

# 地铁列车高速过站风环境数值模拟研究

金海<sup>†</sup> 杨立国 陈凯

中国建筑科学研究院, 北京 100013; <sup>†</sup> E-mail: jinhai@cabrtech.com

**摘要** 基于CFD数值模拟方法,采用“动网格”技术,对列车高速过站(80 km/h)风环境进行数值模拟,给出高速列车开始驶入、完全驶入和驶离车站时,站台区域行人高度风速变化情况。在站台行人区域布置63个风速测点,对列车风的影响进行定量评估,并结合评定人员活动的风环境舒适度评估标准,划定站台区域人员活动安全和舒适范围,为站台区域设计提供建议。

**关键词** 动网格;数值模拟;风环境;舒适度评估

**中图分类号** U467

## Research on High-Speed Subway Train Passing through the Station

JIN Hai<sup>†</sup>, YANG Ligu, CHEN Kai

China Academy of Building Research, Beijing 100013; <sup>†</sup> E-mail: jinhai@cabrtech.com

**Abstract** Dynamic mesh method based on numerical simulation method of CFD was adopted. The changes of wind velocity in pedestrian level were calculated when the train entered, passed through and left the station at high speed (80 km/h). 63 monitor points at the pedestrian height were arranged to assess the influence of train wind quantitatively. The range for the pedestrian safety and comfort were given based on the proper wind comfort criteria, which could provide useful guide to platform design

**Key words** pedestrian dynamic mesh; numerical simulation; wind environment; wind comfort criteria

高速列车在地面行驶时,空气的黏性作用使周围的空气随列车表面一起运动,形成列车风<sup>[1]</sup>。列车风对路旁人员和物体会产生作用力,该作用力的强度取决于列车行驶速度、与列车侧壁的距离、列车外形及自然风条件等。列车风可能危及站台上乘候人员及沿线工作人员的安全,卷起站台边沿或路基侧边的杂物,从而造成列车事故。

通常情况下,地铁列车进站时是减速过程,运行速度会减至零;出站时是由静止开始加速过程,运行速度由零开始加速。因此,正常情况下,站台候车区域地铁列车速度始终保持较低,由于列车行驶引起的列车风速较小,对站台区域行人风环境的影响基本上可以忽略。但在特殊营运条件下,例如考虑将来地铁运营组织、大站快车、列车调度等情

况,可能会出现地铁列车不停站直接通过站台的工作状况。对于地铁列车高速过站时列车风对站台行人风环境的影响,还需进行深入研究。

目前,针对列车风的研究<sup>[2-5]</sup>主要使用现场实测和数值模拟方法。现场实测方法虽然准确,但周期长、费用高,而且对未建车站的列车风无法测试,因此,数值模拟成为较有效的研究方法。本文采用计算流体动力学数值模拟技术中“动网格模型”方法,以深圳地铁列车不停站直接通过车站这一特殊工况(考虑不利工况,设定列车速度为80 km/h,约22.22 m/s)为例,研究地铁列车进出站过程中站台行人风环境的变化。通过在站台行人活动区域布置若干风速测点,对列车过站时出现的风速进行统计分析,并结合我国列车人员安全退避距离标准和国

国家“十二五”科技支撑计划课题(2014BAL05B03)资助

收稿日期: 2014-03-24; 修回日期: 2014-05-30; 网络出版日期: 2015-06-29

外适当的行人风环境舒适度评估标准, 全面评估列车风对站台行人活动的影响, 为设计提供参考。

## 1 数值模型

### 1.1 几何模型和网格划分

为研究地铁高速过站的列车风问题, 首先建立地铁列车过站数值模拟的几何模型, 如图 1 所示。地铁车型参考深圳地铁铝合金 A 型车, 列车由车头、车身和车尾组成, 总长度取 73 m (为提高计算效率, 对原型车的长度进行适当缩减, 约为原型车的一半, 不影响计算结果)。整个计算流域的尺寸取 300 m (长) × 30 m (宽) × 8 m (高), 分为进、出车站的辅助段和车站部分。车站的建模参考已投入运行的某高架轨道车站尺寸, 长、宽、高分别取 100 m × 30 m × 8 m。

