文章编号：1008－8857(2023)02－0075－07　　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2023.02.001

主动式冷梁性能对房间气流组织影响模拟研究

刁忠彦[1]，吕　静[1]，杨　斌[1]，王丽慧[1]，李　明[2]
（1. 上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093；
2. 南京天加环境科技有限公司，江苏 南京 210000）

摘　要：以某主动式冷梁送风房间为模型，利用计算流体力学(CFD)软件模拟了主动式冷梁性能对房间气流组织的影响，并将模拟值和实测值进行了对比，验证了模型的准确性。利用该模型研究了主动式冷梁出风速度、出风温度、出风角度、出风高度以及回风口位置对房间气流组织的影响。结果表明：若仅改变出风速度，当出风速度从 1 m·s^{-1} 增大到 4 m·s^{-1} 时，预期平均通感 P_M 下降，不适人员比例 P_D 先降后升，出风速度为 2 m·s^{-1} 时，P_D 最小，为 9%，此时人员对环境的满意度最高；若仅改变出风角度，当出风角度为 45°时房间气流组织分布最佳；若仅改变出风高度，当出风高度为 2.33 m 时房间气流组织分布最佳。在出风温度为 20 ℃、出风速度为 4 m·s^{-1} 时，比较不同回风口位置(上部、中部、底部)时距离地面高度 Y=1.2 m 截面的气流组织变化，发现回风口位于底部时该截面温度最高，空气速度最小，空气龄最大，P_D 最小，为 28%，此时人体冷热感觉较舒适。

关键词：主动式冷梁；性能；气流组织；模拟分析
中图分类号：TU83　　**文献标志码**：A

Simulation study on the influence of active chilled beam performance on air distribution in a chamber

DIAO Zhongyan[1]，LYU Jing[1]，YANG Bin[1]，WANG Lihui[1]，LI Ming[2]
(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Nanjing TICA Climate Solutions Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: A chamber with active chilled beam air supply was used as a model to study the influence of active chilled beam on indoor air distribution by computational fluid dynamics (CFD) software. The model was verified with the experimental data and further used to investigate the effect of the air-out velocity, temperature, angle, height of the active chilled beam and the location of return air on the air distribution in this chamber. When the air-out speed changes from 1 m·s^{-1} to 4 m·s^{-1}, the predicted mean vote P_M decreases, and the predicted percentage of dissatisfied P_D decreases firstly and then increases. At 2 m·s^{-1}, the minimum P_D of 9% is achieved with the highest environment satisfaction. The best air distribution in the chamber is obtained at the air-out angle of 45° and at the beam installation height of 2.33 m, respectively. The influence of return air such as

收稿日期：2023－03－14
第一作者：刁忠彦(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：主动式冷梁研究。E-mail：dzy493307204@qq.com
通信作者：吕　静(1964—)，女，教授。研究方向：主动式冷梁研究。E-mail: lvjing810@usst.edu.cn

the upper, middle, and bottom on the air distribution in this chamber was compared at the air supply temperature of 20 ℃ and wind speed of 4 m·s^{-1}. The highest temperature at the cross section of Y=1.2 m is achieved for the bottom return air, accompanying by the smallest air velocity and the largest air age. The cold and heat feeling of human body is relatively comfortable with the lowest P_D of 28%.

Keywords: active chilled beam; performance; airflow; simulation analysis

传统空调末端设备往往只是依赖强制对流换热达到降温效果，而主动式冷梁系统是一种结合辐射换热和对流换热的新型空调系统。它起源于欧洲，目前在欧美市场广泛使用[1]。冷梁机组能耗低，设备维护简单，空间占有率低，但是其在国内相较于其他空调末端设备，市场占有率低。随着人们越来越追求室内舒适度[2]，以及节能产品市场需求不断增大，主动式冷梁将得到更多关注，而且该产品自身也在不断改进与完善中，其应用范围越来越广[3–4]。

