第41卷 第9期 太 阳 能 学 报 Vol. 41, No. 9
2020年9月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Sep., 2020

文章编号:0254-0096(2020)09-0271-07

太阳能-锅炉联合中温蒸汽系统设计与TRNSYS模拟

吴 海,楼 波

(华南理工大学电力学院,广州 510641)

摘 要:针对广州某纺织厂设计一套1 t/h热负荷的太阳能-锅炉联合蒸汽系统,建立系统的热力学模型和基于TRNSYS软件的仿真模型,并以太阳指数、集热效率及太阳能保证率等参数为指标对系统进行模拟研究。结果表明:所设计的系统及控制方式在不同时刻所产生的蒸汽量可以满足负荷需求;系统月均太阳指数最高为38%,全年月均集热效率最高为43%,11月份太阳能保证率最高为26%,该系统每年可减少CO_2排放量235 t,节省天然气12万m^3,相当于节约160 t标准煤,具有良好的经济和环保效益。

关键词:太阳能;槽式集热器;热利用;蒸汽系统;TRNSYS模拟

中图分类号:TK512 **文献标志码**:A

0 引 言

根据已公布的数据显示,中国在2019年的能源消耗总量达到48.6亿t标准煤,同比增长3.3%,煤炭消费量增长1%,煤炭消费量占能源消费总量的57.7%[1]。其中,工业能耗占比约为65%,热能尤其是蒸汽是工业能耗的主要形式,大部分的工业热源是由工业锅炉对化石燃料进行燃烧转化而来。目前中国工业锅炉总数约为57万台,其中燃煤工业锅炉约47万台,单台容量≤10 t/h的小锅炉占比达80%[2]。燃煤工业锅炉在使用过程中效率低污染大,自动化水平低,无法满足当前国家日益严格的环保要求。因此,开发利用清洁的可再生能源受到越来越多的关注。

太阳能热利用技术作为可再生能源开发的手段,是实现节能减排、能源替代的有效途径之一[3]。按照输出温度范围大致可分为3类:低温利用技术(<100 ℃)主要应用于制取生活热水及低温采暖;高温利用技术(>300 ℃)主要集中在光热发电领域;中温利用(100~300 ℃)主要是低压蒸汽的利用,在工农业领域中应用十分广泛[4]。化学、纺织、食品等行业中,热固化、干燥、洗涤、煮沸、灭菌等工艺过程用热所需的温度在150~250 ℃之间。因此,大多数工业过程用热可通过太阳能中温热利用系统来提供[5]。

国内外学者对太阳能中温热利用技术进行了理论和实验研究,如侯宏娟等[6]对槽式集热器的光热转换过程进行了理论分析,并利用建立的模型对影响集热器效率的因素进行了研究。高志超等[7]基于600 m^2抛物槽式太阳能实验台建立太阳能蒸汽发生系统的数学模型,并进行模拟研究和系统动态特性分析。郭松等[8]建立一套供热功率为310 kW的太阳能中温热利用制蒸汽的系统,并研究设计工况和变工况条件下不同输入参数对系统性能的影响。何英杰等[9]针对大型畜牧养殖场设计一种太阳能与生物质燃料锅炉蒸汽混合系统,该系统的太阳能集热器装置产生的蒸汽温度可达180 ℃并用于加工秸秆饲料。

国外方面,Padilla等[10]针对槽式集热器进行了较为详细的一维数值传热分析,对接收器的辐射模型和传热关联式进行改进,最后根据实验数据验证其模型的准确性。Ghazzani使用TRNSYS软件对用于食品加工厂供热的小型抛物槽式集热器系统进行动态模拟,对不同时刻的仿真结果进行了分析,通过计算得出该系统与传统锅炉相比每年可减少57%的CO_2排放量[11]。西班牙的Fernandez-Garcia等[12]针对洗涤工业用热设计一套小型槽式太阳能集热系统,通过CFD模拟对相同几何形状下3种不同的集热器槽面玻璃覆盖方式进行比较和分析。

收稿日期:2018-12-17

基金项目:广东省自然科学基金(S2013010016748);广东省能源清洁利用重点实验室项目(2013A061401005)

