

韩冰, 刘润泽, 谭琳. 基于改进熵权法的供水管网水力模型精度评估方法[J]. 净水技术, 2026, 45(7): 173-181.

Han B, Liu R Z, Tan L. Accuracy evaluation method for hydraulic model of water supply network based on improved entropy weight method[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(7): 173-181.

基于改进熵权法的供水管网水力模型精度评估方法

韩冰*, 刘润泽, 谭琳

(上海城投水务<集团>有限公司供水分公司, 上海 200002)

摘要 【目的】供水管网水力模型是城市供水系统运行管理、调度决策和规划设计的重要技术工具,其精度直接影响管网运行分析与决策的科学性。传统精度评价方法多依赖单一指标(如平均绝对误差),难以全面反映模型在误差幅度、波动特性及趋势一致性等方面的表现,且在指标差异度较小时易出现评价结果不稳定的问题。【方法】本文提出一种基于改进熵权法的多指标综合精度评价方法。该方法构建由平均绝对误差、相对误差率均值、均方根误差、相对对数均分误差、纳什效率系数、一致性指数及误差波动指数组成的评价体系,通过无量纲化消除量纲影响,并利用改进熵权法计算各指标权重,形成综合反映模型性能的精度指数(CMAI)。【结果】从数值看,流量监测点的综合精度高于压力监测点,说明在该区域模型中流量预测性能优于压力预测。改进熵权法综合评价结果与单一平均绝对误差评价相比,在模拟 A 中将等效平均误差从 1.140 0 m 降至 0.754 3 m,降低幅度约为 33.9%,说明改进熵权法能够揭示出不同监测类别之间的性能差异,并更好地反映趋势一致性与误差波动情况。【结论】CMAI 可作为模型优化的目标函数,用于指导模型参数调整与数据采集策略优化。

关键词 供水管网; 水力模型; 精度评估; 改进熵权法; 综合指标

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)07-0173-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.07.020

Accuracy Evaluation Method for Hydraulic Model of Water Supply Network Based on Improved Entropy Weight Method

Han Bing*, Liu Runze, Tan Lin

(Water Supply Branch Company, Shanghai Chengtou Water Group Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract [Objective] The hydraulic model of the water supply network is an important technical tool for the operation management, scheduling decision-making, and planning design of urban water supply systems. Its accuracy directly affects the scientific analysis and decision-making of the network operation. Traditional accuracy evaluation method often rely on a single indicator (such as mean absolute error), which makes it difficult to fully reflect the performance of the model in terms of error amplitude, fluctuation characteristics, and trend consistency. Moreover, when the indicator differences are small, the evaluation result are prone to instability. [Methods] Therefore, this paper proposed a multi index comprehensive accuracy evaluation method based on improved entropy weight method. This method constructed an evaluation system consisting of mean absolute error, mean relative error rate, root mean square error, relative logarithmic mean square error, Nash efficiency coefficient, consistency index, and error fluctuation index. The dimensional influence was eliminated through nondimensionalization, and the improved entropy weight method was used to calculate the weights of each indicator, forming a comprehensive accuracy index (CMAI) that reflected the performance of the model. [Results] From a numerical perspective, the comprehensive accuracy of flow monitoring points was higher than that of pressure monitoring points, indicating that the flow prediction performance was superior to pressure prediction in the regional model. Compared with the evaluation result of the single mean absolute error index, the improved entropy weight method reduced the equivalent average error from 1.140 0 m to 0.754 3 m in simulation A, with a reduction rate of approximately 33.9%. This indicated that the improved entropy weight method could reveal the performance differences among different monitoring categories and better reflect the trend

[收稿日期] 2025-09-23

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFC3801000)

[通信作者] 韩冰(1978—),男,高级工程师,主要从事供排水 GIS 水力模型开发、供水漏损控制等工作, E-mail: 78338959@qq.com。

consistency and error fluctuation characteristics. [Conclusion] The CMAI can serve as the objective function for model optimization, guiding the adjustment of model parameters and optimization of data collection strategies.

