

夏季遮阳对建筑制冷照明能耗的影响

李峥嵘¹, 潘欣钰^{1,2}, 赵 群³

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063;

3. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092)

摘要: 对 3 种不同遮阳特性的典型卷帘进行了遮阳系数和光学性能的实验测定. 提出制冷照明综合能耗以及综合节能系数, 构建了相应的典型房间尺寸和窗墙比, 以此就遮阳装置对于制冷和照明能耗的全面影响进行综合研判. 结果表明, 可见光透过率高, 遮阳系数低的卷帘更为节能. 当窗墙比分别为 0.3 和 0.5 时, 与标准玻璃相比, 所研究卷帘的节能率达到 66% 和 47%. 当窗墙比为 0.3, 使用荧光灯时, 对卷帘的开启度进行控制优化较之没有控制的情况节能 5.4%. 如采用光效较低的卤钨灯, 节能率可达 20.7%. 基于模拟计算结果, 在考虑光热环境的情况下节能的遮阳装置应该具有较高的可见光透过率和太阳能直接反射比.

关键词: 建筑节能; 遮阳; 制冷能耗; 照明能耗

中图分类号: TU 111.19

文献标志码: A

Impact of Shading on Building Cooling and Lighting Energy Consumption in Summer

LI Zhengrong¹, PAN Xinyu^{1,2}, ZHAO Qun³

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Shipbuilding NDRI Engineering Co. Ltd., Shanghai 200063, China; 3. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The study measured shading coefficients and optical performance of three kinds of rollers, and then the combined cooling and lighting energy consumption and combined energy-saving coefficients were obtained. A typical room and window to wall ratios were established to assess the impact of shading devices on the cooling and lighting energy consumption. The results show that the roller with high visible transmittance and a low shading coefficient is more energy-saving. When the window to wall ratio equals to 0.3 and 0.5, respectively, the energy-saving rate of the roller reaches 66% and 47% correspondingly in comparison with the

standard glass. When the window to wall ratio is 0.3 and fluorescent lights are used, the control logic of the roller can save energy by 5.4%. If halogen tungsten lights are used, the control method even can save energy by 20.7%. Based on the simulation and calculation results, when outdoor daylight and thermal environment are taken into consideration, energy-saving shading devices are proposed to have high visible transmittance and solar light reflectance.

Key words: building energy efficiency; shading; cooling energy consumption; lighting energy consumption

遮阳技术由于其节能效果显著、成本低廉, 得到越来越多的应用. 近年来, 针对遮阳装置遮阳性能的研究从单一分析其隔热性能或者透光性能逐渐过渡到全面考虑光热两方面对于室内制冷和照明能耗的综合影响^[1-2]. 众所周知, 遮阳装置在遮挡阳光辐射进入室内, 从而减少空调制冷能耗的同时, 也不可避免地阻碍了自然采光, 并导致人工照明能耗的大幅上升. 而这部分上升的照明能耗相对遮阳减少的制冷能耗是处于同一量级的, 特别是在室内使用光效不是很高的灯具时, 这一矛盾就更为突出. 因此, 研究遮阳装置的遮阳系数和可见光透过率对于建筑空调和照明能耗的全面影响具有重要意义.

卷帘遮阳装置具有安装方便, 使用安全的特点, 而且, 相对于固定遮阳来说, 卷帘的遮阳系数和可见光透过率的组合方式更为多变, 调节灵活. 因此, 本文选取 3 类不同遮阳性能的卷帘试件, 对其遮阳系数和可见光透过率进行了实验测定, 根据实测结果模拟计算了由其引起的制冷照明能耗总和, 并探讨了遮阳装置的遮阳性能优化问题.

收稿日期: 2012-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(51278349)

第一作者: 李峥嵘(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑节能与遮阳. E-mail: lizhengrong@tongji.edu.cn

通讯作者: 潘欣钰(1986—), 男, 助理工程师, 硕士生, 主要研究方向为建筑节能. E-mail: pxy22@163.com

1 卷帘遮阳性能实测

1.1 卷帘试件选取

根据卷帘物性参数和遮阳性能的相关关系,可知在其他条件相同的情况下,卷帘颜色越深,遮阳系数越高,可见光透过率越低;而开孔率越小,则遮阳系数越低,可见光透过率越高.为此选取 3 类卷帘,保证试件 1,2,3 号的遮阳系数依次递减,可见光透过率依次递增.3 类卷帘试件的特性如表 1 所示.

