

基于TRNSYS的供水管加肋辐射地板节能性研究

朱 栋, 马景辉*, 刘 琦, 柴建源

浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年4月14日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

摘 要

本文基于肋片效率法提出了一种简化加肋供水管辐射地板模型, 将计算结果与实验数据比较, 得出该模型上表面、下表面温度及出口水温均方根误差分别为 0.03°C 、 0.36°C 和 0.08°C , 验证了该模型的准确性。利用该简化模型, 通过TRNSYS搭建了空气源热泵空调系统对杭州某住宅的供热仿真平台。并在该平台分析了供水管加肋辐射地板在间歇运行下的节能性, 结果表明该地板对比普通地板在供暖周期内空调系统总能耗降低18.64%, 空气源热泵COP提高了0.065, 地板响应时间提高了57.1%。

关键词

肋片效率法, TRNSYS, 辐射地板, 间歇运行

Research on Energy Saving of Radiant Floor with Ribbed Water Supply Pipe Based on TRNSYS

Dong Zhu, Jinghui Ma*, Qi Liu, Jianyuan Chai

School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 14th, 2023; accepted: May 24th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

In this paper, a simplified finned water supply pipe radiation floor model is proposed based on the finned efficiency method. Comparing the calculated results with the experimental data, the root-mean-square errors of the upper surface temperature, lower surface temperature and outlet wa-

*通讯作者。

ter temperature of the model are 0.03°C , 0.36°C and 0.08°C respectively, which verifies the accuracy of the model. Based on this simplified model, TRNSYS was used to build a simulation platform of air source heat pump air-conditioning system for a residential building in Hangzhou. The energy-saving performance of the radiant floor in intermittent operation was analyzed on the platform. The results show that the total energy consumption of the air-conditioning system is reduced by 18.64%, COP of the air source heat pump is increased by 0.065, and the response time of the floor is increased by 57.1%.

Keywords

Finned Efficiency Method, TRNSYS, Radiant Floor, Intermittent Operation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,地板辐射供暖系统越来越受消费者的欢迎,因为它们提供了更好的舒适性、热稳定性和能源效率。地板辐射采暖系统与太阳能、地热能、风能等可再生能源技术相结合,可以减少一次能源的使用和消耗,提高能源效率,降低地板辐射采暖系统的运行成本。

在地板辐射采暖系统运行过程中,由于混凝土地板末端具有较大的热惯性,传统基于规则的控制方式并不能使室内温度像传统空调快速地满足室内热舒适要求。Joe 等[1]引入了基于模型预测控制的智能运行策略,以优化水循环辐射地板系统的性能,最大限度地降低能耗和成本。除优化辐射地板的控制方式外,在普通混凝土地板种结合相变材料,可以转移室内冷热负荷,利用较为廉价的低谷电对相变材料蓄热蓄冷,提高系统经济性,且相变材料加入使室温更稳定,人体热舒适性更好[2]。Chen 等[3]建立了某建筑的状态空间模型,利用该建筑实测数据验证了模型的准确性,基于该模型分别运行 PID 和 MPC 控制策略,比较结果表明 MPC 控制器相比于 PID 控制器降低能耗 14.9%,提高空气源热泵能效比 COP24.5%,地板响应时间减少 56%。在混凝土辐射末端热工性能的研究基础上,研究人员目前主要以改进终端结构提高温度和热响应为主要目的。Ma 等[4]设计了一种带翅片供水管的混凝土辐射地板,该地板相较于普通混凝土地板,释热性能不变的情况下蓄热性能提高了 2 倍。

然而,在房间环境温度变化的情况下,加肋供水管辐射地板为满足室内需热量,运行阶段的系统总能耗等却没有得到探讨。本文提出了一种简化的加肋地板模型并结合杭州地区某住宅建筑,设计了一套空调系统,对该地板的节能效果、响应时间、室内舒适性进行了研究。

2. 地板模型

2.1. 简化地板模型

数值计算和简化模型模拟是模拟混凝土核心冷却板动态热性能的两种常用方法[5]。前者更准确,但耗时,而后者则节省时间,足够准确,适合实际使用。且加肋地板模型由于其复杂性,仿真时间必然会 longer,故提出一种替代方法。

