

文章编号:1673-9469(2023)02-0084-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.013

高铁运行经过地下站台的气动风场研究

崔耀月¹, 闫亚光^{1*}, 解会兵²

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为了研究高速列车运行经过地下车站时的气动效应, 为地下高铁站设计提供参考, 以某地下高铁站为背景, 采用数值模拟的计算方法, 建立了站前隧道-地下车站-列车的数值模型。运用滑移网格的计算方法, 对列车运行经过地下车站的情况进行模拟。列车运行时速选定 200、250、300 和 350 km/h, 站台上布置 25 个测点进行监测, 研究列车运行时速和站台位置两种因素对站台上气动风场的影响。结果表明: (1) 站台上的气动效应随列车运行时速越高变化越大; (2) 列车经过地下站台后还会产生不可忽视的尾波; (3) 站台上气动风场波动值最高的位置是站台入口处。

关键词: 气动风场; 地下车站; 数值模拟; 风速波动; 高速列车

中图分类号: U451+.3

文献标识码: A

Study on Aerodynamic Wind Field of High Speed Railway Running Through Underground Platform

CUI Yaoyue¹, YAN Yaguang^{1*}, XIE Huibing²

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Department of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to study the aerodynamic effect of high-speed trains passing through underground stations, it provides a reference for the design of underground high-speed railway stations. Based on the background of an underground high-speed railway station, a numerical model of tunnel-underground station-train was established by numerical simulations. The calculation method of sliding mesh was used to simulate the train running through the underground station. The train speed was selected at 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h and 350 km/h, and 25 measuring points were arranged on the platform for monitoring. The influences of the train speed and platform position on the aerodynamic wind field on the platform was studied. The results show that: (1) The aerodynamic effect on the platform changes more with the increase of train speed; (2) After the train passes through the underground platform, it will also produce coda waves that cannot be ignored; (3) The highest fluctuation value of the aerodynamic wind field on the platform is at the entrance of the platform.

Key words: aerodynamic wind field; underground station; numerical simulation; wind speed fluctuation; high-speed train

近年来,我国高速铁路建设的发展势头迅猛。在交通运输部发布 2021 年交通运输行业发展统计公报中显示,2021 年年末全国铁路营业里程达到 15 万公里,其中高铁营业里程达到 4 万公里。高速铁路在明线运行时,车身及周围会产生很明显

的空气动力学效应^[1-2],这种空气动力学效应与列车运行时速^[3]、交会情况^[4]和周围环境^[5-7]有很大的关系。在地下空间中,高速列车运行会产生更明显的气动效应^[8-12],这种气动效应同样也会受到很多因素的影响,如地下空间隧道的结构^[13-14]、列

收稿日期:2022-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708020)

作者简介:崔耀月(1996-),女,山东东营人,硕士研究生,从事隧道空气动力学方面的研究。

* 通讯作者:闫亚光(1978-),男,河北永年人,博士,副教授,从事隧道空气动力学方面的研究。

车运行时速^[15]、隧道洞口缓冲结构形式^[16]和列车运行情况等。

在关于高速列车运行时的空气动力学效应研究中,韩华轩以美兰机场地下车站为研究背景,对列车经过地下车站时站内的空气动力学效应模拟分析,讨论了隧道长度、隔离墙设置和缓冲结构对地下车站气动效应的影响^[17]。周鹏采用动网格技术,对隧道内交会列车进行模拟,探究其隧道内会车时车身附近空间流场变化^[6]。赵迎辉建立了列车空气动力学模型,研究了在超高车速 450 km/h 下,列车交会过程中的空气动力学性能^[4]。闫亚光采用有限元法,研究了高速列车在隧道内会车的瞬变压力值,受会车地点、列车长度和速度的影响^[18]。李凌云模拟了北京大兴机场地下高铁车站,研究了列车长度、速度和交会状态对站台上屏蔽门的气动效应^[19]。本文以某地下高铁站为研究对象,对其隧道-车站-隧道进行建模,研究当高速列车过站时,会对站台上引起怎样的气动风场波动变化。文章根据时速划分了不同工况,分别对其进行建模计算,并分析讨论不同测点的风速波动情况。

1 工程概况及建模

本文所研究地下高铁车站站台长度为 650 m,有效站台长度为 450 m,车站宽度为 54.7 m。站内总计 4 条线路,车站设计正线数目为双线,正线居于车站中间,与正线相隔一座站台两边,设置有两条到发线,该线路的地下车站部分俯视图如图 1 所示。