Keywords water supply network; hydraulic model; accuracy evaluation; improve entropy weight method; comprehensive indicators

在城市基础设施体系中,供水管网属于核心组成部分,承担着供水资源的重要作用,其安全稳定运行对社会经济发展至关重要。通过构建水力模型模拟管网运行工况,已成为供水企业实现精细化管理、优化调度决策的重要技术手段。然而,由于管网结构复杂、建模过程中存在简化处理,模型精度往往受到影响,因此建立科学的精度评估方法是保障模型有效性的前提。

实际的供水管网存在大量的不确定影响因素,包括管道属性特征、隐蔽漏损位置、用水规律变化等,虽然地理信息系统(GIS)数据库的应用为复杂管网的资料梳理提供了极大的便利,但阀门精确状态、管道未知关系等问题依然存在,由此造成的不准确管网状态会反映到水力模型计算误差中,也对模型精度评价方法提出更高要求。

采用单一精度指标评价管网动态水力模型时,虽然可以在一定程度上指示模型的精度,但难以全面反映模型的模拟精度。这就会出现2个模型的多时段平均绝对误差可能相同,但误差曲线可能有很大不同的情况。根据英国水研究中心的模型校核评价准则,除需控制流量与压力监测点的模拟偏差外,还需要保证压力分界、供水运行趋势及整体压力分布特征的相互吻合。在实际应用中,则应不断迭代校核、优化模型参数,并在工程实践中提炼形成科学合理的评价体系。

2025年,上海市颁布地方标准《城镇供水管网模型建设技术导则》(DB31/T 800—2025)^[1],调整了不同用途模型对压力计算精度与流量计算精度的要求。2023年发布的中国水协团体标准《城镇供水管网模型构建与应用技术规程》(T/CUWA 20059—2022)^[2]中,采用各时段平均绝对误差作为节点压力和管道流量的精度评价指标。但难以全面揭示模型在误差分布、波动特性及趋势一致性等方面的表现。例如,不同模型可能具有相同的平均绝对误差值,但其误差曲线形态和趋势吻合度却存在显著差异,从而影响评价的客观性与指导性。因此,如何利用多种独立的评价指标对水力模型进行综合评价,已成为提升模型评估准确性与全面性的关键问题。

针对上述问题,本文引入一种基于多指标综合评价与改进熵权法的供水管网水力模型精度评价方法。该方法在平均绝对误差、相对误差率均值、均方根误差、相对对数均分误差、纳什效率系数、一致性指数及误差波动指数等7个维度上对模型精度进行量化评价,并通过无量纲化处理消除不同量纲对评价结果的影响。在此基础上,采用改进熵权法计算各指标权重,从而综合计算得到模型精度指数(CMAI),实现对供水管网水力模型的全面、客观、可比性强的精度评价。该方法不仅能有效克服单一指标评价的局限性,还能为模型优化与运行决策提供量化依据。

1 模型构建与精度评价

1.1 供水管网水力模型概述

供水管网水力模型是对城市供水系统中节点、管道、泵站、阀门等设施进行抽象化与参数化处理的数学模型,用于模拟管网在不同运行条件下的水力特性变化。该模型基于连续性方程、能量方程及节点用水规律,通过计算节点压力和管道流量,为运行调度、管网改造及应急管理提供定量依据。在实际应用中,动态水力模型能够反映压力与流量随时间的变化,更接近真实运行状态。然而,管网结构庞大且运行条件复杂,建模过程中不可避免需要进行结构简化与参数假设,这会引入一定的模拟误差,因此需要对模型精度进行系统评价。

1.2 数据来源与模型构建

本文以某区域供水管网为研究对象,收集水厂、节点、泵站、阀门、管道等基础设施数据,结合历史用水量及用户类型对节点用水规律进行分类,利用专业水力建模软件构建区域供水管网水力模型^[3-4]。模型中设置了压力监测点和流量监测点,通过水力平差计算获取各监测点在预设多个时段的模拟值,并与现场监测的实际值进行比对(具体模型结构详见第3节)。根据监测点的多时段真实值 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 和模型模拟值 $\hat{Y} = \{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n\}$,计算模型精度评价指标,用于后续的综合精度分析。

1.3 模型校验与精度判定

在精度评价前,需对构建完成的供水管网水力

模型进行校验,以确保其能够准确反映实际运行状态。模型校验以监测数据为基础,通过调整模型参数,使模型在监测点的压力与流量模拟值尽可能与实测值相符。校核合格后,方可进入后续的精度评价步骤。

目前,供水行业普遍参考的精度校核要求为2023年发布的《城镇供水管网模型构建与应用技术规程》(T/CUWA 20059—2022)对在不同用途下的动态管网模型精度指标提出了明确要求,其中状态评估和运行调度的精度标准如表1所示。

表1 动态管网模型的精度要求
Tab. 1 Accuracy Requirements for Dynamic Pipeline Network Models

模型用途	压力精度	流量精度
状态评估/运行调度	干管压力监测点多时段绝对误差均值为 ε ,98%以上监测点 ε 不超过0.02 MPa,50%以上监测点 ε 不超过0.01 MPa	出厂流量多时段相对误差均值 δ 不超过10%;管径DN400以上且管道监测流速大于0.3 m/s的管道,瞬时流量误差小于15%测点数量占比不低于80%