“动网格模型”方法要求在列车周围布置尺度很小的网格。为了提高数值模拟计算的效率和可靠性, 本文将整个数值模型的网格分为动态网格和静态网格两个区域。整个计算域的网格分布如图 2 所示。

1) 将在列车周围 1 m 范围的区域设置为动态网

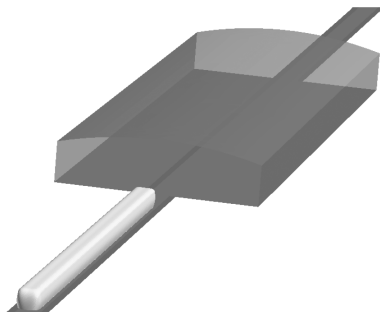


图 1 地铁列车的几何模型  
Fig. 1 Geometric models of train

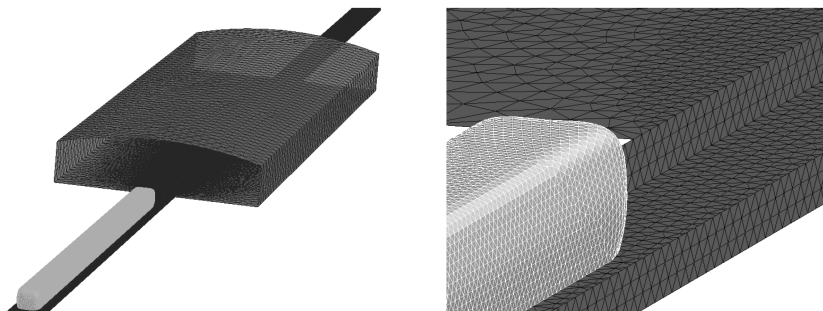


图 2 数值模型网格划分  
Fig. 2 Grid of simulation model

格区域。在这个区域中, 网格单元随时间动态变化, 网格类型为非结构网格, 最小网格尺寸为 0.2 m, 动态网格的数量为 207931 个, 网格动态更新方法为 Smoothing 和 Remeshing 方法。

2) 动态网格区域外为静态网格区域。在这个区域中, 网格单元静止不变, 网格类型为非结构网格, 最小网格尺度为 0.4 m, 静态网格的数量为 982388 个。

### 1.2 边界条件和计算参数设置

采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟湍流流动。边界条件的设置如下: 入流面采用压力入口边界条件, 入口相对总压为零; 出流面采用压力出口边界条件, 出口相对静压为零; 列车表面以及车站的墙壁、地面和屋顶均采用无滑移壁面条件; 进出站流域两侧采用对称边界条件。

非线性对流项的离散格式采用二阶迎风格式, 以减小数值计算误差, 提高计算精度; 时间步长为 0.005 s, 每个时间步长最大迭代计算步数为 20 步, 收敛标准设定无量纲均方根残差降至  $10^{-3}$  以下, 采用并行计算, 在 Fluent 6 平台上进行求解。数值模拟计算在中国建筑科学研究院的 IBM p630 工作站完成。

## 2 数值模拟结果与分析

### 2.1 站台行人高度速度场分布云图

图 3 给出地铁列车以 80 km/h (约 22.22 m/s) 速度过站过程中, 典型时刻站台区域行人高度 (2 m) 的速度场分布。通过分析不同时刻的速度场分布云图, 可以得到如下结论。

1) 地铁列车高速过站时, 车头和车尾附近区域的风场变化剧烈; 而在同一时刻, 列车车体中间区域风场变化相对较小。因此列车过站时, 需重点关

注列车高速驶近和驶离状态产生的列车风对周边环境的影响。

2) 地铁列车不停靠、直接过站的工况相当于其通过一个截面积相对较大的隧道过程。列车经过车站时, 与列车在空旷的地带行驶相比, 由于受车站周围墙壁和屋顶形成的相对有限空间的阻塞, 周围

