



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

上海地区生态农居能源一体化系统研究

姓 名：叶昀暘

学 号：1333098

所在院系：机械与能源工程学院

职业类型：工程

专业领域：动力工程

指导教师：许鹏 教授

副指导教师：史建国 研究员

二〇一六年三月



TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Engineering

**The Research of the Integrated Energy System  
for the Eco-rural Houses in Shanghai**

Candidate: Ye Yunyang

Student Number: 1333098

School/Department: School of Mechanical  
Engineering

Discipline: Engineering

Major: Power Engineering

Supervisor: Prof. Xu Peng

March, 2016

上海地区生态农居能源一体化系统研究

叶昫暘

同济大学

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

在我国传统农村住宅中，主要采用原始方式（如燃烧秸秆、薪柴等）为整个住宅提供能量，这些方式效率低、污染严重，对于环境的破坏和可持续发展方针是相违背的。与此同时，当环境遭到破坏，农村居民的收入也受到影响，平均单位亩产量下降，牲畜更易生病，甚至死亡。因此需要对现有农村住宅进行改造。改造主要有以下两方面：1) 针对供能系统进行改造，将原有分散的传统方式改变为更加经济、无污染的集中式新型供能系统；2) 针对传统农村住宅现有围护结构进行改造，提升围护结构的隔热性。由于在农村住宅中，生活热水需求在所有需求中相对较大，因此第一个方面更为迫切。

本文主要针对上海地区独栋农户进行供能系统改造，提供一套上海地区适用的生态农居能源一体化系统，该系统采用太阳能集热和土壤蓄热两种模式为农居提供全年的生活热水和采暖。该系统对环境无污染，而且效率较高。由于目前上海地区还是以分散型农户为主，因此在短期内该系统相比于大面积的集中式供能系统更易实现和可行。目前太阳能集热和土壤蓄热已经应用于一些建筑类型中，但是有些系统初投资较高，不适用与农村住宅。本研究中采用简易太阳能板式集热板，土壤蓄热将地源热泵用简易式水平埋管所替换，大大降低初投资费用。

在本文中，首先，通过理论估算计算出一户农居热水和采暖需求，并提出相对应的太阳能集热板和埋管等体型参数。其次，根据农居现状提出逻辑控制策略，用 T 型图表示，便于 PID 控制编程，该控制策略以热水优先、采暖其次的原则进行设计。随后，搭建实验平台，验证逻辑控制的合理性，该实验主要目的是验证控制逻辑合理性，是否能够达到所需求的热量，因此并未找实际农居进行实验。最后，运用 TRNSYS 软件进行系统模拟，通过全年分析，判断该系统是否能够满足单户农居所需的全年生活热水和采暖需求。

通过实验和模拟结果表明，上海地区生态农居能源一体化系统能够满足单户农居所需的全年生活热水和采暖需求，能够应用于实际工况。

**关键词：**生态农居，能源一体化系统，TRNSYS 模拟

## ABSTRACT

In the rural areas of China, the main sources of energy are quite primitive. The sources such as burning straw or wood are low efficiency and can cause serious air pollution, which is against the route of sustainable development. Also, the environmental deterioration may lower the incomes of villagers for output of crops decreases and livestock is much easier to be illness or even death. Thus, we need to transform the rural houses. There are two main aspects: 1) Change the energy system. A new integrated energy system can be used to substitute the old one. The new will be more energy saving and no pollution. 2) Change the building envelope. The new building envelope which is lower heat conductivity coefficient can reduce the energy loss. In these two aspects, the first one is more urgent because hot water is more necessary for the villagers.

In the paper, a new integrated energy system is provided that is suitable for the signal-family rural houses in Shanghai. The system uses solar energy and geothermal energy to provide energy and the system can provide heat for the hot water and heating. The system is high efficiency and no pollution. Because there are a lot of signal-family rural houses in Shanghai, the system is more suitable for the rural areas than large-scale integrated energy system. Nowadays, solar energy and geothermal energy are used in some kinds of houses. However, some systems using these energies have high initial costs. Thus, these systems are not suitable for the rural areas. In the research, we use simple solar panel and horizontal buried pipe, which can lower the initial costs. The new system provided in the paper can be used in the rural houses.

In the paper, an estimated volume of hot water and heating is provided and then some main parameters of solar panel and buried pipe are calculated by using some physical equations. Then a control strategy of the new system is provided. After that, experiment and simulation by using TRNSYS are done. Finally, the results illustrate that the new integrated energy system can be satisfied with the energy needs of rural houses.

**Key Words:** eco-rural houses, integrated energy system, TRNSYS

## 目录

<b>第 1 章 引言</b>	6
1.1 上海地区生态农居能源一体化系统研究背景及意义	6
1.1.1 研究背景	6
1.1.2 研究意义	7
1.2 本课题主要研究内容	7
<b>第 2 章 上海地区农居现状与系统适用度分析</b>	10
2.1 农村住宅用能现状	10
2.2 上海地区农居调研结果	11
2.3 系统尺寸分析	14
2.3.1 室内热需求估算	14
2.3.2 太阳能集热板尺寸估算	17
2.3.3 土壤蓄热中地埋管尺寸和布置估算	18
2.3.4 整体系统布置	21
2.4 本章小结	21
<b>第 3 章 生态农居能源一体化系统模型建立</b>	22
3.1 生态农居能源一体化系统控制逻辑	22
3.1.1 生态农居能源一体化系统简介	22
3.1.2 生态农居能源一体化系统逻辑原则	24
3.2 生态农居能源一体化系统控制策略	24
3.2.1 水泵 Pump1 启停控制逻辑	25
3.2.2 阀门 Valve1 切换控制逻辑	26
3.2.3 阀门 Valve2 切换控制逻辑	27
3.2.4 阀门 Valve3 切换控制逻辑	29
3.2.5 阀门 Valve4 切换控制逻辑	30
3.3 其他说明	30
3.4 本章小结	31
<b>第 4 章 上海地区生态农居能源一体化系统建立与测试</b>	35

4.1 上海地区生态农居能源一体化系统实验目的	35
4.2 上海地区生态农居能源一体化系统实验介绍	35
4.2.1 上海地区生态农居能源一体化系统实验台搭建说明	3 5
4.2.2 上海地区生态农居能源一体化系统实验台介绍	3 6
4.3 上海地区生态农居能源一体化系统实验结果及分析	40
4.3.1 检验自动控制逻辑合理性	4 0
4.3.2 各工况下系统运行状况实验结果	4 1
4.4 本章小结	43
<b>第 5 章 上海地区生态农居能源一体化系统模拟验证</b>	<b>4 5</b>
5.1 模拟软件介绍	45
5.1.1 TRNSYS 软件开发背景	4 5
5.1.2 TRNSYS 软件功能介绍	4 5
5.2 模型搭建	46
5.2.1 TRNSYS 模型气象参数的选择	4 6
5.2.2 TRNSYS 模型标准部件的选择	4 7
5.2.3 TRNSYS 模型参数设置	5 5
5.2.4 上海地区生态农居能源一体化系统仿真模型	5 6
5.3 上海地区生态农居能源一体化系统模拟结果及分析	61
5.3.1 太阳能独立供热水	6 1
5.3.2 太阳能独立供暖	6 2
5.3.3 太阳能土壤蓄热	6 3
5.3.4 土壤取热独立采暖	6 5
5.4 本章小结	66
<b>第 6 章 经济性分析</b>	<b>6 7</b>
<b>第 7 章 总结与展望</b>	<b>6 9</b>
7.1 总结	69
7.2 展望	69
<b>致谢</b>	<b>7 1</b>

参考文献.....	7 3
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	7 7

## 第 1 章 引言

### 1.1 上海地区生态农居能源一体化系统研究背景及意义

#### 1.1.1 研究背景

长期以来,分散型农居生活能源供应组成里可再生能源比例低,用能结构不合理、对化石类能源和外部商业性能源依赖程度高。太阳能设备和沼气有一定的应用,但是互为独立,无法互补。造成一定程度的资源浪费。原因是缺乏有效的农居小型户用清洁能源稳定供应技术、成套设备和管理手段。

同时由于没有有效的资源再利用处理手段和设备,造成农村大量生产生活废弃物随意处理、排放。一方面污染了农村地区环境,另一方面又浪费了大量的可再生资源。随着国民经济的高速发展,中国农村地区能耗也飞速增长,由于农居中采用化石类能源、外部商业性能源占比过高,导致大量的能源浪费,并对环境造成不可逆污染,因此农居的节能改造也成为了我国急需解决的一大问题。

通过调研分析指出,我国建筑能耗占总能耗的比值逐年增加,由 1980 年的 10%,到 2008 年长至 27.8%,预计 2030~2040 年,建筑能耗占比将达到 30%~40%,此时建筑能耗将是所有能耗中最为主要的一部分<sup>[1-4]</sup>。而建筑能耗主要由四部分组成:北方采暖、城市住宅能耗(含供热)、公共建筑能耗、农村住宅能耗,其中农村住宅能耗涉及区域最广,总能耗值最高,据 2011 年统计结果,农村住宅全年总能耗为  $9.246 \times 10^{11} \text{kWh}$ ,单位能耗为  $38.8 \text{kWh}/\text{m}^2$ ,与城市住宅能耗  $29.0 \text{kWh}/\text{m}^2$  相比要高得多,这也就说明农村住宅节能潜力是巨大的<sup>[5,6]</sup>。目前农居使用能源方式已经从传统的生物质能(秸秆、薪柴等)向商业能源(煤炭、电、液态石油气(LPG)、提炼油等)转变,部分能源由商业能源替代,到 2007 年,商业能源使用量已经超过传统生物质能,同时也有部分利用可再生能源,如沼气、太阳能、风能、地热能。然而农村能耗总量的增长是巨大的,近十年平均每年以 5.6% 的涨幅增加<sup>[7-19]</sup>。然而缺乏规划的采用可再生能源,不仅仅资源得不到良好的利用,使用效率低,更有可能反而加大能源消耗、资金浪费,因此需要一套有规划、合理的方案针对农居可再生能源的利用,提高可再生资源的利用率<sup>[20-24]</sup>。

结合单户农居可再生能源利用率低和农居可再生资源丰富的现状,以单户农居所需求的能源水平为对象,通过研究与集成适合于本土化的、高效率、简便易行的太阳能、地热能供暖等工艺技术,进行设计与优化,并开发研制成套装备。建立太

太阳能、地热能互补的能源供给模式将有助于实现单户农居形成以可再生能源为主的能源组合，提高废弃物的资源再利用水平。以单户庭院的太阳能、地热能为对象，重点研究单户农居的生活热能需求。实现太阳能、地热能等资源的互补协同利用，大幅提高单户农居能耗构成里的可再生能源比例和能源利用水平。

### 1.1.2 研究意义

由于目前农居使用能源依然以高污染、低效率的能源供应方式为主，然而随着我国大力发展农业，农居能耗逐年上升，在国家总能耗中占有较高比例，因此使用可再生能源取代或部分取代传统生物质能和商业供能将有利于在保证获得同样的效果的基础上，降低农居能耗。通过对能源一体化系统的理论研究，具有以下几点意义：

1) 通过理论分析，初步判定农居适合选取的可再生能源种类，判定依据主要为：农村环境易于获得；获取能源方式简便、费用较低；可再生能源产能较为稳定，可持续不断提供能源。

2) 通过理论分析，依据节能效果、初投资成本、运行简便性和稳定性，初步确定系统连接方式和运行模式，针对系统可靠性、可操作性进行理论研究。

随着农居总能耗的飞速增加，节能高效的生态农居成为了目前我国针对农村调整能源消费格局的重要组成部分。我国“十二五”计划中针对农村提出了较高的要求，因此生态农居能源一体化系统在实际应用中具有重大价值。

由于目前在我国，传统生物质能和商品能源依然是农居主要获取能源的来源。而可再生能源的利用量较少，而且由于缺乏规划，使其节能效果大大降低，而经济成本大大上升，并不能够很好的利用可再生能源。

因此，通过理论研究，提出依靠可再生能源的能源一体化系统，将各个利用可再生能源的设备集成化，统一控制管理，大大降低了初投资，与此同时也优化了节能效果。通过推广，可产生以下实际应用的价值：

1) 有利于环境保护，减少水土流失。因为采用传统生物质能，如秸秆、薪柴会造成对环境的污染，同时过度砍伐易造成水土流失，通过采用可再生能源进行取代，能够大大降低对环境的破坏，同时水土流失也可以得到改善。

2) 改变农民用能习惯。由于农民用能习惯依然较为落后，停留在采用原始供能方式和商业用能方式混合式供能的理念中，因此通过普及能源一体化系统，改善农居大能耗、低效率、高污染的现状，改变农民传统用能习惯。

## 1.2 本课题主要研究内容

当前我国农居发展状况落后，能源利用模式依然采用传统的低效率、高污染供能方式，这不仅造成大量能源浪费，而且对生态环境造成破坏，由于过度砍伐薪柴，还有可能造成水土流失等问题。因此本研究针对农居设计一套一体化节能环保的供能系统，充分利用可再生能源，用可再生能源取代或部分替代传统能源。由于因为地域特点，不同区域的需求有所不同，因此本研究主要针对上海农村进行系统设计，通过调研上海周边农村情况，可知上海农居基本以各自独立的分散农居形式为主，一户农居基本包括一幢二层楼房、一块菜地以及饲养区域。因此该系统采用太阳能、土壤源等方式进行供能。

其中，针对太阳能地源热泵应用于住宅建筑的研究基本以别墅住宅为主，生态农居从体量上看与别墅住宅相似，然而对于初投资和运行成本、模式等方面的侧重点又不同，因此在模式中可以进行借鉴，但是在系统设计中需要考虑系统成本，尽可能降低成本；与此同时，需要尽可能降低系统复杂程度，确保系统稳定性与可操作性。

为了降低成本，用于农居的埋管多采取横管式。而且农居中夏季供冷需求而较少，因此可不予考虑，夏季供冷可采用独立简易系统达到需求，因此可将别墅住宅中的地源热泵改为单纯的埋管系统，降低初投资费用。当在设计过程中，还需要注意太阳能集热过程的时滞现象。

因此，将太阳能集热与水平埋管供热集成起来，设计出一个供给室内采暖和生活热水的简便低廉的系统，并提出合理的控制模式，对于实现节能环保的生态农居而言意义重大，通过推广，对于降低农村传统生物质能源消费、保护生态环境有推动作用。

本研究主要针对上海地区分散型农居的供能系统进行研究，该农居类型基本为二层住宅，门前有种植地房后有牲畜饲养区域，户与户之间间隔较为分散。

本研究主要针对生态农居的供能系统进行设计优化，旨在提出一种经济高效的一体化供能系统。由于农居较为分散，因此不适合采用多户集中供能的方式，而是采用独户独立供能的方式进行供能。主要供能的范围包括生活热水、采暖等内容。

通过调研了解和文献阅读，初步确定采用太阳能集热与埋管两种方式获取能源。然而多种功能方式如何进行连接控制，如何进行匹配，需要进行研究，在连接方式和控制模式的研究中，需要考虑初投资、可操作性、便捷性等方面。从而设计出真正适合于推广的产品。

本研究主要工作范围有以下几方面内容：

1) 针对典型上海地区分散型农居，设计一套合理的一体化供能系统，该系统要求初投资费用尽可能低，能够实现生活热水和采暖两方面功能，此外占地面积和布置位置合理。

2) 在设计成型的一体化系统的基础上, 提出一套合理的控制运行策略, 依据农民生活习惯特点, 提出一套简单易懂的控制策略方法, 通过控制面板的简单切换, 系统内部阀门自动启闭, 进行模式切换, 同时需要考虑该策略的稳定性。

3) 运用模拟软件, 分析其运行的合理性。

4) 选取实验平台进行试验, 测试该一体化系统的稳定性和可操作性, 同时对于该系统的合理性进行评估。

该论文中主要技术路线如图 1.1 中所示。

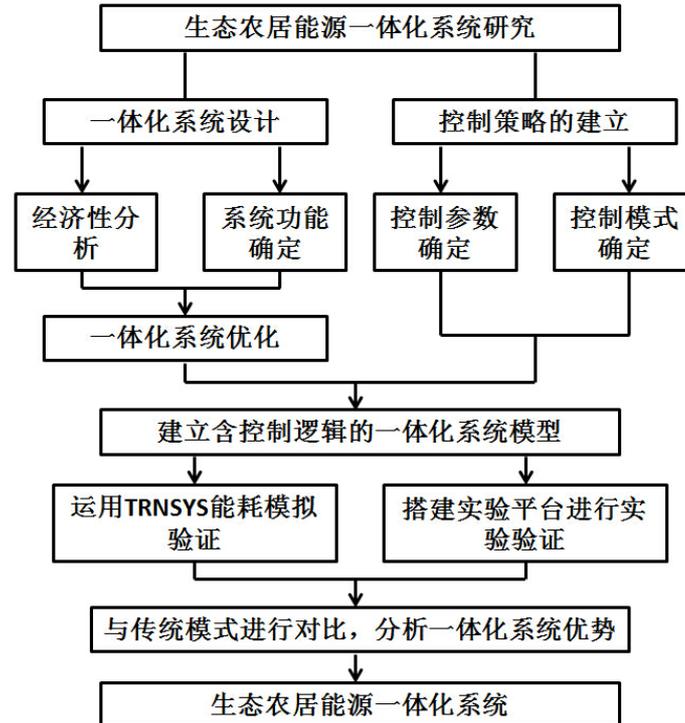


图 1.1 上海地区生态农居能源一体化系统研究技术路线

## 第 2 章 上海地区农居现状与系统适用度分析

### 2.1 农村住宅用能现状

为了便于分析我国农村住宅用能现状，首先需要对一些概念进行定义。农村，指的是经济方式以农业生产为主的区域，包括各种农场，与城市称谓相对。农村人口，指全年大部分时间居住在农村，以农业生产为主要经济来源的人群。农村住宅，又称农居，指的是农村地区的居住建筑，因为农村地区主要从事农业生产，因此建筑类型中绝大多数均为居住建筑。农村住宅能耗，指的是除去为了农业生产所产生的能耗之外的住宅建筑内部使用者的用能能耗，即生活能耗。目前我国农村住宅用能从终端用能途径而言，主要分为炊事、采暖、照明、热水、家电，主要采用的供能源头主要是电力、燃煤、生物质能（秸秆、薪柴）。

依据《统计年鉴》<sup>[25,26]</sup>数据显示，2000~2010 年间，我国农村人口从 8.1 亿减少到 6.7 亿人，人均住房面积从 24.8m<sup>2</sup>/人增加到 34.1m<sup>2</sup>/人。该现象表明我国在不断加快城镇化进程，然而加快城镇化进程，促进产业和人口向城市聚集，并未达到节约耕地的目的，一些地方从农民手中廉价购买大量土地，造成土地城镇化速度大大超前于人口城镇化速度。因此从政策层面上，还需进行改进，土地城镇化也并非等同于真正意义上的城镇化。

从能源消耗来看，如图 2.1 所示，从 1999 年至 2008 年，我国农居逐年的总能耗在逐渐上升，而从 2007 年开始生物质能所占比重有所下降，生物质能逐渐有被商品能耗所取代的趋势。根据《统计年鉴》表明，户均总能耗没有明显变化，而其中生物质能占总能耗的比例大大降低，随着农村电力普及率提高、收入提高、家电增多，农村户均电耗呈现快速上升。

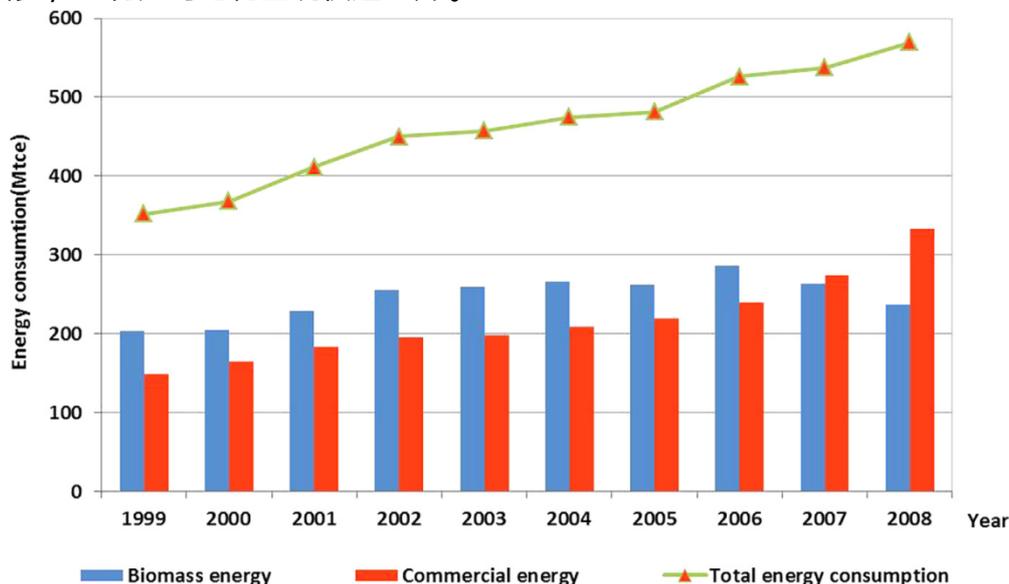


图 2.1 1999~2008 年农居逐年能耗

然而，总体看来，农村用能结构不容乐观，生物质能被煤炭所取代，也带来了一系列问题。因此，发展农村建筑新能源体系至关重要。

随着我国农村经济增长，农民收入提高，农村商品用能耗量在农村能源消耗的比例中比重逐渐增加，但是如果按照现在城镇模式发展农村住宅，将会产生巨大的能源短缺，同时也会严重破坏自然环境，因此，未来的农村发展应该在围护结构合理设计、使用可再生、零污染能源下功夫，从短期发展来看，应该多采用生物质能源和其他可再生能源，诸如太阳能、水电、风能等，同时符之以电力和其他商品能源进行供能，用这种方法取代现如今效率低下、能耗较高、污染严重的传统供能方式。例如，应该鼓励使用太阳能热水或被动式太阳能采暖等方式取代原有的燃烧秸秆、薪柴产热的方式。

由于我国农村人口分布比较分散，形成以村落为主要行政单位的小规模聚居模式，长期以来均采用自筹自建的方式建造农居，因此主要为分散式单体住宅，缺乏整体规划和建造标准。从目前而言，建立较为集中的、具有良好规划性的区域供能还需投入较多时间和费用，所以采用单户农居供能的形式不仅便捷，能较快实现，而且可在既有建筑中使用，投资费用较低，是一个比较好的方法。

## 2.2 上海地区农居调研结果

上海地区属于夏热冬冷地区，如图 2.2 所示，该类地区气候特点是夏季较为炎热，冬季湿冷，空气湿度较大，对于夏热冬冷地区，冬季采暖比较重要，室外日平均温度低于 5℃的天数较长，如没有供暖设施，室内温度低，舒适度较差。

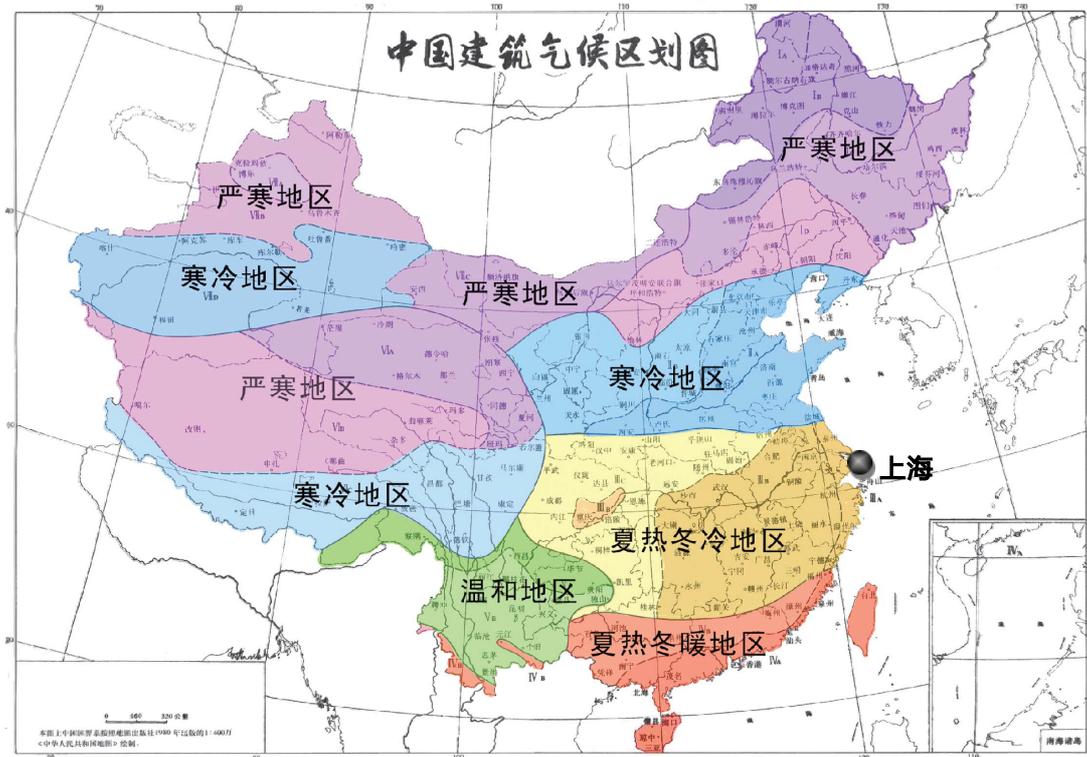


图 2.2 中国建筑气候分区图

为了更好的判断上海地区室外空气温度状况，对上海地区 2014 全年室外温度进行了实际测量（测量点位于虹桥），其中测量值为每半小时记录一次，得到的结果如图 2.3 所示。

