

南水北调中线流态调控与输水能力提升方案

任亚鹏¹ 陈永攀²

1 中国南水北调集团中线有限公司

2 中国南水北调集团中线有限公司河北分公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22272

[摘要] 南水北调中线是国内规模宏大的跨流域调水项目,明渠输水状态好坏,关系到整个工程输水能力和运行安全。渠道运行时常出现水流扰动现象,本文结合现场输水特征,分析渠道均匀流、非均匀流分布特点,讨论不良流态对输水能力和渠身结构带来的不利影响。研究从工程设施升级、在线监测运维、动态调度水量、优化生态流量四个维度给出调控方案,并配套保障措施,支撑工程长期高效平稳、生态友好运行。

[关键词] 南水北调; 中线流态调控; 输水能力; 提升方案

中图分类号: TV68 文献标识码: A

Flow Regime Regulation and Water Conveyance Capacity Improvement Scheme for the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project

Yapeng Ren¹ Yongpan Chen²

1 China South-to-North Water Diversion Group Co., Ltd., Middle Route Company

2 Hebei Branch of China South-to-North Water Diversion Group Co., Ltd., Middle Route Company

[Abstract] The Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project is a large-scale interbasin water transfer project in China. The quality of open-channel flow conditions directly affects the overall water conveyance capacity and operational safety of the project. Flow disturbances frequently occur during channel operation. Based on the characteristics of water conveyance observed in the field, this paper analyzes the distribution characteristics of uniform and non-uniform flows in the channels and discusses the adverse effects of unfavorable flow regimes on water conveyance capacity and channel structural integrity. Regulation schemes are proposed from four dimensions: upgrading engineering facilities, online monitoring and operation and maintenance, dynamic water volume scheduling, and optimization of ecological flows. Supporting measures are also proposed to facilitate the long-term, efficient, stable, and eco-friendly operation of the project.

[Key words] South-to-North Water Diversion Project; flow regime regulation of the Middle Route; water conveyance capacity; improvement scheme

引言

南水北调中线工程是华北区域供水保障的关键工程,明渠内水流紊乱现象一直制约着输水能力。渠道地形起伏、水工构筑物布置以及调度方案等因素叠加,会在弯道、闸体附近形成回流、漩涡与强紊流。这类不良流态会增大输水损耗,削减过流能力,持续冲刷渠坡,加速衬砌结构老化,降低工程服役年限。因此,围绕渠道流态优化开展相关研究,建立一套可行的调控方案,对消除流态带来的不利影响,提高水资源利用水平,保障工程持续安全运转具备很强的现实价值。

1 流态对输水能力的影响分析

1.1 流态类型及特点

南水北调中线明渠投入实际输水之后,渠道断面形式、基底坡降以及各类水工建筑物都会改变水体运动状态,水流大体上可以划分为均匀流与非均匀流两类,两者水力特性差异显著。均匀流是明渠输水较为理想的运行状态,水体沿着渠槽平稳推进,水深、流速以及流向不会沿渠发生明显波动,水流扰动微弱,能够匹配渠道原有的输水设计指标。非均匀流是工程现场更为常见的流态,细分为渐变流与急变流。渐变流一般出现在渠道平缓过渡区段,各项水力参数变化幅度较小,对输水过程产生的干扰相对有限。急变流集中在渠段转弯、断面突变以及构筑物衔接位置,水位与流速会产生剧烈波动,水体紊动强烈,局部涡流、水流脱壁等现象多发,也是诱发各类输水问题的重要诱因。

1.2不良流态对输水能力的制约

各类不良流态会从输水效率、工程安全两个维度持续制约南水北调中线工程的输水能力,是限制工程输水效能提升的关键瓶颈。在输水效能层面,渠道转弯区域、节制闸与分水闸前后、渡槽进出口等关键点位产生的漩涡、回流现象,会大幅增加水流运行阻力,打乱整体输水节奏,直接导致水流推进速度放缓,渠道实际输水流量低于设计标准,造成水资源输送效率大幅下降^[1]。在工程运行层面,紊乱的水流状态会持续冲刷、淘刷渠道边坡与渠底,长期运行下会引发边坡土体流失、衬砌破损、渠道变形等问题,破坏渠道输水断面的完整性,进一步加剧流态恶化,形成“流态紊乱—断面破损—输水受阻”的恶性循环,同时大幅增加工程运维成本,威胁输水系统安全稳定运行。

1.3流态与输水效率的关联机制

明渠输水能力好坏,很大程度取决于水流能量消耗情况,流态变化和能量损失之间有着直接联系。水流平顺均匀的时候,水体内部扰动小,水流和渠壁摩擦带来的能量消耗较少,水体可以顺着渠道断面平稳向前推进,保持设计流量与流速,渠道的输水能力可以充分发挥。一旦渠道出现不良流态,局部漩涡、水流撞击和回流现象会明显增多,水体颗粒相互撞击加剧,同时加大水流与渠槽边界的摩擦作用,大量水流动能被消耗掉,水头损失明显上升。这部分被损耗的能量不能用来推动水体向前输送,会直接减少单位时间通过断面的水量,造成输水效率降低。所以在工程当中,合理调控渠内水流形态,控制局部紊流发展,能够有效减少输水过程的能量损耗,是提高明渠输水能力的关键手段。

