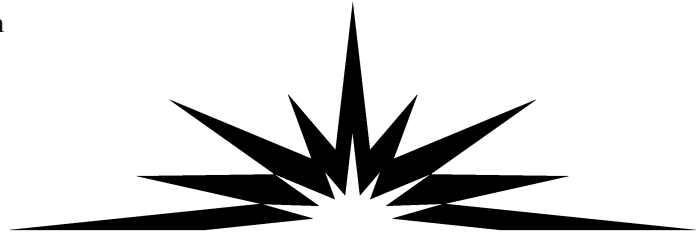

中国可持续能源项目
The China Sustainable Energy Program

能源基金会
The Energy Foundation

项目成果报告系列
Technical Report



利用可再生能源的中国特色零能耗建筑

The Zero Energy Building Using Renewable Energy with Chinese Character

华中科技大学 建筑与城市规划学院

智能建筑研究所

2012 年 08 月

项目信息

项目资助号

Grant Number: G-1011-13546

项目期

Grant period: 12/1/10 - 11/30/11

所属领域:

Sector: 可再生能源利用 零能耗建筑

Renewable Energy Use, Zero Energy Building,

项目概述:夏热冬冷地区全年使用可再生能源进行温度和舒适性调节的教学、办公建筑;在项目中,采用了有流动的空气间层的主动式动态空心墙;气候适应性窗户;充分利用夏热冬冷地区地温年度总平衡的优势,结合可再生能源的利用,将地下冷热源采集水管中的循环水,在室内地板散热器中进行循环,用地板通风的方式,调整进入室内的新风温度。舒适度调节系统全年耗能量等于或小于建筑屋顶上的太阳能电池全年发电量。还能将夏、冬季热、冷量互存地下,反季应用。以实现节能、节地、节水、节材、保护环境和减少污染的目标。

The national demonstration project of renewable energy building in Huazhong University of Science and Technology, approved by the Ministry of Finance and the Ministry of Housing and Urban-Rural Development, is achieved to build up a teaching or office building with renewable energy use to adjust temperature and comfortableness all year in Hot-summer & Cold winter area. There is used the Active Dynamic Air Envelope with air inter-layer. Fully use the advantage of underground temperature balance in a year and utilize renewable energy to adjust the flesh air temperature. The Underfloor Air Distribution System is

including circle water with underground cool or hot source, underfloor radiator and flesh air vent. The used power of comfort adjusting system is equal or smaller than generated solar energy all year from photovoltaic cell on building roof. This project will store up solar hot in autumn and air cool in spring into underground for anti-reason use.

项目成员:

Project team: YU, Zhuang Institute of Intelligent Building, School of Architecture and Urban planning, Huazhong University of Science & Technology

余庄, 华中科技大学 建筑与城市规划学院 智能建筑研究所

关键词:

Key Word: Renewable Energy Use, Zero Energy Building, Active Dynamic Air Envelope, Climatic Adaptive Window, Underfloor Air Distribution System

可再生能源利用 零能耗建筑 主动式动态空气墙 气候适应性窗户 地板送风系统

摘要

低能耗建筑对于我国减少能源消耗，实现减少单位国内生产总值碳排放量的目标有着重要的意义。在低能耗建筑的设计中，集成设计是一种重要的方法，通过将被动式和主动式节能技术与建筑设计进行合理的整合，可以达到创造良好热舒适环境和节约建筑能耗之间的平衡。

建筑能耗使用的集成系统是以主动式节能为主的建筑节能技术，地下冷热源系统通过消耗少量的水泵电力来获取室内热环境调节所需的冷热水资源；地板送风系统采用室内局部热环境控制的方法，使用较少的冷热量使工作区达到合适的气温和风速；动态通风墙则利用墙内主动通风来隔绝室外热环境对室内的影响，改善室内的辐射温度；三者共同作用提高了室内工作区热环境的舒适性。

研究中主要以财政部、建设部可再生能源建筑应用示范项目——华中科技大学建筑与城市规划学院扩建项目（以下简称示范建筑）作为平台，从以下方面展开研究：

首先介绍了示范建筑的概况，结合国内外的相关研究和实践经验，简要分析了建筑能耗使用的集成系统中三个子系统各自的特点，理清了建筑能耗使用的集成系统运行的功能流线。

在实测研究中，对示范建筑的室外和室内热环境、围护结构表面温度以及建筑能耗等方面进行了较长时期的测量，并运用对比研究的方法分析其特点。

模拟研究中用实测数据对计算机模型进行了检验，运用CFD模拟的方法对建筑能耗使用的集成系统在建筑中的集成设计进行优化探讨，研究系统采取不同送风方式、墙体采取不同的材料及构造形式对建筑室内热环境的影响。

在实测研究和模拟研究的基础上，以夏热冬冷地区办公建筑为例，对集成建筑能耗使用的集成系统的低能耗建筑设计方法进行了探讨。在系统设计方面，对建筑能耗使用的集成系统在建筑设计内容进行了归纳，并针对系统在热环境调节方面存在的问题，提出了一些补充设计思路；在建筑设计方面，着力探讨了集成设计对建筑室内空间和围护结构构造设计的影响，并对低能耗建筑集成建筑能耗使用的集成系统的设计流程进行了阐述。

本文旨在为建筑能耗使用的集成系统的低能耗建筑设计模式的推广应用打下一定的基础，集成设计的理念也为低能耗建筑的设计提供了新的思路。

Summary

Low energy building has an important significance in reducing energy consumption and achieving the target of reducing carbon emissions per unit of GDP for China. Integrated design is an important way in the design of low energy buildings. Through integrating the passive and active energy-saving technologies with architecture design reasonably, the balance between creating a thermal comfort environment and building energy saving can be achieved.

Integrated system for low energy using building is an energy saving technology that active ways highlighted. The underground cooling systems obtain the required adjustment hot and cold water to adjust the indoor thermal environment by pumping small amount of power; the floor air supply system achieve the proper temperature and wind speed with less energy by using the control method of local indoor thermal environment; the dynamic ventilation wall improves the indoor radiation temperature by using the active ventilation to isolate the impact of outdoor thermal environment on the indoor one. The combination of the three methods above improves the thermal environment comfort of indoor working space.

The research is based on the study of the expansion projects of the College of Architecture and Urban Planning in Huazhong University of Science and Technology, which is the demonstration construction of the application of renewable energy building ratified by the Ministry of Finance and the Ministry of Construction in China. It will carry out the research mainly from the following aspects:

At first the author analysis the mechanism of three subsystems of the Integrated system for low energy using building from related research and practical experience both domestic and international and gets clear the functional streamline of the system operation.

The author takes a long-term measurement on the climatic characteristics of the site, the indoor thermal environment of the construction, the envelope surface temperature of the building, the energy consumption of the building and some other related aspects, and researchs the characteristics by using comparative study method.

During the simulation study, the author tests the computer models with measured data, optimizes the design of buildings with integrated Integrated system for low energy using building using the CFD simulation method, and studies the impact on the indoor thermal environment with different ways of air supply, materials of walls and tectonic pattern of the system.

Based on the experimental study and the simulation, the author takes a discussion on the design of low-power office buildings with integrated Integrated system for low energy useing building. In the aspect of system operation, the optimization of integrated system in building design are summarized, and several additional design ideas are suggested; while in the aspect of architecture design, the article probes into the impact of the integrated design on the Interior space of buildings and the tectonic design of retaining structures, and the design process of the low energy office building integrated with Integrated system for low energy useing building are described.

This paper aims at laying a foundation for the promotion and application of the design patterns of low energy buildings with Integrated Integrated system for low energy useing building; and meanwhile, the concept of integrated design provides a new thought for low energy building design.

目 录

一、 系统集成的目的和理论基础.....	9
一、 建筑能耗使用的集成系统框图.....	9
二、 围护结构	10
3.1 墙体和屋顶	10
3.2 气候适应性窗户	12
三、 室内舒适度调节系统	14
四、 太阳能建筑一体化	15
五、 建筑自动化部分	17
六、 实测结果	17
7.1 夏季运行状况	17
7.2 室内气温分布规律	21
7.3 平均辐射温度的特点	23
7.4 系统运行时储能池水温的变化.....	27
7.5 系统能耗	30
7.6 实测小结	33

从当地的自然条件出发，当气候适宜和建筑内热环境适宜时，以人为的被动式舒适度调节手段为主；在自然条件不能满足人们生活、工作的舒适度条件时，不依靠被动式的手段，而辅之于主动式的方式实现自然和谐的室内环境，这是富有中国特色的生活和工作方式，另外，建筑还需要最大限度地节约资源（节能、节地、节水、节材）、保护环境和减少污染（简称“四节一环保”），为人们提供健康、适用和高效的适用空间的建筑。“四节一环保”政策体现了以人为本的设计理念，建筑尽量利用自然条件、与自然和谐的设计策略，减少资源、能源消耗和排放，运用适宜的工程技术创造现代社会的人居环境品质。在不断的探索和改善中，“四节一环保”也是富有中国特色的建筑节能方式。

财政部、建设部可再生能源建筑应用示范项目，华中科技大学建筑与城市规划学院教室扩建和既有建筑改造工程，称之为 000PK 建筑（零能耗、零排放、舒适度 PMV 为 0、Popular 大众化、Key 共性关键技术）。建筑主要目标：夏热冬冷地区全年使用可再生能源进行温度和舒适性调节的教学、办公建筑，以全年的屋顶太阳能电池板的发电量等于或小于室内舒适度调节系统和照明总耗电量，所有发电都送入电网，用电从电网输入。由于春、秋季以及寒、暑假的太阳能产生的电能都回馈电网，完全可补足夏、冬季舒适度调节系统和照明耗电量大时的电力消耗。

