

低温热水辐射地板动态散热特性研究

马 超¹, 刘艳峰¹, 王登甲¹, 刘加平²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 根据地板二维非稳态散热过程数值分析发现, 在常用辐射供暖地板结构下, 系统停止运行后 13 h 左右, 地板散热趋于稳定, 20 h 后可认为地板散热过程结束. 为了便于工程上辐射地板散热量计算, 把地板二维非稳态散热数学模型简化为一维散热数学模型. 通过一维解析解与二维数值解对比分析, 发现两者差异在 1.5% 之内. 通过对地板散热数学模型求解分析: 获得了系统停止运行后不同填充厚度地板表面平均温度变化率最大值出现时间; 填充层厚度越大, 地板动态散热越稳定; 厚度大于 60 mm 时, 温度变化率已无明显差异.

关键词: 辐射地板; 散热特性; 表面温度; 温度变化率

中图分类号: TU832.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)03-0416-06

低温热水辐射地板供暖系统因节能及舒适等特性被广泛应用于住宅、办公及商业等民用建筑. 这种供暖方式可方便地实现各用户供暖系统相互独立, 各房间自成系统, 可适用于间歇供暖建筑^[1-3]. 辐射地板是低温热水地板辐射供暖系统中的散热部件, 其表面温度和表面散热量是此类系统设计计算中最重要的参数之一. 由于地板具有较大热惰性, 地板辐射系统间歇运行时, 地板表面温度及散热量受地板散热和蓄热影响较大. 掌握地板动态散热过程中地板散热量和表面温度对研究间歇运行供暖系统的调节控制、地板结构参数选择有着重要意义^[4-7].

数值计算和理论分析是辐射供暖地板热过程分析的常用方法. 数值计算方法对分析地板结构层厚度、盘管间距、盘管水温等设计和运行参数对地板散热性能和地板结构优化设计起到了重要作用^[8-12]. 然而, 数值计算方法在实际工程中较难适用. 理论分析中, Kilis 于 1992 年提出的稳态平面肋片模型最为经典, 该模型将盘管之间地板上表面按传热肋片处理^[13], 并对肋片效率进行了修正^[14]. 众多学者在稳态平面肋片模型基础上进行了改进^[15-17]. 刘艳峰通过对肋基温度修正将模型进行了改进, 提高了计算准确度, 并提出当量热阻算法, 便于工程计算^[18-19]. 稳态平面肋片及其改进模型方便了辐射地板散热过程的工程计算, 然而对于供暖系统间歇运行的辐射地板动态散热难以适用.

本研究主要分析供暖系统停止运行后, 地板表面动态散热特性. 利用数值计算方法对地板二维非稳态散热模型进行分析, 以掌握地板散热特性与盘管间距、供回水温度、填充层厚度等设计和运行参数间的对应关系. 鉴于地板二维散热模型难以进行地板表面温度和散热量理论计算, 对二维非稳态散热数学模型进行简化, 给出地板一维非稳态散热数学模型, 方便工程应用.

1 地板二维非稳态传热数学模型

研究对象选取常用的混凝土埋管式低温热水辐射地板 (如图 1), 构造 (从下到上) 包括结构层、找平层、保温层、填充层、地面层以及防水层等, 盘管位于填充层中^[11,19]. 由于防水层很薄, 在地板传热分析中可忽略这层结构; 地面层和填充层材料热工参数相近, 在传热物理模型中将地面层归入填充层中^[7,20-21].

地板辐射供暖系统房间周边地板多采用保温措施, 周边断面面积远小于地板表面积, 其中只有少部分与外围护结构相连, 所以可认为地板周边绝热. 同时管道下面铺设保温层, 为简化计算, 因此近似认为保温层和结构层接触面为绝热面. 图 1 为热水辐射地板结构物理模型.

