

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.007

南水北调中线干线智慧输水调度的思考

陈晓楠¹, 靳燕国¹, 许新勇², 贺蔚³

(1. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100038; 2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据智慧水利和数字孪生工程建设的相关要求, 基于现代人工智能技术和水利专业知识, 结合中线干线工程输水调度任务和职责, 尝试提出中线干线智慧输水调度的定义和基本功能要求。在分析智能和智慧之间逻辑关系的基础上, 分别从感知智能、认知智能、决策智能系统地讨论了中线干线智慧输水调度的关键技术、存在的不足和提升建议。调度感知智能方面, 提出接触式与非接触式相结合、机器视觉与传统传感相结合、自动采集和人工巡查相结合的数据采集体系, 构建基于多源数据融合的数据清洗方法; 调度认知智能方面, 提出机理研究结合数据挖掘的建模思路, 分别从预报、预警、预演、预案的角度, 全面总结分析输水调度关键技术和建模要求, 构建前馈调控策略模型、水力模拟仿真模型、调度预报预警模型、参数自适应模型等; 调度决策智能方面, 提出以模拟推演为前馈、以实时监测为反馈的调控思路, 建立基于滚动决策修正、实时响应的自动化输水调控策略, 构建多目标优化调度模型。

关键词: 智慧调度; 数字孪生; 人工智能; 南水北调中线

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)05-0046-10

Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project

CHEN Xiaonan¹, JIN Yanguo¹, XU Xinyong², HE Wei³

(1. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Beijing 100038, China;
2. School of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the relevant requirements of smart water conservancy and digital twin engineering construction, by integrating the modern artificial intelligence and water dispatching professional knowledge, the definition and basic functions of smart water dispatching for the South-to-North Water Diversion Middle Route Project are tentatively proposed in this paper combined with the tasks and responsibilities of water transportation scheduling. Through analyzing the logical relationship between intelligence and wisdom, this paper systematically discusses the key technologies, existing shortcomings, and improvement suggestions for the smart water transportation and dispatching in the middle route from the perspectives of perceptual intelligence, cognitive intelligence, and decision-making intelligence. With respect to the perception intelligence, it should be a combination of non-contact and contact measurement, a mixture of machine vision and traditional sensors, and an integration of automatic monitoring and manual inspection. Data cleaning technology is required to support the multi-source data fusion. In the cognition intelligence, a framework is suggested by integrating mechanism studying and data mining. From the perspective of prediction, early warning, rehearsal and emergency plan, the key technologies and modeling requirements of water dispatching were comprehensively analyzed, and the regulation strategy model, simulation model, prediction and early warning model, Self-adaptive model, and so on should be constructed. In terms of intelligent decision-making for the dispatch of the middle route, a regulation approach based on simulation deduction as feedforward and real-time monitoring as feedback is proposed. An automated water dispatching regulation strategy based on rolling decision correction and real-

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979109)
作者简介: 陈晓楠(1979—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事长距离输水调度与水资源管理工作。E-mail: chenxiaonan@nsbd.cn
通信作者: 许新勇(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事流固耦合理论与方法、工程结构优化研究。E-mail: xuxinyong@ncwu.edu.cn
引用本文: 陈晓楠, 靳燕国, 许新勇, 等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 46-55.
CHEN Xiaonan, JIN Yanguo, XU Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 46-55.

time response is established, and a multi-objective optimization dispatch model should be constructed.
Key words: smart dispatching; digital twin; artificial intelligence; South-to-North Water Diversion Middle Route

南水北调工程事关战略全局、事关长远发展、事关人民福祉。工程规划东、中、西三线,跨长江流域、淮河流域、黄河流域和海河流域,建成后形成“四横三纵、南北调配、东西互济”的水资源格局。东、中两线已分别于 2013 年和 2014 年通水运行,西线工程前期论证有关工作正在加快进行。南水北调中线一期主体工程由水源工程、输水工程和汉江中下游治理工程三大部分组成。中线干线工程作为中线工程的输水工程部分,自丹江口水库引水,向河南、河北、北京、天津自流输水,规划多年平均调水量 95 亿 m^3 ,对应口门供水量 85.4 亿 m^3 。中线总干渠以明渠为主,全长 1 432 km,陶岔渠首设计流量 350 m^3/s ,加大流量 420 m^3/s ,沿线共布设 64 座节制闸、97 座分水口、54 座退水闸、61 座控制闸等。中线通水以来,截至 2022 年 7 月下旬已经安全、平稳、持续调度运行 7 a 多,累计向北方调水总量超过 500 亿 m^3 ,其中向北方干涸的河流生态补水近 90 亿 m^3 ,发挥了巨大的社会、经济、生态环境综合效益。

中线干线输水调度依据水量计划,将水源水质、保量、按时输送到沿线各分水处。与其他长距离输水工程相比,中线干线输水调度的难点和问题如下:

a. 受水区依赖程度日益增强,输水调度要求高,但工程输水调度在预报、预警、预演、预案等方面的研究和应用不足。受水区对水资源的需求日益迫切,加之中线水质优良,沿线地方对引江水依赖程度日益增强,当前北京城区超过 70% 的生活用水来自南水,天津市城区几乎全部使用中线供水。基于大量研究成果,并密切联系实际需求,中线干线输水调度在实践中探索形成实用的调度技术,形成以人工分析水情为主、结合闸门远程操控的模式,圆满完成了各项供水任务。但当前的研究成果和应用系统在快速、准确地模拟推演各类输水运行工况方面,特别是极端工况下的精准预演上,还存在较大差距。主要难点:中线总干渠输水距离长,供水流量发生较大调整时所需调度时间长,传统非恒定流模拟分析计算工作量大、时间长,特别是较小计算步长条件下对长距离、长时间的模拟,计算误差将会逐步积累,导致最终计算结果失真等;全年度全天候供水,调度运行工况复杂,各类监测数据易受外界环境的干扰,测量误差易导致上下游水情数据间的逻辑矛盾;渠道综合糙率、过闸流量系数等重要水力参数随着运行条件动态发生变化,而自动识别、修正功能欠缺。此外,对于不同的运行工况,模拟计算的时效性要求不同。对于应急调度要求迅速推演出短时间内水情的快速变化,但对于正常输水情况下的流量调整工况,则模拟的时间可相对较长。因此,针对不同输水运行工况,根据实际运行环境条件,结合机理和数据驱动特点,研究建立高效、实用的预报和推演技术方法十分迫切。

