

基于分层控制策略采光实验的电致变色窗研究

王崇敏, 彭晋卿, 罗伊默, 谭羽桐

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 以长沙市某办公室电致变色(EC)窗为研究对象: 首先, 基于采光实验研究了夏季 EC 窗调控方法与垂直立面太阳辐射强度的关系, 并据此提出了 EC 窗分层控制策略; 其次, 结合 EnergyPlus 能耗模拟, 分析了 EC 窗采取此分层控制策略的节能效果. 研究表明: 当垂直立面太阳辐射强度不超过 70 W/m^2 时, EC 窗处于透明态即可保证室内舒适的光环境, 而随着垂直立面辐射强度增大, EC 窗控制方式根据太阳直射光线入射位置而有所不同; 当太阳直射光入射位置未在人眼视野内时, 调整下层玻璃着色往往比调整中层玻璃着色更能有效控制室内眩光; 太阳直射光从中下两层玻璃进入室内比仅从下层玻璃进入更容易使人产生视觉不适. 此外, 相比于普通玻璃窗和 EC 窗整体控制策略, EC 窗夏季采取分层控制分别节约了 $48.21 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 空调能耗和 $17.6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 照明能耗, 总能耗则分别减少了 20.4% 和 2.5% . 研究成果可为 EC 窗在我国不同季节、不同气候条件下的 EC 玻璃窗的分层控制研究提供借鉴.

关键词: EC 玻璃窗; 分层控制策略; 采光实验; DGP; 天然采光

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0797-07

Study on layered control of electrochromic window based on daylighting experiment

WANG Chongmin, PENG Jinqing, LUO Yimo, TAN Yutong

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper took EC window of an office in Changsha as the research object. Firstly, the relationship between EC window control strategy and vertical facade solar radiation was studied based on daylight experiment, and layered control strategy was proposed. Then, the difference of EC glass window layered control and overall control on office energy consumption was analyzed by EnergyPlus. The experiment results show that when the vertical facade solar radiation is less than 70 W/m^2 , the EC glass window in transparent state can keep a comfortable visual environment. With the increase of vertical facade solar radiation, the control of EC window is different according to the incident position of direct sunlight. When the incidence position is not within the visual field, adjusting the lowest glass to dark is more effective for reducing discomfort glare. Direct sunlight entering the interior from the middle and lowest layers of glass is more likely to cause visual discomfort than from just the lowest layer of glass. In addition, compared with ordinary glass window and overall control strategy, the layered control of EC window saves $48.21 \text{ kW} \cdot \text{h}$ air conditioning energy consumption and $17.6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ lighting energy consumption respectively, and the total energy consumption is reduced by 20.4% and 2.5% , respectively. This paper provides a reference for the application research of EC windows in China.

Key words: electrochromic window; stratification control strategy; daylighting experiment; DGP; daylighting

电致变色(Electrochromic, EC)玻璃作为一种新型动态玻璃, 可以根据室内光热环境需求主动调节电压来改变可见光透过率和太阳得热系数, 从而实现对进入室内的可见光及太阳辐射热的精准调控^[1-2]. 与传统静态窗相比, EC 窗能够解决

太阳光进入室内产生不适眩光以及辐射热过大问题, 具有广泛应用前景^[3-4].

自 WO_3 变色现象首次被发现到 EC 窗问世^[5-7]以来, EC 窗吸引了研究者的广泛关注. Sullivan 和 Selkowitz 等^[8-12] 曾研究并发现了 EC 窗能有效

收稿日期: 2021-07-06

修改稿日期: 2021-10-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978252); 湖南省科技计划基金项目(2017XK2015); 长沙市科技计划基金项目(kq2009041)

第一作者: 王崇敏(1997—), 女, 硕士生, 主要研究电致变色窗光热性能. E-mail: ChminWang@hnu.edu.cn

通信作者: 彭晋卿(1984—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事分布式能源储存方面研究. E-mail: jqpeng@hnu.edu.cn

降低空调能耗,改善眩光.随着研究深入,控制策略在 EC 窗节能和采光方面的重要作用逐渐显露. Sullivan^[13]率先提出了分别基于工作面照度、基于入射太阳辐射强度以及基于空调模式来控制 EC 玻璃窗,发现了不同控制策略对室内光热环境的影响不同. Karlsson 等^[14]研究表明以入射太阳辐射强度作为控制参数可以获得更好的光热环境. Gugliermetti 等^[15]同时考虑了垂直立面太阳辐射强度和眩光指数(Daylight Glare Index, DGI),发现控制参数的阈值选取与玻璃的透过率以及入射方向密切相关.此外,相关研究表明控制参数阈值对 EC 窗的采光和节能效果也具有重要影响. 戚浩然等^[16-17]以室外水平照度作为控制参数,并以总能耗最低为目标优化了其阈值,改善了 EC 窗的节能效果. Lee 等^[18]通过对不同气候区商业建筑中 EC 窗最佳控制参数的选取及阈值优化研究,发现了温度是降低能耗最有效的参数,而综合考虑能耗和采光时,入射到窗上的太阳辐射强度则是更好的选择.

