

基于软测量技术的热力系统凝给水系统流量状态监测方法研究

应冬

海军装备部, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月3日; 发布日期: 2026年4月10日

摘要

对热力系统凝给水系统流量的实时预测在系统状态监测、故障诊断方面有着重要意义。本文提出了融合机理模型与数据驱动的软测量方法, 进而实现凝给水系统的流量实时预测。通过利用泵、阀门的设计参数以及传感器采集的实时数据, 首先构建了凝给水泵、阀门和管道系统的流量实时计算模型, 并在实时仿真平台中进行了模型构建, 进一步开发实时通讯接口, 进行了误差分析和评估。结果表明, 该软测量模型在给水管调节阀、给水泵以及凝水泵等关键流路的流量实时预测, 平均流量误差控制在2.5%以内, 所建立的软测量模型可以较好的预测凝给水系统流量。

关键词

凝给水系统, 流量调节阀, 离心泵, 软测量

Research on Flow Status Monitoring Method of Condensate Feedwater System in Thermal Power Plant Based on Soft Sensing Technology

Dong Ying

Naval Equipment Department, Wuhan Hubei

Received: March 10, 2026; accepted: April 3, 2026; published: April 10, 2026

Abstract

Real-time prediction of condensate feedwater flow in thermal power plants is of great significance for

system status monitoring and fault diagnosis. This paper proposes a soft sensor method that integrates a mechanistic model and data-driven approaches to achieve real-time flow prediction of the condensate feedwater system. By utilizing the design parameters of pumps and valves, as well as real-time data collected by sensors, a real-time flow calculation model for the condensate feedwater pumps, valves, and piping system was first constructed. The model was then built in a real-time simulation platform, and a real-time communication interface was further developed, followed by error analysis and evaluation. The results show that the soft sensor model can effectively predict the flow of the condensate feedwater system in key flow paths such as feedwater regulating valves, feedwater pumps, and condensate pumps, with an average flow error controlled within 2.5%.

Keywords

Condensate Feedwater System, Flow Control Valve, Centrifugal Pump, Soft Measurement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

在火电站系统中, 流量测量是保障安全运行、优化效率、延长设备寿命的核心技术手段。例如锅炉前的给水流量调节阀就是汽水循环中重要的执行机构, 需通过精准控制给水流量确保锅炉内水位稳定, 避免水位过高或水位过低引发风险。目前火电站流量测量主要依赖孔板、文丘里管及超声波流量计等物理传感器。然而, 传统方法存在显著局限性: 孔板流量计因节流结构导致压力损失较大(通常占管路压降的30%~50%), 影响系统能效, 且对直管段长度要求严格(需前10D后5D, D为管径), 长期运行中孔板边缘磨损易造成测量漂移, 需频繁停堆维护[1]; 文丘里管虽压损较低, 但其喉部易被杂质堵塞, 且安装精度要求苛刻; 超声波流量计虽精度可达 $\pm 0.3\%$, 但其测量依赖流体中的悬浮颗粒或气泡反射信号, 在高温高压高纯度给水条件下可能因散射体不足导致数据失真[2]-[4]。此外, 上述方法均需满足前后直管段要求, 在空间受限或复杂管路布局中适用性受限。另一方面, 已有的流量传感器数据可作为辅助分析系统健康状态的数据资源, 但缺乏有效的理论模型进行状态评估支撑, 使得工程中部分传感器的实时数据无法发挥有效的监测或诊断价值。软测量技术(Soft Sensing)是通过结合机理知识与计算机技术, 利用易测变量构建数学模型来推断难测变量的技术, 具有经济可靠、动态响应快等特点, 可用于工程中的状态监测或控制[5][6]。该方法不仅为火电站流量测量提供了一种灵活且高效的替代方案, 为系统的优化运行和故障诊断提供了新的技术支撑。软测量技术作为一种新兴的测量手段, 能够有效弥补传统方法的不足, 为火电站流量测量提供新的思路。

