

基于数字孪生的供热网络动态仿真与优化调度策略研究

刘奕麟

天津市津安热电有限公司 天津 300204

摘要: 随着全球能源转型与“双碳”目标推进,传统供热系统面临热负荷响应滞后、水力失衡及能耗超标等挑战。本文研究基于数字孪生技术的供热网络动态仿真与优化调度策略,通过构建物理实体与虚拟模型的高精度映射关系,融合数据驱动与机理模型,实现供热系统全要素动态仿真。结合AI预测控制算法与多目标优化框架,提出基于模型预测控制的实时优化调度方法,有效提升供热效率,降低碳排放,为智慧供热系统建设提供理论支撑与技术方案。

关键词: 数字孪生; 供热网络动态仿真; 优化调度策略

引言: 在全球能源危机加剧与“双碳”战略深入实施背景下,传统供热系统因存在热能传输损耗大、水力热力耦合失调、动态调控能力不足等问题,已难以满足高效低碳的供热需求。数字孪生技术凭借其“物理-虚拟”实时映射与多尺度仿真能力,为供热系统精细化管控提供了新范式。本文聚焦供热网络动态特性,研究基于数字孪生的建模方法与优化调度策略,旨在通过虚实融合实现热负荷精准预测、设备智能调控及能效动态优化,推动供热行业向智能化、低碳化转型。

1 数字孪生供热网络基础理论

1.1 数字孪生技术核心要素

(1) 物理实体与虚拟模型的映射关系是数字孪生供热网络的核心支撑,需实现全要素、高精度的双向映射。物理实体涵盖供热系统的管道、换热站、用户终端等所有硬件设施,虚拟模型则通过三维建模、参数化配置等技术,复刻物理实体的几何形态、运行参数及性能特征。映射过程中需建立实时同步机制,确保虚拟模型能动态反映物理实体的运行状态,同时虚拟模型的优化决策可反向指导物理实体的运行调控,形成“感知-仿真-决策-执行”的闭环体系。(2) 数据驱动与机理模型融合方法是提升数字孪生精度的关键。数据驱动模型依托传感器采集的海量运行数据,通过机器学习、深度学习等算法挖掘数据背后的隐藏规律;机理模型则基于传热学、流体力学等基础理论,构建供热系统的物理数学方程。二者融合可实现优势互补,利用机理模型保障仿真的物理合理性,通过数据驱动模型修正机理模型的简化误差,尤其在复杂工况下能显著提高虚拟模型的预测精度和适应性。

1.2 供热系统物理特性分析

(1) 热力网络拓扑结构分为枝状、环状及混合式,不同结构对水力和热力特性影响显著。水力与热力耦合

关系体现在水流速度、压力分布决定热量传输效率,而热量变化又会导致流体密度、粘度改变,进而影响水力工况。例如,管道沿程阻力随流量增大而增加,同时高温流体的散热损失会改变管道周边热环境,形成动态耦合效应。(2) 典型设备动态特性呈现差异化特征。换热站的热交换效率受供水温度、流量及换热器结垢程度影响,动态响应存在滞后性;管道存在热惯性,热量损失随环境温度和保温层性能动态变化;用户端的热需求受气象条件、建筑保温及用户行为影响,呈现明显的随机性和波动性^[1]。

1.3 动态仿真关键技术

(1) 基于CFD的建模方法能精准模拟流体流动和热量传递的细节特征,但计算复杂度高、耗时较长;集总参数法通过简化模型结构,将系统划分为多个集中参数单元,计算效率高,但精度相对较低,适用于宏观动态特性分析,实际应用中需根据仿真需求选择合适方法。(2) 多时间尺度仿真策略需针对不同应用场景设计。秒级仿真主要用于捕捉管道突发泄漏、设备故障等瞬时动态事件,为应急处置提供实时支持;小时级仿真适用于供热负荷预测、运行方案优化等中长期调度场景,通过平衡仿真精度和计算效率,满足不同时间维度的决策需求。

2 基于数字孪生的供热网络建模方法

2.1 虚拟模型构建

(1) 几何模型构建的核心是实现热网拓扑结构的高精度三维重建,需覆盖供热系统全链路物理实体。首先通过激光扫描、BIM技术采集管道走向、管径规格、换热站设备布局等几何数据,建立包含阀门、补偿器等关键部件的精细化模型;其次针对复杂管网节点,采用参数化建模技术,确保分支管道连接角度、设备安装位置与物理实体完全匹配;最后通过模型轻量化处理,在保留关键几何特征的同时,降低数据存储量,为后续仿真