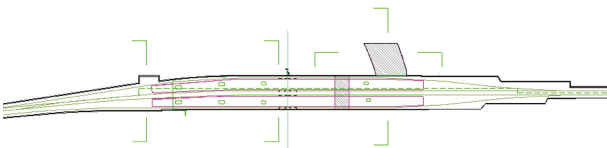


图 1 地下高铁站台俯视图

Fig. 1 Top view of the subway platform

本文对站前隧道-地下车站-列车建模,选用了 gambit 软件进行网格划分,模型中大部分区域选用结构化网格,结构化网格具有计算精度高、计算工作量小,网格质量高、相对稳定、容易收敛等优点,但其适用性较弱;而喇叭口连接处构造比较复杂,对此选取非结构化网格划分,非结构化网格的适用性较强,但其计算速度较慢。分区域网格划分,可以兼顾不同网格类型、大小情况,更有利于减小网格梯度,提高网格质量和增加计算

的精确度。本文采用滑移网格技术模拟列车与车站间的相对运动,在滑移网格技术中,网格不会消失和改变,收敛快、计算效率高、网格质量稳定。

如图 2 所示,图中为该地下车站-隧道-列车整体的建模型,模型由空气域、站前隧道、喇叭口连接处和地下车站组成。模型全长为 1 950 m,入口大气区域长度为 250 m,站前隧道长度为 200 m,隧道净空面积为 100 m²,喇叭口连接处长度为 300 m,地下车站长度为 450 m。设置两端边界条件为压力远场,隧道及车站设置无滑移壁面边界条件,模型通过滑移网格技术进行计算,列车与周围区域之间设置滑移交界面,以此进行数据交换,介质选用理想气体,采用非定常求解器和 k-ε 湍流模型,计算模型的网格数约为 5.5×10⁶ 个,时间步长为 2.5×10⁻⁴ s。

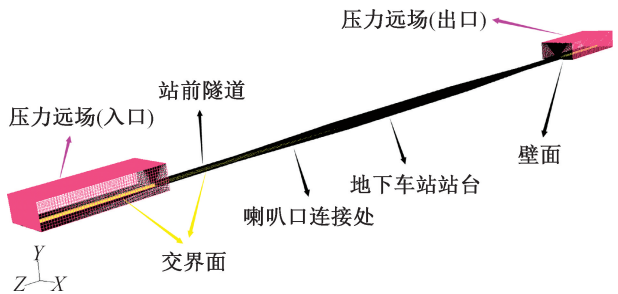


图 2 地下高铁站台模型边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of the subway platform model

列车模型采用 CRH380A 动车组,列车截面积为 11.63 m²,文中采用四辆编组运行的情况建模计算,图 3 为建立的列车模型图,列车建模时采用的详细参数见表 1。

表 1 CHR380A 列车参数

Tab. 1 CHR380A train parameters

项目	参数
编组形式	4 辆或 8 辆编组,可两编组重联运行
最高运营速度	400 km/h
头车车辆长度	25 520 mm
中间车车辆长度	24 175 mm
车辆宽度	3 265 mm
车辆横断面积	11.63 m ²
车辆断面周长	12.86 m
列车摩擦系数	0.003
车辆车顶至轨面高度	3 890 mm
车辆定距	17 375 mm
编组长度及重量	200.67 m, 536 t

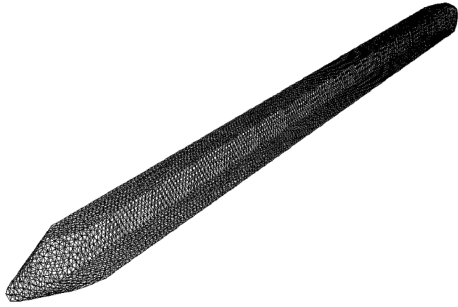


图3 CRH380A型列车模型图

Fig. 3 Train model diagram of CRH380A Train

2 控制方程

高速列车通过隧道引起的空气流动是三维、非稳态、可压缩、紊流流动,可用以下基本方程组描述空气运动规律。

理想气体状态方程:

$$P = \rho RT \quad (1)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho UT) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (4)$$

上述公式中标, R 为摩尔气体常数, u_i 为列车周围流场速度, 分别代表 u, v, w 三个坐标方向的速度分量; ρ 为空气密度; x_i 为坐标的三个分量, 分别代表 x, y, z 三个方向坐标; u_i 或 u_j 为流场速度, 代表 u, v, w 三个坐标方向的速度分量; P 为压力; δ_{ij} 为克罗内克符号, 当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1.0$, 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$; μ 为空气动力粘度; c_p 为比热容; T 为温度; k 为流体的传热系数; S_T 为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分, 有时简称 S_T 为粘性耗散项。