通信作者:楼 波(1965—),男,博士、副教授,主要从事燃烧科学与节能技术方面的研究。loubo@scut.edu.cn

广州市地处北回归线附近，太阳高度角低，日照时间长，光热充足，属太阳能资源丰富区[13]。本文设计一套太阳能-锅炉联合蒸汽系统，基于瞬态模拟软件TRNSYS建立系统仿真模型，采用气象软件Meteonorm提供的广州市典型气象年数据，根据广州某纺织厂1 t/h蒸汽用热需求对该系统的汽温、汽压等参数进行设计与运行模拟，以热效率、产热量、系统辅热量和太阳能保证率等作为系统仿真指标进行全年性能分析和环境效益评估。

1 系统描述及原理

图1为本研究设计的太阳能-锅炉联合蒸汽发生系统示意图。主要由槽式太阳能集热系统、导热油锅炉系统、蓄热罐、蒸汽发生系统以及自动控制系统组成。集热器采用南北轴布置东西向跟踪方式，选用直通式真空集热管，集热器的结构及性能参数如表1所示。通过槽式太阳能集热器接收并汇集的太阳辐射能量，反射在位于焦线的真空集热管上，真空集热管吸收太阳辐射能量并转化为管内导热油工质的热能，导热油流经混合式蓄热罐，再循环流到蒸汽发生器将能量传给水从而产生一定温度压力的蒸汽。当太阳光照充足时，通过蓄热罐把多余的能量储存起来，夜间或者太阳辐射量不足时，启用锅炉向系统提供热量，实现系统持续稳定的输出蒸汽，满足用户需求。

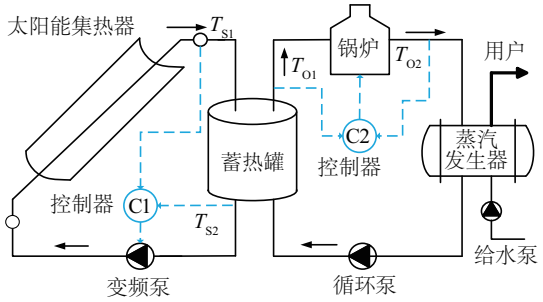


图1 太阳能-锅炉联合蒸汽系统示意图

Fig. 1 Scheme of solar-boiler combined steam system

表1 槽式太阳能集热器主要性能参数

Table 1 Parameters of parabolic trough collector

参数	数值	参数	数值
开口宽度/m	2.5	吸收管长度/mm	2400
长度/m	7.2	玻璃管透过率	0.95
单块集热面积/m²	18	涂层吸收率	0.92
聚光比	63	涂层发射率	0.08(100℃) 0.10(200℃)
吸收管直径/mm	38		

2 系统热力学模型

2.1 太阳能集热器模型

白天系统运行时，槽式集热器接收的太阳能辐射量公式为：

$$Q_{in}=I\times A_c \tag{1}$$

式中，I——单位面积太阳直射辐射值，W/m²；A_c——总集热面积，m²。

槽式集热器的有效吸收热量为：

$$Q_u=c_{pf}\rho_f V_f(T_{of}-T_{if}) \tag{2}$$

式中，c_{pf}——导热油定压比热容，kJ/kg·℃；ρ_f——导热油密度，kg/m³；V_f——导热油体积流量，m³/s；T_{of}——集热器出口温度，℃；T_{if}——集热器入口温度，℃。

太阳能集热器的集热效率：

$$\eta=\frac{Q_u}{Q_{in}} \tag{3}$$

2.2 储热油罐模型

使用蓄热罐系统可解决太阳能热量供给和负荷需求热量之间的不匹配问题，并在光照辐射不足或夜间时延长太阳能蒸汽发生系统工作的时间。本文采用单一蓄热罐，以流体工质导热油为蓄热材料，冷热流体同时流经罐体进行混合，并假设冷热流体在罐体内完全混合，各处温度均匀一致。根据能量守恒原理有：

$$c_{pf}\rho_f V_x\frac{dT_x}{d\tau}=Q_u-Q_f-Q_L \tag{4}$$

式中，V_x——蓄热罐体积，m³；T_x——蓄热罐温度，℃；τ——时间，s；Q_f——蓄热罐提供给供热环路的热量，W；Q_L——蓄热罐表面散热损失，W。

蓄热罐提供给供热环路的热量为：

$$Q_f=c_{pf}\rho_f V_h(T_{oh}-T_{ih}) \tag{5}$$

式中，V_h——供热环路导热油体积流量，m³/s；T_{oh}——与供热环路相连侧蓄热罐管路出口温度，℃；T_{ih}——与供热环路相连侧蓄热罐管路进口温度，℃。