在本文中,按照上述指标要求对模型进行校核。压力监测点多时段绝对误差均值计算如式(1)。

$$\varepsilon_p = \frac{\sum_{t=1}^T |H_{p,t} - H_{p,t}^{\text{sim}}|}{T} \quad (1)$$

其中: ε_p ——压力监测点p多时段绝对误差均值,MPa;

$H_{p,t}$ ——压力监测点p第t个时刻的压力实测值,MPa;

$H_{p,t}^{\text{sim}}$ ——压力监测点p第t个时刻的水力模拟压力值,MPa;

T ——总时刻数。

流量监测点多时段相对误差均值计算如式(2)。

$$\delta_q = \frac{\sum_{t=1}^T \left| \frac{Q_{q,t} - Q_{q,t}^{\text{sim}}}{Q_{q,t}} \right|}{T} \times 100\% \quad (2)$$

其中: δ_q ——流量监测点q多时段相对误差均值;

$Q_{q,t}$ ——流量监测点q第t个时刻的流量实测值, m^3/h ;

$Q_{q,t}^{\text{sim}}$ ——流量监测点q第t个时刻的水力模拟流量值, m^3/h 。

1.4 精度评价指标体系

为全面反映模型精度,本文选取7项指标[式(3)~式(9)],涵盖误差大小、离散程度、趋势一致性等维度^[5],具体如表2所示。

表2 确定性模型精度评价指标标准
Tab. 2 Criteria for Evaluating the Accuracy of Deterministic Models

评价指标	计算公式	指标类型
平均绝对误差	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i - y_i $ (3)	极小最优
相对误差率均值	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right $ (4)	极小最优
均方根误差	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$ (5)	极小最优
相对对数均方误差	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln y_i - \ln \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n \ln y_i }}$ (6)	极小最优
纳什系数	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \hat{y}_{\text{average}})^2}$ (7)	近1最优
一致性指数	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_{\text{average}} + y - y_{\text{average}})^2}$ (8)	极大最优

(续表2)

评价指标	计算公式	指标类型
误差波动指标	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\hat{y}_i - y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)]^2}{n}} \quad (9)$	极小最优

注: n —参与评价的样本数量; y_i —第 i 个样本的实测值; $\hat{y}_i$ —第 i 个样本的模拟值; y_{average} —全部实测值的算术平均值; $\hat{y}_{\text{average}}$ —全部模拟值的算术平均值。

2 改进熵权法

2.1 构建思路与原始矩阵

本文基于改进熵权法区域供水管网水力模型精度识别的方法,具体按照图1中步骤实施。

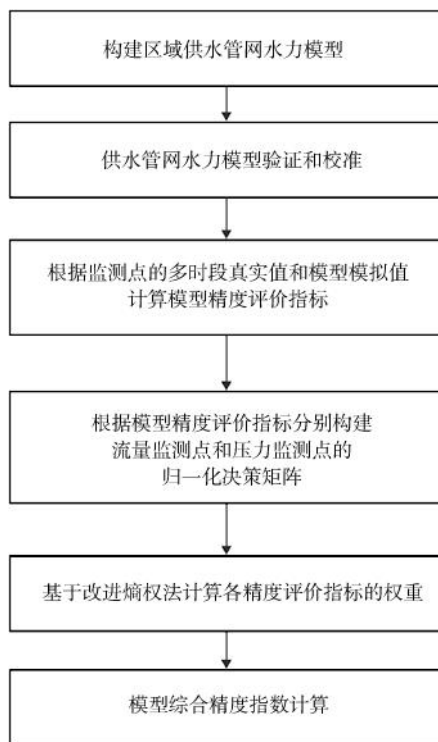


图1 构建与实施步骤

Fig. 1 Construction and Implementation Steps

构建原始评价矩阵 Z , 计算如式(10)。评价时设置 m 个评价指标和 n 个评价对象,本文中评价指标个数 $m=7$,包括平均绝对误差、相对误差率均值、均方根误差、相对对数均分误差、纳什系数、一致性指数和误差波动指标。

$$Z = [Z_{ij}]_{n \times m}, \quad Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{pmatrix} = (Z_1 \ Z_2 \ \cdots \ Z_m) \quad (10)$$

其中: Z_{ij} ——第 i 个监测点在第 j 个指标上的计算值;

