

冰蓄冷空调系统经济性分析

徐 鹏^{1,2}, 潘安东¹, 段之殷^{1,2}

(1. 北京建筑大学 环境与能源工程学院, 北京 100044;

2. 北京建筑大学 供热、供燃气、通风及空调工程北京市重点实验室, 北京 100044)

摘要: 结合工程实例, 阐述了某办公建筑冰蓄冷系统设计方案及运行策略。根据北京地区峰谷电价政策的变化和近五年蓄冷系统实际运行数据, 利用静态经济评价法和动态经济评价法, 对冰蓄冷系统设计初期与实际运行期间的投资回收期进行计算分析。通过对冰蓄冷空调系统进行多角度的经济性分析, 得出北京市对冰蓄冷设备初投资的政策性补贴和合理的峰谷电政策等因素, 是缩短蓄冷设备投资回收期的关键。由此可见在北京地区采用冰蓄冷技术具有良好的经济性, 同时为其他地区优化冰蓄冷系统经济性提供参考。

关键词: 冰蓄冷; 峰谷电价; 运行策略; 投资回收期; 经济性分析

中图分类号: TU243; TU831.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0109-08

Analysis of influencing factors on economy of ice storage air conditioning system

XU Peng^{1,2}, PAN Andong¹, DUAN Zhiyin^{1,2}

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Key Laboratory of HVAC, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Combined with an engineering example, the design scheme and the operation strategy of an ice storage system in an office building are expounded. According to the change of peak-valley electricity price adjustment policy in Beijing and the actual operation data of the equipment in recent five years, the economic analysis at the beginning stage of the design and the payback period investment analysis of the ice storage system in actual operation are analyzed by using static economic evaluation method and dynamic economic evaluation method. Based on the economic analysis of the ice storage air-conditioning system from multiple angles, it is found that the policy subsidy and reasonable peak-valley power policy in Beijing are the keys in shortening the payback period of ice storage equipment investment. Therefore, it can be seen that it is economical to adopt the ice storage technology in Beijing, and it also provides the references for this technology implementing in other regions in the light of optimizing its economy.

Key words: ice storage; peak and valley price; operation strategy; payback period; economic analysis

随着近几年夏季平均气温逐步走高与人们对空调舒适性需求的提高, 促使空调制冷用电量占整个城市用电比例不断上升, 有些城市甚至达到 40% 以上^[1]。同时, 空调用电高峰和低谷时段与电力负荷的高峰、低谷时段几乎一致。这就导致高峰时电力供应不足而低谷时过剩的矛盾相当突出。另外在碳减排量方面, 据统计, 2013 年我国建筑总商品能耗为 7.56 亿 t 标准煤, 约占全国能源消费总量的 19.5%^[2], 而供暖空调用能约占公共建筑总能

耗的 40%^[3]。在城市用电高峰期, 冰蓄冷空调系统可以起到“移峰填谷”的作用, 从而消减电负荷高峰, 减少国家电力建设投资。对于用户而言, 可以通过冰蓄冷空调系统的合理设计和经济性分析, 节省更多的运行费用, 获得可观的经济效益。目前, 冰蓄冷技术已越来越多地被大型办公和商场等建筑场所应用。

关于冰蓄冷空调系统的经济性分析, 王雪梅等^[4]运用全能耗模拟软件 Energyplus, 制定了负

收稿日期: 2020-09-10

修改稿日期: 2021-01-12

基金项目: 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X20064); 国家自然科学基金资助项目(51908020); 北京市教育委员会科技计划一般基金资助项目(KM202010016014)

第一作者: 徐鹏, (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事建筑热能及空调方向研究。E-mail: xupeng@bucea.edu.cn

荷动态模拟的冰蓄冷优化控制策略,保证了设备良好的经济性。Henze G P 和 Krarti M 等^[5]提出适时电价结构的调整是对冰蓄冷空调系统经济性的主要激励因素。Giraldo 和 R. Alberto 等^[6]主要利用数值模拟来评估在商业或办公建筑中安装冰蓄冷空调系统的经济性及可行性。李延宁等^[7]对冰蓄冷空调系统建立经济性分析模型,并对影响冰蓄冷系统经济性的因素进行总结。黄亮等^[8]根据已建立的系统优化计算模型,编写冰蓄冷空调系统经济性分析与优化软件,对影响系统初投资及运行费用等因素进行研究。

目前,大部分冰蓄冷空调系统投入使用后的实测数据相对较少。大部分设计完成后,缺乏对系统进行持续跟踪和反馈,实际运行效果如何并不清楚^[9]。本文对北京某办公楼冰蓄冷空调系统进行持续跟踪,对设备实际运行效果进行研究分析,对蓄冷设备实际运行费用和年节省费用等进行计算记录,从设备实际运行角度出发,进行经济性讨论。

