

基于焓分析的多能互补能源系统模型优化及调度策略研究

王一帆¹, 李娜², 潘崇超^{1,3*}, 李悦¹, 秦建华¹, 李天奇¹, 金泰¹

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京市 海淀区 100083;

2. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京市 西城区 100052;

3. 北京鼎鑫钢联科技协同创新研究院, 北京市 海淀区 100083)

Research on Model Optimization and Dispatching Strategy of Multi-energy Complementary Energy System Based on Exergy Analysis

WANG Yifan¹, LI Na², PAN Chongchao^{1,3*}, LI Yue¹, QIN Jianhua¹, LI Tianqi¹, JIN Tai¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Haidian District, Beijing 100083, China;

2. State Grid Integrated Energy Service Group Limited Company, Xicheng District, Beijing 100052, China;

3. Beijing Dingxin Steel Union Technology Collaborative Innovation Research Institute, Haidian District, Beijing 100083, China)

Abstract: Multi-energy complementarity, as a key point in the revolution of energy consumption, production, technology, and systems in China, is an important means for the country to further improve renewable energy consumption and improve energy efficiency. The exergy analysis method based on the first and second laws of thermodynamics can more profoundly reveal the size, location, and influencing factors of the system energy quality loss; however, there is currently less exergy analysis research of the multi-energy complementary energy system in China. To analyze the multi-energy complementary energy system from the perspective of exergy, this study establishes the material balance constraint and thermal model of the system's water, and simultaneously constructs the system exergy black box model analysis. Thus, the exergy analysis evaluation index is regarded as one of the system operation objective functions. Combined with an energy system example in a park, analyzing the difference in the system scheduling strategy during the heating period when the operating cost is the lowest and the exergy efficiency is the highest as the objective function, which can provide a reference for the multi-energy complementary energy system project. The calculation example results show that the system exergy efficiency increased by 17.8 percentage points, and the price paid was a 30.5% operating cost increase.

Keywords: multi-energy complementary energy system; model optimization; exergy analysis; scheduling strategy

摘要: 多能互补作为能源消费、能源供给、能源技术和能源体制革命中的关键点, 是进一步提升可再生能源消纳和能效的重要途径。焓是能量系统效率的表征, 能够更加深刻地揭示系统用能品质损失的大小、部位和影响因素, 但是当前国内针对多能互补能源系统进行焓分析的工作较少。为从焓的角度对多能互补能源系统开展分析, 建立系统的物质平衡约束和热力模型, 同时构建系统焓分析的黑箱模型, 从而将焓分析的评价指标作为系统运行的目标函数之一。结合某园区能源系统实例, 分析分别以运行成本最低、焓效率最大为目标函数时, 系统在供暖期的调度策略, 为多能互补能源系统项目提供参考。算例结果表明, 系统焓效率提升了17.8个百分点, 付出的代价则是运行成本增加了30.5%。

关键词: 多能互补能源系统; 模型优化; 焓分析; 调度策略

0 引言

能源是人类社会赖以生存和发展的基础, 随着经济的快速增长和人民生活水平的不断提高, 能源需求随之增加, 中国已经成为世界上最大的能源消费国^[1]。多能互补能源系统作为传统分布式能源系统的扩展和能源互联网的主要组成部分, 是中国能源革命的重要技术支持^[2]。

众多学者对多能互补能源系统进行了大量研究。徐宪东等^[3]研究了区域综合能源系统电、热、气的稳态多能流计算; 王英瑞等^[4]建立了综合能源系统中电

基金项目: 国家电网公司科技项目 (52789919000F)。

Science and Technology Foundation of SGCC (52789919000F)。

力系统模型、热力系统模型（水力模型、热力模型）、天然气系统模型和热电联产环节模型，并提出了计算方法；于潇涵等^[5]给出了电转热（power-to-heat, P2H）和电转气（power-to-gas, P2G）设备等耦合单元的数学模型，建立了含P2H、P2G的电气热综合能源系统多能流稳态能量流方程，并提出其计算方法；吴新玲等^[6]以经济效益最优准则、绿色节能最优准则和综合最优准则3种优化目标，分别建立了3种不同的多能源、多目标、多变量的能源协调优化模型；黎静华等^[7]对包含电、气、热的综合能源系统的多能流潮流计算模型和计算方法进行分类和总结。

多能互补能源系统是一种较为复杂的能量系统，其效率可由焓和能量表征，分别称为焓分析法和能量分析法。能量分析方法和焓分析方法统称为热力学分析方法，前者以热力学第一定律为基础，只能反映系统能量在“量”的关系，无法反映系统设备造成的能源品质的浪费；后者以焓平衡为基础，对用能系统整体或局部的用能设备的热力学完善度进行评价，从而揭示用能品质损失的大小、部位和影响因素。同时，焓分析法开始大量应用到工程应用中，尤其在热泵装置、空调系统的制冷装置、建筑能源系统、发电系统或设备等方面的研究中发挥了重要作用^[8]。例如，刘强等^[9]针对火力发电厂中超临界600 MW机组进行数学建模，并进行焓分析，指出不同设备的节能潜力，为大型火力发电厂提供节能方向。陆诗建等^[10]对电厂烟气CO₂捕集系统和各个设备进行焓分析和能量分析，计算出其中损失较大的环节，并提出改进方案。

目前，针对多能互补能源系统进行焓分析的工作仍然较少^[11]，且在多能互补能源系统的建模过程中多以系统的能量流为依据建立约束，同时结合系统元件出力及其约束式，完成系统的建模。不同于电量的供给，热量冷量需要载体，仅仅从能量的角度对系统进行约束显然是不严谨的，应该同时考虑系统供热（冷）水的物质平衡约束。另外，当前研究多以提升经济性、环保性和人体舒适度为优化目标，缺少从焓的角度对系统的运行策略进行评价分析。通过分析系统以焓效率最大为目标函数的运行策略，可得系统内各个设备的运行情况，换言之，可以找出系统内用能的薄弱环节。

基于以上分析，本文首先建立考虑系统供水和回水特性的水平衡模型，并分析输入系统和系统输出的焓，从而建立系统焓分析的黑箱模型。其次，提出焓分析的评价指标，并作为系统运行的目标函数。仿真算例结果表明多能互补能源系统优化的必要性和可行性，以及系统在不同目标下运行策略的不同。

1 多能互补能源系统基本结构

本文研究的多能互补能源系统结构如图1所示。系统内主要包含风机、光伏、太阳能热水器、微燃机、燃气锅炉、电锅炉、电转气设备、吸收式制冷机组、电压压缩制冷机、储能设备等单元。用户电负荷分为可控电负荷和不可控电负荷，热负荷分为生活热水负荷和供暖热负荷。

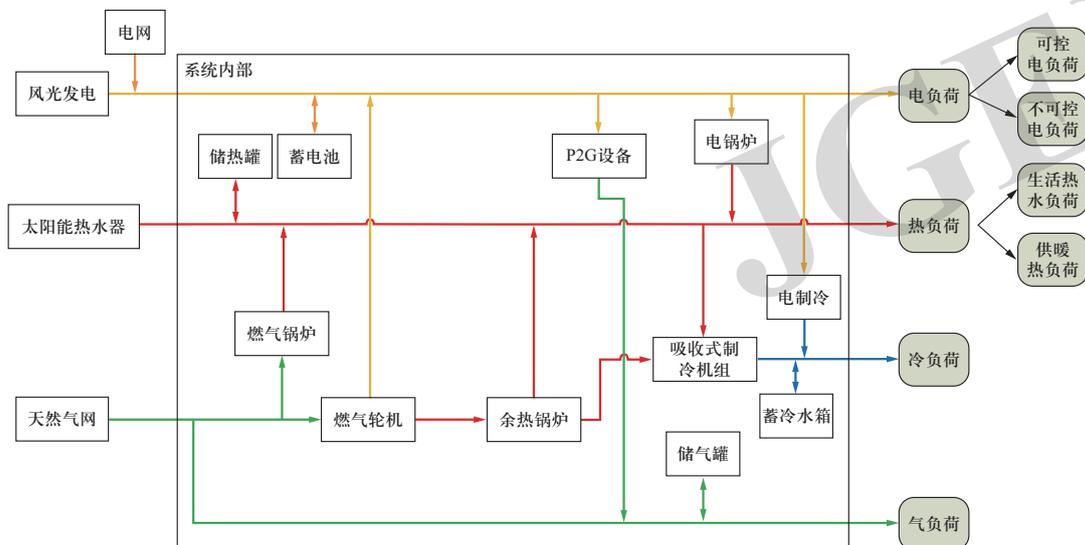


图1 多能互补能源系统的基本架构

Fig. 1 Basic architecture of a multi-energy complementary energy system

2 系统水平衡模型及约束

图2为多能互补能源系统供暖期的水平衡示意图。可以看出，进入系统的水来源于太阳能热水器中的热水、供暖后的回水以及系统内设备加热所需的补充水，系统输出的水用于提供生活热水和供暖水。考虑到高层建筑的供水需求，本文假设用户的供水为二次供水，需要水泵供给，同时将水泵的电耗作为水系统的功耗。因此，供暖期系统的水平衡约束为

$$V_{SW,i}^h + V_i^{in} + V_{MT,i} + V_{EB,i} + V_{GB,i} + V_{HS,i}^{dis} - V_{HS,i}^{cha} = V_{HWL,i} + V_i^{out} \quad (1)$$

又因为太阳能热水和供暖回水混合后进入燃气锅炉等设备加热，故进入系统的水的温度可表示为

$$V_{SW,i}^h \cdot T_{SW,i}^{out} + V_i^{in} \cdot T_i^{in} = (V_{SW,i}^h + V_i^{in}) \cdot T_i^{in,mix} \quad (2)$$

