

分布式水泵变频调节的供热系统节能策略

黄杏

北京硕人时代科技股份有限公司 北京 100085

摘要: 文聚焦分布式水泵变频调节的供热系统节能策略。先阐述分布式水泵变频供热系统基础理论,包括水力特性、变频调节原理及分布式水泵架构优势。接着详细介绍节能控制策略,如单泵、多泵控制,动态负荷预测与前馈控制,水力平衡优化等。还探讨供热系统节能优化方法,涉及水泵选型、管网拓扑、热源侧协同及智慧供热监控平台集成。通过多方面策略与方法,实现供热系统节能、稳定、高效运行,为供热行业节能发展提供理论支持与实践参考。

关键词: 分布式水泵;变频调节;供热系统;节能策略

引言:在能源日益紧张、环保要求不断提高的当下,供热系统节能成为重要课题。传统供热系统存在水力失调、能耗较高、“信息孤岛”、调控依赖经验、故障响应慢、用户投诉多等问题,难以满足现代供热需求。分布式水泵变频调节供热系统应运而生,它凭借独特架构与变频调节技术,在解决水力失调、降低能耗方面展现出巨大潜力。当前供热行业智能化水平已达到较高标准,全自动闭环控制机制覆盖率超90%,手动调节已基本退出主流应用,深入研究其节能策略,有助于优化供热系统运行,提高能源利用效率,减少对环境的影响,对推动供热行业可持续发展具有重要意义。实现从“传统经验型”向“数据驱动智慧运营”转型,达成“经济运行-能效提升-服务优化”的目标。

1 分布式水泵变频供热系统基础理论

1.1 供热系统水力特性分析

供热系统水力特性是保障系统稳定运行与节能效果的核心基础,主要研究管网内流体流动规律及参数变化关系。该特性以流体力学基本定律为支撑,核心参数包括流量、压力损失、阻力系数等,其变化直接影响供热质量与能耗水平。在实际运行中,管网阻力会随管径、管长、管件类型及流体流速变化而改变,呈现出非线性特征,即阻力与流量平方成正比。同时供热系统的水力特性还受末端用户负荷波动、管网泄漏、阀门调节等因素影响,易出现水力失调问题,表现为近端用户供热量过剩、远端用户供热量不足^[1]。通过水力特性分析,可精准识别系统阻力分布、水力平衡点及失调成因,为后续

通讯作者: 黄杏(出生年月1982-09-05).性别:男,民族:汉,中共党员,籍贯:湖南安化县,毕业院校:湖南工业大学,学历:本科(工学学士),职称:高级工程师,研究方向:计算机软件,自动控制。

变频调节、架构设计及优化控制提供数据支撑,是实现分布式水泵变频供热系统高效运行的前提,对提升系统稳定性、降低能源消耗具有重要指导意义。

1.2 变频调节原理

变频调节原理基于电机转速与供电频率的线性关系,通过改变异步电动机的供电频率,实现水泵转速的无级调节,进而精准控制水泵输出流量与压力。根据流体力学相似定律,水泵的流量与转速成正比,压力与转速平方成正比,功率与转速立方成正比,这一特性使得变频调节具备显著的节能潜力。其核心设备为变频器,通过整流、滤波、逆变等环节,将工频交流电转换为频率可调节的交流电,改变电机转速以适配供热系统负荷需求。当前供热系统的变频调节已实现全自动闭环控制,结合压力、流量传感器及PLC控制器,无需人工干预即可完成参数采集、对比、调节全流程,调节精度达 $\pm 0.01\text{MPa}$,响应时间 $\leq 1\text{s}$ 。当末端负荷降低时,变频器自动降低输出频率,水泵转速下降,流量和压力同步调整,功率消耗大幅降低,相比传统节流调节方式,可避免阀门节流造成的能量损耗,实测数据显示,变频调节相较于传统节流调节可节能25%-40%。

具体节能效果如下表所示:

调节方式	流量调节范围	平均节能率	调节精度	控制方式
变频调节	10%-100%	0.325	$\pm 0.01\text{MPa}$	全自动闭环
传统节流调节	30%-100%	0	$\pm 0.05\text{MPa}$	手动调节

