

# 生物质能-太阳能互补供热系统优化设计

王泽龙<sup>1,2</sup>, 田宜水<sup>1\*</sup>, 赵立欣<sup>1</sup>, 孟海波<sup>1</sup>, 侯书林<sup>2</sup>

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了提高生物质能-太阳能互补供热系统的经济效益, 该文从经济性角度对系统的主要参数进行优化设计, 提出了一种生物质能-太阳能互补供热系统设计方案, 建立了系统的经济分析模型, 并采用线性规划的方法进行优化, 并以北京地区一供热面积为 200 m<sup>2</sup> 的办公楼为例进行了优化。结果表明, 建立的经济分析模型可用, 其中, 太阳能集热器的价格、生物质颗粒燃料的价格、蓄热水箱的价格、生物质颗粒燃烧器的价格对系统中各部分参数的优化结果有影响, 且影响程度依次降低。这可为今后生物质能-太阳能互补供热系统的设计提供参考。

**关键词:** 生物质, 太阳能, 优化, 设计, 颗粒燃料, 供热, 互补系统

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.19.024

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-19-0178-07

王泽龙, 田宜水, 赵立欣, 等. 生物质能-太阳能互补供热系统优化设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 178-184.

Wang Zelong, Tan Yishui, Zhao Lixin, et al. Optimal design of biomass-solar complementary heating system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 178-184. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

生物质固体成型燃料, 是指在一定温度和压力作用下, 利用木质素充当粘合剂将松散的秸秆、树枝和木屑等农林生物质压缩成棒状、块状或颗粒状等成型燃料。生物质颗粒燃料能量密度与中质烟煤相当; 燃烧时 CO<sub>2</sub> 零排放, NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 等的排放量远小于煤; 燃烧特性明显得到改善, 提高了利用效率<sup>[1-2]</sup>。

由农业部规划设计研究院开发的生物质颗粒燃烧器以流动性高, 质地均匀的生物质颗粒为燃料, 可以实现连续自动运行, 燃烧效率通常能达到 86% 以上<sup>[3]</sup>。但在使用过程中还存在着点火时间较长, 且点火过程中 CO 排放量大<sup>[4]</sup>; 在低功率运行时, 效率较低, 不宜频繁启动。

太阳能作为清洁能源, 在采暖供热方面面临主要问题是其具有不连续性, 在阴天或者晚上无法工作<sup>[5-8]</sup>。为了实现连续供热, 需要扩大集热器的集热面积和设计较大的热量存储装置, 导致了供热系统

初投资增加。在大规模的供热系统中尚可, 对小规模用户则难以接受。

生物质能-太阳能互补供热系统是指利用生物质颗粒燃烧器和太阳能集热器联合组成一个供热系统, 为建筑物提供冬季采暖和全年生活热水所需要的热量。该系统充分利用了生物质能和太阳能各自的优势, 在阳光充足的时候, 太阳能提供热量, 生物质颗粒燃烧器可以少运行或者不运行, 降低了运行成本, 延长燃烧器的使用寿命; 在无太阳光的时候, 生物质颗粒燃烧器全功率运行, 无需设计较大的热量存储装置和增加太阳能集热器的面积, 降低了初投资。

目前, Frank Fiedler 系统研究了不同连接方式的供热性能, 污染物排放特性等<sup>[9-12]</sup>。国内对生物质能-太阳能互补供热系统的研究则较少, 尤其是对系统中各部分设计参数的优化研究。

本文拟通过建立生物质能-太阳能互补供热系统的经济分析模型, 并利用线性规划的优化方法, 对该系统进行优化, 并应用于典型实例, 为生物质能-太阳能互补供热系统的设计提供参考。

## 1 生物质能-太阳能互补供热系统设计

生物质能-太阳能互补供热系统的设计要满足以下 5 个要求<sup>[13-15]</sup>: 可在采暖季安全稳定高效的运行, 稳定地为建筑物提供采暖所需热负荷; 保证基本生活用热水的水量和水质; 提高太阳能的热利用效率; 降低初投资和运行成本; 使系统的结构简单

收稿日期: 2011-11-11 修订日期: 2012-05-17

基金项目: 科技部国际科技合作项目 (2011DFAG0600)

