

太阳能供暖集蓄热系统容量简化配比方法

高阳², 刘慧², 王登甲^{1,2}, 陈耀文^{1,2}

(1. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安, 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安, 710055)

摘要: 研究建立了太阳能供暖集蓄热系统数学模型, 分析了系统设备容量与节能性和经济性的关系; 构建了系统热损失与热负荷比值 X 、太阳能集热量与热负荷比值 Y 及其与太阳能保证率 F 三者之间关联曲线族。提出了节能性与经济成本综合要求下的太阳能供暖集、蓄热系统容量配比简化工程设计方法, 并给出了不同太阳能资源条件下典型城市的集蓄热配比设计参数推荐范围。

关键词: 太阳能供暖; 集热系统; 太阳能保证率; 离热系统; 配比方法

中图分类号: TU832.1, TK51

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)06-0954-07

A simplified capacity matching method for solar energy heating system

GAO Yang², LIU Hui², WANG Dengjia^{1,2}, CHEN Yaowen^{1,2}

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

2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The paper, the mathematical model of solar heating collection and storage system is established, and the relationship between system equipment capacity and energy saving and economy is analyzed. The correlation curve family are constructed with the system heat loss to heat load ratio X , solar heat collection to heat load ratio Y and solar guarantee rate F . A simplified engineering design method for the capacity ratio of solar heating collection and heat storage under the comprehensive requirements of energy saving and economic cost is proposed, and the recommended range of design parameters of collection and heat storage under different solar energy resources is obtained.

Key words: solar heating; collection system; solar fraction; heat storage system; matching method

我国西北及高原地区太阳能资源丰富, 以太阳能替代或部分替代常规能源供暖是降低一次能源消耗的有效技术途径^[1]。目前, 对于太阳能供暖系统的设计方法主要有平均参数法、图表公式法及仿真模拟法等方法。

平均参数法是一种稳态计算方法, 以集热器效率方程为基础, 利用气象参数平均工况计算集热系统年平均效率, 弱化了动态参数在设计过程中对系统效果的影响, 例如国家标准《太阳能供热工程技术规范》GB50495—2019 其设计过程是先计算集热器面积, 再根据推荐范围确定蓄热容量, 最终确定太阳能系统规模。图表公式法将系统测试或数值模拟的结果整理成可供查看的图表或直接使用的计算公式, 作为太阳能供暖系统的设计工具, 其核心是以图形和方程的形式展示的太

阳能供暖系统无量纲变量和性能的关系, 如 F-chart 是图表公式法的典型应用, 该方法主要考虑了集热面积对于系统性能的影响^[6]。仿真模拟法^[7]是一种动态计算方法, 主要用于集热系统面积、蓄热容积、辅助加热规模等系统优化匹配研究, 通过设置目标函数, 经过系统优化算法计算得到满足目标函数的自变量, 该方法准确度较高, 但是需要使用者具有扎实的软件基础, 因此, 该方法很难直接应用于工程设计和推广。

综上所述, 不同的太阳能供暖系统设计方法具有不同的适用条件。本文在上述研究方法的基础上, 利用模拟软件 TRNSYS 建立太阳能供暖系统动态模型, 模拟得到不同设备容量参数下的太阳能供暖系统性能, 探究太阳能供暖系统设备容量关联关系, 确定出太阳能供暖集热、蓄热系统

收稿日期: 2021-07-18

修改稿日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(52078408、U20A20311); 陕西省杰出青年基金项目(2020JC-43)

第一作者: 高阳(1996—), 女, 硕士生, 主要研究太阳能供暖集蓄热系统设计方面研究。E-mail: 1298938497@qq.com

通信作者: 王登甲(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事可再生能源供暖领域的研究。E-mail: wangdengjia@xauat.edu.cn

