

南水北调工程中大型泵站群联合节能优化方法研究

杜军民¹ 武文昭¹ 马树军¹ 刘英杰² 罗剑宾³

1.河南省南水北调运行保障中心; 2.华北水利水电大学; 3.湖南省株洲南方阀门有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i8.8299

[摘要] 本研究全面剖析该工程的设计思想, 仔细探究泵站群的空间布局特性, 把关键技术要素融合进来, 涉及依照流量特点执行改良设计的办法, 多级串联和并联混合泵站群的协同运作机制, 集散式即时自控体系的集成管控策略, 应急风险评定体系等主要议题, 在此基础上, 联系自动化平台技术, 构建一种节能型改良办法, 重视跨学科协同革新和整个生命期管理的关键性, 此办法可以明显改进工程的能耗状况, 而且大幅度提升整体运作效能, 给别的调水项目中的泵站节能减排改良给予理论根据和操作参照。

[关键词] 南水北调; 大型泵站群; 节能措施

Research on Joint Energy saving Optimization Method for Large Pump Stations in the South to North Water Diversion Project

Du Junmin¹ Wu Wenzhao¹ Ma Shujun¹ Liu Yingjie² Luo Jianbin³

1.Henan Province South to North Water Diversion Operation Support Center;

2.North China University of Water Resources and Electric Power;

3.Hunan Zhuzhou Nanfang Valve Co., Ltd

[Abstract] This study comprehensively analyzes the design concept of the project, carefully explores the spatial layout characteristics of the pump station group, integrates key technical elements, involves methods of improving design according to flow characteristics, collaborative operation mechanism of multi-stage series and parallel mixed pump station groups, integrated control strategy of centralized real-time automatic control system, emergency risk assessment system and other main issues. Based on this, combined with automation platform technology, an energy-saving improvement method is constructed, emphasizing the key importance of interdisciplinary collaborative innovation and whole life cycle management. This method can significantly improve the energy consumption status of the project and greatly enhance the overall operational efficiency, providing theoretical basis and operational reference for energy-saving and emission reduction improvement of pump stations in other water transfer projects.

[Key words] South to North Water Diversion Project; Large pumping station group; energy-saving measure

一、工程概况

(一) 河南省南水北调供水配套工程

南水北调中线工程从丹江口水库引水, 总干渠全长 1432 公里 (包括天津支线 155 公里), 其中河南段 731 公里, 占比 51%; 干线工程共设置分水口门 97 座, 其中河南段 42 座, 占比 43%; 一期工程多年平均调水量 95 亿 m³, 其中河南 37.69 亿 m³, 占比 40%。

河南省南水北调受水区供水配套工程是指 (南水北调中线干线工程河南省段) 分水口门以下, 输送、配置、调度南水北调分配水量的供水工程。规划输水线路总长 1050 公里, 批复概算总投资约 153 亿元, 2011 年 4 月开工建设, 2014 年 12 月与干线工程“同步通水, 同步达效”, 2016 年 12 月实现规划受水区通水全覆盖。由总干渠 42 座分水口门引水, 分别向受水区南阳、平顶山、漯河、周口、许昌、郑州、焦作、新乡、

鹤壁、濮阳、安阳等 11 个省辖市的 91 座城市水厂供水，输水型式分为渠道输水、涵洞输水、利用河道输水和管道输水四种，其中建设提水泵站 23 座（19 处）。

（二）项目现状

目前，该项目选定焦作府城泵站作为试点项目。府城泵站位于焦作市中站区，紧邻焦武路，交通便利。泵站为新建泵站，2019 年 7 月建成通水。泵站设备设施先进，采用双回路电源供

电，供电可靠性得到了有力保证，是全省唯一一座采用西门子进口电机的供水泵站，电气设备采用施耐德的高压变频柜体，且泵站占地面积为全省最大。建成通水以来，总供水量达 15606.65 万 m³，受益人口达 61.92 万人，工程运行良好，已安全运行 1738 天。目前焦作府城泵站已安装部分传感器，具体安装数量如下表所示：

传感器类别	型号	位置	数量	备注
振动传感器	振动速度传感器	水泵自由端垂直方向	20	每台水泵各 4 个 (位置均为一致)
		水泵自由端水平方向		
		水泵驱动端垂直方向		
		水泵驱动端水平方向		
转速传感器	转速传感器	电机轴伸处	5	每台水泵各 1 个 (位置均为一致)
测温	PT100 测温装置	水泵驱动端和自由端轴承处	10	每台水泵各 2 个 (位置均为一致)
测温	PT101 测温装置	电机三相定子绕组	30	每台水泵各 6 个 (位置均为一致)
测温	PT102 测温装置	电机驱动端和自由端处	10	每台水泵各 2 个 (位置均为一致)
压力	真空压力表	水泵进口	5	每台水泵各 1 个 (位置均为一致)
压力	压力变送器	水泵进口 (-0.1MPa~0.15MPa)	5	每台水泵各 1 个 (位置均为一致)
压力	压力表	水泵出口	5	每台水泵各 1 个 (位置均为一致)
压力	压力变送器	水泵出口 (-0.1MPa~0.8MPa)	5	每台水泵各 1 个 (位置均为一致)