以往学者的研究虽然对阀门和泵的流量测量进行了探讨, 但与实际运行数据的实时比对和工程应用较少[7][8]。本文提出了一套集成阀门与管道系统的综合流量软测量模型, 该模型融合了给水调节阀、泵以及管道的特性。本文的创新之处在于, 高效利用了阀门、管道与泵的协同效应, 成功地将流量平均误差控制在给水系统2%以内, 以及凝水总管2.5%以内, 显著提高了流量测量的准确性。

2. 机理模型构建及其原理

2.1. 调节阀流量计算模型

调节阀软测量模型针对主给水流量控制系统上的三列给水调节支路, 各支路管路参数一致, 每列支

路上有并联的两个阀门，流量大的是主给水流量调节阀(Flow Control Valve Main, FVM)；流量小的是旁路给水调节阀(Flow Control Valve Auxiliary, FVA)。从主给水流量控制系统设计说明书里提取给水调节主阀和给水调节旁路阀的设备参数，即 KV 值 - 开度(KV-h)的特性，归一化后的曲线如图 1 所示，主阀和旁阀的额定流量系数 KV_0 分别为 1400 和 275。

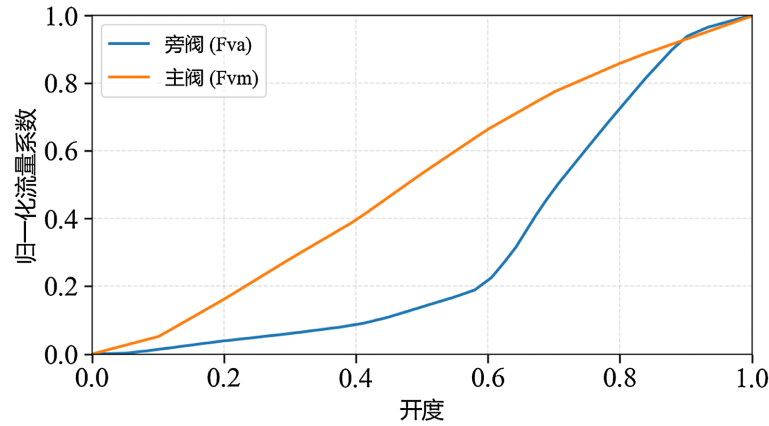


Figure 1. Factory characteristic curve of water supply regulating valve
图 1. 给水调节阀出厂特性曲线

已知流体流经控制阀在紊流条件下不可压缩流体的基本流量为[9] [10]

$$Q_V = K_V N_1 F_P \sqrt{\frac{\Delta p_V}{\rho_1 / \rho_0}} \quad (1)$$

其中 Q_V (单位 m^3/h) 是体积流量， K_V 是阀门的流量系数， N_1 是数字常数，这里取 0.1； F_P 是管道几何形状系数为 1， Δp_V (单位 kPa) 是阀门压降， ρ_1 为工况密度， ρ_0 为标准参考条件下 (通常是 4℃ 的温度和 1 个大气压的压力)，水的密度，等于 1000 kg/m^3 。

由上式可推出阀门两端的压降为

$$\Delta p_V = \left(\frac{Q_V}{K_V N_1 F_P} \right)^2 * \rho_1 / \rho_0 \quad (2)$$

