

基于零能耗约束的拉萨市主被动太阳能组合 供暖协同优化设计研究

张亚亚¹, 刘艳峰^{1,2}, 陈耀文^{1,2}, 车 韧³, 周立军³

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 拉萨市设计集团有限公司, 西藏 拉萨 850030)

摘要: 该研究针对太阳能被动建筑供暖与主动供暖系统之间的相关性和相互反馈作用, 建立了以建筑及系统总成本最低为优化目标, 以建筑零能耗运行作为约束条件的太阳能主被动供暖系统协同优化模型. 以拉萨地区某 2 层民居建筑为例, 得到了不同供暖时长保证率下建筑与太阳能供暖系统的最佳设计参数组合, 并对优化后的建筑能耗及成本分摊比例进行分析, 最后对不同价格参数进行了敏感性分析, 结果表明: 建筑设计、建筑保温、直接受益窗、太阳能系统各部分建筑能耗分摊比例分别约为 7%、60%、17% 和 16%; 而建筑保温、直接受益窗、太阳能系统各部分成本分摊比例分别约为 30%、40% 和 30%. 研究可为拉萨市直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统工程优化设计提供依据.

关键词: 零能耗建筑; 直接受益窗; 太阳能供暖系统; 协同优化; 遗传算法

中图分类号: TU111.4⁺5; TK01

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0811-08

Optimization design of active and passive solar combined heating in Lhasa based on zero energy consumption constraint

ZHANG Yaya¹, LIU Yanfeng^{1,2}, CHEN Yaowen^{1,2}, CHE Ren³, ZHOU Lijun³

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China;

3. Lhasa Municipality Design Group Co., Ltd., Lhasa 850030, China)

Abstract: In this study, aiming at the correlation and mutual feedback between solar passive building heating and solar active heating system, a collaborative optimization model of solar active and passive heating system is established with the minimum total cost of buildings and systems as the optimization objective and the zero energy consumption operation of buildings as the constraint condition. Taking a two-story residential building in Lhasa as an example, the optimal design parameters of building and solar heating system under different heating guarantee rates are obtained, and the optimized building energy consumption and cost sharing ratio are analyzed. Finally, the sensitivity analysis of different price parameters is carried out. The results show that the building energy consumption sharing ratios of architectural design, building insulation, direct benefit window and solar system are about 7%, 60%, 17% and 16%, respectively. The cost sharing ratios of building insulation, direct benefit window and solar system are about 30%, 40% and 30%, respectively. The research can provide a basis for the engineering optimization design of direct-benefit window passive building and solar active heating system in Tibetan Plateau.

Key words: zero energy buildings; direct benefit window; solar heating system; collaborative optimization; genetic algorithm

拉萨市冬季寒冷且漫长, 传统建筑供暖技术在改善当地人居环境的同时, 将消耗大量的一次能源^[1]. 拉萨市化石能源匮乏、运输补给困难, 不利于传统供暖方式大规模应用^[2-3]. 但拉萨市太阳

能资源富集且日照时间长^[4-5], 若能合理高效利用太阳能, 则有望率先实现建筑零能耗供暖运行模式.

现阶段, 为实现建筑零能耗运行目标, 一般

收稿日期: 2021-07-10

修改稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U20A20311、51878532); 陕西省教育厅重点实验室科学研究计划基金项目(21JS029)

第一作者: 张亚亚(1998—), 女, 硕士生, 主要从事建筑节能与可再生能源应用的研究. E-mail: zhangyaya@xauat.edu.cn

通信作者: 刘艳峰(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑节能与可再生能源应用. E-mail: yanfengliu@xauat.edu.cn

在提升建筑热工性能和系统能效、降低用能需求的基础上,还需太阳能等承担剩余能耗,实现“节流”与“开源”并举^[6-7]。太阳能供暖常采用太阳能主、被动技术结合的方式,实现太阳能最大化利用^[8-10]。

在太阳能主被动供暖优化方面,Zhang等^[11]研究了在寒冷气候下,建筑形状,窗墙比,房间进深和朝向等几何参数对学校建筑能耗和热舒适性的作用,与参考案例相比,几何结构改变最多可节省13.6%的能源,并提高3.8%的热舒适性。李恩等^[12]指出,太阳能资源丰富区若各朝向外墙使用相同保温层厚度,则不利于南向太阳能利用,继而造成浪费。因此,一些学者提出了居住建筑不同朝向外墙应该采取不同的保温构造的观点。姚盼等^[13]人提出集热面积和水箱容积间相互影响较大,其他参数互相影响较小。刘妍彤^[14]使用Ecotect、Sketchup、Sunnydesign软件,采取先被动后主动的顺序对西安某住宅建筑的建筑朝向、遮阳构件以及屋顶分布式光伏进行优化,结果表明,主被动优化后,住宅建筑的综合节能性大大提高。王晓亮^[15]通过试验测试、数值计算对高寒地区铁路客运站进行优化。从建筑主被动供暖技术特点和原理出发,基于多目标优化提出了一种“分级式”求解方法。周士筌等^[16]利用NS-GA-II遗传算法对20个典型城市的典型建筑的建筑朝向、窗墙比、建筑外墙构造、屋面构造、室内空调及供暖温度设定值、HVAC系统类型10个参数进行优化,结果表明,对于北方严寒地区的建筑能耗下降38.37%,室内不舒适度时数下降61.5%。现有研究忽视了建筑热工和建筑设备系统之间的相关性和相互反馈作用,造成建筑热工与建筑设备系统优化设计割裂,进而导致太阳能供暖优化设计时,难以给出协同最优设计参数。

