DOI:10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2022. 03. 007

基于大数据分析的二级网智能平衡系统应用

Application of the secondary network intelligent balance system based on big data analysis

左文东[1],李彪[1],郭宝刚[1],高晓宇[2],顾吉浩[2],王维贺[3*],董智鹏[3]
ZUO Wendong[1], LI Biao[1], GUO Baogang[1], GAO Xiaoyu[2], GU Jihao[2], WANG Weihe[3*], DONG Zhipeng[3]

(1.天津华电福源热电有限公司,天津 301700;2.河北工业大学 能源与环境工程学院,天津 300401;3.工大科雅(天津)能源科技有限公司,天津 300401)
(1.Tianjin Huadian Fuyuan Thermal Power Company Limited, Tianjin 301700, China; 2.School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3.Gongda Keya(Tianjin) Energy Technology Company Limited, Tianjin 300401, China)

摘 要:以天津市某住宅小区为研究对象,建设了二级网智能平衡调控系统。基于对供热的大数据分析技术,实现了分户平衡控制,并以热用户舒适室温为目标的"站荷联动"智能调控策略指导热力站节能优化运行。在保障供热质量的前提下,实现了按需供热、节能降耗。通过对改造前后的供热运行数据对比分析可知:二级网供回水温差、用户回水温度离散度、室内温度达标率、循环水泵运行频率、循环泵耗电量以及单位面积热耗等均发生了显著变化。研究结果表明,启用二级网智能平衡系统后,该小区的单位面积热耗和电耗,分别下降14%和23%,热用户室温达标率为99%,供热质量明显提高,节能效果显著。通过对本项目的研究,旨在为同类项目的改造与设计提供参考。

关键词:碳中和;碳达峰;二级网智能平衡;大数据分析;站荷联动;智能调控;精准供热
中图分类号:TK 01 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-0706(2022)03 - 0044 - 06

Abstract: A secondary network intelligent balance system for a residential district in Tianjin was built. Based on big data analysis, heat can be accurately supplied to each dwelling house, and a "station-load linkage" intelligent regulation strategy aiming at providing comfortable room temperature for thermal power users was established to guide the energy-saving and optimal operation of the thermal power station. On the premise of ensuring the heating quality, the strategy realizes the heating on demand, energy-saving and consumption reduction. By comparing the heating operation data before and after the optimization, it can be seen that the temperature difference between the supply and return water of the secondary network, the dispersion of the household return water temperature, the compliance rate of indoor temperature, the operation frequency of the circulating water pump, the power consumption of the circulating pump and the heat consumption per unit area changed significantly. The research results showed that after taking the secondary network intelligent balance system, the heat consumption per unit area and power consumption per unit area in this residential area were reduced by 14% and 23% respectively, and the compliance rate of indoor temperature reached 99%. Moreover, the heating quality was improved significantly while the energy-saving effect was remarkable. The study on this project can provide reference for the transformation and design of similar projects.

Keywords: carbon neutrality; carbon peaking; secondary network intelligent balance; big data analysis; linkage between thermal station and heat load; intelligent regulation; accurate heating

0 引言

碳达峰、碳中和的新气候目标是我国统筹国内和国际两个大局的战略决策[1]。在"双碳"目标的导向下,能源结构的调整与优化布局显得尤为重要。我国能源消费主要集中在工业、交通、建筑三大领域。2019年,我国城镇集中供热导致的CO_2间接排放量为4.5亿t,约占建筑领域碳排放总量的29.0%,约占全国碳排放总量的4.6%[2]。由此可以看出集中供热行业存在较大的"节碳"市场,能源转

收稿日期:2021-08-31;**修回日期**:2021-12-30
基金项目:河北省科技厅河北工业大学科技创新战略资助项目(20180902);华电国际电力股份有限公司项目(JG0220200951)

型和节能降耗是实现集中供热行业“双碳”目标的有效途径。

近年来，集中供热系统的节能降耗技术也在不断升级。穆连波等[3]基于北京某燃气锅炉实际改造案例，提出了烟气余热深度回收利用方案，通过改造每年可减少排放4 722.5 t CO_2；李琦等[4]针对热力站一次侧供热量与需求量不匹配的现象，基于深度确定性策略梯度提出了一种热力站一次侧优化控制策略；Mattias Vesterlund等[5]以瑞典北部小镇为实例，提出了一种基于环状管网的集中供热系统的建模方法，用于优化多热源联网的运行；Ryohei Yokoyama等[6]将多栋建筑的供热和制冷设备通过管网连接，灵活调度冷热源输配实现按需供能，节约能耗10.2%~25.2%。

