

污染物散发量变化时的通风解析及先导控制

四川大学 孔 川[☆]

中国建筑西南设计研究院 王 宁

摘要 通过对污染物散发量呈二次多项式或正弦函数变化时通风排害基本微分方程的理论解析,得到室内污染物浓度表达式,供“先导式”通风计算和浓度控制参考。

关键词 通风 污染物 散发量 浓度 先导式控制

Ventilation analysis and pre-control for varied pollutant emission rates

By Kong Chuan[★] and Wang Ning

Abstract Based on theoretical analyses of basic differential equation of ventilation and pollutant discharge when pollutant emission rate varies in the form of quadratic polynomial or sine function, derives a formula of indoor pollutant concentration, which can be applied to “pre-ventilation” calculation and control.

Keywords ventilation, pollutant, emission rate, concentration, pre-control

★ Sichuan University, Chengdu, China

①

0 引言

排除室内污染物是通风的三大目的之一^[1]。目前,通风改善室内空气质量(IAQ)领域中,在室内通风气流模拟、污染物分布、通风系统布置等研究方面有许多成果^[2-6]。这些研究有两大特点:污染物产生量为定值;多以“反馈式”控制方法控制通风过程。事实上,许多情况下污染物的产生量是变化的,而且也有一定规律可寻。有学者建议加强污染源散发特性与辨识技术的研究^[1],指出了采用预测技术的积极意义^[7]。当已知变化规律时,采用“先导式”控制即成为可能,效果会更好,同时也节能。本文即对此进行数理分析和探讨。

1 数理模型

1.1 物理模型

某房间内,有污染物(或有害物)散发,需采用通风方式控制污染物浓度。进风可分为主导进风和辅助进风,排风为机械排风为主的任意组合,为具广适性,考虑有回风及其可能的净化装置。通风状态模型见图 1。图中, L_0, L'_0 分别为主导、辅助进风量, m^3/s ; y_0, y'_0 分别为主导、辅助进风中污染物质量浓

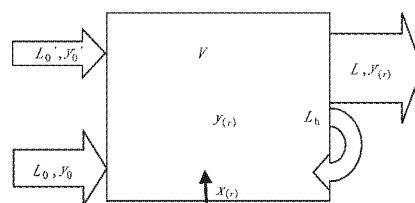


图 1 通风状态模型图

度, g/m^3 ; L, L_h 分别为排风、回风量, m^3/s ; $y_{(\tau)}$ 为 τ 时刻房间内污染物质量浓度, g/m^3 ; $x_{(\tau)}$ 为 τ 时刻房间内污染物散发量, g/s ; V 为房间体积, m^3 。

模型假定:1)任一时刻通风量均平衡,即总进风量等于总排风量;2)污染物为单一物质,且在通风过程中具有化学稳定性;3)污染物浓度取平均值。假定 3)为理想假定,忽略了污染物扩散不均

①[☆] 孔川,男,1963年6月生,工程硕士,在读博士研究生,教授级高级工程师

610081 成都星辉西路8号中国建筑西南设计研究院7-8-5

(0) 13708184209

E-mail: kong_chuan@163.com

收稿日期:2008-04-08

一次修回:2008-07-23

二次修回:2009-03-29

匀性、气流组织影响等,在许多场合可以这样处理,即出风口的污染物浓度为房间内平均浓度。

1.2 数学模型

$$L_0 y_0 d\tau + L_h(1-\eta)y_{(\tau)} d\tau + L'_0 y'_0 d\tau - (L+L_h)y_{(\tau)} d\tau + x_{(\tau)} d\tau = dG_{(\tau)} \quad (1)$$

