

辐射采暖住宅建筑能耗与室内作用温度^{*}

王子介

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 对南京地区冬季采用地板辐射采暖的住宅进行了房间空气温度、围护结构表面温度、热源设备能耗的实测,在此基础上计算了室内平均辐射温度(MRT)和作用温度(Operation Temperature),并对外墙比例不同的房间的作用温度进行了对比。研究结果证明,由于现有240砖墙的住宅建筑围护结构保温性能较差,两面外墙较之一面外墙的房间,作用温度可相差1℃以上。对于所介绍的采暖系统形式,采暖期(以90d计)每m²建筑面积电耗,根据运行模式和室内设计温度的不同,为7.3 kWh至52 kWh。

[关键词] 辐射供暖,居住建筑,作用温度,建筑能耗,节能

[中图分类号] TU 832; [文献标识码] B; [文章编号] 1672-1292(2002)02-0078-06

0 引言

南京地处长江下游、夏季湿热、冬季潮冷,低于5℃的天气有60多天。在计划经济时代,划为非采暖区,建筑外墙采用240砖墙,传热系数约达2.0 W/m²·℃,保温性能较差,不设采暖空调时,冬季室内温度低于热环境卫生学下限标准,影响工作、生活以致人体健康,更谈不上舒适性。近年来家庭多采用冷暖空调的方法,舒适性差,能耗高,各房间温度不均匀。对于房间多、建筑面积大的住宅及别墅,则多台空调难于合理布置,唯有增加投资、牺牲部分建筑空间,采用住宅中央空调系统。南京的情况在长江中下游地区以及整个冬冷夏热地区有代表性。减少建筑能耗,提高室内热舒适性,符合国家和消费者双方的长远利益,是建筑节能和暖通空调工作者义不容辞的职责。

辐射供暖因其节能、舒适、不占用室内使用面积等突出特点,已在北方地区获得大面积应用。但在南方地区应用较少。为了利于推广这一节能技术,同时为了对南京地区住宅建筑在实行“夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准(JGJ134-2001)”(以下简称“节能标准”)之前的能耗及热舒适状况有更深入的了解,以利于标准的推广,对南京某住宅建筑进行了实测研究。

1 实验住宅及供暖系统概况

实验住宅位于南京市东郊新建的仙林地区大学城,依傍仙鹤山麓,空气清新,风景秀丽。由于位于市郊,冬季室外温度低于市区。该住宅为一跃层公寓楼房,位于五楼。总建筑面积约160 m²。图1为住宅底层平面图。为实际体验地暖效果,楼下地面铺设地砖,跃层地面铺设复合木地板。该住宅位于公寓楼的东端,东、南、北三面外墙,由于南京市尚未推广执行节能标准,外墙均为240砖墙,未加保温材料。窗户均为单层玻璃塑钢窗。为了使跃层好用一些,装修时在屋顶室内侧贴装了20 mm厚聚苯乙烯泡沫塑料板。

地暖管采用进口生产线及进口原料、国内生产的交联聚乙烯(PEX)管,管径DN16 mm,管间距25~35 mm,沿外墙处密,内区疏。为便于调节,楼下分5个回路,跃层3个回路,可通过供回水集水器上的阀门进行开关。采用双回路布置方式以尽量均匀地面温度。各回路管长基本一致,以便阻力平衡,水量均

* 收稿日期:2002-08-15。

基金项目:南京师范大学高层次人才科研项目(2001DLYXQB901)。

作者简介:王子介,1948-,南京师范大学动力工程学院教授,从事建筑节能与暖通空调新技术方面的研究与教学。

匀. 管底铺 20 mm 厚苯板, 填充层为 30 mm 厚碎石混凝土, 找平层约 20 mm, 加上地砖, 约 60 ~ 70 mm. 系统中加装了压力表、流量计, 热泵机组单独安装了电表, 用来进行实测、统计和运行控制.