Z_m ——所有监测点在第 m 个指标上的计算值矩阵。

2.2 指标无量纲化处理

为消除量纲与量级差异,将每一列极差归一化,得到归一化决策矩阵 X ,如式(11)。

$$X = [x_{ij}]_{n \times m} \quad (11)$$

其中: x_{ij} ——第 i 个监测点在第 j 个指标上的归一化决策值。

极小最优型(误差类:平均绝对误差、相对误差率均值、均方根误差、相对对数均分误差、误差波动指数)计算如式(12)。

$$x_{ij} = \frac{|Z_{ij} - \max(Z_j)|}{\max(Z_j) - \min(Z_j)} \quad (12)$$

其中: $Z_j = \{Z_{1j}, \cdots, Z_{nj}\}$ ——第 j 列数据集。

对于近1最优型(相关一致性类:纳什系数、一致性指数)计算如式(13)。

$$x_{ij} = \frac{|Z_{ij} - \min(Z_j)|}{|\max(Z_j) - \min(Z_j)|} \quad (13)$$

其中: $\max(\cdot)$ 、 $\min(\cdot)$ ——为该列最大、最小值。

归一化 x_{ij} 后越大表示该对象在该指标上越优。

2.3 传统熵权法与其缺陷

在传统熵权法中对第 j 个指标,先计算第 i 个归一化决策值所占比例 p_{ij} ,如式(14)。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad \sum_{i=1}^n p_{ij} = 1 \quad (14)$$

取熵常数 $k = \frac{1}{\ln n}$,信息熵 H_j 和差异系数 g_j 计算

如式(15)和式(16)。

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (15)$$

$$g_j = 1 - H_j \quad (16)$$

其中: n ——评价对象(即监测点)数量。
据此得到传统权重 $\omega_j^{(0)}$, 计算如式(17)。

$$\omega_j^{(0)} = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (17)$$

其中: m ——评价指标数量。

传统方法的缺陷是当某些指标列的分布差异很小($H_j \rightarrow 1, g_j \rightarrow 0$)时,微小扰动即可引起 $\omega_j^{(0)}$ 的明显波动,造成权重不稳定与区分度不足。

2.4 权重计算——改进熵权法

为缓解“差异度小→权重不稳”的问题,引入指数放大机制,对熵值进行非线性变换以增强区分度^[6]。本文采用专利方案给出的思路:在传统熵权的基础上,以“总熵的指数数量减去本熵的指数数量”构造分子,使熵小(信息量大)的指标获得更高权重^[7],其改进权重计算如式(18)。

$$\omega_j = \frac{\exp\left(\sum_{k=1}^m H_k + 1 - H_j\right) - \exp(H_j)}{\sum_{j=1}^m \left[\exp\left(\sum_{k=1}^m H_k + 1 - H_j\right) - \exp(H_j)\right]}, \quad j = 1, \dots, m \quad (18)$$

其中, ω_j ——第 j 个模型精度评价指标的权重;
 H_k ——第 k 个模型精度评价指标的熵值;
 m ——模型精度评价指标的数量,本实例中, $m=7$ 。

在本式中,若 $H_{j1} < H_{j2}$ (第 $j1$ 指标差异更大、信息量更高),则有 $\omega_{j1} < \omega_{j2}$;当 H_j 接近 1 时,指数放大仍能保持可辨识的权重差异,从而提升鲁棒性与稳定性。

2.5 加权矩阵与模型 CMAI 计算

将归一化矩阵 X 与权重向量 $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_m)^T$ 结合,得到矩阵 E , 如式(19)。

$$E = \begin{pmatrix} \omega_1 \cdot x_{11} & \omega_2 \cdot x_{12} & \cdots & \omega_m \cdot x_{1m} \\ \omega_1 \cdot x_{21} & \omega_2 \cdot x_{22} & \cdots & \omega_m \cdot x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_1 \cdot x_{n1} & \omega_2 \cdot x_{n2} & \cdots & \omega_m \cdot x_{nm} \end{pmatrix} \quad (19)$$

第 i 个监测点的加权得分 s_i 如式(20)。

$$s_i = \sum_{j=1}^m \omega_j \cdot x_{ij} \quad (20)$$

为便于给出区域或分组(如“压力监测点/流量监测点”)的整体精度水平,本文采用 CMAI, 计算如式(21)。

$$C_{MAI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\omega_j x_{ij})}{n} \times 100 \quad (21)$$

其中: C_{MAI} ——CMAI 值。

3 实例分析

本文以某区域供水管网为研究对象(图2),该区域的水力模型包含 92 个节点、117 条管道、5 个压力监测点及 9 个流量监测点。采用水力平差计算获取各监测点在多个预设时段的模拟值,并与现场监测的实际值进行对比分析。

