

文章编号: 1671-6612 (2024) 04-557-06

小区集中供热系统节费运行优化方法研究

胡昌越 马荣江 邓梦思

(西南交通大学 成都 610031)

【摘要】 随着“煤改电”工作的推进,电采暖供热系统得到广泛应用,但由于部分小区的供热系统缺乏合理的运行调控方式,电采暖供热系统运行费用高的问题日益凸显,为降低供热系统的运行费用,提出了一种基于室温预测的供热系统运行节费优化方法,以每日24h的逐时热源设备出力程度的组合作为一种运行模式,利用GA-BP神经网络预测每种运行模式的室温,从而判断其是否满足供暖标准,经验证,所建立GA-BP室温预测模型最大误差为0.7°C,平均误差为0.07°C,说明本模型可用于实际供热系统。最后利用遗传算法从满足供暖达标的运行模式中求解出最低运行费用的运行模式。并以山西省某小区为例,按照两种不同优化模式分别计算运行费用,并与原运行方式运行费用进行对比,结果表明,在不调整现有室温的情况下,节费效果为8.21%,在保证室温不低於18°C的情况下,可实现节费16.74%。

【关键词】 供热系统;室温预测;遗传算法;BP神经网络;最佳节费运行模式

中图分类号 TU833 文献标志码 A

Research on Optimization Methods for Cost-saving Operation of Self-heating and Heating Systems

Hu Changyue Ma Rongjiang Deng Mengsi

(Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 With the advancement of the "coal-to-electricity" initiative, electric heating systems have been widely used. However, due to the lack of reasonable operational control methods in the heating systems of some neighborhoods, the issue of high operational costs for electric heating systems has become increasingly prominent. To reduce the operational costs of heating systems, this paper proposes an optimization method for heating system operation cost reduction based on indoor temperature prediction. It treats the hourly output combinations of heat source equipment over a 24-hour period as an operational mode. The GA-BP neural network is used to predict the indoor temperature of each operational mode, thereby determining whether it meets the heating standard. Verification has shown that the maximum error of the GA-BP indoor temperature prediction model established in this paper is 0.7°C, with an average error of 0.07°C, indicating that this model can be used in actual heating systems. Finally, genetic algorithms are used to find the operational mode with the lowest operational cost from among the operational modes that meet the heating standard. Taking a neighborhood in Shanxi Province as an example, the operational costs were calculated according to two different optimization modes and compared with the original operational method. The results showed that, without adjusting the existing indoor temperature, the cost reduction effect was 8.21%. When ensuring that the indoor temperature is not lower than 18°C, a cost reduction of 16.74% can be achieved.

【Keywords】 Heating system; Room temperature prediction; Genetic algorithm; BP neural network; Optimal energy-saving

基金项目: 四川省自然科学基金 2022 年面上项目“川西高原农宅采暖需求机理与空气源热泵热风机采暖技术研究”(2022NSFSC0273)

作者简介: 胡昌越 (1998.04-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 674491805@qq.com

通讯作者: 马荣江 (1985.10-), 男, 博士, 讲师, E-mail: rongjiangma@139.com

收稿日期: 2024-01-23

operation mode

0 引言

近年来，为减少冬季采暖散煤燃烧，治理大气污染源头，我国北方地区在大力推进“煤改电”改建工程^[1]。在已采用电采暖的北方地区，许多小区集中供热系统缺乏科学合理的运行策略，仍凭借全天候值守人员的个人经验对系统进行控制^[2]。一方面，过度占用消耗了大量专业技术人员资源，另一方面，仅依据个人经验进行控制，可能会导致系统运行能耗偏大、运行费用偏高等不利情况。

在我国北方，建筑围护结构的保温性能较好，建筑本身具备一定的蓄热能力^[3]。同时，由于供热系统本身存在热滞后性，在对供热系统进行调节后，需要经过一段时间才能对室内温度产生调节效果^[4,5]。因此，可以在用能成本低时对建筑供给更多的热量，以便在用能成本高时向建筑供给更少的热量，从而实现供暖室温相对稳定且达标的同时，达到运行节费优化的目的。

基于建筑本身的蓄热能力，以及供热系统的热滞后性，本文提出一种供热系统运行优化方法，即在较长时间段设定热源的出力程度，以该时间段内的逐时热源出力程度作为一种运行模式，并通过供热量及室温约束，判断每种运行模式是否达标，并利用遗传算法求解出供暖室温达标的最佳运行模式。

