

# 夏热冬冷区太阳能转轮除湿空调系统模拟分析

王宏伟,董佳榕,李旭林,任昊

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 以夏热冬冷地区南京市某办公建筑为例,设计一种与土壤源热泵技术相结合的新型太阳能转轮除湿空调系统,以达到舒适并节能环保的要求.方法 通过应用 TRNSYS 软件建立子系统模块,然后建立太阳能转轮除湿空调系统以及常规热泵空调系统仿真模型,对系统各设备能耗、热泵机组性能及太阳能转轮除湿空调系统的重要部件的性能进行模拟;通过太阳能作为再生能源时提供的热量、除湿转轮的除湿量和全热换热器交换的湿量,分析系统运行效果;采用 Airpak 软件对室内温湿度进行模拟,分析太阳能转轮除湿空调系统实现室内舒适度效果;并对太阳能转轮除湿空调系统及常规热泵空调系统进行经济性 & 环保性分析.结果 太阳能转轮除湿空调系统全年能耗相对常规热泵空调系统节省能耗 29.4%,并且可以通过全热换热器与除湿转轮基本实现对南京地区建筑湿负荷的处理,进而减小热泵制冷能耗.结论 太阳能转轮除湿空调系统对环境污染小,节能环保,其应用更具有可行性与长远性.

**关键词** 太阳能;转轮除湿;TRNSYS;应用可行性;节能环保

中图分类号 TU831.3

文献标志码 A

## Simulation and Analysis of Solar Desiccant Air-conditioning in Hot Summer and Cold Winter Regions

WANG Hongwei, DONG Jiarong, LI Xulin, REN Hao

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To meet the requirement of comfort, energy conservation and environment protection, this paper proposed a solar desiccant air-conditioning system and model conventional heat pump system based on TRNSYS to establish subsystem module, taking a Nanjing building as an example, which is in hot-summer and cold-winter zone to design a solar wheel dehumidification air-conditioning system combined with coil source heat pump technology. Through the simulation of the energy consumption of device system, the performance of heat pump and the performance of comfort parts in solar wheel dehumidification air-conditioning system was analyzed and applied Airpark to simulate indoor temperature and humidity and analyze the system's effect of indoor comfort level. And we analyze the economy and environment protection of the solar desiccant air-conditioning

收稿日期:2018-04-08

基金项目:国家重点研发计划资助(2017YFB0604000)

作者简介:王宏伟(1964—),女,教授,博士,主要从事可再生能源利用技术方面研究.

system and the conventional heat pump system. The results show that the annual energy consumption of the system is 29.4% less than the conventional heat pump air conditioning. It can basically realize the conduction of building moisture load in Nanjing area so that reduce the cooling energy of heat pump system. The conclusion is that the solar desiccant air-conditioning system can reduce pollution,save energy and protect environment. Its application is more feasible and long-term nature.

**Key words:** solar energy ; desiccant wheel; TRNSYS ; application feasibility ; energy saving and environmental protection

伴随着能源的飞速消耗,带来了一系列的环境问题,如全球温度升高、空气污染、水环境污染、水资源短缺等问题<sup>[1]</sup>. 据统计,2010 年能源在建筑中的消费总量占能源消费总量接近 30%<sup>[2]</sup>. 因此,为了改善上述出现的问题,我国制定了可持续发展的战略方针,寻求能源的节约方式,并且找到可替代的无污染的环保能源. 太阳能、风能、海洋能等新能源出现,并在未来的发展中,占据了越来越重要的位置<sup>[3-6]</sup>. 太阳能作为清洁且存储量大的可再生能源,既可以减少污染物的排放,又在一定程度上可以减少空调系统中压缩机等的使用,为缓解能源危机以及环境污染问题开辟了新的道路,开发和推广利用太阳能资源对维持与改善人类生态环境意义重大<sup>[7-8]</sup>.

除湿转轮系统可以利用除湿材料对空气中的水蒸气进行吸附,进而可以解决常规空调系统中无法解决利用常温除湿甚至低温除湿就可以解决的问题. Pennington 于 1955 年申请除湿空调系统的第一个相关专利,提出了第一个转轮除湿空调的循环系统,即 Pennington 循环<sup>[9]</sup>. 随后 Dunkle 提出的 Dunkle 循环在 Pennington 基础上添加了一个转轮换热器使得除湿转轮进行再生<sup>[10]</sup>. H. M. HENNING 等<sup>[11]</sup>利用不同的类比分析法分析了转轮除湿过程中的热质交换部分并且预测了硅胶除湿转轮的性能. 大量学者对太阳能转轮除湿空调系统的影响因素进行了计算模拟,得出除湿转轮更加适合于湿负荷较大的南方地区,且送入除湿转轮的温度较低的情况下,节能效果更好的结论<sup>[12-13]</sup>. 近年来,除湿空调系统已经成为了一个研究热

点. 其他除湿系统的研究,杨兴林等<sup>[14]</sup>对绝热逆流除湿器的传质以及传热过程进行了试验及模拟研究;魏皖等<sup>[15]</sup>对现有调温除湿机性能进行了分析,并提出了节能优化方案;龚永奇等<sup>[16]</sup>对冷凝除湿系统和固体除湿系统的能耗进行了对比分析. 基于此,笔者针对除湿转轮技术中所需再生能耗较大的特点,设计了再生能源太阳能与热泵相结合的转轮除湿空调系统,并在能耗、机组性能以及系统的部件性能等运行特性以及系舒适性、经济性和环保性等方面进行了模拟研究,验证了系统的可行性.