目前 EC 窗研究大多是以能耗最低为目标优化控制参数阈值,并且全年控制参数均采用相同阈值,从而忽略了太阳位置季节差异性的影响,难以满足视觉舒适要求.因此,本文基于采光实验,优先考虑天然采光和眩光,对 EC 窗夏季调控方式与垂直立面辐射强度的关系进行了研究,提出了 EC 窗分层控制策略,并对其进行了能耗模拟以验证节能效果.本文第一部分主要介绍了实验平台及方案设计,接着在第二部分介绍了玻璃光热性能参数、采光和能耗模型.第三部分则验证采光模型的准确性,并根据实验所得垂直立面太阳辐射强度和 EC 窗状态调控的关系,提出了夏季 EC 窗分层控制策略,通过能耗模拟分析了其节能性.最后在第四部分总结了实验和模拟得到的主要结论.

1 实验介绍

1.1 建筑概况

本文以长沙市湖南大学智慧能源实验室的一间办公室为研究案例,如图 1(a)所示.该办公室尺寸为 2.5 m×6 m×3 m,南外墙装有 1.16 m×0.73 m 的 EC 玻璃 6 块,每块玻璃均可独立控制.

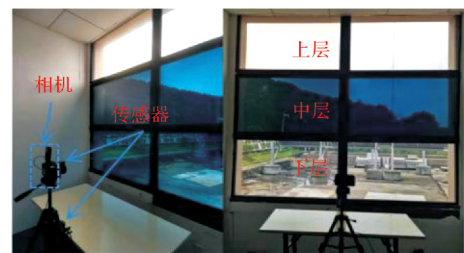
1.2 实验方案

如图 1(b)所示,采光点位于房间中轴线,距窗 1 m,高 0.75 m,采光点正上方置一相机,距地 1.2 m.采光点和相机上均安装照度传感器,分

别测量采光点照度和垂直立面照度.如图 1 所示立面上装有日照辐射计以获取垂直立面太阳辐射强度,此外可从实验室配置的小型气象站获取太阳辐射、温湿度等气象参数.通过相机拍摄曝光程度不同的照片来合成高动态范围图像(High-Dynamic Range, HDR),并据此计算眩光可能性(Daylight Glare Probability, DGP).EC 玻璃着色时长为 30 min,褪色时长为 10 min.实验中分层调节 EC 玻璃来实现室内采光点照度 $\leq 2\,000\text{ lux}$, $\text{DGP}\leq 0.35$ 的采光要求,以此探究夏季 EC 窗调控方式与垂直立面太阳辐射强度之间的关系.实验所用器材及型号如表 1 所示.



(a) 实验室建筑外观图



(b) 实验装置布置

图 1 电致变色窗建筑示意图

Fig. 1 Building with electrochromic window

表 1 实验器材及型号参数

Tab. 1 Experimental equipment and model parameters

名称及型号	配套设备	备注
Photo-metric Sensor	信号放大器 Lab-Jack	自动记录,
LI-210R 照度传感器	U3-LV 数据采集器	1s/次
Canon ESO-6D	Sigma 8mm f/3.5	每 5min/次
相机	EX DG 鱼镜头	一次 3 张
Pyranometer MS-80	Datalogger GL840 数	自动记录,
日照辐射计	据采集器	1s/次

2 模型建立

2.1 窗户物理模型

为分析 EC 窗节能效果,本文选取了普通窗进行对比研究. EC 窗的构造为 10 mm EC 玻璃+12 mm 氩气+6 mm 超白玻璃,普通窗则为两层 6 mm 白玻璃中间填充 12 mm 空气,超白玻璃和白玻璃均选自