为了做使用效果的实测对比, 在楼下和跃层各关闭一个房间的地板管, 实际采暖面积约 124 m². 采用国产的分体式风冷热泵冷热水机组, 额定制热量 9.7 kW, 机组配用进口全封闭涡旋式压缩机, 功率 3.08 kW. 轴流风机功率 0.1 kW. 水泵额定流量 2.2 m³/h, 扬程 15~20 m, 功率 0.37 kW. 热泵机组总功率 3.55 kW.

对该建筑的冬季热负荷作了计算, 由于该住宅邻室和楼下尚未有住户入住, 故皆按不采暖房间考虑, 冷风渗透和高度修正不计. 结果

列于表 1. 计算结果表明, 室内设计温度取 18℃和 16℃时的热负荷分别为 12.9 kW 和 11.7 kW, 按建筑面积 160 m²计算, 单位面积负荷分别为约 81 和 73 W/m², 是节能标准规定值的约 3 倍.

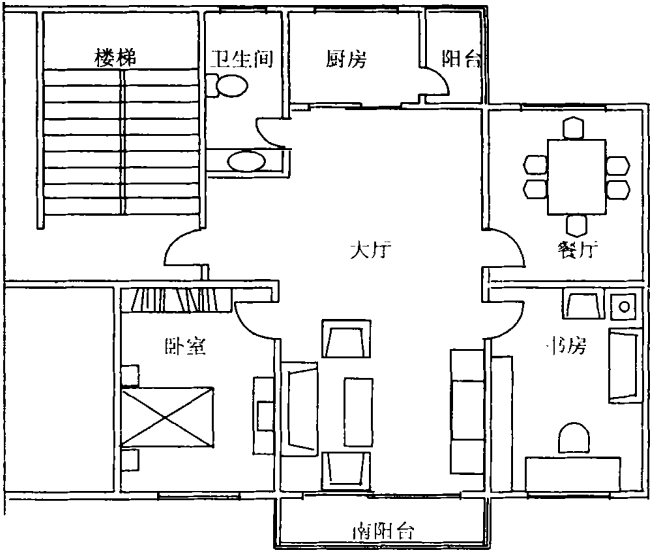


图 1 实测住宅底层平面图

表 1 冬季围护结构热损失计算表

围护结构	面积 F/m^2	传热系数 $K/(W/m^2\cdot^{\circ}C)$	传热量 $Q_1/(kW)$	经朝向修正后的传热量 $Q/(kW)$
南外窗	9.5	5.8	1.157	0.93
南阳台窗	8.5	5.8	1.035	0.83
东外窗	3.1	5.8	0.378	0.34
北外窗	6.4	5.8	0.780	0.78
户门	1.5	4.6	0.145	0.145
南外墙	28.4	2.0	1.192	0.95
北外墙	19.0	2.0	0.798	0.798
东外墙	31.7	2.0	1.331	1.198
西分户墙	24.4	2.0	0.717	0.717
屋顶	105.0	1.8	3.969	3.97
地板	95.0	1.6	3.192	2.23
总计($t_n = 18^{\circ}C$)			14.69	12.9
总计($t_n = 16^{\circ}C$)			13.3	11.7

由于 2001 年末的暖冬现象, 11 月份需采暖天数不多, 所以实测主要集中在 12 月中下旬, 该时段室外最低温度- 5℃. 一般最低温度在- 1~ 2℃之间. 为了实际了解运行效果和能耗情况, 运行方式按常规意义上的“连续运行”和“分时段连续运行”两种. 连续运行时, 机组日夜运转, 根据出水温度控制开停, 室内空气温度可达 18℃以上. 相对湿度仍保持 50% ~ 60% 之间.

“分时段连续运行”即视室外温度情况每天连续开机 6~ 12 h, 晴天、外气温度高时开机时间短, 阴雨天或室外温度低的时候, 增加开机时间. 南京地区尚未实行分时电价, 所以一般在白天外气温度较高、相对湿度较低的时段开机, 热泵运行效率较高. 采用这种运行方式时, 根据运行时间的不同, 客厅、卧室等外墙比例小的房间室内最高温度可达 15~ 18℃. 书房因外墙比例大, 温度比客厅低 1℃左右, 阁楼低 2℃左右. 由于建筑围护结构蓄热作用显著, 楼下室内空气温度波动昼夜仅为 2℃左右, 阁楼温度波动约 3℃. 短时间开窗通风对室内温度基本无影响.