b. 运行工况复杂,输水调度技术难度大,但输水调度智能化、自动化调控程度不足。中线总干渠输水线路长、分水口门多、沿线无调蓄水库,且全年全天候供水还需克服汛期、冰期运行等不利影响,输水调度依靠工程沿线几百个闸门的高度协调配合来实现按时、保质、保量的供水目标,调度技术难度大。尤其是汛期和冰期,对输水调度提出更大挑战。汛期需要应对外水入渠引起的渠段水位壅高,以及深挖方渠段高地下水位对衬砌板顶托破坏风险等;冰期则需密切关注冰情,严格控制流速和水位、流量的波动,防止冰害发生。中线全线通水以来,利用自动化系统实现了水情辅助分析、远程操控闸门的目标,但对于根据供水目标、边界条件和实时水情等实现自动化控制还有很大差距。面对如此复杂且繁多的实际运行工况,目前尚未形成有效的多渠道、多目标、自适应的自动化调控模型,需要在模拟推演的基础上,根据实时水情进行滚动修正,构建安全、平稳、高效的自动化实时调控技术。

c. 输水调度面临新形势和更高要求。中线全线通水近 8 a,向北方受水区供水量逐年攀升,连续 2 a 供水总量超过规划多年平均供水量,随着目标达效由“慢”变“快”、用水需求由“弱”变“强”,供水形势正在发生深刻变化。南水北调是国之重器,是保障群众饮水安全的生命线,新形势下给予中线供水提出更多、更高的要求,要按照“增源挖潜扩能”思路,实现多供水、供好水目标,还肩负择机向河流生态补水助力地方生态文明建设等重任。自 2017 年以来,中线践行生态文明建设的精神,主要利用水库汛期的洪水资源,通过原设计功能为应急退水的退水闸进行河流生态补水,相当于原设计分水口门数量增多近 50%,大大增加了调度的复杂性;引江补汉工程建成后,将提高中线供水保证率,但伴随输水流量的增大,大部分渠段在加大水位、加大流量下运行可能成为常态,此时沿线节制闸将会因高水位而难以起到节制作用,调度控制的方式,以及流量变化过程的衔接等方面都与当前运行工况发生根本变化;随着沿线调蓄水库建设推进,后续中线干线输

水调度还将成为多输入、多输出、多目标、多工况的复杂大系统,对输水调控模型要求将更高。传统的主要依据人工先验经验的输水调度在充分应用现代信息和智能技术以保障安全、平稳、高效输水方面仍存在不少差距和不足,特别在新形势下对中线干线输水调度提出新的任务和更高要求,难以胜任日益复杂的运行工况。

综上,虽然中线总干渠输水调度已取得了不少成果,但仍存在不足,特别是在新形势、新要求下,需要补齐短板,深入推进中线干线智慧输水调度建设,以有效应对新挑战,实现工程的高质量发展。本文针对中线干线输水调度存在问题和面临的未来形势,以中线干线智慧输水调度为论述对象,尝试提出中线干线智慧输水调度的定义和具体功能需求,在分析智能和智慧关系基础上,分别从智能感知、智能认知、智能决策等角度分析中线干线输水调度的关键问题和应对途径,结合人工智能技术和专业知识探讨中线干线智慧输水调度的体系框架和技术方法,以期为南水北调中线干线工程高质量发展提供技术支撑。

1 中线干线智慧输水调度定义和基本功能

1.1 中线干线智慧输水调度定义和内涵

智慧水利是水利高质量发展的显著标志^[1]。目前各界对智慧水利理念和概念认识不尽相同,总体的架构设计也有差异^[2-4]。但整体来看,智慧水利是充分应用新一代信息技术于水利业务之中,深度结合水利知识,强化预报、预警、预演、预案功能,实现水问题有效解决和治水目标。近年来,围绕智慧水利和智能技术在水利上应用等方面开展了大量的工作,也取得了不少成果^[5-9]。智慧水利的显著标志是实现数字孪生流域和数字孪生水利工程^[10]。中线干线工程作为数字孪生水利工程的试点正在积极推进相关工作,而实施智慧输水调度是其中的最为核心业务。

通过对智慧、智慧水利、数字孪生、人工智能等理解,结合南水北调中线干线输水调度实际和高质量发展的要求,尝试将中线干线智慧输水调度定义如下:以中线干线安全、平稳、高效输水为目标,根据业务需求,充分运用人工智能、数字孪生、大数据、移动互联等新一代信息技术,深度结合专业知识和管理标准,具有智能监测、仿真模拟、预报预警、自主调控的能力,以及强大的调度管理业务处理功能,实时感知水情、工情、汛情、冰情等信息,实施快速、精准的自动化调度,并实现规范、精细的调度管理。

