

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.210

不同气候区遮阳控制策略的节能与舒适度优化

周涵宇, 刘刚, 王立雄, 刘魁星

(天津大学 a. 建筑学院; b. 天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室, 天津 300072)

摘要: 遮阳设计是影响建筑能耗及室内光热舒适度的重要原因之一, 开启遮阳系统可以减少太阳辐射, 降低夏季制冷能耗, 减少眩光问题, 但同时会导致更高的照明能耗及冬季的供暖能耗。为研究中国寒冷地区和夏热冬暖地区酒店建筑典型遮阳控制策略的节能潜力和环境舒适度, 采用 Comfen 软件模拟量化不同气候区下 3 种遮阳形式及 10 种控制策略对能耗及舒适度的影响规律, 通过制冷、供热、照明能耗和总能耗、光、热舒适度以及综合优化指数来评估其性能。模拟结果表明: 遮阳控制策略会影响建筑能耗和室内舒适度, 根据不同优化目标给出其对应的最优控制策略, 两气候区对遮阳策略与设计的选择也有所不同, 通过分析其差异, 为遮阳系统设计提供参考建议。

关键词: 遮阳; 优化; 节能; 舒适

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2021)09-067-10

Energy saving and comfort optimization of shading control strategies in different climate zones

ZHOU Hanyu, LIU Gang, WANG Lixiong, LIU Kuixing

(a. School of Architecture; b. Tianjin Key Laboratory of Architectural Physics and Environmental Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: Shading design is one of the important factors that affect building energy saving, indoor light and thermal comfort. The sun shading system can reduce the solar radiation, cooling energy consumption in summer and glare, but at the same time, it will lead to higher lighting and heating energy consumption in winter. In order to study the energy saving and environmental comfort of typical shading control strategies for hotel buildings in the cold areas and the areas with the hot summer and warm winter in China, the effects of three shading forms and ten control strategies on energy consumption and comfort in different climatic zones are simulated by COMFEN. Their performances are assessed in respects of cooling, heating, lighting and total energy consumption, as well as light and thermal comfort and comprehensive optimization index. The simulation results show that the shading control strategy will affect the building energy consumption and indoor comfort. Optimal control strategies are given corresponding to different optimization objectives. In addition, some suggestions are provided for the selection of shading strategies and designs through the analysis of the differences between the two climatic regions.

Keywords: shading; optimization; energy saving; comfort

收稿日期: 2019-05-24 **网络出版日期:** 2020-04-21

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0700200); 国家自然科学基金重点资助项目(51338006)。

Supported by National Key R & D Plan for the 13th Five-Year Plan (2016YFC0700200) and National Natural Science Foundation of China (51338006).

作者简介: 周涵宇(1991—), 女, 博士研究生, 主要从事建筑环境和智能控制研究, (E-mail)1016206027@tju.edu.cn。

通讯作者: 刘魁星, 男, 博士, (E-mail)liukuixing1@sina.com。

酒店建筑客房往往有大面积的窗,导致建筑冷、热负荷增加,遮阳系统设计应被视为节能建筑设计的关键问题。为提高建筑表皮的性能,将遮阳系统的采光、得热、节能进行综合设计的需求越来越高。酒店建筑在运行过程中往往只考虑空调系统等主动技术的控制问题,而且用户缺少主动调控意识。遮阳系统作为被动技术在运行过程中往往效果不好甚至造成反效果,因此,遮阳系统的智能控制变得尤为重要。近年来动态遮阳系统的应用越来越广泛,良好的遮阳控制策略会根据室内外环境变化做出反应,以降低能耗并提高环境舒适度。

基于规则的控制(RBC, rule based control)是遮阳系统控制的常规方法和行业标准。RBC 基于“IF(条件)-THEN(动作)”规则,并将专家知识引入控制回路^[1],RBC 严格依赖于规则和相关参数的正确选择^[2]。关于控制策略和模式的现有研究中,Karlsen 等^[3]开发了一种基于室内外环境的 RBC 遮阳控制策略,实验表明该自动遮阳系统可在建筑能耗和建筑光热环境之间达到最佳的平衡。Liu 等^[4]开发的是包括遮阳、自然通风、夜间降温的智能玻璃幕墙控制策略,模拟结果显示该幕墙和静态玻璃幕墙相比减少 60% 的建筑能耗。Shen 等^[5]比较了 7 种采光和照明的控制策略,包括独立的照明系统和照明采光集成系统,结果显示遮阳系统和照明系统的集成控制可以显著提高光环境舒适度并减少建筑能耗。Nielsen 等^[6]模拟了固定遮阳、可调遮阳和自动遮阳 3 种遮阳形式,结果显示自动遮阳系统在大多数情况下会使建筑能耗降低,并对光环境有显著改善。国内对遮阳控制策略的研究较少,且中国不同气候区差异很大,针对中国不同气候区遮阳控制策略差异的研究更少。

