

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-600-09

某空调冷媒水系统热延迟与衰减特性研究

汤立宽¹ 舒星宇² 龙 雯² 徐新华²

(1. 嘉立坤(广州)自动化科技有限责任公司 广州 511400;

2. 华中科技大学建筑环境与能源应用工程系 武汉 430074)

【摘要】 针对空调冷媒水管网系统动态特性分析与优化需求,建立了高保真数字孪生模型以揭示管网热延迟及衰减特性。研究采用 Modelica 语言的非因果建模方法,建立了包含动态管道方程的系统级仿真模型,标准化流体连接器实现了管网组件的物理互联,完整刻画了水流传热延迟与能量衰减的动态过程。基于实际运行数据进行模型验证,深入分析管网热响应的时空演化特性,为系统优化提供科学依据。模型验证结果表明,空调冷媒水数字孪生模型预测与实际测量一致性好,误差小。进一步仿真结果表明:末端支路 K3 因最长输送路径产生 227 秒延迟,系统整体热延迟达 7.5 分钟;持续供冷工况下管壁散热导致系统管网温升约 0.2℃,即热衰减为 0.2℃。研究成果通过揭示管网拓扑结构对冷量传递时序的影响机制,为系统的优化调控提供一定理论支撑。

【关键词】 空调冷媒水; 动态管网; 热延迟; 热衰减; Modelica 建模

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Thermal Delay and Temperature Decay in a Refrigerant Water System

Tang Likuan¹ Shu Xingyu² Long Wen² Xu Xinhua²

(1. Jialikun (Guangzhou) Automation Technology Co., Ltd, Guangzhou, 511400;

2. Department of Building Environment and Energy Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

【Abstract】 In response to the demand for analyzing and optimizing the dynamic characteristics of air-conditioning chilled water pipe networks, this study establishes a high-fidelity digital twin model designed to reveal the thermal delay and attenuation characteristics of the network. This study employs a non-causal modeling approach using the Modelica language to develop a system-level simulation model that incorporates dynamic pipe equations. Standardized fluid connectors enabled the physical interconnection of pipe network components, allowing for a comprehensive representation of the dynamic processes of heat transfer delay and energy attenuation in water flow. The model is validated against real operating data, and the spatiotemporal evolution characteristics of the thermal response of the network are thoroughly analyzed, providing a scientific basis for system optimization. The model validation results show that the digital twin model of the air-conditioning chilled water system demonstrates good consistency between predictions and actual measurements, with small errors. Further simulation results indicate that: Terminal branch K3 experiences a delay of 227 seconds due to the longest delivery path, while the overall thermal delay of the system reaches 7.5 minutes; under continuous cooling conditions, the pipeline heat dissipation causes a temperature rise of approximately 0.2℃ in the network, corresponding to a temperature attenuation of 0.2℃. The findings provide theoretical support for system

基金项目: 湖北省科技计划重点研发项目(技术创新计划)(2025BCB033)

作者简介: 汤立宽(1987-), 男, 硕士, 工程师, E-mail: 443477082@qq.com

通讯作者: 徐新华(1972-), 男, 博士, 教授, E-mail: bexhuxu@hust.edu.cn

收稿日期: 2025-12-18

optimization and regulation by elucidating the impact of network topology on cooling delivery timing.

【Keywords】 Refrigerant Water System; Dynamic pipeline network; Thermal delay; Temperature decay; Modelica simulation

0 引言

管网作为冷热载能介质的传输载体,其动态特性直接影响系统能效与供需匹配效果^[1-3]。尤其在长管道管网中,能量传递因流体流速限制与管材热惯性产生显著延迟,导致冷热源调控响应滞后,打破负荷实时平衡的刚性约束^[4,5]。同时,管内外温差驱动的热交换作用使得流体沿程产生不可逆温降即管网衰减特性,其衰减程度受输送距离、环境温度、管道传热系数等多参数耦合影响。此类动态特性若未被准确估计,将导致系统设计冗余、调控策略失配及能源浪费^[6]。

在负荷输配侧和能源供给侧,很多学者开展了相关研究。何蕾^[7]建立了含有蓄能罐的冷热电联产系统以进行需求侧的综合响应。许抗吾等人^[8]基于水泵性能曲线建立的数学模型,研究了大型中央空调系统中多台并联水泵的变频控制策略,提出了台数控制优先与频率控制优先两种组合策略,并通过对比分析得出变压差台数优先策略的节能效果最佳。林则焯等人^[9]基于 GWO-BP 神经网络建立的水系统管网阀门开度预测模型,并结合最小阻力控制原理,提出了一种空调水系统泵阀联调优化控制方法,该方法能有效降低管网阻力并实现显著节能。Cox 等人^[10]在能源站侧建立冰蓄冷系统,并制定了在分时电价和实时电价下系统的需求响应控制策略。苏新霞和周璇卿^[11]提出在用户侧安装具有双向可控储能装置的想法。邵世圻等^[12]基于能源站配置储能设备的想法,考虑了管网的动态特性,在调度时增加了对管网的延迟与衰减特性的考虑。Rui 等人^[13]考虑了管网的储能特性,优化了夏季提前开启建筑制冷系统的冷水机组策略。刘志渊等人^[14]建立了管网的延迟衰减模型,并将管网的延迟特性应用到能源站供能容量的选择上,揭示了管网动态特性对能源站的节能影响。韩宝成等人^[15]通过建立大型集中供热管网非稳态水力热力特性模型,研究了热延迟和热衰减特性,热延迟时间约为 1~2 小时,热响应时间约为 2~4 小时,且一次网热损失约占整网供热量的 5%~10%,为供热系统精准按需调控提供了重要理论依据。