二、泵站群安全及高效运行关键技术

（一）优化技术

1. 泵站内优化

装置特性曲线研究有益于把握水泵的运行性能，从而给后续的流量分配组合提供科学依据^[3]。合理规划流量分配组合，可使泵站在不同工况下均能高效运转，防止能源浪费和设备过度损耗。而且，多约束条件的考量，诸如水质、水位变动、能耗限定等，使得泵站运行方案更符合实际需求，优化整体运行效率。

2. 串并联泵站群优化

多时空尺度分析能同时考虑泵站群在不同时间下的情况，做到资源的最优分配，动态效率评估可以随时检测泵站群的效率，及时发现问题并加以调整。多层次逐次优化策略从大范围到小范围，一步步细致地进行优化，使整个泵站群系统一直保持高效运行的状态。

（二）实时自控技术

1. 常态控制

集散自动控制实现了对泵站群的集中管理和分散控制，提高了管理效率和响应速度^[4]。泵站最优组合的确定，结合实时

的流量需求、设备状态等信息，保证在常态下泵站群以最经济高效的方式运行。自动排程算法合理安排泵站的启停顺序和运行时间，减少设备的频繁启停损耗，启停控制优化更精确地控制泵站的启动与停止过程，减少对电网和设备的冲击。

2. 应急控制

风险评估可以提前预估出泵站群会遇到的风险，如洪水、设备故障等。一旦发生意外情况，事故链截断机制马上开始运作，防止事故继续扩散。安全阈值的设置给泵站群运行带来了保障，当泵站群运行参数超出安全范围时，就会触发相应的保护措施。机组状态转换是根据实际情况灵活改变泵站机组的运行状态，保证泵站群在应急情况下仍然能够维持基本功能。

（三）自动化平台

1. 超融合采集服务

能够实时、全面地采集泵站群运行过程中的各种数据，包括设备运行参数、水位、流量等，为后续的分析和决策提供丰富的数据基础。

2. 跨异构数据支撑

解决了不同类型、不同来源数据的整合问题，使得各类数据能够在统一的平台上进行交互和分析，打破数据孤岛，提高

数据的利用效率。

3. 开放式高级应用

允许用户根据实际需求开发和集成各种高级应用，如智能

监控、预测性维护、优化调度等，为泵站群的智能化管理和决策提供了强大的工具支持，进一步提升泵站群的安全和高效运行水平。

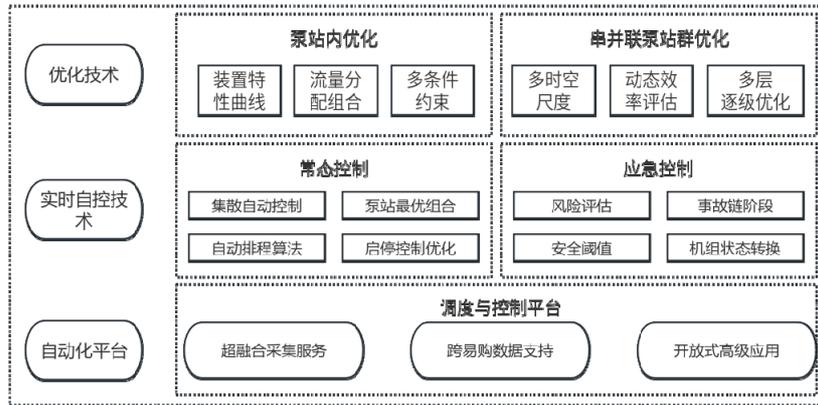


图1 泵站群安全及高效运行关键技术

三、南水北调工程中大型泵站群联合节能优化方法

(一) 机组选择的节能优化

1. 合理进行机组选择

在泵站设计当中，如果原始设计与实际建设不符，致使电机无法带动水泵运转，不但会干扰泵站的运行效果，而且会致使电机效率下降，还会引发过多的能源消耗^[5]。而且在泵站运行期间，电机与负荷成正比。当负荷情况处于标准范围时，电机的运行效率就会慢慢变好。如果负荷超出标准范围，电机的运行效率就会变差，其技术原理基于电机效率与负载率的二次函数关系。当负载率 $\beta \in [0.6, 1.0]$ 时，电机效率处于最优区间；一旦 $\beta < 0.4$ ，效率会大幅骤降，特性成为电机节能选型的理论依据。公式模型为：

