

南水北调工程水量调度十年

王浩,王超,张召

(中国水利水电科学研究院, 100038, 北京)

摘要:南水北调工程是世界上规模最大、距离最长、受益人口最多、受益范围最广的调水工程,其水量调度的规模和难度空前。南水北调东中线工程通水10年来,开展了卓有成效的水量调度实践,为优化水资源配置、保障群众饮水安全、复苏河湖生态环境、畅通南北经济循环提供了可靠的水资源支撑。从法律法规、体制机制、信息化支撑能力方面,总结了南水北调工程水量调度实践经验和显著成效。基于南水北调工程水源区和受水区的水资源供需格局、后续工程规划建设、运行管理实践新变化,从非常规水源利用、水量精准监测、水价机制完善、低碳运行技术等方面,分析了南水北调工程水量调度新需求。结合国家水网构建、南水北调后续工程高质量发展工作新格局,从复杂水网调度、应急调度能力提升、调度智慧化、工程无人运行等方面,分析了南水北调工程水量调度面临的新问题,为下一阶段南水北调工程水量调度实践提供参考借鉴。

关键词:南水北调;水量调度;东线;中线;降本增效;数智赋能

Ten years of water regulation for the South-to-North Water Diversion Project//Wang Hao, Wang Chao, Zhang Zhao

Abstract: The South-to-North Water Diversion Project is the world's largest and longest water diversion project, with the largest beneficiary population and widest range of benefits. The scale and difficulty of its water scheduling problem are unprecedented. Since the project has been put into operation for ten years, the state has carried out effective water regulation practices, which provides reliable water resources support for optimizing water resources allocation, ensuring drinking water safety and reviving the ecological environment of rivers and lakes. This paper summarizes the practical experience and significant achievements of water regulation in the South-to-North Water Diversion Project from the perspectives of laws and regulations, institutional mechanisms, and information support capabilities, providing reference and guidance for water regulation of inter-basin water diversion projects and the future national water network regulation. Facing the new changes of the water supply and demand patterns in the source and receiving areas, the operation management system of the project, the planning and construction of subsequent projects, and the practices of operation and management, the new demand for water dispatching of the South-to-North Water Diversion Project is analyzed from the aspects of unconventional water resources utilization, accurate water quantity monitoring, improvement of water price mechanism, and low-carbon operation technology. Finally, in the view of the new development pattern of national water network construction and continuous promotion of high-quality development of the follow-up projects, this paper analyzes the new challenges of water dispatching from the aspects of water dispatching, emergency dispatching capacity improvement and dispatching intelligence under the water network pattern, so as to provide reference for water regulation of the South-to-North Water Diversion Project in the next stage.

Keywords: the South-to-North Water Diversion Project; water scheduling; the East Route; the Middle Route;

收稿日期:2024-10-23

作者简介:王浩,中国工程院院士。

基金项目:国家重点研发计划课题“南水北调东线水量-水质-水力协同调控理论与方法”(2022YFC3204603)、“多输水场景下中线调蓄水库与输水闸泵群自适应控制技术”(2023YFC3209404)。

cost reduction and efficiency increase; empowering with digital intelligence

中图分类号: TV213.4 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2024)20-0001-05

南水北调工程是党中央决策建设的重大战略性基础设施,是优化水资源配置、保障群众饮水安全、复苏河湖生态环境、畅通南北经济循环的生命线和大动脉,是世界上规模最大、距离最长、受益人口最多、受益范围最广的调水工程。自南水北调东线一期工程2013年11月15日正式通水和南水北调中线一期工程2014年12月12日正式通水,已历时10年,深入分析南水北调工程水量调度困难和挑战,总结南水北调工程10年水量调度实践经验和成效,展望新阶段南水北调工程水量调度新需求、新问题,有益于进一步提升南水北调工程水量调度科技水平,加快构建国家水网,推动南水北调后续工程高质量发展。

一、南水北调工程水量调度难度空前

1. 世界最大规模闸站群, 联动响应高效调控难

南水北调中线工程是一项特大型长距离跨流域调水工程,总干渠从丹江口水库陶岔渠首引水,线路总长达1432 km,陶岔渠首设计流量 $350\text{ m}^3/\text{s}$,加大流量高达 $420\text{ m}^3/\text{s}$,主要向北京、天津、河北、河南四省(直辖市)提供生活和工业用水,多年平均年调水量95亿 m^3 。工程横跨长江、淮河、黄河和海河四大流域,沿线有1座大型泵站、161座分水口门和渠道节制闸,闸门调控水力响应慢,且无在线调蓄水库,渠道调蓄能力小。中线总干渠与大量江、河、沟、渠、公路、铁路相交,工程沿线河渠交叉、渠渠交叉、路渠交叉等状况错综复杂,布置各类建筑物共计2387座。输水渠道水力响应关系尤为复杂,因其沿线无可调蓄水库,任意建筑物处水流动态调控都会产生复杂水力响应过程,进而导致局部区域或整个调水系统水情状态、运行工况发生变化,工程调控难度极大。