现阶段，热源、一级网、热力站的节能降耗技术已相对成熟，但供热二级网缺乏有效的水力调控手段，导致水力和热力失调，以及热用户室温无法实时监控，是供热能耗过高的主要原因[7-9]。国内专家学者也进行了大量地探索研究，旨在消除“供热最后1千米”的失调问题。李甲年等[10]提出一种“预设比例法”对二级网进行流量平衡调节。史凯等[11]基于动态压差平衡阀和静态平衡阀技术，解决二级网水平失调和垂直失调问题。李更生等[12]采用“基于回水温度平衡法的智能二网平衡系统”对单元水力进行了平衡调控，使单元回水温度趋于一致。何乐[13]提出了一种基于室温修正技术的智能楼栋平衡系统，并分析了该系统在调节过程中的水力工况和平衡效果。上述2种方法仅是解决了水平方向上的水力失调问题，高层建筑垂直失调问题仍然存在。刘剑等[14]采用以用户室温作为调控目标的二级网智能平衡的调控策略，并对调控前后的室温及节能率进行了对比分析。但一般情况下，小区室温采集装置的安装数量有限，以室温为目标的智能调控策略在推广时具有一定难度。王建浮等[15]提出应用“通断法”热计量设备，通过改变分户阀门的通断比，实现二级网水力平衡调节，但要实现各用户室内温度的均衡，需要制定复杂的控制逻辑。史登峰等[16-17]定义了室温稳定度、室温偏离度和系统热力平衡度3个公式，并结合其他数据对室温数据进行分析，用于评价二级网热力平衡效果。张杰等[18-19]通过构建新型数字化、智能化二次网热平衡系统，探讨了户间热平衡系统的架构、控制方案和室温估算技术，理论分析了户间热平衡系统的调控过程和运行效果。朱翼虎等[20]提出了以物联网水力平衡阀为核心设备，结合云端服务器和数据分析系统构成物联网水力平衡技术，通过对二级网的应用测试，对水力平衡结果进行了分析。

本文基于大数据分析技术建立二级网分户智能平衡调控系统，同时解决垂直失调和水平失调，并以用户室温反馈优化热力站调控策略，实现热力站和热负荷的“站荷联动”。在保障用户供热品质的前提下，通过降低二级网供水温度和循环水流量，节省热耗和电耗。

1　项目概况

该住宅小区位于天津市武清区，2020—2021年采暖季供暖面积63 771 m^2，12栋建筑，760户，采暖末端为散热器，热力站分高、低区。2020年，对小区二级网平衡系统及热力站自控系统进行了升级。主要建设内容包括：(1)在每个用户回水管道上安装带回水温度传感器的智能阀，调节流量及监测回水温度；(2)选取304户典型热用户，安装室温采集装置，监测热用户室内采暖温度；(3)以楼栋为单位安装12台数据采集集中器，实现数据采集与远程调控；(4)升级小区热力站自控程序，实现上下位机数据对接；(5)在监控中心部署智慧供热管控平台，以热用户室温为目标，实现对热力站运行策略的自动优化。二级网智能平衡系统架构如图1所示。

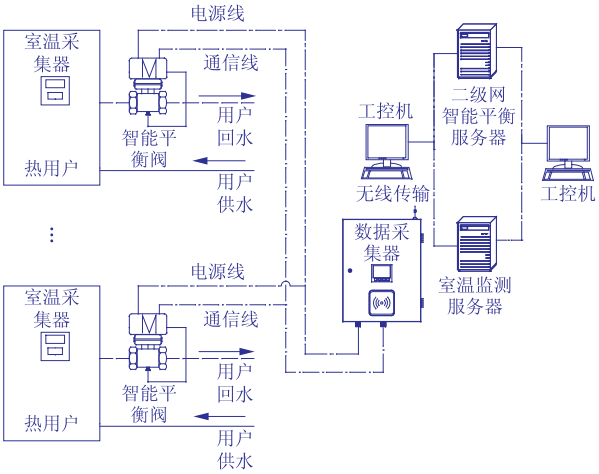

图1　二级网智能平衡系统架构

Fig. 1　Structure of the secondary network intelligent balance system

2　调控原理

2.1　平衡调控理论

散热器与房间的传热量计算公式为

$$Q = A \times k \times \left(t_{pj} - t_n\right) \times \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3, \qquad (1)$$

