

地铁安全门系统活塞风掺混系数研究

朱培根, 徐万里, 刘军, 涂江峰, 田义龙

(解放军理工大学内部环境与设备教研室, 南京 210007)

摘要: 文章通过对地铁安全门系统与隧道气流的交换规律的研究, 建立了物理模型, 数学模型, 通过合理的假设简化, 利用 CFD 模拟手段, 采用示踪气体的方法求解了可以表征地铁活塞风对车站热环境影响程度的掺混系数值。文中选取了三种不同高度的安全门系统进行模拟比较, 得到了其掺混系数的具体值, 并利用掺混系数模拟计算了在不同安全门高度下的地铁空调系统能耗变化情况。

关键词: 安全门; 地铁环控; 掺混系数

中图分类号: U231.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0079-03

The Study of Mix Coefficient of the Stopcock Wind in Metro with Safety Door

Zhu Peigen, Xu Wanli, Liu Jun, Tu Jiangfeng, Tian Yilong

(PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Through study of the rule of the air current between the metro stations which had installed the safety door system and the tunnel, this text established a physics model and a mathematics model, gained the mix coefficient which can marks the degree of the influence stopcock wind in metro inflict to the heat environment, exerting reasonable assumption and simplification, making use of the CFD imitation, adopting tracer air. The text elected three kinds of safety door system with different height to simulate and compare, gained the exact value of the mix coefficient, and simulated the energy consumption of subway air conditioning in different height of safety door by the mix coefficient.

Key words: safety door; HV&AC of metro; mix coefficient

目前采用的安全门高度从 1.1 m~2.5 m 不等^[1]。由于安全门上下部分可能均不完全封闭, 部分空气可以在站台和轨行区之间流通, 站台空调系统的负荷也将受到一定影响。在非空调季, 可以充分利用列车的活塞风进行通风, 从而改善地铁内部环境, 从这一点上考虑, 安全门要优于屏蔽门, 节能效果可能更为明显。

清华大学朱颖心教授通过模拟分析认为, 对于开式系统的地铁岛式站台其掺混系数约为 30%^[2]。通过查阅文献, 发现目前使用较多的安全门系统地铁活塞风掺混系数没有相关研究, 文章通过分析、建模和计算机模拟来确定其掺混系数值, 以供地铁能耗分析中网络模型的求解使用。

1 物理模型

由于数值计算需要花费大量的时间, 为了达到较好的模拟计算效果, 并同时保证计算结果具有代表性, 选择一典型的双层岛式车站作为建模对象。

车站结构全长 238 m, 站台有效长度 144 m, 其余为两侧附属用房占用, 车站主体结构净宽 18 m, 站厅层结构净高 4 m, 站台层结构净高 4.4 m, 站台板距装修面 3.0 m, 吊顶 1.4 m。车站两端各设置 1 条迂回风道, 截面尺寸为 6 m×4.6 m; 两端各设置 2 条机械活塞风道。站厅层与站台层之间通过 3 座自动扶梯相连; 站厅层设置 4 个人员出入口, 出

口截面尺寸为 6 m×4 m。站厅层只设送风口, 回风通过扶梯口进入站台层回风系统, 送风口尺寸为 900 mm×200 mm, 共 72 个。站台层采用上送风, 轨顶回排风(OTE)以及站台底回排风(UPE)的气流组织方式, 送风口尺寸为 900 mm×200 mm, 共 72 个, 布置在装修面上; OTE 回排风口尺寸 1 000 mm×500 mm, 单排 108 个, 9 个一组集中分布于列车冷凝器上方的轨顶处, UPE 回排风口尺寸 810 mm×335 mm, 两排共 144 个, 均匀分布在站台板侧面, 距站台边缘 0.5 m。车站两端各设置 2 台隧道通风风机(TVF 风机)。

站台板距站台层顶部 3.0 m, 安全门系统门高 2.65 m, 上方孔隙净高 0.35 m, 固定门宽 2 m, 底部设有百叶孔隙, 孔隙宽 2 m, 高 0.75 m。滑动门宽 2 m, 净高 2.15 m, 上方设有广告牌, 广告牌高 0.5 m, 为封闭结构。固定门与滑动门间隔设置, 列车停靠站台, 列车门与滑动门同时开启, 用于乘客上下车。模拟中改变安全门高度值。

