

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.033

太阳能-地源热泵式沼气工程加温系统 TRNSYS 模拟

石惠娴¹ 徐得天¹ 朱洪光² 张亚雷² 孟祥真² 郭长城²

(1. 同济大学新农村发展研究院, 上海 200092; 2. 同济大学国家设施农业工程技术研究中心, 上海 200092)

摘要: 利用 TRNSYS 软件对太阳能-地源热泵式沼气工程加温系统进行仿真模拟, 得出该系统某一典型天和全年能量利用效果: 在冬季最冷的典型一天, 总供热包括热泵耗电量、水泵耗电量、地埋管和集热器总集热量共 225.52 MJ/d; 总耗热包括沼气池维护结构散热和加温料液负荷共 208.57 MJ/d。除去无供热效果的水泵耗电部分, 能量输入和沼气池热负荷基本趋于平衡; 系统全年共消耗热量 46 657.32 MJ, 可再生能源(太阳能和地热能)提供 74%; 其中, 太阳能热利用贡献 63%, 地热能贡献 37%, 表明该加温系统可高效利用可再生能源。系统全年向地下蓄热总量为 7 630.99 MJ, 吸热总量为 12 954.81 MJ, 蓄热量虽不能完全满足供热量的需求, 但可以在一定程度上缓解土壤的冷热失衡。

关键词: 沼气工程; 加温系统; 太阳能-地源热泵式; 能耗; TRNSYS 模拟

中图分类号: S216.4; TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0288-08

TRNSYS Simulation of Integrated Solar and Ground Source Heat Pump for Biogas Digester Heating System

SHI Huixian¹ XU Detian¹ ZHU Hongguang² ZHANG Yalei² MENG Xiangzhen² GUO Changcheng²

(1. Institute of New Rural Development, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. National Engineering Research Center of Protected Agriculture, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The energy structure of energy supply project always adopts traditional and renewable energy together for the past years. However, for the future development, renewable energy will gradually increase the proportion, or even completely replace the traditional energy. The actual energy supply engineering energy utilization effect is worthy of attention. There are two schemes to discuss: engineering test and software simulation. Engineering test will be time-consuming, while software simulation can save a great deal of costs, as well as carry out the design and verification of various control schemes. Therefore, the integrated solar-ground source heat pump for biogas digester heating system simulation was studied. The typical day and year energy utilization effects of the heating system were obtained by using TRNSYS platform with Type109 – TMY2 (reader and meteorological data processor), Type71 (vacuum tube solar collector), Type60 (storage tank), Type3b (circulating pump), Type60c (methane), Type668 (heat pump), Type557b (buried pipe), Type14h (operation controller), Type25a (print results) modules. Results showed that in the typically coldest winter day, the total heat supplying capacity was 225.52 MJ/d, which included heat pump power consumption (57.24 MJ/d), water pump power consumption (13.39 MJ/d), buried tube (71.93 MJ/d) and solar collector (82.96 MJ/d). The total heat dissipation capacity was 208.57 MJ/d, which contained biogas pool maintenance structure heat (132 MJ/d) and liquid heating load (76.57 MJ/d). The annual total heat consumption of the system was 46 657.32 MJ, the renewable energy included solar contribution (63%) and geothermal contribution (37%), which accounted for 74%. It showed that renewable energy sources were efficiently utilized in the heating system. Furthermore, the system can store 7 630.99 MJ/a of heat to the ground but the heat absorption capacity was 12 954.81 MJ/a. Although the heat storage capacity cannot meet the demand of heat supply, it can alleviate the cold and hot imbalance of soil to some extent.

Key words: biogas project; heating system; integrated solar and ground source heat pump; energy consumption; TRNSYS simulation

收稿日期: 2017-05-31 修回日期: 2017-06-13
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA103006-02)
作者简介: 石惠娴(1969—),女,副教授,博士,主要从事农业设施领域可再生能源应用研究,E-mail: huixian_shi@tongji.edu.cn

换热器、热泵主机、U 型地埋管换热器(蓄热水箱)、热泵负载侧水泵 B2 和热泵源侧水泵 B1;太阳能地下蓄热系统包括循环泵 B4、U 型地埋管换热器和中转蓄热水箱。