## 1 系统设计

太阳能转轮除湿空调系统主要包括太阳能再生系统、除湿系统和热泵系统 3 个子系统,系统原理图如图 1 所示.

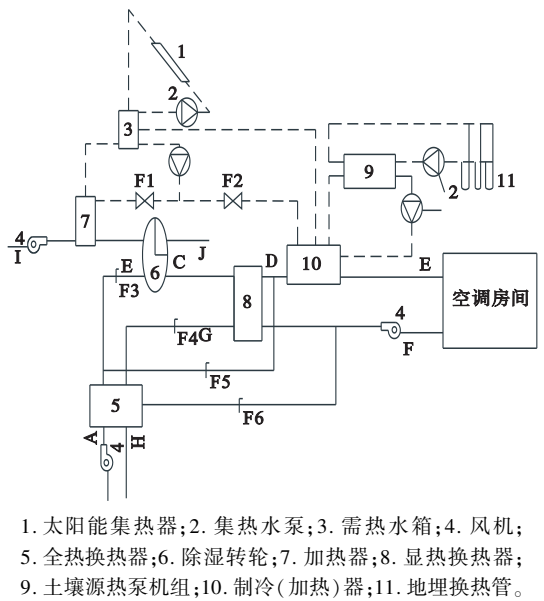


图 1 太阳能转轮除湿空调新风系统运行原理图

Fig. 1 Solar desiccant air conditioning system schematic in summer



制系统连接,负荷输入、输出模块以及其他的辅助模块进行连接构成了整个系统。

2.2 建立常规热泵空调系统仿真模型

热泵空调系统只包含热泵子系统、全热交换器,无除湿子系统及太阳能再生子系统,其余设置基本相同,模型图如图4所示。

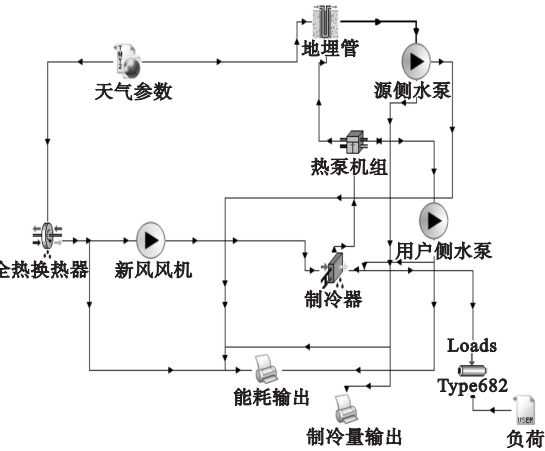


图4 常规热泵空调系统仿真模型  
Fig. 4 Heat system simulation model

3 系统的动态模拟分析

3.1 系统能耗对比分析

利用 TRNSYS 软件建立太阳能转轮除湿空调系统与常规热泵空调系统的仿真模型,模拟分析两个系统的运行能耗,具体数据如表1所示.由表1可知,相对于风机,由于太阳能转轮除湿空调系统夏季存在除湿轮转的再生,其能耗要比热泵空调系统的能耗有所增加,这是由于太阳能转轮除湿空调系统在夏季由于存在除湿轮转的再生,风机能耗多了再生风机能耗造成的。

对于热泵机组的能耗,在夏季,由于太阳能转轮除湿空调系统实现了对建筑湿湿度的独立控制,其热泵能耗要低于常规热泵空调系统的能耗;而冬季,由于供热可以由太阳能直接提供,且南京的气候条件决定南京冬季的热负荷较小,因此太阳能转轮除湿空调系

表1 系统能耗对比

Table 1 The comparison of system energy consumption				kW·h
系统	风机能耗	热泵能耗	水泵能耗	总能耗
太阳能转轮除湿空调系统	7 365.67	25 217.06	14 844.52	47 427.25
常规热泵空调系统	6 815.00	49 485.07	10 909.00	67 209.07

统中的热泵机组能耗相比于常规热泵空调系统中的热泵机组能耗可以降低约 1/2。

对于水泵的能耗,在太阳能转轮除湿空调系统中,夏季,太阳能再生子系统为除湿材料的再生提供热量,集热水泵则保障该系统的正常运行;而在冬季,由于建筑内所需要的热量由太阳能系统与热泵系统共同提供,且由于南京地区的热负荷较小,因此,在冬季水泵的能耗较大.比较两系统中的水泵能耗,呈现出太阳能转轮除湿空调系统的水泵能耗远大于常规热泵空调系统中的水泵能耗。