$$\eta = a + b\beta + c\beta^2;$$

其中 η 为效率， β 为负载率

在选型实践上，对高功率泵站，焦作府城泵站5台主力泵组优先选用永磁同步电机，其部分负载效率比异步电机高8%~12%，如负载率70%时，异步电机效率约82%，永磁同步电机可达90%以上，单泵日均节约200kWh；精准计算水泵设计扬程，府城泵站设计扬程32m、设计流量1.5m³/s，使电机额定功率与实际需求偏差控制在5%以内，从设备源头避免无效能耗。

2. 水泵并联组合优化

水泵并联组合优化聚焦系统能效提升，构建动态匹配模型是关键路径。通过建立并联泵站最低系统功率模型

$$\min P_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n f(Q_i, H_i, \eta_i)$$

其 Q_i 为单泵流量， H_i 为扬程， η_i 为效率，在尺寸搭配方面采取“变频+定频泵”的混合搭配策略，根据泵站实时流量需求，动态调整变频泵的运行频率，定频泵承担基本负荷，做到不同工况下水泵组合的最佳匹配，从系统运行的角度优化能耗结构，为泵站群大规模并联运行的节能增效提供技术范本，促使水泵系统由粗放运行迈向精准能效控制。

焦作府城泵站的应用中，采取“3台定频泵+2台变频泵”的混合搭配策略：定频泵承担60%~70%的基础负荷（流量0.9~1.05m³/s），变频泵根据实时流量需求（如早晚用水高峰流量增至1.8m³/s）动态调节频率（35~50Hz），使泵组整体效率维持在80%以上，单泵单位流量电耗从0.12kWh/(m³·km)降至0.095kWh/(m³·km)。

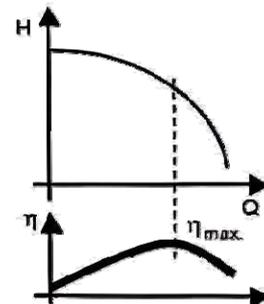


图2 水泵的效率曲线图

3. 调节水泵的频率和速度

水泵机组需根据实时工况调节运行参数：当终端用水量下降20%，从1.5m³/s降至1.2m³/s时，通过变频装置将水泵转速从1450r/min降至1160r/min，单泵功率从1100kW降至700kW，每小时可节电400kWh。同时，结合传感器采集的压力数据，水泵出口压力稳定在0.4~0.5MPa，动态调整水泵运行台数，在低流量时段停运2台定频泵，仅保留1台定频泵+1台变频泵运行，避免“多泵低负荷”的能耗浪费。

(二) 效率节能

1. 智能调度模型

在泵站群管理节能体系中，智能调度模型以多水库联合优化为核心突破，构建数学框架：

$$\begin{cases} \max \sum W_{\text{供水}} \\ \min \sum W_{\text{弃水}} \\ \text{s. t. } V_{\text{min}} \leq V_t \leq V_{\text{max}} \end{cases}$$

在河南段泵站群的应用中，模型通过优化泵站运行时段与流量分配，实现三项关键优化：一是避开用电高峰（8:00~12:

00、17:00-21:00),将30%的输水任务调整至电价低谷时段(0:00-6:00),单泵站日均节省电费约1500元;二是动态匹配水库水位,如府城泵站配套水库水位控制在89.5-91.5m,减少因水位波动导致的水泵扬程额外损耗,扬程稳定时比波动状态节电5%-8%;三是降低弃水率,通过精准预测用水需求,将河南段泵站群月均弃水量从12万 m^3 降至8万 m^3 ,水资源利用率提升至95%以上。

2. 数字化运维平台

在系统前端部署传感器,持续采集泵站设备运作参数,突破设备状态“黑箱”。数据中台肩负起数据汇聚及预处理的责任,汇集多种来源、形式各异的数据,为后续应用层赋予标准化的数据支持。依照数据中台,能耗分析模块全面挖掘能耗数据特性,找出能耗异常点和高耗能环节,发出动态调度策略,做到精准的能耗管理。故障预测模块依仗设备运作状况创建模型,提前识别故障隐患,产生维修决议,将传统的“被动维修”变成“主动预测性维修”。运用BIM技术实现三维可视,结合IoT技术实现即时感知,在此平台上赋予泵站群运维数字化和智能化能力,从设备层面加强管理节能的基础,促使泵站群运维朝着精准预测和智能化决策方向迈进。

