

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.002



不同建筑热工分区办公建筑外围护 结构负荷指标影响因素权重

王焱^{a,b}, 孙鹏宝^a, 付银安^a, 管国祥^a

(兰州交通大学 a. 环境与市政工程学院; b. 铁道车辆热工教育部重点实验室, 兰州 730070)

摘要:为研究多因素对不同热工分区办公建筑总负荷指标的综合影响,在分析了单一因素对建筑总负荷指标影响规律的基础上,采用层次分析法对分别位于哈尔滨、兰州、重庆、广州的办公建筑负荷指标进行了评价。得到了窗户传热系数 K_w 、玻璃遮阳系数 S_c 、窗墙比 R 在不同热工分区办公建筑总负荷指标影响因素中的权重值,并对此进行了一致性检验。结果表明:对于严寒地区的哈尔滨和寒冷地区的兰州节能建筑,各因素重要程度为 $R > K_w > S_c$; 对于夏热冬冷地区的重庆和夏热冬暖地区的广州节能建筑,各因素重要程度为 $S_c > R > K_w$ 。在建筑结构优化设计中应根据各热工分区负荷影响因素的比重不同进行优先控制相应因素。

关键词:办公建筑; 负荷指标; 影响因素; 权重; 优化设计; 窗墙比

中图分类号: TU831.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)01-0007-06

Analysis on the weight of the indices of factors affecting the heat and cold load for office buildings in different climate zones

Wang Ye^{a,b}, Sun Pengbao^a, Fu Yin'an^a, Guan Guoxiang^a

(a. School of Environmental and Municipal Engineering; b. Key Laboratory of Railway Vehicle Thermal Engineering, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: The building total load index of the office buildings in Harbin, Lanzhou, Chongqing and Guangzhou were assessed by the analytical hierarchy process based on the effect of single factor on the building total load index to study the synthetic effects of several factors on the total load index of the office buildings in four climate zones. The weights of varied indexes of window heat transfer coefficient, glass sunshade coefficient and window-wall ratio were determined by the analytical hierarchy process. And the consistency of the weight of index was checked ultimately. The results indicated that the importance of the three factors for the total load index of the office buildings in Harbin and Lanzhou was $R > K_w > S_c$, while the importance of the three factors for the total load index of the office buildings in Chongqing and Guangzhou was $S_c > R > K_w$. In the optimum design of building structure, the crucial factors should be

收稿日期: 2016-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(51266004, 51476073); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2016-2)

作者简介: 王焱(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事暖通空调、强化传热研究, (E-mail) wangye@mail.lzjtu.cn.

Received: 2016-06-08

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51266004, 51476073); Gansu Province Scientific Research Project (No. JK2016-2)

Author brief: Wang Ye (1972-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interests: heating ventilation and air conditioning, heat transfer enhancement, (E-mail) wangye@mail.lzjtu.cn.

controlled preferentially for a building in different climate zones.

Keywords: office building; load index; factors; weight of index; optimum design; window-wall ratio

随着经济的快速发展,中国建筑能耗在社会总能耗的比例逐渐上升,目前已接近 25% (不包含农村非商品生物质能源的建筑用能)^[1],建筑能耗已成为经济发展的薄弱环节。其中办公建筑和大型公共建筑作为能耗大户具有能耗总量大、能源利用效率低、节能潜力大的特点,对实现节能减排的目标具有重要意义,因此受到了人们的广泛关注^[2-4]。窗户作为热量散失的重要构件,与之相关的窗墙比、传热系数、玻璃遮阳系数、窗户外遮阳、朝向等也就成为了降低能耗的研究重点^[5-9]。文献[10]对广州地区某办公建筑围护结构热工属性与建筑负荷关系的研究表明:降低外窗遮阳系数对减少建筑全年空调能耗和最大空调冷负荷是有利的,但降低窗的传热系数对减少建筑全年空调能耗和最大空调冷负荷不利。文献[11]分析了外窗玻璃遮阳系数和窗户传热系数对 3 个热工分区住宅建筑空调能耗的影响,提出了各地区的节能侧重点。文献[12]对兰州地区某办公建筑全年总负荷指标影响因素的研究发现:窗户传热系数对南向总负荷指标的影响较玻璃遮阳系数的影响显著。上述研究大部分只分析了单一因素对单个地区或多个地区建筑能耗的影响,即使探讨了多因素对单个地区建筑能耗的影响,也未对各影响因素的权重进行分析。目前,将与窗户有关的多个因素对多个热工分区建筑能耗的影响进行对比研究并确定这些因素在相应热工分区的权重,还未见报道。本文选取了严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区的代表性城市,综合分析了窗墙比、窗户传热系数、玻璃遮阳系数对这些城市办公建筑总负荷指标的影响,并通过层次分析法计算得到了各热工分区办公建筑总负荷指标各影响因素的权重。