笔者以南向酒店客房为研究对象,对中国 2 个典型气候区下 60 种遮阳 RBC 控制策略进行模拟,为减少建筑能耗、提高室内光热舒适度,优化遮阳策略及遮阳设计形式,最终得出不同优化目标下的最佳控制策略。

1 评价参数

1.1 能耗

由窗户遮阳引起的建筑能耗主要为制冷能耗、供热能耗以及照明能耗,窗户无遮阳时可以带来更多的太阳能,减少冬季的供暖需求,同时有利于建筑采光以减少照明能耗,但会增加制冷能耗导致建筑过热,合理的遮阳系统需要平衡这 3 部分能耗。中国寒冷地区与夏热冬暖地区能耗组成不同,需结合气候特点选择不同的遮阳控制策略。

1.2 光舒适

评价光环境不舒适的预测模型主要针对眩光,这些预测模型包括日光眩光概率(DGP, daylight glare probability)^[7],日光眩光指数(DGI, daylight glare index)^[8-9],统一眩光评级(UGR, unified glare rating)^[10],视觉舒适概率(VCP, visual comfort probability)^[11]和 CIE 眩光指数(CGI, CIE glare index)^[12]。其中日光眩光指数 DGI 和日光眩光概率 DGP 是专门为由窗口带来的日光不舒适眩光而开发的模型^[13],是被最广泛接受的预测来自大尺寸光源不舒适眩光的模型。NS-EN^[14]中规定室内工作场所可接受眩光指数边界值为 22。不同眩光指数下的眩光程度^[15]如表 1 所示。

表 1 不同眩光指数下的眩光程度

Table 1 Glare degree under different glare indices

预测模型	感觉到的眩光程度			
	难以察觉	察觉	受干扰的	无法忍受
DGP	<0.35	0.35~0.40	0.40~0.45	>0.45
DGI	<18	18~24	24~31	>31
UGR	<13	13~22	22~28	>28
VCP	80~100	60~80	40~60	0~40
CGI	<13	13~22	22~28	>28

天然采光可以减少对人工照明需求,且能提高工作效率。Nabil 等^[16]在广泛的文献回顾后发现,天然采光照度在 100~2 000 lx 范围内是有利的。国际照明委员会 CIE(Commission Internationale de L'Eclairage)给出了欧洲一些研究结果的平均值,即照度与不满意百分比的关系曲线,在 2 000 lx 以下时照度越高越满意。

1.3 热舒适

应用最广泛的热舒适度评价模型是 Fanger 提出的 PMV(predicted mean vote)模型^[17]。PMV 模型基于人体热平衡,建立人体热感觉与物理环境参数之间的关系,它可以预测酒店客房中暴露于中等热环境的大量人群的热舒适程度。Comfen 模型中将其量化为预测满意人群的百分比。

2 研究方法

使用 Comfen 模拟软件对酒店客房的遮阳控制策略进行量化研究,分析不同气候区条件下对遮阳控制策略选择的差异。Comfen 是针对立面开窗性能的模拟软件,采用 EnerPlus 为计算内核,Grynning 等^[18]已验证该软件的可靠性。研究模拟分析了建筑能耗及光、热舒适度,选择寒冷地区的典型城市北京及夏热冬暖地区的广州为研究对象,研究了 3 种遮阳设计形式(内遮阳、外遮阳和中置遮阳),10 种控制策略和 2 种遮阳方式(固定遮阳、动态遮阳),为减少模拟时间,选择单个房间作为研究样本,模拟酒店房间内的制冷、供热、照明能耗、总能耗及热舒适度、光舒适度等环境参数。

2.1 模型基本设置

房间模型为普通城市经济型酒店南向的单个客房,如图 1 所示,房间进深 6 m,开间 4 m,房间净高 3 m。房间设置 2 扇窗,每扇窗户高 2 m,宽 1.5 m,窗台高 0.2 m,距侧墙 0.4 m。窗墙比为 0.5。

根据《公共建筑节能设计标准》(GB50189—2015)^[19],寒冷地区外墙的传热系数 $\leq 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,北京选择传热系数为 $0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的外墙;夏热冬暖地区外墙的传热系数 $\leq 0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,广州选择传热系数为 $0.59 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的外墙。对于窗墙比在 0.4~0.5 的外窗,寒冷地区传热系数 $\leq 2.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,太阳得热系数 ≤ 0.43 ;夏热冬暖地区传热系数 $\leq 2.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,太阳得热系数 ≤ 0.35 。统一选用传热系数为 $1.65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,太阳得热系数为 0.299 的窗户。

