

基于 CO₂ 和 TVOC 浓度的空调新风随机控制系统^{*}

解放军理工大学 贾代勇[☆] 耿世彬 袁印奎 杨家宝 韩旭

摘要 为了在满足室内空气品质的要求下,尽可能地减少新风量实现节能的目的,以 CO₂ 浓度和 TVOC 浓度作为控制指标,实现空调新风的随机控制。介绍了该控制系统的原理。实验证明了该系统的稳定性。

关键词 空调新风 CO₂ TVOC 浓度 随机控制

Air conditioning fresh air random control systems based on concentration of CO₂ and TVOC

By Jia Daiyong[★], Geng Shibin, Yuan Yinkui, Yang Jiabao and Han Xu

Abstract For both meeting indoor air quality requirement and saving energy, takes the concentration of CO₂ and TVOC as control indexes to realize random control of fresh air. Presents the principle of the control system. Experimental results show the system to be stabile.

Keywords air conditioning fresh air, CO₂, TVOC, concentration, random control

★ PLA University of Science and Technology, Nanjing, China

①

影响室内空气品质的污染物种类有很多,根据发生源的不同可分为人员相关污染物与建筑相关污染物两类。在非工业建筑中,由于在通常情况下室内人员是 CO₂ 惟一产生源,CO₂ 的浓度不仅代表 CO₂ 本身作为污染物对室内空气的污染程度,而且还能反映室内人员的状况,即人数及活动状况^[1],能体现室内人员对新风的要求,因此,本文将 CO₂ 浓度作为反映人员相关污染物的指示量。

近年来的研究表明,建筑材料、地板蜡、清洗剂及 HVAC 系统本身等所散发的各种挥发性有机物 VOC 是产生病态建筑综合症的主要因素^[2],在非工业环境中, VOC 通常是空气中的重要污染源。常温下,室内空气污染物中,已经得到证实的 VOC 有 5 000 多种;在居室、商场及办公场所中通常情况下有 300 多种。但是它们的单个浓度极低,绝大多数情况下并没有哪一种污染物单独超标,造成室内空气污染是各种 VOC 的共同作用,因而以其总

量 TVOC 作为反映建筑相关污染物的指示量。

本文综合考虑因人员活动及建筑物散发的污染物对室内空气品质的影响,具体以 CO₂ 及 TVOC 浓度作为控制指标,实现空调系统新风的随机控制。

1 控制系统的研究

1.1 控制指标的确定

国外在上世纪 70 年代开始研究新风控制节能技术,提出在大型建筑物空调系统中将新风量控制在最佳值,既可保证室内人员舒适和健康,又可节省能量。为了保证室内空气品质,美国供暖制冷空调工程师学会于 2002 年 8 月颁布了新的通风要求标准——ANSI/ASHRAE Standard 62-2001^[3],这个标准要求综合考虑室内人员及建筑物情况来决定新风量。

①☆ 贾代勇,男,1962 年 3 月生,博士,副教授
210007 解放军理工大学工程兵工程学院内部设备教研室
(025) 84879927
收稿日期:2003-01-20
修回日期:2004-04-29

* 国家人防资助项目(编号:03CZZ301)

对于室内 CO_2 的浓度问题,许多国家进行了研究并制定了相应的评价标准,目前欧美等国家和地区的标准取值是一致的,参考这些标准取值,本文采用 $1\,000 \times 10^{-6}$ (1 000 ppm) 作为室内 CO_2 体积分数的允许值。

对于室内 TVOC 浓度的限值,目前各国的推荐标准有所不同,如欧美日等国家和地区的取值为 $250 \sim 1\,300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2001 年 11 月 26 日,中华人民共和国质量监督检验检疫总局会同建设部联合发布了《民用建筑工程室内环境污染控制规范》(GB 50325-2001),明确规定民用建筑工程及室内装修工程必须要进行室内环境质量检测,其中 TVOC 的室内环境质量浓度限量在 I 类民用建筑工程中应当小于等于 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$,在 II 类民用建筑工程中应当小于等于 $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因此本文室内 TVOC 质量浓度的允许值取为 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

