

# 建筑外百叶最佳固定倾角与动态百叶节能潜力

李峥嵘<sup>1</sup>, 陶求华<sup>1,2</sup>, 蒋福建<sup>1</sup>, 胡玲周<sup>1</sup>

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092; 2. 集美大学机械工程学院, 厦门 361021)

**摘 要:**旨在探索遮阳外百叶的最佳固定倾角以及分析外部动态百叶窗对建筑能耗的影响. 使用模拟分析软件 Energy-plus 建立了上海某遮阳建筑的模拟分析模型, 模拟分析在 19 种不同百叶倾角下 ( $5^{\circ} \sim 175^{\circ}$ ) 的建筑全年照明能耗和空调能耗; 结果表明, 东、西向房间采用水平百叶, 固定倾角为  $45^{\circ}$  时全年综合能耗最低, 南向房间采用水平百叶, 最佳倾角为  $55^{\circ}$ , 而北向采用竖直百叶, 最佳倾角为  $65^{\circ}$ ; 采用逐时最大或最小外窗得热量和综合能耗最低对应的百叶倾角作为动态百叶的倾角, 得到动态百叶倾角时间表, 进行模拟得到动态百叶的全年综合能耗, 与最佳固定倾角相比, 动态百叶进一步挖掘了遮阳系统的节能潜力, 尤其是北向竖直百叶, 节能率提高 44%.

**关键词:**最佳固定倾角; 动态百叶; 综合能耗; Energy-plus

**中图分类号:** TU 226

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)06-0767-06

太阳辐射是影响室内环境的重要因素之一, 它与室内得热量、照明能耗有着密切的关系. 根据建筑物所处地域在不同季节的日照角度、日照时间以及周边环境, 通过遮阳角度的合理布置、对光线的反射、折射进行综合考虑及调配, 可以达到对太阳辐射的合理运用: 夏天, 强烈的光线被挡在室外, 防止过多的热量进入室内; 冬季, 温暖的阳光被折射进室内成漫散光状态, 改善室内光环境和热环境<sup>[1]</sup>. 1922 年, 勒·柯布西耶提出在建筑设计中考虑日照调节, 此后的近半个世纪, 由他提出的百叶遮阳系统风靡一时, 建筑中排除太阳热量方案成为建筑设计立意源泉<sup>[2]</sup>. 然而固定百叶的存在是对冬季建筑采暖能耗不利, 由于遮阳百叶的阻挡, 减少了进入室内的太阳辐射热, 增加了建筑的供暖能耗<sup>[3]</sup>; 即使是可手动调节的百叶, 也时常因为不合理的调节导致能耗偏高<sup>[4-5]</sup>.

国内、外学者对建筑外百叶节能降耗开展了广泛的研究: 李峥嵘<sup>[6]</sup>对建筑外百叶遮阳结构(百叶倾角和百叶数量)进行了优化, 对比分析了优化模型与现用模型全年节能效果, 但只考虑了  $-30^{\circ}$  和  $90^{\circ}$  两种倾角下的情形. 邓天福<sup>[1]</sup>等对空调时期上海地区南向外窗布置  $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  两个固定角度和冬季不采用遮阳办公房间的空调能耗、照明能耗进行了模拟, 但未分析其余朝向的规律. 张磊<sup>[7]</sup>给出了外遮阳百叶太阳散射辐射计算模型; Annica M. Nilsson<sup>[8]</sup>等分析了百叶角度对光散射特性的影响; Jonsson 和 Athanassios Tzempelikos<sup>[9]</sup>给出了百叶角度对室内采光的系统计算方法. Athientis 和 Shenqiu Zhang 等<sup>[10-11]</sup>对可控遮阳设施室内采光的进行模拟得到基于采光的百叶角度规律, 但未同时兼顾遮阳在隔热方面的作用. P. Pfrommer<sup>[12]</sup>给出了通过百叶外窗的太阳辐射得热模型, Hans Simmler 等<sup>[13]</sup>对各种倾角下的百叶太阳辐射得热进行实验和数值分析, 主要关注遮阳在隔热方面的作用, 未涉及采光分析. Athanassios Tzempelikos 等<sup>[14-15]</sup>分析了各朝向的窗墙比、遮阳设施性能对照明、空调能耗的影响, 其室内照度标准取值为国外 500 lx 的限值, 与我国有很大差异. Lee 等<sup>[5, 16]</sup>对动态百叶的光热性能进行了实验, 现场试验的优点很明显, 但是实验周期很长. Fawwaz Hammad 等<sup>[17-18]</sup>对动态百叶的节能潜力做了模拟分析, 但是其室内照度标准取值与我国有很大差异.

