

# 综合交通枢纽中半封闭公交换乘站的空气质量

李炎锋, 赵 梦, 林欣欣

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 为了提高城市交通系统内部环境空气质量,以北京某综合交通枢纽的半封闭公交换乘站为研究对象,选取CO为主要污染物,通过对枢纽内不同时期的通风系统、车流、人流量及空气质量进行现场调研,以实测数据为边界条件,运用大涡模拟技术对不用通风运行模式下交通客流高峰期和低谷期枢纽内0.8 m和1.6 m高度处的空气质量进行分析. 研究表明:除了车辆尾部区域相同位置在上班高峰时期的 $\rho(\text{CO})$ 是低谷期的2倍;在通风系统不运行情况下,枢纽内空气质量在5~10 min会达到对人体有害的程度. 为达到室内空气质量相关标准要求,枢纽内通风系统必须在高峰期连续运行而低谷期可以采取间歇运行的方式.

**关键词:** 公交换乘站; 空气质量; 大涡模拟; 通风

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2015)01-0083-06

doi: 10.11936/bjutxb2014060072

## Air Quality in a Semi-enclosed Public Transport Interchange Station in a Comprehensive Transit Hub

LI Yan-feng, ZHAO Meng, LIN Xin-xin

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to improve the indoor air quality of city transport system, the authors had selected a public transport interchange station in a comprehensive transit hub as a research object. Carbon monoxide was selected as the main pollutant for description of air quality. Ventilation systems, bus traffic and passenger flow, air quality had been investigated by on-site survey. Large eddy simulation technology had been used to analyze indoor air quality of public transport interchange station. The boundary conditions were determined according to the measured date. Indoor air quality results at heights of 0.8 m and 1.6 m under different time periods and operating conditions of public transport interchange station were calculated. Time periods include the peak hour and trough hour. Results have shown that carbon monoxide concentration in peak hour is about twice than that in trough hour in most area except the rear area of the vehicle. Air quality would reach the harmful degree within 5 to 10 minutes if the ventilation system is not operating. The ventilation system should be operated during the peak hour and intermittent operation mode can be adopted during trough hour in order to meet the requirement of air quality standards.

**Key words:** public transport interchange station; air quality; large eddy simulation; ventilation

随着城市交通体系的发展,地铁与公交枢纽实现换乘越来越普遍. 其中,部分公交枢纽由于要与

收稿日期: 2014-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378040)

作者简介: 李炎锋(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事基于建筑节能以及室内空气质量的楼宇控制技术方面的研究, E-mail: liyanfeng@bjut.edu.cn

地铁相通设计为半地下或者半封闭空间。这类公交枢纽的主要特点包括:1) 与外界基本上处于隔离状态,停放在其内部的汽车排放出有害废气容易引起空气质量问题;2) 在交通高峰期和低谷期枢纽内人流密度和车流密度变化大;3) 虽然安装有机械通风系统,但是考虑经济因素和枢纽内温度,实际情况是,冬季通风系统基本上没有正常运行;4) 公交车流和人流密度远远大于普通地下车库,简单按照地下车库相关规范进行通风设计有局限性。

对公交枢纽内空气环境质量的衡量和评价标准有舒适度标准和卫生标准。一般情况下,行人通常在公交枢纽中活动和停留的时间不长,具有相对于广泛意义上室内环境污染<sup>[1]</sup>的特殊性,因其 $\text{NO}_x$ 的水平一般可以满足环境要求<sup>[2]</sup>,故多以 $\text{CO}$ 质量浓度分布为参考标准<sup>[3]</sup>,即以 $\rho(\text{CO})$  5 min最大允许值 $115.0 \text{ mg/m}^3$ 、1 h最大允许值 $30.0 \text{ mg/m}^3$ 作为空气质量的参考标准。

