

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-388-07

中央空调系统预冷控制策略试验研究

袁霞情¹ 袁中原¹ 高 波²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 四川省建筑科学研究院有限公司 成都 610081)

【摘 要】 以夏热冬冷地区的实际办公建筑为对象, 通过试验研究验证了预冷控制策略的实际效果, 并系统分析了该策略对负荷转移的作用规律。该策略通过协同利用建筑围护结构热惯性与中央空调系统控制策略, 将高峰时段的制冷需求转移至电价较低的平谷时段, 实现负荷在时间维度上的优化调度。试验结果表明, 该预冷控制策略在用电高峰时段可降低负荷与能耗: 负荷削减比最低可达 3.5%, 能耗削减比最低为 2.6%。此外, 高峰时段的负荷削减效果随预冷温度的降低而增强, 随预冷时长的增加而提升。研究也发现, 高峰时段负荷和能耗的降低常以全天时段负荷和能耗的增加为代价, 但在部分工况下亦存在不牺牲此代价的情形。

【关键词】 预冷控制; 分时电价; 负荷; 能耗; 试验研究

中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

Experimental Study on the Pre-cooling Control Strategy of Central Air-Conditioning Systems

Yuan Xiaqing¹ Yuan Zhongyuan¹ Gao Bo²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu, 610081)

【Abstract】 Using actual office buildings in regions with hot summers and cold winters as subjects, experimental research validated the practical effectiveness of the pre-cooling control strategy and systematically analyzed its patterns of load shifting. By synergistically leveraging the thermal inertia of building envelopes and central air-conditioning system control strategies, this approach shifted peak-hour cooling demands to off-peak periods with lower electricity rates, achieving optimized load scheduling across time dimensions. Experimental results demonstrated that this pre-cooling control strategy reduced both load and energy consumption during peak electricity periods: the minimum load reduction ratio reached 3.5%, while the minimum energy consumption reduction ratio was 2.6%. Furthermore, the effectiveness of peak-hour load reduction increased with lower pre-cooling temperatures and longer pre-cooling durations. The study also found that reductions in peak-period load and energy consumption often came at the cost of increased load and energy consumption during other time periods. However, under certain operating conditions, reductions could be achieved without sacrificing load and energy consumption during other time periods.

【Keywords】 Pre-cooling control; Time-of-use electricity pricing; Load; Energy consumption; Experimental research

0 引言

在全球节能减排的背景下, 建筑低碳化已成为

可持续发展的重要路径。中央空调系统作为建筑运行阶段的主要耗能环节, 其能耗约占建筑总能耗的

基金项目: 四川华西集团科技项目《基于碳中和目标的绿色零碳建筑技术体系研究及示范》(HXKX2021/024)

作者简介: 袁霞情 (2001-), 女, 硕士研究生, E-mail: 3318366627@qq.com

通讯作者: 袁中原 (1983-), 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-11-21

40%~60%左右^[1,2], 且常在用电高峰时段形成尖峰负荷, 对电网调度造成压力, 这一现象在夏热冬冷地区尤为突出。随着风电、光伏等可再生能源占比提升, 电网结构持续演变^[3], 其波动性与间歇性也使得动态负荷平衡的需求日益增强。需求响应 (Demand Response, DR) 作为一种有效的用户侧调节机制, 通过激励用户调整用电行为, 有助于平衡电网供需、提升能源利用效率与经济可靠性^[4]。建筑作为用电主体, 是实现柔性用能、积极参与 DR 的关键对象。

当前, 随着智能电网与建筑能源管理技术的深度融合^[5], 单体建筑空调系统参与需求响应已成为实现建筑-电网协同优化的关键途径之一, 相关研究也已从理论探索迈向模型构建。

中央空调参与 DR 主要有两类技术路径: 负荷削减^[6-9]与负荷转移。负荷削减是在电网高峰时段直接降低空调功率, 方法多种多样; 负荷转移则借助建筑热惯性或储能系统, 在时间维度上平移用能高峰, 实现能耗的时域优化而非总量削减^[10]。其中, 相比于需要安装大型水箱的显热储热系统^[11]、集成于墙体中的相变材料 (PCM) ^[12]、混合相变材料-

