

基于人体热舒适的室内顶板送风个人制冷系统的入风参数研究

胡嘉文¹,赵诗庆¹,邹金成¹

¹ 生物医学工程学院, 上海交通大学, 上海市

(联系电话: 18817552011, E-mail: hu39517@163.com)

1. 概述

近年来,随着人们对维持生活热环境的需求的与日俱增,用于营造舒适的热环境而使用的空气调节系统(HVAC)逐渐成为日常生活中不可或缺的一部分。研究显示,不论是在工作用电还是家庭用电中,空调系统的耗电量都占有总耗电量的40%-50%^[1-3]。因此,如何有效降低空调系统的能耗,并对室内空间中的空调系统作出合理的设计,也成为了当前研究的一个主要方向。

另一方面,作为一个用于主观描述人的“冷”或“热”的生理感知术语,热舒适受到多种环境因素和生理因素的共同影响^[4-6]。介于人们对室内热舒适要求的提升,在不同情况下相对合理的送风参数搭配设计向空调输出量的设计与控制提出了挑战。然而,当今社会中的室内空调系统却往往难以满足人们的热舒适感需求。一项包含34,000份问卷的针对北美和芬兰的调查表明,只有39%的人对其工作热环境感到满意^[7]。同时,多余的制冷、制热量也会导致大量能源的浪费。基于这种情况,一种工位与环境相结合的空调系统(Task/Ambient Conditioning System,简称TAC)被提出并受到众多研究机构和厂商的青睐。该系统将调控目标集中在用户周围一个较小的区域内,即直接向目标区域合理送风,只关注该区域内的环境变化,从而减少多余调控量^[8-10]。Mao Ning等人对基于床所在区域的TAC系统的制冷效果进行研究发现,相比于传统的全体积空调系统(FAC),TAC系统在热舒适、通风效率及节能效果方面都具有更好的表现^[11]。现有文献大多直接选取现有的空调结构进行参数研究,而对于出风口形态的具体设计鲜有关注。

因此,本研究提出了一种基于人体热舒适参数的由顶板直接向下方目标区域送风的快速制冷系统,并通过COMSOL数值模拟展现了其入风后目标区域的环境变化情况。由于夏季制冷与冬季制热模式有较大差异,目前研究集中在夏季制冷工况上。通过对入风口尺寸、形态,以及入风量、入风温度等不同参数的CFD研究,各参数对制冷效果的影响被直观地体检了出来,其结果对实际的空调设计也有一定的启示。

2. 理论 / 实验设置

目前最常用语衡量人体的热舒适程度的方法当属1970年由Fanger教授提出的PMV(平均预测投票)模型^[12]。该模型综合考虑了干球温度、平均辐射温度、空气速度、空气相对湿度、衣着指数和新陈代谢热这六个基本参数,通过传热学关系计算得到一个介于-3(非常冷)~3(非常热)之间的数值,其中0表示热中性。同时可以计算得到另一个用于表示人群平均热舒适不满意程度的相关指标PPD(平均预测不满意度)。当 $-0.5 < PMV < 0.5$ 时,PPD将低于10%,即此情况下人群中超过90%的人会对当前环境感到满意^[13]。本研究中所采用的热舒适计算公式来源于Parsons的书中相关章节,为方便在COMSOL软件中直接计算得参考PMV值,对于衣着表面的等效温度值采用了平衡情况下的线性计算公式来代替迭代计算^[14]。

同时,在夏季制冷工况下,顶板以低流速送冷风进入室内,冷空气会由于受到重力产生的自然对流作用加速下沉,在人体周围产生低速冷气流带来冷感。因此对于房间整体的缓慢空气温度变化,将从地板层开始降温,逐渐形成室内空气的温度分层。对于顶板所设置的风口的尺寸、形状,以及送风参数的调整,将影响到冷气下行的速度、范围,进而影响到人体的热感受、热舒适,同时对系统的耗电量也将有一定的参考。

