

低温地板辐射供暖 特性参数的研究

中国建筑科学研究院空调所 冯晓梅[☆]

山东建筑工程学院 肖勇全

摘要 建立了低温地板辐射供暖房间各围护结构的热平衡关系式,计算了地板表面温度、热流密度、室内空气温度和围护结构内表面温度。介绍了计算地板表面温度和围护结构内表面温度的耦合程序,测试了地板辐射供暖房间的特性参数。

关键词 低温地板辐射供暖 热平衡 数值计算

Research on the characteristic parameters of low temperature radiant floor heating system

By Feng Xiaomei[★] and Xiao Yongquan

Abstract Establishes the heat balance equation of the building envelope. Calculates the floor surface temperature, heat flow rate per unit floor area, indoor air temperature and inner surface temperatures of building envelopes. Presents the coupled program for calculating the floor surface temperature and the inner surface temperatures. Measures the characteristic parameters.

Keywords low temperature radiant floor heating system, heat balance, numerical simulation

★ Institute of Air Conditioning, China Academy of Building Research, Beijing, China

①

0 引言

低温地板辐射供暖系统因其舒适性和节能性被广泛应用于住宅、宾馆客房、商场、游泳池等建筑中。因此,研究其地板表面温度、辐射换热量、对流换热量、围护结构内表面温度等特性参数是很有必要的,而当前它们的计算主要以美国 ASHRAE 手册^[1]上的方法为依据。由于围护结构种类繁多,特别是大玻璃外窗的广泛采用已经超出了手册规定的范围,所以如何根据低温地板辐射供暖房间围护结构的具体情况合理确定各特性参数是理论上和工程上应考虑的新问题。为此,笔者编写了计算地板表面温度、围护结构内表面温度和室内空气温度的通用程序,分析了盘管间距、埋深等变化对地板辐射供暖房间各特性参数的影响,并进行了实验验证。

1 地板辐射供暖系统各特性参数的计算

1.1 地板表面与房间的换热量

地板辐射供暖房间如图 1 所示,1,6 是北、南

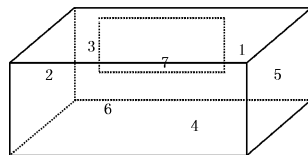


图 1 供暖房间示意图

外墙,2,5 是西、东内墙,3 是顶棚,4 是地板,7 是北外窗。

在辐射供暖条件下,离开地板、墙体的总热量为对流换热量

①☆ 冯晓梅,女,1978 年 6 月生,硕士研究生,工学硕士,工程师
100013 北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院空调所
(010) 84275107-803
E-mail: fxmstar@163.net
收稿日期:2002-08-26
修回日期:2002-10-08

和辐射换热量之和。

1.1.1 辐射换热量与对流换热量的计算

1.1.1.1 第 i 表面的单位面积辐射换热量 $q_{r,i}$

$$q_{r,i} = \sum_{k=1}^7 \sigma \epsilon_{ik} \varphi_{ik} \left[\left(\frac{t_i + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_k + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (1)$$

式中 σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常量, 等于 $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϵ_{ik} 为表面 i 与表面 k 之间的系统黑度; φ_{ik} 为表面 i 对表面 k 的辐射角系数; t_i, t_k 为表面 i, k 的内表面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

为计算方便将式(1)线性化

$$q_{r,i} = \sum_{k=1}^7 h_{r,ik} (t_i - t_k) \quad (2)$$

式中 $h_{r,ik}$ 为围护结构表面 i 和 k 之间的当量辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 可用式(3)近似计算:

$$h_{r,ik} = \sigma \epsilon_{ik} \varphi_{ik} \frac{\left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right]}{t_i - t_k} \approx 4 \times 10^{-8} \sigma \epsilon_{ik} \varphi_{ik} \left[\frac{T_k + T_i}{2} \right]^3 = 4 \times 10^{-8} \sigma \epsilon_{ik} \varphi_{ik} T_m^3 \quad (3)$$