关于公交车站相关的空气质量研究,龙连芳等<sup>[4]</sup>开展广州市区工作日和非工作日公交车站 $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{CO}$ 暴露水平研究;薛佳平等<sup>[5]</sup>开展杭州市机动车 $\text{NO}_x$ 排放清单的建立及其对空气质量的影响。香港学者<sup>[6]</sup>对一个地上多层公交终点站的通风方式进行分析,提出了通风模式对空气质量的影响。研究表明,地下车库、公交枢纽内部不同高度的 $\rho(\text{CO})$ 并不相同,简单按照质量守恒计算整个区域内污染物质量浓度平均值不能全面判断通风系统效果,需重点关注影响行人呼吸高度上的 $\rho(\text{CO})$ 是否符合相关卫生标准<sup>[7]</sup>。

本文选择北京某半地下公交枢纽(与地铁换乘站相连)为研究对象,对冬季枢纽内空气质量进行现场测试和模拟。考虑到:1) 冬季室内外温差大,为了保证枢纽内温度,通风系统实际基本不运行;2) 由于室外寒冷,枢纽人流密度会大于夏季。因此,冬季的室内空气质量的分析结果对运行要求更有指导意义。在不同时段(工作日高峰期、工作日非高峰期)对枢纽内人流量、车辆和 $\rho(\text{CO})$ 进行现场测试,获得空气质量分析的数据。在实测数据基础上,建立交通枢纽空气流动模型,对不同时段行人交通运行状况对 $\rho(\text{CO})$ 分布进行数值模拟,从而对公交枢纽室内环境的空气质量安全进行评价。

## 1 公交枢纽模型场景及计算设置

### 1.1 物理模型

选择北京某综合交通枢纽的公交枢纽为研究对

象,计算模型如图1所示。该枢纽南北方向 $154 \text{ m}$ ,东西方向 $166 \text{ m}$ ,占地面积共 $2.5564 \text{ 万 m}^2$ ,单层结构,层高 $7.3 \text{ m}$ ,公交枢纽内包括附属用房及设备间等,公交枢纽总共5个出入口,其中出口1与地铁车站的出口相连。除1个公交紧急出入口外,主要有1个公交出入口(出口4)和1个公交、人流共用出入口(出口3),其余均为人流出入口和连通通道(出口1、2)。

枢纽通风主要采用柱底送风即下送风,平时柱底排风与上排风相结合,火灾情况下上排烟,风机为双速风机,送排风量为 $4.7005 \sim 8.9879 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ ,平时低速运行,枢纽总排风量为 $89.3095 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 。下送风口与下排风口尺寸均为 $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,安装高度为下底距地面 $0.3 \text{ m}$ ,上排风兼排风口尺寸为 $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,安装高度为 $7 \text{ m}$ 。通风系统设置送风机14台,排风机19台,其中用于上部排烟兼平时排风的排风机有11台。

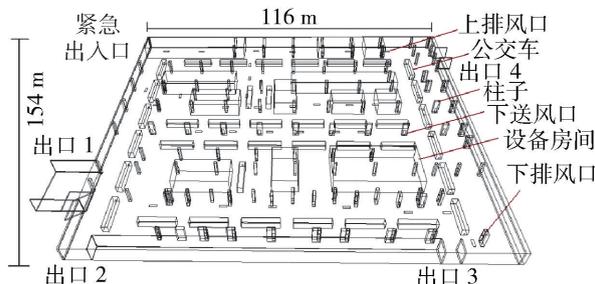


图1 公交换乘站计算模型示意图

Fig. 1 Schematic view of the calculated public transport interchange station

### 1.2 描述污染物运动的数学模型

研究枢纽内空气质量,可以采取以下假设<sup>[6]</sup>:

- 1) 室内气体为理想气体,而且 $\text{CO}$ 源释放污染物恒定;
- 2) 公交枢纽内除汽车排放的尾气外无其他热源,四周围护结构绝热。

枢纽内的气流流动为非稳态的三维湍流流动,描述空气流动的控制方程为<sup>[8]</sup>

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

气体成分守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}'_i \quad (2)$$

动量守恒方程

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_l \nabla \cdot h_l \rho D_l \nabla Y_l \quad (4)$$