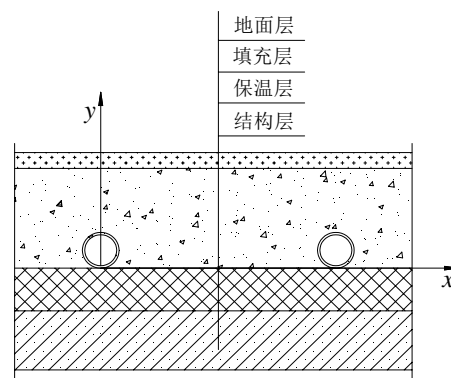


图 1 低温热水辐射地板结构物理模型
Fig.1 Physical model low temperature water radiant floor

收稿日期: 2013-12-16

修改稿日期: 2014-06-10

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金博导类 (20116120110006); 陕西省教育厅自然专项基金 (2013JK0985)

作者简介: 马超 (1983-), 男, 博士研究生, 主要从事太阳能热利用及建筑节能研究. E-mail: machao9108@163.com

本文采用的二维传热计算单元模型以盘管中心界面到两盘管中心界面为模型两侧边界,地板上表面和保温层与结构层接触面为模型上下边界^[7]。

辐射地板二维非稳态传热数学描述:

导热微分方程

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

式中: a 为地板热扩散率, m^2/s 。

定解条件:

(1) 边界条件

1) 由于地板内的管道假设为对称,对于每一个计算单元,沿 X 轴方向的两个边界近似认为是绝热面:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=l/2} = 0 \quad (2)$$

式中: l 为盘管间距, m 。

2) 地板上下表面边界条件

根据低温地板辐射采暖系统的特点,地板表面与室内围护结构各表面和室内空气进行热量交换是以辐射和对流这两种方式进行的,则热交换的综合传热量 q_0 近似为辐射和对流两部分传热量之和。由此可将地板上表面看作第三类边界条件。

上表面边界条件:

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=\delta} = q_0 = q_c + q_r \quad (3)$$

$$q_c = h_c(t - t_n) \quad (4)$$

$$q_r = h_r(t - AUST) \quad (5)$$

上三式中: q_c 为地板上表面与室内空气的对流换热量, W/m^2 ; q_r 为地板上表面与房间其它内表面的辐射换热量, W/m^2 ; λ 为地板填充层导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; δ 为地板填充层厚度, m ; h_c 为地板表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; h_r 地板表面与房间其他表面的辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; t_n 为室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$; $AUST$ 为与地板对应的房间其他内表面的平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

下表面边界条件:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (6)$$

3) 盘管外壁面边界条件

系统运行阶段,因盘管内水流速度较高,盘管内表面换热系数很大,忽略水温 and 盘管内表面温度差,认为两者相等。由于管壁厚度很薄,塑料管的热阻相对于辐射地板热阻较小,可以忽略。盘管与混凝土接触良好,忽略管道与混凝土接触热阻,认为盘管外壁面温度等于接触处混凝土温度^[22-23]。因此,系统运行时,可认为盘管外壁面温度等于供回水平均温度;地板在散热阶段,系统停止供暖,近似认为系统不向地板提供热量,盘管外壁面近似为绝热。

系统运行阶段,盘管外壁面边界条件:

$$t \Big|_{x^2+(y-d/2)^2=(d/2)^2} = t_s \quad (7)$$

式中: d 为盘管外径, m ; t_s 为供回水平均温度, $^{\circ}\text{C}$, $0 \leq x \leq l/2$, $0 \leq y \leq l$ 。

系统停止运行后,盘管外壁面边界条件:

$x^2 + (y - d/2)^2 = (d/2)^2$ 处绝热, $0 \leq x \leq l/2$, $0 \leq y \leq l$ 。

(2) 初值条件

$$\tau = \tau_0, \quad t = t(x, y, \tau_0) \quad (8)$$

2 数值模拟分析

上述建立的地板二维非稳态传热数学模型,由于物理模型的不规则性,对于数学模型的求解非常困

难. 为更好的反应地板传热过程中地板表面温度和散热量特性, 采用数值模拟方法进行分析. 相关研究中认为利用数值计算方法求解地板二维传热问题, 计算结果和实验结果相差不大^[24-27]. 因此可利用数值模拟方法分析地板动态散热特性. 根据地板的物理模型, 为简化计算, 把地板填充层以上各层均归于填充层中, 地板下表面认为绝热.