式中 η 为回风净化装置污染物去除分数, $0 \leq \eta \leq 1$; $G_{(\tau)}$ 为 τ 时刻房间内污染物质量, g。

建筑物室内的进风可以是建筑周边环境空气、净化空气或其他风源。可以设定,进风中单一污染物浓度 y_0, y'_0 是定值。

由假定 3) 可知,回风口的污染物浓度为 $y_{(\tau)}$ 。当有净化装置时,回风中污染物浓度为 $(1-\eta)y_{(\tau)}$ 。

污染物散发量随时间而变,可以根据实际情况测定。本文讨论 $x_{(\tau)}$ 为以下两种函数的情况。

1) 二次多项式函数。如有害气体的少量泄放、泄漏和挥发,加工物体时污染物散发,商场内各营业时段人流产生的 CO_2 等等。此时,污染物散发量 $x_{(\tau)}$ 可表示为

$$x_{(\tau)} = a\tau^2 + b\tau + c \quad (2)$$

式中 a, b, c 为根据实际测定或实践经验确定的系数。

实际中,也有许多污染物散发量 $x_{(\tau)}$ 与 τ 呈线性关系,如排队入场或散场时段剧场或体育馆内人流产生的 CO_2 、连续式加工从第一件工件进入车间至其退出车间时段的污染物散发等。更特殊的是 $x_{(\tau)}$ 为常量,此类情况较多,不一一举例。它们都是二次多项式函数的特例。

2) 正弦函数。如某时段内,展览会人数变化、食堂进餐人数变化产生的 CO_2 散发等状况。此时有

$$x_{(\tau)} = c_0 + X_{\max} \sin \frac{\tau\pi}{n} \quad (3)$$

式中 c_0 为房间内污染物稳定散发量, g/s; $X_{\max}$ 为房间内污染物散发量变化的最大幅度, g/s; n 为正弦函数的半周期时间, s。

显然,工程设计中取污染物散发量 $x_{(\tau)}$ 最大值作为通风设计参数的方法,是上述数学模型中的特例。

$$\frac{y_{(0)} - \frac{A}{P} - \frac{c_0}{VP} + \frac{X_{\max} n\pi}{V(n^2 P^2 + \pi^2)}}{y_{(\tau)} - \frac{A}{P} - \frac{c_0}{VP} + \frac{X_{\max} n\pi}{V(n^2 P^2 + \pi^2)} \left(\cos \frac{\tau\pi}{n} - P \frac{n}{\pi} \sin \frac{\tau\pi}{n} \right)} = e^{P\tau} \quad (10)$$

式(9), (10)中 $y_{(0)}$ 为通风开始($\tau=0$)时刻房间内污染物质量浓度, g/m³。

2.2 污染物浓度函数 $y_{(\tau)}$ 的特例

$x_{(\tau)}$ 为一次函数或常数时,污染物浓度函数

由假定 1), 根据质量守恒定律,在任一微时间段 $d\tau$ 内,污染物进入房间的净质量+房间内部产生的污染物质量=房间内污染物质量增加量,即

2 模型的数学解析

2.1 房间内污染物浓度函数 $y_{(\tau)}$

将式(1)两端除以房间体积 V , 并令

$$A = \frac{L_0 y_0 + L'_0 y'_0}{V} = \left(y_0 + \frac{y'_0 L'_0}{L_0} \right) \frac{L_0}{V} \quad (4)$$

$$Q_{(\tau)} = A + \frac{x_{(\tau)}}{V} \quad (5)$$

$$P = \frac{L+L_h\eta}{V} = \left(1 + \frac{\eta L_h}{L} \right) \frac{L}{V} \quad (6)$$

A 可称为进风当量浓度。 P 为通风换气次数 L/V 与以回风量净化利用度表示的换气次数 $L_h\eta/V$ 之和,可称为除害换气次数。由前述参数分析知, A 和 P 均为常数,而 $y'_{(\tau)} = dG_{(\tau)} / (Vd\tau)$, 式(1)即可写为非齐次线性微分方程

$$y'_{(\tau)} + P y_{(\tau)} = Q_{(\tau)} \quad (7)$$

可解得

$$y_{(\tau)} = \frac{A}{P} + \frac{e^{-P\tau}}{PV} \left(\int x_{(\tau)} de^{P\tau} + C \right) \quad (8)$$

式中 C 为待定常数,与通风前房间内污染物初始浓度等边界条件有关。

式(8)即为房间内污染物浓度 $y_{(\tau)}$ 的基本公式,房间内污染物浓度 $y_{(\tau)}$ 可表示为污染物散发函数 $x_{(\tau)}$ 的函数。对前述 $x_{(\tau)}$ 的两种函数分别求解如下。