本研究针对上述问题,建立了以建筑及系统总成本最低为目标、建筑“零能耗”为约束的太阳能主被动供暖系统协同优化模型。对建筑设计、建筑保温、被动构件和主动系统等设计参数和设备容量进行协同优化,以拉萨地区为例,优化得到了建筑与太阳能供暖系统的最佳设计参数;掌握了各环节承担的建筑能耗以及成本分摊比例;进行了各价格参数对各项成本影响的敏感性分析。为拉萨市直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统协同优化设计提供参考。

1 太阳能主被动供暖系统设计方法及控制策略

1.1 太阳能主被动供暖系统

直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统如图1所示,包括:被动建筑以及太阳能主动供暖系统,其中被动建筑设计可分为建筑设计,如朝向、层高等;建筑热工设计,建筑围护结构差异化保温等;直接受益窗设计,如不同朝向差异化窗墙面积比、窗户类型等;太阳能主动供暖系统包括太阳能集热器、蓄热水箱、低温地板辐射盘管。该系统结合拉萨市的资源条件,可以充分利用太阳能主被动供暖技术,实现建筑零能耗供暖运行模式,并维持室内良好的舒适温度,满足用户热需求。



图1 直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统

Fig. 1 Direct benefit window passive building and solar active heating system

1.2 太阳能主被动供暖系统控制策略

本研究中系统控制策略如图2所示,太阳能主被动供暖系统可分为太阳能集热系统和用户供暖系统。太阳能集热器采取温差控制,拉萨市气压低,水的沸点温度约为80℃,因此蓄热水箱内部最高温度设定为75℃。当室温低于18℃时,系统将给建筑供暖。

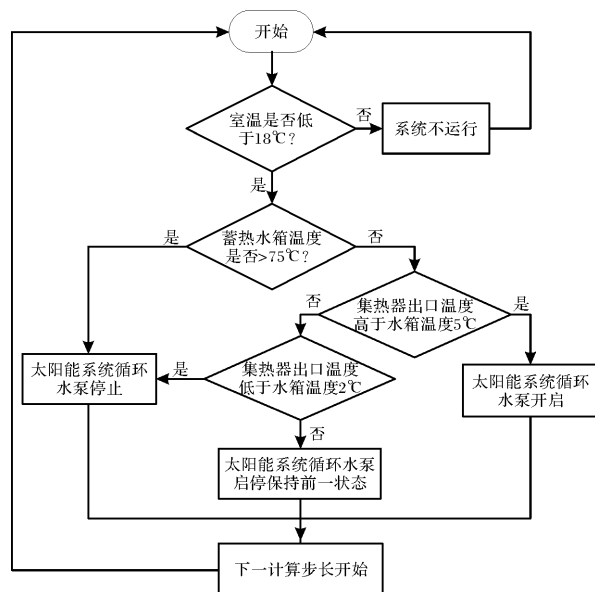


图2 太阳能供暖系统运行控制逻辑图

Fig. 2 Operation control logic diagram of solar heating system

2 优化模型及求解方法

2.1 建筑设计

建筑设计是太阳能主被动供暖系统优化设计的首个环节,合理的设计方案能够有效降低建筑能耗.本文研究对象为单体建筑,主要针对建筑本体节能设计,包括建筑平面布局、建筑朝向、层高等.

建筑平面布局应充分利用日照,主要使用的房间布置在南向,次要或辅助房间布置在北向.被动建筑设计中,矩形平面的布局对太阳能得热是最有利的,因此本研究选择矩形平面布局.建筑朝向的确定不仅与太阳辐射相关,还可能受到地形、平面布局和当地冬季主导风向等因素的影响.拉萨市建筑物的朝向宜采用南北向或接近南北向.为满足建筑空间使用需求,建筑层高不应低于2.4 m.建筑设计对建筑能耗有较大的影响,良好的建筑设计是实现建筑零能耗供暖运行的首要条件.

2.2 建筑非透明围护结构传热过程

建筑非透明围护结构包含墙体、地面、屋顶以及非透明门等构件.通过建筑非透明围护结构的热损失占比高,要想实现零能耗建筑,需对建筑进行保温设计,因此,围护结构的热工设计成为被动式建筑节能设计中的重点.

建筑非透明围护结构传热过程包括外表面热平衡模型^[17]、墙体导热模型^[17]、内表面热平衡模型^[17]以及室内空气热平衡模型^[15].