1 研究模型

1.1 物理模型

构建一独立的 6 层办公楼,呈南北方位布置,层高 3 m,建筑尺寸:长×宽×高=24 m×14 m×18 m,每层 8 个办公室,单个办公室面积为 24 m²,单层面积 336 m²,总建筑面积 2 016 m²。该建筑分别位于严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区的哈尔滨、兰州、重庆、广州 4 个城市。围护结构热工属性以满足当地节能 65% 的要求来确定相关参数。

1.2 热工条件

办公建筑的负荷主要为通过围护结构的负荷和房间内扰。由于办公建筑的人员密度、设备和照明负荷基本稳定,只需考虑工作日和节假日的区别。依据文献[13],人体散热量取 75 W/人、设备散热量取 15 W/m²、灯光散热量取 9 W/m²,人均占有面积 10 m²/人。空调设备间歇运行,开启时段为 7:00—18:00。办公室人均新风量为 30 m³/(h·p)^[13]。根据人员逐时在室率设定空调温度、照明时间及设备使用率。房间的通风换气次数为 0.5 次/h,夏季采用 2 次/h 的夜间通风。

在节能 65% 的同一前提下,不同热工分区建筑围护结构的热工属性不同,体现为不同地区外墙传热系数 K_{ow} 、屋面传热系数 K_c 及外窗传热系数 K_w 、玻璃遮阳系数 S_g 、窗墙比 R 等参数有各自的取值范围及组合形式。对于外墙和屋面来说,不同热工分区建筑的主要区别在于其保温层厚度不同,如图 1 所示。所选 4 个城市建筑的围护结构参数如表 1 所示。

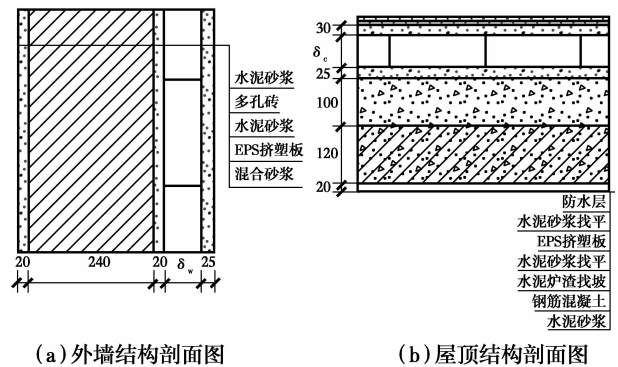


图 1 外墙和屋面结构示意图

Fig. 1 Structure of external wall and roof

表 1 外墙和屋面传热系数

Table 1 Heat transfer coefficients of external wall and roof

城市	δ_c / mm	K_c / (W·(m ² ·K) ⁻¹)	δ_w / mm	K_{ow} / (W·(m ² ·K) ⁻¹)
哈尔滨	140	0.27	100	0.37
兰州	70	0.45	70	0.48
重庆	60	0.45	30	0.74
广州	30	0.72	0	1.40

