

既有建筑围护结构综合热工性能评价方法研究

杨昌智[†],雷小慧,张冷,王琳

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:针对既有建筑围护结构提出了一种综合热工性能评价方法——等效传热系数法.等效传热系数评价法是基于指标评价法和等效能耗模型提出来的,将围护结构多个参数指标综合为一个等效指标,通过比较既有建筑和标准节能建筑的等效传热系数来评价既有建筑围护结构的热工性能与节能潜力.研究分析表明,该方法只需要测试室内外温度,不需要对围护结构各项热工性能参数进行全面布点测试,可以克服既有建筑围护结构现场测试困难和实际围护结构热工性能并不均衡难以全面把握的问题,缩短围护结构热工性能诊断周期.可以用于指导既有建筑围护结构的节能改造.

关键词:既有建筑;围护结构;热工性能;等效传热系数

中图分类号:TU111.19

文献标志码:A

Study on Assessment Method for Comprehensive Thermal Performance of Existing Building Envelopes

YANG Changzhi[†], LEI Xiaohui, ZHANG Ling, WANG Lin

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

Abstract: This paper proposed a method for the comprehensive thermal performance assessment (equivalent heat transfer coefficient) of building envelopes in existing buildings. This method is based on the index evaluation and equivalent energy consumption model, which integrates many evaluation indexes into an equivalent index. The thermal performance and energy-saving potentiality of the building envelope are evaluated by calculating and comparing the heat transfer coefficient of the two equivalent energy consumption models. It is shown that only measurement of indoor and outdoor temperature is needed, while measurement of every parameter in the envelope structure is not needed, which can overcome the difficulties in testing the existing buildings with complex structures. The proposed method can assess the total thermal performance of building envelope rapidly and evaluate the necessity of retrofitting before energy-saving renovation.

Keywords: existing buildings; building envelopes; thermal performance; equivalent heat transfer coefficient

* 收稿日期:2017-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578221), National Natural Science Foundation of China(51578221)

作者简介:杨昌智(1963—),男,湖南宁远人,湖南大学教授

[†] 通讯联系人, Email: yang0369@126.com

近些年来建筑能耗特别是既有公共建筑能耗高的问题逐渐显现,此类建筑的年平均耗电量是普通公共建筑的24倍^[1]。在大型公共建筑能源消耗中,空调采暖用电大约占60%左右^[2-4],但其中大约有40%~50%为围护结构传热所消耗^[5]。所以围护结构性能的好坏直接影响着建筑空调采暖负荷的大小,决定着建筑能耗的高低。现有的关于围护结构热工性能评价与诊断方法大多需要知道详细的围护结构设计参数^[6-8]或者详细的传热模型^[9],但是对于既有建筑而言很难实现对各项参数的全面布点测试,并且由于既有建筑建造时间较长,资料可能缺失,无法获得完整的设计参数。所以需要提出一种简单且适用于既有建筑的围护结构热工性能综合评价方法,以便在既有建筑围护结构改造之前能初步快速地判断是否具有改造价值。

基于以上目的,本文提出了一种既有建筑围护结构综合热工性能的评价方法——等效传热系数法,即分别建立既有建筑和标准节能建筑的等效能耗建筑模型,计算模型的等效传热系数,比较等效传热系数来评估既有建筑围护结构整体热工性能的好坏。

1 等效传热系数

文献[10-11]研究了如何避开围护结构的复杂性,将复杂围护结构简化成具有单层围护结构的规则长方体模型,并称该模型为等效能耗模型,利用累计能耗偏差、累计室内温度偏差、室内外温度相关系数偏差表征原围护结构与模型的能耗等效程度,同时验证了三个指标在表征等效程度上具有一致性:偏差越小,越等效。三个指标具体的计算方法^[11]如式(1)~式(3)所示。

累计能耗偏差,即测试时间内原型建筑和等效模型建筑的围护结构能耗之差:

$$\Delta Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} |q - q'| d\tau \quad (1)$$

式中, ΔQ 为累计能耗偏差; q 为原型建筑围护结构内表面热流; q' 等效模型建筑内表面热流; $[\tau_1, \tau_2]$ 为测试时间段; \int 表示累计计算。

