

# 低温热水辐射地板稳定升温计算模型

蔺洁<sup>1,2</sup>, 陈超<sup>1,2</sup>, 马云<sup>1,3</sup>, 孙乐<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京绿色建筑环境与节能技术重点实验室, 北京 100124;  
3. 江苏淮安市热电公司, 淮安 223001)

**摘要:** 针对地板稳定升温过程, 根据热平衡原理建立地板升温计算模型, 给出地板升温表达式, 利用该式可方便快捷地预测地板升温时间及地板终值温度。为验证方程有效性, 通过改变供水温度、管间距、初始温度条件, 将地板升温测试数据与方程计算结果进行比较, 显示两者最大误差为5.8%, 因此可将该模型用于实际; 同时实测与计算结果一致显示地板升温过程为指数变化规律。

**关键词:** 辐射供热; 地板辐射供热系统; 辐射地板; 稳定升温; 升温计算模型

**中图分类号:** TU832.1

**文献标识码:** A

## 0 引言

太阳能供热采暖系统的散热末端有低温热水辐射地板、散热器、风机盘管等。其中辐射地板所需水温最低, 非常适合与太阳能结合。太阳能具有间歇性和不稳定性特点, 白天房间受到太阳辐射, 需要辐射地板提供的热量少, 夜间需要的热量多; 因此为保证房间温度及太阳能的有效利用, 要根据房间需热量来调节地板供热量。在调节过程中因地板自身蓄热量较大造成温度延迟, 热阻较大造成热量衰减, 使得地板向房间散出热量的过程和大小、房间温度变化的时间和幅度, 及人体热舒适性与散热器调节效果大不相同。如不能准确把握辐射地板的这种热特性, 预测出地板延迟、衰减等参数, 很难实现有效调节。

低温热水辐射地板的延迟、衰减与其结构、材料、水温和环境温度有关。周国兵等<sup>[1]</sup>研究不同材料蓄放热特性; 王登甲等<sup>[2]</sup>计算地板蓄放热过程中结构、水温对地板温度及热流密度的影响; 赵康等<sup>[3]</sup>计算地板升温时间常数; 牛润卓等<sup>[4]</sup>给出了地板升温时间。上述研究采用的都是数值模拟和实验方法, 这在实际应用中并不方便。本文给出一种计算地板延迟、衰减参数的简便方法, 通过建立地板稳定升温模型, 给出地板升温公式, 来预测其升温时

间及最终温度。该方法可为太阳能辐射地板采暖的运行调节提供指导。

## 1 升温传热模型

### 1.1 物理模型

目前辐射地板常见形式中混凝土填充式低温热水辐射地板最为常用, 其构造如图1所示<sup>[5]</sup>。

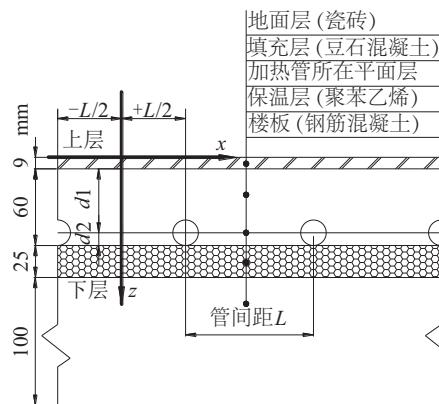


图1 混凝土填充式辐射地板末端结构图

Fig. 1 Radiant floor structure of test room

本课题组对该类地板升温过程进行现场测试, 得到地板表面温度、室内环境温度在供热量、室外温度不变时稳定升温的变化趋势图, 如图2所示。从图2中可看到供暖之始, 地板表面与室内空气从

收稿日期: 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578012)

