

文章编号: 1671-6612 (2019) 04-444-5

# 办公房间内 CO<sub>2</sub> 分布的模拟分析

岳恒刚 邓志辉

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 对于空调房间,通过分析送风中 CO<sub>2</sub> 的来源,考虑了回风的影响,结合质量平衡方程,确定了送风中 CO<sub>2</sub> 的浓度。同时利用 Fluent 软件,建立办公房间的三维模型,模拟分析了房间 CO<sub>2</sub> 浓度的分布。并且在此基础上详细模拟分析了在不同的新风量及不同的新风中 CO<sub>2</sub> 浓度对室内 CO<sub>2</sub> 分布的影响。结果表明,新风对房间内的 CO<sub>2</sub> 有着很好的稀释效果,但为满足相关规范要求,保证室内人员有一个健康舒适的工作生活环境,空调房间供给的新风量不能过小。

**【关键词】** 数值模拟; 新风; 回风; CO<sub>2</sub> 浓度

中图分类号 TM172 文献标识码 A

## Simulation and Analysis of CO<sub>2</sub> Distribution in an Office Room

Yue Henggang Deng Zhihui

(Mechanical Engineering College of Southwest Jiao Tong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** for the air-conditioning room, the concentration of CO<sub>2</sub> in the air supply was determined by analyzing the source of CO<sub>2</sub> in the air supply, and considering the effect of return air, and utilizing mass balance equation and . and the paper also simulated the distribution of CO<sub>2</sub> by using the software of Fluent and building a three-dimensional model of an office. And based on the above, the paper simulated the impact of different outdoor air rates and different CO<sub>2</sub> concentrations of outdoor air on indoor CO<sub>2</sub> concentration. The results show that outdoor air is important for diluting CO<sub>2</sub> in the room, but in order to meet the relative specifications and ensure that indoor workers have a healthy and comfortable working environment, the air conditioning room can't have a small supply of outdoor air.

**【Keywords】** numerical simulation; outdoor air; return air; CO<sub>2</sub> concentration

## 0 引言

现今人们的大多数生活活动都是在室内完成的,室内的空气品质影响着人们的工作效率,体感舒适度乃至身体健康。为此房间内通常利用空调系统对室内空气进行调节,而空调系统引入的室外新风是保障良好的室内空气品质的关键所在。在一般的住宅及办公场所,二氧化碳往往是主要的污染物,因此二氧化碳浓度常被当作描述室内空气品质的指标之一<sup>[1]</sup>,相关规范中规定室内二氧化碳浓度要小于 0.1%<sup>[2]</sup>,即 1000ppm,当浓度超过这个值,

会使大多数人感觉到不适<sup>[3]</sup>。为使得室内人员的身体健康及正常工作得到保证,有必要对房间内二氧化碳浓度及其分布进行控制。

近年来,计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)在模拟预测室内空气分布日趋成熟,由于其成本低、周期短等优点,也越来越受到重视。本文将采用 CFD 软件模拟空调侧送风的办公环境下的室内 CO<sub>2</sub> 浓度分布,并分析新风对室内环境产生的影响。

作者简介: 岳恒刚 (1992-), 男, 在读研究生, E-mail: swjtu\_hgy@163.com

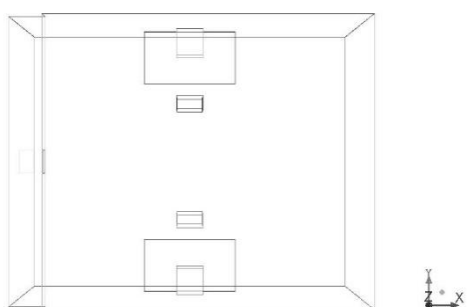
通讯作者: 邓志辉 (1962-), 男, 副教授, E-mail: DZHWKL007@163.com