3. 控制方程 / 数值模型 / 仿真 / 方法 / 仿真 APP 的使用

模型的构建如图 1 所示，为模拟人体在室内正常工作的情形，在一个 $4\text{m}\times 4\text{m}\times 3\text{m}$ 的房间正中间构建了一个坐姿人体模型，其几何特征参照 Xu^[15]中所使用的人体尺寸。入风口设置在人体模型的前上方，同时人体后下方离地 0.1m 高处设置横截面为 $1\text{m}\times 0.1\text{m}$ 矩形的出风口。入风口尝试采用了多种不同的形状设计，包括实心方形、实心圆形、空心圆环等。根据模型的对称性，计算时采用了 XZ 面对称的边界条件，即在计算中只使用 $y > 0\text{m}$ 的半个计算域，从而有效地降低模型计算量。

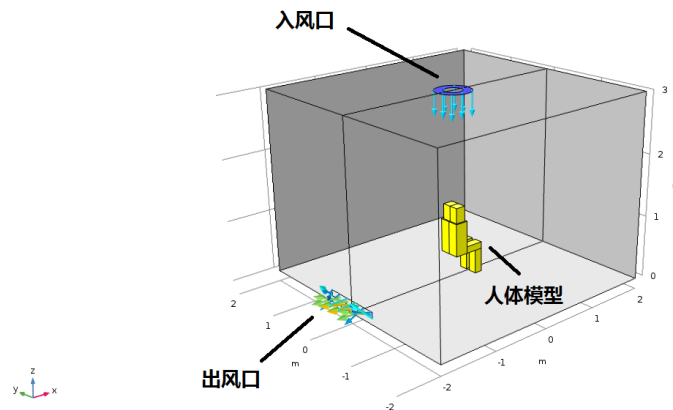


图 1. CFD 几何模型

在计算过程中的，一些环境参数和人体的部分生理参数设置为常量，定义在全局定义的参数中，如表 1 所示。

表 1. 常量参数设定

参量	数值	描述
I_cl	0.6	衣着指数
M	70[W/m ²]	新陈代谢热
Phi_a	0.6	空气湿度
W	0[W/m ²]	劳动负荷
h_body	4[W/(m ² *K)]	体表对流换热系数
T_in	19°C	入风温度
r	0.15[m]	圆环内圆半径
S	0.2[m ²]	圆环风口入风面积

其中前四项是在 PMV 计算公式中所需的参数，均设定为夏季常见工况。h_body 为文献^[16]中所提供的参考值。后两项为圆环风口的尺寸参数。

由于不考虑人体内部的计算域，模型中仅存在唯一计算域，材料设置为空气。模型主要探究顶板输出参数对人体边界上温度与速度结果的影响，故引入传热模块和流体模块，在计算中组建为非等温流多物理场，通过双向耦合进行研究。

在传热模块中，为考虑 PMV 中不可忽略的平均辐射温度项，在物理模型中勾选了表面对表面辐射。同时由于对微观粒子运动不关注，忽略参与介质中的辐射项。因不考虑房间外部环境影响，对壁面设置为绝热条件，同时设置人体边界为第三类边界条件，通过固定的传热系数 h_body 定义边界的对流热通量。入口边界即设置为恒温 T_in，出口即为默认条件，同时设置好相应对称面。

在流体模块中，由于主要考虑气流与人体边界热流的相对运动，不可用层流进行简单计算。在初步研

究中采用了标准k-ε模型计算湍流，后期也尝试过 Realizable k-ε及 SST 等其他湍流模型，但考虑到计算的时间成本和收敛情况，主要计算部分即保持了标准k-ε的设置，以壁函数粗略估计近壁面流动情况。对于空气的可压缩性选项，由于入流空气速度与温度差不可忽略，此处选择弱可压缩流动来描述空气密度性质。同时，为考虑重力引起的自然对流作用，在设置中勾选了包含重力项及使用约化压力项，参考压力和温度均定义在入口一点上。入口边界设置为垂直于平面的定速流，风速定义可以直接定义 v 或者通过流量与入口面积的比值 Q/S 定义。出口边界为默认的定压出口。