水储热罐^[13]以及其他复杂的热能存储系统^[14,15], 利用建筑围护结构 (如混凝土楼板、墙体) 的热惯性进行被动蓄冷/热, 因其低附加成本, 成为经济可行的负荷转移方式。

目前相关研究多基于仿真模拟^[16-20], 试验验证与规律性总结相对不足。为此, 本文以实际办公建筑为试验平台, 部署并测试预冷控制策略, 旨在验证其在实际运行中的负荷转移效果, 并总结相关控制规律, 为建筑主动参与需求响应提供实践依据。

1 试验建筑介绍

本研究选取四川省成都市某办公建筑作为试验对象。该建筑主体采用钢筋混凝土框架结构, 地理坐标为北纬 31°, 东经 104.01°, 建筑朝向为北向 113°。成都市属于亚热带湿润季风气候, 其特征为夏热冬冷。试验建筑由一栋 13 层的主楼和一栋 3 层的副楼组成, 本研究在主楼内进行。鉴于建筑内部不同楼层及办公室的业务范围与保密等级存在差异, 试验区域限定于主楼内 8 个楼层的主要开放式办公区。以第 8 层为例, 其具体试验区域为图 1 中开放式办公室。

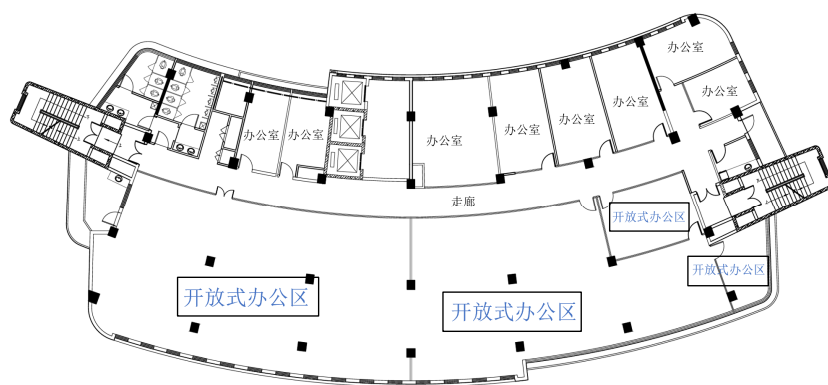


图1 试验建筑第八层平面图及试验区域示意

Fig.1 Eighth floor plan of test building and schematic of test area

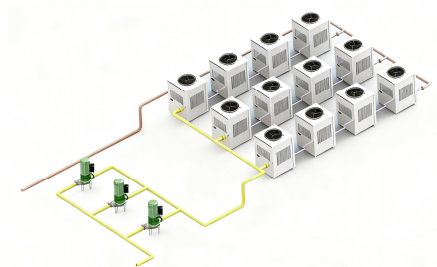


图2 中央空调系统源侧连接示意图

Fig.2 Central air conditioning system source-side connection diagram

该试验建筑采用的中央空调系统形式为空气源热泵加风机盘管系统, 风冷热泵主机置于 13 层屋顶专用机位, 共 12 台风冷热泵模块机组, 与 3 台冷热水泵分三列并联运行, 如图 2 所示。实际运行中仅开启 8 台主机和 2 台水泵, 本研究以实际运行情况进行研究。为监测系统运行状态, 建筑配备了空调机房控制管理平台。该平台能够实时监测并记录包括室外气象参数 (干球温度、相对湿度)、水系统参数 (冷热水流量、供回水温度) 以及系统

分项能耗（主机、水泵及末端风机盘管）在内的关键运行数据，为本研究提供了全面、可靠的数据支撑。

2 预冷控制策略

本文的核心研究目的在于探索中央空调系统与建筑围护结构的协同作用，实现建筑负荷与能耗在时间维度上的转移。为实现此目的，本文将设计中央空调系统的预冷控制策略。该策略的核心思想是利用建筑围护结构的热惯性，在电价适宜的时段进行预冷，将能量以冷的形式储存在建筑围护结构中。策略的具体执行通过两个关键控制环节：预冷控制时长用于确定空调系统的开启时间；预冷控制温度则用于指导室内末端设备的设定温度。