现管道导纳系数已知，管路压降的表达式为

$$\Delta p_L = \frac{G_m^2}{\rho_1 * KADM0} \quad (3)$$

其中 $KADM0$ 为管道导纳系数， ρ_1 (单位 kg/m^3) 为工质密度， G_m (单位 kg/s) 为质量流量，该系数的建立依赖存储于某火电系统的历史数据，将某时刻机组测点数据 (表 1) 导入流体网络仿真软件 MSP (Multi-subject Simulation Platform) 中，采用其热力系统建模组件进行阀门、管道和边界建模。MSP 是一套广泛应用于火力发电、风电、光伏等发电机组仿真建模的多学科仿真平台。该平台以电厂实际热力设备或设备组合为对象划分模块，建立对应的质量、能量与动量守恒方程；通过分析各模块间的连接关系，软件可自动识别隐含在热力系统中的流体网络拓扑结构，并完成大型流体网络的数值求解。在建模过程中，结合管道几何构型、流体物性参数及泵的机械特性，实现了复杂管网系统阻力特性的高精度数字化表征，并基于此求取三条支路的管道导纳系数。图 2(a) 则为支路 A 列的示意图，图 2(b) 则为传入表 1 边界条件的 MSP 仿真运行图。已知阀门压降和管道压降之和，假设并联阀门两端压降相等，工况密度相等， $KADM0$

和 KV 值已知的情况下, 就可以通过上述(1)、(2)联立求解分别得出流经主阀和旁阀的流量以及总流量。边界压力、阀门开度取自 DCS 数据, 则可实时计算出两个支路的实时流量和压差, 并与 DCS 监测的数据进行比对。

Table 1. Flow measurement data of the first branch
表 1. 第一支路流量测点数据

测点名称	数值	单位
主蒸汽与给水母管差压变送器	0.88	MPa
A 列给水调节阀(主阀)开度	47.85	%
A 列给水调节阀(旁阀)开度	80	%
A 列给水支路温度	225	℃
A 列锅炉压力	16.8	MPa
A 列给水支路流量测量值	1411.3	t/h

