

南水北调中线工程关键技术难题与解决方案

刘钰康

中国南水北调集团中线有限公司河南分公司 河南 郑州 450000

摘要：南水北调中线工程作为缓解我国北方水资源短缺的战略性基础设施，在建设运行过程中面临诸多技术挑战。长距离输水安全保障、大流量输水调度及交叉建筑物工程技术等难题，直接影响工程效益发挥。通过构建输水安全综合保障体系、建立智能化调度系统、创新施工技术及强化运行管理等措施，有效突破技术瓶颈，为工程稳定运行和水资源优化配置提供有力支撑，对保障国家水安全具有重要意义。

关键词：南水北调中线工程；关键技术；难题；解决方案

引言

南水北调中线工程跨越长江、淮河、黄河、海河四大流域，全长千余公里，对优化我国水资源时空分布、推动区域协调发展至关重要。然而，工程面临长距离输水安全风险高、大流量调度复杂、交叉建筑物施工难度大等技术难题。这些难题制约工程的高效运行与效益实现。本文围绕中线工程关键技术挑战，深入探讨应对策略，旨在为保障工程可持续运行、提升水资源调配能力提供理论与实践参考。

1 南水北调中线工程概述

南水北调中线工程，作为我国南水北调工程关键构成，从河南丹江口水库陶岔渠首闸引水，途径河南、河北，最终抵达北京与天津。其供水区总面积约15.5万平方千米，总干渠全长1432公里，天津输水支干渠长154千米，年平均调水量95亿立方米。总干渠以明渠输水为主，局部采用管涵过水，渠首设计流量350立方米每秒，加大流量420立方米每秒。该工程从丹江口水库引水，经唐白河流域西部，穿越长江与淮河的分水岭方城垭口，沿黄淮海平原西部边缘，在郑州以西李村附近穿过黄河，沿京广铁路西侧北上，基本可自流至北京、天津。中线工程规模宏大，渠线漫长，建筑物样式繁多，交叉建筑物众多，且总干渠南高北低的地势，为自流输水和供水创造了优越条件。中线工程自通水以来，成效斐然。截至目前，已累计向北方调水突破700亿立方米，惠及河南、河北、天津、北京近1.14亿人，为沿线26座大中城市、200多个县（市、区）的经济社会高质量发展，提供了坚实有力的水资源支撑。受水区通过水资源置换，压采地下水，有效遏制了地下水水位下降趋势，促使水位逐步回升。对华北地区实施生态补水，使得中线工程沿线七里河、滹沱河等16条河流得以生态补水，天然河道阶段性恢复，河湖生态环境显著改善。南水北调中线

工程对构建“四横三纵、南北调配、东西互济”的国家水网体系意义重大，为缓解我国黄淮海平原水资源严重短缺局面、优化水资源配置，发挥着不可替代的重要作用，极大地推动了区域经济社会的可持续发展，改善了生态环境，保障了众多人口的用水需求，对国家的长远发展影响深远。

2 南水北调中线工程关键技术难题

2.1 长距离输水安全保障难题

南水北调中线工程输水线路绵延数千公里，穿越不同的地质区域与气候带，长距离输水安全保障面临着多维度的复杂挑战。沿线地形地貌复杂多变，从山区到平原，地质条件差异显著，如膨胀土、湿陷性黄土等特殊地质分布广泛。膨胀土遇水膨胀、失水收缩，易造成渠道边坡失稳、衬砌结构破坏；湿陷性黄土在水的作用下，土体结构迅速破坏，产生沉陷变形，这些地质因素直接威胁输水渠道的完整性与稳定性。输水系统长期运行过程中，受温度变化、水流冲刷、冻融循环等因素影响，渠道衬砌结构会出现裂缝、剥落等病害。特别是在北方寒冷地区，冬季低温致使衬砌板下积水结冰膨胀，产生冻胀力，对衬砌结构造成严重破坏，一旦发生渗漏，不仅会造成水资源浪费，还可能引发周边土壤盐碱化等次生灾害。输水渠道沿线存在人为活动干扰，如第三方施工、非法取土等行为，也会对输水安全构成潜在威胁，需要采取有效措施实时监测与防范。输水系统的设备设施安全同样不容忽视。泵站、闸门等关键设备长期处于高负荷运行状态，容易出现机械磨损、电气故障等问题，影响输水的连续性与稳定性。一旦某一环节设备出现故障，可能引发连锁反应，导致整个输水系统运行受阻，因此需要建立完善的设备维护与应急保障体系，确保长距离输水过程安全、可靠^[1]。