本文公式中使用的符号及含义见附录A。

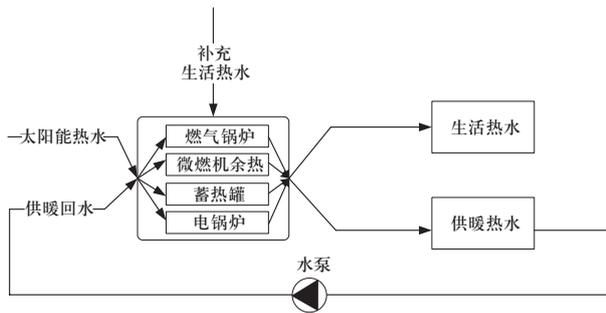


图2 多能互补能源系统供暖期的水平衡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water balance during heating period of multi-energy complementary energy system

图3为多能互补能源系统供冷期的水平衡示意图。与供暖期不同，供冷水在系统内部只经过电制冷机、吸收式制冷机以及蓄冷设备，燃气锅炉和电锅炉等供热设备只为用户提供生活热水负荷，供热方案与图2所示相同。供冷期系统的水平衡约束为

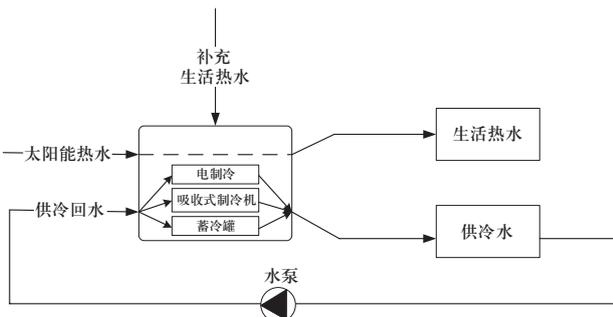


图3 多能互补能源系统供冷期的水平衡示意图

Fig. 3 Schematic diagram of water balance during cooling period of multi-energy complementary energy system

$$V_{SW,i}^h + V_{MT,i} + V_{EB,i} + V_{GB,i} + V_{HS,i}^{dis} = V_{HWL,i} + V_{HS,i}^{cha} \quad (3)$$

$$V_{HP,i} + V_{AC,i} + V_{CS,i}^{dis} = V_i^{in} + V_{CS,i}^{cha} \quad (4)$$

3 多能互补能源系统焓平衡模型

考虑到焓的计算的环境标准实际是变化的，如果以固定的环境温度为基础，则会引起较大的误差，故本文以典型日的逐时温度作为该时刻计算焓时的环境温度标准。

3.1 系统焓分析黑箱模型

基于焓分析的黑箱模型，将系统内部看成一个不透明的黑箱，只可从外界看到系统的输入焓和输出焓。图4为多能互补能源系统的焓分析黑箱模型。可以看出，系统的输入焓有电网的电量、天然气网供气的化学焓、太阳能热水器的热量焓以及供热（冷）回水的热（冷）量焓，系统的输出焓有用户的电负荷、供暖和生活热水的热量焓、供冷的冷量焓以及向用户提供的天然气燃料的化学焓。

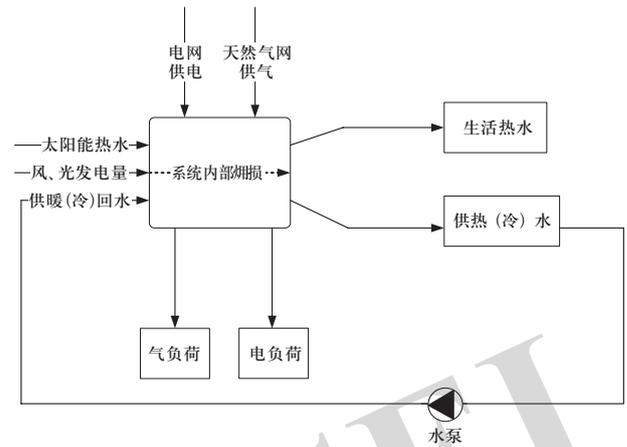


图4 多能互补能源系统的焓分析黑箱模型

Fig. 4 Black box model of exergy analysis of multi-energy complementary energy system

3.2 系统的输入焓和输出焓模型

燃料的化学焓采用朗特（Rant）近似公式表示，则*t*时刻进入系统和系统输出的燃料的化学焓 $e_{f,i}^{in}$ 和 $e_{f,i}^{out}$ 分别可表示为^[12]

$$e_{f,i}^{in} = 0.95Q_{grid,i} \quad (5)$$

$$e_{f,i}^{out} = 0.95Q_{GL,i} \quad (6)$$

太阳能热水器输入系统的热量焓可表示为^[13]

$$e_{SW,i} = Q_{SW,i}^h \cdot \left(1 - \frac{T_{0,i}}{T_{SW,i}} \right) \quad (7)$$

$$T_{SW,i} = \frac{T_{SW}^{in} + T_{SW,i}^{out}}{2} \quad (8)$$

系统*i*时刻向用户提供生活热水的热量焓 $e_{HM,i}$ 的计算公式为

$$e_{HW,i} = Q_{HWL,i} \cdot \left(1 - \frac{T_{0,i}}{T_{HWL,i}}\right) \quad (9)$$

供暖期*i*时刻流出系统的供暖水的热量焓和流入系统的供暖回水的热量焓的计算公式为式(10)和式(11), 供冷期*i*时刻离开系统的供冷水的冷量焓和进入系统的供冷回水的冷量焓的计算公式为式(12)和(13)。

$$e_{Q,i}^{out} = Q_i^{out} \cdot \left(1 - \frac{T_{0,i}}{T_i^{out}}\right) \quad (10)$$

$$e_{Q,i}^{in} = Q_i^{in} \cdot \left(1 - \frac{T_{0,i}}{T_i^{in}}\right) \quad (11)$$

$$e_{Q,i}^{C,out} = Q_i^{C,out} \cdot \left(\frac{T_{0,i}}{T_i^{C,out}} - 1\right) \quad (12)$$

$$e_{Q,i}^{C,in} = Q_i^{C,in} \cdot \left(\frac{T_{0,i}}{T_i^{C,in}} - 1\right) \quad (13)$$

综上所述, 系统的输入焓 E_{in} 和输出焓 E_{out} 分别为

$$E_{in} = \sum_{i=1}^{24} e_{Q,i}^{C,in} + \sum_{i=1}^{24} e_{f,i}^{in} + \sum_{i=1}^{24} P_{grid,i} + \sum_{i=1}^{24} e_{SW,i} + \sum_{i=1}^{24} P_{PV,i}^c + \sum_{i=1}^{24} P_{WT,i}^c \quad (14)$$

$$E_{out} = \sum_{i=1}^{24} e_{Q,i}^{out} + \sum_{i=1}^{24} e_{Q,i}^{C,out} + \sum_{i=1}^{24} e_{f,i}^{out} + \sum_{i=1}^{24} P_{EL,i} + \sum_{i=1}^{24} e_{HW,i} \quad (15)$$

4 系统负荷建模

4.1 供暖负荷建模

在实际工程中, 向用户传递热量或冷量的介质一般为水。以供暖期为例, 被系统加热到一定温度的热水流经用户, 通过热辐射、对流换热和导热的方式加热室内空气, 同时供暖水温度降低, 变为回水继续返回系统加热。在整个换热过程中, 供暖水和回水的流量不变, 如果忽略管道的温降, 则热水因温度降低而损失的热量即为供暖热负荷。因此, 本文建立供暖负荷的模型为

$$V_i^{in} = V_i^{out} \quad (16)$$

$$Q_i^{out} - Q_i^{in} = Q_{SHL,i} \quad (17)$$

$$Q_i^{out} = V_i^{out} \cdot c_p \cdot (T_i^{out} - T_h) \quad (18)$$

$$Q_i^{in} = V_i^{in} \cdot c_p \cdot (T_i^{in} - T_h) \quad (19)$$

中国低温辐射供暖行业规定, 低温供水温度应不大于60℃, 针对民用建筑的供水温度宜采用35~50℃, 供回水温差不宜大于10℃^[14]。同时结合其他文献^[15-17], 本文采取供暖热水温度范围为35~60℃, 供回水温差为5~10℃, 即

$$5^\circ\text{C} \leq T_i^{out} - T_i^{in} \leq 10^\circ\text{C} \quad (20)$$

$$35^\circ\text{C} \leq T_i^{out} \leq 60^\circ\text{C} \quad (21)$$

4.2 生活热水负荷建模

生活热水是指加热后高于常温, 用于清洁的热水, 如盥洗、淋浴等用水, 生活热水负荷主要取决于用户每个时刻的热水需求量和热水的温度^[18]。因此, 满足用户的生活热水负荷意味着既要提供足够的热水体积, 又要保证热水的热量, 这样便可以保证生活热水的温度。如果已知用户逐时的用水量 and 温度, 那么用户逐时生活热水的热量可表示为

$$Q_{HWL,i} = \begin{cases} V_{HWL,i} \cdot c_p \cdot (T_{HWL,i} - T_c), & \text{供冷期} \\ V_{HWL,i} \cdot c_p \cdot (T_{HWL,i} - T_h), & \text{供暖期} \end{cases} \quad (22)$$