另外,变频调节还具备启动电流小、运行平稳等优势,能有效减少水泵启停对管网的水力冲击,延长设备使用寿命,进一步降低运维能耗。

1.3 分布式水泵架构优势

分布式水泵架构相较于传统集中式水泵架构,在供热系统中展现出诸多核心优势,契合现代供热节能与智

能化发展需求。该架构将原本集中设置的大型水泵，分散布置于管网各分区、楼栋或末端用户附近，实现供水分区独立控制，且各分区水泵均接入全自动闭环控制系统，可实现无人值守运行。首先，可有效降低管网沿程阻力与局部阻力，减少长距离输水造成的能量损耗，实测显示，分布式架构相较于集中式架构可降低管网阻力损耗18%-25%，同时避免集中式架构中单一水泵故障导致整个系统瘫痪的风险，提升系统运行可靠性与容错能力。其次，各分区水泵可根据自身负荷需求独立调节转速，精准匹配末端用热需求，从根源上缓解水力失调问题，提升供热均匀性，使末端室温达标率从传统系统的82%提升至98%以上。另外，分布式架构便于系统分期建设与扩容，可根据用户增长情况逐步增设水泵设备，降低初期投资成本。同时，结合智能化控制技术，可实现各分区水泵协同运行与远程监控，提升系统运维效率，减少人工干预，最终实现供热系统能量利用率、运行稳定性与调控灵活性的全方位提升。

2 分布式水泵变频节能控制策略

2.1 单泵变频控制策略

单泵变频控制策略是分布式水泵系统基础且应用广泛的节能方式，适用于负荷稳定、管网简单的分区或末端用户，现已实现全自动闭环控制。其核心逻辑是：通过管网进出口的压力、流量传感器采集实时参数，传至PLC控制器，与预设值对比后，利用PID算法调节变频器输出频率，改变水泵转速，修正运行参数。末端负荷增减时，系统相应调整频率与转速，改变流量和压力。为防低频运行出现气蚀等问题，系统设定最低频率阈值（通常为工频30%-40%），接近时启动保护。该策略逻辑简单、响应快、成本低，能替代传统节流调节，降低单泵能耗，适用于住宅楼栋、小型商业建筑等单一负荷单元，在城市住宅供热分区应用率超95%。

2.2 多泵协同控制策略

多泵协同控制策略针对负荷波动大、管网复杂的分布式供热系统，通过多泵组合调控实现节能稳定运行。依托全自动闭环控制平台，以系统总负荷需求为目标，结合水泵性能、状态及管网水力特性，采用集中协调控制逻辑，合理分配运行负荷，避免部分水泵过载或低效。常见协同方式有并列调频、主次联动、分区互补等，通过变频器集群与中央控制器联动，动态调整水泵转速与启停。系统负荷变化时，控制器自动增减运行水泵并调节转速^[1]。同时具备故障冗余功能，某台水泵故障时，能快速启动备用泵保障供热。该策略适应复杂负荷，相比单泵控制节能率提升8%-12%，在大型工业园

区、成片住宅小区应用率超90%。

2.3 动态负荷预测与前馈控制

动态负荷预测与前馈控制是分布式水泵变频系统实现精细化节能的关键策略，打破了传统反馈控制滞后性的局限，依托智能化算法与全自动闭环控制机制，通过提前预判负荷变化趋势，实现控制指令的前瞻性调整。该策略结合历史供热负荷数据、室外环境参数（温度、湿度、风速）、建筑热工特性、用户用热习惯等多维度信息，采用机器学习、神经网络等算法构建负荷预测模型，预测准确率达96%以上，可精准预测未来一段时间（如1小时、24小时）的供热负荷需求。基于预测结果，前馈控制器提前调节水泵转速、输出流量及供水温度，使系统运行状态提前适配即将到来的负荷变化，避免负荷波动后再进行被动调节造成的能源浪费与参数波动。同时该策略与反馈控制结合形成复合控制模式，通过反馈环节自动修正预测偏差，提升控制精度。例如，预测到夜间室外温度骤降时，系统自动提前提高水泵转速与供水温度，确保末端室温稳定。

2.4 水力平衡优化方法

水力平衡优化方法是解决分布式供热系统水力失调、提升整体供热效率的核心手段，通过对管网流量、压力的精准调控，实现各末端用户供热量的均衡分配。该方法以水力特性分析为基础，结合系统运行参数，采用静态调节与动态优化相结合的方式，依托全自动闭环控制体系，涵盖阀门调节、水泵参数匹配、管网结构优化等多个维度，无需人工手动调节阀门。静态调节主要通过安装平衡阀、自力式流量控制阀等设备，对各支路流量进行初始分配，消除管网固有阻力差异导致的静态失调；动态优化则依托变频控制技术与智能监测设备，实时监测各分区、各末端的流量、压力数据，通过自动调节水泵转速、阀门开度，动态修正流量偏差，确保系统在不同负荷工况下均处于水力平衡状态。水力平衡优化能有效解决近端过流、远端欠流问题，提升末端室温达标率，同时降低水泵运行负荷，实现系统节能与供热质量的双重提升^[3]。