WINDOW 软件自带玻璃数据库, 使用型号为 Perkin Elmer LAMBDA 1050+ 的分光光度计实测了单层 EC 玻璃光谱数据, 然后导入 Optics6 和 WINDOW7.6 中计算得到 EC 窗的光热性能参数, 如表 2 所示, 并将 EC 玻璃的 4 种状态分别命名: S1(透明)、S2(浅)、S3(较深)、S4(深色)。

表 2 EC 玻璃和普通玻璃性能参数
Tab. 2 Performance parameters of glazings

	普通玻璃	电致变色(EC)玻璃			
		S1	S2	S3	S4
传热系数 $/(W \cdot (m^2 \cdot K^{-1}))$	2.703	2.545	2.545	2.545	2.545
$T_{vis}/\%$	78.1	55.5	11.2	7.2	1.8
$T_{sol}/\%$	67.8	27.1	8.7	4.2	1.4
遮阳系数(Sc)	0.808	0.515	0.197	0.193	0.162
太阳得热系数 ($SHGC$)	0.703	0.448	0.171	0.168	0.141

如图 2 所示, 首先参照实际建筑在 Rhino 中建立建筑模型; 然后, 输入实测天气数据及 EC 玻璃数据, 通过 HoneybeePlus 等软件调用 Radiance 计

算采光点照度、眩光可能性(Daylight Glare Probability, DGP)。为保证模拟的准确性, 对室内各表面及窗台反射率进行了测试, 室内墙面、地板、天花板及窗台反射率分别为 0.68、0.14、0.60 和 0.21。

与此同时, 在 SketchUp 中建立建筑模型并导入 EnergyPlus 中, 再输入长沙典型气象年天气文件来模拟夏季能耗。模拟时间为 6 月 1 日至 8 月 31 日, 工作时间为 8:00—18:00, 室内设有一名工作人员, 温度设为 26℃, 采用 60 W 的荧光灯, 其照度设定值为 500 lux, 即当室内参考点照度低于 500 lux 时启用人工照明, 模拟中的照度参考点位置与实验一致, 模拟时间步长为 10 min。本文分别模拟了基于实验得到的 EC 窗分层控制策略、整体控制策略以及普通玻璃的建筑能耗。其中整体控制策略为目前常用, 即当垂直立面太阳辐射强度为: 0~75 W/m², EC 窗整体处于 S1; 75~150 W/m², EC 窗整体处于 S2; 150~250 W/m², EC 窗整体处于 S3; 250 W/m² 以上, EC 窗整体处于 S4。

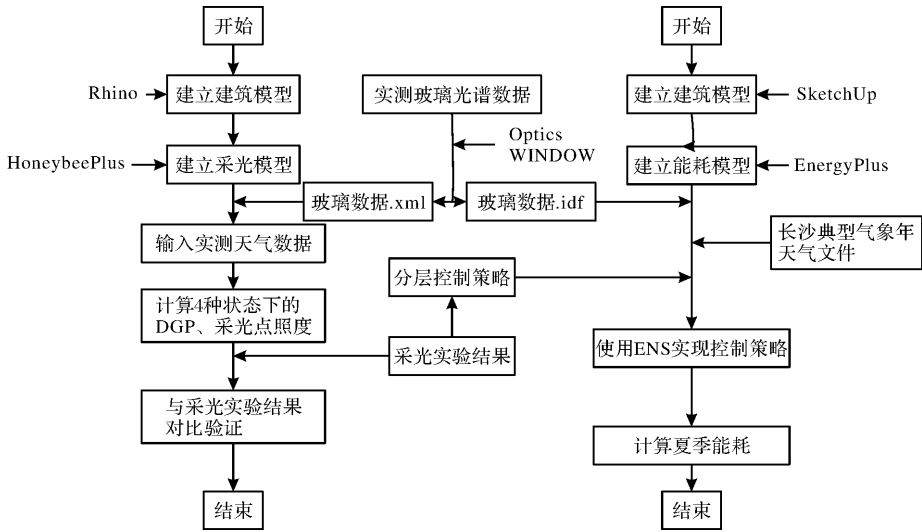


图 2 采光与能耗模拟流程示意图

Fig. 2 Flow chart of lighting and energy consumption simulation

2.2 采光与能耗模型

为实现 EC 窗动态控制, 使用了 EnergyPlus 自带的 EMS 功能。本文在模拟中, 选取太阳高度角、太阳方位角和垂直立面太阳辐射强度作为变量, 通过 Energy Runtime Language 将太阳直射光入射位置、垂直立面辐射强度与 EC 玻璃窗之间的关系编写成控制语句, 实现了对 EC 窗的动态控制。其中关于太阳直射光入射位置的判断如图 3 所示, 首先根据几何方法计算获得太阳直射光落在每