模型中的流场计算采用三维求解雷诺平均的 N-S 方程(RANS)结合连续方程和能量守恒方程计算，控制方程如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

能量方程：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (2)$$

动量方程：

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot \left\{ -p \vec{I} + (\mu + \mu_t) [\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T] - \frac{2}{3} (\mu + \mu_t) (\nabla \cdot \vec{v}) \vec{I} - \frac{2}{3} \rho k \vec{I} \right\} + \vec{F} + (\rho - \rho_{ref}) \vec{g} \quad (3)$$

同时针对标准k-ε湍流模型，有：

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \varepsilon = \text{ep} \quad (5)$$

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$P_k = \mu_T \left\{ \nabla \vec{v} : [\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v})^2 \right\} - \frac{2}{3} \rho k \vec{v} \quad (7)$$

同时，为计算结束后可以方便地得到所需的 PMV 参考值，模型在定义中将其计算公式分解为若干个线性计算公式，并用解析函数和变量值加以描述。同时将人体模型分为头部和身体两部分，读取计算结果中的壁面平均温度、人体身体表面平均温度及平均风速作为公式的变量，从而在后处理的全局计算中直接获取 PMV 的参考值作为研究参量。由于设置中采用了壁函数来近似研究近壁面参数，实际得到的计算值并非人体皮肤表面温度、风速，而是近表面的空气层相应数值，也即是 PMV 计算公式所需的相应环境参量。

在具有相对较大的温度差和速度差的入风口边界处，边界条件参数均添加了一个标准阶跃函数进行调节，使边界条件得以平滑过渡，以增加模型的收敛性。

在进行网格划分前，模型在几何接口通过网格控制域的方法将整个室内空间划分为三个区域：顶部入风口立方、人体周边、剩余部分。在对结果影响较小的外部区域，采用了默认的常规大小四面体网格。而在入风口周边和人体周边的重点关注区域，设置为超细化四面体网格，且最大单元大小不超过 0.04m。对于人体边界网格则采用了极细化设置。模型总计网格约 60 万。对于网格可能的影响，也通过加密网格至 160w 进行了比较，结果显示差异不大，可以采用 60 万网格的设置进行计算。

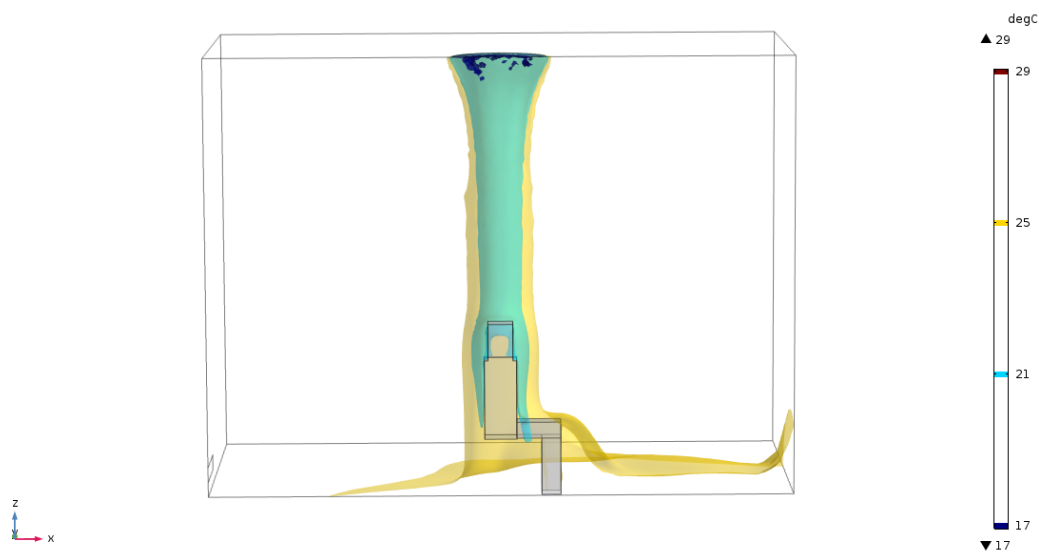
计算机 CPU 为 2 块 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2696 v4, 总计核心数 44, 线程数 88。计算机内存为 64GB。标准设置的一组 Case 计算的平均时间约为 2 天。