智慧输水调度的概念是动态的,随着科技发展和管理水平的提高,对智慧输水调度的理解和认识也会不断更新。基于当前条件,对于中线干线智慧输水调度内涵的理解,从以下几方面进行分析阐述:

a. 以安全为前提,提升输水调度的高效性。实施智慧输水调度首要目的是保障和增强安全性。通过现代化的手段,对未来输水运行形势进行预报、预警,或模拟分析极端工况下的调度响应措施,以便能够提前做出正确、有效的调度,提升输水调度的安全性。在保障安全前提下,利用自动化系统更方便、有效地处理各类输水调度日常事务,解放调度人员劳动力,大幅度提升工作效率。因此,自动化系统的开发和应用务必坚持安全第一,保障系统硬件和软件的可靠性,及时维护、更新,并做好自动化系统失效情况下人工调度的应急预案。

b. 遵循以问题为导向、需求为牵引原则。明确问题是解决问题的前提,先进的技术必须对实际问题针对性地对症下药。因此,必须紧密结合输水调度实践,了解输水调度的难点,把握输水调度的要领,发现输水调度的问题,对输水调度中重要影响因素和关键技术进行系统梳理,对输水调度的业务功能需求进行深入分析。在研发和建模过程中,要本着“应用至上”的原则,不刻意追求复杂、高深的模型,探索可行、实用的模型,切实满足输水调度各项业务需求。

c. 深入推进输水调度管理规范化建设和科技研发。中线智慧输水调度建设是一项系统工程,调度人员直接面对的自动化系统以一套标准制度体系和一系列科研技术成果作为支撑。规范化建设是基础,信息化技术是手段,通过信息技术把输水调度的各项业务流程和要求进行电子化。各类调度模型的研发,需要基于大量相关研究成果的支持。因此,推进输水调度智慧调度建设,应统筹推进信息化建设与输水调度规范化、标准化建设,并不断加强输水调度科技攻关。

d. 深度融合新一代信息技术和水利专业知识。信息技术是实现智慧化调度的重要手段,实现信息采集、数据清洗、知识挖掘、远程控制、三维展示等功能,而专业数学模型则是“灵魂”,实现分析计算、模拟推演、决策控制。目前人工智能技术对数据依赖较大,而对于如此复杂的输水调度系统,需将数据驱动和机理分析密切结合。经典水文学、水力学等可为输水调度提供先验知识,而现代智能技术有强大的数据处理能

力,通过两者深度融合以实现复杂运行工况的快速、准确计算。

e. 有机结合模拟推演与实时调控功能。强化预报、预警、预演、预案措施,根据设定的边界条件对将来或设想的工况进行模拟推演。利用模型进行“前馈”的模拟计算时受水力参数精度影响较大,需要不断修正,特别是当计算的时间和空间较大时,误差将不断累计,预先制定的调控策略需要在运行中据实调整和优化。因此,在“预”的基础上,应充分利用实时监测数据,进行“反馈”计算,预报模拟和实时控制相结合,不断滚动决策,实现精准调控。

1.2 智慧输水调度系统和智能支撑体系

Rowley^[11]提出了“DIKW 金字塔”,用于表示数据、信息、知识和智慧的结构和功能关系。智慧位于顶层,是基于已有的知识,进行判断、决策、创造的能力。Sternberg^[12]认为智慧和智能不同,并从两者与创造力的关系角度分别进行定义。Meystel 等^[13]认为“智能是感知系统运行环境,关联整个系统的发生事件,对这些事件进行决策,执行解决问题和生成各自的行动和控制”。Liew^[14]在“DIKW 金字塔”模型的基础上,在知识和智慧层之间增加了智能层,从而扩展形成“DIKIW”模型。当前对智慧和智能的概念理解尚未统一,两者之间的辨析也不是十分清晰,但整体来看,智慧比智能高一层次,而智能则是智慧的基础和支撑。智能化侧重利用现代通信与信息技术、计算机网络技术、数据挖掘技术,并结合专业知识,形成针对某一个方面的应用。智慧化则是升级版的智能化,在智能的基础上,强调通过人机交互取长补短、优势互补、创造革新等,除了通信技术、数学算法、专业知识外,还应融入管理学、社会学、心理学等知识。根据前述中线干线智慧输水调度定义和内涵,以及对智慧和智能的辨析,中线干线智慧输水调度系统应包括调度业务管理和调度技术支持两大部分,并通过各类智能体系建设来支撑实现智慧的理念。中线干线智慧输水调度系统可由智能调度业务管理系统和智能调度决策支持系统来支撑,其中,智能调度决策支持系统主要涉及智能感知体系、智能认知体系和智能决策体系。

1.3 智慧输水调度系统主要功能设计

本着实用性、可行性原则,分别提出支撑中线干线智慧输水调度系统的智能调度管理系统和智能调度决策支持系统的设计功能(图 1)。根据目前中线干线调度管理相关制度和标准并结合中线 8 a 多的运行经验,在智能调度业务管理方面,系统应具备以下功能:

①调度值班管理。值班人员的签入、签出统一登录和注销管理;值班表辅助编制,调换班管理,并与相关人力考勤系统对接;各值班岗位动态设置,可根据实际情况增减配置;员工值班情况统计分析,包括时长、从事各类值班岗位情况等。

②调度数据管理。基本调度数据的综合展示和趋势分析等数据管理,具备强大的查询、统计功能,可以查询任意时刻、任意站点的调度数据,并对相关数据按指定逻辑要求,进行多条件下的时空统计分析。

③调度指令管理。调度指令的编制、审核、下达和反馈流程闭环管理,实现指令的管理流程、生产操作流程、视频辅助监视复核流程的多系统自动对接,确保调度指令的准确性以及执行的高效性,同时还应具备历史指令、远程操控闸门成功率等查询统计功能。

④调度台账管理。调度运行日志、交接班记录、应急值班记录、防汛值班记录等有关调度生产作业的电子化台账管理。

⑤供水计划管理。水量计划制定、执行,以及供水信息的记录、统计、查询,能够方便地根据时间、空间条件组合统计查询各类供水情况。

⑥文件及信息报表管理。日报、水情报送信息的自动生成,以及通过人机交互界面灵活的交互设置格式和相关内容;工程运维调度配合审批单、应急突发事件报告单等各类调度相关业务制式报表,以及收发文件的管理等。