3 计算结果及分析

3.1 研究工况及测点布置

图4为地下车站的列车运行情况示意图。图中为正线单列车运行经过该地下车站, 两侧站台均有人员候车的情况。正线运行车辆的相邻一侧站台, 在越站列车经过时有屏蔽门阻挡, 所以本文研究与运行车辆不相邻的一侧站台上, 站台上的风速波动情况。

图5为站台上25个测点的布置情况及编号。如图所示, 监测点设置在与运行列车不相邻一侧, 五排测点与站台内侧边缘的距离分别为1、4、8、12和15m, 五列测点间的间距均为100m, 选取的所

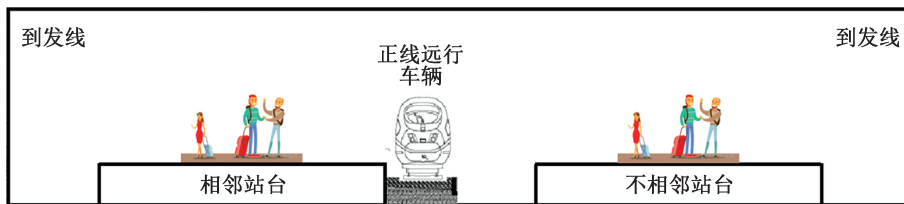


图4 列车运行及人员候车情况图

Fig. 4 Diagram of train operation and personnel waiting

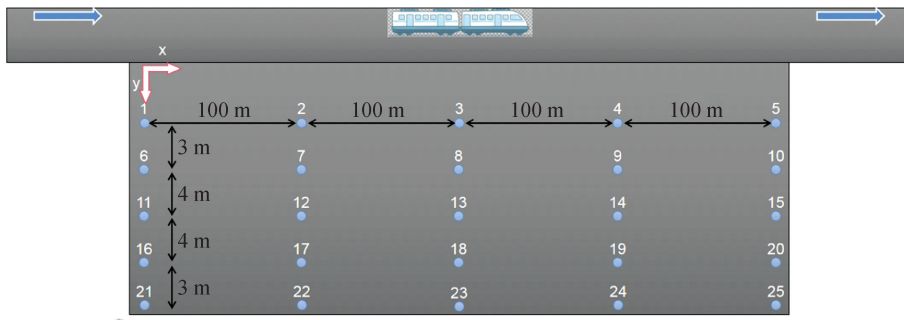


图5 列车运行方向及站台测点布置图

Fig. 5 Layout of train operation direction and platform measuring points

有测点距离地面的垂直距离为 1.5 m。对站台上所有测点的风速波动进行监测,考虑 200、250、300、350 km/h 四种不同时速下站台上风速波动情况。图中沿 x 方向(列车运行方向)布置的测点记为纵向测点,如测点 1—5;沿 y 方向(垂直于列车运行方向)布置的测点记为横向测点,如测点 1、6、11、16、21。

3.2 站台风速变化波动分析

由于站台上的风速波动的影响因素较多,所以本文选测从其中两个角度进行讨论分析:(1)运行经过地下车站的列车的运行时速不同,会对站台上的风速波动产生不同的影响;(2)站台上不同位置的测点,所受到的风速波动影响也不相同。

3.2.1 不同运行时速对风速波动的影响

(1)纵向测点

图 6 为不同时速列车运行经过地下车站时的风速时程图,包含了测点 1—5 五个测点处的风

速波动对比。测点 1—5 是有可能受列车风影响最大的具有代表性的五个测点,对比分析每个测点不同时速下所监测的风速时程变化图,研究其规律。

由图 6 可知,风速波动最高点应为列车经过测点时产生的,由于时速不同,时速较快的工况会先于较低时速工况经过设置的监测点,而且一般来说最高时速(350 km/h)经过测点所产生的风速波动最大,监测点的风速最大值最高,图中也基本符合这规律。但风速监测点 3 所监测的风速最大值似乎不符合这一点规律,排除计算资源限制引起误差的情况下,考虑到列车经过由隧道至车站中间的喇叭口,相当于在截面面积逐步扩大的隧道中行驶,产生的膨胀波及压缩波与正常隧道中的规律不同。尤其时速 350 km/h 的工况下,在全地下结构中运行时速较高,导致在运行至车站中央位置时,地下车站内的气体动力情况相对较为复杂,所以会产生监测时速的最大值没有预期值高

