

基于数字孪生技术的供暖系统 仿真与优化研究

柴 巍

(甘肃蓝野建设监理有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要 数字孪生技术凭借虚实映射、实时交互、仿真推演的核心能力,为供暖系统全流程管控升级提供了全新技术路径。本文围绕数字孪生技术与供暖系统的融合应用展开系统性研究,深入阐释二者的底层适配逻辑,梳理数字孪生技术在供暖系统仿真环节的核心应用维度,同时提出技术驱动下供暖系统优化升级的具体实施路径。研究成果旨在为城镇供暖系统的数字化转型与智慧化升级提供理论参考,助力供暖行业实现低碳高效的高质量发展目标。

关键词 数字孪生技术; 供暖系统; 系统仿真; 智慧供热

中图分类号: TU83; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.008

0 引言

城镇集中供暖是北方地区冬季民生保障的核心工程,直接关系到居民生活质量与社会运行稳定。在“双碳”战略全面落地的背景下,供暖行业面临着节能降耗与供热品质提升的双重发展要求,传统的运行管控模式存在信息滞后、协同不足、预判缺失等固有难点,已难以适配行业精细化、智能化的发展趋势。数字孪生技术作为工业数字化转型的核心支撑技术,能够打破物理系统与数字空间的壁垒,为供暖系统的全周期管控提供全新的技术范式。本文围绕数字孪生技术在供暖系统中的应用展开系统性分析,厘清技术与行业需求的适配逻辑,明确仿真应用的核心场景,提出针对性的系统优化路径,为供暖系统的智慧化升级提供完整的思路参考。

1 数字孪生技术与供暖系统的适配逻辑

1.1 实现供暖系统虚实深度映射

供暖系统的物理实体分布范围广、设备类型多、运行工况复杂,传统的数字化管理模式仅能实现单一设备或单一环节的信息采集与展示,无法形成全系统的整体性数字表达。数字孪生技术构建的虚实映射体系,能够将分散的物理单元整合为统一的数字整体,完整还原系统内各组成部分的空间位置、连接关系、运行参数与动态变化,让物理系统的每一处运行状态变化都能在数字空间得到精准同步。

1.2 支撑系统运行动态实时感知

数字孪生技术构建的感知体系,能够打通供暖系统全链条的数据采集、传输、整合与应用环节,实现对系统运行状态的动态实时感知。数字孪生体系能够整合热源出力、管网压力、供水温度、回水温度、流量流速、设备运行状态等多维度运行数据,同时接入室外气象温度、风力风向、建筑围护结构特性等外部影响数据,形成覆盖系统内外部影响因素的全维度数据感知网络^[1]。依托实时数据传输与处理能力,数字孪生系统能够实现运行数据的毫秒级同步更新,让管控端能够实时掌握系统全流域的运行动态,彻底改变传统模式下数据滞后状态不明的管控困境。

1.3 保障仿真分析精准高效开展

数字孪生技术依托完整的虚实映射体系与实时感知数据,能够为供暖系统提供精准高效的全维度仿真分析能力,打破传统仿真模式的局限性。数字孪生驱动的仿真分析,不再是基于固定参数的静态模拟,而是结合实时运行数据、外部环境变化、用户用热需求等动态因素的动态仿真推演,能够高度还原不同工况下系统的真实运行状态。通过数字孪生系统,能够在数字空间中模拟各类运行参数调整、外部环境变化、设备工况波动对整个供暖系统带来的影响,精准计算不同场景下的热力传输、水力平衡、能耗变化等核心指标,为系统运行调控提供可量化的参考依据。以新

作者简介: 柴巍(1986-),男,本科,工程师,研究方向:建筑环境与设备工程。

疆阿克苏阳光热力有限公司联合航天晨光、浙江大学等科研院所打造的智慧供热综合管控平台为例，其构建了基于自主知识产权的“城市供热数字孪生体”。这套仿真系统能像“天气预报”一样实时预演未来热负荷波动，通过对某区域管网改造的模型预演，节省管道材料 12%，工期缩短近两个月。2024-2025 年采暖季依托多热源智能调度算法，节约标准煤超 1 万吨，减排约 2.8 万吨二氧化碳，相当于 25 万棵冷杉 30 年的固碳效果^[2]。

