

电加热地板辐射采暖启动过程特性研究

罗 勇¹, 杨 杨²

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要:基于能量守恒及传热学的基本理论,建立了电加热地板辐射采暖启动过程的数学模型,开发了用于预测各特征点温度随启动时间变化的计算软件。特征点分别为室内空气温度、地板上、下表面温度,屋顶的内、外表面温度,以及围护结构内、外表面的温度。为了验证程序的合理性,针对同一供暖房间,利用所开发的软件进行了计算并进行了实际测量。结果表明:软件计算值与实测值在合理的误差范围内。利用该软件,综合分析了加热功率、发热电缆覆盖层厚度、围护结构特性以及室外温度等因素对供暖房间升温速率的影响。

关键词:电地暖;升温特性;数值模拟;特征点温度

中图分类号:TU832 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)01-0075-05

0 引言

随着生活水平的不断提高,人们对居住环境的要求也相应提高。就冬季采暖而言,人们已不再仅仅满足于对温度的要求,舒适已提到议事日程。地板辐射采暖就较好地满足了人们对舒适性的要求^[1]。在地板辐射采暖方式中,当不具备热水地板辐射采暖条件或以供冷为主热负荷较小的地区^[2],电地板,因其具备初投资小、施工方便、控制灵活,不仅可满足室内温度的要求,还具备舒适、健康、环保等优势,因此越来越多地获得业内人士的关注^[3-4]。然而,电地暖工作过程消耗的是高品质的电能,为了达到节能和舒适的目的,必须要做到无人使用时(尤其是长时间无人使用的房间)关闭、有人使用时又能获得舒适的温度这一效果。因此,有必要对其启动(升温)过程室内温度随时间的变化规律进行研究。

1 采暖房间热传递过程分析及热平衡方程

1.1 计算模型及传递过程分析

研究过程选择的几何模型如图 1 所示,对计算模型及过程设计做出一些合理假设:在启动后的前期按照非稳态考虑,利用实测数据对围护结构内部的温度分布进行了修正,后期按照稳态过程计算;电地暖启动过程的热量传递如图 2 所示。

热平衡关系如下:参照文献^[5],取发热电缆总发热量的 90%用于地板回填层的蓄热以及向上导热(其余 10%用于向下散热)。向上导热等于地板上表面与室内空气的对流换量与向四周 5 个墙体(或屋顶,以下同称墙面)的净辐射换热量之和。因 5 个墙体之间的温差较小,本文忽略其相互之间的辐射换热。另外由于太阳辐射的不确定性,在建模的过程中按照最不利条件处理,即忽略了太阳辐射对建筑外表面与周围环境之间的长波辐射过程。程序考虑了墙体与室内空气的对流换热。5 个墙体从地面和室内空气中得到的热量用于其自身结构的蓄热以及向室外导热(包括户间导热)。对于 5 个墙体的热传递,其处理方法是相同的,即如是外墙则给出室外空气温度,如是内墙则给出邻室空气温度。由上述分析可得以下热平衡方程

收稿日期:2015-03-05 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2016.01.14

作者简介:罗勇(1964-),男,教授,研究方向为建筑节能技术。E-mail:luoyong_110@sina.com

罗勇,杨杨.电加热地板辐射采暖启动过程特性研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(1):75-79.