表 1 3 类卷帘试件特性参数

Tab.1 Characteristic parameters of three kinds of roller specimens

试件编号	颜色	开孔率
1	黑色	0
2	黄色	0.05
3	白色	0.05

1.2 隔热性能测试

采用防护热箱法测试遮阳系数.测试实验装置主要包括人工光源、防护热箱、水泵、阀门、流量计、Fluke 数据记录仪、热电偶、热流计、总辐射表等.实验原理如图 1 所示.

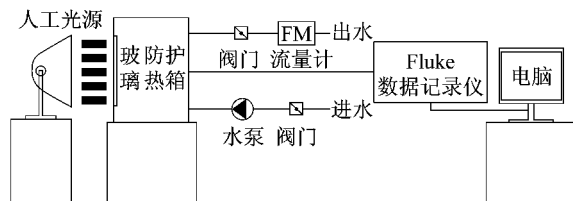


图 1 遮阳系数实验原理

Fig.1 The experimental principle of shading coefficients

箱体玻璃表面接收到的总热量 Q_{all} 可以表示为

$$Q_{all} = ES_{glass} \quad (1)$$

式中: E 为测试光源的辐射强度; S_{glass} 为玻璃面积, 本实验取 0.09 m^2 .

调节循环于防护热箱后壁盘管内的水流量,通过布置于箱体内部的热电偶所测出的箱体内空气温度波动的大小,判定箱体的传热是否达到稳定.当认为是稳态时,读取测出的进出水温差 Δt 以及所测得的水流量 V_{water} ,此时由水带走的热量 Q_r 可以表示为

$$Q_r = \rho_{water} V_{water} c_{pwater} \Delta t \quad (2)$$

式中: ρ_{water} 为水的密度; V_{water} 为水的质量流量; c_{pwater} 为水的比热容,本实验取 $4186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

然后,读取热流计所测得的电压数据,并由此计算出箱体上、下、左、右、后 5 个外壁的热流数值 q_i ,此时箱体外壁的热流 Q_p 可以表示为

$$Q_p = \sum_{i=1}^5 S_{wall} q_i \quad (3)$$

式中: S_{wall} 为外壁面积,本实验取 0.25 m^2 .

由此即可得出进入到箱体内部的热量 Q_{net} 为

$$Q_{net} = Q_p + Q_r \quad (4)$$

从而计算出太阳得热系数 S_{HGC} 为

$$S_{HGC} = \frac{Q_{net}}{Q_{all}} \quad (5)$$

在得到 S_{HGC} 之后,只需将其除以 0.87,即为遮阳系数 S_c .

根据上述的实验原理,测得的遮阳系数如表 2 所示.

表 2 3 类卷帘试件遮阳系数实测结果

Tab.2 The measured results of shading coefficients of three kinds of roller specimens

试件编号	遮阳系数
1	0.71
2	0.63
3	0.50

由表 2 可以看出,1,2,3 号试件的遮阳系数确实依次递减,符合预期结果和模拟验证的要求.

1.3 光学性能测试

遮阳卷帘的光学性能包括可见光透过率、可见光反射率、可见光吸收率 3 项指标,可以采用具有 D65 光源的 U-4100 分光光度计进行实测确定^[3].具体操作时,可将 20 mm 见方遮阳布料放入样品仓内,操控分光光度计在可见光范围内,即可获得相应的透过率和反射率.由于透过率、反射率与吸收率之和为 1,因此也可计算得到吸收率.具体数值如表 3 所示.

表 3 3 类试件的可见光调光性能参数

Tab.3 Dimming performance of three kinds of roller specimens

试件编号	透过率/%	反射率/%	吸收率/%
1	0	4.8	95.2
2	14.4	47.0	38.6
3	20.8	65.1	14.1

由表 3 可以看出,试件 1,2,3 的可见光透过率依次递增,符合预期结果和模拟验证的要求.

另外,为了更全面地了解遮阳性能,同样使用分光光度计测得 3 类试件的太阳能直接透过率和吸收率,如表 4 所示.