2.1.1. 肋片效率法

在一段混凝土辐射楼板中,给水管壁与周围混凝土之间的传热过程为二维热传导过程。考虑供水管

道之间存在一个假想的混凝土翅片，供水管道通过翅片与周围混凝土传递热量，采用翅片效率法，取假想翅片的平均温度作为核心蓄热层温度。因此，供水管壁与周围混凝土的二维热传导过程可以简化为一维热传导过程。

采用有限差分法将混凝土辐射层划分为多层不等厚层。每个混凝土层的热容在两个表面上平均划分，分别作为相邻计算层的热容。中心蓄热层(m层)厚度为供水管道外径，位于m-1层和m+1层之间， T_{m-1} 、 T_m 、 T_{m+1} 分别为各层内部温度。

换热过程分为两部分：中心蓄热层上部向m-1层的换热和中心蓄热层下部向m+1层的换热。在中心蓄热层上部换热过程中，假设“假想肋片”肋片层温度与管壁温度相同。同样，在向下的换热过程中，在该数学模型中，将中心蓄热层下部换热过程分为两个子过程。第一个子过程是管壁向中心蓄热层下部的传热。第二个子过程是不考虑管壁从中心蓄热层下部到m+1层的传热过程，这个过程以肋片平均温度作为“假想肋片”的温度。

2.1.2. 简化模型

为了简化该加肋供水管混凝土地板模型，假设有一根不加肋圆管，其管外径与加肋供水管核心温度层厚度相等，管内径与加肋供水管管内径一致，保持除核心温度层的其它层结构不变，为使其对相邻层的传热量与加肋供水管相等，让假想管核心温度层温度与加肋供水管核心温度层温度相等既能满足不加肋圆管等效传热。加肋供水管核心温度在1/4管间距处，肋片平均温度在肋高1/2处。在所有参数都不变的情况下，只需要求出假设圆管的导热系数，即可保证从供水管到核心温度的传热量相等。首先分析传热过程。

加肋圆管到核心温度的传热分为两个过程，见图1。

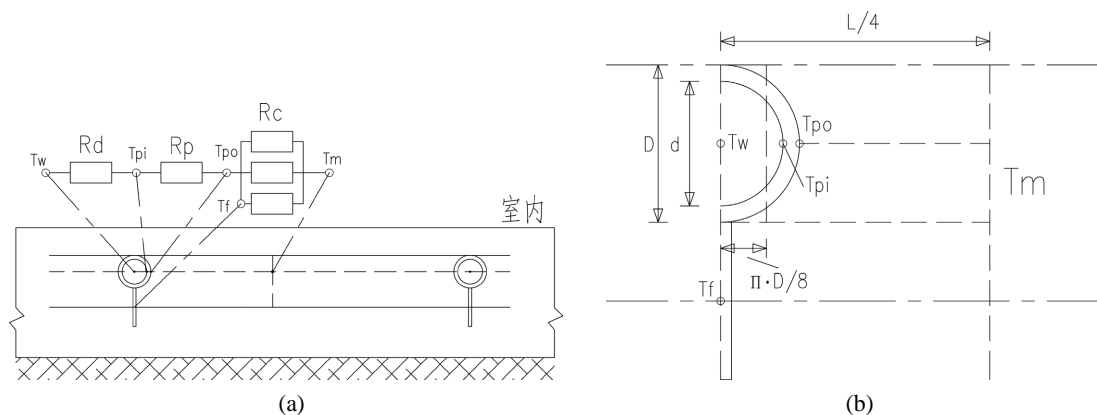


Figure 1. Thermal resistance diagram of ribbed water supply pipe: (a) Thermal group diagram; (b) Detailed drawings of finned pipe dimensions

图 1. 加肋供水管热阻示意图：(a) 热组图；(b) 加肋管尺寸详图

1) 管内壁到管外壁再直接到管间距 1/4 处；

管内壁到管外壁传热热阻为

$$R_p = \frac{1}{2\pi\lambda_p \cdot l} \ln \frac{D}{d} \quad (1)$$

管外壁到核心温度处热阻为

上半管壁

$$R_{up} = \frac{R_c}{\eta_{up}} = \frac{(2 \cdot L_p - \pi \cdot D)}{4 \cdot \lambda_c \cdot D \cdot l \cdot \eta_{up}} \quad (2)$$