层玻璃时的太阳高度角和方位角; 然后根据设定的人眼垂直视角(45°), 水平视角(120°)以及人眼位置计算人眼视野与窗户重合范围即可确定太阳直射光进入人眼视野时的入射位置, 如表 3 所示。

表 3 太阳直射光通过各层玻璃进入人眼视野的角度范围
Tab. 3 Angles of direct sunlight entering each layer of glass

窗层	太阳高度角/°	太阳方位角/°
仅下层窗	81~84	95.7~264.3
中下两层窗	0~81	

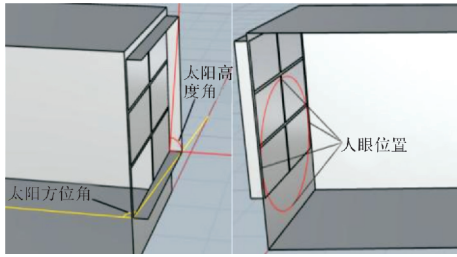


图3 太阳直射光线位置判断示意图

Fig. 3 The incident position of direct sunlight

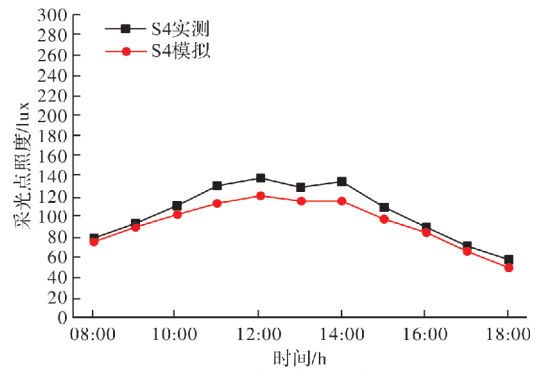
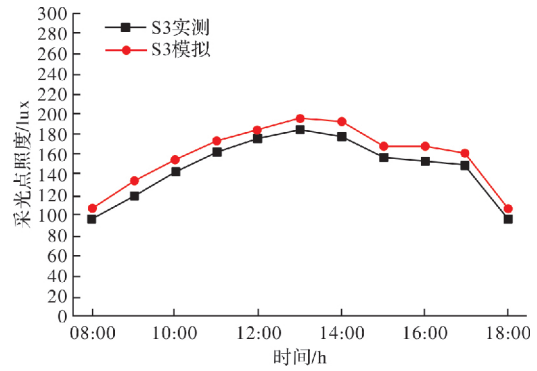
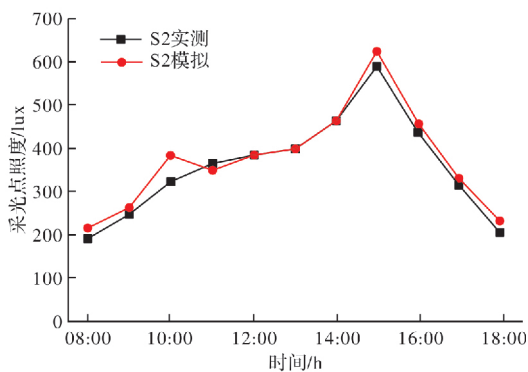
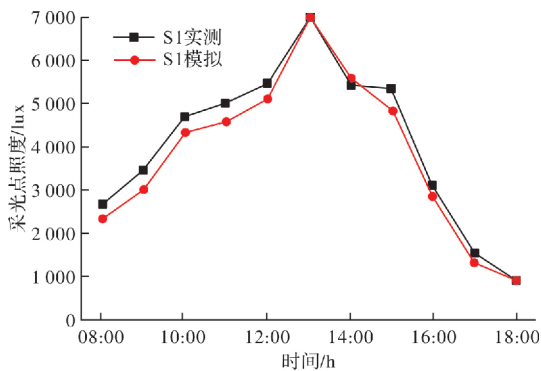
3 结果与分析