作者简介: 王泽龙 (1987-), 男, 山东人, 主要研究方向为生物质能源利用技术。北京 中国农业大学工学院, 100083。

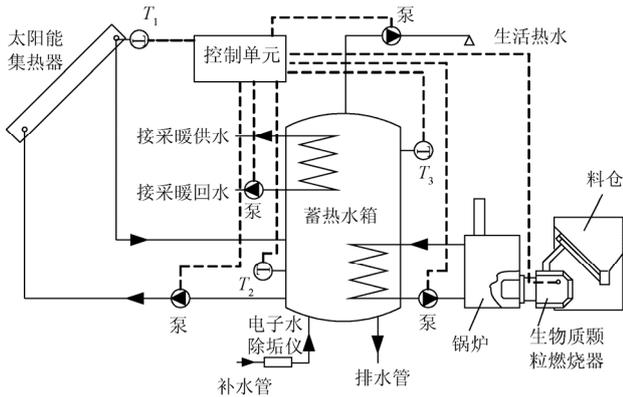
Email: wanglcu2008@126.com

\*通信作者: 田宜水 (1972-), 男, 辽宁人, 高级工程师, 主要从事节能, 可再生能源技术和设备的研究、开发与推广, 以及能源政策的研究等工作。北京 农业部规划设计研究院, 100125。

Email: yishuit@yahoo.com

紧凑。基于以上设计要求，以及从建立系统的成本、难易程度以及供热性能来分析<sup>[16-18]</sup>，提出如图 1 所示的方案。该方案具有控制简单，成本低等优点，较适合目前的中小用户需要。

该方案中，蓄热水箱是连接太阳能集热器、生物质颗粒燃烧器和供热采暖的唯一媒介。供热设备先通过换热器和蓄热水箱中的水进行热量交换，然后再通过换热装置将热量传递给供热终端。生活用热水直接来自蓄热设备，不参与供热循环，水质和水量都可以得到保证。



注：T<sub>1</sub> 为太阳能集热器出水口温度，℃；T<sub>2</sub> 为水箱底部温度，℃；T<sub>3</sub> 为蓄热水箱上部的温度传感器测得的温度，℃；虚线表示控制信号。

图 1 生物质能-太阳能互补供热系统流程图

Fig.1 Biomass energy-solar complementary heating system flow chart

图 1 所示的方案中系统的各装置在控制单元的控制协调下，自动运行。生物质颗粒燃烧器是全功率间歇运行，其控制的方式是温差控制，即当蓄热水箱上部的温度传感器测得的温度 T<sub>3</sub> 大于设定的温度时，燃烧器停止运行；当温度 T<sub>3</sub> 小于设定的温度时，燃烧器开始运行。太阳能集热器的运行方式也是温差控制循环，即当太阳能集热器出水口温度 T<sub>1</sub> 和水箱底部温度 T<sub>2</sub> 的温差超过 7℃ 时，太阳能集热器循环水泵开始循环；当 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 的温差小于 3℃ 时，太阳能循环水泵停止循环。

该系统的运行状态有 3 种情况：当日照条件好，且建筑物热量需求小时，太阳能集热器单独运行，并将多余的热量储存在蓄热水箱中；当日照条件较差时，太阳能集热器单独运行将不能满足供热要求，此时生物质颗粒燃烧器启动，并全功率运行，和太阳能集热器同时进行供热；当在晚上或者阴天时，太阳能集热器不能工作，生物质颗粒燃烧器单独运行。

## 2 系统模型的建立及优化

针对某建筑面积为 A 的建筑物建立生物质能-

太阳能互补供热系统的模型，并对该系统中的主要装置的参数进行优化设计。

### 2.1 系统模型建立

#### 2.1.1 生物质颗粒燃烧器功率计算

建筑物在采暖期最不利工况下的最大耗热功率为

$$Q_m = Q_{hi} \cdot A \quad (1)$$

式中，Q<sub>m</sub> 为最大耗热功率，W；Q<sub>hi</sub> 为采暖热指标，W/m<sup>2</sup>。A 为建筑物的建筑面积，m<sup>2</sup>。

生物质颗粒燃烧器的功率要在太阳能集热器不工作的情况下，其提供的热量经过生物质锅炉、蓄热水箱后输出的最终热量能满足建筑物在供暖季的最大耗热量，其关系如下式

$$P_{burner} \cdot \eta_3 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 = Q_m \quad (2)$$

式中，P<sub>burner</sub> 为生物质颗粒燃烧器的功率，W；η<sub>3</sub> 为锅炉热效率；η<sub>5</sub> 为生物质锅炉用盘管换热器的换热效率；η<sub>6</sub> 为采暖用盘管换热器的换热效率。