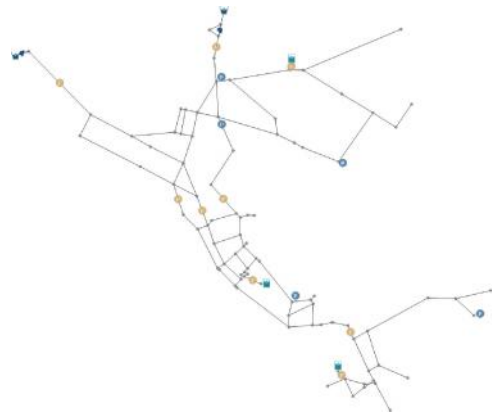


图2 研究区域水力模型

Fig. 2 Hydraulic Model of the Study Area

3.1 平均绝对误差模拟精度

由平均绝对误差为例,计算模型的模拟精度。如图3所示,对 24 h 周期的延时模拟结果评价,模拟 A 在各个时刻均具有较高的模拟精度,但模拟与实测在 24 h 的平均绝对误差为 1.140 0 m,而模拟 B 在 24 h 的平均绝对误差为 0.820 0 m。按照行业的模型精度评价标准,模拟 B 的模拟精度将高于模拟 A,但模拟 B 在实际监测值波动时模拟值并未跟随变化,说明在不同的工况下模型 B 无法匹配现实中的运行工况。若评价加上误差波动和纳什系数指标,由于模拟 A 在稳定性与趋势性上的精度远高于模拟 B,最终评价结果为模拟 A 精度优于模拟 B,更符合现实情况。

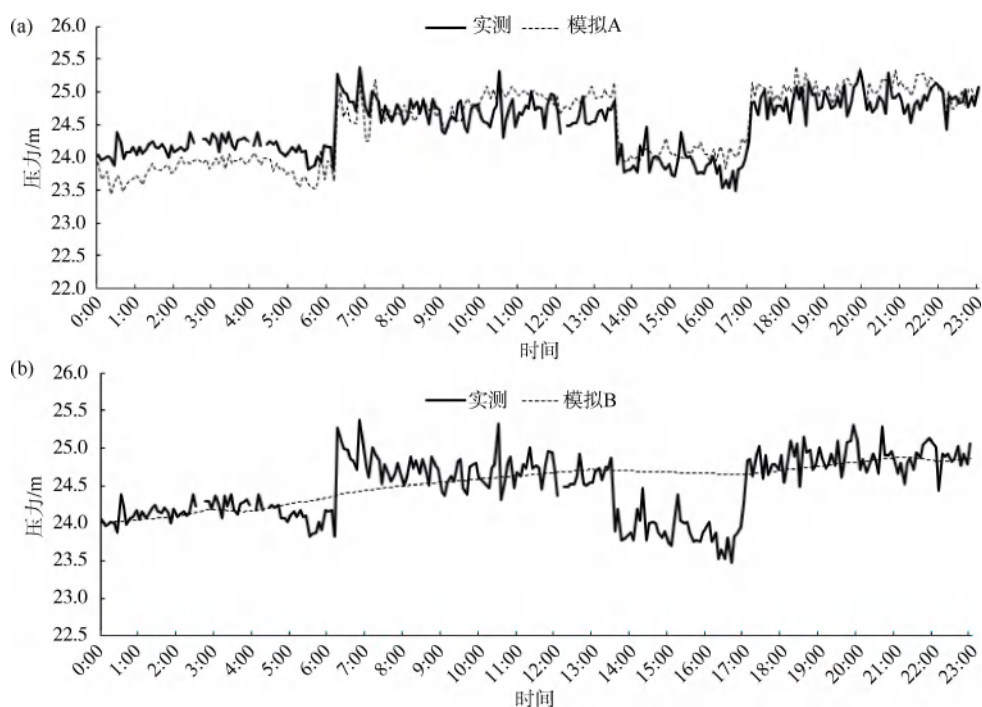


图3 模拟A、B与实测值对比

Fig. 3 Comparison between Simulated A, B and Measured Values

很明显,利用多个指标来衡量实测数据与模拟结果之间的差异,进行多维度考核模型精度,进行综合评估,可以更全面评价模型的准确性。

当使用不同的指标独立评估模型时,评估结果可能会发生变化甚至相互冲突,利用不同指标的独立评价结果对模型精度进行综合评价。但存在以下局限。

单一指标的片面性:仅反映误差的平均水平,无法体现误差的离散化程度(如波动范围)和模拟值与实际值的趋势相关性(如曲线吻合度)。例如,2个模型的平均绝对误差可能相同,但一个模型误差稳定在较小范围,另一个模型误差波动剧烈,其实际精度差异无法通过单一指标区分。