理想气体方程

$$p_0 = \rho TR \sum (Y_i/M_i) = \rho TR/M \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为密度, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $\mathbf{u}$ 为速度矢量, $\text{m}/\text{s}$ ; $Y_l$ 为第 $l$ 种组分的质量分数; $D_l$ 为第 $l$ 种组分的质量扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ; $\dot{m}'_i$ 为单位体积内第 $i$ 种组分质量生成速率, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $p$ 为压力; $h_l$ 为第 $l$ 种组分的焓值, $\text{kJ}$ ; $\mathbf{f}$ 为除重力外的外力矢量, $\text{N}$ ; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏滞应力张量, $\text{N}/\text{m}^2$ ; $p$ 为压力, $\text{Pa}$ ; $p_0$ 为背景压力, $\text{Pa}$ ; $T$ 为温度, $\text{K}$ ; $t$ 为时间, $\text{s}$ ; $R$ 为通用气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; $M_i$ 为混合物中第 $i$ 种成分的分子质量, $\text{kg}/\text{mol}$ ; $M$ 为混合气体平均分子质量, $\text{kg}/\text{mol}$ ; $\mathbf{q}_r$ 为辐射热流向量, $\text{W}/\text{m}^2$ ; $k$ 为热传导系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ; $\mathbf{g}$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ .

### 1.3 数值模拟方法及条件设置

选择美国国家标准与技术研究院开发的数值软件 FDS5.0 (fire dynamic simulator 的简称) 为模拟平台. 它采用 Smagorinsky 形式的大涡模拟 (LES) 计算方法, 主要求解低马赫数的浮力驱动流方程湍流场. 该软件计算建筑火灾结果的准确性已得到了大量的实验验证<sup>[9]</sup>. 采用 Smagorinsky 模型求解小涡模型, 该模型基于混合长度假设, 认为涡黏性正比于亚格子的特征长度  $\Delta$  和特征湍流速度. 采用 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 数确定时间步长和判断方程是否收敛, 该方法通过改变计算时间步长, 控制数值模拟计算的 CFL 数小于某临界值. 根据涡黏性亚格子模型 Smagorinsky 模型整合, 计算过程中空间差分采用二阶中心差分离散, 时间的推进采用显示预估-校正格式对方程进行离散化.

### 1.4 边界条件及源项设定

枢纽出入口边界条件包括出入口的风速、温度和  $\rho(\text{CO})$ . 测试时间为 2012 年 1 月 11 日, 选择冬季进行测量的原因是, 枢纽内通风系统在冬季寒冷时段基本上不运行以维持枢纽内的温度保持在  $5^\circ\text{C}$  左右, 但需要检测内部空气质量是否符合标准.

通过在出入口现场录像统计 1 h 内进出车辆数发现, 车站人流和车流高峰期出现在工作日 8:00—9:00, 低谷时期大约在 10:00—11:00, 晚高峰出现在 17:00—18:00. 因此测试时间定在 3 个时间段内, 测试时间为 30 min. 温度和  $\rho(\text{CO})$  测试采用 TSI8762 型空气质量测试仪, 风速采用 TSI9565 型风速仪.

在枢纽每个出入口布置 6 个采样点. 由于各出入口处  $\rho(\text{CO})$  测量值均低于  $1.0 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 因此, 出入口气流假设  $\rho(\text{CO})$  为  $0 \text{ mg}/\text{m}^3$ . 表 1 给出了枢纽出入口温度和风速的测试结果.