设备容量相互影响关系, 给出两者同时确定方法, 提出了太阳能资源不同地区主要城市的设计参数推荐范围, 为太阳能供暖系统在工程上的准确设计提供指导作用。

1 太阳能供暖系统模型

太阳能供暖系统的原理^[13]如图1所示, 系统主要由太阳能集热、蓄热系统、辅助热源系统及末端用户等构成, 本研究内辅助热源采用电加热。

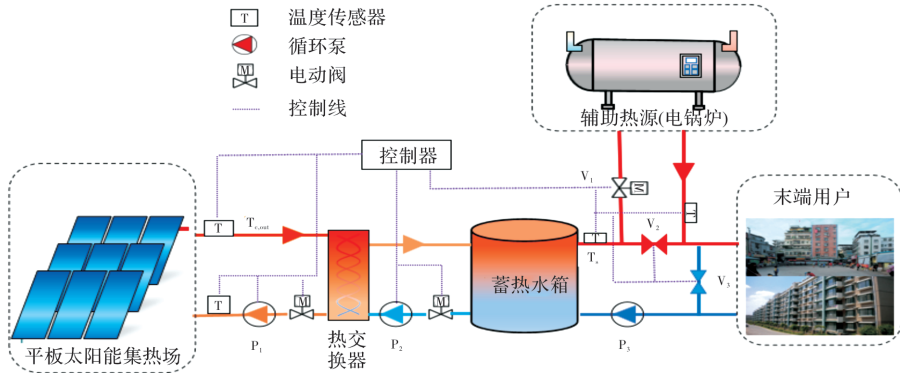


图1 太阳能热水供暖系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of solar water heating system

辅助热源的启闭条件如表2所示。

表2 辅助热源的启闭条件

Tab. 2 Opening and closing conditions of auxiliary heat source

T_s	Aux	V_1	V_2	V_3
$T_s > T_{guore}$	0	0	1	1
$T_{gongnuan} \geq T_s > T_{guore}$	0	0	1	0
$T_s < T_{gongnuan}$	1	1	0	0

注: T_c 为集热器出口温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{s,c}$ 为来自蓄热水箱的供水温度, $^{\circ}\text{C}$; ΔT_{start} 为最小供热温差, $^{\circ}\text{C}$; ΔT_{stop} 为最大供热温差, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为蓄热水箱向末端供暖的出口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{guore} 为末端最大供暖温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

上述系统, 热量平衡方程如公式(1)所示。

$$\int q_{solar} dt + \int q_{aux} dt = \int q_{load} dt + \int q_{loss} dt + \int \Delta q_{tank} dt \quad (1)$$

式中: q_{solar} 为集热器有效集热量, kW; q_{aux} 为辅助热源加热量, kW; q_{load} 为用户热负荷, kW; q_{loss} 为系统热量损失, 包括集热系统热损失、蓄热水箱热损失和管道热损失, kW; Δq_{tank} 为蓄热水箱瞬时蓄热量, kW。

太阳能集热系统瞬时集热量 q_{solar} 用公式(2)表示为

$$q_{solar}(t) = \frac{A_C [I_T(t) F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \{T_s(t-1) - T_a(t-1)\}] +}{1\ 000} \quad (2)$$

集热循环泵 P_1 采用温差控制法, 蓄热循环泵 P_2 采用温度控制法, 启闭条件如表1所示:

表1 集热系统循环泵 P_1 、 P_2 启闭控制

Tab. 1 Circulating pump P_1 , P_2 open and close control

$T_c, -T_{s,c}$	P_1	T_s	P_2
$\geq \Delta T_{start}$	1	$T_c > T_s$	1
$\in (\Delta T_{stop}, T_{start})$	1	$T_c \leq T_s$	0
$\in (\Delta T_{stop}, T_{start})$	0	—	—
$\leq \Delta T_{stop}$	0	—	—

式中: A_C 为集热器面积, m^2 ; + 表示只有当集热量为正时, 来自集热器的热量才会传递水箱; I_T 为入射到集热器倾斜表面的总太阳辐射强度, W/m^2 ; $F_R(\tau\alpha)$ 为集热器的性能系数; U_L 为集热器热损失系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$; T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

蓄热水箱和辅助热源提供给末端的热量由式(3)和(4)计算。如果蓄热水箱供水温度高于末端供水管所需最低供暖温度时, 则末端用户完全由蓄热水箱提供热量, 辅助热源不开启; 否则, 开启辅助热源, 由辅助热源加热到所需供暖温度后再提供给末端。

$$T_s(t-1) \geq T_{S,Min} \text{ 时, } q_{load}(t) = q_{tan,k,s}(t) \quad (3)$$

$$T_s(t-1) < T_{S,Min} \text{ 时, } q_{load}(t) = q_{aux}(t) + q_{tan,k,s}(t) \quad (4)$$

式中: T_s 为蓄热水箱供水温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{(S,Min)}$ 为末端供暖所需最低温度, $^{\circ}\text{C}$; $q_{tan,k,s}$ 为蓄热水箱提供给末端的热量, kW。

随着太阳能集热量的增加, 储热水箱中储存的热量积累, 其热损失量也随之增加, 储热水箱损失的热量可通过式(5)和(6)计算, 即

$$q_{loss}(t) = U_s A_s \frac{[T_s(t-1) - T_a(t-1)]}{1\ 000} \quad (5)$$

$$A_s = 1.845(2 + h/d)V^{2/3} \quad (6)$$

式中: U_s 为水箱的热损失系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$; A_s 为水箱的表面积 m^2 ; h/d 为圆柱形储罐的高径比;

V_s 为蓄热水箱容积, m^3 .