下半管壁

$$R_c = \frac{(2 \cdot L_p - \pi \cdot D)}{4 \cdot \lambda_c \cdot D \cdot l} \tag{3}$$

肋片效率是认为混凝土计算层平均温度为肋片温度，相邻层平均温度为肋片环境温度，换热系数为

$$h = \frac{d_1 + d_2}{2 \lambda_c} \tag{4}$$

其中， d_1 、 d_2 计算层和相邻层的厚度，mm； λ_c 混凝土导热系数；W/(m·K)；根据 $m = \sqrt{((h \cdot A)/(\lambda \cdot L))}$ ， A 肋片截面积， m^2 ， L 周长，m； λ 肋片导热系数，W/(m·K)。再由肋片效率 $\eta = th(m\delta)/m\delta$ 计算出各方向上的肋片效率。

2) 管内壁到管外壁，管外壁到肋片，再从肋片到管间距 1/4 处；

管壁到肋片平均温度处热阻为

$$R_{fin} = \frac{R_f}{\eta_f} = \frac{L_f}{\lambda_1 \cdot \eta_f \cdot \delta \cdot l} \tag{5}$$

肋片到核心温度处热阻为

$$R_{low} = \frac{R_c}{\eta_{low}} = \frac{(2 \cdot L_p - \pi \cdot D)}{4 \cdot \lambda_c \cdot D \cdot l \cdot \eta_{low}} \tag{6}$$

则加肋供水管内壁到核心温度处的总热阻

$$R = R_p + \frac{1}{\frac{1}{R_{up}} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{fin} + R_{low}}} \tag{7}$$

把(2)~(5)式代入后化简得

$$R = R_p + \frac{R_{up} \cdot R_c + R_{fin} \cdot R_c + R_{low} \cdot R_c + R_{fin} \cdot R_{up} + R_{up} \cdot R_{low}}{R_{up} \cdot R_c \cdot (R_{fin} + R_{low})} \tag{8}$$

假想不加肋圆管到核心温度处的传热为管内壁到管外壁，再到核心温度的传热，分为上半管壁和下半管壁，见图 2。

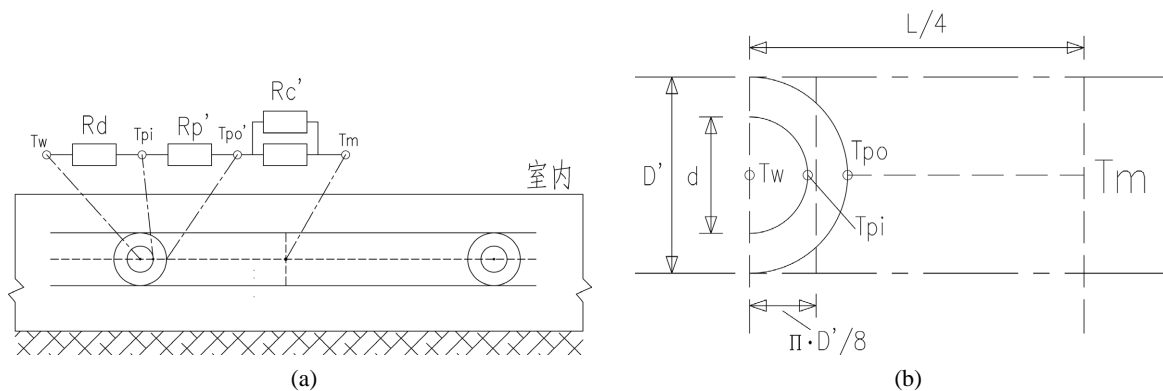


Figure 2. Schematic diagram of thermal resistance of ordinary floor: (a) Thermal group diagram; (b) Detailed drawings of hypothetical pipe dimensions

