

# 地板辐射空调系统的研究分析

张 焯

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 通过对地板辐射空调系统的数学模拟计算,证明了该新型空调方式的可行性和优越性,并提出了引进干燥新风解决夏季结露问题.

[关键词] 地板辐射,有限元法,干燥新风,露点温度

[中图分类号]TU832.1<sup>+</sup>3, [文献标识码]B, [文章编号]1672-1292-(2003)02-0031-04

随着人们生活水平的不断提高,高档住宅对舒适性空调的需求不断增长.地板辐射空调系统能满足这种需求,并不同程度地解决了传统家用空调在舒适性和健康性方面的问题.

地板辐射空调,是基于低温地板辐射采暖系统发展而来的,是指将冷/热源提供的冷媒或低温热媒(低于65℃,一般为热水)打入建筑物地板内的盘管(如交联聚乙烯PEX管或改性聚丙烯PP-C管、铝塑复合PE/AL/PEX管),以辐射散热方式调节人体的舒适度,并辅以少量干燥新风实现空调.由于它更符合人体的舒适和健康要求,并随着热泵技术的推广,它的冷/热源得到了保障,这种新型的空调方式可能得到更广泛的推广,特别是一些公共场合,如游泳池、室内浴场、图书馆、商场等等.

## 1 舒适性要求的满足

### 1.1 地板辐射空调系统的物理模型

地板辐射空调系统采用双回形塑料管布置方式,排管间距为200mm.由于高温管和低温管相间隔布置,可达到温度场均匀的效果,如图1、图2所示.

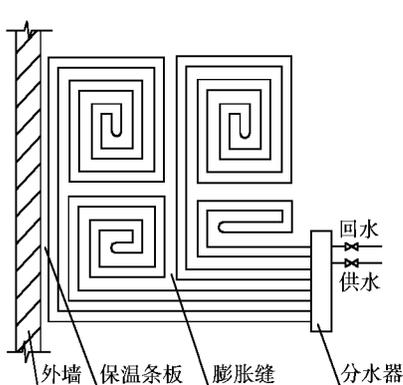


图1 地板辐射空调系统平面布置图

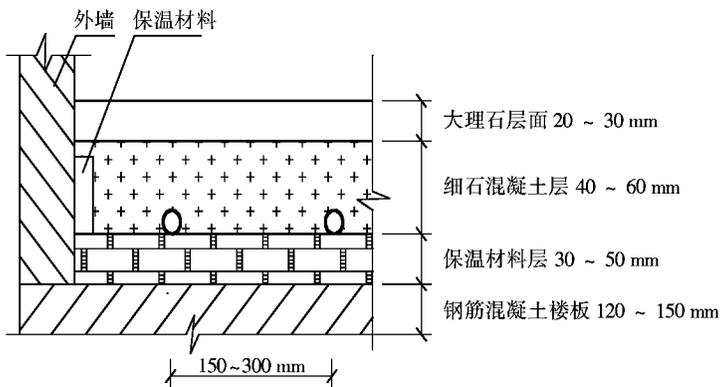


图2 地板辐射空调系统剖面图

### 1.2 传热模拟的建立

构造层内传热过程实际上是一个三维稳态导热过程,其具体的求解非常复杂.为简化问题,沿纵管方向截取微元段,则形成如图3所示的传热计算单元.由于沿管子轴线方向管壁的温度变化缓慢,因此沿管子轴线方向的微弱导热可以忽略.以传热单元的中间面abcd为该传热微元段的代表面,就可以利

收稿日期: 2002-10-15.

作者简介: 张焯, 1975-, 南京师范大学动力工程学院助教, 主要从事暖通空调方面的教学与研究.

用二维稳态导热的方程来求解该传热单元的温度分布和散热量. 该传热单元的二维稳态导热满足以下微分方程:

$$0 = \partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2 \quad (1)$$

式中:  $t$  为地板内温度,  $^{\circ}\text{C}$ .