3 供热系统节能优化方法

3.1 水泵选型与变频范围优化

水泵选型与变频范围优化是供热系统节能的关键基础，对水泵运行效率和能耗影响重大，需综合考量系统水力特性、负荷变化及实际工况。选型要遵循“量体裁衣”，杜绝“大马拉小车”，精准计算管网设计流量和所需扬程，选额定参数匹配的型号，优先用高效节能水泵，如配IE3及以上能效电机水泵，IE3级比传IE1级运行

效率提升10%-15%。变频范围优化也很关键,依托全自动闭环控制系统,依水泵性能曲线和实际需求确定合理频率调节区间,满足末端负荷需求且低功耗节能运行。通常变频范围控制在30-50Hz,系统可规避低频风险,通过增设最小流量回流管等避免气蚀等问题;高于50Hz自动切换工频,兼顾稳定与节能。

3.2 管网拓扑优化

管网拓扑优化是供热系统节能重要环节,通过调整结构布局等降低阻力损失、提升输送效率。以水力特性分析为核心,结合建筑布局等合理规划路径,缩短输水距离,减少管件降局部阻力。依各支路流量需求优化管径,避免投资浪费、散热损失或阻力能耗增加。老旧管网可改造、增设分区节点等减少泄漏与阻力,改造后阻力降20%-28%;新建管网用环状结构,水力稳定性高、故障冗余强、流量分配均匀。还可增设保温层等降散热与调节阻力,提升整体效率,为分布式水泵变频控制提供良好基础,确保全自动闭环控制系统高效运行。

3.3 热源侧协同优化

热源侧协同优化围绕分布式水泵变频系统展开,旨在精准匹配热源输出与末端负荷需求,减少热源生产与输送的能源损耗,提高供热系统整体能效。此优化涉及多方面,包括热源运行参数调节、多热源联动控制以及余热回收利用等。通过整合热源、管网和末端侧的运行数据,构建全自动协同控制体系,达成各环节无人值守且精准联动。单一热源场景中,系统依据末端负荷预测及管网运行参数,动态自动调整热源出水温度和压力,让热源输出与水泵输送能力精准适配,避免热源过度输出浪费能源。多热源联合运行时,优化各热源负荷分配比例,结合不同热源(如燃气锅炉、热泵等)的能效特性,自动优先启用高效热源,实现效益最大化。另外,整合余热回收设备,利用工业、烟气余热供热,降低原生能源消耗,与分布式水泵变频控制结合,形成一体化节能体系,实测供热系统整体能效可提升30%。

3.4 智慧供热监控平台集成

智慧供热监控平台集成是实现分布式水泵变频供热系统智能化、精细化节能的核心载体,也是当前供热行业高智能化水平的集中体现,目前国内规模以上供热企业智能化平台覆盖率达98%,完全实现系统全流程全自

动闭环控制,换热站无人值守。该平台以物联网、大数据、云计算技术为支撑,接入水泵运行参数、管网压力流量、室外环境参数、末端室温、热源运行状态等各类数据,实现数据实时采集、传输、存储与可视化展示^[4]。平台具备数据分析、负荷预测、故障诊断、智能调控等功能,可通过挖掘历史运行数据,自动优化控制策略与运行参数;基于实时数据监测,及时发现水泵故障、管网泄漏、水力失调等问题,迅速发出预警信息并提供运行诊断意见,协助运维人员及时高效解决问题;通过远程控制功能,实现水泵转速、阀门开度、热源输出等参数的集中调控,提升运维效率,可使运维人员数量减少60%以上,运维成本降低45%-55%。通过该智慧供热平台,可实现分布式水泵变频供热系统的全生命周期智能化管理,最大化发挥各项节能策略的协同效应,确保智慧供热系统长期稳定、高效、节能运行。

结束语

分布式水泵变频调节的供热系统节能策略涵盖多个方面,从基础理论到控制策略,再到系统优化方法,形成了一套完整的节能运行体系。当前供热行业智能化水平已达到较高水平,全自动闭环控制机制已全面替代传统手动调节,结合历史数据支撑与智慧供热平台,可有效解决供热系统中的水力失调问题,提高能源利用率,提高供热质量与系统稳定性,实现按需供热和精准调控。随着技术的不断进步,未来该领域还有望进一步创新发展,为供热行业带来更显著的节能效益,助力实现能源节约与环境保护的双重目标,推动供热事业迈向新的发展阶段。

参考文献

- [1]李化森,王志成,张玉中,等.局部分布式变频泵优化供热运行及管网平衡调节实例[J].暖通空调,2024,54(9):153-158.
- [2]张东明,王若愚.供水泵站变频控制技术研究[J].水利技术与经济,2023,25(2):45-49.
- [3]陈明亮,赵艳.基于变频技术的泵站节能运行分析[J].电力节能,2024,31(4):109-114.
- [4]侯晨晨,殷哲,张健,等.供热系统中变频水泵运行效率研究[J].仪表技术,2025(1):73-75,81.