两系统的运行总能耗是由系统中各个部分的设备能耗决定的,因此计算所得两个系

统的总能耗可以得到太阳能转轮除湿空调系统的总能耗远小于常规热泵空调系统的总能耗,约节能 19 781.82 kW·h,约节能 29.4%。由对比可以看出,在能耗方面,太阳能转轮除湿空调系统要优于常规热泵空调系统,且运行较为稳定。

3.2 系统热泵性能对比

对太阳能转轮除湿空调系统及常规热泵空调系统进行模拟,得到了两系统在运行时热泵机组的性能参数,进而对两系统中热泵机组的制冷性能系数(COP)进行计算.热泵机组的COP指的是运行期间机组制冷量与耗电量的比值,计算对比结果如表2所示。

表 2 两系统热泵性能对比

Table 2 Pump performance comparison of the two systems

系统分类	制冷量/kW	耗电量/kW	COP
太阳能转轮除湿空调系统	76 607.70	16 384.53	4.68
常规热泵空调系统	146 085.81	31 820.00	4.59

通过对两系统的性能对比,可以看出太阳能转轮除湿空调系统中热泵机组的COP要略大于常规热泵空调系统中热泵机组的COP,进而可以看出太阳能转轮除湿空调系统具有一定的优越性.

3.3 太阳能转轮除湿空调系统主要部件性能分析

3.3.1 太阳能再生供热量

将太阳能作为再生能源所提供的能量进行整理(见图5).由图可以看出,太阳能在8月份提供的能量最多,在6月份提供的最少.太阳能提供的能量在6月份大约15 882.05 MJ,7月份为17 590.84 MJ,8月份为19 244.61 MJ,9月份为16 430.4 MJ.经计算可得,太阳能作为除湿转轮的再生能源可以为转轮在制冷季节内提供能量大约69 147.89 MJ.如果这部分能源采用电能供给,则转轮除湿空调系统的能耗就要多消耗至少69 147.89 MJ的电能,会给转轮除湿空调系统造成很大的能源消耗,对比两种转轮除湿空调系统可得,在夏季空调运行期间,采用太阳能做再生能源的转轮除湿空调系统要比采用电能做再生能源的转轮除湿空调系统节约大约34%.

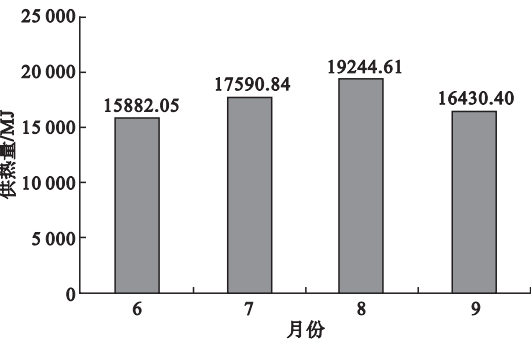


图 5 太阳能的逐月能量供应

Fig. 5 Solar energy supply month by month

3.3.2 除湿转轮除湿量

太阳能转轮除湿空调系统的核心部件为除湿转轮,除湿转轮的除湿量大小决定着除湿子系统能否顺利进行.图6为除湿转轮逐月除湿量的模拟结果,从图中可以看出在该系统中,8月份的除湿量最大,这是因为8月份南京的平均含湿量最大,而9月份与6月份除湿量基本持平,则是由于9月份南京的温度下降.经模拟可得到除湿量在6月份为1.47 kg/kg,7月份为1.87 kg/kg,8月份可达到2.07 kg/kg,9月份为1.50 kg/kg.在除湿转轮的工作时间内,除湿量可达到6.91 kg/kg.

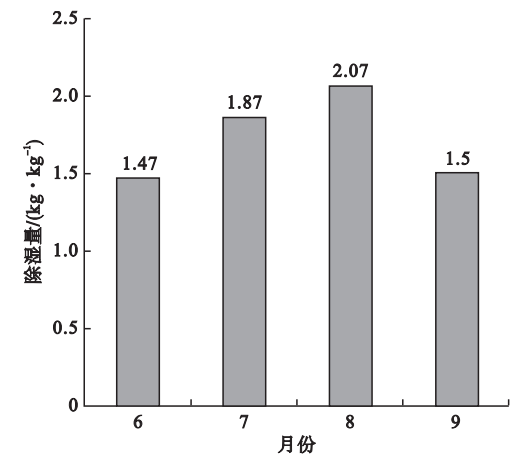


图 6 系统除湿量

Fig. 6 System dehumidification

4 室内舒适度模拟分析

系统运行是否良好主要通过室内人员的舒适性进行比较分析,设计规范中对舒适性主要通过对温度与湿度的感知程度进行比较分析.因此,在研究中,运用Airpak软件对室内温度场与湿度场进行了模拟分析,并与在自然通风状态下室内温度场与湿度场进行比较,分析探究室内舒适度.



4.1 室内温度场模拟

夏季太阳能转轮除湿空调系统运行下房间温度场分布如图7所示,从图中可以看出,在夏季空调运行状态下,房间整体可以达到26℃左右,温度处在舒适区间内.温度场中,靠近外窗的温度较高,能达到27℃左右;人员活动区域则温度相对较高,维持在26~

27℃,这是由于人体自身散热且人员工作时所使用的计算机散热较大造成的;日光灯区域由于日光灯散热,区域温度相对偏高,靠近内墙的区域,由于人员活动较少,分布散热的用电装置较少,温度相对较低,大约在25~26℃,室内整体处于相对较为舒适的范围内.