对于管网模型的研究,往往需要通过建模与仿

真的手段对系统进行研究。近年来许多可视化软件的开发解决了以往传统建模软件数学模型集成连接困难的问题,提高了模型的重用性。FloMaster 应用于管网模型的拓扑以模拟实际复杂的管网。迟莹等人^[16]研究了核设施压缩空气系统中间歇负荷对管网压力波动的影响,并分析了不同间歇负荷工况下管网的压力动态响应特性。罗天航等人^[17]研究了雷达行波管的多支路液冷系统,利用 FloMaster 软件建立仿真模型,分析了系统的稳态流动换热过程和多泵并联切换的瞬态流动过程。但 FloMaster 的元件主要是基于压力-流量关系,往往忽略了热力特性对水力特性的影响。TRNSYS 作为模块化动态仿真软件,广泛应用于空调系统控制策略的设计与优化,但其模型库侧重热力学特性而忽略水力特性^[18,19]。FloMaster 与 TRNSYS 等软件在工程仿真中具有较好的应用基础,但其建模侧重点存在差异: FloMaster 更侧重于管网水力计算及压力、流量等水力特性的分析,难以进行热特性的分析。如果需要进行热特性的研究,通常需要进行二次开发,或采用其他热特性模拟软件通过接口进行对接; TRNSYS 则更侧重于系统层面的热力过程、能量平衡及运行性能分析,难以对复杂管网的水力特性进行快速建模,通常也需要进行二次开发,或者采用其他水力特性软件(比如 FloMaster)通过接口进行对接,从而进行集成仿真模拟。而 Modelica 语言及 MWorks 平台具备多领域统一建模和非因果建模优势,可更准确地描述管网热力-水力耦合关系。

Modelica 语言是多物理领域统一建模语言,支持多领域统一建模,具备高效仿真与跨领域协同能力,很容易实现热力特性(如水力特性)的仿真。Modelica 能够将复杂管网拓扑自动转化为微分代数方程组(DAE),并基于数值算法求解瞬态响应,为复杂管网系统的数字孪生、能效优化及实时调控提供高精度仿真基础。孙鑫南^[20]用 Modelica 语言完成了实际蒸汽供热系统热工和水力耦合的模型仿真计算。近些年,基于 Modelica 语言发展出的商业软件有 Dymola 和 MWorks 等。杜润琪^[21]利用 MWorks 仿真平台建立了集中供热系统二次管网仿

真模型,通过模型预测的方式进行优化调控,控制结果显示优化后供热负荷平均降低 19.71%,循环水泵能耗平均降低了 15.75%。管铮^[22]利用 MWorks 仿真平台围绕集中供热管网动态平衡分析及控制方法开展研究,说明供热系统建模不仅要考虑管网拓扑和流量分配,还要考虑动态扰动条件下系统的调节与控制问题。总体来看,现有基于 Modelica 的研究多集中于供热系统热力-水力耦合建模、动态平衡分析及优化控制等方面,对水系统输配过程中的热延迟与热衰减特性关注相对不足。因此,本文基于 MWorks 平台进一步开展水系统热延迟和热衰减特性的动态仿真研究。

总体来看,现有研究多围绕供热管网或能源站系统的热力-水力耦合建模、动态平衡及优化控制展开,重点关注系统负荷预测、流量分配和调控策略,而对水系统输配过程中由管网蓄热、散热损失及流动滞后共同作用引起的热延迟和热衰减特性研究仍相对不足。基于此,本文以某地空调冷媒水管网系统为研究对象,采用非因果建模方法在基于 Modelica 语言的 MWorks 软件平台搭建涵盖管网动态特性的空调冷媒水管网数字孪生模型。通过非因果建模范式方程直接描述质量守恒、能量传递、热传导等物理规律,支持双向动态交互与多领域耦合。进一步对该模型进行验证分析,并利用该验证模型进行该空调冷媒水管网系统的热延迟特性和热衰减特性进行分析,以期对管网系统的优化设计

与控制提供参考。

1 基于多领域物理建模环境的空调冷媒水数字孪生模型

为构建空调冷媒水数字孪生系统模型,需建立冷水机组、水泵、管道、阀门等流体模块,并根据实际拓扑结构连接相应的模块组成冷媒水数字孪生系统模型。本节以管道模块为例,介绍了模块的建立过程,进而构建冷媒水数字孪生系统模型,并进行系统验证。