表 1 高峰期出入口边界条件测试结果

Table 1 On site test results at portals in peak hours

| 测试位置           | 高峰期      |   | 低谷期      |   |
|----------------|----------|---|----------|---|
|                | 温度/<br>℃ | 风速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 温度/<br>℃ | 风速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
| 出口 1<br>(地下广场) | 1.1      | 0.20                                      | 1.5      | 0.00                                      |
| 出口 2           | -2.5     | 0.35                                      | -2.5     | 0.20                                      |
| 出口 3           | -2.3     | 0.36                                      | -2.2     | 0.30                                      |
| 出口 4(车)        | -2.0     | -0.31                                     | -1.8     | -0.04                                     |
| 出口 5(车)        | -2.1     | -0.20                                     | -1.8     | -0.45                                     |

注: 风速为负值表示风速吹向公交枢纽外部.

虽然公交车在枢纽内是空转, 但在模拟过程中为了简化分析, 按高峰期和低谷期公交车数目设置固定源(热源和污染物产生源), 分布见图 2.

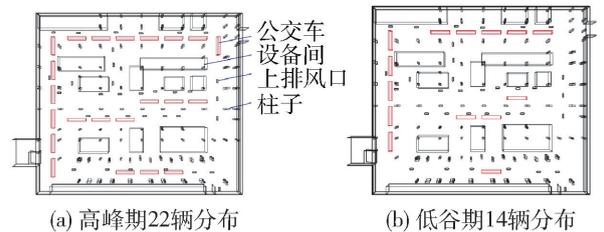


图 2 枢纽内部公交车位置分布示意图

Fig. 2 Schematic view of bus positions in public transport interchange station

由于汽车排出尾气的同时伴随放热, 模拟中将汽车尾气管简化为一个发生化学反应(产物为  $\text{CO}$ ) 且释放低功率的火源.

为了真实地模拟各个工况时枢纽内  $\text{CO}$  的分布情况, 采用文献[10]提供的方法确定公交车的释放因子, 即公交运行期间  $\text{CO}$  释放因子是  $8.66 \text{ g}/\text{km}$ , 空转期间是  $2.0 \text{ g}/\text{min}$ . 根据实际调研, 每辆公交车在枢纽内平均空转(停车不熄火)  $10 \text{ min}$  和运行  $400 \text{ m}$ , 每辆公交车在枢纽内释放的  $\text{CO}$  质量为

$$m(\text{CO}) = 8.66 \text{ g}/\text{km} \times 400 \text{ m}/1000 + 10 \text{ min} \times 2.0 \text{ g}/\text{min} = 23.464 \text{ g}$$

忽略运行时间, 按停留时间为  $10 \text{ min}$ , 每台车辆在枢纽内  $\text{CO}$  平均产生率为  $0.039 \text{ g}/\text{s}$ .

在设定  $\text{CO}$  释放源时假定 C 燃烧产生  $\text{CO}$ , 该工

况下的化学反应热释放率为  $\Delta H = 9.2 \text{ kJ/g}$ 。将公交车尾气排气管简化为  $0.02 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}$  的热源,为了产生  $23.464 \text{ g}$  的  $\text{CO}$ ,热源表面热释放率为

$$\frac{0.0391 \text{ g/s} \times 9.2 \text{ kJ/g}}{0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}} = 8.993 \text{ kW/m}^2$$

将 FDS 中的 burner 表面火源功率设定为  $8.993 \text{ kW/m}^2$ 。在室外大气温度为  $273 \text{ K}$  条件下,实测车辆尾气排气温度的为  $350 \text{ K}$ 。因此将温度设定为  $350 \text{ K}$ ,燃烧产物参数设定为  $Y_{\text{CO}} = 1.0, Y_{\text{S}} = 0.0$ 。模拟中将每辆汽车简化为一个  $12 \text{ m} \times 4.3 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  模块,将面热源贴到其尾部表面,这样通过参数设置, FDS 软件可以模拟出 1 辆公交车排气管处的  $\text{CO}$  释放量和温度。

