

# 太阳辐射得热影响下的近零能耗住宅体形设计研究

房涛<sup>1</sup>, 李洁<sup>2</sup>, 王崇杰<sup>1</sup>, 杨巍<sup>2</sup>

(1. 山东建筑大学 建筑城规学院, 山东 济南 250101; 2. 天津大学 建筑学院, 天津 300072)

**摘要:** 寒冷地区近零能耗住宅中, 太阳辐射得热对住宅的采暖需求影响显著, 进而影响住宅的体形节能设计。从全年冷热能量平衡的角度, 通过对窗墙比、太阳得热系数、体形系数与寒冷地区住宅供暖制冷需求的关系进行敏感性分析, 发现近零能耗目标下住宅的南、东、西向外窗是整体得热构件, 这一结论表明: 以体形系数控制建筑散热面积来实现降低近零能耗住宅冷热需求的方法是不适宜的。由此, 在此基础上通过多元线性回归建立了住宅年冷热需求与建筑形体的数学模型, 其可为我国寒冷地区近零能耗住宅的性能化设计提供必要理论依据。

**关键词:** 近零能耗, 太阳辐射, 采暖需求, 体形系数, 能量平衡

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0287-09

## Form design of nearly zero energy residence due to solar heat gains

FANG Tao<sup>1</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, WANG Chongjie<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Heat sources due to solar radiation seems to have much more influence than transmission heat dissipation on nearly zero energy buildings, which also results in the differences in building form design methods. In this study, the single-factor and two-factor sensitivity analysis is applied to find the relationship between window-wall ratio, solar heat gain coefficient, shape coefficient and the heating and cooling demand of residential buildings in cold areas from the perspective of energy balance. The results indicate that the window (south, east and west direction external window) under the goal of nearly zero energy consumption was the overall heat gain component, which indicated that using the shape coefficient to reduce the radiating area so as to realize decreasing energy consumption was unsuitability for nearly zero energy building. Finally, multiple linear regression was carried out to build the formula of heating and cooling demand, which provided a theoretical foundation for the performance-oriented design of nearly zero residence forms in the cold zones of China.

**Key words:** nearly zero energy; solar radiation; heating demand; shape coefficient; energy balance

体形系数是我国建筑节能控制的重要指标之一沿用至今, 其主要由建筑的平面形状、尺度、层数及高度等设计参数构成。同时受太阳辐射得热作用影响, 外窗作为热量吸收与散失的双向构件, 其与外墙之间的面积比例也直接影响建筑的采暖制冷能耗, 从而也间接影响到建筑的体形设计。因此, 量化体形设计参数对住宅冷热量需求的影响作用, 有利于建立满足空间使用需求前提下的住宅最佳节能空间形式。

近年来, 随着近零能耗建筑的发展, 国内外相关标准、技术导则纷纷对影响建筑外窗太

阳辐射得热的相关参数给出规定限值(表 1)<sup>[1-3]</sup>。在体形设计方面, 德国被动房标准<sup>[1]</sup>及《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)》<sup>[2]</sup>(以下简称被动房技术导则)以性能化设计为导向, 并没有限定体形系数、窗墙比, 而河北省《被动式低能耗居住建筑节能设计标准》DB13(J)/T177-2015<sup>[3]</sup>、山东省《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准》DB37/T5074-2016<sup>[4]</sup>不仅明确规定了体形系数限值, 后者甚至限制了窗墙比的取值, 以此来保障被动房住宅的能耗指标得以实现。

收稿日期: 2019-03-05

修改稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51608308); 住房和城乡建设部科学技术计划(2017-k1-024); 天津市应用基础与前沿技术计划(15JCZBJC49000)

第一作者: 房涛(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事近零能耗建筑设计与可再生能源利用研究。E-mail: arcft0123@163.com

表 1 标准/技术导则中对太阳得热的规定

Tab. 1 The regulations of solar heat gain in standards and technical guides

| 标准名称            | 标准要求              | 气候区                |                    |                    |                    |                |                |
|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
|                 |                   | 极地                 | 严寒                 | 寒冷                 | 温和                 | 夏热冬冷           | 夏热冬暖           |
| 德国被动房标准         | 太阳得热系数 $g$        | $U_g - g \geq 0.7$ | $U_g - g \geq 1.0$ | $U_g - g \geq 1.6$ | $U_g - g \geq 2.8$ | —              | —              |
|                 | 与玻璃传热系数 $U_g$ 的准则 | $\leq 0$           | $\leq 0$           | $\leq 0$           | $\leq -1$          | —              | —              |
| 被动式超低能耗绿色建筑技术导则 | 太阳得热              | —                  | 冬季 $\geq 0.50$     | 冬季 $\geq 0.45$     | 冬季 $\geq 0.40$     | 冬季 $\geq 0.40$ | 冬季 $\geq 0.35$ |
|                 | 系数 SHGC           | —                  | 夏季 $\leq 0.30$     | 夏季 $\leq 0.30$     | 夏季 $\leq 0.30$     | 夏季 $\leq 0.15$ | 夏季 $\leq 0.15$ |
| 河北省被动房标准        | 太阳能总透射比           | —                  | $g \geq 0.35$      | $g \geq 0.35$      | —                  | —              | —              |

对于太阳得热与建筑各围护构件之间的比例关系,德国被动房研究所按照 EN832 欧盟标准计算得出了一栋样板被动式建筑的年供暖能量平衡数据(图 1)<sup>[5]</sup>,其中建筑外窗得热量 17.9 kWh/(m<sup>2</sup>·a)大于散热量 17.35 kWh/(m<sup>2</sup>·a),表明外窗有利于冬季建筑采暖节能,这一结论打破了我国现有地方性被动式超低能耗建筑标准中利用窗墙比控制建筑节能的理论。同时,国外学者对近零能耗建筑平面尺寸与节能影响机理<sup>[6]</sup>,建筑面宽与体形系数取值对采暖能耗影响<sup>[7]</sup>,建筑高度对建筑采暖能耗的影响作用<sup>[8]</sup>,以及较小体型系数与建筑运行能耗的关联性<sup>[9]</sup>等研究成果表明,利用体形系数控制建筑采暖制冷能耗是有所不足的。