本研究预冷控制时长的确定综合考量了分时电价政策与建筑实际使用规律。表 1 为四川省 2025

年分时电价机制，该机制根据不同季节电力供需形势和负荷特性，按季节对峰平谷时段进行调整。办公室人员在岗时间为 8:00–21:00，该设定考虑了人员加班的情况。以本次试验对预冷控制时长的确定流程为例：本次试验时间是 2025 年 7 月 29 日至 2025 年 8 月 21 日，属于夏季。根据夏季分时电价划分，每日 23:00 至次日 8:00 为用电平谷段，且该时段楼内基本无人员活动。为达成削减峰值用电的目标，本研究考虑在此时段内进行预冷策略设计。然而，受中央空调系统惯性及围护结构热惰性影响，室内温度达到稳定所需时间常滞后于设备开启时间。为确保室内热环境稳定且能量能存储在围护结构中，本研究的最小动作时长为 2h。最终，试验选取了 9h、7h、5h 和 3h 四种不同的预控制时长，其对应的中央空调系统启动时间分别为 23:00、次日 1:00、次日 3:00 和次日 5:00。

表 1 四川省 2025 年分时电价机制

Table 1 Sichuan Province's time-of-use tariff period division for 2025

时段划分	季节划分			备注
	春秋季（3–6、10、11 月）	夏季（7–9 月）	冬季（12、1、2 月）	
高峰时段	10:00–12:00、17:00–22:00	11:00–18:00、20:00–23:00	10:00–12:00、16:00–22:00	7、8 月
平段	8:00–10:00、12:00–17:00	7:00–11:00、18:00–20:00、 23:00–次日 1:00	8:00–10:00、12:00–16:00、 22:00–24:00	存在尖峰时段： 13:00–14:00、 21:00–23:00
低谷时段	22:00–次日 8:00	1:00–7:00	0:00–8:00	
电价调整说明	高峰时段电价在平段电价基础上上浮 60%，低谷时段电价在平段电价基础上下浮 60%，峰平谷价差比为 1.6:1:0.4，尖峰时段电价在高峰时段电价基础上的上浮 20%			

本研究依据中国国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》（GB 50736-2012）中对人员热舒适性的规定，夏季供冷工况的舒适温度范围为 24℃~28℃，并以此作为预控制温度设定的基准。文献[18]指出，在供冷工况中适度降低设定温度有助于提升系统控制效果。鉴于策略实施时段建筑处于无人状态，人员舒适性约束可暂时放宽，允许温度偏离舒适区间。同时，考虑到策略时段结束后人员将进入室内，且从室外到室内存在热适应过程，人体热感觉尚不稳定。本研究经综合权衡，将预冷控制温度范围在国家标准基础上扩展 1℃，最终确定为：供冷工况预冷控制温度范围为 23℃~28℃。本次试验选取 23℃和 25℃作为预冷控制温度进行试验。此外，为进一步凸显策略效果，试验增设 18℃的低温策略情景。

综上所述，本研究构建的预冷控制策略试验工况如表 2 所示。需要特别说明的是，策略运行时间均安排在人员在岗时间之前。人员在岗时段内的室内温度依据《近零能耗建筑技术标准》（GB/T 51350-2019）在供冷工况下设定为 26℃。试验中，为兼顾人员舒适性与行为自由度，仅在人员在岗起始时刻将室内末端设定温度统一调整为 26℃，其后时段赋予室内人员完全的温度控制权，不再对设定温度作统一要求。本试验的试验工况安排如表 3 所示。

表 2 预冷控制策略

Table 2 Control strategy for precooling

预冷控制运行策略	试验工况
预冷控制温度/℃	18、23、25
预冷控制时长/h	3、5、7、9

表 3 试验工况安排表

Table 3 Experimental design matrix of test conditions

试验日期	试验工况	
	预控制温度/℃	预控制时长/h
7月29日*	23	9
7月31日*	18	9
8月1日*	25	9
8月5日	18	5
8月6日	23	5
8月7日	25	5
8月8日	18	3
8月12日	23	3
8月13日	25	3
8月19日	25	7
8月20日	23	7
8月21日	18	7