图 2. 普通地板热阻示意图：(a) 热组图；(b) 假想管尺寸详图

管内壁到管外壁传热热阻为

$$R'_p = \frac{1}{2\pi\lambda'_p \cdot l} \ln \frac{D'}{d} \quad (9)$$

管外壁到核心温度处热阻为

上半管壁

$$R'_{up} = \frac{R_c}{\eta'_{up}} = \frac{(2 \cdot L_p - \pi \cdot D')}{4 \cdot \lambda_c \cdot D' \cdot l \cdot \eta'_{up}} \quad (10)$$

下半管壁

$$R'_{low} = \frac{R_c}{\eta'_{low}} = \frac{(2 \cdot L_p - \pi \cdot D')}{4 \cdot \lambda_c \cdot D' \cdot l \cdot \eta'_{low}} \quad (11)$$

l 管长, m; λ_p 管导热系数, W/(m·K); d 加肋供水管内径, mm; D 加肋供水管外径, mm; D' 假想管外径, mm; L_p 管间距, mm; δ 肋片厚度, mm; λ_1 肋片导热系数, W/(m·K); L_f 肋高, mm。假设圆管管内壁到核心温度处的总热阻

$$R' = R'_p + \frac{1}{\frac{1}{R'_{up}} + \frac{1}{R'_{low}}} \quad (12)$$

把(9), (10)代入(11), 有

$$R' = R'_p + \frac{R'_{up} \cdot R'_{low}}{R'_{up} + R'_{low}} \quad (13)$$

假想圆管和加肋供水管核心温度相等, 则有

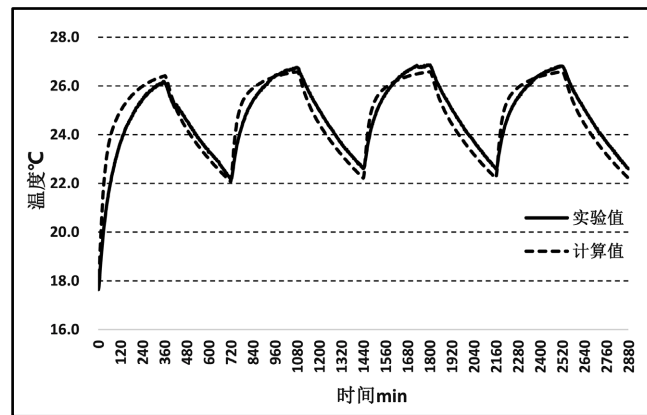
$$R = R' \quad (14)$$

将(8), (13)代入式(14), 根据各供水管及地板对应物性参数即可计算得出假设圆管导热系数。

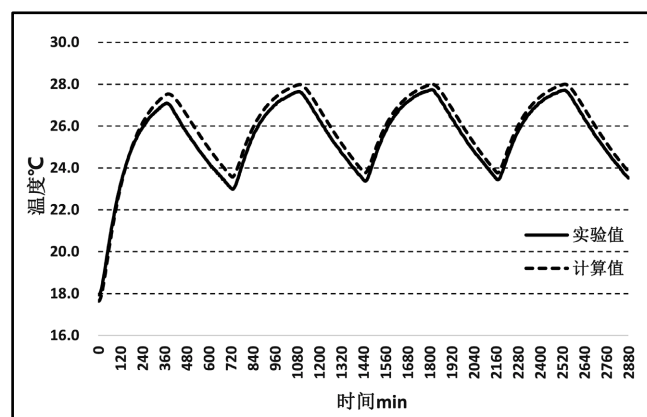
2.2. 模型验证

为了研究该模型的动态性能, 模拟一个尺寸为 1050 mm × 1050 mm × 1050 mm 的小房间, 地板厚度 120 mm, 埋管中心位于混凝土距上表面 35 mm 处, 地板除上表面对室内辐射供热外, 其余表面均为绝热。加肋供水管肋片高 40 mm, 厚度 2 mm; 供水管导热系数 0.45 W/(m·K), 内外径 16/20 mm。等效埋管内外径 16/40 mm, 导热系数根据 2.1.2 节计算, 为 0.852 W/(m·K)。供水温度 29.7℃, 流量 0.1 kg/s, 通过地板持续释热。地板供水启动六小时后停止供水六小时, 重复该过程, 总运行时长为 48 h。初始温度 17.4℃, 室温维持在 16.5℃ ± 1℃。将计算结果与实测数据比较, 见图 3。

