技术交流

空气源热泵与地板供暖 联合运行实验研究 *

重庆大学 付祥钊 林真国 王 勇 中国人民解放军后勤工程学院 张素云

摘要 在夏热冬冷地区的住宅中,对该系统在初始运行、连续运行以及停机等工况下的室温变化、能耗及机组运行情况作了实验。结果表明,优化空气源热泵与地板供暖系统之间的匹配具有很大节能潜力;利用地板供暖系统的蓄能特性,采用夜间运行、白天停机的运行模式,对电网负荷可以起到削峰填谷的作用。

关键词 地板供暖 空气源热泵 能耗

Experimental research on combined air-source heat pump and floor heating systems

By Fu Xiangzhao , Lin Zhenguo, Wang Yong and Zhang Suyun

Abstract Tests indoor temperature change, energy consumption and operation status under the conditions of initial operation, continuous operation and stop in an apartment in the hot summer and cold winter area. The result shows that optimising the match of air-source heat pump with floor heating system can save energy remarkably and that operating during night and stopping during day can balance power network load based on energy storage capacity of floor heating system.

Keywords floor heating, air-source heat pump, energy consumption

Chongqing University, Chongqing, China

随着人们生活水平的提高,冬季供暖正在夏热冬冷地区迅速普及。对该地区居住建筑的各种供暖技术和产品值得进行深入研究,分析各自的优缺点,以筛选、推出经济适用的供暖方案。本文通过现场实际运行实验,分析探讨了空气源热泵与地板供暖联合系统的性能特点。

1 实验现场情况

实验场所是一套建筑面积 150 m² 的住宅,位于重庆市区一幢高层住宅楼的中部(第 17 层)。建筑为剪力墙承重结构,现浇楼板,塑钢单玻窗。该住宅平面如图1所示,表1是各房间相关参数。

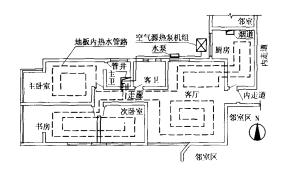


图 1 实验住宅地板供暖示意图

付祥钊,男,1948年12月生,硕士,教授,博士生导师400045 重庆市重庆大学城市环境学院

(023) 65120811

E-mail:xiangzhaof@yahoo.com.cn

收稿日期:2004-02-18 修回日期:2004-04-07

^{*} 国家"十五"小城镇建设重大科技专项课题(编号: 2003BA808A19)

	室内面积	外墙		外墙面积/ m²			外窗传热	外窗面积/ m²				
	$/ m^2$	传热系数 K/ (W/(m ² K))	热惰性 指标 <i>D</i>	南	西	北	总	系数 K/ (W/(m ² ·K))	南	西	北	总
书房	16.12	2.67	5.6	13.60	3.96		17.56	4.3	3.20	5.28		8.48
室但主	18.47	2.67	5.6		3.49	14.90	18.39	4.3		6.59	3.60	10.19
次卧室	9.61	2.67	5.6	7.72			7.72	4.3	3.20			3.20
客厅	39.27	2.67	5.6	1.35		7.20	8.55	4.3	8.01		2.60	10.61
厨房	14.00	2.67	5.6		3.12		3.12	4.3		4.16		4.16
走廊	4.62											
<u>合计</u>	102.09			22.67	10.57	22.10	55.34		14.41	16.03	6.20	36.64

表 1 供暖房间相关参数

实验住宅地板供暖系统热源为一台空气源热 泵机组。机组名义制热工况为进水温度 40 出水温度 45 ,室外环境干/湿球温度为 7 / 6

,额定供热量为 10.5 kW,机组输入功率为 3.4 kW(含压缩机和室外盘管换热风机功率)。 地板供暖系统水泵扬程为 11.5 m,流量为 $1.68 \text{ m}^3/\text{h}$,输入功率为 340 W,控制系统功率为 73 W。设置专用电表记录该空气源热泵与地板供暖联合系统耗电量。

该供暖地板从上至下各构造层依次为 8 mm 厚强化木地板 ,2 mm 厚柔性垫层 ,30 mm 厚水泥 沙浆埋管填充层 ,50 mm 厚聚苯乙烯泡沫保温板 , 120 mm 厚钢筋混凝土楼板层。

