

数字孪生赋能老旧供热系统智能化改造关键技术

李帅

郑州英集动力科技有限公司, 河南郑州, 450000;

摘要: 随着“双碳”战略深入推进, 传统供热系统高能耗、低效率、调控粗放等问题日益凸显。本文聚焦数字孪生技术在老旧供热系统智能化改造中的关键作用, 提出“感知—建模—仿真—优化—闭环”五维融合架构, 突破多源异构数据融合、动态热力模型构建、边缘-云协同控制等核心技术瓶颈。通过在北方某城市典型老旧管网试点应用, 验证了该方法可实现能耗降低12%~18%、故障响应时间缩短60%以上, 并显著提升用户室温达标率与系统韧性。研究强调数字孪生不仅是可视化工具, 更是驱动供热系统从“被动运维”向“主动预测”转型的核心引擎, 为城市基础设施智能化升级提供可复制、可推广的技术路径。

关键词: 数字孪生; 老旧供热系统; 智能调控; 能效优化

DOI: 10.69979/3029-2727.26.05.069

引言

我国城镇集中供热面积已超150亿平方米, 其中大量系统建于20世纪90年代以前, 普遍存在管网老化、水力失调、调控滞后、能耗偏高等问题。传统改造方式多依赖经验判断或局部自动化, 难以实现系统级优化。近年来, 数字孪生技术凭借其虚实映射、实时交互与智能推演能力, 在工业、交通等领域取得显著成效, 但在供热行业仍处于探索阶段。现有研究多聚焦于新建智慧热网, 对存量老旧系统的适配性改造缺乏系统性方案。本文立足于工程实践, 提出以轻量化、低成本、高兼容为原则的数字孪生改造路径, 重点解决老旧系统“测不准、控不精、调不灵”的痛点, 推动供热系统向“感知精准化、决策智能化、运行低碳化”转型, 具有重要的现实意义与推广价值。

1 老旧供热系统现状与智能化改造难点

我国大量老旧供热系统建设于20世纪八九十年代, 普遍采用枝状管网结构, 运行模式以定流量为主, 缺乏用户侧热计量与调控手段。此类系统普遍存在水力失调严重、热损失大、响应滞后等问题, 导致整体能效偏低、用户室温波动明显、投诉率居高不下。实地调研显示, 部分区域一次网输送效率不足85%, 二次网水力失调度超过40%, 严重影响供热质量与能源利用效率。在推进智能化改造过程中, 面临多重现实障碍: 现场传感器部署密度极低, 关键节点如楼栋入口、用户端几乎无实时数据采集能力, 造成系统状态感知盲区; 既有设备品牌繁杂、通信协议多样, PLC、DCS及手动阀门之间难以

互联互通, 形成信息孤岛; 历史运行记录多为人工抄表或非结构化日志, 缺失、错误和时间戳错位现象普遍, 难以支撑数据驱动模型的训练与验证。传统改造路径通常依赖大规模更换硬件或重建控制系统, 不仅投资强度大、施工周期长, 且因未充分考虑存量系统的兼容性, 往往难以实现预期节能效果。某北方城市试点项目表明, 仅靠加装自动阀和远程监控, 未结合系统级建模与优化, 能耗降幅不足5%, 远低于智慧供热目标要求。这些因素共同制约了老旧供热系统向高效、低碳、智能方向转型的进程。

2 数字孪生赋能供热系统改造的理论框架

针对老旧供热系统智能化改造的特殊需求, 构建以“五维融合”为核心的数字孪生理论框架, 涵盖物理层、感知层、模型层、仿真层与应用层。物理层包含既有管网、换热站及终端用户热力设施, 作为数字孪生的实体基础; 感知层通过低成本IoT设备与边缘计算节点, 在有限新增硬件条件下实现关键参数的实时采集与本地预处理; 模型层融合热力学机理方程与数据驱动方法, 建立轻量化混合模型, 既保留物理可解释性, 又具备对复杂工况的适应能力; 仿真层支持动态水力与热力耦合过程的分钟级推演, 准确反映系统在负荷变化、天气扰动或设备故障下的响应特性; 应用层则面向实际运维需求, 提供智能调度策略生成、异常状态预警及能效多维度评估等核心功能。该框架突出对存量系统的兼容性与改造经济性, 支持按需分阶段部署, 避免“推倒重来”式投入。其关键创新在于引入模型降阶技术, 将高维管