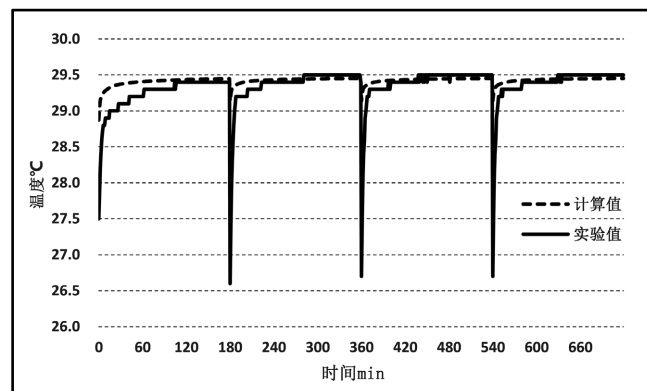
由计算结果得, 简化模型在间歇运行时, 地板各表面温度、供水管出口水温皆与实验值较为吻合。其中上、下表面和出口水温度计算值与实验值平均误差分别为 0.03℃、0.36℃和 0.08℃; 即上表面温度计算值比实验值平均高 0.08%, 下表面温度计算值比实验值平均高 1.42%, 以及出口水温计算值比实验值平均高 0.29%。地板模型上、下表面和供水管出口水温计算结果与实测数据的均方根误差 RMSE 分别为 0.56℃、0.42℃和 0.27℃。结果表明, 该简化模型在一定范围内是可靠的。因此, 在该简化模型的基础上, 建立地板辐射供热系统, 研究该地板在住宅建筑中的节能性。



(a)



(b)



(c)

Figure 3. Comparison of calculation results of radiant floor state parameters: (a) Upper surface temperature; (b) Lower surface temperature; (c) Outlet water temperature

图 3. 辐射地板各参数计算结果比较: (a) 上表面温度; (b) 下表面温度; (c) 出口水温

3. 建筑及空调模型

3.1. 建筑模型

本文选择杭州某幢二层住宅建筑作为模拟对象。该建筑一共有九个房间, 分别有卧室、儿童房、厨房、卫生间、起居室、书房、餐厅、阁楼等功能性房间。空调面积 117.44 m², 体形系数 0.65, 首层层高 3.3 m,

二层层高 3 m, 阁楼高度 1.7 m, 屋顶为坡度 21°坡屋顶并设置 900 mm 挑檐。外墙传热系数 $0.94 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 屋顶传热系数 $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 楼板导热系数 $1.97 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。TRNSYS 建立复杂建筑模型相对较困难, 利用谷歌 3D 建模软件 SketchUp (简称 SU) 建立本文中的建筑模型, 见图 4, 再通过插件导入 TRNSYS。

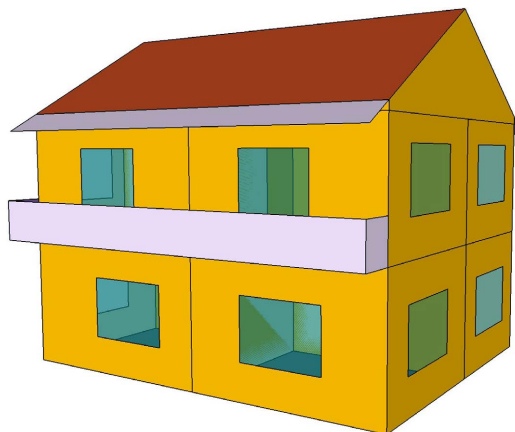


Figure 4. 3D model of residential building
图 4. 住宅建筑 3D 模型

3.2. 空调模型

由于该建筑房间众多, 功能各异, 本文取一楼卧室为典型房间, 研究加肋地板在住宅建筑供热的间歇运行特性。空调系统包括一台提供热水的空气源热泵, 额定制热功率为 8.9 kW ; 一个蓄热水箱, 体积为 1 m^3 ; 一台定流量水泵, 将水箱冷水送回机组加热, 额定流量为 688 kg/h ; 一台变流量水泵, 额定流量为 400 kg/h , 水泵流量根据室内热负荷需求变化。以及一个分流器, 将地板回水按比例一部分返回给蓄热水泵, 另一部分回水连接到合流阀, 与蓄热水箱里的高温热水混合, 以固定水温通过水泵重新送到室内供给热量。该地板辐射供热系统还包括水箱加热控制模块和流量控制模块, 见图 5。

