

长距离水利管道输水系统节能运行优化分析

杨佳鑫

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

【摘要】：为从根本上解决长距离水利管道输水系统能耗始终居高不下的问题，文章在介绍长距离水利管道输水系统能耗构成及其节能潜力的基础上，提出长距离水利管道输水系统节能运行优化核心技术体系，最后结合长距离水利管道输水系统实例，验证技术体系的合理性与可行性，并提出进一步改进措施和未来发展趋势，以期为相关人员提供参考。

【关键词】：长距离输水；输水系统；节能优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.007

我国水资源在时间与空间上的分布都不均衡，这使得长距离水利管道输水系统得到广泛应用，并成为直接影响到区域供水稳定性和安全性，以及促进经济社会稳定发展的关键设施之一。但在该系统规模日益增加以及结构日趋复杂的背景下，系统能耗逐渐增加。长距离水利管道输水系统包含多级泵站，在供水企业的总运营成本中，该系统电能消耗成本占比可达70%以上。就目前来看，大部分长距离水利管道输水系统运行还单纯依赖现有经验制定调度方案，未能充分考虑频繁变化的用水需求与电价，导致该系统虽然运行安全，但始终存在能耗较高的问题。对此，对长距离水利管道输水系统节能运行优化进行深入分析，制定合理可行的优化方案，具有重要作用与意义。

1 长距离水利管道输水系统能耗构成与节能潜力

1.1 长距离水利管道输水系统能耗构成

长距离管道输水系统的总能耗可分为以下几个方面：第一部分是有效能耗，是指将一定体积的水提升到规定高度（克服净扬程）所需的最低能量，由水力学基本原理决定，属于无法通过优化消除的刚性消耗。第二部分为管网损耗能耗，用于克服水流在管道中流动时产生的沿程摩擦阻力及局部阻力（如弯头、阀门等）所消耗的能量。这部分能耗与管道材质、内壁粗糙度、管径以及流速（流量）的平方密切相关。第三部分为设备效率损耗能耗，因水泵机组、电机、变频器等设备未能实现100%高效运行而产生的额外能耗。第四部分为运行策略损耗能耗，由于调度决策不够优化引发的能耗，是节能优化的主要目标。例如：在电价高峰时段大量提水；未充分利用沿线调蓄设施（如水库、前池）进行削峰填谷；泵站内机组搭配不当，导致部分泵处于低效区运行等^[1]。

1.2 长距离水利管道输水系统节能关键影响因素与节能潜力

节能优化的重点是，在保证所有水力安全约束（如压力上限、流量范围、水库水位限制等）被满足的前提下，通过对可控变量的调整，达成能耗的最小化。可控变量主要包括各泵站内水泵的启停状态、转速（或者阀门开度）、各调节阀的开度、各水库/水池的蓄放水策略等。长距离水利管道输水系统的外部不确定性因素主要有以下几种：第一，需水量变化，受季节、天气、节假日、用户行为的影响，有着明显日、周、年周期规律以及随机波动。第二，电价政策，像峰谷分时电价、尖峰电价等，为利用经济杠杆进行移峰填谷提供了直接的动力。第三，设备状态，水泵性能随着运行时间的增加因老化、磨损而下降。第四，水力条件，水源水位、末端用户压力的变动^[2]。

长距离水利管道输水系统的节能潜力主要体现在以下几个方面：第一，通过移峰填谷尽可能减少电费，比如在电价处于低谷时进行提水和蓄水，而在电价处于高峰时进行放水，以此充分利用不同时间段的电费差额起到减少运行成本的作用。第二，通过对水力工况的全面优化减少系统损耗，如采用适当的优化调度措施，确保管道流速始终保持在经济流速范围，防止产生节流损失，将管网的摩阻能耗降至最低。第三，尽可能提高设备的实际运行效率，比如通过对机组组合及其转速的优化，保证所有处于运行状态的水泵均保持在高效区内。第四，最大限度发挥调蓄工程具有的缓冲功能，如利用沿线范围内的水库或水池进行调蓄，减小流量的波动，为后续调度优化创造足够的操作空间，并预留足够时间窗口^[3]。