室内空气热平衡模型可表示为

$$\rho VC_p \frac{dt_r(\tau)}{d\tau} = Q_p(\tau) + Q_A(\tau) + Q_{su}(\tau) \quad (1)$$

式中: ρ 为空气的定压比热和密度, kg/m^3 ; V 为房间体积, m^3 ; C_p 为空气的定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $t_r(\tau)$ 为房间内空气温度, K ; τ 为时间, S ; $Q_p(\tau)$ 为被动建筑内部空气通过围护结构的得热量, W ; $Q_A(\tau)$ 为主动供暖技术向建筑空间提供的热量, W ; $Q_{su}(\tau)$ 为室内所有热源(人员、灯光、设备等)以对流换热带入室内的热量, W .

供暖一般由人员、灯光、设备等带入室内的热量 $Q_{su}(\tau)$ 为定值,由上式可看出建筑主被动供暖相互制约的关系.当被动供暖技术投入越多时,建筑能耗越小,主动供暖系统的供热量越低,主动供暖技术的成本也相应减少;当被动供暖技术投入越少时,建筑能耗越高,需要由主动供暖系统提供的热量越高,主动系统的成本就会大幅

增加.

2.3 直接受益窗被动构件

为实现建筑零能耗,需充分利用建筑被动技术,使建筑在达到节能水平的基础上尽量减少主动设备系统的投入.建筑被动构件可分为直接受益窗、附加阳光间、集热蓄热墙等构件,本研究着重讨论直接受益窗式被动建筑.直接受益窗既是得热构件,也是失热构件,因此需合理设置南向集热窗以及非集热窗.

直接受益窗得热量^[18]可表示为

$$Q_{win1}(\tau) = I S_c \mu F \quad (2)$$

式中: $Q_{win1}(\tau)$ 为直接受益窗太阳能得热量, W ; I 为供暖期南向平均太阳辐射强度, W/m^2 ; S_c 为遮阳系数; μ 为玻璃透过率; F 为窗户面积, m^2 .

通过直接受益窗失热量^[18]可表示为

$$Q_{win2}(\tau) = K_{win} F \Delta t \quad (3)$$

式中: $Q_{win2}(\tau)$ 为直接受益窗太阳能失热量, W ; K_{win} 为窗户的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; Δt 为供暖期室内外平均温差, K .

2.4 太阳能主动供暖系统

太阳能主动供暖系统将承担被动建筑设计后的剩余建筑能耗,从而达到建筑零能耗的目标.

太阳能供暖系统的能量守恒方程如下:

$$Q_j(\tau) = Q_{st}(\tau) + Q_{ls}(\tau) + Q_A(\tau) \quad (4)$$

式中: $Q_j(\tau)$ 为太阳能集热器有效集热量, J ; $Q_{st}(\tau)$ 为蓄热水箱储存的热量, J ; $Q_{ls}(\tau)$ 为系统热损失, J ; $Q_A(\tau)$ 为太阳能供暖系统向建筑空间提供的热量, J .

(1) 太阳能集热器

太阳能集热器有效集热量为

$$Q_j(\tau) = A_{co} \eta(\tau) G \quad (5)$$

$$Q_j(\tau) = C_p m_{co} (T_{co} - T_{ci}) \quad (6)$$

其中,太阳能集热器的效率为

$$\eta(\tau) = F_R (\tau \alpha)_e - F_R U_L (T_{ci} - T_{en}) / G \quad (7)$$

式中: A_{co} 为太阳能集热器面积, m^2 ; $\eta(\tau)$ 为太阳能集热器集热效率; G 为太阳能集热器采光面的太阳辐射强度, W/m^2 ; m_{co} 为集热循环质量流量, g/h ; T_{co} 为太阳能集热器出口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{ci} 为太阳能集热器入口温度, $^{\circ}\text{C}$; F_R 为太阳能集热器热转移因子,无量纲; $(\tau \alpha)_e$ 为有效投射吸收积,无量纲; U_L 为太阳能集热器的总热损失系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_{en} 为室外空气温度, $^{\circ}\text{C}$.

(2) 蓄热水箱

本研究重点关注太阳能供暖系统主被动技术协同作用,采用单节点水箱模型进行蓄热水箱的

简化计算,其数学表达式为

$$\rho V_{st} C_p \frac{dT_{st}}{d\tau} = Q_j(\tau) - Q_L(\tau) - Q_{lst}(\tau) \quad (8)$$

其中,水箱向外界散失的热量为

$$Q_{lst}(\tau) = U_{st} A_{st} (T_{st} - T_{sten}) \quad (9)$$

式中: V_{st} 为蓄热水箱容积, m^3 ; T_{st} 为蓄热水箱水温, $^{\circ}C$; $Q_L(\tau)$ 为建筑热负荷, W ; $Q_{lst}(\tau)$ 为蓄热水箱向外界散失的热量, W ; U_{st} 为蓄热水箱热损失系数, $W/(m^3 \cdot ^{\circ}C)$; T_{sten} 为蓄热水箱所处环境温度, $^{\circ}C$.

