

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-578-06

# 分布式蓄热器在供热系统中的应用及容量优化

朱应杰<sup>1</sup> 王海超<sup>1</sup> Esa Teppo<sup>2</sup> Katja Granlund<sup>2</sup> 余力<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学土木工程学院 大连 116024; 2. 芬兰 Planora 公司 奥卢 90401)

**【摘要】** 蓄热器在供热系统中能够起到削峰填谷和提高运行稳定性的作用。分布式蓄热相比集中蓄热距热用户更近,蓄放热时滞性小,能快速地对用户负荷变化进行响应,增加供热可靠性,改善水力与热力失调,更有利于实现供需的平衡和动态的精准调控。分布式蓄热器的应用效果明显受其容量影响,若容量太小,则可能会因罐体自身限制而不能充分发挥蓄热技术的优化调控潜力;蓄热罐容量太大,易造成蓄热罐长时间闲置或利用率不高,蓄热效率降低的同时也会增加系统的初投资。对此,首先对分布式蓄热器与供热管网的合理连接方式及其运行策略进行了分析,其次以某实际换热站整个供暖季的热负荷数据为基础,提出了一种分布式蓄热罐最大容量的计算方法,并基于 Trnsys 建立了以分布式蓄热供热系统收益最大化为目标函数的蓄热罐容量优化模型,对分布式蓄热罐容量进行优化,提高蓄热罐应用在分布式蓄热系统中的经济性。

**【关键词】** 分布式蓄热;蓄热罐容量;运行策略;优化

中图分类号 TK02 文献标识码 A

## Application and Capacity Optimization of Distributed Heat Accumulator in Heating System

Zhu Yingjie<sup>1</sup> Wang Haichao<sup>1</sup> Esa Teppo<sup>2</sup> Katja Granlund<sup>2</sup> Yu Li<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024; 2.Finland Planora Company, Oulu, 90401)

**【Abstract】** The regenerator can play a role in the heating system and improve the operational stability. The distributed heat storage is more close to the thermal storage heat user, and the heat storage is small, and the user's load changes can be quickly responded. Increase the reliability of heating, improve hydraulic and thermal disorders, and more beneficial to achieve supply and demand Equilibrium and dynamic accurate regulation. The application effect of the distributed regenerator is significantly affected by its capacity. If the capacity is too small, it may be due to the potential of the potential to optimize the adjustment of the heat storage technology without sufficient use of the can body; the heat storage tank is too large, easy to cause heat storage Tan can increase the initial investment of the system while the cans are too idle or utilized. In this regard, this paper analyzes the reasonable connection and operation strategy of the distributed regenerator and the heating pipe network, followed by the heat load data of the entire heating season of the actual heat exchange station, proposed a distribution The calculation method of maximum capacity of the heat storage tank, and established a storage tank capacity optimization model with the maximum distributed heat storage heat transfer system earnings based on TRNSYS, optimized the capacity of distributed heat storage tanks, and improved heat storage. The pot is applied in the distributed heat storage system.

**【Keywords】** Distributed heat storage; storage tank capacity; operating strategy; optimization

作者简介:朱应杰(1995-),男,在读硕士研究生,E-mail:zyj082808@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:王海超(1985-),男,博士研究生,副教授,E-mail:haichaowang@dlut.edu.cn

收稿日期:2021-08-10

## 0 前言

目前集中供热系统是我国城镇供热系统的首

选形式。但随着供暖规模的不断扩大, 供热系统大延迟、强耦合、热惰性越来越严重, 水力和热力失调问题频发, 导致热网供给侧与需求侧热负荷失调, 无法实现精准供热<sup>[1]</sup>。为了解决热能供需不匹配问题, 蓄热技术受到了关注。目前, 大部分研究关注设置在热源处的集中蓄热系统, 但供需不平衡的主要矛盾往往集中在用户一侧。而且随着热网规模的扩大, 集中蓄热系统调节的时滞效应大、灵活性差的缺点也更加明显。集中式蓄热虽可起到“削峰填谷”的作用, 但依然存在很大的输送延迟, 在解决水力失调和热力失调方面效果并不明显。而以热力站为单位的分布式蓄热系统距离热用户更近、灵活性更强, 因此在热力站设置分布式蓄热罐对于系统的调节效果更加明显<sup>[2]</sup>。