1 工程概况

该办公楼项目位于北京市城区,总建筑面积约 60 000 m²,空调面积 43 000 m²。供冷涵盖共五座单体建筑,其中,南北朝向有三座办公楼,均为地上六层,地下一层。办公楼地下一层的功能为办公用品仓库和制冷机房。东侧有两座办公楼,地上五层,地下一层均为停车场。工程使用性质为办公楼建筑,其中含有少部分工作人员值班宿舍。本建筑在供冷季 24 h 连续供冷,其主要冷负荷为白天办公时段 07:00—18:00。此工程于 2011 年进行设计时,得到国家节能政策补贴支持,享受北京市冰蓄冷技术的优惠电价政策,在工程初投资建设费用上也得到优惠 3% 的财政补贴。所以,在技术经济性之外,政府的政策支持也推动了冰蓄冷空调系统设计方案的实施。

2 冰蓄冷空调系统设计与运行方案

2.1 空调负荷计算

冰蓄冷空调系统设计及设备选型是以该系统的设计日逐时负荷分布为依据。根据北京地区夏季空调室外计算干球温度为 33.2℃,计算湿球温度为 26.4℃,空调日平均温度为 28.6℃,通风计算温度 30℃^[10]。本工程设计日峰值负荷为

3 246 kW。空调系统设计日 24 h 逐时冷负荷分布见图 1。

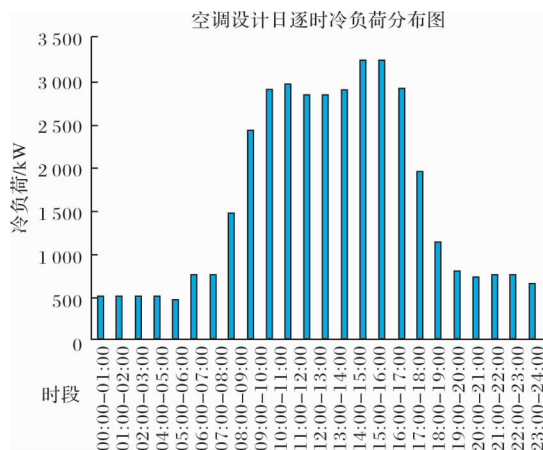


图 1 空调设计日冷负荷分布图

Fig. 1 Daily cooling load distribution of air conditioning design

2.2 冰蓄冷系统负荷平衡运行策略

负荷平衡由主机蓄冰、冰槽供冷、主机供冷、基载供冷四部分承担。主机为双工况制冷机组,其中双工况即为蓄冰工况和供冷工况。主机利用夜间低谷电进行蓄冰工作,2 台主机在夜间的电力低谷时段(23:00—07:00)进行蓄冰。白天峰电时配合冰槽进行供冷。基载供冷大部分时间在主机蓄冰的低谷时段承担夜间的少量负荷。在系统夏季运行期间的耗电量方面,主机供冷和主机蓄冰(双工况机组)的耗电量最大,冰槽供冷只需要水泵进行运转,耗电量最小。所以在负荷相对少的时间里,尽量在峰值电价时段使用冰槽供冷是最好的选择。冰蓄冷空调系统夏季负荷分配策略见图 2~5。