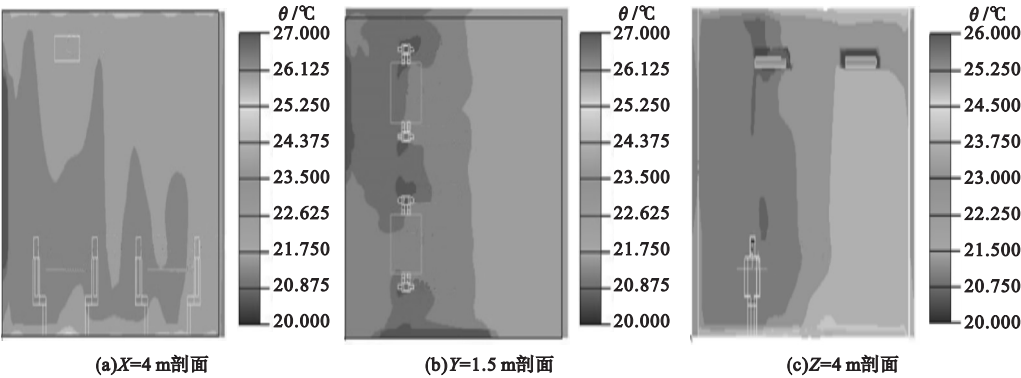


图7 夏季太阳能转轮除湿空调系统运行下房间温度场分布

Fig.7 Room temperature field distribution under the solar wheel dehumidification air-conditioning system in summer

图8为夏季自然通风下的室内温度场情况,可以看出,室内整体处于30~32℃,超过规范所规定的舒适度范围.由两种情况下是

内温度场分布情况可以看出太阳能转轮除湿空调系统达到室内温度设计要求,并且分布较为均匀.

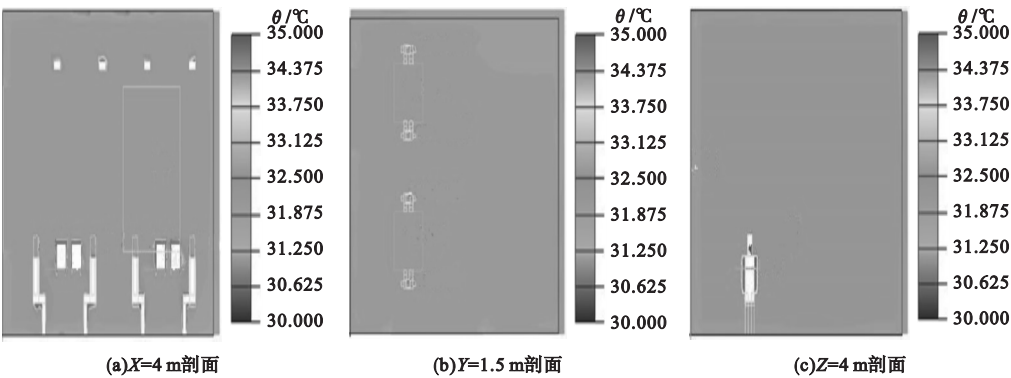


图8 夏季自然通风下房间温度场分布

Fig.8 Room temperature field distribution under natural ventilation in summer

冬季太阳能转轮除湿空调系统运行下房间温度场分布如图9所示,从图中可以看出,在冬季空调运行状态下,房间整体可以达到20℃左右,温度处在舒适区间内.温度场中,靠近外窗的温度较低,维持在15~16℃,人员活动范围内温度相对较高,维持在18~20

℃,室内整体温度分布较为均匀,且大体在20℃,达到舒适度所要求的温度范围.在模拟中可以看出,温度场中的数据都在不同空间数值不同,整个温度场呈现出较均匀分布趋势.

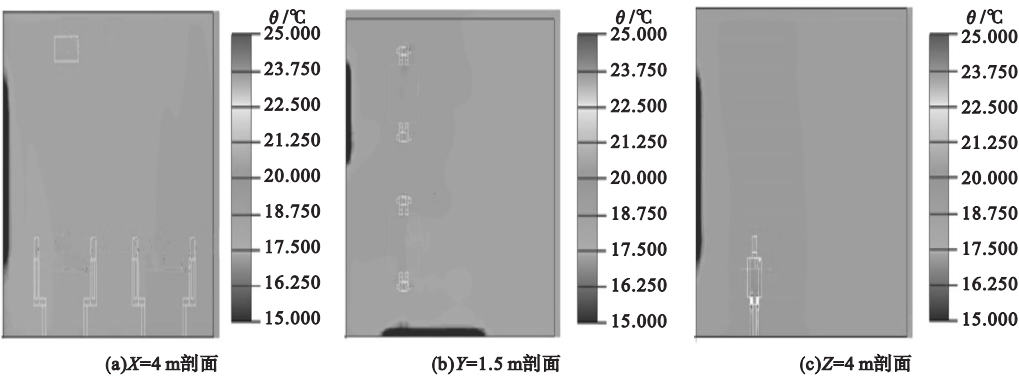


图9 冬季太阳轮除湿空调系统运行下房间温度场分布

Fig. 9 Room temperature field distribution under the solar wheel dehumidification air-conditioning system in winter