蓄热罐表面热损失为：

$$Q_L=h_x A_x(T_x-T_w) \tag{6}$$

式中，h_x——蓄热罐平均表面散热系数，W/(m²·℃)；A_x——蓄热罐外表面面积，m²；T_w——周围环境温度，℃。

2.3 燃气锅炉模型

由于系统的负荷要求持续稳定的蒸汽量，因此当夜间或太阳辐射量不足时，锅炉系统开启向系统输入热量。由能量平衡原理得：

$$Q_b=\frac{c_{pf}\rho_f V_h(T_{set}-T_{bi})}{\eta_b} \tag{7}$$

式中，T_{set}——燃气锅炉设定出口温度，℃；T_{bi}——燃气锅炉进口温度，℃；η_b——燃气锅炉燃烧效率，℃。

假设设计的锅炉额定功率为 Q_b^*，则某一时刻锅炉的负荷为：

$$\theta=\frac{Q_b}{Q_b^*} \tag{8}$$

2.4　蒸汽发生器模型

蒸汽发生器采用盘管式换热器，导热油在管内流动，热量通过管壁传输给容器内的水。忽略换热器热损失，根据能量守恒原理可知，热流体放出的热量与盘管式换热器的传热量以及冷流体吸收的热量相等，其数学表达式为：

$$c_{pf}\rho_f V_h(T_{gin}-T_{gout})=m_c\Delta h_c \tag{9}$$

式中，T_{gin}——蒸汽发生器导热油进口温度，℃；T_{gout}——蒸汽发生器导热油出口温度，℃；m_c——蒸汽发生器冷源流量，kg/s；Δh_c——蒸汽发生器冷源进出口焓差，kJ/kg。

2.5　评价指标计算模型

本文利用产热量、系统辅热量、太阳指数和太阳能保证率等指标来对系统进行全年的性能分析。

太阳指数表示为：

$$f_s=\frac{Q_{in}}{Q_{in}+Q_b} \tag{10}$$

太阳能保证率表示为：

$$\eta_s=\frac{Q_u}{m_c\Delta h_c} \tag{11}$$

3　TRNSYS仿真模型的建立

本文以广州某纺织厂的生产工艺用热负荷为例对整个系统的参数进行设计。该厂位于广州市某工业园内，厂房顶部可利用面积约为 5000 m²，生产工艺用汽要求是 1 t/h，180 ℃、1 MPa 的蒸汽，全年 365 天 24 小时不间断生产运行。根据厂区使用环境，将槽式集热器安装在厂房的顶部，减少占地面积，节约投资成本。在本文建立的系统热力学数学模型基础上，结合工厂实际，用于热负荷数据计算的系统参数如表 2。

表2　系统设计参数

Table 2　System design parameters

参数	值
槽式集热器总面积/m²	5000
集热器流体工质	Thermal 62型导热油
蓄热罐体积/m³	500
变频泵最大流量/kg·h⁻¹	100000
燃气导热油锅炉功率/kJ·h⁻¹	3385000
循环水泵流量/kg·h⁻¹	38028
换热器换热量/MJ·h⁻¹	2692.4
换热器热源进口温度/℃	220
换热器热源出口温度/℃	190
给水泵流量/kg·h⁻¹	1000

3.1　太阳能-锅炉蒸汽系统的构建

瞬态模拟软件 TRNSYS 是由美国威斯康星大学 Solar Energy 实验室开发，并在欧洲一些研究所的共同研究下逐步完善的一类基于模块化的动态仿真程序。每个模块都可实现自身的一种特定功能，通过调用与系统相关的特定功能的模块，并按照系统的原理依次对各模块之间的参数进行连接，输入模拟计算给定条件，便能够得到系统的仿真模拟结果[14]。

