

基于全生命周期成本的温石汤泵站节能运行策略

杨慧敏, 宋世亮

(山东省水网运行调度中心烟威分中心, 山东 烟台 265600)

【摘要】文章以胶东调水工程关键节点——温石汤泵站为对象, 将全生命周期成本管理理论(Life Cycle Cost, LCC)应用于泵站节能运行策略制定中, 针对泵站电费占比超 63.8%、设备老化加剧等突出问题, 构建“技术-经济”一体化分析框架, 系统剖析能耗结构与 LCC 分布, 明确运行能耗成本占主导(65%)。基于此, 从设备、运行与管理三个层面提出集成化节能策略: 推广高效永磁电机与调速系统数字化改造, 如在浆液循环泵和凝结水泵上的应用所示; 开发基于分时电价与机组组合优化的智能调度系统, 以实现更高效的能源使用; 建立预防性维护与 LCC 信息化管理体系, 以提高设备运行效率和降低维护成本。实践表明, 此项策略实现年节电量 126 万 kW·h, 全生命周期成本现值降低约 530 万元, 为大型泵站实现安全、低碳与经济运行提供了可复制的技术路径与管理范式。

【关键词】温石汤泵站; 全生命周期成本; 泵站节能

【中图分类号】TV675

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-07-0004-04

Energy-Saving Operation Strategy for Wen Shitang Pumping Station Based on Life Cycle Cost

YANG Huimin, SONG Shiliang

(Yanwei Branch, Water Grid Operation and Dispatching Center of Shandong Province, Yantai, Shandong 265600, China)

Abstract: Taking Wen Shitang Pumping Station, a key node of the Water Diversion Project to Jiaodong Area, as the research object, this paper applies the Life Cycle Cost (LCC) theory to formulate energy-saving operation strategies for the pumping station. A techno-economic integrated analytical framework is established to address prominent problems including electricity charges accounting for over 63.8% of total costs and worsening equipment aging. The paper systematically analyzes energy consumption structure and LCC distribution, and identifies that operational energy cost dominates with a proportion of 65%. On this basis, integrated energy-saving strategies are proposed from equipment, operation and management dimensions: promoting digital transformation with high-efficiency permanent magnet motors and speed regulation systems, as demonstrated by applications in slurry circulating pumps and condensate pumps; developing an intelligent dispatching system based on time-of-use electricity price and unit combination optimization to achieve higher energy efficiency; establishing a preventive maintenance and LCC information management system to improve equipment operational efficiency and reduce maintenance costs. Practices show that the proposed strategies achieve an annual electricity saving of 1.26 million kW·h and reduce the present value of life cycle cost by approximately CNY 5.3 million, offering a replicable technical route and management paradigm for safe, low-carbon and economical operation of large-scale pumping stations.

Key words: Wen Shitang Pumping Station; Life cycle cost; Pumping station energy saving

温石汤泵站作为胶东调水工程梯级泵站系统中的关键一环——第五级泵站, 承担着跨流域水资源调配的重要使命。此泵站设计流量为 12.6 m³/s, 扬程 29 m, 总装机容量 7 100 kW, 配备 10 台机组(8 台定速电机和 2 台调速电机), 年运

行时间超过 6 000 h。在“双碳”战略背景下, 泵站运行面临两大挑战: 一是能源成本持续上涨, 电费支出占运行总成本比重已超过 60%; 二是设备

收稿日期: 2025-11-11

作者简介: 杨慧敏(1987—), 女, 工程师

老化加剧,维护成本攀升,故障风险增加。问题根源在于未能从系统全局和全生命周期视角开展能效管理与成本控制^[1]。此文引入全生命周期成本理论,通过建立“技术-经济”一体化分析框架,深入研究温石汤泵站的节能运行策略,旨在实现经济效益、社会效益与环境效益的协同提升,为我国大型泵站的现代化管理提供创新思路和实践路径。

1 全生命周期成本与泵站运行管理

全生命周期成本(LCC)管理是一种先进的工程管理理念,从项目或设备的全生命周期视角出发,统筹考虑规划、设计、制造、建设、运行、维护、更新直至报废回收等各阶段产生的全部成本,通过科学分析和优化决策,实现全生命周期总成本最小化的目标。