1.1 空调冷媒水系统介绍

本文以某地铁车站的空调冷媒水系统为研究对象,该空调冷媒水系统主要服务设备用房及管理用房等功能区域。空调冷冻水经分水器供给大里程末端、出入口及换乘通道、小里程末端三个区域使用。大里程末端支路供给远端变电所和设备管理用房,设置两台空调机组。小里程末端支路供向近端设备管理用房,设置一台空调机组。出入口及换乘通道设置风机盘管末端。图 1 为该系统管网拓扑示意图,图中展示了自分水器后三个支路的管路走向、管径和管长。大里程末端供向站厅远端,小里程末端支路供向近端,出入口及换乘通道关闭。在空调冷媒水系统中,远端大里程末端自制冷机出入口总里程约为 450 米,超长管网在设计和运行过程中会对系统的热性能产生显著影响。

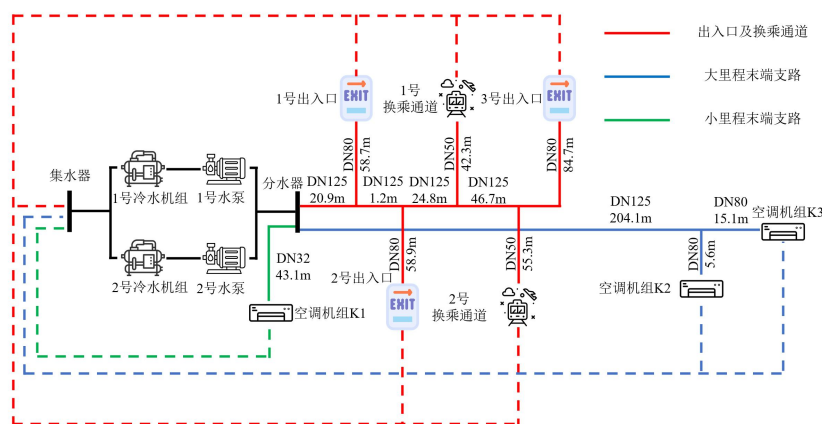


图 1 冷冻水管网拓扑结构

Fig.1 Chilled water piping network topology

1.2 Modelica 建模方法

在工程系统建模领域,Modelica 语言提供两种典型范式:因果化的块图建模与非因果化的物理建

模。块图建模将一个系统分解为已知量和未知量表示。一个块图由多个组件构成,组件可以通过已知量计算求解出未知量。非因果建模使用守恒定律描

述系统或组件的行为和性能,对系统的输入和输出没有明确的规定,通过联立组件本构方程和守恒方程得到整个系统的方程组。与传统因果式建模需要预先指定输入、输出关系不同,非因果式建模模型主要依据部件间的物理守恒方程和本构关系进行描述,变量之间的因果关系由求解器在仿真过程中自动判定。因此,非因果式建模更适用于管网等复杂物理系统的描述,能够避免因系统拓扑变化或边界条件变化而反复重构模型,提高模型的可复用性、扩展性和可维护性。

本文采用基于守恒定律的非因果建模方法在基于 Modelica 语言开发的仿真平台 MWorks 软件平台构建流体系统管段模块。该方法以物理本质驱动建模过程,尤其适用于复杂流体网络的仿真分析。为了构建非因果关系模型,需要识别所建立模型的“流变量”和“势变量”。“势变量”代表了系统的驱动力,“流变量”代表在“势变量”驱动下的流量。例如,在电气领域,电压(V)是“势变量”,电流(I)是“流变量”;在热传递领域,温度(K)是“势变量”,热流(W)是“流变量”;在流体流动中,压力(P)是“势变量”,流量(kg/s)是“流变量”。流变量用“flow”关键字修饰,表示守恒量(如电流、热流)。在连接时,所有相连端口的流变量遵循守恒定律(代数和为零)。势变量一般用“stream”关键词修饰,表示驱动流动的势(如压力、温度)。在连接时,相连端口的势变量值相等。

为实现流体组件的物理互联,采用了流体专用连接器 FluidPort,其核心包含三类变量:势变量、流变量与流属性变量。其势变量压力表征驱动流动的强度量,连接时所有端口势变量自动等值,直接体现压力平衡的物理约束。流变量中质量流量采用 flow 关键字修饰,表征守恒的广延量,连接时所有端口流变量代数和为零,严格满足质量守恒定律。流属性变量如比焓表示传递与流动方向相关的强度量,仅在流体流出时生效,确保能量与组分传递的方向性。这种设计使组件接口天然嵌入物理守恒律,例如当三个管道交汇时,编译器自动生成质量流量守恒方程与压力平衡方程,显著降低建模复杂度。通过流体连接器的势变量(压力)与流变量(质量流量),可自动生成管网节点的压力平衡方程与流量守恒约束。