1 优化方法及研究对象简介

1.1 优化方法

为解决北方小区集中供热系统运行费用高的问题，本文提出了一种小区集中供热系统的节费运行优化方法，主要为通过预设每日的逐时热源出力程度，并判断预设逐时热源出力程度的供暖室温能否满足供暖标准，再从供暖达标的逐时热源出力程度中求解出运行费用最低的最佳组合，从而达到节约运行费用的目的。本方法的主要思路如图 1 所示。

由图 1 可看出，本方法的关键在于：（1）判断不同热源逐时出力组合运行后的室温能否满足供暖标准。（2）求解运行费用最低的热源最佳出力程度组合。这两部分内容分别见本文第 2 节与第 3 节。

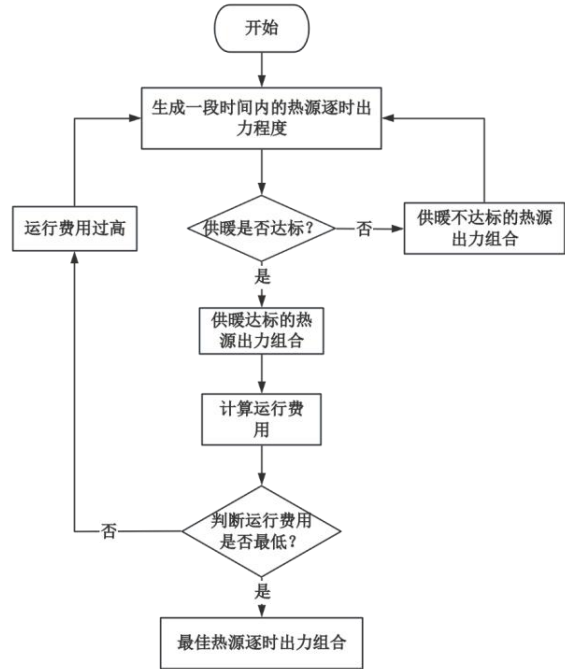


图 1 优化方法主要流程

Fig.1 Main Process of Optimization Methods

1.2 研究对象及数据来源

1.2.1 研究对象简介

本文的研究对象为山西省某小区，小区总建筑面积约为 28000m²，实际供暖面积约为 20000m²。采用 14 台低温空气源热泵 LSQWRFA140M/FP1-H 进行供热，其铭牌参数如表 1 所示，循环水泵为变频水泵，其铭牌参数如表 2 所示。

表 1 空气源热泵铭牌参数

Table 1 Nameplate Parameters of Air Source Heat Pump

工况	环境温度 (°C)	出水温度 (°C)	制热量 (kW)	制热功率 (kW)
额定工况	7/6	45	142	44.3
名义工况	-12/-14	41	94	39.2

表 2 循环水泵铭牌参数

Table 2 Nameplate Parameters of Circulating water pump

流量 (m ³ /h)	扬程 (m)	额定功率 (kW)	实际使用台数 (台)
200	55	75	2

1.2.2 数据采集系统

本文采用空气源热泵主机环境监测集中系统对该小区供热系统的运行数据进行采集和记录, 其主界面如图 2 所示。



图 2 空气源热泵主机环境监测集控系统主界面

Fig.2 Main Interface of the Centralized Monitoring and Control System for Environmental Monitoring of Air Source Heat Pump Units

从图 2 可以看出, 主要采集及记录的数据包括气象站参数, 温度参数以及机组参数。数据采集时间为 2021-2022 采暖季以及 2022-2023 采暖季。

2 GA-BP 供暖室温预测模型

由于需要判断供暖室温能否达标, 因此, 需要对不同运行模式下的供暖室温进行预测, 考虑到供暖室温的干扰因素众多, 部分室温干扰因素数据难以获取, 理论求解十分困难, 难以应用于实际工程中, 本文采用 BP 神经网络对供暖室温进行预测, 并利用遗传算法优化其初始权值和阈值。

2.1 GA-BP 室温预测模型的建立

2.1.1 BP 神经网络结构设计及参数设置

(1) 输入、输出参数选择

影响供暖室温的因素主要包括供热系统运行情况、室外气象参数、室内人为活动及建筑本身的热工性能, 系统供热量作为影响供暖室温的重要因素, 应作为室温预测模型的输入参数; 由于本小区采用地板辐射的供暖形式, 系统的热惰性较大, 在初开启及关闭时刻的室温变化规律与稳定运行后有所不同, 因此, 输入参数中增设系统开关机状态作为输入参数; 在环境气象参数中, 对室温影响最大的参数为外温及太阳辐射, 因此, 外温也需要作为输入参数; 人行为采用固定作息模式。