在实际运行中,太阳能-地源热泵式沼气工程加温系统有 4 种运行模式:①太阳能直供模式:当沼气池内温度低于 32℃,且中转蓄热水箱中水温高于 50℃,系统按照太阳能直供模式运行;沼气池内温度高于 37℃或中转蓄热水箱水温低于 45℃,模式停止。该运行模式的能量流动环路为:太阳能集热器—蓄热水箱—水泵 B4—沼气池内盘管换热器—蓄热水箱—水泵 B3—太阳能集热器。②太阳能热泵加温模式(太阳能为低位热源):当沼气池内温度低于 32℃,且中转蓄热水箱中水温低于 30℃而高于地埋管换热器回水温度时,系统按照太阳能热泵供暖模式运行;当沼气池内温度高于 37℃,停止加热。该运行模式的能量流动环路为:太阳能集热器—蓄热水箱—水泵 B1—热泵机组蒸发器—蓄热水箱;热泵机组冷凝器—沼气池内盘管换热器—水泵 B2—热泵机组冷凝器。③地源热泵单独加温模式:当沼气池内温度低于 32℃,中转蓄热水箱中水温低于地埋管换热器出口温度时,系统按照地源热泵供暖模式运行;当沼气池内温度高于 37℃,停止加热。该运行模式的能量流动环路为:地埋管—水泵 B1—热泵机组蒸发器—地埋管;热泵机组冷凝器—沼气池内盘管换热器—水泵 B2—热泵机组冷凝器。④太阳能地下蓄热模式:沼气池内温度高于 35℃,中转蓄热水箱中水温高于 70℃时,系统按照太阳能地下蓄热模式运行;当中转蓄热水箱中的水温降低至 50℃时,停止该模式的运行。该运行模式的能量流动环路为:太阳能集热器—蓄热水箱—水泵 B4—地埋管—蓄热水箱—太阳能集热器。

2 模型构建

在图 1 基础上构建太阳能-地源热泵式沼气工程加温系统 TRNSYS 模拟模型。针对太阳能-地源热泵式沼气池加温系统特点,TRNSYS 软件仿真模拟该系统应包括气象参数、真空管太阳能集热器、热泵机组、蓄热水箱、沼气池、地埋管、水泵、运行控制器、运算结果打印等,它们在 TRNSYS 中对应的模块如表 1 所示。

根据表 1 中仿真模块,建立太阳能-地源热泵沼气池加温系统 TRNSYS 仿真模型,如图 2 所示。

太阳能-地源热泵沼气池加温系统 TRNSYS 仿真模型模块标准部件参数设置如下:气象数据读取器和处理器(Type109-TMY2)部件,用于读取天气

表 1 太阳能-地源热泵沼气池加温系统 TRNSYS 仿真模型模块
Tab.1 Module of TRNSYS simulation model of integrated solar and ground source heat pump for biogas digester heating system

功能	模块	备注
气象参数	Type109-TMY2	上海地区气象参数
太阳能集热器	Type71	真空管
蓄热水箱	Type60cNoHeat	2 个进口、2 个出口
水泵	Type3b	4 个
热泵机组	Type668	TESS 模块
地埋管	Type557b	TESS 模块
沼气池	Type60c	内部盘管换热器模型
运算结果打印	Type25a	
运行控制器	Type14h	

参数并进行处理,以计算任意表面太阳辐射能。输入参数有地面反射系数、表面倾斜角和表面方位角。真空管太阳能集热器(Type71)部件涉及串联集热器的数量、集热器面积(16 m²)、流体的比热容(4.19 kJ/(kg·K))和效率模式。输入参数有进口温度(循环泵输入)、进口流量(循环泵输入)和环境温度(Type109 输入环境温度);输出参数有出口温度、出口流量和有效集热量。蓄热水箱(Type60)部件涉及用户指定的进口位置、水箱体积(2 m³)、水箱高度、进口 1 的高度、出口 1 的高度、进口 2 的高度、出口 2 的高度、流体的比热容、流体密度、水箱损失系数和流体的导热率。输入参数包括进口 1 的流量、进口 1 的温度、出口 1 的流量、出口 2 的流量、出口 2 的温度和环境温度;输出参数包括出口 1 的温度、进口 2 的流量和热量损失。循环泵(Type3b)部件输入参数有进口温度和进口质量流量,控制信号(Type14h 提供)部件;输出参数有出口温度和出口流量。沼气池(Type60c)部件涉及用户指定的进口位置、池体体积(69 m³)、池体高度、进口 1 的高度、出口 1 的高度、流体的比热容、流体密度、池体损失系数、流体的导热率、换热器内径、换热器外径、换热器总表面积、换热器长度、换热器壁面导热率、换热器材料导热率、换热器进口高度和换热器出口高度。热泵机组(Type668)部件输入参数有进口源水温度和流量、进口负载温度和负载流量;输出参数有出口源水温度和出口负载温度。地埋管(Type557b)部件涉及储存容积、钻井深度、钻井数量、钻井半径、串联的钻井数量、半径区域数量、垂直区域数量、储热器导热系数、储存器热容、每口井中埋管数量(在 TRNSYS 中为负数)、流体比热和流体密度。输入参数有进口流体温度、进口流量、储存器顶部温度和空气温度;输出参数有出口温度、出口流