多指标评价的冲突性:当采用多个独立指标(如均方根误差、纳什系数)时,不同指标的评价结果可能相互矛盾(如模型A的均方根误差优于模型B,但纳什系数劣于模型B),导致难以形成统一结论。

传统熵权法的缺陷:传统熵权法在处理指标权重时,若指标熵值接近1,微小数据变化会导致权重剧烈波动;且当指标差异系数比例相同时,无论熵值本身差异如何,权重计算结果均相同,缺乏对指标信息价值的精细化区分。

3.2 改进熵权法模拟精度

对每个监测点分别计算平均绝对误差、相对误差率均值、均方根误差、相对对数均分误差、纳什系数、一致性指数及误差波动指数,得到原始评价矩阵如表3、表4所示。

根据计算得出的模型精度评价指标分别构建流量监测点和压力监测点的原始评价矩阵,并进行无量纲化处理,建立归一化决策矩阵如表5、表6所示。针对不同类型指标采用2.2节的极差归一化方法,将原始矩阵 Z 转换为0~1区间的无量纲矩阵 $X = [x_{ij}]$ 。

基于传统熵权法和改进熵权法计算了各项精度评价指标的权重,如表7、表8所示。

根据上述得到的各项模型精度评价指标值和采用改进熵权法计算得出的权重,将修正后的决策矩阵 E 每列与对应的权重 ω_j 相乘,构建加权矩阵,如表9、表10所示。

依据式(21)对流量监测点、压力监测点和区域管网水力模型的综合精度指数进行计算,结果表明,流量监测点的CMAI(81.10)高于压力监测点的CMAI(65.22),总CMAI为75.43,这说明模型在流量模拟方面表现优于压力模拟。

表 3 流量监测点精度评价指标值
Tab. 3 Accuracy Evaluation Index Values for Flow Monitoring Points

流量监测点编号	平均绝对误差	相对误差率均值	均方根误差	相对对数均方误差	一致性指数	误差波动指标	纳什系数
SF00001	37.241 1	0.018 0	49.306 9	0.023 8	0.999 8	32.315 1	0.999 0
SF00002	501.471 5	0.055 6	550.483 1	0.018 5	0.985 6	227.063 7	0.937 2
SF00003	63.892 6	0.038 6	76.761 9	0.014 7	0.999 6	76.045 9	0.998 5
SF00004	42.017 6	0.075 0	52.678 2	0.032 4	0.998 5	52.237 3	0.994 4
SF00005	16.706 0	0.088 5	22.337 7	0.043 5	0.997 7	22.335 6	0.991 6
SF00006	12.040 0	0.021 9	17.329 4	0.011 8	0.998 3	13.409 4	0.993 1
SF00007	531.571 6	0.087 0	534.178 7	0.028 3	0.853 4	52.711 5	0.224 0
SF00008	9.232 3	0.400 2	14.794 8	0.178 4	0.999 6	12.247 4	0.998 6
SF00009	8.475 9	0.033 3	11.522 7	0.020 6	0.999 7	11.519 0	0.998 7

表 4 压力监测点精度评价指标值
Tab. 4 Accuracy Evaluation Index Values for Pressure Monitoring Points

压力监测点编号	平均绝对误差	相对误差率均值	均方根误差	相对对数均方误差	一致性指数	误差波动指标	纳什系数
SP00001	1.485 2	0.021 3	1.510 4	0.010 4	0.774 2	0.274 8	-0.222 4
SP00002	3.121 3	0.047 6	3.124 8	0.023 9	0.807 6	0.147 9	-0.008 2
SP00003	0.999 2	0.014 9	0.999 2	0.007 2	0.887 2	0.006 0	0.481 7
SP00004	0.966 8	0.014 8	1.052 1	0.007 9	0.854 8	0.807 0	0.559 1
SP00005	0.999 8	0.016 9	0.999 8	0.008 3	0.799 6	0.001 4	-0.029 4