的风场会发生变化。与此同时, 由于车站大开敞空间与隧道封闭空间相比开敞得多, 阻塞率并不高, 因此车站的阻塞效应对列车风的影响基本上可以忽略。

3) 地铁列车的尾流区速度值虽然不大, 但是尾流区流动结构呈现高度复杂多变的湍流流动特征,

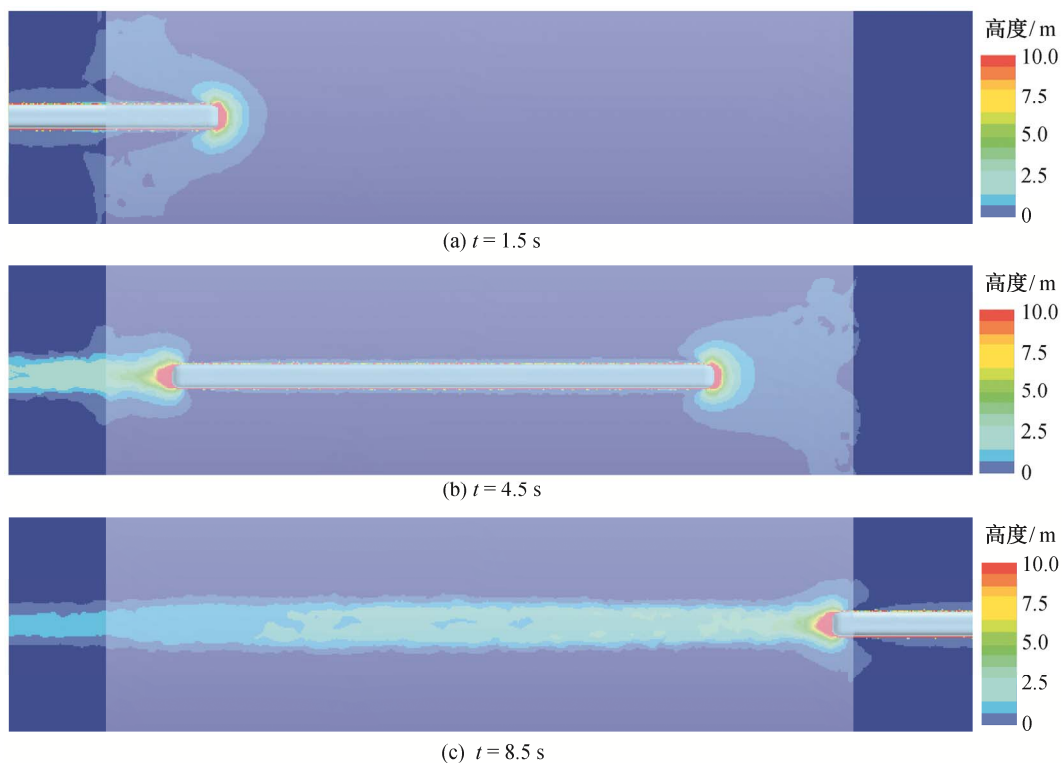
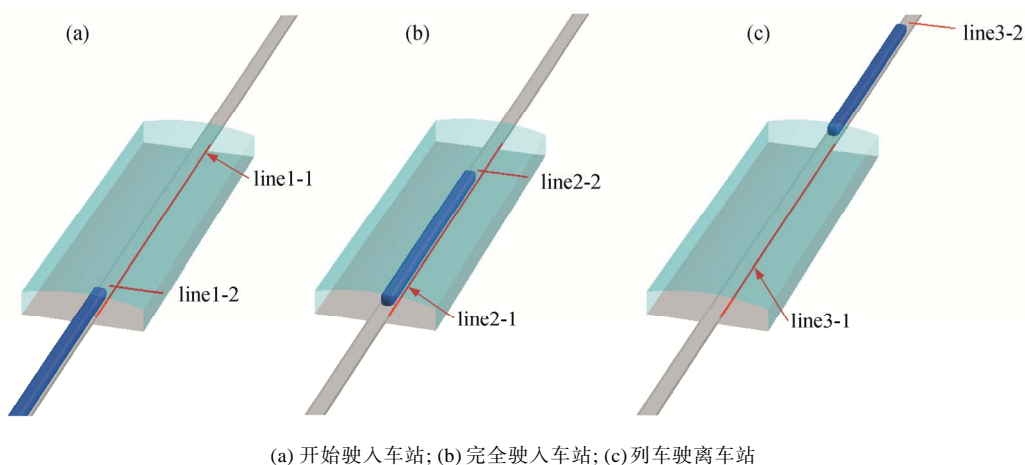


图 3 列车过站不同时刻站台区域行人高度风速场分布云图  
Fig. 3 Velocity contour in pedestrian level of platform



