

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.020

既有居住建筑围护结构节能改造热工性能优化

黄建恩, 吕恒林, 冯 伟, 陈艳霞, 周 泰

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:既有建筑物窗墙比差异较大,在节能改造过程中窗墙比和窗的热工性能对保温层厚度的影响不可忽视。在《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》围护结构节能设计规定的基础上,提出围护结构等效传热系数限值,综合考虑朝向、窗墙比、窗户的类型等因素,建立了外墙保温层厚度计算模型和围护结构热工性能参数优化模型,并以徐州地区某既有住宅为例,验证了模型的可行性。

关键词:既有居住建筑,围护结构,节能改造,热工性能,优化

中图分类号:TU111.195 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)05-0118-07

Thermal Properties Optimization of Envelope in Energy-saving Renovation of Existing Residential Building

Huang Jian'en, Lyu Henglin, Feng Wei, Chen Yanxia, Zhou Tai

(College of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The impact of windows to wall ratio and thermodynamic performance of windows on the insulating layer thickness cannot be neglected in existent residential building energy-saving renovation because of the bigger difference of windows to wall ratio. The limited equivalent coefficient of envelope heat transfer was posed based on "Design standard for energy efficiency of residential buildings in severe cold and cold zones". Factors of orientation, windows to wall ratio and windows types should be comprehensively considered in building calculation model of thermal insulation thickness of external wall and envelope thermodynamic performance optimization model. These models are validated by an existing residential building in Xuzhou.

Key words: existing residential building; building envelopes; energy-saving renovation; thermal properties; optimization

据统计,在很多国家建筑能耗约占总能耗的 40%,其中,采暖空调的能耗约占建筑能耗的 60%^[1]。外墙外保温是降低采暖空调能耗的重要技术措施。

很多学者针对保温层厚度的确定进行了大量的研究。Al-Khawaja^[2]用寿命周期费用分析法给出了卡塔尔多哈地区墙体的最佳保温层厚度,并对不同类型的保温层进行了比较。Mahlia 等^[3]针对马尔

代夫商业建筑采用现值法得出了不同绝热材料最佳保温层厚度和墙中空气间层厚度对节能性和减排量的影响。Sisman 等^[4]分析了土耳其 4 个城市采暖建筑外墙和屋顶最佳保温层厚度和度日数的关系。Tosun 等^[5]用人工神经网络法确定保温层的厚度。Arslan 等^[6]、Ucar^[7]考虑水蒸气的凝结用火用经济学研究了墙体保温层的最佳厚度。Al-Sanea 等^[8]、Daouas 等^[9-10]、Ozel^[11-13]等采用动态方法计算建筑物

收稿日期:2013-02-28

基金项目:江苏省“六大人才高峰”资助项目(2010-JZ-006)

作者简介:黄建恩(1970-),男,副教授,博士生,主要从事暖通空调、建筑节能研究,(E-mail)yhgreen@163.com。

的能耗,并分析了保温层的最佳厚度,动态能耗计算方法更准确的反应了围护结构的能耗状况,可以进一步提高保温层厚度计算的准确性。Bolattürk^[14]、Mahlia等^[15]、Özkan等^[16]、Sö Yölemez等^[17]研究人员采用 $P_1 - P_2$ 经济性模型对最佳保温层厚度进行了研究,该模型考虑了能源价格的增长对最佳保温层厚度的影响。Bolattürk^[18]、Dombayci等^[19]、Ucar等^[20-21]、Kaynakli^[22]、Ekici等^[23]等研究人员对燃料种类对保温层厚度的影响进行了分析和研究。波兰学者Dylewski等^[24]考虑经济和环保效益,通过设置权重给出了一个确定最佳保温层厚度的方法,并考虑了燃煤锅炉、热泵、燃气炉和电锅炉4种热源对最佳保温层厚度的影响。