⑦调度生产场所管理。调度生产场所各类设备设施的资产管理、维修管理;各软件应用系统的运行状态监控、故障自动报送;各类人员进出调度大厅的管理等。

⑧培训考核管理。输水调度相关制度、标准、业务流程图、系统操作手册等各类培训教材进行电子化;调度相关

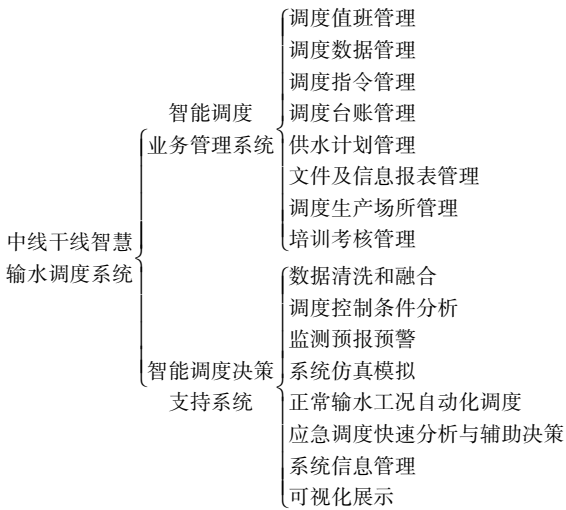


图 1 中线干线智慧输水调度系统框架
Fig.1 Framework of smart water dispatching system in the middle route

知识电子题库建设和知识测试功能;以调度仿真系统为基础,进行输水调度仿真演练和测试;调度人员考核、各级调度考核辅助管理,对日常发现各级调度方面问题的台账建立、整改督促、考核等。

在智能调度决策支持方面,根据相关技术成果,并结合通水以来输水调度实践,提出系统主要功能:①数据清洗和融合。对采集水情数据的正确性与合理性分析判断。根据单点采集数据序列,对明显异常数据进行识别,自动剔除病态数据,并通过上下游数据对比和水力分析处理水位、流量等不合理的倒挂问题;能够将从其他相关系统获得的工情、雨情、冰情等数据进行有机融合,为调度分析决策和调度模型计算提供可靠数据支撑。②调度控制条件分析。根据各口门供水目标流量和实际工情等,自动生成可行、合理的调度控制边界条件,包括调度控制的目标水位、投入运用的闸门等,并能够对人为给定的运行控制边界条件进行计算分析,判断可行性。③监测预报预警。实时监测水位、流量、闸门开度,以及渠段水体变化情况等信息,并在监测值超限时,及时发出预警;根据气温、水温等预测,对冰情进行预报、预警;根据雨情强度、降水范围等预测,结合当前水情、工情,对未来水情进行预报,对调度进行预警。④系统仿真模拟。根据给定运行边界条件和控制条件等,能够快速、准确模拟输水调度状态,包括水位、流量等时空变化的情况,并仿真展示。特别是能够对极端工况进行推演模拟;具有自适应能力,根据积累的各类数据,自动修正完善各水力要素,包括糙率、流量系数等。系统的仿真功能不仅支持输水调度决策,还可作为调度人员培训演练的平台。⑤正常输水工况自动化调度。建立各类知识库,根据供水目标、运行水位、输水流量、实际工情等各类约束条件,对实时获得的各类经过处理后的信息进行智能分析计算,自动生成正确、高效的实时闸门操控指令,实施自动化调度。⑥应急调度快速分析与辅助决策。具有水位骤变、流量骤变、闸门异动及时报警功能;根据突发事件位置、类型、后果等情况,以及沿线实际水情,快速计算,及时提供有效的应急调度方案和策略;建立突发事件应急调度预案库,并不断补充和完善;能够分析计算不同分配原则下,事故段下游利用槽蓄水体维持短时供水方案等,尽力减少事件造成的供水影响。⑦系统信息管理。建立完善数据库,包括固定的工程参数和实时水情数据,以及计算过程中产生的综合糙率、过闸流量系数等水力参数,具有强大的统计、查询、分析功能和数据库维护功能;与其他自动化系统实现无缝对接、数据交互。⑧可视化展示。应用数字孪生技术,实现输水调度的现实与数字世界的动态映射;具有友好的系统用户界面,以可视化方式直观进行展示各类信息和成果;强大的人机交互功能,输入、输出信息交互顺畅,操作方便、高效。

智能调度决策系统应具备以下特性:灵活性、自适应性、鲁棒性、可拓展性。系统的灵活性主要指可以方便地进行人机交互,动态调整边界条件,例如投入运行的节制闸、分水口、退水闸,以及多水源作为输入等功能;系统的自适应性主要指具备自学习能力,根据实际运行数据,自动更新修正各类计算参数,并不断完善知识库等;系统的鲁棒性主要指系统的抗干扰能力,对数据因外界干扰产生的波动,或者个别的异常甚至错误可以自主修正,模型能够正常分析计算;系统的可拓展性主要指按照一定的规则实施模块化开发,明确各类模块功能及输入输出要求,方便后续的更新、增补等需求。

上述从调度业务实际需求的角度提出了智能调度决策系统应具备的主要功能,而从中线干线输水调度智能化研发层面上可划分为智能感知体系、智能认知体系和智能决策体系。中线干线输水调度的智能感知体系建设是基础。通过自动化采集等多种渠道快速、准确获取调度相关的水情、工情、雨情、冰情等数据,并经过数据清洗、融合等处理后,实现全面、深度感知,为输水调度的分析和决策提供信息依据;中线干线输水调度的智能认知体系建设是关键。主要围绕中线干线输水调度的预报、预警、预演、预案的措施强化,通过机理分析和数据挖掘等途径,对输水调度中各类因素与水力响应的关联关系进行量化分析,对水流运动变化规律定量刻画,以实现对未来或设想工况下的推演,为输水调度决策提供支撑。本文的调度决策主要指具体的输水调度控制,即在合适的时机对合适的闸门做出合适的调整。重点是在“预”的基础上,根据实时情况,分析研判后作出科学、有效的具体闸门操控响应的调度决策。