照明能耗设置为 $10 \text{ W}/\text{m}^2$,设备能耗设置为 $6 \text{ W}/\text{m}^2$,室内人员为 2 人。

2.2 模拟设定点

根据模拟软件默认值,酒店客房的制冷温度设定点为 $24 \text{ }^\circ\text{C}$,供热温度设定点为 $21 \text{ }^\circ\text{C}$ 。照明系统有自动连续调光功能,当传感器照度低于 538 lx,会打开人工照明,传感器位置如图 2 所示,照度传感器 1 控制靠近外立面占地面积 75% 的主要采光区,放置在 2/3 此区域的房间深度处,距外墙 3 m;传感器 2 控制剩余的 25% 的辅助空间,放在此区域的中心位置,距外墙 5.25 m。传感器均布置在距地面 0.76 m 处。人员、照明和设备的时间表亦为软件默认值,酒店客房分为工作日和节假日 2 种时间表^[20]。

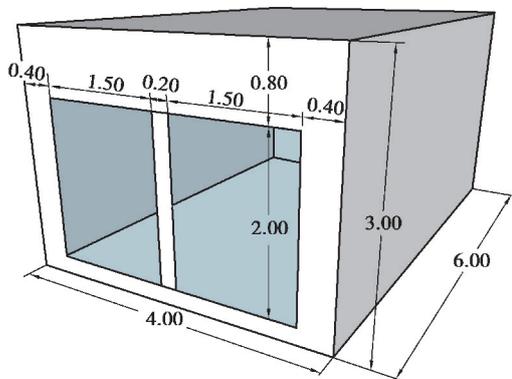


图 1 模型几何尺寸示意图(单位:m)

Fig. 1 Geometric dimension diagram of model

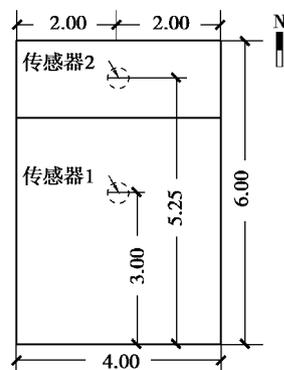


图 2 照度传感器位置示意图(单位:m)

Fig. 2 Illumination sensor position diagram

2.3 遮阳设计及控制策略

研究中内遮阳(in)、外遮阳(ex)、中置遮阳(be)3种遮阳形式,均为水平百叶遮阳帘,导热系数为 $0.90 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,遮阳角度可以从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 变化,百叶板的间距为 20 mm ,厚度为 1 mm ,中置遮阳百叶板宽度为 10 mm ,内、外遮阳宽度为 25 mm 。

软件提供20种预定义的控制策略,可以通过设置太阳辐照度、眩光指数、温度设定点等来设定每种控制策略。选择其中10种控制策略进行模拟对比,如表2所示。

表 2 控制策略

Table 2 Control strategies

控制策略	参数设定点
室外温度高时有遮阳	$T_{\text{set}} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$
室内温度高时有遮阳	$T_{\text{set}} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$
制冷季有遮阳	$P_{\text{set}} = 1 \text{ W}$
室外温度高且太阳辐射强度高时有遮阳	$T_{\text{set}} = 26 \text{ }^\circ\text{C}, I_{\text{set}} = 100 \text{ W}/\text{m}^2$
太阳辐射强度高时有遮阳	$I_{\text{set}} = 100 \text{ W}/\text{m}^2$
眩光指数高时有遮阳	$\text{DGI} = 22$
供暖季夜间有遮阳/白天无遮阳	$P_{\text{set}} = 1 \text{ W}$
供暖季夜间有遮阳/制冷季白天有遮阳	$P_{\text{set}} = 1 \text{ W}$
夜间无遮阳/制冷季白天在太阳辐射高时有遮阳	$I_{\text{set}} = 100 \text{ W}/\text{m}^2$
夜间有遮阳/制冷季白天在太阳辐射高时有遮阳	$I_{\text{set}} = 100 \text{ W}/\text{m}^2$

注: * T_{set} 为温度设定点; P_{set} 为能耗设定点; I_{set} 为太阳辐射强度设定点

策略1~4是为了控制室内得热,减少制冷能耗;策略5、6是为提高光舒适度、避免眩光;策略7~10是通过区分制冷季和供暖季,供暖季减少夜间的能量损失,减少制热能耗,制冷季控制室内得热,减少制冷能耗。

为研究可变遮阳角度的影响,每种控制策略还可以设定百叶角度是否可变。其中 a 为百叶角度固定,开启遮阳时,百叶固定在设定的角度(45°); b 为百叶角度可变,开启遮阳时,通过调整百叶角度使遮阳效果达到最优,阻挡最多的太阳辐射,每个模拟时间步长(15 min)调整一次遮阳角度,来阻挡直接太阳辐射进入室内。