供暖期蓄热水箱瞬时蓄热量 Δq_{tank} 可通过式(7)来确定, 即

$$\Delta q_{\text{tank}}(t) = q_{\text{solar}}(t) - q_{\text{tank},s}(t) - q_{\text{loss}}(t) \quad (7)$$

太阳能供暖系统年累计集热量 Q_{solar} , $\text{kW} \cdot \text{h}$; 通过蓄热水箱提供给末端的总能量 $Q_{\text{tank},s}$, $\text{kW} \cdot \text{h}$; 总辅助加热量 Q_{aux} , $\text{kW} \cdot \text{h}$; 可以用式(8)~

(10)表示.

$$Q_{\text{solar}} = \sum q_{\text{solar}}(t) \quad (8)$$

$$Q_{\text{tank},s} = \sum q_{\text{tank},s}(t) \quad (9)$$

$$Q_{\text{aux}} = Q_{\text{load}} - Q_{\text{tank},s} = \sum q_{\text{aux}}(t) \quad (10)$$

依据前述数学关系指导建立该系统的动态仿真模型^[10], 如图2所示.

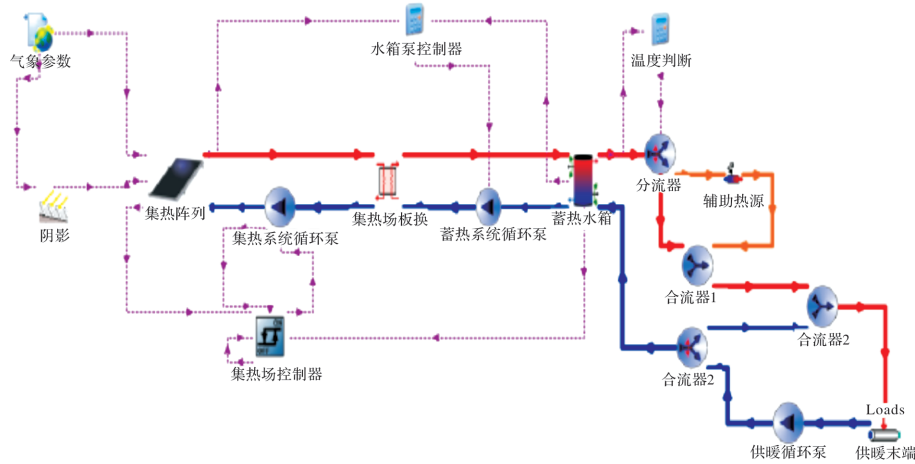


图2 太阳能供暖系统动态模型

Fig. 2 Dynamic model of solar heating system

2 系统节能性和经济性约束

太阳能具有不稳定的特点, 通常为了提高太阳能保证率, 往往需要增大系统设备容量, 初投资相应增大, 初投资高是阻碍太阳能供暖系统推广的主要原因之一. 因此, 合理的设计方法应能在保证系统节能性的前提下, 提高其经济性能.

2.1 经济性分析

采用均热成本 Levelized Cost of Heat(LCOH)对经济性进行评价, 根据多数地区太阳能系统施工实际情况, 不考虑政府补贴与土地租金, 系统生命周期内每产生 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 能量的成本由系统初投资, 运行和维护费用及系统总供暖量构成, 可以表示为^[5]

$$LCOH = \frac{E_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - \frac{RV}{(1+r)^T}}{\sum_{t=1}^T \frac{Q_t}{(1+r)^t}} \quad (11)$$

式中: E_0 为整个系统的初投资, CNY; C_t 为第 t 年运行与维护总费用, CNY; RV 为系统的剩余价值, CNY; Q_t 为系统第 t 年放热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; r 为折现率, %.

式(11)中, 太阳能供暖系统初投资 E_0 主要包括太阳能集热场、蓄热水箱、辅助热源三大部

分^[8]. 则 E_0 可以表示为

$$E_0 = E_{\text{coll}} + E_{\text{aux}} + E_v \quad (12)$$

式中: E_{coll} , E_{aux} 与 E_v 分别为集热场、辅助热源与蓄热水箱的初投资, CNY.