2.5 协同优化模型

(1) 目标函数

模型采用建筑及系统总成本为目标函数,因本研究主要考虑被动建筑设计及太阳能主动供暖系统设计对建筑节能性及经济性的影响,不包含建筑本体建造费用.考虑到太阳能供暖系统系的耗电量较小,产生的耗电费用在总成本中占比少,予以忽略.

$$\min(C_t) = \min(C_b + C_s) \quad (10)$$

$$C_b = \sum C_w A_w + \sum C_l A_l \delta_l \quad (11)$$

$$C_s = C_{co} A_{co} + C_{st} V_{st} \quad (12)$$

式中: C_t 为建筑及系统总成本,元; C_b 为建筑成本,元; C_s 为太阳能供暖系统成本,元; C_w 为窗户价格,元/ m^2 ; A_w 为围护结构各面上的窗户面积, m^2 ; C_l 为保温材料成本,元/ m^3 ; A_l 为围护结构各面上的保温面积, m^2 ; δ_l 为围护结构各面上的保温厚度, m ; A_{co} 为太阳能集热器的面积, m^2 ; C_{co} 为太阳能集热器单位面积设备费用,元/ m^2 ; V_{st} 为蓄热水箱的容积, m^3 ; C_{st} 为蓄热水箱单位容积设备费用,元/ m^3 .

(2) 决策变量

为研究直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统,本文选取13个决策变量,其中建筑设计参数2个,为建筑朝向(Ori)、层高(h);建筑热工设计参数5个,分别为北墙保温厚度(δ_{INW})、东西墙保温厚度(δ_{IEWW})、南墙保温厚度(δ_{ISW})、地面保温厚度(δ_{IG})、屋顶保温厚度(δ_{IR});被动技术设计参数4个,分别为北向窗墙面积比(WWR_N)、南向窗墙面积比(WWR_S)、北向窗户类型(W_{tN})、南向窗户类型(W_{tS});太阳能主动供暖系统设计参数2个,分别为太阳能集热器面积(A_{co})、蓄热水箱容积(V_{st}).

(3) 约束条件

1) 零能耗约束

本文中“零能耗”指太阳能供暖系统向建筑空间提供的热量大于或等于建筑热负荷:

$$Q_A(\tau) \geq Q_L(\tau) \quad (13)$$

想要完全达到建筑零能耗供暖运行,即供暖季每小时均需满足上述条件,所需总成本较大,从而造成不必要的成本浪费,因此本文提出供暖时长保证率的概念,即 $Q_A(\tau)$ 大于等于 $Q_L(\tau)$ 的总小时数与供暖季总时长之比,以牺牲掉热用户部分舒适时间的条件来避免成本浪费.

$$\eta_{gn} = \frac{T_m}{T_z} \quad (14)$$

式中: η_{gn} 为供暖时长保证率,%; T_m 为 $Q_A(\tau)$ 大于等于 $Q_L(\tau)$ 的总小时数, h ; T_z 为供暖季总时长, h .

2) 决策变量参数范围约束

模型中各决策变量的取值范围如表1所示.记建筑正面朝南为 0° ,按逆时针方向增加角度.为减少计算成本,加快收敛速度,在设置围护结构差异化保温时,东西墙保温取值一致.南北向窗户类型取值范围为双层空气玻璃窗(Air2)、三层空气玻璃窗(Air3)、双层氩气玻璃窗(Kry2)、三层氩气玻璃窗(Kry3).集热器单板面积为 $2 m^2$.

表1 决策变量取值范围

Tab.1 Value range of decision variables

变量名称	取值范围
建筑朝向/ $^{\circ}$	-90 、 -60 、 -30 、 -15 、 0 、 15 、 30 、 60 、 90
层高/ m	$[2.4 : 0.1 : 3.3]$
北墙、东西墙、南墙、地面、屋顶保温厚度/ m	$[0.01 : 0.01 : 0.5]$
北向窗墙面积比	$[0.1 : 0.1 : 0.5]$
南向窗墙面积比	0.45 、 0.5 、 0.6 、 0.7 、 0.8
南北向窗户类型	Air2、Air3、Kry2、Kry3
集热器面积/ m^2	$[2 : 2 : 90]$
蓄热水箱容积/ m^3	$[0.5 : 0.5 : 20]$

注:取值范围 $[a0 : c : a1]$ 表示参数取值下限为 $a0$,上限为 $a1$,步长为 c .

3) 初始条件约束

在初始时刻,蓄热水箱内水温取 $45^{\circ}C$,集热器内部工质取 $10^{\circ}C$.

$$T_{st}(\tau=1) = 45 \quad (15)$$

$$T_{ci}(\tau=1) = T_{co}(\tau=1) = 10 \quad (16)$$

2.6 模型求解方法

本研究提出一套被动建筑与太阳能主动供暖系统的协同优化方法.该方法使用 Design Builder 建立被动建筑模型(idf文件),使用 jEPlus 建立被动建筑参数化模型(imf文件);使用 MATLAB 建立太阳能供暖系统模型、优化模型及遗传算法相

关设置. 本文选用遗传算法进行优化求解, 遗传算法^[19]是模拟生物在自然环境中优胜劣汰、适者生存的遗传和进化过程而形成的一种具有自适应能力的、全局性的概率搜索算法.