为了统计能耗,进行了不同运行模式的测试、统计.分时段连续运行时,每天开机 6~ 12 h,日耗电量约 20 ~ 40 kWh,平均耗电量 3.25 kWh/h.以平均日耗电量 30kWh 计,月耗电量 900kWh,南京电费较高,0.52 元/kWh,900kWh 计为 468 元,采暖期 3 个月,总共花费 1400 元,即每 m² 建筑面积采暖期耗电 7.3 kwh,电费约 11 元.由于地暖蓄热性能好,在目前未实行峰谷电价时,白天高温时段开机,提高机组 COP;若实行分时电价,完全可在低谷电价时段开机,进一步降低运行费.

24 h 连续运行时,控制水温 30~ 40℃之间运行(设定温度 40℃,温差 10℃),选择天气情况有代表性的作为统计日,该日(见表 2)室外温度- 3~ 6℃,相对湿度 23%(15:00 测定值)至 64%(8:00 测定值).连续运行时 24 小时耗电约 72 kWh,按此计算,每月电费 1123 元,整个采暖期(90 d)3369 元,即每 m² 建筑面积采暖期耗电约 52 kWh,电费约 27 元.

通过实测进出水温差、水量,可以算得热泵系统的日平均制热量,又通过安装的电表得到日耗电量,由此可算得热泵机组的日平均 COP.不同天气条件下热泵运行参数见表 2.

表 2 热泵运行参数

时间	室外天气	热泵运行时间/ h	循环水量/ L/min	水平均温差/ ℃	平均耗电量/ (kWh/h)	平均制热量/ kW	日平均 COP
1 月 22 日	晴, 6~ - 3℃	8□00 至翌日 10□00	20	6.4	3.21	8.93	2.78
1 月 25 日	小雨, 7~ 3℃	9□00~ 22□00	20	6.5	3.44	9.07	2.64
1 月 17 日	阴转雪, 5~ - 1℃	10:00~ 21:00	20	5.1	2.77	7.12	2.57

2 室内平均辐射温度和作用温度

传统的空调和采暖方式以对流传热为主,室内温度设计参数使用空气干球温度.但采用辐射传热为主要份额的辐射供冷暖时,仅使用室内空气温度已不能准确评价室内舒适性,因此引入平均辐射温度(Mean Radiant Temperature, MRT)与作用温度(Operation Temperature, OT)的概念.

采用辐射采暖时,单位面积热辐射面的发热量可由下式计算:

$$Q_{\text{to1}}= h_r(t_s - t_r) + h_c(t_s - t_a)$$

(1)

式中: h_r 为辐射采暖系数($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$); t_s 为辐射面表面温度($^{\circ}\text{C}$); t_r 为平均辐射温度($^{\circ}\text{C}$); h_c 为对流换热系数($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$); t_a 为空气温度($^{\circ}\text{C}$).

为了进一步简化(1) 式,引入一个假想的等效温度,一般称为作用温度,记为 t_0 ,这样式(1) 可表为:

$$Q_{\text{to1}}= (h_r + h_c)(t_s - t_0)$$

(2)

由(1), (2) 可得:

$$t_0 = \frac{h_r t_r + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

(3)

辐射换热系数可用下式求得:

$$h_r = 4\sigma f_{\text{eff}}[(t_r + t_a)/2 + 273]^3.$$

(4)

式中: σ 为斯蒂芬- 玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$; f_{eff} 为辐射传热时人体表面积有效系数,表征了人体着装后表面积与裸体表面积之比,一般可取为 0.71;

对流换热系数可由式(5) 经验公式计算^[4]:

$$h_c = 8.5 V^{0.5}$$

(5)

式中: V 为空气流速(m/s).