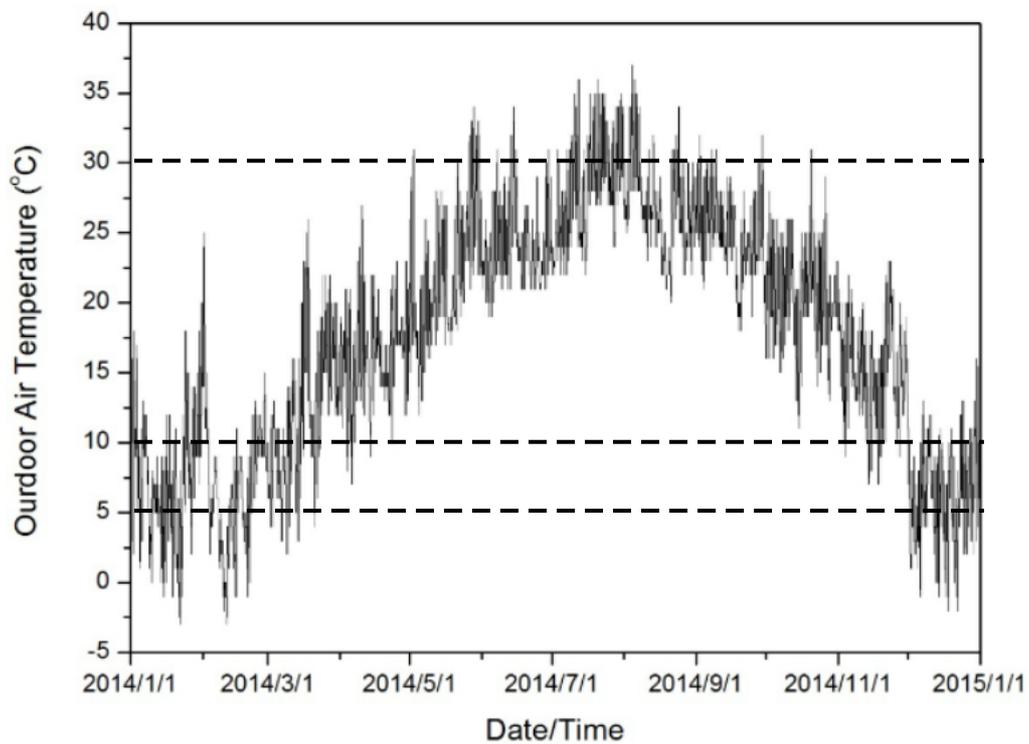


图 2.3 上海地区 2014 年全年室外空气温度

从图 2.3 中可以看出，上海地区夏季最高温度位于 8 月左右，温度值约为 35~37℃，高于 30℃的时间较少，而相反，低于 10℃的时间则相对较长。当低于 5℃时，室外温度过低，为了保证室内舒适度，必须要进行采暖，负荷该条件的时长也比高于 30℃时长长。因此对于上海地区建筑而言，冬季采暖比夏季供冷更为重要。

作为农村住宅而言，围护结构比城镇住宅的隔热性能较差，因此室内温度更接近于室外温度。选取上海地区 2014 年温度达到最高值的一天，即 8 月 4 日，得到全天室外空气温度，见图 2.4，可以发现最高温度出现在 13:00~15:00 间，而作为农村住宅使用者而言，该时间段并非是经常逗留在室内的时间，农村住户白天时间多为外出劳作的时间，而在室内休息时间多为晚上，而夜间温度较低，因此夏季供冷并非至关重要，通过调研结果，对目前农居住户用能情况来看，通常夏季农村住户使用空调频率也是相当低，因此，选取系统时，应主要关注冬季采暖，而夏季供冷则可用一些简便方式进行补充。

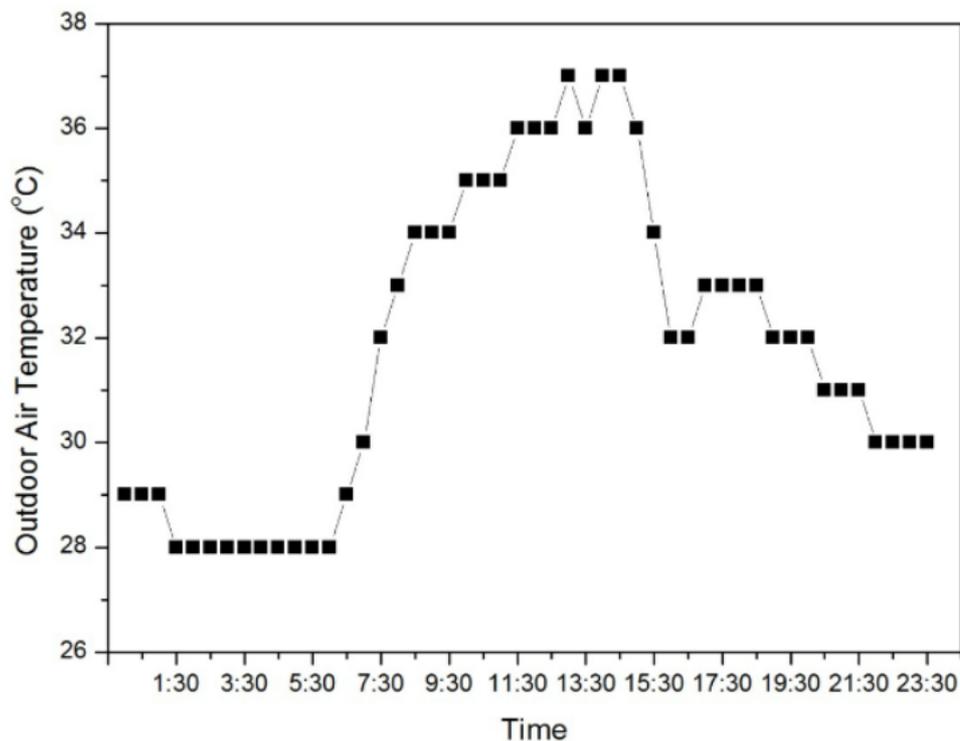


图 2.4 上海地区夏季单日室外空气温度

针对现在上海地区常见农村住宅现状进行调研，得到结果如图 2.5 所示，上海地区农村住宅仍然以独户为主，这种类型建筑通常为住户自行建筑，因此风格均有所不同，但是通常而且该类建筑围护结构隔热性能较差，一些住宅窗户仍然采用铁窗，屋顶墙壁仍采用砖砌。该类建筑门前通常地势较为开阔，住户与住户间隔较开，

门前有小块农田，房后有一些简易家畜农舍。该类建筑内部格局基本为长条形，即各个房间并排设置。

由于该类建筑周围无遮挡，而且上海地区阳光照射时间较长，因此太阳能是一个较为适用的可再生能源。同时，由于门前地势开阔，因此土壤蓄热这一技术也应该给予考虑。在既有建筑中降低建筑能耗，提高居民舒适度，并考虑到成本问题，在系统改造方面，可采用太阳能集热+地埋管蓄热取热的方式进行供能。而作为农村住户，居民所迫切需要改进的方面是改变采暖和供生活热水的方式。



图 2.5 上海地区农村住宅现状调研

## 2.3 系统尺寸分析

### 2.3.1 室内热需求估算

根据上述分析，初步确定生态农居能源一体化系统采用太阳能集热板技术和地埋管土壤取热蓄热技术，针对室内产暖和供生活热水<sup>[27-30]</sup>。

冬季室内热负荷应为围护结构耗热量与门窗缝隙渗入空气的耗热量之和，再扣除室内产热设备、人员等产生的热量，通常情况下，产热的设备、人员在各个住宅建筑中各具特点，同时逐时变化比较明显，具有一定的不确定性，因此可忽略这部

分得热，所以计算结果偏大，有利于防止设备产热不足的现象发生，相当于乘以一个安全系数。故冬季建筑热负荷计算公式为：

$$\dot{Q} = \sum_{j=1}^n C_j \times \dot{Q}_j + \dot{Q}_i \quad (2.1)$$

其中， $\dot{Q}$ 为冬季建筑总热负荷（W）； $n$ 为该建筑共有部分数； $C_j$ 为j部分考虑围护结构附加耗热量后所应乘以一个系数，该数值大于或等于1； $\dot{Q}_j$ 为j部分围护结构基本耗热量（W）； $\dot{Q}_i$ 为门窗缝隙渗入空气的耗热量（W）。

j部分围护结构的基本耗热量按照下式计算：

$$\dot{Q}_j = A_j K_j (t_R - t_{o,w}) \alpha \quad (2.2)$$

其中， $\dot{Q}_j$ 为j部分围护结构的基本耗热量（W）； $A_j$ 为j部分围护结构表面积（ $m^2$ ）； $K_j$ 为j部分围护结构传热系数（ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ）； $t_R$ 为冬季室内计算温度（ $^\circ C$ ）； $t_{o,w}$ 为采暖室外计算温度（ $^\circ C$ ）； $\alpha$ 为围护结构温差修正系数，通常情况下与不采暖房间相邻的隔墙且不采暖房间有门窗与室外相同时，该修正系数取0.7。

围护结构附加耗热量需要对基本耗热量进行修正，主要修正项为：朝向修正、风力附加、外门附加、高度附加。在农居能耗估算中，朝向修正见表2.1；风力附加由于该类农居布置地势比较开阔，因此结构热负荷附加为5%~10%；外门附加由于该类建筑隔热性能较差，而且外门为无门斗的简易外门，因此开始外门侵入的冷空气不大，而且在基本耗热量计算时，结果应较实际结果偏大，所以在此不考虑这一因素；高度附加无需考虑。

表 2.1 朝向修正率

朝向	朝向修正率
北、东北、西北	0~10%
东、西	-5%
东南、西南	-10%~-15%
南	-15%~-30%

门窗缝隙渗入冷空气的耗热量按照下式计算：

$$\dot{Q}_i = 0.278 L \rho_{ao} c_p (t_R - t_{o,w}) \quad (2.3)$$

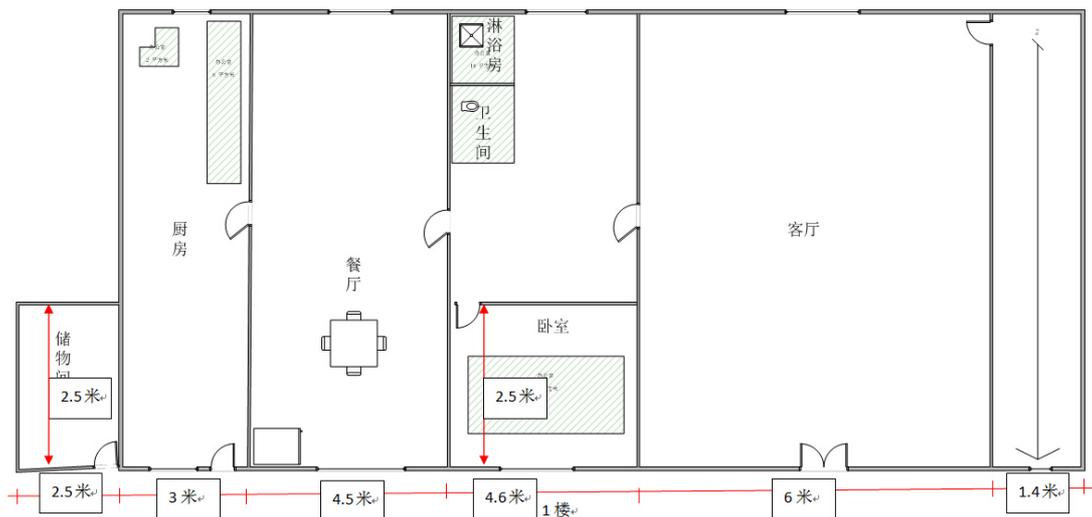
其中， $\dot{Q}_i$ 为门窗缝隙渗入冷空气的耗热量（W）； $L$ 为渗透冷空气量（ $m^3/h$ ），由于无确切数据，故本文按照表2.2推荐值计算渗透风量，表中所示为换气次数，计算渗透冷空气量需要乘以房间体积（ $m^3$ ）； $\rho_{ao}$ 为采暖室外计算温度下的空气密度

( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c_p$ 为空气定压比热,  $c_p=1\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

表 2.2 换气次数

房间类型	一面有外窗的房间	两面有外窗的房间	三面有外窗的房间	门厅
换气次数 ( $\text{h}^{-1}$ )	0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	2.0

依据以上方法, 可以估算出实际单户农村住宅对于采暖的热需求量, 本文中选取调研中比较典型的一户农居进行计算, 该农村住宅为两层建筑, 其平面布置如图 2.6 所示。



1) 一楼平面图



2) 二楼平面图

图 2.6 单户农居室内布置及尺寸平面示意图

根据图 2.6 所示的示意图, 可以看出, 该建筑各个房间基本平行布置, 其中需

要进行采暖的房间为客厅、餐厅、卧室，通常情况下，卧室需要进行采暖的时间为夜间，而客厅和餐厅需要采暖的时间为白天，两者之间基本没有重合的时间，因此应该分开计算，通过计算，客厅和餐厅的冬季采暖热负荷约为 5.86kW，卧室的冬季采暖热负荷约为 4.65kW。若两类房间使用采暖时间完全不重合，则系统应该满足的最大热负荷应为 5.86kW；若两类房间使用采暖时间有重合，则系统应该满足的最大热负荷应为 10.51kW。

除了采暖之外，全年供生活热水应给予考虑，该类建筑主要使用生活热水的情况是在淋浴房，因此在此计算生活热水时只考虑淋浴。生活热水所消耗的热量计算公式为：

$$Q_{\text{热水}} = c_p' q \Delta T \times t \quad (2.4)$$

其中， $Q_{\text{热水}}$ 为生活热水每日所消耗的热量(J)； $c_p'$ 为水的定压比热(J/(kg·°C))； $q$ 为花洒单位时间出水水量(kg/h)，依据通常花洒出水量，本文中设置为 200 kg/h； $\Delta T$ 为加热热水时，热水温升(°C)； $t$ 为每日洗澡用水时间(h)。

按照上式计算，确定生活热水每日所消耗的热量为 33600kJ。

### 2.3.2 太阳能集热板尺寸估算

太阳能集热板需要能够基本满足采暖与供生活热水两部分的全部热量<sup>[31-35]</sup>，根据上述计算可知，采暖全天总热负荷需求约为  $3.78 \times 10^5$ kJ，生活热水每天所需要热量为  $3.36 \times 10^4$ kJ，总需求为  $4.12 \times 10^5$ kJ。

太阳能集热板尺寸应按照下式计算：

$$A_{\text{集热}} = \frac{1000 \times (Q_{\text{采暖}} + Q_{\text{热水}})}{\int_0^T \eta E dt} \quad (2.5)$$

其中， $A_{\text{集热}}$ 为太阳能集热板尺寸(m)； $Q_{\text{采暖}}$ 为采暖全天耗热量(kJ)； $Q_{\text{热水}}$ 为制生活热水全天耗热量(kJ)； $\eta$ 为太阳能集热板集热效率； $E$ 为上海地区设定太阳能集热板倾角方向单位时间辐射量(W/m<sup>2</sup>)； $t_{\text{阳光}}$ 为阳光照射时间(s)，该值范围为 0~T。

由于积分计算较为困难，因此进行简化计算如下：

$$\int_0^T \eta E dt_{\text{阳光}} = \bar{\eta} \bar{E} \Delta t_{\text{阳光}} \quad (2.6)$$

其中,  $\bar{\eta}$ 为太阳能集热板平均集热效率;  $\bar{E}$ 为上海地区设定太阳能集热板倾角方向白天全天平均辐射量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $\Delta t_{\text{阳光}}$ 为阳光照射总时间 (s)。

依据上述计算公式, 选用较为便宜, 集热效率较低的平板式太阳能集热板, 得到该例子中需要太阳能集热板面积约为  $10\text{m}^2$ 。由于该计算未考虑从土壤中取热, 而且提供采暖的热量比供生活热水所需热量高一个数量级, 因此可适当缩小太阳能集热板的面积。

### 2.3.3 土壤蓄热中地埋管尺寸和布置估算

由于上海地区现有农村住宅大多为独户建筑, 周围地势开阔, 因此可以利用土壤蓄热, 在需要额外热量时, 从土壤中取热。由于地势开阔, 为了降低成本, 可以采用较为简易的水平管土壤蓄热<sup>[36-40]</sup>。具体布置方法如图 2.7 所示。

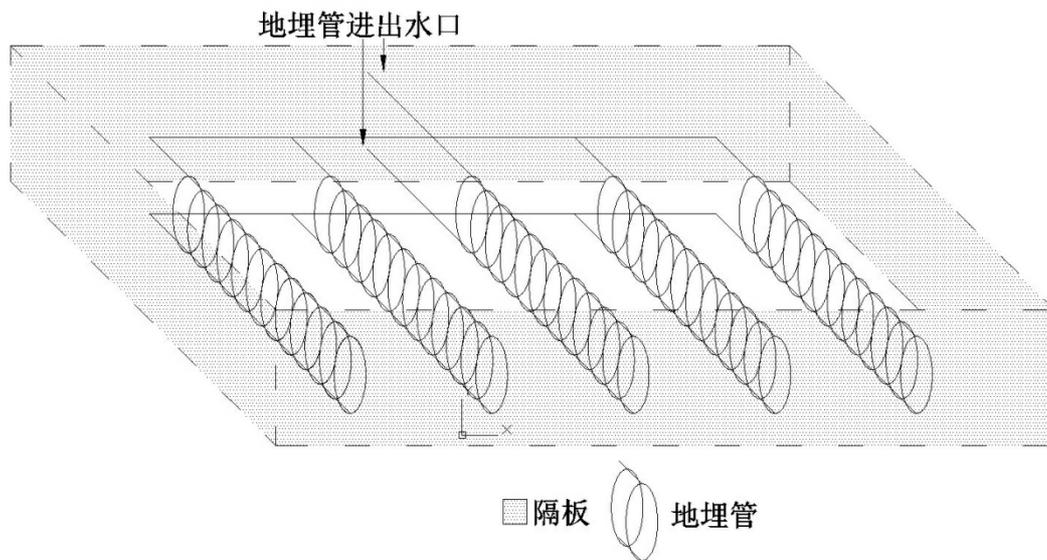


图 2.7 水平地埋管布置方式说明

如图 2.7 所示, 为了减少土地占用空间, 并且能够保证和土壤充分换热, 因此将地埋管按图中所示缠绕, 并纵向防止, 为了减少蓄热区域土壤向周边土壤散热, 在四周加隔板。若顶部需要种植植物, 则在顶部也许加隔板防止渗水。

为了更好地了解不同深度土层的全年温度, 可按照下式计算获得:

$$T(\tau, Z) = T_m + A_w e^{-Z \sqrt{\frac{\pi}{aT}}} \cos\left(\frac{2\pi}{T} \tau - Z \sqrt{\frac{\pi}{aT}}\right) \quad (2.7)$$

其中,  $\tau$ 为从地表面温度年波幅出现算起的时间 (h);  $Z$ 为从地面算起的地层深度 (m), 地面 $Z = 0$ ;  $T(\tau, Z)$ 为在  $T$ 时刻深度  $Z$ 处的地温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_m$ 为年平均地表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $A_w$ 为地表面温度年周期性波动波幅 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T$ 为土壤温度年波动周期 (h),  $T = 365 \times 24 = 8760\text{h}$ ;  $a$ 为大地的导温系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

上海地区年平均地表温度、波幅、大地导温系数都可根据《统计年鉴》和标准获得<sup>[41]</sup>, 按照式 2.7 计算结果见图 2.8。

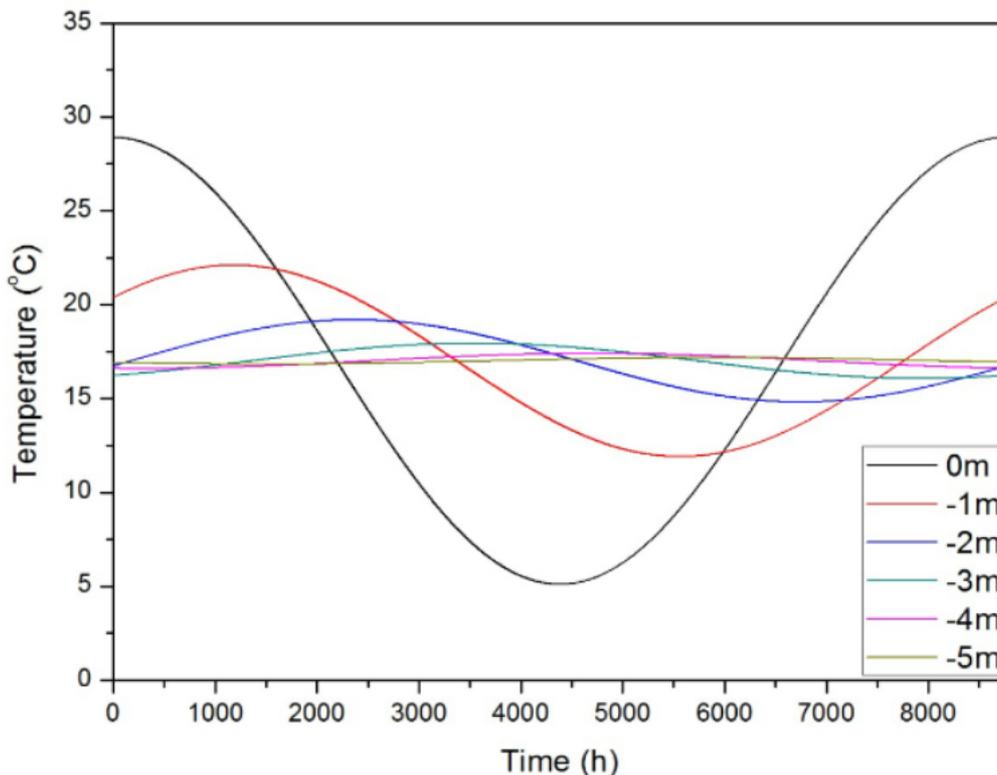


图 2.8 上海地区不同土壤深度全年逐时地温

由图可以看出, 通常情况下当距离地面 3~4m 深时, 土壤全年温度变化幅度较小, 因此只有离地面很近的地方才会严重地受到空气温度变化的影响。将地埋管放置于离地面深 3~5m 处, 则可较好地储存热量。通常情况垂直埋管需要打井, 深度至少 10m 以上, 操作成本较高, 而水平地埋管只需要在要放管处朝下挖土至 5~6m 深, 易于施工, 同时易于后期检修维护。通过隔热处理能够较好地防止热量过快丧失。

如图 2-9 所示, 为单管换热量计算方法<sup>[42-45]</sup>。由于土壤温度变化比较缓慢, 因

此假设土壤温度变化对管路中任意一点  $x$  无温度影响，故在单位时间里管路中任意一点  $x$  的温度值不变，因此实质上管内水的热量损失为：

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{入口}} - \dot{Q}_{\text{出口}} \quad (2.8)$$

其中， $\Delta\dot{Q}$ 为单位时间内管内热水热量损失 (W);  $\dot{Q}_{\text{入口}}$ 为单位时间内管内流入热水的热量 (W);  $\dot{Q}_{\text{出口}}$ 为单位时间内管内流出热水的热量 (W)。

管内热量损失应等于土壤得到热量，即换热量。

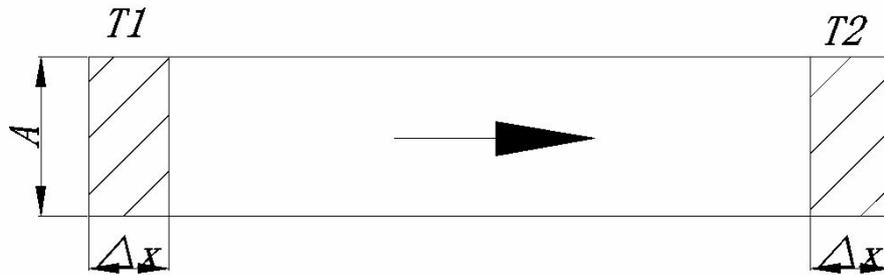


图 2.9 单管换热量计算方法示意图

运用该方法计算的单管的热量计算公式为：

$$\dot{Q}_{\text{管}} = c_p \rho_{\text{水}} A \Delta x (T_1 - T_2) \quad (2.9)$$

其中， $\dot{Q}_{\text{管}}$ 为单位时间内单管损失热量 (W);  $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )，在本文取  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $A$ 为单管截面面积 ( $\text{m}^2$ );  $\Delta x$ 为单位时间内管中水流过距离 ( $\text{m}/\text{s}$ )，在本文中该值等于水流速  $v$ ;  $T_1$ 为入口水温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_2$ 为出口水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