2 启动运行实验

热泵机组在关机 14 h 后启动,由供水温度控制机组运行。当供水温度达到 46 时,机组自动停机;供水温度降到 42 时,机组自动启动;不管压缩机组运行与否,水泵一直处于运行状态。压缩机启停一次为一个运行周期,定义在一个运行周期中,热水机组处于运行状态与停机状态的时间之比为机组运停比,机组在某段时间内运行时间所占的比例为设备运行率。表 2 是该地板供暖系统在2004年1月13日21:54:30至次日05:56:00时段内(室外气温6.7~7.3)的运行情况。

供水温度 机组状态 运/停时间 运停比 供水温度 机组状态 运/停时间 时刻 电表读数 时刻 运停比 电表读数 / (kWh) / (kWh) 21:54:30 15 开机 1 680 6.72 1 435.7 23:14:40 42 运行 330 0.851 439.3 停机 停机 22:22:30 46 250 1 437.4 23:20:10 46 390 1 439.7 运行 运行 22:26:40 42 455 1.60 1 437.4 23:26:40 42 310 0.81 1 439.7 22:34:15 46 停机 285 1 437.9 23:31:50 46 停机 385 1 440.1 1 438.0 22:39:00 42 运行 23:38:15 42 运行 1 440.1 390 1.18 315 0.8122:45:30 46 停机 330 1 438.4 23:43:30 46 停机 390 1 440.5 运行 22:51:00 42 运行 300 1 438.4 23:50:00 42 315 0.81 1 440.5 0.6522:56:00 46 停机 1 438.8 23:55:15 46 停机 390 1 440.9 460 23:03:40 42 运行 1 438.9 05:47:50 停机 490 0.55 1 451.5 300 0.83 46

1 439.3

表 2 初始运行数据

楼板初温只有 15 ,由于楼板蓄热温度逐渐上升,第一个运行周期特别长,达 1 930 s,机组运行时间比停机时间长得多,运停比达 6.72。第二、三运行周期迅速缩短,运行时间显著减少,停机时间缓慢延长。从第四个运行周期起,机组进入相对稳定的运行与停机交替周期,运行时间比停机时间短,运停比最后降为 0.55。总实验时间为 29 160 s,前 4 150 s系统运行周期变化明显,以后变化平缓。房间温度在整个实验过程中上升平缓,初始温度为 15 ,2 h后升到 16 ,8 h 后升到 17 。

停机

360

3 连续运行实验

42

05:56:00

在机组连续稳定的运行状况下,进行了11天的连续运行实验。表3是2003年12月28日至2004年1月8日的运行数据。设定供水温度为42~46 ,在该时段内,各热水回路流量保持不变,客厅为400 L/h,主卧室为420 L/h,书房及次卧室共为380 L/h,厨房及客厅北部共为360 L/h,总流量为1560 L/h。整套住宅内只有1人,照明总功率只有18 W,无其他热源,相邻住户室温12 。结合图1和表1,可计算出书房及次卧室单位面积

270

1 451.6

运行

23:08:40

46

日期	时刻	室外温度	室内温度/		电表读数	时段长度	时段耗电量	小时耗电量	
		/	书房	客厅	/ (kWh)	/ h	/ (kWh)	/ kW	
2003-12-28	08:30	9.4	15.5	18.0	870				
2003-12-28	22:35	7.0	16.5	18.0	898	14.08	28	1.99	
2003-12-29	24:15	6.2	16.0	17.5	950	25.67	52	2.03	
2003-12-30	08:00	7.5	15.5	18.0	966	7.75	16	2.06	
2003-12-30	23:45	6.3	16.0	17.5	998	15.75	32	2.03	
2003-12-31	07:00	7.9	15.5	18.0	1 012	7.25	14	1.93	
2004-01-01	10:00	9.8	16.4	18.0	1 068	27.00	56	2.07	
2004-01-02	08:00	8.5	15.5	18.5	1 111	22.00	43	1.95	
2004-01-04	07:05	7.9	16.0	18.5	1 203	47.08	92	1.96	
2004-01-05	00:25	7.2	16.0	18.5	1 236	17.33	33	1.90	
2004-01-06	07:30	9.2	16.5	19.0	1 296	31.08	60	1.93	
2004-01-07	07:15	9.0	17.0	19.0	1 340	23.75	44	1.85	
2004-01-08	07:15	9.0	17.0	19.5	1 384	24.00	44	1.83	
平均值		8.1	16.1	18.3				1.96	
标准差		1.1	0.5	0.6				0.08	