将枢纽中的停留候车人员简化设置为体积热源,每人散热功率按  $90 \text{ W}$  考虑。为了简化分析,在 5 个候车区设 5 个总热源来表示候车人员。本文主要是研究  $\rho(\text{CO})$  的分布,热源的体积变化对  $\rho(\text{CO})$  的结果影响不大。

忽略与外界接触部分枢纽壁面的向外散热。墙面和近地面边界条件采用无滑移边界条件。

在研究中公交枢纽送排风机分为开启和不开启 2 种状态,数据依据实际运行策略设置:当风机开启时送风方式为下送风,排风采用  $1/3$  下排风,  $2/3$  上排风的排风方式,下送风口风速  $2 \text{ m/s}$ ,下排风口风速  $1.5 \text{ m/s}$ ,上排风口风速  $2 \text{ m/s}$ ;当风机不开启时,风速均为  $0 \text{ m/s}$ 。

枢纽空间的长和宽超过  $150 \text{ m}$ ,而单个送风口或者排风口面积只有  $3 \text{ m}^2$  左右,为了真实地模拟  $\text{CO}$  释放源,将释放源设置在汽车尾部,大小  $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ 。在进行网格划分时,为优化计算速度,计算区域总体分为 3 个部分:由于下送排风口及  $\text{CO}$  释放源均位于  $0 \sim 3 \text{ m}$  空间,上排风口位于  $6 \sim 7 \text{ m}$  空间,这 2 个区域流场变化大,故均采用  $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$  大小的网格,其余区域采用  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  大小的网格,总数量为 210 万网格。计算区域网格数量已经通过网格独立性的验证<sup>[11]</sup>。

### 1.5 模拟场景的设置

采用在各个枢纽出入口进行录像统计 1 h 内步行进出的客流数目,加上进出车辆载客数(按满载进行考虑)。在 1 h 内,通过对进出枢纽以及枢纽内停靠的车辆数目进行统计分析发现,车站人流和车流高峰期出现在工作日上午  $8:00 \sim 9:00$ ,平均有 22 辆车在枢纽内运行。低谷时期大约在上午  $10:00 \sim 11:00$ ,平均 14 辆车在枢纽内运行。

模拟场景分为 4 个。场景 1:车流密度在高峰期,风机不开启;场景 2:车流密度在高峰期,风机开启;场景 3:低谷期,风机不开启;场景 4:低谷期,风机开启。

## 2 计算结果分析与讨论

由于现场测试时枢纽内通风系统均未开启,只能通过数值模拟手段分析开启风机状态(场景 2 和 4)枢纽内  $\rho(\text{CO})$  分布变化,为枢纽通风系统运行方案提供指导。

根据《室内空气质量标准》(GB/T18883—2002)中室内空气采样布点的要求,在枢纽内部布置 10 个采样点,重点考虑枢纽内成人呼吸高度处 ( $1.6 \text{ m}$ ) 和儿童呼吸高度处 ( $0.8 \text{ m}$ )  $\rho(\text{CO})$  分布情况。测试仪器是 TSI 8762 空气质量测试仪,量程  $0 \sim 500 \times 10^{-6}$ ,精度 3%。测试时间为 2012-01-11T8:00—9:00(早高峰)、10:00—11:00(低谷期)、17:00—18:00(晚高峰)3 个时间段,仪器读数每  $15 \text{ s}$  读取 1 次,存储电脑进行处理取平均值。

表 2 给出风机未开启场景下的  $\text{CO}$  测试和计算结果平均值,并给出风机运行状态下  $\text{CO}$  模拟分析结果。由于枢纽面积大,表 2 中的数值是通过选取枢纽内部(远离各出口  $5 \text{ m}$ )的 20 个点位置(车尾部区域选择 10 个点,候车区部分选择 10 个点)的模拟或测量结果分别进行平均,可以看出,不开风机情况下的  $\rho(\text{CO})$  模拟结果与计算结果基本吻合,从而验证了采用大涡模拟技术分析  $\rho(\text{CO})$  的有效性。对比早高峰和晚高峰  $\rho(\text{CO})$  测试结果,可以看出  $\rho(\text{CO})$  晚高峰值比早高峰平均高出 5% ~ 10%,这是因为枢纽空间的半封闭性以及通风换气方式的限制,  $\text{CO}$  稀释需要一定的时间。但是在数值模拟过程中主要考虑  $\text{CO}$  排放,对  $\text{CO}$  长时间的稀释过程不进行考虑,因此,研究采用早高峰期的结果与数值模拟结果进行对比。稀释过程的研究需要未来进一步详细考虑。

