

水利工程泵站群智能调度与能效优化研究

冯毅峰 陈婷婷 钱 晓 徐湘红 杨晓华

昆山市水务综合管理中心 江苏 昆山 215300

摘 要：泵站群作为多机组联动运行的大型水利动力系统，其运行能效受机组性能差异、管网水力特性及输水工况动态变化等多重因素影响。本文针对传统人工调度模式存在的响应滞后、机组协同不足、工况适配性差及能效管控缺失等问题，系统阐述了泵站群智能调度系统的核心内涵与数据感知、运算分析、调控执行三大模块的协同运行机制，提出了基于智能调度的能效优化路径。研究表明，智能调度通过机组组合优化可降低机械能耗，通过动态工况调节可减少水力损耗，通过负荷均衡分配可提升整体运行能效，能够有效解决传统调度模式下机组偏离高效区运行、管网水力失衡、无效能耗叠加等核心问题，实现泵站群整体运行效率与经济效益的最大化。

关键词：水利工程；泵站群；智能调度；能效优化

引言：泵站群是区域水资源优化配置与安全输送的核心基础设施，其运行能效直接决定水利工程的经济效益与绿色可持续发展水平。随着输水规模持续扩大与工况复杂度不断提升，传统依赖人工经验的调度模式已难以适应多机组协同运行与精细化能效管控的实际需求，普遍存在调度响应滞后、机组组合不合理、水力损耗偏高、负荷分配不均等突出问题，导致系统整体能效偏低。智能调度技术的引入为解决上述问题提供了可行路径。本文围绕泵站群智能调度系统的核心构成与运行原理展开研究，系统分析传统调度模式的运行逻辑与现存缺陷，阐述智能调度在实时性、精准性与协同性方面的运行优势，并从机组组合优化、动态工况调节、负荷均衡分配三方面提出能效优化路径，旨在为泵站群高效节能运行提供理论依据与技术参考。

1 泵站群运行基础概述

泵站群属于多机组联动运行的大型水利动力系统，通常由多台水泵机组、高低压电气控制系统、输水管道网络、调压塔及稳压设施等多个子系统共同构成，各设备之间相互配合、相互制约，形成完整的水资源输送与调控体系。（1）在实际运行过程中，泵站群受输水流量需求变化、管道沿程及局部水力损失、各机组额定参数与性能差异、末端负载波动等多重因素叠加影响，整体运行状态始终处于动态波动之中。（2）不同机组在额定扬程、额定流量、运行效率、汽蚀余量及高效工作区间等方面存在显著差异，同一机组在不同工况点下的运行损耗也有明显区别。（3）传统统一化、固定化的调度方式将所有机组视为等同单元进行集中控制，无法适配流量、扬程持续变化的动态运行工况，容易出现机组

偏离高效区运行、管网水力失衡、无用功损耗增大等问题，导致系统整体能效偏低。（4）实现泵站群高效节能运行，需要依托智能化调度手段，综合考虑机组性能特性、管网水力条件及实时输水需求，打破传统调度模式的局限性，实现各机组运行状态与输水需求的精准匹配与协同优化^[1]。

2 传统泵站群调度模式及现存问题

2.1 传统调度模式运行逻辑

传统泵站群调度以人工经验调度为核心运行模式，调度决策完全依赖运维人员对当前输水需求、上下游水位状态、设备运行情况的基础判断，通过手动操作完成机组启停、运行台数调整、基础负荷分配等调度任务。整体调度模式具备明显的固定性与滞后性特征，在日常运行中多采用固定机组组合、恒定转速运行的方式开展长期作业，调度参数调整频次低、响应速度慢。在实际运行中，仅在出现明显运行异常、设备故障报警或大幅水量调整需求时，运维人员才会对机组运行状态进行人工干预与调整。调度过程中主要以满足输水流量需求为唯一核心目标，未对机组运行能耗、管网水力损耗、设备运行效率、机组负荷分配合理性等关键指标进行统筹考量与量化分析，调度逻辑较为单一，难以适配输水工况的动态变化。

2.2 机组协同运行性不足

泵站群通常由多台性能参数存在差异的水泵机组组成，不同机组因制造批次、使用年限及磨损程度不同，其高效运行区间、单位能耗特性及水力损耗特征存在显著区别。传统调度模式缺乏对各机组性能参数的精细化