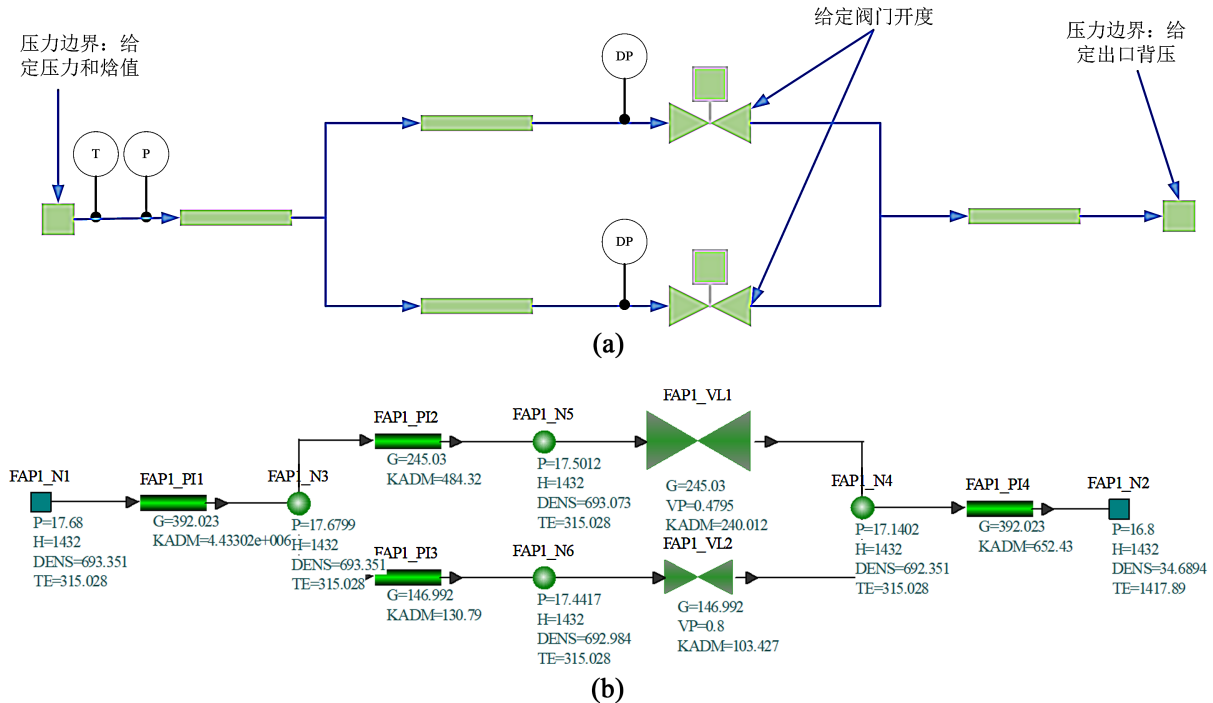


Figure 2. (a) Schematic diagram of water supply branch A; (b) Simulation diagram of water supply branch A
图 2. (a) 给水平支路 A 列示意图; (b) 给水平支路 A 列仿真运行图

2.2. 离心泵流量计算模型

给水泵软测量模型是针对二回路给水泵系统(TFP)上三个支路的给水泵出口流量的计算, 每一列有一台前置泵及一台主泵, 前置泵是定频的, 因此设计说明书提取的泵组扬程 - 流量曲线是以主泵的转速 N 标定, 加上前置泵的扬程 246.8 m, 如图 3 所示。

给水泵出口流量计算步骤与 1.1 类似, 一般情况下不是所有的泵都在运行, 可通过泵出口压力和转速判断泵是否运行, 对运行的泵特性($H = f_1(Q, n)$, 求解时用到参数方程插值法)和相应的管路压降(即式(2), 相

应的管道导纳系数由仿真得出), 已知泵管道系统总的压差, 通过牛顿-拉弗森迭代方法求解非线性方程。

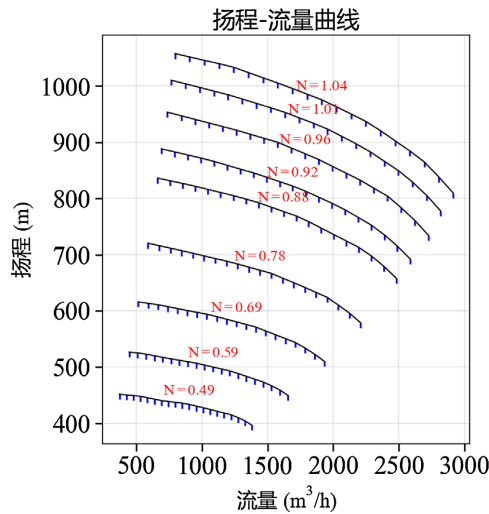


Figure 3. Feedwater pump factory flow-head characteristic curve
图 3. 给水泵出厂流量-扬程特性曲线

凝水泵模型也是同样的方法计算, 然而, 由于凝水泵压力测点相隔太远, 管道导纳系数不再是常数, 在 2.3 节将详细说明。

2.3. 凝水系统管路建模

式(2)的管道导纳系数 $KADM0$ 的数值直接影响供热管网水力计算结果的准确性, 也是判断管段是否发生堵塞和泄漏的依据。对于上述的给水调节阀系统和给水泵系统, 由于其压力节点之间的管路结构简单, 管内流体雷诺数通常远超临界值 2300, 因此处于紊流状态, 基于达西-韦斯巴赫方程 $\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$, 即使将摩擦系数定为常数, 也不会影响系统计算精度[11]。

而凝水泵两端的压力节点之间还有很多阀门系统和测量系统, 同时有分支管路(如化学加药系统、轴封冷却器、凝结水精处理装置、化学取样系统、应急取水系统), 运行工况中, 局部阻力变化或流动状态的变化都会使管段阻力特性系数发生变化[12]。