计算地埋管所需管长计算公式为：

$$L = \frac{1000 \times Q_{\text{max}}}{q_1} \quad (2.10)$$

其中， $L$ 为埋管总长 (m);  $Q_{\text{max}}$ 为夏季向埋管换热器排放的最大热量和冬季吸收最大热量中的较大者 (kW)，在计算单管管长时，用 $\dot{Q}_{\text{管}}$ ;  $q_1$ 为每米管长换热量

(W/m), 通常为 20~40W/m。

通过计算, 可得埋管直径为 0.01m, 单管长度 50m, 管数 8 根。其中, 水流速为 0.1m/s, 进出水温差为 10°C。

### 2.3.4 整体系统布置

通过上述计算, 利用太阳能集热板和土壤蓄热取热供能的方法是可行的, 用户端包括全年供生活用水和冬季采暖, 由于土壤取热的水温温度较低, 通常情况下不会考虑土壤取热供生活热水, 因此太阳能集热在供能侧至关重要, 而土壤取热蓄热起到削峰填谷的作用。

整体系统的布置、系统图和具体的系统控制逻辑将在下一章节详细赘述。

## 2.4 本章小结

本章节主要针对我国农村住宅现状, 上海地区实地调研结果, 以及选取一户典型农村住宅建筑进行一体化系统的初步设计, 并对一些参数进行数学估算, 得到以下结论:

- 1) 现阶段, 我国农村住宅能耗分配不合理, 因此改变农村用能现状势在必行;
- 2) 上海地区农村住宅仍然以单户两层楼自建住宅为主, 分布较为分散, 因此分布式供能方式不太可行, 针对单户建筑供能在现阶段为较好的办法。同时, 该类自建农居围护结构隔热较差, 因此在优化系统的同时, 也需要考虑对围护结构进行改造;
- 3) 根据上海地区气候条件来看, 夏季供冷对于农户而言不是重点, 因此可采用简易方式实现, 根据调研全年农居电费账单结果来看, 夏季空调使用率极低, 因此系统不考虑夏季供冷, 但是上海地区冬季较为寒冷, 因此冬季采暖需要考虑进去, 而生活热水也是农居中用能重要一块, 需要进行考虑;
- 4) 该类建筑周围地势开阔, 有利于太阳能集热和土壤取热蓄热, 因此采用这两种供能方式, 由于上海地区有梅雨季节, 因此利用土壤蓄热取热来弥补太阳能集热有时供能不足能够有效地提高系统实用性。

## 第3章 生态农居能源一体化系统模型建立

### 3.1 生态农居能源一体化系统控制逻辑

#### 3.1.1 生态农居能源一体化系统简介

生态农居能源一体化系统旨在减少传统农居高污染、低效率、低舒适度的现状。

由于上海地区农居多为分散单户，较少遮挡，因此在供能侧选择太阳能集热板，依靠可再生无污染的能源方式进行供能，同时由于单户农居周边土地资源较为丰富，因此采用土壤蓄热能够将多余能源进行储存，以便热能不足时进行补充，与此同时，利用土地资源丰富这一特点并降低初投资成本，选择水平地埋管进行土壤换热<sup>[46-52]</sup>。

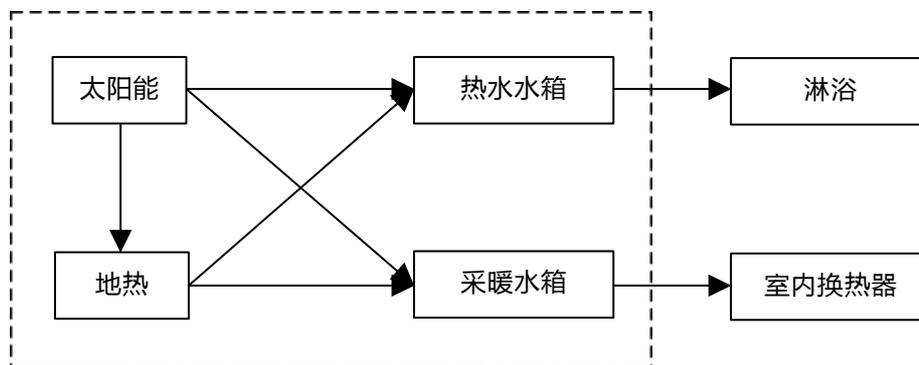
根据上海地区当地状况，得出农民在生活热水和采暖方面需求较为迫切，生活热水和采暖方面耗能在总耗能中占主要比重，因此需求侧主要关注全年供给生活热水，采暖季进行采暖。

根据以上分析供能侧两种能源分别需要太阳能集热板和地埋管两种设备，需求侧则需要两个水箱，具体设备列于表 3.1。

表 3.1 供能侧和需求侧设备

供能侧	设备	需求侧	设备
太阳能供热	太阳能集热板	热水需求	热水水箱
土壤源地热	地埋管	采暖需求	采暖水箱

由于供能侧有两种供能方式，需求侧也有两个需求，因此需要考虑供能方式配合与需求优先级等问题。总体而言，图 3.1 可以概括生态农居能源一体化系统运行方式。



说明：1.虚线内为控制逻辑需要做的内容，箭头为前者为后者提供热量。

2.可实现功能有：①太阳能→热水、②太阳能→采暖、③太阳能→地热（蓄热）、④地热→采暖、⑤地热+太阳能→热水、⑥地热+太阳能→采暖。

3.优先级：供能侧：太阳能 > 地热；需求侧：热水 > 采暖 > 地热（蓄热）。

图 3.1 生态农居能源一体化系统运行方式

其中虚线内为一体化系统所包含的部分，箭头方向表示从提供能源一方指向消耗能源一方。

依据上面的运行方式的说明，可以搭建生态农居能源一体化系统，由于热水主要是供淋浴使用，因此采用水水换热水箱，保持整个系统为闭式系统，避免频繁清洗。供能侧与需求侧各需要一个水泵和一些电动三通阀来调节系统运行。整个系统需要保证太阳能集热板可以给热水和采暖提供热量，地埋管在确保可以给热水和采暖提供热量之外，还可以吸收太阳能集热板提供的热量，并且要使得地埋管和太阳能集热板能够串联提供能源。依据以上要求，搭建适合上海地区的生态农居能源一体化系统为图 3.2 所示。

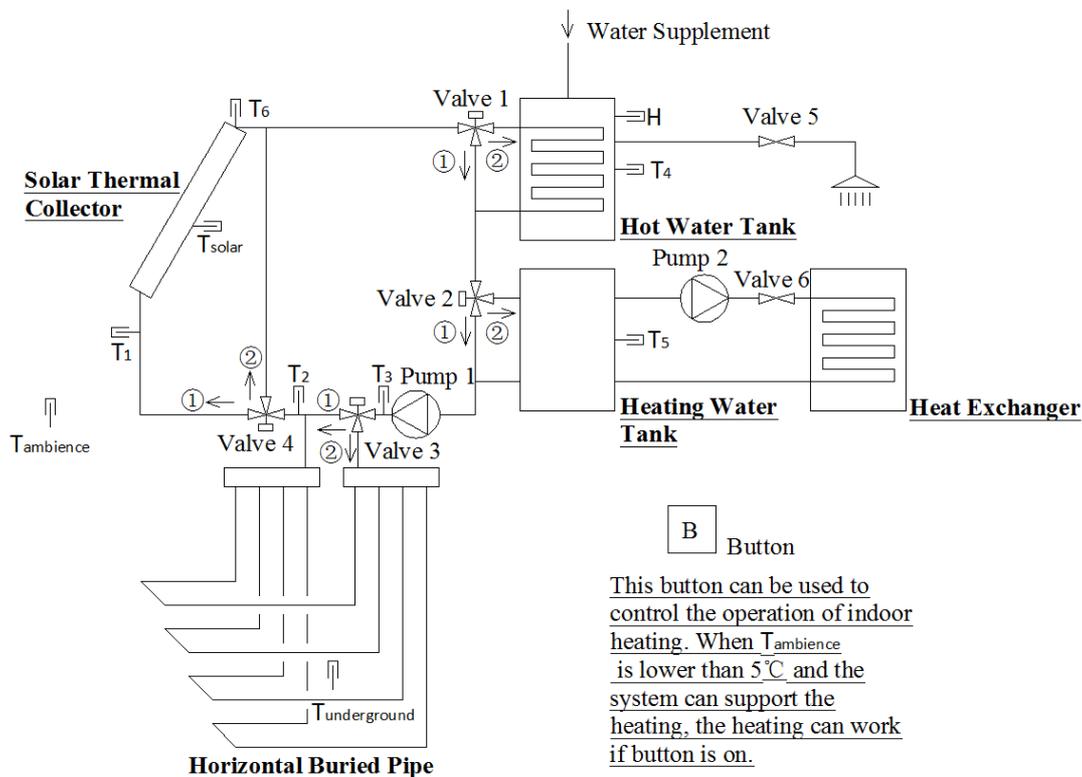


图 3.2 生态农居能源一体化系统示意图

其中，一体化系统中，热水水箱和采暖水箱与两个水泵及电动三通阀集成为一体化系统，一侧接太阳能集热板和地埋管，另一侧接室内用户侧。该系统为闭式系统，热水水箱中有换热盘管，进行水-水换热，顶部开口，进行补水，用户一侧依靠重力势能将水从热水水箱中提取出供给淋浴用水，采暖水箱则为存水罐，需求侧为室内热交换器，依靠水泵进行循环。

### 3.1.2 生态农居能源一体化系统逻辑原则



限值或下限时需判断是否需要改变状态。由于温度变化幅度并没有图 3.3 所示那么显著，属于渐进变化，因此运用该方法可以有效防止系统频繁启停，避免系统损坏。

由于农村住户对于是否采暖有自己的偏好，因此是否采暖需要由农村住户决定，本系统设定了一个手动按钮，当按钮开启且室外温度低于  $4^{\circ}\text{C}$  时，进入采暖季模式。当按钮关闭或者室外温度上升至  $6^{\circ}\text{C}$  时，采暖季模式结束。若不满足上述要求时，该系统保持非采暖季工况运行。

非采暖季工况中，不使用采暖水箱，因此电动三通阀 Valve2 采暖水箱一侧始终保持关闭。

需要注意的一点是该系统中的电动三通阀均为球阀，而且不涉及开度，只有全开或全闭两种模式，两个支路只能为一全开、一全闭的状态，无法两全开或者两全闭，因此下文中开启某一支路，则表明另一支路关闭。

### 3.2.1 水泵 Pump1 启停控制逻辑

水泵 Pump1 的启停需要考虑多种工况。只要某一种工况下，水泵需要运行，则要启动水泵；任何一种工况，都不满足水泵继续运行，则水泵停止。具体的逻辑控制见图 3.4。

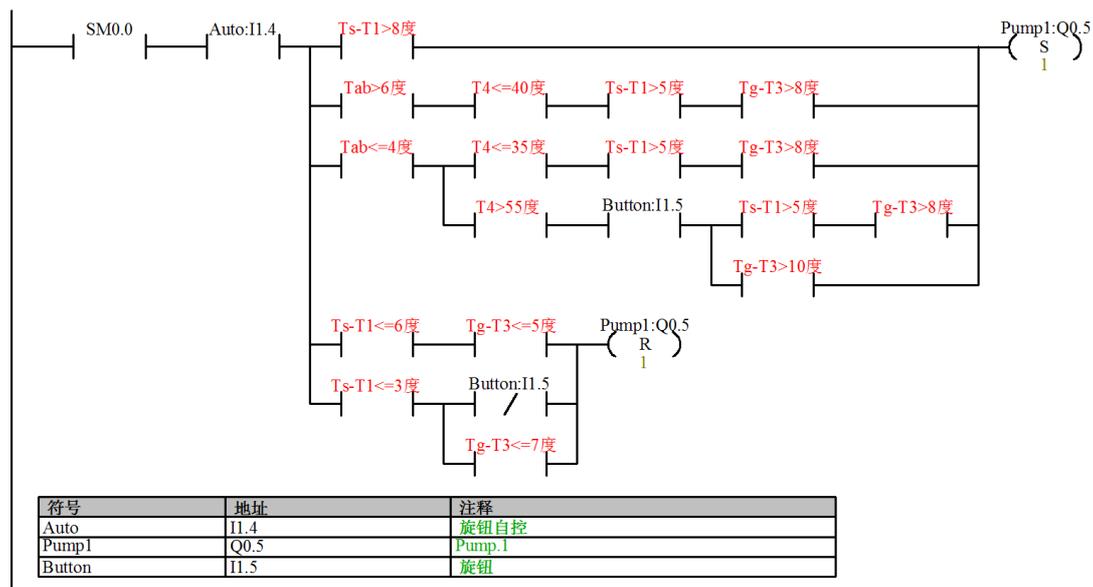


图 3.4 水泵 Pump1 启停控制逻辑图

如图 3.4 所示，该图为水泵 Pump1 的控制逻辑 T 型图。当切换为自动模式进入该控制逻辑，如果  $T_s - T_1 > 8$  度，水泵 Pump1 开启；如果环境温度大于 6 度且  $T_4 \leq 40$  度且  $T_s - T_1 > 5$  度且  $T_g - T_3 > 8$  度，水泵 Pump1 开启；如果环境温度小于等于 4 度且  $T_4 \leq 35$  度且  $T_s - T_1 > 5$  度且  $T_g - T_3 > 8$  度，水泵 Pump1 开启；在环境温度小

于等于 4 度时,  $T_4 > 55$  度且按钮 Button 开启, 如果  $T_s - T_1 > 5$  度且  $T_g - T_3 > 8$  度或者  $T_g - T_3 > 10$  度, 水泵 Pump1 均需要开启。当  $T_s - T_1 \leq 6$  度且  $T_g - T_3 \leq 5$  度时, 水泵 Pump1 停止运行; 当  $T_s - T_1 \leq 3$  度且按钮 Button 关闭或者  $T_g - T_3 \leq 7$  度时, 水泵 Pump1 也停止运行。

以上为水泵 Pump1 启停控制逻辑, 其中考虑了热水水箱和采暖水箱的热需求, 同时也考虑了太阳能集热板和地埋管是否能够提供需求的热量。为了防止水泵 Pump1 频繁启停, 因此采用上下限控制策略, 在区间内时, 保持上一时刻状态运行。

### 3.2.2 阀门 Valve1 切换控制逻辑

阀门 Valve1 的切换主要是判断是否需要加热热水水箱, 以及现有的热量是否足够加热热水水箱, 由于阀门 Valve1 是球阀, 因此出水口①通道和②通道必须有且仅有一个通道是开启状态, 在逻辑控制 T 型图中, 默认②通道开启为 Valve1 开启, ①通道开启为 Valve1 关闭。具体的逻辑控制 T 型图见图 3.5。

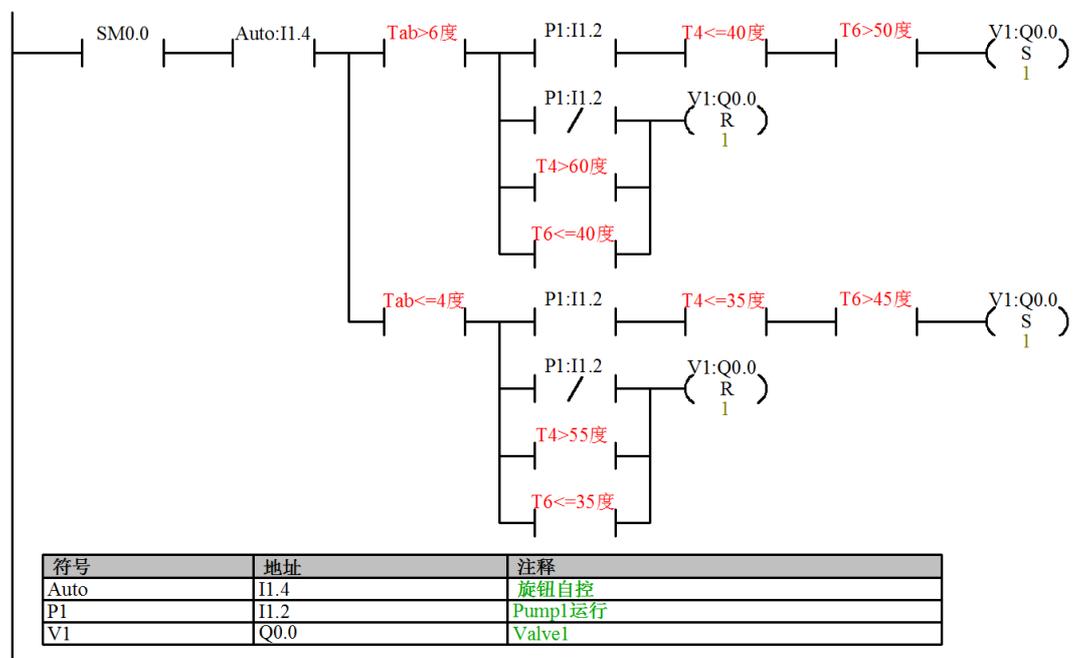


图 3.5 阀门 Valve1 切换控制逻辑图

如图 3.5 所示, 该图为阀门 Valve1 的控制逻辑 T 型图。当切换为自动模式进入该控制逻辑, 如果环境温度大于 6 度, 即进入非采暖状态, 若水泵 Pump1 运行且  $T_4 \leq 40$  度且  $T_6 > 50$  度, 则阀门 Valve1 切换为②通道开启; 若水泵 Pump1 停止, 或者  $T_4 > 60$  度, 亦或者  $T_6 \leq 40$  度, 则阀门 Valve1 切换为①通道开启。如果环境温度小于等于 4 度, 即进入采暖状态, 若水泵 Pump1 运行且  $T_4 \leq 35$  度且  $T_6 > 45$  度, 则阀门 Valve1 切换为②通道开启; 若水泵 Pump1 停止, 或者  $T_4 > 55$  度, 亦

或者  $T_6 \leq 35$  度，则阀门 Valve1 切换为①通道开启。

以上为阀门 Valve1 切换控制逻辑，其中考虑了热水水箱的热需求，同时也考虑了水泵是否运行，即供热侧是否能够提供充足的热量，满足加热需求。为了防止阀门 Valve1 频繁切换，因此采用上下限控制策略，在区间内时，保持上一时刻状态。

### 3.2.3 阀门 Valve2 切换控制逻辑

阀门 Valve2 的切换主要是判断是否需要加热采暖水箱，以及现有的热量是否足够加热热水水箱，由于阀门 Valve2 是球阀，因此出水口①通道和②通道必须有且仅有一个通道是开启状态，在逻辑控制 T 型图中，默认②通道开启为 Valve2 开启，①通道开启为 Valve2 关闭。具体的逻辑控制 T 型图见图 3.6。该逻辑判断中，由于热水水箱优先级高于采暖水箱，因此还需要判断热水水箱是否能够满足热水需求，在热水水箱满足热水需求的情况下，考虑采暖，通常采暖季才需要进行采暖，但为了人为控制的方便性，设置按钮 Button 来判断是否需要进行采暖。

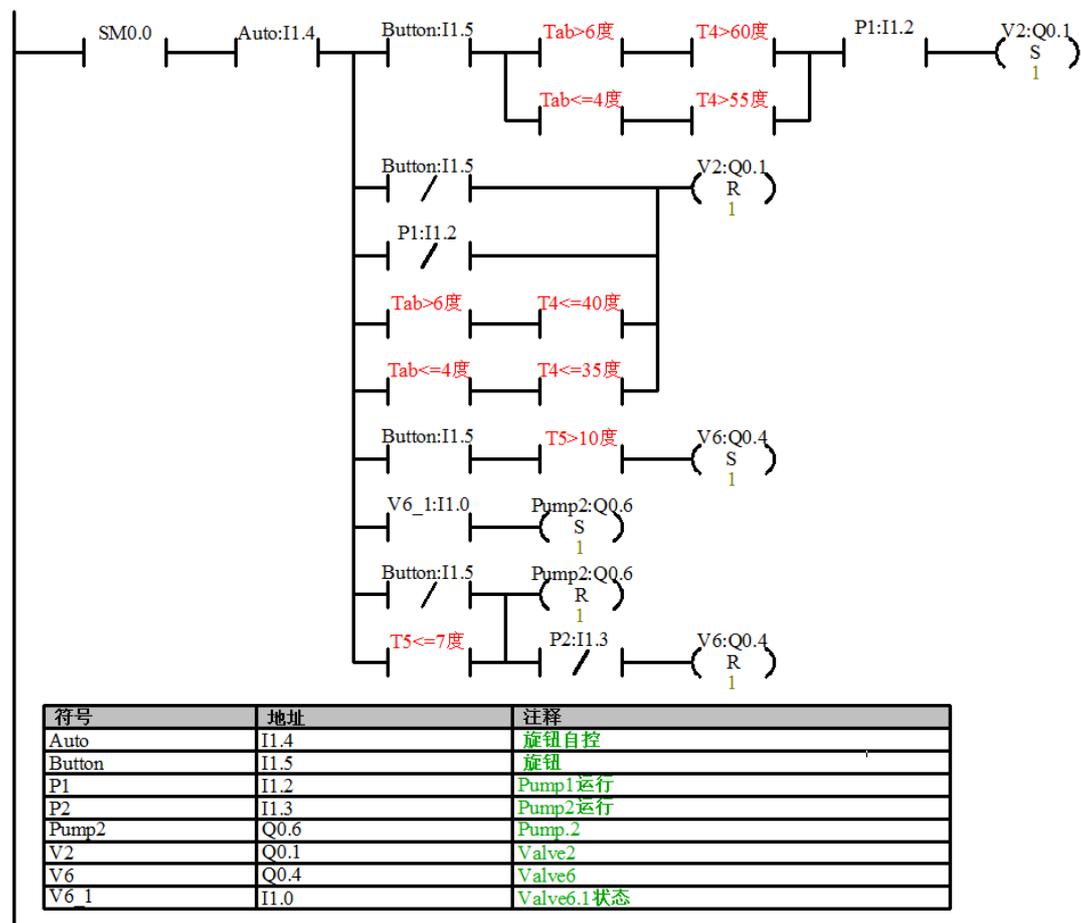


图 3.6 阀门 Valve2 切换控制逻辑图

如图 3.6 所示，该图为阀门 Valve2 的控制逻辑 T 型图。当切换为自动模式进

入该控制逻辑, 如果按钮 Button 开启且水泵 Pump1 运行, 若当环境温度大于 6 度时,  $T_4 > 60$  度, 或者环境温度小于等于 4 度时,  $T_4 > 55$  度, 则阀门 Valve2 切换为②通道开启; 如果按钮 Button 关闭, 或者水泵停止运行, 或者当环境温度大于 6 度,  $T_4 \leq 40$  度, 或当环境温度小于等于 4 度,  $T_4 \leq 35$  度, 则阀门 Valve2 切换为①通道开启。在此处还需要考虑用户侧的阀门 Valve6 的切换和水泵 Pump2 的启停, 这与阀门 Valve2 的切换状态息息相关, 当按钮 Button 开启,  $T_5 > 10$  度, 则阀门 Valve6 开启; 当阀门 Valve6 开启, 则运行水泵 Pump2; 当按钮 Button 关闭或者  $T_5 \leq 7$  度, 则水泵 Pump2 停止运行, 当按钮 Button 关闭或者  $T_5 \leq 7$  度且水泵 Pump2 停止运行, 则阀门 Valve6 关闭。需要注意的是, 在这里阀门 Valve6 为二通球阀, 因此只有开启或关闭两种状态。

以上为阀门 Valve2 切换控制逻辑, 同时考虑了用户侧阀门 Valve6 和水泵 Pump2 的控制逻辑, 其中考虑了采暖水箱的热需求, 也考虑了水泵是否运行, 即供热侧是否能够提供充足的热量, 满足加热需求, 另外需要注意优先级, 要考虑热水水箱是否已经满足热水温度需求。为了防止阀门 Valve2 频繁切换, 因此采用上下限控制策略, 在区间内时, 保持上一时刻状态。

### 3.2.4 阀门 Valve3 切换控制逻辑

阀门 Valve3 的切换主要是判断是否需要从地埋管取热或者蓄热, 由于阀门 Valve3 是球阀, 因此出水口①通道和②通道必须有且仅有一个通道是开启状态, 在逻辑控制 T 型图中, 默认②通道开启为 Valve3 开启, ①通道开启为 Valve3 关闭。具体的逻辑控制 T 型图见图 3.7。