3 优化案例及结果分析

3.1 案例介绍及参数设置

为得到拉萨市建筑与太阳能供暖系统的最佳设计参数组合, 本节将采用第二部分提出的直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统的协同优化方法, 以拉萨某小区居民楼为典型建筑进行

计算.

(1)建筑几何模型建立

典型建筑平面如图 3 所示, 建筑为拉萨市某新建二层民居建筑, 建筑面积 200 m².

(2)建筑模型参数设置

拉萨地区供暖时间设置为 11 月 1 日-3 月 12 日, 供暖季共 132 d, 合计 3 168 h.

典型建筑朝向为 0°, 层高为 2.8 m, 围护结构没有保温, 北向窗墙面积比为 0.4, 南向窗墙面积比为 0.45, 窗户均选用单层玻璃窗. 典型建筑围护结构的传热系数如表 2 所示.

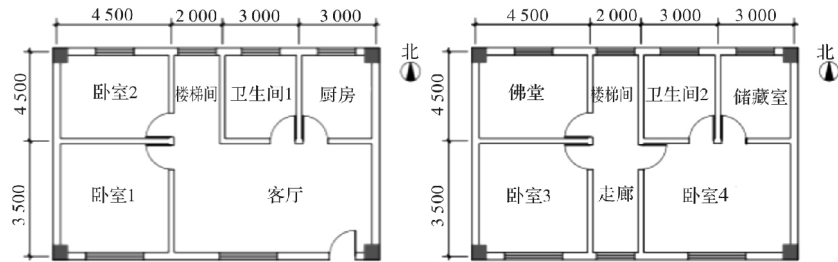


图 3 建筑平面图
Fig. 3 Building plan

表 2 典型建筑围护结构的传热系数
Tab. 2 Heat transfer coefficient of typical building envelope

建筑结构	传热系数/W · (m ² · K) ⁻¹
外墙	1.146
内墙	1.439
屋面	2.763
地面	2.718
楼板	2.805
门	2.868
单层玻璃窗户	5.816
双层空气玻璃窗	2.682
三层空气玻璃窗	1.736
双层氩气玻璃窗	2.481
三层氩气玻璃窗	1.543

对于室内冷风渗透, 所有房间均设置为 0.5 次/h. 对于卧室和客厅, 在有人的时候进行通风, 通风量为 30 m³/(h · 人). 典型建筑所有房间均全天供暖.

(3)太阳能供暖系统及优化模型参数设置

本文所用太阳能集热器为 P-Y/0.6- T/L/YH-1.86 基准型平板集热器.

采用上述优化算法, 通过 MATLAB 软件编程对被动建筑与太阳能供暖系统进行协同优化计算, 初始化种群大小设为 60, 迭代次数设为 300, 计算条件见表 3.

表 3 计算条件
Tab. 3 Calculation conditions

参数	取值	参数	类型	取值
$F_R(\tau\alpha)_e$	0.784 3	$C_w/\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$	Air2	500
$F_R U_L/W \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	5.502 4		Air3	650
$T_{\text{sten}}/^\circ\text{C}$	10		Kry2	600
$C_{\text{co}}/\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$	600	$C_l/\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$	Kry3	800
$C_{\text{st}}/\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$	1 000		EPS	373

3.2 优化结果分析

用 EnergyPlus 软件模拟得到典型建筑逐时耗热量如图 4 所示, 典型建筑整个供暖季能耗为 74.79 kW · h/m².

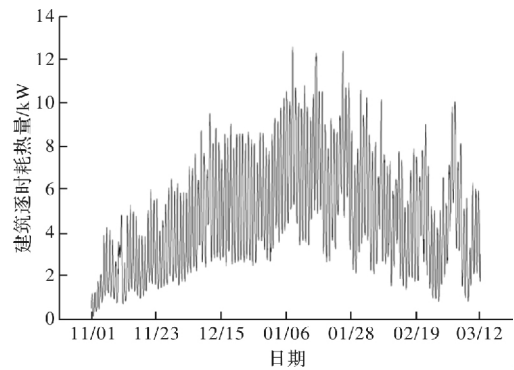


图 4 典型建筑供暖季逐时耗热量
Fig. 4 Hourly heat consumption of typical buildings during heating season

在供暖时长保证率为 95%~99%的情况下, 即

供暖季分别牺牲热用户 158、126、95、63、31 h 的热舒适时长的情况下,以建筑及系统总成本最小为优化目标进行寻优,协同优化结果如表 4 所示.由表可知,优化后的建筑朝向取 0°或-15°;层高均取 2.4 m;围护结构采取差异化保温,且屋顶保温厚度>北墙保温厚度>东西墙保温厚度>南墙保温厚度或地面保温厚度;北向窗墙面积比均为 0.1,以降低建筑能耗;南向窗墙面积比均为 0.45,分析可知由于窗户成本高于围护结构保温成本,虽然增加南向窗墙面积比可降低建筑能耗,但由此带来的建筑及系统总成本会大大增加;南北向窗户类型均选择

双层空气玻璃窗;集热器面积取 14~18 m²;对应蓄热水箱容积取 2~2.5 m³.