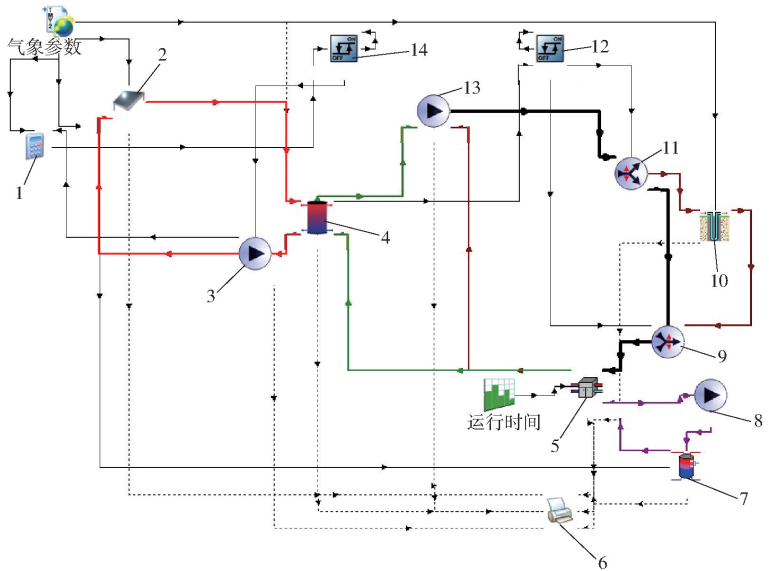


图 2 太阳能-地源热泵式沼气工程加温系统 TRNSYS 模型

Fig. 2 TRNSYS model of integrated solar and ground source heat pump for biogas digester heating system

1. 计算器 2. 太阳能集热器 3. 太阳能循环泵 4. 蓄热水箱 5. 热泵机组 6. 打印机 7. 沼气池 8. 负载侧水泵 9、11. 偏流器
10. 地埋管 12、14. 温差控制器 13. 源侧水泵

量和平均储热温度。运行控制器 (Type14h) 给出控制热泵运行信号。运算结果打印 (Type25a) 给出输出结果。

3 典型天 TRNSYS 模拟及试验验证

选取冬季最冷天(2015 年 12 月 23 日)进行模拟,当天室外温度分布如图 3 所示。沼气池散热负荷模拟步长设为 0.5 h,沼气池散热量如图 4 所示。09:30—16:30 太阳能持续加热蓄热水箱,模拟步长设置为 0.5 h,太阳能集热器进出口温度、太阳辐射强度与集热器集热效率、太阳能集热器理论集热量和实际集热量如图 5~7 所示。09:30—11:00 运行地源热泵模式,模拟步长设为 5 min,太阳能热泵供热量如图 8 所示。14:00—15:30 运行太阳能热泵模式,模拟步长设为 5 min,地埋管与土壤换热量、地源热泵供热量如图 9、10 所示。

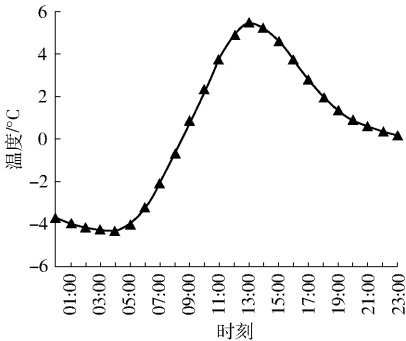


图 3 最冷天室外温度分布

Fig. 3 Outdoor temperature distribution in the coldest day

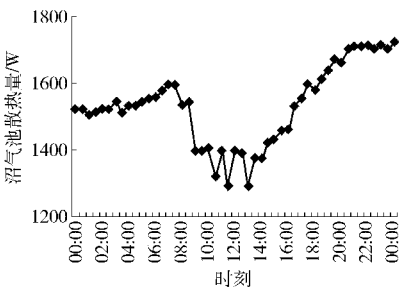


图 4 沼气池散热量随时间变化曲线

Fig. 4 Time variation curve of heat dissipating capacity of biogas digester

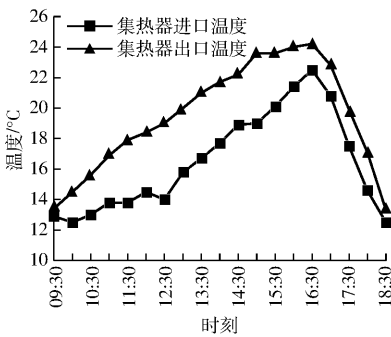


图 5 集热器进出口温度随时间变化曲线

Fig. 5 Time variation curves of inlet and outlet temperatures of heat collector

环境温度的变化一致,在 00:00—06:00 有一逐渐上升的过程,但是上升幅度不大,从 1 747 W 上升到 1 756 W;06:00—14:00 逐渐下降,从 1 756 W 下降到 1 300 W 左右;14:00—00:00 逐渐上升,从 1 300 W 左右上升到 1 700 W 左右。沼气池在一整天的散热量平均值为 1 662.8 W,总散热量为 132 MJ。