基于瞬态模拟软件 TRNSYS 建立的系统仿真模型如图 2 所示。太阳能-锅炉系统由槽式太阳能集热系

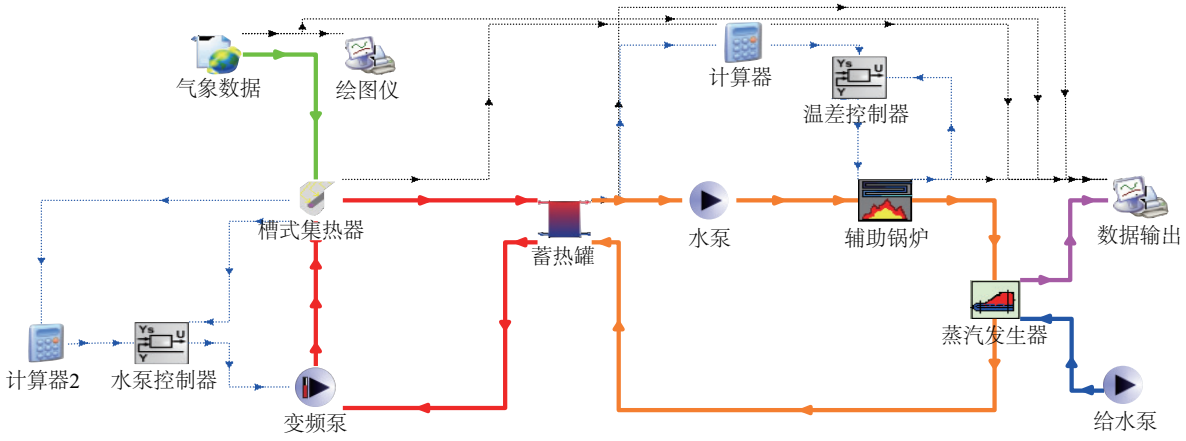


图2　太阳能-锅炉联合蒸汽系统模型

Fig. 2　Simulation model of solar-boiler combined steam system

统、导热油锅炉系统、蓄热罐、蒸汽发生系统以及自动控制系统组成。本文所采用的部件模块主要包括气象数据模块(Type 15-TMY)、槽式太阳能集热器模块(Type 74)、储热罐模块(Type 4)、锅炉模块(Type 700)、蒸汽发生器模块(Type 316)以及温差控制模块和水泵模块等。

3.2 控制系统设置

太阳能-锅炉联合中温蒸汽系统在控制中心的调控下运行,控制系统的原理如图 3 所示。

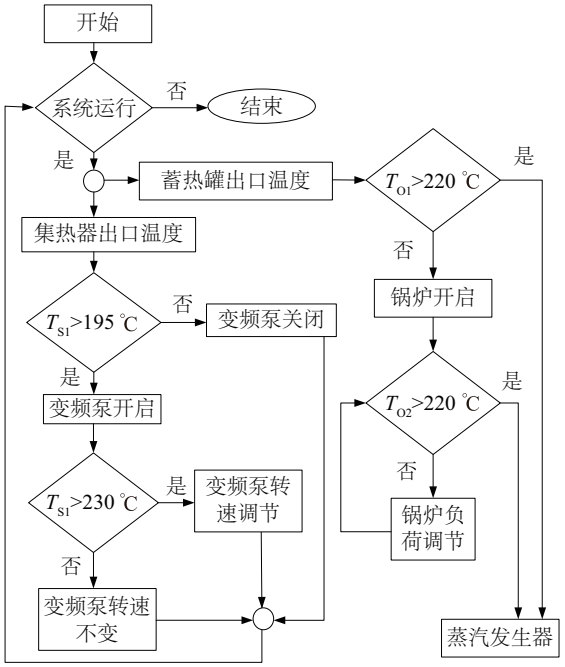


图3 控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of control system

温差控制器 C1 控制与槽式集热器相连的变频水泵的启停与转速调节,当集热器出口温度 T_{s1} 低于 195 ℃时,变频泵关闭,集热器系统停止运行;当出口温度 T_{s1} 大于 230 ℃时,温差控制器 C1 对变频泵输出信号,增加变频泵转速,限制集热器出口温度不高于 230 ℃。温差控制器 C2 控制的是导热油锅炉的启停与负荷调节,当蓄热罐流体的出口温度 T_{o1} 大于 220 ℃时,锅炉关闭,导热油直接经锅炉流到蒸汽发生器把热量传给蒸汽;当蓄热罐的流体出口温度 T_{o1} 小于 220 ℃时,锅炉系统启动,并由温差控制器 C2 根据 T_{o2} 反馈的锅炉出口温度调节锅炉负荷,使锅炉出口温度保持在 220 ℃。