分布式蓄热罐应用在供热系统中, 首先应该考虑与热网合适的连接方式以及确定分布式蓄热罐的运行策略。其次蓄热罐的容量大小也影响分布式蓄热系统的能力, 若罐体容量过大, 会造成利用率不高, 投资浪费; 而罐体容量过小, 则会造成富裕的供热能力没有空间存储, 无法有效提高热源调峰能力。因此, 对分布式蓄热罐容量进行优化以及确定分布式蓄热罐与热网合适的连接及运行策略显得尤为重要。本文首先对分布式蓄热罐与供热管网的合理连接方式及其运行策略进行了分析, 其次提出了一种分布式蓄热罐最大容量的计算方法, 并基于 TRNSYS 对分布式蓄热罐容量进行了优化。

## 1 分布式蓄热罐与热网的连接及运行策略

### 1.1 分布式蓄热罐与热网的连接方式

当前国内多采用常压式蓄热罐, 采用从一级管网蓄热向二级管网放热的方式, 这样蓄热罐冷热水温差较大, 储存相同热量时所需蓄热罐的有效体积较小, 可以减小占地面积和降低初投资<sup>[3]</sup>。蓄热罐与一次网的连接方式分为直接连接与间接连接<sup>[4]</sup>。

蓄热罐与供热管网直接连接时, 不设置换热器, 对供水温度的需求小。蓄热罐与供热管网直接连接可以节省换热器的设置, 节约初投资。蓄热罐与供热管网间接连接时, 设置换热器, 会避免蓄热罐对一次网的水力工况产生影响。但是蓄热罐与供热管网间接连接需要增设换热器初投资会增加, 且供热系统运行时的管理维护较为复杂。

需要注意的是, 蓄热罐与一次供热管网的间接

连接方式是按照高温水系统(供水温度大于 100°C)进行设计的, 对于低温水系统, 应采用蓄热罐与一次网直接连接的方式, 而在实际工程应用中供水温度也很难达到 100°C。因此分布式蓄热罐与一次供热管网的连接方式应采用直接连接, 同时避免蓄热罐对二次网的水力工况产生较大影响应采用间接连接的方式。

### 1.2 分布式蓄热罐在供热系统中的运行策略

在一个 24 小时的蓄放热周期内, 根据用户负荷情况确定基础热源供给恒定的热量。在负荷低谷时, 基础热源供给的多余的热量储存在蓄热罐中, 在负荷高峰时, 即负荷超过基础热源供给的热量时, 首先由蓄热罐进行放热, 当蓄热罐的放热量仍不满足负荷要求时, 再从一次供热管网供给不足的热量。具体运行流程如下:

当基础热源供给的热量  $Q_p$  大于用户负荷  $Q_t$  时, 蓄热罐蓄热, 开启循环水泵 B, 此时水泵 A 处于关闭状态。热网供水进入罐体。罐体底部的冷水经循环泵 B 输出罐体, 进入热网回水管道, 如图 1 所示。

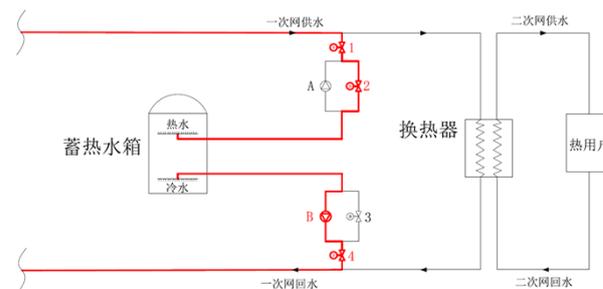


图 1 蓄热罐蓄热模式

Fig.1 Heat storage mode of heat storage tank

当基础热源供给的热量  $Q_p$  小于用户负荷  $Q_t$  时, 蓄热罐放热, 关闭电动循环水泵 B, 开启循环水泵 A。热水经循环泵 A 输出罐体, 当蓄热罐的放热量仍不满足负荷要求时, 再从一次供热管网供给不足的热量, 如图 2 所示。