根据中国国家标准《民用建筑节能设计标准GB 50555—2010》, 集中供应的生活热水, 应保证配水点温度不低于45℃^[19]。同时考虑热水在管道中的温降, 将其水温上限设为95℃, 即

$$45^\circ\text{C} \leq T_{HWL,i} \leq 95^\circ\text{C} \quad (23)$$

4.3 可控负荷建模

本文针对用户可控电负荷的逐步分析建模如下^[20]。

设用户所有可调度电器的集合为 D , 对任意电器 $d \in D$, 用户需先确定其可运行的时段 $[T_a, T_b]$, 在此时段外, 电器 d 的功率 $P_{d,i}$ 为0, 即

$$P_{d,i} = 0 (i \notin [T_a, T_b]), \forall d \in D \quad (24)$$

该设备在何时启动以及在何时停止运行, 则由优化算法和优化目标计算而得。同时, 因为参与需求响应的电器负荷的总耗电量在调度周期内是一定的, 即

$$\sum_{i=T_a}^{T_b} P_{d,i} = P_d^{\text{sum}}, \forall d \in D \quad (25)$$

另外为了保证设备的工作时长, 避免频繁启停对设备的损害, 设备 d 在运行时刻也要满足一定的上下限约束:

$$P_d^{\text{min}} \leq P_{d,i} \leq P_d^{\text{max}} (i \in [T_a, T_b]), \forall d \in D \quad (26)$$

在用户实际的用电情况中, 存在某些电器的使用时间是在第一天夜间直到第二天白天, 则可将其工作

区间 $[T_a, 24] \cup [1, T_b]$ ($T_a > T_b$) 分为2个, 即 $[T_a, 24]$ 和 $[1, T_b]$, 分别视为2个设备 d_1 和 d_2 的工作区间, 2个设备的总耗电量为原设备的总耗电量:

$$\sum_{i=T_a}^{24} P_{d_1,i} + \sum_{i=1}^{T_b} P_{d_2,i} = P_d^{\text{sum}} \quad (T_a > T_b), \forall d \in D \quad (27)$$

5 系统元件优化模型及约束条件

系统内有些设备的运行效率会随运行工况发生变化。一般而言, 在额定运行工况附近工作的设备, 其效率波动不大^[21], 因此本文近似认为其效率是固定值。

需要指出的是, 本章涉及微燃机余热、燃气锅炉和电锅炉加热水后的温升, 其初始温度为 $T_i^{\text{in,mix}}$, 而不是常温水的温度。上述设备的出水温度即温升与 $T_i^{\text{in,mix}}$ 相加的和, 需小于当地水的沸点。

5.1 供电及耦合系统约束

5.1.1 电功率平衡约束

$$P_{\text{grid},i} + P_{\text{MT},i} + P_{\text{PV},i}^c + P_{\text{WT},i}^c + P_{\text{ES},i}^{\text{dis}} = P_{\text{HP},i} + P_{\text{EB},i} + P_{\text{P2G},i} + P_{\text{ES},i}^{\text{ch}} + P_{\text{EL},i} + \sum_{d \in D} P_{d,i} + P_{\text{pump},i} \quad (28)$$

5.1.2 微燃机出力及约束^[22]

$$P_{\text{MT},i} = G_{\text{MT},i} \cdot \eta_{\text{MT}}^c \quad (29)$$

$$Q_{\text{MT},i} = G_{\text{MT},i} \cdot \eta_{\text{MT}}^h \quad (30)$$

$$Q_{\text{MT},i} = V_{\text{MT},i} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{MT},i} \quad (31)$$

$$x_{\text{MT}}^{\text{min}} \cdot P_{\text{MT}} \leq P_{\text{MT},i} \leq x_{\text{MT}}^{\text{max}} \cdot P_{\text{MT}} \quad (32)$$

$$0 \leq \Delta T_{\text{MT},i} \leq \Delta T_{\text{MT}}^{\text{max}} \quad (33)$$

5.1.3 光伏组件的实际出力及约束

以太阳辐射 $I_{\text{STC}} = 1 \text{ kW/m}^2$ 和电池温度 $T_s = 298.15 \text{ K}$ 为标准额定条件 (standard test condition, STC), 可得光伏组件的实际出力及约束为^[23]

$$P_{\text{PV},i} = [1 + k(T_{\text{C},i} - T_s)] \cdot \frac{I_{\text{C},i}}{I_{\text{STC}}} \cdot P_{\text{STC}} \quad (34)$$

$$P_{\text{PV},i} \leq P_{\text{PV}}^{\text{max}} \quad (35)$$

$$(1 - x_{\text{PV}}) \cdot P_{\text{PV},i} \leq P_{\text{PV},i}^c \leq P_{\text{PV},i} \quad (36)$$

5.1.4 风力发电出力及约束^[24]

$$P_{\text{WT},i} = \begin{cases} 0 (v_i < v^{\text{in}}, v_i > v^{\text{out}}) \\ P_{\text{WT}} \cdot \frac{v_i - v^{\text{in}}}{v^0 - v^{\text{in}}} (v^{\text{in}} \leq v_i < v^0) \\ P_{\text{WT}} (v^0 \leq v_i < v^{\text{out}}) \end{cases} \quad (37)$$

$$(1 - x_{\text{wt}}) \cdot P_{\text{WT},i} \leq P_{\text{WT},i}^c \leq P_{\text{WT},i} \quad (38)$$

5.2 供热及耦合系统约束

5.2.1 热功率平衡约束

$$Q_i^{\text{in}} + Q_{\text{SW},i}^h + Q_{\text{GB},i} + Q_{\text{EB},i} + Q_{\text{MT},i} + Q_{\text{HS},i}^{\text{dis}} = Q_{\text{HWL},i} + Q_{\text{HS},i}^{\text{ch}} + Q_{\text{AC},i} + Q_i^{\text{out}} \quad (39)$$

5.2.2 太阳能热水器的有效集热量与系统使用约束^[25]

$$Q_{\text{SW},i} = I_{\text{C},i} \cdot A_{\text{SW}} \cdot \eta_{\text{SW}} = V_{\text{SW}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{SW},i}^{\text{out}} - T_{\text{SW}}^{\text{in}}) \quad (40)$$

$$Q_{\text{SW},i}^h \leq Q_{\text{SW},i} \quad (41)$$

$$Q_{\text{SW},i}^h = c_p \cdot V_{\text{SW},i}^h \cdot (T_{\text{SW},i}^{\text{out}} - T_{\text{SW}}^{\text{in}}) \quad (42)$$

$$V_{\text{SW},i}^h \leq V_{\text{SW}} \quad (43)$$

$$Q_{\text{SW},i}^h = 0 (V_{\text{SW},i}^h = 0) \quad (44)$$

5.2.3 燃气锅炉、电锅炉出力及约束^[26]

$$Q_{\text{GB},i} = G_{\text{GB},i} \cdot \eta_{\text{GB}} = V_{\text{GB},i} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{GB},i} \quad (45)$$

$$Q_{\text{GB}}^{\text{min}} \leq Q_{\text{GB},i} \leq Q_{\text{GB}}^{\text{max}} \quad (46)$$

$$Q_{\text{EB},i} = P_{\text{EB},i} \cdot \eta_{\text{EB}} = V_{\text{EB},i} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{EB},i} \quad (47)$$

$$Q_{\text{EB}}^{\text{min}} \leq Q_{\text{EB},i} \leq Q_{\text{EB}}^{\text{max}} \quad (48)$$

5.3 供气及耦合系统约束

5.3.1 天然气功率平衡约束

$$G_{\text{grid},i} + G_{\text{P2G},i} + G_{\text{GS},i}^{\text{dis}} = G_{\text{MT},i} + G_{\text{GB},i} + G_{\text{GL},i} + G_{\text{GS},i}^{\text{ch}} \quad (49)$$

5.3.2 电转气装置出力及约束^[26]

$$G_{\text{P2G},i} = P_{\text{P2G},i} \cdot \eta_{\text{P2G}} \quad (50)$$

$$G_{\text{P2G}}^{\text{min}} \leq G_{\text{P2G},i} \leq G_{\text{P2G}}^{\text{max}} \quad (51)$$

5.4 储能设备通用模型

本文储能设备的通用模型及约束为^[27]

$$E_{\text{S},i} = (1 - \tau) E_{\text{S},i-1} + \left(\eta_{\text{ch}} P_{\text{E},i}^{\text{ch}} - \frac{P_{\text{E},i}^{\text{dis}}}{\eta_{\text{dis}}} \right) \Delta t \quad (52)$$

$$E_{\text{S}}^{\text{min}} \leq E_{\text{S},i} \leq E_{\text{S}}^{\text{max}} \quad (53)$$

$$P_{\text{ch}}^{\text{min}} \leq P_{\text{E},i}^{\text{ch}} \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \quad (54)$$

$$P_{\text{dis}}^{\text{min}} \leq P_{\text{E},i}^{\text{dis}} \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \quad (55)$$

5.5 水泵设备

本文仅考虑系统向用户供暖或供冷时使用水泵的电耗, 同时假设扬程不变, 供暖/冷水的流量越大, 水泵消耗的电功率越大, 其电耗功率可表示为^[28]

$$P_{\text{pump},i} = \frac{V_i^{\text{in}} \cdot H \cdot \rho_w \cdot g}{\eta_c \cdot \eta_p} \quad (56)$$

5.6 电网、天然气网出力功率约束

电网和天然气网是用户用能需求的主要来源，其每小时的出力功率存在最大功率约束：

$$P_{\text{grid},i} \leq P_{\text{grid}}^{\max} \quad (57)$$

$$G_{\text{grid},i} \leq G_{\text{grid}}^{\max} \quad (58)$$

6 算例分析

6.1 基础数据

本章以北京市海淀区某一由国网外部供电的园区内小型商业类型建筑为研究对象，利用图1所示的多能互补能源系统进行算例分析。选取调度时刻总数为24 h，单位调度时间为1 h。根据NASA提供的天气数据可计算得出供暖期的风力发电、光伏发电以及太阳能热水器的逐时功率，见附录B图B1，园区提供的冬季典型日的电热气负荷见附录B图B2，该日的逐时气温见附录B图B3。光伏系统等能源生产设备参数^[29]见附录B表B1，微燃机等能源转换设备参数^[30]见附录B表B2，储能设备参数见附录B表B3，能源价格参数^[31]见附录B表B4，系统内设备污染物排放参数^[32]见附录B表B5，污染物治理费用^[33]见附录B表B6，可控设备参数^[34]见附录B表B7。