综上所述, 本文选用输入参数为: ①*i* 时刻室内温度; ②*i* 至 *i+1* 时段总供热量; ③*i* 时刻的室外

温度; ④当前时刻 *i*; ⑤*i* 时刻开关机状态。输出参数为: *i+1* 时刻室内温度。

(2) 隐层结构设计

本文选择的是具有 1 个隐层的 3 层 BP 网络, 隐层神经元的数量根据式 (1) [6,7] 确定。

$$I = \sqrt{n + m + a} \quad (1)$$

式中: *I* 为隐含层神经元数; *n* 为输入层神经元数; *m* 为输出层神经元数; *a* 为 1 到 10 之间的常数。

通过上式可确定隐含层神经元个数大致范围, 并在上述范围内反复计算, 最终得出 *I*=8 时误差最小, 故隐含层神经元个数取 8。

经上述步骤, 可确定出 BP 神经网络的结构为: 5-8-1。即为具有 1 个隐层的 3 层神经网络结构, 其中, 输入层、隐层、输出层的神经元个数依次为 5 个、8 个、1 个。

(3) 传递函数确定

采用 sigmoid 型函数作为输入层传递函数, taning 函数为隐层传递函数, logsig 函数为输出层传递函数。训练次数为 10000, 学习率为 0.01。

(4) GA 优化 BP 神经网络初始权值和阈值

由于 BP 神经网络的初始权值和阈值是随机赋予的, 会对神经网络的预测精度造成影响。因此, 以最小平均绝对值误差为目标函数, 使用遗传算法对权值和阈值进行优化, 求解出计算预测误差最小的权值和阈值, 并将其代入神经网络进行室温预测。GA 优化 BP 神经网络的流程可见图 3。

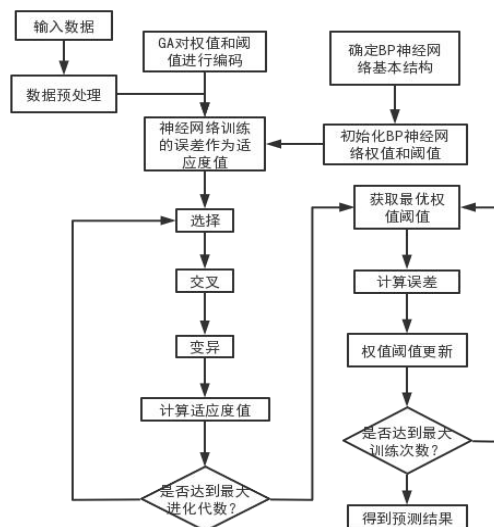


图 3 GA 优化 BP 神经网络流程图

Fig.3 Flowchart of GA-optimized BP neural network

2.1.2 训练数据处理及模型验证

(1) 训练数据处理

为确保室温预测方法能够适用于所有采暖季，故选取其中一个单独采暖季数据进行训练，并使用另一个采暖季数据进行验证。由于 2021-2022 采暖季数据缺失较多，故选用 2022-2023 采暖季数据作为训练集，2021-2022 采暖季数据作为验证集。

输入参数中， i 时刻室内温度、 i 时刻的室外温度、当前时刻 i 通过数据采集系统可直接获取， i 时刻开关机状态通过当前时刻处于关机后的第几个小时确定，开机状态取正值，关机状态取负值。 i 至 $i+1$ 时段总供热量通过式 (2) 确定。

$$Q = c_p \cdot M \cdot (T_g - T_h) \quad (2)$$

式中： Q 表示供热量，kWh； c_p 表示水的定压比热容，kJ/kg·°C； M 表示的热水质量流量，kg/s； T_g 、 T_h 分别表示的供回水温度，°C。

输出参数为： $i+1$ 时刻室内温度，通过数据采集系统直接获取。

2.2 模型验证

通过 2022-2023 采暖季数据进行训练，可得到室温预测模型 net，取 2021-2022 采暖季已有数据代入，得到 2021-2022 采暖季 $i+1$ 时刻室内温度，并将其与实际值对比，结果如图 4 所示。