2 中线干线输水调度智能感知体系提升建议

当前,中线干线工程初步建设了包括水情、工情等智能感知体系,进行水位、流量、闸门开度、工程状态、水质等方面自动监测,但覆盖范围不充分,监测方式比较单一,而且对采集数据的清洗和融合不足,针对目前的问题,从感知类型和数量、感知方式、数据清洗和融合方面提出改进提升建议。

2.1 感知类型和数量

及时准确获得的各类数据是输水调度分析计算的基础。中线干线输水调度智能感知系统涉及的监测数据主要包括各类水情数据,以及与调度相关的工情、雨情、冰情、水质数据等。水情数据包括水位、流量、闸门开度数据,是输水调度分析决策中最重要、最直接的依据。当前中线工程在各节制闸前后、控制闸出口处、退水闸处设置了水位计,在各节制闸、分水口处设置了流量计,各闸门设置了开度仪,自动读取相关位置的水位、流量以及闸门开度。但目前水情采集设施的数量还不能满足全面感知的需求。例如,退水闸由于原设计为应急退水时使用,目前未安装流量监测设施。沿线各建筑物进出口处的水情数据监测尚未全覆盖。此外,两节制闸间渠段较长,在各渠段的重点部位需增设流量、水位采集设施等;与调度相关的其他监测数据目前初步形成了机电设备状态监测、工程安全监测、水质自动监测、沿线降雨量监测等系统,但自动采集数据尚不完善,且涉及内容不够全面,后续还需逐步补充完善诸如渠道沿线地下水自动监测、左岸排水及交叉河道水情监测、冰情自动监测、气象因素监测、藻类壳菜以及淤积监测、工程运维监测、电站和泵站监测,以及总干渠周边水文信息、上游水库信息共享等。

2.2 感知方式

当前中线干线工程的监测设施主要采用传统的接触式传感器,例如采用压力式水位计、超声波流量计等。近年来随着新的监测技术迅速发展,中线在个别试点也在尝试运用新技术进行监测和识别,例如北斗自动化变形监测技术、InSAR 沉降监测、无人机渠坡变形监测、水位的视频图像识别等。为推进全面感知系统的建设,中线应在现有传统监测设施和技术手段基础上,逐步增加对现代监测技术手段的运用,可先以试点方式充分进行检验后不断完善推广,逐步构建中线现代化智能感知系统。①接触式和非接触式监测相结合。接触式的监测主要用于高精度以及现有技术水平下非接触式难以替代的监测项目。非接触式监测主要基于光谱遥感技术,例如可见光、电磁波、声呐、激光等,搭载地面固定设备、卫星、无人机等,具有单位监测成本低、运维方便等优势。在河流流量测量、大坝和建筑物变形监测等方面,非接触式监测方法正逐步得到广泛应用。②逐步试验推进适用于中线总干渠的机器视觉技术。机器视觉是当前人工智能领域基础技术之一,已取得丰富的成果,例如,人脸识别技术已经广泛应用于多个领域。中线总干渠可通过对水尺的图像识别自动监测水位,以及将机器视觉技术应用于工程巡查、安全保卫等方面。③不断推进天地空一体化监测。随着卫星监测精度的提升、无人机成本降低等,未来天地空一体化监测将成为基本监测架构。根据天地空监测手段各自优劣,可实施数据交换,实现互相校准和监测的主动触发。可考虑以实测数据为基础,动态分析监控存在的问题和不足,不断完善水情、工情、天气信息等监测系统,优化监测设备布置,完善监测平台。④自动化监测和人工巡查相结合。尽管自动化监测技术迅猛发展,但目前技术水平还不能实现全方位高精度的自动化监测,很多工作还需要依靠人工巡查,比如工程渗水、裂缝、边坡塌陷等。此外,必须做好极端工况下自动化系统失效时的应急准备,一旦突发事件造成自动采集失效,需要启动人工方式的信息采集。中线针对输水调度最直接的水情监测,除了正常情况下实施自动采集监测以外,还设置了水尺、弧形闸门开度尺等人工监测设施,必要时利用水尺获得水位数据,通过闸门开度尺获得节制闸开度,根据水位开度数据,基于水力学公式计算出过闸流量,确保人工方式能够获得输水调度所依据的水位、流量、开度数据。

2.3 数据清洗和融合

数据的清洗和融合是后续输水调度分析计算的重要基础。输水调度分析决策需要对水情等数据进行清洗,并对各类工情、雨情、冰情等数据进行融合,作为计算的输入和运行边界条件。对于最重要的水情数据,以流量为例,不仅仅要剔除病态数据,而且还要考虑各数据在空间上的逻辑性,例如当上下游流量出现倒挂,则不符合物理机理,将导致程序运行错误等。数据异常的原因较复杂:①设备发生故障,例如流量数据无读数或者显示负值等;②受外界因素等影响,监测数据瞬时出现了大幅度的跳变,产生随机误差;③系统误差造成。例如上游断面计量偏小,而下游断面偏大,单独看每个断面精度都满足要求,但上下游对比则发生了流量倒挂。因此,数据清洗方法要针对不同的情况实施不同方法。对于发生故障出现明显异常的数据比较容易自动发现并剔除。对于随机误差问题一般可以通过对单点时间序列进行滤波处理。对于系统误差产生的数据倒挂,则可根据上下游数据可靠性进行加权拟合分析,形成合理的数据输入。总之,对于水情数据清洗,通过自身“纵向”数据序列分析,结合上下游“横向”比较,实现病态数据的剔除、数据插补以及数据合理化处置。对于工情等其他数据,最重要是通过各自相关系统对专业数据处理并进行分析,给输水调度提出具体的边界约

束和要求,调度上进行统筹分析。例如,对于闸门机电设备,最重要是提供调度可控方式,包括远程可控、现地可控,以及检修状态不可控制。对于工程监测分析,最重要是对输水调度提供明确的水位控制目标等。因此,对水情以外的其他调度相关信息进行提炼、融合,经统筹分析,进而形成输水调度的明确边界条件。