2. 世界最大规模泵站群, 优化调度降本增效难

南水北调东线输水干线长1466.5 km,拥有世界规模最大、最复杂的大型泵站群。全线设立13个梯级共22处枢纽、34座泵站,总扬程65 m,总装机台数159台,总装机容量36.45万kW,总装机流量 $4450.6\text{ m}^3/\text{s}$,工程规模大、泵型多、扬程低、流量大、年利用小时数高。每泵送 1 m^3 要消耗大量电力,电费支出占工程运行成本50%以上,是造成东线水价较高的直接原因。如何降本增效,以最小代价将水送至北方人民手中是东线工程面临的一大难题。东线工程运行时受极端天气、来水不确定、供需不匹配和人工干扰等多源风险相互交织影响,

加剧了水源区调水难度和受水区水量配置难度。

二、10年南水北调工程水量调度实践成效显著

10年来,南水北调工程水量调度从法律法规、调度体制、信息化支撑能力等方面,开展了探索和实践,取得了显著成效,为大型跨流域调水工程水量调度以及未来国家水网调度积累了宝贵经验。

1. 法制健全, 跨域调水有依据

为加强南水北调工程供水管理,充分发挥南水北调工程经济效益、社会效益和生态效益,国家制定了《南水北调工程供水管理条例》(以下简称《条例》),规定了水量调度的原则和依据、水量调度时间、年度可调水量和年度用水计划建议制度、年度水量调度计划及月水量调度方案、两部制水价、水量转让、应急水量调度预案编制、水量水质监测和信息报送与共享等内容。按照《条例》要求,水利部相继制定了南水北调东线一期工程水量调度方案和南水北调中线一期工程水量调度方案,进一步明确工程供水范围和水量分配、调水线路及工程规模、水量调度及监督管理等内容,为工程东线11个年度、中线10个年度调水任务的顺利实施提供了坚实的法律基础。

2. 机构完备, 安全调水有保障

为推动南水北调工程水量调度组织实施,建立了国家、流域、省、水工程多级联动水量调度管理体系:水利部南水北调工程管理司负责组织制订南水北调工程年度水量调度计划,指导调度实施并对水量调度总体实施情况进行监督;水利部南水北调规划设计管理局负责组织审查年度水量调度计划;水利部淮河水利委员会、水利部长江水利委员会分别负责南水北调东线、中线一期工程水量调度计划编制及所辖流域水量调度具体实施情况监督工作。工程沿线各省级行政区水行政主管部门负责辖区内用水计划建议申报和水量调度工作。中国南水北调集团有限公司按照水利部下达年度水量调度计划组织做好东中线输水调度工作。中国南水北调集团中线有限公司负责中线总干渠水量调度具体实施;汉江水利水电(集团)有限责任公司、南水北调中线水源有限责任公司负责丹江口水库水量调度具体实施;湖北省引江济汉工程管理局负责引江济汉工程水量调度具体实施。中国南水

北调集团东线有限公司、南水北调东线江苏水源有限责任公司、南水北调东线山东干线有限责任公司按照管理权限划分,联合承担南水北调东线一期工程水量调度具体实施。在水量调度计划执行过程中,建立了“统一调度、分级管理”工程调度管理体系。以南水北调中线干线工程为例,中国南水北调集团中线有限公司按照总调度中心、分调度中心、现地管理处三级管理模式设置调度机构,按照统一调度、集中控制、分级管理原则,对南水北调中线总干渠全线各闸站进行统一调度控制。通过多层级多部门协同联动,精准精确执行水量调度计划,为南水北调工程水量调度安全实施提供了有力的支撑保障。