基于历史数据, 可以得出如图 4 所示的凝水泵 A 两个压力节点之间的管道导纳系数随体积流量变化的曲线, 定义为稳定线和高阻力线, 其中稳定线对应系统阻力特性相对平缓的稳定运行状态, 而高阻力线则反映了高流量下系统阻力急剧增加、流动状态发生显著变化的非线性特性。凝水泵出口的流量计算仍需联立求解泵特性方程 $H = f_1(Q, n)$ 和管路压差计算式(2), 只是式(2)的 $KADM$ 将不再是常数, 而是流量的函数 $KADM = g(Q)$, 且需要依据历史数据规律及凝水泵功率和效率判断流态, 从而判断选择图 4 的稳定线还是高阻力线。

3. 数据验证与结果分析

采集的数据来源于新装某火电机凝给水系统某次调峰的测量数据, 涵盖给水调节阀、给水泵、凝水泵等关键环节, 各测点数据已进行时间对齐处理。数据采集过程从满功率稳态运行一段时间后开始, 期间历经 3 次调峰, 最终重新回到稳态, 采样时间 48 小时, 采样间隔为 60 秒, 共包含 2880 个时间点。按照第一章的模型理论构建调节阀、给水泵、凝水泵的软测量计算方法, 所得的计算流量与测量流量(DCS 信号)的对比及相应的误差如图 5~10 所示。

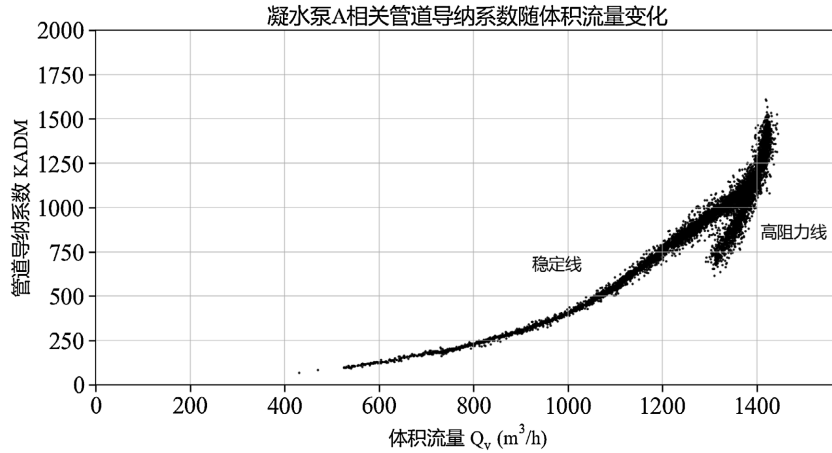


Figure 4. Variation of the KADM coefficient of the pipeline related to condensate pump A with volumetric flow rate
图 4. 凝水泵 A 相关管道导纳系数随体积流量变化

3.1. 给水调节阀流量计算结果分析

图 5 中主阀(Fvm)计算流量为深灰色虚线, 旁阀(Fva)计算流量为浅灰色点实线, 两者之和则为模型计算的 A 列的总流量(红色实线表示), 与该列孔板流量计测量流量(黑色实线表示)基本一致。误差百分比如图 6 所示, 稳态工况下相对 RMSE 为 0.73%, 最大误差 2.53%; 调峰期间相对 RMSE 为 0.82%, 最大误差 3.39%。全过程平均误差控制在 2%以内, 在考虑孔板流量计自身误差和传感器时间对齐系统误差的

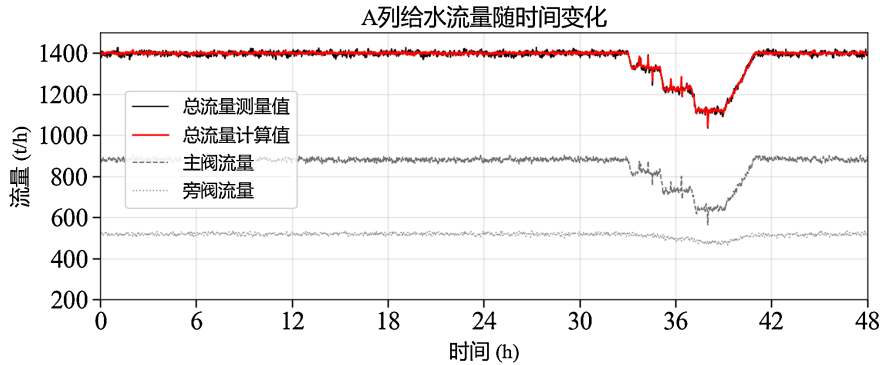


Figure 5. Flow rate of the first branch of the water supply regulation system as a function of time
图 5. 给水调节第一支路流量随时间变化

