

文章编号: 2095-2163(2020)03-0303-07

中图分类号: TU831.2

文献标志码: A

# 某实训楼辐射空调系统供冷的热湿环境模拟研究

曹 振, 傅允准

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 为了研究辐射空调系统供冷工况下送风方式对室内热湿环境的影响,采用数值模拟的研究方法进行相关研究。以上海市某高校的一个实验室为研究对象,利用天正暖通软件对该房间进行负荷计算,得到其冷负荷及湿负荷,根据计算结果设计了辐射吊顶以及新风系统,其中送风方式分为顶板送风和地板送风。利用 Airpak 建立模型并模拟分析在辐射吊顶供冷与这两种送风方式新风复合系统联合运行下房间内温度特性分布、相对湿度特性分布及风速特性分布,并对采用这两种送风方式的辐射空调系统的结露特性进行对比分析。研究结果表明,采用地板送风比采用顶板送风室内温度和相对湿度分布更均匀,风速也更符合设计标准。此外,采用地板送风比采用顶板送风的辐射吊顶发生结露的风险更小。本项研究结果可为用于供冷的辐射空调系统的设计、风口位置的布置及辐射空调系统的在中国南方地区的推广应用提供一定的参考价值。

**关键词:** 负荷计算; 模拟分析; 温度特性分布; 湿度特性分布; 结露特性分析

## Thermal and humid environment of radiant cooling air conditioning system of an training building

CAO Zhen, FU Yunzhun

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** In order to study the relationship between the indoor heat and humidity environment and the air supply mode under the radiant cooling system, numerical simulation method is used to research. A laboratory of a university in Shanghai is used as the research object, and the load calculation of the room is performed by Tianzheng HVAC software. The radiation ceiling and the fresh air system are designed according to the calculation results, and the air supply mode including ceiling air supply and floor air supply. The model is built by Airpak software. And the temperature distribution, relative humidity distribution and wind speed distribution in the room under the radiant cooling system and the two air supply modes are also analyzed by Airpak software. The condensation characteristics of the two air supply methods are compared and analyzed. The research results show that temperature and relative humidity distribution of floor air supply is more uniform than that of ceiling air supply, and the wind speed of floor air supply is more in line with the design standard. In addition, there is less risk of condensation on the radiant panel using floor air supply. The results of this study can provide some reference value for the design of radiant air conditioning system for cooling, the layout of air inlet location and the promotion and application of radiant air conditioning system in the south of China.

**[Key words]** load calculation; simulation analysis; temperature distribution; humidity distribution; condensation analysis

### 0 引言

过度使用化石燃料带来的能源紧张与环境污染问题越来越严重,为此,中国政府在“十二五”期间提出了单位 GDP 能耗下降 16% 的要求<sup>[1]</sup>。在各个行业中建筑行业的能源消耗量比较大,中国的建筑行业对能源的消耗比例接近 1/3<sup>[2]</sup>。而在建筑能耗中,暖通空调的能耗比例最大,占建筑总能耗的 65% 左右<sup>[3]</sup>,辐射空调系统具有节能和舒适高的优点,受到了国内外科研工作者的广泛关注<sup>[4]</sup>。辐射空调属于温湿度独立控制空调系统,与传统集中空调系统相比,辐射空调系统的节能可达 30% 左右<sup>[5-8]</sup>。Imanari 等人<sup>[9]</sup>对日本东京某办公楼的办

公室进行了研究,通过对顶板辐射供冷系统进行能耗模拟,结果发现顶板辐射系统比全空气系统节省 10% 的能耗,此外,房间内垂直温度梯度比较小,人体感觉比较舒适,后来通过实验验证了模拟结果的正确性。

辐射空调系统通常是由辐射末端与独立新风系统联合运行工作,目前使用最多的送风方式是地板送风和顶板送风,对于这两种送风方式对辐射空调系统供冷性能的影响,有学者进行了相关的研究。王亮等人<sup>[10]</sup>利用了实验与数值模拟相结合的方法分别研究了地送风和踢脚送风与地板辐射供冷相结合时室内的温度及风速分布情况,结果表明踢脚送