(三) 管理节能

1. 提升泵站设计质量,实现节能效果

要保证大型泵站节能效果得以实现,设计人员首先需根据泵站建设需求,进行科学合理的规划与设计,并对现场进行勘查,以确保设计具备可行性和安全性。结合泵站建设的需求,尽可能选择节能型的设备及材料,为泵站节能效果的发挥奠定基础。

2. 制定完善管理体系,加大管理力度

节能工作并非一蹴而就,需要工作人员持续调整优化才能逐步实现。因此,在泵站运行过程中,要建立一套完整的管理体制,制定严格的管理制度,以保障泵站内所有设备使用安全稳定,从而达到节能的目的。同时,应安排一定的固定时间对相关设备进行维修保养,以保障其工作状态,一旦发现有耗能的现象,应及时进行控制改造,以防止能源过度消耗。

(四) 变频调速与动态调节技术

1. 调速原理与节能效应

变频调速技术基于流体力学相似定律($Q \propto n$)、($H \propto n^2$)、($P \propto n^3$)实现节能:当用水流量需求降低10%时,通过变频装置将水泵转速从1450r/min降至1305r/min(降低10%),此时功率从1100kW降至约800kW(下降27%),单小时节电300kWh。在焦作府城泵站的应用中,变频调速技术使水泵在非高峰时段保持低转速运行,月均节约9万kWh,占总用电量的18%。

2. 智能控制算法

改良人工电场算法通过优化调速响应提升节能稳定性:相比传统PID算法,其调速响应时间从5秒缩短至2秒,且转速调节精度提高至 $\pm 1r/min$ (避免因频繁波动导致的能耗增加)。结合分时电价机制,算法可自动调整运行策略——在低谷时段(22:00-6:00)提高转速、增加输水储备,高峰时

段降低转速、减少用电成本,单泵站年节省电费约5万元。

四、南水北调工程中大型泵站群联合节能优化成效

从安全角度看,应急控制系统中的风险评估机制和事故预防策略是重要支撑。通过前期识别可能存在的风险并制定专门的防控计划,在洪涝灾害或设备故障等突发状况出现时,可以快速启动应急预案,阻止事故进一步蔓延,保护泵站群的关键功能,进而提升整个系统的安全性。就运行效率而言,依靠先进的改良技术改变泵站内部构造,并且采取串并联泵站集群改良优化手段,配合实时自动化调节系统执行精细管理,使得泵站群在各种复杂情况下都能做到资源的最佳调配,大幅度削减能耗和设备损耗。利用多时空尺度剖析框架以及分层递进式的改良策略,泵站群一直处在高效的运作状态之中,其综合性能比传统模式有了明显的改善。节能效益明显改善,通过执行节能改良方案,选用效能较高的设备,而且融合变频调速技术和动态调节技术,泵站群在维持供水需求的情况下,能耗被大幅度削减。智能调度系统和数字化运维平台实现精确的能耗控制,有效地遏制了不必要的能源浪费,大幅度缩减了运营成本。管理模式朝着科学化和高效化方向发展,依靠自动化的数据采集与分析模块,为决策提供可靠的依据。开放的高级应用接口可以灵活扩充,方便整合多种功能组件,从而极大提升了泵站群的总体智能化程度,确保管理策略具备前瞻性和适应性。

五、结束语

综上所述,南水北调工程中的大型泵站群节能优化作为保障国家水安全及可持续发展的重要基础设施,具有重大战略意义。本次研究基于工程实际需求,全面解析泵站群的结构特点,探索其安全高效的运行策略,同时创新性地提出一套协同节能优化方案,以解决现有泵站群高能耗与协同效率低的问题,助力实现“双碳”目标。由于泵站群节能优化涉及多维度复杂的系统问题,在后续研究中需融入最新技术成果,深化理论与应用的结合,推动南水北调工程向绿色低碳方向转型升级,为我国水资源的可持续利用提供强有力的支持。

[参考文献]

- [1]陶绍明.泵站群联合调控对平原洼地涝灾排除效果分析与优化调控策略研究[J].水利科技与经济,2025(5).
- [2]沈昌荣,夏修萍,刘兆峰.大型泵站群自主可控远程集控系统研究与设计[J].江苏水利,2024(2):11-16.
- [3]潘学锋,林雄,祁韬.泵站节能降耗的互供分析[J].城镇供水,2025(2).
- [4]戴勇华.市政泵站与河道泵闸稳定河道水质的联合优化调度[J].净水技术,2024,43(7):167-176.
- [5]于栋,张世杰.泵站高效节能联合调控运行模式分析[J].水泵技术,2024(4).

作者简介:杜军民,1973年,男,副高级工程师,总工程师,河南省南水北调运行保障中心,研究方向:主要从事水利工程建设与运行管理工作。