由 (1) (2) 式得生物质颗粒燃烧器的功率：

$$P_{burner} = \frac{Q_{hi} \cdot A}{\eta_3 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} \quad (3)$$

#### 2.1.2 蓄热水箱容积计算

在生物质能-太阳能互补供热系统中，蓄热水箱作为连接供暖终端和太阳能集热器、生物质锅炉的媒介，起到短期蓄热，调节供热质量的作用。

蓄热水箱在蓄热温差为 ΔT 时的最大蓄热量为

$$Q_t = \rho_w \cdot V_{tank} \cdot C_w \cdot \Delta T \quad (4)$$

式中，Q<sub>t</sub> 为蓄热水箱最大蓄热量，J；ρ<sub>w</sub> 为水的密度，kg/m<sup>3</sup>；V<sub>tank</sub> 为蓄热水箱容积，m<sup>3</sup>；C<sub>w</sub> 为水的比热容，J/(kg·℃)；ΔT 为蓄热温差，℃。

在本系统中，生物质颗粒燃烧器采用的是间歇运行方式，建筑物在生物质颗粒燃烧器停止运行的时间 t<sub>1</sub> 内消耗的热量为

$$Q_a = Q_{ch} \cdot A \cdot t_1 \cdot 3600 \quad (5)$$

式中，Q<sub>a</sub> 为生物质颗粒燃烧器停止运行的时间 t<sub>1</sub> 内消耗的热量，J；Q<sub>ch</sub> 为建筑物耗热量，W/m<sup>2</sup>；t<sub>1</sub> 为生物质颗粒燃烧器设计的最短停止运行时间，h。

建筑物在生物质颗粒燃烧器停止运行的时间 t<sub>1</sub> 内消耗的热量由蓄热水箱来提供，有

$$Q_a = Q_t \cdot \eta_6 \quad (6)$$

由式 (4) (5) (6) 式得蓄热水箱的容积为

$$V_{tank} = \frac{Q_{ch} \cdot A \cdot t_1 \cdot 3600}{C_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T \cdot \eta_6} \quad (7)$$

#### 2.1.3 太阳能集热器面积计算

太阳能集热器面积的增加，可以减少生物质颗粒燃烧器的运行时间，降低运行成本。但是增加太阳能集热器面积的同时，也增加了初投资。实现经

经济效益的最大化,是确定太阳能集热器面积的一个标准。接下来通过优化来确定太阳能集热器的面积。

#### 2.1.4 循环水泵计算

循环水泵包括太阳能集热器循环水泵和生物质锅炉循环水泵。循环水泵主要计算2个参数:流量、功率<sup>[19-20]</sup>。

太阳能循环水泵:

太阳能集热器循环水泵的流量按太阳能输出的最大功率计算,其计算式如下

$$q_{m1} = \frac{P_{\text{solar}}}{C_w \cdot (T_{s1} - T_{r1})} \quad (8)$$

式中,  $q_{m1}$  为太阳能集热器循环水泵的流量, kg/s;  $P_{\text{solar}}$  为太阳能输出的最大功率, W;  $T_{s1}$  为太阳能集热器出水口温度, °C;  $T_{r1}$  为太阳能集热器进水口温度, °C。

太阳能集热器循环水泵的功率计算式如下

$$P_1 = q_{m1} \cdot g \cdot H_1 \cdot \eta_4^{-1} \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

式中,  $P_1$  为太阳能集热器循环水泵的功率, kW;  $H_1$  为太阳能集热器循环水泵的扬程, m;  $g$  为重力加速度, 取 9.8 N/kg;  $\eta_4$  为循环水泵的效率。

生物质锅炉循环水泵:

生物质锅炉循环水泵的流量计算式如下

$$q_{m2} = \frac{P_{\text{burner}} \cdot \eta_3}{C_w \cdot (T_{s2} - T_{r2})} \quad (10)$$

式中,  $q_{m2}$  为生物质锅炉循环水泵的流量, kg/s;  $T_{s2}$  为生物质锅炉出水口温度, °C;  $T_{r2}$  为生物质锅炉进水口温度, °C。

生物质锅炉循环水泵的功率计算式如下

$$P_2 = q_{m2} \cdot g \cdot H_2 \cdot \eta_4^{-1} \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