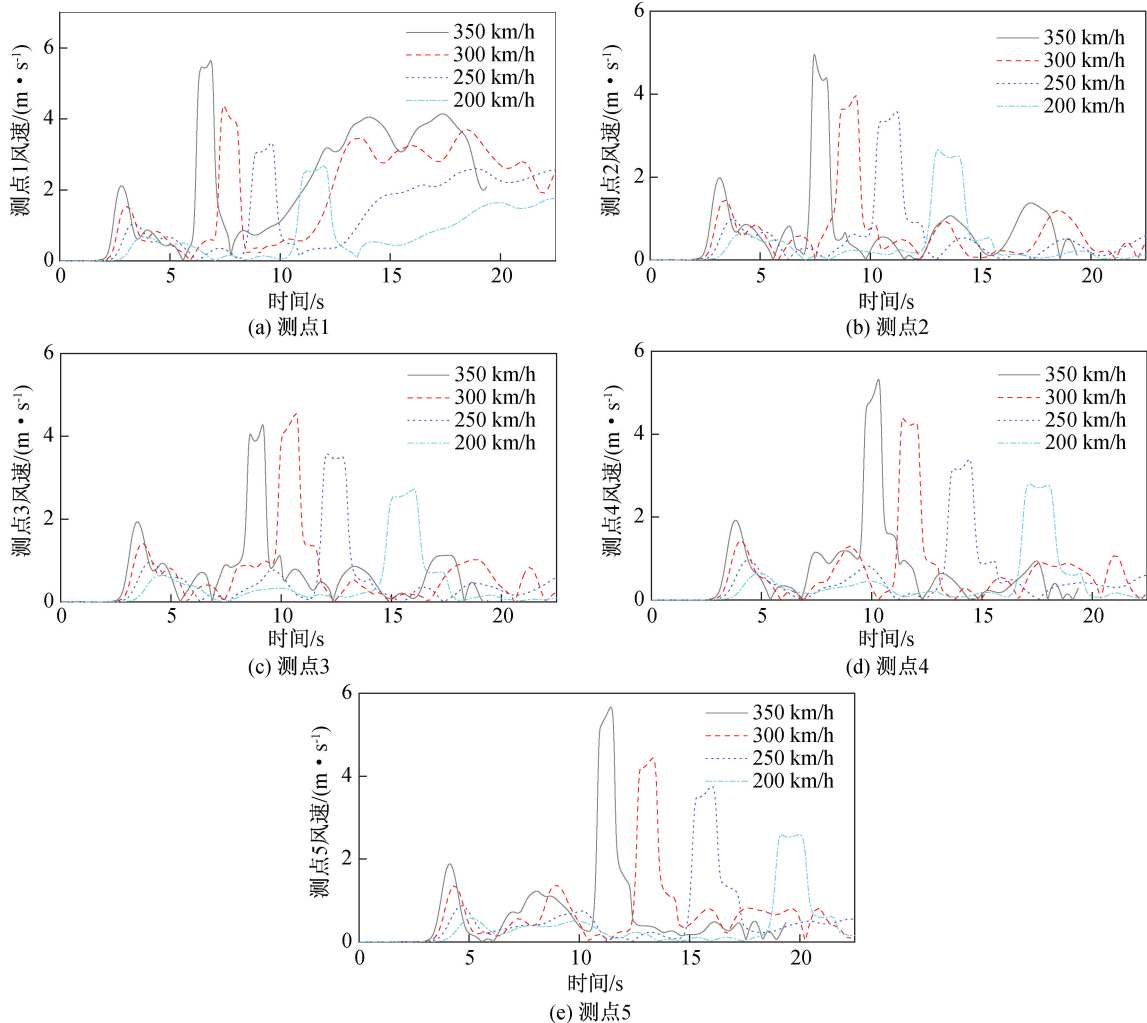


图 6 列车以不同时速运行经过站台的风速时程图

Fig. 6 Time histories of wind speed of trains passing through platform at different speeds

