

哈尔滨地区办公建筑夜间机械通风能耗及室内热环境分析*

哈尔滨工业大学 王昭俊[☆] 易伶俐 高甫生

摘要 采用 EnergyPlus 软件对哈尔滨地区典型办公建筑在常规空调系统运行模式与夜间机械通风系统运行模式下的室内热环境和能耗进行了模拟。结果表明,在哈尔滨地区,白天室外最高温度高于 24 ℃ 时都适合进行夜间机械通风,一共约 60 d,占空调运行期的 72.3%;整个夏季空调运行期内,采用夜间机械通风系统该办公建筑节能指标为 1.15 kWh/(m²·a),节省运行费用指标为 1.02 元/(m²·a);在人工制冷阶段,夜间机械通风模式下的室内热环境明显优于常规空调模式,且房间体积与表面积比越小,越有利于提高室内环境的热舒适性;当室内空气设计温度较高时,室内温度下降大,延迟人工制冷开启时间长,但是节能量未必比室内设计温度较低时高。

关键词 夜间机械通风 办公建筑 能耗 室内热环境

Energy consumption and indoor thermal environment of night mechanical ventilation in an office building in Harbin

By Wang Zhaojun[★], Yi Lingli and Gao Fusheng

Abstract Simulates indoor thermal environment and energy consumption in a typical office building with night mechanical ventilation and conventional air conditioning system in Harbin with EnergyPlus software. The results show that the periods when the maximum outdoor temperatures are higher than 24 ℃ are suitable for night ventilation, the corresponding length is about 60 days, taking 72.3 percent of the summer cooling season. When the air conditioning system is used in Harbin, this night ventilation system would offer a 1.15 kilowatt-hour per square metre per annum reduction in energy consumption for cooling and a 1.02 yuan per square metre per annum reduction in electricity cost. It can improve the indoor thermal comfort significantly in the air conditioning system operating stage during the daytime with night mechanical ventilation. The smaller the ratio of the room volume to its surface area is, the more effective the improvement of thermal comfort is. The higher the indoor design temperature is, the more quickly the indoor temperature drops. Therefore, the start time of the air conditioning system can be delayed. However, the energy saved may not be more than that with the lower design temperature.

Keywords night mechanical ventilation, office building, energy consumption, indoor thermal environment

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

美国、英国、法国、德国等发达国家对夜间通风被动式供冷技术研究较早,研究结果表明:夜间通风与相变墙体相结合适用于美国加州昼夜温差大的气候区^[1];采用夜间通风和重型墙体可使英国温

和气候区白天室内气温最多下降 4 ℃^[2],但采用夜间机械通风时,空调系统能耗会增加,可通过提高

* 北京市“供热、供燃气、通风及空调工程”重点实验室开放课题资助项目(编号:KF200504),黑龙江省博士后科研启动金项目(编号:LBII-Q07039)

①☆ 王昭俊,女,1965 年 1 月生,博士,副教授
150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院 2644 信箱
(0) 13604803495 (0451) 86282123
E-mail: wzjw02@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-07-13
一次修回:2008-03-26
二次修回:2008-12-05

建筑蓄热性、减少太阳辐射得热及室内冷负荷降低供冷系统能耗^[3];在室外平均温度变化 8.4℃的不利气候条件下,采用夜间通风的法国办公建筑室内温度可以降低 1.5~2℃,夜间通风与机械式供冷系统耦合运行可能是有效冷却建筑物的低能耗方式^[4];即使在德国室外温度较高的情况下,夜间通风的建筑室内温度仍然满足舒适性要求^[5]。由于夜间机械通风时,风机的运转需要耗能,与常规空调系统相比,夜间通风系统节能与否就取决于风机多消耗的电能和人工制冷少消耗的电能之间的相对关系。另外,由于夜间通风降低了围护结构内表面平均辐射温度 t_{mri} ,也使室内热环境得到一定改善。文献[6]采用 EnergyPlus 软件模拟分析了英国温和气候区办公建筑采用不同低能耗冷却方式的可行性,并通过实验验证了 EnergyPlus 的准确性。笔者采用 EnergyPlus 对哈尔滨某办公建筑应用夜间机械通风系统与常规空调系统的室内热环境及能耗进行对比分析。