自然通风下房间的温度场分布如图 10 所示,室内温度则处于一个相对较低的范围内,则大致在 5 ~ 7 °C ,南京地区处于夏热冬冷地区,则冬天不存在集中采暖,在这种通风状态下,室内较为寒冷,不能满足舒适度要求。

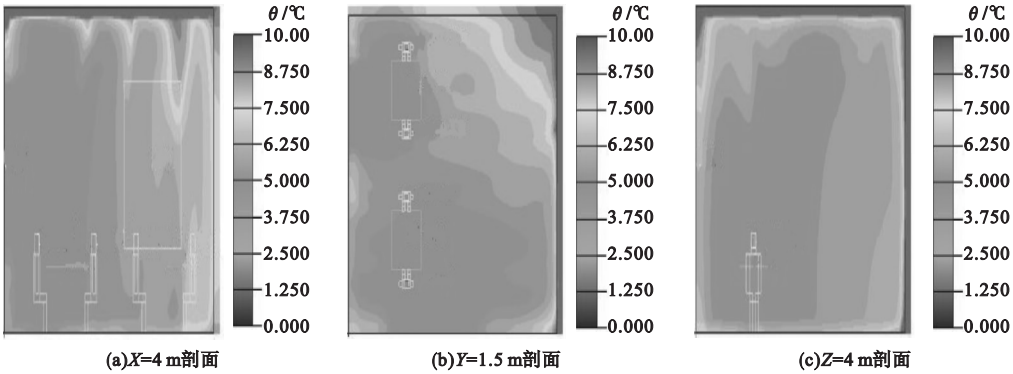


图10 冬季自然通风下房间温度场分布

Fig. 10 Room temperature field distribution under natural ventilation in winter

4.2 室内湿度场模拟

图 11 所示为夏季太阳能转轮除湿空调

系统运行下房间湿度场分布,图 12 所示为夏季自然通风状态房间湿度场分布。

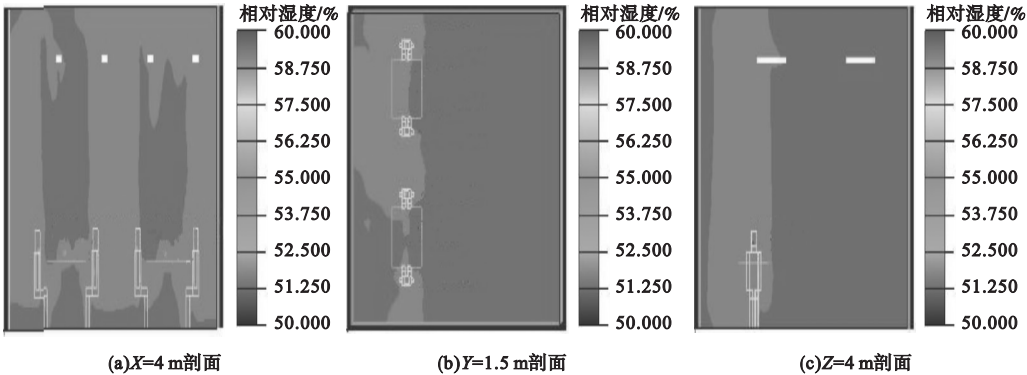


图11 夏季太阳能转轮除湿空调系统运行下房间湿度场分布

Fig. 11 Room humidity field distribution under the solar wheel dehumidification air-conditioning system in summer

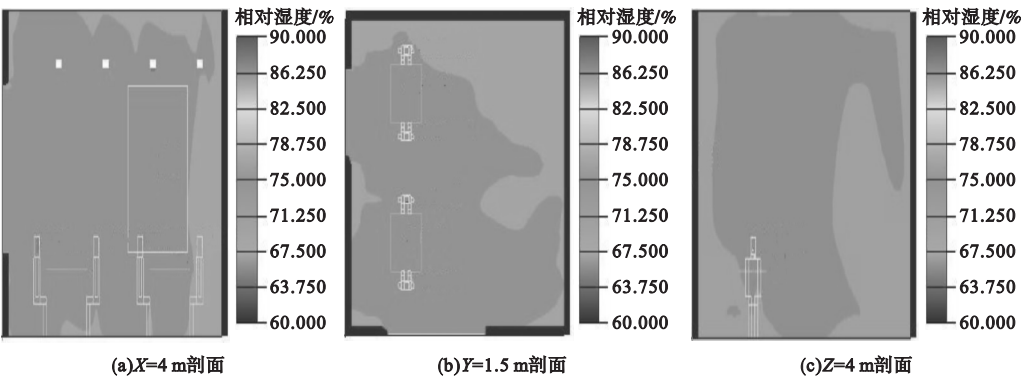


图 12 夏季自然通风下房间湿度场分布

Fig. 12 Room humidity field distribution under natural ventilation in summer

对比分析两图可知,除湿空调系统和自然通风状态的湿度场有明显差异:除湿系统的湿度场中相对湿度多数分布在 55% ~ 60%,而自然通风状态下的湿度场中相对湿度多数分布在 67.5% ~ 72.5%. 一般人体在相对湿度为 45% ~ 60% 感觉较为舒适,可见

除湿空调的相对湿度范围是达到要求的,且从图中可以看出湿度场分布较为均匀,因此除湿空调系统状态下的湿度场舒适性更高.