式中,  $P_2$  为生物质锅炉循环水泵的功率, kW;  $H_2$  为生物质锅炉循环水泵的扬程, m。

## 2.2 系统优化

在生物质能-太阳能互补供热系统中,太阳能集热器面积的增加可以减少生物质颗粒的使用,降低运行成本,但是会导致蓄热水箱的容积增加,因此会增加系统的初投资。生物质颗粒燃烧器功率的增大,可以减少其运行时间,延长其使用寿命,但是初投资增加。因此该系统在初投资和运行成本之间存在矛盾。本文通过建立系统的经济优化模型,对系统中主要装置的参数进行优化设计。

### 2.2.1 目标函数

目标函数是根据特定目标建立起来的,以设计变量为自变量,一个可计算的函数,它是设计方案评价的标准。优化设计的过程实际上是寻求目标函数最小值或最大值的过程。本文将生物质能-太阳能

互补供热系统一年的运行成本和将初投资平均分配到使用寿命的每一年的费用相加作为线性规划的目标函数  $F_{\text{min}}$ , 目标函数取最小值时得到的参数就是系统的最优设计参数。目标函数式如下

$$F_{\text{min}} = \frac{F_{\text{invest}}}{n} + F_{\text{operation}} \quad (12)$$

式中,  $F_{\text{invest}}$  为系统的初投资, 元;  $F_{\text{operation}}$  为系统的运行成本, 元;  $n$  为系统的使用年限。

其中,系统的初投资包括生物质颗粒燃烧器及配套锅炉、太阳能集热器、蓄热水箱、循环水泵、以及其他管道仪表等,其计算式如下

$$F_{\text{invest}} = P_{\text{burner}} \cdot \frac{N_b}{1000} + S_{\text{solar}} \cdot N_s + V_{\text{tank}} \cdot N_t + I_{\text{else}} \quad (13)$$

式中,  $N_b$  为生物质颗粒燃烧器的价格, 元/kW;  $S_{\text{solar}}$  为太阳能集热器的面积,  $\text{m}^2$ ;  $N_s$  为太阳能集热器的价格, 元/ $\text{m}^2$ ;  $N_t$  为蓄热水箱的价格, 元/ $\text{m}^3$ ;  $I_{\text{else}}$  为水泵等附件的投资, 元。

系统的运行成本包括燃烧生物质颗粒燃料的费用,系统的水泵、风机等的用电费用,人工费,系统的维护费用等。其中生物质颗粒燃料费用每月差别较大,需按月计算,其他费用按年计算。计算如式(14)

$$F_{\text{operation}} = \sum_{i=1}^{12} F_i + F_{\text{power}} + F_{\text{labor}} + F_{\text{main}} \quad (14)$$

式中,  $F_{\text{power}}$  为燃烧动力费, 元;  $F_{\text{labor}}$  为人工费, 元;  $F_{\text{main}}$  为系统的维护费用, 元。

$i$  月的生物质颗粒燃料的费用  $F_i$ , 当  $F_i < 0$  时取 0, 计算如式(15)

$$F_i = \frac{Q_i - E_i \cdot S_{\text{solar}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N_p}{q_{\text{pellet}} \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} \cdot N_p \quad (15)$$

式中,  $Q_i$  为  $i$  月份的建筑所需热量, J;  $E_i$  为  $i$  月份倾斜表面月平均日太阳辐射量, J/( $\text{m}^2 \cdot \text{d}$ );  $\eta_1$  为太阳能集热器的集热效率;  $\eta_2$  为生物质颗粒燃烧器的燃烧效率;  $\eta_3$  为生物质颗粒燃烧器的燃烧效率;  $\eta_5$  为生物质颗粒燃料的热值, J/kg;  $N_p$  为生物质颗粒燃料的价格, 元/kg。

由式(12)~(15)得到目标函数式如下

$$F_{\text{min}} = \frac{P_{\text{burner}} \cdot N_b + S_{\text{solar}} \cdot N_s + V_{\text{tank}} \cdot N_t + I_{\text{else}}}{n} + \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i - E_i \cdot S_{\text{solar}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N_p}{q_{\text{pellet}} \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} + F_{\text{power}} + F_{\text{labor}} + F_{\text{main}} \quad (16)$$

### 2.2.2 约束条件

1) 生物质颗粒燃烧器的功率满足的条件是在太阳能集热器不运行的条件下要满足建筑物在采暖期的最大耗热量, 即

$$P_{\text{burner}} \geq \frac{Q_{\text{hi}} \cdot A}{\eta_3 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} \quad (17)$$

