

建筑供热管网热力失衡溯源机制及多约束条件下智能调控策略研究

文 / 徐 洋 山东省枣庄市立医院

摘要：建筑供热管网是现代城市基础设施中非常重要的一部分，它承担着向住户提供一个舒适的热环境。但由于受诸多因素影响，供热管网运行中往往存在热力失衡问题，从而影响热量均匀分布与能源高效利用。文章系统地分析了建筑供热管网热力不平衡产生的原因及溯源机制，在此基础上研究了多约束条件下建筑供热管网智能调控策略，并在实时数据采集和智能算法优化调整的基础上给出了建筑供热管网调控框架。研究目的是利用数学建模与数值求解方法对建筑供热管网进行准确而有效的热力平衡恢复策略来求解热力失衡。试验结果表明：该智能调控策略不但可以有效地恢复热力平衡而且对节能减排具有显著效果，进一步提升了建筑供热管网运行效率及系统稳定性。

关键词：建筑供热管网；热力失衡；智能调控；数学建模

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.073

引言

随着城市化进程加快和建筑节能需求上升，建筑供热管网的管理与优化成为保障居民生活质量和能源高效利用的重要内容。热力失衡，尤其在寒冷季节，严重影响系统效率与用户舒适度，导致过热或过冷现象，并造成能源浪费，影响经济性与环境效益。面对复杂的内外外部影响，如何解决热力失衡并确保系统稳定运行，成为供热系统优化设计的核心问题。传统调控方法依赖固定的运行策略，缺乏实时响应能力。随着智能控制技术的进步，数据驱动的智能调控方法逐渐兴起，具备更强的灵活性和适应性。本研究聚焦于多约束条件下建筑供热管网热力不平衡的智能调控策略框架。在深入分析管网热力失衡原因的基础上，构建了热力学与水力学特征相结合的数学模型，并提出恢复热力平衡的策略。

一、建筑供热管网热力失衡的理论基础与机制分析

（一）建筑供热管网的基本结构与工作原理

建筑供热管网是城市供暖系统的核心，负责向建筑内部提供恒温环境。其结构包括热源、主干管道、支管和终端散热设备，热水或蒸汽通过管道系统输送到终端设备，为室内供热^[1]。供热管网的运行原理依赖于流体热量传递过程，温度梯度驱动热水或蒸汽流动，确保热量分布均匀和平稳。管网内部的热量传递与流体动力学特性紧密相关，流动过程受到管道阻力、管道材质、布置以及流体温度和压力等因素影响。尤其在冬季高峰期，外界温度变化和室内热负荷波动使热力配置变得非常敏感，此时系统的自我调节能力、热力流动稳定性和设备调控精准度成为确保供热效果的关键。尽管现代供热系统普遍采用热力调节和负荷均衡策略，但在特定条件下，仍会出现热力失衡现象。深入了解建筑供热管网的结构和原理，是分析热力失衡问题及其产生原因的基础。

（二）热力失衡的成因与物理机制

热力失衡指供热管网内部热量传递和分配不均，导致部分地区或终端设备温度过高或过低。其产生原因复

杂，涉及多种物理因素的相互作用。水力学是造成热力失衡的直接原因之一，管网内水流速度、流量、管道布置、阻力等因素对热力传输效率有重要影响。在管道直径不均或部分阻塞时，流动阻力增大，导致热量分布不均，进而引发局部温度异常。热力与水力的耦合作用使热力传递变得更加复杂，流速变化直接影响热量输送能力，并形成反馈效应。负荷波动时，系统稳定性易受影响，导致热力失衡。外部环境因素如建筑外气候变化、室内热负荷波动和管网运行时长等，也对热力分布产生深远影响，特别是冬季气温波动剧烈，供热管网负荷变化频繁，造成系统难以维持热力平衡。