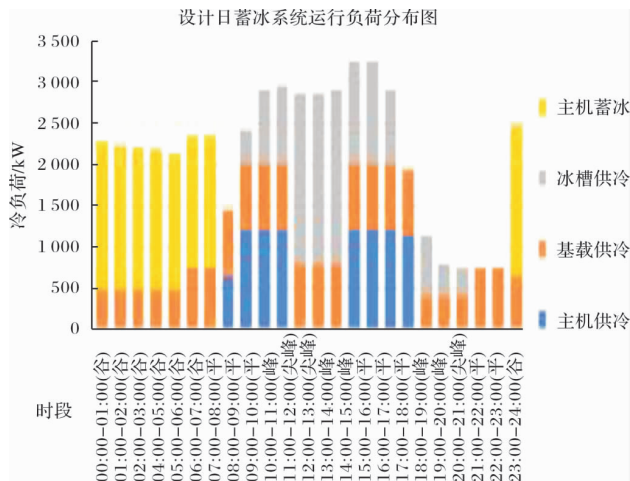


图 2 设计日运行负荷分布图

Fig. 2 Load distribution of daily design

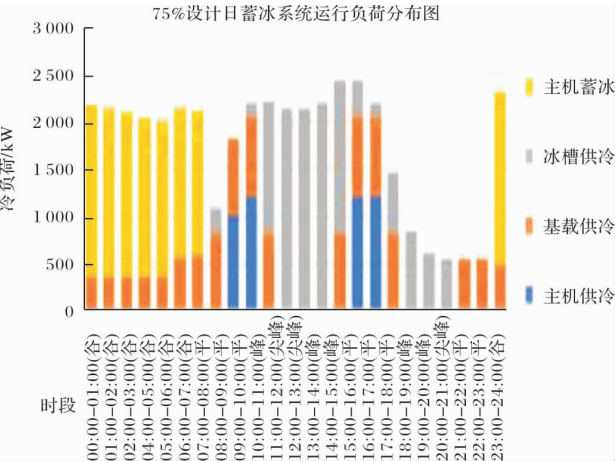


图 3 75%设计日运行负荷分布图

Fig. 3 Load distribution diagram of 75% daily design

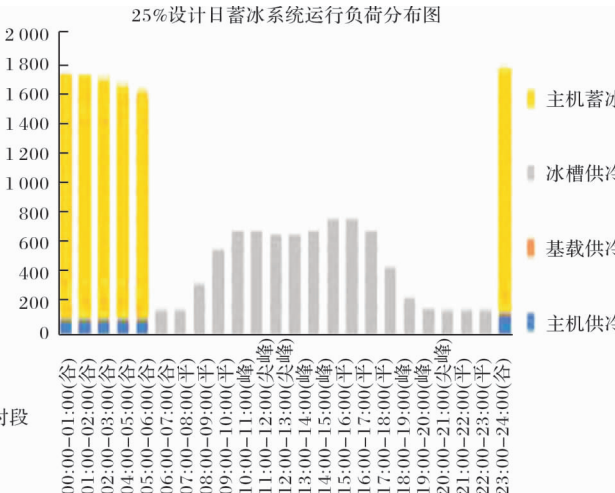


图 4 50%设计日蓄冰系统运行负荷分布图

Fig. 4 50% design daily operating load distribution

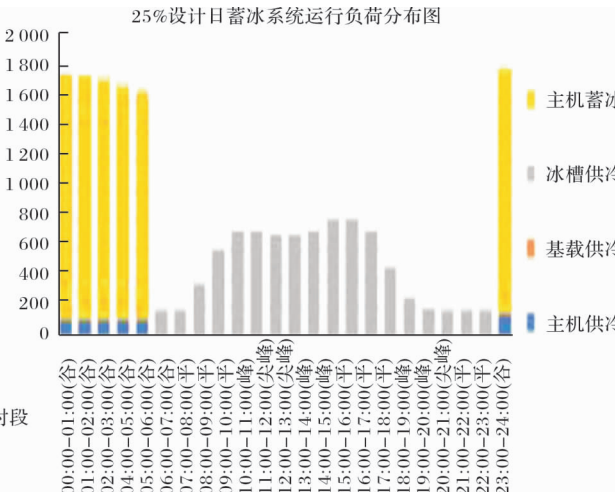


图 5 25%设计日运行负荷分布图

Fig. 5 25% design daily operating load distribution

2.3 冰蓄冷系统设计及设备参数

根据夏季空调设计日逐时冷负荷分布图, 结合该办公建筑中工作人员的工作时间和夜间加班时

间, 本工程的设计冷负荷分布时间为 07:00—22:00 时段。考虑到北京市夏季有一定的潮湿天气, 采用主机上游的串联系统可以提供更低的出水温度, 更好地保证冷冻除湿效果。从而使得在相同的负荷条件下, 串联系统乙二醇溶液的流量较小, 大温差小流量的设计, 可以减小水路系统管径, 在相同的条件下串联系统的乙二醇循环泵小于并联系统。所以, 采用串联系统的设备投资和运行费用都优于并联系统, 并且串联方式管路更加简单, 运行可靠。

根据空调负荷计算和冰蓄冷系统负荷平衡策略, 确定该系统的空调工况制冷量和制冰工况制冷量。双工况冷机一用一备, 乙二醇水泵两用一备; 双工况主机冷冻泵两用一备; 基载冷冻泵一用一备; 主机冷却泵两用一备; 基载冷却泵一用一备。具体设备配置及技术参数见设备配置表 1。

表 1 冰蓄冷空调系统机房主要设备配置及参数

Tab. 1 Main equipment configuration and parameters of ice storage air conditioning system room

序号	设备名称	规格型号	技术参数	功率	数量/单位
1	双工况冷机	SLSB700 II	756 kW	145 kW	2/台
2	基载冷机	SLS600 II	659 kW	129 kW	1/台
3	主机冷却塔	LBCM-LH-300	200 m ³ /h	7.5 kW	2/台
4	基载冷却塔	LBCM-LH-200	200 m ³ /h	7.5 kW	1/台
5	乙二醇水泵	格兰富 NBG 系列	H=37 m Q=280 m ³ /h	45 kW	3/台
6	主机冷冻泵	凯泉立式	H=22 m Q=240 m ³ /h	45 kW	3/台
7	基载冷冻泵	凯泉立式	H=23 m Q=140 m ³ /h	30 kW	2/台
8	主机冷却泵	凯泉立式	H=32 m Q=320 m ³ /h	30 kW	3/台
9	基载冷却泵	凯泉立式	H=32 m Q=180 m ³ /h	22 kW	2/台
10	蓄冰槽	益美高 ICE-204	12 000 kWh		19/组
11	板式换热器		换热量 1 300 kW		2/台
12	乙二醇补液箱		2 m ³		1/个
13	乙二醇纯溶液		25%乙二醇溶液		5/t

3 技术经济性分析

本工程于 2011 年初开始设计施工, 2013 年正式投入运行至今. 在方案设计时期, 通过对夏季运行费用进行估算, 采用静态经济分析法与动态经济分析法分别计算投资回收期. 然而, 在冰蓄冷空调系统实际运行过程中, 北京地区近几年峰谷电价和相应时间段都有一些新的调整, 所以系统实际运行过程的经济性分析与设计之初有所变化. 本文根据设备实际运行数据进行新的经济性分析, 从而与设计之初的经济性分析进行比较.