太阳能集热场初投资 E_{coll} 可以由集热器面积 $A_c(\text{m}^2)$ 来计算^[9].

$$E_{\text{coll}} = 500(1 - 1.652 \cdot 10^{-5} A_c + 2.26 \cdot 10^{-10} A_c^2 - 5.738 \cdot 10^{-16} A_c^3) \quad (13)$$

蓄热水箱初投资与其容积相关, 初投资可以表示为

$$E_v = p_v \cdot V_s \quad (14)$$

式中: V_s 为蓄热容量, m^3 ; p_v 为单位蓄热容积的价格, 一般^[5]取 $138 \text{ CNY}/\text{m}^3$.

辅助热源容量需满足供暖季最大热负荷, 因此辅助热源初投资 E_{aux} 可以表示为

$$E_{\text{aux}} = C \cdot p_c \quad (15)$$

式中: C 为辅助热源容量, kW ; p_c 为单位容量辅助热源的价格, CNY/kW .

系统的维护费用取初投资的 1%, 运行费用 c_r 可以表示为

$$c_r = \int_{t=0}^{t=t_{\text{aux}}} p_{\text{aux}} \cdot w_{\text{aux}} dt + \int_{t=0}^{t=t_p} p_p \cdot w_p dt \quad (16)$$

式中: p_{aux} 为辅助热源单位功率使用价格, CNY/kW ; w_{aux} 为辅助热源功率, kW ; p_p 为电价,

CNY/kW; w_p 为水泵运行功率, kW.

2.2 节能性分析

太阳能保证率是评价太阳能供暖系统设计优劣的重要指标, 表示由太阳能提供的热量占所需总热量的百分比, 可由公式(17)表示^[12].

$$F = \frac{Q_{\text{solar}}}{Q_{\text{load}}} = \frac{Q_{\text{coll}} - Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{load}}} = \frac{Q_{\text{coll}}}{Q_{\text{load}}} - \frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{load}}} \quad (17)$$

式中: Q_{solar} 为供暖期内系统总供热量, kW · h; Q_{load} 为供暖期内建筑总热负荷, kW · h; Q_{coll} 为供暖期内系统总集热量, kW · h; Q_{loss} 为供暖期内系统总热损失, kW · h.

从式(17)来看, 太阳能保证率大小主要与两个无量纲参数密切相关, 第一个是与太阳能供暖系统的增益有关, 第二个是与系统的热损失有关. 分别用 X 和 Y 代表, 即公式(18)和(19).

无量纲参数 X , 即系统热损失与建筑热负荷的比值.

$$X = Q_{\text{loss}} / Q_{\text{load}} \quad (18)$$

无量纲参数 Y , 即系统集热量与建筑热负荷的比值.

$$Y = Q_{\text{coll}} / Q_{\text{load}} \quad (19)$$

基于此, 下面针对无量纲参数 X 、 Y 及太阳能保证率 F 三者间的关系进行分析.

3 简化设计方法

3.1 回归分析

以拉萨地区为例, 随机选取多种建筑面积条件下的供暖热负荷(热负荷 1~6), 改变设备容量进行多次模拟, 将模拟结果进行无量纲化处理, 结果发现, 工况各不相同的太阳能供暖系统其无量纲参数 X 、 Y 与系统太阳能保证率 F 表现出良好的一致性, 结果如图 3 和 4 所示.

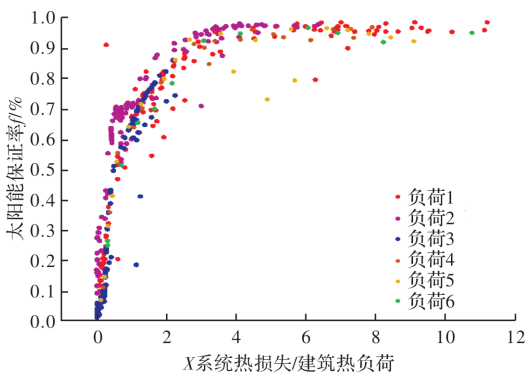


图 3 太阳能保证率 F 随无量纲参数 X 的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of solar guarantee rate F with dimensionless parameter X

