

城市给水处理厂能耗智慧化管理技术研究

苏迪旻¹, 吴育航², 廖丝敏¹, 唐思炜¹, 刘凯喧²

1. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510600

2. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/WCEST.2025050008

摘 要 : 为克服城市给水处理厂高能耗及传统管理滞后问题, 本文聚焦水厂能耗监测、预测与管理展开研究。构建 LSTM 泵站能耗预测模型, 发现模型在学习率 0.001、2 层 LSTM 层配置下, 预测精度优异; 采用 “多初始值优化 + SQP 算法” 拟合离心水泵单泵特性曲线, 解决拟合精度问题; 整合各模块能耗数据, 基于 “感知 – 传输 – 数据 – 模型 – 应用” 五层架构开发能耗智慧化管理系统。研究实现水厂能耗智慧化管理, 为水务企业降本增效、践行 “双碳” 目标提供技术支撑。

关 键 词 : 泵站能耗预测模型; 离心水泵单泵特性曲线; 能耗管理系统

Research on Intelligent Energy Consumption Management Technology for Urban Water Treatment Plants

Su Dimin¹, Wu Yuhang², Liao Simin¹, Tang Siwei¹, Liu Kaixuan²

1. Guangzhou Water Supply Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510600

2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract : To address the issues of high energy consumption and traditional management lag in urban water treatment plants, this paper focuses on researching energy consumption monitoring, prediction, and management in waterworks. An LSTM-based energy consumption prediction model for pump stations was constructed, revealing that the model achieved excellent prediction accuracy with a learning rate of 0.001 and a two-layer LSTM configuration. The "multi-initial value optimization + SQP algorithm" was employed to fit the characteristic curve of a single centrifugal pump, resolving the issue of fitting accuracy. Energy consumption data from various modules were integrated, and an intelligent energy consumption management system was developed based on a five-layer architecture of "perception-transmission-data-model-application". This research enables intelligent energy consumption management in waterworks, providing technical support for water enterprises to reduce costs, increase efficiency, and achieve the "dual carbon" goals.

Keywords : energy consumption prediction model for pump stations; characteristic curve of a single centrifugal pump; energy consumption management system

引言

随着我国 “碳达峰、碳中和” 国家战略的深入推进, 节能减排已成为各行各业发展的核心议题。城市给水处理厂作为城市基础设施的 “能源黑洞”, 其能耗约占全国总电耗的 0.5%–1%, 是名副其实的能耗大户^[1]。在给水处理的全流程中, 泵站输送系统与关键工艺设备的电能消耗构成了运营成本的主要部分, 同时也产生了巨大的碳排放。因此, 在保障供水安全与水质达标的前提下, 如何有效降低水厂能耗、提升能源利用效率, 不仅是水务企业降本增效的内在需求, 更是响应国家 “双碳” 目标、履行社会责任的必然选择与严峻挑战。

一、基于长短期记忆网络 (LSTM) 的泵站能耗预测模型

通过引入门控机制有效解决了传统 RNN 在长序列处理中的梯度消失问题。

(一) 模型结构配置及参数配置

长短期记忆网络^[2-5] (LSTM) 是一种特殊的循环神经网络,

基于 Python 编程语言搭建的长短期记忆神经网络 (LSTM)

基金信息: 广州市自来水有限公司科技项目 (ZB-XZ-2022-FW-0057)。

作者简介: 苏迪旻 (1978–), 男, 汉族, 广东省广州人, 本科, 技术员, 主要研究方向: 信息技术应用研究工作。

模型，经过多次的参数调整及模型效果评估验证，最终构建了一个具备良好性能的 LSTM 模型，模型由 1 个输入层、2 个 LSTM 层、3 个正则化、1 个全连接及 1 个 Linear 输出层组成。LSTM 模型网络结构具体参数如下表 1 所示。

| 表 1 LSTM 模型结构参数 | |
|-----------------|--|
| 层类型 | 设置 |
| 输入层 | 输入尺寸 = [24, 8], 时间步长为 24 小时, 输入包含 9 个特征值 |
| LSTM 层 1 | 单元数 = 128, 返回序列 = True, 激活函数 = tanh |
| 正则化层 1 | Dropout 率 = 0.2 (防止过拟合) |
| LSTM 层 2 | 单元数 = 64, 返回序列 = False, 激活函数 = tanh |
| 正则化层 2 | Dropout 率 = 0.2 (防止过拟合) |
| 全连接层 1 | 输出单元个数 = 32, 激活函数 = ReLU |
| 正则化层 3 | Dropout 率 = 0.1 (防止过拟合) |
| 输出层 | 输出单元个数 = 1, 激活函数 = Linear, 符合回归问题输出 |

(二) 模型评价指标

为确保模型预测结果的准确性与可靠性，本文选取了多种常用的回归评价指标对模型性能进行综合评估，具体包括均方误差 (Mean Squared Error, MSE)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 以及决定系数 (Coefficient of Determination, R^2)。