表 3 连续运行实验表 1

热水流量为 13.53 L/(m²·h),客厅及走廊单位面积热水流量(将厨房回路流经客厅部分流量叠加在内)为 13.12 L/(m²·h)。尽管二者基本相等,但书房内温度比客厅内温度低 2.5 ,这是由于二者单位建筑面积通过围护结构向外传热量和通风气流在室内的流动路线不同造成的。如表 1,书房及次卧室外墙和外窗总面积分别为 26.04 m²和10.92 m²,而客厅外墙和外窗总面积分别为 8.55 m²和10.61 m²。通风气流在室内的流动路线是从书房和主卧室进入,流经客厅由厨房排出。显然,在确定各房间铺管量和供水量时,不能简单地按房间面积计算,需要考虑房间围护结构的特点和通风气流流向等具体情况。

表 3 中各时段小时耗电量稍有差异,这与各时段的室内外温差有关。各时段房间内外温差不同,

围护结构传热量不等,机组运行的时间不同,耗电量不等,但各时段小时耗电量总体比较接近,平均为1.96 kW。连续运行实验中,机组运行周期平均长度为900 s。每个周期中,运行时间360 s,停机时间540 s,机组运停比为0.67,运行率为40%,平均小时能耗1.96 kWh中,机组正常运行能耗1.36 kWh,水泵能耗0.34 kWh,控制系统能耗0.073 kWh,机组启停能耗0.187 kWh,平均每次0.047 kWh。总能耗中,机组启停能耗占9.5%,水泵能耗占17.3%。按室内净面积计算,平均单位面积耗电量为18.65 Wh/m²。

鉴于机组启动会造成额外的能耗,实验中将供水温度范围扩大,希望借此达到节能的目的。表 4 是 2004 年 1 月 18 日的部分运行参数,其中各供水回路流量与表 3 相同。

时刻 室外温度 供水温度 机组状态 运/停时间 运停比 电表读数 时段耗电量 室内温度/ 小时耗电量 / min 书房 客厅 / (kWh) 09:30 9.5 33 启动 15 0.33 14.5 1 593.2 1.0 1.0 17.8 09:45 46 停机 45 14.5 17.8 1 594.2 10:30 33 启动 17.8 1 594.2

表 4 连续运行实验表 2

表 4 室外气象参数与表 3 中 1 月 1 日接近,两日室内温度分布规律相似。表 4 工况比表 3 工况室温低,书房平均低 1.6 ,客厅平均低 0.5 。可见供水温度范围从 42~46 扩大到 33~46 后,客厅室温降低不明显,书房温度下降较大,这是因为客厅单位面积围护结构传热量小于书房。表 3 中机组运行工况与表 2 基本相同,机组运停比应

在 0.55~0.85 之间;表 4 工况运停比则降为0.33, 小时耗电量也从表 3 的 1.96 kW 降为 1.0 kW ,这 表明在保持室内热环境质量的前提下,可以通过扩大供水温度范围达到节能运行的效果。

4 系统停止运行后的室温变化

实验过程中将机组和水泵关闭,全系统停止运行 45.5 h,不向室内供暖。实验发现,机组和水泵完

全停止运行后,室外水温(机组出口处)不断下降,最 终接近室外气温。而停机 45.5 h后,室内书房温度 .客厅温度下降 4.0 . 各房间温度趋向 下降 2.0 均匀,但整体室温变化不大。而在该住宅附近的另 一住宅内,采用风机盘管加空气源热泵热水机组的 供暖方式,在室外气象条件和房间围护结构基本相 同的情况下,当供热系统完全停止运行后,关闭所有 外窗,室温下降比较明显。在对比实验中,地板供暖 系统在刚停机后的 3.5 h 内室温下降了 0.75 均每 h 下降 0.214 : 风机盘管系统则在刚停机后 的 3.5 h 内两次实验中室温分别下降了 6.0 和 ,平均每 h 下降 1.57 ,温度下降速率是地 板供暖系统的 7.3 倍,在停机后更长的时间段内后 者的温度下降速率比前者更大。表 5 是两种不同供 暖系统完全停止运行后室温的下降情况对比。