表 5 流量监测点归一化决策矩阵
Tab. 5 Normalized Decision Matrix for Flow Monitoring Points

流量监测点编号	平均绝对误差	相对误差率均值	均方根误差	相对对数均方误差	一致性指数	误差波动指标	纳什系数
SF00001	0.945 0	1.000 0	0.929 9	0.928 2	1.000 0	0.903 5	1.000 0
SF00002	0.057 5	0.901 7	0.000 0	0.960 2	0.903 1	0.000 0	0.920 2
SF00003	0.894 1	0.946 3	0.879 0	0.983 1	0.998 9	0.700 6	0.999 3
SF00004	0.935 9	0.850 9	0.923 6	0.876 3	0.991 3	0.811 1	0.994 0
SF00005	0.984 3	0.815 5	0.979 9	0.809 7	0.985 9	0.949 8	0.990 4
SF00006	0.993 2	0.989 9	0.989 2	1.000 0	0.990 0	0.991 2	0.992 3
SF00007	0.000 0	0.819 6	0.030 3	0.901 4	0.000 0	0.808 9	0.000 0
SF00008	0.998 6	0.000 0	0.993 9	0.000 0	0.999 2	0.996 6	0.999 4
SF00009	1.000 0	0.960 1	1.000 0	0.947 6	0.999 5	1.000 0	0.999 6

表 6 压力监测点归一化决策矩阵
Tab. 6 Normalized Decision Matrix for Pressure Monitoring Points

压力监测点编号	平均绝对误差	相对误差率均值	均方根误差	相对对数均方误差	一致性指数	误差波动指标	纳什系数
SP00001	0.759 4	0.801 8	0.759 5	0.809 0	0.000 0	0.660 6	0.000 0
SP00002	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.295 2	0.818 2	0.274 1
SP00003	0.985 0	0.995 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.994 4	0.900 9
SP00004	1.000 0	1.000 0	0.975 1	0.959 4	0.713 3	0.000 0	1.000 0
SP00005	0.984 7	0.935 8	0.999 7	0.936 1	0.224 6	1.000 0	0.247 0

表 7 流量监测点权重
Tab. 7 Weight of Flow Monitoring Points

指标	熵值	差异系数	权值	
			传统熵权法	改进熵权法
平均绝对误差	0.900 0	0.100 0	0.208 6	0.147 4
相对误差率均值	0.945 1	0.054 9	0.114 6	0.140 9
均方根误差	0.894 3	0.105 7	0.220 4	0.148 3
相对对数均方误差	0.945 5	0.054 5	0.113 7	0.140 8
一致性指数	0.946 2	0.053 8	0.112 3	0.140 7
误差波动指标	0.943 3	0.056 7	0.118 3	0.141 1
纳什系数	0.946 2	0.053 8	0.112 1	0.140 7

表 8 压力监测点权重
Tab. 8 Weight of Pressure Monitoring Points

指标	熵值	差异系数	传统熵权法权重	改进熵权法权重
平均绝对误差	0.857 6	0.142 4	0.118 6	0.138 6
相对误差率均值	0.859 0	0.141 0	0.117 5	0.138 4
均方根误差	0.857 5	0.142 5	0.118 7	0.138 6
相对对数均方误差	0.859 5	0.140 5	0.117 1	0.138 3
一致性指数	0.759 8	0.240 2	0.200 2	0.153 0
误差波动指标	0.853 0	0.147 0	0.122 5	0.139 2
纳什系数	0.753 4	0.246 6	0.205 5	0.154 0

表 9 流量监测点加权矩阵
Tab. 9 Weighted Matrix of Flow Monitoring Points

流量监测点 编号	平均绝对 误差	相对误差率 均值	均方根误差	相对对数 均方误差	一致性指数	误差波动指标	纳什系数
SF00001	0.139 3	0.140 9	0.137 9	0.130 7	0.140 7	0.127 5	0.140 7
SF00002	0.008 5	0.127 0	0.000 0	0.135 2	0.127 1	0.000 0	0.129 5
SF00003	0.131 8	0.133 3	0.130 3	0.138 4	0.140 6	0.098 9	0.140 6
SF00004	0.138 0	0.119 9	0.137 0	0.123 4	0.139 5	0.114 5	0.139 9
SF00005	0.145 1	0.114 9	0.145 3	0.114 0	0.138 7	0.134 1	0.139 4
SF00006	0.146 4	0.139 5	0.146 7	0.140 8	0.139 3	0.139 9	0.139 6
SF00007	0.000 0	0.115 5	0.004 5	0.126 9	0.000 0	0.114 2	0.000 0
SF00008	0.147 2	0.000 0	0.147 4	0.000 0	0.140 6	0.140 7	0.140 6
SF00009	0.147 4	0.135 3	0.148 3	0.133 5	0.140 7	0.141 1	0.140 7

