

地板辐射供冷/ 暖的简化动态模型及其应用

王子介, 夏学鹰

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 给出了低温地板辐射供冷/ 暖的简化动态模型, 作为模型使用的实例, 研究分析了地板供冷时管间距对各项温度的影响。
[关键词] 辐射供暖, 辐射供冷, 模型, 管间距
[中图分类号] TU832, [文献标识码] A, [文章编号] 1672- 1292- (2004) 01- 0001- 04

0 引言

低温地板辐射供暖已在我国, 特别是北方地区获得了大面积应用, 其舒适、节能、便于分户计量等优点日益被设计人员和用户所认识。部分地区已制定地方法规, 这对于指导工程设计、施工起到了良好作用。辐射供冷的研究也不断取得进展。但目前国内对于辐射供暖/ 冷的理论研究有所不足, 以致现有资料给出的数据不尽完整、准确。我们在长期研究基础上提出了以下动态模型, 并且在自行搭建的实验台上进行了实验验证。用经验验证后的模型进行了有关计算, 获得了一些数据以供参考。

1 基本模型

图 1 为地板辐射供暖模拟网络图。图中, δ_1 、 δ_2 和 δ_3 分别为面层、垫层和保温层厚度;

t_{ha} —— 房间空气温度, / $^{\circ}\text{C}$;
 t_p —— 与地面进行辐射换热的各表面温度的加权平均值 / $^{\circ}\text{C}$;

$$t_p = \frac{\sum_{i=2}^n (F_i t_{ti})}{\sum_{i=2}^n (F_i)}$$
, 式中: F_2 至 F_6 分别为东南西北墙和顶板的面积 / m^2 ; t_{ti} 为与 F_i 相对应的表面温度 / $^{\circ}\text{C}$, 在室内空气流速较小情况下, 可认为等于室内平均辐射温度 MRT;

t_s —— 地面温度 / $^{\circ}\text{C}$;
 t_h —— 混凝土土层上表面温度 / $^{\circ}\text{C}$;
 t_{st} —— 采暖(供冷)管表面温度 / $^{\circ}\text{C}$;
 t_{fp} —— 管中热(冷)水平均温度 / $^{\circ}\text{C}$,

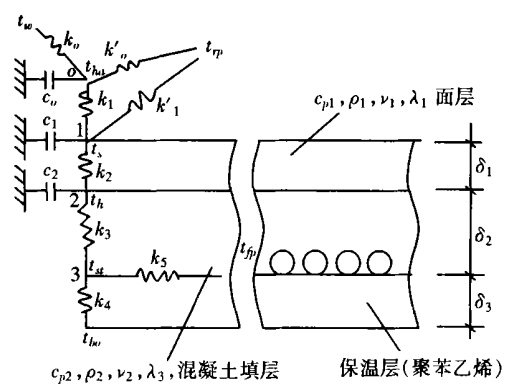


图 1 地板辐射供冷 / 暖模拟网络图

$$t_{fp} = \frac{t_e + t_0}{2}$$
, t_e 和 t_0 分别为进出水温度 / $^{\circ}\text{C}$;

t_{bo} —— 保温层底(楼板顶部)平均温度 / $^{\circ}\text{C}$, 当该模型针对底层时, 即为苯板下的地面温度;

t_w —— 室外空气温度 / $^{\circ}\text{C}$;

$k_0 = \frac{1}{R_0}$, R_0 为室内外空气传热热阻; k'_o 为吊顶与室内空气间传热系数, 可近似认为 $k'_o = \alpha_1$;

$k_1 = \frac{1}{R_1}$, R_1 为房间空气传热热阻; $k'_1 = \frac{1}{R'_1}$, R'_1 为地面与房间其余表面之间的辐射热阻; $k_2 = \frac{1}{R_2}$, R_2 为地面面层材料热阻; 面层材料可以是混凝土, 地板砖, 木地板, 塑料, 地毯等; $k_3 = \frac{1}{R_3}$, R_3 为混凝土土层热阻; $k_4 = \frac{1}{R_4}$, R_4 为保温层热阻; $k_5 = \frac{1}{R_5}$, R_5 为管壁导热热阻。

c_1 —— 地面面层热容, $c_1 = c_{p1} \rho_1 v_1$, J / $^{\circ}\text{C}$, $c_p \rho$, v 分别为比热, 密度和容积; c_2 —— 混凝土土层热

容, $c_2 = c_{p2} \rho_2 v_2, \text{J/}^\circ\text{C}$.

