

收费亭内个性化通风对抑制污染物侵入作用的数值模拟^{*}

河北工业大学 杨 华[☆]

河北省京沪高速公路管理处 任清耀

河北工业大学 刘灵芝 齐承英

摘要 针对目前国内公路收费亭内污染严重、空气质量差的特点,研究提出了采用个性化送新风至人员呼吸区以有效改善亭内工作环境的具体措施和方案。以 NO_2 作为实际多组分污染物的典型代表,运用 Airpak 软件模拟分析了不同送风方向和送风量下收费亭内及窗口处的污染物分布情况,给出了送风方向、送风量与 NO_2 浓度的关系。

关键词 个性化通风 收费亭 污染物 浓度 送风方向 送风量

Numerical simulation on suppression effect of pollutants by personalized ventilation in tollbooths

By Yang Hua[★], Ren Qingyao, Liu Lingzhi and Qi Chengying

Abstract In view of the serious pollution and the poor air quality in the tollbooth, suggests using personalized ventilation system to improve the working environment. Taking NO_2 as a representation of pollutants, simulates and analyses the concentration of NO_2 in the tollbooth and at the window under different air-supply directions or air-supply volumes with Airpak software, and gives the relationships between air-supply direction or air-supply volume and concentration of NO_2 .

Keywords personalized ventilation, tollbooth, pollutant, concentration, air-supply direction, air-supply volume

★ Hebei University of Technology, Tianjin, China

①

0 引言

收费亭是公路交通建设的主要辅助设施之一,其本身工作空间狭窄,且外围处于公路沿线环境污染严重区域,燃烧不完全的机动车尾气、道路扬尘等有毒、有害物质随时影响着亭内工作人员的健康^[1-2]。国内学者对公路交通环境空气污染状况开展了一些研究,主要集中在收费亭内外污染物特征及汽车尾气排放污染物对人体健康的影响方面^[3-5],而对于如何从根本上改善收费亭内人员的工作环境方面的研究尚鲜见报道。文献[6]提出了用强制通风保持亭内微正压来改善收费亭内环境的设想,但没有明确具体的解决措施。为此,本研究提出了采用个性化送风系统(personalized ventilation system, PVS)来有效改善收费亭内工

作环境的可行解决方案。

个性化送风是将送风口和调控器布置在工作人员附近,以便于单独和灵活控制送风的一种空调送风形式。近年来,个性化通风的应用研究主要集中在个性化风口(简称 PV)对室内温度场、速度场及人体热舒适性的影响方面^[7-12],而个性化通风与呼吸区污染物分布关系方面的研究则较少。对于公路收费亭,由于收费窗口常开,往往使得外界污染物对收费亭内的工作人员造成了最直接的危害。在个性化通风设备安装之前进行有效的气流组织

①☆ 杨华,女,1970年8月生,博士,教授,系主任
300401 天津市河北工业大学能源与环境工程学院
(022) 85845718
E-mail: y8h8@163.com
收稿日期:2008-07-03
一次修回:2008-09-03
二次修回:2009-09-03

* 河北省交通厅重点科技项目(编号:Y-060124)

仿真,预测各种工况下室内气流的温度场和速度场,可以达到优化设计的目的^[13]。同时近年来计算流体动力学在建筑环境模拟中的应用日趋广泛与成熟,并逐步成为人们认识与评价室内空气环境的重要手段与工具,数值模拟所获得的如空气流速、温度与污染物浓度等微观数据分布,是设计与控制健康舒适室内空气环境的依据^[14-16]。鉴于此,笔者对个性化送风系统如何有效抑制污染物的侵入方面开展了一定的数值模拟研究,模拟计算结果对个性化送风系统的设计与优化有参考价值。

针对公路收费亭实际情况,设计了 3 种可能的送风位置与方式,然后运用室内环境模拟的专业软件 Airpak,对不同送风方向、不同送风量各工况分别进行了模拟,以寻求获得工作人员呼吸区污染物浓度最低且无吹风感的最佳送风方案。