图 3、4 表明,沼气池散热量随时间变化与室外

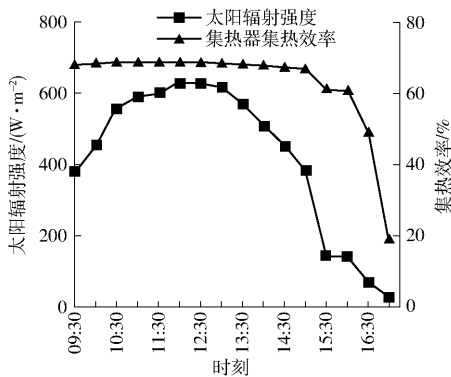


图6 太阳辐射强度与集热效率随时间变化曲线
Fig.6 Time variation curves of solar radiation intensity and collector efficiency

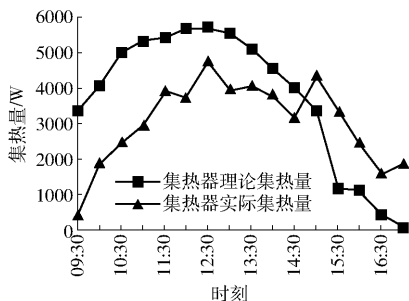


图7 太阳能集热器理论和实际集热量随时间变化曲线
Fig.7 Time variation curves of solar collectors' theoretical and actual heat collection

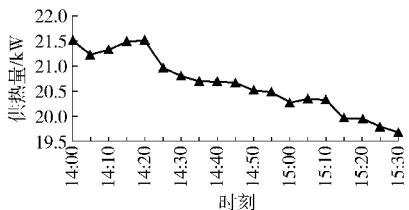


图8 太阳能热泵供热量随时间变化曲线
Fig.8 Time variation curve of solar heat pump heating capacity

图5表明,集热器进出口水温在09:30—15:30随时间变化逐渐变大,进口温度峰值达到22℃,出口温度峰值25℃,这与太阳辐射强度峰值出现的时间12:00不一致的原因是:蓄热水箱的热惰性带来延迟,后来随时间变化两者逐渐变小,这是由太阳辐射强度的全天变化造成的,在集热器停止集热后,进出口水逐渐散热,水温逐渐下降。

图6表明,太阳辐射强度在12:00左右到达峰值,为650 W/m²,全天平均值为422.5 W/m²,集热器集热效率在09:30—15:00都维持在68%左右,15:00—16:30有一个急速下降的过程,模拟结果与实际吻合。在整个集热过程中,集热器集热效率的平均值为64.03%。

图7表明,集热器理论集热量和实际集热量都随着时间先变大后变小,理论集热量峰值5800 W,实际集热量峰值5200 W,两者峰值出现时间不一致

的原因是集热器理论集热量的变化完全是由太阳辐射强度决定的,实际集热量则是由集热器进出口温差决定的。在整个集热过程中集热器理论集热量平均值为3725.75 W,集热器实际集热量平均值为3291.96 W,集热器实际总集热量为82.96 MJ/d。

图8表明,太阳能热泵为沼气池供热量有一个逐渐下降的过程,但是下降的幅度不大,这是由于蓄热水箱中的水温略降,影响了热泵的运行,导致热泵机组的制热效果有所下降,在14:00—15:30启动太阳能热泵供热过程中,热泵供热量的平均值为20.66 kW,总供热量为111.58 MJ。

图9表明,地理管集热量随时间基本没有变化,这是由于在较短时间内,土壤温度保持恒定,地理管换热稳定。在09:30—11:00启动地源热泵为沼气池供热的过程中,地理管换热量平均值为13.32 kW,总供热量为71.93 MJ。

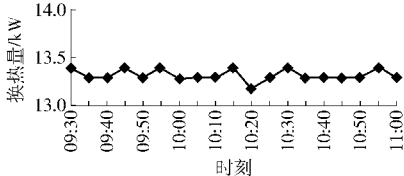


图9 地理管与土壤换热量随时间变化曲线
Fig.9 Time variation curve of heat exchange between underground pipe and soil