3.1 冰蓄冷空调系统设计阶段经济性分析

根据 2011 年北京市峰谷电价、冰蓄冷设备配置和系统运行策略, 空调运行季按照 120 d 计算, 冰蓄冷系统设计运行费用见表 2. 以 50% 与 100% 负荷段设计运行费用进行对比, 两者的日耗电量未翻倍, 日运行费用却达到两倍多. 结合文中上述蓄冰系统负荷分布图 2 和图 4, 在 50% 负荷时段时, 尖峰负荷时段全部由冰槽供冷承担(全部尖峰电价时段均由谷电电价所代替), 基载冷机只在部分平电时段运行. 而 100% 负荷时段, 尖峰负荷时段由基载主机和冰槽供冷同时承担(部分尖峰电价由谷电电价代替), 并且部分时段还需要一台双工况机组联合基载和融冰供冷共同承担其余负荷. 由于 100% 负荷时段尖峰用电费用大幅度增加, 因此导致日运行费用翻倍. 这也充分说明了在 50% 负荷时段, 谷电电价融冰状态替代尖峰用电的作用, 体现了冰蓄冷空调系统移峰填谷的优势.

表 2 冰蓄冷空调系统设计运行费用

Tab. 2 Design and operation cost of ice storage air conditioning system

	日耗电量 /kWh	日运行 费用/元	运行时间 /d	总运行 费用/元
100% 负荷时段	13 957	8 553	12	102 636
75% 负荷时段	10 462	5 455	48	261 840
50% 负荷时段	7 919	3 232	48	155 136
25% 负荷时段	4 473	1 535	12	18 420
合计			120	538 032

为便于对冰蓄冷空调系统进行经济性分析, 参考该空调系统逐时负荷等设计参数, 提供相应常规空调系统的主要设备见表 3, 采用常规空调系统的设计运行费用见表 4. 根据静态分析评价法对设计之初与实际运行期间的冰蓄冷空调系统投资回收期进行计算对比分析. 同时, 考虑到设计之初经济性

分析的时效性, 根据动态分析评价法对蓄冷系统进行分析计算.

表 3 常规系统主要设备

Tab. 3 Main equipment of conventional system

设备名称	容量参数
制冷机	2 台离心式冷水机组 $Q=1\,500\text{ kW}$
冷冻泵	3 台流量 $Q=455\text{ m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=23\text{ m}$
冷却泵	3 台流量 $Q=500\text{ m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=32\text{ m}$
冷却塔	2 台流量 $Q=700\text{ m}^3/\text{h}$

表 4 常规空调系统设计运行费用

Tab. 4 Design and operation cost of conventional air conditioning system

	日耗电量 /kWh	日运行 费用/元	运行 时间/d	总运行费用 /元
100% 负荷时段	10 300	10 609	12	127 308
75% 负荷时段	7 500	7 725	48	370 800
50% 负荷时段	5 500	5 665	48	271 920
25% 负荷时段	2 600	2 678	12	32 136
合计			120	802 164

采用静态经济评价法进行经济性分析. 按式 (1) 计算冰蓄冷空调系统增加的初投资费用, 为

$$\Delta I = I_s - I_c \quad (1)$$

式中: ΔI 为冰蓄冷空调系统增加的初投资, 元; I_s 为冰蓄冷空调系统的初投资, 元; I_c 为常规空调系统的初投资, 元. 按式 (2) 计算冰蓄冷空调系统全年节省的运行费用, 为

$$\Delta P = P_s - P_c \quad (2)$$

式中: ΔP 为冰蓄冷空调系统运行电费节省费用, 元; P_s 为冰蓄冷空调系统全年运行电费, 元; P_c 为同条件下, 常规空调系统全年运行电费, 元. 按式 (3) 计算冰蓄冷空调系统的投资回收期年限, 为

$$n = \Delta / \Delta P \quad (3)$$

式中, n 为投资回收期年限, a.

在北京市鼓励办公场所带头使用节能设备的政策下, 北京市相关节能单位联手节能设备公司, 对设计方案进行国家政策补贴支持, 使该冰蓄冷空调系统的初投资降低了 3%, 提升了系统的经济性.

在政府财政补贴前, 该冰蓄冷空调系统比常规空调系统初投资增加的费用 ΔI 约为 135 万元; 根据表 2 和表 4 的设计运行费用中可以看出, 冰蓄冷空调系统相比常规空调系统年节省电费 ΔP 约为 26.4 万; 根据公式 (3) 计算得到该项目投资回收期

为 5.11 a, 投资回收期大于 5 a. 由此可见, 在没有地方政策对节能设备进行财政补贴前, 该系统设计方案的经济性不足, 不能够得以实施(根据静态经济评价法, 如果投资回收期大于 5 a, 则不应采用冰蓄冷空调系统^[11]).