在模拟过程,人员影响归入热源因素中,枢纽内热源包括了车辆因素和人员因素。考虑到人员在枢纽内停留时一般不超过  $10 \text{ min}$ ,研究重点放在室内空气质量结果分析上,温度、风速分布以及人员舒适性研究结果见文献[11]。

图 3(a) ~ (d) 给出了交通处于早高峰期时公交枢纽内整体  $\rho(\text{CO})$  在  $1.6 \text{ m}$  和  $0.8 \text{ m}$  高度上的分布情况。在场景 1 中公交车尾气排气管附近位置,  $\rho(\text{CO})$  达到  $120 \text{ mg/m}^3$ ,超过  $5 \text{ min}$  最大允许值  $115.0 \text{ mg/m}^3$ ,其他区域  $\rho(\text{CO})$  处于  $10 \text{ mg/m}^3$  左右,人

表2 不同场景下车站内CO质量浓度结果

Table 2 CO concentrations in different scenes in the station

|       |            | mg/m <sup>3</sup> |           |           |          |
|-------|------------|-------------------|-----------|-----------|----------|
| 测量点位置 |            | Z=0.8 m           | Z=0.8 m   | Z=1.6 m   | Z=1.6 m  |
|       |            | 排气管处              | 其他区域      | 排气管处      | 其他区域     |
| 场景1   | 模拟值        | 120.1             | 15        | 80        | 8        |
|       | 早高峰测量值(偏差) | 116.3(15.2)       | 14.0(2.1) | 76.2(8.5) | 7.5(0.8) |
|       | 晚高峰测量值(偏差) | 129.8(16.4)       | 16.0(2.5) | 84.0(9.2) | 8.5(0.9) |
| 场景2   | 模拟         | 60                | 3         | 25        | 2        |
| 场景3   | 模拟         | 100               | 6         | 40        | 5        |
|       | 测量值及偏差     | 96.5(9.2)         | 5.6(0.6)  | 38.0(4.2) | 4.6(0.5) |
| 场景4   | 模拟         | 28                | 3         | 20        | 2        |

注:“( )”中的数据表示枢纽内多点测量结果的偏差值。

员长期停留对人员健康影响较大;场景2风机开启后,大部分区域 $\rho(\text{CO})$ 满足人员卫生健康要求,儿童呼吸高度0.8 m的 $\rho(\text{CO})$ 高于成人呼吸高度1.6 m的 $\rho(\text{CO})$ ,主要原因是车辆尾气管的位置以及下部排风风口的高度设置影响,因此,建议下部排风机采用变频风机,高峰时期即可以通过风机变频方式增加10%左右的下部排风风量以便从尾气处排走更多的CO。