地板填充层热工参数: 密度, $2\,300\text{ kg/m}^3$; 导热系数, $1.3\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 比热: $920\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; 地板表面总换热系数: $9.5\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

根据地板二维非稳态传热数学模型和地板结构相关参数, 使用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件, 在不同盘管供回水平均温度、盘管间距和填充层厚度工况下对地板动态散热过程进行数值模拟分析.

由于地板表面温度和散热量对应关系, 下面仅给出供回水平均温度、盘管间距、填充层厚不同工况下地板表面平均温度变化特性.

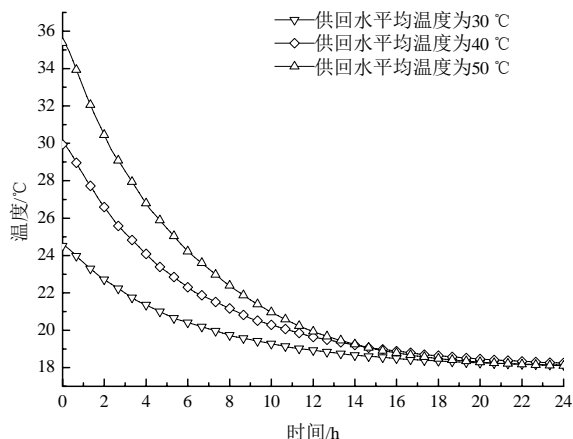


图2 不同供回水平均温度地板散热过程表面平均温度 (盘管间距为 200 mm、填充层厚度为 70 mm)

Fig.2 The surface mean temperature the floor heat dissipation process on the conditions of different supply and return mean water temperature (The coil distance 200 mm, the filling layer thickness 70 mm)

由图 2~4 可知, 系统停止运行后, 常见的地板运行工况下经过 13 h 左右, 地板放热已基本稳定, 经过 20 h 可认为地板接近完全放热. 地板表面平均温度变化幅度受供回水平均温度、盘管间距影响较小, 受填充层厚度影响较大.

3 地板传热数学模型简化分析

3.1 数学模型

利用数值模拟可以分析, 地板动态散热特性, 然而在工程中需掌握地板表面温度及散热量时多不便于使用软件或程序, 为了便于工程计算, 针对地板散热特性, 对二维数学模型进行简化.

系统停止运行时, 地板在散热过程中, 虽地板为二维传热, 但地板计算单元沿 X 轴两边界和地板下表面边界均为绝热边界, 地板在散热过程中热量主要沿 Y 轴方向传递. 因此, 把地板的二维传热模型简化只沿 Y 轴方向一维传热模型.

地板散热阶段: 一维非稳态传热数学模型.

地板导热微分方程:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \quad (9)$$

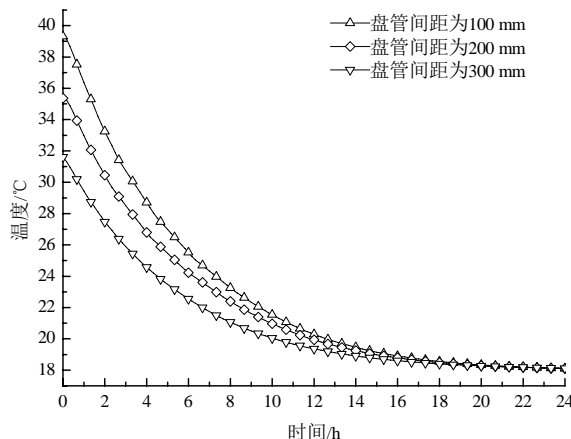


图3 不同盘管间距地板散热过程表面平均温度 (供回水平均温度为 50 °C、填充层厚度为 70 mm)

Fig.3 The surface mean temperature during the floor heat dissipation process on the conditions of different coil distance (The supply and return mean water temperature 50 °C, the filling layer thickness 70 mm)

