

研究报告

# 空调房间的空气品质及其控制研究

邹声华<sup>1</sup>, 李强<sup>2</sup>, 于梅春<sup>1</sup>, 杨景华<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201;

2. 长沙化工设计研究院, 长沙 411007)

**[摘要]** 以典型的空调房间为例, 分析了新风和回风对室内空气品质的影响。研究表明室内污染源的不增加是室内空气品质恶化的主要原因, 新风的质量直接影响室内空气品质, 回风是室内空气的二次污染源。导出了新风和回风对室内空气污染的理论计算公式, 通过仿真表明: 基于室内空气中典型的有害气体体积分数(以 CO<sub>2</sub> 为代表)的变化来控制新风量, 是非常有效的。

**[关键词]** 室内空气品质; 污染物体积分数; 新风量; 控制; 仿真

**[中图分类号]** U270.38 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2007) 03-0082-05

## 引言

充分地利用回风、减少新风是空调系统节能的需要, 特别是在夏季室内外温差较大的情况下, 空调系统使用的回风量愈多, 掺混的新风量愈少, 节能效果就愈明显。然而, 无限制地减少新风, 又会影响室内空气品质 (IAQ)。在许多 IAQ 的调查研究中都提到新风量供应不足的问题<sup>[1~6]</sup>。如何解决好空调整能和室内空气品质的矛盾, 是暖通空调技术人员急需解决的难题。有些人为了改善 IAQ, 片面加大新风量, 然而却达不到预期的效果。作者以典型的通风空调房间为例, 分析了房间通风空调系统空气污染的实质, 并提出了基于室内空气中典型的有害气体 (以 CO<sub>2</sub> 为代表) 体积分数的变化来控制新风量的方案。

## 1 空调房间空气污染的数学物理模型

房间的通风空调过程可用图 1 来表示, 并对其作如下假设: 通风空调过程中室内流动的空气是不可压缩流体; 从室外进入的新风量为  $Q_1$ , 且新风中的污染物体积分数  $\varphi_1$  (常量); 空调机组的风量为  $Q_0$ ; 空调房间的体积为  $V$ , 且房间里产生代表性的

有害气体涌出量为  $q$  (可视为常量); 空调系统的回风量为  $\Delta Q$ 。

经过时间  $t$  后, 室内的有害气体均匀分布, 其体积分数为  $\varphi$ ;  $dt$  时间内, 有害气体体积分数的变化为  $d\varphi$ , 其绝对量变化为  $Vd\varphi$ , 因为回风使室内有害气体的增加量为  $qdt + \Delta Q\varphi dt$ , 排出的风量为  $Q_2 = Q_1 + q$ , 排出的有害气体量为  $\varphi Q_2 dt$ 。

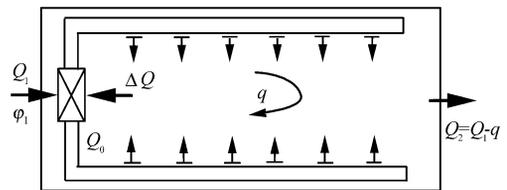


图 1 房间通风空调系统工作原理图

Fig.1 Principle diagram of ventilating and air-conditioning system in a room

根据质量守恒定律, 可得室内的有害气体体积分数的微分方程式:

$$V \frac{d\varphi}{dt} = \varphi_1 Q_1 + Q + \varphi \Delta Q - \varphi (Q_1 + q) = \varphi_1 Q_1 + q - (Q_1 + q - \Delta Q) \varphi \quad (1)$$

式 (1) 变型后, 通过积分和整理得:

[收稿日期] 2006-03-01

[基金项目] 湖南省自然科学基金资助项目 (05JJ0073)

[作者简介] 邹声华 (1962-), 男, 湖南衡阳县人, 湖南科技大学能源安全工程学院教授

$$\varphi = \frac{\varphi_1 Q_1 + q}{Q_1 + q - \Delta Q} + B \cdot e^{-\left[\frac{Q_1 + q - \Delta Q}{V}\right] \cdot t} \quad (2)$$