3.1 实验结果与分析

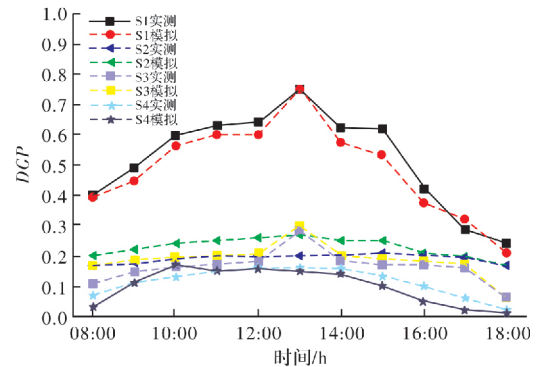
3.1.1 采光模型验证

本文通过 EC 窗采光实验,验证了所建立的采光模型的准确性,探究了夏季 EC 窗调控方式与垂直立面太阳辐射强度关系,得到了分层控制下新的垂直立面辐射强度控制阈值,从而提出了夏季以垂直立面太阳辐射强度为控制参数的 EC 窗分层控制策略。最后通过模拟对比了采用 EC 窗(分层控制策略和整体控制策略)和普通玻璃窗的建筑能耗。

图 4(a)展示了 2021 年 6 月 4 日至 6 月 7 日 EC 玻璃窗整体控制,玻璃状态分别为 S1、S4、S3、S2 四种状态时实验和模拟的采光点照度,可见 EC 窗模拟照度和实验测试照度吻合度较好,最大相对误差不超过 15%。如图 4(b)所示,四种状态下模拟与实测 DGP 基本保持一致。由此可见,本文建立的窗户模型和采光模型准确可靠。



(a) 实测与模拟采光点照度对比图



(b) 实测和模拟DGP对比图

图4 EC玻璃窗采光点照度、DGP的实测和模拟对比图

Fig. 4 Illumination and DGP of measurement and simulation of EC window

3.1.2 垂直立面辐射强度与 EC 玻璃调控策略的关系

实验于 2021 年 7 月 6 日至 28 日,晴朗天气下进行,共 17 日。表 4 和图 5 分别展示了 7 月 16 日和 17 日 9:00~10:00 和 12:10~14:00 玻璃调控方式、天气情况以及采光实验结果。

表4 7月16日和7月17日EC窗调控方式

Tab. 4 EC window mode on July 16 and 17

时间	7月16日	7月17日	太阳入射位置
9:00~10:00	上层 S2	中层 S2	未在入眼内
12:10~13:00	中、下层 S2	上、下层 S2	仅下层玻璃
13:05~14:00	中、下层 S2	上、下层 S2	中、下层玻璃

如图 5(b)所示,7 月 16 日与 7 月 17 日 9:35~10:00 的垂直立面辐射强度相差较小,但此时 7

月 16 日相较于 7 月 17 日的采光点照度和 DGP 均过高, 产生了不适眩光, 说明太阳直射光不在人眼内时 EC 窗中层玻璃着色对采光的调控效果优于上层玻璃着色; 12:10 以后太阳直射光出现在窗户上, 此时 7 月 16 日的垂直立面太阳辐射大部分时间高于 7 月 17 日, 但其所营造的室内光环境却优于 17 日, 说明此天气条件下调节 EC 窗中下层为 S2 状态更为合适。如图 5 所示, 7 月 17 日采光点照度及 DGP 与其垂直立面太阳辐射强度变化趋势相似, 而 7 月 16 日将 EC 窗中层调至 S2 时明显改善室内光环境, 这种分层控制玻璃状态能够具有针对性地改善室内光环境, 从而满足视觉舒适需求。