1.3 管道模块

空调冷媒水系统数字孪生模型主要包括制冷机、冷却塔、水泵、管道、末端设备、阀门、温度传感器、压力传感器、流量传感器等附件模块。本文主要研究某空调冷媒水系统热延迟与衰减特性,所以主要介绍管道模块的开发。本文基于动力学方程的热力-水力管道模型来描述管网的时间延迟、热衰减特性^[23]。流体的流动和传热特性,使用雷诺运输定理的数学方程进行描述。为关注管段流动的主要特征,需要对管段流动方程进行简化。首先假设管道为均匀材料,管壁温度均匀分布,管径温度分布均匀,忽略管壁在轴向上的热传导,并假设管壁是恒温的边界。其次认为保温层为均质材料,并且不考虑管道传热系数沿径向的变化。此外由于管道摩擦产热对系统影响较小,因此忽略管道摩擦产热。

通过管道的能量传输和相关的热损失到周围环境是由能量和连续性方程与内能的组合引导的,内能是管道中轴向位置 x 和时间 t 的函数,如式(1)所示^[24]。同理,忽略较小影响因素,如热扩散、压力损失以及管道摩擦对能量方程的影响,可将式(1)化简为式(2)。将等式(2)中左侧的偏微分部分改为全微分,可得式(3),两边同时积分得到式(4)。管道的热容热阻计算如式(5)和式(6)所示。

$$\frac{\partial(\rho c_v T A)}{\partial t} + \frac{\partial \left[\rho v \left(c_v T + \frac{p}{\rho} \right) A \right]}{\partial x} = \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} f_D \rho v^2 |v| S + \frac{\partial}{\partial x} \left(k A \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \dot{q}_e$$

$$\frac{\partial(\rho c_v T A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v A c_v T)}{\partial x} = -\dot{q}_e \quad (2)$$

$$\frac{CdT(t)}{dt} = \frac{T(t) - T_b}{R} \quad (3)$$

$$\int_{T_{in}}^{T_{out}} \frac{dT(t)}{T - T_b} = \frac{1}{RC} \int_{t_{in}}^{t_{out}} dt \quad (4)$$

$$C = \rho c_v A \quad (5)$$

$$R = \frac{1}{k \ln s \times 2\pi} \lg \left(\frac{\frac{dh}{2} + d \ln s}{\frac{dh}{2}} \right) \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; C_v 为流体定容比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为流体温度, $^{\circ}\text{C}$; A 为管道

空腔截面积, m^2 ; v 为流体流速, m/s ; p 为流体压力, Pa ; f_D 为管道摩擦系数; S 为管道湿周; k 为流体导热系数; $\dot{q}_e$ 为系统内部与管壁的换热量, 表示系统热源; T_{out} 为管道出口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{in} 为管道入口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_b 为管道外环境介质温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{out}} - t_{\text{in}}$ 为水流经管道进出口的时间, s ; C 为管道定长热(冷)容量, $\text{J}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; R 为管道热阻, $(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$; dh 为管道管径, m ; $dlns$ 为管道保温层厚度, m ; $klns$ 为管道保温层热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

根据管网的结构拓扑即可实现对管网模型的热力-水力耦合特性的完整建模与动态仿真分析。图2为管道模型示意图, 流体介质由模型左侧入口流入, 经管道后由右侧出口流出; 模型上方的热交换接口与外界环境相连, 模拟管道与外界的换热。

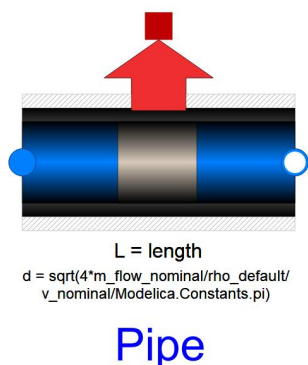


图2 管道模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the piping model

1.4 热延迟与衰减特性

管网延迟特性是指流体在管道网络中传输时,

由于管道长度、介质惯性及摩擦阻力等因素, 导致压力、温度等参数的变化无法瞬时传递, 存在时间滞后的现象。与源相连的介质距离相距甚远, 在传热/冷过程中经过一定时间延迟后才能到达输送终点。压力变化可视为瞬时的, 一般不考虑管网的压力延迟变化。管道的延迟时间即水流经管道进出口的时间, 如式(7)所示, 描述了管段中的延迟特性。管网热衰减特性表征为流体在输送过程中的温度升/降幅, 主要体现为管网入口与出口的温差。该现象源于管内外温差驱动的热交换作用, 即便采取保温措施, 流体在输送过程中仍会通过管壁与周围环境(空气或土壤)发生不可逆的热量传递。式(8)描述了管段中的衰减特性。

$$t_{\text{out}} - t_{\text{in}} = \frac{L}{m_{\text{flow}}} \frac{\pi}{4} (dh)^2 \rho \quad (7)$$

$$T_{\text{out}} = T_b + (T_{\text{in}} - T_b) \exp\left(\frac{t_{\text{out}} - t_{\text{in}}}{RC}\right) \quad (8)$$