2 长距离水利管道输水系统节能运行优化核心技术体系

2.1 系统精细化水力建模与仿真

精确的水力模型是进行所有优化分析的根基。需建立能够准确反映系统拓扑结构、设备特性和水力瞬变过程的数学模型。此模型主要由管网拓扑模型、设备特性模型和水力计算引擎三部分组成，其中，管网拓扑模型用于精准描述管道、节点（分合流点、用户接入点）、泵站、阀门、调压塔、水池等元素的连接关系与空间属性；设备特性模型的核心是水泵的性能曲线，这需要通过现场测试或厂家数据拟合获得。对于变频泵，还需构建转速与性能参数的相似律换算关系；水力计算引擎通常采用基于水力学基本定律（质量守恒、能量守恒）的稳态或瞬态模拟算法。在优化调度方面，多以扩展周期模拟（Extended Period Simulation, EPS）为主，同时辅以必要的瞬态分析来进行安全校验。此外，要利用 SCADA 系统的历史运行数据（压力、流量、水位、耗电量）对模型参数（如管道摩阻系数）进行多次校准，确保模型输出与实际运行数据高度吻合。这是保证优化方案可信度的关键环节^[4]。

2.2 多时间尺度优化调度模型与算法

2.2.1 日前优化调度

时间尺度设为未来 24 小时，每小时作为一个时段。每天在固定时刻（如傍晚），依据最新的需水预测、电价信息、设备状态及初始水库水位，制定次日泵站启停的详细计划。优化目标是使次日总运行电费最低，主要约束条件包括：第一，水力平衡约束，即节点流量平衡与环路能量守恒。第二，设备能力约束，即水泵的流量、扬程、功率上下限，以及水库水位和库容的上下限。第三，运行策略约束，即水泵的最小启停时间、每日启停次数限制，以及水库日末蓄水量要求（为次日调度预留空间）。第四，供水安全约束，即关键节点压力需满足服务压力要求，同时不能超出管道承压上限。求解算法包括以下几种：其一为动态规划（DP），适用于单泵站、单水库的串级系统，但数据问题限制了其在复杂系统中的直接应用。其二为遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）等智能优化算法，适合求解复杂的组合优化问题。通过将水泵启停编码为决策变量，并以水力模拟结果作为适应性评估，能够有效搜索全局较优解，但计算耗时较长，且无法严格证明解的最优性。其三为分解—协调方法，将大系统分解为相对独立的子系统（如按泵站分解），各

自优化后通过协调变量（如区间流量、压力）进行全局迭代协调^[5]。

2.2.2 实时滚动优化与反馈控制

时间尺度为十几分钟至未来数小时，执行周期较短，旨在修正日前计划与实际运行之间的偏差。可运用模型预测控制（MPC）框架，在每个控制周期内，依据当前系统状态（如实测水位、压力）以及短时需水预测，通过水力模型预测未来一段时间（即预测时域）的系统行为；在预测时域中，求解一个优化问题，以运行成本最小化或目标水位/压力跟踪为目标，生成一组最优控制指令（例如泵速设定值）。该框架能够显式应对多变量约束，主动补偿需水预测误差等干扰因素，具备较强的鲁棒性，是实现安全、经济、精准控制的有效工具^[6]。

2.2.3 特殊工况与应急优化

常见的应急状况包括：设备计划检修、因事故导致的停机、水锤防护和水质污染等，针对这些应急状况必须建立对应的优化模型，其目标应从经济性转向保证安全与可靠，比如当核心泵组出现故障时，应立即制定补救方案和调度方案，在满足基本供水需求的同时，将其对社会带来的不利影响降至最低。

2.3 数据支持系统

从数据感知角度讲，可引入物联网传感器或 SCADA 系统对各类状态数据进行动态获取，包括流量、压力与电量等，保证数据采集的准确性和实时性以及数据传输的可靠性。从需求和电价预测角度讲，可考虑引入包含机器学习以及时间序列分析等在内的新兴技术，保证短期预测结果的准确性。除此之外，通过对各类水力建模软件的整合以及对算法模块的优化，为系统调度人员创造可视化数据平台，为方案的模拟仿真以及综合对比等环节提供可靠支撑^[7]。

3 长距离水利管道输水系统节能运行优化实践

3.1 系统概况

以我国某县长距离饮用水输送系统为例，该系统全长约 157km，设计日输水规模为 7.35 万 m³。系统配置二级水厂（A、B 厂），沿线设有 10 座加压泵站（含水池）。原运行方式根据首末水位定时启停泵，存在能耗较高且对需水变化适应能力不足的问题。