区分与量化分析,在机组启停与负荷分配过程中较为随意,常出现高性能机组处于低负荷运行状态、老旧机组被迫高负荷运转等不合理工况。在多机组协同运行过程中,各机组之间缺乏动态协同调控机制,运行节奏与工况响应不统一,部分机组长期处于空载、轻载等低效运行状态,不仅增加了设备无效机械损耗与电气能耗,还导致系统整体能耗大幅上升,输水效率明显降低,严重制约泵站群的综合运行能效水平^[2]。

2.3 工况适配性与能效管控缺失

水利输水过程中,水位、流量、管道阻力始终处于动态变化状态,对泵站群的输出功率、运行工况有着差异化需求。传统调度无法实时捕捉工况动态变化,不能及时调整机组运行参数,导致机组长期偏离高效工作区间运行。同时,传统运行模式缺乏系统化的能效管控思维,未建立能耗与输水效率的对应关系,无法精准识别无效能耗来源,水力损耗、机械损耗、电气损耗得不到有效抑制与优化。

3 泵站群智能调度核心体系与运行原理

3.1 智能调度的核心内涵

泵站群智能调度是依托多源数据感知、实时动态分析与智能优化运算形成的精细化调度模式,区别于依赖人工经验判断的传统调度方式,其核心是以泵站群实时运行状态数据、管网水力参数、各机组性能特性参数为基础,通过构建数学优化模型与量化运算算法,实现多台机组运行状态的动态最优配置。在调度目标层面,智能调度不再单一追求输水流量达标,而是以流量需求满足、设备运行安全约束、系统总能耗最低、整体运行能效最优为综合调度目标,建立多目标协同优化机制。在调度执行过程中,系统根据实时采集的水位、流量、压力、电流、功率等运行数据,动态计算各机组的最优开机组合与运行工况点,使每台机组尽可能运行在高效工作区间内。通过上述机制,从调度决策层面消除机组偏离高效区运行、管网水力不平衡、无效能耗叠加等问题,规避不合理运行状态带来的能源损耗,实现泵站群整体运行效率与经济效益的最大化^[3]。

3.2 智能调度系统核心构成

泵站群智能调度系统主要由数据感知模块、运算分析模块、调控执行模块三部分组成,各模块之间数据互通、功能衔接,构成完整的闭环调度控制体系。(1)数据感知模块是系统运行的数据基础,通过部署于各机组及管网关键节点的传感器与采集终端,实时获取机组转速、运行功率、输水流量、管道压力、进出水口水位

差、电气参数等核心运行数据,同步采集环境温度、负荷变化等外部工况信息,经数据清洗与校准后,为调度决策提供精准、完整的数据支撑。(2)运算分析模块是系统的决策核心,依托预先构建的机组性能特性模型、管网水力损耗模型及多目标优化算法,对实时采集的运行数据进行综合分析运算。该模块根据当前输水需求与设备约束条件,在满足流量、扬程等基本要求的的前提下,遍历计算各机组不同组合方式下的能耗水平,筛选出总能耗最低、综合能效最优的机组组合方案与负荷分配方案。(3)调控执行模块是系统的执行终端,根据运算分析模块输出的最优调度方案,自动向各机组控制系统下达启停指令、转速调节指令及负荷分配指令,完成机组的精准启停、变频调速与负荷优化分配,实现全过程无人干预的智能化调度运行。

3.3 智能调度的运行优势

相较于依赖人工经验判断的传统调度方式,泵站群智能调度在响应速度、决策精度与系统协同三个维度具备显著优势,能够从根本上提升泵站群的整体运行能效。(1)在实时性方面,智能调度系统可全天候、不间断地动态捕捉输水流量、管网压力、水位变化等工况参数的实时波动,并在秒级时间内完成调度方案的自动更新与执行,彻底消除人工调度因信息传递延迟、人工决策耗时所导致的调度滞后性问题,确保泵站群运行状态始终与实时工况需求保持同步。(2)在精准性方面,智能调度依托机组性能特性模型、管网水力损耗模型及多目标优化算法,对实时运行数据进行量化分析与精确运算,精准匹配各机组运行参数与当前输水需求,避免传统经验化调度中因人工判断偏差导致的机组偏离高效区运行、负荷分配不均等问题,显著提升调度决策的科学性与可靠性。(3)在协同性方面,智能调度可统筹泵站群内所有机组的实时运行状态,实现多台机组之间的联动协同运行,均衡各机组运行负荷,使每台机组均运行在高效工作区间内,充分发挥各机组的最佳运行性能,避免单台机组过载或低效运行,为泵站群整体能效优化奠定坚实基础。