收稿日期: 2018-08-27

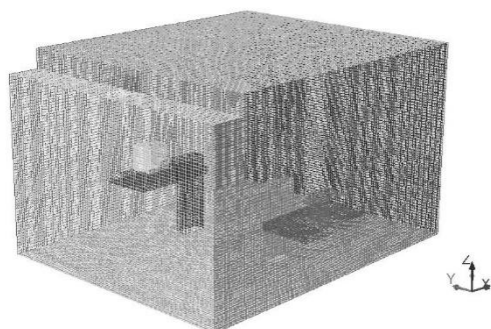
# 1 模型建立

## 1.1 物理模型

本文所研究的房间原型来源于成都市某单位一办公室, 房间尺寸为 5m×4m×3m。室内设计温度 27℃, 室内人员有两人, 人员简化为两个长方体, 尺寸为 0.4m×0.4m×1.2m。房间维护结构、人员、设备产生负荷计算为 1050W, 空调的送风形式为侧送风。



(a) 房间模型



(b) 模型的网格划分

图 1 房间模型及网格

Fig.1 The model and grid of the room

## 1.2 数学模型及边界条件

文章采用 Fluent 软件进行模拟, 计算基于标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 并采用多重组分 (Species) 模型中无化学反应的 Species Transport 模型进行房间内的 CO<sub>2</sub> 浓度分布模拟<sup>[6,7]</sup>。选取送风温差为 7℃, 计算送风量为 0.0929m<sup>3</sup>/s, 模拟中空气用不可压缩流体描述<sup>[8]</sup>。

空调房间内二氧化碳的一般是由新风送进来的和室内人员呼吸产生的。正常情况下室外新风中二氧化碳的含量为 300~400ppm<sup>[4]</sup>; 而人员呼吸产生的二氧化碳浓度与人员的活动强度有关, 具体如表 1<sup>[5]</sup>所示。

表 1 人体的 CO<sub>2</sub> 呼出量

Table 1 CO<sub>2</sub> exhalation of personnel

活动强度	CO <sub>2</sub> 呼出量 m <sup>3</sup> /(h·p)
静坐	0.0144
极轻	0.0173
轻	0.023
中等	0.041
重	0.0748

依据表 1, 确定办公室人员活动强度为极轻, 人员呼吸产生 CO<sub>2</sub> 的强度为 0.0173m<sup>3</sup>/(h·p), 在模型中散发位置在长方体上的 1.1m~1.2m 高度范围内。

根据质量守恒, 达到稳态时伴随送风进入房间内的 CO<sub>2</sub>, 加上室内人员产生的 CO<sub>2</sub> 就等于从房间出口排出去的 CO<sub>2</sub>。同时考虑, 日常条件下, 空气中二氧化碳含量都很低, 一般体积分数都会低于百万分之一, 所以考虑忽略新风、排风以及送风中二氧化碳浓度差造成的气体密度差异, 认为三者密度相同, 则:

$$C_s V_s \rho + m_r = C_c V_c \rho \tag{1}$$

式中,  $C_s$  为送风中 CO<sub>2</sub> 体积浓度, ppm;  $V_s$  为送风量, m<sup>3</sup>/s;  $C_c$  为出风口处 CO<sub>2</sub> 体积浓度, ppm;  $V_c$  为出风口排出风量, m<sup>3</sup>/s;  $\rho$  为气体 CO<sub>2</sub> 的密度, kg/m<sup>3</sup>。

而且, 送风中 CO<sub>2</sub> 浓度是由新风与回风混合得到的:

$$C_s V_s = C_c V_h + C_0 V_0 \tag{2}$$

其中,  $V_h$  为回风量, m<sup>3</sup>/s;  $V_0$  为新风量, m<sup>3</sup>/s;  $C_0$  为新风中 CO<sub>2</sub> 体积浓度, ppm。

根据送风的质量平衡, 可以得到:

$$V_s = V_h + V_0 \tag{3}$$

因为  $V_s = V_c$ , 所以联立式 (1) - (3) 会有:

$$C_s = \frac{m_r (1 - c_i)}{V_s c_i \rho} + C_0 \tag{4}$$

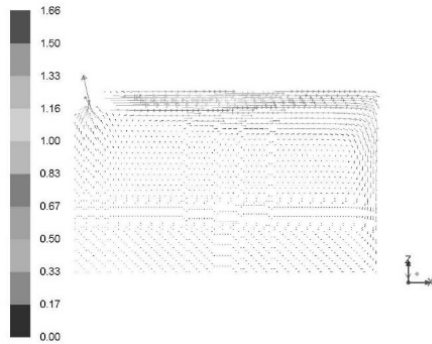
式中,  $c_i$  代表的是新风比:

$$c_i = \frac{V_0}{V_s} \tag{5}$$

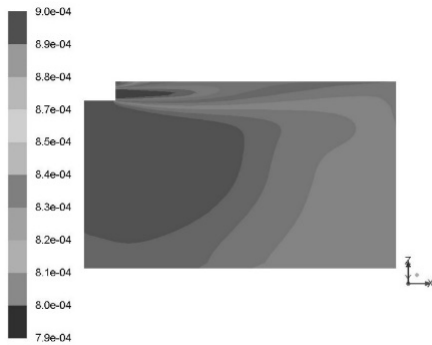
根据前面边界条件的描述,在  $V_0$  与  $C_0$  确定后,就能够确定  $C_s$ , 得到送风中污染物浓度, 由此确定模拟中的边界条件。

### 2 模拟结果及分析

为得到室内  $CO_2$  浓度分布状况, 文章首先采用新风量为  $30m^3/(p \cdot h)$ , 新风中  $CO_2$  浓度  $C_0=350ppm$  进行模拟。



(a) 速度矢量图

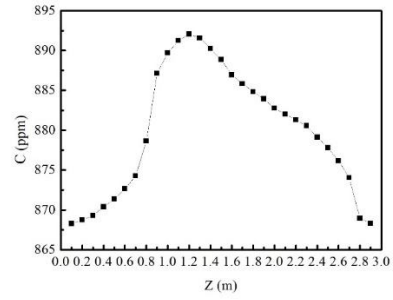


(b) 浓度云图

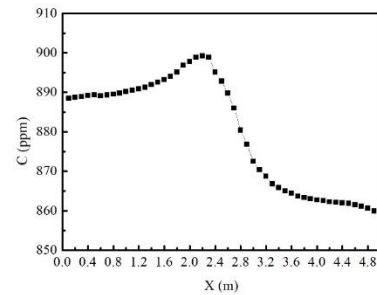
图2  $y=2m$  平面速度及  $CO_2$  浓度分布图

Fig.2 The velocity and  $CO_2$  concentration distribution diagrams at the  $y=2m$  plane

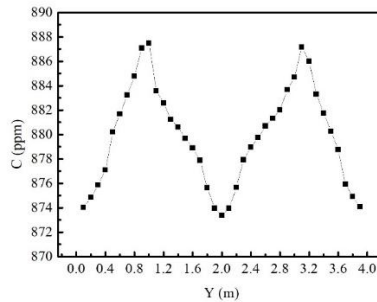
如图  $y=2m$  处截面是一个经过送风口与回风口中心的平面。送风射流自送风口送出后, 在靠近屋顶(吊顶)处形成了贴附射流。送风自送风口送出后不断卷吸射流的周围空气, 使得射流区域沿程不断增加, 使得房间里的空气得到了很好的混合, 同时在下部的区域形成气流回流, 带动室内空气向房间后部运动。对于  $CO_2$  浓度分布云图, 结合同一平面处的速度分布做对比, 分析可知,  $CO_2$  的扩散与房间内的气流运动有着很好的跟随性。为准确了解  $CO_2$  在房间内的扩散, 将通过数据统计进一步分析  $CO_2$  在空间的分布情况。



(a)  $CO_2$  浓度随高度变化曲线



(b)  $CO_2$  浓度随进深变化曲线



(c)  $CO_2$  浓度随宽度变化曲线

图3  $CO_2$  浓度在房间的分布图

Fig.3 The  $CO_2$  concentration distribution diagrams in the room

高度方向上, 在高度方向上  $CO_2$  浓度呈现单峰状, 在房间的下部以及房间上部  $CO_2$  浓度较低, 在房间中部偏下的位置上浓度较高。房间上部气流以送风为主, 送风中  $CO_2$  浓度偏低, 所以房间上部  $CO_2$  浓度较低; 下部是送风引起的气流回流, 带动房间空气向上部运动, 人员呼吸产生的  $CO_2$  无法堆积在下部, 所以下部的  $CO_2$  浓度也比较低; 在房间的  $z=0.9 \sim 1.6m$  区域内, 室内散发源位于此处, 另外送风及房间回流也使得  $CO_2$  无法积聚在这个范围内, 所以这个区域内的  $CO_2$  浓度较高, 在  $z=1.2m$  处  $CO_2$  浓度达到峰值  $892ppm$ 。