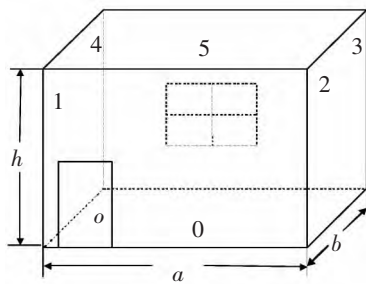


图 1 房间围护结构模型

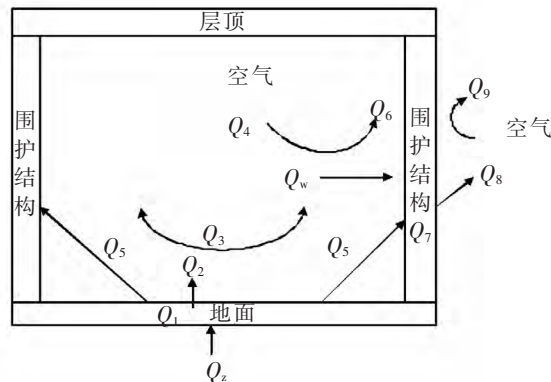


图 2 电地暖房间模型示意图

$$0.9Q_z = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

$$Q_2 = Q_3 + Q_{5d} \quad (2)$$

$$Q_{5w} = Q_7 + Q_8 - Q_6 \quad (3)$$

$$Q_8 = Q_9 \quad (4)$$

$$Q_4 = Q_3 - Q_6 \quad (5)$$

式中, Q_z 为发热电缆的总发热量(W); Q_1 为地面的蓄热量(W); Q_2 为地面向上的导热热量(W); Q_3 为地面与室内空气的对流换热量(W); Q_4 为室内空气的蓄热量(W); Q_{5d} 为地面净辐射换热量(W); Q_{5w} 为围护结构的净辐射换热量(W); Q_6 为围护结构内表面与室内空气的对流换热量(W); Q_7 为墙体的蓄热量(W); Q_8 为墙体的导热传热量(W); Q_9 为墙体外表面与室外空气的对流换热量(W)。

1.2 热量计算公式

利用传热学的基本原理及基本公式计算房间各个部分的热量,组成下列方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_z = qf_{1\tau} \\ Q_1 = c_1 m_1 \left(\frac{\alpha_1 (t_1 + t_2)}{2} - t_0 \right) \\ Q_2 = k_1 f_1 (t_1 - t_2) \tau \\ Q_3 = h_3 f_1 (t_2 - t_n) \tau \\ Q_4 = c_4 m_4 (t_n - t_0) \\ Q_{5d} = \frac{\sigma T_{2i}^4 - J_0}{\frac{1 - \epsilon_0}{\epsilon_0 f_1}} \\ Q_{5w} = \frac{\sigma T_{3i}^4 - J_i}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i}} \\ Q_6 = \sum_{i=1}^5 h_{6i} A_i (t_n - t_{3i}) \tau \\ Q_7 = \sum_{i=1}^5 c_{2i} m_{2i} \left(\frac{\alpha_2 (t_{3i} + t_{4i})}{2} - t_{0i} \right) \\ Q_8 = \sum_{i=1}^5 k_{2i} A_i (t_{3i} - t_{4i}) \tau \\ Q_9 = \sum_{i=1}^5 h_{9i} A_i (t_{4i} - t_{ui}) \tau \end{array} \right. \quad (6)$$

式中, τ 为电加热启动延续时间(s); α_1 为地面蓄热量计算用温度修正系数(其计算方法见下文); α_2 为墙体

蓄热计算温度修正系数(其计算方法见下文); c_1 为地面的质量比热($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); c_{2i} 为墙体(或屋顶,以下同)的质量比热($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); c_4 为室内空气的质量比热($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); f_1 为地面表面积(m^2); A_i 为墙体的表面积(m^2)($i=1,2,3,4,5$); m_1 为地面回填层质量(kg); m_{2i} 为墙体的质量(kg)($i=1,2,3,4,5$); m_4 为空气的质量(kg); k_1 为地面的导热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); h_3 为地面与室内空气的对流换热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); k_{2i} 为围护结构的传热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)($i=1,2,3,4,5$); t_1 为地板下表面温度($^{\circ}\text{C}$); t_2 为地板上表面温度($^{\circ}\text{C}$); t_n 为室内空气的温度($^{\circ}\text{C}$); t_{0i} 为围护结构在启动加热前的初始温度($^{\circ}\text{C}$)($i=1,2,3,4,5$); q 为加热电缆的加热强度(W/m^2); X_{0i} 为地面对围护结构的辐射角系数, ($i=1,2,3,4,5$); σ 为斯蒂芬—波尔茨曼常量, $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϵ_0 为地面的辐射发射率。 λ_i 为围护结构的导热系数; σ_i 为围护结构的厚度; h_{6i} 为围护结构内表面对流换热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)($i=1,2,3,4,5$); h_{9i} 为围护结构外表面与室外空气的对流换热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); t_{3i} 为围护结构的内表面温度($^{\circ}\text{C}$)($i=1,2,3,4,5$); t_{4i} 为围护结构的外表面温度($^{\circ}\text{C}$)($i=1,2,3,4,5$); t_{air} 为室外(或临室)的空气温度($^{\circ}\text{C}$)($i=1,2,3,4,5$); t_0 为房间空气在加热前的初始温度($^{\circ}\text{C}$)。

