

# 既有高层玻璃幕墙建筑遮阳卷帘的调节规律研究

李 翠<sup>1</sup>, 李峥嵘<sup>1</sup>, 赵 群<sup>2</sup>

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092)

**摘 要:**重点分析了上海 9 幢高层玻璃幕墙建筑遮阳的全年使用规律, 提出“卷帘使用状态特征值 Y”的概念, 用于量化研究遮阳的使用规律及其对空调负荷的影响. 结果显示, 上海既有高层玻璃幕墙建筑的遮阳设施以内遮阳卷帘为主, 各遮阳帘 Y 值的分布较分散, 呈现明显的随机性. 而且, 遮阳卷帘的调节规律受到窗户朝向、季节和时间的影响. 遮阳卷帘的日调节主要集中在上下班和午休时间. 在同一季节内, 东南向日平均调节比例相对较高, 北向则较低; 北向遮阳日平均调节比例较高的季节是春季, 东北向和东南向则是夏季. 在季节转换后, 超过 25% 的卷帘将发生季节性调节, 其中以东南向窗户最为显著; 春季转向夏季后, 遮阳帘的季节性调节比例高于冬季转向春季后的比例. 考虑特征值 Y 时, 不同朝向, 夏季设计日空调累计负荷与不考虑时的相差 20%~27%, 后者扩大了实际遮阳使用状态下的节能效果.

**关键词:**高层幕墙建筑; 建筑遮阳; 调节; 卷帘

**中图分类号:** TU86

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)01-0086-06

2000 年前后是上海玻璃幕墙高层建筑迅速发展的重要时期, 当时的玻璃幕墙主要以单层玻璃幕墙为主, 后来逐渐出现了双层玻璃幕墙和通风玻璃幕墙建筑. 但总体而言, 现有玻璃幕墙建筑围护结构的保温隔热性能与非玻璃幕墙建筑差距较大, 特别是在炎热夏季, 太阳辐射不仅造成建筑室内眩光<sup>[1]</sup>, 而且带来较大的空调冷负荷. 建筑遮阳可以阻挡太阳辐射热, 防止室内温度升高<sup>[2]</sup>, 提高室内舒适性<sup>[3]</sup>. 2005 年颁布的公共建筑节能设计标准强调内遮阳不能计入节能设计计算中<sup>[4]</sup>, 但是对于玻璃幕墙高层建筑而言, 非内遮阳技术在国内应用较少而且代价较高.

笔者于 2010 年 12 月~2011 年 9 月, 针对建筑遮阳的应用与调节, 跟踪拍摄了 50 幢建筑, 并对其中的 9 幢高层玻璃幕墙建筑进行了三个季节的跟踪. 本文重点探讨该 9 幢建筑遮阳的使用与调节规律, 分析现有条件下, 遮阳卷帘的调节行为对高层玻璃幕墙建筑空调冷负荷的影响.

## 1 既有幕墙建筑遮阳状态描述方法

### 1.1 九幢高层玻璃幕墙建筑的分布与基本信息

截止到 2012 年 1 月, 统计结果显示上海市玻璃幕墙建筑约 3 600 栋, 其中高层幕墙建筑占 50% 左右, 主要分布于中心城区, 本文研究的建筑以陆家嘴金融区及同济大学周边为主. 被调查的幕墙建筑以办公建筑为主, 内区多为电梯和楼梯间, 外区为办公区且多以开放式办公室为主. 由于受到当地地形的影响, 建筑朝向多为东南、东北、北向、南向等.

本文重点研究的 9 幢建筑, 共有 752 块幕墙单元(以下简称窗户), 其中北向 154 块、东南向 286 块、东北向 312 块. 采用室外拍摄的方法, 对窗的遮阳卷帘的使用状态进行不同季节、不同时间的监测.