（三）热力失衡溯源机制模型的建立

热力失衡溯源机制的研究旨在深入分析建筑供热管网的运行流程，找出热力失衡的根源，并据此提出精确的调控策略。建立该机制模型需要明确系统内部各变量之间的关系和动态特征。系统热力分布、流体运行状态和外部环境变化等因素都会影响管网的热力平衡，构建全面的数学模型至关重要。模型应结合热力学与流体动力学，考虑管道热传递效率、流速和热量传递效率等因素，并反映不同负荷下的系统动态变化^[2]。热量输送过程中的流动是动态的，受管道压力、流速和温度等参数的影响，这有助于追踪和定位热力失衡。溯源机制还需捕获系统内部的瞬时数据，通过多变量分析和反向推理追溯失衡根源。失衡源可能包括管道故障、阀门损坏和局部流量不足等，因此在建模时应考虑多种可能的失衡源，并结合数据驱动优化和实时监控，精确定位失衡源。

二、建筑供热管网热力失衡的影响因素及多约束条件分析

（一）外部环境因素对管网热力平衡的影响

建筑供热管网热力平衡除了受到系统内部状态影响外，外部环境因素也同样会对系统稳定性和热量传输均匀性造成深刻影响。室外气温波动对供热管网热力平衡无疑具有显著影响，特别是冬季寒冷气候，温度的急剧

波动直接导致热负荷改变，这样不仅会使管网热传递效率出现波动，而且会使热力分配受到更复杂的考验。较低气温一般要求系统供给较高热量输出以满足室内温度，这又会导致系统负荷发生改变，而这种不均匀负荷改变使供热管网很难保持稳定热力分布状态，局部地区温差加大，最终造成热力不平衡^[3]。除气温外，建筑供热系

统外部约束还表现为热源供给能力与运行策略。供热季节热源供应是否充足和外部环境因素密切相关。在能源供应有限或者天气因素对热源生产能力造成影响时，建筑供热系统不能根据需要供应稳定热量，这进一步加剧供热管网不平衡问题。外部环境包括空气湿度，风速和地理位置都会对管网热量损失和分配产生间接的影响。

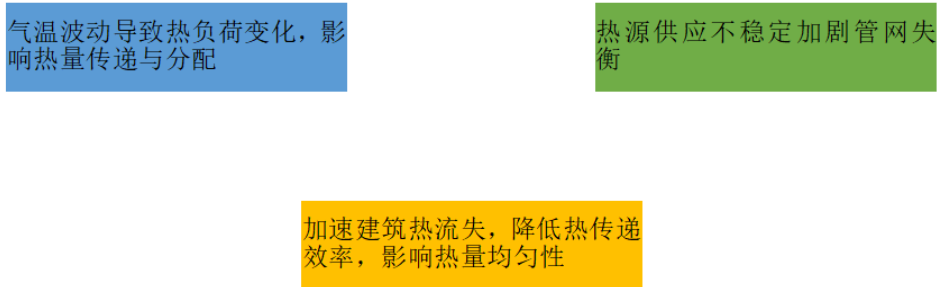


图1 外部环境因素对管网热力平衡的影响图

(二) 管网运行状态与内部参数的相互作用

建筑供热管网内部运行状态对热力平衡起着关键性作用，管网内部流体流动，温度分布，压力变化以及其他一系列物理量间复杂的相互作用直接影响热力传递和分布。复杂供热系统水力学和热力学并不是独立工作的，它们之间存在着耦合关系。水流的流速和压力在热量传输过程中起着至关重要的作用，流速太大、热量很难迅速而高效的传输到末端；相反流速过大会造成热量损失而不能有效地转移至需加热的地区。流体在流动状态下，温度梯度和压力变化表现出非线性复杂联系，系统内各参数发生细微改变，常可触发一系列放大效应并最终造