如此累计室内温度偏差,即测试时间内原型建筑和等效模型建筑的室内温度之差:

$$\Delta t = \int_{\tau_1}^{\tau_2} |t_{in} - t_{in}'| d\tau \quad (2)$$

式中, Δt 累计室内温度偏差; t_{in} 为原型建筑室内温度; t_{in}' 为模型室内温度。

室内外温度相关系数偏差,即测试时间内原型建筑和等效模型建筑室内外温度相关系数之差:

$$\Delta \rho = |\rho - \rho'| \quad (3)$$

式中, $\Delta \rho$ 室内外温度相关系数偏差; ρ 为原型建筑室内外温度相关系数; ρ' 为等效模型建筑的室内外温度相关系数。

相关系数可以由统计学方法计算,若在时间段 τ 内室内温度序列为 t_{in} ,室外温度序列为 t_{out} ,则相关系数计算方法^[10-12]为:

$$\rho = \frac{Cov(t_{in}, t_{out})}{\sqrt{D(t_{in})}\sqrt{D(t_{out})}} \quad (4)$$

式中, $Cov(t_{in}, t_{out})$ 为序列 t_{in} 和 t_{out} 的协方差; $D(t_{in})$ 、 $D(t_{out})$ 为序列 t_{in} 、 t_{out} 的方差。

基于以上模型与计算方法,本文进一步提出了等效传热系数概念:通过改变等效模型建筑单层结构的传热系数使模型建筑的能耗与原型建筑结构最接近,定义使得能耗最接近(偏差最小)时的传热系数为等效传热系数。但该等效传热系数与文献[3]中提出的等效传热系数概念不同:本文提出的等效传热系数是单层围护结构建筑模型的传热系数,综合了围护结构所有影响能耗的因素;文献[3]提出的等效传热系数是考虑了窗墙比后的窗和墙的平均传热系数,这两个等效传热系数没有本质关联。此外,从公式(1)可以看出计算累计能耗偏差需要进行热流测试,而三个指标在表征等效程度上具有一致性,也就是说能耗体现在累计传热量上,假设原型建筑与模型建筑的外围面积相等,要想使得二者的传热量相等或相近,传热系数和室内外温差必须相等或相近。为避免复杂的测试实现原型建筑围护结构热工综合性能的快速测量,可以假设原型建筑和模型建筑的外围面积和传热量相等,这样传热系数和室内外温差就形成了唯一对应关系:当传热系数大时,室内外温差相应减小,反之增大。当原型建筑实测室内温度序列与模型建筑模拟得到的室内温度序列越接近,说明模型建筑的传热系数也就越接近于原型建筑的传热系数值。而室内外温度的相关性实际上就是反映了室内外温差,原型建筑的室内外温度相关性和模型建筑的室内外温度相关性越接近,二者的室内外温差也就越接近,传热量也就越接近,模型建筑的传热系数也就越能反映原既有建筑的综合传热

系数值. 所以本文用室内外温度相关系数偏差代替累计能耗偏差表征原建筑围护结构与模型建筑的等效程度.

2 基于等效传热系数的既有建筑围护结构热工性能评价方法

2.1 方法简述与基本定义

等效传热系数围护结构热工性能评价方法首先需要建立既有建筑(原型建筑)对应的标准节能建筑, 然后分别建立既有建筑 and 标准节能建筑的等效模型建筑, 再计算两个模型的等效传热系数, 最后通过两个等效传热系数的比较来评估既有建筑围护结构的热工性能, 甚至计算出节能潜力. 基本思路如图 1 所示.

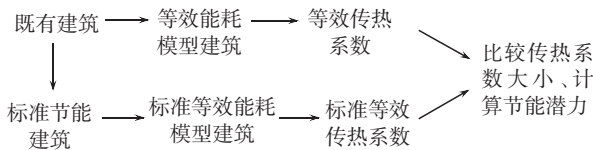


图 1 基本思路

Fig.1 The basic thinking

既有建筑: 需要进行围护结构热工性能评价的建筑.