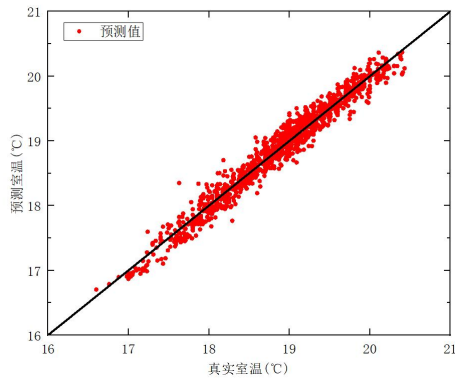


图 4 验证集预测结果

Fig.4 Prediction Results of the Validation Set

本文采用均方根误差 (RMSE)、平均绝对值误差 (MAE) 和最大绝对值误差 (MaxAE) 作为评估所提 GA-BP 室温预测模型预测性能的指标，其计算方法如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_i')^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |T_i - T_i'|}{n} \quad (4)$$

$$MaxAE = Max(|T_i - T_i'|) \quad (5)$$

式中， T_i 、 T_i' 分别表示真实值和预测值，°C； n 表示样本数。

通过计算，可计算出验证集的误差，具体结果如表 3 所示。

表 3 验证集误差情况

Table 3 Validation Set Error

模型	RMSE	MAE	MaxAE
GA-BP 神经网络	0.108	0.066	0.701

通过 2021-2022 年部分日期的验证，最大误差为 0.7°C，平均误差约为 0.07°C，说明本模型可用于进行室温预测。

3 最佳节费运行模式求解

3.1 求解流程

为从所有运行模式中求解出满足供暖标准的最佳节费运行模式，本文采用遗传算法进行寻优，其具体流程如图 5 所示。

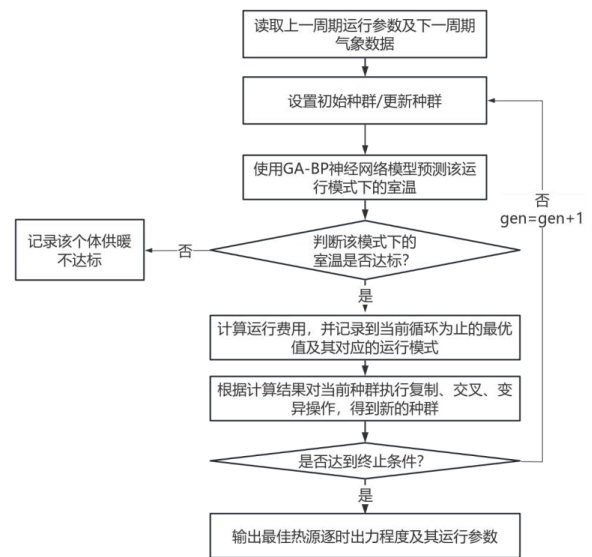


图 5 求解最佳节费运行模式流程图

Fig.5 Flowchart for Solving the Optimal Cost-Saving Operation Mode

在上述流程中，遗传算法参数设置为：种群规模 $NP=100$ ，最大进化代数 $GEN=200$ ；每个个体为一种运行模式，即 $P = (p_1, p_2, p_3 \dots p_{24})$ ，其中 $p_i=0$ 或 0.5 至 1；初代种群由系统随机生成，后续种群

根据上一代种群复制、交叉、变异得到。

3.2 约束条件

本文按照两种优化模式进行最优个体的求解, 分别记为节费模式 1 与节费模式 2, 其中, 节费模式 1 可理解为优化后的末尾室温不低于当前水平, 保证了每日的初始室温不低于实际值, 用以分析不调整现有室温水平下的节费效果, 其约束条件为: 当日逐时室温皆高于 18°C 且优化模式 1 的末尾室温不低于原有运行模式的末尾室温, 可表述为式 (6)。

$$\text{Min}(T_i) \geq 18^{\circ}\text{C} \text{ 且 } T_{24,1} \geq T_{24,0} \quad (6)$$

节费模式 2 可理解为仅保证优化后的室温达标即可, 其约束条件可为: 优化后的逐时室温皆大于 18°C , 可表示为式 (7)。

$$\text{Min}(T_i) \geq 18^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

式中, T_i 表示第 i 小时的室温, $^{\circ}\text{C}$; $T_{24,1}$ 与 $T_{24,0}$ 分别表示节费模式 1 与原运行模式第 24h 的室温, $^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 目标函数

本文的优化目的为运行节费, 故以运行费用为适应度函数。计算方法为:

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^{24} (P_{sbi} + P_{ryi}) \cdot e_i \quad (8)$$

