

太阳能原油加热系统能源利用特性研究

吴承云霄¹, 廖晓炜², 刘峰², 徐洪涛¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 国家市场监管重点实验室(特种设备安全与节能)
中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

摘要: 为了节约原油加热系统中伴生气和电的消耗并减少碳排放, 建立了一套太阳能原油加热系统, 以实现能源的高效利用。基于系统性能指标要求和大庆油田气象数据, 确定了各部件的选型参数, 并制定了详细的运行策略。采用瞬态系统模拟程序 TRNSYS, 对该系统的能源利用特性进行了全年的逐时模拟分析。结果表明: 该系统在晚春至早秋可充分利用太阳能供热, 与传统原油加热系统相比, 全年的综合能耗降低 46.76%, CO₂ 排放量减少 70.70 t。通过经济性分析和计算, 系统初投资回收期分别为静态 6.09 年和动态 7.55 年, 每单位能量成本为 0.86 元·kW⁻¹·h⁻¹, 系统综合效率为 89.77%。太阳能原油加热系统不仅显著降低了能源消耗和碳排放, 还具有良好的经济效益, 为石油行业的可持续发展提供了理论和技术支持。

关键词: 太阳能系统; 原油; 动态仿真; 成本效益分析; TRNSYS

中图分类号: TE 09 文献标志码: A

Energy utilization characteristics of solar crude oil heating system

WU Chengyunxiao¹, LIAO Xiaowei², LIU Feng², XU Hongtao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Key Laboratory of Safety and Energy Efficiency of Special Equipment, State Administration for Market Regulation, China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: To reduce the consumption of associated gas and electricity in crude oil heating systems and decrease carbon emissions, a solar crude oil heating system was developed to achieve efficient energy utilization. Based on system performance requirements and meteorological data from the Daqing Oilfield, component selection parameters were determined, and a detailed operational strategy was formulated. Using the transient system simulation program (TRNSYS), an hourly simulation analysis of

收稿日期: 2024-06-14

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFF0600605)

第一作者: 吴承云霄(1999—), 男, 硕士研究生。研究方向: 油气采输中清洁能源的利用。E-mail: Amadeus.salieri@foxmail.com

通信作者: 徐洪涛(1976—), 男, 教授。研究方向: 新能源高效利用及储能技术。E-mail: htxu@usst.edu.cn

引文格式: 吴承云霄, 廖晓炜, 刘峰, 等. 太阳能原油加热系统能源利用特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(4): 404-413.

Citation: WU Chengyunxiao, LIAO Xiaowei, LIU Feng, et al. Energy utilization characteristics of solar crude oil heating system[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(4): 404-413.

the system's energy utilization characteristics was conducted over a year. Results indicate that the system can fully utilize solar heating from late spring to early autumn. Compared to traditional crude oil heating systems, the annual comprehensive energy consumption decreases by 46.76%, CO₂ emissions reduce by 70.70 t. Through economic analysis and calculation, static and dynamic initial investment recovery periods of the system is 6.09 and 7.55 years respectively, the energy cost per unit is 0.86 yuan·kW⁻¹·h⁻¹, and the overall system efficiency is 89.77%. The solar-powered crude oil heating system not only significantly reduces energy consumption and carbon emissions but also demonstrates favorable economic benefits, providing theoretical and technical support for sustainable development in the petroleum industry.

Keywords: solar system; crude oil; dynamic simulation; cost benefit analysis; TRNSYS

油井开采出的原油具有凝点高、粘度大的特点^[1],在常温下流动性差,需要将原油加热,使其具有良好的流动性后才能输送至各油站^[2]。目前,传统加热原油的方式多为利用化石能源,由水套加热炉、相变加热炉等为燃烧原油提供热量,然而这些方式对环境造成了许多危害^[3-6]。我国拥有非常丰富的太阳能资源,太阳能具有清洁无污染且分布广泛的特点^[7-8],可作为替代化石能源对原油加热的可利用理想能源。因此,将太阳能利用在原油加热系统中,对提高油田经济效益、降低原油生产成本有重要意义^[9]。

针对太阳能原油加热系统的研究,Badran等^[10]将太阳能光热技术加入原油加热系统中,并对两种传热介质进行了理论和实验研究。结果表明,在相同的工况下,使用油作为传热介质的集热器出口温度更高,但效率比使用水为传热介质的低25%左右。Lasich等^[11]设计了一种可同时为原油管道和储罐供热的太阳能供热系统,该系统实现了伴热降低原油粘度,提高了管道原油输送量,降低运维成本,证实了将太阳能应用在原油加热系统中的可靠性。Testa等^[12]将光热加热原油系统中的集热单元和储热单元组成闭合回路,通过不断循环来提高和维持原油温度,证明了将太阳能应用于重油加热的可行性。Altayib等^[13]设计了一种用于炼油厂的三阶段预热的太阳能原油加热系统,同时增加储热单元以应对太阳能的间歇性,结果表明该系统综合效率为60.94%。

国内的学者贾庆仲^[14]设计了基于辽河油田的太阳能石油加热输送系统,结合数据论证了使用集热单元间接加热原油的可行性。孟凤果等^[15]和高丽等^[16]将太阳能辅助电加热技术应用于江苏油

田后,原油温度可被加热达到57~60℃,且进站温度达到50℃左右。解建辉等^[17]以青海油田为应用场景,设计了一套太阳能原油加热系统,研究表明,该系统可加热原油并保持其温度在50℃以上,可明显降低采油集输能耗。林长华等^[18]设计了一种以空气为介质的太阳能原油加热系统,经计算,该系统的热效率可达72.35%。