图10表明,地源热泵供热量随时间变化不明显,在18.3~18.7 kW之间,说明地理管换热稳定,热泵机组运行稳定。在09:30—11:00启动地源热泵为沼气池供热的过程中,热泵供热量的平均值为18.53 kW,总供热量为100.06 MJ。

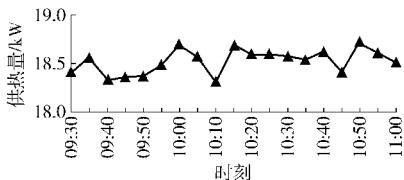


图10 地源热泵供热量随时间变化曲线
Fig.10 Time variation curve of ground source heat pump heating capacity

经计算得出:当天热泵耗电量57.24 MJ/d,水泵耗电量13.39 MJ/d,地理管集热量71.928 MJ/d,集热器集热量82.96 MJ/d,总供热量225.52 MJ/d;沼气池维护结构散热132 MJ/d,加温料液负荷76.57 MJ/d,总耗热量208.57 MJ/d。除去基本没有供热效果的水泵耗电部分,能量输入和沼气池热负荷基本趋于平衡。得出典型日太阳能-地源热泵沼气池加温系统能量贡献比例为集热器集热量36.87%、地理管换热量31.96%、系统耗电量31.17%。其中太阳能保证率为36.87%;同时可以

看出系统耗电量只占了 31. 17%, 其余 68. 83% 全部由可再生能源提供, 可再生能源与耗电量的比例为 7: 3, 说明系统具有良好的节能效果。

4 每月 TRNSYS 模拟

上海地区 4—9 月份是太阳能较丰富的月份, 太

阳能不仅可以保证沼气池的需求, 多余的能量通过地埋管储存在地下。通过模拟结果计算出下列各个类型的能量数值, 如表 2、图 11 ~ 14 所示。

表 2 表明, 沼气池总负荷从 1—12 月份有先变小后变大的趋势, 最大值在 1 月份, 为 6 360. 47 MJ, 最小值出现在 7 月份, 为 1 817. 28 MJ; 太阳能集热

表 2 每月 TRNSYS 模拟数据
Tab.2 Monthly TRNSYS simulation data

月份	沼气池 总负荷/MJ	太阳能 集热量/MJ	地埋管 供热量/MJ	系统 耗电量/MJ	地下 蓄热量/MJ	太阳能提供 系统的热量/MJ	太阳能 保证率/%
1	6 360. 47	1 575. 82	3 110. 84	1 673. 81	0	1 575. 82	24. 78
2	5 410. 78	2 163. 83	1 823. 06	1 423. 89	0	2 163. 83	39. 99
3	5 307. 47	2 286. 82	1 784. 27	1 396. 70	41. 17	2 186. 09	41. 19
4	4 089. 51	3 058. 18	710. 35	1 076. 19	297. 30	2 422. 84	59. 25
5	3 179. 41	3 630. 14	325. 43	836. 69	986. 92	2 046. 72	64. 37
6	2 379. 26	3 296. 26	314. 41	626. 12	1 454. 94	1 457. 32	61. 25
7	1 817. 28	3 432. 11	178. 63	478. 23	1 927. 56	1 193. 70	65. 69
8	1 928. 40	3 019. 39	275. 55	507. 47	1 530. 45	1 180. 07	61. 19
9	2 376. 00	3 205. 80	221. 20	625. 26	1 296. 58	1 561. 61	65. 72
10	3 547. 46	2 634. 19	435. 24	933. 54	96. 08	2 385. 53	67. 25
11	4 459. 68	1 858. 53	1 427. 54	1 173. 60	0	1 858. 53	41. 67
12	5 801. 60	1 926. 59	2 348. 27	1 526. 74	0	1 926. 59	33. 21