式中, e_i 表示第 i 小时电价, 元/kWh; P_{sbi} 和 P_{ryi} 分别表示第 i 小时水泵能耗及热源能耗, 需要依据热源出力程度计算, kWh。

其中, 水泵为定频水泵, 单台水泵的额定功率为 75kW, 两台水泵的总功率为 150kW, 系统开启时, 水泵以额定功率运行, 系统关闭时, 水泵停止运行, 其计算公式如式 (9) 所示。

$$P_{sbi} = \begin{cases} 0, & p_i = 0 \\ 150, & p_i > 0 \end{cases} \quad (9)$$

热源能耗用其出力程度与额定功率的乘积表示, 计算公式如式 (10) 所示。

$$P_{ryi} = p_i \cdot P_e \quad (10)$$

式中: p_i 表示第 i 小时的热源设备出力程度, 由算法自动生成; P_e 为热源设备额定工况下的每小时能耗, kWh。

3.4 优化结果分析

本文按 3.2 节所述两种优化模式对所述小区供热系统进行运行优化, 用 2021-2022 采暖季数据进行计算, 由于采暖季中途数据出现中断, 故对 2021

年 12 月 6 日至 2022 年 2 月 13 日以及 2022 年 3 月 8 日至 3 月 18 日的节费运行模式进行求解, 并计算优化后的运行费用进行计算, 具体节费效果如图 6 所示。

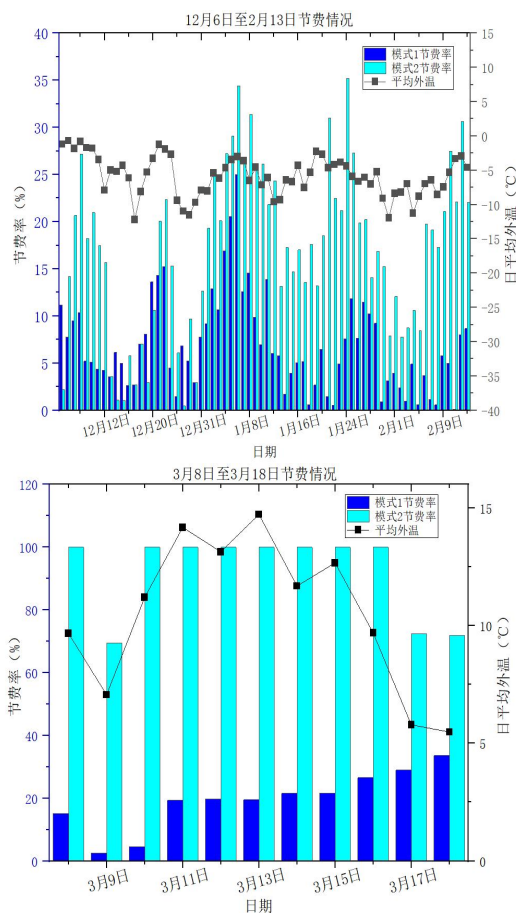


图 6 2021-2022 采暖季节费情况

Fig.6 Heating Season Fee in 2021-2022

整体上看, 外温越高时, 优化模式 1 的节费效果越好, 原因为当外温较低时, 在低电价时段系统已经接近满负荷运行, 节费空间较小。而优化模式 2 的优化效果则主要取决于当日的实际室温变化量与期望室温变化量的差值。

从图 6 可以看出, 不同外温范围的优化效果有较大差异, 按照本文所述三个温度区间, 分别以部分日期为例, 分析其运行费用与节费效果。当平均外温在 $(-15^{\circ}\text{C}, -5^{\circ}\text{C})$ 范围时, 以 2022 年 1 月 30 日至 2 月 3 日为例 (平均外温依次为 -9.08°C 、 -11.91°C 、 -8.35°C 、 -8.19°C 、 -6.97°C), 其节费优化情况可见图 7 (左); 当平均外温在 $(-5^{\circ}\text{C}, 5^{\circ}\text{C})$ 范围时, 以 2021 年 12 月 7 日至 12 月 11 日为例 (平均外温依次为 -1.8°C 、 -0.79°C 、 -1.70°C 、 -1.78°C 、 -3.45°C), 其节费优化