2 数字孪生技术在供暖系统中的仿真应用

2.1 模拟系统全域运行状态参数

供暖系统的运行管控核心在于对全系统运行状态的精准把握，而系统全域的运行状态由海量动态变化的参数共同构成，涵盖热源、热网、热力站、热用户全链条的水力、热力、设备运行等各类参数，且各参数之间存在复杂的耦合关联关系。数字孪生技术的仿真应用，首先体现在对系统全域运行状态参数的全维度高精度模拟。在传统的运行管控模式中，仅能通过有限的监测点位获取离散的数据，无法掌握系统全域的参数分布与动态变化，也难以厘清不同参数之间的相互影响。数字孪生驱动的仿真模拟，能够基于实时采集的监测数据与系统内在的物理运行规律，模拟计算出系统全域各个节点各个管段的运行参数，完整还原整个供暖系统的水力工况与热力工况分布^[3]。无论是主管网的压力温度变化，还是支线管网的流量流速分布，抑或是末端热力站的换热效率与用户端的室内温度变化，都能通过仿真模拟得到精准的量化结果。

2.2 研判供热传输损耗变化趋势

供热传输损耗是影响供暖系统能源利用效率的核心因素，也是供暖行业节能降耗工作的核心管控对象。供热传输损耗的产生与变化，受管网保温性能、水力工况、热力工况、环境温度、运行负荷等多重因素的综合影响，呈现出复杂的动态变化特征，传统模式下难以对损耗的分布情况与变化趋势进行精准的研判与管控。数字孪生技术的仿真应用，为供热传输损耗的全维度研判提供了全新的技术手段，能够实现对系统传输损耗的精准量化、分布定位与趋势研判。通过数字孪生仿真系统，能够对供暖管网全线路的传输损耗进行精细化的模拟计算，精准量化不同管段、不同区域的热损失量与损耗率，清晰定位系统内高损耗的环节与节点，彻底改变传统模式下只能核算整体损耗无法精准定位损耗分布的困境^[4]。依托多维度的仿真推演

能力，能够分析不同运行参数、不同环境条件、不同调控方案对传输损耗的影响规律，厘清各类因素与损耗变化之间的内在关联，为损耗管控提供精准的靶向方向。数字孪生仿真系统能够结合历史运行数据、实时工况变化与气象预测数据，研判供热传输损耗的未来变化趋势，预判不同时段、不同场景下的损耗波动情况，为供暖系统的节能管控提供前置性的决策依据。

2.3 预判系统运行潜在风险问题

供暖系统的安全稳定运行是民生保障的核心前提。在系统运行过程中，设备故障、管网泄漏、水力失衡、压力超限等各类风险问题，不仅会影响供热质量，严重时还会引发安全事故，造成民生保障中断与经济损失。传统的运维管理模式多为事后处置与定期检修，难以提前识别与预判系统运行中的潜在风险，无法实现风险的前置防控。数字孪生技术的仿真应用，能够依托系统运行的全维度数据与仿真推演能力，实现对供暖系统运行潜在风险的提前预判与精准识别，推动运维管理模式从事后处置向事前预防转型。数字孪生仿真系统能够基于系统的历史运行数据与实时运行参数，构建系统正常运行的基准工况模型，通过仿真模拟对比实时运行状态与基准工况的差异，精准捕捉系统运行中的异常参数变化，识别出潜在的风险隐患。针对管网泄漏风险，通过仿真模拟管网压力与流量的分布变化，能够精准定位微小泄漏引发的参数异常，在泄漏问题扩大前完成风险预警与定位。针对设备故障风险，通过仿真模拟核心设备的运行参数变化规律，能够预判设备性能衰减趋势与潜在的故障风险，为设备的预防性维护提供依据。针对水力失衡、压力超限等系统运行风险，通过仿真推演不同工况下的系统运行变化，能够预判极端天气、负荷突变等场景下可能出现的工况失衡问题，提前制定应对预案。

3 数字孪生技术驱动供暖系统优化的建议

3.1 优化供热参数智能调控方案

供热参数调控是供暖系统运行管理的核心环节，调控的精准度直接决定了供热质量与系统运行效率。传统的供热调控多以经验式的人工调控为主，存在调控滞后、精度不足、供需不匹配等问题，难以适配复杂多变的运行工况与用户用热需求。数字孪生技术的应用，能够为供热参数智能调控方案的全面优化提供核心支撑，推动供热调控模式从经验驱动向数据驱动、从滞后调控向前瞻调控、从粗放管控向精准调控转型^[5]。依托数字孪生系统的全维度虚实映射与实时感知能力，

能够全面掌握系统全链条的运行参数、外部环境变化与末端用户的用热需求,为调控方案的制定提供全面、精准、实时的数据基础,彻底改变传统调控中数据不全状态不明的困境。借助数字孪生系统的仿真推演能力,能够对不同的参数调控方案进行预演,精准量化不同调控方案下的供热效果、能耗变化与系统工况影响,筛选出兼顾供热质量与节能降耗的最优调控方案,实现调控方案的科学决策与精准制定。