1 建筑模型及参数确定

以哈尔滨一典型办公建筑为模型^[7],该建筑高 21.6 m,层高 3.6 m,共 6 层,总建筑面积 8 560 m²,南北向,四周无遮挡。考虑到 EnergyPlus 中对建筑几何参数输入的要求,对该建筑进行了部分简化处理。图 1 为该建筑简化后的 3 层平面图,其中编号的第一个数字为楼层代号,第二个数字为房间代号,各层相同位置的房间代号相同。1~11 号房间 1~6 层相同,3-12 为报告厅,层高 7.2 m,1-12 为玻璃幕墙中庭,层高 7.2 m。

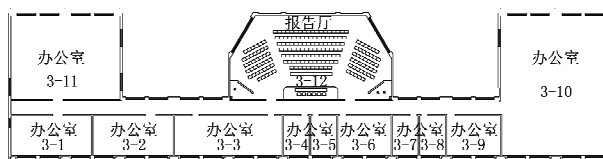


图 1 某办公建筑 3 层平面图

室内计算参数根据《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003)取值,夏季室内空气设计温度为 26℃,相对湿度为 60%。根据《办公建筑设计规范》(JGJ 67—2006),办公室人员密度取 0.14 人/m²,新陈代谢水平见文献[7],人员负荷按 26℃情况取值,显热为 61 W/人,潜热为 73 W/人,散湿量为 109 g/人;照明负荷取 10 W/m²;办公设备(计算机)散热量为 200 W/台;新风量按《办公建筑设计规范》(JGJ 67—89)及 ASHRAE 标准取 35 m³/(人·h)。室内负荷考虑了室内照明、设备逐时变化,各房间的人员显热、照明和设备功率逐时冷负荷系数均根据《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2005)确定。该办公楼内工作人员常规上班时间为周一到周五 8:00~17:00,空调运行时间为 7:00~17:00(预冷 1 h),周末停止运行。

2 模拟对比方案

根据文献[7]的分析结果,在常规空调运行风量范围内,夜间通风时间越长,风量越大,通风效果越好。下面以开启时刻 21:00、换气次数 10 h⁻¹为例,模拟分析常规空调系统与夜间机械通风系统的运行能耗及室内热环境热舒适性。常规空调系统与夜间机械通风系统运行模拟方案见表 1。

表 1 常规空调系统与夜间机械通风系统运行模拟方案

系统	模拟日期	运行控制模式	换气次数/h ⁻¹
常规空调系统	6月10日~8月31日 且室外最高温度高于24℃	1) 全新风运行阶段:当室外温度较低时,采用全新风运行排除室内余热 2) 人工制冷阶段:当全新风运行不能满足室内温度要求时,开启人工制冷	10
夜间机械通风系统	6月10日~8月31日 且室外最高温度高于24℃	1) 夜间机械通风阶段:21:00~7:00 2) 全新风运行阶段:白天利用夜间通风蓄存的冷量和白天较低温度的室外空气排除室内余热 3) 人工制冷阶段:当全新风运行不能满足室内温度要求时,开启人工制冷	10

3 模拟结果分析

3.1 代表日运行结果分析

3.1.1 延迟开启人工制冷时间

根据常规空调系统运行方案和夜间机械通风系统运行方案的模拟结果,对代表日 6 月 10 日、7 月 13 日、8 月 11 日延迟人工制冷开启时间进行分析,结果见表 2。可见,上述 3 个代表日夜间机械通风均可延迟人工制冷开启时间。因 6 月 10 日夜

间室外温度较低且白天温度较高,延迟人工制冷开启时间最长,为 2 h;7 月 13 日和 8 月 11 日,两天都延迟人工制冷开启时间 1 h。7 月 13 日白天室外温度较高,夜间机械通风延迟了预冷时间,人工制冷 8:00 开启。8 月 11 日白天室外温度较低,人工制冷 10:00 开启。