在系统仿真模拟方面,国内外学者使用的系统仿真软件主要有:Aspen HYSYS, MATLAB/Simulink, EnergyPlus, OpenModelica, TRNSYS等。Aspen HYSYS在化工和石油工业中广泛应用,拥有强大的热力学数据库及模型,但主要针对化工过程^[19];MATLAB/Simulink以通用性和强大的计算能力闻名,几乎可以模拟任何类型的系统,但需要较强的编程能力^[20];EnergyPlus专注于建筑能耗分析和HAVC系统仿真,其优势在于开源,但主要限于建筑领域^[21];OpenModelica也是开源软件,支持多个领域的系统建模,但专业数据库及模型较少^[22]。在研究原油加热系统时,TRNSYS因其专业性、动态仿真能力、模块化结构和丰富的组件库,特别适合热力系统和可再生能源系统的仿真,是本研究理想的仿真软件选择^[23]。它能够进行长期性能分析且结果具有可靠性,适合评估系统在不同条件下的运行表现。吴洋洋等^[23]在TRNSYS中建立了太阳能油储维温系统的长周期能流输运模型,其模拟结果和实验值偏差7.29%,表明TRNSYS中的模型可以较准确地反映系统实际性能。朱尚文等^[24]在TRNSYS软件中建立了浮顶油罐太阳能相变维温系统,通过分析原油静储热负荷、原油供热量占比等指标,表明系统在4—12月可以满足原油的静储需求。李景营等^[25]

对东营某太阳能集热系统的运行策略,在 TRNSYS 软件中进行了优化模拟,结果表明,系统的温差控制的最佳策略为:下限温差 3℃、上限温差 10℃时停止换热。

综上,现有的太阳能原油加热系统研究中,大多侧重于工程技术试验或简化的理论分析,但当地气候以及合适的温控策略对系统的影响也尤为重要。因此,本文基于黑龙江省大庆油田,设计了太阳能原油加热系统,并制定了一套详细的运行策略,采用 TRNSYS 软件对太阳能原油加热系统进行全年动态仿真以及经济性分析。研究结果可为油气输运领域和原油加热系统的实际工程应用提供参考。

1 研究对象

本文设计的太阳能原油加热系统拟应用于黑龙江省大庆油田。油田地处黑龙江西南部,属温带季风性气候,光照充足,降水偏少,冬长严寒,夏秋凉爽。大庆地区月均总辐射和环境温度如图 1 所示,冬季 12—2 月极冷且总辐射较低;春季 3—5 月气温回升,总辐射增多;夏季 6—8 月气温温暖,总辐射最充足;秋季 9—11 月气温逐渐下降,总辐射下降。故在晚春至早秋(4—9 月)区间内,气温适宜且太阳辐射充足,是利用太阳能的最佳时段。

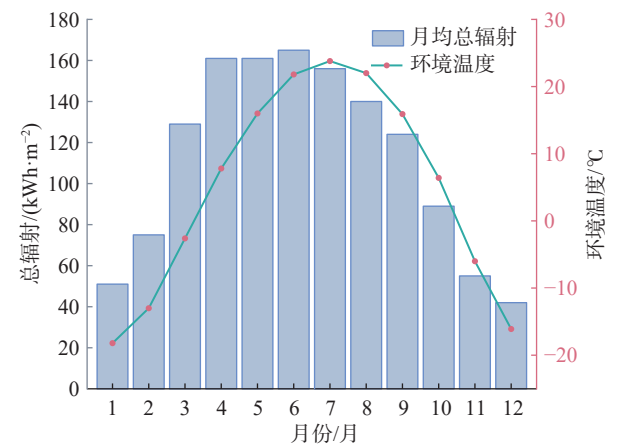


图 1 大庆月均总辐射和环境温度
Fig.1 Monthly average global radiation and ambient temperature in Daqing

油井开采的原油一般是由油、水和气组成的混合物,本设计考虑到原油中气组分的含量相对较少,故忽略,在计算时只考虑原油中的油、水这两种成分。设计原油进入加热系统的进口温度

为 10~20℃,经过系统加热后的原油出口温度为 60~70℃。根据油田实际可知,原油的质量流量为 12 t/d,具体的原油物性参数如表 1 所示。计算可知,原油的比定压热容为 2.275 kJ/kg·K。

表 1 原油的物性参数
Tab.1 Parameters of the crude oil

成分	质量流量/(t·d ⁻¹)	比定压热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
油	9.6	1.89
水	2.4	4.20

假定系统在夏季运行时,原油的最低进口温度为 20℃,经过本太阳能原油加热系统加热后的原油出口温度为 70℃,进出口温差 $\Delta\theta=50^\circ\text{C}$ 。在上述的进出口条件下,加热原油实际所需的热负荷 Q 的计算公式如下:

$$Q = m_o c_{p,o} \Delta\theta + m_w c_{p,w} \Delta\theta \tag{1}$$

式中: m_o 为油的质量流量; $c_{p,o}$ 为油的比定压热容; m_w 为水的质量流量; $c_{p,w}$ 为水的比定压热容。

经计算,本系统加热原油实际所需的热负荷 $Q=16.33\text{ kW}$ 。

2 太阳能原油加热系统设计及模拟

2.1 系统原理

太阳能原油加热系统主要由太阳能集热系统和辅助加热系统组成,系统原理如图 2 所示。

其中:太阳能集热系统主要由平板式集热器、储热油罐、充热循环油泵 P1、放热循环油泵 P2 和阀门 V3~V6 等组成,其管路中循环介质为导热油;而辅助加热系统主要由电加热器和调温阀 V1、V2、V7、V8 等组成,其管路中介质为原油。太阳能集热系统和辅助加热系统之间的能量交换通过管壳式换热器进行。在太阳能集热与储热循环中,储热油罐充热出口和换热器热侧出口的导热油通过平板式集热器吸收太阳能热量,再将热量传递到管壳式换热器和储热油罐中。来自储热油罐放热出口的高温导热油流经管壳式换热器,与辅助加热系统侧的原油进行热交换。在辅助加热系统中,从冷端进入的原油经过管壳式换热器、电加热器加热后,温度升高,达到设定温度后从热端流出。

2.2 系统部件选择

a. 平板式集热器的面积计算^[26]