3.2 提升能源利用整体效率水平

在“双碳”背景下,提升能源利用效率是供暖行业高质量发展的核心任务,也是供暖系统优化升级的核心目标。传统供暖系统的能源利用管控多集中于单一环节的节能改造,缺乏全系统、全流程的能效优化手段,难以实现能源利用效率的系统性提升。数字孪生技术的深度应用,能够为供暖系统能源利用效率的全方位提升提供系统性的解决方案,从全链条、多维度推动节能降耗工作的落地见效。数字孪生系统能够对供暖系统从热源生产、管网传输到末端用热的全链条能源消耗情况进行全维度的数字化管控,精准量化各个环节的能源利用效率与损耗情况,清晰定位系统内能效偏低的环节与节能潜力空间,为能效提升工作提供精准的方向,避免传统节能改造中盲目施策效果不佳的问题。依托数字孪生的仿真分析能力,能够对各类节能技术、改造方案的应用效果进行预演与评估,量化不同节能措施带来的能效提升效果,筛选出适配系统实际情况的最优节能方案,降低节能改造的试错成本,提升节能改造的投入产出比。通过数字孪生系统的全流程协同优化,能够打破热源、热网、末端用户之间的管控壁垒,实现全系统的能效协同优化^[6]。在热源端,能够根据系统仿真推演的用热需求,优化热源的出力分配与运行工况,提升热源生产环节的能源转化效率。在管网传输端,能够通过优化水力热力工况,最大限度降低传输环节的能源损耗。在末端用热端,能够通过精准的供需匹配,避免末端过热造成的能源浪费,实现全链条的能效协同提升。

3.3 完善系统运维管理响应机制

运维管理是保障供暖系统长期安全稳定运行的重要支撑。传统的供暖系统运维管理多采用定期检修、故障后抢修的被动式运维模式,存在运维效率低、故障处置慢、人力成本高、风险防控不足等问题,难以适配大规模复杂化的供暖系统运维管理需求。数字孪生技术的应用,能够推动供暖系统运维管理机制的全面优化与完善,构建起事前预防、事中精准处置、事

后闭环优化的全周期运维管理体系,全面提升运维管理的效率与质量。依托数字孪生技术的风险预判能力,能够实现对系统运行潜在风险的提前识别与预警,推动运维管理模式从被动的故障处置向主动的预防性维护转型。通过对系统设备、管网的运行状态进行持续的仿真分析与状态评估,能够精准预判设备性能衰减、管网老化等潜在问题,制定针对性的预防性维护计划,在故障发生前完成隐患排查与处理,最大限度减少故障停机事件的发生,保障系统的连续稳定运行。数字孪生技术能够大幅提升故障处置的精准度与响应效率。当系统出现故障问题时,数字孪生系统能够通过运行参数的异常分析与仿真定位,快速精准地确定故障发生的位置、类型与影响范围,为运维人员提供精准的故障信息与处置指引,大幅缩短故障排查的时间,提升故障处置的效率。

4 结束语

数字孪生技术与城镇供暖系统的融合应用,具备坚实的底层适配逻辑与广阔的应用空间。数字孪生技术通过虚实深度映射、动态实时感知与精准仿真分析,能够全面破解传统供暖系统运行管控中的难点问题,为供暖系统的仿真分析提供全维度的技术支撑。同时,驱动系统在运行调控、能效提升、运维管理等方面可实现全方位优化升级。在数字化转型与双碳战略的双重背景下,数字孪生技术将持续推动供暖行业的智慧化升级,助力构建低碳高效、安全稳定、精准智慧的新型城镇供暖体系,为民生保障提质与行业高质量发展提供持续的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张文祥,姚凌云,李云祥,等.数字孪生运维平台在某项目中的研究与应用[J].现代建筑电气,2024,15(04):86-90.
- [2] 中国科技网.新疆阿克苏:“数智防护盾”为城市供热解困增效[DB/OL].(2025-07-01).https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-07/21/content_373157.html.
- [3] 许亮,杨峪峰,陈占国.基于LabVIEW和Matlab的数字孪生供热系统平台的设计与仿真[J].计算机测量与控制,2023,31(12):173-179,230.
- [4] 钟崑,郑立军,俞自涛,等.基于“数字孪生”的智慧供热技术路线[J].华电技术,2020,42(11):1-5.
- [5] 陈奉奇.一种数字孪生驱动下的供热信息模型通用框架设计[J].中国科技信息,2025(23):95-97.
- [6] 赖博宏,郝俊红,杨天镇,等.数字孪生支撑下综合能源系统的智慧运维发展与挑战[J].中国电机工程学报,2026,46(01):157-172.