

生物质能-太阳能互补供热系统优化设计

王泽龙^{1,2}, 田宜水¹, 赵立欣¹, 孟海波¹, 侯书林²

(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-生物质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200m²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。

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CO₂零排放, NO_x、SO₂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^[1-2]。

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^[3]

。但其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^[4]; 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^[5-8]

。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, FrankFiedler系统研究了不同连

接方式的供热性能, 污染物排放特性等^[9-12]。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-

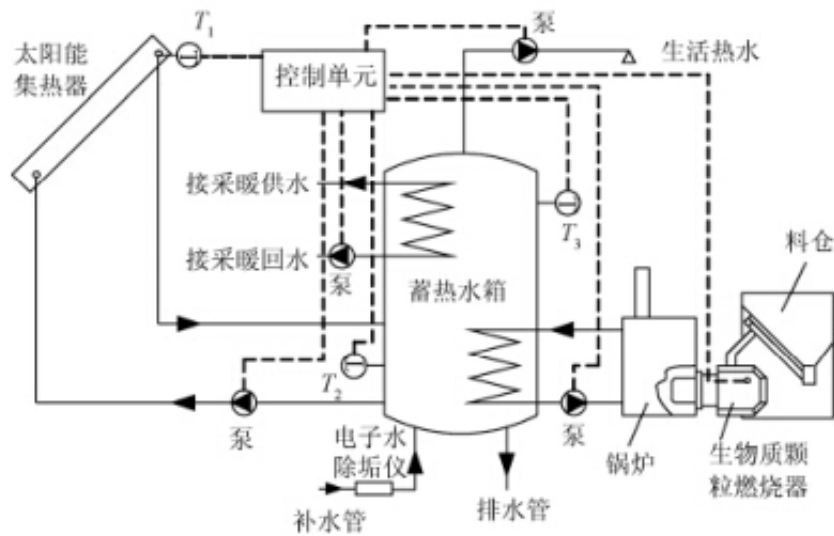
太阳能互补供热系统的设计要满足以下5个要求^[13-15]

: 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^[16-18]

, 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_1 为太阳能集热器出水口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_2 为水箱底部温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_3 为蓄热水箱上部的温度传感器测得的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；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_3 大于设定的温度时，燃烧器停止运行；当温度 T_3 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_1 和水箱底部温度 T_2 的温差超过 7°C 时，太阳能集热器循环水泵开始循环；当 T_1 和 T_2 的温差小于 3°C 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_m 为最大耗热功率, W; Q_{hi} 为采暖热指标, W/m^2 。 A 为建筑物的建筑面积, m^2 。

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_{burner} 为生物质颗粒燃烧器的功率, W; η_3 为锅炉热效率; η_5 为生物质锅炉用盘管换热器的换热效率; η_6 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_t 为蓄热水箱最大蓄热量, J; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; V_{tank} 为蓄热水箱容积, m^3 ; C_w 为水的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ΔT 为蓄热温差, $^\circ C$ 。

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_1 内消耗的热量为

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

式中, Q_a 为生物质颗粒燃烧器停止运行的时间 t_1 内消耗的热量, J; Q_{ch} 为建筑物耗热量, W/m^2 ; t_1 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_1 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。实现经农业工程学报2012年济效益的最大化，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^[19-20]。

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_{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， $^{\circ}\text{C}$ ； T_{r1} 为太阳能集热器进水口温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

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； η_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， $^{\circ}\text{C}$ ； T_{r2} 为生物质锅炉进水口温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

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_{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

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

式中, F_{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

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

式中, N_b 为生物质颗粒燃烧器的价格, 元/kW; S_{soler} 为太阳能集热器的面积, m^2 ; N_s 为太阳能集热器的价格, 元/ m^2 ; N_t 为蓄热水箱的价格, 元/ m^3 ; I_{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_{power} 为燃烧动力费, 元; F_{labor} 为人工费, 元; F_{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)

$$F_i = \frac{Q_i - E_i \cdot S_{\text{soler}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N_p}{q_{\text{pellet}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} \cdot N_p \quad (15)$$

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, $\text{J}(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; η_1 为太阳能集热器的集热效率; η_2 为生物质颗粒燃烧器的燃烧效率; η_3 为 i 月份的天数, d ; q_{pellet} 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

$$F_{\min} = \frac{P_{\text{burner}} \cdot N_b + S_{\text{soler}} \cdot N_s + V_{\text{tank}} \cdot N_t + I_{\text{else}}}{n} + \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i - E_i \cdot S_{\text{soler}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N_p}{q_{\text{pellet}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} + F_{\text{power}} + F_{\text{labor}} + F_{\text{main}} \quad (16)$$

