

文章编号: 1671-6612 (2020) 01-086-05

# 不同冷辐射表面位置 对内嵌管式围护结构供冷房间负荷的影响

陈尚斐 隋学敏

(长安大学建工学院 西安 710061)

**【摘要】** 采用 Energyplus 软件搭建了西安地区典型住宅建筑的内嵌管式地板、顶板、墙面辐射供冷模型, 对比研究了在相同的埋管参数与室内操作温度条件下, 辐射系统连续运行时冷辐射板位于三种不同位置的房间冷负荷差异。模拟结果表明, 地板供冷的表面峰值冷负荷高出墙面供冷 16.01%, 墙面供冷的水侧峰值冷负荷高出地板供冷 7.92%。

**【关键词】** 内嵌管式围护结构; 冷辐射表面位置; 冷负荷; 仿真模拟; 影响规律  
中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Influence of Different Radiant Surface Positions on Room Cooling Load with the Tubes-embedded Building Envelope

Chen Shangfei Sui Xuemin

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710061)

**【Abstract】** For typical residential buildings, the models of the tubes-embedded radiant floor, radiant ceiling and radiant wall were established by using Energyplus software. At the same conditions of tubes-embedded parameters and indoor operative temperature, the difference of room cooling load in three different radiant surface locations during continuous operation was studied. The simulation results show that surface side peak cooling load of radiant floor is 16.01% higher than radiant wall, the hydronic side peak cooling load of radiant wall is 7.92% higher than radiant floor.

**【Keywords】** tubes-embedded building envelope; radiant surface position; cooling load; simulation; influence rule

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划一面上项目 (2019JM-453);

2015年陕西省住房城乡建设科技计划项目 (2015-K72);

中央高校基本科研业务费专项资金资助 (300102288202)

作者简介: 陈尚斐 (1994.4-), 女, 硕士研究生, E-mail: 1830926196@163.com

通讯作者: 隋学敏 (1981.3-), 女, 博士, 副教授, E-mail: suixuemin@163.com

收稿日期: 2019-05-30

## 0 引言

内嵌管式围护结构辐射供冷系统是在地板、顶板或墙体等建筑围护结构内部嵌入通有冷冻水的水管, 从而在混凝土建筑构件内部形成冷量的存储与传递, 使得围护结构内表面降温, 通过围护结构

内表面与室内环境的辐射与对流换热, 实现对建筑室内热环境的控制。该系统由于舒适性高、节能性好的优点, 近年来受到广泛关注<sup>[1]</sup>。

空调负荷计算是空调系统设计及设备选型的基础, 其准确性对系统的初投资及节能性影响较大。

空调系统按照去除室内热量的方式不同,可分为辐射式空调系统和对流式空调系统,两种不同空调末端的房间冷负荷形成机理存在差异<sup>[2]</sup>。对流式空调中,系统通过对流换热的方式来消除房间内的得热,辐射得热部分进入室内后并不能直接进入空气中,而是通过辐射换热的方式传递到各围护结构内表面和家具的内表面,提高这些表面的温度后,再通过对流换热方式逐步释放到空气中,形成冷负荷;而在辐射空调系统中,对流换热和辐射换热都存在,由于冷辐射表面可将一部分辐射得热直接转化为冷负荷,有别于对流式空调房间辐射得热到冷负荷的转化过程,从根本上改变了辐射空调房间冷负荷形成过程,导致这两种系统下的空调房间冷负荷形成机理存在差异,从而针对这两种不同空调房间的冷负荷计算方法也有所不同。

辐射空调系统根据辐射表面位置的不同分为地板供冷、顶板供冷和墙面供冷三种辐射供冷系统,冷辐射板位于不同的位置会影响房间热过程,从而进一步地影响房间负荷特性。目前,国内外相关研究多是关于这三种不同冷辐射方式下的室内热环境和热舒适情况的对比研究<sup>[3-5]</sup>,有关三者冷负荷方面的对比研究尚未见相关报道。本文采用建筑能耗模拟软件 Energyplus 搭建了内嵌管式辐射供冷系统模型,基于热平衡法模拟计算,分析不同冷辐射表面位置对内嵌管式辐射供冷房间冷负荷的影响,为内嵌管式辐射供冷系统的负荷计算及优化设计提供参考。