6.2 目标函数

本文模型的优化目标是在计及系统水平衡约束的情况下，探究系统分别采取运行成本最低和烟效率最大为目标函数时，其运行调度策略的不同。以运行成本最低为目标函数：

$$\min C_{\text{OP}} = C_{\text{grid}} + C_{\text{M}} + C_{\text{PT}} \quad (59)$$

$$C_{\text{grid}} = \sum_{i=1}^{24} (P_{E,i} \cdot P_{\text{grid},i}) + P_{\text{G}} \cdot \sum_{i=1}^{24} G_{\text{grid},i} \quad (60)$$

以系统烟效率最大为目标函数：

$$\max \eta_{\text{ex}} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \quad (61)$$

6.3 优化结果分析

本文建立的数学模型为混合整数非线性优化问题，求解工具为LINGO11^[35]。令目标函数为运行成本最低的运行策略为方案1，目标函数为烟效率最大的运行策略为方案2。则方案1的电、热、气功率平衡情况见附录C图C1、C2、C3，方案2的电、热、气功率平衡情况见附录C图C4、C5、C6。

6.3.1 电负荷调度策略分析

图5为供暖期2种调度方案下的电网逐时出力曲线。可以发现，方案1下的电网在调度周期内都保持出力状态，平均负荷率为32%；方案2在除18:00以外的任意时刻的电网出力值均不小于方案1，电网在19:00—22:00的出力占最大出力的80%以上，平均负荷率为49%。从曲线平稳性方面上来看，方案2的电网逐时出力曲线稳定性表现较差，多次出现波峰波谷且曲线波动范围较大，标准差为86 kW；方案1相对曲线波动范围较小，相邻时刻间出力的差距较小，标准差为64 kW。

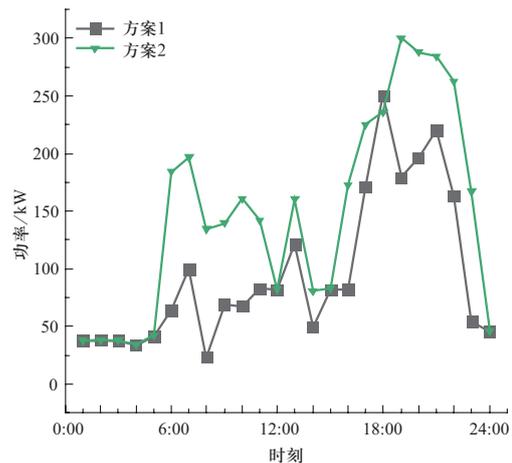


图5 供暖期2种调度方案的电网逐时出力

Fig. 5 Hourly power output of the power grid for the two scheduling schemes during the heating period

图6为供暖期2种调度方案下微燃机的逐时出力。可以看到方案1在大部分时间都没有启动，只在10:00、16:00、20:00—23:00启动，且最大功率仅为16 kW；方案2调度下微燃机在调度周期里都没有启动。

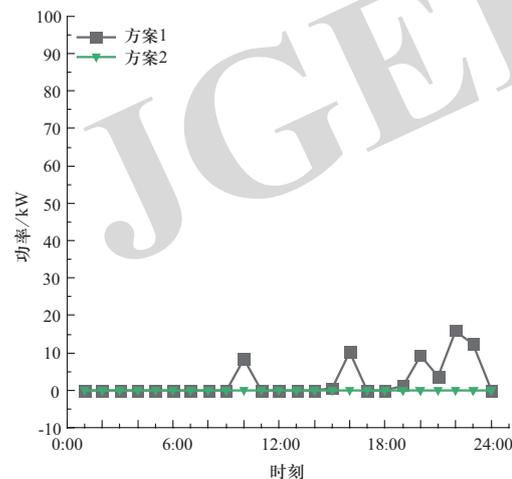


图6 供暖期2种调度方案的微燃机逐时出力

Fig. 6 Hourly output of micro-gas turbines for two scheduling schemes during heating period

图7为供暖期2种调度方案中蓄电设备容量的变化曲线。方案1在1:00将初始电量释放后，分别在6:00、7:00、13:00、18:00进行充电，并在8:00、14:00、19:00向系统释放电能；方案2则是在1:00释放完初始电量后就不再参与系统调度直到调度周期结束。

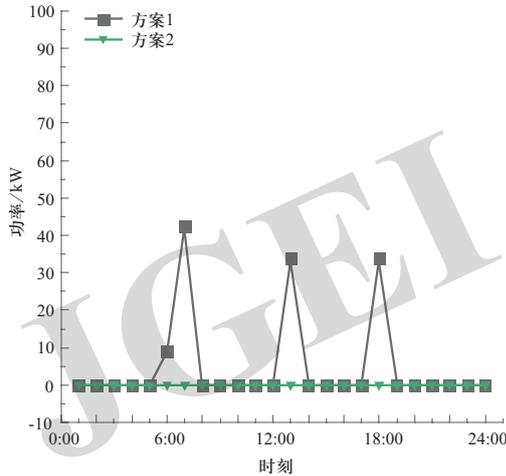


图7 供暖期2种调度方案的蓄电设备逐时容量

Fig. 7 Hourly capacity of power storage equipment for two scheduling schemes during heating period

综上所述，在优先消耗廉价的风电和光伏发电的基础上，2种方案的电调度策略各有其偏向性。方案1在负荷较低的调度初期，电网负荷处于低谷期，此时电网优先出力负担电负荷，蓄电设备的初始电量在1:00释放完毕，而微燃机没有发电，随着系统电负荷的增加，电网处于平时段和峰时段，电价上涨，算法以系统运行成本最低为目标决定不同设备出力的大小。此时，电网出力仍占大部分，并以微燃机和蓄电设备辅助供电，在8:00、14:00、19:00，电网出力功率出现明显下降，这是由于蓄电设备在该时刻放电，微燃机则在10:00、16:00、20:00—23:00辅助电网供电。方案2调度策略较为简单，微燃机全程处于停机状态，蓄电设备的初始电量在1:00就释放完毕，系统的电量需求只由电网提供。

6.3.2 热负荷调度策略分析

图8为供暖期2种调度方案下的微燃机余热锅炉的逐时出力，其出力曲线特征与上文微燃机发电曲线的出力特性相同。图9为供暖期2种调度方案下的电锅炉逐时出力。在方案1中，电锅炉只在17:00—22:00启动运行，平均负荷率为12%，标准差为45 kW。方案2的电锅炉除1:00—5:00、12:00和14:00—15:00外均处于启动状态，平均负荷率为35%，曲线波动范围较大，波动性明显，标准差为67 kW。

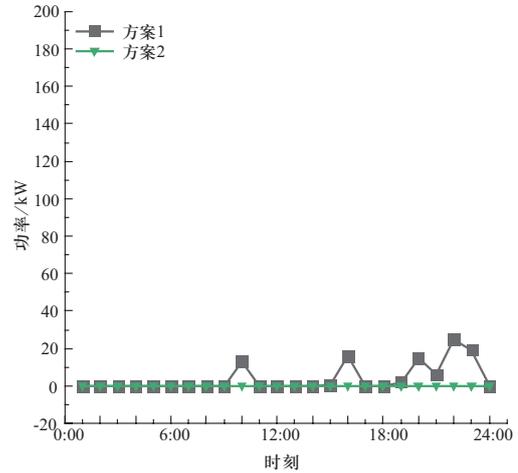


图8 供暖期2种调度方案的微燃机逐时余热功率

Fig. 8 Hourly waste heat power of micro-gas turbines for two scheduling schemes during heating period

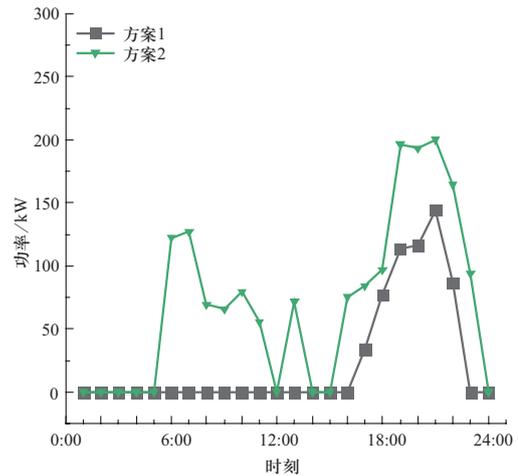


图9 供暖期2种调度方案的电锅炉逐时功率

Fig. 9 Hourly power of electric boilers for two scheduling schemes during heating period

图10为供暖期2种调度方案下的燃气锅炉逐时出力。方案1的燃气锅炉在整个调度周期内都保持启动状态，在6:00—10:00、14:00—17:00以及19:00—23:00均保持最大出力，平均负荷率为85%，标准差为51 kW。方案2的燃气锅炉全程运行，平均负荷率为62%，曲线出现多次波动，相邻时刻间差距较小，标准差为41 kW。

图11为供暖期2种调度方案下的储热设备容量变化。可以看出，方案1在1:00没有进行充放，初始热量在2:00略微耗散到9.75 kW，在3:00—5:00充能到54 kW，随后在6:00和7:00释放，接着在8:00—12:00逐渐充能到最大容量，13:00放能到68 kW，在14:00—15:00又充能到最大值，16:00和17:00放能，又在18:00储热到最大值，然后再进行放热，直到21:00储热量完全释放，并在随后的时刻不参与调度；方案2的储热设备