中国研究人员对保温复合墙体的构造、施工技术、施工质量控制等方面的研究较多,但对保温层最佳厚度的研究成果相对较少。陈凡等^[25]运用全生命周期费用分析建立了最佳保温层厚度的数学模型,并用投资回收期对其经济效益进行了评价。黄春华^[26]、王厚华^[27]、许建柳^[28]、郭楠^[29]等利用全生命周期分析法分别研究了长沙地区居住建筑、重庆地区居住建筑、南京地区居住建筑、长春市既有住宅节能改造等情况下墙体保温层的最佳厚度。于靖华、杨昌智、田利伟^[30-32]等针对夏热冬冷地区的住宅建筑用 $P_1 - P_2$ 经济性模型对寿命周期内的最佳保温层厚度进行了研究。Zhu等^[33]对中国不同气候区的最佳保温层厚度和节能量进行了研究,但在研究过程中并没有考虑资金的时间价值,研究结果的精度受到一定的影响。文献[25-33]均采用度日法计算建筑物的能耗。

对外墙保温层厚度的确定,尽管已经进行了大量的研究工作,但大多数研究者在研究过程中没有充分考虑窗墙比和外窗的热工性能对最佳保温层厚度的影响,这使得研究成果的应用受到一定的限制,尤其对既有建筑改造工程。不同建筑有不同的窗墙比,更需要研究窗墙比及外窗的热工性能对保温层厚度的影响。本文在《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》围护结构节能设计规定的基础上,提出围护结构等效传热系数限值,综合考虑朝向、窗墙比、窗户的类型等因素,建立了外墙保温层厚度计算和围护结构热工性能参数优化模型,该方法可以应用于既有居住建筑围护结构节能改造方案确定和性能参数优化设计。

1 等效传热系数及耗热量限值

围护结构(本文特指外墙和外窗构成的围护结

构,下同)采暖能耗主要受当地气候条件、室内采暖温度、围护结构性能及窗墙比的影响。对严寒和寒冷地区的居住建筑,冬季采暖空调能耗是建筑能耗的主要部分,为便于研究和应用,忽略各朝向太阳辐射的影响,仅考虑温差传热引起的采暖耗热量。

1.1 年采暖耗热量

采暖能耗可按度日法进行计算,单位面积围护结构的年采暖耗热量按下式进行计算:

$$Q = 86.4 \cdot [WWR \cdot k_{win} + (1 - WWR)k_m] \cdot HDD_{18} \quad (1)$$

式中: Q 为单位面积围护结构的年采暖耗热量, kJ/a ; WWR 为窗墙比; k_{win} 为窗的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; k_m ,外墙平均传热系数(考虑了热桥影响), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; HDD_{18} 为室内采暖温度基数为 18°C 时的采暖度日数。令

$$k_e = WWR \cdot k_{win} + (1 - WWR)k_m \quad (2)$$

k_e 称为围护结构的等效传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,是综合考虑了窗墙比、外墙和外窗热工性能影响的围护结构的平均传热系数。则有:

$$Q = 86.4 \cdot k_e \cdot HDD_{18} \quad (3)$$

1.2 等效传热系数限值

《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 26-2010)给出了不同气候分区建筑物不同朝向围护结构窗墙比的限值,外墙和外窗的热工性能限值。根据标准规定的窗墙比、热工性能限值和式(2)可以计算出不同气候分区建筑物各朝向的围护结构等效传热系数。以寒冷地区为例,窗墙比限值北向(N)小于等于0.30,东西向(E、W)小于等于0.35,南向(S)小于等于0.5;外墙和外窗热工性能限值见表1。

表1 外墙和外窗热工性能限值

围护结构部位	传热系数 $K/(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$		
	≤ 3 层建筑	4~8层建筑	≥ 9 层建筑
外墙	0.45	0.60	0.70
WWR ≤ 0.20	2.80	3.10	3.10
外窗 0.2 $<$ WWR ≤ 0.30	2.50	2.80	2.80
0.3 $<$ WWR ≤ 0.40	2.00	2.50	2.50
0.4 $<$ WWR ≤ 0.50	1.80	2.00	2.30