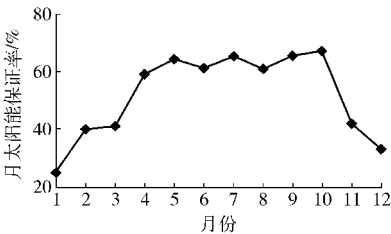


图 11 月太阳能保证率

Fig. 11 Monthly solar energy supply assurance rate

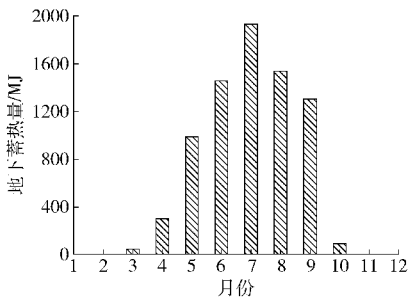


图 13 月地下蓄热量

Fig. 13 Amount of heat stored underground each month

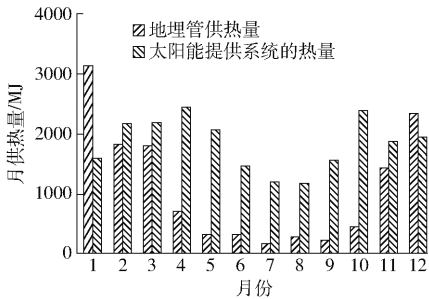


图 12 太阳能与地热能月供热量

Fig. 12 Solar and geothermal energy monthly heating capacity

量从 1—12 月份有先变大后变小的趋势, 最大值出现在 5 月份, 为 3 630. 14 MJ, 实际上, 4—9 月份的集热量都维持在 3 000 MJ 以上, 最小值出现在 1 月份, 为 1 575. 82 MJ; 地埋管供热量从 1—12 月份是先变小后变大的趋势, 最大值在 1 月份, 为 3 110. 84 MJ, 最小值出现在 7 月份, 为 178. 63 MJ; 系统耗电量从 1—12 月份是先变小后变大的趋势, 最大值在 1 月份, 为 1 673. 81 MJ, 最小值出现在 7 月份, 为 478. 23 MJ。

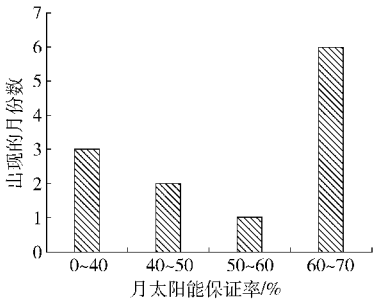


图 14 半年内月太阳能保证率各级频数

Fig. 14 Rate of various frequencies of solar guaranteee within six months

图 11 表明, 4—10 月份太阳能保证率都维持在一个较高的水平, 都接近或超过 60%。除了 6、7、8 月份, 提供给系统有效利用的太阳能数值都相当可观, 尤其是 2—4 月份、10—12 月份, 接近或超过 2 000 MJ。图 12 表明, 地埋管的供热量受季节的影响

非常明显,冬季从地下取热远超过了夏季。图 13 表明,3—10 月份有了多余的太阳能储存在地下,最大值出现在 7 月份,为 1 927. 56 MJ,而 1、2、11、12 月份没有向地下蓄热。

此外,还计算得到月太阳能保证率各级频数,如图 14 所示。月太阳能保证率在区间 50% ~ 60% 的月份数为 1 个月,在区间 40% ~ 50% 的月份数为 2 个月,在区间 60% ~ 70% 的月份数为 6 个月;月太阳能保证率低于 40% 的有 3 个月。以上结果都比较符合上海地区气象变化特点。

5 全年 TRNSYS 模拟

首先,根据上海地区全年气象参数绘制出全年室外干球温度分布及全年日平均太阳辐射量,如图 15、16所示。在发酵温度(35 ± 1)℃、水力停留时间 20 d 的条件下,4 个太阳能集热器模块(集热面积 16 m²)运行,系统全年运行模式模拟结果如图 17、18 所示。

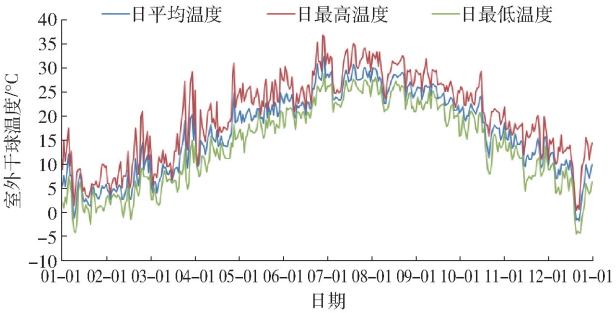


图 15 全年室外干球温度
Fig. 15 Annual outdoor dry bulb temperature

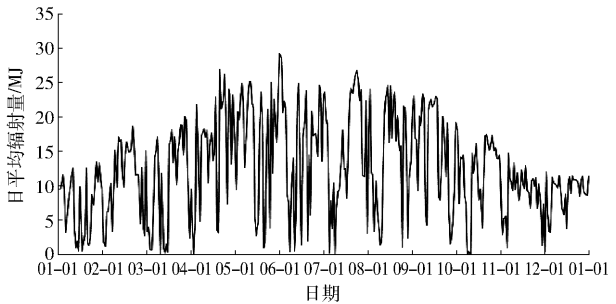


图 16 全年日平均太阳辐射量
Fig. 16 Annual average daily solar radiation

图 17 为全年输入到加温系统的太阳能、耗电量以及埋管供热量模拟结果;图 18 为太阳能理论集热量与地下蓄热量。11 月份至次年 12 月份,地下蓄热量为零,一方面是由于太阳能集热量远小于沼气池总负荷,另一方面是由于地源热泵模式的长期运行,地下蓄热场主要处于向系统供能状态;系统耗电量变化关系和沼气池加温负荷变化规律相同,6—7 月份最小为 16. 6 MJ/d,1 月份最大约 54 MJ/d。