下文将对控制策略用代号的方式表示,由遮阳形式、控制策略、遮阳角度是否可变3部分组成,如ex-1a表示选择控制策略1(室外温度高于 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 时有遮阳)的固定外遮阳。

3 结果分析

3.1 节能

模拟得出每种情况的照明能耗、制冷能耗、供暖能耗、风扇能耗和总能耗。运行风扇的能源需求与制冷需求相关,可将其看作制冷能耗的一部分。

从图3可以看出,寒冷地区比夏热冬暖地区有更大的能源需求,寒冷地区供热能耗是总能耗的最主要因素,其次是制冷能耗;夏热冬暖地区制冷能耗占总能耗的比重最大,其次是照明能耗。不同控制策略能耗有所不同,一般趋势是遮阳率越高,供热能耗和照明能耗越大,而制冷能耗越低。寒冷地区比夏热冬暖地区的能耗变化大。在寒冷地区,遮阳控制策略对供热能耗的影响最大,是总能耗的最主要影响因素,且供热能耗越高,照明能耗越高,所以总能耗变化幅度较大。在夏热冬暖地区,由于夏热冬暖地区总能耗的两大影响因素是制冷能耗和照明能耗,当遮阳率高时,可使制冷能耗降低,但照明能耗相对较高,导致总能耗趋于平稳。