国内学者刘加平、王锦等指出当建筑受热外界面吸收的日照辐射热量大于其向外散失的热量,“盈余的”热量越大建筑越节能,应根据气候特点合理平衡建筑体形设计与得失热,而不应该仅仅以体形系数为指标<sup>[10]</sup>。本文作者研究发现传热系数小的外窗对应的建筑能耗可能偏高,原因在于随着外窗保温性能的提升,太阳辐射得热对建筑能耗的影响可能大于传导散热,增大南向窗墙比有利于节能<sup>[11]</sup>。张海滨研究指出在考虑太阳辐射作用时,相同面积相同高度的建筑,平面长宽比越大越节能<sup>[12]</sup>。

因此,在住宅近零能耗目标下,如何平衡体形设计与太阳辐射得热之间的制约关系,由此建立符合新节能目标下的建筑体形设计理论,成为我国目前推广被动式建筑、超低能耗建筑、近零能耗建筑等较高层次节能建筑发展的关键。文章将通过敏感性分析,研究住宅窗墙比(window-wall ratio,简称 WWR)、外窗太阳得热系数(solar heat gain coefficient,简称 SHGC)、体形系数(shape coefficient,简称 SC)的得失热与采暖、制冷需求的关系,为近零能耗住宅体形节能设计提供理论

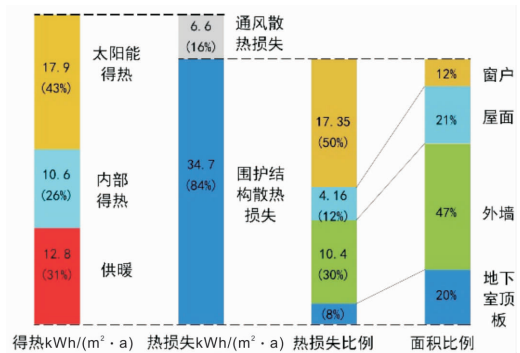


图 1 建筑得失热及围护结构面积比

Fig. 1 The gain and loss of heat and building envelope area proportion

依据。

## 1 影响太阳辐射吸收的围护结构设计因素分析

由图 1 可知,虽然外窗仅占建筑外围护结构面积的 12%,但其得热量占建筑总得热的 43%,散热量占建筑总散热的 42%,这不仅说明窗户得失热在建筑中占比最大,而且说明外窗自身得失热平衡与否将直接影响建筑能量需求。根据国内被动房能耗计算标准<sup>[3]</sup>,当外窗无遮阳设施时,透明围护结构的太阳辐射得热量计算如下:

$$q_{s,i,j} = \frac{\alpha_j \cdot F_j \cdot J_{i,j} \cdot g_j}{A} \quad (1)$$

式中:  $g_j$  表示第  $j$  个外窗透明材料的太阳能总透射比;  $J_{i,j}$  表示第  $j$  个围护结构朝向的太阳辐射总辐射照度, W/m<sup>2</sup>;  $F_j$  表示第  $j$  个透明围护结构的面积, m<sup>2</sup>;  $\alpha_j$  表示第  $j$  个透明围护结构的玻璃与洞口面积比;  $A$  表示建筑面积, m<sup>2</sup>。

非透明围护结构虽然不能直接将获取的太阳辐射得热传入室内,但是非透明围护结构外表吸收太阳辐射,引起围护结构室外综合温度变化,进而影响围护结构的传热耗热量,如下式:

$$q_{env_{i,j}} = \frac{(K_j + 0.05) \cdot F_j \cdot |\theta_{int} - \theta_{syn_{i,j}}|}{A}$$

(2)

$$\theta_{syn_{i,j}} = \theta_{ext_i} + \frac{\mu_j \cdot J_{i,j}}{a_{ext}}$$

(3)

式中:  $\theta_{int_h}$  表示采暖期室内计算温度, 取 20℃;  $\theta_{ext_i}$  表示在  $i$  计算时点的室外温度,℃;  $\theta_{syn_{i,j}}$  表示在  $i$  计算时点的室外综合温度,℃;  $\mu_j$  表示第  $j$  个围护结构外表面的太阳辐射吸收系数;  $a_{ext}$  表示围护结构外表面换热系数, 取 23 W/m<sup>2</sup>;  $K_j$  表示第  $j$  个围护结构的传热系数, W/(m<sup>2</sup> · K); 0.05 表示系统热桥附加值。

受地球运行规律影响, 各个朝向的太阳辐射强度随季节变化而变化, 图 2 为北京各朝向太阳辐射强度在一年中的变化统计<sup>[9]</sup>。

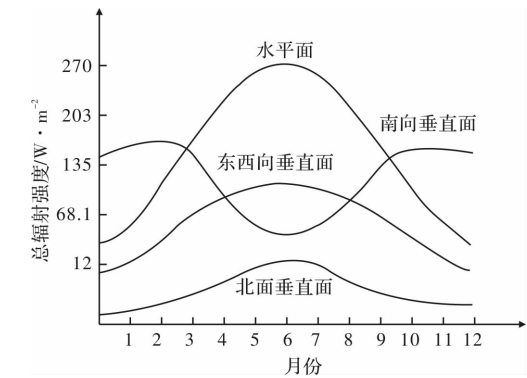


图 2 北京地区各个朝向太阳辐射强度

Fig. 2 The solar radiation intensity in different directions in Beijing area

综上所述, 围护结构中的南向、东西向外墙、外窗及屋面直接接受太阳辐射, 其对应建筑围护结构的设计参数包括南向窗墙比  $WWR_{南}$ 、南窗太阳得热系数  $SHGC_{南}$ 、东西向窗墙比  $WWR_{东西}$ 、东西窗太阳得热系数  $SHGC_{东西}$ 、屋面太阳辐射吸收系数、外墙辐射太阳吸收系数。由此, 以上 6 个参数将作为研究的重点内容。