**作者简介:** 曹 振(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:温湿度独立控制空调系统研究;傅允准(1978-),男,博士,副教授,主要研究方向:热泵技术及建筑节能。

**通讯作者:** 傅允准 Email: caozhenhn@163.com

**收稿日期:** 2019-10-13

风与地板供冷的结合方式可以使人体获得更高的热舒适性。张岩<sup>[11]</sup>通过数值模拟的方法研究了单独使用辐射吊顶供冷和地板送风与辐射吊顶联合供冷的运行特性,研究发现,单靠辐射吊顶供冷会发生结露,而吊顶与地板送风结合后不仅不会发生结露,而且室内舒适性较高。袁永莉等人<sup>[12]</sup>通过数值模拟与实验结合的方法研究了地板送风与辐射吊顶夏季供冷时室内的温度梯度情况,结果发现高度 2.0~2.7 m 范围内温度梯度变化剧烈。王玮等人<sup>[13]</sup>通过研究了地板送风与置换送风在住宅内的应用发现,与地板送风相比,置换通风能够更好地达到室内的温度要求。尽管关于地板送风及顶板送风的研究都不少,然而却没有对辐射吊顶分别与地板送风和顶板送风的联合供冷运行特性的对比分析研究,地板送风与顶板送风作为比较常用的 2 种送风方式,缺少相关研究就使得空调设计人员在设计送风口的位置时会缺少参考,因此有必要进行该项研究。

本次研究采用数值模拟的研究方法,这是由于数值模拟的方法具有变量因素都是可控的,而且可以避免干扰因素对研究结果的影响的优点,这里以上海某高校的一间实验室为研究对象,本次主要模拟了稳态时地板送风与顶板送风室内的温度、相对湿度以及气流速度等等,模拟结果以垂直方向和水平方向的云图展现。根据模拟结果得出这两种送风方式中舒适性更高、结露风险更小的送风方式。研究成果可以为辐射空调系统的设计及风口布置提供参考,同时也是对辐射空调系统领域研究的有力补充。

## 1 负荷计算

### 1.1 相关参数

该实验室位于实训楼的第一层,房间的面积为 33.6 m<sup>2</sup>,南侧、北侧和西侧墙体为内墙,东侧墙体为外墙和外窗,房间长 8.4 m,宽 4 m,高 3.1 m。上海室外气象参数和办公楼的室内设计参数见表 1、表 2。

表 1 室外设计参数

Tab. 1 Outdoor design parameters

气象参数	夏季	冬季
干球温度/℃	34.4	-2.0
湿球温度/℃	27.9	/
相对湿度/%	/	70
大气压力/Pa	100 540	100 540

### 1.2 计算结果

采用天正暖通软件按逐时法计算夏季房间内冷

负荷和湿负荷,计算结果为室内冷负荷为 3 486 W,湿负荷为 332.1 g/h。

表 2 室内设计参数

Tab. 2 Interior design parameters

主要参数	夏季	冬季
温度/℃	26	20
相对湿度/%	60	/
人员密度/(人·m <sup>-2</sup> )	0.1	0.1
新风量/(m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup> ·h)	30	30

## 2 系统设计

房间的空调系统采用的是辐射吊顶与独立新风系统相结合的空调系统,辐射吊顶主要由辐射金属板组成。

### 2.1 辐射吊顶设计

辐射吊顶采用的是某公司标准化定制的辐射板,单块辐射板尺寸为 1.2 m×0.6 m,本项目中辐射板单位辐射板面积换热量为 85.62 W/m<sup>2</sup>,则单块板换热量为 61.65 W,房间内布置辐射板的数量为 39 块,辐射吊顶承担的显热负荷为 2 404.35 W,新风承担的显热负荷为 1 081.65 W。