1.1 LCC 基本模型与构成要素

泵站的全生命周期成本主要包括初始投资成本、运行能耗成本、维护成本、故障停机损失成本及退役处置成本等。其基本数学模型可表示为:

$$LCC=C_I+C_O+C_M+C_F+C_D$$

式中: C_I 为初始投资, C_O 为运行能耗成本, C_M 为维护成本, C_F 为故障损失成本, C_D 为退役处置成本。

在温石汤泵站这类高能耗项目中,运行能耗成本 C_O 占比通常超过 63.8%, 是 LCC 控制的关键,任何有效的节能措施都将对全生命周期成本产生决定性影响。

1.2 LCC 分析与节能运行内在联系

LCC 分析与节能运行之间存在着深刻的内在联系,体现在技术经济决策的各个方面。在泵站运行管理中,节能已不再仅仅是技术层面的问题,更是关乎经济效益的核心决策^[2]。在设备选型阶段,高效电机与传统电机相比,虽然采购价格高出 20%~30%, 但其更高的运行效率可在全生命周期内通过节约电费收回增量投资并产生净收益。温石汤泵站此前应用的内反馈高频斩波调速装置正是基于 LCC 理念进行的技术选择。虽然该装置比传统液力耦合器价格高约 15%,但其卓越的调速性能和节能效果使投资回收期缩短至 2.3 年, 且在 10 年生命周期内可节约 LCC 约 25%。此外,LCC 分析为运行策略优化提供了量

化依据。通过建立不同运行工况下的能耗模型与成本模型, 可以精确计算出最优的机组组合、运行参数及维护周期,实现技术可行性与经济合理性的统一。

2 温石汤泵站运行现状与 LCC 分析

2.1 运行模式与能耗结构

温石汤泵站采用 8 台定速电机与 2 台调速电机组合运行的混合模式,旨在兼顾运行效率与调节灵活性,在实际运行中却未能充分实现。目前,在响应调度中心的流量调节指令时,主要依赖调节内反馈调速机组的转速来实现流量控制,定速机组则长期处于固定运行状态,导致系统整体能耗偏高,且因调速电机频繁处于非高效区运行造成电能浪费。同时,调速机组在调节过程中承受持续的电气与机械应力,加速了关键部件的老化,增加了设备故障风险,影响了泵站的整体运行可靠性与经济性。相比之下,2 台配备内反馈高频斩波调速装置的调速机组展现出了显著的节能优势,通过为期 6 个月的跟踪监测,获得了调速电机在不同转速下的详细运行数据,见表 1。数据分析表明, 调速机组在 50%~100%转速范围内连续调节时,节电效果极为显著:当占空比从 100%降至 50%时, 有功功率从 570 kW 降至 160 kW,节电率高达 71.9%。这一结果充分证明了调速运行在泵站节能中的巨大潜力, 也揭示了优化运行模式的迫切性和重要性。

表 1 调速电机在不同转速下的能耗与节电率监测数据

占空比/%	转速/(r·min ⁻¹)	有功功率/kW	功率因数	电机效率/%	节电功率/kW	节电率/%
100	748	570	0.89	95.2	—	—
90	700	450	0.87	94.5	120	21.1
80	660	330	0.85	93.8	240	42.1
70	610	270	0.83	93.0	300	52.6
60	580	198	0.81	92.1	372	65.3
50	530	160	0.78	90.5	410	71.9

2.2 基于 LCC 的成本分布识别

为了准确掌握温石汤泵站的成本结构特征, 对近 5 年的财务数据、运行记录和维护档案进行了系统梳理和分析, 并采用 LCC 管理方法对各项成本进行了归集和分配。分析结果显示,温石汤泵站的 LCC 构成具有典型的大型泵站特征:运行能耗成本占据绝对主导地位,达到总成本的

65%;初始投资成本占20%;维护维修成本占10%;故障停机损失成本占4%;退役处置成本占1%。进一步对运行能耗成本进行分解发现,主泵电机电耗占比高达82%,变压器及供电系统损耗占9%,辅助系统(包括冷却、通风、照明等)电耗占6%,其他用电占3%。这一分布指明了节能工作的重点方向为主泵电机能效的提升,这是降低运行成本的关键。故障统计分析进一步证实,约35%的电气故障和28%的机械故障与频繁启停直接相关。基于LCC的成本分布识别不仅揭示了现有运行模式的弊端,还为后续节能策略的制定提供了明确方向和数据支撑。