在政府财政补贴费用落实, 初投资优惠 3% 之后, 冰蓄冷空调系统比常规空调系统初投资增加费用 ΔI 减少为 120 万元. 冰蓄冷空调系统运行季相比常规空调系统年节省电费 ΔP 约为 26.4 万元不变. 投资回收年限 n 变为 4.54 a, 小于 5 a. 该项目具体投资回收期分析曲线见图 6. 由图可见, 当政府补贴对初投资优惠减免 1% 以上时, 投资回收期开始小于 5 a. 可见随着政府补贴力度的加大, 投资回收期成线性下降趋势, 冰蓄冷技术经济性显著提高. 所以, 当地政府对节能设备的财政补贴支持是提升冰蓄冷空调系统经济性、缩减工程投资回收期的主要原因之一, 也是推动冰蓄冷技术工程方案得以实施的关键.

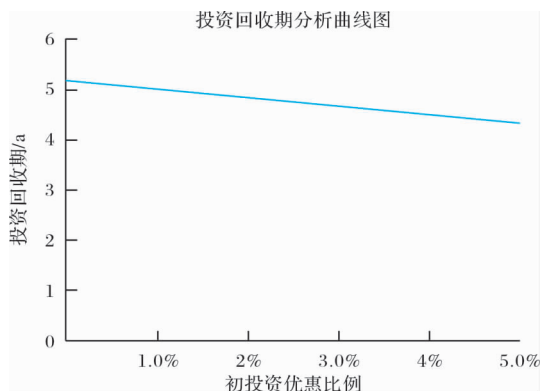


图 6 投资回收期分析曲线图

Fig. 6 Investment payback period analysis curve

采用动态经济评价法进行经济性分析. 动态回收周期考虑到资金的时间价值, 计算工程项目开始到净现值等于 0 的年限, 冰蓄冷空调系统动态回收周期可以按式(4)计算.

$$\sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+s)^n} = \sum_{n=0}^K \frac{I_n}{(1+s)^n} \quad (4)$$

式中: N 为动态回收期, a; s 为考虑投资的时间价值所给出的标准折现率; K 为投资结束年份; E_n 为第 n 年的净收益; I_n 为第 n 年的投资.

设在 $N=0$ 投资后不再追加初投资, 即 $K=0$. 等式右边, 为

$$\sum_{n=0}^K \frac{I_n}{(1+s)^n} = I_0 = I \quad (5)$$

式中: E_n 为第 N 年的净收益, 以每年的净收益保持不变为条件, 即 E 保持定值. 得到蓄冷空调动态回收期计算式为(6).

$$T = \lg \frac{1}{1 + \frac{I}{E}s} / \lg(1+s) \quad (6)$$

式中: I 为初投资增加量, E 为每年电费收益(节省运行费用/元), s 为折现率. 在蓄冷系统可行性分析中, 如果估算的回收期 T 小于用户要求的回收期 T_c , 则此方案可行^[12].

以冰蓄冷空调系统运行期间我国 CPI 维持稳定在 3% 为标准, 设折现率 $s=5\%$. 根据式(6)对冰蓄冷系统进行动态回收期计算. 在政府补贴前, 回收年限为 4.6 a. 政府对设备初投资进行补贴后, 回收年限缩短为 3.7 a. 经过动态评价法分析, 表明设计方案可行.

3.2 实际运行费用及经济性分析

本工程 2013 年正式投入运行至今, 对系统的运行费用及维护修理费进行统计记录. 由于该办公场所配有计量系统服务器端, 计量系统可以通过表头选择对冰蓄冷空调机房的各个设施进行电量计量和监控记录, 从而可以得出系统的实际耗电量. 通过对冰蓄冷空调系统实际耗电量和每年北京市的峰谷电价调整政策进行运行费用计算.

根据自控数据记录, 2013—2017 年间, 本工程项目供冷季电量及电费均呈上升趋势, 同时, 冰蓄冷空调系统相比常规空调系统夏季实际运行节省费用也呈现上升趋势, 五年间分别节省费用 25 万元、27 万元、28 万元、30 万元和 32 万元, 在系统实际运行五年的过程中共节省运行费用约 142 万元, 年均节省费用 ΔP 约为 28.4 万元. 通过经济性分析, 根据公式(3)计算系统实际投资回收期. 在未得到政府补贴的情况下, 系统实际运行投资回收期 n 为 4.75 a, 当获得政府财政补贴后, 系统实际运行投资回收期 n 为 4.23 a, 系统实际运行过程的投资回收期有所缩短. 获得政府补贴后的冰蓄冷工程项目, 实际运行投资回收期缩短 10.9%, 可见政府对冰蓄冷空调技术的财政补贴力度是缩短蓄冷工程项目投资回收期的关键.