(a) 开始驶入车站; (b) 完全驶入车站; (c) 列车驶离车站

图 4 风速特征线的布置示意图  
Fig. 4 Location of wind velocity line

出现不同尺度的涡流,其影响在列车通过后一段时间内依然存在。

## 2.2 站台行人高度风场速度分布曲线

分别沿列车纵向和横向布置两条特征线(见图4),用特征线上列车风速的分布定量分析列车风对站台风环境的影响。纵向特征线布置在站台区域,距列车侧壁为2 m,高2 m(行人高度)处;横向特征线布置在列车车头,垂直于列车前进方向,高2 m处。图4给出列车开始驶入车站、列车完全驶入车站和列车驶离车站3个不同时刻风速特征线的布置示意图。

图5~7分别为在 $t=1.5$  s、 $4.5$  s和 $8.5$  s 3个不同时刻的行人高度速度分布曲线。在每一时刻,分

别给出沿纵向和横向风速特征线上的速度分布。通过观察行人高度风速沿列车纵向与距侧壁距离的变化曲线图,可以得到如下结论。

1) 在垂直于列车行驶方向的横向,地铁列车过站时,行人高度处(2 m高)的风场速度与距列车侧壁距离的关系呈幂指数律形式,与试验结果一致。在距列车侧壁2 m的距离,行人风场最大速度为2.5 m/s左右(图5(b),图6(b)和图7(b))。

2) 当列车通过时,在站台区域,距离列车侧壁2 m,平行于列车行驶方向的纵向,在列车头部和尾部附近,行人高度处(2 m高)的风场速度各出现一个峰值(图6),而且列车头附近出现的峰值比尾部附近的峰值大,这与日本高速列车实车线路的测