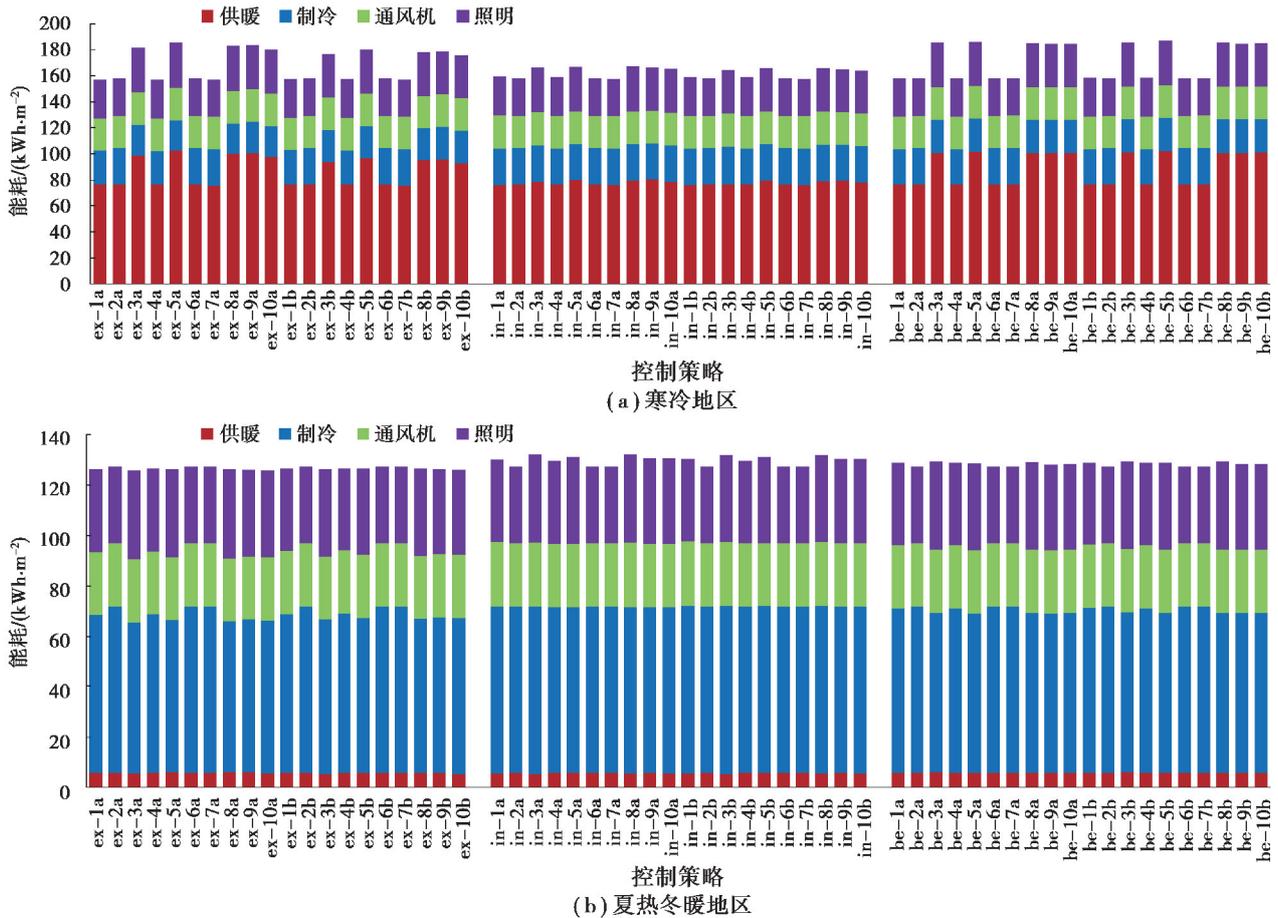


图 3 不同控制策略的能耗

Fig. 3 Energy consumption of different control strategies

寒冷地区策略 1、2、4、6、7 总能耗较低,且内遮阳能耗普遍较低。寒冷地区总能耗和供热能耗正相关性较强,通过遮阳控制减少供热能耗是降低全年总能耗的关键。总的来说:寒冷地区遮阳率越低,总能耗越低;夏热冬暖地区不同控制策略间能耗差别不大,而不同遮阳形式对能耗的影响明显,外遮阳能耗最低,其次是中置遮阳,和寒冷地区相反,夏热冬暖地区内遮阳能耗最大。

寒冷地区的外遮阳和内遮阳,可变遮阳(B)能耗略低于固定遮阳(A)能耗;夏热冬暖地区,可变遮阳(B)能耗略高于固定遮阳(A)能耗。

没有遮阳的情况供热能耗及照明能耗均是最低的,而制冷能耗会相应增加,在这 2 个气候区,与其他带有控制策略的窗户相比,无遮阳情况的总能耗均相对较低。

寒冷地区在没有任何遮阳措施的情况下,建筑的总能耗是 157.87 KWh/m²。比全年无遮阳的情况能耗低的策略有 ex-1a、ex-7b、ex-7a、ex-4a、ex-1b、ex-4b、in-7b、in-7a。能耗最低的前 6 个遮阳形式均是外遮阳,这是由于合理的遮阳控制策略可以使冬季室内获得充足的太阳得热,且外遮阳在阻挡夏季太阳得热方面效果最佳,这些策略不仅能保证供暖季室内获得足够的太阳能,还能降低夏季制冷能耗。与无遮阳情况相比,策略 be-5b,固定中置遮阳,太阳辐射强度高于 100 W/m² 时有遮阳)增加能耗 18.3%,策略(ex-1a,固定外遮阳,室外温度高于 26℃时有遮阳)减少能耗 0.5%,不同控制策略对建筑能耗的影响相差 18.8%。

夏热冬暖地区在没有任何遮阳措施的情况下,建筑的总能耗是 127.43 KWh/m²。所有外遮阳形式的控制策略均比全年无遮阳的情况能耗低,而内遮阳和中置遮阳均比全年无遮阳的情况能耗高。与无遮阳情况相比,策略 in-3a(固定外遮阳,制冷季有遮阳)增加能耗 3.8%,策略 ex-10a(固定外遮阳,夜间有遮阳/制冷季白天在太阳辐射高于 100 W/m² 时有遮阳)减少能耗 1.3%,不同控制策略对建筑能耗的影响相差 5.1%。