3 中线干线输水调度智能认知体系

中线干线输水调度在预报、预警、预演、预案功能强化方面有待提升。中线干线输水调度智能认知体系,主要围绕上述“四预”功能构建相关专业模型,以及用于建模的机理或数据驱动的方法等。针对目前存在的问题和不足,提出中线干线输水调度智能认知体系建设相关建议。

3.1 机理和数据驱动建模方法分析

传统水力学中的恒定非均匀流、非恒定流、谢才公式、达西定律、圣维南方程组等基本概念和方程是输水调度模拟计算的基础,在设计和运行中得到广泛应用。但由于机理的复杂性和实际工况与理想条件的差异,传统水力学模型一般经过大量的简化,并且采取经验系数,导致往往精度不足,尤其是随着时间和空间尺度的增大,计算误差累计逐步增大,最终导致计算失真。随着现代智能技术发展,很多学者尝试利用各类数据挖掘方法,例如人工神经网络、遗传程序设计、支持向量机等,建立纯数据驱动模型进行各类回归、模拟研究,并取得了丰富的成果,针对一些问题或在某些条件下甚至取得优于机理模型的精度^[15]。但纯数学驱动完全抛弃了机理也存在一些问题,例如泛化功能弱,一旦预测模拟数据较大地超出训练样本范围,预测效果会较差,甚至出现不符合理论的错误值。此外,由于过分依赖数据,当数据量较少或者代表性不充分等,拟合效果不佳。纯数据驱动方法是否可以完全取代物理意义理论,在学术界目前争议很大,不少学者认为因果关系超越相关性,基于大数据的模型应该服从已有的基本理论。笔者认为至少在目前的技术条件和理论研究基础下,应将机理模型和数据挖掘技术相结合,发挥各自优势,以取得更好的效果。笔者曾经建立基于信息扩散技术的径向基神经网络模型,结合信息扩散处理小样本数据的优势和径向基神经网络拟合精度高的优点,提出数据挖掘的新方法。利用此方法与过闸流量机理模型相结合,使用信息扩散径向基神经网络回归综合流量系数,再使用传统水力学公式计算过闸流量,取得较好效果^[16-18]。

3.2 围绕“四预”的调度功能

根据中线干线输水调度的主要业务,从强化预报、预警、预演、预案方面分析模型主要功能。

a. 预报功能。丹江口水库来水预报和地方需水预测等对中线水量调度决策至关重要,本文主要讨论中线所辖的管理范围。在中线总干渠输水调度方面,预报功能主要涉及汛期总干渠沿线降雨预报,包括范围、时间、强度,以便预先做好全线调度应对。此外,冰期对气温、水温、冰情等预报,这是冰期动态调控的重要依据,以确保冰期运行安全前提下实现多供水的目标。

b. 预警功能。与预报功能相对应的汛期暴雨、防汛预警,以及冰期寒潮、流冰等相关预警。在输水调度过程中实时水情预警,主要包括调度过程中水位超限预警、流量偏离目标流量预警等。

c. 预演功能。突发事件应急调度的模拟推演,尤其是针对极端工况下的应急调度模拟。预演还包括在正常运行条件下,各类调度工况的模拟和仿真,例如根据入渠流量调整情况,分析预判沿线水位、流量变化过程等。

d. 预案功能。主要针对各类应急工况,基于预先建立的应急调度方案库,关键时刻能快速提供有效的调度应对策略。

3.3 输水调度重点模型

结合实践对中线干线输水调度的关键技术问题总结分析,认为应重点研究的模型包括前馈调控策略模型、水力模拟仿真模型、调度预报预警模型、参数自适应修正模型。

a. 前馈调控策略模型。中线线路长,长距离调控所需时间长,分水口门多,水位、流量变化调整需求频繁,沿线 60 多个渠池组成了等效串联小水库群,其水力联系密切,一座闸门的动作将“牵一发而动全身”。因此,调度调控十分复杂,很难仅根据实时的水位、流量等控制目标就实现可靠的自适应调控,需要针对运行工况,预先制定相应的调度策略和调控思路,即根据既定的目标和边界条件,进行输水调控前馈分析。主要包括控制方式优化研究(实际运行中已拓展了原闸前常水位概念,将“点控制”拓展为“区间控制”)、目标控制水位动态优化研究、多闸门联合调控效果研究,以及各典型工况下(包括各类应急工况)调控策略研究等。

利用前馈模型,根据给定的目标和各类约束条件,可预先形成调控的方案和策略。

b. 水力模拟仿真模型。前馈调控策略模型重点实现调控策略的建立,而根据调控策略实施效果分析需要借助模拟仿真模型。不论是针对正常输水调度各类工况还是应急调度情况,根据前馈调控策略模型建立的调控策略,利用模拟仿真模型能够实现快速、准确推演过程中水位、流量等水力要素的时空变化情况。总干渠非恒流的变化特性研究(恒定流状态看作非恒定流的特殊情况,且实际中恒定是相对的)可分为渠道输水模拟和过闸流量计算两大部分,结合在一起形成整个工程输水调度仿真。模拟仿真计算量大,耗时长,可考虑将典型工况事先进行模拟,提炼形成知识库,以备快速调用。

c. 调度预报预警模型。预报预警模型主要为前馈调控模型及时提供相关调度边界条件和约束条件。汛期调度运行时,利用降水预报模型,预测未来降水持续时间、强度、范围,分析预判经产汇流后入渠外水量和水位壅高等情况,以便提前提出水位控制要求和入渠流量调减要求。冰期运行,在研究确定各断面冰期安全输水流量指标基础上,利用机理和统计等方法,根据气温、水温等对未来冰情预报预警,为调度提供流量调整的依据。此外,在调度过程中,根据当前运行状态和未来条件等,对未来一段时期水位、流量变化趋势计算分析并预报预警,以便及时调整优化调控策略等。

d. 参数自适应修正模型。在模拟推演模型计算中需要用到各类水力参数,如渠池综合糙率、过闸流量综合流量系数等。在调度过程中,随着各类监测数据的积累和不断丰富,应建立自适应水力参数率定模型。根据采集的水位、流量数据,自动选择输水整体稳定状态,计算相关的必要水力参数,并建立该参数和运行条件相关关系,以不断提高前馈计算的精度。实际上,工程一旦建成运行后,本身就是 1 : 1 原型,应该充分利用不断积累的运行数据,为每个建筑物、每个渠段建立专属的水力学模型,根据运行数据的积累,不断自动完善修正,提高模拟精度。