2.2 大流量输水与高效调度难题

南水北调中线工程承担着向北方地区大规模供水的重任,大流量输水对工程的水力性能与调度管理提出了极高要求。大流量输水时,渠道内水流速度加快,对渠道边坡及衬砌结构的冲刷能力增强,易造成边坡坍塌、衬砌损坏等问题。大流量输水还会引起水位波动加剧,增加了对泵站、节制闸等控制设施的运行管理难度,要求其具备更高的调节精度与快速响应能力,以适应流量变化带来的水位波动。在不同的输水工况下,如何实现输水系统的高效运行是一大难题。当输水流量发生变化时,泵站的能耗、输水渠道的水力损失等都会相应改变,需要综合考虑输水效率、能耗成本、设备运行寿命等多方面因素,优化泵站开机组合与运行参数,寻求最佳的输水方案。由于受水区用水需求具有季节性、随机性特点,用水时间与用水量难以精准预测,这就要求调度系统能够根据实际用水需求,实时调整输水流量,实现水资源的合理分配与高效利用,避免水资源浪费或供水不足的情况发生。输水系统各组成部分之间存在复杂的水力联系,一处流量或水位的变化会通过水流传播影响到整个输水系统。需要建立精准的水力模型与高效的调度算法,对输水系统进行动态模拟与优化调度,实现大流量输水过程中各控制节点的协调运行,保障输水系统在满足受水区用水需求的同时,保持高效、稳定的运行状态。

2.3 交叉建筑物工程技术难题

南水北调中线工程线路长,沿途需要穿越众多河流、铁路、公路等交通干线,交叉建筑物的建设面临诸多技术难题。在跨越河流时,需要综合考虑河道行洪、通航、生态等多方面要求,合理选择交叉建筑物形式。采用渡槽形式时,需要解决大跨度结构设计、混凝土温控防裂、基础处理等技术问题,确保渡槽在承受较大水流荷载与结构自重的情况下,具有足够的强度、刚度与稳定性;采用倒虹吸形式时,要处理好进出口水流衔接、管道防淤堵、结构抗浮等关键技术,保证倒虹吸在输水过程中水流顺畅、运行安全。在穿越铁路、公路等交通干线时,交叉建筑物既要满足输水功能要求,又不能影响交通正常通行。在施工过程中,需要采取有效的交通疏解与安全防护措施,减少施工对交通的干扰。由于铁路、公路对地基沉降要求严格,交叉建筑物的基础设计与施工必须严格控制沉降量,避免因基础沉降导致交通设施损坏或输水结构破坏。交叉建筑物与既有交通设施之间的空间位置关系复杂,需要进行精确的测量与计算,确保交叉建筑物与既有交通设施在空间上互不干扰,实现安全、稳定运行。不同类型的交叉建筑物在结

构形式、受力特点、运行工况等方面存在较大差异,需要针对具体工程条件,开展专项技术研究与设计优化。从结构选型、材料选用、施工工艺到运行管理,每一个环节都需要严格把控,解决交叉建筑物建设与运行过程中遇到的各种技术难题,保障南水北调中线工程与既有基础设施的安全运行与协同发展^[2]。

3 南水北调中线工程关键技术难题的解决方案

3.1 构建输水安全综合保障体系

(1) 针对输水渠道可能遭遇的地质灾害与外部破坏风险,采用三维地质建模与遥感监测技术,对沿线地质条件进行精细化勘察与动态评估。通过实时采集土壤湿度、地下水位、边坡位移等数据,构建地质灾害预警模型,提前识别潜在隐患。在渠道设计上,采用抗冲刷、抗冻胀的混凝土衬砌结构,结合复合土工膜防渗技术,提升渠道自身结构强度与防渗性能,有效抵御水流侵蚀与冻融破坏。(2) 为防范水质污染风险,在水源地及沿线重要节点设置多层次水质监测网络,部署在线水质传感器,对pH值、浊度、重金属含量等关键指标进行高频次监测。利用大数据分析 with 人工智能算法,建立水质变化预测模型,一旦出现污染趋势,可快速定位污染源并启动应急预案。在输水渠道周边建设生态缓冲带,种植具有净化功能的水生植物,形成天然的水质净化屏障,降低面源污染对输水水质的影响。(3) 面对极端天气对输水安全的威胁,构建气象-水文耦合预警系统。整合气象部门的高精度天气预报数据与输水系统的水文监测数据,模拟暴雨、洪涝、冰冻等极端天气下的输水渠道运行状态。通过优化渠道的泄洪设施与排水系统设计,提高渠道应对极端天气的能力。在冬季,采用智能温控系统对关键输水设施进行防冻保护,确保输水过程的连续性与安全性。