1.3 参数选取

讨论窗户传热系数对建筑总负荷指标影响时,各地区窗墙比 R 均取 0.5,哈尔滨、兰州、重庆、广州

的玻璃遮阳系数分别为 0.81、0.48、0.39、0.39。

讨论玻璃遮阳系数对建筑总负荷指标影响时,各地区窗墙比 R 均取 0.5,哈尔滨、兰州、重庆、广州的窗户传热系数分别为 1.9、2.2、2.4、2.7。

讨论窗墙比对建筑总负荷指标影响时,窗户传热系数 K_w 和玻璃遮阳系数 S_c 取值如表 2 所示。

讨论以上 3 个因素对建筑总负荷指标影响时外墙和屋面相关参数如表 1 所示。

表 2 窗户各项参数取值

Table 2 Values of window parameters

R	哈尔滨		兰州		重庆		广州	
	K_w	S_c	K_w	S_c	K_w	S_c	K_w	S_c
0.2	2.7	0.81	3.0	0.81	3.5	0.81	5.2	0.58
0.3	2.5	0.81	2.7	0.58	3.0	0.5	4.0	0.5
0.4	2.2	0.81	2.4	0.54	2.6	0.45	3.0	0.39
0.5	1.9	0.81	2.2	0.48	2.4	0.39	2.7	0.39
0.6	1.6	0.81	2.0	0.45	2.2	0.39	2.5	0.29
0.7	1.5	0.81	1.9	0.39	2.2	0.34	2.5	0.27
0.8	1.4	0.81	1.6	0.39	2.0	0.29	2.5	0.25
0.9	1.3	0.81	1.5	0.34	1.8	0.27	2.0	0.2

2 3 种因素对总负荷指标的影响对比

2.1 建筑总负荷指标

为了将室温维持在一定的范围内,单位时间需要向室内输入的冷量或热量分别称为冷负荷和热负荷。影响建筑室内负荷的主要因素有:围护结构热工属性、建筑结构、室内热源、室外气象条件等。但不同房间的热边界条件是动态变化的,对应的热传递过程也存在差异,要准确获得建筑物各房间的室温及冷、热负荷值,需要分别建立围护结构热平衡方程(包括外墙、屋面、窗户)、家具热平衡方程、室内空气热平衡方程等,按照边界耦合条件对所有房间温度进行联立求解。具体过程见文献[14]。负荷指标是计算所得负荷与建筑地板面积的比值,总负荷指标为冷、热负荷指标之和。

2.2 结果分析

图 2 为窗户传热系数对 4 个城市节能建筑总负荷指标影响对比情况。图中窗户传热系数取值范围包含了该城市所属热工分区节能 65% 办公建筑可以选取的所有值^[13]。可以看出,在各城市可取值范围内,窗户传热系数增大引起的总负荷指标的增幅不同,哈尔滨和兰州地区建筑总负荷指标随窗户传热系数增大其增幅明显,重庆地区建筑次之,广州地区窗户传热系数对总负荷指标基本没有影响。

图 3 为玻璃遮阳系数对 4 个城市节能建筑总负

荷指标影响对比情况。图中玻璃遮阳系数取值范围包含了该城市所属热工分区节能 65% 办公建筑可以选取的所有值^[13]。玻璃遮阳系数对各城市建筑总负荷指标的影响也存在一定差异。随着玻璃遮阳系数增大,重庆和广州地区建筑总负荷指标呈现出近似一致的增幅,而哈尔滨与兰州地区建筑总负荷指标则均随玻璃遮阳系数的增大略呈下降趋势。这说明在夏热冬冷地区的重庆和夏热冬暖地区的广州,适当减小玻璃遮阳系数有利于降低建筑总负荷指标,而位于严寒地区的哈尔滨和位于寒冷地区的兰州,则刚好相反。

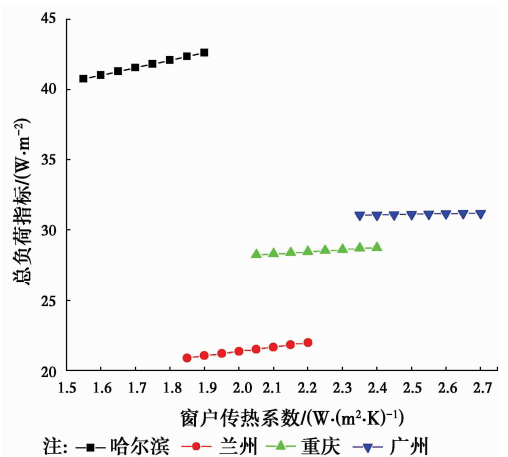


图 2 窗户传热系数对总负荷指标的影响对比

Fig. 2 Comparison of the influence of K_w on the total load index

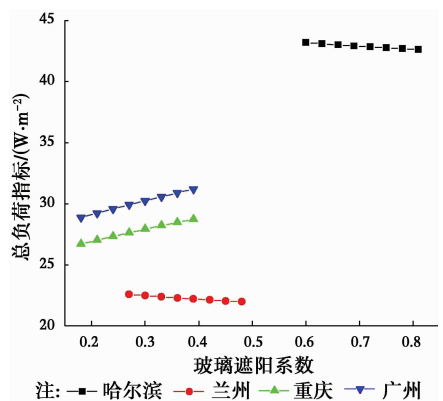


图 3 玻璃遮阳系数对总负荷指标的影响对比

Fig. 3 Comparison of the influence of S_c on the total load index

图 4 为窗墙比对 4 个城市节能建筑总负荷指标影响对比情况。图中窗墙比取值范围包含了该城市所属热工分区节能 65% 办公建筑可以选取的所有值^[13]。可以看出,随着窗墙比增大,各热工分区建筑总负荷指标均呈上升趋势。其中,哈尔滨和重庆地区的上升速度一致,兰州和广州地区的上升速度