表 5 不同供暖系统室温下降情况对比

地板供	暖系统	风机盘管供暖系统					
停机后小	平均室	停机后小	平均室	3温/			
时数/ h	温/	时数/ h	第一次	第二次			
			实验	<u>实验</u>			
0	18.25	0	20.0	18.0			
3.5	17.5	0.5	18.0	16.0			
6.0	17.5	1.0	17.0	15.0			
9.5	17.0	1.5	16.0	15.0			
12.5	16.5	2.5	16.0	14.0			
17.0	16.5	3.0	15.0	13.7			
22.5	16.0	3.5	14.0	13.0			

表 5 反映出地板供暖系统良好的蓄热性能。 地板供暖系统在运行期间加热了地板下各构造层 及循环热水,地板内积蓄的热量在系统热源停止运 行后仍可以向室内供暖,使室温降低较慢。风机盘 管供暖系统直接加热室内空气,建筑本体结构的蓄

热量远不及地板供暖系统,因此,室温下降速率要 快得多。

5 地板蓄热供暖运行实验

鉴于以上的实验结果,可以利用地板供暖系统 的蓄热性能,改变机组的运行模式,在电力负荷低 谷期间运行,在电力负荷高峰期停机,由地板蓄存 的热量来维持室温。表 6 是 2004 年 1 月 11 ~ 14 日期间夜间运行、白天停机的实验结果,供水温度 设定与表3工况相同,机组平均每天运行10.57 h, 平均耗电量 1.99 kW,21 kWh/d。表 6 与表 3 的 室外气象条件、室内温度和小时耗电量等基本相 当,但表6工况平均每天比表3工况运行时间少 13.43 h,每天节电 55 % (26.1 kWh)。在本实验 中,室内温度日波动为0.5~2.0 ,只比全天连续 运行高 1.0 左右, 仍比风机盘管供暖的热稳定性 好:室内最低温度为17.0 .只比全天机组连续供 暖降低 0.5 。这说明夜间开机、白天停机的蓄热 运行模式能够满足室内供暖要求。并且可以明显 节省供暖运行费用,在电网分时计费地区更是如 此。以该地板供暖住宅所在地区为例,白天高峰电 价为 0.42 元/(kWh), 夜间低谷电价为 0.34 元/ (kWh),则每日蓄热供暖所节省运行费用为 26.1 $kWh/d \times 0.42 \pi/(kWh) + 21 kWh/d \times 0.08 \pi/$ (kWh) = 12.642 元/d,可比连续运行节省 60%的 运行费,在峰谷电价差更大的地区经济性将更加显 著。地板蓄热供暖对室内热舒适的影响不大。地 板蓄热供暖模式宏观上对供电起到了削峰填谷的 作用,而且是投资很小的削峰填谷技术,具有较好 的应用前景。

表 6 夜间运行工况

	日期	时刻	室外温度	机组状态	室内温度	室内温降	电表读数 / (kWh)	运行时数 / h	运行耗电量 /(kWh)	小时耗电量 / kW
_	01-11	20:10	9.7	 启动	17.0		1 393	10.83	20.5	1.89
	01-12	07:00	9.2	停机	18.0	0.5	1 413.5			
	01-12	21:18	8.9	启动	17.5		1 413.5	10.7	21.5	2.01
	01-13	08:00	9.8	停机	19.5	2.0	1 435			
	01-13	21:50	9.0	启动	17.5		1 435	10.17	21	2.06
	01-14	08:00	8.5	停机	19.0	1.5	1 456			
	01-14	20:46	8.0	启动	17.5		1 456			

6 结论

6.1 在全天连续供暖条件下,该空气源热泵机组 的平均运行率只有 40 %, 机组运行周期为 900 s, 每 h 运行 4 个周期,机组由于启动造成的能耗占总 能耗的 9.5 %, 地板供暖系统水泵能耗占总能耗的

17%左右。地板供暖系统与空气源热泵之间的匹 配还应作进一步研究。

6.2 地板供暖系统各房间铺管量、铺管间距等、需 针对不同房间耗热量特点确定,尤其要注意通风气 (下转第128页)

