

空气源热泵直接地板辐射供暖系统优化运行方式

杜彦<sup>1</sup>, 田琦<sup>1</sup>, 杨晋明<sup>1</sup>, 郭卫强<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024;  
2. 太原市恒星伟业冷冻空调设备有限公司, 山西 太原 030024)

**摘要:** 从运行方式的角度对空气源热泵直接地板辐射供暖系统进行优化,以山西某栋两层居住建筑为例,将实测数据与 DeST-h 软件模拟数据进行结合,比较全天连续运行、白天运行夜间停机、电价移峰填谷运行三种不同运行方式的经济性和舒适性.结果表明:三种运行方式均可基本满足舒适性的要求,但就经济性而言,白天运行夜间停机的运行方式既充分利用围护结构的蓄热能力,又缩短了系统运行时间,因此为最佳运行方式.  
**关键词:** 空气源热泵; 直接地板辐射供暖; 运行方式; DeST-h 软件; 经济性  
**中图分类号:** TU 832.1      **文献标志码:** A

目前,我国城乡建设房屋每年以 20% 的速度增长,而建筑总能耗约占社会终端能耗的 20.7%<sup>[1]</sup>,在建筑能耗中,非节能的供暖能耗占据十分重要的地位.因此,供暖能耗的节能减排刻不容缓.近几年,空气源热泵低温热水地板辐射供暖技术已得到很多专家学者的关注和研究<sup>[2-5]</sup>.空气源热泵系统在寒冷地区和夏热冬冷地区运行节能效果显著<sup>[2,6-7]</sup>.地板辐射供暖舒适卫生、热稳定性好、节省室内空间<sup>[8-9]</sup>.研究表明,当地暖盘管敷设时按照由四周向中心旋入,可大大提高辐射供暖的均匀性<sup>[10]</sup>.此外,低温热水地板辐射供暖技术相较于传统供暖方式节能 20%~30%<sup>[11]</sup>.空气源热泵直接地板辐射供暖系统是一种新型供暖方式,它将节能环保的空气源热泵技术与高换热效率的制冷剂直接地板辐射供暖技术相结合,有效提高供热效率,并且其广泛的能量来源可使此系统广泛应用于集中供热无法到达的城镇和农村居民住宅建筑.与传统的空气源热泵低温热水地板辐射供暖相比,空气源热泵直接地板辐射供暖的节能性更高(传热工质直接使用制冷剂,减少中间一次换热),且独立可控(压缩机采用数码涡旋压缩机,可大范围调节制冷剂容量).就空气源热泵供暖存在的两大问题,室外温度越低系统性能系数越低和停机除霜<sup>[12]</sup>,虽然已有大量学者提出多种解决办法<sup>[13-15]</sup>,但仍然没有确切的办法可以彻底解决这两个困扰已久的问题.本文通过对某安装了空气源热泵直接地板辐射供暖系统的住宅建筑进行实际测量,并结合 DeST-h 软件的模拟数据,得出经济性最佳的系统运行方式.

1 研究对象

1.1 供暖系统

空气源热泵直接地板辐射供暖系统是由数码涡旋空气源热泵与地板辐射盘管相结合,如图 1 所示.系统基本工作原理是逆卡诺循环,以 R22 为制冷剂,通过数码涡旋压缩机将制冷剂压缩升温,直接流入室内地埋管向屋内供暖;然后,流过节流装置降温减压,再通过空气热交换器吸收空气中的低品位能;最后,进入压缩机进行下一个循环.系统通过地埋管辐射散热,使得距地板表面 2 m 以内空间温度得到很好保证,人体对温度的感受是头冷脚热,是目前舒适度和节能性均较高的一种供暖方式.