1 公路收费亭的物理模型

目前,国内各类公路收费亭一般都采用一种小型的封闭式筒装建筑,且绝大多数的结构与组成基本相同,只是尺寸略有不同。本文模拟的收费亭模型的尺寸为 2.23 m×1.51 m×2.35 m(长×宽×高),亭内设有一个高为 0.6 m 的办公桌和一名工作人员。为改善工作人员的办公环境,本研究开发设计了一套个性化送新风系统,同时结合收费亭实际结构特点与使用要求,将个性化送风口位置固定在亭子外围护结构的交角柱上,风口的高度与坐姿的工作人员呼吸部位相平,个性化风口选用两个中心距离为 0.085 m、直径为 0.05 m 的圆形风口,上下放置,收费亭物理模型如图 1 所示。

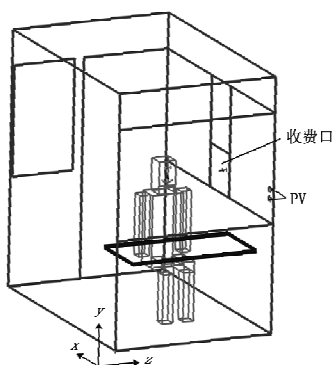


图 1 收费亭物理模型

因风口安放位置受实际收费亭结构条件所限,将有可能的送风方向分为 3 种情况进行模拟:人体右侧送风(R)、正对人体呼吸区送风(M)、人体左

侧送风(L),3 种送风方式见图 2。人员位置坐标为(0.98,0,0.9),个性化送风口中心位置坐标为(0.08,1.25,0.7),以此点作为送风方向示意线的起点,则人员附近沿送风方向流线上另一点坐标分别为 R(0.892,1.25,0.7),M(0.892,1.25,0.9),L(0.95,1.25,1.12)。

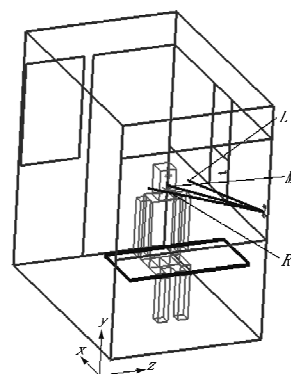


图 2 送风方向示意图

2 亭内环境模拟的数学模型

2.1 数学模型

为了获得个性化送风下收费亭内空气的流场、温度场及污染物浓度场分布情况,首先作如下简化假设:

1) 亭内空气低速流动,可视为不可压缩流体且符合 Bossinesq 假设^[17],即由压力引起的密度变化可忽略不计,而温度引起的密度变化可近似表示为式(1)的形式:

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha \Delta t) \quad (1)$$

式中 ρ_0 为流体的恒定密度; α 为热膨胀系数; Δt 为温差。

2) 除常开的收费口外,不考虑漏风影响,认为亭子气密性良好。

在上述假设下,速度、温度以及组分变量的控制方程的通用形式^[17]用式(2)表示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial\tau} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}) + S \quad (2)$$

式中 ρ 为密度; ϕ 为通用变量; τ 为时间; u, v, w 为速度矢量在 x, y 和 z 方向的分量; Γ 为广义的扩散系数; S 为广义源项。对于特定的方程, ϕ, Γ, S 具有特定的形式。表 1 给出了 3 个通量变量与特定方程的对应关系。

表 1 通用方程中各符号的具体形式

| | ϕ | Γ | S |
|------|--------|---------------|--|
| 连续方程 | 1 | 0 | 0 |
| 动量方程 | u_i | μ | $-\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i$ |
| 能量方程 | t | $\frac{K}{c}$ | S_t |
| 组分方程 | C_s | $D_s \rho$ | S_s |

表 1 中 μ 为空气动力黏度; p 为流体微元上的压力; S_i 为动量守恒方程的广义源项; t 为温度; K 为流体的传热系数; c 为比热容; S_t 为流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分, 有时简称 S_t 为黏性耗散项; C_s 为组分 S 的体积浓度; D_s 为该组分的扩散系数; S_s 为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量, 即生产率。

由于实际空气是黏性流体, 为湍流流动, 选择平均湍流能量模型 $K-\epsilon$ 双方程湍流模型来计算室内流场。

2.2 边界条件

考虑到收费亭外围护结构一般由保温效果较好的材料制成, 因此壁面边界条件按照绝热边界条件处理; 个性化送风口处的边界条件定义为速度入口; 因收费窗口与外界大气保持常相通状态, 故该边界定义为压力出口, 其相对压差设为 0。