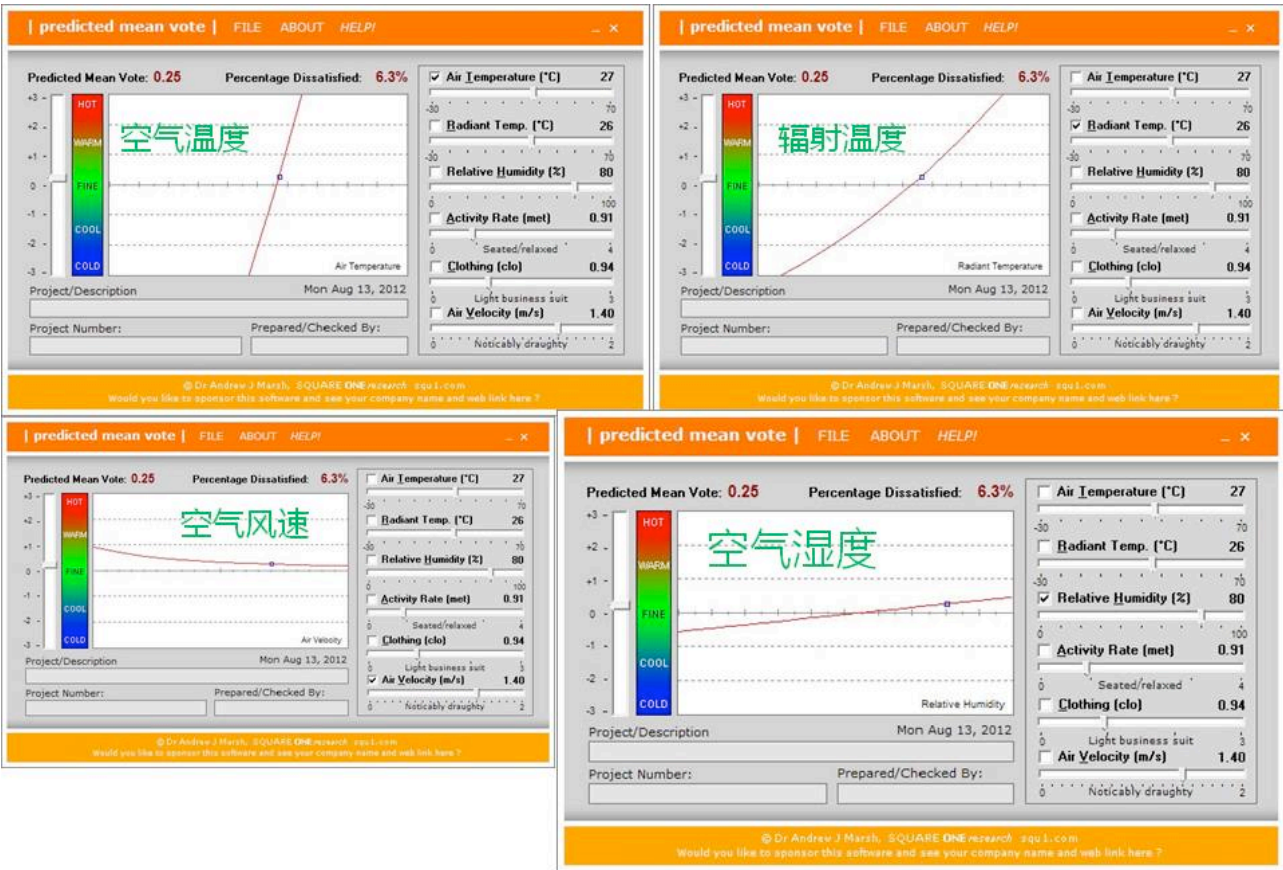
作为围护结构改造的示范，主动式动态空心墙的最大特点是拥有一个流动的空气间层，在冬、夏两季，采用主动式送风的方法，用一定温度的空气不断从墙体内部通过，有效的阻隔室外冷、热量通过墙体集聚，提高墙体的保温和隔热功效。通往空气间层的空气，是主动输入与室外有较大温差的室内空调废风；玻璃窗的改造，则在玻璃窗上增加一个附件，夏天可玻璃窗遮阳，而冬天则反射太阳光取暖和改善照明。由于围护结构的自适应能力加强，室内每年需要调节的时间大为减少。

结合可再生能源的利用，将采集到的地下冷热源（室内地板散热器的循环水与地下冷热源采集水管中的水进行循环）去调整进入室内的新风温度；并通过新风冷热交换系统进行热交换；然后，收集建筑内部已经使用后的废风，与新鲜空气交换热量后，输送到动态空心墙的空气间层当中。

充分利用夏热冬冷地区地温年度总平衡的优势，变夏热冬冷地区气候双向影响的劣势为优势，以土壤中的冷、热源，用竖埋管中水循环方式带至室内地板下，再用地板送风的方式，进行夏热冬冷时的室内舒适度调节，这也是夏热冬冷地区不用压缩机技术的热舒适度调整技术，增强的围护结构自适应性减少了需要进行室内舒适度调节的时间；由于系统中有一个储能器，故还能将秋、春季（无需室内温度调节时段）的热、冷量互存地下，反季节应用。

项目在充分进行了计算机计算和模拟的基础上进行设计的，特别对围护结构的建筑性能以及舒适度调整系统的设计提供了较为充分的数字设计基础。

一、系统集成的目的和理论基础



相同情况下，空气温度、辐射温度、室内风速与湿度对PMV的影响曲线图。湿度对PMV的敏感度远远不及两个温度。也就是说，调整温度最有效。

系统集成的目标是调整室内的空气温度和辐射温度，如上图所示，在相同的 PMV 值下，衣着和人体活动值固定，则空气的湿度与风速对 PMV 的敏感度要远远小于空气温度和辐射温度，也就是说，在一定的建筑室内环境要求下，达到 PMV 值，调整空气温度和辐射温度，本文讨论的主要是调整辐射温度，可以更快和更好的达到室内舒适度的要求。

既满足中国人的生活习惯，又能达到建筑节能的要求，特别强调“部分时间，部分空调”的应用，是本项目的主要实现目标。在围护结构既满足室内舒适度调整，又达到建筑节能的要求，且还能亲和大自然的前提条件下，如何在 不舒适的气候条件下调整室内舒适度，尽量利用自然条件以及可再生能源，达到建筑节能和和谐自然室内环境的共生要求，使之具有中国特点，也是本项目的目标。

一、 建筑能耗使用的集成系统框图

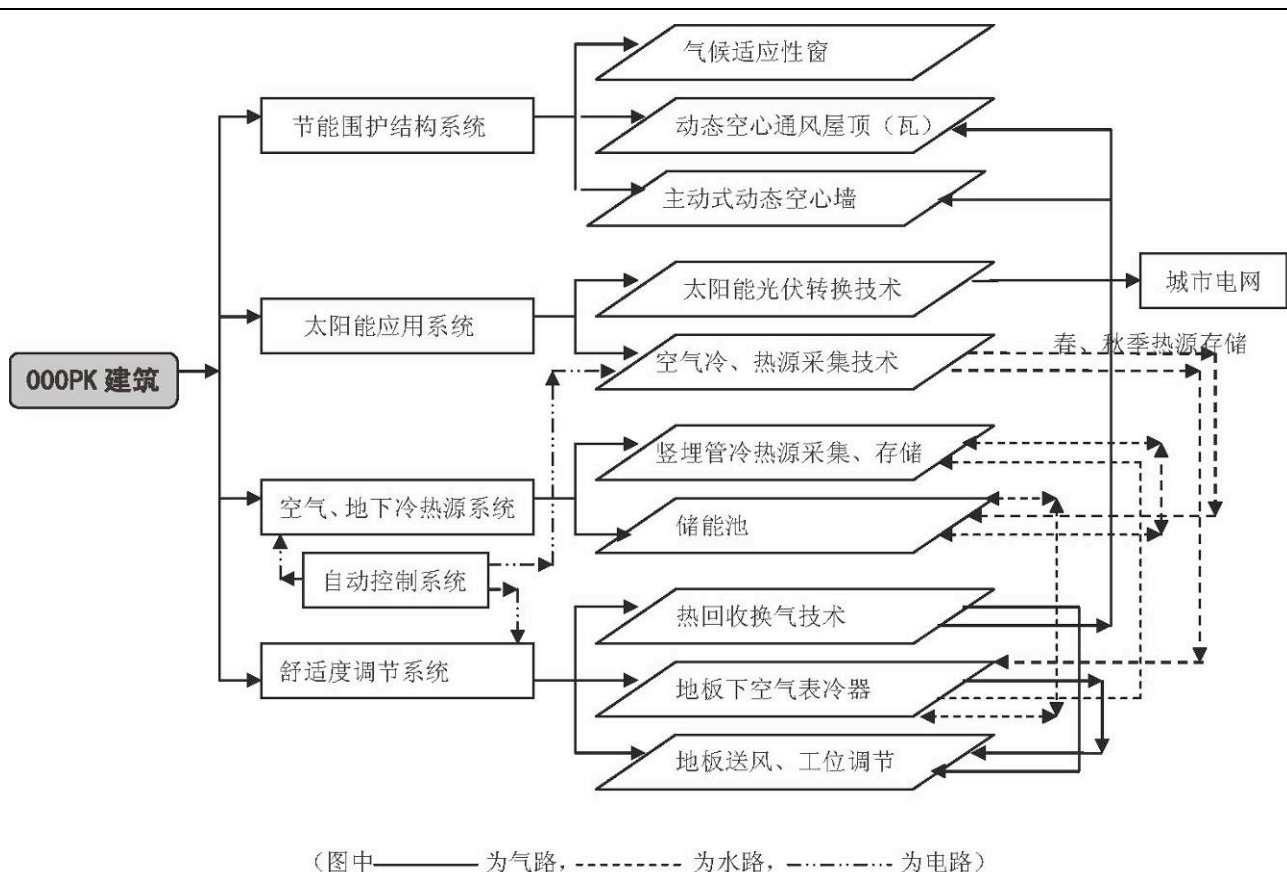


图 2.1 建筑能耗使用的集成系统框图

二、 围护结构

3.1 墙体和屋顶

项目采用独立自主创新的主动式动态空心墙（Active Dynamic Air Envelop, ADAE），其墙体采用的是复合轻质材料组合。主动式动态空心墙最大的特点是拥有一个流动的空气间层，在冬、夏两季，采用主动式送风的方法，用一定温度的空气不断从墙体内部通过，有效的阻隔室外冷、热量通过墙体集聚，提高墙体的保温和隔热功效。通往空气间层的空气，是主动输入与室外有较大温差的室内空调废风；

结合可再生能源的利用，将采集到的地下冷热源去调整进入室内的新风温度；并通过新风冷热交换系统进行热交换；然后，收集建筑内部已经使用后的废风，与新鲜空气交换热量后，输送到主动式动态空心墙的空气间层当中。

围护结构内层使用轻质内墙板，由内外两层防火板+ 聚苯颗粒与粘接剂+ 水泥、粉煤灰等构成。厚度为 100 mm；导热系数为 0.78 W/(m.k)。围护结构外层的主要材料为 30 mm 聚氨酯，内外用防火材料和外墙材料包裹，与内层之间形成 60 mm 的空间；如图 2.2 所示。

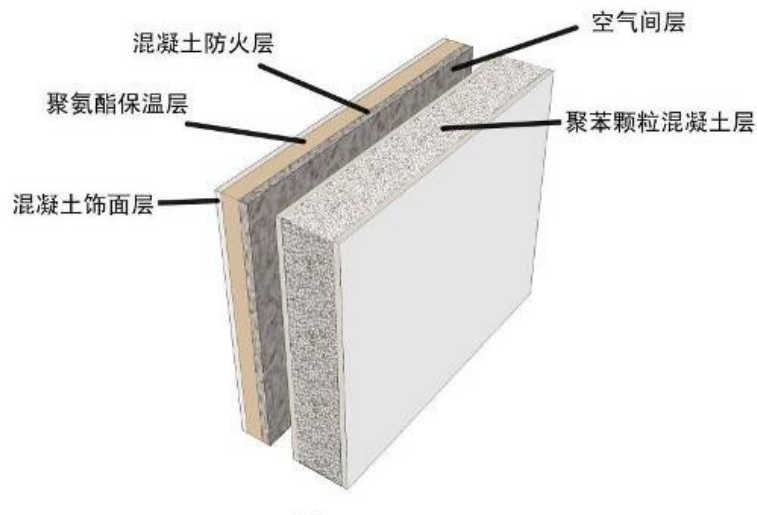


图 2.2 动态空气墙示意图（自绘）

动态空气墙还能与光伏电池板一起组成屋顶，其内层与主动式动态空气墙体一样；外层为太阳能光伏电池板（薄膜太阳能光伏玻璃）。电池板既是建筑结构的瓦，也是动态空心墙的外层。动态空心墙的出风口由屋顶无动力风机完成，它既是动态空气墙，也是动态空气屋顶的出风口，既调整墙体的保温、隔热性能，又为太阳能电池降温，提高发电效率；如图 2.3 所示



