型渠道输水控制的二步法研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 414-418. (HAN Yan cheng, GAO Xue ping. Two step optimal operation and control method for long distance gravity-flow delivery in canals [J]. ADVANCES IN WATER SCIENCE, 2006, 17(3): 414-418. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2006. 03. 020
- [40] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 长距离输水渠道冰期运行控制研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 8-13. (MU Xiang peng, CHEN Wen xue, CUI Wei, et al. Operation and control to long distance water diversion canal system during frozen period [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 8-13. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2010. 01. 003.
- [41] C. Y. Cheng, X. Qian. (2010) Evaluation of Emergency Planning for Water Pollution Accidents in Reservoir Based on Fuzzy Comprehensive Assessment. Procedia Environmental Sciences, 2, 566-570.
- [42] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 等. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001. (DENG Xiao jun, XU You peng, ZHAI Lu xin, et al. Establishment and application of the index system for urban river health assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 993-1001. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201209221339
- [43] Xiao kang Xin, Ke feng Li, Brian Finlayson, et al. Evaluation, prediction, and protection of water quality in Danjiangkou Reservoir, China. Water Science and Engineering, 2015 8(1): 30-39.