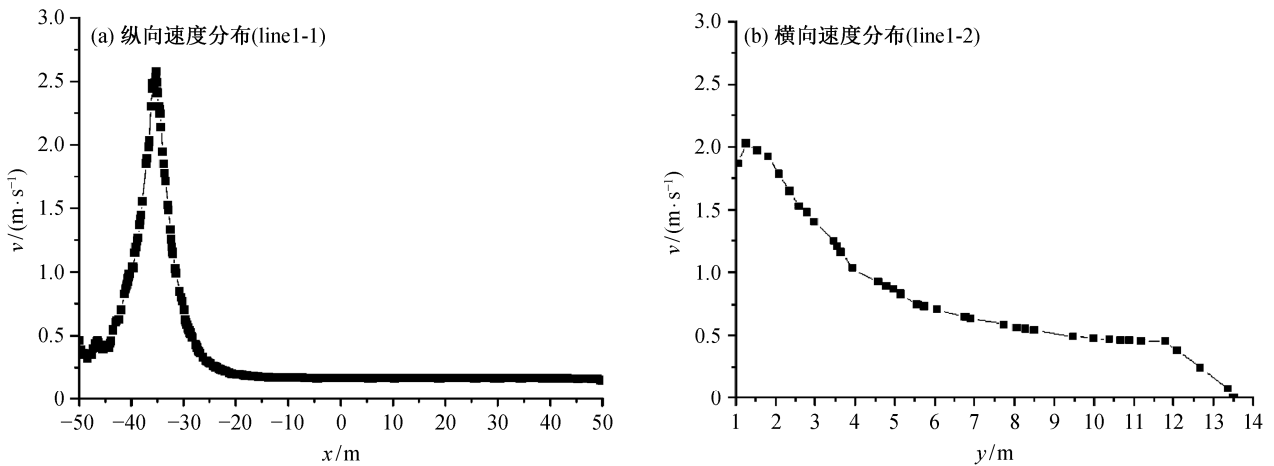


图5  $t=1.5$  s时刻列车纵向和横向列车风速分布曲线

Fig. 5 Distribution curve of longitudinal and horizontal velocity at  $t=1.5$  s

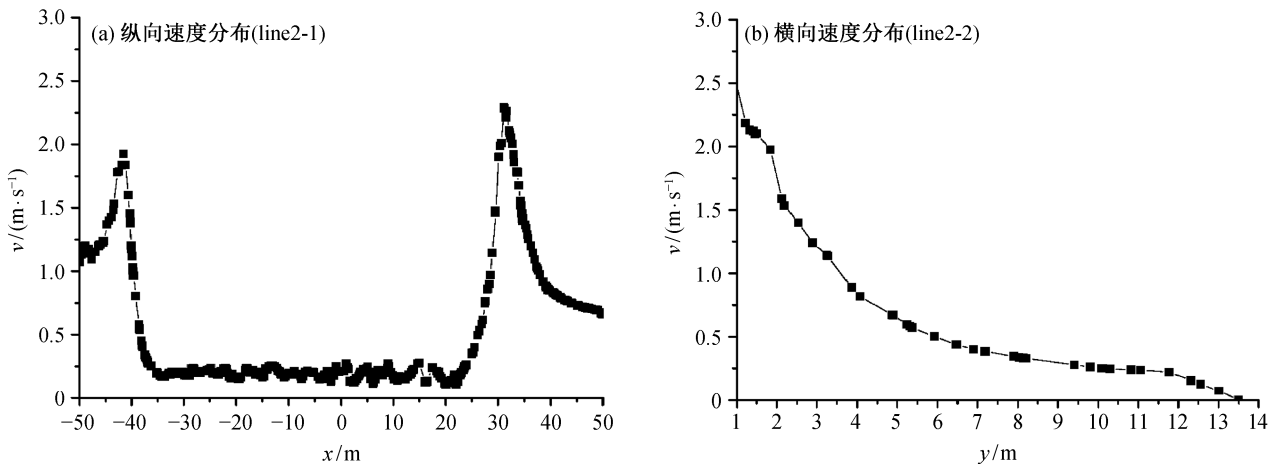


图6  $t=4.5$  s时刻列车纵向和横向列车风速分布曲线

Fig. 6 Distribution curve of longitudinal and horizontal velocity at  $t=4.5$  s

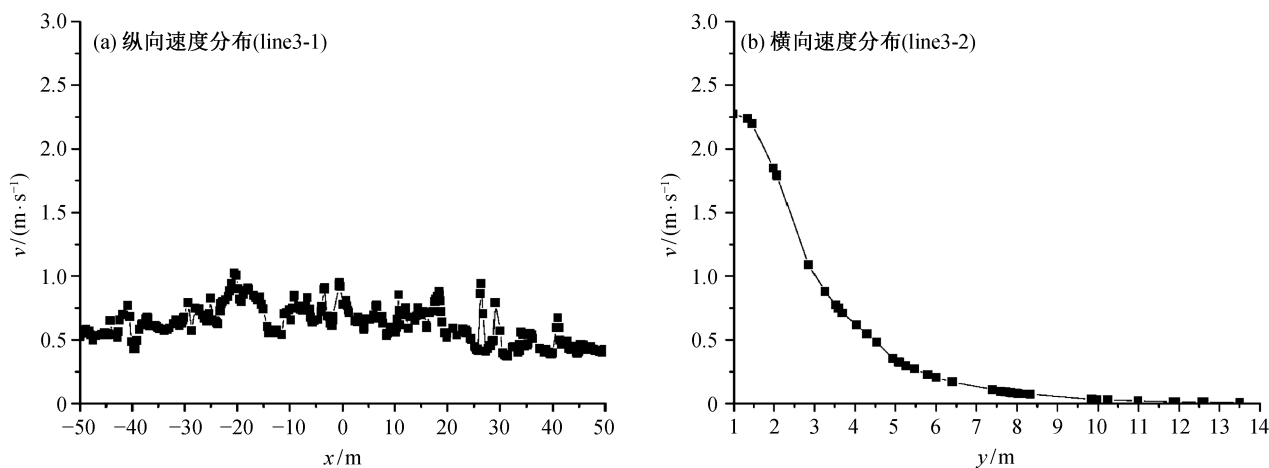


图 7  $t=8.5$  s 时刻列车纵向和横向列车风速分布曲线  
 Fig. 7 Distribution curve of longitudinal and horizontal velocity at  $t=8.5$  s

量结果的趋势相同。

3) 高速列车通过后, 其尾流影响区的速度虽然不大 (约为 0.5~1.0 m/s), 但是尾流的流动较复杂, 而且在列车尾部后面的很长范围内, 风速依然保持在 0.5~1.0 m/s (图 7), 非常容易在站台局部地区引起扬尘。