求解器设置中，有的结果采用了参数化扫描的设置，以方便地获得一组随特定参数变化的数据之间的

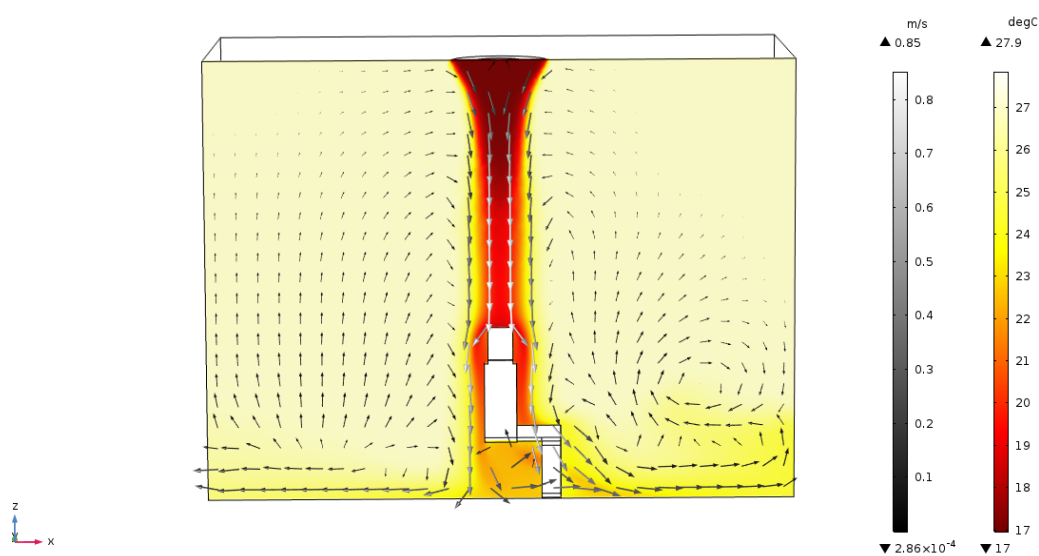
对比。模型采用瞬态求解器求解，结果输出的时间步设置为前 10 秒内以 1s 为时间步长，10-30s 或更长则以 5s 为一步。求解器采用动态时间步长进行求解，且容差由物理场控制。在后处理过程中，对于每个 case 直接读取其全局计算算子中的 PMV 随时间变化的值，以观察人体热感受随时间变化的发展趋势。

4. 实验结果 / 仿真结果 / 讨论

图 2 为一个标准 case 计算后的结果图展示。可以看出，冷空气由于初始速度和重力的双重因素影响加速下沉，在接触人体表面后顺壁面方向缓慢流向房间底部。一部分空气向房间出口方向流出，与出口相对的一侧则由于具有一定风速的冷气遭遇房间壁面而上行，接着与房间空气的自然对流相互作用，形成涡流。出口一侧的室内空气则由于没有突出的几何特征，空气流动完全由自然对流主导。人体下方则由于多种因素共同作用，气体流动较不规律。