成热力严重不平衡。管网内部参数变化和系统运行状态具有紧密反馈机制。当系统负荷变化时，管道内流体性质随负荷波动也随之调整。温度变化对水流的密度、黏度有直接的影响，从而影响水流在管道内的流速和热量传递效率。管道阻力、管径、阀门设置及管网布局等工程参数对流体运动状态及热力分布都有实际工作时不容忽视的作用。系统的设计通常假定某类理想状态是稳定的，而实际工作过程中因负荷的复杂波动及外部环境的扰动，管网内各参数之间微小的不协调就会诱发大尺度热力不平衡。



图2 管网运行状态与内部参数的相互作用图

(三) 多约束条件下的热力失衡分析框架

建筑供热管网热力失衡分析是实际工程应用过程中既要考虑物理因素影响，又要融合多种工程约束条件构成综合分析框架。约束条件类型较多，涵盖管网设计约束，运行过程中负荷波动约束，设备性能约束和外部环境变化约束。在多重约束条件下，热力失衡产生原因表现出高度复杂性，而传统单一分析方法不能完整地揭示其内在规律^[4]。热力失衡分析框架需首先厘清各种约束条件间的相互影响，并构建多维度分析模型。流体力学、热力学和水力学三者之间的耦合效应构成了该模型的核心部分，它不仅要求覆盖管道中热流，流速和压力等物理量变化规律，还需考虑管网维护周期，负荷调节能力，设备故障及其他非理想因素扰动。多约束条件下系统运行是否稳定取决于如何寻求上述复杂因素间的平衡机制以避免过度调节或者故障。

心部分，它不仅要求覆盖管道中热流，流速和压力等物理量变化规律，还需考虑管网维护周期，负荷调节能力，设备故障及其他非理想因素扰动。多约束条件下系统运行是否稳定取决于如何寻求上述复杂因素间的平衡机制以避免过度调节或者故障。

三、多约束条件下的智能调控策略与技术框架

(一) 智能调控的基本原理与关键技术

智能调控技术是现代建筑供热管网系统的核心部分，它的发展依赖于信息技术，控制理论和系统工程三者之间的深度结合。基本原则是在实时数据采集和分析的基

基础上,综合监测系统运行状态,根据外部环境,内部参数和负荷需求等因素的变化,动态地调整控制策略,从而最终达到准确调节管网热力平衡目的。传统供热管网调控模式一般依赖于固定设定值与预定时间表,智能调控可根据实时变化进行自动适应以增强系统响应速度与调节精度。其中一项关键技术就是实时数据采集和传感技术。该系统通过布设各种传感器及监测设备实时采集管网内温度、压力和流速,并与外界环境信息相结合形成数据集进行后续分析。数据的精准性,全面性对智能调控起到有效支持作用。还有一个关键技术就是数据分析和处理的能力。传感器获取的数据一般都具有非线性和时变等特点,如何在海量而又繁杂的数据中挖掘出宝贵信息,准确地对系统未来状态进行预测是智能调控技术得以顺利实现的根本所在。数据分析技术主要有但不仅仅局限于机器学习和神经网络,可以从大量数据中挖掘隐藏规律,为调控决策提供准确依据。智能算法在智能调控中处于核心地位。采用自适应控制算法可以使供热管网对各个节点运行参数进行实时调节,从而保证热量的均匀分布和满足用户的要求。相较于传统控制策略,智能调控对于处理系统负荷波动及环境变化表现出明显的灵活性及准确性。该算法智能化既减少人为干预频率,又提高能源使用效率及系统稳定性。