图 13 及图 14 分别为冬季太阳能转轮除湿空调系统运行下房间湿度场分布与冬季自然通风状态房间湿度场分布.

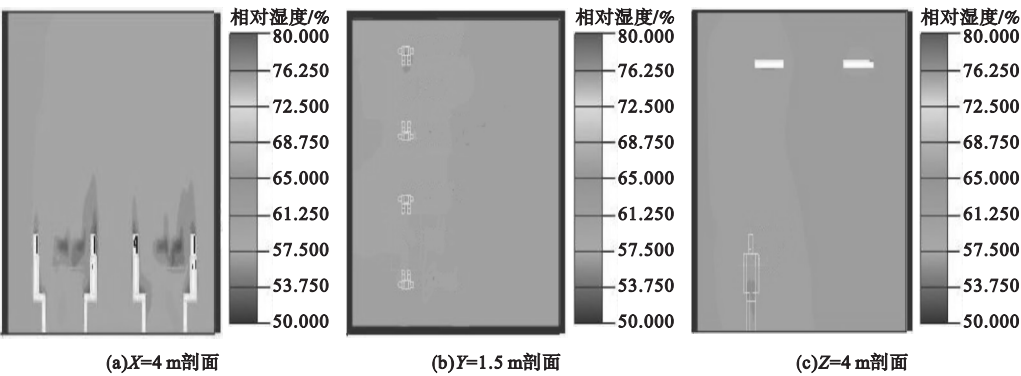


图 13 冬季太阳能转轮除湿空调系统运行下房间湿度场分布

Fig. 13 Room humidity field distribution under the solar wheel dehumidification air-conditioning system in winter

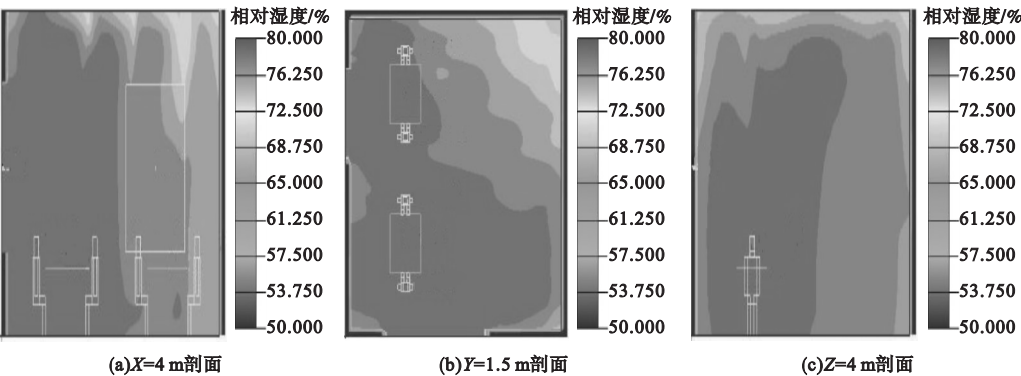


图 14 冬季自然通风下房间湿度场分布

Fig. 14 Room humidity field distribution under natural ventilation in winter



对比两图可知,夏热冬冷地区典型城市——南京,在冬季相对湿度较高,在自然通风状态下,室内相对湿度也相对较高,可达到80%,而除湿空调系统在冬季经加热后,含湿量不变的情况下,室内相对湿度即可达到规范要求范围之内,因此,在冬季供暖情况下,可不考虑除湿,且湿度场可达到一个稳定状态,大约在53%~61%,可见除湿空调的相对湿度范围是达到要求的。

通过对室内温度场与湿度场比较分析可得,太阳能转轮除湿空调系统运行状态下,室内温湿度达到设计规范要求,且舒适性较好。

5 经济性 & 环保效益性分析

5.1 系统经济性评价

为减少计算量,对两系统共同存在的热泵、水泵及风机设备,选用同一设备,热泵选用KH-24型号热泵,该热泵系统共计一台,花费费用大约为7.8万元;水泵分为用户侧及源侧,均为一用一备,共计3.2万元,而对于太阳能转轮除湿空调系统,由于存在集热工质的循环,因此比普通热泵空调系统多集热水泵以及再生水泵,因此太阳能转轮除湿空调系统所需费用为3.92万元;风机费用在常规热泵空调系统中,只含有新风与回风风机,因此费用只有3000元,而除湿系统的风机需包含有对除湿转轮再生的再生风机,因此费用就多出来了600元。对于太阳能转轮除湿空调系统,除了基本的热泵子系统以外,还需包含除湿系统特有的太阳能集热系统费用及除湿转轮费用,因此最终太阳能转轮除湿空调系统的费用就比热泵空调系统的费用多出来约15.92万元<sup>[19]</sup>。