3.2 舒适

3.2.1 热舒适度

图 4 为 2 个气候区控制策略的热舒适度,横坐标为控制策略,纵坐标为全年平均预测热环境满意人群的百分比。

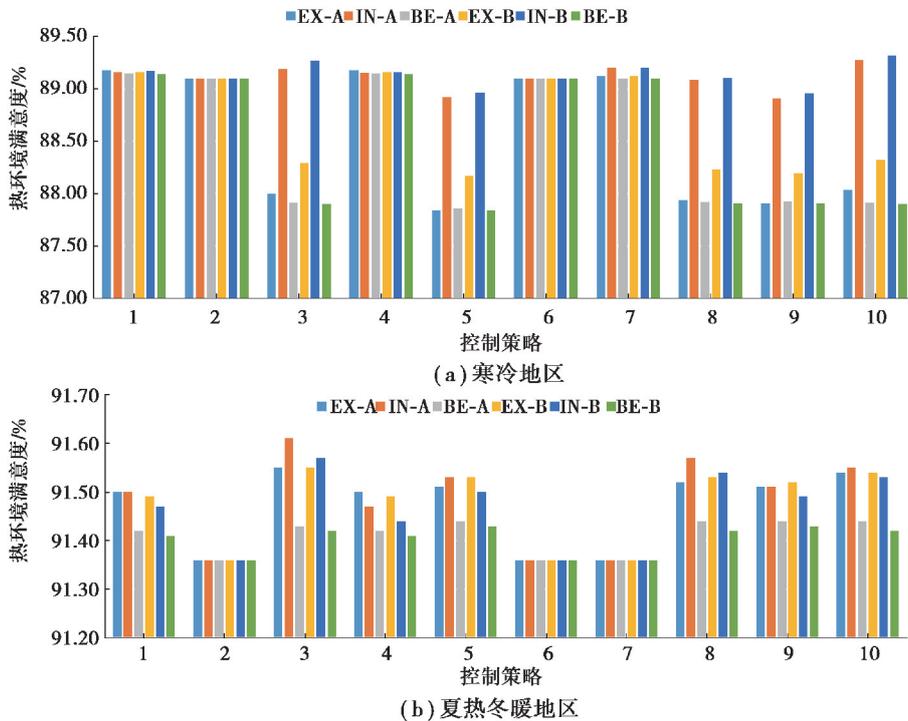


图 4 不同控制策略的热舒适度

Fig. 4 Thermal comfort of different control strategies

由于酒店客房为空调房间,在冬夏空调季室内温度超出空调设定点时即开启设备制冷、制热,所以热舒适度均较高;由于不同遮阳控制策略只在过渡季对热舒适有较大影响,全年平均后会拉平舒适度的差异,所以不同控制策略热舒适度的差异较小。

寒冷地区:策略 1、2、4、6、7 的热环境满意度较高,另外同一策略中内遮阳的舒适度更高。舒适度最高的控制策略是 in-10b(可变内遮阳,夜间有遮阳/制冷季白天在太阳辐射高于 100 W/m^2 时有遮阳),满意率为 89.31%,舒适度最低的控制策略是 ex-5a(固定外遮阳,太阳辐射强度高于 100 W/m^2 时有遮阳),满意率为 87.83%,对热环境满意率的影响差别不大,无遮阳情况的舒适度满意率为 89.09%。不同控制策略对热舒适度的影响相差 1.48%。

夏热冬暖:策略 3 的热环境满意度较高,另外同一策略中内遮阳和外遮阳比中置遮阳的舒适度更高。舒适度最高的控制策略是 in-3a(固定外遮阳,制冷季有遮阳),满意率为 91.61%,舒适度最低的是控制策略 2、6、7,满意率为 91.36%,对热环境满意率的影响差别不大,无遮阳情况的舒适度满意率也是 91.36%。不同控制策略对热舒适度的影响相差 0.25%。

整体来说,寒冷地区和夏热冬暖地区不同控制策略的热舒适度变化规律呈相反趋势,对于寒冷地区热舒适度较高的控制策略,在夏热冬暖地区的热舒适度则相对较低。夏热冬暖地区比寒冷地区的整体热舒适度更高。

3.2.2 光舒适度

模拟结果显示,窗墙比为 0.5 的酒店客房所有时间眩光指数均在 22 以下,所以无需考虑眩光的影响,仅用照度在 $100 \sim 2000 \text{ lx}$ 的小时数评价光舒适度。将整个房间平面分成 10×10 个点,传感器布置在 0.76 m 高度处,每 1 个小时计算 1 次这 100 个点的照度值,从而统计出房间各个位置照度在 $100 \sim 2000 \text{ lx}$ 的小时数。图 5 横坐标为控制策略,纵坐标为光舒适满意度百分比。