图 2.3 动态空气墙和屋顶太阳能电池的无动力风机出风口（自拍）

主动式动态空气墙的特点是内层隔热，外层保温，空气间层调节与气候之间的适应性，且施工方便，外层可使用聚氨酯块干挂。建筑和安装费用低，符合框架结构特征的建造，还能减轻建筑的总重，配套设备费用也低，整个建筑生命周期中的使用费用也较低；适应性广；防火性能好；作为光伏屋顶，光伏电池板替代瓦，使得建筑的建造费用降低。使用膜电池，对光亮度的要求低，发电时间长，总发电量高，也能达到屋顶的防水要求；在屋顶施工也较为方便；

3.2 气候适应性窗户

围护结构中的窗的改造是建筑节能的另一关键点，这里既包括既有建筑，又包括新建建筑。符合人们的生活习惯的窗户，也是极具中国特色的建筑要求。就是要能开窗通风。气候适宜时，特别是春、秋天，开窗通风，呼吸大自然的空气。窗的可开启性，也是自然和谐室内环境的必要条件。但它也是气候不适宜时，室内环境调节的弱点。窗的开启也是中国人判断生活舒适性的心理因素，特别是在居住建筑中。那么，经过详细计算机计算以及模拟，在实测数据的支持下，认为在窗的密闭性解决后，遮阳的合理使用比墙体改造（外墙外保温）的实用性高，性价比也高，可操作性强，还特别适合于既有建筑的改造。

在南向窗上增加夏天可完全遮阳，冬天可反射阳光进室内提高室内温度和照度，而又不影响玻璃视觉的附件，就可以满足对太阳辐射利用的两面性的要求，夏热冬冷变为冬暖夏凉。窗的改造为南向窗是内侧为普通中空玻璃窗，窗外侧为两层，即活动上、下层的遮阳附件。东、西、北向窗为内侧普通中空玻璃窗，外侧遮阳为遮阳天窗和遮阳侧窗附件。所有遮阳附件只需满足一个参数，即它的阳光反射参数。那么，调节遮阳附件的角度，夏天或在需要遮阳时间段里，将它对准太阳，即能将太阳辐射反射回天空；而冬天，调整遮阳附件与窗垂直，同样利用它的反射特性，将太阳辐射的热和太阳光线反射至室内天花板，再反射至室内地板，用以调整室内温

度和自然光线。这样，既能符合中国人开窗的生活习惯，又能满足建筑节能的要求。下图为南向窗相片。



图 2.4 气候适应性南向窗（自拍）



图 2.5 气候适应性南向窗冬季反射阳光效果（自拍）

气候适应性窗的特点就是外遮阳附件只要玻璃的一个特性，即阳光反射性，它既能夏天遮阳，还能冬天反射热量和光线进室内，特别适合长江以南使用；而对内窗没有任何特别要求，只需保证一定的密封性，使用普通中空玻璃即可。这样，玻璃窗的价格即能大幅降低。还基本不影响窗的采光；由于遮阳附件的反光对准太阳，夏、春、秋天的光反射回天空，不会对附近建筑产生光污染；故也特别适合既有建筑改造，因只需在旧墙和旧窗上安装遮阳（反射）

附件。且价格低廉，制造容易，施工容易；

三、 室内舒适度调节系统

地下勘探资料表明，本学院大周边地区没有地下水，从地下 15 米到 70 米左右为石灰石岩层。这是有代表性（无地下水作冷热量交换）的地质条件。所以，采用“竖埋管 + 地下冷热源缓冲器（地表浅层水池） + 热回收换气技术 + 地板送风系统 + 智能控制系统”的集成方案，利用各自的优点进行互补，避免各自的缺点，是本项目解决室内舒适度调整的策略。

地下冷热源采出后，在我们所处地区，常年为 18-20 度的冷、热（循环水）源，实际上本身已能满足很大部分在夏、冬两季对室内舒适度调整要求不严格的建筑空间使用，特别是冬季采暖。再与使用热回收换气技术和地板送风系统进行集成，形成不使用热泵（压缩机）的建筑空间舒适度调整技术，把舒适度调整中最耗电的部分去掉，应用在建筑中全年对室内环境要求不是非常严格的场合。该策略不仅为城市所用，还能为农村和城镇的未来舒适度调整也可起到关键示范作用，解除对该地区城市、农村和城镇的部分建筑，对未来全年舒适度调整要使用化石燃料的后顾之忧。

室内舒适度调节系统，采用自循环回路通过地下竖埋管采集地下冷（热）源，将冷热源储存在储水池中，该储水池也可称为储能池，在建筑中，可由建筑中的消防水池完成此功能。另一自循环回路再将该储能池中的水（也是冷、热源）循环送到室内地板下表冷器，其冷（热）源再由新风系统的吹出的新风带进室内。新风系统再收集室内的废风，送进主动式动态空气墙，调节围护结构的气候适应性，提高保温、隔热性能，实现可再生能源梯级使用。新风去湿由新风机中特殊材料解决。地板送风系统由地下静压箱缓冲风压和风量。地板送风系统能耗是传统空调系统能耗的 66%，还可提高工作区空气品质。新风部分去湿由新风机解决，机内有特殊材料的过滤器，可以去掉一定程度的湿气，能进行一定程度的热交换。

新风机的新风进口可在室外或室内二层上部，新风出口在室内

地板风冷器下，新风出口风将温度带进室内。新风机污风进口则抽取室内一层顶部的空气，与新风进口的风进行热交换后，送入动态空气墙中的空气间层，增强围护结构的气候适应性。见图 2.6，图 2.7。



图 2.6 地板送风系统（自拍）



图 2.7 储能池（自拍）

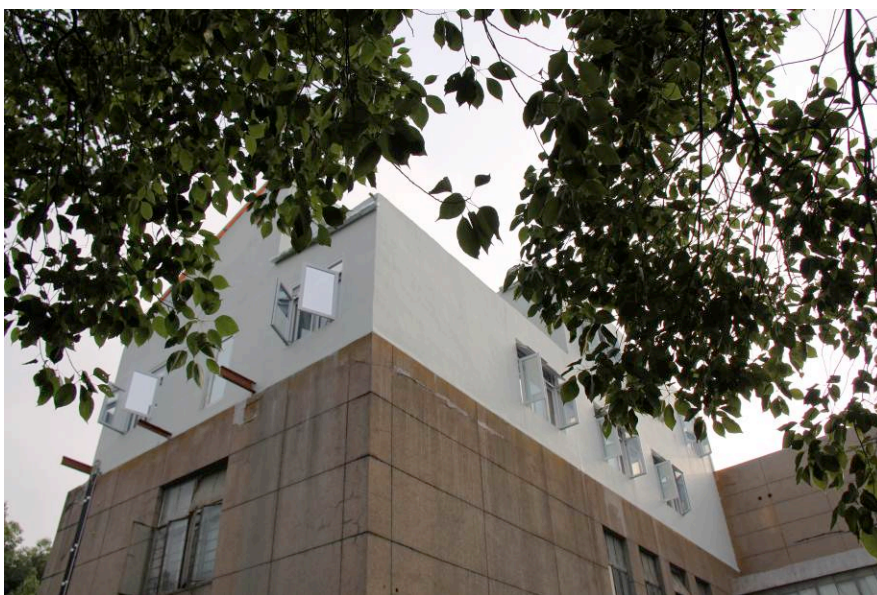
四、 太阳能建筑一体化

坡屋顶的角度经计算后，采用 23 度的坡度，以利更多的收集阳光。太阳能膜电池板与屋顶的空气间层的支撑节点结构为钢结构，屋顶间层的气流冷却太阳能板，提高太阳能板发电效率，主要解决

春季末期、夏季、秋季早期的发电效率问题。太阳能电池板温度超过一定温度后，发电效率下降。而本地区上述季节时间段内，特别是夏天，太阳直射下的温度，经实测，高达 **50-60** 度，致使在太阳光最丰富的季节，太阳能电池板发电效率较低。用排出室外的废风（温度大约在 **30-34** 度左右）去冷却太阳能电池板背面的部分。实现可再生能源梯级利用，还能适当调整太阳能电池板的发电效率，这也是本项目要解决的关键问题之一。

主动式动态空心墙和动态空气屋顶的出风口都是无动力屋顶风机。它一机三用，微弱风力即可旋转，形成机内负压，引导动态空气墙内和屋顶内的空气逸出，即利用了风力，也是‘热’烟囱，因为它是不锈钢材质，与下部材质形成温度差，也可起热烟囱作用，同样引导废气排出，见图 2.7。

建筑的二层北面，有一室外平台。平台栏杆将用由细铜管和铁翅片做成的空气冷水器完成（实际上是南方流行的太阳能热水器），在这里，空气冷水器中的循环水采集冬天和春天中空气中的冷源，然后循环到储能池中，再被循环水带到地层 **50** 米下的岩石中，争取实现空气和地下的冷源反季节储存、使用。建筑的东墙面和西墙面将安装太阳能热水器，其循环系统将与室内地板下风冷器的循环水连通。在冬天，若室内温度需要提升，而太阳能热水中的水温高于室内温度时，补充提高室内循环水温度。另外，也在夏末和秋季，送热源进储能池，循环储存进地下岩石，以备冬天使用。见下图。



图八 建筑东面预留太阳能热水器安装钢架和二楼北面小平台（自拍）

五、 建筑自动化部分

将对地下冷、热源部分的分、集水器上的温度和流速，以及地下水循环马达的变频调速进行监控；对储能池中水温进行采集；室内舒适度调节系统的水泵，风机进行马达的变频调速，循环水进行监控；室外冷空气采集系统，以及太阳能热水器的控制系统按照上两节所述功能进行监控。整个系统将形成完整的可再生能源利用的计算机控制理论和实际运行系统。