3. 数智赋能,科学调水有支撑

为支撑南水北调工程水量调度,南水北调东中线一期工程共建设了山东段调度运行管理系统、苏鲁省际工程调度运行管理系统、江苏段调度运行管理系统、中线干线工程自动化调度与运行管理决策支持系统、中线水源工程供水调度运行管理系统、引江济汉工程自动化调度运行系统和南水北调水资源统一管理系统等七大系统,形成了以监测感知、调度决策、运行控制为核心功能的南水北调工程水量调度信息化支撑能力。调度运行管理系统是南水北调工程实现安全调水、精细配水、准确量水的重要手段,为合理调配区域内水资源、充分发挥南水北调工程的经济和社会效益起到技术支撑作用。为进一步发挥数字化、网络化和智能化技术在工程水量调度中的支撑作用,推动了数字孪生丹江口、数字孪生南水北调中线1.0、数字孪生洪泽泵站、数字孪生邓楼泵站、数字孪生东线北延工程等多项工作,探索建设了工程数字孪生平台,通过智慧化模拟,支撑工程全要素预报、预警、预演、预案模拟分析,提供智慧化决策支撑,提高工程综合调度管理水平。

4. 跨域协同,空间均衡见成效

截至2024年9月下旬,南水北调东中线一期工程累计调水超750亿 m^3 ,工程供水已成为沿线40多座大中城市的重要水源,直接受益人口超1.85亿人,南水已占北京市城区供水的70%以上,天津市主城区供水几乎全部来自南水,河南省10余个省辖市用上南水。南水北调工程为优化水资源配置、保障群众饮水安全、复苏河湖生态环境、畅通南北经济循环、助力国家重大战略实施、推进经济社会高质量发展提供了可靠的水资源支撑。通水以来,南水北调中线工程助力沿线50多条河流生态复苏,永定河、滹沱河、大清河等实现全线贯通。华北地区自20世纪70年代以来地下水水位逐年下降的趋势得到根本扭

转,初步实现地下水采补平衡。东线北延应急供水工程向京杭大运河补水,2022年京杭大运河实现百年以来首次全线贯通,至今连续3年实现全线水流贯通。

三、南水北调工程水量调度新需求

随着南水北调工程水源区和受水区水资源供需格局、工程运行管理体制、后续工程规划建设、运行管理实践等方面出现新情况新变化,南水北调工程水量调度也面临诸多新需求,亟待在未来的水量调度实践中继续深入探索。

1. 统筹非常规水源利用,均衡调配水量

近年来,随着经济社会发展和产业结构调整,我国用水结构发生深刻变化。2022年全国非常规水源利用量较2012年的44.6亿 m^3 提高了2.9倍。在工程年度水量调度计划编制中,还需统筹协调常规和非常规水源利用,均衡调配水源区、受水区水资源,最大程度发挥水资源利用效益。

2. 加强水量监测,精准计算水量

在实际调水过程中,特别是南水北调东线工程,采用开放河道输水,与当地水存在复杂的水量交换关系。江水、淮水、大汶河水、当地水等相互掺和,经沿线4个调蓄湖泊调蓄后水源不清,成本收益核算困难。需实现供用水量监测计量全覆盖,精准计算多水源供用水量。

3. 完善水价机制,用水公平配置

在实际调水中,南水北调水价格高,生态补水水价机制不健全,存在争用生态补水、南水北调水消纳不足等问题。需考虑各地发展不平衡以及城乡差别带来的不同水价承受能力,以地级行政区为区域单元,综合考虑当地水、外调水成本,以工业、城市生活用水户为重点,推行区域综合水价。

4. 智慧低碳调水,工程降本增效

南水北调东线工程通过梯级泵站提水,工程运行成本居高不下。需充分利用沿线洪泽湖等湖泊调蓄作用以及峰谷电价差,优化运行梯级泵站。同时,还要研究工程沿线风电、光伏与梯级泵站联合开发利用方式,探索输水工程风光水互补提水运营模式,实现南水北调工程“低碳”乃至“零碳”运行。

四、南水北调工程水量调度新问题

随着《国家水网建设规划纲要》印发以及南水北调后续工程高质量发展工作推进,南水北调工程作为国家水网主骨架、大动脉,在解决水资源时空分布不

均、更大范围实现空间均衡要求下,将会更加充分发挥其“生命线”作用。南水北调工程水量调度也会面临诸多新问题,需进一步研究探讨。

1. 水网格局下水量调度更为复杂

南水北调工程输水线路长、闸泵工程多,是典型的多水源多用户大规模调水系统,水量调度尤为复杂。以中线工程为例,沿线各类重要调控断面超过70处,任意的水流动态调控都会产生复杂的流量变化和水力响应,使得工程本身安全、平稳、高效运行难度极大。近年来,南水北调后续工程持续推进,东线北延应急供水工程正式启用,引江补汉工程开工建设,南水北调工程建设规模持续扩大,调度复杂度也将明显增加。随着南水北调工程沿线省、市、县级水网配套工程的逐步完善,多水源多用户复杂水网格局下的水量调度难度将进一步凸显。