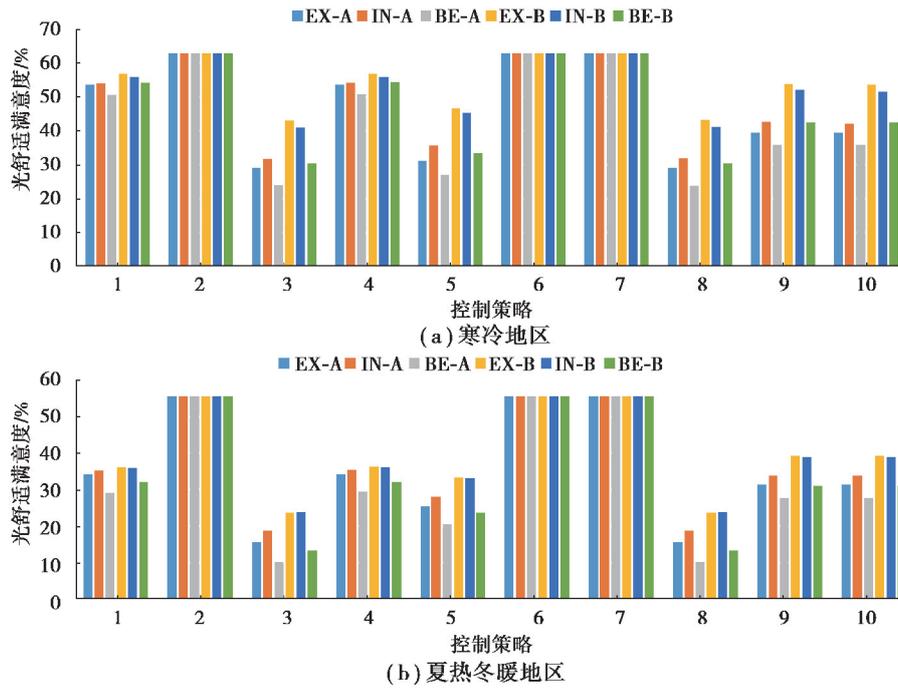


图5 不同控制策略的光舒适度

Fig. 5 Light comfort of different control strategies

寒冷地区由于出现眩光而导致光舒适度降低的情况较少,所以寒冷地区光舒适和能耗的变化规律类似,遮阳率越低,平均照度值越高,照度出现在 $100\sim 2\,000\text{ lx}$ 的小时数也相对越高。策略2、6、7的照度值是最舒适的,也是平均照度值最高的。照度在 $100\sim 2\,000\text{ lx}$ 的小时数最多的是策略ex-2a,ex-2b,ex-6a,ex-6b,ex-7b,in-2a,in-6a,in-7a,时间及空间占有比率为62.91%,全年无遮阳情况仅次于以上策略,时间几乎相同, $100\sim 2\,000\text{ lx}$ 小时数最少的是be-8a,时间及空间占有比率为23.78%。可以看出,不同控制策略对采光的影响较大,对光舒适度的影响相差39.13%。

夏热冬暖地区和寒冷地区相同,策略2、6、7是照度在 $100\sim 2\,000\text{ lx}$ 的小时数最多的,也是平均照度值最高的,时间及空间占有比率为55.61%,与全年无遮阳情况时间相同, $100\sim 2\,000\text{ lx}$ 小时数最少的是be-8a,时间及空间占有比率为10.04%。不同控制策略对光舒适度的影响相差45.57%。同一控制策略,动态遮阳(B)优于固定遮阳(A)。

整体来说,不同控制策略光舒适度的变化规律一致,若某种控制策略在寒冷地区的光舒适度较高,在夏热冬暖地区光舒适度也同样较高。寒冷地区比夏热冬暖地区的整体光舒适度更高。

3.3 优化

不同控制策略及窗户类型有不同的优缺点,如有些控制策略能耗较低,但舒适性较差。为了比较不同控制策略,综合考虑能耗及光热舒适度,得出最优的控制策略,首先需要统一各自的量纲,对原始数据进行标准化处理,使各目标函数处于统一数量级,便于综合评价。现定义每种控制策略的能耗指数、热舒适度指数及光舒适度指数,从而可以得到整体性能指标,将能耗和舒适度的所有性能参数集成到一起。采用min-max标准化法(min-max normalization)对原始数据进行线性变换,各参数的指数结果值为 $0\sim 1$,转换函数表达式为

$$I_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1)$$

式中: I_i 为参数指数值; x_i 为原始数据; x_{\max} 为样本数据的最大值; x_{\min} 为样本数据的最小值。根据式(1),能耗指数值越小越好,舒适度指数值则是越大越好,为统一趋势,使所有性能参数的指数值均为越低越好,将舒适度指数的标准化处理方法改为 $1-x$,即不满意率。最终能耗指数($I_{i-\text{energy}}$)及舒适度指数($I_{i-\text{comfort}}$)的函数表达式为

综合考虑能耗及舒适度,寒冷地区策略 2、6、7 明显优于其他策略,首先这 3 个策略的光舒适程度是最高的,而能耗指数与热舒适指数与其呈正相关,也相对较小。其中寒冷地区综合指数最低的是 in-7b(0.02, 0.07, 0.00),即供暖季夜间关遮阳,减小热损失;白天遮阳全开。策略 7 外遮阳的能耗更低,但热舒适指数较高,内遮阳综合指数最低。综合考虑能耗及舒适度,夏热冬暖地区外遮阳的综合指数明显优于其他遮阳形式,由于外遮阳的能耗明显低于其他遮阳方式,而目标指数之间无相关性,光和热舒适度在不同遮阳形式中分布均匀。其中综合指数最低的是 ex-10b(0.05, 0.28, 0.36),即夜间关遮阳;太阳辐射强度高且在制冷季时白天关遮阳。结果显示合适的控制策略,动态遮阳会优于固定遮阳。

不同评判标准下,寒冷地区及夏热冬暖地区的最优控制策略如表 3 所示。

表 3 最优控制策略汇总

Table 3 summary of optimal control strategy

优化目标	寒冷地区	夏热冬暖地区
总能耗	ex-1a	ex-10a
供暖能耗	ex-7b	in-3b
制冷能耗	ex-8a	ex-2a
照明能耗	2、6、7	2、6、7
光舒适度	2、6、7	2、6、7
热舒适度	in-10b	in-3a
综合(1: 0: 1)	ex-7b	2、6、7
综合(1: 1: 1)	in-7b	ex-10b

4 结 论

1)不同控制策略对建筑能耗的影响,寒冷地区相差 18.8%,夏热冬暖地区相差 5.1%;对热舒适度的影响,寒冷地区相差 1.48%,夏热冬暖地区相差 0.25%;对光舒适度的影响,寒冷地区相差 39.13%,夏热冬暖地区相差 45.57%。不同控制策略对光舒适度的影响最大,其次是能耗,由于模拟对象为空调建筑,对热舒适度影响最小。