王梦蕾[5]提出了 3 个反映主动式冷梁的评价指标，分别与其结构特点、冷却性能和系统能效相关。Nelson 等[6]通过模型建立方程式来预测对称排列时被动式冷梁的制冷容量。张智力等[7]通过实验研究喷嘴尺寸和一次风风量对冷梁诱导比的影响。Filipsson 等[8]建立了一个高精度的主动式冷梁制冷量求解模型。Kim 等[9]研究了被动式冷梁在室内房间的应用特性。莫鹏程等[10]借助计算流体力学(CFD)软件计算得出诱导比随一次风风量增大而增大，且到达一定风量后诱导比的增长趋于平缓。Wu 等[11]建立了基于能耗和热舒适的优化模型，采用不适人员比例 P_D 模型评价热舒适性。Filipsson 等[12]研究了主动式冷梁在自动耦合调节系统中的运用，为后续应用提供了参考[13–14]。Rhee 等[15]对主动式冷梁系统的控制策略进行了研究，以寻找合适的防结霜控制参数。佟思辰[16]提出通过改善新风系统、改变冷凝水系统方案及动态运行优化来解决冷梁空调系统的结露问题。郁文红等[17]对新风机机组进行了设计，对主动式冷梁的运行调控进行了优化，从而防止设备出现结露现象。Pantelic 等[18]通过测量和调查等方法评估室内空气质量、人体热舒适度等参数，结果表明被动式冷梁空调系统的综合评价更高。云楠[19]利用 CFD 软件对主动式冷梁空调系统进行建模，从而实现了对该系统的监控。Cehlin 等[20]设计了一套新的冷梁系统，该系统可改善局部热环境并提升室内空气散热效果。

1 主动式冷梁

图 1 为主动式冷梁工作原理示意图。室外空气经空气处理设备处理后，由风管从一次风进风口送入主动式冷梁顶部的静压箱内。从喷嘴喷出的高速射流[21]顺着挡板进入室内，从而在冷梁下部形成负压区域。室内气流组织从二次回风孔板进入主动式冷梁内部[22]，再流经热交换器，与之发生充分的热交换。一次风从喷嘴高速喷出后，在混合区带走部分回流空气，将其再次送入室内[23]。房间的供冷或供热可通过改变热交换器的盘管供水温度来实现。

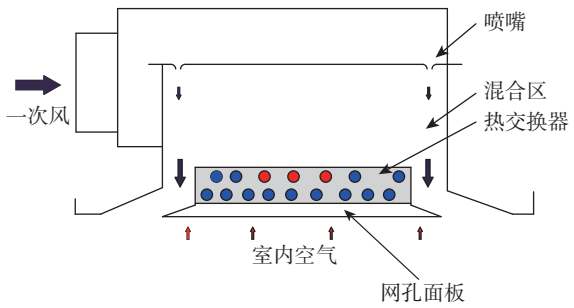


图 1 主动式冷梁工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principles of an active chilled beam

2 模拟研究

2.1 物理模型的建立

本文研究对象是冷梁房间气流组织情况。采用 Airpak 软件建立主动式冷梁房间模型。房间

模拟模型如图 2 所示。该模型内部有： 日光灯 2 盏，功率均为 25 W；办公桌 1 张；人员 1 名，坐姿时高度为 1.2 m；计算机 1 台，功率为 120 W；主动式冷梁设备 1 台；回风口 1 处。表 1 为房间模块参数。

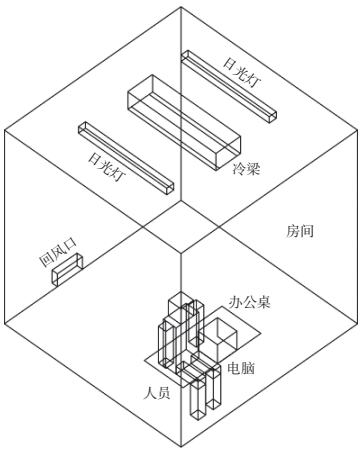


图 2　房间模拟模型
Fig. 2　Simulation model of a chamber

表 1　房间模块参数
Tab. 1　Module geometry in the chamber

模块名称	尺寸
房间	3.2 m × 3.2 m × 2.8 m
计算机	0.4 m × 0.3 m × 0.4 m
日光灯	1.20 m × 0.15 m × 0.10 m
人员	1.70 m × 0.28 m × 0.18 m
办公桌	1.2 m × 0.6 m × 1.5 m
冷梁	1.20 m × 0.23 m × 0.60 m
回风口	0.5 m × 0.2 m

2.2　模拟数据对比验证

本文中分三层（距离地面高度 Y 分别为 0.6、1.2、1.8 m）布置测点，水平方向相邻测点间距为 0.6 m，共布置 21 个测点。实验工况为：送风方式为上送下回；出风温度为 20 ℃；出风速度为 2 $m·s^{-1}$；出风空气相对湿度为 60%。分别利用 T 型热电偶和热线风速仪对测点进行测量，共测量 3 次，每次间隔 30 min。对 3 次测得的温度和速度求平均值，并利用相关指标对房间气流组织进行评价。