4 中线干线输水调度智能决策体系

狭义上讲,中线干线输水调度决策体现在具体的实时闸门控制指令上,即在适当的时机对沿线各闸门进行适当的操作。根据前馈调控模型,对给定目标和约束下预先得到的方案,但在实际运行中不可避免存在计算误差,且中线运行工况和外部环境复杂,仅前馈调控模型难以取得满意效果,需要充分利用实测数据,对调度策略进行实时修正,采用前馈结合反馈方式实现自动化调度。

4.1 前馈耦合反馈的实时调控

对于输水调度自动控制方法国内外研究成果较丰富,例如经典的 PID (proportion integration differentiation),根据既定目标,通过比例调节、积分调节、微分调节实现自动控制。该算法具有简便、容易实现等优点,但是在复杂的运行实际中面临着参数整定的困难,常规 PID 参数往往整定不良、性能欠佳。随着人工智能算法的发展,不少学者将各类数据挖掘方法与传统控制技术进行融合,提出人工神经网络 PID 控制器、模糊自适应 PID 控制器等,以期提高控制参数整定效果^[19]。大量研究和实践表明,对于单闸控制,这些自动化控制方法能够取得很好效果,但是对于具有紧密水力联系的多渠池自动控制,问题将十分复杂,单纯以目标进行驱动,很难取得很好效果,应考虑前馈和反馈相结合的控制思路,由前馈推演模拟模型提出控制目标和控制策略,反馈实时控制模型根据实际情况具体执行,并不断进行滚动更新和修正。在实时调度过程中,还可结合优化模型和数据驱动技术动态地优化执行调度策略。

4.2 实时报警和调度响应

实时调度决策过程中,还应考虑突发事件时调度实时报警并快速响应功能。例如水位发生骤变、流量发生骤变,以及闸门发生异动等,需要第一时间发现水情异常并实时响应,以便采取及时有效的应对措施。报警和预警不同,预警是对未来可能出现的不利情况提前进行提醒,而报警则是已经发生了危险必须紧急应对。目前,中线干线输水调度系统中已初步建立了涉及水位、流量、闸门开度异常报警功能,以 1 min 为计算单位,自动计算分析是否发生异常,一旦捕捉到水情有异常,系统将发出声音和图像警报,根据具体警情,核实后迅速采用相应的调度调控措施。

4.3 优化调度决策

输水调度系统是一个多目标的复杂系统,具体实时调度中,还应考虑优化调度控制,针对输水调度中众多期望,对输水调度策略和方案进行多目标优选或者利用优化算法自动搜寻满意结果。这里的优化调度主

要指输水调度控制方面的优化,不涉及工程的经济运行优化调度问题。对于调控方案优劣评判属于多目标综合评判问题,可考虑响应时间、水位波动幅度、闸门操作频次,以及大流量输水期间的水位、流量控制和水力衔接效果等因素。调度优化问题建模的关键是建立多目标综合评价体系,在此基础上可利用现代优化算法,例如粒子群、遗传算法、模拟退火算法等,求解高维非线性模型,得出优化调度策略和方案。

5 结 语

南水北调是跨流域跨区域配置水资源的骨干工程,是国家水网的主骨架和大动脉。新时代、新阶段的发展必须贯彻新发展理念,必须是高质量发展。智慧水利是水利高质量发展的显著标志,南水北调中线干线智慧输水调度是支撑中线工程高质量发展的重要途径。本文结合南水北调中线干线输水调度实际,尝试提出了南水北调中线干线智慧输水调度的定义,以及功能需求框架,并从感知体系、认知体系、决策体系对中线干线输水调度关键技术问题进行分析。数据感知、清洗和融合是输水调度建模的基础,结合现代技术与传统方式,构建输水调度全面感知体系,并提出了消除水情数据倒挂的清洗方式等;构建机理和数据双驱动的建模方法,从预报、预警、预演、预案方面,研究中线干线输水调度的关键技术和难点,并根据调度特点总结分析了前馈调控模型、水力模拟仿真模型、调度预报预警模型和优化调度控制模型等;提出基于前馈结合反馈的自动化调控模型思路,以模拟推演为前馈,以监测状态为反馈,实施滚动决策修正、实时响应的自动化输水调控,并基于实测数据为各建筑物构建专属的水力模型。

参考文献:

[1] 李国英. 推动新阶段水利高质量发展为全面建设社会主义现代化国家提供水安全保障—在水利部“三对标、一规划”专项行动总结大会上的讲[EB/OL]. [2021-08-26]. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202108/t20210824_1540429.html.

[2] 张建云,刘九夫,金君良. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报,2019(6):1-7. (ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang. Understand and thinking of smart water conservancy[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6):1-7. (in Chinese))

[3] 王浩. 中国科技之路·水利卷·水利民生[M]. 北京:中国水利水电出版社,2021.