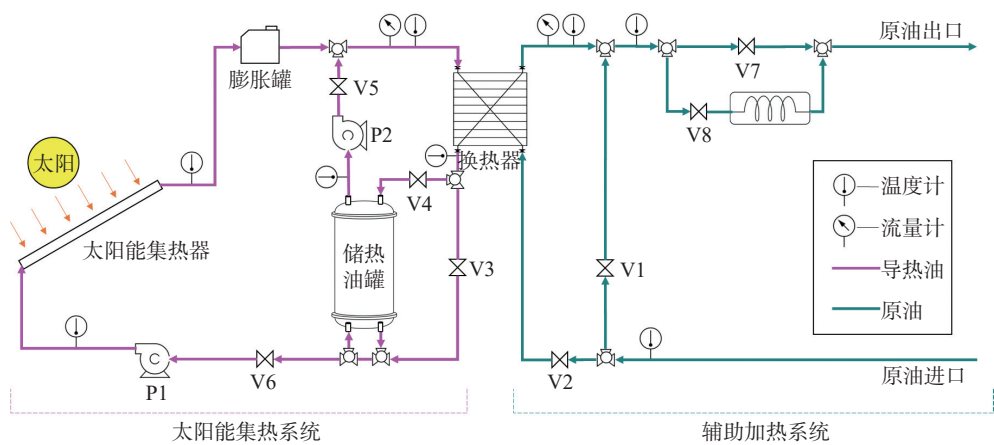


图 2 太阳能原油加热系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of solar crude oil heating system

$$A_c = \frac{86\,400 Q_J f}{J_a \eta_{cd} (1 - \alpha_L)} \quad (2)$$

式中： A_c 为平板集热器总面积； f 为太阳能保证率，大庆地区取 0.45； Q_J 为加热原油所需的热负荷，其值为 Q 增加 10% 余量； J_a 为集热器采光面上年平均日太阳辐照量，经查表大庆地区为 $12.923 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ ； η_{cd} 为集热器平均集热效率，取 0.58； α_L 为管路及储热油罐热损失率，取 0.04。

经计算，得到集热器总面积为 97.26 m^2 。为了提高系统的可靠性和稳定性，确保系统在各种气候情况下都能够正常运行，最终确定集热器总面积为 100 m^2 。

b. 传热介质选择

综合考虑系统运行特性和所在地区气候条件等因素，传热介质需具有良好的导热性、热稳定性和可靠性。本系统选用 L-QD350 导热油，其具有优异热稳定性，高温下不易结焦积碳，使用温度范围广，满足系统运行需求。其物性参数如表 2 所示。

表 2 导热油的物性参数

Tab.2 Parameters of the thermal oil

参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	865
比定压热容/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1.95
导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.133

c. 储热油罐的容积计算

储热油罐储存升温后的导热油，在白天太阳充足时，导热油以进口温度 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 、出口温度 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 进出换热器与原油换热，进出口温差 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为了满足夜间的原油加热需求，假定夜间加热负荷为

全天负荷的 2/3，由此可计算所需导热油量。

$$V_t = \frac{2}{3} \cdot \frac{86\,400 Q}{c_{p,t} \Delta \theta_t \rho_t} \quad (3)$$

式中： V_t 为储热油罐的容积； $c_{p,t}$ 为导热油的比定压热容； ρ_t 为导热油的密度； $\Delta \theta_t$ 为储热油罐进出口导热油温差。

经计算，得到储热油罐容积为 18.59 m^3 ，为了方便储热油罐制造和安装，最终确定储热油罐容积为 19 m^3 ，尺寸为 $2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$ 。

d. 管壳式换热器的换热面积计算^[27]

为了保证本系统的传热性能和可靠性，采用管壳式换热器作为换热设备，其中原油在管程中流动，导热油在壳程中流动。

$$A_{hx} = \frac{(1-L)Q}{\varepsilon U_{hx} \Delta \theta_j} \quad (4)$$

式中： A_{hx} 为管壳式换热器的换热面积； L 为储热油罐到换热器的管路热损失率，取 0.02； ε 为结垢影响系数，取 0.7； U_{hx} 为换热器传热系数，取 $20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ； $\Delta \theta_j$ 为传热温差，为 $30.34 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

经计算，得到管壳式换热器的换热面积为 41.67 m^2 。

为了保证太阳能原油加热系统在应用场景的长期运行效果，在 TRNSYS 平台上搭建了系统仿真模型，进行全年逐时动态模拟，详见图 3。

TRNSYS 软件中各组件的输入参数包括：气象条件、集热器属性、导热油物性参数等。输入的天气数据为使用 Meteonorm8 软件导出的 TMY2 格式数据文件，相关部件经过选型计算，具体参数如表 3 所示。

2.3 系统的温控策略

为了提高大庆油田的太阳能利用率，并发挥

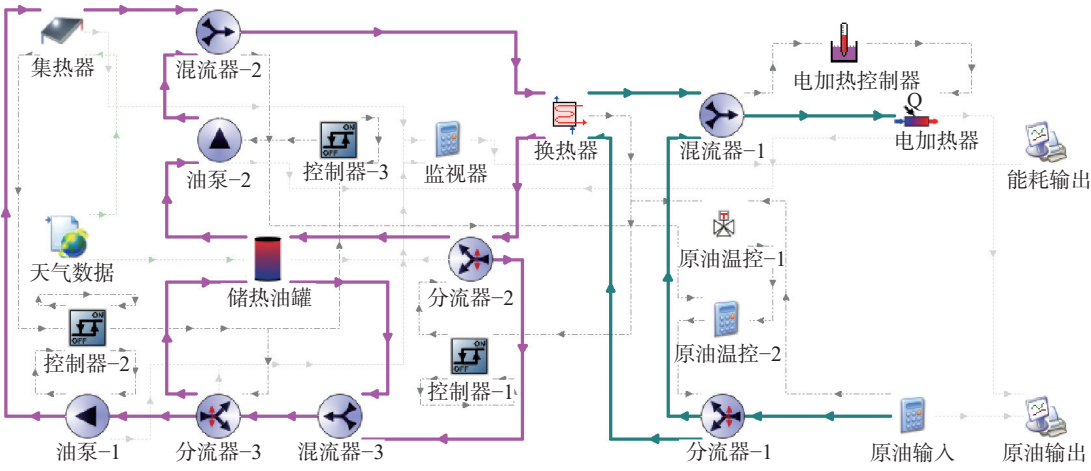


图3 TRNSYS逐时动态系统性能分析模型

Fig.3 Analysis model for the transient system dynamic performance by using TRNSYS