式中 T_i, T_k 分别为表面 i, k 的热力学温度, K ; T_m 近似取某已知温度, 例如, 令其等于室温 t_n , 或令其等于上一次迭代的第 i 和第 k 内表面的平均温度。

1.1.1.2 第 i 表面的单位面积对流换热量 $q_{c,i}$

$$q_{c,i} = h_{c,i} (t_i - t_n) \quad (4)$$

式中 $h_{c,i}$ 为各内表面的平均表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; t_n 为室内空气的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

表面传热系数 $h_{c,i}$ 的计算是一个特别复杂的过程, 因为它与流体的温度场、速度场紧密相关, 为求解表面传热系数必须先求解出流体的温度场和速度场。可以先求解壁面处综合换热系数 h_i (表面传热系数 $h_{c,i}$ 与辐射换热系数 $h_{r,ik}$ 之和)^[2], 然后根据式(3)求得的 $h_{r,ik}$ 即可求出表面传热系数 $h_{c,i}$ 。

根据单位面积对流换热量和辐射换热量, 可得整个房间的换热量 Q_1 ($Q_1 = (q_{r,4} + q_{c,4}) F_4$, 其中 F_4 为地板表面面积, m^2)。

1.1.2 实感温度^[3]的计算

在辐射供暖系统中, 通常以实感温度作为衡量辐射供暖的标准, 它标志着在辐射供暖环境中, 人或物体受辐射和对流换热综合作用时, 以温度表现出来的实际感觉。

实感温度可以由黑球温度计来测量, 也可以根据经验公式计算得出:

$$t_s = 0.52 t_n + 0.48 \bar{t} \quad (5)$$

式中 t_s 为室内实感温度, $^{\circ}\text{C}$; $\bar{t}$ 为室内围护结构的平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; $\bar{t} = \sum_{k=1}^7 F_k t_k / \sum_{k=1}^7 F_k$, 其中 F_k 为表面 k 的面积, m^2 。

1.1.3 热水流量的计算

热水经过盘管后自身焓变化量为:

$$Q_2 = G c \Delta t \quad (6)$$

式中 G 为热水流量, kg/s ; c 为管内热水比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; Δt 为供回水温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据能量守恒 $Q_1 = Q_2$, 可以求出热水流量 G 。

1.2 围护结构内表面温度及室内空气温度的计算

1.2.1 数学模型的建立

建立房间围护结构内表面的热平衡方程式所采用的假设^[4]为: a) 窗户在北面, 冬季供暖负荷主要考虑通过围护结构的热损失。b) 外墙的外表面温度用室外空气温度 t_w 来代替, 计算围护结构的传热系数时把室外空气热阻考虑进去。根据以上假设, 列出房间 6 个面 ($i=1, 2, 3, 5, 6, 7$) 的热平衡方程式:

$$K_i (t_w - t_i) + h_{c,i} (t_n - t_i) + h_{c,4} (t_n - t_4) + \sum_{k=1}^7 h_{r,ik} (t_k - t_i) = 0 \quad (7)$$

式中 K_i 为包括室外空气热阻在内的第 i 面围护结构的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; t_4 为地板表面温度, $^{\circ}\text{C}$, t_4 的计算方法见文献[5]。

对于地板辐射供暖系统, 在稳态条件下建立房间空气热平衡时, 只考虑空气与各壁面的对流换热量。其数学表达式为:

$$\sum_{k=1}^7 F_k h_{c,k} (t_k - t_n) = 0 \quad (8)$$

解由式(7), (8) 组成的方程组, 即可得各围护结构的内表面温度 t_k 及室内空气温度 t_n 。

1.2.2 求解算法

笔者编写了计算地板表面温度、围护结构内表面温度的耦合程序 FXM-II。其计算步骤如下:

a) 假设热水流量 G 、除地板外的围护结构内表面温度 t_k 和室内空气温度 t_n , 代入程序 FXM-I (由于篇幅所限, 程序 FXM-I 见文献[5]), 求出辐射板表面平均温度 t_4 、热流量 q , 计算出热水流量 G 等。