通信作者: 蔺洁(1965—), 女, 博士、副教授, 主要从事建筑环境与系统的节能方面的研究。linjie@bjut.edu.cn

同一温度开始升温,随着系统稳定加热,地板表面温度上升速率快于室内空气,两者随时间升温速率皆不断降低,直至温度恒定,升温速率为零。在整个升温过程中,热量依次由加热管内热水通过对流换热传递给加热管内壁,管内壁再以导热方式传到外壁,之后克服接触热阻,热量被传到管外壁侧的填充层,再通过填充层内部传导到地板表面。因组成地板主要结构的填充层材料-豆石混凝土的比热容、密度较大,蓄热能力较强,在升温初期,热量大部分用于加热地面结构层,小部分通过地表面散向室内。随着加热时间延长,地板结构层与加热管之间温差逐渐减小,地板结构层蓄热能力减弱;同时地板表面温度随时间逐渐升高,向室内所散热量逐渐增大,最终达到稳定值。此时地板温度最高,且辐射地板、房间围护结构、人体及室内空气达到热平衡。

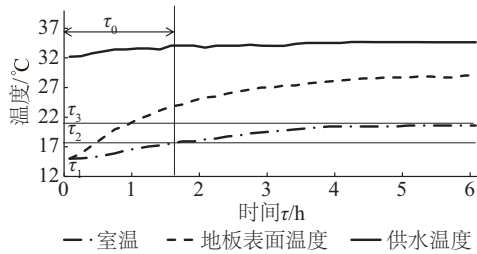


图2 辐射供暖过程中各温度随时间变化

Fig. 2 Different temperatures with radiant heating time

## 1.2 数学模型

混凝土地板的升温过程可用导热微分方程表达。该升温过程为非稳态变化,所建方程为:

$$c_p \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (1)$$

边界条件:  $\lambda \frac{\partial t}{\partial z} = h_z(t - t_o)$ ,  $z = 0$ ;  $\frac{\partial t}{\partial z} = 0$ ,  $z = d_1 + d_2$ ;  $\frac{\partial t}{\partial x} = 0$ ,  $x = \pm L/2$ ;  $t = t_b$ , 在管壁。

初始条件:  $\tau = 0$ ,  $t = t_{b0}$

式中,  $t$ 、 $t_b$ 、 $t_{b0}$ ——地板温度、加热管管壁温度和地板初始温度, °C;  $x$ 、 $z$ ——地板结构剖面图的横、纵坐标;  $d_1$ 、 $d_2$ ——加热管中心到填充层表面以及到保温层表面的距离, mm;  $\tau$ ——时间, h;  $c_p$ ——地板材料比热容, J/(kg·°C);  $\rho$ ——地板材料密度, kg/m³;  $\lambda$ ——地板材料导热系数, W/(m·°C);  $h_z$ ——地板表面和室内的综合换热系

数, W/(m²·°C);  $t_o$ ——混凝土地板供暖室内环境作用温度, °C。

运用数值模拟求解方程(1)可得到地板任意时刻温度场分布<sup>[6]</sup>,但数值模拟法计算量大,难以在实际工程中使用。在实际工程中使用无需了解地板内部温度分布,而只关心房间温度能否满足要求。因房间温度主要受地板表面散热量影响,而地板表面散热量与地板表面温度呈对应关系,因此只要控制住地板表面温度就能保证房间获得的热量,把握地板表面散热量与房间所需供热量之间匹配关系,就可最终满足房间温度要求。目前国内外相关文献<sup>[7,8]</sup>大多用地板表面平均温度作为地板调节参数控制指标,国内外标准<sup>[9~11]</sup>通常也只规定地板表面平均温度。有研究表明控制地板表面平均温度是辐射地板供暖/供冷系统一种较好的控制方式<sup>[12]</sup>;且在辐射地板供暖中,根据地板表面平均温度控制循环水泵的启停,可较好地减小室内气温波动<sup>[13]</sup>。故本文以地板表面平均温度作为地板升温过程的控制指标。

## 1.3 计算模型

混凝土辐射地板升温过程的初始条件分2种:

1)初始时刻室内环境作用温度低于地板表面平均温度;2)两者温度相同。无论哪一种,当供热条件和环境条件都不发生改变时,地板表面平均温度终会达到一稳定温度不变<sup>[14]</sup>。