注: *等试验日采用的是 9h 的预控制时长, 即中央空调系统的开启时间是前一日的 23:00, 本文为表示方便, 统一用开启时间所在日期的后一天表示。

3 试验过程及结果分析

3.1 数据采集与处理

本试验的数据采集依赖于建筑自身配置的空调机房控制管理平台。基于供回水温度和冷热水流量, 可以由热力学基本公式计算主机供冷量, 具体计算式如式 (1) 所示。负荷量可近似等于主机供冷量。

$$Q = c * M * \Delta T \quad (1)$$

式中: Q 为中央空调系统主机供冷量, kW; c 为水的定压比热容, 常数, 取 $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; M 为冷冻水的质量流量, kg/s ; ΔT 为冷冻水的供回水温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

为评估预冷控制运行策略的效果, 需将试验日期的数据与未采用策略的基准日期数据进行对比。基准日期的选取主要考量影响负荷的关键因素。文献[21]指出, 在室外干球温度、室外相对湿度、太阳辐射强度、风向、风速、云量等室外气象参数中, 室外干球温度与建筑冷/热负荷表现出强相关性, 室外相对湿度呈中等相关, 其余参数则相关性极弱或无相关性。因此, 本研究将基准日期定义为与试

验日期具有相近室外干球温度及相对湿度的日期。

为量化两个日期在以上参数上的相似程度, 本文采用三种统计误差指标: 均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 以及平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE), 其计算式分别如式 (2) ~ 式 (4) 所示。本文对上述误差指标设定了筛选阈值, 具体限值如表 4 所示。

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中: y_i 为试验数据; $\hat{y}_i$ 为基准数据; n 为数据点数量。

表 4 误差指标及其限制

Table 4 Error Metrics and Their Limitations

筛选指标	指标限制	
	室外干球温度	室外相对湿度
RMSE	2	10
MAE	2	10
MAPE	10%	30%

以 2025 年 8 月 13 日为例, 为确认合适的基准日期, 本研究通过对比发现, 2025 年 7 月 21 日与该试验日具有高度相似的室外干球温度和室外相对湿度特征。这两日室外干球温度与相对湿度的具体对比情况分别如图 3 和图 4 所示。

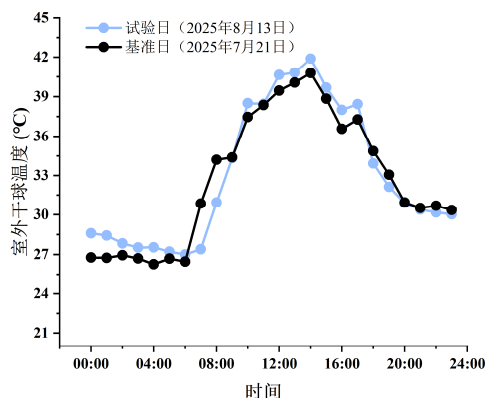


图 3 室外干球温度对比图

Fig.3 Outdoor dry-bulb temperature comparison chart

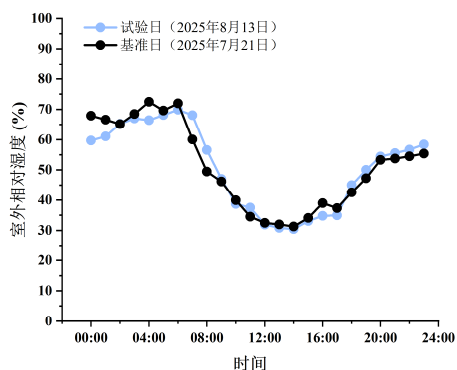


图4 室外相对湿度对比图

Fig.4 Outdoor relative humidity comparison chart

经过计算, 室外干球温度的方根误差约为 1.337、平均绝对误差约为 1.033、平均绝对百分比误差约为 3.27%; 室外相对湿度的均方根误差约为 3.699、平均绝对误差约为 2.854、平均绝对百分比误差约为 5.50%。根据数值和对比图综合判断, 可以认定 2025 年 8 月 13 日与 2025 年 7 月 21 日在室外干球温度和室外相对湿度上具有相似特征。