2.3 污染物设置与处理

汽车尾气排放的主要污染物为一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物、硫化物、铅、苯及一些悬浮颗粒物, 其中氮氧化物又是二氧化氮(含量较大)、一氧化氮等多种氮氧化物的混合物, 它们都会对人体产生严重危害, 且其含量往往远超过空气质量标准限值。为方便计算, 选取 NO_2 为各类污染物的典型代表, 模拟研究其浓度分布规律, 对于其他污染物的分布规律可以类推得出。

根据相关实测数据^[4], 模拟设定收费窗口处

NO_2 质量浓度(即亭外空气中 NO_2 质量浓度)为 2.16 mg/m^3 , 质量分数相当于 1.67×10^{-6} 。

2.4 数值求解方法

对上述数学模型应用 Airpak 软件进行计算, 采用控制容积法对控制方程组进行离散, 用 SIMPLE 算法进行求解。对收费亭内空间离散采用六面体网格, 并在温度、速度梯度较大的个性化送风口处, 对网格进行局部加密细化。收敛条件是: 流动方程相对误差 1×10^{-3} , 能量方程相对误差 1×10^{-6} 。

3 结果分析与讨论

3.1 模型验证

为对所建模型有效性进行验证, 首先对应用个性化通风系统的模拟收费亭内环境进行了测试, 同时, 又应用上述模型并结合所测各边界数据, 对该工况下亭内空气的温度场、流场进行了模拟计算。该实验工况为: 新风口距离人 60 cm, 位于电脑的左侧, 新风出风温度为 21°C , 新风量为 $45 \text{ m}^3/\text{h}$; 亭内还设有一背景空调, 送风温度为 25°C 。收费亭内几个典型位置点实验测试结果与模拟计算结果的对比见表 1。由表 1 可见, 实验结果和模拟计算结果相差不大, 因此可以认为本文所用的数值模拟方法及模型是正确的。

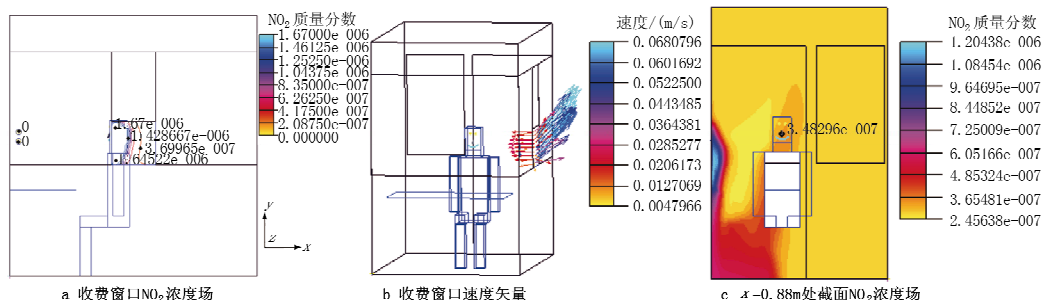
表 1 模拟结果与实验结果的对比

| 对比点位置 | 温度/ $^\circ\text{C}$ | | 速度/(m/s) | |
|--------|----------------------|----------|---------------------|---------|
| | 实验测试 | 模拟计算 | 实验测试 | 模拟计算 |
| 收费窗口中心 | 25.0 | 25.520 6 | 0.58 | 0.684 8 |
| 头顶中心 | 25.4 | 25.809 1 | 0.19 | 0.157 6 |
| 呼吸区中心 | 25.7 | 25.844 9 | 0.13 | 0.160 0 |
| 人手部位 | 26.0 | 25.987 9 | 0.20 | 0.245 0 |
| 人脚部位 | 25.9 | 25.649 9 | 0 | 0 |

3.2 结果分析

3.2.1 窗口及呼吸区截面 NO_2 浓度

当个性化送风速度为 1 m/s 时, 3 种送风方向下的模拟结果如图 3~5 所示。其中 $x=0.88 \text{ m}$ 截面为经过人员呼吸区且紧贴人面部的一个截面。