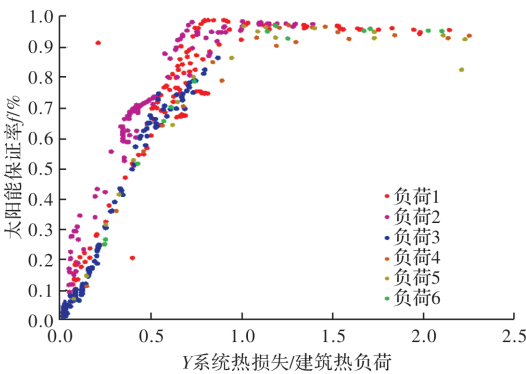


图 4 太阳能保证率 F 随无量纲参数 Y 的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of solar guarantee rate F with dimensionless parameter Y

图 3 表示, 对于同一地区, 太阳能保证率 F 与无量纲参数 X 、 Y 构成三维空间中的一条曲线, 采用回归分析的方法表示该曲线如式(20)所示.

$$F = \frac{P_1 + P_2 \cdot X + P_3 \cdot X^2 + P_4 \cdot Y + P_5 \cdot Y^2 + P_6 \cdot Y^3}{1 + P_7 \cdot X + P_8 \cdot X^2 + P_9 \cdot Y + P_{10} \cdot Y^2 + P_{11} \cdot Y^3} \quad (20)$$

式中: X 为系统热损失与热负荷的比值; Y 为系统集热量与热负荷的比值; P 为回归系数, 如表 3 所示.

表 3 典型城市参数回归系数

Tab. 3 Regional parameter regression coefficient

地点	回归系数										
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
拉萨	0.032	0.825	0.020	-0.173	-0.081	0.035	0.487	0.057	0.047	-0.488	0.033
西宁	-0.066	-0.504	0.000	3.563	-5.964	4.651	-0.459	0.000	0.545	-1.073	2.766
西安	-0.209	3.601	-1.534	-6.055	-14.616	60.599	3.112	-2.107	-9.18	3.791	56.92

以相关系数 R^2 来评价回归模型, 评价指标为式(21)^[13].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{mm} (V_{pre,i} - \bar{V}_{true})^2}{\sum_{i=1}^{mm} (V_{true,i} - \bar{V}_{true})^2} \quad (21)$$

式中: $V_{true,i}$ 为动态模拟得到的太阳能保证率值; $V_{pre,i}$ 为该设计方法计算得到的太阳能保证率值; $\bar{V}_{true,i}$ 为动态模拟得到的太阳能保证率平均值.

针对太阳能资源不同区域, 以拉萨、西宁、

西安为例^[9],对回归方程进行评价,如表4所示。表中各地区回归模型 R^2 为0.95~0.97之间,表明所选变量集热器面积、蓄热水箱与太阳能保证率相关性较好。

表4 典型地区回归方程决定系数

Tab. 4 Each region regression equation determines the coefficient

地点	R^2
拉萨	0.957 8
西宁	0.970 1
西安	0.954 0

3.2 计算值和模拟值对比

对于供暖期动态室外气象条件,为方便工程计算,采用平均参数法来近似替代动态模拟结果。以下对平均参数法与动态模拟法的所得结果一致性进行了证明。

太阳能供暖系统集热量可用式(22)进行计算。

$$Q_{\text{collection}} = a \cdot A \cdot G \cdot \eta_0 \cdot \tau \quad (22)$$

式中: $Q_{\text{collection}}$ 为计算得到的供暖期系统集热量,kWh; a 为单个太阳能集热器有效集热面积与总面积的比值; G 为水平面12月的月平均时刻辐照量, kW/m^2 ; η_0 为集热器的效率参数; τ 为供暖时长,h。

太阳能供暖系统的热损失 Q_{loss} 主要由集热系统热损失 Q_{loss1} 、蓄热系统热损失 Q_{loss2} 和管网热损失 Q_{loss3} 三部分的热损失组成。

集热系统热损失为

$$Q_{\text{loss1}} = \frac{A \cdot F_R \cdot U_L \cdot (T_{\text{ref}} - T_a)}{1\,000} \cdot \tau \quad (23)$$

蓄热系统热损失为

$$Q_{\text{loss2}} = U_{\text{tank}} \cdot A_S \cdot (T_s - T_a) \cdot \tau \quad (24)$$

$$A_S = 1.845 \cdot (2 + h/d) \cdot V^{2/3} \quad (25)$$

管网热损失为

$$Q_{\text{loss3}} = m \cdot Q_{\text{collection}} \quad (26)$$

式中: Q_{loss1} 为集热系统总热损失, $\text{kW} \cdot \text{h}$; F_R 为集热器换热器效率系数; U_L 为集热器热损失系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$; T_{ref} 为供暖期内集热器内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; U_{tank} 为蓄热水箱热损失系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$; T_a 为计算采暖期室外平均温度, $^{\circ}\text{C}$; Q_{loss2} 为蓄热系统总热损失, $\text{kW} \cdot \text{h}$; A_S 为蓄热水箱的表面积, m^2 ; h/d 为蓄热水箱的高径比; V 为蓄热水箱容积, m^3 ; Q_{loss3} 为管网总热损失, $\text{kW} \cdot \text{h}$; m 为管网热损失率,取0.2^[2]。