## 1 建筑模型

### 1.1 模型建立

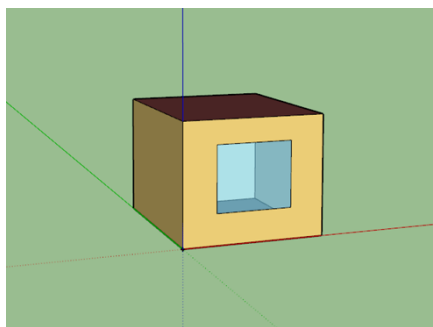


图1 建筑模型示意图

Fig.1 Architectural model

本文选取西安市某典型住宅建筑的主卧室作为建筑模型,房间长 3.4m,宽 3.9m,高 2.75m,

南面和北面墙体为外墙,南墙上有一尺寸为 1.5m×1.8m 的外窗,窗墙比为 0.28,东面、西面墙体均为内墙,其相邻房间均为空调房间,室内热环境与本房间相同,建筑模型如图 1 所示。

Energyplus 设定建筑围护结构由一层层材料组成,首先建立建筑材料(Material),再通过引用材料来构建围护结构(Construction),建筑围护结构的构造形式及热工参数依据《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准(JGJ 26-2010)》<sup>[6]</sup>要求设置,围护结构热工参数如表 1 所示,窗户的热工性能参数如表 2 所示。

表 1 围护结构热工参数

围护结构	结构层	厚度 mm	导热系数 W/m·K	比热容 J/(kg·K)	密度 kg/m <sup>3</sup>	热阻 m <sup>2</sup> ·K/W
外墙	石膏板	19	0.16	1090	800	
	保温板	50	0.03	1210	43	
	混凝土	200	1.95	900	2240	
内墙	石膏板	19	0.16	1090	800	
	混凝土	200	1.95	900	2240	
	石膏板	19	0.16	1090	800	
地板层	隔音砖	6	0.06	590	368	
	空气隔层	—	—	—	—	0.18
	混凝土	200	1.95	900	2240	

表 2 窗户热工性能参数

玻璃类型	构造方式	传热系数	太阳得热系数 (SHGC)	遮阳系数 (SC)	可见光透射率 (VT)
普通玻璃					
双层窗	3mm+空气 12mm+普通 玻璃 3mm	2.70	0.76	0.87	0.81

### 1.2 气象参数设定

模拟采用 Energyplus 官方网站提供的中国标准气象数据 (CSWD) 作为室外气象输入,西安地区夏季空调室外计算干球温度 35.1℃,湿球温度 25.8℃;冬季空调室外计算温度 -5.6℃。选取夏季

典型设计日 (Summer Design Day) 作为分析对象, 通过从软件自带的气象数据库里选用 “Xian Ann Clg .4% Condns DB=>MWB” 作为夏季典型设计日进行夏季冷负荷计算。夏季典型设计日室外干球温度如图 2 所示, 太阳辐射强度如图 3 所示。

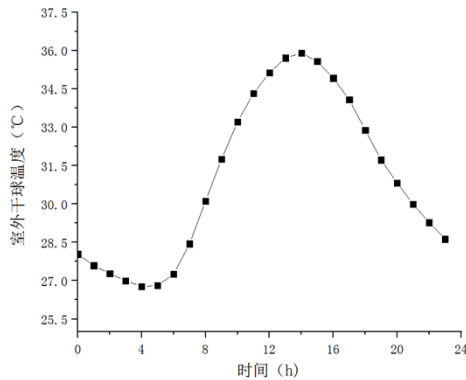


图 2 夏季典型设计日室外干球温度变化规律

Fig.2 Change law of outdoor air dry bulb temperature on typical design day in summer