均方误差 (MSE)：通过计算预测值与真实值之间差值的平方均值，放大较大误差的影响，从而对异常值更为敏感。其表达式为：

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

平均绝对误差 (MAE)：计算预测值与真实值之间绝对差值的平均值，具有与原始数据相同的量纲，解释性强，对异常值不敏感，适用于误差分布较为均衡的场景。其表达式为：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

均方根误差 (RMSE)：MSE 的平方根，恢复了与原始数据相同的单位，便于在实际应用中解释误差大小。与 MSE 类似，RMSE 也对较大误差更为敏感，适用于对异常值容忍度较低的任务。其计算公式为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

决定系数 (R^2)：用于衡量模型对数据变异的解释能力，取值范围为 $(-\infty, 1]$ ，越接近 1 表示模型拟合效果越好。其计算公式为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

(三) 实验结果

本研究数据取自南方某城市给水处理厂，以取水泵站离心水泵启停记录、瞬时供水流量及对应耗电量等关键运行参数作为模

型输入特征，开展训练与验证。模型训练结果如下表 2 所示：

| 表 2 LSTM 模型评价 | | | | | |
|---------------|--------|------|------|------|-------|
| 学习率 | LSTM 层 | MAE | MSE | RMSE | R^2 |
| 0.001 | 1 | 0.56 | 0.65 | 0.82 | 0.89 |
| | 2 | 0.26 | 0.35 | 0.59 | 0.95 |
| | 3 | 0.44 | 0.47 | 0.68 | 0.91 |
| 0.01 | 1 | 1.23 | 1.35 | 0.98 | 0.82 |
| | 2 | 1.09 | 1.01 | 0.92 | 0.89 |
| | 3 | 1.21 | 1.23 | 0.95 | 0.84 |
| 0.1 | 1 | 4.56 | 3.89 | 2.24 | 0.76 |
| | 2 | 4.28 | 4.18 | 1.79 | 0.82 |
| | 3 | 4.35 | 4.69 | 2.38 | 0.77 |

由表 2 可知，当学习率设为 0.001 且 LSTM 层数为 2 时，模型取得最优性能，MAE 为 0.26，RMSE 为 0.59， R^2 达 0.95，显著优于其他组合。

二、离心水泵单泵特性曲线拟合

(一) 离心水泵单泵特性曲线数学模型构建

1. 流量-扬程特性曲线

离心水泵单泵的流量-扬程特性曲线满足二次函数关系，其数学模型可表示为：

$$H = a_1 Q^2 + b_1 Q + c_1 \quad (6)$$

式中：H 为扬程 (m)，Q 为流量 (m^3/h)， a_1 、 b_1 、 c_1 为特性曲线系数。

2. 流量-功率特性曲线

离心水泵单泵的流量-功率特性曲线同样满足二次函数关系，其数学模型可表示为：

$$P = a_2 Q^2 + b_2 Q + c_2 \quad (7)$$

式中：P 为扬程 (kW)，Q 为流量 (m^3/h)， a_2 、 b_2 、 c_2 为特性曲线系数。

(二) 离心水泵单泵特性曲线拟合

1. 约束条件

为确保拟合单泵水泵特性曲线准确性，根据离心水泵工作原理，曲线需满足以下物理约束条件：

约束条件一： $a_1 < 0$ ， $c_1 > 0$ ，确保曲线开口向下，保证零流量时扬程为正值，且单泵输出扬程随流量递增而减少。

约束条件二： $a_2 > 0$ ， $c_2 > 0$ ，确保曲线开口向上，保证零流量时功率为正，且单泵输出扬程随流量递增而增加。

2. 多初始值优化

针对传统最小二乘法在非线性曲线拟合中易陷入局部最优解的问题，本研究提出了一种基于工程经验的多初始值优化算法，并采用序列二次规划 (Sequential Quadratic Programming, SQP) 算法进行约束优化求解，确保获得全局最优的泵特性曲线参数。

序列二次规划算法作为一种高效的非线性约束优化方法，其核心思想是通过迭代求解一系列二次规划子问题来逼近原问题的解。在每次迭代中，算法构造原问题的拉格朗日函数，并在当前

迭代点处进行二次近似，同时将非线性约束线性化，形成二次规划子问题。通过求解该子问题获得搜索方向，再沿此方向进行线性搜索确定步长，最终收敛至满足 Kuhn-Tucker 条件的最优解。

在本研究的泵特性曲线拟合中^[6-7]，SQP 算法展现出显著优势。算法能够严格处理流量-扬程特性曲线及流量-功率特性曲线物理约束，确保拟合结果符合水泵工作原理。通过精确的一阶和二阶导数信息，算法具有超线性收敛速度，计算效率显著高于传统优化方法。

3. 优化目标函数

实际工程实际中统计得出的部分流量、扬程及功率数据明显偏离实际，为提高拟合精度采用平均相对误差（MARE）作为优化目标，该指标能够均衡处理不同量纲数据，避免绝对误差在量级差异较大时产生的偏差。