通过软件模拟得到各测点的温度和速度，将温度、速度模拟值和实测值进行对比，结果如图 3 所示。图中温度实测值和模拟值均在 23.6 ～ 24.7 ℃ 之间，温度实测值变化较为平缓，且所有测点的温度实测值和模拟值的平均偏差为 0.3 ℃。速度实测值和模拟值的变化趋势大致相似，且所有测点的速度实测值和模拟值的平均偏差为 0.014 $m·s^{-1}$。综上可知，采用 Airpak 软件进行房间气流组织研究是可靠的。

3　模拟分析

3.1　出风温度、出风速度对房间气流组织的影响

为了避免空气湿度对模拟结果产生影响，将出风空气相对湿度控制在 60%。模拟计算时冷梁出风角度为 45°，出风温度分别为 20、22 和 24 ℃，出风速度分别为 1、2、3 和 4 $m·s^{-1}$。选择 Y=1.2 m 截面为研究对象，利用 Airpak 软件得到各工况下该截面平均温度、平均风速、空气龄以及不适人员比例 P_D、预期平均通感 P_M，并对比出风温度和出风速度对房间气流组织的影响。

3.1.1　平均温度

图 4 为不同工况下 Y=1.2 m 截面平均温度。随着出风速度从 1 $m·s^{-1}$ 增大到 4 $m·s^{-1}$，3 种出风温度下 Y=1.2 m 截面平均温度均逐渐降低。从变化幅度来看，出风温度分别为 20、22、24 ℃ 时，该截面平均温度分别下降 2.4 、1.9 、1.2 ℃，即出风温度为 20 ℃ 时该截面平均温度降幅最大。

3.1.2　平均风速和空气龄

不同工况下 Y=1.2 m 截面平均风速和空气龄如图 5 所示。从图中可见，当冷梁出风速度一定时，不同出风温度下 Y=1.2 m 截面平均风速和空气龄基本相同。这表明，在出风温度变化不大时，出风温度的改变对室内空气流速基本没有影响。选取冷梁出风温度为 22 ℃ 时的平均风速和空气龄曲线进行分析。从图 5 中可见，随着出风速度的增大，该截面平均风速和空气龄的变化趋势相反，其原因为：空气速度越大，其在房间内滞留时间越短，空气龄越低。

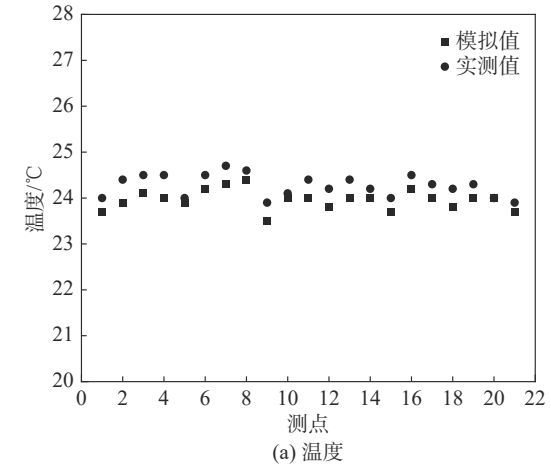


图 3 温度、速度模拟值和实测值对比

Fig. 3 Comparison between the simulated and measured values of temperature and velocity

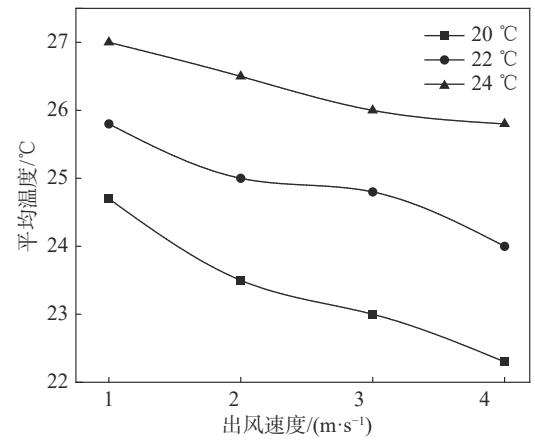


图 4 不同工况下 *Y*=1.2 m 截面平均温度

Fig. 4 Average temperature at the cross section of *Y*= 1.2 m under different working conditions

