

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.212

# 内嵌运行优化的降温负荷需求响应设备投资方法

杨高峰<sup>1</sup>, 刘思旭<sup>1</sup>, 慕杰<sup>2a,2b</sup>, 杨知方<sup>2a,2b</sup>, 王怡<sup>2a,2b</sup>

(1. 国网重庆市电力公司, 重庆 400023; 2. 重庆大学 a. 电气工程学院;  
b. 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 随电力市场改革的进一步推进, 分时电价等政策的出台为需求响应技术的应用发展提供了有利的市场环境。以蓄冷空调系统为代表的降温负荷需求响应设备可有效缓解电力供需平衡的难题。降温负荷的需求响应能力及潜在效益与其需求响应设备的投资规划及运行方法紧密相关。现有基于蓄冷技术的需求响应设备投资规划方法多考虑单一的设备类型, 基于固定或简化的系统运行策略与设备运行特性进行运行模拟, 难以实现不同类型设备组合与用户冷负荷需求特性的最优匹配, 导致系统需求响应能力的优化空间受限, 无法充分发挥其经济性价值。因此, 本文研究考虑运行策略优化的降温负荷需求响应设备统一投资规划建模方法。首先, 提出电力市场环境下计及多类制冷与蓄冷设备运行策略优化的需求响应模型, 实现降温负荷对价格信号的灵活响应, 充分节约用电成本。然后, 构建内嵌统一运行策略优化模型的需求响应设备投资规划模型。该模型以用户投资运行总成本最小化为优化目标, 统筹考虑电价政策、冷负荷需求特性、相关设备的投资成本与工作特性, 通过基于大  $M$  法的线性建模方法, 最终建立一个混合整数线性规划模型, 可采用商业求解器实现高效求解。算例分析表明所提方法可充分适应当前电力市场环境, 有效提升用户的投资效益, 优化用电负荷曲线, 发挥需求响应技术的应用价值。

**关键词:** 需求响应; 分时电价; 电力市场; 混合整数规划; 降温负荷; 蓄冷空调

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)09-101-11

## Investment method of cooling electric load demand response equipment embedded with operation strategy optimization

YANG Gaofeng<sup>1</sup>, LIU Sixu<sup>1</sup>, MU Jie<sup>2a,2b</sup>, YANG Zhifang<sup>2a,2b</sup>, WANG Yi<sup>2a,2b</sup>

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400023, P. R. China; 2a. School of Electrical Engineering; 2b. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** With the further advancement of electricity market reform, the introduction of time-of-use price and other policies has provided a favorable market environment for the application and development of demand response technology. The cooling electric load demand response technology represented by the cold storage air conditioning system can effectively alleviate the problem of power supply and demand balance. The demand

收稿日期: 2022-04-07

基金项目: 国网重庆市电力公司科技资助项目 (SGCQ0000DKJS2100217); 国家自然科学基金资助项目 (U2066209)。

Supported by the Science and Technology Project of State Grid Chongqing Electric Power Company (SGCQ0000DKJS2100217), and National Natural Science Foundation of China (U2066209).

作者简介: 杨高峰 (1981—), 男, 高级工程师, 主要从事电网规划和运行、需求侧响应研究, (E-mail)9229754@qq.com。

通信作者: 杨知方, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, (E-mail)zfyang@cqu.edu.cn。

response capability and potential benefits of cooling electric load are closely related to the investment planning and operation methods of demand response equipment. The-existing-cooling-technology-based demand response equipment investment planning methods mostly consider a single equipment type, and based on fixed or simplified system operation strategy for operation simulation, it is difficult to achieve the optimal matching of different types of equipment and user cold demand characteristics, resulting in the limited optimization space of the system demand response capacity and economic value. Therefore, this paper investigates the unified investment planning modeling method for cooling electric load demand response equipment considering the optimization of operation strategy. Firstly, this paper proposes a demand response model considering multiple types of chillers and operation strategy optimization in the electricity market. It realizes flexible response of cooling electric load to price signals and fully saves electricity cost. Then, this paper constructs a demand response equipment investment planning model with embedded unified operation strategy optimization to minimize the total cost of investment and operation. This model considers the price policy, cold demand characteristics, investment cost and operating characteristics of related equipment, and adopts linearization techniques to build a mixed-integer linear programming model. It can be efficiently solved by a commercial solver. The analysis shows that the proposed method can fully adapt to the current electricity market environment, effectively improve the investment efficiency of customer, optimize the electricity load curve, and leverage the value of demand response technology.

**Keywords:** demand response; time-of-use electricity price; electricity market; mixed integer programming; cooling electric load; cold storage air conditioning

随着用电量不断增长,电网负荷结构及负荷特性发生了深刻的变化,以空调为代表的温控类负荷在电网中的占比不断增大<sup>[1]</sup>。以中国重庆为例,近年来,受夏季高温伏旱天气影响,重庆电网负荷特性呈现夏季高峰负荷快速增长、空调负荷占比逐年攀升、峰谷差进一步拉大的发展趋势。尖峰负荷时段空调等降温负荷占比高达55%,峰谷差超过50%,巨大的降温负荷已成为高峰负荷不断攀升和负荷特性不断恶化的重要原因<sup>[2]</sup>。由于这类负荷特殊的季节及时段用电特性,电力系统面临设备平均利用率降低的风险与运行安全的威胁,电力供应可能出现阶段性、局部性的紧张状态<sup>[3]</sup>。

能源储蓄是缓解能源供求双方不匹配的有效手段,在电能难以大规模储蓄的情况下,需求侧响应技术是解决电力供需平衡的重要努力方向<sup>[4-7]</sup>。需求响应技术通过电价等手段鼓励用户调整用电时间,在不改变本身用能需求的前提下,用户需要借助能源储蓄或能源转化设备来实现其电力需求在时间上的转移<sup>[8]</sup>。蓄冷技术是实现降温负荷需求响应的重要技术手段,可以在保障用户冷负荷需求的前提下实现用户电力负荷需求的转移,可充分挖掘空调负荷的调整潜力<sup>[9-11]</sup>。现有研究表明,在空调负荷集中、负荷曲线峰谷差大的地区,以蓄冷空调为代表的降温负荷需求响应设备具有显著的应用潜力与价值,在国内外已有大量的研究与工程实践应用<sup>[9-13]</sup>。