式中：A为散热器表面积，m^2；K为散热器传热系数，$W/(m^2 \cdot ℃)$；t_{pj}为散热器内热媒平均温度，℃；t_n为室内采暖设计温度，℃；β_1，β_2，β_3为散热器修正系数。

由式(1)可知，在理想条件下，各用户供回水均

温一致即达到了用户间的热力平衡，而热用户供水温度基本相同，则各用户回水温度一致即可认为达到热力平衡。使用回水温度一致法，可避免流量测量的复杂性和低精度，有效提高了调控效率且降低了成本。但由于热用户散热设备阻力系数和周边采暖状况等各不相同，因此需要通过大数据挖掘技术，建立各用户回水温度修正的数据库。

由于用户回水温度存在明显的滞后性，因此二级网调控方式必然是定周期调节模式，调控步长根据实际回温与理论回温的偏差决定。

二级网热用户的动态调节会使整个二级网的管网特性发生变化：近端用户阀门关小，管网阻力系数增大，但由于缓解了水力失调现象，整网流量会明显降低，最终二级网循环泵降低频率运行即可满足要求。一般循环泵按照设定供回水压差的模式运行，即可实现水泵自动调频且满足水力工况。

2.2 调控效果验证

二级网智能平衡调控效果检验：(1)调控前后的能耗对比分析；(2)热用户回水温度离散性分析；(3)热用户室温分析。

由于调控前后室内外平均温度不同，为了统一对比标准，将实际能耗折算至供暖期室外计算温度和同一室温下计算，折算公式为

$$q' = q \times \frac{t_n - t_w}{t_{npj} - t_{wpj}}, \tag{2}$$

式中：q为实际耗热量，MJ/(m²·d)；q'为同一边界条件下的折算耗热量，MJ/(m²·d)；t_{npj}为室内均温，℃；t_{wpj}为室外均温，℃；t_n取 18 ℃；t_w为采暖室外计算温度，天津地区取−7 ℃。

标准差S和极差ζ的计算公式为式(3)和式(4)，目标数值越小，说明调控效果越好。

$$S = \sqrt{\frac{(M - x_1)^2 + (M - x_2)^2 + \cdots + (M - x_n)^2}{n}}, \tag{3}$$

式中：$x_1, x_2, \cdots, x_n$为各用户回水温度，℃；M为回水温度的平均值，℃。

$$\zeta = x_{max} - x_{min}, \tag{4}$$

式中：x_{max}为用户回水温度最大值，℃；x_{min}为用户回水温度最小值，℃。

3 调控效果分析

3.1 调控前后能耗分析

3.1.1 热耗分析

选取2020—2021年采暖季智能调控启用前后2个时段的热耗数据，并将热耗数据折算到统一室内及室外标准温度下，再进行对比分析。

未启用智能调控时，供热运行人员根据经验对热力站进行调控，用户室温受室外温度波动的影响较大，室内均温在21.20~25.50 ℃范围内波动，并且用户室温比较离散。启用平衡系统后，热力站根据典型用户的室温目标23.00 ℃进行调控。调控结果表明，热用户的日均室温波动很小，基本在(23.00±1.00) ℃范围内变化。本文中的室外温度数据来源于中国气象网，调控前后的室内外温度统计结果见表1，室内外温度变化曲线如图2所示。

表1 室内外温度数据统计

Table 1 Statistical data of indoor and outdoor temperatures

时段	起止时间	时长/d	室内均温/℃	室外均温/℃
1	11-26—12-10	15	23.00	0.42
2	12-11—12-25	15	22.80	−2.20