b) 以 t_4, t_k 为边界条件, 计算室内空气温度

场,求出各内表面的表面传热系数。

c) 根据房间热平衡程序 FXM- II, 求出围护结构内表面温度 t_k 、空气温度 t_n 。

d) 把求出的 t_k, t_n 再代入 FXM- I, 重复以上步骤,反复迭代,直到两次求出的热流量 q, t_4 , 各围护结构内表面温度 t_k 等参数相差不大,迭代结束。此时求出的值 t_k, t_n, t_4, q, G 即为所求的值。

1.2.3 计算结果

表 1 给出了室外温度 t_w 为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 供回水平均温度 t_{pj} 为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盘管间距 d 、埋深 l 变化时的各特性参数。

表 1 盘管间距及埋深同其他特性参数的关系

d/mm	150	200	220	250	200	200	200
l/mm	90	90	90	90	70	120	150
$t_4/^{\circ}\text{C}$	31.62	30.00	29.34	28.34	30.98	28.75	27.69
$t_n/^{\circ}\text{C}$	24.02	22.69	22.15	21.35	23.50	21.68	20.83
$t_1/^{\circ}\text{C}$	16.39	15.38	14.97	14.37	15.99	14.62	13.98
$t_2/^{\circ}\text{C}$	23.63	22.33	21.80	21.01	23.12	21.34	20.51
$t_3/^{\circ}\text{C}$	23.86	22.54	22.01	21.22	23.34	21.54	20.70
$t_5/^{\circ}\text{C}$	23.63	22.33	21.80	21.01	23.12	21.34	20.51
$t_6/^{\circ}\text{C}$	16.46	15.45	15.05	14.44	16.06	14.69	14.05
$t_7/^{\circ}\text{C}$	7.00	6.40	6.16	5.80	6.76	5.95	5.56
$\bar{t}/^{\circ}\text{C}$	23.49	22.19	21.66	20.88	22.97	21.20	20.37
$t_8/^{\circ}\text{C}$	23.77	22.45	21.91	21.12	23.25	21.45	20.61
Q_c/W	34.74	33.92	33.54	32.89	34.44	33.17	32.43
Q_r/W	34.10	32.94	32.55	32.04	34.93	30.97	29.57
Q/W	68.84	66.86	66.09	64.93	69.37	64.14	62.00
$G/(\text{kg}/\text{h})$	106.86	103.80	102.60	100.81	107.69	99.57	96.26
$Q_r/Q/\%$	49.53	49.26	49.25	49.35	50.35	48.29	47.69

注: Q_c, Q_r, Q 分别为对流换热量、辐射换热量和总换热量。

由表 1 可以看出,随着盘管间距的增加,地板表面温度、室内空气温度、围护结构内表面温度减小;随着埋深的增加,亦如此。另外,围护结构内表面温度受室外环境影响很大,由此造成了内墙的温度与外墙、外窗的温度有较大的差异。整个围护结构中考虑了窗户的影响(传热系数较大,温度低),致使地板辐射供暖条件下的室内实感温度略低于室内空气温度。

2 实验条件及装置

地板辐射供暖房间位于山东建筑工程学院某一实验机房里。房间尺寸为 $8.9\text{ m} \times 4.7\text{ m} \times 3.9\text{ m}$ (如图 2), 所选的房间位于 1 层, 顶层是学校的报告厅, 报告厅采用的是全空气集中空调系统, 间歇运行。东面相邻的是非供暖房间, 西面为一内厅, 北面是 240 mm 厚的外砖墙, 外墙上有一铝合金塑钢外窗, 窗的面积为 4.8 m^2 , 南面相邻的是学生自