3 基于LCC的节能运行策略设计

3.1 设备层:高效设备选型与技术改造

设备层策略的核心是通过采用高效节能技术和产品,从根本上提升泵站的能源利用效率。针对温石汤泵站的具体情况提出3个方面的技术改造方案:一是在设备更新和新增时优先选用高效永磁同步电机^[3]。与现有Y系列异步电机相比,永磁同步电机在75%~100%负载范围内的效率可提高3%~5%,且在低负载工况下的效率优势更为明显。虽然采购价格比同容量异步电机高20%~25%,但基于LCC分析,在10年生命周期内,效率提升带来的电费节约足以覆盖增量投资并产生约15%的净收益。二是对现有的内反馈斩波调速系统实施数字化升级。具体措施包括:采用高频PWM控制器,将开关频率由5 kHz提升至20 kHz,从而显著改善电流波形,并降低谐波损耗;引入自适应模糊PID控制算法,使系统能够依据运行工况自动调整控制参数,进而提升动态响应特性及稳态精度;增设转子电流在线监测装置,实时监测电机负载变化,以实现按需功率输出。三是构建完善的能源计量与监测系统。在泵站各关键节点安装智能电表、流量计、压力传感器和温度传感器,建立覆盖全面的数据采集网络,为精细化管理提供实时、准确的数据支撑。特别构建泵站能效监测平台,实时计算并展示机组效率、系统能效比、单位水量电耗等核心指标,为运行优化提供直观参考。

3.2 运行层:智能调度与负荷优化

运行层策略的重点是通过优化调度方式和

运行参数,挖掘现有设备的节能潜力。温石汤泵站开发了基于多目标优化的智能调度系统,集成了3个核心功能模块:一是分时电价优化模块。结合当地电网的分时电价政策(峰时段:8:00~11:00,18:00~23:00,电价1.2元/kW·h;平时段:7:00~8:00,11:00~18:00,电价0.8元/kW·h;谷时段:23:00~次日7:00,电价0.4元/kW·h),以电费最小化为目标,自动生成最优的运行时间表。具体策略是在电价谷段适当提高运行负荷,利用前池的调节能力储备水量;在电价峰段则尽量减少非必要运行,仅维持基本流量需求。测算表明,仅此一项措施即可使泵站年度电费支出降低12%~15%。二是机组组合优化模块。采用改进的遗传算法,综合考虑流量需求、设备效率特性、运行约束条件等多个因素,实时求解最优的机组启停组合和负荷分配方案。与传统的平均分配负荷或按序启停的方式相比,优化调度可使系统整体效率提高2%~3%^[4-5]。三是安全约束管理模块。针对原有斩波系统可能引发的谐振问题,在控制程序中设定了“转速禁区”,当运行参数接近谐振区域时自动调整转速设定值,确保系统安全稳定运行。同时,建立了运行工况评价体系,对每次调度决策的实际效果进行后评估,不断优化调度规则和参数,形成持续改进的闭环管理。

3.3 管理层:预防性维护与LCC信息化

管理层策略旨在通过创新管理模式和信息化手段,巩固和扩大技术与运行层面的节能成果。提出了基于状态的预防性维护体系,通过安装在关键设备上的振动传感器、温度传感器、电流传感器等监测设备,实时采集设备运行状态数据,利用大数据分析和机器学习算法,准确判断设备健康状态,预测潜在故障,科学制定维护计划^[6]。与传统的定期维修相比,这种维护方式可将非计划停机时间减少40%以上,维护成本降低15%~20%,同时避免过度维护造成的资源浪费。在管理支撑方面,通过集成设备台账、维护记录、能耗与成本等多源数据,能够自动生成分析报表,清晰展示成本构成与变化趋势,并借助专门的节能效益计算模块,准确量化各项节能措施的经济效益,为决策提供可靠依据。此外,建立与全生命周期成本绩效挂钩的考核激励机制,将节能目标、设备可靠性与维护成本等关键指标纳入部