根据表1可知,太阳能转轮除湿空调系统的总能耗为47427.25kW·h,热泵空调系统的总能耗为67209.07kW·h。经过调研知道南京市电价计价方式试行峰谷电价。峰段为8:00—21:00,电价为0.558元/(kW·h);谷段为21:00—次日8:00,电价为0.358元/

(kW·h),系统运行时间为早八点到晚八点,处于用电峰段,所以基本电价为0.558元/(kW·h)。通过热泵使用单位的介绍,可知除湿空调系统的运行费用为2.646329万元,热泵空调系统的运行费用为3.750266万元,则太阳能转轮除湿空调系统更省钱。

经过计算,常规热泵空调系统费用年值为5.06万元,太阳能转轮除湿空调系统费用年值5.53万元,则太阳能转轮除湿空调系统的费用年值略微较高,这是由于该系统初投资较高导致的。该系统中,初投资系统中费用最高的为太阳能集热系统总费用以及除湿转轮的费用。由于这两者的费用较高,会使该系统的推广与应用受限,但是随着现在人们对能源危机的认识以及政府的支持,初投资费用定会有所改善。因此,在不久的将来,太阳能转轮除湿空调系统必将被大家普遍接受及应用。

5.2 系统环境效益评估

在该系统中,除湿转轮再生能源采用的是太阳能,利用太阳能集热器吸收热量经过太阳能集热系统的循环最终为除湿转轮的再生提供热量;冬季太阳能可以为建筑提供室内所需要的热量,在全年系统的运行上就可以减少常规能源的使用。因此,采用太阳能能源可以减少污染物的排放。计算系统的节能减排,首先要将系统总能耗转换成标准能源消耗量,比较两系统能够的节约的能源,再转化为热值节约量,进而计算污染物减排量,两系统热值节约量如表3所示。

表3 系统的节能性

Table 3 Energy efficiency of the system

系统分类	系统总能耗/(kW·h)	节约热值/MJ
除湿空调	47427.25	234464
热泵空调	67209.07	0

由表3可知,除湿空调系统比常规热泵系统每年节约热值234464MJ。 $Q$ 为排放量,系统中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、烟尘(FC)、二氧化

硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )的排放量计算过程:

$$Q_{\text{CO}_2} = \frac{2.47 \times 234\,464}{29.308} = 19\,760 \text{ kg},$$

$$Q_{\text{FC}} = \frac{0.01 \times 234\,464}{29.308} = 80 \text{ kg},$$

$$Q_{\text{SO}_2} = \frac{0.02 \times 234\,464}{29.308} = 160 \text{ kg},$$

$$Q_{\text{NO}_x} = \frac{7.25 \times 234\,464 \times (1 - 80\%)}{29.308 \times 1\,000} =$$

11.6 kg.

根据计算可知,采用除湿空调系统比采用常规热泵系统每年可减少二氧化碳排放量 19 760 kg,烟尘排放量 80 kg,二氧化硫排放量 160 kg 以及氮氧化物排放量 11.6 kg.

## 6 结 论

(1)能耗方面,比较全年系统能耗,太阳能转轮除湿空调系统会比热泵系统节能 9 781.82 kW·h,约节能 29.4%.

(2)性能方面,太阳能转轮除湿空调系统中热泵机组的  $COP$  约为 4.68,而常规热泵空调系统中热泵机组  $COP$  则为 4.59. 通过对比可得,太阳能转轮除湿空调系统相对比较节能.

(3)太阳能转轮除湿空调系统的再生能源为太阳能. 经模拟分析,整个制冷季节中,太阳能可以提供大约 69 147.89 MJ 的能量用于再生,约比电能作为再生能源的转轮除湿空调系统节能约 34%.

(4)通过对温度场模拟结果比较分析,夏季除湿空调系统室内温度基本保持在 26℃ 左右,而自然通风状态下,室内温度达到 32℃,温度较高,不能满足舒适度要求;而冬季空调系统运行状态下温度维持在 20℃ 左右,而自然通风状态下,室内仅可达到 7℃,因此采用太阳能转轮除湿空调系统室内生活环境相比温度更为适宜.

(5)通过对湿度场模拟结果比较分析,夏季除湿空调系统经除湿后,室内相对湿度

大部分在 55% ~ 60%,而自然通风状态下相对湿度大部分在 67.5% ~ 72.5%;冬季空调系统的相对湿度维持在 53% ~ 61%,而自然通风状态下,相对湿度则可达到 80%,室内工作生活环境湿度较高,舒适性较差.

(6)太阳能转轮除湿空调系统相对于常规热泵空调系统的初投资较高,但运行费用低,在长期运行中更加经济节能.

(7)太阳能转轮除湿空调系统相对于常规热泵空调系统每年减少二氧化碳排量 19.76 kg,减少烟尘排放量为 80 kg,减少二氧化硫排放量 160 kg,减少氮氧化物排放量 11.6 kg.