数码涡旋压缩机的核心技术是“轴向柔性”技术(美国谷轮公司专利技术),此技术可维持涡旋盘尖

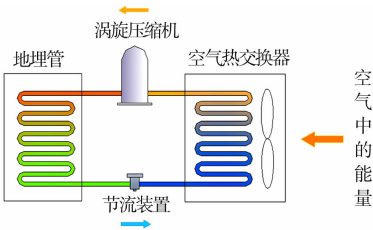


图 1 系统原理图  
Fig. 1 System principle diagram

端恒定,均匀的压力可使涡旋盘在轴向移动很小的距离,以确保涡旋盘始终以最佳力工作.因此数码涡旋压缩机可在很宽的范围内进行连续并且无级的容量输出<sup>[16-17]</sup>.数码涡旋压缩机的优点不仅体现在容量调节范围广(10%~100%),还有无需回油装置、电磁干扰可忽略不计、调节容量反应迅速、可靠性强等优点.将其应用至此系统最重要的原因是数码涡旋压缩机可直接把制冷工质作为传热介质<sup>[16]</sup>.与传统低温热水系统相比,将制冷剂直接作为传热工质的方式减少了一次中间传热过程,可有效提高传热效率.此外,制冷剂的热量传送量是水的 10 倍左右,是空气的 20 倍左右<sup>[18]</sup>.

1.2 实测建筑概况

实测建筑位于山西省中南部,砖混结构,墙体加有保温层,上下共两层,总面积 207.4 m<sup>2</sup>,一层层高 3.24 m,二层层高 2.90 m,塑钢双层玻璃窗,有闷顶.整栋建筑均采暖,一层为起居室,二层为主卧室,现居住人数为 2 人.建筑物计算用采暖期室外平均温度为-2.3 ℃<sup>[19]</sup>,采暖设计室外计算温度为-11 ℃<sup>[19]</sup>.由于此建筑为空气源热泵直接式地板辐射供暖系统的示范工程,参观考察的流动人员较多,经常性的启闭外门和人员的散热等因素对建筑室内温度等参数的测定有一定的影响.表 1 是建筑围护结构信息(建筑物西侧为采暖邻室,故无西侧外墙).表 1 中: $K$  为传热系数; $A$  为建筑面积.

表 1 建筑围护结构信息

Tab. 1 Building envelope parameters			
建筑结构	$K/W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	方位	$A/m^2$
外窗	2.50	东	3.43
		南	24.80
		北	6.77
外墙	0.60	东	57.97
		南	36.81
		北	54.63
阁楼	1.03	—	100.00

2 测试过程及结果

实验系统所用制冷剂为 R22,进出房间的温度分别为 30~40 ℃和 20~30 ℃.设置专用电表记录该系统的耗电量.实验主要设备:JXJ-1 型温度热流巡检仪,Testo 174H 型温湿度记录仪,TBQ-2 型太阳总辐射表,水银温度计,锡箔纸等.

实验过程使用温度热流巡检仪测量每面外墙的传热系数,在每面墙的中心附近设一个测点,数据记录在巡检仪内.两个温湿度记录仪分别放置于一层、二层客厅内,距地面 1 m 左右,房间中心附近,并进行了防辐射处理,每 0.5 h 记录一次室温,以此温度代表室内平均温度.水银温度计固定在室内墙上距地面 1.5 m 左右和室外背光处,并用锡箔纸遮住温度计底端,避免太阳辐射影响温度变化,每隔 1 h 读取一次数据,用以校核室内平均温度、记录室外温度;太阳能总辐射表放置于建筑朝南的落地窗前,每天 9:00 开始记录,17:00 记录当天最后一次,每隔 0.5 h 记录一次.实验开始时间为 2014 年 1 月 13 日 16:00,结束时间为 2014 年 1 月 27 日 15:00,历时 14 d.

实验系统设定空气源热泵开机时间为 8:00,关机时间为 18:00,这期间系统根据室温实时变化,系统自动控制流量在 10%~100% 运行,室温设定为 20 ℃.采用白天运行夜间停机的运行方式进行实测,实验期间室温( $\theta$ )和耗电量( $Q$ )的实测结果,如图 2 所示.