随着供暖时长保证率的提升,建筑能耗呈现先降低后上升的趋势,太阳能供暖系统设备容量逐渐上升,建筑及系统总成本也逐渐增加,最小值对应于供暖时长保证率为 95%的工况,为 33 173.7 元,分析可知在供暖保证小时数增加时,先提升被动建筑供暖技术投入,当仍不能满足条件时,主动供暖系统的投入逐渐增加,对应供暖时长保证率为 97%时,被动建筑供暖技术投入最多.

表 4 不同供暖时长保证率下的太阳能主被动供暖协同优化结果

Tab. 4 The collaborative optimization results of active and passive solar heating under different heating guarantee rates

η_{en} /%	O_{ri} /°	h /m	δ_{INW} /m	δ_{IEWW} /m	δ_{ISW} /m	δ_{IG} /m	δ_{IR} /m	WWR_{N}	WWR_{S}	W_{tN}	W_{tS}	A_{co} /m ²	V_{st} /m ³	Q_{h} /kW · (h · m ⁻²)	C_{t} /元
95	0	2.4	0.09	0.07	0.03	0.03	0.1	0.1	0.45	Air2	Air2	14	2	12.71	33 173.7
96	0	2.4	0.09	0.08	0.05	0.04	0.09	0.1	0.45	Air2	Air2	14	2	12.16	33 682.2
97	0	2.4	0.1	0.08	0.05	0.04	0.1	0.1	0.45	Air2	Air2	14	2	11.46	34 249.9
98	-15	2.4	0.1	0.07	0.04	0.03	0.11	0.1	0.45	Air2	Air2	16	2	12.03	35 052.4
99	-15	2.4	0.09	0.07	0.03	0.04	0.09	0.1	0.45	Air2	Air2	18	2.5	12.90	36 073.7

3.3 建筑能耗分摊比例分析

为进一步分析直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各设计阶段的参数对建筑能耗的作用,以典型建筑为参考建筑,得到不同供暖时长保证率下建筑设计、建筑保温、直接受益窗、太阳能系统各部分建筑能耗分摊比例如图 5 所示.

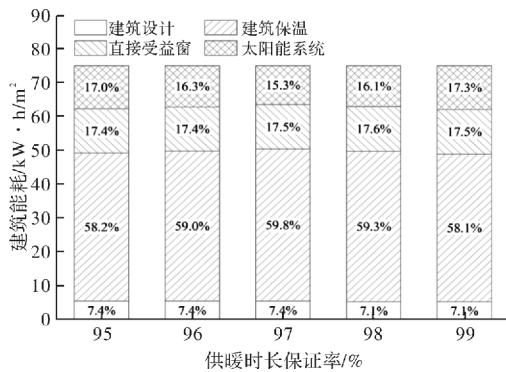


图 5 不同供暖时长保证率下各部分建筑能耗分摊比例

Fig. 5 The building energy consumption allocation ratio of each part under different heating guarantee rates

在同一供暖时长保证率下,各部分建筑能耗分摊比例大小为:建筑保温>直接受益窗>太阳能系统>建筑设计.随着供暖时长保证率的增加,建筑保温所承担的建筑能耗先增加后减小,在供暖时长保证率为 97%时最大,建筑能耗分摊比例为 59.8%;太阳能系统所承担的建筑能耗则呈现先减少后增加的趋势,最小值对应供暖时长保证率为 97%的工况,建筑能耗分摊比例为 15.3%;直接受益窗承担的建筑能耗约占建筑总能耗的

17%;建筑设计承担的建筑能耗最小,约占建筑总能耗的 7%.

3.4 成本分摊比例分析

建筑及系统总成本受建筑保温、直接受益窗、太阳能系统这 3 个阶段的设计参数影响,在不同供暖时长保证率下,建筑保温、直接受益窗、太阳能系统各部分成本分摊比例如图 6 所示.

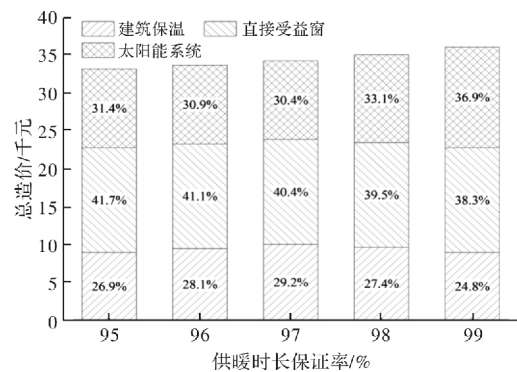


图 6 不同供暖时长保证率下各部分成本分摊比例

Fig. 6 The cost allocation ratio of each part under different heating guarantee rates