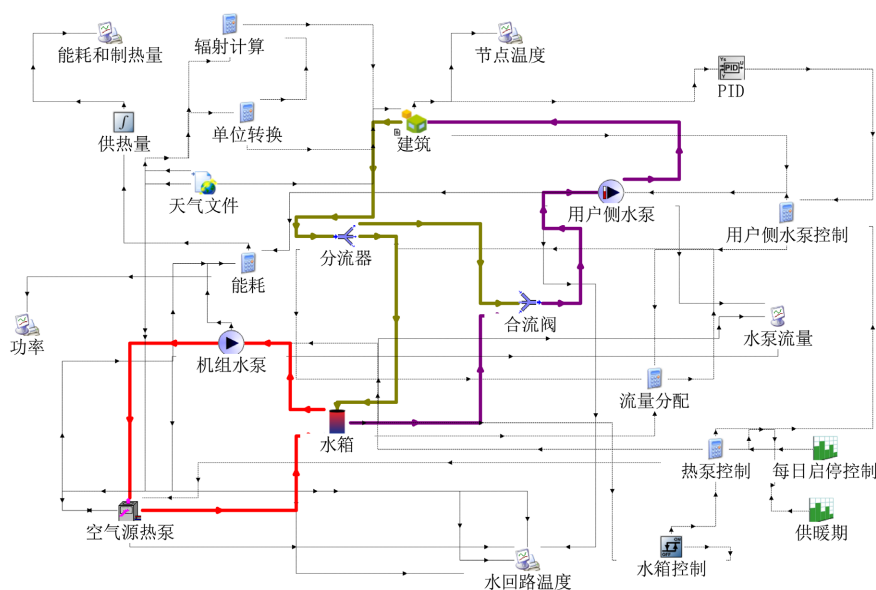


Figure 5. TRNSYS air-conditioning system diagram
图 5. TRNSYS 空调系统图

4. 模拟结果及分析

根据第2节建立的建筑和空调系统模型,模拟该建筑在1月1日至1月10日的空调运行,室外气象参数选择杭州典型气象年天气文件。由于典型房间为卧室,设定空调开启时间为20:00~8:00。房间人员设置为2人,即在地板运行时有两人占用房间。初始温度15℃,空气湿度50%。

1) 室内热环境分析

室内设定温度为18℃,由于地板为间歇运行,在地板停止运行期间,由于太阳照射的作用,室内温度可能会比设定温度要高。但在晚上室温都低与设定温度,地板处于运行状态。普通地板和加肋供水管地板240h模拟计算结果见图6。

