

智能化运行技术提升二级加压泵站原水管线输水效能探析

葛立福

天津市滨海水业集团有限公司 天津 300250

摘要: 二级加压泵站是原水输水系统的关键节点,其运行效能直接影响供水安全与能耗成本。传统运行方式依赖人工经验,存在工况响应滞后、能耗偏高、调度粗放等问题。本文从智能化运行技术视角出发,分析输水效能影响因素,梳理运行现状与痛点,探讨变频调速、智能调度、泵组优化、数字孪生等技术的应用路径,并提出分阶段实施策略。智能化运行技术可有效降低输水单耗、提升工况适应能力、保障输水安全,为原水输水系统提质增效提供技术支持。

关键词: 二级加压泵站;原水管线;输水效能;智能化运行;泵组优化

引言: 原水输水系统是城市供水的“主动脉”,二级加压泵站承担着将原水提升至高位调节池或水厂的重要任务。受水源水位波动、管网阻力变化、用电峰谷差异等因素影响,泵站运行工况复杂多变。随着物联网、大数据、自动控制等智能化技术日益成熟,将其应用于泵站运行管理成为提升输水效能的有效途径。本文旨在系统分析智能化运行技术在二级加压泵站原水管线中的应用路径与优化效果。

1 二级加压泵站原水管线输水效能概述

1.1 输水效能的内涵与评价指标

输水效能是指泵站输送原水过程中单位能耗所实现的输水量,综合反映运行经济性。核心评价指标包括:输水单耗(千瓦时/千吨),是衡量能效水平的关键指标;泵组效率(%),反映设备工况匹配程度;管输效率(%),反映管线水头损失状况;负荷匹配度,表征流量与需求量的吻合程度;启停频次,反映运行稳定性。上述指标相互关联,共同构成输水效能综合评价体系。提升输水效能的核心在于优化泵组运行工况、降低无效能耗、提高供需匹配精度。

1.2 影响输水效能的主要因素

影响输水效能的因素可分为泵站侧、管线侧和运行侧三类。泵站侧因素包括水泵选型合理性、泵组配置方式、变频装置配备及设备老化程度,选型不当会导致泵组偏离高效区。管线侧因素包括管径、管材、长度、使用年限及结垢、泄漏等,结垢增加阻力,泄漏造成水量损失。运行侧因素最具改善潜力,包括调度策略、工况调节方式、峰谷用电安排等。传统恒速泵站阀门调节存

在较大节流损失,变频调速可动态调节转速,显著提升部分负荷下的运行效率^[1]。

1.3 提升输水效能的总体思路

提升输水效能的总体思路是从“经验驱动”向“数据驱动”转变,实现“按需供水、经济运行”。具体包括三个层面:感知层面,部署流量计、压力变送器等在线监测设备,构建全方位感知网络;分析层面,利用数据采集与监视控制系统对运行数据进行分析挖掘,优化调度方案;控制层面,采用变频调速、泵组智能投切等执行机构,实现自动调节与闭环控制。三个层面层层递进。已建泵站可分步实施改造,新建泵站应在设计阶段统筹预留智能化功能。

2 二级加压泵站运行现状与存在问题

2.1 运行调度依赖人工经验

目前大量二级加压泵站仍以人工操作为主,调度决策依赖经验判断。存在三个突出问题:一是响应滞后,水位骤降或需水量突增时难以及时调整,造成供水不足;二是决策偏差,不同人员判断标准不一,缺乏量化规则;三是劳动强度大,夜间节假日需值守,误操作风险高。

2.2 设备运行工况偏离高效区

泵组效率偏低是影响输水效能的重要因素,设计选型阶段,按远期最大流量选泵导致常规流量下偏离高效区,出现“大马拉小车”现象,某泵站实际效率从82%降至68%。运行调度阶段,恒速泵站阀门调节流量产生节流损失,需水量为额定流量60%时附加能耗可达20%

以上。泵组配置不合理也是常见问题,多台同型号大泵并联在小流量工况下均处于低效区。设备老化磨损如叶轮汽蚀、口环间隙增大等也会导致效率逐年下降。

2.3 原水管线工况适应性不足

管线水力工况动态变化,但泵站运行未能自适应调整。管线结垢使糙率系数增大,泵站被迫提高扬程导致能耗增加。水源水位季节性波动使实际扬程变化,传统泵站难以动态调整运行参数。部分泵站管线泄漏检测滞后,微小泄漏长期未被发现,水量损失持续累积^[2]。由于缺乏对管线状态的实时感知能力,泵站运行无法与管线工况变化形成联动,只能在末端被动应对,输水效能难以维持在较优水平。