$x_{(\tau)}$ 为二次多项式函数:

$$\frac{y_{(0)} - \frac{A}{P} - \frac{\frac{2a}{P} - b + cP}{VP^2}}{y_{(\tau)} - \frac{A}{P} - \frac{aP\tau^2 + (bP - 2a)\tau + \frac{2a}{P} - b + cP}{VP^2}} = e^{P\tau} \quad (9)$$

$x_{(\tau)}$ 为正弦函数:

$$\frac{VP^2 y_{(0)} - VPA - cP + b}{VP^2 y_{(\tau)} - VPA - cP - b + bP\tau} = e^{P\tau} \quad (11)$$

$$\frac{VPy_{(0)} - VA - c}{VPy_{(\tau)} - VA - c} = e^{P\tau} \quad (12)$$

再简化,假定无回风且进风浓度均为 y_0 ,则有

$$\frac{Ly_{(0)} - Ly_0 - c + \frac{Vb}{L}}{Ly_{(\tau)} - Ly_0 - c + \frac{Vb}{L} - b\tau} = e^{\frac{L}{V}\tau} \quad (13)$$

$$\frac{Ly_{(0)} - Ly_0 - c}{Ly_{(\tau)} - Ly_0 - c} = e^{\frac{L}{V}\tau} \quad (14)$$

式(14)即为全面通风工程中常用的基本计算式^[8]。

2.3 污染物通风当量浓度 $f_{(\tau)}$

污染物通风当量浓度是指任一通风时刻,房间内进风污染物浓度与室内污染物散发量换算为通风量时浓度之和。由式(8)可写出其基本表达式为

$$f_{(\tau)} = \frac{A}{P} + \frac{e^{-P\tau}}{PV} \int x_{(\tau)} d\tau$$

由此,式(8)可写为

$$y_{(\tau)} = \frac{y_{(0)} - f_{(0)}}{e^{P\tau}} + f_{(\tau)} \quad (15)$$

$$f_{(\tau)} = \frac{A}{P} + \frac{c_0}{VP} - \frac{X_{\max} n \pi}{V(n^2 P^2 + \pi^2)} \left(\cos \frac{\tau \pi}{n} - P \frac{n}{\pi} \sin \frac{\tau \pi}{n} \right) \quad (17)$$

可见, $f_{(\tau)}$ 与 $x_{(\tau)}$ 的函数类型相同。

2.4 房间内污染物浓度曲线

从式(15)可以看出,污染物浓度函数 $y_{(\tau)}$ 是渐近线为 $y_{(\tau)}=0$ 的指数函数和污染物通风当量浓度函数 $f_{(\tau)}$ 之和,在 $y-\tau$ 坐标系上,是一条具有渐近线为 $f_{(\tau)}$ 的曲线。图 2~4 所示为常见的 $x_{(\tau)}$ 为线性函数、常数、正弦函数的污染物浓度曲线。

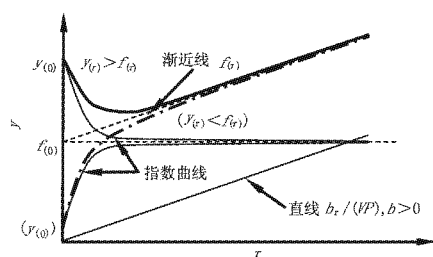


图 2 $x_{(\tau)}$ 为线性函数的浓度曲线

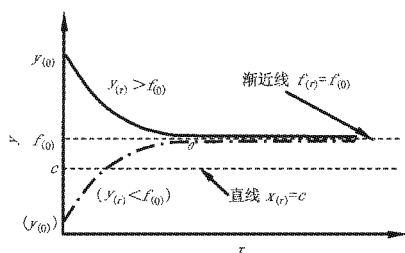


图 3 $x_{(\tau)}$ 为常数的浓度曲线

3 通风状况污染物浓度控制基础

式中 $f_{(0)}$ 和 $f_{(\tau)}$ 分别为通风初始时刻 ($\tau=0$) 和 τ 时刻的污染物通风当量浓度, g/m^3 。

分析式(15)可知,对一个既定通风过程,经过一定时间后,污染物浓度 $y_{(\tau)}$ 将非常接近污染物通风当量浓度 $f_{(\tau)}$ 。当两者的接近度达到 99% 或更大时,工程上可认为通风排害达到稳定状态,即 $y_{(\tau)} = f_{(\tau)}$;在此之前则为不稳定状态,有 $y_{(\tau)} \neq f_{(\tau)}$ 。