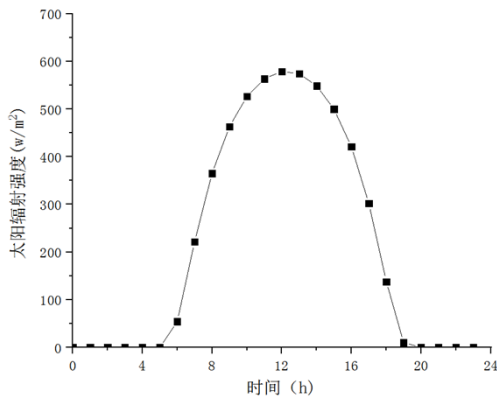


图 3 夏季典型设计日室外太阳辐射强度变化规律

Fig.3 Change law of outdoor solar radiant intensity on typical design day in summer

### 1.3 室内内扰及埋管参数设定

室内热源主要包括人员、灯光及设备, 本文模拟设定卧室人员为 2 人, 灯光负荷为 5W/m<sup>2</sup>, 设备负荷为 8W/m<sup>2</sup>。人员在卧室内的时间为晚上 10 点至次日上午 7 点, 灯具和电器设备的开启时间均为晚上 10 点至 11 点。

混凝土结构里的埋管参数影响内嵌管式围护结构辐射供冷系统的供冷能力, 在 Energyplus 中通过 Construction:InternalSource 来设置盘管间距和盘管位置。具体的埋管参数如表 3 所示。参数设置中

由于住宅建筑主卧室的北外墙面积小于地板和顶板的面积, 为了在不同的供冷面积条件下达到相同操作温度范围进一步对比冷负荷, 墙面供冷系统的供水温度取 15°C, 地板和顶板供冷系统的供水温度取 18°C。

表 3 混凝土结构层埋管参数

Table 3 Embedded-pipe parameters of concrete layer

管间距 (mm)	管内径 (mm)	质量流量 (kg/s)	供水温度 (°C)
150	15	0.11	15/18

## 2 辐射供冷系统模型

EnergyPlus 采用导热传递函数法 (Conduction Transfer Functions) 计算墙体传热, 用热平衡法 (Heat Balance Algorithm) 计算房间负荷<sup>[7]</sup>。低温辐射供冷模块有变流量和定流量两种方式, 变流量系统是保持供水温度恒定, 通过系统中水流量的变化来满足负荷要求, 而定流量变供水温度系统则是通过循环水泵将供、回水混合后来调节高温冷水的进口水温并保持流量恒定, 出口水温随室内负荷变化, 本模拟中选择 EnergyPlus 中 ZoneHVAC : LowTemperatureRadiant: ConstantFlow 定流量模块。

内嵌管式围护结构辐射供冷系统, 辐射板提供的冷量只能去除室内的显热负荷, 所以通常辅助通风系统来去除室内的潜热负荷。本文为简化模型, 对湿负荷和通风系统不进行分析, 并假设所研究空调室内保持正压状态, 不考虑由空气渗透作用所引起的室内得热得湿。

## 3 表面冷负荷和水侧冷负荷定义

对流式空调中, 冷负荷是为了维持建筑物室内空气的热湿参数在某一范围内, 在单位时间内需从室内除去的热量。若忽略传热损失, 水侧去除的热量与空调末端侧去除的热量相同, 即空调末端侧冷负荷与水侧冷负荷相同。但这不适用于内嵌管式围护结构辐射供冷系统<sup>[8]</sup>, 由于内嵌管式辐射供冷系统与建筑结构相耦合, 围护结构的较大蓄冷性能使得系统从冷辐射表面移除的热量与通过水侧循环回路移除的热量不同, 因此需要对辐射表面的传热过程和水侧的传热过程分别分析。