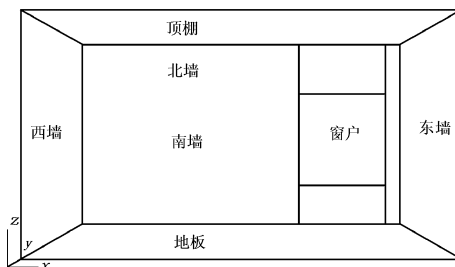


图 2 地板辐射供暖房间

习室,采用同样的地板供暖系统。地板辐射供暖系统地板层构造参见文献[5],环路布置采用双回形,管材采用的是进口原料制作的交联聚乙烯(PEX),供水温度小于等于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 直径 $\Phi 12/16\text{ mm}$, 间距 200 mm , 埋管层厚度为 120 mm 。整个供暖房间采用 4 个相同的双回形环路。

在实验中,所用仪器均经过山东省计量研究所标定。测量室内温度场的地板测点及空间测点布置分别如图 3 和图 4 所示,地板测点布置如图 5 所示。

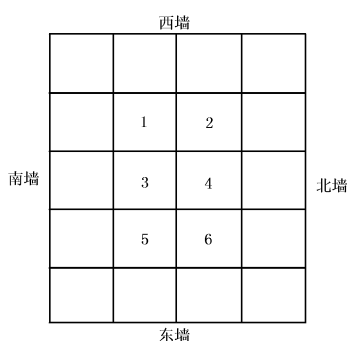


图 3 空间测点平面图

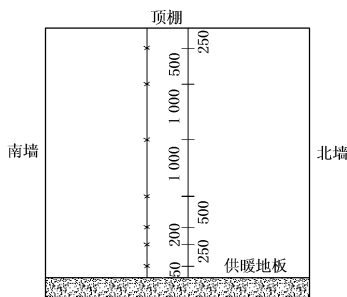


图 4 空间测点布置图

水温度为 $52.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 回水温度为 $46.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 供回水平均温度为 $49.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 流量为 $515\text{ kg}/\text{h}$ 。

3 实验测试结果

3.1 各表面温度分布

在各测点测量了地板表面温度及各围护结构内表面温度,见表 2。因为篇幅的限制,测点温度不能一一列出,在此只列出其平均值。

习室,采用同样的地板供暖系统。

地板辐射供暖系统地板层构造参

对于其他墙面及窗户,也分别布置了许多测点,其布置方式同地板一样。

实验从 $10:00 \sim 22:00$, 室外平均温度为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 顶层报告厅一天中未曾使用,室内空气平均温度为 $11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 西墙外大厅空气平均温度为 $15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与东墙相邻的房间室内空气温度为 $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。地板辐射供暖房间的热源采用锅炉水,经换热器换热后,供

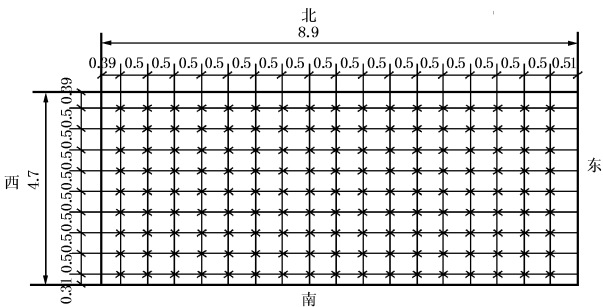


图 5 地板测点布置图

表 2 地板辐射供暖系统各特性参数

	实验值	计算值	绝对误差
$t_1/^\circ\text{C}$	17.21	17.80	0.59
$t_2/^\circ\text{C}$	20.70	20.85	0.15
$t_3/^\circ\text{C}$	20.59	20.77	0.18
$t_4/^\circ\text{C}$	31.41	31.74	0.33
$t_5/^\circ\text{C}$	19.05	19.27	0.22
$t_6/^\circ\text{C}$	22.94	22.89	0.05
$t_7/^\circ\text{C}$	11.03	11.11	0.08
$\bar{t}/^\circ\text{C}$	22.49	22.63	0.14
$t_n/^\circ\text{C}$	24.41	23.73	0.68
$t_s/^\circ\text{C}$	23.49	23.20	0.29
Q_r/W	59.41	57.36	2.05
Q_c/W	54.79	54.82	0.03
Q/W	114.20	112.18	2.02
$G/(\text{kg}/\text{h})$	515	505.86	9.14
$Q_r/Q/\%$	52.02	51.13	0.89