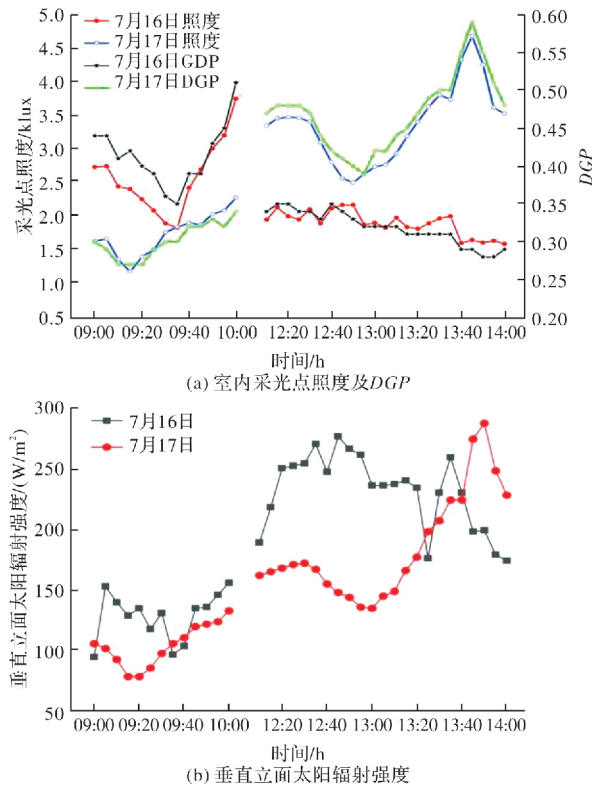


图 5 7 月 16 日和 17 日采光实验结果

Fig. 5 Results of experiment on July 16 and July 17

如图 5 所示, 7 月 16 日 12:10 的室内采光点照度为 1 956 lux, DGP 为 0.34, 满足室内采光要求。此时垂直立面太阳辐射强度为 189 W/m², 窗户状态为中下层 S2, 上层透明。太阳高度角和方位角分别为 75.5°和 121.3°, 据表 3 可将其归为太阳直射光仅透过下层窗。按照上述过程筛选出实验结果中所有满足采光点照度不超过 2 000 lux 且 DGP 不大于 0.35 的时刻点, 并记录对应时刻的垂直立面太阳辐射强度和窗户所处状态; 再按照各时刻的太阳高度角和方位角, 依据表 3 将其分成太阳直射光不在视野范围、太阳直射光透过中下两

层窗和太阳直射光仅透过下层窗三类; 最终筛选统计得到了垂直立面辐射强度与 EC 窗分层控制的关系, 如表 5 所示。

表 5 玻璃状态和垂直立面太阳辐射的对应关系

Tab. 5 Correspondence between glass state and solar radiation of vertical facade

太阳直射光入射位置	垂直立面太阳辐射强度/W·m ⁻²	窗户对应状态
所有位置	0~70	所有玻璃为 S1
未在人眼内	70~110	中层玻璃 S4
	110~140	下层玻璃 S4
	140~	中下两层玻璃为 S2
	70~210	中下两层玻璃为 S2
中、下两层玻璃	210~	中下两层玻璃为 S3
仅下层玻璃	70~120	下层玻璃为 S4
	120~250	中下两层为 S2
	250~	中下两层为 S3

当垂直立面辐射强度小于 70 W/m², 无论太阳直射光位置如何, EC 玻璃窗处于 S1 状态均可满足采光和眩光需求, 由于太阳直射光未照射到南立面或者受到较厚云层遮挡使南立面垂直太阳辐射强度较小, 因此, EC 窗处于透明态即可满足视觉舒适要求。而随着垂直立面太阳辐射强度增大, 即使太阳直射光线未出现在视野中, EC 玻璃也需调整着色状态才能满足采光要求, 即当垂直立面辐射强度处于 70~110 W/m² 时, 需将中层玻璃调至 S4 状态; 在 110~140 W/m² 时, 将下层玻璃调至 S4 状态; 超过 140 W/m² 时, 将中下两层玻璃调至 S2 状态。从上述垂直立面辐射强度与对应的 EC 窗调控方式不难发现, EC 窗中层着色和下层着色所对应的垂直立面辐射强度阈值不相同, 这是由于采光点及人眼位置与下层窗平行, 相同条件下, 下层窗着色比中层着色使采光点照度及 DGP 更低。太阳直射光出现在视野时, 当太阳直射光透过中下两层窗且垂直立面辐射强度为: 70~210 W/m², 需将中下两层玻璃调至 S2 状态; 超过 210 W/m² 时, 需将中下两层玻璃调至 S3 状态。而当太阳直射光仅通过下层窗且垂直立面辐射强度为: 70~120 W/m² 时, 需将下层窗调至 S4 状态; 120~250 W/m² 时, 需将中下两层窗调至 S2; 超过 250 W/m² 时, 需将中下两层窗调至 S3 状态。太阳直射光线出现在中下两层窗与仅出现在下层窗时 EC 窗调整状态不同的主要原因在于太阳直射光透过中下两层窗时比仅透过下层窗时的太阳高度角较低, 进入室内的太阳直射光更多且落点靠近采光点和人眼位置。

根据表5进一步提出了夏季EC窗分层控制策略,如图6所示。首先判断垂直立面辐射强度是否超过 70 W/m^2 ,未超过则将EC窗调至透明态,若超过则继续判断太阳直射光是否出现在人眼视野内,当未出现在人眼视野时,则依据其对应的室外垂直立面辐射强度阈值调整EC窗状态;若出现在人眼视野时,则进一步判断太阳直射光入射位置为中下两层窗还是仅下层窗,再根据其分别对应的垂直立面太阳辐射强度阈值对EC窗进行调控。

