

泵站能耗优化与高效运行策略研究

高 帅

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司 天津 300200

摘 要：文章聚焦泵站能耗优化与高效运行策略。首先阐述泵站能耗与运行特性基础理论，分析设备、运行控制、管理与环境等关键影响因素及多因素耦合作用。接着介绍设备优化、运行控制优化、能量回收与节能改造等核心技术。然后构建分场景运行、全生命周期运行管理及智能化管理平台等高效运行策略体系。通过多维度研究，旨在为泵站降低能耗、提升运行效率提供全面且可行的方案，推动泵站向高效、节能、智能化方向发展。

关键词：泵站能耗；优化调度；智能控制

引言：泵站作为水利工程与工业生产的关键枢纽，在供水排水、灌溉、工业循环等领域作用重大。然而，当前泵站能耗问题突出，不仅增加运行成本，还造成能源浪费。泵站能耗受设备、运行控制、管理与环境等多因素影响，且各因素相互耦合，使能耗优化难度增大。在此背景下，深入研究泵站能耗优化与高效运行策略，挖掘节能潜力，提升运行效率，对实现能源节约、保障泵站稳定运行及推动相关领域可持续发展具有重要意义。

1 泵站能耗与运行特性基础理论

1.1 核心概念界定

泵站作为水利工程与工业生产中的关键水利枢纽，核心功能是通过动力设备实现流体的输送、提升与加压，广泛应用于供水排水、农田灌溉、工业循环等领域。泵站能耗指泵站在单位时间或完成单位输送任务时，消耗的电能及其他形式能源的总量，是衡量泵站运行效率的核心指标。运行特性则是泵站在不同工况、环境条件下，表现出的流量、扬程、功率、效率等参数的变化规律及相互作用关系^[1]。核心概念还包括泵站效率，即有效输出能量与输入能量的比值，以及工况点，指泵体实际运行时流量与扬程的匹配状态，其合理与否直接影响能耗水平。明确这些核心概念，是开展能耗分析、优化设计与高效运行管理的理论基础。

1.2 泵站能耗核心机理

泵站能耗核心机理围绕能量传递与损耗展开，本质是电能通过动力设备转化为流体机械能，同时伴随各类能量损耗的过程。电能输入后，首先通过电机转化为机械能，此过程中存在铜损、铁损、机械摩擦损耗等，电机效率直接决定这一阶段的能量转化效果。随后，机械能通过泵体传递给流体，使流体获得动能与势能，实现输送目标，而泵体运行中会产生水力损耗、容积损耗和机械损耗。水力损耗源于流体在泵内流动时的沿程阻力

与局部阻力，容积损耗由泵体密封间隙的流体泄漏导致，机械损耗则来自叶轮与泵壳的摩擦等。另外，管路系统的阻力损耗、阀门节流损耗等也会间接增加泵站总能耗。各类损耗的叠加效应决定了泵站整体能耗水平，其产生机理与设备性能、工况匹配度密切相关，是精准管控能耗的关键切入点。

1.3 泵站运行特性分析

泵站运行特性主要通过流量、扬程、轴功率、效率四大核心参数的动态关系体现，且受设备性能、运行工况、环境条件等多重因素影响。在额定工况下，泵站效率达到峰值，能耗最优；当偏离额定工况时，参数呈现显著非线性变化，效率下降，能耗攀升。流量与扬程呈负相关关系，扬程升高时流量减小，轴功率则随流量增加而增大，需通过工况调节实现参数平衡。不同运行模式下特性差异明显，如恒速运行时参数相对稳定，但适应性差；变速运行可灵活调整工况点，更贴合实际需求。泵站运行特性还具有时效性，设备老化会导致参数漂移，效率逐年下降，能耗逐步上升。通过系统分析运行特性，可明确最优工况区间，识别特性异常背后的能耗问题，为工况优化、设备维护及节能改造提供数据支撑。

2 泵站能耗关键影响因素分析

2.1 设备因素

设备因素是影响泵站能耗的核心硬件基础，直接决定能耗基准水平。泵体与电机的性能参数是关键，泵的比转数、高效区范围与实际工况的匹配度至关重要，高效区范围窄的泵在偏离额定工况时能耗激增，而节能型泵体可通过优化流道设计降低水力损耗。电机效率等级直接影响能量转化效率，高效电机比普通电机损耗降低10%-20%，且启动性能与负载适应性更优。设备老化程度显著影响能耗，叶轮磨损、密封件损坏会加剧容积损耗与水力损耗，轴承润滑不良、电机绝缘老化会增加机

械损耗与电气损耗。辅助设备性能也不可忽视,如变速装置的调节精度、阀门的流通能力等,劣质辅助设备会产生额外能耗。设备选型不合理、搭配不当,如大泵小流量运行,会导致能耗浪费,因此设备的选型、维护与更新是能耗管控的重要环节^[2]。

