

辐射供冷空调系统的室内热舒适性研究

李根 刘益才¹ 毕麟 刘绍文 王晓倩

(中南大学, 长沙 410000)

摘要: 辐射供冷空调系统是一种具有舒适性节能性的系统形式, 本文详细介绍了辐射供冷空调系统的发展现状, 系统构成以及优缺点。此外通过建立围护结构的传热模型, 采用数值仿真软件, 分析了辐射冷顶板供冷对围护结构内表面温度及室内热舒适性的影响, 主要从人体垂直温差角度分析了冷顶板辐射对人体室内热舒适性的作用效果, 结果表明, 顶板辐射供冷使得人体头脚的垂直温差小于 3℃, 满足人体热舒适要求。

关键词: 辐射供冷空调系统; 室内热舒适; 数值仿真; 垂直温差

Study on Indoor Thermal Comfort of Radiant Cooling Air

Conditioning System

Li Gen Liu Yicai Bi Lin Liu Shaowen Wang Xiaoqian

(Central South University, Changsha 410000)

Abstract: Radiant cooling air conditioning system is a kind of system with comfort and energy saving. This paper introduces the development status of Radiant cooling air conditioning system, composition of the system and the advantages and disadvantages of the system. In addition, by establishing the heat transfer model of the enclosure structure and using numerical simulation software, the influence of the cooling ceiling cooling on the inner surface temperature of the enclosure structure and indoor thermal comfort was analyzed. The radiation of the cold roof plate was analyzed mainly from the perspective of vertical temperature difference of the human body. The effect of thermal comfort in the human body is shown in the results. The results show that the radiation cooling of the ceiling makes the vertical temperature difference between the human head and the foot less than 3 °C, which meets the thermal comfort requirements of the human body.

Keywords: radiation cooling air conditioning system; indoor thermal comfort; numerical simulation; vertical temperature difference

0 引言

冷却顶板辐射式空调系统主要采用的是辐射换热来对室内环境降温, 其辐射换热量达到 50% 以上, 比较符合在舒适时人体习惯的辐射散热与对流散热的比例关系^[1]。辐射换热和对流换热混合换热这种系统形式比起单纯依靠对流换热有着相当的优势, 比如无吹风感、热量分布均匀等, 其对于人体具有明显的节能性和舒适性。由于顶板的辐射作用, 可降低室内垂直温度梯度, 提高人体舒适感, 近年来研究人员对于辐射冷顶板系统传热性能和室内热环境做了大量的研究^[2]。Miriel 等对顶板辐射供冷系统的热舒适和能耗进行了数值计算和实验测

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776226); 中南大学研究生自主探索创新项目资金资助(2018zzts491)

作者简介: . 刘益才 (1968-), 男, 教授, E-mail: lycsu@csu.edu.cn

试对比研究^[3]。路诗奎等人采用 TRNSYS 软件顶板和地板辐射供冷系统的热舒适和能耗进行了对比分析,结果表明,顶板和地板辐射供冷系统在夏季都有良好的舒适性,而地板辐射所需的能耗高于冷顶板辐射系统^[4]。为了提高室内环境的热舒适性、降低空调能耗、提高室内空气品质,辐射冷板技术有着广泛的应用前景。但是迄今为止,国内对辐射供冷的研究仍然停留在高校和设计单位的理论层面,目前的产品大多还是依靠产品进口。又由于对辐射冷板的热工性能不甚了解,从而造成这一优异的末端形式在我国推广缓慢。本文拟对夏季室内以天花板冷板为末端,进行室内环境的模拟,为此系统未来的研究指出一个方向。

1 辐射供冷应用现状

1.1 发展现状及系统构成

冷却顶板辐射式空调系统起源于欧洲,经过多年的发展已经在美国、日本和澳大利亚得到了广泛的使用,由于其舒适性和节能性受到各国的普遍欢迎,其系列化的产品得到广泛应用。冷板的传热机理大致是热量从冷媒经过管壁导热至辐射冷板壁面,辐射冷板最后以辐射、对流复合换热将热量传到房间壁面和房间内的空气。所以往往可以通过控制冷顶板表面温度而达到控制室内热环境的目的。其中辐射换热量取决于冷却顶板下表面温度、房间内壁面温度、人体及室内热源的表面温度,以及各表面的几何形状、相对位置及其辐射特性等;对流换热量则与冷板附近空气流动状态有关,其取决于冷却顶板下表面温度,空气流速,空气状态以及换热面积等。一般而言,辐射换热量的数值会比对流换热量的数值高,占比会高于总换热量 50%以上^[5]。

1.2 辐射供冷的优缺点

辐射供冷的主要优点如下:

(1)比常规空调系统节能可达 28%-40%。由于辐射冷板空调系统可以调节冷板换热面积,如果换热面积设置的更大,载冷剂的温度可非常接近室内气温,载冷剂与室内气温及壁面温度的换热温差小可进一步增强制冷系统的 COP 值,当然辐射供冷其冷媒温度较高,如果采用地下水等自然冷源能进一步降低能源消耗。

(2)由于对人体而言,辐射散失的热量会高于对流散失的热量,所以在人体感觉舒适的时候也不会有吹冷风的感觉,不易出现“空调病”,室内没有像风机之类的动力机械,故室内没有机械振动产生的噪音,并同时还能省去常规系统的空调风机能耗这一部分。

(3)采用冷板系统能大大增加建筑可用的高度。没有大型空调系统的风管水管布置,对于大型建筑在相同建筑高度下可以建造更多的楼层,大大增加建筑的建筑面积。对于小型家庭建筑,冷板辐射式空调可以作为天花板装修的一部分,增强室内装修的美观性与实用性。

(4)辐射供冷由于辐射冷板主要与建筑围护结构内壁面换热,故这种换热存在换热延迟,当外界气温波动比较严重时,房间内温度变化会滞后,且变化量会有所减少,这就使得辐射冷板空调系统能一定程度的维持人能感受到的室内的环境温度稳定。

但是,顶板辐射供冷也有如下一些缺点:

(1)辐射顶板表面易结露当室内侧冷顶板表面温度低于空气露点温度时,会产生结露,影响室内卫生条件。

(2)辐射供冷能力有限由于露点温度的限制,所以限制了辐射供冷的供冷能力。

所以采用辐射供冷空调系统时,需综合考虑当地的实际露点温度来设置辐射冷板运行温度,所以一般采用比当地实际露点温度高 1℃来设计计算的原则。

1.3 室内热舒适影响因素

现阶段热舒适在常规空调环境下的研究成果已经形成较为成熟的评价体系,对于室内

热舒适环境已经有较为明确的数值界定。ISO7730-2005^[6]和 ASHRAE55-2004^[7]是国际上通用的预测和评价室内环境热舒适度的标准。影响热舒适的因素主要有 6 个，其中环境因素有空气温度，平均辐射温度，湿度和风速等四个；人体的因素有代谢率和服装热阻等两个。造成局部热不舒适的因素主要有垂直温差，吹风感，地板温度，辐射不对称等。

国际标准中给出了头部和脚踝处允许的最大温差值。ASHRAE55-2004 中规定温差小于 3℃；ISO7730-2005 中按建筑分类给出了不同的要求：A 类 < 2℃，B 类 < 3℃，C 类 < 4℃。

ISO7730 标准规定：人员采取坐姿时，人员活动区处于地面上方 0.1 和 1.1m 之间的温差应保证不大于 3℃，而美国 ASHRAE55-92 标准考虑人员站着工作的情况，从可靠性角度建议，1.8 和 0.1m 之间的温差 ≤ 3℃^[8]。

2 物理模型与模拟方法

2.1 空间模型的建立

本文采用 CFD 数值仿真软件，以某地四人办公室为研究对象，分析该办公室如果采用了辐射冷顶板系统，研究其室内热舒适，为该办公室采用辐射冷顶板系统供冷提供设计参考。在设计时，对室外日照辐射纳入考虑，其通过外窗影响室内热环境。

- (1) 所选取的办公室大小：L=3.6m；W=3m；H=3m；
 - (2) 北外窗（2.8*2 m²），西南内门（0.8*2.1 m²）；
 - (3) 四人坐在办公室办公，且把人体简化为圆柱体（r=0.5m，h=1.1m）
- 房间的空间模型及人体热源的设置分别如图 1 和图 2 所示：

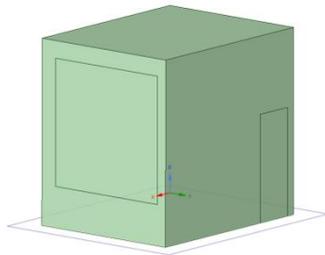


图 1 空间物理模型

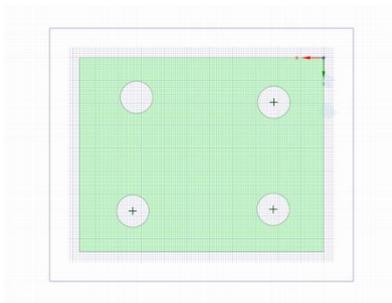


图 2 热源（人体）位置设定方式

2.2 数学模型的建立

(1) 流动、传热及辐射的控制方程

室内气流流动与传热过程都服从三个基本的物理定律，即质量守恒、动量守恒、能量守恒。在数值传热学中，我们将这些守恒定律的表达式—偏微分方程称为控制方程。

各控制方程的通用形式见下式：

$$\frac{\partial (\rho\phi)}{\partial t} + \text{div} (\rho U\phi) = \text{div} (\Gamma_{\phi} \text{grad} T\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