图 3 风速 1 m/s (风量 $14 \text{ m}^3/\text{h}$)向人体右侧送风模拟结果

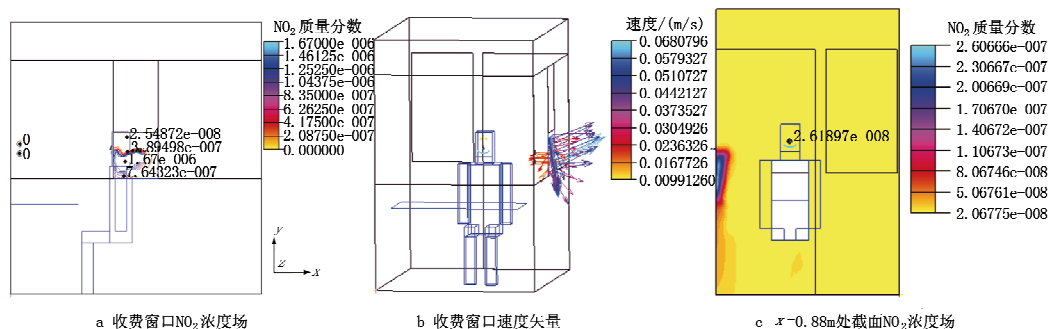


图4 风速 1 m/s(风量 14 m³/h)正对人体送风模拟结果

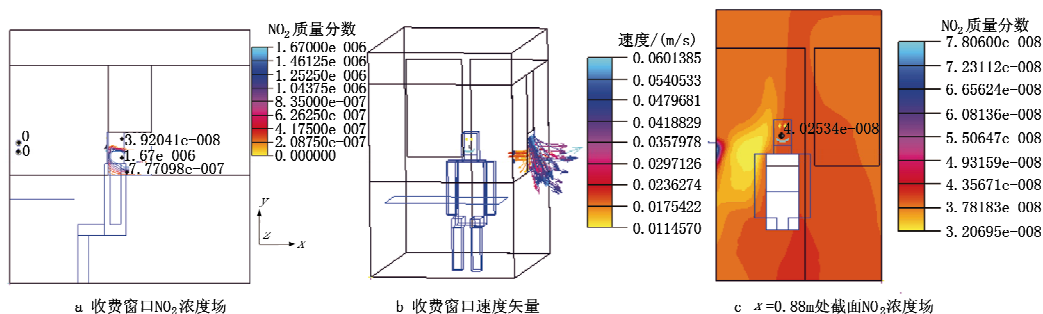


图5 风速 1 m/s(风量 14 m³/h)向人体左侧送风模拟结果

由图 3~5 可以看出,由于内外压差作用,收费窗口会有大量的 NO_2 进入,窗口处 NO_2 进入的位置与送风方向有一定的关系。当 PV 向人体左侧送风及正对人体呼吸区送风时,污染物偏向收费口的中下部进入,而当 PV 向人体右侧送风时, NO_2 则偏向收费口的前部进入收费亭。其中向人体左侧送风时, NO_2 流通面积占窗口面积较另外 2 种方式小。3 种送风方式下,在工作人员口鼻部位(设为 B 点(0.88,1.25,0.9)) NO_2 的浓度也不相同,正对呼吸区送风时浓度最小,左侧送风次之,而右侧送风 NO_2 浓度明显高出另外 2 种送风方式。

由改变送风速度进行的模拟计算可知,左侧送风和正对人体送风时,由收费窗口进入的 NO_2 量会明显随着个性化送风速度的提高而逐渐减小,且

左侧送风减小的程度更大些;相对而言,人体右侧送风时收费口处 NO_2 进出量的变化则不明显。

3.2.2 抑制窗口处 NO_2 侵入的最小送风速度

图 6~8 是送风速度 1.7 m/s、不同送风方向下收费口处 NO_2 的质量分数与速度模拟结果。从图 6~8 可看出,左侧送风时,收费口几乎没有 NO_2 进入,右侧送风仍明显存在部分面积的窗口有 NO_2 进入;由于风量的加大,PV 可以使风直接吹到工作人员的呼吸区,使 NO_2 在 $x=0.88$ m 截面上有一个明显的浓度较低的区域;3 种送风方式下随送风量的增加 B 点的 NO_2 浓度均有所降低,但右侧送风仍达不到室内空气质量三级标准中所要求的 9.3×10^{-8} 。此外,对于左侧送风而言,由图 8a 可以看出,窗口处进入亭内的 NO_2 最大浓度