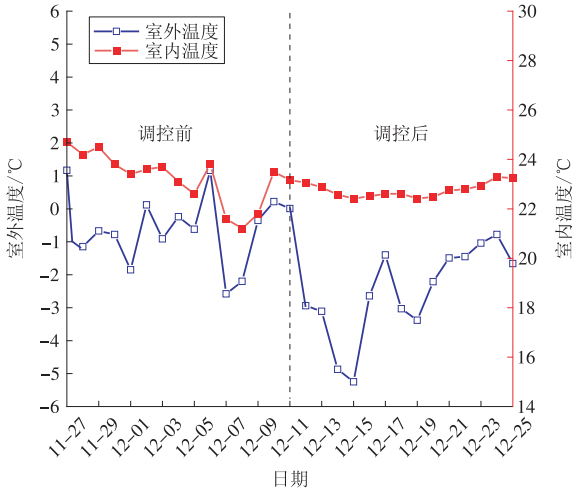

图2 日均室内外温度变化曲线

Fig. 2 Variation of daily average indoor and outdoor temperatures

热耗数据采用该小区热力站内的热计量表，图3和图4分别给出了调控前后的单位面积热耗以及折算至采暖期室外计算温度和相同室温下的单位平米热耗统计。

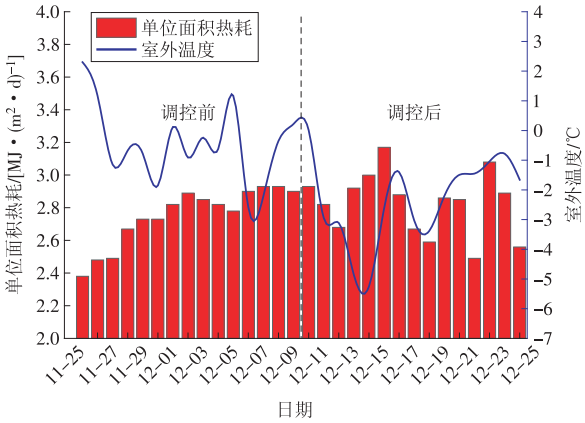

图3 单位面积热耗

Fig. 3 Heat consumption per unit area

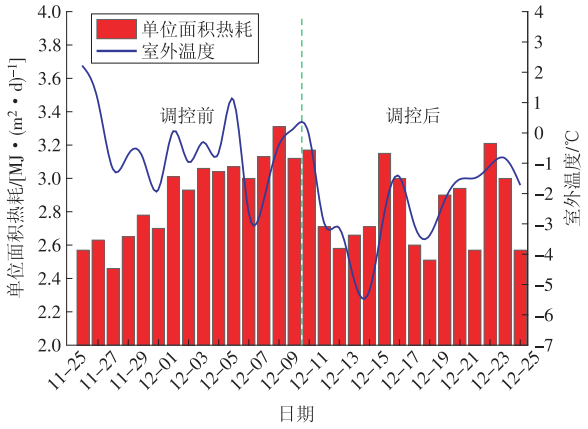

图 4　折算后单位面积热耗

Fig. 4　Heat consumption per unit area after conversion

经有效数据计算,时段 1 热耗指标为 2.95 MJ/(m²·d)即 34 W/m²,时段 2 热耗指标为 2.82 MJ/(m²·d),利用耗热量折算公式(2),调控前折算耗热量为 3.27 MJ/(m²·d),调控后折算耗热量为 2.82 MJ/(m²·d),调控后热耗降低 14%。

3.1.2　电耗分析

供热二级网总循环流量直接影响热力站耗电量,图 5 和图 6 分别给出了智能调控前后的循环水泵频率曲线和供回水温差曲线。由图可知,循环水泵频率由 50 Hz 降低到 46 Hz,供回水温差由 8 ℃上升到 11 ℃,说明二级网水力失调得到了有效缓解,减小了运行流量,实现“小流量、大温差”的智能运行模式,循环泵频率随之降低,节省了热力站的电耗。

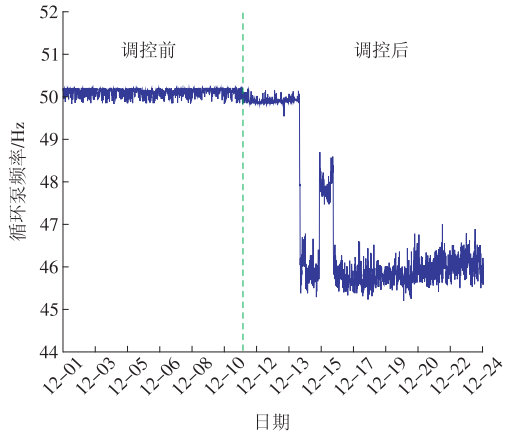

图 5　循环泵频率曲线

Fig. 5　Curve of the circulating pump frequency

根据热力站电耗统计报表,本采暖季调控前(时段 1)日均电耗为 0.011 4 kW·h/m²,调控后(时段 2)日均电耗为 0.008 8 kW·h/m²,电耗下降 23%,节电量效果显著。