在房间进深的方向上, 送风气流中 CO<sub>2</sub> 浓度低, 气流自送风口送出, 沿墙壁向下运动, 在房间下部产生回流, 带动人员呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 向房间后部运动, 同时房间上部的空气射流与下部的回流在房间中后部区域产生气流旋涡, 旋涡区域内 CO<sub>2</sub> 与空气混合较为充分, 使得该区域内 CO<sub>2</sub> 浓度高而且分布均匀, 在  $x=2.2\text{m}$  平面上 CO<sub>2</sub> 浓度值达到 899.2ppm; 房间前部还是以送风气流为主, CO<sub>2</sub> 浓度较低。

在房间宽度方向上, CO<sub>2</sub> 浓度分布出现两个峰值, 在  $y=0\sim 2.0\text{m}$  范围内, CO<sub>2</sub> 浓度由 874ppm 迅速升高到 887.5ppm (该峰值出现在  $y=0.9\text{m}$  平面上), 然后又迅速降到 873.4ppm; 在  $y=2.0\sim 4\text{m}$ , CO<sub>2</sub> 浓度同样是迅速升高至 887.1ppm (该峰值出现在  $y=3.1\text{m}$  平面上) 又迅速回落。这种分布形态应该是受房间内人员分布影响产生的, 室内散发源呈对称分布, 所以 CO<sub>2</sub> 浓度也呈现出对称分布, 且在靠近散发源处 CO<sub>2</sub> 浓度高。

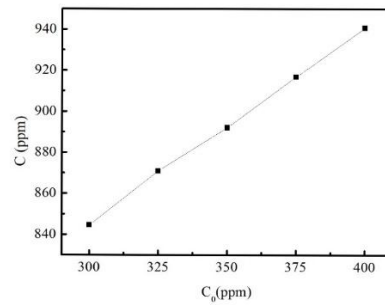
### 3 新风对室内 CO<sub>2</sub> 分布的影响

新风对于室内 CO<sub>2</sub> 浓度分布起着重要的控制作用, 文章将进一步从新风中不同 CO<sub>2</sub> 浓度含量及不同新风量这两个方面着手分析新风对室内 CO<sub>2</sub> 浓度分布的影响。在前面已经分析了 CO<sub>2</sub> 在房间分布的整体情况, 为体现新风作用效果及 CO<sub>2</sub> 浓度分布对人员健康的影响, 取离墙 600mm, 离地 75~1800mm 的呼吸区<sup>[9]</sup>的 CO<sub>2</sub> 平均浓度进行分析。

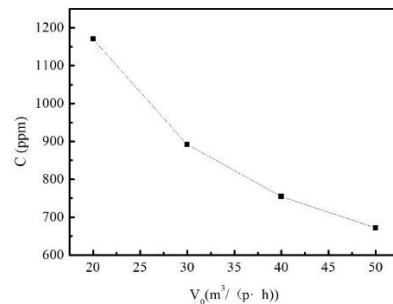
图 4 (a) 是采用新风量为 30m<sup>3</sup>/(p·h), 室外空气中 CO<sub>2</sub> 浓度分别取 300ppm、325ppm、350ppm、375ppm、400ppm 等几组数据对房间内的 CO<sub>2</sub> 浓度进行的模拟。由图可知, 伴随着室外空气中 CO<sub>2</sub> 浓度的增加, 在新风量一定的情况下呼吸区的 CO<sub>2</sub> 平均浓度呈现明显的上升趋势, 室外空气中 CO<sub>2</sub> 浓度由 300ppm 上升到 400ppm 时, 呼吸区的 CO<sub>2</sub> 平均浓度也由 844.5ppm 上升到 940.7ppm。当新风量一定时, 不同的室外空气中 CO<sub>2</sub> 含量, 引起的呼吸区的 CO<sub>2</sub> 平均浓度差异最大可达到约 100ppm, 所以洁净新风的作用是不可忽略的。