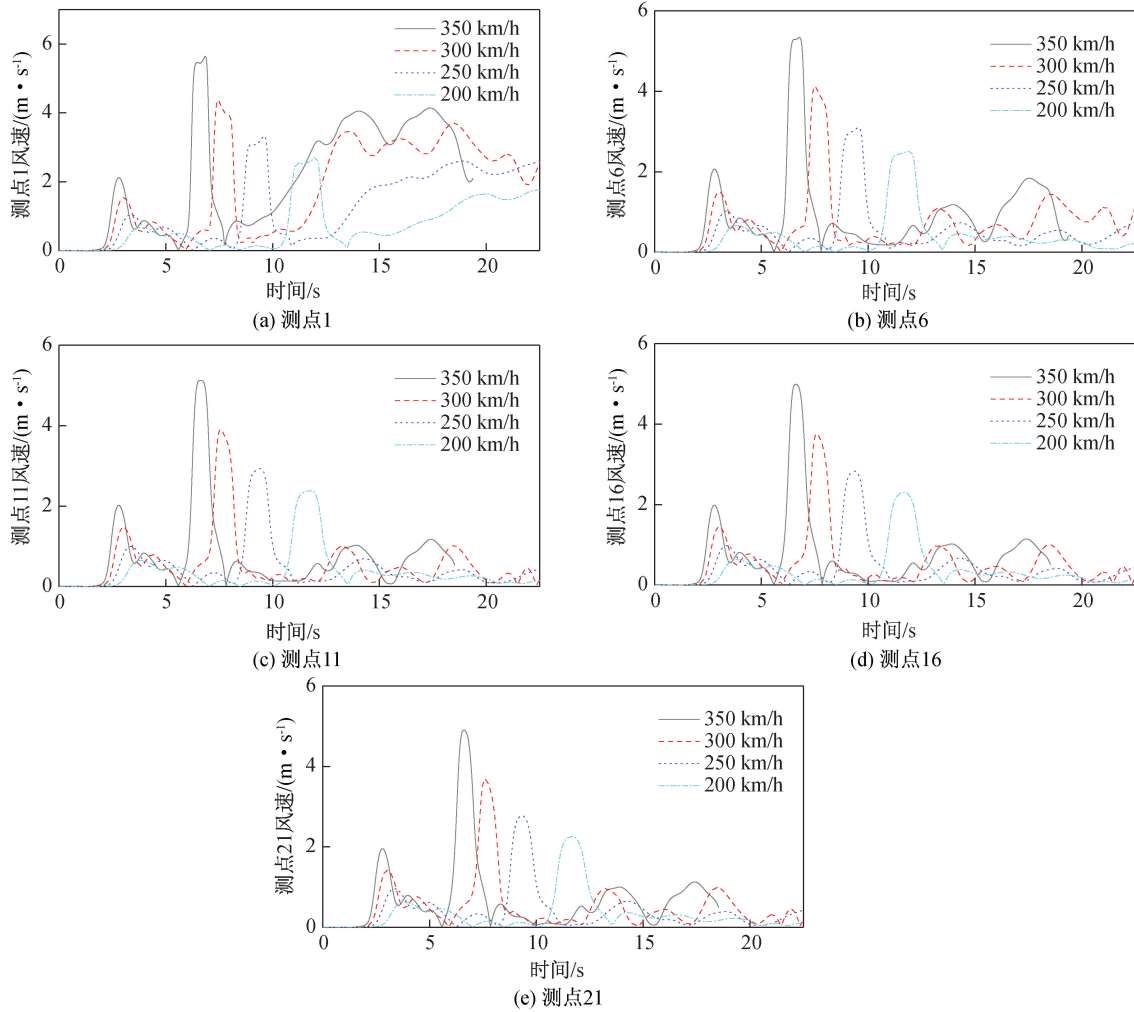


图7 列车以不同时速运行经过站台的风速时程图

Fig. 7 Time histories of wind speed of trains passing through platform at different speeds

情况,这种概情况也有待商榷。

同时监测点1所对应的各个时速工况下的风速波动,在经过测点位置后的波形图还是有较大波动,而且时速越高的工况所对应的波动越明显,也考虑与上文所分析的原因有关,即列车以较高时速经过最靠近入口处的监测点后,车站内的压缩波及膨胀波效应还是较为明显,从而影响监测点的风速波动,但最后监测点风速都会趋于0 m/s,其余几个图也由于监测点距离入口越来越远,此种情况变得越来越不明显。如监测点5位于车站出口处,图中显示经过测点5之后的风速最大值也较高,但之后测点5所检测到的风速波动较为常规。

(2) 横向测点

图7是同样为列车以不同时速运行经过站台的风速时程图,但图中所包含的是横向测点1—21。测点1—21是在站台上距离运行列车侧由近及远布置的,对比研究与运行列车距离不同的测点,风

速波动时程图的不同变化。

由图7所示,测点1处的风速波动较其他测点的更加明显。可以看到在波动图的最高处,即列车运行经过该测点处的时候,车头和车尾经过测点处,分别引起了不同程度升高的风速波动,而车身经过该处时,对应的的风速波动会有所下降。这种凹形的波动在其他测点处并不明显,且随与运行列车侧的距离逐渐减弱。在运行列车经过站台该处的监测点之后,测点1处各时速对应的波形图都还会产生不可忽视的风速波动,而这种现象在其他测点的风速波形图中相对不明显,且距离运行列车侧越远的测点波动越小。所以,与运行列车一侧的距离远近不同,对该测点处的风速波动影响还是比较明显的。