寒冷地区不同朝向的围护结构等效传热系数限值计算结果见表2。在既有建筑节能改造过程中只要改造后的建筑物围护结构等效传热系数不超过限值,采暖能耗就可以满足标准规定的能耗限值。由于节能标准规定的不同朝向的窗墙比限值、外窗性能要求不同,围护结构等效传热系数限值因朝向而

异。这种差异性将会直接导致围护结构改造方案的不同,确定围护结构节能改造方案需要按朝向且充分考虑窗墙比和窗户性能的影响经优化分析确定。下面将分别给出外墙保温层厚度确定模型和围护结构改造热工性能参数优化模型。

表 2 寒冷地区围护结构等效传热系数限值

朝向	等效传热系数限值/(W·(m ² ·°C) ⁻¹)		
	≤3 层建筑	4~8 层建筑	≥9 层建筑
N	1.065	1.260	1.330
E、W	0.993	1.265	1.330
S	1.125	1.300	1.500

2 外墙保温层厚度计算模型

2.1 保温墙体的平均传热系数

根据民用建筑热工设计规范,墙体的平均传热系数可采用面积加权法进行计算。简化计算时,可根据所设计的结构体系、选择外墙主体部位和结构性热桥部位的面积在外墙面积中所占的比值 A 和 B 按下式计算:

$$k_m = Ak_{\text{wall}} + Bk_b \quad (4)$$

式中: k_{wall} 为墙体主体部位的传热系数,W/(m²·°C); k_b 为墙体热桥部位的传热系数,W/(m²·°C); A 、 B 为外墙主体部位和结构性热桥部位的面积在外墙面积中所占的比值,可按表 3 取值。

表 3 外墙主体部位和热桥部位与外墙面积比

结构体系	A	B
砖混结构	0.75	0.25
框架结构	0.75	0.25
框剪结构	0.55(填充墙)	0.45
剪力墙结构	0.35(填充墙)	0.65(剪力墙)

注:本表引自国家建筑标准设计图集;建筑围护结构节能工程做法及数据(09J908-3);亦可直接取剪力墙部位的 k 作为 k_m 。

对保温层厚度为 x 的保温墙体,其主体部位的传热系数和热桥部位的传热系数可根据传热学理论进行计算:

$$k_{\text{wall}} = \frac{1}{R_{\text{tw}} + x/\lambda_{\text{ins}}} \quad (5)$$

$$k_b = \frac{1}{R_{\text{twb}} + x/\lambda_{\text{ins}}} \quad (6)$$

式中: R_{tw} 、 R_{twb} 分别为墙体主体部位和热桥部位除保温层以外的其它构造层的热阻,(m²·°C)/W; λ_{ins} 为保温材料的导热系数,W/(m·°C)。

针对既有住宅,窗墙比是确定的,在节能改造时

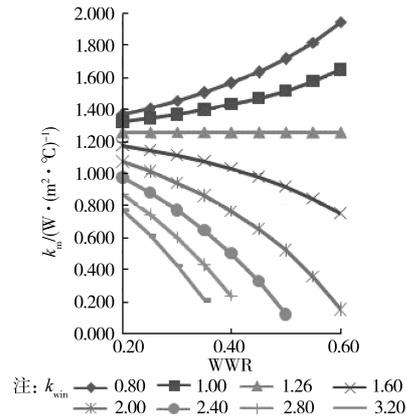


图 1 外墙平均传热系数变化规律

只要选定了窗户的类型,可确定不同窗墙比要求的外墙平均传热系数,由式(2)得:

$$k_m = \frac{k_{\text{emax}} - \text{WWR} \cdot k_{\text{win}}}{(1 - \text{WWR})} \quad (7)$$