2 计算蓄热量用温度修正系数及软件应用简介

2.1 计算用温度的修正系数 α

电地暖启动过程是典型的非稳态传热过程,而程序中地板(或墙体,以下同)在 τ 时刻,其蓄热量的温度计算仅与地板两侧表面温度有关。在稳态情况下这样处理是合理的,而在非稳态传热情况下,因其内部温度分布是非线性的,显然两侧面温度的算术平均值不能代表其实际值。为此笔者通过实验的方法(由于篇幅限制,有关试验方法及公式的拟合方法本文不再赘述),得到非稳态条件下、蓄热计算用温度的修正系数

$$\alpha = -5.11t^2 + 20.465t - 14.405 \quad (7)$$

修正后的温差为

$$\Delta t = \frac{\alpha(t_1 + t_6)}{2} - t_0 \quad (8)$$

式中, τ 为时间(h)。

2.2 软件应用简介

软件输入参数主要有:房间几何参数、围护结构相关参数以及材料的物性参数、室内、室外(临室)初始温度、覆盖层厚度、加热功率等。输出参数主要有:电地暖启动后不同时刻、室内温度、上下地板表面温度、四周墙体内外面温度等数据。

3 电地暖应用软件合理性分析

为了分析软件输出结果的合理性,笔者在石家庄市某小区采用电地板辐射采暖的房间中,进行了电地暖启动过程各特征点温度的实际测量,测试工作自上午 8:00 开始。测试当天气象条件:晴天。将被测房间的几何尺寸、围护结构的热物性以及环境温度等参数利用软件进行了计算。实测结果与计算结果数据见表 1(限于篇幅仅给出室内温度的数据)。

从表 2 数据可以看出,室内温度的模拟计算值与实测值最大误差为 14.7%;在加热初期以及后期误差较小,5~11 h 时段误差较大,主要原因可能是软件未考虑太阳辐射所致。但总体来看,计算结果基本能够反映室内温度的变化规律,对工程的应用以及运行可提供帮助。

4 电地暖应用软件的工程应用

4.1 特征点温度随时间的变化规律

本文所指特征点温度分别为室内温度、地板上下表面温度、围护结构内、外表面温度。输入参数:地面覆盖层厚度 30 mm,覆盖层导热系数为 $1.54 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,加热功率为 $200 \text{ W}/\text{m}^2$,室外温度为 -1°C ,临室温度为 18°C ,各个特征点温度变化如图 3 所示。

表 1 软件计算结果与实验结果对比

时间/h	数值模拟室内 温度/℃	实测室内 温度/℃	误差/%	时间/h	数值模拟室内 温度/℃	实测室内 温度/℃	误差/%
1	8.96	8.5	4.8	10	15.3	17.2	-12.4
2	9.91	9.6	3.1	11	16.3	18	-10.4
3	10.41	11.2	-7.6	12	16.98	18.4	-8.4
4	11.25	12.3	-9.3	13	17.64	18.7	-6.0
5	12.2	13.5	-10.7	14	18	19	-5.5
6	13.1	14.9	-13.7	15	18.44	19.2	-4.3
7	13.51	15.5	-14.7	16	18.6	19.6	-5.4
8	14.13	16.0	-13.2	17	18.71	19.7	-5.3
9	14.82	16.5	-11.3	18	18.83	19.8	-5.3

从图 3 中可以看出,随着加热时间的增加,发热电缆供给的热量增加,热量传递给地面,再通过地面的对流换热以及辐射换热使各个特征点温度逐渐升高。加热 3 h 之后,升高速率逐渐减小,表明电地板辐射采暖房间已经接近热平衡状态。地板下表面(紧贴紧靠加热电缆的部位)温升最快,温度也最高,约在 50 ℃ 到达平衡状态,而地板上表面温度在 24 ℃ 左右就达到平衡状态,符合相关规定的要求^[5]。室内温度在 10 h 之后就达到设计值 16 ℃,此时已经满足人体舒适性要求。

4.2 加热功率对室内温度的影响

地面覆盖层厚度为 30 mm,覆盖层导热系数为 1.54 W/(m·K),室外温度-1 ℃,临室温度 18 ℃,加热功率依次为 100 W/m²、150 W/m²、200 W/m²、250 W/m²,不同加热功率下室内温度变化情况如图 4 所示。