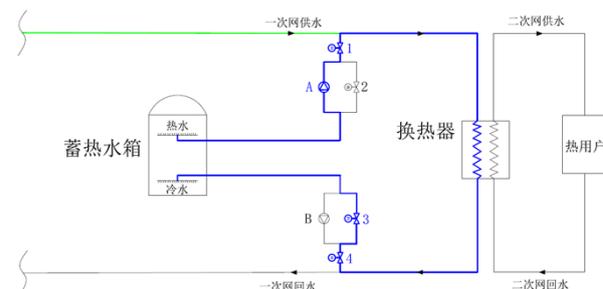


图 2 蓄热罐放热模式

Fig.2 Heat release mode of heat storage tank

## 2 分布式蓄热罐最大容量的计算

确定某个供暖季下的蓄热罐容量需要根据供暖季的每一天的逐时热负荷变化和基础热源供热量,计算每一天的蓄热罐容量。供暖季的蓄热罐最大容量为供暖季中每一天计算蓄热罐容量的最大值。在一个 24 小时的蓄放热周期内,基础热源供热量可由用户热负荷在这 24 小时内的平均值来确定。经计算这样确定的基础热源供热量可基本实现在一个 24 小时的蓄放热周期内达到蓄放热平衡。当蓄热罐的放热量仍不满足用户负荷要求时,可再从一次供热管网供给不足的热量。则蓄热罐在一个时间周期内的蓄、放热量为:

$$Q_x = \int_{r_1}^{r_2} Q_p - Q_l \quad (1)$$

蓄热罐的蓄热量应是该函数的最大值与最小值之差,即:  $Q_x = Q_{\max} - Q_{\min}$ 。

集中供热系统中蓄热罐一般采用常压热水蓄热罐,热水温度按 90°C、冷水按 60°C 考虑<sup>[5]</sup>,则蓄热罐有效体积为:

$$V = \frac{Q_x}{\partial \rho C (T_1 - T_2)} \quad (2)$$

式中:  $Q_x$  为蓄热罐蓄热量, J;  $V$  为热罐有效体积,  $m^3$ ;  $\partial$  为蓄热罐有效体积参数,取 0.9;  $\rho$  为蓄热罐内水的密度,  $kg/m^3$ ;  $C$  为水的比热容,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $T_1$ 、 $T_2$  为蓄热罐热水、冷水温度,  $^\circ C$ 。

下面以某实际换热站为例,计算分布式蓄热罐最大容量。

济南市某换热站的供热面积为 106950.13 $m^2$ ,其负荷类型主要为居住建筑热负荷。利用 DeST 软件对该换热站承担的所有建筑的热负荷进行模拟,从而获得该换热站整个供暖季逐时热负荷数据。以模拟热负荷为基础,对分布式蓄热罐容量进行计算。

分布式蓄热罐为短期蓄热,蓄放热周期为 24 小时。在一个周期内,蓄热罐须完成一个完整的蓄放热过程,在每个蓄放热周期结束时,须保证蓄热罐内的蓄热量接近于零,即下个蓄放热周期开始时蓄热罐内没有多余的热量。根据计算居住建筑分布式蓄热罐的蓄放热周期为当日 11:00 至次日 10:00。基础热源供热量可由用户热负荷在这 24 小时蓄放热周期内的平均值来确定,这样可以基本保证蓄热

罐在每个蓄放热周期结束时达到蓄放热平衡。

分布式蓄热罐的最大容量为以供暖季所有日期计算所得的容量的最大值。以供暖中期的某一天为例计算蓄热罐容量,对蓄热罐的基础热源、逐时蓄热量、放热量进行分析,结果如图 3 所示。

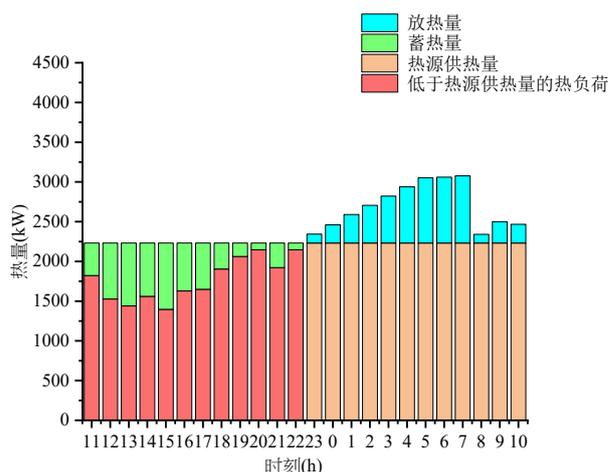


图 3 供热系统在计算日的负荷分布情况

Fig.3 The load distribution of the heating system on the calculation day

如图 3 所示,可以看出蓄热罐在 11 时至 22 时,处于蓄热状态,总蓄热量为 5574.77kWh; 23 时至次日 10 时,蓄热罐处于放热状态,放热量 5574.77kWh。因此,该计算日的蓄热量为 5574.77kWh。