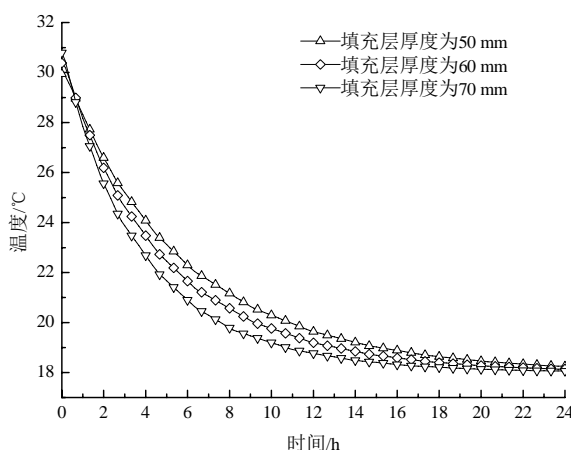


图4 不同填充层厚度地板散热过程表面平均温度 (供回水平均温度为 40 °C、盘管间距为 200 mm)

Fig.4 The surface mean temperature during the floor heat dissipation process on the conditions of different filling layer thickness (The supply and return mean water temperature 40 °C, the coil distance 200 mm)

1) 边界条件:

对于地板上表面, 即 $x = \delta$ 处:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = h(t - t_n) \quad (10)$$

式中: h 为地板表面总换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

对于地板下表面, 即 $x = 0$ 处:

$$\frac{\partial t}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

2) 初值条件:

$$\tau = \tau_0, \quad t = t(x, \tau_0) \quad (12)$$

引入过剩温度 $\theta(y, \tau) = t(y, \tau) - t_n$, 由上述地板的导热微分方程和边界条件可求得地板温度分布:

$$\theta(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(\beta_n \frac{x}{\delta}) \exp(-\beta_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}) \quad (13)$$

式中: C_n 为系数; β_n 为方程 $\tan \beta_n = \frac{\delta h}{\beta_n \lambda} = \frac{Bi}{\beta_n}$ 的根, Bi 为毕渥准则 ($Bi = h\delta/\lambda$).

当系统停止供暖之前地板传热近似处于稳定状态时, 可得其初值条件:

$$\tau = \tau_0, \quad t = -\frac{q_w}{\lambda} y + \frac{q_w}{h} + \frac{q_w}{\lambda} \delta + t_n \quad (14)$$

式中: q_w 为地板处于稳态传热时地板表面平均热流, W/m^2 .

把式 (14) 代入式 (13) 计算可得地板散热阶段温度分布:

$$\theta(y, \tau) = A \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\beta_n \frac{y}{\delta}) \exp(-\beta_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}) \quad (15)$$

式中: $A = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2h\delta q_w (1 - \beta_n \sin \beta_n - \cos \beta_n) + 2\beta_n \sin \beta_n q_w (\lambda + h\delta)}{h\lambda \beta_n (\beta_n + \sin \beta_n \cos \beta_n)}$

地板每平方米经过 τ 小时传递的热量可表示:

$$q_\tau = \rho c \int_0^\delta [\theta_0 - \theta(y, \tau)] dy \quad (16)$$

经计算得:

$$q_\tau = -\rho c \delta A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \exp(-\beta_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}) + \rho c \delta q_w \frac{h\delta + 2\lambda}{2\lambda h} + \rho c \delta t_n \quad (17)$$

3.2 数学模型求解

根据地板一维散热数学模型求解得到地板温度和散热量解中 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 次级数中后面的项与前面的项相比所起作用较小, 当 Fo (Fo 为傅里叶数, $Fo = a\tau/\delta^2$) 数较大时, 级数收敛较快. 当 $Fo \geq 0.2$ 时用计算式第一项来计算对应计算式已经足够精确^[28].

在常见的地板不同工况范围, 当 $Fo \geq 0.2$ 时, 不超过 1 600 s 时, 由数值模拟结果, 地板的散热过程时间要远大于 1 600 s, 因此, 计算地板表面温度求解级数可仅取第一项.