( $B=e^k$ ,  $K$ 为积分常数)

把初始条件(未发生循环风时)  $\varphi_1=0=\varphi_1+q/Q_0$  代入式(2), 可得常数  $B$ , 再代入式(2), 可得:

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_1 Q_1 + q}{Q_1 + q - \Delta Q} + \left[ \varphi_1 + \frac{q}{Q_0} - \frac{\varphi_1 Q_1 + q}{Q_1 + q - \Delta Q} \right] \cdot e^{-\left[\frac{Q_1 + q - \Delta Q}{V}\right] \cdot t} \quad (3)$$

如要利用回风(循环风)节能, 必须使  $Q_1 < Q_0$ , 则回风量为  $\Delta Q = Q_0 - Q_1$ 。全空气空调系统, 一般不采用直流式空调, 其回风率为  $m$  (%), 则:

$$\Delta Q = mQ_0 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 如新风中的有害物体积分数  $\varphi_1=0$ , 得:

$$\varphi(t) = \frac{q}{Q_1 + q - mQ_0} + \left[ \frac{q}{Q_0} - \frac{q}{Q_1 + q - mQ_0} \right] \cdot e^{-\left[\frac{Q_1 + q - mQ_0}{V}\right] \cdot t} \quad (5)$$

上式右边第一项是流出空调房间的有害气体体积分数, 也是空调房间可能达到的最大有害气体质量分数; 第二项是从发生循环时新风为  $Q_1$ , 与时间常数  $\left[\frac{Q_1 + q + mQ_0}{V}\right]$  大小随时间而变化的一个变量, 由于  $Q_0 > Q_1$ ,  $q \ll Q_0$ , 因此,  $\left[\frac{q}{Q_0} - \frac{q}{Q_1 + q - mQ_0}\right]$  的值是一个负数, 随着时间的延长, 此值将由循环前后有害气体最大体积分数之差(负数)趋向于0。这时也就是达到循环后的最大有害气体体积分数及所需时间  $t$ , 是与室内容积  $V$  和新风量  $Q_1$  及室内有害气体涌出量  $q$  相关的量。室内容积  $V$  和新风量  $Q_1$  愈大、室内有害气体涌出量  $q$  愈小, 所需的时间越短; 反之就越长。 $\varphi(t)$  表示了循环风时室内有害气体体积分数随时间变化的关系式, 它是一个负指数函数曲线。

## 2 新风对室内空气品质的影响

一般地, 人们用增加新风量的方法来提高室内空气品质, 因此, 对新风量也给予了足够的重视<sup>[2~8]</sup>。由式(3)可知, 新风的质量对室内空气品质也有影响, 近年来, 新风质量受到了人们普遍的关注<sup>[9~10]</sup>。随着城市建设步伐的加快, 人口密度不断增加, 汽车的拥有量不断上升, 人们在生产和生

活活动过程中不断向外排放废气, 致使室外空气环境污染严重, 有些甚至超过室内空气质量标准。另外, 由于入室新风往往因受空调系统的污染而质量变坏。在上述两种情况下, 即使增加新风量, 也难以改善室内空气品质。

因此, 对于新风质量应有明确的标准, 室外采集的新风至少要符合《室内空气卫生标准》。为了保证新风质量, 国内有些学者提出了三级过滤的设计<sup>[4]</sup>。需要指出的是, 目前新风过滤主要考虑室外颗粒污染物的去除, 而对室外新风中的气体污染物很少进行处理。因此, 要保证良好的室内空气品质, 新风处理必须考虑气体污染物的过滤, 要设法使新风中的污染物降到卫生标准以下。

## 3 空调房间回风对 IAQ 的影响

在空调系统中, 回风经过空调机处理后再次进入室内, 会存在二次污染。从式(5)可见, 当利用回风且风量大于新风量时, 室内的有害气体质量分数升高, 其最大值取决于新风量和室内有害气体的涌出量, 是一定值, 与回风中的有害气体量无关, 因此, 回风流中所携带的室内的有害气体不会无限地增加室内的有害气体。