模拟统计得出全年输入到系统各类能量:沼气池

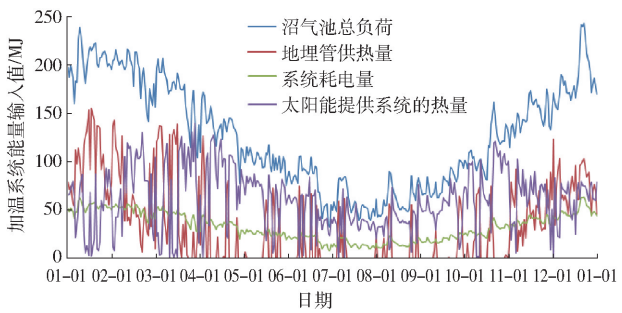


图 17 加温系统能量输入
Fig. 17 Heating system energy input

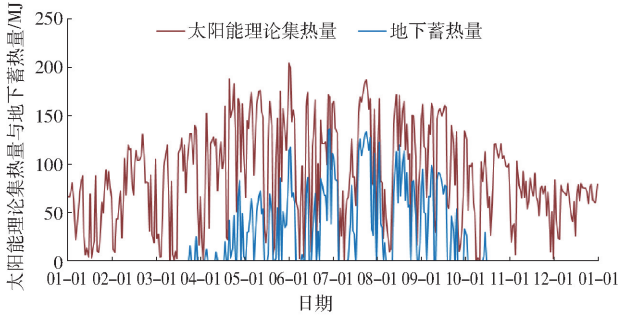


图 18 太阳能理论集热量与地下蓄热量
Fig. 18 Theoretical solar heat collection and underground heat storage amounts

总负荷 46 657. 32 MJ,太阳能集热量 32 087. 65 MJ,其中 21 958. 66 MJ 用于输入加温系统,即太阳能热利用占 68. 43%,7 630. 99 MJ 储存蓄热在地下,占 23. 78%。其余 2 498. 00 MJ 在利用过程中损失到环境,占太阳能总量的 7. 78%。埋管供热量为 12 954. 81 MJ,系统耗电量 12 278. 24 MJ,系统耗电量占整个加温系统消耗能量的 26. 02%,其余 74% 全部由太阳能和地热能(可再生能源)提供,地热能占 27. 45%,太阳能占 46. 53%。说明系统具有良好的节能效果,并且能够高效利用可再生能源。

6 结论

(1)在 2015 年 12 月 23 日,热泵耗电量 57. 24 MJ/d,水泵耗电量 13. 39 MJ/d,埋管集热量 71. 928 MJ/d,集热器集热量 82. 96 MJ/d,总供热量 225. 52 MJ/d;沼气池维护结构散热 132 MJ/d,加温料液负荷 76. 57 MJ/d,总耗热量 208. 57 MJ/d。能量贡献比例为:集热器集热量 36. 87%,埋管换热量 31. 96%,系统耗电量 31. 17%,可再生能源与耗电量的比例为 7:3。能量输入和沼气池热负荷基本趋于平衡,系统节能性及可再生能源利用性良好。

(2)按月模拟,月太阳能保证率在区间 40% ~ 50% 的月份有 2 个月,在区间 50% ~ 60% 的月份有 1 个月,在区间 60% ~ 70% 的月份有 6 个月;月太阳能保证率低于 40% 的有 3 个月。结果符合上海地区气象变化特点。

(3) 系统全年共消耗 46 657.32 MJ 热量,可再生能源(太阳能和地热能)提供 74%。其中,太阳能热利用贡献 63%,地热能贡献 37%,说明该加温系统能够较好地使用可再生能源。系统全年向地下蓄热 7 630.99 MJ,吸热量为 12 954.81 MJ,蓄热量虽不能完全满足供热量的需求,但能在一定程度上缓解土壤的冷热失衡。

参 考 文 献

1 董呈娟,王侃宏,李保玉. 太阳能辅助地源热泵供热运行特性研究[J]. 煤气与热力, 2006,26(9): 39-42.
DONG Chengjuan, WANG Kanhong, LI Baoyu. Study on operation characteristics of solar assisted ground source heat pump for heat-supply[J]. Gas & Heat, 2006,26(9): 39-42. (in Chinese)