2021年7月26日,国家发展改革委印发《关于进一步完善分时电价机制的通知》(以下简称《通知》),部署各地进一步完善分时电价机制。《通知》要求上年或当年预计最大系统峰谷差率超过40%的地方,峰谷电价价差原则上不低于4:1,其他地方原则上不低于3:1。分时电价是一种典型的价格型需求响应方式,该政策为鼓励空调蓄冷等需求响应相关技术的投资应用提供了重要的激励信号<sup>[14]</sup>。分时电价根据电网负荷的变化,将每天24小时划分为高峰、平段、低谷等时段,并对应设置不同价格<sup>[15]</sup>。在分时电价机制下,用电客户为利用峰谷价差,减少用电成本,将自主投资建设蓄冷空调系统,并优化控制相应设备运行,实现用电负荷在时间上的转移。

针对冰蓄冷空调系统的投资规划方法已有大量研究。庄友明<sup>[16]</sup>研究了当空调采用全部蓄冷策略或主机优先的部分蓄冷策略时,制冷机组的容量设计方法,指明系统规划设计时需综合考虑投资与运行费用;Habebullah<sup>[17]</sup>分别以全部蓄冷策略和部分蓄冷策略为基本运行策略,讨论了不同电费制度下冰蓄冷系统投

资规划的经济性,进一步分析了系统规划设计与电价政策及运行策略的紧密关系。徐鹏等<sup>[18]</sup>分析了峰谷电价政策与运行策略等因素对冰蓄冷系统投资经济性的影响,表明冰蓄冷系统采用优化运行策略可以有效降低系统运行费用,提升系统投资效益。针对系统运行策略优化,闫华光等<sup>[19]</sup>提出了一种动态冰蓄冷空调的经济最优控制策略,结合分时电价,对各个时段冷负荷的融冰需求进行优先度排序,实现冷负荷动态分配下的最低运行费用;米增强等<sup>[20]</sup>结合空调系统的实际运行特性和用户用电期望,以设备运行费用最低、电网负荷波动最小为目标构建双层优化模型,实现冰蓄冷空调的优化控制;孙悦等<sup>[21]</sup>对冰蓄冷系统的优化运行控制策略研究进行了综述。王胤钧等<sup>[22]</sup>建立了冰蓄冷系统运行模型和设备投资容量优化模型,考虑了系统的非线性运行特性,使用改进的粒子群优化算法求解模型。Song等<sup>[23]</sup>简化了控制策略的冰蓄冷系统投资优化模型,研究了冰蓄冷系统不同控制策略和电价政策对蓄冰装置最优容量和系统投资经济性的影响。

现有以蓄冷空调系统为代表的降温负荷需求响应设备投资规划方法研究,一部分基于冷机优先、蓄冰槽优先等单一的系统典型运行策略,根据工程经验总结的规则进行系统设计,难以适应复杂多变的市场环境;另一部分建立投资规划优化模型,简化系统运行策略,或限定设备不同时刻的工作状态,或难以计及不同类型冷机的组合优化,或模型复杂难以求解,导致空调负荷的需求响应能力与用户参与需求响应的潜在效益的优化空间受限,无法充分发挥其经济性。

笔者以蓄冷空调系统为降温负荷需求响应的设备,提出一种可包含多类型设备、考虑设备多工况的蓄冷空调系统运行策略统一优化模型,并基于此,提出一种考虑多场景运行策略优化的设备投资规划优化模型。首先,介绍了蓄冷空调系统的工作原理与典型运行策略,并基于此提出了计及蓄冷空调系统运行策略优化的降温负荷需求响应行为优化模型。该模型通过引入整数变量描述设备的工况转变,采用分段线性化技术处理制冷机组的非线性运行特性,充分优化用户冷负荷需求的供应方式,实现降温负荷对电价信号的灵活响应,节约用电成本;其次,构建了内嵌统一运行策略优化模型的需求响应设备投资规划模型,以用户投资运行总成本最小化为优化目标,以电价政策、空调负荷需求、相关设备的投资成本为参数,以典型场景的形式模拟系统运行场景,以设备投资容量与典型场景下的运行策略为决策变量,最终建立一个混合整数线性规划模型。该模型可采用商业求解器实现高效求解。

## 1 基于蓄冷空调系统的需求响应行为通用优化建模

### 1.1 蓄冷空调系统的典型运行策略

蓄冷空调系统主要由制冷机组、蓄冷设备和风机盘管等组成。其中,制冷机组输出冷源,包括制冷和制冰2种工作状态;蓄冷设备则包括蓄冷和释冷2种工作状态。用户基于蓄冷空调运行安排实现用电负荷的转移,故而蓄冷系统的运行策略安排是用户需求响应行为的分析基础。蓄冷空调的运行策略是指蓄冷空调系统以设计循环周期(如设计日或周等)的负荷及其特点为基础,以电价机制为条件,对系统工作模式做出最优的运行安排,一般可归纳为全部蓄冷策略和部分蓄冷策略。其中,部分蓄冷策略还可进一步细分为冷机优先控制、融冰优先控制和定比例优先控制。优化蓄冷空调系统的运行策略本质上是合理分配冷负荷需求的供应方式,在满足用户冷负荷需求的前提下,实现降温电力负荷曲线的优化。

### 1.2 基于蓄冷空调系统的降温负荷需求响应模型

降温负荷的需求响应行为优化基于蓄冷空调系统的运行策略优化。以某一典型运行场景为例,介绍用户降温负荷的需求响应行为优化模型。以冰蓄冷空调系统的控制策略优化为基础,针对多种制冷机组蓄冰设备建立运行约束,构建基于蓄冷空调系统的需求响应行为通用优化模型。每个典型运行场景包括一个运行周期1 d,并以1 h为时间步长。每个运行场景的已知参数包含冷负荷需求、电量电价与容量电价。

用户在典型运行场景 $k$ 的运行目标为运行成本(电费)最小化:

$$\min c_k^p = \sum_t \lambda_{k,t}^e \times W_{k,t}^e \quad (1)$$

式中, $\lambda_{k,t}^e$ 是典型场景 $k$ 下时段 $t$ 的电价。系统能耗 $W_{k,t}^e$ 为

$$W_{k,t}^e = \sum_i W_{i,k,t}^D + \sum_j W_{j,k,t}^O + \sum_q W_{q,k,t}^1 + W_{k,t}^Z + W_{k,t}^S, \quad (2)$$

式中: $k$ 、 $t$ 分别是场景和时段的索引变量; $i$ 、 $j$ 、 $q$ 分别是待投资的双工况机组、单工况制冷机组、单工况制冰机

组的索引变量;  $W_{i,k,t}^D$  是双工况机组典型场景  $k$  下时段  $t$  的耗电量;  $W_{j,k,t}^O$  是单工况制冷机组典型场景  $k$  下时段  $t$  的耗电量;  $W_{q,k,t}^1$  是单工况制冰机组典型场景  $k$  下时段  $t$  的耗电量;  $W_{k,t}^Z$  是系统运行时其他设备在典型场景  $k$  下时段  $t$  的固定能耗,  $W_{k,t}^S$  是蓄冰设备在典型场景  $k$  下时段  $t$  融冰时的能耗。