2)控制策略对寒冷地区能耗的影响更明显;而遮阳形式对夏热冬暖地区能耗的影响更明显。2 个气候区均是外遮阳的能耗较低,寒冷地区能耗最低的前 6 个遮阳形式均是外遮阳,外遮阳形式配合合理的遮阳控制策略可以最大程度降低建筑能耗;夏热冬暖地区所有外遮阳形式的控制策略均比全年无遮阳的情况能耗低,而内遮阳和中置遮阳均比全年无遮阳的情况能耗高。

3)寒冷地区和夏热冬暖地区不同控制策略的热舒适度变化规律呈相反趋势,夏热冬暖地区的整体热舒适度更高;2 个气候区不同控制策略光舒适度的变化规律一致,寒冷地区的整体光舒适度更高。

4)动态遮阳相对固定遮阳的优势主要体现在对光舒适度的影响上。

5)寒冷地区能耗及光热舒适度这 3 个目标指数之间均呈正相关,寒冷地区可直接选择策略 7(即供暖季夜间关遮阳,减小热损失;白天遮阳全开),这一策略可同时保证能耗较低且光热舒适度较高,而夏热冬暖地区目标指数间相关性较低,需根据不同的优化目标选择相应控制策略。

6)在这 2 个气候区,与其他有遮阳的窗户相比,无遮阳情况的总能耗、光热舒适度及综合优化指数均不是最差的,所以选择不恰当的遮阳控制策略及设计形式还不如不设遮阳。

参考文献:

- [1] Psomas T, Fiorentini M, Kokogiannakis G, et al. Ventilative cooling through automated window opening control systems to address thermal discomfort risk during the summer period: Framework, simulation and parametric analysis[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 153: 18-30.
- [2] Schulze T, Eicker U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 56: 221-232.
- [3] Karlsen L, Heiselberg P, Bryn I, et al. Solar shading control strategy for office buildings in cold climate[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 118: 316-328.
- [4] Liu M Z, Wittchen K B, Heiselberg P K. Control strategies for intelligent glazed façade and their influence on energy and comfort performance of office buildings in Denmark[J]. *Applied Energy*, 2015, 145: 43-51.
- [5] Shen E, Hu J, Patel M. Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies[J]. *Building and Environment*, 2014, 78(8):155-170.
- [6] Nielsen M V, Svendsen S, Jensen L B. Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(5):757-768.
- [7] Wienold J, Christoffersen J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(7): 743-757.
- [8] Hopkinson R G. Glare from daylighting in buildings[J]. *Applied Ergonomics*, 1972, 3(4): 206-215.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB/T 50033—2013 建筑采光设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T 50033-2013 Building lighting design standard[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [10] Bedocs L, Einhorn H D, Fischer D, et al. Discomfort glare in interior lighting[R]. Paris: CIE, 1995.
- [11] IESNA. The IESNA lighting handbook[M]. New York: IESNA, 2000.
- [12] Einhorn H D. Discomfort glare: a formula to bridge differences[J]. *Lighting Research & Technology*, 1979, 11(2): 90-94.
- [13] Suk J Y, Schiler M, Kensek K. Investigation of existing discomfort glare indices using human subject study data[J]. *Building and Environment*, 2017, 113: 121-130.
- [14] Standards B. Light and lighting-lighting of work places-part 1: indoor work places [S]. Brussels, 2011.
- [15] Jakubiec J, Reinhart C. The 'adaptive zone'-A concept for assessing discomfort glare throughout daylit spaces[J]. *Lighting Research & Technology*, 2012, 44(2): 149-170.
- [16] Nabil A, Mardaljevic J. Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(7): 905-913.
- [17] Fanger P O. Calculation of thermal comfort, introduction of a basic comfort equation[J]. *Ashrae Transactions*, 1967, 73(2):1-20.
- [18] Grynning S, Time B, Matusiak B. Solar shading control strategies in cold climates-heating, cooling demand and daylight availability in office spaces[J]. *Solar Energy*, 2014, 107: 182-194.
- [19] 中华人民共和国建设部. GB 50189—2015 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50189—2015 Standard for energy conservation design of public buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [20] Robin M, Mehry Y, Charlie C, et al. Comfen 5: Program description: a pc program for calculating the heating and cooling energy use of windows in commercial buildings [EB/OL]. (2019-03-15)[2019-3-28]. [https:// windows. lbl. gov/ sites/ default/ files/ software/ Comfen/ COMFEN5UserManual. pdf](https://windows.lbl.gov/sites/default/files/software/Comfen/COMFEN5UserManual.pdf).

(编辑 詹燕平)