3.2　热用户回水温度离散性分析

从上位机软件抽取调控前后 2 个时间点的换热机组回水温度及部分热用户回水温度,并对热用户回水温度离散性进行分析。图 7 和图 8 分别为 2020 年 12 月 8 日 19:00(调控前)与 12 月 23 日 19:00(调控后)各用户回水温度散点。由图可知,机组平均回水温度为 39.04 ℃,调控前的用户回水温度离散度较大,最高回温为 44.00 ℃,最低为 34.50 ℃,极差为 9.50 ℃。智能调控后,热用户回水温度的离散度明显减小,大部分回水温度与换热机组平均回水温度接近。用户回温最高值为 41.00 ℃,最低值为 37.50 ℃左右,极差为 3.50 ℃。在智能调控的过程中,大部分近端用户的智能阀开度逐步减小,回水温度逐渐降低,最终在低开度保持稳定。远端用户在调控前期,流量不足,回水温度低于换热机组平均回水温度,智能阀处于全开状态。调控后,远端用户的回水温度较调控前明显上升,逐渐与换热机组平均回水温度趋于一致。

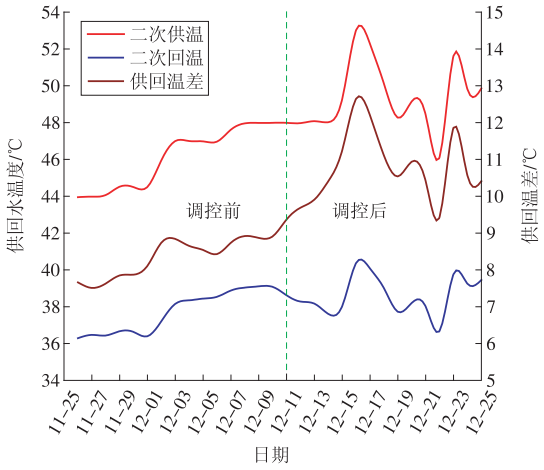

图 6　供回水温差曲线

Fig. 6　Curve of the supply and return water temperature

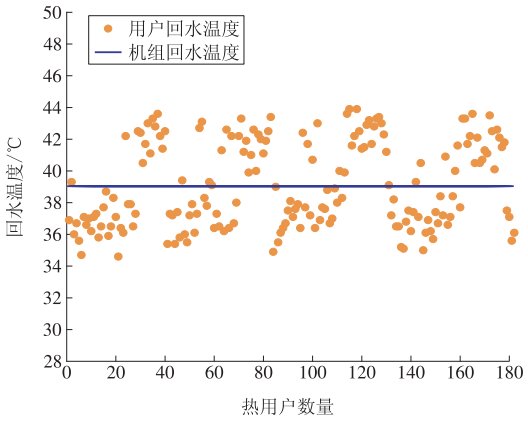

图 7　12 月 8 日 19:00 热用户回水温度散点

Fig. 7　Discrete points of the heat user´s return water temperature at 19:00 on December 8th

对该小区用户回水温度利用公式(3),(4)计算,得到调控前后用户回水温度标准差和极差,见表 2。由表 2 可知,开启智能平衡后,热用户回水温

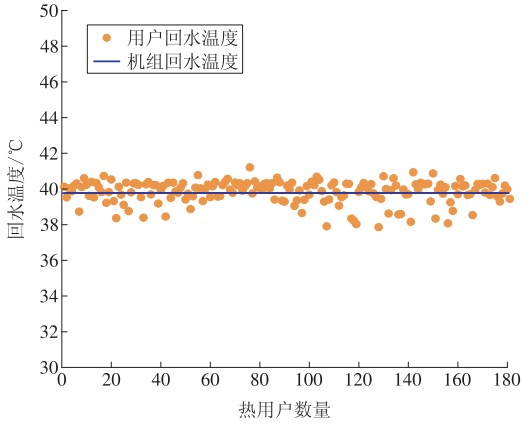

图 8　12 月 23 日 19∶00 热用户回水温度散点

Fig. 8　Discrete points of the heat user´s return water temperature at 19∶00 on December 23rd