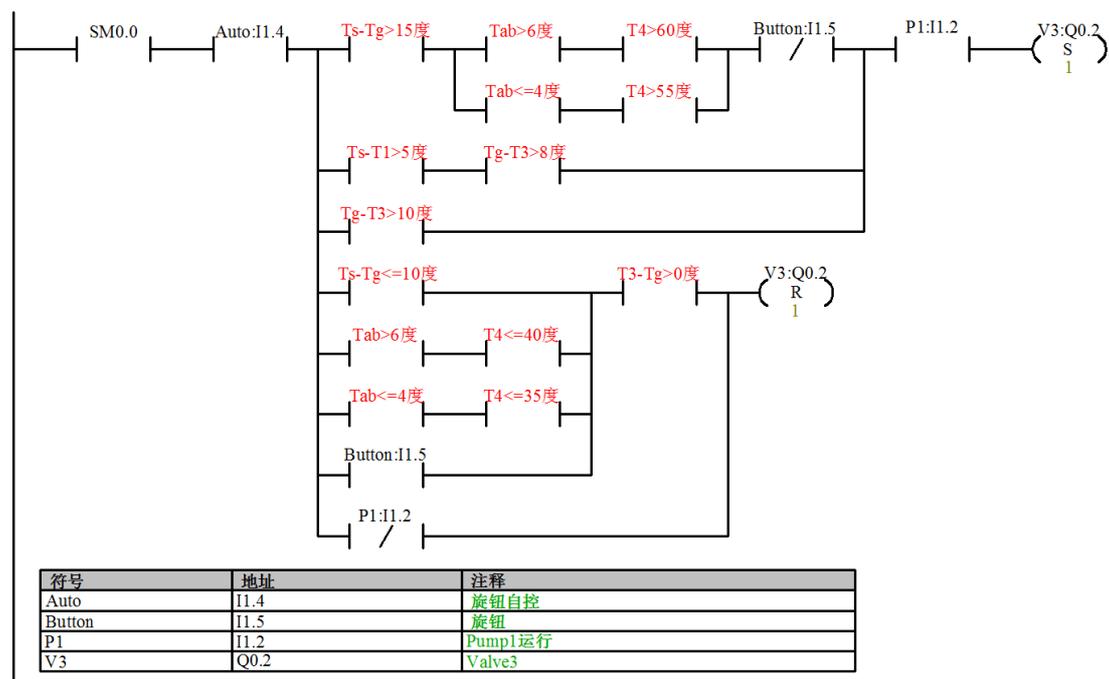


图 3.7 阀门 Valve3 切换控制逻辑图

如图 3.7 所示, 该图为阀门 Valve3 的控制逻辑 T 型图。当切换为自动模式进入该控制逻辑, 当  $T_s - T_g > 15$  度且按钮 Button 关闭且水泵 Pump1 运行, 如果环境温度大于 6 度,  $T_4 > 60$  度, 或者环境温度小于等于 4 度,  $T_4 > 55$  度, 则阀门 Valve3 切换为②通道开启; 当  $T_s - T_1 > 5$  度且  $T_g - T_3 > 8$  度, 则阀门 Valve3 切换为②通道开启; 当  $T_g - T_3 > 10$  度, 则阀门 Valve3 切换为②通道开启。当  $T_3 - T_g > 0$  度时,  $T_s - T_g \leq 10$  度, 或者环境温度大于 6 度且  $T_4 \leq 40$  度, 或者环境温度小于等于 4 度且  $T_4 \leq 35$  度, 或者按钮 Button 开启, 则阀门 Valve3 切换为①通道开启; 当水泵 Pump1 停止运行, 则阀门 Valve3 切换为①通道开启。

以上为阀门 Valve3 切换控制逻辑, 其中考虑了从地埋管蓄热和取热。为了防止蓄热逻辑和取热逻辑发生冲突, 因此此处做了一个  $T_s$  或者  $T_3$  与  $T_g$  之间的大小判断, 当  $T_s$  或者  $T_3$  大于  $T_g$ , 则判断蓄热逻辑; 当  $T_s$  或者  $T_3$  小于  $T_g$ , 则判断取热逻辑。另外, 为了防止阀门 Valve3 频繁切换, 因此采用上下限控制策略, 在区间内时, 保持上一时刻状态。

### 3.2.5 阀门 Valve4 切换控制逻辑

阀门 Valve4 的切换主要是判断太阳能集热板是否能够有足够热量提供给系统, 由于阀门 Valve4 是球阀, 因此出水口①通道和②通道必须有且仅有一个通道是开启状态, 在逻辑控制 T 型图中, 默认②通道开启为 Valve4 开启, ①通道开启为为 Valve4 关闭。具体的逻辑控制 T 型图见图 3.8。

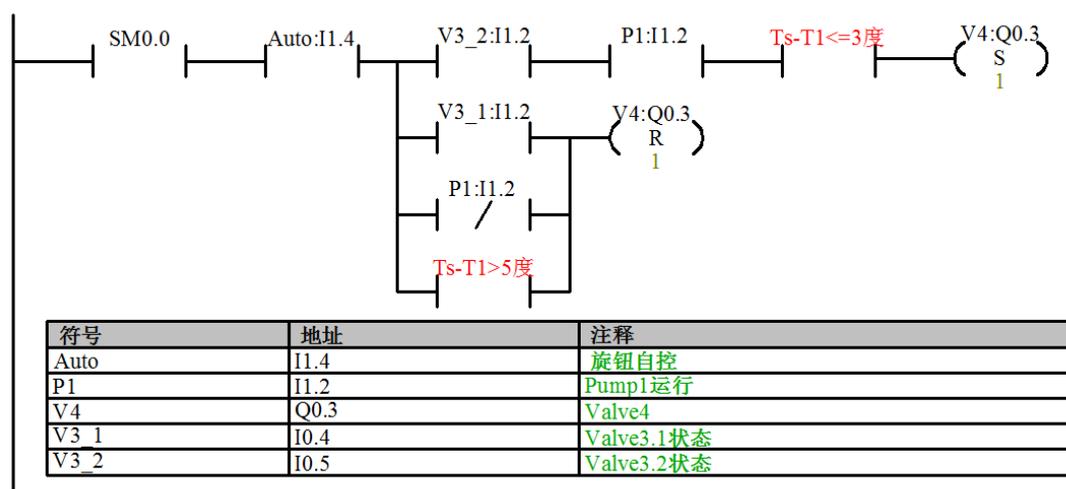


图 3.8 阀门 Valve4 切换控制逻辑图

如图 3.8 所示, 该图为阀门 Valve4 的控制逻辑 T 型图。当切换为自动模式进入该控制逻辑, 当阀门 Valve3②通道开启且水泵 Pump1 运行且  $T_s - T_1 \leq 3$  度, 则阀

门 Valve4 切换为②通道开启；当阀门 Valve3①通道开启，或者水泵 Pump1 停止运行，或者  $T_s - T_1 > 5$  度，则阀门 Valve4 切换为①通道开启。

以上为阀门 Valve4 切换控制逻辑，其中考虑了太阳能集热板是否有足够热量提供给系统。另外，为了防止阀门 Valve4 频繁切换，因此采用上下限控制策略，在区间内时，保持上一时刻状态。

### 3.3 其他说明

由于热水水箱要求水温较高，通常在上海地区冬季太阳能集热板通过水-水换热方式可以将水温加热到  $40 \sim 50^\circ\text{C}$ ，但有时候达不到  $55^\circ\text{C}$ ，而夏季也较难达到  $60^\circ\text{C}$ ，由于这一原因该系统将始终保持加热热水水箱工况，无法进入其他工况。因此需要采用辅助加热，在本课题中使用电加热，当 Valve1②通道开启两小时并且 Valve1①通道始终未开启，则启动电加热，当 Valve1①通道开启，停止电加热，电加热功率推荐为  $2\text{kW}$ 。

为了方便用户自主调节，本系统设定了人为切换模式，当切换为人为模式，则可以用手动进行调节，当温度要求不满足时，也可以进行工况的切换。除此之外，为了防止太阳能集热板过热，设定了保护措施，当温度达到危险值时，报警器响起，需要人工进行处理，避免过热损坏设备。

### 3.4 本章小结

本章节主要针对上海地区生态农居能源一体化系统的控制策略进行了一下分析，其中主要要点有以下几点：

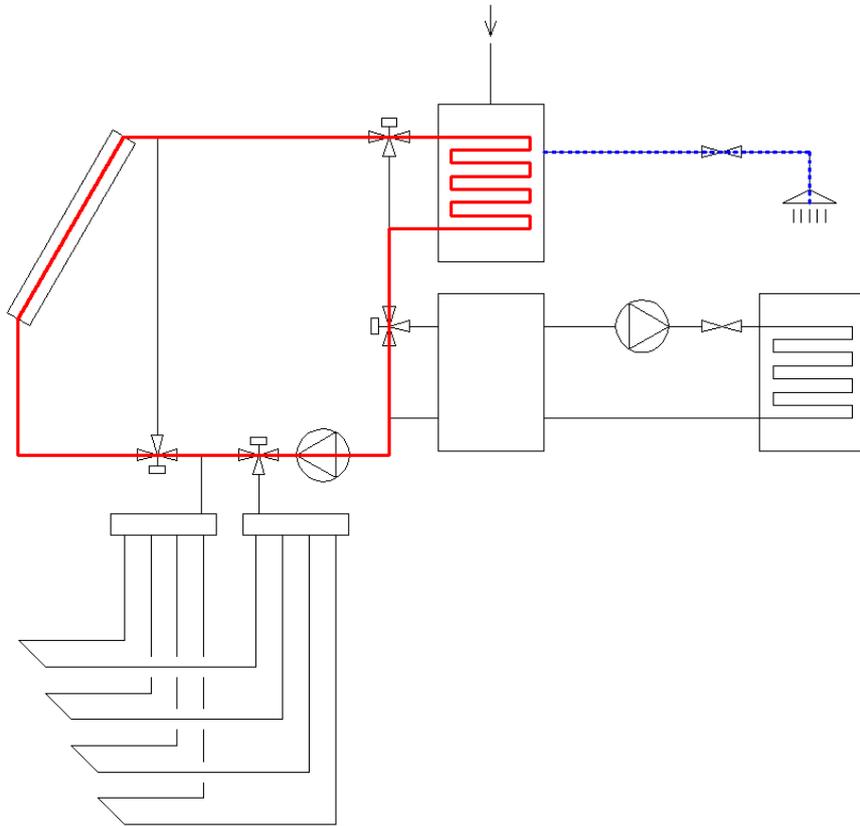
1) 该系统主要由地埋管进行土壤换热、太阳能集热板进行太阳能换热，用户侧主要是提供生活热水和采暖；

2) 该系统主要分为采暖季和非采暖季两种工况。非采暖季中，不考虑地埋管从土壤取热和室内采暖，因此系统逻辑较为简单；采暖季中，两种供热方式、这两种方式串联运行、用户侧两种需求均需要考虑，系统逻辑较为复杂；

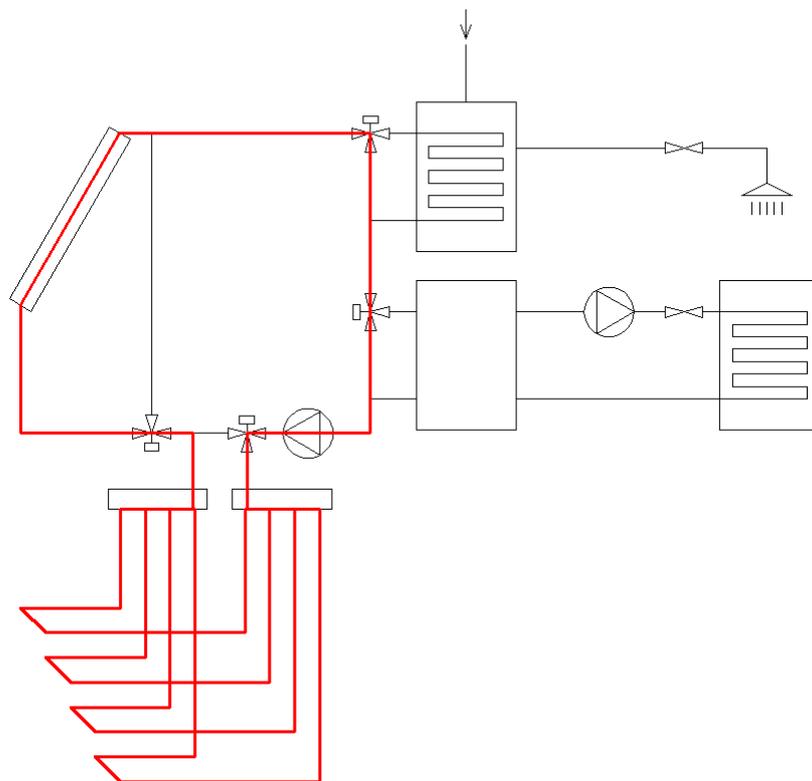
3) 该系统逻辑考虑避免频繁启停和频繁工况切换，又考虑主要以温度或温差作为判断依据，因此设置上下限进行控制，有效避免频繁变化引起系统寿命减少；

4) 该系统考虑到不同用户不同使用习惯，因此设定了系统自动控制和认为操作两种方式，用户可依据自己不同的需求进行选择。

依据本章节的控制策略，归纳为图 3.9 中这六种不同的运行工况。

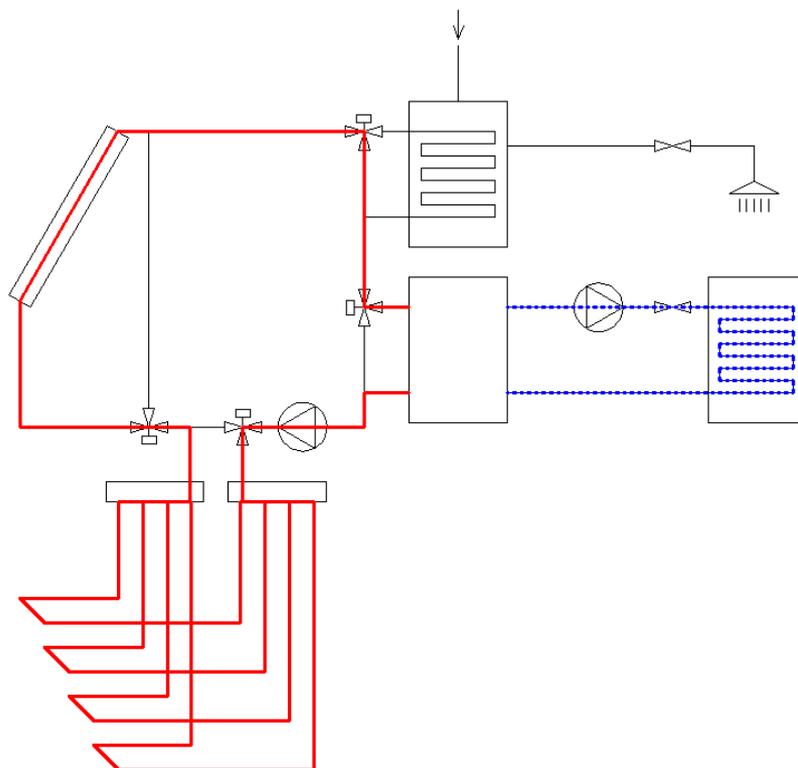


1) 太阳能集热板独立供热水

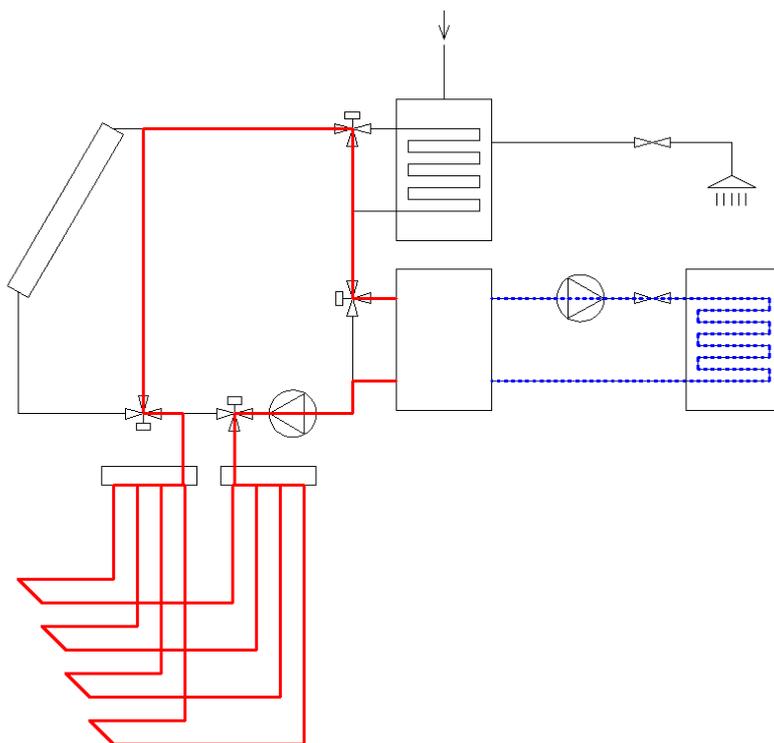


2) 太阳能集热板进行土壤蓄热





5) 太阳能集热板+地埋管串联采暖 (采暖季使用)



6) 地埋管独立采暖 (采暖季使用)

图 3-9 生态农居能源一体化系统不同运行工况

## 第 4 章 上海地区生态农居能源一体化系统建立与测试

### 4.1 上海地区生态农居能源一体化系统实验目的

该实验主要目的为验证在第 3 章所描述的控制逻辑是否可行，通过搭建生态农居能源一体化系统，并运用远传设备，判断该系统是否能够满足热水及采暖需求，从第 3 章描述的生态农居能源一体化系统控制逻辑来看，该系统逻辑在按钮 Button 开启后较为复杂，即在采暖季系统逻辑控制较为复杂，因此该实验在冬季进行，从而分析该系统的可行性。

### 4.2 上海地区生态农居能源一体化系统实验介绍

生态农居能源一体化系统实验台设在同济大学生态农庄的实验大棚，由于主要测试一体化系统的可行性，因此并未选择实际农居进行实验，在此需要说明一下实验台搭建之前做的一些说明。

#### 4.2.1 上海地区生态农居能源一体化系统实验台搭建说明

生态农居能源一体化系统测试的实验结果会与实际结果有所区别，因此在此做一些说明，其说明如下：

1) 生态农居太阳能集热板与地埋管与实际工况有所不同。因为一体化系统中，太阳能集热板与地埋管并未在一体化系统的集成箱体中，因此为了节省实验台搭建成本，因此采用的是原有系统的太阳能集热板与地埋管，该太阳能集热板为真空管式水平太阳能集热板，地埋管为竖直式地埋管，显然这与板式太阳能集热板和水平地埋管的换热效果有所不同，同时太阳能集热板与地埋管是从原系统拆除下来的，因此系统布置时，沿程的管长较长，热量损失较为严重，所以实验效果将低于实际效果。

2) 用户侧与实际情况有所不同。为了节约实验成本且满足实验目的，用户侧并非实际的农居，热水侧无使用者用水，采暖侧则加热大棚室内温度，该结果测下来的大棚室内温度值无实际意义，因此主要关注热水水箱和采暖水箱中的热水温度变化情况。

3) 系统搭建的简化。由于该系统仅为实验使用，因此并未做一体化箱体，将两个水箱、两个水泵、控制面板，以及阀门管路装在箱体内，但是将这些部件按照集成要求安装，仅仅是未做箱体。

## 4.2.2 上海地区生态农居能源一体化系统实验台介绍

上海地区生态农居能源一体化系统的实验台设置在同济大学嘉定校区生态园内，该系统主要有以下四个部分组成：

### 1) 能源一体化系统柜

能源一体化系统控制柜主要作用是吸收热源提供的热量，储存于热水水箱和采暖水箱中，以备用户侧需求。该系统柜中，主要包含热水水箱<sup>[53]</sup>、采暖水箱、两个定频水泵、四个电动三通阀、一个电动二通阀以及一些管路连接。

该能源一体化系统柜是整个生态农居能源一体化系统的主体，两个水箱尺寸规格按照本文 2.3 中所设定的尺寸进行配置。另外根据调研结果，上海地区农居布置形式主要为长条形，因此该能源一体化系统采用横向平铺布置更为合理，即尽可能减少该系统柜的宽度。该箱体整个放置布局见图 4.1 所示。

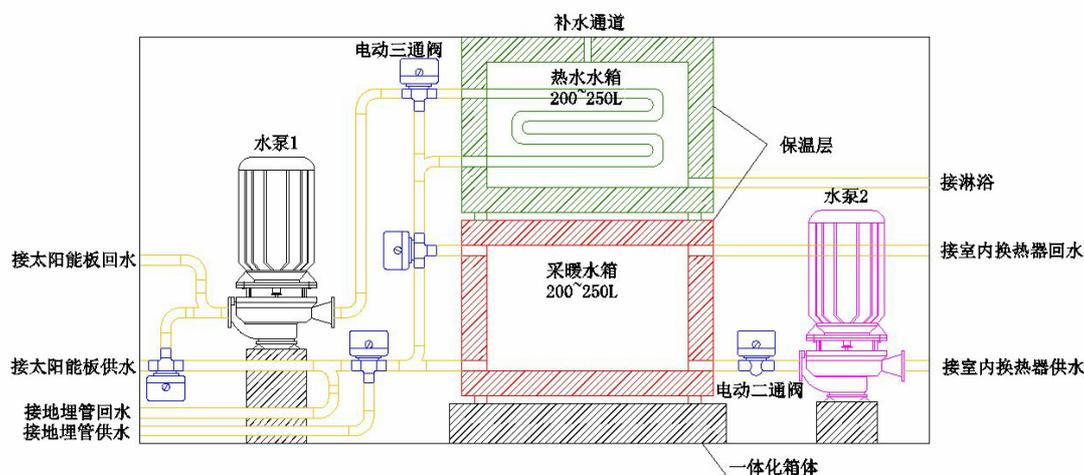


图 4.1 能源一体化系统柜布局示意图

### 2) 逻辑控制柜

逻辑控制柜主要作用是控制整个系统运行，对于不同条件下的系统运行工况进行切换，该逻辑控制柜还负责数据记录以及远程传输的功能。

该控制柜如图 4.2 所示，面板由 Simens 触摸屏、八个旋钮、无纸记录仪面板组成。Simens 触摸屏中可以更改逻辑控制条件，同时可以在系统图上观察实时数据。八个旋钮分别控制两个水泵的启停、四个电动三通阀的切换、一个电动二通阀的开闭、一个按钮 Button 的开关，这八个旋钮分别有“Hand”、“Stop”、“Auto”三档，当调节至“Hand”时，则该旋钮控制的部件收到开指令，为手动开启；当调节至“Stop”时，则该旋钮控制的部件收到关指令，为手动关闭；当调节至“Auto”时，则该旋钮控制的部件依照第 3 章的控制逻辑进行切换，为自动模式。无纸记录仪为数据存储

部件，主要记录历史数据，在无纸记录仪面板上可以读到实时和历史数据。

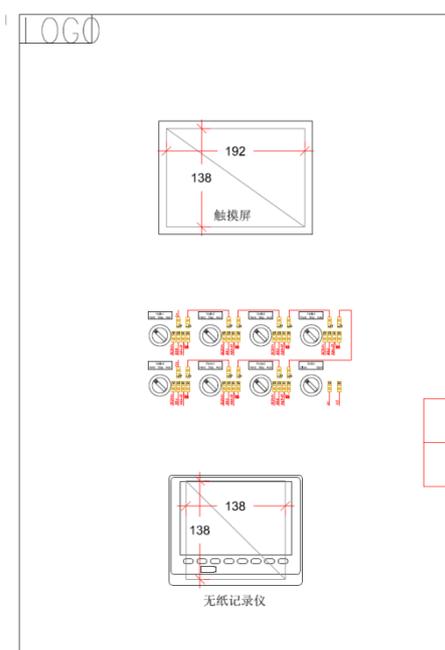


图 4.2 逻辑控制柜示意图

逻辑控制柜的功能实现主要依靠无纸记录仪、Simens PLC 控制模块和传输器来实验，具体功能实现方法如图 4.3 所示。

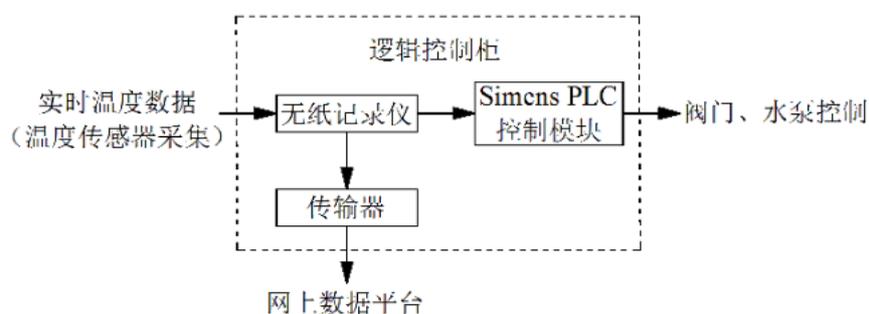


图 4.3 逻辑控制柜功能实现方法示意图

从图 4.3 可以看出，该控制柜需要接收系统中温度测点的各个实时温度值，然后将数据记录在无纸记录仪中，这些数据一路通过传输器进行远程传输，将数据发送至网上的数据平台，另一路发送至 Simens PLC 控制模块，该模块根据控制逻辑，判断该执行哪一个工况，然后将指令发回系统中各个阀门和水泵，阀门和水泵依照指令进行调整。