### 1.2 既有高层玻璃幕墙建筑遮阳设施的选择与控制模式

根据已有的 1 万多张相片, 本文调查的 752 个窗户采用的内遮阳均为卷帘, 从卷帘所处的开启状态及其变化规律判断, 这些卷帘没有执行集中调控, 导致幕墙立面上的卷帘位置参差不齐、高低无序, 见图 1.

收稿日期: 2012-09-17 修改稿日期: 2013-01-04

基金项目: 中美清洁能源联合研究中心建筑节能合作项目(2010DFA72740)

作者简介: 李 翠(1982-), 女, 上海人, 博士研究生, 主要从事建筑节能方面研究.

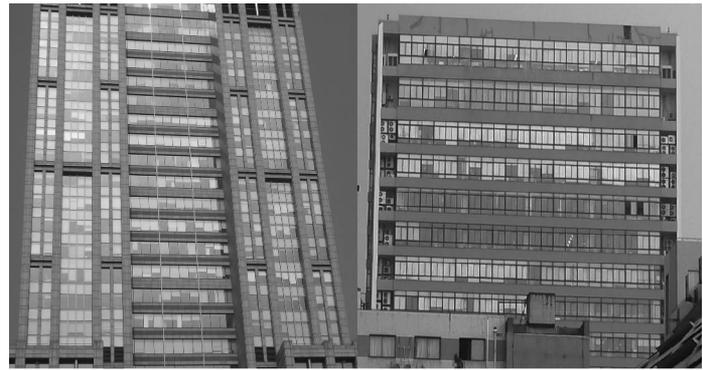
### 1.3 遮阳卷帘使用状态的描述

为了量化研究卷帘的开启状态,本文提出“卷帘使用状态特征值”的概念(见公式 1),用  $Y$  表示(“卷帘使用状态特征值”概念的示意图见图 2):

$$Y = \begin{cases} 0, & \text{卷帘完全收起} \\ x_i & \text{卷帘落下长度与其完全打开落下长度之比} \\ 1, & \text{卷帘完全落下} \end{cases} \quad (1)$$

## 2 调研结果讨论

本文主要研究遮阳的调节性能,而公司一般上班时间是上午 9 点到下午 6 点,因此遮阳拍摄的时间段选择为上午 8:00 到下午 6:30,每隔半小时拍摄一次.如果前后两次的照片显示卷帘的  $Y$  值发生了变化,即认为卷帘被调节了一次;并根据  $Y$  值的增加或者减少判断卷帘被下调或者上调.这样可以统计出卷帘某时间段内被调节的次数、发生的时间以及相应的调节方向(上调或者下调).



A 东南面 B 北面

图 1 幕墙建筑遮阳应用现状

Fig. The application status of glass-curtain buildings

### 2.1 各朝向、季节卷帘 $Y$ 值的分布规律

首先将各朝向、季节条件下卷帘的  $Y$

值及相应的卷帘数量进行了统计.为了处理数据方便,本部分用 20 个  $Y$  值描述照片中遮阳卷帘所处的状态,分别为 0、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.45、0.5、0.55、0.6、0.65、0.7、0.75、0.8、0.85、0.9、0.95、1.0.不同季节、不同建筑朝向上各卷帘在不同时间的  $Y$  值见表 1.

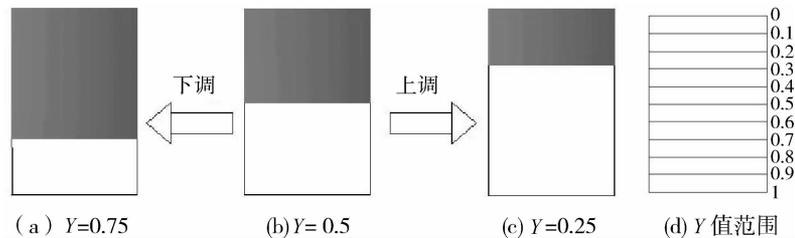


图 2 “卷帘使用状态特征值  $Y$ ”取值示意图

Fig.2 The characteristic value  $Y$  of roller blind's running status

表 1 不同季节各朝向上卷帘  $Y$  值及其相应的卷帘数量

Tab.1 Value  $Y$  and quantity of roller blind for every façade aspect in different seasons