标准节能建筑: 与既有建筑具有相同的形状尺寸, 但是各项参数值满足建筑节能设计标准的限值.

等效能耗模型建筑: 根据既有建筑建立的具有单层围护结构的规则长方体.

标准等效能耗模型建筑: 根据标准节能建筑建立的等效能耗模型, 增加“标准”一词是为与既有建筑的等效能耗模型区分开, 方便文章表述.

2.2 模型建立方法

利用能耗模拟软件 DesT 建立模型, 包括等效能耗模型建筑、标准节能建筑、标准等效能耗模型建筑.

建模之前, 需要对既有建筑进行相关测试: 室内散热量、建筑尺寸、测试时间段内室内外逐时温度等. 通过测试, 得到 τ 时间段室内外温度序列为:

$$t_{in} = (t_{in,1}, t_{in,2}, t_{in,3}, \dots, t_{in,\tau})$$

$$t_{out} = (t_{out,1}, t_{out,2}, t_{out,3}, \dots, t_{out,\tau})$$

标准节能建筑: 与既有建筑形状大小尺寸相同, 但是围护结构各项参数均满足公共建筑节能设计标准的要求, 通过对 DesT 软件设置使得室外气象参

数、内扰与既有建筑相同, 然后模拟得到室内温度序列:

$$t_{in(B)} = (t_{in(B),1}, t_{in(B),2}, t_{in(B),3}, \dots, t_{in(B),\tau})$$

等效能耗模型建筑: 根据既有建筑建立的具有单层围护结构的长方体模型, 该模型的建筑面积与既有建筑相同, 室外气象参数、内扰与既有建筑也相同, 模拟室内温度, 但是由传热学^[13]理论可以知道模型建筑的传热系数 K 改变, 室内温度会发生变化, 因此在改变传热系数 K 的情况下, 分别利用 DesT 软件模拟等效模型建筑的室内温度, 得到对应的温度序列组:

$$t_{K,in} = (t_{K,in,1}, t_{K,in,2}, t_{K,in,3}, \dots, t_{K,in,\tau})$$

标准等效能耗模型建筑: 根据标准节能建筑建立的单层围护结构长方体, 建筑内扰、室外气象参数与标准建筑相同, 同样, 室内温度与传热系数 K 相关, 分别模拟不同 K 值情况下的等效能耗模型室内温度, 得到对应的温度序列组为:

$$t_{K,in(B)} = (t_{K,in(B),1}, t_{K,in(B),2}, t_{K,in(B),3}, \dots, t_{K,in(B),\tau})$$

该建模方法的优点: 只需要知道既有建筑的形状大小, 室内热扰, 室外气象参数, 不需要知道围护结构具体结构形式、详细的传热系数等参数值, 而既有建筑的面积通过测量得到, 室内热扰根据计算照明、设备发热或者人员等散热等得到估计值, 克服了既有建筑现场布点难和资料不全的问题.

2.3 计算等效传热系数

2.3.1 等效指标计算

本文采用室内外温度相关系数偏差来验证等效程度. 在 2.2 节中已经讨论了建模方法以及得到了温度序列: $t_{in}, t_{out}, t_{in(B)}, t_{K,in}, t_{K,in(B)}$.

根据式(3)、式(4)计算室内外温度相关系数偏差, 等效能耗模型建筑与既有建筑的室内外温度相关系数偏差计算过程:

$$\rho = \frac{Cov(t_{in}, t_{out})}{\sqrt{D(t_{in})}\sqrt{D(t_{out})}} \quad (5)$$

$$\rho_K = \frac{Cov(t_{K,in}, t_{out})}{\sqrt{D(t_{K,in})}\sqrt{D(t_{out})}} \quad (6)$$

$$\Delta\rho' = |\rho_B - \rho_K| \quad (7)$$

标准等效能耗模型与标准节能建筑的室内外温度相关系数偏差计算过程:

$$\rho_B = \frac{Cov(t_{in(B)}, t_{out})}{\sqrt{D(t_{in(B)})}\sqrt{D(t_{out})}} \quad (8)$$