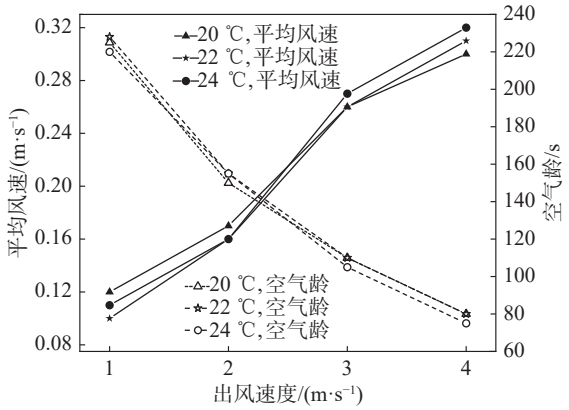


图 5 不同工况下 *Y*=1.2 m 截面平均风速和空气龄

Fig. 5 Average wind speed and air age at the cross section of *Y*=1.2 m under different working conditions

3.1.3 P_M 和 P_D

不同工况下 *Y*=1.2 m 截面 P_M 和 P_D 如图 6 所示。随着出风速度的增大，不同出风温度下 P_M 均呈下降趋势。当冷梁出风温度为 22 ℃时，随着出风速度的增大，P_M 从 0.48 降到 −0.63，人员冷热感觉基本在舒适的范围内。而当出风温度分别为 20 、24 ℃时，随着出风速度的增大，人员冷热感觉从舒适转为微凉，此时 P_D 较高。综上所述，在上送下回送风方式下最优工况为出风温度 22 ℃、出风速度 2 m·s^{-1}。22 ℃时 P_D 先降后升，出风速度为 2 m·s^{-1} 时 P_D 最小，为 9%，此时人员对环境的满意度最高。

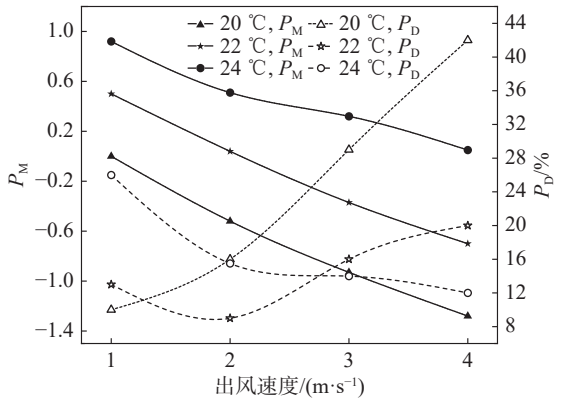


图 6 不同工况下 *Y*=1.2 m 截面 P_M 和 P_D

Fig. 6 P_M and P_D at the cross section of *Y*= 1.2 m under different working conditions

3.2 出风角度对室内气流组织的影响

冷梁出风角度的可变范围为 15° ～ 65°。在

冷梁居中布置，出风高度为 2.33 m，出风温度为 20 ℃，出风速度为 2 m·s^{-1}，出风空气相对湿度为 60%，出风角度分别为 30°、45°、60°时对 Y=1.2 m 截面的气流组织进行模拟。

不同出风角度下 Y=1.2 m 截面温度云图、速度矢量图如图 7 所示。当出风角度为 30°时，相较于出风角度为 45°、60°时，截面温度普遍偏高，温度分布不均匀，这主要是由于气流与壁面发生碰撞后下沉，使得较多冷气流未与室内空气充分换热；截面速度分布不均匀，气流速度较小，这主要是由于冷梁喷射出的气流黏附于顶板导致其运动距离较长，且在发生碰撞后下沉，动量衰减。而当出风角度为 60°时，截面温度分布均匀，中部区域温度较低；截面气流速度较大，且由于部分气体未黏附于顶板，直接下沉与室内热气流混合，导致出现气流死角。当出风角度为 45°时，截面气流速度更为均匀，在 0.20～0.24 m·s^{-1} 之间，这符合人体对热舒适性的基本要求。综上所述，当冷梁出风角度为 45°时，Y=1.2 m 截面温度分布更均匀，温度更舒适，气流组织更合理。