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

$$P_{\text{burner}} \geq \frac{Q_{\text{th}} \cdot A}{\eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5} \quad (17)$$

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

$$\frac{C_w \cdot \rho_w \cdot V_{\text{tank}} \cdot \Delta T}{(P_{\text{burner}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 + \frac{E \cdot S_{\text{soler}} \cdot \eta_1 - Q_{\text{th}} \cdot A}{3600 \cdot t_1}) \cdot \eta_6} \geq t_2 \quad (18)$$

式中, t_2 为生物质颗粒燃烧器设计的最短运行时间, h ; t_1 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

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

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%。

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

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

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:

$$F_{\min} = \frac{P_{\text{burner}} \cdot N_b + S_{\text{soler}} \cdot N_s + V_{\text{tank}} \cdot N_t + I_{\text{else}}}{n} + \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i - E_i \cdot S_{\text{soler}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N_p}{q_{\text{pellet}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6} + F_{\text{power}} + F_{\text{labor}} + F_{\text{main}} \quad (21)$$

约束条件:

$$\begin{cases} P_{\text{burner}} \geq \frac{Q_{\text{th}} \cdot A}{\eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5} \\ \frac{C_w \cdot \rho_w \cdot V_{\text{tank}} \cdot \Delta T}{(P_{\text{burner}} \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 + \frac{E \cdot S_{\text{soler}} \cdot \eta_1 - Q_{\text{th}} \cdot A}{3600 \cdot t_1}) \cdot \eta_6} \geq t_2 \\ \frac{C_w \cdot \rho_w \cdot V_{\text{tank}} \cdot \Delta T}{\eta_6 \cdot Q_{\text{th}} \cdot A} \geq t_1 \\ E \cdot S_{\text{soler}} \cdot \eta_1 \leq 43200 \cdot Q_{\text{th}} \cdot A \end{cases} \quad (22)$$

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200m²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_{ch}	20 W·m ⁻²	文献[21]	太阳能集热器的集热效率	η_1	0.5	文献[22]
采暖热指标	Q_{hs}	50 W·m ⁻²	文献[21]	生物质颗粒燃烧器的燃烧效率	η_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 MJ·m ⁻² ·d ⁻¹	文献[22]	生物质锅炉用盘管换热器的换热效率	η_5	0.9	市场调研
蓄热水箱蓄热温差	ΔT	15℃	文献[21]	循环水泵的效率	η_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	η_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	η_6	0.9	市场调研
生物质颗粒燃料的热值	q_{gross}	17 MJ·kg ⁻¹	市场调研	水的比热容	C_w	4.2 kJ·(kg·℃) ⁻¹	文献[22]
生物质颗粒燃烧器的价格	N_b	150 元·kW ⁻¹	市场调研	水的密度	ρ_w	1 000 kg·m ⁻³	文献[22]
生物质颗粒燃料的价格	N_p	500 元·t ⁻¹	市场调研	人工费	F_{labor}	2 000 元·a ⁻¹	市场调研
太阳能集热器的价格	N_s	1 000 元·m ⁻²	市场调研	系统的维护费用	F_{main}	500 元·a ⁻¹	市场调研
蓄热水箱的价格	N_t	450 元·m ⁻³	市场调研	燃烧动力费	F_{power}	200 元·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_{bsc}	5 000 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：

目标函数：

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

约束条件：

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

(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20kW，太阳能集热器（由清华阳光生产）面积为15m²

，蓄热水箱（由清华阳光生产）容积取430L时，目标函数取得最小值。此时，初投资为23376.5元，年运行成本为4147.1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^[23]。

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 $\pm 20\%$ 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 $\pm 2\%$ ，初投资变动为 $\pm 1.5\%$ ，运行成本变动为 $\pm 2.3\%$ 。

当生物质颗粒燃料的价格变动为 $\pm 20\%$ 时，则太阳能集热器面积变动为 $\pm 7.2\%$ ，蓄热水箱容积变动为 $\pm 3.4\%$ ，生物质颗粒燃烧器功率变动为 $\pm 1.2\%$ 。初投资变动为 $\pm 1.7\%$ ，运行成本变动为 $\pm 1.9\%$ 。

当蓄热水箱的价格变动为 $\pm 20\%$ 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 $\pm 0.75\%$ 。初投资变动为 $\pm 0.7\%$ ，运行成本变动为 $\pm 1.7\%$ 。

当生物质颗粒燃烧器价格变动为 $\pm 20\%$ 时，则太阳能集热器面积变动为 $\pm 1.7\%$ ，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200m²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20kW，太阳能集热器面积为15m²，蓄热水箱容积取430L时，系统的经济性最好。此时，初投资为23376.5元，年运行成本为4147.1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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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: M ä lardalen 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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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及安装[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).

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/95559.html>