3.3 峰谷电价及时段调整政策的影响

该冰蓄冷空调系统实际运行投资回收期比设计阶段投资回收期缩短 6.8%. 设计之初的运行费用估算约为 53.8 万元(如表 2 所示), 而实际平均年运行费用约为 51.8 万元, 运行费用下降 3.7%. 这与北京市发改委对峰谷电价及时段进行政策调整有关, 如图 7 所示. 从图中可以看出, 在冰蓄冷空调系统运行五年间, 谷电电价基本保持不变, 平电电价有小幅上涨, 高峰电价和尖峰电价涨幅

明显.

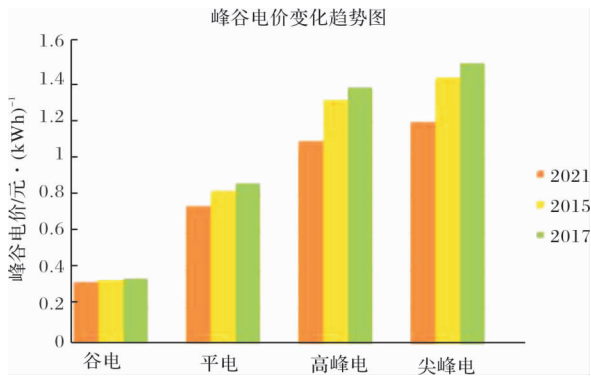


图 7 北京市峰谷电价变化趋势图

Fig. 7 Variation trend of Beijing peak and valley electricity prices

评价峰谷电价对冰蓄冷系统经济性的主要影响是看两者差价的绝对值^[13]。通过对比可知,尖峰电价由蓄冷系统设计初期的 1.2 元/kWh,到 2015 年的 1.44 元/kWh,到 2017 年的 1.52 元/kWh;高峰电价由 1.1 元/kWh,到 2017 年的 1.41 元/kWh;而低谷电价在运行期间基本维持在 0.35 元/kWh 的水平。这使得峰谷电价差值由设计时期的 0.85 元/kWh,上升到 1.17 元/kWh,峰谷电价差价的绝对值增加 37.6%,这对提升冰蓄冷空调系统经济性有显著影响。

冰蓄冷空调系统实际年节省费用比设计阶段增加了 7.6%,这与北京市发改委于 2011 年 7 月 1 日起,将 16:00—17:00 由平电时段调整为尖峰电时段,20:00 至 21:00 由尖峰时段调整为高峰时段有关^[14]。调整前后的冰蓄冷空调系统设计日分时段电费分布见图 8。对比可以看出 16:00—17:00 时段冰蓄冷系统运行电费有明显上升,增长约 350 元。峰谷电时段政策调整后,根据单时段所用电量,计算常规空调设备设计日 16:0—17:00 时段运行费用增加约 650 元。相比常规空调运行费用增长量,冰蓄冷空调系统设计日 16:00—17:00 时段节省运行费用约 300 元,体现了冰蓄冷系统相对常规空调系统在峰谷电价时段政策合理调整后的优势。因此,建议北京市电力相关部门可以进一步考虑将上午和下午办公的部分平电时段适当调整为尖峰电时段或者高峰电时段,这样不仅可以进一步节省冰蓄冷空调系统用户的运行费用,也可以让更多的用户考虑应用冰蓄冷空调技术。

对于冰蓄冷空调系统而言,不同地区制定的峰谷电价和峰谷时段等政策对运行费用和投资回收期等经济性因素有直接影响,以江苏省峰谷电价及分

时政策为例,由于江苏省的峰谷电分时政策与北京市有很大区别,江苏省峰谷电分时只分为平电时段(8:00—24:00)和低谷电时段(00:0—8:00),江苏省 2013—2017 年平电电价基本维持在 0.85 元/kWh,低谷电价 0.37 元/kWh,根据江苏省峰谷电价政策对该冰蓄冷空调系统进行经济性分析。冰蓄冷空调负荷平衡运行策略不变,假设系统各负荷日耗电量均不变。具体冰蓄冷空调系统设计运行费用见表 5,常规空调系统设计运行费用见表 6。通过对比,在江苏省峰谷电价政策下,常规空调系统的设计运行费用要低于冰蓄冷空调系统,因而该冰蓄冷空调系统工程方案不能在江苏地区执行。在现有峰谷电政策不变化的情况下,若江苏地区采用冰蓄冷空调系统需要更改相应的负荷平衡策略。可见,相同冰蓄冷空调系统方案在不同的峰谷电相关政策下,系统经济性有很大区别。所以,不同地区峰谷电相关政策性因素也是影响冰蓄冷空调系统经济性的关键。

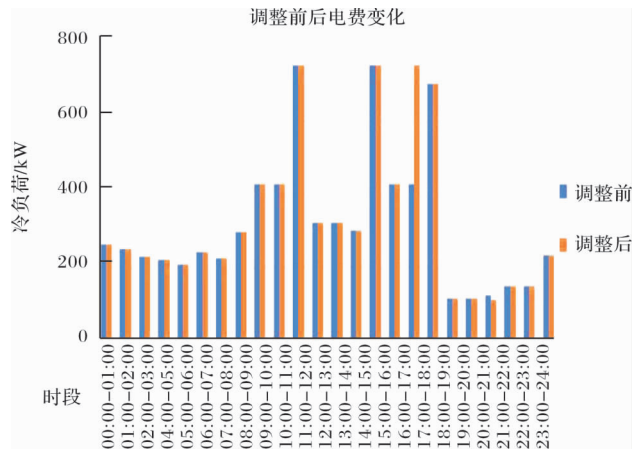


图 8 冰蓄冷系统设计日全天电费分布图

Fig. 8 Electric charge distribution diagram of all-day period of ice storage system design day