季节朝向 上卷帘数量	Y 值																			
	0	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
东北向 冬季	92	3	1	9	10	3	9	7	10	8	6	17	14	19	12	20	2	21	6	44
东北向 春季	102	1	0	16	0	2	10	5	4	15	11	1	6	27	16	25	5	17	0	48
东北向 夏季	96	4	0	0	6	4	6	2	4	20	4	8	11	20	7	32	10	19	14	46
东南向 冬季	89	5	2	8	7	5	9	9	6	9	12	7	3	2	9	18	3	12	2	69
东南向 春季	65	17	3	7	12	8	13	6	1	8	5	4	8	7	9	15	9	7	4	78
东南向 夏季	80	7	9	7	3	4	7	4	2	7	4	7	3	12	4	13	5	10	12	86
北向 冬季	0	4	10	1	2	4	3	0	2	1	3	1	2	4	6	11	4	16	0	80
北向 春季	1	8	3	5	0	8	4	4	0	4	5	3	6	2	2	17	1	26	0	54
北向 夏季	31	0	2	3	0	2	2	0	1	3	3	2	3	9	3	24	0	9	1	55

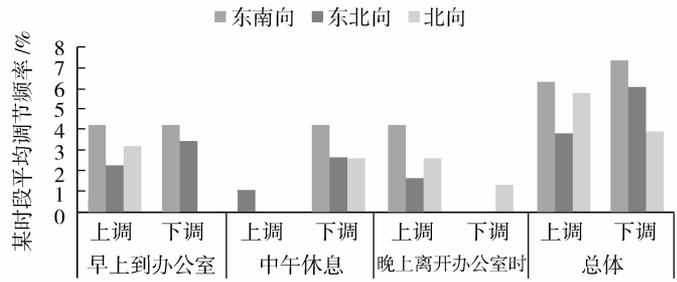
显然,除了北向的冬季、春季外,所有卷帘的使用状态呈现两头大的规律,即  $Y$  为 0 和 1 的卷帘数量明显多于其它状态的卷帘数量,但是北向遮阳帘全部放下的数量占据绝对多数.这种分布规律也将影响遮阳帘的调节规律(见下文).

### 2.2 朝向和时间对遮阳帘使用调节的影响

数据统计结果显示卷帘的日调节发生率非常低,且主要发生在上下班和中午休息时间,因此,以夏季为例,作者将此三个时刻发生调节的卷帘数量及其调节方向进行统计,并用总窗户数量和监控天数进行加权平均,得到“时段平均调节比例”的值(见公式 2). 结果如图 3 所示.

$$\text{时段平均调节比例} = \frac{\text{某季节某朝向某时段所有遮阳被调节次数}}{\text{该季节该朝向总窗户总数} \times \text{该季节该朝向总监控天数}} \quad (2)$$

显然,无论朝向如何,早上刚到办公室的时候,遮阳双向调节行为发生的概率都比较高,中午休息的时候向下调节、下班时候向上调节的概率也比较高,(这与文献[5]的研究结果相似). 早晨上班时候的调节行为受到多种因素影响(包括工作类型、天气条件、室内照度、个人心理等等),中午的下调行为应该与午休的需求有关,而下班时间的上调暗示室内人员在结束一天工作后有种期望接触自然、获得休息或者其它信息的渴望,与文献[6]~[12]研究结果相似.



遮阳被调节时间及其调节方向

图 3 卷帘日调节规律

Fig. 3 The daily running behavior of the rollers

总体而言,东南向上调、下调的比例相当,这与东南向遮阳帘处于全开、全关状态的数量相有关;东北向遮阳帘下调的比例较多,这是因为东北向遮阳帘处于全开的数量相对较多;北向遮阳帘上调的比例较多,这与北向遮阳帘处于全关的数量相对较多有关,见表 1.

