

基于启停控制的办公建筑空调用电负荷调度研究

周腾德¹, 崔红社^{1,*}, 牛梦涵¹, 刘龙¹, 马倩倩²

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 河北航东建设工程股份有限公司, 邢台 054000)

摘要:为挖掘空调系统用电负荷调度潜力,以青岛市某办公建筑空调系统为例,搭建 TRNSYS 能耗模拟仿真平台,模拟启停控制下空调系统用电情况,对空调系统用电负荷调度潜力进行分析。模拟结果表明,在保证室内热舒适的前提下,10:30—11:30 停机 1 h 负荷调度效果最好,调度容量为 557.81 kWh。若聚合区域内 50 栋类似规模建筑,停机 1 h 可调度容量为 27.89 MWh,区域负荷调度效果十分可观。

关键词:空调系统;负荷调度;办公建筑;TRNSYS

中图分类号:TU831 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)03-0088-07

Research on load scheduling of office building air conditioning based on start-stop control

ZHOU Tengde¹, CUI Hongshe^{1,*}, NIU Menghan¹, LIU Long¹, MA Qianqian²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Hebei Hangdong Construction Engineering Co. Ltd., Xingtai 054000, China)

Abstract: In order to explore the power load scheduling potential of air conditioning system, taking the air conditioning system of an office building in Qingdao as an example, TRNSYS energy consumption simulation platform was built to simulate the power consumption situation of air conditioning system under start-stop control, and the power load scheduling potential of air conditioning system was analyzed. The simulation results show that, under the premise of ensuring indoor thermal comfort, the optimal load scheduling effect is achieved when the machine stops from 10:30 to 11:30 for 1 h, and the scheduling capacity is 557.81 kWh. If there are 50 buildings of similar scale in the aggregation area, the dispatching capacity is 27.89 MWh, and the regional load dispatching effect is very impressive.

Key words: air conditioning system; load scheduling; office building; TRNSYS

“十四五”期间,负荷峰谷差持续拉大,可再生能源发电快速增长,对电力实时平衡提出新挑战,电网已进入紧平衡时代,电力系统面临着巨大的调峰压力^[1-2]。我国电源结构仍以煤电为主体,灵活性不足,源侧调峰能力有限。因此,实现电网需求侧响应,降低高峰时段用电十分重要。

在电网需求侧中,建筑空调系统用电负荷占比大,多个省份空调用电负荷占比超过 30%。对于间歇性运行的办公建筑,空调系统运行时间多集中在高峰用电时段,对其进行用电负荷调度具有重要意义。国

收稿日期:2023-03-05

基金项目:山东省高等学校科技计划项目(J18KA189)

作者简介:周腾德(1998—),男,山东青岛人。硕士,研究方向为建筑节能。E-mail:ztd13969830575@163.com。

* 通信作者:崔红社(1971—),男,山东青岛人。博士,副教授,主要从事人工环境和建筑节能等方面的研究。E-mail:cuihongshe@sina.com。

内外对空调负荷参与负荷调度的研究,主要聚焦于空调系统的建模^[3-4]和参与需求侧响应的调控方式。直接负荷控制^[5-7]是空调负荷参与电力需求响应最直接有效的方式,引起学者们的广泛关注,其可细分为启停控制^[8-9]、温度调控^[10-12]、轮控^[13-15]等。温度调控、轮控是指通过改变室内设定温度和部分空调启停,降低制冷主机耗电量。这 2 种方式调控期间制冷主机仍运行,可调度负荷容量小且调度时间长,同时对空调自控系统的要求较高,较难在既有办公建筑中实施。启停控制是指在电力高峰时段对制冷设备进行短时间的停机处理。该方式调控期间制冷主机停机,可迅速降低空调系统用电负荷,响应速度快,可调度负荷容量大且调度时间短,同时控制方式简单易实施,更适合应用于既有办公建筑空调系统用电负荷调度。在采用启停控制方式时,应同时兼顾用电负荷调度容量和室内热舒适。

本文以青岛市某办公建筑空调系统为例,搭建 TRNSYS 能耗模拟仿真平台,模拟启停控制下空调系统用电情况,在保证室内舒适度的前提下,对空调系统用电负荷调度潜力进行分析。