将回归值与模拟值进行对比,如图5、6所示。并求两者平均值,系统集热比均值为0.856,系统热损失比均值在1.246,因此,可采用平均参数计算的方法近似替代动态系统模拟输出的系统性能参数。

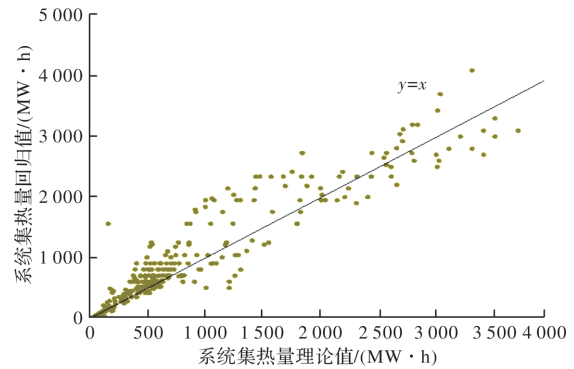


图5 系统集热量偏差对比

Fig. 5 Comparison of system heat collection deviation

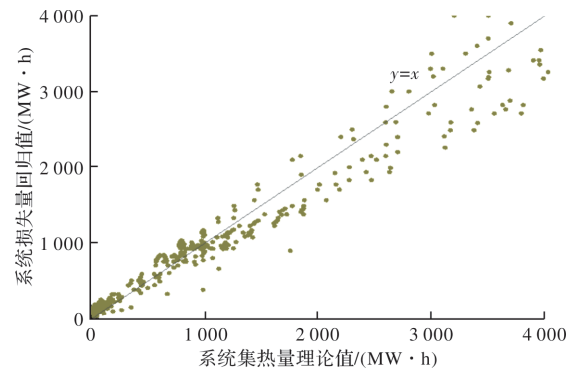


图6 系统热损失量偏差对比

Fig. 6 Comparison of system heat loss deviation

3.3 设计参数推荐范围

上述公式(20)是关于太阳能保证率 F 与集热面积 A_c 和蓄热容积 V_s 构成的是二元隐式方程式,需转化为一元方程后方可求解。因此,引入集蓄热比 V_s/A_c ,可将上述方程式转化为仅含有集热面积 A_c 作为未知数的一元方程进行求解^[2,12]。以下将给出典型城市集蓄热比 V_s/A_c 和基于经济性的太阳能保证率 F 的推荐范围。

3.3.1 太阳能保证率 F 推荐范围

以拉萨地区为例,依据前述建筑热负荷1~4,计算出不同设计太阳能保证率下的系统均热成本 $LCOH$,如图7所示。

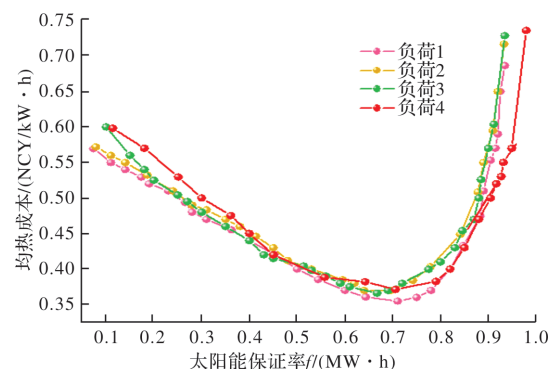


图7 均热成本 $LCOH$ 随太阳能保证率变化情况

Fig. 7 Variation of soaking cost $LCOH$ with solar guarantee rate

从图 7 中可看出, 对于同一系统, 太阳能保证率在 60%~80% 的时候, 系统的均热成本最低, 这是因为太阳能供暖系统具有初投资高运行费用低的特点, 当太阳能保证率低于 60%(f_1), 太阳能供暖带来的节能效果小于初投资所占的费用; 而当太阳能保证率大于 80%(f_2) 时, 由于极端天气的存在, 增加太阳能保证率就意味着增大设备容量即更高的初投资, 因此, 在拉萨地区太阳能供暖系统设计过程中, 太阳能保证率选择 60%~80% 更经济。