图 5 列出了符合筛选限值的对比结果, 括号外日期为试验日期, 括号内为基准日期。需要说明的是, 在室外相对湿度的对比中, 8 月 12 日对应的 RMSE 值与 8 月 21 日对应的 MAE 值略高于表 4 所设定的筛选限值。鉴于文献[21]指出, 相对湿度与负荷的相关性显著低于室外干球温度, 其对整体负荷对比的影响相对较小。因此, 在可接受的误差范围内, 本研究适当放宽了对该参数的筛选限制, 因此, 上述试验日期对应的基准日期仍被纳入基准日期集合用于后续分析。

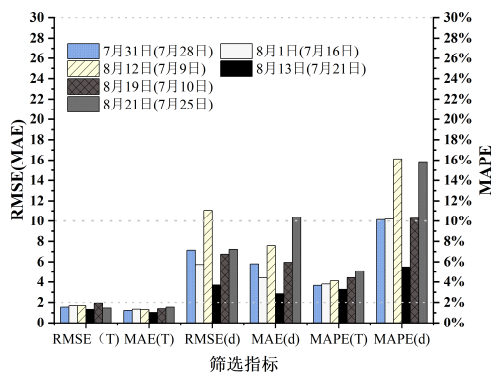


图5 筛选结果

Fig.5 Screening results

3.2 试验结果与分析

本研究将试验数据与基准数据进行对比以量

化预控制运行策略的实际效果, 并以两者在用电高峰时段数据的相对差值作为策略效果的评估指标, 分别从负荷和能耗两个维度进行分析。以 2025 年 8 月 13 日的试验结果为例。图 6 展示了基准日(2025 年 7 月 21 日)与试验日(2025 年 8 月 13 日)的逐时负荷对比曲线。可以看出, 在夏季用电高峰时段, 即图中灰色区域, 试验日的负荷显著低于基准日。经计算, 该高峰时段内试验日的累计负荷较基准日降低了 3.5%, 同时, 在全天时段试验日的累计负荷较基准日降低了 1.0%。图 7 为基准日与试验日的中央空调系统逐时总能耗对比曲线。同样在用电高峰期, 试验日的系统总能耗明显下降。计算表明, 试验日高峰时段总能耗相较于基准日减少了 2.6%, 而全天时段试验日总能耗相较于基准日增加了 1.7%。

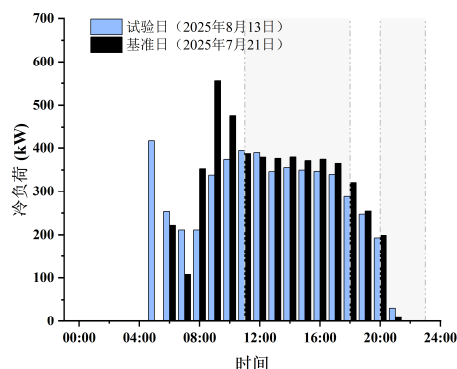


图6 基准日与试验日逐时负荷对比曲线

Fig.6 Hourly load comparison curve between baseline date and test date

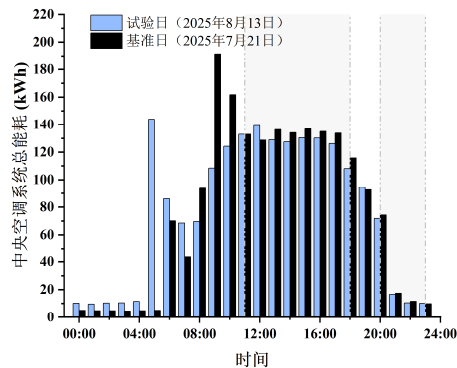


图7 基准日与试验日逐时中央空调系统总能耗对比曲线

Fig.7 Hourly comparison curve of total energy consumption for the central air conditioning system between the baseline date and test date