2 流态调控与输水能力提升的具体方案

2.1工程设施优化

各类水工构筑物是维持渠道水流平稳运行的硬件基础,构筑物本身的结构完好程度与设计方案,会直接影响水流形态,也是开展流态调控的首要环节。渠道衬砌改造工作主要围绕断面规整和防渗稳流两个方向开展,选用抗冲性能强、渗漏量小的混凝土与复合土工膜作为衬砌材料,对渠身实施整体性衬砌施工,从源头控制渗漏问题,稳定水体基础条件。运维阶段需要持续开展渠道巡检,针对渠底坑洼、边坡破损、衬砌裂缝以及断面变形等病害开展专项修复,清理渠内淤积泥沙与突出障碍物,保持断面形态连续规整,为水流平顺流动创造条件。节制闸、分水闸改造兼顾结构改良与自动化调控,通过调整闸门外形与安装倾角,削弱水体过闸时的冲击效应,抑制漩涡、回流生成,减小过闸水头损失^[2]。配套部署闸门自动启闭系统,根据输水调度要求精细调节开度,实现流量精准控制,还可在闸室上下游布置导流墩、导流板,引导水流平顺转换,改善闸区紊乱流态。对于渡槽、倒虹吸这类交叉输水建筑物,改造重点放在进出口衔接段,采用渐变式断面设计,让渠道和建筑物内部水流能够平缓衔接过渡。

2.2智能监控系统构建

依托当下智能化技术手段,搭建一套覆盖范围完整、多层次联动的渠道流态监测平台,以此实现渠内水流状态的实时采集、

数据解析与险情预判,为渠道流态的动态调节提供可靠的数据支撑。监测点位布置要贴合工程现场运行条件,优先关注渠道运行的薄弱区段,按照重点区域优先布设、测点数据精准采集的思路,在渠道转弯处、闸阀上下游、分水口、渡槽进出口这类容易产生水流紊乱、水力条件波动明显的位置,布设水位传感器、流速测量装置以及多普勒流速剖面仪等监测仪器。各类监测装置持续不间断采集水位、流速、流向以及水体紊动强度等水力参数,形成覆盖全线的监测网络,保证采集到的数据真实可靠,能够客观反映各个渠段实际水流状态。在数据传输与处理层面,配套高速通信硬件,保障监测信息持续稳定上传,减少信号中断、数据延迟与丢失等问题。借助大数据与云计算技术搭建专用的数据处理平台,对海量监测信息完成归档存储、噪声剔除与深度解析,开展水力模型拟合工作。结合中线工程自身输水特点建立明渠流态仿真模型,利用数据推演模拟不同输水条件下水流变化趋势,提前识别漩涡、回流等异常流态风险。依托实测数据和仿真计算成果搭建智能调度模块,对照工程输水任务、运行规程以及安全管控要求,自动筛选适宜的运行方案,动态调整闸门开启程度、机组运行工况等关键参数,做到对渠道不良流态的即时处置与精细化调控。

2.3水量调配策略调整

科学调整渠道水量调度方案,能够适配渠内水流条件,缓解大流量输水过程中出现的水流紊乱现象,在保障输水效率的同时维持工程运行稳定。调度模式摒弃过去固定不变的分水方式,综合考虑受水区用水需求、各渠段过流承载能力以及现场实时流态条件,建立能够随现场工况灵活变化的水量分配机制。按照不同渠段结构条件实施差异化配水,渠槽顺直、水流条件良好的区段可适度加大输水流量,充分释放渠道的输水能力;弯道、闸站上下游这类水力条件复杂,容易产生紊流的位置,则需要严格控制过流量,避免局部流量过大带来水流冲刷与漩涡等不良流态,在保证全线总输水量满足计划要求的基础上,提升水资源输送效率。依托智能监测系统持续传回的流态、用水负荷等实测信息,构建动态调度更新机制,及时调整输水方案^[3]。在日常运行平稳、没有安全隐患的时段,可以适度提高输水负荷,挖掘渠道输水潜力;当监测系统捕捉到水流扰动、渠壁冲刷等异常信号时,迅速降低对应渠段的输水流量,同步开展流态治理工作,等到水流恢复稳定之后再逐步恢复正常输水水平,平衡工程输水收益和运行安全。

2.4生态友好型流态塑造

输水工程的流态优化,不能只满足输水输送的基本功能,还要兼顾流域生态保护需求,通过科学的调控方式打造绿色生态的输水体系,让工程建设效益与流域生态保护效益同步提升。生态流量稳定保障是流态生态调控的关键前提,在保质保量完成跨区域输水工作的基础上,结合渠道沿线河道的实际生态用水诉求,精准测算确定河道最小下泄生态水量。通过在输水渠道沿线布设生态泄水闸、泄水孔等配套设施,常态化、标准化向下游河道补给水量,有效维系全域水系连通状态,守护水生生物栖