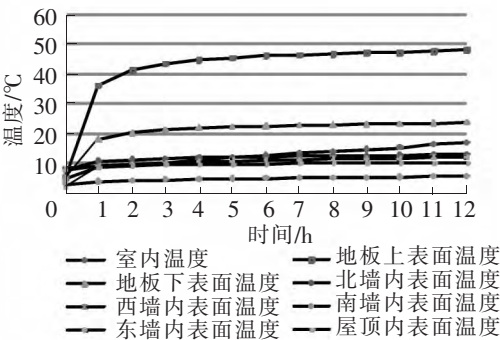


图 3 特征点温度随时间变化曲线

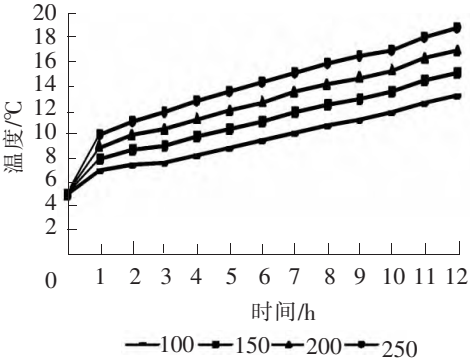


图 4 加热功率对室内温度变化曲线

4.3 覆盖层厚度对室内温度的影响

当覆盖层导热系数为 1.54 W/(m·K),加热功率为 200 W/m²,室外温度为-1 ℃,邻室温度为 18 ℃,覆盖层厚度依次为 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm 时,室内温度变化如图 5 所示。

显然,其他条件不变时,覆盖层厚度越大,室内升温越慢,这是由于供给热量相同时,随着覆盖层厚度的增加,地面覆盖层的蓄热量增加所致。

4.4 室外空气温度对室内温度的影响

地面覆盖层厚度为 30 mm,覆盖层导热系数为 1.54 W/(m·K),加热功率为 200 W/m²,邻室温度为 18 ℃,室外环境温度依次为-1 ℃、-6 ℃、-12 ℃时,室内温度的变化规律如图 6 所示。

显然,启动之初对流换热比例较高,随着时间的延长,这个比值逐渐减小。

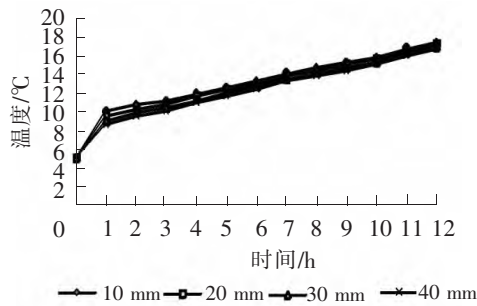


图 5 覆盖层厚度室内温度变化曲线

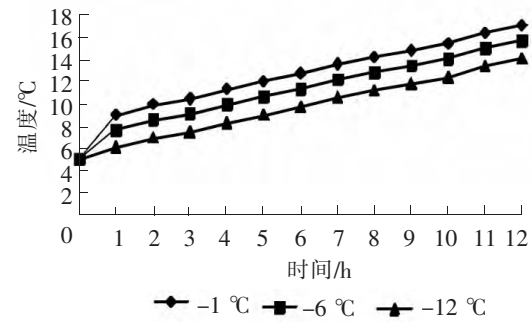


图 6 室外温度对室内温度的影响

5 结论

(1) 电加热地板辐射采暖的启动过程是典型的非稳态传热过程,通过对地板和墙体进行蓄热温度修正,可利用能量守恒方程以及稳态传热方程来预测电加热地板辐射采暖的启动特性。预测结果基本符合实际情况,因此所开发的计算软件对电加热地板辐射采暖室内温度的预测具有一定的工程应用价值。

(2) 通过应用所开发的软件可以分析各种因素对电加热地板辐射采暖启动特性的影响,定量分析地板、墙体、室内空气等特征点温度随启动时间的变化规律。

(3) 在工程设计过程中,借助所开发的软件,可结合工程建设的不同条件合理地设置加热功率,也可作为电地暖间歇运行的控制策略提供依据。软件的预测功能对研发新型覆盖层或开发新型预制沟槽保温板或供热板具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1]方修睦,王伟,施雪华. 电热膜供暖的热舒适性分析[J]. 暖通空调,2002,32(4):94-111.
- [2]中国建筑科学研究院. GB50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3]金洪文,徐辉,刘明会. 一种新型供暖方式——电热膜采暖[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2001,2(3):15-17.
- [4]张亮. 不同热源供暖性能的比较与评价研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.
- [5]中国建筑科学研究院. JGJ42—2012 辐射供暖供冷技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

Study on Heating Characteristics of Electric Floor Radiant Heating

Luo Yong¹, Yang Yang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Based on the conservation of energy and the basic theory of heat transfer, this paper establishes electric radiant floor transfer model, and develops software to calculate and analyze of the feature point temperature change with the startup time. These feature points include the indoor air, the upper and lower surface of floor, the inner and outer surface of retaining structure. To verify the rationality of the program, the developed software is used in the same heating room for the calculation and actual measurement. The results show that the calculation errors are in a reasonable range. Using this software, the factors of heating rate are analyzed. These factors include heating power and heating cable cover thickness, building envelope characteristics, outdoor temperature and so on.

Key words: electric floor heating; heating characteristics; numerical simulation; characteristic temperature