2) 生物质锅炉间歇运行, 生物质锅炉在间歇运行的一个周期内运行的时间由生物质颗粒燃烧器的功率、太阳能集热器的面积、蓄热水箱的容积共同决定的。如果在一个周期内生物质颗粒燃烧器运行的时间过短, 说明生物质颗粒燃烧器的功率过大或者蓄热水箱的容积过小。如果生物质颗粒燃烧器的功率过大, 成本增加; 如果蓄热水箱的容积过小, 则蓄热量小, 导致燃烧器频繁启动。所以用下式对其进行约束, 即在太阳能集热器和燃烧器共同运行的条件下, 燃烧器的运行时间不能过小

$$\frac{C_w \cdot \rho_w \cdot V_{\text{tank}} \cdot \Delta T}{(P_{\text{burner}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_5 + \frac{E \cdot S_{\text{solar}} \cdot \eta_1 - Q_{\text{ch}} \cdot A}{3600 \cdot t_s}) \cdot 3600} \geq t_2 \quad (18)$$

式中,  $t_2$  为生物质颗粒燃烧器设计的最短运行时间, h;  $t_s$  为供暖期的平均日照时间, h。

3) 生物质锅炉间歇运行中一个周期的停止运行时间不能过短, 如果停止运行的时间过短则不符合燃烧器的工作特性。在一个周期中停止运行的时间是由蓄热水箱的容积, 太阳能集热器的面积来决定的, 其约束如下

$$\frac{C_w \cdot \rho_w \cdot V_{\text{tank}} \cdot \Delta T}{\frac{Q_{\text{ch}} \cdot A}{\eta_6} \cdot 3600} \geq t_1 \quad (19)$$

4) 在该系统中以生物质颗粒燃烧器为主要热源, 因此限制太阳能的保证率小于 50%。

$$E \cdot S_{\text{solar}} \cdot \eta_1 \leq Q_{\text{ch}} \cdot A \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 0.5 \quad (20)$$

式中,  $E$  为供暖季太阳能倾斜表面月平均日太阳总辐照量,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

### 2.2.3 优化模型

根据以上分析, 整理目标函数和约束条件如下式。

目标函数:

$$F_{\text{min}} = \frac{P_{\text{burner}} \cdot N_b + S_{\text{solar}} \cdot N_s + V_{\text{tank}} \cdot N_t + I_{\text{else}}}{n} + \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i - E_i \cdot S_{\text{solar}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_i}{q_{\text{pellet}} \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} \cdot N_p + F_{\text{power}} + F_{\text{labor}} + F_{\text{main}} \quad (21)$$

约束条件:

$$\begin{cases} P_{\text{burner}} \geq \frac{Q_{\text{hi}} \cdot A}{\eta_3 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} \\ \frac{C_w \cdot \rho_w \cdot V_{\text{tank}} \cdot \Delta T}{\left( P_{\text{burner}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_5 + \frac{E \cdot S_{\text{solar}} \cdot \eta_1 - Q_{\text{ch}} \cdot A}{3600 \cdot t_s} \right) \cdot 3600} \geq t_2 \\ \frac{C_w \cdot \rho_w \cdot V_{\text{tank}} \cdot \Delta T}{\frac{Q_{\text{ch}} \cdot A}{\eta_6} \cdot 3600} \geq t_1 \\ E \cdot S_{\text{solar}} \cdot \eta_1 \leq 43200 \cdot Q_{\text{ch}} \cdot A \end{cases} \quad (22)$$

## 3 示范工程计算与分析

为了验证优化模型是否正确, 针对目前北京的气候条件, 对供热面积为  $200 \text{ m}^2$  的某办公用楼的生物质能-太阳能互补供热系统主要装置的设计参数进行了优化计算。具体的参数如表 1 所示。