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{\text{测}} - y_{\text{实}}}{y_{\text{实}}} \right| \tag{8}$$

式中：n 为有效点的个数， $y_{\text{测}}$ 为有效点中不同流量根据拟合曲线计算得出的扬程/功率预测值， $y_{\text{实}}$ 为实际有效点中不同流量所对应的扬程/功率真实值。

结合工程实际，为保证水泵特性曲线的拟合准确性，离心水泵单泵特性曲线拟合中规定流量-扬程特性曲线 MARE < 5%，流量-功率特性曲线 MARE < 3%。

三、水厂能耗智慧化管理系统

为实现城市给水处理厂能耗的精细化、智能化管理，本文在前述研究基础上，设计并开发了一套集成能耗预测、设备建模与实时监测于一体的水厂能耗智慧化管理系统^[8]。该系统采用分层架构设计，自下而上分别为感知层、传输层、数据层、模型层与应用层，具备良好的可扩展性与模块化特征：

- （1）感知层：获取水厂耗能设备相关数据，包括流量、压力、电流、电压、功率、启停状态等。
- （2）传输层：实现数据的稳定传输与边缘缓存，保障数据完整性与时效性。
- （3）数据层：对原始数据进行清洗、归一化、时间对齐与

缺失值填补，形成高质量的时间序列数据集，为后续建模提供支撑。

（4）模型层：集成 LSTM 泵站能耗预测模型、离心水泵单泵特性曲线拟合模型，实现泵站能耗预测、水泵设备性能评估。

（5）应用层：提供可视化界面与交互式分析工具，实现不同方式能耗统计、不同泵组合能耗预测等功能，辅助管理人员科学决策。

四、结论与展望

（一）结论

（1）LSTM 泵站能耗预测模型效果佳：以 Python 构建的 LSTM 模型，在学习率 0.001、2 层 LSTM 层的最优配置下，MAE 为 0.26、RMSE 为 0.59、R² 达 0.95，能精准预测泵站能耗；学习率过大会致误差剧增，3 层 LSTM 因过拟合或梯度衰减性能下降，模型可靠性与实用性强。

（2）离心水泵特性曲线拟合精准：“多初始值优化 + SQP 算法”方案，结合物理约束（流量-扬程曲线 $a_1 < 0$ 、 $c_1 > 0$ ；流量-功率曲线 $a_2 > 0$ 、 $c_2 > 0$ 与 MAE 目标（流量-扬程 MARE < 5%、流量-功率 MARE < 3%），解决传统方法局部最优问题，为泵组调度和能效评估提供依据。

（3）能耗智慧化管理系统：基于五层架构（感知-传输-数据-模型-应用）开发的系统，整合 LSTM 预测与水泵特性拟合模型，实现能耗数据实时处理、分析与可视化，解决传统管理痛点，助力水厂向主动控耗转型。

（二）展望

- （1）提升模型泛化与适配性：扩大数据来源，引入迁移学习，减少模型对特定场景依赖；融合气象、原水水质等外部因素，优化输入特征，增强预测动态适应性。
- （2）推进多设备协同与全局调控：拓展至全流程耗能设备，建多设备能耗耦合模型；引入多目标优化算法，实现全厂设备协同调度，挖掘跨环节节能潜力。
- （3）深化系统与运营融合：增强系统闭环控制功能，对接现有控制系统实现策略自动执行；增加设备健康管理模块，实现能耗管控与运维一体化。

参考文献

[1] 李都望, 余天奇. 水厂的能耗分析与节能措施 [J]. 有色冶金设计与研究. 2019, 40(06): 109-110+18.
[2] 郭娟. 基于 EDA-LSTM 模型的建筑能耗预测方法研究 [J]. 科技与创新. 2024, (22): 35-7.
[3] 邵必林, 史洋博, 赵煜. 融合注意力机制与 LSTM 的建筑能耗预测模型研究 [J]. 软件导刊. 2021, 20(10): 61-7.
[4] 王涛, 于泽沛, 时斌, et al. 基于 LSTM 与 DDPG 的空调能耗优化控制策略 [J]. 计算机与数字工程. 2024, 52(11): 3439-45.
[5] 谌东海, 王伟, 赵昊裔, et al. 基于 MI+PSO-LSTM 的能耗预测模型 [J]. 计算机工程与设计. 2022, 43(10): 2889-96.
[6] 黄亚, 周建旭. 水泵全特性曲线的预测及对数值分析的影响 [J]. 排灌机械工程学报. 2021, 39(08): 777-83.
[7] 王枫月, 朱洋, 宋龙波, et al. 基于遗传算法的离心泵并联优化及试验 [J]. 水泵技术. 2023, (06): 1-10.
[8] 李子怡, 钟炜. 智慧水厂能耗监测评价与异常诊断管理平台研究 [J]. 给水排水. 2024, 60(02): 153-7+66.