3.3 运行工况及模拟参数的设置

根据 3.2 节系统参数设计值对系统各大模块的运行参数进行设置,选取气象软件 Meteonorm 提供的广州市典型气象年文件(TMY2 文件)作为气象数据,对系统进行全年性能模拟。系统模拟的总时间设为 8760 h,系统运行间隔为 1 h,软件模拟计算步长取默认值 0.125。

4 模拟结果和讨论

4.1 模型验证

文献[15]中对双轴跟踪槽式集热器系统进行详细测试,给出了大量的实验结果。图 4 是本文基于该实验条件建立的模型得出的模拟结果与文献[15]中的试验结果的对比。由图 4 可知,模拟结果与实验结果吻合较好,最大偏差为 5.3%,最小偏差为 1.5%,证明了 TRNSYS 仿真模型的准确性。

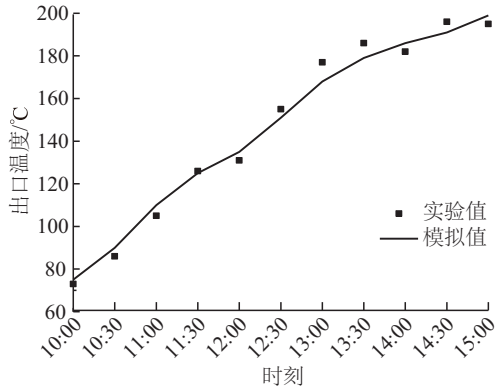


图4 导热油出口温度实验值与模拟值对比

Fig. 4 Comparison of the simulation and experimentally obtained heat transfer oil temperature

4.2 运行结果与分析

图 5 和图 6 为根据气象软件 Meteonorm 提供的 TMY2 数据文件进行模拟得出的气象数据结果。图 5 显示广州市(113.2 °E, 23.1 °N)全年最高温度为 36.3 ℃,最低温度为 3 ℃;图 6 显示全年最高太阳直射辐射强度为 3500 kJ/(h·m^2)。

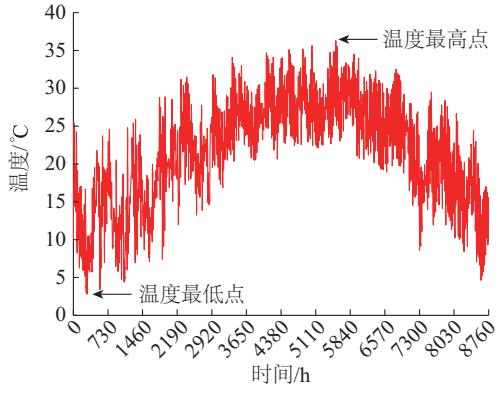


图5 全年环境温度变化图

Fig. 5 Annual environmental temperature change chart

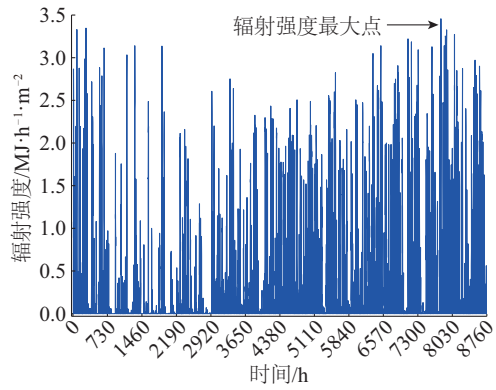


图6　全年太阳直射辐射变化图

Fig. 6　Annual variation of direct solar radiation

太阳能-锅炉蒸汽发生系统1月份第1周的运行参数曲线如图7所示。由图7可看出，随着辐射值的增大，太阳能集热器的出口温度维持在最高限制温度不变，而蓄热罐的温度则在平缓上升。随着蓄热罐出口温度的升高，温差控制器开始对锅炉系统的负荷进行调节，使锅炉出口流体的温度稳定在220 ℃，整个系统产生的蒸汽温度保持在180 ℃，蒸发量维持1 t/h不变，系统完美匹配了工厂的用热负荷需求。