利用回风, 室内有害气体体积分数从初始值上升到最大值的变化过程呈现指数函数关系, 其上升到最大值的时间与室内容积、室内有害气体涌出量和新风量的大小有关。

回风率  $m$  越大, 最大有害气体体积分数会升高, 但不会无限制地升高, 当回风率一定时, 它是一极限值; 初始体积分数  $\varphi_0 = \varphi_1 + q/Q_0$  越大, 回风对室内污染的影响程度越小, 反之则越大。例如一个空调房间完全采用新风时(新风中无有害气体), 并设室内产生的有害气体为纯  $\text{CO}_2$ , 初始体积分数为 0.1%, 这时恰好能满足卫生要求。如果利用回风, 设计新风率为 10%, 在这种情况下, 空调房间的  $\text{CO}_2$  最大体积分数将会达到 0.991%, 它约是初始值的 9.91 倍, 相当于超过了卫生标准的近 10 倍; 当新风率为 20% 时, 房间内的  $\text{CO}_2$  最大体积分数约是初始浓度的 4.98 倍; 当新风率为 30% 时, 房间内的  $\text{CO}_2$  最大体积分数约是初始值的 3.326 倍; 当新风量在 40% 时, 房间内的  $\text{CO}_2$  最大体积分数约是初始值的 2.496 倍。以上数据足以说明回风对室内空气污染的严重性; 另外也可发现: 当新风率达到 20% 以后, 新风对提高室内空气品质的作用能力

衰减加快。

### 4 空调房间新风量的控制

Reardon J. T. 研究了以 CO<sub>2</sub> 体积分数作为调节对象的新风量控制方法，它与定新风量法和风机跟踪法相比，具有以下优点：CO<sub>2</sub> 是一种人体呼出的气体，它可以表明人体散发有害气体冲淡的程度；应用 CO<sub>2</sub> 体积分数作为调节对象，才能进行需求控制，而应用风量为调节参数，一般只能进行定量控制；以 CO<sub>2</sub> 体积分数作为调节对象，不但包括了空调机组吸入的新风量，同时也计入各个空调区域从围护结构渗入的新风量；测量 CO<sub>2</sub> 体积分数要比测量风量精确一些，且更方便。

为简化起见，认为空调房间主要污染物为 CO<sub>2</sub> 且分布均匀，即按照集总参数处理。根据质量守恒定律，单位时间内进入房间的 CO<sub>2</sub> 体积减去单位时间内由房间排出的 CO<sub>2</sub> 体积等于房间内 CO<sub>2</sub> 的变化率，单位时间内进入空调房间的 CO<sub>2</sub> 体积包括室外新风引入的 CO<sub>2</sub> 以及室内释放出的 CO<sub>2</sub>，而单位时间内从空调房间排出的 CO<sub>2</sub> 体积包括排风带走的 CO<sub>2</sub> 以及空调房间漏风带走的 CO<sub>2</sub>。与排风带走的 CO<sub>2</sub> 相比，房间漏风带走的 CO<sub>2</sub> 可以忽略不计。由于要保持室内空气质量不变，因此新风量等于排风

量，由此，式 (1) 可转化为：

$$V \frac{d\varphi}{dt} = Q_1 \varphi_1 - Q_1 \varphi + q + \theta_t \quad (6)$$

式中：V—被控房间体积，m<sup>3</sup>；φ—房间内空气污染物体积分数，10<sup>-6</sup>；Q<sub>1</sub>—系统新风量，m<sup>3</sup>/h；φ<sub>1</sub>—新风中污染物体积分数，10<sup>-6</sup>；q—房间内 CO<sub>2</sub> 涌出量，m<sup>3</sup>/h；θ<sub>t</sub>—干扰变量，人员进出、抽烟等影响因素导致 CO<sub>2</sub> 等污染物的变化，m<sup>3</sup>/h。