### 3) 太阳能集热板

太阳能集热板主要作用是提供上海地区生态农居能源一体化系统的热源，为提供热源的一种方式。

该集热板为真空水平太阳能集热管，由于考虑实验成本，该集热板采用实验台现有的集热板，当该系统运用于实际农居时，可以改为平板式太阳能集热板，降低初投资费用。

#### 4) 地埋管

地埋管主要作用是提供上海地区生态农居能源一体化系统的热源，为提供热源的一种方式，同时也作为储热的一种方式，可以把太阳能集热板多余热量暂时储存于土壤，待系统热需求大于热供给时，从土壤中取热。

该太阳能集热板为垂直管，由于考虑实验成本，该地埋管采用实验台现有的地埋管，当该系统运用于实际农居时，可以改为水平式地埋管，降低初投资费用，同时充分利用单户农居地形开阔的优势。

该系统以上四部分为上海地区生态农居能源一体化系统实验的主要部分，该实验用户为实验大棚，而非实际农居，实际农居将在后续工作中进行实验。该整个系统的示意图可见图 4.4 所示。



### 4.3 上海地区生态农居能源一体化系统实验结果及分析

上海地区生态农居能源一体化系统实验主要考虑冬季工况，这是因为冬季时室外温度较低，辐照度也较低，同时系统需要考虑采暖需求，因此系统运行模式较为复杂，达到要求也较为困难。为了测试各个工况能够达到实际要求，本实验分为两部分进行：1) 手动输入室外及系统中要求输入参数，检查系统中自动控制逻辑是否与预期工况一致；2) 通过手动调节，判断各个工况达到需求量所需要的时间，从而预期系统运行合理性。

#### 4.3.1 检验自动控制逻辑合理性

由于实际天气情况在一段时间内不一定能实现所有工况，因此无法判断整个PID控制逻辑是否能够在不同条件下得到相应工况，故在此通过电脑 Simens 的 PID 控制软件调节控制柜的输入值，从而判断在不同条件下系统是否能够做出应有的响应，获得相对应的工况。为了覆盖所有不同的工况，因此设计表 4.1，通过输入表 4.1 中各值，理论上能够获得系统所有工况。

表 4.1 系统输入值设置列表

温度值 (°C) 序号	T <sub>ab</sub>	T <sub>solar</sub>	T <sub>ground</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	Button
1	20	70	30	35	35	35	20	25	60	0
2	4	55	20	30	30	30	60	20	50	1
3	20	70	30	35	35	35	65	25	60	0
4	20	52	55	45	45	45	20	20	55	0
5	4	35	35	20	20	20	60	20	30	1
6	4	20	35	20	20	20	60	20	20	1

通过输入表 4.1 列表的输入值，在不同序号下获得系统中水泵和阀门切换结果于表 4.2 所示。

表 4-2 理论系统输出反馈

信号 序号	Pump1	Pump2	Valve1	Valve2	Valve3	Valve4	Valve6
1	启动	停止	②通道	①通道	①通道	①通道	关闭
2	启动	启动	①通道	②通道	①通道	①通道	开启
3	启动	停止	①通道	①通道	②通道	①通道	关闭
4	启动	停止	②通道	①通道	②通道	①通道	关闭
5	启动	启动	①通道	②通道	②通道	①通道	开启
6	启动	启动	①通道	②通道	②通道	②通道	开启

从表 4.2 中可以看出序号 1 为太阳能独立供热水；序号 2 为太阳能独立采暖；

序号 3 为太阳能加热土壤；序号 4 为太阳能与地埋管联合供热水，从该设置数据来看，需要  $T_{ground}$  较高时才可以实现该工况，而实际情况基本很难实现，因此该工况在实际中可不予考虑；序号 5 为太阳能与地埋管联合采暖；序号 6 为地埋管独立采暖。

通过实验测试，逻辑结果完全符合表 4.2 所示，因此该 PID 控制逻辑合理。

### 4.3.2 各工况下系统运行状况实验结果

由于各个工况能够进行切换，因此在接下来的实验部分主要考量在各个工况下，系统达到要求所需要的时间和效果。

#### 1) 太阳能独立供热水

将系统手动调至太阳能独立供热水模式，监测全天热水水箱随着时间变化情况，得到全天瞬时数据，其中环境温度、热水水箱水温、太阳能板温度如图 4-5 所示。

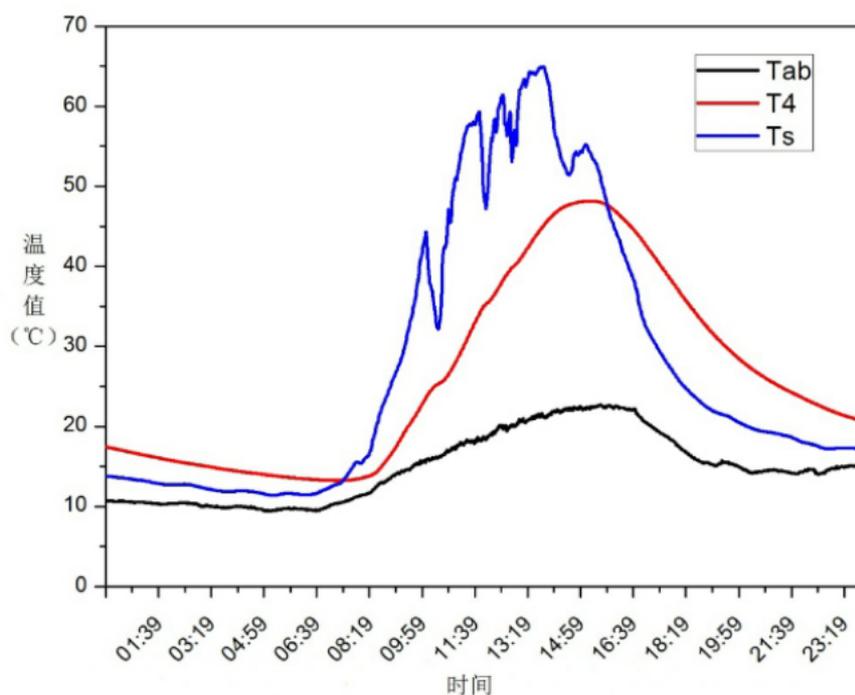


图 4.5 太阳能独立供热水模式数据结果

根据图 4.5 所示，可以看出在九点左右热水水箱中水温开始升高，至下午三点左右水箱温度已经达到  $50^{\circ}\text{C}$  左右，如果采用辅助加热，可以有效缩短加热时间，而且水温可以达到更高温度。在该图中， $T_4$  温度值在下午三点之后又逐步下降，这是因为模式为手动模式，若采用自动模式，则水温将保持在温度最高值。

通过该实验可以看出若调整为手动值，在运行时也需要设置自动切换控制，当下一时间步长热水水箱水温低于上一时刻热水水箱水温  $\Delta$ ，则切换成①通道，即旁

通走水，防止加热后的热水又被温度下降的管内水降温，或者在太阳下山前由人工进行切换，这样才能达到需求水温。

## 2) 太阳能独立采暖

将系统手动调至太阳能独立采暖模式，监测一天中 6:00~16:30 的数据，得到的环境温度、采暖水箱温度及太阳能板温度如图 4.6 所示。

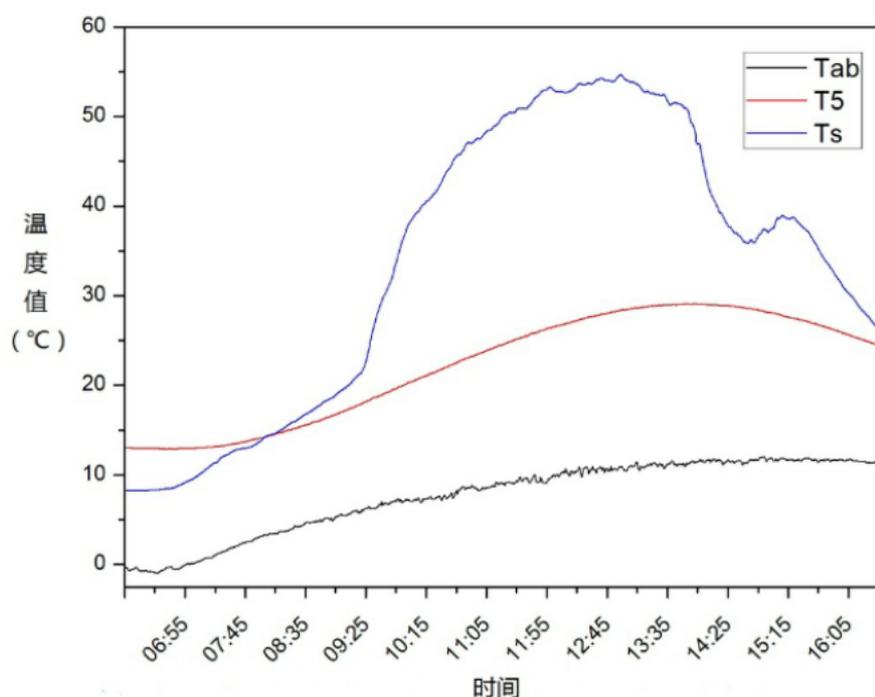


图 4.6 太阳能独立采暖模式数据结果

由图 4.6 所得，在冬季太阳辐照良好的情况下，通常水温可以高于环境温度约  $15^{\circ}\text{C}$ ，由于采暖水箱中有保温作用，若不使用，水温在夜间可以基本保持在当天最高温度，这有利夜间给室内供暖，因此太阳能独立采暖在夜间可行。

## 3) 太阳能加热土壤

将系统调至手动模式，让太阳能集热板中的水流经地埋管，用太阳能加热后的水与土壤换热，将热量储存至地下，一整个白天的各个温度测点的温度数据记录与图 4.7。

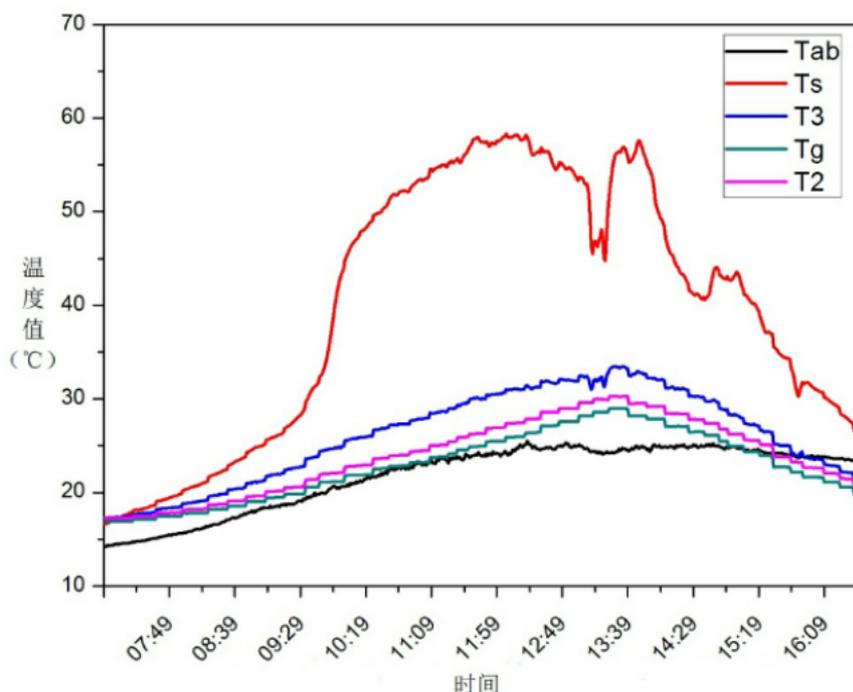


图 4.7 太阳能加热土壤模式数据结果

从图 4.7 中所示，在冬季白天中流入地下的水温能够达到  $30^{\circ}\text{C}$  以上，通常上海地区冬季在地下 3m 左右的土壤温度在  $15^{\circ}\text{C}$  左右，因此有  $15^{\circ}\text{C}$  的温差。从图 4.7 中可以看出进入地下前的水温与从地下出来的水温相差约为  $5^{\circ}\text{C}$ ，这些热量将会储存在地下土壤中。由于该实验所用的是垂直地埋管，因此和之前设计的水平地埋管的总换热面积和形式都有差异，该结果仅用于参考，从而判断该系统的可行性。

#### 4) 其他模式

除以上三种模式外还包括单独土壤取热和太阳能与土壤两种热源联合使用的模式，这些模式在实际运行时不常用，而且由于地埋管形式与设计形式有出入，因此取热的模式测出的结果实际意义不大，因此在此处不进行测试。其他模式会在模拟中涉及。

### 4.4 本章小结

通过针对上海地区生态农居能源一体化系统的实验，将该系统的样机搭建完成，并针对该样机进行控制逻辑和部分常见工况进行测试。通过测试得到以下结果：

1) 该控制逻辑基本合理，相互切换之间无冲突，由于使用区间上下限控制策略，不会产生频繁启停。

2) 该系统中基本能够满足用户需求，但是太阳能与土壤热量联合供生活热水较

难实现。

3) 该系统后期需要针对土壤蓄热方面再做深入研究。

## 第 5 章 上海地区生态农居能源一体化系统模拟验证

### 5.1 模拟软件介绍

#### 5.1.1 TRNSYS 软件开发背景

在计算机模拟中,通常将其分为瞬态模拟和稳态模拟两种,TRNSYS(Transient System Simulation)为一种针对系统的瞬态模拟软件。该瞬态模拟软件是由美国 Wisconsin-Madison 大学 Solar Energy 实验室(SEL)开发,并在欧洲研究所共同研究下逐步完善的一款主要针对太阳能、系统能耗等方面的模拟软件。目前参与的研究所主要有法国建筑技术与科学研究中心(CSTB)、德国太阳能技术研究中心(TRANSOLAR)、美国热能研究中心(TESS)。TRNSYS是由Fortran语言编译而成,其开源性较强,因此不断有新的模块产生,供有不断更新的需求的使用者使用。目前TRNSYS最新版本为TRNSYS17.0,本文中使用的TRNSYS版本为TRNSYS16.0。

TRNSYS由一系列软件所构成,其中主要有以下部分:TRNSYS、Simulation Studio、TRNEdit、TRNBuild、TRNSed。其中,TRNEdit和TRNSed是由美国SEL开发,TRNSYS Simulation Studio是由法国建筑技术与科学研究中心(CSTB)开发,TRNBuild是由德国太阳能技术研究中心(TRANSOLAR)开发<sup>[54]</sup>。

#### 5.1.2 TRNSYS 软件功能介绍

TRNSYS软件为系统动态仿真软件,其构造为模块化的,即每一个部件均由一个模块构成,整个系统的搭建就是将各个系统中的模块连接起来,每一个模块作为子系统是相互独立的,模块中包含输入条件、输出条件,以及内部参数所构成,当获得实时输入值,依照该模块内部的参数和算法,获得实时输出值,该值即带入下一模块,作为其实时输入值进行计算。由于在不同的系统模拟分析中会用到一些相同的模块,因此通常情况下,无需再单独编制程序来实现所需要的功能,而是调用这些模块,给其特定的输入条件,并调整一下内部参数,将各个所需模块组合起来,就可以进行模拟计算,这对于使用者而言,较为直观和便捷。

TRNSYS软件中模块主要分为:控制器模块、与电相关模块、热交换器模块、空调系统模块、水系统模块、循环模块、负载结构模块、输出模块、物理模块、太阳能集热模块、热存储模块、外接模块、气象参数模块。

值得注意的是TRNSYS中的模块不是完全能够一一对应实际系统的,例如太阳

能热水系统中，除了实际系统中的部件（太阳能集热器、水泵、水箱等）之外，还需要添加一些额外部件，比如能够读取瞬时气象数据的气象参数模块、随时间变化的负荷输入模块、能够获得输出计算结果的输出模块，这样在计算后才能够从输出模块中获得数据记录或者图表。这种利用广义部件的组合进行系统瞬态模拟体现了系统模拟的积木性与瞬时性。

TRNSYS 中的不同部件通过程序赋予的类型数（TYPE 数）进行区分，为了在系统中每一个部件都能够区分所处的不同位置，在系统内又赋予了不同的单元数（UNIT 数）。这样通过查看某一个部件的 TYPE 数，就可以知道该模块的类型；通过查看 UNIT 数，就可以知道在系统中该模块所在的位置。

在系统模型中，是由一套以时间为自变量的相互关联的微分方程所组成，通过随时间变化的气象参数作为约束条件，联机方程组求解，从而得到一段时间内的性能实时数据，TRNSYS 瞬态模拟是对系统的数学模型求解，由于以时间为变量，结果具有瞬时性，对该结果进行时间积分，可以获得该段时间的累计值。

TRNSYS 软件运用范围广，功能强大，可以模拟建筑全年逐时能耗、空调系统优化、太阳能光伏系统、太阳能集热系统、地源热泵水系统、辐射地板系统、蓄冷蓄热系统、冷热电三联供系统、燃料电池系统等。而且不断开发新的模块，使得运用范围不断扩大，另外该软件可以导入 EnergyPlus 等软件数据、执行 Matlab 等 C 语言语句、并且用户可以自行用 Fortran 语言开发新模块。

## 5.2 模型搭建<sup>[54-57]</sup>

### 5.2.1 TRNSYS 模型气象参数的选择

本课题主要针对上海地区农户进行系统改造，选取 Type109 模块，外部文件设置为上海地区，其中得到的全年室外温度和斜面辐射量如图 5.1 和 5.2 所示。

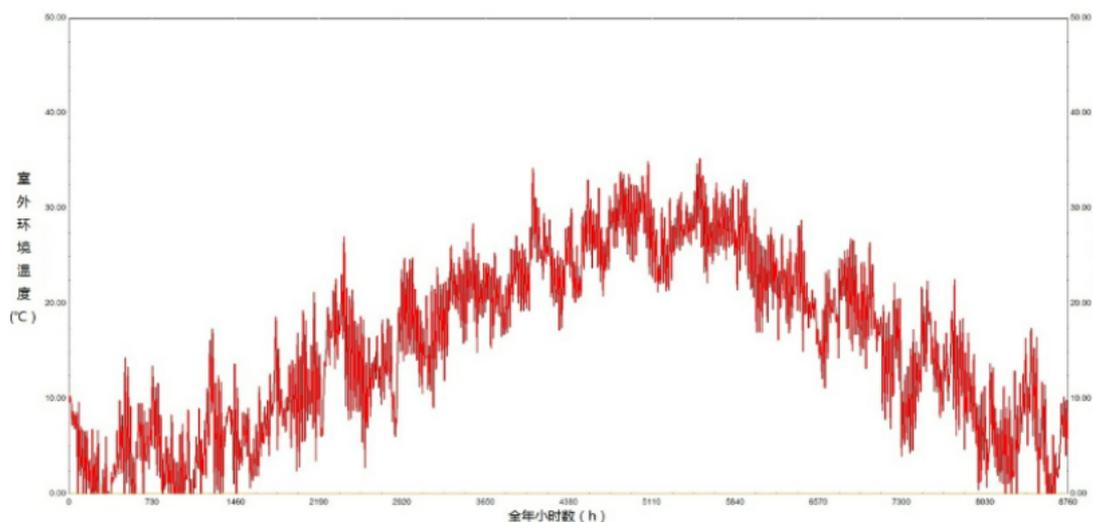


图 5.1 室外逐时环境温度

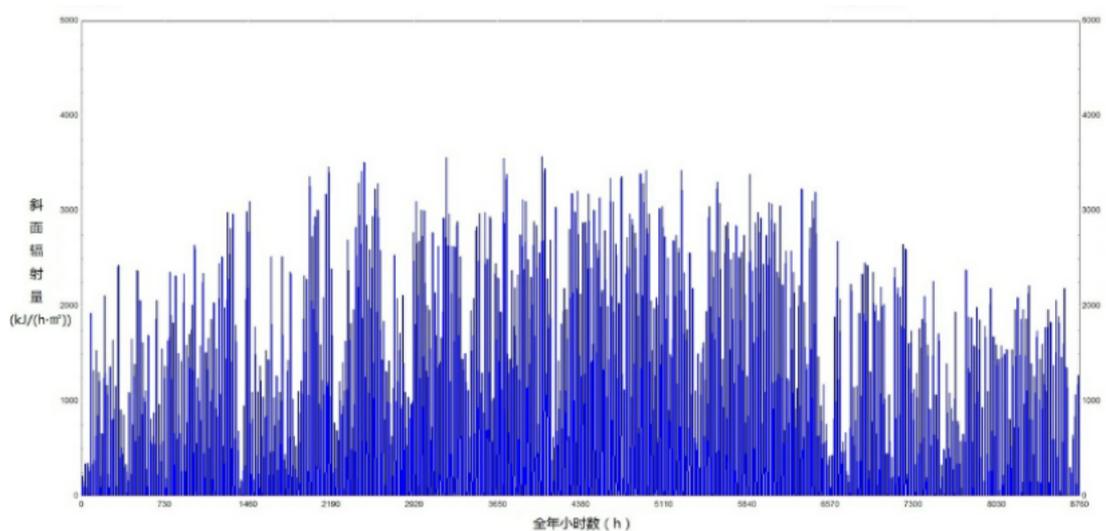


图 5.2 斜面逐时辐射量

通过图 5.1 和 5.2 中我们可以看出，全年中环境温度和辐射量基本在七月、八月最高，而在一月、十二月最低，由于控制逻辑通常需要在一分钟至五分钟之内判断一次，因此若进行全年模拟不仅工作量大，而且在模拟计算过程中容易产生叠加误差，造成最终模拟结果与实际结果差异巨大，因此在实际模拟中，选取典型天气模拟一天的系统运行，通过一天的系统中各处数值变化来判断系统及控制逻辑的合理性。

### 5.2.2 TRNSYS 模型标准部件的选择<sup>[58]</sup>

TRNSYS 针对上海地区生态农居能源一体化系统模型的搭建，需要选用以下模块：

## 1) 太阳能集热板 (Type73)

Type73 的太阳能集热板是平板式的, 该模块内部数学算法如下所示:

可用得热量用 Hottel-Whillier 方程计算:

$$\dot{Q}_u = \frac{A}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} F_{R,j} (I_T (\tau\alpha) - U_{L,j} (T_{i,j} - T_a)) \quad (5.1)$$

其中,  $\dot{Q}_u$  为平板式太阳能集热板可用的热量 (KJ/h);  $A$  为集热板板面面积 ( $m^2$ );  $N_s$  为集热板阵列中集热板数量;  $F_{R,j}$  为第  $j$  个模块总集热板热去除效率因数;  $I_T$  为太阳能集热板倾斜表面全辐射量 ( $KJ/h \cdot m^2$ );  $\tau$  为集热板表面的短波透射比;  $\alpha$  为吸收平面短波吸收率;  $(\tau\alpha)$  为表面的短波透射比与吸收平面短波吸收率的乘积;  $U_{L,j}$  为第  $j$  个模块单位面积的集热板总热损失系数 ( $KJ/h \cdot m^2 \cdot K$ );  $T_{i,j}$  为第  $j$  模块集热板流体进口温度 ( $^{\circ}C$ );  $T_a$  为环境温度。

在式 5.1 中,  $F_{R,j}$  用下式计算获得:

$$F_{R,j} = \frac{N_s \dot{m}_c C_{pc}}{A U_{L,j}} \left( 1 - \exp\left(-\frac{F' U_{L,j} A}{N_s \dot{m}_c C_{pc}}\right) \right) \quad (5.2)$$

其中,  $\dot{m}_c$  为运行工况下流量 ( $kg/h$ );  $C_{pc}$  为集热板内流体比热容 ( $KJ/kg \cdot K$ );  $F'$  为集热板翅片效率因子。

对于总的损失系数的确定是集热板结构和运行工况下复杂的过程, 在本文中运用下式获得估计值<sup>[59]</sup>:

$$U_{L,j} = \frac{3.6}{N_G} + \frac{3.6\sigma(T_{av,j}^2 + T_a^2)(T_{av,j} - T_a)}{\frac{1}{\epsilon_p + 0.05N_G(1 - \epsilon_p)} + \frac{2N_G + f - 1}{\epsilon_g} - N_G} + U_{be} \quad (5.3)$$

$$\frac{C}{T_{p,j}} \left[ \frac{(T_{av,j} - T_a)}{N_G + f} \right]^{0.33} + \frac{1}{h_w}$$

其中,  $T_{av,j}$  为第  $j$  个模块集热板流体平均温度 ( $^{\circ}C$ )。

上式中,  $h_w$  用下式计算:

$$h_w = 5.7 + 3.8W (W/M^2 \cdot K) \quad (5.4)$$

$f$  用下式计算:

$$f = (I - 0.04h_w + 0.0005h_w^2)(I + 0.091N_G) \quad (5.5)$$

C用下式计算：

$$C=365.9(I-0.00883\beta+0.0001298\beta^2) \quad (5.6)$$

总的表面短波透射比与吸收平面短波吸收率的乘积可用下式计算：

$$(\tau\alpha) = \frac{I_{bT}(\tau\alpha)_b + I_d \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) (\tau\alpha)_s + \rho I \left( \frac{1-\cos\beta}{2} \right) (\tau\alpha)_g}{I_T} \quad (5.7)$$