六、 实测结果

7.1 夏季运行状况

(1) 室内热环境

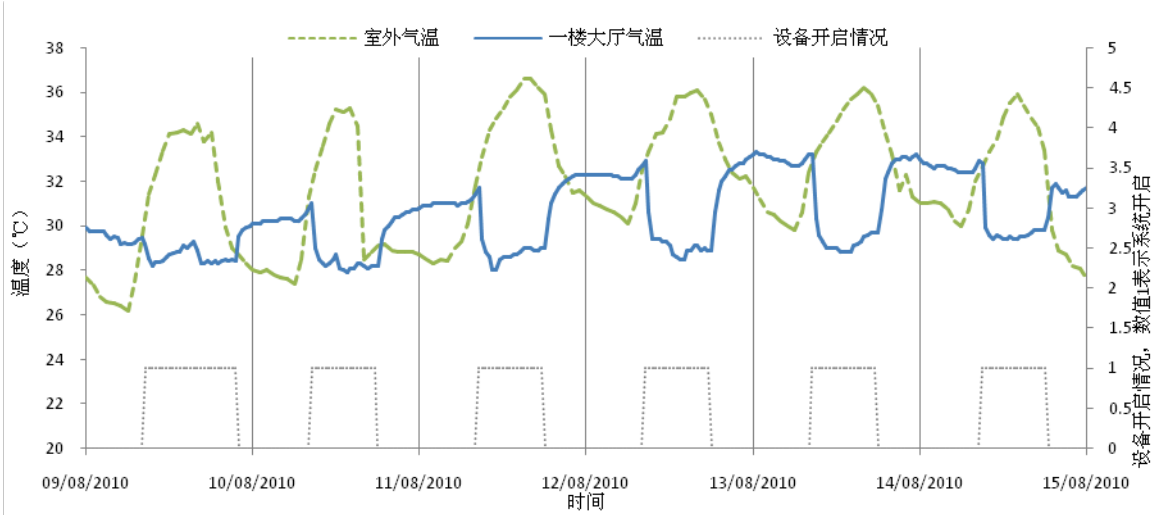
选取 2010 年 8 月 9 日凌晨至 15 日凌晨的六天时间来分析夏季系统开启时的室内热环境（图 7-1）。这六天内系统的地下水泵均一直开启，室内水泵及地板送风系统在人员工作时同时开启，开启时段见图 7-1a 中所示（10~12 日仅开启部分送风口）。

由图中可知，这几天均为晴天，室外太阳辐射非常强烈，正午时可达到 $800\text{W}/\text{m}^2$ 以上，给建筑形成很大的热负荷；白天的室外气温很高，11~13 日的最高最高气温都超过 36°C ，夜间气温也超过了

30℃，最高气温出现在下午 15 时左右，最低气温出现在凌晨 6 时日出之前；室外的湿度变化与温度变化规律基本相反，白天相对湿度随气温升高而降低，夜间随着气温降低而升高，平均湿度约 70%。

系统开启后室内测点温度迅速下降，经过一小时左右可以达到 29℃左右，随后室内气温略有上升的趋势，这主要是室外气温和太阳辐射的影响，以及后面要提到的水温变化的影响。送风系统关闭后室内气温迅速上升，夜间温度比较稳定，早上太阳升起后室内温度会逐渐上升，直至送风系统开启。由于示范建筑中没有除湿系统，系统开启时随着温度的降低，室内相对湿度约增大 10%左右，室内外的日平均湿度基本相等。

将室内外气温进行比较可以发现：系统开启时室内气温远低于室外气温，室外气温受太阳辐射的影响急剧升高，室内则由于地板送风系统的送风抵消了这部分影响，温度基本保持稳定。太阳落山后室外气温下降很快，至夜间 21 时左右室内外温度相等，随后室内气温高于室外，接近室外的日平均气温。第二天日出后室外气温上升，至系统开启时室内外气温又接近相等。



a)

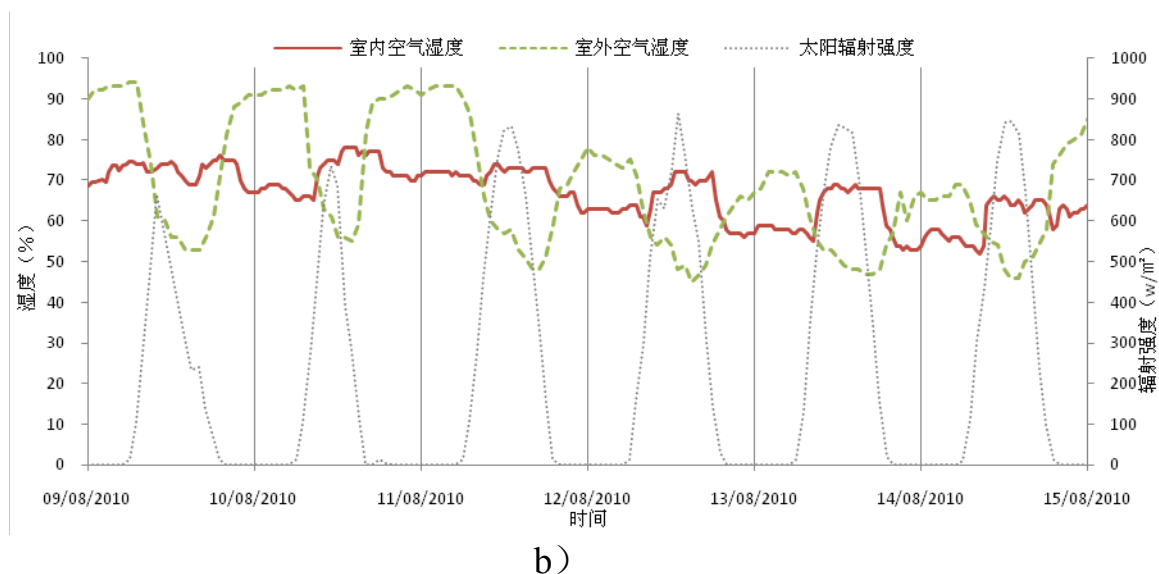


图 7-1 夏季大厅温湿度与室外环境参数

从上述分析可知，冬夏季集成系统开启时建筑室内热环境可以达到一定的效果，对于室内热环境要求不严格的建筑，可以达到设计要求。开启后温湿度达到稳定状态需 1 小时左右，随后室内温湿度相对稳定，但仍会受到太阳辐射及室外气温一定的影响。

(2) 围护结构温度

图 7-2 为南墙和南窗内外表面温度的变化情况（10~12 日期间测点所在风口未开启）。白天强烈的太阳辐射作用到墙体和窗的外表面，使其温度升高剧烈，在下午 14 时，南墙外表面温度达到最高值，平均在 47℃ 左右。南窗外表面与南墙外变化规律一致，最高温度高出墙外 2℃ 左右；在系统运行时，南墙内表面温度基本与室内温度的变化趋势保持一致，墙内外温差很大，可达到 17℃。南窗内表面则受到太阳辐射的影响，温度略有波动。夜间随着室外气温下降，21 时以后墙体和窗的外表面温度逐渐低于内表面，这会产生通过墙和窗从室内向室外的热流作用，此时由于窗户的传热系数较高，降温比墙体要快。

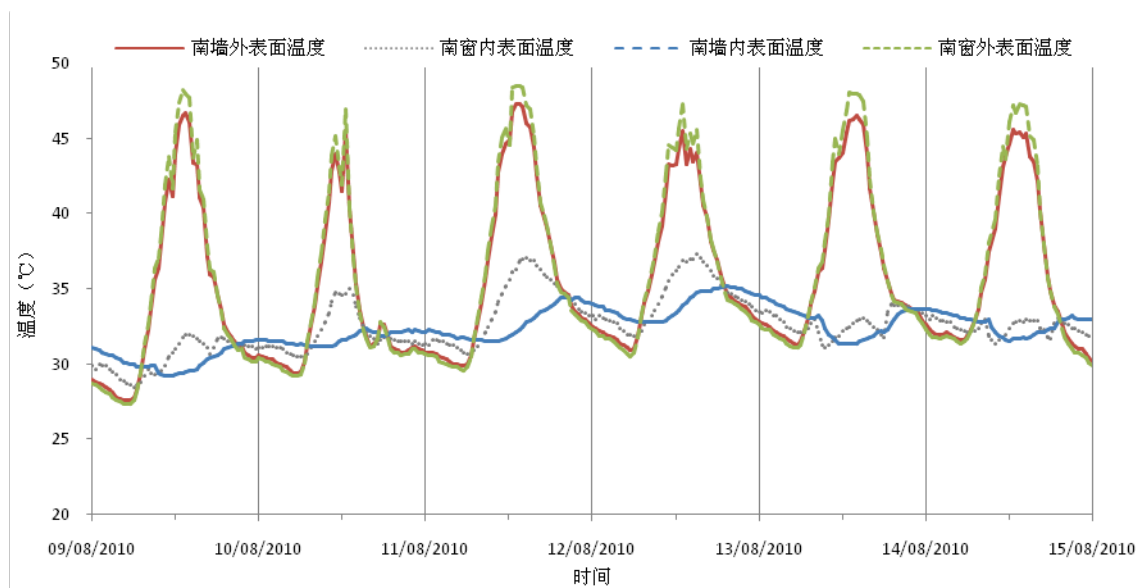


图 7-2 南墙和南窗内外表面温度

图 7-3 为围护结构外表面各朝向的温度变化情况。在各个朝向中斜屋面受到的太阳辐射量最大，且为玻璃材质的太阳能膜电池板，因此其白天温升也最快，在下午 14 时左右温度达到最高值。西墙外表面在上午受到的太阳辐射小，温升较慢；到下午由于受到太阳直射辐射的作用，温度加快，在下午 16 时左右达到最高值。北墙外表面位于太阳辐射的阴影区，温度最低而且变化较慢，最高气温出现在下午 15 时左右。因此，在系统运行的时间段内，通过围护结构的传热负荷情况是斜屋面>南墙面>西墙面>北墙面。

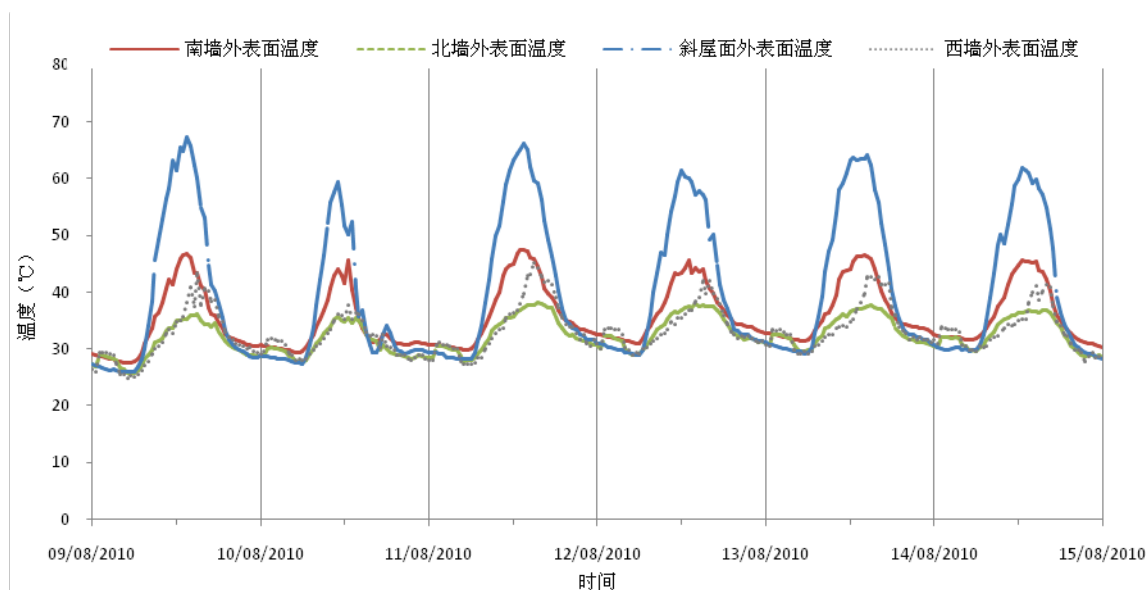


图 7-3 围护结构外表面温度

图 7-4 是围护结构内表面的温度变化情况，在系统运行时北墙内表面的温度最低，与室内温度变化的趋势一致。南墙由于热负荷较大，内表面温度高于北墙约 1℃。由于西墙内部没有设空气间层，其内表面温度受室外影响较大，在傍晚时可达到 37℃。斜屋面的传热负荷最大，内表面的温度最高，受室内设备开启的影响较小。