1 办公建筑空调用电负荷特性

1.1 空调用电负荷特点

以青岛市某办公楼为例,夏季建筑用电类型及占比明细见表 1。

从表 1 可以看出,空调用电负荷占比最大,其次是照明负荷,消防和公共负荷占比较小。办公建筑空调系统为间歇运行方式,运行时间为 7:00—18:00,集中在电网高峰用电时段,采用启停控制参与负荷调度可行性高。若聚合相似建筑群体,能够有效降低停机时段内区域建筑用电负荷,在一定程度上缓解电网压力,便于电网调峰。

表 1 夏季建筑用电负荷类型及占比

用电类型	用电负荷比例/%
照明	25
空调	60
消防	10
公共	5

1.2 影响空调负荷调度的因素

空调负荷作为温控负荷,具有能量转化和存储特性,因此具备较强的调控潜力。采用启停控制方法参与负荷调度时,影响空调负荷调度的因素主要有以下 3 个方面:

1) 建筑综合热惰性^[16]。该性能使建筑具有蓄冷和释冷能力,当空调从开启转为关闭时,建筑将空调开启时段蓄存的冷量释放到室内。室内温度受到热惰性影响,不会出现温度突增。

2) 空调系统的时滞性^[17]。中央空调系统结构复杂且水管道行程长,因此冷量输送存在滞后性。空调运行过程中,冷冻水系统不断向房间输送冷量,当制冷主机关闭后,冷冻水系统中仍有残存冷量,若将该部分冷量释放到室内,可以有效减轻室内温度的波动。

3) 室内人员舒适温度区间。建筑室内人员感到舒适的温度并非一个固定值,而是一个温度区间,可以利用人体的热舒适温度上限,延长空调系统的停机时长。

2 空调柔性负荷调度模拟分析

2.1 TRNSYS 仿真模型构建

以青岛市某办公楼为例搭建 TRNSYS 模拟仿真平台。该办公楼建筑面积约 5.4 万 m²,空调使用面积 4.5 万 m²。按照建筑实际尺寸,利用 SketchUp 软件内的 OpenStudio 插件,搭建建筑物理模型如图 1 所示。

将生成的 IDF 文件导入 TRNSYS,设置建筑围护结构详细参数,见表 2。

室内设计参数、热扰参数等参照《实用供热空调设计手册》。建筑的照明开关时间、设备使用率、人员在室率情况如图 2 所示。从图 2 中可以看出,11:00—13:00 照明使用时间和人员在室率均有所降低,此时所需冷量也有所降低。

建筑冷源系统设备型号参数见表 3。

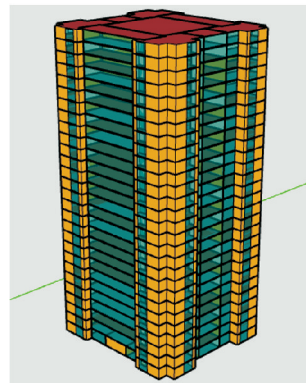


图 1 建筑物理模型

表 2 围护结构参数

围护结构	材料	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	热惰性指标 D
外墙	50 mm 厚挤塑聚苯板与 250 mm 厚加气混凝土	0.46	5.40
屋面	100 mm 厚挤塑板	0.30	1.80
地面	30 mm 厚挤塑板+100 mm 厚 C10 细石混凝土垫层	0.85	1.65
外窗	12 mm 氩气 Low-E 中空玻璃隔热铝合金	1.94	—

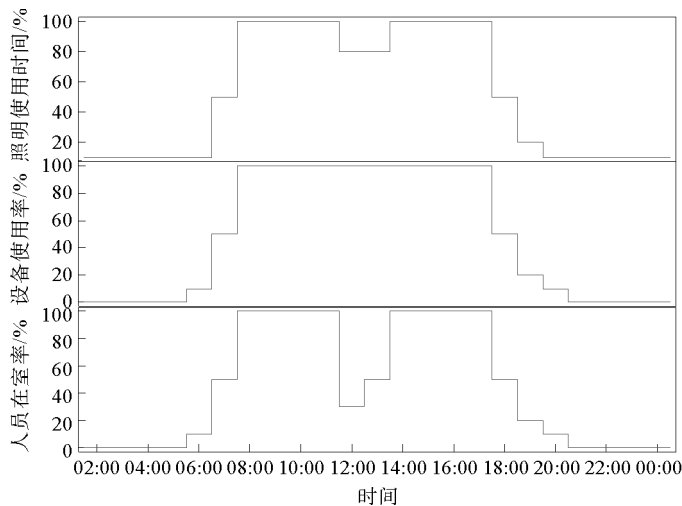


图 2 热扰作息时间

表 3 冷源系统设备参数

设备名称	设备参数	数量/台
冷水机组	制冷量 1758 kW;功率 324 kW;COP = 5.43	2
冷冻水泵	流量 302.09 m ³ /h;扬程 32 m;功率 40 kW	2
冷却水泵	流量 357.77 m ³ /h;扬程 32 m;功率 45 kW	2
冷却水塔	风机数量 2 台;风机功率 15 kW	2