### 2.3 站台风速测点的统计分析

#### 2.3.1 风速测点分布

本文在站台一侧候车区域布置 3 排风速测点, 每排 21 个, 共计 63 个, 测点分布如图 8 所示。3 排测点横向距离列车侧壁分别为 2, 7 和 11 m, 测点间纵向距离为 5 m, 测点离地高度为 2 m。

通过分析列车高速过站时测点的风速值, 根据行人风环境舒适度评估准则, 对站台行人风环境进行全面定量评估。

#### 2.3.2 结果与分析

表 1 给出地铁列车过站时, 站台 63 个风速测点在各个时刻的风速值。通过分析各个风速测点的风速值, 可以看出: 63 个风速测点中, 风速最大值为 0~1 m/s 的测点有 44 个, 约占总数的 69.8%; 为 1~2 m/s 的测点有 14 个, 约占 22.2%; 大于 2 m/s 的测点有 5 个, 约占 8.0%; 最大风速值为 2.40 m/s, 相当于 2 级风的风速。

1995 年中国铁道科学研究院在沪宁线, 采用人体模特测力系统进行站台人员安全退避距离的试验。试验时人体模特取最不利站位, 面迎列车方向, 得出站台人员允许承受的列车风风速为 14 m/s, 气动阻力最大值为 110 N; 并制定“站台人员安全退避距离标准”的建议值: 旅客列车以 140~160 km/h 的速度正线通过车站时, 正线侧站台边缘安全线应设

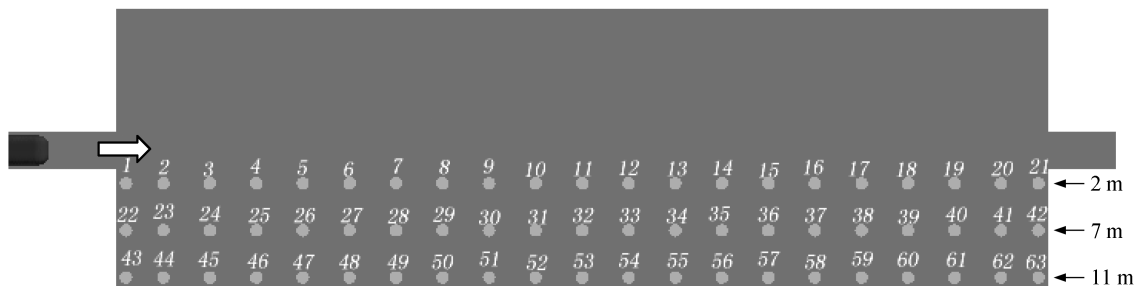


图 8 站台行人活动区域风速测点分布  
 Fig. 8 Location of wind velocity probe on pedestrian level of platform

表 1 站台行人高度风速测点的风速统计值  
Table 1 Value of wind velocity on pedestrian level of platform

测点	$V/(m \cdot s^{-1})$									
	0.5 s	1.0 s	1.5 s	2.0 s	2.5 s	3.0 s	3.5 s	4.0 s	4.5 s	5.0 s
1	0.18	1.33	0.46	0.32	0.25	0.27	0.33	0.61	1.07	0.94
2	0.03	2.01	0.43	0.27	0.14	0.13	0.15	0.15	1.31	0.89
3	0.01	0.46	1.02	0.33	0.20	0.13	0.16	0.18	1.17	0.81
4	0	0.16	2.40	0.37	0.23	0.15	0.21	0.23	0.19	1.11
5	0	0.09	0.72	0.73	0.29	0.21	0.16	0.19	0.19	1.55
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	0	0.05	0.12	0.20	0.27	0.35	0.42	0.47	0.42	0.15
62	0	0.07	0.18	0.28	0.39	0.49	0.59	0.68	0.67	0.39
63	0	0.07	0.17	0.27	0.38	0.48	0.58	0.67	0.70	0.54