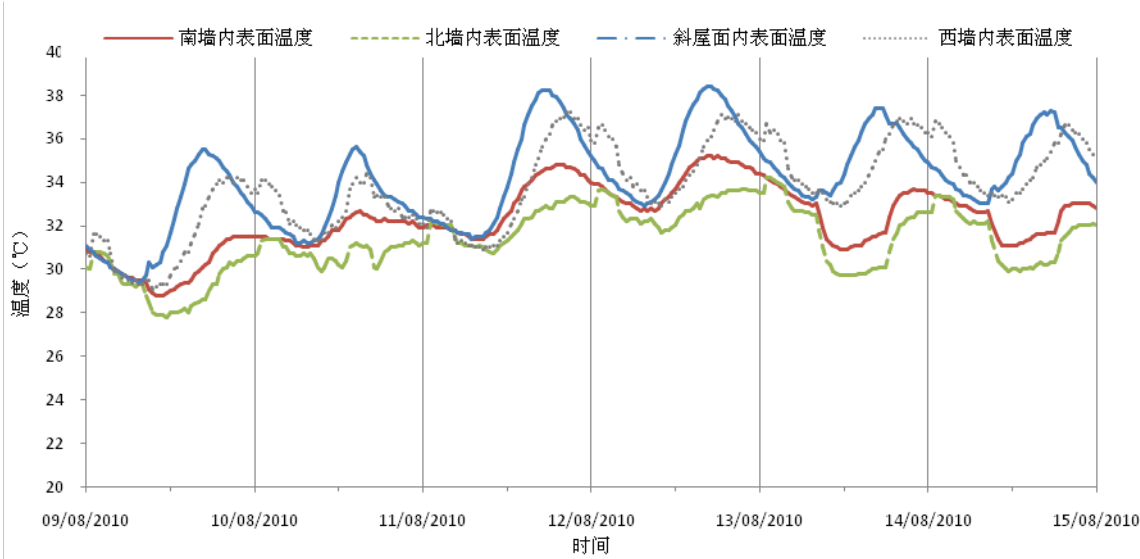


图 7-4 围护结构内表面温度

7.2 室内气温分布规律

地板送风系统是一种侧重于对室内局部热环境进行调节的送风方式，本节中对系统开启时室内温度分布的规律进行研究，在室内布设了多个测点，研究室内不同位置不同高度处的温度分布情况。在示范建筑中的办公室一中布点进行测量，包括风口处的测点和房间中部的测点，测点位置见 **Error! Reference source not found.**。冬季测试时间为 2011 年 1 月 2 日，夏季测试时间为 2010 年 8 月 4 日。

冬季的测点包括办公室一中的南 3#风口处 0.2m、1.5m、2.8m 高度的三个测点，房间正中的 0.2m、1.5m、2.8m 高度的三个测点，

以及二楼 4.5、5.8m 高度处的两个测点。从图 75 中可以看出，各测点由于位置的不同，系统开启时的温度变化有较大的差异，在相同高度处风口处测点的温度均高于房间中测点，房间中测点温度高于二楼测点；办公室一中的各测点的温度变化的速率较为接近，而二楼测点则温度升高较慢。在风口处随着高处的增加，温度的下降趋势较为明显，0.2m 处测点与 1.5m 处有 0.6℃左右的温差，1.5m 处测点与 2.8m 处测点有 0.4℃左右的温差。在房间中处不同高度测点的温度相差较小，依次是 1.5m 处测点温度>0.2m 处测点温度>2.8 m 处测点温度。二楼两个测点温度最低，受到热空气浮升力作用的影响，5.8m 处测点温度高于 4.5m 处测点。随着系统的运行，各测点的温差逐渐减小，系统关闭时各测点的温度逐渐相等。

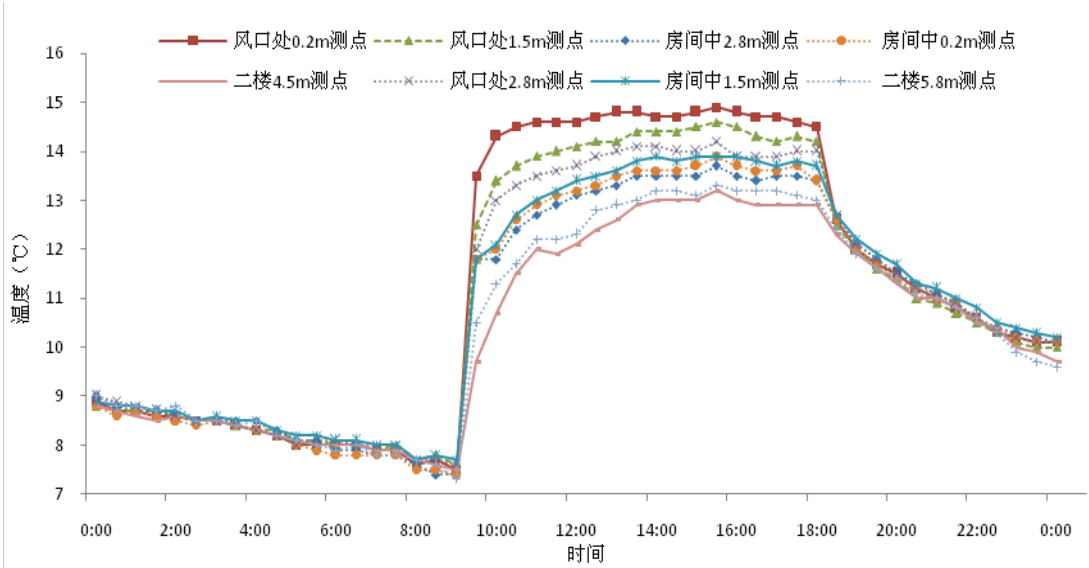


图 7-5 各测点温度对比——冬季

图 7-6 为夏季各测点温度的对比情况。夏季的测点较少，在办公室一的风口上设置一个测点，房间中部的 1.5m 高度处设置一个测点，大厅中间 1.5m 高处设置一个测点，二楼 4.5m 高处设置一个测点。从曲线图中可知，出风口处测点的温度最低，风口上的测点温度较房间中部测点低 0.5℃；由于大厅中间没有出风口，其测点温度较高，可达到 29℃左右；二楼温度很高，可达到 32℃左右。各测点

的温差较冬季大，气温分布不均匀的现象十分明显，即风口周围温度最低，离风口距离远的大厅中部温度较高，而随着热压作用产生的上升气流使得热空气集聚在二楼，温度最高。另外，随着系统的运行，各测点的温度均有逐渐升高的趋势。

综合冬、夏两季的实测数据可知，集成系统开启时示范建筑室内各处的气温分布较不均匀，由于地板送风口之间间距较大，室内气温以出风口为中心逐渐变化。由于系统的出风温度位于热舒适范围内，使得在出风口附近的热环境较为适宜，离出风口较远处热环境略差，而远离地板送风口且较高的建筑二楼空间热环境则较不理想，说明集成系统的下送风方式使得室内空间产生了一定的热力分层现象，具有以地板出风口为圆心的一定范围的热舒适区域。夏季的室内分层现象较为明显，在风速适当时，夏季出风口的冷空气集聚在室内空间下部；而在冬季时，由于热空气浮力的作用使得室内空气逐渐对流，室内各处的温差较小。

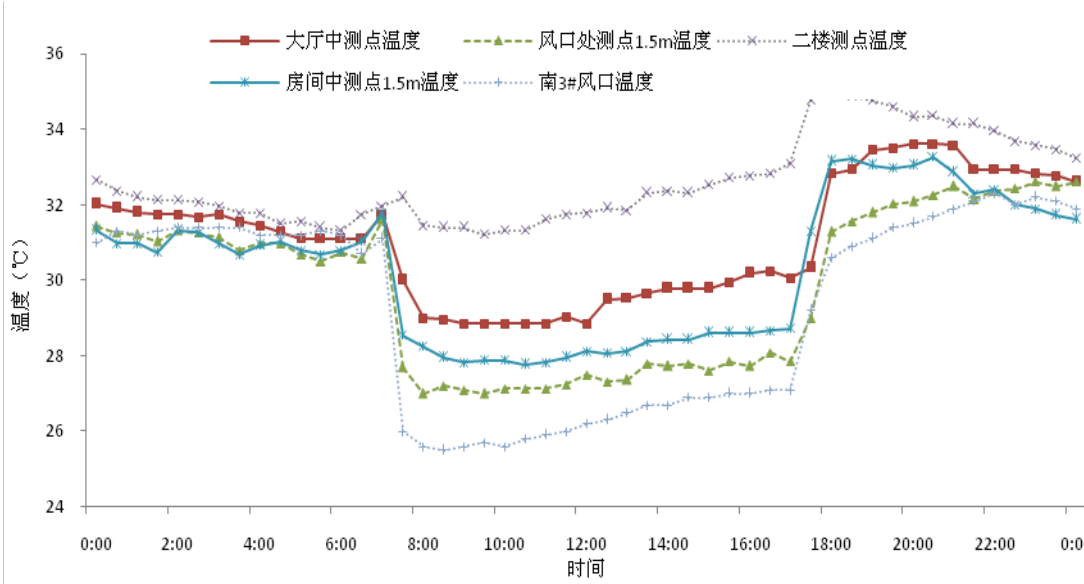


图 7-6 各测点温度对比——夏季

7.3 平均辐射温度的特点

建筑围护结构与室内的换热作用主要包括两个方面，通过辐射影响室内的平均辐射温度，以及通过接触面空气的对流作用影响附

近的空气温度。平均辐射温度（黑球温度）是指环境四周表面对人体辐射作用的平均温度，它取决于各表面的温度及人与表面间的相对位置关系，反映了建筑围护结构及设备的辐射作用对人体的影响。关于人体热舒适的相关研究表明：在达到热平衡状态时，对流换热占总散热量的 25—30%，辐射散热占 45—50%，呼吸和有感觉蒸发散热量占 25—30% 时，人体才能达到热舒适状态，可见平均辐射温度是室内环境舒适性的一个很重要的影响因素。建筑内的平均辐射温度可用黑球温度计测得。