综上所述, 所建车站物理模型正面图如图 1 所示。

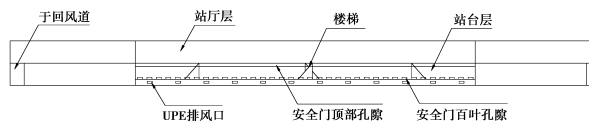


图 1 模型正面图

2 数学模型

数值模拟计算中,采用有限容积法,所用模型为标准 $K-\epsilon$ 双方程模型,求解问题为三维非稳态的不可压缩粘性流体湍流流动。由于湍流时均方程组不封闭,在 $K-\epsilon$ 双方程模型中,附加了 K 方程和 ϵ 方程,因而可以构成封闭的方程组,能够求解。

湍流动量扩散率 ν_t 与湍流动能 K 之间有如下关系:

$$\nu_t = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon} \quad (1)$$

其中: ν_t 为湍流动量扩散率; C_μ 为常数; K 为湍流动能; ϵ 为湍流动能扩散率。

K 方程可以表示为:

$$\frac{DK}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] + p - \epsilon \quad (2)$$

ϵ 方程可以表示为:

$$\frac{D\epsilon}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] + \epsilon \left(C_1 \frac{p}{K} - C_2 \frac{\epsilon}{K} \right) \quad (3)$$

其中 $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 均为给定的有关系数,通过一些特定的实验确定,表 1 显示了各系数的数值^[3-4]。

表 1 湍流中各系数的数值

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

以上模型及各系数适用在高雷诺数条件下,由于地铁活塞风影响较大,且车站通风空调系统作用形成的强迫对流,地铁车站气流雷诺数 $Re \geq 2000$ ^[5],其模型为高雷诺数模型,可以直接使用标准 $K-\epsilon$ 双方程模型,无需修正。

3 安全门高度上限值求解

通过 CFD 模拟可知,站台排风排烟系统开启后,造成了站台层负压,站厅层空气流向站台层,在楼梯口部形成了向下的气流。对不同高度安全门车站的气流进行模拟,可以得到不同门高相对应的楼梯口向下气流速度值,从分析得到速度为 1.5 m/s 时所对应的门高,即为要求的安全门高度上限值。

安全门高度与站台 3 个楼梯口向下气流速度对应关系如图 2 所示。图 2 可以看出,随着安全门高度的增加,楼梯口向下的气流速度逐渐下降,而且这种下降趋势越来越明显,说明安全门越高,对气流的影响程度越大,且其影响程度呈非线性变化。楼梯口向下气流速度等于 1.5 m/s 时所对应的安全门高度介于 2.60~2.80 m 之间,对于工程计算,此处采用插值计算方法精度已经足够,可以求解得 1.5 m/s 时所对应的安全门高度,即安全门高度上限值为 2.70 m。因此,对于净高 3.0 m 的站台层,文章研究的安全门高度范围确定为 2.00~2.70 m。

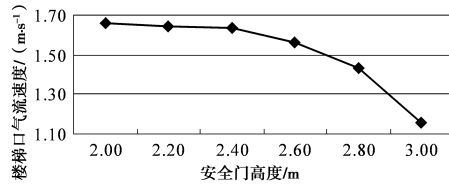


图 2 楼梯口最不利气流速度随安全门高度变化图

4 活塞风掺混系数 CFD 模拟

文章采用示踪气体策略(Tracer Gas Technique)进行研究。示踪气体伴随着活塞风进入站台及回排风系统,假定某时刻从隧道口进入的活塞风中此种示踪气体的浓度为 c ,而其风量为 G ;车站初始环境中(活塞风影响到车站之前)示踪气体浓度为 0,回排风中示踪气体浓度同样为 0,即此种示踪气体不存在。活塞风从隧道口进入,风速由零逐渐增大,再逐渐降为零的过程中,逐渐影响到车站热环境,设此刻进入车站的示踪气体浓度为 c_1 ,风量为 G_1 ;进入回排风系统的示踪气体浓度为 c_2 ,风量为 G_2 。于是,掺混系数值 η_{mix} 可用(4)式来表示:

$$\eta_{\text{mix}} = \int_{t=0}^T \frac{c_1 G_1 + c_2 G_2}{cG} dt \quad (4)$$

模拟过程中,通过对影响区域边界上的网格进行统计,可以方便地求出各个时刻 c, G, c_1, G_1, c_2, G_2 的值,因而可以准确得到所需的掺混系数值。

4.1 基本假设

受地铁活塞风影响,空气流场随时间不停波动,应当看作是三维瞬态流动,而文中重点关心车站与区间隧道气流量的交换情况,为了简化计算,引入以下假设^[6-7]:

- 1) 空气不可压缩,流量平衡;
- 2) 整个模拟简化为一个过程来处理。即从列车进站引起隧道口气流变化,速度由零开始逐渐增加直到速度再次降为零为止,此过程基本上与一个完整的列车进站停靠过程重合;
- 3) 列车进站是一个不断移动的过程,相当于是一个不断移动的压力边界,这种边界在模拟计算中很难处理,为方便计算,模拟中将这种移动的边界简化为固定在进站端隧道口部的连续性速度边界;
- 4) 假设列车始终没有停靠站台,即站台侧的隧道空间中始终没有列车;
- 5) 车站通风空调系统开启,送风口不受外界风压影响,所有送风口保持定风量送风;
- 6) 忽略活塞风道、竖井对活塞风的影响;
- 7) 每次只有一侧列车进站;
- 8) 车站结构中柱、人员站位等影响加以忽略。

4.2 边界条件

地铁通风空调三维模型的 CFD 模拟中,主要关注气流的交换情况,因此对热湿边界条件的设置加以简化,主要考虑速度边界及压力边界。由于每次只考虑一侧列车进站的情况,因此仅设列车进站端的隧道口为速度边界,其具体的速度值由现场实测数据提供,其余 3 个隧道口设定为自由边界。实测部分结果如图 3 所示。

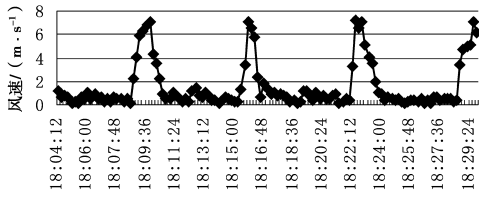
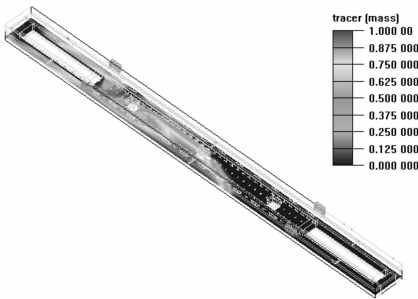


图 3 列车进站端隧道口活塞风测试风速

4.3 示踪气体浓度分布

通过模拟计算,可以很直观地看出示踪气体浓度场的分布,同时也直观地得到了列车活塞风对车站环境的影响程度。图 4 显示了某时刻示踪气体浓度分布的模型三维立体图。



4 某时刻示踪气体浓度分布模型三维立体图

从图可以得出,列车活塞风从隧道口进入后,一小部分通过旁通的迂回风道进入了另一侧隧道,而绝大部分向前推进,进入站台有效部位后,由于站台压力较高,活塞风会继续向前推进,并不能立即侵入站台,反而因为本身的诱导作用,加速了站台空气的流出,因此,越靠近站台与附属用房交接的地方活塞风的侵入程度越小。而随着活塞风风速的不断变化,车站原本较稳定的空气流场被扰乱,同时进入隧道的活塞风不断增加,隧道内空气压力逐渐升高,当有局部压力超过站台压力时,活塞风开始通过安全门的孔隙侵入站台,随着时间推移,侵入程度会越来越大,直到建立起一个新的压力平衡。理论上,在模拟计算的这段时间内,新的压力平衡并不能完全达到,那是因为局部的空气扰动会引起压力的波动,而波动的扩散性和传递性又会引起整个空间的压力波动,鉴于气体流动的复杂性,并从流动连续性的角度考虑,笔者认为当列车进站端隧道口的速度边界值减小为零时就可以停止计算。

4.4 活塞风掺混系数求解

根据公式(4)提供的活塞风掺混系数的计算方法进行求解。由于从隧道口进入的活塞风量可以根据实测设定的边界值得到,因此只要将各时刻进入车站的示踪气体浓度 c_1 ,风量 G_1 ,进入回排风系统的示踪气体浓度 c_2 ,风量 G_2 求解统计出来即可。图 5 显示了 2.00 m 高安全门各时刻 cG , c_1G_1 , c_2G_2 和 $c_1G_1+c_2G_2$ 值。