一致,但窗墙比对哈尔滨和重庆的建筑总负荷指标影响更为明显。这就为不同热工分区建筑结构优化以降低建筑能耗提供了思路。

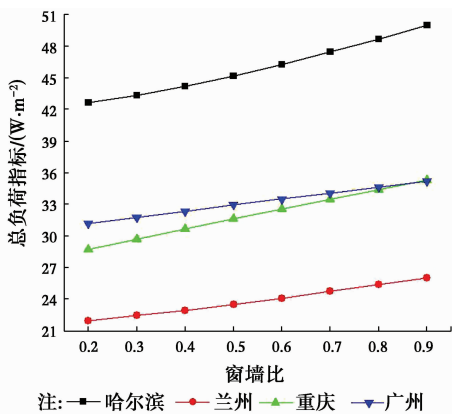


图4 窗墙比对总负荷指标的影响对比

Fig. 4 Comparison of the influence of R on the total load index

以上只是各单一因素对不同热工分区节能建筑总负荷指标影响程度的对比定性分析。下面,分析窗户传热系数、玻璃遮阳系数、窗墙比3个因素对不同热工分区建筑总负荷指标的综合影响。

3 各影响因素权重确定

本文涉及的权重就是影响建筑总负荷指标的各因素的重要程度,是建筑围护结构优化设计的重要参考指标。采用层次分析法确定窗户传热系数、玻璃遮阳系数、窗墙比3个因素对总负荷指标的影响权重。

为了减少主观人为因素对判断矩阵的影响,先根据单一因素对总负荷指标影响的计算数据,每次取两个因素按表3的数量标度比较其重要程度,得到判断矩阵,求解其最大特征根和最大特征根对应的标准化特征向量,再检验一致性,最后得到各因素权重指标。

表3 判断矩阵的标度

Table 3 Standard of judgement matrix

标度	定义	说明
1	同样重要	2个元素对属性同样重要
3	稍微重要	1个元素比另一个稍微重要
5	明显重要	1个元素比另一个明显重要
7	重要得多	1个元素主导地位已显示出来
9	极端重要	1个元素占绝对重要地位
2,4	上述两相邻	表示需要在上述两个标度之
6,8	因素的折中	间折中时的定量标度

3.1 构造判断矩阵

根据上文计算数值,算出各因素变化时总负荷

指标的相对变化率,对照表3比较各因素间的重要程度得到的判断矩阵,如表4~7所示。

表4 哈尔滨地区

Table 4 Harbin region

	K_w	S_c	R
K_w	1	6	1/4
S_c	1/6	1	1/8
R	4	8	1

表5 兰州地区

Table 5 Lanzhou region

	K_w	S_c	R
K_w	1	1/6	1/5
S_c	6	1	2
R	5	1/2	1

表6 重庆地区

Table 6 Chongqing region

	K_w	S_c	R
K_w	1	4	1/3
S_c	1/4	1	1/5
R	3	5	1

表7 广州地区

Table 7 Guangzhou region

	K_w	S_c	R
K_w	1	1/7	1/4
S_c	7	1	4
R	4	1/4	1

据此,可得各城市判断矩阵依次为(下标 H、L、C、G 分别代表哈尔滨、兰州、重庆、广州)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_H &= \begin{bmatrix} 1 & 6 & 1/4 \\ 1/6 & 1 & 1/8 \\ 4 & 8 & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{A}_L &= \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1/3 \\ 1/4 & 1 & 1/5 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{A}_C &= \begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 1/5 \\ 6 & 1 & 2 \\ 5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{A}_G &= \begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 1/4 \\ 7 & 1 & 4 \\ 4 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3.2 计算各因素的相对重要程度