以此类推,分别计算出供暖期每一天的蓄热量,即获得 121 个数据。而蓄热罐的最大蓄热容量即为逐天计算的蓄热量的最大值。通过计算可得知,该换热站整个供暖季最大蓄热能力为 6573.12kWh,根据公式 (2) 可计算得到对应蓄热罐体积约为 208.7 $m^3$ 。

## 3 基础热源供热量确定方式对比

### 3.1 平均值法

平均值法确定基础热源供热量指的是将整个供暖季模拟得到的每一天逐时热负荷相加再除以供暖天数(本文的实例位于济南,因此是 121 天)所求得的数作为整个供暖季每日每时刻的基础热源供热量<sup>[6]</sup>。采用平均值法对基础热源供热量进行计算,整个供暖季热源供热量不需要变化,仅有一个值。但是会造成热量被大量浪费以及严重不足的

情况。

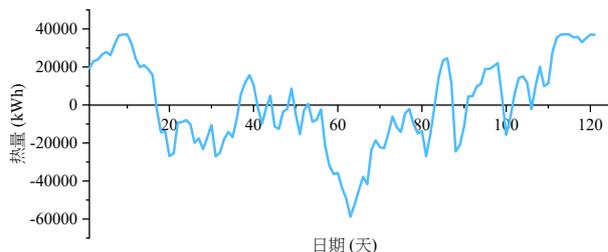


图 4 基础热源供热量按平均值法计算一个蓄放热周期完成后剩余或不足的热量

**Fig.4 The heat supplied by the basic heat source is calculated by the average method to calculate the remaining or insufficient heat after a heat storage and release cycle is completed**

如图 4 所示正值表示基础热源供热量按平均值法计算一个蓄放热周期完成后剩余的热量, 负值则表示基础热源供热量按平均值法计算一个蓄放热周期完成后不足的热量。从图中可以看出采用平均值法计算基础热源供热量, 在供暖初期、末期甚至中期都会有大量的热量在蓄热罐在 24 小时内放热完成后被剩余, 储存剩余的热量需要建造更大体积的蓄热罐会增加建设成本, 而且长期剩余的热量会造成热量损失无法被利用使蓄热罐的优势无法发挥出来; 而在供暖中期会出现仅靠蓄热罐储存的热量和基础热源供热量无法满足用户的用热需求, 缺乏大量的热量, 需由基础热源再次供给热量或者增加调峰锅炉等手段, 增加了燃料成本和建设初投资, 蓄热罐调峰的灵活性也丧失掉了。

### 3.2 特征日法

供暖季每个月对应一个特征日, 特征日的逐时热负荷等于对应时刻下该月每一天逐时热负荷的平均值。每个月的热负荷需求仅用特征日一天的热负荷需求来表示<sup>[7]</sup>, 即计算蓄热罐容量时每月只对特征日进行计算。特征日不是该月中具体的某一天, 而是一个虚拟日。当蓄热罐采用短期蓄热, 即以 24 小时为周期进行计算时, 采用特征日法计算蓄热罐最大容量只需要对每个月份进行一次计算, 采用特征日法对整个供暖季的计算, 可以大大减少计算量。但是采用特征日法会造成该月某日热用户的热负荷在 24 小时内大部分时间都大于特征日求出的基础热源供热量, 蓄热罐无法发挥作用且会增加燃料成本; 而且也会造成该月某日热用户的热负荷在 24 小时内大部分时间都小于特征日求出的基础热

源供热量, 蓄热罐无法储存多余热量, 造成能源浪费, 也不能灵活发挥蓄热罐的调节作用。

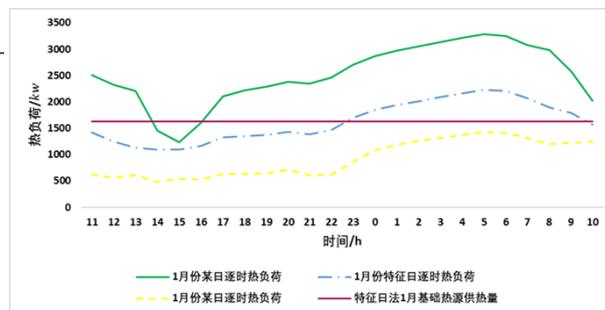


图 5 基础热源供热量按特征日法计算 1 月份特征日及某两日的情况

**Fig.5 The basic heat source heat supply is calculated according to the characteristic day method in January on the characteristic day and the situation of a certain two days**