根据地板一维散热数学模型得到的散热阶段地板温度分布公式 (15), 带入相关参数经计算可得地板表面平均温度随时间指数变化规律, 见表 1.

由表 1 可知, 地板表面平均温度变化率随填充层厚度增大而减小.

表 1 不同工况下一维数学模型解析解

Tab.1 The analytical solution of one-dimensional mathematical model in the different conditions

供水平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	盘管间距/mm	填充层厚度/mm	解析解
40	200	50	$t(\tau) = 13.49 \exp(-0.29\tau) + 18$
40	200	60	$t(\tau) = 13.16 \exp(-0.23\tau) + 18$
40	200	70	$t(\tau) = 12.80 \exp(-0.20\tau) + 18$
50	100	70	$t(\tau) = 22.83 \exp(-0.20\tau) + 18$
50	200	70	$t(\tau) = 18.61 \exp(-0.20\tau) + 18$
50	300	70	$t(\tau) = 14.76 \exp(-0.20\tau) + 18$

4 数值解与解析解对比分析

上述分别利用了二维数值模拟和一维非稳态散热数学模型对地板表面平均温度进行求解. 下面选取其中三种工况进行对比分析两者结果. 选取工况见表 2.

表 2 不同对比工况
Tab.2 The different contrastive conditions

工况	供回水平均温度/℃	盘管间距/mm	填充层厚度/mm
工况一	30	200	70
工况二	40	200	50
工况三	50	100	70

由图 5 可知, 三种工况下地板二维非稳态散热模型数值模拟结果和一维非稳态散热数学模型解析解吻合良好, 计算可得两者差异在 1.5% 之内. 由于数值模拟结果的可靠性, 因此可认为地板一维散热数学模型可用于地板散热量和表面温度计算.

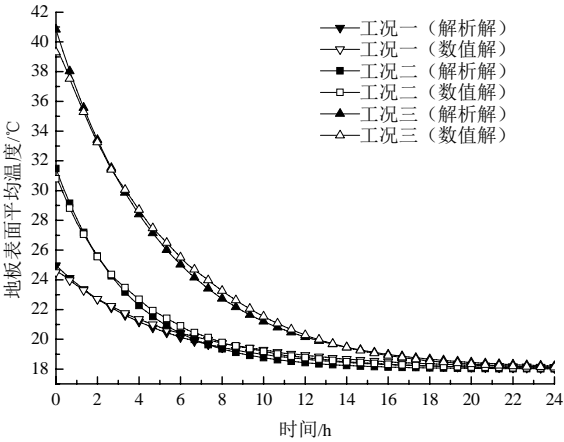


图 5 地板表面平均温度解析解和数值解对比
Fig.5 The comparison of the analytical solution with numerical solution of the floor surface mean temperature

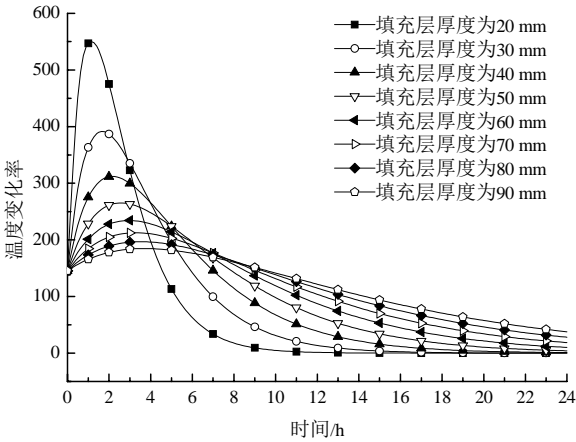


图 6 不同填充层厚度地板表面平均温度变化率
Fig.6 The mean temperature change rate of the floor surface in the conditions of different filling layer thickness