表 1 北京某建筑物优化参数  
Table 1 Optimization parameters of the Beijing building

参数	符号	数值	数据来源	参数	符号	数值	数据来源
供暖期建筑物耗热量	$Q_{\text{ch}}$	$20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	文献[21]	太阳能集热器的集热效率	$\eta_1$	0.5	文献[22]
采暖热指标	$Q_{\text{hi}}$	$50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	文献[21]	生物质颗粒燃烧器的燃烧效率	$\eta_2$	0.9	市场调研
供暖季太阳能倾斜表面月平均日太阳总辐照量	$E$	15 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	文献[22]	生物质锅炉用盘管换热器的换热效率	$\eta_5$	0.9	市场调研
蓄热水箱蓄热温差	$\Delta T$	$15^\circ\text{C}$	文献[21]	循环水泵的效率	$\eta_4$	0.9	文献[22]
燃烧器设计最短停止时间	$t_1$	0.5h	市场调研	锅炉热效率	$\eta_3$	0.8	市场调研
燃烧器设计最短运行时间	$t_2$	0.5h	市场调研	采暖用盘管换热器的换热效率	$\eta_6$	0.9	市场调研
生物质颗粒燃料的热值	$q_{\text{pellet}}$	$17 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	市场调研	水的比热容	$C_w$	4.2 $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	文献[22]
生物质颗粒燃烧器的价格	$N_b$	$150 \text{ 元} \cdot \text{kW}^{-1}$	市场调研	水的密度	$\rho_w$	$1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	文献[22]
生物质颗粒燃料的价格	$N_p$	$500 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$	市场调研	人工费	$F_{\text{labor}}$	$2000 \text{ 元} \cdot \text{a}^{-1}$	市场调研
太阳能集热器的价格	$N_s$	$1000 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$	市场调研	系统的维护费用	$F_{\text{main}}$	$500 \text{ 元} \cdot \text{a}^{-1}$	市场调研
蓄热水箱的价格	$N_t$	$450 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$	市场调研	燃烧动力费	$F_{\text{power}}$	$200 \text{ 元} \cdot \text{a}^{-1}$	市场调研
系统的使用年限	$n$	10 a	市场调研	水泵等附件投资	$I_{\text{else}}$	5000 元	市场调研

### 3.1 计算

将表 2 中的数据代入优化模型式 (21)、(22) 中, 得到的目标函数以及约束条件如下

目标函数:

$$F_{\text{min}} = 0.15P_{\text{buener}} + 84.12S_{\text{solar}} + 45V_{\text{tank}} + 4454.9 \quad (23)$$

约束条件:

$$\begin{cases} P_{\text{burner}} \geq 15432\text{W} \\ 0.72P_{\text{burner}} + 320.51S_{\text{solar}} - 35000V_{\text{tank}} \leq 4444.4 \\ V_{\text{tank}} \geq 0.1269\text{m}^3 \\ S_{\text{solar}} \leq 23.04\text{m}^2 \end{cases} \quad (24)$$

### 3.2 结果分析

通过计算得知,当生物质能-太阳能互补供热系统中生物质颗粒燃烧器的功率为 20 kW, 太阳能集热器(由清华阳光生产)面积为 15 m<sup>2</sup>, 蓄热水箱(由清华阳光生产)容积取 430 L 时,目标函数取得最小值。此时,初投资为 23 376.5 元,年运行成本为 4 147.1 元。

#### 3.2.1 初投资分析

在生物质能-太阳能互补供热系统的初投资中,太阳能集热器的投资占的比例最大,为 64%;蓄热水箱的投资占的比例最小,为 2%;生物质颗粒燃烧器的投资占比例是 13%;水泵等附件的投资所占的比例是 21%。对一个建筑物而言,循环水泵等附件的投资是基本不变的,因此其投资对优化结果基本没有影响。随着生物质颗粒燃烧器生产技术的不断成熟以及生产规模的扩大,其成本会较大幅度的降低,从而能加速生物质能-太阳能互补供热系统的推广。

#### 3.2.2 运行成本分析

生物质能-太阳能互补供热系统运行成本主要包括生物质颗粒燃料费用、燃料动力费、系统维护费、人工费。在运行成本中,生物质颗粒燃料费用占 47%,人工费占 36%,系统维护费占 12%,燃料动力费占 5%。

#### 3.2.3 敏感性分析

敏感性分析是在确定性分析的基础上,进一步分析不确定性因素对项目的最终经济效果指标的影响及影响程度。假设当一个因素改变时,其他因素不改变,来分析各因素的变化对系统中各部分设计参数的影响。<sup>[23]</sup>

生物质能-太阳能互补供热系统中影响各部分设计参数的主要因素有太阳能集热器的价格、生物质颗粒燃料的价格、蓄热水箱的价格、生物质颗粒燃烧器的价格等。当太阳能集热器的价格变动±20%时,通过经济优化模型式(21)、(22)计算可得,太阳能集热器的面积减少或增加 10%,蓄热水箱容积减少或增加 5%,生物质颗粒燃烧器功率变动为±2%,初投资变动为±1.5%,运行成本变动为±2.3%。