$$\rho_{K(B)} = \frac{Cov(t_{K,in(B)}, t_{out})}{\sqrt{D(t_{K,in(B)})}\sqrt{D(t_{out})}} \quad (9)$$

$$\Delta\rho' = |\rho_B - \rho_{K(B)}| \quad (10)$$

2.3.2 等效传热系数计算方法

根据计算可知室内外温度相关系数偏差与等效模型建筑单层结构的传热系数相关, 可以建立 $\Delta\rho$ 、 $\Delta\rho'$ 与 K 的关系式, 又由于该指标越小越等效, 所以可以根据等效程度与传热系数的关系求等效传热系数. 由等效传热系数定义, 当使得室内外温度相关系数偏差最小时所对应的传热系数即为等效传热系数. 因此由室内外温度相关系数偏差与传热系数的关系式求等效传热系数的数学表达过程为:

第一步: 求关系式.

采用回归分析法^[14]拟合得到室内外温度相关系数偏差与传热系数的关系式为:

$$\begin{cases} \Delta\rho = f(K) \\ \Delta\rho' = f(K) \end{cases}$$

第二步: 求等效传热系数 K .

由式(7)、式(10)可以知道 $\Delta\rho \geq 0$ 和 $\Delta\rho' \geq 0$ 恒成立的, 所以求使得 $\Delta\rho$ 、 $\Delta\rho'$ 有最小值时对应的传热系数 K 值, 即为所求值.

2.4 围护结构的节能潜力计算

根据 2.3 节的计算方法得到等效传热系数和标准等效传热系数. 通过比较既有建筑和标准节能建筑的等效能耗模型建筑的传热系数来评估既有建筑围护结构的热工性能, 并定义围护结构节能潜力计算公式为: K'_B

$$\varphi = \frac{|K' - K'_B|}{K'} \times 100\% \quad (11)$$

式中, K' 为等效传热系数; K'_B 为标准等效传热系数.

3 方法应用举例

3.1 建立模型

为说明该方法的应用过程, 以位于长沙市的某三层办公建筑为例进行分析, 建筑面积约为 360 m², 南北朝向, 南向两扇外窗, 北向有三扇外窗, 建筑形状如图 2 所示, 具体相关参数见表 1.

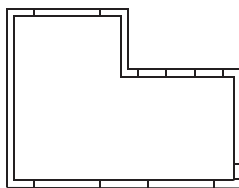


图 2 既有建筑

Fig.2 Existing building shape

表 1 既有建筑相关参数值

Tab.1 Basic parameters of existing building

建筑参数	数值
灯光	10 W·m ⁻²
设备	15 W·m ⁻²
人员	0.1 人·m ⁻²
人员作息	8:00 ~ 18:00
窗墙比	0.34/0.16

根据既有建筑建立标准节能建筑, 标准节能建筑围护结构各项参数满足《湖南省公共建筑节能设计标准》^[15], 即表 2 中的最低限值. 根据既有建筑和标准节能建筑建立等效单层围护结构模型建筑, 如图 3 所示.

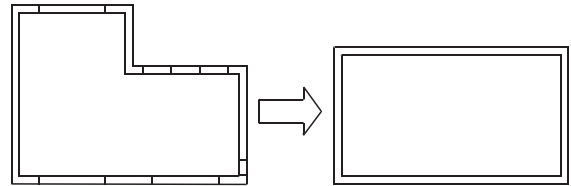


图 3 等效建模

Fig.3 Modeling

表 2 围护结构相关参数标准限值

Tab.2 The standard values of building envelope

围护结构部位	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	
屋面	≤0.7(D≥3.0); ≤0.5(D<3.0)	
外墙	≤1.0(D≥3.0); ≤0.7(D<3.0)	
建筑不透明外门	<2.5	
外窗	传热系数	遮阳系数(南北)
窗墙比≤0.2	≤4.7	—
0.3<窗墙比≤0.4	≤3.0	≤0.6

3.2 模拟结果

采用温湿度自动记录仪通过 24 h 测试得到既有建筑室内外实际温度, 利用 DeST 软件模拟了标准节能建筑和不同传热系数下的模型建筑的室内温度, 相关测试和模拟结果如表 3 所示, 其中因为标准等效能耗模型建筑与等效能耗模型建筑形状一样, 都是单层围护结构的规则长方体, 其他条件也相同, 所以得到与等效能耗模型相同的室内温度.