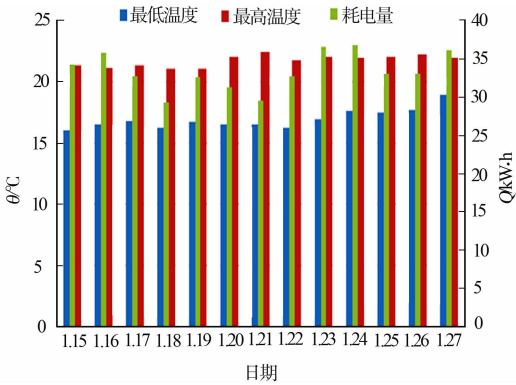


图 2 白天运行夜间停机工况  
室内温度范围和耗电量实测值

Fig. 2 Actual measured values of indoor temperature and power consumption in running of daytime on and nighttime off

3 模拟情况及结果

3.1 软件参数设置

本次模拟实验室外气象参数采用山西榆社地区典型气象年代室外气象参数,系统 8:00 至 18:00 开启,其他时间停机,房间换气次数为 1 次·h<sup>-1</sup>,室内采暖控制温度为 20 ℃,室内内容忍温度下限为 16 ℃,家具系数为 1.0,软件计算过程中考虑阳光遮挡.人员作息、灯光作息和热泵系统作息,如表 2 所示.表 2 中: $k_u$  为设备的使用系数.室内热源基本情况:卧室、起居室的灯光均为 5 W·m<sup>-2</sup>;起居室的设备为 10 W·m<sup>-2</sup>;卧室、起居室的总人数均为 2 人;人员产热为 51 W·人<sup>-1</sup>;人员产湿为 59 g·(h·人)<sup>-1</sup>.

3.2 模拟方案

根据空气源热泵直接地板辐射采暖系统运行时间的不同,本实验选择三种不同的运行方式模拟运行工况,并分析这三种运行方式的舒适性和经济性.

3.2.1 全天连续运行 该运行方式是传统的运行方式,其优点是随室内温度的变化,机组自动控制,可保证室内温度始终保持在设定范围内,舒适性较好.但此运行方式没有充分利用地板辐射供暖盘管敷设面积大和蓄热性好的特点,增加了系统不必要耗电;而且,机组在低温环境下运行易造成经常性停机除霜,会导致机组性能系数急剧下降,给用户带来不舒适感.使用 DeST-h 软件模拟此方案主要用于与其他运行方式的对比.

3.2.2 白天运行夜间停机 该运行方式是在白天设定时间区间内运行,其余时间停机的间歇运行.此运行方式是为避开限制空气源热泵快速发展中夜间系统性能系数急剧下降和停机除霜两大问题.白天运行夜间停机还能充分利用地板辐射供暖围护结构蓄热的优势,即白天围护结构可以将系统供热量和太阳照射所吸收热量储存起来,夜间温度下降较快时释放到室内,大大减缓室温下降的速度.文中实测数据即为此运行方式下测得,最终模拟结果与实验结果进行比较,以此验证模拟结果真实性.

3.2.3 电价错峰填谷运行 该运行方式是在电价谷值时开启系统进行制热供暖.峰谷分时电价的时段:8:00 至 22:00 为峰电时段,其余时间为谷电时段.峰值电价比谷值电价高,当系统运行时间均在谷值电价时,耗电费用将大大减少.但必须考虑的是,在寒冷地区冬季夜间温度较低,空气源热泵系统在此时段运行的性能系数较低,且易出现停机除霜,影响供暖效果,而长期出现停机除霜,会对机组性能产生破坏性影响.

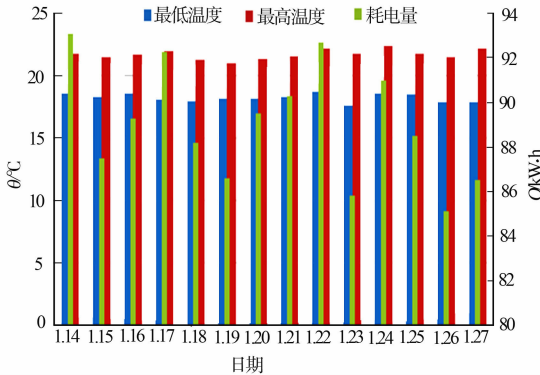
实验开始时间为 2014 年 1 月 13 日 16:00,结束时间为 2014 年 1 月 27 日 15:00.实验开始前系统已运行超过 24 h,为围护结构蓄热,以保证实验开始后室温正常变化.