上述结果表明,在 2025 年 8 月 13 日的试验中,本研究的预冷控制运行策略在降低夏季用电高峰期的负荷和中央空调系统总能耗方面均有积极作用,此时,虽然全天时段的累计负荷没有增加,但是全天时段总能耗有小幅增加。其余试验日与基准日的对比计算结果如表 5 所示。

表 5 试验日与基准日对比计算结果汇总

Table 5 Summary of calculation results comparing test date and base date					
试验日期	基准日期	高峰时段负荷 削减百分比*	高峰时段总能耗 削减百分比*	全天时段负荷 削减百分比*	全天时段总能耗 削减百分比*
7 月 31 日	7 月 28 日	27.064%	19.134%	-0.8%	-4.5%
8 月 1 日	7 月 16 日	18.395%	19.795%	-3.4%	4.5%
8 月 12 日	7 月 9 日	10.043%	28.854%	-17.6%	-1.9%
8 月 13 日	7 月 21 日	3.484%	2.603%	1.0%	-1.7%
8 月 19 日	7 月 10 日	5.404%	27.089%	-29.1%	-0.9%
8 月 21 日	7 月 25 日	15.879%	18.856%	-13.8%	-9.6%

注: *指试验日相较于基准日的减少百分比。

根据表 5 中的试验结果,按预控制温度与预控制时长进行整理后,得到图 8 所示的关系。分析可知,当预控制温度固定为 18℃或 25℃时,夏季用电高峰时段的负荷削减百分比随预控制时长的增加而上升。另一方面,当预控制时长固定为 3h、7h 或 9h 时,负荷削减百分比均随预控制温度的降低而增加。除此之外,从表 5 可以发现用电高峰时段的负荷或能耗的削减基本都牺牲了全天时段的负荷或能耗。尽管如此,仍存在能微小地维持全天时段负荷或能耗不增加的情况。

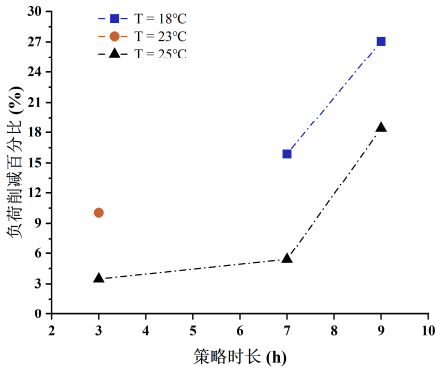


图 8 高峰时段负荷削减百分比随预冷控制策略的变化
Fig.8 Percentage of peak-hour load reduction varying with precooling control strategy

对中央空调系统总能耗的对比分析显示,尽管各试验日在用电高峰时段的总能耗均低于基准日,但其变化规律不如负荷削减百分比显著。主要原因如下:

首先,基准日筛选主要考虑负荷强度因素。若

以总能耗为依据,需纳入更多影响因素,将大幅增加基准日遴选的复杂度。

其次,空调系统总能耗(尤其是主机能耗)不仅取决于负荷绝对值,还受机组性能系数(COP)影响,而 COP 与室外气象条件密切相关。本研究虽保证了试验日与对应基准日的气象条件相似,但未约束不同试验日之间的气象差异。例如,8 月 12 日与 13 日的室外干球温度均方根误差达 2.987,平均绝对误差为 2.514,高峰时段温差尤其显著,如图 9 所示。

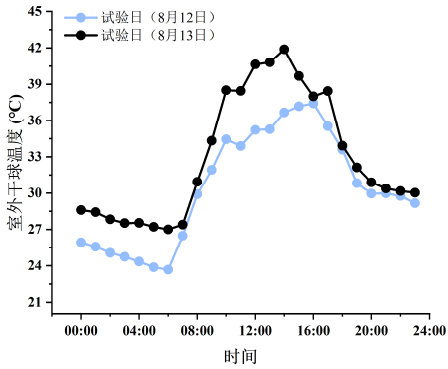


图 9 试验日(8月12日)与试验日(8月13日)室外干球温度曲线图

Fig.9 Outdoor dry-bulb temperature curve for test day (August 12) and test day (August 13)