采用同样的方法, 可得各个太阳能资源不同地区典型城市的太阳能供暖系统设计推荐值如表 5 所示。

表 5 典型城市太阳能供暖系统设计参数

Tab. 5 Recommended range of solar heating system design parameters in major cities

地点	太阳能保证率 $F/\%$	集蓄热比 V_s/A_c
拉萨	60~80	0.15~0.25
西宁	50~70	0.12~0.20
西安	40~60	0.1~0.15

3.3.2 集蓄热比值 V_s/A_c 推荐范围

对模拟结果分析发现, 不同集蓄热容量组合可实现相同的太阳能保证率, 对比它们的均热成本如图 8 所示。

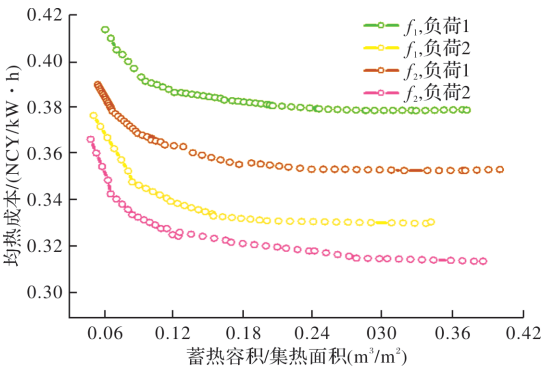


图 8 均热成本 F 随集蓄热比值变化情况

Fig. 8 Variation of soaking cost F with heat storage ratio

可以看出, 随着 V_s/A_c 的增加, 不同工况下的太阳能供暖系统均热成本 $LCOH$ 都呈现先剧烈后缓慢的减小趋势。该变化过程可分为三个阶段, 首先, 集蓄热比值很小时, 系统几乎不蓄热, 为达到供暖要求需增大集热面积, 系统均热成本较高; 紧接着, 随着集蓄热比值增加, 集热面积可适当减小, 系统均热成本明显降低; 最后, 因为太阳能保证率一定时, 集热面积的取值范围也一定, 再增大集蓄热比值, 即增大蓄热容积, 其初投资增加对系统均热成本影响较小, 故而均热成

本呈现平缓趋势。综合考虑经济与节能性, 在拉萨地区太阳能供暖系统的设计过程中, 推荐 V_s/A_c 的比值为 0.15~0.25。

采用同样的方法, 可得各个太阳能资源不同地区典型城市的太阳能供暖系统设计推荐值如表 5 所示。

3.4 与现有规范设计方法对比分析

现采用本研究的集蓄热简化设计方法与规范设计方法对比分析太阳能保证率和系统经济性。选择拉萨市某办公建筑(建筑面积 3 700 m², 采暖期 11.15~3.15)为分析对象。

分别采用规范推荐方法(先计算集热面积再确定蓄热容积, 用 M 表示)及本设计方法(解方程同时获得集、蓄热设备参数, 用 N 表示)得到该系统的集蓄热设备参数, 比较两者实际太阳能保证率 F 和均热成本 $LCOH$ 的大小, 如图 9 所示。

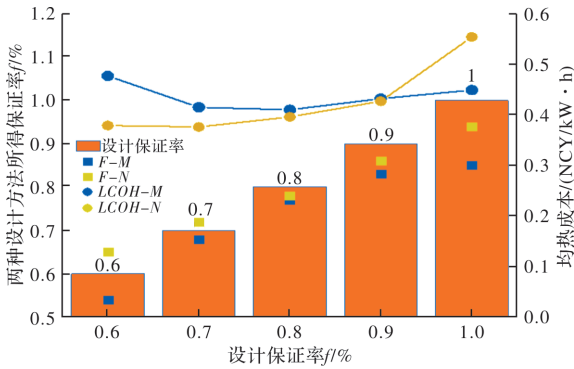


图 9 实际保证率 F 与均热成本 $LCOH$ 对比图

Fig. 9 Comparison of actual guarantee rate F and soaking cost $LCOH$

从图 9 中可以看出, 规范方法得到的太阳能保证率偏差范围在 3%~14%, 且设计保证率越高, 太阳能供暖系统的实际保证率与设计保证率偏差越大; 而采用本设计方法得到的太阳能保证率偏差范围在 2%~8%, 与规范设计方法得到的太阳能保证率偏差相比波动范围更小, 同时所对应的 $LCOH$ 普遍低于规范方法。因为相较于现有规范提出的先计算集热器面积再根据推荐范围确定蓄热容积, 本研究提出的设计方法考虑到了集蓄热系统间协同作用对于太阳能保证率和系统经济性的影响, 设计方法中包含参数更加全面, 推荐值范围更加明确。