### 2.3 朝向和季节对遮阳帘使用调节的影响

对比前后两个拍摄时刻的 Y 值,如果 Y 值发生了变化,则认为该遮阳帘被调节了一次. 采用“日平均调节比例”的概念(见公式 3)对某季节内各朝向建筑遮阳卷帘的调节数量进行统计. 结果(见图 4)显示,东南向和东北向遮阳在夏季的调节频率高于冬季和春季,因夏季的空气温度、尤其是太阳直接辐射造成的眩光影响比较大,随着太阳的日运行,导致室内人员对遮阳帘的调节行为相对比较多.

$$\text{日平均调节比例} = \frac{\text{某朝向某季节所有遮阳被调节总次数}}{\text{该季节该朝向总窗户总数} \times \text{该季节该朝向总监控天数}} \quad (3)$$

而对于北向建筑遮阳而言,冬季和春季的调节比例明显高于夏季,可能是由于北向主要受到太阳散射辐射影响,夏季太阳直接辐射在北向造成的眩光现象较少,而冬季和春季由于室外气温较低,希望获得太阳辐射导致遮阳帘相对频繁调节.

### 2.4 季节变化对遮阳帘使用调节的影响

将某一遮阳帘的 Y 值按照季节进行监控次数的加权平均(见公式 4),可以得到该遮阳帘的季节平均 Y 值,并与相邻季节的季节平均 Y 值相比较,如果不同,认为该遮阳帘发生了季节性的调节行为,随季节变化发生调节的遮阳帘数量占总窗户数量的比例,见下图 5.

$$\text{季节平均 Y 值} = \frac{\text{同一季节对同一遮阳卷帘 Y 观测值的总和}}{\text{同一季节对同一卷帘的总观测次数}} \quad (4)$$

显然,季节变化导致的遮阳帘的调节比例超过 25%,远高于日调节比例和季节内的调节比例. 说明室外气温或者太阳辐射的变化对于遮阳帘的使用具有较大影响.

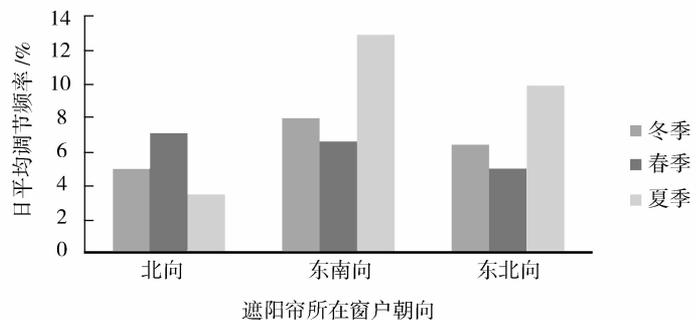


图 4 不同季节各朝向遮阳帘的日平均调节频率

Fig. 4 The daily running behavior of the rollers for every façade aspect in different seasons

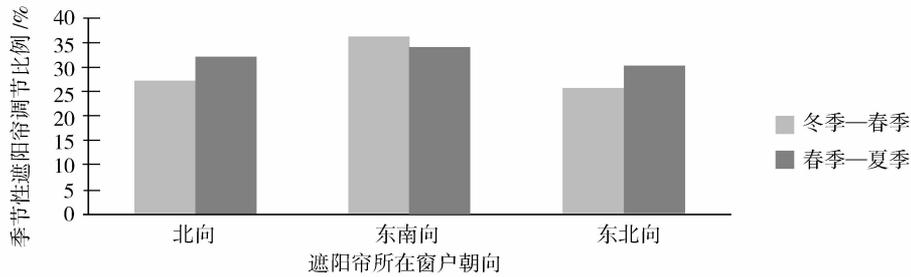


图 5 随季节变化发生调节的遮阳帘比例

Fig. 5 The running behavior proportion of the rollers with seasonal changes

### 3 遮阳帘调节规律对建筑空调负荷的影响

#### 3.1 遮阳帘调节规律的数学描述

为了定量研究遮阳帘的使用状态对建筑空调负荷的影响,本部分采用拟合方法,针对不同朝向与季节,建立遮阳帘特征值  $Y$  与处于该特征值下的遮阳数量之间的拟合关系,再以窗口面积作为加权系数计算该朝向、某季节的当量遮阳系数,最后将该当量遮阳系数带入软件中,模拟计算实际条件下的空调冷负荷,并与目前常用的方法比较,探索特征值  $Y$  的引用对空调负荷计算结果的影响。