集成系统中的动态通风墙体可以改善墙体的保温隔热性能，使得系统开启时墙体内表面夏季温度较低而冬季较高，对改善室内的辐射热环境有益。为了研究示范建筑室内辐射温度的特点，在实验中用黑球温度计进行了测量，并将示范建筑与空调建筑进行了对比以分析各自的特点。

(1) 黑球温度的变化规律

图 7-7 为冬季示范建筑室内的黑球温度与空气温度的比较。冬季时示范建筑室内的黑球温度略低于空气温度，其变化规律与气温变化一致。用空气温度减去黑球温度，得两者之间的差值，从图中可见：室内送风系统关闭时，差值平均约 0.5℃，在系统开启时，差值有所减小，至 0.3℃ 左右。

图 7-8 为围护结构内表面温度与黑球温度的比较。集成系统关闭时，室内黑球温度低于南墙内表面温度，而高于南窗内表面温度；系统开启后黑球温度升高较快，墙内表面温度的升高有一定的滞后；系统运行稳定后，墙内表面温度仍然继续上升，逐渐超过黑球温度，直至系统关闭；南窗内表面温度则受室外太阳辐射量和气

温等的影响较大；黑球温度的数值介于墙体和窗的内表面温度之间。

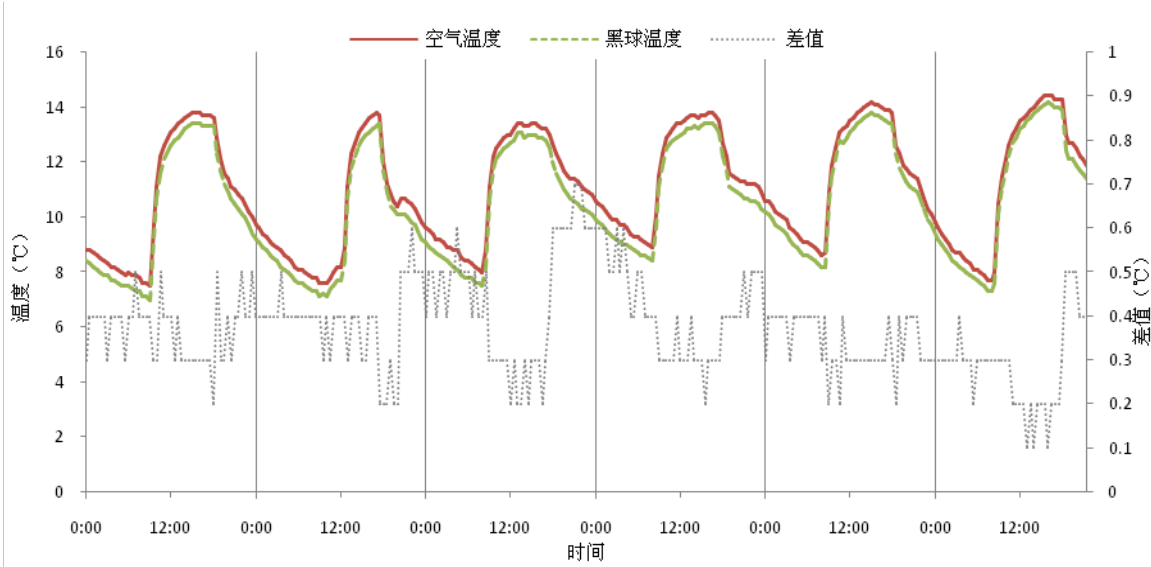


图 7-7 室内空气温度与黑球温度比较——冬季

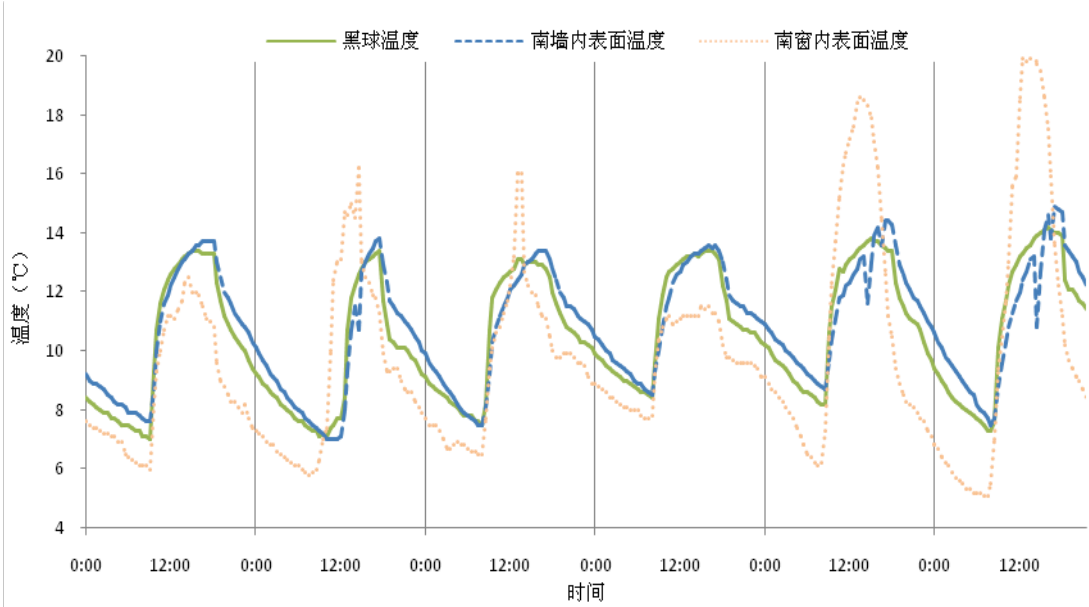


图 7-8 围护结构内表面温度与黑球温度的比较——冬季

图 7-959 为夏季空气温度和黑球温度的关系，实验测得的黑球温度略低于空气温度，系统关闭时差值约 0.6℃，至白天系统开启后减小至 0.2℃左右。由于夏季白天外围护结构受室外气温及太阳辐射作用，内表面温度往往高于室内气温，特别是在系统开启，室内温

度较低的情况下，其平均辐射温度与气温的差值会随着系统的开启而减小。

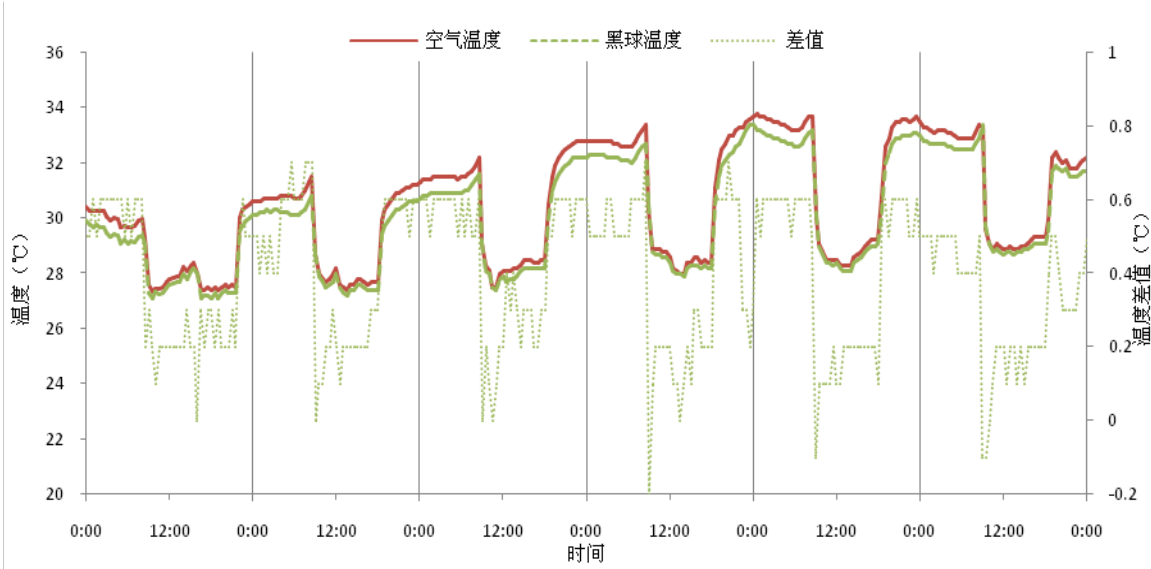


图 7-95 室内空气温度与黑球温度的比较——夏季

(2) 与空调建筑的比较

实验过程中对一栋空调建筑的室内热环境进行测量，分析其内部的空气温度和黑球温度变化规律。测试选择了建规学院的模型教室，于 2010 年 12 月 24 日~25 日进行测试，图 7-10 和图 7-11 为测试结果。

该教室的墙体保温性能良好，空调为立式柜机，测试的第一天和第二天开启空调，其中第二天的空调温度设置较高，第三天未开空调作为对比。

从图 7-10 中可见，空调开启时室内温度约经过一个半小时上升至设定温度，随后室内温度随着设定温度上下波动，这主要是由于空调中的温控机制，采取间歇式运行方式所致。通过计算室内的空气温度和辐射温度间的差值可以发现，空调关闭时差值约 0.6℃，空调开启时差值也随之加大，升高到 1.2℃左右。空调建筑的差值大于示范建筑，说明空调运行时该建筑的室内气温与围护结构表面温度有较大的温差。

图 7-11 为第一天室内各测点的温度变化曲线，可见在空调开启时南墙内表面温度比室内气温低 4.5℃左右，温差很大，此时黑球温度较低，围护结构表面对室内的活动人员产生冷辐射，影响了室内的舒适性。