3.1.2 室内负荷对比

文献[8]指出,利用建筑围护结构等的蓄冷能

表 2 夜间机械通风系统运行时人工制冷延迟时间

		6 月 10 日	7 月 13 日	8 月 11 日
最高温度/℃		27.3	29.0	26.8
最低温度/℃		10.3	21.6	18.9
常规空调系统	全新风运行阶段	7:00~8:00		7:00~9:00
	人工制冷运行阶段	8:00~17:00	7:00~17:00	9:00~17:00
夜间机械通风系统	夜间机械通风阶段	21:00~7:00	21:00~7:00	21:00~7:00
	全新风运行阶段	7:00~10:00	7:00~8:00	7:00~10:00
	人工制冷运行阶段	10:00~17:00	08:00~17:00	10:00~17:00
延迟开启时间/h		2	1	1

力,在夜间无人逗留时段采用机械通风预冷,日间冷负荷能减少 18%,且使冷负荷偏移,降低制冷所消耗的能量。文献[9]利用建筑能耗分析软件 DOE-2 研究了在无人办公时采用预冷和部分冷却手段对大型办公楼能耗的影响,结果表明,

采用夜间机械通风预冷手段能减小早上的用电峰值,可以使冷负荷偏移和减小。对上述 3 个代表日该办公建筑采用常规空调系统和夜间机械通风系统时白天的总负荷进行对比,结果如图 2 所示。

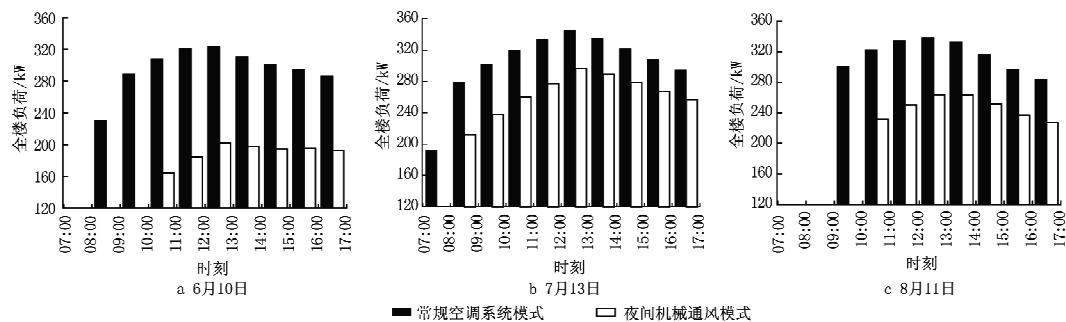


图 2 两种方案总负荷比较

由图 2 可以看出,采用夜间机械通风不仅能延迟人工制冷开启时间,并且在人工制冷运行期间可使冷负荷偏移和减小。夜间温度越低,冷负荷减小得越多,6 月 10 日室内负荷减小得最多,其次为 7 月 13 日和 8 月 11 日。6 月 10 日夜间机械通风模式室内最大冷负荷为常规空调系统模式的 65.4%,减小了 34.6%;相应地,7 月 13 日为 83.2%,减小了 16.8%;8 月 11 日为 79.2%,减小了 20.8%。

冷负荷的偏移和减小能减小冷负荷峰值,可减小空调系统的设备容量,降低设备初投资。冷负荷分布被“削平”,使得制冷设备能在部分负荷下工作。冷负荷从白天向晚上偏移可使夜间通风发挥

更大的作用,包括建筑物自然冷却和自然通风都能取得更好的效果,能将建筑物内围护结构中储存的热量移走。

3.1.3 运行能耗对比

根据表 2 和图 2 的分析可见,夜间通风不仅能延迟人工制冷开启时间,而且能大大降低办公建筑冷负荷,但是采用夜间机械通风时,风机的运转要消耗电能,与空调系统相比,夜间机械通风系统节能与否就取决于风机多消耗的电能和人工制冷少消耗的电能之间的相对关系。以上述 3 个代表日为例,分析夜间机械通风系统和常规空调系统的运行能耗,模拟结果见图 3。