忽略房间内其余表面与空气之间的对流换热, 由图 1 中点 1 的热平衡关系可得:

$$c_{p1} \rho_1 v_1 \frac{dt_s}{d\tau} = Q_r + Q_c + Q_d \quad (1)$$

式中: Q_r 为地板表面与其余各房间的辐射换热热量

$$Q_r = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right] + \frac{1}{\varphi_{12}} + \frac{\sigma(T_s^4 - T_p^4) F_1}{\sum_{i=2}^6 F_i - F_1} \left[\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right] \quad (2)$$

式中: σ 为玻耳兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_s 和 ε_1 分别为地板表面热力学温度 K 和表面发射率; T_p 和 ε_2 分别为其余各表面热力学温度的加权平均值 K 和表面发射率; φ_{12} 是地板对其他表面的整体角系数, F_1 为地板面积.

Q_c 为地板表面与空气之间的对流换热热量,

$$Q_c = \alpha_1 F_1 (t_s - t_{ha}) \quad (3)$$

式中: α_1 为地板表面与空气间的对流换热系数.

Q_d 为混凝土填层表面与地面层内的传热量,

$$Q_d = \frac{\lambda}{\delta_1} F_1 (t_s - t_h) \quad (4)$$

将(3) . (4) 式代入(1), 注意到 $v_1 = F_1 \delta_1$, 各项同除以 F_1 可得:

$$c_{p1} \rho_1 \delta_1 \frac{dt_s}{d\tau} = - \frac{Q_r}{F_1} + \alpha_1 (t_{ha} - t_s) + \frac{\lambda}{\delta_1} (t_h - t_s) \quad (5)$$

或写作:

$$c_1 \frac{dt_s}{d\tau} = - \frac{Q_r}{F_1} + k_1 (t_{ha} - t_s) + k_2 (t_h - t_s) \quad (5')$$

式中: $c_1 = c_{p1} \rho_1 \delta_1$; $k_1 = \alpha_1$; $k_2 = \frac{\lambda}{\delta_1}$.

由点(2) 热平衡式可得:

$$c_{p2} \rho_2 \delta_2 \frac{dt_h}{d\tau} = k_2 (t_s - t_h) + k_3 (t_{st} - t_h) \quad (6)$$

或写作:

$$c_2 \frac{dt_h}{d\tau} = k_2 (t_s - t_h) + k_3 (t_{st} - t_h) \quad (6')$$

式中: $c_2 = c_{p2} \rho_2 \delta_2$; $k_3 = \frac{\lambda_2}{\delta_2}$, λ_2 , δ_2 分别为混凝土填层的导热系数和厚度.

由点(3) (埋管处) 的热平衡式可得:

$$c_5 \frac{dt_{st}}{d\tau} = k_3 (t_h - t_{st}) + k_4 (t_{lo} - t_{st}) + k_5 (t_{fp} - t_s) \quad (7)$$

式中: $k_4 = \frac{\lambda_3}{\delta_3}$, λ_3 , δ_3 分别为保温层的的导热系数

和厚度;

$$k_5 = \frac{\lambda_g}{\delta_g}, \lambda_g, \delta_g \text{ 分别为塑料管(PEX) 壁的导热}$$

系数和壁厚;

$c_5 = c_{pg} \rho_g \delta_g$, 分别为塑料管(PEX) 的比热、密度和厚度.

2 管径和埋管密度(管间距) 的影响

当需要研究管径和埋管密度(管间距) 的影响时, 热水(冷水) 带给地板的总热量(冷量) 可用下式算得:

$$Q_z = \frac{\lambda_g}{\delta_g} F_1 F_{gu} (t_{fp} - t_s) \quad (8)$$

式中: F_{gu} 为每 m^2 地板面积时的管表面积, $F_{gu} = \pi dL/\text{m}^2$, L 为单位面积管长度. 这样, 在假设地板温度均匀分布前提下, 每 m^2 地板面积的热量(冷量) 可用下式算得:

$$Q_{zu} = \frac{\lambda_g}{\delta_g} \pi dL (t_{fp} - t_s) \quad (9)$$

忽略地板(或楼板) 直接向室外的热损失, 可得到向下的传热量:

$$Q_{db} = Q_z - Q_d. \quad (10)$$

在模拟计算中, 可以固定室内温度来计算所需要的进水温度 and 水量, 也可以固定进水参数, 计算在一定室外气温下可以达到的室内温度, 此时应增加相应的方程:

$$c_o \frac{dt_{ha}}{d\tau} = k_1 F_1 (t_s - t_{ha}) + k_o F_1 (t_w - t_{ha}) + k'_o \sum_{i=2}^n F_i (t_{rp} - t_{ha}) \quad (11)$$