4 结论

通过仿真软件 TRNSYS 编制了太阳能供暖系统动态模型, 基于大量的模拟结果, 归纳总结出了太阳能供暖系统集热量、系统热损失、建筑热

负荷和太阳能保证率间的内在联系,并进一步分析了系统设备容量与系统经济性和节能性的关系,得到结论如下:

(1)本研究提出无量纲参数 X 表示系统热损失与建筑热负荷之间的关系,无量纲参数 Y 表示系统集热量与建筑热负荷之间的关系,通过回归分析的方式建立无量纲参数 X 、 Y 和太阳能保证率 F 间的数学关系,确定了太阳能供暖系统在不同工况下都具有的共同特性,为简化设计方法的提出奠定了理论基础;

(2)以太阳能保证率 F 作为评价系统节能性的主要指标,以太阳能供暖系统全生命周期内的均热成本作为评价系统经济性的主要指标,基于大量的模拟结果,给出了不同太阳能资源地区的参数推荐范围,在此推荐范围内,可通过计算得到最佳系统设备参数(集热面积和蓄热容量),使得系统均热成本最小;

(3)本研究给出了太阳能集热面积和蓄热容积更为明确的配比范围,提出了太阳能集热面积和蓄热容积两部分的简化配比设计方法,为太阳能供暖系统工程设计应用提供指导作用。

参考文献 References

- [1] 梁俊强. 中国太阳能建筑应用行业现状与趋势[J]. 建筑节能, 2013, 41(4): 34-36.
LIANG Junqiang. Current situation and trend of solar building application industry in China[J]. Building Energy Conservation, 2013, 41(4): 34-36.
- [2] 郑瑞澄, 路宾, 李忠. 太阳能供热采暖工程应用技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
ZHENG Ruicheng, LU Bin, LI Zhong. Solar heating engineering application technical manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 带辅助能源的家用太阳能热水系统热性能试验方法: GB/T 25967-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Thermal performance test method for household solar hot water system with auxiliary energy: GB/T 25967-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [4] SHUKLA S. N., TIWARI G. N. Transient analysis of forced circulation solar water heating system with collectors in series. Energy
- [5] LOUVET Y. LCOH for solar thermal applications [C]//LCOH for solar thermal applications conventional reference system, 2017. [OL]. Available: <http://task54.8ea-shc.org/> [Accessed: September-2020].
- [6] KLEIN S A, BECKMAN W A, DUFFLE J A. A design procedure for solar heating systems[J]. Solar Energy, 1976, 18(2): 113-127.
- [7] GUO Fang, ZHANG Junyue, SHAN Ming, et al. Analysis on the optimum matching of collector and storage size of solar water heating systems in building space heating applications [J]. Building Simulation, 2018, 11: 549-560.
- [8] WARD J C. Minimum cost sizing of solar heating systems [C]//International Solar Energy Society Conference. Manitoba: Wileg, 1976, 4: 336.
- [9] ZHANG Ruichao, WANG Dengjia, LIU Yanfeng, et al. Economic optimization of auxiliary heat source for centralized solar district heating system in Tibetan Plateau, China [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114385.
- [10] 张鹤飞, 俞金娣. 太阳能系统瞬态模拟程序 TRNSYS 的设计特点和算例 [J]. 太阳能学报, 1987, 8(4): 212-216.
ZHANG Hefei, YU Jindi. Design features and examples of TRNSYS for transient simulation of solar energy system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1987, 8(4): 212-216.
- [11] KLEIN S A, BECKMAN W A, DUFFLE J A. A design procedure for solar heating systems [J]. Solar Energy, 1976, 18: 113-127.
- [12] 王岳人, 毛宏迪, 宋延丽. 主动式太阳能供暖系统保证率定量分析 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2013, 29(6): 1078-1084.
WANG Yueren, MAO Hongdi, SONG Yanli. Quantitative analysis of guarantee rate of active solar heating system [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2013, 29(6): 1078-1084.
- [13] 潘明众, 刘艳峰, 周勇. 集热蓄热墙式被动构件向房间传热量的简化计算方式 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(4): 594-601.
PAN Mingzhong, LIU Yanfeng, ZHOU Yong. A simplified calculation method of heat transfer to room by passive component of heat collecting and regenerative wall [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., (Natural Science Edition) 2020, 52(4): 594-601.

(编辑 吴海西 沈 波)