1.2 控制系统的研究

图 1 为控制系统原理示意图。图中 PLC 为可编程控制器,并兼有 A/D 和 D/A 转换等功能。

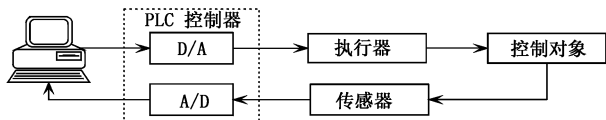


图 1 控制系统原理示意图

传感器不断地将室内的 CO_2 和 TVOC 浓度(控制对象)信号转换为电信号,并由 PLC 中的 A/D 转换器转换为数字信号送入计算机并显示(或打印)出来,监控人员可随时掌握控制对象中的 CO_2 和 TVOC 浓度情况。在计算机中将测得的室内 CO_2 和 TVOC 浓度与给定值比较,由此获得偏差值并由 D/A 转换器转换为电信号送入控制器,控制器根据此偏差信号,按照设定的控制规律输出电信号并驱动可逆电机(执行器)转动,调节风门的开度,从而实现新风量的随机控制。

根据国内外的有关研究,当室内 CO_2 体积分数大于等于 $10\,000 \times 10^{-6}$ 时,人会产生较强的反应(如呼吸加深,肺换气量增加);TVOC 质量浓度大于等于 $3\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,多数人明显感觉不适。因此,当传感器检测到室内 CO_2 或 TVOC 浓度两者之一达到上述值时,本控制系统自动将新风阀门调节到最大开度。新风阀门与回风阀门是联动的,以此保证空调系统的总送风量仍为设计值。

根据文献[3]的标准,送入室内的新风应为人活动所需新风与建筑物所需新风之和。在本控制系统中,控制器的输出为单独控制 CO_2 浓度的理论输出与单独控制 TVOC 浓度的理论输出之和。由于在某个新风量下,一般不可能使 CO_2 和 TVOC 浓度正好达到各自的给定值,为保证控制系统的稳定性,计算机输出偏差值时,在一个偏差值为负,另一个偏差值为正或 0 的条件下,输出的负偏差值项取为 0,因此本控制系统稳定后,对于室内 CO_2 和 TVOC 浓度值,一个正好为给定值,另一个则小于等于给定值。

考虑到控制对象的时间常数远大于其滞后时间,且使用了电动调节风门,因此控制器的控制规律设定为比例积分控制。

本控制系统的框图如图 2 所示,传感器布置在

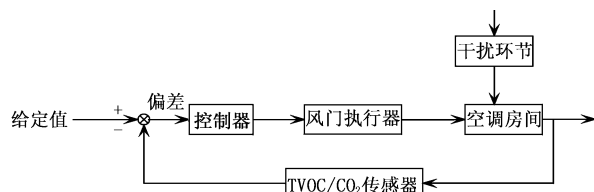


图 2 控制系统框图

回风管中。根据控制理论^[4]可计算出各环节的传递函数。

$$\text{空调房间: } W_{1C}(S) = \frac{K_{1C}}{T_{1C}S + 1} \quad (1)$$

$$W_{1V}(S) = \frac{K_{1V}}{T_{1V}S + 1} \quad (2)$$

$$\text{传感器: } W_{2C} = 1 \quad (3)$$

$$W_{2V} = 1 \quad (4)$$

$$\text{控制器: } W_3(S) = K_{3C} + K_{3V} + \frac{1}{S} \left(\frac{K_{3C}}{T_{3C}} + \frac{K_{3V}}{T_{3V}} \right) \quad (5)$$

$$\text{执行器: } W_4(S) = K_4 \quad (6)$$

$$\text{干扰环节: } W_{5C}(S) = K_{5C} \quad (7)$$

$$W_{5V}(S) = K_{5V} \quad (8)$$

上列各式中 W 为传递函数; S 为复变量; K 为放大因数; T 为时间常数;下标 C 对应 CO_2 ,下标 V 对应 TVOC。

根据拉氏变换求得房间内 CO_2 的浓度变化 ΔC_C 为:

$$\Delta C_C = A e^{-\alpha \omega_c t} \sin(\omega_c \sqrt{1 - \alpha^2} t) \quad (9)$$

$$\text{式中 } A = \frac{K_{1C} K_{5C} T_{3C} T_{3V}}{K_{1C} K_4 (K_{3C} T_{3V} + K_{3V} T_{3C})} \frac{\omega_C}{\sqrt{1-\alpha^2}}$$

$$\alpha = \frac{K_{1C} K_4 (K_{3C} + K_{3V}) + 1}{2}$$

$$\sqrt{\frac{T_{3C} T_{3V}}{(K_{3C} T_{3V} + K_{3V} T_{3C}) T_{1C} K_{1C} K_4}}$$

$$\omega_C = \sqrt{\frac{K_{1C} K_4 (K_{3C} T_{3V} + K_{3V} T_{3C})}{T_{1C} T_{3C} T_{3V}}}$$

t 为时间。

房间内 TVOC 的浓度变化 ΔC_V 为:

$$\Delta C_V = B e^{-\beta \omega_V t} \sin(\omega_V \sqrt{1-\beta^2} t) \quad (10)$$