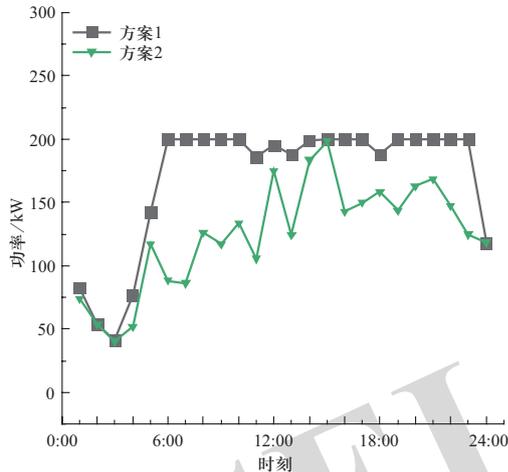


图 10 供暖期2种调度方案的燃气锅炉逐时功率

Fig. 10 Hourly power of gas-fired boilers for two scheduling schemes during heating period

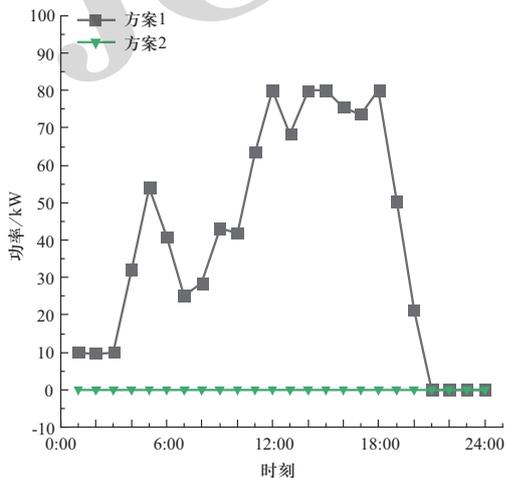


图 11 供暖期2种调度方案的储热设备逐时容量

Fig. 11 Hourly capacity of heat storage equipment for two scheduling schemes during heating period

在1:00就将初始容量释放完，并在剩余的调度时间内储热量均为0。

综上，方案1中，系统热负荷主要由燃气锅炉提供，电锅炉只在燃气锅炉负荷率较高且无法满足需求时启动，微燃机余热供能参与度和出力功率较低，储热设备在前21 h均参与调度。方案2没有微燃机的余热供应，且储热设备几乎不参与调度，电锅炉和燃气锅炉合作供热，并没有主次之分，具体出力功率则由系统算法决定。

6.3.3 气负荷调度策略分析

图12为供暖期2种调度方案的天然气网逐时出力。方案1的天然气网出力曲线呈现先下降后上升再下降趋势，符合用户热负荷曲线变化趋势，且在10:00和12:00—22:00维持天然气网的最大出力，平均负荷率

为80%。方案2曲线整体处于下方，每个时刻的天然气网出力最小，平均负荷率为59%。从曲线平稳性分析，方案1波动范围较大，标准差为86 kW；方案2出现波峰波谷较多，但变化幅度不大，标准差为77 kW。

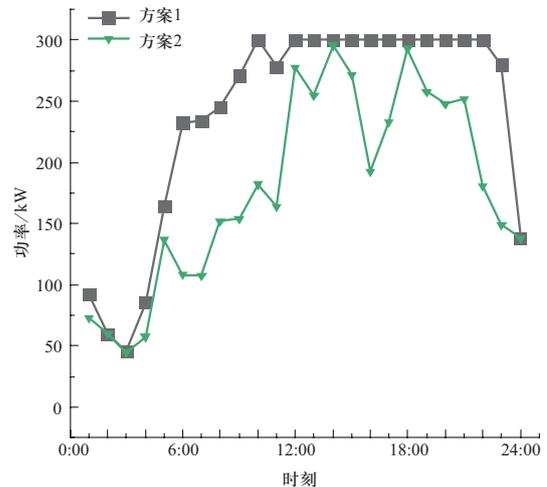


图 12 供暖期2种调度方案的天然气网逐时出力

Fig. 12 Hourly output of natural gas network for two scheduling schemes during heating period

图13为2种调度方案中储气设备容量的变化曲线。方案1在1:00—7:00保持初始容量不变，8:00开始充能，并在11:00和12:00维持最大容量，13:00和14:00进行放能，随后逐渐充能直到17:00充满储气设备，接着放能直到21:00容量为0。方案2的储气设备在1:00就将初始容量释放至0.48 kW，2:00保持不变，3:00释放完毕并且直到调度结束不再有充放过程。

综上，方案2调度策略最为简单，系统的气负荷

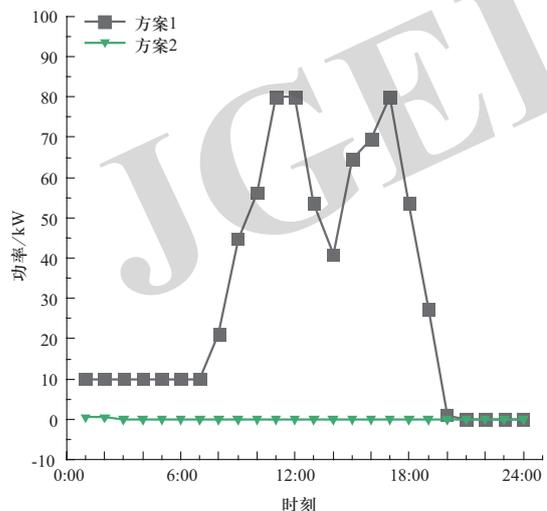


图 13 供暖期2种调度方案的储气设备逐时容量变化

Fig. 13 Hourly capacity changes of gas storage equipment for the two scheduling schemes during the heating period

几乎全由天然气网负担，因为电锅炉为主要供热手段，燃气锅炉出力较小，系统对天然气的需求最少，故天然气网出力较其余方案最小，储气设备仅仅在1:00和3:00有充放过程；方案1以天然气网出力为主，同时储气设备参与调节，共参与13 h，参与度达54%。

6.3.4 供暖水逐时温度和供回水的逐时温度差

图14为供暖期2种调度方案中供暖水温度的变化曲线，方案2保持60℃不变，而方案1的供水温度则是一个变化的过程。方案1在大部分时刻为最低供水温度35℃，在2:00和18:00—22:00供水温度升高，最大温度为56.64℃，平均温度为39.48℃。

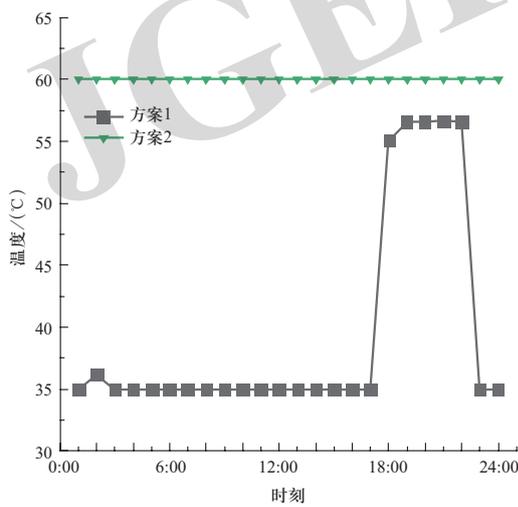


图14 供暖期2种调度方案的供暖水逐时温度

Fig. 14 Hourly temperature of heating water for two scheduling schemes during heating period

图15为供暖期2种调度方案中供回水温差的变化曲线。方案1在调度周期内的温差保持在10℃，而方案2则维持在5℃。因此，方案1在每个时刻会选择最小的供水流量，方案2则会选择最大的供水流量。

从上述分析可以看出，方案1会采取最大的供回水温差降低供水流量，减少水费和水泵电耗，同时系统算法还会在不同的时刻采取不同的供水温度。方案2为使其焓效率指标最大，采取了最大的供水流量和最大的供水温度，保证了系统输出供热的热量焓最大，同时选择了最大回水温度，这意味着输入系统的回热的热量焓最大，故输入系统的其他焓减少，从而使系统整体的焓效率提高。

6.3.5 评价指标对比

表1为2种调度方案的各项评价指标对比。方案1的运行成本最小，为5 945.93元，焓效率为46.7%。方案2的运行成本为7 757.33元，焓效率最大，为64.5%。

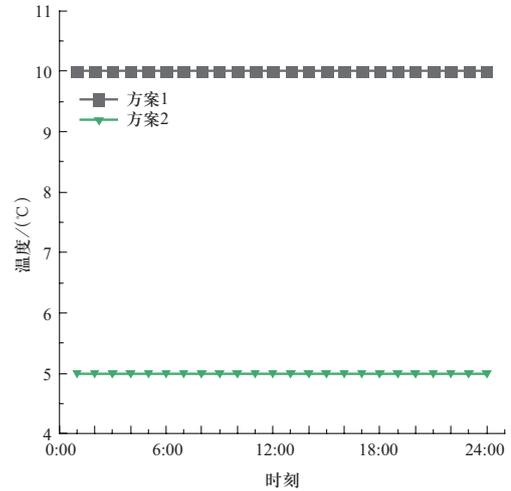


图15 供暖期2种调度方案的供回水逐时温度差

Fig. 15 Hourly temperature difference between supply and return water for two scheduling schemes during heating period

方案1的焓效率与最大焓效率相差17.8个百分点，占比为27.6%；方案2的运行成本与最小值相差1 811.40元，占比为30.5%。

系统充分利用能源生产、转化、存储设备之间的相互配合，从而保持运行成本最低。当系统追求热力学完善度最高时，运行策略更加简单和清晰，其焓效率相较提升了17.8个百分点，付出的代价则是运行成本增加了30.5%。

表1 供暖期2种调度方案的各项评价指标

Table 1 Evaluation indicators of the two scheduling schemes during the heating period