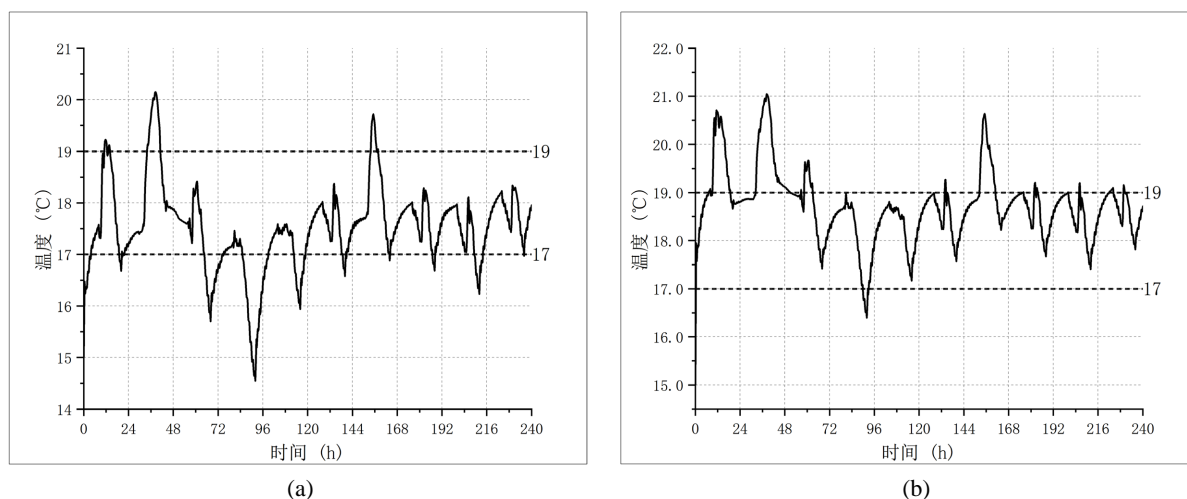


Figure 6. Temperature change of radiant floor: (a) Ordinary floor; (b) Ribbed water supply floor

图6. 辐射地板运行室内温度变化: (a) 普通地板; (b) 加肋供水管地板

由计算结果得,人员占用期间两者室内温度基本在 $18^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围内波动,皆满足室内舒适度要求。在人员占用期间,加肋供水管地板运行下室内温度比普通地板平均高 0.5°C ,而在地板不运行时,由于加肋地板蓄热量较普通地板多,其室内温度降温速度要比不加肋地板缓慢;对应室内温度比不加肋地板更稳定,并且室温更高,刚进房间的人员舒适性更好。选取1月6日0点至24点加肋地板和普通地板室内温度,见图7。由图可知,有助地板可以快速地让室内温度满足设定点温度,其响应时间为30 min,而无肋地板由于开启时室温较低,地板供热不能使室温立刻满足室温要求;无肋地板的响应时间为70 min。有助地板比普通地板响应时间减少了57.1%左右。

2) 系统能耗分析

由于辐射地板和机组并不是同时开启和关闭,辐射地板在室内有供热需求时根据蓄热量自动调节流量,供给房间热量,满足舒适度要求。空气源热泵机组则是在蓄热水箱的水温不能满足房间供水要求时对水箱热水进行加热。并且房间人员是间歇占用辐射地板房间。故统计240h运行周期内的热泵机组总能耗,辐射地板供热系统总能耗,及热泵总制热量,结果见图8。

由计算结果得,模拟周期内加肋地板的热泵能耗比普通地板的热泵能耗少74.06 MJ,热泵能耗降低23.23%;辐射地板系统总能耗加肋地板比普通地板少81.08 MJ,总能耗降低18.64%;而机组制热量加肋地板相比于普通地板低228.15 MJ,总制热量降低21.73%。然而,热泵机组能耗及制热量降低并不能说明系统运行效果更好。根据COP的定义,计算出加肋地板和普通地板系统对应的热泵机组COP分别为3.359和3.294,即加肋地板系统的热泵机组COP提高了0.065,热泵制热效率更好。加肋地板相比于普

通地板蓄热能力更强,在白天地板停止运行期间,能够储存更多的光照热量,以供夜间供热期间使用,从而整体上空气源热泵制热量要比普通辐射地板系统少,这是加肋地板总能耗较普通地板低的根本原因。

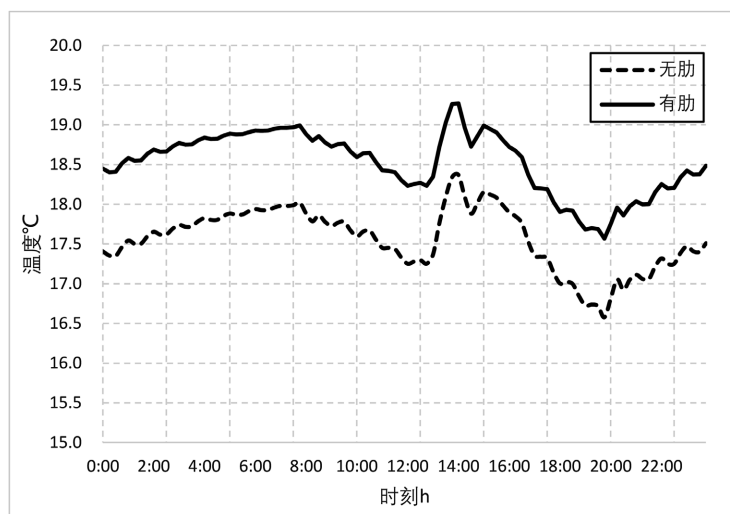


Figure 7. Comparison of room temperature changes (January 5)