3.2 建立智能化输水调度系统

(1) 依托物联网技术,在输水干渠、分水口门、泵站等关键节点部署大量传感器,实时采集水位、流量、压力、设备运行状态等数据,构建覆盖整个输水系统的感知网络。利用5G通信技术实现数据的高速传输,将采集到的海量数据汇聚至中央数据处理平台,为智能化调度提供基础数据支撑。(2) 基于大数据与人工智能技术,开发智能输水调度模型。该模型以满足受水区用水需求、保障输水安全、降低运行成本为目标,综合考虑水源来水情况、输水渠道工况、受水区用水规律等多方面因素,通过优化算法自动生成科学合理的调度方案。例如,在不同季节根据用水需求变化,动态调整泵站的开机组合与运行参数,实现水资源的高效调配。(3) 搭

建可视化的智能调度决策平台,将输水系统的运行状态以三维可视化的形式呈现。调度人员可通过该平台直观查看输水线路的实时工况、各分水口门的分水情况以及设备运行状态等信息。平台具备模拟仿真功能,可对不同调度方案进行预演分析,评估其可行性与效果,为调度决策提供科学依据,实现输水调度的精准化、智能化管理^[3]。

3.3 创新交叉建筑物施工技术

(1)在穿越铁路、公路等交通干线时,采用顶管施工技术与盾构施工技术。顶管施工通过液压千斤顶将预制管道逐节顶入土层,无需大面积开挖地面,减少对交通的影响;盾构施工则利用盾构机在地下掘进,同步进行管片拼装,形成稳定的地下通道。两种技术均配备高精度的导向系统,确保施工精度,避免对既有交通设施造成破坏。(2)针对穿越河流、湖泊等水域的情况,研发新型水下施工技术。采用沉管法施工时,先在岸上预制钢筋混凝土管段,经水压试验合格后,通过浮运、沉放等工序将管段准确安装至设计位置,再进行管段间的连接处理。运用水下机器人与声呐探测技术,对水下施工过程进行实时监测与质量控制,确保水下交叉建筑物的施工质量与安全。(3)在处理输水渠道与地下管线交叉问题时,运用BIM技术进行施工方案优化设计。通过建立三维信息模型,对交叉区域的空间关系进行精确分析,合理规划施工顺序与施工方法。采用非开挖施工技术,如水平定向钻、微型隧道掘进等,减少对既有地下管线的干扰,保障施工过程中地下管线的正常运行,同时提高交叉建筑物施工的效率与质量。

3.4 加强工程运行维护与管理

(1)运用无人机巡检与机器人巡检相结合的方式,对输水渠道、建筑物等设施进行全方位巡查。无人机搭载高清摄像头与红外热成像仪,可快速覆盖大面积区域,对渠道边坡、衬砌表面等进行宏观检查,及时发现裂缝、塌陷等明显缺陷;机器人则可进入渠道内部、建

筑物狭小空间等区域,进行近距离的精细化检测,获取更详细的设施状态信息。(2)建立设施健康评估体系,基于巡检数据与在线监测数据,运用机器学习算法对输水设施的健康状况进行评估。通过分析设施的变形、渗漏、结构应力等指标的变化趋势,预测设施的剩余使用寿命,制定科学合理的维护计划。对于出现病害的设施,采用新型修复材料与修复工艺,如纳米复合材料修补裂缝、非固化橡胶沥青防水涂料处理渗漏等,确保设施性能的及时恢复。(3)引入数字化运维管理平台,实现工程运行维护的全流程信息化管理。该平台集成设施台账管理、巡检任务派发、维护记录查询等功能,将运维人员、设备、工作流程等要素进行统一管理。通过数据分析功能,对运维工作进行统计分析,总结运维规律与经验,持续优化运维管理模式,提高工程运行维护的效率与管理水平,保障南水北调中线工程的长期稳定运行^[4]。

结语

综上所述,南水北调中线工程关键技术难题的解决,有效保障了工程的安全稳定运行与水资源的科学调配。构建的安全保障体系、智能化调度系统及创新施工技术,显著提升了工程建设与管理水平。未来,随着科技发展与工程运行经验积累,需持续优化技术方案,加强智能化与信息化建设,进一步提升工程综合效益,为国家水安全战略实施筑牢坚实基础。

参考文献

- [1]谢向荣,郑光俊.南水北调中线渠道工程关键技术研究[J].水利水电快报,2020,41(2):32-39.
- [2]王文,苗淳洋,李昊,等.南水北调中线工程藻水分离技术研究[J].人民黄河,2020,42(7):83-85.
- [3]陈润.南水北调中线工程某河建筑物透水防冲墙防护施工技术[J].水利科技与经济,2023,29(8):140-145.
- [4]武今巾,何巍伟,席绪昭,等.南水北调中线工程藻类成因浅析及在线监测技术初探[J].科技资讯,2023,21(11):136-139.