

供热系统水力平衡调节技术研究

乔 红

中核第七研究设计院有限公司 山西 太原 030000

摘 要：本文针对供热系统水力失调导致的供暖不均与能耗偏高问题，开展水力平衡调节技术研究。基于流体连续性方程与能量守恒定律，阐明管网压力损失与阻力系数的匹配关系，分析静态失调与动态失调的成因及运行危害。对比静态平衡阀、动态平衡阀及智能调节技术的原理与适用场景，提出动静结合组合调节、精细化调试安装及常态化运维三项优化策略。静态调节消除结构性流量偏差，动态调节适配负荷波动，智能调节实现全管网精准管控，三者协同可显著提升系统水力平衡水平与运行能效。

关键词：供热系统；水力平衡；水力失调；调节技术；管网优化

引言：供热系统水力平衡直接决定供暖均匀性与运行能效，是供热工程领域的核心技术问题。当前大量供热管网存在近端过热、远端不热的水力失调现象，导致用户采暖舒适度下降、系统能耗偏高、设备损耗加剧。水力失调分为静态与动态两类，成因涉及管网施工误差、布局差异、负荷波动等多重因素，单一调节手段难以全面解决。本文围绕水力平衡核心理论，系统分析失调类型与成因，对比主流调节技术特点，并提出组合应用与运维优化策略，为供热系统水力平衡工程实践提供技术参考。

1 供热系统水力平衡核心理论

供热系统水力平衡的本质是管网流体力学平衡，其理论基础建立在流体连续性方程与能量守恒定律之上。热媒在封闭管网内循环流动时，各环路的压力损失、流量分配与阻力系数之间形成动态匹配关系。理想水力平衡状态下，系统所有供暖终端的实际流量与设计流量偏差应控制在允许范围内，各环路供回水压差保持稳定，不存在局部涡流、滞流、超流等异常流态，确保每个末端用户均获得设计工况下的供热量。（1）从管网运行机理分析，供热管网是并联与串联相结合的复杂管路系统，总管网的流量分配与阻力特性由各分支管路共同决定。在串联管路中，管路总阻力等于各管段阻力的累加，流经各管段的流量全程保持一致；在并联管路中，各支路供回水压差相等，支路流量与自身阻力成反比关系，阻力较小的支路获得较大流量，阻力较大的支路流量相应减小。水力平衡的核心调控逻辑，即通过调节各支路阻力特性，使并联与串联管路的实际流量匹配设计工况，消除因阻力分配不均导致的流量偏差问题。（2）根据流体力学基本原理，供热管网管路压力损失与热媒流量的平方成正比，与管路综合阻力系数成正比。阻力

系数是影响水力平衡的核心参数，其数值与管道管径、管壁粗糙度、管路长度、阀门开度及局部管件损耗等因素密切相关，也是水力调节过程中的主要调控对象。通过精准调整阻力系数，可实现管网流量的重新分配，是水力平衡调节技术的理论根基^[1]。

2 供热系统水力失调类型及成因分析

2.1 静态水力失调

静态水力失调是供热系统在稳定运行、无负荷波动情况下存在的固有失调问题，属于系统结构性失调，是供热系统最基础、最普遍的失调类型。该类失调主要产生于系统建设、改造阶段，在系统投入运行前就已存在，且不会随运行工况变化自行消除。其核心成因主要包括三个方面：一是管网施工误差，管道铺设过程中管径偏差、管路弯折、管件连接不规范等问题，会改变管路原始阻力，导致实际阻力与设计阻力不符；二是管网布局差异，供热管网主干管、分支管长度差距较大，远端支路管路更长、阻力更大，近端支路阻力更小，天然形成近端流量过剩、远端流量不足的问题；三是设备安装偏差，各支路阀门、过滤器、散热设备的安装规格、开度初始状态存在差异，造成支路阻力不一致，打破流量分配平衡。静态水力失调会导致系统基础流量分配不均，是后续各类运行问题的根源。

2.2 动态水力失调

动态水力失调是系统运行过程中受工况波动影响产生的暂时性失调问题，属于运行性失调，随系统负荷、设备运行状态的变化持续波动。该类失调在完成静态平衡调节后仍可能出现，是影响供热系统持续稳定运行的主要问题。动态水力失调的核心诱因是系统负荷动态变化。供热终端用户的室内温度需求、门窗开闭、人员活动等因素会导致散热负荷实时变化，部分终端温控设备

自动调节开度，会改变对应支路的管路阻力，进而引发整个并联管网的流量重新分配。单一支路阻力变化会联动影响其他支路的流量与压力，造成原本平衡的管网工况失衡，出现部分终端流量骤增、部分终端流量骤减的动态失调现象。此外，循环泵启停、管网积气堵塞、设