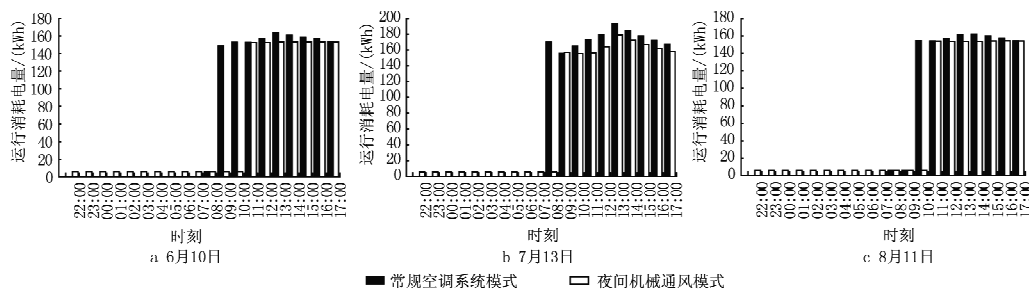


图 3 两种方案运行能耗比较

由图 2 和图 3 可见,虽然夜间机械通风模式下白天室内负荷减小幅度较大,6 月 10 日最大负荷减小了 34.6%,7 月 13 日减小了 16.8%,8 月 11 日减小了 20.8%,但是两种运行模式运行能耗最大值相差却不大,6 月 10 日夜间机械通风模式最大运行能耗比常规空调系统运行模式减小了 6%,7 月 13 日减小了 7%,8 月 11 日减小了 5%。由于夜间风机运行耗能,如果采用夜间机械通风不能延迟人工制冷开启时间,则夜间机械通风运行模式减少运行能耗相对较少。

表 3 显示了夜间机械通风运行模式的节能性。由图 3 及表 3 可见:1) 延迟人工制冷开启时间越长,节能量越大,6 月 10 日延迟人工制冷开启时间 2 h,节省电量最大,为 268 kWh;2) 相同延迟开启时间,白天室外温度越高节能量越大,7 月 13 日和 8 月 11 日延迟人工制冷时间均为 1 h,但是 7 月 13 日室外温度较高,节省电量比 8 月 11 日多 84 kWh。

表 3 夜间机械通风系统运行节能性 kWh

		6月10日	7月13日	8月11日
常规空调系统	全新风运行风机能耗	6		12
	人工制冷阶段能耗	1 404	1 737	1 260
	运行总能耗	1 410	1 737	1 272
夜间机械通风系统	夜间通风阶段风机能耗	60	60	60
	全新风运行风机能耗	12	6	18
	人工制冷阶段能耗	1 070	1 471	1 078
	运行总能耗	1 142	1 537	1 156
夜间机械通风系统总节能量		268	200	116

3.2 夏季空调运行期模拟结果分析

哈尔滨地区夏季 8:00 室外气温在 14~25 °C 之间波动,最高气温不超过 25 °C,室外温度较低^[7]。正因为哈尔滨地区上午部分时间室外温度较低,白天较低温度的室外空气与夜间通风蓄存冷量共同作用消除余热有可能满足室内温度热舒适性要求。所以对哈尔滨地区夏季空调运行日室外最高温度高于 24 °C 日期的模拟结果进行单独分析,结果发现夏季空调运行日室外最高温度高于 24 °C 的日期均适合进行夜间机械通风。

哈尔滨地区适合采用夜间机械通风的时间一共约 60 d,夏季各月份总延迟开启人工制冷的时间及节电量如图 4 和图 5 所示。从图 4、5 可见,7 月应用夜间机械通风延迟人工制冷开启时间最长,为 25 h,其次是 8 月和 6 月,分别为 23 h 和 17 h,延迟人工制冷开启时间共 65 h;对于节电量,7 月最多,为 3 785 kWh,其次是 8 月和 6 月,分别为 3 188 kWh 和 2 856 kWh,该办公楼整个夏季空调运行