在平板内由于温度场具有对称性, 对每个计算单元, 沿管间距(0.2 m)方向的两面可近似认为是绝热面, 即:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0.0} &= 0 \\ \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0.2} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

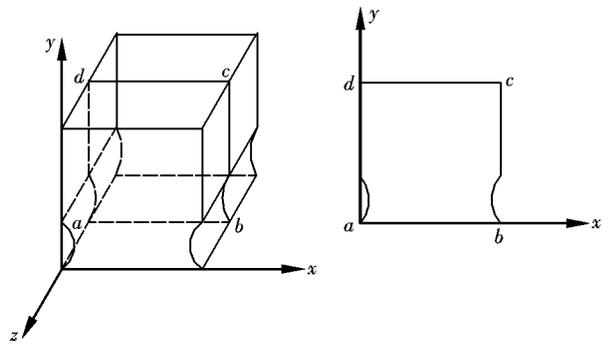


图3 传热计算单元

同时为减小地板向下的热量损失, 楼板层数有导热系数很小的保温隔热材料, 可近似为绝热层, 边界条件为:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0.0} = 0 \quad (3)$$

对于地板表面, 对流换热和辐射换热同时进行. 由于室内空气不以散热、吸收和再发射等形式参与辐射, 因此对流换热和辐射换热可认为是相对独立的. 地板的总换热量为对流换热量和辐射换热量之和. 本文用综合换热系数  $\alpha$  来考虑对流和辐射两方面的效应, 即:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r$$

式中:  $\alpha$  为综合换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\alpha_c$  为对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\alpha_r$  为辐射换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

另一方面认为地板各层材料紧密接触, 不考虑接触热阻. 因此地板层(0.22 m)边界条件为:

$$-\lambda \cdot \left. \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right) \right|_{y=0.22} = \alpha \times (t_2 - t_n) \quad (4)$$

式中:  $t_2$  为地板表面平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  为地板导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $t_n$  为室内空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ .

对于初始时刻, 认为地板内部温度均匀一致, 并等于室内初温:

$$t \Big|_{\tau=0.0} = t_{n_0} \quad (5)$$

再结合建筑物内热平衡公式<sup>[1]</sup>, 可求解建筑物内空气的干球温度.

### 1.3 模拟计算

对上述数学模型用有限元法进行求解. 温度函数在平面区域上用三角形单元离散. 由于是多层材料的复合板, 每层材料都单独进行单元划分及微分方程变分, 再总合. 最后用消去法借助计算机求解线性方程组.

#### 1.3.1 冬季采暖

冬季采暖的初始温度  $t_{n_0}$  为  $12^{\circ}\text{C}$ , 地板表面换热系数  $\alpha$  为  $10.576 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 供回水平均温度、地板表面平均温度、空气干球温度如图4所示.

由此可证明, 在地板辐射空调系统中, 供暖品质得到了保证. 特别是低温热媒的有效利用, 也证明了这种新型空调方式在能源综合利用方面的优势.

#### 1.3.2 夏季供冷

夏季供冷的初始温度  $t_{n_0}$  为  $34^{\circ}\text{C}$ , 初始相对湿度为 78%, 地板表面换热系数  $\alpha$  为  $10.179 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 供回水平均温度、地板表面平均温度、空气干球温度如图5所示.

由于在空调实现中的主要传热方式是辐射, 所以人体的实感温度较空气温度要低, 也就是说在保证

人体的舒适度不变的前提下,对于辐射空调来说室内设计温度可以提高 $2^{\circ}\text{C}$ 左右.而根据美国堪萨斯州立大学实验<sup>[3]</sup>,以及ASHRAE推荐<sup>[3]</sup>, $25^{\circ}\text{C}$ 左右是人体的最佳舒适温度.从温度变化曲线上可以发现当供回水平均温度为 $15^{\circ}\text{C}$ 时,地板表面平均温度为 $22.92^{\circ}\text{C}$ ,室内空气温度可达 $26.89^{\circ}\text{C}$ .因此,夏季辐射制冷足以满足人体对温度的舒适度要求.