2.2 运行控制因素

运行控制因素通过调节工况状态,直接影响泵站实时能耗水平,是能耗优化的核心可控环节。工况调节方式决定能耗效率,恒速运行通过阀门节流调节流量,会产生大量节流损耗,而变频调速、变角调节等方式可使泵体始终运行在高效区,显著降低能耗。运行参数设定合理性至关重要,流量、扬程的设定值与实际需求偏差过大,会导致无效能耗增加,如过度加压、流量冗余等。启停控制策略也影响能耗,频繁启停会产生冲击电流,增加额外损耗,且缩短设备寿命间接提升长期能耗。运行人员的操作水平直接关联控制效果,误操作、调节不及时会导致工况偏离最优区间,而自动化控制系统可实现参数实时监测与精准调节,避免人为误差。科学的运行控制可在不改变设备硬件的前提下,降低10%-15%的能耗。

2.3 管理与环境因素

管理与环境因素虽不直接参与能量转化,但通过间接作用影响泵站能耗水平,且易被忽视。管理因素方面,日常维护制度不完善会加速设备老化,如未定期清理泵体流道、检查密封性能,会导致损耗逐年增加;能耗监测体系缺失,无法精准定位能耗异常点,难以开展针对性优化。人员管理不到位,运行人员专业能力不足,无法熟练操作自动化设备、判断最优工况,会造成能耗浪费。环境因素方面,介质特性影响能耗,流体粘度、含沙量过高会增加泵内阻力与磨损,提升能耗;环境温度、湿度变化会影响电机散热性能,导致电机效率波动,高温环境下电机损耗可增加5%-8%。电网电压稳定性也会影响设备运行效率,电压波动过大易造成电机过载,增加能耗与设备故障风险。

2.4 多因素耦合作用分析

泵站能耗并非单一因素作用的结果,而是设备、运行控制、管理与环境多因素相互耦合、协同影响的产物,其耦合效应往往大于单一因素的独立影响。设备老化与运行控制不当存在正向耦合,老化设备的高效区变窄,若调节策略不及时优化,会导致工况偏离程度加剧,能耗损耗呈叠加增长。环境因素与设备因素耦合明显,高含沙流体环境会加速叶轮磨损,同时降低泵体水力效率,若维护管理未针对性加强,会形成“环境劣化-设备损耗-

能耗激增”的恶性循环。运行控制与管理因素耦合体现在,自动化控制系统需依托完善的监测管理体系提供数据支撑,否则调节精度不足,而科学的管理策略可保障控制策略有效落地。多因素耦合使能耗影响机制更复杂,仅针对单一因素优化效果有限,需构建多因素协同管控体系,才能实现能耗精准优化。

3 泵站能耗优化核心技术

3.1 设备优化技术

设备优化技术聚焦泵体、电机及辅助设备的性能提升与结构改进,是降低泵站能耗的核心硬件支撑技术。泵体优化方面,采用流体力学仿真技术优化流道结构,减少流道内涡流、冲击等水力损失,同时改进叶轮设计,扩大高效区范围,使泵体在宽工况范围内保持较高效率^[3]。针对老化泵体,开展节能改造而非整体更换,如叶轮修复与再制造、密封件升级,可恢复设备性能,降低能耗。电机优化以高效节能电机替代传统电机为核心,搭配电机节能控制器,减少铜损、铁损,同时根据泵站负载特性,选用变频电机、永磁同步电机等专用电机,提升能量转化效率。辅助设备优化包括阀门、管路系统改造,采用低阻力阀门、优化管路布局,减少节流损耗与沿程阻力,通过设备整体优化,可使泵站基础能耗降低15%-20%。

3.2 运行控制优化技术

泵站作为能源消耗的重要环节,其能耗优化与高效运行不仅是提升能源利用效率、降低运行成本的关键所在,更是推动行业绿色可持续发展的必然要求。本文立足基础理论,深入剖析影响泵站能耗的诸多因素,如设备性能、运行工况、控制策略等,进而提出一系列核心优化技术。通过设备层面的优化,选用高效节能设备,提升单机效率;在控制方面,采用智能调控算法,实现精准运行;同时结合改造措施,对老旧泵站进行升级焕新。另外,构建高效运行策略体系,涵盖分场景的差异化运行策略、全生命周期的精细化管理以及智能化平台的实时监测与决策支持。多管齐下,全方位实现泵站能耗的精准管控与高效运行。展望未来,随着科技的不断进步,新的理念、技术和方法将不断涌现。我们需持续探索创新,紧跟时代步伐,不断完善泵站能耗优化与高效运行的策略体系,推动其迈向更高水平,从而为水利、市政等相关领域的发展提供更为坚实、强有力的支撑,助力行业实现高质量发展的目标。