表3 室外、室内温度
Tab.3 Indoor and outdoor temperature

实际室外温度/ $^{\circ}\text{C}$	实际室内温度/ $^{\circ}\text{C}$	标准室内温度/ $^{\circ}\text{C}$	不同传热系数等效模型室内温度 $t_{k.in}/^{\circ}\text{C}$					
			$K=0.265$	$K=0.344$	$K=0.712$	$K=1.204$	$K=2.185$	
$t_{out}(24)$	$t_{in}(24)$	$t_{in(B)}(24)$						
13.39	16.58	22.92	24.72	24.28	22.88	21.58	19.74	
13.31	16.57	22.83	24.72	24.26	22.84	21.48	19.57	
13.21	16.56	22.73	24.70	24.23	22.79	21.38	19.40	
13.21	16.56	22.62	24.66	24.18	22.73	21.26	19.24	
13.15	16.55	22.51	24.61	24.13	22.66	21.14	19.08	
13.10	16.50	22.40	24.56	24.06	22.58	21.02	18.92	
13.03	16.50	22.28	24.50	24.00	22.50	20.89	18.77	
12.96	16.46	22.17	24.44	23.93	22.41	20.77	18.62	
12.93	16.44	22.06	24.38	23.85	22.32	20.65	18.47	
12.97	16.39	21.95	24.31	23.78	22.24	20.53	18.33	
13.07	16.37	21.42	23.40	22.91	21.48	19.86	17.81	
13.22	16.37	22.08	24.17	23.68	22.29	20.71	18.71	
13.31	16.38	22.38	24.54	24.06	22.65	21.08	19.04	
13.54	16.38	22.57	24.78	24.30	22.86	21.29	19.20	
13.73	16.40	22.71	24.97	24.49	23.02	21.44	19.31	
14.22	16.43	22.27	24.46	23.98	22.47	20.86	18.67	
14.66	16.44	22.66	24.94	24.46	22.95	21.34	19.17	
15.13	16.43	22.87	25.22	24.74	23.22	21.59	19.40	
15.72	16.41	23.03	25.44	24.96	23.40	21.76	19.55	
16.01	16.43	23.14	25.61	25.13	23.54	21.90	19.66	
16.07	16.49	22.81	25.26	24.78	23.16	21.48	19.22	
15.80	16.66	22.30	24.70	24.20	22.57	20.86	18.62	
15.37	16.57	21.98	24.35	23.85	22.23	20.51	18.32	
15.12	16.54	21.75	24.10	23.60	22.00	20.26	18.13	

3.3 计算结果

3.3.1 室内外温度相关系数偏差

根据式(5)~式(10)计算室内外温度相关系数偏差,得到结果如表4所示: $\Delta\rho$ 为等效能耗模型建筑与既有建筑对比得到的累计室内外温度相关系数偏差, $\Delta\rho'$ 为标准等效能耗模型建筑与标准节能建筑对比得到的累计室内外温度相关系数偏差。

3.3.2 等效传热系数

根据表4中数据,拟合得到室内外温度相关系数偏差与传热系数的关系式,拟合趋势线如图4所示,拟合关系式分别为:

$$\Delta\rho = 0.061K^2 - 0.361K + 0.514 \quad R^2 = 0.996$$

$$\Delta\rho' = 0.190K^2 - 0.522K + 0.382 \quad R^2 = 0.967$$

表4 传热系数与室内外温度相关系数偏差

Tab.4 Heat transfer coefficient and deviation of correlation coefficient of indoor and outdoor temperature

K	$\Delta\rho$	$\Delta\rho'$
0.265	0.411	0.240
0.344	0.406	0.235
0.712	0.300	0.128
1.204	0.159	0.012
2.185	0.019	0.152

根据 2.3.2 节中的求解方法,计算得到等效传热系数 $K' \approx 2.38$,标准等效传热系数 $K_B' \approx 1.37$.