情况可见图 7（中）；当平均外温在(5°C,15°C)范围时，以 2022 年 3 月 14 日至 3 月 18 日为例（平均外

温依次为 14.72°C、11.68°C、12.66°C、5.78°C、5.47°C），其节费优化情况如图 7（右）所示。

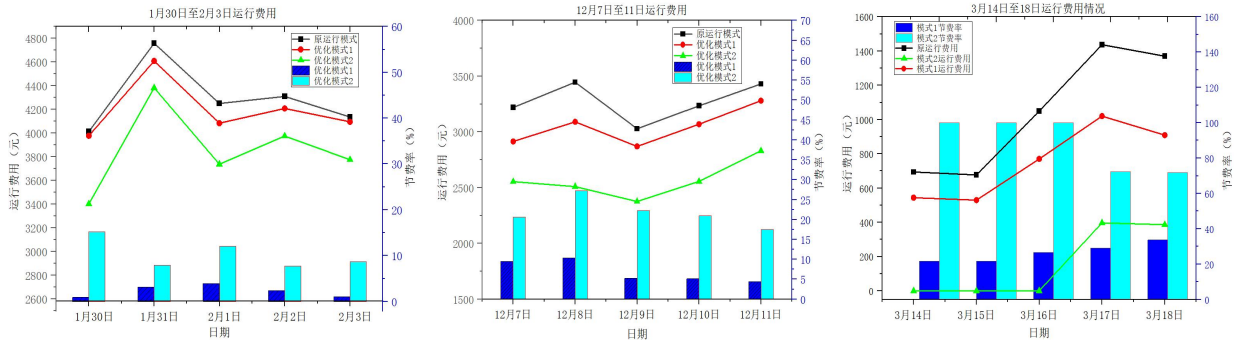


图 7 部分日期运行费用具体情况

Fig.7 Details of operating costs for some dates

不同外温区间优化效果差异较大，不同温度区间总运行费用及节费情况如表 4 所示。

表 4 不同温度区间总运行费用情况及节费率

Table 4 Total operating costs and cost savings for different temperature ranges

温度区间 (°C)	原模式运行费 (万元)	模式 1 运行费 (万元)	模式 2 运行费 (万元)	模式 1 节费率 (%)	模式 2 节费率 (%)
(-15,-5]	17.99	16.91	16.17	6.00	10.11
[-5,5)	10.18	9.07	8.05	10.82	20.89
(5,15)	1.05	0.83	0.10	20.84	90.37
整季	29.22	26.81	24.32	8.21	16.74

4 结论

本文针对小区集中供热系统所提出的节费运行优化方法，可以得到以下结论：

(1) 本文所述室温预测方法在进行实际供热系统的室温预测时，最大误差约为 0.7°C，平均误差约为 0.07°C，预测效果较好，可适用于实际供热系统。

(2) 以 2021-2022 采暖季为例，平均外温越高时，优化效果越明显，从整个采暖季来看，通过优化模式 1，整季可实现节费 8.21%。通过优化模式 2，可实现节费 16.74%。

(3) 由于缺失数据时间段为 11 月份及 2 月底和 3 月初，其外温水平相对较高，优化效果高于平均值，故实际整个采暖季的节费效果应高于计算值。

综上所述，本文所述优化方法，在不增加投资成本的前提下，能够在一定程度上节约供热系统的运行费用，同时，由于该系统现由供热管理人员全天候值守运行，因此，本方法还能减少管理人员的工作量，降低人力成本，对实际供热系统节费优化具备一定的指导意义。

参考文献：

- [1] 丁涛,牟晨璐,贺元康,等.西北地区清洁供暖政策现状与典型案例分析(二):典型案例与经济性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5126-5135.
- [2] 刘向向,卢婕,严勤,等.考虑热惯性的居民楼宇综合能源系统日前运行优化[J].可再生能源,2020,38(3):409-415.
- [3] 赵仕磊.北方建筑节能改造方向研究[J].城市建筑,2020,17(14):42-43,54.
- [4] 马可心,刘剑,刘伟,等.模糊理论结合PID控制方法在集中供热系统中的应用[J].热科学与技术,2021,20(6):601-606.
- [5] Day JK, McIlvennie C, Brackley C, et al. A review of select human -building interfaces and their relationship to human behavior, energy use and occupant comfort[J]. BUILDING AND ENVIRONMENT, 2020,178.
- [6] Liu Y, Yang J, Li L, et al. Negative effects of sufficiently small initial weights on back-propagation neural networks[J]. Journal of Zhejiang University-Science C, 2012,13(8):585-592.
- [7] 王伟.人工神经网络原理:入门与应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1995.