2 节能性评估

2.1 综合能耗评价指标

为了更加全面合理地评估遮阳装置的节能性,

表4 3类试件太阳能总透过率和吸收率

Tab.4 Total solar energy transmittance and absorption rate of three kinds of roller specimens

试件编号	太阳能直接透过率/%	太阳能直接反射率/%	太阳能直接吸收率/%
1	0	4.7	95.3
2	20.1	50.8	29.1
3	22.7	60.2	17.1

本文提出制冷照明综合能耗指标,由此来计算比较遮阳装置隔热调光性能对室内能耗的影响.制冷照明综合能耗计算公式可以表示为

$$C_{LE} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_{VACi}}{E_{ER}} + \frac{L_{Fi}}{L_E} \right) \quad (6)$$

式中: C_{LE} 为光热综合能耗; H_{VACi} 为第*i*个计算时刻的窗体日射冷负荷; L_{Fi} 为第*i*个计算时刻由于室内照度不足而需要人工照明补足的光通量; E_{ER} 为建筑暖通系统的能效比,本文取值为3; L_E 为选用灯具的光效,本文取常用的荧光灯光效为45 lm·W⁻¹。

式(6)能够全面评估遮阳装置对于室内照明能耗以及暖通能耗的综合影响.同时,为了使得制冷照明空调能耗能有一个对比的统一基础,规定一类遮阳材质的综合节能系数为

$$C_{CLE} = \frac{C_{LEshade}}{C_{LEglass}} \quad (7)$$

式中: C_{CLE} 为遮阳装置的综合节能系数; $C_{LEshade}$ 为标准玻璃加装遮阳装置的窗体制冷照明综合能耗; $C_{LEglass}$ 为只有标准玻璃情况下的窗体制冷照明综合能耗。

2.2 评估模拟计算方法

计算制冷照明综合能耗主要采用软件模拟的方法.考虑到E+软件的天空模型为CIE(International Commission on Illumination)的4种标准天空模型叠加而成,更为符合实际情况^[4],因此采用该软件模拟自然采光情况下的室内照度分布,拟合沿窗体的进深距离和室内照度的关系曲线,再根据建筑照明设计标准^[5],照度的下限值取300 lx,由此算出 L_{Fi} 。

因为E+软件是基于热平衡法计算,无法输出窗体日射负荷报告,所以该项负荷采用精度同样得到认可的eQuest能耗软件计算.为保持模拟数据的一致性,这两款软件都采用同一套SWERA气象数据,因此能够保证两者的模拟计算结果是在光、热环境匹配一致的气象数据下进行的。

在软件当中构建几何尺寸为5.0 m×5.0 m×2.7 m的常见房间,模拟日射负荷最大的西向窗体,窗墙比分别取0.3和0.5.由于本模拟是为了验证遮阳卷帘的节能性,因此应尽量降低玻璃的影响,故设定标准玻璃的传热系数*U*值为5.91 W·m⁻²·K⁻¹,遮阳系数为1,可见光透过率为0.9^[6].另需说明的是,室内照度分布计算网格离开四面外墙各0.5 m,每个计算点间隔为0.5 m,该布置主要考虑到在贴近墙壁的区域,软件计算的精度会出现降低,且计算的目的主要是拟合室内照度与建筑进深的关系,故而,没有必要计算到所有的室内工作面区域.室内各壁面的光学性能按照建筑采光设计标准^[7]取值,如表5所示。

表5 室内各表面可见光反射率

Tab.5 Visible light reflectance of indoor surfaces

表面名称	可见光反射率
顶棚	0.75
墙面	0.60
地面	0.30

根据以上的软件设定,再将实测的3类卷帘相关遮阳性能导入到软件当中,即可得到标准玻璃以及分别加装1,2,3号试件后的窗体日射得热负荷 H_{VACi} 以及室内补足300 lx标准所需的光通量 L_{Fi} 。

2.3 综合节能评估结果

根据2.2节中模拟所得的 H_{VACi} , L_{Fi} 以及式(6)和式(7)的取值和计算方法,可以获得各个模拟组别的制冷能耗、照明能耗、制冷照明综合能耗以及综合制冷系数,如表6所示。

表6 各模拟组别的综合节能计算结果

Tab.6 The computed results of comprehensive energy-saving rate of all the simulation groups

窗体构成	窗墙比	制冷能耗/(kW·h)	照明能耗/(kW·h)	C_{LE} /(kW·h)	C_{CLE} /(kW·h)
标准玻璃	0.30	1.93	0.00	1.93	1.00
	0.50	3.14	0.00	3.14	1.00
加装1号	0.30	1.22	3.75	4.97	2.57
	0.50	1.97	3.75	5.72	1.82
加装2号	0.30	1.08	0.77	1.85	0.96
	0.50	1.75	0.24	1.99	0.63
加装3号	0.30	0.87	0.41	1.27	0.66
	0.50	1.40	0.08	1.48	0.47

由表 6 可以看出,遮阳性能最优的 3 号试件具有最小的综合节能系数. 在窗墙比为 0.3 时,3 号试件的 C_{LE} 为 $1.27\text{ kW}\cdot\text{h}$,而 1 号试件高达 $4.97\text{ kW}\cdot\text{h}$,窗墙比为 0.5 时,3 号试件的 C_{LE} 为 $0.47\text{ kW}\cdot\text{h}$,而 1 号试件高达 $5.72\text{ kW}\cdot\text{h}$. 在两种大小不同的窗墙比情况下,3 号试件基本都比 1 号试件节能 74%. 另外值得注意的是,选择遮阳性能较差的卷帘在考虑光热综合效应的时候可能导致比不加装卷帘的情况更不节能.