息、繁殖的水环境条件,有效杜绝因人工输水调度不当造成的河道干涸、水质恶化等生态问题。摒弃传统人工渠道规整、单一的输水设计思路,参照天然河流的水流规律与地形特点,对渠道结构进行生态化改造。渠道边坡摒弃全硬质衬砌模式,改用植草防护、生态砌块等柔性护坡工艺,借助边坡与水体的自然摩擦稳定水流。同时在渠道关键段落打造浅滩、深潭交错的自然水系形态,改变单调的输水水流形态,为水生动植物打造多元生存空间。此外,通过常态化水质、水生生物、河道地形监测,实时研判流态调控措施的生态影响,动态优化输水调度参数,及时调整调控方案,从源头规避过度工程调控带来的生态损伤。

3 方案实施保障措施

3.1 组织管理保障

系统化的组织管理体系是方案落地实施的核心保障,能够有效统筹各项工作、规避实施乱象、保障推进效率。工程管理部门需牵头成立专项工作领导小组,明确领导小组统筹规划、整体协调、监督落实的核心职责,全面负责流态调控与输水能力提升方案的落地部署、进度管控与质量验收^[4]。结合工程运维、调度管理、工程养护、生态保护等不同岗位的工作职能,细化各部门、各岗位的职责分工,构建权责清晰、各司其职的工作体系。建立常态化沟通协调机制,定期召开工作推进会,梳理方案实施过程中存在的难点问题,统筹协调跨部门工作衔接,打通工作推进壁垒,保障工程改造、智能系统搭建、水量调度优化等各项工作有序衔接、高效落地。同时建立全程监督考核机制,将方案实施成效纳入岗位考核指标,倒逼各项工作规范落实。

3.2 技术人才保障

工程能否顺利推进流态调整和输水系统优化,很大程度上依靠一线技术人员的专业能力,人才队伍建设是整套方案落地并长期稳定运行的关键。对照项目现场的实际技术需求,需要吸纳并持续培养水利结构设计、流体计算、自控系统、数据建模以及水生态相关人员,打造一支多学科融合的技术队伍,补齐原有运维队伍在智能调度、精细管控方面存在的能力缺口。持续开展在岗学习工作,定期安排技术人员参加技能学习、行业研讨和现场实操训练,着重熟悉在线监测仪器、水力仿真模型以及动态调度平台的使用方法,提高人员精细调控、设备故障排查和突发情况处置能力。依托项目搭建技术研讨载体,支持技术人员立足现场工况开展技术改进与试验研究,直面流态调控过程中的各类实际难题,依靠稳定可靠的人才力量,保障整套实施方案持续落地、迭代完善。

3.3 资金投入保障

充足且规范的资金保障是方案各项工程建设、技术升级、运维优化工作顺利推进的基础前提。积极对接各级财政部门,争取专项财政资金支持,将南水北调中线流态调控与输水能力提升工程纳入水利重点运维升级项目,保障核心工程、核心技术的资金供给。同时拓宽多元化融资渠道,规范引入合规社会资本、水利专项投资资金,破解单一财政资金供给的局限性,补齐项目资金缺口^[5]。建立精细化资金管理制度,明确资金使用范围与审批流程,将资金重点投向工程设施改造、智能监控设备采购、技术研发创新、人才培养、生态治理等关键环节,杜绝资金滥用、浪费等问题。定期开展资金使用核查与审计工作,规范资金使用流程,提升资金利用效率,为方案全周期实施、长效运维提供稳定充足的资金保障。

4 结语

综上所述,南水北调中线在长期输水运行中,紊乱流场会削弱渠道过水能力,损伤衬砌结构,对沿线生态造成扰动。依托现场实测数据明确各类不良水流的产生原因与影响,结合工程改造、在线监测、调度调整和生态保护形成综合管控方案,优化水力条件,减少水头损失,挖掘输水潜力。配套完善管理机制、技术团队与资金保障,落实各项管控措施,稳步提高输水效率,维持工程长效安全运行。

[参考文献]

- [1]练继建,刘利坤,王孝群,等.基于调蓄工程的南水北调中线区间调水动态调控[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(6):1297-1306,1389.
- [2]王玉莲,杨泽凡,闫龙,等.基于多方法综合比较的南水北调西线工程水源区生态需水研究[J].水资源保护,2024,40(4):137-147.
- [3]郭新蕾,潘佳佳,苑希民,等.南水北调中线冬季冰情变化特征及输水能力提升策略研究[J].水利学报,2024,55(4):389-402.
- [4]刘国军.南水北调北京段配套输水工程建设管理的思考[J].北京水务,2022(5):47-53.
- [5]史远.南水北调中线干线智慧输水调度探讨[J].水上安全,2025(11):34-36.

作者简介:

任亚鹏(1990--),男,汉族,河北石家庄人,本科,工程师,研究方向:水利工程。