(a) 结果等温线示意图



(b) $y=0.05\text{m}$ 截面温度云图，速度矢量图

图 2. $Q=160\text{m}^3/\text{h}$ 圆环入风口结果示意图

4.1. 风口形状的影响

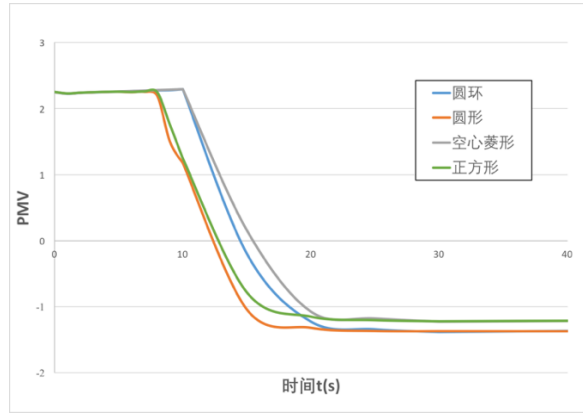


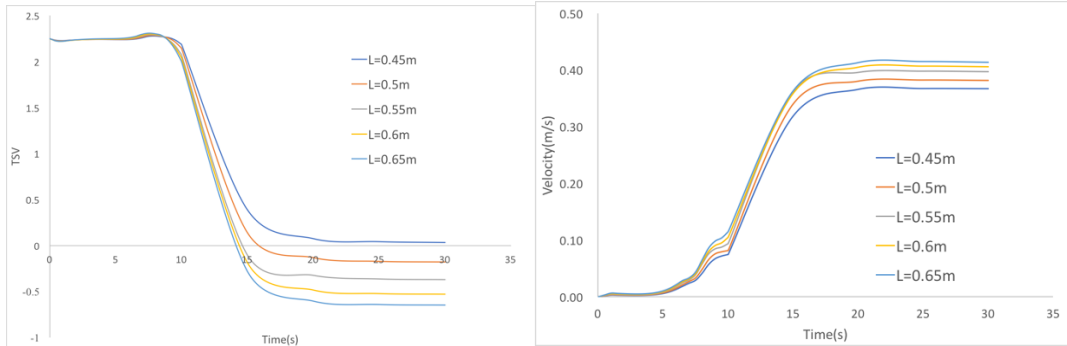
图3 风口形状对制冷效果的影响

对于每个计算结果，模型在后处理过程中提取其全局变量中表示人体身体表面平均值的温度、风速、以及 PMV 计算结果加以观察。总体而言，在该顶板入风模式下，人体周围的热环境将在 10-20s 内迅速达到相对稳定，随后 PMV 将随室内总体温度下降而平稳缓慢地下降。但由于室内总体空气在此类 TAC 系统中下降缓慢，本研究只关注前 30s 使人体热舒适达到相对稳定的计算结果。

在保持入风面积一定的情况下，模型换用了四种不同形状的入风口加以同样的入风参数进行研究。如图 3 结果显示，在同样的送风条件下，圆环和圆形的设计相比于方形设计将产生更多的冷量，使得 PMV 稳定值更低。同时，实心风口相对于空心风口而言，能使研究参数在更短的时间内达到平衡。但同时，空心风口也可能具有设计美观等其他方面的潜在优势。

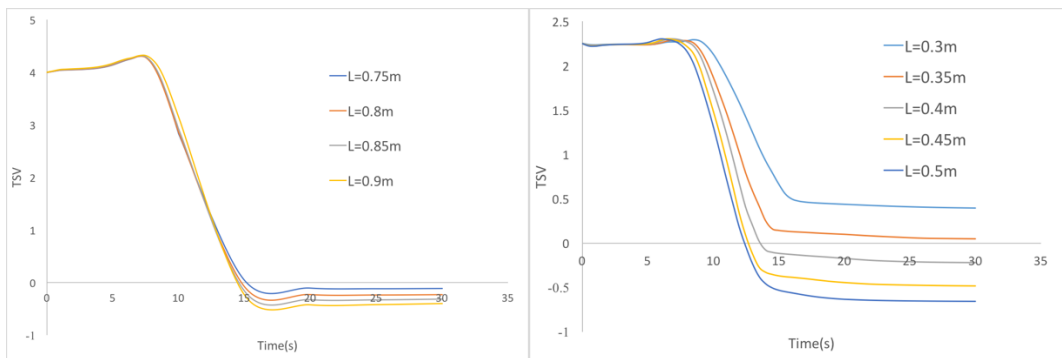
4.2. 方形风口模拟结果

对于实心方形的基准风口研究，模型选用了 $V=0.3\text{m/s}$ 和 $V=0.5\text{m/s}$ 两种速度，在室内温度初值 T_i 分别为 27°C 和 30°C 两种情况下进行了方形风口尺寸的扫描。L 表示风口边长。