图 4 (b) 是模拟新风量为 20m<sup>3</sup>/(p·h)、30m<sup>3</sup>/(p·h)、40m<sup>3</sup>/(p·h)、50m<sup>3</sup>/(p·h) 时, 保持新风中 CO<sub>2</sub> 浓度为 350ppm, 得到的房间呼吸区的 CO<sub>2</sub> 平均浓度的分布。由图可知, 在常用的新风量范围内,

伴随着送风中新风量的增加, 呼吸区的 CO<sub>2</sub> 平均浓度逐渐降低, 在新风量由 20m<sup>3</sup>/(p·h) 上升到 50 m<sup>3</sup>/(p·h), 呼吸区的 CO<sub>2</sub> 平均浓度由 1169.9ppm 下降到 671.3ppm; 同时我们也注意到, 在新风量较少时, 呼吸区的 CO<sub>2</sub> 平均浓度已经超出了国家《室内空气质量标准》要求的 1000ppm 了。因此, 为满足国家规范要求, 房间通风的最小新风量需受到控制。



(a) CO<sub>2</sub> 浓度随室外浓度的变化曲线



(b) CO<sub>2</sub> 浓度随新风量的变化曲线

图 4 新风对室内 CO<sub>2</sub> 分布的影响

Fig.4 The influence of outdoor air on indoor CO<sub>2</sub> concentration distribution diagrams in the room

为了满足规范要求, 考虑室外空气中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化, 在前面模拟的基础上进一步计算模拟得到当呼吸区的 CO<sub>2</sub> 平均浓度达到 1000ppm 时, 对应于不同的室外 CO<sub>2</sub> 浓度所需新风量如表 2 所示。

表 2 满足规范要求的 minimum 新风量

Table 2 Minimum outdoor air volume that meets regulatory requirements

C <sub>0</sub> (ppm)	300	325	350	375	400
V <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /(p·h))	23.4	24.3	25.2	26.2	27.2

由表 2 分析可知, 为满足国家标准要求, 当室外 CO<sub>2</sub> 浓度越高, 所需新风量也越大, 所以

尽管室外的 CO<sub>2</sub> 是室内的 CO<sub>2</sub> 来源之一，但在一般的室外 CO<sub>2</sub> 浓度变化范围内，新风在房间送风中仍是扮演着稀释净化房间 CO<sub>2</sub> 污染物的角色。

#### 4 结论

本文全面考虑送风中 CO<sub>2</sub> 的来源，并确定了送风中 CO<sub>2</sub> 浓度表达式，利用数值模拟方法，模拟得到了房间内 CO<sub>2</sub> 的分布状况。根据模拟结果，房间内 CO<sub>2</sub> 浓度的分布与房间内的气流运动有着很好的跟随性。同时 CO<sub>2</sub> 是的分布于室内散发源分布有很大的关系；新风能很好地稀释房间的气体污染物。增大新风量，能显著降低房间内的 CO<sub>2</sub> 浓度；但新风中 CO<sub>2</sub> 浓度增大，会导致房间中 CO<sub>2</sub> 浓度升高；所以空调系统取新风点应考虑选取在空气质量好的环境内；整体比较可知新风在房间送风中仍是扮演着稀释净化房间气体污染物的角色；同时为保证室内人员有好的工作生活环境，空调系统的新风量不宜取得过小，基于此模型的房间，新风量最好大于 27.2m<sup>3</sup>/(p·h)。本文所采用的模拟方法适的用于模拟其他类型房间以及室内

其他气态污染物。

#### 参考文献：

- [1] 陆亚俊,马最良,邹平华.暖通空调[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [2] GB/T 18883—2002,室内空气质量标准[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [3] 张军甫.办公建筑室内空气品质测试与气流组织分析[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [4] 李金华.置换通风条件下室内空气品质研究[J].洁净与空调技术,2005,(2):5-8.
- [5] 金朝芬,朱颖心.建筑环境学[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [6] 朴文龙.不同通风方式下办公建筑室内苯浓度的数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [7] 唐家鹏.ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2016.
- [8] 田柳,卢军,吕怿非,等.不同送回风方式对主动式置换通风住宅室内环境的影响[J].制冷与空调,2018,32(3): 256-265.
- [9] ASHRAE Handbook. Heating Ventilating and Air Conditioning Systems and Application[M]. Atlanta: ASHRAE, Inc. 1987.