3.2 节能运行优化方案实施

建立全系统精细化水力模型，通过三个月历史数据校正，关键节点压力模拟误差控制在 2% 以内，制定以下两级优化策略：第一级为每日 16:00 平台自动

获取次日分时电价和需水预测，调用以改进遗传算法为核心的优化引擎，在 30min 内生成次日各泵站每台泵的逐时启停计划，优先利用夜间谷电向末端水厂补水；第二级基于 MPC 框架，每 15min 滚动一次，根据水库实际水位与计划水位的偏差及超短期需水预测，微调正在运行泵的转速（变频控制），实现水库水位精准追踪，降低水位波动。此外，优化方案生成后，自动进行水力瞬态模拟，校核启停泵过程中的水锤压力，确保运行安全。

待项目投入运行后，预测可取得以下成果：经济效益方面，单位输水电耗将下降约 8.5%，由于显著的移峰填谷效果，平均购电单价降低，全年将节省电费约 200 万元，投资回收期不超过 2 年；安全与稳定效益方面，管网压力波动幅度可减少约 40%，设备启停更加平稳，水锤风险下降，水库水位控制在更合理范围内，供水保障度提高；管理效益方面，将实现从经验调度到智能调度的转变，减轻调度人员负担，提升决策的科学性与透明度。

3.3 节能运行优化方案实施改进建议与未来发展趋势

虽然节能运行优化方案的实施取得了一定成效，但依然存在改进空间：第一，通过强化计量监测并建立完善的水力模型，持续推动更高水平应用模块的开发；第二，最大限度发挥出数据与模型具有的价值，保证模型构建及维护的有效性；第三，在充分考虑系统规模和复杂程度的基础上明确管理目标，制定包含全过程的技术路径；第四，组建横跨不同专业部门的人才队伍，制定系统运行维护规则，此外通过加强合作培训提高人员技术能力^[8]。

参考文献：

- [1] 田言峰.循环水系统冷却塔回水余能节能改造的可行性研究[J].电站系统工程,2025,41(06):38-40.
- [2] 朱兴国.热电厂凝汽器循环水系统节能技术改造方案研究[J].中华建设,2025,(10):174-176.
- [3] 李晓倩,孙起升,刘宜萍,等.冷却循环水系统节能控制改造与节能效益[J].资源节约与环保,2025,(09):5-8.
- [4] 翟琦,唐曼.炼油循环水系统冷却塔的节能改造及应用研究[J].工业用水与废水,2025,56(04):80-84.
- [5] 姜国斌,张广志,魏成权.空调水系统变频泵的节能控制及应用[J].安装,2025,(08):89-92.
- [6] 陈键科,熊志勋,王锋,等.空调冷冻水系统温差的节能与经济性综合分析[J].上海节能,2025,(07):1111-1118.
- [7] 韩占猛,谭效时,刘耀中,等.信息化节能技术在船舶工业企业循环水系统中的应用[J].船舶物资与市场,2025,33(02):110-112.
- [8] 徐永宁.高效节能泵在循环水系统中的应用与优化研究[J].今日制造与升级,2025,(05):154-156.

长距离水利管道输水系统的节能运行优化，正呈现若干显著发展趋势：第一，通过和数字孪生之间的深度融合，打造可实现动态模拟仿真的数字孪生模型，提高和物理系统之间的匹配程度。在数字孪生技术的加持下，除了能更好的完成优化，还能在员工技术培训以及事故模拟等方面发挥出显著作用。第二，积极引入人工智能技术，比如通过采用强化学习等先进的人工智能技术，使人工智能体自动提出最佳控制方案，这样可以从根本上解决复杂建模问题以及采用传统优化算法存在的计算问题。第三，在做好输水系统优化的同时还应将视角扩宽到整个水源，即实行协同优化，包括水库、水厂与配水管网以及全体终端用户，以此在全局层面使水资源的分布、利用实现最优。第四，充分考虑和新能源之间的结合，比如在泵站周围布置光伏系统与储能装置，深入探索在当前电价和新能源出力均有明显波动的条件下的系统最佳运行方案。

4 结语

综上所述，长距离水利管道输水系统节能运行优化具有很高复杂程度，除了与水利工程知识相关，还涉及到自动控制以及运筹学等多个学科。通过构建专门的数字化模型，并引入当下主流优化算法形成系统的动态控制和调度方案，可以在满足基本供水安全需求的基础上，有效减少运行产生的能耗及污染，进而带来显著的综合效益。伴随一系列新兴信息技术的发展和运用，未来该系统节能优化必定向更高水平智能化方向迈进。通过持续的理论探究和各类技术实践，该系统的运行将满足预期经济性需求，最终实现水资源可持续利用目标。