表 5 冰蓄冷系统设计日运行费用(江苏省)

Tab. 5 Daily operating costs of ice storage system design (Jiangsu Province)

	日耗电量 /kWh	日运行 费用/元	运行 时间/d	总运行 费用/元
100%负荷时段	13 957	9 400	12	112 800
75%负荷时段	10 462	6 500	48	312 000
50%负荷时段	7 919	4 134	48	198 432
25%负荷时段	4 473	1 735	12	20 820
合计			120	644 052

表 6 常规空调系统设计运行费用(江苏省)
Tab. 6 Design and operation cost of conventional air conditioning system (Jiangsu Province)

	日耗电量 /kWh	日运行 费用/元	运行 时间/d	总运行 费用/元
100%负荷时段	10 300	7 725	12	92 700
75%负荷时段	7 500	5 625	48	270 000
50%负荷时段	5 500	4 125	48	198 000
25%负荷时段	2 600	1 950	12	23 400
合计			120	584 100

3.4 运行策略影响分析

运行人员合理调整运行策略是提升冰蓄冷空调系统经济性的重要因素之一。由文中图 2 和图 4 可见,在北京市电价时段政策调整前,在 16:00—17:00 平电时段,负荷由基载供冷、主机供冷和冰槽供冷三部分承担。从图 2 可以看出,设计日计算运行负荷时基载供冷和主机供冷承担该时段负荷的 70%。从图 4 中可以看出,50%设计日运行负荷时基载供冷承担供冷负荷的 55%。峰谷电时段政策调整后,运行人员可根据具体电价时段政策的变化更改运行策略,在 16:0—17:00 时段以开启冰槽供冷自控模式为主,减少或关闭基载和主机供冷模式。充分利用冰槽供冷承担该时段全部负荷,利用冰槽夜间的谷电电价完成此时段的供冷任务,从而减少基载冷机和双工况机组(主机)在该时段大约 60%的尖峰电费。以设计日负荷为例,根据峰谷电时段政策调整运行策略,该时段可节省冰蓄冷空调系统实际运行费用约 200 元(占单日运行费用 3%),相比常规空调系统,该时段可节省运行费用约 500 元。

严格规范冰蓄冷系统运行人员操作流程也是降低运行费用的关键。在 50%设计日负荷时的下班时间(如图 4),随着供冷负荷需求量的下降,应充分提升融冰工况的利用率,避免过早开启基载机组。然而很多运行人员为节省夜间蓄冰时段前(夜间 23:00)开启基载机组的操作流程,选择过早开启基载机组,使得属于融冰工况单独承担冷负荷的下班时段,变成基载供冷和融冰工况共同承担,导致基载机组及水泵运行费用增加,设备损耗增加。根据实际运行数据的计算统计,单日过早开启基载机组(如下午六点开启基载),导致系统单日运行费用上升约 20%。同样,在 25%设计日负荷时期(如图 5),应充分利用系统双工况机组制冰+制冷工况的运行优势,夜间蓄冰只需开启双工况机组及配套水泵设备方可完成工作。此时如果运行人员还采用之前夏季制冰工况+基载供冷工况的夜间蓄冰模

式,对于基载冷机低负荷运行而言,不仅经济性较差,还增加了基载冷冻、冷却水泵的运行费用,而水泵的能耗约占空调系统总能耗的 20%以上^[15]。所以,根据运行数据统计,该不合理操作导致系统单日运行费用上升约 10%。因此,运行人员合理规范的运行策略也是影响冰蓄冷空调系统经济性的因素之一。

3.5 移峰效益分析

建筑能耗占全球近 40%的能源消耗,而空调系统是建筑能源的主要消耗^[16]。通过建设冰蓄冷空调系统,可以提高现有电网负荷率和运行效率,从而降低供电煤耗,使电力部门实现减排。根据所研究地区电网负荷率与供电煤耗之间的定量关系,得到冰蓄冷系统单位蓄冷量的碳减排量是 0.686 kg/kWh^[17],该办公建筑空调季总蓄冷量为 987 953 kWh,可知该办公建筑冰蓄冷空调系统每年可实现电网 CO₂ 减排约 677.7 t。因此,冰蓄冷空调系统的环境效益与社会效益同样显著,具有很好的应用前景。政府及相关职能部门应积极采取相关激励政策,推广冰蓄冷技术的应用。