2 围护结构太阳得热关键参数取值筛选

2.1 基础模型与边界参数设置

目前, 国内进行近零能耗住宅示范项目多以现有城市高层住宅为基础, 通过对围护结构热工设计参数的提升, 实现低能耗需求的目标。因此, 研究首先对列入寒冷地区山东省内被动房住宅示范的 11 个项目 30 栋住宅进行调研, 调研统计结果表明: 住宅平面以南北通透板式高层住宅为主, 标准层总面积在 480 m<sup>2</sup> ~ 750 m<sup>2</sup> 之间, 平均值

600 m<sup>2</sup>。为简化研究, 本文设定 7 个层高 3 m, 层数 33 层的长方体建筑体量作为研究对象(表 2), 每一栋建筑单层面积均为 600 m<sup>2</sup>, 通过改变长宽比实现形体系数的逐渐降低。

表 2 基础模型尺度

Tab. 2 The basic models sizes

| 编号 | 面宽/m | 进深/m | 形体系数 SC | 面宽/进深 |
|----|------|------|---------|-------|
| 1# | 63   | 9.5  | 0.252   | 6.63  |
| 2# | 60   | 10   | 0.243   | 6     |
| 3# | 57   | 10.5 | 0.236   | 5.43  |
| 4# | 54   | 11.1 | 0.227   | 4.86  |
| 5# | 51   | 11.8 | 0.219   | 4.32  |
| 6# | 48   | 12.5 | 0.212   | 3.84  |
| 7# | 45   | 13.3 | 0.205   | 3.38  |

基础模型的外围护结构热工设计参数以国内近零能耗建筑节能设计标准<sup>[2-4]</sup>(表 2)为依据进行设置, 其中窗户由于玻璃镀膜的位置、层数、类型、填充气体的种类及暖边间隔条等不同, 外窗组件的得热能力和散热能力相互制约, 目前三层玻璃的传热系数可以达到 0.5~0.8 W/(m<sup>2</sup> · K), 对应太阳得热系数取值 0.4~0.6<sup>[5]</sup>。按照被动房技术导则, 在无遮阳设施时, 外窗冬季和夏季太阳得热系数 SHGC 相等, 按冬季限值取 0.45, 夏季可以通过遮阳使 SHGC 降到 0.3, 以满足技术导则得限值要求(表 3)。

表 3 围护结构节能设计参数初始值

Tab. 3 The initial values of energy saving design parameter in building envelope

| 围护结构部位 | 设计参数与取值                                  |             |     |  |         |         |
|--------|--|-------------|-----|--|---------|---------|
|        | 传热系数 /W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> | 外表面太阳辐射吸收系数 | 窗墙比 | 传热系数 /W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> | 冬季 SHGC | 夏季 SHGC |
| 外墙     | 0.15                                     | 0.5         | -   | -  | -       | -       |
| 屋顶     | 0.15                                     | 0.5         | -   | -  | -       | -       |
| 气密性    | 0.6 h <sup>-1</sup>                      | -           | -   | -  | -       | -       |
| 南窗     | -  | -           | 0.6 | 1.0                                      | 0.45    | 0.3     |
| 东西窗    | -  | -           | 0.1 | 1.0                                      | 0.45    | 0.3     |
| 北窗     | -  | -           | 0.4 | 1.0                                      | 0.45    | 0.3     |

室内环境参数及运行参数选自《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)》及山东省

《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准 DB37/T5074-2016》, 室内人员在室率、照明开关频率、

家电使用率按照《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准 DB37/T5074-2016》设置(表4)。

表4 室内环境参数及运行参数

Tab. 4 The indoor environment parameters and operation parameters

|                       |                        |                       |                    |         |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|---------|
| 采暖期 <sup>1</sup>      | 11.13~03.14            | 室内设置温度 <sup>2</sup>   | 20℃                | 24 h 运行 |
| 制冷期 <sup>1</sup>      | 05.02~09.24            | 室内设置温度 <sup>2</sup>   | 26℃                | 24 h 运行 |
| 新风量 <sup>2</sup>      | 30 m <sup>3</sup> /h·人 | 相对湿度 <sup>2</sup>     | 30%~60%            |         |
| 室内照明功率密度 <sup>1</sup> | 5 W/m <sup>2</sup>     | 室内设备功率密度 <sup>1</sup> | 8 W/m <sup>2</sup> |         |
| 室内人员密度 <sup>2</sup>   | 32 m <sup>2</sup> /人   | 人体新陈代谢率               | 0.9(软件默认值)         |         |

注: 1. 数据来源于山东省《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准 DB37/T5074-2016》; 2. 数据来源于《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)》

以上基础模型及边界参数带入 Energyplus 能耗模拟软件<sup>[13]</sup>, 利用建筑热平衡计算原理<sup>[14]</sup>分析在济南气候条件下的近零能耗住宅窗墙比、太阳得热系数、体形系数与冷热量的需求关系。

## 2.2 单因素敏感性分析及关键参数筛选

首先, 以1#住宅为例, 对透明围护结构关键参数进行敏感性分析。当其他参数不变, 如图3、4所示, 随着南向建筑窗墙比的增大, 建筑供暖需求降低16.5%, 供冷需求升高13.4%, 全年冷热总需求降低2.5%; 随着东西向窗墙比的增大, 建筑供暖需求降低2.1%, 供冷需求升高9.1%, 全年冷热总需求升高3.4%。结果表明: 南向窗墙比的敏感性大于东西向, 且当SHGC=0.45时, 增大南向窗墙比、减小东西向窗墙比有利于住宅采暖制冷能耗总量降低。