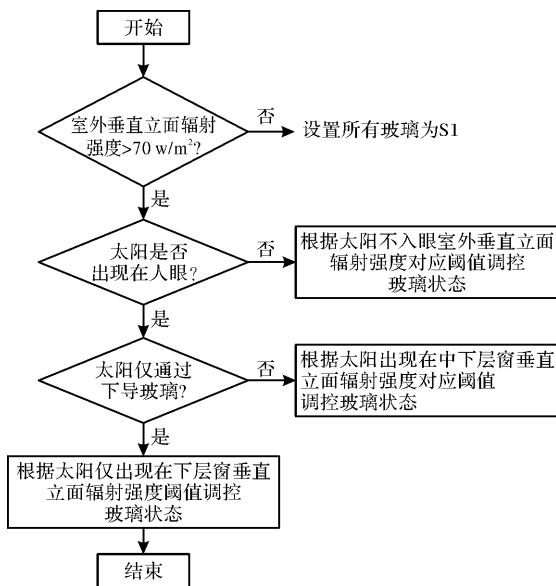


图6 夏季EC玻璃分层控制策略

Fig. 6 Layered control strategy of electrochromic window

3.2 模拟结果与分析

本文对采用分层控制策略的EC窗的能耗进行了模拟,并与整体控制策略以及普通窗进行了对比。本文在模拟时,选取太阳高度角和方位角以及垂直立面太阳辐射强度作为变量,使用Energy-Plus软件自带的EMS实现对EC窗的动态控制。

如图7所示,夏季普通窗的照明能耗仅为 $0.04\text{ kW}\cdot\text{h}$,而分层控制和整体控制策略下EC窗产生的照明能耗分别为 $2.22\text{ kW}\cdot\text{h}$ 和 $19.82\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。可以发现,EC窗采用整体控制时减少进入室内的太阳辐射热的同时遮挡了大量可见光,从而增加了照明能耗。相比于普通窗户,EC窗使用分层控制策略时的照明能耗有所增加但空调能耗减少了 $48.21\text{ kW}\cdot\text{h}$;EC窗采用分层控制时虽比整体控制增加了 $12.95\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的空调能耗,但减少了 $17.6\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的照明能耗。整体而言,采用分层控制策略的EC窗与普通玻璃窗和整体控制策略相比,总能耗分别减少了 20.4% 和 2.5% ,具有较好的节能效果。

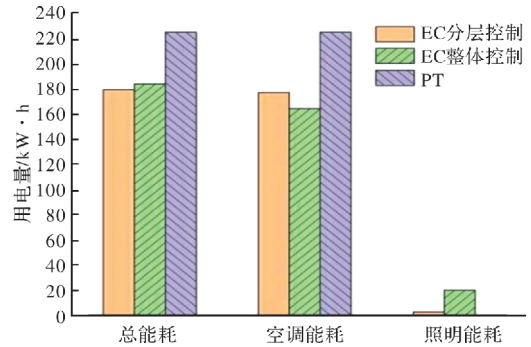


图7 EC玻璃窗与普通玻璃窗能耗对比图

Fig. 7 Energy consumption of EC and ordinary window

4 结论

本文基于EC窗的采光实验结果首先验证了其采光模型的准确性,接着对夏季EC窗调控方式与垂直立面太阳辐射强度的关系进行了研究,得到了EC窗调控状态与垂直立面太阳辐射强度阈值的对应关系并提出了夏季EC窗分层控制策略。最后,对新提出的分层控制策略进行了能耗模拟,并与整体控制策略和普通玻璃窗对比。具体结论如下:

(1)夏季当垂直立面辐射强度小于 70 W/m^2 时,EC窗整体处于透明态即可满足室内光环境需求;而随着垂直立面太阳辐射增大,则需根据太阳直射光入射位置以及垂直立面太阳辐射强度阈值来改变窗户状态以满足室内光环境需求;

(2)当太阳直射光不在人眼视野时,较低窗层着色比较高窗层着色对控制室内光环境更为有效。中、下层窗着色能遮挡更多落到采光点的光线;

(3)当太阳直射光位置处在人眼视野内,太阳直射光入射位置不同对室内采光的影响不同。入射位置为仅下层窗要比中下两层窗对室内照度及眩光影响更小;