为了探索适合于上海地区建筑各朝向的最佳百叶角度和动态百叶的运行模式, 本文根据照明标准<sup>[19]</sup>中对办公建筑室内照度的限值, 建立了上海某遮阳建筑的模拟分析模型, 采用 Energy-Plus 软件模

收稿日期: 2012-04-27 修改稿日期: 2012-11-28

基金项目: 国际科技合作计划, 中美清洁能源联合研究中心建筑节能合作项目(2010DFA72740-03)

作者简介: 李峥嵘(1969-), 女, 江苏淮安人, 教授, 博士生导师, 主要从事暖通空调、建筑节能方面的研究.

拟各朝向百叶倾角从 5°变化到 175°,分析在 19 种倾角和动态百叶的全年建筑照明能耗和空调能耗;在这基础上分析固定百叶和动态百叶应用于建筑各朝向的节能效果,给建筑各朝向百叶遮阳的选用和运行提供参考.

1 遮阳百叶光热环境软件模拟

1.1 建筑模拟模型

模拟建筑是一栋 3 层办公楼,见图 1,每层 9 间办公室,每间办公室的几何尺寸为长 6 m,宽 6 m,层高 4 m.为消除外墙、地面、屋顶带来的影响,取第 2 层各朝向中间房间为对象,窗户尺寸为 4 m×1.8 m=7.2m<sup>2</sup>,根据上述数据,该模拟房间的窗墙比为 0.30,窗地比为 0.20,符合我国建筑采光的相关标准<sup>[20]</sup>.

建筑主要围护结构热工参数见表 1,符合节能设计规范的要求<sup>[21]</sup>.

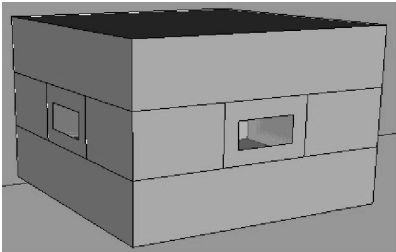


图 1 模拟建筑模型

Fig. 1 Model of simulated building

表 1 建筑围护结构热工参数表

Tab. 1 Thermal parameters of the building envelope

结构名称	材料	传热系数/W·m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
外墙	20 mm 抹灰+240 mm 砖墙+25 mm 聚苯乙烯保温板+20 mm 抹灰	0.65
内墙	20 mm 抹灰+240 mm 砖墙+20 mm 抹灰	1.39
屋顶	20 mm 吸声瓦+100 mm 加气砂浆混凝土	1.16
楼板	15 mm 水泥砂浆+100 mm 轻质混凝土+10 mm 聚苯乙烯保温板	1.12
窗	铝合金双层窗(3 mm 厚、无色)	2.35

1.2 建筑光学参数

遮阳装置、玻璃以及室内各表面的光学性能对于室内照度分布具有重要影响,本文根据国家标准<sup>[20]</sup>来确定室内表面反射比,如表 2 所示.

1.3 气象条件

本研究使用上海典型气象年(CSWD)逐时气象数据进行模拟计算.