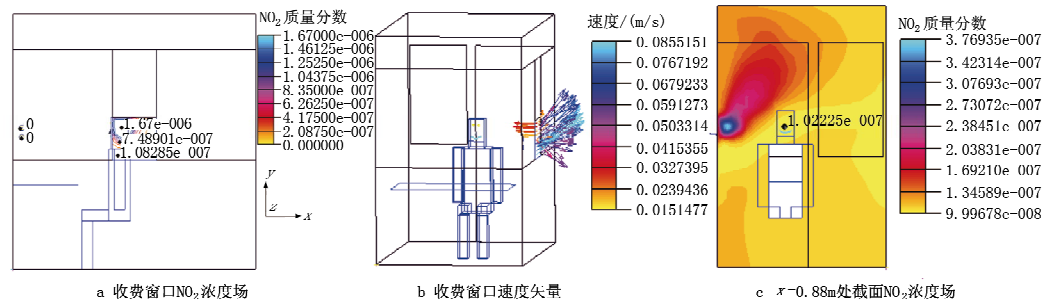


图6 风速 1.7 m/s(风量 24 m³/h)向人体右侧送风模拟结果

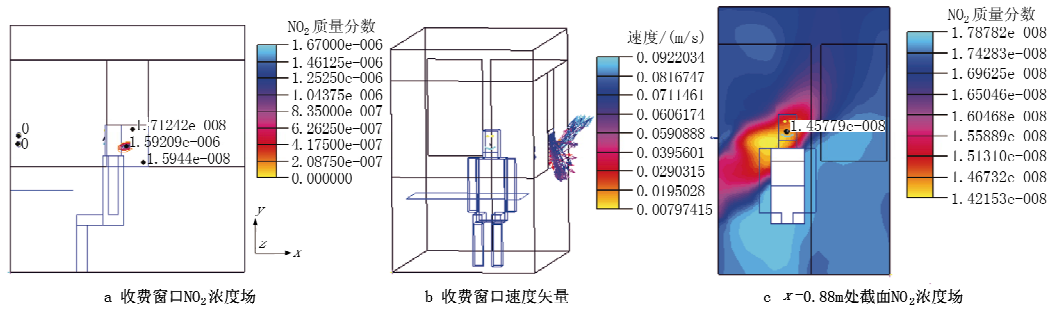


图 7 风速 1.7 m/s(风量 24 m³/h)正对人体送风模拟结果

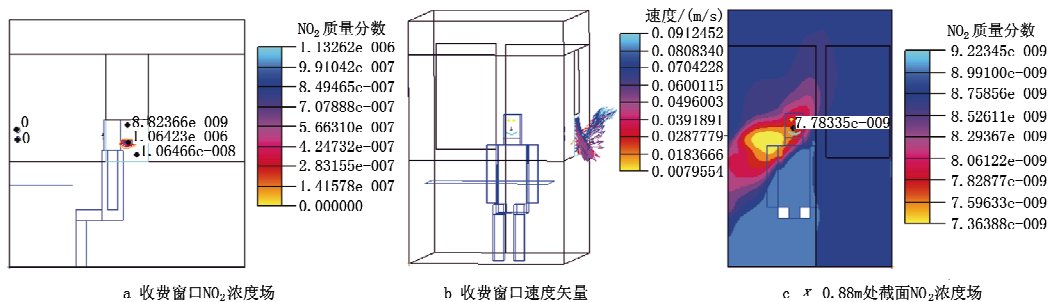


图 8 风速 1.7 m/s(风量 24 m³/h)向人体左侧送风模拟结果

已由初始设定的 1.6700×10^{-6} 降到了 1.13262×10^{-6} , 图 8b 表明此时窗口处速度矢量方向全部指向亭外, 这些数据共同证明了此时窗口处的流态达到了一种不再有 NO_2 侵入的临界状态。即当左侧送风风速只要大于 1.7 m/s, 就能够完全抑制 NO_2

通过收费口进入亭内。

同样, 通过进一步模拟找出了正对人体送风和向人体右侧送风时, 达到没有 NO_2 由窗口侵入时的临界状态的送风速度与风量, 结果如图 9, 10 所示。正对人体送风所需要的最小风速为 1.71 m/s,