式中: $c_o = c_{po} \rho_o v_o$, c_{po} , ρ_o 和 v_o , 分别为空气的比热、密度和容积.

k_o 为室内外空气间传热系数 $/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$; k_o

$$= \frac{1}{R_o} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{d.pj}}, \alpha_1, \alpha_2 \text{ 分别为围护结构}$$

内、外侧的对流换热系数 $/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $R_{d.pj}$ 为围护结构平均热阻,

$$R_{d.pj} = \frac{\left[\frac{\delta_l}{\lambda} F_d + \frac{\delta_{vi}}{\lambda_{di}} F_{wi} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} F_w \right]}{\sum F}, \text{ 式中, 下标}$$

d, wi, w 分别表示门、窗、墙.

k'_o 为吊顶与室内空气间传热系数, 可近似认为 $k'_o = \alpha_1 / (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

3 考虑室外温度和内墙表面温度对辐射和对流传热的影响

在研究室内温度恒定情况下地板供冷 / 热的情况时, 可以假定内墙温度恒定为某一温度(即在图 1 所示网络图中, 不考虑 t_{ha} 节点以上部分), 可以简化模型和程序。实际上, 室外温度变化影响到内墙温度, 内墙温度又影响到室内空气温度和地面与内墙表面的辐射换热量, 是非常复杂的物理现象, 要对此作出准确的动态模拟实非易事。但采用网络模拟的方法, 假定各扇墙的温度均匀分布, 可以把传热简化为一维问题, 这对于工程问题, 是完全可以满足要求的。注意到在本实验小室中, 未计及太阳辐射问题, 则可得到下述两个方程:

$$\alpha_2(t_{hw} - t_w) = \frac{\lambda_b}{\delta_b}(t_b - t_{hw}) \quad (13)$$

$$\frac{\lambda_b}{\delta_b}(t_b - t_{hw}) = \alpha_1(t_{ha} - t_b) + Q_r \quad (14)$$

式中: t_w 为室外空气温度 / °C; t_{hw} 为外墙外表面温度 / °C; λ_b 为外墙导热系数; t_b 为外墙内表面温度 / °C; δ_b 为墙厚度 / m。

4 实验验证及部分计算结果

计算得到的结果在我们建在济南和南京的实验室进行了验证, 模拟结果和实验结果显示了良好的一致性。详见参考文献 [3]、[4], 此处不再赘述。

我们使用美国 TRNSYS 和欧洲 ESACAP 软件进行模拟计算, 限于篇幅, 以下仅给出与工程设计联系较密切的部分计算结果, 供参考。

作为模型应用的实例, 将管间距的变化对各项温度参数变化的影响做了分析。首先假定一个参照状态, 在此状态下, 通过调节程序中管子间距的大小数值, 解出一系列所求参数, 以期能得到管间距对于地板供冷系统的影响。计算分析所选取的参照状态为:

(1) 物性参数:

水泥沙浆: $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ $c = 1050 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

$\lambda = 0.93 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

混凝土: $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ $c = 920 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

$\lambda = 1.51 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

24 砖墙双面抹灰: $\lambda = 2.08 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

$R = 0.492 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$

PEX 塑料管: $\rho = 940 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0.41 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

聚苯乙烯泡沫: $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ $c = 1.38 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

$\lambda = 0.042 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

(2) 边界条件:

水泥沙浆层厚度: $\delta_1 = 0.02 \text{ m}$; 混凝土层厚度:

$\delta_2 = 0.06 \text{ m}$

聚苯乙烯泡沫层厚度: $\delta_3 = 0.02 \text{ m}$ $\delta_0 =$

$v_0/F_1 = 0.450 \text{ m}$

墙体厚度: $\delta_b = 0.260 \text{ m}$

房间各个面层的面积: $F_1 = F_6 = 78 \text{ m}^2$

$F_2 = F_4 = 29.25 \text{ m}^2$ $F_3 = F_5 = 54.00 \text{ m}^2$

供水温度 $t_e = 13.00 \text{ }^\circ\text{C}$ 回水温度 $t_o = 15.00 \text{ }^\circ\text{C}$