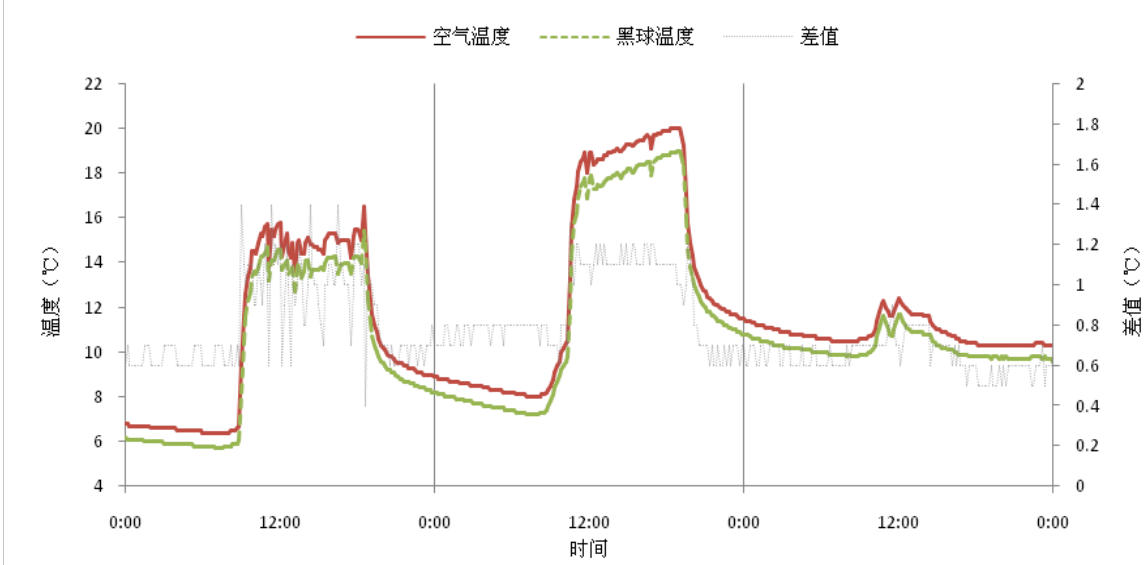


图 7-10 教室的空气温度与黑球温度

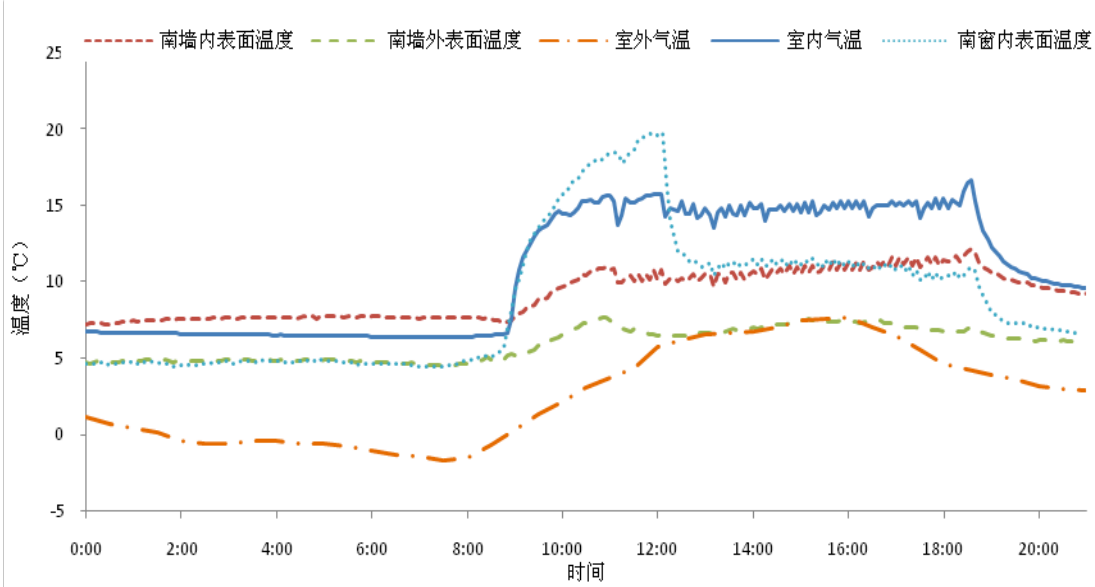


图 7-11 第一天空调开启时室内各测点温度变化

由此可见，与空调建筑相比，示范建筑设备开启时室内温度波动较少；并且示范建筑的墙体内表面温度与室温差距很小，使得空气温度和辐射温度保持一致，较好的改善了室内热环境。

7.4 系统运行时储能池水温的变化

图 7-12 是夏季工况下储能池中的水温随系统运行的变化情况，时间段为 2010 年 7 月 17 日至 8 月 4 日，这段时间室外气温高，系统开启比较频繁。图中的次纵坐标轴表示设备的运行情况，数值为 1 时表示室内水泵及送风系统开启，数值为 2 时表示地下水泵开启。水温受气温变化的影响不明显，而受设备运行的影响较为显著。将设备运行情况与水温的变化结合起来，可以分析系统运行时水温的变化规律以及地下冷热源系统的运行规律。从图中可以看出以下几个特点：

(1) 在地下水泵开启后，水温逐渐降低，降温的速率与储能池的初始水温有关，并随着水罐内的水温降低而逐渐变慢，呈幂函数关系变化。例如 7 月 17 日夜间和 20 日白天系统开启后，最初降温速率较快，第一个小时可以降温 1°C 左右，随着水罐温度的降低降温速率逐渐减慢，6 小时后每小时仅能降温 0.2°C ，经过一夜的运行水温平均可以降低 3°C 左右。室内水泵及送风系统开启时，水温温升较快，近似呈线性规律变化。

(2) 系统运行可以采取两种不同的方式。一种方式如 7 月 18 日和 19 日两天的设备运行方法，是在前一天晚上开启地下水泵，对储能池进行蓄能，白天开启室内水泵及送风系统，同时关闭地下水泵，利用储能池中的水调节室内热环境。即地下水泵和室内水泵单独开启的运行方式。这种方式在室外气温高、新风热负荷较大时，如果长时间运行会使得水温过高，如 7 月 19 日白天运行十个小时后，储能池水温从 22°C 升高到 28°C ，升高了 6°C ，此时的水温过高，已经不能用于室内热环境调节了。

另一种为地下水泵一直开启，室内水泵间歇开启的运行方式，七月下旬以后的大部分运行工况都采取这种方法，这种方法可以将

储能池中蓄积的热量及时转移至地下，避免水温过高，例如 7 月 30 日地下水泵不关闭，经过白天 10 小时运行，水温上升了 3℃左右，晚上继续开启地下水泵，至第二天白天可基本上恢复至运行前的水温。这种方法对于室内热环境调节有利，但同时也延长了水泵的运行时间，增加了水泵的电耗。

(3) 采取间歇使用的方法，长期运行时系统基本能保持换热平衡，温度在 23.5℃左右上下波动，最低水温保持在 22℃左右，这说明在地埋管换热器附近的地温能够维持在较为稳定的温度，达到了热交换的动态平衡。

设备的间歇运行对于地下冷热源系统十分重要，长期高负荷连续运行会将大量的热量转移至地下，如果转移至地下的热量大于地埋管换热器向周边土壤的散热量，就会使地埋管换热器及周边土壤温度发生变化，当温度升高到一定程度时，就会使得储能池水温过高，从而使系统失去热环境调节的功能。图 7-13 为 2010 年 8 月 2 日和 3 日两天系统连续运行对储能池水温的影响，第一天下午 18:30 关闭示范建筑内的部分出风口，留两个出风口继续运行，至第二天上午 8:30 开启室内全部的十个出风口。从图中可知，第一天在储能池水温 22℃时开启室内水泵及送风系统，经过十小时的全负荷运行使水温升高至 26.2℃；夜间部分负荷运行时，水温仅下降了 1.6℃，使得第二天出风口气温超过 26℃，热环境调节效果不佳；第二天中午送风系统关闭两个小时，使得水温略有降低，缓和了其温度升高的趋势。总体看来，经过两天的运行，储能池水温上升了 2℃，影响了后期的使用。因此，在系统白天高负荷运行后，夜间应关闭室内水泵使水罐中的水温得到较快的恢复。

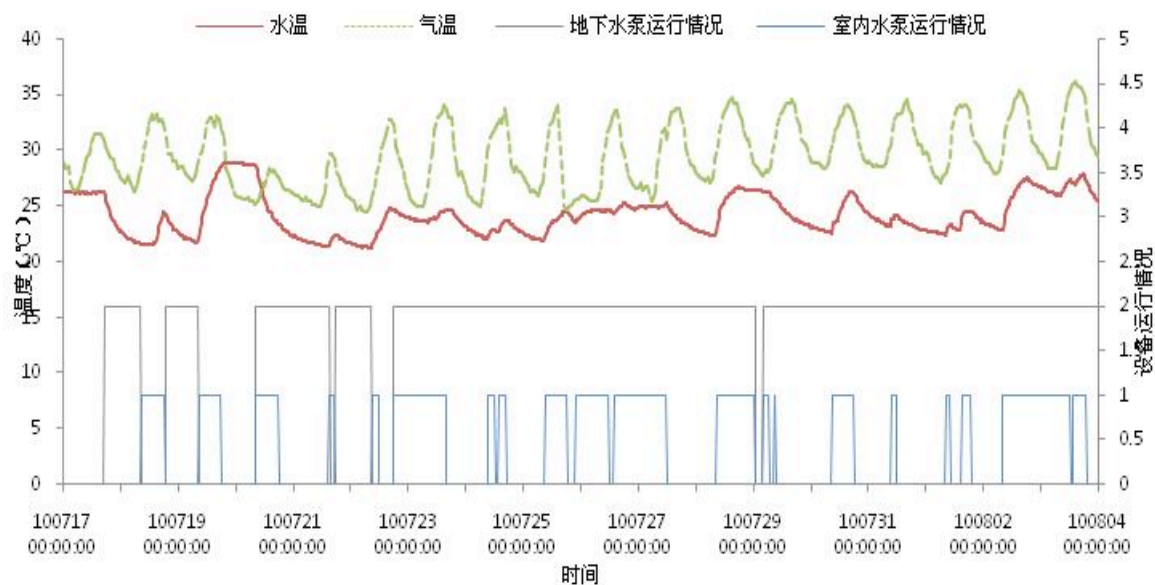


图 7-12 储能池水温随系统运行的变化

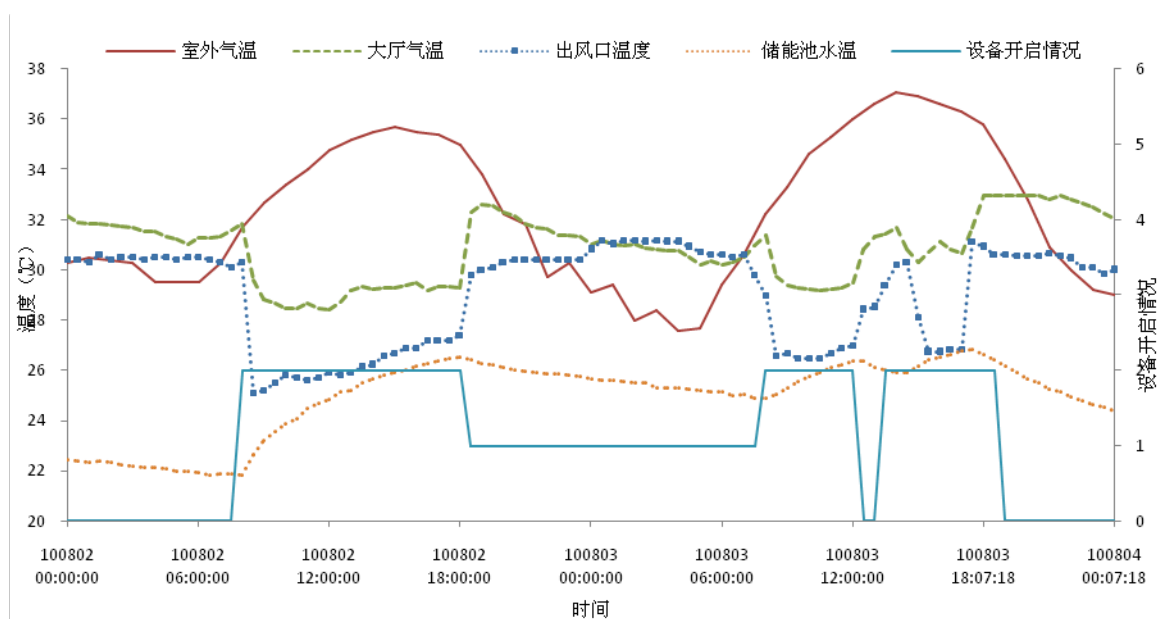


图 7-13 系统连续运行对储能池水温的影响

7.5 系统能耗

(1) 示范建筑中集成系统的能耗

示范建筑的能耗主要包括集成系统运行能耗、照明能耗、电脑及其它设备能耗等几个方面，建筑内用一块电表单独记录了集成系统的运行电耗，系统中的主要用能设备有：地下水泵和室内水泵，室内出风口处的风机盘管（共 10 台，高档送风量为 $900 \text{ m}^3/\text{h}$ ），热