考虑实际应用中较难判断  $Y$  值为 0.05 所引起的卷帘高度变化,同时考虑  $Y$  的分档数目对数学拟合公式精度的影响,将卷

表 2 遮阳  $Y$  值与对应的数量百分比之间的拟合多项式

Tab. 2 The polynomial regression of the roller blind'  $Y$  and the corresponding proportion

朝向	季节	$n$ 与 $y$ 之间的拟合关系式	对拟合公式的评价		
			调整 $R^2$	$F$	$Sig.$
NE	冬	$n1=0.497-2.485Y+4.396Y^2-2.262Y^3$	0.767	7.599	0.065
	春	$n2=0.576-3.151Y+5.732Y^2-3.017Y^3$	0.842	11.62	0.037
	夏	$n3=0.572-3.273Y+5.96Y^2-3.077Y^3$	0.831	10.843	0.041
SE	冬	$n4=0.409-1.289Y+1.127Y^2$	0.712	8.426	0.037
	春	$n5=0.391-1.29Y+1.175Y^2$	0.88	22.976	0.006
	夏	$n6=0.44-1.599Y+1.484Y^2$	0.79	12.309	0.02
N	冬	$n7=0.07+0.287Y-1.717Y^2+1.872Y^3$	0.988	165.192	0.001
	春	$n8=0.148-0.571Y+0.788Y^2$	0.844	17.286	0.011
	夏	$n9=0.289-1.153Y+1.242Y^2$	0.942	49.974	0.001

帘的  $Y$  值分为 7 档,以中心位置表示该档位的  $Y$  值,分别为 0.1, 0.25, 0.4, 0.55, 0.7, 0.85, 1. 前后两个  $Y$  值对应的卷帘数量计入该中心值对应的卷帘数量. 这样可以得到各朝向、各季节卷帘使用状态 ( $Y$ ) 与该状态下卷帘数量百分比 ( $n$ ) 之间拟合关系式,并用统计量判定系数 ( $R^2$ )、检验统计量 ( $F$ ) 和  $F$  检验的显著性水平  $Sig$  对拟合结果进行评价,结果见表 2. 可以认为表 2 中得到的拟合多项式满足精度要求。

#### 3.2 现有遮阳调节模式对建筑能耗的影响

采用表 2 中的拟合公式,本部分引入受季节、朝向影响的面积当量遮阳系数概念  $C'_i$ :

$$\bar{Y} = \frac{A_1 Y_1 n_1 + A_2 Y_2 n_2 + \dots + A_n Y_n n_n}{\sum (A_1 Y_1 + A_2 Y_2 + \dots + A_n Y_n)} \quad (5)$$

$$C'_i = \bar{Y} C_i + (1 - \bar{Y}) C_{iw} \quad (6)$$

当  $C_{iw} = 1$  时,  $C'_i = 1 - (1 - C_i) \bar{Y}$  (7)

其中:  $C_i$  为窗遮阳设施的遮阳系数;  $C_{iw}$  为无遮挡部分遮阳系数;  $Y_i$  为某朝向、季节下遮阳使用状态特征值;  $n_i$  为对应某  $Y_i$  的遮阳卷帘数量与总窗户数量之比;  $A_i$  为对应某  $Y_i$  的窗洞面积。

因此,计算辐射得热引起的空调设计负荷时应采用以下公式 8,而非公式 9<sup>[13]</sup>:

$$\dot{Q}_{c(\tau)} = C_a A_w C_s C'_i D_{jmax} C_{LQ} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{c(\tau)} = C_a A_w C_s C_i D_{jmax} C_{LQ} \quad (9)$$