$$\text{式中 } B = \frac{K_{1V} K_{5V} T_{3C} T_{3V}}{K_{1V} K_4 (K_{3C} T_{3V} + K_{3V} T_{3C})} \frac{\omega_V}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\beta = \frac{K_{1V} K_4 (K_{3C} + K_{3V}) + 1}{2}$$

$$\sqrt{\frac{T_{3C} T_{3V}}{(K_{3C} T_{3V} + K_{3V} T_{3C}) T_{1V} K_{1V} K_4}}$$

$$\omega_V = \sqrt{\frac{K_{1V} K_4 (K_{3C} T_{3V} + K_{3V} T_{3C})}{T_{1V} T_{3C} T_{3V}}}$$

2 控制系统的实验

为了验证控制方案的可行性和可靠性,本文设计了如图3所示的实验台进行测试。实验台配备了送、回、排风系统。空气质量测试小室外形尺寸为 2.5 m×2.5 m×2.5 m,铝合金框架,玻璃围护结构。管道接触处采用



图3 实验台

有机玻璃,以防止由于风管摆动影响密封性,保证小室的气密性要求,地面采用防锈铁皮。小室送风采用顶部全面孔板送风方式,孔口数 1 400,孔口直径 10 mm,稳压层净高 400 mm;选用苏州某厂型号为 150FLJ7 的离心风机,并置于送风段,以利于保持小室正压;CO₂ 浓度传感器采用德国 QPA63 传感器;TVOC 浓度传感器为改造后的 AIR-200 型传感器,该传感器的输出原来只有 4 个挡次,经改造后建立了 TVOC 浓度值与传感器输出电压间的函数关系;PLC 控制器为 S7-200 型,其基本单元是一个标准可编程逻辑控制器,包括 CPU、电源

和 I/O 口。

扩展模块包含额外的输入输出端口,并通过总线连接器与基本单元相连;风门执行器为 ML7161E 型直接耦合风门执行器,连接自制单叶蝶阀。

进行实验时,实验气体在混合箱中混合后释放到送风管内,随空气送入小室顶部稳压层中,经孔板进入室内,保证了空间浓度的均匀性。待小室中 CO₂ 和 TVOC 浓度达到一定数值且稳定后,启动控制系统,计算机自动记录调节过程。部分实验结果见图 4 和图 5。

从图 4 和图 5 可以看出,无论初始浓度高于还是低于允许值,经控制系统调节后,都可以使室内的 CO₂ 和 TVOC 浓度满足控制要求。当初始浓度低于允许值时,系统自动关小新风阀,在满足空气品质的前提下,减少新风量的供给;当初始浓度高于允许值时,系统自动开大新风阀,增加新风量,降低室内 CO₂ 和 TVOC 浓度,使室内空气质量满足要求。

3 结论

本控制系统以 CO₂ 浓度作为反映人员相关污染物的指示量,以 TVOC 浓度作为反映建筑相关污染物的指示量,实现了空

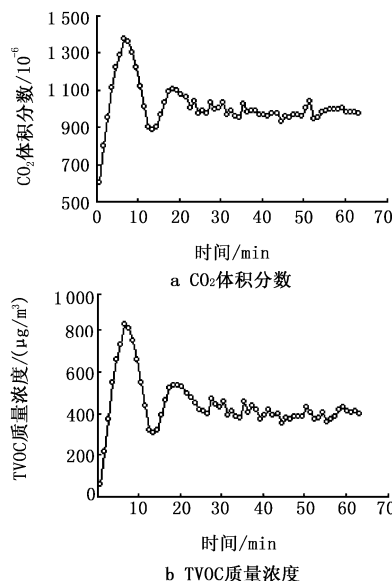


图4 CO₂ 和 TVOC 初始浓度低于允许值时的实验结果

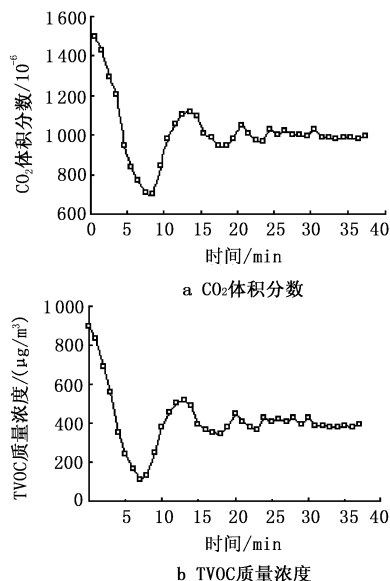


图5 CO₂ 和 TVOC 初始浓度高于允许值时的实验结果