### 2.2 新风系统设计

由给定参数可知,房间内人员密度为 0.1 人/m<sup>2</sup>,房间面积为 33.6 m<sup>2</sup>,则房间内人数为 3.36 人,取人数为 4 人。由于新风承担的显热负荷为 1 081.65 W,承担湿负荷为 332.1 g/h,取送风状态点 O 的含湿量为 10 g/kg,则可根据焓湿图得到室内状态点及送风状态点的具体参数,按消除显热负荷所需风量为 207 m<sup>3</sup>/h,此新风量消除余湿负荷的能力为 422.28 g/h,由上文可知,室内的余湿负荷为 332.1 g/h,计算结果大于室内的余湿负荷,可以满足除湿要求。总新风量 207 m<sup>3</sup>/h,也满足人均新风量 30 m<sup>3</sup>/(h·p) 的要求。

## 3 数值模拟

Airpak 模拟采用了软件为 Fluent 公司开发的 Airpak 模拟软件,该软件具有面向对象的建模功能,有很多模块可以自行选择,如:房间、墙壁、送风口、排风口、人体等,而且对紊流、层流、稳态、瞬态问题均适用,同时采用 FLUENT 求解器进行求解,采用有限体积法对控制方程进行离散,求解速度较快,计算结果准确。Airpak 软件的模拟结果包括了室内温度场、速度场、空气龄、气流组织、PMV-PPD 等,方便用户对房间进行全面综合的评价。

### 3.1 物理模型

房间模型的具体尺寸是根据房间的真实尺寸确

定的,其尺寸为8.4 m(x) × 4 m(z) × 3.1 m(y),该办公室的吊顶由3排金属辐射板构成,每一排板数为13块,单块金属板的尺寸为1.2(m) × 0.6(m)。为简化模型,建模时将每一排相连的13块辐射板简化成一整块板,建立的模型如图1所示。

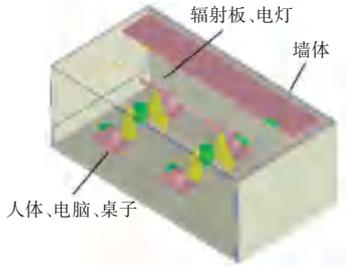


图1 辐射空调房间模型

Fig. 1 Radiant air conditioning room model

3.2 数学模型

假设室内流体为稳态、不可压缩流体,流动的方式为湍流,由于此模型中考虑因密度差引起的自然对流问题,因此在模拟中启用浮力模型<sup>[14]</sup>。本模拟中采用质量连续性方程、动量方程、能量方程及标准模型。研究内容详见如下。

(1)质量连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \tilde{N} \cdot (\rho U) = 0, \quad (1)$$

(2)动量方程:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \tilde{N} \cdot (\rho U \otimes U) = -\tilde{N} \rho' + \tilde{N} \{ \mu_{eff} [ \tilde{N} U + (\tilde{N} U)^T ] \} + S_M, \quad (2)$$

(3)能量方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \tilde{N} \cdot (\rho U h) = \tilde{N} \cdot (\lambda \tilde{N} T) + \tau \cdot \tilde{N} U + S_E, \quad (3)$$

表3 2个工况信息表

Tab. 3 Two working conditions information table

	地板送风	顶板送风
南墙、南外窗外表面温度/℃	36	36
东墙、地板	绝热	绝热
西墙、北墙外表面温度/℃	33	33
人数、显热负荷/(W · 人 <sup>-1</sup> )、湿负荷/(g · h <sup>-1</sup> )	4,58,184	4,58,184
电脑数、显热负荷/(W · 台 <sup>-1</sup> )	4,135	4,135
电灯数、显热负荷/(W · 盏 <sup>-1</sup> )	4,24	4,24
辐射板温度/℃	16	16
送风参数	$v = 0.72 \text{ m/s}, d = 8 \text{ g/kg}, t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$v = 0.72 \text{ m/s}, d = 8 \text{ g/kg}, t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
送风口数量	2	2
送风口位置	地板	顶板

(4) k - ε 模型:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \tilde{N} \cdot (\rho U k) = \tilde{N} \cdot [ (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \tilde{N} k ] + P_k + P_{kb} - \rho \epsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} = \tilde{N} \cdot (\rho U k) = \tilde{N} \cdot [ (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \tilde{N} \epsilon ] + P_k + P_{kb} - \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} (P_k + P_{kb}) - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon). \quad (5)$$