其中:  $C_a$  为有效面积系数;  $A_w$  为窗口面积,  $m^2$ ;  $C_s$  为玻璃的遮阳系数;  $D_{jmax}$  为日射得热系数;  $C_{LQ}$  为窗玻璃辐射得热冷负荷系数。

以某种灰色镀膜遮阳卷帘、双层中空断热铝合金窗户为例,研究由于 $C'_i$ 的使用对辐射得热负荷的影响.计算中采用的卷帘遮阳系数为0.62<sup>[14]</sup>,窗户有效面积系数为0.75,双层6 mm中空玻璃的遮阳系数0.74.根据公式8和公式9容易得到上海地区夏季设计日6点~18点日射辐射得热累计冷负荷,见表3.

公式(8)的计算过程考虑了遮阳实际使用高度的影响,该影响通过特征值 $Y$ 传递给当量遮阳系数;公式(9)没有考虑遮阳实际使用中的差异,认为遮阳全

部放下,遮阳系数为遮阳产品自身的取值.不同朝向,两者计算结果相差20%~27%,说明如果不考虑特征值 $Y$ 的影响,将放大遮阳设施引起的节能效果,与实际差距较大.

## 4 结 论

(1)上海既有高层玻璃幕墙建筑的遮阳仍以内遮阳卷帘为主,其调节主要依靠室内人员的自主调节,集中控制率很低;(2)被调查建筑中,遮阳的调节呈现明显的随机性,而遮阳帘的悬挂高度与该朝向上、处于该高度的遮阳数量之间存在2次方或者3次方多项式的关系;(3)既有幕墙建筑的遮阳卷帘的调节规律受到朝向、季节和时间的影响;(4)既有遮阳卷帘的日调节频率较低,主要集中在上下班、午休的时候;全开或者全闭合状态的遮阳帘数量占多数;其中东南向的遮阳卷帘调节频率相对较高;(5)对于东南和东北向遮阳卷帘而言,日平均调节频率从高到低的季节分别是夏季、冬季和春季;而对于北向建筑而言,其从高到底的顺序是春季、冬季和夏季;(6)当季节发生转换时,超过25%的遮阳帘状态将发生季节性变化.对于东南向建筑而言,从冬季到春季和从春季到夏季所引起的发生季节性调节的遮阳帘数量相当;对于北向和东北向建筑,春季到夏季引起的季节性调节比例略高于从冬季变化到春季;(7)在模拟计算通过窗户的日射得热冷负荷时,必须考虑遮阳使用规律带来的影响.以上海为例,通过设计日冷负荷的计算发现,遮阳使用规律带来的计算结果与不考虑该规律的计算结果相差20%以上,后者放大了遮阳设施引起的节能效果,与实际差距较大.

## 5 讨 论

遮阳技术虽然引起了社会和行业的高度重视,但是遮阳系统或者产品的使用规律却缺乏相应的资料积累.本文仅仅是在该方面做了一点尝试,还需要更多的工作支持相关方面的研究,为遮阳技术的合理应用、调节、正确评价提供依据.

最后,本项目收到了中美清洁能源联合研究中心建筑节能合作项目(2010DFA72740)的支持,对此表示感谢.

## 参考文献 References

- [1] 罗 涛. 玻璃幕墙建筑的室内外天然光环境研究[D]. 北京:清华大学建筑学院,2005.  
LUO Tao. Study on the indoor and outdoor daylight environment of glass curtain wall buildings[D]. Beijing: School of architecture, Tsinghua University, 2005.
- [2] 李峥嵘,赵 群,展 磊. 建筑遮阳与节能[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.  
LI Zheng-rong, ZHAO Qun, ZHANG Lei. Solar Shading and Energy Conservation[M]. Beijing: China Building industry Press, 2009.
- [3] 杨慧媛,高甫生. 玻璃类型对玻璃幕墙建筑室内热环境的影响分析[J]. 暖通空调,2005,35(10):23-28  
YANG Hui-yuan, GAO Pu-sheng. Analyses of the effect of glass types on indoor thermal environment in glass curtain buildings[J]. HV&AC, 2005,35(10):23-28.
- [4] GB50189-2005,公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.  
GB50189-2005, Design standard for energy efficiency of public building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.