一般而言,冰蓄冷系统可由多种类型的制冷机组与蓄冷设备构成,不同设备的工作特性各异。制冷机组包括单工况制冷机组(机组只有制冷工况而无制冰工况,只能直接满足用户的用冷需求)、单工况制冰机组(机组只有制冰工况而无制冷工况,只能为蓄冰槽制冰)和双工况机组(机组既有制冰工况也有制冷工况,可以在2种工况间切换),3种机组的能效比特性各不相同,一般需要基于用户的用冷需求特性进行组合配置。例如,对于夜间有一定冷负荷的用户,在冰蓄冷系统设计时,除双工况冷机之外,倾向于配置一台单工况制冷机组作为基载冷机。因此,需综合考虑多种设备的运行特性,以实现系统配置与用户用冷需求特性的高度适应性。

双工况机组相关约束:

$$W_{i,k,t}^D = W_{i,k,t}^r + W_{i,k,t}^c, \forall i, \forall k, \forall t; \quad (3)$$

$$W_{i,k,t}^r = f_i^r(Q_{i,k,t}^r), \forall i, \forall k, \forall t; \quad (4)$$

$$W_{i,k,t}^c = f_i^c(Q_{i,k,t}^c), \forall i, \forall k, \forall t; \quad (5)$$

$$0 \leq Q_{i,k,t}^r \leq a_i^r \times U_i^D \times Z_{i,k,t}^r, \forall i, \forall k, \forall t; \quad (6)$$

$$0 \leq Q_{i,k,t}^c \leq a_i^c \times U_i^D \times Z_{i,k,t}^c, \forall i, \forall k, \forall t; \quad (7)$$

$$Z_{i,k,t}^r + Z_{i,k,t}^c \leq u_i^D, \forall i, \forall k, \forall t; \quad (8)$$

$$Z_{i,k,t}^r, Z_{i,k,t}^c, u_i^D \in \{0, 1\}, \forall i, \forall k, \forall t. \quad (9)$$

式中:  $a_i^r$ 、 $a_i^c$  分别是机组  $i$  最大制冷功率和最大制冰功率与机组容量的比例常数;  $f_i^r$ 、 $f_i^c$  分别是制冷工况和制冰工况下机组  $i$  输出冷量与冷机耗电量的函数关系;  $W_{i,k,t}^r$ 、 $W_{i,k,t}^c$  分别是时段  $t$  机组  $i$  在制冷工况和制冰工况的耗电量;  $Q_{i,k,t}^r$ 、 $Q_{i,k,t}^c$  分别是时段  $t$  机组  $i$  在制冷工况和制冰工况的制冷量;  $Z_{i,k,t}^r$ 、 $Z_{i,k,t}^c$  分别是时段  $t$  机组  $i$  在制冷工况和制冰工况的工作标志变量,  $Z_{i,k,t}^r = 1$  表示机组  $i$  处于制冷工况,可直接为用户供冷,  $Z_{i,k,t}^c = 1$  表示机组  $i$  处于制冰工况,可为蓄冰槽制冰;  $U_i^D$  是机组  $i$  的投资容量;  $u_i^D$  是机组  $i$  的投资标志变量,  $u_i^D = 1$  表示系统将投资建设机组  $i$ 。式(3)是机组耗电量的计算公式,总耗电量由2种工况下的耗电量组成;式(4)(5)描述了机组输出制冷功率、制冰功率与输入电功率的关系;式(6)(7)描述了机组的制冷功率和制冰功率与制冷工况、制冰工况工作标志,以及机组投资容量的关系,即机组运行功率不能超过其投资容量限制;式(8)描述了机组工况工作标志与机组投资决策的关系,即,机组只能在投建后才能运行,且任意一台双工况机组在同一时刻只能处于一种工况。

单工况制冷机组相关约束:

$$W_{j,k,t}^O = f_j^O(Q_{j,k,t}^O), \forall j, \forall k, \forall t; \quad (10)$$

$$0 \leq Q_{j,k,t}^O \leq a_j^O \times U_j^O \times Z_{j,k,t}^O, \forall j, \forall k, \forall t; \quad (11)$$

$$Z_{j,k,t}^O \leq u_j^O, \forall j, \forall k, \forall t; \quad (12)$$

$$Z_{j,k,t}^O, u_j^O \in \{0, 1\}, \forall j, \forall k, \forall t. \quad (13)$$

式中:  $f_j^O$  是冷机  $j$  输出冷量与冷机耗电量的函数关系;  $a_j^O$  是机组  $j$  最大制冷功率与机组容量的比例常数;  $W_{j,k,t}^O$  是时段  $t$  机组  $j$  的耗电量;  $Q_{j,k,t}^O$  是时段  $t$  机组  $j$  在制冷工况和制冰工况的制冷量;  $Z_{j,k,t}^O$  是时段  $t$  机组  $j$  的工作标志变量;  $U_j^O$  是机组  $j$  的投资容量;  $u_j^O$  是机组  $j$  的投资标志变量。单工况制冷机组在数学模型上可以视为一种只能处于制冷工况的特殊双工况机组,其运行约束含义可类比于双工况机组。

单工况制冰机组相关约束:

$$W_{q,k,t}^1 = f_q^1(Q_{q,k,t}^1), \forall q, \forall k, \forall t; \quad (14)$$

$$0 \leq Q_{q,k,t}^1 \leq a_q^1 \times U_q^1 \times Z_{q,k,t}^1, \forall q, \forall k, \forall t; \quad (15)$$

$$Z_{q,k,t}^1 \leq u_q^1, \forall q, \forall k, \forall t; \quad (16)$$

$$Z_{q,k,t}^1, u_q^1 \in \{0, 1\}, \forall q, \forall k, \forall t. \quad (17)$$

式中:  $f_q^1$  是冷机  $q$  输出冷量与冷机耗电量的函数关系;  $a_q^1$  是机组  $q$  最大制冷功率与机组容量的比例常数;  $W_{q,k,t}^1$



是时段  $t$  机组  $q$  的耗电量;  $Q_{q,k,t}^1$  是时段  $t$  机组  $q$  在制冷工况和制冰工况的制冷量;  $Z_{q,k,t}^1$  是时段  $t$  机组  $q$  的工作标志变量;  $U_q^1$  是机组  $q$  的投资容量;  $u_q^1$  是机组  $q$  的投资标志变量。同样,单工况制冰机组在数学模型上也可视为一种只能处于制冰工况的特殊双工况机组,其约束含义类比于双工况机组。