式中: k_{emax} 为围护结构等效传热系数限值,W/(m²·°C)。

2.2 外墙平均传热系数影响因素分析

由式(7),可得出外墙平均传热系数限值随窗墙比和窗的热工性能的变化规律。对某朝向围护结构传热系数限值为定值,在窗墙比固定的情况下, k_m 随外窗的传热系数线性变化, k_{win} 增大, k_m 减小;当 k_{win} 等于某朝向等效传热系数限值时, k_m 为常数,不随窗墙比的变化而变化;当 k_{win} 大于某朝向等效传热系数限值时,随窗墙比的增大, k_m 需要减小,即增加保温层厚度;当 k_{win} 小于某朝向等效传热系数限值时,随窗墙比的增大, k_m 需要增大,即降低保温层厚度。以 4~8 层的居住建筑北向墙体为例,围护结构等效传热系数限值为 1.26 W/(m²·°C),外墙平均传热系数随窗墙比和窗热工性能的变化规律如图 1 所示。

可见,外墙平均传热系数受朝向、围护结构限值、窗墙比和窗户性能的影响,因此外墙保温层厚度的确定也应充分考虑朝向、窗墙比和窗户性能的影响。

2.2 保温层厚度的计算模型

对于特定地区的某一既有居住建筑,各朝向的窗墙比、墙体主体部位和热桥部位的构造和热阻均是确定的,如果选定了保温材料类型,在式(4)、(5)、(6)组成的方程组中,只有保温层厚度 x 是未知数,联立(4)、(5)、(6)得:

$$\left(\frac{x}{\lambda_{\text{ins}}}\right)^2 + (R_{\text{tw}} + R_{\text{twb}} - 1/k_m) \frac{x}{\lambda_{\text{ins}}} + (R_{\text{tw}}R_{\text{twb}} - \frac{AR_{\text{twb}} + BR_{\text{tw}}}{k_m}) = 0 \quad (8)$$

由(8)可求出墙体保温层需要的厚度,其中 k_m 由式(7)计算确定。

3 经济性评价模型

3.1 节能量的计算

保温可有效的降低居住建筑的采暖能耗,每年节约的能耗可按下式进行计算:

$$\Delta Q = 86.4 \cdot \Delta k_e \cdot \text{HDD}_{18} \quad (9)$$

$$\Delta k_e = \text{WWR} \cdot \Delta k_{\text{win}} + (1 - \text{WWR}) \left[A \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{tw}}} - \frac{1}{R_{\text{tw}} + x/\lambda_{\text{ins}}} \right) + B \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{twb}}} - \frac{1}{R_{\text{twb}} + x/\lambda_{\text{ins}}} \right) \right] \quad (10)$$

式中: ΔQ 为每年节约的采暖耗热量, kJ/a ; Δk_e 为节能改造前后围护结构等效传热系数的差值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$; Δk_{win} 为节能改造前后窗的传热系数差值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

3.2 单位面积围护结构的改造费用

每平方米围护结构的改造成本可按式(11)进行计算:

$$C = \text{WWR} \cdot C_{\text{win}} + (1 - \text{WWR}) \cdot C_{\text{ins}} \quad (11)$$

$$C_{\text{ins}} = x \cdot c_i + c_p \quad (12)$$

式中: C 、 C_{win} 、 C_{ins} 分别为单位面积的围护结构、窗户和保温层的改造费用, $\text{元}/\text{m}^2$; c_i 为保温材料价格, $\text{元}/\text{m}^3$; c_p 为单位面积保温层施工综合费用, $\text{元}/\text{m}^2$ 。