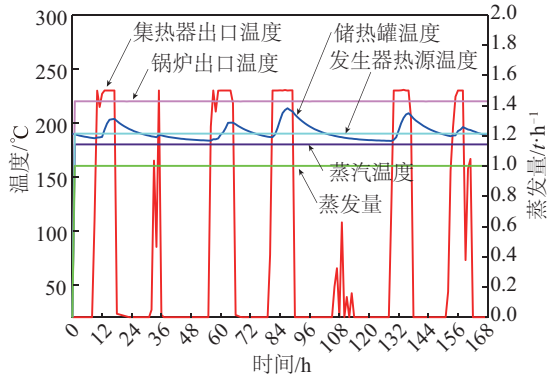


图7　系统运行参数图

Fig. 7　Diagram of system operation parameter

图8给出了系统太阳指数和集热器集热效率在一年中的变化规律。由图8可知，系统月均太阳指数在11月份达到38%，为全年最高；3、4月份集热器的集热效率较低，11月份集热器的集热效率最高。结合图6可知，当太阳能辐射强度较低时，集热器效率也会降低，该结果与文献[7]的研究结论一致；另外随着环境温度的降低，集热工质温度与环境温度之差增大，集热器热损失也随之增大，集热效率降低。

图9给出了集热器和锅炉每月平均输入的热量对比，11月份集热器收集到的热量最多，并且太阳能保证率达到26%。模拟结果显示，太阳能-锅炉蒸汽发生系统在下半年时段运行时的整体性能最佳。

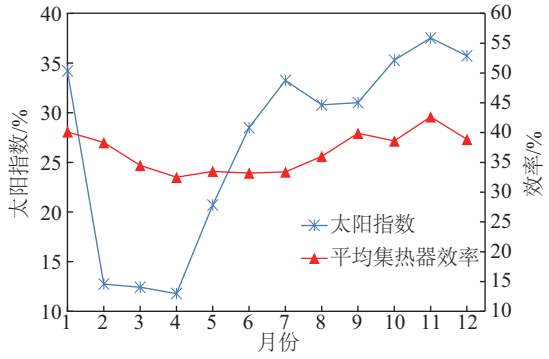


图8　月均太阳指数曲线和集热效率曲线

Fig. 8　Monthly average solar fraction curve and collection efficiency curve

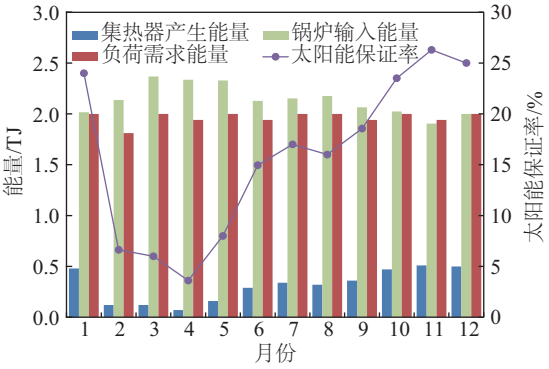


图9　系统各模块热量

Fig. 9　Monthly energy at different components

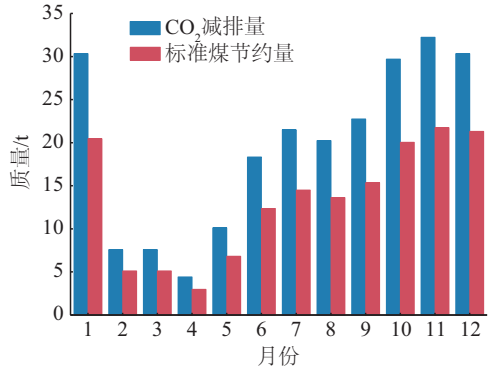
4.3　环境和经济效益

当前，为响应国家关于锅炉节能改造的政策和法规，广东省主要城区积极实施“煤改气”、“煤改电”和热电联产替代等污染防治行动，大力推广使用燃气锅炉[16]。此举在一定程度可以大幅降低粉尘和SO_2的排放，但依然存在NO_x和CO_2污染问题，并且广东较其他区昂贵的天然气价格也使得企业的能源成本增高。太阳能-锅炉蒸汽系统的研发对于广东工业锅炉领域的节能环保意义重大。