蓄冷设备相关约束:

$$W_{k,t}^S = \varepsilon \times Q_{k,t}^T, \forall k, \forall t; \quad (18)$$

$$S_{k,t}^1 = (1 - \alpha) \times S_{k,t-1}^1 + Q_{k,t}^S - Q_{k,t}^T, \forall k, \forall t; \quad (19)$$

$$0 \leq Q_{k,t}^S \leq \delta \times \left( \sum_i Q_{i,k,t}^r + \sum_q Q_{q,k,t}^c \right), \forall k, \forall t; \quad (20)$$

$$0 \leq Q_{k,t}^G \leq \beta \times Q_{k,t}^T, \forall k, \forall t; \quad (21)$$

$$0 \leq S_{k,t}^1 \leq U^S, \forall k, \forall t; \quad (22)$$

$$S^d \leq S_{k,t}^1 - S_{k,t-1}^1 \leq S^u, \forall k, \forall t; \quad (23)$$

$$0 \leq Q_{k,t}^S \leq U^S \times Z_{k,t}^S, \forall k, \forall t; \quad (24)$$

$$0 \leq Q_{k,t}^T \leq U^S \times Z_{k,t}^T, \forall k, \forall t; \quad (25)$$

$$Z_{k,t}^S + Z_{k,t}^T \leq u^S, \forall k, \forall t; \quad (26)$$

$$Z_{k,t}^S, Z_{k,t}^T, u^S \in \{0, 1\}, \forall k, \forall t. \quad (27)$$

式中:  $\varepsilon$  是蓄冰槽处于融冰工况时,融冰能耗与蓄冰槽融冰量之间的比例关系;  $\alpha$  是蓄冰槽的自损系数;  $\delta$  是蓄冰槽的蓄冰系数;  $\beta$  是蓄冰槽的融冰系数;  $S^u$ 、 $S^d$  分别是蓄冰槽相邻时段间储冷量的爬坡限制;  $W_{k,t}^S$  是时段  $t$  蓄冰槽在融冰工况的耗电量变量;  $S_{k,t}^1$  是时段  $t$  蓄冰槽当前的总蓄冷量变量;  $Q_{k,t}^S$ 、 $Q_{k,t}^T$  分别是时段  $t$  蓄冰槽在蓄冰工况和融冰工况的蓄冰量和融冰量;  $Q_{k,t}^G$  是时段  $t$  通过蓄冰槽融冰的制冷量;  $Z_{k,t}^S$ 、 $Z_{k,t}^T$  分别是时段  $t$  蓄冰槽在蓄冰工况和融冰工况的工作标志变量;  $U^S$  是蓄冰设备的投资容量;  $u^S$  是蓄冰设备的投资标志变量。

式(18)描述了蓄冰槽融冰时的能耗;式(19)描述了蓄冰槽相邻时段总储冰量之间的关系;式(20)描述了时刻  $t$  蓄冰槽在蓄冰工况的蓄冰量与冷机制冰功率之间的转换关系;式(21)描述了蓄冰槽的融冰量与其制冷功率之间的转换关系;式(22)表明蓄冰槽的总储冰量受其投资容量限制;式(23)描述了蓄冰槽相邻时段总储冰量的爬坡约束;式(24)(25)描述了蓄冰槽的蓄冰量、融冰量与蓄冰工况、融冰工况工作标志的关系,并且表示了蓄冰槽任意时刻的蓄冰量与融冰量受投资容量的约束;式(26)描述了蓄冰槽蓄冰工况与融冰工况的工况转换限制。

其他设备工作功率:

$$W_{k,t}^Z = \varphi \times Q_{k,t}^D, \forall t. \quad (28)$$

式中:  $W_{k,t}^Z$  是冰蓄冷空调系统工作时循环系统中水泵、风扇等设备的耗电量;  $Q_{k,t}^D$  是用户在某一时刻的总制冷负荷需求;  $\varphi$  是估算冰蓄冷空调系统工作时的辅助设备工作功率的系数。

系统峰值负荷:

$$W_{y,m}^C \geq W_{k,t}^E + W_{k,t}^0, \forall y, \forall m, \forall k, \forall t. \quad (29)$$

式中:  $W_{y,m}^C$  是系统在  $y$  年  $m$  月的峰值负荷;  $W_{k,t}^E$ 、 $W_{k,t}^0$  分别是系统在  $k$  场景 ( $m$  月内) 的冰蓄冷系统用电量和其他用电量。

冷负荷平衡约束:

$$\sum_i Q_{i,k,t}^r + \sum_j Q_{j,k,t}^o + Q_{k,t}^G = Q_{k,t}^D, \forall t. \quad (30)$$

式(30)左侧是时刻  $t$  通过机组制冷或蓄冰槽融冰的总供冷功率,右侧是用户在时刻  $t$  的总制冷负荷需求  $Q_{k,t}^D$ 。

### 1.3 冰蓄冷空调非线性运行特性的分段线性化处理

严格来说,冷机的能效比是其负载率的非线性函数,故冷机的输入电功率与其输出冷功率之间呈非线性关系。这一关系可基于冷机具体的工作特性曲线,进行线性或分段线性拟合。假设已知拟合后得到的关键参数,以关系式(4)为例,冷机输入电功率与输出冷功率的分段线性关系可建模如下:

$$W_{i,k,t}^r = \sum_n (a_{i,n,k,t}^r X_{i,n,k,t}^r + b_{i,n,k,t}^r), \forall i, \forall k, \forall t; \quad (31)$$

$$Q_{i,k,t}^r = \sum_n (c_{i,n,k,t}^r X_{i,n,k,t}^r), \forall i, \forall k, \forall t; \quad (32)$$

$$X_{i,1,k,t}^r \leq Y_{i,2,k,t}^r, \forall i, \forall k, \forall t; \quad (33)$$

$$X_{i,n,k,t}^r \leq Y_{i,n,k,t}^r + Y_{i,(n+1),k,t}^r, n=2,3,\dots,N-1; \quad (34)$$

$$X_{i,N,k,t}^r \leq Y_{i,N,k,t}^r, \forall i, \forall k, \forall t; \quad (35)$$

$$0 \leq X_{i,n,k,t}^r \leq 1, \forall i, \forall n, \forall k, \forall t; \quad (36)$$

$$Y_{i,n,k,t}^r \in \{0,1\}, \forall i, \forall n, \forall k, \forall t. \quad (37)$$