计算奠定基础。(2)物理模型构建需重点建立热力/水力耦合方程组,精准刻画热网运行的物理规律。水力方程组基于流体力学原理,包含连续性方程、动量方程,考虑管道沿程阻力、局部阻力及水泵扬程等参数,描述流量、压力的动态分布;热力方程组结合传热学理论,涵盖管道散热方程、换热器热交换方程,引入环境温度、保温层导热系数等变量,反映温度场的传递特性;通过耦合系数将两类方程关联,形成统一的数学模型,实现水力工况与热力工况的协同仿真。(3)行为模型聚焦用户侧用热模式预测,采用“历史数据+机器学习”的融合技术路径。首先收集历年气象数据(温度、湿度、风力)、建筑属性(面积、保温等级、朝向)及用户用热记录(室内温度设定、用热时长),构建多维度数据集;然后通过数据清洗、特征工程提取关键影响因子,选择LSTM、随机森林等算法搭建预测模型;模型训练过程中引入交叉验证,优化模型参数,最终实现对不同季节、不同时段用户热需求的精准预测,为供热调度提供依据。

2.2 数据交互与同步机制

(1)物联网传感器布局需兼顾数据采集全面性与经济性,同时优化采集频率。在管道关键节点(干管、支管连接处)安装压力、温度传感器,实时监测流体参数;在换热站进出口部署流量传感器,捕捉热媒输送状态;在用户端设置室内温度传感器,采集用热反馈数据。采集频率根据参数特性动态调整:压力、温度等高频变化参数采用秒级采集,流量、用户用热数据等缓慢变化参数采用分钟级采集,通过差异化采集策略,在保证数据时效性的同时,减少冗余数据传输^[2]。(2)虚实同步算法是实现物理实体与虚拟模型实时联动的关键,以卡尔曼滤波校正为例,其核心是通过“预测-更新”循环降低数据误差。首先基于物理模型预测虚拟模型的运行状态(如管道压力、温度);然后将传感器采集的物理实体实际数据与预测值进行对比,计算偏差;最后通过卡尔曼滤波算法对偏差进行加权修正,更新虚拟模型参数,确保虚拟模型状态与物理实体高度一致。针对数据传输延迟问题,引入超前补偿机制,进一步提升同步精度。

2.3 模型验证与校准

(1)实验平台设计以缩比热网实验台为核心,模拟实际供热系统的运行环境与工况。实验台按一定比例缩小管道、换热站等设备,保留原系统的拓扑结构与物理特性;配备可调节的热源装置、循环水泵及流量控制阀门,实现不同负荷、不同工况的模拟;同时部署与实际

系统一致的传感器网络,采集实验数据,为模型验证提供真实可控的测试环境。(2)静态精度验证通过将虚拟模型仿真数据与实际运行数据进行对比实现。选取稳定运行工况(如连续72小时额定负荷运行),采集虚拟模型与物理系统的压力、温度、流量等关键参数,计算两者的偏差率(如压力偏差 $\leq 2\%$ 、温度偏差 $\leq 1^\circ\text{C}$);针对偏差超标的参数,分析模型假设、边界条件设置等问题,校准管道阻力系数、换热器传热系数等关键参数,直至静态精度满足工程要求。(3)动态响应验证聚焦突发工况模拟,检验模型对异常情况的刻画能力。模拟管道泄漏(通过关闭实验台部分阀门模拟)、水泵故障(调整水泵转速模拟)等突发场景,记录虚拟模型与实验台的压力骤降、流量波动等动态响应曲线;对比两者的响应延迟时间、峰值偏差等指标,评估模型的动态跟随性能;根据验证结果优化模型的动态参数,提升模型对复杂工况的适应性。

3 基于数字孪生的供热网络动态仿真与优化调度策略

3.1 多目标优化框架设计

(1)目标函数需围绕供热网络核心运行需求构建,实现多维度效益平衡。能耗最小化以降低热源单位供热量的能耗为核心,通过优化水泵转速、换热器运行参数,减少管网输送过程中的能量损耗,例如基于数字孪生仿真调整供水温度与流量匹配关系,避免过度供能;供热质量均衡化聚焦用户端室内温度稳定性,以用户室内实际温度与设定温度的偏差绝对值之和最小为目标,消除管网水力失调导致的“近热远冷”问题,保障不同区域、不同楼层用户的供热体验一致;经济性最优综合考虑燃料成本、设备运维成本与用户热费收益,建立成本-收益数学模型,在满足能耗与供热质量要求的前提下,实现供热企业运营利润最大化,例如通过仿真对比不同热源组合的成本差异,选择最优能源供给方案。(2)约束条件需严格匹配供热系统安全运行边界,避免优化方案超出工程实际能力。管道压力/温度安全阈值是核心约束,根据管道材质、设计标准设定压力上限(如钢管工作压力不超过1.6MPa)与温度范围(如供水温度不低于 60°C 、不高于 95°C),防止因压力过高导致管道破裂或温度异常影响用户用热;设备容量限制针对热源、水泵、换热器等关键设备,确保优化调度中设备运行负荷不超过额定容量,例如热源出力不超过设计最大供热量、水泵流量不超过额定流量,避免设备过载损坏,保障系统稳定运行^[3]。