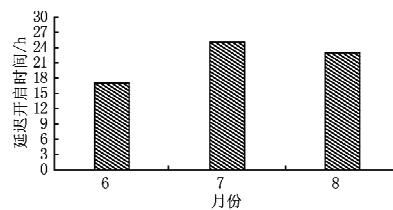


图 4 延迟开启人工制冷时间

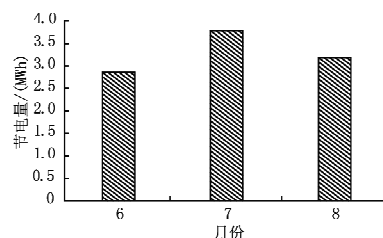


图 5 节电量

期节电量为 9 829 kWh。该办公建筑总面积为 8 560 m²,单位面积节电量为 1.15 kWh/(m²·a)。文献[10]给出哈尔滨地区超市利用夜间通风节能量指标为 2.99 kWh/(m²·a),由于办公建筑室内物品少,所以节能指标相对较小。

4 夜间机械通风经济性分析

对于非工业用电,东北地区统销电价约为 0.54 元/(kWh),而峰谷统销电价分别约为 0.73 元/(kWh)和 0.3 元/(kWh),用电高峰时段为 7:30~11:30 和 17:00~21:00,低谷时段为 22:00~5:00。根据图 4 和图 5 统计,哈尔滨地区夏季空调运行日该办公建筑夜间机械通风节省的运行费用为 8 700 元/a,节省的运行费用指标为 1.02 元/(m²·a)。

5 夜间机械通风对室内热环境的影响

根据热舒适标准 ASHRAE Standard 55—2004^[11]推荐,夏季服装热阻为 0.6 clo,根据《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003)规定,夏季室内风速为 0.3 m/s。以预计平均热感觉指数 PMV 和预测不满意百分数 PPD^[11]为指标,比较夜间机械通风运行模式与常规空调系统运行模式的室内热环境。选取房间 3-1,3-5,3-10,3-11 分析夜间机械通风对室内热环境的影响。表 4 给出了各房间相关参数,4 个房间里 3-5 体积与表面积比最小,其次是 3-1,3-11 和 3-10。以 6 月 10 日、7 月 13 日、8 月 11 日为代表对比房间 3-11 两种运行模式下的 PMV 值,结果如图 6 所示。

表 4 房间相关参数

房间	体积/ m^3	表面积/ m^2	体积与表面积比/ m
3-1	259.2	276.0	0.94
3-5	75.6	117.6	0.64
3-10	1 231.2	928.0	1.33
3-11	738.0	617.4	1.20

由图 6 可见,上述 3 个代表日夜间机械通风模式下室内热舒适度完全满足热舒适标准推荐的 $PPD < 20\%$, 即 $-0.75 < PMV < 0.75$ 的要求。在夜间机械通风模式下全新风运行阶段,6 月 10 日和 8 月 11 日夜间室外温度较低,由于夜间连续通

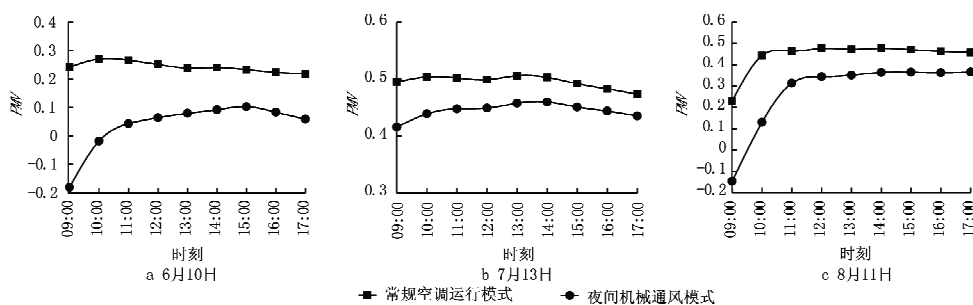


图 6 房间 3-11 两种运行模式下 PMV 值比较

风,白天室内围护结构内表面平均辐射温度和室内空气温度较低,室内稍稍偏凉。在人工制冷阶段,夜间机械通风模式下室内热环境明显比常规空调运行模式好。总体上看,夜间机械通风有效改善了室内热环境。

下面分析夜间机械通风模式下不同房间室内热环境。图 7 给出了不同房间夜间机械通风模式下的

PMV 值。从图中可见,夜间机械通风模式下各房间热舒适度都满足热舒适标准的要求。比较上述 3 个代表日各房间 PMV 值可见,在全新风运行和人工制冷运行阶段,房间 3-5 的 PMV 值最小,其次是 3-1,3-11 和 3-10。房间体积与表面积比越小,房间 PMV 值越小,夜间机械通风对进入人工制冷阶段后房间热舒适度的改善效果越明显。