式中： $a_{i,n,k,t}^r$ 、 $b_{i,n,k,t}^r$ 、 $c_{i,n,k,t}^r$ 分别表示分段线性拟合后的关键参数，是模型的已知量； $X_{i,n,k,t}^r$ 、 $Y_{i,n,k,t}^r$ 分别表示表征冷机输入功率与冷机输出冷功率处于分段线性关系式上具体位置的辅助变量； $n$ 是分段线性处理后分段数的索引； $N$ 是分段总数。

综上所述，式(1)~(37)构成了计及蓄冷空调系统多类运行工况转换与多种运行设备组合的降温负荷需求响应行为通用优化模型。考虑到降温负荷需求响应设备的投资规划方案与设备运行策略紧密相关，在进行需求响应设备统一投资规划时，需统筹考虑当前的电价政策、用户的空调负荷特性、相关设备的投资成本与工作特性以及基于蓄冷空调系统设备运行策略优化的降温负荷需求响应行为。

## 2 降温负荷需求响应设备统一投资规划模型及其线性处理方法

### 2.1 需求响应设备统一投资规划模型

内嵌运行策略优化的降温负荷需求响应设备投资优化建模框架如图1所示。以典型场景的形式描述系统投建后的运行需求，系统规划的已知参数包括各类制冷机组、蓄冰设备、辅助设备的单位容量成本等。在系统规划模型中，协同考虑运行约束与规划约束，其中规划变量可视为运行变量的边界条件。

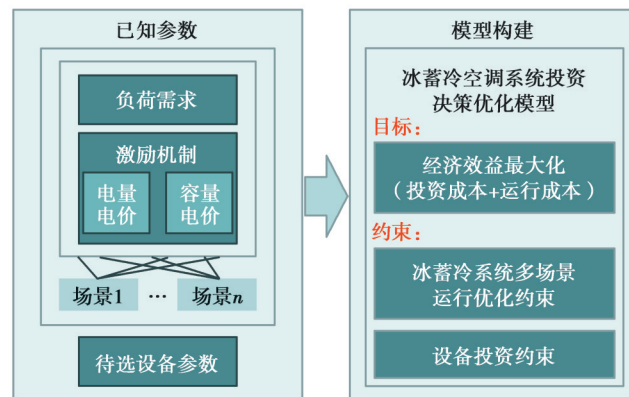


图1 降温负荷需求响应设备投资规划建模框架

Fig. 1 Modeling framework for investment planning of cooling load demand response equipments

#### 2.1.1 目标函数

此模型的优化目标是最小化冰蓄冷空调系统的初投资费用、维护费用与运行费用。

$$\min \text{COST} = C^V + C^M + C^P, \quad (38)$$

$$C^V = \sum_i c_i^D \times U^D + \sum_j c_j^O \times U^O + \sum_q c_q^I \times U^I + c^S \times U^S + c^X \times Q_{\max}^D, \quad (39)$$

$$C^M = \sum_i c_i^d \times U^D + \sum_j c_j^o \times U^O + \sum_q c_q^i \times U^I + c^s \times U^S, \quad (40)$$

$$C^P = \sum_y (\sum_k \omega_{y,k} \times (\sum_t \lambda_{k,t}^E \times W_{k,t}^E) + \sum_m \lambda_{y,m}^C \times W_{y,m}^C) / (1 + \eta)^y, \quad (41)$$

式中： $C^V$ 是系统的初投资费用，主要包含制冷机组（双工况、单工况制冷、单工况制冰）、蓄冷设备和其他辅助设备的购买、运输、安装等成本； $C^M$ 是系统的维护费用，主要包含制冷机组（单工况或双工况）、蓄冰设备等设备每年的维护成本； $C^P$ 是系统的运行费用，包含系统在整个运行模拟期（例如，设备的使用寿命、用户要求的投资回报周期等）的电费。已知参数包括： $c_i^D$ 、 $c_j^O$ 、 $c_q^I$ 、 $c^S$ 分别是双工况机组、单工况制冷机组、单工况制冰机

组、蓄冷设备单位容量的投资费用向量;  $c_i^d$ 、 $c_j^o$ 、 $c_q^i$ 、 $c^s$  分别是前述设备单位容量的维护费用向量;  $c^x$  是辅助设备的投资费用系数;  $Q_{\max}^D$  是系统供应的最大冷负荷量;  $\lambda_{k,t}^e$ 、 $\lambda_y^c$  分别是电量电费和容量电费;  $\omega_{y,k}$  是各类场景出现的天数;  $\eta$  是贴现率(一般取 8%)。待优化变量包括:  $U^D$ 、 $U^O$ 、 $U^I$ 、 $U^S$  分别是各类设备的规划容量向量;  $W_{k,t}^E$  是冰蓄冷系统在场景  $k$  时段  $t$  的运行耗电量。

### 2.1.2 系统投资容量约束

$$u_i^D \times H_i^{Dmin} \leq U_i^D \leq u_i^D \times H_i^{Dmax}, \forall i, \forall t; \quad (42)$$

$$u_j^O \times H_j^{Omin} \leq U_j^O \leq u_j^O \times H_j^{Omax}, \forall j, \forall t; \quad (43)$$

$$u_q^I \times H_q^{Imin} \leq U_q^I \leq u_q^I \times H_q^{Imax}, \forall q, \forall t; \quad (44)$$

$$u^S \times H^{Smin} \leq U^S \leq u^S \times H^{Smax}, \forall q, \forall t. \quad (45)$$

式中:  $H_i^{Dmin}$ 、 $H_i^{Dmax}$ 、 $H_j^{Omin}$ 、 $H_j^{Omax}$ 、 $H_q^{Imin}$ 、 $H_q^{Imax}$ 、 $H^{Smin}$ 、 $H^{Smax}$  分别表示双工况机组、单工况制冷机组、单工况制冰机组、蓄冰设备的投资容量上限和下线。