测点	$V/(m \cdot s^{-1})$								
	5.5 s	6.0 s	6.5 s	7.0 s	7.5 s	8.0 s	8.5 s	9.0 s	最大值
1	0.96	0.93	0.87	0.8	0.72	0.65	0.57	0.53	1.33
2	0.9	0.86	0.81	0.75	0.70	0.64	0.58	0.55	2.01
3	0.76	0.73	0.70	0.66	0.61	0.55	0.5	0.47	1.17
4	0.83	0.78	0.76	0.74	0.71	0.67	0.62	0.59	2.40
5	0.91	0.95	0.97	0.94	0.89	0.83	0.75	0.70	1.55
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	0.13	0.18	0.24	0.30	0.35	0.30	0.10	0.05	0.47
62	0.19	0.25	0.34	0.42	0.51	0.52	0.27	0.12	0.68
63	0.23	0.28	0.37	0.46	0.55	0.61	0.45	0.21	0.70

在距钢轨头部外侧 2.5 m 处<sup>①</sup>。因此当列车不停站直接通过站台时,距列车侧壁 2 m 外站台区域的旅客和工作人员是安全的。

根据 Soligo 等<sup>[6]</sup>的行人风环境评估标准,当风速值为 0~2.5 m/s 时,适合行人坐、站立、行走等,舒适度为 1 级。因此可以得出,当地铁列车以 80 km/h 的速度直接过站时,在距离列车侧壁 2 m 开外,站台区域的行人风环境满足站台行人候车活动(坐和站立)的舒适性要求。

### 3 结论

本文采用计算流体动力学数值模拟技术的“动网格模型”方法,对深圳地铁列车不停站直接通过车站(列车速度 80 km/h,约 22.22 m/s)这一特殊工

况下形成的列车风对站台区域行人风环境的影响进行数值模拟,分析地铁列车直接过站过程中站台区域行人风环境的变化。通过数值模拟研究,可以得出以下结论。

1) 地铁列车高速过站时,车头和车尾附近区域的风场变化剧烈;而在同一时刻,列车车体中间区域风场变化较小。因此列车过站时,需重点关注列车高速驶近和驶离时对周边环境的影响。

2) 在站台区域距列车侧壁 2 m,平行于列车行驶方向的纵向方向上,行人高度(2 m 高)处的风场速度在列车头部和尾部附近各出现一峰值;在垂直于列车行驶方向的横向方向上,行人高度(2 m 高)处的风场速度与距列车侧壁距离的关系呈幂指数律形式衰减。当列车以 80 km/h 的速度行驶

① 铁道部. 即有线提速技术条件(试行), 2002

时,距列车侧壁 2 m 的距离,行人风场最大速度为 2.5 m/s 左右。

3) 地铁列车通过后,其尾流影响区的速度绝对值虽然不大,约为 0.5~1.0 m/s,但是尾流区流动结构复杂多变,且列车尾部影响范围广、时间持续较长,容易在站台局部地区引起扬尘,需要引起一定的关注。

4) 站台行人活动区域 63 个风速测点的统计结果表明,风速最大值为 0~1m/s 的测点有 44 个,约占 69.8%;最大值为 1~2 m/s 的测点有 14 个,约占 22.2%;大于 2 m/s 的测点有 5 个,约占 8.0%;最大风速值为 2.40 m/s,相当于 2 级风的风速。参考我国“站台人员安全退避距离标准”规定,当列车不停站直接通过站台时,站台 2 m 开外的站台区域旅客和工作人员是安全的。

根据 Soligo 等<sup>[6]</sup>的行人风环境评估标准,可得出当地铁列车以 80 km/h 的速度直接过站时,在站台候车区域(离开列车 2 m 开外区域),仅仅考虑由于列车风产生的风环境(不考虑自然风的影响),可以满足站台行人候车活动(站立和坐)的要求。

## 参考文献

- [1] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学. 北京: 国防工业出版社, 2006: 657-670
- [2] 徐鹤寿, 何德昭, 王厚雄. 准高速列车侧向人员安全退避距离的研究. 中国铁道科学, 1996, 17(1): 21-31
- [3] 张小钢, 刘应清, 赵海恒. 高速列车经过路边建筑物时的非定常湍流绕流数值模拟研究. 铁道科学, 1998, 20(2): 87-92
- [4] 雷波, 刘应清. 列车风作用下人体气动力的计算分析. 铁道学报, 1999, 21(6): 20-23
- [5] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1-9
- [6] Soligo M J, Irwin P A, Williams C J, et al. A comprehensive assessment of pedestrian comfort including thermal effects. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77-78: 753-766