表 10 压力监测点加权矩阵
Tab. 10 Weighted Matrix of Pressure Monitoring Points

压力监测点 编号	平均绝对 误差	相对误差率 均值	均方根误差	相对对数 均方误差	一致性指数	误差波动指标	纳什系数
SP00001	0.105 2	0.110 9	0.105 2	0.111 9	0.000 0	0.092 0	0.000 0
SP00002	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.045 2	0.113 9	0.042 2
SP00003	0.136 5	0.137 7	0.138 6	0.138 3	0.153 0	0.138 4	0.138 7
SP00004	0.138 6	0.138 4	0.135 1	0.132 7	0.109 1	0.000 0	0.154 0
SP00005	0.136 4	0.129 5	0.138 5	0.129 5	0.034 4	0.139 2	0.038 0

在具体误差表现方面,模拟 A 与模拟 B 的平均绝对误差差异显著。模拟 A 的实测与模拟值之间的平均绝对误差为 1.140 0 m,模拟 B 的平均绝对误差为 0.820 0 m,表明模拟 B 在整体偏差控制上较模拟 A 有一定优势。然而,单一的平均绝对误差指标仅能反映平均误差水平,无法体现误差的分布特征、波动情况及趋势一致性。

将改进熵权法应用于模拟 A 的综合精度评价后,得到的模型精度指数对应的等效平均误差为 0.754 3 m,较直接采用平均绝对误差评价结果降低了约 33.9%。这说明多指标综合评价在充分考虑误差幅值、波动性与趋势一致性的情况下,能够对模型精度给出更加合理且全面的量化反映。尤其是在某些时段平均绝对误差受极端误差影响而放大的情况下,改进熵权法通过加权综合多个精度指标,能够削弱单一指标的偏倚效应,从而提供更稳定、鲁棒的模型精度评估结果。

4 结论

本文针对传统供水管网水力模型精度评价方法存在的单一指标片面性和评价结果不稳定性,提出了一种基于改进熵权法的多指标综合精度评价方法。该方法以平均绝对误差、相对误差率均值、均方根误差、相对对数均分误差、纳什系数、一致性指数和误差波动指数 7 个精度指标构建评价体系,通过无量纲化处理消除量纲影响,并采用改进熵权法计算各指标权重,最后形成可量化的 CMAI。

在某区域供水管网实例中,该方法分别对流量监测点与压力监测点进行精度综合评价,结果表明:流量监测点的 CMAI(81.10)高于压力监测点的 CMAI(65.22),总 CMAI 为 75.43,这说明模型在流量模拟方面表现优于压力模拟。与单一平均绝对误差评价相比,改进熵权法在模拟 A 中将等效平均误差从 1.140 0 m 降至 0.754 3 m,降低幅度约为 33.9%,有效削弱了极端误差对整体评价的影响,提高了评价结果的稳定性与鲁棒性。多指标综合评价不仅能够全面反映模型在偏差幅度、波动性和趋势一致性等方面的性能,还能为模型优化与运行决策提供更加科学的参考依据。

综上,改进熵权法为供水管网水力模型的精度

评价提供了一种有效、全面且可推广的方法。后续研究可考虑引入实时监测数据实现动态精度评价,结合机器学习优化权重计算方式,并扩展至更大规模或多类型供水系统,以进一步提升模型的适应性与实用价值。

参考文献

- [1] DB31/T 800—2025 城镇供水管网模型建设技术导则[S].
DB31/T 800—2025 Technical guidelines for pipe network model construction of urban water supply networks[S].
- [2] T/CUWA 20059—2022 城镇供水管网模型构建与应用技术规范[S].
T/CUWA 20059—2022 Technical specification of model construction and applications of urban water distribution networks[S].
- [3] 杨开峰. 中小城市供水管网 EPANET 水力模型的建立和应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
Yang K F. The research of small city water supply network EPANET hydraulic model establishment and application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [4] 李睿. 基于 AQUIS 的供水管网水力模型建立与校核的应用案例[J]. 城镇供水, 2023(3): 7-11, 15.
Li R. Application of establishment and calibration of hydraulic model in water supply network based on AQUIS[J]. Journal of China Urban Water Association, 2023(3): 7-11, 15.
- [5] 丁相毅, 石小林, 凌敏华, 等. 基于因子分析的供水管网健康状态评价指标遴选[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 67-73.
Ding X Y, Shi X L, Ling M H, et al. Selection of evaluation indicators for water supply network health status based on factor analysis[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 67-73.
- [6] 陈思锦. 供水管网水力模型校核方法对比分析与研究应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
Chen S J. Comparative analysis and application of hydraulic model checking methods in water supply network[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [7] 施贵刚, 刘婉婉, 左静瑶. 基于熵权法的指标赋权技术与对比分析[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2024, 42(11): 168-171.
Shi G G, Liu W M, Zuo J Y. Research and comparative analysis of index weighting technique based on entropy weight method[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2024, 42(11): 168-171.