混凝土辐射地板各点温度、温度变化速率在升温过程中随时间变化,稳定时各点温度也不一样,但是从初始升温状态到最终平衡状态地板各点的总升温时间相同,升温变化规律一致。因此根据前述,只要掌握混凝土辐射地板中任意一点的升温时间和升温变化趋势,就可把握地板整体升温规律,而不用考虑混凝土辐射地板内部变化。下面就以混凝土地板表面平均温度点作为计算对象。

设混凝土辐射地板初始温度  $t_{b0}$  均匀,地板在升温过程中得到加热管内热水传递的热量  $Q_d(t)$ ,同时地板表面又向室内放出热量  $Q_s(t)$ 。当混凝土地板得到热量大于地板表面散出热量时,混凝土地板开始升温、蓄热。建立混凝土辐射地板表面热平衡方程为:

$$c_p \rho V \frac{dt}{d\tau} = Q_d - Q_s \quad (2)$$

初始条件:  $\tau=0, t=t_{b0}$

如果将地板内部传热阻按正比于温度梯度考虑,则地板得到的加热管放热量可表示为:

$$Q_d = \frac{A_b(t_g - t)}{R} \quad (3)$$

地板表面散热量为:

$$Q_s = Q_c + Q_r = A_b(q_c + q_r) = A_b \cdot h_z(t - t_o) \quad (4)$$

式中,  $t_g$  ——加热管管壁平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R$  ——从加热管壁到地板表面的传热热阻,  $(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ ;  $A_b$  ——混凝土地板表面积,  $\text{m}^2$ ;  $V$  ——混凝土地板体积,  $\text{m}^3$ ;  $Q_c$  ——混凝土地板表面对流传热量,  $\text{W}$ ;  $Q_r$  ——混凝土地板表面辐射传热量,  $\text{W}$ 。

将式(3)、式(4)代入式(2),并整理得:

$$\frac{c_p \rho V}{A_b \cdot U_z} \frac{dt}{d\tau} + t = \frac{1}{U_z} \left( \frac{t_g}{R} + h_z t_o \right) \quad (5)$$

式中,  $U_z = \frac{1}{R} + h_z$ ,  $R = R_1 + R_2 + R_3$ ,  $R_1 \sim R_3$  为填充层、水泥砂浆找平层、地表面覆盖层的热阻,  $(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ 。根据文献[15],有:

$$R_1 = \frac{L}{2\pi\lambda_1} \left[ \ln\left(\frac{L}{\pi\delta}\right) + \frac{2\pi\lambda_1 d_1}{L} + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{G(s)}{s} \right]$$

$$G(s) = \frac{\frac{Bi+2\pi s}{Bi-2\pi s} e^{-\frac{4\pi s d_2}{L}} - 2e^{-\frac{4\pi s (d_1+d_2)}{L}} - e^{-\frac{4\pi s d_1}{L}}}{\frac{Bi+2\pi s}{Bi-2\pi s} + e^{-\frac{4\pi s (d_1+d_2)}{L}}}$$

其中,  $s=1, 2, 3, \dots$ ;  $Bi = \frac{h_z L}{\lambda_1}$ ;  $R_2 = \frac{H_2}{\lambda_2}$ ;  $R_3 = \frac{H_3}{\lambda_3}$

式中,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ——填充层、水泥砂浆找平层、地表面覆盖层导热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $H_1, H_2, H_3$  ——填充层、水泥砂浆找平层、地表面覆盖层各层高度,  $\text{mm}$ ;  $\delta$  ——加热管直径,  $\text{mm}$ ;  $Bi$  ——毕渥数。

化简式(5)得:

$$T \frac{dt}{d\tau} + t = KQ_\lambda \quad (6)$$

$$T = \frac{c_p \rho V}{A_b \cdot U_z} \quad (7)$$

$$KQ_\lambda = \frac{1}{U_z} \left( \frac{t_g}{R} + h_z t_o \right) \quad (8)$$

将初始条件代入,可得方程式解:

$$t = KQ_\lambda - (KQ_\lambda - t_{b0})e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (9)$$