表3 TRNSYS输入端参数
Tab.3 Input parameters of TRNSYS

组件	输入参数	数值
Type1b/平板式集热器	集热器面积/m ²	100
	集热器倾角/(°)	45
Type158/储热油罐	油罐容积/m ³	19
	油罐高度/m	4.2
Type5g/换热器	总换热系数/(W·K ⁻¹)	833.4
Type138/电加热器	最大加热功率/kW	18
	设定加热温度/℃	60

本太阳能原油加热系统的节能潜力，本文结合系统各设备性能指标和当地的天气参数，制定了符合应用场景的温控策略，对太阳能原油加热系统进行协调控制。该温控策略的核心在于通过实时监测关键温度参数来动态调整系统运行模式，其监测参数包括：集热器进出口导热油温差($\Delta\theta_c$)、换热器出口导热油温度($\theta_{1,out}$)、换热器进口导热

油温度($\theta_{1,in}$)、换热器出口原油温度($\theta_{2,out}$)。温控策略分为太阳能集热系统和辅助加热系统2个子系统，各自包含多种运行模式。

太阳能集热系统运行控制策略如下：当 $\Delta\theta_c>5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $\theta_{1,out}\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，模式1-1(热导热油直供)，如图4(a)所示；当 $\Delta\theta_c>5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $\theta_{1,out}>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，模式1-2(储热油罐充热)，如图4(b)所示；当 $\Delta\theta_c\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，模式1-3(储热油罐放热)，如图4(c)所示。

辅助加热系统运行控制策略如下：当 $\theta_{1,in}\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，模式2-1(全辅助加热)，如图4(d)所示；当 $\theta_{1,in}>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $\theta_{2,out}\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，模式2-2(联合供热)，如图4(e)所示；当 $\theta_{1,in}>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $60\text{ }^{\circ}\text{C}<\theta_{2,out}\leq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，模式2-3(直接输出)，如图4(f)所示；当 $\theta_{1,in}>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $\theta_{2,out}>70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，模式2-4(温度调节模式)，如图4(g)所示。

整个太阳能原油加热系统的温控策略逻辑如图5所示，系统的具体运行模式如表4所示。

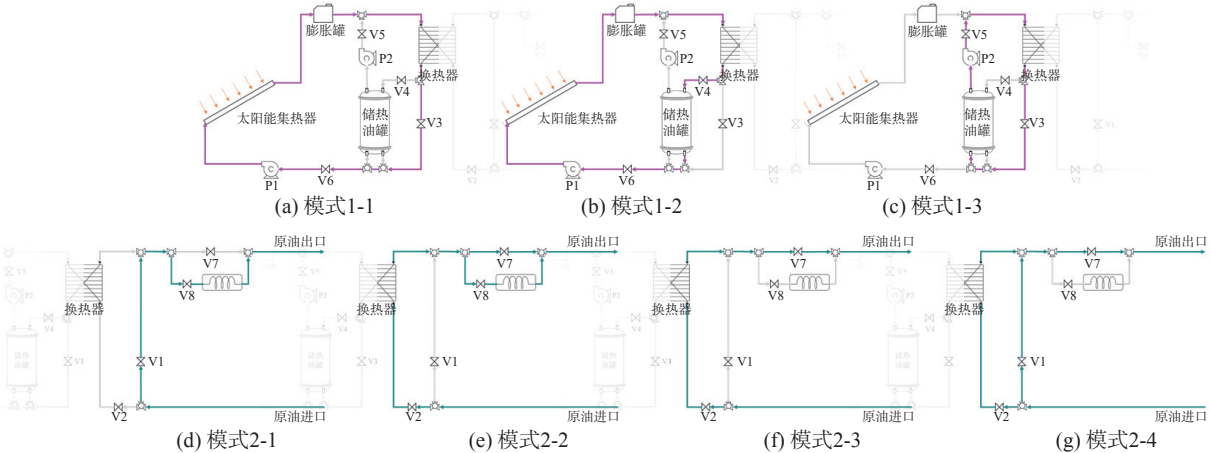


图4 太阳能原油加热系统运行模式示意图

Fig.4 Schematic diagram of solar crude oil heating system operation mode

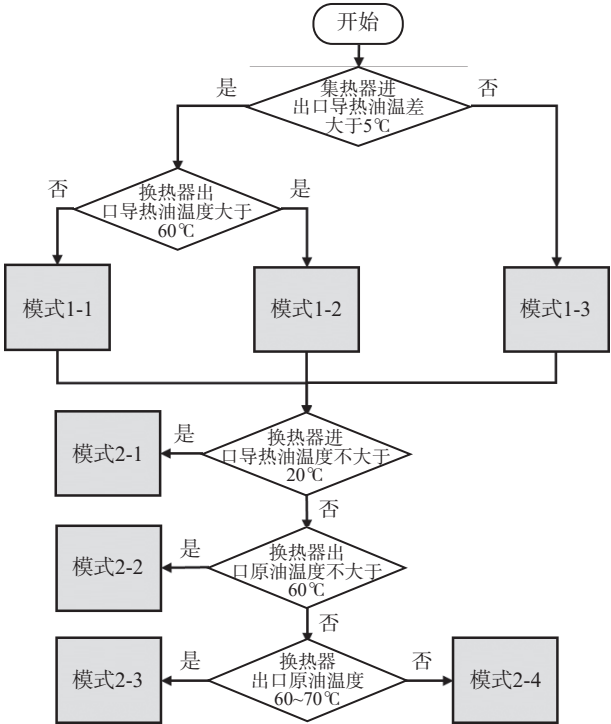


图 5 太阳能原油加热系统温控策略逻辑图

Fig.5 Logic diagram of temperature control strategy for the solar crude oil heating system