由图 6 可看出,在同一供暖时长保证率下,直接受益窗的成本分摊比例最大,其次是太阳能系统,建筑保温的成本分摊比例最小.随着供暖时长保证率的增加,建筑及系统总成本逐渐增大.建筑保温的成本分摊比例先增加后减少,在供暖时长保证率为 97%时最大,为 29.2%;直接受益窗的成本分摊比例逐渐减少;太阳能系统的成本分摊比例则呈现先减少后增加的趋势,最小值对应供暖时长保证率

为 97% 的工况, 成本分摊比例为 30.4%。

4 敏感性分析

敏感性分析可得到关键参数对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统的协同优化设计结果的影响。保温材料价格、窗户价格及主动设备价格对建筑及系统各项成本影响较大, 因此对建筑与太阳能供暖系统的最佳设计参数组合必然存在较大影响。本节将对供暖时长保证率为 98% 的直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统进行敏感性分析, 价格参数如表 5 所示。

表 5 敏感性分析价格参数
Tab. 5 Sensitivity analysis of price parameters

参数	类型	价格波动范围			
		-10%	0%	10%	20%
$C_1/\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$	—	335	373	410	450
	Air2	450	500	550	600
$C_w/\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$	Air3	585	650	715	780
	Kry2	540	600	660	720
	Kry3	720	800	880	960
主动设备价格	$C_{co}/\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$	540	600	660	720
	$C_{st}/\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$	900	1 000	1 100	1 200

注: 窗户价格与主动设备价格采取组合价格形式。

4.1 保温材料价格(C_1)的影响分析

当 C_1 在初始价格 -10%~20% 范围内波动时, 对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本的影响如图 7 所示。

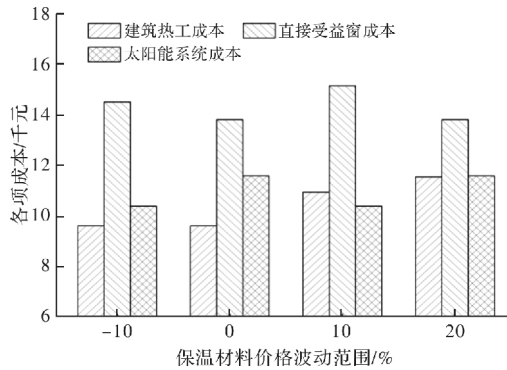


图 7 保温材料价格对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本影响

Fig. 7 The impact of Insulation Material Price on the Cost of Direct Benefit Window Passive Building and Solar Active Heating System

结果表明, 随着 C_1 的提高, 建筑热工成本先保持不变后增加, 直接受益窗成本以及太阳能系统成本呈现小幅度波动趋势; 其中建筑热工成本变化率最大, 说明 C_1 对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本影响由大到小为: 建筑热工成本 > 太阳能系统成本或直接受益窗成本。

4.2 窗户价格(C_w)的影响分析

Air2、Air3、Kry2、Kry3 等不同类型窗户价格对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本的影响如图 8 所示。结果表明, 随着各类型窗户价格的提升, 建筑热工成本、直接受益窗成本逐渐增大, 太阳能系统成本保持不变; 其中直接受益窗成本变化率最大, 建筑热工成本变化率次之, 太阳能系统成本变化率为 0, 说明 C_w 对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本影响由大到小为: 直接受益窗成本 > 建筑热工成本 > 太阳能系统成本。

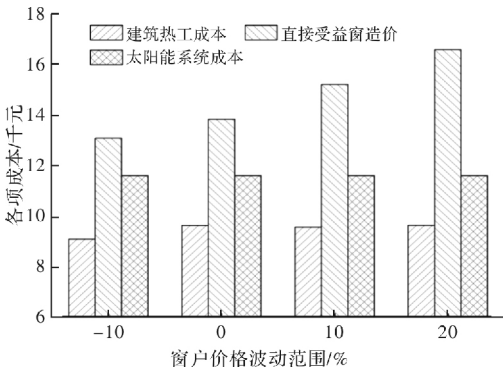


图 8 窗户价格对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本影响

Fig. 8 The impact of window price on cost of direct benefit window passive building and solar active heating system

4.3 主动设备价格(C_{co} 与 C_{st})的影响分析

主动设备价格对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本的影响如图 9 所示。

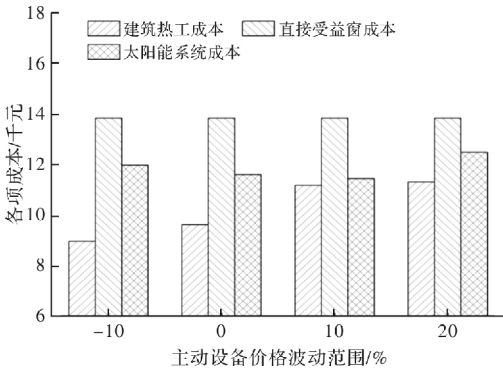


图 9 主动设备价格对直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本影响

Fig. 9 The impact of active equipment price on the costs of direct-benefit window passive building and solar active heating system

结果表明, 随着主动设备价格的提升, 建筑热工成本逐渐增大, 太阳能系统成本先降低后上升, 直接受益窗成本保持不变; 其中建筑热工成本变化率最大, 太阳能系统成本变化率次之, 直接受益窗成本变化率为 0, 说明主动设备价格对直