式(9)表明了混凝土辐射地板在稳定加热作用时,地板升温过程呈指数规律变化。

对式(9)求导,得到:  $\frac{dt}{d\tau} = \frac{(KQ_\lambda - t_{b0})}{T} e^{-\frac{\tau}{T}}$

$$\text{当 } \tau=0, t=t_{b0}, \left. \frac{dt}{d\tau} \right|_{\tau=0} = \frac{(KQ_\lambda - t_{b0})}{T} \quad (10)$$

$$\text{当 } \tau=T, t_T = KQ_\lambda - \frac{(KQ_\lambda - t_{b0})}{e},$$

$$\left. \frac{dt}{d\tau} \right|_{\tau=T} = \frac{(KQ_\lambda - t_{b0})}{eT} = \frac{1}{e} \left. \frac{dt}{d\tau} \right|_{\tau=0} \quad (11)$$

$$\text{当 } \tau=\infty, t_\infty = KQ_\lambda = \frac{1}{U_z} \left( \frac{t_g}{R} + h_z t_o \right)$$

$$\left. \frac{dt}{d\tau} \right|_{\tau=\infty} = 0 \quad (12)$$

比较  $\left. \frac{dt}{d\tau} \right|_{\tau=0}$ 、 $\left. \frac{dt}{d\tau} \right|_{\tau=T}$ 、 $\left. \frac{dt}{d\tau} \right|_{\tau=\infty}$  可看到地板在稳定

升温过程中初始时刻升温速率最快。随着时间推移,地板升温速率逐渐变慢,直至为零,此时地板温度稳定于一温度值  $t_\infty$ 。当地板所在环境条件或供热条件发生变化时,该平衡状态才被打破。

## 2 计算模型参数

### 2.1 时间常数 $T$

式(7)中的  $T$  被称为时间常数。可看到:时间常数与组成地板的材料和结构有关,与供热量和初始温度无关。通过式(11)、式(12)可得:当  $\tau=T$  时,  $t_T = 0.632 t_\infty$ 。这说明当地板被持续加热时,时间常数等于地板升温幅度达到总升温值的 63.2% 时所用加热时间(如图 3)。也就是说,混凝土地板在室内环境作用温度、得热量不变时,地板温度如一直以初始温度速率变化到达终值温度时所需要的时间为  $T$ 。时间常数值的大小反映地板升温快慢。

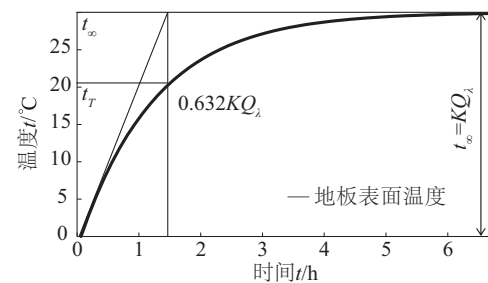


图3 混凝土填充式辐射地板升温反应曲线

Fig. 3 Radiant floor temperatures with heating time

### 2.2 混凝土地板升温时间 $T_s$ 与终值温度 $t(T_s)$

当混凝土地板得到稳定加热量,地板表面平均温度会上升并达到新平衡态。该平衡状态温度  $t_\infty$  取决于  $KQ_\lambda$  值的大小。实际上,混凝土地板表面平均温度接近新平衡态温度是一个无限趋近过程,因此将混凝土地板升温温度接近新平衡态温度 95% 时的升温时间近似认为是混凝土地板升温时间  $T_s$ ,