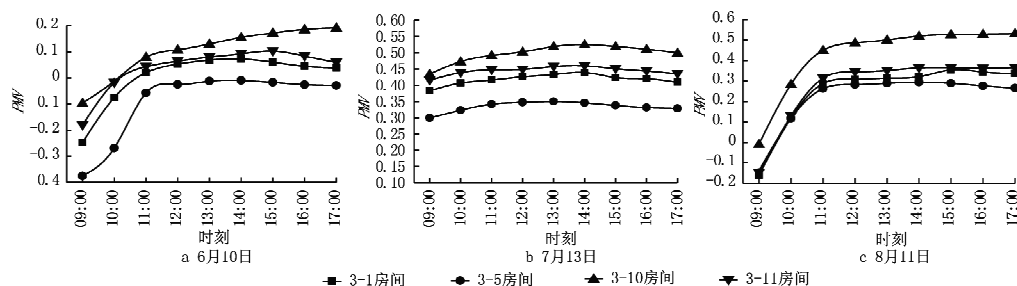


图 7 不同房间夜间机械通风模式下的 PMV 值

6 不同室内空气设计温度对夜间机械通风的影响

对于民用建筑,《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003)规定,夏季室内空气设计温度采用 $24 \sim 28^\circ\text{C}$;《办公建筑设计规范》(JGJ 67—89)规定,一般办公室夏季室内空气设计温度采用 $26 \sim 28^\circ\text{C}$,高级办公室 $24 \sim 27^\circ\text{C}$ 。前文对办公建筑夜间机械通风的研究基于夏季室内设计温度为 26°C ,为办公建筑最常用的设计温度。下面简单分析室内空气设计温度为 28°C 时的夜间机械通风节能状况。

图 8 为常规空调运行模式与夜间机械通风模式围护结构内表面平均辐射温度和室内空气温度

对比图。从图中可见,当室内设计温度为 28°C 时,夜间机械通风系统与常规空调系统相比,在 8:00,围护结构内表面平均辐射温度 t_{mrt} 下降 $2.0 \sim 2.5^\circ\text{C}$,室内空气温度 t_{in} 下降 $1.0 \sim 2.0^\circ\text{C}$ 。

表 5 为 6 月 10 日、7 月 13 日、8 月 11 日夜间机械通风人工制冷延迟时间表。上述 3 个代表日夜间机械通风延迟人工制冷开启时间分别为 3 h, 1 h, 2 h。表 6 为夜间机械通风节能表。节电量与延迟人工制冷并非简单的线性关系,节电量与白天运行负荷也有关系,上述 3 个代表日节电量分别为 199, 137 和 67 kWh。