TRNSYS 软件是模块化的动态仿真程序,通过模块间的数据传输实现仿真模拟。根据表 3 中的设备在 TRNSYS 中选择相应的模块,见表 4。

采用青岛市典型气象年参数作为室外气象条件,建立该办公楼空调系统模拟仿真平台,如图 3 所示。空调系统运行逻辑如下:当冷负荷大于零时,启动 1 台机组;当负荷大于 1 台机组额定制冷量的 90% 时,同时启动第 2 台机组及相对应的冷冻水泵、冷却水泵。空调系统运行过程中,机组、冷冻水泵及冷却水泵一一对应且同比例调节。

该建筑制冷季运行时间为 7 月 1 日—

9 月 30 日,7:00—17:00,夜间、双休日均停机。空调系统设备能耗占比情况如图 4 所示。

表 4 TRNSYS 模块类型

模块名称	模块编号	模块名称	模块编号
冷水机组	 Type666	分流	 Type11f
水泵	 Type110	合流	 Type11h
冷却塔	 Type162b	数据输出	 Type65c
风机盘管	 Type673	时间表	 Type14h
管路	 Type31	积分	 Type24

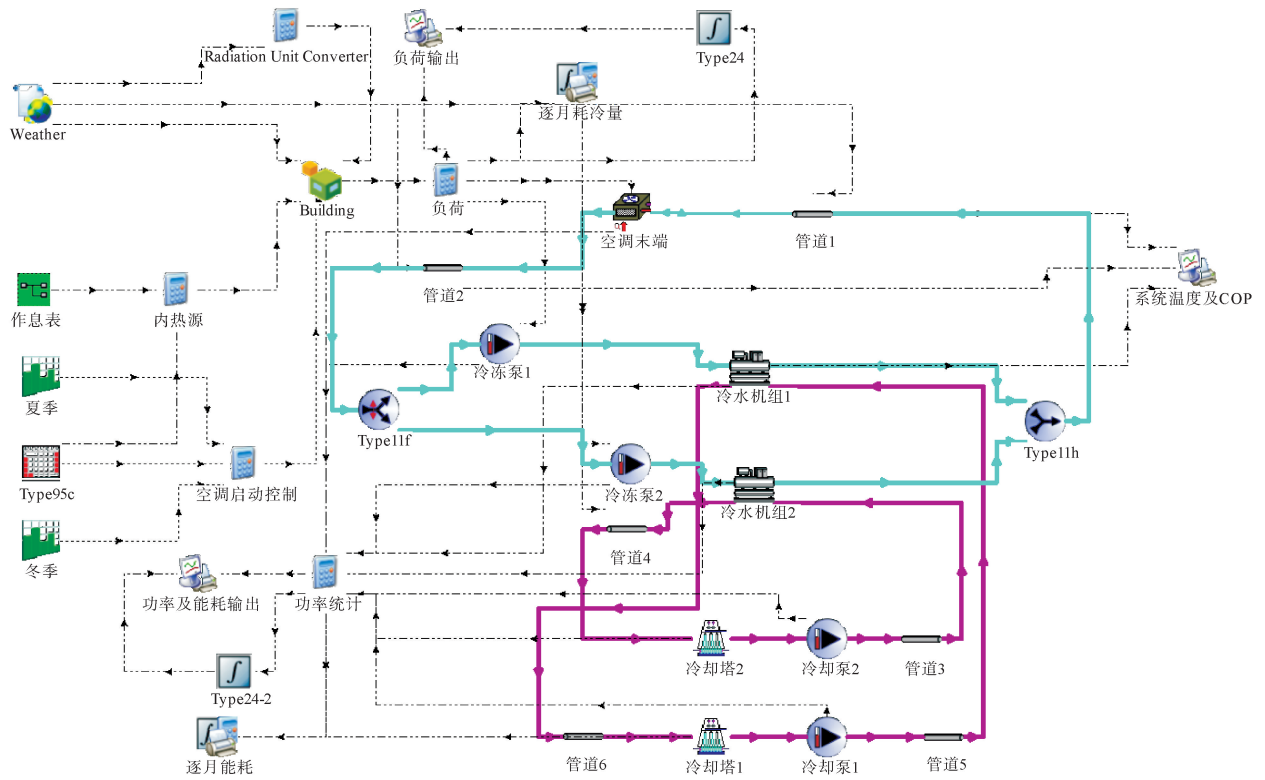


图 3 空调系统模拟仿真平台
 蓝线表示冷冻水循环;紫线表示冷却水循环

由图 4 可知,冷水机组的能耗占比大,占总能耗的 65%;其次是冷却水泵,约占 14%;冷冻水泵占比 11%;冷却塔和末端各占 5%。若对空调系统进行停机控制,冷水机组、冷却水泵、冷却塔停机,冷冻水泵和末端低频率运行,可降低停机时段 80%以上空调用电负荷。青岛市夏季 7、8 月份设备功率较大,多为 2 台冷水机组同时运行,故后续负荷调度研究中时间限定在 7、8 月份。

2.2 启停控制策略研究

启停控制是调度空调负荷方式中最直接的一种方式,是在保证停机时段室温不影响人员热舒适的前提下,对制冷设备进行短暂时间的停机处理。启停控制时段内,制冷主机、冷却水泵、冷却塔均停机,为将系统残存冷量释放到室内,冷冻水泵及末端设备低频率运行。