上式中， $\frac{\partial (\rho\phi)}{\partial t}$ 是非稳态项，若是稳态问题，则该项为 0， $\text{div} (\rho U\phi)$

是对流项， φ 是通用变量，可以代表 u, v, w, T 等求解变量； $\text{div}(\Gamma_\varphi \text{grad}T\varphi)$ 是扩散项， Γ_φ 为广义扩散系数； S_φ 为广义源项，处在 Γ_φ

S_φ 位置上的项是数值模拟计算模型方程中的一种定义。

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mu T) = \text{div}\left(\frac{k}{Cr} \text{grad}T\right) + S \quad (2)$$

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \mu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \mu)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

动量守恒定律：

$$\frac{\partial(\rho \mu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i \mu_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

(2) 辐射积分方程

导热和对流可以由以上控制方程来描写，但在考虑辐射换热时，需要用下式来描述。

$$\frac{d(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega \quad (5)$$

该方程可以计算壁面由于辐射而引起的加热/冷却的热量源。在考虑辐射因素时，将该方程计算出来的热量源并入能量守恒方程中的广义源项。其中： \mathbf{r} 是位置向量， \mathbf{s} 方向向量，

\mathbf{s} 散射方向， s 沿程长度(行程长度)， a 吸收系数， n 折射系数， σ_s 散射系数^[1]。

2.3 模拟结果

分别对对应图片位置选取温度云图。截取的位置如下图 3 所示，图 4-9 是根据上述 CFD 模拟软件生成的温度云图。

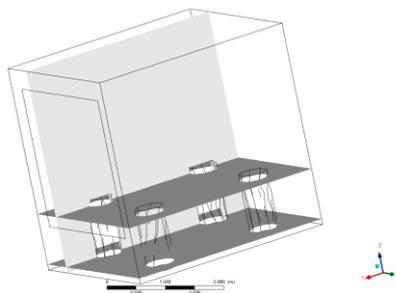


图 3 各个平面对应空间位置

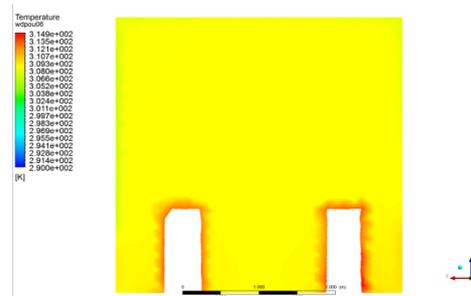


图 4 房间 ZX 平面，Y=0.6m 剖面截图（无制冷装置）

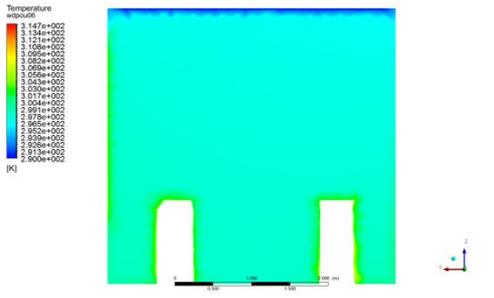


图5 房间 ZX 平面, Y=0.6m
剖面截图 (冷板辐射制冷)

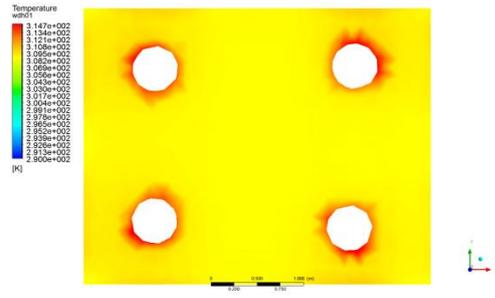


图6 房间 XY 平面, z=0.1m
剖面截图 (无制冷装置)

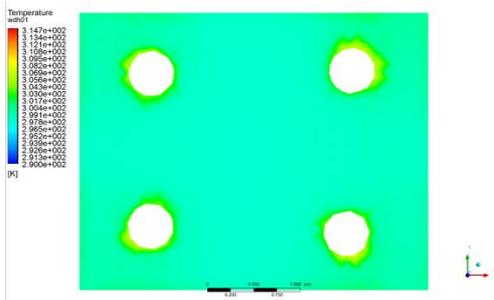


图7 房间 XY 平面, z=0.1m
剖面截图 (冷板辐射制冷)