活塞风掺混系数的值等于 $c_1G_1+c_2G_2$ 围合的曲线面积与 cG 围合的曲线面积之比。3 种不同高度的安全门活塞风掺混系数值如图 6 所示。

由图 6 可以看出,随着安全门高度的增加,活塞风掺混系数值逐步减小,且减小的幅度有增大的趋势,说明安全门

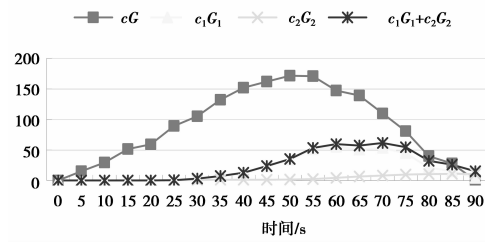


图 5 2.00 m 高安全门 $cG, c_1G_1, c_2G_2, c_1G_1+c_2G_2$ 值

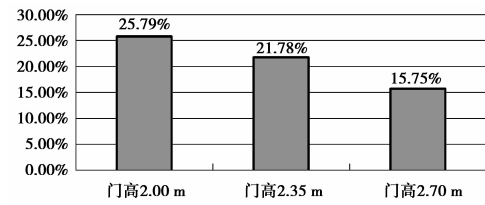


图 6 3 种不同高度安全门活塞风掺混系数值

越高,影响越大。但从模拟的结果看,3 种不同高度的安全门活塞风掺混系数均不超过 30%,与文献^[2]非屏蔽门岛式站台活塞风掺混系数的模拟结果具有可比性。

4.5 3 种不同高度的安全门系统能耗分析

为了得到不同高度安全门系统(即不同掺混系数)对地铁通风空调能耗的影响情况,需对地铁通风空调系统能耗详细分析,其中包括无安全门系统下的能耗以及不同安全门高度下的能耗,在此基础之上进行对比,从而分析规律,得出结论。

建立地铁通风空调的网络物理模型及数学模型,采用 STESS 软件模拟计算,并根据模拟得出的安全门系统活塞风掺混系数值等数据进行相应修正,从而得出通风空调系统能耗值,具体能耗值见图 7。若以近期为例,设无安全门时的能耗为 100%,则相对能耗见图 8。

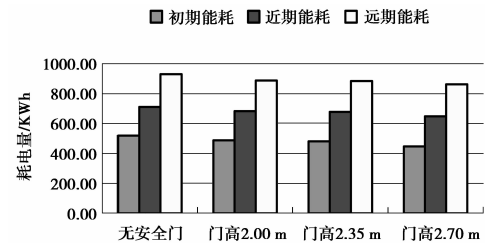


图 7 初期、近期和远期地铁通风空调能耗变化

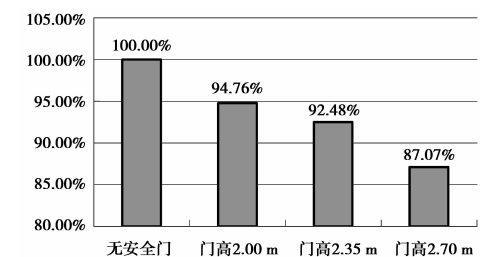


图 8 近期空调冷负荷相能耗

分布状态的主要因素,同时,在路建成后的 20 年里,路基顶部中心附近将出现较大的拉应力,并且随时间推移而逐渐增大,应引起铁路管理部门的高度重视。对于 4 m 以上高填路基,路基本体下孔隙水压力分布基本不受列车荷载影响。

由于冻土路基稳定性问题十分复杂,而且涉及知识面广,目前对冻土路基的理论研究较少,不少方面尚属空白。本文仅从理论上进行了初步探索,并与部分实测温度数据作了对比分析,以期能为冻土路基的设计、维护及研究提供理论依据和参考。

参考文献:

- [1] 吴紫汪,程国栋,朱林楠,等. 冻土路基工程[M]. 兰州:兰州大学出版社,1999.
- [2] 喻文学,宴启鹏. 青藏公路多年冻土地区路基冻融变形的初步分析[J]. 西安公路学院学报,1986,6(2): 7-10.
- [3] 刘永智,吴青柏,张建明,等. 青藏高原多年冻土地区公路路基变形[J]. 冰川冻土,2002,24(1): 10-15.
- [4] 张建明. 青藏高原冻土路基稳定性及公路工程多年冻土分类[D]. 中国科学院研究生院,2004.
- [5] 李忠,徐文明,陈明长. 青藏高原清水河多年冻土区铁路路基沉降变形特征研究[J]. 工程地质学报,2006,24(6): 824-829.
- [6] 孙增奎,王连俊,白明洲,等. 青藏高原多年冻土区铁路路基变形特征研究[J]. 中国安全科学学报,2003,13(8): 25-28.
- [7] 俞祁浩,刘永智,童长江. 青藏公路路基变形分析[J]. 冰川冻土,2002,24(5): 623-627.
- [8] 郑波. 高温—高含冰量冻土力学特性及冻土路基变形研究[D]. 中国科学院研究生院,2009.
- [9] 毛雪松,王秉刚,胡长顺,等. 多年冻土地区路基变形场和应力场的数值分析[J]. 冰川冻土,2008,28(3): 396-400.
- [10] 汪双杰,黄晓明,侯曙光. 多年冻土区路基路面变形及应力的数值分析[J]. 冰川冻土,2006,28(2): 217-222.
- [11] 王铁行,胡长顺. 多年冻土地区路基温度场和水分场耦合问题