5 地板散热过程表面温度变化率

在一维地板散热温度分布和表面散热量计算式, 地板厚度是影响地板表面散热量和表面温度重要参数. 为寻求地板动态散热过程中填充层厚度对表面温度影响关系, 采用 $\theta(y, \tau)$ 对 δ 求导:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \delta} = A \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\beta_n \frac{y}{\delta}) \exp(-\beta_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}) + A \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\beta_n \frac{y}{\delta}) \frac{\beta_n \tau}{\delta^2} \exp(-\beta_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}) + A \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\beta_n \frac{y}{\delta}) \exp(-\beta_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}) \frac{2\beta_n^2 a\tau}{\delta^3} \quad (18)$$

在供回水平均温度为 40℃, 盘管间距为 200 mm 工况下, 带入相关参数计算得到不同填充层厚度地板表面平均温度变化率, 如图 6.

由图 6 可知, 系统停止运行后, 填充层厚度越大时, 地板表面动态散热越稳定; 填充层厚度大于 60 mm 时, 温度变化率已无明显差异. 不同填充层厚度, 地板表面平均温度变化率最大值出现时间, 见表 3.

由表 3 可知, 地板动态散热时, 不同填充厚度, 地板表面热响应差异较大. 因此在工程允许条件填充层厚度下, 间歇运行的供暖系统, 可根据使用情况不同选择地板厚度.

表 3 地板表面平均温度变化率最大值出现时间

Tab.3 The time of the maximum value of the mean temperature change rate of the floor surface

填充层厚度/mm	20	30	40~50	60~90
时间/h	1	1.7	2	3

6 结论

利用数值模拟和理论分析相结合的方法对供暖系统停止运行后地板散热过程进行了研究, 得到以下几点结论:

- (1) 地板表面平均温度变化幅度受供回水平均温度、盘管间距影响较小, 受填充层厚度影响较大.

(2) 在常用辐射供暖地板结构下,系统停止运行后 13 h 左右,地板散热趋于稳定,20 h 后可认为地板散热过程结束。

(3) 通过地板二维非稳态散热数学模型简化得到一维散热数学模型。通过一维解析解与二维数值解对比分析,发现两者差异在 1.5% 之内。地板一维散热数学模型可用于地板表面散热量和温度计算。

(4) 获得了系统停止运行后不同填充厚度地板表面平均温度变化率最大值出现时间;填充层厚度越大,地板动态散热越稳定;厚度大于 60 mm 时,温度变化率已无明显差异。