总结来说,站台上测点的风速波形图受运行列车时速影响显著,且最高时速基本出现在站台出入口附近;而距离运行列车的远近不同,同样会比较明显地影响该处的风速波动。

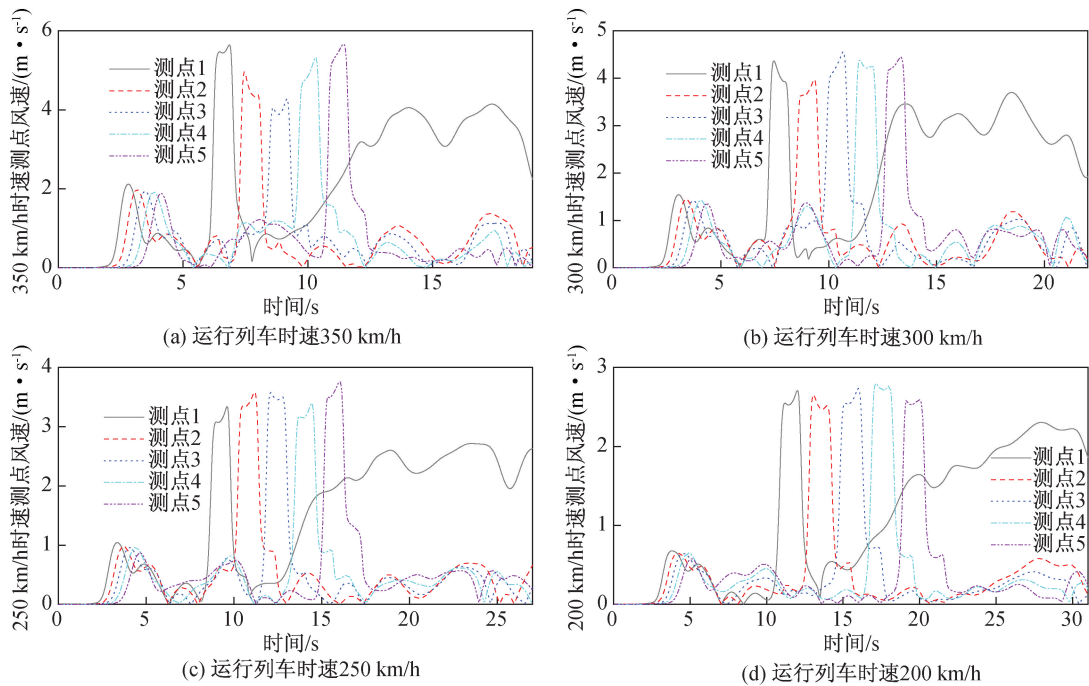


图8 列车运行经过站台时测点1—5的风速时程图

Fig. 8 Time history of wind speed at Points 1—5 when train passes platform

3.2.2 站台不同位置的风速波动

(1) 纵向测点

列车运行经过站台时,选取测点1—5,研究列车在地下车站行驶过程中的风速时程变化。

图8为列车匀速经过站台上测点1—5的风速时程图,将不同时速划分出来分别成图研究。由图8可见,列车以同一时速经过不同测点时,测点所监测到的风速最大值都有不同,而不同测点最大值的差异随着时速的增加也变大。即列车运行速度最大时,沿纵向的五个站台测点所监测到的风速最大值差异最大,随着列车行驶速度的减小,这种差异逐渐变小,列车以200 km/h时速经过纵向测点时,不同测点间的最大值差异已然不显著。而靠近入口处的测点风速图,在列车行驶经过测点之后,风速波动仍然显著也印证了上一节中的规律。

同时,本节中发现随着时速减小,距离列车相同距离的不同测点所监测到的风速最大值减小的同时,其差异波动也趋于平缓。故考虑到地下车站站台上测点所监测到的风速波动,与列车过站时速有很大关系,而较高时速列车运行经过地下车站会更加值得讨论研究。

(2) 横向测点

以上对于站台列车风速的研究,都参考的是距离列车侧较近的监测点,研究其不同时速或以

一定时速通过不同监测点的风速波动,研究角度相对较为单一。所以本小节研究列车以相同时速通过横向测点时的风速波动图,横向测点选取站台上距离运行列车由近及远的测点。由于前文已经分析过,风速最大值出现在站台出入口的概率较高,最大值接近,且不同时速列车经过站台出口侧测点的风速波形图较常规,故两者选择较复杂的入口处测点风速进行研究,所以本次选取入口及站中处各五个测点研究讨论。

由上文分析得,列车运行时速越高,站台上监测点所监测到的风速波动越大,则可能对于站台上人员舒适度影响越大,故本小节选取两种较高时速300和350 km/h下的工况进行讨论研究,其所对应的风速波形图如下如图9—12所示。