3.3 经济性评价模型

既有建筑的节能改造经济性评价可从改造费用、获得的节能收益等方面进行评价,可以运用美国学者 Duffie 提出的 $P_1 - P_2$ 经济性模型对既有建筑改造的经济性进行综合评价,其表达式如式(13)、(14)所示^[31]。

$$P_1 = \text{PWF}(N_e, i, d) = \sum_{j=1}^{N_e} \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+d)^j} = \begin{cases} \frac{1}{d-i} \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^{N_e} \right], & i \neq d \\ \frac{N_e}{1+i}, & i = d \end{cases} \quad (13)$$

$$P_2 = D + (1 - D) \frac{\text{PWF}(N_{\text{min}}, 0, d)}{\text{PWF}(N_L, 0, m)} + M_S \text{PWF}(N_e, i, d) - \frac{R_v}{(1+d)^{N_e}} \quad (14)$$

式中: P_1 为能耗费用在经济性分析年限 N_e 内总支出的现值因数,即经济性分析年限内总能耗费用与首年的比值; P_2 为分析年限 N_e 内对保温层的支出资金总额与初投资的比值; i 为能源价格增长率; N_e 为分析年限, a ; m 为银行贷款利率; d 为市场贴现率; D ,初投资首付百分比,对节能改造可取

100%; M_S ,年维修费用与初投资的比值,墙体保温层在使用过程中一般无维修成本,取0; R_v 为再售价与初投资的比值,本项目取0; N_L 为贷款期(年)限; N_{min} 为 N_e 与 N_L 的较小值。

在寿命周期内,净现值LCS(元)为围护结构节能改造节省的采暖费用现值与投资费用现值之差,其表达式分别为:

$$\text{LCS} = P_1 \cdot \Delta C_H - P_2 \cdot C_{\text{ins}} \quad (15)$$

$$\Delta C_H = C_e \cdot \Delta Q / \eta_1 \eta_2 q \quad (16)$$

式中: η_1 为设备运行效率; η_2 为管网输送效率,节能建筑取0.90; C 为单位面积围护结构的改造费用, $\text{元}/\text{m}^2$; ΔC_H 为节能改造后单位建筑面积围护结构每年节约的采暖费用, $\text{元}/\text{m}^2$; C_e 为能源当前价格, $\text{元}/\text{单位燃料}$; q 为能源低位发热量, $\text{kJ}/\text{单位燃料}$ 。

当LCS为0时对应的分析年限为投资回收期,得出投资回收期计算公式如下:

$$N = \begin{cases} \frac{\ln \left[1 - \frac{C_{\text{ins}}}{\Delta C_H} (d - i) \right]}{\ln \frac{1+i}{1+d}}, & i \neq d \\ \frac{C_{\text{ins}}}{\Delta C_H} \cdot (1+i), & i = d \end{cases} \quad (17)$$

3.4 围护结构改造热工性能优化

对于确定的建筑物和选定的特定类型的保温材料,需要的墙体平均传热系数越小,保温层厚度也越厚。而要求的墙体平均传热系数随窗墙比和窗户的热工性能而变化,由式(7)可知:提高窗户的热工性能可降低对墙体保温的要求,但是高性能的窗户造价也较高,需要综合考虑窗户性能的提高和降低对保温层的要求两方面的因素进行优化分析。

围护结构节能改造外墙和外窗的最佳性能参数为寿命周期内净现值最大时对应的参数,或者是投资回收期最小时对应的参数。由前面的分析可知,寿命周期内净现值和投资回收期与窗户的类型,传热系数和价格有关,窗户的价格并不是传热系数的单值函数,因此式(15)或式(16)均为非连续函数,无法通过求极值的方法获得围护结构的最优参数,但是可以通过市场调研,通过多方案比较的方法,获得围护结构节能改造的最佳性能参数。

对既有建筑改造,选定了窗户的类型可由(7)式计算出需要的外墙传热系数,然后解(8)式可得到需求的保温层厚度,通过(11)式可计算出不同性能的窗户和相应保温层厚度下单位面积围护结构改造的费用,运用 $P_1 - P_2$ 经济评价模型可比较不同围护结