由此可见,污染物通风当量浓度 $f_{(\tau)}$ 反映了既定通风工况的最大排害能力。利用污染物通风当量浓度 $f_{(\tau)}$,可以使函数 $y_{(\tau)}$ 的解析和控制分析更加清晰和简便。对前述两种污染物散发函数 $x_{(\tau)}$, $f_{(\tau)}$ 的表达式分别为

$x_{(\tau)}$ 为二次多项式函数:

$$f_{(\tau)} = \frac{A}{P} + \frac{P^2 x_{(\tau)} - 2aP\tau + 2a - bP}{VP^3} \quad (16)$$

$x_{(\tau)}$ 为正弦函数:

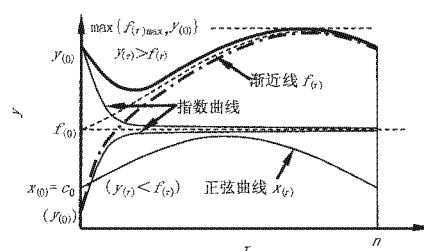


图 4 $x_{(\tau)}$ 为正弦函数的浓度曲线

3.1 通风排害机理分析

分析式(8)可以看出,当 A (进风量及其有害浓度) 增大时, $y_{(\tau)}$ 增大,而除害换气次数 P 增大时, $y_{(\tau)}$ 减小。显然,在房间体积 V 、通风前初始条件决定的常数 C 和污染物散发函数 $x_{(\tau)}$ 为既定条件下,要降低 $y_{(\tau)}$,在数学意义上关键是增大 P ,而不是增大 A 。在物理意义上,式(8)表明,进风只具有稀释污染物浓度的能力,并不具备排除能力,而排风和净化才是积极的排害和除害措施。文献[9-11]也提出了类似的看法。在工程意义上,在有人员的场所,排害的重要性与保障人员所需新风的重要性相同,在无人员的情况下,显然排风意义最大。

由式(6)可知,增加除害换气次数 P 有三种手段。其一,增大排风量 L ;其二,当 η 不为 0 时,增大回风量 L_h 或/和增加 η ,这对于封闭系统非常有

用;其三,减小房间体积 V ,这也是工程中防烟分区划分不宜过大的原理之一。

增大 P 的另一个作用是,使通风不稳定状态所需时间 τ_c 缩短,从而更快地达到稳定状态。图 5 所示为以 $f_{(0)}$ 为渐进线时,不同的 P 与 τ_c 的定性关系。显然, P 越大, τ_c 越小。

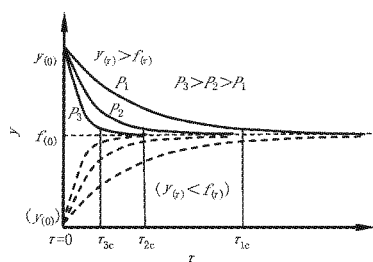


图 5 不稳定状态 P 与 τ_c 关系

3.2 理论除害换气次数

通风状态下的除害换气次数应能使任一时刻污染物浓度 $y_{(t)}$ 不大于控制浓度 y_k (y_k 为根据有关标准规定而选取的常数)。在此条件下,用 y_k 替代式(15)中的 $y_{(t)}$,即可求得理论除害换气次数 $P_{k(t)}$,它是与 $x_{(t)}$ 有关的函数。因篇幅有限,本文只给出 $x_{(t)}$ 为常数时的公式,如下

$$P_{k(t)} = \frac{AV + c}{y_k V} \quad (18)$$

显然,此时 $P_{k(t)}$ 为常数。

3.3 污染物浓度增减判别

要控制有害物浓度,判断通风状态下污染物浓度的增减是一个关键问题,也是动态模拟时必不可少的。当已知污染物散发函数 $x_{(t)}$ 时,可运用函数增减性判断原则,预先便可方便地判别。否则,就需要设置污染物浓度探测器进行检测和分析。