图 7. 室温变化对比图(1月5日)

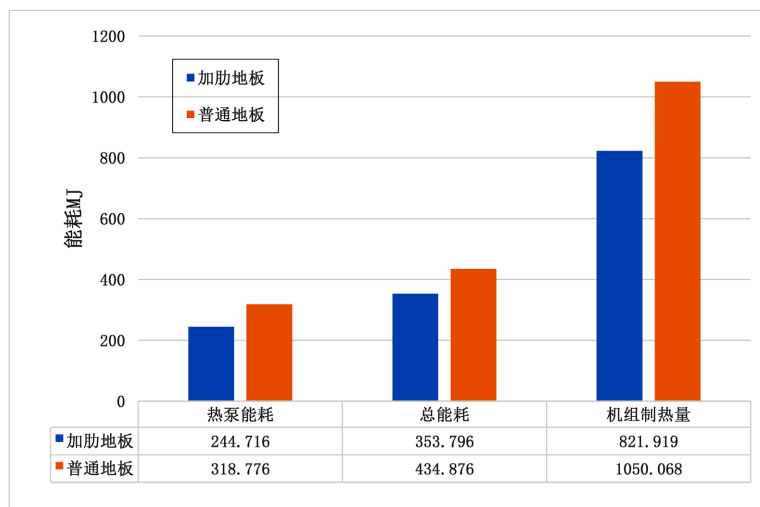


Figure 8. Energy consumption and heat yield of air conditioning system (January 1~January 10)

图 8. 空调系统能耗及制热量(1月1日~1月10日)

5. 结论

本文提出了一种简化的加肋地板模型,提高数值计算效率,并且和实测数据进行比较,验证了模型的准确性。基于该简化模型,建立了空调系统,模拟杭州某住宅建筑中该辐射地板系统的间歇运行,并对模拟结果进行了分析。得到如下结论:

1) 简化模型数值计算结果与实测数据上下表面及出口水温均方根误差分别为 0.03°C 、 0.36°C 和 0.08°C , 计算结果表面该模型较为准确;

2) 加肋地板房间对比普通辐射地板房间室温波动更小,温度变化幅度更低,且总体加肋地板房间室温比普通辐射地板房间室温高 0.5°C , 室内舒适性更好;

3) 加肋地板房间室温变化波动范围较普通地板房间小, 室温更稳定, 地板开启供热能快速满足室温要求, 加肋地板响应时间比普通地板快 57.1%;

4) 在满足更好的室内舒适性下, 加肋地板系统总能耗比普通辐射地板系统低 18.64%, 空气源热泵 COP 高 0.065, 该地板辐射供热系统更节能, 效率更高。

参考文献

- [1] Joe, J. and Karava, P. (2019) A Model Predictive Control Strategy to Optimize the Performance of Radiant Floor Heating and Cooling Systems in Office Buildings. *Applied Energy*, **245**, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.209>
- [2] 王婕婕. 基于 TRNSYS 的相变蓄能式地板辐射供冷系统间歇运行特性及系统优化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [3] Chen, Q., Li, N. and Feng, W. (2021) Model Predictive Control Optimization for Rapid Response and Energy Efficiency Based on the State-Space Model of a Radiant Floor Heating System. *Energy & Buildings*, **238**, Article ID: 110832. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110832>
- [4] Ma, J.H., Yang, Y.Z., Zheng, X., Dai, B.B., Zhu, D., and Liu, Q. (2021) Impact on Heat Storage Performance of Concrete Radiant Floor with Finned Water Supply Pipes. *Journal of Building Engineering*, **44**, Article ID: 103351. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103351>
- [5] Gwerder, M., Todtli, J., Lehmann, B., Dorer, V., Guntensperger, W. and Renggli, F. (2009) Control of Thermally Activated Building Systems (TABS) in Intermittent Operation with Pulse width Modulation. *Applied Energy*, **86**, 1606-1616. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.008>