为避免出现设备频繁启停,应设置合理的热舒适温度范围,结合 ASHRAE 标准手册和 ISO 7730 标准,确定办公环境下,人员服装热阻和新陈代谢率低于 1.2 met(1 met=58.15 W/m²)且夏季风速不超过 0.24 m/s 时,人员感觉热舒适的室内温度区间为[24,27](温度上下浮动 0.5℃)。选取建筑夏季典型日空调系统用电功率及青岛市分时电价进行分析,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,当日机组刚开始启动时总耗电功率突增。这是由于空调间歇运行,夜间冷冻水温度升高,在机组刚开始启动时空调需要快速降低到设定温度,导致耗电功率出现突增。随后根据室内冷量需求,用电功率出现双峰曲线的变化趋势。机组启动后,室内温度降至设定温度,7:00—9:00 时室外温度较低,冷量需求小,总耗电功率降低;9:00—11:00 时室外温度逐渐升高,冷量需求增加,总耗电功率逐步提升,在 11:00 时达到高峰。11:00 后,受到人员作息的影响,功率开始降低。在 15:00 时左右,室外环境达到日最

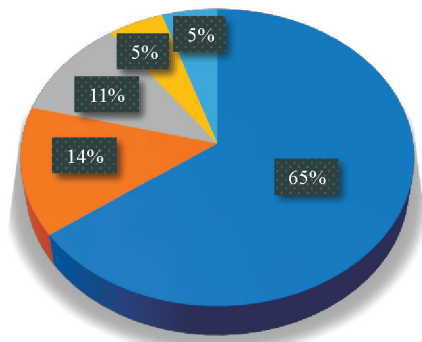


图 4 空调系统运行能耗占比
 ■ 冷水机组; ■ 冷却水泵; ■ 冷冻水泵; ■ 冷却塔; ■ 末端

高温度,受到热惰性及空调时滞因素影响,第二个耗电功率高峰滞后1 h,在16:00时达到高峰,之后随着室外温度降低和冷量需求减少,功率逐渐降低。

为降低室温波动对热舒适的影响,应避开7:00—9:00机组刚开启时段和14:00—17:00室外高温时段,选定在9:00—14:00时段之间停机和17:00时提前停机1 h,观察该时间段内室温变化,计算满足人体热舒适要求下,空调柔性负荷的调度容量。

2.3 空调柔性负荷调度潜力评估

根据选定的时间段,采取停机1 h的控制策略,设置空调系统的停机时间,共划分11种工况,见表5。

典型日各启停工况室温变化如图6所示。从图6中可以看出,启停时间段的室内波动较大,在停机时刻,室温曲线坡度陡峭,上升幅度较大,达到一定温度后,曲线坡度逐渐平缓。当机组再次启动后,室温曲线坡度再次变得陡峭,直至降低至24℃。这是因为机组刚停机时,室内外温差大,围护结构传热量大,室温上升较快;当达到一定温度时,围护结构传热量减小,在建筑热惰性和冷冻水残存冷量的作用下,室温缓慢上升;机组重新开启后,室温迅速下降到室内设定温度。