1.4 模拟工况说明

室内人员密度为 0.1 人/m<sup>2</sup>,照明功率密度为 11 W/m<sup>2</sup>,针对该办公楼的使用性质,设定工作日每天早晨 8:00 至 18:00 的人员在室率为 1,其余时间为 0.在考虑基于自然采光的照明调光时,把各朝向房间分为两个分区:第一个分区为高自然采光区(接近窗口,通常不需人工照明,见图 2 中离窗 1 m,2 m,3 m 的参考点),覆盖从窗户向内至 1.5 倍窗高的范围,占房间面积 45%;第二个分区为低自然采光区,覆盖房间剩余区域,占房间面积 55%;两个分区的照明设备依据各自参考点的照度确定室内人工照明,参考点均位于工作面,距楼板 0.8 m 高处;第一分区的参考点离窗 2.7 m,第二分区的参考点离窗 5 m(见图 2,离窗 4 m,5 m,6 m 的参考点自然采光照度较接近);参考点的设计照度取 300 lx,房间尽量采用自然采光,若参考点自然采光照度不足 300 lx,则开启人工照明进行补充.

遮阳百叶叶片宽度 25 mm,叶片间距 18.75 mm,百叶与玻璃间距为 50 mm,直射、散射反射率为 0.8.设置各朝向百叶倾角从 5°变化到 175°,见图 3,模拟分析在 19 种倾角下的全年建筑照明能耗和空

表 2 室内各表面反射比

Tab. 2 Reflectance of interior surface

表面名称	反射比
顶棚	0.75
墙面	0.6
地面	0.3

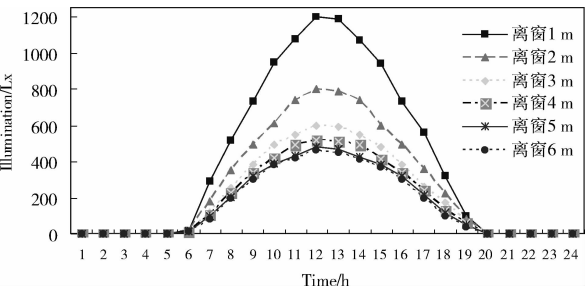


图 2 水平百叶 45 度倾角时南向房间各参考点照度(7 月 21 日)

Fig. 2 Illumination of reference points in south-aspect room, inclination of horizontal louvers being 45 degrees(July 21)

调能耗。

### 1.5 空调方式及空调设计参数

空调设备采用热泵式直接膨胀式空调,制冷额定能效比为3.0,制热额定能效比为2.7,夏季室内设计计算温度26℃,冬季室内设计计算温度18℃。空调开启时间8:00~18:00,渗透风量设置为0.25次/h。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 各种百叶角度下的能耗规律及最佳固定倾角

采用 Energy-Plus 软件模拟得到全年8760h的逐时照明能耗、空调能耗。图4~图7为各朝向房间外窗采用水平百叶和垂直百叶在19种倾角下(5°~175°)的全年综合能耗分布。

从图4可以看出,相同百叶倾角时,北向房间外窗采用垂直百叶比水平百叶更节能,这是因为垂直式遮阳能够有效地遮挡高度角较小的、从窗侧斜射过来的阳光。北向垂直百叶在65°倾角时能耗最低;同时也可以看出,百叶角度小于35或大于135°时,综合能耗会因照明能耗的急剧增加而大幅上升,而百叶角度在45°~125°之间时,北向房间综合能耗对百叶角度的变化不是很敏感。

从图5可以看出,相同百叶倾角时,南向房间外窗采用水平百叶比垂直百叶更节能,这是由于水平百叶遮阳能够有效地遮挡高度角较大的、从窗口上方投射下来的阳光。南向外窗水平百叶在55°倾角时能耗最低;同时也可以看出,百叶角度小于35°或大于155°时,综合能耗会因照明能耗的急剧增加而大幅上升,而百叶角度在45°~115°之间时,南向房间综合能耗对百叶角度的变化不是很敏感。