式(2)~(45)构成了冰蓄冷空调系统的投资决策优化模型。

## 2.2 非线性关联约束的线性化处理

在投资优化模型中,运行状态与投资容量均为变量,故原约束(6)(7)(11)(15)(24)(25)存在非线性项。利用大  $M$  法对其进行线性化处理,基于各设备的投资容量限制对  $M$  赋值,得到:

$$0 \leq Q_{i,k,t}^r \leq a_i^r \times H_i^{Dmax} \times Z_{i,k,t}^r, \forall i, \forall k, \forall t; \quad (46)$$

$$0 \leq Q_{i,k,t}^r \leq a_i^r \times U_i^D + a_i^r \times H_i^{Dmax} \times (1 - Z_{i,k,t}^r), \forall i, \forall k, \forall t; \quad (47)$$

$$0 \leq Q_{i,k,t}^c \leq a_i^c \times H_i^{Dmax} \times Z_{i,k,t}^c, \forall i, \forall k, \forall t; \quad (48)$$

$$0 \leq Q_{i,k,t}^c \leq a_i^c \times U_i^D + a_i^c \times H_i^{Dmax} \times (1 - Z_{i,k,t}^c), \forall i, \forall k, \forall t; \quad (49)$$

$$0 \leq Q_{j,k,t}^O \leq a_j^O \times H_j^{Omax} \times Z_{j,k,t}^O, \forall j, \forall k, \forall t; \quad (50)$$

$$0 \leq Q_{j,k,t}^O \leq a_j^O \times U_j^O + a_j^O \times H_j^{Omax} \times (1 - Z_{j,k,t}^O), \forall j, \forall k, \forall t; \quad (51)$$

$$0 \leq Q_{q,k,t}^I \leq a_q^I \times H_q^{Imax} \times Z_{q,k,t}^I, \forall q, \forall k, \forall t; \quad (52)$$

$$0 \leq Q_{q,k,t}^I \leq a_q^I \times U_q^I + a_q^I \times H_q^{Imax} \times (1 - Z_{q,k,t}^I), \forall q, \forall k, \forall t; \quad (53)$$

$$0 \leq Q_{k,t}^S \leq H^{Smax} \times Z_{k,t}^S, \forall k, \forall t; \quad (54)$$

$$0 \leq Q_{k,t}^T \leq H^{Smax} \times Z_{k,t}^T, \forall k, \forall t; \quad (55)$$

$$0 \leq Q_{k,t}^S \leq U^S + H^{Smax} \times (1 - Z_{k,t}^S), \forall k, \forall t; \quad (56)$$

$$0 \leq Q_{k,t}^T \leq U^S + H^{Smax} \times (1 - Z_{k,t}^T), \forall k, \forall t. \quad (57)$$

大  $M$  法的核心思路是通过遍历对整数变量取值的遍历将单个非线性约束转化为多个线性约束。以约束式(6)为例,当整数变量  $Z_{i,k,t}^r = 0$  时,约束可等价于式(46);当  $Z_{i,k,t}^r = 1$  时,约束可等价于式(47)。综上所述,经过线性化处理,将降温负荷需求响应设备统一投资规划模型整理为一个混合整数线性规划模型,可通过商业求解器进行高效求解。

## 3 算例分析

### 3.1 算例说明

以某一典型的工商业用户为例,考虑其基于冰蓄冷空调系统参与需求响应,在保证其用冷需求的前提下,研究冰蓄冷空调系统的投资决策与优化运行策略。本节将通过算例验证分析在给定电价机制下基于蓄冷空调系统运行策略优化的降温电力负荷需求响应行为,对比分析不同运行策略对空调系统设备投资决策方案的影响。

1) 电价政策:分时电量电价与容量电价的数据见表1所示。基本电费(最大需量)为 30 240 kW·h。

2) 负荷需求:根据实际供冷经验,以典型设计日冷负荷为基础,以其 25%、50%、75%、100% 4 种状态为冷负荷需求的典型场景,且分别占比 20%、30%、30%、20%。冷负荷需求曲线如图2所示。

3) 设备价格:参考《实用供热空调设计手册》以及典型冰蓄冷系统的设备成本,可对设备单位冷量价格进

行估算,如表2所示。

表1 电价数据

Table 1 Electricity price data

时段名称	时段划分	电价/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )
谷时段	0:00~7:00, 23:00~24:00	0.300
平时段	7:00~10:00, 17:00~19:00, 21:00~23:00	0.793
高峰时段	13:00~16:00, 19:00~21:00	1.257
尖峰时段	10:00~13:00	1.430

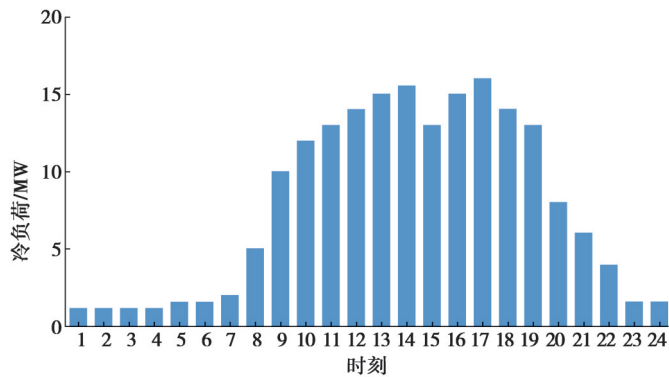


图2 典型设计日冷负荷需求

Fig. 2 Typical design daily cooling load demand

表2 设备成本数据

Table 2 Equipment cost data

元/kW

设备	双工况机组	单工况制冷机组	单工况制冰机组	蓄冰设备	其他辅助设备
投资成本	729	680	750	175	366

### 3.2 算例对比分析

为进一步说明系统运行策略对系统投资规划结果的影响以及优化运行策略的重要性,讨论基于以下4种运行策略模拟系统投资规划结果,分别为:1)M0仅使用冷机制冷;2)M1采用全部蓄冷策略;3)M2采用主机优先的部分蓄冷策略;4)M3采用文中所提优化运行策略。

当系统基于不同策略模拟时,系统各设备的投资容量决策如表3所示(以20年为模拟周期)。

表3 系统各类设备投资总容量

Table 3 System investment planning results

运行策略	双工况机组/(kW·h)	单工况制冷机组/(kW·h)	单工况制冰机组/(kW·h)	蓄冰设备/(kW·h)
M0	0	16 000	0	0
M1	1 300	1 200	27 401	174 044
M2	2 014	10 986	0	11 711
M3	8 800	1 200	0	43 992

如表3所示,M0的规划结果是常规空调系统,M1~M3的规划结果是冰蓄冷空调系统;其中,M1采用全部蓄冷策略,其蓄冰设备容量最大;M2采用主机优先策略,即高峰冷负荷需求由制冷机组(满载)与蓄冰设备共同承担,蓄冰设备容量相对较小;M3考虑运行策略优化,可灵活分配冷负荷需求,蓄冰设备与制冷机组的容量都比较适中。

以典型日冷负荷需求为例,系统运行模拟情况如图3所示。

由图3可知,M1策略中,日间冷负荷需求全部由蓄冷设备满足,夜间电价低谷时段,由双工况机组或单



工况制冰机组制冰蓄冷;M2策略中,日间冷负荷需求由制冷机组和蓄冷设备共同满足,其中制冷机组全程满载供应大部分冷负荷,蓄冷设备则负责补充;M3策略可在任意场景保证最优的系统控制方案,实现冷负荷需求在制冷机组与蓄冰设备之间的最优分配。