方案	目标函数	运行成本/元	焓效率/%
方案1	运行成本最小	5 945.93	46.7
方案2	焓效率最大	7 757.33	64.5

6.4 算例优化结果总结

在本算例中，系统分别以最优经济性和最大焓效率为目标函数时的运行策略存在明显差异，具体体现在以下方面。

1) 电网和天然气网出力方面。当目标函数为运行成本最少时，系统天然气网平均负荷率大于电网，且在负荷高峰期，系统明显会优先使用天然气网供能；目标函数为焓效率最大时，电网平均负荷率略大于天然气网，且二者没有表现出明显的规律性，由算法决定其出力。

2) 微燃机出力方面。微燃机作为供电手段之一，其利用程度却较低。当目标函数为运行成本最少时，

即使天然气价格低于电价,微燃机仅在某些时刻作为辅助设备供电,平均负荷率不足1%;当目标函数为焓效率最大时,微燃机则完全没有运行。

3) 储能设备利用方面。当目标函数为运行成本最少时,储能设备都参与了系统的调度,其中,储热和储气设备参与度较高;目标函数为焓效率最大时,储能设备几乎没有参与调度。

4) 供暖方面。目标函数为最少运行成本时,系统供暖水温度是变化的,均低于最大允许温度,供回水温差保持最大,代表供暖水流量保持最小;目标函数为焓效率最大时,系统保持最大的供暖水温度和最小的温差,代表输出系统的热量焓和供暖水流量最大,而不是为了提升焓效率选择最大的供回水温差,从而使回水的输入焓最小。

5) 热负荷调度策略方面。目标函数为最少运行成本时,燃气锅炉供热优先级高于电锅炉,当燃气锅炉达到最大功率后,电锅炉辅助供热;目标函数为焓效率最大时,系统负荷低时,由燃气锅炉单独供热,随着系统负荷的升高,燃气锅炉和电锅炉联合供热,没有明显的优先级,由算法决定二者的出力。

7 结论与展望

本文考虑了系统的水平衡约束,对多能互补能源系统进行了建模,建立了系统焓分析的黑箱模型,分别从焓和经济性的角度分析系统的运行策略,从而得出不同运行方式下的优劣情况。通过算例分析可以看出,系统焓效率的提升关键在于余能的利用和转化,表现为采用尽量少的能源转化环节和效率尽量高的设备,但同时也导致了运行成本的增加。

在实际的工程方案的决策中,有些方案虽然在热力学角度上是最完善的,但是在经济性方面却不一定是最佳的,二者往往不具有 consistency。系统在追求经济性最优的同时,提升焓效率的代价则是放弃使用诸如储能等需要多次进行能源转化的设备,以及转化效率较低的能源设备,从而牺牲了部分经济性。如果能源在多次转化后的效率不低于能源生产设备,那么无疑会使系统在保证经济性的同时大幅度提升焓效率。

在未来的研究中,将结合工程经济学和热力学的焓经济学应用到多能互补等复杂能源系统中,可为工程决策提供更加全面的指导和依据。

参考文献

- [1] 李立涅,张勇军,徐敏.我国能源系统形态演变及分布式能源发展[J].分布式能源,2017,2(1):1-9.
LI Licheng, ZHANG Yongjun, XU Min. Morphological evolution of energy system and development of distributed energy in China[J]. Distributed Energy, 2017, 2(1): 1-9(in Chinese).
- [2] 梅生伟,李瑞,黄少伟,等.多能互补网络建模及动态演化机理初探[J].全球能源互联网,2018,1(1):10-22.
MEI Shengwei, LI Rui, HUANG Shaowei, et al. Preliminary investigation on the modeling and evolutionary analytics of multi-carrier energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 10-22(in Chinese).
- [3] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等.区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642(in Chinese).
- [4] 王英瑞,曾博,郭经,等.电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J].电网技术,2016,40(10):2942-2951.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2951(in Chinese).
- [5] 于潇涵,赵晋泉.含P2H、P2G电-气-热综合能源系统多能流算法[J].电力建设,2018,39(12):13-21.
YU Xiaohan, ZHAO Jinquan. Heat-gas-power flow calculation method for integrated energy system containing P2H and P2G[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 13-21(in Chinese).
- [6] 吴新玲,余家驹,黄芙蓉,等.多能源、多目标、多变量的能源协调优化调度模型[J].节能,2018,37(12):126-128.
- [7] 黎静华,黄玉金,张鹏.综合能源系统多能流潮流计算模型与方法综述[J].电力建设,2018,39(3):1-11.
LI Jinghua, HUANG Yujin, ZHANG Peng. Review of multi-energy flow calculation model and method in integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(3): 1-11(in Chinese).
- [8] 甄志,崔晓钢,陈鸿伟,等.焓分析方法及在工程领域中的应用[J].电力科学与工程,2003,19(1):62-65.
ZHEN Zhi, CUI Xiaogang, CHEN Hongwei, et al. Exergy analysis method and its application[J]. Electric Power Science and Engineering, 2003, 19(1): 62-65(in Chinese).
- [9] 刘强,段远源.超临界600 MW火电机组热力系统的焓分析[J].中国电机工程学报,2010,30(32):8-12.
LIU Qiang, DUAN Yuanyuan. Exergy analysis for thermal power system of a 600 MW supercritical power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(32): 8-12(in Chinese).
- [10] 陆诗建,赵东亚,朱全民,等.胜利电厂100 t/d烟气CO₂捕集装置焓分析与节能方法探索[J].天然气化工(C1化学与

- 化工), 2019, 44(5): 96-101.
- LU Shijian, ZHAO Dongya, ZHU Quanmin, et al. Exergy analysis and energy saving method for a 100 t/d CO₂ capture device in Shengli Power Plant[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2019, 44(5): 96-101(in Chinese).
- [11] 郭艳飞, 吴强, 程林, 等. 基于焓效率的综合能源系统能效分析模型[J]. 可再生能源, 2017, 35(9): 1387-1394.
- GUO Yanfei, WU Qiang, CHENG Lin, et al. Efficiency analysis model of integrated energy system based on the exergy efficiency[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(9): 1387-1394(in Chinese).
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 能量系统焓分析技术导则 GB/T 14909—2005[S].
- [13] 胥义. 几种太阳能热水系统的焓分析[J]. 上海节能, 2001(2): 20-21.
- [14] 中华人民共和国建设部. 中华人民共和国建筑工程标准: 地面辐射供暖技术规程 JGJ 142—2004[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [15] 周志伟. 供热系统大温差供热优化运行的研究与应用[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
- [16] 叶蕾. 能量平衡法及其在地板辐射采暖控制系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [17] 高鹏程. 供回水温度影响地板辐射采暖性能的模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [18] 刘畅. 公共建筑用热系统节能设计与运行能耗评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准: 民用建筑节能设计标准 GB 50555—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [20] LU Xiaoxing, LI Kangping, XU Hanchen, et al. Fundamentals and business model for resource aggregator of demand response in electricity markets[J]. Energy, 2020, 204: 117885.
- [21] 李杨, 刘伟佳, 赵俊华, 等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3680-3689.
- LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3680-3689(in Chinese).
- [22] 梁文豪. 多能互补的分布式供能系统建模与优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [23] 张曦, 康重庆, 张宁, 等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 6-13.
- ZHANG Xi, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 6-13(in Chinese).
- [24] 张磊, 朱凌志, 陈宁, 等. 风力发电统一模型评述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 207-215.
- ZHANG Lei, ZHU Lingzhi, CHEN Ning, et al. Review on generic model for wind power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 207-215(in Chinese).
- [25] 任红军. 太阳能热水系统在住宅项目中的应用研究[J]. 居舍, 2020(23): 189-190.
- [26] 刘佳星. 多能互补综合能源系统日前经济优化调度[J]. 资源信息与工程, 2020, 35(4): 143-150.
- LIU Jiaying. Economically optimized scheduling of multi-energy complementary integrate system[J]. Resource Information and Engineering, 2020, 35(4): 143-150(in Chinese).
- [27] 杜先波, 陶苏滕, 刘述波, 等. 综合能源系统日前-日内多目标优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 109-117.
- DU Xianbo, TAO Sumeng, LIU Shubo, et al. Day-ahead and intraday optimal control strategies of integrated energy system considering multiple objectives[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 109-117(in Chinese).
- [28] 岳金文, 李志鹏, 秦武, 等. 基于目标电耗的城镇供水泵机组节能技术的研究及应用[J]. 流体机械, 2017, 45(5): 46-50.
- YUE Jinwen, LI Zhipeng, QIN Wu, et al. Energy-saving technology research for water pump unit of urban based on target power consumption and its implement[J]. Fluid Machinery, 2017, 45(5): 46-50(in Chinese).
- [29] 朱兰, 牛培源, 唐陇军, 等. 考虑直接负荷控制不确定性的微能源网鲁棒优化运行[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1400-1413.
- ZHU Lan, NIU Peiyuan, TANG Longjun, et al. Robust optimal operation for micro-energy grid considering uncertainties of direct load control[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1400-1413(in Chinese).
- [30] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.
- CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287(in Chinese).
- [31] 施泉生, 丁建勇, 刘坤, 等. 含电、气、热3种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 269-276.
- SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 269-276(in Chinese).
- [32] 史佳琪. 区域综合能源系统供需预测及优化运行技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [33] 何仲潇. 多能协同的综合能源系统协调调度方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [34] 陈志彤. 多能流型区域综合能源系统经济调度优化运行[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [35] 桑杨阳, 朱万红, 但兵兵. 非线性规划建模与LINGO软件的编程应用[J]. 电脑知识与技术, 2012, 8(10): 2419-2422.
- SANG Yangyang, ZHU Wanhong, DAN Bingbing. Modeling of nonlinear programming and LINGO's programming and application[J]. Computer Knowledge and Technology, 2012, 8(10): 2419-2422(in Chinese).