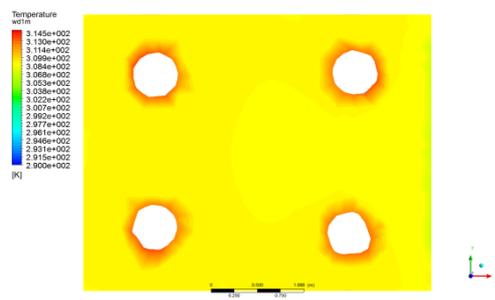


图8 房间 XY 平面, z=1.1m
剖面截图 (无制冷装置)

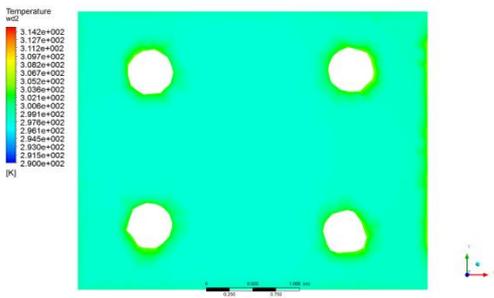


图9 房间 XY 平面, z=1.1m
剖面截图 (冷板辐射制冷)

2.4 结果分析

以上各图中, 4,6,8 图为没有使用制冷装置时的温度截面分布云图, 而 5,7,9 图为使用冷板辐射制冷时的温度分布截面云图。

首先比较 4,5 两图, 可以知道当没有制冷时, 平均截面温度为 308.2K, 而使用冷板制冷时的平均截面温度为 299.4K, 温差为 8.8K, 说明使用冷板辐射制冷时对房间的温度有着十分明显的降低效果。

随后比较 6,7 两图, 可以发现当没有制冷时, 平均截面温度为 309.4K, 而使用冷板制冷的平均截面温度为 298.8K, 温差为 10.6K, 而 8,9 两图则说明, 当没有制冷时, 平均截面温度为 309.6K, 而使用冷板制冷时的平均截面温度为 300.4K, 可以看到使用冷板辐射制

冷时对房间的温度有着十分明显的降低效果。

比较 7,9 两图, 可以知道其垂直温差在 3℃ 以内, 因此满足垂直温差热舒适性要求。

在图 4-9 中可以看到当冷板温度较低时, 空气温度可以达到普通空调所要求的 26-28℃, 而真正在使用过程中, 由于人体表面会受到房屋顶板和壁面冷辐射的影响, 所以并不要求 26-28℃ 的室温是最满足人体舒适度的温度, 可以进一步提高冷板温度, 防止冷板结露问题的产生。亦或是在冷板结构上调整, 使得冷板结露产生的凝水能够被收集排出。

综上所述, 使用辐射冷板制冷装置不仅能够满足室内降温要求, 而且在垂直温差分布上也符合相关规范, 是一种具有较强可行性的制冷方式。

3 结论

- (1) 使用冷板辐射供冷系统能取得比较好的供冷效果, 使得室内温度均匀, 人体垂直温差不超过 3℃, 达到了人体舒适度要求。
- (2) 使用冷板辐射供冷系统在保证不使空调结露的前提下可以尽可能调高冷板温度, 即便空气温度没有降到正常人体要求的室内温度, 但由于人体表面和冷板及室内壁面的辐射换热, 使得人体也能感觉到凉意。
- (3) 在使用辐射供冷系统时, 如若难以保障冷板处结露问题, 可以再优化设计冷板结构, 使得冷板处产生的凝水更容易被收集排出。

参考文献

- [1] 张佩东. 辐射供冷—置换通风室内热环境及动态响应特性研究[D]. 西安建筑科技大学, 2008.
- [2] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷[M]. 机械工业出版社, 2004.
- [3] Strand R K, Baumgartner K T. Modeling radiant heating and cooling systems: integration with a whole-building simulation program[J]. Energy & Buildings, 2005, 37(4):389-397.
- [4] 路诗奎, 吕艳, 张小松, 等. 辐射供冷/机械通风系统的热舒适与能耗分析[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(3):60-62.
- [5] 布文峰, 王世洪. 户型冷板辐射式空调系统研究[J]. 制冷与空调, 2002, 2(4):25-27.
- [6] 黄箐. 辐射冷顶板条件下室内热舒适及 PMV 指标适用性研究[D]. 湖南大学, 2013.
- [7] Ning H, Wang Z, Ren J, et al. Thermal Comfort and Thermal Adaptation between Residential and Office Buildings in Severe Cold Area of China ☆[J]. Procedia Engineering, 2015, 121:365-373.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating, and AirConditioning Engineers. ASHRAE handbook of fundamentals.[J]. Ashrae Handbook of Fundamentals, 1972.
- [9] JGJ142-2012 辐射供暖供冷技术规程[M]. 中国建筑工业出版社, 2013.