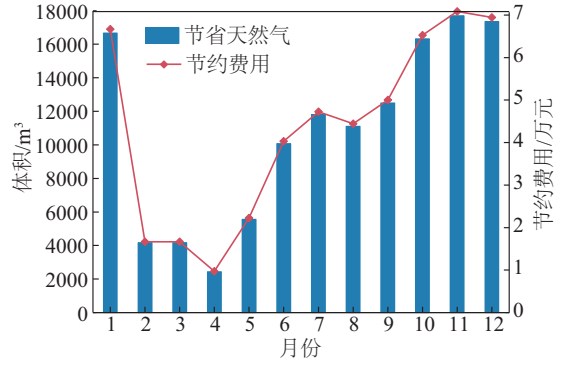
广东省《锅炉大气污染物排放标准》规定，燃气锅炉氮氧化物的排放量限值为50 mg/m³，每立方的天然气燃烧约产生1 m³的CO_2，天然气价格为4元/m³。工业锅炉每燃烧1 t的标准煤，产生CO_2 2620 kg，SO_2 8.5 kg，NO_x 7.4 kg[17]。

根据以上数据，根据集热器每月的产热量进行换算，对系统的环保和经济效益进行析，结果如图10所示，由图10a可知，由于太阳辐射强度的变化，CO_2减排

量最高的月份约为 33 t,最低为 4.8 t。系统全年运行可减少 CO_2 排放量 235 t,节省天然气 12 万 m^3,相当于节约 160 t 标准煤,系统具有良好的经济性和环保性。



a. CO_2减排量



b. 经济收益

图10 各月平均CO_2减排量和经济收益

Fig. 10 Average monthly CO_2 emission reductions and economic returns

5 结 论

本文建立一套太阳能-锅炉联合中温蒸汽发生系统,通过瞬态系统模拟软件 TRNSYS 建立系统仿真模型,对系统全年的运行性能进行模拟,并就系统的环保和经济效益进行分析,得出以下主要结论:

1)所设计的系统及运行控制方式在不同时刻所产生的蒸汽量可以满足负荷需求;全年月均集热效率最高值为 43%,全年月均太阳指数最高为 38%,11 月份太阳能保证率为 26%达到最高。

2)集热器的集热效率会随着辐射强度的增加而增加,因此在太阳辐射强度较高的地方安装的太阳能-锅炉系统会有较高的热效率。

3)系统全年运行可减少 CO_2 排放量约 235 t,节省天然气约 12 万 m^3,相当于节约 160 t 标准煤,具有良好的经济性和环保性。

[参考文献]

[1] 国家统计局. 中华人民共和国2019年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2018-02-28.

[2] 夏淑貌. 燃煤工业锅炉节能环保现状及发展趋势[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(10): 5-8.
XIA S M. Present situation and development trend of energy- saving and environmental protection for coal-fired industrial boilers[J]. Coal processing & comprehensive utilization, 2017(10): 5-8.

[3] 关跃. 太阳能利用技术发展及应用调研[J]. 应用能源技术, 2018(9): 53-56.
GUAN Y. Research on development and application of solar energy utilization technology[J]. Applied energy technology, 2018(9): 53-56.

[4] NAIK H, BAREDAR P, KUMAR A. Medium temperature application of concentrated solar thermal technology: Indian perspective[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2017, 76: 369-378.

[5] JIA T, HUANG J P, LI R. Status and prospect of solar heat for industrial processes in China[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2018, 90: 475-489.

[6] 侯宏娟, 杨勇平, 於震跃. 槽式太阳集热器㶲分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(6): 1022-1028.
HOU H J, YANG Y P, YU Z Y. Exergy analysis of parabolic trough solar collector[J]. Acta energiae solaris sinica, 2014, 35(6): 1022-1028.