接受受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统各项成本影响由大到小为:建筑热工成本>太阳能系统成本>直接受益窗成本。

5 结论

本研究充分考虑了被动建筑与主动太阳能供暖系统之间的相互反馈作用,建立了直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统的协同优化模型,利用遗传算法在 MATLAB 平台上编程,对建筑设计、建筑热工、被动构件和主动系统中的关键设计参数与设备容量等进行协同优化,主要结论如下:

(1) 通过直接受益窗式被动建筑与太阳能主动供暖系统的协同优化组合设计,可实现建筑设计、建筑热工、被动构件和主动系统等设计阶段合理分配,当多环节承担建筑能耗时,建筑及系统整体的成本更低;

(2) 在同一供暖时长保证率下,建筑保温能耗分摊比例最大,直接受益窗成本分摊比例最大,建筑设计、建筑保温、直接受益窗、太阳能系统各部分建筑能耗分摊比例分别约为 7%、60%、17%和 16%,建筑保温、直接受益窗、太阳能系统各部分成本分摊比例分别约为 30%、40%和 30%;

(3) 随着供暖时长保证率的增加,建筑保温所承担的建筑能耗及成本占比先增加后减小,而太阳能系统所承担的建筑能耗及成本占比先减少后增加;

(4) 敏感性分析表明:保温材料价格变化对建筑热工成本影响最大,窗户价格变化对直接受益窗成本影响最大,而主动设备价格变化对建筑热工成本影响最大。

参考文献 References

- [1] 赵斌,卢大为,刘维安,等.高寒高海拔地区太阳能集中供暖技术及其应用[J].华电技术,2020,42(11):51-55.
ZHAO Bin, LU Dawei, LIU Weian, et al. Technology and application of solar central heating in extremely cold and high-altitude areas[J]. Huadian Technology, 2020,42(11):51-55.
- [2] 江亿,冯雅,戎向阳,等.对拉萨城市供暖模式的探讨[J].暖通空调,2013,43(6):1-7.
JIANG Yi, FENG Ya, RONG Xiangyang, et al. Discussion on urban heating modes for Lhasa[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2013, 43(6):1-7.
- [3] 冯雅,杨旭东,钟辉智.拉萨被动式太阳能建筑供暖潜力分析[J].暖通空调,2013,43(6):31-34,85.
FENG Ya, YANG Xudong, ZHONG Huizhi. Heating potential of passive solar building in Lhasa[J]. Heat-

- ing Ventilating & Air Conditioning, 2013,43(6):31-34,85.
- [4] 张乐乐,高黎明,赵林,等.基于 ITPCAS 数据的青藏高原太阳总辐射时空变化特征[J].太阳能学报,2019,40(9):2521-2529.
ZHANG Lele, GAO Liming, ZHAO Lin, et al. Spatiotemporal variation characteristics of total solar radiation over Qinghai-Tibetan plateau based on ITPCAS data[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019,40(9):2521-2529.
- [5] 刘艳峰,胡筱雪,周勇,等.拉萨新民居建筑冬季室内热环境影响因素分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(1):109-115.
LIU Yanfeng, HU Xiaoxue, ZHOU Yong, et al. Analysis on influence factors of indoor thermal environment of new residential buildings in winter in Lhasa [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition). 2019,51(1):109-115.
- [6] 梁俊强,刘珊,喻彦喆.国际建筑节能发展目标的比较研究——迈向零能耗建筑[J].建筑科学,2018,34(8):118-123.
LIANG Junqing; LIU Shan; YU Yanzhe. A comparative study on the goals of energy conservation development of international buildings: Towards buildings with Zero Energy Consumption[J]. Building Science, 2018, 34(8):118-123.
- [7] IQBAL M. T. A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland[J]. Renewable Energy, 2004 (29):277-288.
- [8] 叶晓莉,端木琳,齐杰.零能耗建筑中太阳能的应用[J].太阳能学报,2012,33(S1):86-90.
YE Xiaoli, DUANMU Lin, QI Jie. The application of solar energy in Zero energy buildings[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(S1):86-90.
- [9] 王登甲,刘艳峰,刘加平.青藏高原被动太阳能建筑供暖性能实验研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(2):269-274.
WANG Dengjia, LIU Yanfeng, LIU Jiaping. Experiments analysis on the heating performance of the passive solar house in the Qinghai-Tibet plateau[J]. Sichuan Building Science, 2015,41(2):269-274.
- [10] SI Pengfei, FENG Ya, LÜ Yuexia, et al. An optimization method applied to active solar energy systems for buildings in cold plateau areas: The case of Lhasa [J]. Applied Energy, 2016, 194: 487-498.
- [11] ZHNAG Anxiao, BOKEL Regina, ANDY van den Dobbelen, et al. The effect of geometry parameters on energy and thermal performance of school buildings in cold climates of China[J]. Sustainability, 2017, 9 (10): 19.

(下转第 834 页)