从表 2 可以看出,除了外墙、外窗外,其他面的内表面温度都比较高。这样,不仅可以使冷辐射引起的人体散热量大大降低,而且提高了围护结构内表面的温度,从而提高人体的热舒适性。另外,由表 2 可以计算出计算值与实验值的最大误差为 3.574%,说明仿真程序 FXM-Ⅱ 的计算精度较高。

3.2 室内空气温度分布

由于低温地板辐射供暖系统和其他供暖系统的供暖机理不同,必然会产生沿房间高度方向上不同的空气温度分布。由于实验条件的限制,本文只测量了测点布置如图 3 和图 4 所示的室内空气温度分布。部分测点的测试结果如图 6 所示。

由图 6 可见,在竖直方向上,室内空气温度分布比较均匀,温度梯度小,并且出现特殊的“负温度梯度”,这是由于低温地板辐射供暖系统在传热过程中热流主要向上传递。地板辐射供暖的这种特有现象不仅使散热更加均匀而高效(与对流散热方式相比,一方面,使房间顶部不会过热,减少了围护结构耗热量;另一方面,由于传热温差小,使室内气流的自然对流换热减弱,室内产生的上升气流减

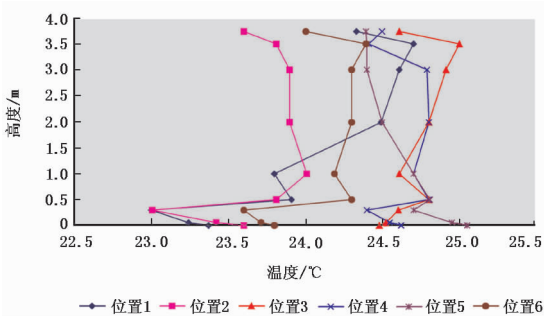


图 6 竖直方向上室内空气温度分布

弱,室内空气流动缓慢,室内的卫生条件得以改善),而且能使人产生“脚暖头凉”的感觉,更好地满足人体的热舒适性要求。

4 结论

4.1 通过耦合程序求解了围护结构内表面温度等参数,由表 1 可见外墙、外窗、内墙之间的温度有较大的差异,这种差异性势必影响房间的热舒适。

4.2 地板辐射供暖系统室内热环境的舒适性是通过室内实感温度体现出来的。由于外窗的影响,室内实感温度略低于室内空气温度。而对于无外窗的房间适当降低供热量仍可保证室内一定的舒适度。

4.3 室内空气温度并不是衡量室内热环境舒适性的惟一标准,室内热环境的舒适性还受很多因素的影响,其中,围护结构内表面温度是一个很重要的参数,而它又与地板层的结构(盘管间距、埋深)、热媒温度、室外环境温度、围护结构材料等多种因素有关。

4.4 在地板辐射供暖房间的竖直方向上,室内空气温度分布出现特殊的“负温度梯度”,使得房间顶部不会过热,减少了围护结构的热损失。

4.5 用耦合程序 FXM-Ⅱ 可以方便地计算盘管间距、埋深变化时室内各特性参数的变化。

参考文献

- ASHRAE. 2000 ASHRAE Handbook-System and equipment. Panel heating and cooling. 6.1-6.4
- 章熙民,任泽霁,梅飞鸣. 传热学. 北京:中国建筑工业出版社,1993. 101
- 陆耀庆. 供暖通风设计手册. 北京:中国建筑工业出版社,1987. 262-274
- 彦启森,赵庆珠,陈在康. 建筑热过程. 北京:中国建筑工业出版社,1986. 115-121
- 冯晓梅,肖勇全. 低温地板辐射供暖的动态仿真. 建筑热能通风空调,2001,20(6):15-18