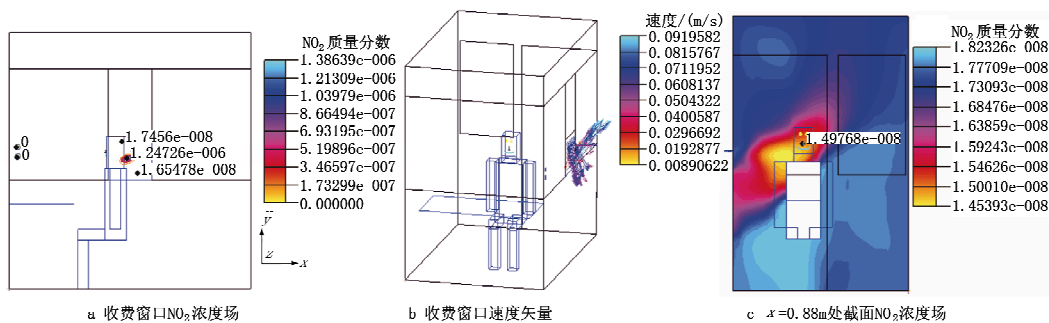


图 9 风速 1.71 m/s(风量 24 m³/h)正对人体送风模拟结果

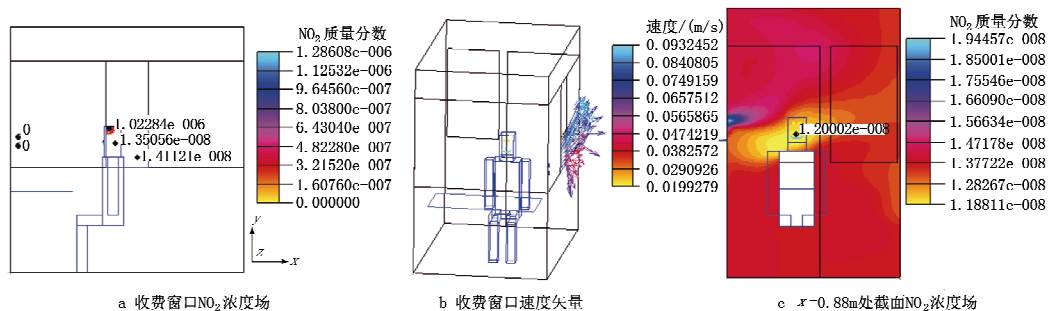


图 10 风速 1.9 m/s(风量 27 m³/h)向人体右侧送风模拟结果

而对于右侧送风而言则必须达到 1.9 m/s 时才能实现。由此可见,为控制外界 NO_2 的侵入,右侧送风需要耗费更多的能量。

3.2.3 人员呼吸区内 NO_2 浓度、空气龄及舒适性研究

考虑到工作人员在收费亭内的位置基本保持不变的特点,在人的头部四周取了一个 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 区域定为人员可能涉及到的较为敏感的呼吸区,图 11 定量地给出了各种送风方式、不同送风量下呼吸区的 NO_2 质量分数(横坐标含义为:送风方向-送风速度,如右-1 表示向人体右侧送风、送风速度为 1 m/s)。由图 11 可以看出,左侧送风和正对人体送风即使在 1 m/s 的条件下,呼吸区 NO_2 浓度也都没有超过环境空气质量三级标准,而右侧送风送风速度达到 1.7 m/s 时,呼吸区的污染物浓度依然较高且超标。

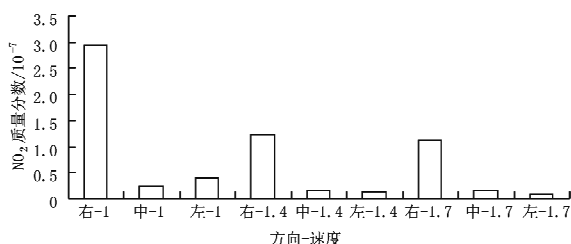


图 11 不同送风方向与风速下呼吸区的 NO_2 质量分数

图 12 为不同送风方式下的平均空气龄模拟结果。空气龄指空气质点从进入房间起至达到某点所需经历的时间^[18]。局部平均空气龄指同时达到某点所有空气质点的平均空气龄。洁净新风质点在室内运动时,沿途吸收污染物。所以局部平均空气龄越短,空气吸收污染物机会越少,空气越新鲜,换气效率越高。由图 12 可以看出,随着送风速度的增大,呼吸区的空气龄逐渐减小;就左侧送风和正对人体送风而言,无论是在何种风速下,正对人体送风时呼吸区的空气龄都低于左侧送风的空气龄。