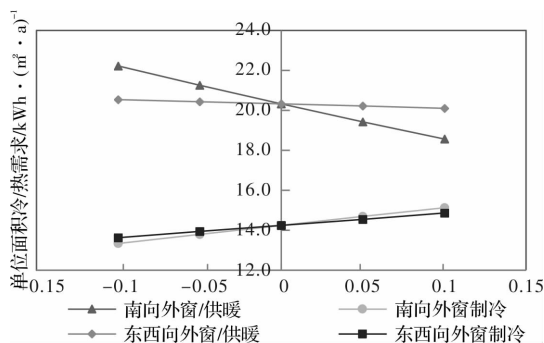


图3 WWR<sub>南</sub>、WWR<sub>东、西</sub>与冷/热需求关系

Fig. 3 The relationship between the window-wall ratio in south, east and west directions and the demand of heating and cooling

当其他参数不变, 如图5、6所示, 南向外窗太阳得热系数由0.2增至0.6时, 住宅单位面积供暖需求降低43.4%, 因夏季采取遮阳措施SHGC保持0.3, 供冷需求不变, 全年总需求降低29.3%; 东西向外窗SHGC由0.2增至0.6时, 住宅单位面积供暖需求降低9.1%, 因夏季采取遮

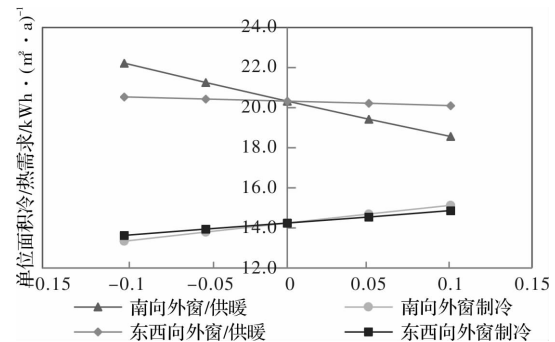


图4 WWR<sub>南</sub>、WWR<sub>东、西</sub>与全年冷热总需求关系

Fig. 4 TheThe relationship between the window-wall ratio in south, east and west directions and the aggregate demand of heating and cooling in one year

阳措施SHGC保持0.3, 供冷需求不变, 全年总需求降低5.5%。结果表明: 南窗SHGC敏感性大于东西向; 当南向WWR=0.6, 东西向WWR=0.1, 且夏季采取恰当的措施时, 增大南窗及东西窗SHGC均有利于节能。

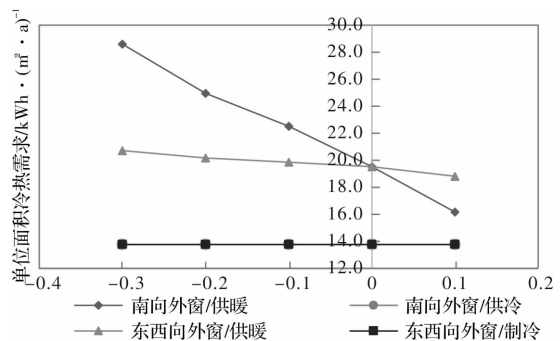


图5 SHGC<sub>南</sub>、SHGC<sub>东、西</sub>与冷/热需求关系

Fig. 5 The The relationship between the solar heat gain coefficient in south, east and west directions and the demand of heating and cooling

对非透明围护结构, 当其他参数不变时, 依次研究外墙太阳辐射吸收系数、屋面太阳辐射吸收系数对住宅供暖制冷需求的敏感性, 如表5所

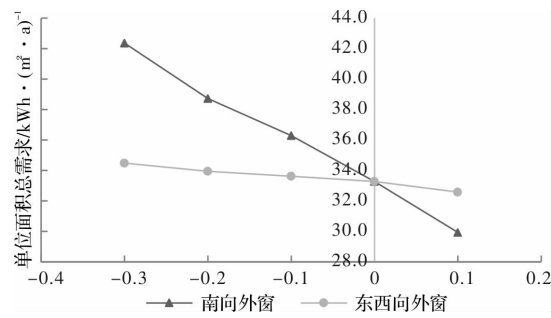


图 6 SHGC<sub>南</sub>、SHGC<sub>东西</sub>与全年冷热总需求关系  
Fig. 6 The relationship between the solar heat gain coefficient in south, east and west directions and the aggregate demand of heating and cooling in one year

示, 当外墙、屋顶太阳辐射吸收系数变化时, 住宅供暖、制冷需求几乎不变。

表 5 非透明围护结构太阳吸收系数对冷热需求影响

Tab. 5 The effect of non-transparent envelop solar heat gain coefficient on the demand of heating and cooling

| 太阳辐射吸收系数 | 外墙    |       |       | 屋面     |       |        |
|----------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
|          | 供暖需求  | 制冷需求  | 总需求   | 供暖需求   | 制冷需求  | 总需求    |
| 0.3      | 27.94 | 15.32 | 43.26 | 27.86  | 15.38 | 43.24  |
| 0.5      | 27.83 | 15.42 | 43.25 | 27.85  | 15.40 | 43.24  |
| 0.7      | 27.72 | 15.51 | 43.24 | 27.83  | 15.42 | 43.25  |
| 0.9      | 27.62 | 15.61 | 43.23 | 27.82  | 15.44 | 43.25  |
| 敏感系数     | -1.1% | 1.9%  | 0.08% | -0.14% | 0.04% | 0.004% |

### 3 太阳辐射影响下的建筑体形节能设计

#### 3.1 澄清体形系数与建筑冷热需求的关系

由于南向、东西向窗墙比与建筑形体共同影响建

筑太阳得热需求, 因而研究南向、东西向外窗 SHGC 及南向、东西向窗墙比四个关键参数影响下建筑形体与能量需求的关系, 对于建筑体形节能更有价值。为此, 采用控制变量法将实验分为四组, 如表 6 所示, 依次展开计算分析, 分析结果如下所述。