3.3 模拟结果

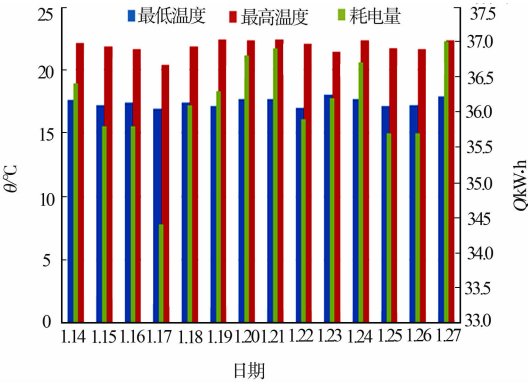
模拟试验期间,三种运行方式的室温和耗电量的模拟结果,如图 3 所示.

表 2 作息情况表  
Tab.2 Schedule table

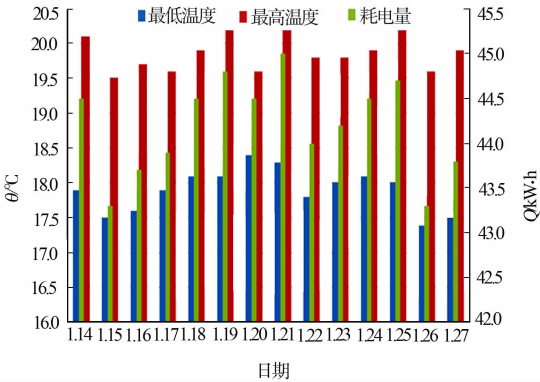
项目	主卧室		起居室	
	时间段	$k_u$	时间段	$k_u$
灯光	19:00~21:00	0.5	19:00~21:00	1.0
	21:00~22:00	1.0	21:00~22:00	0.5
设备	全天	0	11:00~13:00	1.0
			19:00~21:00	1.0
			21:00~22:00	0.5
人员	0:00~8:00	1.0	19:00~21:00	1.0
	19:00~21:00	0.5	21:00~22:00	0.5
	21:00~24:00	1.0		
热泵系统	每天 8:00~18:00 开启,其他时间关闭			



(a) 全天连续运行



(b) 白天运行夜间停机



(c) 电价错峰填谷运行

图 3 不同运行方式下室内温度和耗电量模拟值

Fig.3 Simulation values of indoor temperature and power consumption under different operation modes

4 实测与模拟结果对比分析

实验模拟三种不同运行方式,其中全天连续运行是目前普遍的运行方式,节能性较差,而电价移峰填谷运行则不利于设备自身性能的保护。因此,这两种运行方式并未进行实测,只是模拟与白天运行夜间停机的运行方式进行对比分析。

4.1 耗电量分析

根据图 2 和图 3(b)可知:白天运行夜间停机的耗电量模拟结果与实测数据范围基本一致,平均偏差为 3 kW·h,相对偏差约为 9%。虽然存在一定误差,但通过误差分析进行修正后模拟数据与实测数据有较好的一致性。产生偏差的主要原因:1) 实际室外温度与软件中设定的室外气象参数不可能完全相同;2) 实测过程中,屋内人员、设备增加,人体和设备散热量变大;3) 实验期间住户仍每天开灶做饭也会产生热量。