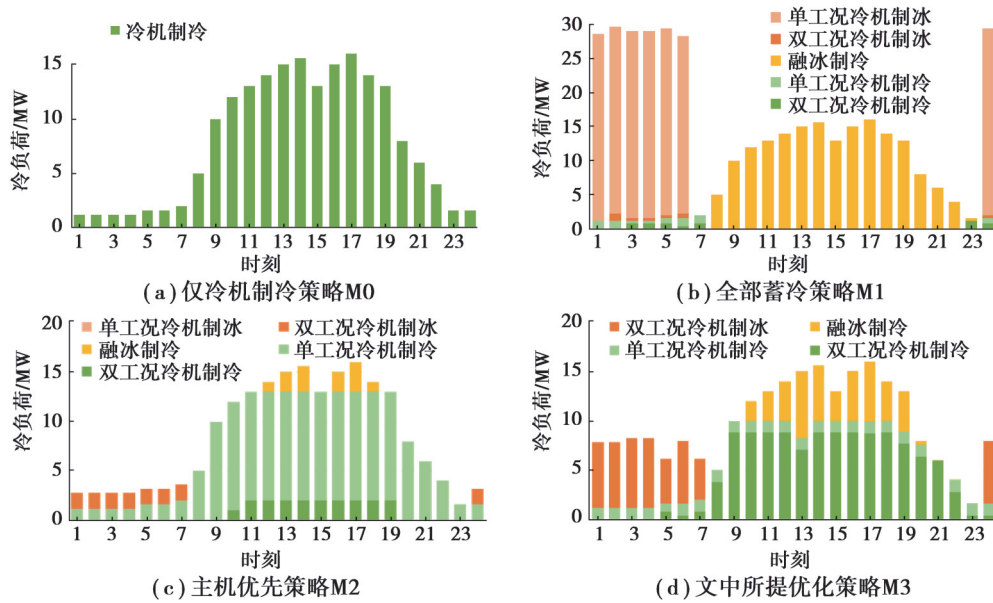


图 3 系统运行情况

Fig. 3 System operation situation

当冷负荷需求为典型日冷负荷需求时,对应用户电力负荷曲线如图 4 所示。

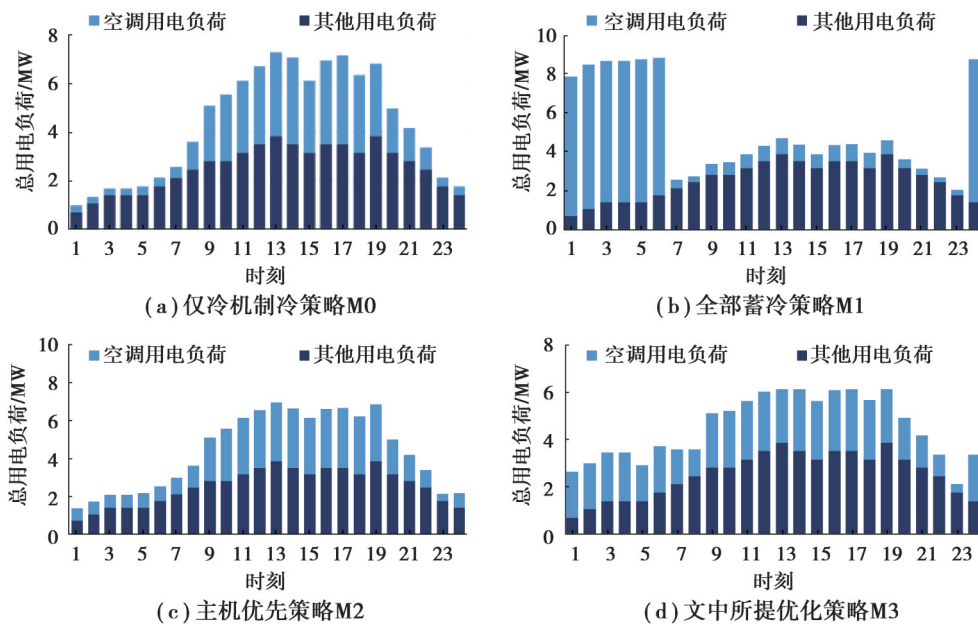


图 4 用电负荷曲线

Fig. 4 Electricity load curve

由图 4 可知,在 4 种运行策略下,用电负荷峰值依次为 7 300、8 786、6 949、6 117 kW;M1 运行策略下,空调用电负荷主要集中在电价低谷时段,相较于常规空调系统,原负荷高峰时期的空调用电负荷大幅降低,但形成了相较于原来更高的新负荷高峰,用电负荷峰值升高了 20.35%;M2 运行策略下,部分用电高峰期的空调负荷转移到电价低谷时段,相较于常规空调系统,用电负荷峰值降低了 4.8%;M3 运行策略下,空调用电负荷合理分布在各个时段,原高峰负荷时期的空调用电负荷显著减少,用电负荷峰值降低了 16.21%。

考虑不同运行策略时,系统的总成本组成如图 5 所示。

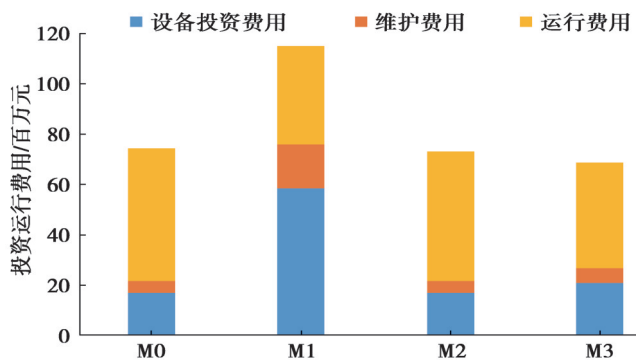


图5 系统投资运行总费用

Fig. 5 Total cost of system investment and operation

由图5可知,当考虑全部蓄冷策略时,系统的运行成本最低,但由于所需蓄冰装置的容量较大,系统的投资成本较高,总投资运行成本最高;当考虑主机优先的部分蓄冷策略时,系统投资费用相对于全部蓄冷策略显著降低,系统运行费用系统相对升高,总投资运行成本明显小于全部蓄冷策略,与常规空调系统相当;当考虑文中所提优化运行策略时,系统可根据各个运行场景的价格与负荷特性灵活调整运行方式,系统总投资运行成本最低,相应系统投资效益最高。

综上所述,在冰蓄冷系统投资规划时,协同考虑系统优化运行策略,可有效提升系统设备的利用效率,降低系统投资运行总成本,优化用电负荷曲线,充分发挥冰蓄冷空调技术的应用价值。