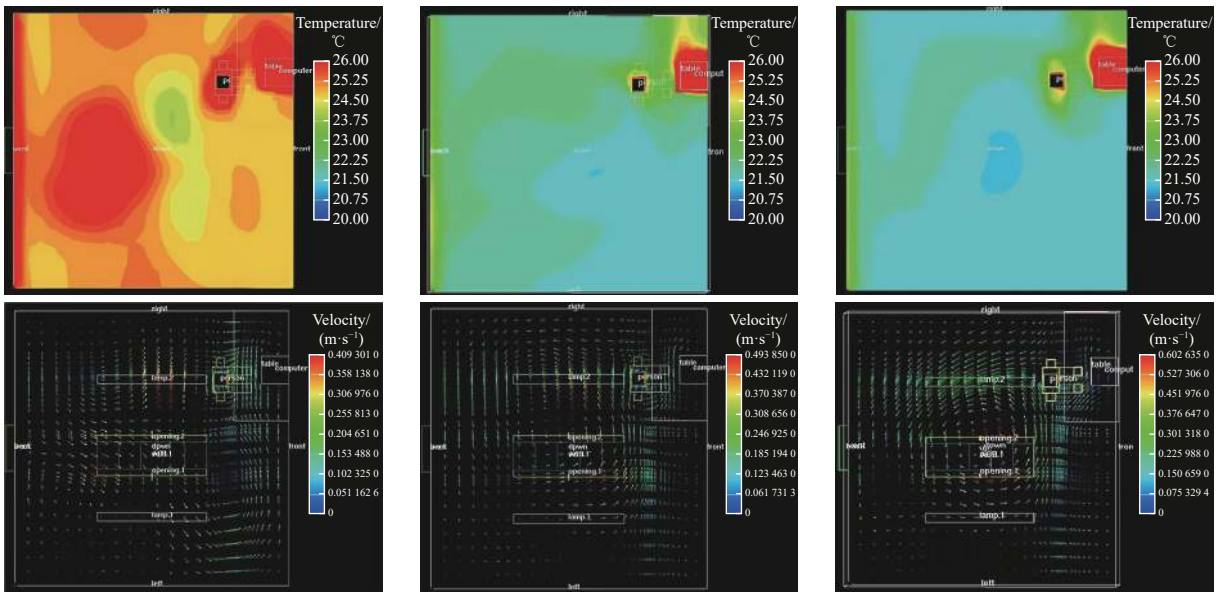
3.3　出风高度对室内气流组织的影响

在出风温度为 20 ℃，出风速度为 2 m·s^{-1}，出风空气相对湿度为 60%，冷梁安装高度即出风高度分别为 2.10、2.33、2.80 m 时对 Y=1.2 m 截面的气流组织进行模拟。

不同出风高度下 Y=1.2 m 截面温度云图、速度分布图如图 8 所示。当出风高度为 2.10 m 时，截面温度分布较为均匀，但中部出现温度较低（20 ℃）的区域，且中部区域气流速度过大；当出风高度为 2.80 m 时，截面温度分布均匀性较差，气流扰动较为剧烈，这主要是由于随着出风高度的增加，浮升力对热气流的影响加剧，停留在下部的热气流减少，且由于一次风的诱导作用，二次回风风速较大；当出风高度为 2.33 m 时，截面温度分布均匀，在 23.25～24.15 ℃ 之间，人体感觉舒适，且气流速度在 0.20 ～ 0.24 m·s^{-1} 之间，这符合人体对热舒适性的基本要求。综上所述，冷梁出风高度为 2.33 m 时室内气流组织情况最佳。