3 控制策略与遮阳性能优化探讨

3.1 卷帘开启控制策略优化

卷帘在实际应用当中,随着室外光热环境的变化,可以控制其开启度,从而获得更好的隔热调光效

果. 为了探究在考虑制冷照明综合能耗的情况下,控制策略是否还能有效地降低能耗,按照上述指标计算方法,对 3 号试件覆盖窗体一半面积的情况(即 3 号试件开启 50%)进行了模拟. 标准玻璃、加装 3 号试件、3 号试件开启 50% 的 3 种情况逐时制冷照明综合能耗数据如图 2 所示.

由图 2 可知,窗墙比为 0.3 时,8:00—10:00 的时段将 3 号试件开启 50% 是比较节能的,之后的 11:00—17:00 则是 3 号试件全部放下更为节能. 这一控制策略较之全天候将 3 号试件放下可以节能 5.4%. 而如果采用光效为 $20\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 的卤钨灯,8:00—12:00 开启 3 号试件 50%,之后时段全部放下,则和全天放下 3 号试件比较可以节能 20.7%. 采用不同荧光灯和卤钨灯两种情况下的优化控制策略能耗指标数据如表 7 所示.

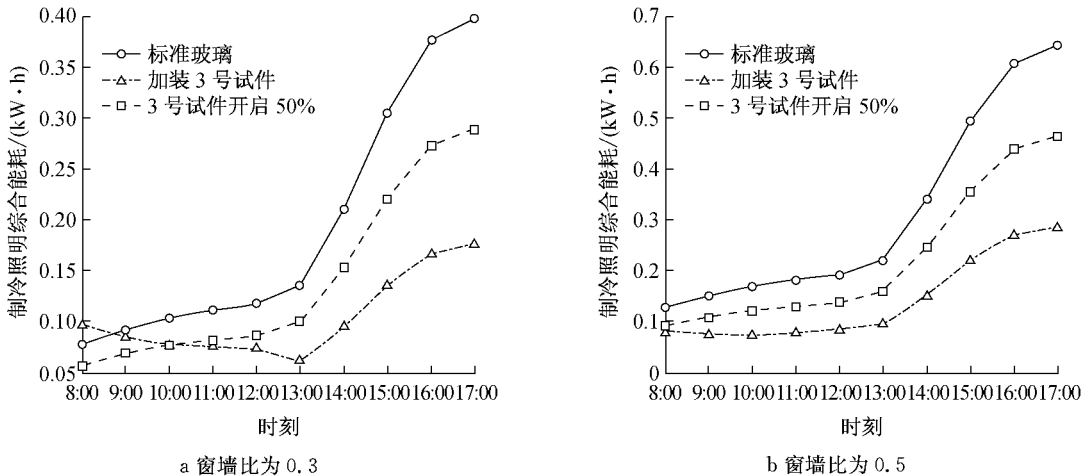


图 2 3 种情况的逐时制冷照明综合能耗
Fig.2 The hourly combined cooling and lighting energy consumption in 3 cases

表 7 不同灯具和控制策略的逐时能耗指标

Tab.7 The hourly energy consumption index with different artificial lights and control strategies				
时刻	$C_{LE}/(\text{kW}\cdot\text{h})$			
	卤钨灯 3 号试件全部放下	卤钨灯控制优化	荧光灯 3 号试件全部放下	荧光灯控制优化
8:00	0.177	0.058	0.098	0.058
9:00	0.139	0.069	0.085	0.069
10:00	0.115	0.077	0.077	0.077
11:00	0.107	0.082	0.076	0.076
12:00	0.100	0.087	0.074	0.074
13:00	0.061	0.061	0.061	0.061
14:00	0.095	0.095	0.095	0.095
15:00	0.136	0.136	0.136	0.136
16:00	0.167	0.167	0.167	0.167
17:00	0.177	0.177	0.177	0.177
总计	1.274	1.01	1.046	0.99

注:控制优化栏目中灰色背景对应时段采用将 3 号试件全部放下的策略,白色背景对应时段采用将 3 号试件开启 50% 的策略.