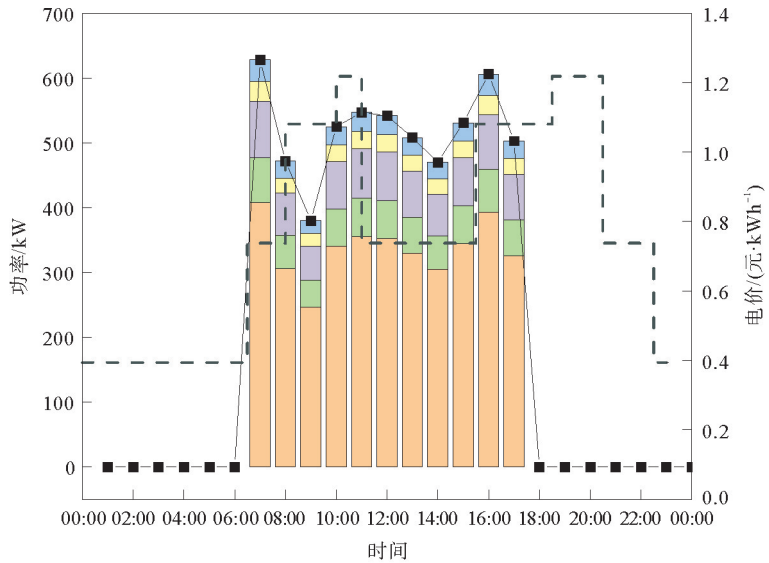


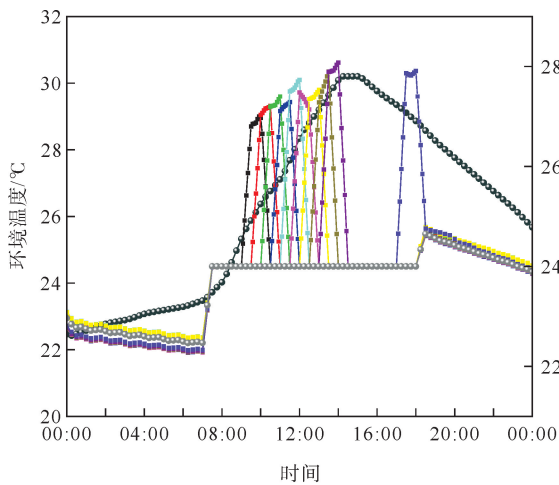
图5 空调系统用电功率及青岛市分时电价情况

■ 总耗电; ■ 机组耗电; ■ 冷冻水泵耗电; ■ 冷却水泵耗电; ■ 冷却塔耗电; ■ 末端耗电; - - 电价

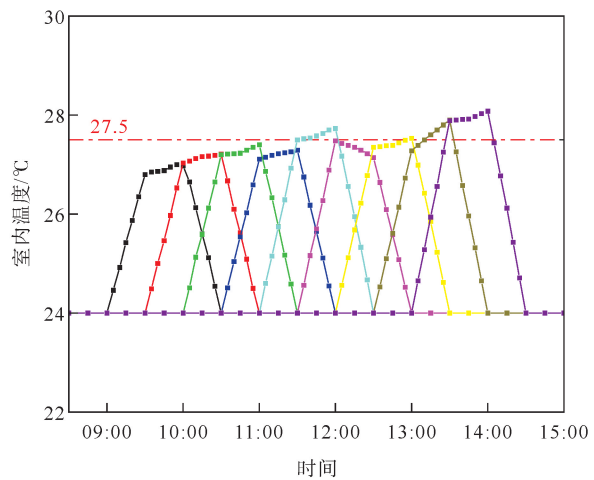
表5 空调系统启停工况

编号	停机时间段	编号	停机时间段
工况1	无停机	工况7	11:30—12:30
工况2	9:00—10:00	工况8	12:00—13:00
工况3	9:30—10:30	工况9	12:30—13:30
工况4	10:00—11:00	工况10	13:00—14:00
工况5	10:30—11:30	工况11	17:00—18:00
工况6	11:00—12:00		