构改造方案的优劣,应选择寿命周期内净现值最大或投资回收期最小的方案。

4 工程应用

以徐州某既有居住建筑改造为例进行分析。徐州气象站位于北纬 34.28 度,东经 117.15 度,海拔 42 m,采暖度日数 HDD_{18} 为 2 090($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$),空调度日数 CDD_{26} 为 137($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$),采暖期天数 84 天,采暖期室外平均温度 2.5 $^{\circ}\text{C}$,按严寒和寒冷地区建筑节能设计标准属于寒冷区。该建筑为砖混结构,6 层,总建筑面积 3 977.34 m^2 ,外墙和外窗基本构造和传热系数见表 4,考虑热桥修正后外墙的平均传热系数为 2.27 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;窗墙比东西向 0.03,北向 0.24,南向 0.43,各朝向窗、墙面积详见表 5。

表 4 外墙和外窗基本参数

名称	结构	传热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$)
外墙	240 mm 砖墙,双面抹灰(20 mm)	2.03
外窗	单层钢窗(SC=0.8)	6.40

表 5 各朝向窗墙面积及窗墙比

朝向	外窗面积/ m^2	外墙面积/ m^2	窗墙比
N	232.65	970.20	0.24
E,W	16.20	529.20	0.03
S	417.96	970.20	0.43

4.1 围护结构改造方案

根据徐州市场上常见的窗的类型,选定如下 4 种窗作为节能改造的备选方案,其主要性能及价格见表 6。本研究保温层选用 EPS(B1 级)保温板,导热系数 0.053 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (考虑了修正系数)。由(8)式可计算出各朝向 4 种改造方案相应的保温层厚度,分别见表 7。

4.2 改造方案优化及经济性分析

每个朝向 4 种改造方案的改造的费用、净现值和投资回收期可分别利用式(11)、(15)、(17)计算,计算结果见表 7。计算时设备运行效率取 0.79,燃料种类为煤炭,低位发热量 17 690 kJ/kg ,价格 0.85 元/kg,煤炭价格增长率 8.61%(根据文献 34 提供的 1994 年到 2005 年的煤炭价格计算得出);EPS(B1 级)保温板价格 958 元/ m^3 ,保温层施工其他综合费用 45 元/ m^2 (包括其他材料费、人工费和不可预见费)^[31];银行贷款利率 6.55%;市场贴现率取长期贷款利率 6.55%;寿命周期年限 20 a。

表 6 窗户的类型及价格

编号	类型	价格/ (元· m^{-2})	传热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$)
窗 I	双扇推拉塑料窗(88 系列白色,普通浮法玻璃(5+12A+5))	380	2.8
窗 II	双扇推拉塑料窗(88 系列白色,单面 Low-e 玻璃(5+12A+5))	510	2.6
窗 III	双扇推拉塑料窗(三玻)(90 系列白色,普通浮法玻璃(5+6A+5+6A+5))	460	2.4
窗 IV	内平开下悬塑料窗 88 系列白色,单面 Low-e 玻璃(5+12A+5)	999	2.3

从表 7 可以得出如下结论。

1)各朝向的最佳改造方案:北向为 I 型窗对应的改造方案,保温层厚度为 44.7 mm,投资回收期为 6.53 a;东西向为 I 型窗对应的改造方案,保温层厚度为 19.8 mm,投资回收期为 5.44 a;南向为 III 型窗对应的改造方案,保温层厚度为 88.8 mm,投资回收期为 8.07 a。

表 7 外墙保温层厚度及围护结构改造经济性指标

方案	保温层		改造成本/ (元· m^{-2})	净现值/元	投资回收期/a
	厚度/ mm	造价/ (元· m^{-2})			
N I	44.7	87.80	157.93	395.29	6.53
N II	39.5	82.87	185.38	367.84	7.59
N III	35.1	78.62	170.15	383.07	7.00
N IV	33.1	76.72	298.07	255.15	11.71
E,W I	19.8	64.00	73.48	238.60	5.44
E,W II	19.6	63.79	77.18	234.90	5.70
E,W III	19.4	63.58	75.48	236.60	5.58
E,W IV	19.3	63.48	91.55	220.53	6.70
S I	290.7	323.49	347.79	411.30	10.12
S II	142.0	181.07	322.51	436.58	9.45
S III	88.8	130.08	271.95	487.14	8.07
S IV	73.2	115.17	495.22	263.87	13.88