参考文献 References

- [1] 邹同华, 马丽君, 金梧凤. 低温地板辐射供暖系统室内温度场的实验研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(7): 88-90.
ZOU Tonghua, MA Lijun, JIN Wufeng. Experiment of indoor temperature field of lower temperature radiant floor heating systems[J]. HV & AC, 2010, 40(7): 88-90.
- [2] FONTANA L. Thermal performance of radiant heating floors in furnished enclosed spaces[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(10): 1547-1555.
- [3] KARLSSON H, HAGENTOFT C E. Application of model based predictive control for water-based floor heating in low energy residential buildings[J]. Building and Environment, 2011, 46(3): 556-569.
- [4] 吴锦京, 卢纪富, 曾章传, 等. 空气源热泵直接地板辐射供暖运行模式实验研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(1): 71-74.
WU Jinjing, LU Jifu, ZENG Zhangchuan, et al. Experiment of operating modes for direct floor panel heating systems with air-source heat pumps[J]. HV & AC, 2010, 40(1): 71-74.
- [5] AHN B C, SONG J Y. Control characteristics and heating performance analysis of automatic thermostatic valves for radiant slab heating system in residential apartments[J]. Energy, 2010, 35(4): 1615-1624.
- [6] 牛润卓, 邓启红. 低温地板辐射采暖预见性间歇运行特性的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(3): 10-13.
NIU Runzhuo, DENG Qihong. A parametric study on predictive control of intermittently operated radiant floor systems[J]. Building Energy & Environment, 2008, 27(3): 10-13.
- [7] 刘艳峰. 地板供暖设计与运行基础理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
LIU Yanfeng. Study on basic theory of designing and running control of imbed pipe floor heating[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2004.
- [8] CHUANGCHID P, KRARTI M. Foundation heat loss from heated concrete slab-on-grade floors[J]. Building and Environment, 2001, 36(5): 637-655.
- [9] LAOUADI A. Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software[J]. Building and Environment, 2004, 39(4): 421-431.
- [10] 张于峰, 郝斌, 谢慧, 等. 热管地板辐射供暖的特性[J]. 天津大学学报, 2007, 40(10): 1209-1214.
ZHANG Yufeng, HAO Bing, XIE Hui, et al. Thermal performance of thermosyphon-embedded floor heating[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(10): 1209-1214.
- [11] JIN X, ZHANG X S, LUO Y J. A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(10): 1753-1758.
- [12] QI H B, HE F Y, WANG Q S. Simulation analysis of heat transfer on low temperature hot-water radiant floor heating and electrical radiant floor heating[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(204/208): 4234-4238.
- [13] KILKIS B I. Enhancement of heat pump performance using radiant floor heating systems[J]. American Society of Mechanical Engineers, 1992, 28: 119-127.
- [14] KILKIS B I, ELTEZ M, SAGERS S S. A simplified model for the design of radiant in-slab heating panels[J]. ASHRAE Transactions, 1995, 101(1): 210-216.
- [15] 胡晓微, 潘黎. 低温热水地板辐射供暖系统改进型平面肋片模型算法[J]. 天津商学院学报, 2007, 27(3): 4-7.
HU Xiaowei, PAN Li. Improved plane fin model calculation for heat dissipating capacity in low-temperature hot water floor radiation heating system[J]. Journal of Tianjin University of Commerce, 2007, 27(3): 4-7.
- [16] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE handbook-2008 HVAC systems and equipment[M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2008.
- [17] 蔺洁, 谢静超, 陈超, 等. 低温热水地板辐射换热器传热简化模型的改进[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(7): 1078-1083.
LIN Jie, XIE Jingchao, CHEN Chao, et al. Improvement of the simplified heat transfer model for low-temperature hot water floor heat exchanger[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(7): 1078-1083.
- [18] 刘艳峰, 刘加平. 低温热水辐射地板传热平面肋片模型的改进[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(10): 1190-1192.
LIU Yanfeng, LIU Jiaping. Corrected composite-fin model of heat conduction in embed-pipe heated floor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(10): 1190-1192.
- [19] LIU Y F, WANG D J, LIU J P. Study on heat transfer process for in-slab heating floor[J]. Building and Environment, 2012, 54: 77-85.
- [20] 王登甲. 间歇采暖太阳能建筑热过程及设计优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
WANG Dengjia. Study on the thermal process and the design optimization of intermittent heating solar building[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [21] ZHANG L, LIU X H, JIANG Y. Simplified calculation for cooling/heating capacity, surface temperature distribution of radiant floor[J]. Energy and Buildings, 2012, 55: 397-404.
- [22] 彭钦磊. 地板辐射供暖系统换热的简化计算研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
PENG Qinlei. Study on simple calculation for heat transfer of floor panel heating system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [23] 杨德伟, 王振兴. 地板采暖传热过程分析[J]. 工程热物理学报, 2007, 8(3): 472-474.
YANG Dewei, WANG Zhanxing. The analysis of heat transfer process in floor heating[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 8(3): 472-474.

- SHI Bingfeng, ZHANG Sujuan. The design management in general contract project[J]. International Economic Cooperation, 2012(10): 50-54.
- [16] 王伍仁. EPC工程总承包管理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 144-146.
- WANG Wuren. EPC project general contracting management[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 144-146.
- [17] 郑品石, 袁天赐. 我国总承包企业供应链管理体系分析[J]. 商业时代, 2012(5): 85-88.
- ZHENG Pinshi, YUAN Tianci. China's general contracting enterprise supply chain management system analysis[J]. Journal of Commercial age, 2012(5): 85-88.
- [18] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- CAI Wen. The Matter-element model and its application[M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1994.
- [19] 陈斌. EPC模式下总承包商成本控制能力影响因素分析[J]. 江苏科技信息, 2012(10): 26-28.
- CHEN Bin. The influence factors analysis about EPC mode general contractor cost control ability[J]. Journal of Jiangsu Science and Technology Information, 2012(10): 26-28.
- [20] 李治国, 滕惠平. 平衡记分卡在EPC型企业战略管理中的应用[J]. 建筑经济, 2012(5): 73-75.
- LI Zhiguo, TENG Huiping. The application of balanced scorecard in EPC enterprise strategic management[J]. Journal of Architectural economy, 2012(5): 73-75.