研究[J]. 土木工程学报,2008,36(12): 93-97.

- [12] 欧尔峰,李双洋. 青藏铁路路基热蠕变数值分析[J]. 兰州交通大学学报,2009,26(4): 73-77.
- [13] 陈飞熊. 饱和正冻土温度场、水分场和变形场三场耦合理论构架[D]. 西安理工大学,2009.
- [14] 李宁,徐彬,陈飞熊. 冻土路基温度场、变形场和应力场的耦合分析[J]. 中国公路学报,2008,19(3): 1-7.
- [15] 李双洋. 多年冻土区铁路路基热—力稳定性数值仿真研究[D]. 中国科学院研究生院,2008.
- [16] 安维东. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州:兰州大学出版社,1989.
- [17] 中华人民共和国行业标准编写组. TB 10001-2005 铁路路基设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2006.
- [18] 孙志忠. 青藏铁路多年冻土块石护坡路基试验研究[D]. 中国科学院研究生院,2009.
- [19] Zhang Mingyi, Lai Yuanming, Liu Zhiqiang, et al. Nonlinear analysis for the cooling effect of Qinghai-Tibetan railway embankment with different structures in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 42: 237-249.
- [20] Lai Yuanming, Wang Qiusheng, Niu Fujun, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 38: 165-184.
- [21] Lai Yuanming, Zhang Shujuan, Zhang Luxin, et al. Adjusting temperature distribution under the south and north slopes of embankment in permafrost regions by the ripped-rock revetment[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 39: 67-79.
- [22] Li Shuangyang, Lai Yuanming, Zhang Mingyi, et al. Study on long-term stability of Qinghai-Tibet Railway embankment[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 57: 139-147.

(编辑 詹燕平)

(上接第 81 页)

从模拟的结果可以得出,安全门越高,地铁空调冷负荷减少越明显,越利于车站空调系统节约能耗,但根据模拟数据发现,当安全门高于 2.35 m 后,需要增加夜间通风来降低隧道温度,以达到规范要求,所以会增加夜间通风能耗,从而使得节能效果不明显。而随着安全门高度的继续增加,空调负荷迅速下降,相比于增加的夜间通风能耗,节省的空调能耗再次体现出优势,总能耗下降明显,但是下降幅度不超过 15%。

5 结论

通过模拟计算,选用的 2.00 m、2.35 m 及 2.70 m 高的三种安全门系统,其活塞风掺混系数分别为 25.79%,21.78%,15.75%,随着安全门高度的增大,活塞风掺混系数数值逐步减小,且减小的幅度有增大的趋势。在安全门高度允许的范围之内,其通风空调总能耗基本变化趋势为:安全门越高,能耗越低,但安全门高度增加到一定值,需要增加夜间通风以降低隧道温度,产生了夜间通风能耗,所以存在“瓶颈区域”,当安全门高度突破“瓶颈区域”后,通风空调能耗下降明显,但下降总幅度不超过 15%。

参考文献:

- [1] 北京城建设计研究总院. 地铁设计规范[M]. 北京:中国计划出

版社,2003.

- [2] ZHU YX, QIN OY. Airflow fluctuations and thermal environment: a literature review[C]//4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2003:78-86.
- [3] MING-TSUN KE, TSUNG-CHE CHENG, WEN-POR WANG. Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system[J]. Building and Environment, 2002.
- [4] 朱颖心. 水力网络流动不稳态过程的算法[J]. 清华大学学报,1989,5(29).
- [5] 贾力,方肇洪,钱兴华. 高等传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [6] 朱培根,朱颖心,李晓峰. 地铁通风与热模拟方案及其分析[J]. 流体机械,2004,32(11): 39-42,49.
- [7] 沈翔,吴喜平,董志周. 地铁活塞风特性的测试研究[J]. 暖通空调,2003,33(2): 65.

(编辑 周沫)