2)不同朝向节能改造的围护结构最优参数是不同的,节能改造的收益也有一定差异,对既有建筑节能改造应分不同的朝向确定其最佳改造方案和性能参数。

3)提高窗户的性能可以相应减少保温层的厚度,但不一定能获得最佳节能改造方案,各朝向均显示出此特性,这主要是由于窗户的性能提高相应的

价格也提高,节能收益是否提高还取决于相应的保温层厚度、保温层造价及窗墙比,需要综合比较。

4)窗墙比过大时,需要选用热工性能好的窗户,如南向窗墙比为0.43,当选用I型窗时对应的保温层厚度为290.7 mm,即使投资回收期 and 寿命周期内的净现值可以接受,也因保温层过厚而不可行。

5)围护结构最佳性能参数与窗墙比及朝向有关,不考虑窗墙比和朝向的影响,仅仅考虑窗或外墙单一因素确定围护结构性能参数的方法是不恰当的,围护结构节能改造方案需要综合考虑窗墙比、朝向、墙体及保温材料类型、窗的类型等因素经经济技术分析得出。

5 结 论

针对既有住宅的节能改造,提出了综合考虑窗墙比、朝向、墙体及保温材料类型、窗的类型等因素的围护结构性能参数确定方法,建立了 $P_1 - P_2$ 经济模型对围护结构性能参数进行优化分析,并以徐州地区某既有住宅为例,验证了模型的可行性。提出的围护结构性能参数确定和优化方法可以为既有建筑节能改造提供依据和参考。

参考文献:

- [1] Kaynakli O. A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012,16:415-425.
- [2] Al-Khawaja M J. Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004,24: 2601-2610.
- [3] Mahlia T M I, Iqbal A. Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives [J]. *Energy*, 2010,35: 2242-2250.
- [4] Sisman N, Kahya E, Aras N, et al. Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey's different degree-day regions [J]. *Energy Policy*, 2007,35: 5151-5155.
- [5] Tosun M, Dincer K. Modelling of a thermal insulation system based on the coldest temperature conditions by using artificial neural networks to determine performance of building for wall types in Turkey [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34: 362-373.
- [6] Arslan O, Kose R. Thermoeconomic optimization of insulation thickness considering condensed vapor in buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38: 1400-1408.
- [7] Ucar A. Thermoeconomic analysis method for optimization of insulation thickness for the four different climatic regions of Turkey [J]. *Energy*, 2010,35: 1854-1864.
- [8] Al-Sanea S A, Zedan M F, Al-Ajlan S A. Effect of electricity tariff on the optimum insulation-thickness in building walls as determined by a dynamic heat-transfer model [J]. *Applied Energy*, 2005,82: 313-330.
- [9] Daouas N, Hassen Z, Aissia H B. Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010,30: 319-326.
- [10] Daouas N. A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads [J]. *Applied Energy*, 2011,88: 156-164.
- [11] Ozel M. Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method [J]. *Applied Energy*, 2011,88: 2429-2435.
- [12] Ozel M. The influence of exterior surface solar absorptivity on thermal characteristics and optimum insulation thickness [J]. *Renewable Energy*, 2012,39: 347-355.
- [13] Ozel M. Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011,31: 3854-3863.
- [14] Bolattürk A. Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey [J]. *Building and Environment*, 2008,43: 1055-1064.
- [15] Mahlia T M I, Taufiq B N, Ismail, et al. Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall [J]. *Energy and Buildings*, 2007,39: 182-187.
- [16] Özkan D B, Onan C. Optimization of insulation thickness for different glazing areas in buildings for various climatic regions in Turkey [J]. *Applied Energy*, 2011,88: 1331-1342.
- [17] Söylemez M S, Ünsal M. Optimum insulation thickness for refrigeration applications [J]. *Energy Conversion & Management*, 1999,40: 13-21.
- [18] Bolattürk A. Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006,26: 1301-1309.