回收风机一台（风量为 2000 m³/h），鼓风机两台（用于增加墙内送风量，风量为 750 m³/h）。图 7-14614 为集成系统的耗电量情况，从中可知集成系统开启时日均耗电量为 50 度左右(平均每天开启系统 10 小时)。

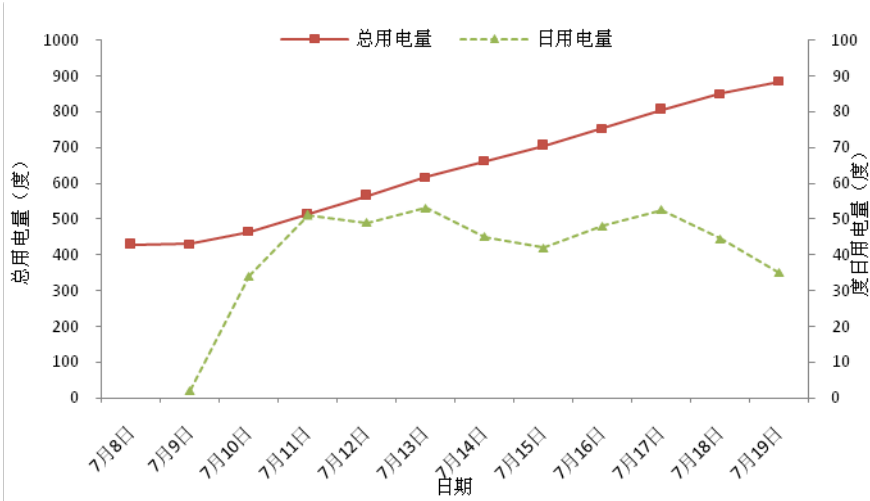


图 7-146 系统耗电量

(2) 集成系统的能效比

由于示范建筑中的室内送风采用全新风系统，系统运行时通过水系统的循环将地下的冷热量转移到新风中送入室内，忽略换热效率等因素的影响，可近似认为系统采集的地下冷热量等于新风的热量变化。因此通过计算室内的送风温度与室外空气的温差以及总的送风量，可以计算出转移到建筑室内的地下冷热量，进而估算出系统的能效比。

图 7-15 和图 7-16 分别为冬季和夏季室内出风口新风与室外气温间的温差情况，可见冬季的温差远高于夏季温差，计算得出冬季平均温差为 14.7℃，夏季平均温差为 8.4℃。

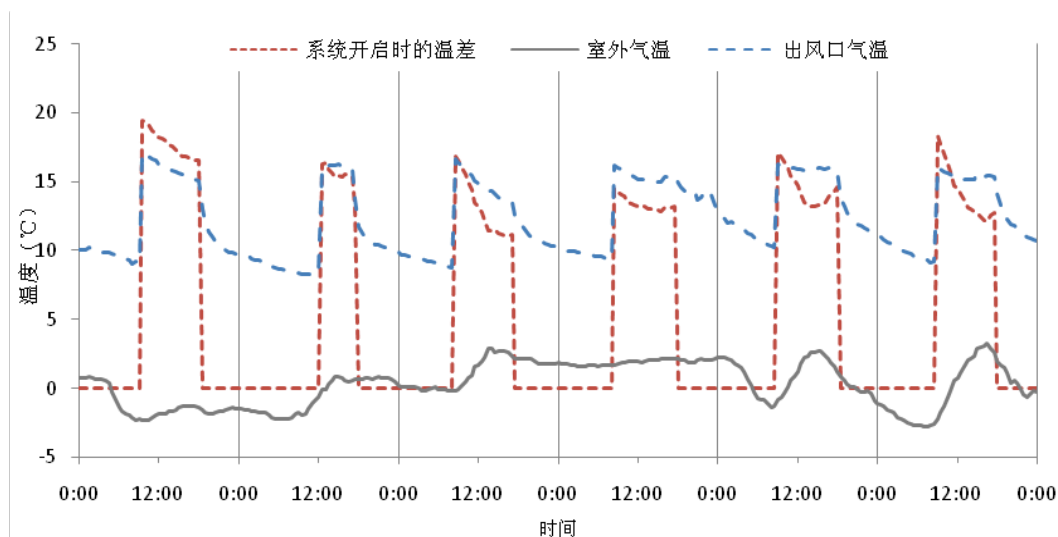


图 7-15 出风口与室外气温间的温差——冬季

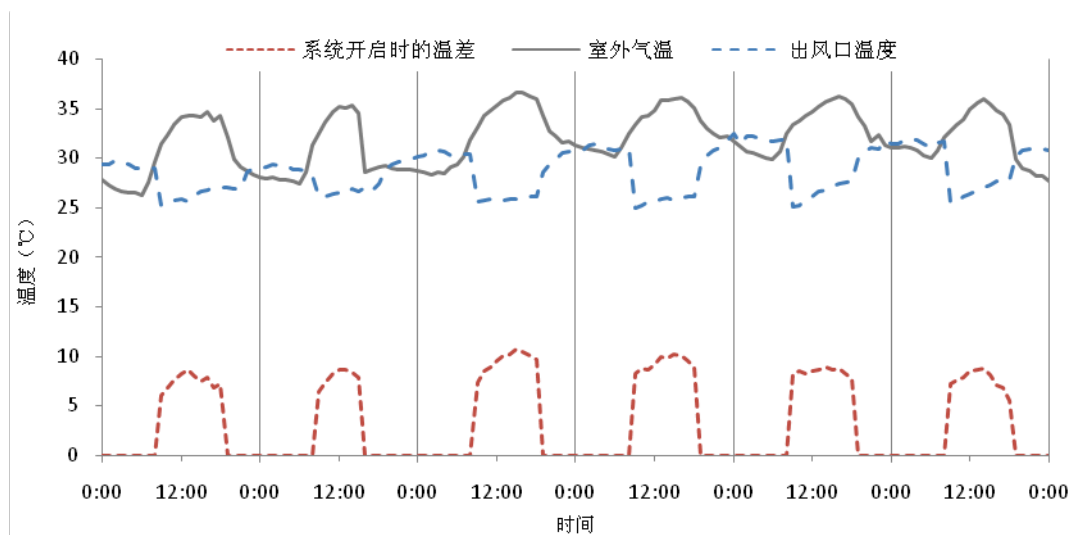


图 7-167 出风口与室外气温间的温差——夏季

根据 $Q = C_m \Delta t = C \rho_{\text{空气}} V_{\text{新风}} \Delta t_{\text{新风}}$ ，可计算出冬季的系统制热功率为 47.8KW，夏季的系统制冷功率为 26.2KW。如果按系统每天运行十小时，并且根据示范建筑的平均电耗进行估算，可得出系统的冬季能效比为 9.56，夏季能效比为 5.24，能效比较高（不考虑空气湿度变化对能耗的影响）。需注意的是，上述计算只是为了了解集成系统的能耗特点所做的简要估算。

7.6 实测小结

本章基于华中科技大学建筑与城市规划学院智能建筑研究所的研究平台，对集成集成系统的低能耗建筑热环境进行了实测研究，主要结论如下：

(1) 基地所在的武汉市的气候具有双向性的特点，平均气温最低的月份为1月和12月，平均气温最高的月份为7月和8月；夏季6至9月的相对湿度较高，11月至2月的相对湿度较低。

(2) 集成系统对示范建筑热环境的调节能够满足示范建筑对室内热环境要求不严格的建筑功能目标；在系统开启后室内温度迅速上升，经过约一个小时较快的温度变化后，逐渐趋于平稳，太阳辐射及室外气温对室内气温变化有一定的影响；与非空间教室对比可知集成系统开启时室内热环境的稳定性较好。

(3) 随着系统的运行，储能池中水温的变化使得室内出风口的温度随之改变；系统开启时，室内出水管壁温低于进水管壁处 1.5°C 左右，随着系统的运行，进出水管的管壁温差变小；室内排风口温度变化与室内气温趋于一致；随着系统的运行，空气间层内的气温逐渐上升，但它的变化趋势与排风口气温相比有一定的滞后性。

(4) 建筑围护结构内外表面的温度情况，通风效果好的南北墙的内表面温度与室内温度变化一致，未设空气间层的西墙以及热负荷最大的斜屋面其内表面温度变化受室内设备开启的影响较小；夏季通过围护结构的传热负荷情况是斜屋面 $>$ 南墙面 $>$ 西墙面 $>$ 北墙面。

(5) 集成系统的下送风方式能使室内空间产生一定的温度分层现象，具有以地板出风口为中心的一定范围的热舒适区域。送风口附近的热环境较为适宜，离送风口较远处热环境略差，而远离地

板送风口且较高的建筑二楼空间热环境则较不理想。夏季的室内分层现象较为明显，在风速适当时，夏季出风口的冷空气集聚在室内空间下部；而在冬季时，由于热空气浮力的作用使得室内空气逐渐对流，室内各处的温差较小。

(6) 冬季时示范建筑室内的黑球温度略低于空气温度，其变化规律与气温变化一致；在集成系统开启时，黑球温度与空气温度间的差值减小；空调建筑的差值大于示范建筑，说明空调运行时该建筑室内气温与围护结构表面有较大的温差，而动态通风墙体使得示范建筑室内的空气温度与辐射温度较为接近，室内热环境得到改善。

(7) 系统运行可以采取两种不同的方式，分别是地下水泵和室内水泵交替开启，以及地下水泵一直开启、室内水泵间歇开启。采取间歇使用的方法，长期运行时系统基本能保持换热平衡，温度在 23.5°C 左右上下波动，最低水温保持在 22°C 左右。设备的间歇运行对于地下冷热源系统十分重要，在系统白天高负荷运行后，夜间应关闭室内水泵使水罐中的水温得到较快的恢复。

(8) 集成系统开启时日均耗电量为 50 度左右；通过计算室内的送风温度与室外空气的温差以及总的送风量，可计算出转移到室内的地下冷热量；经过简要估算得出系统在冬季能效比为 9.56，夏季能效比为 5.24，高于普通地源热泵系统。