2. 突发情景下调度能力有待提升

近年来,受全球气候变化和人类活动影响,我国气候形势愈发复杂多变。2023年7月,海河流域发生流域性特大暴雨洪水,北拒马河发生超标准洪水,南水北调中线工程北拒马河暗渠安全运行受到严峻挑战。2024年6月,为应对华北、黄淮等地旱情,水利部调度南水北调工程全力支持沿线地区抗旱保供水工作,工程由正常供水紧急切换至抗旱应急调度模式。趋多趋频趋广趋强的极端水旱灾害事件,给南水北调工程应急调度提出了更高要求。同时,东中线工程均位于我国工农业发达地区,新型污染物、藻贝类增殖等突发污染风险持续增加,污染快速定位和水量精准调度技术需进一步提升。

3. 精确精准调水迫切要求调度智慧化

国家“十四五”规划明确提出要构建智慧水利体系。《国家水网建设规划纲要》进一步指出,国家水网以智慧调控为手段。在数字孪生水利体系建设进程中,智慧调度将发挥极其重要的作用。依托数字孪生南水北调先行先试项目建设,中线工程建成数字孪生输水调度仿真预演系统,为精准化调度决策奠定了坚实基础;东线北延工程数字孪生系统已具备年月水量调度方案编制和工程实时调度功能。尽管南水北调工程智慧调度已取得阶段性成果,但仍聚焦于局部区域、特定场景下决策支持,尚未实现多场景、全过程孪生调度,距离“一键生成调度指令”现实需求还存在较大差距。

4. 降本增效驱动工程探索“智能体”构建技术

经济社会高质量发展、国家水网“绿色智能”目标对调水工程运行管理降本增效需求日趋紧迫,推动“无人值守、智能控制”,提高工程控制精度,减少工程运管

成本是实现工程运管降本增效的关键路径。长期以来受工程控制设备可靠性、工程设施设备故障诊断技术水平、工程事故应急处置能力等方面制约,调水工程从自动控制跨越至智能控制,仍面临诸多困难与挑战。随着信息技术跨越式革新,智能控制已在工业制造、交通领域深化应用,无人驾驶、黑灯工厂已从设想变为现实。面对新需求、新形势,南水北调工程作为中国最具标志性的调水工程,亟待融合大数据、边缘计算、人工智能技术和现代控制理论方法,探索调水工程运行“智能体”构建技术,研发工程智能控制算法和装备,推动南水北调工程“无人值守、智能控制”目标从设想变为现实。

五、展望

从南水北调工程水量调度10年实践经验和成效来看,管理和技术双轮驱动是高质量推进水量调度组织实施的根本路径。构建以《南水北调工程供用水管理条例》为核心的法律法规体系,为南水北调工程水量调度提供根本依据;构建多级协同的调度管理机构,是南水北调工程水量调度的工作基础;建设数智赋能的调度信息化系统,是南水北调工程水量调度的技术支撑。南水北调工程水量调度的成功实践,为我国大型跨流域调水工程水量调度以及未来国家水网调度的组织实施提供了生动的实践案例。在国家水网构建、南水北调后续工程高质量发展的新格局下,针对南水北调工程水量调度面临的新需求、新问题,还需要持续不断开展探索与实践。

参考文献:

- [1] 夏军. 南水北调工程高质量发展的几点思考[J]. 水利发展研究, 2024, 24(9): 1-4.
- [2] 刘昌明. 南水北调工程对生态环境的影响[J]. 海河水利, 2002(1): 1-5+70.
- [3] 张楚汉. 关于南水北调后续工程的几点思考[J]. 中国水利, 2022(18): 18-20.
- [4] 刘昌明. 南水北调: 在节水的基础上实施缓解北方水危机[J]. 科学对社会的影响, 2003(3): 26-31.
- [5] 夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905-915.
- [6] 夏军. 跨流域调水及其对陆地水循环及水资源安全影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(6): 831-842.
- [7] 刘昌明. 发挥南水北调的生态效益修复华北平原地下水[J]. 南水北调与水利科技, 2003(1): 17-19.
- [8] 朱程清. 强化流域水资源统一调度助力复苏河湖生