(二) 多约束条件下智能调控的数学建模与求解

建筑供热管网智能调控系统面临多约束条件,需要构造复杂数学模型以精确刻画其运行特性和行为。此模型需综合考虑热力学,水力学和环境变化诸多因素之间的相互影响,基于此引入了约束条件。供热管网约束条件主要有流体流速受限,热源供热能力受限,管网布局受限和设备性能受限,每项约束条件对调控策略选择和优化有直接影响^[5]。进行数学建模时,必须先确定模型基本变量包括管网内温度分布,流速和压力等动态特征。本文从流体力学和热力学基本原理出发,构造了热力传输和流动方程组,包括传热方程,Navier-Stokes方程和能量守恒方程等。这些方程是表征供热管网热力和水力特性的理论基础。然后该模型把这些物理量和各种约束条件组合在一起构成一个多变量约束优化问题。约束条件既涉及各管道和阀门运行约束,又要兼顾热源供给能力和管网负荷需求改变。每一个约束条件对于调控策略的可行性和最优性均有显著影响,所以如何准确地将这些复杂的约束表达于模型之中是智能调控系统成功实现的关键。为了解决这些高度复杂的多约束优化问题,常用的数值计算手段包括但不限于最优化理论、遗传算法以及粒子群优化算法,这些方法在高维计算环境中表现出色、在非线性问题上搜索最优解和有效地处理了多种约束条件的矛盾。求解时需兼顾算法的计算复杂性和实时性以保证调控系统在满足系统动态响应的前提下寻求适当的控制策略。通过求解该数学模型,供热管网可以达到精准调控热力失衡,保证系统在环境及负荷变化情况下仍然保持高效稳定运行。

(三) 基于智能调控的热力平衡恢复策略

热力平衡恢复策略作为建筑供热管网智能化调控的一项核心工作,旨在通过对管网各参数的智能化调整使整个供热系统面对外部环境波动和内部负荷变化,本实用新型可快速恢复热力平衡并避免局部超温或者过冷,保证用户使用舒适度及系统高效工作。该战略的实现,首先取决于热力失衡状态实时监测和准确评估。该调控系统以传感器网络所采集的数据为基础,可对各区域内温度,流速和压力等参数的变化情况进行实时监控,并把这些数据传送给中央处理单元加以分析。在智能算法的帮助下,该系统可以对不同地区热力失衡风险进行预测,并且依据预测结果对其进行预先调整。实际运行时热力平衡恢复并不只是单纯的温度调节,还要综合考虑管道内水流和压力的变化,热源调节能力及各种终端设备运行情况等因素。该智能调控系统是通过协调调节各个节点来优化各参数以达到全局热力平衡。实施恢复策略时,调控系统可对阀门开度,泵转速和热源输出量进行动态调节,保证各区域热量供应和需求匹配。该调控策略在系统稳定运行后,将其置于预设“维持模式”中,以最小能耗维持热力平衡。该基于智能调控恢复策略能在短期内对环境变化和负荷波动做出反应,有效地避免了因人为干预不充分或者反应缓慢而导致系统失衡和能效浪费。

结语

该研究对建筑供热管网热力失衡产生原因及溯源机制进行深入探究,并在多约束条件下提出智能调控策略,为建筑供热管网热力不平衡问题提供有效解决途径。通过对管网热力失衡数学模型的构建,结合多约束优化理论提出基于智能调控热力平衡的恢复策略,该策略可对系统状态进行实时监控和对调控参数进行自适应控制。试验结果证实了所提策略对恢复热力平衡,提高能效的有效性。智能调控系统在促进供热管网运行效率的同时也降低了能源的浪费,对于可持续建筑供热系统的实现有着现实的意义。

参考文献

- [1] 林新宇,严玉林,于磊,等.合流制管道沉积物中污染物的赋存特征及其季节迁移规律[J].环境科学学报,2024,44(3):117-126.
- [2] 李树平,吴烨璇,沈继龙,等.多水厂供水管网水量溯源分析[J].给水排水,2024,50(1):115-120.
- [3] 常留红,等.基于SWMM的污水管网外来水量入渗反演识别研究[J].水资源保护,2024(5).
- [4] 黄晓敏,傅肖尉,赵志超,等.基于分区水质监测的污水管网收集效能评估[J].水资源保护,2023(6):152-159.
- [5] 曹斌,朱召贤.关于城中村雨污分流改造的研究分析[J].建筑与装饰,2023(4):116-118.