室外温度 $t_w = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 管子直径 $D = 20 \text{ mm}$

水流量 $M_w = 0.113 \text{ kg/s}$

在上述物性参数和边界条件下所得到的结果列于图 2 ~ 图 5。

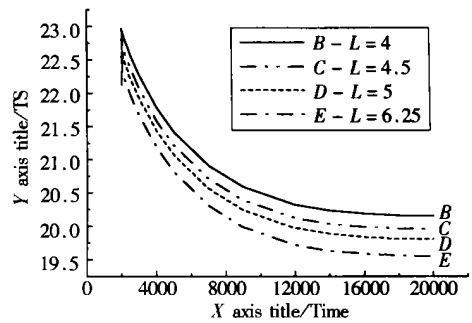


图 2 地板表面温度随管间距的变化

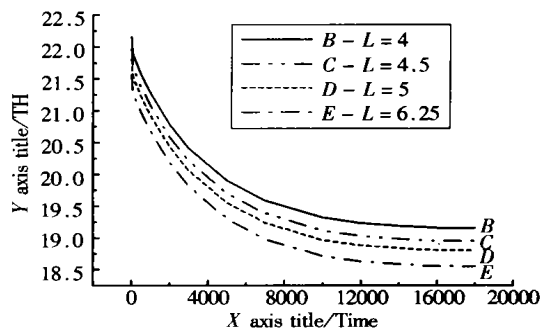


图 3 混凝土填层上表面温度随管间距的变化

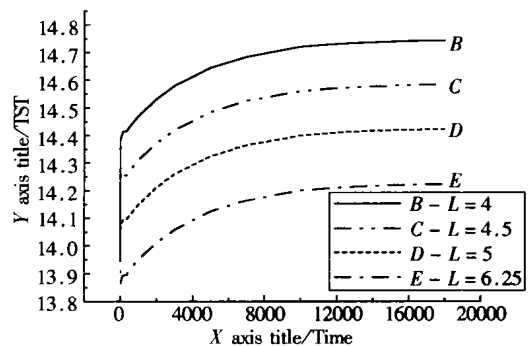


图 4 供水管表面温度随管间距的变化

可以看出, 对于地板供冷系统来说, 当给回水温度一定时, 各个温度参数随着时间的逐渐增大其

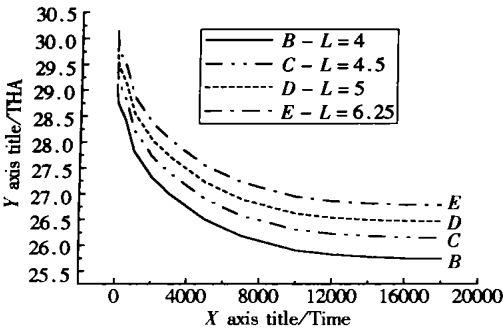


图 5 室温随管间距的变化

数值解也呈现增大趋势. 在上述给定的被覆层厚度下, 地板表面温度值(TS) 比混凝土填层上表面温度值(TH) 约高 1℃左右. 管表面温度值(TST) 值介于供回水温度(13~ 15℃) 之间, 随着时间的变化, 其波动值较小, 曲线呈平缓升高的走向. 地板供冷系

统的各温度参数与管间距的大小有密切关系. 增大管间距, 各温度参数都趋于减小. 地板表面温度值(TS) 和混凝土填层上表面温度值(TH) 减小的幅度相差不大. 管间距的变化对室内空气温度值(THA) 的影响非常明显. 由于地板供冷本身供冷能力较低, 因此, 减小盘管间距显得尤为重要.

[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, 夏学鹰. 地板辐射供冷可行性研究分析[J]. 暖通空调, 2002, (6) : 56~ 58.
[3] 夏学鹰. 地板辐射供冷/ 暖系统的实验研究与动态模拟 [D]. 济南: 山东建工学院, 2001.
[4] 李先中. 置换通风-辐射供冷系统的特性及其应用的可行性研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.

One-Dimensional Dynamic Models for Radiant Floor Heating/ Cooling

Wang Zijie, Xia Xueying

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

Abstract: The simplified dynamic models for radiant floor heating are developed. The effect of row distance between the tubes on temperatures are analyzed by using the models.
Key words: radiant heating, radiant cooling, model, row distance between tubes

[责任编辑: 刘 健]