4 基于智能调度的泵站群能效优化路径

4.1 机组组合优化,降低机械能耗

依托智能调度系统强大的数据运算与模型分析能力,可根据实时输水需求与各机组的高效运行区间,动态筛选并确定最优机组组合方式。(1)系统通过智能优化算法对不同机组组合方案下的综合能耗、机械损耗、输水效率、管网水力损失等关键参数进行全面比对与量化评估,优先匹配综合效率较高的机组参与

运行,系统性规避效率偏低的机组长期作业,从根本上杜绝机组轻载、空载、偏离高效区运行等低效工况的持续发生。(2)在输水负荷动态变化过程中,智能调度系统根据实时采集的流量、扬程、功率、电流等运行参数,自动计算当前工况下所需的最优开机台数与运行组合,动态调整投入运行的机组数量与各机组的运行工况点,实现输水负荷与机组产能的精准适配。针对低负荷时段,系统自动减少运行机组数量,避免多余机组处于低效运行状态;针对高负荷时段,系统合理增加运行机组数量,防止单台机组过载运行导致效率急剧下降。通过上述机组组合优化策略,有效降低泵站群整体机械能耗,减少因机组组合不合理导致的无效设备损耗与电能浪费,显著提升泵站群在不同负荷段下的综合运行效率与经济运行水平^[4]。

4.2 动态工况调节,减少水力损耗

水力损耗是泵站群运行能耗浪费的核心来源之一,主要源于水泵机组运行工况与输水管道水力特性之间的不匹配。(1)在传统固定转速运行模式下,机组长期工作在固定工况点,难以适配流量、扬程持续变化的实际输水需求,导致管网内压力分布不均、流速分布失衡,产生大量沿程水力摩擦损耗与局部涡流损耗。(2)通过智能调度系统实时监测管道进出口压力、输水流量、上下游水位差、流速分布等核心水力参数,建立管道水力特性与机组运行状态的动态映射关系,据此动态调节水泵转速、出水流量、阀门开度等运行参数,使机组运行工况始终适当前管道水力特性。在低负荷时段,系统自动降低水泵转速,减少管内流速,降低沿程摩阻损失;在高负荷时段,系统合理提升运行参数,避免因流速过高产生局部水锤与涡流,有效降低沿程损耗与局部涡流损耗。通过上述精细化工况调节,显著减少管网内水力紊动、压力脉动与流速突变带来的能量损耗,提升水资源输送过程中的有效利用率,降低无效水力能耗,实现泵站群水力能效的最大化。

4.3 负荷均衡分配,提升整体能效

基于智能调度系统的多机组协同调控能力,可实现泵站群整体输水负荷的科学均衡分配,从根本上改变传统调度模式下负荷分配不均、部分机组长期过载而部分

机组长期低效运行的问题。(1)系统通过实时运算各机组的当前运行能效、剩余承载能力、机械损耗系数及设备运行状态等关键参数,将整体输水负荷按照各机组的实时性能状态进行科学分配。(2)在负荷分配过程中,系统优先将负荷分配至当前运行效率较高、剩余承载力充足的机组,同时限制效率偏低或接近额定上限的机组承担过多负荷,使所有运行机组均处于高效稳定的工作区间内,避免出现单一机组长期过载运行导致效率急剧下降、部分机组长期处于轻载或低效区间运行造成能源浪费的情况。同时,系统根据各机组累计运行时长与磨损程度,动态调整负荷分配比例,均衡各机组的磨损速率,延长设备整体使用寿命。

结束语

本文系统分析了传统泵站群调度模式在响应速度、机组协同及能效管控方面的固有缺陷,阐述了智能调度系统依托数据感知、运算分析与调控执行三大模块实现精细化调度的运行原理,并从机组组合优化、动态工况调节、负荷均衡分配三个路径提出了能效优化方案。研究表明,智能调度在实时性、精准性与协同性三个维度具备显著优势,可有效降低机械能耗与水力损耗,提升泵站群综合运行能效。未来应进一步融合数字孪生、自适应优化算法及边缘计算技术,持续深化智能调度在复杂工况下的自学习与自决策能力,推动泵站群运行管理向全面智能化、精细化方向发展。

参考文献

- [1] 邹梓琪. 水利水电工程中智能调度系统优化与能效提升策略研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(2):063-066.
- [2] 李皓巍,郭汝腾. 水利工程中泵站节能技术的优化路径研究[J]. 科技创新与应用,2025,15(32):149-152.
- [3] 于建昌,韩春丰. 水利工程中多级泵站能效提升技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(5):080-083.
- [4] 连辉珍. 基于人工智能优化算法的水电运行能效控制机制研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(11):081-084.