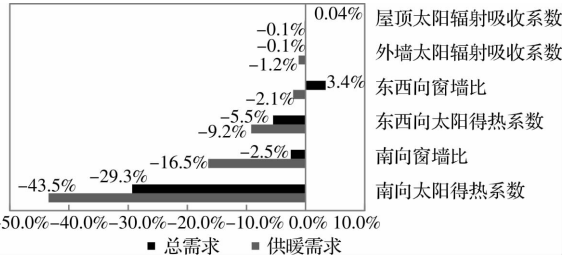


图 7 影响太阳得热的各参数敏感性分析  
Fig. 7 Sensitivity analysis of the influence of each parameter on solar heat gain

表 6 体形系数与冷热需求实验设计

Tab. 6 The experiment design of building shape coefficient and the demand of heating and cooling

| 编号 | 实验目的                           | 控制变量  |
|----|--------------------------------|---|
| 1  | 澄清南向窗墙比不同时, 体形系数与能量需求的关系       | 1#~7# 建筑 WWR <sub>南</sub> 取值 0.5 到 0.7, 其余参数按初始值取值  |
| 2  | 澄清东西向窗墙比不同时, 体形系数与能量需求的关系      | 1#~7# 建筑 WWR <sub>东西</sub> 取值 0.5 到 0.7, 其余参数按初始值取值 |
| 3  | 澄清南向外墙 SHGC 不同时, 体形系数与能量需求的关系  | 1#~7# 建筑南窗 SHGC 取值 0.5 到 0.7, 其余参数按初始值取值            |
| 4  | 澄清东西向外墙 SHGC 不同时, 体形系数与能量需求的关系 | 1#~7# 建筑东西窗 SHGC 取值 0.5 到 0.7, 其余参数按初始值取值           |

图8~10表明,当南向窗墙比取值0.5~0.7时,从1#到7#,建筑体形系数减小18.8%,但供暖需求却增大7.9%~11.6%,供冷需求降低13.7%~14%,年总需求升高0.3%~1%;当南向窗墙比从0.5增大至0.7时,冬季供暖需求降低11%~14%,夏季供冷需求升高11.3%~11.9%,建筑全年总能量需求降低4%~4.7%。结果表明:(1)减小体形系数虽可减少围护结构散热面积,但同时也减小南向太阳辐射得热面积,从而减少的太阳得热大于减少的散热,导致建筑供暖需求增加,说明南向外窗的得热能力远大于形体的散热能力,反映了体形系数理论并不适用于济南地区近零能耗住宅;(2)增大南向外窗,有利于节能。

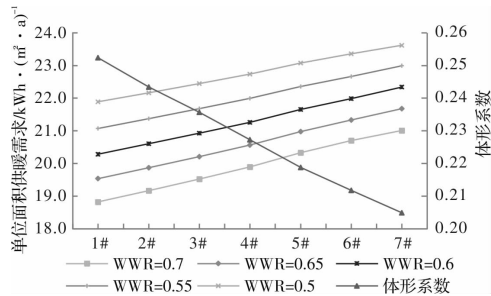


图8 WWR<sub>南</sub>、体形系数与热需求关系

Fig. 8 The relationship of window-wall ratio in south direction, shape coefficient and heating demand

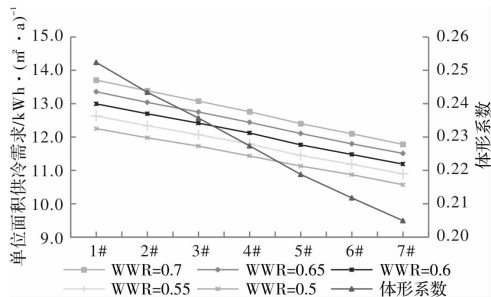


图9 WWR<sub>南</sub>、体形系数与冷需求关系

Fig. 9 The relationship of window-wall ratio in south direction, shape coefficient and cooling demand

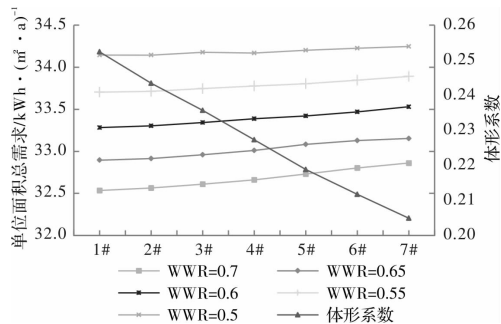


图10 WWR<sub>南</sub>、体形系数与全年冷热需求关系

Fig. 10 The relationship of window-wall ratio in south direction, shape coefficient and the aggregate demand of heating and cooling

图11~13表明,当东西向窗墙比取值0~0.35时,从1#到7#,建筑体形系数减小18.8%,但供暖需求却增大9.1%~10.1%,供冷需求降低8.9%~13.9%,年总需求升高0.7%~1.7%;当东西向窗墙比从0增大至0.35时,冬季供暖需求降低0.5%~1.4%,夏季供冷需求升高7.3%~13.4%,建筑全年总能量需求升高2.5%~3.5%。结果表明:(1)减小体形系数虽然减少了围护结构总散热面积,同时也减小了南向太阳得热面积、增大了东西向太阳得热面积,而南向减少的太阳得热大于形体减少的散热与东西向增加的得热,导致建筑供暖需求增加,说明南向外窗的得热能力远大于形体的散热能力及东西