其中， $I_{bT}$ 为太阳能集热板入射直射辐射量 ( $\text{KJ}/\text{h}\cdot\text{m}^2$ )； $(\tau\alpha)_b$ 为直射辐射的表面短波透射比与吸收平面短波吸收率的乘积； $I_d$ 为散射水平辐射量 ( $\text{KJ}/\text{h}\cdot\text{m}^2$ )； $(\tau\alpha)_s$ 为天空散射辐射的表面短波透射比与吸收平面短波吸收率的乘积； $\rho$ 为反射率； $I$ 为全水平辐射量 ( $\text{KJ}/\text{h}\cdot\text{m}^2$ )； $(\tau\alpha)_g$ 为地面反射辐射的表面短波透射比与吸收平面短波吸收率的乘积。

第  $j$  个模块的出口温度按照下式计算：

$$T_{o,j} = \frac{AF_{R,j}(I_T(\tau\alpha) - U_{L,j}(T_{i,j} - T_a))}{N_s \dot{m}_c C_{pc}} + T_i \quad (5.8)$$

其中， $T_i$ 为集热器进水温度。

当集热板内流量为 0 时，集热板滞流温度按照下式计算：

$$T_p = \frac{I_T(\tau\alpha)}{U_L} + T_a \quad (5.9)$$

## 2) 有换热盘管的热水水箱及无换热盘管的热水水箱 (Type60)

该水箱的热物性取决于热力分层, Type60 水箱可以将水箱中水体分成等体积的  $N$  层 ( $N \leq 100$ ), 其中每一层内的水体充分混合, 即温度等参数一致, 分层程度根据  $N$  的值所决定。当  $N=1$  时, 该水箱则是模拟一个完全混合、无分层的水箱; 当  $N > 1$  时, 该水箱则是模拟分为  $N$  层的分层水箱。该水箱分层示意图见图 5.3 所示<sup>[60,61]</sup>。

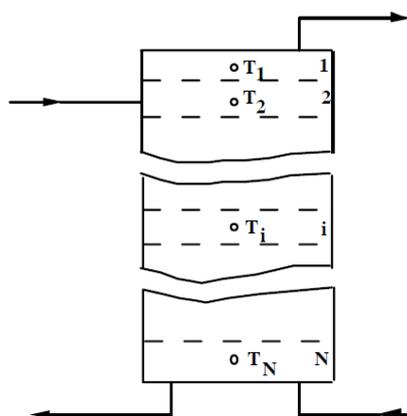


图 5.3 Type60 水箱分层示意图

在 Type60 中，可以选择固定进水口或变进水口，不等值节点、辅助热源等也可以选择。

在某些情况下，水箱需要设置为不完全绝热，因此可以定义额外参数来渐进累加隔离某些节点并定义递增损失系数。第  $i$  节点的损失系数可用下式计算：

$$U_i = U_{\text{tank}} + \Delta U_i \quad (5.10)$$

其中， $U_{\text{tank}}$  为水箱原始损失系数； $\Delta U_i$  为水箱递增损失系数，该系数可正可负，但是要保证  $U_i$  为正。

此外，考虑到水箱中水因温度过高沸腾，因此设置压力释放阀，计算时考虑该能量损失。

在混合界面的节点和水箱壁面的导热，在模拟分层过程中，需要输入附加导热参数  $\Delta k$ ，该参数附加在水箱流体的导热性上并应用于所有节点， $\Delta k$  估算公式为：

$$\Delta k = k_{\text{tank wall}} \frac{A_{\text{c,tank wall}}}{A_{\text{c,water}}} \quad (5.11)$$

其中， $k_{\text{tank wall}}$  为水箱壁导热系数； $A_{\text{c}}$  为截面面积。

另外为了减少误差，Type60 内部有自己的时间步长，因此可以不受 TRNSYS 设定的时间步长的影响。

在某一节点中，能量平衡示意图由图 5.4 所示。

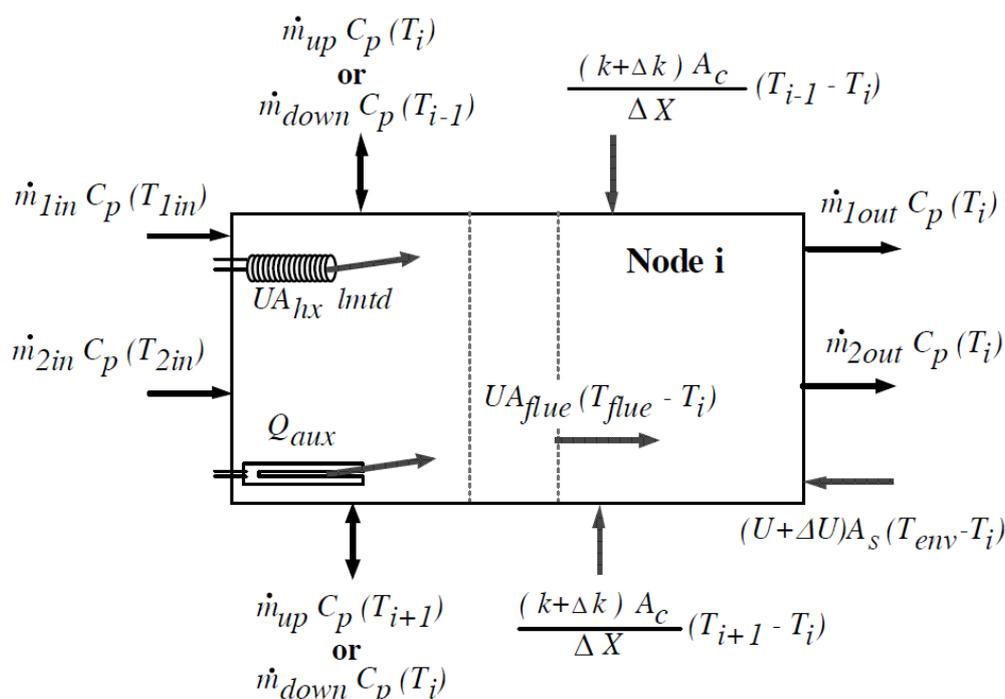


图 5.4 i 节点中能量流的图示

将所有的能量流用一个式子表达，即能量平衡方程，这是一个对 i 节点温度进行微分的微分方程，表示如下：

$$\begin{aligned}
 (M_i C_p) \frac{dT_i}{dt} = & \frac{(k+\Delta k)A_{c,i}}{\Delta x_{i+1-i}} (T_{i+1} - T_i) + \frac{(k+\Delta k)A_{c,i}}{\Delta x_{i+1-i}} (T_{i-1} - T_i) + (U_{\text{tank}} + \Delta U_i)A_{s,i}(T_{\text{env}} - T_i) + \\
 & UA_{\text{flue},i}(T_{\text{flue}} - T_i) + \dot{m}_{\text{down}} C_p (T_{i-1}) - \dot{m}_{\text{up}} C_p (T_i) - \dot{m}_{\text{down}} C_p (T_i) + \dot{m}_{\text{up}} C_p (T_{i-1}) + \\
 & Y_{\text{htr1}} \dot{Q}_{\text{aux1}} + Y_{\text{htr2}} \dot{Q}_{\text{aux2}} + UA_{\text{hx1}} (\text{lmtd}_1) + UA_{\text{hx2}} (\text{lmtd}_2) + UA_{\text{hx3}} (\text{lmtd}_2) + \dot{m}_{1\text{in}} C_p T_{1\text{in}} - \\
 & \dot{m}_{1\text{out}} C_p T_i + \dot{m}_{2\text{in}} C_p T_{2\text{in}} - \dot{m}_{2\text{out}} C_p T_i
 \end{aligned} \quad (5.12)$$

其中，当水温高于设定值时辅助热源关闭，在一个主从关系的两个辅助热源情况下，次要辅助热源在受邀辅助热源开启时关闭。每个节点的温度值通过附近节点温度按照式 5.12 计算获得。每一个时间步长计算一次结果，每个热交换器的  $UA_{\text{hx}}$  和对数平均温差 (LMTD) 由迭代获得。外部自然对流系数  $h_o$  由下式计算：

$$h_o = \frac{Nu_D(k)}{d_o} \quad (5.13)$$

其中， $Nu_D = CRa^n$ 。通常 C 约为 0.5，n 为 0.25。

当水箱中含有换热盘管，则从包含主盘管入口的节点至主盘管出口的节点进行迭代计算。图 5.5 为含有换热盘管的水箱在 TRNSYS 中的例子。

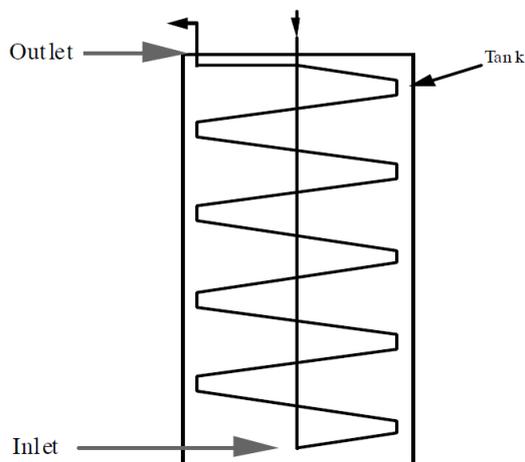


图 5.5 含有换热盘管的水箱示意图

虽然在图 5.5 的例子中，实际情况是输入口在水箱顶部（黑色小箭头表示），但是需要在模型定义时定义输入口在水箱底部（灰色大箭头表示），若进出口均设置为顶部，则表示换热盘管都处于水箱顶部。

### 3) 水平埋管 (Type31)

水平埋管的计算方法与水管的计算方法一致，通过入口单位时间的能量减去单位时间沿程损失能量即获得出口单位时间的能量，通过这一公式可以获得出口温度。

在计算水平埋管沿程能量损失时需要获得环境温度信息，但是该信息并非是室外环境温度，而应该是土壤温度。本模拟中，用 Type501 模块提供土壤环境温度值。该模块中，采用 Kasuda 发现的未扰动土壤温度全年温度曲线函数进行计算：

$$T = T_{\text{mean}} - T_{\text{amp}} \times \exp \left[ -\text{depth} \times \left( \frac{\pi \alpha}{365} \right)^{0.5} \right] \times \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \times [t_{\text{now}} - t_{\text{shift}} - \frac{\text{depth}}{2} \times \left( \frac{365 \alpha}{\pi} \right)^{0.5}] \right\} \quad (5.14)$$

其中， $T$ 为所需某一深度土壤温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）； $T_{\text{mean}}$ 为平均地表温度（可用平均空气温度）（ $^{\circ}\text{C}$ ）； $T_{\text{amp}}$ 为地表温度振幅（最高空气温度减去最低空气温度）（ $^{\circ}\text{C}$ ）； $\text{depth}$ 为土壤深度（ $\text{m}$ ）； $\alpha$ 为土壤热扩散率； $t_{\text{now}}$ 为当前的日期（ $1 \sim 365$ ）； $t_{\text{shift}}$ 为最小表面温度对应日期（ $1 \sim 365$ ）。

根据式 5.14，可以获得如图 5.6 所示的不同深度全年温度曲线。

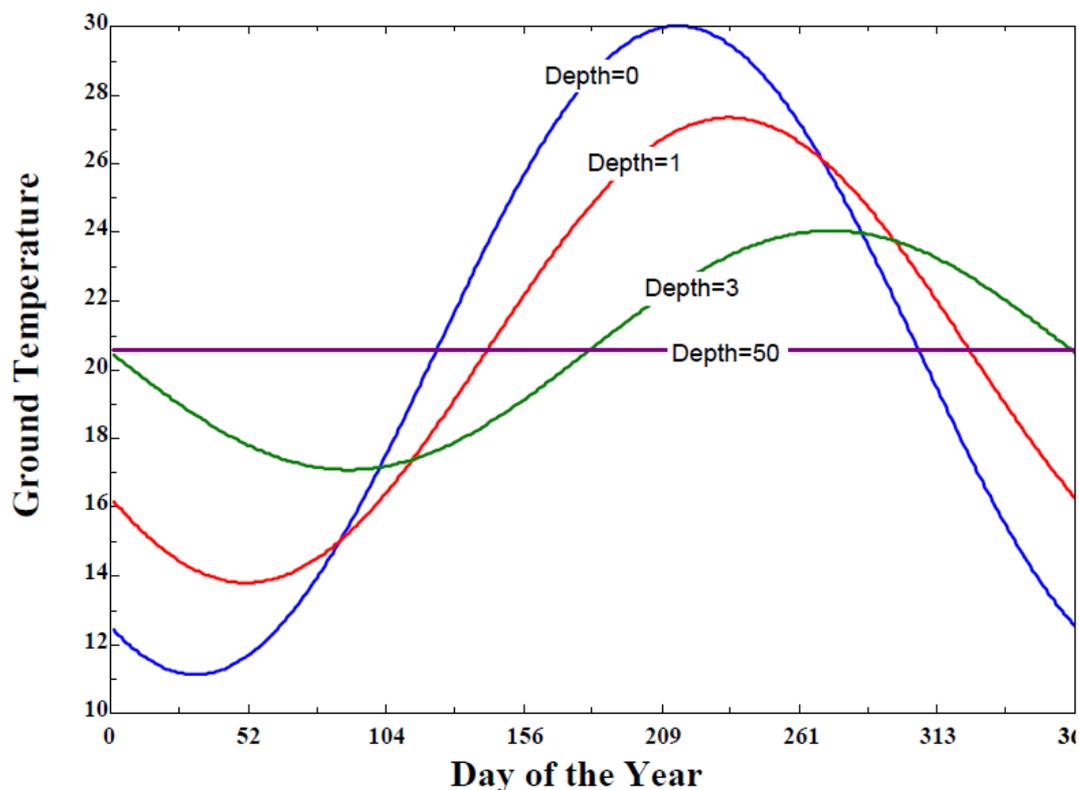


图 5.6 不同深度全年温度曲线图

#### 4) 合流三通及分流三通 (Type11)

在本文模拟中，合流三通和分流三通选用 Type11 中的其中两种模式。其中合流三通如图 5.7 所示，分流三通如图 5.8 所示。

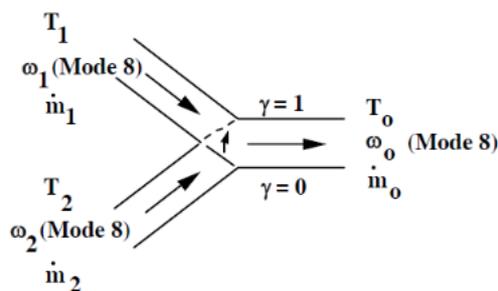


图 5.7 合流三通示意图

在该模式下，其对应的公式列举如下：

$$T_o = \frac{\dot{m}_1 T_1 (1 - \gamma) + \dot{m}_2 T_2 \gamma}{\dot{m}_1 (1 - \gamma) + \dot{m}_2 \gamma}$$

$$\omega_o = \frac{\dot{m}_1 \omega_1 (1 - \gamma) + \dot{m}_2 \omega_2 \gamma}{\dot{m}_1 (1 - \gamma) + \dot{m}_2 \gamma}$$

$$\dot{m}_o = \dot{m}_1(1 - \gamma) + \dot{m}_2\gamma \quad (5.15)$$

其中， $T_o$ 为流体出口温度； $T_1$ 为 1 支流流体温度； $T_2$ 为 2 支流流体温度； $\omega_o$ 为出口流体含湿量； $\omega_1$ 为 1 支流流体含湿量； $\omega_2$ 为 2 支流流体含湿量； $\dot{m}_o$ 为出口流体质量流量； $\dot{m}_1$ 为 1 支流流体质量流量； $\dot{m}_2$ 为 2 支流流体质量流量； $\gamma$ 为控制信号，值为 0~1。

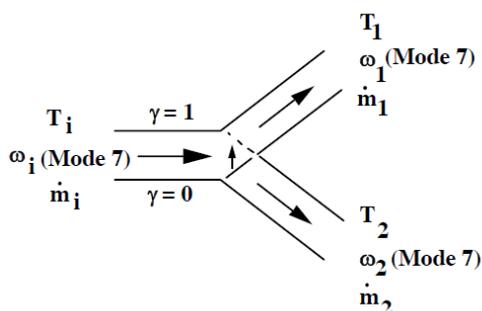


图 5.8 分流三通示意图

在该模式下，其对应的公式例举如下：

$$T_1 = T_i$$

$$\omega_1 = \omega_i$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_i(1 - \gamma)$$

$$T_2 = T_i$$

$$\omega_2 = \omega_i$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_i\gamma \quad (5.16)$$

其中， $T_i$ 为流体入口温度； $\omega_i$ 为入口流体含湿量； $\dot{m}_i$ 为入口流体质量流量。

### 5) 定频水泵 (Type114)

当定频水泵信号小于 0.5 时，水泵保持停运状态；当定频水泵信号大于等于 0.5 时，水泵保持运行状态。在停运状态下，水流质量流量、能量传递等均为 0，水泵出口水温等于水泵入口水温。当水泵运行时，各个参数的计算公式如下：

$$\eta_{\text{pumping}} = \frac{\eta_{\text{overall}}}{\eta_{\text{motor}}}$$

$$\dot{P}_{\text{shaft}} = \dot{P}_{\text{rated}} \eta_{\text{motor}}$$

$$\dot{Q}_{\text{fluid}} = \dot{P}_{\text{shaft}}(1 - \eta_{\text{pumping}}) + (\dot{P} - \dot{P}_{\text{shaft}})f_{\text{motorloss}}$$

$$\dot{Q}_{\text{ambient}} = (\dot{P} - \dot{P}_{\text{shaft}})(1 - f_{\text{motorloss}})$$

$$T_{\text{fluid.out}} = T_{\text{fluid.in}} + \frac{\dot{Q}_{\text{fluid}}}{\dot{m}_{\text{fluid}}} \quad (5.17)$$

其中,  $\eta_{\text{pumping}}$  为水泵抽吸效率;  $\eta_{\text{overall}}$  为水泵总效率 (电机效率×抽吸效率);  $\eta_{\text{motor}}$  为水泵电机效率;  $\dot{P}_{\text{shaft}}$  为抽吸过程需要的轴功率 (kJ/hr);  $\dot{P}_{\text{rated}}$  为水泵额定功率 (kJ/hr);  $\dot{Q}_{\text{fluid}}$  为水泵电机对通过液流的能量传递 (kJ/hr);  $f_{\text{motorloss}}$  为无效功率系数 (该部分功率转化为热能);  $T_{\text{fluid.out}}$  为水泵出口流体温度 (kJ/kg);  $T_{\text{fluid.in}}$  为水泵入口流体温度 (kJ/kg);  $\dot{m}_{\text{fluid}}$  为流体通过水泵的质量流量 (kg/hr)。

此外, 对于该系统的控制主要由计算器进行执行。对于输出则选择可以图像输出的输出器 (Type65c)。

### 5.2.3 TRNSYS 模型参数设置

能源一体化系统的 TRNSYS 模型参数设置基本保证与上文理论计算和实验中选用的参数保持一致, 以确保结果一致性。其中主要参数设置如下:

太阳能板选取平板式太阳能板, 其主要参数列于表 5.1。

表 5.1 TRNSYS 太阳能集热板主要参数选择

参数名称	数值
平板面积	12m <sup>2</sup>
平板板面吸收率	0.8
平板板面发射率	0.1

热水水箱与采暖水箱选取外形较为一致, 以便叠加放置, 其中参数设置列于表 5.2。

表 5.2 TRNSYS 水箱主要参数选择

参数名称	数值
水箱体积	0.3m <sup>3</sup>
辅助加热	设置为无

地埋管选用水平地埋管，其中参数设置列于表 5.3。

表 5.3 TRNSYS 地埋管主要参数选择

参数名称	数值
地埋管直径	0.1m
地埋管埋管深度	-3m
地埋管长度	50m

### 5.2.4 上海地区生态农居能源一体化系统仿真模型

上海地区生态农居能源一体化系统需要在不同的模式下切换，因此仿真模型中需要有较为复杂的控制逻辑。在模拟过程中，需要对阀门和水泵进行启停和切换，因此需要设定一系列控制模块，本模拟使用延时控制和计算器实现所有控制。由于用户端热需求很难进行估计，因此本模拟仅针对供能侧至热水水箱和采暖水箱这一部分进行模拟。

该模拟如图 5.9 所示，其中粗实线连接部分为整个系统模型，虚线连接部分为控制部分及输入参数部分，细实线为输出模块。

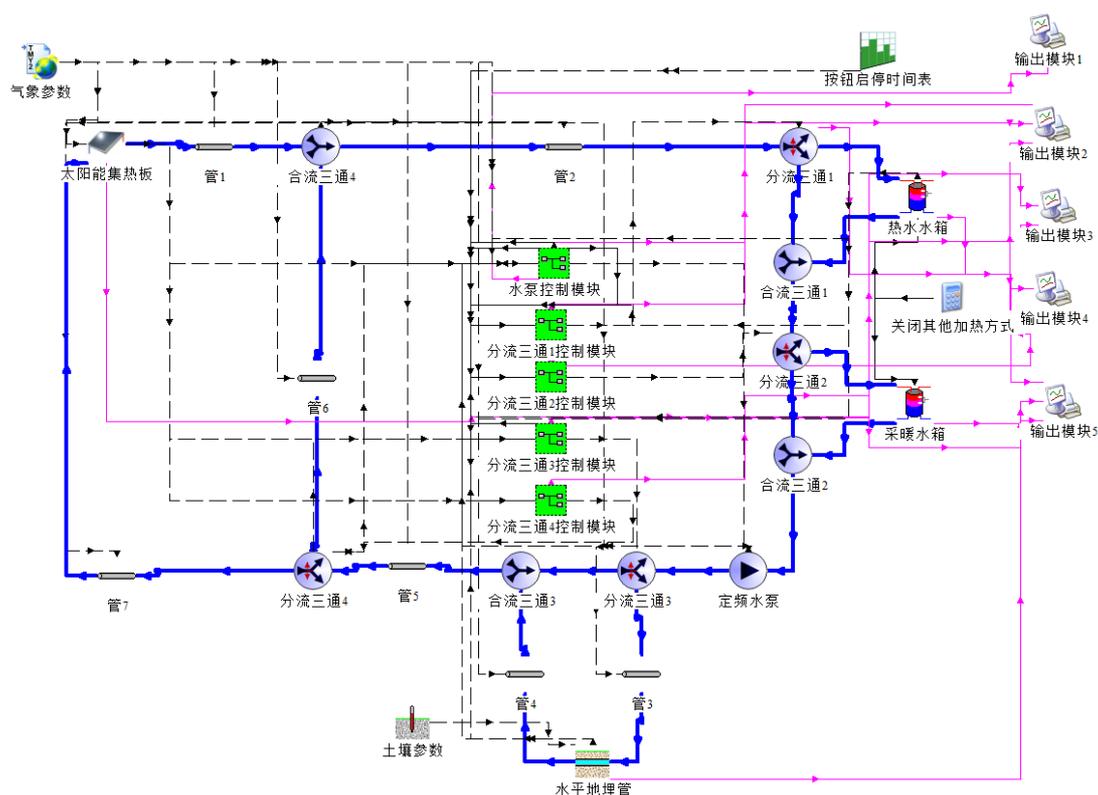


图 5.9 上海地区生态农居能源一体化 TRNSYS 模拟系统图

其中，控制模块中均使用计算器及延时控制模块，控制策略按照第 3 章中所述，因此每一个控制模块中的策略基本相同，具体说明见图 5.10 中所示。

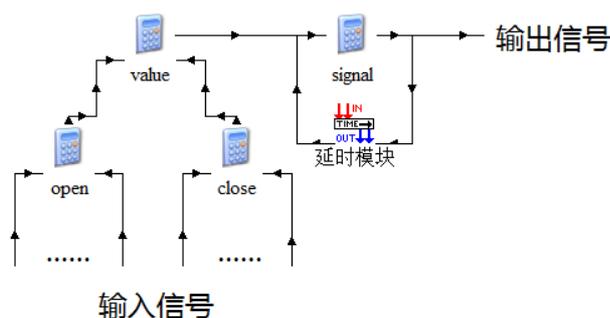


图 5.10 控制模块说明示意图

如图 5.10 所示，依照第 3 章控制逻辑，如果满足开启条件，则 open 模块输出值为 1；如果满足关闭条件，则 close 模块输出值为 1。因此从 open 与 close 两个模块输出信号到最终需要得到的输出信号可以用表 5.4 表示。