式中: T_{out} 为管道出口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{in} 为管道入口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_b 为管道外环境介质温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{out}} - t_{\text{in}}$ 为水流经管道进出口的时间, s ; C 为管道定长热(冷)容量, $\text{J}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; R 为管道热阻, $(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ 。

公式(7)和(8)分别描述了管段中的延迟和衰减特性。在管道模块中输入参数集(管径 dh 、管长 L 、保温热导率 $klns$ 、保温层厚度 $dlns$ 、环境温度 T_b), 动态管道模型就可集成流体流速、管壁热容及环境散热方程, 量化延迟与衰减的协同影响。

1.5 数字孪生模型

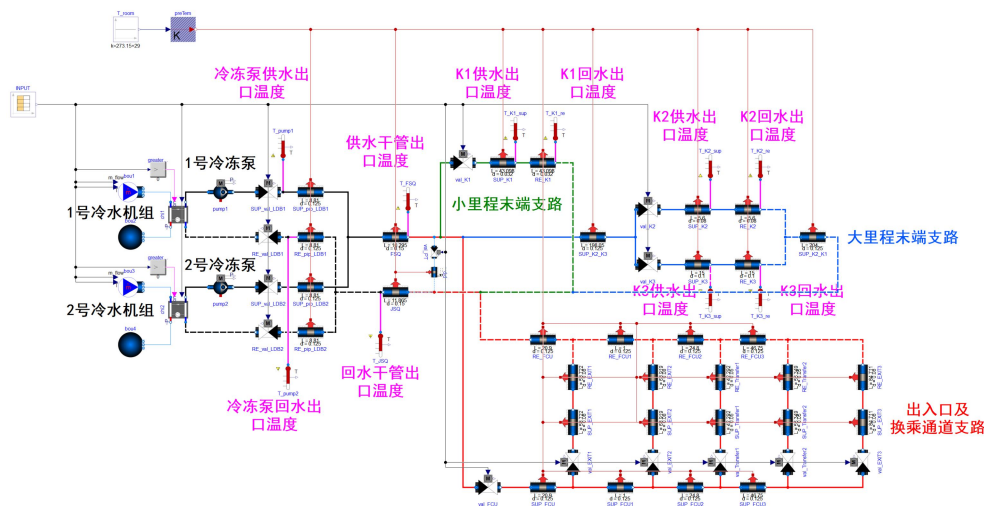


图3 空调冷媒水管网系统数字孪生模型

Fig.3 Digital twin model of the HVAC chilled-water piping network system

基于管道模块及管网拓扑,在 MWorks 上搭建了该地铁站的空调冷媒水管网系统的数字孪生模型,如图3所示。将管长、管径输入该管网系统的仿真模型中,根据设计要求设置管道保温层的参数。管道为无缝钢管及镀锌钢管,管道尺寸小于 DN80 设置 40mm 保温层,管道尺寸大于 DN80 设置 50mm 保温层^[24]。保温层材料是玻璃离心棉壳,管外铺敷铝箔板,导热系数为 $0.033\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。按照实际测得的供水温度和流量,考虑到弯头等组件的流动阻力,适当调整管道的阻力系数。同时,调节阀门以确保管网各个管段的流量达到实测值。管道外的空气温度设定为站厅层的温度设计值 29°C 。

1.6 数字孪生模型验证与讨论

该系统设置有空调节能控制系统,系统采集的数据主要包含供回水干管的温度和压力、流量、各个设备末端的阀门开度及进出水温度等。采用 2025 年 8 月 9 日到 14 日的实测数据,将实测的水温数据与数字孪生模型的水温预测进行对比以验证管网模型的正确性。对空调冷媒水系统的数字孪生模型进行仿真,输出各个管段的出水温度和流量预测结果。图4所示为数字孪生模型管网流量预测值与实测值对比,流量仿真值与实测值的皮尔逊系数 PCC 为 0.995,归一化绝对误差 NMBE 为 1.72%,均方根误差 RMSE 为 0.27kg/s 。管网的水力特性与实际一致性很好,误差较小,在水力特性方面满足系统仿真要求。在数字孪生模型管网温度预测值与实测值对比方面,以设备管理用房 B 端设备 K2 为例,将供水干管温度与设备 K2 的进口预测温度和实测温度进行对比,结果如图5所示。从图5中可以看出供水干管的实际供水温度、实际测量的 K2 进口温度和预测 K2 的进口温度三条曲线整体趋势基本一致,计算 K2 实际值与预测值的皮尔逊相关系数 PCC 为 0.954。K2 实际供水温度比预测温度高 $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$,均方根误差 RMSE 为 0.2°C 。K2 供水温度实际值比预测值高的原因是仿真时输入的是保温层设计参数,而在实际系统中由于长期运行缺少维护,保温层有破损或者受潮,导致保温材料导热性增大,实际保温性能下降。在实际工程应用中,可根据末端供水温度预测值与实际值的差异来判断管网保温层的保温效果。保温性能劣化、保温层受潮或物理破损会导致冷源损失,当实际末端供水温度持续高于预测值时,数字孪生系统可以发出