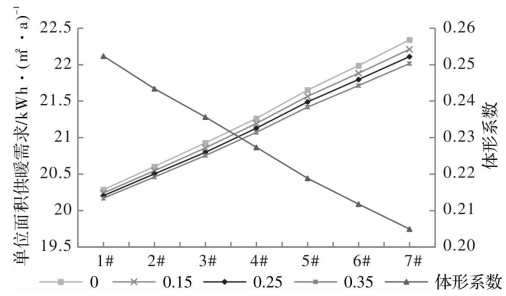


图11 WWR<sub>东西</sub>、体形系数与热需求

Fig. 11 The relationship of window-wall ratio in east and west direction, shape coefficient and heating demand

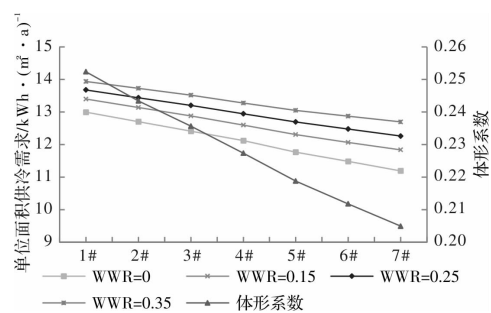


图12 WWR<sub>东西</sub>、体形系数与冷需求

Fig. 12 The relationship of window-wall ratio in east and west direction, shape coefficient and cooling demand

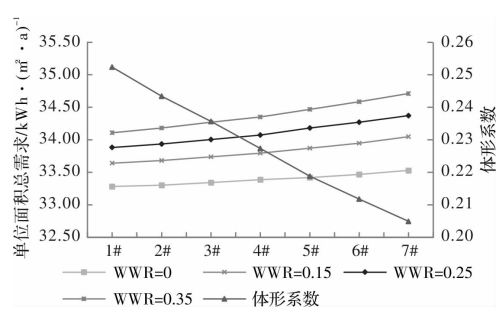


图13 WWR<sub>东西</sub>、体形系数与全年冷热需求

Fig. 13 The relationship of window-wall ratio in south direction, shape coefficient and the aggregate demand of heating and cooling

窗的得热能力,反映了形体系数并不适用于处于寒冷地区济南市的近零能耗住宅;(2)减小东西向外窗,有利于节能。

图14~16表明,当南向外窗 SHGC 取值 0.4~0.6,夏季采取遮阳措施 SHGC 保持 0.3 时,从 1# 到 7#,建筑形体系数减小 18.8%,但供暖需求却增大 2.1%~10.1%,供冷需求降低 13.2%,当南窗 SHGC=0.4~0.5 时,年总需求降低 0.3%~2.5%,当南窗 SHGC=0.55~0.6 时,年总需求升高 0.5%~1.7%;当南向外窗 SHGC 从 0.4 增至 0.6 时,冬季供暖需求降低 18.4%

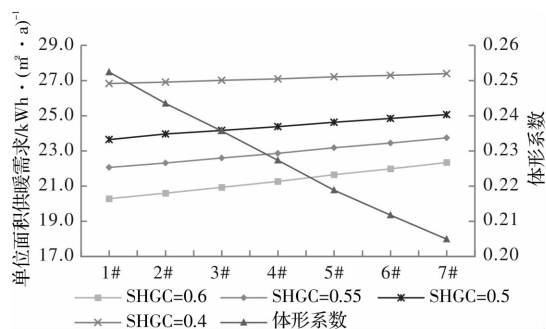


图 14 SHGC<sub>南</sub>、形体系数与热需求

Fig. 14 The relationship of solar heat gain coefficient in south direction, shape coefficient and the heating demand

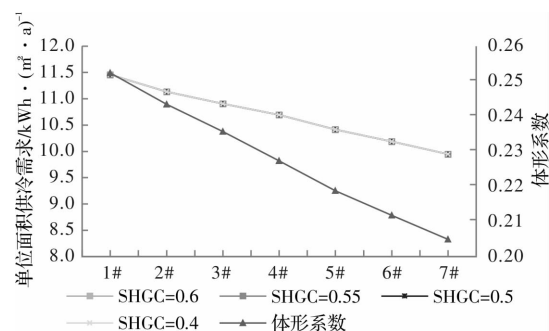


图 15 SHGC<sub>南</sub>、形体系数与冷需求

Fig. 15 The relationship of solar heat gain coefficient in south direction, shape coefficient and the cooling demand

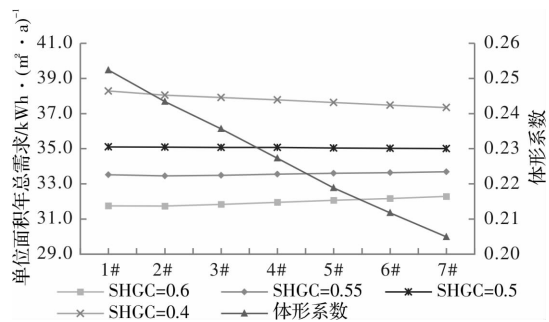


图 16 SHGC<sub>南</sub>、形体系数与全年冷热需求

Fig. 16 The relationship of solar heat gain coefficient in south direction, shape coefficient and the aggregate demand of heating and cooling

~24.3%,夏季供冷需求不变,建筑全年总能量需求降低 13.5%~17.1%。结果表明:(1)增大南向太阳得热有利于降低冬季供暖需求;(2)减小形体系数、增大南窗 SHGC 时,减少的太阳得热大于减少的散热,导致建筑供暖需求增加、供冷需求降低,但就全年来看,夏季减少的冷需求可能大于冬季增加的热需求,全年总需求可能增加,也可能降低,这反映了平衡建筑形体与南窗太阳得热的重要性。