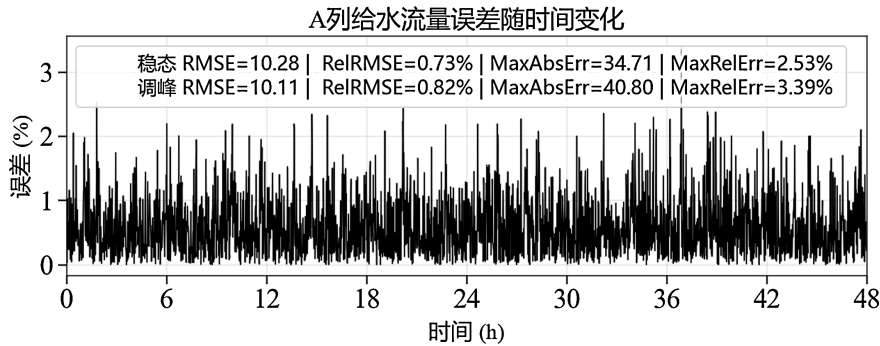


Figure 6. Error of the first branch of water supply regulation as a function of time
图 6. 给水调节第一支路误差随时间变化

前提下, 该结果可以说明本文的调节阀流量计算模型完全符合软测量的标准, 可以替代流量计作为可靠且精准的流量监测手段, 能够在复杂工况下确保流量调控的稳定性与高效性, 对于提升整个流体输送系统的性能、优化工艺流程降低、运营成本等方面皆具有极为重要的意义与价值。

3.2. 给水泵流量计算结果分析

图 7 为给水泵 A 的计算流量(红色实线)与测量流量(黑色实线)随时间的变化, 稳态和调峰过程中计算值与测量值高度一致。根据图 8 显示的给水泵 A 误差分析结果, 稳态 RMSE 为 21.10, 调峰 RMSE 为 21.48。结合图 7 中计算流量与测量流量的高度一致性可以看出, 该模型在给水泵 A 的流量监测中表现出良好的适用性; 平均误差仍能控制在 2%以内, 极端点接近 3.5%的误差也在孔板流量计固有误差和传感器时间对齐系统误差的可接受范围内。这表明该模型同样能够满足给水泵系统的流量监测精度要求, 在复杂工况下为给水泵的运行状态评估和性能优化提供了可靠的数据支撑。

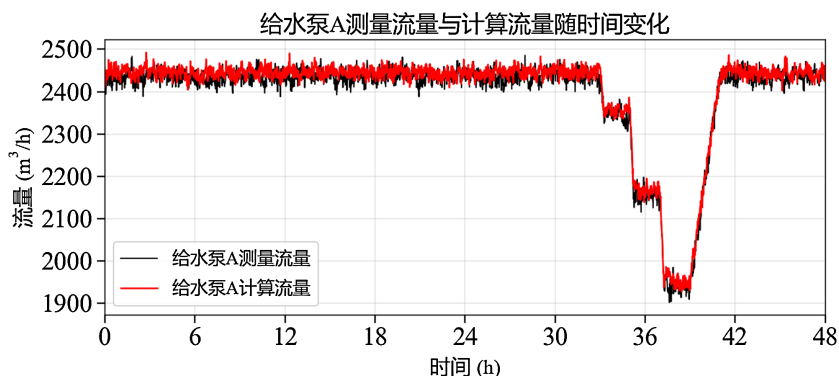


Figure 7. Changes in calculated and measured flow rates of water pump A over time
图 7. 给水泵 A 计算流量与测量流量随时间变化