则可得到  $T_s \approx 3T$ 。并且看到混凝土地板升温时间  $T_s$  与时间常数  $T$  的影响因素一致,都与材料的重度、比热容、地板厚度及地板热阻呈正比,与供热量和初始温度无关。由式(9)得,地板受到热作用,经过时间  $T_s$ ,温度上升为:

$$t(T_s)=0.95KQ_A=0.95t_{\infty} \tag{13}$$

$0.95t_{\infty}$  已十分接近新平衡值  $t_{\infty}$ ,可近似认为地板温度不再发生变化,已达平衡。此外地板终值温度可表达为:

$$t(T_s)=0.95[\frac{1}{U_z}(\frac{t_g}{R}+h_zt_o)] \tag{14}$$

可看到地板终值温度与地板升温过程中环境作用温度、地板内部导热热阻、地板表面综合换热

热阻、以及供水温度有关,与地板初始温度无关。下面通过实验进行验证。

### 3 计算模型实验验证

#### 3.1 实验条件

##### 3.1.1 实验场所

实验房间位于北京市某高校一坐北朝南 2 层办公建筑第 2 层,该房间长×宽×高为 3.2 m×3.2 m×2.85 m,有一个 1.5 m×1.5 m 单框双玻中空塑钢南向玻璃外窗;房间的东、西邻室及楼下房间室内供暖条件同实验房间,北墙相邻走廊。实验房间混凝土填充式辐射地板布置形式为回折型。该辐射地板结构层具体材料参数见表 1。

表 1 混凝土填充式辐射地板材料参数表  
Table 1 Material parameter table of floating screed hot water floor

名称	材料	规格/mm	导热系数/W·(m·℃) <sup>-1</sup>	比热容/J·(kg·℃) <sup>-1</sup>	密度/kg·m <sup>-3</sup>
地面层	瓷砖	9	1.10	850	2500
	水泥砂浆找平层	10	0.93	840	1800
填充层	豆石混凝土层	50	1.28	920	2300
	加热管 PE-X	内径/外径为 16/20 mm;管间距为 100/200 mm			
保温层	聚苯乙烯	25	0.047	1330	1050

注:地板表面对流和辐射综合换热系数按 10.5 W/(m<sup>2</sup>·℃)计算。

##### 3.1.2 实验测试设备

辐射供暖系统热源为电热水锅炉。系统加装了一套控制器可保证热源供水温度精度±0.3℃。房间内温度测试用铜-康铜热电偶,测量精度为±0.5℃,利用 Agilent 巡检仪进行数据采集。根据之前实验研究结果<sup>[16]</sup>,将加热管内水流速度控制在 0.3±0.01 m/s。

##### 3.1.3 实验测点

1) 供暖地表面及围护结构表面温度测点布置。供暖地表面布置有 5 个测点,分布于加热管上方和两管中间,如图 4 所示。房间的南外墙和外窗的内外表面中心位置各布置 1 个测点,东、西、北墙及北门内表面中心各布置 1 个测点,测点距地面高度均为 1.5 m。

2) 室内空气温度测点布置。在实验房间中心位置沿高度 0.75 m 和 1.5 m 处各布置 1 个测点,同时 1.5 m 处又布置一个黑球温度测点;走廊外墙壁

及其空中布置有 2 个测点,用以测试北墙外壁面及走廊空气温度。

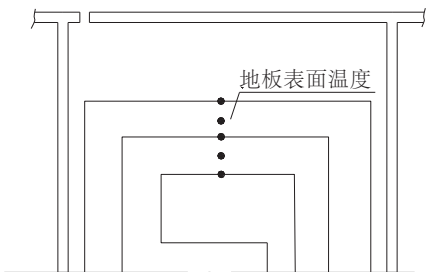


图 4 实验房间供暖地面表面测点布置图

Fig. 4 Radiant floor surface test point arrangement of test room

#### 3.2 实验内容

根据现有实验条件,通过改变供水温度  $t_g$ 、加热管间距  $L$  及不同初始温度  $t_{b0}$  得到辐射地板表面平均温度随时间的变化,具体实验方案见表 2。