### 3.1 辐射供冷表面的传热过程

辐射系统通过供冷表面移除房间显热, 定义该冷却速率作为表面供冷速率, 冷表面移除的热量包括对流和辐射两部分, 由下式计算:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{surf} = & -\dot{q}_{surf,cond} = \dot{q}_{surf,conv} + \dot{q}_{lw-surf} \\ & + \dot{q}_{lw-int} + \dot{q}_{sw-sol} + \dot{q}_{sw-int} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\dot{q}_{surf,cond}$ 、 $\dot{q}_{surf,conv}$  分别为供冷表面的导热量和对流传热量,  $W/m^2$ ;  $\dot{q}_{lw-surf}$ 、 $\dot{q}_{lw-int}$  分别为室内各表面与供冷表面之间的长波辐射传热量和内部负荷的长波辐射换热量,  $W/m^2$ ;  $\dot{q}_{sw-sol}$  为表面吸收的太阳辐射量,  $W/m^2$ ;  $\dot{q}_{sw-int}$  为内部负荷的辐射短波换热量,  $W/m^2$ 。

### 3.2 水侧的传热过程

辐射冷板与水侧的热交换, 主要传热机制是导热传递, 水侧供冷量是基于水环路能量平衡的除热量, 根据水侧传热平衡, 水侧供冷量由下式计算:

$$\dot{q}_{hyd} = (mc_p)_{water} (T_{wo} - T_{wi}) \quad (2)$$

式中,  $m$  为水的质量流量,  $kg/s$ ;  $c_p$  为水的比热容,  $J/kg \cdot K$ ;  $T_{wi}$ 、 $T_{wo}$  分别为供水温度和回水温度,  $^{\circ}C$ 。

由于 EnergyPlus 负荷计算模块会自动默认为理想的空气系统的冷负荷的定义, 因此针对辐射供冷系统需要重新定义负荷: 表面冷负荷=表面供冷量=表面除热量; 水侧冷负荷=水侧供冷量=水侧除热量, 以此对辐射系统冷负荷进行分析。

## 4 模拟结果分析

### 4.1 操作温度

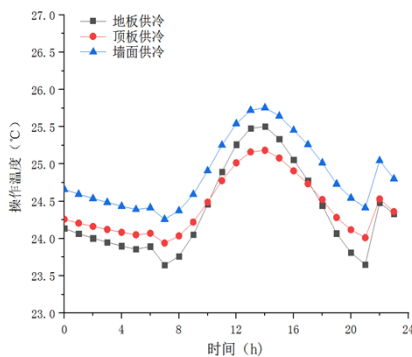


图4 三种不同冷辐射表面位置的操作温度一日变化规律

Fig.4 Daily change law of operative temperature under three different cooling radiant surface positions

内嵌管式辐射供冷系统的传热形式主要是辐射换热, 本文选用操作温度作为控制温度以更准确

地评价室内人体热舒适, 其中操作温度大小等于平均辐射温度和室内空气温度的平均值<sup>[9]</sup>。典型设计日三种不同冷辐射表面位置下的室内操作温度一日变化规律如图4所示。

由图4可知, 在连续供冷条件下, 三种不同位置下的操作温度变化趋势相同, 均在舒适区23~26 $^{\circ}C$ 范围内波动, 三者之间的操作温度差异较小, 认为近似相同, 从而进一步对比研究不同冷辐射表面位置下供冷房间的表面冷负荷和水侧冷负荷差异。

### 4.2 表面冷负荷差异分析

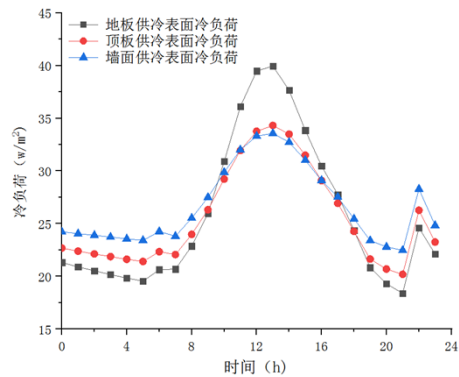


图5 三种不同冷辐射表面位置表面冷负荷一日变化规律

Fig.5 Daily change law of surface cooling load under three different cooling radiant surface positions

连续供冷条件下三种不同冷辐射表面位置下的表面冷负荷关系见图5, 由图可见, 三种冷辐射位置下的表面冷负荷变化规律基本一致, 都随着室内得热的变化而变化, 在下午14:00左右达到峰值。在7:00之后, 地板供冷的表面冷负荷迅速增长, 并于下午14:00达到最大的表面峰值冷负荷, 高出墙面供冷表面峰值冷负荷16.01%。这是因为当太阳辐射通过窗户进入到室内地板表面时, 辐射地板可以直接吸收部分短波辐射, 通过盘管内循环的冷却水将这部分热量消除, 极大地增强了地板供冷能力, 导致地板供冷的表面峰值冷负荷最大。