注:工况1为不采取停机控制的基准工况。



(a) 各工况室温变化



(b) 工况2—10室温变化

图6 各启停工况室温变化

● 环境温度; ● 工况1; ● 工况2; ● 工况3; ● 工况4; ● 工况5; ● 工况6; ● 工况7; ● 工况8; ● 工况9; ● 工况10; ● 工况11

工况 2—5、7 在停机时段内,室温均低于舒适温度上限 $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,能够实现全时段负荷调度。工况 6、8—11 在停机时段内,有部分时间室温超出热舒适温度上限,不建议在以上时段进行启停控制。

各工况空调电负荷变化如图 7 所示。从图 7 中可以看出,各工况刚停机时,冷水机组、冷却水泵、冷却塔均停机,冷冻水泵及末端设备低频率运行,空调用电负荷迅速降低,一直维持到停机时段结束。机组开启后,用电负荷迅速增加,且超过同时间基准工况(无停机工况)用电负荷,这是因为停机时段内室温升高,重新开启机组后冷量需求大,用电负荷较基准工况大。

汇总各工况用电负荷调度容量,见表 6。调度容量的定义:与基准工况相比,各启停工况在停机时段内,空调系统减少的总用电量。由表 6 可知,采用 1 h 停机方式可调度空调负荷 $403.21\sim 557.81\text{ kWh}$ 。其中,工况 5 停机时段内能够调度的空调总用电量最多,因为在前文分析中,10:30—11:30 时段为该建筑空调系统用电高峰时段。工况 2 停机时段内能够调度的总用电量最少,因为 9:00—10:00 时段内室外温度低,室内冷量需求小。综合停机时段内室温变化情况,及调度容量情况可知,工况 5 启停控制效果最好,调度容量为 557.81 kWh 。若聚合区域内 50 栋类似规模建筑,则可调度容量为 27.89 MWh ,区域负荷调度效果十分可观。

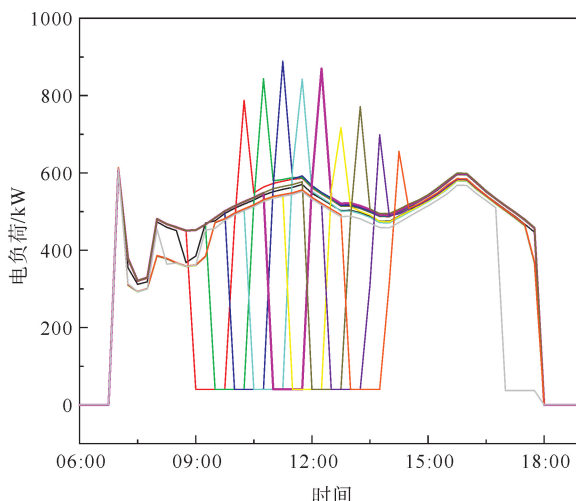


图 7 各启停工况空调用电负荷变化

— 工况1; — 工况2; — 工况3; — 工况4; — 工况5; — 工况6;
— 工况7; — 工况8; — 工况9; — 工况10; — 工况11

3 结论

1) 综合停机时段内室温变化及调度容量情况可知,10:30—11:30 时停机的负荷调度效果最好,调度容量为 557.81 kWh 。若聚合区域内 50 栋类似规模建筑,则可调度容量为 27.89 MWh ,区域负荷调度效果十分可观。

2) 在空调系统采取停机控制时,受到建筑热惰性和空调系统残存冷量的影响,室内温度没有直线上升,而是有一个明显变化过程;逐时用电负荷在停机时快速下降,停机时间段内保持最低耗电,当重新开启空调时,建筑冷量需求增加,用电负荷超过停机前状态。

本文采用的是 ASHRAE 标准手册和 ISO 7730 标准,认为办公楼空调设计温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,波动上限为 $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在之后的研究中,可对上述设定参数进行调研,采用实际工程使用较多的空调设计参数和波动范围进行模拟,实用价值将进一步提升。

参考文献(References):

- [1] 苏南. 电力系统如何应对调峰压力? [N]. 中国能源报, 2021-09-06(022).
SU Nan. How to cope with peak pressure in power system? [N]. China Energy News, 2021-09-06(022).
- [2] 辛保安. 加快建设新型电力系统 助力实现“双碳”目标[J]. 国家电网, 2021(8):10-12.
XIN Baoan. Accelerate the construction of new power systems, Helping to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. State Grid, 2021(8):10-12.
- [3] SHI Qingxin, LI Fangxing, LIU Guangxi, et al. Thermostatic load control for system frequency regulation considering daily demand