2 毕月虹,陈林根. 太阳能-土壤热源热泵的性能研究[J]. 太阳能学报, 2000,21(2): 214-219.
BI Yuehong, CHEN Lingen. Study on solar-ground source heat pump[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2000,21(2): 214-219. (in Chinese)

3 宫克勤,刘逸,刘丹,等. 太阳能地源热泵式空调系统研究[J]. 太阳能学报,2007,28(4): 416-420.
GONG Keqin, LIU Yi, LIU Dan, et al. The study on the air-condition system of solar energy and geothermal-source heat pump[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007,28(4): 416-420. (in Chinese)

4 吴晓寒. 地源热泵与太阳能集热器联合供暖系统研究及仿真分析[D]. 长春:吉林大学, 2008.

5 杨卫波. 太阳能-地源热泵系统的理论与实验研究[D]. 南京:东南大学, 2007.

6 杨卫波,倪美琴,施明恒,等. 太阳能-地源热泵系统运行特性的试验研究[J]. 流体机械, 2009, 37(12): 52-57.
YANG Wei-bo, NI Mei-qin, SHI Ming-heng, et al. Experimental study on operation characteristic of solar-ground source heat pump system[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(12): 52-57. (in Chinese)

7 LUCIA U, SIMONETTI M, CHIESA G, et al. Ground-source pump system for heating and cooling: review and thermodynamic approach[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 70: 867-874.

8 AWANI S, KOOLI S, CHARGUI R, et al. Numerical and experimental study of a closed loop for ground heat exchanger coupled with heat pump system and a solar collector for heating a glass greenhouse in North of Tunisia[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 76: 328-341.

9 OZGENER O, HEPBASLI A. Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study[J]. Building and Environment, 2005, 40(8): 1040-1050.

10 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(增刊2): 356-362.
GUO Changcheng, SHI Huixian, ZHU Hongguang, et al. Review of solar-assisted ground source heat pump system[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(Supp.2): 356-362. (in Chinese)

11 石惠娴,王卓,朱洪光,等. 太阳能-空气源热泵耦合式沼气池加温系统设计[J]. 建筑节能, 2010(10): 28-31.
SHI Huixian, WANG Zhuo, ZHU Hongguang, et al. Design on heating systems combined with air-source heat pump and solar energy of the rural biogas digester[J]. Construction Conserves Energy, 2010(10): 28-31. (in Chinese)

12 裴晓梅,张迪,石惠娴,等. 太阳能-地源热泵沼气池加热系统集热面积优化[J]. 农业机械学报, 2011,42(1): 122-128.
PEI Xiaomei, ZHANG Di, SHI Huixian, et al. Collector area optimization of integrated solar and ground source heat pump system for heating biogas digester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1): 122-128. (in Chinese)

13 YANG W B, SHI M H, DONG H. Numerical simulation of the performance of a solar-earth source heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17-18): 2367-2376.

14 KJELLSSON E, HELLSTR M G R, PERERS B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings[J]. Energy, 2010, 35(6): 2667-2673.

15 YUSOFF M, CLOSE D J. Transient and steady-state considerations of solar air heaters1[M]//Brandvold G E. Sun: mankind's future source of energy. Oxford: Pergamon, 1978: 905-906.

16 SAFA A A, FUNG A S, KUMAR R. Heating and cooling performance characterisation of ground source heat pump system by testing and trnsys simulation[J]. Renewable Energy, 2015, 83: 565-575.

17 管巧丽. 太阳能-蓄热与地源热泵供热水系统的 Trnsys 模拟与研究[D]. 天津:天津大学, 2009.

18 AL-SAAIDI S N, ZHAI Z J. A new validated trnsys module for simulating latent heat storage walls[J]. Energy and Buildings, 2015, 109: 274-290.

19 SHRIVASTAVA R L, VINOD K, UNTAWALE S P. Modeling and simulation of solar water heater: a trnsys perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 126-143.

20 韩延民,代彦军,王如竹. 基于 TRNSYS 的太阳能集热系统能量转化分析与优化[J]. 工程热物理学报,2006,27(增刊1):57-60.
HAN Yanmin, DAI Yanjun, WANG Ruzhu. Optimum analysis energy conversion for solar collector system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006,27(Supp.1): 57-60. (in Chinese)

21 YAU Y H. The use of a double heat pipe heat exchanger system for reducing energy consumption of treating ventilation air in an operating theatre—a full year energy consumption model simulation[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(5): 917-925.

22 HOBBI A, SIDDIQUI K. Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate usingtrnsys [J]. Solar Energy, 2009, 83(5): 700-714.