3.2 优化算法选择与改进

(1)传统优化方法在供热网络调度中存在明显差

异与局限性。线性规划适用于目标函数与约束条件均为线性的简单场景，如静态负荷下的热源分配，但难以处理供热系统中存在的非线性关系（如管道阻力与流量的二次方关系），优化精度受限；动态规划通过将多阶段决策问题分解为单阶段子问题求解，可处理一定程度的动态特性，如分时供热调度，但随着管网规模扩大，状态变量维度激增，易出现“维数灾”，计算效率大幅下降，难以满足大规模热网的实时优化需求。（2）智能算法凭借较强的非线性处理与全局寻优能力，成为供热网络优化的主流选择。强化学习Q-Learning通过智能体与环境的交互试错，不断更新Q值表优化决策策略，可适应供热系统的动态变化，例如根据实时用热负荷调整水泵运行状态，但其收敛速度较慢，需通过改进奖励函数（如结合能耗与供热质量设置分层奖励）提升学习效率；多目标粒子群优化算法通过粒子群体的协同搜索，可同时优化多个目标函数（如能耗、经济性），生成Pareto最优解集，供调度人员根据实际需求选择，但易陷入局部最优，需引入混沌初始化、自适应惯性权重等改进策略增强全局寻优能力。（3）算法实时性改进策略是保障优化调度落地的关键。模型简化通过忽略次要因素（如管道局部微小阻力、短期小幅负荷波动），降低优化模型的复杂度，例如将复杂管网划分为若干个等效单元，减少变量数量；并行计算利用多核CPU或GPU架构，将优化问题分解为多个子任务同步计算，例如将不同区域管网的优化计算分配至不同计算节点，大幅缩短计算时间，确保算法在分钟级内输出调度方案，满足供热系统动态调整需求^[4]。

3.3 动态调度策略实现

（1）基于预测的滚动优化依托数字孪生的仿真预测能力，实现调度方案的动态更新。以MPC模型预测控制为例，首先通过数字孪生模型结合用户用热模式预测与气象预测数据，预测未来24小时的热负荷变化趋势；然后以预测负荷为基础，在当前控制周期内（如1小时）求解优化问题，得到该周期内的最优调度方案（如热源出力、水泵转速）并执行；当下一控制周期开始时，结合

最新的实际运行数据（如实时负荷、设备状态）修正预测模型，重新进行优化计算，形成“预测-优化-执行-修正”的滚动循环，确保调度方案始终与实际工况匹配，提升供热系统的适应性与经济性。（2）突发事件应急响应需快速响应异常工况，保障系统安全与用户基本用热需求。针对管道泄漏突发事件，数字孪生模型通过传感器数据监测到压力骤降、流量异常后，立即触发应急仿真，模拟泄漏位置与泄漏量对管网水力、热力工况的影响，同时自动生成调度方案：关闭泄漏点上下游阀门隔离故障区域，调整周边管网水泵流量，补充其他区域热媒供给，减少对非故障区域用户的供热影响；针对极端天气（如寒潮、暴雪），提前通过数字孪生预测极端天气下的热负荷激增情况，提前调整热源出力，储备热媒，同时优化管网流量分配，优先保障医院、学校等重点用户的供热需求，避免因负荷骤增导致系统瘫痪，确保供热稳定性。

结束语

综上所述，本研究依托数字孪生技术构建了供热网络动态仿真框架，通过虚实映射、多物理场耦合建模及数据-机理融合方法，实现了热力工况精准预测与多目标动态优化。实验验证表明，该策略可显著提升供热系统能效与稳定性，有效应对负荷波动及突发事件。后续研究将聚焦模型轻量化与异构数据协同处理，推动数字孪生技术在智慧供热领域的工程化落地，为行业低碳转型提供关键技术支撑。

参考文献

- [1]张莉.供热调节技术在集中供热系统中的应用探析[J].山西建筑,2018,(12):129-130.
- [2]杨景懿,马红兵,张博等.基于数字孪生的室温控制智慧供热研究[J].区域供热,2023,(07):76-78.
- [3]何乐,李琳,王振功.基于人工智能以室温为目标的换热站调控方式浅析[J].区域供热,2023,(14):153-154.
- [4]薄盛,王海超,赵洁等.集中供热系统供暖建筑室温控制算法研究综述[J].煤气与热力,2023,(08):90-91.