备老化损耗等运行波动，也会加剧动态水力失调^[2]。

2.3 水力失调的运行危害

未平衡管网带来多维度能耗与设备损耗问题，量化危害指标见表 1。

表1 水力失调对供热系统运行指标影响量化对比

运行指标	水力平衡管网	中度失调管网（流量偏差 ±30%）	重度失调管网（流量偏差 ±60%）
支路流量偏差	≤ ±5%	±20%~±30%	±40%~±60%
循环泵单位热输配电耗	基准值 100%	122%~135%	140%~145%
区域室温最大温差	≤ 2.5℃	4~6℃	7~10℃
管道、阀门年均冲刷损耗速率	基准值 100%	160%	220%
年度管网清洗频次	1 次 / 采暖季	2~3 次 / 采暖季	4 次及以上

（1）采暖舒适度劣化：同一换热站覆盖区域室温极差最高可达 10℃，近端室温超标 3~6℃，远端低于设计采暖温度；（2）输配能耗大幅上升：为保证远端达标，循环泵运行功率提升 20%~45%，无效输配电耗占比显著增加；（3）设备损耗加剧：超流支路介质冲刷磨损加剧，欠流支路杂质沉积、积气堵塞，阀门、管道故障率提升 1 倍以上；（4）系统压力振荡：管网压差分布紊乱，换热器、循环泵长期承压波动，设备设计使用寿命缩短 15%~25%。

3 主流供热系统水力平衡调节技术

3.1 静态水力平衡调节技术

静态水力平衡调节技术主要用于解决系统结构性、固有性水力失调，核心原理是通过调节阀门开度，固定各支路的管路阻力系数，匹配设计流量需求，实现系统基础流量平衡，调节完成后设备状态保持固定，无动态调节功能。该技术的核心设备为静态平衡阀，是传统供热管网最常用的调节设备。（1）静态平衡阀具备精准开度调节、流量锁定功能，可通过阀门刻度精准控制阻力大小，工作人员可结合管网设计参数，通过专业仪器检测各支路实际流量，对比设计流量逐步调整阀门开度，对阻力偏大、流量不足的支路增大开度，对阻力偏小、流量过剩的支路减小开度，完成全管网静态流量校准。调节完成后锁定阀门开度，固定管网阻力配比，消除系统固有水力失调。（2）该技术结构简单、成本低廉、运维便捷，适用于管网布局固定、负荷波动较小的老旧供热管网、小区固定供热系统。但其局限性较为明显，仅能实现静态工况平衡，无法适配系统动态负荷变化，当终端负荷波动、管网工况改变时，平衡状态会被打破，无法自主调节。

3.2 动态水力平衡调节技术

动态水力平衡调节技术主要用于解决系统运行过程中的动态水力失调，核心优势是可实时适配管网工况波动，自动调整支路流量与压力，维持系统动态平衡，核心设备包括动态平衡阀、压差控制阀、流量控制阀等。

（1）动态平衡阀依托内部弹簧、膜片感应管网压力、流量变化，无需人工干预，可实时感知支路供回水压差波动，自动调整阀门节流开度。当某一支路负荷变化、阻力改变引发管网压力波动时，动态平衡阀可快速补偿阻力变化，抑制支路流量波动，避免单支路工况变化影响整个管网的平衡状态，有效解决负荷波动带来的动态失调问题。压差控制阀则以管网压差为调控目标，稳定各支路供回水压差，为流量稳定提供基础条件，常应用于高层建筑、分支较多的复杂供热管网。（2）该技术可实现无人值守动态调节，适配终端负荷频繁波动的供热场景，调节响应速度快、工况稳定性强。相较于静态调节技术，设备成本更高，结构更复杂，对安装位置、管路清洁度要求较高，适用于商业建筑、高层住宅等负荷波动大的供热系统^[3]。

3.3 水力平衡智能调节技术

随着供热系统精细化运行需求提升，融合传感技术、数据采集与自动控制的智能水力平衡调节技术逐步应用。该技术突破了传统单一阀门的被动调节模式，通过压力传感器、流量传感器、温度传感器实时采集管网各节点的运行参数，将数据传输至终端控制系统，依托数据比对分析，精准判断水力失调位置与失调程度。

（1）控制系统可根据实时运行数据，自动驱动电动平衡阀、变频循环泵等设备，实现流量、压力的精准联动调节。针对近端流量过剩、远端流量不足的问题，可分区、分段精准调控各支路阻力与流量；针对不同时段的负荷波动，可自适应调整系统运行参数，实现全时段、