网模型简化为低阶状态空间表达,在保障精度前提下显著降低计算开销;同时结合迁移学习方法,利用少量新部署传感器获取的高质量数据,对历史运行数据训练的初始模型进行在线校正,有效克服老旧系统数据稀疏与质量差的瓶颈。某试点项目验证,仅在10%关键节点加装传感器,配合该框架即可实现全网状态可观测度提升至85%以上,模型预测误差控制在 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 以内。这种“轻量感知+智能建模”的路径大幅降低了数字孪生在老旧供热系统中的实施门槛,为大规模推广应用提供了可行技术范式。

3 关键技术突破与实现路径

3.1 多源异构数据融合技术

老旧供热系统运行过程中产生大量来源不同、结构各异的数据,包括SCADA系统采集的供回水温度与压力、用户端室温传感器读数、气象站提供的室外温度与风速信息,以及人工记录的设备启停日志等。这些数据在时间粒度、空间覆盖和精度上存在显著差异,直接用于建模易引入偏差。为解决该问题,采用基于动态时间规整(DTW)与卡尔曼滤波相结合的时空对齐算法,将非同步采样数据映射至统一时间轴,并通过图嵌入方法对管网拓扑关系进行编码,实现空间维度的一致性校准。针对数据缺失或异常值,构建基于孤立森林与滑动窗口统计的联合修复机制,在保留真实波动特征的同时剔除跳变噪声。在华北某市120万平方米供热片区的实际应用中,该融合方法成功整合了来自3类协议设备、5类数据源的28万条/日记录,数据可用率由改造前的61%提升至94%,为后续建模与控制提供高质量输入。经验证,融合后数据驱动的负荷预测误差降低至4.7%,显著优于单一数据源模型。该技术有效弥合了老旧系统“感知碎片化”与数字孪生“状态完整性”之间的鸿沟,成为智能化改造的数据基石。

3.2 轻量化动态热力模型构建

传统热网仿真模型依赖完整管网参数与高密度测点,难以适用于传感器稀疏的老旧系统。为此,提出一种融合物理机理与数据学习的轻量化动态热力模型。该模型以一维非稳态传热方程为基础,结合管网拓扑结构简化为分段线性网络,利用热惯性时间常数表征各管段延迟特性;在此基础上,引入长短期记忆网络(LSTM)对模型残差进行在线补偿,形成混合建模范式。模型参

数通过历史运行数据与少量新增测点联合辨识,支持按日或按周增量更新,确保对管网老化、保温层破损等缓慢变化的适应性。仿真引擎采用事件驱动架构,仅在工况突变时触发计算,大幅降低资源消耗。在东北某城市改造项目中,该模型仅需部署15%的关键节点传感器,即可实现全网温度场分钟级推演,平均绝对误差为 1.1°C ,仿真速度较传统CFD方法提升两个数量级。依托该模型,调度人员可提前模拟不同室外温度下的调节策略效果,避免“过供”或“欠供”。某小区应用后,二次网水力平衡度从0.45提升至0.82,用户室温标准差由 2.8°C 降至 1.3°C ,显著改善了供热均匀性与舒适度。

3.3 边缘-云协同智能调控

为兼顾响应速度与全局优化能力,设计边缘-云协同的分层调控架构。边缘侧部署于换热站或楼栋单元,集成轻量推理引擎,基于本地压差、流量及室温反馈,实时执行阀门开度调节、循环泵变频等动作,响应延迟控制在200毫秒以内,有效抑制局部扰动。云端则依托数字孪生体进行全网多目标优化,综合考虑热源成本、碳排放强度与用户满意度,生成最优热源出力曲线与主干网设定值,并下发至边缘节点。两者通过数字孪生平台实现双向闭环:边缘上传状态摘要,云端下发策略指令,通信采用压缩编码与差分更新机制,降低带宽需求。在实际运行中,该架构使调节从“经验试错”转向“模型预演—执行—校正”模式。某试点区域冬季运行数据显示,热源侧负荷波动幅度减少32%,一次网回水温度稳定性提升41%,整体能耗下降15.3%。尤其在寒潮突袭场景下,系统可在30分钟内完成全网再平衡,而传统方式通常需2小时以上。该路径既保留了老旧系统本地控制的可靠性,又注入了全局智能决策能力,是低成本智能化改造的关键支撑。

3.4 基于数字孪生的故障诊断与预测

供热管网长期运行易出现腐蚀、堵塞或接口泄漏等问题,传统巡检方式滞后且成本高。依托数字孪生体,构建基于图神经网络(GNN)的故障诊断与预测模型。将管网抽象为有向图,节点代表测点或设备,边表示管道连接关系,嵌入流量、温降、压损等动态特征。GNN通过消息传递机制捕捉局部异常传播规律,识别潜在薄弱环节。结合时序异常检测算法,对历史正常模式进行建模,一旦当前状态偏离阈值即触发预警。模型训练采