假设空调房间体积为 4 m×5 m×3 m，房间内允许的污染物体积分数值为 1 400×10<sup>-6</sup>，室外新风污染物体积分数为 280×10<sup>-6</sup>，新风量等于排风量，室内人员污染物涌出率为 0.019 2 m<sup>3</sup>/h·人，室内 CO<sub>2</sub> 面积散发率为 0.008 5 m<sup>3</sup>/h，空调房间内人员设为 3 人，则此房间释放出的 CO<sub>2</sub> 总量为 0.000 075 m<sup>3</sup>/s，最终可得控制方程<sup>[11~12]</sup>：

$$60 \times \frac{d\varphi}{dt} = 0.000 28 \times Q_1 - Q_1 \times \varphi + 0.000 075 + \theta_t \quad (7)$$

根据上式，采用 PID 控制算法 (3, 2, 0.5)，新风阀特性为线性变化，阀门比例系数取 2，建立 SIMULINK 仿真模型<sup>[13]</sup>如图 2 所示。

假设空调房间的送风量为 630 m<sup>3</sup>/h，人员刚进房间，室内 CO<sub>2</sub> 体积分数与新风的相等，新风阀最小开度为 15% (按估计预设)。图 3、图 4 分别是室

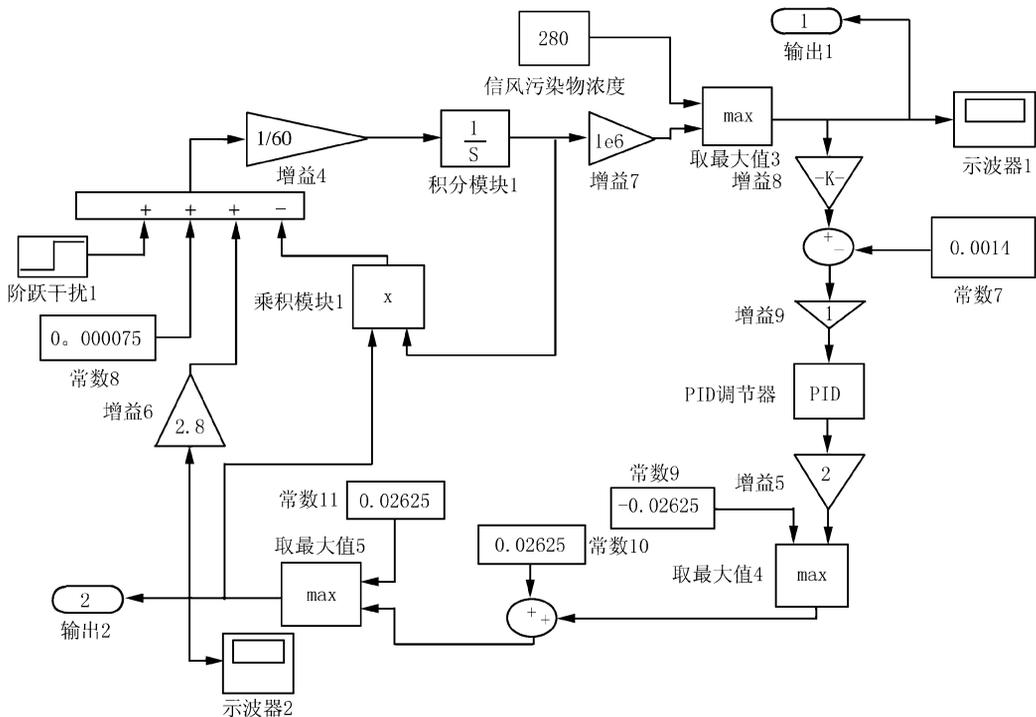


图 2 根据污染物浓度控制房间新风量 SIMULINK 模型

Fig.2 SIMULINK model of control outside air-conditioning system in a room

内污染物体积分数变化曲线和和新风阀门开度变化曲线，而图 5、图 6 分别代表室内出现污染物体积分数干扰信号后的污染物体积分数变化曲线和和新风阀门开度变化曲线。从图 3、图 4 可以看出，室内污染物体积分数在 2 000 s 时趋于稳定值  $1\ 400 \times 10^{-6}$ ，新风阀门开度相应稳定于预设值 15% 的位置。空调房间在某一稳定时刻（如 2 000 s）时，CO<sub>2</sub> 体积分数