MRT 可近似认为等于围护结构内表面平均温度,围护结构内表面平均温度采用面积加权平均温度,即:

$$t_r = \frac{\sum A_i t_i}{\sum A_i}. \quad (6)$$

在室内空气流速小于 0.2 m/s 时, 作用温度可认为等于平均辐射温度和室内空气温度的平均值^[5], 是影响人体舒适度的重要指标. 空气流速较低时室温和 MRT 对室内舒适程度具有同等影响力. 即作用温度

$$t_0 = \frac{1}{2}(t_a + t_r). \quad (7)$$

为了研究热泵-地板采暖使用效果和运行规律, 对该住宅进行了围护结构表面温度和室温的实测. 围护结构表面温度用 ST-60 型非接触测温仪(美国制)测得, 室内、外空气温度和相对湿度用 HMP-46 型温湿度计(芬兰制)读取, 温湿度计使用前均经过校正. 在白天每 3~4 小时测定一次. 为了进一步研究各温度变化关系, 根据 1 月 22 日实测数据作出了图 2 至图 5 的曲线.

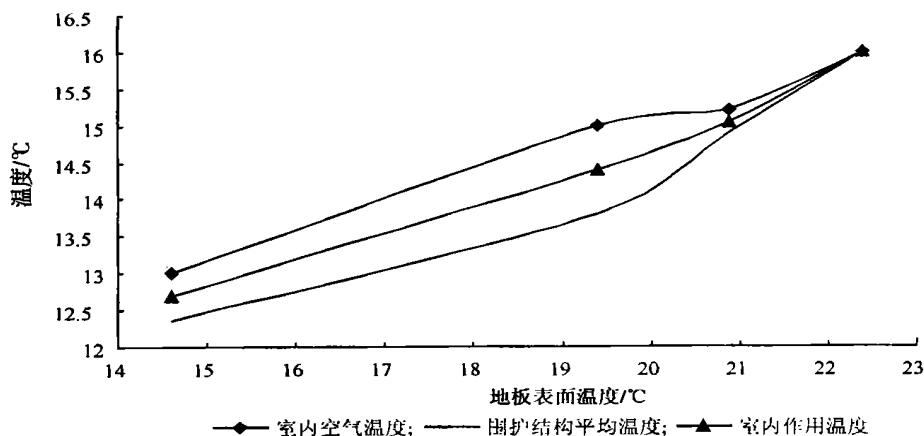


图 2 空气温度、围护结构内表面平均温度及作用温度与辐射面(地面)温度关系(书房)

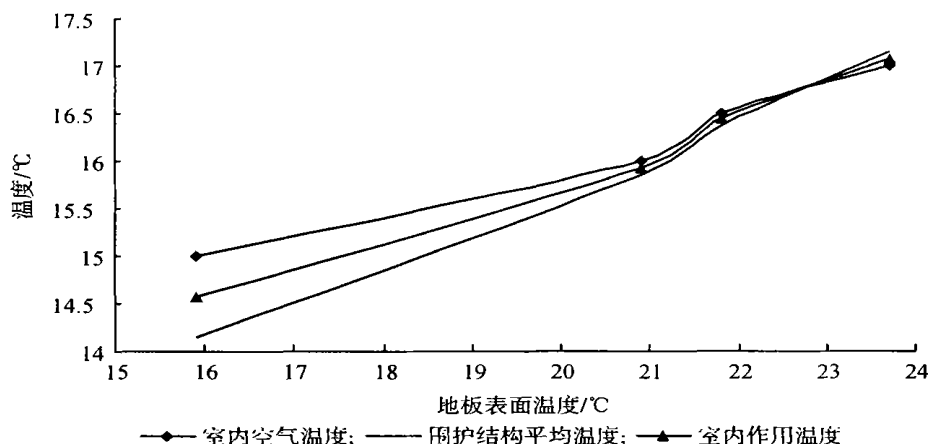


图 3 空气温度、围护结构内表面平均温度及作用温度与辐射面温度关系(卧室)

图 2、图 3 示出了不同外墙比例的房间辐射面温度与室内空气温度、平均辐射温度及作用温度的关系. 随着辐射面温度升高, 通过辐射传热使围护结构其余部分内表面温度升高, 围护结构与空气的对流换热又使空气温度不断升高, 并使得作为二者函数的作用温度也不断升高.