提示信息,用于防潮层修复或管道保温层材料更换的决策。

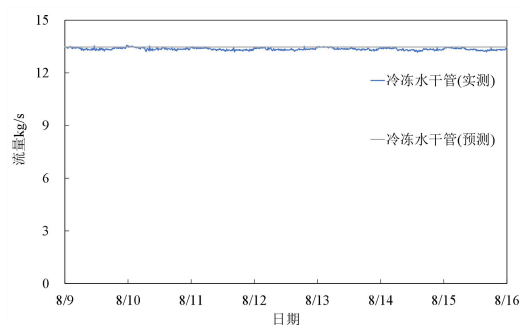


图4 数字孪生模型管网流量预测值与实测值比较

Fig.4 Comparison of predicted and measured pipe-network flow rates in the digital twin model

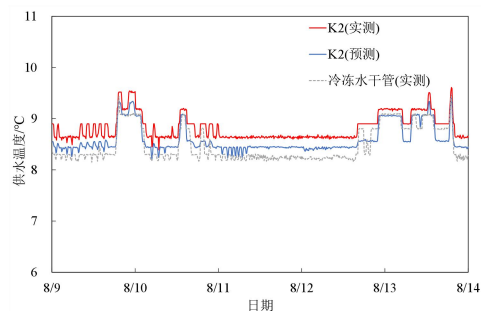


图5 数字孪生模型管网温度预测值与实测值比较

Fig.5 Comparison of predicted and measured pipe-network temperatures in the digital twin model

2 空调冷媒水热延迟与衰减特性分析

对冷媒水系统的数字孪生模型进行仿真,得到管网各个管段的温度、流量和流速等参数。水泵运行频率 45Hz,仅 1 号泵运行,控制阀的开度按照实际开度进行调整以确保管网末端的流量与测量值一致。K1、K2 和 K3 末端的模拟流量分别为 0.65kg/s 、 5.59kg/s 和 7.56kg/s ,流量与其设计流量一致。管网初始化需要一段时间,为研究热延迟特性,需设置一个阶跃信号,在第 20 分钟时把冷冻水供水温度从 7°C 上升至 10°C 。同时,在进行热延迟分析时,末端的负荷设置为 0。

管网中上一供水管段的出口温度与下一管段的进口温度相等,将空调冷媒水各管段的出口温度进行绘制。图6是管网支路供水管段的出口温度(即进入末端盘管设备的入口温度)。从图6中可以看出 1 号冷冻水泵供水管段和供水干管迅速响

应, 在 10 秒内就开始了响应, 其次是 K1 供水管段、K2 供水管道, K3 供水末端距离最远, 最晚响应。K1 供水管道经过 74s 后从 7.2℃ 开始响应, K1 进口温度稳定在 10.2℃。K2 供水管道经过 216s 后从 7.2℃ 开始响应, K2 的入口处温度稳定在 10.2℃。K3 供水管段经过 227s 后管道出口从 7.2℃ 开始响应, K3 的供水管温度稳定在 10.2℃。

图 7 是管网回水管段的出口温度 (即进入回水干管或者集水器的入口温度), 回水管道出口趋势与供水管道基本一致。K1 的回水管经过 127s 后管道出口从 7.3℃ 开始响应, 进入回水干管前温度稳定在 10.3℃。K2 用户的回水管经过 220s 后管道出口从 7.2℃ 开始响应, 进入回水干管前温度稳定在 10.2℃。K3 的回水管经过 242s 后管道出口从 7.2℃ 开始响应, 进入回水干管前温度稳定在 10.2℃。由于末端 K1 离回水干管最近, 因此在末端 K1 的回

水管道开始响应后, 回水干管随之在 142s 开始响应, 回水干管内尚未升温的水先和已经升温的 K1 的末端回水混合, 待大里程末端回水后, 回水干管温度上升至稳定。1 号冷冻水泵的回水管出口 (即制冷机进口) 响应时刻相对回水干管滞后约 8s。

根据管网管段出口温度响应时间可知管段响应先后顺序与管网结构拓扑紧密相关, 距离越近的管道越早响应, 温度经过一段时间的延迟后开始上升。各管道的开始响应时刻基于公式 (7) 中的延迟时间的累加, 即水流在管道中的流动时间的累加。对于整个管网来说, 最远的用户末端 K3 需要 227s 才能响应到制冷机提供的冷水。在当前流量下整个管道流经一圈需要 455s, 大约为 7.5 分钟。当前流量与设计流量一致, 管网循环一圈所需的时间为 7.5 分钟。