- 态环境[J].中国水利,2022(7):9-10.
- [9] 夏军,黄国和,占车生.南水北调中线工程对区域经济社会可持续发展影响研究的几个关键问题[J].北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(Z1):484-489.
- [10] 王浩,张建云,王亦楠,等.水,如何平衡发展之重[J].中国水利,2020(21):11-19.
- [11] 王浩,栾清华,刘家宏.从黄河演变论南水北调西线工程建设的必要性[J].人民黄河,2015,37(1):1-5+14.
- [12] 王浩,雷晓辉,尚毅梓.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):1-8.
- [13] 胡鹏,王浩,赵勇,等.南水北调西线工程水源区可调水量“十问”[J].中国工程科学,2024,26(2):210-223.
- [14] 王芳,王浩,孙赫英,等.我国水生态格局与保护现状[J].中国水利,2014(13):1-5.
- [15] 石玉林,于贵瑞,王浩,等.中国生态环境安全态势分析与战略思考[J].资源科学,2015,37(7):1305-1313.
- [16] 赵洪涛,轩玮,李卢祎.推进南水北调后续工程高质量发展 加快构建国家水网主骨架和大动脉——访水利部党组书记、部长李国英[J].中国水利,2022(18):1-3.
- [17] 翟家齐,赵勇,赵纪芳,等.南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响[J].南水北调与水利科技,2022,20(3):440-450.
- [18] 高媛媛,陈文艳,王仲鹏,等.浅谈南水北调工程对国家水网建设的作用[C]//中国水利学会调水专业委员会.中国水利学会调水专业委员会2022年度学术论文论文集.北京:中国水利水电出版社,2022.
- [19] 高媛媛,陆旭.南水北调立法对国家水网引调水工程建设的启示研究[J].水利发展研究,2024,24(4):73-77.
- [20] 陈阳,霍建伟.南水北调工程调度运行管理系统建设与应用[J].河南水利与南水北调,2021,50(12):39-42.
- [21] 孙维亚,邬俊杰,茹兴康,等.数字孪生在南水北调中线高质量发展中的应用实践[J].水利发展研究,2024,24(9):85-89.
- [22] 金旻,徐岩,王彤彤.南水北调中线水资源调度复杂性对策研究[J].中国水利,2013(20):4-8.
- [23] 赵勇,何凡,何国华,等.关于国家水网规划建设十点认识与思考[J].水利发展研究,2023,23(8):37-48.
- [24] 杨爱民,张璐,甘泓,等.南水北调东线一期工程受水区生态环境效益评估[J].水利学报,2011,42(5):563-571.
- [25] 钟玉秀,付健,刘洪先,等.对构建南水北调中线一期工程运行管理体制的思考和建设[J].水利发展研究,2012,12(7):27-33.
- [26] 王衍.南水北调东线一期工程运行成本降低途径与措施浅析[J].中国设备工程,2021(20):175-176.
- [27] 苏茂林.开展更高水平的黄河水量调度[J].人民黄河,2021,43(1):1-4.
- [28] 赵惠萍,汪昌树.沅江流域水量调度方案研究[J].水利规划与设计,2024(8):42-46.
- [29] 刘博静,娄森元,缪萍萍.永定河水量调度规范化管理问题研究[J].人民黄河,2023,45(S1):26-27.
- [30] 王慧.水资源配置格局实现全局性优化[J].中国水利,2022(19):14-15.
- [31] 熊璠,轩玮.创新建设运营体制机制 推进南水北调后续工程高质量发展——访中国南水北调集团有限公司党组书记、董事长蒋旭光[J].中国水利,2022(18):7-11.
- [32] 李庆中.南水北调工程保障国家水安全的作用探析[J].水利发展研究,2020,20(9):9-12.
- [33] 韩亦方.水价——南水北调工程的经济杠杆[J].南水北调与水利科技,2003(S1):34-35.
- [34] 朱卫东,张元教.南水北调工程实行两部制水价的思考[J].水利经济,2008(4):37-39+68+76-77.
- [35] 王振华,黄茁,吴敏.南水北调中线水源地水质保护立法及建议[J].长江科学院院报,2015,32(6):59-64+115.
- [36] 陈曦川,普利锋.我国现行立法体制与南水北调有关立法形式研究[J].南水北调与水利科技,2006(2):8-10.
- [37] 张乃丰,任红蕾,林飞.南水北调中线工程突发水污染下游供水方式研究[J].人民黄河,2023,45(4):63-69.
- [38] 李思悦,刘文治,顾胜,等.南水北调中线水源地汉江上游流域主要生态环境问题及对策[J].长江流域资源与环境,2009,18(3):275-280.