由上述对实测数据和模拟数据的比较分析可知:耗电量模拟数据的修正系数为 0.91,修正后模拟数据可较好的反正真实情况。

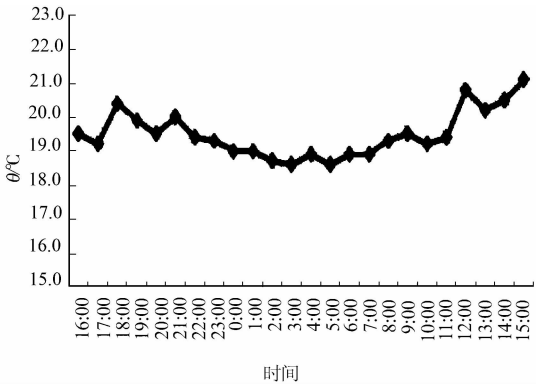
将图 3(b)与图 3(a)比较可知:全天连续运行的日平均耗电量是白天运行夜间停机的 2.4 倍。夜间室外温度急剧下降,系统在夜间运行时不仅制冷效率(coefficient of performance, COP)很低,耗电量大,而且易出现结霜的现象,不仅不能供暖,还需消耗大量电能除霜。另外,全天连续运行并未利用地板辐射供暖系统围护结构蓄热的优点,因此节能性较差。

将图 3(b)与图 3(c)比较可知:电价移峰填谷运行的日平均耗电量是白天运行夜间停机的 1.2 倍。虽然这两种运行方式的耗电量相差并不大,但电价移峰填谷运行使得系统需在温度很低的夜间运行。此时,机组不仅 COP 值很低,有结霜的问题,而且长期在低 COP 值运行对机组自身性能维护也是很不利。

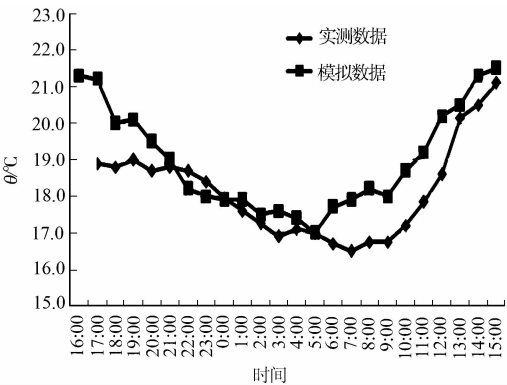
4.2 逐时室温分析

三种运行方式的室温实测与模拟结果对比结果,如图 4 所示。分析以 2014 年 1 月 15 日 16:00 至 1 月 16 日 15:00 为例进行,可代表实验期间的模拟和实测数据的一般规律。

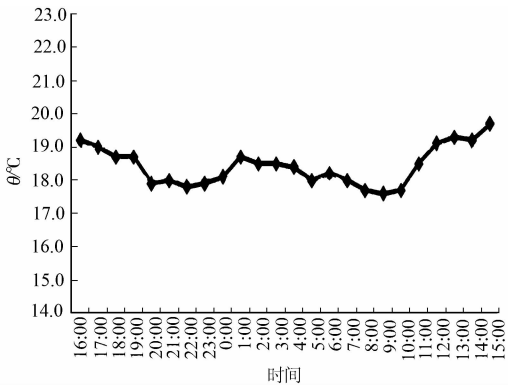
由图 4(a)可知:当系统运行方式为全天连续运行时,室内温度较平稳,夜间温度稍有下降,最低温度在凌



(a) 全天连续运行



(b) 白天运行夜间停机



(c) 电价移峰填谷运行

图 4 不同运行方式下内逐时平均温度

Fig. 4 Hourly indoor temperature in running under different operation modes

晨 5 点出现,为 18.6 °C,能很好满足用户的舒适性。

由图 4(b)可知:两曲线走势基本相同,实测与模拟结果基本吻合,实测平均室温为 18.2 °C,而温度的模拟结果为 19 °C。由图 4(b)还可知:空气源热泵直接地板辐射供暖系统在开机期间,其室内温度保持在 17~21.5 °C 之间,温度基本在室温要求范围内,变化平缓,关机后室温下降;但由于地板辐射供暖



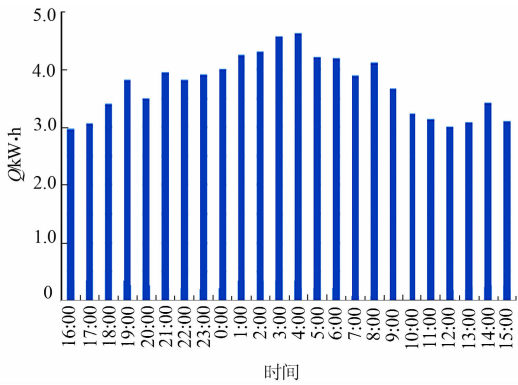
系统围护结构的蓄热性,温度下降后蓄热体放热,减缓室温下降的速度. 夜间最低温度为 17.0℃,可以满足人员夜间的热量需求.