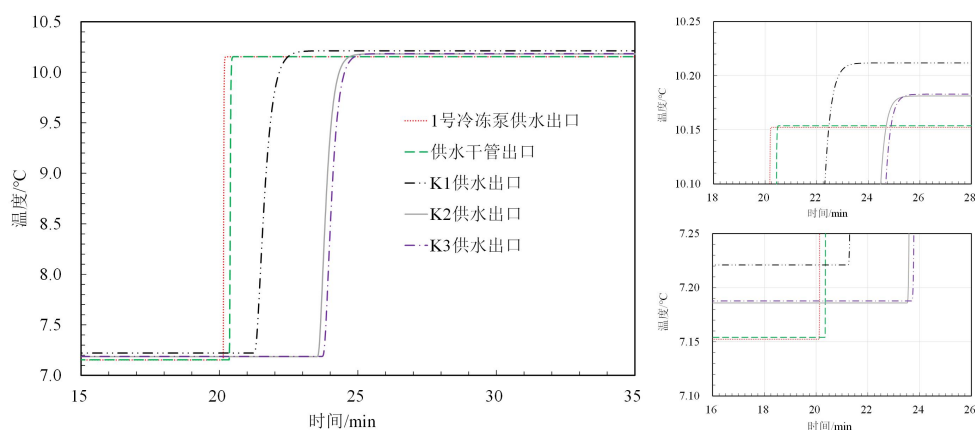


图 6 冷冻管网供水管段的出口温度 (即末端设备的入口温度)

Fig.6 Outlet temperature of the chilled-water supply pipe section (i.e., the inlet temperature of the terminal unit)

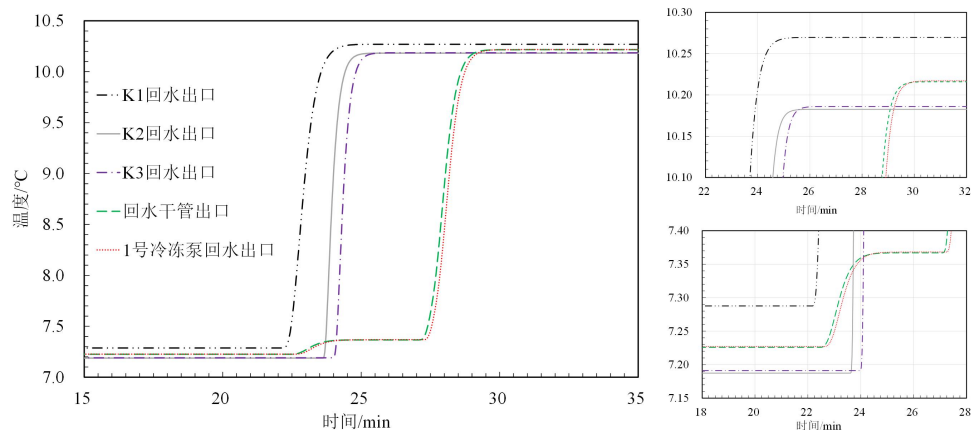


图 7 冷冻管网回水管段的出口温度 (即进入集水器的入口温度)

Fig.7 Outlet temperature of the chilled-water return pipe section (i.e., the inlet temperature to the return-water header)

所有末端温度稳定值略高于供水干管温度 7°C ,原因是其在阶跃信号变化的前20分钟的管内与管外 29°C 的环境通过管道保温层有冷损失,使管内水温明显高于 7°C ,大约为 7.2°C 。因此,当管网长时间运行时,如果管道保温材料保温效果不好,会导致实际进入末端的供水温度上升,从而导致供冷品质下降。而管网规模越大管道越长,供冷品质下降或者能量浪费情况越严重。20分钟后,阶跃信号上升至 10°C ,此时末端供水温度稳定后维持在 10.2°C ,即末端的温升仍为 0.2°C ,即热衰减约为 0.2°C 。

在实际工程应用中,很难对管网的主干管及各个支路的流量及温度等进行详细测量,因此一般仅能根据管长和流速估算进行热延迟的简略计算,本文采用空调冷媒水系统的数字孪生系统进行系统的复现,模拟系统在不同工况下的运行状态,准确预测管网干管及不同支路的流量及温度状态等,同时基于冷媒水热延迟与衰减特性的定义进行详细准确的计算,反映冷媒水由冷源侧传递至末端过程中的热延迟与热衰减准确特性,可为冷机启停时刻确定、负荷响应预测及运行调控策略制定提供参考。

3 结论

本文基于实际物理空间的空调冷媒水系统采用动态管道模型,基于Modelica语言的流体连接器接口搭建了空调冷媒水数字孪生模型。空调冷媒水数字孪生模型与实际验证结果对比,PCC为0.954, RMSE为 0.24°C ,空调冷媒水数字孪生模型仿真结果与实际一致性好,误差小,数字孪生模型能准确反映管网实际热力及水力特性。进一步对空调冷媒水管网的延迟和衰减特性进行仿真分析。结果表明管网拓扑决定响应时序,本研究中K1末端响应时间为74s, K2末端响应时间为216s,末端K3响应最慢为227s,管网总延迟约7.5分钟,该管网的热衰减约为 0.2°C 。通过上述研究结果,可为本地地铁站实际运行过程中冷机启停策略的制定提供一定理论参考,使冷媒水系统能够更快速、准确地响应地铁站负荷变化,从而保障站内热环境长期维持在人体舒适范围内。同时,本文所选取的地铁车站空调冷媒水系统具有典型的集中供冷系统特征,包括冷机、冷冻水泵、换热末端及复杂输