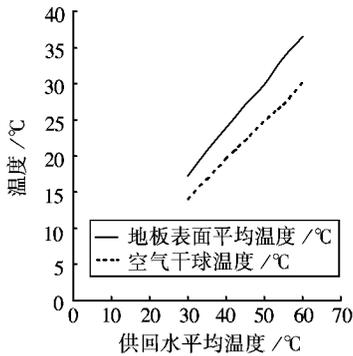


图4 辐射供暖室内温度变化曲线

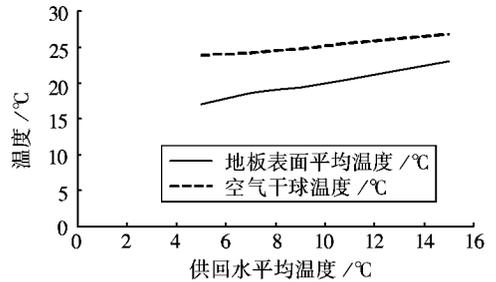


图5 辐射制冷室内温度变化曲线

## 2 健康性要求的满足

地板辐射空调系统辅以干燥新风实现空调,可以保障室内空气品质.虽然处理新鲜空气要消耗部分能量,但从社会经济的发展来看,这是值得的,也是可以承受的.

地板辐射空调系统的主要传热方式是辐射.冬季相对而言可以做到“脚暖头凉”,无传统供暖时的口干舌燥感,更符合人体生理学特性.夏季也不会出现直接吹风所引起的空调病,系统对人体的健康性得到保证.

## 3 结露问题的解决

地板辐射空调系统在冬季的使用已经得到了北方地区(如韩国的大部分地区)工程实践的证实<sup>[2]</sup>.而它在南方以及一些沿海潮湿地区的夏季使用将可能受到当地空气露点温度的限制,出现室内表面结露的问题<sup>[2]</sup>.这个问题一方面要求我们在实际使用时要对当地气象参数做一个合理的分析,另一方面系统中引入的干燥新风可在一定程度上解决这个问题.

以南京地区为例,有地板辐射空调实验用房如图6、图7所示.

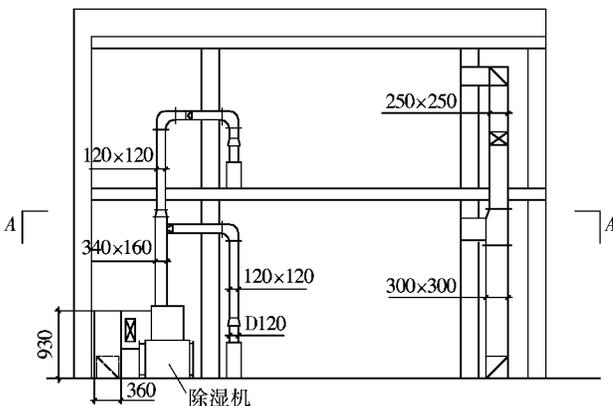


图6 辐射制冷置换通风复合系统风系统布置

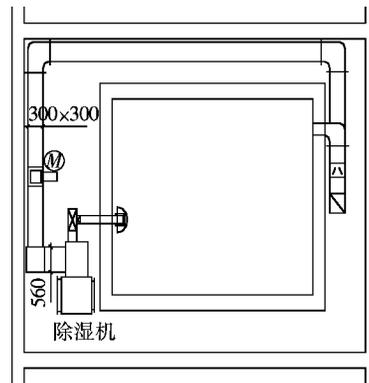


图7 A-A剖面图

辅以“ $3.68\text{ kW}$ 的热泵机组”+“功率为 $1\text{ kW}$ 的除湿机”,供实验用二层楼,240砖墙,内外抹灰.其结

构为外套间模拟外部环境,内间实验用房,在地板层中布置了如图1、图2所示的系统结构,计 $24.2\text{ m}^2$ 。热泵向系统提供冷水,平均温度为 $15.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。由除湿机完成室内部分送风的干燥任务,风量为 $900\text{ m}^3/\text{h}$ 。小室内部和套间布置了16个铂电阻敏感元件测定内间实验用房地面、吊顶、墙壁的温度,及内外套间的空气温度,用610型工控机进行数据采集和处理。