由图 4(c)可知:系统根据电价的不同移峰填谷运行时,由于夜间开机温度在 18~20℃之间,保证了室内温度的舒适性;白天室内温度大约在 17.5~19.5℃之间,温度基本满足室内 18℃的要求.

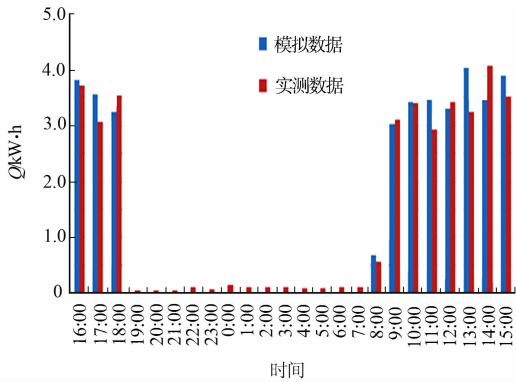
4.3 逐时耗电量分析

三种运行方式的的逐时耗电量实测与模拟结果对比,如图 5 所示. 由图 5(a)可知:此运行方式的耗电量很大,24 h 耗电量为 89.3 kW·h,节能效果不佳.

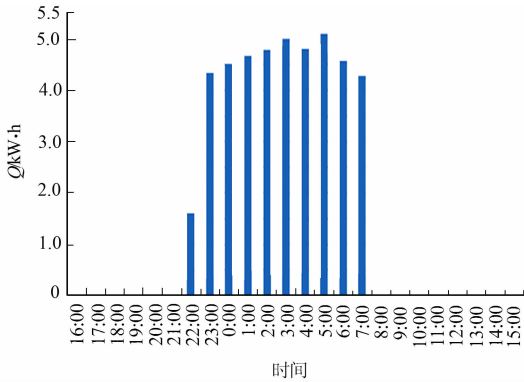
由图 5(b)可知:在开机期间实测与模拟的每小时耗电量大致趋势相同,夜间停机时由于系统仍与电源连接,所以有微小的耗电. 此图亦可以证明模拟结果的可用性. 此 24 h 的实测耗电量为 35.66 kW·h,模拟结果为 35.8 kW·h.



(a) 全天连续运行



(b) 白天运行夜间停机



(c) 电价移峰填谷运行

图 5 不同运行方式下内逐时耗电量

Fig. 5 System power consumption per hour under different operation modes

由图 5(c)可知:此运行方式耗电量集中在夜间,此 24 h 模拟得到的耗电量为 43.68 kW·h,略高于白天运行夜间停机运行方式,远低于全天连续运行方式,因此节能效果不错.

5 结论

实验运用 DeST-h 软件,对位于山西省中南部的某被测建筑建立模型,绘制建筑围护结构,设置围护结构参数、空气源热泵直接地板辐射供暖系统运行参数和室外气象参数;然后,对模拟数据和实测数据进行对比分析,所得模拟结果与现场实测数据取得较好的一致性.

由模拟和实测结果分析可知:三种运行方式中,白天运行夜间关机的运行方式同时兼顾舒适性和经济性(运行费用低). 此运行方式充分利用了空气源热泵直接地板辐射采暖系统的围护结构蓄热性能,夜间关机状态下仍能基本保证室内温度不低于 16.5℃,在节能的同时兼顾用户的舒适性. 该运行方式规避了传统空气源热泵系统因除霜而造成的高能耗、低舒适性的问题,既保证了系统的高性能系数,又减少了机组因结霜而损坏的概率.