3 结果分析

本文使用大庆地区典型年共 8 760 h 的逐时气象数据进行系统仿真模拟。在 TRNSYS 中使用 Equation 组件输入原油进口温度为 20 ℃，流量为 500 kg/h，仿真模拟结果与分析如下。

3.1 原油进出口温度

图 6 为原油加热系统全年运行时，根据温控策略调控的原油出口温度变化曲线。可以看出，原油进口温度在 20 ℃ 时，经过本系统加热后，原油出口温度可以基本稳定维持在 60~70 ℃，最高温度为 70.4 ℃，最低温度为 59.3 ℃，平均出口温

度为 60.6 ℃，能够满足原油输运的加热需求。一天中，温度最高和太阳辐照量最大的时刻集中在中午时间段。此时，2 个子系统分别通过开启储热油罐前端阀门、启用调温阀调控这 2 种策略，可以将原油出口温度控制在 70 ℃ 以下，在增加原油流动性的同时，最大可能地减少热量损失。在太阳辐照量不足和夜间时，2 个子系统分别启用储热油罐和电加热器联合供热，增加经济性的同时，提高系统运行稳定性。

3.2 典型周运行特性分析

系统按温控策略运行，在夏季和冬季的一个典型周内的储热油罐相关温度变化曲线和各模块供热情况如图 7 所示。其中，夏季典型周为全年中的 4 320~4 488 h，冬季典型周为全年中的 8 016~8 184 h。可以看出，充热温差曲线、放热温差曲线、储热油罐平均温度曲线与原油出口温度曲线的变化趋势基本保持一致，表明储热油罐能够将集热器吸收的热量及时储存并传递到换热器供原油加热。集热器、电加热器、储热油罐供热功率交替出现波峰，表明系统在不同时间段内，根据实时需求和条件，灵活调整各个组件的运行状态，达到能源利用效率最大化和运行成本最小化的最佳运行状态。

由图 7(a)、图 7(c) 可知，夏季典型周的充热与放热的最高温差分别为 44.9 ℃ 和 37.4 ℃，而冬季典型周的充热与放热的最高温差分别为 7.9 ℃ 和 0 ℃。这是由于日间太阳能集热系统启动循环，系统切换为模式 1-2，导热油在平板集热器中吸收热量后对储热油罐加热，使得储热油罐充热时进出口温差增大。而在太阳能集热系统处于模式 1-3 时，系统由储热油罐供热，使得储热油罐放热进口端的导热油温度提高，与出口端的导热油温差

表 4 太阳能原油加热系统运行模式

Tab.4 Operation mode of the solar crude oil heating system

系统运行模式		监测值	模式描述
太阳能集热系统	模式1-1	$\Delta\theta_c>5\text{ }^{\circ}\text{C}, \theta_{1,\text{out}}\leq60\text{ }^{\circ}\text{C}$	热导热油直供
	模式1-2	$\Delta\theta_c>5\text{ }^{\circ}\text{C}, \theta_{1,\text{out}}>60\text{ }^{\circ}\text{C}$	储热油罐充热
	模式1-3	$\Delta\theta_c\leq5\text{ }^{\circ}\text{C}$	储热油罐放热
辅助加热系统	模式2-1	$\theta_{1,\text{in}}\leq20\text{ }^{\circ}\text{C}$	停用太阳能集热系统,开启辅助加热系统
	模式2-2	$\theta_{1,\text{in}}>20\text{ }^{\circ}\text{C}, \theta_{2,\text{out}}\leq60\text{ }^{\circ}\text{C}$	太阳能集热系统和辅助加热系统联合供热
	模式2-3	$\theta_{1,\text{in}}>20\text{ }^{\circ}\text{C}, 60\text{ }^{\circ}\text{C}<\theta_{2,\text{out}}\leq70\text{ }^{\circ}\text{C}$	满足温度条件,直接输出
	模式2-4	$\theta_{1,\text{in}}>20\text{ }^{\circ}\text{C}, \theta_{2,\text{out}}>70\text{ }^{\circ}\text{C}$	停用辅助加热系统,温度由支路控制