4 污染物浓度的实际控制过程与节能

通风工程中,污染物浓度的实际控制很难做到在任意时刻使除害换气次数随时间变化。当前推崇的做法是,使用变频器^[12-14]使可提供的换气次数与理论换气次数接近。其实,有条件时设置数台排风机,根据污染物浓度函数及其控制要求,预先输入程序开启相应数量的排风机,也能起到良好的效果。图 6 所示为污染物散发量 $x_{(t)}$ 为线性函数时,采用等差换气次数排风与采用最大换气次数(恒定风量)排风的污染物浓度变化曲线图。从两者总通风量的比较中即可简单求得理论节能比。

当然,节能运行的方法很多,并不限于上述等

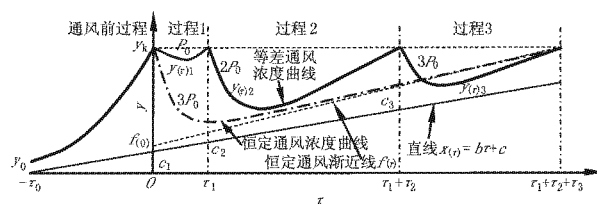


图 6 污染物浓度实际控制过程

差通风量控制过程。

5 结论

5.1 污染源散发常常具有变化特性,若能获得污染物质量散发函数,可以使通风控制污染物浓度技术得到提高。本文的数理分析模型即建立在污染物散发量为已知变化规律条件下,并考虑了回风及除害(净化)等过程,使分析模型更具有广适性。

5.2 对污染物散发量 $x_{(t)}$ 呈二次多项式和正弦函数时的解析,得到的动态通风参数解,可作为“先导式”通风计算和浓度控制的参考公式。

5.3 通过数理分析,更清晰地认识到进风并非除害的至要因素,排风和净化才是除害的核心动力。

参考文献:

- [1] 李先庭,蔡浩. 我国通风领域面临的挑战[J]. 暖通空调,2008,38(2):31-36
- [2] 鹿世化,黄虎,李奇贺. 数值模拟用于室内空气质量控制的研究进展[J]. 暖通空调,2007,37(5):40-46
- [3] 王智超,唐冬芬,胡晓明. 住宅机械通风方式的国内研究现状与发展方向[J]. 暖通空调,2005,35(8):39-43
- [4] 宋黎,柯佳雄,刘峰. 室内有毒有害气体扩散的数值模拟[J]. 暖通空调,2006,36(9):12-14
- [5] 刘东,庄江婷,丁燕. 结构抗火试验室通风状况的数值模拟及分析[J]. 暖通空调,2008,38(7):136-140
- [6] 徐新喜,韩浩,赵秀国. 气体污染物进入超压防护舱室后的运动状态数值模拟[J]. 暖通空调,2007,37(8):38-41
- [7] 刘玉峰,沈晋明. 室内空气品质预测新方法[J]. 暖通空调,2005,35(5):8-11
- [8] 孙一坚. 工业通风[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,1994
- [9] 刘国丹,张长兴,胡松涛,等. 室内空气质量影响因素实验研究[J]. 暖通空调,2006,36(2):104-107
- [10] 朱伟民,李明宝,谭洪卫,等. 造船厂焊接车间通风方式的研究[J]. 暖通空调,2008,38(2):18-21
- [11] 朱培根,朱颖心. 地铁车厢内人员新风量的研究[J]. 暖通空调,2006,36(3):75-77
- [12] 刘卫斌. 变频调速在通风系统中的应用分析[J]. 暖通空调,2007,37(1):120-122
- [13] 张冷,尹应德,黄文胜,等. 地下车库通风的变频控制研究[J]. 暖通空调,2005,35(7):113-116
- [14] 葛风华,刘翼俊,刘晔. 地下车库通风能耗分析[J]. 暖通空调,2006,36(3):98-101