表 2 辐射地板稳定升温实验方案

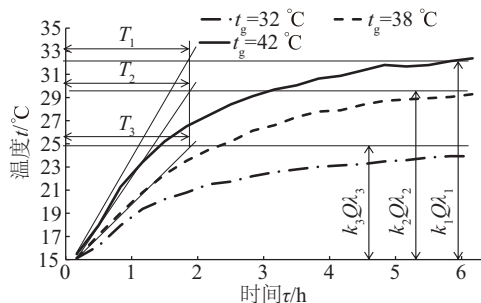
Table 2 Testing scheme of floating screed hot water floor stable heating process

实验方案	供水温度 $t_g/^\circ\text{C}$	加热管间距 $L/\text{mm}$	初始温度 $t_{b0}/^\circ\text{C}$	室外空气温度 $t_w/^\circ\text{C}$	考察对象
工况 1	32, 38, 42	200	15	$-1 \pm 1$	供水温度不同
工况 2	34	100, 200	20	$0 \pm 1$	加热管间距不同
工况 3	34	100	15, 16, 18	$1 \pm 1$	初始温度不同

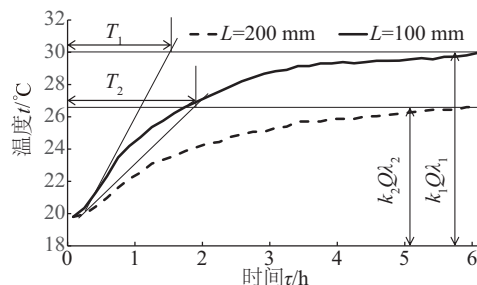
### 3.3 计算结果与实测结果比较分析

图 5a~图 5c 给出了不同实验条件下辐射地板表面平均温度随时间变化曲线及利用简化模型计算的时间常数和终值温度。从图中看到, 3 种工况下地板升温变化曲线皆呈指数变化规律, 与式(9)表达一致; 同时看到模型计算的终值温度与实测结果十分接近。另可看到管间距与地板时间常数呈对应关系。管间距一定, 地板时间常数就为定值, 而地板终值温度随供水温度升高而增加, 同时地板初始温度对地板升温时间和终值温度无影响。

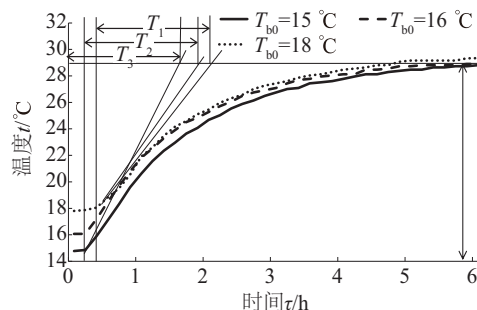
由图 5a 进一步显示, 当管间距一定, 随着系统供水温度从  $32^\circ\text{C}$  升至  $42^\circ\text{C}$ , 供暖地表面层最终温度也从  $24^\circ\text{C}$  升至  $33^\circ\text{C}$ 。这表明系统供水温度越高, 地板达到平衡时单位体积混凝土得到的热量越多, 供暖地表面层温度上升速率越大, 地板最终平衡温度越高。虽然初始升温速率不同, 但终值温度与升温速率之比值相同, 故时间常数相等。图 5b 显示当, 供水温度一定, 加热管间距为 100、200 mm 所对应的供暖地表面升温至稳态时的温度分别为  $29.8$  和  $26.8^\circ\text{C}$ , 时间常数分别为 1.5 和 1.9 h。管间距越大, 单位体积混凝土得到热量越少, 地板各点温度越低, 所达终值温度越低, 时间常数越长。加热管间距对供暖地表面最终温度和时间常数都有影响。图 5c 显示, 当供水温度和地板结构一定, 不同初始温度 15、16、 $18^\circ\text{C}$  对应的地板终值温度和时间常数相同, 都为  $28.7^\circ\text{C}$  和 1.5 h。这表明地板终值温度与升温时间并不随初始温度而变。