附录A 符号及含义

$V_{SW,i}^h$	—— i 时刻系统利用太阳能热水器中的热水体积	P_d^{\max} 、 P_d^{\min}	——设备 d 在 i 时刻运行功率的上下限
V_i^{in}	—— i 时刻供暖/冷水的体积	$P_{MT,i}$	——微燃机 i 时刻的发电功率
$V_{MT,i}$	——微燃机 i 时刻所产余热加热水的体积	$P_{ES,i}^{\text{dis}}$	—— i 时刻蓄电设备的放电功率
$V_{EB,i}$	—— i 时刻电锅炉加热水的体积	$P_{ES,i}^{\text{ch}}$	—— i 时刻蓄电设备的充电功率
$V_{GB,i}$	—— i 时刻燃气锅炉加热水的体积	$P_{EB,i}$	—— i 时刻电锅炉的耗电量
$V_{HS,i}^{\text{dis}}$	—— i 时刻储热设备释放热水的体积	$P_{\text{pump},i}$	—— i 时刻水泵的耗电功率
$V_{HS,i}^{\text{cha}}$	—— i 时刻储热设备存储热水的体积	$P_{HP,i}$	—— i 时刻电制冷机的耗电量
$V_{HWL,i}$	—— i 时刻用户所需生活热水的体积	$P_{P2G,i}$	—— i 时刻电转气设备的耗电量
V_i^{out}	—— i 时刻供水的体积	$G_{MT,i}$	—— i 时刻微燃机消耗天然气的热功率
$T_{SW,i}^{\text{out}}$	—— i 时刻太阳能热水器的出水温度	η_{MT}^c	——微燃机的发电效率
T_i^{in}	—— i 时刻供暖回水温度	$Q_{MT,i}$	—— i 时刻微燃机的余热功率
$T_i^{\text{in,mix}}$	——供暖期 i 时刻系统的进水温度	η_{MT}^h	——微燃机的余热回收效率
$V_{HP,i}$	—— i 时刻电制冷机降温水的体积	$\Delta T_{MT,i}$	—— i 时刻微燃机余热加热水的温升
$V_{AC,i}$	—— i 时刻吸收式制冷机的冷冻水体积	P_{MT}	——微燃机发电的额定功率
$V_{CS,i}^{\text{dis}}$	—— i 时刻蓄冷设备释放冷水的体积	x_{MT}^{\min}	——微燃机发电的最小负荷率
$V_{CS,i}^{\text{cha}}$	—— i 时刻蓄冷设备存储冷水的体积	x_{MT}^{\max}	——微燃机发电的最大负荷率
$Q_{\text{grid},i}$	—— i 时刻天然气网出力的高位热值	ΔT_{MT}^{\max}	——微燃机余热加热水温升的最大值
$Q_{GL,i}$	—— i 时刻用户所需天然气的高位热值	$P_{PV,i}$	—— i 时刻光伏系统实际的发电功率
$e_{SW,i}$	—— i 时刻太阳能热水器输入到系统的热量焓	k	——功率温度系数
$Q_{SW,i}^h$	—— i 时刻系统利用太阳能热水器的热量	$T_{C,i}$	—— i 时刻电池板的实际温度
$T_{0,i}$	—— i 时刻的环境温度	$I_{C,i}$	—— i 时刻的太阳能强度
$T_{SW,i}$	—— i 时刻太阳能热水器进出口的平均水温	P_{STC}	——STC条件下光伏系统的发电功率
T_{SW}^{in}	——太阳能热水器的进水温度, 为定值	x_{PV}	——当地允许的弃光比例
$Q_{HWL,i}$	—— i 时刻用户所需生活热水的热量	P_{PV}^{\max}	——光伏系统最大功率
$T_{HWL,i}$	—— i 时刻系统向用户提供生活热水的温度	$P_{WT,i}$	—— i 时刻风力机组的发电量
$e_{Q_i}^{\text{out}}$ 、 $e_{Q_i}^{\text{in}}$	—— i 时刻供暖期供暖水的热量焓和回水的热量焓	P_{WT}	——风力发电机组的额定功率
$e_{Q_i}^{\text{C,out}}$ 、 $e_{Q_i}^{\text{C,in}}$	—— i 时刻供暖期供冷水的冷量焓和回水的冷量焓	v_i	—— i 时刻的实际风速
T_i^{out}	—— i 时刻供暖水温度	v^{in}	——风力发电机的切入风速
$T_i^{\text{C,out}}$	—— i 时刻供冷水温度	v^{out}	——风力发电机的切出风速
$T_i^{\text{C,in}}$	—— i 时刻供冷回水温度	v^0	——风力发电机的额定风速
$P_{\text{grid},i}$	—— i 时刻系统向电网的购电量	x_{wt}	——当地允许的弃风比例
$P_{PV,i}^c$	—— i 时刻系统利用的光伏发电量	$Q_{GB,i}$	—— i 时刻燃气锅炉的功率
$P_{WT,i}^c$	—— i 时刻系统实际利用的风电功率	$Q_{EB,i}$	—— i 时刻电锅炉的产热量
$P_{EL,i}$	—— i 时刻用户的电负荷	$Q_{HS,i}^{\text{dis}}$	—— i 时刻储热设备的放热功率
Q_i^{out} 、 Q_i^{in}	—— i 时刻供暖水热量和回水热量	$Q_{HS,i}^{\text{ch}}$	—— i 时刻储热设备的储热功率
$Q_{SHL,i}$	—— i 时刻用户的供暖负荷	$Q_{SW,i}$	—— i 时刻太阳能的集热量
c_p	——水的比热容	A_{SW}	——太阳能热水器的集热面积
T_h	——供暖期常温水的温度	η_{SW}	——集热效率
T_c	——供冷期常温水的温度	V_{SW}	——太阳能热水器水箱的体积
P_d^{sun}	——设备 d 在运行时刻的功率总和	$G_{GB,i}$	—— i 时刻燃气锅炉消耗天然气功率
		η_{GB}	——燃气锅炉的能量转换效率
		$\Delta T_{GB,i}$	—— i 时刻燃气锅炉加热水的温升

- Q_{GB}^{min} 、 Q_{GB}^{max} —— 燃气锅炉功率上下限
- η_{GB} —— 电锅炉的能量转换效率
- $\Delta T_{EB,i}$ —— i 时刻电锅炉加热水的温升
- Q_{EB}^{max} 、 Q_{EB}^{min} —— 电锅炉功率上下限
- $G_{grid,i}$ —— i 时刻系统从天然气网的购气量
- $G_{P2G,i}$ —— i 时刻电转气设备的产气量
- $G_{GS,i}^{dis}$ —— i 时刻储气设备的放气功率
- $G_{GS,i}^{ch}$ —— i 时刻储气设备的充气功率
- $G_{GL,i}$ —— i 时刻用户的气负荷
- η_{P2G} —— 电转气设备的综合能量转换效率
- G_{P2G}^{max} 、 G_{P2G}^{min} —— 电转气设备的功率上下限
- $E_{S,i}$ —— i 时刻储能设备的容量
- E_S^{min} —— 储能设备容量下限
- E_S^{max} —— 储能设备容量上限
- τ —— 储能设备的自损失率
- η_{ch} —— 储能设备充电效率
- η_{dis} —— 储能设备放电效率
- $P_{E,i}^{ch}$ —— 储能设备在 i 时刻的充电功率
- $P_{E,i}^{dis}$ —— 储能设备在 i 时刻的放能功率
- P_{ch}^{min} —— 储能设备的充电功率的下限
- P_{ch}^{max} —— 储能设备的充电功率的上限
- P_{dis}^{min} —— 储能设备的放能功率的下限
- P_{dis}^{max} —— 储能设备的放能功率的上限
- H —— 扬程
- ρ_w —— 水的密度
- g —— 重力加速度
- η_C —— 传动机构效率
- η_P —— 水泵效率
- P_{grid}^{max} —— 电网每小时的最大供电量
- G_{grid}^{max} —— 天然气网每小时的最大供气量
- C_{grid} —— 电网购电和购买天然气的费用
- C_M —— 设备维护费用
- C_{pt} —— 系统运行产生污染物处理的费用
- $p_{E,i}$ —— i 时刻的电价
- p_G —— 天然气的购买价格
- η_{ex} —— 系统的焓效率

附录B 案例基础数据

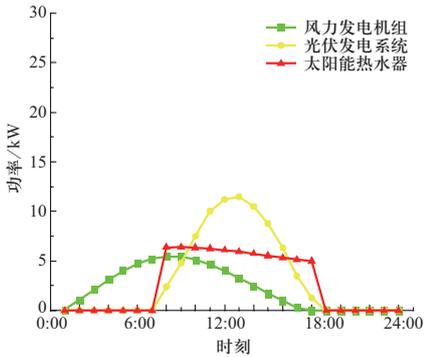


图 B1 冬季典型日可再生能源设备逐时功率

Fig. B1 Hourly power of renewable energy equipment on a typical winter day

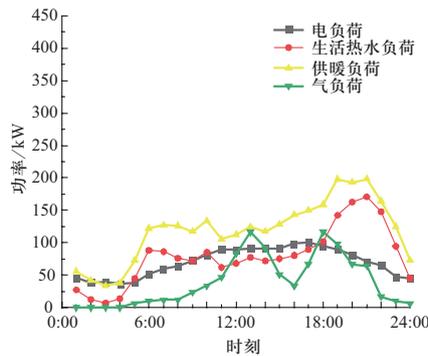


图 B2 冬季典型日用户逐时负荷

Fig. B2 Hourly load of typical daily users in winter

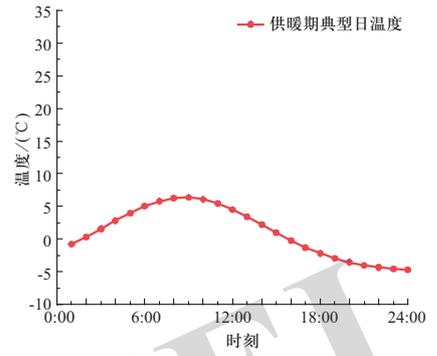


图 B3 冬季典型日逐时温度

Fig. B3 Hourly temperature of typical day in winter

表 B1 生产设备参数

Table B1 Production equipment parameters

设备	当地允许最大浪费比例	维护成本 / (元 · (kWh) ⁻¹)	最大出力功率 / kW
风力发电系统	0.3	0.024	33
光伏发电系统	0.3	0.0296	20
太阳能热水器		0.012	10
电网			300
天然气网			300