由图9可见,距离运行列车由近及远的站台上的不同测点,风速波形图走势基本一致,且随着与运行列车距离的增加,监测点所监测到的风速最大值也逐渐变小,而间隔相同距离下每一相邻测点监测风速最大值的差异也不尽相同,这种差异在距离运行列车侧越近越明显,分析其原因为距离列车侧越远的测点所受到的列车风风速波动影响越小。300 km/h时速下车站入口监测点1所监测到的最大风速值为4.36 m/s,而其最小的测点21所监测到的最大风速值为3.67 m/s,差值为0.69 m/s;而站中测点中监测风速值最大的测点3

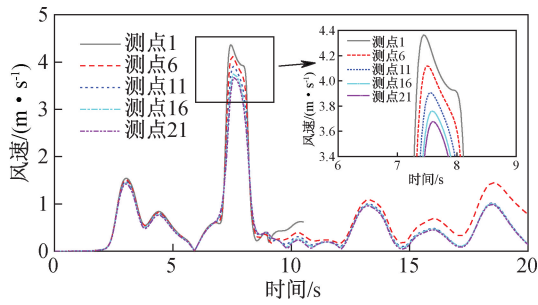


图9 列车以 300 km/h 时速经过车站入口测点的风速时程图及细节图

Fig. 9 Wind speed time history and details of train passing through measuring points at station entrance at 300 km/h

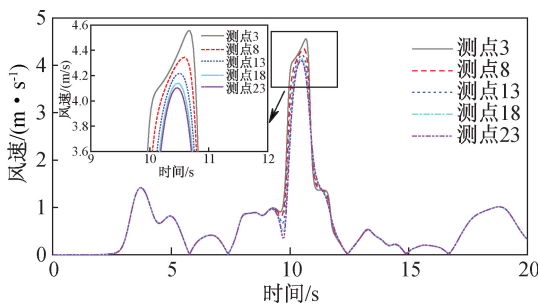


图10 列车以 300 km/h 时速经过车站站中测点的风速时程图及细节图

Fig. 10 Wind speed time history and details of train passing through measuring points at central station at 300 km/h

所监测到的最大风速值为 4.55 m/s,测点 23 所监测到的最大风速值为 4.10 m/s,差值为 0.45 m/s。对比两处不同横向位置的各测点风速最大值,站台入口处的差异明显大于站台中央处的差异,且其两处距离运行侧最近的测点所监测到的风速最大值差异不大;综合对比风速时程图也发现,站台入口处的风速波动也相对明显于站台中央处的波动。

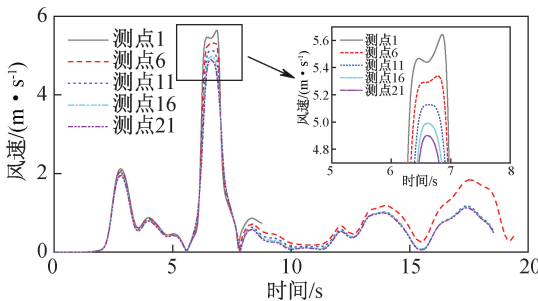


图11 列车以 350 km/h 时速经过车站入口测点的风速时程图及细节图

Fig. 11 Wind speed time history and details of train passing through measuring points at station entrance at 350 km/h

由图 11 得到,站台入口处测点 1 和 21 风速最

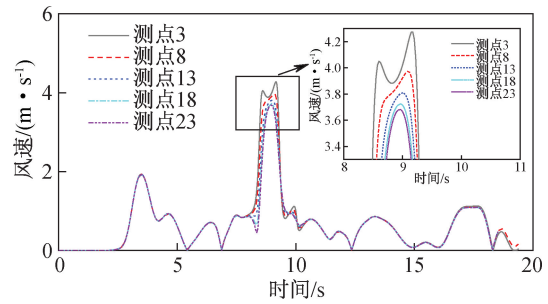


图12 列车以 350 km/h 时速经过车站站中测点的风速时程图及细节图

Fig. 12 Wind speed time history and details of train passing through measuring points at central station at 350 km/h

大值分别为 5.64 和 4.90 m/s,差值为 0.74 m/s;站台中央处测点 3 和 23 风速最大值分别为 4.27 m/s 和 3.68 m/s,差值为 0.59 m/s。与上文相比,时速越高的列车运行经过站台测点时,不仅测点风速值越大,其相同横向坐标的测点之间的风速最大值差异也越来越大,而且站台入口处已有测点的风速最大值超过 5 m/s。从而也印证了列车运行经过地下车站时相对更加不利的情况,即列车以 350 km/h 的高时速经过站台入口处。

4 结论

1) 列车运行时速对站台上的气动效应有明显的影响,列车时速越高气动效应波动越大。列车运行时速达到 350 km/h 时,站台上的气动风场较复杂。

2) 站台上的气动风场在列车经过站台后还会有一段明显的波动,这段尾波波动的剧烈程度甚至会比列车经过测点时更明显。列车在地下车站运行产生这种不可忽视的尾波,有可能会对站台上人员及设施产生不利影响。

3) 在本次模拟的地下车站,站台上的风场波动最明显的地方是站台入口处,风速波动值也最大,其次是站台出口处,波动相对最弱的为站台的中间部分,此结论对站台上人员的安全及舒适设计有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 石家庄: 中国铁道出版社, 2007.
 [2] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006(1): 1-9.
 [3] 田红旗, 许平, 梁习锋, 等. 列车交会压力波与运行速度的关系[J]. 中国铁道科学, 2006(6): 64-67.