如图 5 所示, 图中的一条直线表示的是 1 月份按照特征日法计算得到的基础热源供热量, 实线表示的是 1 月份某日的逐时热负荷, 从图中可以看出该日热用户的热负荷在 24 小时内大部分时间都大于利用特征日法求出的基础热源供热量, 蓄热罐蓄的热量很少, 仅靠蓄热罐储存的热量和基础热源供热量无法满足用户的用热需求, 缺乏大量的热量, 需由基础热源再次供给热量或者增加调峰锅炉等手段, 增加了燃料成本和建设初投资, 蓄热罐无法发挥作用; 而虚线表示的热用户的逐时热负荷在 24 小时内大部分时间都小于用特征日法求出的基础热源供热量, 蓄热罐需储存的热量过多, 储存剩余的热量需要建造更大体积的蓄热罐会增加建设成本, 而且会造成能源浪费。

本研究的基础热源供热量确定方法为: 以一个 24 小时蓄放热周期内的用户热负荷的平均值作为基础热源供热量。采用此种方法在一个 24 小时周期蓄放热内, 蓄热罐的蓄热量及放热量基本一致, 在每个蓄放热周期结束时, 可以保证蓄热罐内的热量接近于零, 即下个蓄放热周期开始时蓄热罐内没有多余的热量。既可以降低建设处投资, 又可以节约能源, 而且可以充分发挥蓄热罐灵活调峰的作用。

## 4 分布式蓄热罐容量的优化

最大蓄热罐容量能保证系统的蓄热潜力得到最大程度发挥, 但计算结果显示, 该蓄热能力仅出现在整个供暖季的短时间内, 出现频率极低。因此

当考虑系统经济性时,该蓄热罐对应最大蓄热容量并非最佳<sup>[8]</sup>。因此,本文利用 TRNSYS 对分布式蓄热系统进行建模,优化蓄热罐的容量。

建模采用的是蓄热罐与一次供热管网的直接连接方式。将利用 DeST 计算出的逐时热负荷读入模型中即模拟图中的建筑负荷,模拟图中的一次管网供给热量处的数据则为一个 24 小时蓄放热周期内的用户热负荷的平均值,循环泵控制模块可根据前文提到的控制策略即基础热源和建筑负荷的大小关系设置循环泵的启停控制蓄热水箱蓄放热,当一次管网供给热量及蓄热罐的放热量不满足用户用热需求时,可再由补充热源控制模块控制一次管网补充热量供给不足的热量。变量计算器中储存蓄热水箱的体积变化范围为 1-250m<sup>3</sup> 及一次供热管网补充热量,将费用年值法的计算公式输入优化函数计算器中,最终可输出蓄热罐体积对应的增加的燃料热量及费用年值,可通过优化分析得到经济性最优的蓄热罐体积,分布式蓄热系统仿真模拟如图 6 所示。

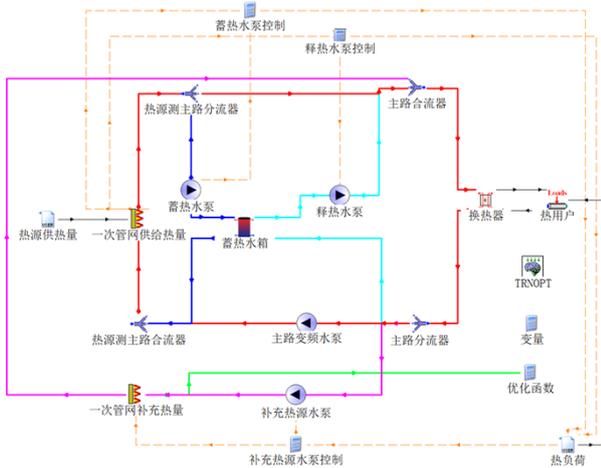


图 6 分布式蓄热系统仿真模拟图

Fig.6 Simulation diagram of distributed heat storage system

当蓄热罐的容量被优化时,虽然蓄热罐的建设成本被减少了,但蓄热罐储存的热量会出现不满足用户用热需求的情况,需要从一次供热管网再次供给不足的热量,会增加燃料成本。因此蓄热罐的最优容量为此容量下蓄热罐的建设成本和增加的燃料成本的最小值。可在 TRNSYS 模型中利用动态计算费用年值法作为优化函数进行计算。确定满足用户用热需求的最优的蓄热罐容量和一次供热管