### 4.3 水侧冷负荷差异分析

连续供冷条件下三种不同冷辐射表面位置下的水侧冷负荷关系见图6, 由图可见, 三种冷辐射位置下的水侧冷负荷与表面冷负荷变化趋势基本一致。对于水侧传热过程, 冷水在盘管中循环以去除冷辐射表面吸收的热量, 发现墙面供水的水侧峰值冷负荷最大, 高出地板供水的水侧峰值冷负荷7.92%。通常地板供冷的表面峰值冷负荷最大, 反馈到水侧向供冷构件传递的冷量同样是最大的, 而

本文研究的墙面供冷是将冷却水管内嵌在外墙体中, 通入的循环冷冻水不仅可以除去冷辐射表面的热量, 还会除去通过外围护结构导热进来的部分热量, 因此墙面供冷工况下水侧所需的冷量增大, 达到最大的水侧峰值冷负荷。

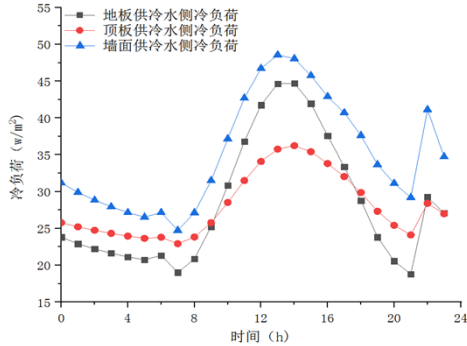


图 6 三种不同冷辐射表面位置的水侧冷负荷一日变化规律

Fig.6 Daily change law of hydronic level cooling load under three different cooling radiant surface positions

### 5 结论

本文搭建了内嵌管式地板、顶板、墙面辐射供冷模型, 通过模拟计算后, 发现三种不同冷辐射表面位置辐射供冷系统中, 地板供冷下的表面峰值冷负荷高于墙面供冷的 16.01%, 水侧峰值冷负荷是墙面供冷略高于地板供冷, 因为水管内嵌在外墙体中, 循环的冷却水带走室内热量的同时还除去了通过外围护结构导热进来的热量, 使得水侧所需的冷量增大。

为方便研究, 在模拟过程中对住宅建筑模型及内扰参数的设定进行了简化, 这与实际工程存在误

差。辐射供冷系统的冷负荷不仅与冷辐射表面位置有关, 还受运行方式、控制方式等的影响, 在进一步的研究中有待完善, 以更全面的对比分析位于三种不同冷辐射表面位置下的冷负荷差异。

### 参考文献:

- [1] Joaquim Romani, Alvaro de Gracia. Simulation and control of thermally activated building systems (TABS)[J]. Energy and Buildings, 2016,127:22-42.
- [2] J J Feng, F Bauman, S Schiavon. Experimental comparison of zone cooling load between radiant and air systems[J]. Energy and Buildings, 2014,84(12):152-159.
- [3] 陈露, 廖胜明. 三种方式辐射供冷室内热环境对比分析[J]. 建筑热能通风空调, 2010,29(3):53-56.
- [4] 黄立志. 不同辐射供冷方式下的室内热舒适和能耗分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [5] Gao Zhihong, Liu Xiaohua, Jiang Yi. Cooling performance analysis of radiant panel at different positions[J]. Journal of Southeast University, 2010,26:364-367.
- [6] JGJ 26-2010, 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [7] 潘毅群, 吴刚. 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用[J]. 暖通空调, 2004,34(9):2-7.
- [8] Feng Jingjuan, Schiavon Stefano, Bauman Fred. Cooling load differences between radiant and air systems[J]. Energy and Buildings, 2013,65:310-321.
- [9] 黄惊. 辐射冷热墙供暖特性的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.