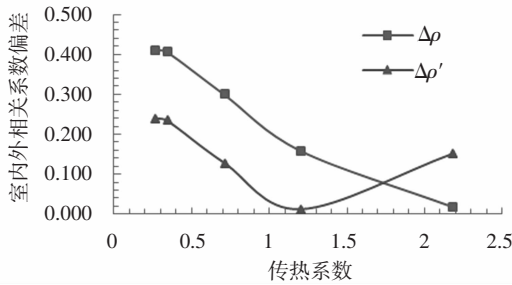


图4 累计室内外温度相关系数偏差与传热系数的关系图

Fig.4 The relation graph between heat transfer coefficient and deviation of correlation coefficient

3.4 节能潜力

根据计算结果运用公式(11)得到节能潜力为:

$$\varphi = \frac{|K' - K_B'|}{K'} \times 100\% = 42.44\%$$

3.5 结果验证

文献[16]利用能耗模拟软件模拟建筑改造前和改造后的负荷,通过负荷比较得到建筑的节能潜力,所以采用该方法来验证本文提出的等效传热系数法评价既有建筑围护结构热工性能的可行性.利用能耗模拟软件 DeST 模拟该办公建筑改造前后的负荷,得到改造前建筑的全年累计负荷为 98 573.88 kW·h,改造后的节能建筑全年累计负荷 50 004.79 kW·h,所以节能潜力:

$$\varphi = \frac{98\ 573.88 - 50\ 004.79}{98\ 573.88} \times 100\% = 49.3\%$$

结果表明软件模拟负荷法得到的节能潜力与等效传热系数法得到的结果比较接近但不完全一样是因为两者都只是估计值,本身都存在一定的误差,所以结果必然不可能完全一致.但是在工程上用来指导围护结构改造,初步判断围护结构是否具有改造价值已经足够,比较发现等效传热系数法比负荷模拟法更具有一定的优势.等效传热系数法不需要知道实际建筑围护结构的具体参数,而软件模拟负荷法要得到改造前的负荷需要知道实际建筑围护结构的各项参数,显然这是较难实现的,尤其是对于建造时间较久远的建筑而言围护结构设计资料可能丢失,只能采用现场测试的方法得到,但是建筑围护结构形式、材料复杂多样,甚至同样的材料随着建造时间的推移,不同的地方损坏程度不同,很难实现对围

护结构各项参数各个局部全面而准确的测试.由此看来用等效传热系数法对建筑围护结构热工性能进行评价更方便和快速.

4 结论

1)本文基于已有的能耗等效模型提出了等效传热系数概念并具体介绍了获得方法,同时还介绍了建立等效模型建筑和标准等效模型建筑的方法.

2)等效传热系数综合了围护结构的各个构件,包括外墙、外窗、窗墙比、遮阳等因素对建筑能耗的影响,使得评价指标由多个简化为一个,简化了围护结构性能的评价指标,减少了测试参数,只需要测试实际建筑的室内外温度,克服了既有建筑围护结构现场测试和设计参数不全的困难.所以等效传热系数法可以初步快速判断围护结构综合热工性能以及改造价值,用于指导既有建筑围护结构的节能改造工作.

3)本文针对具体建筑举例说明了等效传热系数方法的应用过程,得到该建筑的节能潜力,并将结果与软件模拟负荷方法得到的结果进行了比较,说明了该方法具有可行性.但本文提到的方法没有考虑太阳辐射透过透明围护结构进入室内的辐射传热,对于具有大面积透明围护结构的建筑应用本文推荐的方法所产生的误差有待进一步研究.