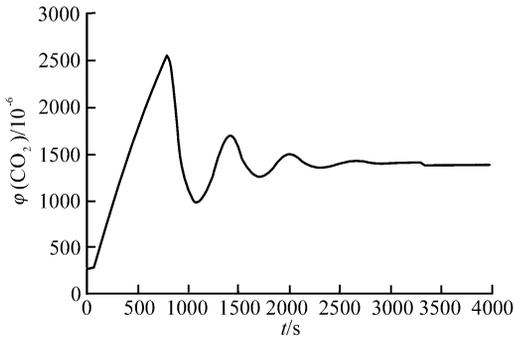


图 3 空调房间内 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化  
Fig.3 Variation of CO<sub>2</sub> volume fraction

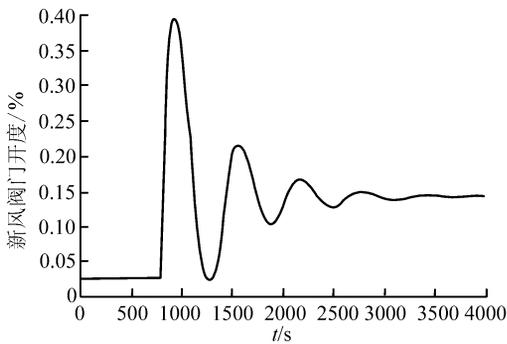


图 4 空调房间新风阀门开度的变化  
Fig.4 Variatin of outside air valve

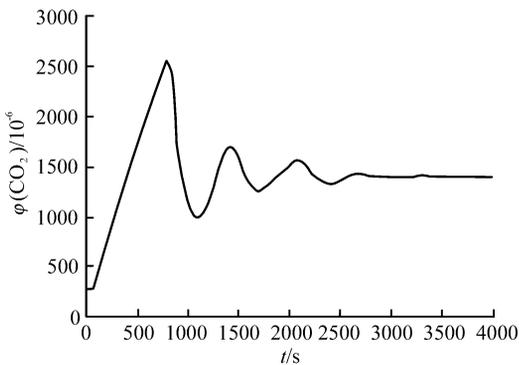


图 5 干扰后空调房间 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化  
Fig.5 Variation of CO<sub>2</sub> volume fraction by step

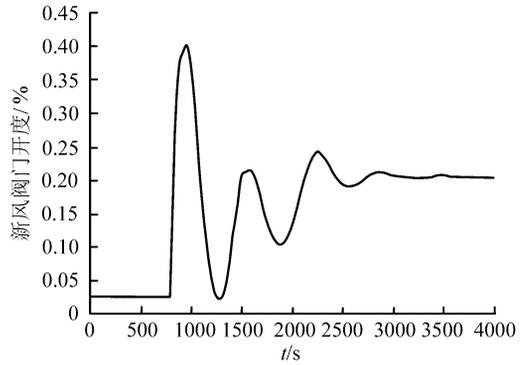


图 6 干扰后空调房间新风阀门开度变化  
Fig.6 Variation of outside air valve by step

突然增加，以升高后 CO<sub>2</sub> 体积分数与设定值的差值 ( $0.000\ 03\ \text{m}^3/\text{s}$ ) 作为阶跃干扰信号  $\theta_t$ ，对空调房间进行 SIMULINK 仿真，结果表明：CO<sub>2</sub> 体积分数在 2 000 s 时，出现了显著波动，直到 2 500 s 时才趋于稳定（图 5）；为了消除干扰信号的影响，有效降低室内污染物浓度，新风阀开度逐渐增大，最后稳定于 20 % 的位置（图 6）。

仿真结果与空调房间的大小有关，无论是 CO<sub>2</sub> 体积分数变化曲线，还是新风阀门开度变化曲线，随着房间容积的增加，时间常数相应增加，因此调节过程增长，稳定时间也相应延长。