根据判断矩阵计算对总负荷指标的各影响因素权重,得到判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 及对应归一化的特征向量 $\mathbf{W}=(W_1, W_2, W_3)^T$ 。

$$\mathbf{A}\mathbf{W} = \lambda_{\max}\mathbf{W} \quad (1)$$

归一化后的特征向量 $\mathbf{W}=(W_1, W_2, W_3)^T$ 即为相对应的各影响因素权重。 λ_{\max} 和 \mathbf{W} 采用和积法计算。

各城市的特征向量依次为

$$\mathbf{W}_H = (0.237, 0.064, 0.699)^T, \mathbf{W}_L = (0.28, 0.092, 0.628)^T,$$

$$\mathbf{W}_C = (0.081, 0.577, 0.342)^T, \mathbf{W}_G = (0.075, 0.696, 0.229)^T.$$

3.3 一致性检验

在权重计算过程中,客观事物的复杂性和人为主观因素会对判断矩阵的一致性产生一定影响,因而需要对判断矩阵的一致性进行检验。

一致性指标 CI 的检验公式如式(2)所示。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n + 1} \quad (2)$$

式中: CI 为一致性指标; n 为影响因素个数。

一致性比率 CR 的计算公式如式(3)所示。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中: CR 为一致性比率,当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵具有满意的一致性。 RI 为评价一致性指标,三阶时取 0.58。

根据以上各式求得各城市一致性比率依次为 $CR_H = 0.081$ 、 $CR_L = 0.065$ 、 $CR_C = 0.025$ 、 $CR_G = 0.066$,均小于 0.1,一致性可以接受。

3.4 权重分析

不同因素对各城市建筑总负荷指标的影响权重如表 8 所示。可以看出,窗户传热系数、玻璃遮阳系数、窗墙比 3 个因素在不同热工分区节能建筑总负荷指标中的相对重要程度并不一致。对于严寒地区的哈尔滨和寒冷地区的兰州节能建筑,各因素重要程度为 $R > K_w > S_c$;对于夏热冬冷地区的重庆和夏热冬暖地区的广州节能建筑,各因素重要程度为 $S_c > R > K_w$ 。这是因为窗墙比在不同气候分区对建筑负荷影响的侧重点不同:对北方地区建筑主要影响供暖热负荷,因为北方地区建筑负荷中冬季供暖负荷占绝对大份额,室内外大温差是引起供暖负荷份额占优的最主要因素,作为室内外耦合传热载体也是建筑保温最薄弱环节的窗户自然也就成为了重要的影响因素,玻璃遮阳系数对严寒和寒冷地区建筑负荷影响很小;而南方地区建筑负荷主要以冷负荷为主,可以看出,玻璃遮阳效果在夏热冬冷地区的重庆以及夏热冬暖地区的广州显得尤为突出,窗墙比作为影响太阳辐射透射强度的重要因素,是仅次于玻璃遮阳系数的另一负荷影响因素,而窗户传热系数对夏热冬冷地区和夏热冬暖地区的建筑负荷影响甚微。另外,窗墙比对严寒地区建筑节能的重要性与玻璃遮阳系数对夏热冬暖地区建筑节能的重要性非常接近。图 5 直观地反映了与窗户有关的三个因素对不同热工分区节能 65% 办公建筑总负荷指标的综合影响。这也为针对不同气候特征地区进行建筑围护结构优化设计提供了理论参考。

表 8 各因素权重

Table 8 Weight for factors

因素	哈尔滨	兰州	重庆	广州
K_w	0.237	0.28	0.081	0.075
S_c	0.064	0.092	0.577	0.696
R	0.699	0.628	0.342	0.229

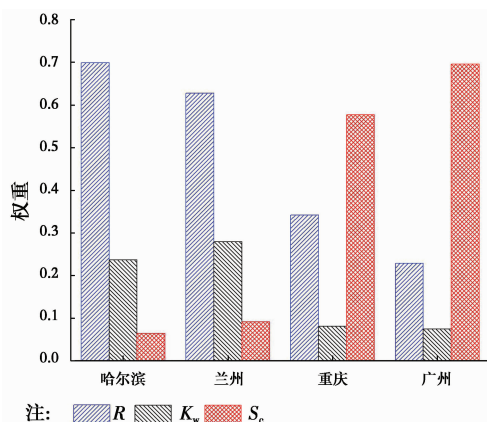


图 5 多因素对总负荷指标的综合影响对比

Fig. 5 Comparison of the synthetical influence of three factors on the total load index