度的离散性明显降低，说明各用户水力失调问题明显改善。

表 2　热用户回水温度标准差和极差

Table 2　Standard deviation and range of the heat user´s return water temperature

时间段	标准差 S	极差 ζ
调控前	3.50	9.5
调控后	1.32	3.5

3.3　热用户室温分析

为分析调控过程对用户室温的影响，随机抽取了 3 户室温统计数据。图 9 给出了抽取样本的室内温度变化趋势：调控前热用户室内温度波动较大，调控后室内温度波动较小并逐渐趋于稳定，说明二级网平衡调控策略发挥了明显的作用。

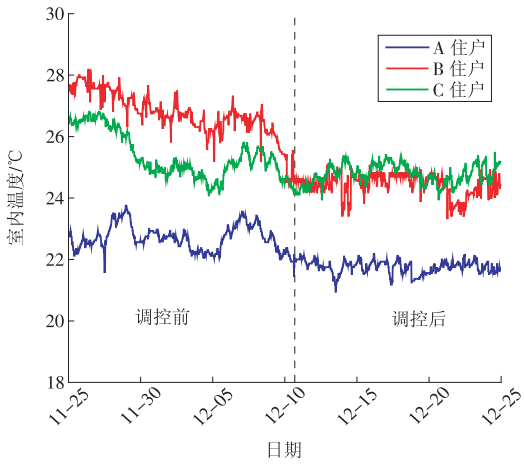

图 9　室内温度动态分析(2020)

Fig. 9　Dynamic analysis on the indoor temperature in 2020

通过上位机软件对热用户室内温度进行了抽样调查，热用户室温达标率均为 99% 以上，如图 10 所示，说明启用智能平衡在节能降耗的同时，并未对供热质量造成影响。

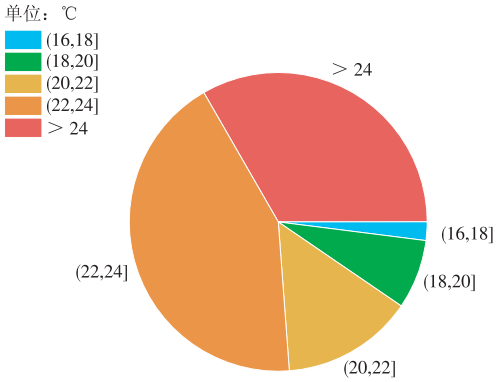

图 10　12 月 23 日室内温度统计

Fig. 10　Indoor temperatures on December 23rd

3.4　经济性分析

由本文 3.1 小节的能耗分析可知，整个采暖季按 121 d 计算；节能量根据能源折标系数折算为标准煤，则节能量统计结果见表 3。

表 3　各类能源折算标煤量

Table 3　Standard coal equivalent of various energy sources after conversion

项目	节电量/[(kW·h)·a^{-1}]	节热量/(GJ·a^{-1})	节约标煤/t
参数	20 062.40	3 472.30	124.79

由表 3 可知，整个采暖季预计节电量 20 062.40 kW·h，节热量 3 472.30 GJ，总节能量折合标煤 124.79 t，减少 CO_2 排放量 308.23 t。

天然气热值一般为 35 998 325.66 J/m^3，则节热量对应节省天然气 96 132.3 m^3；天然气单价 2.31 元/m^3，则节约燃料成本 22.21 万元；电费单价 0.89 元/(kW·h)，节约电量成本 1.79 万元；整个采暖季节能收益为 23.90 万元。本项目投入资金 110.00 万元，投资回收期 4.6 a。

4　结论

对小区二级管网的水力平衡系统进行升级改造后，消除了水力失调及冷热不均，日均室温与室温目标设定值接近且波动幅度减少，室温达标率 99% 以上，供热质量明显提高。在保障热用户采暖热舒适度的前提下，实现了按需供热、精准供热。与启用智能调控系统前相比，热耗降低 14%，电耗降低 23%，节能效果显著。

参考文献：

[1]何建坤.碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型[J].环境经济研究，2021，6(1)：1-9.
HE Jiankun. Low carbon transformation of energy and economy aiming for the peaking of carbon emission and

carbon neutrality[J]. Journal of Environmental Economics, 2021, 6(1): 1-9.