全管网的动态水力平衡。同时,系统可实时记录运行数据,便于工作人员分析管网运行状态,提前预判堵塞、失调等潜在问题。(2)该技术调节精度高、智能化程度强,可实现精细化、无人化运维,彻底解决传统人工调节精度低、滞后性强的问题,适用于大型集中供热管网、多片区联动供热系统。唯一短板为设备投入成本高,需要配套的智能化运维体系支撑。

4 水力平衡调节技术应用优化策略

4.1 动静结合的组合调节方案

绝大多数供热系统同时存在静态与动态水力失调问题,单一调节技术难以全面解决,因此需采用“静态粗调+动态微调”的组合调节模式。在供热系统检修期与供暖启动前期,优先使用静态平衡阀完成全管网静态调节,依据设计流量逐支路校准各支路基础流量,消除因管网施工误差、布局差异、设备安装偏差等因素造成的结构性阻力偏差,搭建稳定的基础平衡工况。在系统正常供暖运行阶段,依托动态平衡阀、压差控制阀等设备,实时响应终端负荷波动引发的动态失调,自动稳定各支路流量与供回水压差。对于大型复杂供热管网,主干管路采用静态平衡阀固定基础阻力配比,分支管路及末端环路安装动态平衡阀与压差控制阀,实现分级分区调控。该组合模式兼顾调节精度与运行稳定性,有效规避单一静态调节无法适配动态工况、单一动态调节设备投入成本过高的问题,适用于绝大多数民用集中供热系统。

4.2 精细化调试与安装优化

设备安装与调试精度直接决定水力平衡调节的实际效果,需从全流程施工调试环节进行优化控制。在设备安装阶段,应严格依据管网设计标准安装静态平衡阀、动态平衡阀、传感器等调节设备,规避管路弯折、设备倒装、管径不匹配等常见安装问题,保证管段内流态稳定,减少因人工安装不规范带来的阻力偏差。在调节设备布设方面,优先在管网关键节点、远近端支路、高低区交界处安装调节设备,精准覆盖水力失调高发区域,提高调节效率。在系统调试阶段,摒弃传统人工经验调节方式,采用专业流量检测设备对各支路逐支检测、逐段校准,详细记录各支路设计流量、实际流量与阀门开度的对应关系,精准修正流量偏差,将各支路流量偏差控制在正负百分之五的最优范围内。调试完成后做好设备编号标记与参数归档,为后续运维巡检与工况复检提供可靠数据支撑^[4]。

4.3 常态化运维工况优化

供热系统长期运行过程中,管道内壁结垢、杂质沉积、阀门老化等问题会持续改变管网阻力特性,逐步破坏已建立的水力平衡状态,因此常态化运维优化是维持系统水力平衡的关键保障。应定期对管网过滤器、管道内部进行清理,去除水垢、铁锈、杂物等堵塞物,避免局部管路阻力异常升高导致流量分配偏差。定期检查静态平衡阀、动态平衡阀及压差控制阀的运行状态,排查阀门卡滞、密封失效、弹簧疲劳、调节失灵等故障,及时维修或更换损耗设备。同时,结合季节负荷变化与用户实际采暖反馈,定期对管网水力工况进行复检与微调。供暖初期、严寒期、供暖末期负荷差异较大,应针对性调整管网运行参数与阀门开度,适配不同阶段的热量需求,持续维持系统水力平衡,保障全供暖季系统稳定高效运行^[5]。

结束语

供热系统水力平衡调节是保障供暖质量与运行能效的核心技术环节。本文系统梳理了水力平衡核心理论,分析了静态与动态水力失调的成因及危害,对比了静态平衡阀、动态平衡阀及智能调节三种主流技术的适用场景,并提出动静结合、精细化调试与常态化运维的组合优化策略。静态调节奠定基础流量平衡,动态调节应对工况波动,智能调节实现全管网精细化管控,三者协同可覆盖绝大多数供热系统的平衡需求。未来,随着物联网与数字孪生技术发展,水力平衡调节将向全自动、自适应方向演进,进一步提升供热系统运行能效与服务品质。

参考文献

- [1]刘强,魏光明.供热管网热力平衡调节技术的智能化发展研究[J].科技创新与应用,2026,16(13):158-161.
- [2]李俊.自动化调节技术在供热热力平衡中的应用分析[J].全面腐蚀控制,2026,40(1):89-91.
- [3]王玉彤.基于强化学习的供热管网水力平衡动态调控方法研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026(4):162-165.
- [4]陈得风.节能技术在集中供热系统中的应用效果与优化研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2026(2):001-004.
- [5]王静.供热管网水力平衡调适在暖通施工中的节能效果研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026(5):117-120.