a. 不同供水温度



b. 不同管间距



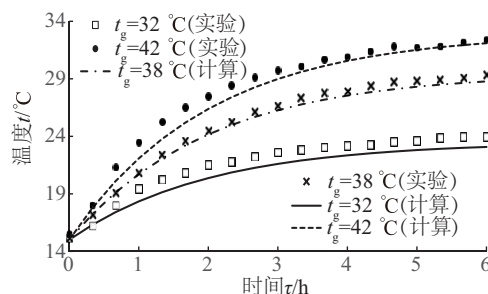
c. 不同初始温度

图 5 不同供水温度、管间距和初始温度条件下地表面层升温速率变化

Fig. 5 Radiant floor temperature rate with different supply water temperature, tube spacing &amp; initial temperature

图 5c 中地板初始温度越高, 初始升温速率将越小, 且初始温度与终值温度之差越小。地板达到终值温度时, 地板与环境达到平衡, 此时蓄热量为零, 加热管放热量等于房间需热量。

图 6a~图 6c 分别给出了上面 3 种情况下的模型计算结果与实测数据。对比两者可看到, 时间常数的误差范围为 2.2%~5.8%, 终值温度的误差范围



a. 不同供水温度

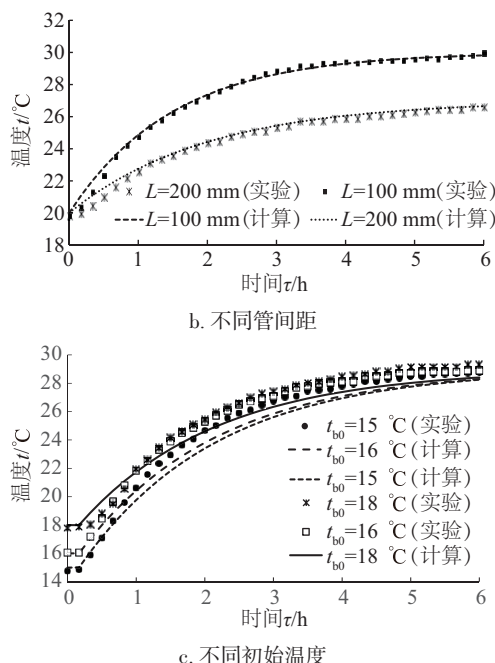


图6 不同供水温度、管间距和初始温度下  
地表面层实验与计算升温曲线

Fig. 6 Radiant floor temperature rate between model  
calculated data and testing data with different supply water  
temperature, tube spacing & initial temperature

为 0.94%~5.70%, 误差在实际工程允许范围内, 因此该模型完全能满足工程应用要求。

## 4 结 论

1) 本文给出一种可用于热水辐射地板稳定升温过程描述的计算模型, 利用该模型可方便快捷地获得地板升温时间与地板表面最终温度, 这提供了便捷调节辐射地板的可能性。

2) 通过实验测试和模型计算结果显示: 热水辐射地板稳定升温过程呈指数变化规律; 比较 2 种方法得到的混凝土辐射地板升温时间和终值温度显示两者最大误差为 5.8%。

3) 混凝土辐射地板的升温时间与组成地板的材料重度、比热容、地板厚度以及地板热阻呈正比, 与供热量和初始温度无关。混凝土辐射地板的终值温度与地板升温过程中环境作用温度、地板内部导热热阻、地板表面综合换热热阻、以及供水温度有关, 与地板初始温度无关。

### [参考文献]

[1] Zhou Guobing, He Jing. Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage

materials and heating pipes [J]. Applied Energy, 2015, 138: 648—660.

[2] Wang Dengjia, Liu Yanfeng, Wang Yingying, et al. Numerical and experimental analysis of floor heat storage and release during an intermittent in-slab floor heating process [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 398—406.

[3] Zhao Kang, Liu Xiaohua, Jiang Yi. Dynamic performance of water-based radiant floors during start-up and high-intensity solar radiation [J]. Solar Energy, 2014, 101(3): 232—244.

[4] 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.