其他区域 $\rho(\text{CO})$ 较高峰期有明显下降.在开启风机场景下 $\rho(\text{CO})$ 全面达到卫生标准的要求。

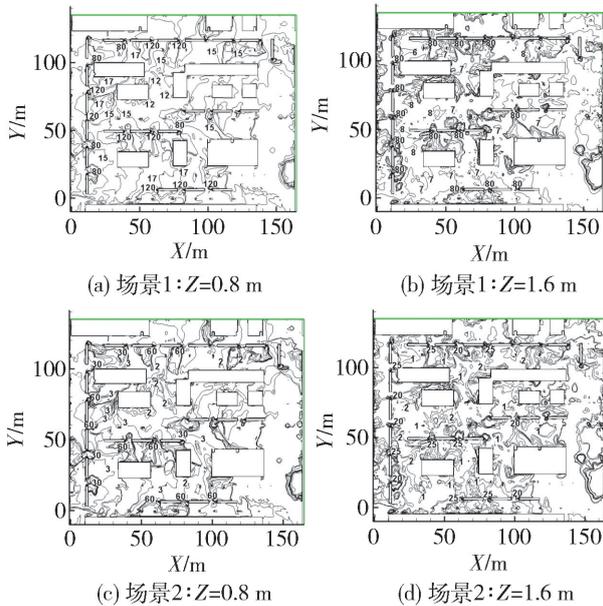


图3 高峰期枢纽内 $\rho(\text{CO})$ 分布图  
Fig. 3 CO concentration in peak hour

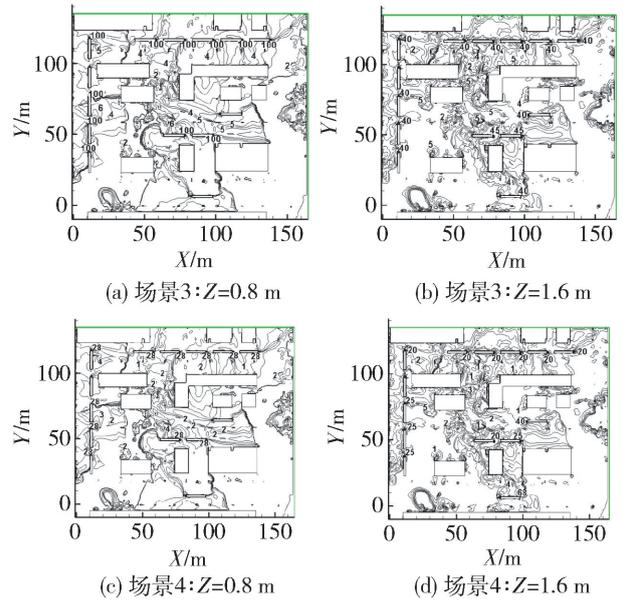


图4 低谷期 $\rho(\text{CO})$ 分布图  
Fig. 4 CO concentrations in trough hour

从4个场景模拟结果可以看到,对于半封闭型的交通枢纽,由于与外界通风不畅,冬季工作日高峰一定要开启风机系统以保证枢纽内空气质量要求.而对于非高峰期可以采用间歇运行的方式。

由于车库内通风系统启动一般是与CO传感器联动<sup>[12]</sup>,因此,CO的装置放置位置建议设置在0.8 m处.对于夏季运行主要考虑交通枢纽内温度因素,机械通风系统运行时间会增长,有关空气质量问题另行研究.此外,枢纽通风系统的效果只是通过数值模拟得到,缺乏翔实的现场实测数据,难以进行全面评价,需要进一步开展研究。

图4(a)~(d)给出了交通低谷期时枢纽内的 $\rho(\text{CO})$ 在0.8 m和1.6 m高度的分布情况.可以看出,由于空转车辆数的减少,枢纽内 $\rho(\text{CO})$ 远远低于高峰期,但不开风机时,尾气管附近 $\rho(\text{CO})$ 仍然保持在100 mg/m<sup>3</sup>,但是当风机开启时明显降低.而

### 3 结论

通过对半封闭公交枢纽冬季交通运行高峰期和低谷期的 $\rho(\text{CO})$ 分布进行数值模拟和现场实测以及对枢纽内通风系统运行效果进行模拟,得到结论如下:

1) 在风机未开启工况下,通过现场测试 $\rho(\text{CO})$ 与数值模拟结果对比发现,实测数据略低于模拟数据,但在合理的误差范围内,从而验证了数值模拟技术的有效性.因此,可利用数值模拟进行不同工况、不同高度上的污染物浓度分析,有助于对枢纽通风系统效果的全面评价.