参考文献

- [1] 鲁华章.既有大型公共建筑节能激励机制优化设计[J].城市开发,2015(12):80—81.
LU H Z. The optimal designs of incentive mechanism for energy efficiency in large public buildings [J].Urban Development,2015 (12):80—81.(In Chinese)
- [2] 欧志华,郭俊明.浅谈我国建筑节能 50%设计标准的含义[J].建筑节能,2007,35(12):60—62.
OU Z H, GUO J M. Brief introduction on implication of the design standard of 50% energy efficiency of building in China [J].Construction Conserves Energy, 2007, 35(12):60—62.(In Chinese)
- [3] HUANG J E, LU H L, GAO T, et al. Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings[J]. Energy and Buildings.2014, 75(5):504—510.
- [4] 龚光彩,蔡立群,王平,等.建筑围护结构节能设计火用分析及 CO₂ 排放研究[J].湖南大学学报(自然科学版).2015,42(1):

- 109—114.
- GONG G C, CAI L Q, WANG P, *et al.* Research on the energy and CO₂ emissions of the energy-saving design of building envelope[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2015, 42(1):109—114. (In Chinese)
- [5] 郎四维.我国建筑节能设计标准的现状与进展[J].制冷与空调, 2002, 23(3):1—6.
- LANG S W. Current situation and progress of energy efficiency design standards in buildings in China [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2002, 23(3):1—6. (In Chinese)
- [6] 薛志峰.既有建筑节能诊断与改造[M].北京:中国建筑工业出版社, 2007:44—65.
- XUE Z F. Energy saving diagnosis and renovation of existing buildings[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 44—65. (In Chinese)
- [7] YU J H, TIAN L W, YANG C Z, *et al.* Sensitivity analysis of energy performance for high-rise residential envelop in hot summer and cold winter zone of China [J]. Energy and Buildings, 2013, 64(5): 264—274.
- [8] 于靖华, 杨昌智, 田利伟, 等. 夏热冬冷地区围护结构热工性能系统评价方法的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版). 2008, 35(10):16—20.
- YU J H, YANG C Z, TIAN L W, *et al.* Systematic evaluation of the thermal performance of building envelopes in hot summer and cold winter zone [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2008, 35(10):16—20. (In Chinese)
- [9] 黄靓, 王辉, 蒋文龙. 带双梁的框架结构节能体系及其热工性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(9):14—18.
- HUANG L, WANG H, JIANG W L. Research on the Energy-efficient system and thermal performance of frame structure with dual-beams [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2013, 40(9):14—18. (In Chinese)
- [10] 孙国建, 张辉, 吕宁. 一种评价围护结构能耗的简化方法[J]. 建筑节能, 2014, 42(10):54—57.
- SUN G J, ZHANG H, LV N. A simplified evaluation method for assessing energy performance of building [J]. Building Energy Efficiency, 2014, 42(10):54—57. (In Chinese)
- [11] 张湘圆, 张辉. 建筑围护结构能耗检测及评价的等效模型[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(5):58—61.
- ZHANG X Y, ZHANG H. An equivalent model for on-site test and evaluation of energy consumption of building envelopes [J]. Building Energy & Environment, 2012, 31(5):58—61. (In Chinese)
- [12] 韩旭里, 谢永钦. 概率论与数理统计(修订版)[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2011:104—105.
- HAN X L, XIE Y Q. Probability and statistics (revised edition) [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2011:104—105. (In Chinese)
- [13] 章熙民, 任泽需, 梅飞鸣. 传热学[M]. 第5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007:10—103.
- ZHANG X M, REN Z P, MEI F M. Heat transfer [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007:10—103. (In Chinese)
- [14] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2008:95—98.
- LI Y Y, HU C R. Experiment design and data processing [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:95—98. (In Chinese)
- [15] DBJ43/003—2010 湖南省公共建筑节能设计标准[S]. 长沙: 湖南省住房和城乡建设厅, 2010:46—47.
- DBJ43/003—2010 Design standard for energy efficiency of public buildings in Hunan province[S]. Changsha: Bureau of Housing and Urban-Rural Development of Hunan, 2010:46—47. (In Chinese)
- [16] 仇中柱, 郭文雯, 李芑, 等. 能耗模拟在建筑围护结构节能改造中的应用[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(1):1—4, 18.
- QIU Z Z, Guo W W, LI P, *et al.* Application of building energy simulation in building envelop retrofit [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(1):1—4, 18. (In Chinese)