[2]江亿，胡姗. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调，2021，51(5)：1-13.
JIANG Yi, HU Shan. Paths to carbon neutrality in China's building sector[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(5): 1-13.

[3]穆连波，王随林，朱峰，等. 燃气锅炉烟气冷凝余热深度回收系统应用与节能分析[J]. 暖通空调，2020，50(12)：65-69.
MU Lianbo, WANG Suilin, ZHU Feng, et al. Application and energy saving analysis of flue gas condensation waste heat deep recovery systems for gas - fired boilers [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(12): 65-69.

[4]李琦，韩冰城. 基于深度确定性策略梯度的热力站一次侧优化控制[J]. 科学技术与工程，2019，19(29)：193-200.
LI Qi, HAN Bingcheng. Primary side optimization control of heating substations based on deep deterministic policy gradient[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 193-200.

[5]VESTERLUND M, DAHL J. A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 555-567.

[6]YOKOYAMA R, KITANO H, WAKUI T. Optimal operation of heat supply systems with piping network [J]. Energy, 2017, 137: 888-897.

[7]曹进喜. 热量计量数据在二次热网智能调节中的应用[J]. 中国计量，2019(9)：46-51.

[8]郑刚，李金刚，刘依婷. 基于建筑综合物性系数的换热站运行调节策略分析[J]. 华电技术，2021，43(12)：72-78.
ZHENG Gang, LI Jingang, LIU Yiting. Analysis on operation regulation strategy for heat exchange stations based on building comprehensive physical property coefficients [J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 72-78.

[9]胡雪，杨俊红，刘德朝，等. 基于人工智能与热力系统融合的综合节能[J]. 华电技术，2020，42(11)：21-33.
HU Xue, YANG Junhong, LIU Dechao, et al. Research on comprehensive energy - saving technology based on integration of artificial intelligence into thermal systems[J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 21-33.

[10]李甲年，曲辰. 浅谈供热运行管理工作中二次网流量平衡调节的有效方法[J]. 区域供热，2016(5)：99-102.

[11]史凯，花博，侯家涛，等. 基于动态压差平衡阀和静态平衡阀的供热二次管网水力平衡案例分析[J]. 区域供热，2018(6)：81-88.

[12]李更生，王磊，等. 基于回水温度平衡法智能二网平衡系统的应用分析[J]. 区域供热，2019(1)：66-70.

[13]何乐. 智能楼栋平衡系统在供热二次网中的应用分析[J]. 区域供热，2018(2)：27-43.

[14]刘剑，付国栋，付强，等. 以用户室温作为调控目标的二次网智能平衡技术的应用[J]. 区域供热，2020(4)：129-133，145.

[15]王建浮，王炎，吴钧，等. 应用“通断法”热计量设备实现供热二网水利平衡自动调节方法[J]. 区域供热，2020(1)：14-22.

[16]史登峰，何乐，王珂. 二次网热力平衡度概念及其分析应用[J]. 区域供热，2020(2)：106-109.

[17]方修睦，杨大易，周志刚，等. 供热自动化、信息化及智慧化的差异探讨[J]. 华电技术，2020，42(11)：34-38.
FANG Xiumu, YANG Dayi, ZHOU Zhigang, et al. Discussion on automation, informatization and intellectualization of heating [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 34-38.

[18]张杰，赵睿，朱雷，等. 岳康园高区户间热平衡系统的初步应用与研究[J]. 区域供热，2021(1)：116-124.

[19]杨瑞. 智能化、数字化、网络化供热系统的构建与实施[J]. 华电技术，2020，42(6)：83-86.
YANG Rui. Construction and implementation of intelligent, digital and networked heat - supply system [J]. Huadian Technology, 2020, 42(6): 83-86.

[20]朱翼虎，王芃. 水力平衡技术的现状分析与物联网水力平衡阀的应用[J]. 区域供热，2017(5)：80-83，117.

（本文责编：张帆）

作者简介：

左文东(1972)，男，工程师，从事电厂的供热经营与管理方面的工作，zuowdfyrd@chd.com.cn；

王维贺*(1993)，男，工程师，从事智慧供热技术研究与应用方面的工作，wangweihe@gdkeya.com。

*为通信作者。