最后,此前总结的负荷变化规律是基于试验日与基准日的相对百分比,而非负荷绝对值。百分比变化虽呈现趋势,但实际负荷值仍强烈依赖具体气象条件。

综上, 由于难以控制试验日之间的气象波动, 总能耗变化受到 COP 及外部气象参数变化的共同影响, 因而未呈现如负荷削减百分比那样清晰的规律。

4 结论

文章以夏热冬冷地区的实际办公建筑为研究对象通过试验验证了使用预冷控制策略的实际效用, 并得到如下结论:

(1) 在该办公建筑中实施预冷控制策略, 能较好地实现负荷和能耗在用电高峰时段的转移, 即将用电高峰时段的负荷和能耗转移至用电低谷段。用电高峰期的负荷削减百分比随预冷控制时长和预冷控制温度呈现出一定规律性, 即削减百分比随预冷控制时长的增加而增大, 随预冷控制温度的减小而增大。中央空调系统总能耗在用电高峰时段的削减百分比没有如此规律性。

(2) 在试验中, 发现用电高峰时段的负荷和能耗的削减常以牺牲全天时段的负荷和能耗为代价, 尽管如此, 仍存在能微小地维持全天时段负荷和能耗不增加的情况。

参考文献:

- [1] LI B, YOU L, ZHENG M, et al. Energy consumption pattern and indoor thermal environment of residential building in rural china[J]. *Energy and Built Environment*, 2020,1(3):327-336.
- [2] ZHOU C, FANG Z, XU X, et al. Using long short-term memory networks to predict energy consumption of air-conditioning systems[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,55:102000.
- [3] 曹艺严,陈济,刘秉祺,等. 电力增长零碳化(2020-2030): 中国实现碳中和的必经之路[R]. 落基山研究所, 2021,01.
- [4] 杨力俊,潘伟,田闻旭. 计及需求响应和风光不确定性的微电网多目标优化模型[J]. *电力需求侧管理*, 2022,24(3):1-8.
- [5] 宋梦,高赐威,苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. *电力系统自动化*, 2016,40(14):158-167.
- [6] TANG H, WANG S, LI H. Flexibility categorization, sources, capabilities and technologies for energy-flexible and grid-responsive buildings: State-of-the-art and future perspective[J]. *Energy*, 2021,219:119598.
- [7] WANG H, WANG S, TANG R. Development of grid-responsive buildings: Opportunities, challenges, capabilities and applications of HVAC systems in non-residential buildings in providing ancillary services by fast demand responses to smart grids[J]. *Applied Energy*, 2019,250:697-712.
- [8] RAN F, GAO D, ZHANG X, et al. A virtual sensor based self-adjusting control for HVAC fast demand response in commercial buildings towards smart grid applications[J]. *Applied Energy*, 2020,269:115103.
- [9] TANG R, WANG S, SHAN K. Optimal and near-optimal indoor temperature and humidity controls for direct load control and proactive building demand response towards smart grids[J]. *Automation in Construction*, 2018,96:250-261.
- [10] TANG H, WANG S, LI H. Flexibility categorization, sources, capabilities and technologies for energy-flexible and grid-responsive buildings: state-of-the-art and future perspective[J]. *Energy*, 2021,219.
- [11] MENG Q, LI Y, REN X, et al. A demand-response method to balance electric power-grids via HVAC systems using active energy-storage: Simulation and on-site experiment[J]. *Energy Reports*, 2021,7:762-777.
- [12] JOHRA H, HEISELBERG P, DRÉAU J L. Influence of envelope, structural thermal mass and indoor content on the building heating energy flexibility[J]. *Energy and Buildings*, 2019,183:325-339.
- [13] HIRMIZ R, TEAMAH H M, LIGHTSTONE M F, et al. Performance of heat pump integrated phase change material thermal storage for electric load shifting in building demand side management[J]. *Energy and Buildings*, 2019,190:103-118.
- [14] Chen, Yongbao, et al. Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review[J]. *Energy And Buildings*, 2018,177:125-139.
- [15] STINNER S, HUCHTEMANN K, MÜLLER D. Quantifying the operational flexibility of building energy systems with thermal energy storages[J]. *Applied Energy*, 2016,181:140-154.