4 结论

本文通过对冰蓄冷空调系统实际运行过程的监测记录与分析,说明在相应的峰谷电价差和相关政策的推动支持下,结合合理的设计和系统运行策略,北京地区办公场所应用冰蓄冷系统可以获得很好的经济性和环境、社会效益。本例对具有类似空调冷负荷特性(利用夜间无冷负荷或低冷负荷时段的谷电电力来进行蓄冷,以保证在白天峰电价时段的释冷)的办公建筑场所应用冰蓄冷空调技术具有一定的参考和借鉴意义。通过经济性分析,可以得到如下结论:

(1)对节能设备的政策性财政补贴是影响冰蓄冷技术推广应用的重要影响因素,对于本工程而言,当政府补贴对初投资优惠减免 3%时,系统实际运行投资回收期缩短 10.9%。

(2)峰谷电价差及峰谷电价执行时间段等政策性因素是影响冰蓄冷空调系统经济性最重要的因素。对于本工程而言,政策调整峰谷电价差绝对值增加 37.6%,冰蓄冷空调系统实际运行投资回收期缩减 6.8%。

(3)在不同地区的峰谷电相关政策性因素下,相同的冰蓄冷空调系统设计策略,以北京和江苏地区为例进行对比,得出的经济性分析结果完全不同,可见不同地区采用冰蓄冷空调系统需要严格根据当地的峰谷电相关政策等因素进行蓄冷系统设计

分析。

(4)运行人员规范冰蓄冷空调系统的实际操作步骤,适时根据天气负荷情况对运行策略进行更改,可以有效降低全天运行费用,是缩减设备投资回收期以及保证系统良好经济性的重要因素。

参考文献 References

- [1] 张文奏. 冰蓄冷空调系统经济性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
ZHANG Wenzao. Economic analysis of ice storage air conditioning system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2015[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 4-6.
Research Center of Building Energy Efficiency, Tsinghua University. Annual development report of China building energy efficiency 2015 [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2016: 4-6.
- [3] 王宝龙, 石文星, 李先庭. 空调蓄冷技术在我国的研究进展[J]. 暖通空调, 2010, 40(6): 6-12.
WANG Baolong, SHI Wenxing, LI Xianting. Research progress of air conditioning storage technology in China[J]. HVAC, 2010, 40(6): 6-12.
- [4] 王雪梅, 李炎锋, 吕子强, 等. 基于负荷动态模拟的冰蓄冷系统优化控制分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(3): 552-556.
WANG Xuemei, LI Yanfeng, LV Ziqiang, et al. Optimization control analysis of ice storage system based on dynamic load Simulation [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2010, 26(3): 552-556.
- [5] HENZE G P, KRARTI M. Ice storage system controls for the reduction of operating cost and energy use [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1998, 120(4): 275-281.
- [6] Giraldo, Alberto R. Simulation d'un système de stockage saisonnier de glace pour la climatisation d'un bâtiment commercial ou institutionnel[J]. Society & Labour, 2012, 30(7): 69-99.
- [7] LI Yanning, WANG Shufen. Study on the current situation of economic analysis of ice storage air-conditioning system[J]. Applied Mechanics and Materials 2014, 580-583: 2441-2446.
- [8] 黄亮. 冰蓄冷空调系统的经济性分析与优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
HUANG Liang. Economic analysis and optimization of ice storage air conditioning system[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [9] 吴若飒. 公共建筑中蓄冷空调系统能效经济性评价与保障体系研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
WU Ruosha. Study on economic evaluation and guarantee system of energy efficiency of cold storage air-conditioning system in public buildings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [10] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
LU Yaoqing. Practical heating and air conditioning design manual [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.
- [11] 解嘉珍. 冰蓄冷空调系统用于商场的技术经济性研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(6): 42-44.
XIE Lizhen. Research on the technical economy of ice storage air conditioning system used in shopping mall [J]. HVAC, 2010, 40(6): 42-44.
- [12] 马宇驰. 冰蓄冷空调的经济性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
MA Yuchi. Economic analysis of ice storage air conditioning [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2005.
- [13] 严德隆, 张维君. 空调蓄冷应用技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
YAN Delong, ZHANG Weijun. Application technology of air conditioning storage [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997.
- [14] 北京市发展和改革委员会. 北京市发展和改革委员会关于调整北京市夏季尖峰电价时段的通知[R] (京发改[2011]1060号), 北京: 北京市发展和改革委员会 2011.
Beijing Development and Reform Commission. Notice of Beijing development and reform commission on the adjustment of Beijing's summer peak electricity price period [R] (No. 1060, Beijing Development Reform [2011]). Beijing: Beijing Development and Reform Commission, 2011.
- [15] 文建良. 风机盘管水系统管网特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
WEN Jianliang. Study on pipe network characteristics of fan coil water system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [16] SUN Liangliang, WU Jiahua, JIA Haiqi, et al. Research on fault detection method for heat pump air conditioning system under cold weather [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 25(12): 122-129.
- [17] 樊瑛, 龙惟定. 冰蓄冷系统的碳减排分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 105-108.
FAN Ying, LONG Weiding. Carbon emission reduction analysis of ice storage system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science edition), 2011, 39(1): 105-108.

(编辑 沈 波)