表 5.4 控制模块信号输入输出要求

模块	信号值			
	Open	1	1	0
Close	1	0	1	0
输出信号值	不存在该情况	1 (开启)	0 (关闭)	保持上一时间步长状态

依照表 5.4 所示，从 open、close 至最终输出值需要经过两次计算获得，因此添加一个 value 部件，其中 value 中的计算公式为：

$$\text{value} = 2 \times \text{open} + \text{close} - 1 \quad (5.18)$$

其中，value 为 value 部件输出值；open 为 open 部件输出值；close 为 close 部件输出值。

当获得 value 值后，经过 signal 计算公式为：

$$\text{signal} = \text{eq1}(\text{value}, -1) \times \text{delay} + \text{eq1}(\text{value}, 1) \quad (5.19)$$

其中 signal 为 signal 部件输出值；delay 为延迟信号输出值，即上一时间步长的 signal 部件输出值。其中式中 eq1(a,b) 为当 a 的值为 b 时，输出 1；当 a 的值不为 b 时，输出 0。

按照上述计算后，可知道每一个部件的输入值和输出值，最终得到不同输入信号下需求的输出信号值，其结果可用表 5.5 表示。

表 5.5 控制模块运算过程

模块	该模块输出信号值			
Open	1	1	0	0
Close	1	0	1	0
Value		1	0	-1
Signal		1 (开启)	0 (关闭)	delay (保持上一时间步长值)

从图 5.9 中可以看出，该系统比较复杂，运算工作量大，而且由于管路相互切换，造成某段管路在某一时间段内不参与计算，当下次重新参与计算时，初始值可能会与实际值有较大偏差，造成模拟结果不准确。因此除了图 5.9 所示整个系统，还构件了不同运行工况下的分系统，在分系统中可以计算达到要求温度所需时间，从而判断该系统是否可以应用于实际工况。

### 1) 太阳能独立供热水

太阳能独立供热水是该系统第一优先级的选择，因为热水需求是该系统的首要需求，而太阳能集热板能够提供足够热量供给热水水箱，该工况下的系统图如图 5.11 所示。

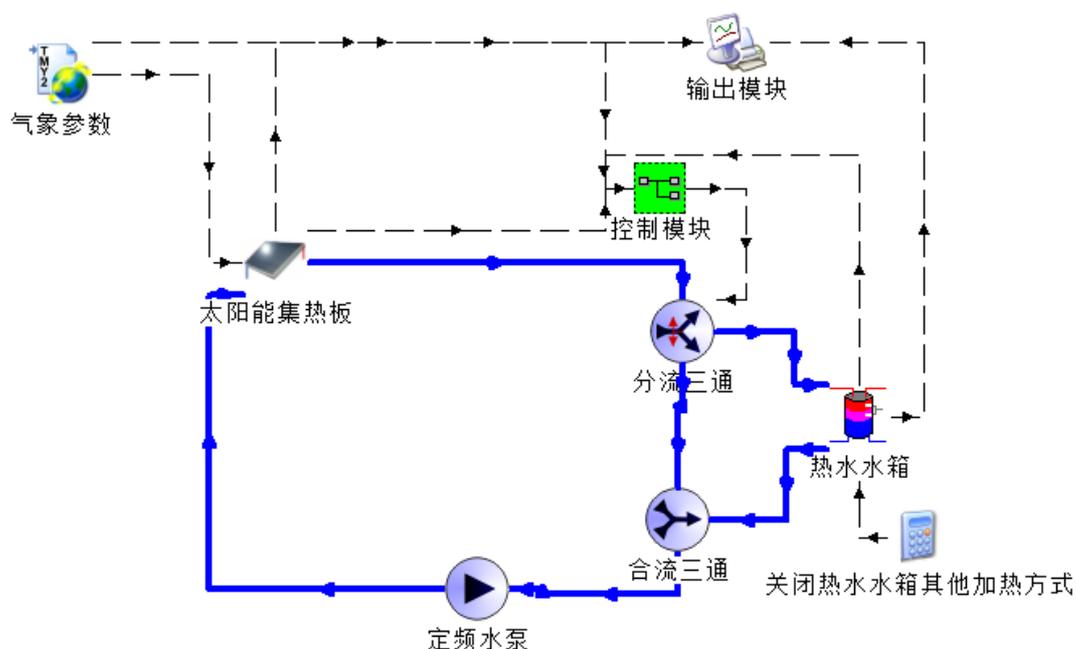


图 5.11 太阳能独立供热水 TRNSYS 模拟系统图

### 2) 太阳能独立供暖

太阳能独立供暖通常在冬季使用，其优先级低于供生活热水，当生活热水满足

时, 判断 Button 是否开启, 若开启, 则进入供暖模式。因此构建较为简单的系统图, 如图 5.12 所示。

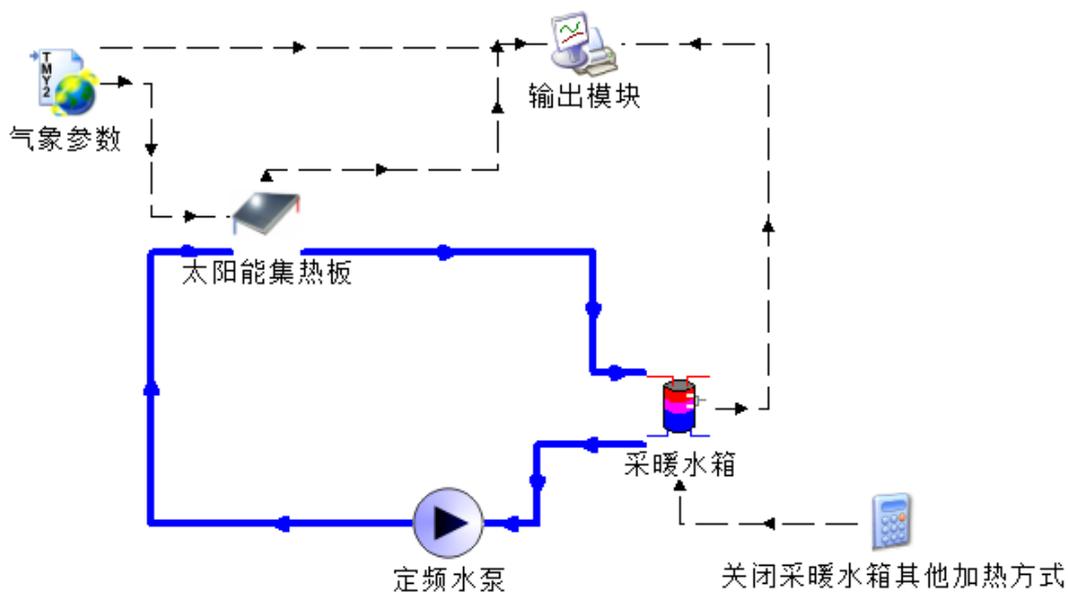


图 5.12 太阳能独立供暖 TRNSYS 模拟系统图

### 3) 太阳能土壤蓄热

在实现热水需求和无采暖需求的情况下, 若太阳照射充足, 则进入太阳能土壤蓄热, 将热量储存在土壤中, 在夜间或阴雨天气可以将土壤中的热量取出, 以便夜间或阴雨天气采暖使用, 图 5.13 所示为该工况下的系统图。

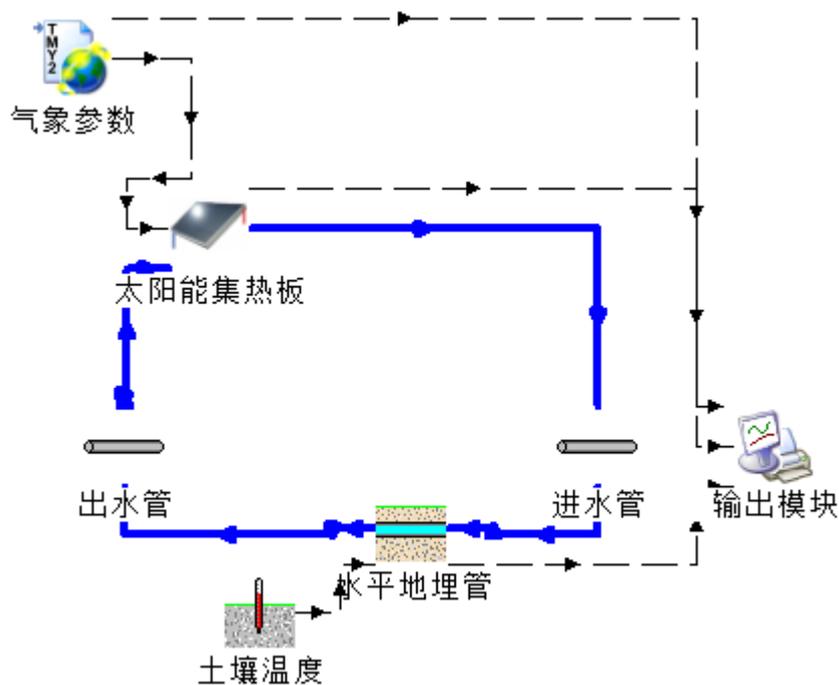


图 5.13 太阳能土壤蓄热 TRNSYS 模拟系统图

#### 4) 土壤取热独立采暖

本工况下，主要通过模拟判断如果完全从土壤中取热，能够保证采暖水箱有多少热量进行采暖，该工况下系统图如图 5.14 所示。

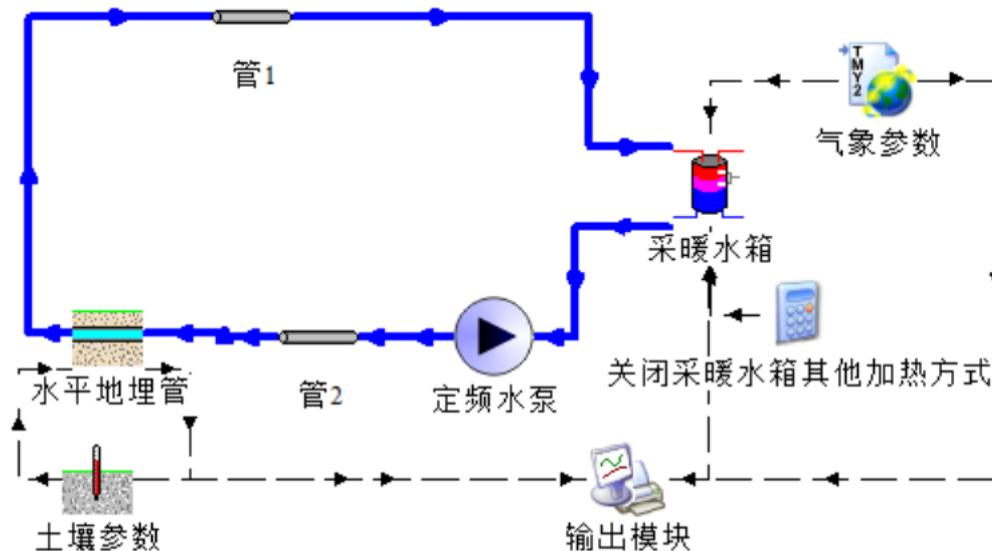


图 5.14 土壤取热独立采暖 TRNSYS 模拟系统图

#### 5) 其他工况

除以上四种工况之外，还有太阳能与地埋管串联供热水和太阳能与地埋管串联采暖两种工况。

其中太阳能与地埋管串联供热水情况出现频率低，因为据理论推算，地埋管中水温能够达到满足热水需求的温度，但是该情况下阳光通常充足，当阳光不充足时，地埋管中水温较低，不能满足热水需求，而且太阳能板温在阳光不充足的情况下，温度也较低，因此二次加热后的水温依然很难满足热水需求，故该工况不予考虑。

太阳能与地埋管串联采暖这一工况通过二次加热，使水温提升，该工况为土壤取热独立采暖的优化工况，能够得到更好的效果，因此若土壤取热独立采暖工况能够满足要求，则太阳能与地埋管串联采暖工况也能够满足要求。

### 5.3 上海地区生态农居能源一体化系统模拟结果及分析

上海地区生态农居能源一体化系统模拟将不同工况中典型状况分别进行模拟，获得不同工况下能够达到需求所需要的时间，判断该系统是否可行。

#### 5.3.1 太阳能独立供热水

通过模拟太阳能独立供热水环路一整天的模拟值可以得到图 5.15 和图 5.16 所示结果，该结果不考虑辅助加热。

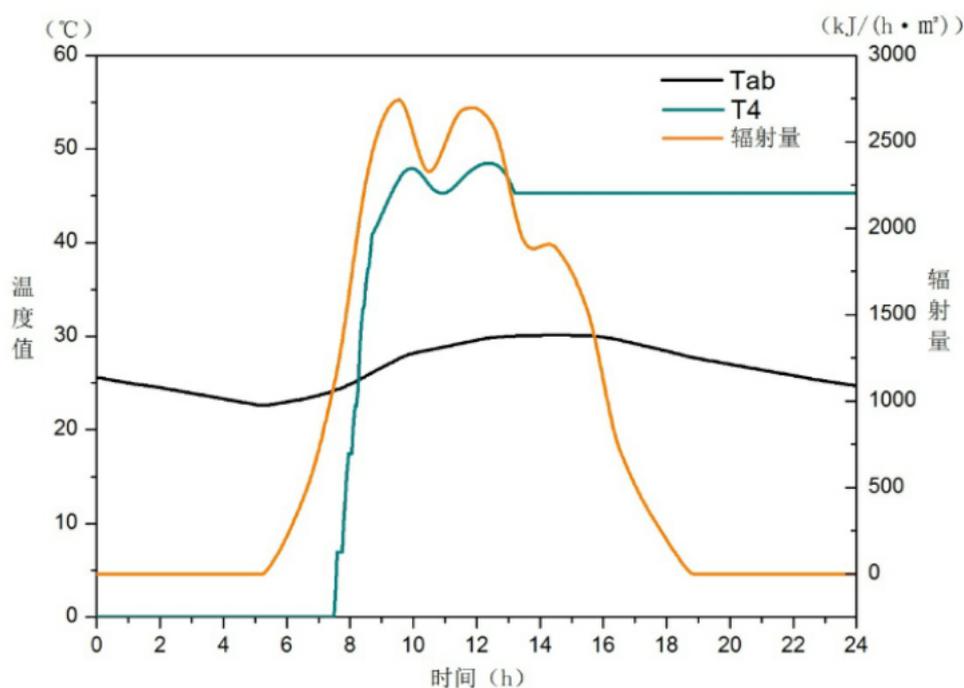


图 5.15 太阳能独立供热水夏季工况模拟

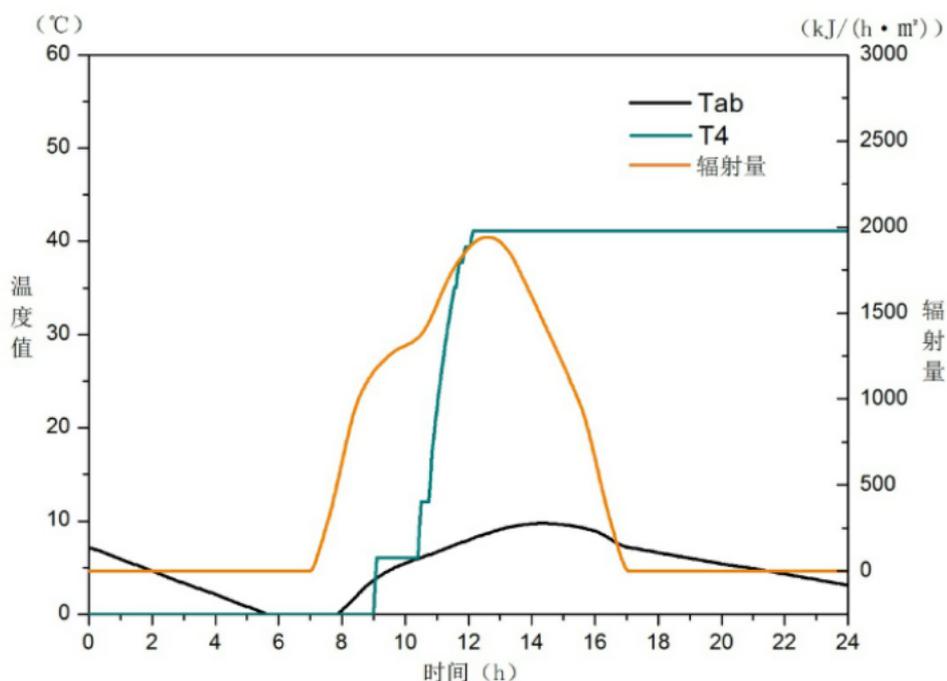


图 5.16 太阳能独立供热水冬季工况模拟

从图 5.15 和图 5.16 中可以看出，夏季在晴好天气，通常两个小时内可以将热水水箱  $0^{\circ}\text{C}$  水温升高到  $50^{\circ}\text{C}$  左右；冬季在晴好天气，通常两个小时内可以将热水水箱  $0^{\circ}\text{C}$  水温升高到  $45^{\circ}\text{C}$  左右，这样通过辅助加热继续提高一定温度，能够大大降低能源消耗。

从图 5.15 和图 5.16 中可以看出，在晴好天气下，冬季和夏季可用太阳能时长约为 9~11 小时，一般水箱初始温度为环境温度或者高于环境温度，使用辅助加热，从初始温度加热到需求温度通常加热热水水箱全程应该在 2.5 小时之内。因此在夏季，约有 7~8 小时可以向土壤蓄热；在冬季，约有 6~7 小时可以进行采暖和向土壤蓄热。

### 5.3.2 太阳能独立供暖

太阳能独立供暖基本发生在冬季，当冬季热水水箱水温达到要求，或者室内人员手动要求进行采暖时，系统中热水流入采暖水箱，而将采暖水箱中的冷水换出至太阳能集热板进行加热。当采暖水箱中水加热到一定温度，开启 Valve6 并启动 Pump2，将加热后的水与室内空气进行换热，由于室内负荷无法精确计算，因此计算算到热水水箱为止，通过增加热水水箱散热量来代替室内负荷。模拟结果如图 5.17 所示。

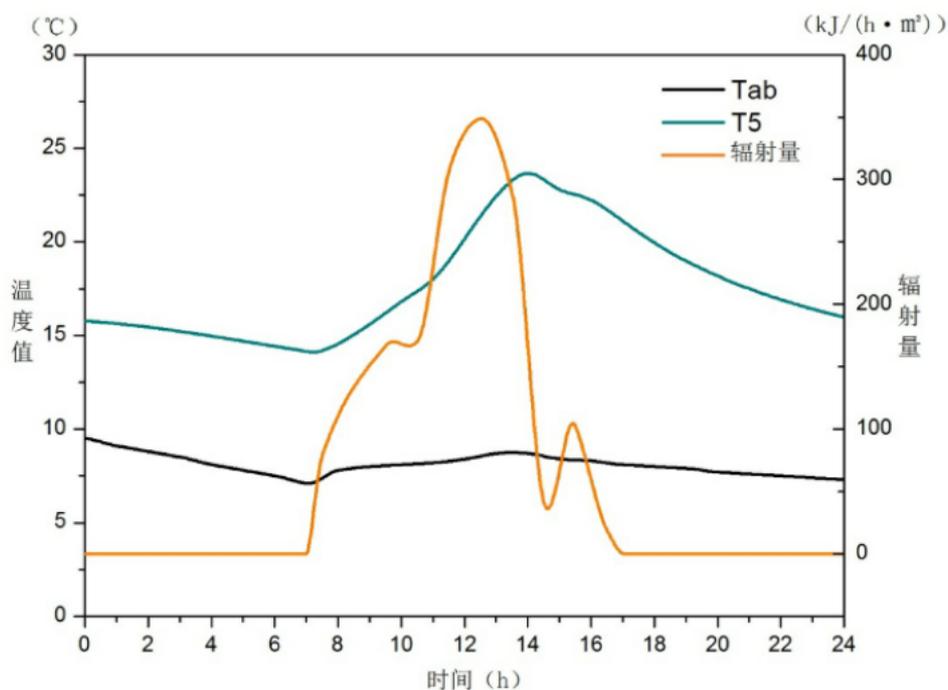


图 5.17 太阳能独立供暖工况模拟

从图 5.17 中可以看出，该结果与实验结果相似，在太阳辐射量较低时，热水水箱中水温能够保持高于室外环境温度  $6\sim 7^{\circ}\text{C}$ ，当太阳辐射量较充分时，热水水箱中水温可以高于室外环境温度  $15^{\circ}\text{C}$ ，甚至更多，因此使用该系统，在非连续阴雨天的情况下应该能够基本满足单户农居的采暖需求。

### 5.3.3 太阳能土壤蓄热

太阳能土壤蓄热是在无热水需求和采暖需求的情况且阳光充足时进行，通过 TRNSYS 模拟获得在夏季和冬季天气下，全天均进行太阳能土壤蓄热时瞬态环境温度、埋管平均水温及斜面辐射量值，见图 5.18 和图 5.19 所示。

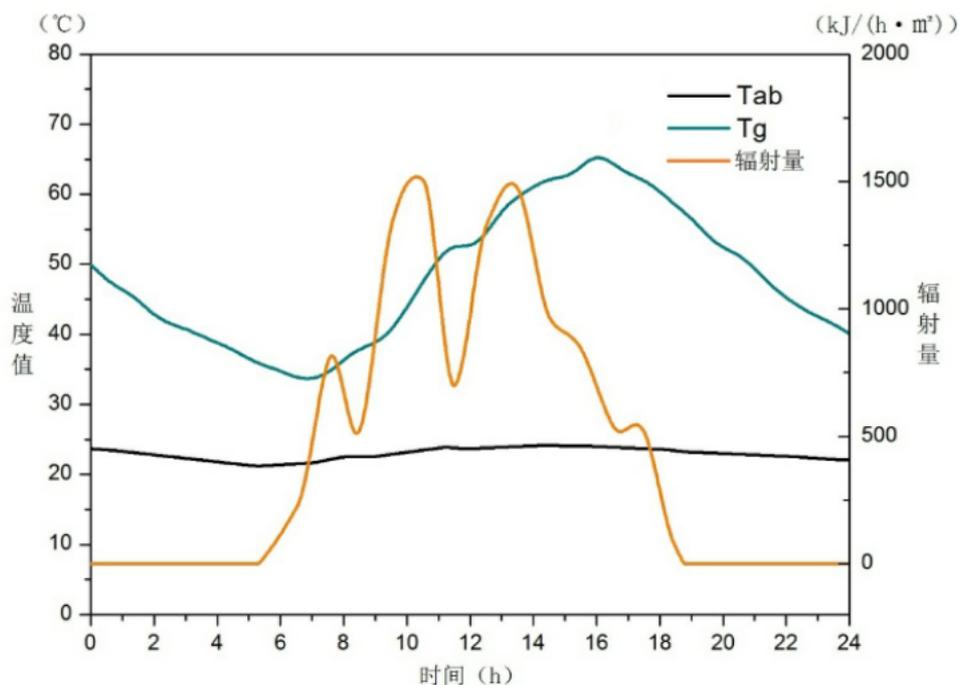


图 5.18 太阳能土壤蓄热夏季工况模拟

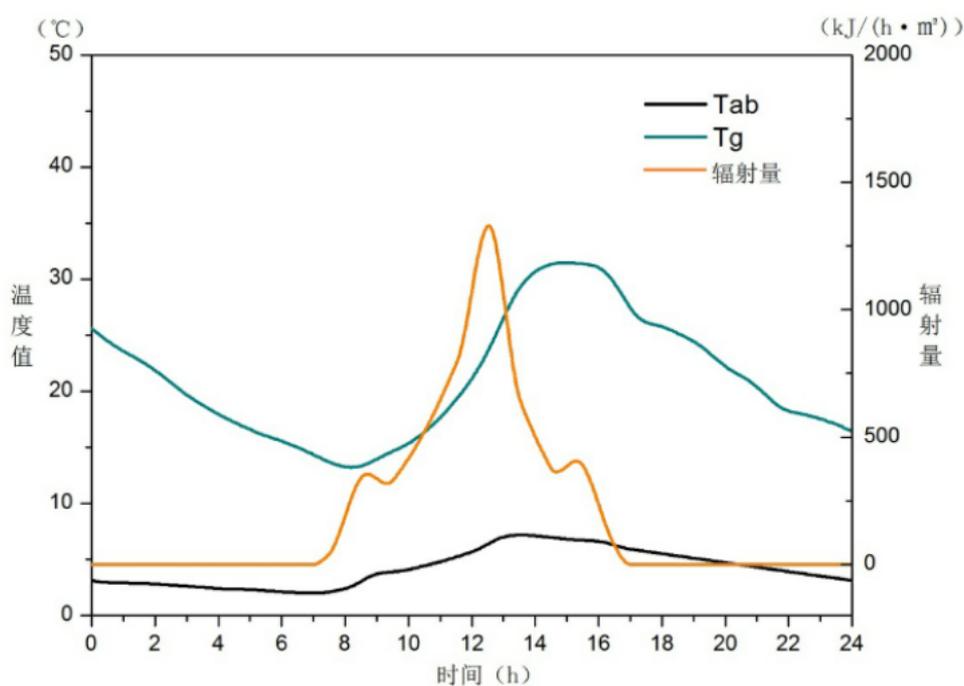


图 5.19 太阳能土壤蓄热冬季工况模拟

从图 5.18 所示，当夏季阳光充足，辐射量高，地埋管平均水温可以达到 50~70°C，根据第 2 章的理论计算可以看出地埋管周围土壤平局温度大约在 15~20°C，有 30~50°C 的温差，在一定流量下，保证管路与土壤充分换热，能够储存较高热量。