[7] 高志超, 隋军, 刘启斌. 抛物槽式太阳能蒸汽发生系统研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 721-724.
GAO Z C, SUI J, LIU Q B. Study on parabolic trough solar collector steam generation system[J]. Journal of engineering thermophysics, 2011, 32(5): 721-724.

[8] 郭松, 郑鑫, 邱泽晶. 太阳能中温集热利用制蒸汽系统性能研究[J]. 热科学与技术, 2017, 16(2): 159-165.
GUO S, ZHENG X, QIU Z J. Performances of steam generation system by heat utilization of mesothermal solar[J]. Journal of thermal science and technology, 2017, 16(2): 159-165.

[9] 何英杰, 孔晓玲, 蒋德云. 太阳能与生物质燃料锅炉蒸汽混合系统的设计与研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2015, 27(6): 65-69.
HE Y J, KONG X L, JIANG D Y. Design and study on solar energy and biofuels boiler of steam hybrid system[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015, 27(6): 65-69.

[10] PADILLA R V, DEMIRKAYA G, GOSWAMI D Y.

Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver [J]. Applied energy, 2011, 88(12): 5097-5110.

[11] EL GHAZZANI B, PLAZA D M, EL CADI R A. Thermal plant based on parabolic trough collectors for industrial process heat generation in Morocco[J]. Renewable energy, 2017, 113: 1261-1275.

[12] FERNANDEZ-GARCIA A, ESTHER R, MANUEL P. A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat[J]. Journal of cleaner production, 2015, 89: 272-285.

[13] 刘爱君，陈雯超，秦鹏. 广州市太阳能资源的分析与评估[J]. 广东气象，2014，36(3)：59-61.
LIU A J, CHEN W C, QIN P. Analysis and evaluation of solar energy resources in Guangzhou[J]. Guangdong meteorology, 2014, 36(3): 59-61.

[14] 李亭，齐春玲，刘吉营. 基于TRNSYS模拟的太阳能复合式供热系统的研究[J]. 建筑节能，2018，46(5)：1-5.
LI T, QI C L, LIU J Y. Solar compound heating system with the TRNSYS simulation[J]. Building energy efficiency, 2018, 46(5): 1-5.

[15] 马炎，陈海军，钱裕等. 双轴跟踪槽式太阳能集热器性能试验[J]. 热力发电，2015，44(1)：19-24.
MA Y, CHEN H J, QIAN Y, et al. Performance test of a two-axis tracking parabolic trough solar collector[J]. Thermal power generation, 2015, 44(1): 19-24.

[16] 广东省政府环境保护厅. 广东省锅炉污染整治实施方案(2016-2018年)[Z]. 2016-11.

[17] 秦光勇，赵国凌，王少静. 工业锅炉碳排放计算与降碳举措评价[J]. 工业锅炉，2014(5)：22-27.
QIN G Y, ZHAO G L, WANG S J. Carbon emission measurements and carbon reduction solutions assessment for industrial boilers[J]. Industrial boilers, 2014(5): 22-27.

DESIGN AND TRNSYS SIMULATION OF SOLAR-BOILER COMBINED MEDIUM TEMPERATURE STEAM SYSTEM

Wu Hai, Lou Bo

(*School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou* 510641, *China*)

Abstract: A solar-boiler combined steam system was designed for a textile mill in Guangzhou with 1 t/h steam thermal load. The thermodynamic model of the system and the simulation model based on TRNSYS software were established. The system was simulated and evaluated by the parameters of solar fraction, heat collection efficiency and solar guarantee rate, etc. The simulation results show that the amount of steam generated at different times by the designed system and its control method can meet the load demand. The maximum monthly average solar fraction of the system is 38%, the highest monthly average heat collection efficiency is 43%, and the highest solar energy guarantee rate is 26% in November. The system could reduce CO_2 emissions by 235 t per year and save natural gas by 120,000 m^3, equivalent to saving 160 t of standard coal, which has good economic and environmental benefits.

Keywords: solar energy; trough collectors; heat utilization; steam system; TRNSYS simulation