(4)相较于普通玻璃窗,使用分层控制策略的EC窗能有效降低进入室内的太阳辐射热,节省了 20.4% 的总能耗;与整体控制策略相比,分层控制策略更大程度地利用了天然采光,减少了 2.5% 的总能耗。

本文基于采光实验从采光和视觉舒适角度对EC窗分层控制策略的参数阈值进行了优化,在营造舒适室内光环境的同时降低了能耗。该研究方法为不同季节、不同气候条件下的EC玻璃窗的分层控制研究提供了借鉴。

参考文献 References

[1] 沈庆月,陆春华,许仲梓.电致变色材料的变色机理及

- 其研究进展[J]. 材料导报, 2007(S1):284-288,292.
- SHEN Qingyue, LU Chunhua, XU Zhongzi. Color-changing mechanism of electrochromic materials and their research progress[J]. Materials Reports, 2007 (S1):284-288,292.
- [2] PICCOLO A, SIMONE F. Performance requirements for electrochromic smart window[J]. Journal of Building Engineering, 2015, 3:94-103.
- [3] 赵永青,黄永红. 电致变色玻璃窗的节能潜力研究分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2016(5):69-71.
- ZHAO Yongqing, HUANG Yonghong. Energy saving potential analysis and study of electrochromic glazing [J]. Intelligent Building & City Information, 2016 (5):69-71.
- [4] SU X, ZHANG X. Environmental performance optimization of window-wall ratio for different window type in hot summer and cold winter zone in China based on life cycle assessment[J]. Energy & Buildings, 2010, 42(2):198-202.
- [5] LAMPERT C M. Electrochromic materials and devices for energy efficient windows[J]. Solar Energy Materials, 1984,11 (1/2): 1-27.
- [6] SVENSSON S E M, GRANQVIST C G. Electrochromic tungsten oxide films for energy efficient windows [J]. Solar Energy Materials, 1984, 11(1/2): 29-34.
- [7] GRANQVIST C G, AZENS A, ISIDORSSON J, et al. Towards the smart window: progress in electrochromics[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 1997, 218: 273-279.
- [8] SELKOWITZ S E, RUBIN M, LEE E S, et al. Review of electrochromic window performance factors [R]. [s. i.]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2017, 2255:226-248.
- [9] SULLIVAN R, RUBIN M, SELKOWITZ S. Reducing residential cooling requirements through the use of electrochromic windows[R]. [s. i.]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1995.
- [10] SULLIVAN R, LEE E S, RUBIN M, et al. The energy performance of electrochromic windows in heating-dominated geographic locations[R]. [s. i.]. Lawrence Berkeley National Lab. CA (United States), 1996.
- [11] SULLIVAN R, RUBIN M, SELKOWITZ S. Energy performance analysis of prototype electrochromic windows[J]. ASHRAE Transactions, 1997, 103(2):149-156.
- [12] ALEO F, PENNISI A, SCALIA S, et al. Optical and energetic performances of an electrochromic window tested in a "PASSYS" cell[J]. Electrochimica Acta, 2001,46: 2243-2249.
- [13] SULLIVAN R, LEE E S, PAPAMICHAEL K, et al. Effect of switching control strategies on the energy performance of electrochromic windows[A]//Proceedings of SPIE. Germany, Freiburg: The International Society for Optical Engineering, 1994, 2255.
- [14] KARLSSON J, KARLSSON B, ROOS A, et al. Control strategies and energy saving potentials for variable transmittance windows versus static windows[J]. Micro Total Analysis Systems, 2001, [s. n.]
- [15] GUGLIERMETTI F, BISEGNA F. Visual and energy management of electrochromic windows in Mediterranean climate[J]. Building and Environment, 2003, 38 (3): 479-492.
- [16] 戚皓然,孙育英,王伟,等. 电致变色玻璃窗的夏季调控方法优化研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(4):70-75.
- QI Haoran, SUN Yuying, WANG Wei. Study on optimal control of electrochromic windows in Summer[J]. Building Technology, 2019, 35(4):70-75.
- [17] 孙育英,戚皓然,王伟,等. 电致变色智能窗在北京某办公室应用的节能特性分析[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(4):385-392.
- SUN Yuying, QI Haoran, WANG Wei, et al. Energy saving analysis of electrochromic windows in an office in beijing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(4):385-392.
- [18] LEE J H, JEONG J, CHAE Y T. Optimal control parameter for electrochromic glazing operation in commercial buildings under different climatic conditions [J]. Applied Energy, 2020, 260:1-13.

(编辑 吴海西 沈 波)