- e) 调节阀有方向性,按照箭头的指示方向安装。
- f) 通常定流量系统阀门安装在盘管的上游,这是考虑维修的方便,在盘管出现问题时可以关断此阀门,保证其他支路的正常运行。在变流量系统中调节阀应尽量安装在盘管的下游,使盘管始终处于正压状态。调节阀门安装在上游,在调节过程中盘管可能处于负压,空气可能会通过小的泄漏点进入盘管.影响盘管的运行效率。
- g) 在保证前后直管段的前提下,调节阀应尽量靠近所需要控制的设备安装。
- h) 支架固定牢靠,并有防止因管道伸缩影响 阀体的措施。

4 系统调试

除了作常规检测外,调节阀还要在系统调试中进行检测。在定流量系统中,当环路系统调试平衡时,通常是使所有分支的控制阀全开;而调试变流量系统时,过程正好相反,具体步骤如下:

- a) 将压降可能最大的分支盘管阀门全开,其他盘管阀门均关闭。
- b) 调整压差控制器直到通过这一分支的流量 达到设计值。
- c) 关闭这个盘管分支阀门,全速运转水泵,检测流经此阀门的流量是否为0,在泵的最大压头时,执行器能否严密关闭阀门。
- d) 以同样方式检查每一个分支,确保其余分支压降都不大于首个支路,检查执行器是否能将所有阀门关闭严密。
- e) 如果另一分支有一个更高的压降,重设压差控制器直到流量满足要求。

5 调节阀的选择步骤归纳

- 5.1 收集所有的相关数据,包括泵技术参数和管径(管径的选择比阀门的尺寸应更有优先级)。必须反复计算管径、泵压力和通过管道后的压降。
- 5.2 选择阀门尺寸,选择最小的阀门流通能力,应能满足在90%的开度下有最大流量能力,同时应考虑汽蚀、闪蒸和雷诺数等因素。
- 5.3 为保证运行状况,在可以预见的调节范围内, 应采用等百分比阀门。
- 5.4 根据工程实际情况选择阀门的本体。根据经验,阀门尺寸应等于或者稍微小于管道尺寸,例如 *DN75* 的管道选用 *DN50* 的截止阀。
- 5.5 执行器应能准确确定阀芯的位置,并保证控制器失灵时阀芯处于安全位置。

参考文献

- 1 付祥钊,王岳人,王元,等.流体输配管网.北京:中国建筑工业出版社,2001.190 = 199
- 2 Avery Gil. Designing & commissioning variable flow hydronic systems. ASHRAEJ, 1993, 35(7): 23 25
- 3 李平. 汽蚀和闪蒸现象及对策研究. 石油化工自动化, 1997(5): 59-60
- 4 Rahmeyer William , Cain Fred. Calibration and verification of cavitation testing facilities using an orifice. http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/rahm/CAVITER. 2003-04-13
- 5 Wilkinson Ron. Control valves:install those valves right. HPAC Heating/ Piping/ Air Conditioning Engineering, 2000(9): 58 - 59
- 6 Harrold Dave. Select and size control valves properly to save money. Control Engineering Europe, 1999 (10). http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA188852. 2003 - 04 - 16

(上接第 103 页)

流的流向,简单地按房间面积确定会造成各房间温度不均。

- 6.3 地板供暖系统对水温不敏感,扩大供水温度范围可明显降低机组运行能耗,同时减少机组启动次数和启动能耗,并能较好地保持室内热舒适。
- 6.4 地板供暖系统具有良好的蓄热性能,在热泵机组停止运行后,房间仍可以在较长时间内利用地板内蓄热量向室内供暖而维持室温,尤其是空气源热泵除霜时室温不会发生变化,这是空气源热泵与风机盘管匹配或空气源热泵房间空调器不具有的

优点。

- 6.5 实验表明,利用地板供暖系统的蓄热性能,可以实现夜间运行、白天停机的蓄能运行模式,明显减少能耗和运行费用,宏观上对电网起到削峰填谷的作用。
- 6.6 空气源热泵与地板联合供暖系统运行的节能 潜力很大,具有推广意义,其运行工况的优化值得 深入研究。

参考文献

1 付祥钊.夏热冬冷地区建筑节能技术.北京:中国建筑工业出版社,2002