PID 控制使室内 CO<sub>2</sub> 体积分数和新风阀门开度均能较快达到稳定值，并有效消除静差。基于 CO<sub>2</sub> 体积分数变化控制新风量，新风量变化明显，在节能的同时有效实现空调房间新风量的需求控制。

## 5 结论

1) 室内污染物来自人员和室内气体污染源两个方面，回风会加重室内环境的污染，新风量的确定应考虑人体的最小新风量需要、卫生要求和回风影响，取其中最大值。

2) 新风的数量和质量对室内空气品质均有影响，要提高室内空气品质，除了要保证新风量以外，还必须保证新风的质量，新风的质量至少要满足《室内空气卫生标准》。

3) 有回风的空调房间，室内空气污染物体积分数随回风率的加大而增加的，当回风率一定时，它对空调房间的空气污染有一极限，而不是无限增加。

4) 公式 (5) 是指导我们利用回风、使用新风的理论依据，加强对新风量的控制对提高 IAQ 是非常有利的。

## 参考文献

- [1] 马仁民. 国外非工业建筑室内空气品质研究动态[J]. 暖通空调, 1999, 29(2): 38~41
- [2] 许钟麟. 洁净室设计[M]. 北京: 地震出版社, 1994
- [3] Lawson C N. Ventilation-Where it came from, where it is, and where it is going[J]. ASHRAE Trans, 1995, 101(5): 528~529
- [4] Olesen B W. International development of standards for ventilation of building[J]. ASHRAE J, 1997, (4): 31~39
- [5] 孙一坚. 工业通风[M]. 北京: 中国建筑工业出版社
- [6] 杨则华, 白蔚君. 室内空气品质对“病态建筑”的影响与对策[J]. 鄂州大学学报, 2000, 7(2): 62~64
- [7] 荣海琴, 郑经堂, 王茂章. 室内空气中挥发性有机化合物及多孔炭材料在其脱除中的应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 1999, 7(6): 104~106
- [8] 杨纯华, 赵志安. 现代化办公楼的空调节能与新风控制方法的探讨[A]. 湖南省暖通空调制冷学术年会论文集[C], 2000
- [9] Heiselberg P, Murakami S, Roulet C A. Ventilation of Large Spaces in Buildings-Analysis and Prediction Techniques [R]. IEA Annex 26 Report. Denmark: Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1998.
- [10] Rousseau P G, Mathews E H. A new integrated design tool for naturally ventilated buildings[J]. Energy and Buildings, 1996, 32(2): : 231~236
- [11] Chang Y J, Park Y C, Chung K S, Han H T, Lee J J. A control of supply duct outlet air temperature in PEM[A]. 2001In: Proceeding of the 4th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings[C]. Hong kong: the City University of Hong Kong, 2001
- [12] 陈焕新, 杨培志, 张登春. 列车车厢中 CO<sub>2</sub> 浓度控制系统的仿真[J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 17(3): 75~77
- [13] Kulkarni M R, Feng Hong. Energy optimal control of a residential space-conditioning system based on sensible heat transfer modeling[J]. Building and Environment, 2004, 39(1): 31~38

## The Research of Air Quality and Its Control in Air-conditioning Room

Zou Shenghua<sup>1</sup>, Li Qiang<sup>2</sup>, Yu Meichun<sup>1</sup>, Yang Jinghua<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

2. Changsha Chemical Design and Research Institute, Changsha 411007, China)

[Abstract] The influence of outside air and return air on the IAQ in a typical air-conditioning room is analyzed. It is proved that the increasing indoor contamination makes the IAQ worse, the outside air quality has a direct effect on the IAQ, and the return air produces secondary pollutants. The theoretical formula about outside air, return air and the contaminant is induced. The simulation results show that controlling the outside air volume by contaminant mass fraction(CO<sub>2</sub>) can save energy and improve the IAQ effectively.

[Key words] indoor air quality; mass fraction of contaminant; outside air volume; control; simulation