而当窗墙比达到 0.5 时,可以看到基本上全天候将 3 号试件放下是最节能的. 这主要是由于窗墙

比扩大时,制冷负荷大幅增加,而照明能耗在总能耗中所占的比例就会减小. 在这种情况下卷帘全部放

下既能有效降低制冷能耗,同时也不致于将室外光线全部遮挡住,从而造成照明能耗大幅上升。

3.2 卷帘遮阳性能组合优化

通过上文的模拟计算可以发现,一种遮阳装置的遮阳性能主要包括遮阳系数和可见光透过率这两项,理想的遮阳装置应该有较高的可见光透过率和较低的遮阳系数。下面将3类实测遮阳试件的可见光透过率、太阳能直接透射率和吸收率之和以及遮阳系数制成综览图,如图3所示。

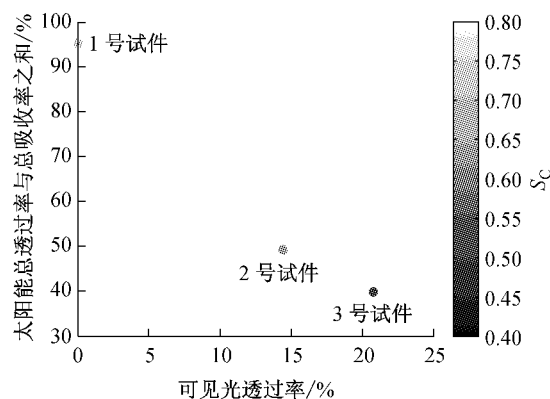


图3 遮阳装置遮阳性能综览

Fig.3 An overview of shading performance of different shading devices

通过遮阳性能综览图可以清楚地看到,在制冷照明综合能耗评估中具有较好节能性的3号试件可见光透过率高,而太阳能直接透过率与吸收率之和较小,因此其遮阳系数也是较低的,数据点呈现深色。理想的遮阳材质数据点应该落在遮阳性能综览图表的右下方,且其数据点的颜色应该偏深。而要达到这样的性能组合,就要求遮阳材质在可见光波段的透过率要高,同时在红外波段的反射率要高,从而可以保证其遮阳系数是较低的。

4 结论

本文通过实测获得了3类不同卷帘的遮阳系数以及相应的光学特性,并提出用制冷照明综合能耗和相应的综合节能系数来全面评估遮阳装置的节能性。结论如下:

(1) 窗墙比为0.3时,3号试件的 C_{LE} 为1.27 kW·h,而1号试件高达4.97 kW·h;窗墙比为0.5

时,3号试件的 C_{LE} 为0.47 kW·h,1号试件高达5.72 kW·h。在两种大小不同的窗墙比情况下,3号试件基本都比1号试件节能74%。

(2) 当窗墙比较小小时,对卷帘进行开启度的优化控制较之将卷帘全部放下,不进行调节的情况更为节能。另外,控制策略的节能性还与照明灯具的光效有关,光效越低,则节能性越好。

(3) 遮阳性能作为遮阳系数和可见光透过率的组合特性,更为合理的遮阳材质应该具备在可见光波段有较高的透过率,同时其太阳直接反射率也要较高,保证遮阳系数是比较小的,从而在引起较小制冷能耗的同时,又不会使得室内的照度过低。

参考文献:

- [1] 耿建国. 上海地区遮阳住宅建筑自然采光与能耗研究[D]. 上海: 同济大学机械与能源工程学院, 2008.
GENG Jianguo. Research on the indoor daylighting environment and energy consumption of shanghai shaded residential building [D]. Shanghai: College of Mechanical Engineering of Tongji University, 2008.
- [2] Hussain M Alzoubi, Amneh H H Al-Zoubi. Assessment of building facade performance in terms of daylighting and the associated energy consumption in architectural spaces: vertical and horizontal shading devices for south exposure facades[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 1592.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JG/T280—2010 建筑遮阳产品遮光性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JG/T280-2010 Test method for building shading product visual performance [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [4] Lawrence Berkely National Laboratory, University of Illinois, University of California. EnergyPlus 6.0 manual [M]. Berkeley: LBNL in Berkeley, 2010.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50034—2004 建筑照明设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50034—2004 Standard for lighting design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.
- [6] ASHARE. Handbook—2001 fundamentals [M]. Atlanta: ASHARE, 2001.
- [7] 中华人民共和国建设部. GB50033—2001 建筑采光设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50033—2001 Standard for daylighting design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.