从图6、图7可以看出,东向、西向房间综合能耗随着百叶倾角呈余弦变化,外窗采用水平45°倾角百叶时东、西向房间综合能耗最低。

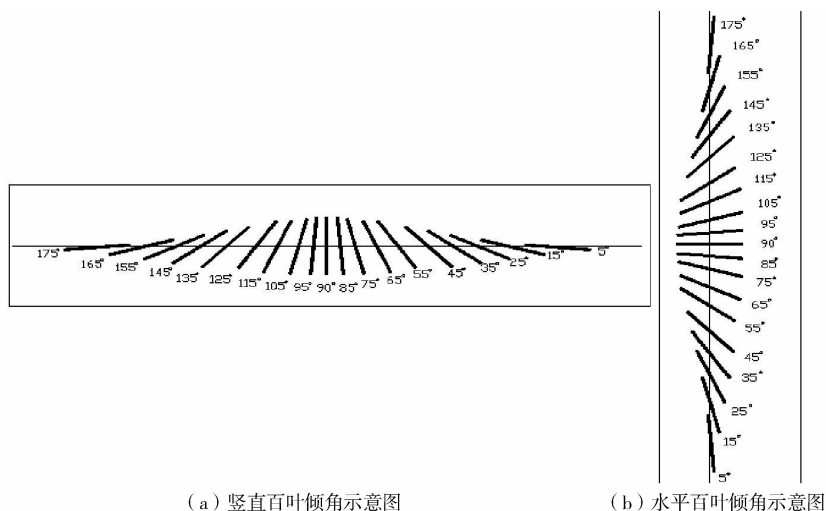


图3 百叶倾角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of louver inclination

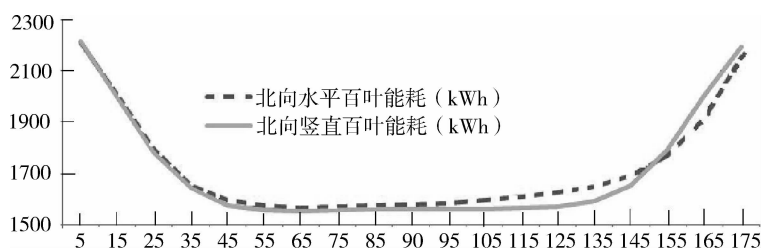


图4 北向百叶遮阳房间能耗

Fig. 4 Energy consumption of north-aspect room with louver

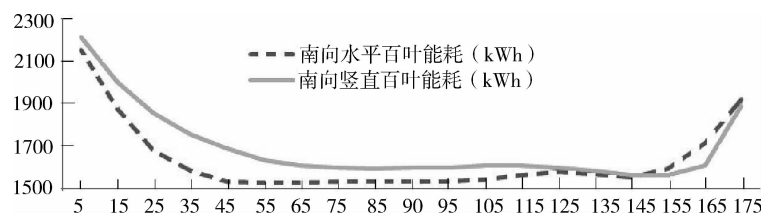


图5 南向百叶遮阳房间能耗

Fig. 5 Energy consumption of south-oriented room with louver

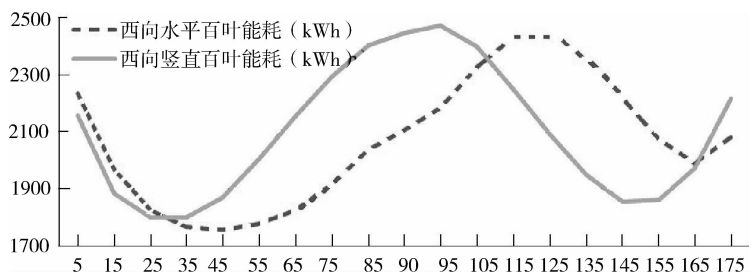


图6 西向百叶遮阳房间能耗

Fig. 6 Energy consumption of west-aspect room with louver

在未采用任何遮阳措施时,各朝向房间综合能耗为东向 2 689 kWh,西向 2 726 kWh,南向 1 850 kWh,北向 1 668 kWh;与未采用遮阳设施相比,各朝向采用最佳固定百叶时分别节能东向 34.8%,西向 35.6%,南向 17.4%,北向 6.8%。可以看出,东、西向采用固定百叶遮阳的节能效果很明显,南向次之,而北向由于接受的太阳辐射量比其他朝向小(尤其是直射辐射,6—9月上海地区北向接受的总直射辐射为东向的 1/6),采用固定百叶的节能率最小。