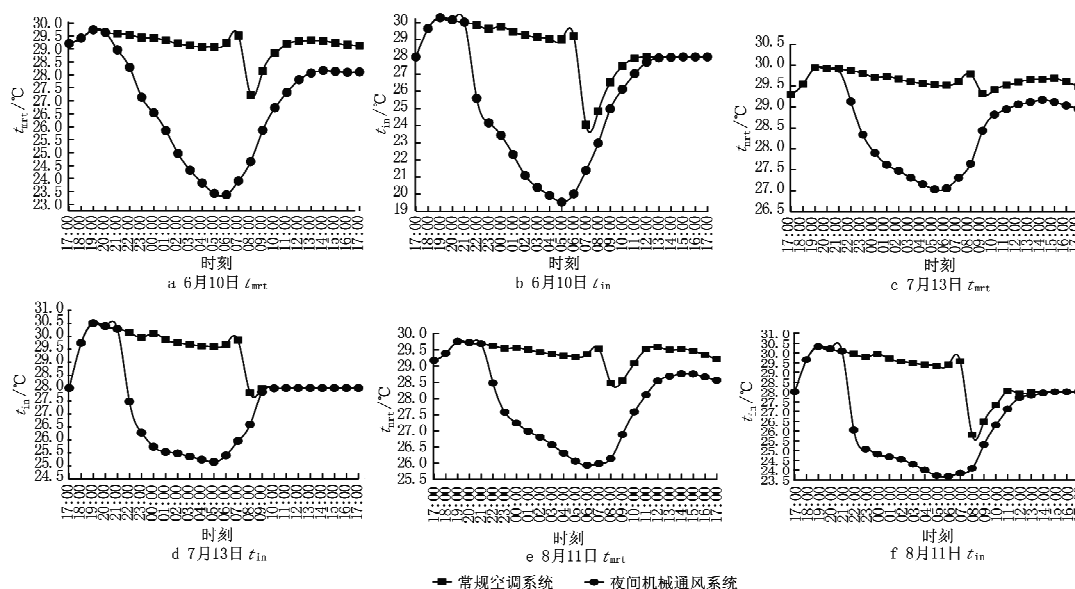


图 8 两种方案温度比较

表 5 夜间机械通风系统运行时人工制冷延迟时间

		6月10日	7月13日	8月11日
常规空调系统	全新风运行阶段	7:00~10:00	7:00~12:00	7:00~11:00
	人工制冷运行阶段	10:00~17:00	12:00~17:00	11:00~17:00
夜间机械通风系统	夜间通风阶段	21:00~7:00	21:00~7:00	21:00~7:00
	全新风运行阶段	7:00~13:00	7:00~13:00	7:00~13:00
	人工制冷运行阶段	13:00~17:00	13:00~17:00	13:00~17:00
延迟开启时间/h		3	1	2

表 6 夜间机械通风系统运行节能性 kWh

		6月10日	7月13日	8月11日
常规空调系统	全新风运行风机能耗	18	6	24
	人工制冷阶段能耗	950	1 315	823
	运行总能耗	968	1 321	847
夜间机械通风系统	夜间通风阶段风机能耗	54	60	60
	全新风运行风机能耗	36	12	36
	人工制冷阶段能耗	679	1 112	684
	运行总能耗	769	1 184	780
夜间机械通风系统总节能量		199	137	67

由上述分析可见,当室内空气设计温度从 26℃ 提高到 28℃ 时,虽然延迟了人工制冷开启时间,但由于室内空气设计温度较高时,设计日冷负荷减小,空调系统的设备容量变小,节能量未必比室内温度设计温度较低时大。

7 结论

7.1 对于哈尔滨地区,当室外最高温度高于 24℃ 时都适合进行夜间机械通风,适合进行夜间机械通风的时间约 60 d,占空调运行期的 72.3%。

7.2 夜间机械通风模式下,在 3 个代表日可延迟人工制冷时间 1~2 h,可使白天室内冷负荷减小 16.8%~34.6%,夜间温度越低,冷负荷减小得越

多。

7.3 夜间机械通风模式下,该办公建筑节电量指标为 1.15 kWh/(m²·a),节省的运行费用指标为 1.02 元/(m²·a)。

7.4 夜间机械通风模式下,室内热环境满足热舒适标准的要求,在人工制冷阶段,夜间机械通风模式下室内热环境明显优于常规空调模式,且房间体积与表面积比越小,人工制冷阶段室内热环境改善越明显。

7.5 当室内空气设计温度较高时,室内温度下降幅度大,延迟人工制冷开启时间长,但节能量未必比室内温度设计温度较低时大。

参考文献:

- [1] Helmut E Feustel, Corina Stetiu. Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBL-38320, UC-1600, University of California, Berkeley, USA, 1997
- [2] Kolokotroni M, Webb B C, Hayes S D. Summer cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates [J]. Energy and Buildings, 1998, 27(3): 231-237
- [3] Kolokotroni M, Aronis A. Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation [J]. Applied Energy, 1999, 63 (4): 241-253
- [4] Blondeau P, Sperandio M, Allard F. Night ventilation for building cooling in summer[J]. Solar Energy, 1997, 61 (5): 327-335

(下转第 36 页)