图17~19表明,当东西向外窗 SHGC 冬季取值 0.4~0.6 时,夏季采取遮阳措施 SHGC 保持

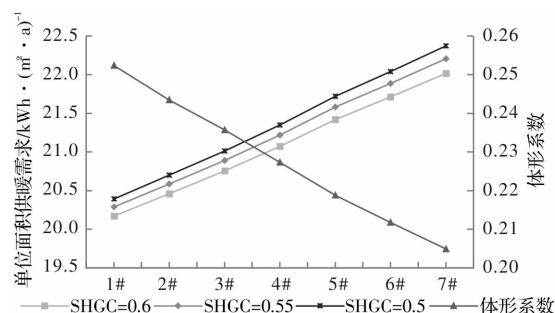


图 17 SHGC<sub>东西</sub>、形体系数与热需求

Fig. 17 The relationship of solar heat gain coefficient in east, west direction, shape coefficient and the heating demand

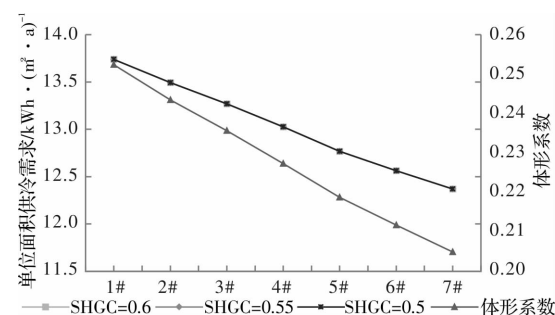


图 18 SHGC<sub>东西</sub>、形体系数与冷需求

Fig. 18 The relationship of solar heat gain coefficient in east, west direction, shape coefficient and the cooling demand

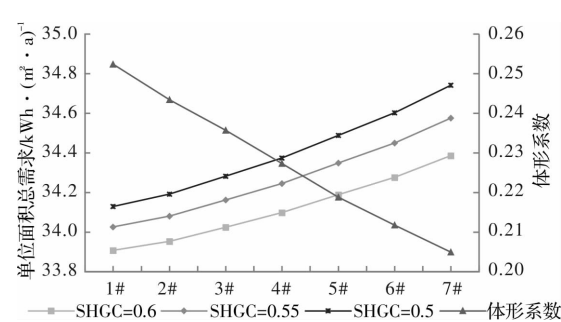


图 19 SHGC<sub>东西</sub>、形体系数与全年冷热需求

Fig. 16 The relationship of solar heat gain coefficient in east, west direction, shape coefficient and the aggregate demand of heating and cooling



0.3 不变, 从 1# 到 7#, 建筑体形系数减小 18.8%, 但供暖需求却增大 9.2%~9.7%, 供冷需求降低 10%, 年总需求升高 1.4%~1.8%; 当东西向外窗 SHGC 从 0.4 增至 0.6 时, 冬季供暖需求降低 1.1%~1.6%, 夏季供冷需求不变, 建筑全年总能量需求降低 0.6%~1%。结果表明: (1) 增大东西窗 SHGC 有利于冬季节能; (2) 东西向外窗 SHGC 冬季取值 0.4~0.6 时, 东西窗得热对建筑全年冷热需求影响大于体形散热, 这反映了近零能耗住宅设计中合理设计东西窗太阳得热比控制体形系数更重要。3.2 建筑体形与冷热需求的量化关系研究

以上研究表明, 建筑体形系数与建筑供冷供热需求并无直接联系, 为此将体形系数还原成建筑形体最基本的几何要素: 面宽和进深。围护结构的节能设计参数按照初始值取值, 建筑形体按照 1#~7# 的面宽和进深进行全排列, 形成 49 组实验, 依次进行采暖制冷能量需求模拟计算。按照建筑面宽与进深得比值对模拟结果统计(图 20), 散点图明显分成两组。对比两组数据分析发现, 灰色散点对应得是建筑进深 9.5 m 及 13.3 m 的实验组, 而其他实验组全部集中在黑色散点, 并且当面宽进深比一定时, 灰色实验组能耗高于黑色实验组。这表明: (1) 当建筑面宽进深比一定时, 进深过大( $\geq 13.3$  m)或者过小( $\leq 9.5$  m), 都会导致建筑冷热需求的升高; (2) 当建筑进深取值 10 m~12.5 m 时, 建筑冷热需求与面宽进深比呈明显的线性关系。为此, 对其进行线性回归分析<sup>[16]</sup>, 拟合方程如下:

$$E = 34.259 - 64.855(a/b^2) \quad (R^2 = 0.422) \quad (4)$$

式中:  $E$  表示单位面积冷热需求,  $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;  $a$  表示长宽比;  $b$  表示建筑宽度, m。模型标准化残差呈正态分布, 预测值与实测值误差在  $-0.1\%$ ~ $0.08\%$ 。

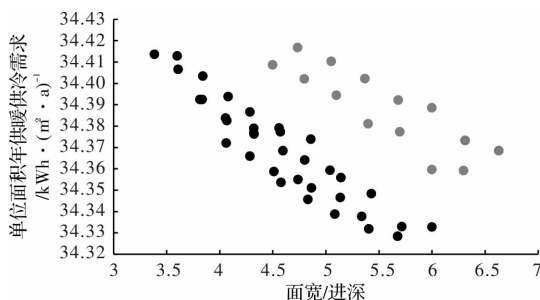


图 20 建筑面宽进深比与建筑年冷热需求的散点图

Fig. 20 The scattering points diagram of length to width ratio and the aggregate demand of heating and cooling