[4] Niu Runzhuo, Deng Qihong. A parametric study on predictive control of intermittently operated radiant floor system [J]. Building Energy & Environment, 2008, 27(3): 10—13.

[5] JGJ 142—2012, 辐射供暖供冷技术规程 [S].

[5] JGJ 142—2012, Technical specification for radiant heating and cooling [S].

[6] 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, 28(3): 472—474.

[6] Yang Dewei, Wang Zhenxing. The analysis of heat transfer process in floor heating [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(3): 472—474.

[7] 于燕玲, 宗杰, 涂光备, 等. 地板辐射供暖房间温度调节方法 [J]. 煤气与热力, 2005, 25(5): 7—10.

[7] Yu Yanling, Zong Jie, Tu Guangbei, et al. Method of temperature regulation in radiant floor heating room [J]. Gas & Heat, 2005, 25(5): 7—10.

[8] 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.

[9] GB 50736—2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 [S].

[9] GB 50736—2012, Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings [S].

[10] Linton R, Frutiger T, Blanc S, et al. American society of heating, refrigerating and air conditioning engineers, HVAC systems and equipment, panel heating and cooling [S]. ASHRAE Handbook-2008, Atlanta: ASHRAE Inc, 2008, Chapter 6.

[11] European Committee for Standardization. European standard EN 1264 floor heating-systems and

- components[S], 1997.
- [12] 张 玲, 黄奕沅, 陈光明. 双回型辐射地板表面平均温度测量位置的模拟与分析[J]. 暖通空调, 2004, 34(6): 23—27.
- [12] Zhang Ling, Huang Yi, Chen Guangming. Simulation and analysis of measuring position of radiant floor average surface temperature for two-pass style systems [J]. HV & AC, 2004, 34(6): 23—27.
- [13] 郭富军, 杨昌智. 低温热水地板辐射采暖的控制方式[J]. 建筑热能通风空调, 1999, 18(3): 50—52.
- [13] Guo Fujun, Yang Changzhi. Control methods of low-temperature water floor radiant heating system[J]. Building Energy & Environment, 1999, 18(3): 50—52.
- [14] 马 云, 蔺 洁, 陈 超, 等. 热水地面辐射供暖系统热响应特性实验研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(12): 125—131.
- [14] Ma Yun, Lin Jie, Chen Chao, et al. Experimental analysis on the thermal response characteristics of radiant floor heating systems[J]. HV & AC, 2016, 46(12): 125—131.
- [15] Larsen S F, Filippin C, Lesino G. Transient simulation of a storage floor with a heating/cooling parallel pipe system[J]. Building Simulation, 2010, 3(2): 105—115.
- [16] 蔺 洁, 陈 超, 李清清. 回折型布置方式低温热水地板辐射换热器传热性能[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(10): 1570—1575.
- [16] Lin Jie, Chen Chao, Li Qingqing. Heat transfer properties of hot water floor heat exchanger with a two-pass style system [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(10): 1570—1575.

## CALCULATED MODEL OF HOT WATER RADIANT FLOOR STABLE HEATING PROCESS

Lin Jie<sup>1,2</sup>, Chen Chao<sup>1,2</sup>, Ma Yun<sup>1,3</sup>, Sun Le<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Key Laboratory of Green Built Environment and Energy Efficient Technology, Beijing 100124, China;

3. Huaian Thermal Power Co., Ltd., Huaian 223001, China)

**Abstract:** In order to find out the law of floor heating process, the calculated model of the floor heating process was established according to the principle of heat balance in which the equation to forecast the floor temperature rising time and final temperature. The model was validated against a group of new datasets obtained by field measurements under the conditions with different water temperature, tube spacing and environmental temperature on the floor heating process. The results show that the relative error between the measured data and calculated results is only 5.8%. Therefore, the proposed mathematical model can give reliable results for real applications. Also, the agreement between experiment and calculation result shows that the floor temperature exhibits an exponential relationship with the heating time.

**Keywords:** radiant heating; floor radiant heating system; radiant floor; stable heating process; calculated models