根据7月和8月每天2:00、8:00、14:00、20:00 4个数据采集时间采集到的相关参数,取其中每隔2天的一组数据利用EXCEL软件绘制变化曲线如图8、图9所示。

实验结果显示,室内空气流速为: $0.08\sim 0.16\text{ m/s}$ ,整个供冷季室外气象参数波动范围为:空气干球温度 $18.4\sim 37.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度 $41\%\sim 96\%$ 。通过空调以后室内气象参数维持在:空气干球温度 $18.4\sim 27.7\text{ }^\circ\text{C}$ ,

相对湿度 $58\%\sim 82\%$ 。由于实验地南京的实际室外温度的变化,实验所得结果中有部分时段室内空气干球温度偏出 $25\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ,与通过数学模型推出的结果略有偏差,但有关的室内参数均在美国堪萨斯州立大学实验所得的菱形舒适区内<sup>[3]</sup>。结露的问题也在一定程度上得到了解决。

## 4 结论

地板辐射空调系统的冬季使用国外已有大量实例,其在夏季的使用也有很高的研究推广价值。本文的数值模拟结果表明,当供回水平均温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,夏季地板辐射供冷能满足人体舒适度的要求。另外采用本文提出的引入干燥新风的方法,可有效地解决南方地区夏季地板辐射供冷时出现的结露问题,从而使地板辐射空调系统具有一定的推广价值。

### [参考文献]

- [1] 张焱. 低温地板辐射采暖的可行性分析[J]. 能源研究与利用, 2002, (5): 33~ 36.
- [2] 王子介. 地板供暖及其发展动向[J]. 暖通空调, 1999, (6): 35~ 38.
- [3] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [4] 孔祥廉. 有限元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

## Analysis on Feasibility of Floor Radiant Air Conditioning System

Zhang Ye

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

**Abstract:** The feasibility of floor radiant air conditioning system was proved and its superiority was analyzed through the theoretical calculation. The problem of high dew point was solved by adding some dry fresh air.

**Key words:** floor radiant, finite cell, dry fresh air, dew point

[责任编辑: 严海琳]

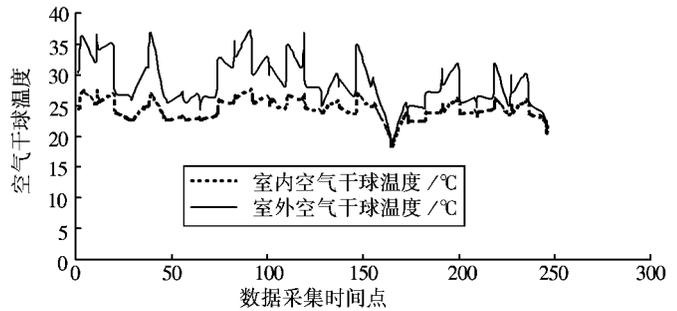


图8 辐射供冷空气干球温度变化曲线

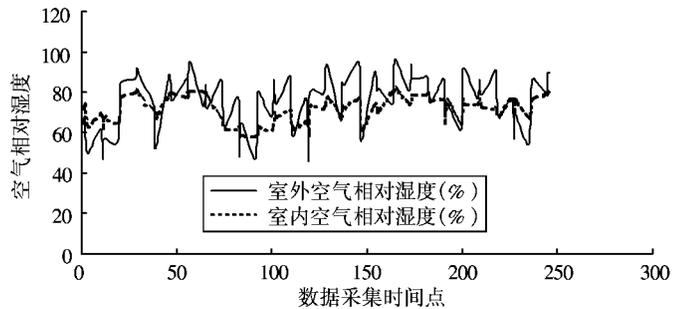


图9 辐射供冷空气相对湿度变化曲线