门与个人绩效评价,有助于激发全员参与节能的主动性,推动形成可持续的长效管理机制。

4 结 语

将全生命周期成本理论系统应用于温石汤泵站的节能运行策略设计中,通过深入剖析成本结构与运行特性,提出了涵盖设备技术改造、运行调度优化与管理体系升级的集成化节能方案。实践表明,该策略不仅显著提升了泵站的能源利用效率——实现总能耗降低 19.2%、年节电量 126 万 kW·h,更在全生命周期维度上体现出突出的经济性,成本现值降低约 530 万元,投资回收期仅 3.8 年。这一成果验证了 LCC 理论在大型泵站能效管理中的科学性与实用性,为泵站低碳化、精细化与智能化转型提供了可复制的路径。未来,全生命周期成本管理必将在更多工程中发

挥核心指导作用,为我国“双碳”目标下的水利行业可持续发展注入持久动力。

参考文献

- [1] 朱光艳.企业全生命周期成本管理优化策略研究[J].天津经济,2025(9):92-94.
- [2] 李明瑶.基于全生命周期理论的工程造价成本控制策略[J].建材发展导向,2025,23(17):61-63.
- [3] 李金生,李金芳,王越.建筑工程中基于 BIM 技术的全生命周期成本控制研究[J].居业,2025(8):153-155.
- [4] 赵斌.建筑工程造价与项目全生命周期成本的协同管理方法[J].陶瓷,2025(8):215-217.
- [5] 赵廷荣.基于全生命周期成本的绿色建筑动态成本效益评估方法[J].绿色建筑与智能建筑,2025(8):30-32.
- [6] 李婷.温石汤泵站内反馈高频斩波调速系统闭环控制原理[J].山东工业技术,2017(9):279.

(责任编辑 张玉燕)

(上接第 3 页)长江水水权交易,促进了水资源节约集约高效利用。

2.5 “一网融合”,注重效益发挥

以水网调度管理体制机制改革为契机,山东省加快构建完善与乡村振兴、内河航运、文化旅游、产业经济等行业融合发展的多功能综合性水网。高效完成年度引江、引黄任务,统筹用好雨洪资源、非常规水等多种水源。建立重点河流生态流量保障应急响应机制,29 条省级重点河流与 18 条市级重点河流实现了水资源统一调度全覆盖。2025 年以来累计向河湖湿地实施生态补水 9.82 亿 m³,助力大汶河戴村坝重要控制断面连续 4 年实现不断流,京杭大运河连续 4 年全线贯通,全力保障了生态用水需求。通过深入实施“水网+”行动,带动沿线产业升级、功能提升和水美乡村建设,利用天然河道改造内河航道通航里程 1 117 km,169 km 小清河实现全线复航,累计建成省级以上水利风景区 239 个,打造效益河湖样板 25 个,有效增强了区域水利发展内生动力。

3 结论与展望

山东省以制度创新、组织创新、数字创新和市场创新为突破,坚持“顶层设计+系统推进+闭环管理”,统筹水资源、水环境、水生态治理,构建了“方案编制+平台支撑+监督执行+生态融合+技

术标准化”的改革模式,为省级水网建设提供了“可操作、可落地、可推广”的经验做法和路径模板范式,有力促进国家级、省级、市县级水网有效衔接,提升水网综合效能。今后山东省将进一步完善“一轴三环、七纵九横、两湖多库”现代水网总体布局,着力提升水资源优化配置能力、水旱灾害防御能力和河湖生态保护治理能力,持续深化数字赋能与机制创新,推动省级水网与国家骨干水网、市县水网高效协同,实现水资源精准调度、集约节约利用,为保障区域水安全、服务高质量发展提供坚实支撑,为国家水网建设贡献更多“山东智慧”和“山东方案”。

参考文献

- [1] 钮新强.国家水网规划建设体系及关键问题探讨[J].长江技术经济,2023,7(5):24-30.
- [2] 吴文庆.加快构建国家水网 推动水利高质量发展[J].中国水利,2024(24):7-9.
- [3] 钮新强,吴永妍,王磊,等.高质量建设国家水网工程的思考与建议[J].中国工程科学,2024,26(6):108-119.
- [4] 黄红光.纵深推进省级水网先导区建设奋力谱写中国式现代化山东实践水利篇章[J].中国水利,2023(24):70.
- [5] 水利部.水利部关于加快推进省级水网建设的指导意见[J].中华人民共和国水利部公报,2022(2):18-21.
- [6] 山东省人民政府.山东省人民政府关于加强省级水网统一调度管理的实施意见[J].山东省人民政府公报,2025(15):2-6.

(责任编辑 张玉燕)