- [19] Dombayci Ö A, Gölcü M, Pancar Y. Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources [J]. *Applied Energy*, 2006, 83: 921-928.
- [20] Ucar A, Balo F. Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey [J]. *Applied Energy*, 2009, 86: 730-736.
- [21] Ucar A, Balo F. Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35: 88-94.
- [22] Kaynakli O. A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33: 1164-1172.
- [23] Ekici B B, Gulten A A, Aksoy U T. A study on the optimum insulation thicknesses of various types of external walls with respect to different materials, fuels and climate zones in Turkey [J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 211-217.
- [24] Dylewski R, Adamczyk J. Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls [J]. *Building and Environment*, 2011, 46: 2615-2623.
- [25] 陈凡, 谭大璐. 节能建筑外墙最佳保温层厚度探讨及效益评估[J]. *新型建筑材料*, 2007(2): 48-51.
Chen F, Tan D L. Discussion on optimal thermal insulation thickness of energy saving building external wall and benefit assessment [J]. *New Building Materials*, 2007(2): 48-51.
- [26] 黄春华, 叶勇军. 节能建筑外墙保温层厚度的经济性优化[J]. *建筑热能通风空调*, 2005, 24(6): 73-76.
Huang C H, Ye Y G. Economical optimum of insulation thickness on external wall of energy saving building [J]. *Building Energy & Environment*, 2005, 24(6): 73-76.
- [27] 王厚华, 吴伟伟. 居住建筑外墙外保温厚度的优化分析[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(8): 937-941.
Wang H H, Wu W W. Optimizing insulation thickness of external walls for residential buildings [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(8): 937-941.
- [28] 许建柳, 何嘉鹏, 孙伟民. 南京建筑围护结构保温层经济厚度计算研究[J]. *暖通空调*, 2008, 38(1): 49-52.
Xu J L, He J P, Sun W M. Calculation of economical thermal insulation thickness of building envelope in Nanjing [J]. *Heating Ventilation & Air Conditioning*, 2008, 38(1): 49-52.
- [29] 郭楠, 赵松源, 赵嵩颖. 长春市既有建筑外墙节能改造保温厚度的研究[J]. *建筑节能*, 2010, 38(10): 64-66.
Guo N, Zhao S Y, Zhao S Y. Energy-saving insulation wall thickness of the existing building in Changchun [J]. *Building Energy Efficiency*, 2010, 38(10): 64-66.
- [30] Yu J H, Yang C Z, Tian L W, et al. A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China [J]. *Applied Energy*, 2009, 86: 2520-2529.
- [31] 于靖华, 杨昌智, 田利伟, 等. 长沙地区居住建筑外墙保温层最佳厚度的研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(9): 16-21.
Yu J H, Yang C Z, Tian L W, et al. Research on the optimum insulation thickness of the external wall for residential buildings in Changsha region [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2009, 36(9): 16-21.
- [32] Yu J H, Tian L W, Yang C Z, et al. Optimum insulation thickness of residential roof with respect to solar-air degree-hours in hot summer and cold winter zone of China [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43: 2304-2313.
- [33] Zhu P Y, Huckemann V, Fisch M N. The optimum thickness and energy saving potential of external wall insulation in different climate zones of China [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 21: 608-616.
- [34] 曹海霞. 煤炭价格市场化改革历程及发展趋势研究[J]. *经济问题*, 2008(9): 49-51.
Cao H X. Coal prices reform course and future development trend in China [J]. *Economic Problems*, 2008(9): 49-51.

(编辑 吕建斌)