其中,ρ为流体密度;U为气流速度向量;S<sub>M</sub>为体积力总和;μ<sub>eff</sub>为紊流粘性系数,N · s/m<sup>2</sup>;P为修正压力;μ<sub>t</sub>为紊流黏度;k为紊流动能;ε为紊流损耗;c<sub>ε1</sub>、c<sub>ε2</sub>、σ<sub>k</sub>、σ<sub>ε</sub>均为常数;P<sub>kb</sub>和P<sub>εb</sub>表示浮力的影响。

3.3 基本假设

为使问题简化,故做出以下假设:

假定供冷辐射板表面的温度分布均匀,房间内外部气流流动为湍流,房间气密性良好,不考虑漏气及空气渗透的影响。

3.4 边界条件的设定

(1)本模拟采用稳态模型,湍流方程采用标准k-ε方程,采用DO辐射模型,激活能量方程;周围环境温度为34.4℃,当地大气压为100.5Kpa。组分运输方程开启species下transport and reaction模型,在材料的选择上选用mixture,组分设置为2种成分水蒸气vapor和空气air,且水蒸气位于空气上方,在自然对流的条件下,由于温度差的存在会引起浮升力,本模拟考虑到这一问题采用boussinesq模型,并且考虑重力的作用。

(2)2个模拟工况基本信息见表3。

送风口具体位置如图2所示。

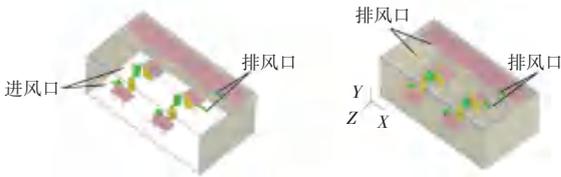


图2 地板送风与顶板送风的送风口位置

Fig. 2 Air inlet location of floor air supply and ceiling air supply

### 3.5 网格划分

采用六面体非结构化网格对模型进行网格划分,对空调区域做网格局部加密处理,对非空调区域做稀疏处理, $X$ 方向网格单元最大尺寸为0.415 m, $Y$ 方向网格单元最大尺寸为0.155 m, $Z$ 方向网格最大单元尺寸为0.2 m,地板送风模型的网格单元数为107 016,网格节点数为116 090;顶板送风模型的网格单元数为100 737,网格节点数为109 618。

## 4 模拟结果

模拟结果选取了2种工况下 $y = 1.5$  m水平面的温度分布、相对湿度分布、风速大小分布以及 $z = -2.1$  m 竖直面的温度分布、相对湿度分布、风速大小分布。 $y = 1.5$  m 高度跟人体的头部大致相当,选取此平面分析更具有代表性。同时也绘制出了2种工况下距南墙不同距离的温度和相对湿度变化情况以及距地面不同高度的温度和相对湿度变化情况。

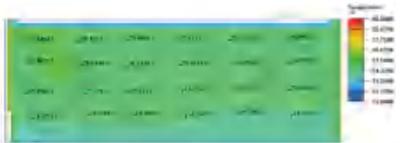
### 4.1 室内温度场

地板送风与顶板送风室内温度分布如图3和图4所示。



(a)  $y = 1.5$  m 温度分布

(a) Temperature distribution when  $y = 1.5$  m



(b)  $z = -2.1$  m 温度分布

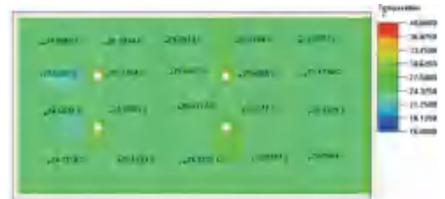
(b) Temperature distribution when  $z = -2.1$  m