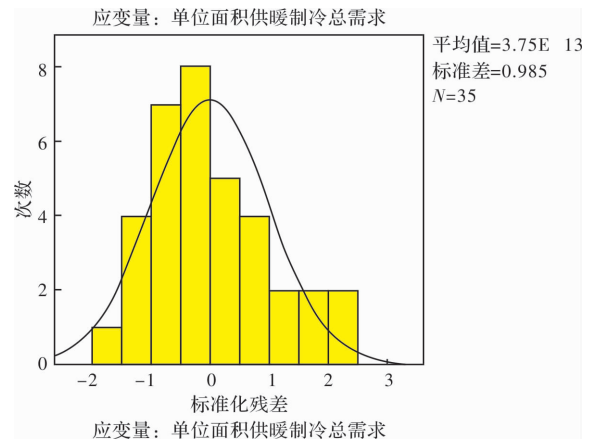


图 21 标准化残差呈正态分布

Fig. 21 Standardized Residuals with the normal distribution

## 4 结论

为满足近零能耗住宅节能目标的实现, 建筑透明围护结构保温性能的提升导致外窗得热能力的下降, 从而引起太阳得热对建筑供暖需求的影响超过形体散热, 由此体形系数理论不再适用于寒冷地区近零能耗住宅的体形节能设计。

文章研究结论表明, 对寒冷地区近零能耗住宅而言, (1) 南向外窗的得热能力远大于形体的散热能力及东西窗的得热能力, 对建筑供暖需求影响最大, 而南向外窗的热量与南向外窗面积及 SHGC 相关, 南向外窗面积由建筑南立面面积及南向窗墙比共同决定, 换言之, 减小体形系数不仅减少建筑的散热面积, 还会减少建筑的得热面积, 减少的得热量甚至会大于减少的散热量, 进而导致建筑采暖需求的增加; (2) 当南向窗墙比、SHGC 较大时, 虽然有利于冬季节能, 但是必须合理控制建筑形体, 避免南向得热面积过大导致夏季供冷需求的大幅升高; (3) 东西窗太阳得热也会影响建筑供暖需求, 当东西向无窗时, 建筑最节能, 当东西向有窗时, 增大东西窗 SHGC 比减小体形系数更有利于建筑节能; (4) 近零能耗建筑进深过大过小都不利于建筑节能, 因而必须结合建筑平面布局避免进深过大或过小, 当进深在 10 m~12.5 m 时, 面宽进深比与建筑全年冷热需求呈明显线性关系。

综上, 近零能耗建筑得热与散热能力不同于普通节能建筑, 因而必须通过计算验证实现性能化设计, 才能得到最佳节能体形。

## 参考文献 References

- [1] Passive House Institute. Criteria for the Passive House,



- EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard[S]. version 9f,2016;5-27.
- [2] 住房和城乡建设部. 被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)[S]. 北京:中国建筑科学研究院,2015;7-12.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical guide of passive ultra-low energy green building(try out)(residential buildings)[S]. Beijing: China Academy of Building Research, 2015;7-12. (in Chinese)
- [3] 河北省住房和城乡建设厅. 被动式低能耗居住建筑节能设计标准: DB13(J)/T177-2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015;26-51.
- Department of Housing&Urban-Rural Development. Hebei. Design standard for energy efficiency of passive low-energy residential buildings: DB13(J)/T177-2015[S]. Beijing: China Architecture&Building Press, 2015;26-51. (in Chinese)
- [4] 山东省住房和城乡建设厅. 被动式超低能耗居住建筑节能设计标准: DB37/T5074-2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016;6-10.
- Department of Housing&Urban-Rural Development. Shandong. Design standard for energy efficiency of passive ultra-low energy residential buildings: DB37/T5074-2016 [S]. Beijing:China Architecture&Building Press,2016;6-10. (in Chinese)
- [5] 贝特霍尔德·考夫曼,沃尔夫冈·菲斯特. 德国被动房设计与施工指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015;17-21,52-59.
- BERTHOLD Kaufman, WOLFGANG Feist. Passivhauser erfolgreich planen und bauen[R]. Passivhaus Institut,Darmstadt,2015;11-16.
- [6] JEDRZEJUK Hanna, MARKS Wojciech. Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization[J]. Building and Environment,2002,37: 1037-1043.
- [7] FLORIDES G A, TASSOU S A, KALOGIROU S A, et al. Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness[J]. Applied Energy,2002,73 (3-4):299-328.
- [8] MECHRI Houcem Eddine, CAPOZZOLI Alfonso, CORRADO Vincenzo. USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design[J]. Applied Energy,2010. 10,87(10):3073-3083.
- [9] SZALAY Zsuzsa, ZOLD Andras. Definition of nearly zero-energy building requirements based on a large building sample [J]. Energy Policy, 2014, 74 (11): 510-521.
- [10] 王锦. 建筑方案创作阶段的节能构思[D]. 西安建筑科技大学,2005;20-27.
- WANG Jin. Energy Efficiency Conceiving During the Stage of Architecture Composition[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005: 20-27.
- [11] 房涛. 天津地区零能耗住宅设计研究[D]. 天津:天津大学,2012;67-89.
- FANG Tao. Research on Design of Zero-energy Residential Building for Tianjin Area[D]. Tianjin: Tianjin University,2012;67-89.
- [12] 张海滨. 寒冷地区居住建筑体型设计参数与建筑节能的定量关系研究[D]. 天津大学,2012;65-92.
- ZHANG Haibin. Study on qualitative relationship of the design parameters of residential buildings and building energy efficiency in cold regions[D]. Tianjin: Tianjin University,2012;65-92.
- [13] 潘毅群,左明明,李玉明. 建筑能耗模拟——绿色建筑设计建筑节能改造的支持工具之一:基本原理与软件[J]. 制冷与空调,2008,22(3):10-16.
- PAN Yiqun, ZUO Mingming, LI Yuming. Building Energy Simulation-Supporting Tool for Green Building Design and Building Commissioning-Part I: Basic Principle and Software[J]. Refrigeration & Air Conditioning,2008,22(3):10-16(in Chinese).
- [14] 彦启森,赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986.
- YAN Qingshen, ZHAO Qingzhu. Building Thermal Process [M]. Beijing: China Architecture&Building Press,1986.
- [15] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京:高等教育出版社,2004;91-136.
- ZHANG Wentong. SPSS Advanced Tutorial in Statistical Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004;91-136.

(编辑 桂智刚)