表3 上海地区夏季设计日辐射得热累计冷负荷计算结果

Tab.3 Calculation results of summer design solar heat gain on accumulated cooling load in Shanghai

朝向	公式8的计算结果 (w/m <sup>2</sup> 窗洞面积)	公式9的计算结果 (w/m <sup>2</sup> 窗洞面积)	相对差值 /%
SE	125.3	99.2	26
NE	219.8	172.5	27
N	82.5	69.0	20

- [5] VorapatInkarojrit. Balancing Comfort; Occupants' Control of Window Blinds in Private Offices. Doctor of Philosophy in Architecture in the GRADUATED DIVISION of the UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY, 2005.
- [6] Haydar Sukru Tokel. User Control Actions in Buildings; A Case Study of Shading[J]. MSc Program "Building Science & Technology", Vienna, 2006.
- [7] CF Reinhart DrIng, K Voss DrIng. Monitoring manual control of electric lighting and Blinds[J]. Lighting Res. Technol, 2003, 35(3):243-260.
- [8] Ardeshir Mahdavi, Abdolazim Mohammadi. Occupants' operation of lighting and shading systems in office buildings [J]. Journal of Building Performance Simulation, 2008(3): 57-65.
- [9] ZHANG Yu-fan, Peter Barrett. Factors influencing occupants' blind-control behaviour in a naturally ventilated office building[J]. Building and Environment, 2012(54):137-147.
- [10] Christoph F Reinhart. Lightswitch-2002; a model for manual and automated control of electric lighting and blinds [J]. Solar Energy, 2004, 77:15-28.
- [11] JIAN Yao. An Investigation of Adjustment of Solar Shading Devices in Office Buildings[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011.
- [12] Abdolazim Mohammadi, Elham Kabir. MODELING USER CONTROL OF LIGHTING AND SHADING DEVICES IN OFFICE BUILDINGS[J]. AN EMPIRICAL CASE STUDY, Building Simulation, 2007:772-778
- [13] 陆亚俊, 马最良, 邹平华. 暖通空调[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.  
LU Ya-jun, MA Zui-liang, ZHOU Ping-hua. HV&AC [M]. second edition. Beijing: China building industry press, 2007.
- [14] 潘欣钰. 卷帘和软百叶遮阳性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.  
PAN Xin-yu. Research on Shading Performance of Rollers and Blinds Made by Soft Materials[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.

## Research on roller blind behavior for high-rising glass curtain buildings in Shanghai

LI Cui, LI Zheng-rong, ZHAO Qun

- (1. College of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Shading products in nine high-rising glass-curtain buildings are studied to find out its running behavior. A new characteristic value "Y" is defined to quantify the roller blind's running status. Results show that interior roller blind is the main shading product used for Shanghai's existing high-rising glass—curtain buildings, and the separate distribution of the Y value refers to the randomness of the use of the rollers. Further research shows that the façade aspect, time and season will affect the roller use. The daily adjusting action mainly happens when occupants arrive first time or leave office last, and when they have a rest during noon. During a fixed season, the daily adjusted ratio for rollers facing south-east is higher than that for others. The highest daily adjusted ratio for rollers facing north happens in spring, while in summer for those facing south-east and north-east. More than 25% of the rollers will be adjusted after the season changes, especially for the rollers facing south-east. The total adjusted ratio of rollers is bigger when the season changes from spring to summer than that from winter to spring. This paper suggests that ignoring the running behavior of the rollers will result in magnifying the energy saving from shading products.

**Key words:** high-rising glass curtain building; shading; adjust; roller