图3 地板送风

Fig. 3 Floor air supply

图3(a)和图4(a)为地板送风和顶板送风 $y = 1.5$  m 水平截面房间内温度分布图,由两工况温度分布图可以看出,靠近人体和电脑的区域温度都略

高于其他区域的温度,室内区域整体温度为 $25$  °C左右,温度分布比较均匀。地板送风房间左侧区域温度为 $25.3$  °C左右,而顶板送风室内左侧区域温度为 $24.6$  °C左右,比地板送风温度偏低。图3(b)和图4(b)为地板送风和顶板送风 $z = -2.1$  m 竖直截面房间内温度分布图,由图中的数据可知,房间内整体温度在 $24$  °C ~  $25$  °C,竖直方向靠近辐射板附近区域温度较低。地板送风室内下方的温度较低,均为 $24$  °C左右,竖直方向温差为 $1$  °C左右,顶板送风房间内整体上竖直方向温度分布均匀。根据国际标准ISO 7730,对于房间高度方向每米温差不能超过 $3$  K时人体才能够得到舒适性,所以模拟结果表明该系统满足人体舒适度的要求。



(a)  $y = 1.5$  m 温度分布

(a) Temperature distribution when  $y = 1.5$  m



(b)  $z = -2.1$  m 温度分布

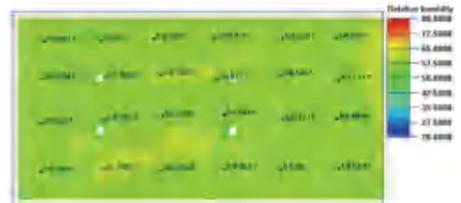
(b) Temperature distribution when  $z = -2.1$  m

图4 顶板送风

Fig. 4 Ceiling air supply

### 4.2 室内湿度场

地板送风与顶板送风室内相对湿度分布如图5和图6所示。



(a)  $y = 1.5$  m 相对湿度分布

(b) Relatively humidity distribution when  $y = 1.5$  m



(b)  $z = -2.1$  m 相对湿度分布

(a) Relatively humidity distribution when  $z = -2.1$  m

图5 地板送风

Fig. 5 Floor air supply



(a)  $y = 1.5$  m 相对湿度分布

(a) Relatively humidity distribution when  $y = 1.5$  m



(b)  $z = -2.1$  m 相对湿度分布

(b) Relatively humidity distribution when  $z = -2.1$  m

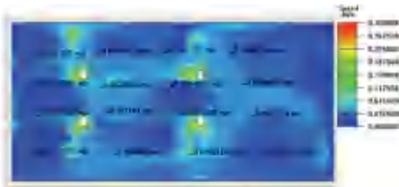
图6 顶板送风

Fig. 6 Ceiling air supply

图5(a)和图6(a)为地板送风和顶板送风工况  $y = 1.5$  m 高度水平面的相对湿度分布图,从图中数据可以发现2种工况室内大部分区域相对湿度范围在57.5%~61.5%,其中地板送风室内左侧区相对湿度为58%左右,右侧区域相对湿度为60.5%左右。顶板送风室内左侧区域相对湿度为61%左右,而右侧区域为60%左右。图5(b)和图6(b)为地板送风和顶板送风工况  $z = -2.1$  m 位置竖直面相对湿度分布图,由图可知,地板送风房间下方靠近地板区域的相对湿度在64%~65%左右,上方大部分区域的相对湿度为60%左右。顶板送风室内只有送风口下方部分区域的相对湿度偏高为62%左右,其他区域均为60%左右。

### 4.3 室内风速分布

地板送风与顶板送风室内风速分布如图7和图8所示。



(a)  $y = 1.5$  m 风速分布

(a) Wind speed distribution when  $y = 1.5$  m

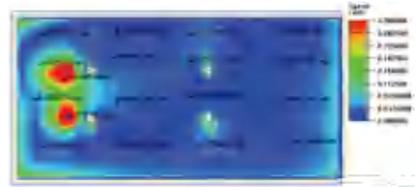


(b)  $z = -2.1$  m 风速分布

(b) Wind speed distribution when  $z = -2.1$  m

图7 地板送风

Fig. 7 Floor air supply



(a)  $y = 1.5$  m 风速分布

(a) Wind speed distribution when  $y = 1.5$  m



(b)  $z = -2.1$  m 风速分布

(b) Wind speed distribution when  $z = -2.1$  m

图8 顶板送风

Fig. 8 Ceiling air supply

图7(a)和图8(a)为地板送风和顶板送风  $y = 1.5$  m 平面风速分布,由图可看出,风速的大部分在0.05 m/s到0.1 m/s之间,其中地板送风室内整体风速分布均匀,顶板送风室内送风口附近区域风速较大,风速最大值达到了0.5 m/s。图7(b)和图8(b)为地板送风和顶板送风  $z = -2.1$  m 竖直面风速分布,由图可知两工况下室内风速大部分在0.02 m/s~0.1 m/s左右,地板送风室内风速分布比较均匀,室内靠近进风口区域风速为0.18 m/s左右。根据文献[14]中设计要求,室内风速不宜太大,夏季室内设计风速  $v \leq 0.30$  m/s,所以地板送风更加满足要求。