网补充热量,费用年值法的计算公式为:

$$Z = C * \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \tag{3}$$

式中, Z 为费用年值,元; C 为蓄热罐建设成本和增加的燃料成本,元; r 为折现率,取 0.05; n 为寿命年限,取 10。

$$C = vA_t + \frac{Q_b A_r}{\partial} \tag{4}$$

式中, v 为蓄热罐体积, m<sup>3</sup> (变化范围为 1-250m<sup>3</sup>); Q<sub>b</sub> 为增加的燃料热量; ∂ 为燃料热损失,取 0.9。

相关经济性数据为:燃料成本 A<sub>r</sub> 为煤价 0.65 元/kg;蓄热器单位体积成本 A<sub>t</sub> 为 1250 元/m<sup>3</sup>。

本文在 TRNSYS 模型中利用动态计算费用年值法作为目标函数优化蓄热罐容量,计算出费用年值随蓄热罐体积的变化曲线如图 7 所示,从表 1 中可以得到不同蓄热罐体积对应的费用年值以及增加的燃料热量。

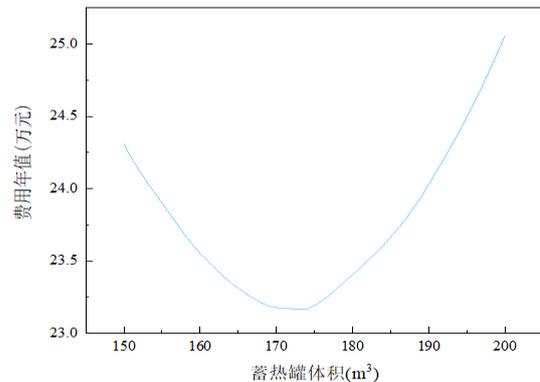


图 7 费用年值曲线

Fig.7 Annual cost curve

表 1 不同蓄热器体积经济性对比

Table 1 Comparison of the economic efficiency of different heat accumulators

蓄热罐体积 (m <sup>3</sup> )	增加的燃料热量 (kW)	费用年值 (万元)
185	2406.1	23.67
180	4041.99	23.41
175	5854.21	23.19
173	6849.88	23.17
170	8561.1	23.18
165	11939.83	23.31
160	15786.99	23.55

由图 7 可以得出, 随着蓄热罐体积增大, 费用年值呈现先降低后增加的趋势, 存在最小值。结合表 1 可以看出, 在蓄热罐体积为  $173\text{m}^3$  时, 系统费用年值最低, 为 23.17 万元, 此时系统的经济性最好。

## 5 结论

本文确定分布式蓄热器与供热管网的合理连接方式及其运行策略, 以某实际换热站整个供暖季的热负荷数据为基础, 提出了一种分布式蓄热罐最大容量的计算方法。根据济南市某供热站分布式蓄热系统实际运行情况, 计算得到该系统蓄热罐的最大蓄热容量为  $208.7\text{m}^3$ ; 本文以费用年值为目标函数, 通过 TRNSYS 模拟优化分析得出, 在本供热站中, 蓄热罐最优体积为  $173\text{m}^3$ , 此时系统的经济性最好, 费用年值为 23.17 万元。

### 参考文献:

- [1] 江亿. 我国北方供暖能耗和低碳发展路线[N]. 中国建设报, 2019-07-15(004).
- [2] 张婷. 分布式蓄热在集中供热系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [3] 田立顺. 蓄热罐在热电联供集中供热系统的应用[J]. 煤气与热力, 2016, (11): A21-A24.
- [4] 张婷. 分布式蓄热在集中供热系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [5] JEBAMALAI J M, MARLEIN K, LAVERGE J. Influence of centralized and distributed thermal energy storage on district heating network design[J]. Energy, 2020, 202: 117689..
- [6] 苏芬仙, 苏华, 陈凌霜, 等. BIN 法能耗计算中频数间隔分析及选用[J]. 低温建筑技术, 2011, (3): 56-59.
- [7] Tingting F, Risto L. Optimization of Combined Heat and Power Production with Heat Storage Based on Sliding Time Window Method[J]. Applied Energy, 2016, (162): 723-732.
- [8] MOON H, KIM H, NAM Y. Study on the optimum design of a ground heat pump system using optimization algorithms[J]. Energies, 2019, (21): 1-17.