2.4 能耗管理与数据应用薄弱

能耗管理和数据应用能力不足是深层原因,许多泵站未建立精细化能耗考核体系,输水单耗、泵组效率等指标缺乏常态化统计,无法识别高能耗时段和低效设备。运行数据散落各处,缺乏关联分析,数据价值未能发挥。大部分泵站未部署专业优化调度软件,历史数据未用于模型训练,无法形成“数据-分析-决策-执行-反馈”闭环。已实施智能化改造的泵站通过数据挖掘发现,不同泵组组合能耗差异可达10%-15%。传统管理模式,这些优化空间难以被识别和利用。

3 智能化运行技术及应用路径

3.1 变频调速与压力闭环控制

变频调速是实现泵站精准运行控制的核心技术。其基本原理是通过改变水泵电机的供电频率来调节转速,进而改变流量与扬程,使水泵运行工况始终与管网需水曲线相匹配。相比传统阀门节流调节,变频调速消除了节流损失,在部分负荷工况下可节电20%-35%。具体应用中,应在出水母管上安装压力变送器,将实时压力信号反馈至变频控制器,与设定压力值进行比较运算后自动调节频率,形成压力闭环控制。当需水量增大导致压力下降时,变频器自动提高频率增加转速;需水量减小时自动降低频率。对于多泵并联的泵站,可采用“变频母管制”——一台变频泵承担流量调节任务,其余工频泵根据需求自动投入或退出,实现全流量范围内的经济运行。

3.2 泵组智能组合与轮值优化

对于配备多台水泵的泵站,合理选择运行泵组的组合方案是降低能耗的有效途径。智能泵组优化的核心是根据实时流量需求,自动计算各台水泵在不同组合下的

总功耗,选择能耗最低的运行方案。对于同型号泵组,优化问题简化为确定运行台数,可通过建立“流量-效率-功率”数学模型求解。对于不同型号或包含变频泵的泵组,优化问题较为复杂,可采用遗传算法、粒子群算法等智能优化方法进行寻优计算。实际应用中,将优化算法嵌入泵站控制系统,每间隔一定时间(如15分钟)根据当前流量需求自动计算最优泵组组合,并控制相应水泵启停或变频调节。同时建立泵组轮值机制,根据各泵累计运行时长自动安排启停顺序,避免个别水泵长期运行而其他水泵长期闲置,均衡设备磨损、延长整体使用寿命。智能组合与轮值优化相辅相成,共同提升泵组运行的科学性^[3]。

3.3 需水量预测与优化调度

需水量预测是实现“按需供水、超前调度”的基础。基于历史流量数据和相关影响因素(如季节、气温、节假日等),采用时间序列分析、神经网络、支持向量机等算法构建预测模型,对未来24小时的需水量进行逐时预测。预测精度达到90%以上时,即可作为调度决策的依据。在预测基础上进行优化调度,核心任务是制定未来24小时内各时段的最优运行方案,包括启停时间、运行台数、变频频率等。优化目标可以是输水单耗最低,也可以是电费最省(结合峰谷电价),或两者兼顾。约束条件包括水位上下限、压力范围、机组启停次数限制等。这是一个多约束、非线性的优化问题,可采用动态规划或混合整数规划求解。生成的优化调度方案下发至控制系统自动执行,或作为操作建议推送给值班人员。预测与优化的结合,将泵站运行从“被动响应”转变为“主动预调”,有效提升输水效能。

3.4 数字孪生与智能运维

数字孪生是智能化运行的进阶形态,通过在虚拟空间中构建与物理泵站一一映射的数字模型,实现对泵站运行状态的仿真、诊断与预判。数字孪生系统的构建包括三个步骤。几何建模,按照实际尺寸构建泵房、管道、水泵等设施的三维模型。机理建模,根据水泵特性曲线、管道水力模型、电机效率模型等建立运行机理模型。数据融合,将实时采集的流量、压力、电流、振动等数据接入模型,使数字模型与物理实体同步运行。基于数字孪生,可开展多项智能运维应用。在线仿真,模拟不同调度方案的效果,为运行决策提供依据。异常诊断,当实际运行参数偏离仿真值时自动报警,提示设备故障或管线泄漏可能。预测性维护,通过分析振动、温度等趋势,预判设备劣化趋势,提前安排检修。数字孪