(a) $V=0.3\text{m/s}$, $T_i=27^\circ\text{C}$, TSV

(b) $V=0.3\text{m/s}$, $T_i=30^\circ\text{C}$, Velocity



(c) $V=0.5\text{m/s}$, $T_i=30^\circ\text{C}$, TSV

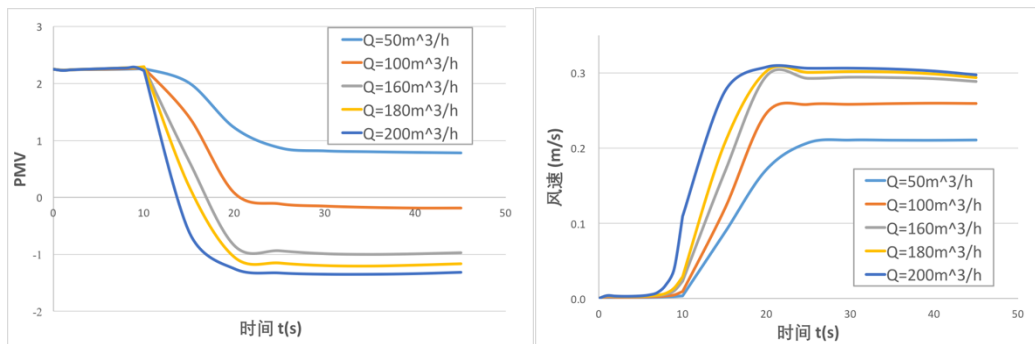
(d) $V=0.5\text{m/s}$, $T_i=27^\circ\text{C}$, Velocity

图 4. 方形风口边长扫掠结果

图 4(a)表示在入口风速为 0.3m/s, 初始室温为 27°C的情况下, 人体热感受指数(Thermal Sensation Vote, TSV, 由 PMV 公式计算所得)随时间变化的趋势。随着风口逐渐增大, 即 L 越大, 稳定的 TSV 值越低, 表示人处于更冷的热感受中。这是由于该条件下控制送风风速不变, 则入风面积越大, 实际入风量越大, 即制冷量越大。若希望达到能使较大比例的人群感觉舒适的热中性状态(PMV=0), 则采用 L=0.45m 的设计即可。图 4(b)则是相应的人体表面风速值, 可以发现在研究的条件下, 风速均处于 0.3~0.4m/s 之间, 对于直接送风系统而言处于可以接受的范围(0.8m/s 以内)。

对比图 4(a)与图 4(c)可知, 当室内初始温度升高时, 该送风设计虽然同样可以在短时间内达到平衡, 但所需的制冷量大大提高, 为达到同样热感受所需的风口大小也相应增大。对比图 4(a)与 4(d)则可以发现, 当风速增大时, 相应的风口大小需求也随之降低。这是因为流量是风口截面与流速的乘积, 当风速提高时, 达到同样送风流量的尺寸需求就降低了。

4.3. 圆环风口模拟结果



(a) 向下送风时 PMV 随流量变化

(b) 向下送风时风速随流量变化

图 5 垂直向下送风时流量 Q 变化结果

为更直观地研究制冷量对人体热舒适的影响, 模型对于圆环形状的风口采用控制风口尺寸的方法, 扫掠了不同入风流量下人体热感受的变化, 结果如图 5 所示。可以看出, 随着单风口流量在 50~200m³/h 间波动, 其正下风的目标区域稳态 PMV 可以实现 -1.3~0.8 之间变化。同时, 即使在垂直送风这样个体能最快直接感受风速的情况下, 多种流量下人体表面风速也最多在 0.3m/s 左右, 同样避免了风感过强带来的不适感。