表 6 空调系统各启停工况用电负荷

工况	调度容量/kWh
2	403.21
3	424.64
4	458.36
5	557.81
6	527.79
7	506.71
8	483.55
9	469.63
10	453.43
11	484.34

- profile and progressive recovery[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6259-6270.
- [4] 程定一. 基于空调负荷建模的源-荷协同备用优化配置研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
CHENG Dingyi. Studies on co-optimization of reserve allocation for supply/demand sides based on modeling of air conditioning loads[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [5] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [6] 邓宇鑫, 王磊, 李扬, 等. 温控负荷直接负荷控制策略与优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(6): 18-25.
DENG Yuxin, WANG Lei, LI Yang, et al. Direct load control strategies and optimization scheduling of thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(6): 18-25.
- [7] GONG Xun, CASTILLO-GUERRA Eduardo, CARDENAS-BARRERA Julian, et al. Robust hierarchical control mechanism for aggregated thermostatically controlled loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 453-467.
- [8] 王婷, 刘潇, 武媚, 等. 大规模空调负荷聚合建模及跟踪控制方案研究[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(6): 51-56.
WANG Ting, LIU Xiao, WU Mei, et al. Research on load aggregation modeling and tracking control scheme for large scale air conditioning[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(6): 51-56.
- [9] 刘开欣. 基于集群负荷需求响应的主动配电网优化控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
LIU Kaixin. Research on optimal control strategy of active distribution network with aggregated loads demand response[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [10] 胡建强, 梅海峰, 方堃, 等. 电力需求侧温控负荷集群的聚合辅助服务[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2020, 19(1): 9-16.
HU Jianqiang, MEI Haifeng, FANG Kun, et al. Ancillary services provided by aggregated thermostatically controlled loads in power demand side[J]. Journal of Nantong University(Natural Science Edition), 2020, 19(1): 9-16.
- [11] 唐升卫, 周伊琳, 刘菲, 等. 基于用户舒适度约束的中央空调冷负荷需求响应策略研究[J]. 电气应用, 2015, 34(18): 99-104.
TANG Shengwei, ZHOU Yilin, LIU Fei, et al. Research on the demand response strategy of central air conditioning cold load based on user comfort constraint[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(18): 99-104.
- [12] YOON Ji Hoon, BLADICK Ross, NOVOSELAC Atila. Demand response for residential buildings based on dynamic price of electricity[J]. Energy & Buildings, 2014, 80: 531-541.
- [13] 徐青山, 吴泉, 杨斌. 考虑状态差异性聚类的空调负荷直接负荷控制动态优化方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 33-42.
XU Qingshan, WU Xiao, YANG Bin. Dynamic optimization method for direct load control of air conditioning loads considering state variability clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 33-42.
- [14] 黄海涛, 王岱峰, 朱丰泽, 等. 考虑热舒适度的变频空调响应调控策略[J]. 电力建设, 2018, 39(9): 9-17.
HUANG Haitao, WANG Daifeng, ZHU Fengze, et al. Study on the control strategy of frequency conversion air conditioning considering thermal comfort[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(9): 9-17.
- [15] 方健, 梁国开, 栾乐, 等. 考虑 DLC 空调轮控的配电网无功优化协调方法[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 95-102.
FANG Jian, LIANG Guokai, LUAN Le, et al. Optimization and coordination method for reactive power of distribution network considering DLC air-conditioning load cycle control[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 95-102.
- [16] 乐慧, 李好玥, 江亿. 用空气源热泵实现农村采暖的“煤改电”同时为电力削峰填谷[J]. 中国能源, 2016, 38(11): 9-15.
LE Hui, LI Haoyue, JIANG Yi. Using air source heat pumps to realize rural heating “coal to electricity” while relieving pressure on the power grid[J]. Energy of China, 2016, 38(11): 9-15.
- [17] 赵志达. 基于时滞辨识的中央空调系统建模及优化控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
ZHAO Zhida. Research on modeling and optimal control for central air-conditioning system based on time delay identification[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

(责任编辑 姜锡方; 英文校审 程文华)