从图 5.19 所示，当冬季阳光充足，虽然辐射量不高，但是地埋管中平均水温也

能达到  $15\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，在冬季情况下可以维持土壤有一定热量。

值得注意的是，图 5.18 与 5.19 中所示是手动模式，当辐射量趋近于 0 时，仍然与土壤换热，而实际情况下，土壤温度将保持在全天最高值，然后逐渐散热，因此可以看出到夜间和阴雨天气土壤有较多热量加热流入换热的水。夏季使用土壤取热的情况较少，因此需要选取隔热性能较好的材料隔离储热土壤与其他土壤，保证夏季储存的热量尽量不散失，到冬季运行时，能够在较高土壤温度下进行补热，这样能够在取热时获得更多热量，同时也减少全年热量损失。

### 5.3.4 土壤取热独立采暖

该工况模拟主要是为了判断如果在一定土壤温度且冬季气象参数下，从土壤取热加热采暖水箱，大概需要多久，且温度下降趋势是如何的。其模拟结果如图 5.20 所示。

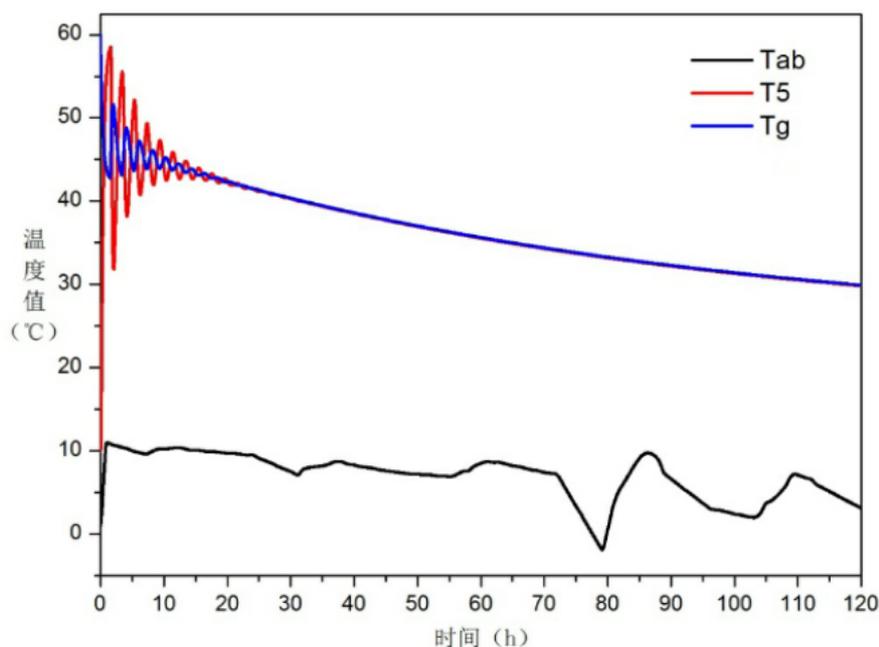


图 5.20 土壤取热独立采暖工况模拟

如图 5.20 所示，该工况设置为地埋管初始水温为  $60^{\circ}\text{C}$ ，热水水箱温度为  $10^{\circ}\text{C}$ ，由于采暖水箱中不是水-水换热，而是直接换水，因此温升很快，当达到稳定时，地埋管与采暖水箱中水温降至  $45^{\circ}\text{C}$  左右，若不进行室内换热，采暖水箱中水温可以在 4 天左右保持在  $30^{\circ}\text{C}$  以上。当然这与实际情况有出入，因为实际情况有室内换热，因此温度下降较快，但是当土壤保温较好时，水温在夜间单户农居采暖时应该可以维持在  $30^{\circ}\text{C}$  左右，这对于室内用户采暖而言，是足够的。

## 5.4 本章小结

本章运用 TRNSYS 软件模拟上海地区生态农居能源一体化系统在一些典型工况下的运行效果，根据之前章节分析，可以看出该系统共有六种运行工况，由于太阳能集热板与地埋管串联运行供生活热水这一工况基本不会在实际运行中出现，因此不予考虑，而太阳能集热板与地埋管串联运行采暖这一工况为太阳能独立采暖和土壤取热独立采暖的中间情况，因此在这两种情况中予以考虑，不单独考虑，因此在模拟计算了典型的四种工况下系统运行后有以下结论：

1) 该系统基本能够实现在上海地区运行要求，需要注意的是运用第 3 章所述的控制逻辑并非为最优逻辑，因此还存在继续优化的空间。

2) 该系统策略考虑上海地区典型农户作息习惯进行设置，若需要在冬季长时间全天进行采暖，依照现有的控制策略，则无法向土壤存储热量，也因此较难从土壤取热，这时需要改变现有控制策略。

3) 经过模拟可知，热水水箱中一定需要增加辅助加热，水平地埋管周围需要用导热系数较低的隔板将蓄热土壤和环境土壤分割开，否则较难蓄热。

4) 由于 TRNSYS 在计算过程中并非与实际完全符合，例如当支流切换时，某一直流从未运行切换为运行，则内部数值从起始值开始计算，因此会影响与实际结果的契合度。实际的运行优化调整还需要在实际工况中进行实地实验获得。

## 第 6 章 经济性分析

从经济角度分析该系统需要注意以下几点要点：1) 经济性比较不能直接将现有生态农居与传统农居的供能系统初投资及运行费用做对比；2) 生态农居能源一体化系统初投资不能按照现有系统搭建费用考虑；3) 成本的增加会对环境保护有益，可采取政府补贴方式进行弥补增加部分。

根据以上要点，提出一种针对上海地区生态农居能源一体化系统的经济性分析方法，其初投资增加部分计算公式如下：

$$\Delta cost_{\text{初始}} = cost_{\text{一体化系统, 初始}} - cost_{\text{电热水器, 初始}} - n_{\text{空调}} \times cost_{\text{空调, 初始}} \quad (6.1)$$

其中， $\Delta cost_{\text{初始}}$  为一体化系统与原有系统总和的初投资费用增加部分；

$cost_{\text{一体化系统, 初始}}$  为一体化系统初投资费用； $cost_{\text{电热水器, 初始}}$  为与一体化系统获得对应

热水量的等价太阳能热水器初投资； $cost_{\text{空调, 初始}}$  为在某一房间内与一体化系统获得

对应采暖效果的等价空调初投资； $n_{\text{空调}}$  为等价空调数量。

后期运行费用减少计算公式如下：

$$\Delta cost_{\text{运行}} = cost_{\text{电热水器, 运行}} + n_{\text{空调}} \times cost_{\text{空调, 运行}} - cost_{\text{一体化系统, 运行}} \quad (6.2)$$

其中， $\Delta cost_{\text{运行}}$  为一体化系统与原有系统总和的一年运行费用增加部分；

$cost_{\text{一体化系统, 运行}}$  为一体化系统一年运行费用； $cost_{\text{电热水器, 运行}}$  为与一体化系统获得对

应热水量的等价太阳能热水器一年运行费用； $cost_{\text{空调, 运行}}$  为在某一房间内与一体化

系统获得对应采暖效果的等价空调一年运行费用。

其中旧系统运行费用是达到一体化系统运行效果时所支出的费用。

该系统投资回收期计算公式如下：

$$N = \frac{\Delta cost_{初始} - money_{补贴}}{\Delta cost_{运行}} \quad (6-1-3)$$

其中，N为投资回收年数； $money_{补贴}$ 为政府补贴总费用。

依照上述计算方法计算结果如表 6.1 所示。

表 6.1 上海地区生态农居能源一体化系统投资回收期估算

一体化系统初投资	32000RMB 太阳能集热板：8000 地埋管：6000 一体化部分：10000 控制柜：3000 现场安装调试：5000	$\Delta cost_{初始}$	21000RMB
等价旧系统总初投资	11000RMB 电热水器：500 空调：3*3500		
一体化系统年运行费用	300RMB	$\Delta cost_{运行}$	1200RMB
旧系统总年运行费用	1500RMB 电热水器：500 空调：1000		
政府补贴	2100RMB (按初投资多支出费用 10%计算)	投资回收期	15 年

根据表 6.1 所示可以看出投资回收期大约在 15 年左右，但该表数据比较粗略，更为精确的投资回收期还去要进一步核算。

## 第 7 章 总结与展望

### 7.1 总结

本文针对上海地区生态农居能源一体化系统进行了一下工作。

1) 对上海地区气象特点与上海地区单户农居进行调研, 了解单户农居中用户作息习惯, 并评估该类农户的体型、隔热保温性能、热水及采暖需求等内容, 为后期能源一体化系统的搭建做准备。

2) 通过物理计算方法计算该类农户典型能源消耗数据, 初步确定运用太阳能集热和土壤蓄热取热方式为农户提供热水和采暖需求, 并依据计算的单户农居典型能源消耗数据计算系统尺寸, 以确保在最不利的气象参数下能够保证有足够能源供给。

3) 根据理论计算结果设计上海地区生态农居能源一体化系统, 并为该系统设计控制逻辑, 通过逻辑切换, 可以实现太阳能独立供生活热水、太阳能独立采暖、太阳能土壤蓄热、太阳与地埋管串联运行供生活热水、太阳能与地埋管串联运行采暖、土壤取热独立采暖六种工况, 并确保系统逻辑之间不冲突。通过设置上下限区间, 确保系统不频繁启停。

4) 根据设计结果进行系统搭建, 搭建完成上海地区生态农居能源一体化系统, 通过 PID 控制器对各个逻辑切换进行测试, 同时测试在不同工况下系统运行是否正常, 是否能够达到预期效果。由于系统在冬季工况下最难达到预期效果, 且逻辑切换最为复杂, 因此本实验均在冬季进行, 通过测试, 该系统能够基本满足设计要求。

5) 运用 TRNSYS 软件对上海地区生态农居能源一体化系统进行搭建并模拟, 判断不同工况下系统运行是否合理。通过不同工况的模拟, 得到的结果基本与实验数据一致, 且说明该系统能够基本满足设计要求。

6) 根据调研结果, 提出一套上海地区生态农居能源一体化系统投资回收期的计算方法, 通过计算得到该系统的投资回收期约为 15 年。

### 7.2 展望

本文所进行的研究和工作, 仍有许多不足之处可以在今后工作中进行完善。

1) 本文由于实验环境与经费所限, 因此试验场地并非在真实的单户农居中进行, 选用的地埋管也与设计方案不同, 因此在实验过程中得到的结果与实际结果有差异, 在后续工作中应寻找实际农居针对该系统进行测试。并且对于土壤保温隔热等方面还需进行改进。

2) 由于 TRNSYS 在模拟中对于支流的计算有所缺陷, 因此在模拟计算中与真

实值有差异，在今后的工作中需要运用其他软件进行验证。

3) 上海地区生态农居能源一体化系统控制逻辑还不完善，在后续工作中应对该控制逻辑进行再优化，以达到符合上海地区生态农居用能需求并且节能的系统。

4) 对于投资回收期的计算较为粗略，因此在后续工作中需要再进行细化。

## 致谢

时光荏苒，转眼间两年半的硕士研究生学习生活也步入尾声，在研究生期间，我受益匪浅，获得了许多新知，也得到了许多关怀和帮助，在此要向他们表达我最真挚的谢意。

首先，我需要感谢的是我的导师许鹏老师。许老师为人谦和，在论文选题中给予了我极大的帮助，在我遇到困难时给予我支持，也让我能够顺利地完成了课题工作，在提交初稿后，许老师百忙中抽出时间仔细修改，提出了许多中肯的指导意见，使我能够不断完善论文。与此同时，他的治学之风和对事业的孜孜追求将影响和激励着我，因为他的认真，他的坚持，让我能够在研究生期间发表多篇论文；因为他的影响，让我能够志存高远，萌生了去美国继续深造的想法，在即将毕业之时也顺利拿到了心目中美国高校的全奖录取通知书。可以说许老师在我的人生路上留下了深刻的印记，我也将以他为楷模，向他学习，不断努力超越自我。借此机会，我要向许老师表达我深深的谢意。

其次，我还要感谢史建国老师，因为他的指导，让我能够顺利完成实验工作，因为在课题进行之前，并未实际自己搭建过试验平台，因此在搭建时遇到了许多困难，正因为史老师的帮助指导，也让我最终能够完成实验平台的搭建；我还要感谢我的班主任苏醒老师这几年对我们的关心、帮助和支持；当然也要感谢同一师门的小伙伴们，我们互帮互助，互相勉励，一起成长，使我拥有了一个良好的学习工作氛围，这两年来我取得的这些成果和这样一个团队息息相关，在此我特别要感谢陈永保博士和吴云涛师弟在我实验中给予的帮助。能够在研究生期间认识这些老师和小伙伴，是我极大的荣幸。

同时，我还要感谢我的家人，他们的默默支持是我能够顺利完成课业的重要精神支柱，此份恩情了然于胸，此生必要实现他们寄予的殷切期望和我心中的承诺。

最后，我还要感谢我的母校，同济大学。在同济七年的时光，是我最美好的一段时光，也是我逐渐长大成人的一段时光，从懵懵懂懂的高三毕业生到有清晰规划的硕士毕业生，这期间经历了种种喜怒哀乐。在同济，我认识了许多志同道合的朋友；在同济，我认识了许多良师益友；在同济，我也学习到了仰望星空、脚踏实地的同济精神。如今即将离开母校，然而我的心始终与母校联系在一起，此刻的我百感交集，有感伤也有快乐，有遗憾也有收获，以后的我将会更加努力，用自己的成绩为母校增光添彩，用自己的实际行动来报答母校给予的指导，同时也用自己的努力回馈社会，回馈国家，报答父母、老师、朋友的恩情。

2016 年 1 月于同济大学

## 参考文献

- [1] Kong,X., Lu,S., Wu,Y., 2012.A review of building energy efficiency in China during “Eleventh Five-Year Plan” period. *Energy Policy* 41, 624– 635.
- [2] Perez-Lombard, L., Ortiz,J ., Pout,C., 2008. A review on buildings energy consumption information. *Energy Build.* 40(3), 394– 398.
- [3] J iang, Y., 2007. Annual Report on China Building Energy Efficiency. Building Energy Research Center, Tsinghua University, China Building Industry Press, Beijing.
- [4] CNBS, 2008. Main Data Bulletin of the Second National Agricultural Census , China National Bureau of Statistics.
- [5] Cai, W.G., Wu, Y., Zhong, Y., Ren, H., 2009. China building energy consumption: situation, challenges and corresponding measures. *Energy Policy* 37(6), 2054– 2059.
- [6] CNBS, MOEP, 2011. China Statistical Yearbook on Environment 2010. China National Bureau of Statistics, Ministry of Environmental Protection, China Statistics Press, Beijing.
- [7] Xiaohua, W., Zhenmin, F., 2001. Rural household energy consumption with the economic development in China: Stages and characteristic indices. *Energy policy* 29(15), 1391– 1397.
- [8] Zeng, X., Ma, Y., Ma, L., 2007. Utilization of straw in biomass energy in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11(5), 976– 987.
- [9] Chang, J ., Leung, D.Y., Wu, C.Z., Yuan, Z.H., 2003. A review on the energy production, consumption, and prospect of renewable energy in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 7(5), 453– 468.
- [10] Zhang, L., Yang, Z., Chen, B., Chen, G., 2009. Rural energy in China: pattern and policy. *Renew. Energy* 34(12), 2813– 2823.
- [11] J iang, Z.M., 2008. Reflections on energy issues in China. *J . Shanghai J iaotong Univ. (Sci.)* 13, 257– 274.
- [12] Dincer, F., 2011. The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15(1), 713– 720.
- [13] Tang X, Liao H. Energy poverty and solid fuels use in rural China: Analysis based on national population census[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2014, 23: 122-129.1.2
- [14] 杨艳丽, 李光全, 张培栋. 中国沼气产业对减排 CO<sub>2</sub> 的模拟与预测[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 2.
- [15] 张迪, 石惠娴, 朱洪光, 等. 如何保证地源热泵式沼气池加温系统长期稳定运行[J]. *节能技术*, 2011, 29(1): 9-14.
- [16] 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.
- [17] 石惠娴, 王韬, 朱洪光, 等. 地源热泵式沼气池加温系统[J]. *农业工程学报*, 2010 (2):

- 268-273.
- [18] 裴晓梅,石惠娴,朱洪光,等.太阳能—沼液余热式热泵 高温厌氧发酵加温系统[J].同济大学学报,2012,40(2): 292-296.
- [19] Sapkota A, Lu Z, Yang H, et al. Role of renewable energy technologies in rural communities' adaptation to climate change in Nepal[J]. Renewable Energy, 2014, 68: 793-800.
- [20] He B, Yang L, Ye M, et al. Overview of rural building energy efficiency in China[J]. Energy Policy, 2014, 69: 385-396.
- [21] Zhu, B., Zhang, W., Du, J., Zhou, W., Qiu, T., Li, Q., 2011. Adoption of renewable energy technologies (RETs): a survey on rural construction in China. Technol. Soc. 33(3), 223– 230.
- [22] Ding W, Wang L, Chen B, et al. Impacts of renewable energy on gender in rural communities of north-west China[J]. Renewable Energy, 2014, 69: 180-189.
- [23] Beshada E, Zhang Q, Boris R. Winter performance of a solar energy greenhouse in southern Manitoba[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2006, 48(5.1): e5.
- [24] Cotana F, Belardi P, Manciola P, et al. TIAR: Renewable energy production, storage and distribution; a new multidisciplinary approach for the design of rural facility[J]. Energy Procedia, 2014, 45: 323-332.
- [25] 中华人民共和国农业部. 全国农村可再生能源统计资料 2000-2010[R].
- [26] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2011[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011
- [27] 杨世铭, 陶文铨, 传热学(第三版)[M], 北京: 高等教育出版社, 1998
- [28] 罗棣庵, 传热应用与分析[M], 北京: 清华大学出版社, 1989
- [29] 周鑫发, 杨启岳, 武敏, 等. 夏热冬冷地区农居建筑节能数学建模与计算[J]. 能源研究与信息, 2006, 22(3): 174-179.
- [30] 钱磊. 地源热泵系统的可行性研究及在工程实例中的应用[J]. 商品与质量· 建筑与发展, 2014 (8)
- [31] 李申生, 太阳能[M], 北京: 人民教育出版社, 1988
- [32] A Ucar, M Inalli, A thermo-economical optimization of a domestic solar heating plant with seasonal storage, Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2-3): 450-456
- [33] Ucar A, Inalli M, Thermal and economical analysis of a central solar heating system with underground seasonal storage in Turkey, Renewable Energy, 2005, 30(7): 1005-1019
- [34] TSchmidt, D . Marigold, H.MoUer-Steinhagen, Central solar heating plants with seasonal storage in Germany, Solar Energy, 2004, 76: 165-174
- [35] 张开黎, 旷玉辉, 于立强, 太阳能利用中的蓄热技术, 青岛建筑工程学院学报, 2000, 4(21): 92-96
- [36] 赵军, 黄涛, 李新国, 土壤蓄热性能的研究, 天津大学学报, 2005, 38(7): 5-9
- [37] 高青, J D Spitler, 李明等, 地下蓄能及其对地源热泵系统的作用, 地热能, 2006, 6: 8-12
- [38] A Georgiev, A Busso, P Roth, Numerical simulation of the performance of a solar-earth source heat pump system, Renewable Energy, 2006, 31(7): 971-985
- [39] 李伟, 李新国, 赵军, 等. 土壤蓄热特性与模拟研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1491-1495.
- [40] 王华军, 赵军, 沈亮, 地源热泵长期运行特性的实验研究, 华北电力大学学报, 2007, 34(2):

52-54

- [41] 王敏, 孟浩, 白杨, 等. 上海市土地利用空间格局与地表温度关系研究[J]. 生态环境学报, 2013(2):343-350.
- [42] 孙亭, 刁乃仁, 肖洪海, 等. 水平埋管换热器的传热性能研究[C]// 中国制冷学会 2009 年学术年会. 2009.
- [43] Kwon O, Bae K J, Park C. Cooling characteristics of ground source heat pump with heat exchange methods[J]. *Renewable Energy*, 2014, 71: 651-657.
- [44] 张文雍, 郑茂余, 王潇, 等. 太阳能季节性土壤蓄热影响因素分析[J]. 建筑科学, 2010 (6): 81-86.
- [45] 何雪冰, 丁勇, 刘宪英, 地源热泵埋管换热器传热模型及其应用, 重庆建筑大学学报, 2004, 26(2): 76-80
- [46] 韩敏霞. 太阳能土壤跨季节蓄热—地源热泵组合理论与实验研究[D]. 天津大学, 2007.
- [47] B Nordell, G Hellstrom, High temperature solar heated seasonal storage system for low temperature heating of buildings, *Solar Energy*, 2000, 69(6): 511-523
- [48] Bakirci K, Yuksel B. Experimental thermal performance of a solar source heat-pump system for residential heating in cold climate region[J]. *Applied thermal engineering*, 2011, 31(8): 1508-1518.
- [49] 杨卫波, 施明恒, 陈振乾. 太阳能-U形埋管土壤蓄热特性数值模拟与实验验证[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(4): 651-656.
- [50] 孙志林, 杨柳, 屈宗长, 太阳能热泵系统及其供热系数比较, 制冷空调与电力机械, 2005, 26(106): 25-28
- [51] 杨睿, 韩敏霞, 太阳能 . 地源热泵组合空调 / 热水系统的设计与应用, 中国建设动态: 阳光能源, 2006, 12: 22-24
- [52] 王双喜, 马春生, 张静, 赵聪慧, 秦刚, 节能温室太阳能土壤蓄热加温系统的研究, 农业工程学报, 2003, 19(5): 197-203
- [53] 李阳. 水箱中换热盘管位置对太阳能热水系统性能的影响研究[D]. 东南大学, 2013.
- [54] Klein S A, Beckman WA, TRNSYS-A Transient Simulation Program, *ASHRAE Transactions*, 1976(82)
- [55] Ø. Ulleberg, Mørner S O. TRNSYS simulation models for solar-hydrogen systems[J]. *Solar Energy*, 1997, 59(s 4-6):271-279.
- [56] Beckman W A, Broman L, Fiksel A, et al. TRNSYS The most complete solar energy system modeling and simulation software[J]. *Renewable Energy*, 1994, 5(1):486-488.
- [57] Chargui R, Sammouda H, Farhat A. Geothermal heat pump in heating mode: Modeling and simulation on TRNSYS[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(7):1824-1832.
- [58] 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]. 天津大学, 2009.
- [59] Klein S.A., 1975. Calculation of flat-plate collector loss coefficients. *Solar Energy*, 17 (1). Pp. 79-80
- [60] Klein, S.A., "A Design Procedure for Solar Heating Systems", Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Wisconsin-Madison, (1976)
- [61] Newton, B.J., "Modeling of Solar Storage Tanks", M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, (1995)

## 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

叶昀暘, 男, 1990年9月生。

2013年7月毕业于同济大学 建筑环境与设备工程专业 获学士学位。

2013年9月入同济大学读硕士研究生, 就读于动力工程(暖通方向)专业。

### 已发表论文:

- [1] JI Y, XU P, YE Y.Y, LU X, MAO J.C. "Energy Load Superposition and Spatial Optimization in Urban Design: a Case Study". Computers, Environment and Urban Systems (2015). Accepted
- [2] YE Y.Y, XU P, MAO J.C, JI Y. "Experimental Study on the Effectiveness of Internal Shading Devices". Energy and Building (2015). 111 (2016) 154-163
- [3] YE Y.Y, XU P. "The Evaluation on the Effect of Seasonal Nature-ventilated Window". The 11th International Conference on Industrial Ventilation (2015). Accepted
- [4] JI Y, XU P, YE Y.Y. "HVAC Terminal Hourly End-Use Disaggregation in Commercial Building with Fourier Series Model". Energy and Buildings. 97 (2015) 33-46
- [5] YE Y.Y, XU P, SHA H.J, YUE P, ZHANG H. "ShadingPlus-A Fast Simulation Tool for Building Shading Analysis". Energy Efficiency (2015). ISSN: 1570-646x.
- [6] YE Y.Y, XU P, Mao J.C. "Energy Performance of External versus Internal Shading Devices in Residential Buildings". Applied Mechanics and Materials (2014), 672-674:546-549.
- [7] YUE P, ZHANG H, YE Y.Y, SHA H.J. "Development of Testing Platform for Building Shading Device". Advanced Materials Research (2014), 1073-1076:1254-1258.
- [8] CHEN L, XU P, YE Y.Y. "Simulation and Analysis on the Effect of Seasonal Shading Ventilated Window". Building Energy Efficiency (2014), (9):37-46. DOI:10.3969/j.issn.1673-7237.2014.09.009.