5. 结论

通过使用 COMSOL 软件对所需研究的顶板送风问题的模拟研究, 本研究定量观察了不同入风口尺寸及送风参数下人体热舒适程度的计算结果。通过固定变量扫掠的策略, 模型不仅计算得到了该送风模式下 PMV 值的变化趋势, 发现了其趋于相对稳定的特征, 同时对风口形状、尺寸、室内初始温度、送风流量等参数均进行了规律性观察, 其结果对于相应送风系统的设计具有启发作用。根据计算结果, 在特定的送风功率下, 选择实心圆形的入风口设计将会一定程度上提高制冷效果。同时对于夏季常见室内工况, 顶板送风系统只需采用约为 100m³/h 的 19°C 冷气流量即可使人体快速处于热中性环境, 这个流量相比于现有的壁挂式空调输出流量(约为 600m³/h)有极大的降低。后续的研究将可能考察入风温度的影响, 以及有关风口更多的创新性设计的实现。

参考文献

[1] F. Zhang et al., "The effects of higher temperature setpoints during summer on office workers' cognitive load

- and thermal comfort," *Building and Environment*, vol. 123, pp. 176-188, 2017.
- [2] S. Liu, L. Yin, W. K. Ho, K. V. Ling, and S. Schiavon, "A tracking cooling fan using geofence and camera-based indoor localization," *Building and Environment*, vol. 114, pp. 36-44, 2017.
- [3] N. Mao, D. Pan, M. Chan, and S. Deng, "Performance evaluation of an air conditioning system with different heights of supply outlet applied to a sleeping environment," *Energy and Buildings*, vol. 77, pp. 281-291, 2014.
- [4] N. Djongyang, R. Tchinda, and D. Njomo, "Thermal comfort: A review paper," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 2626-2640, 2010.
- [5] D. Enescu, "A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 1353-1379, 2017.
- [6] C. Karmann, S. Schiavon, and F. Bauman, "Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: A critical literature review," *Building and Environment*, vol. 111, pp. 123-131, 2017.
- [7] Da Li and V. R. K. Carol C. Menassa, "Personalized human comfort in indoor building environments under diverse conditioning modes," *Building and Environment*, vol. 126, pp. 304-317, 2017.
- [8] D. Pan, M. Chan, L. Xia, X. Xu, and S. Deng, "Performance evaluation of a novel bed-based task/ambient conditioning (TAC) system," *Energy and Buildings*, vol. 44, pp. 54-62, 2012.
- [9] J. Du, M. Chan, D. Pan, and S. Deng, "A numerical study on the effects of design/operating parameters of the radiant panel in a radiation-based task air conditioning system on indoor thermal comfort and energy saving for a sleeping environment," *Energy and Buildings*, vol. 151, pp. 250-262, 2017.
- [10] H. Zhang, E. Arens, and Y. Zhai, "A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments," *Building and Environment*, vol. 91, pp. 15-41, 2015.
- [11] N. Mao, D. Pan, S. Deng, and M. Chan, "Thermal, ventilation and energy saving performance evaluations of a ductless bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system," *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 297-305, 2013.
- [12] P. O. Fanger, *Thermal comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press, 1970.
- [13] P. Lenzuni, D. Freda, and M. Del Gaudio, "Classification of thermal environments for comfort assessment," *Ann Occup Hyg*, vol. 53, no. 4, pp. 325-32, Jun 2009.
- [14] K. Parsons, *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*, 3 ed. CRC Press, 2014.
- [15] Y. Xu, X. Yang, C. Yang, and J. Srebric, "Contaminant dispersion with personal displacement ventilation, Part I: Base case study," *Building and Environment*, vol. 44, no. 10, pp. 2121-2128, 2009.
- [16] R. J. d. Dear, E. Arens, Z. Hui, and M. Oguro, "Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments," *International Journal of Biometeorology*, vol. 40, pp. 141-156, 1997.

致谢

感谢 COMSOL Multiphysics 软件及其技术支持部门各位工程师对于本研究的大力帮助。软件界面的人性化和功能的全面性使得本研究的建模工作条理分明，操作简明。工作人员的热心解答也为我在软件学习的过程中增添了一大助力。

同时感谢项目的支持和身边老师、同学的关心与支持，老师的指点和同学的帮助也使得研究的方向更为多面而具体。