## 2.2 动态百叶的节能潜力分析

固定百叶的存在对冬季建筑采暖能耗不利,由于遮阳百叶的阻挡,减少了进入室内的太阳辐射热,增加了建筑的供暖能耗,限制了百叶遮阳系统的节能效果。劳伦斯伯克利国家实验室开发了通过实时光热控制手段减少照明和制冷负荷的动态外窗,见图 8。

动态百叶的角度应根据需要随时变化,百叶角度调整的原则是:冬季非制热时段,房间应能尽可能从外窗吸收热量,夏季非制冷时段,房间应能尽可能减少外窗的太阳辐射得热;而在制冷、制热时段,应该使得照明、空调综合能耗最低。

本文利用前述 38 次模拟的结果得到各朝向动态百叶开启角度时间表(slat angle schedule),方法如下:非制冷、制热时段(19:00~07:00),空调和人工照明尚未开启,冬季取每小时外窗太阳得热最大的百叶角度作为动态百叶开启角度,夏季取每小时太阳得热最小的百叶角度作为动态百叶开启角度。制冷、制热时段(8:00~18:00),空调和人工照明开启,取每小时照明、空调综合能耗最小的百叶角度作为动态百叶开启角度,图 9 为 7 月 21 日北向房间竖直动态百叶角度时间表。

采用上述方法得到的四个朝向外遮阳百叶的动态角度重新模拟计算,得到动态百叶下各房间照明、空调综合能耗。与最佳固定百叶相比,动态百叶使得各朝向房间能耗更低,见表 3。