3.4　回风口位置对室内气流组织的影响

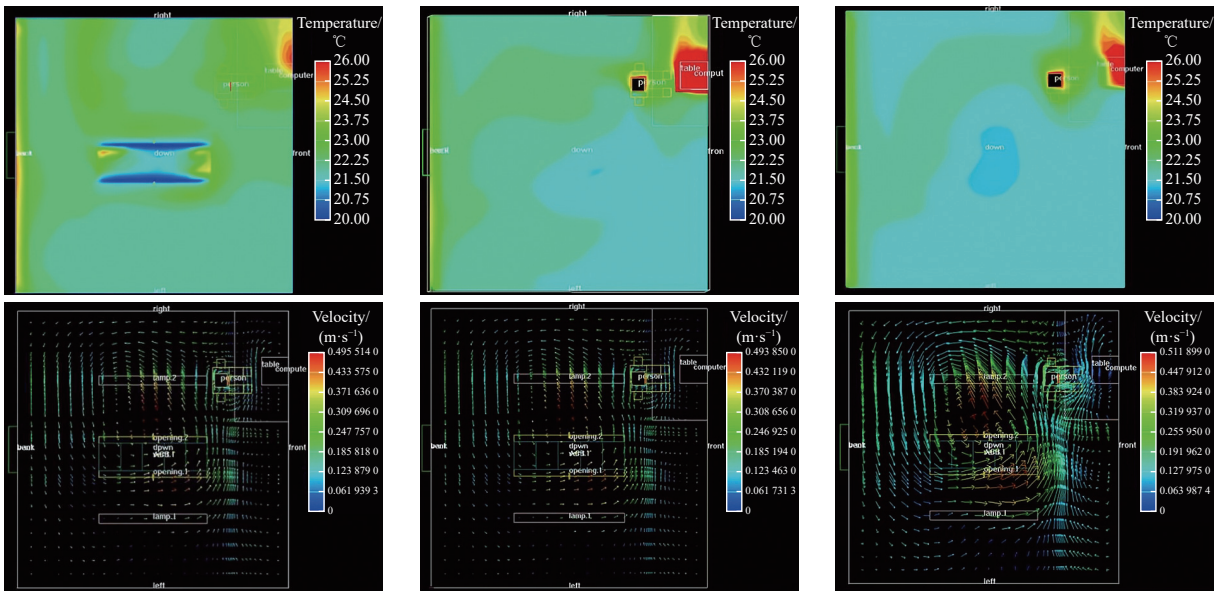
在冷梁居中布置，出风高度为 2.33 m，出风温度为 20 ℃，出风速度为 2 m·s^{-1}，出风空气相对湿度为 60%，出风角度为 45°时，改变回风口位置，对 Y=1.2 m 截面的气流组织进行模拟，结果如表 2 所示。由表中可知：①回风口位于中部



(a) 出风角度为 30°　　(b) 出风角度为 45°　　(c) 出风角度为 60°

图 7　不同出风角度下 Y=1.2 m 截面温度云图、速度矢量图

Fig. 7　Temperature contour and velocity vector at the cross section of Y= 1.2 m at different air-out angles



(a) 出风高度为 2.10 m (b) 出风高度为 2.33 m (c) 出风高度为 2.80 m

图 8 不同出风高度下 *Y*=1.2 m 截面温度云图、速度分布图

Fig. 8 Temperature contour and velocity distribution at the cross section of *Y*= 1.2 m at different air-out heights

时，截面平均温度最低；而回风口位于底部和上部时，平均温度较高；②回风口位于上部和中部时，空气平均风速较大；回风口位于底部时，空气平均风速较小；③因为空气流速和空气龄负相关，所以回风口位于底部时，空气龄最大；回风口位于上部和底部时，空气龄较小；④回风口位于底部时，平均温度最高，为 23.8 ℃，P_M 最大，为−0.9，热感觉较适中，舒适度较好，P_D 为 28%，人员对热环境的满意度较好。

综上所述，在冷梁出风高度为 2.33 m，出风温度为 20 ℃，出风速度为 2 m·s^{-1}，出风空气相对湿度为 60%，底部回风时截面平均温度最高，平均风速最小，空气龄最大，人体冷热感觉比较舒适，P_D 最小。

表 2 不同回风口位置时 *Y*=1.2 m 截面参数的平均值

Tab. 2 Average values of the parameters at the cross section of *Y*=1.2 m at different return air locations

回风口位置	平均温度/℃	平均风速/(m·s^{-1})	空气龄/s	P_M	P_D/%
上部	23.7	0.23	110	−1.0	32
中部	23.3	0.29	92	−1.1	35
底部	23.8	0.20	120	−0.9	28

4 结 论

以某冷梁送风房间为模型，通过 CFD 软件模拟了冷梁对房间气流组织的影响规律，并将模拟值和实测值进行了对比，验证了模型的正确性。利用该模型研究出风速度、出风温度、出风角度、出风高度以及回风口位置对室内气流组织的影响，主要结论为：

(1) 控制出风温度、出风角度、出风高度及回风口位置一定时，随着出风速度逐渐增大，空气龄和 P_M 均呈下降趋势，而 P_D 先降后升。当出风速度为 2 m·s^{-1} 时 P_D 最小，为 9%，此时人员对环境的满意度最高。

(2) 若仅改变出风角度，当出风角度为 45°时 *Y*=1.2 m 截面温度场分布更均匀，温度更舒适、气流组织更合理；若仅改变出风高度，当出风高度为 2.33 m 时室内气流组织情况最佳；若仅改变回风口位置，当回风口位于底部时室内气流组织最佳。

(3) 在送风方式为上送下回，出风温度为 22 ℃，出风速度为 2 m·s^{-1}，出风高度为 2.33 m，空气相对湿度为 60% 时房间气流组织分布最佳，舒适性最好。

参考文献：

[1] 柳仲宝, 李嵘. 主动式冷梁在绿色建筑中的设计与应用 [J]. 暖通空调, 2015, 45(1): 19 − 23.