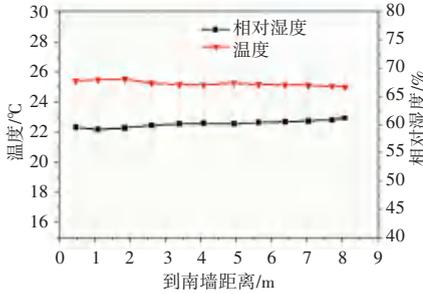
### 4.4 温湿度变化分析

地板送风与顶板送风室内温湿度变化趋势分别如图9和图10所示。

南墙为玻璃幕墙,图9(a)为  $y = 1.5$  m 水平截面温湿度变化,由图9(a)可知,随着与玻璃幕墙之间距离的逐渐增加,室内温度从25.5℃缓慢降低至25℃,降低的幅度为0.5℃左右,相对湿度则从60%缓慢上升至63%,升高幅度为3%左右;图9(b)为  $z = -2.1$  m 竖直面温湿度变化,由图9(b)可知,随着与地面的距离的增加,室内温度从24.5℃缓慢降低至22.5℃,降低幅度为2℃左右,相对湿度从62%逐渐上升至67%左右,靠近辐射板时又迅速降低至60%左右。

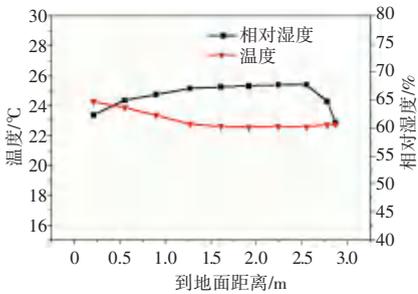
图10(a)为  $y = 1.5$  m 水平截面温湿度变化,由图10(a)可知,随着与玻璃幕墙之间距离的逐渐增加,室内温度从24.5℃缓慢升高至25.5℃,升高幅度为1℃左右,相对湿度则从63%缓慢降低至60%,降低幅度为3%左右;图10(b)为  $z = -2.1$  m 竖直面温湿度变化,由图10(b)可知,随着与地面的距离的增加,室内温度先在25℃左右保持稳定,

接近辐射板时温度则迅速降低,高度为 2.9 m 时温度仅为 22 °C 左右,室内相对湿度在 60% 左右保持稳定,靠近辐射板时相对湿度缓慢上升至 62% 左右。



(a)  $y = 1.5$  m 距南墙不同距离的温度和相对湿度

(a) Temperature and relative humidity at different distances from the south wall when  $y = 1.5$  m

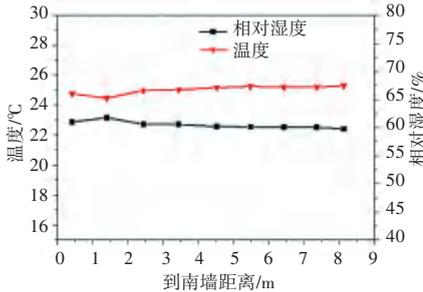


(b)  $z = -2.1$  m 距地面不同距离的温度和相对湿度

(b) Temperature and relative humidity at different distances from the floor when  $z = -2.1$  m

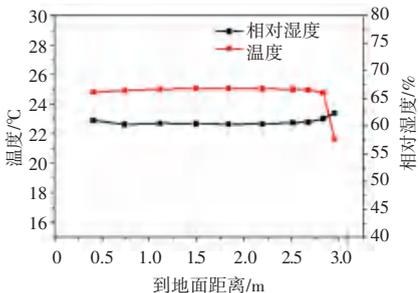
图9 地板送风室内环境

Fig. 9 Indoor environment of floor air supply



(a)  $y = 1.5$  m 距南墙不同距离的温度和相对湿度

(a) Temperature and relative humidity at different distances from the south wall when  $y = 1.5$  m