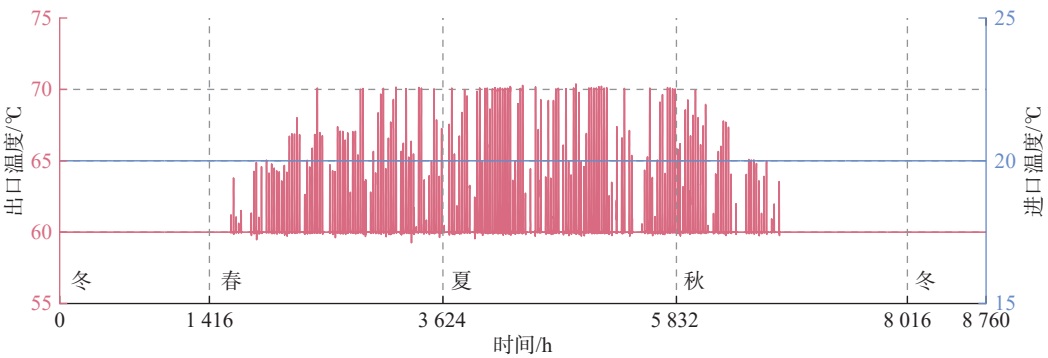


图 6 原油进出口温度

Fig.6 Inlet and outlet temperature of the crude oil

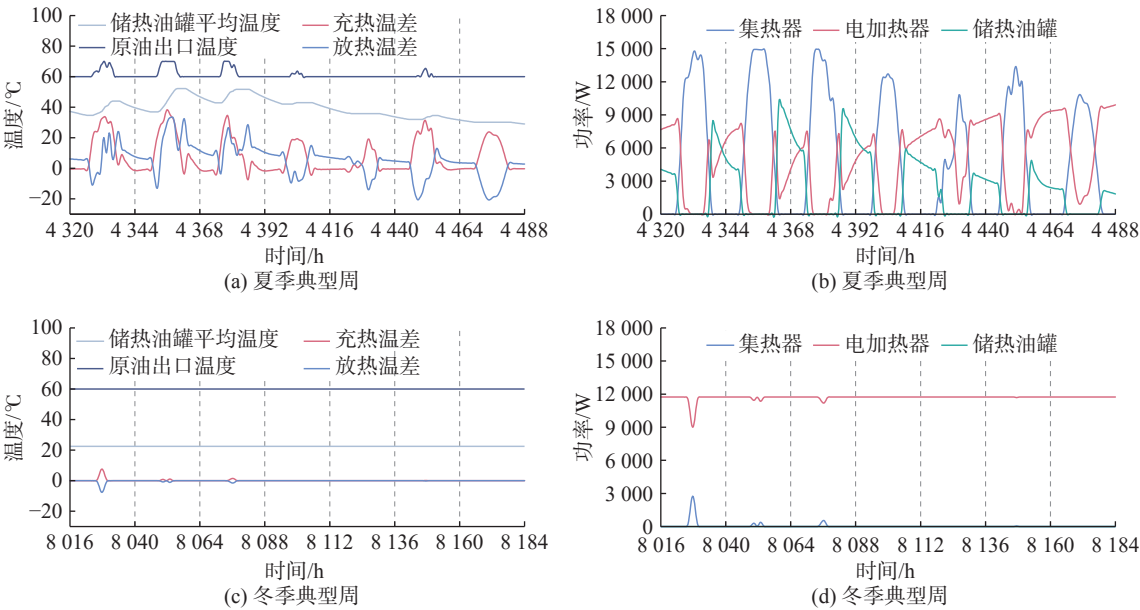


图 7 系统夏冬季典型周运行特性

Fig.7 Typical weekly operation characteristics of the system in summer and winter

减小，换热能力下降致使储热油罐放热时进出口温差减小。同时，由于大庆地区冬季太阳辐照量低且气候严寒，冬季几乎不会启用储热油罐，由集热器和辅助电加热联合供热。

在 TRNSYS 中，储热油罐充热进口、放热出口温度是由储热油罐上一组件“分流器-2”输出的。这导致夏季时，在储热油罐进行充热时，放热温差显示为负值，即放热出口减放热进口温度为负值；冬季时，存在充热温差且放热温差为负值，但是从储热油罐平均温度可看出，实际上并没有对储热油罐进行充热。

在夏季，太阳能集热量充裕，白天可以达到设计要求为原油供热，并且多余的热量为储热油罐充热，夜间主要由储热油罐中热油和电加热器供热。以图 7(b) 中夏季第 1 天为例，凌晨时段，由于储热油罐中热量不足以继续供热，放热温差

接近 5℃，此时 2 个子系统分别处于模式 1-3 和模式 2-2，系统所需热负荷主要由辅助加热系统的电加热器提供。日出时段，太阳能较弱，2 个子系统切换为模式 1-1 和模式 2-2，集热器供热量略低于原油端热负荷，启用电加热器辅助加热；上午及下午时段，太阳能较强，2 个子系统切换为模式 1-1 和模式 2-3，集热器供热量和原油端热负荷匹配；中午时段，太阳辐照度接近峰值，集热器出口温度急剧升高，2 个子系统切换为模式 1-2 和模式 2-4，此时辅助加热系统启用调温阀调节原油出口温度，同时太阳能集热系统为储热油罐充热；日落时段，2 个子系统切换为模式 1-3 和模式 2-3，储热油罐温度达到一天的峰值，开始转换为储热油罐供热。夜间时段，储热油罐中热量充足，但是放热出口温度不足加热原油至设定值，故由储热油罐和电加热器联合供热，2 个子系统分别切换为

模式 1-3 和模式 2-2。之后的几天,由于天气影响,太阳辐照量降低,白天为储热油罐充热量逐渐减少,导致储热油罐平均温度逐渐降低,储热油罐供热量也随之下降,故由电加热器承担热负荷增加。

在冬季,太阳辐照量低且气候严寒,少数白天可由集热器提供少量热量,主要热量由辅助加热系统提供,其他大部分时间关闭太阳能集热系统,完全由电加热器供热。以图 7(d) 中冬季第 1 天为例,凌晨至日出时段,由于储热油罐无剩余热量且温度过低,导致进入换热器导热油温度低于 20 ℃,故 2 个子系统分别处于模式 1-3 和模式 2-1。日出至日落时段,太阳能仅能提供少量热量,无多余热量储存进储热油罐,2 个子系统分别切换为模式 1-1 和模式 2-2。日落至第二天凌晨时段,太阳能已不能分担原油端热负荷,故完全由

电加热器供热,2 个子系统分别切换为模式 1-3 和模式 2-1。之后的几天,太阳辐照量进一步减弱,集热器提供热量也随之减少,太阳能集热系统大部分时间关闭,系统主要由电加热器供热。

3.3 光热、电加热器、储热油罐供热量占比

平板集热器获得的热量分别用于直接加热原油和用于储热油罐储热,图 8 中所述的光热部分为直接加热原油的部分。由图 8 可知,光热的供热量占比呈现先上升后下降的变化趋势,其中最大供热量占比在 6 月,其值为 41.87%,这与当地的外界环境温度和太阳辐照度有关。

电加热器的供热量占比呈现先降低后升高的变化趋势。受太阳能集热系统供热量与外界环境变化的影响,在 5—8 月时,电加热器供热量占比明显下降,最低为 35.21%,原油加热所需热量主要由平板集热器和储热油罐供给。