当生物质颗粒燃料的价格变动为±20%时,则

太阳能集热器面积变动为±7.2%,蓄热水箱容积变动为±3.4%,生物质颗粒燃烧器功率变动为±1.2%。初投资变动为±1.7%,运行成本变动为±1.9%。

当蓄热水箱的价格变动为±20%时,则太阳能集热器面积减少或增加 2.1%,蓄热水箱的容积减少或增加 0.8%,生物质颗粒燃烧器的功率变动为±0.75%。初投资变动为±0.7%,运行成本变动为±1.7%。

当生物质颗粒燃烧器价格变动为±20%时,则太阳能集热器面积变动为±1.7%,蓄热水箱的容积减少或增加 0.8%,生物质颗粒燃烧器的功率减少或增加 0.7%。初投资减少或增加 0.3%,运行成本减少或增加 0.8%。

通过敏感性分析,发现对生物质能-太阳能互补供热系统中各部分参数影响最大的因素是太阳能集热的价格,其次是生物质颗粒燃料的价格,而蓄热水箱的价格和生物质颗粒燃烧器的价格对系统的设计参数影响较小。

## 4 结 论

1) 建立了生物质能-太阳能互补供热系统的经济分析模型,并利用线性规划的方法对系统中各部分的设计参数进行了优化。

2) 针对北京地区某供热面积为 200 m<sup>2</sup>的办公楼进行优化。优化结果表明,当生物质能-太阳能互补供热系统中生物质颗粒燃烧器的功率为 20 kW,太阳能集热器面积为 15 m<sup>2</sup>,蓄热水箱容积取 430 L 时,系统的经济性最好。此时,初投资为 23 376.5 元,年运行成本为 4 147.1 元。通过敏感性分析发现,系统中各部分设计参数的影响因素有太阳能集热器的价格、生物质颗粒燃料的价格、蓄热水箱的价格、生物质颗粒燃烧器的价格,且影响程度依次降低。

生物质能-太阳能互补供热系统充分利用生物质能和太阳能优势,即减少了生物质能的使用,延长了生物质颗粒燃烧器的使用寿命,又弥补了太阳能不稳定的缺点,具有较强的互补性,适合中小用户使用,具有广泛的推广价值。

#### [参 考 文 献]

- [1] 田宜水,孟海波. 农作物秸秆开发利用技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
- [2] 鄂佐星,佟启玉. 秸秆固体成型燃料技术[M]. 黑龙江:黑龙江人民出版社, 2009.
- [3] 罗娟,侯书林,赵立欣,等. 生物质颗粒燃料燃烧设备的研究进展[J]. 可再生能源, 2009, 27(8): 90-95.