图 4、图 5 示出了书房和卧室围护结构各部分内表面平均温度与辐射面温度的关系. 可以看出, 单层窗和大面积未做保温的外墙(书房东墙)温度受室外温度影响较大, 即便在室内地面热辐射作用下, 窗

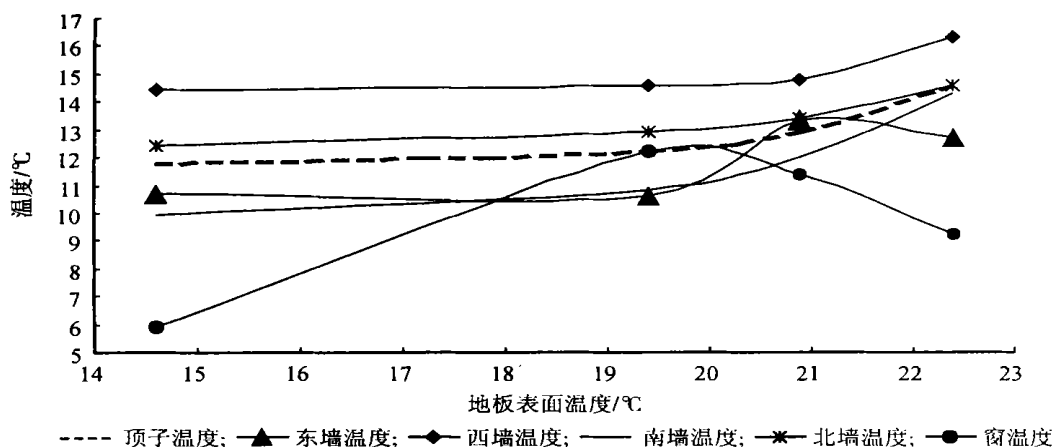


图4 围护结构内表面平均温度与辐射面(地面)温度关系(书房)

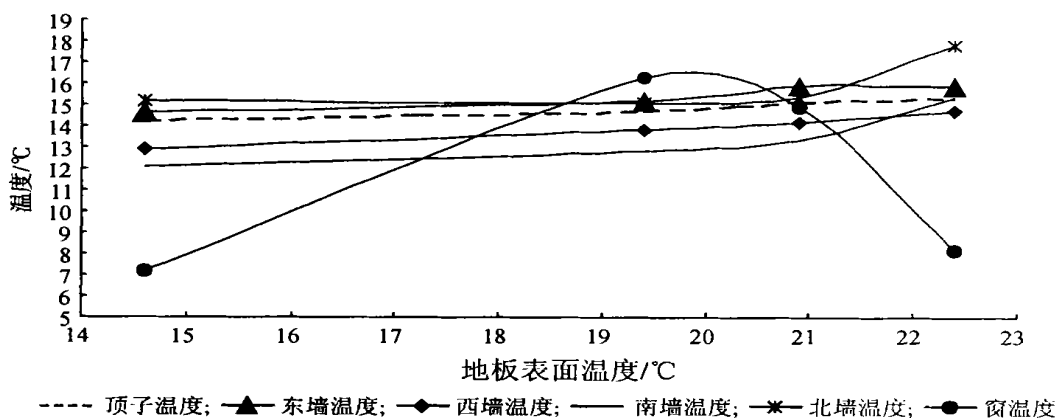


图5 围护结构内表面温度与辐射面(地面)温度关系(卧室)

和外墙内表面仍呈明显的周期性变化。特别是外窗,温度变化很大。比较书房和卧室的相关曲线可知,由于卧室只有一面外墙(南墙),在辐射面积小于书房情况下(家具对地面覆盖面积大)室内空气温度、围护结构内表面温度均比书房明显地高,以致作用温度高出 1°C 还多。由图中也可以看出,外窗内表面温度受室外温度和日照的影响远大于辐射面对它的辐射传热,从而显示了明显的周期性变化趋势。