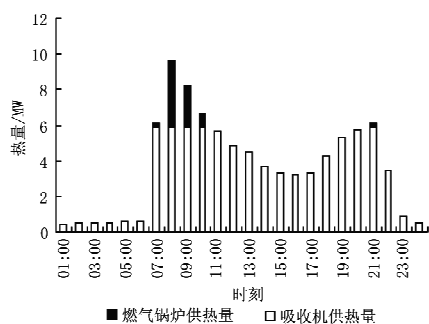


图 11 冬季热负荷平衡图

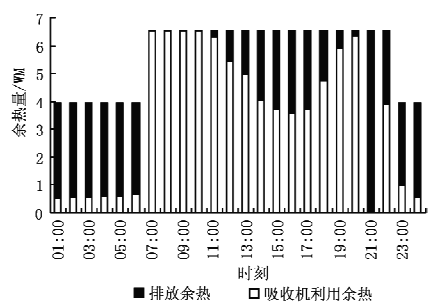


图 12 冬季余热平衡图

4.4 优化结果分析

从优化后的各设备配置情况及冷热电平衡图可看出：

1) 当以经济效益为目标优化时，允许燃气内燃机部分负荷运行，承担该建筑物低谷时的电负荷和冷热负荷；当电负荷和冷热负荷处在高峰时燃气内燃机满负荷运行，并且用电制冷和燃气锅炉作为补充，而不是令燃气内燃机一直满负荷运行。这是由于燃气当量电力价格按照天然气的热值以及内燃机的发电效率进行折算后明显低于市政电价，所以该系统尽量使用天然气作为能源，以达到经济效益最优的目的。

2) 当以经济效益为目标优化时，由于系统能

源需求大部分由天然气满足，虽然各设备配置基本能够保证利用率和运行的经济性，但是由于建筑物冷热负荷的逐时变化与内燃机余热所能提供的冷热量不能很好地匹配，所以造成大量余热的浪费。

3) 由表 5 可以看出，优化方案比传统方案年运行费用节省近 1 000 万元，具有一定的经济效益，但运行能耗与传统方案相当。

4) 根据优化后的初投资及年能耗费用可求得该三联供系统的投资回收年限，预测其回收年限不大于 5 a，故按静态法计算。

$$N = \frac{I}{A} \quad (20)$$

式中 N 为投资回收年限； I 为投资增量； A 为年能耗费用节省量。

由此求得该三联供系统回收期限为 3 a，因此具有一定的经济可行性。

5 结论

优化后的系统比传统的以热定电方案有明显的经济优势。但由于燃气内燃机发电机组的余热利用不能与建筑物冷热负荷很好地匹配，所以并没有发挥节能优势。对于建筑冷热电三联供系统，经济上的最优不一定是能耗上的最优。

参考文献：

- [1] 李辉, 江亿, 朱颖心. 热电冷联产系统中电负荷的模拟计算[C]//2004 年暖通空调制冷学术年会论文集, 2004
- [2] 段洁仪, 冯继蓓, 梁永建. 北京中关村软件园燃气轮机冷热电三联供方案[C]//03'中国分布式能源会议论文集, 2003
- [3] 张蓓红. 热电(冷)联供系统优化配置及运行策略的研究[D]. 上海: 同济大学, 2005
- [4] 江亿, 刘兰斌, 杨秀. 能源统计中不同能源核算方法的探讨[J]. 中国能源, 2006, 28(6): 5-8
- [5] Jens Pfafferott, Sebastian Herkel, Martina Jäschke. Design of passive cooling by ventilation; evaluation of a parametric model and building simulation with measurements[J]. Energy and Buildings, 2003, 35 (11): 1129-1143
- [6] Olsen E L, Chen Qinyan. Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(6): 561-571
- [7] 易伶俐. 北方地区办公建筑应用夜间通风研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- [8] Ruud M D, Mitchell J W. Use of building thermal mass to offset cooling loads[G]//ASHRAE Trans, 1990, 96(2): 820-829
- [9] Eto J H, Powell G. Implication of office building thermal mass and multi-day temperature profiles for cooling strategies [J]. American Society of Mechanical Engineers, 1985, 41(1): 67-73
- [10] 武丽霞. 严寒地区大型超市应用夜间通风与人工制冷耦合运行研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004
- [11] ASHRAE Standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2004

(上接第 48 页)