- Luo Juan, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. The research progress of pellet burning equipments[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(8): 90—95. (in Chinese with English abstract)
- [4] 徐飞, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物质颗粒燃料热风点火性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 288—294.
- Xu Fei, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Experimental study on hot-air ignition of biofuel pellets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 288—294. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郭长城, 石惠娴, 朱洪光, 等. 太阳能-地源热泵联合供能系统研究现状[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 356—362.
- Guo Changcheng, Shi Huixian, Zhu Hongguan, et al. Review of solar-assisted ground source heat pump system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 356—362. (in Chinese with English abstract)
- [6] 谌学先, 高文峰, 兰青, 等. 热泵与家用太阳热水器联合供热性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 272—275.
- Chen Xuexian, Gao Wenfeng, Lan Qing, et al. Performance jointly test of heat pump water heater with household solar heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 272—275. (in Chinese with English abstract)
- [7] 支晓晔, 刘燕, 刘蓉, 等. 燃气与太阳能联合供热系统集热器面积优化[J]. 煤气与热力, 2009, 29(2): 15—18.
- Zhi Xiaoye, Liu Yan, Liu Rong, et al. Optimization of collector area of gas and solar heating system[J]. Gas and Heat, 2009, 29(2): 15—18. (in Chinese with English abstract)
- [8] 岳华, 岳晓钰, 王磊磊, 等. 太阳能和生物质能互补供暖系统[J]. 煤气与热力, 2009, 29(11): 15—17.
- Yue Hua, Yue Xiaoyu, Wang Leilei, et al. Heating system with complementation between solar energy and bioenergy[J]. Gas and Heat, 2009, 29(11): 15—17. (in Chinese with English abstract)
- [9] Frank Fiedler, Chris Bales, Tomas Persson, et al. Comparison of carbon monoxide emissions and electricity consumption of modulating and non-modulating pellet and solar heating systems[J]. Energy Research, 2007, 31(10): 915—930.
- [10] Frank Fiedler, Svante Nordlander, Tomas Persson, et al. Thermal performance of combined solar and pellet heating systems[J]. Renewable Energy, 2006, 31(1): 73—88.
- [11] Frank Fiedler. Combined Solar and Pellet Heating Systems[D]. Sweden: Mälardalen University, 2006.
- [12] Tomas Persson, Frank Fiedler, Svante Nordlander, et al. Validation of a dynamic model for wood pellet boilers and stoves[J]. Applied Energy, 2009, 86(5): 645—656.
- [13] 王泽龙, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质户用供热技术发展现状及展望[J]. 可再生能源, 2011, 29(4): 72—83.
- Wang Zelong, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. Developing status and prospect of household biomass heating technology[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(4): 72—83. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李新国, 赵军, 王一平, 等. 太阳能、蓄热与地源热泵组合系统的应用与实验[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1658—1660.
- Li Xinguo, Zhao Jun, Wang Yiping, et al. The application and experiment of solar-ground coupled heat pump with heat storage[J]. Solar Journal, 2009, 30(12): 1658—1660. (in Chinese with English abstract)
- [15] 中国建筑工业出版社. 太阳能供热采暖工程技术规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [16] 孟玲燕, 徐士鸣. 太阳能与常规能源复合空调/热泵系统在别墅建筑中的应用研究[J]. 制冷学报, 2006, 27(1): 15—22.
- Meng Lingyan, Xu Shiming. Research on application of integrated refrigeration/heat pump system combined solar and traditional energy in house[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(1): 15—22. (in Chinese with English abstract)
- [17] 康艳兵. 不同采暖方式的技术经济评价分析[J]. 中国能源, 2008, 30(1): 16—23.
- Kan Yanbing. Different heating ways of technical and economic evaluation analysis[J]. Energy of China, 2008, 30(1): 16—23. (in Chinese with English abstract)
- [18] 江亿. 华北地区大中型城市供暖方式分析[J]. 暖通空调, 2000, 30(4): 30—32.
- Jiang Yi. Heating schemes analysis for medium and large cities in the North China[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2000, 30(4): 30—32. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张景雪. 有压与常压热水锅炉供热系统循环泵的比较[J]. 煤气与热力, 2010, 30(8): 7—9.
- Zhang Jingxue. Comparison of circulating pump between pressured and atmospheric pressure hot water boiler heating systems[J]. Gas and Heat, 2010, 30(8): 7—9. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王立平, 王宗林, 宋宇. 热水采暖系统循环水泵选择分析及研究[J]. 区域供热, 2010(3): 15—18.
- Wang Liping, Wang Zonglin, Song Yu. Analysis and research about heating system circulating pump[J]. District Heating, 2010(3): 15—18. (in Chinese with English abstract)
- [21] 贺平, 孙刚. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [22] 中国建筑科学研究院. 太阳能集热系统设计与安装[M].

北京: 中国计划出版社, 2006.

- [23] 何永恒, 李进. 项目敏感性分析[J]. 交通科技与经济, 2012, 14(4).

He Yongheng, Li Jin. The sensitivity analysis of project[J]. Technology and Economy in Areas of Communications, 2012, 14(4). (in Chinese with English abstract)

## Optimal design of biomass-solar complementary heating system

Wang Zelong<sup>1,2</sup>, Tan Yishui<sup>1\*</sup>, Zhao Lixin<sup>1</sup>, Meng Haibo<sup>1</sup>, Hou Shulin<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to improve the economic benefits of the biomass-solar complementary heating system, optimization design on the economical efficiency is necessary. In this paper, a design scheme of biomass-solar complementary heating system was put forward. The economic analysis model on this system was set up. A linear programming method was used to optimize the scheme. The system was optimized taking a 200m<sup>2</sup> building in Beijing for example. The results showed that the established economic analysis model was available, in which the price of the solar collectors, biomass pellet fuel, heat storage tank and the biomass pellet burner effected on the optimization results of the various parts parameters in the system, and the degree of influence decreased systematically. It can provide areference for the design of biomass - solar complementary heating system in the future.

**Key words:** biomass, solar energy, optimization, design, pellets, heating, complementary