应该说明,围护结构内表面温度同时受到室外温度和太阳辐射的影响,但除了窗以外,外气温度和太阳辐射的影响远小于辐射面对其余围护结构内表面温度的影响。为了进行验证,我们关闭了餐厅的地板管,测得餐厅除了窗以外,其余围护结构内表面温度波动远小于其余房间,说明上述结论是正确的。

3 讨论及初步结论

(1) 就冬季运行而言,适当设计选用的热泵冷热水机组加地板采暖用于南京地区无论就技术性还是经济性而言,都是可行的。

(2) 由于该地区住宅建筑使用240砖墙和单层窗,屋顶热阻也不够大,影响了能耗和运行费的进一步降低。

(3) 室内平均辐射温度 and 作用温度是衡量室内热舒适性的主要指标,外围护结构热阻偏低的状态对平均辐射温度 and 作用温度的进一步提高不利。

[参考文献]

- [1] 王子介. 地板供暖及其发展动向[J]. 暖通空调, 1999, 6: 35~ 38.
- [2] 王子介. 地板辐射供冷及地热空气源热泵可行性研究分析[C]. 全国热泵和空调技术交流会论文集, 2001. 10: 258~ 265.
- [3] 张建忠, 龚延风. 空气源热泵冷热水机组在南京的应用[J]. 现代空调, 2001, 3: 141~ 156.
- [4] B W Olesen, E Michel. Heat Exchange Coefficient Between Floor Surface and Space by Floor Cooling-Theory or a Question of Definition[J]. ASHRAE Transactions: Symposia, DA- 00- 8- 2: 684~ 694.
- [5] B W Olsen. Possibilities and Limitations of Radiant Floor Cooling[J]. ASHRAE Transactions 1997(103), 1: 42~ 48.
- [6] 1999 ASHRAE Applications Handbook, Chapter 52[Z].

Energy Consumption and Operating Temperature of Residential Building by Using Radiant Heating

Wang Zijie

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: The air temperature, inner surface temperature and heating equipment energy consumption in winter season were measured for an apartment equipped with radiant heating system. Based on the measured results, the average radiant temperature and operating temperature of different rooms with different outside walls were calculated and compared. The results show that the operating temperature of rooms with two sides of outside walls is more than 1℃ higher than that with one side of outside wall. The range of the energy consumptions of the heating system varies from 7.3 kWh/m² to 52 kWh/m² for a heating season, depending on the equipment operating models and room design temperatures.

Key words: radiant heating, residential building, operating temperature, building energy consumption, energy efficiency

[责任编辑: 刘健]

(上接第 60 页)

- [9] Boyer J P. Laser tomography method of flame fronts[J]. Combustion and Flame, 1980, 39(1): 3~ 14.
- [10] Roquemore W M. Influence of vortex shedding process on a bluff body diffusion flame[J]. AIAA, 1983, 83(2): 335~ 339.
- [11] Chen L D. Visualization of jet flame[J]. Combustion and Flame, 1986, 66(1): 81~ 90.

The Experimental Study on the Particle Imaging Velocimetry Based on Single Exposal Image.

Yang Hongmin¹, Gu Fan², Liu Yong², Xu Yiqian²

(1. College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC;

2. Department of Power Engineering, Southeast University, 210096, Nanjing, PRC)

Abstract: The characteristics of different PIV (Particle Imaging Velocimetry) technologies were generalized in this paper. In view of the complexity and high expense of these systems, a new approach to obtain the 2-D velocity field based on the two FFT to the single spatial laser tomography images is proposed and a simple system based on this method is also developed. The experimental results show that good effect was achieved for the measuring range of low velocity and the PIV with lower expense can be expected.

Key words: laser tomography image, single exposal image, Particle Imaging Velocimetry

[责任编辑: 刘健]