生将泵站运行从“事后处理”推向“事前预知”，是提升输水效能与运维水平的前沿方向。

4 智能化运行技术实施策略

4.1 分阶段推进与差异化配置

智能化改造应遵循“整体规划、分步实施、效益优先”的原则。第一阶段（基础感知层），完成流量计、压力变送器、电表、水位计等在线监测设备的安装，实现泵站运行参数的全覆盖采集，同时建立数据采集与监视控制系统平台，为后续分析提供数据基础。第二阶段（自动控制层），对主要水泵实施变频改造，配置压力闭环控制系统，实现单台水泵的自动调节。在此基础上，部署泵组智能投切模块，实现多泵联合作业的自动组合优化。第三阶段（智能决策层），建立需水量预测模型和优化调度系统，实现运行方案的自动生成与下发。条件成熟时建设数字孪生平台，开展智能运维。不同规模泵站的配置方案应有所差异：小型泵站可侧重变频调速与自动控制，中型泵站应覆盖预测与优化调度，大型骨干泵站宜建设数字孪生系统。差异化的配置策略可平衡投资效益与管理需求。

4.2 数据驱动与模型迭代优化

智能化运行的核心是数据驱动，需要建立“采集-分析-优化-验证”的闭环机制。数据采集应保证准确性，定期对流量计、压力计等仪表进行校准，确保源头数据可信。数据分析方面，建立运行指标库，按班次、按日、按月统计输水单耗、泵组效率、峰谷电量占比等指标，形成常态化的效能分析报告。模型迭代方面，需水量预测模型和优化调度模型应定期采用最新数据重新训练和验证，避免模型老化导致偏差。建议每季度对预测模型进行一次评估，当预测误差超过 10% 时触发模型更新。泵组特性曲线也应在实际运行中持续校核，将实测数据与出厂曲线比对，修正模型参数。建立运行案例库，记录典型工况下的最佳调度方案，供操作人员参考。数据驱动的持续优化，使智能化系统始终保持对实际工况的良好适应性，输水效能得以稳步提升。

4.3 人员能力提升与制度建设

技术是手段，人才是根本。智能化系统投用后，对运行人员的知识结构和操作能力提出了更高要求。应开展分层分类培训：对操作人员培训控制系统的基本操作、报警处置流程、常见故障排除方法；对技术管理人员培训优化调度原理、数据分析方法、系统维护技能；对决策层培训智能化运行的评价指标体系、投资回报分

析方法。培训形式包括集中授课、现场演练、案例研讨等，有条件的企业可组织赴先进泵站参观学习^[4]。修订完善操作规程，将智能化系统的操作要求纳入标准化作业文件；建立运行效果评价机制，将输水单耗、泵组效率等指标纳入绩效考核体系；制定系统维护制度，明确服务器、网络、仪表的巡检周期与维护责任人。通过人员能力提升与制度保障，确保智能化系统“用得好、用得久”。

4.4 效益评估与持续改进

智能化改造项目实施后，应建立科学的效益评估体系。经济效益方面，对比改造前后的输水单耗变化，计算节电量和电费节省；统计设备故障率和维修费用变化；评估无人或少人值守带来的人力成本节约。运行效益方面，考察供水压力稳定性、工况调整响应时间、设备启停频次等指标改善情况。评估周期以连续运行 12 个月为基准，应剔除极端工况或重大检修等异常时段的影响。评估结果应形成专项报告，识别智能化系统的不足与改进方向。对于未达到预期效果的环节，应分析原因——是设备选型问题、参数设置不当，还是模型精度不足，并有针对性地优化调整。建议每年组织一次智能化运行水平评审，对标行业先进指标，设定下一年度提升目标。持续改进是智能化运行的生命力，只有不断迭代优化，才能确保输水效能始终维持在先进水平。

结束语

智能化运行技术为破解二级加压泵站传统调度模式的局限提供了有效路径。以变频调速、需水量预测、数字孪生为代表的智能技术，通过实时感知、科学决策与精准执行，能够显著降低输水单耗、增强工况适应能力。实施智能化改造需坚持分阶段推进，注重数据驱动与模型迭代，同步强化人员培训与制度保障，形成持续优化闭环。随着人工智能与大数据的深度应用，泵站运行将加速向无人化、自适应、预测性方向演进，为原水输水系统提质增效注入新动能。

参考文献

- [1] 韩烨. 变频调速技术在水厂泵站节能运行中的应用研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2026, 39(1): 107-110.
- [2] 曾腾飞. 补水泵站变频调速技术节能降耗运行效果分析与实践研究 [J]. 水上安全, 2025(18): 109-111.
- [3] 夏红明, 张国文, 喻未. 数字孪生技术在泵站运行管理中的应用 [J]. 南昌工程学院学报, 2025, 44(1): 21-26.
- [4] 邵子洋. 大型泵站智能化运行管理系统的构建与应用研究 [J]. 治淮, 2025(1): 69-70, 73.