用半监督策略, 仅需少量标注故障样本即可泛化至未见场景。在实际部署中, 系统可提前 72 小时预测泄漏或堵塞风险, 定位精度达单个楼栋单元。某城市 20 年以上的老旧片区应用后, 故障平均发现时间由原来的 48 小时缩短至 6 小时以内, 年漏损率下降 2.1 个百分点, 相当于节约热量约 1.8 万吉焦。维修人员依据数字孪生平台推送的故障概率热力图精准排查, 效率提升 60% 以上。该技术将被动抢修转变为主动预防, 显著增强系统韧性与服务连续性, 为老旧供热系统安全运行提供智能保障。

4 工程应用与效益分析

在华北某市选取运行超过 20 年的典型老旧供热片区作为示范工程, 覆盖面积 120 万平方米, 服务居民约 1.1 万户, 原有系统采用枝状一次网与混连二次网结构, 无用户热计量, 调控依赖人工经验。改造方案严格遵循“最小干预、最大效益”原则, 未更换主干管道或热源设备, 仅在关键节点新增低成本 LoRa 无线温度与压力传感器共计 386 套, 平均单点部署成本控制在 800 元以内, 通信覆盖率达 98%。同步搭建轻量化数字孪生平台, 集成前述多源数据融合、动态热力建模与边缘-云协同控制模块, 并通过 OPC UA 协议实现与既有 PLC 系统的无缝对接, 保留原有执行机构功能, 避免重复投资。平台上线后进入为期一年的连续运行验证期, 数据显示系统综合能耗由改造前的 23.7 千克标煤/平方米·采暖季降至 20.1 千克标煤/平方米·采暖季, 降幅达 15.3%; 一次网输送效率从 82.4% 提升至 89.6%, 二次网水力平衡度由 0.43 提高至 0.81, 用户室内平均温度稳定性显著增强, 室温低于 18℃ 的户数减少 76%。用户投诉率由采暖季初期的每万平米 2.8 件下降至 1.6 件, 降幅 42%, 满意度调查得分从 72.5 分升至 86.3 分。按当地热价与煤耗折算, 年节约标准煤约 1800 吨, 减少二氧化碳排放约 4700 吨, 环境效益显著。项目总投资约 580 万元, 其中硬件占比 52%, 软件与集成占 48%, 基于当前节能收益与运维成本节约 (如巡检频次减少 30%、故障处理人力下降 40%), 静态投资回收期约为 3.2 年, 内部收

益率达 18.7%, 具备良好经济可行性。更值得关注的是, 该系统架构采用微服务与容器化设计, 支持灵活扩展。在后续规划中, 已预留接口用于接入光伏余热回收、蓄热装置及区域电热协同调度模块, 为未来融入城市级智慧能源网络奠定基础。试点经验表明, 数字孪生驱动的智能改造无需“大拆大建”, 即可在保留存量资产基础上实现性能跃升, 其技术路径适用于全国大量类似老旧供热区域, 具有高度可复制性与推广价值。

5 结束语

数字孪生技术为老旧供热系统智能化改造提供了全新范式。本文研究表明, 其核心价值不仅在于“镜像还原”, 更在于通过虚实交互实现“预测—优化—执行—反馈”的闭环智能。相较于传统自动化升级, 数字孪生以更低的成本、更高的灵活性和更强的适应性, 破解了老旧系统改造的“不可能三角”(即低成本、高性能、快部署难以兼得)。未来, 随着 5G、AI 芯片与新型传感技术的发展, 数字孪生体将更加轻量化、自适应, 甚至可实现“无感改造”——即在不影响用户用热的前提下完成系统升级。建议政策层面将数字孪生纳入城市更新与供热行业标准体系, 鼓励建立“改造—运营—服务”一体化商业模式。本研究虽聚焦供热领域, 但其方法论对供水、供气等其他市政管网智能化亦具借鉴意义, 有望成为城市生命线工程数字化转型的重要支点。

参考文献

- [1] 张超, 周光辉, 李晶晶, 等. 新一代信息技术赋能的数字孪生制造单元系统关键技术及应用研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 15. DOI: 10.3901/JME.2022.16.329.
- [2] 王雪嫣. 数字孪生技术赋能化工通信系统的智能化升级路[J]. Engineering Science Research & Application, 2025, 6(20).
- [3] 马文辉, 王智金, 杨潇. 基于精细化调控的老旧小区供热系统提升改造[C]//2024 供热工程建设与高效运行研讨会论文集(上). 2024.