由表 3 可见,动态百叶进一步挖掘了遮阳系统的节能潜力,尤其是对于北向房间,使北向房间节能率提高了 44%。

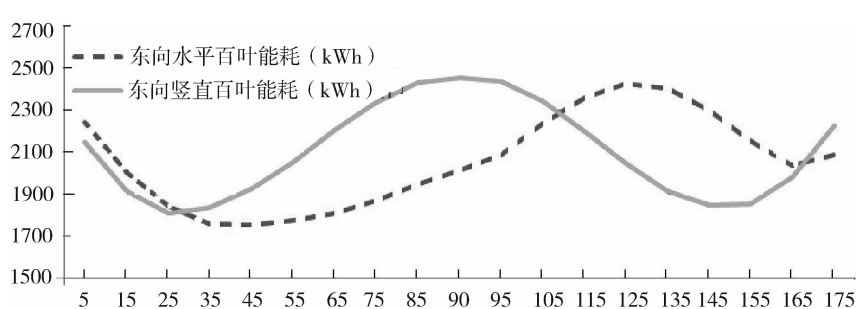


图 7 东向百叶遮阳房间能耗

Fig. 7 Energy consumption of east-aspect room with louver

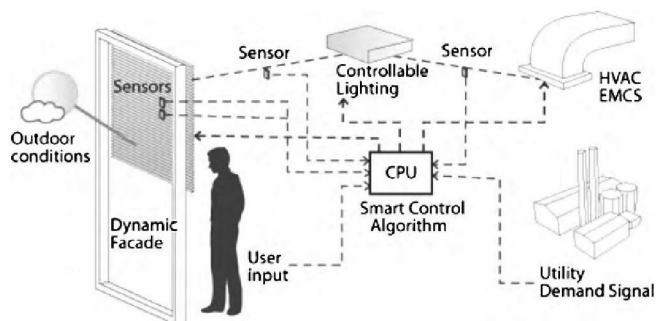


图 8 动态外窗概念图

Fig. 8 Concept map of dynamic exterior windows

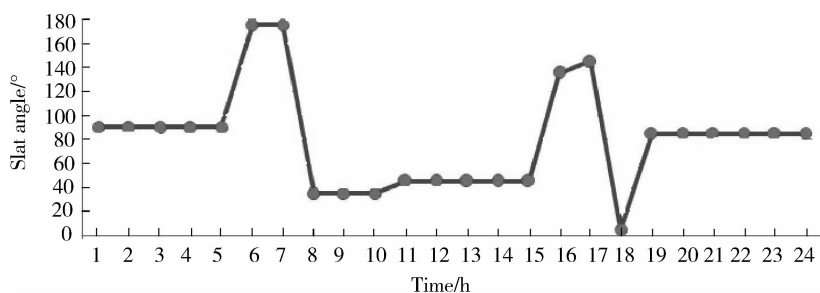


图 9 北向竖直动态百叶角度时间表(7月21日)

Fig. 9 Dynamic slat angle schedule of vertical louver on the north-aspect facade(July 21)

### 3 结 论

本文使用模拟分析软件 Energy-Plus 建立了上海某遮阳建筑的模拟分析模型,设置各朝向百叶倾角从  $5^{\circ}$  变化到  $175^{\circ}$ ,模拟分析在 19 种百叶倾角下的全年建筑照明能耗和空调能耗;与未采用遮阳设施相比,各朝向采用最佳固定百叶时分别节能东向 34.8%,西向 35.6%,南向 17.4%,北向 6.8%。东、西向水平百叶固定倾角为  $45^{\circ}$  时全年综合能耗最低,南向水平百叶固定最佳倾角为  $55^{\circ}$ ,而北向竖直百叶最佳倾角为  $65^{\circ}$ ;固定百叶的存在对冬季建筑采暖能耗很不利,限制了百叶遮阳系统的节能效果,动态百叶通过实时光热控制的手段减少照明和制冷负荷能进一步挖掘遮阳系统的节能潜力;采用逐时最大或最小外窗得热量和综合能耗最低对应的百叶倾角作为动态百叶的倾角,得到动态百叶倾角时间表,进行模拟得到动态百叶的全年综合能耗,与最佳固定倾角相比,动态百叶进一步挖掘了遮阳系统的节能潜力,尤其是北向竖直百叶,节能率提高 44%。研究结果将对夏热冬冷地区建筑各朝向百叶遮阳的倾角设置和动态百叶遮阳的运行模式提供指导。

表 3 固定百叶与动态百叶节能效果

Tab. 3 Energy-saving effect of fixed louvers and dynamic louvers

朝向	固定百叶 节能量 /kWh	动态百叶 节能量 /kWh	固定百叶 节能率 /%	动态百叶 节能率 /%
东向	937	1065	34.8	39.6
西向	971	1088	35.6	39.9
南向	322	385	17.4	20.8
北向	113	164	6.8	9.8

### 参考文献 References

- [1] 邓天福,李景广,叶倩. 外遮阳百叶隔热性能与采光分析[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(4):13-18.  
DENG Tian-fu, LI Jing-guang, YE Qian. The analyses of outer blinds system on heat insulation and daylight [J]. Building Energy and Environment, 2008, 27(4):13-18.
- [2] 贾若芹,董奇英. 节能建筑的百叶遮阳系统[J]. 建筑科学, 2011, 27(增刊 2):101-103.  
JIA Ruo-qin, DONG Qi-ying The shutter system of energy-conservation architecture [J]. Building Science, 2011, 27(S2):101-103.
- [3] GALASIU AD, ATIF MR, MACDONALD RA. Impact of window blinds on daylight-linked dimming and automatic on/off lighting controls[J]. Sol Energy, 2004, 76:523-544.
- [4] OSTERHAUS WKE. Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments [J]. Sol Energy, 2005, 79:140-158.
- [5] KIM J, PARK Y, YEO M, et al. An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer[J]. Build Environ, 2009, 44:1517-1527.
- [6] 李峥嵘,夏麟. 基于能耗控制的建筑外百叶遮阳优化研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(11):11-13.  
LI Zheng-rong, XIA Lin. Optimization of building external louver shading devices based on energy control [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007, 37(11):11-13.
- [7] 张磊,孟庆林. 百叶外遮阳太阳散射辐射计算模型及程序实现[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(6):92-95.  
ZHANG Lei, MENG Qing-lin. Calculating model of solar diffuse radiation transporting through external blinds and it's program realization[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(6):92-95.
- [8] ANNICA M, NILSSON, JACOB C Jonsson. Light-scattering properties of a Venetian blind slat used for daylighting applications [J]. Solar Energy, 2010, 84: 2103-2111.
- [9] ATHANASSIOS Tzempelikos. The impact of venetian blind geometry and tilt angle on view, direct light transmission and interior illuminance [J]. Solar Energy, 2008, 82: 1172-1191.
- [10] ZHANG Shenqiu, DAGNACHEW Birru. An open-loop venetian blind control to avoid direct sunlight and enhance daylight utilization[J]. Solar Energy, 2012, 86:860-866.
- [11] HU Jia, SVETALANA Olbina. Illuminance-based slat angle selection model for automated control of split blinds [J]. Building and Environment, 2011, 46:786-796.
- [12] PFROMMER P, LOMAS K J, KUPKE Chr. Solar radiation transport through slat-type blinds: A new model and its application for thermal simulation of buildings [J]. Solar Energy, 1996, 57(2): 77-91.