Research on the construction enterprises' EPC general contracting ability evaluation based on the method of matter-element

LU Mei¹, PEI Yali^{1,2}

(1. School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. Shanxi Lu'an Engineering Investigation & Design Co. Ltd., Changzhi 046204, China)

Abstract: Presently the low EPC project general contracting ability has become a stumbling block of our construction enterprises entering into international engineering high-end market and keeping sustainable development. In view of some shortages about the most domestic scholars taking the EPC project general contracting ability as the general contractor enterprises' core competitiveness, and from the project general contracting enterprise's business perspective, this paper analyses and obtains the essence that EPC project general contracting ability is one ability of engineering general contracting enterprises' core business abilities. The paper further elaborates the EPC project general contracting ability's features and content, establishes the evaluation index system and puts forward the assessment model based on the matter-element analysis theory through calculating the dependent degree coefficient of the evaluation indexes and capability maturity's each rank to determine the enterprises' the level of EPC engineering general contracting ability. Finally it uses a case for verifying the research methods and makes some suggestions to provide an effective means for EPC general contracting contractors to understand and promote EPC general contracting ability.

Key words: EPC; engineering general contracting ability; core business ability; matter-element analysis; dependent degree

(本文编辑 桂智刚)

(上接第421页)

- [24] 申德艳, 王随林, 闫全英. 薄型干式地板辐射供暖系统实验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 1-5.
- SHEN Deyan, WANG Suilin, YAN Quanying. Experimental study on thin dry model radiant floor heating system[J]. Building Science, 2010, 26(10): 1-5.
- [25] CORGNATIA S P, PERINOA M, FRACASTOROA G V, et al. Experimental and numerical analysis of air and radiant cooling systems in offices[J]. Building and Environment, 2009, 44(4): 801-806.
- [26] JIN X, ZHANG X S, LUO Y J, et al. Numerical simulation of radiant floor cooling system: The effects of thermal resistance of pipe and water velocity on the performance[J]. Building and Environment, 2010, 45(11): 2545-2552.
- [27] ZHANG D L, CAI N, WANG Z J. Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system[J]. Energy and Buildings, 2013, 61: 260-266.
- [28] 章熙民, 任泽霖, 梅飞鸣. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- ZHANG Ximin, REN Zepei, MEI Feiming. Heat Transfer[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007.

Study on dynamic heat dissipation characteristics of low temperature hot water radiant floor

MA Chao¹, LIU Yanfeng¹, WANG Dengjia¹, LIU Jiaping²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: According to the numerical analysis of two-dimensional unsteady heat dissipation process of the floor, it's found that the heat dissipation process of the floor is basically stable around 13 h and is close to the end after 20 h under the common floor structure of the radiant heating. To make engineering calculation convenient, the mathematical model of two-dimensional unsteady heat dissipation is simplified to one-dimension. Comparing the results of one-dimensional analytical solution and two-dimensional numerical simulation, it's found that the difference of the two results varies from 0.5% to 1.5%. By solving the mathematical model of the floor heat dissipation, the time corresponding to the maximum value of the mean temperature change rate of the floor surface is obtained under different filling thickness, after the systems stop. The thicker the filling more stable is the floor dynamic heat dissipation. When the filling thickness is more than 60 mm, there's no obvious difference of the temperature change rate.

Key words: radiant floor; heat dissipation characteristic; surface temperature; temperature change rate

(本文编辑 桂智刚)