[2] 黄萍, 曲明璐, 黑迎晓, 等. 辐射–新风复合系统室内热环境影响因素模拟研究 [J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(4): 378 − 385.

[3] 沈建芳. 节能——空调行业的大趋势和对策 [J]. 制冷技术, 2004, 24(2): 18 − 22.

[4] 陈小花. 我国建筑中央空调能耗现状及节能措施研究 [J]. 科技信息, 2013(14): 241 − 242.

[5] 王梦蕾. 主动式冷梁空调系统性能参数的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

[6] NELSON I C, CULP C H, RIMMER J, et al. The effect of thermal load configuration on the performance of passive chilled beams[J]. Building and Environment, 2016, 96: 188 − 197.

[7] 张智力, 张旭, 张恩泽. 喷射型诱导风口诱导比的实验研究 [J]. 暖通空调, 2008, 38(2): 62 − 64.

[8] FILIPSSON P, TRÜSCHEL A, GRÄSLUND J, et al. A thermal model of an active chilled beam[J]. Energy and Buildings, 2017, 149: 83 − 90.

[9] KIM J, TZEMPELIKOS A, HORTON W T, et al. Experimental investigation and data-driven regression models for performance characterization of single and multiple passive chilled beam systems[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 1736 − 1750.

[10] 莫鹏程, 翁文兵, 徐晨光. 基于 Fluent 对主动式冷梁诱导比的模拟 [J]. 建筑节能, 2018, 46(7): 58 − 62.

[11] WU B J, CAI W J, CHEN H R. A model-based multi-objective optimization of energy consumption and thermal comfort for active chilled beam systems[J]. Applied Energy, 2021, 287: 116531.

[12] FILIPSSON P, TRÜSCHEL A, GRÄSLUND J, et al. Performance evaluation of a direct ground-coupled self-regulating active chilled beam system[J]. Energy and Buildings, 2020, 209: 109691.

[13] ARGHAND T, JAVED S, TRÜSCHEL A, et al. Cooling of office buildings in cold climates using direct ground-coupled active chilled beams[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 122 − 132.

[14] ARGHAND T, JAVED S, TRÜSCHEL A, et al. A comparative study on borehole heat exchanger size for direct ground coupled cooling systems using active chilled beams and TABS[J]. Energy and Buildings, 2021, 240: 110874.

[15] RHEE K N, CHOI S H, TSOUVALAS A. Experimental investigation on the control performance of an active chilled beam system under dynamic cooling loads[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 194: 117069.

[16] 佟思辰. 基于冷梁的室内环境热舒适性与空调系统性能优化 [D]. 北京: 北方工业大学, 2019.

[17] 郁文红, 龚子阳, 杨牧笛, 等. 主动式冷梁在空调系统中的设计与应用 [J]. 建筑节能, 2018, 46(7): 81 − 82, 144.

[18] PANTELIC J, RYSANEK A, MILLER C, et al. Comparing the indoor environmental quality of a displacement ventilation and passive chilled beam application to conventional air-conditioning in the tropics[J]. Building and Environment, 2018, 130: 128 − 142.

[19] 云楠. ACB 式 HVAC 空调系统的建模 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

[20] CEHLIN M, KARIMIPANAH T, LARSSON U, et al. Comparing thermal comfort and air quality performance of two active chilled beam systems in an open-plan office[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 22: 56 − 65.

[21] 袁丹青. 多喷嘴射流泵流场的数值模拟及试验研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2009.

[22] 赵凯, 文圣勇. 主动式冷梁诱导性能数值模拟研究 [J]. 建筑节能, 2017, 45(10): 23 − 26.

[23] 翁文兵, 黄旭, 朱佳璐. 主动式冷梁诱导特性研究 [J]. 制冷学报, 2017, 38(6): 60 − 65, 79.