(b)  $z = -2.1$  m 距地面不同距离的温度和相对湿度

(b) Temperature and relative humidity at different distances from the floor when  $z = -2.1$  m

图10 顶板送风室内环境

Fig. 10 Indoor environment of ceiling air supply

### 4.5 结露分析

为了研究表明辐射吊顶是否结露主要受到辐射吊顶贴附层(距离辐射板 0.01 m)空气参数的影响,因此选取辐射吊顶贴附层(距离辐射板 0.01 m)内 12 个测点位置进行研究,对辐射空调系统以地板送风方式和顶板送风方式辐射板的结露情况进行分析<sup>[15]</sup>。测点位置如图 11 所示,2 种送风方式的露点温度与辐射板温度如图 12 所示。



图 11 测点位置示意图

Fig. 11 Test point location diagram

由图12可知,室内辐射吊顶的温度稳定在 19 °C,地板送风和顶板送风的露点温度都比较稳定,地板送风的露点温度为 11.5 °C 左右,顶板送风的露点温度为 12 °C 左右,地板送风和顶板送风的露点温度都远低于辐射板温度,所以在辐射空调系统稳定运行时,采用这两种送风方式辐射板均不会出现结露现象,而地板送风贴附层露点温度比顶板送风贴附层露点温度低 0.5 °C 左右,所以采用地板送风出现结露现象的风险更小。

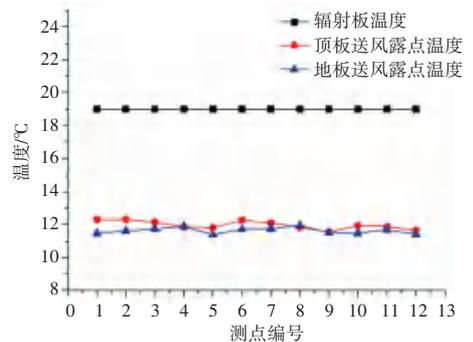


图 12 露点温度与辐射板温度

Fig. 12 Dew point temperature and radiant panel temperature

### 5 结束语

通过对地板送风和顶板送风的辐射吊顶供冷空调系统的模拟研究,得出了以下结论:

(1)从温度分布来看,地板送风房间温度与顶板送风房间温度分布范围基本相同,均为 24.5 °C ~ 25.5 °C,而由温度变化可以发现,从南墙到北墙以及从地面到辐射吊顶,顶板送风房间内温度逐渐降低,降低幅度较大,地板送风温度变化则很小,温度比较稳定。所以相比较顶板送风而言,地板送风室

内温度更加均匀。

(2)从相对湿度分布来看,地板送风与顶板送风房间内相对湿度平均值为60%左右,由湿度变化则可以看出,从南墙到北墙,顶板送风和地板送风室内相对湿度都比较稳定。而从地面到辐射吊顶,地板送风室内相对湿度逐渐升高,顶板送风室内相对湿度则比较稳定。

(3)从风速分布来看,顶板送风的进风口下方部分区域风速超过0.3 m/s,风速最大值达到了0.5 m/s,地板送风室内风速分布比较均匀,室内靠近进风口区域风速为0.18 m/s左右,所以使用地板送风比顶板送风可以获得更高的人体舒适性。

(4)地板送风和顶板送风的露点温度都远低于辐射板温度,所以在辐射空调系统稳定运行时,采用这两种送风方式辐射板均不会出现结露现象,但地板送风的贴附层内露点温度比顶板送风贴附层内露点温度更低,所以采用地板送风出现结露现象的风险更小。

## 参考文献

- [1] 张国兴,张振华,管欣,等.我国节能减排政策的措施与目标协同有效吗?—基于1052条节能减排政策的研究[J].管理科学学报,2017,20(3):162.
- [2] 林波荣,李紫薇.面向设计初期的建筑节能优化方法[J].科学通报,2016,61(1):113.