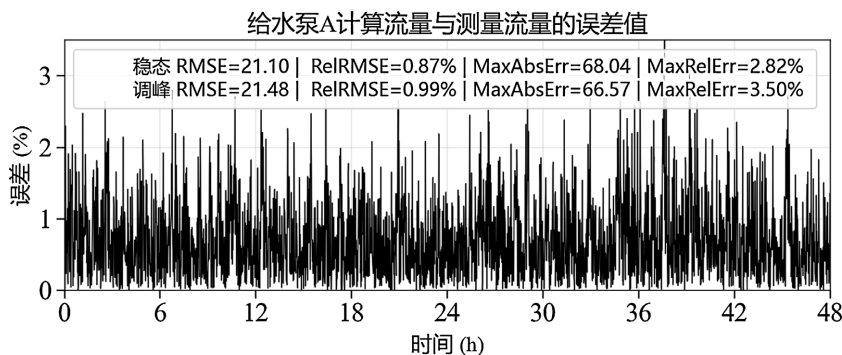


Figure 8. Flow error of water pump A over time
图 8. 给水泵 A 流量误差随时间变化

3.3. 凝水泵流量计算结果分析

单独的凝水泵管路是没有流量计的, 仅有凝水总管有流量计, 总管分为三列凝水支路, 凝水泵 B 没有运行, 凝水泵 A 的流量为深灰色虚线, 凝水泵 C 的流量为, 凝水泵总管计算流量(红色实线)则为凝水泵 A 与 C 的流量之和, 凝水总管计算值(红色实线)与测量值(黑色实线)基本一致。根据图 10 误差分析显示稳态与调峰工况下相对 RMSE 均为 0.8%左右, 最大误差分别为 3.01%和 2.93%。在考虑凝水系统无分支流量计、仅总管有流量计的实际情况, 以及传感器时间对齐系统误差后, 该模型误差整体控制在 2.5%

以内，完全满足流量监测的精度要求，证明了凝水泵模型在复杂工况下仍能提供可靠的流量数据支撑。

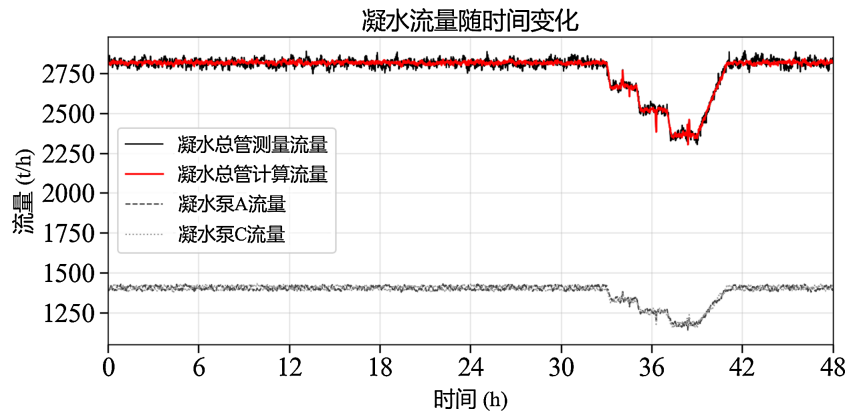


Figure 9. Changes in calculated and measured flow rates of the condensate pump over time
图 9. 凝水泵计算流量与测量流量随时间变化