3.3 能量回收与节能改造技术

能量回收与节能改造技术聚焦于回收利用冗余能量、改造高能耗环节,进一步挖掘泵站节能潜力。能量回收技术主要针对泵站冗余压能,采用水力涡轮机、能量回

收装置,将流体输送过程中多余的压能转化为电能或机械能,反馈至泵站电网,实现能量循环利用,在高压供水、循环水系统中回收率可达10%~15%。节能改造技术涵盖管路、散热、密封等多个环节,管路改造采用保温材料减少热能损耗,更换耐腐蚀、低阻力管材降低沿程阻力;电机散热系统改造优化散热结构,提升高温环境下运行效率。针对老旧泵站开展整体节能改造,整合设备更新、控制优化、能量回收技术,重构泵站运行体系,相较于传统改造模式,整体能耗可降低25%~30%,同时延长设备使用寿命。

4 泵站高效运行策略体系构建

4.1 分场景运行策略

分场景运行策略基于泵站不同运行场景的需求差异,构建针对性的运行方案,实现全场景能耗最优。按工况负荷可分为满负荷、部分负荷、低负荷场景,满负荷场景采用泵组并联优化策略,合理分配各泵负载,维持整体高效运行;部分负荷场景启用变频调速技术,降低泵体转速,避免低效运行;低负荷场景采用小流量专用泵替代大泵,减少能量浪费。按应用领域可分为供水、灌溉、工业循环场景,供水场景需保障水压稳定,采用“恒压变频+分时调节”策略,匹配用水高峰低谷需求;灌溉场景结合作物需水规律与气象数据,动态调整流量与运行时长;工业循环场景针对介质特性,优化工况参数,减少设备磨损与能耗。分场景策略通过精准适配不同场景需求,避免单一策略的局限性,实现各场景下能耗与运行效益的平衡。

4.2 全生命周期运行管理策略

全生命周期运行管理策略贯穿泵站规划设计、建设安装、运行维护、退役更新全阶段,构建闭环管理体系,实现长期能耗优化。规划设计阶段,基于实际需求精准选型设备,优化泵站布局与工艺流程,奠定节能基础;建设安装阶段,严控施工质量,减少设备安装偏差导致的额外损耗。运行维护阶段,建立常态化监测与维护制度,定期开展设备巡检、流道清理、参数校准,及时发现并处理能耗异常点;采用状态检修替代定期检修,根据设备运行状态精准安排维护,降低维护成本与停机损耗。退役更新阶段,科学评估设备能耗与性能,制定合理的更新计

划,优先替换高能耗老旧设备,同步整合节能技术^[4]。全生命周期管理打破各阶段割裂状态,通过各环节协同管控,实现泵站长期高效低耗运行,延长使用寿命的同时降低全周期能耗成本。

4.3 智能化管理平台构建

智能化管理平台是实现泵站高效运行的核心支撑,通过整合数据监测、智能分析、精准控制、远程管理功能,构建一体化运行管理体系。平台以物联网技术为基础,部署流量、扬程、功率、能耗、温度等多维度传感器,实现运行参数实时采集与传输,保障数据全面性与准确性。依托大数据与人工智能算法,构建能耗分析模型、设备故障预警模型,精准识别能耗异常原因,提前预判设备故障,为运行优化与维护决策提供数据支撑。平台集成智能控制模块,实现泵组启停、工况调节的自动化与远程控制,减少人为干预,提升调节精度。搭建可视化管理界面,实时展示泵站运行状态、能耗数据、优化建议,支持多泵站集中管理,实现能耗动态监控、策略精准下达、效果实时评估,推动泵站运行管理向智能化、精细化转型。

结束语

泵站能耗优化与高效运行是提升能源利用效率、降低运行成本的关键。本文从基础理论出发,剖析能耗影响因素,提出核心优化技术,构建高效运行策略体系。通过设备、控制、改造等多方面优化,以及分场景、全生命周期管理和智能化平台建设,实现泵站能耗精准管控与高效运行。未来,随着技术不断进步,需持续探索创新,完善策略体系,推动泵站能耗优化与高效运行迈向更高水平,为相关领域发展提供更强有力的支撑。

参考文献

- [1]陈家健,严良文,陈善超.移动泵站管理系统设计与开发[J].计算机应用与软件,2024,41(7):13-19.
- [2]陈连映,李博飞,袁雯,等.梯级泵站能耗影响分析及节能降耗策略研究[J].甘肃水利水电技术,2024,60(11):21-25,37.
- [3]吴巍,王高旭,吴永祥,等.蒙开个地区河库连通工程的泵站运行方式研究[J].水利水运工程学报,2024(2):55-61.
- [4]马韧韬,高普新.引调水工程泵站节能评估要点分析[J].水电站机电技术,2020(7):31-32.