- [13] HANS Simmler, BRUNO Binder. Experimental and numerical determination of the total solar energy transmittance of glazing with venetian blind shading [J]. Building and Environment, 2008, 43:197-204.
- [14] ATHANASSIOS Tzempelikos, ANDREAS K Athienitis. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand [J]. Solar Energy, 2007, 81: 369-382.
- [15] ATHANASSIOS Tzempelikos, ANDREAS K Athienitis, PANAGIOTA Karava. Simulation of facade and envelope design options for a new institutional building [J]. Solar Energy, 2007, 81: 1088-1103.
- [16] LEE E, DIBARTOLOMEO D, SELKOWITZ S. Thermal and daylighting performance of an automated Venetian blind and lighting system in a full-scale private office[J]. Energy and Building, 1998, 29:47-63.
- [17] FAWWAZ Hammad, BASSAM Abu-Hijleh. The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building[J]. Energy and Buildings, 2010, 42:1888-1895.
- [18] SVETLANA Olbina, HU Jia. Daylighting and thermal performance of automated split-controlled blinds [J]. Building and Environment, 2012, 56:127-138.
- [19] GB 50034—2004, 建筑照明设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.  
GB 50034—2004, Standard for lighting design of buildings[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [20] GB 50033—2001, 建筑采光设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.  
GB 50033—2001, Standard for daylight design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [21] GB 50189—2005, 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.  
GB 50189—2005, Design standard for energy efficiency of public building[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

## Optimum fixed slat angle of building's external louvers and energy-saving potential of dynamic louvers

LI Zheng-rong<sup>1</sup>, TAO Qiu-hua<sup>1,2</sup>, JIANG Fu-jian<sup>1</sup>, HU Ling-zhou<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** This research is aimed at exploring the optimum fixed slat angle and the influence of dynamic external louvers on the energy consumption of a building. The energy-plus software was used to predict the energy consumption of both lighting and air-conditioning in a representative building model located in Shanghai, where slat angles of external louvers are set at 19 fixed angles ranged from 5° to 175°. Results show that the annual overall energy consumption reach minimum when the fixed angle of horizontal louvers is 45° on the east and west facades; and the optimum fixed slat angle is 55° for horizontal louvers on the south facades, and 65° for vertical louvers on the north facades. The slat angle schedule of dynamic louvers are obtained by extremum of heat gain through windows and the lowest overall energy consumption from above simulation, and then corresponding annual overall energy consumption was calculated. Compared with the optimum fixed slat angle, dynamic louvers could further exploit energy saving potential, especially in employing dynamic vertical blinds on the north facades, with an energy saving rate by 44%.

**Key words:** optimum fixed angle; dynamic louvers; overall energy consumption; Energy-plus