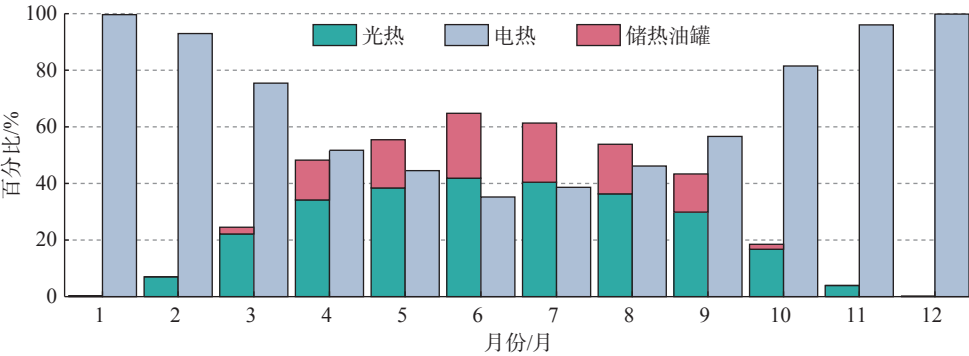


图 8 光热、电加热器和储热油罐逐月供热量占比

Fig.8 Monthly proportion of heat supply from collectors, electric heater sources and thermal oil storage tanks

在 4—9 月,储热油罐发挥储热及供热作用。在 6 月,储热油罐供热量占比达到最大值 22.93%,但是在 9 月后,储热油罐供热量占比明显降低,主要原因是进入冬季后,环境温度骤降,平板集热器获得的热量主要用于直供,储热油罐平均温度逐渐下降,剩余热量耗尽。平板集热器与储热油罐与环境条件变化关联性大,二者可在晚春、夏、早秋时发挥优势为原油加热供热,而在冬、早春、晚秋时仍然主要依靠电加热器供给热量。

3.4 经济性分析

a. 系统运行费用

对于相同的应用场景,将本文设计的太阳能原油加热系统与传统的原油加热系统进行对比经济性分析。传统的原油加热系统多为使用化石燃料或直接使用纯电加热,故本节分析中的传统原油加热系统为使用纯电加热的系统,主要耗能设

备为电加热器。

本系统使用的大庆 35 kV 大工业用电电价为 0.570 8 元/kW·h。从图 9 可以看出,在本应用场景下,传统原油加热系统月平均运行费用为 7 500.31 元,整年运行费用为 90 003.74 元,总能耗为 157 680 kW·h,折标煤 19.39 t(理论发电标煤耗为 123 g/kW·h)。而本文太阳能原油加热系统月平均运行费用为 3 993.39 元,整年运行费用为 47 920.74 元,总能耗为 83 953.64 kW·h,折标煤 10.33 t。系统全年综合能耗降低 46.76%,减排 CO₂ 共 70.70 t,年运行费用节省 42 083 元。

b. 系统初投资成本及回收期

本文太阳能原油加热系统初投资成本主要由表 5 中所述项目组成。其中:平板集热器单块集热面积约 1.86 m²,总共需 54 块集热器;管道及平板集热器内部的导热油约 0.18 m³,储热油罐内导

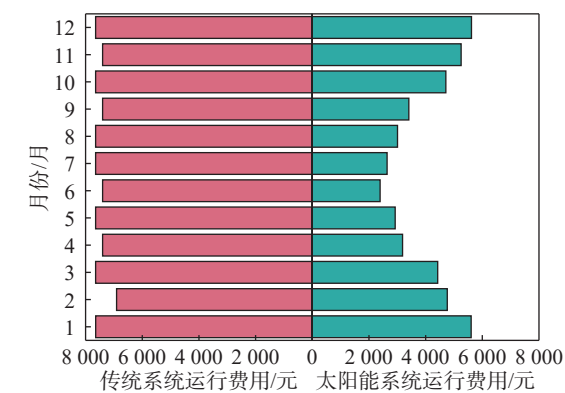


图9 系统逐月运行费用对比

Fig.9 System monthly operating cost comparison

热油总量为 19 m³；系统控制设备包括电磁阀 8 件、调温阀 1 件、止回阀 2 件、电磁流量计 2 件和测温探头 8 件；DN25 不锈钢管在系统中预计需使用 182 m。

表 5 系统初投资成本

Tab.5 System initial investment cost

项目	单价	总价/万元
平板集热器	750元/块	4.05
储热油罐	16000元/台	1.60
电加热器	4500元/台	0.45
管壳式换热器	20000元/台	2.00
导热油泵	1100元/台	0.22
膨胀罐	1200元/件	0.12
电磁阀	110元/件	0.088
调温阀	1000元/件	0.10
止回阀	230元/件	0.046
导热油	8.5元/L	16.30
电磁流量计	1500元/件	0.30
测温探头	160元/件	0.128
DN25不锈钢管	12.8/m	0.233

投资成本回收期的计算公式为

$$B = \frac{C_o}{S} \tag{5}$$

式中： B 为静态初投资回收期； C_o 为搭建系统所需的初成本； S 为系统运行年节省费用。

$$N = \sum_{y=1}^D \frac{S}{(1+r)^y} - C_o \tag{6}$$

式中： N 为净现值，当大于 0 时说明项目收益为正； D 为动态初投资回收期； r 为折现率，对于供

热项目取 5%； y 为系统运行时间，年。

可计算出，本文太阳能原油加热系统的初投资总成本为 25.635 万元，静态初投资回收期为 6.09 年，动态初投资回收期为 7.55 年。

c. 每单位能量成本及系统综合效率

$$P = \frac{C_o + y_0 C_y - C_r}{y_0 Y} \tag{7}$$

式中： P 为每单位能量成本； C_y 为系统年运行费用； C_r 为系统的残余价值，对本系统预估为 2.34 万元； Y 为系统年产能； y_0 为系统设计运行年限，为 15 年。

$$\lambda = \frac{E_{hx} + E_e}{E_{co} + E_e + E_{pu}} \tag{8}$$

式中： λ 为系统综合效率； E_{hx} 为换热器输出的能量； E_e 为电加热器消耗的能量； E_{co} 为太阳能集热器输入的能量； E_{pu} 为泵消耗的能量。