- [3] 陈焜.毛细管辐射空调系统的设计及优化研究[D].西安:西安工程大学,2016.
- [4] 高松,赵民,李扬,等.辐射供冷空调系统下的人体热舒适性研究[J].西安交通大学学报,2017,51(9):98.
- [5] 薛志峰,江亿.北京市大型公共建筑用能现状与节能潜力分析[J].暖通空调,2004,34(9):8.
- [6] 崔文盈.温湿度独立控制溶液除湿空调系统的理论及技术方案的论证[D].重庆:重庆大学,2007.
- [7] 段凯,康侍民,刘俊跃,等.辐射吊顶+热泵式溶液除湿系统在夏热冬暖地区的应用[J].制冷与空调,2008,22(1):58.
- [8] 张桂荣,李敏霞,郝长生.温湿度独立控制在医院建筑中的应用研究[J].建筑热能通风空调,2008,27(4):37.
- [9] IMANARI T, OMORI T, BOGAKI K. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. Comparison with the conventional all-air system[J]. Energy and Building, 1999, 30(2):167.
- [10] 王亮,李金声.辐射供冷与下送风复合空调系统性能对比研究[J].制冷与空调,2015,29(5):593.
- [11] 张岩.辐射供冷与新风送风方式复合研究[D].北京:北京建筑工程学院,2012.
- [12] 袁永莉,周翔,张旭.辐射空调+地板送风系统数值模拟与实验研究[C]//上海市制冷学会2013年学术年会.上海:上海市制冷学会,2013:497.
- [13] 王玮,徐文华.置换通风和地板送风在住宅辐射顶板空调系统中的应用比较[J].制冷技术,2009,29(3):48.
- [14] 赵荣义,范存养,薛殿华,等.空气调节[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [15] 金梧凤,王倩,于志浩.辐射吊顶供冷房间结露特性研究[J].制冷学报,2015,36(6):57.

(上接第302页)

## 参考文献

- [1] 李元明.关于近年来危险驾驶案件数量增减情况的调研报告[N].河南法制报,2018-12-28(018).
- [2] 庄杰.基于人车耦合的安全驾驶行为预警关键技术研究[J].电子技术与软件工程,2018(13):237.
- [3] 应海宁,唐振民,韩旭.基于两次聚类的PWARX驾驶行为辨识模型[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(2):79.
- [4] PEI Jifang, HUANG Yulin, HUO Weibo, et al. SAR automatic target recognition based on multiview deep learning framework[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2018, 56(4):2196.
- [5] 张文达,许悦雷,倪嘉成,等.基于多尺度分块卷积神经网络的图像目标识别算法[J].计算机应用,2016,36(4):1033.
- [6] 林志洁,罗壮,赵磊,等.特征金字塔多尺度全卷积目标检测算法[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(3):533.
- [7] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G. ImageNet classification with deep Convolutional Neural Networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012, 25(2):1106.
- [8] 宋光慧.基于迁移学习与深度卷积特征的图像标注方法研究

- [D].杭州:浙江大学,2017.
- [9] 王茜,陈一民,丁友东.基于改进卷积神经网络的机动车图像分类算法[J].计算机应用与软件,2018,35(7):263.
- [10] ACKERMANN S, SCHAWINSKI K, ZHANG Ce, et al. Using transfer learning to detect galaxy mergers[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 479(1):415.
- [11] DING Z, SHAO M, FU Y. Incomplete multisource transfer learning[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(2):310.
- [12] KHAN R U, ZHANG Xiaosong, KUMAR R. Analysis of ResNet and GoogleNet models for malware detection[J]. Journal of Computer Virology and Hacking Techniques, 2019, 15:29.
- [13] BALLESTER P, ARAUJO R M. On the performance of GoogLeNet and AlexNet applied to sketches[C]// Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-16). Phoenix, Arizona USA: AAAI, 2016:1124.
- [14] 王敬仁,傅凯,蔡晖,等.基于机器视觉的地铁分流系统[J].教育教学论坛,2019(21):55.
- [15] 李国诚,黄明,崔进宝,等.基于树莓派的智能监控系统设计与实现[J].工业技术创新,2019,6(2):42.