4 结论

分析了窗墙比、窗户传热系数、玻璃遮阳系数对严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区节能建筑总负荷指标的影响,并通过层次分析法计算得到了各热工分区办公建筑总负荷指标各影响因素的权重。得到了如下主要结论:

1) 窗户传热系数增大引起哈尔滨和兰州地区建筑总负荷指标增幅明显,重庆地区建筑次之,广州地区建筑总负荷指标基本不受影响。

2) 重庆和广州地区建筑总负荷指标与玻璃遮阳系数变化呈正相关关系,两个地区建筑总负荷指标增幅一致,而哈尔滨与兰州地区建筑总负荷指标则均随玻璃遮阳系数的增大略呈下降趋势。

3) 各热工分区建筑总负荷指标均随窗墙比增大呈上升趋势,但窗墙比对哈尔滨和重庆的建筑总负荷指标影响更为明显。

4) 在所研究的窗户传热系数 K_w 、玻璃遮阳系数 S_c 、窗墙比 R 这 3 个因素中,对于严寒地区的哈尔滨和寒冷地区的兰州节能建筑,各因素重要程度为 $R > K_w > S_c$;对于夏热冬冷地区的重庆和夏热冬暖地区的广州节能建筑,各因素重要程度为 $S_c > R > K_w$ 。窗墙比对严寒地区建筑节能的重要性与玻璃遮阳系数对夏热冬暖地区建筑节能的重要性非常接近。

参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2013[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013. Building Energy Conservation Research Center of Tsinghua University. Annual report on the development

- of Chinese building energy efficiency 2013 [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [2] CHEUNG C K, FULLER R J. Energy-efficient envelope design for high-rise apartments [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(1): 37-48.
- [3] 于新巧, 陈征, 汪汀, 等. 我国办公建筑用能行为现状调研与分析[J]. *建筑科学*, 2015, 31(10): 23-31.
YU X Q, CHEN Z, WANG T, et al. Investigation and analysis of the energy-using behavior in office buildings in China[J]. *Building Science*, 2015, 31(10): 23-31. (in Chinese)
- [4] AREZOU S, ALI K, MUHD Z A, et al. Methods for adaptive behaviors satisfaction assessment with energy efficient building design [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 250-259.
- [5] YU J H, LIU Y, XIONG C, et al. Study on day lighting and energy conservation design of transparent envelope for office building in hot summer and cold winter zone [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 121: 1642-1649.
- [6] RIZKI A, MANGKUTO M R, ANINDYA D A. Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics [J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 211-219.
- [7] LAMA T C, GEB H, FAZIOC P. Impact of curtain wall configurations on building energy performance in the perimeter zone for a cold climate [J]. *Energy Procedia*, 2015, 78: 352-357.
- [8] GOIA F. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential [J]. *Solar Energy*, 2016, 132: 467-492.
- [9] TIBI G, MOKHTAR A. Glass selection for high-rise buildings in the united arab emirates considering orientation and window-to-wall ratio [J]. *Energy Procedia*, 2015, 83: 197-206.
- [10] 赵立华, 李宁, 王钊. 广州地区办公建筑外围护结构的热工性能与节能分析[J]. *建筑科学*, 2008, 24(4): 49-53.
ZHAO L H, LI N, WANG Z. Analysis on thermal characteristics and energy efficiency of building exterior envelope in office buildings in Guangzhou [J]. *Building Science*, 2008, 24(4): 49-53. (in Chinese)
- [11] 方珊珊. 不同地区住宅建筑外窗节能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
FANG S S. The research on exterior window energy-saving of resident building of different zones of China [D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)
- [12] 孙鹏宝, 王焯. 寒冷地区某办公建筑围护结构负荷指标影响因素分析[J]. *兰州交通大学学报*, 2016, 35(1): 6-10.
SUN P B, WANG Y. Analysis on the factors affecting the heat and cold load index for an office building in cold zone [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2016, 35(1): 6-10. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Design standards for efficiency of public buildings: GB 50189-2015 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [14] 谢晓娜, 宋芳婷, 燕达, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第二讲 建筑动态热过程模型[J]. *暖通空调*, 2004, 34(8): 35-47.
XIE X N, SONG F T, YAN D, et al. Building environment design simulation software DeST (2): dynamic thermal process of buildings [J]. *HV & AC*, 2004, 34(8): 35-47. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)