(下转第 112 页)

- 工程水文地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 14-16.
- [3] 张永双, 郭长宝, 李向全, 等. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 2-8.
- [4] 郭长宝, 王保弟, 刘建康, 等. 川藏铁路交通廊道地质调查工程主要进展与成果[J]. 中国地质调查, 2020, 7(6): 2-4.
- [5] 宋健, 唐方头, 邓志辉, 等. 青藏高原嘉黎断裂晚第四纪运动特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 974-978.
- [6] 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 744-748.
- [7] 王玉海, 李曦滨, 李茸, 等. 曹村煤矿十采区水文地质条件与突水危险性分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(3): 66-68.
- [8] 张宇. 川藏铁路贡嘎隧道水文地质条件及线路优选研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [9] 彭琪. 拉月隧道温泉成因机制及地温场数值模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [10] 朱志强. 色季拉山隧道工程岩体渗透特征及涌水预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [11] 郭艺, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 基于聚类分析与因子分析的西藏高原南部湖水水化学特征研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2021, 38(3): 81-89.
- [12] 李倩, 王普, 王秀村, 等. 基于改进多属性群决策的高速铁路建设项目质量管理绩效评价[J]. 铁道学报, 2018, 40(5): 156-163.
- [13] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 446-460.
- [14] 马剑飞, 李向全, 张春潮, 等. 西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系[J]. 水文地质工程地质, 2021, 2021, 48(5): 24-32.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 90 页)

- [4] 赵迎辉. 高速交会列车的气动性能及车辆动力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [5] 田红旗. 风环境下的列车空气阻力特性研究[J]. 中国铁道科学, 2008(5): 108-112.
- [6] 周鹏. 高速列车气动特性及环境影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [7] 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[J]. 铁道学报, 1998(2): 88-93.
- [8] 金海, 杨立国, 陈凯. 地铁列车高速过站风环境数值模拟研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2015, 51(4): 606-612.
- [9] 王英学, 高波, 骆建军, 等. 高速列车进入隧道空气动力学模型实验分析[J]. 空气动力学学报, 2004(3): 346-351.
- [10] 王瑞丽. 高速列车驶入隧道气动效应数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [11] 周朝晖, 许建林, 梅元贵. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 黄颖. 城际铁路隧道及地下车站空气动力学效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [13] 徐文协. 高速地铁列车在单洞双线隧道中的空气动力效应研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [14] 管鸿浩, 龚彦峰, 踪敬良, 等. 高速列车单列通过时双线隧道内列车风分布规律研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(6): 83-89.
- [15] 蒋尧, 李奎, 胡炜, 等. 时速 350 km 高速铁路半地下车站气动效应影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 187-193.
- [16] 邓隆. 高速铁路隧道洞口异型缓冲结构气动参数分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [17] 韩华轩. 高速铁路地下车站隧道气动效应及缓解措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [18] 闫亚光, 杨庆山. 高速列车隧道内会车时气动舒适性研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(1): 56-61.
- [19] 李凌宇. 地下高铁站台屏蔽门气动效应研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 104 页)

- [7] 王海军, 陈海滨, 余佩义. 平板闸门小开度时侧收缩引起的水流现象试验研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2007(1): 28-30+35.
- [8] 樊晶晶, 王海军, 毛舒娅, 等. 平板闸门小开度闸后水流特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 124-128.
- [9] 郝鑫, 黄海艳, 王海军, 等. 高水头平板闸门小开度的数值模拟与试验对比[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 30-34.
- [10] 苟超, 杨红宣, 沈春颖, 等. 折流角变化下的旋流式竖井溢洪道涡室脉动压强试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 214-220.
- [11] 郭子敬. 基于矢量和法的库水位下降边坡稳定性研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2018, 35(2): 31-34+48.
- [12] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [13] 王蓓, 吕城腾, 纪南. 某水电站倾倒岩体基于 UDEC 变形评价方法研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(3): 60-64.
- [14] 苟小武, 刁明军, 王川隘, 等. 消力池尾坎坡度对底板脉动压强特性的影响试验研究[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2022, 48(6): 701-708.

(责任编辑 周雪梅)