配管网等关键组成部分,其运行过程中普遍存在负荷波动明显、管网输送存在热延迟与热衰减、冷机启停调控需与末端需求相匹配等问题。因此,虽然本文以某一实际地铁车站为案例开展建模与仿真分析,但所建立的热力-水力耦合建模方法、热延迟和热衰减特性分析思路,以及对冷机启停和系统动态响应的研究结论,对其他地铁车站冷媒水系统及类似建筑集中空调水系统具有一定参考价值。需要指出的是,本文所构建的数字孪生模型仍处于初步阶段,尚未实现数字模型、三维模型与实体系统之间的实时交互与协同反馈,后续将进一步围绕多模型融合、实时数据驱动及虚实交互机制开展深入研究。

参考文献:

- [1] 刘魁星,耿若曦,龙惟定.能源总线系统输配管网水力计算方法[J].暖通空调,2017,47(4):10-13.
- [2] 刘永鑫,金虹,罗鹏,等.贝叶斯方法在水力管网阻力特性辨识估计中的应用研究[J].建筑科学,2018,34(8):89-93,105.
- [3] 马超龙,韩冲,马乐志,等.基于智慧热网系统的供热管网仿真模拟及能耗分析[J].建筑节能,2019,47(3):145-148.
- [4] W Gu, J Wang, S Lu, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017,199:234-246.
- [5] 朱应杰,王海超,Esa Teppo,等.分布式蓄热器在供热系统中的应用及容量优化[J].制冷与空调,2022,36(4):578-583.
- [6] 梁艳辉.换热站二级管网质-量调节策略及系统设计应用[J].制冷与空调,2025,39(2):268-273.
- [7] 何蕾.基于需求侧综合响应的热电联供型微网运行优化[J].电测与仪表,2018,55(7):47-52,61.
- [8] 许抗吾,褚赛,刘启明,等.基于性能曲线的并联水泵控制策略研究[J].制冷与空调,2025,39(3):439-448,454.
- [9] 林则焯,袁中原.基于GWO-BP神经网络的空调水系统泵阀联调优化控制方法[J].制冷与空调,2024,38(4):443-450.
- [10] Cox S J, Kim D, Cho H, et al. Real time optimal control of district cooling system with thermal energy storage using neural networks[J]. Applied Energy, 2019,238:

- 466-480.
- [11] 苏新霞,周璇卿.储能应用于需求侧响应的商业模式[J]. 科技与创新,2017,(19):5-6.
- [12] 邵世圻,戴赛,胡林献,等.计及热网特性的电热联合系统调度方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(10): 24-30.
- [13] Tang R, Wang S, Shan K, et al. Optimal control strategy of central air-conditioning systems of buildings at morning start period for enhanced energy efficiency and peak demand limiting[J]. Energy, 2018,151:771-781.
- [14] 刘志渊,于航,黄子硕.考虑管网衰减延迟特性的分布式能源站实时出力计算[J].暖通空调,2017,47(4):19-22.
- [15] 韩宝成,王钰熙,张晓东,等.大型集中供热管网热延迟热衰减特性研究[J].区域供热,2025,(1):93-106.
- [16] 迟莹,王璐,李昂,等.核设施压缩空气系统模拟研究[J].暖通空调,2025,55(S1):388-391.
- [17] 罗天航,林贵平,卜雪琴,等.基于 Flowmaster 平台的雷达行波管多支路液冷系统流动换热分析[J].制冷与空调,2017,17(9):34-39.
- [18] 季科,张永贵,刘冰冰,等.基于 TRNSYS 的空调水系统仿真平台[J].暖通空调,2015,45(5):93-96.
- [19] 张超,宰相,鲁梦龙,等.基于 TRNSYS 的区域供热系统仿真与模型验证[J].建筑科学,2021,37(12):103-110.
- [20] 孙鑫南.基于 Modelica 的蒸汽管网系统热工水力动态特性分析[D].杭州:浙江大学,2020.
- [21] 杜润琪.集中供热系统二次网的动态仿真与优化控制研究[D].北京:北京建筑大学,2023.
- [22] 管铮.基于 Modelica 模型的集中供热管网动态平衡分析及控制方法研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
- [23] Yu J, An C, Tang Q, et al. Heat transfer characteristics of subsea long-distance pipeline subject to direct electrical heating[J]. Geoenergy Science and Engineering. 2024, 234,212679.
- [24] B van der Heijde, M Fuchs, C Ribas Tugores, et al. Dynamic equation-based thermo-hydraulic pipe model for district heating and cooling systems[J]. Energy Conversion and Management, 2017,151:158-169.