## 4 结束语

以蓄冷空调系统为降温负荷需求响应的设备基础,提出了电力市场环境下计及多类制冷机组与蓄冷设备运行优化的降温负荷需求响应行为优化模型。构建了内嵌统一运行策略优化模型的降温负荷需求响应设备投资规划模型,可充分优化用户冷负荷需求的供应方式,挖掘用户需求响应潜力,实现降温负荷对电价信号的灵活响应,优化用户电力负荷曲线,节约用户用电成本,提升以蓄冷空调系统为代表的的需求响应技术的投资效益,为不同市场政策下的蓄冷空调系统投资建设提供了经济性最优的指导方法。

## 参考文献

- [1] 王永权,张沛超,姚焱.聚合大规模空调负荷的信息物理建模与控制方法[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6509-6520.  
Wang Y Q, Zhang P C, Yao Y. Cyber-physical modeling and control method for aggregating large-scale ACLs[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6509-6520.(in Chinese)
- [2] 吴润基,王冬晓,谢昌鸿,等.空调负荷参与配电网电压管理的分布式控制方法[J].电力系统自动化,2021,45(6):215-222.  
Wu R J, Wang D X, Xie C H, et al. Distributed control method for air-conditioning load participating in voltage management of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 215-222.(in Chinese)
- [3] Malik A, Haghgadi N, MacGill I, et al. Appliance level data analysis of summer demand reduction potential from residential air conditioner control[J]. Applied Energy, 2019, 235: 776-785.
- [4] 张钦,王锡凡,王建学,等.电力市场下需求响应研究综述[J].电力系统自动化,2008,32(3):97-106.  
Zhang Q, Wang X F, Wang J X, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.(in Chinese)
- [5] 陈敏,高赐威,郭庆来,等.互联网数据中心负荷时空可转移特性建模与协同优化:驱动力与研究架构[J].中国电机工程学报,2022,42(19):6945-6957, S3.  
Chen M, Gao C W, Guo Q L, et al. Modeling and coordinated optimization for spatiotemporal load regulation potentials of Internet data centers: motivation and architecture[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6945-6958/6945-6957, S3.(in Chinese)
- [6] Palensky P, Dietrich D. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 381-388.
- [7] Chen Z Q, Sun Y Y, Ai X, et al. Integrated demand response characteristics of industrial park: a review[J]. Journal of Modern

- Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(1): 15-26.
- [ 8 ] 高赐威,李倩玉,李慧星,等.基于负荷聚合商业需求响应资源整合方法与运营机制[J].电力系统自动化,2013,37(17):78-86.  
Gao C W, Li Q Y, Li H X, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.(in Chinese)
- [ 9 ] 艾欣,赵阅群,周树鹏.空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性研究[J].中国电机工程学报,2016,36(6):1596-1603,1772.  
Ai X, Zhao Y Q, Zhou S P. Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1596-1603, 1772.(in Chinese)
- [ 10 ] She X H, Cong L, Nie B J, et al. Energy-efficient and-economic technologies for air conditioning with vapor compression refrigeration: a comprehensive review[J]. Applied Energy, 2018, 232: 157-186.
- [ 11 ] Zhang Z H, Zhang P, Zhao Y, et al. Survey-based air-conditioning demand response for critical peak reduction considering residential consumption behaviors[J]. Energy Reports, 2020, 6: 3303-3315.
- [ 12 ] Kang Z Q, Wang R T, Zhou X X, et al. Research status of ice-storage air-conditioning system[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 1741-1747.
- [ 13 ] 朱学锦.某金融中心冰蓄冷系统的应用与经济性分析[J].制冷技术,2016,36(3):72-78.  
Zhu X J. Application and economic analysis of ice storage system for a financial center[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2016, 36(3): 72-78.(in Chinese)
- [ 14 ] 刘军,吴梦凯,叶泽,等.进一步完善我国峰谷电价政策的思考与建议[J].价格理论与实践,2021(2):62-66.  
Liu J, Wu M K, Ye Z, et al. Thoughts and suggestions on further improving China's time of use electricity price policy[J]. Price: Theory & Practice, 2021(2): 62-66.(in Chinese)
- [ 15 ] 谭显东,陈玉辰,李扬,等.考虑负荷发展和用户行为的分时电价优化研究[J].中国电力,2018,51(7):136-144.  
Tan X D, Chen Y C, Li Y, et al. Research on optimization of TOU considering load development and user behavior[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 136-144.(in Chinese)
- [ 16 ] 庄友明.冰蓄冷空调的运行模式及制冷主机容量确定[J].流体机械,2003,31(2):56-59.  
Zhuang Y M. Performance patterns and refrigeration capacity determination for ice storage air conditioning system[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(2): 56-59.(in Chinese)
- [ 17 ] Habeebullah B A. Economic feasibility of thermal energy storage systems[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(3): 355-363.
- [ 18 ] 徐鹏,潘安东,段之殷.冰蓄冷空调系统经济性分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(1):109-116.  
Xu P, Pan A D, Duan Z Y. Analysis of influencing factors on economy of ice storage air conditioning system[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(1): 109-116.(in Chinese)
- [ 19 ] 闫华光,石坤,许高杰,等.动态冰蓄冷系统的经济最优控制策略研究[J].控制工程,2016,23(2):303-308.  
Yan H G, Shi K, Xu G J, et al. Research on control strategy of dynamic ice storage system based on economic optimization[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(2): 303-308.(in Chinese)
- [ 20 ] 米增强,张文彦,贾雨龙.柔性负荷虚拟电厂下冰蓄冷空调的优化控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(11):15-20,27.  
Mi Z Q, Zhang W Y, Jia Y L. Optimal control strategy of ice storage air conditioning under flexible load virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 15-20, 27.(in Chinese)
- [ 21 ] 孙悦,韩明新,任洪波,等.冰蓄冷空调系统优化运行控制策略研究综述[J].制冷与空调,2020,20(11):69-73,77.  
Sun Y, Han M X, Ren H B, et al. Review on optimal operation and control of ice storage air-conditioning system[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2020, 20(11): 69-73, 77.(in Chinese)
- [ 22 ] 王胤钧,于军琪.某冰蓄冷空调系统全寿命周期模型分析[J].暖通空调,2017,47(7):80-84.  
Wang Y J, Yu J Q. Life cycle model analysis of an ice cool storage air conditioning system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(7): 80-84.(in Chinese)
- [ 23 ] Song X, Zhu T, Liu L C, et al. Study on optimal ice storage capacity of ice thermal storage system and its influence factors[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 288-300.