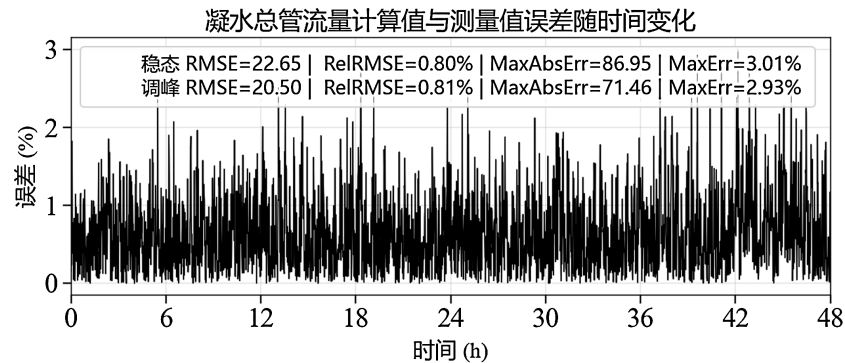


Figure 10. Error between calculated and measured flow rates of total condensate pump over time
图 10. 总的凝水泵计算流量与测量流量误差随时间变化

4. 结论

本文提出了一套集成阀门、离心泵与管道系统的综合流量软测量模型，并将其应用于某热力系统的流量测量。通过与传统物理传感器测量方法的对比和数据分析，结果表明该模型在动态特性监测、流量预测方面精度满足工程需求。

(1) 在给水调节阀系统中，模型计算的平均流量误差控制在 2% 以内，个别点在 3% 左右；在凝水总管系统中，平均误差也在 2.5% 以内。这表明模型能够有效整合局部与整体的流量数据，为流量监测提供精准可靠的依据。

(2) 模型具有良好的适应性和灵活性。能够处理复杂的管路系统，如凝水泵管路，该管路存在多个阀门系统和分支管路，运行工况复杂，局部阻力变化和流动状态变化都会影响管段导纳特性系数。而模型通过引入流量相关的管道导纳系数，解决了这一问题，实现了凝水泵系统的流量监测。

此外，本研究的模型在实际应用中展现了强大的潜力。通过与实际数据进行对比，我们验证了模型在不同运行工况下的稳定性和可靠性。这为进一步推广该模型在火电站及其他工业领域的应用奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 全胜. 核电厂流量测量问题处理[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(6): 49-51+60.

-
- [2] 郝晓锋. AP1000 三门项目二回路主给水流量测量分析[J]. 中国高新技术企业, 2013(15): 40-43.
- [3] 居法立, 陈远伦, 陶佳林. 核电厂超声波流量计在主给水流量测量中的应用[J]. 中国核电, 2014, 7(2): 118-123+112.
- [4] 许洲. 声学多普勒流量计(ADFM)在特大型污水厂出水计量的应用分析[J]. 城市道桥与防洪, 2014(4): 128-131+7.
- [5] Nguyen, T.N. (2020) Model-Based Diagnostic Frameworks for Fault Detection and System Monitoring in Nuclear Engineering Systems.
- [6] Brumand-Poor, F., Kotte, T., Hanifa, A., Reese, C., Hofmeister, M. and Schmitz, K. (2025) Advancing Pressure-Based Flow Rate Soft Sensors: Signal Filtering Effects and Non-Laminar Flow Rate Determination. *Journal of Experimental and Theoretical Analyses*, 3, Article No. 8. <https://doi.org/10.3390/jeta3010008>
- [7] 陶晓磊, 赵晓东, 吴俊, 等. 基于调节阀的流量测量方法实验研究[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(2): 144-149.
- [8] 陈华东, 王豪. 污水泵站流量软测量方法及应用[J]. 自动化仪表, 2006(6): 61-63.
- [9] 国家标准化管理委员会. GB/T 17213.2-2017. 工业过程控制阀 第 2-1 部分: 流通能力 安装条件下流体流量的计算公式[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [10] 陆培文, 汪裕凯. 调节阀实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [11] 吕艺枫. 海阳核电厂服务水系统改造实验及性能分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2021.
- [12] Simpson, A. and Elhay, S. (2011) Jacobian Matrix for Solving Water Distribution System Equations with the Darcy-Weisbach Head-Loss Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137, 696-700. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000341](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000341)