表 B2 能源转换设备参数

Table B2 Parameters of energy conversion equipment

设备	最大出力功率/kW	维护成本 / (元 · (kWh) ⁻¹)	产电效率	产热效率	制气效率
微燃机	200	0.068	0.3	0.68	
燃气锅炉	200	0.003 7		0.9	
电锅炉	200	0.012		0.95	
P2G	80	0.025			0.6

表 B3 储能设备参数

Table B3 Energy storage equipment parameters

储能类型	最大充放功率/kW	维护成本/(元·(kWh) ⁻¹)	初始容量/kWh	额定容量/kWh	充放率	自耗率
储电	37.5	0.083	10	100	0.9	0.02
储热	25	0.018	10	80	0.9	0.025
储气	25	0.005	10	80	0.9	00

表 B4 能源价格参数

Table B4 Energy price parameters

时段	电价/(元·(kWh) ⁻¹)	天然气价格/(元·m ⁻³)
谷时段	1:00—8:00	0.364 7
	24:00—1:00	
平时段	8:00—14:00	3.49
	17:00—19:00	
	22:00—24:00	
峰时段	14:00—17:00	1.190 2
	19:00—22:00	

表 B6 污染物治理费用

Table B6 Pollutant treatment costs

污染类型	元/kg		
	CO ₂	SO ₂	NO _x
治理费用	0.21	14.842	62.946

表 B7 可控设备参数

Table B7 Controllable equipment parameters

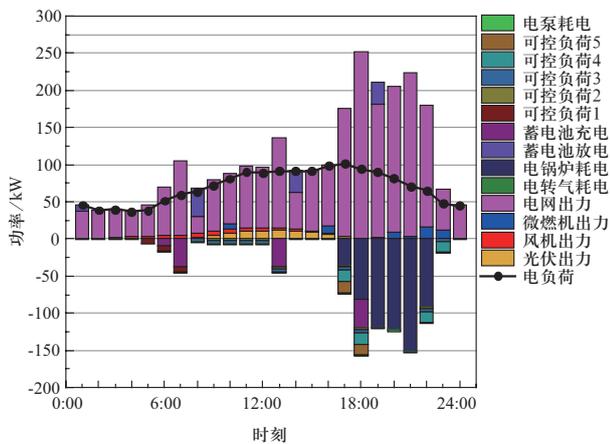
设备	原定运行时段	可调度运行时段	总运行时长/h	运行功率/kW	编号
扫地机器人	8:00,	5:00,	2	20	1
	10:00	11:00			
洗衣机	9:00,	9:00,	2	20	2
	11:00	23:00			
洗碗机	10:00,	8:00,	2	40	3
	12:00	24:00			
娱乐设备	21:00,	17:00,	2	60	4
	23:00	24:00			
烘干机	20:00,	15:00,	1	30	5
	21:00	21:00			

表 B5 设备污染物排放参数

Table B5 Equipment pollutant emission parameters

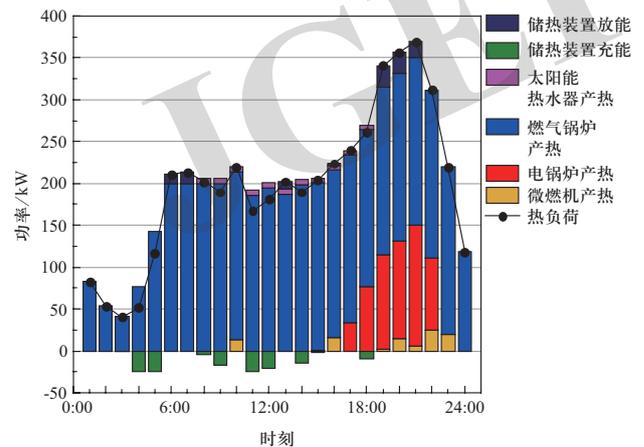
设备	CO ₂	SO ₂	NO _x
微燃机	649	0.206	9.89
电网	889	1.8	1.6

附录C 案例运行结果



图C1 运行成本最低的供暖期电负荷调度运行结果

Fig. C1 Operation result of electrical load dispatching during the heating period with the lowest operating cost



图C2 运行成本最低的供暖期热负荷调度运行结果

Fig. C2 Results of the heat load scheduling operation during the heating period with the lowest operating cost

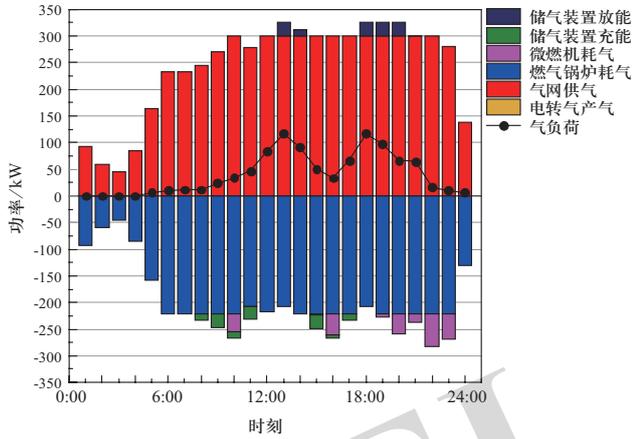


图 C3 运行成本最低的供暖期气负荷调度运行结果
 Fig. C3 Operation results of gas load dispatching during the heating period with the lowest operating cost

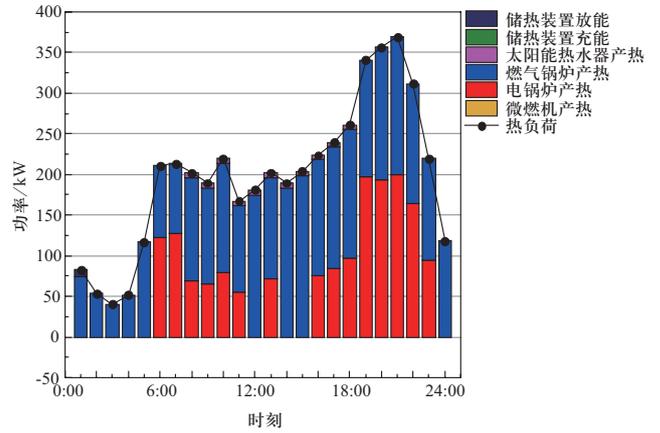


图 C5 焓效率最大的供暖期热负荷调度运行结果
 Fig. C5 Results of heat load scheduling during the heating period with the highest exergy efficiency

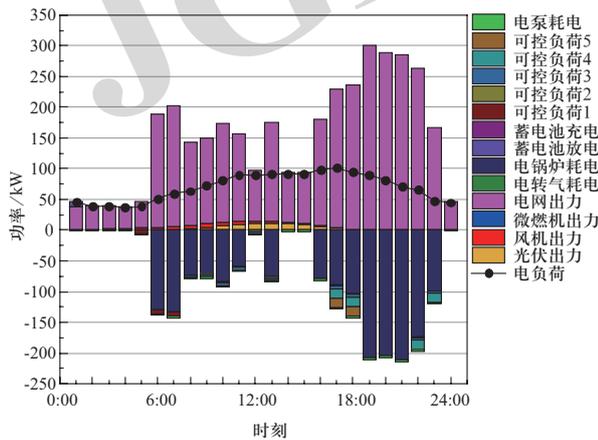


图 C4 焓效率最大的供暖期电负荷调度运行结果
 Fig. C4 Results of the electrical load dispatch operation during the heating period with the highest exergy efficiency

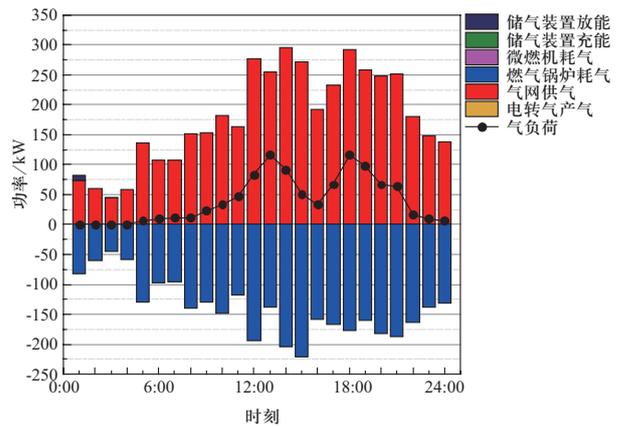


图 C6 焓效率最大的供暖期气负荷调度运行结果
 Fig. C6 Results of the gas load dispatching operation results of the heating period with the highest exergy efficiency

收稿日期：2021-02-01；修回日期：2021-03-31。



王一帆

作者简介：

王一帆（1995），男，硕士研究生，研究方向为多能互补能源系统与综合能源系统。

李娜（1986），女，研究员，研究方向为综合能源建模及标准化。

潘崇超（1980），男，副教授，研究方向为智慧能源系统建模及标准化。通信作者，E-mail: panchch@ustb.edu.cn。

（责任编辑 李锡）