2) 枢纽不同交通量对公交枢纽内空气质量的影响明显,即使风机开启,高峰期的 $\rho(\text{CO})$ 整体上是低谷期的1倍以上,应考虑高峰期枢纽内人员的健康安全.枢纽内处于尾气排放高度(0.5~1.0 m)的 $\rho(\text{CO})$ 明显高于其他高度,由于儿童呼吸高度为0.8 m左右,需要特别注意枢纽内儿童健康安全.

3) 风机不开启时,高峰期汽车尾气部位的 $\rho(\text{CO})$ 超过人员5 min承受极限值,低谷期时 $\rho(\text{CO})$ 虽然没有超过人员5 min承受极限,但也超过了人员1 h承受浓度范围;风机开启时,汽车尾气部位的 $\rho(\text{CO})$ 降低到人员5 min承受极限值以下,但高峰期时依然超过人员1 h承受极限.可见风机的开启能够很好地控制 $\rho(\text{CO})$ ,提高枢纽内的空气质量,同时,人员应当尽量远离排气管尾气部位,对于长期处于枢纽内的工作人员应特殊考虑其健康安全.

### 参考文献:

- [1] 柳靖. 机动车尾气在街谷中分布规律及其对建筑环境的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学市政环境工程学院, 2009.  
LIU Jing. Vehicle exhaust distribution in street canyons and its effect on built environment [D]. Harbin: School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [2] 黄振依, 潘金城, 黄春英, 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, 4(1): 43-44.  
HUANG Zhen-nong, PAN Jin-cheng, HUANG Chun-ying, et al. Investigation on health effect of indoor air pollution in the toll-gates [J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2006, 4(1): 43-44. (in Chinese)
- [3] 顾登峰. 地下车库通风系统数值模拟与变频控制研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007.  
GU Deng-feng. Numerical simulation and frequency control of the underground garage ventilation system [D].

Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2007. (in Chinese)

- [4] 龙连芳, 王新明, 冯宝志, 等. 广州市区公交车站PM<sub>2.5</sub>与CO暴露水平研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(9): 140-145.  
LONG Lian-fang, WANG Xin-ming, FENG Bao-zhi, et al. Exposure levels of PM<sub>2.5</sub> and CO at bus stations in urban Guangzhou [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(9): 140-145. (in Chinese)
- [5] 薛佳平, 田伟利, 张清宇. 杭州市机动车NO<sub>x</sub>排放清单的建立及其对空气质量的影响[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 613-618.  
XUE Jia-ping, TIAN Wei-li, ZHANG Qing-yu. Development of NO<sub>x</sub> emission inventory from motor vehicles in Hangzhou and study on its influence on air quality [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(5): 613-618. (in Chinese)
- [6] CHOW T T, ZHANG Lin, WEI Bai. Assessment of alternative ventilation schemes at public transport interchange [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2006, 11(6): 447-458.
- [7] ZHANG Lina, FENG Jiang, CHOW T T, et al. CFD analysis of ventilation effectiveness in a public transport interchange [J]. Building and Environment, 2006, 41(3): 254-261.
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-5.
- [9] MCGRATTAN K. Fire dynamics simulator technical reference guide [M]. Version 5.0. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2005: 1-5.
- [10] MAEVSKI I Y. Design fires in road tunnels [M]. Washington D C: Transportation Research Board, 2011: 5-10.
- [11] 林欣欣. 城市交通枢纽中运营环境控制及人员疏散研究[D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2013.  
LIN Xin-xin. Study on the operating environment control and evacuation in the city public transport interchange [D]. Beijing: College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 苏晓峰. 地下停车场污染物扩散数值模拟与通风系统优化[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2012.  
SU Xiao-feng. Numerical simulation of the dispersion of pollutants and optimization of ventilation system of the underground garage [D]. Chongqing: Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, 2012. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)