参考文献:

[1] 江亿. 我国建筑能耗趋势与节能重点[J]. 建设科技, 2006(7):10-13,15.  
[2] 许可,王树刚,蒋爽,等. 空气源热泵用于低温热水地板辐射供暖系统的模拟研究[J]. 制冷技术, 2014,34(1):12-17.  
[3] 王子介. 空气源热泵用于住宅地板辐射供暖的实测研究[J]. 暖通空调, 2003,33(1):8-11.  
[4] 李元哲,于涛,陈天侠. 空气源热泵地板供暖系统在北方寒冷地区应用的节能性与适用性[J]. 暖通空调, 2012,42

(2):62-65.

[5] 肖益民,付祥钊.户式空气源热泵地板供暖系统实测分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2009,36(12):14-18.

[6] 王林,陈光明,陈斌,等.一种用于低温环境下新型空气源热泵循环研究[J].制冷学报,2005(2):34-38.

[7] 韩宗伟,李先庭,石文星.适用于寒冷地区的太阳能与低温空气源热泵复合空调系统[J].暖通空调,2011,41(1):104-107,112.

[8] 冯永杰.传统供暖方式亟待改造新型地热采暖迅速崛起[J].中国高新技术企业,2010(3):119-120.

[9] 曾章传,吴锦京,魏新利.空气源热泵直接地板辐射采暖系统实验研究及热力性能分析[J].太阳能学报,2011,32(8):1151-1157.

[10] 冉茂宇.采暖地板对室内人体热辐射的理论计算模型[J].华侨大学学报:自然科学版,2010,31(1):95-98.

[11] 王子介.低温辐射供暖与辐射制冷[M].北京:机械工业出版社,2004:2-3.

[12] 张斌,张志荣,杨彬.空气源热泵系统调试中发现的问题与对策[J].制冷空调与电力机械,2010,31(5):67-69.

[13] 董建锴,姜益强,姚杨,等.空气源热泵过冷蓄能除霜蓄能特性实验研究[J].太阳能学报,2012,33(9):1536-1540.

[14] 曲明璐,邓仕明,董建锴,等.空气源热泵蓄能换向除霜对室内热舒适的影响[J].暖通空调,2013,43(4):76-79.

[15] 王鸿雁.利用制冷剂过冷放热除霜的研究[J].制冷与空调,2009,9(1):47-49.

[16] 叶盛,陈汝东.数码涡旋 VRV 空调系统的节能因素分析[J].应用能源技术,2006(9):17-20.

[17] 王贻任.美国谷轮公司压缩机应用技术讲座(第九讲):数码涡旋技术[J].制冷技术,2003(1):35-38.

[18] 张智力,吴喜平.VRV 空调系统的节能因素分析[J].能源技术,2002,23(2):59-61.

[19] 山西省建设厅.DBJ 04-216—2006 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)山西地区实施细则[S].北京:中国建筑工业出版社,2006:23.

Research of Optimizing Running Modes for Direct Radiant Floor Heating System with Air Source Heat Pump

DU Yan<sup>1</sup>, TIAN Qi<sup>1</sup>, YANG Jin-ming, GUO Wei-qiang<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. Taiyuan Hengxingweiye Refrigeration Air-Conditioning Equipment Company, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** From the aspect of running modes, direct radiant floor heating system with air source heat pump was optimized. Installing this system in a two floor residential building in Shanxi Province, three different running modes, including all-day continuous running, intermittent running (daytime on and nighttime off), and electrovalent peak load shifting running, were compared the economy and comfort by combining the measured and simulative data from the DeST-h software. The results showed that the three running modes could all meet the comfort requirement basically, but the intermittent running could also make full use of the thermal storage capacity of the building envelope and shorten the running time economically, which indicates that the intermittent running is the best way to run.

**Keywords:** air source heat pump; direct radiant floor heating; operation mode; DeST-h software; economy

(责任编辑: 黄仲一      英文审校: 方德平)