(8)太阳能转轮除湿空调系统相比于常规热泵空调系统降低了设备能耗,减少了运行费用,减少了环境的污染,整个系统运行高效稳定,能够满足用户要求. 因此,综合各方面来看,太阳能转轮除湿空调系统的应用更具有优势.

## 参考文献

- [1] 温源远,李宏涛,杜譔,等. 2016 年全球环境发展动态及启示[J]. 环境保护,2017(14): 62-65.  
(WEN Yuanyuan, LI Hongtao, DU Huan, et al. Developments and implications of global environment in 2016[J]. Environmental protection, 2017(14): 62-65.)
- [2] 郭伟,陈曦. 中国建筑节能技术标准体系现状研究[J]. 建筑节能,2013(9): 61-65.  
(GUO Wei, CHEN Xi. Current building energy efficiency standard system in China[J]. Building energy efficiency, 2013(9): 61-65.)
- [3] 柳逸月. 中国能源系统转型及可再生能源消纳路径研究[D]. 兰州:兰州大学,2017.  
(LIU Yiyue. Study on energy system transition and renewable energy integration in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.)
- [4] 董炜. 低碳转型趋势下中国能源消费结构优化研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.  
(DONG Wei. Optimization of energy consumption structure in China under trend of low-carbon transition [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.)
- [5] 方德斌,董炜,余谦. 低碳转型趋势下中国能

- 源消费结构优化[J]. 技术经济, 2016, 35 (7): 71-79.  
(FANG Debin, DONG Wei, YU Qian. Optimization of energy consumption structure in China under trend of low-carbon transition [J]. Technology economics, 2016, 35 (7): 71-79.)
- [6] 何凌云, 吴梦, 尹芳. 可再生能源投资总量和结构对碳排放的影响研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2017(1): 76-88.  
(HE Lingyun, WU Meng, YIN Fang. Study on the impact of total renewable energy investment and structure on carbon emissions [J]. Journal of China university of geosciences (social sciences edition), 2017(1): 76-88.)
- [7] 李海涛. 太阳能利用研究进展[J]. 科技创新与应用, 2016(9): 38-39.  
(LI Haitao. The research progress in solar energy utilization [J]. Technological innovation and application, 2016(9): 38-39.)
- [8] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2009.  
(HE Zinian. The solar energy heat application [M]. Beijing: China University of Science and Technology Press, 2009.)
- [9] PENINGTON N A. Humidity changer for air-conditioning: US, US 2700537[P]. 1955.
- [10] DUNKLE R V. A method of solar air conditioning [J]. Inst. engrs. australia Mech. & Chem. eng. trans, 1965, 1(5): 73-78.
- [11] HENNING H M, ERPENBEEK T. Potential of solar energy use in desiccant cooling cycles [J]. International journal of refrigeration, 2001, 24(3): 220-229.
- [12] 代咪咪. 太阳能两级转轮除湿空调系统性能研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2015.  
(DAI Mimi. Study on the performance of solar driven two-stage desiccant air conditioning system [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2015.)
- [13] 苑文会. 太阳能再生溶液除湿空调系统的仿真模拟研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.  
(YUAN Wenhui. Modelling of a liquid desiccant air dehumidification system with solar regenerator [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2017.)
- [14] 杨兴林, 邹晓薇, 吴鹏. LiCl 溶液除湿性能的数值模拟和试验研究[J]. 流体机械, 2016, 44(2): 59-65.  
(YANG Xinglin, ZOU Xiaowei, WU Peng. Numerical simulation and experimental research of LiCl liquid dehumidification performance [J]. Fluid machinery, 2016, 44(2): 59-65.)
- [15] 魏皖, 廖小平, 张翼. 地下工程调温除湿机的节能优化方案及性能模拟研究[J]. 流体机械, 2017, 45(3): 75-80.  
(WEI Huan, LIAO Xiaoping, ZHANG Yi. Study on energy saving optimization scheme and performance simulation of dehumidifier with temperature control in underground engineering [J]. Fluid machinery, 2017, 45(3): 75-80.)
- [16] 龚永奇, 邓建, 刘慎洋. 蒸汽压缩式飞机空调车除湿的改进研究[J]. 流体机械, 2017, 45(5): 83-86.  
(GONG Yongqi, DENG Jian, LIU Shenyang. Dehumidification improvement of vapor compression aircraft air conditioning vehicle [J]. Fluid machinery, 2017, 45(5): 83-86.)
- [17] 杨少刚, 李慧, 尹久浩. 基于 TRNSYS 的变频泵模块的开发及应用[J]. 暖通空调, 2015(8): 36-41.  
(YANG Shaogang, LI Hui, YIN Jiuhao. Development and application of variable frequency pump module based on TRNSYS [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2015(8): 36-41.)
- [18] JURINAK J J, MITCHELL J W, BECKMAN W A. Open-cycle desiccant air conditioning as an alternative to vapor compression cooling in residential applications [J]. Asme journal of solar energy engineering, 1984, 106(3): 35-43.
- [19] 徐伟. 地源热泵技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
(XU Wei. Ground source heat pump technical manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)