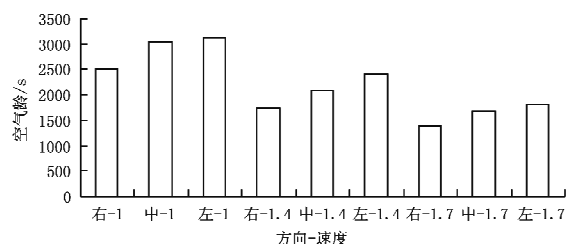


图 12 不同送风方向与风速下呼吸区空气龄

图 13 给出了不同送风方向与送风速度下,呼

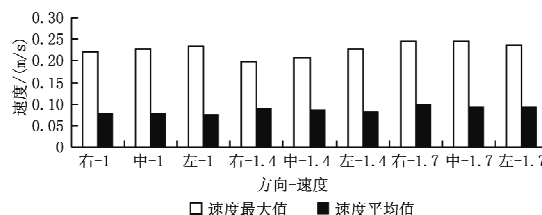


图 13 不同送风方向与风速下呼吸区的风速

吸区内可能的最大风速和平均风速值。显然,随着个性化送风量的增加,呼吸区的平均风速也随之增大,但对于呼吸区域的最大风速而言,没有呈现出这种规律性。其中正对呼吸区送风,即使达到了能有效抑制污染物进入的临界送风状态(即送风速度达 1.7 m/s),也可以保证呼吸区内风速不高于 0.25 m/s 的舒适性要求。

目前个性化通风中的舒适性调查多是通过热舒适投票和热感觉投票进行的,均为主观实验,没有类似预测平均投票指标的定量化描述。但大量的研究发现,不同部位的局部热感觉对全身热感觉影响的权重不同,一般头颈部的权重最大,上半身(包括胸部和腹部)次之,下半身最小^[7]。因此本系统设计时利用这种影响,通过将个性化送风直接吹向人的呼吸区,来改善人的头部以至上半身的舒适性,并可通过调节送风温度及送风方向来满足不同的舒适要求。

4 结论

4.1 针对目前公路收费亭内空气污染严重、收费人员工作环境恶劣的现状,提出了采用个性化送新风来改善亭内环境的有效解决措施,并对不同送风方向与送风速度作用下的亭内环境开展了模拟研究工作。

4.2 由研究结果可以得出,对所模拟的收费亭而言,当正对人体呼吸区送风或向人体左侧送风时,送风速度需达到 1.71 m/s 或 1.7 m/s 时,亭内所形成的微正压即能够完全抑制 NO_2 通过收费窗口进入亭内;而向人体右侧送风时,只有速度达到 1.9 m/s 时才能够完全抑制污染物的侵入,显然此时耗能也会随之增大。右侧送风方式下呼吸区的空气龄较低,但其呼吸区 NO_2 浓度要明显高于另外两种送风方式。不同送风方式下呼吸区的最大风速没有呈现出规律性,但在风速不超过 1.7 m/s 的情况下都没有吹风感。

4.3 针对所研究的收费亭模型,综合考虑呼吸区的 NO_2 浓度、空气龄及舒适性等方面,可以得出正

对人体呼吸区的送风方式最佳的结论。

参考文献:

- [1] Mao B H, Chert H B. Sustainability analysis of Chinese transport policy [J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2001, 8(4):323-336
- [2] Fakayode S O, Olu-Owolabi B I. Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osogbo, Nigeria; its relationship to traffic density and proximity to highways [J]. Environmental Geology, 2003, 44(2):150-157
- [3] 陈克军, 陈克亮, 张兰军, 等. 公路收费亭内外空气污染特征及其影响因素 [J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1848-1853
- [4] 黄财林, 洪惠民, 林嫣, 等. 道路收费站作业环境因素检测与评价 [J]. 中国职业医学, 1999, 26(5):20-22
- [5] 黄振依, 潘金城, 吴银娇, 等. 路桥收费站室内空气污染对人体健康影响的调查 [J]. 职业卫生与应急救援, 2006, 24(1):43-44
- [6] 李全, 崔晓东. 高速公路的发展与交通建筑的物理环境 [J]. 经济师, 1999, 14(5):46-47
- [7] 李俊, 孙淑凤, 狄洪发, 等. 稳态条件下人体对个体送风的热反应研究 [J]. 暖通空调, 2004, 34(12):1-6
- [8] 郑国忠, 荆有印. CMP 桌面工位空调的气流组织与微环境评价 [J]. 制冷与空调, 2006, 6(3):33-37
- [9] 端木琳, 舒海文, 杜国付. 工位空调送风气流微环境评价 [J]. 暖通空调, 2004, 34(12):7-9
- [10] 端木琳, 舒海文, 王宗山, 等. 桌面工位空调环境参数分布特性 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2007, 23(2):306-309
- [11] 端木琳, 沈胜强, 孙宇明. 个性化通风系统的热舒适性分析 [J]. 暖通空调, 2007, 37(2):31-37
- [12] 杨建荣, 李先庭, Melikov A. 个性化送风微环境的实验测试研究 [J]. 暖通空调, 2004, 34(9):87-90
- [13] 陶文铨. 计算传热学的近代进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [14] Awbi H B. Application of computational fluid dynamics in room ventilation [J]. Building and Environment, 1989, 24(1):73-84
- [15] Gan G. Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics [J]. Energy and Buildings, 1995, 23(2):83-93
- [16] Spengler J D, Chen Q. Indoor air quality factors in designing a healthy building [J]. Annual Review of Energy and Environment, 2000, 25(1):567-601
- [17] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- [18] 陈焕新, 胡益熊, 陈宁, 等. 改善空调列车车内空气品质的途径 [J]. 铁道车辆, 1998, 36(8):37-38

· 征订 ·

欢迎订阅 2010 年《给水排水》(月刊)

中文核心期刊 建设部优秀期刊 中国科技论文统计源期刊 中国科学引文数据库(CSCD)核心库期刊

《给水排水》创刊于 1964 年, 是国内创刊最早、发行量最大、内容涵盖最广的水行业综合性权威期刊, 在业内享有盛誉, 被誉为“水行业百科全书”。《给水排水》刊发的论文多次在中国科学技术协会、中国土木工程学会组织的科技论文评选活动中获奖, 成为给排水行业唯一获此殊荣的期刊。《给水排水》由中华人民共和国住房和城乡建设部主管, 亚太建设科技信息研究院(建设部科技信息研究所)、中国建筑设计研究院、中国土木工程学会主办。

报道内容 《给水排水》设有水业导航, 城镇给排水, 工业给排水, 建筑给排水, 施工、材料与设备, 管网设计与运行, 计算机技术, 标准规范交流园地等固定栏目和策略研讨, 科技信息综述等机动栏目。《给水排水》始终坚持“以实用、新颖为主, 交流、导向兼顾, 提高、普及结合”的办刊方针。2009 年, 《给水排水》重点报道了给水厂、污水处理厂改造工程, 节能减排工程和北京奥运会场馆、上海青草沙水源地原水工程、上海世博会园区及场馆工程等重大项目, 并约请有关领导及业内专家撰写了行业政策和极具技术前瞻性的文章作为“水业导航”栏目专稿; 同时深入报道了城镇供水应急处理及预防措施, 给水厂、污水处理厂及管

网完全、高效运行管理经验, 膜技术研究及应用实例。2010 年《给水排水》将在保持原有特色基础上, 加强对行业热点问题的报道, 并继续深化“水业导航”栏目的导向作用, 围绕保障城乡安全供水、提标改造实际运行情况等, 加大对新技术、新工艺、新材料的报道力度。

适读人群 建筑设计院、市政设计院、工业设计院、自来水公司、排水公司、水务管理部门、科研院所、高校、建筑安装单位、房地产开发企业、设备制造厂家以及相关单位的工程技术人员、运行管理人员、研究人员。

发行与邮购 《给水排水》为月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 国内外公开发刊。国内邮发代号: 2-757, 国外发行代号: M4425。每册定价: 12.00 元, 全年定价: 144.00 元。全国各地邮局均可订阅, 错过邮局订阅的读者, 可直接在我刊发行部订阅。

地址: 北京市西外车公庄大街 19 号

邮编: 100044

发行部电话: (010)68305036/68302904(传真)

编辑部电话: (010)68302907/68362263

E-mail: gsps@vip.163.com

网址: www.wwe1964.com