可计算出，本文太阳能原油加热系统的每单位能量成本为 0.86 元/kW·h，系统综合效率为 89.77%。

4 结 论

本研究针对传统原油加热系统能耗高、环境影响大的问题，设计了一套适用于黑龙江省大庆油田的太阳能原油加热系统。结合当地气候条件和系统各装置性能，制定了详细的运行策略，并利用 TRNSYS 软件进行了全年逐时仿真模拟分析。研究结果表明：

a. 本系统通过对太阳能与电能的合理配置，实现了原油加热系统的高效运行和能源梯级利用。

b. 所提出的温控策略可以使系统灵活适配运行需求和条件，其不仅适用于大庆油田，还可为其他地区的原油加热系统提供参考。

c. 所设计的太阳能原油加热系统能够稳定运行，且充分利用太阳能供热，满足原油加热需求，原油出口温度平均达到 60.6 ℃，全年中在 6 月，太阳能供热量占比最高达到 41.87%。

d. 与传统原油加热系统相比，该系统全年综合能耗降低 46.76%，年运行费用节省 42 083 元，减排 CO₂ 共 70.70 t。系统静态和动态初投资回收期分别为 6.09 年和 7.55 年，每单位能量成本为 0.86 元/kW·h，系统综合效率达到 89.77%，具有良好的经济性和显著的节能减排效果。

未来研究可进一步探索系统优化和智能控制策略,以及考虑不同气候条件下的系统性能评估,为推动清洁能源在油气行业的应用提供理论和技术支持。

参考文献:

- [1] 常小虎,赵毅,郝芸,等. 纳米流体在原油加热系统中的定量实验研究[J]. 现代化工, 2020, 40(6): 160-164.
- [2] 丁月华,陈渝广,曾宪强. 原油集输风光电一体化节能技术[J]. 油气储运, 2006, 25(4): 43-46,5,62.
- [3] 于淼. 真空相变加热炉电控系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [4] 马卫国,孙洪钰,冯定. 油田用加热炉技术现状与发展方向[J]. 石油机械, 2006, 34(10): 70-71.
- [5] CHEPELIEV M, VAN DER MENSBRUGGHE D. Global fossil-fuel subsidy reform and Paris Agreement[J]. *Energy Economics*, 2020, 85: 104598.
- [6] MAHMOUD M, RAMADAN M, NAHER S, et al. The impacts of different heating systems on the environment: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 142625.
- [7] OBAIDEEN K, ALMALLAHI M N, ALAMI A H, et al. On the contribution of solar energy to sustainable developments goals: case study on Mohammed bin Rashid al Maktoum solar park[J]. *International Journal of Thermofluids*, 2021, 12: 100123.
- [8] LI G, LI M, TAYLOR R, et al. Solar energy utilisation: current status and roll-out potential[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 209: 118285.
- [9] 王岗,全贞花,赵耀华,等. 太阳能-热泵复合供能系统[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 2132-2139.
- [10] BADRAN A A, HAMDAN M A. Utilization of solar energy for heating fuel oil[J]. *Energy Conversion and Management*, 1998, 39(1/2): 105-111.
- [11] LASICH J, KAILA N. Helitherm-solar power throughput enhancement and heat tracing for heavy oil pipelines[C]//Paper Presented at the SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Porlamar: SPE, 2001.
- [12] TESTA D, CARNELLI L, CORSO G, et al. Concentrating solar power applied to EOR: high temperature fluid circulation for enhancing the recovery of heavy oil[C]//Paper Presented at the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. Ravenna: OMC, 2015.
- [13] ALTAYIB K, DINCER I. Analysis and assessment of using an integrated solar energy based system in crude oil refinery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113799.
- [14] 贾庆仲. 太阳能在石油输送中的应用研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4): 483-487.
- [15] 孟凤果,滑洁,潘蒙. 原油集输系统太阳能集热器电辅加热的智能控制[J]. 油气田地地面工程, 2009, 28(3): 11-12.
- [16] 高丽. 太阳能电加热组合技术在油田生产中的应用[J]. 节能技术, 2012, 30(5): 428-430.
- [17] 解建辉,王海鹏. 论太阳能原油加热系统在油田的应用推广[J]. 石油石化节能, 2022, 12(1): 51-54.
- [18] 林长华,李洋,陈红伟,等. 太阳能加热原油系统设计与热力学性能分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2023, 43(1): 43-48.
- [19] LIU Z M, KARIMI I A. Simulating combined cycle gas turbine power plants in Aspen HYSYS[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 1213-1225.
- [20] ABDULRAHMAN I. An open-source Simulink-based program for simulating power systems integrated with renewable energy sources[J]. *Electrical Engineering*, 2020, 102(4): 2181-2192.
- [21] CRAWLEY D B, LAWRIE L K, WINKELMANN F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program[J]. *Energy and Buildings*, 2001, 33(4): 319-331.
- [22] FRITZSON P, ARONSSON P, POP A, et al. OpenModelica - a free open-source environment for system modeling, simulation, and teaching[C]//Proceedings of 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Munich: IEEE, 2006: 1588-1595.
- [23] 吴洋洋,蔡江阔,赵雪峰,等. 太阳能油储维温系统动态能流分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 141-147.
- [24] 朱尚文,李栋,张谧,等. 浮顶油罐太阳能相变维温系统运行特性分析[J]. 节能技术, 2022, 40(3): 248-252.
- [25] 李景营,李凤名,王东,等. 电加热辅助太阳能集热的数值模拟研究[J]. 节能, 2022, 41(4): 23-26.
- [26] GB 50495—2019, 太阳能供热采暖工程技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [27] 郑瑞澄. 民用建筑太阳能热水系统工程技术手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2011.

(编辑:董伟)