[4] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等. 智慧水利解析[J]. 水利学报,2021,52(11):1355-1368. (JIANG Yunzhong, YE Yuntao, ZHAO Hongli, et al. Analysis of smart water conservancy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11):1355-1368. (in Chinese))

[5] 叶枫,张鹏,夏润亮,等. 基于新一代大数据处理引擎 Flink 的“智慧滁河”系统[J]. 水资源保护,2019,35(2):90-94. (YE Feng, ZHANG Peng, XIA Runliang, et al. “Smart Chuhe River” system based on Flink, a new generation of big data processing engine[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):90-94. (in Chinese))

[6] 胡兴球,过昕彤. 城市中小河流域长制的建设实践与思考[J]. 水利经济,2021,39(2):73-76. (HU Xingqiu, GUO Xintong. Practices and considerations on establishment of river chief system of small and medium-sized rivers in cities[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021, 39(2):73-76. (in Chinese))

[7] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China’s semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):28-35. (in Chinese))

[8] 王建群,段蓉,蔡晨凯. TIGGE 模式在淮河水系史河流域的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):14-21. (WANG Jianqun, DUAN Rong, CAI Chenkai. Application of TIGGE precipitation forecast in Shihe Catchment of Huaihe River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(1):14-21. (in Chinese))

[9] 刘艳,张婷,康爱卿,等. Seq2Seq 模型的短期水位预测[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):57-63. (LIU Yan, ZHANG Ting, KANG Aiqing, et al. Short-term water level prediction based on Seq2Seq model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3):57-63. (in Chinese))

[10] 中华人民共和国水利部. 关于大力推进智慧水利建设的指导意见(水信息[2021] 323 号)[EB/OL]. [2022-08-03]. http://www.mwr.gov.cn/zw/tzgg/tzgs/202112/t20211227_1556994.html.

[11] ROWLEY J. Where is the wisdom that we have lost in knowledge? [J]. Journal of Documentation, 2006, 62(2):251-270.

[12] STERNBERG R J. Implicit theories of intelligence, creativity, and wisdom[J]. Journal of Personality and Social Psychology, 1985, 49(3):607-627.

[13] MEYSTEEL A M, ALBUS J S. Intelligence, systems: architecture, design, and control[M]. New York: Wiley, 2000.

[14] LIEW A. DIKIW: data, information, knowledge, intelligence, wisdom and their interrelationships [J]. Business Management Dynamics,2013,2(10):49-62.

[15] 史良胜,查元源,胡小龙,等. 智慧灌区的架构、理论和方法之初探[J]. 水利学报,2020,51(10):1212-1222. (SHI Liangsheng, ZHA Yuanyuan, HU Xiaolong, et al. A preliminary exploration of framework, theory and method for intelligent irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(10):1212-1222. (in Chinese))

[16] 陈晓楠,贾琦,韩黎明,等. 遗传程序设计在南水北调中线流量计率定中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(6):290-293. (CHEN Xiaonan, JIA Qi, HAN Liming, et al. Application of genetic programming for calibration of flowmeter in the middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009,7(6):290-293. (in Chinese))

[17] 陈晓楠,段春青,靳燕国,等. 人工神经网络在流量计率定中的应用[J]. 人民黄河,2015,37(3):129-131. (CHEN Xiaonan, DUAN Chunqing, JIN Yanguo, et al. Application of artificial neural networks for calibration of flowmeter in South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Yellow River,2015,37(3):129-131. (in Chinese))

[18] 陈晓楠,段春青,郭芳,等. 基于人工神经网络过闸流量模型在南水北调中线工程的应用[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(1):153-156. (CHEN Xiaonan, DUAN Chunqing, GUO Fang, et al. Application of gate flow model based on artificial neural network in the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2015,13(1):153-156. (in Chinese))

[19] 李广军. 基于 RBF 神经网络的 PID 整定[D]. 成都:西南交通大学,2005.

(收稿日期:2022-08-03 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第 8 页)

[16] SUN Mingkun,LI Zhijia,YAO Cheng,et al. Evaluation of flood prediction capability of the WRF-hydro model based on multiple forcing scenarios[J]. Water,2020,12(3):874.

[17] 包为民. 水文预报[M]. 4 版. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[18] 刘洪波,菅浩然,孙明坤. WRF-Hydro 模型在典型中小流域的日径流模拟研究[J]. 水文,2021,41(4):48-55. (LIU Hongbo, JIAN Haoran, SUN Mingkun. Daily discharge simulation of small and medium-sized humid and semi-humid basins using WRF-hydro model[J]. Journal of China Hydrology,2021,41(4):48-55. (in Chinese))

[19] 李致家,张珂,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社,2021.

[20] YUCEL I, ONEN A, YILMAZ K K, et al. Calibration and evaluation of a flood forecasting system; Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall[J]. Journal of Hydrology,2015,523:49-66.

[21] 赵人俊,王佩兰. 流域水文模型参数的客观优化方法[J]. 水文,1993,13(4):21-24. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Objective optimization method of hydrological model parameter [J]. Journal of China Hydrology, 1993, 13(4):21-24. (in Chinese))

[22] SENATORE A, MENDICINO G, GOCHIS D J, et al. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean: impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems,2015,7(4):1693-1715.

[23] KERANDI N, ARNAULT J, LAUX P, et al. Joint atmospheric-terrestrial water balances for East Africa: a WRF-hydro case study for the upper Tana River Basin[J]. Theoretical and Applied Climatology,2018,131(3):1337-1355.

[24] 刘松,余敦先,张利平,等. 基于 Morris 和 Sobol 的水文模型参数敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(6):1296-1303. (LIU Song, SHE Dunxian, ZHANG Liping, et al. Global sensitivity analysis of hydrological model parameters based on Morris and Sobol methods[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(6):1296-1303. (in Chinese))

[25] 高颖会,沙晓军,徐向阳,等. 基于 Morris 的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):87-90. (GAO Yinghui, SHA Xiaojun, XU Xiangyang, et al. Sensitivity analysis of SWMM model parameters based on Morris method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2016,27(3):87-90. (in Chinese))

[26] LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2002,27(9):645-654.

(收稿日期:2022-12-16 编辑:刘晓艳)